

אבשלום כורש אליצור

לחזות בתפארת

התפתחות הפיסיקה בהשראת אידיאל היופי



Avshalom C. Elitzur

Glory Emerging

Beauty as a Guiding Ideal in the Evolution of Physics

© All Rights Reserved by the Author

© כל הזכויות שמורות למחבר

אטלנטיס, הוצאת ספרים
תל-אביב 2007

תוכן

- הקדמה
תודות
פתח-דבר מאת יקיר אהרוןוב
1. הרומאן המוזר בין יופי ואמת
2. ארגוגיה אינטלקטואלית למרגלות האולימפוס
3. אי-שלומות שוافت לאינסוף
4. קופרניקוס מפיל עמוד בהיכל
5. השמים מספרים כבוד אל – וקפלר מחבר להם מנגינה
6. גלילאו מודד זמן במנגינות
7. דקרט מנתה כל מה שזו
8. ניווטן מאחד שמים ואrazil
9. חוקה אחת לקטן ולגדול
10. פרקי עוצה פיסיקה בלי משוואות
11. מקסול מאיר את האור
12. בניין כולל בהדרו
13. איינשטיין רואה יופי פעמיים
14. איינשטיין עושה את זה שוב
15. פלנק משחרר שד קטן
16. השד מביא את החברים שלו
17. יש לי סברה
18. ואף על-פי כן, نوع ינווע הזמן
19. אסימטריה פורקת-על
20. יש לי תיאוריה
21. רעם פצחה שלא התפוצצה
22. בדלי ניסיתי לשנות את העבר
23. פרדוקס השקרן הקונטני
24. קונטנים ויחסות: שונים, אבל עושים יחד ילדים
25. המיתרים מצטרפים לסימפוניה
26. ואלה תולדות האיחודים
27. מכתב גליי לאיינשטיין הבא
- נספח מתמטי
ביבליוגרפיה
אינדקס

הקדמה

כמו מאלף של להקת קופים שהחלה להתפרע במאצע ההופעה, צריך אני להסביר איך יצא הספר זהה כל כך שונה ממה שהיא אמורה להיות. הוא מבוסס על הרצאותי באוניברסיטה בר-אילן. דיברתי על היופי המתגלה לפיסיקאים בטבע ובחוקיו, והמדריך אותם עד היום בחיפושיהם אחרי תורה חדשה. כיוון שרוב תלמידי היו סטודנטים שלא למדו מדעים, ניצבתי בפני אתגר: להסביר את התפתחות הפיזיקה מיימי קדם עד ימינו, להסביר את התגליות ופריצות-הדרך, להגיע עד השאלות הלא-פתרונות בפניהם ניצבת הפיזיקה כיום, וכן לתאר גם כמה מעבודותיי שלי בנושאים אלה – וכל אלה בשפה פשוטה ומובנת.

הዮפי שביקשתי להראות היה יופי נשגב, קר ומדויק, שואף לשלים וואר עוצמה הולכת וגדלה מדור לדור. בחוקיו ובמשוואותיו התמציתיים אין זכר לתוו פניהם, לקולות צחוקם ובכיהם ולריכח זיעתם של הגברים והנשים שגילו וייצרו אותו, כמו הילום שבכתר שאינו מגלת דבר על עלילות הכרויים, המבריחים, המלטשים ואנשי-האצולה שתחת ידיהם עבר. אבל כשניסיתי להסביר לשומעי איך התפתח היופי המוקפד זהה מצאנו את עצמנו מתודעים אל יופי אחר, חם, מציף וגוועש, אףום ענק שפרקיו הם סיורי חיותם של מעריצי היופי לדורותיהם שהנחילו לנו את האוצר הזה. מי שרוצה להיות מדען, כדאי לו להכיר את שני המישורים המנוגדים-משלימים האלה. כך מצאתי את עצמי מלמד גם פיסיקה וגם את ההיסטוריה שלה. ראייתי את שומעי מתלהבים יותר ויותר, נסחפתים בהתלהבותם, ורציתי לשחרר בחוויה הזאת גם אתכם.

וזו, כשהעליתי את הרצאות על הכתב והגעתי אל פרשת-הדרכים בה נמצאת הפיזיקה ביום, חשתי צורך לחלק אתכם בסיפורו המוזר של עוד אהב-יופי שיצא בעקבות אותם נפילים וזוכה גם הוא לגלות דבר או שניים. האיש הזה הוא במרקחה אני, ומדובר הטבע יש גם בסיפורו עליות וירידות, וגם בו החיפוש אחר היופי עבר לפעמים במקומות לא הכוי יפים. בעיני, דוקא ההכרה הזאת עשוה את המשע בעקבות היופי, עם כל התלאות הכרוכות בו,יפה בעצם.

יש כמובן הבדל בין התוכן המדעי, שהוא עיקר ספר זה, לבין מעט התוספות האישיות שהתגנבו אליו פה ושם. דמו לעצמכם מורה-דרך המובילכם הארץ לא-נודעת, תחילת בדרכים מסומנות וככובשות היטב שכבר פילטו מגלי-ארצות נודעים, אחר-כך בכל מיני פינות נידחות, ולבסוף במקומות שטרם דרכה בהם רגלי אדם, והוא מסביר בכל מקום מי גילה מה, איך ומתי. רק טבעי הוא שבგיעכם למקומות הבתולים, יעשה דיבורו יותר ויותר אישי, וmdi-פעם אפילו ייפלט לו איזה שווץ קטן, שהוא כמו "אגב, אני גיליתי את המערה הזאת", "פה מצאתי קיזור-דרך", "שם פעם כמעט אכלו אותי", וכו'. כך גם בספר זה: ברוב פרקי נלק בדרכים שכבר סללו קודמינו הגאנונים ובהן נתודע אל מיטב הידע המקובל בפיזיקה של ימינו. רק לקראת הסוף, כשנגיע לשאלות שעליין אין עדין תשובה, אזמיןכם ללוות אותי עוד כמה צעדים בכיוון בו אני עצמי הולך בחיפושי אחרי תיאוריה אחת, משאת-נפשם המתמהמתה של הפיסיקאים מדור-דורות.

הספר כתוב בשפה היומיומית של הרצאות כפי שהוקלטו בבר-אילן בידי שניים מתלמידי, והוא מיועד לכל סוג הקוראים: מהדיותות וחובבים ועד מדענים שהפיזיקה העיונית היא מקצועם. הוא פותח בהסברת מושגי-יסוד ומסיים בחידושים שרק זה עתה עברו

את השיפוט המדעי. כל פרק מסיים בסיכון תמציתי. הביבליוגרפיה מפנה אל מאמרים עדכניים מכתבי-עת מקצועיים, ספרים מעולים בעברית שנכתבו בידי חוקרים ישראליים, ספרים חשובים שתורגמו לעברית ומקורות אינטרנט בדוקים.

לטובת הקוראים הנרתעים מתמטיקה – ובאותה מידת לטובה אלה שלא יכולים בלעדיה – ריכזתי את כל ההסברים המתמטיים הנלוויים בספר שבסוף הספר.

למדתי הרבה מהחברים והעמיתים שקבעו את כתב-היד והעיזו את הערותיהם, ואני משללה את עצמי שלא נותרו דבריהם לשפר ולהתקן. כל העירה וביקורת מצדכם התקבל בתודה ובמלוא תשומת-לב.

זה לי ספרי השלישי והייתי כבר אמר לתרגול להנחות הזאת, ובכל זאת מעולם לא גרמה לי הכתיבה להיסחף בחדווה כזאת בהתוודעות-מחדש אל הפליאה שבטיבו ובחוקיו. את החוויה הזאת אנסה לעורר גם בכם.

תודות

הרבה חברים ועמיתיים סייעו בכתיבת ספר זה. חלקם, שותפים למחקריו ולדרכיו במדע, מופיעים באופן טבעי בספר. בכל זאת אני שב ומביע את הכרת-תודתי הלבבית לפروف' יוסף רוזן ולד"ר שחר דולב על שקבעו את כתב-היד בסבלנות שוב ושוב וחלקו ATI בנדיבות כזאת בעושר ידיעותיהם ותבונתם.

תודה מיוחדת ליליאור גולגר ומאור גリンברג, שsparkו יחד את כתב-היד ושיפרו אותו לאין ערוך בכל התחומים והרמתו, מפיסיקה עד היסטוריה, מהיגיון עד עריכה לשונית.

תודה – בסדר אלפבית – ובמידה שווה מקרב-לב – לפروف' יששכר אונא, ד"ר שחר ארזי, פרופ' זאב בכלר, – – – – – “כן, קיה זה חֶבְרָעַ מֵאַיִן כְּמֹהָהוּ!”

תודה לעמיתים מחו"ל שהזמיןו אותי לביקורים במוסדותיהם, למחקר, להוראה ולהחלפת-דעות, ושבמהלכם נכתבו כמה פרקי הספר: Lucian Hardy, Perimeter Institute, Waterloo, Canada; Robert Jahn, Princeton University, Princeton, USA; Pier Luigi Luisi, ETH and University of Rome, Harald Atmanspacher, Institute for Frontier Areas of Psychology, Freiburg, Germany; Nancy Kolenda, The Center for Frontier Sciences, Temple University, Philadelphia.

תודה לヨסיה רוזו, החבר הנאמן שליווה את הספר בדאגה ואהבה בכל שלביו. מעל לכל, תודה לכם, תלמידי בבר-אילן ובכל המוסדות בהם זכיתי ללמד, על ההשראה וההתלהבות, על הדיוונים הקולניים, על עבודות-הגמר שהגשותם ושםן שאבתי ולמדתי ללא בושה. אליכם התכוון ר' מנדל מקוץ כצענה לאדם שהתייעץ בו בבחירה מקצוע לבנו: “עשה אותו מורה, אולי יפגוש פעם תלמיד פיקח וילמד מהשו חדש.”

טרחנו ווות אקדמיות

מאז רב הושקע בספר זה כדי שהדיקן המדעי לא יפגום בשטף הקראיה. כל הפניה ביבליוגרפיה מופיעה בספרות מוקטנתה המציגות את מספר המקור בביבליוגרפיה שבסוף הספר. כשנחווצים גם מספרי העמודים, הם מתווספים בסוגרים. לעומת זאת, הערת שוליים תופיע בתחום העמוד. מעולם לא הבנתי את עצנותם של מחברים המערבים את שני סוגיה הערות ומאלצים את הקורא לדלג הלוך-ושוב אל סוף הספר.

הקפדתי על כתיב פונטי של השמות והמנחים הלועזים. בימינו, עם נפילת המהיצות בין תרבויות, חשוב לדעת איך מבוטא שמו של אדם בשפטו, וכך יצאו כמה שמות שונים מהמקובל בספרים קודמים. כך גם לגבי מילים לועזיות. ברוב המקרים העדפת לנקד מילים ושמות במקום להשתמש בכתיב מלא, אבל לפחות יהיה יותר להשאיר עם הניקוד כתיב מלא שכבר נעשה מקובל. הכתיב הלטני של כל שם לוודי מופיע באינדקס.

השתמשתי באינדקס גם כדי לחסוך לצורך החיוני במלון מונחים: בכל ערך בו מופיעים מספרי עמודים באות מודגשת, הפניה היא למקום בגוף הספר בו מוסבר המושג לראשונה. לצד כל חוק פיסיקלי או דיוון המזכיר ביטויים מתמטיים, עננה קטנה בשוליים מפנה אל המשוואות בנספה המתמטי.

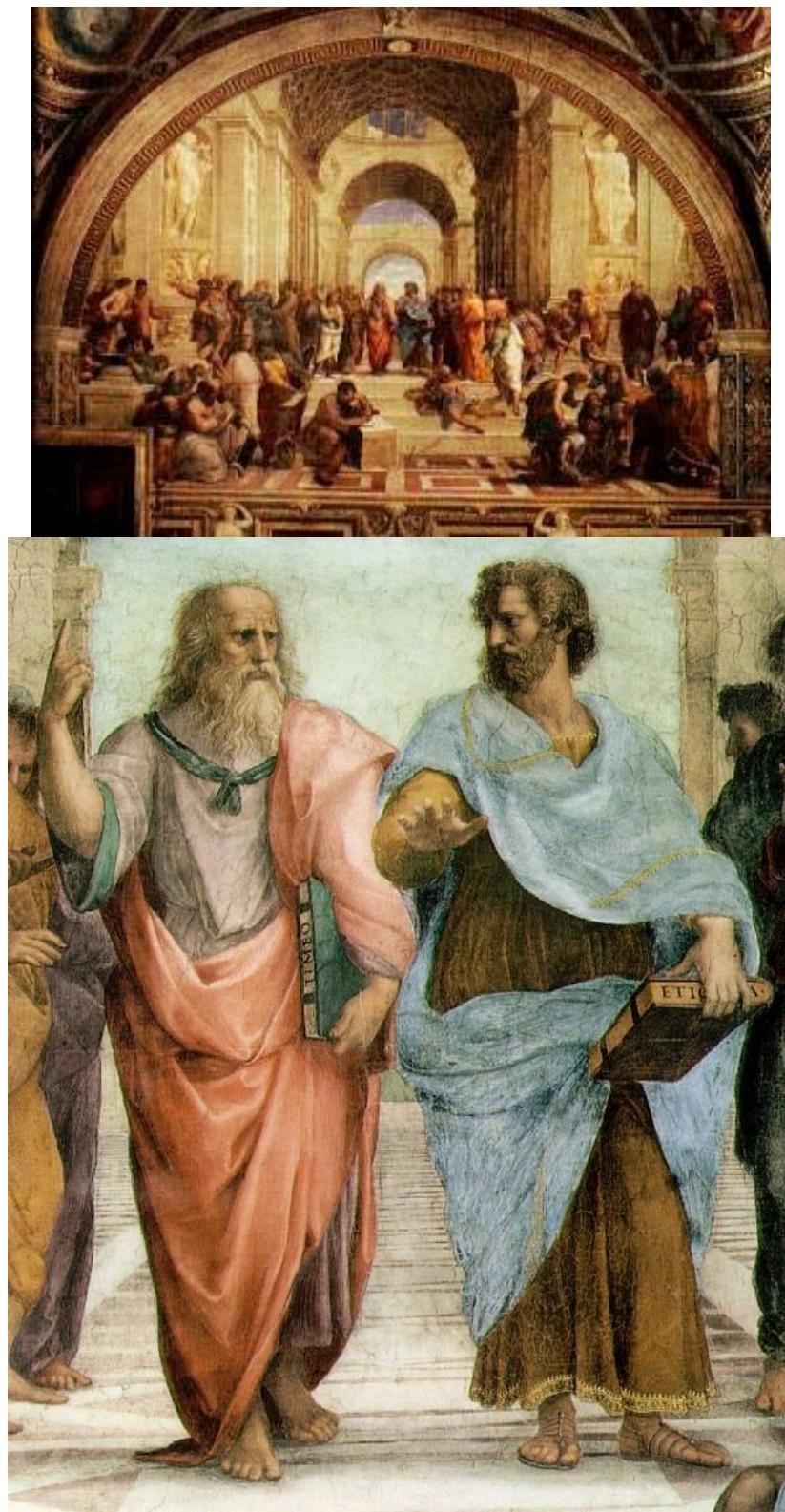
פתח-דבר

כשהייתי ילד אהבתី חידות. אפילו מעוברים-ושבים שלא הכרתי הiyti מבקש לפעם: "אדון, חוד ל' חידה." החידות פתחו בפניי את סודות ההיגיון. עם השנים מצאתי מקור בלתי-נדלה לחידות בטבע כולם. למדתי שאפשר גם לחוד לטבע חידות ולקבל עליהם תשובה מפתיעות. כך נעשיתי מdadן ונמשרתי אל יסודות הפיזיקה.שתי תורות מהפכו, היחשות והקונטים, שבו את לבּי, שתיהן חוללו מהפכה במחשבת האדם, ושתיهن הצינו בעוצמה ובדיוק מדהים אףלו כשבאו תוצאות מוזרות מאוד, אבל הייתה ביניהן סתירה מהותית. איך יכולות שתיהן להיות נכונות? זו הייתה החידה הקשה והמרתקת מכלן. שיטה חדשה להבנת הטבע צמזה ברבות השנים מניסיונו לפתור חידה זו. יחד עם תלמידי מצאתי דרך חדשה לשאול שאלות, ושרה של ניבויים פיסיקליות מפתיעים, שאושרו בניסויים, חזרה ורמזה לנו כי הכוון נכון גם אם הדרך עוד ארוכה. אףלו ביום, כשהאני רשםית בגיל הפרישה, חידות אלה מעסיקות את מחשבותי ותוצאות הניסויים ממשיכות להלhib אוטי כמו בצעירותי. הרבה שאלות הנחשות בדרך כלל לפילוסופיות, כמו שאלת חופש הרצון, מקבלות משמעות פיסיקלית חדשה במסגרת הדרך הזאת.

בכל אלה נזכרתי עם קריית ספר זה. מחברו היה תלמידי, והוא מעיד על עצמו כcosa גם ביום, כשהוא חוקר בזכות עצמו שכבר שלח אליו לשיפור עבודה דוקטורט של אחד מתלמידיו, ואני מקווה שהמשך יבוא. שמחתי לעקוב אחריו במשך שנים וראות את התפתחותו גם כחוקר מקורי וגם כאחד המורים המלהיבים שפגשתי בעולם כולם. שני הצדדים האלה באים לידי ביטוי בספרו.

אליזור מתאר בספר זה את התפתחות הפיזיקה מצד היופי של הטבע ושל חוקיו, ובכך הוא מעיר כי את הרגשות החזקים שפיעמו בי מאז הiyti יلد. במהלך קריית כתב-היד של ספרו חזרנו לשוחח ולהתווכח כמו ביוםיהם בהם עשה את הדוקטורט, בנושאים אחדים הסכמנו ובאחרים נשארנו חלוקים זה על זה, וכמה שאלות והבנות חדשות צצו ומצאו את דרכן אל הדפים הבאים. אני מסכימ אתו שהיופי, למראות שהוא מושג סובייקטיבי ופחות ברור מהקריטריונים הלוגיים והמתמטיים, הוא מדרך מעולה בחיפוש אחר האמת המדעית. אני גם מסכימ אתו שמושג הזמן בפי שהוא מתווך ביום בתורות היחסות והקונטים איינו מתאר במלואו את טبعו החזק של הזמן. בשיטה שפיתחת במחקריו, שגם היא מוסברת באחד הפרסומים, ניתן להסתכל על כל אירוע משנה כיווני זמן, מעלה לעתיד ולהיפך. הסתכלות כפולה זו חושפת היבטים חדשים ומפתיעים בעולם הקונטי. גם כאן שמחתי לגלוות כי שיטה זו מצאה את דרכה גם לאחד הפרדוקסים המקוריים של אליזור ודולב.

נהניתי מאוד לקרוא את הספר, גם בענייני מדען וגם בענייני מורה. מצאה חן בענייני הדריך בה מסביר אליזור סוגיות ושאלות עמוקים, שבה יכול כל אדם להבין את המדבר. לשנינו משותפת גם הdagga לעתיד המדע הישראלי ולמקומו בהתפתחות המדע בעולם, והספר הזה מהויה כניסה מעולה לכל הרוצה להכיר את פלאי היקום או אף להצדפה אל חוקריים.



אריסטו ואפלטון מתוכ "האסכולה האטונאית" מאת רפאלו סנטיזו (1483-1520). ביצירה מופיעים גדולי הפילוסופיה, המתמטיקה והאסטרונומיה של העולם העתיק, שבקלאסתקרים עשה רפאל מהווה לבני הרנסאנס בימיו, כולל עצמו. הספרים בידי שני הגיגים, והכיוונים אליהם מופנות ידיהם, מבטאים את המחלוקת בין המטפיסיקה והרציניות. את פני אפלטון צייר האמן בדמות פני מورو, לאונארדו דא-ווינצ'י.

1. הרומאן המודר בינה יופי ואמות

ברית נכרתה לנצח בין הגאון והטבע
הבטוחתיו של ההוא – זה קיים יקימן.
פריזיר שילד

מהרבה בחינות היהת ציון-דרך היסטורי. בשנה זו, ניבא ניוטון, ישוב ישוע המשיח, מה שלא ממש התגשם, אבל בשנה זו קמה מדינת ישראל ונכחה מגילת זכיות האדם, ושנה זו היא גם מפנה בתולדות הקוסמולוגיה: מאמר פורץ-דרך על היוצרות היקום⁵³ פורסם על-ידי רלף אלפר, הנש ביתה וג'ורג' גMOV. המאמר הכה גלים. היה רק בעיה קטנה אחת: בתחום עצמו מעולם לא שמע קודם על המאמר. הוא הلك אל גMOV לבקש הסברים.

מה יש לך, אמר גMOV, לא אמר יפה?

יפה מאד, התעכבר בהה, אבל לא כתבתי אותה!

או מה אם לא כתבת אותה! התעכבר גם גMOV. בכלל זה רצית שאוותר על צירוף יפה כזה של אלף, בטא וגמא? ועוד במאמר על ראשית היקום?

בזה לא היה צריך להתאמץ הרבה כדי להזכיר ממי למד גMOV לשפץ את ההיסטוריה.⁵⁴ שבע-עשרה שנה קודם לכן נפל הפיסיקאי והאסטרונום ארתוור סטנלי אדינגרטון קורבן לתעלול דומה. האיש הטוב הזה היה רגיל לשאול "למה" בכל פעם שנתקל באחד מהם גדים של הטבע שאין להם סיבה ידועה: למה מהירות האשור היא דוקא זאת ולא אחרת? ומה מטען האלקטרון דוקא כזו ולא כפליים? "כח" זה לא תשובה, אמר אדינגרטון. חיב להיות קשר טמיר בין כל המספרים הללו. והוא חיפש שנים רבות את הקשר הזה, שבעיני חבריו נראה כסתם נומרולוגיה.

בזה עקב אחרי המאמצים האלה בעניין רב ולבסוף החליט לעזור לעמיתו. יחד עם שני חברים, בק ווייזלר, פרסם מאמר קצר בעטתו של אדינגרטון.⁵⁵ המאמר עסק במספר מפורסם בתורת הקוונטים, 1/137, שהוא הסיכוי שאלקטרון יפלוט חליק או. כמובן רק טבעי היה שמיד עם גילוי המספר הזה קיבל אדינגרטון התקפי אובייסיה חדש: למה דוקא 137? כאן נחלצו שלושת הליצנים לעוזה והציעו – בשמו, כמובן – דרך לגוזר את המספר הזה מקובעים אחרים של הטבע: "יהא נתון סריג גבישי משושה. טמפרטורת האפס המוחלט פירושה שכל דרגות החופש שלו קפאו." עורך כתב העת, שמייד עבר לדום למראה מאמר מפיזיקאי כה חשוב, אףלו לא שם לב שהמחבר החליף את המילה האנגלית "מעלות חום (degrees)" ב"דרגות חופש (degrees of freedom)". וכך המשיך "אדינגרטון" להנתרש עד למסקנה המבוקשת: "כיוון שהאפס המוחלט הוא מינוס 273 מעלות [צלסיוס כמובן; עם פרנהייט זה לא היה עובד] וכיוון ש[כאן בא חישוב המראה למה צריך להוסיף לו 1 ולחלק ב-2], מתקבל 137." העורך הנפעם פרסם את המאמר – ואדינגרטון הקים שעורוריה.⁵⁶

א. גMOV טען שבתת שיתף פעולה עם המעשה. מאוחר יותר, כשהתיאוריה הייתה על הקרים, שקל בהה (שקיבל את ה nobel ב-1967) לשנות את שמו ל"ז'ריאס" כדי להתרחק משוני חבריו עד סוף האלף-בית האנגלי. גMOV, מצדיו, ניסה לאלחלה לשכנע מחבר שותף אחר, רוברט הרמן, לשנות את שמו ל"דلتה".

ב. בכך לא תמו נפלאות המספר הזה. כשאושפז וולפנג פאולி בבית-חולמים, ראה שמספר הדרו הוא 137 והודיעו שהוא הסוף שלו. ליצנים ישראלים הצביעו ל-137 הסבר משליהם: זה, בgmtaria, ערכו של "אדינגרטון" כשהוא נכתב בשני ד' כמו באנגלית. גרשום שלום העיר שזה גם ערך המילה "קבלה". את כל התיאוריות היפות האלה קלקל

שני התעלולים האלה הם פארודיות על אהבת הפסיכאים לתיירותיות יפות. לטענה שהיפה הוא גם האמתי נתיחס בסלחנות אם היא בא מפי משורר. "היוֹפִי הוּא אָמָת," כתוב ג'ון קיטס, "האמת יופי". זה כל אשר תדעו עלי אדמות, וכל שעלייכם לדעת. " וכחדר לו עונה ג'ובראן בليل ג'ופראן: "היוֹפִי הוּא הנצח המביט בעצמו במראה." אבל מה שמותר למשוררים לא מותר למדענים. המדע, אמר תומס הקסל⁵¹, הוא "שכל ישר מאורגן, שבו לעיתים קרובות מוחסלת תיאוריה יפה בידי עובדה מכוערת".

ובכל זאת, גдолוי הפסיכאים, אותם נפגוש בפרקם הבאים, הודיעו שהיפושיםם אחריו היוריות טובות יותר הוזכרו ע"י קריטריון אסתטי.^{71,70,60,4} רקרט איבד את סיכויו אצל אשה שאחריה חיזר כשאמר לה "שומן יופי לא ישווה לאמת".⁵² איינשטיין כינה את התגלית של יידיו-יריבו בור "הצורה הנעה ביותר של מוסיקליות בשטח המחשבה".⁴⁴⁽¹⁰²⁾ כחדר לו השיב הניסיך לואי דה-ברזאי, שגם הוא, כאינשטיין, היה מוסיקאי חובב ומימייסדי תורה הקוננטים: "למה פניתי אז לענף נפלא אבל קשה זה? לשאלת זו אני עונה בלי היסוסים: משומן שרווחי הייתה מוקסמת על-ידי יופיו של המדע. היוֹפִי והשירות שלו המדע הכניעוני!"⁴⁴⁽¹⁰³⁾ ורג'ר פנרוֹז, הפסיכאי הממעיק והנוועז ביותר בדורנו, מודה כי הוא אכן מאמין לא רק בקשר אובייקטיבי בין "יופי" ו"אמת" אלא גם בין שני האידיאלים האלה לבין האידיאל השלישי של אפלטון, "הטוב".⁷⁰

לא במקרה, אם כן, נזהר הקסל בדיבורו: תיאוריה יפה מוחסלת בידי עובדה מכוערת "לעתים קרובות", אבל גם ההיפך יכול לקרות! גם "עובדות", "אחרי הכל", יכולות להתגלות בעtid כלא-מדויקות או אפילו שגויות, וכך במשחק המדע יש הימור: לפעמים צריך לתקן את התיאוריה לפי הנתונים ולפעמים עדיף דוקא להתעלם מהנתונים ולהניחו שיופרכו בבוא היום. ובהתאם, לפעמים מסתים המהלך בהפסד קולossal ולפעמים ברוחה ענק. במשחק מורת-העצבים הזה, כפי שנראה בפרקם הבאים, מלא יופייה של התיאוריה תפקיד חשוב.

1.1. יופי מוחשי וטעם אישיש
МОבן שהגדרת המושג "יופי", מבון הפשט של דברים היפים לעין, מצריכה הרבה דיונים ממשיים, וМОבן שזה בדיקות או אפילו שגיאות, וכך במשחק המדע יש הימור: לפעמים צריך לתקן צדיו הסובייקטיבים והסותרים של היוֹפִי כדי להראות שככל זאת, מעבר להבדלי הטעם, כולנו מתחוננים באותו דבר.

מה יפה בעיני? זכות היוצרים שייכת כמובן לטבע. יש יופי מרהייב בעוצמה, במרקבי הענק של האוקיאנוסים והמדבריות, באינסוף כוכבי הלילה ובכוחות ההרס של התפרצויות הגעש, סופות הברקים והשיטפונות. יופי מסוג אחר נלווה אל שפע גילויי החיים. אני שבע מלhattbonen בשלל צבעי הפסיון המלכתי, ובאותה מידת נעהתקת נשימתה למראה ברbor לבן ענק הנוחת מולי על פני האגם. היוֹפִי החי מפגין עושר ללא عمل, עוצמה ללא מאzx, כאילו מתריס הארגניזם נגד חוקי ההסתברות או אפילו נגד חוקי הטבע עצם. לא פחות יופי מסתובב בינוינו בני האדם, והוא מוכתב בדורך-כללו ע"י צרכיהם אבולוציוניים. אשה יפה מזכירה לי את דברי משורר אלמוני מראשית המאה השבע-עשרה:

פדן אחד שגילתה שהמספר המדוק הוא דוקן 137.04, אבל לפחות זה כבר היה מאוחר: מהדר 137 הוא יצא לגמר בר-מין.

No beauty she doth miss
When all her robes are on.
But Beauty's self she is
When all her robes are gone.

היא עצמה לא יופי תחסּ
עת תעטה כל גלימותיה
אך יופי עצמו היא, מתגלם בبشر
באין כל גלימה עליה.

החיים מבאים את יופי העדינות והרונן: בפרפר, בפרפר, בחיקת התינוק המפיז אור על סכבותתו. יופי ביולוגית אחר קיים בכוח הפיזי, בשירירים חזקים או בכיווי האתלט, ומנגד קיים היופי הרוחני, כפי שנוכחת כשהזמנתי לחת הרצאה בישיבה חרדית ונדהמתי מזו פניו של ראש-הישיבה הזקן. הקולות יוצרים עולם מופלא משליהם: שירת השחרור או הקנרי מרכיבת מציללים טהורים ונקיים המשתלבים למלודיה כובשת. חבל שתרבות המערב גרמה לנוון יכולתם של רוב האנשים לשיר, כי קול יפה יכול לרכוש כל אדם. אבל גם מנגינה יכולה לגרום לדלקות לאדם לרקוד או לבכות.

הענינים מסתבכים כשהאנו עוברים מהיופי שבבעיטה לה שיצרים בני-האדם. איך לגשר על הבדלי הטעם בין אנשים ותרבויות? הרי יש שבטים במלואו שביעינהם אישת היא יפה רק אם שפתיה נמתחו בעוזרת כפיס עז לממדים המעוררים بي גועל, ואחרים מתחבבים מקעקועים וניקובים שביעני הם סתם השחתה אכזרית של גופם. העובדה שאני כמעט חרש ליפי המוסיקה הקלראית שהיא במעט בחלקים רבים בתרבות המערבית, אבל ברגע זה, כש"רדיו יאסו" הנאנן מנגן לי שיר יווני סוחף, אני חייב להזכיר לעצמי שיש אנשים שגם המוסיקה הזאת לא עושה להם כלום. האם כל אלה הם רק עניינים סובייקטיביים? לא, כי הרבה מחקרים ביולוגים ואנתרופולוגים²⁷ גילו ביופי האנושי מאפיינים אוניברסליים ברורים כמו סימטריה, צחות העור ושאר סימנים המעידים על בריאות, הנחשים לפנים בכל התרבותות. מאפיינים משותפים עומדים גם בסוד כל סוג המוסיקה, כמו יכולתם לחקות צחוק, בכינן וקצב הלב.

כל סוג היופי האלה מבוססים על הרמונייה. ביוונית "הרמוס" פירושו מפרק או כתף (ומכאן arm באנגלית), ובהשלה, הרמונייה היא חיבור מוצלח בין חלקים שונים. פנים יפות מרכבות מחלקים היודיעים לנו היטב, אבל הפרופורציות ביניהם נתנות תחושה של שלמות, כך של שניינו רק יגומם ביופיים: "כל המוסיף גורע." בשיר יפה, כל מילה היא בדיק במקומה. אפילו שפה זרה יכולה להישמע שובה-לב בשל היחסים בין הבורותיה ותנוועותיה. כשהחלקים "מדוברים" זה עם זה, השלם יוצא יפה.

זה בודאי הסיבה שה"יפה" קיים בעיקר בתחום הראיה והشمיעה. החושים האחרים יכולים לספק הנאות עצומות, אבל אין מפתחים דיים כדי ליצור את המרכיבות האסתטיות.פה ושם נכנה "אמן" גם טבח מומחה או, אם נהיה ממש נדיבים, אפילו מסז'יסט מעלה, אבל האסתטיקה שלנו תלואה בעיקר בעינינו ובאזורינו כי, בני-האדם, אלה העורצים החושיים הרחבים מספיק כדי לחתוך בעיבוד השכלי הדרוש להערכת הרמונייה.

2. 1 רמזים מעולים האמורים כדי להעמיק את חקרתנו בוואו נלק אל האנשים שיצירת יופי היא פרנסתם. מה אומרים האנשים על עבודתם שיכול להועיל לנו במידע?

א. הצעיר שותף ליצירה. נתחיל מנקודת-מבט לא שגרתית. שום מושג אינו ניתן להבהרה מספקת בלי ניגודו, ועל כן נצטרך לדון גם בהיפוכו של הנושא שלנו. ואכן, האמונה

עוסקת לא רק ביופי אלא גם בכיעור: בספרות ובציור, למשל, מופיעים לעיתים דברים ממש דוחים. ובכל זאת, ככל שאנו מודעים מהכיעור, צורת הסתכלותו של האמן עצמו נתפסת כיפה: חדות הבדיקה, האומץ, היושר ובעיקר החמלה.⁴ בעצם, אין גם קטע כמו פצעון בגיןו של אדם יפה או כתם זיעה על חולצתו מגברים את יופיו בכך שהם גורעים משלמותו ועשויו אותו אנוושי, ככלומר, **אמיתיה?** היטיב לומר הביולוג זאן רוסטאן: "הዮפי באמנות אינו אלא כיעור שהוכרע".⁵ המאמץ לתאר את המציאות כהוויותה, אפילו בניגוד לציפיותו של הציופה, היא אחד מקוויו הדמיון בין האמנות למדע: האמת מצילה יופי משלה אפילו על מה שאינו יפה!

אבל מהו בעצם "מכוער"? כאן מתחה לנו הפתעה: למרות שהמושג "כיעור" הוא ההיפך מ"יופי", הדבר המכוער עצמו אינו היפוכו של הדבר היפה! הוא מכוער אם גותר בו משחו מהיפה. הוא דוחה דוקא בשל תסכול הציפייה ליופי. כאוהב בעלי-חיים קל לי להביא דוגמה מהזואולוגיה. בפניהם של הסוס או הזאב, השונים לחלוות מפני האדם, יש בעניין הרבה יופי. לא כן כשאני מבית מקרוב לפני גורייה או שימפנזה בגוים. הדמיון לפנים האנושיות מעורר בי ברגעים הראשונים דחיה אינסטינקטיבית. הרבה ממניעי הגזענות נובעים מהמנגנון הזה של "שנת הדומה" וכבר הרחבתי על כך במקומות אחרים.⁶ מה אם כן מכוער בענייני מי שמעיריך את יופיים של חוקי הטבע? לא הכווס המוחלט אלא סדר שמתגלים בו פגמים. אם היפות נובע מהרמונייה, הכיעור הוא הרמונייה מופרת. פגמים וצרימות בחוקי הטבע, המעוררים במידען דחף מיידי לתקן אותם, הם בין המניעים החשובים ליצירה המדעית. ב. היזיوجדי הוא אוניברסלי. עmons עוז אמר פעמי' שספר המתאר מיציאות המוכרת לכל התרבות הוא גם זה הנקנה בנמל-תעופה אחד ונזוק בנמל-תעופה שני. לעומת זאת, לעיתים דוקא ספר היורד לפרטי הווייתם של בני תרבות רחוקה מזו שלנו שובה את לבנו. היכולת הזאת לחשוף את החוקים השולטים ביקום כולו מתוך התבוננות בטיפת-מים, בשלבתה נר או בכל חלק זעיר אחר של המציאות, גם היא מעוררת תחושת שיתוף בין האמן למדען.

ג. היפות אינו מוגבל ליפה. הצורך לתפוס ולהנציח יופי או היבט אחר של המציאות גורם לאמן דוקא לסתות מהתיאור המוחשי. אפילו הציור הריאליסטי ביותר עושה לעיתים אידיאלית של האובייקט שלו. האמן היווני שפיסל את דמותה של היפהפיה שישבה מולו בודאי השם איזו שומה על האף, שנפגומה או שד נפול מעט, כדי לשמר בשיש את יופיה ולא מאפייניהם אקרים. המעבר אל האמנות המופשטת היה אם כן המשך של מגמה זו: ציירים ומשוררים חשו שניתן למסור את מהותו העמוקה של מהهو ע"י קווים בודדים או כמה מיללים, מעבר למאפיינים הגלויים לעין. כך, בהדרגה, נזנחה הנאמנות למקור החיצוני לטובה חוקים פנימיים. ההשתחררות הזאת מהמקור אפשרה גם לאמן וגם למדען לחזור לעומק מהותם של הדברים.

א. אוי נזכר בסיפור "אוביים" של צ'כוב, שבו שני אנשים שעולמים חרב עליהם באותו יום הופלים לשונאים. בסימטריה המוקפדת שלו דומה סיפור זה לסיפור דה מופסאן, ולא בדמי כונה צ'כוב "מופסאן הרוסי", אבל צ'כוב פוגם בכוונה בשלמות האמנות כשהוא מוסיף לסיפור אנטו-קליניקס בצורת הערה אישית על השנאה הנובעת מאי-הבנה. האידיאלים של הרופא והחנק דוחקים הצדקה את האידיאל האסתטי של האמן, והנה למרות הפגם הזה התוצאה היא ספרות במיטהה.

ד. החיפוש מוביל רפלקסיה. לעיתים מתסכל האמן בכוונה ציפייה מסוימת שלו, אפילו ע"י מעשה פרובוקטיבי ומרגיז, ובכך אומר לנו שהוא לא על המציאות. באופן דומה, כמה מההצלחות הגדולות במדע שנפגוש בפרקם הבאים, כמו תורות היחסות והקונטים, התאפיינו ע"י הפניה של תשומת-הלבchorה אל הצופה, שבקבותיה למדנו להתגבר על עוד מגבלה תפיסתית וללמוד שהוא חדש על המציאות. זיגזגים כאלה בין אנטולוגיה (חקר הייש) לאפסטמולוגיה (חקר אופן תפיסתו את הייש) משתפים להשתנות האמנות והמדוע. הופשטייר⁶⁶ הקדים ספר ענק לניתוח המשותף לשלווש יצירות כאלה: הוכחת אי-השלמות של המתמטיקאי גּאַל (ר' 3.5 להלן), הציורים של אשר והקנונים של באך: ככל משתקפת היירה שוב ושוב בתוך עצמה וגורמת לנו לחשב על החוקים השולטים בה וגם בנו.

רופי ניתן לדיווק. הלוך האחرون שאני רוצה לקחת מהאמנות הוא פחות נעים, ולא פלא שהספרות הדנה באסתטיקה במדוע מתעלמת ממנו. כל דיון ביופי חייב להתמודד עם האזהרה העתיקה (משל לי"א 30) "שכר החן והבל היופי". הנה, התפוה על המדף במרקול הוא כליל-יופי: אדום, נטול-פגמים ובוהק – ובאותה מידת חסר-טעם ובמקרה הפחות טוב גם ספוג רעלים. בכלל, בין מגוון צורות היופי המוצע למכירה סבירנו, הסוג הנפוץ ביותר הוא דווקא הקיטש. אם המדע מhapus אחורי היופי, עליו להיות מודע לאפשרות שהיופי יכול להטעות.

לא די בהרמונייה, למשל, כדי ליצור יופי, אהרת כל מושלש היה יפה. ביופי צריכה להיות מידת כלשהו של עושר ומורכבות. מצד שני, הגודש הוא עקוני ויוצר קיטש. מצד שלישי, לא מעט זבל הנמכר היום כאמנות הוא היפכו של הקיטש והוא גרווע לא-פחות: סופר-תחכם עם אפס תוכן והרבה חשיבות עצמית. ב"יצירה" שכולה שני מושלשים שחורים, שאספן אמנות מהרצליה קנה בחמשת אלף זולר, אין שום הפשטה אלא הטעשה. וכשה"טיט גאלרי" בלונדון שילם 22,300 ל"ש ל"אמן" תמורה קופסת שימורים אותה מילא בצואתו (מעשה שהיה!), הייתה זו רק עוד פגישה בין כיעור לאיאולת.

לאמנות, אם כן, כמו לכל דבר חי, יש גם פתולוגיה. פתולוגיות כאלה מופיעות גם במדוע, כמו בשיטויות של הפוסט-מודרניזם או בתיאוריות המתחזות למדוע ע"י שימוש בביטויים מדעיים. זהו אם כן עוד ללח שנותנת לנו האמנות: היופי העומד בבחן הזמן, מעבר לתחפות האופנה ומנגני העדר, הוא זה הגורם הנאה לא רק לחושים אלא גם לאינטלקט.

3. 1. נפלאות היופי המושג
עשיו אלו מוכנים לצעד הבא: יש גם יווי הפונה **היישר** אל האינטלקט. הנה, כשאנחנו שומעים על פיתרון חכם או המצאה מוצלחת אנחנו אומרים בצדק "איזה יופי!" לא מקרה הוא שבשפת המשנה (בוזאי בהשפעת התרבות היוונית), "יפה" פירושו גם "MouseEvent", "צדוק" ו"נכון". ליווי זהה, הפונה ישירות אל שלנו, אקרא יופי מושגי. הוא היופי המאפיין את היצירה המדעית והוא ניכר בשלושה מאפיינים יהודים שיעסקו אותנו בספר זה:

א. הוא מתגבר. הפלא הראשון של היופי המושגי קשור לעומק שלו. אם נתכח פרח לחקליו או נפרק יצירה לציליליה יעלם יופים, ואם נשיך לטלש יהלום גם אחריו שהילצנו אותו מקליפת הסלע רק נוריד מערכו. אבל עכשו תארו לעצמכם עורך שחצן המקצר רומאן גדול של ג'ויס ומקבל נובליה יפהפייה, ובא חוצפן נוסף ומצמצם אותה יותר והנה יוצא שיר

מושלם במשקל ובחരיזה; או פעל המרים את פטישו על פסל של מיכלאנג'לו ובטרם הספקנו לעצור בעדו מתגללה מתחת לחתיכות שנפלו פסל מדמים שכל הרואה אותו מבין שהפסל המקורי היה רק חיקוי ירוד שלו; והנה משתלט על הטאג' מהאל אדריכל מטורף אפילו יותר מאשר ג'יהאן והוא משתמש בקירות המבנה כפיגומים זמינים שביניהם הוא בונה ארמון כה מרהיב שאפילו מקברה של מומתאו נשמעות גנחות התפעלות. היאמן?

ב. הוא מטהחד. אם יופי פירושו הרמוני שבה חלקיו השונים של הדבר היפה תואמים זה את זה, רק ציפוי הוא שמהמיזוג של שני דברים יפים לא יצא משחו יפה. אם לפרט תהיה כנף אחת של שפירית, אם "הארוח קין" יופיע בסצנה מתוך "מלחמת הכוכבים" או אם ב"אובלדי אובלדה" העולץ של החיפושים יתערבו צליליו רובי-הגאגועים של "הבן יקר לי אפרים", התוצאה תהיה במקרה הטוב קומית, אם לא גראוטסkit. המרכיבים של כל יצירה, יפה ככל שתיהה בפני עצמה, ישבו את הרמוני בין החלקי היצירה האחרת. האמנם? האם לא יתכן אמן שיגלה קוד משותף לשתי יצירות שונות לחלוטין, ועל-פי הקוד הזה ימצגן כך שהחלקיהם השונים יתאימו ביניהם אפילו יותר מששתאיימו בתחום כל יצירה בפני עצמה?

ג. הוא מתגללה. ראיינו כי האמנות יוצרת יופי לא רק כמו שהוא רואה בעולם אלא גם יופי חדש, השואב את כוחו רק מהרמוני בין חלקיו בלי להתחשב במצבות. אבל מה היו אותם אומרים לו סיפורתי לכם על אמן זה, שיוצר דברים מדמיים לא לפיה שראה אלא על-פי איזה היגיון פנימי, ואז, כשהוא מסתובב בעולם, הוא מגלה דברים בדיקות כפי שיצר? הנוכל לדמיין, למשל, את אָשֵׁר מגלה את מפל המים מהצירור המפורסם שלו מניע תחנת כוח ברוטרדם? או אוניה נכנסת בצפירה ל"תעלת אלנבי" לעניינו הננדמות של קישון?

*

בוודאי הבנתם שהסוג השני של יופי הוא המאפיין את היצירה המדעית. אמנם, היו אמנים שהתלוננו שהמדע מקלקל את היופי, כמו ג'ון קיטס שהאישים את ניוטון על "הרס את פיות הקשת בענן כשצמצם אותה לצבעי המנסרה" – האשמה שעוררה את דוקינס¹⁷ לכתוב ספר שלם כהגנה מפניה. אכן, את היופי המשוגע צרייך ללמידה לאהוב כמו שלומדים להעריך אסכולת ציור או מוסיקה חדשה, אבל למי שילמד להכיר את היופי הזה יתגלה הפלא: המדע יוצר יופי בתיאוריות, בחוקים ובמשוואות שלו, אבל היצירה הזאת היא בעצם גילוי של יופי טמיר, הקיים איפה שהוא למציאות והעומד לא רק בסיסו הקשת בענן וזוהר הצפון אלא גם בכל נורה שרופה וכחם שחבתה. מזה יותר מאלפיים וחמש-מאות שנה שיוופיים של חוקי הטבע הולך ומتعצם, אוצר יותר ויותר הדר בפחות ופחות מילים, ומוביל לגילוי תופעות יותר ויותר מדמיונות במצבות.

אם המדע מהפץ את האמת, היופי ההולד-וגובר הזה הוא הדרך שבה האמת משתקת איתנו ב"קר... קר... מתחם..." בוואו נתחיל גם אנחנו לחפש. כמה נחמד יהיה אם נגיע למקום שבו נשמע את כולם צורחים במקהלה "חם! חם! אש!"

2. ארגינטינה האלימפיאס

למרגלות אטלנטו אלית

כִּי פָצָא בְּקֶדֶד אֵל אַיִקָּה
שָׁאַל כִּי פָאַרְקָן דְּרַפְּקָן מָאֵל
מְלָאָה בְּהַרְפָּתָקָות, מְלָאָה בְּדָעַת.
קוֹנְסְטְּנְדִּינָּס קוֹוָאִיפָּס, “אִיטָּקָה”
(תרגם י. ברונובסקי)

ההיסטוריה אינה זורעת גאנים במידה שווה בערווגות הזמן. יש והיא זונחת עמים גדולים למאות שנים בלי להעניק להם אף אדם גדול, ויש דורות בהם היא מזמנת כמה ענקים לאותה עיר ואפילו לאוטו בית-קפה. בעניין רוחנו נוכל לראות את הרשב"ם מזכיר לרבנו שם אין הפק את כסת הדיו כשישב על ברכי הסבא שלהם רשי; את רفال הנער מסמיק בכיכר סאנ-פייטרו לשמע ניבולי-הפה שמטיה מילangan'לו בלואנארדו; את דארווין וקלוין מקשיבים מרותקים להרצאה של פרדיי במכון המלכותי למדע; את טולסטוי מנשק את צ'קוב וגורקי בגין יאסניה פוליאנה; או את פרויד ואדר אורקלים שטרודלים בגן ה”פרטר” בעודם מרכלים על הסטוצים של שרדיינגר היושב אל השולחן ממול ומתאמנים בדיאנוזות על הרצל העובר על אופניו ברחוב וכמעט דורס את צניג. כן, נוכל להשוב על הרבה תקופות פריחה אלה, אבל זה יהיה נורא מدقא, כי, בוואנו ונודה: ביום אנו חיים בתקופה הבינונית והמשמימה ביותר בתולדות החשיבה המודרנית. למה, בעצם? מה, זה לעלה מיובל, חurf הגידול העצום באוכלוסייה העולם, בידע, בנגישות לו, בחופש המחשבה ובמספר אנשי המדע החיים ביום,

שומם דמות המתקרבת לשיעור-קומתם של ניוטון או איינשטיין אינה נראה באופק? תשובה אין לי, אבלensus מתחילה דזוקא בברוכה שבתקופות, שנמשכה כשלוש-מאות שנה באוצר קטן בחופי הימים האגאי והאדראטי. שם, ביון הקדומה, באותו אזור בו הופיע רעיון הדמוקרטיה, הופיעו מאות גאנים בכל תחומי היצירה. כי בכל מאודם אהבו היוונים את היופי ואת האמת. הם טבעו את המושג ”פילוסופיה”, אהבת החוכמה, והחוכמה, תדעו לכם, אהבת את מי שאוהב אותה.

1.2 תלס מגלה את הכוח שבמופשט מהלך איש מילטוס (624-547 לפ"ס)⁶⁷ הוא איש-המדינה הראשון הידוע לנו בשם. היסטוריון מראשית המאה ההלניסטית ושמו דיויגנס לארטוס, שיצירתו המונומנטלית “חייהם ודעותיהם של פילוסופים נודעים”⁶⁷ תלוהו אותנו בפרק זה, מביא מפיו ציטוט אופיני:

אלוהים הוא העתיק בדברים, כי לא הייתה לו לידה. העולם הוא היפה בדברים, כי הוא מעשי-ידי אלוהים. המקום הוא הגדל בדברים, כי הוא מכיל את כל הדברים. השכל הוא מהיר בדברים, כי הוא זורם דרך הכל. הכוורת הוא חזק בדברים, כי הוא המושל בכל. הזמן הוא מהיר בדברים, כי הוא מוצא כל דבר.

תלס הפליג למצרים, אולי יחד עם המחוקק סולון (שניהם גם הונצחו בספריו הנפלא של הרצל ”סולון במצרים”) ומכווני אותה תרבות שוקעת הצל' הרבה אוצרות משכחה. החשוב

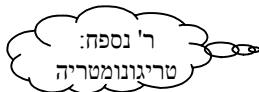
⁶⁷. בדיעו להלן בפילוסופים היוונים אימצתי כמה כלליים פשוטים. כיון שאין זה מחקר היסטורי הסתפקתי בציון שנות הלידה והפטירה המקובלות ביותר מבלי להוסף את ה-”circa” המקביל לציוני זמן לא ודאים. הוא האמור, כמובן, בנוגע לקלסתקרים. הקפדי, לעומת זאת, על הבחנה בין ת' ל-ט' בתעתיק העברי לשמות יווניים: הראשונה מבוטאת כמו ה-th במילה thing והשנייה כ-ת' רגילה בעברית.

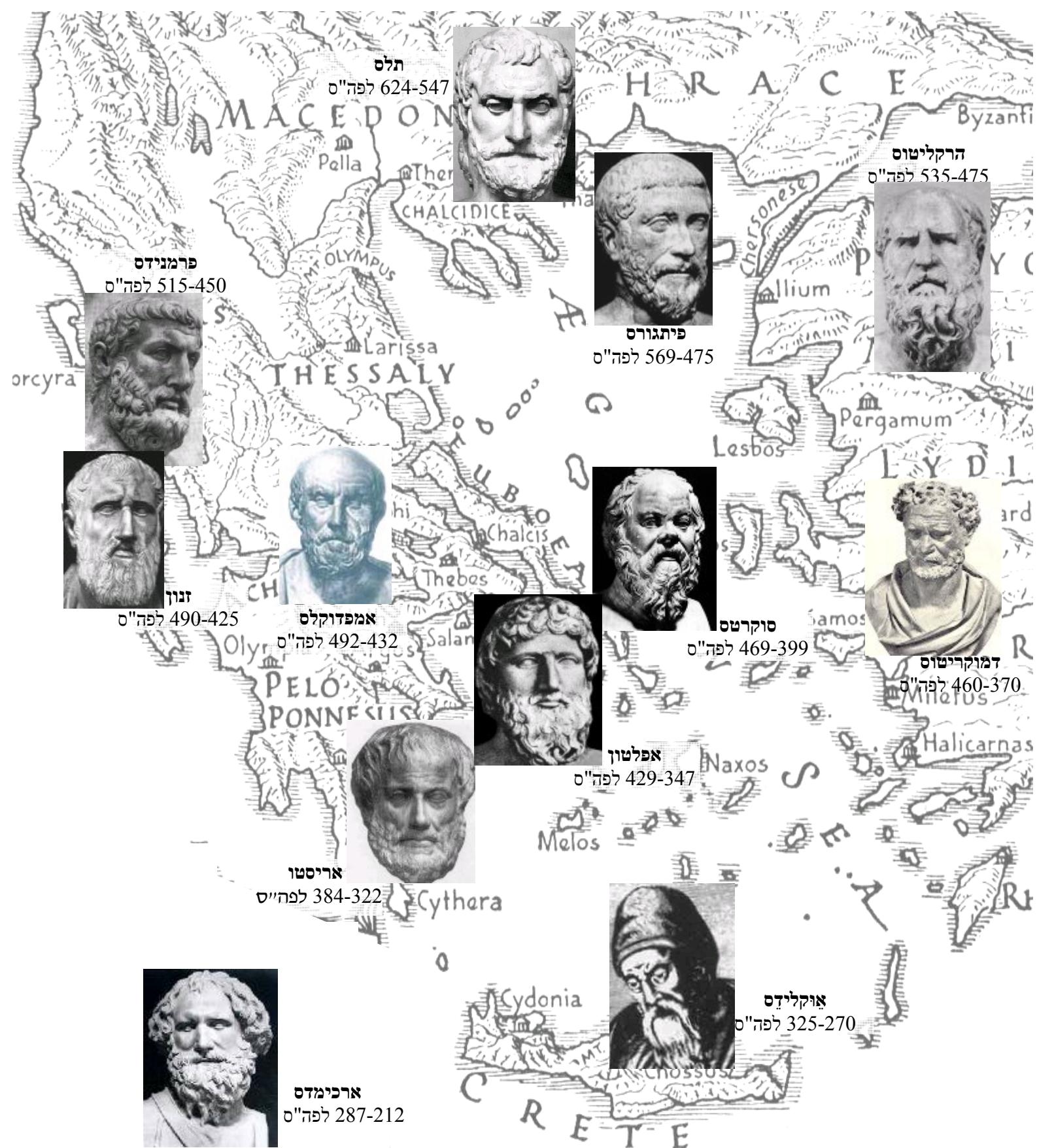
בهم היה הגיאומטריה ("מדידת האדמה"), ענף של המתמטיקה העוסק במחקר הצורות. הוא למד, למשל, איך למדוד את גובהה של פירמידה בלי לטפס עליה: נגע מוט בקרקע, נחכה עד שאורך צל המוט יהיה שווה לגובהו, ואז נמדד את אורך צל הפירמידה: זה גם גובהה. זו כמובן דוגמה של עצლנים, ולמקרים פשוטים נחוצה מתמטיקה יותר מסובכת. כך נולדו ה-"סינוס", ה-"קוסינוס" ועוד מושגים שהרבה תלמידים מקללים עד היום עמוקם לבם, אבל הם אפשרים לדעת את ריחוקו וגודלו של עצם מרוחק מבלתי לטrhoה להתקרב אליו.

מכאן עשה חلس צעד מכרייע וניסה ליישם שיטות אלה למידות קוור השמש והירח. בעבר כמו דורות הצליחו יוונים אחרים, בורייציות מהוכחות על השיטות האלה, למדוד את גודל הירח ומרחקו מאננו וכן את רוחק השמש (אריסטרכוס איש סמוס, סטטוסטנס מקירנה, 276-194 לפה"ס, שבעה את המונח "גיאוגרפיה"). התוצאות שלהם היו כמובן רק קיומיים, ואריסטרכוס גם פפס לא מעט, אבל אפילו הטעויות שעשו הן חינניות, כי הסבוכן של מכשורייהם רק מדגיש את גודל קפיצתם המוחשבתית.

חלס הוא הראשון שתיאר את המגנטיות. הוא גם הראשון שתיאר איך גוש ענבר המשופשף באrieg מושך פיסות נייר. ענבר הוא "אלקטרוון" ביוניית ומכאן שם התחום כולו. ללא ספק הרגיש חلس בקשר בין שתי התופעות, קשר שהיה צריך לחכות 2500 שנה עד שיבינו אותו כראוי (ר' פרק 10). זה בודאי נתן לו רמז חשוב: **העולם שסביבנו מלא תופעות שונות ומשונות, אבל ברמה העמוקה יותר יש ביניהם קשרים שכדי להשוו.** השקפת-עולם זו באה לידי ביטוי המצית באמירותיו המפורסמת (שהד לה נמצא גם בתחום הבריאה המקראי) "כל הדברים הם מים." הוא הבין שהמים, הקרקע והאדמים הם פנים שונות של אותו דבר, ואולי שם לב שהמים נמצאים בכל דבר חי, וכך שסביר שאפשר להכליל מסקנה זו עד לקיצוניות. בקיצור, חلس החל לחפש את מה שהפיסיקה מחפשת עד היום: תורה מאחדת שתראה איך הרבה תופעות שונות הן גילוייה של תופעה אחת.

מלחס היה עני ובני דורו בזו לעיסוקו בפילוסופיה עד שניבא מסיק זיתים מוצלח, קנה הרבה שמן, עשה הרבה כסף ואז שב למחרקיו.ليلת אחד, מס' אפלטון, הלך חلس בעודו מסתכל בכוכבים ונפל לבור. נערה שעברה שם שאלת אותו: "איך אתה רוצה להבין את מה שבשים אם איןך רואה את מה שמתחת לרגליך?" המדען הראשון הידעו להיסטוריה הוא אם כן גם הפרופסור המפורסם, שקוע כולם בכמה נושאים שונים: הוא מגלה משפט בגיאומטריה הקורי על שמו, חוקר את המגנטיות ואת החשמל, את כדריות הארץ ואת גשמי השמים. הוא עצמו, מן הסתם, אינו יודע מה הקשר בין כל הנושאים הללו, קשר שילך ויעמיק עד ימינו, אבל הוא מרגיש אינטואיטיבית בקיומו.





2. פיתגורס והמספרים שביסודו הינו פ' בערך ימי תلس ביקר אותו בחור שטרם מלאו לו עשרים, ובצתתו נסע למצרים ללימוד שם מהכוהנים. זה היה פיתגורס איש סמוס (569-475 לפה"ס), האיש שטבע כנראה את המונחים “פילוסופיה (אהבת החוכמה)” ו”מתמטיקה (הנלמד)”. במצרים למד במצרים (מוֹף המקראית), נפל בשבי הבבלי, שוחרר בסביבות לא ברורות, חזר לארציו והתיישב בקרוטון (כיום באיטליה). שם ייסד קומונה שהבריה אוחדו בחוקי הסתפקות במעט, שיתוף-הרכוש ותקופות ארוכות של שתיקה בדומה ל”ויפסהה” של היהודים. יוסף בן-מתתיהו טען ב’נגד אפיון’ כי הפיתגוראים למדו מתורת משה, סברה שרואה בין ההיסטוריה העתיקים. גם רעיונות פמיניסטיים פרחו בקומונה הזאת: ייתכן שהמתמטיקאית הראשונה בהיסטוריה הייתה **טיאנו אשת פיתגורס**. לארטיו⁶⁷ מצטט בשם אמרות חכמות על מיניות האישה. השקפותו של פיתגורס על הדעת יכולת היה להישמע מפי מוכנני הדמוקרטיה האמריקנית כמו גם מאבות הסוציאליזם: “רוב הנשים והגברים, מטיבם בריאותם או מ모וצאם, חסרים את האמצעים הדרושים לגודל בהון ובouceמה, אבל לכולם יכולות לגודל בדעת.”⁽³⁷⁾

“במשולש יש-זווית, אורך ניצב אחד כפול עצמו ועוד אורך הניתב השני כפול עצמו שווה לאורך היתר כפול עצמו.” במשפט⁸ הפשט הזה משתמש עד היום בנאים לקביעת זווית הפינה (סmeno 3 מטר מהפינה על קיר אחד ו-4 מטר על הקיר השני ומדדו את האלכסון בין הנקודות. קיבלתם פחות מ-5 מטר או יותר? מה זה אומר על הזווית?) ונוטים לקביעת מרחקים (הלכתם 6 ק"מ מזרחית ואחר-כך 7 ק"מ צפונה. כמה התרחקתם מנקודת המוצא?). אלה הם רק מעט מהיישומים המעשיים. במתמטיקה ובפיזיקה מהו
משפט זה יסוד לתגליות רבות שנגנו בפרק הבאים.



עבור חברי הקומונה הפיתגוראית זו הייתה רק התחלה. הם גילו קשר מתמטי בין אורך המיתר של כלי הנגינה לבין הציליל שהוא מפיק. הנה למשל מיתר שהפריטה עליו משמעה “זו”. אם נלחץ בדיק על נקודת המחזית שלו, עולה גובה הציליל בבדיקה באוקטבה אחת. לעומת זאת, מיתר מתחה באותה מידת שאורךו $\frac{5}{6}$ מיתר זה ישמיע “לה”, הארכו ל- $\frac{4}{3}$ תיתן “סול”, $\frac{3}{2}$ “פה” וכן הלאה. פיתגורס עסק גם באסטרונומיה והיה כנראה הראשון הראשו להבין כי שני כוכבי-הlection שנקראו בימי הָרְמֵס ואפולו הם למעשה אחד, כוכב-חמה (מורורי). את שיטתו המוסיקלית יישם לאסטרונומיה: הוא ייחס לכל כוכב-lection ציליל מסוים, וסביר שאיננו שומעים את נגינתם רק מפני שלעולם אינה פוסקת, וכך התרגלנו אליה כמו שהנפה מתרגל לרעש הקורנסים.

כך נולדה אחת האסכולות המשפיעות ביותר בהיסטוריה. מהקשר בין המתמטיקה והמוסיקה הסיקו הפיתגוראים מספרים הם דברים ממשיים למרות שאי-אפשר לראותם. מכאן קצהה הייתה הדרך להאמין בקיים קשר בין המספר לבין עוד דבר בלתי-נראה: הנשמה. על-פי אמונתם, המתמטיקה והמוסיקה מרפאות ומחזקות את הנשמה.

⁸. “משפט” (האורמה) במתמטיקה הוא קביעה המתבססת על “הוכחה” במובן הקפדי שיוסבר בהמשך. גם שמשפט פיתגורס היה ידוע לעמים רבים לפני היוונים, הראשון שארכימדס הוא הראשון שהוכיחו. אוקלידס (ר' 2.7 להלן), שהניאג את חובת הוכחה, פרסם את ההוכחה הראשונה למשפט זה מבלי להזכיר את ארכימדס, ומזה התפרסמו מאות הוכחות, ביניהן של אונארדו, האוקנס, לייבניץ וג'יימס גארפלד (לימים נשיא ארה"ב), וגם אינשטיין הילך הגיע לבדו לאחת מהן.

על-פי כל העדויות בא על הקומונה קץ אלים. הם השתדלו כנראה להתרחק מהפוליטיקה הסוערת של קרווטון אבל זו רדفة אחריהם. המונ מוסת עשה בהם טבה. פיתגורס, לפי אחד הספרים, נמלט מרודפיו עד שהגיע לשדה קטניות. נאם לאיסור שהטייל על פגעה בקטניות – נראה שהאמין כי גם בהן יש נשמה – עצר בגין השדה ונפל בידי רודפיו.

3.2 הפרה-סוקרטיים ויסודות המציאות
אם פיתגורס יישם את המתמטיקה גם לנושאים שימושיים, שני הפילוסופים בדור שאחריו חקרו בכליהם הדלים את החידה הקשה והחמקמה ביותר של הפיסיקה, את הזמן. הרקליטוס מאפוזס (535-475 לפ"ס) ופרמניקס מאלאה (450-515 לפ"ס) היו שני צדיה של יוון ובוודאי לא נפגשו מעולם, אבל את דעותיהם המנוגדות עוד נשמע בפרקם הבאים מתנצלות ללא הכרעה גם במאה העשרים ואחת. “פנטה רִי קִי אַיְן מָנִי (הכל זורם ודבר אינו מתחיד)” היא סיסמתו המפורסת של הרקליטוס. רוב משפטיו כתובים בצורה פרודוקסים פואטיים, כמו “לחיות זה למות, להיות ער זה לישון, להיות עיר זה להזקן”, וכן כונה “המעורפל”. ואם נכונות העדויות על מנהגו הסוציאומטיים נראה שגם בראותו הנפשית הייתה טעונה שיפור. אבל הוא הפילוסוף הראשון שהעמיד תורה עקבית של המציאות. לדעתו, הקבוע היחיד במציאות הוא השינוי: “איןך יכול להכנס לאותו הנהר פעמיים.” הנהר אינו דבר אלא תהליך, ובאותה מידת, גם דברים הנראים קבועים משתנים ללא הרף שכן כל דבר מכיל את ניגדו והניגודים האלה נתונים במאבק נצחי. “המאבק הוא אביהם ומילכם של כל הדברים.”
והמאבק אכן בא. פרמניקס, בנויגוד קווטבי, ראה בכל שינוי אשלה. המציאות, שהושינו מראים רק מעט ממנו, היא נצחית ונטולת כל שינוי או תנועה. גם ריבוי התופעות היה בעניינו אשלה: “הכל הוא אחד”, המתגלת לחושינו בדמות אינספור עצמים. בנויגוד ליריבו המתוודד, זכה פרמניקס לתלמידים שהיוו את האסכולה האלאטית. הגאוני בהם היה גם המאהב שלו, זנון (425-490 לפ"ס), וירטואוז באמנות הפרודוקס (פרא דזקפה = מעבר לאמונה). זנון הביך בעיקר את הפיתגוראים, שמושג המספר שלהם הביא אותם להאמין בקיום “אטומיים” של זמן. הנה למשל פרודוקס החז: אם נניח שהזמן מורכב מחלקים קצרים שהם עצם בלתי ניתנים לחלוקת, אזי בכל רגע כזה נמצא החץ העפ במנוחה בנקודת מסויימת, אבל אז, אם בכל רגע החץ אינו נע, איך הוא נע בכל זאת? כי הזמן ניתן לחלוקת עד אין סוף! יאמר מיד השומע כדי להימלט מסתירה – ומיק ישלו זנון את פרודוקס “אכילים והצב”: אם אכילים עושים תחרות ריצה עם הצב ונונן לו “פור” הוגן של כמה מטרים, הרי עד שידיביך את הרוחה ביניהם יעבור הצב עוד מרחק, אמן קטן יותר, אבל גם אותו יצטרך אכילים לעبور בזמן כלשהו וגם במהלך זמן זה יצטרך פער נוסף, ומספרם של הפערים הקטניים-והולכים האלה הוא – כפי שאמרנו לפני רגע – אינסוף, ולכן אכילים לעולם לא ישיג את הצב!

זהו אחד הצמתים המכריים בתולדות המחשבה האנושית: החשיבה הלוגית מוכיחה שדבר מסוים הוא בלתי-אפשרי, בעוד המציאות שהוא מוכיחה מדי רגע שהוא קורה בלי הרף (מצב דומה נפגוש בפרדוקס של יום, פרק 3.5 להלן). מה לעשות? יש כמה אפשרויות: א) להראות שהפילוסוף רק ביצע להטוט מילולי, מה שנוהג לקרוא “فلسف”, שבאמצעותו ניתן להוכיח כל שנות, כמו שעשו למשל הסופיסטים (ר' 2.4 להלן). ב) להזות

שחוšíינו אכן מעתעים בנו. ג) לחשוף פגם סמי בחשיבה של הטוען, ואם הטוען זהה הוא אדם חכם – ייחשף פגם בחשיבה של כולנו.

קל לשולב את אפ豁ות (א) במקהה זהה: הפרדוקסים של זנון נבחנו שוב ושוב ונמצאו קשים להתרה. זנון עצמו, נאמן למורו, בחר ב-(ב). אלפיים שנה מאוחר יותר פנו מתמטיקאים ל-(ג) וחשפו טעות לא-טריוויאלית בחשיבה שלו, ואגב-כך ייסדו ענפים חדשים במתמטיקה. הפיסיקאים, מצידם, חשפו בעיות במושגי המרחב והזמן – דרך בה נלך גם בספר זה. הנה דוגמה לכך ש"אין אפס" בפרדוקס מוצלח: הוא תמיד מוביל לתגלית!⁹

כמו פילוסופים רבים אחרים, הסתבך זנון במרובות בפוליטיקה: הוא נטל חלק בקשר נגד גיארכיס רוזן אלֶאָה. על סיפור הוצאתו להורג מביא יידיננו לארטיס⁶⁷ כמה גרסאות מקבריות. לפי אחת מהן עונה זנון כדי שישיגר שמות שותפיו לקשר, אבל הוא חתר בנשיכה את לשונו וירק אותה על גיארכיס, ואז הסתער ההמון על הרודון והרגו. לפי גרסה אחרת הוא קרא לו כדי ללחוש לו את השמות, אבל במקום להגיד ניעץ את שנייו (או אףו) של הרודון, ולשומרי-הראש לא נותרה ברירה אלא כדי לחוץ את אדונם המילל מכאב. כך או כך, הסתבר, המות לא מתרשם מפרדוקס החץ.

אמפdockס מסיציליה (432-492 לפה"ס) היה שילוב של רופא, משורר, פובליציסט ו"גורו" אפוף מסתורין. ב-1990 התגלה קטע פפירוש של אחד מכתביו – תגלית ראשונה של חיבור קדם-סוקרטי. תחומי מחקרו עסקו באברהילוגיה, באתיקה ואפילו בגרסה קודמת של תורת האבולוציה, לפיה היו פעם איברים בודדים שהצטרכו מאוחר יותר ליוצרים שלמים. גם על סיפור מותו לא חסרות גרסאות בייזריות, למשל: הוא רצה שייחשבו שעלה השמיימה במותו ולכנן קפץ אל לוע הר-הגעש אטנה, אבל ההר המלשן פלט החוצה את אחד מסנדליו. לזכותו נזקפת תורת ארבעת היסודות המפורסתת, אותה הציע בمعנה לפרמנידס: עלמןנו בניי מאויר, אש, מים ואדמה. החומרים השונים הם תערובות שונות של היסודות האלה, המונעים ע"י שני כוחות: אהבה ומאבק. בהשפעת הפיתגוראים, ניחש אמפdockס כי תוכנות החומרים נובעות מהיחסים המספריים בין היסודות, שהם עצם מתכלים ואינם נוצרים – ניסוח ראשון של חוק שימור החומר.

פרדוקסים של זנון המשיכו להדדה. דמוקריטוס מאפרקה (370-460 לפה"ס), עוד פיתגוראי שהפליג לארצות רחוקות לknות דעת, הוא אבי התורה האוטומית. נוכל למנוע פרדוקסים, אמר דמוקריטוס, אם נניח כי החומר בניו מחלקיקים מאד-מאוד פיצפונים שאינם ניתנים לחלוקה (א-טומוס = בלתי-מחולק). ההבדלים בין העצמים השונים סבירנו, אם כן, נובעים רק מסוגי האטומים המרכיבים אותם ומכמיותיהם השונות. האטומים אינם מתכלים, אינם נוצרים ואינם משתנים. חולשה אחת ממנו סבלה התיאוריה הייתה הנחת קיומם של אינספור סוגים אטומים – נסיגה מהפשתות של אמפdockס. גורם חשוב שהוסיף דמוקריטוס לתוכנות החומר היה החלל שבין האטומים, העושה אותם צפופים או מרוחקים. דמוקריטוס היה הראשון שהאמין בסיבותיות מלאה ולא הותיר שום מקום לאלים להתערב בעולם. הוא היה נראה אתאיסט אבל לצד מחשבותיו המדעיות פיתח גם תורה מוסר.

כהנה וכנהה הורו אנקסגורס, פיליאוס, פרוטגורס, דיגנס... וכל חכמי יוון האלה, שמרעינווניותם שרדו רק פרגמנטים שצוטטו בכתביהם אחרים, שייכים רק לשלב הקדום המכונה "פרה-סוקרטי"! אם רצוננו להגיע מתיישבו לפיסיקה המודרנית, נצטרך להשאיר את

הדיון בהם לאחרים³⁷ ולסכם את מפעלים כך: בימי קדם נתפס העולם כנסלט בידי אלים שהגנו/זלוו/הרגו/בגדו עם/את מי שرك התחשק להם. באו הפילוסופים והחליפו את **המיתות בלוזוס (חוק)** ובכך סללו את הדרך לשילית האדם בטבע, בחברה ולבסוף גם **בנפשו פנימה**.

4.2 סוקרטס מזמן לדיאלוג סוקרטס (469-399 לפה"ס) דוקא פנה עורף מוגן למדע (אפלטון תיעד ויכוח שנון בין לבין פרמנידס וזנון בעת ביקורם באתונה) ופנה לשאלות מוסר ודת. אבל הוא חולל מהפכה כשההעמיד את הדיעת עצמה כנושא חקירה, ובכך לימד גם את המדע להבחין בין טענות אונטולוגיות (על המציאות) ואפיקטומולוגיות (על אופן הכרתינו את המציאות). “כל אני יודע,” הכריז, “הוא שאני יודע כלום.” בימיו פרחה האסכולה הסופיסטית, קבוצת פלسفנים שתחת הסיסמה “האדם הוא מידת כל הדברים” החלה להתדרדר להזניה של הפילוסופיה לסתם רטוריקה המוכיחה כל דבר לפי רצון השומר (“నכוון שהאבן הזאת מעולם לא נפרה? לנן האבן הזאת היה!” או: “నכוון שהכלה הזאת היא אמא? ונכוון שהיא שלך? אם כן, היא אמא שלך!”). סוקרטס לקח מהסופיסטים את שיטת הטלת הספק ושיכلل אותה לוירטוואזיות, אבל בניגוד להם האמין שקיים אמת ורצה לעזור לאנשים להגיע אליה. כך נולד הדיאלוג הסוקרטי, בו אמרו הצד השני להגיעה אל האמת בעצמו, וכך היפך סוקרטס לנודניק המעצבן ביוטר בעיני רוב הציבור האתוני.



“מוות סוקרטס” מאת זאק-לווי דוד, לימים ציר המהפהча הצרפתי וידידם של רובספייר ומריא (ר' פרק 9). בניגוד לאמונה המקובלת הוא לא היה דמוקרט, והתרועע בಗלו עם כנופיית שלושים הטיראנים הידועה לשמה. כשהנתבע לדין על “זולול באלי העיר” ו“השחתת הנער” כבר היה בן שבעים, ונראה שהוא נחשש לקבל עונש מוות: כששאל אותו בית-המשפט מה הוא עצמו סבור צריך להיות פסק-דין הצעיר, בנאום מנומך לפרטיו, להזכיר לו שלוש ארוחות חיינם. אפלטון וחבריו המבוילים כמו מיציע הקהל ומירהו להצעיר עונש של קנס, אבל המושבעים כבר התרתחו. כך ארגן הקשיש לעצמו סוף דрамטי מעובד לפרטיו, כולל ניצוח על

מקהלה התייחסות של תלמידיו (ראו תמונה) בעודו שותה את הרעל, ואפילו הסוהר טרם כמה יבבות. חופש המחשבה וחופש הדיבור זכו לקדוש המעונה הראשון שלהם, שנכנס לתפקידו במרץ רב.

5.2 אפלטון משאיר שלו יים

אם אנו מכירים כיום את סוקרטס למרות שמיינו לא העלה מילה על הכתב, הרי זה בזכות הדיאלוגים היפהים של תלמידו אפלטון (429-347 לפ"ס), שבו האמתי היה דווקא אריסטוקליס. בכינוי פלטון – "רחב" – זכה מורה לספורת בשל כתפיו הרחבות, והעברית, בעקבות אהotta העברית, הוסיפה לו א'. בן עשרים ושבע היה בזמן משפט סוקרטס. הוא בא משפחה אצילתית – שניים מ"כונפיית השלושים" היו דודיו – וברח אחרי הפלת הטיראנים, ותקופה ארוכה ננד ביעולם. על-פי סיפור שאפילו חוקרים רצינאים¹⁵ מקבלים כאמתית, הוא נמכר לעבד ונפדה ע"י חבר, שסירב לקבל חזקה את כספו וביקש שאפלטון יקיים בו בית-ספר. כך נוסדה ה"אקדמיה" המפורסמת, המכון מחקר אינטנסיבי בו עבדו חוקרים ממגוונות שונים על שאלות שאפלטון הטיל עליהם ושלל עבודותיהם בנה את השקפת-עולם. הוא היה בעל דעת מקוריות בתחוםים רבים (למשל בענייני אהבה, שם טבעו לכבודו את המונח "אהבה אפלטונית"), סופר נפלא וגם, לא נעים לומר, פאשיסט לא קטן: אילו ניתן בידיו הכוח להקים את מדינת הפילוסופים שלו היה נוצר עוד "גנ עדן" מסווג אלה שכבר ראיינו יותר מדי במאה העשרים. אבל כיון שהמתמטיקאי והפילוסוף אלפרד נורת' וויטהד (1861-1947) סבר שככל הפילוסופיה המערבית היא "סדרת העורות שליים לאפלטון", לא יזיק להציג בכמה מאותם עמודים ב"שיעיאס" שככל כך הרבה חכמה הצבירה בשוליהן.

ישנם תחומיים העוסקים בתופעות אובייקטיביות, מוחשיות, הקיימות במציאות החיצונית, כמו הפיזיקה, הרפואה או הסנדירות. מהצד השני נמצאים תחומי האמנות כמו הספרות והמוסיקה, שהם בעיקר יציריים דמיוניים והשיפוט של יצירותיהם הוא עניין סובייקטיבי של טעם. אבל מה מקום המתמטיקה בחלוקה זו? מספרים אינם קיימים במציאות. האם מישחו ראה אי-פעם שלוש? ראיינו שלוש קלמנטיניות, שלוש תולעי-משי או שלושה חברי-כנסת, אבל סתם שלוש, את השלוש עצמו, לא ראיינו מעולם. אפשר כמובן לכחות 3, 3 או 3, אבל גם ספרות אלה הן רק ייצוגים מוסכמים. באותה מידה יכולנו להסכים ליצג שלוש ע"י צב ניג'ה. המושג המופשט עצמן, כך נראה, הוא יוצר דמיונו של האדם.

ممש לא נכון, אמר אפלטון. מושגים מופשטים יכולים להיות יותר אמיתיים מכל עצם מוחשי. אחרת, איך תסבירו את העובדהשמי של המספרים המופשטים האלה, מי שידוע כמה זה שלוש ועוד שלוש בלי קשר קלמנטיניות או לחושחים, דווקא הוא יכול לבנות גשרים שלא יתפרקו תחת רגlinנו ואוניות שלא יהפכו חיש-מהר לצוללות? הנה הפרודוקס שלילוה אותנו לאורך הספר הזה. המתמטיקה היא יוצר רוחנו, עוסקת בדברים מופשטים שאינם נראים במציאות. היא גם גורמת הנה אסתטית לאנשים מסוימים (שהם, במקרה, אלה שמצלחים בה ולא מקללים אותה אחרי הבדיקה). אם כך, צריכה הייתה המתמטיקה להימנות על המקצועות החומניים והאמנויות. במציאות, כמובן, המתמטיקה היא מלכת התחומיים הריאליים: העיסוק במספרים טהורים שאיש אינו יכול לראותם נותן לאנשים כוח אדיר לשולט במציאות החיצונית!

תשובה אפלטון ליחידה היא חזרה בדרך הפיתגוראים וערעור על הנחת-יסוד של חשבתנו: התרגלנו לחשוב שהעצמים המוחשיים הם אמיתיים ואילו המחשבות, הזיכרונות והרעיון הם רק **השתקפות** שלהם. טעות! העצמים המוחשיים הם בבאות היוורת של מחשבות ורעיון שעל פיהם בראו האלים את העולם. לנ, האמן, המיסטי והמתמטי מתחברים, איש-איש בדרכו, אל העולם האמיתי הוא שבסוד העולם המוחשי שלנו. באחד הדיאלוגים הנפלאים שלו, "אנון", מתאר אפלטון איך סוקרטס משוחח עם עבד חסר השכלה ובעזרה סדרת שאלות מראה לו שהוא יודע גיאומטריה! לנ, אם למדתם משהו חדש, בעצם רק **זיכרון** במשהו שידעתם עוד טרם לידתכם.⁴

דמיינו לעצמכם, המשיך אפלטון, אנשים מסכנים החיים כל ימיهم כבולים בתחום מערכת ויכולים לראות רק את דופן הפנימי, עליו נופלים צללים של מה שהם אחריהם. הם מאמינים שהצללים הם העולם האמיתי. יום אחד יתגער אחד מהם מכבלו, יצא ויראה את העולם בצבעים ובתלת-מימד, ואז יבין שעד עתה ראה רק צללים. כך גם עולמנו: הכסא אני עכשו יושב עליו הוא לדעתי מאד אמיתי, אבל לפני אפלטון הוא רק העתק של "אם כל הכסאות" בעולם האידיאלי, שככל הcasאות בעולמנו הפגום הם בבאותה. זו הסיבהשמי שיוודע לטפל במספרים – מהם, לדבריו, הדברים האמיתיים – יכול לשולט בעצמים המשקפים אותם.

6.2 אריסטו לא מתרגש מיופי אריסטוטלוס (לפה"ס), שבו קוצר בפי הערבים לאריסטו, הוא שנתן לפיסיקה את שמה (פיסיס טבע). בכל הקשור למעורבות בפוליטיקה השair את שני מוריו הרחק מאחור. אביו, שהיה גם מورو הראשון, היה הרופא של מלך מקדוניה, אבל נפטר כשarisטו היה בן עשר (האם נפטרה עוד קודם). בהיותו בן שבע-עשרה עבר לאטונה, שם למד אצל אפלטון, שהעירindeו מאוד, אבל כיון שכבר אמן הוגין התלמיד עצמאית מחשבתו, לא התמנה לירושו. הוא עבר לעיר אחרת למד בחצר המלך ואף התתacen עם בת משפחתו המלוכה. כשהו הופיע המלך חזר למקדוניה בהזמנת המלך פיליפוס להיות מחנה לאלכסנדר בן השלוש-עשרה, וכשהזה יצא לכיבושיו באסיה חזר אריסטו לאטונה ויסד בית-ספר משלו. כשמת אלכסנדר בהודו ואטונה חזרה להיות מוקדונית, חש אריסטו כי גורלו עומד להיות כזה של סוקרטס. הוא לא התלהב מהרעיון והעדיף להמלט מהעיר ולהקים בית-ספר חדש במקום אחר. עברו מאות שנים, וכמו התלמיד שהחל כמלך "נאור" וסימן כדיktotor מטורף, כך יופיע גם מפעלו המרהיב של המורה לחורבה רעונית ענקית שהכרה יהיה להרים אותה מן היסוד כדי לבנות מחדש החדש.

איך קרה שדווקא אריסטו, שבניגוד לשני מוריו היה גם מדען מוצהר, נעשה לסמל חשכת ימי-היבנים שהמדע נאלץ להילחם בו בחירות נפש? כתביו הקיפו את כל תחומי הדעת, מכמה מדעים, כמו אסטרונומיה, ניסויים לא היו מבושים אפילו מדען בן-ימינו (דארוון ראה בו את גדול מורייו). הוא גם נחשב לאבי הלוגיקה ועד היום הולך ההיגיון המדעי בדרך דומה לחוקי ההיגיון שניסח. מצד שני, הוא היה חוסך לעצמו הרבה ביזונות אם היה מצלה

⁴. אך לאמונה זו מופיע בתلمוד, נידה ל2.

לפעמים לומר בפשטות, כמו הסבא הרוחני שלו, "אני לא יודע."⁸ תחת זאת השair מסכת אדרירה של אמריות החלטיות, ובהן לא מעט שטויות שנוסחו בטון פסקני ואיש לא העז לבדוק אותן. למרות ריבוי התחומים בהם עסק, הוא התנגד בחריפות למחקר אינטראדיסציפרני והזהיר שלא לחקור תופעות בתחום מדע אחד ע"י שימוש בכלים של מדע אחר. ועוד בעיה: הוא היה גם מלומד גדול, שהכיר וצייט בהרחה את קודמו ובני-זמנו, וכן נוצר הרושםשמי שבקיא באրיסטו בקיא בפילוסופיה היוונית כולה. על-פי הדיקוטומיה של בבלר,⁹ אפלטון היה "פוטנציאלייסט," כלומר השתיית את המדע על יסודות שהם עצם פלאיים ובלתי-נראים, אבל ניתן לגלוות את עקרותיהם בעקיפין. אריסטו, לעומתו, היה "אקטואלייסט" שרצה מדע המתבסס רק על מה שניינו לראות באופן ישיר וסילק את כל הסיבות הנסתרות. בכך ניקה את המדע מאמננות טפלות (אם כי לא דחה את האסטרולוגיה), אבל גם דיכא את הופעתן של השערות חדשות.

לפיכך, גם בספר זה, נגלה לפעמים שאристו בצירוף מחבט שטיחים מהווים עזרים לィמודים מועילים: הצלפה בצוותא בפדן הקדמון היא תרגיל חימום טוב בתחילת כל שיעור פיסיקה. אבל בוואנו נודה: זה לא ממש הוגן. קoon, בספרו מבשר-התקופה "המבנה של מהפכות מדעית,"⁴⁶ סיפר איך הכנין בצעירותו הרצאה ובה התכוון לתקוף, כמו כולם, את אריסטו. לשם כך ניסה להעמיד את עצמו במקומו ועל רקע תקופתו, אז הבין את גודלו. במילים אחרות: כולנו חכמים אחר מעשה.

אריסטו התנגד לטענת אפלטון שהמתמטיקה יכולה להסביר את הרבגוניות העצומה של הממציאות הפיסית. כיוון שהוא גם מומחה ממש לאסטטיקה, היטיב לחשוף את הגיחוך בכמה מאמננות הפיתגוראים בקשר ליפוי. ואכן, עליינו להודות כי לא מעט הבלמים מנוסחים בצורה יפה. לכן, גם כשתנגד בפרקם הבאים לגישה המהניתה של אריסטו, בוואנו נזכר את זהירותו כי העדפת היפי כקריטריון יחיד עלולה לבוא על החשבון האידיאלי השני שלנו, דהיינו, האמת.

7.2 אוקלידס בונה בניין גדוֹל על בסיס צר נראה שאחרי התנ"ך, "יסודות" של אוקלידס אלכסנדריה (325-270 לפה"ס) הוא הספר המודפס והמהתרגם ביותר בהיסטוריה. על אוקלידס האיש לא ידוע כמעט דבר מלבד שעבד כמורה או כחוקר בספרייה האגדית של אלכסנדריה ושכתב גם ספרים על אסטרונומיה ומוסיקה. מה עשה את ספרו לאחד המסמכים המכוננים של התרבות? בוודאי לא מקוריותו אלא גיבוש כל הידע המתמטי הרב שנאכר בימי למערכת לוגית פשוטה ורבת-עוצמה.

הרעיוון הוא פשוט: כיוון שהרבה טענות מתמטיות הופרכו לבסוף, איך נדע אם טענה כלשהי אינה מופרcta? נבדוק על אילו טענות היא נשענת, ועל אילו טענות נשענות הטענות ההן עצמן וכך הלאה עד שנגיע לכמה "אקסiomות," הנחות כל כך פשוטות עד שלא ניתן להוכיחן בלי להסתמך במעגליות, אבל גם לא להפריכן.² ששת הפרקים ("ספרים") הראשונים ב"יסודות" עוסקו בגיאומטריה, שביסודו מצא אוקלידס חמש אקסiomות כאלה: 1) דרך כל שתי נקודות אפשר להעביר קו ישר אחד, (2) כל קו ישר אפשר למשיך ללא גבול כקו ישר, (3) בהינתן נקודה וקו, אפשר להעביר מעגל שמרכזו בנקודה ורדיוסו שווה לקו,

⁸. שכלו של אריסטו, מעיר פריס בשינויו, "היה דומה לצנצנת שבה קווטלים האנטומולוגים את חרקיהם. כל אשר נגע בו, הוואר ונחנק בעת ובזונה אחת." (25)

⁹. אוקלידס עצמו השתמש בביטוי "אקסiomה" לציון הנחת-יסוד כללית וב"פוסטולט" להנחה-יסוד ספציפית בגיאומטריה. הבדיקה ביום אינה נחשבת כעקרונית ולכן נדבר מעתה רק על אקסiomות.

4) כל הוווית הישרות חופפות זו לזו, 5) אם ישר חוצה שני ישרים כך שסכום הוווות הפנימיות בצד אחד קטן מכפליהם ווית ישירה, אוii שני הישרים נחתכים זה עם זה באותו צד אם יהיו ארוכים עד אינסוף. מכאן המשיך לאריתמטיקה (תורת המספרים) וגם ביסודה מצא חמש אקסiomות: 1) שני גודלים השווים לגודל שלישי שווים ביניהם, 2) אם יתרוספו גודלים שווים לגודלים שווים יהיו הסכומים שווים, 3) אם יוסרו גודלים שווים מגודלים שווים יהיו ההפרשים שווים, 4) דברים המתלכדים זה עם זה שווים זה ליה, 5) השלם גדול מהלכו.

על בסיס זה בנה אוקלידס בניין ענק ומושלם: בין חלקיו אין שום חיבור רופף. את השיטה מתמצת אברון² כך: "כמה שפחות הנחות, כמה שיותר הוכחות."

8.2 ארכימדס הופך ידיעה לכודז

ה זיכרונו הקולקטיבי אינו נדיב, כפי שנוכח למגנית-לבו כל מי ש"פדייה" שלו נחרטה בזיכרונו הציבור יותר מכל הצלחותיו. כך, האוטוציאציה הראשונה שמעורר שמו של ארכימדס (287-212 לפה"ס) היא של איש רץ עירום ברחוב וצועק "אוריקה!" האיש אליו רץ היה הרודן של סירקוסי (כיום סירקוז, סיציליה), הירון השני. הוא החש שכתחר שנעשה לו עשוי לא רק מזוהב והטיל את משימת הבירור על קרויבו הצעיר, שלמד אצל האוקלידים באלאנסדריה. ארכימדס היה טרוד בבעיה זו כשבטבל באמבטיה. כך התגלה החוק המפורסם: "געף השקווע בתוךו (נוול, ג) מאבד משקל השווה למשקל אותה כמות תוקד השווה לנפח הגוף".

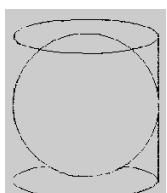
ומענין שדווקא אדם כה תלוש מהמציאות, שעתיד יהיה לשלים על כך בחיו, המחייב לראשו את העוצמה הטכנולוגית הגלומה במידע המופשט: ארכימדס עשה את המחקר השיטתי הראשון על המנופים ובו חישב כמה כוח נרוויח אם בניה את המשא על נקודה מסוימת במנוון ונלחץ על נקודה אחרת מצד אחד, ובכך אפשר לבני דورو להרים משאות ענקיים שנחשבו למעלה מכוחם. מחקר אחר שלו, שעסוק בהידרואסטטיקה (החוקים השולטים בנוזל במצב מנוחה), סייע לשאיות כמוות גודלות של מים ("בורג ארכימדס") הוא מתקן להרמת מים הנפוץ עד היום ולבנייה אוניות ענק. אם להאמין לעוד סיפור נפוץ, מחקריו בחוקי החזרת האור סייעו לו לבנות מראה פרבוליית (מושג שiosoבר בפרקם הבאים) שבעזרת הצלחה להבעיר מרוחק ספינות קרב רומיות שעגנו בנמל סירקוז.

"רק תננו לי נקודת משען מתחילה", התרברב ארכימדס, "וממנה איזין את העולם כולו".

זהו אولي הדוגמה הראשונה בתולדות הפילוסיפה לשיטה שתשתמש הרבה את אינשטיין גם אותנו בפרקם הבאים, דהיינו "ניסוי החשיבה".¹⁷ לא תמיד אפשר לבצע ניסוי, אבל ניתן להריין בראש סימולציה שלו. כך אנחנו עושים, למשל, כשהאנחנו מהארים לאיזה מקום ומנסים לדמיין מראש איך נעשה קיצורי-דרך. מזמן יכול להריין ניסויי חשיבה כאלה אם הפנים היבב את חוקי-הטבע הרלוונטיים לסיטואציה שאotta הוא חוקר. כזה הוא ניסוי החשיבה של ארכימדס: לא משנה אם קיימת נקודת משען מחווץ לכדור-הארץ המתאימה להשען עליה מנוף, אם אם קיימים מנוף מספיק חזק שלא יישבר במהלך הניסוי. די בהכרה שנייסוי כזה **אפשרי בעיקרון** כדי להסיק מסקנה פיסיקלית. ולא רק בניסויי חשיבה הצעין ארכימדס: **כיוון שהיה גם מהנדס, והראשון לתרום עקרונות מתמטיים לצרכים מעשיים, הוא**

גילה את החוקים הנושאים את שמו בעזרת הרבה ניסויים של ממש.

הירון לא הצעין בחכמה כמו קרויבו. הוא סיבך את ארצו במלחמה בין קרתגו לרומא, ובסופה השתלטו הרומיים על סירקוז. המפקד הרומי, שהעריץ את האיש שהטיבע את



אוניותיו בכוח המדע בלבד, הזהיר את חיליו שלא לפגוע בארכימדים. אבל חיל שעבר על פני ז肯 שציר בחול ספוג גערה: "מי מו טואס קיקלואס טרטה (אל תבלבל את מגלי)!"³⁰ החיל התרתח: תראו חוות! (או משחו כזה בלטינית) והרג אותו.

ב-146 לפה"ס נכבה יונן כולה בידי רומי ולמושל סינקוז התמנה מרקוס קיירו הנודע. הוא מצא את מצבתו הנשכחת של ארכימדס, שעלייה תמונה כדור חסום בגליל, נושא הוכחה המפורסת "השיטה והנפה של כדור נמצאים ביחס של 2:3 לשטח לנפה של גליל החוסם את הכלור".³¹ המדיני-פילוסוף שיפץ את מצבת המתמטיקי.

*

השמש שזרחה על הֶלְס הحلة שוקעת. האימפריה שקמה על חורבותיה קיבלה מארכימדס את הדעת הדורוש לבניתם לביסטראות, כבישים ואקווడוקטים, אבל לא התעניינה כמעט בשום דבר שלא ניתן לפולש אליו, להטיל עליו מסים או סתום להרוג אותו. אחר-כך באו ימים גרוועים עוד יותר. בין ההיסטוריונים לא הוכרע הוויוכוה מי השמיד את הספרייה הענקית באלאנסנדראה – הרומים, הנוצרים או המוסלמים, אבל על אמרת עגומה אחת אין מחלוקת: כל אחד מהצדדים היה מסוגל לכך!³² בפריפריה של המלכה שנחרבה עוד יותר זיקרים עומדים מהאור הגדול,³³ אבל כשהמתמטיקאית והאסטרונומית הנודעת היפטיה (370-415), ראש בית-הספר האפלטוני באלאנסנדראה, נקרעה לגזרים בידי אפסוף נוצרי מוסת, היה ברור שתקופת רעה משמשת ובאה, אם כי איש לא שיער כמה ארכואה תהיה. וימי הבינים... כן, יש מומחים שיכעס אם נקרה להם "ימי החושך" ויזכרו כל מיני הוגים חשובים שהיו בהם, אבל ספק אם כל ההתקדמות המחשבתית שהלכה באירופה עד הרנסאנס שколה אפילו לדור אחד בתור הזהב של יוון. האם הייתה זו ההתעסקות האובסיבית בביולוגיה של הבתול בן הכתולה שגרמה לעם נזק מוחי לדורות? אפילו היהודים, שנענו בהתעוורויות אינטלקטואליות מרהייבה לאתגר התרבותי הגדול שהציג בפניהם הכיבוש ההלני (ימי הזוגות, התנאים והאמוראים) ושרוו מטובו הרבה יותר ממה שהיו מוכנים להודות, הפנו את עיקר כישורייהם לתחום ההלכה והאמונה. המדע נאלץ לנזוד לבגדד, לטהרן ולשאר ערי האסלאם הפורח, עד שיקומו עמי אירופה לשבור את עלן הכנסייה והמלך, והיהודים יצאו מהגטו.

³⁰. מطبع חדש שנתגלחה לאחרונה מלמדת שפרעונית מצרים האחרון, קלואופטרה השביעית (69-30 לפה"ס) לא הייתה היפהפה המוכרת לנו מכתבי שיקספיר אלא יוונית עם תווי-פנים פשוטים, כמעט גסים (עובדת שצוינה כבר בידי פלוטרוכוס). הארכיאולוג המצרי עוקשה אל צאיל חשפ' לאחרונה חיבוריהם ערביים עתיקים המעידים כי אם הצליחה эта זו לשחרר את ראש של يولיס קיסר ומרקוס אנטונינוס, היה זה יותר בשל אישיותה ולמדנותה: היא הייתה מתמטיקאית וכימאית שהיברה ספרים בנושאים אלה, עוד שריד למסורת ההלניסטית.

3. א' – שלמות שואפת לאין סוף

יש הרואים דברים כפי שהם ושאליהם: למה?
ואחרים חולמים על דברים כפי שיוכלו להיות ושאליהם: למה לא?
(ג'ורג' ברנרד שו)

היכן עומדים אנו כיום בוגר לשאלות שהעיסקו את אבות המdad? ספר זה מתאר את התפתחות הפסיכה באופן כרונולוגי, אבל בפרק זה נסטה לשעה קלה מסדר הזמנים כדי לבדוק את הרפאים gabois שהציבו לנו היוונים ולשאול איזה מהם עברנו מАЗ ואיזה לא. זו תהיה הזדמנות לתרגם את הדקדוק של המdad, ומה שיותר כיף – את המוסיקה שלו.

3.1 חתירה תחת היסודות

לא רק ספר כלים היה ה"סודות" של אוקלידס (ר' פרק 2.7) אלא גם יצירת מופת: בכל הדורות, חוקרים מתחומים שונים ניסו לחקות את האלגנטיות של "כמה שפחות הנחות, כמה שיותר הוכחות." המתמטיקאים עצם שאלו: אולי נשמש עוד אksioma ונקבל בנין יותר חזק? כאן מתעוררת בעיה: כל חכמולג יכול להחליט לזרוק איזו אksioma שמתחשך לו, אבל אז יתמודט כל הבניין. החוכמה היא לבנות מחדש מבניין **يُثبت** על האksiomas שנוטרו! כמה מהמתיקאים (הבולט שבהם גאוס, 1777-1855) נטלו לאksioma החמישית (ר' 2.7) בגיאומטריה האוקלידית: היא ארוכה מדי וaphaelו אוקלידס השתמש בה רק כשהיה מוכרת. תחילה ניסו לגוזר אותה מהaksiomas האחרות ונכשלו, אז ניסו להניח אksioma החליפית ולבנות עליה את כל הגיאומטריה מהתחלת. אם יתקלו בסתרות, זו תהיה הפרכת האksioma, אבל אז היא כבר לא תהיה אksioma! למרבה העניין – עוד עדות לגאנונתו של אוקלידס – הגיאומטריות החליפיות שנבעו מהaksioma החדש היו די חולניות אבל עקבות לחלוותן. תשאלו: בשבייל מה זה טוב? יענו המתמטיקאים: אנחנו עושים לא רק מה ששימושי אלא מה שנראה לנו יפה, והגיאומטריה החליפית הזאת היא יפה! עברו מאות שנים, בא איינשטיין וגילה שגיאומטריה כזו נותנת בסיס לתורת היחסות הכללית (ר' פרק 14). הנה שוב הפרדוקס האפלטוני: **מושגים מופשטים, שהומצאו על ידי האדם כשבוע אינטלקטואלי, התגלו כתואמים את המציאות ממשית במקרים שאף אחד לא דמיין לעצמו.**

המבנה הלוגי הזה אומץ גם במדע. הנזיר האנגלי ויליאם מאוקאם (1285-1349) טבע את הכלל הידוע כ"תער אוקאם" האומר בצורתו המודרנית כך: בהינתן כמה מיאוריות המסבירות את אותה תופעה, עדיפה זו המסתמכת על פחות הנחות-יסודות. ואולם, הניסיון הראה שכאשר הצלחה מישחו לוותר על אחת מהנחות-היסודות של תיאוריה מבלי להגיע במדויקת ובכוח ההסבר שלה, התיאוריה שהתקבלה אחרי הקיצוץ הייתה, לעיתים קרובות, מדויקת יותר ואף הניבה גילויים חדשים. הפלא זהה – א) השמתה הנחות-יסודות שהן לכורה הכרויות, ב) בניית בניין חדש על הבסיס הצר יותר שנשאר, ג) ה גילוי שדווקא הבניין הזה חזק ורחב יותר, ו- ד) בנוסה לכל גם תוכם הلكים מהמציאות עוד לפני התגלו – חוזר בכל תולדות המדע.

3.2 הרחבת מושג המספר

כך החולו ערעורים במתמטיקה גם נגד יסודות תורה פיתגורס. ברור שהרבה מהמתמטיקה של הפיתגוראים הייתה סתם נומרולוגיה: מספרים זוגיים נחשבו "נקבאים" ואי-זוגיים "זכרים", ובהמשך נעשו חלקים "קדושים" ואחרים "טמאים" וכן נפרץ סכר השטוויות. כמו כן התברר

שם אוחבי הרמונייה, כשהאומרים להם משחו שלא מוצא חן בעיניהם, מסוגלים להגיב בצורה לא הכி הרמוניית. פיתגוראי אחד, היפוסט, גילה משחו מטריד שנבע דוקא משפט המשולש המפורסם של המורה: אם ניקח ית' של משולש ישר-זווית ושווה-שוקיים ונבדוק מה היחס בין אורכו לאורך אחד הניצבים, נגלה ש**שווה מידה** בעולם – סנטימטרים, בלאות, אובייקט – לא תוכל לבטא את היחס הזה במספרים רגילים כמו 3:2, בסתם שבר כמו 352/361, או אפילו במספר עשרוני מחרורי כמו ...0.333... כל מה שנקלבל יהיה המספר העשרוני המעכבר... 1.414213. הנמדד עד אינסוף בלי להזור לעולם על עצמו. למספר זהו אנו קוראים **כיוון** “**אי-רצionarioלי**”, “**לאמור**”, “**לא-חלוקתי**” (יחס = ratio). זה היה הראשון במשפחה מספרים כאלה שהתגלו כבעלי חשיבות עליונה, כמו ה-**פִי** ה היווני (π), המוכר יותר בהיגויו האנגלי **פי**, שהוא היחס בין היקף מעגל לקוטרו: ...3.141592... היה זה מהלומה לאמונה שהמספרים הללו יסוד העולם. מה שעצבו הוא שלעובדת הלא-**יפה** זאת, דהיינו היעדר מידת המשותפת, יש הוכחה מוחצת שהיא עצמה יפה מאד!¹³ ומה שהכי עצוב, מספר אירצionarioלי זהה גם ה-**פִי** שנגash בהמשך, הקשור דוקא ב*ביפוי!*

הפיתגוראים, כך מסווג, כל כך התרגזו על היפוסט עד שהטבחו אותו ביום בתוקוה שאף אחד לא ישמע על השערוריה. הם עצם הכהישו את הסיפור, כי הם היו, כזכור, צמחונים נחמדים שהקפידו לא לפגוע אפילו בקטניות. הם הוו, עם זאת, כי השביעו כל חבר חדש בשבועות סודיות, וכך הלאה הרבה מהידע שלהם לאיבוד. הנה, אידיאלים טובים יכולם להוביל למעשים רעים. די להזכיר בפשעי הקרים הקותליים שנעשו בשם אותו ספר בו מופיע מכתבו המרטיט של יוחנן אל הקורינתיים על האהבה, או בצרפתים שצרכו כל היום “**לייבורטה! אג'ליטה! פנטרניטה!**” כשבם כל “**טָה**” יורד להב הגילוותינה על צווארו של עוד מסכן בשם החירות, השוויון והאהווה. יש כאן לפקח חשוב: גם אידיאל ה **יופי**, אפילו אם אינו מוביל לשפיכות דמים, מסוגל להתעורר למקומות בהחלט לא יפים.

מושג המספר המשיך להתרחב גם אחרי הכנסת המספרים האירצionarioליים. אמן המספרים עצם הם דמיוני, אבל אנחנו יכולים לפחות להלביש בהם משחו – קלמנטינות, חושחים וכדומה. בהדרגה הופיעו מספרים יותר ויותר מוזרים. כדי לציין כי בימי קדם אפילו “אחד” לא נחשב למספר כי “מספר” היה, בעצם הגדרתו, **רבים!**³² מכאן ניתן להבין כמה קשה היה לקבל ש”**אפס**” הוא מספר עד שהערבים הביאו אותו מהודו. אבל אז בא חכם אחד ושאל: אם המספרים הולכים ויורדים באחד עד האפס, מה יקרה אם נמשיך ונחסר אחד מהאפס עצמו? כך נולדו המספרים השיליליים, -1, -2... וכו’ והיה צורך להרחיב את האריתמטיקה כדי שתוכל לטפל גם בהם. חיש מהר התברר שהמספרים המשונים האלה יכולים לעזרה הרבה בעיות מעשיות, כמו לאפשר לבנק לשמור לנו “**מינוס**”. כיוון שכך, בא חכם יותר גדול ושאל: מה השורש הריבועי של מספר שלילי זהה? וזה כבר בהחלט מוגזם. שורש ריבועי של 4, למשל, פירושו מספר שאם נכפיל אותו בעצמו נקבל 4. כך, $2 = \sqrt{4}$, $3 = \sqrt{9}$, $4 = \sqrt{16}$ וכו’. אבל הכפלה של כל מספר בעצמו, אפילו אם הוא שלילי, נותנת מספר חיובי! הפיתגוראים, מן הסתם, היו מזמינים את החכם הזה לטויל קצר בים כמו כמו שעשו להיפוסט, אבל בדור ההוא – זו הייתה איטליה של ראשית הרנסאנס, אליה נתוודע בפרקם הבאים – היו מתמטיאים שדוקא שהם מספק להם תעסוקה. הם סימנו את המספר המשונה ב-*i* (מלשון *imaginary*) והמציאו עבورو ציר **מספרים “מדומים”**, ניצב לציר המקביל, ועליו סיידרו את כל השורשים הבלתי-אפשריים האלה: *i*, שהוא השורש הריבועי

ר' נספה:
מעgal והבדור

של 1-, ואחריו 2, 3 וכו'. גם הפעם, מתחת לאפס הוסיף מספרים מודומים שליליים, – 2, – 3 וכו', כך שהתקבל ציר מספרים שלם המאונך לציר הרגיל. על מערכת-הצירים הדו-מדיות הזאת בנו תחום מתמטי חדש. עכשו לכו ננסו להבין מהי קלמנטינה מודומה, שהעלאה בריבוע תיתן קלמנטינה שלילית, שהעלאה בריבוע תיתן סוף-סוף קלמנטינה שאפשר לאכול.

חוק חוק, אבל גם כאן קרה הפלא: המספרים המודומים התגלו כשלב הכרחי בפתרון הרבה בעיות מעשיות. במאה ה-19 נמצאו להם שימוש גם בתיאוריה האלקטרומגנטיות ובמאה ה-20 התגלה שהם חוניים לחישוב התופעות המזורגות של תורה הקונטים (ראו פרקים 15 עד 16). מי יגלה עפר מעניין אפלטון! המתמטיקאים, מסתבר, לא המציאו אלא גילו משהו החובי בסוד המציאות!

טענה זו, שתגלית מתמטית היא גילוי ולא המצאה, יכולה להסביר את הצלחת התוכנית “פחות הנחות, יותר הוכחות”. הרי לא כל מי שמערער על אקסiomה הופך למציא ענף חדש. להיפך, ברוב המקרים יוצא לנו משאו חסר-ערך. אם נזרוק את כל האקסiomות ונסתפק ב”אלוהים בראש העולם” או ”כל מה שאנו רואים זה רק בראש שלנו”, נוכל לבנות על אקסiomה בודדת זאת תיאוריה המסבירת כל דבר, אבל מהחיאוריה הזאת, כפי שתראו בהמשך, לא יגבע שום ניבוי חדש. במדוע, החוכמה היא להשmidt את האקסiomה הנכונה – נכון יותר: **הלא נכונה** – ורק אז, על הבסיס הנותר, יתרוםם בניין גדול יותר.

3.3 מעבר למספר

הפליה של אפלטון – שהחוקים האריתמטיים החלים על שלוש קלמנטינות חלים גם על שלושה סטרפטוקוקים, שלושה גניקולוגים ועל כל שאר העצמים – רק הלכה והעמידה Maoz, כי תורה המספרים היא רק הקומה הראשונה בבניין המתמטיקה. אם ה”שלוש” המופשט הוא מושג החל על כל העצמים, בוואו נחשוב על מושג מופשט יותר, נאמר א, הحل על כל המספרים. אם מעולם לא ראיינו את ה”שלוש” עצמו, במנוטק ממיקרוביים או מרופאים, בזודאי שמדובר לא ראיינו א. האם גם ההפשטה הזאת תניב משהו מעניין?

המילה ”אלגברה“ מקורה בគורת ספרו של המתמטיקאי והאסטרונום הפרסי ابو ג'עفر אל-כּוּרִיזְמִי (780-845) ”**חַפָּאֵב אֶל-גּ'אָבֵר וְאֶל-מִוקּ'אָבְּלָה** (חישוב ההשלמה והאייזון).“ גם שמו של אל-כּוּרִיזְמִי עצמו התגלגל למושג ה”אלgebra“, המצין שורה קבוצה של פעולות מתמטיות. האלגברה מחליפה את המספרים ב”נעלים“ (אותיות), ואלה מגלים חוקיות יסודית יותר. זהו צעד נוסף בהפשטה המתמטית: כמו שהשווינו האריתמטי $a \times b + a \times c = a \times (b + c)$ נכוון ל.cgi כל שלושה מספרים שנציג במקום השווין שלושת הנעלמים.

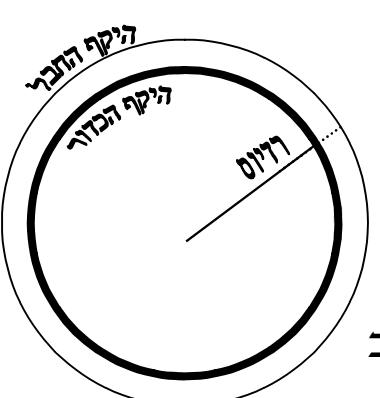
הנה חידה אלגברית, פשוטה להפליא ומפתיעה באותה מידה, הממחישה את יכולתה של המתמטיקה להציג מיד על עובדה שהשכל הישר יצליח לגנות רק אחרי זמן רב או אפילו יסרב להאמין לה. יהא כדור שהרדיוו שלו הוא מטר אחד, וסביבו קשרור חבל. החבל יוצר אם כן מעגל, שהיקפו הוא גם היקף הכדור. עכשו נאריך את החבל הקשור סביבה הכדור במטר אחד, וניתן למעגל להתרחב במידה שווה סביב הכדור. בכמה גדר רדיוו המעגל החדש? אם תעשו את החישוב, תמצאו שהתוספת של מטר אחד להיקף המעגל מאריכה את הרדיו

ר' נספח:
חקי האלגברה

ב-0.15915 מ', ככלומר המעלג שיווצר החבל סביר הcador גבה במעט 16 ס"מ – גובה של חתול יעבור מתחתיו בנוחות.



א



ב

יפה, ועכשו היליפו את הcador שלנו בcador הרבה יותר גדול, נאמר, כגודל כדור הארץ, והקיפו גם אותו בחבל. החבל יוצר מעגל ענק שהradiוס שלו 6,378,135 מטר והוא 40,075,160 מטר והוא גודל ענק קשור סביר הcador בצורה מהדקה שאיפלו קרציה לא תוכל לעבור תחתיו.שוב, הוסיפו מטר אחד איפה שהוא לאורך החבל ותנו לمعالג להתרחב במידה שווה סביר הcador. כמה גודל רדיוס המעלג החדש? הציבו את המספרים במשוואת היקף המעלג, וכמה הקלקות על המחשבון שלכם יתנו גודל שכל חתול יעבור מתחתיו בנוחות.

רגע, מה קורה פה?! הוספנו רק מטר להיקף כדור-הארץ כולו ושוב התפח כל המעלג במעט 16 סנטימטרים כמו בפעם הקודמת? ברור שזו טעות! בוואו, אם כן, נקיψ בחבל כדור עוד יותר גדול, נאמר, בגודל הгалקסיה, ונאריך גם את החבל הזה במטר אחד בלבד. מה רדיוס גלקסית שביל החבל? לומר את האמת – זה לא משנה. לנו נמצא, תעשו את החישוב, וכשתגמרו, יכול חתול לעבור בנוחות **בכל מקום**, על פני מילוני שנות-אור, דרך ה-16 ס"מ שמתוחה לחבל המקיף את כדור הгалקסיה.

הנה תרגיל משלים: קצטו חזקה מטר אחד מהחבל המקיף את הгалקסיה, מתחו וחברו אותו מחדש. עכשו לא יוכל שום חתול ושם קרציה על פני כל מילוני שנות-אור המשתרעים סביר הcador לעבור תחת החבל. ואפשר גם כך: הוסיפו 16 ס"מ לרדיוס הгалקסיה כולה, כך שהיא מתפח בשיעור זה לכל הכוונים על פני מילוני שנות-אור. התופסת להיקפה? מטר אחד.

עם המסקנה הזאת תוכלו להשלים בכמה דרכים: א) אחרי הצבות של כל מיני מספרים גדולים וקטנים וחישובי התוצאות, ב) אחריAIMוז החשיבה היזואלית, ג) אחרי הבנת הקשר האלגברי בין ההיקף לרדיוס. מבט במשוואת היקף המעלג מראה לנו מיד: אין בה שום התייחסות לגודל המעלג. לכן – הגיוני או לא – תוספת מטר להיקף מעגל תגדיל את הרדיוס בכ-16 ס"מ בין אם מדובר בצד רגאל או בгалקסיה. מסקנה: **החשיבה המתמטית יכולה לראות דברים מסוימים טוב יותר מהשכל הישר**.⁴ וזאת לא מפני שהיא מנוגדת לו אלא כי היא חסינה לכמה מהמלכודות האורבות לחשיבה היזואלית.⁵

מה הייתה ההפשטה הבאה במתמטיקה? אם המשוואה האריתמטית פועלת על מספרים והמשוואה האלגברית פועלת על אותן המיצגות מספרים, המשוואה הדיפרנציאלית פועלת על פונקציות, שהן עצמן מעין משוואות. גם כאן, כפי שנראה בפרק 8.8, רמת ההפשטה

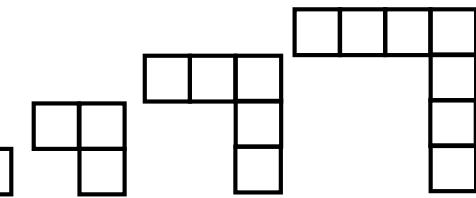
⁴. עוד חידה נוגדת-איןטואיציה מסווג זה, בה כשלו אפילו מתמטיקאים נודעים, ידועה בשם "Monty's door" ומתחוארת במקומות רבים בראשת.

⁵. מצד שני, גם לחשיבה המתמטית יש מגבלות. כשהציגתי חידה זאת לאחד מתלמידי המבריקים. הוא חשב רק רגע, חירות אמר: "היחס בין היקף לרדיוס הוא לנינאי, או גודל הcador לא משנה" ובכך הסתירים העניין לגביו. לדעתינו אלא אם רק הקנה מדברת מגורוני), הסਮוכות כה חזקה על ההיגיון המתמטי, עד לאובדן הפליאה לדברים הנראים פרזוקסליים, עלולה לגרום להחמצת תגליות חשובות. אשוב לעניין זה בפרקם האחרונים.

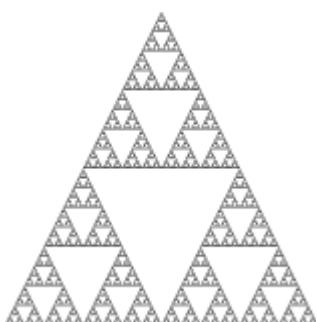
החדשה מאפשרת טכנולוגיה מתקדמת עוד יותר. מה לגבי אוטם תחומי מתמטיקה מופשטים להלוטין שאין להם כל שימוש? זה בדיקת העניין: אין להם שימוש **כיום**, אבל כפי שנראה בהמשך כבר היו ענפים רבים של המתמטיקה העיונית שהתגלו מאוחר יותר כמתאים לטיפול בבעיה מציאותית כלשהי. נראה, על כן, כי כוחה של המתמטיקה גדול יותר ככל שהיא מופשטת יותר.

4.3 שעשו ים כבדי – ראש

ראינו ששיטת הוכחה שהנ Hag אוקlidס במתמטיקה היא תובעניות הרבה יותר מהhocחה המדעית באמצעות ניסוי: שום מתמטי לא יעוץ להוכחה טענה כלשהו על סמך בדיקת מיליון דוגמאות, כי כבר קרה שرك המקה המיליארד ומהו הציב!³⁹ הוכחה צריכה להיות **עקרונית**, בלי קשר לניסיון. הנה, לדוגמה, הטענה שכל סכום של מספרים אי-זוגיים עוקבים המתחיל מ-1 נותן מספר ריבועי, למשל, $2^2=1+3$. במקרה זה, הוכחה העקרונית קלה להמחשה ויזואלית. את כל המספרים האי-זוגיים מה-1 ומעלה אפשר לצירר כקבוצות ריבועים היוצרים צורות "ר" שצלעותיהן שוות, והן הולכות וגדלות בקובייה אחת בכל זרוע, כמו באירור שלנו. נכוון שכל צירוף של "ריש"ים המתחילה מהריבוע הבודד משמאלי יוצר ריבוע? הנה יכולם אנו לומר "מש"ל" (מה שציריך להוכיח) או, אם נרצה להשוויז בלטינית, "mo^{re} ut m^out h^oz^oik at a^uns^o!"



הוכחות כאלה, הנכונות עד לאינסוף, הולידו מגוון שעשויות, בהם נבעו גם צורות חדשות של יופי וגם הבנות חדשות של המציאות. לאונארדו פיבונצ'י (1170-1250) תהה מה יקרה אם ניצור טור מספרים שבו כל מספר הוא סכום שני המספרים הקודמים. הוא כתב, אם כן, ..., 0, 1, 1, 2, 3, 5, 8, 13, וקיים מקור בלתי-נדלה של תוכנות מסקרנות המשיכות להתגלות עד היום. קחו למשל, כל מספר בסדרה וחברו אותו עם כל קודמו: תקבלו סכום השווה למספר השני הבא אחריו פחות אחד. לדוגמה, סכום חמישת המספרים הראשונים, $1+1+2+3+5$, שווה לסכום המספר השביעי, 13, פחות אחד. יש לסדרה אינסוף תוכנות מסקרנות כאלה,³⁹ אבל הדיווינד האמתי בא כשהתגלה שהוא מתארת שפע אדריכלים הקיימים בטבע,⁴⁰ מיסידורי עליים על הגבעות ומבנה הקונכיות ועד צורת הгалקסיות.



| | | | | | | | | | |
|---|---|----|----|-----|-----|----|----|---|---|
| 1 | | | | | | | | | |
| 1 | 1 | | | | | | | | |
| 1 | 2 | 1 | | | | | | | |
| 1 | 3 | 3 | 1 | | | | | | |
| 1 | 4 | 6 | 4 | 1 | | | | | |
| 1 | 5 | 10 | 10 | 5 | 1 | | | | |
| 1 | 6 | 15 | 20 | 15 | 6 | 1 | | | |
| 1 | 7 | 21 | 35 | 35 | 21 | 7 | 1 | | |
| 1 | 8 | 28 | 56 | 70 | 56 | 28 | 8 | 1 | |
| 1 | 9 | 36 | 84 | 126 | 126 | 84 | 36 | 9 | 1 |

עשוע דומה מציג מושלש הקרויה על שם המתמטי הצרפתי בלייז פסקל (1623-1662) אבל תואר כבר בידי המשורר והאסטרונום הפרסי עומר כיאם (1048-1122). זהו מבנה העשווי משורות מספרים שכל מספר בהן הוא סכום שני המספרים מימין ומשמאלו בשורה מעליו. גם כאן התברר שאין גבול לתוכנות

³⁹ וגם, בעבר, בכמה קיבוצים בהם היה נהוג "מרק פיבונצ'י" שבושל משאריות הימים הקודמים.

המפליאות של המשולש. כך למשל, סכום אברי כל שורה הוא אחת החזקות של שתיים: $2^0 + 2^1 = 2^2$, $2^1 + 2^2 = 2^3$ וכו'. ואם נצבע בשני צבעים את הספרות הזוגיות והאי-זוגיות יתקבל "משולש סירפינסקי" שבתוכו משולש הפוך וסביבו משולשים ישרים. את המשחק זהה אפשר עוד להמשיך כך שבכל אחד מהמשולשים הפנימיים יהיה עוד משולש הפוך שסביבו עוד משולשים ישרים שבתוכו כל אחד מהם עוד... מתבלטת אם כן צורה פרקטלית, כלומר, צורה שגם אם נפרק אותה לחלקיהם קטנים נגלה שהיא חוזרת ומופיעה בהם עד אינסוף. והנה, גם הפרקטל הוא צורה השולטת בתופעות רבות בטבע.³⁹

והנה מספר חמים שמקורו בהערה של אוקליידס ושהפך מקור לעיסוק אובייסיבי מאז עד ימינו:²⁴ ניקח קו ישר ונסמן את קצוותיו ב-א' ו-ב'. עכשו נסמן נקודה ג' שתחلك אותו לשני חלקים, כך שהיחס בין הקטע הגדל א'-ג' לבין הקטע הקטן ג'-ב' יהיה כמו היחס בין הקו השלם א'-ב' לבין הקטע הגדל א'-ג'. אז, אנשים מצאו את היחס הזה, "חיתוך הזהב", בגוף האדם, בפנים יפות, במבנים קדומים, ביצירות אמנות, בצמחים, ביצורים חיים ולבסוף בכל מקום בו רק הסתכלו. כמובן שהיחס מה"גיליים" האלה היה רק פרי דמיונם, כפי שהוויה מריו ליביו כשהמצא את החיתוך הזה גם ביחסים השונים בין חלקי הטלויזיה שלו.²⁶ ובכל זאת, המספר הזה, ...1.61803..., המסומן באות היוונית פֵי (Φ) ומוכר יותר בהיגוי האנגלית פִי, חוזר וצץ בטבע במקומות שונים ומשונים כמו סיור זרעי התפוח, פרח הוורד וקונכיות החילזון. "אין צורך להאמין במיסטיקה כדי להושיראה כלשהו לנוכח יכולתו זו של חיתוך הזהב להופיע במצבים ובtopluses שאין לכוארה כל קשר ביניהם." (20²⁴) רוצחים דוגמה? בבקשה: לכו אל סדרת פיבונאצ'י לעיל, קחו אחד מספריה וחלקו אותו במספר הקודם. זוגות המספרים הראשונים יתנו מנות פשוטות כמו 1 או 1/2, אבל ככל שתעלו בסדרת המספרים תראו שבר הולך ונראה כמו ...1.618... נכון, זה יהיה מזדענו פִי.

בָּ

המשותף לכל המשחקים האלה הוא ש-א) ביסודות עומדים כלל יחיד ופשוט, ובכל זאת ב) נובעות מהן עוד תכונות מפתיעות, ו-ג) מתברר שהם מתארים תופעות רבות הקיימות במציאות! נראה שהיקום עצמו נברא בצורה דומה לשעועים של פיבונאצ'י ופסקל: חוקים פשוטים יוצרים סדריות המולדות מגוון ענק של תופעות יותר ויותר מורכבות.

3.5 א- שלמות פורייה

כמו אודיסאוס שהורה למלאיו להשאיר אותו קשור לתורן כל עוד הסירנות שרוט, גם אנחנו, לאור המחלוקת בין אפלטון ואריסטו, צריכים להחליט שלא ניתן ליפוי להסיט אותנו מהאמת. לצד העיסוק ביופיין של הфизיקה והמתמטיקה, בואו ניתן דעתנו על שני מומי המתגללים בשתי הגברות האלה אחרי בדיקה יותר פולשנית. שתיהן מתחרות על כתר "מלכת המדעים". הфизיקה תובעת אותו בנימוק שהיא עוסקת במרכיבים הבסיסיים ביותר של המציאות כמו חומר, אנרגיה, מרחב וזמן, ולכן כל שאר המדעים, העוסקים בתופעות מורכבות יותר, הם ענפי-משנה שלה. המתמטיקה, מצד שני, טוענת שהיא מוגבלת רק למציאות הידועה לנו. כל מציאות שנוכל להעלות בדמיונו, כל עוד שולטים בה חוקים קבועים, ויהיו אלה הבזאריים ביותר, תוכל המתמטיקה לתאר אותם, ולכן היא יסודית יותר מהфизיקה. בואו נראה מה יוכל ללמידה מוויכוח זה.

הפיזיקה היא מדע ניסיוני,⁸ כלומר היא לומדת על המציאות והתמצית. שיטות אלה מושתתות על עיקנון הסיבתיות: אם סיבה א' גרמה לתוצאה ב', בתנאים דומים היא תגרום לה תמיד. בפילוסופיה המכונה מסקנה כזאת "אינדוקציה", הסקה מהידוע על הלא-ידוע. והנה העיקנון הכל-כך יסודי הזה נפל קרבן להפרכה פשוטה וקטלנית של הפילוסוף דיויד יומ (1711-1776). נניח שאני זורק אבן למעלה פעמים רבות ומגלה שהוא חזרה ונופלת. אני מסיק שכקירה תמיד כשהזור על הניסוי. פשוט, נכון? בא יומ ואומר: המסקנה הסיבטיבית הזאת חסרת תוקף אפילו אם זורקת את האבן מיליון פעמים, כי **כל טיעון סיבתי מסתמך בעצמו על סיבתיות**. הנה, נסה לומר "אני מאמין בסיבתיות כי היה תמיד הוכחה לנכונה" ותחשוב על מה שאמרת: לא cocci אינטיליגנטי, נכון?

זכרו שהאידיאל של הפילוסופים הוא אדם שאינו – ואם צריך אפילו מות – על-פי הפילוסופיה שלו, כפי שעשה האבא האדול שלהם באตอนה כששתה את הרעל. יום היה איש טוב והגון, אבל אין ספק שהוא לא חי על-פי הפילוסופיה שלו: הוא לבש מעיל כשהיה קר בחוץ, לא התחצץ לשוטרים, עקי שלוליות וכדומה, בKİצ'ו: הוא למד מניסיון העבר והשתמש באינדוקציה כמו כל אחד. כי גם אם איינו יכולים להוכיח שיש חוקיות בעולם, אין לנו ברירה אלא לנוהג לפיה! הרבה הכם ניסו להתגבר על הפרוזקס הזה. הבולט שבhem, עמנואל קנט (1724-1804), הצבע על כך שלא ניתן לחשב שום מחשبة בלי להסתמך מראש על מושגים כמו חלל, זמן וסיבתיות. מכאן הסיק קנט שמושגים אלה אינם נובעים מהניסיון אלא הם "א-פריריים", כלומר טבועים בנו מלידתנו. זה ללא ספק תרגיל פילוסופי מבריק (ולא קשה לשם גם בו הדר לאפלטון), אבל המחיר שהוא תובע מעתנו הוא להאמין לדבר כל כך מהותי כמו רק "בראש שלנו" ואנחנו מלבושים אותו על מציאות שאינו יודעים מה היא.

המתמטיקאים אהבו לנפנף בנקודות העיוורון הזאת של המדע הניסיוני עד שאחד משליהם עשה להם תעלול וערער את הבסיס המקביל של המקצוע שלהם. המדע, כפי שראינו, משתמש באינדוקציה, הסקה ממקרה פרטני על הכלל. המתמטיקה, לעומת זאת, משתמשת בדוקציה, כלומר הנחת עיקנון ראשוני שמננו נגוראות מסוימות ספציפיות יותר. כמובן, העיקנון הראשוני הזה אינו נובע מהניסיון, כי זה תחומו של המדע. לכן, כל מערכת של הנחות-יסוד היא חוקית בעיני המתמטיקאי כל עוד היא עקבית, כאמור, לא ניתן לגזור ממנה סתירה – דבר והיפוכו. אמרו אנשים: בואו נבנה את כל המתמטיקה כמו שאוקליידס בנה את הגיאומטריה, כלומר נבדוק מה המינימום של הנחות-יסוד שגוזר את כל טענות המתמטיקה (כולל הגיאומטריה, שהזורה עכשויה להיות ענף של המתמטיקה). טובו המוחות של המאות ה-19 וה-20 נרתמו למרוץ הזה, וגילו הרבה דברים יפים בדרך. ואז הופיע בחור בן עשרים וחמש בשם קורט גֶּל (1906-1978) והוכיח שכל מערכת עקבית של הנחות מתמטיות חייבת לכלול טענות שלא ניתן להוכיח בתוך אותה מערכת. גדול עצמו, שהוא אפלטונייסט, הסיק מהוכחת אי-השלמות שלו מסקנה מרחיקת-לכיה מודע: **האמת חרגת מגבולות ההינתנות-להוכחה**.¹¹ המתמטיקה, עם ההיגיון הצרוף והמושלם שלו, ת策רך להיות עם העובדה שייתכנו בתוך עולמה דברים אמיתיים שלא יהיה בכוחה להוכיחם.

⁸. ב"ניסיוני" השתמש להלן訳してある "אמפרי". יש מדעים, כמו אסטרונומיה, שבהם לא ניתן לעשות ניסוי, ולכן האימוט בהם הוא התמצית. הניסוי והתמצית הם אם כן מבחנים ניסיוניים.

באופן דומה התרמודדו מודיע הטעור על האינדוקציה. לערתם בא פילוסוף יהודי-אוסטרי, קארל פופר⁴² (1902-1994), שהצליח לעקוף את יום במלח עוצר-נשימה: נכוון, לאינדוקציה אין תוקף לוגי, כי גם אחרי מיליון פעמים יתכן שאבן שנזרקה למללה עדין לא טיפול חזקה, וכןן, כל אישוש הוא זמני. אבל מה לגבי הפרכה? היא דזוקא מוחלטת: אם פעם אחת תישאר האבן באוויר, אני צריך לחזור על הניסוי כדי להפריך את האינדוקציה שעשית קודם! מהתובנה הזאת הוציא פופר את התרומה החשובה ביותר שננתנה לפילוסופיה המודרנית למדע: קритריון התיחסום בין מדע למדע-מדומה.

באותם ימים שלטו במדע הפוזיטיביסטים, אנשים חכמים וקדונים מאוד שטענו שציריך לסלך מההידוע כל זכר למטפיזיקה, ככלומר לטענות שלא ניתן להוכיחן בשום ניסיון, כמו טענות האפלטוןיסטים. הם עשו עבודה חשובה בסילוק דברים מיותרים, אבל לקחו את תער אוקאם (ר' 3.1) לקיצוניות שהחניקה את החשיבה המדעית: אפילו אטומים נחשבו בעיניהם משהו כמו מלאכים, שלעולם לא ניתן היה להוכיח את קיומם. אמרו הפוזיטיביסטים: תיאוריה היא מדעית רק אם ניתן להוכיח אותה. ככלומר, היא צריכה לנבא משהו, ואם הניבו מתאמת, היא מדעית.

פופר, שהיה אז בחור צעיר מאוד, הזמין את עצמו يوم אחד לפגישה של הפוזיטיביסטים (שנקראו "החוג הוונאי") ואמר: בדיקת ההפרכה! תיאוריה היא מדעית אם ניתן, ב UIControlו,



להפריכה. זה נשמע קצת מוזר, כי תיאוריה שהופרכה היא לא נכונה. נכוון, אמר פופר, היא לא נכונה, אבל היא מדעית. כשהתיאוריה מראה לנו שימושו אינו נכון – במקרה זה: התיאוריה המסכנה עצמה – היא מקדמת את ידיעתנו בצד חשוב קדימה! (כמובן, אם התיאוריה ניתנת להפרכה, ובמקרה גם לא הופרכה, נשמה יותר). קל עכשו להבין מהיון הכוח העצום של תיאוריות פסאודו-מדועיות בעיני מאמינהן: הן בנויות מראש כך שככל מה שיקרה רק יאשש אותן (חשבו על ניבויים אסטרולוגיים כמו: "משהו שלא חשבת עליו הרבה זמן יתקשר אליך", או "אהורי הצינויים שלך מסתתר צורך גדול שיאהבו אותך"). הן נכוונות כיום כפי שהיו לפני שנים, אבל בבדיקה מסוימת זו הן חסרות ערך: הן אין

מסתכנותות בשום ניבו של ממש.⁸ האמת המדעית בנויה מאינדוקציות שלל-פי יומם אין ביטחון שלא יופרכו יומם אחד, אבל מהפרכה להפרכה המדע מתקדם.⁹

אגב, כדי להנחיל את העיקרון של פופר לאנשים בגיל צעיר ולהתרגל לישם אותו לא רק במדוע אלא גם בהשכפות הפוליטיות, בחיי האישים וכדומה. כל מי שיש לו דעה נחרצת בנושא כלשהו, כדי לו מדי פעם לעזר ולשאול את עצמו: האם יכול לקרות שהוא שיגרום לי להבין שהדעה הזאת שלי מוטעת? וכי שינה לענות בכנות, יגלה להפתעתו שהתשובה היא לעיתים קרובות שלילית! ככה זה, אנחנו נוטים לבנות לעצמנו תיאוריות שרק הולכות וונשות עם הזמן חסינות בפני העבודה. זו תופעה שכיחה אצל אנשים אינטלקטואליים ומלאדים ונוטה, למרבה הצער, להתחזק עם הגיל. חזקה על התרגיל הזה היא דרך טובה לשמר על צערות רוחנית.

הנה שוב מה שمبادיל פילוסופיה אמיתית מלהטוטי מיlim: הערעור של יומם על הסיבותו הניב הבחנה שתרמה הרבה להפתחות המדע.

6.3 הגורם האנושי
למרות שהחוק המדעי חושך סדר והיגיון עמוקים בעולם, התהליך המוביל לגילויים לא חייב להיות מסודר או היגיוני עצמו. כשהסקרטס מסביר לנו ברצינותו הומית ב"המשתה" איך אהבת נערים יפים מובילה אהבת היופי עצמו ולאהבת האמת, מותר — וראוי — לגור, לאור העובדה שהיא אי-אליה אנשים מרשימים בעלי אהוב שום נער ואיפלו שום גערה. ההומוסקסואליות של סוקרטס ואפלטון הייתה בודאי הדלק הראשוני לפעליהם האינטלקטואלית (והם עצם הקדימו את פרויד להכיר בחשיבות הסובלימציה של היצר), אבל שום בר-דעת לא יתייחס ברכינותו לקישור הישיר שעשו בין העדפותיהם המיניות לבין פועלם. כדי, אם כן, לומר כמה מלים על המקורות הנפשיים המזינים את הדחף המדעי.

יש אנשים שהעסק במדוע עושה אותם צנوعים, פשוטים וטובים-לב. המגע עם היזמות הבריאה מכניס באדם פרופורציות ומקטין את משקלם של ענייני כסף, "מה יגידו" ושאר שטויות היום-יום. כך היה עם נפילים כמו דארווין, פרקטי ואיינשטיין. גם לי היה מזל, כפי שאספַר בהמשך, להכיר כמה מדענים דגולים, וכשהאני חשב על כך אני מתפלָע עד כמה מצחניים האנשים האלה גם בגודלם האנושית.

ויש, למרבה הצער, גם דוגמאות הפוכות. אל בני משפחת ברנולי נתוודע בהמשך (פרק 9.3.2) ואני כבר מזהיר אתכם שזו לא תהיה היררכות מלבדה. המगעיל ביותר מביניהם, יהונ, התרשם להרס הקריירה של בנו דניאל ואף הצליח לגנוב ממנו את משוואת תנועת הנזלים ולפרסם אותה בשם!¹⁰ פריץ הֶבר (1868-1934, נובל 1918), היהודי שדמה יותר לנאצים שיסלקו אותו מגרמניה, התרשם במהלך המלחמה העולמית הראשונה לפיתוח הנשק הכימי ואיפלו בבוקר שאחרי התאבדות אשתו, שלא יכלה להיות עם מעשו, יצא לחזית לספור הרוגים.

⁸ במנוחי תורה האינפורמציה, קל לראות שהקריטריון של פופר דורש שתכולת האינפורמציה של טענה תהיה גבוהה. אינפורמציה פירושה הקטנת אי-הודאות ביחס למשהו. לכן, כשאני אומר "מאדים הוא אדום או כחול או טורקיז או י록 עם משכבות" אמרתי לכורה יותר מאשר במשפט הקצר "מאדים הוא י록," אבל במשפט השני, שקל יותר להפריכו מאשר את הראשון, יש יותר אינפורמציה, אם גם מועטעה.

⁹ לדעתי יש קשר عمוק בין הוכחה של יומם, אי-השלמות של גודל ועיקרונו התייחס של פופר. נראה שכולם מצביעים על כך שהמדע אינו יכול להתקדם ללא הנחות מטפיסיות. אבל אני יודע איך להראות קשר זה בצורה ריגורוזית.

¹⁰ ברנולי ידע היטב מה שיש אדם במצב בןנו. "כל לוֹפִילּ", המוכר לכל מי שלמד חדו"א, הוא כנראה "כל בראנולי" שהמרקיז הנודע גנב מבראנולי האב אחרי שלמד אצלן.

למרבה הביזיון, מרכזים מדעיים על שם הפשע הזה קיימים באוניברסיטאות ישראליות. ספרו של פול ג'ונסון "אינטלקטואלים"¹² מראה כי כמה מגדולי ההוגם של תרבות המערב היו טיפוסים די מרושעים. "החוקן של ויטגנשטיין"³ מספר על ויכוח בן עשר דקות בין קארל פופר ולודוויג ויטגנשטיין, שכמעט הסתיים במכות אם לא גרווע מזה, וככל שהספר עוקב אחרי התנהוגותם של שני הפילוסופים מתקשה הקורא יותר להחליט מי משניהם דוחה יותר.

ובכל זאת, גם הצדדים הלא-יפים של נפש האדם – התחרותיות, הקנהה וכדומה – שותפים ביצירה המדעית. לא אחר מאשר אריסטו העיר כי בגאנות יש קווטוב של שיגעון. בנושא זה תרם פופר עוד תרומה חשובה כשביטל את הדרישה להצדיק השערה מדעית. כשהמשהו מעלה השערה ניתנת להפרכה, אמר פופר, זה לגמרי לא משנה אם סיבותיה הן רצינאליות. דוגמא טובה לטענת פופר מספקת הרפואה. בימי הביניים חשבו אנשים שצמחיים הגדלים ליד מקווי-מים חסינים מפני מחלות הנובעות מרטיבות ומרקור ולכון יכולם לסייע בריפויין. התיאוריה המופרcta הזאת הניבה השערה ניתנת להפרכה, שלגמרי במקרה דזוקא אויששה, וכן התגלתה שמהערבה (*Salix*) אפשר להפיק חומצה אצטיל-סליצילית (אספירין), אחת התרופות המוצלחות ביותר בתולדות הרפואה.

מסיבה זו אין לדעתו סתירה בין הדריך בה ראה פופר את התקדמות המדע – הפרוכות מובילות להחלפת תיאוריה אחת בתיאוריה טובה יותר – לבין הנitionה שעשה היסטוריון המדע היהודי-אמריקני תומס קון (1996-1922) להופעת המהפכות המדעית.¹³ קון טען כי כשתתגלוות עובדות הסותרות לתיאוריה, קורה בדיק מה שכולם קיוו שאינו קורה במדע: התיאוריה "מתקנת" את העובדות כדי להגן על עצמה. התיאוריה, אמר קון, קיימת בתחום "פרק-גמה" – מושג קצר מעורפל המאפיין את מכלול העמדות, התפיסות והשיטות המגדירות מדע בתקופה כלשהי. לפרט גמות יש כוח גדול מכפי שיש לנו, והן מסוגלות Lagerom לנו לראות דברים בצורה אחרת או אפילו לא לראותם כלל. רק אחרי שכמוות הסתירות עברת ספר מסוים מתרחשת מהפכה, שגורמת לנו לראות דברים באור חדש וחזר חלילה. אילו היה קון מסיים כאן, היה בוודאי זוכה רק לשבחים. אבל הוא הוסיף למודל הזה טענה מוזרה לפיה לא ניתן להשוות בין תיאוריות ולקבוע איזו תיאוריה טובה יותר, כי בשל הפרשנות השונה של תיאוריות לאוthonן עובדות אין בסיס משותף להשוואה זאת. בכך הקדים קון את השטויות של הפוסט-מודרניזם וספג הרבה ביקורת.¹⁴ אבל אם נתעלם מהטענה האחרונה, נוכל ללמד גם מקון וגם מפופר: הראשון הוא יותר היסטוריון וסוציאולוג של המדע המראה איך המדע מתקדם במצבות, בעוד שהשני הוא פילוסוף של המדע המראה איך המדע צריך להתקדם. קון מראה את השיבתו של הגורם האנושי – השמרנות וההתהפרות בעמדות מוכרות – בעוד פופר מראה איך ניתן להתעלות מעל הגורם הזה.

לרוג'ר פנרוֹז, מתמטיקאי ופיזיקאי שעוד נפגש הרבה בהמשך, יש טענה מרוחיקת-לכתח

- בעניין זה:⁷⁰ התגליות המתמטיות המפורסמות לא יכלו להתגלו בתהיליך אלגוריתמי, ככלומר התהיליך המתנהל על-פי כלליים קבועים, כמו התהיליכים השולטים בפעולות המחשב. זו טענה שנוביה בחלוקת,² אבל אין חולק על כך שהדרך המובילה לתגלית הגיונית היא לא תמיד הגיונית עצמה. ואכן, בפרקם הבאים נגושים טיפוסים שונים ומשונים שפעלו מניעים דתיים, מרדייפת כבוד או אפילו מתאות פחות מוכבדות, ודזוקא הם הזרימו אל המדע רעיונות

שהפכו אותו. כמו שהאبولוציה חיבת את הצלחה לאינספור תקלות במנגנון התורשתי, כך גם הייצרותיות זוקקה לאספקה מתמדת של "רעש" היוצר צירופים חדשים.

7.3 עיקרונו השפיע

אחרי שיוצרים כמו המספרים המדומים התקשו כתואמים את המציאות, החלו הדמיון המתמטי להתרפע עוד יותר. היה זה פיסיקאי, ניוטון, שהמציא מושג מוזר, הנגורת, שהוא "גדול גודל מ於是 אבל קטן מכל מספר שהוא", כדי לעשות הישובים מסווג חדש. הנימוק שנותן כדי להוכיח שנגורות כאלה הן ממשיות היה צולע, אבל מהרגע שהציג את שיטתו, והתרבר שהחישובים שהוא מציעו נתונים תוצאות מדוקיקות (ראו פרק 8.8), התעלמו הפיסיקאים משאלת החוקיות הלוגית שלה וניגשו לעובדה עם הכלוי החדש. רק במאה ה-19 הצלicho המתמטיקאים בולצנו ו-ניירשטיינס לחתן לנגורת את תעודת ההקשר המיווה. בוקר טוב, גיכחו הפיסיקאים, מה היינו עושים בלבדיכם! הנון-שלאנטיות הזאת, על-פי בכרל⁹, היא חלק בלתי-נפרד מהמתודה המדעית: המדען מוכן להניח הנחות ללא הוכחה מספקת ולהתקדם אתן, במקום שבו היה הלוגיקן הקפדן נשאר תקווע. בכרל¹⁰ מתחמת את הגישה הזאת בסיסמה של גיליאו: "באר את הפלא ע"י הנס".

כמו האפס, גם האינסוף משך את הדמיון המתמטי. גיאORG קנטור (1845-1918) המציא חשבון מיוחד לאינסוףים והוכיח בדרך פשוטה יחסית שמספר הנקודות על קו מסוים שווה למספר הנקודות על קו גדול יותר ואפילו למספר הנקודות על מישור או מרחב כלשהו² ("אני רואה את זה", כתוב על הוכחה, "אבל לאאמין!"). במילים אחרות, שימושים בין סוגים שונים של אינסוף מתקלות תוצאות המנוגדות לשכל הישר. למשל הצלicho המתמטיקאים להפריך את הוכחותיו של קנטור, ניסו לדוחוון בטענה שאינסוףים אינם דבר מציאות. קנטור, שהיה אפלטונייסט, טען שהם דזוקא קיימים אפילו שהוא ואפילו גיס את אלוהים לצורך זה. לטענה זו הctrף מאוחר יותר עוד אפלטונייסט מפורסם, גDEL, אותו כבר שמענו בדבר בזכות אמיתות החורגות מיכולת ההוכחה.¹¹

מייקל גוילן⁶⁰, עבר מרצה לפיזיקה בהרוורד, תומך בהקשר זה בטענה הקרויה "עיקרונו השפע": "כל דבר שהמתמטיקה מרשה את קיומו, יתגלה בסופו של דבר כקיים למציאות הפיסיקלית. זו טענה קייזונית ולא כולם מסכימים אתה. אני עצמי קצת נזהר מלhattעמק בשאלות האלה. אחרי הכל, קנטור השתגע, ניוטון השתגע, ניימן השתגע זמנית (ר' פרק 8.8), וגם גוילן חזר בתשובה לפני כמה שנים ונעשה למטייף. ובכל זאת, היו כמה מקרים שהגרמו לפיסיקאים להתייחס אל "עיקרונו השפע" ברצינות.

8.3 הכוח והיופי של חוק הטבע

יש אמירה מפורסמת של ריצ'רד פיניון (1918-1965, נובל 1965), לא הכى תרבותית אבל קולעת: "הפיזיקה היא למתמטיקה מה שהסקס הוא לאוננות". כיוון שהספר הזה עוסק בפיזיקה, שהוקיה מנוסחים בלשון מתמטית, בואו נראה במה מתധדים חוקים אלה.

גם עולמו של הפיזיקאי מאוכלים בישויות "אפלטוניות" שלא ניתן לראותן באופן ישיר אבל ביטוייה נמצאים בכל מקום. אף אחד לא ראה "أنרגיה", "כוח" או "شدה" אלא רק את תוצאותיהם. עוד יותר אפלטוני הוא ה"חוק" הפיסיקלי: במקומות שונים ובזמנים שונים, תופעות הנראות שונות לחלוין מציאות לאותם חוקי-יסוד בדיקות מתמטי מפליא. זה מה שהפיעים את איינשטיין, שאמר "הדבר הכى פחות מוכן בעולמנו הוא עובדת היותו מוכן".

וכמו המתמטיקה, גם הפיזיקה מוליצה אותנו אל חוקים יותר ויתר אינוריאנטיים, ככלומר, בלתי-משתנים. סוג חשוב כזה של אינוריאנטיות הוא הסימטריה.⁷² הנה דוגמא: יושב אדם אל שולחנו ומשחק במצפן, ואחרי הרבה ניסיונות הוא רושם חוק טبع חשוב: "מחת המצפן מצביעת תמייד שמאלה." בא חברו לבקרו והוא מראה לו את החוק שנייה, אבל החבר רואה שהמצפן מצביע דווקא ימינה, שהרי הוא מביט בו מעברו השני של השולחן! ואם עמוד מהצד יצביע המצפן "קדימה", "אחריה" וכו'. יש כאן, אם כן, כמה חוקי טבע לגבי אותה תופעה, שככל אחד מהם מתאים לצופה אחר, וזו לא תוצאה מרשימה במוחך. נעריך יותר את הישגם של שני היסקיים הללו כאשר, אחרי הרבה הקיימות ודרישות, הגיעו לניסוח חוק מאוחד כללי יותר: "מחת המצפן מצביעת תמייד צפונה." החוק הזה הוא יותר סימטרי וכך גם יתר אינוריאנטי (בלתי משתנה) מקודמו, בכך שאינו תלוי במקומו של הצופה ביחס לשולחן. אבל לא לעולם חוסן: כשהיצאו שני המדענים הדגולים, מצוידים במצפנים, לסיבוב הרצאות בעולם להרצות על חידושים, ויגיעו במקרה לאולם הרצאות המציג באילף רינגנס (Ellef Ringnes) צפונית לקנדה, יגלו שההדגמה נכשלה ושני מצפנים שם מצביעים – שוד ושביר – זה לכיוונו של זה! ואם יפליגו משם לנקודה הנגדית מול חוף אDALI (Adélie) שבאנטארקטיקה יגלו שני המצפנים פונים לכיוונים הפוכים! נחוץ, אם כן, חוק אינוריאנטי עוד יותר, שלא יאביד את תוקפו אפילו בצפון או בדרום המגנטיים. לא יתעצלו השנאים, יחפרו לעומק כדור הארץ ויגלו שהוא בעצם מגנט ענק המשפיע על כל המצפנים. החוק הבא שלהם יאמר, אם כן, כך: "מחת המצפן מצביעת לכיוון הקוטב המונגש של השדה המגנטי בו היא נמצאת." וזה ללא ספק חוק עוד יותר כללי, שכוחו יפה גם על מדים ואפילו על נוגה, במקרה שיתחשק לשניים לנסוע ולהרצות גם שם על התנהגות המצפנים.

לפנינו אם כן שני סוגים טענות מדעיות. חוק טبع הוא כלל האומר "בහינתן גורם A תהיה המזאה B." עיקרון הוא כלל מסווג גבוה יותר האומר "בhaiinten חוק-טבע X תקיים תוצאה החק את הכלל Y." כך, למשל, מהעובדת שהחוקי הטבע הילכו ונעשה במרוצת הדורות יותר ויותר תקפים ומדויקים, ניסחו אנשים את העיקרון הכללי יותר השולט בהם והוא עיקרון הסיבתיות: "בhaiinten אתם גורמים יופיעו תמייד תוצאות." עיקרון ספקולטיבי יותר הוא "עיקרון השפע" שהוזכר לעיל. גם המאפיינים האסתטיים של התיאוריה המדעית המעסיקים אותו בספר זה – פשטות, אחידות, ואפילו היפות עצמו – יש להם מעמד של עקרונות. כמובן, העיקרון, כמו חוק הטבע, הוא טענה הנינתנת להפרכה ולכן מלאים העקרונות תפקיד חשוב – למעשה חשוב מאוד – בהפתחות הפיסיקה.

כל ההתקדמויות שתראו בספר זה תהינה מהסוג הזה: חוקים שונים המתארים היבטים שונים של הטבע מתמזגים לחוק אחד שהוא יותר כללי, אינוריאנטי, סימטרי, ובסופה של דבר – פשוט.

9.3 מגילוי על הבניין לגילוי במציאות: הדוגמה של תורה האטום

ראינו, אם כן, שההתפתחות חוקי הפיסיקה דומה לתהליך האוקלידי: תחילתה נעה וייתור על אקסומות שמתברר שאפשר להסתדר בלבדיהן. הבניין החדש שנבנה על הבסיס הצר יותר הוא, למרבה הפתעה, חזק ורחב יותר, ככלומר, מופיעים בו חלקים חדשים שלא היו קודם. יתרה מזאת, החלקים האלה קיימים אףה שהוא למציאות וכדי יצא לחפש אותם. וכך

להמחיש עקרונות אלה על רעיון שראשיתו ביוון והוא מעסיק את הפסיכה עד ימינו: טבע החומר.

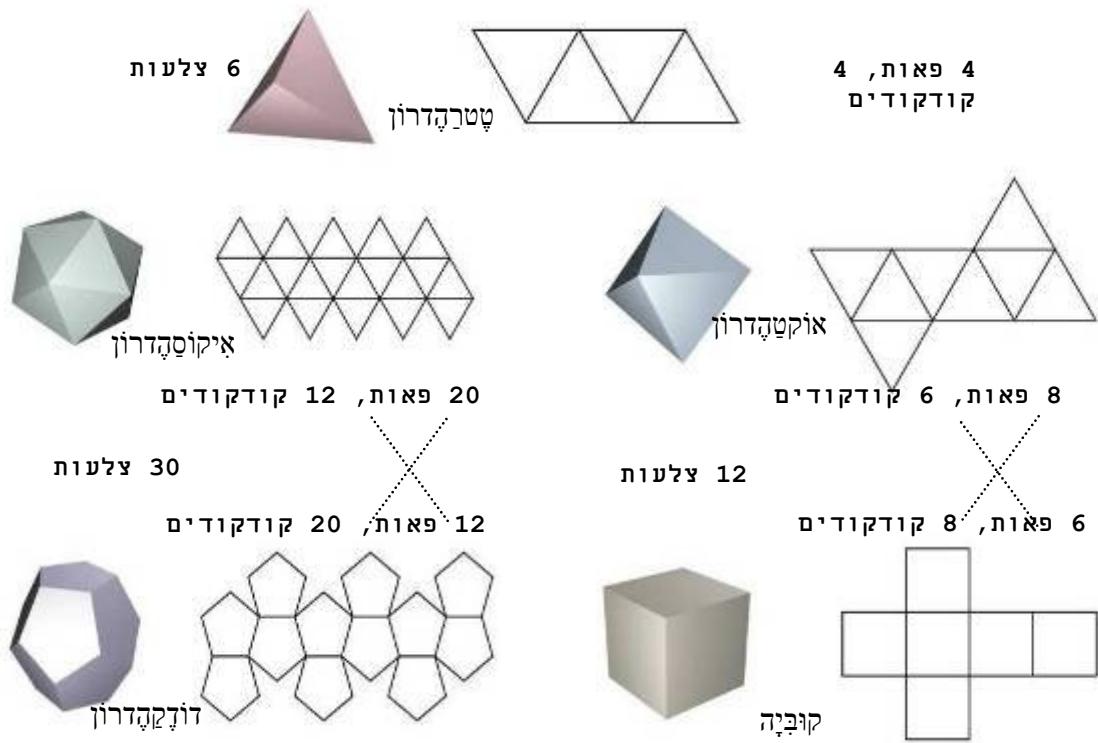
שמענו בפרק הקודם על המחלוקת בין אמפדוקלס ודמוקריטוס. הראשון האמין בקיום ארבעה יסודות מהם בניו הכל, בעוד השני האמין בקיום של אוטומיים מאינספור סוגים. אפלטון הוא שאחד את שתי התיאוריות: יש ארבעה יסודות הם בניויים מארבעה סוגים אוטומיים. מכאן המשיך אפלטון וניסה לחתת לתורה המאוחדת בסיס מתמטי. הוא הוכיח כי בעודם הדו-מדדי אין סוף למספר המצלולים המושלים – מושל, ריבוע, מחומש וכו' – בעולם הבלתי-AMENTי יש רק חמשה בלבד, הקוראים לפיכך "גוףים אפלטוניים". אם הספרו את הצלעות, הקודקודים ("שפיצים") והפאות ("צדדים") של כל אחד מה גופים האלה, תגלו שהם מסתדרים בשני זוגות בעלי אותו מספר צלעות ומספרים הפוכים של קודקודים ופאות (ר' תמונה). הגוף החמישי הוא בן- הזוג של עצמו. במקרה אחר: גם אילו הכרתם רק שניים או שלושה מהחמשה גופים בלבד, היותם יכולים לגלות את הנוראים לפי ה"חורים" בטבלה.

אמר אפלטון: חמשה גופים מושלים וארבע יסודות – זה כמעט אותו דבר. הוא ישב והתאים גוף מושלם אחד לכל אחד מהיסודות. האש, למשל, צריכה להיות עשויה מאטומים בצורת טטרדרון, שה"שפיצים" שלהםאפשרים להם לחזור לכל דבר. הקובייה הייצה בצריכה להיות צורת אטום של אדמה וכו'. מפה המשיך אפלטון להתפלפל ולהוכיח בכל מני חישובים שכאשר יסוד אחד מתרכב עם יסוד אחר, הם מתגלגים לצירוף אחר של ארבעת היסודות, כך שסק-כל הפאות של האטומים (מושלים, ריבועים וכו') נשאר אותו דבר. מה לעשות עם הצורה החמישית, הדזקדרון? לא נשארו יסודות, אבל זו בהחלט לא סיבה יותר על תיאוריה כל כך יפה. הדזקדרון, אמר אפלטון, קשור לצורת היקום כולו. עכשו הכל הסתר.

שטוויות במיין עגבניות? בוואו נדייק: שטוויות במיין הוכחה מתמטית נכון. גופים מושלים יש באמת רק חמישה אבל ארבעת היסודות אינם יסודיים. ובכל זאת, עם התקדמות המדע, החלפו הפרטים אבל הרעיון המנחה נשאר בעינו. הנה אם כן תקצר ההפתחות שתتواءר בפרקים הבאים:

אריסטו, צפוי, מיהר לחלוק על מورو גם בנושא זה. הוא דחה =====

זכור, הרבה לפני אפלטון הבחן מידוענו מילס שהשתמש יוצר כוח משיכה בדומה למגנט ולכבידה. בעבר יותר מאלפיים שנה הtagלה שהחומר מרכיב משנה מטענים: חיובי ושלילי. מטענים שווים דוחים זה זה ומשונים מושכים זה זה. עכשו הזר הזיגזג אל הכימיה: יסודות כימיים מתרכבים ביחסים מסוימים – ראייה לאוטומיים של דמוקריטוס. בינהיים גילו הכימאים יסודות ממש, ככלומר, לא כמו ה"יסודות" של היוונים אלא חומריים טהורים שאינם מרכיבים מוחמים אחרים. נותר לסדר את כל היסודות האלה בטבלה, לאורך ולרוחב, לפי סדר מספרי שכלל גם את משקליהם וגם את תוכנותיהם הכימיות. מיד התגלו "חורים" בטבלה. הכימאים החלו לחפש יסודות לא-ידיועים שתכונותיהם הכימיות מתאימות לחורים האלה והנה, הפלא ופלא: הם מצאו אותם! במקרה ה-20 חזר הזיגזג לתורת החומר: התגלה כי האטום אינו באמת "א-טום" (בלתי-מתחלק): חלקיקים יסודיים יותר היו



הפרוטונים, בעלי המטען החשמלי החיובי, והאלקטרונים בעלי המטען השילי. כך, בבה-אות, הפכו כל התכונות הכימיות של החומרים לתכונות חשמליות של משיכה ודחיה בין האטומים שלהם! די לספר את האלקטרונים בקיליפה החיצונית של האטום של יסוד כלשהו כדי לגוזר מהם את כל תכונותיו הכימיות. כך נעשה כל הциמה ענף של הפיזיקה. כאמור, הכל הסתדר יפה בתשבץ, אבל כמו במתמטיקה, תמיד מופיע עוד נודניק המערער את אחד היסודות בבניין החדש. התגלה שגם הלקיקים כמו פרוטונים אינם חלקיים-יסוד אלא מורכבים מחלקיקים עוד יותר קטנים, והhypothese אחר תורה חדשה יצא בדרך. שוב סיידרו הפיסיקאים את החלקיים, הפעם במשוואות, ושוב התגלה כי למשוואות יש פתרונות לא-ਮוכרים. הלכו אנשים למאייצי החלקיים וכיוננו אותם כך שם יש חלקיים כאלה הם יופיעו. נחשו מה? הם הופיעו! בקיצור, בסופה של יום התברר כי הפיתגוראים והזקן מאתונה לא טעו הרבה: תכונות החומר נובעות מיחסים המספריים בין מרכיביו.

אחד ממנבאי החלקיים החדשים, פול דיראק (1902-1984, נובל 1933), ייחס חשיבות עלילונה ליפוי המתמטי. בהתרסה נגד הביטוי הרווח “זה יותר מדי יפה כדי להיות אמיתי” כתב פעמי “תוצאה זו היא יפה מדי כדי להיות לא נכוןה. חשוב יותר שהמשמעות של תהיה יפה מאשר שתתאים לתוצאות הניסוי.” אפלטוןיזם קיזוני כזה נראה קרוב יותר לדת מאשר למדע⁴, אבל האליטה של המתמטיקאים והפיזיקאים כוללת הרבה אפלטוניסטים מוצחים ובעליים. עוד אחד ממייסדי תורת הקוונטים, יוג'ין ויגנר (1902-1995, נובל 1963), כתב בהתקפות על “יעילותה הבלתי-הגיגנית של המתמטיקה במידע הטבע.” בעיניו, קיומם של חוקי טבע היה בעצם דבר לא טבעי, ועוד פחות מזה שהאדם מסוגל לגלוותם. “נס התאמתה של שפת המתמטיקה לניסוח חוקי הפיזיקה,” התפיט ויגנר בnimma דתית, “הוא מתנה מופלאה שאנו מבינים אותה וגם אנחנו ראויים לה.”

מי שהסיקה מסקנות אישיות מהאמר של ויגנר הייתה אחוטו: היא התהתקנה עם דיראק.

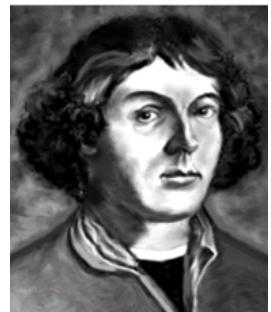
⁴. לא פלא שהדת הדרוזית מromeמת את פיתגורס ואפלטון כנבאים לצד יתרו ומשה.

*

שלושת הפרקים הראשונים הללו היו מעין מבוא להצגת עיקרי החשיבה המדעית. הנה, לסיום, ניסיון שלי לחתם הגדרה תמציתית למה שמייחד את המדע והאסתטיקה שלו.

מהו מדע?

- א.** התופעות הנראות לעין הן רבות מספור, מוקטנות, מעורבות והפכפות,
 - ב.** אבל התצפית והחשיבה מגלוות חוקים השולטים בהן
 - ג.** והניסוי מגלה וمبודד תופעות יסודיות יותר המרכיבות אותן.
 - ד.** ככל שהההקירה מתקדמת
- 1.** פחות יסודות (ג), פשוטים יותר;
 - 2.** ופחות חוקים (ב) פשוטים יותר אף הם, השולטים בהם ביתר תוקף ודיקוק,
 - 3.** עומדים ביסוד יותר תופעות (א) שנראו תחיליה שונות ולא קשור ביניהן.
- ה.** הכרת מכלול המציאות (א-ד) מגלה טבע מסויר וצפוי יותר, ולכנן יידיזתי יותר לחיים; הגיוני והרמוני יותר, ולכנן יפה יותר.
 - ו.** כל כך, עד אשר בהם מקרים בהם אין הדבר כך – כשתגלות תופעות (א) לא-עקביות – סביר להניח כי חוקים (ב) ו/או יסודות (ג) חדשים עדין חבויים בהן, שגילוין
 - ז.** חשוב שוב את הסדר (ד), ואף
 - ח.** יוביל לגילוי תופעות (א) חדשות בעולם הנראה לעין,
 - ט.** מה שיגביר את יופיו.



4. קוןפרנס מפ'יל עם עוד בהיכל אם יאמרו לך זקנים סטור וילדים בנה, סטור ואל תבנה, שסתירת זקנים בניין ובניין נערם סתירה. (מילא ל"א 2)

מה הייתה דעת הפלשטים על השינוי הקל שעשה שימוש בארכיטקטורה של מקדשים? כיוון שהוא לא התיעץ בהם לפני המעשה, וכיוון שני העמודים שהפיל תמכו במקרה בג שעלייהם, חוששנו שלא התפתח שם דיון הנדי עמוק בנושא. המבנים שעלייהם אוחנו סומכים, החל מימי הפירמידות העומדות איתנות עד היום, בנויים על אותו עיקנון הנדי: מבנה חזק צריך בסיס רחב.

אבל דוקא תורה ההנדסה עצמה, ואמה המתמטיקה, לימדו אותנו דבר הפוך: בניין לוגי חזק בניו על בסיס אקסימטי צר, ולכן ערעור אחד היסודות של בניין זה יכול דוקא לחזקו! זה היה גם סוד מעשהו של ניקולס קופרניקוס (1473-1543) הנודע בשם קופרניקוס, שהפיל עומד לא במקדש פלשתי אלא במקום הרבה יותר מסוכן: בדוקטרינה הנוצרית.

הוא נולד בטורון שבפולין, בן-זקונים לסוחר עשיר שמו היה ניקולס ושם כשהיה בן כבן עשר. נראה שהאם נפטרה קודם. אחיה, לוקס נצנורקה, לימים בישוף מהוז נרמיה, אסף אליו את ארבעת היתומים ודאג להינוכם. ניקולס נרשם לאוניברסיטת קראקוב, שם קנה את ה"סודות" של אוקlidס והחליט להשלים את לימודיו באיטליה.

מן הסתם אהב מאוד את הארץ הדרומית, שבdomה ליוון הקדומה הייתה פדרציית מדינות קטנות של סוחרים ויורדי-ים, וחיה-הרוח בה תפסו: לאונארדו כבר קנה בה שם, קולומבו, שטען כי הוא איטלקי, גילה את "הודו" ואיטלקי אחר, אמריגו וספוצ'י, הבין שמדובר ביבשת שלמים קיבל את שמו. מעל לכל, איטליה היא שבישרה את הרנסאנס בשורת מתמטיקאים מבריקים שראשיתה במודענו פיבונצ'י ושהאחד משיאיה היה בהתקחשויות הפומביות עצורות הנשימה שהתנהלו בין קרדאננו וטרטאליה, באותו ימים ממש, סביב פיתרון המשוואות הריבועיות.¹

בבולוניה למד קופרניקוס משפטים עד שדודו קרא לו למלא משרה כנסייתית רמה. הוא קיבל רשות לשוב לאיטליה וללמוד רפואי באוניברסיטה פדואה ופְרנה. את ההיכרות הגורלית בחייו עשה בימי לימודיו בבולוניה: בעל הבית בו שכר חדר היה מרצה לאסטרונומיה, דומניקו מריה דה נוברה, שעורר בו את העניין במקצוע וגם סיפר לו שהתיאוריה השלטת כבר נמאה על הרבה אנשים אבל איש אינו מעז לומר זאת בגלוי.

כהנה וכהנה שמע הפולני הצער עד שחזר למלdotו לעבוד בשירות הכנסייה. בניגוד מעט שאנו יודעים על חייו הפרטיים, הקריירה שלו ידועה כמעט מזוזה: כומר, מנהלן, כלכלן, מפקד מיליציה, אחראי על משלות הבירה ורופא שטיפל חינם בעניים.

בין כל עיסוקיו החל קופרניקוס להפייץ בין יהודים כתבי-יד ובו מודל אסטרונומי חדש. השמורה הchallenge מתפשטה. מרצה באוניברסיטה רומה ציטט את המודל ומכתבים החלו להגיע עם בקשנות לעותק. קופרניקוס החל לכתוב ספר אבל שמר אותו ב מגירה.

עד שיום אחד הופיע איש צעיר בפתח. גאורג יוואכימ בטיקוס (1514-1574) היה מרצה למתמטיקה ואסטרונומיה באוניברסיטה ויטנברג. בטיקוס לא היה שמו המקורי אלא שם שנאלץ לבחור אחרי שאביו הרופא הוצאה להורג בעוד הוא עצמו היה נער. יהסים חמימים

נקשרו בין הקתולי השוך-הילדים, עתה בן ששים ושש, לבין הפרוטסטנטי בן העשרים וחמש. בודאי נזכר קופרניקוס כי זה היה גם גילו כשייצא לאיטליה. הבחור הגיע לו שלושה ספרים יקרים ועליהם הקדשה ממחמת-לב: "למוריה ורביה קופרניקוס". אם זה נכון, פטר, שיש לך תיאוריה חדשה על היקום?

4.1 גיאו (או אג) צנטריות

זה היה סוף ימי הביניים ובמהשכת אירופה שלט אריסטו (ר' פרק 2.6). אמן בתקילת העדיפה הנוצרות את אפלטון, אבל האסלאם גילה את אריסטו במאה השמינית כשליש לאסיה הקטנה, תרגם אותו לערבית, למד אותו בתלהבות בגדי ובתראן (כן, זה היה די מזמן) ולקח אותו, בעיקוף רחב ובעזרת מלומדים יהודים רבים, עד לספרד, שםפגש בו אירופה מחדש. מול הררי הפטפטת של תיאולוגיה ימי-הביניים נחשב אריסטו למפהון, ו"חדונים" כתומות אקזינס הרגיסטו כמו גיבורים כשעשויו סינתזה של כתביו עם הסולסטיקה (שיטת הלימוד) הנוצרית. ומכוון ששספר הלוגיקה שלו היה הטוב ביותר בשוק באותה תקופה, הסתמכו עליו גם ההוכחות לעיקרי אמונה הנוצרות.⁸ מי יعز, מול שילוב זה, להפרש השקפת-עולם אחרת? כך התבצר שלטון אריסטו גם באסטרונומיה.

מעמד האסטרונומיה היה פרדוקסלי באותם ימים: מצד אחד היא הייתה בלתי-נפרדת מהאסטרולוגיה, שעדיין היו משתמשים בבלוי-דעת במונחיה, כמו *disaster* ("ללא כוכב")⁹ או "קונסטלציה" (מערך כוכבים), או בשמות ימי השבוע בשפות אירופה, ואפילו בשמה של השבת (על שם שבתאי) בעברית. מצד שני, דוקא בתחום זה הבשילו ניצני מדע אובייקטיבי ומדויק: הכוכבים היו גלויים לעין ולא מוסתרים ע"י אורות העיר כבימינו, ניתן היה לחקור את מסלוליהם, ובעיקר לחזור על המדיות מדי לילה ו מדי שנה ולעשותן מדיקות יותר. כל כך, עד שהכהנים ידעו בדיקות מתי ייפול צל עמוד המקדש על המזבח, מתי יתרחש ליקוי חמה או לבנה, וכਮובן איך לבטל את סכנתו ע"י תשלומים נאים לכיסם. בקיצור, חוקי הרקיע היו זמינים לכל TAB-דעת. הייפלא, אם כן, כי כשהחלה תרבות המערב להתעורר מהתרדמה בה שקעה מימי נפילת יוון, נשאה עיניה בסקרנות מחודשת אל השמים?

אתם בודאי יודעים, גם אם איןכם מסתכלים בכוכבים מדי לילה, מהן תנועות השמים אותן הכירו אבותינו: א) המשך וכל שאר גרכי השמים נעים בתנועה קבועה מזויה למערב, ב) הירח, בנוסף על התנועה הכלולית, נראה בכל לילה מתקדם קצת יותר מהר, בערך באותו כיוון, ובאותו זמן גם משנה בהדרגה את צורתו מסחרך לעיגול מלא לשחר הפוך וחזר חלילה, ג) חמשה כוכבים, בהירים מהאחרים, עשויים, בנוסף על התנועה הכלולית מזויה למערב, תנועות איטיות ומזרזות, כולל אחורנית לכיוון מזרח, ו-ד) הירח והשמש עוברים מדי פעם ליקוי מלא או חלקי. במקרה של ליקוי-חמה, ניתן לראות שהירח פשוט מסתיר את המשש. במקרה של ליקוי לבנה נדרש חשיבה קצת יותר עמוקה כדי להבין שהארץ היא

⁸ כך עשה גם הרמב"ם (1135-1204), שניסה להשתית על אריסטו את האמונה היהודית (למרות שהוא עצמו הצבע על סתירות רבות באסטרונומיה האристוטלית³⁶ ולעג בגלו לאסטרולוגיה!). "מורה נבוכים" נעשה לאחר הספרים הקנוניים של היהדות, אבל, כפי שמעיריים פונקנסטיין ושתינזליין,³⁷ מעולם לא עלה על דעת היהודים להעלות בשל כך את הפילוסופיה של אריסטו למעטה דוגמה דתית.

⁹ על הדעת עולות כאן השורות המרירות של ר' אברהם אבן-עוזרא: גלגל ומעלות במעדרם / נטו במקלכם למלחת. / לו יקיו גרות שחורתני / לא יקחש שמש עקי מותני. / איגע להצלחה ולא אוכל / כי עותוני פוכבי שמי. / לו אקיה סחר במקרכין / לא יגעוון אישים בכל דבר.

המאפילה על הירח. הקדמוניים גם שמו לב כי הליקויים אינם מתרחשים כל חדש ומכאן הבינו שבין מסלולי המשמש והירח יש זווית קטנה. בפרק 2.1 הכרנו את השיטות הטריגונומטריות המוחכמתו שהמציאו היוונים כדי למדוד גדים ומרחקים אסטרונומיים, כך שע"י מדידת הפלקסקה (הבדל בזווית בה נראה כוכבים בתקופות שונות בשנה) יכלו להבחין שכוכבי-הlections קרובים אלינו יותר מכוכבי-השבת. התוצאות והמדידות האלה הלאו ונעשו מדויקות יותר במרוצת הדורות.

אריסטו קבע שהארץ היא מרכזו היקום, וקלודius פטולמיוס (90-168) מאלכסנדריה, המוכר בשם העברי תלמי, בונה גם מחטמי מדוקדק של היקום זהה. בחיבורו היפה והבהיר אלמגסט ("הגדול" בשמו המקורי; במקור "הקובץ המתמטי") שילב את כל הנתונים שהיו ידועים בזמנו למודל אחד. זהו יקום שבמרכזו הארץ וסביבה סובבים כדורים מהומר שקוף דמיי-בדולח. בצדור החיצוני קבועים כל כוכבי-השבת, בצדור הפנימי סובב הירח, באחד הצדורים האמורים קבועה השימוש, ובכל אחד משאר הצדדים קבוע אחד מהמשת כוכבי-הlections. כל אלה נבראו כМОון למען הארץ והיצור שלט בה: להאריך לנו, לעוזר לנו לחשב חיים ומועדים וכמוון לבنا מה צופן לו העתיד.

הצדורים שעלייהם סבבו כוכבי-הlections היו מעוניינים במיוחד. היו עליהם גלגלי-משנה, "אפיקלים", שגרמו לכל כוכב-לכת לעשות לולאות מורכבות במהלך הקפתו את הארץ. הארץ עצמה לא הייתה בדיק במרכזה המערכת אלא קצת ליד המרכז. כל התקונות האלה, שעם השנים נוספו עליהם עוד ועוד, היו הכרחיים כדי לישב את המודל עם נתוני התציפות ההולכות-ומתרבות של האסטרונומים בעת היא. בסך- הכל היה זה מאיץ מעורר-כבוד לארגן את היקום בתמונה עקבית אחת.

4.2 נס המרד
 התמונה הזאת, ככל שהיא, יותר לתציפות האסטרונומיות, נעשתה יותר ויותר מסורבלת ואפילו בימי-הביבנים נשמעו רטינות נגדה. במאה ה-13, כך מסופר, לא התפקיד מלך ספרד, אלפונסו העסקי "אל סאביו (המלך)" והעיר כי אילו נועץ בו אלוהים לפני הבריאה היה ממליץ לו על מבנה פשוט יותר.⁴¹ המתמטיקאי והמוסיקולוג הצרפתי ניקול אולם (1320-1382) חלק בגלוי על אריסטו והביא נימוקים מפורטים בזכות תנועת הארץ. דעות הליוצנטריות מפורשות השמיעו, מלבד הממסד הכנסיית, הבישוף ניקול קוזנוס (1401-1464). הוא חלק על דברי אריסטו שאבן נופלת שואפת אל מרכז כדור הארץ "כי זה מקוםה" ושיער כי במקומות אחרים בשל תישכנה אבניים (!), ואפילו קדם لكפלר (ר' פרק 5) בגילוי האליפטיות של מסלולי כוכבי-lections. כבר פטולמיאוס עצמו, שכמתמטיקאי היה עד ליפוי שבפטשות, מסגיר נימת התנצלות בסוף ספרו:

ואל יחשוב אדם, שהנהות אלה הן מסווכות יתר על המידה, אם יראה את התהبولות הלקויות ששימושו בידינו... ולא זו בלבד אלא יאה לדון את הפשיטה שבתנוועת גרמי השמים לפי הנסיבות הנראים לנו עלי אדמות, משום שגם אצלנו אותו דבר עצמו אין פשט כל הבריות במידה שווה.^{(126)³⁶}

בעיני קופרניקוס הייתה תמונה זו "מפלצת" שהרכיבה מראש, רגליים וזרועות שנלקחו מקומות שונים. במודל החליפי שהציג הדיח את הארץ ממרכזה מערכת המשמש והפך אותה לכוכב-לכת אחד בין כמה אחרים. התוצאה, לפי תיאורו, הייתה כובשת:

ולאחר שהנחתית את התנוונות שאני חולק לארץ להלן בגופו של החיבור, הזרתי ומצאתי בהסתכלות רבה וממושכת, שאם מעבירים את תנוונתיהם של שאר כוכבי הלכת לסיבוב הארץ ומחשבים לפיה זה את סיבובו של כל כוכב וכוכב, לא זו בלבד שתופעתיהם עצמן יוצאות מזה, אלא שככל סדרי הכוכבים ומסלוליהם כולם, הם ושיעוריהם והשימים עצםם, מתקשרים כל כך עד שא-אפשר לשנות שם דבר בשום חלק כלל שתהא ערובה בשאר החלקים ובכל העולם כולם.³²⁾

עוד הוא מתלבט בשאלות אלה ובדורות פרצה אחת מהפכות האידירות בתולדות תרבויות המערב. כומר גרמני בן שלושים מאוניברסיטת ויטנברג, מרטיין לוטר, החל לערער על סמכות הכנסייה הקתולית ודרש זכות לכל אדם לעבד את אלוהים בלי תיווך. זו הייתה ראשית הפרוטסטנטיות. ויטנברג, צורך, הייתה האוניברסיטה ממנה הגיע אורהו העזיר של קופרניקוס!

שנתים ישב בטיקוס בבית מورو ובמהלכן פרסם "יו"ח ראשוני" על המודל החדש. עם הזמן הצלחה לשכנע כי המודל של שלושת הספרים המהודרים שהביא לו הוא הראווי לפרסם את ספרו הגדול. עם כתב-היד היקר יצא לגרמניה, וב-1543 יצא לאור *De revolutionibus orbium coelestium* ("על הקפת גלגל השמים"). שלא בספרים מפורטים אחרים בתולדות המדע, זהו ספר מסורבל ומשעמם,¹³ אבל המומחים שהבינוו השתכנעו בדיקות של חישובי המרחקים של כוכבי-הlections על פיו.²⁴⁾

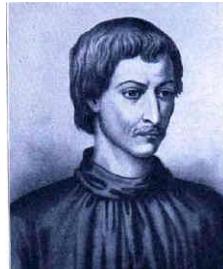
אבל לתמונה הזאת היה מושגי, שילך ויכבד עם השנים. אם הארץ אינה מרכזו היקום, אם היקום אינו מערכ של צוריו בדולח, זה בתוך זה, שבhem משובצים מילוני גרמי-שמותים שכולם נבראו למען בני-האדם שעל הארץ במרכזו, איזה מין יקום זה באמת? קופרניקוס היה מוכחה להביע על תחילת התשובה כשהתמודד עם טיעון חזק של אריסטו נגד ההליו-צנטריותו: אריסטו טען נגד אריסטרכוס (ר' 2.1) כי אילו הייתה הארץ נעה, היינו רואים פרלקסה (תזוזה יחסית) של כוכבי-השבת, ומכיון שאיננו רואים פרלקסה עצמאית, הארץ עומדת. מול טיעון הגיוני זה נאלץ קופרניקוס לשער כי הכוכבים רוחקים מatanו הרבה יותר מאשר משייריו האסטרונומיים לפניו ולכון הפרלקסה אינה מורגשת. במילים אחרות: **היקום הוא ענק לאין-שייעור ממאה שהאמינו עד אז.**

בטיקוס לא יכול היה להיות נוכח בהדפסת ה"הקליפות"²⁵⁾ ולכון ביקש מהኮמר אנדריאס אוסיאניך לפקח עליה. כשה קיבל את הספר חתכו עיניו: לספר התווסף פתח-דבר שכאלו נכתב בידי קופרניקוס, שבו הצהרה שהמודל אינו טוען שכך באמת בנזיה מערכת המשאל אלא רק מציע שיטה מתמטית נואה יותר לחישובים אסטרונומיים. קפלר, בעבר דור (ר' פרק 5), למד ממוריו מسطלין על התרמיה וחשף אותה ברבים. מה רצתה הלוثرני להשיג? נזיר כי בימי הביניים הייתה האוניברסיטה מקום בו ניתן היה, עד גבול מסוים, להשמיע דעתות כפירה. אם הלא סטודנט להלשין לאינקווייזיציה על הרצאה ששמע והרצאה זמן לחקירה, היה החשוב נוקט בתרגיל סכולסטי בדוק: "אמרתי את זה לאנוקווייזיסטי more, non asserendi more, disputanti more, על דרך הדיוון, לא על דרך ההכרעה".²⁶⁾ בדרך כלל זה היה עובד, אבל עכשו, אחרי

²⁵⁾. לא קלים היו חי התלמיד הנאמן הזה בשנים הראשונות. אחרי קריירה מפוארת כמרצה בליפציג פרצה שעורוריה כשנהחד ביפוי אחד מחלמידיו. הוא ברה לפולין, שם עבר בשירות המלך זיגיסמונד השני, וטש את מחקרו החשובים בגאומטריה, למד רפואה ובמשך שנים אחדיו האחרונות עבד כרופא. מתמטי אי ציר בשם ולנטין אותו (1550-1605) בא פעם לשאול אותו על הפונקציות הגאומטריות שגילוה. כששמע רטיקוס על מטרתבו ואמר בהתרgesות: "באתי אליו באותו גיל בו ביקרתי אני את קופרניקוס! לולא ביקרתי אותו עבדתו לא הייתה מתפרסמת לעולם!" ארטו פרסם את עבודות רטיקוס אחרי מותו.

ויטנברג, היו כל המלומדים חשודים. גרווע מזה: הפרוטסטנטים הקימו אינקוויזיציה משלהם, וגם הם שנאו את קופרניקוס. לותר כבר נשמע אומר “הטיפש זהה רוצה להפוך על פיו את כל מדע האסטרונומיה”. קלין, המפלצת מגנבה, השמיע דבריהם מאימים עוד יותר. יתרון, אם כן, שאוסיאניך התכוון לטובת הספר, אבל זה לא עוזר. הכנסייה כללה את ה”הקפות” בראשימת הספרים האסורים, שם נשאר עד 1966.

3.4 הדים בארץ ובשם ים



כיוול שנים החלפו ממות קופרניקוס והאנושות בחרה לציין את תחילת המאה ה-17 באופן מכוער. ג'ורדנו ברונו (1548-1600), נזיר בנדיקטיני שננד באלירופה ופרסם ספרים חתראניים בנושאים שונים, תmak גם בתורה ההליווצנטרית, אבל הרחיק-לכת יותר, מקופרניקוס: אם כוכבי-השבת הם כל כך רחוקים עד שהפרלקסה שלהם בלתי-מורגשת, ובכל זאת אנחנו רואים אותם, זה אומר שהם הרבה יותר גדולים מהם שחשבנו, ככלומר, שככל כוכב זה הוא ממש, ואפילו שימוש גדולה בהרבה מזו שלנו, ולכל שימוש כזאת יש בוודאי כוכבי-לכת ממש, מיושבים ביצורים חיים וחושבים! מה מקום של ישותם בין האלוהים ביקום אינסופי כזה שאין בו שום חלק חשוב יותר מהאחרים? האם אביו שלוחה אותו למות מחדש בכל עולם? שאלת קצת יותר דחופה היתה: מה מקום של הכנסייה והאפיקור ביקום זהה? פקידי האינקוויזיציה לא הסתפקו בשאלות קוסmolוגיות והוציאו צווי-מעצר והסגירה. זמן לא רב אחרי שחזר ברונו לאיטליה מולדתו נעצר. הכנסייה, חייבים לומר, חזרה וננתנה לו הזדמנויות לחזור בו מדעתו, ولو רק באMRIה. אבל ברונו, כסוקרטס לפניו, לא היה מוכן להקל על איש. “אתם חוששים מגזר-הדין שלי יותר ממני”, לגלג על שופטו. ב-1600 הועלה על המוקד על-פי מיטב מסורת החמלת הנוצרית: עירום, קשור במחופך ופיו חסום.

בעבור ארבע שנים הופיעה בשם סופרנובה, אירוע שבו מתמוטט כוכב ענק תחת משקלו שלו ויוצר התפוצצות אדירה. גם אם הכוכב עצמו הוא רחוק מכדי שניתן יהיה לראותו, התפוצצתו נראית היטב וכן נראה כאילו נוצר כוכב חדש (“נובה”). זו הייתה הסופרנובה השנייה באותו דור: לפניה התחוללה אחת ב-1572 – צירוף-מרקמיםבולט בהתחשב בעובדה שעד היום לא נראה בשבייל-החלב עוד אירוע כזה.⁴⁶ אבל באותה תקופה כבר קמו שלושה אסטרונומים משיעור-קומתו של קופרניקוס – ברקה, קפדר וגיליואו – והם יכלו לקבוע לפי הפרלקסה שהיא “כוכב” החדש הפצע מחזע למעגל הירח, ככלומר, גם הרקיע ה”בלתי-משתנה” נתון לשינויים! הנה, אפילו הטבע החל להתחזק אל אריסטו. הרנסנס (דור התהיה) הגיע.

4.4 מה יותר יפה?

רק צפי היה שתומס קון,⁴⁶ בניתו למחפות מדעית, משתמש במהפכה הקופרניקאית כדוגמה מרכזית. הוא טען שהמניע לה היא אסתטי בעיקרו. בשל הטענה הבעיתית יותר של קון (ר' 3.6), לפיה השקפות-עולם שונות אין ניתנות להשוואה מבחינה “אמתותן”, התקבל הרושם ש”יופיה” ו”אמת” הם אידיאלים שונים. על כך מшиб ביכלר:

וכך התברר שבעוד שבסטרונומיה הישנה היו רק 37 גלגולים, הרי קופרניקוס נאלץ להשתמש ב-57 (כמעט 50% יותר) גלגולים כדי להשיג את אותן תוצאות עצמן. איפה האסתטיקה, איפה הסימטריה,

⁴⁶. ב-1987 נפתחה התפוצצות סופרנובה ב”ענן מגן הגדול” שניתן היה לראותה בעין בלתי-מוזונית.

אייפה ההרמונייה? ומדוע העדיפו וקיבלו אנשים כקפלר וגלילאו את התיiorיה החדשה? אייפה הרציונאלות המדעית? ⁽²²⁾⁴

גינגריץ' מתאר באריכות את השתרשותו של השיבוש:

האגדה [שהמודל קופרניקאי פשוט יותר מהפטולמי] הגיעה לשיאה כאשר הכרזת האנציקלופדייה בריטניקה ב-1969 כי בימי המלך אלפונסו, כל כוכב-לכת נזקק ל-40 עד ששים אפייציקלים! המאמר הסתיים במילים “שיטת תלמי, אחרי שהתקיימה אלף שנים ויותר, התמוטטה לבסוף; מנגנון השעון היגיאומטרי שלו נעשה מסורבל במידה שלא תיאמן, בלי שהכנים שיפורים מיניהם את הדעתה בפועלתה.” כشعරרתי על הטענה הזאת, השיבו עורךי ה”בריטניקה” תשובה צולעת לאמר שמחבר המאמר אינו עוד בחיים, ואין להם שמן של מושג היכן מצא בשעתו את הראותו לאותם אפייציקלים ⁽⁶⁹⁾¹³ על-גביו אפייציקלים.

ובכן, האם תורה קופרניקוס הייתה יפה יותר מקודמתה? על שלוש קביעות אין מחלוקת: א) הון פטולמיאוס והן קופרניקוס ניסו כל אחד להציג את המודל שלו כיפה בפשטוותו, ב) שני ממשיכיו של קופרניקוס, קפלר ⁽¹²⁸⁾²⁴ וגלילאו, אמרו בምורש כי נפammo מהיופי של תורהו אבל גם תיקנו ושיפרו אותה, ו-ג) אכן, המודל הקופרניקאי יוצא יפה יותר (לאמר, פשוט יותר וניתן לביטוי מדויק ע”י פחת נסחאות) אחרי קפלר, עוד יותר אחרי גלילאו, עוד יותר אחרי ניוטון, והכى יפה אחרי איינשטיין. נראה, אם כן, שאפירלו בתמונה החקלאית והמקוטעת שהצטיריה لكופרניקוס החל לבצבץ הופי המזועם שגרם לו להתעלם מנתונים שהפריעו לו ולשים את מבתו בתיאוריה. הוא לא הראשון שעשה הימור זהה, וכפי שנראה בהמשך גם לא الآخرון.

*

ב-1999 ביקר האפיירור יוחנן פאולוס השני בארץ הולדתו פולין, שזכרה אותו יותר בשם קרול יוזף וויטינה. במהלך המסע סר אל עיר הולדתו של קופרניקוס, שם ביקש ממנו קבל-עם סליחה על יהס הכנסייה לתורתו. בקהל, נרגש בעיליל, היה האסטרונום הפולני אלכסנדר וולשצ’ון (1946-1996), הראשון שגילה כוכב-לכת מהווים למערכת השמש, כפי שניבא ברונו.

כמו לכל חברה, גם לקהיליה המדעית יש מיתוסים ואגדות שעלו ברכיהן היא מחנכת את תלמידיה. על קופרניקוס מספרת האגדה הרנסאנסית איך ביוםיו האחרונים, כשהיא כבר מחוסר-הכרה, הובא הספר מבית הדפוס אל מיטהו והושם בין ידיו. איש התעורר לרגע, זיהה את ספרו ועצם עיניו בחזוק. ¹³ כמו ה”טוב למות בעד ארצנו” של טרומפלדור, לא חשוב אם הסצנה זו התרחשה במציאות. היא מבטאת יפה את התפקיד שמילא האיש במהפכה המדעית: הראשון להפיח חיים חדשים במדע שהתabin מזה כ-1700 שנה.

זו הייתה רק התחלה. קופרניקוס ה필 עמוד מרכזי אבל עוד הרבה עמודים מיותרים נותרו על תלם. על שלושת ממשיכיו בדור הבא הוטל המשימה, מתוך סיכון גדולים, להמשיך במלאה. רק אז, בדור שאחריהם, יבוא רב-הבנייה שיקים תחת הריםות שלושה עמודים בלבד ועליהם בניין חדש, כולל בהדרו, המסביר יחד את תנועות כל הדברים: כוכבים, שימושות וגלקסיות, כמו גם תפוחים, אטומים וחלקיקים.



5. השמיים מספרים כבוד אל – ג'נס קפלר מחבר להם מגינה

ברן יחד פְּקָבִי בָּקָר

איוב ל"ח 7

כיוון שיפוי יכול גם להטעות, הגיבור הבא שלנו אכן תהה בחיפושו והגיע לכל מיני מקומות מפוקקים, אבל חזר מהם עטור ניצחון. יוהנס קפלר (1571-1630) מתייחד בין אבות המדע בගילוי-הלב בו סיפר על עצמו, על משפחתו ועל חי-הנפש שלו, וזו הזדמנות נדירה להיווכח כי לא רק אינטיגנ贊יה אלא גם תוכנות אופי כמו יושר, אומץ, עקשנות ואפילו שיגען לדבר אחד הם היוניים לגאוניות המדעית.

בגיל עשרים ושש כתב קפלר יומן אסטרולוגי של המשפחה בה גדל. מה יש לומר, נבחרת מרשימה. האב **היינריך** “איש מושחת”, עקשן, שוחר-מריבה, שנדון מראש לסוף מר. נוגה ומאדים הגבירו את רשותו... היה בצל עמוד-התליה... התיחס רע מאד אלAMI, ולבסוף גלה מביתו ונפטר.” אמא קתרינה “נמוכה, רזה, שחרחות, הולכת רכילה, אשת מדנים, בעלת מג רע”, שגדלה בידי דודה שהועלה על המוקד בעזון כישוף. סבא סְבָּלֶד, ראש-העירה, “קצר-רוח ועיקש, והכרת פניו מגלת את עברו המפוקף.” והסבתא, אף היא קתרינה, “פיקחת וشكנית, אבל חסודה; צנומה ומהירת-חימה; ערנית, פגע-רע מועד”. יש עוד תיאורים של דודים ודודות ואחים ואחיות, וקשה למצוא בהם אפילו נורמלי אחד. וכל אלה הם רק ליטופים בהשוויה לדיווקנו שלו:

איש זה [קפלר כותב על עצמו בגוף שלישי] דומה לכלב מכל הבדיקות. בחיצוניותו הוא נראה כמו כלב שעשוים קטן. גוף גמיש, רזה וחזק, ובוני בתואם. אפילו הרגלי האכילה שלו היו כלביים: הוא אהב לכרסם עצמות וקליפות ישות של לחם, והיה כה רעבתן, שמייד לחטוף כל מה שנקרה לפני עיניו. עם זאת הוא שותה במצום, אף זאת כמו כלב, ומסתפק במזון הרגיל ביותר. וזאת הייתה גם התנהגותו. הוא נזק תמיד ל吉利וי רצון טוב מצד הזולת, היה תלוי באחרים, מילא את כל משלותיהם, מעולם לא התמרמר כשגערו בו, והוא להוט לזכות שוב בהסדרם... הוא מרושע, ונושך אנשים בעקיזותיו... אבל אדוניו מחבבים אותו. הוא נרתע כמו כלב מכל רחיצה. הוא פחז כמים, וゾת בזודאי בಗל מבטו המרובל של מדים אל כוכב, ומבטיו המשולש אל הלבנה... בהיותו בן עשר... לאחר כל חטא, היה עורך טקס כפירה, בתקווה להינצל מעונש; הטקס היה הכרזה על משוגותיו לפני (27)⁴⁸ ... ועדה...

בריאותו, עוד לפני שמלאו לו עשרים, יכלה לספק עבודה לסניף של קופת-חולמים: כמעט נספיתי באבעבועות... סבלתי כל הזמן מגעי עור, לעיתים קרובות מפצעים קשים, לעיתים קרובות מגרב [אקוומה] מהמת מורסות כרוניות ברגלי שלא נרפא כראוי... באמת ידי הימנית הייתה רימה ובשמאלית מורה ענקית... תקפה אותה קדחת... סבל أيام מכאב-ראש וכבדות בגפיים... (22)

וכשאנחנו קוראים על אשתו ברברה, שנפטרה והשאירה אותו עם שני ילדים קטנים, מתבל הרוישם שאת הפגיעה הסדרתי הזה יכלו החיים להפתיע רק לטובה: פניה הביעו סכלות, זעם, שיממו ועגמה... היה לה אופי רגנן... מעולם לא כיניטה טיפשה, אם כי ייתכן שהבינה שאני חושבה לטיפשה, כי הייתה רגינה מאוד... בראותי שדברי הםרו לה היה טוב לי לנשוך את אצבי מאשר להוסיף ולפגוע בה.

אשתו השנייה סוזנה, שהיתה צעירה ממנו בעשرين שנה, הייתה, בטעות, אישת טוביה. המכתב בו הוא מספר איך בחר בה בדרך “מדעית” מתוך אחת-עשרה מועמדות הוא משוחה

שצריך לקרוא כדי להאמין,⁴⁸ אבל אני לא מתקoon לספר לכם אותו, ראשית כי יש לנו דברים יותר חשובים לעסוק בהם, ושנית כדי שתקראו בעצמכם את אחת מפנימי ההיסטוריה בתחום ההיסטוריה של המדע: הביאוגרפיה שכותב קסטלר,⁴⁸ שאפילו תרגומה העברי הוא נפלא בפני עצמו.

5.1 זה לא יכול להיות מקרה כסטודנט באוניברסיטה טוביינגן נקשרה נפשו של קפלר באחד המרצים, איש צנווע בשם מיכאל מסטליין, שהニア אותו מלאה עשות כומר והכנסו בסוד תורה קופרניקוס. בן עשרים ושלוש התמנה הוא עצמו למרצה למתמטיקה ולאסטרולוגיה החצר של הארכידוכס פרדיננד. כעבור שנה, כשציר לתלמידיו תרגיל על הלוח, נצנצה בו מחשבה. מזה זמן רב היה תוהה למה יש דוקא שישת כוכבי-לכת ולמה הם משתמשים סביב המשמש במרחקים ובמהירות הנקראים מקרים לגמרי. עכשו, בתרגיל שציר על הלוח היה משולש שווה-צלעות החום מעגל ונחסמ על-ידי מעגל נוסף. היחס בין הרדיוסים של זוג מעגלים זהה, בלי קשר לגודליהם, הוא תמיד 1:2. ואז הבין קפלר שהוא (בערך) גם היחס שבין המעגלים בהם נעים שבתאי וצדק סביב המשמש (היחס הייעוד כיום: 1:1.83). מקרה? לא אצל קפלר. כיון שבתאי וצדק סביב המשמש הוא הצורה המושלמת הראשונה בפשטוּתָה, ושבתאי וצדק הם הראשונים ל מערכת המשמש (אם מתחילה לספר מבחן), אז אולי, אם נשים ברוח בין שתי המსילות הבאות את הצורה המושלמת הבאה, כלומר הריבוע, ואחריה את המשושה, וכוכב, תבהיר הסיבה למה היחסים בין מיסילות כוכבי הלכת הם דוקא כאלה ולא אחרים?

רעיון נחמד, רק חבל שהוא לא עבד. אז שאל קפלר: למה לעסוק בגופים דו-מדדים? מצולעים מושלמים יש אינסוף, אבל בעולם התלת-ממדי, כוכור, הוכיה אפלטון (ר' 3.8) שיש רק חמישה גופים מושלמים. וכוכבי-לכת יש **שישה!**

קפלר ניסה שוב: הוא החל בשבתאי, כלומר דמיין את מיסילתו המעלית בצורת כדור, שבתוכו הניה צורה מושלמת אחת, הקובייה, באופן שכל פינותיה נגעו בצדור. בתוך הקובייה הזאת היה חסום כדור שייצג את מיסילת צדק. כדור זה חסם את הצורה המושלמת הבאה, הטטראדרון, והוא הפירמידה (טוב זה לא לבדוק לפי הסדר הגיגוני אבל אל תהיו כאלה קטנוניים). הכדור הבא ייצג את מיסילת מאדים, שחסם דוקענדרון, שהכדור שבתוכו היה מסלול נוגה, ואז נשאר האוקטעהדרון שנחסם בתוך הכדור הזה, והכדור שבתוכו היה שיך לכוכב-חמה.

עכשו השוו את המודל לנחתונים. להיצה קטנה פה ושם, וכוכבי-הלכת השתבצו עם סטיות קלות של עד 10% – בודאי טעויות של האסטרונומים הפרימיטיביים האלה (במודל תוכלו לראות שדפנות הכדורים עבותות כדי ליישב את המודל עם הסטיות). קפלר התחיל להתרגש: בואנה, גיליתי את סוד היקום!

5.2 כיעור + כיעור יופי

⁴⁸. וודמה לרשימתה “بعد ונגד” שעשה דארווין לפני נישואיו עם דודנתו אמה, שגם הם הפליאו לאהבה גדולת.

אני יודע מה אתם חושבים עכשיו: את מי מענייניות השטויות הנומרולוגיות-ימיביניימות של האפלטוןיסט המטורלlez הזה, שעוד חשב שקיים רק **שישה כוכבי-לכת!** בבקשה, חכו ותראו איך מכל אלה צומח מדע לתפארת. "רק לעיתים נדירות בתולדות המדע," אומר האסטרונום והיסטוריון המדע גינגריץ', "נודעה בספר כה מוטעה השפעה כה ניכרת על הכוונות התקדמות המדע בעתיך."⁵⁵

קפלר פרסם את עובודתו ב-1596 בספר *Mysterium Cosmographicum* (תעלומה תורת דיקום) שהקנה לו שם בכל אירופה. אבל הוא רצה הרבה יותר: שהמודל הגאוני שלו יתבסס לא על נוחוני ה"בערך" של האסטרונומים בהם אלא על נתונים מדוייקים שלא ישאירו מקום לספק שהוא אכן גילתה את סוד היקום. רק לאיש אחד היה באותו ימים מה שקפלר היה צריך: טיקו (טיגה אוטזון) ברקה (1546-1601), אציל קני שנעשה ראש האסטרונומים של ימיו בזכות תצפיותיו המדוקאות והמכשירים שבנה. אבל ברקה לא גילתה לאיש את מצאיו כי רצה לפרסם אותם רק במסגרת התיאוריה שלו, שהיתה פשרה בין פטולמאיסוס ו קופרניקוס: הארץ במרכז, המשמש חגה סביבה וכוכבי-הלכת חגים סביב השמש.

"כל מכשיר שלו," התmrמר קפלר, "עליה יותר מכל ההון שלו ושל משפחתו גם יחד... אין הוא יודע להשתמש בעושרו כראוי, על כן צריך לנסות לחילוץ מידיו את אוצרותיו." (48)⁴⁸ ישב קפלר וכותב מכתב חנפני ל"נסיך המתמטיקאים בני דורנו ובני כל הדורות," הציע את עצמו כעוזר (בליל להזכיר, משום מה, את משימת "חילוץ" האוצרות) – והתקבל.



לברהה, אז בן חמישים וארבע, היה אף מכסף, כי את הארגניל איבד בדו-קרב עם חוצפן אלמוני שהעוז לטען שהוא מתמטי גודל ממן. אם קפלר בא משפחת מופרעים, ברכה גדול בתחום שתי משפחות מופרעים **אציליים**: משפחת אביו ומשפחת הדוד העיררי שחטא אותו, ואהבת-המדון של בני משפחתו דבקה גם בו. הוא היה אסטרונום מסור שהקדיש את מיטב לילותו למיפוי הכוכבים, אבל גם ניהל אורח-חיים של פיאודל מרושע בארכמן עם בית-סוהר (אליו זرك הרבה אריסים שלא שילמו בזמן) ותזמורת משלו.

ביחסים בין השניים האלה לא היה רגע דל. קפלר בן העשרים ותשע היה משוכנע שהוא גדול המדענים בכל הדורות, אבל לצד אמונה זו, כפי שכבר נוכחתם, היה לו דימוי עצמי גרווע – פרדוקס שמספק עד היום פרנסה להרבה פסיקולוגים. הוא אהב לכנות את עצמו "עלוב," "פושע" ושאר ביטויים החביבים על מזוכיסטים, והיחסים עם דמות אב כמו ברהה נתנו לו די והותר הזדמנויות להזמין מכות. שוב ושוב היה מבקש יפה: טיקו, טיקו, **בקשה!**, תביא כמה נתוני מדידות! הוא היה צריך את הנתונים האלה להוכחת התיאוריה שלו. ברכה, כמובן, הקפיד שלא לחת לו אותם – הרי הוא שכר את קפלר כדי שיעזר לו לבסס את התיאוריה שלו (שכחתי לציין שברהה, במקרה, האמין **שהוא** גדול המדענים: את חדר עבודתו פייר ציור של שמונה גוני האסטרונומיה, כשההשכיעו הוא טיקו והשミニי "טיקונידס," עצאו המיוחל). לכן היה זורק לו מדי פעם מספר בודד אבל נזהר שלא לחשוף את התמונה המלאה. פעמים, בארוחות הערב, שאל את קפלר כמה זמן יידרש לו, אם יקבל את כל הנתונים, לחשב את מסילתoadים. "שמונה ימים!" אמר מיד קפלר בלי לדעת לאיזה מלכודות הוא נכנס. ברכה, שכבר שבר את הראש בניסיונות למצוא את מסלול כוכב-הלכת הבועיתี้ הזה, נתן לו בחיווך נבזז את הנתונים. כמעט שמונה שנים אחר כך, כשאחריו תשע-מאות עמודי פוליו צפופים של חישובים, עוד נאבק קפלר עם המשימה. חלפו, אם כן, שמונה ימים בליל שקפלה

יביא את התוצאה ולברהה היה תירוץ מצוין לא לחת לו נתונים נוספים. בראה גם לא היה זריין בתשלומי המשכורת, ולקפלר הייתה בעיה לגמור את החודש עם האישה והילדים שהיו איתה. תוסיפו על כל אלה שברהה החזק בפמלייתו גם גמד מעות-צורה בתפקיד הלייצן, ושהברנס הודה נהנה במיוחד לעשות את תעלולייו לקפלר העגמוני, ותבינו למה היו הדברים מגייעים מידיו פעם לפיצוץ. קפלר היה זורק את המפתחות על השולחן ועוזב בצעקות, אבל אחר כך היה מבין שנשאר בלי עבודה (ובלי הנתוונים!) והוזר להתפלש בעפר ולבקש סליחה מהבוס, שהוא מהיך בסלחנות ואומר: בודאי בני, אתה יודע שאני אוהב אותך אפילו שאתה עושה לי רק בושות, אז בוא נחזר לעבודה. וכך עד המריבה הבאה.

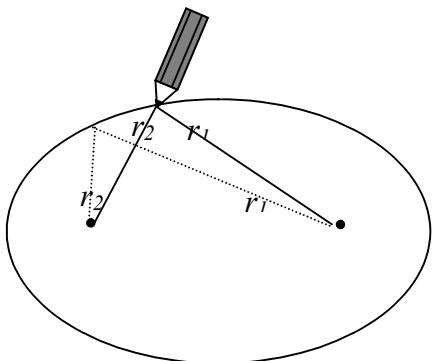
שנה וחצי נמשך הקשר בין שני האגו-מניאקים עד שיום אחד הוזמן ברהה לאירועת-ערב אצל חברים. היין זרם שם כמים, הוא היה כבר לא צער וஅחרי כמה COSTOT היה צריך לлечט למקום חשוב, אבל שום אציג אינו Km באמצע מסיבה. הוא התפקיד והתפקיד עד שהגיע הביתה עם חום גבוה וכאבים לא חשוב איפה. כיון שאhab אוכל טוב לא שמע בקהל הרופא וכל מה שבא לו. זו הייתה תוחלת המאה ה-17, בית-המרקחת לא ידעו מה זה אנטיביוטיקה ואנשים נהגו למות אפילו מהצטנויות. וכך, אחד-עשר יום שכב מר טיקו במיטהו, גנה וננה, ייל וקיל, בכח ומחה, הזה כל מיני הזיות ומלמל כל מיני שטויות עד שמת.

וקפלר – האיש הכל-כך דתי הזה, המצחוני והנחמד – שעת סופת הוריקן ברחבי ארמנונו של הבר-מיין, פתח ארוןوت, הפך מגירות, גנב, בזז וחמס בלי בושה כל פיסת נייר שرك יכול היה לשים את ידו עליה, ועם השלול הזה הרים רגלו וברח. משקמו היורשים מאבלם והבחינו בגולה, הרימו קול זועות ודרשו לקבללה חזקה, אחרת אווי לקפלר. בשמהה הרבה, אמר קפלר בנימוס, רק תשלמו לי קודם מה שאבא שלכם היה חייב לי. עד שהגיעו להסדר, הספיק להעתיק כל אות מהנייר. סוף-סוף! בידיו היו נתונים מספריים מדויקים, שאותם ישבע בתיאוריה שלו, אז ייוכחו פולם בגאנוניותה.

היתה רק בעיה אחת, קטנטנה: המספרים לא התאימו.

במודל, כזכור, היו מסלולים מעגליים שחסמו את הקוביות, הטטרודרונים ושרар המה-شمודרונים. והנה, הנקודות הבודדות שציינו את מיקומם המדויק של כוכבי-הלכת, כפי שמדד בקפדיות כזאת ברהה ז'ל, היו – מה לעשות – ממש מחוץ למעגלים אלה. במיוחד בלטה נקודת ציון אחת של מאים, שסתה בשםונה דקota-קשת מהזווית שהועיד לה הקפLER (רק שייהי לכם מושג بما מדובר: המעל מתחלק ל-360 מעלות, כל מעלה מתחלקת ל-60 דקות וכל דקה מתחלקת ל-60 שניות). מי לא היה פוטר סטייה קטנה כזאת כשגיאה במידידות והזור לדרך הישנה והבדוקה של להיצה פה ולהיצה שם? אפילו גלילאו ונויטון, בפרקיהם הבאים, יעשו בדיקות. אבל קפLER, שמעולם לא החמץ הזדמנות להצליף עצמו, שלא כעס כשגבנו לו רעיון ולא הרגיש אשם כששגד את אוצרות הידע של ברהה, קפLER שלנו, שאhab את האמת יותר מאשר את עצמו, אמר כך:

ואולם לנו נתנה ההשגה העלונה בחסדה צופה דיין כתיכון ברהה, וכן דין אףוא שנכיר בערכה של מתנת שמים זו ונשתמש בה... מכאן ואילך אסלול את הדרך לקראת אותה מטרה לפֵר ריעונותי שלי. שחרי אילו האמנתי שモתר לנו להתעלם משמונה הדקות, הייתה מיישב בדוחק את ההיפותזה שלי. אולם מאחר שלא יכולתי להרשאות לעצמי להתעלם מהן, הרי שמונה הדקות האלה פותחות פתח מהפה שלמה באסטרונומיה.⁽¹³⁵⁾⁴⁸



בקיצור, הוא זרק לפחות את המודל שבזכותו העריצה אותו אירופה יכולה ויצא בדרך חדשה.⁴

תחילתה ניסה תיקון שעצם המחשבה עליו גרמה לו מיאס: אולי מהירות כוכבי ההלכת אינה קבועה אלא עולה ויורדת? זה לא עבד. עברו כמה שנים ניסה רעיון אחר, דוחה עוד יותר: אולי, חס ושלום, המסלולים אינם עגולים אלא אליפטיים? גם זה לא עבד. כדי שאין לו מה להפסיד, החליט קפלר לנסות את שתי האפשרויות המב hiloth יחד: מסלול אליפטי, שבו נע כוכב-הlection מהר יותר כשהוא קרובה לשמש ולאט יותר כשהוא רחוק ממנה.

הכול השתבץ בדיקוק, אבל בדיקוק, במודל החדש.

גם אליפסה, בכה קפלר, וגם מהירות לא קבועה! גועל-נפש! איך יכול האל הטוב ליצור מרומייו המושלמיים תופעות כל כך לא הרמוניות?

לא נעים. הבטחנו בתחלת הספר שנקיים דיאלוג ביקורתית עם הקריטריון האסתטי במדוע, ובמקרה הזה צריך להזדמנות שהמורשת האפלטון-הזיקה במקומם להועיל. אפלטון האמין שرك צורה מושלמת כמו מעגל יכולת להוות את מסלולי הכוכבים. אריסטו, שהתנגד למורו בהרבה עניינים, דורך עיגל פינות בעניין זה והוסיף שיש שתי פיסיות, ארצית ושמימית. הפיזיקה הארץית יוצרת דברים מצ'זוקמים כמו קווים עקומים, מעגלים פחוסים ותנועות לא קזובות הנובעות מחיכוך, אבק, חולדה וכדומה. הפיזיקה השמיימית, לעומת זאת, מכילה רק דברים מושלמיים כמו מעגליים. לפטולמאוס, אם כן, לא נותרה ברירה: מתוך ציאות לשני מוריו הגודלים עשה שימושית באוויר (מן הסתם במעגלים מדוייקים) כדי להשאיר את הכוכבים במעגלים ומעגלי-משנה. אפילו קופרניקוס, שעערר על פטולמאוס אבל העריך אותו (הוא הלך בעקבותיו אפילו בקביעת סדר הפרקים בספרו²⁴), לא שלח ידו במעגליים.

אבל אחרי שהטאושש קפלר החל לשים לב שבמבנה החדש שלו, הפחות יפה לכוארה, היו כמה דברים יפהפיים. לא היה זה היופי הפשטי של מסלולים מעגליים אלא היופי התמציתית של שלושת "חוקי קפלר," יסוד האסטרונומיה המודרנית. שני החוקים הראשונים פורסמו בספרו *Astronomia Nova* (אסטרונומיה חדשה) ב-1609. החוק הראשון הוא:

א. כל כוכב-לכת סובב את השמש במסלול בצורת אליפסה שהמשמש נמצא באחד מנקדייה.
אליפסה היא מעגל מוארך שיש לו שני מוקדים, כלומר מכל נקודה על גבי האליפסה אפשר למתוח שני רדיוסים למקום האחד שיש למעגל.⁵ סכום האורכים של שני הרדיוסים נשאר קבוע: כשהאחד קצר השני ארוך ולהפך.

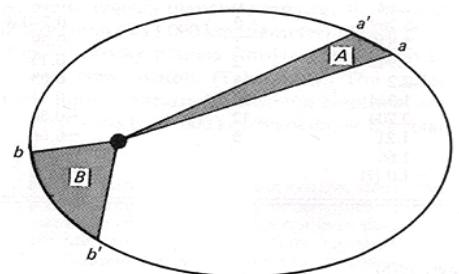
במקום כל האפיזיקלים ושאר התקיונים של פטולמאוס ו קופרניקוס, עכשו ניתן להסביר את כל התנועות המסובכות של כוכבי-הlection בשמים על סמך מסלול אחד לכל כוכב, והפעם המשמש נמצאת תמיד באחד מנקדי האליפסה, שלא כמו במודל הקודם בו עמדה, סתם ככה, מחוץ למרכז המעגל. אמרו בעצםם מה יותר יפה: מעגל מושלם שעליו רוכבים עוד ועוד

⁴. איינשטיין⁴ מביא תיאור מפורט יותר של הצעדים המחשבתיים שקייפר היה צריך לעשות בחישובים אלה, ומומלץ לעקוב אחר ההסבר שלו במלואו.

⁵. ההגנות מהיבית לציין שהאקסצנטריות של מסלולי כוכבי-הlection היא חלה מאוד, כלומר אלה אליפסות כמעט מעגליות, כפי שאנו יכולים לראות כאן על הארץ: ההבדלים בין החורף והקיץ נובעים רק מהבדלי הזווית בהן מאירה علينا השמש, בעוד ההבדל במרקח השמש אינו ממשוני. מצדדים, שהסיגר בידי קפלר את סוד האליפסה, הוא האקסצנטרי ביותר בין כוכבי-הlection שהוא ידועים אן.

מעגליים מושלמים בגודלים שונים, שלעולם אינם יודעים אם לא נצטרך להוסיף עליהם עוד אחד בכל פעם שיגלו האסטרונומים עוד סטיה – או אליפסה אחת ודי? החוק השני היהיפה אפלו יותר:

ב. הקו המחבר בין כוכב-הlection לבין השמש מכשה שטחים שווים בזמנים שווים.



כוכב-הlection נע מהר כשהוא קרוב לשמש ולאט כשהוא רחוק ממנה. בכל פרק-זמן שנבחר,eko המחבר בין השמש לבין כוכב-הlection בתנועתו יכסה "פלח" מהאליפסה. כל ה"פלחים" שנוצרו באותו פרקי זמן הם בעלי שטח.

3.5. אימא יש רק אחת

ובעוד האיש מפענעה את חוק השמיים, נפרע כל חוק על הארץ. היו אלה ימי הרפורמציה, קתולים ופרוטסטנטים שהטו אלה את אלה במרץ רב, והתברר שאחותה הצעריה של כנסיית רومة הייתה לא פחות מטופשת ורzechנית ממנה (גם ביחסה ליהודים). מחוזות גרמניה עברו הלוך ושוב משליטת אמונה אחת לאחרת. רודולף השני, קיסר "האימפריה הרומאית הקדושה" (שלא הייתה רומאית וממש לא קדושה), היה מושג עם תעודות שהסתגר בארכונו ועסק במיסטיקה ומאגיה בעודו מתיאס מוציא משליתו את הונגריה, אוסטריה, מוראביה ובוהמיה, עד שהשאירו למשה כלוא בפראג. בארמון הסטובבו אنسוי-מדע לצד ידוענים ומיסטיקים, וגם המהרא"ל³² הוזמן פעם לשיחה. קפלר, אחרי מות ברהה, ירש את משרתת "המתמטיקאי הארץ", כלומר אסטרולוג החצר של רודולף. קל לשער איזה רוחה היה יכול לעשות מעמדת-הכוח הזאת, והנה, עצתו התקיפה ביותר לוועציז הקיסר הדיכאוני הייתה: להרחק אותו מאסטרולוגים!

ואז נפלה עליו צרה חדשה. זכרים את אמא קתרינה? עכשו היא זקנה מרת-נפש החיה בלבד בלייננברג, מזורה ועקשנית כמו בנה המפורסם, שנואה על כל שכניה – בקייזר, מה שהוא מכנים כיום "מכשפה". הצרה הייתה שבאותם ימים די היה במילה זו שהטיחו בה השכנים כדי להביאה בפני האינקויזיציה, שכבר העלה על המוקד את דודתה. ואם להביא בחשבון את הרגל שהיא לה להתחמס עם כל מיני עשבים, מצבה היה בהחلط גרווע. זו הייתה תקופה בה תבע דיבוק המכשפות את הייחון של מיליון נשים ברחבי אירופה. כיוון שבנה האחר ובתה כבר החלו להתנער ממנה, שלח קפלר מכתב דחווף לבית המשפט והודיע כי יש לאמו זכות לייצוג משפטו, והוא, הוד מעלת המתמטיקאי הארץ, יבוא לייצג אותה (סיגן³² מביא תיאור מצמר של ההליכים האינקויזיטוריים שהיו בגרמניה באותה עת ימים, ומהם ברור כי לקפלרית לא היה סיכוי לצאת מהסיפור בחיים ללא התערב בנה). משך שש שנים נאלץ לשוב ולהשתתף בישיבות בית-הדין ולהקור את העדים לפרט האשמהותיהם. בעניין עולה עתה דמותו של חוקר הרמוניות זהה כשהוא נאלץ לנבור עמוקי האיוולת של דורו: סליה גברת, את אומרת שחטפת פתאום כאבי-גב כשעכברת ליד הבית של אמא שלו. לא היו לך כאבי-גב קודם לכן? אתה, שכן נכבד, האם ילך שמת אחרי שאמי

³². ר' יהודה ליווא בן בצלאל (1512-1609), פוסק נודע, פילוסוף ומיסטיKEY, הוא גיבור אגדת ה"גולם" שפסלים רבים שלו מעטרים עד היום את פראג, בה השתמר גם ביתו של קפלר. הוא שב מפולין להtagorder בפראג-מ-1597 עד מותו. בהגותו השתלבו מוטיבים אפלטוניים ברורים, כמו הטענה שהיופי האמתי קשור אל הקדושה. כיוון שתעודתו של קפלר מאוניברסיטה טוביינגן מכילה גם ציון "מעולה"⁶⁰ בעברית, אפשר שהשנים החליפו כמה מילים בשפתנו אם נפגשו.

קיללה אותה הוא הילד הראשון שנפטר בביתכם? כך שיגע המלומד האובסיבי את העדים ואת בית-הדין ישיבה אחר ישיבה, עד שלכלם נמאס מהענין והם שיחררו את הזקנה, שנפטרה בעבר חצי שנה כאישה חופשיה.

4.5 ג' בוש

בשנים בהן נלחם קפלר על חייו כתוב את ספרו *Harmonice Mundi* (הרמוניית העולם) שהופיע ב-1619. רק כשיטים אותו גילתה החוק השלישי, שאותו מיהר להוסיף לספר שכבר ירד לדפוס. הנה הוא בניסוחו המודרני:

ג. זמן ההקפה של כוכב-הלכת סביב המשמש המוכפל בעצמו עומד ביחס ישיר למרחקו הממוצע מהמשמש המוכפל בעצמו פעמיים.

הוא היה עכשו בענינים: אף-דפים צפופים של חישובים, רובם בשיטת הניסוי והתיעיה, הולידו חוקים שהתאימו לכל נתון משפט הנתונים שהיו בימיו, וכן, כפי שהוא יודע לך, לנחותים שהתגלו אחריו.

אם אתם רואים את הקשר המבצע בין החוק השלישי והשני? כוכב-הלכת שמסלולו קרובה לשמש מקיף אותה מהר יותר מאשר כוכב-הלכת שמסלולו רחוק יותר, אבל גם כשמדובר באותו כוכב-הלכת הנע באטיפסה, הוא נע מהר כשהוא קרובה לשמש ולאט כשהוא רחוק ממנה! קפלר, למרות שמטליין הזקן נזף בו שלא לערב פיסיקה עם אסטרונומיה, נותן פה פיסיקה במיטה: הילה הוא משער שכוכבי-הלכת החיצוניים נעים לאט יותר כי מניעות אותן נשומות חלשות יותר, אחר-כך עולה בדעתו שאלה יש רק נשמה אחת, של המשמש, שהשפעתה נחלשת עם המרחק, ולבסוף הוא מחליף את המילה "נשמה" עם "כח". והוא שמע שהאנגלוי ויליאם גילברט הוכיח שצדור הארץ מגנט ענק הוא עשה צעד קדימה ומשער שתופעה דומה מושכת את כוכבי-הלכת אל המשמש. הוא גם מתחש שהగאות והשלפ' נובעים מהשפעת הירח, וכך שאבן מהארץ שטיוזב בקרבת הירח טיפול לא חזורה ארצת אלא על הירח! בקיצור: הוא היה ממש קרוב לגילוי הכבידה.

(חידה קטנה: קפלר גילתה חוק בתחום האופטיקה, "חוק היפוך ריבוע המרחק", האומר "עוצמת האור יורדת ביחס ישיר לריבוע המרחק מקור האור". האם אתם יכולים לראות בינהו זה לבין החוק השלישי של קפלר? הלי ואני יגלו לכם אותו בפרק 8, אבל אתם מוזנים להציג במשוואות המתארות חוקים אלה בנספח ולנסות לגלותו בעצמכם.)

ספר ההוראה בימינו מגישים את חוקי קפלר כאילו הוא עצמו הציג כשלישיה מסודרת. "דומה", מילגלאג כהן,²⁴ כי המאמץ שנדרש כדי להפריך את שלושת חוקיו של קפלר משאר עובדותיו לא היה קטן מהאמץ הדרוש לגילויים מחדש. החוקים מופיעים במקומות שונים בתוך ביל פיתגוראי טיפוסי: כוכבי-הלכת נעים באטיפסה, אבל המרוחים ביניהם מקבלים למרוחתי הטוניים המוסיקליים שכיכבו בספרו הראשון. הם ממש מייעים יחד נגינה שמיימת לבורא, מה שסביר מדוע בני האדם כל כך אהובים מוסיקה (בחילק הזה של הרמוניית העולמות" יש הרבה הפניות בספר מוסיקה חתרני של איטלקי אחד, וינצ'נצו גילילאי, שנגנש בקרוב). הגופים המושלים, שכאורה ננטשו אחרי נתישת המעגליים, שוב חוזרים לככבר בתמונה, יחד עם המצלעים הדו-מדיים והשליש של האב, הבן וروح הקודש, בollowים בנומרולוגיה מסוימת. כוכב-הלכת אחד, בעוברו בין האפקליון (המרחב הגדול מהשמש) והפרקליון (המרחב הקטן), משמש את הדיסוננס הضرורית "מי-פה-מי", המציגים "מי-זהה

ר' נספח:
החוק השלישי

ר' נספח:
חוק
היפוך ריבוע המרחק

(אומללות)" ו"פָאָס (רַעַב)", "ומעטם ההברות האלה תוכלו להבין כי בביטחוןנו זה מושלים האומללות והכפן." את הדברים הללו כתב אדם שכבר שכל שלושה מיליון בקטנותם וראה את אשתו מטה מטורפת מצער, נודה ע"י הכנסייה הפרוטסטנטית בלינץ אליה נدد מהצ'קיסר מתיאס כדי שלא להמיר את דתו לקתוליות, וחזה בחורבן שהביאו על ארצו המלחמות בשם ישות. על אף כל אלה הספר שופע שמחה, המתעללה לפעים עד אקסטазה.

בן חמישים ותשע מת קפלר ואחריו שורת חיבורים גאוניים. בספרון מ-1611 הניח את היסוד למדע הקריסטלוגרפיה כשגורר את תכוונות גביש השלב מהצורות הנוצרות מכדורים מצופפים. כאן חזר ויישם את מחקרו המתחמיים בגופים האפלטוניים להבנת הגבישים, הפעם בהצלחה מלאה. ספר אחר שלו מאותה שנה, "ציוויליקה" (מונייה המהדרת עד היום ב"דיאופטרים" של האופטיקאים), עושה אותו לאחד מייסדי תורת האור. בכך, רגליו של אבי האסטרונומיה המודרנית היו שקוות עמוק בימי הביניים, אבל אפילו השטויות של אנשים כמו הוא הן מלאפות. מספר כוכבי הלכת – יסוד האובסיה שלו – הוא עובדה אקראית, וכמוון גם לא נכונה, ובוודאי שאינה משקפת חוק טבע או עיקרון עמוק⁴⁸, אבל קפלר לא יכול היה לדעת על עוד אינספור מערכות השימוש שרך ביום נתן להתחילה לספר את כוכבי-הלכת שלhn. ההערה שלו "אתם הפיסיקאים, הטו אוזן, כי עוד מעט נפלוש לתחומכם"⁴⁹

מבشرת את הפלת המחיצה בין פיזיקה "שמימית" ו"ארצית" ובכך סוללת את הדרך בפני כל

ילד המשחק בכוון להתוודע אל הכוחות המעציבים את היקום כולם. "אל ההתפעלות מאדם

נפלא זה", אומר איינשטיין, "מצטרף עוד רגש של התפעלות ויראת כבוד, שאינו מכוען לשום

אדם אלא להרמונייה אופפת-החדות של הטבע שלתוכה נולדנו."⁵⁰

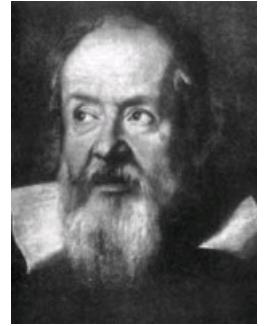
*

במבט לאחר, אנחנו חווים תודה لكפלר לא רק על הפיזיקה שהוריש לנו אלא גם על ש"ציווה את גופתו למדע" במובן הרוחני. באופן מוזר, השאפטנות מוקיעת-השחקים שהתמזגה עם מזוכים, היפוכונדריה ודימוי עצמי נמוך, בתוספת השקפת העולם האסטרטולוגית, דוקא עשו אותו למדען טוב בכךSSIYOU לו להסתכל על אנשים, כולל עצמו, ביושר המזכיר את הריחוק הקליני של פסיכיאטר מודרני, ובכך להתגבר על כשי התחושה של עצמו. "אליך אשוב, קפלר האציל", כתוב נובאים בסוף המאה ה-18, "אשר בשגב לך יצרת עולם שכולו רוח, ואילו בזמןנו נחשב הדבר לחוכמה... להשפיל את הגובה במקומ להגביה את השפל".⁵¹ המאה ה-20 הייתה עדה לעוד ניסיון כזה למזג מיסטיות ומדע, בשיתוף-הפעולה בין קארל גוטבר יונג לבין הפסיכינט המפורסם שלו, ולפנגג פאולי, ממייסדי תורת הקונטנים. בספרם "סינクロניות", המנסה לחת בסיס מדעי לטלפאתיה וראיות הנולד, משתמש פאולי בהרחבה על קפלר. התוצאה, לדעתו, אינה מרשים. לעומת זאת, לאנשי-המדע הרציונאלים נותן קפלר הזדמנות להבין איך הגונות יכולה דוקא לפרוח כשהיא ניזונה מחומריים אירציונאליים. לכך התכוון פופר⁴² (3.5) כאשר שגם השערות העולות מסיבות לגמרי לא-נכונות יכולות להניב תגליות מדעיות.

על ערש דוויי רואו את קפלר מצבע על ראשו ועל הכוכבים. מה ניסה לומר לנו בכך? "מעט שלושים שנה קודם לכן שמע הוא עצמו את ברקה החור וממלמל על ערש דוויי Ne"

⁴⁸. שונה היה הדבר לו שאל קפלר את אותה שאלה על מסילות האלקטרונים באוטום (ר' פרק 16).

– “אל יראוני כמי שהי את חיו לשוווא.” אין סכנה שמיישחו
יחסוב כך על קפלר. יותר מזה: הוא גם קיים את משאלת מורו במלואה.



6. גליילאו מודד זמן במלחינהות

המוסיקה היא ההנאה שחשה נפש האדם מהספרייה מבלי להיות מודעת לכך שהיא סופרת. ליבניין

שני שמותיו של גליילאו גליילי (1564-1642) נגزوו משמו של חבל-ארץ יפה כאן בישראל, אבל ככלנו הורגלו לקרוא לו בשם הפרט (כמו לשני טוסקנים אחרים, לאונרדו ומיילאנגליו)/caiilo הוא חבר שלנו. בן דורו של קפלר היה אבל שונה ממוני מאוד, איש כוחני וערמוני שתמיד עשה חשבונות תועלתי. הוא היה מבוגר מעט מקפלר, אבל בעודו קפלר הציג על תמיכתו בקורפרניקוס כבר מנעוריו נשאר גליילאו “ברון” עד 1613. קפלר, שנחשב אז לבכיר האסטרונומים, כתב לו הרבה מכתבי הערכה ועיזוז וכמוון ביקש גם ממוני נתונים. גליילאו נפנה במכתבי התמיכה שלו קפלר לפני כל העולם אבל רק פעמים טראח לענות לו, כשהיה צריך ממנו איזו טובעה. הוא היה חופשי לגמרי מכל האמנות המיסטיות בהן היה שקוע עםיתו הגרמני, אבל דזוקא הוא נשאר תקווע עם המעגליים של פטולמיאוס וקורפרניקוס, לא הבין את תגלית האליפסה של קפלר, ואפילו התנגד בעקשנות לטענתו ה-“מיסטית” כי כבידת הירח אחראית למחזרי הגאות והשפל.

אבל הם השלים זה את זה. שניהם היו חילוי המהיפה הקורפרניקאית שהצוו את הגבול המלאכוטי בין מדעי הטבע השונים, קפלר מאסטרונומיה לפיסיקה וגליילאו בכיוון ההפוך, מכינים איש-איש בדרךם לבמה לניטוון, שיחד את עבודותיהם לתורה אחת. שניהם היו גם סופרים נפלאים שכתו דיאלוגים שובי-לב בשפת עמם – קפלר בגרמנית-רחוב עסינית וגליילאו באיטלקית מתרוננטה – במקום הלטינית העבשה בה נגעו אז לכתחוב ספרי מדע. איינשטיין, שהיה בעל הבחנה פסיכולוגית חזורתה,⁷ עמד על ההבדל באופיים כאשר שקפלר “לא היה אחד מآلלה המפיקים הנאה אינטינקטיבית מהמלחמה עם אחרים, כפי שהוא בבירור, למשל, גליילאי, אשר זדונו הנעלה מהנה את הקורא המבין אף כיום.”⁽²³¹⁾⁴⁴

1.6 ניסויים מחשבתיים
באיטליה, השריד לאימפריה שהחריבה את האימפריה היוונית, התנגן הרנסанс מראש כל גג. ובעוד האמנים והמחזאים מגלים מחדש את פידיאס וסופוקליס, שבו גם המלומדים אל אוצרות המדע של מורשת יוון. אתם מוזמנים להציג שוב בתמונה “האסכולה האתונאית” שהבאתי בפתח ספר זה, ובה גдолיל המדע בתולדות האנושות. רוכם מתו אלף וחמש-מאות שנה לפני שצוירה התמונה. כמה עצוב: שום אדם משיעור-קובחת לא קם מאז! אבל אילו היה רפאל מציר אותה תמונה רק דור אחד או שניים מאוחר יותר, כבר היה צריך להוסיף לה שורה של ענקים חדשים. זה, בהתמצית, נס הרנסנס!

לשמחה הזאת הצטרפה גם משפחתו גליילאי. גליילאו היה בנו הבכור של וינצ'נצו, מוסיקאי מלומד מפירנצה שכותב ספר בשם “דיילוג על מוסיקה עתיקה ומוסיקה מודרנית” (זכרו את השם הזה כשישב הבן לכתחוב את ספרו) ובו טען, ביגוד לפיתגורס (ראו 2.2), שגם מיתרים שהיחס ביניהם אינו הרמוני ממשיים מיזוג נעים. בכך קלקל תיאוריה יפה לטובת סתם עובדה וגם עשה צחוק מחכם עתיק, מה שיתברר כנטיה משפחתיות אצל הגליילאים. הוא שלח את בנו לאוניברסיטת פיזה ללמידה רפואי. אבל גליילאו, שהבריו קראו לו “הווכמן”, מצא בפיזה את ה-“סודות” של אוקליניס ומאז לא ראו אותו בחדרי האנטומיה. חוותה מכרעת אחרת

הייתה לו פעם בזמן התפילה. לא, הוא לא שמע קול קורא לו מלמעלה אלא רק שם לב לnbrשת הנרות הארוכה שהשתלשה מתקרת הכנסייה ונעה ברוח כמטולת: התנועות הלכו ונחלשו, ככלומר נעשו קטנות יותר, אבל כshed את משך התנוודות, תוך שימוש בדופק שלו בתור שעון, גיליה שימוש התנוודות קבוע בעלי קשר לארכן. הגילוי הזה, של **משהו קבוע** **ביסוד השינוי**, פתח את נפשו של הצעיר להערכת פשוטות של חוקי הטבע.

אבל בינהיים שמע וינצ'צ'ו שהילד לא מתכוון להיות דוקטור ויצא מיד לפיזה לעשות לו סקנדל. כל מי שהיה עד לריב בין נהגים איטלקים יכול לדמיין איזה סצנה של צעקות, אם לא גרווע מזה, הלכה שם בין שני האדונים חמץ-המצג. אבל היה לגיליאו שכל זמן לפגישה גם מתמטיקי ידוע שהצלחה להרגיע את האב ולשכנעו تحت לבנו ללמידה מה שהוא אוהב.

גיליאו סיימ את לימודיו בלי לעבור בחינות ועל כן בלי תואר. תחילתה עבד עם אביו במחקר הפיסיקה של הנגינה והתפרנס כמורה פרטי עד שהבריו המתמטיקים סידרו לו ב-1585 משרה נמוכה באוניברסיטת פיזה. עד מהרה הסתכסס המרצה החדש עם הנהלת האוניברסיטה בשל היעדרויות וסירוב לבוש את הגלימה הנדרשת. הוא גם כתב שיר בחרוזים אינפנטיליים בו הסביר שהגלימה מקשה על פרופסור לבקר בבית-הזונות וגורמת לו להתנחות "בחטא שמציאות לו ידיו".

מפייזה עבר ב-1592 לאוניברסיטת פדוואה, שם כוכר פגשנו את קופרניקוס, וב-1610 קיבל מינוי כפול ממש חלומי: פרופסור באוניברסיטת פיזה והמתמטיקי של דוכס טוסקנה. בהדרגה גבר בטחונו העצמי ומהקורי הוציאו לו שם למרחקים.

כבר כשהחל לחזור את רעיוןותו של אבי הפיסיקה היוונית, ארכימדס, ניתן היה לראות כי הוא נמצא על מסלול התנגשות עם המדע של ימי: הוא עשה ניסויים. ביום איננו יכולים לומר מדע לא ניסויים, אבל באותו ימים נחשב הדבר לחוצפה: מה פתאום לעשות ניסוי בנושא שאנשים חשובים כבר כתבו עליו ספרים? "בשאלות מדעיות", ענה גיליאו, "סמכותם של אלף איש אינה שווה למסקנתו הצנואה של היחיד." שוב עולה כאן קולו הבוטה של האב בספרו על המוסיקה: "אללה המבקשים הוכחה לטענה כלשהי ומסתמכים רק על משקלה של סמכות, בלי שום נימוק שיתמוך בה, התנהוגותם מגוחכת."

לא רק את בני דורו מנער גיליאו מכבלו הדוגמה הדתית אלא גם אותנו, מהרגלי החשיבה ה"հיגוניים" שלנו. הנה אומר אריסטו: כשהשני גופים נופלים ארצה, הכבד מגיע לפני הקל. טענה בהחלט הגיגונית, והיה נחמד אילו הייתה גם נכונה. אולי אריסטו ראה נזחה נופלת לאט יותר ממטבע ונתן להתנגדות האויר להטעות אותו, אבל מפליא איך דורות של מלומדים לא העלו בדעתם לבדוק את הטענה הזאת בניסוי פשוט ורך מחרוזו אותה מדור לדור. גיליאו הפריך אותה לא רק בניסוי אלא גם ב"ניסוי חשיבה" כמו אלה שהנהי ארכימדס (פרק 2.8). הנה ניסוי החשיבה של גיליאו, והתאמרו בעצמכם אם הוא לא חמוד. שני כדורים, א' קל ו-ב' כבד, נופלים יחד מאותו גובה. על-פי אריסטו, ב' ייפול מהר יותר. עכשו נחזיר על הניסוי כשלני הcadorsים קשורים. מה תהיה מהירותם יחד? א' יעכב קצת את ב' ולכן תהיה מהירותם המשותפת נמוכה יותר. אבל אז, אם נזג אותם לכדור אחד, ג', הרי על-פי אותו היגיון ייפול ג' לאט יותר מאשר ב'! אריסטו המסכן: גיליאו הביס אותו אפילו בmargin היבטי שלו, הלוגיקה האристוטלית!

2.6 התאוצה – השער לפיסיקה המודרנית
 איזה מושג בולט בהזנחה בפיזיקה של אריסטו, מהויה יסוד במחפה הניתונית, מלא תפקיד מכירע באלקטרומגנטיות, מסרב באופן מרגייז להשתלב ביחסות הפרטית, נעשה לבסוף מאולף ביחסות הכללית, ומוליך ניבויים חדשים אפילו בתורת הקונטנים? התאוצה היא מושג פשוט, המציין כל שינוי מהירות, וגיליאו הוא הראשון שחקר אותה בשיטות. השיטה שאלתր כדי למדוד זמן באמצעות הפרימיטיביים שהיו ברשותו הן מבריקות בפני עצמן, כמו שקילת כמות המים שנשפכה בפרק-זמן הנמדד או זמום מנוגנות צבאות³⁹ – עוד מתנה מאבא וינצ'נו. יכול מחקרים אלה הוא שפה פשוטה בה ישמשו חוקרי התאוצה בדורות הבאים.

ר' נספח:
תנועה והתאוצה

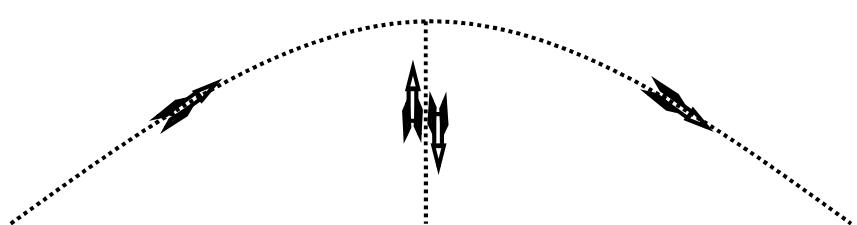
נתחיל בתאוצה הפוכה שבה מגביר הגוף את מהירותו באותו מידה בכל רגע. גילייאו טבע חוק אלגנטי: דרך שעובר נס בתקופה שווה לתאוצה שווה כפול ריבוע הזמן לחלק לשתיים. הדוגמה הבולטת ביותר לתאוצה היא הנפילה החופשית. כפי שידוע כל צנחן, למרות שנפלתו אינה חופשית למחרי בגלל התנגדות האוויר, הגוף הנפל מתחילה לדמת במהירות נמוכה אבל זו גוברת מרגע לרגע. מה מידת העלייה הזאת במהירות? במילים אחרות: מהי התאוצה של הנפילה החופשית? לגיליאו לא היו הכלים למדוד אותה ישירות כי נפילת החופשית היא מהירה מאוד. הוא גלגל אם כן כדורים בשיפורים הולכים וגדלים. חוק התאוצה הופיע בຄולם בלי קשר לשימוש. על סמך ניסויים אלה היישב בעקביפין את תאוצת הנפילה החופשית: 9.8 מטר לשנייה בריבוע. זה, אם כן, הקבוע המפורסם של הנפילה החופשית, שנוהגים לסמנו באות *g*.

בחשיבות המעשית של שני הישגים אלה – הבנת המושג הכללי של התאוצה וקבעת התאוצה הספציפית של הנפילה החופשית – תוכלו להיווכח ע"י תרגיל קטן. אם אתם עומדים ליד בור عمוק (או על גג בניין, מבון אם וידאתם קודם שאינכם מסכנים מישחו למטה), הפילו למטה אבן ומדדו בדיקך רב ככל האפשר את השניות מהנפילה עד שמיעת החבטה. הציבו את מספר השניות במקום הביטוי "זמן" ואת המספר 9.81 במקומות הביטוי "תאוצה"
 בחוק שבספקה הקודמת, כולם, $\frac{1}{2}gt^2 = h$, ותקבלו את עומק הבור או גובה הבניין.

תרגיל משלים יאפשר לכם להבין ממהו עמוק לגבי טבע התאוצה. נניח שהאבן שהפלת נזרקת מאותה נקודה בה פגעה בקרקע, ובאותה מהירות כmo מהירות הפגיעה, רק בכיוון הפוך, ככל מר לעלה. ברור לכם כמה שהאבן תאט עכשו במקום להאייז. מה תהיה מהירותה בכל רגע? ולאיזה גובה תגיע? כמובן, זו תהיה אותה תאוצה, *g*, רק בסימן מינוס. ככל נקודה תהיה לאבן אותה מהירות הייתה לה כשבורה באותה נקודה ברגע נפילתה, והוא תגיע עד אותה נקודה ממנה התחללה, ואז תחל ליפול חזרה.

אם גילייאו יכול לחשב היכן תהיה בכל רגע אבן הנופלת למטה או הנזרקת למטה, תסכמו ATI שזה ממש קטן עליו לנבא את מסלולו של גוף הנזרק לכל כיוון. גילייאו פנה אם כן לחקור את הפרבולה.

3.6 העקומה רבת-החזן
 מאו המראה הקטלנית של ארכימדס (ר'
 2.8) היה ברור שהפרבולה היא צורה



מיוחדת. ההגדרה ההנדסית שלה היא "קו הנכלל את כל הנקודות הרחוקות מרחק שווה מנקודה מסוימת ומקו ישר מול אותה נקודה",¹ והוא צפנת עושר של תובנות מעשיות ועיניות.

בציור משמאלי מסלוליהם של שני קליעים. האחד נורה בכיוון אלכסוני כלפי מעלה, טס בפרבולת ונופל הרחק מאוד מהמקום בו נורה. בדיקת אותו רגע בו נורה הקליע הראשון, נורה טיל שני בכו **ישר למעלה** כך שהוא מגיע לאחת הנקודות בה מגיע הראושון בשיא הפרבולת, וחזר ונופל, כמו כן, היישר למטה. איזה מסלול ארוך יותר? הפרבולות כמובן. אבל איזה קליע הגיע יגיע ראשון לנקודת השיא? ואיזה ישוב ראשון ארץ? אחרי מה שקרה עם הטענה של אריסטו אתם בודאי מבינים שכדי להיזהר כשלילאו שואל שאלות כאלה. ככל שהזה ייראה מוזר, **שניהם יגיעו למעלה ולקראע באותו רגע**.

עכשו שאלה משלימה לגבי הקליע במסלול הפרabolus: מה מהירותו האופקית בתחילת מסלולו ובסיומו?שוב, בואו ניזהר. בודאי נדמה לכם שהקליע חייב להאט במרוצתו לקראת סוף נפילתו – עובדה שהוא פוגע לבסוף בקרען. לא מדובר: אמן התנגדות האויר גורמת להאטת מסלול, אבל אם נתעלם ממנו נבין את הסיטוטאציה טוב יותר: הקליע יטוס **באותה מהירות אופקית לאורך מסלולו**, ורק ינמיך בתאוצה כלפי מטה. כך קדם גלילאו לניוטון בගילוי חוק ההתמדה: "נתאר לעצמנו חליקין, הנורה לאורך מישור אופקי ללא חיכוך. אנו יודעים... כי חליקין זה ינוע לאורך המישור בתנועה קזובה נצחית".²⁴⁽²⁴⁾

ר' נספח:

משוואת הפרבולות
גיליילאו הצליח אם כן להפריד את התנועה הפרבולית לשני רכיבים (וקטורים) נפרדים: הנפילה החופשית וה坦ועה האופקית. נוכל לבדוק כל אחת מהן אם ננווע יחד עם הקליע בכיוון התנועה האחרת. למשל, **אם נסתכל על הקליע בעודנו נעים בדיק אטו ימינה, נראה זריקה ונפילת אנטיות רגילות. ומайдך, אם ניזרק וניפול בדיק אטו למעלה ולמטה, נראה תנועה אופקית רגילה כאילו לא הייתה שום השפעה כבידה.**²

זכרו בבקשתו את השוויון הזה בעודו כמה פרקים. משחו מואוד יפה כבר מצבץ בו.

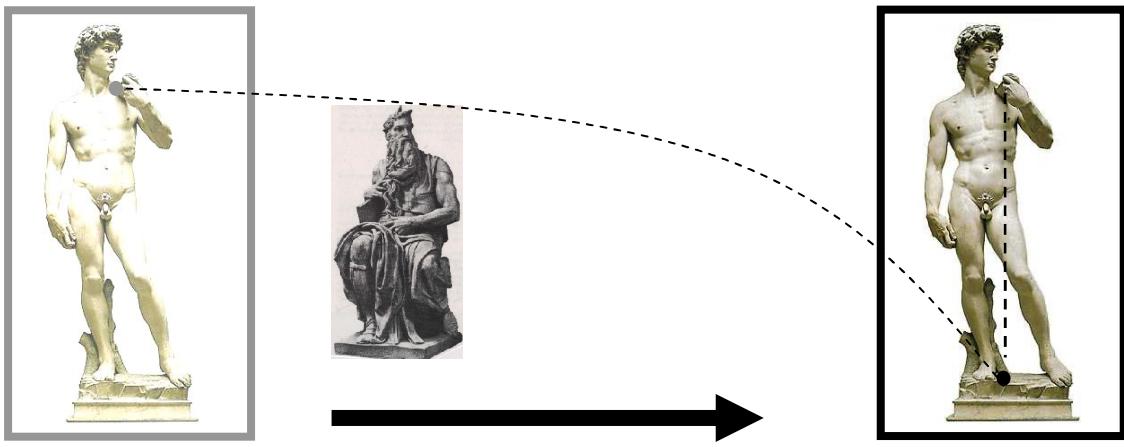
4.6 אחדות

לא רק חוקים גילו גליילאו אלא גם משחו עמוק יותר, עיקרונו פיסיקלי (ר' פרק 3.8). עיקרונו האינוריאנטיות הגלילאית אומר: חוק הטבע אינם מושפעים ממצב התנועה או המנוחה של המערכת בה הם פועלים. גליילאו עצמו בודאי לא עמד על מלאה חשיבות העיקרון שגילה. הוא רק רצה להגן על השקפת הקופרניקהית מפני טיעון רציני שהעליה נגדה כבר ע"י פטולמיאוס, ואגב כך גילו משחו עמוק **בסיסו המדיניות הפיסיקלית**.

אמרו האנטי- קופרניקאים: אילו הייתה הארץ נעה, הריaben הנופלת מראש מגדל הייתה מגעה לא אל תחתית המגדל אלא הרחק ממנה, כי בינוים האדמה ברחה מתחתיה. גליילאו, על סמך ניתוח חוקי התנועה שהכרנו לעיל, הראה שאין הבדל מבהינה זו בין אדמה נעה ואדמה נעה, ולכן ייפול הcadour לאותו מקום בו היה נופל לו הייתה הארץ עומדת במקומה.

¹. האטימולוגיה היוונית של המילה היא סבוכה. מילולית: פרא = לצד, בזלה = לזרוק, ובשאלת בשפות הלטיניות: להשוות. מכאן *parable* (משל) באוגרית וכונ' עצם המילה "דיבור", *parlez* ו- *palabra* בצרפתית וספרדית. הצורה ההנדסית הדומה, **היפרבולה** ("לזרוק יותר מדי"), משמשת באנגלית לציון הגזמה.

². הנה תרגיל נחמד (רמז): אל תתאמזו יותר מדי: וילהלם טליירה חז אל התפוח, אבל הפעם מחזיק בנו ולטר את התפוח בידי בראש מגדל. אם נתעלם מהתנגדות האויר, لأن צורך האב לכובן אם הוא יודע שבנו ישמטו מידיו את התפוח בבדיקה ברגע יריית החץ?



בואו נחזר על ניסוי המחשבה שלו. בציור שלפניכם עשווה לגאון איטלקי אחר ושמי את דוד של מיכלאנג'לו בתחום קרון נושא וברקע את משה צופה ניה על הרציף. הפעם דוד ישתמש באבני קלע לא כדי להרוג ענקים אלא כדי לבדוק את עיקרון גלילאו.

בשמיעה ראשונה נשמע הרעיון מופרך: דוד בחלטת יכול להרגיש אם הקרון שלו נושא או עומד. אבל זה קורה רק כשהקרון נושא ב מהירות לא קבועה, למשל, כשהוא מאץ בתחלת הנסיעה או מאט בסופה ודוד נלחץ אל הדופן האחורי או הקדמי. אבל כל עוד הקרון נע ב מהירות קבועה – אפילו ב מהירות עצומה של אלפי Km\ש – לא יוכל דוד לבדוק בתנועתו. ביום, כשהכמעט כל אדם מכיר את חווית הטיסה במטוס, קל להיווכח בעובדה שאפילו מהירות גבוהה מאוד אינה מורגשת כל עוד היא קבועה.

כמובן, אם יסתכל דוד החוצה יראה שהוא בתנועה, אבל הנה דבר מוזר: כל הניסויים שיעשה בתחום הקרון יהיו נתונים אותה תוצאה אילו היה הקרון עומד ללא-ניע בעוד המסילה, הרציף, משה ושאר העולם היו נעים אחרנית. בואו נבקש, למשל, מדוע להפיל אבן-קלע בתחום הקרון הנושא ב מהירות קבועה. שני פירושים יתכןו, והם שווים-ערך:

1. גרסה הצופה מבחויז: קודם עבר כאן קרון ב מהירות מטורפת מימין לשמאלו ובו עמד אדם שהחזק אבן. כישמט את האבן טסה גם היא ב מהירות עצומה [זכרו את עיקרון ההתמדה], ולכן ירצה ארצה בקו עקום [זכרו את הפרבולה]. כיון שהקרון עצמו המשיך לטוטס, הגיע הcadour בסוף טיסתו אל רצפת הקרון הדורר תחתיו, בדיקן נקודת שמתהה לידיו של הנושא.

2. גרסה הצופה מבפנים: הקרון עומד ואני הפלתי אבן והוא נפלה בקו אני ישרא לארצה (אגב, באותו זמן, כל העולם שבחויז, כולל האדם על הרציף שישב מהחזק שניلوحות, טס ב מהירות מטורפת משמאלו לيمין).⁴

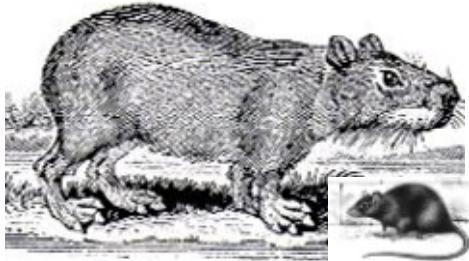
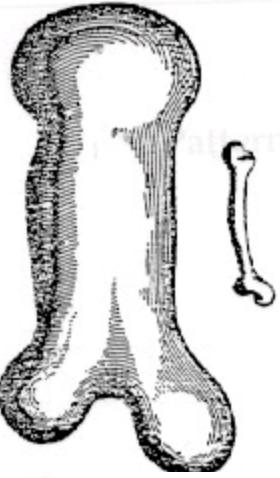
ובצורה כללית יותר:

1. גרסה הצופה מבחויז: כל מה שבתוכה הקרון טס קדימה וכל מה שבחויז – עומד.

2. גרסה הצופה מבפנים: כל מה שבחויז לקרון טס אחורה וכל מה שבפנים – עומד.
עכשו נוthen לנו גליילאו את העיקרון הכלול את שני הגרסאות:

א. עיקרון היחסות: כל תנועה היא יחסית.

א. ואמנם, אם יפיל משה את הלוחות בזמן נסיעתו של דוד יטען דוד שהלוחות לא נפלו היישר ארצה אלא בזורה פרבולה.



וכך, כל ניסוי שיעשה דוד בתוך הקרון – בנית מגדל קלפים, ניתוח מוח מסובך או מזיגת תה לחלב בספלី חרסינה שימושית לו ישישות אנגליות – ניתן לפירוש כאילו הקרון עומד במקומו ורק היקום שבחוון נע. כל עוד מהירות הקרון קבועה, לא יורגש שם הבדל.

בעצם, למה שניה מופתעים מאינוריאנטיות זו? הרי זה היה מזור אילו היה חוק אחד למערכות הנוסעות ב מהירות קבועה של 60 קמ"ש, חוק אחר למערכות הנוסעות ב מהירות קבועה של 67 קמ"ש וכך חוק נבדל לכל מהירות. מהי, אם כן, מנוחה? מבחינה מתמטית היא פשוט " מהירות קבועה של 0 קמ"ש", והרי כבר למדנו לקבל את האפס כמספר לכל דבר!

5.6 ה פיזיקה של החזים ספר זה אינו עוסק בבiology, אבל כדי להזכיר כי גלילאו המחייב את כוחה של הפיזיקה כשהחיל את עקרונותיה על שאלות מתחום מדעי החיים. אם גופם של

חיות וצמחים תומך יפה בעצמו ואני מתפרק, הוא בניו מן הסתם בהתאם לחוקי הפיזיקה. כאן הצבע גלילאו על קשר, שאינו מובן מאילו, בין המבנה והגודל. בציור משמאלי נראה ההשוואה שעשה גלילאו בין עצמות הירך של שני יונקים בגודלים שונים. לחייה הגדולה יש כובן עצם גדול יותר, אבל אין זו הגדלה פשוטה: יחס האורך והרוחב בה שונים לחלווטין. שניינו זה מתחייב מהפיזיקה. הסוס, למשל, גבוה בערך פי שלושה מהכלב. אילו היו גם עצמותיו גדולות מאלו של הכלב, באורך וברוחבן, פי שלושה, הן היו מתרסחות תחתיו כי נפח הסוס, וכן גם משקלו, גדול פי שלוש בשלישית מזו של הכלב, ככלומר פי עשרים ושבעה. חזק העצם נקבע על-פי חתך הרוחב שלו, והוא זה עולה רק בריבוע עם כל הכפלה בмеди הכלב. נחוצה אם כן עליה בעובי היחסי של העצמות עם גידילת הגוף. מצד שמאל הבאתי דוגמה שלא הייתה מוכרת לגלילאו אבל ממחישה את כוונתו. הקפיבארה הוא יונק אוכל עשב שגודלו יותר ממטר החילידי נחרות דרום אמריקה. הוא שיך לסדרת המכרסמים, ככלומר מדובר ביצור דמיי עכבר שגדל ותפס את הנישה האקולוגית בה מחזיקם, במקומות אחרים, החזיר, התאו ודומיהם. והנה, הקפיבארה שונה מאוד מקרובתו החולדת לא רק בגודל אלא בפרופורציות, הדומות יותר לאלה של חזיר או כבש. ב"שני מדעים" עבר גלילאו בטבעיות משלו בתחום הנדסת המבנים אל האנטומיה, ובכך עזרר את השאלות שילידן בבוא היום את תורה האבולוציה.

6.6 ברוכים הבאים אל הפיזיקה המודרנית מכל העבודות האלה מצטייר לעניינו מדוען שלא לחייב אותו איינשטיין⁽³²⁾, "אבי הפיזיקה המודרנית". בואו נסכם את המאפיינים שהכניס גלילאו לפיזיקה החדשה.

6.6.1 הניסיון כשותפות עליון

גלילאו, בניגוד לקפלר ולמרות אמונתו הדתית העמוקה, משתמש רק על הניסיון והחשיבה הגיונית. בכך הוא לוקח את הצד הביקורת שบทורת אריסטו השומר עליו מפלפולים מיסטיים. אבל אמנם שעשה צחוק מהשערת קפלר בדבר הקשר בין הගאות והשפלה לבין תנועת הירח, אבל אפשר להבין למה, באותו ימי טרומ-Νיוטון, היא נשמעה לו הזיה.

6.6.2 סיבות נסתרות

מצד שני, גיליאו איננו חושש להכennis גורמים "אפלטוניים" לא-מוחשיים. על-פי אריסטו,aben הנזקפת למעלה נופלת חזרה הארץ, וכదור מתגלגל מאט עד עצירה, פשוט כי "זהطبع"
להיות על האדמה במנוחה. המהפקה של גיליאו היא בהבנה שעל הגוף האלה פועל כוח,
חיצוני ונפרד:⁹ לולא הכבידה הייתה האבן ממשיכה בתנועתה ל מעלה, ולולא החיכוך היה
הכדור ממשיך להתגלגל ללא סוף.

6.6.3 המתמטיקה ככל ניבור

בתוך אבי הבליסטיקה ממחיש לנו גיליאו לראשונה את עוצמתו ה"חוק" בפיזיקה המודרנית:
נכניס למשווה את מהירותו ההתחלתית של הגוף ואת ציונו, נציב את מספר השניות במקום
ה-t, נחשב ונדע איפה יהיה הקלייע (הפוג', החללית) בכל רגע. החוק פועל, אם כן, כמשווה
מתמטי: **הציבו במקומות הנעלמים את נתוני המצב ההתחלתי ותקבלו את
המצבים הבאים בכל רגע.** בעיקרו זה טמונה עוצמת הטכנולוגיה כולה.

6.6.4 ההבחנה בין עיקור וטפל

כשגיליאו מסיק מהתנועת גופים על חוק ההתמדה, הוא מלמד אותנו גם ממה **להתעלם**. זה לא
פשוט. איך אפשר, לדוגמה, לראות את הכבידה והחיכוך, השולטים בכל רגע מחיינו,
כ"טפלים" מבחינה פיסיקלית? זה בדיק העניין: לימוד חוקי הטבע מחייב לבוזד גורמים
מוסימים עד לדרגה לא מציאותית. לפעמים תשמעו פיסקיים אמורים: "נניח שיש לנו חדר
סגור ענק שיש בו גלקסיה שלמה," או "נניח שהתנודות האוויר זניחה," וכו'. כך, למשל,
הנפילה החופשית והמסלול הפרבולי שתוארו לעיל הם אידיאלייזציות: אנו מתעלמים
מהתנודות האוויר, מנתחים את התנעות הטהורות, ואחר-כך חוזרים ומבאים בחשבון את
התנודות כדי לקבל תוצאות אמיתיות. מיסבה זו קוראים לפיזיקה **"אמנות ההנחה
והזנחה."**

כשנחתה "אפולו 15" על הירח ב-1971, הפיל האסטרונאוט דיבוייד סקוט נושא ופטיש
לענין מצלמת הטלויזיה. עכשו לא היה צריך **"להזנחה"** את התנודות האוויר – היה פשוט
לא הייתה. בשידור חי לעניין מיליון צופים הגיעו שני העצמים יחד אל קרקע הירח. המדע
המודרני הצדיע לאביו כארבע מאות שנה לאחר שכיוון את הטלסקופ שלו אל המקום עליו
עמדו עתה שליחיו.

7.6 אסטרו נום מול דשכה

gilialo היה קתולי מאמין, אבל שני אבותיו הרוחניים היוונים, אוקליידס וארכימידס, עשו אותו
למදען הראשון שבינו הנסיוני, התצפית והחשיבה הלוגית היו הסמכות היחידה. באחד
מכתביו לגלג' על הרגל של אחד מיריביו לצטט עוד ועוד בני-סמכתא בתקופה שסמכותם
המשמעותית תכרייע את הcpf לטובת דעתה מסוימת:

חשיבה אינה דומה לగירית משא. אכן כמו סוסים יכולים לגורור שקי תבואה רבים יותר مما שיכל
לגורור סוס אחד לבדו. אלא שהחשיבה דומה יותר לדזרה – סוס ערבי גועי אחד יותר מאשר מאה
סוסי משא.⁽⁷⁴⁾

כששמע על המצאת הטלסקופ התמסר לילה אחר לילה למחקר הרקיע. הוא ניצל את
כישוריו כנסיין ובונה מכשירים ושכלל את הגדלת הטלסקופ פי ארבעה. כשחקר את הירח
הצליח לקבוע את גובה ההרים שעלייו ע"י יישום גאוני של משפט פיתגורס על משחקי האור
והצל עליהם. כשהסביר את המכשיר אל המשמש הוכיחה שהתנוועה הקשתית של כתרייה מתאימה

להנעות כדורי סביב עצמו. תגליתו הדרמטית ביותר, אותה פרסם בספרון "שליח המוכבים", הייתה שלצדק יש ארבעה ירחים שלא נראה קודם בטלסקופ. בכך שם לעז את האמונה שגרמי השמים נבראו למען בני האדם – אחרי הכל, זה יהיה קצת טיפשי לברוא למען בני-האדם גרמי-שמות שאותם אינם יכולים לראות – וגם גرم לאנשים להבין שאולי גם כדור-הארץ הוא, כמו צדק, כוכב-לכת שיש לו ירח.

כמה מידדיו הצעירים של גليلאו הקימו אקדמיה עצמאית משליהם "האקדמיה הלנקיאנית", והזמננו אותו להצטרף אליה, ובמכתביהם שהחליפו חברי האקדמיה הבשילו ניצני המדע המודרני. מגוון כישרונו של גليلאו, המדען, המורה והסופר, הבשילו בספרו הגדל "דייאלוג" הדיעו ביום יותר על-פי תורת-הכותרת שלו: "על שני שיטות-העולם העיקריות, של פטולאיוס ושל קופרניקוס". זה תיאור של שיחות המתקימות ממשך ארבעה ימים בין שלושה חברים: סלונייטי, חברו הצעיר של גليلאו שנפטר בדמי ימו, המציג את ההשקפה המדעית החדשה, סגנון, חבר אחר המציג את השכל הישר, וסימפליצ'ו הtmp.

לගليلאו, כפי שראינו, היה כישרונו מופלא לסבך את עצמו בצרות. ידיו הקרדינל מפאו ברבריני התמנה לאפיפיור ונקרא עתה אורובנוס השמני. אילו נаг גليلאו ביתר טاكت היה יכול לפרסם את דעתיו בצהרה שתאפשר לכנסיה להעמיד פנים כailו הן תרגילים מתמטיים, כפי שטענה הקדמה של אוסיאנדר לקופרניקוס. אבל במקומות רבים ב"דייאלוג" נשמעו כמה מדעתיו של סימפליצ'ו (שמו באיטלקית פירשו גם "גולם") דומות לאלו של האפיפיור החדש, וכמוון נמצא סכסוך שהעיר על כך להוד-קדושתו, שהיא גם עצבי בغالל מלחתת שלושים השנה עם הפרוטסטנטים. פיליו די פוטנה! התרתת הפפא, איפה האינקווייזיה? גليلאו זמן לחקירה ב-1663. זו הייתה חקירת לוקסוס: להשוד היו הרבה חברי בחלוונות הגבויים, בהם כמה מבני משפחת ברבריני שאורובנוס סיידר להם ג'ובים. הם סייעו לו ככל יכולתם ובמקביל הזהירו אותו שבדאי לו, לשם שניין, לסתום את פיו ולהשוו קצת על ג'ורדנו ברונו. בית-הדין דרש ממנו לפרסם התכחשות לדעתו. הרבה קתולים היו שמחים ביום הعالם הזה,³² אותו אולץ לקרוא בקול על ברכיו:

אני, גليلאו, איש פרינציה, בן שבעים, בן של וינצ'נצו גליילי המנוח, עמדתי לדין בפני בית-דין זה וכעת אני כורע ברך לפניכם, קרדינלים גדולים ונערצים... עיני רואות וידי נוגעות בספרי הבשורה, נשבע שהאמנתי תמיד ומאמין בעיתך האל גם אאמין בעיתך כל מה שדולגת, מטיפה ומלמדת הכנסתיה הקתולית הקדושה של רומא...

לפיכך, לאחר שאני מבקש להסיר מלכ' כבודכם ומלב כל הנוצרים המתאימים את החשד החמור שבצדוק הועלה נגדי, אני מתחפש בגליילי-לב ובאמונה שלמה לשגיאות ולכפרות הנזונות וככלל לכל שגיאה ודעה המנוגדות לכנסיה הקתולית הקדושה, ומקהל אותן ומכריז על תיעובי קלפיהן. ואני נשבע שלעולם לא אומר עוד ולא אטען לעולם, אם בעל-פה ואם בכתב, דברים שכאללה העולמים להעלות נגדי חשב דומה; ואם אדע על כופר כלשהו או מישחו או החשוד בכפירה, אמסור אותו לידי האינקווייזיה כאן או לידי האינקווייזטור או הומר במקום מגוריו...³²

"Epur si muove" (ואף על-פי כן نوع תנווע!) כרך, מספרת האגדה, לחש הזקן מוכחה-השיגרון כשיקם מכריעתו, מה שבודאי לא העוז לעשות, אבל זה גם לא היה נחוץ: הספר המוחרם כבר היה, בשפות רבות, רב-מכר ברחבי אירופה. הוא נדונן למעצר-בית, ומאז בילה את כל חייו בביתו באראצ'טרי.

³². גليلאו, וכולנו אותו, חייבים כאן תודה ללא אחר מאשר נפוליאון בונפרט, שאחרי כיבוש רומא החרים את מסכי האינקווייזיה ודאג לתרגם ופרסום ההליכים במשפט גليلאו.

על אלה נספה מהלומה אישית נוראה. שתי בנות ובן היו לגיליאו מחוץ לנישואין. לבן וינצ'נצו השיג מעמד חוקי, אבל את בנותיו הכניס למןזר. מעשה אכזרי ללא ספק, אבל באותו ימים היו דברים כאלה מוקבלים. הבית הגדולה, וירג'יניה, קיבלה בשמה את תפקיד הנזירה. שם הנזירות שבחורה, מריה צ'לטקה ("מרים השמיית"), היה מஹוה ברורה בתחום עיסוקו של אביה. מכתבה האותבם השתמרו והם מהווים תעודה מרתתקת,³² אם "מרתתקת" הוא הכנוי הנכון לדלות האימה בה היה או לפניה "אבי אדוני האחוב ביותר" שנלוותה לכל הבשיל כפרי או מלובש חם ששלהה לו. אבל היא נפטרה ב-1634. גليلאו שקע בדיcano, "מלא שנה עצמית ושומע בלי הרף את בתיה אהובה קוראת לי".⁽²⁸⁴⁾³² מה שסייע לו להתגבר על האסון היה ספרו האחרון "שני המלעים" שבו נגשו שוב שלושת הידידים לאربעה ימים ושהוחזו על מחרפיו האחוריים של "ידינו איש האקדמיה".³³ למרות שהספר לא כלל דיונים על אסטרונומיה לא יכול היה גليلאו להוציא לאור באיטליה והספר נדפס בהולנד. אבל כשהגיע אליו העותק כבר היה זה מאוחר מדי. "אללי! אדון נערץ", כתוב לידי צרפת,

ידיך ומשורתך המסור גليلאו התעוור לחלוtin לפני כחודש, בצורה שאין לה תקנה. הרקיע הזה, האדמה הזאת, היקום הזה שהגדלת פי מאה, לא, פי אלף, מעבר לגבולות שהיו מוקבלים לפני כן,⁽⁹⁷⁾³¹ התכווצו עתה מבחינתי עד למעגל הצר שתופסת עצם אישיותי. ג'ון מילטון, גדור משורי-Angharia בעת היא, ביקר את גليلאו בימי מסעו באיטליה וכותב על מעצרו. שניים רבעות אחר כך, וגם הוא עיור, הכתב לאשתו את ה"המנון לאור", "שלא יקשה למצוא בו הדר לגיליאו:

על פן, בקתר-ען, אפה, אור עליון,
זרכ מבנים, ואות הָנְשָׁמָה לכל חותם
האנו. שם טע עינים. כל אד ממש
געה ופזר, למען אַחֲזָה ואספר
קברים, בלב פְּשֻׁוּרִים עין בּוֹ-פְּמוֹתָה.
(תרגום אברהם רגנסון)

דייר חדש הטרף למשק-הבית של הווילה בארצ'טרי. וינצ'נצו ויויאני (1622-1703) בן השבע-עשרה הביא עמו לא רק שם שהיה יקר ללב המדעת החולה אלא גם כישרונו מתמטי נדר ומוסריות אין-קץ למורו. הוא עשה מזכירו, הביגורף שלו ולימדים מדעת בזכות עצמו. דייר נוסף בווילה, אונגלייטה טורייצ'לי (1608-1647), עתיד היה להפריך עוד הבלתיה אריסטוטלית: "הטבע אינו סובל ריקנות". הוא באמת לא סובל אלא נהנה ממנו: "ואקום טורייצ'לי" נמצא ביום בכל ברומטרא.

כשנפטר גليلאו לא הרsha אורהנו לעשות לו לויה ומצבה נאותה. ויויאני הירוש את כספו להקמת המצבה לכשיוסר האיסור, בתוספת בקשה להיקבר לידו. שתי הבקשות מולאו עבור תשעים וחמש שנה.

*

שני דברים שונים חקר גليلאו ולא העלה בדעה שיש קשר ביניהם: א) המסלולים הפלבוליים של פגזי תותחים, ו-ב) המסלולים (המעגליים לדעתו) של כוכבי-הלכת והירחים. מה היה אומר לו ידע שתי התנועות האלה תתגלינה כתנועה אחת, הנפילה החופשית, שאותה יתרה לנו ניוטון בפרק ?

אבל לא רק ניוטון יוכיח שעובדותיו השונות של גלילאו מצביעות בבלוי-דעת לאותו כיון. כיום אנו מביטים אהורנית אל גלילאו מעל פסגת הר שהוא אפילו לא ידע על קיומו ורואים אותו מוכיה עוד שני דברים שונים לכארה: א) חוקי הฟיסיקה אינם מבדילים בין מנוחה לבין תנועה קצובה, ו-ב) גופים קבועים וקלים נופלים באותו מהירות. מה הקשר בין שתי הנסיבות? הוא עצמו בוודאי לא ראה כל קשר. את הראשונה הביא כדי לתמוך בתורת קופרניקוס ואת השנייה נתן בעירותו כדי לעזר על הדוגמה האристוטלית. האם אתם יכולים כבר לנחש איך יובילו שתי התגליות האלה, שם הרחק בשער הגיא של עמק הרנסאנס, אל ההר הנישא של תורה היחסות הפרטית, ואחריו גבוהה עוד יותר אל פסגת היחסות הכללית?



7. דקרט מנתן כל מה שזאת

חי אדם אינם נמדדים במספר נשימותיו אלא ברגעים עוצרי-הנשימה שביהם.
אלמוני

ההשוואה בין המדע לבין אשה היא נדושה, אבל רינה דקרט (1596-1650) לחה אותה לKİצוניות: אם היא צנעה ונמצאת תמיד לצד בעלה מכבדים אותה, אבל אם היא מתמסרת לכל אחד ממשיכים אותה.⁽⁵¹⁾ נאמן לאנלוגיה זו, השתדל המוסקטר הגור-החרב להתייחד עם "אשתו" הרחק מעין הציבור. בכל פעם שמספר מעריציו גדול מעל לרמה הנסבלת נעלם פתואם כאלו בלהה אותו האדמה. היפושים היו מתארגנים עד שימושו היה מתר אותו במקום אחר באירופה ומארגן סביבו חוג מעריצים חדש – עד להיעלמות הבאה.

אם יש אמת בדברי הפסיכואנליטיקאים על השפעת מאורעות הילדות על חי האדם⁵² לא קשה לאתר את השירות המוקדמות בחיה דקרט, שנולד למושפה מיוחדת בצרפת. אמו מתה כשהיה בן שנה אחרי שלידה תינוק שמת גם הוא (דקרט, בסילוף מוזר, ספר שנספרה כמה ימים אחרי לידתו שלו). גם הוא עצמו שמע מהרופאים כי לא יאריך ימים.مامי, ספר, ירשתי כנראה את השיעול היבש ופני החיוורים. האב, שלא אהב את ילדו החמיישי, הכניסו למנור ישועי בגיל שಮונה. אפילו כספריו של דקרט הוציאו לו שם בעולם נשמע השופט ז'ואקים דקרט מפטר בארסיות: "מכל ילדי רק אחד גرم לי צער. האם היה הכרחי להביא לעולם בן כל כך מגוחך שישכים להיות בכריית עגל?" אבל ירושה נאה מאמו אפשרה לדקרט להתמסר למחקרים ולמלא עוד הרבה כריכות הדורות, תוספת צער לשופט הנפוח ורוחה נקי לאנושות.

במנזר נקשר הילד אל מנהל טוב-לב ואל מורים שאהבו ללמד מדעים. באוניברסיטה למד משפטים אבל סירב לлечת בדרכיו אביו. הוא פנה לקריריה צבאית ארוכה אך נטולת התנסות קרבית (למעט הצעת שני שודדים שנקלע לシリתם). אחרי כמה שנים בפריז, בהן החל להתבלט כפילוסוף, נמאסו עליו המעריצים והוא עבר להולנד. כאן, בתוך העם האמיץ שהצליח לא-מכבר להוכיח את כובשי הספרדים שוק על ירך, נחשף לחופש המחשבה והכיר נער מהונן בשם קריסטיאן האוכנס, אותו נגש בפרקם הבאים כגדול מדען הולנד במאה ההיא. פטרכנו הגadol של דקרט היה הנזיר הפורטוגזיסקי מון מרסן (1588-1648), מתמטיקאי ופיזיקאי (הראשון שמדד את מהירות הקול), מגנו של גלילאו וידידם של כמעט כל מדען הדור, שחדרו במנזר בפריז היה בעצם מוסד מחקר פרטי משגשג. מרסן תיווך בין דקרט לשאר עמיתיו. עם השנים הלך דקרט ונעשה לאדם השא יותר ויתר, יצא למסעות ארוכים (יש אומרים שהוא מעורב גם בריגול), החליף כתובות כמו גרבאים והתרחק מבני משפטו כמו מגיפה. האיש קטן-הקומה הזה היה אדם די בריא, אם לשופט לפי פניה ושותיו הרבות בצבא, אבל על الرجل אחד הקפיד: להישאר במיטה כל בוקר עד השעה אחת-עשרה ולחשוב. היה לו הרבה על מה.

7.1 מחשבות ראשונות

למתמטיקה הוכנס דקרט בהולנד עקב פגישה מקרית ברחוב. הוא ראה מודעה שהציגה אתגר מתמטי וביקש מעובר-אורח לתרגם לו אותה מפלמית. האיש, איזק ביקמן, נעשה למורה וידידו כעשר שנים, עד שהידידות נפגמה כשקרט שמע שביקמן מיחס לעצמו כמה

⁵¹. יש.

מרעיהונתו. אבל עתה הקדיש לביקמן ספר על יסודותיה המתמטיים של המוסיקה ויחד החלו השניים בלימוד הฟיזיקה מתוך גישה הפוכה לו של אריסטו: עצמים מתחננים כפי שהם מתחננים לא “כי זה טבעי” אלא בשל סיבות חיצונית ובלתי-נראות, כמו כוחות הפעלים עליהם והניתנים לתיאור מתמטי.¹⁰ כך ניסחו השניים לראשוña את חוק ההתמדה ואת חוק שימור התנע, אותם נגש בפרקם הבאים. עובודתו הבאות של דקרט עסקו בנפילת החופשית, בפיזיקה של הנזלים ובשבירת האור.

ב-1619 פקדו אותו שלושה חלומות שפסיולוגים עשו מהם מטעמים, אבל לדקרט הייתה משמעותם פשוטה: הם הציבו על ייעודו הפילוסופי. הוא כתב בדרך כלל בצרפתית ולא בלטינית, כדי להיות מובן לכלם, ואת ספרו “הגיוןת” כיוון דוקא לנשים. סגנוño פשוט ומצחין בכנותו, והוא חולק עם הקורא את התלבתו וחוויותיו. אחד מספריו מסתיים בהערה הנונשלאנטית “אני מקווה שההיסטוריה תשפט אותי לא רק על מה שהסבירתי אלא גם על מה שהשمتתי כדי להשair לאחרים את העונג לגלוותם.”

בחיותו בן שלושים וארבע, והוא כבר מלומד נודע, נרשם לאוניברסיטה ליזן כסטודנט ולמד בין השאר אנטומיה ופיזיולוגיה, בסיס למחקריו שניסו להעמיד את הבiology על בסיס מכוניסטי טהור. הוא גם החל כתוב ספר על תורת קופרניקוס, אבל כמשמעותו על ההסתכימות של גיליאו השתפן ונגנו את הספר. הוא גם הקפיד לעקוף את ארצטרי במשמעותו באיטליה וציין בגלוג כי התאמץ לקרוא את ה”דילוג” של גיליאו ולא מצא בו שום דבר מעניין. האם רק ניסה להרחק מעליו צרות עם הכנסתיה? החיבור הקופרניציאי פורסם אחריו מותו ומיד הוחרם ע”י הכנסתיה. הפרוטסטנטים בהולנד הזדרזו להקדים באיוולתם את הקתולים: עוד בחיי דקרט הואשם ה”הגיוןת” באתאיזם.

7.2 מכוונות ורוחות

הספק הוא מקור התבונה (*Dubium sapientiae initium*), אמר דקרט, אבל הוא גם ידע שהספק, בצורתו הקיצונית, מביא לשיתוק רעוני גמור. لكن הקדים לו את “מכת המגע” המפורסמת: הוא שאל את עצמו אם ניתן **שכל הממציאות סביבו היא פועלתו של שד מרושע** השולט במוּחוּ ויוצר בו אשליות. לא ניתן לשלול בזווית אפשרות כל כך הזיהה, אבל אפילו במקרה זה יש דבר אחד שלא ניתן להטיל בו ספק: באשליה עצמה! זו הייתה האקסומה הבודדת שעלייה, במהלך אוקטידי חדש, קיוה דקרט להעמיד השקפת-עלם שלמה שבה אפילו קיום האלוהים והנשמה יקבלו הוכחה מוצקה. הצדדים הבאים היו, כמובן, הרבה פחות משכנעים, אבל *Cogito Ergo Sum* (אני חושב לפיכך אני קיים) הפך למבשר הפילוסופיה המודרנית.

בראייה לאחר, שתי טעויות של דקרט בולטות ביום לעין. הראשונה היא הדואליزم הקיצוני שלו. דקארט, כפיזיקאי, הראה איך ניתן בעיקרונו להסביר את פעלות הגוף החיצונית מכונה, ובכלל זה גם את כל פעולות המוח מהרפלקס עד המחשבה. לא חשוב אם כל הסביריו היו נכונים – הוא הראה שהדבר ייתכן עקרונית. אבל אז נתקל בבעיה עתיקה שלא זכתה לפיתרון עד היום, “**ביפוי הגוף-נפש**”,²⁵ והבין ששולם הסבר מכוניסטי לא יכול להסביר את החווית הסובייקטיבית. הוא בחר, אם כן, בדואליזם, האמונה שה頓悟ה אינה דבר פיסיקלי, ככלומר, אינה חומר, אנרגיה או שדה, אבל מתחננת בעולם הפיסיקלי. זה מהלך

מואוד בעייתי⁶, אבל דקרט החrif אותו עוד יותר: הרי הוא עצמו הדגים את ייעילותו העקרונית של המודל המכניתי, העושה את תפקידה של הנשמה מיותר! لكن יוצר חיצוי משונה: כל החיים הן רק מכונות אוטומטיות (אומנם מושכללות מואוד-מואוד אבל מכונות) המציגות לחוקי הפיסיקה בלבד. האדם, לעומת מכונה לא-אוטומטית שאויה מפעילה הנפש הלא-פיזיקלית דרך בלוטת האצטروبול שבבסיס המוח. וכך, אם דרכתם על חתול והוא מילל מכאב, יאמר דקרט שהוא בדוק כmo שמערכת האזעקה במכונית שלכם צופרת: לא בגלל חוויתם כאב אלא בשל מגנון מורכב המותקן בו. אבל אם החתול ישפט אתכם ואתם תיללו מכאב, זה יהיה כי באמת כאוב לכם. החיצוי הזה הוא לא רק אווילי אלא גם אכזרי. הפילוסוף היהודי-גרמני שלמה מימון (1754-1800), באוטוביוגרפיה שלו, הכה על חטא על שהתאזר לבורי-חיים בצעירותו מתוך אמונה בדוקטרינה הזאת.

טעותו השנייה של דקרט הייתה תמייה וモבנת יותר. הוא התנגד לאוטומיזם ולכן דחה גם את קיומם של חלקיקי יסוד וגם את קיומו של החלל הריק. בעיניו היה היקום מלא בכל מקום בمعنى "אבק" קלוש של חומר, והוכנבים סבבו סביב המשמש בכלל "ערבולות" של החומר הקלוש הזה – ניסיון ראשון להבנת הכבידה. איינשטיין²²⁸⁴ מתייחס בהדרה להתנגדותו של דקרט למושג החלל הריק: אם יתacen חלל ריק לחלוטין, נובע מכך שה גופים הפעלים זה על זה מרוחק (כמו מגנטים) פועלים ללא גורם פיזיקלי בינם. ניתן לומר, אם כן, שמושג ה"שדה" ותורת היחסות הכללית שנכיר בפרקם הבאים מענה לקשי שאותו התמודד דקרט.

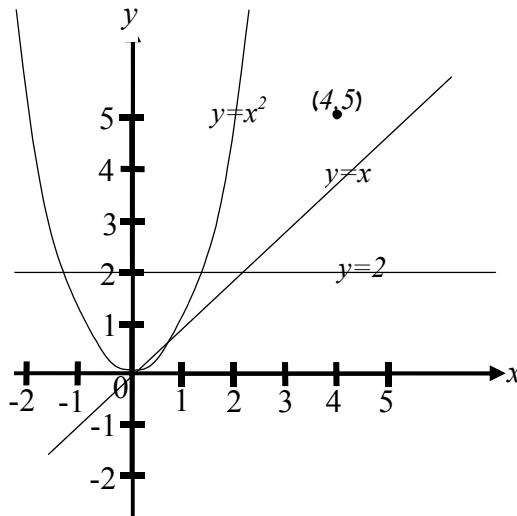
כשדקרט מדבר על וודאות שאינה מוחלטת אבל ניתן לבב שקט לסוך עליה, הוא משתמש במשל המביטה הן את כוחו והן את יופיו של הסבר מדעי: אין בו שום דבר מיותר ואי-אפשר להזין בו שום חלק מבלי פגום בכללו:

אם מישחו מתאמץ לקרוא מכתב שהאותיות בו אין מסדרות כהלכה, והוא מחייב לקרוא B בכל מקום שכותב A, ו-C בכל מקום שכותב B, וכך עברו יתר אותיות האלבבית, ואם הוא מוצא בדרך זו שהמכתב בניו מילים, לא יהיה לו ספק שהפשר האמתי של המכתב כלל במילים אלה, אף-על-פי שגילה זאת על-פי ניחוש, ועל-אף שאפשר שהכותב לא סייר את האותיות על-פי כוונה זו אלא אחרת, וכך הצפין בו פשר אחר... מכיוון שזו אפשרות כל-כך בלתי סבירה, בעיקר כשהמכתב המופיע מכל מילים רבות, עד של פשר אחר נראה לא-יאומן.¹⁰⁽²⁷⁾

3.7 מעקומותיו יוציאת משואת מהו איה מה, אם כן, עשוה את דקרט לאחד מאבות הפיסיקה המודרנית? הנה עוד אמרה שלו, פחות מפורסמת אבל חשובה מאוד: *Omnia apud me mathematica fiunt*: (כל הדברים הפה מתמטיים עברו). הישגו היה כפול: הוא גםiscal את שפת המתמטיקה וגם לימד את הפיסיקה לדבר בשפה זו.

למתמטיקה עצמה, כמובן, יש יהסים מורכבים עם בתה הוייזואלית, הגיאומטריה. מאו המשברים במתמטיקה היוונית, עליהם דיברנו בפרק 3.2, נחתפו הנקודות והקוויים של הגיאומטריה כעולם יותר עקי וחסין-סתירות מאשר עולם המספרים. בא דקרט והפך את הכוון: הוא הראה שניתן לתאר את מיקומיהם, אורכייהם וצורותיהם של קוויים ונקודות ע"י מספרים. הוא הנהיג את מערכת הציריהם המפורסמת שליבניץ, במחווהיפה, כינה "קרטזיאנית" על שמו. בציור משמאל שני ציריהם שעלייהם רשומים ברוחחים שווים

⁶. וגם אני מצאתי לו, למורת רוחי, תיומך חדש שאף אחד לא הצליח עד היום להפריך.¹

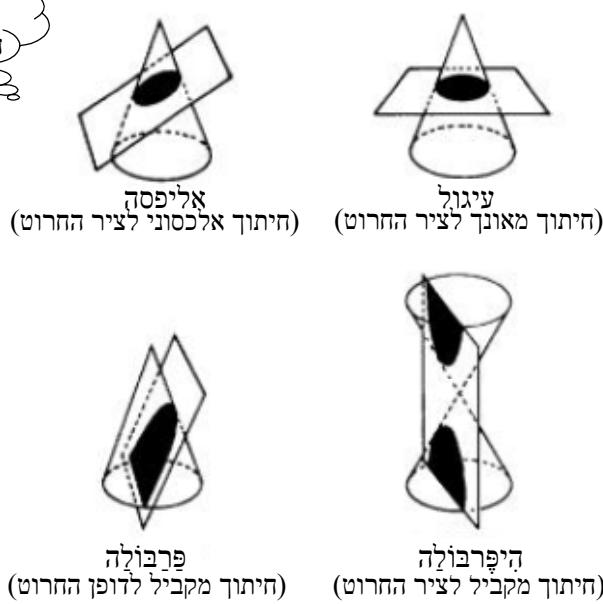


המספרים מ-0 ומעלה, כך שנקודות המפגש ("ראשית הציריים") היא ב-0. ניתן לייצג כל נקודה על שטח זה ע"י זוג מספרים, אחד לכל ציר, וכל קו מיוצג ע"י משווהה. הנה כמה דוגמאות פשוטות. הנקודה (4,5) נמצאת מול הספרה 4 על ציר x ומול הספרה 5 על ציר y . המשווהה $2 = y$ נותנת קו ישר אופקי: לכל ערך של x ערכו של y הוא 2. לעומת זאת, $x = y$, נותנת ישר משופע: לכל ערך של x ערכו של y זהה. לבסוף, המשווהה $x^2 = y$, הקרויה "משווהה ריבועית" כי ערכיה הם "בריבוע", נותנת צורה עוקמתה, היפרבולה: לכל ערך של x ערכו של y שווה לזה של x מוכפל בעצמו. את כל זה ניתן, כמובן, לעשות גם בשלושה ממדים, וגם ביותר: לפעמים, כשהפיסיקאים רוצחים לחשב את היחסים בין גורמים שונים, הם מציאים מרחב מופשט עם מספר גדול של מדדים ובו שמים את המערכת הקרטזיתانية המתאימה.

מכאן הופכת כל הגיאומטריה למתמטיקה: כל צורה גיאומטרית מוגדרת – ריבוע, מעגל, אליפסה ועוד – ניתנת לתרגום למשווהה. ההישג הזה חשוב במיוחד ללימוד צורות עוקמות, שאוטן הרבה יותר קשה לתאר מאשר קווים ישרים (נראה אתכם מושרטים פרבולה מדויקת!).

כליזה נתן בסיס חדש לאחת העבודות הגאוניות ביותר של המתמטיקה היוונית, "תורת החróוטים" של אפולוניוס איש פרגָה (לפה"ס). מה המשותף למעגל, לאלייפסה, לפרבולה ולהיפרבולה? בציור הבא מופיע חרטן הנחתק ע"י מישור המאונך לציר שלו

(כלומר كانوا היישר העובר במרכזהו), והחותצאיה היא כמובן מעגל מושלם. אם יהיה המישור הזה אלכסוני, נקבל אליפסה מדויקת*. ואם יהיה המישור החותך מקביל לדופן החרטן, נקבל את מיעודעתנו היפרבולה. ניתן גם המצב שהמישור החותך יהיה מקביל לציר, ואז כפי שאתם רואים תתקבל היפרבולה, אבל שני קצוותיה הפתוחים מתרחקים זה מזה בזווית גדולה יותר. כל הצורות האלה, גילתה אפולוניוס, נוצרים מחתכים שונים של החרטן. וכן, מוסיף עכשו דקרט, ניתנות לביטוי ממשוואות ריבועיות במערכת-הציריים שלו!



עכשו, כשהמתמטיקה למדה לטפל יפה בצורות, שמהה הפיסיקה להתחבר אליה: כל תנואה מושרטת קו כלשהו במרחב. חוק ההתמדה, למשל, שדקרט היה אחד ממנשחיו, מכתיב

*. כו, חבירים, אליפסה ולא ביצה. למה? תחשבו בעצמכם.

קו ישר (שגם הוא התר-חרוט "מנוען": מישור החיתוך הוא על דופן החרוט), אבל תנועות אחרות מושרטות קו עקום. תודות לדקרט נעשו כל התנועות ממושמעות: הפרבולות של גלילאו, האליפסות של קפלר ועוד הרבה מסלולים קיבלו עתה צורת משוואות תמציתיות. אבל לא רק התנועה, אלא כל תהליך שבו יש קשר סיבתי בין שני משתנים הנitin לתיאור ע"י גרפ (כמו החום של החולה בבית-החולים מצד אחד והשעה מצד שני) יכול מעתה לקבל צורת משווה דומה. עם הזמן למדו אנשים לייצג כוחות בטבע ע"י חצים הנקראים "וקטורים", "שאורך החץ מייצג את עצמת הכוח והכוון את כיוונו. חצים כאלה, במערכות הkartesianas, נשמעות יפה לחוקי האלגברה וכך יכול הפיסיקאי לחשב את פועלות-הgomelin בין הכוחות השונים. הפיזיקה החלה לאלף את התנועה ואפילו את השינוי עצמו.

4.7 סן רנאטוס מייצר תשים שי קד ושה אם ילדותו של דקרט, תחת נבואותיהם הקודרות של הרופאים, עשתה אותו להיפוכנדר, היא גם עוררה בו את העניין באנטומיה ובפיזיולוגיה. הוא גיבש לעצמו תורה בריאות סודית (שכללה בין השאר אכילת כמה מרשימה של ביצים) וכותב לאבו של האוננס כי יכול להאריך ימים לפחות כמה מאות שנים. משרתת בשם הלן ילדה לו בת ושמה פרנסין, אותה כינה בפני אחרים "אחיינית". הוא אהב מאד את ילדתו, אבל היא נפטרה כשהייתה בת שש. דקרט בן הארבעים וארבע עבר את הצער הקשה ביותר בחייו. אבל נראה שהווית האבاهות עשתה משהו לאיש המסגר: מהעדויות משלו ה先后ות עליה דאגה ממש אבاهית לכפריים ההולנדיים שבקרם חי. שרפשתין⁵² מצטט תיאורים של דקרט על הבעות פניהם של ילדים העומדים לפוץ בבכי, ויש בהם הרבה חמלת והבנה.

ספרו "עלרונות הפילוסופיה" הוקדש לתלמידיו המבריקה, אליזבת נסיכת בוהמיה. שמע היידמות הזאת הגיע לאוזני קリストינה מלכת שוודיה. גם אני רוצה, אמרה הود-מעלתה. תביאו לבאן את הצלפת שילמד גם אני! ספינה-קרוב נהוגה בידי אדמירל הגעה לחוף הולנד. דקרט עלה לסיפון והגיע לאדמירל מכתב סירוב חנפני. כעבור כמה ימים שמע שספינה-הקרב חזרה, ושאהזונה מהצפון ממש לא אהבת שמסרבים לה, והחליט שלא כדאי להרגיז אותה. טעות גורלית: חורף אותה שנה היה מהగרוועים במאה ה-17, ודזוקא אז החליטה הוד-מעלתה (שהתגלתה עם השנים כሞפרעת בinalgומית) שהזמן hei מתאים ללימוד פילוסופיה זה חמיש בבוקר. כך מצא המסקן את עצמו יוצא מהמיתה באמצעות הלילה, לא בדוק בשעה לה התרגל. בימים חלה שגריר צרת בשטוקהולם. דקרט, שכבר התפאר בטיפול מוצלח שהעניק לבליין פסקל בזמן מחלתו, טיפול גם בשגריר עד להחלמתו, אבל אז חוף דלקת-ריאות עצמו. רופא החצר בא לביקור. אבקש את פרדונך, אמר החולה בנימוס, אבל אני במקרה גם מומחה עולמי למחלות ויכול לטפל בעצמי. מצבו התדרדר, והוא הספיק להוריש חלק מהונו לאומנתו וכעבורה עשרה ימים נפטר.⁸ השודדים קברו את הcorpore夷 בבית-קברות להיינוקות שלא נטבלו, עד שצרצה מוכת-התהיפות תבעה וקיבלה את בנה הדגול, ליתר דיוק: קיבלה את רבו, כי בעניין רבים נחשב דקרט לקדוש, ולקתולים יש מנג גנמד לזלוש ולשמור הלק-חילוף של קדושים בתור קמעות. הפעם, מסתבר, התקשה הבר-מין לבrhoה מהמעריצים בדרכו חזרה אל המולדת.

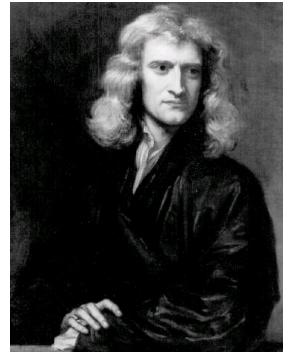
⁸. נראה שדזוקא בלוטת האctrוביל, שדקרט ייחס לה את מושב הנשמה, היא שהחישה את קצו. האctrobil מפריש מלטוניין, האחראי לשינה ולמצב הרוח. לאדם שהתרגל לשעות היום של צרפת וארצות השפלת, המעביר לשעות אוור בודדות ביום מהבודאי הביא דיכאון וחרדה, שהוסיף להשפעתו החרסנית של האקלים.

*

יש סיפור על דקרט ההולך לבית המטבחים לנתח שם את הנבלת היומית ופוגש שם הולנדי צערץ מציר עור של שור. למה אתה מציר דוקא חיות מותה? שואל דקרט. עונה הבוחר: הפילוסופיה שלך גוזלת את נשותינו, ואילו אני אשיב את הנשמה אפילו לפגרים. לאמן זהה קראו רמברנדט.

הסיפור הזה – אמיתי או לא – מלאו אותו עצב. צר לי על רמברנדט, שימוש עני ומורעב בלי לדעת שמוזיאונים באראה"ב יקנו בעתיד את ציוריו בסכומים שש-ספרתיים. וצר לי על דקרט, שהיצור היחיד שעורר בו אהבה ייגזל ממנו בצורה טרגית. אבל ההתרסה של רמברנדט מעוררת בי גם שאלות ענייניות יותר לגבי הצלחתו המזהימה של דקרט להפוך כל תנועה למשואה. זהה תחילה של דרך מפוארת, אותה י Mishik בפרקם הבאים ניטון ואחריו איינשטיין ו邏ינקובסקי, שבה הפהוק כל תנועה לביטוי מתמטי שממנו ניתן יהיה ללמידה דברים מדהימים שאיש לא שיער. ובכל זאת, משחו ילק וייעלם ככל שתגבר המתחמיזציה הזאת של התנועה: התנועה עצמה. הפרדוקסים של זנון (ר' 2.3) יזרו להציק לנו ככל שתגדל הצלחת הגישה הזאת.

אבל עוד היום גדול. בפרקם הבאים נלמד קודם הצלחה עצמה ורק אחר-כך נשאל מה היה המהיר שלא.



8. ניוטון מאחד שמיים וארץ

לראות עולם בגרגר של חול
ורקיע בפרה השדה,
להזיק את האינסוף בcanf-יד
ונצח בשעה ייחודה.
ויליאם בליביק

בערב חג-המולד בשנה בה כבה באחוזה ארכיטרי המאור הגדול של איטליה⁸ נולד באחוזה וולסט'ורף שבחלב לינקנשייר באנגליה תינוק חלש לאלמנה הטריהה הנקה איסק-ניוטון, שלא האמינה כי יהיה עד הטבילה. היא טעתה בשמוניים וארבע שנים. בדברי-ימי המדע מעטות ההצלחות עוצרות-הנשימה כמו זו שנעשה ליתום העיר זהה, איזיק ניוטון (1642-1727), שנשאר קטן-גוף אבל נעשה ענק-רוח, ובטרם מלאו לו עשרים וארבע לקח את התיאוריות להן הקדישו ארבעת קודמו את כל חייהם וגיבש אותן לכמה חוקי-יסוד המסבירים כל תנועה בשםים ובארץ. “אם הרקhti ראות,” אמר, “הרי זה משומם שעמדתי על כהפי ענקים.” אל הענקים האלה התוועדו בפרקם הקודמים, ועתה יוכל לראות איך מתמזגות גיניותיהם השונות תחת שרביטו של ניוטון להרמונייה אחת, אחידה ורבת-עוצמה.

אבל שום דיון רציני בניוטון לא ניתן בלי השאלה הלא-נוחה ששאלנו בפרק 3.6: האם גאננים הם גם אנשים טובים? ראיינו שההתשובה לכך היא בדרכ-כלל היובית, ופוגשנו (ועוד נפגוש) כמה מדענים גדולים שהיה כיף להיות חבר שלהם. לא הפעם. סובלנות? חמלת? כבוד לוזלת? אל תצחיקו אותו. ניוטון, לצד גאננותו הבלתי-נתפסת, היה, בפשטות, מניאק מרושע ורודף-נקם. לצד מה שהנהיל לנו נחוודע אם כן גם אל האיש עצמו.

1.8 תנאי ההתחליה
לא ציריך להיות פיסיולוג גדול כדי להבין שאופיו החרגיג של ניוטון קשור בדרך בה גודל.^{51,69} אביו נפטר לפני לידתו ואמו נישאה שנית כשהיה בן שלוש, נטשה אותו בידי סבתו ועברה אל בית בעלה המכומר ברנברס סמית' באחוזה הסמוכה, שם ילדה שלושה ילדים. מה חשב הילד על אמו הגרה ממש מולו עם משפחתה החדשה אפשר להבין מווידי על ארבעים ותשעה חטאיהם, שהחיבר בגיל תשע-עשרה: לצד “השפרצת מים ביום קדשך” ו“הכאת אחותי”, “מתוגברים ב’הכחשה שעשית כי’” ו“חזרה לסורו”, “מופיעים האישומים” (13) أيام על אביו ועל אמי סמית' לשורוף אותם ואת ביתם עליהם. (14) תפילה למות ותקווה שיפקד כמה אנשים.” שני סעיפים אלה הם בענייני מכמורי-לב במיוחד. מהכינוי “אבי” לسمית' עולה דמות ילד זנוח המחשש אבא אפילו למי שאסר עליו לבוא אל ביתו, ו“תפילה למות” מלמדת על דיכאון קשה. כמו רבים במצבו, לימד הילד הזה לעשות את המות לאחרים כשיצבור די כוח בוגרותו.

ఈ התאלמנה הנקה בשנית שבה לוולסט'ורף עם שלושת ילדי סמית'. היא הציקה לבנה הבכור והתנכלה למה שהיא יקר לו: לימודיו. כשהיה בן עשר שלחה אותו ללמידה בבית-ספר טוב, אבל דרשה שיחזור להיות איכר וינהיל את האחוזה שירשה מבعلاה. המלאך של הנער בתקופה זו היה מנהל בית-הספר, הנרי סטוקס, שמצא עצמו שב ומפיצר באיכרה

⁸. ניתןshima או מין סידור כזה בין האיטלקים לאנגלים, כי גם שייקספיר נולד בשנה בה מת מיכלאנג'לו, 1564. גליילאו, אגב, נולד באותה שנה.

הכורה והעקשנית שתثير לבנה להמשיך וללמוד, ומשלא הצליח ויתר אפילו על שכר-ההוראה שלו. לבסוף נעתה הינה ואייזק סיים את לימודיו בהצטיינות. סטוקס, דמעות בעיניו, שלח את תלמידו בן התשע-עשרה לאוניברסיטה קימברידג' שכבר אז נחשבה לעתיקה.

2.8. דרכם ככוכב מאלבינו

1666, שנה שההיסטוריה היהודית הייתה מדיפה לדרג עלייה – בה ארע הביזון של שבתאי צבי – ידועה דזוקא כ"שנת הפלאות" (*annus mirabilis*) בחייב ניוטן, עכשו סטודנט בן עשרים וארבע. זו הייתה שנה רעה גם לאנגלים כי מגפת דבר השטוללה בארץ ושריפה גדולה החריבה את לונדון. האוניברסיטאות נסגרו וניוטן חזר לבנות שנתיים באחוזה משפחתו. לעומת זאת כבר בלע את כתבי אוקלידס, קופרניקוס, גלילאו ואחרים. עכשו היה שoked על מחברת בכריכת עור אותה החל למלא ב-1661, ובה הניח את היסודות לכמה מקצועות: החשבון הדיפרנציאלי, המכניקה והאופטיקה. שני כישרונות החלו להבשיל בו באותו ימים: נסין קפדן ומהוכם מצד אחד ותיאורטיקן מזהיר מצד שני. הנה שתי הערות שנמצאו במחברותיו, המתמצחות יושר וגאוניות: א) "אפלטון חברי, אריסטו חברי, אבל האמת חברתי הטובה ביותר". ב) "טבעי ובתווחה להקיש את טבע הדברים מפעולותיהם זה על זה יותר מאשר מפעולותיהם על חווינו. הסבירינו ביחס לגוף ולנפש כאחד אין צריכים להיות מושפעים לא מזה ולא מזו".⁽²⁷⁾⁽⁵⁰⁾

המגיפה עברה, ניוטן חזר לקימברידג', סיים את לימודיו והתקבל לחבר סגל. מה עשה עם הרשימות שהביא מולסת'ורף? בפשטות: כלום. הוא לא פרסם אותן וקרוב לוודאי שהעולם לא היה יודע עליו כמה אנשים שהתרבו אליו ובשכנועים עדינים – הוא כבר נודע כמועד להתרצויותicus – הוציאו ממנו יצירה אחר יצירה. אחד מהם היה המתמטיקאי הצער איזק ברו, שווייתר על הפרופסורה בקיימברידג' לטובת משרת כומר האਰמן והמליץ על ניוטון לתקין שחתפנה. הוא חילץ מיד ניוטון מאמר קטן על החשבון הדיפרנציאלי וקיבל רשות להראותו לכמה חברים אבל לא לפרסמו (האישור ניתן רק כשניוטון היה בן 68 ובארו היה ז"ל עקב מנת-יתר של אופיו). אחרי שהמציא ניוטון את טלסקופ המראה, התקבל לחברה המלכותית הבריטית. נשיא החברה, הנרי (היניידק) אולקנבורג, גרמני לשעבר שייסד את חבר-העת המדעי הראשון (היוצא לאור גם כיום), היה גם הוא, למרבה המזל, אדם נעים וabhängig שידע לספוג את התרצויות-הכעס של הבהיר ולשדרו לפרסם עוד מרשימותיו הסודיות.

עם השנים התגלו בכוכב העולה קווי-אופי מוזרים יותר: שעות עבודה אינסופיות, פיזור-נפש קיצוני, הזנחה הלבוש והאכילה, ומעל לכל פגיעות איוונה שגרורה אותו לשרשרת מריבות. שנאה עזה ניטשה בין רوبرט הוק (1635-1703), מדען ואמן רב-צדדי וمبرיק אבל נטול כישرون מתמטי, שmedi פעם גם הקדים את ניוטון בתגלית זו או אחרת ובכך החריף את עצבונו. ניוטון לקח ממנו נתונים תצפיתיים והציג אותם במשוואות שלו בצורה שנתנה לו חוקי טبع מדוייקים. אבל בשhook, אדם רודף-מדון בעצמו, התלונן על שמו לא הוזכר במחקריו של ניוטון באופטיקה מיהר ניוטון לגנוו אותם. הוא פרסם אותם רק כעבור שבע-עשרה שנה, מיד אחרי מות הוק, כדי שיריבו לא יזכה ללמידה שהוא מהם. מאוחר יותר ינסה ניוטון ללא הצלחה להביא להשמדת כל כתבי יריבו, ונראה שהצליח להשמיד את הדיווקן היחיד ששרד ממנו. מלחמה אחרית ניטשה בין לבין אסטרונומים שקדן בשם פלמסטיד

(1719-1646). ניוטון היה זוקק לנוטונו התחפתיים לביסוס הฟיזיקה שלו, אבל כשןקלע לריב אתו עשה כל שימוש אפשרי בסמכותו, עתה כנשא החברה המלכותית, כדי שעבודת חייו של האיש תימחק מההיסטוריה. ועל כל אלה תאפיל פרשת ליבגינץ (ר' 8.5 להלן), שנוטון האשימו בગיבת תגלית החשבון הדיפרנציאלי. וגם בכל אלה לא יהיה די עד שהמלומד המתבודד יקבל תפקיד ציבורי רב-עוצמה שיאפשר לו לשולח אנשים אל מותם, ובו יעסוק בהתלהבות עד סוף ימיו.

3.8 על שלושה חוקים היקום עומד שנת 1679 מצאה את ניוטון במצב קשה: אמו הלטה באבעוות, הוא חבש את פצעיה וטיפל בה במסירות עד מותה. בשנה זו עבר התקף דיכאון. באותה עת החל להתקתב עם הוק על הביבזה, מה שכנהה דרבן אותו לרוץ את ממציו בהבנת כוח זה. בעבר כמה שנים נכנס לחייו עוד מלאך מסווג של סטוקס, ברו ואולדנבורג: אדמונד קלי (1656-1742) אסטרונום צער, טוב-מזג וכופר גמור. בחור זה עתיד היה לגלוות כי כוכב-השביט שהופיע ב-1686 הוא אותו שביט שהופיע ב-1607, ב-1531 וכן הלאה במרוחים של 75 שנה, והוא קרוי כיום על שמו. ב-1684 שיערו קלי והוק שהחוק השלישי של קפלר נובע מכוח משיכה המשמש הנחלש ביחס הפוך למרחק בין כוכב-הlection⁸, וגם המסלול האליפטי המפוזם של קפלר ניתן להוכיח על בסיס כוח זה. הלי יצא מלונדון לקיימברידג' לבקר את ניוטון, הצלחה להתחבב עליו וקנה את ידידותו. הוא שאל אותו מה תהיה צורת מסלולי כוכבי-הlection אם פועל עליהם כוח משיכה הנחלש בצורה כזאת עם המרחק. "אליפסה", אמר ניוטון. "הכוחתי את זה באיזו מהברת, אבל אני לא זוכר איפה שמתי אותה." האלי הבין היטב את גודל התגלית: ניתן לגזר את חוקי האסטרונומיה מחוקים פיסיקליים! אולי, שאל בעדינות, אפשר לקבל את המחברת שלך לפרסום? טוב, אמר איש המפוזר, אהפesh אותה. שבועות עברו, הלי כבר התיאש, ואז התברר שהביקור גרם לנוטון, שהתקרב עתה לארבעים, לפיצ' מהודש של יצירתיות. הוא חזר לרישומיו מ"שנת הפלאות", בדק ותיקן כמה טעויות בחישוביו ומיד ראה את התאמתם היפה לנחותים האסטרונומיים שכבר היו ידועים. הוא המשיך ופירט את תגליותיו בשאר ענפי הפיזיקה (חוץ מאופטיקה, כי ביניים הפק הוק לשנווא-נפשו), ועד מהרה התפתח ספר עב-cars! האלי הtagים לסייע בעריכה, החברה המלכותית הזדרזה להעניק את שירוטי ההדפסה שלה, וכשנגמר לה התקציב התנדב הלי (שמצבו הכספי היה גרווע באוטם ימים) לממן מכיסו את ההוצאות. הוא גם כתב הקדמה חנפנית ואפילו שיר-הלהל למחבר! בעבר שנה וחצי של עבודה מואצת, ב-1687, הופיע אחד הספרים המשפיעים ביותר בהיסטוריה: *Philosophiae Naturalis Principia Mathematica*, "העקרונות המתמטיים של פילוסופיית הטבע".

על-פי מופת ה"סודות" של אוקלייס, גם ה"עקרונות" בניו במתכונת לוגית קפנדית: מינימום חוקי יסוד, המקבילים לאקסומות של המתמטיים, שעליהם ניתן להסביר כמה שיוור תופעות.

8.3.1 השחקנים מגדירים זה את זה שלושה מושגים מהיבים הגדרה מדעית לפני שניגש ללמידה חוקי ניוטון:

⁸. כאן התשובה לחידה שהשאرتி לכמ בפרק 5.4 על הקשר, שקפלר עצמו לא היה מודע לו, בין חוק ריבוע המרחק הקובע את עוצמת האור לבין שלושת חוקיו על תנויות כוכבי-הlection.

מאסה היא כמות החומר של הגוף, שאotta נוכל למדוד בפשטות ע"י שקילתו, אבל יש למאסה עוד צד: ההתנגדות לשינוי במצב התנועה. הנה הדוגמה: נסו לדחוף בדמונכם אבן החץ ואחריה סלע. לכארה, העובדה שדחיפת הסלע קשה יותר נובעת מהעובדה שהוא "שוקל" יותר. אבל ניוטון הבין שההתנגדות הסלע לדחיפה מופיעה גם **בנפרד מהכבדה**. במילים אחרות, גם אסטרונאות בחלל החיצון יתקשה יותר לדחוף סלע מאשר אבן החץ, למרות שני הגוף מרחפים בחלל. להשלמת ההבנה של מושג המאסה דמיינו עכשו את האסטרונאות הזה מנסה לעצור בחלל אבן החץ נעה ואחריה לעצור סלע הנע באותה מהירות. שוב, עצירת הסלע הגדול תהיה קשה יותר. מאסה, אם כן, מבטאת שני דברים, שהקשר ביניהם הוא קצת מסתורי: א) משקל ו-ב) מידת ההתנגדות לשינוי מצב התנועה. מושג נלווה הוא **מרכז המאסה** (המורכב גם בצורה הפשוטה מדיקטת "**מרכז הכבידה**"). זהה נקודה דמיונית בגוף המתנהגת כאילו כל המאסה של הגוף מרכזות בה. כל כוח הפועל על הגוף פועל, אם כן, כאילו פועל רק על מרכז המאסה שלו. אם יש לגוף צורה מתאימה, מרכז המאסה שלו יכול להיות אפילו מחוץ לו, עיקרונו המאפשר למרכז המאסה של מכוניות להיות קרוב לכביש, או לאתלט לקפוץ מעל מوط בעוד מרכזו המאסה שלו עבר ... מתחתיו!

מהירות היא מילה המציבה בעיה קשה למחבר העברי כי באנגלית התייחדו לה שתי מילים שונות: speed מצינית סתם מהירות בעוד velocity פירושה מהירות **בכיוון מסוים**. בספר זה, לצורך הבירויות, משתמש במונח "מהירות כיוונית".

תואוצה, בעקבות גליילאו, היא מושג מרכזי גם בתורת ניוטון. בהתבסס על הגדרתנו הקודמת, נגידר תואוצה כ"שינוי מהירות הכוונית במשך יחידת זמן". אם אני נוסע במכונית וرك משנה כיוון בלי להאיץ, ככל זאת הייתה פה תואוצה למורות שלא הגברתי את מהירותי. תואוצה מופיעה, אם כן, בין אם אני מוסיף לחץ על הדושה, לחץ על הבלמים (תואוצה שלילית או תואוצה) או סתם מסובב את הגהה.

כוח, השחקן הראשי של שלישיית הדרاما הניאוטונית, ניתן עתה להגדירה בפשטות כ"מה שגורם לתואוצה". כשאנו דוחפים משהו, או עוצרים משהו נע, או משנים את תנועתו בדרך אחרת, הפעלנו עליו כוח. סוג אחד של כוח הוא הכבידה, וכוחות אחרים הם המגנטיות והחישמל, אליהם נתוודע בהמשך.

8.3.2 דוקי היסוד

אם הבנתם את שלושת מושגי היסוד – מאסה, תואוצה וכוח – שלושת חוקי התנועה של ניוטון יובנו לכם ללא קושי:
א. כל גוף ימשיך במצבו, מנוחה או תנועה אחידה בקו ישר, אלא אם כן הוא מאולץ לשנות מצבו זה עקב כוח חיצוני המופעל עליו.

* מונח זה ממחיש את יכולתה המפליאת של הפיזיקה לזהות יסוד קבוע בהרבה שינויים מבלבלים. דמיינו למשל בומרגג עף באוויר ומסתובב סביב עצמו בזמן מעופו: כל נקודה בboomrgg סובבת במעגלים רבים, אבל מרכז המאסה שלו (הנמצא מחוץ לו) עושה פרבולת רציפה ללא סתיות! או דמיינו טיל המתרפוץ לרסיסים רבים בזמן מעופו. מרכז המאסה של הטיל הופך עתה למרכו המאסה של כל הרסיסים (כלומר נקודה דמיונית באוויר), אבל הנקודה הזאת ממשיכת את דרכה בדיקוק כאילו הטיל נשאר שם!

ב. תאוצתו של גוף נמצאת ביחס ישר לכוח השקל^א הפעיל עליון, כיוונה כלפיוν הכוח השקלול, וגודלה נמצאת ביחס הפוך למאסת הגוף.

ג. כאשר הגוף מפעיל כוח על הגוף שני, הגוף השני מפעיל על הראשון כוח שווה בכיוון הנגדי. החוק הראשון ידוע כ"חוק ההתמדה (אינרציה)". אם נדחף, למשל, אבן בחלל החיצוני, היא תמשיך בתנועתה, אףלו מיליון שנים, כל עוד לא יופעל עליה כוח אחר. מעניין: ניוטון עצמו בודאי הבחין שהחוק הראשון בעצם כולל בחוק השני. למה, אם כן, העניקה לו מעמד נפרד ולא כלל אותו בחוק השני כפי שהוא עושה בבודאי אוקלידס? נראה שהרגיש אנטואיטיבית שלמושג "קו ישר"^ב יש חשיבות מיוחדת. זה מהזיר אותנו אל הבדיקה של גלילאו: **אין הבדל בין תנועה קצובה למנוחה.** תורה היחסות תצדיק אינטואיציה זו במלואה.

החוק השני הוא "חוק התאותה". כדי לוודא שהבנתם אותו שימו לב לטעות טבעית מאוד של אריסטו, שגילהו וניוטון דורשים מأتנו להתגבר עליה. הנה, טוען אריסטו, אם נסתכל סביבנו נראה שככל גוף נע נוצר לבסוף. לכן, מצבם הטבעי של גופים הוא מנוחה, ואם גוף נע, זה מפני שהוא שפועל עליו כוח. על כך משיבים גليلאו וניוטון: טעות! דוחוק עצירה של גוף מעידה על כוח הפעיל עליון, כמו כוח המשיכה והחיכוך, שהם תופעות דמיינתיות כאן על כדור הארץ אבל לא בחלל. לכן, על הגוף הנע בתנועה קבועה לא פועל שום כוח.

את החוק השלישי, "חוק הפעולה והתגובה", אגדים בעזרתו הפעולה שהיא אני קם מכסי: אני דוחף ברגליי את רצפת הבניין, הנטווע חזק בקרקע כדור הארץ, אבל אני מצליח לדוחוף את כדור הארץ למטה בשל המאסה הגדולה שלו (החוק השני). בו-זמנן, פועל עליי כוח נגדי השקול לדחיפה, ומכוון שהמאסה של גופי קטנה יותר, התוצאה היא עליית גופי כלפי מעלה.

דוגמה נוספת בה משלבים החוקים השני והשלישי היא הכוח המרכזיופוגלי, שהוגדר ע"י האוקנס (ר' להלן) וימלא תפקיד חשוב בהמשך דיוונו. הנה דלי מים הקשור בחבל שמשהו מסובב במחירות באוויר. המים אינם נשפכים אלא נלחצים לקרקע הדלי, כלומר לכיוון הנגדי למרცז המעלג. כוח זה אינו כוח יסודי אלא שקול של שני כוחות: מצד אחד, כוח הסיבוב דוחף בכל רגע את הדלי להמשיך בקו ישר בכיוון הקורי "משיק" למעלג. מצד שני יש כוח אחר – משיכת החבל – המושך את הדלי למרცז. הדלי, ה"רוצח" להמשיך בקו ישר לפי החוק הראשון, מפעיל על החבל כוח נגדי לפי החוק השלישי, וכך מתקבל הכוח השקלול הלוחץ את הדלי בכיוון ההפרך למרცז ואת המים אל תחתית הדלי. אם יתנתק החבל, ייעלם הכוח המושך למרცז, ואז ייעלם גם הכוח המרכזיופוגלי, ולכן יעופו הדלי והמים בכיוון המשיק למעלג.

"**ואיך פירושו הוא, זיל גמור?**" (השאר הוא הפירוש, לך השלם你自己). תורה הכוחות של ניוטון הchallenge מיד להסביר כל תנועה בשמים ובארץ.

^א. "כוח שקלול" כי יתרחק שיפעלו על הגוף כמה כוחות בכיוונים שונים או מנוגדים. הכוח השקלול הוא "הסכום הוקטורוני" של הכוחות האלה.

4.8 הביבידה

ב”שנת הפלאות” החל ניוטון גם במחקר הביבידה (גרווטיציה). מגלילאו למדנו שגוף נופל נתון לתאוצה, ככלומר בכל רגע גדולה מהירותו. אם כך, אומר החוק השני, על גוף זה פועל כוח. ניוטון פנה להגדרת כוח זה.

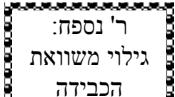
הסיפור מוכר: ניוטון ראה תפוח נופל ושאל: למה הוא לא נשאר במקומו גם אחרי שניתק מהעץ? ואז חשב על הירח. לו היה הירח נתון רק להשפעת החוק הראשון, היה ממשיך ובורח לנו בכו ישר. שני הגוף, אם כן, מפגינים תופעה דומה: התפוח הנופל שומר על כיוונו אך משנה את מהירותו, ולעומתו הירח שומר על מהירותו אך משנה את כיוונו. בשני המקרים, אם כן, מופיע **שינויי המהירות הциונית**, כאמור: גם התפוח וגם הירח הם בתאוצה. מה עוד אומר החוק השני? התאוצה היא בכיוון הכוח. הכיוון אליו מואיצים התפוח והירח הוא הארץ, ולכן הארץ היא מקור הכוח הפועל על שניהם.

עכשו שאל ניוטון שאלה חשובה: אם כדור הארץ הוא המפעיל את הביבידה, למה גוף גדול כבוד יותר מגוף קטן? תשובתו הייתה שכוח הביבידה הוא תכונה של החומר עצמו, וכך, את כובדו של התפוח, למשל,קובעים שני שותפים: לא רק כדור הארץ מושך את התפוח, גם התפוח מושך את כדור הארץ. במקרים אחרים, כל הגוף שסובבכם – כיסאות, שלוחנות, אנשיים, אפילו חלקיים – מפעילים כבידה אלה על אלה לפני המאסות שלהם. כיוון שהביבידה של גופים כאלה היא חלשה, ועל כלם מאיפה הביבידה האדירה של כדור- הארץ, איןנו מרגשים בה, אבל היא קיימת, וניתנת למידיה (ר' בהמשך). לכן, כשהתפוח נופל מהעץ, הוא מצית לשולשת חוק-היסוד. נת힐 דוקא בשלישי: שני הגוף נמשכים זה אל זה באותה מידת מושכים זה את זה. אבל מי יבוא אל מי? אומר החוק הראשון: שני הגוף מתנגדים לשינוי במצבם, ככלומר התפוח שזה עתה ניתק מהעץ “לא רוצה” לשנות מצב המנוחה שלו, וגם כדור הארץ “לא ממש בא לו” לעלות לkrarat התפוח. מה אומר החוק השני? לשני הגוף נגרמת תאוצה, השווה לנוכחות הדדי הפועל עליהם מחולק במאסה של כל גוף. לכדור הארץ מסה כל כך ענקית עד שתתפוח יצטרך לחכות הרבה מילוני שנים כדי שכדור הארץ יתקרב אליו. לתפוח עצמו, בשל המסה הזעירה שלו, יש יכולת המתהה הרבה יותר חלשה ולכן הגיע אל הארץ תוך הרף-עין.

ומה לגבי השימוש? גם סביבה מתחקים מסלולי כוכבי-הלכת, וגם כאן משמעות החוק השני היא שהשימוש מפעיל עליהם כוח.⁸ וגם במקרה זה, הכוח שפעיל השימוש על כוכבי-הלכת עומד ביחס ישיר גם למסה של השימוש וגם למסה של כוכבי-הלכת עצמו.⁹ לעומת זאת, כשיין ניוטון לשולשת חוקי קפלר, הבין שהם רק מקרים פרטיים של שלושת חוקי התנועה שלו, החלים לא רק על כוכבי-הלכת אלא על כל גוף חומי.

⁸. קל להבין את החידוש של ניוטון מתוך השוואת לדרט: דקרט שאל מה דוחף את כוכבי-הלכת וכך הגיע להשערה מערכות “האפק הקוסמי” סביב המשם. ניוטון, לעומת זאת, שאל מה מסיט את כוכבי-הלכת מה坦ועה בכו ישר, ומיד הבין שהגורם נועד בשם עצמה.

⁹. אם נזכיר כאן במונח “מרכז המסה” אליו התווידנו למעלה נוכל להכליל את התופעה. כיוון שהשימוש גדול בהרבה מכוכבי-הלכת, מרכזו המסה המשותף לה ולכוכבי-הלכת נמצא הרבה יותר קרוב אליה מאשר לכוכבי-הלכת – למעשה ממש בתוכה. ככלומר: גם השימוש סובבת סביב המרכז הזה, רק שה坦ועה בקווי מוגשת כיוון שהוא נמצא בתחוםה. זה לא חייב להיות כך: כshawdlo של כוכבי-הלכת מתקרב לזה של השימוש, מרכזו המסה נמצא אף הוא בין שנייהם, ושניהם סובבים סביבו. זו התופעה הידועה של “כוכבים כפולים.”



כך, בשורה של צעדים מתמטיים פשוטים ומוזהירים, הצליח ניוטון להחלץ מהנתונים האסטרונומיים חוק כללי:

חוק הכבידה: בין כל שני גופים פועל כוח השווה למכפלת המאסות שלהם, כפול המספר הקבוע G, חלקו המרחק ביניהם מוכפל בעצמו.

נשאר רק לגלות את ערכו של G. ניוטון חישב אותו באופן גס כשהציג במשוואת החוק את המאסות המשוערות של הארץ והירח, שאות נפחיהם כבר חישבו היוונים. בואו נקבל ערך מדויק יותר.

5.8. שונאים מוצאים מוצא את ה-G של היקום לאנגלים הנחמדים יש דרך משליהם להגדיר אדם המתנהג בצורה שונה משונה: לא "קוקו" ואפילו לא "מזר", אלא מונה גאותרי מכובד ששימושם גם אותו בפרקם הקודמים: "אקסצנטרי", ככלומר חורג מהמרכז. גם אני רוצה להיות נחמד, ולכן אומר שהנרי קונדייש (1731-1810) היה קצת אקסצנטרי, ככלומר, קצת הרבה: הוא לא סבל אנשים, בעיקר לא נשים, לבש בגדים עתיקים, השמיע צויצים (!) ועשה הכל כדי שלא ידברו או יגשו אליו. אפילו משרתו (הוא היה מיליוון, אם כיippi בפשתות) קיבלו ממנו הוראות על פתקים.

קונדיישקבע את ערכו של G בניסוי פשוט (שכאן עשייתי אותו קצת יותר פשוט) ומדדיק. שני כדורי עופרת קטנים חוברו לשני קצוותיו של מוט שהיה תלוי מן התקורה בדיקן מרכזו, כמו מאזניים. למרכו המוט הוכרה מראה שאליה כוונה אלומת אור שהוחזרה אל הקיר ממול. עכשו קירב קונדייש שני כדורי עופרת גדולים, משני ציווילים הפוכים, אל שני הצדורים הקטנים שבקצות המוט. האלומה שהוחזרה מהראי שינה מעט את כיוונה. נותר לקונדייש רק לחשב מתוך סטיה זו עד כמה זזו מקומות שני הצדורים הקטנים עקב משיכת הגודלים.

אקדמי ואוצר כי בניתוחים קבעו אנשים יחידה למדידת הכוח: הכוח הדרוש להאייז קילוגרם אחד במטר לשנייה בריבוע נקרא, כייא וכנהה, ניוטון אחד. הערך המדוקיק של G הידוע כיום הוא אם כן 6.672×10^{-11} ניוטון לשתי מסות בנות 1kg הרוחוקות זו מזו מטר אחד, שזה ממש- ממש קצת: אפילו כשהתקרבו לגודר-שחקים ענק לא תרגשו את הכבידה שהוא מפעיל עליום, אפילו אם גם הבניין תרחפו בחלל החיצון. אבל מה שבאמת מופלא הוא שהקלוש הזה הוא אוניברסלי, ככלומר שולט בכל היקום.

6.8. החשבון המוזר אם קופרניקוס, קפלר וගיליאו הפילו עמודים במקדש האристוטלי ובניו עליהם מבנה חדש, איך נתאר את פעולה של ניוטון? ניסוח סביר יהיה זה: הוא חפר עמוק מתחת למבנה החדש, העמיד לו יסודות חדשים, חזק וכיסה אותם בעפר, עליה חזרה אל הבניין, הוסיף לו אגפים חדשים, ולסיום בנה מסדרונות שחיבורו בין כל אגף ואגף. עוצר- נשימה, נכון? אבל זה באמת מה שניתו עשה: הוא הניח יסודות חדשים למתמטיקה ואז המשיך את בנין תחומי הฟיזיקה השונים המבוססים עליהם. אגב כך, הוא גם הראה דרך להתמודד עם הפרזוקס העתיק של זנון (ר' 2.3) בנוגע לזמן. "אולי הצעד המחשבתי הגדול ביותר שזכה אדם לעשות אי-פעם", כינה איינשטיין את החשבון הדיפרנציאלי.⁽¹⁶⁰⁾ בואו נתודע אליו.

6.8.1. איך לקלול משהו מהרבה-הרבבה אפסים במרקן החשבון החדש עומד יצור מתמטי מוזר, "גודל שואף לאפס", עם הגדרה קצת חולנית: "גודל מאפס אבל קטן מכל מספר אחר". נא להסביר: הנזורת.

מתמטיקאים רבים לדבר על "התעלול הנבז" שעשה ניוטון כדי לגורום לנגורת שלו להיות גם אפס וגם לא אפס לפי החשך, והוא מוסבר בנספח. אם תרצו לקבל מושג אינטואיטיבי על התעלול דמיינו את ניוטון בא לפיצוציה וմבקש פחית בירה. הוא קורא את הכתוב על הפחית ואומר למוכר: "רגע, כתוב פה שהרופאים אומרים שאלכוהול מזיך לבריאות, אז תביא במקום זה חבילת סיגריות." הוא מקבל את החבילה והולך.

"סליחה," קורא אחורי המוכר, "לא שילמת על הסיגריות!"

ניוטון מסובב ראשו ומביט בו כלא-מאמין. "ולמה שאשלם? הרי קיבלת במקומן פחית בירה חדשה!"

"אבל..." מגמג המוכר, "גם על הבירה לא שילמת!"

"מה?! תגיד, אתה לא קרוב של לייבניץ במקורה? איך אתה מעז לבקש תשלום על משהו שלא לךחתי מכך?"

"אבל כן לךחתי סיגריות..."

"ואתה, נודניק, כן קיבלת בירה!"

זה ברור מה שנירטו עשה עם הנגורת: פעם הניה שהיא קיימת ופעם שהיא לא. חמוש בשיטה הדו-פרצופית הזאת, הצליח לפתור בעיה כמו היישוב נפה הבית: חבית, כידוע, אינה גליל פשוט אלא מתרחבת באמצעות עצמה ולכן משווהת הגליל אינה מתאימה לה. גודלי המדע לפני ניוטון התהבו בעיה זו ומיצאו לה פתרונות חלקיים: ארכימדס, פרטמא, וגם יידיננו קפלר, שלקראת תנתנו עם סווונה התפונה לחזור את נפה הבית הין שקנה. בשיטה של ניוטון, ניתן היה להתייחס לחבית כאלו אוסף עיגולים, כל אחד ברדיוס שונה, שעוביים אפס, אבל יש אינסוף עיגולים כאלה, ולכן יוצא מהם חבית שלמה. פילוסוף נודע בן זמנו של ניוטון, הבישוף האירי ברקלי (1685-1753), העיר ב글וג:

אם נרים את המשך ונצץ תחתינו... נגלה ריקנות גדולה, אפלה ובלבול; ואולי, אם איני טועה, ממש בדברים בלתי-אפשריים וסתירות... אלו אינן כמויות סופיות ולא כמויות קטנות באופן אינסופי, ועם זאת הם עדין אין לא-כלום. האם לא נוכל לקרוא להן רוחות רפואיים של גדלים עזובים ששבקו חיים?⁽¹²⁶⁾

היתה רק בעיה אחת, קטנטנה: השיטה הזאת עבדה.

8.6.2 ייש מ (אי נסוך) אי

נתחיל בבעיה פשוטה. הנה מעגל. מה שיפוע הקו שלו? עצם השאלה נשמעת טיפשית. קל להגדיר את השיפוע של קו ישר, למשל, כביש: "בכל מטר הוא נעשה נמווק ב-10 ס"מ." אבל אם שיפועו של הכביש נעשה תלול יותר **מנקודה** **לנקודת**, כמו במעגל, הגדרת השיפוע ניתנת רק **בערך** ע"י קו דמיוני קצר. כדי שהדיקוק יהיה מושלם, חיב הקו הזה להיות הכי קצר שאפשר, ככלומר באורך... נקודה. אבל ממתי יש **לנקודת** שיפוע? המתמטיקאים הקדמונים הצביעו, בהיסוס ובהרבה התנצלויות, להשוו עלי המעגל אליו הוא מצלע עם הרבה-הרבה צלעות קטנטנות, ולהגדיר את השיפוע שלו בכל נקודה בהתאם שם אחת הצלעות האלה. בא ניוטון והביא למתמטיקה את מושג ה"**נגזרת**". את היצור הבלתי-סביר הזה, מעין "קו ישר באורך נקודה", הראה ניוטון איך ליחס מתחזק נסחת הקו העקום כולם שאותה, כזכור, כבר נתן לנו דקרט בפרק 7. הנגזרת, אמר ניוטון, היא השיפוע המדויק של הקו העקום. קל להיווכח באמינות השיטה הזאת כשמדבר במעגל, כי אפשר למצוא את

המשיק למעגל הזה בשיטה חוקית: נשרטט את הרדיוס שלו ונציב בסופו קו מאונך לו. והנה, מה הנגזרת של ניוטון מתאפשר אותו משיק. לכן, הodo כולם, אפשר לסמן על הנגזרת גם כאשרנו רוצים למצוא את השיפוע של עקומות מסווכות יותר, שבחן לא קיימת שיטה חוקית.

כמו הזוגות חיבור-חיסור וכפל-חילוק, גם לנגזרת יש בן-זוג הפוך, האינטגרל, וגם הוא בניוי על הגודל השואף לאפס. נזהור אל העיגול שלנו ונשאל שאלה משלימה: מה שטחו? גם כאן נוכל להתחכם ולהשתמש בנוסחה הידועה למקורה זה,² אבָל לא תמיד זה יהיה עיגול; לעיתים זו תהיה אליפסה או צורה שונה יותר. איך, אם כן, נמצא את השטח? אפשרות אחת, מאוד לא מדעית, היא למלא את העיגול בהרבה-הרבה מלכינים צרים וצפפים. אך שטח כל מלבן קל לחשב – אורך כפול רוחב – ואז נחבר את שטחי כל המלבנים יחד. ברור שזה "חיפוף", כי המלבנים אינם מלאים לגמרי את העיגול אלא משאירים צ'ופצ'יקים דמיי משולש שני הצדדים. אילו היו צ'ופצ'יקים אלה סתם מושלשים, היינו מודדים את שטיהם ומוסיפים אותם לשטחי המלבנים, אבל הבעיה היא שאללה לא ממש מושלשים: גם מהם ייוותרו צ'ופצ'יקונים בצורות שאוותם נחוץ למלא בעוד מלכינים ומושלשים קטנים עד אין סוף. ברור, כמובן, שהדיקijkן יגדל ככל שייהיו המלבנים צרים יותר, אבל הם לעולם לא יכסו ממש את כל שטח העיגול, אלא אם כן יהיה עובי של כל מלבן... נכוון, שוב אפס, ושוב, נחוץ אינסוף מלכינים כאלה!

אל דאגה, אמר ניוטון. האינטגרל שלו יעשה לכם את העבודה. ושוב, נוכל להיווכח בנכונות השיטה כשננסה אותה על צורה פשוטה כמו עיגול: **מתකבת בדיקות** אותה התשובה כמו ה-²אך המוכר.

כך נולד ה-"אינפי" או ה-"חדו"א" (חשבון דיפרנציאלי ואינטגרלי), חישוב הגדלים השוואתיים לאפס, שבאנגלית נקרא בפשטות calculus, החשבון.

3.6.3. חזקה אל הפיזיקה

בוודאי הבנתם איך העקומולוגיה הזאת נותנת בסיס חדש לפיזיקה: הפיזיקה חוקרת שינויים. את השינוי ניתן לייצג ע"י קו בשיטת דקרט, ואת קצב השינוי ע"י העקומות של הקוו הזה. גילוי תוכנותיה הקוויות של נקודה הוא אם כן מהפכה גם במתמטיקה וגם בפיזיקה.

סוג השינוי הפשטוט ביותר הוא שינוי המיקום, כאמור התנועה, ושינוי התנועה הוא התואיצה. מעכשו, אם נדע את מצבו ההתחלתי של גוף, נוכל לקבל את מקומו, מהירותו ותאוצתו בכל רגע לא ע"י ניסויים מייגעים אלא בעזרת המשוואה של ניוטון. קל להציג את השיטה הזאת על הנפילה החופשית של גלילאו (פרק 6.2): משוואת גלילאו נותנת את מקומו של גוף נופל בכל רגע (ועם הסימן מינוס, כזכור, היא יכולה לעשות זאת גם לגביו גוף שנזרק כלפי מעלה). ניתן לתאר תנועה זו בשיטת דקרט (פרק 7) כך שתיתן קו עקום – בהבדל אחד, שהפעם ציר אחד במערכת הצירים הוא ציר הזמן. בא ניוטון, עשוה למשוואה הזאת "גוזרה", כאמור מוצאת את הנגזרת של הקו המתאר את מקום הגוף בכל רגע, ועכשו אומרת לנו המשוואה את מהירותו בכל רגע. אם הגוף הזה הוא, למשל, טיל המשרטט במעופו את הפרבולה המוכרת, יכולה השיטה של ניוטון לומר לנו לבדוק היכן הנגזרת מתאפסת, כאמור, אייפה שיפוע הפרבולה נעשה אופקי, שהוא בדיקות השיא שממנו יתחיל הטיל לרדת. כך יכולים אנו לדעת לאיזה גובה הגיע הטיל, ומתוך כך גם לאיזה מרחק. הנה, מה שנראה כפלපול פילוסופי עקר על אפסים-שאינם-אפסים נותן תשובה מדעית לשאלות של חיים ומוות!

קיבלונו אם כן חשבון חדש. במקום המשוואה המוכרת, שלתוכה אנחנו מכנים מספרים ומקבלים את המספר המבוקש, יש לנו עכשו "משוואת-על" שלתוכה אנחנו מכנים משווה אחת ומקבלים משווה חדשה. כתבו, אומר ניוטון, משווה קרטזיאנית של גוף נע (פרבולת, אליפסה ועוד), רק שבמוקם לתאר את היחס בין צירי המרחב, כתבו אותה כך שתתאר את היחס בין המרחב והזמן: ברגע t_1 נמצא הגוף בנקודה x_1 , ברגע t_2 בנקודה x_2 וכו'. אם באמצעות "משוואת-העל" שלו, תעשו למשווה גזירה, היא תהפוך ממשוואת מקום למשוואת מהירות. עוד גזירה והיא תהפוך ממשוואת מהירות למשוואת תאוצה. ואם תעשו לה אינטגרציה, היא תהפוך את המשוואות בכיוון ההפוך, ממשוואת תאוצה למשוואת מהירות וממשוואת מהירות למשוואת מקום. כך, למשל, קיבל ניוטון מחדש את המסלולים האליפטיים של קפלר מתוך חישובים שהתבססו על כבידת כוכבי-הלכת. וכמוון, זו רק דוגמה בודדת. משוואות דומות, שבהן הזמן הוא הציר המתאר את השינוי, משמשות כיוון בהנדסה, ברפואה, בכלכלת ובכל תחום החוקר שינויים באופן כמוותי.

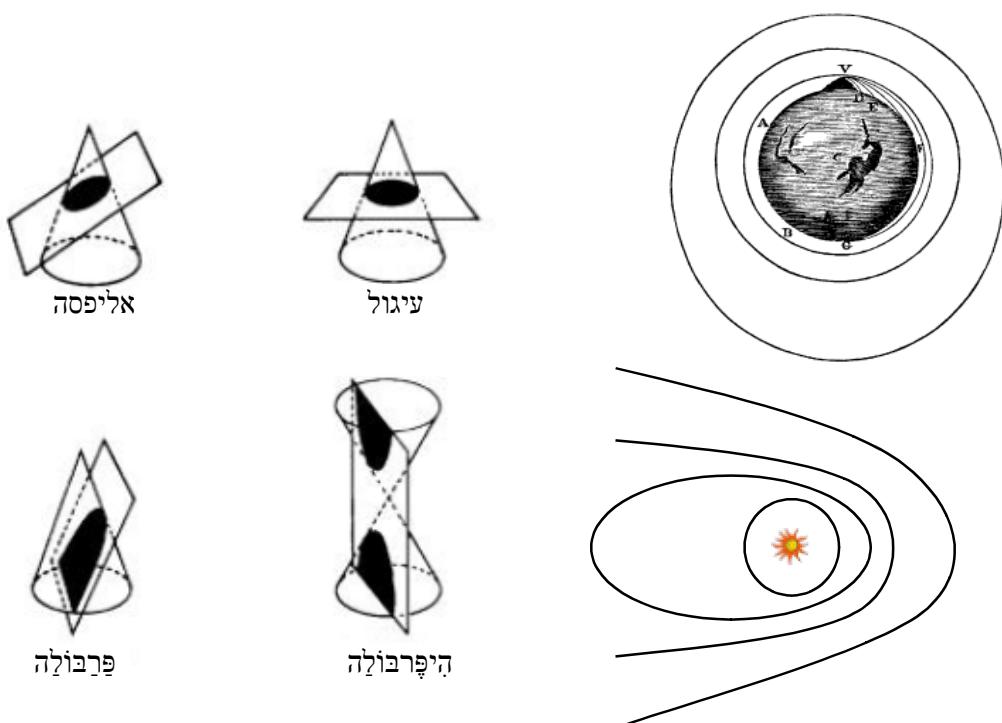
7.8 הענקיים שרים במקהלה אנחנו עדים עכשו לאחד האיחודים היפים בתולדות הפיסיקה: תהליכיים שונים-לכארה מתגים כפנים שונות של אותו תהליך, וכל אלה מתאחדים עם אחת מהיפות שבתגליות המתמטיקה!

הנה מה שאנו יודעים על התנויות הקשורות בכבידה: א) פטולמיאוס ו קופרניקוס ייחסו לגרמי השמים תנועה מעגלית, ב) קפלר הראה שכוכבי-הלכת נעים באליפסות, ג) גיליאו תיאר את המסלולים הפרבוליים של קליעים הנורים על הארץ, ו-ד) ביום ידוע שיש אסטרואידים המגיעים למערכת השמש מהחלה החיצון ובהשפעת כבידת השמש "עושים פרסה" אחורינית בפרבולת או בהיפרבולת. במקביל: א) אפולוניוס הראה לנו בפרק 7.3 כי כל המסלולים האלה, מהעיגול עד ההיפרבולה, שייכים לאותה משפחה: דהיינו חתכי החירות, וב) דקרט הראה לנו שם אך כל הצורות הללו ניתנות לייצוג ע"י אותה מערכת משוואות ריבועיות.

עכשו בא ניוטון, חמוש באינפי שלו, ומוכיה: כל המסלולים האלה הם וריאציות של אותה הופעה, הנפילה החופשית!

ראשית, אין הבדל של ממש בין אליפסה ומעגל. מעגל הוא פשוט אליפסה שנייה המוקדים שלה נמצאים באותו נקודה (אקסצנטריות אפס). ואכן הרבה מסלולים לווייניים, כמו אלה של הארץ והירח, הם מעגלים כמעט מושלמים. שנית, כשליליאו תיאר את מסלולו של טיל הטס באוויר כפרבולה, הוא צדק רק בערך. הטיל היה מشرطט פרבולה לו הארץ הייתה שטוחה, כך שכוח הכבידת כוכב היה ומשיך אותו בכל נקודה לאוטו צד, בקוויים מקבילים. כיון שהארץ היא כדורית, מרכז המסעה שלה (ר' 8.3 לעיל) נמצא במרכז כדור-הארץ. לכן, כוח הכבידה אינו מושך את הטיל לאוטו צד בכל רגע במעופו אלא טיפה "אלכסון" אל מרכז כדור-הארץ. לכן, מסלול הטיל אינו פרבולה אלא קשת שהיא חלק מאליפסה ענקית. במילים אחרות, אילו היו דוחסים את כל כדור-הארץ לכדור קטן, היה מסלול הטיל נסגר לאליפסה שהכוכב הדחוס נמצא באחד מוקדיה, בדיק על-פי החיק הראשוני של קפלר! או, אם אתם רוצחים ניסוי יותר מעשי, תוכלו לחשב היכן ייפול הטיל לשיגורתם ולהפוך באדמה מנהרה בצורת אליפסה המשיכה את הקשת. האליפסה הזאת תkip את מרכז כדור-הארץ ותחזור אל פניה האדמה למקום שממנו שייגרתם את הטיל. אחרי שתצליחו לבנות מנהרה כזו בתוך הליבה הלהותת של כדור-הארץ (ואחר כך גם להתגבר על העניין הפROUT של סילוק כל האטמוספירה שלו), תראו דבר נחמד: הטיל ששיגרתם ייפול לתוכה פתח המנהרה, יגיח כעבור כשעה וחצי מהפתח השני, יעבור מעליכם שוב בקשת וייפול שוב לתוכה הפתחה הראשונית וכך ימשיך להkip את מרכזו כדור הארץ בתור ירח פיצפון העובר דרך בטן האדמה. ולבסוף, אם תשגרו את הטיל לכיוון כדור-הארץ למרחק רב בכוח ובזווית המתאימים, תקבלו פרבולה או היפרבולה. ואם תשגרו אותו מהארץ ישר למעלה והוא ייפול חזרה על ראשם, גם הקו הישר הזה הוא "היפרבולה מנונה", ככלומר מישור החיק לדופן החירות. בקיצור, כל מסלולי הנפילה החופשיים מشرطמים את חתכי החירות.

ニוטון עצמו המציא יפה את הקurve הזאת בין כל מסלולי הנפילה החופשית, המהווים



פשרה בין ההתמדה לכוח הכבוד. בצד הימני שבתוכה שלפניכם מופיע היצור המקורי של ניוטון ובו מסלולי קלייעים הנוראים בכיוון אופקי לאדמה. אם הקלייע לא נורה חזק מספיק, הוא יעשה קשת של אליפסה (שגלילאו חשב בטעות לפרבולה) סביר כדור הארץ לפני שיפגע בו. ככל שהירייה תהיה חזקה יותר, תתרחק הקשת סביר כדור הארץ עד שתתישא לעיגול או לאליפסה. במקרה זה, אם לא תהיה התנגדות האויר, הפגיעה הקלייע ללוויין. ידיעת היחס הנכון בין כוחות הכבידה וההתמדה מאפשרת כוונת אדם לשגר לוויינים בכל מיני מסלולים סביר הארץ והשימוש.

איירוניה: אפולוניוס היה גם אסטרונום שעבד במסגרת המודל הגיאו-центрלי, שרטט כל מני אפיזיקלים מעגליים ולא תיאר לעצמו שהאליפסה, הפרבולה וההיפרבולה, היוצאות מעבודתו הגיאומטרית, יתגלו כרלוואנטיות בתחום עבודתו השני, תנועות כוכבי-הלכת! וכך, מסלולים שונים ומשונים של גופים נעים, על הארץ וביקום כולם, נעשו כולם וריאציות על שלושה חוקי-יסוד. היטיב לומר המשורר אלכסנדר פוף:

طبָע וְחַקֵּיו נִוּטוֹן אֲפּוּזִים בְּלִיל שָׁחוֹר
וַיֹּאמֶר אֱלֹהִים: יְהִי נִוּטוֹן! וַיֹּהַי בְּלִיל אֹור.

8.8 אור חדש על האור
תחת ידי ניוטון הבשילה גם האופטיקה, שבפיתוחה החלו קפלר ודקרט, למדע מדויק. ניוטון פירק את אור השמש ליסודותיו בניסוי מפורסם בפשטותו: קרן אור העוברת במנסרת זכוכית התפרקה לצבעים שונים (המספר שבע הוא שרירותי כי הגבולות בין הצבעים הם הדרגתיים, וניוטוןלקח אותו בודאי מהדת). כשהשער ניוטון כל צבע כזה במנסרה שנייה, נשאר הצבע בעינו וגם זווית השבירה, ככלומר הזווית בה שינה האור את כיוונו כתוצאה מהמעבר במנסרה, נשארה יהודית לכל צבע. בניסויים משלים אחד ניוטון את כל הצבעים מחדש, וכתוצאה שב והופיע הצבע הלבן. הוא הסיק לפיכך כי אלה מרכיביו היסודיים של האור.

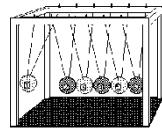
תגלית זו הובילה את ניוטון להשערה שהאור מורכב מחלקים זעירים, הטסים ב מהירות עצומה מקור האור, מתנגשים בעצמיים ומתרים משם לכיוונים שונים וכן מגיעים גם אל עינינו. עובדה, אמר ניוטון, כשאור פוגע בזווית כלשהו במשטה חלק – ראי הוא המשטה החלק ביותר – הוא מוחזר בזווית הפוכה, ממש כמו כדור טניס או ביליארד.

לדעיה זו כמו מתנדדים שטענו שהאור הוא גלים של חומר מאד-מאוד קלוש, אפילו יותר מהאויר, הנמצא בכל מקום. את הראשון, הוק, כבר פגשנו. מתנדד בולט יותר היה קרייסטיאן הוֹאָכְנָס⁸ (1629-1695), מתמטיקאי, אסטרונום (הוא גילה את הירח הראשון של צדק ואת צורת טבעתו) ופיזיקאי. ההולנדים, כזכור, כבר התפארו בתגליות חשובות באופטיקה: הנס לַיְפְּשִׂי (1570-1619) המציא את הטלסקופ, אנטוני פָּן לִינְהַיָּק (1632-1723) המציא את המיקרוסkop, וילפרודט פָּן רַזְ�ן סָנֵל (1580-1626) גילה את חוק השתברות האור ואפילו ברוך ספינואה (1632-1677), כשלא כתב ספרים שהרגיזו את חצי העולם, התפרנס מליטושים חדשים. האוכנס, שזכה להתחנד על ברכי דקרט, למד ממנו ליישם למחקר האופטי את כל המתמטיקה.

האור, אמר האוכנס, כמו הקול, הוא גל, ככלומר תנועה בלבד. נימוקו נשמע מזר במבט ראשון, אבל מחשבה נוספת מגלה כמה הוא מבריק. תארו לעצמכם שורת כדורים עומדים

⁸. לא שמעתם עליו אף פעם? אולי דזוקא כן: האנגלים שיבשו את שמו ל"היוגנס".





כך שהם נוגעים זה זהה. אם ניתן לראשו שביהם מכיה בכיוון השורה נראה אותו פוגע בצד אחד השני ו חוזר למקוםו, השני יפגע בשלישי וישוב למקוםו וכך הלאה, התנועה תעביר לאורך כל השורה ובסיופה רק הצדර האחרון יעוף החוצה מהשורה (גרסה מודרנית לניסוי זהה היא משחק הצדורים התלויים בתחוםה). כך מתקדמים גלי הקול: אוטם אויר אחד דוחף את השני ושב למקוםו. כך, אמר האוכנס, מתקדמים גם גלי האוויר, והאטומים במרקחה הזה הם האטומים של חומר קולוש מאין כמוותו הקרויה אחר, הנמצא בכל מקום, אפילו במה שנראה לנו ואקום מוחלט.

למה בעצם שנאמין להאוכנס שהאוויר הוא הפרעה גלית של ים של אטומים של משחו שאי-אפשר להוכיח את קיומו, בעוד ניוטון מציע שהאוויר הוא, בפשטות, האטומים עצם הנעים למקום למקום? אומר האוכנס: כשהעדים נוע במרחב ומתגש בעצמים אחרים, הוא מאבד בהדרגה ממהירותו ומאט. גלים, לעומת זאת, הולכים ונחלשים אבל מהירותם נשארת **בעינה** כי האינטראקציה הבסיסית שביבסוד הגל – אוטם אחד המכבה באמצעות שני אופני אלסטיות – נשארת בעינה. האוכנס האמין שהאוויר אינו מאט מהירותו ולכון ראה בו תופעה גלית.

בשלב זה לפניו מחלוקת אחת מתוק רבות, בבעיה הנראית טכנית בלבד, אבל כשנגייע למאה ה-20 היא תוליך אותנו למקוםות שאיש מה משתתפים בה לא יכול היה לדמיין.



9.8. **לייבניץ** מאורו
לא הייתה לנירוטון בעיה לעמוד על כתפי ענקים כל עוד הם לא היו בחיים, אבל הענק שחי בימיו עשה הכל כדי לגמד לגודל של גזורת, אם לא להעלים ממש. ביום נתן להעrik יותר את גדולת היוצר השני של החשבון האנפיניטיסמי ומיל ש Hatchib אלטרנטיבית חשובה לתמונה-העולם הנירוטונית. גוטפריד וילהלם פון לייבניץ (1646-1716) היה אדם רב-צדדי מאוד הנחשב כiom, בין השאר, לאבי תורת המחשב, שהגיע לתגליות בכל מדעי הטבע והחיים. הוא נולד כבנו של פילוסוף, ממנו התीיתם בגיל ש וירש את ספרייתו העניקה בה למד בכוונות עצמו, ובגיל ארבע-עשרה החל ללמידה באוניברסיטה בה למד אביו. פגישה עם האוכנס בפאריז הציתה את התלהבותו למתמטיקה, ובהדרכתו של האוכנס שקע בלימוד עצמו. ב-1684 פרסם את מאמרו על החשבון הדיפרנציאלי. פלאטור! השותול נירוטון מוזם. כולם יודעים שאני המצאי את השיטה.

נכון, ספרו של לייבניץ יצא בזמן שכותב-היד של נירוטון בנושא זה הסתובב באופן חשייב בין ברו ומתי-המעט האחים שהורשו לראותו. האפשרות של פלאטור הייתה, אם כן, קיימת אבל קולושה מאד. מצד שני ולמען ההגינות, נזכיר כי לייבניץ, שהתפרקנדיפלומט ומשפטן, היה בעצמו מומחה בinalgומי לתחכמים, זיופי תאריכים ונבזויות. כמו רבים מגיבוריו ספר זה, הוא היה מורה של משפחת המלוכה והתמהה בתיאזיות עם נסיכות נדבניות, כמו סופי מונבר (אחotta של נסיכה אליזבת, שהייתה כזוכה תלמידתו של דקרט), ובתה, סופי-שרלוטה מלכת פרוסיה. אבל בעיקר נהנה לייבניץ מהסתה של קROLIN מאנסבאך, שהתחנה עם אחד מבני קונבר (בית המלוכה הבריטי הנוכחי), עברה לאנגליה ונעשה לימים מלכת בריטניה. לייבניץ כתב לה שניוטון כופר בנצרות, והפרנויה של נירוטון הגיעו לשיאים חדשים.

למי, אם כן, זכות הבכורה? עכשו הtgtלה ניוטון כרב-אמן הצד המרושע של מקצועו: הפוליטיקה האקדמית. ועדה "מדעית" הוקמה ע"י החברה המלכותית הבריטית לחקר מי גנב ממי את החשבון הדיפרנציאלי, שהורכבה מעושי-דברו של הנשיא החברה, אחד בשם איזק ניוטון. כשהגיע זמן המסקנות התנדב האיש החביב לכתוב אותן עבור חברי הוועדה העוסקים, וכל שנותר להם היה לחתום. ביום מקובל שני האנשים האלה המכיאו את החשבון החדש באופן בלתי-תלי. לכל גרסה יתרונוטיה וחרונוטיה, ושתייהו התמזגו לצורה המוכרת לנו.

מחליקת אחרת של לייבנץ עם ניוטון הייתה לכaura פילוסופית, אבל במאה ה-20 היו לה השפעות מרוחיקות-לכת על הפיסיקה. קשבו על נקודה כלשהי בחדר מולכם. מהי הנקודה הזאת? יש בה אויר אבל זה לא מהותי כי אפשר לעשות בחדר ואקום. מה יהיה אז אותו לא-כלום? זה ה"חלל" או ה"מרחב" שבו קיימים ונעים כל הגוף. אבל הנקודה הזאת שבחלל החדר כמובן אינה נקודה כי בינוים נع כדור-הארץ יחד עם החדר ואתכם למקום אחר. מבחינה כדור-הארץ אתם ישבים עדין באותו חדר, באותו בית, באותה עיר ובאותה ארץ, אבל הנקודה **ההיא**, האם יש לה איזה ממשמעות בפני עצמה? האם החלל הריק הוא "משהו" כמו החומר או רק מושג מופשט?

ניוטון האמין שהחלל הוא דבר ממשי ומוחלט. הוא קיבל את דברי גלילאו שאין הבדל של ממש בין מנוחה לתנועה קבועה, אבל בנווגע לתאוצה, שבה הגוף המשנה את מהירותו עבר שינויים פיסיקליים שנייתן למזוד אותם, סבר ניוטון שבמקרה הזה קורה משחו בין הגוף המאייז לבין החלל הריק שבסביבו, בערך כמו שתנועה בתוך מים תגרום לכם להרגיש את התנגדות המים. לפיכך האמין ניוטון שהחלל הריק הוא "משהו", כמו שהוא גם הזמן: רגע מסוים, גם אם לא קרה בו כלום, הוא ממשי.

לייבנץ, לעומתו, טען שהחלל והזמן אינם דברים בפני עצם אלא יחסים בין עצמים או אירועים. במילים אחרות: אם לא היו גופים לא היו גם החלל והזמן. את טענתו תמרק בשורה של ניסויים דמיוניים: מה היה קורה אילו בראש אלהים את כל היקום כמה מטרים ימינה או שמאליה? ומה אם היה בורא אותו חמיש דקות קודם או מאוחר יותר? כיון שהוקי הפיזיקה היו גורמים לכל הדברים לקרות בדיקן כפי שהם קורים עכשו, הסיק לייבנץ שהחלל והזמן אינם דברים בפני עצם אלא רק נובעים מהיחסים בין הגוףים החומירים.

הטייעונים האלה, כאמור לעיל, עולמים להישמע כפלפול חסר-תועלת שאינו מוביל לשום תקומות מדעית. אבל במאה העשרים הם יהפכו לאבן-הפינה של פיסיקה חדשה וגדימה – עוד דבר שעליו אנו חייבים תודה לייבנץ.

למרבה הצער, עשה לייבנץ אותה טעות כמו אויבו המיתולוגי ובזבוז חלק גדול מהיו עיל רדיפת כוח פוליטי. את מרבית רעיונותיו הביע במכתבים ולא בספרים, ובכך הציב משימה קשה לדורות שאחריו יהיו צריכים לנבור בהררי המסמכים שהשair, ורוב חייו עבד כשלגיר נודד, משפטן, ספרן ראשי והיסטוריון בשירות שני מלוכה גרמניות. עוד יותר קשה להבין איך בזבוז האיש הזה שלושים שנה מהיו על מפעל-ענק בנושא מטופש כמו תולדות בית קובר! גרווע מזה: הוא לא סיים את המשימה, מה שהכעיס את המלך גיאORG, לימי ג'ורג' הראשון מאנגליה, שאסר על לייבנץ לבוא לאנגליה לשמהת לב ניוטון. כשנפטר לייבנץ בודד וממורמר היה ניוטון שמח וטוב-לב. שברתי את לבו, אמר לחבריו.

10. 8 פנים רבות לניטון
 ניטון האrik ימים עד גיל 85 כשהוא מתהדר בשערות-שיבה ארוכות מול הקרחות של עמיתו, וכל שינו מלבד אחת נותרו בפיו. לפי כל היזע כיום, מט ניטון בתוליו. מזכירו, שנקרה במקרה המפרי ניטון, העיד כי בחמש השנים בהן עבד אותו שמע אותו צוחק רק פעם אחת (מסיבה ממש לא מצחיקה). הוא לא אהב מוסיקה, וכשהאזין לגיאORG פרידריך קנדל מגן על נבל, התפעל מ...גמישות אצבעותיו. השימאון בחיי האהבה והיעדר שמחת-החיים אינם הדברים המוזרים היחידים בחיי ניטון. עליהם נוספים הקירירה החצי-משמעותית שלו וuisoku במטיסטיקה, שקשה לחברם לאישיות אחת עם נפלוות המדעית.



ניטון, ציור של ויליאם בליק. "לא-ידיוע, מופשט, הוגה קדרות, סודי, רבץ הלה, איתן אף בסתר". גינויים דומים מופיעים בשירים הבולטים במסורת אנגליה באותה ימים: וורדסורת', שלוי וקיטס, שטען כי ניטון "פרם את הקשת בענן".

למעט הצעת נישואין שהציג בצעירותו לחברת-ילדות, שלא מומשה, לא היה בחיי ניטון שום קשר אהבה עם אישת. את משק-ביתו ניהלה דודניתו היפה, שתחת אותה גם קיימה פרשת אהבים גלויה עם ידידו (מהבה הקודם היה ג'ונתן סויפט, מחבר "מעשי גוליבר"). הדבר הקרוב ביותר לאהבה היה ביחסו עם שני גברים. הראשון, ג'ון ויקינס, חלק דירה אותו והיה שותף למחקרים האלכימיים במשך עשרים שנה, אבל כשההפק כומר והתחנן ניתק ניטון כל קשר אליו. האיש השני היה המתמטיקאי השוואצי פاطיו דה דוויה (1664-1753), שהוא צעיר ממנו ב-22 שנה ונודעomi שאוהב להתחבר למדענים ידועים. בין השניים נוצר קשר רב-עוצמה – דוויה מהניף לניטון ותוקף בארכיטקטורה ליבניין, ניטון מעתייר על דוויה מתנות ומפציר בו לעבור לגור אותו, ודוויה מתחמק בכל מיני אמתלאות ואפילו נעלם מדי פעם. במכתביהם מופיעות פה ושם מילים שהיו מובנות רק לשניהם.⁶⁹ עשר שנים נמשך הקשר ואז הסתיים בצורה מוזרה: דוויה כתוב מלונדון שהוא גוסס, אחר-כך הודיע שמצא חבר חדש,

ニוטון יצא מיד ללונדון... וכאן נפסקה התקותבת.⁸ בתוך כמה שבועות הפק ניוטון לאדם אחר. אם 1666 הייתה לו "שנת הפלאות," 1693 הייתה "השנה השחורה" שלו. המכתבים שכתב בתקופה זו היו של אדם שכבר לא שמר על קשר עם המציאות. הוא הודיע כי הוא מנתק קשר עם כל ידידו והזכיר את "המלך" ג'ים השני שהודח זה מכבר. את הפילוסוף הנודע לוק (1632-1704) האשים כי הוא אתאיסט ומנסה "לסבך אותה עם נשים," ואם ימות, הוא, ניוטון, לא יצטרך. אחר-כך באו מכתבים אחרים, נוגעים לב, בהם אמר כי אינו זוכר מה כתב אבל ביקש סליחה על דבריו, וסיפר על הפרעות בשינה ואכילה שנמשכו שנה שלמה. אחד המכתבים מסתיים במילים "עבדך העולב ובישי-המזל ביותר".

היציאה מהմשבר הפיסיוכטי הוליכה אל שלב אף עוד יותר בחיו. ידידים סדרו לו משרה ממשית בכריה: המפקח על המטבח המלכותית. התפקיד כלל באותו ימים את האחריות להבאה לדין של Ziipni מטבחות, עבירה שעונשה באותו ימים היה תליה בתוספת עינויים אכזריים. ניוטון עזב מיד את קימברידג' והתמסר לג'וב, התizzard עם עברייןיהם ויצא בהחפות לטייר במקומות מפוקפקים. יש טוענים שהוא גם נוכח בחקרות בכלא, שבאותם ימים התנהלו, כידוע, בצורה לא הילדה. סוף-סוף, בתפקידו כאינקווייזטור, מצא המלומד שיכור-הכח את האויבים המתאים לו בדמות ראשי העולם התהוו, ואלה שלח בזה אחר זה אל הגדרם, עיסוק בו שקע כמעט עד יומו האחרון. הוא רדף Ziipni, אומר הפסיכיאטראנטוני סטור בספרו "הدينמיקה של היצלה," "בנהה פראית האופיינית לפרנוואידים (84)³³ המגייעים לעמדת כוח."

הרבה מידעינו על עולמו הנפשי של ניוטון אנו חיבים לאחד מאבות הכלכלת המודרנית, ג'ון מיינרד קיינס (1883-1946), שהיה גם אספן ספרים נלהב. הוא קנה במכירה פומבית את כתביו הלא-מדעיים של ניוטון, שהוקרן אותה תקופה לא חשו בנוח אתם, ופרסם מחקר חדש בו התגלה ניוטון מקרוב. ניוטון, אמר קיינס, לא היה ראשון המדענים אלא אחרון המכשפים. מחקריו המדעיים היו רק חלק זעיר ממכלול כתבו, שרובם עסק באקלימה, היסטוריה עתיקה ותיאולוגיה. הוא היה, מסתבר, נוצרי מונותאיסט שכפר באلوותו של ישוע. הוא למד עברית, תנ"ך ותלמוד (אם כי לא התעניין בהודים שהחלו להתישב באנגליה ממש באותו ימים), התעמק בבניה המשכן ובית המקדש, שבהם ראה גילום סמלי של מערכת השימוש, וחיבר פירוש מקיף לנבואות דניאל. בסוד כל החקרות האלה הייתה טענה מזויה: כל חוקי המדע היו כבר ידועים לחכמי-קדם, משה ואפלטון, ונשכחו בשל עוננות בני-האדם. כדי להוכיח זאת "תיקון" ניוטון שוב ושוב את הכרונולוגיה המקובלת במאות שנים כדי להתאים את תקופות הנבאיים לזמן החיים של חכמי יוון.

מה אומרת השקפת-עולם זאת? היא רוחה בין מיסטיקים ואמנים, המאמינים כי השראתם באה מקור חיוני כלשהו והם רק "כלי" להעברת יצירויותם. אך לכך קיים גם בהשקפה האפלטונית הרווחת בין המתמטיים והמדענים שפגשנו לאורך ספר זה, שהאמינו

⁸. האפשרות שהיא יסוד הומוסקסואלי בקשר זהה, בלי קשר לשאלת אם מומש, מתחזקת לאור ההשוויה למקרים אחרים בהם נרם קשר סימבולי בין יוצר מפורסム לבין תלמיד צער. ביחסו אוסקר ווילד ואלפרד דאנלס היה ניצול מתמייד מצד הצער, גם נרג ליחס עצמו את ההשראה לצירויות של ווילד⁹, כפי שדויה יהיה לעצמו את ההשראה לגילוי הכבידה. ליאונארדו גר במחצית השניה של חייו עם פוחח צער, סלאנו, שח' על השבונו¹⁰. ההתומות הפרנוואידית של ניוטון דומה מודר למקה מפורסם אותו תיאר פרויד¹¹ זה של השופט שרבר, שנאבק גם הוא בהזיות הומוסקסואליות.

כפי הם מגליים משחו מופשط אבל **אמיתי** הקאים מחוץ להם. אבל ניוטון לא הסתפק בכך וייחס את כל חוקי המדע לתורה מושלמת שכבר הייתה קיימת לפני כן, התנוונה במהלך הדורות, וכל שנותר לעשות הוא לגלוות מחדש. זו השקפה עצומה, אבל כשםאמינים בה טיפשים המגיעים לעדות כוח היא הופכת לסנה גדולה, כפי שתיעיד ההיסטוריה של הקנאות הדתית. השקפותו של ניוטון, השוללת מהאדם יכולת להקש והרואה בכל המדע רק חזרה אל חוקים שכבר היו ידועים לאבותינו, עשו אותה מפגר בהרבה אחרי ארבעת קודמיו, שעל כתפיהם זכה לעמוד.

חוקרת ישראלית, עיבל לשם-רמותי, כתבה מחקר על ניוטון מתוך גישה המנוגדת קופטיבית לזו המובאת כאן. בעינה מכלול הגותו של ניוטון הוא הרמוני, והפיזיקה משתלבת בו היטב עם התיאולוגיה. אחרי יצאת ספרה באנגלית⁶⁸ כתבה ספר בעברית²⁸ ובו נתנה ביטוי קופשי יותר להשקפתה הרואה בניוטון מבשר של ה"ניו איג'". אבל גם בין החוקרים שאינם מרחיקים לכת כמו לשם-רמותי קמו לאחרונה מתנגדים לדימוי של "שני ניוטונים", אחד רציונלי והשני מיסטי. דעתו בעניין זה היא הדעה הישנה: היו בפירוש שני ניוטונים, ובוזאי יותר, כי באישיותו של ניוטון ניכרות תופעות שככל פסיכולוג יכול כ"דיסוציאטיביות", ככלומר מבטאות חלקיים סותרים של האישיות שלו התהברו כראוי – בדיקות שמתגלה ביום באנשים שסבלו מהזנחה ו/או התעללות בילדותם. אחרי הכל, אפילו החוקרים ה"מאחדים" האלה לא ינסו לטען שמכתבו הרפואיים של ניוטון מ-1693 מתישבים עם המכתבים שכתב אחר-כך ובהם התנצל על דבריו או אףלו לא זכר אותם.ensus מה ניוטון שעבר גם אל כתביו. ניוטון של ה"עקרונות" השתמך על חישובים קפדיים בעוד ניוטון ההיסטוריון התפתל בזורה מביכה כדי להבהיר אנשים או מאורעות מאות שנים קדימה או אחרת כך تحت לעברים מעמד בכורה. ניוטון האופטיקאי עשה ניסויים מזהירים בפשטותם בעוד ניוטון האלכימאי לא השאיר, ככל הידוע לי, שום חידוש כימי. ניוטון האסטרונום היישב מסלולי כוכבים בדיקות מדרימות בעוד ניוטון התייאולוג הבטיח שישוע ישב לתחיה בשנת 1948. בקיצור, ההבדל הוא במבחן התוצאה: עבודותיו המדעית של ניוטון הניבו אינספור ניבויים שאוששו או הופרכו, בעוד עבודותיו בתחום הרוחני נותרו הטעסקות אובייסיבית ממשימה שלא השפיעה אפילו על המיסטיקה של ימיו. לכן, במקום לראות בניוטון נביא, נלמד ממנו הרבה יותר אם נראה אותו במלוא מורכבותו: גאון פגוע ופוגעני, שבמרבית חייו הצלחה להתעלות מעל להחולשותיו.

*

חלק מכתבי-היד המיסטיים של ניוטון, אותם לא הצליח קיינס לרכוש, נקבע ע"י אברהם יהודה שתרם אותם לאוניברסיטה העברית. לאחרונה התגלתה בהם נבואה לפיה קץ העולם הגיע עוד לא הרבה זמן: בשנת 2060. מה היה ניוטון אומר לו ידע שנבואתו תגיע לירושלים, המקום בו אמרה להתחיל מלחתת גוג ומוגוג? ושוב הסתירה המוזרה הזאת: הוא ניבא בסתר את קץ העולם אבל במקורי חיפש – ומצא – את הקבוע שבסיסו השינויים: את המהירות הקבועה שבסיסו שינוי המיקום, את התאוצה הקבועה שבסיסו שינוי המהירות ואת החוק שבסיסו כל השינויים. המפרי ניוטון הנאמן מספר לנו איך מגש האוכל שהביא היה יותר מאשר שנות רבות, וmdi העירו לו על כך היה ניוטון אוכל בחופזה, חוזר לשולחנו ושותה אפילו...

לשבת. עלום חוקי הבורא היה לו מקום מפלט. רשות הדיבור, לסיום, לאיש עצמו, שלא אהב שירה אבל מדי דברו על הטבע והוציא שירה במייטה:

על כן יאמרו הפילוסופים כי הטבע אינו עושה דבר לשוא, והיוther לשואה הוא כאשר די בפחות, כי אהוב הטבע את הפשטות, ולא יתרادر בסיבות למעלה מן הדorous.

(“אלגורוות” כפר ר' רלע א')

רעל אב הדרנום. ארכטינוס נטול נזקן ארכטינוס נטול נזקן
ארכטינוס נטול נזקן ארכטינוס נטול נזקן ארכטינוס נטול נזקן
ארכטינוס נטול נזקן ארכטינוס נטול נזקן ארכטינוס נטול נזקן

9. פוקה אחת לקטן ולגדול

איך הוא ברא פועל, פועם,

וכל נרעם לך לשלם!

גתה, פואט, תרגם י. כפכפי

המאה ה-17 קרבה אל סופה ומאה חדשה בפתח. איזה כיף! סוף-סוף חזר העולם לימי הזוהר של יוון: גאנונים קמים ברחבי איטליה, בריטניה, גרמניה, צרפת, הולנד ודנמרק, מתחכבים, מתווכים, מתחנפים ומתקוטטים, וכך מקדמים את המדעים והאמנויות בצדדי ענק.פה ושם נשמע גם קול אשה, אותו לא שמענו מאז נrzחה היפאטיה, ועוד מעט יצטרפו סופראים למקהלה. ובאמסטרדם ישב גם פילוסוף אחד שבין ליטוש עדשות להברקתן כתוב ספרים חזפניים ומזכיר לנו שיש עוד עם אחד, מפוזר בין העמים, המתיחיל לצאת מגאות אירופה אל ההשכלה, וחכו-חכו מה יהיה כשיישלח גם הוא נציגים לחגיגה!

למהירות הגוברת בה התקדם בניין הפיסיקה בעידן הנאורות הייתה גם סיבה לוגית. כשאתם מלאים תשbez או מרכיבים פאזור, הצעדים הראשונים הם הסנסיים ומצרכיים תיקונים חוררים, אבל ככל שתתקדמו יקבל כל חלק חסר רמזים מוצלבים מיותר וייתר כיוונים עד שצורתו תיעשה ממש וدائית. וכשמארג זהה מגיע להשלמתו, קורה דבר שגם האמן וגם המדען מכירים היטב: הייצור מצטיינת גם ביופי וגם בעוצמה. כי מה אנחנו אומרים על הדבר היפה? "מושלם! אני לא רוצה לשנות בו שום פרט." זהה הוא גם יופייה של תיאוריה מדעית בשלה: יופי הנובע לא רק מההרמונייה המלאה בין חלקיה, אלא מהעובדת שהחלקים האלה מחוברים זה לזה בצורה כל כרך חלקה עד שככל אחד מהם הוא הכרחי ולא נשאר בינויהם שום רווח.

כך קרה בפיזיקה הקלסית: עיקרונו, שבתורתו של ניוטון היה רק מרומז, עלה ונעשה מפורש, ותודות לו הפק הקיום כולל מכלול חלק חסר נעשה מיד בולט בהיעדרו, וממש הזמן תגלית חדשה.

1. 9. מה העד יף ניוטון לא לידע?
ניוטון החל לגלות מאפיין חשוב של הטבע, אבל, כמה מוזר, לא השלים את תגליתו. זאת יעשה אויבו המיתולוגי, לייבניץ. המשפט מתוך ה"עלרוננט" בו חתמנו את הפרק הקודם, המדבר על הפשטות של חוקי הטבע, משקף בעצם מהهو עמוק יותר מהחוקים, דהיינו עיקרונו, ובמקרה שלנו, זהה הסיבתיות: "סיבות דומות מביאות תמיד לתוצאות דומות." והנה, מכל האנשים, דוקא ניוטון לא חשב שהיקום נשלט תמיד ע"י הסיבתיות.

נחשב, לדוגמה, על שתי מכונות (ריקות, מתוך רחמנות) הנושאות ב מהירותם גבוהות ומתגששות חיונית. אם הן אלסטיות (גמישות) להלוטין, הן יעופו אחורייה באורה, כמו שני כדורי ביליארד. במקרה זהה, סך-כל המהירויות לפני ואחרי התאונה יישארו אותו דבר. אבל אם אלו מכונות רגילות נקלט שתי גרוטאות מעוכות ליד מקום ההתגשות. כמה רסיסים יעופו לכל הכיוונים, אבל שתי הגרוטאות עצמן יותרו דומות זו בקרבת זו. האם לא הלא כאן מהهو לאיבוד? התחלנו עם שני גופים גדולים שטסו מהר, אבל בסופו של התהליך, רוב החומר נותר דומם.

את ניוטון זה לא הטריד. להיפך,cadm דתי זה התאים לתמונה עולמו: הוא סבר שבתהליכיים כאלה הקום הולך ומאבד תנואה, ולכן הגיע לבסוף לעצירה מוחלטת. רק אלוהים

מתערב מדי פעם ומחזיר לו את התנועה החסירה. לכן כתוב ניוטון את משווהת התנועה למקורה זהה כך שהמהירות של מכוניות אחת היא חיובית ואילו זו הנגדית היא שלילית, ואם שתי המכוניות נסעו באותה מהירות זו ל夸ראט זו, והתגשו, סך-כל המהירות בסוף התהליך היא אפס.

ברור שכאן ביצע האיש הגדול נסיגה מחשבתי. אפילו קודמו, היושע דקרט, האמין שסך-כל התנועה ביקום משתמר. גם לייבניץ, איש לא פחות דתי שהקדיש שנים רבות של דיפלומטיה ומחשבה לאיחוד מחדש של הכנסיות הקתולית והפרוטסטנטית, הקפיד שלא לערב את אלוהים בחישובים הפיסיקליים והניח שהיקום הוא מערכת סגורה הפועלת כמו שעון משוכל. (אלה מכם הבקאים בפילוסופיה מכיריהם בוודאי את המשל היפה שלו על שני השעונים המתואמים שבאזורתו ניסה להסביר את ההתאמה בין התודעה לפועלות המות.) לייבניץ סבר, לפיכך, כי במשוואות התנועה של ניוטון צריךibir מהירות *u* להיות מוכפל בעצמו, ככלומר². על-פי תיקון זה, גם המהירות השלילית תורמת גודל חיובי להתגשות כי מספר שלילי בריבוע הוא חיובי. לנן, *כמויות התנועה ביקום לעולם אינה יכולה להיות להיעלם*. להיכון הולכת התנועה, אם כן, כשמדבר בהתגשויות לא אלסטיות כמו זו של שתי הגראות? תשובהו של לייבניץ הייתה כי התנועה מתפרקת להמון תנועות זעירות של חלקיקי החומר.

כיום אנו יודעים כי לייבניץ צדק, ושבכך היה בעצם יותר ניוטוני מניווטון. הוא היה, אם כן, מראשוני המגלים של החוק הראשון של התרמודינמיקה, הוא חוק שימור האנרגיה, וגם של החוק השני, לפיו כל תנועה הופכת לבסוף לחום (ר' פרק 12). חוקי השימור יוכחו לבוא היום *בסיסדים יותר מחוקי ניוטון עצם*.

2.9 אפסות לית צרפתית
העיקרון שהרטיע את ניוטון אבל היה ברור ללייבניץ מצא הד נלהב לבבוח שמעבר לתעלת לה-מןש. חליצת התנועה הזאת הייתה אשה מופלאה, המركזה אמיili דו שטלה (1706-1749). למדע הביא אותה אחד מגאנני ההומניזם, פרנסואה מררי דה וולטר (1694-1778). מילדותה אהבה אמיili מתמטיקה ולימוד שפות זרות, כמו גם רכיבה וסיף, ועל הוריה עברו הרבה לילות ללא שינוי בשל התכונות הלא-נשיות הללו של בתם. אבל היא הרגיעה את חששותיהם כשהתחתנה עם בן אצולה ציון ומואוף, ילדה לו ילדים ובו-זמן ניהלה פרשיות אהבה סוערות עם גברים כלבבה, עד שפגשה בולטר, שחזר מאנגליה ולמד שם את תורה ניוטון, למדה פיסיקה וגם אותו כוננה יהסים פתוחים במקביל לגברים אחרים, מה שאפשר גם לו לפתח רומאן מקביל עם אחינינו, שנעשה לימים אשטו. בтирיה שאטו דה סיריי שהחרימו שני השובבים מבعلاה הציתן של שטלה נהג וולטר להתחבא בכל פעם שהיה לו צורך עם המשטרה. זה קרה לעיתים די תכופות, כי ממשلت צרפת לא עוזדה את הפצת תורת ניוטון מהחשש שיחד אתה יבואו מעבר לתעלת עוד מנהגים לא יפים כמו הוצאת מלכים להורג. אמיili, מצדה, הקצתה אגף שלם בטירה למכוון מדעי עם ספרייה של 21,000 ספרים ועובדת משוכללה. היא התעמקה בכתביו דקרט, לייבניץ וניוטון וכתבה ספר גדול שניסה לשלב בין תורותיהם. “*היא הכתיבה ואני כתבת*”, “*ספר וולטר בכנות על “יסודות הפילוסופיה של ניוטון”*”. כמעט כל ספריו בחמש-עשרה שנות אהבתם הוקדשו לה. לי נראה

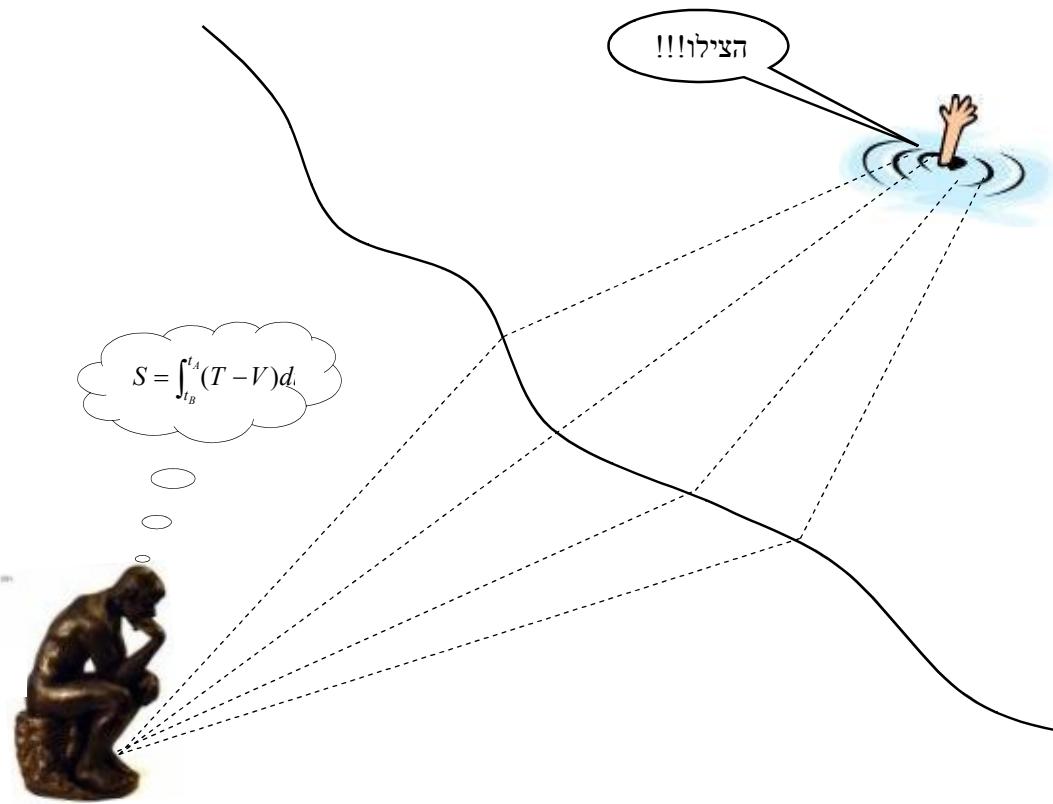


ציור-השער של "יסודות הפילוסופיה של ניוטון" (1738). שמו של וולטר הופיע כמחבר יחיד, אבל הציור מתאר אותו עטור זר דפנה (ויפה יותר משאה במציאות), כותב בעוד אמילי דו שטלה (ויפה כפי שהיא), מצויה במראה, מכוננת את האור של ניוטון אל שולחנו.

שהעבודה על ניוטון השפיעה עליהם קצת יותר מדי: דודנית רכלנית שהתארהו אצלם סירה כי הם נהגו להתווים באנגלית, מן הסתם מבטא אוים.

עתה פנתה שטלה לתרגום ה"עקרונות" של ניוטון לצרפתית בתוספת ביאורים מפורטים ונספח מתמטי גדול. כשהגיעה למחלוקת בין ניוטון ליבנץ בדבר התנוועה החסורה (ר' 9.1 לעיל), הכרעה בין שני הענים בפנייה אל הניסוי: פיסיקאי הולנדי, שסבל מלידה מהשם וילם סֶברְעַנסָּנָה (1688-1742), הפיל כדורי עופרת על משטח חמרך ומדד את עומק הגומחות שעשו הבדורים. כשהedor אחד נפל על המשטח ב מהירות כפולת זו של השני, הייתה הגומה שיציר המוקה **פי ארבע** מהגומה השנייה, בדיקוק כפי שהיינו מצפים על-פי משוואת ליבנץ הקושרת את האנרגיה הקינטית לריבוע המהירות. שטלה תיארה את הניסוי בשולי הטקסט ואזדה בליבנץ. כך זכו הצרפתים לתרגום מלטינית של ה"עקרונות" שהיא מעולה בהרבה מהתרגום האנגלי.

בדמי ימה, בגיל ארבעים ושתיים, נפלה שטלה קרבן לתאונת שתבעה את חי נשים רבים באותו יום: היא הרתה. ליד מיטתה היו המركיז בעלה, וולטר פילגשא, והמשורר הצעיר שהיה אחראי למצובה. היא ילדה תינוקת (שהונחה, כך דיווח וולטר, על ספר גיאומטריה)



וכעבור שבוע נפטרה. “איבדתי חצי עצמי”, קון וולטר המסכן, “נשמה שעבורה נוצרה נשתי”.⁸

3.9 עצנות אצילית
בין באי שאטו דה סיררי היה המركיז הצעיר פיר-לווי מזרו דה מופרטואַי (1698-1759), בנו של שודזים ומחוז נלהב שלAMIL. אם ניוטון היה ענק שעמד על כתפי ענקים, הרוי מופרטואַי זכה לעמודה הנעל כתפי ניוטון והן על כתפי יריביו, וכך לגלות עיקרונו יותר יסודי אפילו מהוקי ניוטון עצמו.

9.3.1 שני חוקים מתמצגים לעיקרונו
אבות רבים לעיקרונו זהה, ושורשי מגיעים לפחות עד אוקלידס ופטולמיאוס: הטבע הוא חסן ו”בוחר” בנתיב התנועה הקצר/הפשט/המehr ביותר. הראשון לנסה לנסה טיעון כמותי ברוח זו היה המתמטיקאי הצלפתני פיר דה פרטמא (1601-1665). הנה קרן אור יוצאת מפנס בנקודה A ופוגעת בנקודה על הקיר. הדרך בין שתי הנקודות אותה עשתה הקרן היא הקו הישר, ככלומר הדרך הקצרה ביותר. טריוויאלי, נכון? עכשו נשים במקום הקיר ראי. קרן-האור תוחזר מנקודה B בה פגעה בראוי, באותה זווית, אל נקודה אחרת, C. גם כאן אין שום דבר מזרע: הקרן מציתה לחוק ”זווית ההחזרה שווה לזווית הפגיעה.”

אבל בואו ננסה להסתכל על התהליך בדרך חדשה. נניח שאמרתי לכם מראש: קרן-האור הגיע מ-A ל-C תוך נגיעה בנקודה כלשהי על הראי. מהי הדרך שעבירה? כאן, במקום לשחק עם חוקי השבירה, כל שעליים לעשות הוא להפסיק את הזיגzag הקצר ביותר בין A

⁸. בשנים הבאות תעניק השראה לעוד נשים שיפאו את המדע הצלפתני. סופי זרמיין (1776-1831) התפרסמה בימי המהפכה כמתמטיקאית, על-פי רוב בשם בדי גברי. זה היה גם זמן של מריאן-אן לבואזיה (ר' בהמשך). במאה העשרים יהיו אלה מריאן קירוי ובתה אירן קירוי-זוליו (ר' פרק 12).

לראי ומשם ל-C. רוצים לבדוק? בבקשתו: נסו בדמיונכם להטות את הראי כך שזווית הפגיעה של הקרון בו תהיה שונה. משחו מטהיל להיות מזרע: אם A ו-C, ככלומר העבר והעתיד, **כפויות על הקרון, היא תמיד "תבחר" את B, ברגע כלשהו ביניהם, כך שתיקבל הזיגzag הקצר ביותר.**

אני יודע מה אתם הולכים לומר: "חכמולוגיה! העתיד אינו קבוע מראש, וכל התופעות המזוררות האלה נובעות מזה שלקחת אירוע עתידי אליו הוא נתון ושאלת מה יעשה הטבע כדי להגיע אליו." חכו, זה לא כל כך פשוט. מי שאומר "העתיד קבוע פחות מאשר העבר" הולך להסביר בפרקם הבאים עם כמה מהעקרונות הבסיסיים של הפיסיקה. אז בואו נתקדם אל תרגיל קצר יותר מורכב.

הנה שוב קרון-אור היוצא מנקודה A באוויר ופוגעת בפני המים בנקודה B. כיוון הקרון משתנה על-פי חוק סן ויה פונה בזווית כלשהו לעבר נקודת C בתוך המים (ראו איך כפית בocos מים נראה "נשברת"). בואו נזכיר עוד פרט: מהירות הקרון בתוך המים קצר קומה מזו שבאוויר. עכשו נזהור על התרגיל: **בහינתן A ו-C, ובහינתן העובדה שהאור מתקדם במים לפחות יותר באוויר, מה תהיה הדרך הקצרה ביותר בין שתי נקודות?**

הנה אותה שאלה בניסוח מעשי (ר' ציור): מציל נמציא על החוף בנקודה A ורואה אדם טובע בים בנקודה C. המציל יודע שהירותו ריצתו על היבשה גדולה בהרבה ממהירות שחיהו במים. לאיו נקודת B שעל שפת המים יכוון את ריצתו כדי להמישך ממש בשחיה אל הטובע, כך שיגיע אליו בזמן הקצר ביותר? בודאי ניחשתם: עליו לרווץ תחילת על היבשה בכו ישר לא אל הטובע, אלא באלאנסון, עד נקודת מסוימת על שפת המים, ומשם לשבור ולשחות בכו ישר אל הטובע. בחירות כיוון הריצה האלבנסונית על היבשה, ככלומר כיוון שבירת תנועת המציל בעוברו מים ליבשה, ניתנת לחישוב מתוך ההבדל בין מהירות ריצתו ומהירות שחיהו וכמוון על-פי מיקומו ומקום הטובע. וקרן האור? היא עושה את דרכה, ממקום מוצאה באוויר עד מקום פגיעה בתוך המים, בדיק על-פי הכל זה!

משהו מזרע כאן: **שני חוקים אופטיים – חוק ההזורה וחוק השבירה – ניתנים לגזירה מתוך עיקרונו אחד:**

עיקרונו פרמא: *קרון-אור עישה את הדרך הקצרה ביותר בין שתי נקודות.*

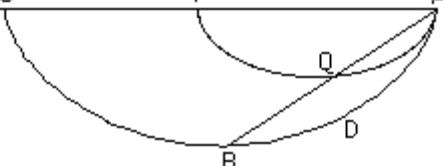
9.3.2 ארויות הדור במפגן משותף

אבל עיקרונו זה לא עובד לגבי דברים שאין אור. מצד שני, הטבע נותן לנו כמה רמזים לכך שהתנהגות האור דומה להתנהגות גופים חומריים: ההזורה של אור הפוגע בראש, למשל, זהה לזה של כדור הפוגע בקיר.⁸ האם ניתן, אם כן, למצוא עיקרונו כולל יותר שיטאות גם לאור וגם לגופים? תסכנו ATI שזה עיקרונו בעל עצמה.

כאן נזכר מופרטוואי בוכוכה עוזר-נשימה שהתקיים דור אחד לפני ושבו השתתפו כל ענקי הפיסיקה בהפגנת כוחותיהם. הסיפור החל ממיודעינו מארצטרி, גליילאו ותלמידו וייאני, שהוכיחו שהוא מזרע: **בහינתן שני מסלולים, אחד ישר ואחד מעוגל, בהם יכול כדור להתגלגל מנקודה אחת לשניה, הוא יגיע למhone חפציו מהר יותר דוקא במסלול המעוגל,**

⁸. גם ההשתברות של האור, בעברו מזרע אחד לאחר, דומה להתנהגותם של גופים בעלי מסה. הפרידו מצעצוע ילדים או "לגו" של מכוניות זוג גלגלים המהוברים בציר. גללו את זוג הגלגלים בזווית כלשהו מהרצפה אל השטיח או להיפך. כיוון תנועתם המשותפת יישבר על-פי אותם כללים של השתברות האור.

כלומר הארוך יותר! ב-1696 בא יוהן ברנולי הראשון⁴ ופרסם בכתב-העת "דייוויה המלומדים" חידה כללית: נתונה נקודה A, ובמרחיק-מה ממנה, נמוך יותר, נקודה B. מה הדרך המהירה ביותר בה יכול לנوع גוף מ-A ל-B תוך היעזרות בכוח הכבידה בלבד? כיוון שגלילאו הוכיח שהזאת לא מישור משופע ישר, מהו המסלול? הם קראו למסלול זהה ברכיסטוכרון ("זמן קצר"), ועל החידה הסתערו גדולי הדור: ליבנץ, יוהן ברנולי עצמו, אחיו יעקב (شمיד פתח בסכוך חדש עם אחיו), לופיטל ואחרון-אחנון הביב: ניוטון! הוא היה אז מנהל המطبעה המלכותית, וברנולי וליבנץ שלחו לו את החידה בתוספת עקיצה נבזית, מתוך תקווה שיתברר שכבר אינו בקשר. ניוטון, שפיקח בהםים על הפתק סדרת מטבעות חדשה, הגיע הביתה בשעה ארבע אחר הצהריים, ראה את העכיה והחל לעבוד עליה בלי הפסקה עד שפתר אותה בארבע לפנות בוקר. משמאלו הסרטוט של ניוטון המראה כי הדרך הקצרה ביותר תהיה המסלול העקום B-D-A. הוא שלח את הפתרון בעילום שם לברנולי, שזיהה מיד את הפותר: "את הארייה מסגירה טביעת רגלו!"

הפתרון אליו הגיעו המדענים האלה היה הציקלאידה, צורה הנוצרת ע"י נקודה כלשהי על גלגל המתגלגל על מישור. עכשו נפתחה הדרך לעיקרון מאוחד, שיחול באותה מידה גם על קרני אור וגם על גופים חומריים. הנה הקלייע של גלילאו מפרק 6.3, המשרטט

פרבולת באוויר. בואו נגדיר לו מראש את נקודת המוצא, A, את הנקודה הגבוהה ביותר אליה הגיע, B, ואת הנקודה בה הגיע חזרה לקרקע, C. האם יש עיקרון שבנבא את הפרבולת שבין שלושת הנקודות? בואו נדמיין שזו קרן אור שצרכיה לעבור בין שלוש הנקודות, אלא שהפעם היא אינה עוברת בפשטות מאויר למים אלא עושה את כל דרכה בנזול ההולך ונעשה סמיך בהדרגותיות כלפי מעלה. לחילופין, תארו לעצמכם את המציגו שלנו דרך דרכו אל הטובע ובחזרה אל החוף, מתוך נזול כזה שיש לו הרבה רצונות רוחב דקיקות, כל אחת סמוכה יותר. המציג יצטרך לפטור עכשו מושא דיפרנציאלית נושא ניוטון, כי מדובר בהמוני קווים קטנטנים, אבל הפתרון שיאפשר לו לעשות את הדרך הזאת הכى מהר הוא – הפלאopolia – הפרבולת!

9.3.3 הניסוח המאחד

מופרטואי הבין שישמשו משותף לכל התנועות ביקום, מקרני אור ועד גלקסיות. משוהו בכל התנועות האלה נוטה להיות מינימלי: לא הדרך, לא הזמן, אלא – וזה הייתה תגליתו – ה"פעולה". הגדרת הפעולה היא "האנרגייה הקינטית פחות האנרגייה הפוטנציאלית". את

⁴. לא נוכל להתעכ卜 על תלמידות הברנולים, אז נסתפק בתקציר: ניקולאוס (1623-1708) סוחר שברה מהולנד לשוויין לפני הספרדים, ילד את המתמטיקאים יעקב הראשון (1654-1705), ניקולאוס הראשון (1662-1716) וyoּהן הראשון (1667-1748). ניקולאוס הראשון ילד את ניקולאוס השני (1687-1759) ששימש את השושלת המתמטית בענף הזה. יעקב הראשון הכניס את אחיו יהונתן הראשון בסוד המתמטיקה נגד רצון האב, אבל כמובן כמה שנים נועשה לאיבר. יעקב הראשון לא ילד מתמטיקאים, אבל יהונתן דזוקא כן: את ניקולאוס השלישי (1695-1726), את דניאל (1700-1782), ואת יהונתן השני (1710-1790). יהונתן אסר על דניאל ללימוד מתמטיקה, זה – כמובן – המרה את פיו. דניאל היה מדען מבריק והגון, אבל אביו, שכבר היה עסוק במריבות גם עם מדענים מחוץ למשפחה, סילק אותו מביתו כשהחברר שsnowים זכו יחד בפרס יוקרתי, ולבסוף גנב ממנו את מחקרו על הפסיקה של הנזולים ופרסם אותו בשם. יהונתן השני ילד את יהונתן השלישי (1744-1807), את דניאל השני (?-?) ואת יעקב השני (1759-1789). יעקב השני ירש את הקתדרה של דודו דניאל אבלطبعם בצעירותו. יהונתן השלישי, שהיה מתמטיקאי בוגרי, עשה הרבה כרך ממכתירת משפטו, אבל התברר שאת רוב המכתבים שבוסף כתוב הוא עצמו. בכך, סוף-סוף, ירדה המשפחה המשבנת מעל במת המדע.

המושגים האלה נלמד בפרק 12, אז נאמר כאן רק שהאנרגיה הקינטית מתחבطة בתנועה המשנית של הגוף ברגע נתון, בעוד האנרגיה הפוטנציאלית היא יכולה התחנעה שהצטברה בו, כמו התחנעה הציבורית בקפייז דורך. מהרגע שהגדר מופרטואית כך את מושג הפעולה, התגלתה עיקרונות הנכון לגבי כל התנועות בטבע:

עיקרונות הפעולה המינימלית: בכל תנועה, כשהאנרגיה הפוטנציאלית של הגוף הנע בכל רגע מחוסרת מהאנרגיה הקינטית שלו, והסכום המתkeletal מוחש במעט (אינטגרל) לכל המסלול, מתברר כי הגוף נע במסלול בו הפעולה היא הנמוכה ביותר האפשרית.

זכרו כי בדרך כלל נהוג לחבר את שתי האנרגיות, הקינטית והפוטנציאלית, כי הן מתחלפות זו בזו ולכך סכום נשאר קבוע. מה שモפרטואי מורה לנו הוא דווקא להסר אותן זו מזו. אז, במקום גודל קבוע, נקבל גודל חדש, ה"פעולה", המשתנה במהלך תנועתו של הגוף. אבל כאשר נחשב את מוצע הפעולה על כל הנקודות שעל מסלול התנועה, ככלומר נעשה אינטגרציה שלהן, תופיע התגלית במלוא הדירה: **בכל תנועה פיסיקלית, נע הגוף במסלול שסך-כל הפעולה בו היא המועטה ביותר שאפשר.**

9.3.4 תהילה ומחירה

גילוי העיקרונות היה شيئا של קריירה מדעית מופלאה. באותו ימים כבר נודע מופרטואי כפיסיקאי וביוולוג שרשם לזכותו תגלית מפורסמת. אקדמי ואזורי כי ניוטון שיער כי עקב סיבוב כדור-הארץ, הכוח המרכזי גורם לו להיות פחוס מעט בקטבים ב-1/230. ג'ובני דומניקו קסיני (1625-1712) מצא תימוק לטענה זו במדידת צורתו של צדק, טענה שהזוקה ע"י בנו, ננדו ונינו (כולם אסטרונומים!) אחריו. אבל מה עם כדור-הארץ עצמה? משלהת שהנהייג מופרטואי יצא ב-1735 לפולנד כדי לבדוק אם כדור-הארץ הוא אכן כדורי, וחזרה בתרועת ניצחון: ניוטון צדק שוב!

פטרונו החשוב ביותר של מופרטואי היה פרידריך השני "הגדול" מלך פרוסיה, ברנס בהשלט צבוני: מצביא שתלטן שהרchip את גבולות ארצו במהלך מלחמות רבות, ליברל, סופר, מוסיקאי, הומוסקסואל גלי, חובב מדע ואמניות, ואחרון-אחרון-מגעיל: אנטישמי. הוא הזמין את מופרטואי ל"ראיון עבודה" לאוהלו במהלך קרבות קטנים נגד האוסטרים, אבל הקרב לא התנהל בדיקוק לפי התוכנית, ה"bos" ברוח הביתה לפרוסיה ומופרטואי נפל בשבי. המלכה מריה-תרזה הייתה נחמדה אל השבי המפורסם וה חוזירה אותו לברלין, שם התמנה לנשיאות האקדמיה הפרוסית למדעים.

את עיקרונות הפעולה המינימלית פרסם ב-1746, ובו ראה את שיא הישגיו. אבל מרגע זה פרצה בעולם המדע קטטה המונית. יהאן זמואל קניג (1712-1757), ידיד ותיק ובן-חסות של מופרטואי, פרסם מאמר שבו האשים אותו בגניבת הרעיון מתוך מכתב של לייבניץ! מופרטואי הניחם דרש מקניג להראות לעולם-Collo את המכתב, קניג לא ענה וגורש מהאקדמיה. השערוריה החלה לצבור תואזה. נגד מופרטואי כמו בני משפחתו קסיני ויוהן ברנולי הראשון, בעוד שלצדו עמדו דניאל (איך לא) ברנולי, ז'וזף-לואי לגראנז' (1736-1813) ולאונרד אוילר (1707-1783). الآخرון, ראיין לציין, כבר הגיע לתגלית דומה אך לאطبع עליה זכות בכורה. ואז גילתה המלומד השבור עוד פרצוף מוכר במחנה אויביו: וולטר, שהרעדיף עליו עד עתה הצהרות אהבה שמנוניות, אבל כנראה לא שכח איך מופרטואי שכב עם אAMILI שלו בתקופה בה מנעה ממנו מחלתו לתקוף כגבר. לעומת זאת כבר צבר הפילוסוף הקישש

ר' נספה:
חוק הפעולה
המינימלית

מוחוות במדע הרשעות מריבוטיו עם אויבו המפורסם, ז'ז'ק רוסו, ועתה כיוון את החץ ארסו נגד "סר איזק מופרטואי". פרידריך, שהקים לו חצר-מלכות בשם סאן-סובי ("לא דאגות" – הוא דבר צרפתית יותר מאשר גרמנית) התרגז וסילק את וולטר מפרוסיה, אבל הפרשה כבר יצאתה מכלל שליטה. להגיגת הצטרכו עוד שני צעירים יידי-נפש שייעשו מפורטים בבאו היום: גוטהולד אפרים לְסִינְג ומשה מנדרסון, לימים מנהיג תנועת ההשכלה היהודית, שטענו גם הם כי זכות הבכורה מגיעה ללייבניץ. בעת זאת היה מופרטואי יורק דם, פשוטו ממשמעו, עקב מהלה ממנה סבל מאז מסעו ללפלנד. הקנאה והמריבה יכולות לדרבן את המדע, כמו במקרה של הברנולים, אבל למופרטואי הן רק החישו את מותו.

9.3.5 בשורה התחתונה

מה, בסופו של יום, חשיבות עיקרון הפעולה המינימלית? לא פחות מאשר **עיקרון-יסודות** שאיפלו חוקי ניוטון ניתנים להיגזר ממנו, והמאפשר*חישובים קלים יותר מהם*. החוקים האומרים שגוף ימשיך במצבו, או ישנה מהירותו בהתאם לכוח המופעל עליו, או שיפעל כוח נגדי על גוף המפעיל עליו כוח – כולן נובעים מהטענה שככל תנועה מתקדמת במסלול שבו הפעולה היא מינימלית. העיקרון שוכל בידי אוילר ולגראנז', ומאותר יותר בידי המילטון (ר' בהמשך) לכדי ניסוח חדש של הפיזיקה הקלסית, הקroi כיום מכנית אנליטית. ביום מעדים הפיזיקאים את משוואת אוילר-לגראנז' על משוואת ניוטון, כי כ舍םדובר במערכות גדולות ומרובות-חלקים, המכנית הניאוטונית נותנת אוסף משוואות שלפעמים פשוט אי-אפשר לפתור אותן, בעוד שמשוואת אחת מהסוג "לגראנז'יאן" מאפשרת לדעת הרבה על מצב המערכת אפילו בלי לפתור אותה.

מופרטואי עצמו התיחס באופן דתי לעיקרון שלו וראה בו הוכחה פשוטה לקיום האלוהים. נוצר מצב מביך: אחרי שמדוברים כה רבים, החל מדקרט, דרך DARWIN ועד הגנטיקה המודרנית, סילקו את התכליות מהביולוגיה לטובת הדטרמיניזם הפיסיקלי, מצאו הפיזיקאים את עצם מול הרושם כאילו איפלו בטע הדום קיימת "שאיפה" למשהו. "בעוד שיטות ניוטון נתנו למדענים תחושה של הבנה" מער גליק,¹⁴⁸ "עקרונות מינימום השאירו תחושה של מסתורין." כך או אחרת, החוק געשה איתן יותר בתורת היחסות הפרטיט והכליות ובתורת הקוונטיים. פיינמן, בקטע "אגבי" שהפך בינתיהם לפניהם קלאסיקה,¹⁴⁹ סיפר איך, בהיותו תלמיד תיכון משועם, קרא לו המורה והדגים לו את עיקנון מופרטואי. שנים רבות הילך עליו התרגיל כסם ודוחיה בעת ובעונה אחת, עד שגילה בהשראתו את שיטת סכום המסלולים הקוונטיים, עליו נדבר בפרק הבא. לא אחר מאשר אבי תורה הקוונטיים, פלנק (ר' פרק 15) ראה בפעולה המינימלית עיקנון העומד בסיסו כל חוקי הפיזיקה.¹⁵⁰

וכך, ולא בפעם האחרון, הרבה ייע, דם וدمות מובילים להישג מופשט יפהפה. לדעתו, עדין מסתתר בעיקנון זהה רמז עמוק שהפיזיקה עוד לא מיצחה, הקשור לטבע הזמן עצמו.

4.9 העיקרון האידיר ביזטר בהיסטריה

חלק זה הוא אחד החלקים החשובים בכל הספר ולכך אבקש מכם תשומת-לב מיוחדת. לעיתים אחזור בו מהמסגרת הכרונולוגית של הדיון ואציג אל ימינו כדי להראות איך, עד היום, אנחנו עובדים בתחום החזון של ניוטון, איפלו כשאנחנו מעמידים אותו בהנאה גלויה על טעותו.

ראינו את הפיזיקה מאמצת את העוצמה של שפת המתמטיקה. משפט מתמטי, כמו $c^2 = a^2 + b^2$ של פיתגורס, נכון לגבי כל המשולשים – גדולים, קטנים, ירוקים או עשויים משוקולד. הדיק של התוצאה הסופית תלוי רק בבדיקה של מדידת הצלעות. במקרה אחר: האלגברה נותנת את האותיות הכלליות, אנחנו צריכים להציב במקומם את המספרים הפרטיים, וככל שנדייך בהם יגדל דיק התוצאה. ממש כך, גם חוק פיסיקלי, כמו $F=ma$ של ניוטון, נכון לגבי כל המאוסות, התאותות והכוחות. אם נבצע היטב את המדידות לקרה הפרטי ונציג את המספרים במקום שתים מהאותיות שבמשוואת הכללית, נקבל את הערך השלישי בבדיקה.

לכן, מה שהחל בעבודת ארכימדס, בסיס בתורת אוקלידס, שוכל במחקרים גלילאו והורח בשיטת דקרט, הבשיל תחת ידי ניוטון ונעשה מפורש תודות ללייבניץ, שוכל בידי מופרטואן וקיבל את צורתו השלמה בידי לגראנז' ומילטון, הוא העיקרון בעל העוצמה המעשית הגדולה ביותר בתולדות האנושות:

כל תהליך פיסיקלי מציאות לחוק/ טبع כללים בצורת משווה/ות, שבהן ניתן להציב את תנאים ההתחלת הפסיכיפיים לאותו אירוע. אם החוק יהיה נכון ותנאי ההתחלת יהיה מדויקים, ניתן יהיה לנביא את כל המცבים הבאים שיופיעו אחרי אותו מצב בעתה, או לדעת את כל המცבים הקודמים שהיו לפני בעבר.

ולכן:

בכל תהליך בו הנביינו אכן תואם את המיציאות, אויו או שמתארים באירוע גורמים בלתי-ידועים או שעורב בו חוק נוסף.

במילים אחרות: מארג חוקי הפיזיקה נעשה כה הדוק עד שככל סטיה ממנו מבשתת תגלית: או שבתהליכי הסוטה מעורב גורם חדש או שיש צורך בחוק חדש!

כל המדענים שבאו אחרי ניוטון נשאו את חזונו אל תחומי הולכים וגדים. נזלים? דניאל ברנוולי ניסח את המקבילה $L=ma$ השוללת בתנועתם. גזם? רוברט בזיל (1627-1691) גילתה את חוקיהם. חשמל? אור? חכו לפරדיי ומקסול בפרקיהם הבאים. בכל תחום נשנה ההבטחה וגם קויימה: אם תדעו את חוקי הטבע הרלוונטיים לתופעה שאותה אתם חוקרים, ואם תמדו היטב את תנאי ההתחלת ותציבו את המספרים במשוואות החוקים, תוכלו לשלוט במה שאתה רואים. השימוש הזה הוא הניטרו והגלאציין של הפיזיקה.

המקום הראשון בו התגלה עיקרון זה במלוא עצמותו היה מערכת השימוש: במקום אינספור מדידותיהם המיגעות של האסטרונומים בדורות הקודמים אמר ניוטון: תנו לי את מיקומו ומהירותו של כוכב-לכת ברגע מסוים ואני אוכל לומר לכם היכן יהיה בעוד שעיה, יום או שנה, או היכן היה לפני שעיה, יום או שנה. כמובן, ככל אידיוק קל בתנאי ההתחלת יביא לסטיה גוברת והולכת בניוביום לזמןים ארוכים, אך זו רק בעיה טכנית: ככל שיגדל הדיק התקין הסטיה. מערכת השימוש היא נוחה מאוד להכרת העיקרון הזה כי אין בה חיכון, אבק, חלודה וכדומה. מה שהבטיחה ניוטון קיימה הפיזיקה כולה: האסטרונומים למדו לנבא את מיקומי כוכבי-הלקת והירחים על-פי כמה מדידות ההתחלתיות, ועם השנים הצליחו בכך גם עם כל הכוכבים והгалקסיות ביקום.

ועד היום, בכל פעם שהתגלתה סטייה מההזון הזה, כשהחצירוף של חוקי הטבע ותנאי ההתחלה לא נתן את התוצאה הנכונה, התגלה גרם שמים חדש – או חוק חדש. **מה תגידו על תורה כזו שתאפשר הטעויות המתגלות בה הן מכרה זהב?**

הנה כמה דוגמאות, מימי ניוטון ועד ימינו.

9.4.1 אורנוס ונפטון: חבר מבי א זבר ויליאם-פרדריק (וילהלם-פרידריך) קרשל (1738-1822), נער גרמני ממוצא יהודי, היגר לאנגליה ונעשה שם מוסיקאי. אחרי באה אחותו קרולין-לוקרציה (1750-1848) והתרנסה צמרת. בהדרגה עברו השניים ממוסיקה למתמטיקה ולבסוף לאסטרונומיה, בה התגלו כצמד מוצלח להדוחים. קרולין ריסקה וסיננה טונות של זבל סוסים כדי להכין תבנית רואיה למראת הטלסקופ שיצק אחיה. יחד מיפו מחדש את השמים וגילו כוכבים כפולים, ערפיליות ושר עצמים מפליאים. קרולין גילתה שמונה כוכבי-שביט. ויליאם גילה, לראשונה בהיסטוריה המודרנית, כוכב-לכת חדש. כך התווסף למערכת השמש חבר שביעי, אורנוס. אלא שהחבר הזה, במקום לוامر תודה על צירופו, הרמה את פי אבות הפסיקה. מסלולו לא תאם את חוקי קפלר ולכנן גם לא את חוקי ניוטון. האם נחוץ תיקון בחוקים או אולי שהוא חסר בתנאי ההתחלה? כמה אסטרונומים החשו שחוק ריבוע המרחק של ניוטון אינו מדויק למרחקים גדולים, אבל הראשון שشرط ב-1821 את מסלול אורנוס, אלכסיס בובאר (1767-1843), פנה לכיוון השני ושיער שעוז כוכב-לכת מסתובב לו שם רחוק יותר אףלו מאורנוס, והשכבה שלו מסיטה את אורנוס מסלולו. האנגלי ג'ון אדמס (1819-1892) החל לחשב היכן, בהנחה שהחוקי ניוטון נכונים, צרייך להיות הכוכב הנעלם, ובדוק באותה שנה, 1846, סיום הצרפתי אורבאן ז'אן-ז'וזף לה-גרא (1811-1877) היישובים מדויקים יותר. כוכב-הלכת השמיני, נפטון, התגלה באותה שנה בתוכה מעלה אחת מהנקודה אותה יעד לו לה-גרא.⁴

9.4.2 דוג סוטים עווה של ישעיה וудין התנהגו שני החברים החדשים בצורה השודה, סטייה פה, סטייה שם, והזולץ בחוקים חזר. אמרו אנשים: יש להם בוודאי חבר שלישי, עוד יותר רחוק, שמשפיע על שניהם. כך חזר הסיפור על עצמו: האמריקני פרטניל לוזל (1855-1916) היה אסטרונום מכובד שהזיק מאד למוניטין של עצמו בשל מחקריו על תעלות המאדים,سلطנותו היו תעלות שנחפרו בידי ציוויליזציה מפותחת. ב-1905 פנה לעובדה מדעית יותר וחישב את מסלולו של כוכב-הלכת התשיעי, וגם חיפש אותו עד יום מותו, לשוא. אבל ממשיכו, במכון שנקרא מעתה מכון לוול, קלידי ויליאם טומבאו (1906-1997), הוא שגילה ב-1930 את פלוטו.

9.4.3 ואולי נשאים את החוקים? הסטיות מתמונה העולם הניאוטונית הביאו לגילויים לא רק בתנאי ההתחלה, כלומר שלושה כוכבי-לכת חדשים, אלא גם לגילויים גדולים יותר בחוקי הטבע עצםם. לה-גרא, האסטרונום שחקר את הסטיות של נפטון, הבחן בתופעה דומה כשהסתכל לצד ההפוך, בקרבת השמש. כוכב-חמה (מרקורי), הפנימי ביותר מכוכבי-הלכת, עווה משחו מוזר: הוא הג סיבב המשם באלייפה, אבל האליפסה עצמה מסתובבת גם היא, והסטייה מהחוקי ניוטון היא כ-566 שנים-קשת למאה שנה. לה-גרא נזכר בכך-ארציו המפורסם, פיר-סימון דה לפלא (1749-1827),

⁴ האמת היא שאת נפטון גילה לראשונה גליילאו בצד המרוחק של מערכת השמש בלי לדעת שהוא כוכב-לכת, כי תנוועתו בשמים הייתה חלשה מדי, ולכן חשב אותו בטעות לכוכב-שבט.

שמילא את הפרצה שהשair ניוטון בתמונת-העולם הניאוטונית: לפلس הראה שאוות היעלמויות של תנועה עליהן דיברנו בתחילת הפרק, שבענין ניוטון היו דליות של אנרגיה מהיקום שאלווהים היה צריך לתקן, הוא כולן מסוג "תנוזות המטוטלת" המבטלות את עצמן, וכך לא בורחת מהיקום שום אנרגיה. זה בפירוש לא היה המקראה של כוכב-חמה: התנזות העירות שלו היו בכירור מצטרבות לכיוון אחד. כמו אנשים, כנראה ממש נואשים, הציעו לתקן את משווה ניוטון מ- $F = \frac{G \times M_1 \times M_2}{r^2}$ ל- $F = \frac{G \times M_1 \times M_2}{r^{2.0000016}}$ בניסיון להתאים אותה לתנועת מרכורי. תסכימו ATI שזה לא ממש משבנע. לה-וירה הפעיל על הסיטה את אותו תרגיל שעשה על אורנוס ונפטון, ככלומר, לבדוק את השפעת הכבידה של כוכבי-הlections הסמכים לכוכב-חמה, דהיינו נוגה, ארץ ומאדים. זה הסביר חלק מהתופעה, אבל עדין נותרה סיטה של כ-43 שניות-קשת.⁴ הוא חיפש, אם כן, כוכב-לכת חדש בסביבה ואפילו הוזרו לחת לו שם, "וולקן," אבל הפעם לא מצא.

היה זה איינשטיין שקבע ב-1915 על ההזדמנות לגלוות תגלית בכיוון ההפור: זה לא משחו שחרר בתנאי ההתחלת אלא בחוקי הטבע. חוק הכבידה של ניוטון יכול להסביר את תנועתו של כוכב-לכת סביב המשם, אבל כשהכוכב הזה קרוב מדי לשמש מתגלה מוגבלותו של רעיון כוח הכבידה. איינשטיין, כפי שנראה בפרק 14, החליף את כוח הכבידה העיקרי של המרחב-זמן. כוכב-חמה, לפי תורה הייחוסות הכללית, אינו נع במרחב ישר אלא למרחב שהוא עצמו עמוק בצורה מיוחדת. עיקום זה הסביר את הסיטה הנותרת במלואה.

9.4.4 ומה אם לא תמיד $F=ma$

הסיטה הבאה מהמכניקה הניאוטונית מטרידה את המדע, בעצם ימינו אלה, בקנה-מידה הרבה יותר גדול: תנועת הgalakseiot. בוויוכוך הניטש סביבה שיק התקיף הנועז ביותר – בעצם אחת ההצעות הגדולות בתולדות הפיזיקה – למדען ישראלי הקורא תיגר על לא פחות מאשר חוק-היסוד של הפיזיקה הניאוטונית.

הבעיה עצמה פשוטה – ולכן כל כך קשה: רוב הgalakseiot מסתובבות, מה שאומר שעל כוכביהם פועל מצד אחד הכוח המרכזי הדוחף אותם אל מחוץ ל galakseiy ומצד שני כוח הכבידה המושך אותם פנימה. את המסה הכוללת של galakseiy ניתן לחשב בערך מתוך האור הכללי שהוא מקרים. את הכוח המרכזי הדוחף קל לחשב לפי משוואת האוכנס אותה הכרנו בנספח לפרק 8: הכוח המרכזי הדוחף שווה ל קבוע כלשהו כפול רדיוס היסוד חלקי ריבוע זמן היסוד. ישבו אנשים וחישבו מהו הכוח המרכזי להעיף מזמן את כל הכוכבים שבשוליו galakseiy. התוצאה הייתה כוח שעצמתו הייתה צריכה להיות מזמן על הכוכבים האלה לכל עבר! התעלומה חוזרת גם בנוגע לצבירי galakseiy: galakseiy בשולי הצביר מסתובבות במהירות שהיתה צריכה מזמן לגבור על כוח משיכת הצביר כולו.

מהו, אם כן, מתוך הזוג הניאוטוני המבטיח של חוקי טבע ותנאי ההתחלת, החילק החסר במרקחה זהה? רוב הפיזיקאים בימינו הולכים בדרך הבטוחה ומאשימים את תנאי ההתחלת. זהה ההשערה המפורסת בדבר "החומר האפל." ברחבי galakseiy, הם אומרים, מפוזר חומר מסווג שעדיין אינו מוכר למדע והוא זה המוסיף את הכבידה הדורישה כדי למנוע מזרועות galakseiy מלヒתלש ממנה. הבעיה היא שהחומר הזה צריך להיות בעל תכונות מיוחדות מאוד:

⁴ זוכרים את שמוña דקוטה-הקשת שהעלו את קפלר על דרך חדשה? הביטחון העצמי של המדע התקדם הרבה מאז!
סיטה של 43 שניות קשת שווה בערך ל--- מרחק של ---.

הוא אינו פולט שום צורה של חום או קרינה אחרת, ומה שייתר מזור: הוא גם אינו בולע ואינו מחזיר קרינה. השערות שונות הוצעו בוגע לחקיקים מהם מורכב החומר הזה, וניסיונות מאד מעניינים נעשו לפתור בעורתו, באלה הזרמתה, בעיות נוספות באסטרופיזיקה ובКОסמודולוגיה, כמו שאלת התפשטות הקום. להשלמת ההגאה נזקקו אנשים להשערה מקבילה בדבר “אנרגיה אפלָה” הממלאת אף היא את הקום ושאינה דומה לשום צורה מצורחות האנרגיה הידועות לנו. המרכיבים הנסתרים הללו, אומרת הסברה, יכולים להסביר את אי-התאמות המתגלות ביום בין התיאוריה לתצפית.

פיסיקאי ממון וייצמן, מרכדי מילגרום, בחר, כמו איינשטיין, בדרך השניה:¹⁰ אולי חוק**הטבע הרלונטיים** אינם מדויקים וצריכים תיקון? החוק אותו הוא מציע לתקן הוא לא פחות מאשר החוק השני של ניוטון. לפי השערתו, חוק זה נכון רק כקירוב, בתוצאות רגילות, ואילו בתוצאות נמוכות מאוד צפוי להתגלות בו אי-דיוק, שהוא הגורם לכוכבים שבשוליו הגלקסיה שלא להיכנע לתאוצה. תיאוריה זו ידועה בשם דינ'ם, דינמיקה ניוטונית מתוקנת, ובאנגלית – Mond – Modified Newtonian Dynamics

האם נמצא עצמנו מתקנים يوم אחד את משווהת היסוד של ניוטון? מנוקודת הראות האסתטית, תיקון זה מהו טלי על המשווהה המקורית (ר' בנספה) ועושה אותה פחות פשוטה ולכון, לטעם של אובי הפשטות, פחותיפה. תומכי התיאוריה, מצד שני, מצבעים על האלגנטיות של ההסבר שלה לסייע הגלקטי: הוא חסני ומסתמך רק על התפלגות החומר הנראה ועל ההנחה כי היחס בין מסה להארה הוא קבוע. התומך המרשימים ביותר שהציגו לדינ'ם, יעקב בקנשטיין, מנסהמצו להציג את המודל ברוח היחוסות הכללית (ר' פרק 14), ככלומר לשנות גם את משווהת הכבידה כך שתהייה שות-ערך לתאוצה,¹¹ מה שיעשה את המודל לאלגנטי באמת. מצד שלישי, תומכי השערת החומר האפל (בهم עוד ישראלי, אבישי דקל מהאוניברסיטה העברית¹²) הביאו ראיות חדשות משליהם. כך או אחרת, הפוסק העליון בעניין הכהיליה המדעית הוא, כמובן, הניסיון. לנוכח הצורך להוכיח האסטרונומיות.

אבל בסופו של יום, רואו באיזה מצב מתרק אנחנו במצבים: או שתתחולל בשנים הקרובות מהפכה נוספת בפיזיקה, שהתיקון שתכננו לחוקים הקלסיים יהיה כמעט אלה של היחסות והקונטנים, או שיתגלו צורות חדשות להלוטין של חומר ואנרגיה או אפילו מאפיינים חדשים של היקום, המרחב והזמן. סמולין, המודה שהдин'ם מטריד את שנותו בלילות, מכנה את הסיטואציה “מענגת באופן מפחיד”.¹³ אופיינית לא פחות העובדה שחוקר מבירק גירין¹⁴ אפילו אינו מזכיר את הדינ'ם, למראות שאין ספק שהיא מדrica גם את מנוחתו. ושוב, ה’אין אפס’ הזה, המצב שמשהו חדש וمسעיר הולך או-טו-טו להתגלות לכך או לכך, והוא תוצאה ישירה של החזון הניוטוני המביטה שפנקס היקום מאוזנים.

5.9. ושוב האור: ניוטון צודק גם כשהוא טועה כמו המסה שבמערכת-השמש, בגלקסיות וביקום כולם, הגורמת לנו עד היום לשוב ולהידבר עם ניוטון, כך גם בנו-לוייתה האלגנטית, האור, מלץ אותנו לחזור אל הויכוח עם ניוטון ולגלות עוד פנים מופלאות של המציאות הפיסיקלית.

ניוטון, כזכור, ראה באור שטף של חלקיקים, הטסים ב מהירות עצומה מהמקור לכל עבר, פוגעים בעצמים ומתחזרים שוב מסביב. הבר-פלגתה שלו מאותו דור, מיודענו האוכנס, חשב

אחרת: האור הוא גלים בדומה לגלי הקול והמים. שטויות, אמר ניוטון. כולם יודעים שהגלים עושים עקיפה, ככלומר, יכולים לעקוף מכשוליהם. כך עושים גלי הקול. لكن, אם יעמוד ההולני בון-הבליעל מאחרי הקיר ויקרא לי בשמות גנאי אשמע אותו אבל אם יעשה לי פרצופים לא אראה אותו. אילו האור היה גלים כמו הקול, היה עושה עקיפה והייתי רואה את מה שמאחרי הקיר.

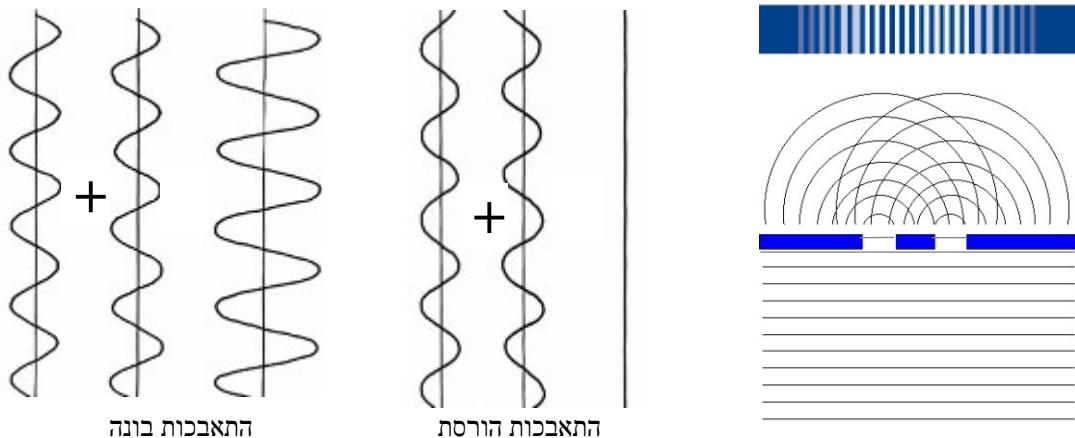
הפיזיקה התפלגה לשני מחנות, חלקייםים (הרוב) וגליסטים (המיינוט). הגליסטים טענו שהאור כן עושה עקיפה, רק חלשנה. עובדה: כאשר מנורה עובר מבעד לנקב צר במחיצה רחוכה וממשיך אל מסך מאחריה, עוביו של כתרם האור על המסך הוא קצר יותר גדול מעובי הכתם שהינו מצפים לראות משטף של חלקיים הנעים בקו ישר (ר' ציור). ענו החלקייםים: אלו רק חלקיים שהשתפשו בשולי הסדק ועפו קצר הצידה. התורה הגלית נשאהה במיעוט.

עד שבא תומס יאנג (1773-1829). הרבה גאנונים היו באנגליה בעת ההיא, אבל בבחור זהה, עליינו להודות, היה ממש חיורי: בגיל שנתיים ידע לקרוא, ובגיל ארבע-עשרה כבר למד יוונית, לטינית, צרפתיות, איטלקיות, עברית, כשדים, סורית, שומרונית, ערבית, פרסית, טורקית ואמהארית. נוסף לכך, הוא קיבל ירושה שעשתה אותו עשיר ולן התלבט מה באמת הוא רוצה להיות כשיגדל. הוא עשה רופא מוצלח אבל גם בלשן ואגיפטולוג שסייע בפענוח כתבי-החרטומים (השפה השלוש-עשרה?), וכמוון גם פיסיקאי. "האדם האחרון שידע הכל," מכנים אותו ההיסטוריונים של המדע.



אמר יאנג: מניסויי עקיפה לא ניועש. גלים עושים עוד משהו ייחודי להם: התאבכות. נתחיל בניסוי פשוט עם גלים באmbטיה. נתקין שובר-גלים לרווח האmbטיה ובו נעשה פתח קטן. בקצה השני נעשה גלים עם האצבוע. הגים הולכים ומתפזרים במעגלים, ועד שיגיעו אל שובר הגים יקבלו חזית שטוחה. והנה, כל גל שטוח כזה עושה דבר מעניין: החלק שהגיע לפתח שובר-הגים יוצא

מן הצד השני, אבל עכשו הוא כבר לא גל שטוח אלא מתפשט בקשחת, כמו בתחלת דרכו. זו העקיפה שעלה דיברנו קודם, ושנויטון ותלמידיו הצליחו להוכיח את קיומה באור.יפה, אבל עכשו נdag שgal שטוח יפגע בשובר-גלים ובו שני פתחים (ר' ציור). עכשו תצאהו משנייהם שתי חזיות-gal קשתיות ותתערבנה זו בזו. כאן נכנסה לפועל התאבכות. הכלל הוא פשוט וכי להבין אותו בואו נזכיר שלכל גל יש شيئا ושפלה. כשלים מתערבים זה בזה – נניח שהם באותו אורך – הם יכולים להיפגש כשהם באותו מופע (פאזה), ככלומר, شيئا מול شيئا ושפלה מול שפל, ואז התוצאה היא "התאבכות בונה": גל בעוצמה כפולה. מצד שני, הגים יכולים להיפגש במופע הפוך, ככלומר, השיא של האחד מתמזג עם השפל של השני ולהייפך, ואז התוצאה היא "התאבכות הורסת": הם מבטלים זה את זה. וכמוון, ייתכנו כל מצבים הביניים שבהם הגים יחזקו או יחלישו זה את זה חלקיית. הגים המעורבים המגיעים לדופן הנגדית של האmbטיה מציגים אם כן את "דגם התאבכות" המפורסם: עצמתם נעה החל מאפס עד גל בעל עוצמה כפולה וחוזר חלילה, הכל בהתאם למרחק הנקודה משני הסדקים.



ר' נספה:
משוואת התארכות
מה שעשה יאנג עכשו היה פשוט ומוחץ: הוא העביר **אלומת אור** דרך שני סדקים ובחן את הדגם שהתחווה על המסך שמאחוריהם. קווי האור והצל יצרו דגם התארכות לכל דבר. הפעם לא היה הסבר חלקי לסתופה והתורה הגלית ניצחה. עם הזמן התגלה שהצבעים השונים הם אורך-אל של קירינה אלקטرومגנטית (ר' פרק 11) ועכשו ניתן היה לחזות בדיקות את צורת התארכות: הכניסו למשואה את אורך גלי האור ואת רוחבי הסדקים ומיקומיהם, חשבו – ותוכלו לדעת בדיקות את עצמת האור בכל נקודה על המסך!

האיש שהשלים את הבנת האופי הגלי של האור היה גאון ארוי שהזכיר מעט את יאנג. ויליאם רוזן פמילטון (1805-1865), בנו של עורך-דין שמסיבה לא ברורה נמסר לאימוץ לדודו הכהן בינקותו. בגיל שלוש ידע לקרוא ועד גיל חמיש ידע לטינית, יוונית ורומיונית עברית. עד גיל שיתים-עשרה הוסיף להן צרפתי, איטלקית, ערבית, ארמית, פרסית וסנסקרית. העברית והארמית עניינו אותו במיוחד כי בעזרתו למד את התנ"ך והברית החדשה. רק בגיל שש-עשרה נחשף לשפה מסווג שונה – המתמטיקה – ומאז נקבע ייעודו, הגם שעשה מאמצים כושלים להיות גם משורר. אחר-כך באו ה"עקרונות" של ניוטון והבחור הסתער על האסטרונומיה והאופטיקה בעזרת החשבון הדיפרנציאלי. מהניתוח המתמטי שעשה לחוקי הגלים נבע ניבויו מפתיע, לפיו אוור העובר דרך גבישים מסוימים ייצור חרוטים חילולים של "חושך". הניבו נבדק בידי חבר ואושש. תורה הגלים זכתה לאישוש נוסף.

ובכל זאת, למה יש לי הרגשה ששוב, בסוף של יום, י יצא ניוטון מנצה מהויכוח? נכון, האור אינו שטף חלקיים אלא גלים, אבל תורה הגלים נותנת לנו חוקים השולטים בגלים האלה, ובמطيיחת לנו שאם נכניס למשואה את **תנאי ההתחלה המתאים** נוכל לנבא בדיקות את התנאות. במילים אחרות: החזון הניאוטוני מצילח שוב בגודל.

וחוץ מזה, חכו עד שנגיעה לקובונטים. עד היום, עוד לא נאמרה המילה الأخيرة בקשר להליך האור.

6.9 הפיזיקה של העולם המיקרוסקופי כמו האלבוהה, נושא האלכימיה את "אל"-הידיעה שנתנו לה העברים שהעיבו אותה מיוון העתיקה לאירופה. האלכימאים היו קבוצה מגוונת: מכשפים שהתעסקו עם שדים ורוחות, נוכלים תאי-בצע, ורומיון גם מדענים של ממש, וכולם ניסו לגלוות את החוקים השולטים בתגובה החומריים אלה עם אלה. האגנזה שלהם הייתה פשוטה ותמיימה: הם ראו איך, עם כל מיני ערבותים ובישולים, הופך חומר אחד לחומר אחר, לעיתים לרעל רב-עוצמה ו/או

לתרופה מצילה-חימם, ולכנן קיוו להפוך בשיטות כאלה מתקנות רגילותות לכיסף זהב. כל מה שצרכין, אמרו, זה רק לשחק עם ארבעת היסודות שבתוכה המתקנות האלה, קצת יותר מיסוד האש, פחות מיסוד המים וכו', ובסוף נקבל זהב. הם גם קיוו לעזר את ההזדקות והמוות. ניוטון, כפי שראינו, עסק הרבה יותר באכימיה מאשר בפיזיקה, אם כי לא השאיר שום דבר מעניין בתחום זה. לאט-לאט, מאינספור ספרים וריצפים, החל מדע חדש להיפרד מאמו: כמו שמהאסטרולוגיה יוצאה האסטרונומיה, כך ילדה האכימיה את הכימיה.

בין המובילים בהפתחות המדע החדש היה אנטואן-לורן לובואזיה (1743–1794). הוא הבביר את מושג ה"יסוד" בכימיה, הוכיח שרוב המתקנות הן עצמן יסודות, בניגוד לארבעת ה"יסודות" של היוונים שהיו תרכובות או תערובות פשוטות, וכן סתם את הגולל על חלומות האלכימאים ליצור זהב ממתכת אחרת. בעיקר התעניין לובואזיה בתהיליך הבירה, המחולל שינויים כה דרמטיים בתכונות החומר, והפריך את התיאוריה המשכנעת שלשלטה בימיו בדבר "פלוגיסטון", מין חומר נתול מסה היוצא מהחומר הבוער. הוא גם הוכיח במדידותיו שנשימת בעלי-ה חיים זהה מבחינה כימית לבירה – תרומה מכרעת להפתחות הפיזיולוגיה. ניסויו הקפדיים של לובואזיה מדויק נטול מסה היוצא מהחומר הבוער. הוא גם הוכיח במדידותיו אלא גם את משקל האויר שבו התרחש התהיליך כולו. שותפו למחקרים אלה היה מיום אחד – לפולס, ויחד הניחו יסודות ראשוניים למדע התרמודינמי. חוק השוב – חוק שימור החומר – נזקף ביום לזכות לובואזיה.

אשת לובואזיה, מריאן פירט (1758–1836), הייתה בת שלוש-עשרה כשנישאה לו והוא הייתה, בפשטות, מתנת-חיו. היא תרגמה עבורו מאמרים מאנגלית, הינה את השרטוטים לעבודתו והשתתפה אותו בויכוחים עם מדען הדור. לאור העבודה שלבוואזיה נגה לפחותים לעצמו את תגליות עמיתיו האנגלים, חלקים עד היום היסטוריונים בשאלת כמה מתגליותיו היו בעצם אותה נערה-רעיה.⁸ לחץ הזוג המאושרים בא הקץ עם המהפכה הצרפתית. לובואזיה היה גם עורך דין וגובה-מיסים חרוץ בשירות ממשלה המלך, שהקיף את פריז בחומה שאפשרה לו לגבות מסים מכל מי שנכנס הוא יצא ממנו, למרבה זעמו של המון המורעב (קשה שלא להשוב כאן על הקבלה לפועלו הפיסיקלי של לובואזיה, חוק שימור החומר, שגם הוא מבוסס על פנקסנות קפדרנית). ואם לא די בכך, שנים אחדות קודם לכן היה ללבואזיה ויכוח קולני עם ז'אן-פול מרא, רופא ומדען מוכשר מאוד אבל פסיכופט לא קטן. עכשווי, תחת שלטון האימים של רובספיר ודנטון, הפק הדוקטור המלומד לעיתונאי צרhani ומג'יר-קצף, וההסתה של עיתונו הביאה להאשמה ללבואזיה בגידה ולהוציאו להורג. "רגע אחד נדרש לראש הזה ליפול", "קונן לגראנז", "אבל מה שנים לא יוציאו עוד ראש זהה".

וכמו הצמד אמפוקל-דמוקריטוס מימי קדם (ר' פרק 2.3), קם ללבואזיה עמית שהשלים את מחקר היסודות שלו ע"י חזרה לתורה האוטומית. ג'ון דלטון (1766–1844), פיזיקאי שלמד בצעירותו אצל פילוסוף עיוור, קנה לו שם בחקר הראייה. הוא עצמו היה עיוור-צבעים

⁸ אחרי מות בעל נישאה מריאן לרוזן הבריטי רמפורד, לשעבר אמריקני בשם בנגמין חומפסון (1814–1573) שערך לשורות הבריטים בעת מלחמת העצמאויות. מחקרו בחום שנוצר בתותחים בעת הקידוח במתכת עשו אותו לאחד ממייסדי התרמודינמיקה. בעת בריחתו מאמריקה נטש את אשתו וכשהגיע לפריז ביקש בקש את יד האלמנה המפורסמת, ששמה להינsha שוב למדענו נודע. לרובה הצער, גילתה שהיא הבודגנית רצה רק את כספה ושלחה אותו לכל הרוחות.

(ליקוי הנקרא כראוי "דלטוניזם"), חקר את התופעה וציווה לשמר את עיניו למדע, ואכן ניתוח שנעשה לעינו ב-1995 גילתה בהן את הגן הגורם לליקוי. דלטון, יש להודות, היה נסיך רשלני, אבל על כך פיצו כשרונותיו כתיאורטיקן. באותו ימים התנהל מરוץ היישגים ערך בין האנגלים, הצרפתים והאיטלקים להבנת החוקים שביסוד המשקלים, הנפחים והלחצים של גזים ונוזלים שונים כשהם עוברים شيئا' טמפרטוריה או מגיבים אלה עם אלה. דלטון, כשההשויה יסודות שונים על-פי משקליהם הסוגליים, הבחן כי הם מתרכבים זה עם זה במנות שלמות כמו 1:1 או 1:2. لكن הצעיר הסבר למגוון התופעותזה: א) החומר בניי מאטומים בלתי ניתנים לחלוקת. ב) כל יסוד בניי מאטומים זהים ואופייניים לו. אך זהה מגוון האטומים למגוון היסודות. האטומים של יסוד זהים לחלוין במשקלם ובצורתם. ג) אטומים אינם ניתנים לשינוי. ד) כבסיסות שונות מתרכבים ליצירת תרכובות, חילק הקטן ביותר השומר על תכונת התרכובת – המולקולה – בניי מספר מסוים קבוע של אטומים מכל יסוד. ה) בתגובה כימית אין נוצרים אטומים ואינם נהרסים. הם רק מסתדרים באופנים אחרים.

אליה מכמם המתמצאים בכימיה מוזמנים לבדוק תחילה עד כמה תקפים העיקרים האלה בכימיה המודרנית. נכון, כבר (א) איןנו נכון, אבל עכשו החילו את המילה "אטום" (לא-מתפרק) על הלא-מתפרקם האמתיים בימינו, כמו האלקטרון או הקוורק. חזון דמוקריטוס-دلטון עמד בבחנה בצורה מפליאה.

פרק חדש נפתח. הכימיה הופכת לפיסיקה של חלקי החומר היסודיים, מה שאומר שכוחות וחוקי תנועה חדשים מצפים לנילויים.

*

זכה וולטר, ובדור שאחריו ליבו כתביו את רוח החופש גם במדע וגם בתרבות כולה. לפרייה של אותם ימים אנחנו חיבים תודה על המאורות הגדולים שנתנה צraft לאנושות, ובهم המدعן שהוא, לבושתו, גם רצח. עשר שנים השתגעו הצרפתים בהנחתה כנופיית טרוריסטים, והוא שינתה המהפכה כיוון בהנחתו של "קיסר" נפוח שיצא לכבוד את כל אירופה תחת עקרונות הצדקה והנאורות שהשתבשו בימי קודמו. גם זה לא מש הצליח, אבל נפוליאון בכל זאת הצליח לעשות כמה דברים יפים: הוא השמיד את האינקוויזיציה בכל מקום אליו הגיעו, וכך אליליו אלכסנדר מוקדון ופרידריך הגדול, טיפה את המדע. מידוענו לגראנז', עמיתו פורייה (1768-1830) ואחרים היו בין באי הצרו.

דוברו הרחות ביותר של המדע הרצפני באותם ימים היה לפלס, אותו פגשו בדף הקודמים פעם סוגר את הרוחים במערכות המשמש ופעם חובר ללבואזה בחקר הבירה. יש סמליות עמוקה בשיתוף-פעולה זה בין כימאי ואסטרונום, והוא מותמצת את המסר העיקרי של פרק זה: אם היקום סגור מבינה חומרית ואנרגטית, כדי לעקוב אחרי כל כמות עצירה של חומר ואנרגיה המשתפים בכל תהליך, כי כל חריגה מהם צופנת תגלית.

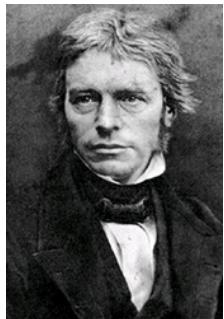
כשיצא לאור "המכניקה השמיימת" של לפלס החל לנפוליאון להעניק לו עותק. או-לה-לה, אמר הקיסר, באמת יפה מצדך. אבל מה שמעטי לך, שכחבת ספר על היקום בלי להזכיר בו את הבורא?

הוּד מעלהך, השיב לפלס, להיפוטזה הזאת לא נזקמתי.

כך, בקרב העם הראשוני שהעוז לבטל את איולות המונרכיה, קיבל גם אלוהים פטור מהאחריות למאזן האנרגיה. החזון, שאפילו ניטוון לא העז לשאוף לו, מומש: יקום סגור

שהשכונתיו מואזנים, ושמלומד אפוף-הgingים יכול להגיע בו לגילויים כבירים בלי לקום מכעס. בפסקה מפורסמת דיבר לפلس על יוצר הקורי מאז "השד של לפלס", "אבל קל לראות שהרבה מתכונותיו של שד זה ביקש עידן הנאורות تحت לאדם עצמו:

נשווה נא בדמיונו חבונה הידועה ברגע מסוים את כל הכוחות הפעלים בטבע ואת מקומים כל הדברים מהם מרכיב העולם; נניח עוד כי חבונה זו מסוגלת להעביר את כל הנתונים האלה בניתוח מתמטי. אז תפיק מהם תוצאה שתחבק בנוסחה אחת ויחידה את תנונות הגופים הגדולים ביקום והאטומים הקטנים ביותר. מאומה לא יהיה בלתי-ודאי לתבונת זו. העבר והעתיד יהיו גלוים לעיניה.



10. פִּרְדֵּי מַשְׁנֶן אֶת בָּלִי פִּיסִּיקָה עֲוֹשָׂה פִּרְדֵּי

מַשְׁנֶן אֶת

היזרו בבני עניים שהם תצא תורה.
(נדרים פ"א 1)

הרומנים של צ'רלס דיקנס, כמו "דיוויד קופרFIELD" ו"אוליבר טויסט", אהובים עליי מאוד, אבל יש אנשים שמעקמים את האף ואומרים: "טלנובלות, דבריהם שלא קורים בחיים האמיתיים." לא נכון. דיקנס עצמופגש אדם שישפورو היה מופלא יותר מכל הרומנים שלו. זה היה מייקל פרדי (1791-1867), נער כמעט אנאלפתי שהוטל עליו לתקן את הרכיכה של קרך מתוך האנציקלופדיה המפורסמת בעולם. הוא הציג פנים וקרא את הערך "חשל". ביום, שתים-עשרה מהזרות מאוחר יותר, מכוב הוא עצמו באוטו ערך באותה אנציקלופדיה.

ג'ים פרדי, נפה כפרי עני שבא ללונדון מירוקשר עם משפחתו, היה חבר בכנסייה מוזרה שנסדה בידי גון סנדמן ושהטיפה לחיי צניעות קיצוניים. בלונדון נולד לו מייקל, שלמד בבית-הספר "יסודות קריאה, כתיבה וחשבון" עד שנאלץ לעזוב בגין שלוש-עשרה ולצאת לעבוד במקום אביו החולה. בלונדון של אותו ימים, מסלול היו של הילד נראה מובהך כמו זה של בן-גilio מהמעמד הגבוה, רק לכיוון ההפור: עוני, רעב ומחלות, בתקווה שאדיקותו בדעת תמנע לפחות התדרדרות לפשע. והנה, הנער המתקשה בקריאה מצא עצמו מוקף בספרים: פליט מצרפת, ז'ורז' ריבו, שבא ללונדון אחרי המהפכה, נתן לו עבודה בהשאלת עיתונים: לך תביא את העיתון הזה למר סמית' ואחר-כך תעבור אותו למר ג'ונס וכו'. כשהראה שהנער מצטיין בעבודה הצעירה לו קידום למקצוע מכובד יותר: פורכות. כאן, בין חיתוך קרטוניים לבישול דבק, החל מיק להסתכל גם במה שבתווך הרכיכות. פעם היה זה ספר בכימיה מאות ג'ין מרפט (לה ישלה בשנים הבאות עותקים ממאמרים כאות תודה ל"מורתי הראשונה") שעוזד אותו לעשות ניסויים בעצמו. פעם אחרה היה זה קרך מה"בריטניקה" (מהזרה השלישי) שבו היה ערך בן 127 עמודים על חשל, והוא החל לעשות ניסויים גם בחשל. ריבו הטוב הרשה לו לפתח מעבדה בחדרון צדי, שם רכש המדען הצעיר الرجل: לא להאמין לשום טענה עד שיביע את הניסוי בעצמו.

פרדוי קרא גם ספר בשם "על שיפור הנפש" שמחברו, הקומר איזק וטס, הבטיח לצערדים עניים כי יוכל להיות גנטלמנים מלומדים אם ישמעו לעצותיו: היה מודע לבורותך, לך להרצאות, דבר עם אנשים חכמים, אל תיכנס למחלוות, אל... וכו'. באותו ימים לא הייתה פסיכולוגיה, ובאזור הספר הזה למד הנער לעצב מחדש את עצמו. בגין תשע-עשרה התיתם מאבו. באותה שנה ראה מודעה ברחוב על הרצאות ב"אגודה העירונית לפילוסופיה" שנסדה בידי צורף בשם גון טיטום*. מחיר הכניסה היה שילינג אחד. אף מוצאים סכום כזה? האח הבכור רוברט, שירש את בעיותם אביהם לנפה, נתן לו את הכסף. בהרצאות פרגדי עוד צעירים שאהבו ללמידה. הוא רשם בשקדנות את הרצאות והחל להתכתב עם אחד המשתתפים, ובכך העניק אוצר נפלא להיסטוריונים של המדע. עלייה עולגה עכשו תמונה היה של הבחורים האלה מגיעים במתיבם בגדיהם למפגש לו חיכו כל השבוע, מהתאמצים

*. אגודה זו תפתח ברבות הימים מכללת בויקבק בלונדון.

להסתיר איש מפני רעהו נעלים מבוקעות, שרול מטולא ובתו ריקה, ומחקים ברכיניות נוגעת-לב את חברי "המכון המלכוטי למדע" שהיה פתוח רק לבני המעד הגובה. יום אחד הזמיןו חברי האגודה את פרדיי לחתם להם הרצאה, ואנחנו יכולים לתאר לעצמנו מה הייתה הפעטאזה של המרצה והশומעים ולמי ניסו להיזמות. את כל הרצאות העלה פרדיי על הכתב ואז עשה את מה שידע הכי טוב: הוא כרך אותו ל"ספר" מהודר, שנשא הקדשה אוחבת לבוס שלו. "פרק לא וו!" התמוגג ריבו מנהת והראה את הספר לכל לקוחותינו, שאחד מהם היה, במרקחה, חבר "המכון המלכוטי למדע". האיש ביקש לשאול את הספר, וכשהחזרו מצא פרדיי בין דפיו כרטיסים לסדרת הרצאות במכון המלכוטי מפי גدول אנשי המעד באולם ימים, סר המפרי דייני (1778-1829). ושוב עולה בדיון סצנה דיקנסית כשהעלם נמוֹך-הקומה בעל פניו הנער, רחוץ, מסורק ובוודאי סמוך עד אוזניו, מתיעץ להרצאה בבית חלומותיו, מקשיב ורושם כל מילה.

בintéתיים פרש ריבו ואת מקומו תפס צרפתי אחר, פחות נחמד, שדרש מפרדיי להפסיק עם השטויות ולעבוד בכווך נזדק. פרדיי הרגיש שהוא חייב לעשות משהו כדי שיוכל להתמסר למדע. הוא חוזר על תרגיל ההתחנפות מיימי החברה העירונית, ניגש לדיווי ונתן לו כרך מהודר – זה היה, מן הסתם, כרך **מאוד** מהודר – של הרצאות שרשם מפיו, 386 עמודים, כולל ציורים. אולי, שאל, במבטא הקוקני שדבק בו כל חייו, במרקחה... זת'ו'מרת... אולי אתם מהפשים עוזר?

מצטרע, אמר דיווי, המדע הוא איש קשה ולא כדאי לך לשנות מקצוע. תקוותיו של פרדיי התרסקו. אה-כך נפגעה עינו של דיווי בתאונת מעבדה והוא שלח לקרוא לפרדיאי לרשום לו רשומות, וכשהחלים שלח אותו חזקה לכרייכיה ופרדיאי היה שוב נורא עצוב. ואז קרה נס: האסיסטנט הכימי של המכון הסתבך בקרב אגראפים עם עובד אחר ופוטר. מרכבה הופעה בשעות הערב בשכונות העוני ג'יוקובס גל, מול בית משפחת פרדיי. השליח מסר למיקל מכתב: בוא מהר למכון! הוא בא. במקום מעבדה מאולתרת בירכתי הceryciaה באו משרה מלאה פלוס דירח הינט בתחום בית-המקדש שלו. הללויה!

השנה הבאה, 1813, אפשרה לפרדיאי להסתכל במבט קצר יותר מפוכח על "הכהן הגדול" שלו העריץ עד עתה מרוחוק. דיווי לkahו אתו כאסיסטנט למסע בן שנה וחצי באירופה. הייתה רק בעיה קטנה עם הגדרת התפקיד "אסיסטנט". אתה מבין, אמר דיווי, אני נוסע עם האישה ואנחנו צרייכים משרות, אבל בגל המצב הביטחוני (אנגליה הייתה אז במלחמה עם נפוליאון, שנtan ויזה מיו'חתת לדיווי) המשרת שלנו התפטר. אז מה דעתך שבתחלת המסע תבוא בשני התפקידים וברגע שנגיע לפאריז נמצא משרות אתה תהיהשוב רק אסיסטנט?

כמובן, שום צרפתי לא נראה לדיווי טוב מספיק כמו מיק שלו, שבין צחצוה נעלים لكنיית עיתון-הבוקר היה אפשר לדבר אותו על הפקת יוד מaceous או על פטנט חדש של מנורה למכרות. והייתה הדיווית הפטפטנית והמרושעת – סלייחה: ליידי ג'יין – שהיה ממש חשוב לה להזכיר לבוחר מבאר-יעקב כי מבחינה הוא בסך- הכל עוד משרות החייב לשטווף רצפה ולאכול במטבח עם החדרנית והטבח. פרדיי היה אומלל וכבר חשב לחזור הביתה ולוותר על המדע. למזו ולםזלו, הוא בלע את העלבונות ונשאר. במהלך המסע הייתה לו הזדמנות ללמידה קצרה צרפתי ואיטלקית ולהתודע אל מדען אירופה הגדולים, כדוגמת אלסנדרו וולטה (1745-1827) ואנדרה-מארי אמפר (1775-1836), ששמותיהם מופיעים עד היום

כיהידות מתה ומטען על מכתשי הشمل בכתיכם. בין לבין הקשיב בנסיבות עצורה לוויכוחיו מورو עם גדולי הדור. גם דיווי יעקב מזוית-עינו אחר בן-טיפוחיו ההולך ונעשה לאיש. בשובם לאנגליה העלה דיווי את עוזרו בדרגה ונתן לו לעבוד לבד. פרדיי עסק בעיקר בכימיה, וגילה תגלית אחר תגלית. אבל ב-1820 הטיל עליו דיווי משימה ששינתה את חייו. הנה ניסוי מעניין שעשה דני אחד. שב תחקור את הנושא.

1.10 זהה בפה תאומים

למגנט יש תמיד שני קטבים: אם תשברו אותו לשניים יהיה כל חלק מגנט קטן בפני עצמו, עם קווטב צפוני וקווטב דרומי המציגים לכל פשטוט: דווימים דוחים והשווים מושכים. כשהמנת מושך ברזל, הוא הופך אותו למגנט חלש המציג לאותו כלל. וכשהמת המצפן מצבעה צפונה, הקוטב הצפוני שלו נמשך אל הקוטב הנגדי של מגנט ענק העובר בעמוקי כדור הארץ.

הסביר-רבא-רבא שלנו, תלס (פרק 2.1), הוא שכותב ראשון על המגנט, והוא גם כתב על תופעה דומה הגורמת לפיסות ניר להימשך אל גוש ענבר ("bijoune" "אלקטראון") שושופש. את הצורה הפשטוטה הזאת של החשמל יכול לגלות כל אחד. התכו ניר עיתון לחתיכות קטנות ככל האפשר והניחו אותן על השולחן. קחו פיסת נילון, שפשפו אותה בשערותיכם וקרבו אותה מלמעלה אל פיסות הניר. מה שగובר על כוח הכבידה ומושך אותן למעלה הוא הכוח החשמלי. פיסת הנילון התמלאה החשמל סטטי, ככלומר עומד, הקרווי גם "מטען". המטען הזה יכול לעبور מגוף אחד לגוף שני, ואז הוא יהיה "זרם" ויעשה דבריים עוד יותר מעניינים.

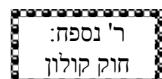
תלס עצמו, מן הסתם, חשב שיש קשר בין המגנטיות והחשמל עליהם כתוב. אבל רק כעבור הרבה מאות שנים בא שארל דו פַי (1698-1739) וגילה שגם חשמל, כמו למגנט, שני סוגים: חיובי ושלילי. גופים הטעונים בחשמלים האלה מציתים לכל דומה זהה של קוטבי המגנט: דווימים דוחים והשווים מושכים.

בא עוד שארל אחד, דה קולז'ן (1736-1806) והראה שלישי התואמים, המגנטיות והחשמל, עוד תוכנה משותפת, גם להם וגם לאחיהם הגדל, הכבידה. כמו בחוק של ניוטון, גם כוחות חשמליים ומגנטיים נחלשים באופן תלול לפי מרחקם מהגוף:

חוק קולז'ן: עוצמת השדה נחלשת ביחס יש לריבוע המרחק מהגוף בעל המטען המגנטי או החשמלי.

האם זה הכל? ואולי לשתי התופעות יש לא רק תוכנות משותפות אלא הן משפיעות זו על זו? חוקר מדנמרק, הנס כריסטיאן ארסטד (1777-1851) (שהיה חבר קרוב ותומך של דני גודול אחר, הנס כריסטיאן אנדרסן), עשה ניסוי לפני תלמידיו בבית-הספר: הוא הניח תיל חשמלי על השולחן והעביר בו זרם. במקרה היה כיון התיל צפון-דרום ובמקרה היה מצפן מונח ליד התיל. כשה עבר הזרם בתיל, הסתוובבה מהט המצפן לכיוון מזרח-מערב! כשבORK הזרם חזרה למצבה הרגיל. בצלום ממשמאלי תיל מאונך מוקף מצפנים. כשה עבר בו זרם מסתדרות מטה המצפנים בעיגול סביבו. אם יתהפך כיון הזרם יתהפך כיון המצפנים. הקשר בין כיון הזרימה לכיוון המצפנים מבוטא ע"י כלל ידוע:

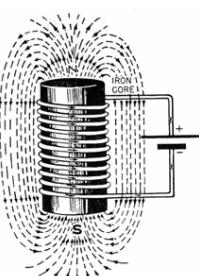
כלל היד הימנית: אם נניח את כף ידנו הימנית כישאצבעותיה כפופות על תיל בו זרם



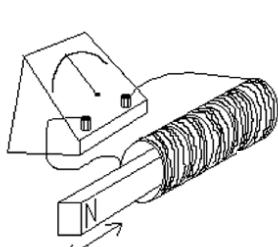
חשמל^א כך שהאנדרט יהיה בכיוון אליו פונה הזרם, הכיוון אליו פונת האכובות יהיה ההפוך
אליו תפנה מחת המטען.

משהו מאוד מוזר בתופעה הזאת: אצל ניוטון, כוח המשיכה פועל בקו ישר, ככלומר הגוף
המושכים נעים היישר זה אל זה. אך קורה גם במשיכה או בדחיה בין מגנטים או מטענים
חסמיים לבין עצם. אבל איזה מין כוח הוא זה, הפועל בין מגנטים ומטענים, הדוחף גוף
בכיוון הניצב לו?

תודות לארסטד נוכל להבין ניסוי מעניין שעשה אמפר: שני תילים מקבילים, כשהזורם בהם
זרם לאותו כיוון, מושכים זה את זה. לעומת זאת זו סתירה לכל הדומים דוחים והשוניים
מושכים, אבל אם נדמיין את כיוון הכוח המגנטי סובב סביב הזרם לפי "כלל היד הימנית"
לעיל, נבין שני הצדדים הסמוכים של התילים הם כמו שני מגנטים הפוכים ולכן הם
מושכים זה את זה.



במכון המלכותי ישב פרדיי ושיחק כל היום במגנטים ובסוללות, אותן סוללות שמיודעו
ולטה המציא ושאפשרו לייצר זרם חשמלי (ר' פרק 12). תחילת חזק את המagnet של
ארסטד. אם הזרם יוצר כוח מגנטי חזק בכיוון המאונך לו, אפשר לחזק את המagnet הזה ע"י
שנגורום לזרם לחזור ולזרום באותו כיוון הרבה פעמים. כך נולד האלקטרומagnet (ר' ציור).
כתwil מלופף על מוט ברזל, הוא מחזק את הכוח המגנטי של עצמו בכיוון המאונך לכיוון
זרימת החשמל. הברזל עצמו מתמagnet ותרום גם הוא לחזק המagnet.



הഗיל פרדיי לעשוה ב-1821 כשהעמיק את תגליתו של ארסטד. הוא בנה מתקן מהוכם
שבו היה מוט מגנטי צף במאונך בקערת כספית, צפון למעלה ודרום למטה, במקביל לתיל
חשמלי, אני גם הוא. כשהעביר זרם בתיל החל המagnet לשחות במהירות סביב התיל! וכך
נולד המנוע החסמי הראשוני.



זו הייתה רק ההתחלה. אם ארסטד יצר מגנטיות מחשמל, אמר פרדיי, צריכה
להיות דרך לייצר חשמל מגנטיות. עשר שנים אחרי תגלית המנוע, ב-1831,
הצליח. הוא ליפף תיל לסליל וחיבר אותו למד-זרם. כשהוכניס מגנט לסליל, נוצר
בתיל זרם רגעי – ונעלם. כשהווציא את המagnet,שוב נוצר זרם – ושוב נעלם.
במילים אחרות, **חסמל נוצר כשהмагנט זז**.

כך המציא פרדיי את הגנרטטור ובכך פתח פרק חדש בטכנולוגיה וגם בתולדות
האנושות, כי עד היום מניע החשמל כמעט כל דבר בציורייזציה שלנו, כולל המקלדות וכל מה
שמחוור אליה שבuzzורתם אני כותב עכשו. אבל אנחנו מתעניינים לא בטכנולוגיה אלא
בשאלת המדעית לגבי טבע התאים האלה, לכן בואו נמשיך אחרי פרדיי התאורטיקן. נגלה
כי גם הוא שיך לאLIGHTה המצומצמת המלווה אותנו מראשית ימי המדע: האפלטונייסטים.

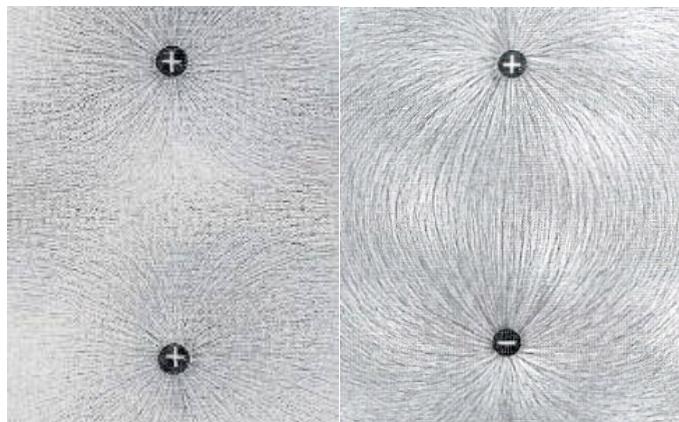
2. 10. ה"שדה"



בסוף ימי הוכניס פרדיי לפיסיקה מונח חדש, שנשמע קצת רוחני ולכו התייחסו אליו אנשים
בחשד. המagnet והחסמל, אמר פרדיי, יוצרים סביבם שדה, מין ישות המפעילה כוח על
העצמים המצויים בה. את המושג "כח" כבר הגדר לנו ניוטון: כל דבר שגורם לגוף לשנות
את תנועתו. הניסוי המפורסם שבאזורתו המחייב פרדיי את השדה בוודאי מוכר לכם. קחו

^a. רצוי בלי לגעת, כדי שלא נהפוך בעצמו לתופעה חסמיית מעניינת.

מagnet בצורת מוט או פרסה, הניחו עליו דף נייר ועליו פורו נסורת ברזול (קל ליצור נסורת צאת מצמר הברזול לניקוי כלים במטבח: פשוט שפשפו אותו עד שיתפור). כמה הקשות באצבע על הנייר ולויעניכם יופיע אוסף קווים היוצאים מוקטב אחד של המגנט אל השני. הקווים האלה קרוויים קווי-כוח. יש אומרם שהקווים האלה הוציאו לפראדי שדה חרוש ומכאן שם התופעה. גם המטען החשמלי, אמר פרדי, מוקף שדה כזה. נחשוב למשל על הליק בעל מטען חשמלי שלילי. קווי-הכוח שלו הם קווים ישרים היוצאים ממנו לכל הכוונים. השדה חזק יותר ככל שהקווים האלה צפופים יותר, כלומר בקרבת המקור. כל



הליק בעל מטען חיובי שייקלע לשדה זהה, יימשך אל החליק הראשון לאורך הקו המחבר ביניהם, וכל חליק בעל מטען שלילי יידחה לכיוון הפוך.

שני הציורים הבאים מראים בשיטה דומה את השדות סביב שני גופים חשמליים קטנים. קווי-הכוח היוצאים מכל גוף מתוארים ע"י הליקי מתכת המרחפים על שמן ומקבלים בעצם מטענים חשמליים זעירים. ניתן ממש לראות את כוחות הדחיה והמשיכה בין הגוףים.

עם המושג החדש הזה שהכניס פרדי לפיסיקה, באו נחזר לרגע לניטון ולכוח הכבידה שלו (פרק 8.4) ונוסף לתיאוריה יסוד חשוב: סביר כל מסה קיים שדה כבידה, ככלומר אינספור קווי-כוח היוצאים מהגוף ומהפטים בחלל, ועל כל גוף שאליו הם מגיעים הם מפעילים כוח הפועל בקו ישר המחבר בין שני הגוףים.
אבל בשני השדות שחקר פרדי היה משחו חדש, לא דומה לשום דבר אחר.

3. 10. שנ יים שם אחד
חשיבות לי להסביר לכם את לב-לבה של תגלית פרדי, וגם הגרפיకאי שצייר את התמונה המצורפת השקיע מאמץ לעשوت את הנושא מובן, כי כאן מתחבא אחד הסודות העמוקים של הטבע.

ועוד הערה: בניסויים שאתאר כאן אני רוצה למנוע מהשפעתו של שדה אחד מלחתurb בשדה השני, וגם למנוע מניטון מלחתurb עם החוק השלישי שלו, "חוק הפעולה והתגובה".
למשל, אם ארצתה לתאר את השפעתו של מגנט על מטען חשמלי, חשוב לי שפעולות המטען החשמלי עצמו על המגנט לא תבלבל אותנו ושהמגנט לא יוזז גם הוא. לכן משתמש פעם במגנט גדול ומטען חשמלי קטן ופעם להפרק, לפי הצורך.

3. 10.3. מגנט בשדה חשמלי

נתחיל בשדה החשמלי. דמיינו לעצמכם גוף כדורי גדול טוון מטען חשמלי. לשם קיצור מכנים הפיזיקאים גוף כזה "טען". לאור מה שלמדנו, המטען הזה מוקף בשדה. השדה מורכב מקווי-כוח, ככלומר זילוני קוויים היוצאים מהטען לכל הכוונים ויוצרים סביבו שדה בדמות כדור גדול האופף אותו בחלל. זה אומר שככל מטען חשמלי הפוך, שייקלע לאחד מקוואי-הכוח האלה, יימשך אל המטען שלנו היישר לאורכו הקו, וכל מטען חשמלי זהה יידחה בכיוון הפוך.

עכשיו, מה יקרה למגנט קטן שיימצא בתחום השדה זהה? כמובן. הוא לא יושפע בכלל מהשדה. אבל ל"כולם" זהה יש סיג חשוב: **כלום כל עוד המטען אינו נע ביחס למגנט**.
יפה, עכשו נתאר לעצמנו את המטען נע לيمין. ברור שהשדה החשמלי הcdnורי המקיים אותו נע אליו. עכשו אבקשכם לשים לב רק לאוותם קווי-כוח בשדה זהה הניצבים לכיוון התנועה של המטען: הם יוצרים יחד עיגול החותך את כדור השדה באמצעותו, בניצב לכיוון התנועה (כיוניהם למעלה-למטה וקדימה-אהורה ביחד בלבד למשור הדף).

פרדוי גילה כי ברגע שהטען נז, והשדה זו אותו, קורה דבר מפליא לקווים האלה שבתווך העיגול: קווי-כוח חדשים יוצאים מהם, **לכיוון הניצב ב-90 מעלות** גם להם וגם לכיוון העיגול. קיבלנו, אם כן, בתחום העיגול החותך, שבתווך השדה הcdnורי, קווי-כוח היוצרים הרבה מעגלים בגודלים שונים זה סביר זה, כשהטען הנע במרכזם (להוציאים: המעגל הוא הקו ○ והעיגול הוא השטח המלא אותו ●). כל מעגל הוא אם כן קו-כוח עגול שצץ בהתאם מתחום השדה החשמלי ברגע שהטען החל לנוע, וכיונו, כאמור, ניצב גם לכיוון התנועה של המטען וגם לכיוון קווי-הכוח החשמלי. היצזו שוב בתרשים לוודא שהבנתם את זה. ממש לא מסובך.

אמרתי שסביר המטען הנע הופיעו קווי-כוח "חדשים"? הנה ההפתעה: אנחנו כבר מכירים אותם. אלה הם קווי-הכוח המגנטיים. אכן, אם עד עתה היה המagnet שצד אדייש למטען החשמלי, עכשו, כשהטען נע, יסתובב המagnet ויעמוד בכיוון הניצב הן למטען והן לכיוון התנועתו. במקרים אחרים: המagnet יסתדר לאורך קווי-הכוח המגנטיים שהופיעו סביב המטען הנע. אם ייעזר המטען, ייעלמו קווי-הכוח המגנטיים, והוא והagnet יהיו שוב אדישים זה זהה.
גם כאן חל "כלל היד اليمنית" לעיל: **נשים את יד ימין בכל מקום סביב המטען כך שאגודלו יפנה לכיוון תנועתו, וה"צפון" של השדה המגנטי יהיה בכיוון שאר אצבעותינו.**"

10.3.2 מטען חזמי בשדה מגנטי

עכשו נחליף תפקדים בין המטען והagnet. גם הפעם, כדי שהטען לא יפריע לנו עם השדה שלו, נעשה אתagnet גדול ואת המטען קטן. עוד דבר שעליינו לזכור הוא שיש הבדל חשוב (עליו נתעכבר בהמשך הספר) בין קווי-כוח מגנטיים לבין קווי-כוח חזמיים: קווי-הכוח המגנטיים אינם ישרים אלא יוצריםليلות, מהקווטר הצפוני שלagnet אל הדרומי, ומשם דרך גוףagnet חוזרת לצפוני ולהיפך. אני רוצה להציג על השדהagnet תופעה דומה ככל האפשר לו שהדגמוני קודם על השדה החשמלי, ולכן, כדי לעשות את השדהagnet דומה לשדה החשמלי, אשמש בסידור הזה:agnet יהיה מגנט פרסה עגול שני קטבי פונים היישר זה אל זה, כך שקווי-הכוח העוביים ביניהם יהיו ישרים. את המטען החשמלי הזעיר שלנו נשים ברווח הזה שבין הקטבים. לא יקרה כלום. עכשו נזין אתagnet ימינה בכיוון הניצב לכיוון קווי-הכוח שלו. והנה שוב, מכל קו-כוח מגנטי ייצאו קווי-כוח חדשים הניצבים ב-90 מעלות גם לו וגם לכיוון תנועתagnet. ועכשו לא תתקשו לנחש מהם קווי-הכוח האלה שצצו פתאום: נכוון, אלה הם קווי-כוח חזמיים. ואם עשיתם את

*. ומה לגבי קווי-הכוח החסמיים שאינם מאונכים לכיוון התנועה של המטען? אין מופיע רצף. הקו הבודד המופנה כדיוק לכיוון התנועה לא יוצא שם קווי-כוח מגנטיים, אבל הקווים האחרים יוציאו קווי-כוח מגנטיים הולשים יותר בהתאם לזרותיהם שם יוצרים עם כיוון התנועה. נקבל אם כן שדה מגנטי רציף על פני כל השדה החשמלי, המגיע לשיאו בעיגול הניצב לכיוון התנועה.

האנלוגיה נכון, תבינו שגם הגוף החשמלי קיבל דחיפה מזורה **למעלה או למטה**, לכיוון הניצב גם לכיוון בו נמצא המגנט וגם לכיוון תנועת המגנט.

עד כאן הזנו את המגנט לעומת המטען. מה יקרה אם נשאיר את המגנט במקומו ונזיז את המטען? **אותה תוצאה**. שימו לב שאני לא מדובר על השדה של המטען – דאגתי לעשות אותו זניח – אלא על השדה של המגנט: הוא הופך לשדה חשמלי lagi כי כל מטען הנע בניצב לקווי-הכוח שלו.

עוד זוג ניסויים פשוט ויפה ימחיש לנו את השפעת השדה המגנטי על מטען נע. בציור הבא עוד מגנט פרסה עגול, העומד כך שה"דרום" שלו קרוב אלינו בעוד "צפון" הוא בכיוון הפוך, פנים הדף. בין שני קטביו, באמצע, עובר תיל. בתיל אין זרם ולכון הוא אדיש למגנט. מה יקרה אם יעבור בו זרם? במקרה זהה יעברו בתיל הרבה גופים בעלי מטען חשמלי שלילי – האלקטרונים (ר' פרק 12). אלה הם גופים קטנים מאוד- מאוד, אבל כמובן שהם רבים מאוד- מאוד, הם יכולים בכוחות משותפים למשוך את כל התיל לצד זה או אחר. ולכון:

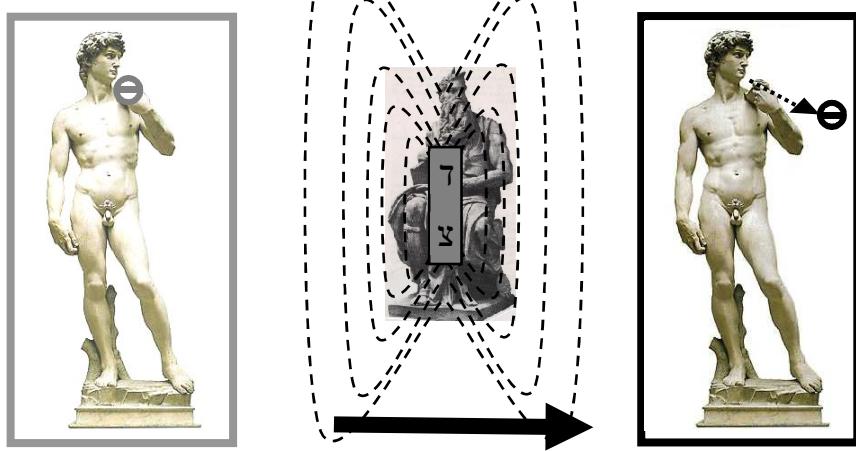
ניסוי 1. נעביר זרם בתיל, **מיימין לשמאלו**. התיל יידחף למטה. נעביר זרם הפוך **משמאלו לيمין**: התיל יידחף **למעלה**.

ניסוי 2. עכשו לא נעביר בתיל שום זרם ורק נדחוף אותו בעצמו, נאמר בלחיצת אצבע, **למטה**. בתיל יעבור זרם **מיימין לשמאלו**. נדחף את התיל בכיוון הפוך, **למעלה**. בתיל יעבור זרם הפוך, **משמאלו לימין**.

מה קרה כאן? נזכיר שגם עבר בו זרם יש אינספור אלקטرونים היושבים בתחום האטומי שלהם. כשדחפנו את התיל **למטה או למעלה** מצאו האלקטרונים את עצם נעים בתחום השדה המגנטי ומיד צייתו לחוק פרדיי: הם ברחו מהאטומים שלהם ונעו בזווית הניצבת הן בכיוון קווי-הכוח המגנטיים והן **לכיוון תנועתם**, ככלומר, לאורך התיל.

לסימטריה היפה בין שני הניסויים נוסיף לסיום היבט כמותי. כוח הדחיפה ב-(1) תלוי בעוצמת הזרם, ועוצמת הזרם ב-(2) תלולה במהירות בה דחפתם את התיל.

4.10 ושוב האיןווריאנטיות
כדי להעמיק את הבנתנו בטבע שני השדות נעשה עוד ניסוי מחשבתי אחד, שהוא וריאציה על ניסוי שעשינו זמן-זמן. הוא יחשוף לעינינו היבור מפתיע בין פרדיי לבין גלילאו, וייתן בהמשך רמז חשוב לאינשטיין. הנה אם כן צמד הגיבורים התנ"כיים שהבאו מארצו של גלילאו, דוד ומשה, שבפרק 6 סייעו לנו כל כך יפה להבין את עיקרונות האינווריאנטיות. עשינו נזמין אותם לאנגליה (אחד מהם, נראה לי, לא אהב את האקלים) ונבקש מהם לעזור לנו בניסויים במגנטיות וחשמל.



דוד, בקרון שעוזד לא החל לנוע, מחזיק במטען חשמלי קטן בעוד משה, היושב ברציף, מחזיק במגנט גדול. המגנט שביד משה מאונך, צפונה למטה ודרומ למעלה. עכשו ננייע את הקרון של דוד על פני משה, משמאלו לימין. התוצאה: המטען שביד דוד עף אל מחוץ לדף, היישר אלינו.

זכירים מה טען דוד בפרק 6 במצח נחושה? גם הפעם הוא מצהיר: "אני והקרון שלי עומדים, זהה רק העולם, עם הרציף ממול והאיש עם המגנט הגדול היושב שם, הטסים מימין לשמאלו, ובגללם ברוח לי המטען שהחזקתי ועף לכיוונכם." מה יקרה, אם כן, אם דוד באמת ישב במקום משה, בעוד משה, עם המגנט שלו, יחלוף על פניו בקרון מימין לשמאלו? אם גليلאו צודק, תתקבלו אותה תוצאה.

ובכן, גليلאו שוב צודק, ושוב יכול דוד לטעון את טענתו האגוצנטרית, וכל חוקי הטבע יתנו לה את אותו מעמד כמו לטענת השכל הישר שהעולם עומד ודוד נע. לבסוף, תארו לעצמכם שימושה התיאטיב בקרון של דוד. מה יקרה כשהקרון של דוד ינועשוב? נכון: כלום. שני הגופים נעים, אבל תנועתם היחסית היא **אפס**.

מניסויים אלה הולכת ומתבררת עוד סימטריה מפליאת שתהפוך ליסוד הפיזיקה של ימינו. ראיינו שהטען שביד דוד עף בכיוון הניצב לדף, אלינו. מה צריך לעשות כדי שהטען יעוף בכיוון ההפוך, אל "עומק" הדף? אפשר א) לבקש מדוד שינוי בכיוון ההפוך, ב) לבקש ממשה שיהפוך את כיוון המגנט, ג) להחליף את המטען שביד דוד משלילי לחובי, ו-ד) לצלם את כל התהליך בוודיאו ולהרייך את הסרט אחוריית.

ומה יקרה אם נעשה את כל הפעולות יחד? יופיע התהליך המקורי! לפניו עיקרון אינואריאנטיות המטען, הזוגיות והזמן (Charge, Parity and Time) בפיזיקה המודרנית, הנובע מתוריות היחסות והקוונטיים המCAFות לנו בהמשך:

עיקרון שימור ה-CPT: בכל תהליך פיסיקלי, חוקי הפיזיקה יישארו בעינם אם נחליף כלטען בהיפוכו, כל צד במרחב בהיפוכו וכל כיוון בזמן בהיפוכו.

מה שמתגלה כאן קשר הוא עמוק בין מטען, מרחב וזמן, שואלי נתונים לנו רמז על ממדים נוספים של המציאות. להמחשת הדברים באו נעשה ניסוי בשלושה ממדים. שימו מוליכם ספר כלשהו כשהשער מוליכם. עכשו א) הפכו אותו לאחוריו כך שהימין והשמאל שלו יתהפכו גם הם, ב) הפכו אותו שוב פנים ואחרו כך שגם ה"למעלה" וה"למטה" שלו יתהפכו, ו-ג) סובבו אותו על משטח השולחן כך שה"למעלה" וה"למטה" שלו יתהפכו שוב. הספר

עבר שלושה סיבובים בשלושת מימי המרחב – וזר לנצח המוקורי. מה שה-CPT אומר לנו הוא שהמתען, המרחב והזמן שלובים באיזה אופן זה זה כמו שלושת מימי המרחב! טוב, נסחפנו קצת לפיסיקה של ימינו. בואו נזהר למסגרת הcrononlogia.

5. 10. צמד חוקים

אתם בוודאי מבינים היטב המוזר של שני הכוחות האלה, המבדיל אותם מכל כוח אחר: השדה המגנטי אינו "מרגייש" במתען החשמלי הנמצא בתוכו כל עוד המתען אינו זו לעומתו, אבל פועל עליו ברגע שהוא עושה תנועה כלשהי בכיוון הניצב לקווי-הכוח שלו. אותו דבר מופיע יוצרים שדה מגנטי רב-עוצמה על פני כל העיר, ואילו אתם עצמכם ארנבת קטנה שפמו יוצרים שדה מגנטי רב-עוצמה על פני כל העיר, ומה תעשו כדי שהנמר לא יגלה אתכם? שמרוב פחד נעשה פרוותה טעונה במתען החשמלי. מה תעשו כדי שהנמר לא יגלה אתכם? באיזה צורה מתגנוו אל מחוץ לתוך השדה? ומה צריך הנמר לעשות כדי שתתגלו? ומה תעשו כדי לבטל את פועלתו? השדה האלקטרומגנטי, אם כן, רגש לתנועה. על כך נוסיף את המזרות השנייה: השדה שפעיל השדה החשמלי/מגנטי אינו רק ישר אלא גם ניצב, ככלומר מסובב/מעיף את המגנטי/המתען הczyda.

וכך, מכל ההזדמנויות האלה ה הגיעו שני חוקי-יסוד, הידועים ביום כחוק פרדיי והחוק המקביל של מקסול (ר' בפרק הבא), המאחדים בין שתי התופעות:

- א.** שדה חשמלי נוצר בכל מקום שבו שדה מגנטי משתנה עם הזמן. עוצמת השדה החשמלי הנוצר פרוטרציונית לקצב שינוי השדה המגנטי. כיוונו ניצב לכיוון השני בשדה המגנטי.
- ב.** שדה מגנטי נוצר בכל מקום שבו שדה חשמלי משתנה עם הזמן. עוצמת השדה המגנטי הנוצר פרוטרציונית לקצב שינוי השדה החשמלי. כיוונו ניצב לכיוון השני בשדה החשמלי.

6. 10. פרדיי לא אהב טלנוובלות כשאדם שהצטרף לקבוצה מוהסת מבחן מתחילה להתקדם בה, זו רק שאלה של זמן עד שיתחיל למשוך אש, אפילו אם הוא הבוחר הכى נחמד בעיר. דיווי, פטרונו של פרדיי, היה כימאי ופיזיקאי גאנז שרשם לזכותו שורה ארוכה של תגליות ומקומו בתולדות המדע היה כבר מובטח. אבל לרגש יש חוקים משלו. אין ספק שכיבד ואהב את בן-חסותו, אבל אין גם ספק שבשלב מסוים החל לשים לו רגל בכל פינה. צד פיסיולוגי מעוניין בתסבוכת הזאת הוא העובה שגם דיווי לא היה בן המעד הגובה אלא בנו של נגר (יש אומרים שניישויו לאלמנה עשירה באו לא אהבה אלא כדי לקדם את מעמדו), ונראה שפרדיי בן הנפה עורר בו לא מעט תסביכים בנושא זה.⁸

ראינו איך ב-1821 הציג פרדיי את המנווע החשמלי הראשון, ככלומר מתקן שהפך אנרגיה חשמלית لأنרגיה קינטית. הבעייה הייתה שהיא שמן קצר קודם לנישה דיווי, יחד עם ויליאם וולסטון, לבנות מנוע כזה ונכשל. יותר מזה: פרדיי נכנס למעבדה בזמן שייחתם של השניים למלא את חובתו היומיית – שטיפת בקבוקים – וכך אפשר ששמע חלק משיחתם. וכך, מיד אחרי שפרסם פרדיי את המצאותו, החלה מסתובבת השמועה בחברה המלכותית שהוא גנב את הרעיון מווולסטון. פרדיי, עכשוין בן שלושים, מיהר אל האיש לברר את פשר השמועה.

⁸. לתסבירות הפיסיולוגיות הזאת נראה לי שצורך להוסיף גם את הדמיון הפיזי בין השניים. מדיוי נותרו רק ציורי דיוקן בעוד פנקסי השair גם צלומים. אבל מצויר הדיווקן של פרדיי מתקבל הרושם שהוא היה את מورو בהופעתו החיצונית.

ולסתון היה ג'נטלמן. אחרי הפגיעה הצהיר ברבים על תמיכתו בפרדוי והלחישות המכוערת פסקו. רק מכיוון אחד נמשכה שתקה מעיקה: דיוווי. המתיחות גברה בעבר שניםים, כספרדי גילה כיצד לנצל כלור. דיוווי, לו הגיע את טוותה המאמר, טען שהזה הרעיון שלו ופרדוי, כמו תמיד, יותר. אז ההצעה מועמדתו של פרדי לחברת המלכותית, היוקרתי במוסדות המדע בעולם. דיוווי, עתה נשיא החברה, דרש מפרדוי למשוך חזקה את מועמדותו, וזה השיב כי אין לו מה למשוך כי לא הוא הציע את עצמו. נארקה הצבעה החשאית שבסופה נספרו הפתקים. כולם היו לבנים מלבד שחור אחד, מעוניין של מי.

אבל פרדי שמר אמוניהם לדיוווי ומעולם לא יצא נגדו. עשר שנים אחרי קבלתו לעבודה עדין כלל תפקידו שטיפת בקבוקים יומית. מ-1824 הטיל עליו דיוווי חובות אדמיניסטרטיביות ומחקר משעמם להפליא בייצור זכוכית. פרדי מצדו החל להרצות לקהל הרחב, בעיקר לנערים.⁸ כך נטה את מחקרו בחשמל לכמה שנים ולא חזר אליהם עד אחרי מות פטרונו. אבל כשהוז, חזר בגודל: ב-1831 גילה, כפי שראינו, את המנווע החשמלי. אחרי באו תגליות חשובות נוספות, המצירות דיון בתוכנה יהודית שהייתה לפרדוי – נכון: תוכנה שלא הייתה לו.

7. 10 גם לא מתמתץijk אם הצליח פרדי לסלג לעצמו אנגלית יפה, הנה שפה חשובה יותר לא למד וגם לא רצתה ללמידה. את צפיותיו רשם במילים ולא במשוואות, ולעתים גם דבר על המתמטיקה בנימה מזולגת. בכך הוא תופס מקום היחיד במינו בתחום הפיזיקה. בורותו במתמטיקה, לצד האופי המוזר של השדה, גרמו לכך שרעיוןותו לא נקלטו בדורו. היה זה מקסול, אותו נגoso בפרק הבא, שתרגם את גילויו פרדי לשפת המשוואות ומיד הוציא מהם משהו חדש ומפתיע. השאלה המענית, שולדעתו לא נתנו עלייה את הדעת כראוי עד היום, היא אם מושג השדה היה מתגלה לו לא נאלץ פרדי, בשל עילגותו המתמטית, לפתח כפיציו את השיבתו הויזואלית. שאלה זו מביאה לשאלה מטרידה יותר: האם ההסתמכות הוחלقت וגוברת של פיסיקאים על המתמטיקה אינה מביאה לנינוי הקשר החינוי לחשוב בתמונות?

8. 10 הלא-כלום כמו לijk החשבתו הויזואלית של פרדי בולטת בהישג הגודל – ניסויי ועיוני – של חייו המאוחרים. בהרצאה ב-1843 שאל שאלה מפתיעה: האם ייתכן שהחל הריך – החל עצמו, לא האויר – הוא מוליך חשמלי? זה הייתה שאלה די שונה כי הוא ייחס תוכנה פיסיקלית ל"שומ-דבר" עצמו. ההשערה עוררה לגлог, אבל הערכה של מדען צער וGBT, וויליאם תומסון (1824; לימים לורד קלוין, מייסדי התרמודינמיקה) עוררה אותו לעשות ניסוי: הוא שיחק עם הקיטוב של האור (קיוטב הוא הכיוון שבו מתנזדים גלי האור, וזה מושג שעוד נחזר אליו בהמשך), וכשהעביר אור מוקוטב בשדה מגנטי מצא שהוא מסובב אותו! תגלית זו ידועה כיום האפקט המגנטי-אופטי. כך התגלתה ראשיתה של קשר טמיר בין האור, החשמל והמגנטיות.⁹

⁸. מאז, "הריצאות יוםSSH" ו"הריצאות הג-המולך" במקוון הפכו למסורת וכיום הן משודרות בטלוויזיה הבריטית.

⁹. ושוב היה פרדי חיב תודה למורו: את סיבוב האור גיליה כבדק את תוכנותיה המגנטיות של הזכוכית, נושא בו קנה הבנה מימי המחקר המשעמם בעדשות שכפה עליו דיוווי.

הממצא זה חיזק את השערת פרדי שלחיל עצמו תוכנות חשמליות ומגנטיות. תוך זמן לא-רב תוביל השערה זו לתגליות מרעישות בוגרעות לתוכנותיהם הפיסיקליות של החלל והזמן.

9. 10 המורה

שם גדול עשה פרדי בזכותו הרצאותיו, שימושו קהן גדול ולו בניסויים. הוא החשיב מאוד את אמנות ההרצאה ורשם הרבה עצות למי שרוצה להצלחה בה. תחילת הרצאה ב"אגודה העירונית לפילוסופיה", שם עשה את צעדיו הראשונים ושביריה היו עכשו גאים בו עד היום. אחר-כך, כפרופסור ומנהל המכון המלכותי, החל להרצאות באותו אולם אליו הגיעו לראשונה. בקהל ישב צ'ארלס דיקנס, שהדפיס ופרסם את הרצאותיו לציבור הרחב. גם צ'ארלס אחר, DARWIN, נראה בקהל, אבל מעולם לא נרשמה שום התיחסות של פרדי האודוק לתורת האבולוציה. ספר קטן וחמוד, מבוסס על סדרת הרצאותיו להג המולד, נקרא *The Chemical History of a Candle* (הוא זמין כיום ברשות) ותרגם לפניו שנים רבות לעברית בשם "מעשה הנר".¹⁰ פרדי היה פותח בהדלה נר, כנהוג בחג המולד או בחנוכה שלנו בתקופה שנה זו. אין חוק מהוקי היקום, היה אומר, "שאינו מתבטא בצורה זו או אחרת בתופעה של הנר הדולק". וזה היה שואל שאלות של ילד קטן: למה השלהבת כהה מבפנים ובHIRA מבחן? ומה השועה זקופה לפטיל כדי לבוער? וכך הלאה למא ולמה ולמה, ומהו החיפוש אחרי התשובות שמעוררת תופעה כל כך פשוטה וימומית היה מוביל את שומעו אל כל פרק מספרי הפיזיקה והכימיה. אילו היה נותן את הרצאות האלה כיים, האם לא היה מגיע באותה טבעיות לחידות הקונטים והקוסטולוגיות?

10. 10 שק יעה

כל חייו נשאר פרדי נאמן לכנסייה הסנטניאנית, בה שירות כמטיף. בניגוד בולט למورو, שנשא בගואה את ה"סר", דחה פרדי תארי אצולה שהוצעו לו על שירותים ציבוריים רבים מספור. הוא סירב לפתח נשק כימי עבור ממשלה בריטניה, לא רשם פטנטים על אינספור המצאותיו (אחייו רוברט, שישלים כוכור את השילינג הראשון להשכלה, רשם פטנט אחד על הארוונה שהמציא פרדי) ואפילו לא עשה בפיתוח חיים כי לא רצה להפגין חוסר ביטחון באלהם. כל הסתפקות-במעט שדרשה אמונהו עשו אותו סגפני עם השניים. לסנדמים, כנראה, לא הייתה מקבילה לתוכחה היפה בתלמיד (IROSHMI KIDOSHIN פ"ד 12) "עתיד אדם ליתן דין וחשבון על כל שראתה עינו ולא אכל". רק פעם אחת, ב-1844, לא בא לתפילה يوم א' ומיד נקרא לבירור בפני זקני העדה: מה זה צריך להיות? אה-בה-מה, אמר האח מיקל. הוזמנתי לאירועת-ערב בוינדזור. הodium-עלתה, אתם מבינים, לא נעים לסרב. המלכה? התրתחו הזקנים, זו סיבה לא להתייצב לפני מלך מלכי המלכים הקדוש ברוך-הוא? תבקש סליחה מיד! הפעם, סוף-סוף, אמר פרדי "לא" לבית-הדין ההמוני, וקיבל עונש הורדת בדרגה והרחקה זמנית.

לROUT המזל, בריאותו הנפשית של פרדי לא הייתה איתנה. הוא נשא את הסנדמנית שרה בירנד בהיותו בן שלושים, נישואים מלאי אהבה, וארבעים שנה גרו שניהם בדירה הצנוועה שבקומת העלונה במכון המלכותי, ממש הייתה מביאה ארווחת לublisher בעלה שבקומת המרתף. למרות אהבתם לילדים (מייקל כתב להם כמה ספרי מדע) לא זכו לילדת. את כל זמנו השקיע פרדי במדע ובכנסייה, ללא עניין במסיקה, ספורט, פוליטיקה או חי חברה. משבר נפשי ראשון (דיכאון?) פקד אותו כשהתקרב לגיל חמישים. באותה עת הועלה לדרגת "זקן"

בכנסייתו ואיכות פרטומיו ירדה, אבל התגלית שהחל הרים משמש כמוליך באה דוקא בתקופה זו.

החל מגיל ששים וחמש החלה ניכרת בו ירידת אינטלקטואלית, וכשנפטר בעבר עשר שנים, מוקף בדאגה ואהבה בבית שהעניקה לו המלכה ויקטוריה, כבר סבל מסניליות מתקדמת. זו בודאי הסיבה שעל מכתביו הנלהבים של מקסול ענה במעט ריחוק. הכישלון הקולוסאלי של חייו היה שדווקא המורה הווירטואוזי הזה לא העמיד ממשיכי-דרך, כפי שריבו עודד אותו ללמידה בנערותו וכפי שדייוויד הדרכו בראשית דרכו. מי יודע, אולי קרה גם לפרדי מה שאנו רואים עד היום באנשים שהגינו לגдолה אבל לא ממש הפכו את הצלחתם; אולי, בסתר-לבו, עדין חיש הגאון אציל-הנפש הזה כשלילית-קורכים בזעם המתمرד נגד חוקי תקופתו, מתודע אל סודות הטבע באפלולית החדר הקטן שהוקצתה לו מתוך חמלת?

*

פרדי עשה נפלאות בחקר הכימיה והחומר, מבליל להבין את הקשר ביניהם, קשר שרק ביום אנחנו מבינים אותו אחריו שהתגללה כי באטום יש כוחות חמליים. הכימאים רואים בו את אחד מאבותיהם, ובין היפיסקיים הניסיוניים יש הרואים בו את גדול הניסיוניים בתולדות המקצוע. בהתחשב בכך שפרס נובל מוענק על תוצאות ניסיוניות, גילויו היו בודאי מזכים אותו ביום ביותר מנובל אחד. אנחנו האפלטונייטים נזוכר אותו כמאחד גדול. אם בימי האמינו שיש כמה סוגים שלם, הוא הראה שכולם סוגים של אותה תופעה, כמו שככל סוג המגנטיות הם אחד. אחר-כך המשיך ואיחד את שתי התופעות, וגם הראה את הקשר בין לבין האור. מכאן פנה לאיחוד גדול יותר: פרדי היה בטוח שגם לכבייה יש קשר למשפחה הזאת, וחיפש אותו עד סוף ימי. גם אנחנו כיום בטוחים שיש קשר כזה, אבל עוד איננו יודעים מהו בדיק. איינשטיין, ואחריו הרבה אנשים, ניסו למצוא אותו ולא הצליחו עד היום, וזה דבר שאין רואה בחומרה רבה.

11. מקסול מאיר את האור



אור, אורי, האור הממלָא-עולם
האור נושא-הعين
אור ממתיק-לב!
רבינדרנת טגור

זה היה נחמד אם כמה מהצ'יזבטים ב"ציפן דה-וינצ'" היו נכונים, למשל, הסיפור על אגדת-סתור עתיקה בשם "סדר ציון" של ראשיה נמנן לאונארדו, בוטיצ'לי, ניוטון וויקטור הוגו. יש שהוא מסעיר במחשבה על ארנון חשאי כזה בו חברים כמה מגאנני כל הדורות, במיחוד כshedōr באנשים היהודיים לנו כמתבזדים. לרעיוון הקוסם הזה יש כל מיני הדים, לפעמים קצת מטrollerים, כמו ב"מלך הנפלים" של אין ראנד או בכל מיני סיורים על "הబונים החופשיים". והנה, במצבות קיימת אגודה אוניות נשאית בדוק צואת ושם "האפוסטלים מקיימברידג'". היא נוסדה ב-1820 בידי ג'ורג' טומלינסון, לימים בישוף גיברלטר, והוא מונה שנים-עשר סטודנטים נוצרים מקיימברידג', כמספר שליחי ישוע. זהות ה"שליחים" נודעת רק אחרי שהם פורשים מהאגודה בסיום לימודיהם והופכים ל"מלאכים". מלאי מקום באים מתוך קבוצת "עוברים" המוזמנים למסיבה בלי לדעת את מטרתה, ובסופה נבחרים מתוכם ה"שליחים" החדש. כדי שבת בערך נגশים שניים-עשר המופלאים, אוכלים סנדביץ'ים עם סרדיינים (הקרויים משום-מה "לווייתנים") ודנים במאמר שמציג אחד מהם. במהלך הדורות הוציאו הולוג כמה מהມאורות הגדולות של תרבות המערב: המשורר אלפרד טניסון, ראש הממשלה ארת'ור ג'יימס בלפור, המתמטיקאי גודפרי הארדி, הספר أولדוס האקסלי, והפילוסופים ג'ורג' מור, לודוויג ויטגנשטיין וברטרנד רاسل. במאה ה-20 הופיעו גם כבשים שחורות: שניים מרוגלי קיימברידג' היהודיים לשמה, גאי ברגס ואנתוני בלנט, היו "מלאכים". מצד שני, "מלאכים" אחרים, כמו האחים ליטון וג'ים סטריצ'י ואבי הכללה המודרנית ג'ון מיניארד קיינס, ייסדו את "hog בלומסברי" המפורסם. אין ספק, זו הייתה מדרגת גאנים מושובחת.

ובין המאורות האלה זוהר באור יקרות סקוטי אחד בעל פני נבייא, ג'ים קלרק מקסול (1831-1879), שנבחר ל"שליח" ב-1852. הוא היה נוצרי אדוק, ובהתחשב בכך שהומוסקסואליות הchallenge או רוחות בין חברי האגודה (עד 1985 לא הייתה ביניהם אישת), היה בודאי צריך פה ושם להתעלם מדברים ששמע או ראה סביבו. כיוון שהוחבת הכנסה שלו הייתה להציג בפני חבריו אמר משלו, לאמן הנמנע שהאמר שהציג היה טויטה של אמרו "על קווי-הכוה של פרדי", בו פיתח את החלק הספקולטיבי והפרוע ביותר בעבודתו של אבי תורת החשמל המודרנית.

1.11 צורות לבשות מספרים

فردี้, כוכור, לא ידע מתמטיקה ואפילו הרשה לעצמו לזרזול בה. צורת השיבתו הייתה ויזואלית: הוא חקר את קווי-השدة כאילו היו ממש קיימים לפניו בחלל המקיף את המגנט או המטען. מקסול, לעומתו, התבך בשירים מתמטיים חזקים. אבל כשהוא מזכיר במאמריו את פרדי (שעוד חי בימי והספק להחליף אותו כמה מכתבים לבבים), הוא חולק שבחים כאלה לגישתו שנחשבה ל"פרימיטיבית", ואומר כי לו לא חשיבה זו לא היה פרדי מגלה את השدة ואת הקווים המרכיבים אותה. מכאן ממשיק מקסול בשני שלבים: תחילת

ר' נפה:
משוואות מקסול

הוא ממשיך ופתח את רעיונותיו הוויזואליים של פרדיי, ואחר כך מלביש אותם בלבוש מתמטי המגלה את מלאו כוחם.

את רעיונותיו הוויזואליים של פרדיי, שבעת ההיא כבר הולידו כמה חוקים הנוגעים לחשמל ולמגנטיות, תמצת מקסול לארבע משוואות מפורסמות. זה היה, בעצם, מתחקש מאליו: **מצד אחד חוקי החשמל והמגנטיות עוסקים בשדה החשמלי והмагנטי, מצד שני יש תיאוריה מתמטית שהומצאה בדיקן כדי למדוד שינוי בצורה הכி מדוקת, הלא היא החדו"**, אז בואו נבטא תורה אחת באמצעות השניה. המשוואות מוסברות בנספה, אבל כאן נעשה כבוד לפרדיי ונבעז אותו כמו שהוא דרש, במילים: **א. עוצמת השדה החשמלי תלואה בגודל המטען החשמלי המחולל אותו נחלשת ככל שגדל המרחק מהטען (חוק גאוס).**

ב. לשדה מגנטי קווי-כוח ללא קצוות. כל קו יוצא מהקוטב הצפוני של המagnet, עובר דרך הקוטב הדרומי ומשם חזר אל הקוטב הצפוני (חוק גאוס).

ג. שדה מגנטי משתנה מחולל שדה חשמלי (חוק פרדיי).

ד. שדה חשמלי משתנה מחולל שדה מגנטי (חוק אמפר).

2. 11 קפיצה מחשבתיות אל הלא-כלום
תჩילה רשם מקסול את משוואותיו כך שיתארו את השינויים השודות בתחום חומר, אבל מה לגבי הריק? זכרו שפרדี้ כבר עשה פעם קפיצה כזוית כדייחס מוליכות החשמלית לחלל הריק עצמו. מקסול ניסה אם כן לרשום את משוואותיו לא עבר/molיך אלא עבר החלל הריק. במקום האיברים במשוואת המתארים מוליכות הכנס מקסול 0, והתקבלה רבייעית החוקים המשלימה:

א. אין מטענים חשמליים בריק.

ב. אין קטבים מגנטיים בריק.

ג. שדה מגנטי משתנה מחולל שדה חשמלי.

ד. שדה חשמלי משתנה מחולל שדה מגנטי.

אתם בודאי מבינים היכן הפתעה: בשתי המשוואות האחרונות התייחס מקסול לחלל הריק כאילו הוא משה. ההשערה הפרדוקסלית הזאת הביאה לו את תגליתו האדירה. מה הדבר אותו?

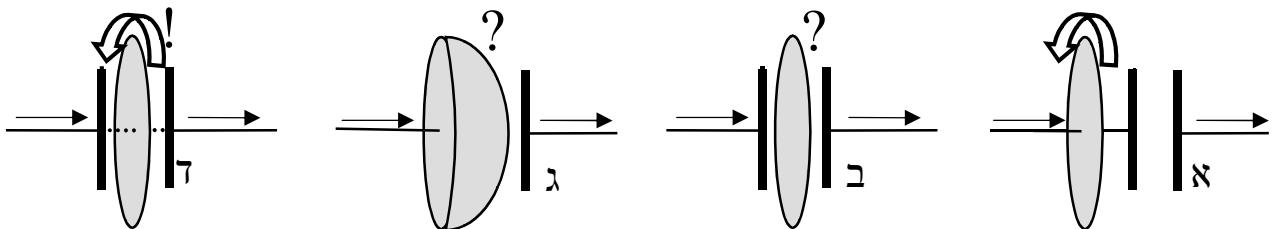
הנה מתכן חשמלי שימושי הנקרא **קפל**, המורכב משני לוחות של חומר מוליך (מתכת), וביניהם חומר מבודד כלשהו או סתם אויר. אל לוח א' מגיע זרם דרך תיל המחבר אליו, ומלוח ב' יוצא זרם דרך תיל שני ("ציר"). שני התילים מחוברים למקור זרם (סוללה או גנרטור), וכך מגיע זרם מצד אחד וטוען לוח אחד בטען שלילי, בעוד שטען שלילי דומה "נשאב" מהלוח השני אל אותו מקור זרם ומשאיר בלוח השני עודף. כך נטען שני לוחות הקבל בטענים מנוגדים שיישארו שם זמן רב, וזו צורת אחסון נוחה שלטען שמהנדסי אלקטרוניים משתמשים בה בبنיה טרנזיסטורים ועוד כל מיני דברים מאוד מועילים (שאני לא מבין בהם כלום).

עכשו בואו נתודע אל

חוק אמפר: קיים יחס ישיר בין הזרם החשמלי העובר דרך משטה סגור לבין השדה המגנטי

המשיק לשפט המשפט הנוצר כתוצאה מהזרם זהה.

כלומר, אם נשרט צורה סגורה כלשהי, למשל מעגל, סביב נקודה על מוליך בו זרם החשמל, כך שהצורה הזאת סגורה על משטח, למשל עיגול (תזכורת: "מעגל" הוא קו, הנראת כדו, ו"עיגול" הוא השטח המלא אותו, כדו●), אז על כל נקודה שעל פני הצורה הזאת יש שדה מגנטי המשיק לה, שעצמתו היא ביחס ישיר לזרם ה"מנוקב" את המשפט.

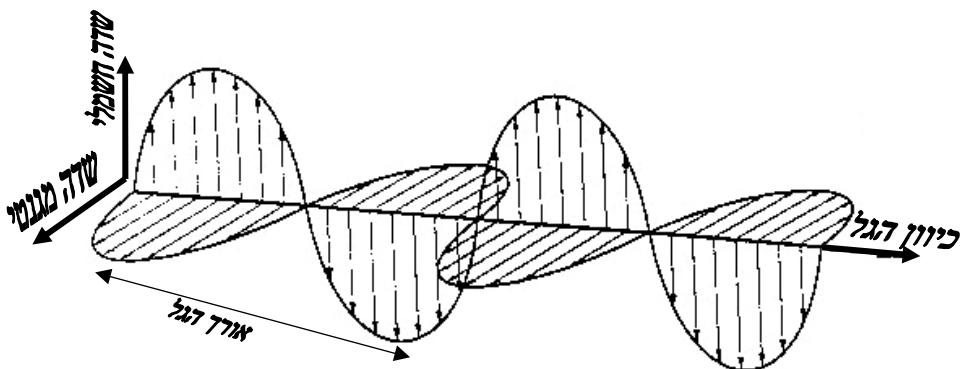


עכשו מחדל מקסול את חוק אמפר על הקבל לעיל. לא קשח להבין מה קורה בנקודה כלשהי על התיל בו זרם החשמל (ר' ציור, חלק א'). בכל מעגל סביב נקודה הזאת עובר שדה מגנטי שעוצמתו תלוי בשטח העיגול שבתוכו. אבל מה לגבי נקודה כלשהי ברווח שבין הלווחות? שם, מוסכם עליינו, לא עובר שום זרם. האם סביב נקודה הזאת השדה המגנטי הוא אפס (ב')? מקסול לא בטוח: הוא שואל שאלה חדשה לגבי העיגול ב-א' ה"מנוקב" ע"י הזרם: נניח שמחנו וכופפנו את משטח העיגול כך שעשינו ממנו חצי כדור, ששוליו (כלומר המעגל) עדין מקיפים את אותה נקודה על התיל, אבל המשטח עצמו עבר דזוקה במרוחה הריק שבין לוחות הקבל (ג'). מה תהיה עכשו עצמת השדה המגנטי על המעגל? אפס? הרי זה אותו מעגל כמו ב-א' הוא הצעיר, לכן, תיקון לתיאוריה: גם ברוח שבין לוחות הקבל עובר זרם החשמל. אין זה זרם המוכר לנו אלא "זרם העתקה". מקסול האמין, ככל בני דורו, שגם החל הריק, ככל הוווקום, מלא בסוג מאד קלוש של חומר החדר לכל מקום. זהו ה"אטר", שכבר פגשנו בתורת דקרט בדמותו מן "אבק" שעושה מערכות סביב המשם, ועכשו האמיןו אנשיים שגם השדה המגנטי והחשמלי הם מין זרים שלו. המשיק מקסול: כשהוא זרם במוליך, החלקיקים החיוביים שלו (היום אנחנו יודעים שאלה הם האלקטרונים) בורחים מהחלקיקים החיוביים שלו (אטומים שבתוכם הם יושבים). לעומת זאת, כשהוא זרם במבודד, החלקיקים השליליים לא מצליחים לברוח מהחיוביים, אלא רק קצת מתרחקים מהם בכיוון השדה החשמלי. להתרחקות הרגעית הזאת בין החלקיקים, המתרחשת בתוך חומר מבודד, קראו מקסול "זרם העתקה". גם לאטר, המשיק מקסול, יש אטומים המורכבים מחלקיקים חיוביים ושליליים, ולכן קיים זרם זהה גם ברווח הריק שבין לוחות הקבל. לכן, בכל פעם שהקבל נטען או נפרק, גם משטח שעובר במרוחה הריק שבין "מנוקב" ע"י זרם, הוא זרם ההעתקה (ד').

חלק מכם יודעים שהשערת האטר אינה מקובלת כיום, אבל השורה התחתונה של כל הפלפול של מקסול היא זו: גם בחלל הריק **עוורירים זרים**. טענה זו עצמה נחשבת לנכונה כי היא עומדת ב מבחן הניסוי, ויש לה תוצאות מעניינות.

3.11 גלים בלא-כלום

אם בחלל הריק עובר זרם, הרוי חוק פרדיי (ר' פרק 10.3) מחייב שיווצר סביבו שדה מגנטי. ואם הזרם זהה אינו קבוע אלא משתנה – כמובן, אם הזרם הזה הוא בתאוצה (הנה חזר אלינו מושג היסוד) – אז גם השדה המגנטי שיווצר סביבו ישנה עם הזמן לפי השינויים בתאוצה. דורש שסביב השדה המגנטי ייווצר שדה החשמלי, אבל אז, החוק המשלים (ר' שם) מחייב שוב שדה מגנטי משתנה וכך הלאה. כיון שכל שדה מתפתח מסביב לחברו בכיוון הניצב לו, כל המהומה הזאת הולכת ומתרפשת למרחב לכל הכוונים. קיבלנו אם כן גל הנראה כך:



להשלמת התמונה נוסף שרשרת התנודות הזאת מתרחשת לא רק בקוו, כמובן, הגל מתקדם מקור האור לא רק בכיוון אחד, אלא בכל הכוונים, כך שיש לנו גל כדורי המתפשט לכל עבר בשרשראות זיגזגית כזאת של תנודות, חשמלית-מagnetית-חשמלית וכו' מה מהירות הגל הזאת? הנה הגענו לאחד הרגעים הדramטיים ביותר בתולדות הפיסיקה.

4.11 קרוב שלishi מתגלה

האנלוגיה שתתמש褚 אותנו היא מהירות הקול. באוויר, בגובה פני הים, בתנאים אטמוספריים רגילים ובטמפרטורה של 21 מעלות צלזוס, הקול מתקדם ב מהירות של 344 מטר לשנייה. למה טרחתו למנות את התנאים האלה? כי מהירות הגלים תלויות בתכונות התווך בו הם מתקדמים. לו היו נעים, למשל, במים, הייתה מהירותם שונה. הכלל הקובל מהירות גלי הקול בתווך כלשהו אומר: מהירות הגלים שווה לשורש הריבועי של קשייחות התווך דוחולקת בצויפתו.

הצעד הבא ברור, אבל מיד צצה בו בעיה. מהו התווך בו נעים הגלים האלקטרומגנטיים? במילימ' אחריות: אלה גלים של מה? את תשובה מודיעני הדור אתם כבר מכירם: כשם שגלי הקול הם גלים של אוויר, כך צריכים להיות גלים של האתר, אותו חומר קלוש מאוד- מאוד שוף אחד עוד לא מדד אותו. ומהרגע שהבינו שהאור הוא גלים, ניחשו שאלה הגלים של האתר. גם מksamול החש ש egalim האלקטרומגנטיים היוצרים מהמשוואות שלו הם גלים של האתר. אבל אם נרצה למצוא את מהירותם באופן תיאורטי, כפי שמהירות הקול ניתנת לחישוב מתוך הקשייחות והדחיסות של האוויר, נדרש לשאול: מה הן הקשייחות והצפיפות של האתר?

עכשו עשה מקסול את קפיצה חיו: במקום לעשות ניסויים שיגלו את התכונות האלה של האתר הוא גזר את הקשייחות מהוק קולון הקובל את תכונות השדה החשמלי ואת הצפיפות

ר' נספח:
גלי מהירות
הגלים
האלקטромגנטיים

מחוק אמפר הקובלע את תוכנות השדה המגנטית. את שני המספרים האלה הציב בנוסחה

$$\text{מיהירות} = \frac{\text{קשייחות}}{\text{צפיפות}},$$
 חישב היישב, וקיבל את התוצאה 300,000 ק"מ בשניה.

מאייפה היה המספר הזה מוכר לו? גוד הונס, הרי זו מהירות האור!⁸ מקסול התחליל להתרגם. דמיינו את עצםם במקומו ותראו איך תקבלו גם אתם דיפיקות-לב. ניסיתם לאחד חשמל ומגנטיות, המשוואות באמת הסתדרו יפה, ואז התברר שנייה השדות שחקרתם יוצרים מן זיגzag המתקדם בחלל, וכשהיחסתם את מהירות הזיגזג קפזה לכם מבין המשוואות מהירות הדיזעה של האור, שככלל לא חשבתם עליו!

באותו ערב הייתה למקסול פגישה עם בחורה. הם טיילו בגין וה"דייט" שלו העירה משחו על הכוכבים שעלייהם. תסכימו אתי שזו העלה די מקובלת במרקמים כאלה, אבל התשובה של מקסול הייתה הכל חוות מקובלת: "מה היה מרגישה אילו ידעת שאת הולכת עכשו עם האדם היחיד בעולם שיעד מה אור שבאה מהכוכבים האלה?" נראה התשובה הזאת עשתה רושם עמוק על הגברת הצערה, לימים לידי כת'רין מקסול.

5. 11 רמזים: תופעות גליות והאור הבלתי – נראה
 לנגד עני מקסול היו עוד רמזים לכך שהוא בדרך הנכונה: בשאלת טבעו של האור כבר ניצחה התורה הגלית, כפי שראינו בפרק 9.5: הניסוי של יאנג הראה שאור עווה התאכחות ממש כמו גלי מים. כאן המקום לספר איך זכה מיזענו הרשל לחנוך בצורה יפהפייה את תחילת המאה ה-19: הוא חוזר ב-1800 על ניסוי המנסרה של ניוטון ובו הפריד את אור המשמש לצבעיו השונים, ובנוסף מدد את החום שייצר כל צבע. החום עלה מצבע לצבע ככל שהרשל התקרב אל האדים. עכשו הרציב את המדוחם מעבר לאדם, במקומות בו לא ראה שום צבע. המדוחם הראה חום גבוה יותר! כך התגללה האינפרא-אדם. על האור הבלתי-נראה זהה הפגין הרשל את כל התכונות הידועות של אור, כגון החזרה ממראה ושבירה ע"י זכוכית. עברו שנה עשה יהן וילאם ריטר (1776-1810) את הניסוי המשלים. אמןם ככל שנלך על ספקטרום הצבעים לכיוון הפוך, הסגול יהיה האור "קר" יותר, אבל פועלתו הכנימית על מלחי כסף, החביבים על הצלמים, דזוקא גוברת.⁹ ריטר הניח כסף קלורי על הקשת מעבר לסגול, במקומות בו לא נראה כל צבע, וקיבל את התגובה החזקה ביותר! התגליות הללו הרחיבו את תחום האור אל מעבר לתחום הנראה. השאלה שנשארה פתוחה היה: עד כמה נרחב תחום זהה? האלקטרומגנטיות הציעה בסיס תיאורטי חדש לאופטיקה. עכשו נהוץ היה נסין שישלים את המלאכה.

6. 11 הרץ מוכיח

⁸. ליתר דיוק, מקסול קיבל 311,000 ק"מ לשניה בעוד מהירות האור כפי שנמדדה ב-1849 הייתה 315,000 ק"מ לשניה, בהחלلت בתוך טווח השגיאה.

⁹. אל תבלבלו מהעובדת שהגלים אולטרא-סגולים הם פחות מחממים: יש בהם יותר אנרגיה מאשר באור הנראה, ובאור הנראה יש יותר אנרגיה מאשר באינפרא-אדם. העניין הוא שגלים אלקטרומגנטיים יכולים להגביל עם משיטה בשלושה דרכי: לחזור דרכו, להוביל עלי-ידו או להיות מוחזרים ממנו. מבחינת האולטרא-סגול, בעל הגלים הקצרים, אנחנו די שkopים, אך שהוא עבר דרכנו ועשה לנו נזקים ורק מבפנים. האור הנראה, לעומת זאת, מוחזר מגופנו רבו או קצתו (תלו בצבע העור). רק האור האינפרא-אדם, למרות שיש בו פחת אנרגיה מהגלים הקודמים, נבלע כולו בגופנו ומהם אותו.



את האישוש הניסיוני קיבל התיאוריה האלקטרומגנטית מילד הפלא של המדע הגרמני, היינריך רודולף הרץ (1857-1894), תלמידם של קירכהוף והלמהולץ (ר' פרק 12). הוא היה בנו של יהודי מומר. לא ידועה לי התייחסות שלו למצוותו היהודי (מקורות אינטראנס מצינימ שנקבר בבית-קבורת היהודי), מלבד אולי העובדה שהצטיין בגערוותו דוקא בלימודי ערבית ונסקריט. כך או אחרת, הנה סנונית ראשונה עם שיכובש בסערה את הפיסיקה במאה ה-20.

הוא קיבל את הדוקטורט בגיל עשרים ושתיים, לאחר הפסכות עקב שירותו הצבאי כקצין, וכעבור שש שנים נעשה פרופסור באוניברסיטה קרלסרוהה, שם החל בניסויים באלקטרומגנטיות. הניסוי עצמו פשוט: אם נוצר מתח חשמלי גדול בין שני כדורי מתכת, יעבור ביניהם ברק. אם נתען את שני ה כדורים מטענים הפוכים לסירוגין, בקצב של פעמיים רבות בשניה, יעברו במרוחה הריק שביניהם ברקים הלו-ושוב, מה שייראה כהזק מתמיד. לפניו מטענים החשמליים בתאוצה, ועל כן, על-פי מקסול, הם צריכים לפולות סדרת גלים רציפה. גלים אלה מתפשטים במחירות האור ומעבירים אנרגיה לכל מוליך באורך המתאים הנקרה על דרכם. במקום אחר בעבודה העמיד הרץ מוט ברזל מכופף לעיגול כמעט שלם, ששתי קצוותיו הסתיימו בעוד זוג כדורי מתכת. הגלים ששידר המתקן יצרו זרם חילופין חדש במוח המעוגל, ושוב נוצרו מטענים מתחהכרים בשתי גולות המתכת. התוצאה: ברגע שהופעל המתקן הראשון, הופיע הזרק מתמיד בין שתי הגולות שלו, והזרק כזה הופיע בין שתי הגולות המוט המעוגל בקצתו השני של החדר!

חשוב שתடעו להבדיל בין עיקר וטפל בניסוי זה. ההבזקים היו רק דרך לדעת שבמתקן המשדר ובמתקן הקולט עוברים זרים באותו זמן. התהליך המהותי הוא זה: כשהמטען החשמלי נעה בתאוצה, הוא יוצר גל אלקטرومגנטי. זרם חילופין לאורך תיל מבטיח תאוצה של מטענים חשמליים (אלקטرونים) החוזרת על עצמה, ככלمر סדרה קבועה של גלים. גלים כאלה יוצרים מחדש זרם חילופין בכל גוף מוליך המונח במאונך--- להם. זו, במקרה, פועלות המשדר והאנטנה.

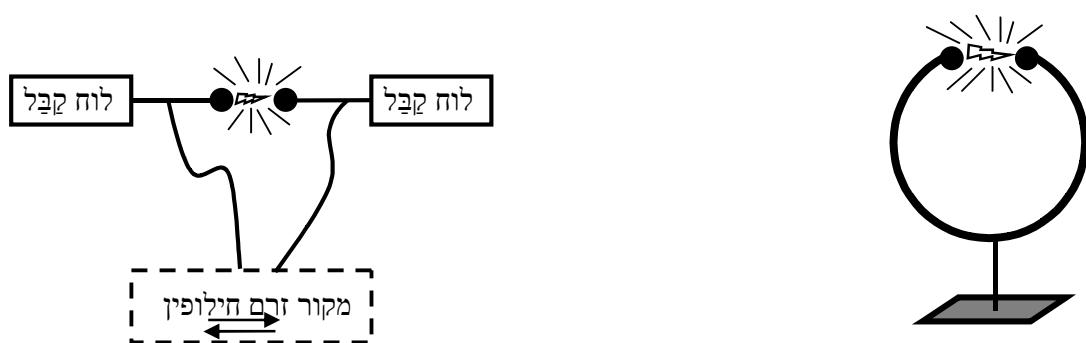
נותר להרץ לקבוע שמהירות התמסורת בין המשדר והקולט הייתה מהירות האור. היא הייתה. הוא גם הוכיח שהקרינה החדשה מוחזרת ע"י משטח מוליך כמו שאר מוחזר ע"י ראי.

זה היה בוודאי הופך לראשונה מופלאה לולא פגע הסרטן במדען הצעיר. "התלמיד המוכשר ביותר שלו" קונן עלייו הלמהולץ. תלמידיו זכרו אותו כאיש נעים וביישן וכמדע בלתי-מעשי לחלוטין. כשהשאלו אותו לאן אפשר להמשיך אחרי גילוי הגלים האלקטרומגנטיים ענה במבוכה "אני חושב שלא שום מקום". "תוֹךְ שְׁנִים מַעֲטוֹת יִקְבָּל וַיְלַהֵלּ קָוְנְדָּגָן (1845-1923, נובל 1901) את פרס נובל על גילוי הקרינה הנושא את שמו,^א גואיללמו מרקוני () על המצאת הרדיו, ואחריהם יבואו הרדיואר, המיקרו-גל, ה-MRI והטלפון הסלולארי. את הרץ עניינו דברים אחרים לגמרי. הוא הבין שאור אולטרה-סגול המוקדם על מוליך --- -- כמעט גילוי האפקט הפוטו-אלקטטרי שייפול לבסוף בידי איינשטיין.

^א רנטגן, ראשון הזוכים בפרס נובל לפיסיקה, היה אידיאליסט מתבודד שהתנגד לקריאת הקרניים על שם וסירב לרשום עליהם פטנט, למרות שהוא היה הראשון להמחיש את סגולותיהן הרפואיות בצלום המפורסם של כף-ידי אשתו ענדות הטבעת. את כל סכום הפרס תרם לאוניברסיטה שלו, ואחריו מלחת-העולם הראשונה נפטר בעוני.

כתב-יד שהתגלה רק לאחרונה, של הרזאה אותה לא נתן לבסוף, מגלה שאות מהשנתו העסיק

:



7.11 היופי והכחוד

“לא רבים בעולמנו זכו לחויה כזו”, אמר איינשטיין על התגלית של מקסול. המשוואות שלו הפכו במרוצת הדורות לסמל ליופי של חוקי הфизיקה. קל להבין למה: הכל התגברש לארבע משוואות קצרצרות, שביניהן התגלתה סימטריה יפה, וכשהמשוואות ניבאו תנועה מסוימת, התברר שהיא משווה מיעודה במהירות שלה:

מהירות גלי האוויר נקבעת ע”י התכונות הפיזיקליות של האוויר,

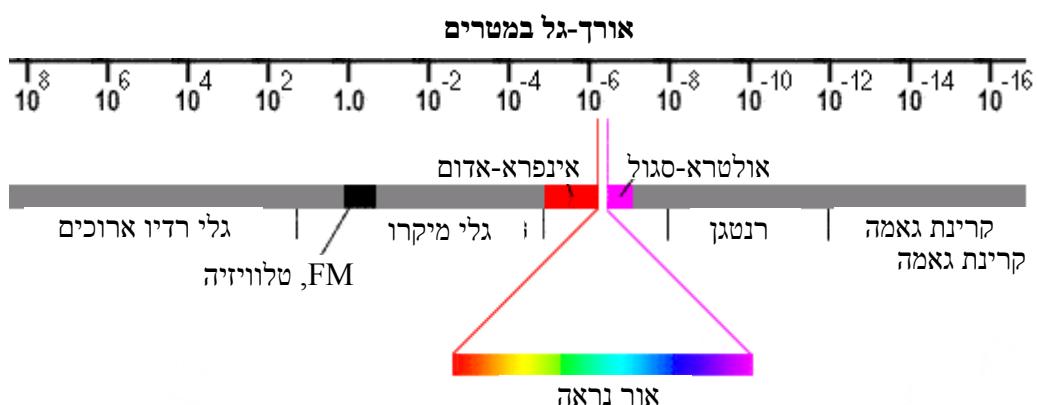
מהירות גלי המים נקבעת ע”י התכונות הפיזיקליות של המים,

ומהירות גלי האור נקבעת ע”י התכונות הפיזיקליות של ה...”

אנשים שמו את המילה "אטר" במקום החסר, אבל משהו היה פה מפליא: מקסול לא ידע שום דבר על התכונות הפיסיקליות של האטר כשבילה את מהירות הגלים שלו. ביום אנחנו לא מתפלאים על זה, כי למדנו שהatr לא קיים, אבל מקסול, כמובן, לא ידע גם את זה. יש לנו, אם כן, מהירות שניתנה לא ע"י מדידה הניסיונית אלא ע"י החשיבה התאורטית – החלום של כל אפלטוןיסט – קלומר: יש כאן גודל מיוחד, כמו ה- π וה- ϕ של המתמטיים.

(הרץ?) נכיר מיד, אבל בוואו נקשיב תחילה למה שהוא אומר על מושאות מקסול: "אי-אפשר להימנע מהתחווה שלנוסחאות מתמטיות אלה יש קיום עצמאי ותבונה משלهن, ושהן חכמות יותר מאננו, חכמות יותר אפילו ממי שבילה אותן, ושאנו יכולים לקבל מהן יותר מאשר הוושם בהן מלבת הילה."

סיגן



"One cannot escape the feeling that these mathematical formulae have an independent existence and an intelligence of their own, that they are wiser than we are, wiser even than their discoverers, that we get more out of them than was originally put into them."

8.11 פיזים בצל המוחות

בימים ההם עלהה על כס המלוכה בבריטניה גברת עגלאה, פשוטה ולבבית שנכוננו לה שנים רבות בשלטון. ויקטוריה לביית הנובר זכרה לנו בעיקר כי שבתקופתה היה צורך להתנהג כאילו אין סקס בעולם. בין ראיי-הממשלה שלה, החביב עליה ביותר היה בנג'מין דיזרלי, יהודי מומר, סופר מוכשר וקובציינטור אוני שהעלה את החנפנות למלכתו לדרגת אמנות ממש. כמו הרבה מומרים, הפק דיזרלי לאומן וקולוניאליסט, יותר בריטי מהבריטים. תחת שניים אלה, שכנראה שרד בינויהם גם מתח מנוי בלתי ממוש מאז התאלמנה ויקטוריה, המשיכה הממלכה להתרחב. בעזרת חברי הרוטשיילדים קנה דיזרלי מהמצרים את תעלת סואץ ואחר-כך סייפה את הודי והכתר את ויקטוריה לקיסרית. יריבו, גולדסטון, היה היפוכו הגמור: חוטב-עצים חסן שחיו פשוט, תיעב את הקולוניאליזם ונרג לנצח בלילה לרובי הזרות כדי להחזיר נערות למوطב. ללא הוועיל: בריטניה כבר איבדה אמן את אריה^ב, אבל עדין השתרעה על פני קנדה ודרום-אפריקה, אוסטרליה והודו, כמו גם על הרבה ארצות קטנות יותר.

סיפור היו אפוף נימה קודרת המזכירה את חיי האחים בבית ברונטה. הוא נולד כבן היחיד של עורך דין מאדינבורו. פעוט סקרן לא גובל. בהיותו בן שנתיים רשם אמו כי הוא מוליך את אביו על פני הבית וմבקש להראות לו היכן עוברת שרשרת הפעמון. הוא חונך בידי אמו והיה מסוגל לצטט פרקים שלמים מספר תהילים. בהיותו בן שמונה מטה אמו, ממנה ירש את הרגש הדתי. מכאן נשכר למד אותו. היה מכה אותו עד שפטור. האב מת ב-1856 מות אמו. להשווות עם הקודמים. כמו כן אפשר לדבר כאן על ההשפעה של הגנים, אבל נראה לי שהפסיכולוגים צודקים כשהם

בגיל 14 כתבת את מאמרו המתמטי הראשון שזכה להערכה

כבר ידע בעל-פה את כל פרק קי"ט מהתהילים. אוכל לחסוך לכם הוצאה בתהילים כדי לדעת מה מיוחד בפרק זהה אם אספר שהעתיקת הפרק הזה הייתה העונש החביב על אחד מורי בית-הספר הייסודי...
אשר הייתה היפוכונדרית

“בתה עניא אולה עניות (אחרי העני הלך העוני),”

9. 11 ועוד בחור מוזר אם לא די היה בפרדี้ האוטודיקט, שריעונותו הושלמו בידי מקסול המתמטי המחונן, נוצר שאת עבודתו של מקסול ישלים אוטודיקט אחר, גם הוא בריטי, מתבודד ותמהוני

שלבסוף ייחה את גבול השפויות. אוליבר הביסייד (1850-1925) גדל כילד חירש-لامחזה ומתבודד, ולמרות שהוא תלמיד מצטיין עזב את בית-הספר בגיל שש-עשרה והתמסר ללימוד כתב-המורס – בחירה נוגעת-לבב מצד ילד שהתקשה לתקשר – ולתורה האלקטרומגנטיות. שנים אחדות עבד כמספר טיגרף אבל בגיל עשרים ושבע חזר לבית הוריו ובמקביל השתקע במחקר עצמאי. מאמר שכתב על חשמל משך את תשומת-לבו של מקסול, שהזכיר אותו במאדורה הבאה של ספרו. המהמאה הזאת מפי גדול מדעני אנגלייה בעת היה עוררה את התעניינותו של הבוחר באלקטרומגנטיות והוא התפטר מהעבודה והתמסר למחקריו

לדין בקונדיישן:

Why should I refuse a good dinner simply because I don't understand the digestive processes involved.
 [reply when criticised for his daring use of operators before they could be justified formally.]

Maxwell concluded that Saturn's rings could not be completely solid or fluid. Instead they must consist of small but separate solid particles—"a conclusion that was corroborated more than 100 years later by the first Voyager space probe to reach Saturn."²

$$1. \operatorname{div} E = 0$$

$$2. \operatorname{div} H = 0$$

$$3. \operatorname{curl} E = c x dH/dt$$

$$4. \operatorname{curl} H = c x dE/dt$$

Where E = electric field strength,

H = magnetic field strength,

curl = rotation (or rate of change and vorticity),

div = divergence,

dH/dt and dE/dt are partial differentiations with respect to time.

x = multiplication

כשהיה בן שלוש רשם אמו שהוא אומר בלי הרכ

רזהורים על הפסיכולוגיה של המדען 11.10

בפתח עולם חדש 11.11

הת庵כות ברעיש

On Maxwell and Maxwellian views of charge and current

Diane Greco, M. A., Massachusetts Institute of Technology

The desire to connect the disparate behaviors of imponderables characterized much physics in the nineteenth century, both on the Continent and in Britain. But imponderables themselves did not persist for very long in the hard-nosed climate of the nineteenth-century. Based on a program of mechanical explanation, the physics of imponderables eventually came to be re-defined, in terms of a unifying concept of energy to which all imponderable phenomena could ultimately be reduced.

By the end of the century, James Clerk Maxwell's derivation of general equations describing the behavior of the electromagnetic field was thought have almost completely fulfilled this demand for a unified physics. The need for a field -- initially a mechanical agency for transporting energy with finite velocity -- arose with the realization, pioneered by H. C. Orsted and Michael Faraday, that electrical and magnetic phenomena could not be adequately explained as the result of forces exerted between elements of imponderables (central forces). Although Maxwell's model of the field provided a way to understand electromagnetic phenomena from a mechanical point of view, his mathematical structure of the field survived the late nineteenth century rejection of the mechanistic world view (in favor of electrodynamics) and became the basis of later elaborations developed by Heinrich Hertz and others.

In contrast to the [mechanical](#) ideal of physics so strongly characteristic of the early nineteenth century, Maxwell's work supported the rise of a more energy-centered physics -- electrodynamics. To be *dynamical* in the sense used in the mid- to late nineteenth century, a theory need only provide expressions for kinetic and potential energy, expressions that one may deploy in what are known as Lagrange's equations. Lagrange's equations are a set of second-order differential equations that describe a system of particles; the equations relate the kinetic energy of the system to a set of generalized coordinates as this energy changes over time (generalized velocities). But, as Buchwald points out, these coordinates and velocities "need not directly represent an actual mechanical state." For this reason, Maxwell's use of Lagrange's equations rendered mechanical models

essentially superfluous. Instead of seeking a complete, tangible realization of the material microstructure thought by many to support electromagnetic phenomena, Maxwellian theory sought unity by means of a set of field equations linked with Hamilton's principle.

Roughly, Hamilton's principle asserts that potential and kinetic energies tend to equalize during a motion. Therefore, Hamilton's principle requires that the path actually taken by any physical system between two states at specified times and with appropriate constants (for the medium of propagation) at these times must be such that the potential and kinetic energy of the system are an extremum -- their difference, integrated over the time interval, equals zero. In Maxwell's hands, Hamilton's principle became one important key to the transformation from a mechanical interpretation of electromagnetic phenomena to a dynamic one. In this way, Maxwell's use of the principle neatly aligns his work with a central characteristic of nineteenth-century physics in general -- the concept of energy as a unifying foundation for all interactions of imponderables.

Maxwellian theory has one deep feature that distinguishes it from electromagnetism *after* the electron: Maxwellian theory assumes that applying Hamilton's principle to suitably chosen field energy densities (with appropriate medium constants) is all that is necessary to obtain satisfactory mathematical expressions of electromagnetic phenomena. That is to say, if one adopts Hamilton's principle as the fundamental formula of electromagnetism, every problem in field theory reduces to finding an appropriate expression for the field's potential and kinetic energies. As a result, where modern theory introduces the electron, Maxwellian theory introduced new forms of energy.

Today, Maxwell's equations are foundational; even Albert Einstein's revolutionary theory of special relativity took Maxwell's equations as uniquely invariable between different frames of reference. To put a finer point on the difference between Maxwellian physics and today's understanding of electricity and magnetism, Jed Buchwald's summary is worth quoting in full: *For the Maxwellians, the world was fundamentally a continuum, and the laws which governed it had to be expressed in an appropriate mathematical form. [É] The goal of the theory was a general set of equations containing variables whose values were defined at every point. Phenomena were to be generated by manipulating functions of these variables -- in particular, energy functions. In practice this meant that the Maxwellians were willing to alter what modern theory considers to be basic equations and were unconcerned with the factors modern theory uses to avoid modifying the basic equations, namely, material microstructure.*

Maxwellian charge and current

In modern electromagnetic theory, charge is the source of electric fields, and current is the source of the magnetic fields. In Maxwellian theory, by contrast, charge is produced by the electric field as a result of what was known as "displacement" (of which more anon). As Maxwell and his contemporaries understood it, charge did not provoke an image of a substance; it was not a "stuff."

Moreover, current, in the usual sense of the rate of change of charge over time, was related only indirectly to the magnetic field at this time. As historian Jed Buchwald has demonstrated, in Maxwellian theory "a current is not a substance to be acted upon; it is merely a condition to be changed." That is, current was not considered as a flow of charged particles, but as a series of chargings and dischargings. Maxwellians interpreted these chargings and dischargings as the growth and decay of "displacement," that is, the shift in location of some "incompressible substance" (such as the ether) whose very shifting endows it with a potential energy. If nothing happens to change this potential energy, Maxwellians reason that it will simply dissipate, lost as material heat. This loss results in an inequality of displacement values (between say, one charged surface and another, uncharged one) that engenders to a discontinuity between the two regions. The magnitude of this discontinuity is the charge.

Last modified 21 March, 2002

.12

בנין כלול בהדרן

השלמות מושגת לא כשאין עוד מה להוסיף אלא כשאין עוד מה לגרוע.
אנטואן דה-סאן אקזיפרי

מסענו הגיעו לחצי הדרך. עוד מעט תהיה גם המאה ה-19 מאחרינו. העולם, לטוב ולרע, הולך ונעשה מודרני. "מדען" הוא כבר אדם עם פרנסת מוכובת, קרוכה בדרך כלל בהוראה אוניברסיטה, מה שמבטיחה לו הרבה ממשיכים. הוא כבר לא צריך להנמק מדי-פעם את קולו במקרה שאיזה כומר עבר בחוץ (אם כי עדין צריך להיזהר מהשלטונות), והצבא והתחשייה אףלו מעתנינים לפעמים במחקריו. לציבור ברור כי גם אם מדענים משתקעים לעיתים בעיסוקים הנראים טיפשיים להפליא, כמו לגאל כדור אינספור פעמים על מישור (גיליאו) או לטחון טונות של זבל סוסים (הרשל ואחותו), כדי לתמוך בהם כי מדי פעם יוציא מהם בטעות משהו מאוד מעויל.

ועוד שינוי חשוב חל במדען: עכשו הוא חלק מקהילתייה גדולה שרובו עיסוקה הוא עבודה שיטית, לפעמים חדגונית, של איסוף נתונים ועיבודם. אם עד עתה ליוינו את החלוצים המיתולוגיים שפריצות-הדרך שלהם נעשו בבדיקות, הגיע הזמן לתת את הכבוד לעובדים רבים מן השורה, אלה שבמנוחיהם של קון¹¹ "עובדים בתוך הפרדיגמה". בילדיהם ישאר המדע אוסף הברקות מעניינות ללא קשר למציאות. ציבור גדול זה מתמסר בסבלנות לתחזיות, ניסויים, מדידות, הצלבות, חזותות ושיפורים, ואת התוצאות הוא מארגן בטבלאות, גרפים וקטלוגים עמוקים. רק על סמך עבודות-דורות מסווג זה הצלicho ענקי המדע להוביל את מהפכותיהם, ואחרי כל מהפכה שב ציבור המדענים מן השורה לעבד את כל פרטיה. כי מדע, בסופו של דבר, הוא יכולת לענות לאינספור שאלות הילד: "אבא, למה השמיים כחולים? למה הבצל ח裏ף? למה הקרח קר והענינים לא נופלים? ולמה...?" בפרק זהה נראה איך כל תשובה לשאלות פשוטות כאלה פורטת לפרטות את ההון שצברנו בפרקם הקודמים. וראו זה פלא, דזוקא העבודה הפנדנטית הזאת תניב את השימוש המדמים ביותר שבעוכותם יגיע בנין הפיסיקה הקלאסית לשיא יופיו ועוצמתו. אם הנפילים מהפרקם הקודמים בנו את היסודות והעמודים, בפרק הזה יבואו המומחים בעבודות היום יום שיחברו אותם בקשרות ויוסיפו תקרה, מרצפות, חיבור לכבלים, ג'קוזים – טוב, אני קצת נשחף, אבל אתם מבינים את הרעיון הכללי.

ನכו, תוך כמה שנים יהפוך כל הארון הזה להיכל אחד בתוך הארון הגדול יותר של תורת היחסות, ובאיזושהי דרך לא-מובנת הוא יהיה, בו-זמנית, גם אגן של עוד ארון הנמצא במקום אחר לගמרי, זה של תורה הקוונטום, ויתחילו לבצבז קווי-המתאר של בנין רם ונישא, שבו ישתלבו כל היכולות כולל אחד שיש איש אינו מסוגל עדין לדמיין. אבל למרות כל אלה, הפיסיקה הקלאסית נותרה עד היום כמו בסיום בנייתה: ארון איתן ומרהיב-עין.

1.12 הארגינה מקבלת שם ומידה

נפתח בבחינה מחודשת של שלושת מושגי-היסוד שעלייהם השתית ניטוון את הפיסיקה: "מASA", "תאוצה" ו"כוח". בפרק # הכרנו את חשיבותם של חוקי השימור בפיסיקה, ולכן מתבקשת עתה השאלה: האם גם שלושה אלה הם גדלים קבועים? לגבי המסה התשובה היא חיובית, כפי שגילתה לבואזיה כמשמעות חוק שימור המASA. תאוצה, לעומת זאת, מופיעה

ונעלמת, אבל המושג הבסיסי יותר שביסודה, "מהירות", כשהוא מוכפל במאסה, יוצר גודל חדש "תנע", שתודות ללייבניץ גילינו גם הוא משתמר. המושג השלישי, "כוח", אינו משתמר אלא מופיע ונעלם: הכוחות שאתה והכסא מפעלים זה על זה ייעלמו ברגע שתקומו. האם זה הכל או שמא מסתחר כאן עוד גודל יסודי יותר, שגם הוא קבוע? אכן, יסוד נוסף בцентр בעבודותיהם של גלילאו וניוטון וזה הזמן להכירו.

תחילה ניתן את הכבוד לניחושים הראשונים, שלא עמדו ב מבחן המדעי אבל סללו את הדרך להבנה חדשה. לבואזיה, הפנסן הנאמן של שימור החומר, הפריך כוכור את תיאוריית הפלז'יסטון, לפיה האש היא סוג של חומר, אבל במקום הציע את תיאוריית ה"קלורייק", לפיה החום הוא נוזל חמקמן העובר מגוף חם לגוף קר. האינטואיציה שלו, אם כן, הייתה שמדובר בעוד גורם קבוע ביקום, העובר מגוף לגוף, והוא האמין שגם גורם זה הוא חומר.

אבל גם תאוריה זו נקלעה לבעיות: מהיכן בא החום כשתי גופים קרים מתחככים זה בזה? יש לנו עסוק עם גורם פשוט יותר. הראשון שהציג עליון היה מיודענו הרופא הטוב יאנג, ובהמשך הצטרפו לדיוון עוד שנים מחבריו למקטוע, שבין מדידת דופק לכתיבת רצפת חקרו את היישות המסתורית הקרויה "אנרגיה". בכך ייסדו ענף חדש בפיזיקה, התרמודינמיקה, החוקר את גלגלי האנרגיה. מהי, אם כן, האנרגיה? יאנג הגדר אותה בפשטות:

אנרגיה היכולת לבצע עבודה.

מה שמחיב הגדרה נוספת. "עבודה" בפיזיקה מוגדרת באופן דומה לזה היומיומי, אבל מדויק יותר:

עבודה הכוח שהופעל על גוף כפול הדרך של אורכה הופעל.

דרך, אולי שמעתם, מודדים בסרגל, בעוד כוח למדנו למדוד בפרק # ע"י השימוש ב מהירות הגוף שעליו פועל הכוח. לכן, אם משחטו חזיר, מדדו לאיזה מרחק זו אותו משחו (במטרים), וכמה כוח הפעיל לשם כך אותו משחו (בניוטוניים), הכספיו זה זה ותקבלו את העבודה שנעשהה (בג'ולים). אם המשחטו חזיר זו עם אפס חיכוך, כך ששווים אנרגיה לא היפה לחום במהלך ההזזה, אז כמוות האנרגיה שהושקעה שווה בפעולות עבודה שהתבצעה.⁸

איזה סוג אנרגיה אנו מכירים? הרבה, והם מחליפים זהוות ביניהם שוב ושוב, כמו חברי ארגון חזאי, בעברם מקום למקום. בשמש משתחררת אנרגיה גרעינית, הופכת לאור שהוא אנרגיה אלקטромגנטית, שבגיעה לכדור-הארץ הופכת לאנרגיה טרמית, מהמתה אותו ומעלה עננים למעלה ומקנה להם אנרגיה פוטנציאלית, שתהפוך לקינטית כשיידר גשם ומים יזרמו בנחלות, וחלקה יהפוך לאנרגיה חשמלית כתוצאה ברקעים כתוצאה מהיכוך טיפות המים זו בזו, בעוד חלק אחר מאור השמש, הנקלט בצמחים, הופך לאנרגיה כימית, העוברת בחלוקת לבני-החיים, שבגופם היא הופכת בחלוקת לקינטית וחשמלית, בעוד השאר עבר, כעבור מיליון שנים, אל הנפט, שבזמן הבירה בתהנת הכוח הופך אותה חזורה לאנרגיה טרמית, המונעת את המגנט בגנרטור שוב באנרגיה קינטית, ההופכת בהשפעת השדה המגנטי לאנרגיה חשמלית, ההופכת במנורה שלכם חוזרת לאנרגיה אלקטромגנטית, או, במעלה המעלה אתכם למעלה, לאנרגיה קינטית, מה שצובר בוגופכם אנרגיה פוטנציאלית, ככלומר

⁸ בואו נדייק: הכוח צריך להתגבר על התנגדות. סוג אחד של התנגדות הוא החיכוך וסוג אחר, נוח יותר למדייה, הוא הכבידה. אם הזנו עצם בחלל, הכוח הופעל כל עוד הינו צריים להתגבר על התנגדות ההתמדה.

אנרגניה שתהפוך ל^{קינטיט} אם תחליטו לרדת חזרה היישר מהחלון, מה שאני סומך עליוכם שלא תעשו אחרי שתשמעו מה קרה לאיש הטוב שתפגשו בשורות הבאות.

12.1.1 הרופא שמדד לטבע חום

רופא צער ששירות על אוניה הולנדית, יוליוס רוברט פון מאיר (1814-1878), הבחן בתופעה מעניינת: מי גלים גבוהים, שנדחו ע"י הרוח, חמים קצת יותר ממי ים שקטים. במיללים אחרים: תנועה הפכה לחום. לתגלית מפתיעה יותר זכה בימי שירותו באי יואה. באותו ימים, הקוזת-דם הייתה שכיחה לטיפול רפואי, הנחשב כיום לחסר ערך, אבל היה ערך רב מאוד להקות-דם שעשה מאיר מורייד של מלח. הדם הוורדי, החוזר מהגוף אל הלב, הוא דל בחמצן ולכך כהה. אבל הדם שיצא היה אדום, ומאייר חשש שעשה את הטעות הרווחת בין רופאים טירונים של החלפת וריד בעורק. אבל זה כן היה וריד, וכך גילתה מאיר כלל: בארצות חמות הדם הוורדי אדום יותר. למה? הוא ניחש שבקלים הם הגוף אינו צריך את כל החמצן שבדם לצורך הפקת חום מבוערת המזון.

האם יש קשר בין חום גלי הגוף ללחם הגוף? שאלת יפה מזינה תשובה יפה. כשהוזר מאיר לארכזו התמסר למחקר התופעות שראה במסעותיו.⁴ הוא הציע את חוק שימור האנרגיה, האומר בניסוחו המודרני:

החוק הראשון של התרמודינמיקה: אנרגיה אינה להיווצר או להיעלם. היא יכולה לשנות את צורתה אבל כמותה הכוללת נותרת בעינה.

ניסוחיו של מאיר לא היו מקצועים והיחסובים שעשה היו קצת מרושלים, ואולי משומך זכתה עובdotו לביקורת עונית מצד הממסד המדעי. מצד שני, ככל היה ברור שאם הוא צודק, זהו אחד העקרונות החשובים ביותר בתולדות הפיזיקה. אבל בעת היה עבדו על אותה עיטה שני גיבוריינו הבאים, שהתנהגו אל מאיר בחזרות. אז, ב-1848, נפטרו שנים מילדיו. לא מצאתי במקורות ההיסטוריים שום פרטים נוספים על האסון זהה, אבל לא קשה לנחש מה זה עשה לו. עברו שנתיים וניסה להתאבד בקפיצה מוקמה שנייה – יותר זעקה לעזרה מניסיון רציני – ונעשה נכה, ובמשך כמה שנים היה, כמו שאומרים, "נכנס ויוצא"⁵ מהאישפו הפיסייאטרי. רק ב-1859 החלה לבוא ההכרה במאיר, תחילת מארצו שננתה לו את תואר-הaczולה "פון," ואחר-כך מבריטניה ארץ הג'נטלמנים, בה קמו מלומדים שתבעו צדק כלפי מגלה החוק בערוב ימיו.

12.1.2 שער הצליףין

מה שמאיר התאמץ לעשות כל השנים, בהצלחה חלקית, היה נוסחה להמרת **כמותית** של אנרגיה, בדומה לשער החליפין של השקל בדולר וב יורו. אם אנרגיה קינטית, למשל, מתגלגת לאנרגיה **תרמית**, איך הופכים מהירות וمسה למלות חום? ואיך נמיר מעלות חום לऊאים של חשמל? את המשימה הזאת לקח ג'יימס פרסקוט ג'אול⁶ (1818-1889), בנו של יצן בירה עשיר, שלמד מדע מפי מורים פרטיים שהבולט שבהם היה דלטון. כמו דלטון היה ג'אול אדם דתי מאד וראה במידע דרך להכרת האלוהים.

מחלת האב אילצה את שני בניו לחתן לידיהם את ניהול ממשלת הבירה. ג'אול ויתר על לימודי אוניברסיטה אבל החל לעסוק במחקר במעבדתו הפרטית. ב-1840 שלח לחברת

⁴ תיאור עצמי של הרגע בו נזכרה בוחרת האינטואיטיבית של החוק מצוטט אצל יונג, ---

⁵ למראות שכך ביטא ג'אול עצמו את שמו, היחידה הקרויה על שמו מבוטאת ביום אנגלית כג'אול.

המלכוטית מאמר על החום הנוצר ע"י זרם חשמלי. המאמר פורסם בקיצור ורוב החוקרים הتعلמו ממנו. לעזרתו באו מיוודענו פרקיי ומקסול, וכן מדען בן עשרים ושלוש, ויליאם תומסון, לימים לורד קלון, שתמך בו בוויכוח עם מייר. ג'אול קבע את יחידת האנרגיה הבסיסית, הקרויה כיום על שמו:

$$1 \text{ ג'יל} = 1 \text{ ניוטון לאורך 1 מטר.}$$

אפקט ג'אול-תומסון משמש עד היום בהתתקנת מקררים. הוא קובל כי כשהוגז מתחפשט, הוא מתקרר בהתאם להתחפשותו. תוכלו להיווכח בכך כשהתנסבו על ידכם תחילת בפה פעור ותחוושו את חום נשימתכם, ולאחר כך ב"פוי" צר. זרם האוויר הדקיק המגיע אל ידכם נאלץ להתחפש פהאום ובכך מתקרר את ידכם.

12.1.3 ועוד דוקטור מיילד את החוזק

בעת היא החל לעלות כוכבו של הרמן לודוויג פרידיננד פון הלמהולץ (1821-1894), רופא, פיזיקאי, פילוסוף, מתמטיקאי וגם מומחה לאסתטיקה ואמנויות. האופתלמוסקופ, הנמצא ביום בכל מרפאת עיניים, הוא אחד מהמצאותיו.

אני יודע למה אתם מצפים עכšíו: שבסייעו חייו אביה לכם אסונות, מחלות, משפחה מופרשת ושאר מרעין בישין. לא הפעם. הלמהולץ, לשם שניין, היה גאון שפוי, רגוע ואפילו די משעמם, מלבד זה שעוד גיל שבע היה ילד חולני – פרט המופיע בחיהם של הרבה רופאים. אביו היה מורה שלימד אותו פילוסופיה ומוסיקה. כיוון שלא היה למן למדים אוניברסיטאיים, פנה ללימודי רפואי כעתודאי בצבא הגרמני. במסגרת עבודתו השגרתית כרופא צבאי בשירות קבע היה לו הרבה זמן לניסויים במעבדה מאולתרת שהקים. הישגיו המדעיים הביאו לשחרורו המוקדם מהשירות ולקרירה באוניברסיטהות רבות.

כמו מייר, גילתה הלמהולץ את חוק שימור האנרגיה דרך מחקרו בפעולות השריר. בביולוגיה שלט אז הוויטליזם, התורה שראתה בחיים כוח הנבדל משאר כוחות הטבע. הלמהולץ הצליח למדוד את כל סוגיה האנרגיה הנפלטים בשיריר העושה עבודה ולהוכיח ששם דבר לא הולך לאיבוד. מלבד אלה, הספיק האיש הזה להוכיח את תורת תipsis הצבעים של יאנג לפיה מגיבה העין לשולשה צבעי יסוד, לחשוב על גיאומטריה לא-אוקלידית ולנסות לחבר את כל אלה לפילוסופיה של קאנט. בקיצור: הלמהולץ לא חסך באנרגיה, אבל בהחלט לא בזבזו אותה.

12.1.4 סיכום: חמ מקמה אבל קבוצה

הנה, אם כן, המאפיין המדהים ביותר של האנרגיה: **ישות בלתי-נראית המתגלגת בין תופעות שונות שכאהורה אין שם קשר ביניהן**. מכל האיחודים שיצרה הפיסיקה התאורטית, זה אולי בעל העוצמה הגדולה ביותר. חשבו לרגע על תנועת עיניכם לאורך השורות ברגע זה: מה שמניע אותן הניע פעם ברק בעננים, גל באוקיאנוס, גלגל מכונית, התפרצויות הר-געש, סופת ברד, כנף ציפור, נצנוץ כוכב וכך הלאה – עד למפגץ הגדול!

חוק שימור האנרגיה וגילוי שער החליפין שלו הוסיף לפיסיקה כלי רב-עוצמה: בכל תהליך שבו מופיעה חירגה, ولو הצעירה ביותר, **מחשבון האנרגיה המתגלגת מצורמת לצורה, כדי לעצור ולבחון מה קרה**. חוק חדש או צורה חדשה של אנרגיה בודאי מתחבא שם.

2. 12. החומר מגלה את יסודותיו זה הזמן לחזור ולחקור את בני-זודינו הקיימים, שעובודתם העניקה לפיסיקה את אחד מיסודותיה האיתנים ביותר: **מי שהוקר את החלקיקים הקטנים ביותר של החומר, מגלה בהם לא סתם חוקים פיזיקליים אלא חוקי-יסוד.**

גם הפעם, הגיע תחילתה רמזו חשוב מהשמות: אסטרונום גילה כי הכימיה המתגלת במחנות ובאביריים שעל הארץ שולחת ביקום כולם.

12.2.1 הכימיה של אור הכוכבים החים היו רעים אל יוזף פון פראונהופר (1787-1826), בנו של זוג מבוואריה, ממש מהתחילה: עד גיל שתיים-עשרה איבד שבע אחיו ואחיותיו, את אמו ולבסוף את אביו. את סאות צרותיו השלים זוג קשה-לב שהעבידו לא רק כשליה אלא גם כמשרת ואסר עליו לлечת בית הספר או אפילו לקרוא. ואז, כמו שאומרים, כשנדמה היה שגרוע יותר לא יכול היה להיות, התמוטט בית הזוג על יושביו. ארבע שעות נמשכו מאמץ הפינוי ובמהלכם נמצא נמצאה אשת הזוג ללא רוח-חיהם. ואז, כמו שאומרים, קרה נס: השוליה בן הארבע-עשרה הוצאה לא פגע. ואז, כמו שאומרים, קרה עוד נס: למקום האסון הגיעו הנסיך מקסימיליאן הראשון, למלך מלך בוואריה, ויוציאו הבכיר. רחמי השנים נכרמו על הניצול הקטן והם לקחו תחת חסותו. מעתה הרשה הזוג לוייזף למד בבית-ספר והארמן העניק לו תמייה. הנער הזה גדל וגדל לפטרוניו כפל-כפליים: הוא נעשה לוטש עדשות, תעשיין של טלסקופים ומיכנירים אופטיים, ומעלה לכל מדען מזהיר, אחד מאבות האופטיקה המודרנית.

פראונהופר חקר תעלומה ישנה: כشنיטוں העביר או רשם בניסוי המפורסם שלו במנסраה, הוא לא ראה, או אולי הטעלם מהעובדה, שבין הצבעים השונים שנוצרו בהשתברות האור הלבן, היו פה ושם פסים דקים שחורים. ולאסטון, חברו של פרדיי, הבחן בתופעה אבל סבר שאלה הם סתם "גבולות" בין הצבעים. פראונהופר שקד על חקירת הפסים האלה, ספר, מגד ומין אותו (574 במספר), ועד היום הם קרויים על שמו. הוא חיבר מנדרה לעדשות טלסקופ – הספקטורוסkop הראשון – וחקר את קשת הצבעים המשתרבת מאורם של כוכבים רחוקים, אותם השווה לאור המשמש. **הסתבר שלכל כוכב יש ספקטרום ייחודי.** ואז, בגיל 39, מת יلد-הפלא, עטור תاري אצולה ואותות-כבד מדיעים.

דור חלף ושני כימאים חברו להשלים את עבודתו. כל מי שלמד כימיה מכיר את מבער הגז שהוא המציא אמנם פרדיי, אבל שוכל בידי רוברט וילhelm אברהרד בונז (1811-1899). במעבר בונז, הגז המוזרם בציינור מתרבעב היטב באוויר (או, מוטב, בחמצן) לפני שהוא מגיע אל הפייה, וכך מתקיים להבה כחולה, הפלות פחות אור אבל חמה הרבה יותר מאשר הבהה הבהירה. בא חברו של בונז, גוסטב רוברט קירכהוף (1824-1887), ואמר לו: ידוע שהומרים שונים יוצרים להבות בצבע שונה כשבעירם אותם. בוא נבחן בספקטורוסkop את האור הנפלט מהם כשהם בוערים במעבר שלך! ואכן, התברר שהאור הנפלט מכל יסוד כשהוא לוהט מפיק קשת צבעים האופיינית לו, מעין "טבעת אצבע" כימית. שבדקו את ספקטרום הנתרן הלוות, גילו שני פסים בהירים בדקם במקומות בו נמצאים שניים מהקווים השחורים של פראונהופר! מקרה? ממש לא: כשהעבירו השניים אור דרך גז, גילו בספקטרום קווים שחורים בධוק במקומות בהם מופיע אור חזק בספקטרום האור



שאותו פולט גז זה כשהוא להט! הנה סימטריה רבת-משמעות: כל יסוד, כשהוא קר, בולע אויר באותם אורכי-גל שאותם הוא פולט כשהוא חם!

עכשו, כשזכתה הכימיה בכלי רב-עוצמה לבידוד יסודות חדשים, פנו השניהם להמשיך את העבודה שנטעה עם מות קודם: **כשהעבירו בספקטросקופ את האור הבא מכוכבים שונים, יכולו לקבוע מה הם היסודות השכיחים בכוכבים אלה.** מהם, אם כן, הפסים השחורים? המשך לא רק פולט אור, אלא גם בולעת אותו חזקה. אור באורכי-גל קצרים (כלומר, חם מאוד) הנוצר בלביה הלוהת של השימוש ומגיע אל קליפתת הפחות חמה (בשימוש, ארבעת אלף מעלות צלזוס==== זה נראה קר) נבלע שם, ולכן החלק הזה בקשת הצבעים מופיע כפס שחור.

כך גילה הספקטросקופ שפע יסודות חדשים. חלקם נקראו על שם הצבע שהם פולטים, כמו ציון (כחול) או רובידיום (אדום) וחלקם על שם המקום בו התגלו, כמו הליום (שמש), וכמו כן, יסודות שהתגלו תחילה בכוכבים התגלו עד מהרה כאן בארץ.

מדוע חדש, האסטרופיזיקה, נולד מזל טוב, והוא אכן ביכאים: פענחו את הסדר שבחומרים המתחלתיים בボונזנים שלהם, כי ממן תלמדו על כל היקום!

12.2.2 אלמנטרי, ווטסן יקיiri

כבר האלכימאים הבינו כי החלוקה היונית לאربעה יסודות החומר אינה נכונה והחלו לחתור להכרת היסודות האמיתיים. בואו נעשה ניסוי פשוט, "אלקטROLיזה". ניקח כוס מים ונערבב בה מעט מלחה. המלח עצמו אינו בעל תפקיד כימי והוא נועד רק להגבר את המוליכות החשמלית של המים. עכשו נחבר שני תילים חשמליים לשני קצוות סוללה ואת שני קצוחות החופשיים נתבול במים (ר' ציור). בועות יופיעו ליד כל קצה תיל ופני המים ירדו עד שייעלמו. המים, כך מלמד הניסוי הזה, אינם יסוד. פירקנו אותם לשני חומרים יסודיים יותר, הגזים המגן ומימן. נוכל לאgor את בועות שני הגזים האלה בשתי מבחנות. אם נערבב אותם נקבל תערובת גזים פשוטה, שאotta נוכל להפריד מחדש בклות יחסית. אבל אם נדליך גפרור בתחום התערובת (שימו לב להדגשה שב"אמ": אל תנסו את זה בבית!), יתרחש פיצוץ ושני הגזים יהפכו שוב למים. המים הם תרכובת: שלא כתערובת, בה שומרים החומרים על תוכנותיהם, כאן נוצר חומר חדש עם תוכנות שונות לחלוין מלאה של מרכיביו: שני גזים דלקים הפכו לנוזל ממש לא דליק.

את המגן והמגן אי-אפשר לפרק יותר, ולכן הם יסודות, ככלומר חומרים פשוטים, טהורים, שלא ניתן לפרקם לחומרים יסודיים יותר. כמה יסודות כאלה קיימים? מיודעינו לביאזיה, קוונקיש, זיוי, פרקי ורבים אחרים שקדו להוסיפה על הרשימה מתכוות, גזים וחומרים נוספים, יסוד-יסוד ותוכנותיו הייחודיות עמו, וכל אחד מחזק את השאלה: האם יש סדר נסתר בסוד השפע הזה של יסודות החומר?

12.2.3 ההשערה האטומית

את הצעד הראשון להשלמת היפותקளית על הכימיה פגשנו כבר ביוזן כshedmoriotos הצעיר, משיקולים עיוניים בעיקר, את ההשערה האטומית. אלפיים שנה אחריו בא דלטון נתן להשערה זו חזקים ניסיוניים. לעיל עשינו הבחנה בין יסוד, תערובת ותרכובת. בואו וננסח אותה במונחי ההשערה האטומית:

אטום: החלק הקטן ביותר של יסוד כימי שבו מצויות תוכנותיו הכימיות של אותו יסוד.

מיילקולה: החלק הקטן ביותר של תרכובת שבו מוציאות תוכנותיה הכימיות של אותה תרכובת, והוא מרכיבת מהאטומים המחויבים של היסודות המרכיבים אותה. איך נוכל לדעת, אם כן, שהומרים עשויים באמת מאטומים או ממולקולות? ראשון בא לעוזרתנו החשובן: מההשערה האוטומית מתחייבים כמה ניבויים פשוטים מהם נוכל להתחיל את חקרתנו.

12.2.4 עדרת המספרים

دلטוֹן נתן לשערה האוטומית ביטוי מתמטי. אתם בוודאי זכרם את חוק דלטוֹן: **יסודות שונים מתרכבים ביניהם ביחסים קבועים.** על כך נוסיף תגלית שעשה ז'וזף-לוֹאַי גִּילוֹסָק (1778-1850) יחד עם הכימאי והגיאוגרף הגדול אלכסנדר פון-הימבולט (1769-1859):
חוק גִּילוֹסָק: גִּים מתרכבים ביניהם ביחסים קבועים.

הדמיון בין החוקים ברור, מה שמצוין לא מנע מדלטוֹן וגִילוֹסָק לפתח בריב. עודם משמשים זה את זה בא רוזן איטלקי מהפכן, לורנצו רומנו אמדאו קרלו אַבּוּגְדָּרוֹ (1776-1856), ושיעיר השערה שמייצגה את שני חוקיהם לחוק חדש. השנים מיד פנו להתקוטט גם אותו, אבל ההשערה שלו – כמה נחמד – הוכחה כנכונה:
חוק אַבּוּגְדָּרוֹ: כאשר שני גִּים באותו נפח נמצאים באותה טמפרטורה ובאותו לחץ, מספר האטומים שלהם שווה.

כלומר, אם תנפחו צמיג אחד של מכונית במימן ואת השני בחמצן עד שבשני הצמיגים יהיה אותו לחץ, ככל צמיג יהיה אותו מספר אטומים. כמובן, המשקלים של שני הגנים **אין** שווים, מה שאומר, בפשטות, שאנחנו יודעים עכשו את היחסים בין אטומי החמצן והמים! בשיטות דומות ניתן היה למצוא את המשקלים היחסיים של אטומי נזלים ומזקנים. חוק אַבּוּגְדָּרוֹ, אם כן, הוא צעד ענק בהבנת מבנה האטום. כך התבררו שני מושגים שסייעו למין את היסודות על-פי תוכנותיהם:

ערכיות מצינית את כמות הקשרים הכימיים שישוד מסויים יכול ליצור עם יסודות אחרים. זהו כמובן מספר הקשרים שיכول ליצור אטום בודד של אותו יסוד. ניתן לדמיין את זה כאילו יש לאטומים “ידיים” שהם יכולים לחתת זה לזה. ניקח למשל את המימן, החומר הקל ביותר, שכפי שנראה בהמשך, האטום שלו הוא הפשט ביותר. נניח שהוא מסוגל ליצור קשר אחד, כלומר “יש לו יד אחת”. עכשו ניקח יסוד אחר, למשל החמצן, ונשאל: עם כמה אטומי מימן יכול האטום שלו להתקשר (“כמה ידיים יש לו”?) התשובה היא שתים, ולכן הערכיות של החמצן היא שתים, הפתמן יכול להתקשר עם שני המיצנים (דו-תחמושת הפתמן הידועה) או עם ארבעה מימנים (מתאן, גז הביצות), ולכן ערכיותו היא ארבע וכך הלאה. עליי לומר ולהזuir כי “**ערכיות**” אינה מושג מדויק אלא מלא יוצאים מן הכלל: יש יסודות המגליים ערכיות שונות בנסיבות שונות. לכן, כשרוצים לציין את תוכנותיו הכימיות של היסוד, משתמשים ביום בערך מדויק יותר: מספר האלקטרונים בקlijפה החיצונית של האטום שלו, אבל בדיעון זה המונח **ערכיות** יספק.

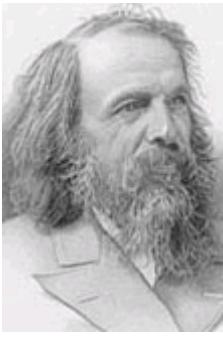
משקל אטומי הוא משקלו של אטום בודד של היסוד, אותו אנו יכולים לחשב על-פי חוק אַבּוּגְדָּרוֹ. כדי לוודא שהבנתם, נזהור לניסוי האלקטרוליזה לעיל: אם פירקנו קילוגרם אחד

של מים, שהם בערך ליטר, נקבע 111.111 גרם (תשיעית הק"ג) חמצן ו-888.888 גרם (שמונה תשיעיות) מימן. למה, אם כן, אנו אומרים שمولקולת המים מורכבת מאטום אחד של חמצן ושני אטומי מימן? כי אטום אחד של חמצן כבד פי שיש-עשרה יותר מאשר מאטום המימן.

הנפחים של שני הגזים יהיו באמת ביחס של 1:2.

כל יסוד, אם כן, מתייחד במשקל אטומי ובערכיותו משלו. האם יש קשר בין שתי הוכנות? כן. היכנו עכשו לאחד האיחודים היפים ביותר בתולדות המדע.

12.2.5 מנדייב קורא את החומרים לסדר

הצחה ברעמת הארץ של גדור מדעני רוסיה מעלה בזיכרון דמות אחרת ומאיימת מאותם ימים: הנזיר המופרע רספוטין שהשתלט על משפחת המלוכה הרוסית. אבל אל דאגה: דימיטרי אינוביצ'י מנדייב (1834-1907), היה רציונליסט נאור וטוב-לב, אם גם קצת חם-מזג, כיאה לייחסו האתני המערבי: היה בוدم טטари, אבל סבו היה יהודי מומר משקלוב, עירם של רבנים נודעים כמו ר' ברוך הרופא שתרגם לעברית את ה"יסודה" של אוקlidס. גם חינוכו היה מגוון: "הכל הוא מדע", "שין לו גיסו המהפקן בילדותו. "הכל הוא אמונה", הבטיח לו מנפה הזכוכית בבית-החרושת של אמו. "הכל הוא אהבה," ענהה האם. לכולם הקשיב הנער רב-קשב.

הוא היה בן זקנינו (ה-11 ? ה-14 ? ה-17 ? יש גרסאות שונות) של מורה לספרות שהתעוור אחרי שהולידו. לפrensת המשפחה ניהלה האם בית-החרושת לזכוכית. בתוך שנה נפטר האב ובית-החרושת נשרף. מעתה הקדישה אמו את מעט שנות חייה הנותרות כדי לעזור לבנה לקנות השכלה. היא הצליחה. דימיטרי, שזכה לשמעו תורה מפי בונין בגרמניה, נעשה כימאי רבוני מאד ולמרצה נערץ הן על הסטודנטים והן על המוזיאקים (האיכרים), שאת חייהם שקד לשפר בעזרת חידושים הכימיים. גם איש אמץ היה, ולא פעם הסתכסך עם השלטונות בשל קנאותו לחופש הדיבור ותמייכתו במאבקי הסטודנטים.

נושא הדוקטורט של מנדייב היה "על העירוב של מים עם אלכוהול", ועד היום מהולה הווודקה הרוסית לפני האחוזים שקבע (על סמך הרבה לגימות קפדיות!) בהיותו ראש מכון התקנים הרוסי. בהיותו כבן חמישים התאהב עד מעל לאוזניו בנערה בת שבע-עשרה והציג לה נישואין. הייתה רק בעיה קטנה: הוא היה כבר נשוי ואב לילדים, ובאותם ימים חביב החוק הרוסי להחות שבע שנים בין אישת לאישה. קרובי הנערה המזועזעים שלחו אותה לרומה. מנדייב נסע אחריה. כשהבינה את חששותיה מהניסיונו העמיד אותה בפני חישש כבד יותר: אם לא חינשאיל אקפוֹן לִים! היא נישאה לו, ילדה לו ארבעה ילדים, לימהה אותו אמונה והיה אותו עד סוף ימיו, ככל הנראה בלי שיצטרך לרוץ שוב אל חוף הים. כשהתלוננו אנשי החצר של ניקולאי ה--- על המלומד הביגמיסט ענה הצאר: "למנדייב יש שתי נשים, אבל לי יש רק מנדייב אחד."

לගילוי הטבלה המזהורית שלו זכה מנדייב תודות להיותו מורה מסור: הוא לא מצא ספר ללימוד לכימיה ברוסית שהשבע את רצונו ולכן כתב ספר בעצמו. בין הדברים שניסה להסביר לתלמידיו הייתה העבודה שכבר העסיקה כימאים רבים: המשקלים האטומיים של היסודות יוצרים סדרה, אולם לא רציפה, של מספרים כמעט שלמים. זאת ועוד, לאורך הסדרה הזאת יש תכונות החזורות על עצמן. למה? הוא לקח 63 כרטיסים ועל כל אחד רשם את אחד היסודות שהיו ידועים בימיו. כשסידר אותם בשורה על-פי משקליהם האטומיים,

| | | | | | | | | | | | | | | | | | |
|---|--|---|---|--|--|--|---|--|--|--|--|--|--|---|---|---|------------------------------------|
| 1 H Hydrogen 1.00794 | | הטבלה המוחזורת כיוון | | | | | | | | | | | | 2 He Helium 4.003 | | | |
| 3 Li Lithium 6.941 | 4 Be Beryllium 9.012182 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 11 Na Sodium 22.989770 | 12 Mg Magnesium 24.3050 | | | | | | | | | | | | | | | | |
| 19 K Potassium 39.0983 | 20 Ca Calcium 40.078 | 21 Sc Scandium 44.955910 | 22 Ti Titanium 47.867 | 23 V Vanadium 50.9415 | 24 Cr Chromium 51.9961 | 25 Mn Manganese 54.938049 | 26 Fe Iron 55.845 | 27 Co Cobalt 58.932200 | 28 Ni Nickel 58.6934 | 29 Cu Copper 63.546 | 30 Zn Zinc 65.39 | 31 Ga Gallium 69.723 | 32 Ge Germanium 72.61 | 33 As Arsenic 74.92160 | 34 Se Selenium 78.96 | 17 Cl Chlorine 35.4527 | |
| 37 Rb Rubidium 85.4678 | 38 Sr Strontium 87.62 | 39 Y Yttrium 88.90585 | 40 Zr Zirconium 91.224 | 41 Nb Niobium 92.90638 | 42 Mo Molybdenum 95.94 | 43 Tc Technetium (98) | 44 Ru Ruthenium 101.07 | 45 Rh Rhodium 102.90550 | 46 Pd Palladium 106.42 | 47 Ag Silver 107.8682 | 48 Cd Cadmium 112.411 | 49 In Indium 114.818 | 50 Sn Tin 118.710 | 51 Sb Antimony 121.760 | 52 Te Tellurium 127.60 | 53 I Iodine 126.90447 | |
| 55 Cs Cesium 132.90545 | 56 Ba Barium 137.327 | 57 La Lanthanum 138.9055 | 72 Hf Hafnium 178.49 | 73 Ta Tantalum 180.9479 | 74 W Tungsten 183.84 | 75 Re Rhenium 190.23 | 76 Os Osmium 192.217 | 77 Ir Iridium 195.078 | 78 Pt Platinum 196.96655 | 79 Au Gold 200.59 | 80 Hg Mercury 204.3833 | 81 Tl Thallium 207.2 | 82 Pb Lead 208.98038 | 83 Bi Bismuth (209) | 84 Po Polonium (210) | 85 At Astatine (210) | 86 Rn Radon (222) |
| 87 Fr Francium (223) | 88 Ra Radium (226) | 89 Ac Actinium (227) | 104 Rf Rutherfordium (261) | 105 Db Dubnium (262) | 106 Sg Seaborgium (263) | 107 Bh Bohrium (262) | 108 Hs Hassium (265) | 109 Mt Meitnerium (266) | 110 Ts Tsungstenium (269) | 111 Uub Ununtrium (272) | 112 Ts Tsungstenium (277) | 113 Ts Tsungstenium (277) | 114 Ts Tsungstenium (277) | | | | |

| | | | | | | | | | | | | | | |
|---|---|---|---|--|---|--|--|--|--|---------------------------------------|---|---|--|--|
| 58 Ce Cerium 140.116 | 59 Pr Praseodymium 140.90765 | 60 Nd Neodymium 144.24 | 61 Pm Promethium (145) | 62 Sm Samarium 150.36 | 63 Eu Europium 151.964 | 64 Gd Gadolinium 157.25 | 65 Tb Terbium 158.92534 | 66 Dy Dysprosium 162.50 | 67 Ho Holmium 164.93032 | 68 Er Erbium 167.26 | 69 Tm Thulium 168.93421 | 70 Yb Ytterbium 173.04 | 71 Lu Lutetium 174.967 | |
| 90 Th Thorium 232.0381 | 91 Pa Protactinium 231.03588 | 92 U Uranium 238.0289 | 93 Np Neptunium (237) | 94 Pu Plutonium (244) | 95 Am Americium (243) | 96 Cm Curium (247) | 97 Bk Berkelium (247) | 98 Cf Californium (251) | 99 Es Einsteinium (252) | 100 Fm Fermium (257) | 101 Md Mendelevium (258) | 102 No Nobelium (259) | 103 Lr Lawrencium (262) | |

בכל משכצת מופיע הקיצור המקבול של שם היסוד, מעליו מספרו האטומי (שלא היה ידוע בימי מנדלייב), מתחתיו שמו האנגלית ומשקלו האטומי. עשרה היסודות הראשונים הם: מימין, הליום, ליטיום, בריליום, ברונן, תיכון, המציג, גופרית וניאון. הרוחות הגודלים בשורות 1-3 לא היו בטבלה המקורית של מנדלייב והוספו מאוחר יותר. המלבן הנפרד למטה ציריך להיות משולב בשתי השורות האחרונות של הטבלה, בין המספרים האטומיים 57-72, 89-104, ומעליו ציריך להשתרע "מפרץ" כמו בשתי השורות העליונות. נהוג להציגו בנפרד רק מטעמים של רוחב הדף.

בלי להיכנס לפרטים כימיים מדי, נוכל לראות איך הטורים האנכיים בטבלה אכן יוצרים דפוס ברור. כך, למשל, הטור השמאלי (מלבד המימן) מורכב ממתכונות המגיבות בחזקה עם מים ואילו הטור הימני מורכב מגזים אציליים.

הבחן שתכונות כימיות כמו הערךיות חזרות על עצמן לאורך השורה במוחזרות מסוימת, ולכן, כששבר את השורה לפי המוחזרים וסידר את השורות הקצירות זו מתחת לזו, הופיעו, כמו בתשבץ, גם סדרות אנכיות!

בשלב זה הייתה התמונה רחוקה מלהיות חלקה, ולכן, כדי לפשט את הדיוון, אתייחס לקטע הראשון מסדרת היסודות כפי שהוא ידועה היום. המשקלים האטומיים שלהם, כאמור, קרובים למספרים שלמים: 1.008 (מיין), 4.003 (הליום), 6.941 (ליטיום), 9.012 (בריליום) וכו'. והנה, מבחינת הערךיות של כל יסוד, מופיעות מהזרויות: לליטיום ולנתרן תכונות כימיות דומות לאלו של המימן, למגנזיום ולסידן תכונות דומות לאלו של הבריליום וכן הלאה.

אתם בוודאי מבינים שבמידה שיש כאן סדר, הוא לא ממש ברור, ואני עוד עשיתו לכם חיים קלים בכך שהשתמשתי בנתונים של ימינו. למנדייב היה קושי משולש: א) הוא היה מוגבל ל-63 היסודות שנודעו באותה ימים, ב) הוא הכיר רק שתי תכונות כימיות, "משקל אטומי" ו"ערךיות", בלי לדעת דבר על "המספר האטומי" עלייו נדבר בהמשך, ו-ג) הוא התבבס על משקלים לא מדוקים. מסיבות אלה, אחרים ניסו למצוא סדר דומה לפניו ונכשלו. מה שעזר למנדייב היה, בפרט, העובדה שנาง עלי-פי מוסר כפוף: **לפעמים רישן את התיאוריה כדי שתתאים לעבודות – כפי שדורשים האристוטליסים הפදנטים – ולפעמים בדיקת ההיפך,অন্ত উৎসুক হতাকাম তাইরিয়া – কমো শুবুশিম অফলতনিস্টিম হস্তি-আচরিয়ত.** כך, למשל, המשקלים האטומיים של כשייני תריסרי יסודות (מתוך 63!) לא התאימו למקומות שייעד להם בטבלה. כאן, יאמר אולי מדען הגון, צריכה התיאוריה להיזרק לפחות. "בשם אופן!" עונה מנדלייב. "אין שום סיבה יותר על טבלה כל כך יפה רק בגל עשרים ומשהו יסודות שלא משתלבים בה. אם המשקלים האטומיים שלהם לא מתאימים

לטבלה, אז בבקשתה, במקום להפריע לי, לכו למעבדה וזקקו אוטם יותר טוב ואל תחזרו עד שהמשקלים יתאימו. **תַּרְשׁוֹ?**⁸

הכימאים לגלgo על ההתנהלות הבריונית הזאת של תאורטיקאי בעולם העובדות, אבל שקיולות מדוקיות יותר אכן היזו את היסודות בדיקות אל המkommenות שהקצתה להם מנדليب. כמובן, היה ההישג המהם ביותר: בטבלה נותרו משכבות ריקות. מה עשה מנדليب? פשוט: בסנסקריט, "אקה", "קבי", ו"טרי" הם "אחד", "שתי" ו"שלוש", ובهم השתמש כדי לציין מקום אחד, שני או שלישי אחריו יסוד ידוע כלשהו. כך נולדו "אֲקָרְבּוֹן" שהוא אמר ליה את הפטמן, "אֲקָלוּמִינּוּם" וכו', שעד מהרה אכן התגלו וקיבלו שמות משליהם.

וכאן הגיע גאנותו של יידינו אל גבולה. דוקא הוא, מכל האנשים, פקפק בקיים האטומים ובוודאי בגופים קטנים יותר, החל לחפש יסודות קלים יותר מהמיין והתעמק בתכונות האתר. היה שלום, אם כן, דימיטרי איבנוביץ'. אנו נשיך לחפש תשובה לשאלות רבות המתעוררות בנו למראה הטבלה: למה המפוץ הזה בשלושת השורות הראשונות? ולמה הפער הזה בין המספר הסידורי לבין המשקל האטומי? ולמה זה האחרון אינו מספר שלם? אל צרפת נשוב עתה, שם, בין אכילת קרואסון לגלגול כמה רכילות, נתודע אל דור שהחל בשלב הבא של המשען אל יסודות החומר.

12.2.6 מסטרי החומר הקורן

את פריצת-הדרך הראשונה הביא, כרגע, המקרה: אנטואן אנרי בקֶרֶל (1852-1908, נובל 1903) פתח לוחות צילום שהיו סגורים במעטפה אטומה והופתע בגלות בהם כתמים מוזרים. לידם היו כמה גושי מלח אורגניים, שכבר נודעו כבעלי תכונות מוזרות. הוא הסיק שגושי המלח פולטים קרינה שלא הייתה א/or והחודרת דרך עצמים. לעומת זאת כבר נודעה קרינת רנטגן שהציגינה בחודנות זאת, אבל הקרינה החדשה לא נפלטה ממתkan החסמי אלא מחומר דומם. כך התגלתה הרדיואקטיביות, שפתחה עידן חדש בפיזיקה.

את שמה קיבלת התופעה מרירה סלומה סְקָלוֹדוּבְּסָקָה (1867-1934) מהגרת מפולין שננקה או תחת כיבוש הרוסים. בצרפת נישאה ונעשה מארי קִירִי⁹, האשה הראשונה שזכה בnobel, יחד עם בעלה פִּיר (1859-1906) ב-1903. הפעם השנייה בה זכתה אשה בנובל, הייתה ב-1911, כשהוונק הפרס ל... מארי קִירִי, ואילו האERICA ימים עוד שנה הייתה רואה את הפעם השלישית, כשהוונק הפרס ל... בתה ארין (1897-1956) ולהתנה זו אין פרדריק ז'ולי-קִירִי (1900-1958), שאף צירף לשמו, במחווה פמיניסטית יפה, את שם משפחת אשתו.

סיפורם של מארי ופייר הוא לא ספק סייפור האהבה המרגש ביותר בתולדות המדע, וברבורה גולדסמיית' מגוללת אותו בריגישות ובחן. כמו רבים מגיבורינו הקודמים, עברה ילדותה של מניה בצל פטירת שתי אחותיה, זו אחר זו, מה שהשאר בה נטייה קרונית לדיכאון. האב היה מורה למדעים שהכיבוש הרוסי מנע ממנו להיות מדען. בגיל 23 נסעה ללימוד בפריז, שםפגשה את פִּיר בן-ה-34, כבר מדען מבריק בזכות עצמו: הוא גילתה את עיקרונו הסימטריה היסبتית (ר' פרק #) וכן, יחד עם אחיו, את התופעת הפיזיואלקטריות,

⁸ אם רצונכם לבטא את השם כמו צרפתים מבטן ומלידה, שרבעו מעט את שפתיכם כאילו ברצונכם לומר "קורי" אבל הגידו "קִירִי". עכשו עשו את כל זה במלרע... לא רע.

== . פגישה ראשונה עם הפולנית הצערה גרמה למלומד הבישן, שעד אז התרחק מנשים, לחוש כי הוא ניצב בפני גאונית, שכמותו הייתה מתבודדת מטבעה. הם נישאו ומעתת התבונדו יחד.

מארי בחרה את קרינה בקְרֶל כנוסא הדוקטורט שלה. התברר שהאורנים הוא המקור החזק ביותר לקרינה זו. אנשים נהגו באותה ימים לכנות אורנים כדי להשתמש בו להכנת כלי זכוכית וקרמיקה זהירותם. אחרי הפסק האורנים נשארה פסולה דמיית-זפת המכונה פיטשפלנֶקה (פצלת העטרן). מארי בדקה את הפסולה הזאת ולהפתעתה גילתה בה קרינה חזקה אף יותר מזו של האורנים. עכשו החל מפעל הרואי של בישול עירימות עפר שהובאו מהמכרות לשם זיקוק הייסוד הרדיואקטיבי הנוסף שהסתתר בהן. באנגליזה הכימית השתמשה בשיטה מארי אותה כבר הכרנו, הספקטרוסקופיה, וגם זו הוכיחה לה שישוד חדש הולך ומשתחרר. פיר, הפיסיקאי, מدد את הרדיואקטיביות של החומר המזדקק באמצעות מכשיר מיוחד שפיתח. ימים ולילות חלפו ובני הזוג המותשים עבדו יומם ולילה בצריף המלא עירימות עפר, פה מקרים רבים נקבעו יבש ופה שותים כוס תה להתחمم. לאט-לאט הולך המזדקק ונעשה זהה יותר בחשכה, והוא הלכה וגברה הרדיואקטיביות שלו, עד שנותרו בידי מארי כמה גרגירים של יסוד חדש, רדיואקטיבי פי 400 מהאורנים, אותו כינה פולוניום לכבוד מולדתה. אבל עכשו הייתה הפסולה שנותרה לצד קורנת עוד יותר! מארי חזרה לבשל ולזקק אותה עד שלבסוף נותרה בידיה כמעט זעירה ביותר של חומר רדיואקטיבי פי כמה מיליון מהאורנים. היא ידעה שמדובר בחומר המתפרק במחירות והופך ליסוד אחר, וכך רצתה אותו אל מעבדת הספקטרוסקופיה, שם גילתה את הרדיום. עכשו החל מבצע ענק: בסיווע הברון רוטשילד קנו בני הזוג טונות של עפר שהצרכו מאות טונות של מים לשטיפה, וכעבור שלוש שנים

מארי שמה לב ששולם ריאקציה כימית אינה משנה את הרדיואקטיביות של יסוד כלשהו, ומכאן הסיקה שהיא זו תכונה של האטום עצמו.

סיפור האהבה בין מארי ופיר קيري הוא אחד המרגשים ביותר בתולדות המדע, ונ��ע באכזריות ביום השנה ה--- ליום נישואיהם כשפיר, מהר ---, נדרס ע"י עגלה שעברה ברחוב. שנים אחדות חלפו והאלמנה השבורה מצאה ניחומים בזרועות הפיסיקאי פול לאניאן (1872-1946), שלם אצל לורד קלוין והתקתר אצל פיר קירי. זיווג יפה לכל הדעות, אבל הייתה רק בעיה אחת: האיש היה נשוי. עיתוני צרפת עטו על שערוריות האלמנה שפגעה בヅר בעלה וגם גולת צרפתי הגון ממשפחתו. לאניאן נבהל וחזר אל חיק רعيיתו. הגדילו לעשות כמה עיתונים שטענו שה"פולנית" הורסת-המשפחות היא בכלל יהודיה!
ומدام קيري נעלבה עד עמקי נשמה.

כיוובל שנים חלף וב-1995 הורה הנשיא פרנסואה מיטראן להעיר את עצמות בני-הוזג קيري אל הפנטיאון הלאומי לצד שאר גודלי האומה. בין המזומנים היו נשיא פולין לך ולנסה, שלא-מכבר שחרר את ארצו מעול הרוסים, וכמה מבני שושלת קירי, בהם פרופסור לפיסיקה גרעינית ושמה... הלן ז'וליו-לאנגן. אפשר לדמיין את הרומן שהתחיל ב"מה הסיפור על ה- liaison" שהיא לסתה של עם סבא שלך?"

7. 12.2.7 א-טומוס? כן-טומוס!

המדע קיבל צעוז חדש, הקרןנה הרדיואקטיבית. הפן המסוכן שלו יתגלה רק בהמשך וכרגע הוא מקור אינסופי של חידות והפתעות. עכשו נפנה אל האנגלים, שחודרו אל תוך האтом מכיוון אחר ומשם התחרבו עם מחקריהם שעמבר לתעלת.

זכרים את פֶּרְקִי? הוא חקר לא רק זרמי חשמל העוברים דרך מתכת אלא גם זרמים העוברים באוויר, כמו הברקים, או, אפילו יותר טוב, בוואקום. "קרניים קטודיות" הן מעין נחש-אור מתחפלים מהפנטים ביופיים העוברים בתוך צנצנת ואקוום מהקוטב השלייל (קתוודה) של תיל המחבר לסוללה אל הקוטב החובי (אנודה). לקרניים האלה מטען שלילי, כפי שמכיחה הטייתן הצדה כשהן עוברות בשדה החשמלי או מגנטי. צעד נוסף עשה מיזדענו הרץ, יחד עם תלמידו פיליפ לנרד (1862-1947, נובל 1905) שעוד נפגש באחד הפרקים הבאים (זו תהיה פגישה לא נעימה, אבל נניח לזה CUT). השניים הוכיחו שהקרן מסוגלת לעبور דרך מתכת דק, רמז לחקיקים קטנים יותר מאטומיים.

את הניסויים המכרייעים עשה ג'וזף ג'ון תומסון (1856-1940, נובל 1906). בניסוי קפדי נ美妙 ממד את התעוקמות הקרניים בהשפעת שדה חשמלי כדי לקבוע את היחס בין המסה של החלקיקים לבין המטען שלהם. ההפרש היה ענק! נראה היה שכמות עצומה של מטען אצורה בחלקיקים שימושיים כמעט אפסי. לשם השוואה, אטומים של מימן טעונים חיובית (היום אנחנו יודעים שהם פרוטונים) היו כבדים פי אלף, למרות שטען החובי היה זהה בעוצמתו לזה של האלקטרונים. ניסויו של לנרד הביאו למסקנה דומה.

תומסון סבר שהקרניים מורכבות לא מאטומים אלא מחלקיקים קטנים יותר שהאטומים היו מרכיבים מהם. כיצד עליינו להבין אם כן את הנייטרליות החשמלית של רוב העצמים שביבנו? אמר תומסון: אולי האטום דומה לפודינג שזיפים, שבו מטען הפודינג עצמו הוא חיובי, ובתוכו שוחים צימוקי שזיפים שטען השלייל. המודל, אין ספק, מעורר תיאבון. אבל האם הוא גם נכון?

ירושו של תומסון ב厓בודות קוונדייש היה ארנסט רת'רפורד (1871-1937), בריטי מניו-זילנד. הוא פנה להזכיר את הקרןנה הרדיואקטיבית שגילו הצלפתים. בהשראת ניסויי תומסון העביר את הקרןנה הנפלטה מהרדיום בשדה חשמלי. להפתעתו התפצלה הקרן לשניים: חלק אחד פנה לצד החובי, ומכאן הסיק שטען החשמלי שלילי, כמו מטען הקרניים שמדד מورو לפניו, אבל החלק השני פנה לכיוון ההפוך, כלומר היה טעון חיובית, וחילקיו היו בעלי מסה גדולה אף מונחים מלאה של הקרןנה בעלת המטען השלייל. הוא כינה אותן קרני "אלפא" ובטא, "אליהן צטרף" גמא" בעמודים הבאים.

בשל האנרגיה האדירה של קרני האלפא השתמש בהן רת'רפורד להפץין חומרים אחרים. כשהפץין בהן עלה זהב דקיק, הופתע לגלות שחלק מהן לא חדר דרך העלה

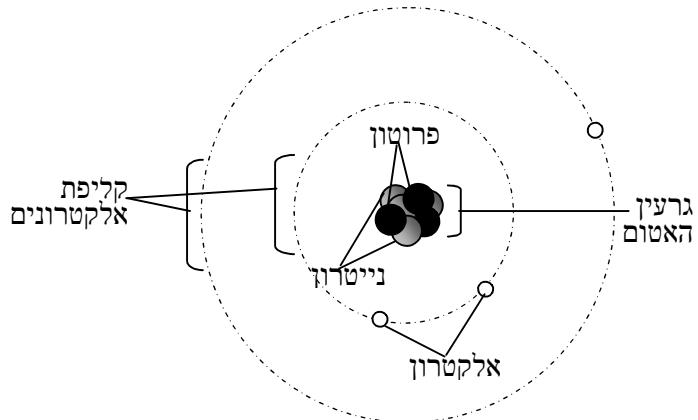
כיום ידוע שהגיבור האמתי של הסיפור הוא אשה, ליזה מייטנר, היהודייה שנוצלה עד
תום בידי עמייתיה

רת'רפורד גילתה שהקרינה הולכת ונחלשת עם הזמן, "מחצית חיים" נוצר יסוד חדש!
רדיוום פולט רדון והופך לעופרת!

רת'רפורד היה פיזיקאי שובייניסט. "המ杜 היחיד זה פיסיקה", אמר. "כל השאר זה איסוף
בולים." כשהתבשר כי זכה בפרס נובל לכימיה, לא נשאר חיב ובנאות קבלת הפרס העיר כי
ראה הרבה תמורות של חומר אחד למשנהו, אבל מעולם לא ראה תמורה כה מהירה של
פיזיקאי לכימאי.

זכה תומסון ושבעה מהתלמידיו, בהם רת'רפורד, זכו בפרס נובל, תלמיד אחר הוכיה
שትומסון טעה והאקלטרונים שלו מתנהגים לפעמים דזוקא כגליים (פרק #). שמו היה -
תומסון – נכוון, בנו.

12.2.8 הכל (כמעט) מסתדר בתמונה החדש
מכל העבודות עליהן שמענו בעמודים הקודמים עולה ומתבהרת תമונה של האטום המסביר
את כל תכונותיהם של העצמים סביבנו: משקלם, חזקם, צבעם,طعم, ריחם וכל מה שייעלה
בדעתכם. זה הזמן לצייר את התמונה בשלמותה ולהנוט מפירותיה.



את תכונותיו העיקריות של האטום קובעים שלושה חלקיקים קטנים יותר מהם הוא בניו:
1) הפרוטון, שמטענו החשמלי חיובי, 2) האלקטרון, שהוא בעל מטען חשמלי שלילי
שעוצמתו זהה לזה של הפרוטון רק הפוכה, אבל משקלו קטן מזה של הפרוטון ב-xxx, 3)
הנייטرون, שמשקלתו כמעט זהה של הפרוטון, אבל הוא נטול מטען חשמלי. הפרוטונים
והנייטرونים נמצאים בגרעין האטום בעוד האלקטרונים "סובבים" סביבם. המילה "סובבים"

נתונה במרקאות כי תורה הקוונטיים תתעורר בהמשך ותראה שהם לא ממש סובבים אלא אי-יכשו נמצאים בתנועה סביב הגרעין.

לפניכם שני אטומים. משמאלי האטום הפשטוט ביותר, אטום מימן, המורכב מפרוטון ועוד ואלקטרון ועוד הנע סביבו. מימין אטום מורכב יותר, זה של הליתיום. בגרעין שלו מצופפים שלושה פרוטונים וארבעה ניטרונים. סביבם נעים, בשני מסלולים הקרוים "קליפות", שלושה אלקטرونים.

את תוכנות האטום מבטאים במדוקן שני גדים: **המספר האטומי** של יסוד הוא מספר הפרוטונים בגרעין האטום שלו, שבמצב הנורמלי שווה למספר האלקטרונים בקליפותיו הקבועים את תוכנותיו הכימיות. **המשקל האטומי** הוא המספר הכולל של החלקיקים בגרעין, פרוטונים וניטרונים יחד. **אייזוטופים** הם אטומים זהים בכל תוכנותיהם הכימיות, כלומר הם בעלי אותו מספר פרוטונים ואלקטרונים, אבל בגרעיניהם יש יותר או פחות ניטרונים, מה שהופך אותם לכבדים או קלים יותר. כך, "מים כבדים" הם מים שבמימן שלהם יש, מלבד הפרוטון הבודד, גם ניטרון או שניים, או שבאטום החמצן שלהם יש X ניטרונים במקום X.

הבנה טובה של האטום מחייבת להציג שקנה-המידה האמיתית שלו אינו ניתן לתיאור בתמונה רגילה. במקרים אחרים: אל תאمينו לתמונה שציירתי. אם רצונכם לקבל מושג על היחסים האמיתיים בין חלקו האטום, דמיינו לעצמכם כדור גולף מרוחף באוויר וסביבו כדור שהרדיוʊס שלו הוא קילומטר אחד. זה בערך היחס בין גרעין האטום שבתוכה לבין קליפה האלקטרונית הראשונה שבה סובבים האלקטרונים סביבו. הקליפה השנייה נמצאת במרחק של ארבעה ק"מ מהגרעין, ובאטומים בעלי קליפה שלישית היא נמצאת במרחק תשעה ק"מ. אשר לאלקטרונים עצם, הנעים במסלולי הקליפות הענקיות סביב "כדור הגולף", הרי בקנה-מידה זה עליינו לדמיין אותם בגודל של גרגירי חול! בקיצור, רוב האטום מרכיב, בפשטות, משומ-דבר, ואם תביאו בחשבון שהמරחק בין אטומים בגוף מוצק הוא בערך חצי קוטר האטום, תבינו שרוב גופכם הוא בעצם חלל ריק, כמו גם העצים שסביבכם. עם התמונה המוזרה הזאת, תוכלו עכשו לענות כמעט על כל שאלה לגבי תוכנות העצמים שסביבכם: צבע, ריח, גמישות ועוד. באו נראה כמה דוגמאות.

12.2.8.1. קשיות

קני-המידה הענקיים של האטום מעלים מיד שאלה פשוטה: אם רוב האטום עשוי מחלל ריק, איך זה שאינו יכולם לעבור דרך הקיר? התשובה פשוטה גם היא: בחלים הריקים האלה פועלם **כוחות אדירים**. כוח אחד-Anno McFiries תודוט לפידוי, הוא הכוח החשמלי, המציג כזכור לחוק פשוט: מטענים שווים דוחים זה את זה ומטענים שונים מושכים זה את זה. לכן, האלקטרונים נמשכים אל הפרוטונים שבגרעין, והאטום כולם נمشך אל האטומים השכנים בשל עודף או מחסור בטען החשמליים שלהם. סוג אחד של מושיכה בין אטומים נכיר בהמשך, הוא הקשר הכימי, אבל גם אטומים או מולקולות שאין נקשרים זה זהה נוטים להיצמד זה אל זה בשל כוחות החשמליים יותר חזקים הפועלים ביניהם. זה מה שמקנה לגופים המוצקים את צורתם הקבועה, ולנוזלים את נתייתה להרטיב או להחלך לזרמים ולשלוליות, בעוד הגזים הם חומרים שבהם האטומים או המולקולות רק מתנגשים זה בזה.

זו גם הסיבה לקשיותם של הגוףים: הקיר שמולכם עשוי אמן ברובו מלא-כלום, אבל איןכם יכולים לחדר דרכו כי קליפות האלקטרונים של האטומים שלכם דוחים את קליפות האלקטרונים באטומים של הקיר.

2.8.2. אנרגיה אטומית

כאן מוזכרת השאלה הבאה: למה, אם הפרוטונים שברענן טעונים חיובית, הם אינם דוחים זה את כפי שחייב חוק המטען? הבתוחתי לכם שהכרת חלקו היסוד של החומר תחשוף בפנינו חוקי-יסוד של הטבע, אז נא להזכיר כוח חדש: הכוח חזק. זה כוח מושך, וכך שתבינו מיד לא כדאי לכם לhattעסק אותו. בנגדוד לכוחות הכבידה והחsequential שאותם אנו יכולים לראות בחיי היום-יום, פועל כוח זה רק למרחקים תת-אטומיים, אבל עצמותו עליה עולה פי כמה מונימ: היא-היא שחוללה את זועת הירושימה ונגסאקי כשהשתחררה מהאטומים שבוקעו. ברגען פועל עוד כוח אחד, הוא הכוח החלש, החבר הרבייעי במשפחת כוחות היסוד, ואליו נשוב בפרק #.

הנה אם כן ההסביר לתופעות שלמדנו בפרק #: כשייש ברגען יותר מפרוטון אחד, דרישה נוכחות של מספר דומה של נייטرونים כדי להוסיף כוח חזק שיתגבר על כוחות הדחיה החשמליים. בכל זאת, אטומים גדולים (מעל ---) הם לא יציבים (כלומר, הכוח חזק בהם אינו מצליח להתגבר לאורך זמן על הדחיה בין הפרוטונים==)==) ולכן הם רדיואקטיביים: האטום מתפרק ע"י פליטת חלקיקי **אלפא**, שהם גרעינונים שבהם שני פרוטונים ושני נייטرونים, חלקיקי **בתא**, שהם אלקטרונים הנעים במהירות הקורובה למהירות האור, וקרני גמא, שהן קרניות אלקטромגנטיות בעלות גלים קצרים ביותר ולכון בעלי כושר חדירה עצום. כל סוג הקרןה האלה מסוגלים לחדר עמוק וגורם לשינויים כימיים שונים ומשונים בגוף החי, ולכון מסוגלים להיות מסרטנים, או, כמשמעותם בהם בזיהירות הרואה, לקרינה המסוגלת להשמיד תאים סרטניים.

2.8.3. משקל

בשלב זה אתם כבר יכולים להסביר על סך התוරה האטומית את תוכנתו היסודית ביותר של כל חומר, דהיינו, את משקלו, וליתר דיוק המסה שלו. אמם את ההסביר העמוק ביותר למסה ולכבדה תthan רק תורה היחסות בפרק #, אבל כאן נעשה צעד ראשון. גם לחלקיקים האלמנטריים עליהם דיברנו, זעירם ככל שיהיו, יש מסה. לכן, כיוון שרוב החומר נמצא ברגען האטום, המסה של כל חומר נקבעת על-פי מספר החלקיקים ברגעני האטומים שלו. גרעין אטום המימן מכיל רק פרוטון בודד, ולכון המימן הוא היסוד הקל ביותר ומשקלו האטומי הוא 1. גרעין אטום ההליום מכיל שני פרוטונים ושני נייטرونים ולכון הוא היסוד הקל הבא ומשקלו האטומי הוא 4. גרעין אטום העופרת מכיל --- פרוטונים ו--- נייטرونים ומשקלו האטומי הוא --- וכך הלאה.

2.8.4. פעילות כימית

כמו כן, הדבר הכى מעניין בנוגע לחומרים הוא פעילותם הכימית: למה ניטרוגליקין הבא בגע עם חמץ יוצר התרכזות אידירה? למה המסברים מחלדים? למה חצי בקבוק וודקה הופך אדם לרקדן מעולה והחזי השני עושה ממנו סמרטוּט רצפה?

את התשובות הספציפיות לא תמצאו כאן, כי הבנת כל תגובה כימית מצריכה הכרת הרבה פרטים מażועים, אבל הפסיכה של האטום נותנת את התשובה העקרונית: **תכונותיהם הכימיות של כל החומרים נובעים מהתכונות החשמליות של האטומים שלהם.**

אטום שיש לו מספר שווה של פרוטונים ואלקטרונים, והמסודרים בצורה המאפשרת להם לנטרל זה את מטען החשמלי של זה, הוא אטום מאוזן, והוא איןנו נוטה להתרכם עם אטומים אחרים.案 אלה הם הגזים האצילים כמו ההליום והארгон. למזלנו, רוב האטומים אינם מאוזנים, מסיבות הקשורות בעיקר לתורת הקוונטים שאיתה נלמד בהמשך, וכך כל אטום זה מנסה, בכלל פגישה עם חבריו, לשפר את מצבו: לגנוב מהם אלקטرونים, לדוחף להם אלקטرونים לא רצויים או ליצור שותפות שונות ומשנות כדי להגיע לאיזון.⁴ זהה התגובה הכימית בין שני יסודות היוצרת תרכובת חדשה: אטומים, שאינם מרצו ממספר האלקטרונים שלהם ומסידורם, עושים עסקות אלה או אחרות ביניהם ויוצרים יחד מולקולה, ככלומר, גרעינים שיש להם קליפה אלקטרונית משותפת. כך, למשל, יון הוא אטום לא מאוזן, שמספר הפרוטונים והאלקטرونים שבו אינו שווה ולכן הוא נשא מטען חשמלי חיובי או שלילי. אטומים אלה הם כמובן פעילים מאוד מבחינה כימית בהיותם להוטים להתחבר לאחרים כדי להתאונן.

זו הסיבה שרוב החומרים מסביבנו הם תרכובות ולא יסודות, מה שאומר **שיחidot הבניין שלהם אינם אטומים אלא מולקולות** (ר' #). המולקולה, על-פי התורה האטומית, היא כמו אטומים שעקב עסקות האלקטרוניים שעשו ביניהם הפכו לمعין אטום-על, ככלומר כמו גרעינים העוטפים בקיליפה אלקטרונית משותפת. למולקולה זו הכוונות החשמליות שלה, ככלומר גם היא יכולה לעשות עסקאות אלקטרוניים עם אטומים או מולקולות אחרות. הריה והטעם של חומרם שסבירכם, רעלותם או ערכם התזונתי – כל אלה נובעות מהתכונות הכימיות בין המולקولات של החומר לבין המולקولات שבמערכות גופכם.

12.2.8. צבע

ומה עם הצבע של העצמים? גם תכונה זו מקבלת הסבר פשוט בתורה האטומית. האור הלבן, כפי שניתנו הוכחה, הוא תערובת של אורות בצבעים שונים, ככלומר, כפי שהוכיחו יאנג ומקסול, גלים אלקטرومגנטיים באורכים שונים: **הकצרים הם עתירי אנרגיה והארוכים חלשים יותר.** כשלגeli אוור פוגעים באטום, רובם מוחזרים אחוריית ע"י השدة החשמלי של קליפה האלקטרונית שלו, אבל חלק מהם נבלע ע"י האלקטרונים.

מי מוחזר ומילבָע? בוואו נזכיר את העובדה, שתסבר מאוחר יותר בתורה הקוונטים, שהאלקטرونים מסתובבים באטום רק בקיליפות מוגדרות, שמרחיקן מהגרעין הוא קבוע. בכל קליפה כזו מסתובבים אלקטرونים שיש בהם כמה מסוימת של אנרגיה. אם פוגע באלקטרון גל אלקטромגנטי הנושא בדיק את כמה האנרגיה הדרישה לאלקטרון כדי

⁴ העדפתி לא להכנס לטיבוק-היתר של חוקי האטום, אותן ניתן למצוא בכל ספר כימיה, או הנה בקיצור נמרץ הכללים העיקריים: כאמור, מספר האלקטרונים באטום קבוע ע"י מספר הפרוטונים, אבל מספר האלקטרונים שיכולה להכיל כל קליפה מוגבל ע"י הנוסחה N^2 -N הוא מספר הקליפה. כך, הקליפה הראשונה יכולה להכיל רק שני אטומים, השניה שמונה וכו'. העניינים מסתובבים עכשו עוז יותר בשל שני כללים הנובעים מתורת הקוונטים (ושיש להם, למרבה הצער והשיעום, כל מיני יצאים מן הכליל): א) **כלל הדואט:** באטום בעל קליפה אחת מספר האלקטרונים שואף להיות שניים, וב-ב) **כלל האוקטט:** באטום בעל – קליפות מספר האלקטרונים שואף להיות שמנה. מכאן תבינו איזה סחר-חליפין עיר באלקטרונים חייב האטום לבצע עם שכניו כדי לצית לצליל הכללים האלה. מרכיבתו הכימית של היקום היא תולדת החוקים האלה.

להימצא בклиיפה הרוחקה יותר מהגרעין, האלקטרון בולע את האנרגיה הזאת ו"קופץ" אל הקליפה הבאה. גם ההיפך יכול לקרות: הוא יכול "לייפול" חזרה לקליפה נמוכה יותר ואגב-כך לפלוט חזרה גל באותו אורך שהיה צריך כדי להקליפה הנמוכה לגבורה. הנה, אם כן, ההסבר לתגליות של בונזן וקריכהוף: **כל חומר קר בולע אור באותו אורך גל שאותו הוא פולט כשהוא לוחט.** זה אומר שהנוחות, למשל, היא בולעת את כל אורכי-הגל המעורכבים בצע הלבן מלבד האדום, שאותו היא פולטת חזרה, מה שאומר שם תלהito הנוחות, תקבלו להבה ירוקה====, כלומר הצע המשלים של האדום. ובמנחי התורה האוטומית: **לאutomii הנוחות יש אלקטرونים בклиיפה ה====, שכשיהם בולעים אור === הם קופצים לקליפה ה====.** האור האדום אינו באורך-הגל המתאים להקפיצה זו ולכן הוא מוחזר מהנוחות. האלקטרון אינו מחזיק באנרגיה שבולע לאורך-זמן אלא פולט אותה חזרה, אבל לא באותו צורה. למשל, אלקטרון שבולע גל קצר מאוד (עתיר אנרגיה) וקופץ שתי רמות יכול ליפול חזרה קודם ברמה אחת, ולפלוט גל ארוך יותר (פחות אנרגטי), וזה ליפול שוב לרמה המקורית ולפלוט עוד גל ארוך.

חלק ממנו נפלט כגליים ארכיים יותר, בתחום האינפרא-אדום, למשל, הגוף שהואר פולט חזרה חום, ושלק אחר מהקרינה נפלט באורך-גָל ארוך יותר מהגל המקורי שנבלע. צבעו של חומר, לsicom, מבטא את יכולת הבליעה האלקטרומגנטיות של האלקטרונים בклиיפה החיצונית של האוטומיים שלו.

6.2.2.12. חשמל ומגנטיות

עם התורה האוטומית נוכל עכשו לחזור גם אל עולם החשמל והмагנטיות שהכרנו בפרק # ולהבין מה באמת קורה שם.

אם האלקטרונים, המתרכזים בклиיפת האטום סביב הגרעין, הם החלקיקים נושא המטען החשמלי השילילי, הרי זרם החשמלי הוא בפשטות שטף של אלקטرونים. דרך אחת לייצור זרם החשמלי היא כימית: נתבול את קצחותם של מוט אבן ומוות פחמן בתוך חומצה. החומצה תמים את האבן, משיכתה החשמלית תגרום לאוטומי האבן להיתלש מההמות ולהזרר אליה, אבל הם ישאירו מאחור את האלקטרונים שלהם וכך, עם עודף מטען חיובי, ישחו אוטומי האבן בחומצה אל מוט הפחמן וייספו בו. מוט האבן טעון עכשו בעודך מטען שלילי ואילו במוט הפחמן עודף מטען חיובי. כיוון שהאלקטرونים הנטושים אינם יכולים לעبور דרך החומצה====, הם זוקקים לנטייב אחר כדי להשיג את האוטומיים הבוגדים שלהם. את הנטייב זהה ונספק ברוב נדיותנו בצורה תיל נוחות בין שני המוטות. זהה הסוללה החשמלית.

דרך אחרת בה למדנו בפרק # לייצור זרם היא ע"י מגנט. עכשו, על סמך מה שלמדנו על האוטומים, נוכל להבין איך פועל המגנטי עצמו. למדנו כי כדי שיתקיים מגנט צריך זרם החשמלי לנوع בלי הפסקה. אפשר להבין את זה באלקטרומגנטי, שבו באותה עובר זרם, אבל איזה זרם עבר במגנטי הפשוט המציג לנו פתקים לדופן המקרר? כזכור, האלקטרונים "סובבים" במחירות עצומה סביב הגרעין. בנוסף לכך, התגללה שהם סובבים גם סביב עצםם, והתועפה השנייה קרויה ס핀.⁸ אם כל אלקטרון נמצא בمعنى תנואה מתמדת סביב עצמו, הוא מהוווה

⁸. שיהיה ברור: כל עניין ה"סתובובות" כאן הוא מושג בעייתי. תורה הקוונטים (ר' פרק #) מראה שלא מדובר בתנועה ממש של האלקטרון סביב הגרעין שכן אין לאלקטרון מקום ומהירות מוגדרת בכל רגע. אשר לספין, לغمרי לא ברור איך יכול חלקיק נקודתי להסתובב סביב עצמו כאשר צדדיו השונים כתוב נ.ג.פ., ובכלל

מagnet זעיר, שקווטבי ה"צפון" וה"דרום" שלו הם משני צדי ציר הסיבוב שלו. למה, אם כך, לא כל חומר הוא מגנט? כי בכל אטום, האלקטרונים פונים לכיוונים שונים וכך מבטלים זה את השדה המגנטי של זה. הברזל הוא חומר מיוחד מבחינה זו: באטום שלו יש ארבעה אלקטרונים שהספרינטים שלהם פונים לאותו כיוון וכן דזוקא מחזקים זה את זה. לכן כל אטום ברזל הוא מגנט מיקרוסקופי. הכוח המגנטי הזה של אטום הברזל חזק דיין כדי לגרום לאטומים השכנים להסתדר באותו כיוון ולהזק זה את זה, וכן נוצרים בברזל אזוריים מגנטיים עזירים. אבל הכוח של כל אזור כזה אינו מספיק חזק כדי לגורם גם לאזוריים הסמוכים להסתדר באותה צורה, ולכן גוש הברזל כולו אינו מגנט. רק כشمקרים אלו מגנט מסתדרים האזוריים יפה: הם מפנים לקוטב המתקרב – צפוני או דרומי – את צד הפוך ומושכים אותו יחד. אבל כשירחക המגנט יזרו האזוריים לנצח הקודם.⁴ מהו, אם כן, מגנט? פשוט, זה ברזל שהוא בשדה מגנטי חזק ו"שוכנע" ע"י דפיקות, שפשופים ושאר אמצעים עדינים או פחות עדינים להסתדר בצורה כזו שאפילו אחרי הרחיקת השדה המגנטי המקורי יישארו האזוריים המגנטיים מושרים באותו כיוון.

12.2.8.7. סיכום: הכל (כמעט) מסתדר בתמונה החדש

כך, בעמל משותף ומפרק על פני ארצות ודורות, התגבשה תמונה לכך ובעל כוח הסבר רב. כך גם קיבלנו פיתרון מספק לחידה שהעסיקה את מנדלייב ובני דורו: המספר האטומי (מספר הפרוטונים) של כל היסודות נותן סדרה רציפה: מימן הוא 1, הליום הוא 2, ליטיום 3, וכן הלאה. המשקל האטומי (מספר הפרוטונים והנייטرونים יחד) הוא בדרך כלל כפול מהמספר האטומי. אם כך, למה לרוב אין זה מספר שלם? פשוט: כל יסוד מופיע בטבע אטומים אחיהם הנבדלים זה מזה רק במספר הננייטرونים שלהם. עוד אנו מבחינים כי ככל כתערובת של כמה איזוטופים, ולכן משקלו הוא המוצע שלהם. עליה לא ידע מנדלייב: שורה בתשbez של מנדלייב מבצתת עתה תוכנה משותפת חדשה, עליה לא ידע מנדלייב: פשוט, **לכל היסודות באותו עמוד === אותו מספר אלקטרוניים בחלוקת החיצונית!**

וכך, באיחור של --- שנה, התגשם חזון המשותף של פיתגורס, אמפלוקס, דמוקריטוס ואפלטון: כל מה שבינו מרכיב משולשה חלקי יסוד, שהיחסים המספריים והמרחביים ביניהם מסבירים את כל תכונות החומר. נכוון, תורה הקונטנים תשוב ותבלגן לנו כמה פרטיהם בתמונה זאת, אבל בנסיבות היא נשאה מדוקת ורבת-עוצמה.

3. 12 האנרגיה והחומר עשוים יחד בלבד אם החוק הראשון של התרמודינמיקה, בו פתחנו פרק זה, נחשב לאחד מהחוקי היפיסיקה ה"יפוי" בשל פשטותו וככליותו, הנה יש הרבה שביעיניהם החוק השני של התרמודינמיקה הוא חוק ממש מכוער וモטעה, כפי שיעידו הטראדיות להלן שפקדו כמה מגליו. עד היום הוא מעורר מחלוקת סוערת, ו/אפילו אני נקלעת לאותה מהן (פרק #). מצד שני, דזוקא אסתטיקאי נלהב כ/איינשטיין ראה בחוק זה - - -

מהירות ה"סיבוב" זהה צריכה להיות --- יותר ממהירות האור. השימוש במילה "סיבוב" צריך להיעשות בהסתיגיות רבות רק מפני שעד היום אין דרך טוביה יותר להסביר את תופעת הספן.

⁴. מי שיצמיד סטטוסקופ בתוספת מגיבור קול לבצל שאליו מתפרק מגנט ישבע את ה"קליקים" של האזוריים המגנטיים האלה דוחפים זה את זה כדי להסתדר לאותו כיוון.

תלמידם של אמפר וגיא-לוסק

קלאויזיס: החוק
מקסול ובולצמן: הביטוי המולקולרי

בואו נבחן עכשיו מקרוב את הטענות נגד האסימטריה התרמודינמית, שעוד מושמעות מפני פיסיים עיוניים רבים, ונראה איך האסימטריה החלקית מפריכה אותן בצורה העשוה את בעיית אסימטריות-הזמן לחריפה במיוחד. מה אומר החוק השני של התרמודינמיקה? הניסוח הפשוט שלו הוא זה: במערכות סגורות שיווי-המשקל הולך וגדל עם הזמן. הנה ספל הקפה שלפנני, שאני מנהל עליו מירוץ נגד הזמן במהלך ההחלטה הזאת. אם לא אמהר לשתו ממנה, הוא יאבך חום לאוויר האולפן הקר עד שישתרטר שיווי-משקל, שבו הקפה והאוויר יהיו באותה טמפרטורה. התהליך הפוך, כמובן, אינו סביר: אם מישהו יספר לנו שראה כוס פורשת הנמצאת בשיווי-משקל עם האוויר, שהלכה והתחמה אליה, והאוויר שביבה התקarrך קצת בהתאם, נסיק שאולי באמת מדובר פה ב"ערעור שיווי-המשקל" של מישהו, אבל מסוג אחר.

ניסוח פשוט יותר של החוק השני אומר שא-הסדר במערכות סגורות הולך וגדל עם הזמן. יש אנשים שמתבלבלים משני הניסוחים האלה, כי "שיווי-משקל" שבו כל החומר או האנרגיה מפוזרים באופן שווה במהלך נראה להם דוקא כצורה של "סדר". אבל עקרות-הבית יבינו בקלות שאין זה כך, כי בית מסודר הוא מצב רחוק משיווי-משקל: כל המטבח מרכזים רק במטבח, כל המיטה רק בחדר השינה וכל הרחצה רק באמבטיה. בית שבו נמצאים החפצים האלה בשיווי-משקל מבhitת פיזורם, הסדר בו טעון שיפור. "אי-סדר" הוא אם כן מונח נרדף לשיווי-משקל, או, במונח הנפוץ, "אנטropיה".

אנטropיה זו יוצרת חץ-זמן ברור. ניקח שלוחן ביליארד, נסדר עליו משולש של כדורים ונשגר לתוכם כדור אחד. המצב המסודר, המשולש, יפנה את מקומו למצב הבלתי-מסודר של כדורים המתרכזים לכל הכוונות. זה התסrisk המוכר לנו. לעומת זאת, בהילוך לאחר מכן נקבל סרט מוזר: תחילת ערבותה של כדורים מתרכזים, ולאחר כך, מאלייהם, הם מתכנסים במרכז ויוצרים משולש מושלם הפולט החוצה כדור יחיד. ההתרחשות הראשונה היא מציאותית והשנייה לא, בהתאם לחוק השני.

החוק הזה גרם בעיות תיאורטיות ומושגיות רבות החל מהרגע שבו נוסח. הסיבה לכך הייתה שבתנוונות האטומיים והמולקולות הבודדים שולטת המיכאניקה הניתונית, שהיא סימטרית לחלוtin בזמן. והרי כל המערכות עשוות מאטומים ומולקולות. כיצד, אם כך, יכולות הרבה התהッシュויות סימטריות ליצור יחד משהו אסימטרי? לודוויג בולצמן

{L.Boltzmann}, אחד מאבות התרמודינאמיקה, חשב שהוא יכול להגיד את הסטטיסטיקה להסביר על שאלה זו. בנוסחה מפורסמת, החקוקה על מצבתו, הוא ראה כי כל הממערכות שואפות לעבור מצב בלתי-مستבר אל מצב יותר מסתבר. כשאני רואה בחול טביעה-געל ברורה, אני לא מאמין שהצורה הזאת נוצרה באקראי, מלאיה. "مستבר" הוא אפוא מונח נרדף ל"մבולגן". הטעע, אמר בולצמן, שואף למצב המסתבר יותר, וכך הופכים מצבים מסוודרים למצב אי-סדר. אבל עד מהרה קמו לניסוח הזה מתנגדים חריפים, בעיקר תלמידי מיודענו מכך. הבולט שבhem היה לושmidt, שאמר לבולצמן כך: אתה מגיסת את חוקי ההסתברות כדי להסביר את חין הזמן. אבל חוקי ההסתברות עצם הם אדישים לכיוון הזמן. לכן, אם אתה מנבא שהמערכת תהיה בעתיד במצב יותר מסתבר, הרי טועון זה חיל גם על מצב העבר שלו. לכן, כשאני רואה שולחן ובו כדורי ביליארד מסוודרים, אני צריך דוקא להניח שב עבר היה השולחן במצב המסתבר, ככלمر, בערבותה מוחלטה, ורק אחר-כך עבר במצב המסתבר, המסור. ההוכחה של בולצמן, אם כן, סותרת את עצמה עקב הניסיון להשתית תהליך פיסיקלי אסימטרי בזמן על חוקי ההסתברות, שהם עצם אינם תלויים בכיוון הזמן.

יתרה מזאת, יש עד היום פיסיים הטוענים כי אפילו עצם מושג ה"אנטרופיה" אינו אלא מונח סובייקטיבי, המתאר רק את הבורות של הצופה אבל אין לו משמעות אובייקטיבית. נגד הגדרתו של בולצמן, שלפיה "אנטרופיה" היא המצב בעל הסבירות האגובה ו"סדר" הוא המצב הפחות מסתבר, הם טוענים כך: אם ניקח מצב בלתי מסוודר, נמדדונו ונגידיר את מצבו כל המולקولات המרכיבות אותו, ונשאל מה הסיכוי שיתקבל מצב כזה בבדיקה, תהיה הסבירות נמוכה גם הפעם B קיימים אי-ספר מצב אי-סדר, ורק מפני שאנו יודעים להבחין ביניהם אנו קוראים לכלום באותו שם. לכן, הם מסיקים, ההבדל בין "סדר" ו"אי-סדר" אין לו משמעות פיסיקלית, כמו ההבדל בין "יופי" ל"כיעור".

הטעון הפויזיטיויסטי הזה הוא, לדעתו, מופרך גם מבחינה אינטואיטיבית וגם מבחינה פיסיקלית. אינטואיטיבית, נראה לי מוגוחך לומר שמה שכל ילד יכול להבחין, דהיינו, ההבדל בין סדר לאי-סדר, הוא מעבר להבנת הפיסיקה. אבל יש לי גם טיעון פיסיקלי פשוט. בואו נחשוב שוב על ספל הקפה שעמד פה. כשהקפה חם ואוויר החדר קר זהו "סדר", וכשהטמפרטורה של הקפה שווה לזה של אוויר החדר זהו "אי-סדר". לטענת הפויזיטויסט, גם המצב השני הוא מאוד מסוודר, כי יש הסתברות נמוכה מאוד לקיומו כאשר יודעים בדיק את מצבו כל המולקولات שלו. אבל שימו לב: מצב הסדר הוא בכל זאת מצב פיסיקלי ייחודי הנבדל מכל מצב אי-הסדר במובן הבא: מכוס הקפה החמה הנמצאת בחדר קר ניתן להפיק עבודה B לכל מנווע דרוש מאגר של חום ומאגר של קור, ובמקרה זה יש לנו הפרש טמפרטורות הדרוש לביצוע עבודה. לעומת זאת, במצב הלא- מסוודר, אין שום אפשרות לבצע עבודה מאקרוסקופית. זה בהחלט הבדל פיסיקלי ולא סובייקטיבי. לכן, גם אם בולצמן לא הצליח להסביר לחוק השני, הרי שהгадירה ההסתברותית שלו לאנטרופיה היא בהחלט שימושית: "סדר" הוא מספר מצומצם של מצבים שבהם ניתן להפיק עבודה מהאנרגיה שבמערכת, ו"אי-סדר" הוא מספר העצום של מצבים שבהם האנרגיה היא בלתי-נצללה. מערכת סגורה עוברת תמיד מיד ממסגרת הראשון אל מצב מסגרת השני.

משמעותנו הגדרה אובייקטיבית לאנטropיה, נוכל לשוב ולשאול: מדוע היא עליה? הפיסיקאי השמרן, המאמין בסימטריה של חוקי הטבע, עונה כך: האסימטריות בזמן אין נובעות מחוקי טבע כלשהם, אלא רק ממצבי-התחלתה השכיחים בעולםנו. לשאלת מדוע תסריט שבו כדורו ביליארד המסודרים במשולש מתחזירים על השולחן הוא סביר, בעוד התסריט ההפוך אינו סביר, תשובה זו: כמובן, ההתרחשות השנייה אינה סבירה. אבל זה רק בגלל שתנאי ההתחלתה שהחרתם אפשררים רק את ההתרחשות הראשונה. מהנדס מוכשר יכול לסדר את ה כדורים על השולחן במצב התחלתי מיוחד, ולהת לכל אחד מהם את המכה ברגע הנכון ובכיוון הנכון, כך שלבסוף אכן ייווצר המצב המסדר. ושים לב: אמן התהlixir בכללותו אינו סביר, אבל אם נסתכל בנפרד על כל אינטראקציה בין שני כדורים או בין כדור אחד דופן, נראה שהוא סימטרית בזמן בהחלט. האסימטריה מופיעה רק בתהליכיים שבהם יש הרבה כדורים. אבל תנועותיו של כל כדור היחיד הוא סימטריות. לכן, ימוך הפיסיקאי השמרן, האסימטריה אינה נובעת מחוקי היסוד אלא רק מתנאי ההתחלתה שהוא יוצרם. וכך ברגע להתנהגות האסימטריה של כוס הקפה המתקררת: גם כאן, כל מולקולה בודדת מתנהגת באופן סימטרי לחלוּתו בזמן. המולקולות המהירות של המים החמים מתנגשות בדפנות הספל ומעבירות להן אנרגיה קינטית, ומולקולות של הדופן מעבירות את האנרגיה הקינטית לאוויר. כל אחת מהאינטראקטיות האלה יכולה להתפרש באופן ההפוך, ומדי פעם כך אכן קורה. לכן גם התהlixir הזה הוא, בעיקרונו, הפוך. והוא רק בעל סבירות נמוכה. אם המנדס הגאנני שלנו היה מתאם מראש את כל תנועות המולקולות בחדר בצורה המתאימה, היינו אכן רואים ספל קפה פושר מתחם מלאיו.

גם הטענה הזאת לא cocci משכנעה. בשני המקדים, יכולתו של המנדס להפוך את גידול האנטropיה יש לה מחיר בהגדלת האנטropיה מוחוץ למערכת. אחרי הכל, החכם הזה ילכלך הרבה ניירות במהלך עבודתו, יבזבזו הרבה זמן מחשב, ישתה הרבה ספלים קפה כדי לא להירדם ואחר-כך ירוזר הרבה פעמים לאיזה מקום, בקיצור: הוא יגדיל את האנטropיה מוחוץ למערכת שבה הוגדל הסדר. לכן, החוק השני נכוון תמיד לגבי המערכת האגדולה יותר, הכוללת את המערכת שבה הוקטנה האנטropיה. אבל מי שטוענים שהחוק השני חוק טبع יסודי, נאחזים בנימוק ההיפותזה כדי לטעון שהגדר האנטropיה הוא לא חוק ממש אלא תולדה של תנאי ההתחלתה, בעוד כל ההתרחשויות המיקרוסkopיות המרכיבות אותו הן היפותזה.

יפה. עד כאן אייכשהו הצליח יריבנו, די בקושי, להיחלץ מהויכוח מבלי להזות בקיומה של אסימטרית-זמן יסודית. אבל מול האסימטריה שראינו בעולם החלקיים, שום דבר לא יעזור לו. אין כאן עניין של תנאי ההתחלתה כי זהה אינטראקטיות יסודית שמעורבים בה שני חלקיקים בלבד ואי-אפשר לפרך אותה לאינטראקטיות יותר יסודיות שבהן תימצא הסימטריה האבודה. יש, אם כן, מקום להשד כי גם החוק השני של התרמודינאמיקה, היוצר את האסימטריה המאקרוscopicית, אינו נובע מתנאי-התחלתה גרידא אלא מייצג תוכנה מהותית של עולםנו. היטיב לבטא את יהודו של החוק השני של התרמודינאמיקה, שהאמין כי לחוק זה יש מעמד עליון בין חוקי הטבע. אם יאמר לנו פיסיקאי שהוא מצא סתירה לתורת היחסות, אמר אדינגרטון, נקשייב לו. אבל אם יאמר שמצא סתירה לחוק השני נשלח אותו לחפש מקצוע אחר.

אם כן, הطبع, אפילו ברמה היסודית ביותר, מבديل בין עבר לעתיד, ובכך נבדל הזמן מהmundים שביהם קיימת סימטריה. כמו מנגד הדבר למה שכותב אינשטיין לבסו: "אין אי-היפות בחוקי- היסוד של הטבע". מתברר שדווקא יש, ולכך אין לפיסיקאים עד היום הסבר מניח את הדעת. משימתנו הבאה תחיה לחקור את הקשרים בין שמות אסימטריות-הזמן שהכרנו היום, אולי נגלה שיש להן שורש משותף.

בתקופה שבה הוויכוח על אי-היפות בזמן, נגע בולצמן קשה מהויכוחים עם תלמידי מאך ולבסוף התאבד. פאול אהרנפט, שבמובנים רבים המשיך את עבודתו של בולצמן, שלח גם הוא יד בונפשו. אז אני מבקש, חברים, למרות שהנושא מתריד, לא לחת אותו ללב יותר מדי.

יום פירושו אנרגיה קוינטית גבוהה של המולקולות

קלוין החל ללמידה באוניברסיטה בגיל 10

הענף המדעי הרלוונטי: סטטיסטיקה, פסקל

החוק השני של התרמודינמיקה: בכל מערכת סגורה, כמו האנתרופיה אינה יכולה לרדת. היא יכולה רק להגיע למקסIMUM ושם להישאר.

בציור שלפניכם קופסה מהולקת לשנים ע"י מהיצה. צדה האחד מלא גז והשני ריק. אם תעשו חור במחיצה, יתפזר הגז במידה שווה בין שני חלקיק הקופסה. זו דוגמה פשוטה לעלייה האנתרופיה. מהי אנתרופיה זו? יש כמה דרכי להגדיר ולמדוד אותה, וכל מורה הגדרה מועדף. אני נהוג להביא את כולם ולהראות איך הן חופפות ומשתלבות.

א. שווי משקל

זו נראה לי ההגדרה הברורה ביותר. הקופסה החללה במצב רחוק משיווי-משקל מבחינה הלחץ והטמפרטורה (הגז היה חם יותר מאשר דחוס) וסיימה במצב שבו הלחץ והטמפרטורה שוויים בכל חלקיה. כך קורה כשלעצמו קפה חם מתקררת:

ב. אי-סדר

זו ההגדרה הפשטota ביותר. הרבה אנשים לא אוהבים אותה כי "סדר" נשמע להם מושג סובייקטיבי. מי קבע, למשל, שהסדרה 0000000000 היא מסודרת והסדרה 7065132446 היא סתם אקראית? תמיד יכול misuse לשלווף הוכחה שבסדרה השנייה מסתתר סדר עמוק! אני לא מתרשם מהטענה הזאת. "סדר" ניתן להגדירה מתמטית אובייקטיבית, כמו, בדוגמה שלפנינו, מידת השכיחות של ספרה אחת לעומת יתר הספרות, וכבר הרחבתי על כך במקומות אחרים.¹⁰ לכן ההגדרה של אנתרופיה כא-סדר יכולה בהחלט לשרת אותנו.

מצד שני, יש כאן שהгадרה הזאת של אנטרופיה כא-סדר נראית להם סותרת את הגדרה הקודמת כшибוי-משקל. הם אומרים: לי המצב של שיבוי-משקל בתמונה לעיל נראה יותר מסודר מהראשון. הסטירה תיעלם כשנחשוב לרגע על משק-הבית שלנו. תארו לעצמכם אדם בא הביתה ושואל: איפה נעל-הבית שלי? אומרים לו בני-ביתו: חפש במטבח, באבטיה או במרפאת, כי בביית הזה הנעלים מפוזרות במידה שווה בכל החדרים. ואם ישאל המסקן איפה הפסל שלו יסבירו לו כי ייתכן באותה מידת שימצא אותו בחדר השינה או בסלון, כי גם הפסלים בבניין מפוזרים במידה שווה. אתם מבינים אם כן ש"סדר" פירושו מצב הרחוק משיבוי-משקל.

ג. הסתברות גובהה

אם אפשר לכם שאתמול*ו* הייתה במועדון ביליארד

ד. ירידת יעילות האנרגיה

זו הגדרה שמהנדסים רבים השתמש בה. החוק הראשון () מראה לכל אנרגיה להתגלגל לאנרגיה אחרת, אבל כאן מתערב החוק השני בצורה נבזית ואומר: אני מראה לאנרגיה להתגלגל כמה שתרצה, בתנאי ש-א) הגלגל לעולם לא יהיה שלם אלא חלק מהאנרגיה הראשונה יתגלגל לחום, ו-ב) האנרגיה השנייה תהיה בעלת נצילות נמוכה יותר מהראשונה. האנרגיה בעלת הנצילות הגבוהה ביותר היא ---, אחריה --- ואילו האנרגיה בעלת הנצילות הנמוכה ביותר היא החום. לכן, כל האנרגיות מלגלגות במודר סולם הנצילות: בכל גלגול של אנרגיה בורח חלק ממנו והופך לחום, עד שלבסוף כל האנרגיה שבמערכת הופכת לחום.

ה. מספר המצבים הפנימיים

זו הגדרה שסבכה את בולצמן המסקן, שחשב שהוא נותן **הסבר** לחוק השני. היא לא, אבל היא אכן המדוקיק ביותר לאנטרופיה. שוב, היזכרו במשקל-הבית שלכם ונסו לחשב כמה דרכים יש כדי לסדר את הבית: הרבה, נכון? אפשר לסדר במטבח צלחות בארון הימני וכוסות בארון השמאלי ולהיפך, אפשר לשים לסדר בארון הבגדים חולצות למעלה ומכנסים למטה ולהיפך, וכו'.יפה, אבל כמה דרכים יש "לסדר" את כל הדברים האלה **בבלאן?** האם המתמטית העצובה היא שרובם המכريع של הצירופים המרחבים של העצמים נמצא בקטgorיה של אי-סדר לעומת המעת

ארבעה זוק ים

רק לצורך השלמות נציג את הרשימה המלאה של חוקי התרמודינמיקה. **החוק השלישי** קובע שלא ניתן להגיע אל האפס המוחלט⁸ ==. אחרי שלושת החוקים האלה התגלה חוק נוסף, והוא נקרא כראוי החוק ה...לא, **החוק האפס**. פשוט, אנשים הבינו שהוא יותר בסיסי משלשות קודמייו כי הוא אומר: **בහינתן שתי מערכות ==**.

*

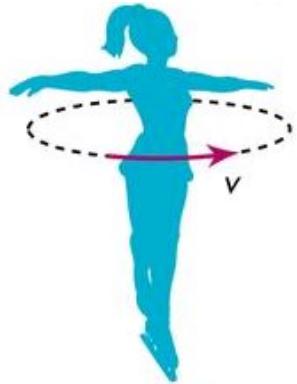
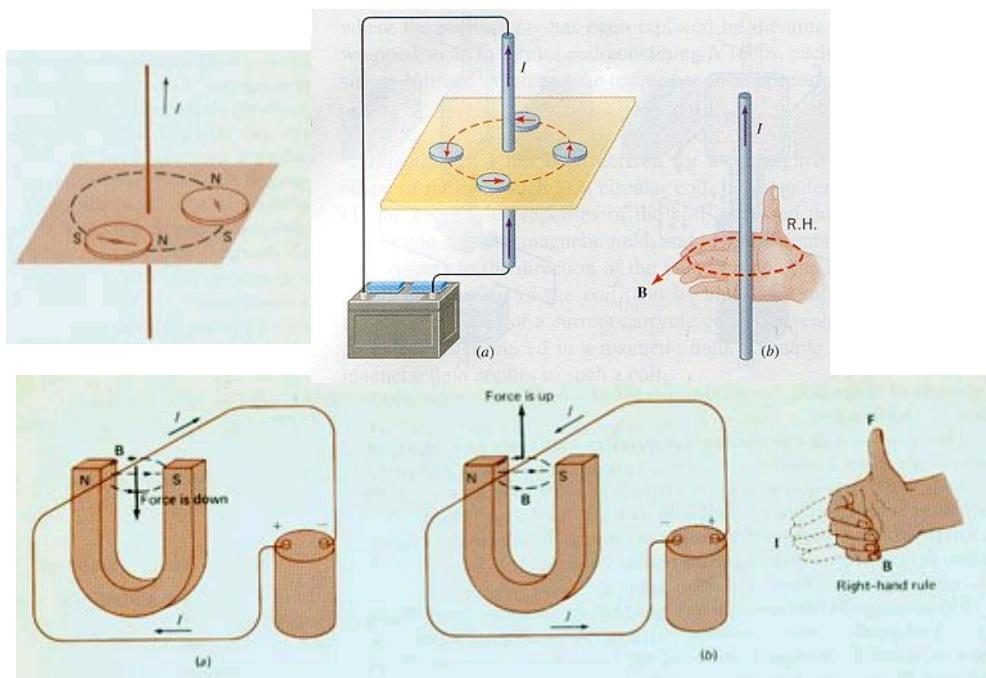
קלוין המסכן: הוא עשה כל מיני דברים חשובים ויפים בתרמודינמיקה והעניק עידוד ורעיון להרבה מעמידתו בדור ההוא, ובכל זאת הרבה אנשים זוכרים לו רק את האמרה האומללה שהפיזיקה הושלמה ונגמרה ואין עוד מה לגלות בה

1900

אני בנadam נחמד ולא אוהב לרמות אנשים, אז ברצוני להבטיח לכם שם תסגורו את הספר
זהה מיד עכשו תישאר הפיזיקה בזיכרונכם כארמון

<http://www.gutenberg.org/dirs/etext98/fdayd10.txt>

⁸ זהה בפשטות הטמפרטורה בה תנועת המולקולות היא אפס. קלוין הוא שקבע אותה והוא הבסיס לסולם החום שלו, שהוא רחב יותר מאשר של צליוס ופרנהיט.



As R decreases v must increase.



שימור התנע והתנו הסיבובי: להעביר לפיקט 9 (או לפרק החדש המתוכנן על הסימטריה) שם: יאנג: צבע בזווית הסיכון הוא התאככות. כן להתייחס לחוק ברנולי על הנזלים והגזים (עשה ניסוי!). הסבר את עילוי המטוס. הערת שוליים: את המצב האידיאלי מוצאים בעזרת הדו"א. או אולי להעביר את זה לניטון???) וחוק בוטל.

לעשות את כל הספר ניסויי יותר: לפרק על גלילאו ונפילת חופהית להוסיפה את ניסוי המטולטלת (?). לפרק על ניוטון להמליץ על מנסרה (קומי פראונהופר?). ארכימדס? ומה עם ניסוי הכווס והנרט? בפרק 9 על השתרבות האור: לחזור למנסרה. שרוף מלח על הכיריים החשמליים. נחשת? ניסוי פיסות הניר והחsequential בתוספת ההסתכלות של קוזן!



امي נטר

לפרק על האסימטריה של הזמן. אולי יהיה צורך בפרק קודם על סימטריה? אכן ראוי שהוא יהיה אחראי היחסות והקוונטיים כי אז ניתן יהיה לצרף את פאולי.
משהו על מחול וחלל.

בפרק זה ניאלץ שוב לסתות פה ושם מהמסגרת הcronologית לטובת אחדות התיאור

לאמן ולמדען מטרות שונות. הראשון יוצר יופי והשני מנסה להבין את המיציאות הסובבת אותו.

בחתירה של המדען והמתמטיקאי אל גיליי יסודות טהורים עד כדי הפשטה – מושגים כמו מספר, אנרגיה וכדומה – יש הקבלה מעניינת למה שעשו האמן. לכארה האמן יוצר דוקא מורכבות ולא פשוטות, אבל גם הוא מנסה תחילה לבודד יסודות של העולם הדמיוני אותו הוא יוצר. אמונות הצייר התפתחה תודות להיפושיםם הבלתי-נלאים של אבותינו אחרי האדם הטהור, הצהוב הטהור ושאר הצבעים, שאחרי גילויים בצוריהם הנקיים ניתן היה לצייר אינספור ציורים ממשל צירופיהם. גם המוסיקאים הקדומים הקדישו את חייהם לניסיונות להפיק צלילים נקיים של "דו, רה מי" וכוכי ליצור מהם כל מנגינה שתעליה על הדעת.

Bernoulli's problem was an early example of a class of problems called Calculus of Variations now. These are extremal problems (finding maxima and minima), where the independent variable is not a number, not even several numbers, but a curve or a function. A rule which assigns a number to each curve of a given collection is called a "functional". It is like an ordinary function, except that a collection of curves instead of numbers serves as an independent variable.

Observe the motion of the surface of the water which resembles that of hair, and has two motions, of which one goes on with the flow of the surface, the other forms the lines of the eddies; thus the water forms eddying whirlpools one part of which are due to the impetus of the principal current and the other to the incidental motion and return flow.



13. אינשטיין רואה יומן פערם ים

חייב אדם להושיט ידו אל מעבר להישג-ידו.
אחרת, לשם מה קיימים השמיים?
רוברט בראונינג

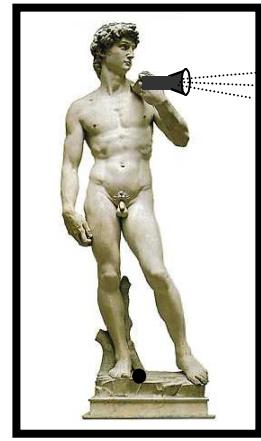
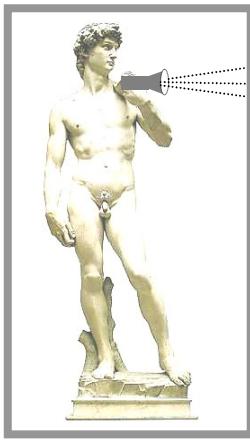
בשנים 1902-1905 נהגה חבורה קטנה לhippo בדירה קטנה בברן לשיחות על מדע ופילוסופיה. ה"נשייא", אלברט איינשטיין (1879-1955), סימן תואר ראשון בפיזיקה באוניברסיטה ETH בציריך,⁴ אבל לא התקבל לתואר שני--- ונאלץ לעבוד כפקיד במשרד הפטנטים. לפיכך הקים מוסד משלו, ה"אקדמיה אולימפיה". הכל התחליל כספרסם מודעה בעיתון ובها הציע שיעורים פרטניים במתמטיקה ופיזיקה עם שיעור חינם לניסיון. רומני דלפון בשם מוריץ סולוביין בא לנשות את שיעור החינם. השניים שקוו בשיחה ארוכה, ויתרו על השיעורים הפרטניים ועברו לשיחות קבועות. אחר כך צירף איינשטיין את המתמטיקי קוונרד הביכט ושולשתם קבעו תוכנית פגישות בהן היו אוכלים יחד ארוחת ערב ואחר כך דנים בכתביהם, ספרנזה, מך, פואנקה ועוד פילוסופים ומדענים, בתוספת קצת ספרותיפה ולקינוח פרקי גינה בכינור מאות איינשטיין. משטר הלימודים היה קפדי. כשהעוז פעם סולוביין ללבת לקונצרט במקום לפגישה, הלוו איינשטיין והביכט לדירתו והשתוללו שם, לככלו והפכו לו את הרהיטים, וכשהופיע לפגישה למחרת עשה לו איינשטיין סצנה מאד לא יפה עם צעקות וכיוני-גנאי, ומما נזהר המסקן לא להבריז שוב. לא שפר גם גורלו של הביכט, שספג גידופים ממשו כשהחמיין פגישות. חברי האקדמיה לא נשאו חייבים וקרוואו לנשיאם הדיקטטור "אלברטוס ריטר פון שטייסביין", שהוא כמו "אבייר עצם התחת".⁵ עם הזמן צירף איינשטיין את אשתו, הביכט את אחיו וכן חבר הביא חבר. בתוך קבוצה זו מצאה את איינשטיין בשנת 1905. "שנת הפלאות", אותה חוות ניווטן בגל עשרים וארבע, פקדה את איינשטיין בהיותו בן עשרים ושמונה.

ארבעה מאמרם כתוב בשנה ההיא. בראשון העניק דהיפה מכראות לتورת הקוונטים. בשני ניתח את "תנוועת בראון" (התנוועות המיקרוסקופית של חלקיק שען המרחק באוויר) וממנה גזר את ההוכחה הראשונה לקיום האטומים. בשני המאמרים הנותרים הביא לעולם את תורה היחסות הפרטנית. על המאמר הראשון, שדוקוא לא היה החשוב ביותר בעיניו, קיבל פרס נובל. ביום אין ספק שתורת היחסות ראייה לא יהיה לפרס זהה, ובענין רבים ראוי ניתוח התנוועה הברואונית לנובל שלישי. אתם מבינים, אם כן, ששם דבר כבר לא יהיה כפי שהוא מהרגע שהבחור הזה יעלה על במת הפיזיקה, ולכן הוא יעסוק אותנו הרבה בפרקם הבאים. היום נתחיל מההפקה היסודית ביותר שחולל, תורה היחסות הפרטנית.

1.3. שני דברים יפים מתנגשים
אחד-עשרה שנה אחריו "שנת הפלאות"⁶ ישב הפיסיקולוג מקס ורטהיימר שעوت רבות עם איינשטיין, אז כבר מנהל "מכון הקיסר וילhelm" בברלין⁷ וביצומה של המהפקה השנייה של תורת היחסות הכללית, וניסה לשחזר אותו את הגילוי.⁸ בואו ננצל את הזמנת הזאת להציג לתוך מוחו.

⁴. גם אני, בכל הצניעות, מזמן לפעמים להרצות בה.

⁵. משרה מאד נוהה: העובד היחיד המכון היה איינשטיין עצמו.



איינשטיין היה רגש, צפוי, ליפוי של הפסיכה הקלאסית. תיאוריה, לפי האידיאל האוקלידי, היא יפה כשהיא מסבירה מקרים מסוימים תופעות בminerim חוקים. בוואו נזכר בשני החברים שבפרק 3.8 חקרו את המטען: הם החלו עם כמה "חוקי מצפן" שונים לכל צופה ובהדרגה גיבשו אותם לחוק אחד. החוק הבזבז הזה הטען **באינוריאנטיות**, כלומר בתוקף כללי החל על כל הצופים. צעד גדול בכיוון זה עשה גלילאו, שבפרק 6.4 הוכיח לנו שלא ניתן להבדיל בין מהירות קבועה לבין מנוחה (שגם היא מהירות קבועה, בגודל אפס). לכן, ככל חוקי התנועה שניסחו גלילאו, ניוטון ומישיכיהם תקפים באותה מידת לכל המהירותות קבועות. בעיני איינשטיין, זה היה פשוט יפה.

והיה יופי שני, שונה לגמרי, שבגללו כמעט עף איינשטיין מהאוניברסיטה בזמן לימודיו לתואר ראשון. אחד המרצים שלו היה פיזיקאי חשוב בשם נבר. איינשטיין שאל אותו למה הוא לא מלמד את חוקי מקסול והפרופסור רשם לפניו את התהצפות. חוקים אלה היו מאוד יפים בעיני איינשטיין, ופרק 11 אתם יודעים למה: ראשית, כל חוקי החישמל והמגנטיות גובשו בהם לארבע משוואות קצרות. שנית, משוואות אלה נבעה מהירותות של גלים מסווג חדש, **בלתי תלות בתכונות הפיסיקליות של המדים שבו הם נעים**. היה זה כמובן הטבע עצמו נתן לנו "מספר מיוחד". ושלישית: המספר המיוחד הזה התאים בדיקון למשהו שכבר היה ידוע מהמציאות, מהירות האור! זה, בעיני איינשטיין, היה כਮובן יפה מאוד.

היתה רק בעיה אחת, קטנטנה: שני הדברים היפים האלה, של גלילאו ושל מקסול, סותרים זה את זה.

כדי להיווכח בכך בוואו נזהר אל ניסוי המחשבה עם דוד הזרק אבני בתוך הקרון ומשה המשתכל עליו מבחוץ (פרק 4.6). ראיינו שככל מה שעושה דוד בקרון הזה, כל עוד הוא נוסע במהירות קבועה, איןנואפשר לו לדעת אם הוא נע או נח. אבל מה אם דוד ימדד לא אבני קlew בזמן נסיעתו אלא קרני אור? כאן חיב אחד משני סוגיו היופי להתקלקל:

א. אם תנתנו אלומת האור כפי שנגנה אבן הקlew ותקבל מדוד הנוסע תוספת מהירות, משוואת מקסול לא תהיה נכונה לגבי כל הצופים: בעיני משה, מהירות הקרון תהיה גבוהה יותר כשדוד יכוון את הפנס לכיוון הנסעה, ונמוכה יותר כשיאיר בכיוון ההפוך. "המספר המיוחד" של מקסול לא יהיה עוד מיוחד.

ב. מצד שני, אם אלומת האור לא תושפע מהירותו של דוד, משה יראה את המהירות הידועה אבל דוד עצמו יבחן שמהירות האור אינה נכונה לגביו: אלומת האור תברוח ממנו לאט יותר אם ישגר אותה בכיוון נסיעתו ומהר יותר אם יאיר בכיוון ההפוך. אם המספר של מקסול הוא אכן "מיוחד" והזוף נובע רק מתנועתו של דוד, הלכה האינוריאנטית של גלילאו: כל צופה יכול לדעת אם הוא נע או נח!

בפני חברי "אולימפיה" החל אינשטיין פורש את מחשבותיו על פיסיקה חדשה שתשתמר על שני הנקודות ייחד, במלוא כוחם ובלי שום סתירה. אחד הבוחרים האלה היה מיקלה-אנגלו בּסּוּ, איטלקי-שווייצרי יהודי שעוד מלא תפקיד חשוב בפרקם הבאים, ושבعد עם אינשטיין – כמה נוח – במשרד הפטנטים. מתי שהוא בסביבות מיי 1905 החל אינשטיין להזמין אותו לצתת אותו לכמה טיוולי צהרים ולהקשיב לו. בסוּ, כפי שמעידה התודה הלבבית של אינשטיין בסוףamar, לא רק הקשיב אלא גם הציע הצעות משלו, וכן התגבשה בטוילים אלה, בתוך כמה שבועות, תורה היחסות הפרטית.

2. 13 בהחלטת לא הכל יחס

הנה, אומר אינשטיין, שתי הנחות-יסודות פיסיקליות:

1. המרחב שווה לכל הצלפים (אם דוד מודד את אורכו של עצם כלשהו ומוצא שהוא מטר אחד, זה יהיה אורך העצם גם על-פי הסרגל של משה).

2. הזמן שווה לכל הצלפים (אם דוד מודד את הזמן החולף בתהליך כלשהו ומוצא שהוא דקה אחת, זה יהיה משך התהליך גם על-פי שעונו של משה).

בעניי כל אדם, שתי הנחות האלה הן כל כך מובנות מאליהן עד שהוא לא אפילו לא מודע להן. עכשו מציע אינשטיין להחליף אותן באחת:

A. מהירות האור שווה לכל הצלפים (לכן הסרגלים והשעונים של דוד ומשה מראים תוצאות שונות, וכל הזופים האלה יבטיחו שמהירות האור תהיה בדיקות אותו דבר עבור שניהם).

רגע, מהهو מזור פה: האם לא אמרו לנו שהכל ייחס? נכון, נכון, מшиб אינשטיין, אבל לא אני! זו הייתה הטענה של גלייאו, ואני מצאתי דוקא את היוצא-מן-הכלל שלו! האמת היא שמדובר לא אהבתי את השם "תורת היחסות" והעדפתி לקרוא לה "תורת האינוריאנטיות," אבל השם פשוט יותר כבר תפס.

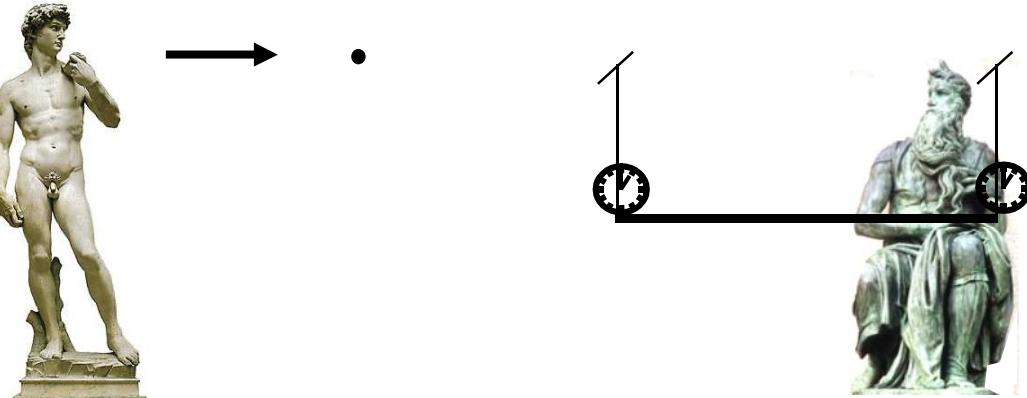
חברים, זה אחד מהרגעים המכريعים בהתפתחות הפיסיקה אז תודאו בבקשתם מבינים כמה הטענה הזאת לפניה שנסמיך: יש משה, שבין אם אנו רודפים אחריו, בורחים ממנו, מתגשים אותו או יושבים ומחכים לו, מהירותו ביחס אלינו נשארת קבועה. הנה שלושה תרגילים בחיבור מהירויות, אחד משעםם, השני גם, והשלישי... חכו ותראו.

13.2.1 תרג'il משעמם עם אבניים

הנה שוב דוד ומשה, והפעם גם משה מוכן להיות בתנועה כדי להמיחס את מושג המהירות היחסית. אם דוד נושא במהירות של 90 קמ"ש ומשה דולק אחרי ב-100 קמ"ש, אז משה מתקרב אל דוד לאט מאד: 10 ק"מ בשעה. ואם שניהם נוסעים זה לצד זה במהירות של 100 קמ"ש בדיק, הרי מהירותם היחסית היא בדיק 0 ושניהם יכולים למזרג זה לזה קופת הפה תוך כדי נסיעתם בלי לאבד טיפה. ואם שניהם נוסעים בכיוונים מנוגדים במהירות של 50 קמ"ש כל אחד, ואחד סוטה מסלולו, ההתגשות ביניהם תהיה... אבל כל זה, כאמור, לא שייך לאינשטיין.

עכשו ימדדו גיבוריינו את מהירותו היחסית של גופ שליishi שיזרקו זה לעבר זה. לשם כך משתמש משה במיד-מהירות מהסוג הפשטוט ביזור: מוט, שבשני קצוותיו קבועים חיישנים, וכל אחד מהם מחובר לשעון. כשיזרקו דודaban למתקן, והוא תחולף על פני מד-המהירות שבידי

משה, יפעל קודם ההיישן הראשון שיעצור את השעון שתחתיו, ואחריו יעשה כן ההיישן השני. נחלק את אורך המוט בהפרש הזמן שבין שני השעונים וזו תהיה מהירות האבן.



מה קובע את מהירות האבן ביחס למשה? ראשית, כמובן, תלוי באיזו מהירות נזרקה האבן עצמה. שנית, אם מי שזרק אותה היה בתנועה, תתווסף מהירותו ל מהירות זריקת האבן. ושלישית, אם זה שמדד אותה נמצא גם הוא בתנועה, תתחבר גם מהירותו ל מהירות האבן ביחס אליו. לכן,

א. מהירות היחסית של האבן = מהירות הזורק + מהירות האבן + מהירות המודד.

זכרו שהסימן + מכוון גם ל מהירות שלילית, כך שאם משה, למשל, בורח מడוד, **נפחית** את "מהירות המודד" משתי המהירות האחרות. בKİז'ור: כשהמישהו זורק עליים משהו, כדי שהמישהו הזה ינוע لكمראתכם ב מהירות ה כי נמוכה שאפשר, למשל אפס או, עדיף, מהירות שלילית, וכן לגבי עצמכם: אל תנוועו לקראת המשהו הנזרק עליים כי בכך תגדלו את המהירות בה יפגע בכם.

טריוויאלי, משעמם, אבל נכון.

13.2.2 תרג'il משענים עם גלי קול

גיבורינו עברים למדידת המהירות היחסית של גלי קול. דוד משמעו שriskות בחיל-הרוועים שלו ומד-המהירות שבד משה שודרג כך שני ההיישנים הם עתה שני מיקרופונים. בלבד זאת נשארו כל פרט הנסיוני כמו זה הקודם. והנה, כאן משתנה החוק:

ב. מהירות היחסית של הקול = מהירות הקול + מהירות המודד.

מה השתנה החוק הזה מחוק האבן? להיכן נעלם האיבר " מהירות השורק"? העניין הוא שהקול אינו עצם כמו האבן אלא גלים בתחום האויר בו כולנו שרויים. שדנד נע, והוא אינו מניע את האויר סביר משה, ולכן מהירותו אינה תורמת ל מהירות הקול שמודד משה (היא תורמת רק לתדרותם – ר' בנספח). לעומת זאת, אם משה נע, כן נוצרת תנועה (ביחס אליו) של האויר המעביר אליו את הקול. יש כאן, אם כן, אסימטריה בין שני הגיבורים, הנובעת מהבדל התנועה ביחס לתווך המעביר ביניהם את הקול.

גם כאן לא צריך להיות אינשטיין כדי להבין את זה.

13.2.3 תרג'il מודר עם גלי אור

הגיע הזמן למדוד את המהירות היחסית של האור, וכך עברים השניים לכלי-רכב מהירים, המתקרבים למהירות של $300,000 \text{ ק"מ בשניה}$. דוד מאיר בפנס, מד-המהירות של משה

שודרג שוב ואת שני המיקרופונים בשתי קצות המוט שלו החליפו שני חישני אור. מה אומר החוק עכשו? פשוט וሞז:

ג. מהירות היחסית של האור = מהירות האור.

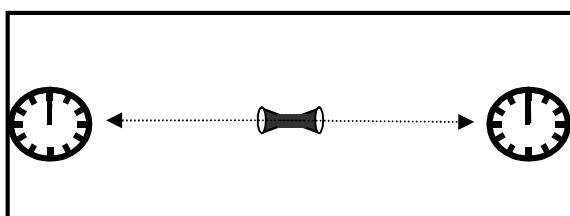
בכוונה הגדלתי את הנקודה בסוף המשפט. נעלמו שני האיברים האחרים שהיו בחוק א'. לא רק שמהירות האור אינה מושפעת ממהירות המאייר, היא גם לא מושפעת ממהירות הקולט! במלילים אחרות, האור הוא ابن מסווג מיוחד: בין אם תברחו מפניה עפה אליהם, ובין אם תרצו לקראותה, ובין אם לא תזוזו ותחטפו אותה בישיבה, זה לא ישנה כלום כי תמיד תחטפו אותה ב/אותה מהירות: 299,792.458 מטר בשניה.

איך יתכן דבר כזה? קל-קלות, אומר איינשטיין, ואם תבינו את זה הבנתם את תורה היחסות:

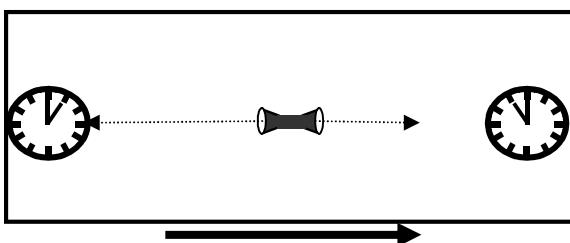
מהירות האור היא **תמיד** 299,792.458 מטר בשניה כי המטר הוא **לא תמיד** מטר והשניה היא **לא תמיד** שנייה.

מהו, אחרי הכל, מד-מהירות? בכל סוג, פשוט או מסובך, מדובר בסופו של דבר בסרגל ובשני שעונים. כולכם הנחתם עד היום שאורך הסרגל וקצב השעונים הם תמיד אותו דבר. זה היה נכון כל עוד הייתה המערכת הזאת נעה במהירותות נמוכות. במציאות היו בה זיופים קלים, אבל הם היו מאד-מאוד קטנים ולכנן לא ניתן היה להרגיש בהם. אבל כשהמערכת נעה במהירותות המתקרבות למחרות האור, הפכה התכווצות הסרגל למורגשת, האטת השעונים נעשתה נראית לעין, וגם הסתירה בין השעון הקדמי והאחוריו גדלה, וכל הזופים האלה שיתפו פעולה בקונספירציה מושלמת כדי לדאוג שמהירות האור תהיה 299,792.458 מטר בשניה – לדוד, למשה ולכל דבר אחר ביקום. כך יכול דוד להמשיך ולטעת במצח נחוצה שהוא דוקא עומד בעוד סכל כדור הארץ נעה מתחת לגלגליו. הפיזיקה החדשה של איינשטיין שימרה יחד את אינוריאנטיות גליליאו ואת תורת מקסול, במלוא פשטותן ויזופין.

13.2.4 לב העניין: ביטול הבו-זמןיות
איינשטיין הבהיר את המהפכה שלו בערעור על ההיגד הפשוט "שני דברים קרו בשני מקומות באותו רגע." נשוב לקרון של דוד ונציג באמצעות פנס המAIR לשני הכיוונים, כיוון הנסיעה והכיוון הנגדי. על שני דפנות הקרון נציג שעונים המורימים את אותה שעה בדיק. כל עוד הקרון נח, קרני האור יגיעו לשני השעונים בבדיקה באותו רגע.



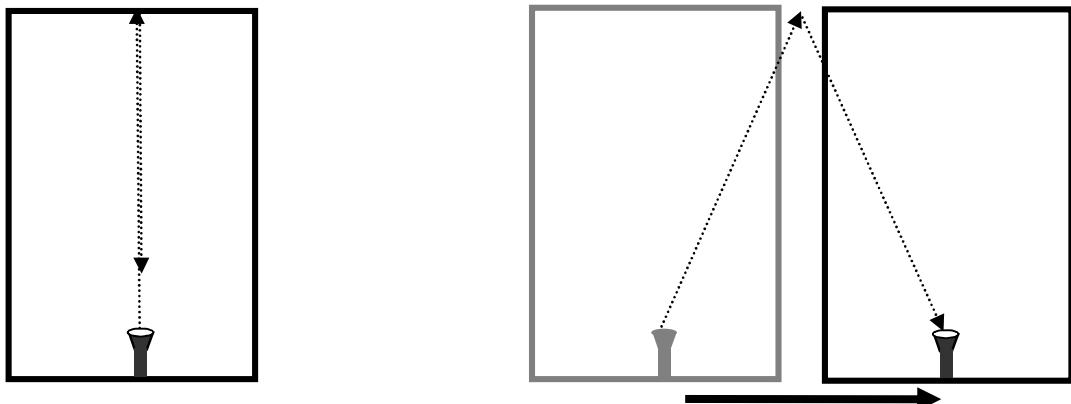
עכשו ניתן לקרון לטוס ימינה במהירות הקروבה למחרות האור. שתי הקרניים לא יכולות להגיע לשני שעונים באותו רגע, כי שעון אחד בורה מהקרן והשני טס לקרהתה, ולכנן דוד יכול להבין שהוא נושא, מה שగילילאו לא מרשה. אם כן, אולי הקרן הנעה בכיוון הנסיעה תנוע מהר יותר והקרן הנעה בכיוון הפוך תנוע לאט יותר? אבל אז משה בחוץ יראה קרני אור נעות במהירותות שונות ואת זה איינשטיין לא מרשה! אין ברירה: מושג הבו-זמןיות צריך לעוף. קיבל אם כן שתי גרסאות שוות-ערך לאותו ניסוי:



1. גרסת הצופה מbehiz: קודם טס פה מישחו בקרון ושלח שתי קרני אור לכיוונים מנוגדים. לkrן שטסה בכיוון הנסיעה לקח יותר זמן להגיע לשעון על הקיר שברח ממנו ואילו לkrן שטסה בכיוון הפוך לקח פחות זמן להגיע לשעון על הקיר הנגדי שבא לkrראתה. אבל שני השעונים זיהו: השעון על הקיר הימני האט והשעון השמאלי האיז, וכך הראו את אותה שעה כשבಗעו בהם שני קרני האור.

2. גרסת הצופה מבפנים: שתי הקרניים טסו ב מהירות שווה ופגעו באותו זמן בשני שעונים מתואמים (כל העולם, לעומת זאת, השתגע ונע ב מהירות עצומה, והשעונים שלפני הקרונ החלו ל מהר ואלה שאחרי הקרונ החלו לפגר).

אם הבו-זמןיות אינה מוחלטת, בודאי שהזמן עצמו אינו יכול להיות מוחלט. נציג עכשו את הפנס על קרקעית הקרונ ונציג מראה על התקרה. נמדדות כמה זמן לוקח לkrן לעשות את הדרך הלוך-ושוב.⁴ עכשו נחזור על הניסוי במצב תנועה. שימו לב לדבר מעניין: האור, כדי שלא להרגינו את איינשטיין ולא לגלות לנוסע בקרון שהוא נע, אינו פונה היישר למעלה אלא **באלאנסון** (משם אולי היה eben שנזירה למעלה⁵), כך שהוא פוגע גם הפעם במראה שמעליו.יפה, אבל האלאנסון הזה הוא קו ארוך יותר מהקו היישר, ולכן לא כauraה יידרש לkrן יותר זמן לעשות את המסלול האלאנסוני הלוך ושוב, וכך ירגע הנוסע בהבדל. אפשרות אחת היא שהkrן ת מהר יותר כדי להספיק לעשות את המסלול האלאנסוני (כך נוהגת האבן במקרה זה): המהירות שלה היא צירוף המהירות האנכית והאופקית), אבל אז יראה הצופה מbehiz krן או רגע מהר יותר מאשר איינשטיין שוב נורא ימעס. מה עושים? פשוט וקל: **שעונו של הנוסע יפגר בהתאם ל מהירותו.**



ואם הזמן מצית לאינשטיין, איך ברירה יש למmedi המרחב? נציג את הפנס על הקיר הימני של krן הנע ואת המראה על הקיר השמאלי ושוב נמדדות את הזמן הדרוש למחזור krן האור הלוך-ושוב. כשהkrן נוסע, יידרש krן יותר זמן לעשות את הדרך הלוך, ופחות

⁴. מתיקן מחשבתי זה קרוי "שעון לאנזון" על שם מציאו, מיודיענו מהפרק הקודם.

⁵. אני חייב להסתיג התיאור הזה, המופיע בכל הספרים ללא הסבר נוסף ורק מבלב את הקורא הנבון: למה, אם האור אינו מקבל תוספת מהירות הנע, הוא צריך לקבל ממנו את **כיוון תנועתו?** ואולם, לא זה מה שקרה: במצבות מתרחשת האור כגל כדורי לכל הכוונים. כשמדבר בפנס, המועד לפולות אלומת אור צרה, רוב הגל הצדורי נבלע בדפנות הפנס ורך חילק זעיר ממנו יוצא מהפתח. כשהפנס נע, חילק אחר של הגל, זה שפנה מלכתחילה לכיוון האלאנסוני ושאמור היה להיבלע בדפנות הפנס, יצא לחופשי במקומות החלק שבהיה נפלט אליו עמד הפנס במקומו. מה שמרתק בתיאור זה הוא שהוא חל כਮובן גם על צופה "נע" המביט בפנס "נה": "גם הצופה הנע יראה הצד או מתרחשת לכל הכוונים בעודו "מתרחק" ממרכז הצד! הדבר אפשר לנוכח את היחסות הפרטית כך: "כל צופה רואה את האור כאילו הוא מתרחשת באתר הנה לעומתו". בעניין יש כאן רמז עמוק לגבי טבע המרחב-זמן.

זמן לדרך חזרה, אבל כיוון שהיא תבלה זמן רב יותר במסלול האיטי, סך-כל משך המזהור יהיה הרבה יותר ארוך מהרגיל. התארכויות הזמן בנוסחה לעיל אין בה די כדי לקוז את הפיגור הזה. אין ברירה: אם איינשטיין אמר שאסור לנושאים במהירות קבועה לדעת שהם בתנועה, אז הקרון חייב להתקצר בהתאם למ מהירותו כדי להסתיר מדן את היותו בתנועה.

כמובן, אותן עקרונות יחסותיים מחייבים שגם **ההיפך** יקרה: דוד הנושא יראה את כל העולם מתקצר בכיוון נסיעתו ואת כל השעוניים שבוחז מאטים. הניגוד הזה, כפי שנראה בהמשך, אינו מביא לשום סתירה פיסיקלית. אם שני צופים נעים זה כלפי זה ואחד מהם משנה את מהירותו (למשל עוצר) כדי להיות באותו מצב כמו חברו, תשתלו על המצב תורה היחסות הכללית, אותה נלמד בפרק הבא. התוצאה: השעון של הצופה ששינה את מהירותו יפגר לתמיד והסרגל שלו יתכווץ לתמיד.

ר' נספה:

התקרחות המרחב

האם נעשה ניסוי כזה? אין כוון אפשרות להטיס אנשים ב מהירות שיאפשרו לראות את סרגלייהם התקצרו וشعוניהם פיגרו, אבל מדידות שנעשו בחלקיים הנעים ב מהירות הקروבה ל מהירות האור מאפשרות לבדוק את השפעת התנועה על הזמן. ספרותון מגיע מהמשמש אל כדור-הארץ, ב מהירות הקروבה לאור, הוא מתנגש בעוצמה עם אותו אויר ויוצר חליקן בשם מואן המשיך לטוס, גם הוא ב מהירות הקروבה לאור, לכיוון הארץ. המואן הוא חליקן מאד לא יציב: זמן קיומו הוא $C - sec^{6} \times 10^{-1}$ (פחות משתי מיליון השנייה), מה שאומר שהוא יספק לנوع רק כ-600 מטר לפני מטה בטרם יתרחק גם הוא. בקצב הזה, כשמדבר במואנים הנוצרים בגובה 10 ק"מ, רק כ-3 מכל עשרה מיליון היו צריכים להגיע אל האדמה. בנסיבות מגיעים לאדמה כ-490,000, בדיקות לפי הניבו היחסותי: ב-98% מהירות האור מתארכים היי המואן פי 5, כלומר הוא חי ממוצע 7.8 מיליון השנייה, וכך צולחים החלקיים האלה את כל הדרך עד פני הים.

ובקיצור: תורה היחסות מנצחת לא רק ב מבחון הלוגי אלא גם הניסיוני.

3. 13. **אלקטرومגנטיות**, סימטריה ואסתטיקה יקרה לאמרו ההיסטורי נתן איינשטיין כותרת צנעה: "על האלקטרודינמיקה של גופים נעים." הוא פותח בדוגמה שאotta לממנו כבר בפרק 10.4 וכן המוקם להפיק ממנה את מלאו התובנה. אתם זוכרים איך דוד ומשה הדגימו לנו ניסוי המשלב את תורתיהם של גלי אלו ופרקיי? הנה נשים מטען חשמלי בתוך שדה של מגנט:

א. אם המגנטי נע, יידחף המטען לכיוון המאונך הן לקווי-הכוח המגנטיים והן לכיוון תנועתו המגנט.

ובכן להיפך:

ב. אם המטען נע, הוא יידחף לכיוון המאונך הן לקווי-הכוח המגנטיים והן לכיוון תנועתו שלו. שימו לב: אם תנועת המטען ב-(ב) הפוכה לכיוון תנועת המגנטי ב-(א), אזי בשני המקרים ינוע המטען בכיוון זהה. זה הגיוני, כי בשני המקרים **התנועה היחסית זהה** ולכך צריכה גם התוצאה להיות זהה. ענייני איינשטיין הייתה זו סימטריה יפה של הטבע. מה שהיא לא יפה בעניינו היה היעדרה של סימטריה כזאת בחוקים שהסבירו אותה: למmeno שבקרה (א) אומרת הפיזיקה שהмагנט הנע יוצר סבבו שדה חשמלי הדוחף את המטען בכיוון הניצב. במקרה (ב) אין שום שדה חשמלי סביב המגנטי, אבל כיוון שהטען נע, מופיע עליו השדה המגנטי כוח הדוחף אותו באותו כיוון ניצב כמו במקרה (א). ענייני איינשטיין זו הייתה שערוריה: שני

חוקי טבע שונים לגמרי נחוצים להסביר את אותה תוצאה! וזה לא הכל: אם גם המגנט וgam המטען ינעו באותו כיוון, לא תורגש שום השפעה של המגנט על המטען, ממש כמובן היו שניהם במנוחה. למה? הфизיקה הקלסית נתנה הסבר מורכב: המגנט הנע אמן יוצר סביבו שדה החשמלי המשפיע על המטען החשמלי כמו ב-(א), אבל תנועת המטען בתוך השדה המגנטי גורמת שיפעל עליו כוח כמו ב-(ב) רק לכיוון ההפוך, ושני הכוחות האלה מבטלים זה את זה בדיק. נו, בהחלט! אמר איינשטיין: הרי על פי עיקרון גליליאו, אם יימצאו שני העצמים בתוך הקרון הנע של דוד, יוכל לטעון שהмагנט לא משפיע על המטען פשוט מפני שאין בהם נמצאים במנוחה! למה הфизיקה צריכה שני הסברים לאותה תופעה אם מילא לא ניתן להבדיל בין תנועה למנוחה?

הבעיה פשוט התנדפה בתורת היחסות. “ידעו,” כך פתח את מאמרו, “שהאלקטטרודינמיקה של מקסול, בהיותה מיושמת על גופים נעים, מובילה לאסימטריות שאינן מהותיות לתופעות.” עכשו, במקום שני הסברים שלא ניתן להבדיל ביניהם, בא הסבר אחד: ה להשפעות בין מגנטים ומטענים תלויות רק בתנועותיהם היחסיות. כך נעשה התיאוריה סימטרית כמו התופעות.⁴ בצדק מכנה זאת אובייקטיבי “אחד העerusרים הראשונים בתולדות המדע המודרני שמובסים על עיקרון אסתטי.”^[140]

4. 13 אלגנטיות

השאלות שהתרידו את איינשטיין הצעיר לא עניינו את הפסיקאים ב/אותה תקופה כי הן נראו פילוסופיות ולא מדעית. מה שהתריד אותם היה הרבה יותר מעשי: הכישלון למדוד אפקט הקשור ב”את”. כיום נראה שהatter הזה, שミלא תפקיד כל כך חשוב בתורות אריסטו, דקרט ומקסול, אינו קיים, אבל אם נדע למה חיפשו אותו נבין טוב יותר את היחסות.

במה מתפשטים גלי מים? רק במקרים מסוימים: אין גלי מים בבריכה ריקה. באופן דומה, אין גלי קול אם אין אויר. במקרים אחרים: המים והאויר הם ה”תוך” של הגלים שלהם. מהו אם כן התוך של גלי האור? אמרו אנשים: יש לנו ראה דבר כזה, שנקרא לו ”atter”, שהאור הוא הגלים שלו. האתור הזה הוא כמו גז אבל הרבה יותר קלוש, כי גלי אור מתפשטים גם בוואקום, שבו גלי קול אינם קיימים, ולכן האתור חייב להיות משהו דרך דרך כל הקירות ומהירות וונצא בכל מקום. אם נחשוב עוד מה צרכות להיות תוכנות האתור, קיבל שתי תוכנות סותרות: מצד אחד צריכה להיות לו דחיסות **כמעט אפסית** כדי שבאמת יוכל לעבור דרך כל הקירות וכן שכוכבים יעברו דרכו בלי להאט, ומצד שני **אלסטיות כמעט אינסופית** כדי שיוכל לשאת גלים כה גדולים ברוחבי היקום.

מסובך, אבל בוואו נמשיך. משתמש מכאן ניבוי נסיוני: כדור הארץ, הנע במהירות של 30 קמ”ש סיבוב המשמש (שהיא עצמה נעה סביב מרכז הгалקסיה ב מהירות של 220 קמ”ש), אמם אינו סובל מרוח נגדית של אויר, כי האויר שלו צמוד אליו ע”י הכבידה, אבל בהחלט חייבת להיות ”רוח אטּר” נגדית כי האתור אינו-Amor להיות מושפע מכבידה, אחרת היו מערכות אתור משבשות את אויר הכוכבים. ואם האור הוא גלים של האטּר הזה, אז גלי אור הנשלחים בכיוון תנועת כדור הארץ נעים למשה נגד הזרם, ולכן ניתן לגלות את הפיגור

⁴ ההגינות מחייבת להזכיר שהראשון להעלות ערעורים אלה נגד ההסבר הכלול לתופעות האלקטרומגנטיות היה מהנדס אלמוני בשם אוגוסט פפל שכתב ספר ובו טען שתפיסת המרחב והזמן של הфизיקה הקלסית לקוים בחסר. ידוע/איינשטיין קרא את ספרו בשקייה. הפתיחה של מאמרו המצוטטה לעיל מראה שאכן לא תבע זכות ראשונים על הבדיקה זו.

במהירותם. האמריקני-יהודי אלברט אברהם מילסן (1852-1931, נובל 1907), פיסיקאי שיבר הוכיח את מינומנותו במדידה מאוד מדויקת של מהירות האור, יחד עם אדווארד מורלי (1838-1923), ניסו לגלוות פיגור זה בשורת ניסויים, שברבבות השנים נעשו יותר ויותר מוחכמים, ולכן נתנו לפיגור זה מספר יותר ויותר מדויק. מספר זה היה – כמה מביך – אף.

השערות נועזות מאוד והעלו להסביר כיישלון זה. האירי ג'ורג' פיצ'רלד (1851-1901) וההולנדי הנדריק לורנץ (1853-1928, נובל 1902) שיערו שהאפקט גורם להתקפות הסרגלים ולהתארכות השעונים. במיללים אחרים: הם הציעו את אותם ניבויים כמו איינשטיין, כמה שנים לפניו. אם כך, תשאלו, מה יתרון תורה היחסות?

זו נקודה חשובה מאוד: **היחסות גוזרת את התארכות הזמן והתקשרות הסרגלים לא כתיקון אד-הוק לפיזיקה בעקבות כיישלון ניסוי זה או אחר אלא מתוך הנחת-יסוד חדשה אחת**. בולט כאן הניגוד לורנץ, שהנחת אחת-עשרה הנחות-יסוד חדשות כבסיס לניבויו.¹⁰ זהו הישג אסתטי, ובתוור שכזה יתרון מכריע בעיני הפיסיקאי העיוני.

כך זכה איינשטיין לחוויה דומה לו של מקסול לפניו: הוא החל משיקולים עיוניים, אבל מסקנותיו עלו בקנה אחד עם השערת לורנץ-פיק'רלד שהמניע לה היה ניסוי מילסן-מורלי. הטעע שלח לאינשטיין רמז: אתה בדרך הנכונה, המשך! אז הוא המשיך. וגם הפעם, הקיצוץ במספר הנחות-יסוד הביא לגדרה במספר הניבויים: פיצ'רלד ולורנץ ניבאו רק את ההתקשרות והאטת הזמן של שעון וסרגל בתנועה, אבל איינשטיין ניבא גם את התופעות המשלימות, שיתגלו כאשר הצופה עצמו נעה לעומת סרגל או שעון במנוחה, ובנוסף ניבא גם את שוויון המסה והאנרגיה, לעילו נזכר בהמשך.

13.5 דיסהרטומוניות פרטיות

המארים שפרסם איינשטיין ב"שנת הפלאות" התפרסמו בכתב-העת *Annalen der Physik* שעורכו היה מקס פלנק, אותו נכיר היטב בהמשך. הם עוררו את סקרנות העורך, ובעקבותיו את סקרנות הקהיליה המדעית כולה, כלפי הבוחר המוזר שהחל לצאת מאלמוניותו. איינשטיין, כזכור, לא התקבל לתואר שני ב-ETH ולכן נרשם ללימודים באוניברסיטה ציריך. עתה לקח מאמר שכותב ב"שנת הפלאות" (למעשה החמישי), הגישו לאוניברסיטה זו כעבודת דוקטורט וזוכה בתואר ב-1906. מכאן החל לטפס בסולם הדרגות באוניברסיטאות ברן, ציריך ופראג, עד ש-1914 הוצאה לו פרופסורה מלאה בברלין, ללא חבות הוראה ובתוספת חברות באקדמיה הפרוסית למדעים. במשרה זו החזיק עד 1933, כשהי��ת נעשה קנצל גרמני, אז הקימה אוניברסיטת פרינסטון¹¹ עבورو מכון מיוחד.

בהדרגה, ככל שנחשף לעיני הציבור, הילה להתבטא בו גם האוטיסידריות שתהפוך אותו לסמל. הדרך הטובה ביותר להבין את אופיו של איינשטיין היא להציג אותו עם ניוטון: ניוטון, כזכור לנו, היה ממש חולה כוח. איינשטיין חש בחילה כלפי כל סמכות. ניוטון כמעט לא צחק. איינשטיין היה מצחיקן וירטווזי. ניוטון היה בתול כרוני. איינשטיין התפרק על ימין ועל שמאל. ההתנגדויות הראשונות של איינשטיין עם האקדמיה הגרמנית, שמעורבותה הפוליטית ההתבטאה בגילויי-דעת פטרווטיים, סיימו אותו כ"בוגד" בעיני עמיתיו. גם באלה"ב החופשית, אליה ברוח אחורי עליית היטלר לששלטון, הקפיד שלא להיות אזרח צייתן. הוא ביטא ב글וי דעתות סוציאליסטיות וכשהחל הסנטור מקארתי בחקרות לגילוי קומוניסטים שהרסו

¹⁰. גם אני, בכל הצניעות, נתתי בה כמה הרצאות.

את חייו הרבה אנשים, קרא איינשטיין לסרב להעיד בפניו. הוא היה פציגיפיסט, אבל לא פנאטי: כשב�다 הפרק שאלת המלחמה מול היטלר קרא לאנשים להשתתף בה. תודו שיש משחו חמוד באינשטיין כשהוא כועס:

ענין זה מביא אותי אל המפלצת הגדולה ביותר שהולידה הווית העדר: אל הצבא, השנוא עלי! כבר כשאדם יכול לצעוד בסך בהנאה לקצב המוסיקה אני זו לו; הוא קיבל את המוח הגדול שלו רק בעוטות, שכן בשביילו מוח השדרה היה מספיק למגמי. את כתם החרפה הזה של הציוויליזציה יש לסלק בהקדם האפשרי. גבורה על-פי פודה, מעשה אלימות חסר-טעם ואהבת המולדת המאוסה – מה להחת שנותי אליהם. מה שפלה ובווזיה נראית לי המלחמה; הייתה מעדיף שיקצצוני לחthicות ובלבך [7] שלא אשთף במעשה עלוב שכזה!

איינשטיין הוא בן המאה ה-20 ולכון התיעוד עליו, כולל בנושאים אישיים מאוד, קיים בשפע. הוא היה בנים הבכור של הרמן ופאולינה איינשטיין, אח למאיה. הוא החל לדבר קצר מאוחר וכילד נתף לעתים התפרצויות זעם אלימות, אם כי נדירות. בבית-הספר שנא את החינוך הפרוסי, ולמרות שהצטיין במקצועות הריאליים נראה שニתק עצמו מהויה הכיתה וראה בו עונש מתמשך. בזמןו הפנו למד את אוקלידס ואת ניסויי פרדי. תקופה מסוימת בילדותו הקפיד לקיים את מצוות היהדות והל Chin מזורי דת, וכל חיו נשarra בו דתוות מעורפלת. כשהיה בן שש-עשרה עזב את בית-הספר בשל מחלת לא ברורה וה策רף להוריו שעברו אז לאיטליה בשל קשיים כלכליים. הוא היה מאושר מאוד באיטליה, ובגיל זה ניסה לראשונה לדמיין מה יראה אם ירכב על קרן אור. שם עברה המשפחה לשוויץ. אחרי שהשלים את לימודי התיכון התקבל ללימודים ב-ETH, שםפגש את החברים שהפכו את השיבתו, בהם אשטו לעתיד, מילוה מריצ'ן. היא הייתה סטודנטית לפיזיקה כמוו, סרבית, מבוגרת ממנו ארבע שנים, אינטלקטנית מאוד, חמת-מזג ויפה, שבסלה מנכות בירך. החברות ביניהם התפתחה לאהבה, וזו הביאה להתפרצויות בכיר קולניות מצד אמו של איינשטיין על שבנה יוצאה עם "בחורה צולעת". כשהתברר שמילוה סובלת מעד בעיות בריאות, מצא איינשטיין את עצמו מול שני הורים בוכים. הזוג נולדה תינוקת טרם נישואיהם, שנמסרה לאימוץ ומעולם לא נודע גורלה.

בזמן זהה כשל איינשטיין בכל ניסיונותיו להתקבל ללימודים לתואר גבוח יותר. עוד חבר שווה-זהב של איינשטיין ב/אותם ימים היה המתמטיקאי מרסל גרוסמן (1878-1936). כשהיו סטודנטים הוא נתן לאינשטיין להעתק מנו את סיכומי הרצאות שהעתצל לשימוש, אחר כך הפעיל עבورو פרוטקציות משפחתיות כדי שיקבל משרה במשרד הפטנטים, ולימים יעזר לו בהכרת הבסיס המתמטי של תורה היחסות הכללית.

אחרי מסירת התינוקת נישאו איינשטיין ומילוה ב-1903. בעבר שנה נולד הנס-אלברט ואחריו, ב-1910, אדוארד. הסיפור נעשה עכשו מעיק. איינשטיין מוכר לכולנו כדמות מלאכית: סבלן, צנווע ושלו. אבל זה יהיה שירות גרווע למדע, ובמיוחד למדענים צעירים, אם נטפח סביבו מיתוס לא מציאותי. כמו לכל אדם היו לו חולשות וצדדים לא נעים. לא נסעה לנתח את הכישלון ביחסיו עם מילוה. כל מי שהיה מעורב בסכסוך זוגי יודע שיש שני הצדדים לסייע. לא כך נהג הפיזיקאי אברהם פיס, תלמידו של איינשטיין שכתב עליו ביגרפיה "רשמית" חנפנית. הוא ניסה ליצור רושם כאילו מילוה סבלה ממחלה-נפש, בלי להתייחס לעובדה שהיא חווה **учול** כשמקרה את בתה לאימוץ – חוויה המסוגלת לשבור כל אדם – ואחריו כן ראתה את ההתקשרות הפתאומית באבתו של איינשטיין אליה. מקוממת עוד יותר העובדה שפיס כמעט לא מזכיר את הכישלון האיום של איינשטיין ביחסיו עם שני בניו. אין

ספק ש/הוא אהב אותם מאד – יש עדות נוגעת-ללב כמה בכה ביום בו ניתנה המשמרות עליהם לגורשתו⁶ – אבל אין גם ספק שזו הייתה אהבה בעיתיה. הצעיר, אדווארד, היה ילד מבריק ורגיש, אבל בברותו אובחן כחולת-נפש. הוא החל ללמידה רפואי ורצה להיות פסיכיאטר, אבל בגין עשרים, אחרי שהאהב באשה מבוגרת ממנו, התaszפן בעקבות התקף אלים. מילווה עברה להתגורר בסמוך לו עד סוף ימיה. הוא כתב לאביו מכתבים רבים שהביוגרפים אינם מצטטים אבל מודים שרבים מהם היו מלאי כאב. איינשטיין כתב לפניו שכבר כשהיה “צטעה” ילד קטן איבחן בו *Dementia praecox*, השם שהוא אז לשכיזופרניה. נסו לשים את עצמכם במקום ילד שאביו נתן לו אבחנה כזאת!⁷ בסו, שתפקיד ברבות השנים גם כעובד סוציאלי של המשפחה המפורקת, הפציר באיןשטיין לשלוח את הבן לטיפול. עוזב, אמר איינשטיין, כל הרופאים רמאם. תאמרו: אולי איינשטיין, שהבין הרבה בפסיכולוגיה (במכותב ברכה שלחה לפרויד ליום הולדתו השמנוני סיפר שהיא קורא בכתביו אחת לשבוע), איבחן נכון את בנו? אולי היה גן מסויים במשפחה, שגרם לאב להיות רק קצת סכיזואידי ואילו בגין התפרץ לשכיזופרניה מלאה? הסיפור הזה לא משכנע לאור היחסים שהוא לאיןשטיין עם אביו. איינשטיין, כמובן, האשים את מילווה שסכסכה בין לבין הבנים, אבל די לשמע על כמה מה מריבות בין האב והבן כדי לדעת שאיןשטיין היא מסוגל לאמל את בנויפה מאוד בעצמו. כשהיהודים הנס-אלברט שאינו מתחoon להיות פיסיקאי, אלא – שומו שם – מהנדס, אמר לו אבא פשוטות: איןך בני יותר! איינשטיין גם עשה לו את המנות כשהציג בפניו את בחירת לבו (שהיתה מבוגרת ממנו – מסורת משפחתית אצל האיןשטיינינם), וניסה ללא הרף לשכנעו לותר עליה – חזרה פתטית על הסצנות שעשתה לו אמו שלושים שנה קודם. כשהראה שהבן בכל זאת התחתן אתה, הלק לידיך רופא וביקש ממנו לשכנעו לא להביא ילדים, פן יירשו את הגנים של אם נמותת-הקומה! בקיצור, הגאון שני לו התנגד כבריון נבער בין כתלי ביתו. בתקילת שנות השלושים אוושפו אדווארד ב”בורגה-צלזי” המפורסם בשוויץ. מאז, עד מות איינשטיין יותר מעשרים שנה מאוחר יותר, לא התראו האב והבן. בהתחשב בכישלון ביחסו עם בנו הבכור, אולי היה זה מעשה התחשבות מצד איינשטיין לותר על הקשר עם הצעיר האומלל.⁸

הוא דיבר בגינוי-לב על הצד הזה באופיו:

חשש הצד החברתי וההכרה בצויר במחויבות חברתיות עמדו אצל תמיד בסתרה מיוחדת במינה להיעדר המובהק אצלך של צורך מיידי ליצור קשר עם בני אדם ועם קהילות אנושיות. אני “אב בודד” אמיתי, שמעולם לא השתיך בכלל לו למדינה, למלוכה, לחוג ידידים; כן, ואילו לא למשפחה הקדומה. תמיד חשתי זרות וצורך בבדידות נוכח כל הקשרים הללו. רגש זה הולך וגובר עם הזמן. עם התקדמות הגיל הח adam ביתר חריפות אך לא צער בגבולות ההבנה וההרמונייה עם הזולת. אמונם adam כזה מאבד חלק מהתמיימות ומהENSOR הדאגה, אבל הוא משתחרר במידה רבה מן התלות בהרגלים ובביקורת של שאר האנשים ואני מפתה להשתית את שוויי המשקל שלו על בסיס לא מוצק שכזה.^[6]

⁶. טרגדיה זו שופכת אור חדש על היחסים המיוחדים בין איינשטיין לקורט גולדסטיין⁹ מתחאה דאגה נוגעת-לב מצד איינשטיין כלפי המתמטיקאי הגאון, שאחרי כמה שנים במקו ללימודים متקדמיים הראה סימנים הולכים וגוברים של פסיכון. איינשטיין הסביר מידיו את העובדה שימי ספררים – בצדק, לאור העובדה שגדל התערער מאוד אחרי מותו – ואף הודה שהוא בא למשדרו במכון, במקום לעבוד בבית, רק כדי שתהייה לו הזכות ללוות את גדל הביתה בסוף היום. האם אפשר לחשב על תיקון יפה יותר למה שכשל בו עם “טהה”?

6. 13 תוצאה הרת-גורל איינשטיין הדרך ע"י אידיאל היופי, אבל אילו לא היו שיקוליו מוביילים לבסוף למשהו מעבר לאסתטיקה, היינו שלחיהם אותו לעבד בchnerות טפתיים במקום לבזבז עליו כל כך הרבה דפים. איינשטיין היה פיסיקאי כי מהשבותיו הפילוסופיות הניבו לבסוף תוצאות ניסיוניות רבות-עוצמה. בואו נראה איך המשווה המפורסמת ביותר של הפיסיקה, $E=mc^2$ נובעת בפשטות מקודמתה הניתונית $F=ma$ אחרי תיקון קטנטון המתבקש מהאנוריאנטיות של מהירות האור.

אם מהירות האור קבועה לגבי כל הצופים, פירוש הדבר הוא שהוא גם גבול המהירות העליון ושם דבר לא יכול לעבור אותה. נניח אם כן שאנו מיצים גוף קטן כלשהו בחלל, נאמר, ב--- קמ"ש לשניה. בתוך --- שנים אנו אמורים להגיע למהירות האור, מה שהיחסות אוסרת. מה יהיה אם כן גורל האנרגיה הקינטית המושקעת הגוף? פשוט: אם לא התאזה (a) במשוואת ניוטון לעיל היא שתגדל, תגדל המסה (m)! כך יתגללה שקשה יותר ויוצר להאייז את הגוף ככל שנתקרב למהירות האור. וכך, שני החוקים הקלסיים

1. חוק שימור החומר: חומר אין נוצר יש מאין ואין מתכלת.

-

2. חוק שימור האנרגיה: אנרגיה אינה נוצרת יש מאין ואין מתכלת. או חדו בתורת היחסות ל-

א. חוק שימור החומר ואנרגיה: הכמות הכוללת של חומר ואנרגיה בכל מערכת נשארת קבועה.

לכן, $E=mc^2$ נותנת את שער-החליפין לפיו הופכת ישות אחת לאחרת. את ההנחה האiomה ביותר לייחס זה ראה העולם ב--- בהירושימה וכעbor --- ימים בנסאקי: --- של אורנויום הפכו ל--- של חום, ובתוך כך הפכו --- איש ברגע לאבק. רבים אחרים מתו בייסורים בשבועות, בחודשים ובשנים שאחר-כך. מאז התדרדרה איוולת המין האנושי לשפל אחר שפל בעודו שוקד למלא את מחסני בפצצות נוראות יותר ויוצר, והסופי אינו נראה לעין.

אבל למה להתעסק ברוע ובטיפולות של האדם כשהטיבע מציע מהשוו מריהיבות לשקלות החומר והאנרגיה? השימוש, המוכרת לכל הבוראים על הארץ מיום הופעת החיים, היא המספקת

7. 13 מינקובסקי ו"מטריקת המינוס"
הכירו בבקשת את הגיבור השני של הפרק הזה. הרמן מינקובסקי (1864-1909), יהודי מרוסיה, היה מרצה למתמטיקה ב-ETH כשם לב אחד התלמידים שלו מתעצל בלימודיו. על-פי המספר הוא כינה אותו "כלב עצן". עברו הימים ומינקובסקי, שקדם מזמן למשרה בטינגן, שמע שדווקא אותו עצן, איינשטיין, המציא את תורה היחסות. ישב מינקובסקי והתעמק באותה תורה ולבסוף, בהרצאה מפורסמת ב-1908, הודיע שמצא דרך לבטא אותה באופן גיאומטרי. איינשטיין, שהיה כנראה עוד פגוע מהפרופסור שלו לשעבר, אמר בזוזול: "מתמטיκאי אחד בטינגן מצא דרך לבטא את התיאוריה שלי בצורה שפיסקיים לא יוכל"



להבין.” הלגלוֹג זהה ייעלם בעוד ארבע שנים, כפי שתראו בפרק הבא, כSHIPתAiינשטיין את תורה היחסות הכללית. מינקובסקי, כמו עזוב, נפטר כעבור שנה בגיל 46. מודל היקום בן ארבעת הממדים הוא כיום חלק בלתי-נפרד מתחום היחסות כולה.

תארו לעצמכם, אמר מינקובסקי, עולם דו-ממדי שהזמן הוא הממד השלישי שלו. “העתיד” הוא “למעלה” ו“ה עבר” “למטה” במדד השלישי. כל עצם נקודתי בעולם זה יתואר כקו המתמשך מה עבר אל העתיד (ר' תמונה), והnickרא “קו-עולם.” קו זה מכיל את ההיסטוריה של הנקודה: אם בנקודה כלשהי במדד השלישי המסומנת ב-00:00 הקו מתעקל לيمין עד לנקודה 01:00 ואחר כך מתיישר, פירוש הדבר שהנקודה נעה ימינה מהצד עד השעה אחת ואחר כך נעצרה. באופן דומה ניתן לראות כי בשעה 02:00 הصلة הנקודה לנעו שמאלה וחזרה למקוםה המקורי. באותו האופן, צורות דו-ממדיות על המשטח, כמו עיגול וריבוע, יתוארו כצורות תלת-ממדיות בצורת גליל ומנסחה המתמשכות מה עבר אל העתיד, כך שהגליל והרביבוע הם רק חתכים דו-ממדיים שלהם. גם עולמנו התלת-ממדי, אמר מינקובסקי, הוא חתך כזה בעולם ארבע-ממדי, שהמדד הרביעי שלו הוא הזמן.

אבל כאן צריך להיות זהירים ולשים לב שגם אינה גאומטריה רגילה כי למדד הרביעי בה יש חכונות ממש פרורטיות. זוכרים את המושג “מספר מדומה” פרק #? הנה לכם עוד מקרה שבו המצאה מתמטית מופשטת לティור של דבר שהתגלה הרבה זמן אחר כך במציאות. גם ממד הזמן, אמר מינקובסקי, הוא מימד שאם תסמן אותו במספרים דימוניים תראו את כל האפקטים של תורה היחסות נובעים מגיאומטריה החדשה.

הנה משפט פיתגורס האומר שאם נחבר את ריבוע שמי צלעות במשולש ישר-זווית קיבל את ריבוע היתר: $c^2 = a^2 + b^2$. על סמך משפט זה כבר ראיינו שיטה למציאת המרחק בין שתי נקודות במקרים בהם נתון לנו רק מיקומן על פני רשת של קווי אורך ורוחב. הנה למשל בנין הכנסת בירושלים נמצא ליד מפגש קו האורך 170 וקו הרוחב 130, בעוד חוף תל-ברוך נמצא בפגש קו האורך 130 עם קו הרוחב 170. נניח שאין לנו סרגל כדי למדוד ישירות את אורך הקו הישר בין שני האתרים החשובים האלה. אם נבחר מקום בו נפגשים קווי האורך והרוחב של שני המקומות זה יהיה ליד מפגש קו האורך 130 וקו הרוחב 130, איפה שהוא ליד צומת מסמיה. נקודה זו נמצאת כ-40 ק"מ מערבית מהכנסת וכ-40 ק"מ דרומית לתל-ברוך. לכן, על-פי משפט פיתגורס, כדי למציא את המרחק בין ירושלים לה”א علينا להעלות בריבוע את שני המספרים האלה, לחבר את התוצאות, להוציא מהסכום שורש וזה יהיה את המרחק עצמו.

אבל עכשו תארו לעצמכם שבמשרד החשב הכללי בירושלים יושב פקיד מופרע המחליט שקווי האורך בישראל צריכים להיות מסומנים ע”י מספרים מדומים ולא ממשיים.⁴ הוא מסמן אם כן את קווי האורך של מדינת ישראל לא בקילומטרים אלא בשורותים ריבועיים של מינוס קילומטר. מי שינסה עכשו לחשב מרחקים בין מקומות בישראל על-פי משפט פיתגורס קיבל תוצאות מאד מעניינות כי הוא יצטרך לחסר מספרים במקומות לחבר! יתרה, למשל, שכדי להגיע במהירות מנתניה לפתח-תקוה עדיף לנסוע לא היישר דרומה אלא לעשות זיגזג מזרחה דרך קלקיליה, או, אם נרצה להגיע ממש מהר, דרך שכם! והכי מעניין:

⁴. דברים אלה נכתבו בתקופה בה יושב משרד האוצר האdiamond ביותר שכיהן כחשב כללי והנתן להתקפות בלתי-פוסקות על מלחמו בשחיתות. גילוי נאות: ד”ר זילכה היה תלמיד שלי לפני הרבה שנים.

כיוון שהברזי בית-הנבחרים והగברות בחוף תל-ברוך נמצאים על קו שהוא כמעט לגמרי לגמרי אלכסוני, ככלומר קרוב ל- 45° , הרי שעת מרחיקיהם הכמה שווים מצומת מסמיה נctrך להסר זה מזה, ואז המרחק ביניהם הוא, למרבה הנוחות, קרוב לאפס!

אם הבנתם את העיקרון הזה, תגלו מיד שהבנתם לעומק את טבעו של הזמן על-פי תורה היחסות! בציור להלן נראים מסלוליהם של דוד ומשה. משה נשאר יושב במקומו בעוד דוד יוצא בקרון הסילוני שלו למסע של --- ק"מ ב--- שעות, עושה פרסה וחוזר. במרחב האוקלידי, קו-העולם של משה הוא בבירור קצר יותר משל דוד, אבל במרחב-זמן של מינקובסקי, שבו קוויים אלכסוניים הם קצרים יותר, מסלולו של דוד קצר יותר. זה בדוק מה שאומרת היחסות: אם על משה עברו --- שנים, על דוד עברו רק -- שנים. וככל שההירותו של דוד התקרב למהירות האור, יהיה מסלולו במרחב-זמן יותר אלכסוני (קרוב ל- 45°), והזמן שעובר עליו התקרב לאפס.

החשיבות בתיאור זה הוא שככל צופה רואה את המרחב-זמן בהתאם למצב תנועתו. נדגים זאת ע"י מרחב מינקובסקי פשוט (תמונה 2), שבו ניצג כל אדם ע"י נקודה. הקו היישר מימין הוא קו-העולם של רAOבּן, וניתן לראות על פיו שרAOבּן עומד כל הזמן במקומו. הקו השמאלי, לעומת זאת, הוא קו-העולם של שמעון ומנו ברור שמשמעותו נועינה.

כבר ממבט ראשון אנו רואים כי במרחב מינקובסקי אין זכר לזרימת הזמן: כל הרוגעים קיימים יחד, ממש כשם שככל המיקומות קיימים מבחינתנו יחד. אבל אפילו אם נתעקש ונציבע על נקודה מסוימת בזמן, למשל על השעה 00:00 בבוקר بحيו של רAOבּן, נגלה כי מושג פשוט כמו "עכשו" הוא בעיתוי. הנה, למשל, שאלה הנראית פשוטה: מהו ה"עכשו" לגבי רAOבּן בשעה 00:00?

תשובותו של מינקובסקי – וככן התרגום הגיאומטרי המדוקיק לטענת היחסות של איינשטיין – היא שה"עכשו" תלוי במידירות הצופה. מבחינתו של רAOבּן זה פשוט: המישור האופקי החותך את קו העולם שלו בשעה 00:00 מייצג את כל האירועים ביקום המתראחים, מבחינתו, בשעה זו. פה אין שום חידוש. אבל כשאנו דנים במשמעותו של תורת היחסות משחו מזרז: ה"עכשו" של שמעון הوطה בהתאם לממדתו – הקו המקווקו בתמונה, ולכן שמעון מתлонן בכל השעונים ביקום השtagען: כל אלה שלפנינו האטו את מהלכם בעוד שככל אלה שאחורי החלו למהר, והם הולכים ומלהרים ככל שהם מרווחים יותר!

התוכנה המעניינת של המרחב-זמן היא שהמייד הרביעי שלו, ככלומר הזמן, שונה משלשות מימי המרחב הרגילים בכך

8. 13. שני פרדוקסים של זמן ומרחב פרדוקסים, כידוע, הם מורים טובים בכל תחום. גם "פרדוקס התאומים" מספק הזדמנויות מעולה לתרגל ולהבין את החשיבות היחסותית.

הפרדוקס עצמו פשוט. תהינה שתי תאומות, שם האחת נועה ושם אחודה מנוחה. וכשימותיהן כן הן: נועה אוהבת להיות בתנועה בעוד אחודה מעדיפה לנוח בצל. נועה,

המבוגרת יותר, יוצאת למסע ב מהירות קרובה למחרות האור. בשובה היא אמורה למצוא שבסמוך שעת נסיעה חלפה על מנוחה תקופה הרבה יותר ארוכה, כך שמנוחה עכשו מבוגרת ממנה בהרבה.יפה, אבל כיוון שתורת-היחסות אינה מבילה בין תנועה ומנוחה, למה שלא יקרה היפך, ככלומר שנوعה תטען שהיא זו שהייתה במנוחה בעודו אחותה התרחקה ממנה וזרה? ואם כך, למה לא יתרבר שדווקא نوعה הזקנה?

ברוב ספרי הלימוד התשובה היא פשוטה: אמן התנועה היא יחסית, אבל התאוצה היא מוחלטת. نوعה לא סתם נסעה אלא נסעה וזרה, ככלומר האיצה.

9. 13 הפיזיקה הקלסית כמקראה פרט¹ בוודאי שמתם לב שתורת היחסות אינה מבטלת את הפיזיקה הקלסית. כשאתם נוסעים במכוניות או באופניים איןכם צריכים מעכשו לדאוג להתקצרות זרועותיכם או להאטת שעונייכם, וזה לא מפני שהאפקטים האלה לא קוראים. הם פשוט כל כך חלשים, "זניחים" בשפה המקצועית, שאפשר להתעלם מהם ולהמשיך לשימוש במשוואות פשוטות של הפיזיקה הקלאסית. התיקון היחסוטי מתייחס להיות מרגש רק כשהמהירויות מתקרבות למהירות האור. הפיזיקה הקלאסית נשמרת, אם כן, בתחום היחסות בתור "קירות" או "막다" פרט². ההתפתחות האורגנית הזאת אופיינית למफכות המדען. לא "עולם ישן עדי היסוד נחריבה" כמו במקרה מהפכות פוליטיות, אלא משאו כמו "יסודות עולם ישן נשלה בצרה הרבה יותר יפה בעולם חדש". בצרפתית או ברוסית, עם מגינה מתאימה, זה יישמע לדעתך לא פחות מרגש מה"אינטרנציונל".

*

באוטוביוגרפיה האינטלקטואלית שלו,³ במהלך ניתוח תМОנת העולם הניאוטונית, עושה איינשטיין תפנית פתואומית, מעל בראש הקורה ומעבר לשתי המאות המפרידות ביניהם גיבורו: "ניוטון, סלח לי. אתה מצאת את הדרך היחידה אשר, בתקופתך, הייתה בקשר אפשרית לאדם בעל כוח החשיבה והיצירה הגבוהה ביותר".⁴^[31] זו הנסיבות שהייתה אופיינית לאインשטיין ושלפעמים אפילו גרמה לו סבל: הוא היה מהפכן, אבל העריץ את ההיגיון של תМОנת-העולם הקלסית וניסה לשמר אותו גם בפיזיקה המודרנית. הילד בן השתיים-עשרה שלמד לבדוק את אוקלידס, ושבבגרותו טרם לפיתוחה של גיאומטריה חדשה, רשם לזכותו הישג אוקלידי אדיר: הוא השמייט עוד יסוד מתחת לארמון הפיזיקה ועל היסודות נותרו קיבל ארמון גדול יותר, שבתוכו נשאר הארמון הקודם בתור אלם הכנסה.

היאמן? בתחום שניים ספורות יהיה הארמון הזה עצמו אולם הכניסה של עוד ארמון, ענק ומרחיב עוד יותר, שאותו בנה פיזיקאי אחד שאולי שמעתם עליו: אלברט איינשטיין.

יש כאן עוד אינוריאנטיות מעניינת ואני יודע אם לא שמו לב אליה קודם: כשההמערכת בה אנו נמצאים בולמת, איננו יודעים אם מדובר בתאוצה או בכבידה, אבל אם נבחר לפרש זאת כתאוצה, עדיין קיימות שתי אפשרויות שקולות: א) הינו בתנועה במנוחה ועכשו אנהנו מואיצים קדימה, או ב) הינו בתנועה אחרת ועכשו אנו מאטים. במונחי המודל של מינקובסקי, זה שווין-ערך בין שני המסלולים הבאים: ועוד אינוריאנטיות יותר עמוקה: אם היחסות הפרטית יוצרה שווין בין התנועות של גופים זה ביחס לזה, היחסות הכללית יוצרה שווין בין "תנועות" המסיה והמרחוב-זמן זה ביחס לזה. במקרים אחרים, אין הבדל בין קו-עולם המתעקם למרחוב-זמן ישר לבין קו-עולם ישר בתוך מרחוב-זמן עקום. כך:

יש למישהו רעיון?

Although nature commences with reason and ends in experience it is necessary for us to do the opposite, that is to commence with experience and from this to proceed to investigate the reason.

Love me when I least deserve it, because that's when I really need it.

Observe the motion of the surface of the water which resembles that of hair, and has two motions, of which one goes on with the flow of the surface, the other forms the lines of the eddies; thus the water forms eddying whirlpools one part of which are due to the impetus of the principal current and the other to the incidental motion and return flow.

14.

אַיִן-שְׁטֵינֶן עָוֹשָׂה אֶת ذָה שָׁוֹב

כִּי אִם אַיִ-פָּעָם לִמְדָת לְעֹופָר, עַל הָאָרֶץ תַּהֲלֵךְ וְעַנְיִיךְ מַפְנוֹת הַשְׁמִימָה,
כִּי שֵׁם הִיתְהַגֵּד וְשֵׁמָה תַּעֲרוֹג לְשֻׁוֹב.

לאונרדו דָא וִינְצִי



שנת --- מצאה את איינשטיין עצוב ומתוסכל. היו האישים הסתבכו וגם אהובתו האמיתית, הפיסיקה, לא עשתה לו חיים קלים. הואהצליח להתגרש מAMILואה ו עבר לגור עם בת-דודתו אלזה, אבל הנישואין היו מלכתחילה רעוים והוא התפרק, בידיעתה, על ימין ועל שמאל. בינהיים החלה בתה של אלזה, ששמה היה במקרה אילזה, ללחוץ עליו שיתחנן עם אמה באופן מכובד כדי שגם היא תוכל להתחנן, אז הודיע איינשטיין שהוא בעצם מאוהב ב... אילזה. הלכה הבת להתייעץ עם אמה, חזרה והתלבטה, חזרה והתלבטה איינשטיין שהיא מעדיפה אותו בתור אבא. בלית ברירה הסתפק איינשטיין באלווה למרות שהמשיך לעשות עניינים לאילזה. הפיתרון הזה לחיה האהבה שלו היה די צולע. אבל את בעיותיו עם בת-הזוג האמיתית, הפיסיקה, פתר בצורה אחרת, יפה להפליא.

1.14. יְוָצָא-מִן-הַכָּלְלָן מַעֲצָבָן

אתם בודאי זכרם שתורת היחסות הפרטית, ככל שהיתה יפה והניבתה ניבויים מהפכנים, הייתה מוגבלת למחרויות קבועות. בשל ההגבלה הזאת, כל שינוי בנסיבות הופך את תורה היחסות ללא רלוונטי. לא מוקובל עליי, הודיע איינשטיין, אני רוצה תיאוריה שתבעוד תמיד! מה יש בשינוי המהירות הזה אליו התוודענו בפרק 6.2, הקרווי "תאוצה", "שהיחסות הפרטית אינה יכולה להתמודד אותו? כדי להבין את זה בואו נוודא שכמה מונחים פיסיקליים פשוטים מהפרקים הקודמים עדין שגורים על פינו. "איינרציה" היא התמדה, ועל-פי החוק השני של ניוטון (פרק 8.3) כל גוף נע או נח שומר על מצבו כל עוד לא הפרעתם לו. "מערכת אינרציאלית" מציאות לאינוריאנטיות של גלילאו, ולכן גם ליחסות הפרטית. אם תתעוררו פעם במאצע נסעה ברכבת וטראו רכבת סמוכה נוסעת, לא תוכלו לדעת אם זו רכבת נוסעת הנראית מبعد להlon רכבת עומדת, או היפך, או כל צירוף של שתי האפשרויות.

"תאוצה" היא בפשטות שינוי בנסיבות הכוונית, כאמור הן בנסיבות עצמה והן בכיוון: העלאת המהירות, האטה, עצירה, התנועה וגם שינוי בכיוון — כל אלה הן תאוצות. והתאוצה הזאת היא המפירה את האינוריאנטיות של גלילאו ולכן גם את היחסות הפרטית. בכל האצה של המכונית, גופנו מרגיש בה מיד כשהוא נזרק קדימה, אחריה או לצדדים. במקרים אחרים, התנועה היא יחסית ואילו האצה היא מוחלטת. זה צרם לאיינשטיין מאוד. לא חשוב כמה הערצה הרעיפה עליו הקהילה המדעית על היחסות הפרטית ועל תרומתו לתורת הקוונטים, הוא ידע שילדת שעשוינו עדין אינה שלמה.

עד ליום שבו חשב מה מרגיש אדם הנופל מגובה רב. לסיפור יש גרסאות שונות. המוצלחת ביניהן היא שפועל שנפל מגג בניין ספר שברגע שנפל החסר משקל. אבל שלא כמו התפוח הנופל של ניוטון, את הספר הזה איינשטיין הודה שהמציא רק כדי לשמה עיתונאי נודניק. במציאות הוא סתם ישב על כסאו במשרד הפטנטים וחשב מה מרגיש אדם הנופל מגובה רב והבין משהו. ההבנה הזאת, ספר איינשטיין, הייתה "המחשבה המאושרת ביותר בחיי".

2. 14 איננו ריאנטיות חדשה מה בדיק במצבו של המסקן היפוטטי גرم לאדם נחמד כמו אינשטיין שמה כל כך גדולת? אם חוקי הפיסיקה, על-פי אינוריאנטיות גלילאו, אינם מבדים בין צופה נח וצופה הנע במהירות קבועה, הרי שעכשיו גילתה אינשטיין אינוריאנטיות חדשה: חוקי הפיסיקה אינם מבדים בין צופה מרוחף לבין צופה הנופל באופן חופשי.

הנה הקרון בו עומד דוד, שבuzzתו למדנו יחסות פרטיה בפרק הקודם, ועכשיו נלמד בעזרתו את התורה החדשה של אינשטיין, היחסות הכללית. נפילת הקרון מגובה רב (אחרי שננקוט אמצעים להגן על דוד כשיגיע לקרקע). שוב פיל דודaben קלע במהלך הניסוי ומה שיסטכל בנסיבות מבחוץ.

א. **גרסת הצופה מבחויז:** קודם צנחה פה ברנס מסכן אחד בתוך קרון, וכשהפילaben קלע היא נפללה יחד אותו בדיק באותה תואוצה ולכון נשארה תמיד ליד היד שלו.

ב. **גרסת הצופה מבפנים:** אין פה שום כבידה. אני חסר משקל לחלוותין. עזבתיaben קלע והיא נשארה מתחפת במקום בו עזבתי אותה, בדיק על-פי חוק ההתמדה של ניוטון (אגב, משומם מה כל העולם בחוץ טס בתואוצה מטורפת כלפי מעלה).

האינוריאנטיות החדשה אומרת, אם כן, שאין הבדל בין נפילה וריחוף. ונפילת היא תואוצה, האוביכת הראשית של היחסות הפרטית! אינשטיין חש שהוא מתקרב לפתרון הבעיה. עכשו ניסה לשחק עם התואוצה עצמה. בואו נשים את דוד והקרון שלו בחלל החיצון, שם באמת יראה את כל התופעות של היעדר כבידה כמו אבני מרחפות באוויר. עכשו נניע את הקרון כלפי מעלה בנסיבות הולכת וגוברת ב--- בכל שנייה, שזו התואוצה של גופים נופלים על כדור הארץ. אינוריאנטיות החדשה הופיעה: כל ניסוי שיעשה דוד בקרון המאייז כלפי מעלה ניתן לפירוש כאילו פועלת עליו כבידה מלמטה!

א. **גרסת הצופה מבחויז:** קודם עבר פה איש אחד בקרון שהאייז כלפי מעלה. כשהעוזב את האבן היא החלה בתנועה קבועה כלפי מעלה בשל הדחיפה הראשונית שקיבלה ממנו, אבל רצפת הקרון המאייז התקרכה אליה בנסיבות הולכת וגוברת עד שלבסוף הגיעו אליה. מאותה סיבה נלחץ האיש עצמו כל הזמן אל רצפת הקרון.

ב. **גרסת הצופה מבפנים:** אני נתון להשפעת כוח משיכה מתחתיי. لكن אני לא יכול לרחה, וכשאני עוזב את האבן היא נופלת לרצפה (אגב, כל העצים שבחויז נופלים גם הם בנסיבות הולכת וגוברת כלפי מעלה, ורק בגלל שהוא דוחף את הקרון שלו כלפי מעלה הוא נשאר כל הזמן במקומו).

ואם נבקש מדוד להשליך אבן בכיוון אני בתוך הקרון? אם הקרון מרחף בחלל או נעה בנסיבות קבועה, תشرط האבן קו ישר במעלה בתוך הקרון אל הקיר הנגדי. אבל אם הקרון נעה כלפי מעלה בתואוצה, תشرط האבן קו מוכר לנו: בדיק הפרבולת שמשמעותה אבן נופלת.

עכשו הביא אינשטיין למשחק את ידיתו הותיקת, קרן האור. נניח שדוד משגר בכיוון אני קרן אור במקומות אבן קלע. נניח הפעם שהקרון טס כלפי מעלה בתואוצה מטורפת, הרבה מעבר לתואוצה הכבידתית (אחרי הכל זה ניסוי מחשבתי ומוגבלות טכנולוגיות לא מדאיות אותן). במקרה הזה, גם קרן האור תشرط פרבולת כאילו הייתה אבן נופלת.

פרבולה?! חשבנו שככל מה שקרה בקרון המאיץ כלפי מעלה ניתן לפירוש כאילו הוא קורה בהשפעת הכבידה, אבל כבידה לא מעקמת קרני או. זה מקלקל את האינוריאנטיות החדשת של איינשטיין!

(זהו עוד רגע מכירע בתולדות הפיסיקה ואני מזמין אתכם לסגור עכשו את הספר ולנסות לפרט את הבעיה בעצמכם. נסו להיזכר איך גילה איינשטיין בפרק הקודם את תורת היחסות הפרטית מקרים כמו זה שבו דוד משחק בקרון אוור בקרון הנושא במהירות קבועה. ואז נסו לישם את אותו הлок-מחשبة לבעיה שלפנינו. אני מבטיח לכם שאם תשחקו עם הבעיה בראש פתחה, תוכלו לגלוות עצמכם את תורת היחסות הכללית!)

באו נסכם את הבעיה. היחסות הפרטית היא יפה כל עוד מדובר במהירותים קבועות, אבל התואכות מקלקלות אותה. בכל הניסויים שעשה דוד בפרק 6.4 בקרון הנושא שלו, כמו לזוג תה בחלב לסלפי חרסינה בידי זקנות אングליות, השווין בין תנועה ומנוחה היה מוחלט רק כל עוד **המהירות הייתה קבועה**. די בשינוי קל של מהירות או הכוון כדי שהתה יישפּ על הגברות וניתן יהיה לדעת שהקרון נמצא בתנועה. לפיכך הייתה תורה היחסות הפרטית מוגבלת. אבל עכשו מצאנו לתואצה בת-זוג, היא הכבידה. אם ניכנע לכבידה ע"י נפילה חופשית נהייה בתואצה כלפי מטה ביחס לכדור הארץ, אבל אנו עצמוני נמצאים במצב בו לא נרגיש שום כבידה. מצד שני אם נימצא במצב נתול כבידה אבל נהייה בתואצה כלפי מעלה, יהיה מצבנו זהה לכבידה. זה היה בהחלט יפה – הרחבת מריהבה של היופי של היחסות הפרטית – מלבד קרני האור שהוא שאליהם לקלקל את הכל: אם בקרון הטס של דוד נראה קרני אור מתכוופות נדע שאנו בתואצה ולא בכבידה.

האם בגלל זה נותר על האינוריאנטיות היפה הזאת? בשום אופן!, אמר איינשטיין. אולי תשאלו את עצמכם במקומות זה אם האור באמת אינו מתכוופ בשפעת הכבידה?

לאインשטיין היה, אם כן, **ণיבוי חדש**, ונשאר רק לבדוק אותו. כדי לודאות את האור מתכוופ בקרון של דוד, צריך דוד לטוס כלפי מעלה בתואצה אדירה, הרבה יותר מהתואצה – – – על כדור הארץ. זו צריכה להיות תאוצה השווה לכבידה של גוף הרבה יותר כבד. הלא איינשטיין לחבר אסטרונום, פרוינדליך, ושאל אותו אם כוכב-הlection צדק יכול לעשות את העבודה. זה לא ילק, אמר החבר. רק המשמש כבده מספיק כדי לעקם אור העובר לידה במידה שנרגיש בה, אבל מי יכול למדוד אור ליד גוף כל כך מסנוור? אין בעיה, אמר איינשטיין, תעשה את זה בזמן ליקוי חמה. איינשטיין החל להזמין את עצמו לארכוז-ערב אצל הפרוינדליכים ולכטוט את המפה בחישובים (שנים אחר-כך התהרטה אשת האסטרונום על שכיבסה אותה). השנים הגיעו למסקנה שטיטית אור הכוכבים ליד המשמש תהיה 1.75 שניות-קשת. עכשו החל איינשטיין לשדר את חברו לנסוע לרוסיה לעשות שם צילומים בזמן ליקוי חמה. המסקן שמע בקולו. רעיון ממש גרווע: הרוסים חשו בגרמניה שהסתובב אצלם טלסקופ ומכלמות ושמו אותו בمعצר לכמה חוזדים.

הישועה באה ב-1919. הימים היו ימי מלחמת העולם הראשונה. גרמנים, אנגלים, צרפטים ועוד כמה עמים מאד תרבותיים שחטו אלה את אלה במרץ רב. אבל אנגלי אחד שהיה קווקז אדוק העדיף לכת למאסר ולא להרוג אנשים שלא עשו לו כלום. למזלנו, הצליח יידיו לשכנע את שלטונות בריטניה שהבהיר יביא יותר תועלות אם ימדוד כוכבים במקום לשבת בכלא. הטיעון שלו היה מוחץ: הוא יצלם ליקוי חמה כדי להפריך תיאוריית של

הגרמנים! זה עבד. ה"בחור" היה ארטטור סטנלי אדינגטון (1882-1944) שפגשנו בעמוד הראשון של ספר זה. הוא הפליג לסייעות האי הפורטוגזי פרינסיפ במערב-אפריקה אחריו שהגרמנים הבטיחו שיתאפשרו לא להטביע אותו כדי שיווכל לבדוק את הטענות של הפרופסור שלהם (אדינגטון הפעם לא הצליח לעמוד כוונתו להפריך את איינשטיין). כשהתקבלה שעת ליקוי החמה נעשה מעונן. כ-400 שניםות ארך הליקוי, העננים כיסו את השמש, המסקן התפלל בלי הרף, ואם לא תלש את שעורתו מיאוש הרוי זה רק מפני שהיא עסוק בהכנסת והוצאה לוחות הצילום מבלי להציג לעבר המשש עצמה. ואז, בדקות האחרונות, חיכו אליו השמים והתבהרו. מ-16 צילומיו רק אחד היה באיכות טובה מספיק — וזה היה מספיק. למחרת--- דחקה כוורתה חדשה את כל ידיעות המלחמה בעיתוני גרמניה ובריטניה: הטענה ציית לדרישתו של המלומד המזר והאור התכוופף בהשפעת הכבידה בבדיקה כפי שהיא אמרה להתכוופף בניסוי-המחשبة הילודות עם הקרון המאייז בחלל.

3. 14 גם הבמה היא שזקן תיארתי כאן את גילוי תורה היחסות הכללית במספר צעדים אלגנטיים, אבל במציאות זה היה תהליך קשה ומיסיר עבר איינשטיין. מהתיאוריה החדשה נבעה הבנה חדשה של המרחב והזמן, והבנה הזאת הציבה בפניו משימה מתמטית קשה. הוא פנה לעזרת המתמטיקאי מרסל גروسמן, אחד מחברי "אולימפיה" המתודולוגית. "עזר לי, מרסל, לפני שאשתגע," כתב לו, וגורסמן בא לעוזר.

אבל קודם לכן צריך היה איינשטיין לעשות עוד步 צעד חשוב, שהצריך יוישר להזות שיטה. סיפרתי לכם בפרק הקודם שהוא צחוק מהמודל הגיאומטרי של מנקובסקי. עכשו, כשביקש בחיפויו אחר היחסות הכללית, אימץ את המודל הזה בשםיה. השינוי המכريع שהוסיף איינשטיין ליקום הארבע-ממדי הוא שהוא יכול *להתעקם*. קל לדמיין דף דו-ממדי מתעקם לתוך הממד השלישי, אבל קשה לדמיין מרחב תלת-ממדי עושה כך, ועוד יותר קשה לדמיין את המרחב הארבע-ממדי של מנקובסקי מתעקם: האם הוא מתעקם לתוך מימד חמישי כלשהו? תורה היחסות נשארת שותקת בעניין זה ואני עצמי אני רואה את העניין ברור עד הסוף. באior --- דגם דו-ממדי של היקום, ככלומר משטח שameda הרוחב שלו הוא המרחב וממד האורך הוא הזמן. הקווים האנכיים מצינים את מסלולי המרחב-זמן של עצמים במנוחה: העצם נשאר באותו מקום בכל הזמנים. אם נניח במרחב הזה עצמים במרחקים שווים זה מזה, הם יצרו קווים מקבילים כאלה. הקווים האופקיים מצינים את הזמן: אם נניח שעוניים רבים לאורך קו רוחב זהה, יירוחם את אותה השעה. נקבל אם כן רשות של קווים ישרים. אבל הקו שבאמצעו הוא קו-העולם של עצם בעל מאסה גדולה (נאמר, כוכב) ואפשר לראות איך הוא מעקם את המרחב-זמן שבבסיסתו. השעוניים שעל פני הכוכב מפזרים מעט אחרי אלה הרוחקים יותר בחלל (על כך בהמשך). כמו כן, עצמים הנמצאים בקרבתה הכוכב ינועו, תחילתה לאט ואחר כך במהירות גוברת, כלפיו. זו הכבידה המוכרת לנו. אבל העצים האלה, על-פי איינשטיין, הם **במצב מנוחה ביחס לחלל שסביבם**, רק **שהחלל הזה מתעקם כלפי הכוכב**.

עכשו הפעיל איינשטיין שיקול של סימטריה: אם 'א' משפייע על 'ב', חייב 'ב' להשפייע באותה מידת על 'א'. لكن, אם המאסה מעקמת את המרחב-זמן מסביבה, גם המרחב-זמן פועל על המאסה ומשפייע על מסלולה! וכך יחד שני חוקים: 1) חוק ההסתדרה של ניוטון, האומר

שगוף יישאר במצבו כל עוד לא הופעל עליו כוח, ו-2) חוק הכבידה, לפיו עצמים נמשכים זה לזה. **חוק הכבידה הוא רק מקרה פרטי של חוק ההתמדה!**
וכך, המרחב והזמן, אותם חשבנו למושגים מופשטים, הופכים לששות אחת ארבע-מדנית, מין יריעת ציר שעליה אנחנו מצורירים. אבל יריעה הזאת אינה אדירה למה שמצויר עליה. נכוון יותר לדמות אותה לבמה שלוקחת חלק במה שעושים השחקנים מעלה, למשל מתромמת מתחת לרגלי הטוביים ושוקעת מתחת לרעים כדי שהטוביים ינצחו.

למטר, כומר, המפץ הגודל

מרקורי: לפי ניוטון הכבידה תלולה למרחק, אבל הכבידה היא-היא המרחק! ממערכת-
היחס של מרקורי... ר' ת'רון 96

4. 14 האדמה בווערת

ה"ויקיפדיה" מצטט ראיון שעשה תומס קון עם ג'ים פרנק ממנו מסתבר שלנרד נולד יהודי.

5. 14 ההיפי מפרי נסטורן

ברקט כתב בשירו: "כדי לחיות יהדיו המצאנו רק את הקפיטליזם. כשהמצאנו את הפיסיקה חשבנו על הרבה יותר: על דרך למות יהדים".

אפרים קציר, הנשיא הרביעי, סיפר לי שבן-גוריון חש הקלה גדולה כשהתקבל סיורבו של איינשטיין.

6. 14. שורשים פילוסופיים
 מי הם אבותיו הרוחניים של איינשטיין? לנו, שבספר זה למדנו פיסיקה בגישה היסטורית, קל להזכיר עליהם. מצד הפיסיקה עצמה אלה הם בעיקר גלילאו, קפלר, ניוטון, פרדיי ו/ומקסול. מצד ה/מתמטיקה בולט במיוחד אוקלידס. מצד הפילוסופיה אנחנו יודעים שקרה הרבה את יום, קאנט וספינוזה, אבל ניתן להזות את השפעתם של אפלטון וליבניצן. בפרק # שמענו את ליבניצן מערער על מושגי המרחב והזמן המוחלטים של ניוטון בעזרת כמה תרגילי מישיבה פשוטים: מה היה קורה לו ברא אלוהים את העולם כמו מטרים ימינה? האם אז הייתה למלים כמו "כאן" ו"שם" משמעות מוחלטת בלי קשר לתחנת האוטובוס הסמוכה



Ernst Mach (1838-1916)

תוכנית הלימודים שקבע הנער הבוגד לעצמו, ושמאוחר יותר חיב בה את הברי
 ל"אולימפה" מצטיינת בשילוב רב-עוצמה של מדע ופילוסופיה

7. 14. תוצאות פיזיקליות: מפתטי היקום עד הטלפון הנייד
 כמו היחסות הפרטית, הניבה גם היחסות הכללית שפע הניבויים מפתיעים. אזכור כאן
 שניים הנוגעים לטבע היקום ואחד הנוגע לכולנו.

אם הביבה מעקמת את המרחב-זמן, האם מידת העיקוםזה גורמת לו להיסגר על עצמו
 כמו כדור? איינשטיין, על סמך הנתונים המשוערים שהיו בידו, ניסה לחשב את מידת
 העקמומיות של המרחב-זמן ביקום כולם. הוא קיבל כמה פתרונות אפשריים, אבל כולם נתנו
 מצב לא יציב. השתמע מהם שהיקום חייב להתכווץ בשל הביבה ההלכת ומכווצת את
 המרחב-זמן, או, להיפך, להתרפש בשל איזו דחיפה ראשונית הפעלת נגד התכווצות זו.
 איינשטיין, בnihוש, הוסיף למשוואות שלו איבר נוסף, "הקבוע הקוסmologi", שהסביר את
 היקום באותו מצב. כמובן כמה שנים גילו כמה אסטרופיזיקאים כי כל הgalakties ביקום
 מתרחקות זו מזו, כלומר, היקום מתרפש. "הപלה הכיגולה שלי", קונן איינשטיין כשם

על הדבר. אפשר להבין את התסכול שלו. החלום של כל מזען אפלטוני הוא שהיחסובים תיאורתיים יקדימו לגנות דבר הקיים במציאות, כפי שראינו לא-פעם בספר זה. אילו בטח איינשטיין יותר במשוואות שלו, היה יכול להתפאר בהישג חדש מסוג זה.

תופעה אחרת הנובעת מהיחסות הכללית היא החור השחור. במקומות מסוימים ביקום יש הרבה חומר: כוכבים, אבק ועוד. כוכבים כאלה מושכים אליהם עוד כוכבים ומתמזגים אתם, וכתוצאה לכך גודל כוח הכבידה שלהם והם מושכים יותר חומר, וחוזר חלילה, וכך הולכת הכבידה ונעשה חזקה יותר ויותר. פיסיקאים שעקבו אחריו תהליך זה בחישוביהם הגיעו לפיתרון שבו הכבידה כל כך חזקה עד שאינה סתם מעקמת קרני או אלא בולעת אותו לחלוتين. לגוף הזה כבידה כה חזקה עד שהוא מתמוטט כלו לנוקודה בגודל אפס, אבל זו נוקודה כבדה מאוד! סביר הנוקודה הזאת קיימ גבול שאיפילו קרני אוור אין יכולות לצאת ממנו. ומכיון ששום דבר אינו יכול לנوع מהר יותר מהאור, הגבול הזה, "אפק האירועים", מהו גבול פנימי ליקום שלנו. כל מה שנופל לתוכו נמצא למעשה מחוץ ליקום.

לחור השחור אינספור תוכנות שונות ומשונות, וככלן משגעות פיסיקאים עד היום ויוצרות פרדוקסים קשים. בעיקר עומדת הפיזיקה נוכח מול אותה נוקודה שבמרכז החור, ה"יהודיות (סינגולאריות)"

לסיום הנה מקרה שבו חדרו אפקטים של היחסות הכללית גם לטכנולוגיה של ימינו. נפתח בהאטה של הזמן ביחסות הפרטיט, כפי שלמדנו מ"שעון לאנז'ון" בפרק --. ההאטה הזאת מופיעה במערכות אינרציאליות ולכון היא הדדית: דוד סבור ששעונו של משה האט ומשה סבור כך לגביו דוד. היחסות הכללית מסוגלת לטפל גם בתוצאות, שהן תנועות לא יחסית אלא מוחלטות.

בשוויון-הערך בין תאוצה לכבידה, אותו למדנו בפתח פרק זה. כשהגוף מאיצ, הזמן שלו נראה מאט את מהלכו כמו שריאינו בגוף הנע ביל תאוצה בפרק -.

מהතורה נבע שבסודה כבידה, הזמן מאט את מהלכו על-פי הנוסחה הבאה:

תוצא שאותו הוכיחו הפליה וקייטינג (--) ב-- כשהיחסו בין שני שעונים ---. התוצאה הזעירה זהה הביע הפתעה לא-נעימה לטכנולוגיה החדשה של ה-GPS, מערכת קביעת המיקום --- המשמשת ביום בכלי-רכב רבים. ל מערכת הזאת דרוש לוין המרחב גבוה מעל האדמה ומהודד את מיקומו של המשתמש. כשהוכנסה המערכת הזאת לשימוש הופיעו "זיפפים" שגרמו למשוקעה נזקים גדולים. המסקנים שכחו את מה שמנבאת היחסות הכללית, שעון הפעול על פני כדור הארץ יפעל טיפ-טיפה לפחות יותר משעון הנמצא גבוה יותר ולכון נתון פחות להשפעת הכבידה של כדור הארץ. די היה בהפרש הזה בין השעונים על הארץ לשעון שבלוין כדי לגרום לסטיות, שדרשו תיקון מיוחד.

8. 14 האיחוד הכלול

או מה, על רגל אחת, עיקר ההידוש של היחסות הכללית? אם היחסות הפרטית שילבה בין תורות גלילאו ומקסול, היחסות הכללית שילבה בין שני היריבים המרים מכל, ניוטון וליבניצ. איינשטיין הctrף לlivniz בערעור על מעמד העצמאי של המרחב והזמן (שהזאת אוחדו למתהות אחת בידי מورو מינקובסקי)

לסיום שימו לב איך איינשטיין סוגר פה מעגל בן --- שנה. אתם זוכרים את התגלית של גלילאו (פרק -) לפיה כל העצמים נופלים באותה מהירותם בלי קשר למשקלם? בפיסיקה של גלילאו זה היה פרי ניסוי מהשבה, בפיסיקה של ניוטון זה נעשה מעוגן במתמטיקה (ראו בנספח ע' -), ואילו ביחסות הכללית של איינשטיין זה הכרחי: נ필ת שתי האבני ייחד פירושה התמדה במצב המנוחה שלתן זו ביחס לו, כאילו ריחפו בחלל, ואין שום סיבה שבחלל נטול-כבידה תתחיל פתאום האבן הכבודה להתרחק מהקלה!

בבוקר שבו פורסמו הכותרות בעיתוני ברלין שבישרו על תוכאות המדידה של אדינגרטון שאישרו את תורה היחסות הכללית הופיע איינשטיין לשיעור בתרמודינמיקה והתחיליל אותו כרגע. הסטודנטים הנרגשים העירו לו על הכותרות אבל הוא נראה אדיש. סטודנטית אחת לא התAFXקה. “אבל אדוני,” שאלה, “מה הייתה אומר אילו לא אישרו המדידות את הניבו שלך?” “היהתי מצטער מאוד בשבייל אלוהים,” ענה. “התיאוריה טובה.”

ובצורה כללית יותר:

הפירוש של הצופה מבחן: כל מה שבתוכה הרכבת נע וכל מה שבוחן – נה.

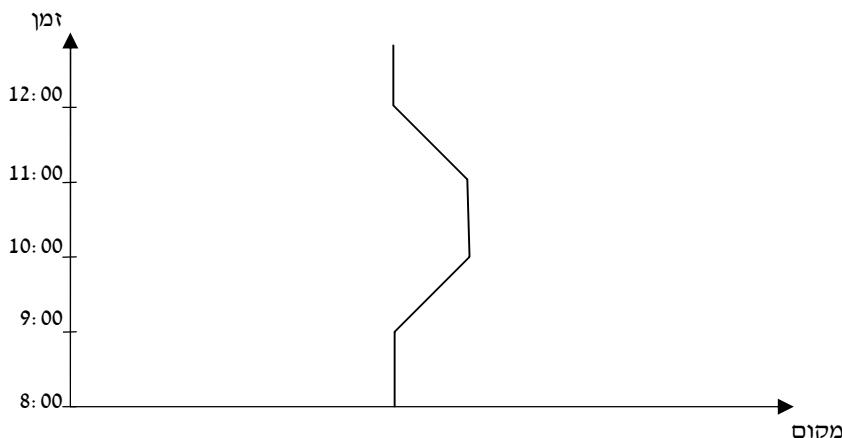
הפירוש של הצופה מבפנים: בדיקת ההפק.

עכשו, אמר גליליאו, יש לנו משהו יותר חשוב מאשר הרכבת נעה. ואם סימנו עד כה פירושים באותיות, הנה נסמן את העקרונות במספרים:

עיקרון 1: הכל יחסי.

וכך, כל ניסוי שנעשה בתוך הקרון – בניה מגדל קלפים, ניתוח מוח מסובך או מזיגת תה לחלב בספליל חרסינה עדינים ושתייתו בחברת גברות אングליות מיווחסות – ניתן לפירוש כאילו הקרון עומד במקומו וرك היקום שבוחן היחלית בהתאם לנوع כל עוד מהירות הקרון קבועה, לא נרגש בשום הבדל. מה פשר העיקרון הזה? רוב הפיזיקאים ראו בו סתם מקרה חמוד, אבל איינשטיין, שהביא אותו לדין באלה חברות צעירים, הוציאו ממנו עיקרון פילוסופי עמוק: **חוקי הטבע היסודיים שוויים לכל צופה.**

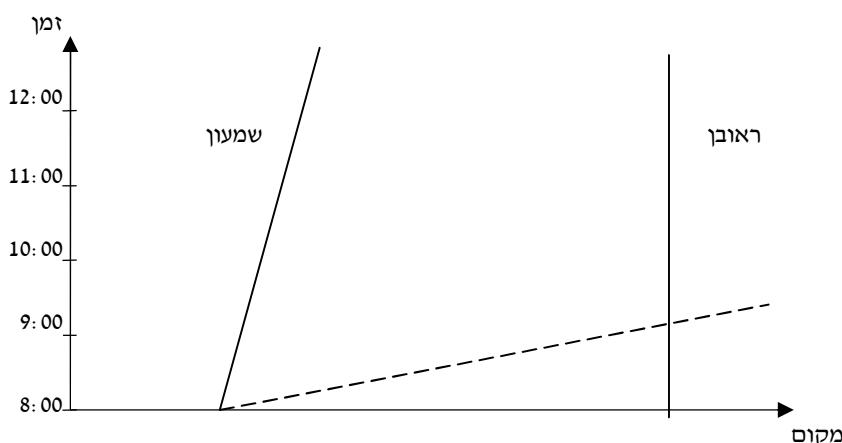
השינוי השני שחוללה היחסות במושג הזמן הוא עמוק יותר. כדי להבין אותו علينا להסביר כיצד מינקובסקי, אבל תחילתה בספר משחו על האיש שעלהשמו קריי מרחב זה. הרמן מינקובסקי היה מתמטיקאי ב-ETH ב策里יך בתחילת המאה, והוא לא רואה נתת אחד הסטודנטים שלו שנראה לו עצנן, ושםו היה במקרה אלברט איינשטיין. עברו שנים ומינקובסקי שמע שאותו בחור עצנן פיתח תורה ששמה תורת היחסות. מינקובסקי התלהב מאוד מהתורה החדשה וחיש-מהר מצא דרך לייצגה באופן גיאומטרי. תארו לעצמכם, אמר, עולם דו-ממדי שנشرط אותו כך שהᾶם השלישי שלו הוא הזמן. בעולם כזה, "העתיד" פירושו "למעלה" ו"ה עבר" פירושו "למטה". אם כך, הרי כל עצם נקודתי בעולם זה יתוואר עצם דו-ממדי, קרי, קו, המתמשך מה עבר אל העתיד (תמונה 1). קו זה נקרא "קו-העולם" של הנקודה. עכשו ניתן לראות שהקו מכיל את ההיסטוריה של הנקודה: אם בשעה 9:00 הקו מתעקל לימין ולאחר כך מתישר, פירוש הדבר שהנקודה נעה ימינה עד השעה 10:00 ואחר כך נעצרת. באותו דומה ניתן לראות כי בשעה 11:00 החל הנקודה לבוע שמאליה וחזרה למקומה המקורי. באותו האופן, צורות דו-ממדיות כעיגול וריבוע יתווארו כיריעות תלת-ממדיות בצורת גליל ומנסחה המתמשכות מה עבר אל העתיד.



תמונה 1

החשוב בתיאור זה הוא שכל צופה רואה את המרחב-זמן בהתאם למצב תנועתו. נדגים זאת ע"י מרחב מינקובסקי פשוט (תמונה 2), שבו ניצג כל אדם ע"י נקודה. הקו היישר מימין הוא קו-העולם של רואבן, ונitinן לראות על פי שרואבן עומד כל הזמן במקומו. הקו השמאלי, לעומת זאת, הוא קו-העולם של שמעון וממנו ברור ששמעון נע ימינה.

כבר מבט ראשון אנו רואים כי במרחב מינקובסקי אין זכר לזרימת הזמן: כל הרגעים קיימים יחד, ממש כמו שכל המקומות קיימים מbehינתנו יחד. אבל אפילו אם נתעקש ונצבע על נקודה מסוימת בזמן, למשל על השעה 8:00 בבודק בחיו של רואבן, נגלה כי מושג פשוט כמו "עכשו" הוא בעיתוי הנה, למשל, שאלה הנראית פשוטה: מהו ה"עכשו" לגבי רואבן בשעה 8:00?



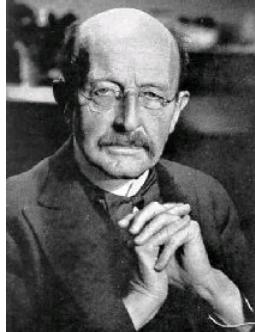
תמונה 2

תשובתו של מינקובסקי – וכאן התרגם הגיאומטרי המדוקיק לטענת היהדות של איינשטיין – היא שה"עכשו" תלוי בנסיבות הצופה. מbehינתו של רואבן זה פשוט: המישור האופקי החותך את קו העולם שלו בשעה 8:00 מייצג את כל האירועים ביקום המתראחים, מbehינתו, בשעה זו.פה אין שום הידוש. אבל כשאנו דנים בשמעון אומרת תורת היהדות משהו אחר: ה"עכשו" של שמעון הוטה בהתאם

למהירותו - הקו המקווקו בתמונה, ולכן שמעון מתلونן שכל השעונים ביקום השתגעו: כל אלה שלפניו האטו את מהלכם בעוד שכל אלה שאחריו החלו למהר, והם הולכים ומזהרים ככל שהם מרוחקים יותר!

כמובן שהתווצה האמור חלש מאד ב מהירותם שאנו מרגלים בהן ביום יומ, תורה היחסות קובעת שהשינויים יתחלו להיות מורגשים רק כאשר המהירות מתקרבת לזו של האור. לכארה, זו רק אשליה אופטית: כאשר רץ לקראת שעון ב מהירות עצומה, אורות האור הבאים מאותו שעון יהדרו לעיניו בתדרות רבה יותר וכן יהיה נדמה לו שהשעון ממהר. כך גם לגבי השעונים שאחריו: אותן האור ה"רודפים" אחריו יגיעו לעיניו בתדרות נמוכה יותר וכך יהיה נדמה לו שהשעון מפגר. אבל כאן בא הוראה היחסות ומודיעת: זו לא אשליה אופטית. השעונים **באמת** י מהרו ויפגרו לעומת שעון של שמעון! רוצים הוכחה? בבקשתה: כשהיפוך שמעון את כיוון תנועתו וישוב לבתו תתaffle התופעה והשעונים שלפניו יתחלו להיאץ בעוד שעון הששאותיר מאחריו יתחלו לפגר. אבל – זהה "אבל" חשוב – ההאצה של השעונים שבביתם שמעון בחלק השני של מסע (הזהרה הביתה) תעלה במעט על הפיגור שפיגרו בחלק הראשון (היציאה לחיל). לכן, סך-כל השינויים האלה צריך להיות האצה "נותו". אשליה אופטית? התהכמוניות לוגיות? המדובר בתוצאה פיסיקלית: כשהיזוז שמעון למקוםו יגלה שעון מפגר ביחס לשעונים שהשואיר אחריו בביתו. שיימו לב שאין מדובר כאן רק בשעונים אלא גם בזמן עצמו. כמובן, אם הנסעה הייתה מהירה ו/או אם שמעון בילה בה זמן רב, הוא יגלה שהוא צעריר בהרבה מכל הزادותים שהשואיר אחריו!

העובדת שמיישור ה"עכשו" מוטה בהתאם ל מהירותו של הצופה אומרת משהו חשוב על המרחב והזמן: הם יכולים להתערבב זה בזה. חשבו, למשל, על האורך והרוחב של עצמו כשלשונו. הרי "אורך" ו"רוחב" הם, בסך הכל, מדדים שרירתיים: רשאי אדם להטוט את סרגלו לכל כיוון שיתחשק לו ולהכריז עליו כ"אורך", בתנאי שה"רוחב" יהיה מאונך לו. ה"אורך" של צופה אחד הוא, אם כן, תערובת של ה"אורך" וה"רוחב" של צופה שני. באופן דומה, ה"זמן" וה"מרחב" של צופה אחד הם תערובת של ה"זמן" וה"מרחב" של חברו הנע ב מהירות שונה.



פלנק מושחרר שד קטע]

אין בעולם דבר מסוכן יותר מאשר לנסות לדלג מעל תהום בשתי קפיצות.
לOID ג'ורג'

מהפכת הקונטנים הchallenge בידי אדם שישום דבר לא היה יותר רחוק ממנו מאשר מהפכות, גרמני פדנט מהסוג שהולך לישון רק בכhtonת-לילה או מקסימום בפיג'מה ועובד מעבר החזיה גם כשהכבבש ריק, וכל חפצו הוא להבין למה משווות ה--- המעכבות הוזה נתנת אינסופים כשהיא מתקרבת לתהום האור הסגול. שם האיש הזה מקס קרל ארנסט לודוויג פלאנק (1858-1947). ביום אחד, כשהלך עם בנו הקטן ברחוב, לא התAFXק ואמר לו: היום גיליתי משהו שהוא התגלית החשובה ביותר מזו ניווטן.

מכאן מתקדם הסיפור בשני מישורים. במישור המדעי אכן תתריר התגלית ככל פחות מאשר תחילת סופה של הפיסיקה הקלסית. במישור האישי זו תהיה אחת הטרגדיות האיוומות בתולדות המדע שתבייא כליה על משפחתו של פלאנק, כולל על הילד הנחמד ההולך לצדוו. בואו נתחיל בסיפור המדעי.

יש קשר, כך גילו ---, בין צבע האור לבין החום שהוא יוצר. לפני שנמשיך, חשוב שנדע לא להתבלבל בין האנרגיה של הקרינה לבין החום שהיא יוצרת בגופים שבהם היא פוגעת. גלים אלקטרומגנטיים יכולים להגיב עם משטה בשלושה דרכי: לחדור דרכו כמו שאור עבר דרך זכוכית, להיבלע על-ידיו כמו שהוא נבלע בגוף שחור, או להיות מוחזרים ממנו כמו האור מהראי. גלים קצרים כמו האולטרה-סגול אנחנו די שkopים, لكن הם עוברים דרךנו בלי לחם אותנו ורק עושים לנו נזקים ברמה המולקולרית. ההיפך קורה עם האור האינפרא-אדום: למורות שיש בו פחות אנרגיה מבואר הנראה, הוא נבלע כולם בגופנו ומהם אותנו יותר מהאור הנראה.

עששו, כשמדנו להבדיל בין חימום לבין אנרגיה, הקשר בין אורך הגל האלקטרומגנטי לאנרגיה שלו זה: ככל שהגל קצר יותר כך האנרגיה שלו גדולה יותר. לאור אדום, למשל, יש גלים ארוכים ולכן הוא יוצר פחות חום מאשר האור הכחול, זה הנפלט למשל מהבת הגז, שאורך גליו קצר יותר, ועל כולם עולה האור הסגול, שגליו הם הקצרים ביותר בתחום הנראה ולכך נושאים אנרגיה גבוהה יותר. קיימים אורכי גל נוספים בתחום הלא נראה, כמו האולטרה-סגול שיש לו יותר אנרגיה אפילו מהסגול, ובהמשך רנטגן וכך הלאה עד לקרני הקצירות והקטניות ביותר. כך גם מהצד השני יש גלים ארוכים יותר מהאדום: האינפרא-אדום וכן הלאה עד גלי הרדיו. האנרגיה שקרינה האלקטרומגנטית עולה ביחס הפוך לאורכו הגלים שלו.

אמרו אנשים: בואו נמצא נוסחה המתארת את היחס הזה. הנה למשל:

יפה, אבל הנוסחה הזאת

הכל הסתדר נפלא!

תלמידו של מיעודנו הלמהולץ

1.15 א' ו' ב'

איש טוב היה פלנק, הגון ואוהב. הוא נולד למשפחה השובهة של פרופסורים ושותפים. כמו איינשטיין גם הוא היה מוסיקאי מוכשר. בצעירותו למד נגינה, שירה והלחנה וחשב לפנות לקריירה מוסיקלית, אבל בחר לבסוף בפיזיקה. הפרופסור שלו עז לחשוף מקצוע אחר כי לא נשארו הרבה דברים חדשים לגנות בפיזיקה, ועל כך ענה פלנק שהוא לא מחהש לגנות דברים חדשים אלא רק להבין את מה שכבר ידוע. הוא למד אצל הלמהולץ וקירכהוף, עשה עבודה ניסיונית אחת, החליט שהוא מעדיף להיות פיזיקאי עיוני ומאז התמקד בתרמודינמיקה. החיים לא היטיבו אותו. הוא התאלמן מאשתו מاري בגיל צעיר כשהיא כבר אב לארבעה, וזו נשאה את דודניתה, מארגה, שילדה לו את בן זקוניו הרמן. הבן הבכור, קרל, נהרג במלחמת העולם הראשונה. באותו שנה נפטרה הבית מרגרטה מקריש-דם שבוע אחורי שילדה תינוקת. הבית התאומה, אמה, התהנתה עם האלמן, כעבור שנתיים ילדה אף היא תינוקת ובבדיקנות מקפיאת-דם, שבוע אחר הלידה, חזרה על גורל אחותה. שתי הנכדות היו ונשאו את שמות אמותותיהן.

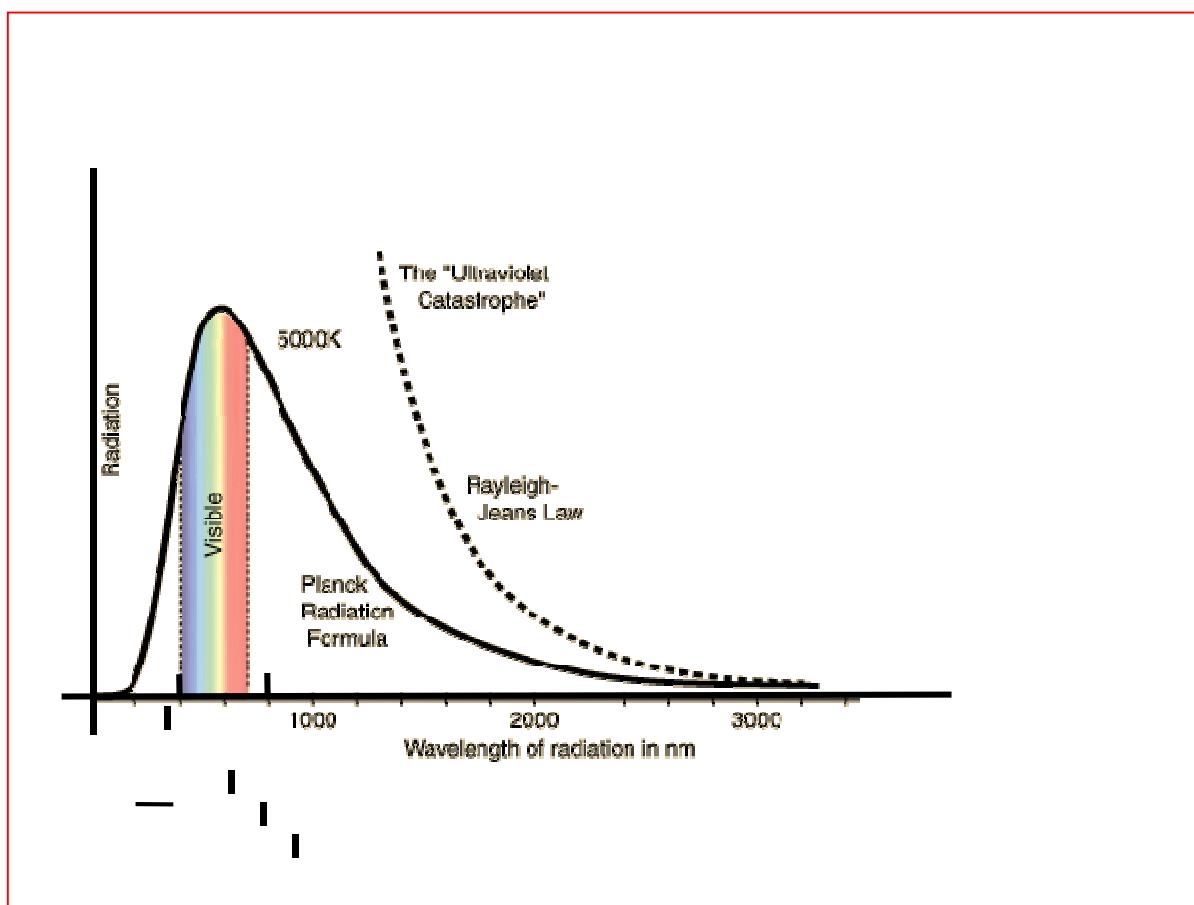
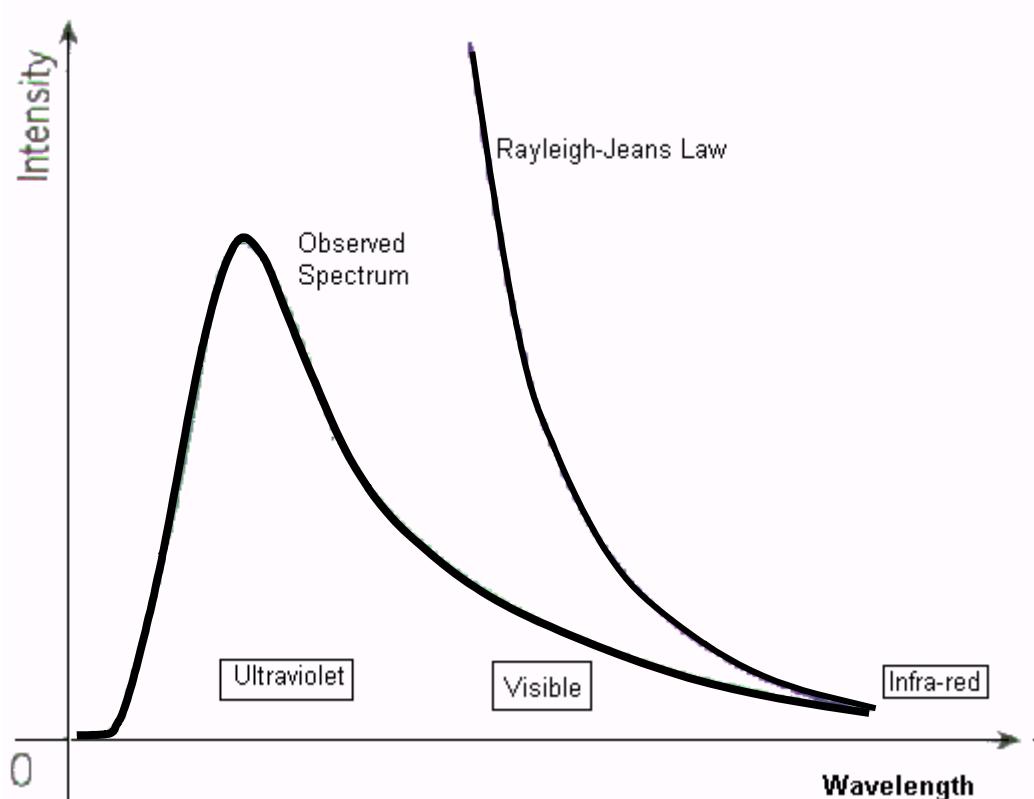
את תגלית הקוונטים גילתה ב-1900 ובמשך כמה שנים עשה כמיטב יכולתו לעקוף את משמעותיה הרחבות בתקופה לשמר את הפיזיקה הישנה. אל איינשטיין התווידע כעורך ה-
== שקיבל את ארבעת מאמריו ב"שנת הפלאות". מאז עקב אחריו בעניין, מתנגד לגילויו הקוונטיים והיחסותיים כל עוד אפשר היה לעשות זאת, תורם משהו לתיאוריות כשלילה משהו עצמו, ומטפח את הכוכב העולה. כשנעשה דיקון אוניברסיטה ברלין השיג את המשרה הנכפסת עבור איינשטיין ב-1914 ומאז נפגשו השניהם תכופות לא רק כדי לעשות מדע אלא כדי לנגן יחד, מסורת בה החל הלמהולץ. יש אמרה מפורסמת של פלנק על ההיסטוריה של המדע: "אמת מדעית חדשה אינה מtabסת בכך שאובייה משתכנעים ומשנים את דעתם אלא בכך שאובייה מתים בהדרגה והדור הצעיר לומד את האמת מההתחלתה." ללא ספק לא ראה את עצמו כיוצא מן הכלל בעניין זה.

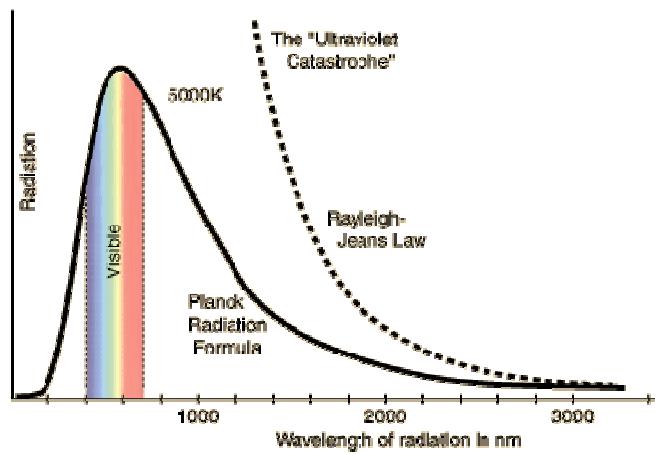
כשלו הנאצים לשלטו ראה פלנק את האוניברסיטה הגרמנית מתרוקנות מהמדענים שברחו מהן (באوها תקופה שאל שר המדע הגרמני את המתמטיקאי הילברט אם המתמטיקה הגרמנית נפגעה מעזיבת היהודים. "הייא לא נפגעה, אדון", באה התשובה. "הייא לא קיימת"). פלנק השיג פגישה עם היטלר בניסיון לשכנעו לא לגרש את המדענים היהודים. בזכרונותיו סיפר איך בסוף השיחה החל היטלר לנוע בעצבות. "אתה יודע מה אומרים עלי? שיש לי עצבים חלשים. השמצות!" צrho היטלר והכה על ברכו. "השמצות!" פלנק מלמל כמה מילים נימוס וברת. לקרואת סוף המלחמה נכשל הקשר המפורסם נגד היטלר והגשטו עצר את ארוין פלנק (אותו ילד ששמע מאביו על גילוי הקוונטים), שכנראה ידע שהוא על הקשר. פלנק, שהוא קשור במיווח לבן הזה, כבר היה שנוא-נפש של היטלר וגבילס בשל תמייתו באיןשטיין, מה גם שהקירה ממשלתית העלה שהוא עצמו היה 1/16

יהודי (לנרד ושאר הפיסיקאים הנaziים כינו אותו "יהודי לבן"). השנה הייתה 1945, סוף הריך השלישי כבר היה קרוב מאוד, ודוקא אז, כפי שאנו הידועים יודעים, הגיע הרצנות הנאצית לשיאם חדשים. פלנק התבשר כי בנו מת במהלך החקירות. הוא ברוח לאזרור הכפר, ובחוודשי סוף המלחמה נאלצו הוקן בן ה-87 עם אשתו ובנם הנוטר להיות בעיר. לעומת זאת כבר סבל ממחלה ---, אבל חוסן גופו (הוא היה מטפס הררים מנוסה) עמד לו, כמו גם הרצון האדיר לראות שחר חדש על מולדתו. היילי בנות הברית סייעו לשלווה לשוב לגטינגן, שם החלו הוא וחבריו לשחק את "מכון קיזור ויללהם" בעיר. אבל הבריטים אסרו על השימוש בשם הקיסר האויל, ולכן נקרא המכון מאז, קרואי, "מכון מקס פלנק". פלנק עוד הספיק לנסוע לבריטניה לנאות ביובל ה-300 להולדת ניוטון ונפטר ב-1947, "מוות של גאולה" לדברי ג'יימס פרנק.

אין דיוקן הולם יותר לפלנק מאשר דברי בן-טיפוחיו, איינשטיין, שכפי שכבר רأיתם היה לו הבנה עמוקה בפסיכולוגיה של המדענים:

זאת ארץ התעלומות. זה עולם שטבשו אנו ניתן לתפיסה על-ידי הכוחות האנושיים לפי מושגי השכל; אנו מסוגלים רק להרגיש את ההARMוניה שלו ואת יופיו, כשהאנו נאבקים בדרכנו להבנתו.
מקס פלנק





.16



השד מבייא את החבר ים של 1

נישתו שיכל, נישתו צוֹס (כשאין שכל, אין צרות)
פטגמ יידי

מי צוחק עכשו, צחוק רע ומאיים, מתחת המצבה המפוארת בכנסייה ווסטמינסטר? כן, הוא ולא אחר, שאפילו בAKER אינו מוכן לסלוח להוק, להאוכנס ולMESSICHם. "גלים, מה? מימי לא ראייתי גל פוגע כלו בנקודה קטנטנה אחת במרקחים עם כל האנרגיה והתנע שלו!" לא נעים. אולי הוא בכל זאת צדק והאור מורכב מחלקיים? אבל אז, איך נסביר את כל הניסויים שהוכיחו חד משמעית את האופי הגלי של האור ושל הקירינה האלקטרומגנטית בכלל?

יש לי רעיון. בואו נעשה ניסוי שיעשה אחת ולהתميد סוף לחלוקת הטיפשית זו. ושיאפשר לנו להתקדם הלאה.

לא היה לאלברט איינשטיין בחיו חבר קרוב יותר מאשר נילס בוהר {N.Bohr}. רגש כמו שהיה לו כלפיו, כך אמר, לא הריגש לפני שום אדם אחר. עם זאת, שני הידידים בלב-נפש אלה חלקו זה על זה בחיריפות בנוגע ליסודותיה של הפיזיקה. השילוב המיחזד הזה, של ידידות אישית חזקה מצד אחד וניגוד קווטבי בהשकפות מצד שני, הוליד את אחד הדיאלוגים המדעים הפוריים ביותר בהיסטוריה. הוויוכוה היה על תורה הקונטנים, שגרמה לאינשטיין ללביד קשה. הוא היה למשה האבא של התיאוריה הזאת, אבל התנכר לה מהרגע שעמדה על רגליה. הכל התחיל באותה שנה שבה היה לו בראש פיצוץ יצרתי אדר, שגרם לו לכתוב שלושה מאמרים שכל אחד מהם פרץ דרך חדשה בפיזיקה. אחד המאים האלה היה מבשרי תורה הקונטנים. אבל ברבות השנים, כשהראה איינשטיין איך תורה שהוא היה אחד מمولדי הולכת ופתחת, בעיקר תודות לבוהר, הוא פחות ופחות אהב אותה וניסה להראות שהיא לא נכונה. הוא נהג מדי פעם לשגע את בוהר בתעלול שהוא קרא לו "גדן-קספרימנט", לומר ניסוי-מחשבה. זהו ניסוי שמעורבים בו מצבים קיצוניים, שבדרך כלל קשה לבצע טכנית, אבל מי שידוע לחשב יכול לדמיין את הניסוי ולנבא נכונה את תוצאותיו. באמנות הזאת היה איינשטיין מומחה גדול, והוא השתמש בה יפה נגד בוהר. יש סיפורים נוגעים-ללב על הוויוכוהים המתmeshכים בין השנים האלה. בוהר היה נראה לעיתים מתרוצץ כאחוז-תזזית בין הפיסיקאים, מספר להם על ניסוי-המחשبة האחרון של איינשטיין ואומר: נכוון שזה מוכרא להיות לא נכון? אז איפה פה בדיקת הטריק? איינשטיין, לעומת, היה מתכנס בשתקה עמוקה, ורק גיחוך קטן מתחת לשפמו גילה את הנאותו. אברהם

פאיס ראה פעם את בוהר מסתובב בפריגסטון, אחרי שלא הצליח לשכנע את איינשטיין, כשהוא ממלמל שוב ושוב "נמאס לי מעצמי". מה יש לומר, היהה לאיש זהה נטיה לקחת ניסוי-מחשבה באופן די אישי.

וכך אמר איינשטיין לחברו: ניקח פנס ונאריר על פני ראי החזי-חדר. אנחנו יודעים מה צריך לזכור: החזי האור יעבור דרך הראי, כמו בזכוכית שקופה, והחזי الآخر יוחזר, ישתקף, כמו בראי רגיל {אייר 1}. ועכשו,نعمם את הפנס: נעשה את האור חלש, ויתר חלש, ויתר חלש, עד שהפנס יפלוט רק פוטון בודד כל כמה דקות. מהו פוטון? זהה הכמות המינימלית של אור היכולה להתקיים, על פי תורת הקוננטים. "קונוטום" פירושו כמות, ותורת הקוננטים מבוססת על עיקרון פשוט: لأنרגיה יש כמותות יסוד שאינן ניתנות לחולקה, כמו החלקיים של החומר. קונוט של אור נקרא "פוטון", ואינשטיין הצעיר, באותוamar פורץ-דרך שהזכיר קודם {ושעליו}, אגב, ולא על תורה היחסות, נתנו לו את הנובל}, גילה שהפוטון מתנהג כחלקיק: כשיורים פוטון לתוך גז, נרתעת אחת ממולקולות הגז כאלו פגע בה גופ, ואפשר להראות שכל האנרגיה והתנע של הפוטון עברו אליה, בשלמות ובלי שום שארית, כמתחייב מהתורת הקוננטים. איינשטיין הצעיר גילה, אם כן, את טבעו החלקי של הפוטון, ואינשטיין המבוגר מנצל עכשו תגלית זו כדי לנגן את בוהר.

כי השאלה הנשאלת כאן היא: מה דינו של פוטון היחיד הפוגע בראי החזי-חדר? כאן אפשר לבחור בין שתי תשובות, בהתאם להשקפת עולמו של המשיב. איינשטיין היה ריאלייסט. הוא האמין שההופעות קיימות ללא תלות בצופה: בין אם ראיינו תופעה או מdidnנו אותה, ובין אם לא היינו שם בכלל, התופעה קיימת. וכן זו הייתה דעתו של איינשטיין לגבי הפטון: או שהפוטון עובר בשלמותו לצד אחד, או שהוא מוחזר בשלמותו לצד השני. גם אם איינו יכולים לדעת איזו ממשית האפשרויות מתרחשת, אחת מהן, בסופה של דבר, מתרחשת באת התשובה החליפית נתן בוהר, וזה הייתה תשובה די מוזרה. הוא טען שתורת הקוננטים יצירה מהפכה בעצם הצורה שאנחנו מסתכלים על העולם. אין שום אפשרות לנבא מה יקרה לפוטון הפוגע בראי החזי-חדר. כל מה שאפשר לעשות הוא חיזוי סטטיסטי: ב50%- מהמקרים הפוטון יחדור לצד השני, וב50%- הוא יוחזר לצד שמננו בא. שימוש לב שני החרבים מודדים שאי-אפשר לדעת לאן יפנה הפוטון, אלא רק לחשב את ההסתברויות לכך שיפנה לצד זה או לאחר. אבל נילס בוהר ממשיך ואומר כאן דבר מוזר מאד: הפוטון, כל עוד לא מdidnנו אותו, נמצא שני צדי הראי באותה מידת.

כאן המקום להזכיר כי בתורת הקוננטים מתואר הפוטון על-ידי "פונקציית-גלאן". אל תיבחו מהמללה זו. זה פשוט בייטוי מתמטי האומר לנו מה הסתברות למצוא את החלקיק במקום או במצב זה או אחר. פונקציית-הגלאן מתארת את מיקומו של הפוטון בכל רגע בצורה של גל, שהפוטון מסוגל להיות נקודה בכל נקודה על פניו. ה"gel" הזה מתפשט כמו גל או רגיל. לכן, כשהוא פוגע בראי החזי-חדר, הוא גם מתפצל כגל או רגיל: החיזיו חודר אל מעבר לראי וחיזיו מוחזר לצד שמננו בא. לכן, בתשובה לשאלת היכן נמצא הפוטון, בוהר השתמש במונח חשוב בתורת הקוננטים: הפוטון נמצא ב"סופרפוזיציה", כלומר, הוא לא נמצא בפוזיציה אחת, כגון הצד זה של הראי או הצד השני, אלא במובן מסוים הוא נמצא בשנייהם גם יחד. רק כשהנדוד היכן הוא, נkirיה אותו להימצא במקום מוגדר. נעמיד שני מכשירי גילוי שני צדי הראי, והיה אם הגלי הימני יעשה "קליק" אותן הוא שהפוטון נמצא בימין, ואם

הגלי הימני יעשה "קליק" אותן הוא שהפוטון נמצא בשמאל. אבל, ואת הנקודה הזאת לא פסק בוחר להציג, כל זמן שלא מדנו את הפוטון, הוא נמצא בשני הצדדים באותה מידה, בעת ובונה אחת.

לאינשטיין כל זה נראה ממש מעורר גיהוץ. הרי המוסכמה הראשונה של תורה הקוונטית היא שאנרגיה באה במנות בדידות, ולכן אין-אפשר לפצל פוטונים. שום ניסוי שבעולם לא יגלה חצי פוטון. הגלי הימני ביותר אנחנו יכולים לבנות יכול לעשות רק אחד משני דברים: או שיעשה "קליק", או פירוש הדבר שהפוטון כולם, הגוף אחד, פגע באותה נקודה בדיק, או שהוא לא יעשה "קליק", מה שהוא שפה פוטון לא עבר שם בכלל. הרי זה, נא לזכור, היה גילוי של איינשטיין הצעיר, שהישובו הראו כי הפוטון כולם, ולא חלק ממנו, פוגע בಗלי.

לכן אמר איינשטיין לחברו: כאן אתה רואה את אי-השלמות של המודל שלך. לסגור למודל מעשה-ידיך כאילו הוא המציאות, זו עובdot-אלילים. אניאמין שתורת הקוונט, כפי שאנונו מכירים אותה, אינה שלמה. יומ אחד נמצא שהוא עמוק יותר בטבע, ואז תהיה לנו תיאוריה מדויקת יותר שתוכל לומר לנו בדיק لأن הלך הפוטון. מה שאתה מכנה "פונקציית- gal" מבטא בסך הכל את הדעת שלנו Q נכוון יותר: את הבורות שלנו Q לגבי מיקומו של החלקיק. אנחנו לא יודעים בדיק איפה הוא, ולכן אנחנו מדמיינים "פונקציית-gal" במציאות קיימים סתם חלקיים, הנמצא במקום מוגדר אחד.

הרעilon שצורך להכנס צופה או תודעה אנושית על מנת לתת משמעות לתופעה פיסיקלית נראה לאינשטיין חוטא לרוח הפיזיקה. מה שייך עניין המדידה למיקומו של הפוטון? האם הוא מכחח עד שנמדד אותו כדי להחליט איפה הוא נמצא? משאלה זאת איינשטיין לשאלות כלויות יותר על טבע המציאות. אם על אי בודד באוקיאנוס השקט נופל אגוז קוקוס מהעץ באמצעות הלילה, האם הוא משמע חבטה? נניח שאין שם מישהו שישמע אותה, האם זה אומר שלא הייתה חבטה, שלא היה קול, שככל האירוע לא היה?

אבל גודלו של איינשטיין הייתה בכך שmedi פעם היה הוא עצמו נתקל בטיעון שה坦אים יותר לשיטתו של בוחר, והוא לא היסס להשתמש בו לטובת חברו. וכך קרה שאינשטיין עצמו הצבע על הוכחה לטענת בוחר, שהפוטון נמצא ביותר מקום אחד: הפוטון יוצר התאבכות. קל לראות תופעה זו במרקחה שלנו. נניח שמשני הצדדים של הראי, שפיצל כביכול את הפוטון לשניים, נעמיד שתי מראות שלמות, לא חצי-חדרות, כך שהן תחרוננה את שני החצאים של פונקציית-gal לכיוון המרכז {כמוון, עוד לא החלנו מהי פונקציית-gal הזאת, אבל אם היא מתנהגת כמו gal-אור רגיל, המראות צרכות להזכיר את שני החצאים}. באותו מקום שבו שני "חצאי הפוטון" נפגשים, נעשה ניסוי שאור 2 מתאר אותו בצורה פשוטה.

כאשר gal פוגש בגל שני, איז, אם שני הгалים נפגשיםシア מולシア ושפלו מול שפל, הם חזקים זה את זה, ואם הם נפגשיםシア מול שפל ושפלו מולシア, הם מבטלים זה את זה. וכמוון יתכנו כל מצבי-הBINIIM שבהם הгалים קצת מחזקים וקצת מבטלים. זהה התאבכות. עכשו, ניצור התאבכות בין שני חצאי הפוטון שלנו: נעמיד בין שני חצאי פונקציית-gal המוחזרים למרכו עוד ראי חצי-חדר, ונעמיד אותו בצורה כזו שгалים הנפגשים מצד אחד ייצור התאבכות מחזקת, ואילו הгалים הנפגשים מצד אחד ייצור התאבכות מבטלת. כדי שנ賓ן טוב יותר את מה שהולך לקרות פה, נזכיר כי אילו העברנו במערכת זו גלי אור

רגילים ולא פוטון בודד, הם אכן היו יוצרים, כמתחיב, או רזק מצד שבו חיזקו זה את זה, ואפלה מצד השני, שם הם ביטלו זה את זה. מערכת זאת נקראת אינטראפטור מאר-זנדר, והיא משמשת הרבה את תחום האופטיקה.

והנה, כשהנעביר במערכת זו פוטון יחיד נקלט דבר מפתיע מאוד: יש התאבכות הפוטון יופיע רק מצד שבו אמרה להיות התאבכות מוחזקת, ולעולם לא מצד שבו צפואה התאבכות מבטלת. תסכימו עתי שהז מצב לא רק מארך, אלא ממש מביך: אם אנחנו רוצחים להשוו על הפוטון בעל עצם שנמצא במקום אחד בלבד כמו העצמים הרגילים Q ספלים, אופניים או ג'ירפות Q הרי עצם זה איננו יכול להתארכ עמו, שכן הוא יכול לעבור רק במסלול אחד: או שהוא עבר בשלמותו דרך הראי החצי-חדיר והמשיך במסלול הימני, והוא מגיע אל נקודת התaabכות עצם ייחד ואין לו עם מי להתארכ, או שהוא הוחזר בשלמותו על-ידי הראי החצי-חדיר, המשיך במסלול השמאלי והגיע מהצד השני לאותה נקודת התaabכות, אבל גם הפעם הוא הגיע עצם ייחד ואין לו עם מי להתארכ. בקיצור, פוטון הנמצא במקום אחד ועובד במסלול אחד אינו יכול להתארכ עם עצמו. אינו יכול? עובדה: הוא מתארכ.

מבולבלים? נבוכים? ברוכים הבאים לתורת הקוננטים. הניסוי כופה علينا את ההכרה כי אכן, כל עוד לא מՃנו באמת מאיהה צד עבר הפוטון, הוא עבר משני הצדדים בעות ובאונת אחת. אם כך, מתרבר שהמודל הסטטיסטי שנראה לנו לקרי, לא שלם, דוקא הוא מתאר את המציאות באופן עמוק מאוד.

איינשטיין הסתווב סביר החידה הזאת כמו, להבדיל, חתול סביר פה אשפה סגור. הוא ניסה לתקוף אותה מכל צד אפשרי, כי הדבר נראה לו אבסורדי לגמרי. האבסורד קשור בעוד מאפיין מרכזי בתורת הקוננטים, והוא הדואליות {כפל-פנימ}. מהו הפוטון? האם הוא חלקי או גל? כשאני עושה ניסוי על מנת לגלות את מיקומו של פוטון, אני שם גלאים במקומות שבהם הוא יכול להימצא, ולבסוף אחד מהם מגיב לכל המאסה וכל האנרגיה של הפוטון. אם כן, זהו חלקי שפגע בנקודת אחת בלבד. אבל כאשר אני עושה ניסויים בתaabכות או בעקיפה, מתגלה שהפוטון מתרפש למרחב, עוקף מכשולים, מתארכ עם עצמו, בקיצור: גל. אבל אולי, אם עשה ניסוי שבו מתגלה הפוטון כגל, נוכל לגלות גם את תוכנותיו החלקיות? כאן אנחנו נתקלים בעוד עיקרון יסודי של תורה הקוננטים, עיקרון אי-הוזדות, והוא אומר כך: תשכחו את מה שאתה רגילים לו בפיסיקה הקלאליסטית, שבה אפשר לקחת כל גוף ולמדוד את המשקל ואת המיקום ואת המהירות ואת התנע שלו, בו-זמנית, בכל דרגת דיוק שנרצה. בעולם החלקיקים התת-אטומיים, שבו שלטת תורה הקוננטים, קיימים זוגות רבים של גדלים שמתוכם אפשר למדוד רק גודל אחד בכל מדידה. מדידה זו גורמת שלא נוכל לדעת שום דבר על הגודל الآخر. כך, למשל, ניתן לקבוע בדיוןות את מיקומו של חלקי, אבל אז אנו מ Abedים כל ידיעה לגבי התנע שלו, ולהפוך. הוא הדין בקשר לטבעו של הפוטון. רצונכם למדוד את תוכנותיו החלקיות? בבקשתה, אבל אז הוא יאנדר להלטין את תוכנותיו הgalיות. ואם תרצו למדוד את תוכנותיו הgalיות, עליכם לוותר על כל ידיעה בדבר תוכנותיו החלקיות.

אמר איינשטיין: הבה נתהכמה לו. נעמיד על כל מסלול אפשרי של הפוטון גלי חלש מאוד, זהה שאינו בולע את הפוטון אלא עושה "קליק", אפילו קיבל ממנו רק דחיפה קלה.

נראה איזה גלאי עשה "קליק", ואז נדע באיזה מסלול עבר הפוטון. בכך נמדד את המיקום שלו, ואחר כך, כשבחן את דגם ההתאככות, נמדד בכך גם את התנוע שלו וכך נפר את עקרון אי-הוודאות. בוهر מיהר להוכיח לו שאמן אפשר לברר היכן עבר החלקיק מבלי לעזרתו, אבל אז Q כמה מרגיז תירס תרומות ההתאככות شهرתי, אם גילינו היכן עבר הפוטון, מדדנו תכוונה חלקית במהותה, ואז תיעלם התאככות, שהיא תכוונה גלית מובהקת.

הපראأدוקסים האלה מטרידים אותנו כאשר אנחנו מדברים על חלקיקים, אבל אי-אפשר להגביל אותם רק לעולם המיקרוסקופי. זאת ידוע מניסוי-מחשבה שהציג עוד אחד מאבות תורת הקוונטים, ארווין שרדינגר {E.Schrodinger}: נניה שבתווך תא סגור לחלווטין נמצא חתול, ולידו מכשיר הפולט גاز ציאניד ומופעל על-ידי התפרקות של אטום רדיואקטיבי. על פי תורת הקוונטים, כל עוד לא מדדנו את האטום הוא בסופרפויזציה, כלומר במצב של "התפרק" ולא התפרק" כאחד. לפיכך, צריך גם המכשיר להימצא בסופרפויזציה של "פעל" ולא פעל, היציאניד Q בסופרפויזציה של "התנדף" ולא התנדף, וכן החתוול Q בסופרפויזציה של "חי" ו"מת". כמובן, איש מאמין לא ראה אי-פעם חתול בסופרפויזציה. אבל בתורת הקוונטים אין שום סיבה שלא יהיה מצב כזה כל עוד לא נעשה הסתכלות בחתול, או לפחות כל עוד לא נוצרה אינטראקציה בין העולם החיצוני. מכאן, מצב הסופרפויזציה, כאמור הימצאתו של עצם בשני מצבים מנוגדים, יכול להשפיע באופן עקרוני לא רק על חלקיקים, אלא גם על גופים מאקרוסקופיים.

תאמרו: אם נפתח את הקופסה לאחר כמה ימים, נוכל לדעת אם החתול היה חי או מת לפני ההסתכלות, שכן אם הוא היה מת, תהיה גופתו במצב של התפוררות. טעות: עיקרון הסופרפויזציה חל לא רק על מצבו של החתול ברגעו פתיחת התא והסתכלות בו, אלא על כל ההיסטוריה שלו בתקופה הניסוי. את זאת למדנו מ"ניסוי הברירה המאוחרת" שתיארנו לעיל. הסתכלותנו בחתול קובעת באופן רטרואקטיבי את מצביו בעבר.

חברים, תהוכנו להפתעה לא נעימה: כל Q ואני מתכוון: כל מה שסבירנו, הוא אנאולוגי לחתוול של שרדינגר. כי מה מיוחד בניסוי החתוול של שרדינגר? זהו המצב שבו לאירוע קוונטי יש תוצאות מאקרוסקופיות. אבל זה המצב לגבי היקום כולו על פי הקוסmolוגיה המודרנית נוצר היקום, עם כל החומר והאנרגיה שבו ועם המרחב והזמן עצמו, בפיוץ אדריך הקרוי "המבחן הגדל". במלים אחרות, כל היקום החל מנקודה בעלת גודל אפסי. כיוון שהוא נקודה הייתה זעירה לאין שיעור, הרי על פי כל מה שמדנו שלטו בה חוקי תורת הקוונטים. אם כך, הרי אותה ראשית זעירה-לאין-שיעור של היקום חייבות היה להיות בסופרפויזציה. אם כך, כיצד נעשתה ה"מדידה" או ה"הסתכלות" או ה"אינטראקציה עם העולם החיצון" שהעבירה את המצב הלא-מוגדר למצב מוגדר? מי היה הצופה?

יש יותר מדי שאלות בסיפור הזה, ותשובה של ממש עוד אין. עם הבעייה הזאת נצטרך להיות מעתה בכל פעם ש"נשטוף את העיניים" במראה יפה או נתמסר לקרני המשמש על שפת הבריכה.azor, שהתרגלו לנו כמשהו די פשוט, מתגללה עכשו כוסף של ישויות זעירות לאין-שיעור Q וביעילותות אותה מידת. כל פוטון יוצא לדרך כמו גל, שעליו נמצא הפוטון בדרך כישופית כלשהיא בכל הנקודות בעט ובעונה אחת, אבל ברגע שהgel הווה פוגע

בעצמים שבדרךנו, "מחליט" הפטון לhimself כולם באחת הנקודות האלה ולהיעלם לחלווטין ובן-רגע מכל המקומות האחרים. גרווע מזה: ההחלטה הזאת קובעת באופן רטרואקטיבי את ההיסטוריה הקודמת של הפטון מאז שיצא בדרךו אלינו. כמעט אמרתי שתורת הקונטנים שופכת אור חדש על טבע המרחב והזמן, אבל עכשיו אני שם לב שכבר אני יודע מהו אור.

פרק ג.

להיות בהרבה מקומות בזמן אחד

כמו ניסויי-מחשבה שבuzzותם הביך איינשטיין את בוהר

{וועוד הרבה אנשים}

בפרק הקודם הכננו את רצונו למחולקת בין שני ענקים. איינשטיין היה ריאלייסט, שהאמין שהתופעות קיימות בלי קשר למה שעשו השופה, או אפילו לקיומו של צופה כלשהו. הטענה שהצופה עצמו קובע את אופי המציאות נראית לו, למעשה, נובעת מהמחשבה מוגזמת של ה"אגו" שלנו. את השקפת-עלמו ניתן לתמצית בכלל אפסטומולוגי נפלא שמאיה תלמוד {סוטה כ"א} בתשובה לשאלת אイוב "והחכמה מאין תימצא?" אומר ר' יוחנן: "אין דברי תורה מתקיים אלא למי שימושו עצמו כמו שאינו".

מנגד עמד בוהר, בעל הגישה הפיזיטיויסטי. הוא היה כועס אילו שמע אותנו מגדרים אותו כך, כי בין הפיזיטיויסטים והאידיאלייסטים והקומפלמנטריסטים יש מריבות גדולות על הגדרות, אבל אותנו זה לא צריך להטריד. לעניינו, בהגדרת הפיזיטיויסם כוללים כל אלה שאינם ריאלייסטים, כאמור, אינם מאמינים שיש קיום לתופעות ללא צופה שיצפה בהן.

ראינו את איינשטיין מKENNT את חברו בניסויי-מחשבה שהפכו את שאלת קיומם של עצמים שטרם נצפו לשאלת בוערת בפיסיקה המודרנית. בוהר כMOVEN לא היה קוטל קנים, ועל כל ניסוי-מחשבה שזרק לו איינשטיין השיב תשובה שנונה. אבל אחד הניסויים האלה הותיר את בוהר פעור-פה זמן רב, וברבות השנים הפך לפאראדווקס מרתתק. לפני כמה שנים הצליחו להפוך את ניסוי-המחשבה הזה לניסוי ממשי, שעוד חידד את הבעה. ושוב נשתמש בסיפור מהחיים כדי להסביר את הפאראדווקס.

זכרים את הסטטיסטיקי ואשתו, שמתוך הריב שלהם על מחצית המאה הגענו אל שאלות-היסוד של תורת הקונטנים? בוואו נלק אליהם שוב. הם השלימו בinityים וגם נולדו להם תאומים. כבר כשהיו שני התאומים האלה קטנים מאוד התעוררו בעיות קשות בחינוכם: הם השתוללו כל היום, והוריהם הרגישו שהם מוכרכחים לקבל מהם חופש פעמי שבוע. לכן, בכל שבת, נהגו להפריד אותם זה מזה ולשלוח אותם אל סבא וסבתא. היו להם שני זוגות כאלה של סבא וסבתא: זוג אחד גר בירושלים והשני בחיפה. ההורים והתאומים עצם גרו בתל-אביב. וכך, בכל שבת היה תאום אחד נשלח לבנות עם הסבא והסבתה שבירושלים ואחיו היה נשלח אל זוג הסבים שבchiaפה, ולהוריהם היה קצר שקט.

והנה, במרוצת השבועות וכוחו גם הסבים והסבות שההתאומים מפונים, קפרייזים ומאוד לא צפויים. התברר שהדרך היחידה להרגיעם היא להציג להם גליה. הבעה הייתה שם היו מגיבים רק ל غالיה אחת מתוך שלושה סוגים: שוקולד, וニיל או תות. והתבררו עוד כמה דברים מעצבים: אי-אפשר להזות את התנוגות של תאום אחד בקשר ל غالיה מסוימת. אם בשבת אחת, כשהוזעה לו גליה שוקולד, הוא אמר בהתלהבות "כן", הרי בשבת הבאה היה

אותו זאטוט מסוגל לברוח מאותה גלייה בצריחות-אים. ועוד גילוי מצער: בכל שבת ניתן היה לשאול כל אחד מהתאומים רק על גלייה אחת. אם שאלו אותו אם הוא רוצה גלייה מסווג אחד והוא ענה, בהתלהבות, "כן", או, בגועל-נפש, "לא", לא ניתן היה עוד לשאול אותו במשך כל השבת על שום גלייה אחרת.

כך התנהלו העניינים במשך כשנה. בכל סוף-שבוע נסע כל תאום פעם ל Sabha וסבתא האלה ופעם ל Sabha וסבתא האלה; בכל פעם הציעו להם גלייה אחת מבין השלוש ובכל פעם השיבו מה שהשיבו. והנה בא יום ההולדת של התאומים ושני זוגות הסבא וסבתא מירושלים ומהיפה באו לבקרם בתל-אביב, והתברר שהם רשמו לעצם יומן על התנהגות נגידיהם ביחס לגלייות שהם הציעו להם. כשהשוו את הרשימות האלה, לאמר: איזו גלייה הוצאה לכל תאום בכל שבת ומה השיב, התבררו כמה דברים מפתיעים. ראשית, הייתה קורלאציה {התאמה} מוחלטת בין תשובותיהם של התאומים בהם לבין גליות. כלומר, אם Sabha וסבתא שבחיפה שאלו את התאום שהוא אצלם אם הוא אוהב גליית תות, והוא אמר "כן", ובמקרה גם Sabha וסבתא שבירושלים שאלו באותה שבת את התאום השני אם הוא אוהב גליית תות, איזי גם הוא אמר "כן". והוא אם הראשון אמר "לא", גם השני אמר "לא". חשוב להדגיש שסוג הגלייה שהוצאה לתאומים היה אكري לחולו: כיוון שתשובתו של כל תאום לגלייה הייתה בלתי צפואה, מצאו עצם הסבא וסבתא, בכל שבת, קונים להם באكري את משלוש הגליות האלה, מפני שככל ניחוש היה טוב כניחס אחר, ואפשר היה רק לקוות שהפעם יאהב התאום את הגלייה הזאת. כך או אחרת, הנה מתברר שלמרות חוסר היציבות הבולט בהתנהגות התאומים, דזוקא הייתה קורלאציה מדוקית בין תשובותיהם בכל פעם שהציעו להם אותה גלייה. איך אפשר להסביר את זה? פרץ ויכוח בתוך אותה משפחה, צפוי, וכל אחד צידד בהסבר אחר.

והנה עבר נילס בוור באוטו רחוב, שמע את המולה מן המרפא שמעליו ועלה למלחה לברר על מה הוויוכה. הם הסבירו לו. בוור חשב הרבה, ינק מקטרתו והצעה תשובה מאוד מעניינת: תראו, אתם מניחים הנחה מטאфизית שנייה לא מוכן לקבל. אתם מניחים שלפני ששאלתם את התאום איזו גלייה הוא אוהב, כבר הייתה לו נטייה מסוימת לאחת הגליות. אבל איך אתם יכולים לדעת על גודל שטרם צפיתם בו או מדרתם אותו? כמובן יותר יהיה לחשוב על המצב הזה במונחים של תורת הקונטנים, ככל מר/distancia תואם היה מצב לא-מוגדר ביחס לכל אחת מהגליות האלה: כל עוד לא שאלתם אותו, הוא גם אוהב וגם לא-אוהב גלייה תות; אוהב ולא-אוהב גליית וניל; אוהב ולא-אוהב גליית שוקולד. בקיצור, הילד בסופרפוזיציה. רק השאלה שלכם אם הוא אוהב גלייה מסוימת, כלומר: עצם המדידה שאתם עושים עליו, מאלצת אותו לעבור מהמצב הבלתי-מוגדר אל המצב המוגדר של אהוב לא-אוהב.

בוור המשיך ופיתח את ההסבר שלו בהתלהבות: שימו לב שאנו רואים כאן גם את פעלותו של עקרון אי-הודאות: איןנו יכולים לדעת יותר מוגדל אחד בעת ובעונה אחת. כאשר שאלתם בשבת אחת לדעתו של הילד לגבי אחת הגליות Q וניל או שוקולד או תות Q איבדתם את הסיכון לדעת באותה שבת על יחסיו כלפי גלייה אחרת. ההצעה משנה את המערכת הנכפית.

מכאן, המשיך בוחר, משתמעת מסקנה מהפכנית: אם יש קורלאציה בין שני התואמים, ככלומר הם נותנים תשובות توאמות, אני מסיק מכך שהם משפייעים מרחק זה על זה. שניתם יוצאים מביתם בסופרפויזיה, ככלומר אוחבים וושונאים גם יחד כל אחת מהgelidot. והיה כאשר נשאל הילד בעיר אחת על יחסו לאחת הgelidot, הוא עבר ממצב של סופרפויזיה למצב מוגדר. בו ברגע, אליו התאום שבעיר האחרת עבר גם הוא לאותו מצב מוגדר ביחס לאותה gelida. ההתאמה בין התשובות נובעת אם כך מקיים של קשר מסתורי ביניהם. כשאחד מהם נשאל שאלה, והשאלה הזאת גורמת לשינוי במצבו התודעתי, מתחולל שינוי זהה מיד באותו רגע באחיו הרחוק.

שמעו האנשים ומהו אל לבם, ומאוד התרגשו מההסבר הזה: הנה, מתרברר שבין המזיקים הקטנים יש קשר טמיר ונעלם הגורם להם להיות קשורים זה לזה גם כשם רחוקים זה מזה. עוד הם מדברים, ובאותו רחוב עבר גם איינשטיין. הוא שמע את המולה, נשא עניין למרפסת וראה את חברו יושב בכינוס המשפחה. והוא אמר לעצמו: אווי, בוחר שוב מבבל לצייר את המוח עם הטענות שלו על "דברים שלא קיימים לפני שצפו בהם"ומי יודע מה עוד. צריך לעלות לשם ולהבהיר את הדברים. עליה גם הוא למעלה, דפק על הדלת ואמר: שלום אנשים טובים. על מה מדברים פה? הם סיפרו לו, ואיןשטיין, הריאלייסט, איש השכל היישר, אמר: חברים, איך אתם יכולים להאמין בדברים האלה כאשר יש לכם הסבר הרבה יותר פשוט? הרי שני הילדים האלה יצאו באותו בוקר מאותו בית בתל-אביב. למה להניח שקיימות ביניהם השפעות מסתוריות מרחק, כאשר אפשר פשוט להניח שבאותו בוקר הם נדברו ביניהם לפעול על פי חכנית מוגדרת במסגרת מלחמת התשה שלהם נגד הסבים והסבתות? יתכן, למשל, שבאותו בוקר הם אמרו זה לזה: היום נאמר "כן" לוונייל, "לא" לhtonot ו"לא" לשוקולד, או כל צירוף משולש אחר של "כן" ו"לא". ואם כך, מה הפלא שהם מציגים קורלאציות כאלה? שוב פרץ הויכוח היישן בין שני החברים במלוא עוזו ו איתם נחלקה המשפחה כולה Q וברקע הקימו התואמים רעש מהרייד.

לוויוכוח הזה לא היו שום תוצאות. אף אחד מהצדדים לא היה יכול לשכנע את רעהו, וכך מתחיל פרק מעניין. אני רוצה להציג את הפרק הזה, מפני שהרבה ספרים על תורה הקונוטיים אינם מתייחסים כראוי לחלקו של הגאון הצעיר שעלה לאוთה מרפסת והעז להשמיע חידוש בmundus שני גdots הדור. זה היה הפיסיקאי האירי ג'ון סטיווארט בל {J.S.Bell}. הוא הראשון שהצליח להפיק את הבעה מתחום הפילוסופיה ולהפוך אותה לשאלת פיסיקלית שאפשר לחת עליה תשובה על ידי ניסוי. בל הבחן ראשון בעובדה שההכרעה בין שתי הגישות היריבות חורגת קצת מן המוקם שבו מיקדו עד אז את הדיון. עד אז התמקדו רק במקרים שבהם נשאלו התואמים שאלות זרות, ככלומר: ניל-וNIL, שוקולד-שוקולד וחותות-חותות, והתפعلن מההסכם שיש ביניהם, ככלומר: כן-כן ולא-לא. והנה, בל שאל שאלה חדשה: מה בנווגע לקרים שבהם נשאלו התואמים על גליות שונות, כמו שוקולד-וNIL, וNIL-חותות וכן הלאה? לכaura זה לא מעוניין, מפני שאנו חנו לא מצפים למצוא הסכמה בקרים אלה. אבל בל שם לב לעובדה מעניינת: אם יש לתואמים תוכנית כלשיי מראש, שעל פיה הם הסכימו ביניהם איזו תשובה הם יתנו לכל גליה, איזי, בכל אותםקרים שבהם נשאלו לגבי גליות שונות, חייב להיות מספר גדול יותר של הסכומות מאשר אי-הסכומות.

ברעיון זהה, שמייד נבין איזו משמעות מהפכנית יש לו לגבי השאלה שלפנינו, יוכל כל אחד מכם להיווכח אם יעשה בעצמו את התרגיל הבא: שיכתוב לעצמו שורה של חמישים "תוכניות", ככלומר, שלישיות של תשובות כמו כן-כן או כן-לא-כן וכדומה {התוכניות יכולות להיות זהות או שונות}. ואחר כך, באופן אקראי ובALTHI-תלי, שיבחר חמישים זוגות של טעמי גילדות מבין השלוש שאוון בוחנים. וכך, לבסוף, הוא יפעיל חמישים תוכניות על חמישים זוגות אקראים של שאלות. תתקבלנה שתי רישימות של תשובות. כמובן, בכל המקרים שבהם היו השאלות זהות, ככלומר, אותן גילדות, תהיה התשובה זהות. אבל oczywiście, שיבורר את המקרים שבהם נשאלו התאומים שאלות שונות ויראה אם יש יותר הסכמאות {כן-כן או לא-לא} מאשר אי-הסכמאות {כן-לא או לא-כן}. מהtagלית המתמטית של בל מסתבר שהתוצאות מציאות לכל פשוט: כאשר התשובות נקבעות על-ידי תוכנית מוכנה מראש, אז, בהתאם מקרים נשאלו צמד שאלות שונות, הייבים צמד-התשובות לחת יותר הסכמאות מאשר אי-הסכמאות.

עם התגלית זוית יכולים אנו, יחד עם כל, לאזר אומץ ולעולות אל אותה מרפסת שבה שקוועים שני החברים בוינכה שלהם. מה אנחנו צריכים לעשות הוא לבקש את המחברות שבهن נרשמו תשובות התאומים במהלך כל השבתות. הפעם לא נתעכט על התאמת המפליהה בין התשובות בכל המקרים שבהם נשאלו התאומים שאלות זהות, אלא לבדוק את אותם המקרים Q והם הרוב Q שבהם היו השאלות שונות. האם יש בין התשובות יותר הסכמאות או אי-הסכמאות? עכשו אנחנו יודעים שאם נמצא יותר אי-הסכמאות אז לא יתכן שההתאומים השתמשו בתוכנית מוכנה מראש. במקרה כזה ניאלץ להודות כי אחת משתיהם: או שני התאומים ידעו מראש בכל בוקר איזו גליה סבא וסבירא יציעו להם, ככלומר, הם בעלי כושר נבואי, או, להלופין, כל תאום מסוגל לדעת באופן טלפטי איזו שאלה שואלים את אחיו בעיר אחרת וגם איזה תשובה נתן האח, כדי לחת את התשובה ההיפוכה, במקרה שהם נשאלו לגבי שני טעמי שונים.

לשמחה בוחר ולמגינט-לבו של איינשטיין, נגלה שיש יותר אי-הסכמאות מאשר הסכמאות. מדוע אנחנו משחקים כאן בתאומים ובגילדות? פשוט, כי מהמשל הזה קל לנו לעבור לדוגמה. הנמשל הוא ניסוי-מחשבה מפורסמת שהתרפרס ב-1935 - והפק לפני שנים אחדות לניסוי אמיתי. זהו ניסוי איינשטיין-פודולסקי-רוזן, הידוע בראשי התיבות EPR, על שם ממציאיו {נתן רוזן הוא כיום פרופסור אמריטוס בטכניון}. אציג כאן את הניסוי בצורה המודרנית שפותחה על-ידי דיבויד בוהם ואחרים. ובכן, במקום שני התאומים היוצאים מטל-אביב נחשוב על זוג פוטונים הנפלטים יחד מאטום אחד לכיוונים שונים עד שהם מתרחקים מאוד זה מזה. תנאי הניסוי מהיבים שהפוטונים יהיו בעלי קיטוב זהה. מהו קיטוב? אם תחשבו על גל-האור, הרי תנודתו יכולות להיות בכיוון למעלה-למטה, ימינה-שמאלת וכו'. כיוון התנודות האלה הוא הקיטוב, זכוכית מקטבת מאפשרת רק לאור בעל קיטוב מתאים לעבור דרכה. על פי תורת הקוונטים, הקיטוב הוא גדול בדיד ולא רציף, ככלומר, בכל כיוון שבו נציב זכוכית מקטבת לפני פוטון יחיד, נקבל אחת משתי תשובות: או שהפוטון עבר לחלווטין או שהוא נחסמ לחלווטין. במקרה שלנו, הפוטונים הם בקורסואציה, ככלומר, אם פוטון אחד עבר זכוכית מקטבת שהוצבה לפני בזווית כלשהי, מתחייב שגם הפוטון الآخر יעבור זכוכית מקטבת שהושמה לפני אותה זווית. אם כן, כמו התאומים שלנו, זוג פוטונים כזה

חייב לחת תשובות זהות לשאלת הפילוסיקאי: האם אתה עובר או לא עובר בכיוון הקיטוב הזה?

ברור לנו מהי המלכודות שטמן כאן איינשטיין לבוהר, ולבסוף נפל בה הוא עצמו. אם צודק בוהר בטענתו כי לשני הפוטונים אין כיוון קיטוב מוגדר לפני שנמדדו {כלומר, הם בסופרפוזיציה}, ורק המדידה קובעת אותו, ואם בסופו של דבר צרכות התוצאות להיות זהות, משתמש מכאן שמדידת חלקיק אחד קובעת בו-זמנית את קיטובו של החלקיק השני, ויהיה זה מרוחק מהראשון ככל שנרצחה B עכשו, מייעץ להסתכל לאיינשטיין בעניינים ולומר דבר כזה? הרי תורה היחסות אוסרת על קיומן של השפעות מידיות, שמהירותן עוברת את מהירות האור. כאן הצלחה איינשטיין להראות שתורת הקוננטים עלולה לסתור את תורה היחסות, והמהומה הייתה רבה.

והנה, שלושים שנה דשו הפילוסיקאים בפרטן ניסוי EPR-, והוא נוכחות היה בעיקרו פילוסופי כי הניסוי בצורתו המקורי אינו יכול להכריע בין בוהר לבין איינשטיין. איש אינו חולק על כך שם נמדד את כיוון הקיטוב של הפוטונים באותו כיוון, תתקבלו אותה תשובה. כך מתחייב מעצם תנאי הניסוי. השאלה היא איך לפרש את התוצאות, וכך ניתן כל צד לפחות לשיטתו. איינשטיין אמר: שני הפוטונים יצאו מן האטום עם כיוון קיטוב מוגדר, ולכן אין פלא שיש ביניהם התאמה. ואילו בוהר יאמר: שני הפוטונים יצאו בסופרפוזיציה בלי שום קיטוב. רק ברגע שמדדת את הפוטון האחד, הכרחת את השני להימצא באותו מצב.

גודלותו של ג'ון בל היא בכך שהוא הסב את תשומת-הלב לכיוון שאף אחד לא חשב עליו קודם לכן. הוא הציע: ניקח שני פוטונים הנפלטים מאותו אטום לשני כיוונים, כפי שהציגו איינשטיין, פודולסקי ורוזן. כל אחד מהפוטונים האלה ייקלט על-ידי מכונה המודדת לגמרי באקראי אחד משלושה כיווני קיטוב. הקשר בין המסל ולהנמשל ברור: שני התאומים שלנו הם שני הפוטונים, שלוש הגלידות הן שלושת כיווני הקיטוב, ואוהב ולא-אהב פירושים עובר ולא-עובד בכיוון קיטוב מסוים. גם כאן, אנו מצפים שככל פעם שהפוטונים יתקלו בשני מקטבים המוצבים באותה זווית, אזי או שנייהם יעברו או שניהם ייחסמו. אבל מה באשר למקרים שבהם עבר כל פוטון מדידת קיטוב שונה? כאן חל "אי-שוויון בל" הנודע, שבתרגיל לעיל יישמשו אותו על סיפור התאומים. הוא נובע מעקרון אי-הוויזואות, האומר שמדידת גודל אחד משנה גודל אחר. שימו לב: על פי תורה הקוננטים המדידה של הגודל האחד משנה את הגודל השני במצבות ולא רק את ידיעתנו לגביו. לכן, אם אנו מודדים שני חלקיקים מרווחקים בעלי אותם ערכים, מדידת ערך אחד של חלקיק אחד תנסה את הערך الآخر של החלקיק השני. עכשו, כשהאנו מבינים את הנמשל, איננו יכולים להוכיח עוד, וחיש-מהר נעשה את הניסוי בצורה שמצויע בל: ניקח את כל המקרים שבהם נמדדו שני כיווני קיטוב שונים מבין השלושה שעליהם החלטנו, ונראה: האם יש יותר התאמות או יותר אי-התאמות בין התוצאות?

ניסויים כאלה עשו פיסיקאים אחדים בשנים האחרונות, כשהטכנולוגיה התפתחה לדרגה שבה ניתן היה סוף סוף לבצע מדידות כה עדינות. ובאמת, כמו למשל, גם בנמשל המציאות מתברר שיש אי-הסכמות Q עובר-נכחים, נחסם-עובד Q יותר ממה שתאפשר כל תכנית שהיתה כתובה, כמובן, בתחום הפוטונים מלכתחילה {איור 4}. לפניו אם כן הוכחה חותכת:

בין שני חלקיים הרחוקים זה מזה כרצונו, יכול להתקיים קשר מיידי, בניגוד לרווחה של תורה היחסות.

אני אומר "בניגוד לרווחה של תורה היחסות" מפני שהניגוד אינו עם החוק כתוב שלו, ולכן יש פיסיקאים שמנסים להתעלם מהבעיה בגלל הבדל דק זה: אמם הניסוי לעיל מוכיח השפעה מיידית של חלקיק אחד על משנהו, ללא התחשבות בגבול העליון של מהירות האור שהציבה היחסות, אבל לא ניתן להבהיר אינפורמציה באופן זה, מפני שלא ניתן לשלוט על התוצאה שתתקבל במדידת הפוטון היחיד. לכן, אומרים כמה אנשים, בוא נאמר שתורת היחסות אוסרת רק על העברת אינפורמציה ב מהירות על-אורית, אז לא תהיה לנו סתירה. הניסוח הזה נראה לי, כמו גם למრבית הפיסיקאים התייארטים, התהמקות. ברור שאיינשטיין עצמו היה רואה כאן סתירה עם תורה היחסות ולא היה מטהטא אותה בניםוקים ככלה.

לסיפור זה יש שני המשכימים, אחד עצוב ואחד שמח. העצב הוא שגון בלבד נפטר ב-1990- באופן פתאומי בגיל 62. ההמשך השמה הוא שבערך באותו זמן המציאו שלושה פיסיקאים Q גリンברגר, הורן וצילינגר Q ניסוי מעניין עוד יותר: במקום שני חלקיים יוצאים שלושה חלקיים מאותו מקור, ועל כל אחד מהם מבצעים אחת מהוק שתי מדידות. המוחד במצב זה הוא שאין צורך בחזרות רבות, כמו בניסוי הקודם, שעל תוצאותיהן צריך לעשות ניתוח סטטיסטי כדי להכריע בין איינשטיין ובוהר. כאן די בניסוי אחד וייחיד כדי לדעת על פיו איזו גישה נכונה. חוקר צער מאוניברסיטת דורהאם, לוסיאן הארדי, מצא הוכחה חדשה לקיומה של השפעה מרחק בין שני חלקיים, כמו בניסוי EPR. חברי דניאל רוליך, סנדו פופסקו ואני הוכחנו כי פעולה מרחק בניסוי EPR אינה תופעה סטטיסטית בלבד אלא חייבת לפעול בכל זוג חלקיים. בזמן שאנו מכין דברים אלה לדפוס עדין ידוע ניסוי גリンברגר-הורן-צילינגר כניסוי מחשבתי, אבל אני מעדיך שתוקן כמה חדשניים הוא יהיה ניסוי ממשי. אגב, צילינגר הוא איש הטוב ששכל את ניסוי הפעזה שתיארתי בפרק ב'.

בעיה קשה דוחפת לפתרונות קיצוניים, ולפעמים מטוטפים. בין הניסיונות רבים שהוצעו כדי לישב את הסתירה בין תורה הקוונטום לבין השכל הישר, הראשון היה זה של בוהר, והוא נקרא תיאורית הקומפלמנטאריות {השלמה}. בוחר האמין שהטבע ניתן להסביר על-ידי תיאורים סותרים, ושזוווקא תיאורים סותרים כאלה משלימים זה את זה. האם האלקטרון הוא חלקיק או גל? האם האדם הוא צבר של כימיקלים מסוימים או ישות חייה? האם הנפש היא מכאניזם עצבי או ישות רוחנית? בשנותיו האחרונות האמין בזהר שככל המקרים האלה, השאלה מהו טبعו האמתי של הדבר היא חסרת-משמעות; הכל תלוי בסוג הניסוי או בסוג התצפית שאנו ערכים. כך הופך הפעזה לחלק בלתי-נפרד מההתצפית. פיסיקאים אחרים, בראשם פון-נוימן וויגנר, עשו צעד מרתק-לכט עוד יותר בקשר למעורבותו של הפעזה: עולם הקוונטום הוא מסתורי, אבל גם התודעה האנושית, כפי שנראה בפרק י"א, היא דבר מסתורי. אם כן, אולי שתי הבעיות הן אחת? הם הסיקו לפיכך, שהתודעה היא האחראית למעבר הבועתי מהסופרפויזיצה אל המצב המוגדר. בעקבותיהם היו שטענו שככל עולם התופעות הפאראפסיקולוגיות {ר' פרק י"ב} ניתן להסביר קוונטי. פיסיקאים אחרים טענו שככל רגע שנעשה מידה קוונטית, היקום מתחלק לאין-ספר יקומים, שככל אחד מהם מתרחשת אחת התוצאות האפשריות, ויחד עם היקומים האלה מתפצל גם הפעזה לאין-ספר

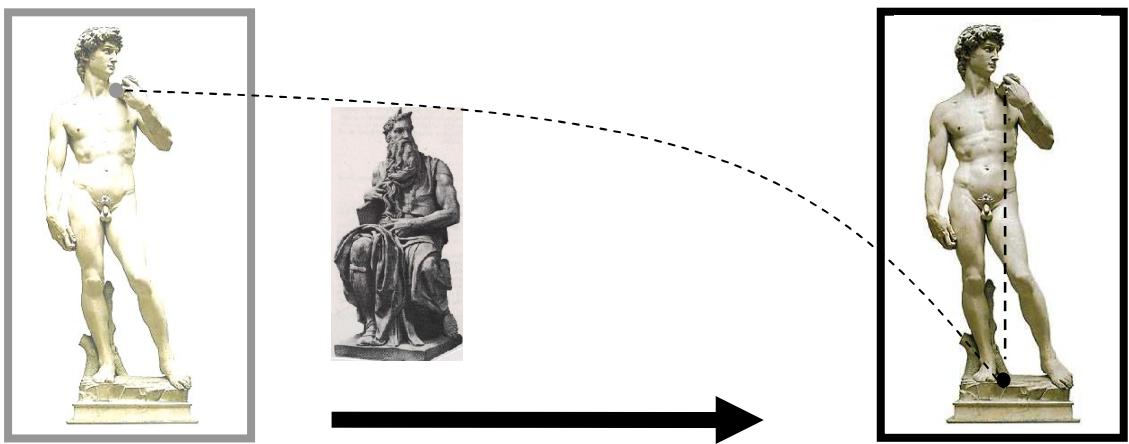
"אני"ים, או שהתודעה מתפצלת לתודעות רבות שכל אחת רואה יקום אחר. הרעיון זה נקרא "פירוש העולמות המרוביים" ואם הוא נשמע לכם כהנחה, אני מבטיח לכם שיש חיים פיסיים רבים שמחזקים בו ברצינות גמורה.

אני לא מאמין לאף אחד מהרעיוןות האלה, ככל שיהיו חביבים על פופולריואטורים שטחיים הבונים עליהם טיעונים "מהפכנים", כאילו הפסיכה הוכיחה שאין מזיאות אובייקטיביות והכל קים רק בראש שלנו. כמובן, כל בעיה בעולם אפשר לפתור {נכון יותר, לפתור} על-ידי טיעונים כאלה, אבל תגליות מדעיות של ממש לא תימצא בדרך זו. חשוב להציג כי אף אחד מהפירושים המנוגדים הקיימים חיים לajaran הקונטינט אינו מציע ניסוי מעשי המסוגל להפריכו או לאששו, אך שאין לנו פה תיאוריות מדעיות במובן העמוק של המלאה. כל הפירושים האלה רק מלמדים על עומק המשבר שתורת הקונטינט מציה בו מזה שנים רבות. פתרון הניגוד בין תורה הקונטינט לארות היחסות מצוי לא בהיפיכת התודעה לגורם המעצב את המזיאות הפסיכלית, אלא באותו היבטים יסודיים של המזיאות הפסיכלית שתורת היחסות מטפלת בהם. במלים אחרות Q וכך אני מסגיר דעתה אישית Q תורה הקונטינט של העתיד תאמיר לנו דברים מפתיעים מאוד על המרחב ועל הזמן.

למעשה, בשנים האחרונות הופיעו כמה רעיונות מעניינים בנושא זה. פיסקיים אחדים טוענו כי בעולם הדברים הקטנים מאוד, שבו שלטת תורה הקונטינט, ניתן לראות את כיוון הזמן כאילו הוא לפחות פעמיים מתחפה. לעומת, בעוד שבעולםנו הרגיל כל אירוע משפייע על מה שייהה בעתיד, בעולם הקונטינט יכול אירוע להשפייע באותה מידת גם על אירועים קודמים בעבר. הרעיון הזה, שהוצע לראשונה על-ידי ריצ'רד פינימן, יצר פריצת-דרך בדמויות תורה האלקטרודינמיקה הקונטינטית והעניק לפינימן את פרס נובל. פינימן גילה שניתן לראותות חלקיים מסוימים, הקרוים אנטי-חלקיים, כחלקיים הנעים אחורה בזמן. קריימר הראה לפני כעשר שנים שאם מפעילים את ההכרה הזאת על כל האינטראקציות הקונטינטיות, כמו מהתופעות שהתרידו אותנו מtgtות באור חדש. כך, למשל, פאראודוקס ה-EPR- מתגלה כמצב שבו אחת המדידות משפיעה אחורה בזמן על אירוע הפליטה של שני החלקיים שהתרחש בעבר, ומהם חזורת ההשפעה וקובעת את מצבו של החלקיק המרוחק השני בהווה. ההשפעה מתקדמת אם כן במסלול שונה במרחב-זמן הקרווי "זיגzag פינימן". יקיר אהרוןוב מאוניברסיטת ת"א הוכיח לפני שנים רבות כי ניתן לראות את מצבו של חלקיק בזמן שבין שתי מדידות כאילו החלקיק מושפע מן המדידה הקודמת והן מן המדידה הבאה. מתברר כי במצב-ביניים זה יש לחלקיק כמה תוכנות פאראודוקסאליות שטרם נחקרו די הצורך.

הוא אשר אמרתי: הקונטינט לא מערערים את קיום המזיאות האובייקטיבית, כפי שמצוירים זאת פופולריואטורים רבים, אלא עושים משהו יותר מעניין. הם מראים לנו שהדרך שבה אנחנו חשבים על הזמן והמרחב, אפילו אחרי מההפקה האדריכלית של תורה היחסות, אינה נכונה. אם האמרה הזאת נשמעת לכם קיזונית, בואו נבחן מקרוב את מושג הזמן עצמו, בלי קשר לajaran הקונטינט, ונראה איך בעיתינו רק תחריף.

הגיאז הזמן לגשת להבית מקרוב במושג הזמן.



אל הנער שבו התמים
שימצא באחד הימים
את בגדיו הפוזרים על החוף.
נתן יונתן, "שוב החורף חורש את הים"

גלילאו, דארווין ואינשטיין היו גיבורי ילדותי, לצד גיבורים רגילים יותר שכיכבו בספריה הרפתקאות של אותם ימים. המילה "מדען" רק החלה להתאזור בשפה, ובספרים היישנים עוד כיכבו "המלומדים", תואר אפוף יראת-כבוד. מדי פעם, כשהשمعתי דיון בנושא מדע כלשהו, הייתה לי מזינה מירב-חישבות: "המלומדים סבורים ש..." החלטתי גם אני להיות מלומד כשלגדר.

ברחוב מרגולין ברוחבות גרו ניצולי שואה מפולין ורומנים לצד עולים מתימן. באמצעו, בחצרות הומות חיות ועופות משק, גרו משפחות גדיין, אמדקי ויושבי שעלו מאיראן. אמדקי פירשו "מבטח" בפרשיטה. סבי, שהיה מולא (רב) ונצר לשושלת של עושי-נפלאות, התהדר בגרסה המוסלמית של השם, "מְזָדָאֹלֶה" ואבי, בהברקה לשונית, עברת אותו ל"אלצ'ור". היה לי בוגר חדש, קטן-קומה, מתבוזד, חשדן, יהיר, ותלמיד גרווע. בחינוך הממלכתי-דתי היה לי תלמידים היה או מהפир. מורים הרשו לעצם להעליב תלמיד ואיפלו להחטיף לו סטירה על כל דבר של מה-בכך. בית-הספר וכל הקשור בו עוררו בי מיאוס. שנים אחדות עבדה אמי כעזרה-בית בעונן הרב דוד משה רוזנבוים, אדמו"ר חסידות קרטשניך ברוחבות, שם דבק שרייך של מבטא יידי בעברית שלי, שלא הצלחתה להיפטר ממנו עד היום, כמו גם הרגל לשיר בכל הזדמנויות ובכל סגנון אתני. אבל שם, ב"היינך" אלו היה מציז בעוד אמא שוטפת כלים או רצפה, גם ראיתי מה מעולל לילדיהם חינוך דכאני, בעיקר הפחד מהגופ ומהמניות. העיתונים סיירו על מרד הסטודנטים בארא"ב. "היפי" היה כינוי גנאי לכל מי שלא הסתperf. בעיניים כלות קראתי על הצעירים מעבר להם שהטיפו לאהבה חופשית ומרדו בשלטון הצבאות והבצע. לא נראה שהתבגרתי הרבה מז.

בעזרת רופא צייתן השגתנו אבחנות מעורפלות שאפשרו לי להיעדר מדי פעם מהלימודים לטובה בתיכון ספר רלונטיים יותר. באותו ימים היה כל השטח בין רחובות לרמלה ונס-צינה מכוסה בפרדסים ושדות-בר, מנומרים בגבעות כורכר שיחניות, וביניהם ביצה שהייתה מתמלאת מדי חורף, רוחשת שפע יצורי-מים ובעל-כנה. בין הפרדסים גרה משפחת אל-עסאי, בدواים משפט א-סאנע שלידיהם היו חברי האוהבים. כשהגענו אליו הצעיר לגיל שלוש ללחתי אותו אליהם לכמה "טיולי גיבוש" שגרמו לפעוות לבדוק את שפטינו כדי שלא לבכות. את יבול החינוך הזה קצרתי שנים אחר-כך כשתיilit תי אתו, עתה איש-ביבחון חסן, בין מה שנותר מהפרדסים. פתאום זינק אל אבן לצד הדרך ושלף מתחתיה זעמן שחזור ענק שהחליט שאני האשם בכל מהומה ונען בcpf-ידי את שניינו. עכשו היה אני צריך להתפרק שלא לצורך.

*

מגיל רך זכיתי להכיר אנשים שהחדרו בי אהבה לקריירה. אבא ז"ל היה מורה, איש כריזמטי וمبرיק, אבל מגיל צעיר נשא קווי-אופי הרסניים שעתדים היו להפוך בערוב ימיו לדיכאון משתק. הוא תיעב תינוקות, ואל ילדיו כמעט שלא התקרב עד שלמדו לדבר. לעיתים חשתי

כבנו של ילד מגודל, נוטה להתרצויות-זעם ומרוכז רק בעצמו. עם השנים גבר בינוינו הריחוק, משאير בי צימאון לאהבת-אב. אבל הספרייה בחדרו הנעול, אליה הייתה מטפס בהיעדרו, וההכילה ספרי-קדושים לצד ספרים אחרים, לא תמיד מתאימים לילד, הייתה לי עוד בית-ספר.

בבית ממול גרה הניה, חברתה של אמא שנעשתה בת-בית במשפחהנו. מאות ספרים קנתי לי אשה יקרה זו, ובhem הייתה שקווע כל שנות ילדותי. בית הסמור גר בן-דודיו מנשה, תלמיד מצטיין ומורי הראשון למדעים. המורה לטבע מרגלית הלפרט-קוטב, שגרה במורדות הרחוב, הייתה נקודת-אור זהורתה בבית-הספר והייתה תמיד אורחה רצוי אצל, שואל מספרייתה ספר אחר ספר. וברחוב המקביל גר הזוג היפה ביותר שראיתי מימי. עוזרא אַיל היה פרופסור לפיזיולוגיה בפקולטה לחקלאות של האוניברסיטה העברית. הוא ותמר כבר עמדו להיות סבא וסבתא כשהקשתינו יום אחד באمثالה כלשדי על דלתם, וכך התודעת אל סיפור אהבה גדול הנמשך עד היום כשבוערא ז"ל כבר איןנו. הם היו הורי השנאים.

בצפון רחובות שוכן מכון וייצמן. כמה מהחברי ללימודים, בני משפחות פרנקל והירשפלד, היו בניהם לעובדי המכון. פעמים רבות הוזמנתי אליהם לארוחת שבת, מקשיב לסיפורים על שנת השבתון בארה"ב ומתבונן ביראת-כבוד באבא הпроופסור שר "יה ריבון עולם ועלמא". בזיכרון הסמוכה שיחק שחר בן-מנחם, ילד גינגי שביעיתונים כתבו שהוא גאון. רציתי לדבר אותו על מדע אבל התבונתי. רק כשהיינו שניינו בני עשרים,ymi בRICTת השחיה של המכון, הרהרתי עוז לפני ולחליפ' לחיצת-ידיים רטובה. שעות וימים שוחחנו על יחסות וקונונטים, אני רברבן דעתן והוא מתקן אותי בנעם וב��כלנות. שנים רבות מאוחר יותר, כשביברתיו בברקלוי והתוכחנו על משהו, הזכיר לי שעם כל הכאב, הוא שהכניס אותי אל עולם הפיסיקה. הודיתי, תרתי משמע.

*

יום אחד חדרה האסטרונומיה לרגע לחיה. הייתה כבן אחת-עשרה. אמא עשתה לי קפה בחלב. זה היה קפה שחור שגיגריו צפו מעל המשקה החם. ערכבתי את הקפה והבטתי בגרגירים הצפים. הם התקבצו אל נקודת המרכז. האם יש כוח משיכה בין הגיגרים? נזכרתי במשהו שאמרו המלומדים על מתח הפנים של המים ושיערת כי הוא המזופף אותם זה אל זה.⁸ והנה, לפני שככל הגיגרים הצטופפו לגוש אחד, נתן היה לראות כמה "זרועות" לוליינות שנוצרו מהם, הולכות ומחננות אל המרכז. מאיפה היה המראה מוכר לי? שבתי וערכתי את המשקה, שוב התפזרו הגיגרים ויצרו זרועות, ולפני שהתכנסו שנית לגוש קטן ידעתי מה אני רואה: זו הייתה צורת גלקסיה. התרגשת. אני יודע איך נוצרו גלקסיות: כוח המשיכה יוצר גושי כוכבים ומושכים אל המרכז, הם מסתובבים מאיזושהי סיבה ולכון הכוח המרכזי יכול דוחף אותם החוצה, אבל לבסוף המשיכה מתגברת. איזה יופי! "אני סבור שחוקי היקום שליטים גם בספל קפה."

תהייתי אם גם המלומדים סבורים כמווני.

⁸. עכשו כשאני חושב על זה נראה לי שהמצב מורכב יותר: כיון שהכוח המרכזי דוחף את המים אל שלו הספל, גיגרי הקפה הקלים יותר צריכים "לצוף" דוקא לכיוון המרכז.

18.

ו אפּ עַל־פּ יִ כְּנָעַן וְזָמָן

הזמן חורת בפנינו את כל הדמעות שלא הזנו.
נטלי קליפורד ברני

“בזבוזי את הזמן, ועכשו הזמן מבזבז אותו!”

מילימ מצמרות אלה שם שיקספיר בפי ריצ'רד השני מזכירות לנו את הצד הקודר של הזמן: שגיאות שלא ניתן לתקן, אנשים יקרים שמתו והזדמנויות שהוחמצו. כהה לשיקספיר עונה המלחין הטרופי בRELIOZ: “זמן הוא מורה טוב, אבל הוא הורג את תלמידיו.” מצד שני, קשה שלא לרחרם על אלה שימושתעדים בזמן, ככל חיהם עוברים בהצחה בלתי-פוסקת במחוגי השעון ושמפסידים את הצד היפה של הזמן: את הלידות החדשות, את חסד השנים המוסףות חוכמה וניסיון חיים, ואפילו את החכמה שבאמירתו של גון לננו: “זמן שנחנית לבזבז לא בזבז.” לא כדי לברוח מהזמן, אבל לא כדי גם לרדוף אחריו. מהי, אם כן, תוכנות הבולטות ביותר של הזמן? נדמה לי שעל התשובה לא תהיה מחלוקת: הזמן עבר, הזמן רץ, הזמן בורה לנו כל הזמן.

בהיגד הזה יש בעיה אחת קטנטנה: מבחינה פיסיקלית, ואפילו סתם בrama הלוגית, הוא מופך מיסודה.

הגענו לפשרות-דריכים בספר הזה. עד כאן היו דרכינו סלולות ומסומנות יפה, תיאוריות מבוססות ו邏輯יות הראו לנו את הדרך.

כל אמרה מסווג “זמן חולף/עבר/זמן” מובילה לסתירה מיידית. ניתן להמחיש סתירה זו על אמרתו המפורסמת של ניוטון ב”פרינציפיה”: “זמן המוחלט האמתי, המתמטי, כשלעצמו ומצצם טبعו, זורם באופן אחיד וללא התחשבות בשום גורם חיוני.” ככלומר, גם הוא סבר שהזמן זורם. הקביעה הזאת, הגיונית כל כך לכואלה, אינה עומדת במחנן ההיגיון. בואו נבדוק את הדבר מקרוב. “לנו” פירושו “להיות במקום אחד בזמן אחד, ובמקום אחר בזמן אחר.” ככלומר, הזמן הוא אמת המידה לתנועה. אם אני אומר שנסעתי לכאן מביתי, כוונת הדברים היא שבבוקר הייתה ביתי ועכשו אני כאן, ובכל רגע של זמן נסעהתי היהתי במקום אחר בדרך. עכשו יש לנו בעיה: אם נרצה לומר שהזמן עבר, הרי בהתאם להגדירה לעיל של “תנועה” נצרך לומר שהזמן נמצא באותו מקום אחד בזמן אחד ובמקום אחר בזמן אחר, וזה כמובן אבסורד. נסו למשל, לענות על השאלה “באיזו מהירות זורם הזמן?” ותראו איך אתם מסתבבים. לשם כך תצטרכו להניח את קיומו של מין זמן-על, שלפי אותו היגיון גם הוא יציריך זמן-על, וכך הלאה לאינסוף.

והנה, הפיסיקה עושה דבר פשוט עם חולוף-זמן: היא מתעלמת ממנו לחלוותין. לשווה נחשפּ אותו באיזו תיאוריה או בחוקי הפיסיקה. כל מה שנוחנים לנו חוקים אלה הוא כללי התאמה: אם נתונה מערכת מסוימת, ונתונים תנאי התחלה שלה, הרי בכל רגע ורגע תהיה המערכת במצב מסוים, בהתאם לאותו החוק. אבל בכך אין שום רמז לכך שהזמן זורם. קל להמחיש זאת על הדוגמה של מפה גיאוגרפית. המפה נותנת לנו התאמה בין קווי הארץ או הרוחב של אזורים מסוימים לבין הגובה שלהם מעל פני הים. כך למשל, ככל שננו בישראל מזרחה, נמצא באותו מקום יותר ויותר גובה מעל פני הים ואחר כך יותר ויותר

נמור, עד שנגיע אל הבקעה. ברור שאין בכך שום טענה שהארץ נעה באופן כלשהו, מזורה או מערבה. ארץ-ישראל במקומה עומדת, רק הגובה שלה משתנה בהתאם לאזור. בדיק באופן זה, הפיסיקה אינה אומרת לנו שום דבר על תנועתו של הזמן אלא רק על ההתאמה בין הזמן לבין מצבים פיסיקליים שונים. אם ידוע לנו, למשל, משקלה של אבן והגובה שבו היא נמצאת מעלה לקרקע ברגע שנעוזב אותה, נוכל לדעת היכן היא תימצא בכל רגע נתון. אבל ההתאמה הזאת אינה אומרת שהזמן זורם, ממש כמו שהמפה אינה אומרת שהארץ נעה. לא נמצא מהתסבוכת הזאת גם אם נאמר לנו עצמנו נעים בזמן. אותם פאראדווקסים ייחכו לנו גם כאן. לומר שאחנו נעים בזמן, פירושו להפוך את הזמן למדיד מרחב כלשהו שעליו אנו נעים, ושוב זוקקים אנו למדיד זמן נוספת.

אבל כאן באה תחוותנו הבלתי-אמצעית ומתקוממת כנגד האמירות האלה בתוקף. הרי אנחנו מרגישים בכל רגע של קיומו מאפיין מיוחד של הזמן, והוא ה"עכשו". מאפיין זה יוצר לנו הבדל ברור בין העבר, שהוא כבר לא קיים, בלתי-נגיש, לבין שנית לשינוי, בין העתיד, שלגביו איןנו יודעים כלום והוא עדין פתוח, כשביניהם מפריד רגע ההווה המשי שאותו אנחנו חשים באופן בלתי-אמצעי. אמרה יהודית עתיקה ביתאה יפה הבדל זה: "ה עבר אין, ההווה כהרף עין, העתיד עדין, דאגה מנין?" יש לנו תחושה לגבי ההווה שהוא ממשי יותר, אמיתי יותר, בעוד שהעבר כבר איןנו והעתיד עדין איןנו. אבל בואו נבדוק את האמירה הזאת.

הנה, למשל, היום שבו מוקלטת ההרצאה הזאת הוא יום רביעי. יש לי תחושה ברורה שיום רביעי זה נבדל מהימים האחרים בכך שהוא, מבחינתי, "עכשו". יום שלישי כבר חלף ואני, ביום חמישי עדיין לוט בערפליל העתיד. כמובן, נראה לי שה"עכשו" היה תחילתו ביום ראשון ואחר כך ביום שני וכך עבר על פני השבוע כולו. אבל שוב אמרתי דבר הבל. ברגע שאני אומר שמשהו נע על פני הזמן, אני מניח זמן-על נוסף שאותו הפיסיקה אינה מכירה וגם אינה רוצה להכיר, ואולי בזכות, כי השערת קיומו של זמן נוסף Tabia לנו סדרה אינסופית של זמנים, לפי אותו היגיון.

אם כן, לא הצליחנו להראות שההווה הוא במובן כלשהו יותר אמיתי מן העבר או העתיד. מבחינה זו דומה הזמן למרחב. ניקח לדוגמה את העיר שנחאי. לגבי היא לא קיימת באופן ממשי, מפני שהיא רחוכה ממני ואין לי שום מושג מה קורה בה. אבל לגבי אדם שנמצא בשנחאי, העיר רחובות אינה קיימת באופן ממשי. אם תשאלו אותי ואת הסיני שם היכן רחובות והיכן שנחאי, יאמר כל אחד "כאן" ביחס לעיר. מי צודק? ברור ששנינו צודקים באותה מידת, מפני ש"כאן" הוא מושג יחס. אבל כך הדבר גם בוגנע ל"עכשו" B הנה, יום רביעי זה הוא בשביili "עכשו", והוא יותר אמיתי מבחינתי מן היום שבו תשמעו או תקראו את מה שאני אומר עכשו. אבל מבחינתכם, אותו היום יהיה "עכשו" ואילו היום הזה כבר יהיה עבר ואני.

על-פי אותו היגיון, שאנו מספק לטעון שרחובות היא במובן מוחלט כלשהו יותר אמיתי מאשר שנחאי, אין לי שום הצדקה לטעון שיום רביעי זה הוא יותר ממשי מכל הימים שכבר היו במיליארדי השנים הקודמות או שעוד יבואו. בעצם, כל מי שלמד קצת פילוסופיה אנגלית יודע שלמים כגון: "כאן", "עכשו", "זה", וכמוון המלה "אני", הם אינדקסיקלים, ככלומר מילים שאמיתותן יחסית. אנשים שונים יכולים לומר "זה" לגבי עצמים שונים, וכל

אחד מהם צודק. הפילוסופיה מסכימה עם הפילוסופיה בנקודה זו בהתעלמותה מהאינדקסיקלים האלה, ובמקרים היא מדיפה מונחים שכוחם יפה לגבי כל צופה. במקום "כאן" נציין קווי אורך ורוחב המוסכמים על הכל, ובמקום "עכשו" נציין את הרגע על פי השעון המקורי. עזבנו מינוחים סובייקטיביים ואיםנו שפה מדעית הנכונה לגבי כל הצופים, אבל המהיר שעליינו לשלם על כך הוא יותר על האמונה שהזמן עבר. איך נסתכל, אם כן, על הזמן? האם הוא מעין מרחב, שבו קיימים העבר, ההווה והעתיד יחד, כמו שנחאי ורחלות וכל שאר ערי העולם קיימות יחד? זו מסקנה מוזרה, אבל המשך יהיה מוזר עוד יותר.

בצר לנו, וננה אל המהפכה המדעית האדירה ביותר שלמה בהבנת הזמן, תורת היחסות. כאן תLER בעיתנו ותחריף. המהיר שתובעת תורת היחסות מהשכל הישר שלנו בנושא זה גבוהה הרבה יותר. בהמשך אני רוצה להראות שדווקא איינשטיין, בניגוד לפיסיקאים רבים, חש שההיר הוזה שתובעת תורה היחסות מכאייב במילוי.

באו ננסה להבין מה אומרת תורה היחסות על תחומיינו כאילו יש מין "עכשו" העובר על פני הזמן, מה עבר לעתיד. ראשית ככל היא מציבה בפניינו הנחה מוזרה: מהירות האור קבועה לגבי כל הצופים לא חשוב באיזו מהירות ולאיזה כיוון אנחנו נעים ביחס לקרן האור; אם אנו טסים לקראתה או בורחים ממנה, לעולם נקבל ממדידתנו תוצאה זהה: מהירות האור היא 300,000 ק"מ בשנייה. לכל הדעות זה רעיון משונה: אם אני רץ לדור שזרקו אליו, הרי שהמהירות ביחס אליו תהיה גבוהה יותר, ואם אני בורח ממנו, מהירותו לגבי תהיה נמוכה יותר. מדוע אין זה כך לגבי מהירות האור? הרשו לי לזכור את הויכוח בציון עובדה פשוטה: ההנחה הזאת של תורה היחסות ה-Ηכחה. כל המסקנות המוזרות של התורה ניתנות לגזירה מההנחה הזאת, בצירוף הדרישה שהוקי הטבע יהו שוים לכל צופה. לכן, הזמן והמרחב אינם מוחלטים; הם משתנים בהתאם למהירותו של כל צופה, וכך שהירות האור יוצאת בסופו של דבר תמיד קבועה. עם המסקנות האלה של תורה היחסות נמנית גם המסקנה שמה שאנו מכנים "עכשו" הוא יחסיל למורי.

נזהר ליחס בין שנחאי לרחלות כדי להסביר יחסיות זו. נניח שסיני אחד מפעיל משדר רדיו בשנחאי, והוא מודיע: ברגע שבו יגיע על פי חשבוני אותן הוזה לישראל,acha בגונג לציין את הידידות בין שני העמים. נניח עוד שאין וחברי נוסעים במכוניותינו, אני מזרחה והוא מערבה, וחולפים זה על פני זה בכיביש. אותן הרדיו של הסיני נקלט במקלטי מכוניתינו בדיקוק ברגע שבו אנחנו חולפים זה על פני זה. נניח עוד שלמען המדע העלימה משטרת ישראל עין מהעובדת שקצת חרגנו מההירות המותרת Q נאמר, נסענו במהירות של 200,000- ק"מ בשנייה. עכשו השאלה היא, מתי היכה הסיני בגונג? כיון שהמהירות העצומה שבהן נסענו אני וחברי בכיוונים מנוגדים יצרו, כאמור, הבדלים ניכרים בין מדידות הזמן והמרחב שלנו, הרי שהוא נחלוק זה על זה בשאלת הזמן שבו עשה הסיני את המעשה. אני אומר: הוא עשה את זה קצת לפני שעברנו זה מול זה, וחברי אומר: לא, הוא עשה את זה קצת לאחר מכן. הוויכוח שלנו לגבי הסיני מסתכם בכמה הליקוי שנייה, אבל אם הסיני חי במקרה לא בשנחאי אלא על כוכב בערפילית אנדראומדה {ואות הרדיו המבשר על צלצול הגונג שודר לפני דורות רבים}, כי אז, גם אני ואני חלפנו זה על פני זה ברוחב בהליכה רגילה, יהיה חלוקים זה על זה בשנים רבות: אני אתען שברגע הפגישה בינו כבר נח הסיני שבע ימים בקברו, שנים רבות אחרי שנדרמו ונשכחו הדוי פעמונו, ואילו חבריי יטען שהסיני

עודו מילל בחיתוליו, ושהצלול בגונג הוא עוד עניין לעתיד. עכשו נחשוב על שנים סינים שם באנדرومדה, לאו דוקא עם כינור גדול אבל עם מכשירי מדיה משוכלים, המתוכחים על מה שאני עושה במא שלגביהם הוא "רגע זה", ובין כי גם הם יתווכחו ביניהם אם אני עוד תינוק בעירסה או כבר מזמן בר-מין. הנה אם כן, ה"עכשו" שלו יכול להיות "עכשו" לצופה אחד, " עבר" לשני ו"עתיד" השלישי, הכל בהתאם למערכות הייחוס שלהם, ככלומר ל瑪יריות ולכיוונים שבהם הם נעים. אבל מהו באמת הרגע הזה שבו אני נמצא? עבר, הוא מהירויות או עתיד? תורה היחסות היא דמוקרטיבית בנקודת הזאת. היא אומרת: אין צופה מוחש, ולכן אין שום "עכשו" מוחלט שהוא באופן אובייקטיבי נכון יותר. כך נאלצים אנחנו לוותר על עצם מושג ה"עכשו".

מכאן אנחנו עוברים להתוודע לשני מושגים מרכזיים בתורת היחסות, שאותם אנו חיבים למתמטיקאי הנודע הרמן מינקובסקי (H.Minkowski). המושג הראשון הוא ה"מרחב-זמן". הזמן הוא למעשה ממד אחד מרבעת הממדים של "מרחב-זמן" הכלל גם את שלושת ממדיו המרחב שאנו יכולים לראות. איור 5 הוא "דיאגרמת מינקובסקי" הממחישה את הרעיון הזה. בתמונה זו, כדי להקל על דמיונו, אנו משתמשים ממד מרחב אחד ומסתפקים בעולם דו-ממדי, כך שהממד השלישי הוא ממד הזמן שלו. אם כן, כל חתך דו-ממדי במרחב הזה הוא רגע אחר בזמן. ה"למטה" הוא כיוון העבר בעוד ה"למעלה" הוא העתיד. המושג החשוב השני בתורת היחסות הוא "קו-העולם". כל עצם למרחב הרגיל הוא קו-עולם במרחב-זמן, והוא ממש מה עבר אל העתיד. כך, העיגול על המשטח הדו-ממדי שלנו הוא בעצם גליל ב"מרחב-זמן" התלת-ממדי שיצרנו. מה שיפה בדיאגרמה הזאת הוא שהוא יכולה לתאר את כל המצבים של עצם כלשהו בכל רגע בזמן. כך, למשל, אם בשלב מסוים זו העיגול מקומו ימינה ואחר כך שמאליה, יהיה קו-העולם שלו מפותל לכיוונים אלה באותוstant זמן. ומהמשל אל הנמשל: כל עצם שאנו רואים בעולמנו התלת-ממדי הוא בעצם קו-עולם ארבע-ממדי הנמשך מה עבר אל העתיד, וכל תנועותיו של עצם זה הן עיקומים ופיתולים על קו-העולם שלו.

בכך, כמובן, נעלמה מהותו החולפת של הזמן. היקום נתפס כאוסף של מצבים, מראשיתו ועד סוף, שכולם, במובן מסוים, קיימים באותה מידה. הרעיון שישנו מין "עכשו" החולף לאורך הזמן והופך אירועים עתידיים שטרם אירעו להויה ממשי, אין לו מקום כאן. זוכרים את הסיני מאנדרוםדה? הדיאגרמה של מינקובסקי תעזר לנו להבין מדוע מושג ה"עכשו" הוא ייחסי: ה"עכשו" הוא חתך למרחב זמן. לגבי צופה נח, החתך הזה פשוט ניצב למשך הזמן. אבל לגבי צופים נעים, מישור ה"הווה" נוטה בהתאם לכיוון ולמהירות תנועתם {איור 6}. מכאן, שיש צופים ביקום ש מבחינתם מתהווים "עכשו" אירועים בעבר או בעתידי הרחוק. אין משמעות לשאלת מי צודק, כי הכל תלוי בנקודת המבט. כך אובדת משמעות ה"עכשו" המוחלט ובמקומו מופיע היקום כאוסף של מצבים Q עבר, הווה ועתיד. המשורדים יחד לאורך ממד הזמן.

כאן המקום להעיר כי למרות שבתיior זה הזמן הוא ממד כמדדי המרחב, בכל זאת יש לו מאפיין ייחודי. משפט פיתגורס למרחב, כידוע לנו, מורה איך למצוא את המרחק בין שתי נקודות: נמדד את הבדלי האורך, הרוחב והגובה ביניהן, נעלם כל אחד מהגדלים האלה בריבוע, נחבר אותם ואז נמצא את ריבוע המרחק בין הנקודות. למרחב-זמן, לעומת זאת, אם

אנו רוצחים למצוא את ההפרש בין אירוע במקום אחד ובזמן אחד לבין אירוע אחר במקום שני ובזמן שני, علينا להזور על התרגיל בארכעה ממדים, אבל את ממד הזמן ברכיבוע נצטרך לא להוסיף אלא להחסיר B אף אחד לא נתן עדין הסבר של ממש ל"מיןוס" זהה המיחד בתורת היחסות את הזמן, אבל עבורנו יש כאן עוד חיזוק להשׁד שזה זמן אינו "סתם" ממד.

לפרופ' יובל נאמן אני מודה על הערכה מלאפת שהעיר על דברים שכתבתי פעם בהקשר זה. החלקיקים היחידים ביום נחקרים לשני סוגים מבחינות מהירותם: חלקיקים "דמוני-זמן", והם החלקיקים שהם העצמים המוכרים לנו, ושאים יכולים לעבור את מהירות האור, ולעומתם חלקיקים "דמוני-אור" כגון הפוטונים והנייטרינוים, החביבים לנו רק ב מהירות האור. והנה בשנות השבעים מצא סודרשאן, על פי שיקולי סימטריה, פתרון שלישי למשוואות תורת היחסות, שהוא בדיקות הנקראות החלקיקים "דמוני-זמן" המוכרים לנו. אלה הם חלקיקים "דמוני-מרחבי", שהם הירות האור היא גבול מהירותם התחתון, שאליו אין הם יכולים להגיע. חלקיקים כאלה, שאיש טרם גילתה אותם, נקראים "טאכיוונים". טאכיוון צריך להתאים כדי להאט את מהירותו, כי מהירות אינסופית היא עברו מה שמצוב המנוח הוא עבורנו מה שמעניין אותנו הוא איך הטאכיוון רואה את העולם שלנו. מבחינתו הזמן אינו עבר אלא כל הזמן קיימים בעת ובונה אחת, ולעומת זאת המרחב "עובר" B בכיוון שבו נע הטאכיוון במרוצתו השגעונית, היקום שלו מתכווץ לגודל אפס, והוא חווה את ממד המרחב שבו הוא נע כפי שאנו חווים את הזמן, נקודת נקודת. נאמן מסיק מכאן שתורת היחסות מסבירה יפה את חלוף-זמן על סמך האופי של קווי-העולם שלנו: עצמים שקווי-העולם שלהם הם "אנכיאים" כמו שלנו, למשל, נמתחים מה עבר לעתיד, חווים את המרחב כקיימים לכל אורכו, בעוד שהזמן נקלט אצלם רגע אחר רגע. שונה הדבר לגבי עצמים כמו טאכיוונים, שקווי-העולם שלהם הם "אופקיים": ממד המרחב שבו הם נعيش, נאמר צפון-דרום, נתפס על ידם נקודת נקודת, ממש כמו שהזמן נתפס אצלנו רגע אחרי רגע. מאידך, הזמן שלנו קיים עבורם כמו שмеди המרחב קיימים עבורנו, למשל כל הרגעים, בעבר, בהווה ובעתיד, קיימים יחד.

הטייעון הזה, לדעתתי, מחריף עוד יותר את הבעיה שלנו. הוא מדגיש שהזמן הוא חולף רק מנוקודת-הראות של יצורים כמונו, העשויים מחלקיקים רגילים. אם יתברר שטאכיוונים הם עצמים ממשיים, אז יתברר שהזמן הוא ממד ממש כמו ממד האורך והרוחב, וה עבר והעתיד קיימים בו לצד ההווה. אני עצמי לאאמין באפשרות זו, כי הריאתי במקומות אחרים שפריצת מהסום מהירות האור סותרת לא רק את תורת היחסות {בעיה שמודל הטאכיוונים הצלחה לעקוף}, אלא גם את תורת הקוונטיים והתרמודינטיקה.

מעניין שאפלו כמה מהreasוןיות האחרונות בפיזיקה הנחשבים לנועזים וגובלים במדוע בדיוני, הם שמרניים להפליא בכלל הקשור לשאלת מעבר הזמן. קחו לדוגמה את הנושא החדש מאזימי ה. ג'. וולס, של מסע בזמן. הרבה אנשים טובים הגיעו מוחם בפראודוקסים הלוגיים הקשים שמעורר רעיון כזה. מה יקרה אם אדם יסע אל העבר ויירוג את סבא שלו כשעוד היה ילד? הרי אז הוא לא היה יכול להיוולד ואז אין מי שיירוג את הסבא, ולכן הוא בן ייולד וכן יירוג אותו. ומה, לחופין, אם הסבא יסע אל העתיד, יראה איזה נס עמד ליצאת ממנו, ואז יזרור להווה ויהפוך לנזיר?

שאלת המשע בזמן מובילה אותנו אל השלב הבא בתורת היחסות, הקורי תורת היחסות הכללית. לא ניכנס כאן לפרטיה, שכבר הוסברו בספרים אחרים בסדרה זו, ורק נציגו שהיא מתחארת את חוקי התנועה כנובעים מהמבנה של המרחב-זמן. הגרוויטציה, למשל, היא עיקום של המרחב-זמן. גופים ה"נמשכים" אל גוף כבד פשטוט מציתים לחוק הראשון של ניוטון, המצווה עליהם להמשיך בתנועתם בקו ישר, אבל כשהם מתקים סביב גוף כבב, איזי "קו ישר" מוליך היישר אל הגוף עצמו. תורה היחסות הכללית גם תראה את המרחב-זמן כולם, כולל את הגוף עצמו, כמובן, והשאלה אם העיקום הזה עושה את הגוף "סגור" על עצמו או לא היא אחת השאלות הפתוחות החשובות של הקוסמולוגיה. עוד תצא ניסיוני חשוב של תורה היחסות הכללית הוא שגוף הנמצא בתואצה מודד את הזמן לאט יותר. במלים אחרות: כל התהליכים בו מאיימים את מהלכם ביחס לגופים שאינם בתואצה. כיוון שתואציה וגרוויטציה הן היינו-הך בתורת היחסות הכללית, הרי שאדם הנמצא בקרבת כדור הארץ יזדקן לאט יותר מאשר חברו המרחק בחלל. ההבדל הזה כਮובןZNICH כשמדבר בשדה הגרוויטציה של כדור הארץ, אבל מי שייצליה להתקרב לחור שחור מבלי להיבלע בתוכו ויברחה משם כעבור שעה קלה, יגלה שהוא נמצא נמצא בעtid הרחוק, שכן הזמן שעבר על הזמן בינהיים שווה לכמה אלפי שנים.

כל אלה הם תוצאות המתחיבות מבנה המרחב-זמן העקום, כפי שהוא מתואר על-ידי היחסות הכללית. והנה, יש כמה פתרונות אפשריים של המשוואות המתארות את עקומות היחסות המרחב-זמן, מהם משתמש לפחות להפליג אחורנית בזמן. הראשון שהשתעשע בפתרונו היה קорт ג[דו]ל הגאנוי, מגלה משפט הא-שלמות שהריעש את המתמטיקה. גדל המתמודד עם פאראדווקס רצח-הסב לעיל בהנחה שרירותית שדבר זה פשוט לא יהיה אפשרי. בשנים לאחר מכן התעורר מחדש מתחם העניין בעיקומי המרחב-זמן עקב המחקר בתכונות החוררים השחורים, שאוותם נפגש בהמשך. שייהי ברור: אף אחד אין מושג יrox מה קורה ממש בתוך החור השחור, באונה נקודה בעלת גודל אפסי האמורה להימצא במרכזו. הגיאומטריה של המרחב-זמן לא סתם מתעקלת בנקודה ההיא אלא יוצרת מין "קווזי" כזה שככל המשוואות המתארות אותו נותנות אינסוף חסרי ממשות. ובכל זאת, היו שמצו פתרונות שלפיהם ניתן לעبور דרך חור השחור או "חור תולעת" מן המקום והזמן שלנו אל יקום אחר או אל הזמן שלנו בזמן אחר.

אבל מה בקשר לפאראדווקס הסב? האם אין דרך לא שרירותית להימנע ממנו? שני חוקרים ידועי-שם מאוקספורד, דיוויד דויטש ומיקל לוקווד, הציעו רעיון מהוכם. הם אימצו את "פירוש העולמות המרוביים" שכבר הזכרנו בדיוננו על תורה הקוונטיים. לפי הפירוש זה, כל פעם שפונקציית-গল כלשהי באה במאע עם עצם ה"מודד" אותה Q כלומר, אין-ספור פעמים בכל שנייה Q מהפצל כל היקום {וأنو יהז אותו} לאין-ספור יקומים שבכל אחד מהם מתמשת אחת התוצאות האפשריות. עם הרעיון הזה באו דויטש ולוקווד לפאראדווקס והכריזו שפתרו אותו: פשוט, מי שيسע אל העבר ויהרגו את סבו, יעשה את זה בענף אחר בהיסטוריה המתפצלת של היקום, ולענף הזה יהיה המשך אחר, שבו אין שם פאראדווקס.

הרעיון הזה נחשבים, באופן טבעי, למהפכנים, אבל למעשה הם שמרניים עד שיעום. כל המחברים האלה מניחים בדבר מובן מסוילו שהזמן אינו זורם, ולכן העבר או העtid קיימים ומהכדים לנouse הנוצע ממש כאילו מדובר במרחב. על האפשרות שהזמן

מבטא התפתחות אמיתית, שעדיין אינה מובנת לפיסיקה, הם אינם טורחים להתעכ卜. לעומת זאת, השאלה שאנו מעריכים כaan היא, בכל הצניעות, רדיקאלית באמת: האם הזמן הוא אכן רק ממד ותו-לא?

אם הזמן הוא רק ממד, מדוע אנחנו משוכנעים שהעתיד אינו קיים כפי שקיים ההווה? בתשובה מצבייה הפיסיקה על עובדה הנובעת מחוק שאותו נכיר בפרק הבא, החוק השני של התרמודינמיקה. אחת התופעות הנובעות מחוק זה היא שככל מקורות האור, הקול וכדומה, פולטים אנרגיה בכיוון העתיד בלבד, ולכן אינפורמציה אינה יכולה להגיע אלינו מהעתיד. אבל מכך אי-אפשר להסיק שהעתיד אינו קיים, ממש כמו שאין הצדקה להסיק ששנחאי אינה קיימת רק משום שהיא אינפורמציה ממש עוד לא הגיע אליה לנו. לכן, אומר הפיסיקאי השמרן, העתיד והעתיד קיימים בבדיקה כמו ההווה.

רבים הפיסיקאים המכירים את תורת היחסות שאינם מודעים לפאראడוקס הזה שהוא יוצרת. אדם אחד לפחות היה מודע לו והוטרד ממנו. זה היה כМОון איינשטיין. היה לו ידיד אישי קרוב ושמו מיקלה בסו {M.Besso}. ידידותם החלה בציריך, באותו חברה אגדיות של סטודנטים שנקראה "אולימפה" ושהחברה נגגו להתאסף מדי פעם לשותות אספרסו ולדעת בעוניini פיסיקה. בסו נשאר בקשר הדוק עם איינשטיין גם בשנים הבאות והיה מעורב בכל בעיותו המשפחתיות, והשניים נגגו להחליף מכתבים ארוכים ביניהם. עברו השנים ובסו, הפיסיקאי, נעשה לפילוסוף, והוא מצא עצמו מוטרד יותר וייתר מבעית מעבר הזמן. הוא חזר ואמר לאיינשטיין שימושו חסר בכך שבמה מתארת תורת היחסות את הזמן: היא מתעלמת מתקונתו הדינאמית. איינשטיין כתב לו בסובלנות: "עליך להשלים עם העובדה שהזמן הסובייקטיבי עם הדגש שלו על העכשיו הוא נטול משמעות אובייקטיבית". חלפו כמה שנים Q סליה: על-פי איינשטיין, נדמה היה שהלפו כמה שנים Q ומיקלה בסו נפטר. איינשטיין היה כבר איש זקן וחולה, והוא היה עתיד למות בעצמו כעבור חדש. הוא כתב לילדיו של מיקלה בסו מכתב קצר מוזר, מכתב של פיסיקאי המאמין באמונה שלמה שהפיסיקה שלו מתארת נכון את העולם. וכך כתב: "מיקלה הקדים אותי קצת לעזוב את העולם המשונה הזה. זה לא חשוב. עברונו, הפיסיקאים המסורים, ההבדל בין עבר, הווה ועתיד הוא אשלה, היה עיקשת ככל שתהיה".

בואו ניקח את מכתב התנהומים הזה של איינשטיין ברצינות. כפי שנראה, הוא מבטא השקפת-עולם עקבית ומוגבשת. איינשטיין אומר שהאסון הזה, מות חברו, הוא פחות כאב אם מבינים שההבדל בין עבר, הווה ועתיד הוא אשלה. מיקלה בסו עדין קיים בעבר, אבל כיון שאנו יכולים לתפוס רק את הווה איןנו יכולים לראות את ידידנו המת. אבל הידיד הזה משיך להתקיים שם, בעבר. במונחי המודל של מינקובסקי, קו-העולם של איינשטיין ארוך באربع שבועות מזה של מינקובסקי, אבל שני קווי-העולם נשארים קיימים זה לצד זה.

מורין, לארי הורביזן, שאל פעם שאלה חריפה לגבי האמירה הזאת של איינשטיין: מה היה קורה אילו מיקלה בסו היה בא אל איינשטיין ואומר: אווי ווי, אני כבר לא צעיר כמו הייתה, כאב לי פה וכואב לי שם, וכיוצא בהלה תלונות של זקנים? איינשטיין, על-פי אותה גישה, ציריך היה לומר לחברו גם במרקחה זה כי ההבדל בין עבר, הווה ועתיד הוא רק אשלה וכלן אין מקום לצער, שכן בסו הצער עודו קיים בעבר. אם ניקח את האמירה הזאת ונפתח ממנה תמונה עולם עקבית, נגיע למסקנה הבאה: כל אחד מאיתנו איןנו "אני" אחד, אלא

הרביה "אני"ים. בכל רגע ורגע של חיינו קיים "אני" אחר, דומם וקפוא, כמו תמונה בזוזה בסרט, החווה את מה שקרה באותו רגע. החוק השני של התרמודינטיקה, שעוד נתעמכ בז, גורם לכך שהזיכרון האגוריים במוחם של ה"אני"ים הרוגאים האלה מסודרים כך שכלי אחד מהם נושא זיכרונות של ה"אני"ים הנמצאים בעבר ולא של אלה הנמצאים בעתיד. לכן, יש לנו אשליה שאנו "אני" אחד עקב העבודה שכלי "אני" רגעי נושא את הזיכרונות של קודמי.

המסקנה הזאת בדבר ריבוי ה"אני"ים, אני חייב להציג, נובעת באופן הכרחי מהתורה היחסות. אם לכל הרוגאים בזמן אותו מידת ממשות, חייב הדבר להיות כך לגבי כל ה"אני"ים של הצופה: בכל רגע בזמן קיים "אני" אחר. הצופה האנושי הוא קו-עולם ארבע-ממדי כמו כל עצם אחר למרחב מינקובסקי, המשתרע לאורך הזמן מיום הלידה ועד המוות, ו"אני" הוא כל חתך תלת-ממדי בקו-העולם הזה. אבל קו-העולם עצמו, כמו כל המרחב-זמן הארבע-ממדי, אינו נع ואינו משתנה.

חברים, יש לי הרגשה שאני חוזר על עצמי, אבל אני מוכחה להציג שוב: ההנחה כאילו קיים איזה "עכשו" העובר על קווי-העולם האלה והופך כל אירוע, לפי התור, מ"עתיד" ל"הווה" ול" עבר", אין לה מקום בתמונה העולם של הפיסיקה הנוכחית. פילוסוף המדע רודולף קרנאפ, ששוחח עם איינשטיין בנושא זה, סיפר כי העבודה שאותה החתסנו לנו, שלפיה ה"עכשו" שונה מן העבר ומן העתיד, אין המדע יכול לתפוס, הייתה בעיני איינשטיין "עניין של ויתור כאוב". "יש מהهو ב'עכשו'", אמר איינשטיין, "שפשוט נמצא מחוץ לתחום המדע".

הפילוסופיה המודרנית הלה בדרך-כלל בצייתנות אחרי הפיסיקה בנקודה זו. ברטראנד רاسل, ובקבותיו פילוסופים אנגליטיים רבים כגון סمارט וגרינבאוום, טענו שככל היגד מסוג "הזמן עובר" או "זמן משתנה" הוא חסר משמעות. סмарט, כשם כן הוא, אףלוطبع את החידוד: Changes do not change. עדי צמח, פילוסוף ישראלי רב-תחומי, הרחיק לכת ופיתח על יסוד ההשערה הזאת אפילו תורה מוסר מיוحدת. הוא אמר כך: מהטענה שהזמן אינו עובר, אנחנו חייבים לקבל את זה שכלי ה"אני"ים שלנו, מהינקות ועד יום המוות, קיימים באותה מידה, כל אחד ברגעו, לאורך זמן. אם כך הדבר, מדוע צריך אני לעשות דברים שייעזרו לאני"י الآخر שלי הקיימים בעתיד? תשובה של צמח, בעקבות דיוויד יום ופילוסופים בודהיסטים, היא שאכן אין הצדקה לכך שאעשה דברים שייעזרו לי בעתיד, כי ה"אני" הזה בעתיד אינו "אני" יותר מכל מישחו אחר. הוא רק נושא את הזיכרונות שלו. והמסקנה של צמח פשוטה: "ואהבת לרעך כמוך" Q בואו נאהב כולנו זה את זה כמו את עצמנו, מפני שכלי אחד מאיתנו הוא אוסף של "אני"ים שונים, והקשר בין ה"אני" הנוכחי שליל לבין הבא אחריו לא צריך להיות חזק יותר מאשר הקשר בין חבריו.

אם כן, יש לנו בנושא זה קונצנזוס רחב המאחד את מרבית הפיסיקאים והפילוסופים. אנחנו יכולים לחזור לרגע אל שני הchemicalים הקדומים שאטם התחלנו את מסענו אל היזמות הזמן, הרקליטוס ופארמנידס. הראשון אמר: דבר אינו נותר כמו שהוא, והשני אמר: דבר אינו משתנה. מරחק אלף שנים שהלפו מאז, מי משני בר-הפלוגטה אלה גבר בויכוח? התשובה ברורה. תורה היחסות היא תורה ברוחו של פארמנידס, המתיחסת אל המזויות כאלו אוסף של אירועים הקיימים יחד. אילו יכולנו להסתכל על המרחב-זמן, כפי שמתוארת אותו תורה היחסות, היינו רואים אותו דומם וקבוע לנצח.

להשכה האורתודוקסית זו את נוטים כמעט כל הפסיכאים בימינו הטורחים מדי פעם להשוב על הזמן. מיעוט קטן בהם נטה להשכה האחורה, ובו עסוק בפרק הבא. אזכור כאן רק כמה פילוסופים שהלכו נגד דעת הרוב. מי שניסה להזכיר שוב את תורה של הרקליטוס בדבר מהותו של הזמן כהשתנות, היה הפילוסוף היהודי-צרפתי אנרי ברגסון. הוא האמין שיש משהו יוצר בזמן, וככל שהפסיכיקה מתפתחת יותר כך היא מאבדת את יכולתה לתפוס אותו. במלים אחרות, הוא סבר שאנו משלמים מהיר בהבנתנו את הזמן: ככל שהבנתנו געשית מתמטית יותר, מדעית יותר, כך חומק משושאותינו ההיבט היוצר של הזמן. בהשכה התהווית זו החזיקו גם וייטהד ורייכנבאך, אבל איש מהם לא הצליח לתת לה ביטוי שאfilו יתקרב לTORAH היחסות מבחינת האלגנטיות המתמטית, יכולת הניבו של תופעות חדשות והיכולת להציג ניסויים חדשים. אם כן לנו אלטרנטיבה מדעית של ממש להשכה השלטת, רק ביטוי של אי-נחת, מין תחושה אינטואיטיבית שלא יתרכן אותה הרגשה פנימית שלנו, שהיא כל כך חזקה, היא מוטעית.

האם באמת, "אף על פי כן نوع ינווע?" אמרותי קודם שבין המיעוט של הCONFIRMERS בכך שחלוף-זמן הוא רק אשליה קיימים גם כמה פיסיקאים, ויש להם דברים די מעניינים לומר בנוגע זהה. בואו אם כן ננסה לתקוף את הבעייה מזוונית פיסיקלית חדשה. נמצא שם אנשים המתלבטים בבעייה אחרת שיש לה נגיעה חשובה לענייננו.

ה חיים הם מה שקרה בעודך מתכנן תכניות אחרות.
גון לנו

בשיכתנו הקודמת השארנו את הזמן תקוע במצב קצר מוזר, או שמא אנחנו תקועים במצב מוזר ביחס אליו? עיקר המבוכה נוגעת לגבי מצבו של העתיד מבחןינו. השכל הישר אומר בתוקף: אני לאאמין שהוא שיקרה מהר, ובמאה הבאה, ובעוד מיליון שנה כבר קיים. העתיד איינו קיים אלא הולך ונוצר מתוכה הווה. על כך עונה הפסיכיקה: כל מה שיכל צופה מסויים לומר על העתיד שלו הוא שאין לו ידיעה עליו, אבל בכך אין הצדקה לטעון שהעתיד איינו קיים. לכן אי-אפשר לומר שקיים מן "הווה" מוחלט העובר לעתיד ויוצר מצבים שלא היו קודם. כל הנחה שלפיה הזמן נع או משתנה גוררת הנחת זמן נוספת וכן וכך הלאה עד לאין סוף. הרבה יותר פשוט להניח שזמן, כמו במרחוב, יש לכל הנקודות ולכל המצבים דרגות ממשות זהה. ההבדל בין עבר, הווה ועתיד הוא, אם כן, כמו ההבדל בין "כאן" ו"שם": זהו הבדל שרירותי ונכוון רק ביחס לצופה מסויים.

אבל בעצם, כשהגענו לשלב הזה בויכוח, עולה בדעתי שואלי אפשר להיפטר מכל העניין בכך שנחלה ששאלות חלוף-זמן פשוט אינה שאלה מדעית. אחרי הכל, יש לנו שתי השקופות, היחסותית וההתהוויתית, שתתייחסו מתיישבות באורה מידה עם כל מה שאנחנו רואים, ואינו מכירם ניסוי שיכריע ביניהן. אם כך, אולי נניח את הנושא לפילוסופים ונעבור לנושאים יותר מבטחים?

לפני שאענה על השאלה לגופה אני רוצה לומר שאיני מרגיש נוח עם עצם הניסיון הפוזיטיביסטי להוציא מתחום המדע שאלות שלא ניתן להכריע בהן מייד. בואו נזכיר באותו איז-שווין גאוני של בל, שעליו שמענו בשיחה קודמת. בל לפק שתי השקופות שונות, של איינשטיין ושל בוהר, שאיש לא ידע להכריע ביניהם בניסוי, ומצא מקרה שאיש לא שם לב אליו ובו הן נתנות ניבויים שונים. מוסר השכל: שאלה פילוסופית יכולה להפוך לשאלת מדעית אם יודעים איך לשאול. לכן, ככל, לא הייתה ממהר להיפטר משאלות על-ידי העברתן אל הפילוסופיה. אבל אני רוצה לעשות הפעם דבר נוסף. בואו נחזור היבט מוזר אחר של הזמן, שלגביו לא יכול אף פיסיקאי לטעון שהוא אינו בעיה מדעית. הבעיה הזאת היא נושא לויכוחים ארוכים ונוקבים במהלך האחרונה: בעית האסימטריות בזמן.

על מנת להבין למה תופעת האסימטריות גורמת כאבי-ראש רציניים, אנחנו צריכים הקדמה קצרה כדי להכיר את אחד המושגים החשובים ביותר בפסיכיקה כיום: הסימטריה. סימטריה נראה מושג הלקוח מתחום האסתטיקה, אבל היא גם אחת התכונות של חוק פיסיקלי טוב. הנה דוגמה: נניח שאני עושה כמה ניסיונות במצבן ומגלה שמחט המצפן פונה לכיוון ימין. אם אקח עוד כמה מצפנים הנמצאים על השולחן ואסתכל עליהם, אראה שההציפה שלי נכונה. אם כן, אני רושם לפני חוק טبع: "מהטי מצפן מצביעות לכיוון ימין". האם החוק הזה תקין תמיד? הנה חבירי היושב מעברו השני של השולחן ינתק, על סמך אותן תכיפות, חוק טבע הפוך. וכשהעביר להבטח במצבים מהצד שלו אctrיך להזות שהצד

אתו. אם כך, אם שינוי מיקומו של הצופה מחייב את שינוי חוק הטבע שניסחנו, הרי החוק שלנו הוא לא תמיד תקין. אני מבין, אם כן, ש"ימין" ו"שמאל" הם מושגים סובייקטיביים הקיימים במעמדו של הצופה כלפי המערכת הנצפית. מה דעתכם על חוק כללי יותר? הנה: "מחטי מצפון מצויות צפונה". החוק החדש הוא סימטרי יותר מוקודמו Q הוא נכון לגבי צופים המסתכלים מצפון מכל הצדדים Q ולכן הוא גם בעל תוקף כללי יותר. בלשון הפיסיקה: החוק החדש הוא יותר אינוריאנטי, ככלומר בלחתי משנתה. בעצם אני וחברי מטילים בעולם עם הצפון וננהנים מהיכולות של חוק הטבע החדש שלנו, עד שנגיע לאזרור הקוטב הצפוני או הדרומי ושם נראה שכיוון הצפון מתחפק בנזודה מסוימת. אם נעמוד שני צדיה של אותה נזודה, יראו המיצנונים שלנו כיוונים הפוכים.שוב, علينا להפוך חוק יותר אינוריאנטי, שייהיה בעל תוקף רחוב יותר ומהסן אפילו משינויים כאלה, ואנחנו מותרים בעצם אפילו על המונחים "צפון" ו"דרום". החוק החדש הוא: "מחטי מצפון מצויות מצויות על קווטר השדה המגנטי הפוך להן".

כך נגלה, ככל שתתקדם, שהטבע אديיש כלפי "שמאל", "ימין", "צפון", "דרום", ואפילו "למעלה" ו"למטה". חוקי הטבע היסודיים עומדים בעינם כאשר מחליפים את הכוונים האלה. תאמרו: איך ייתכן הדבר אם חוק המשיכה קובע שעצים נופלים רק "למטה"? לא נכון. בצדו השני של כדור הארץ יש אנשים עם הראש למטה, וכשהם מפלים חפץ הוא נופל, מבחינתנו, למעלה. גם חוק המשיכה, אם כן, אדייש לכיווני המרחב: הוא מחייב עצמים ליפול לכיוון הגוף בעל המאסה, לא חשוב באיזה צד הוא נמצא.

הסימטריה של חוקי הטבע מתבטאת יפה בבחן הראי. כל התרחשות פיסיקלית שאני רואה, אם אעמיד מולה ראי, אראה בו עולם שכל הצדדים בו הפוכים לשלי: השמאלי שם הוא הימיני שלי ולהפך. ובכל זאת, פיסיקאי המסתכל بما שקרה בראשו לא יוכל להבדיל בין התהליך האמתי לבין תהליך הראי. חוקי הפיסיקה תקפים באותה מידת לא-גבי שני המקרים. הכל תלוי בתנאי ההתחלה: אם תנאי ההתחלה היו כאלה שהכדור מקבל מכמה מימין, הוא יפנה שמאל; אם משמאל, הוא יפנה ימינה. {אמנם, ביוולוג שיסטכל בראש עיר שיחסו השמאלי והימני בארגנוזמים שבו מהופכים לאלה הקיימים במצבאות, אבל הוא יודעת שבבחינת הפיסיקה אין שום מניעה שיהיו יצורים זהים לנו שלבים פועם מצד ימין דווקא. האסימטריה הביוולוגית מקורה כנראה בתנאי ההתחלה המקרים של האבולוציה. נזהור לנושה זהה בפרק ט}. אם כן, הסימטריה של חוק הטבע, הנראת לכאורה דריישה אסתטית, היא בעצם העניקה לחוק הטבע את כלויותו ואת כוח ההסביר שלו.

עכשו מתחקשת, באופן טבעי, הסימטריה של הזמן. אמרנו קודם שכאשר נסתכל על שיקופו של תהליך בראש, נראה תהליך פיסיקלי נורמלי לחולוטין. מסתבר שגם היפוך בזמן נותן לנו תהליך פיסיקלי שהחוק הטבע תקפים לגבי באותה מידת. נתבונן, למשל, בהתגשות של שני כדורי ביליארד על משטח חלק ונסריט את התהליך הזה בוידאו. בעצם נקרין את סרט הוידאו בהיפוך ונראה אותו לפיסיקאי. אם לא היה כל חיכוך, הוא לא ידע להבדיל בין התהליך האמתי והתהיליך המהופך. חוקי הטבע היסודיים הם סימטריים בזמן כמו במרחב. ככלומר, האינטראקציות היסודיות בטבע הן כאלה שגם שוגם אם נתאר אותן מהסוף להתחלה יתקבל תהליך המציאות בבדיקה לאותם חוקי טبع.

המתיםטיקית הידועהامي נ[ת+]ר הוכיחה שככל צורה של סימטריה קשורה בחוק שימור יסודי של הפיסיקה. כך למשל, איני מאמין שהספר שלפניינו פותאם אליו, כי הדבר סותר את חוקי שימור האנרגיה והתנע. זהה בעצם טענה של סימטריה: אין אנרגיה והתנע בתנאי ההתחלת, וכך לא צרכיהם להיות אנרגיה והתנע בסוף. יש כאן גם סימטריה מרחבית: איני מאמין שהספר יתחל פתואם לנوع ימינה, כמו שאיני מאמין שהוא יתחל לנوع שמאלה. וכן בזמן: איני מאמין שהוא יתחל לנوع ברגע מסוים אם עד אותו הרגע הוא נתן, כשם שאינני מאמין שגוף שנע עד אותו רגע ייעזר ללא סיבה.

והנה, הסימטריות השונות משתלבות ביניהן לעל-סימטריות. זה מושג חשוב שכדי קצח להתעכ卜 עליו. נתחל בצורת הגדוד. זה גוף סימטרי מושלם. לאיזה כיוון שנסובב אותו, בין אם יהיה זה סיבוב של 20 מעלות או 75 או 130 מעלות, צורתו עומדת בעינה. אבל עצמים לגמרי לא סימטריים משנים את צורתם אחרי סיבוב חלקיק, וחוזרים למצבם המקורי רק אחרי סיבוב שלם של 360 מעלות. אם ניקח שטר כסף ונסובב אותו חצי סיבוב, 180 מעלות, צורתו תשתנה, כי הצדדים שלו התחלפו. עכשו, קחו שטר כספי וסובבו אותו חצי סיבוב סביב ציר אחד, ולאחר מכן סביב ציר שני, ולאחר מכן סביב ציר שלישי. כלומר: פעמי למלה פעם משמאלי לימין ופעמי מפנימם לאחור. אחרי שלושת ההיפוכים האלה חוזר השטר לבדוק למקומו הקודם. ככלומר, כל האסימטריות של השטר משתלבות לסימטריה גבוהה יותר. ראיינו, אם כן, שני סוגי של סימטריות: סימטריות למרחב וסימטריות בזמן. לגבי הסימטריות למרחב ראיינו דבר מעניין, שהסימטריות ימין-שמאל, למעלה-למטה וקדימה-זורה משתלבות לפעמים לעל-סימטריות גדולות יותר. באופן טבעי השאלה: האם הסימטריות האלה של המרחב משתלבות גם עם סימטריות-זמן לסימטריה גדולה יותר?

בוחלת: אם ניקח סביבון מסתובב ונשקי אותו בראש, הסביבון שבראי יסתובב בכיוון הפוך. כמו כן, אם נצלם את הסביבון המסתובב בוידיאו ונקרין את הסרט מהוסף אל ההתחלת, נראה גם היפוך של כיוון הסיבוב. ככלומר, תנועת הסביבון אינה איננו-ריאנטית תחת היפוך למרחב או בזמן. אבל עכשו נעשה את שני ההיפוכים יחד: נשקי את הסביבון בראש, נשQUIT את התחליך המשתקף ואחר מכן נקרין אותו מהוסף להתחלת. כיוון הסיבוב המקורי יופיעשוב. הזמן מתנהג כמו ממדיהם הדוגמתה, ויוצר סימטריות משולבות המאפשרות לנו לנסה חוקי טبع יותר ויתר כלליים.

ארנסט מאך, הפילוסוף והפיזיקאי, חתף פעמי דיכאונו רציני אחרי שלמד על "חוק היד הימנית" בתורת החישמל. החוק הזה, שאותו ניסה פראדי, מבטא את הקשר בין כיוון זרם החישמל בתיל לבין כיוון השدة המגנטי הנוצר כתוצאה מהזרם. נשים את ידנו הימנית על התיל {אין צורך לגעת, כדי שלא נהפוך בעצמנו לתחפעה אלקטромגנטית מעניינת} כדי שאצבעותינו יצביעו לכיוון הזרם, והוא נראה האגדול את הכיוון שאליו תיטה מהט מצפן המקביל לתיל. תשאלו: מה מדכא פה? האם היה למאך ממשו נגד צד ימין? ובכן, למעשה לא היה שום דבר נגד שום צד, אבל הוא ציפה שם לטבע לא יהיה, והואלקח לבב אישית את העובדה שהחוק הטבע מעדייף צד אחד על משנהו.

אילו היה מאך חי בימינו, היינו יכולים להרגיע אותו כך: נכון, זה היה מוזר אילו היה רק "חוק היד הימנית" ולא "חוק היד השמאלית". הסיבה שאנו רואים רק את החוק הראשון נובעת מסימטריה אחרית הקיימת בחלק זה של היקום: החומר שלנו עשוי מאטומים

שהגרעין שלהם הוא בעל מטען חשמלי חיובי ואילו לאלקטרונים מטען שלילי. מבחינה הфизיקת אין שום סיבה עקרונית מדוע לא יהיה המצב הפוך. נגדי כל חלקי קיימים אנטית-חלקי בעל מטען הפוך ו/או ספין הפוך {ספין הוא מעין סיבוב של החלקיק סביב עצמו}. כך למשל, משיקולי סימטריה ככל הנראה פיסקיים את קיום הפוזיטרונים, שהם אלקטرونים בעלי מטען חיובי, וכן התגלו חלקיים כאלה. לכן, אם קיימים מקומות ביקום העשויים מ"אנטי-חומר", ככלומר מאטומים בעלי מטענים הפוכים לאלה שלנו, שולט בהם "חוק היסוד". מן הסתם היה ההסבר הזה עושה את מאך עצוב מסיבה אחרת: הוא היה השמאליות". פיזיטיויסט מושבע שטען שהאמונה באטומים שאיש לא ראה אותם היא מטאфизית, אבל זו כבר לא הבעה שלנו.

שים לב שלמדנו כאן הרחבה חדשה לעיקרון הסימטריה. עד עכשיו דיברנו על הסימטריה המשולבת של זמן ומרחב. עכשיו אנחנו רואים שגם המטען החשמלי מציאות לсимטריה המשולבת יפה עם הסימטריות האחרות. גילוי זה הוביל למשפט מפורסם בפיזיקה הקרויה "משפט ה-CPT". שלוש האותיות האלה מציניות שלושה מישורי סימטריה: {C (charge) הוא המטען החשמלי, P (parity) מצין את כיווני הימין והשמאל, ובמקרה שלנו את החלקיק והאנטי-חלקיק שכיווני הספין שלהם הפוכים, T (time) - את כיווני העבר והעתיד. משפט ה-CPT אומר שבכל תהליך, אם נהפוך את כל הסימנים האלה יחד, ככלומר, נהפוך את כל סימני ה"פלוס" וה"מינוס", כל ה"שמאל" וה"ימין", וכל ה" עבר" וה"עתיד", יהיה התהליך מהופך אפשרי באותה מידת.

אם כן, עשינו דרך ארוכה בעולם הסימטריות מאז ניסיוננו הראשוני לנתח חוק טبع על סמך ההסתכלות במחט המצחן. ראיינו שיש קשר יפה בין מידת הסימטריה של חוק פיסיקלי לבין כלויותו, חסכנותתו, פשוטותו ויכולתו לאחד תופעות שונות בהסביר אחד. ניתן לומר, למעשה, שככל שההתורות של הפיזיקה מתקדמיות יותר Q מן הפיזיקה הקלאסית אל האלקטרומגנטיות, ומשם אל היחסות הפרטית ומשם אל היחסות הכללית ומשם אל פיזיקת החלקיקים ותורת ה"סופרסימטריה" המתפתחות בימינו Q הן מתאפיינות בסימטריה הולכת וגדלה. בודאי הרגשותם כמה שזה תואם את חזון מיעודינו הפיתגוראים, שנשבו בקסם היופי וההרמוני והחליטו שהיפוך חוקים הארכימוניים יסייע לנו להבין טוב יותר את המיצאות.

בכך, כמובן, נעלמה מהותו החולפת של הזמן. היקום מתואר כאוסף של מצבים, מימי קדם ועד העתיד הרחוק, שכולם קיימים באותה מידת. הרעיון שישנו מין "עכשווי" החולף לאורך הזמן והופך אירועים עתידיים שטרם אירעו להוויה ממשי, אין לו מקום כאן. זוכרים את מישורי ה"עכשווי" של רואבן ושמעון? דיאגרמת מינקובסקי תעזר לנו להבין מדוע נובע מהם שהזמן לא עבר. נניח שרואבן ושמעון נמצאים באותו מקום אחד ביקום. נניח עוד שביקום אחר, הרחק מהם, חי לוי (תמונה 3). נניח שרואבן נושא ברגע מסוים לכיוונו של לוי בעוד ששמעון נושא באותו רגע לכיוון הההפוך. נשאל את שניותם ברגע זה: "מה עושה לוי

עכשו?" תשובה של רואבן תהיה: יושב על ספסל בגין עם חבריו הזקנים, שותה תה ומפליג בדיורים על מהותו. ואילו שמעון יאמר: יושב עם מוץ' בעגללה בה מובילו אותו אמו לפעוטון. אם כן, בחיי לוי יש אינספור רגעים וביהם אינספור מצבים, מינקות עד זקנה, ועל-פי תורה היחסות כולן אמיתיים באותה מידת. כל אחד מהם הוא "עכשו" לגבי צופה כלשהו.

דבר אחד חשוב להציג בדיון זהה, והוא שלמרות שצופה אחד טוען שה"עכשו" שלו חל בו-זמן עם העבר של צופה מרוחק, הוא לעולם אינו יכול לשגר תשודרת לאותו ארורע בעבר. לכן, אם מישחו חשב שכ' יכולם רואבן ושמעון להזהיר את לוי על אי-יעדים שיקרו בעtidו, תמצאו שהפיסיקה מונעת כל אפשרות שכזו. נסביר: בכך שהוא ליעיל יתקיים, צריכים רואבן ושמעון להיות מרוחקים מלי' כמה מאות שנות או! במצב זה, רואבן יידע לחשב כי "עכשו" לו! מפתפת עם חבריו הקשיים, אך הוא יאלץ לחכות כמה מאות שנים כדי לצפות בהם ולדעת מה נאמר שם. ובאותה מידה, אם שמעון ירצה לשלו מסר לloi', המסר יגיע לנכדיו...

ספרנו איך הגיעו מינקובסקי לפיתוח הבסיס הגיאומטרי ל תורה היחסות. והנה, כשהשمع אינשטיין על הרעיון של מינקובסקי פטר אותו בבלוג: "משמעותו שמתמטיקאי אחד הצליח לעשות את תורה היחסות שלו כל כך מסובכת שאף אחד לא בין אותה". האם היה אינשטיין עדין פגוע מהעובדת שמינקובסקי כינה אותו "עצלן" כשהיה סטודנט? כך או אחרת, בעבר --- שנים נאלץ אינשטיין לבולו זורה את אמרתו המגלגת. מינקובסקי כבר לא היה בחיים (הוא נפטר מדלקת התוספתן ולפני מותו אמר: "כמה חבל למות בשחר תורה היחסות"),

אבל אינשטיין היה מוטרד מאוד מהעובדת שתורת היחסות הפרטית שלו מתאימה רק לתנויות קצובות, ככלומר תנויות בנסיבות קבועה ובכיוון קבוע. הפעולות העדינות שמנינו לעיל () כמו בניית קלפים ושתייה תה, יכולות להתבצע ללא הפעעה רק בהיעדר شيئا' בנסיבות. ברגע שהמערכות הנעה מאיטה, מאייצה או משנה את כיוונה, איזו תנועתה אינה יחסית وكل לקבוע בודאות מי Nun ומי Nah.

אבל ברגע שהרכבת מאיטה, מאייצה או משנה את כיוונה, يتمוטט מגדל הקלפים והטה והחלב יישפכו לכל העברים, למגינת-לב הגברות. כאן כבר לא יוכל לטעון שהרכבת עמדה ורק כדור הארץ שינה את מהלכו: תאוצה היא תופעה מוחלטת ולא יחסית. שנים רבות שקע אינשטיין בחיפוש אחר תורה שבה יישאר עיקרון היחסות תקף גם לגבי מהירותו לא קצובות וכן גילתה את תורה היחסות הכללית. בתורה זו מופיע עיקרון חדש: אדם הנמצא במהירות לא קצוביה יכול לפרש את כל התופעות שהוא רואה, כגון התמונות מגדל הקלפים ושפיכת התה, כאשר פועל על הקרון כוח משיכה מהצד ההפוך לכיוון התאוצה. כשהיחס אינשטיין מה יקרה לkrן או רור בקרון שתונעו לא קצובה,

כל זה עיקר היחסות הכללית בקיצור נמרץ. מה שחשוב לנוינו הוא שאינשטיין לקח את הגיאומטריה של מינקובסקי ועשה אותה לבן-פינה בתורת היחסות הכללית:

א. הפירוש של הצופה מבחוץ: הנושא המשכנ שבעליית נופל בנסיבות הולכת וגוברת ארצתה. כשהוא מוג קוקה-קולה לכוס היא נשפכת בנסיבות הולכת וגוברת לפני מטה אבל לא מגיעה אל הocus הנופלת גם היא. וכשהוא עוזב את הocus גם היא נופלת אותו בנסיבות מהירות, וכך היא נשארת ליד ידו.

ב. הפירוש של הצופה מבפנים: אני מרוחף לי בנחת בעליית שאין בה שום כוח משיכה, ולכן הocus שעוזבת מרחפת בדיקון מקום שבו השארתי אותה והkokah-kolla מרחפת מעלה (אגב, משום-מה האדמה המשוגעת הזאת מתקדמת לקראתי מלמטה בנסיבות הולכת וגוברת).

א. הפירוש של הצופה מבוחז: על הנוסע שבמעלה לא פועל שום כוח משיכה. זו רק המעלית שמאיצה כלפי מעלה. כשהוא מוזג קוקה-קולה מהבקבוק לכוס, הכוו מאיצה כלפי מעלה וקולטה את הקוקה-קולה ומאלצת אותה להיות צמודה לקרקעית הכוו, וכשהוא עוזב את הכוו מידו היא נשארת במקומה אבל רצפת המעלית דוחרת למעלה בתאוצה ומרסקת אותה.

ב. הפירוש של הצופה מבפנים: אני נתון להשפעת כוח משיכה. לכן הקוקה-קולה נשפכת יפה לכוס, וכשאני עוזב את הכוו היא נופלת לרצפה ונשברת (אבל, כל העצמים שבוחז נופלים גם הם במהירות הולכת וגוברת כלפי מטה, ורק בגלל שימושו מושך את המעלית שלי לכיוון ההפור היא נשארת כל הזמן במקומה).

מדוע הזמן לא עבר

19.1

מהי תכונתו הבולטת ביותר של הזמן? רוב בני האדם יאמרו: הזמן עבר, הזמן רץ, הזמן, פשוט, בורה לנו כל הזמן.

והנה, בהיגד זהה יש פגם לוגי קטן: הוא מופרך מיסודה. כל אמירה מסווג "זמן חולף/עובד/orom" מובילה לסתירה מיידית. "לנوع" פירושו להיות במקום אחד בזמן אחד, ובמקום אחר בזמן אחר. כלומר, הזמן הוא אמרת המידה לתנועה. אם אדם אומר שנסע מביתו אל בית החותנתו, כוונת הדברים היא שבשעה שעשו ושלושים היה בביתו, ובתשעה ועשרים בבית החותנתו, ובכל רגע של זמן מסוימת היה במקום אחר בדרך. הזמן הוא המודד את התנועה. וכך הבהיה: אם נרצה לומר שהזמן עבר לגבי אותו אדם, הרי בהתאם להגדירה לעיל של "תנועה" נctrיך לומר שהזמן אחד באותו מקום אחר בזמן אחר, וזה כמובן אבסורד. נסו לחשב, למשל, על השאלה "באיזו מהירות זרם הזמן", ותראו איך אתם מסתבכים. לשם כך הצורך להניח את קיומו של מין זמן-על, שלפי אותו היגיון גם הוא יוצר זמן-על ממשו, וכן הלאה במין חד-גדי אין סוף.

והנה, הפיסיקה עשויה דבר פשוט עם מעבר הזמן: היא מתעלמת ממנו להלוטין. לשוא נחפש באיזה חוק מחוקיק הפיסיקה התיאhorות כלשהו למעבר הזמן. כל מה שנוננים לנו חוקים אלה הוא כללי התאמאה: אם נתונה מערכת מסוימת, ונחותים תנאי ההתחלתה שלה, יוכל לומר מה יהיה מצב המערכת בכל רגע ורגע. אבל בכך אין שום רמז שהזמן זורם. קל להמחיש זאת בעזרת הדוגמה של מפה גיאוגרפית. המפה נותנת לנו התאמאה בין קווי האורך או הרוחב של אזורים מסוימים לבין הגובה שליהם מעל פני הים. כך למשל, בישראל, ככל שננו מזרחה, נמצאת עצמנו במקום יותר ויותר גובה מעל פני הים ואחר כך יותר ויותר מדרום, עד שנגיע אל הבקעה. ברור שאין בכך שום טענה שהארץ "עליה" או "ירדת". גובה הארץ קבוע בכל מקום, ו"משתנה" רק כשבורים ממוקם. בדוק באופן זה, הפיסיקה איננה אומרת לנו שום דבר על תנועתו של הזמן אלא רק על ההתאמאה בין הזמן לבין מצבים פיסיקליים שונים. אם ידוע לנו, למשל, הגובה שבו נמצא אבן מעלה לקרקע ברגע שנעוזב אותה - h_0 , יוכל לדעת היכן תימצא האבן בכל רגע נתון:

$$h = h_0 - \frac{1}{2}gt^2$$

במקום h_0 נרשום את הגובה ההתחלתי, במקומות t , ניכנס את השניה המדוקית בה אנחנו רוצים לדעת היכן האבן וailo g הוא גודל קבוע המציין את תאוצת הגרavity. מטר לשנייה ברכיב�ו). יש לנו, אם כן, שורה של מצבים פיסיקליים המתאימים לכל רגע בזמן. אבל שימו לב שבמושואה זו, כמו בכל שאר

משוואות הפיסיקה, אין שום רמז לכך שהזמן עצמו משתנה!

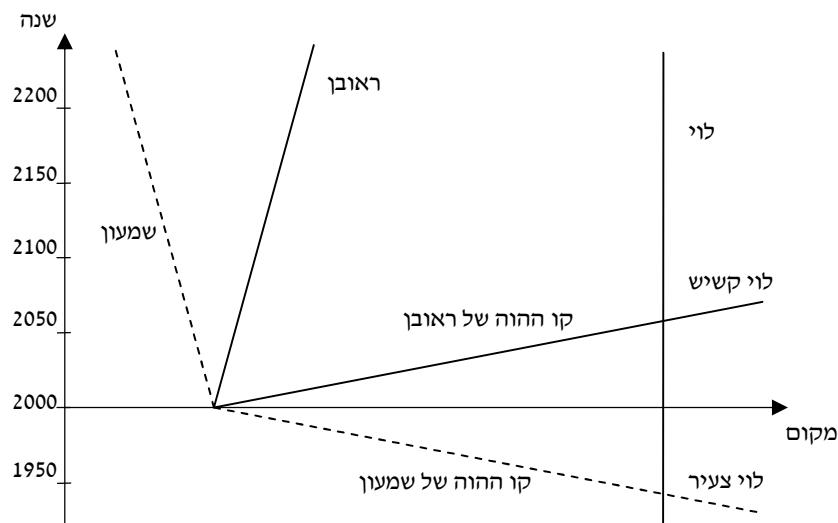
כך נוצרת סתירה מהותית בין החוק היסודי לבין תחושתנו. תחושתנו אומרת "המצבים השונים של האבן מופיעים בזה אחר זה" ועל כך עונה הפיסיקה: "בחוקים שלי אין שום זכר להופעה ולהיעלמות זאת של המצבים. מבחינתי כל הרגעים קיימים יחד (כמו שככל המקומות במפה קיימים יחד) ובכל רגע קיים המצב הפיסיקלי המתאים לו".

לא נצא מהתסבוכת הזאת גם אם נאמר שאנו עצמנו נעים בזמן. אולם פרדוקסים ייחכו לנו גם כאן. לומר שאנחנו נעים בזמן, פירושו להפוך את הזמן למדיד מרחב כלשהו שעליו אנו נעים, ושוב תישאל השאלה: באיזו מהירות? ושוב נזדקק למדיד זמן נוסף וכך לא יהיה לדבר סוף.

בצ'ר לנו, נפנה אל המהפכה המדעית האדירה ביותר שהלה בהבנת הזמן, תורה היחסות. כאן תלך בעיתינו ותחריף. מהחיר שתובעת תורה היחסות מהשכל היישר בנושא זה גבוהה הרבה יותר. נקדים ונאמר שדווקא איינשטיין, בנויגוד לפיסיקאים רבים, חיש שהמahir הזה שתובעת תורה היחסות מכאייב במיוחד אבל הוא לא מצא לכך פתרון אחר.

הכל טוב ויפה, אבל לאן נעלם הזמן?

ນץין, עם זאת, שפיסקיים אחרים חיפשו דרכיהם יותר מתחוםzeit לערך את גבולות הזמן ופיאלו לעשות מסענות בזמן. כך, למשל, מצא המתמטיקאי האנגלי קורט גל (מגלה משפט אי-השלמות הידוע) פתרונות להורות היחסות הכלכליות שבמה המרחב-זמן מתקעם סביר עצמו בצורה המאפשרת לאדם לחזור לעברו. כתוצאה מ"תגלית" זו החל גדול להוגיע את מוחו בשאלת מה יקרה אם יחזור אדם לעבר ויירוג את אביו מולדיו. הוא "פתר" את הבעיה פשוט ע"י הנחה שרירותית שאדם כזה תמיד ייכשל, למשל, שהcador יתקע לו באקדח וכדומה. סטיבן הוקינס וקיף ת'וון הציעו גם הם תריחסים דומים המבוססים על תורה היחסות הכלכלית. לבארה, אלו הם מודלים נועזים, אבל בכלל הקשור לשאלת מעבר הזמן הם שמרניים עד שיערומם. מי שטוען שנייתן לנסוע אל העבר כשם שנייתן לנסוע להוּדוֹ, מניה שאירועי העבר קיימים לצד אירועי ההווה כשם שהרוּדוֹ קיימת לצד ישראל. חזרנו, אם כן, לתמונה היקום הקפוא של איינשטיין ומינקובסקי.



תמונה 3

פילוסוף נודע, הנס ריכנបאך, סיפר איך באמצע הסרט "רומיאו וויליה", לפני שיוליה שתחה את הרעל, צעק אליה מישהו מהקהל: "אל תעשי את זה!" כולם מגלים על טעות זאת, אמר ריכנបאך, אבל אנחנו צריכים להבין שגם העולם הממשי שלנו הוא זהה. כל מה שהיה בעבר כבר קיים, לצד מה שקרה עכשו ולצד מה שכבר קרה בעבר. כל הממצבים קיימים יחד לאורך זמן, כמו שכל המקומות קיימים יחד לאורך ממדיו המרחב, כמו תמונה בסרט.

הקץ, אם כן, לרעיון הבחירה החופשית. אם יחליט אדם סתם כך לנגור את הקיר כדי להוכיח שיש לו רצון חופשי, נסביר לו כי גם החלטתו לנגור את הקיר, שבאה בעקבות התתרממות על הידיעה שהעתיד כבר קיים, הייתה אף היא קיימת מזמן וועלם כמו כל שאר אירועי העבר והעתיד. וכך גם הקץ למושג ה"אני" היחיד. אם יאמר מישהו "הבוקר אכלתי פצוצי אורז ובערב אוכל אטריות" נctrיך לוומר לו כי אותו אדם שאכל פצוצי אורז "עודו" אוכל אותו, זה שיאכל אטריות "כבר" אוכל אותן, ואילו זה הדבר אליו הוא חילק אחר של קו העולם שלו אותו אדם. אם ניקח את האמירה הזאת ונפתח ממנה תמונה עולם עקבית, נגיע לעסקנה הבאה: כל אחד מתנו איננו "אני" אחד, אלא הרבה "אני"ים. בכל רגע ורגע של חיינו קיים "אני" אחר, דומם וקפוא, כמו תמונה בודדת בסרט, החווה את מה שקרה באותו רגע. החוק השני של

התרמודינאמיקה, שעוזר לתעמק בו בהמשך, גורם לכך שהזיכרונות האגורים במוחם של ה"אני"ים הרגשיים האלה מסודרים כך שכל אחד מהם נושא זיכרונות של ה"אני"ים הנמצאים בעבר ולא של אלה הנמצאים בעתיד. לכן, יש לנו אפשרות שאנו "אני" אחד, וזאת בשל העובדה שכל "אני" רגעי נושא את הזיכרונות של קודמיו. לא לחינם אמר הפיזיקאי הנודע אדינגרטון כי המשפט "כל יום אני מרגיש טוב יותר" צרייך, על-פי תורת היחסות, להתנסח כך: "הצד של קו-העולם שלי הפונה לעתיד מרגיש יותר טוב מהצד הפונה לעבר".

השකפה זו ידועה כהשकפת "היקום הקפוא" (Block Universe) והוא המקובלות על רוב הפסיקאים. שייהי ברור, הדברים הללו אינם פרשנות מסוימת לTORAH היחסות. הם נובעים ממנה באופן לוגי. איינשטיין עצמו היה מוטרד בכך שבפיזיקה אין מקום למעבר הזמן. הפילוסוף רודולף קרנאפ, ששהה אליו בנוסחה זה, סיפר כי העובדה שאת התנסות שלנו, שלפיה ה"עכשווי" שונה מן העבר ומן העתיד, אין המדע יכול לתפוס, הייתה בעניין איינשטיין "ענין של יותר כאוב". "יש משחו ב'עכשווי', אמר איינשטיין, "שפשות נמצאה מחוץ לתחום המדע".

חישד ראשון: הזמן עדיין נותר מזרך בתורת היחסות

הקורא המבקש לצירר לעצמו את התיאור הנוכחי של קרייתו במאמר זה על-פי TORAH היחסות צרייך, אם כן, לתאר זאת כך: אדם ארבע-ממדי המתמשך ממה עבר אל העתיד, אווז בידו הארבע-ממדית בספר ארבע-ממדי. כל רגע הוא בעצם חתך תלת-ממדי בגופים אלה. אם כן, לא קורא אחד ולא ספר אחד, אלא אינספור קוראים ואינספור ספרים, ככל אחד מהם הוא חתך תלת-ממדי במרחב-זמן הארבע-ממדי. כל "אני" רגעי כזה מסתכל באות בודדות בספר שמלו. תחושתו של הקורא כי הוא קורא אחד שקרה מאמר זה מתחילה מוסברת, אם כן, כאשרlia גרידא הנובעת מסידור הזיכרונות לאורך הזמן, כפי שהסבירנו לעיל.

הכל טוב ויפה, והתמונה הזאת באמת עקבייה ולא ניתן לסתור אותה, ובכל זאת היא משאירה אותנו עם תחושה לא נועה שמייחדו פה לא מבין מושהו. נכון, TORAH היחסות הראתה שהזמן הוא אחד מרבעת ממדיו היקום, יחד עם ממדי המרחב. ובכל זאת יש הבדל עקרוני בין ממדי המרחב והזמן: למרחב יכול אדם לעמוד במקומו או לנוע קדימה ואחורה, בעוד דרכן לעמוד בזמן ובוודאי שלא לכלכת אחרוניות (חו"ץ מאשר בנבכי חור שחור, אך על כך בהזמנות אחרות). אם הזמן הוא רק ממד, מדוע אנחנו יכולים אותו בצורה כה שונה מאשר הממדים?

ואכן, היחסות מבדילה את הזמן מאשר הממדים בכך שקווי העולם מתמשכים תמיד לאורך הזמן (אם כי הם יכולים להתפתל ולהתעקם עד גבול מסוים) ולעולם לא לאורך אחד מממדיו המרחב. למעשה, היחסות יוצרה הבדל עמוק אף יותר בין הזמן לביןשאר הממדים: משפט פיתגורס, כמובן, מורה איך למצוא את המרחק בין שתי נקודות למרחב התלת-ממדי: נמדד את הבדלי האורך, הרוחב והגובה בינהין, נעלם כל אחד מהגדלים האלה בריבוע, נחבר אותם וכן נמצא את ריבוע המרחק בין הנקודות:

$$l^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$$

במרחב-זמן, לעומת זאת, אם אנו רוצים למצוא את ההפרש בין אירוע במקום אחד ובזמן אחד לבין אירוע אחר במקומות שני ובזמן שני, علينا לחזור על התרגיל באربעה ממדים, אבל את מד הזמן בריבוע נctruck לא להוסיף אלא להחסיר!

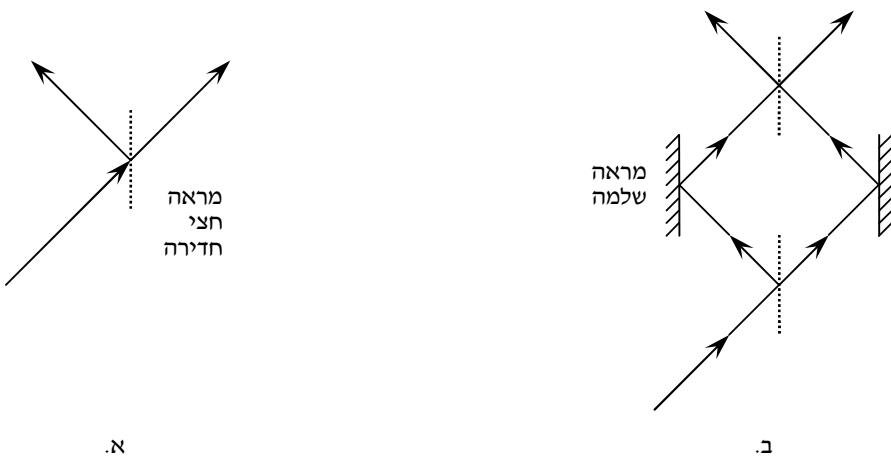
$$\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 - \Delta t^2$$

אף אחד לא נתן עדין הסבר של ממש ל"מינוס" הזה המיחד בתורת היחסות את הזמן, אבל עבורנו יש כאן עוד חיזוק להשׁד שזמןינו אינו "סתם" ממד.

על מוקדם ומאוחר בתורת הקוונטיים

אם היחסות מאנזבת את המבוקש הוכחה למעבר הזמן, מה אומרת על כך יריבתה ההיסטורית של היחסות, מכאניקת הקוונטום? תשובהה של התורה הזאת – כמה לא מפתיע – "כן ולא".

תורת הקוונטום היא תורה די מסובכת, אבל הפרודוקסים הנכונים ממנה הם פשוטים מאוד – כל אחד יכול להבין כמעט מעצמה – וזו בדיקת הסיבה שהם כל כך חמורים! נציג כאן שלושה מהניסויים המפורסמים של תורה זו, המביאים לתוצאות פרודוקסליות, ונבחן את ההשלכות שלהם לגבי טבע הזמן.



תמונה 4

הניסוי הראשון קשור בתופעה הקרויה התאבכות. לשם כך נפצל אלומת אור לשתי תת-אלומות בדרך הבאה. אם קרן אור פוגעת בזכוכית שקופה, היא עוברת כולה. אם היא פוגעת בראשי, היא מוחזרת כולה. לפיכך, אם היא פוגעת בראשי-חדר, ח齊ה עבר וח齊ה מוחזר (תמונה 4א). עכשו נשים שני צדדיו של ראש הרציח-חדר כזה שתי מראות שלמות, שתהינה קצת מעליו, וכקצת מעליהם עוד ראש הרציח-חדר, ועוד קצת מעליו שני גלאי-אור משני הצדדים. מתקיים מעוין מדויק של מראות (תמונה 4ב). למעוין זהה, כפי שגילו מאך זונדר לפניו שנים רבות, יש תוכנה נחמדה: אם קרן אור פוגעת באכלסון בראשי-חדר התחתון, היא מתפצלת לשני הצדדים, הפוגעים בשתי המראות השלמות ומוחזרים בשלמותם אל הראי החצי-חדר העליון. כאן מתפצלת כל מחצית לשני גלאים, אבל כל ארבעת הרביעים הללו מצטרפים זה אל זה בדרך השונה מהחשבון המוכר לנו: שני הרביעים מצד אחד מבטלים זה את זה, וכך מתkowski אף אור בגלאי שבאותו צד, ואילו שני הרביעים מהצד השני מחזקים זה את זה ויזרים אלומת אור שלמהenklatet בגלאי הנגדי. אם כן, כל אלומת אור שתיכנס למתקן זהה מלמטה מכיוון ימין תצא ממנה מלמעלה לשמאלי, ולהפך.

כל זה ידוע יפה מתרת הגלים של הפיזיקה הקלואיסטית ולא קשה להסביר. והנה, איינשטיין, כשהחיש דרך להפריך את תורה הקוונטום שתמיד הרגיזה אותו, מצא במתיקן הזה דוקא תמיכה מפתיעת לתורת הקוונטים. תארו לעצמכם חליק אור יחיד, "פוטון", הנכנס למתקן כזה. הפוטון הוא חלקיק בודד, ולעולם לא נמצא חצי-פוטון. לפיכך היינו מצפים שהפוטון יעבור רק באחד המסלולים של מתקן מאך-זונדר. אבל העובדה היא שהוא תמיד יodium לצאת למעלה מימין, ונקלט בגלאי שמאלו, מראת שבאיזו דרך כישופית הפוטון עבר בשני המסלולים בעת ובעוונה אחת! ואמנם, ב-1991 הצעו אליצור ווידמן ניסוי שבו מונחת על אחד המסלולים פצצה כה רגילה עד כדי בפוטון היחיד לפוצץ אותה. האם אפשר לבדוק האם פצצה

כזאת תקינה או מוקלקלת בלי לפוצץ? ההיגיון הפשט אומר, כמובן, שם הפעצה רגישה אפילו לאינטראקטיבית החלשה ביותר שאפשר, לא ניתן לבחון אותה גם להשאר אותה שלמה. אבל, בהסתמך על התהלהן הקונטני שבו פוטון ייחד "עובר" אי-יכחו בשני מסלולים, הראו אל-יצור וויזמן איך פוטון בודד יכול להרגיש בקיומה של פצחה במסלול אחד בעוד שהוא עבר, לכאהרה במסלול השני.

מה שעושה את תורה הקונטנים ל תורה פיסיקלית מרכזית היא העובדה שמה שאמרנו כאן על הפוטון נכוון לגבי כל הלקק: אלקטרוניים, פרוטונים וכל החקיקים הידועים לנו כחקיקים בעלי מסה, ואפילו אטומיים ומולקולות שלמות, יתנהגו כגליים לכל דבר כשיעברו במתקן מאך-זנדר. כמובן, הם מסוגלים לעبور בשני מסלולים (או באلف מסלולים) בעת ובזעונה אחת. העובדה שהדואליות הזאת מאפיינת אל כל החקיקי החומר והאטומיים הידועים לנו היא העושה את תורה הקונטנים לתורה בעלת תוקף כללי.

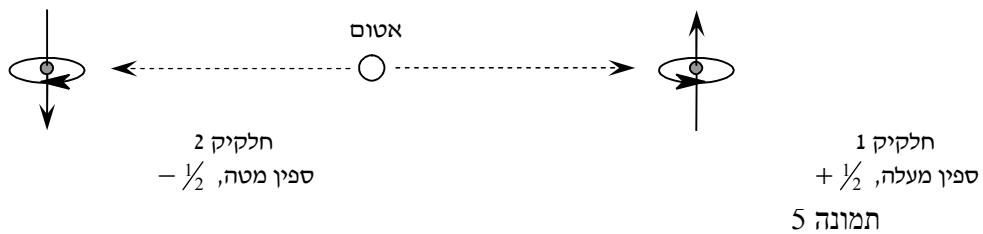
עכשו נצדע רק עוד צעד אחד מהניסוי פשוט הזה לניסוי דומה, "ניסוי הברירה המאוחרת". גם כאן, הרעיון המקורי הוא של איינשטיין, כאשר ג'ון וילר מאוניברסיטת פרינס頓 פיתח אותו בצורה המדגישה את הפרודוקס שהוא יוצר. נתאר לעצמנו מתקן מאך-זנדר גדול מאוד, כזה שנדרשות שנים רבות לפוטון הבודד כדי לעبور אותו. למעשה, טען וילר, יש ביקום כוכבים רבים המפיצלים פוטונים העוברים לידם ומאהדים אותם בבדיקה כמו מתקן מאך-זנדר, רק שהמרחקים במקרה זה נמודדים במיילוני שנות אור. לכן, כשהפוטונים הללו מגיעים לכדור הארץ, הם מספקים ניסויי ברירה מאוחרת בקנה-מידה אסטרונומי.

עכשו נדמה לעצמנו נסין היושב ליד הראי החזי-חדר העליון ומחליט ברגע האחרון, סתום לפិ החשך, אם לסלк את הראי הזה או להשאירו במקומו. אם יסלק אותו, יתגלה הפוטון באופן אקראי באחד משני הгалאים. פירוש הדבר זה הוא שהפוטון התנגן כחקיק ממשך כל השנים ועבר ממשך כל השנים רק לעומת הימני, ופירוש הדבר הוא שהפוטון התנגן כגל ממשך כל השנים ועבר בשני המסלולים. הנה, למעשה, חלום של כל הסטאליניסטים לדורותיהם: החלטה בהויה משנה את ההיסטוריה כרצוננו. ניתן לומר כי אנחנו המהלייטים אם הפוטון "היה" חליק או "היה" גל ממשך כל התקופה בה עשה את דרכו אלינו.

מה אומר הניסוי הזה לגבי מעבר הזמן? הדברים אינם פשוטים וכואן יש מחלוקת אפילו בין שני המחברים של מאמר זה. אחד מאתנו (א.א.) רואה בניסוי הזה תמיכה חזקה להשערה ההתחווות: הנה, לא רק העתיד נתון לשינוי, אלא גם העבר, הנחשב מעצם הגדרתו לעובדה מוגמרת, יכול, בהתאם מסוימים ובנסיבות מסוימות, להשנותו. השני (ש.ד.) גורס אחרת: הנה, כל מצב קוונטי "כבר" נקבע ע"י אירועים שיתרחשו בעתיד ממש כמו שהוא נקבע ע"י תנאי העבר, כפי שטוענת השקפת "היקום הקפוא".

הניסוי השלישי שנציג הוא ניסוי איינשטיין-פודולסקי-רוזן (EPR). הוא הומצא ע"י איינשטיין כדי להוכיח את חבירו נילס בוהר, אבל עם הזמן התברר שתוצאות הניסוי דווקא תומכות בפירושו של בוהר למכניקת הקונטנים, על כל המסקנות מההypothesas הנובעות ממנו.

על-פי אחת הגרסאות של ניסוי זה אatom פולט שני החקיקים כך שהספרין המשותף שלהם הוא אפס. הספרין הוא תוכנה פנימית של החקיקים קוונטיים הדומה לסייעת החקיק סביר עצמו כסבירון. החקיקים קוונטיים (בעל ספין $\frac{1}{2}$) בשדה מגנטי, יכולים להסתובב רק בשתי צורות: עם כיוון השעון (הנקרא ספין $\frac{1}{2}$ – או "ספין מטה" על-פי כיוון ציר הסיבוב ב"חוק היד הימנית") או נגד כיוון השעון (ספין $\frac{1}{2}$ + או "ספין מעלה") – תמורה 5.



כלומר, אם חלקיק 1 מסתובב כך שציר סיבובו פונה כלפי מעלה, אז ציר סיבובו של חלקיק 2 חייב לפנות מטה, וכן להפוך. נניח לשני החלקיקים להתרחק זה מזה מרחק רב כרצוננו ואו נמדד את הס핀ן של אחד מהם. אם הוא פונה למעלה נדע שהס핀ן של החלקיק השני פונה מטה ולהפך. פירושו של אינשטיין למשהו זה היה פשוט: לשני החלקיקים היו **mirror spins** מוגדרים, והמדידה שלנו רק שינתה את הידע שלנו לגבי הס핀ן האחד ולפיכך גם את הידע שלנו לגבי הסpinן השני. זו, כמובן, תשובה השכל הישר למצב זה. אך, אם במקורה העלה אדם ועל בית ימינו מהמגירה, הוא פשוט יודע שהנעל שנתרה היא שמאלית. המדידה לא שינתה אם כן את מצב החלקיקים אלא רק את מצב ידיעתו של הצופה.

אבל בויה העדיף כאן את היגיון המטורף של תורה הקוונטום, לפיו המדידה אינה סתם מגלה תכונה שהיתה קבועה מראש אלא ממש יוצרת אותה ברגע המדידה. מכאן משתמש מסקנה מטרידה: אם המדידה יוצרה את הס핀ן של חלקיק אחד, היא חייבת לייצר **באותן מידי** גם את הסpinן של החלקיק השני, אחת היא כמו הוא מרוחק. ההתגשויות עם תורה היחסות היא בלתי-נענתה, שהרי היחסות הצבה את מהירות האור כגבול העליון למהירות. בעוד שכאן מהירות ההשפעה של חלקיק אחד על משנהו היא אינסופית. מכאן הרעיון גבול שוחלן ניסוי זה. שנים רבות מאוחר יותר בא ג'ון כל ומצא סידור מדידות קצת יותר מורכב, שבعزורת אי-שווין מתמטי שלו לחולטין את האפשרות שאינשטיין נתה לה, דהיינו ששני החלקיקים יצאו לדרך מותאים מראש. ניסוי EPR היה במקומו ניסוי מחשבתי בלבד, אבל מהרגע שהוא ביצורה המאפשרת להבדיל בין השקפותיהם של איינשטיין ובויה, הוא הפך לאתגר מעניין לפיזיקאים הניסיוניים. ואכן, החל משנות השמונים נעשה הניסוי פעמים רבות והتوزאות הזרו ואוששו את תורה הקוונטום. מזוז, היכולת של אירוע אחד להשפיע מיידית על אירוע אחר תוך סתירה עקיפה ל תורה היחסות ("נון-локאליות"), נעשתה לחלק בלתי-נפרד מעולם הקסמים הקוונטי.

מה אומר הניסוי הזה על טבע הזמן? הוא יכול לומר הרבה דברים, תלוי איך מפרשים אותו, ובמהלך השנהו אכן הוצעו לו פירושים שונים ומשונים. נסתפק כאן בהערה אחת: יש בניסוי הזה סתירה עקיפה ל תורה היחסות. אנו אומרים "סתירה עקיפה" כי למרות שהניסוי הזה מוכיח שמדידת חלקיק אחד משפיעה בו-זמנית על החלקיק השני, לא ניתן להעביר אינפורמציה בדרך זו. لكن נוקטים פיסיקאים רבים בעמדה הпозיטיביסטית האומרת שלא הוכחה כאן הפרה אמיתית של האיסור על מהירות גבוזות מהירות האור. לנו זו נראה עמדה מתחמת וברור שאינשטיין, לו היה חי לראות את תוצאות הניסוי, היה מודה שתורת היחסות אינה נותנת תיאור שלם של הזמן.

נשוב לנושא זה מאוחר יותר, אבל קודם נctrיך לעשות סיבוב בתחום נוסף של הפיזיקה שיש לו מה לומר על הזמן.

מדוע אין זמן ביוון

לא התקדמנו הרבה בניסיון לפתור את הסתירה בין מעבר הזמן, עליו מדווחים לנו חושינו, לבין חוקי הלוגיקה והפיזיקה, המכחישים מעבר זה. במצבה הנוכחי של הפיזיקה, לא נראה באופן פרטוני לבעה. ובאמת, אילו הייתה זו הבעה היחידה הקשורה בזמן, היינו מנהים את הבעה לפילוסופים ועובדים לעסוק בנושאים יותר מעולים. אבל מתריר שיש עוד בעיה הקשורה בזמן, והוא דוקא שיכת בתחום המחבר הניסיוני. זו הבעה הידועה בשם האסימטריה של הזמן. אם נלמד אותה, היא בוודאי תשפוך אור על הבעה הראשונה.

לפני שנבין למה האסימטריה היא בעיה, הנה נראה מה כל כך טוב בסימטריה. חוקי הטבע אינם מבדים בין ימן, שמאלו, למטה וצדומה. לו היו עושים כן זה היה עצוב, כי אז לא היינו יכולים לנוכח חוקי טבעי כללים. במקרה אחדות של חוקי הטבע היסודיים לכיווני המרחב היא-היא שעשו אותם לחוקי-יסודו.

הנה דוגמא. ישב אדם אל שולחנו ומשחק במצפן, ואחרי מספר ניסיונות הוא רושם חוק טבעי: "מחט המצפן מצביע תמיד שמאל". בא חbro לברקו והוא מראה לו את החוק שניסח, אבל החבר רואה שהמצפן מצביע דווקא ימינה, שהוא מביט בו מעברו השני של השולחן! יש כאן, אם כן, שני חוקי טבעי לגבי אותה התלותים במיקומו של הצופה, וזה לא תוצאה מרשימה במוחך. נעריך יותר את היגיון של שני הפסיקאים הללו כאשר, לאחר הרבה חקירות ודרישות, הגיעו לניסוח חוק כללי יותר: "מחט המצפן מצביע תמיד צפונה". החוק הזה הוא יותר אינו-ריאנטי (בלתי משתנה) מקודמו, בכך שאינו תלוי במיקומו של הצופה בהיחס לשולחן. אבל לא לעולם חוסן: כשהיצאו שני המדענים הדגולים, מצוידים במצפנים, לשיבוב הרצאותם בעולם להרצות על היוזם, הגיעו במקורה לאולם הרצאות המצוי באי אלף רינגנס (Ellef Ringness) צפונית לקנדה, גילו שהdagמה נכשלה ושני המצפנים מצביעים – שוד ושרבר – זה לכיוונו של זה! נחוץ, אם כן, חוק אינו-ריאנטי אף יותר, שלא יאביד את תוקפו אפילו בצדון או בזווית המגנטים. על כן יחוירו השניים לעומק כדור הארץ ויגלו שהוא בעצם מגנט ענק המשביע על כל המצפנים. החוק הבא שלהם יאמר, אם כן, כך: "מחט המצפן מצביע לכיוון הקוטב הדרומי של השדה המגנטי בו היא נמצאת". וזה ללא ספק חוק עוד יותר כללי, שכוחויפה גם על מדדים ואפילו על נוגה, למקרה שיתחשക לשני החברים לנouse ולהרצאות גם שם על התנהגות המצפנים.

וכמו שאין "צפון" או "דרום" אוניברסליים, אין גם "למעלה" ו"למטה" אוניברסליים. אמנם, כל הדברים שביבנו נופלים למטה ולא למעלה, אבל מעברו השני של כדור הארץ, באוסטרליה, שם גרים אנשים טובים שרואים למטה ורגליםם למעלה, נופלים הדברים, מבחינתנו, למטה. לכן גם כאן נחוץ חוק טבעי אינו-ריאנטי: במקרים "דברים נופלים למטה" נאמר "דברים נופלים כלפיו העצם בעל המסעה המפעיל עליהם כוח משיכה". הנה כך, במקרה מושגים סובייקטיביים, תלויים בצופה, נתנה לנו הפסיכה מערכת חוקים אובייקטיבית, תקפה לכל צופה, ומשמעותם כך סימטרית לחלוון.

אם חוקי הטבע הם סימטריים במרחב, הם צריכים להיות סימטריים גם בזמן, ככלומר, לא להבחין גם בין " עבר" ו"עתיד ". ואכן, אם נצלם בוודיאו התנגשות אלסטית בין שני כדורי ביליארד, או את תנועתו של כוכב-לכת סביב המשמש (בחרנו שתי דוגמאות חיכוך מסיבות שיבוהרו בהמשך), נגלה שהסרת שביידינו ניתן להקרנה מההתחלת לסוף ומהסוף להתחלה מבלי שההצעה המקורנת תסתור שום חוק לחוקי הטבע.

פיזיקאית ידועה,AMI נתה, הוכיחה שהסימטריות הללו קשורות לחוקי השימור. היסודותים של הפסיכה. כך, למשל, הסימטריה בזמן נובעת מחוק שימור האנרגיה. כשאנו אומרים "ארגון אינה נוצרת יש מן ואין ונאה געלמת" כמונו כאומרים "אם הייתה X אנרגיה בתחילת התהליך, תהיה X אנרגיה גם בסופה".

עכשו בווא נזכר כי בתורת היחסות הפק הזמן לעוד ממד כמו ממד המרחב. מה הפלא, אם כן, שהסימטריה השוללת למרחב חלה גם על הזמן? נזהור שנית לדוגמאות שהזכרנו לעיל, כאמור, ההתנגשות בין שני כדורי ביליארד ותנועתו של כוכב לכט סביבה המשמש. שני התהליכים הם א) סימטריים למרחב, כי אם נשקר

אוthem בראוי יהיה התהיליך המשווקף תואם את חוקי הטבע בדיקות כמו התהיליך המקורי, וכן ב) סימטריים בזמן, כי אם נצלם אותם בוידיאו ונريיצ' את הסרט אחרוניית היה התהיליך המהופך תואם את חוקי הטבע בדיקות כמו התהיליך המקורי.

הקץ, אם כן, לכל כיוננו המרחב והזמן. מעתה, "ימין", "שמאל", "קדימה", "אחורה", "למעלה", "למטה", וכן " עבר" ו"עתיד" אין להם משמעות בחוקי הפיזיקה. חוקים אלה אינם תלויים בצופה והם הלים על כל ההתרחשויות במידה שווה.

מדוע דזוקא יש לו

וכאן מתחילה בעיה המטרידה את הфизיקה מזה שנים רבות: די במבט חתוֹף שביבנו כדי לגלות שהסימטריה האחורונה שהזכרנו, זו של הזמן, לא מתקינה בטבע! כל התהליכים המוכרים לנו, גם אם אינם מבדים בין "ימין" ו"שמאל", "למעלה" ו"למטה", בהחולט מבדים בין " עבר" ו"עתיד": אם נצלם בוידיאו קוביית קרח הנמסה במים והופכת אותו לפושרים, הרי הסרט הפוך – מים פושרים המתחמים מלאיהם בעוד שבאמצעותם נוצרת לה קוביית קרח מבחינה – הוא מגוחך בעיליל. כך לגבי גפרורים חדשים הופכים לפחים ועשן, וכך לגבי מאכלים המעלים עובש וכך, למרבה הצער, לגבי בני-אדם המזקינים ומתים. לכל הדברים הללו אין היפוכי זמן. אפילו כדורי הביליארד, עקב החיכוך שלהם עם השולחן, מציגים אסימטריה, אמן חלה, אך היא תלך ותגבר עם הזמן עד שהכדרורים ייעצרו. ולא עוד אלא שבכל מקום בקיים בו נסתכל, מצביע חז' הזמן לאותו כיוון. שימושות הולכות ומתקררות, סלעים הולכים ומתפוררים, גלקסיות הולכות ומצינות, ואם נזכה לגלות יצורים חיים במקומות אחרים בקיים, אין ספק שגם ספלי הקפה שלהם יתקרוו וגופיהם יציתו לאותם חוקי בליה.

זהו אם כן מצב חמוץ: אין "צפון" יקומי ולא "למעלה" יקומי ולא שום כיוון מרחבי השליט בקיים, שכן אלו הם כינויים סובייקטיביים המשתנים ממוקם למקום. אבל יש בהחולט " עבר" יקומי ו"עתיד" יקומי. הזמן נבדל, אם כן, מממד המרחב בעוד תcona מהותית. לאיש מן הרחוב אין בכך שום הפתעה אבל הפסיכאי השומע חדשות אלה מתעצב אל לבו. אם תורה היחסות שילבה כל כך יפה את כל הממדים, למה בכלל זאת שונה הזמן מממד המרחב?

החוק האחראי לקיומו של חז'זמן זה ולקיומו של התופעות המctrחות שמנינו לעיל, נקרא החוק השני של התרמודינמיקה והוא אומר כך: "בכל מערכת סגורה, יכולת האנתרופיה רק לעלות עם הזמן".

כמו הבהירות: א) "אנתרופיה" לצורך זה זהה עם "אי-סדר". ב) "מערכת סגורה" בא להוציא מן הכלל מערכות שבהן מתערב מישהו, כגון בעל-בית העושה סדר בביתו. בבית זה תליך האנתרופיה ותקנן, אבל בסביבה שמחוץ לבית, שהאשפה מהבית הוצאה אליה והחומר שהפעיל בעל הבית נפלט אליה, האנתרופיה תגדל וכן יצא החוק השני צודק גם במקרה זה. ג) הניסוח "לעלות עם הזמן" הופך את החוק השני לחוק ייחודי בין כל חוקי הфизיקה, כי משתמש ממנו שעליית האנתרופיה

מבדילה יפה בין עבר ועתיד, כפי שנוכח למגינת-לבו כל מי שאינו מתערב באנתרופיה שביבתו. בזמנים שלא מסדרים ומנקים אותם מדי פעם, האנתרופיה בסוף השבוע תמיד תהיה גדולה יותר מזו שבתחלתו ולעתם לא הפה. נcone, זה לא הוגן, אבל ככל האם החיים.

ניסיוניהם של הפיזיקאים להסביר מדוע קיים "זמן" יקום, ולא שום חז' דומה במרחב, הביאו ליצירת שתי תשובות מנוגדות, שעל פיהן נחלק הקהילה המדעית כולם לשני מחנות.

הדעה המקובלת: חז' הזמן הוא מדומה

התשובה הראשונה היא תשובתם של רוב הפיזיקאים. היא נעשתה דעת הרוב מפני שהיא פשוטה והגיונית.

נתחילה בעובדה פשוטה: כל אינטראקציה בודדת היא סימטרית לחלוטין בזמן. התנגשות בין שני אלקטرونים, למשל, כמווה כהתנגשות בין שני כדורי ביליאר אידיאליים נטולי חיכוך: אם נסרייט את ההתנגשות ישר והפוך לא יהיה שום הבדל בין שני התסריטים. כך לגבי פגישה בין אלקטרון וחלקיק שלו, הפויטרון: שני החלקיקים ירצו בשמהה זה לקרה זה ויאינו זה את זה ובמקומם יוצר פוטון, אבל הפוטון הזה יכול, מתי שرك יתחשך לו, להתרחק מחדש לזוג אלקטרון-פויטרון שינויו זה מפני זה על נשמה באמצעות מדרגות בה רצוי קוזמיים אל סופם.

מהסימטריה המושלמת הזאת, השלטה בחלקיקים בודדים, הבה נתקדם עוד צעד לעבר התופעות האסימטריות המוכרות לנו בעולם המאקרוסקופי. הנה, למשל, ספל הקפה החם: על-פי החוק השני של התרמודינמיקה, ציריך הקפה להתרקר בהדרגה ולהעביר את חומו לאוויר החדר. ברמה המיקרוסкопית נראה הדבר כך: "חם" הספל, הפגעותיו בתווך במולקולות האוויר. בהתנגשויות האלה מאבדות המולקולות המהירות חלק מהאנרגיה שלן ומעבירות אותה למולקולות שבנה התנגשו, וכך מתקררים המים ומתחמסים האוויר שביבם. עכשו, אם נתבונן בהתנגשויות הבודדות, נגלה שלא כתוב בשום מקום שלא יכול לקרות ההדר לאמור, ש מולקולה מהירה של אוויר תפגע במולקולה איטית של מים ותכניס אותה להילוך גבוהה. מדובר, אם כן, איננו רואים ספל קפה קר שואבים חום מאוויר החדר ומהחמים מאלייהם? כאן מגאים הפיזיקאים את תורת ההסתברות. אמנם, מדי פעם אכן קורה ש מולקולות אוויר מהירות מתנגשות במולקولات מים איטיות, אבל רוב מולקולות האוויר אין מהירות ממולקولات המים, ולכן הסיכוי שמספר גדול של מולקולות אוויר מהירות יפגע במולקולות המים בזמן מסוים הוא נזוק. הסיכוי אמנם אינו אפסי, אבל מתקרב מאוד לאפס. הצטרכו לשבת כמה מיליאוני שנים, בעצם מיליאדי שנים - זמן ארוך יותר מגיל היקום - ולצפות בכוס קפה פורשת כדי שימושו מעין זה יתרחש פעמי.

החוק השני הוא, אם כן, חוק הסתברותי בלבד. הוא חל על גופים גדולים המכילים מספר עצום של אטומים. לכן, כשמדבר בחלוקת בודד, הסיכויים להתראותו של תהליך קדימה ואחוריה בזמן הם בדיק 50:50, אבל עם כל חלקיק המתווסף לו משתנים הסיכויים לרעת התהליך הפה: בגרם מים, שבו כ- 10^{25} מולקולות, ההסתברות היא $(\frac{1}{2})^{10^{25}}$! כדי להמחיש את סדרי הגודל, מאו ראשית היקום לא עברו 10^{18} שנים...

אם נחזור עתה ונשאל מדוע מתנהג ספל הקפה באופן אסימטרי, תהיה תשובה הפיסיקאי לכך פשוטה: **האסימטריה בזמן הוכנסה לתהיליך זה כבר מלכתחילה.** הרי רוב החום היה מלכתחילה בקפה ורק מעט באוויר החדר, ולכן מתקדים הקפה והאוויר לקרה שיווי משקל. לו התחלנו בשינוי משקל, היו הסיכויים לשני התרחישים – הקפה מחם את האוויר והאוויר מחם את הקפה – שוויים. על כן, אזורים זעירים של הקפה הפוך היו אמנים מתחמים, אך אזורים זעירים אחרים היו מתקקרים, הכל על-פי המקרה, וכך הוא נשאר במוצע פושר.

יתרה מזאת, בהחלט ניתן לחשב על מצב שבו האוויר מחם את הקפה אפילו אם האוויר קר והקפה חם. כל מה שציריך לעשות הוא לסדר מראש את מולקולות האוויר בדיקוק רב מאוד במרקם ובמהירות המתאים כך שברגע מסויים תתגשנה טריליאוני מולקולות אויר מהירות במולקולות מים איטיות. זה אמן בלתי אפשרי בטכנולוגיה של ימינו, אבל בהחלט אפשרי ברמת העקרון. בambilים אחרות, ייתכנו תנאי התחללה מסוימים, אחרי סיור נאות של כל המולקולות בעולם, שיגרמו לעולם הפוך מזה המוכר לנו: ספל קפה פושרים מתחמים בעודם שהאוויר סביבם מתקרר, גפרורים רפואיים שואבים עשן ואור מהאוויר ונעים חדשים, זקנים מצערניים ומתרים קמים לתחיה.

אם כך, ניתן לשאול, מדוע היקום שלנו הוא דוקא כזה ולא אחר? על כך תהיה התשובה: המדע אינו עוסק בתנאי ההתחללה. זו תשובה קצר פוזיטיביסטי, ככלمر, תשובה של החוק היבש, אך היא בהחלט מתקבלת על הדעת. כל מה שהמדע יכול לומר הוא "בהתנן תנאי התחללה כאלה וכאללה, קירה וכך (למשל, בהינתן אבן המושלחת למעלה בהירות X ובזווית Y היא תגיע חזקה תוך Z דקוט)". אבל תנאי ההתחללה עצם הם עניין שרירותי. ובמיוחד דברים כמו שמדובר במקומות שונים. היקום החל במקצת הגדול בצורה כזו שהאנתרופופיה שלו הייתה נמוכה ולכן היא יכולה רק לעלות. באותה מידת יכולת היקום להתחל במקצת גדול שבו האנתרופופיה גבוהה אבל דאטומים שלו מסתודרים בצורה מזוויקת כך שהאנתרופופיה תלך ותרד עם הזמן.

אבל אם כך, יתעקש השאלה, מדוע באמת לא החלט היקום כך? ועל כך ניתן לומר – לענות לו: זו תשובה שמעבר למדע. נתונים לנו תנאי התחללה של היקום, אבל אי-אפשר לדעת מה היה קודם להם, במיוחד אם מבאים בחשבון שמקצת הגדול נוצר גם הזמן עצמו והשאלה "מה היה לפני הזמן" אפילו לא ניתנת לניסוח הגיוני.

ניתן, אם כן, לסכם כך את התשובה המקובלת על רוב החוקרים לשאלת האסימטריה של הזמן: חוקי הטבע עצם הם סימטריים לחליין, ולכן כל האינטראקציות הבודדות בטבע גם הן אינן מבדילות בין עבר לעתיד. את האשם באסימטריה יש לתרולות באותו מפץ גדול שהתחילה את היקום. אז, מסתבה כזו או אחרת, נוצרו תנאים של אנתרופופיה נמוכה ומהז היא יכולה רק ללכת ולגדול. ואם יתעקש איזה נדוניק לשאול מה היה לפני המפץ הגדול, הוא יסתברך כל כך בפרדוקסים לוגיים עד שלא יתריד אותו יותר.

תימוק לדעה המקובלת: העולם הקוונטי סימטרי אפילו יותר מכפי שהוא נראה

כיוון שעיקר עבודתנו בשנים האחרונות הוא בתורת הקוונטים, מצאנו גם אנו כמה ממצאים החומכים בדעה המקובלת. נתאר כאן בקיצור אחד מהם.

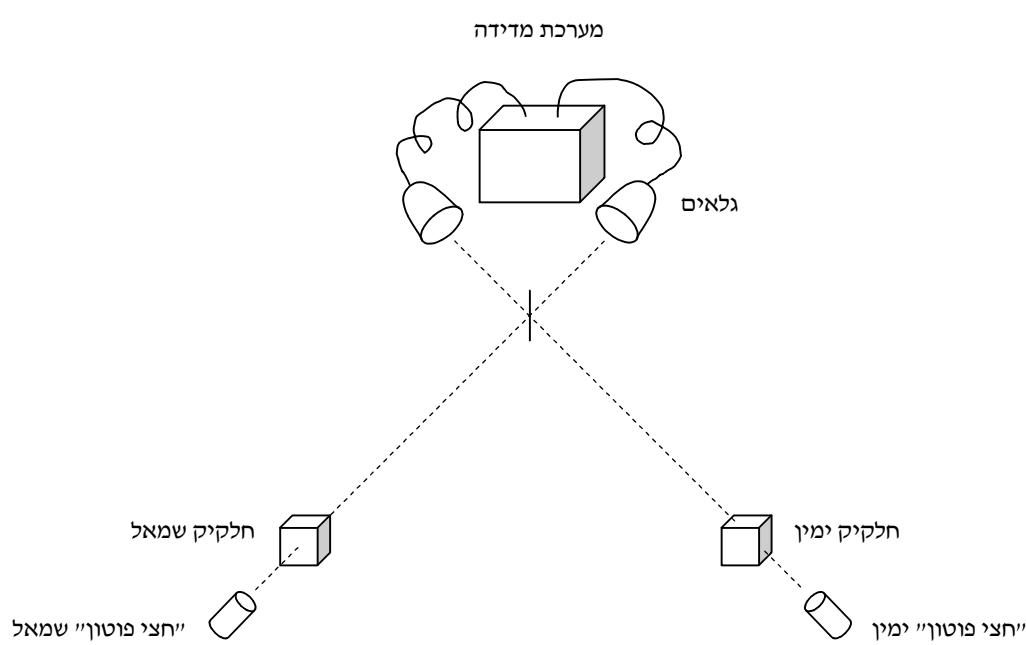
עד ב-1964 הראו אהרונוב, ברגמן וליבוביץ' שכלי אינטראקטיה קוונטית ניתנת לкриאה, כמו אינטראקציות היסוד בפיזיקה הקלאסית, מה עבר לעתיד ומהעתיד לעבר. בשנים שאחר כך הראו אהרונוב וחב' דוגמאות רבות לסתטריה זו ואף ניבאו תוצאות מפתחות בהסתמכם עליה. בעקבות גישה זו, החלתו לפני זמן לא רב להפוך על פיו את הניסוי המפורסם בגין תורת הקוונטים, הלא הוא ניסוי איינשטיין-פודולסקי-רוזן שפגשנו בפרק 0.

בניסוי זה, כזכור לכם, היה לשני החלקיקים מקור משותף בעבר, שהוא האחראי להתחאה ביניהם. השאלה שלנו הייתה: ומה יהיה אם לשני החלקיקים יהיה אירוע משותף **בעתיד**? האם גם אז יקיימו ביניהם קשר טלפטי ממוחך כמו ב-EPR הרגיל?

בשנתיים לאחר מכן אנתנו עוסקים בפרויקט קצר פרורוטי שבו אנחנו לוקחים את הניסויים המוזרים של תורת הקוונטים ו"מכליאים" ביניהם. התוצאה, לעומת קרוביות, היא ניסויים עם תוצאות פרדוקסליות אף יותר מאשר הוריהם. במהלך העבודהנו זאת מצאנו ניסוי EPR מהופך כזה (שאנחנו קוראים לו RPE) ע"י מיזוג ניסוי ההتابכות של מאק-זנדר, ניסוי הברירה המוחורת של וילד, ניסוי הפצתה של אליצור-וויידמן וכמוון ניסוי EPR. הניסוי המתkeletal מגלה את הפרדוקסים של כל הוריו, ויחד עם זאת הוא די פשוט. כיוון שהוא הופך את ה-EPR על פיו בזמן, קראנו לו ניסוי RPE.

לכארה מצב כזה לא ניתן ממשום שהוא ייצור פרדוקס לוגי: נניח שלקחנו שני חלקיקים מרוחקים שמעולם לא נפגשו, נעשה מדידה על אחד מהם, נגלה כי גם החליק השני המרוחק הושפע מהמדידה, וזאת מפני שהם עתידיים להתחבר. אבל אז, מה יקרה אם נחליט אחרי המדידה **שלא** לחבר ביניהם? כיצד ניתן יהיה אז להסביר את התוצאה?

תורת הקוונטים מאפשרת לנו ליצור EPR מהופך כזה אם נעשה את המדידות בצורה זהירה: נמדד את שני החלקיקים, אבל לא נסתכל ישירות בתוצאות המדידות אלא נשמר אותן במקומות מבודדים. אחר כך נחבר את שני החלקיקים, ורק אז נלך ונסתכל בתוצאות המדידות. נגלה כי התוצאות הללו, שהיכלו לנו "モוקפות" כל הזמן הזה, מקיימות את אי-שוויון כל המפורסמים: ההסתכלות באחת מהן משנה, **באותו רגע**, את תוצאת הבדיקה השנייה, אחת היא כמה היא מרוחקת.



למעשה עשינו כאן דבר אפלו יותר מרוחיק לכך: החלקיים עצם אינם מגיבים זה עם זה כלל. תחת זאת, חלקיק או רוחיק ייחד יוצא באותו רגע שני מקורות או רוחקים אל מטרה אחת, ובדרךו הוא נוגע בו-זמנית בשני החלקיים המרוחקים. הקורא הסבלן, שעדין לא סגר את המאמר הזה ביאוש, בודאי הבחין שהמשפט האחרון שאמרנו נשמע בלתי-שפוי לחוטין: היה זה אכן אמורנו שנ Hag מונית בודד יצא בדרךו באותה עת גם מבאר-שבע וגם ממחיפה והגיע לבסוף לתל-אביב. ובכן, מה לעשות, תורה הקונטנים אכן מאפשרת מצב כזה שבו חלקיק ייחד יצא משני מקורות בעת ובוונה אותה ומגיע למקום שלישי לחלקיך אחד. וזהו למעשה הרחבה של הלכה שמילמד אותנו ניסוי הביריה המאוחרת של וילר (פרק 0):

כשאנו מבצעים ניסוי התארכות, אנו יוצרים אי-ודאות לא בקשר לעתיד, כפי שאנו רגילים להשוב, אלא בקשר לעבר: מהרגע שנפתחה התארכות של חלקיק ייחד, לעולם לא ניתן יהיה לדעת אם החליק הגיע אליו מימין או מצד שמאל. גם כאן, אם חלקיק בודד הגיע אליו מחד משני מקורות אפשריים, ובגינוו הציג תופעת התארכות שאינה מאפשרת לדעת מהיכן הגיעו, איזו **שתי היסטוריות** הן **אמיתיות** באותה מידה ושתיהן תורמות ל*תוצאה הסופית*. לאפקט הזה קוראים אפקט הנבורי-בראון-טויס, אבל שלא כמו ה-EPR שהזכרנו קודם, אין הדבר כאן בשלושה מחברים אלא בשניים, שלאחד מהם (בריטי, כמובן) היה שם משפה כפולה.

גם אנחנו, נאמנים למסורת התרבות-שםית של תורה הקונטנים, פרסמו את ניסוי EPR המהופך כשלישיה, אחרי שאנו ציילנרג ממכוון שרדיינר בוינה הציגו אילינו בתכנון ניסוי זה (תמונה 6). אם כן, חלקיק אחד, שעלה-פי היגיון הקונטי, יצא בדרךו משני מקורות מrhoחים והגיע לבסוף למchozo חצאו בשתי דרכיהם שונות, פגש בשתי הדרכים בהן עבר שני חלקיקים. עובדה: שני החלקיים הללו, שמעולם לא פגשו זה זה, הופכים עתה לחלקיק EPR לכל דבר: מדידה של האחד משפיעה מידית על השני.

אם כן, העולם הקונטי מופיע אף הוא כנטול כיון זמן, מה שמצוין, לכואורה את הדעה המקובלת שאסימטריות הזמן היא תופעה סטטיסטית גרידא, המופיעה רק במצבים גדולים של חלקיקים ולא בחוק-טבע יסודי כלשהו.

הדעה הלא-מקובלת: חז' זמן חלש מתחבא בכל תהליך

הבה נזכיר שוב בשאלת: אם האינטראקציות היסודותיות הן סימטריות בזמן, מדובר הוא דווקא אסימטרי בזמן? התשובה המקובלת, אותה סקרנו בפרק הקודמים, אמרה: **בכל אשימים** תנאי ההתחלה. חוקי הטבע עצם אינם מבדילים בין עבר לעתיד. נפנה עתה אל התשובה השניה, האומרת דבר הרבה יותר נועז: **מי אמר בעצם שהאינטראקציות היסודותיות הן באמת סימטריות בזמן?**

בתשובה הזאת מחזיק, בין השאר, רוג'ר פנרו מאוניברסיטת אוקספורד. הוא חושד שאפלו באינטראקציות הנראות לנו סימטריות, כגון התנגשות בין שניALKטרונים, יש אסימטריה חלשה. لكن, אם כוס קפה חם מתקרטת מליה וכוס קפה קר אינה

מתהמתת מאליה, הרי זה משומ שבל אחת מההתגשויות המולקולריות המרכיבות את התהlik, שהן לכורה סימטריות לחלוtin, יש בכל זאת מן "ז'ופ" קל מאד, בלתי-מורגן בכלים של היום.

את התשובה הזאת שואב פנزو בעיקר באופן אנטווטיבי מIRON של עוז שני תופעות אחרות שאינן סימטריות בזמן: א) קיימת אסימטריה זעירה בעולם החלקיקי, הקשורה בכוח הגראני החלש. זהה אסימטריה מפלייה מאד, שהיא היא קיימת גם בחלקיק הבודד ולכן התשובה המקובלת (פרק 0) אינה תקפה לאביה. ב) הפיסיקאים המהפשים תורה שדה מאוחדת, שתסביר את כל כוחות הטבע הידועים כביטויים של כוח אחד, לא הצליחו במשךיהם עד היום מפני שלגראוטיציה אין עד היום ביטוי קונטני. והנה, כידוע, כשהומר נדחס לנಕודה זעירה בגודל אף, נוצר חור שחור, וזה תופעה אסימטרית בעיל. אומר אם כן פנزو: נכון, האסימטריה בזמן היא עיקרון חשוב ויקר, אבל אם רצוננו להתקדם בה נשים את האפשרות שעולמנו, ברמה היסודית ביותר שלו, אין סימטרי בזמן, ולכן, כשהתגלה סוף-סוף תורה הגראווטיציה הקונטנית, שהיא השדה המאוחד, היא תהיה אסימטריה בזמן.

מרבית הפיסיקאים מתיחסים אל הצעה הזאת בערך כמו שיתיחס יהודי מאמין לטענה כי כшибוא המשיח יהיה מותר לאכול חזיר.⁴ מה גם שעדיין לא ברור אם וכייד אפשר היה לקשרו אסימטריה קונטנית שכזו לאסימטריה המאקווסקופית של החוק השני של התרמודינמיקה. לא ייפלא אם כך, שדעה זו נותרה דעת מיעוט.

מה קורה כשחובבים על שתי השאלות יחד?

עד כה פعلنנו לפי אסטרטגייה מחקרית מסוימת. ראיינו שאין פתרון לבעית ממעבר הזמן, ולכן רוב הפיסיקאים רואים בה בעיה פילוסופית ואינם מוטרדים ממנה. אמרנו, אם כן, כך: הבה נלמד את בעיית האסימטריה בזמן, שהיא בעיה ניסויית מובהקת, ונראה מה ניתן להוכיח מאהת על האחרת. התקווה הייתה ברורה: בכך שנחשוף כישלון אחד של הפיסיקה הקשור בטבע הזמן, אולי נצליח להיזז אותה מעמדתה השמרנית בנוגע למעבר הזמן. לאכזבתנו, התגלה ההפק: קומה של אסימטריה הזמן רק אפשר לפיסיקה להתבצע ביתר שאת בשלילת מעבר הזמן!

כדי להבין איך זה קורה הבה נסתכל בשגיאת מפורסמת של הוקינג, שמננה חור בפומבי לפני שנים רבות. הוקינג חשב תחילת שגילה הסבר פשוט לחוק השני של התרמודינמיקה: היקום התחל במצב מסודר מאד, אבל גם צפוף מאד. ככל שהיקום מתרפש, נוצר יותר חלל ריק, וכך החל החומר החם לפזר את חומו לחלל שביבו. במילים פשוטות יותר, עצם התפשטות היקום יצרה יותר מקום, ולכן יותר אפשרויות לבלאן.

הוקינג חוזר בו מטענה זו בಗל' תלמיד שלו, דני לפלאם, ששאל אותו מה יהיה אם יתחל היקום يوم אחד להתקווץ חורה, כפי שיש תסרים החווים שיקרה. האם אז יתהפק כיון עליית האנתרופיה? אם יש לנו ספל קפה ההולך ומתקרר, ובמקרה זה בדיקת הרגע בו החל היקום להתקווץ, איך ידעו המולקולות להפוך בדיקת באוטו רגע את מהלכו כדי שיכוס הקפה תחזר ותחזור? למשמע שאלה זו נאלץ הוקינג להזכיר שזה רעיון די חלש. סביר יותר שהאנתרופיה תמשיך לעלות גם בקום מתכווץ.

⁴ לטובת הפיסיקאים שאנו זו תחוותם, נציג שדעה זאת ממש אכן קיימת ביהדות: "למה נקרא שמו חזיר? שעתיד הקודש ברוך הוא להחזיר אותו לישראל" (---).

והנה, במהלך דיונים אלה העלה הוקינג טיעון אפיסטטולוגי פשוט אבל גורלי: אם אכן יתכווץ היקום ויחד אותו תרד האנתרופיה, אנחנו לא נרגע בכך! אחרי הכל, כיצד יודעים אנו שהזמן עבר? רק בגלל עליית האנתרופיה. גלי אור וקול חזרים לאבירי החושים שלנו, ושינויים כימיים מתחאים נוצרים בנירונים שלנו לצורך זיכרונות. אבל אם יתהפק כיון האנתרופיה ביקום כולו, הוא יתהפק גם בסביבתנו ובתוך גופנו, וכך נ└ך ונעשה צעירים מרגע לרגע, אבל גם נשכח מרגע לרגע את מה שקהלנו בשלב הקודם, וכך לא נרגע כלל בהיפוך.

כאן עולה למשה שאלה מטרידה: כיצד ניתן לדעת שזו לא מה שקרה בבדיקה עצהו? כיצד יודעים אנו שאנו חיים ביקום מהופך שהכל בו הולך אחרנית? התשובה מטרידה עוד יותר: אי אפשר לשולול אפשרות זאת, מהטעמים שמנינו לעיל!

בצר לנו, נפנה אל חוקי ההסתברות. אם אי-אפשר לשולול אפשרות זאת באופן עקרוני, אולי ניתן להראות שהיא מוגחת מבחינה הסתברותית? לכארה, זו דרך מוצלחת. כולנו יודעים ש:

לא סביר שככל החלקיקים במערכת כלשהו יימצא ברגע ההתחלתי בתיאום מושלם כך שהאנתרופיה של המערכת תלך ותקtan מלאה.

המשפט הזה הוא נכון וככל הסתכלות במתරחש סביבנו תאשר אותו. אחרי הכל, מעולם לא רأינו כוס מים פושדים שבמקורה התחממה מאליה ויצרה קוביית קרח נאה באמצעותה. עצהו, כמו מדענים טובים, علينا לחתם משפט זהה ביטוי ממשי. הנה נקשרו את ההסתברות לגודל המערכת:

עוד יותר לא סביר שהדבר יקרה במערכת גדולה. ככל שגדל מספר החלקיקים, כך קטנה ההסתברות להיפוך זהה של האנתרופיה.

וגם זה נכון, ומשוואות התרמודינמיקה מאשרות זאת. מה יותר טבעי, אם כן, מאשר להמשיך להחיל משפט זה על המערכת הגדולה ביותר היועה לנו?

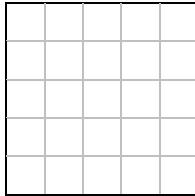
הכי לא סביר שהדבר יקרה ביקום כולו.

והנה, במשפט ג' יש טעות קטלנית: הוא חסר ממשמעות להלוטין! כי איך אנו מבינים בין תהליך נורמלי שבו האנתרופיה עולה לבין התהליך המהופך? כשאדם מסתכל על סרט שבו חביתות הופכות מחדש לפניים שלמות, וענן נשאב חורה לארכוב רידינג, הוא מבין שהוא סרט מהופך מפני שהוא עצמו מסתמן על חץ הזמן המוכר לו, דהיינו, גופו וסביבתו. אבל על מה יסתכל מי שאינו בתוך יקום שלו מהופך? עצם המילים "ישר" ו"מהופך" הן חסרות-משמעות כשם דבר על כל היקום, שכן אין לנו שום מסגרת חיצונית לשפט על פיה!*

כאן בא הפילוסאי האורתודוקסי ואומר בחוווק של עליונות: אמרתני לכם! כל הדיוברים האלה על מעבר הזמן הם הסרי ממשמעות ורק מבלבלים את כולם. אם ניפטר מעבר הזמן, יהיה לנו יקום ארבע-ממדי שככל האירועים בהיסטוריה שלו – עבר, הווה ועתיד – קיימים יחד ומסודרים לפי הסדר על פני ממד הזמן. מי שירצה, יכול לקרוא אותם מה"התחלת" אל ה"סוף", ולטעון שהאנתרופיה עולה, וממי שירצה, יכול לקרוא אותם מה"סוף" אל ה"התחלת" ולטעון שהאנתרופיה יורדת. שתי הדריכים נכונות באותה מידה.

אפשר להמחיש את העיקרון הזה בכתב שכותב ר' אברהם ابن-עוזרא לאדם ששאל אותו מה הדין עם חבית דעת שנפל לתוכה זובב. הראב"ע קבע שהדבש כשר, והוא ניסח זאת כך:

* דומה הדבר למה שאנו מכירים מתורת היחסות: אדם הנמצא בחלל הנעה במהירות גבוהה לא ירגע שהשעונים בחלליהם האטו, שכן כל תהליכי גופו ומוחו מאטים באותוקצב.



אפשר לקרוא את המסר הזה ישר או הפוך מכל צד והוא יישאר בעינו: "אנו קובעים שהיצור הולני יהיה בדבש בטל ומובטל." כך, על-פי הפיזיקה המקובלת, ניתן לקרוא גם את ההיסטוריה של היקום פנים ואחור בציר הזמן. מותר לומר:

היה היה יקום שבו החלקיים היו מוסדרים במצב המאוד מיוחד בו יש לה אנתרופיה נמוכה. גלקסיות גז לוהט יצרו שימוש חמות שפלטו בהדרגה חום אל החלל הקר עד שקפאו. הפיזור הסופי של החלקיים ביקום היה לכוארה ערובה גמורה, אבל ערובה זו שימרה בדיקנות את עקרונות המצב המסדר שהייתה בתחילת. בין לבין, אנשים נולדו, הזקינו ומתו, וספלי הקפה החם ששתו התקरרו אם שתו אותם מאוחר.

ומותר באותה מידה לומר:

היה היה יקום שהחלקיים המפוזרים בו בערבה היה מוסדרים בצורה כל כך מדויקת עד שייצרו בהדרגה שימושות שהלכו והתהממו עד שייצרו גלקסיות של גז לוהט בעוד האנתרופיה של כל היקום הולכת ונעשה נמוכה. בין לבין, מתים קמו מקבריהם, הציערו ונעשו תינוקות שחזרו לבטן אמותיהם, והקפה שפלטו מבטנם אל הספלים היה קר אם פלו אותו מוקדם אבל הלק והטהם.

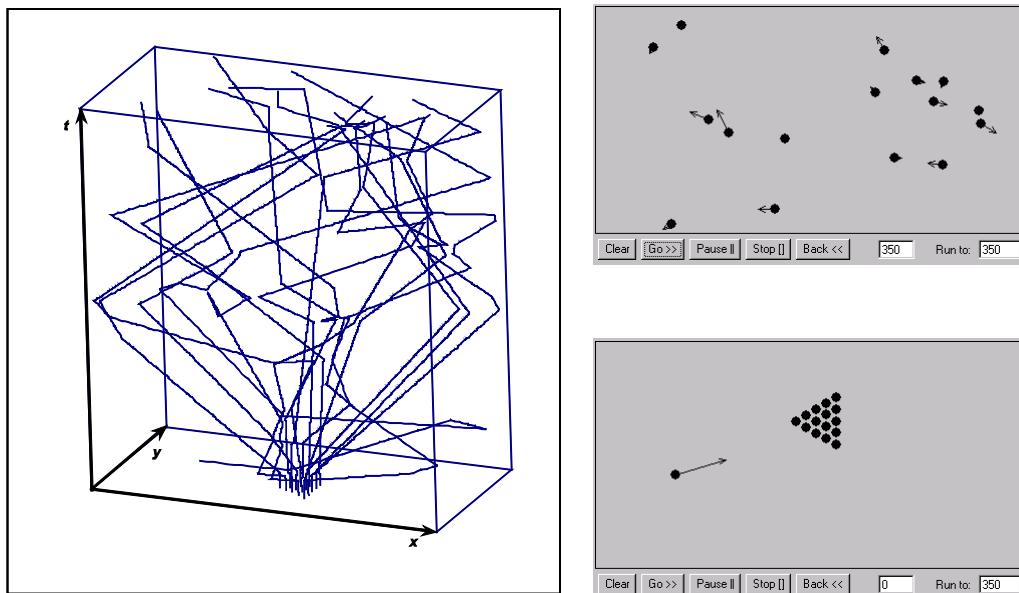
שני התיאורים מתיחסים לאותו יקום ארבע-ממדי, ושניהם שווי-ערך ממש כמו הדריכים ההפוכות בהן ניתן לקרוא את ריבוע הקסם של אבן-עוזרא. בשניהם פועלים אותם חוקי הפיזיקה ואלהם חוקי ההסתברות.

הגענו, אם כן, למביוס טומו: קיוינו שהבעיה הפתחה של האסימטריה בזמן, שככל הפיזיקאים מודים בה, התאפשר לנו להאהז במשהו כדי להוכיח שמעבר הזמן אינו אשלה, והנה התברר שהאסימטריה בזמן דוקא נותנת נימוקים טובים לאלה השוללים את מעבר הזמן. עכשו יש לפיסיקאי השמן תמורה עקביתמושלמת: יקום דומם וקפוא, שכל האירופים בו – עבר, הווה ועתיד – קיימים יחד לאורך ממד הזמן. כל אחד מתנו הוא אוסף של אינספור "אני"ים דומים כאלה, מהם מרכיב קו-העולם שלו המתmeshך מה עבר אל העתיד. החוק השני של התרמודינמיקה משתלב כאן בטבעיות ומסביר יפה מדוע יש לנו אשלה שהזמן עובר: אחת התופעות הנבעות מחוק זה היא שכל מקורות האור, הקול וכדומה, פולטים אנרגיה בכיוון אחד – שנקרה לו "עתיד" – בלבד, ולכן אינפרומציה אינה יכולה להגיע אליו מהעתיד. זאת ועוד, החוק השני קובע שאם רישום כלשהו (מראה, צליל) הוטבע במוחנו, הוא ישאיר עקבות בעtid ולא בעבר. מיסיבה זאת טבועים בכל "אני" זיכרונות ה"אני"ים הקודמים, ומכאן האשלה שהזמן עובר.

ובכן, ליותר? להודות שתפיסטנו את הזמן היא אשלה? לא כדאי למהר, כי בתוך התמונה הכלמעט-מושלתה זאת גילינו, לפני שנים אחדות גם אחד המסוגל להפוך את כל המצב על פי. ובעשותנו כן, גם הכנסנו את ראשינו בין שניים מענק – הפיזיקה המודרנית המתכתשים בנושא זה מזה לעלה מעשרים שנה מבלי שאיש מהם יבחן בפגם הזה.

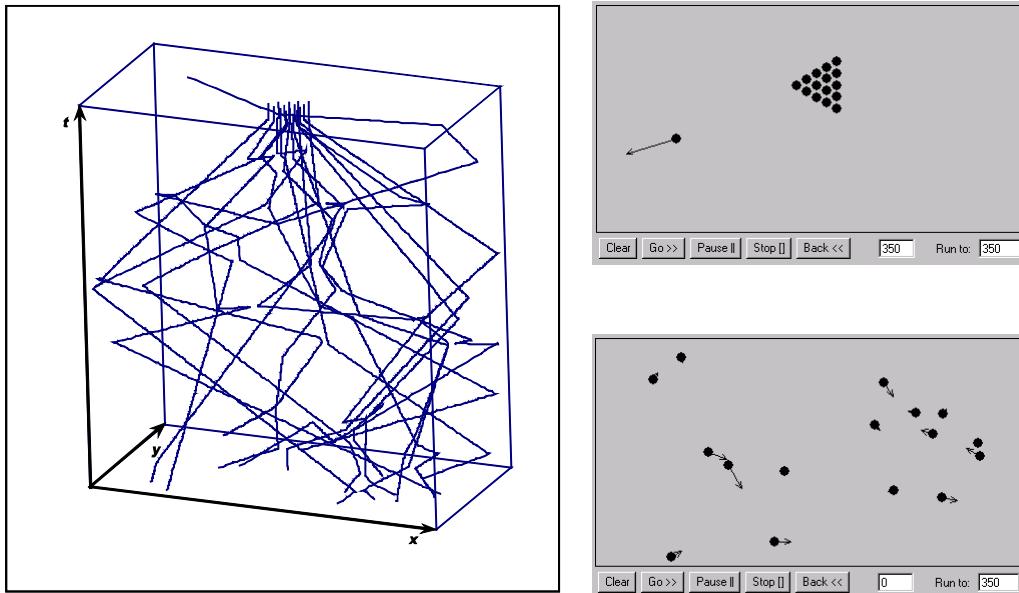
שאלת הסיבותיות

כדי להבין את כיצד ניתן מהפך כזה הבה נוכנש לדיוון שאלת נוספת הנוגעת לאושיות הфизיקה המודרנית: האם עולמנו נשלט לחלוטין ע"י הסיבתיות? בambilim אחרות, האם כל אירוע המתרחש ביקום, ותהא זו אפילו תנועת חלקיק זעיר שבזעירים, נקבע באופן מוחלט ע"י מה שקדם לו? השאלה הזאת – בניסוחו המפורסם של איינשטיין "אם אלהים משחק בקוביה" – היא שאלת בלתי-פתרונה ולא נתימר לפוסוק בה כאן^a, אבל אנחנו יכולים שלא להעיר בתמייה על העובדה שככל הספרות העצומה הדנה בחז הזמן ובמעבר הזמן, אין כמעט התייחסות לשאלת הסיבתיות, למרות שגם מדען ירגיש מיד באופן אינטואיטיבי ששתי השאלות הקשורות קשר הדוק זו אל זו.

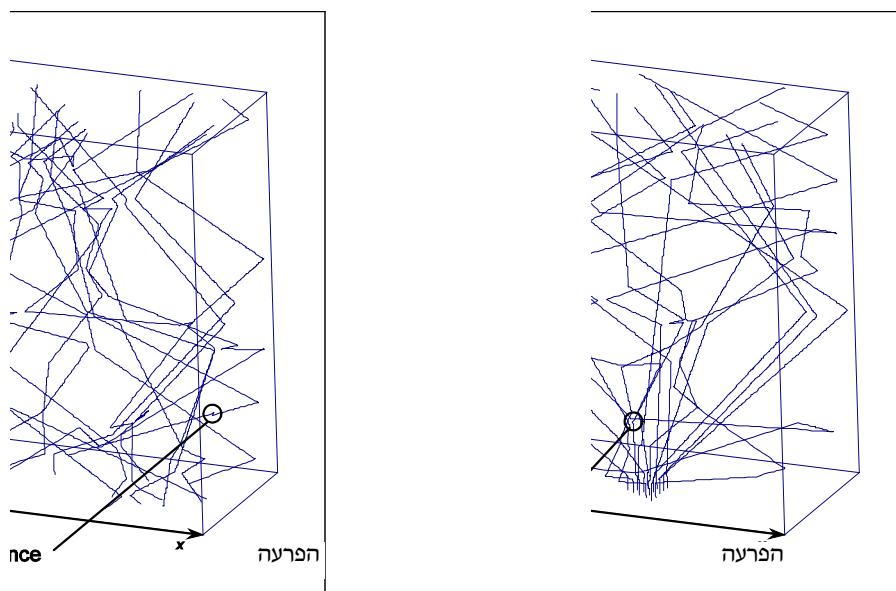


חמונה 7א

^a לא מכבר פרסمنו מאמר בכתב-עת חשוב בפיזיקה (Physical Review) שבו השתמשנו בפרטראה על אמירותו זו של איינשטיין. על סמך הניסוי שהצענו בסקנו שאولي אלהים לא רק משחק בקוביה אלא גם מרשה לעצמו להמשיך ולטלו לאותה עד הרגע האחרון לפני נפילתה. העורך כה נבהל מהאמירה ה"זתית" הזאת שעיכב את פרסום המאמר עד שסילקנו כל רמז לאלהים.



תמונה 7 ב



תמונה 8 ב

תמונה 8 א

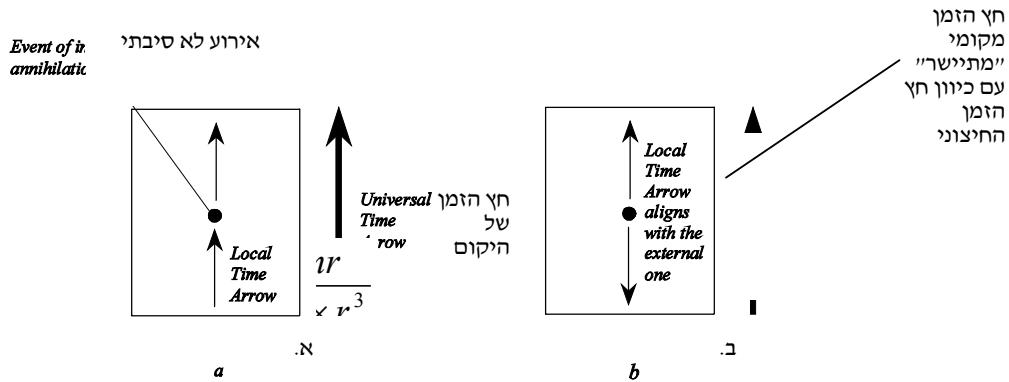
תמונה 7 א ממחישה טענה זו. זהה הדמיית מחשב המתארת את תנועותם של כדורי ביליארד. מימין למיטה ניתן לראות קבוצת כדורי ביליארד מסודרים בצורת משולש, עד שכדור נוסף פוגע בהם וሞיך אותם לכל רוח (ימין למעלה). בבירור, האנתרופיה עלתה בתהליך זה. מצדה השמאלי של התמונה ניתן לראות דיאגרמת מרחב-זמן של התהליך, הכולרת את מסלוליהם של ה כדורים במרחב-זמן.

בתמונה 7 ב הפכנו את הכיוון. בסימולציה, שאנו מזמינים את כל המ unin לחזות בה (www), ניתנה הפקודה לכדורים בשלב הסופי להפוך את כיווני תנועותיהם. חיש-מהר, יתארגן הבלגן מחדש למשולש יפה שיפלוט חורה כדור בודד למקום שמננו בא. משמאלי,שוב, מופיעה דיאגרמת מרחב-זמן של התהליך המהופך.

מה שנאמר עכשו הוא כמעט טריויאלי, וכל סטודנט מתחיל יודע אותו, ובכל זאת, כמעט איש מבין הפיזיקאים הדנים בשאלות מקורו של ח'ז-זמן לא שם אליו לב: בעולם שאיןו סיבתי לחולtin, תהליך א' הוא אפשרי בהחלה But still he can do it – נדון לכישלון. הנה תמונה 8: חזרנו על התהיליך הראשון בתוספת "זוף" קל – הזנו מעט את אחד הcadors במלון הניסוי. התוצאה: האנתרופיה גדלה גם הפעם. בתמונה 8ב הכנסנו את הזוף לתהיליך הפוך, שהוא אמר להוריד אנתרופיה, והתוצאה הייתה הרת אסון: מרגע ההתערבות, השתלט מחדש הא-סדר והרס את כל היפוך.

בניסוח המקובל על הפיזיקאים נאמר כך: תהליך נורמלי, כזה שהאנתרופיה שלו עולה עם הזמן, איןנו רגish לתנאי ההתחלה, ואילו אותם תהליכי נDIRIM שהאנתרופיה שלהם יורדת עם הזמן, הם רגושים ביותר: כל תהליך כזה מהיבת תנאי התחלה מדויקים לאין-שיעור וככל סטייה מתנאים אלו תגרום לו להפוך מחדש לתהיליך נורמלי, מגדייל אנתרופיה. יקיר אהרוןוב ביטה עיקרונו זה בצורה קולעת: אם נוציא תולעת אחת מקברו של אדם, או שום היפוך בזמן של תהליכי הקורים בקשר לא ייחזר אותו לחיים.

נכון, זה ידוע לכל, אבל יש לעיקרונו זה השלכה מיידית על טبع הזמן: בהינתן מערכת סגורה שיש בה אירוע לא-סיבתי אחד, או, ללא קשר לתנאי התחלה של אותה מערכת, האנתרופיה של תך ותגדל, החל מאותו אירוע, בשני היכונים! הרושם המתkeletal הוא שלמרות ש'ז' הזמן באוטה מערכת הצבע תחילת לכוון ההיפוך מזוה של היקום, הרי מהרגע בו הופיע האירוע הלא-סיבתי, חור ח'ז-זמן היקומי והשתלט מחדש על המערכת, למרות שהמערכת מבודדת לחולtin מיקום זה (תמונה 9).



תמונה 9

מכאן נובעת באופן לוגי מסקנה לא פחות מרוחיקת-לכט לגבי היקום כולו: אם קיימת אי-שם אפילו אינטראקציה אחת שאינה סיבטית, היקום כולו אינו אסימטרי בזמן. מכאן שהדרך המקובלת לקרוא את ההיסטוריה של היקום (גרסה! Error! Error! Reference source not found. גרסה 0) היא מופרcta.

נשarra אם כן רק שאלה קטנה: האם היקום בו אנו חיים הוא סיבתי? כMOVED שזו לא שאלה קטנה כלל, וכבר אמרנו שהוא למעלה מיכולהנו. אבל היה מי שכן פסק בשאלה זו, והוא לא אחר מאשר סטיבן הוקינג הנודע. האיש הטוב הזה טוען בתוקף שהחוקי הטבע מאפשרים את קיומו של אינדטרמיניזם יסודי, ככלומר, תהליך שאינו סיבתי. כל מה שאנו אומרים בשולי דבריו הוא שטענה זו סותרת את טענתו השנייה, לפיה אין ח'ז זמן יסודי.

הוקינג והתנדפות החורים השחורים

תחילה העלה על מעמדה של היסודות בפיזיקה כיום. נהוג להזכיר שתורת הקונטנים כבר ערערה על הסיבות, אך למעשה אין זה מדויק. הפורמליזם של תורת הקונטנים, כאמור, מערכת החוקים שלה, משמר את הסיבות. נכון, בהינתן מצב קונטני מסוים, A, ניתן אך ורק לחזות הסתברויות של המצביעים B ו-C שיבואו בעקבותיו. אבל אין בכך כדי לשלול את האפשרות ש-B או C נקבעו מראש ע"י A ורק חוסר ידיעתנו מונע מلنבאת המשובב על סמך ידיעת הסיבה. זהה

השערת "משתנים נסתנים" שאינשטיין השתעשע בה בתקופה להפריך את תורת הקונטנים, אך כמובן, לא רק שלא הוכחה אלא אף הוגבלה (כגון ההוכחה של ג'ון בל שימושיים נסתנים כללה יפעלו מරחק, לכאורה בניגוד לתורת היחסות – ר' פרק 0 לעיל), ולמרות זאת מאמינים בה רוב הפיזיקאים.

הפיזיקאים מסתמכים על עיקרון הקורי בשפה המקצועית "השערת שימור היוניתאריות", שבשפה היום-יום-יוםית ניתן לנחשו כעיקרון שימור האינפורמציה. כך, למשל, אם השלכנו ספר למדורה, הרי המידע כתוב בספר לא נעלם לחולטין. הוא נשמר בפוטונים (חלקייקו האור) היוצאים מהאש. בלתי אפשריאמין לשחרר את המידע הזה בטכנולוגיה של ימינו, אבל בעיקרון המידע הזה לא אבד אלא רק התערבב עם כמות אדירה של מידע הנראה לנו לא יותר מאשר רעש אקריאי. עד כמה ניתן לשחרר מידע זהה הוא שאלת טכנולוגית ולא יותר. בעיני הפיזיקה התיאורטית, המידע לא נעלם לעולם.

והנה, לפני יותר מעשורים שנה הודיעו הוקינג כי יש מקרה שבו האוניטאריות אינה נשמרת, כאמור, תהליך שבו אינפורמציה נעלמת ממש, לחולטין, ולא סתם מתערבבת עם רעש. התהליך הזה הוא התנדפותו של חור שחור. לפיסיקאים היה ידוע זמן רב קודם לכן כי כנסטר חור שחור, הרי כל מה שייפול לתוכו – אופניים, בנינות, חברים כנסת – יאביד את כל תכונותיו הפיסיקליות (צבע, צורה, ריח וכו') ויישנה רק את שלוש התכונות הפיסיקליות היחידות של החור השחור: מסה, תנע סיבובי ומטען חשמלי. יש כאן, כאמור, איבוד אינפורמציה מובהק, אבל הפיסיקאים הניחו שתכונותיהם האבודות של החיצים שנפלו לאחר השחר נשארות בחווית בתוכו, מעבר להישג ידו של הקום הנראה. והנה בא הוקינג, בעקבות רמז של יעקב בקנשטיין מהאוניברסיטה העברית, והוכיח כי חורים שחורים מתנדפים בתהליך קוונטי מפליא ופושט. לא נזוז על פרטיה התהליך – הם מוסברים בצורה בהירה ב"קצוץ תולדות הזמן". מה שהשוו לבניינו הוא שהחלקיקים הנפלטים מהחור השחור והגורמים לכילוונו נוצרים על שוליו, הרחק מהאופנים, הבננות והח"כים שנבלעו למרכו. כאן, אמר הוקינג, יש אובדן אינפורמציה אמיתי. בעוד הפוטונים היוצאים מהאש משמרים עדין את תוכן המכוב בספר, הפוטונים היוצאים משולי חור שחור אינם יכולים לשמר מאומה מתכונות הגופים שנבלעו הרחק מרכזו. וכך, בכללות החור השחור, תיעלם לחולטין כל האינפורמציה שנבלעה בו.

והנה אירוניה: מזה שנים רבות שהוקינג ופנרו מנהלים ויכוח על מקורות של חן הזמן. הוקינג, הצעיר שבהם, דזוקא נוקט בעמדה השמרנית (פרק 0) בעוד שפנרו, כפי שראינו, מעלה את השערת הנזועות יותר (פרק 0). הוויכוח הממושך הזה (שכמו הוויכוח המפורסם בין איינשטיין ובוהר, נעשה מתוך ידידות והערכתה הדדית), הenthal עלimoto ציבוריות ולאחרונה אף יצא כספר. אבל לאורך כל הוויכוח הזה, לא הבין פנרו איך הוקינג מגיש לו בבל-דעת, שוכ ושוב, את הטיעון התומך דזוקא בגישתו שלו!

הelogika כאן פשוטה בתכלית. נדמיין לעצמנו שתי מערכות סגורות. אחת מהן עוברת התפתחות נורמלית, וכך שהאנתרופיה שלה תגבר עם הזמן. הבה נתן למערכת מספיק מסה וזמן שיאפשרו לחור השחור להתחווות ולהתנדף. כשהנפחה את המערכת לאחר זמן מסוים ונבדוק את האנתרופיה שלה, נמצא שהאנתרופיה גדולה. זה לא מפתיע: אם ההשערה של הוקינג נכונה, החלקיקים שאלייהם התנדף החור השחור לא יכולים לשמור את האינפורמציה על האובייקטים שנבלעו קודם לכן ע"י החור השחור. לפיכך, התנדפות החור השחור פשוטה נוספת לאנתרופיה של המערכת, בדרך זהה לו ששל ההפרעה הבודדת בתמונה 7 א' שבטייה הופרעה השרשורת הסיביתית.

המערכת השנייה תהיה ההיפוך המדויק של המערכת הראשונה: מערכת סגורה בה המצביעים והתנעים של כל החלקיקים מתואמים-مراיש עם מרבית הדיווק כך שהאנתרופיה שלה קטנה עם הזמן (ספלוי קפה מתחמים, מתיים קמיים מקבריהם וככל שאור מעשי הליצנות שהוכרנו). גם כאן יהיו כמויות החומר ומשך הזמן המוקצים למערכת מספיקים להתחווות והתנדפות חור השחור. בפתיחה המערכת בתחום הניסויינו אנו מוצאים שהיפוך הזמן נכשל: האנתרופיה גדולה גם במרקחה זהה.

הסיבה ברורה: האפקט משמיד האינפורמציה של החור השחור הרס את ההתאמות המוסדרות מראש שעמן הוכן המצב התחלתי. תהליך זה מביא ל蹶ה שראינו בתמונה 7 ב', בהבדל שכשלון הסיביות שנגרם ע"י החור השחור משפייע לא רק על חלקיק אחד אלא על חלקיקים רבים.

ובכן, כפי שאומרים עורכי הדין, We rest our case. אם התרחש אי-שם ביחסים אפילו אירוע אחד שאינו דטרמיניסטי להל庭ן – תھא זו התנדפותו של חור השחור, פיהוקו של חתול או דמעות שהזילה עקרת בית אחר קילוף בצל – או זוי מאבדים היחסים הסיבתיים בכל היקום את סימטריית הזמן שלהם. אירוע כזה שקיים להפרעה שהציגו במסללו של כדור ביליארד בודד: עם הזמן הוא משפייע על כל האירועים האחרים. כך יכולים אנו לשולב את האפשרות שאנו חיים ביחסים מהופך מהסוג שהזכרנו בפרק 0, וכך יכולים אנו סוף-סוף לקבע שהאירועים בעבר גורמים לאיורים בעתיך ולא להפין. ברצונו לחזור ולהציג את פשטותו של הטיעון הזה: אם הדטרמיניזם צודק, היקום אינו שונה מושלחן הביליארד שבתוכונה 6 אלא רק במספר מרכיביו. כל אירוע שאינו סיבתי באופן חרור דין כדי ההפרעה הקללה שהפערנו למהלכם של כדורו הביליארד. בעצם, משולש יפה הופך לערובית כדורים (או, בעולםנו, ספלוי קפה מתקరרים ואנשים מזדקנים ומתים) הוא אפשרי בעוד שההיליך הפוך מציריך התערבות מוחשבת היבט ומתרשכת מצד כוח עליון.

מנקודה זו, שבה צריכה הפיסיקה המקובלת לגיים צירופי מקרים ניסיים, יש רק שתי דרכים לחזור אל המדע. מחד אפשר שיתברר שהוקינג ודומיו טועים והאינפורמציה נשמרת אפילו בהתנדפות החור השחור (רעיון שנתרם לאחרונה על ידי תורת המיתרים המנסה לתאר תאור מפורט של החורים השחורים). אנחנו כמובן מכוונים שלא כך יהיה, אבל כרגע נותר רק לחכות ולראות מה יילד יום. מצד שני, אם יתברר שהצדקה היה דוקא עם הוקינג, אז קורסת גם הטענה השמרנית שהובאה בתחילת מאמר זה, דהיינו שאירועי העתיד קיימים לצד אירועי ההווה וה עבר ממש כשם שערי הצפון קיימות לצד ערי הדרום. ואם כך, אם העתיד אינו קיים, תחרור התורה האומרת כי הזמן נתון להתחווות ותאלץ את הפיסיקה להרוג מגבולותיה הנוכחיים.

או מה יلد יום?

אוגוסטינוס הקדוש – שהוא, למעשה, למעשה, לא כל כך קדוש כלל אלא קנאית מרושע – ראי אולי יותר לכינוי אוגוסטינוס החדש בשל הפטגם השנון שלו שנעשה ידוע לכל: "מהו הזמן יודע אני אבל כשותאים אותו אני יודע." שמונה מאות שנה מאוחר יותר, כשמהרינו שתי מהפכות גדולות בפיסיקה של המאה העשרים, גם אנחנו איננו יודעים עדין מהו הזמן, ובכל זאת זו א' – ידיעה מורכבת, עשרה

ומסקנת יותר מזו של ימי הביניים. אנו יודעים, לפחות, מה הזמן **איננו**: המרחב והזמן אינם סתם במה פאסיבית שעלייה מתחוללים האירועים שסביבנו. תורה היחסות הראתה שהמרחב-זמן הוא מעין יריעת חיה, המשתפת באופן פעיל במה ש"מציר" עליה ע"י הקיפולים והעיקומים הרוחשים בה. תורה הקונטנים הוסיפה והראתה שהמרחב-זמן עושים אפילו דבר יותר מפליא: ברמה הקונטנית, הרבה מתחת לכלה הצפיה שלנו, יוצר המרחב-זמן אינספור זוגות חלקיים "וירטואליים" המופיעים ומתאיינים ללא הפסיק לפרק-זמן קצרים מכל שיעור.

תורת המיטרים, אותה תורה שאפתנית המנסה לאחד את תורות הקונטנים והיחסות, מנסה אף להרחיק לכת יותר ולהראות כי בעולמנו אין, למעשה מאומה בלבד המרחב-זמן, רק שמספר ממדיו הוא גדול יותר مما שחשבנו, וכל החלקיים והכוחות היוצרים לנו אינם אלא פיתולים זעירים ביותר של מרחב-זמן רב-ממדי זה. לתורת היחסות ולתורת הקונטנים מצטרפות התורות הגדולות האחרות של הפיסיקה, התרמודינמיקה והקוסМОЛОגיה, וגם להן יש מה לומר על הזמן, על כיוונו ועל מוצאו, וגם הן מוכנות להשתלב עם התורות האחרות לפיסיקה חדשה, שאיש אינו יודע כיצד תיראה.

פֶּאֲשֶׁר קַיִתִי עַולְלָה, כַּעֲלָל דָּבְרָתִי, כַּעֲלָל חַשְׁבָּתִי,
וְכֶאֲשֶׁר קַיִתִי לְאַישׁ, כַּסְירָתִי דְּבָרִי כַּעֲלָל.

הראשונה אל הקורינטים י"ג 11

המאמר הראשון שכחתי בפיזיקה היה מלאכת מחשבת של בורות ויהירות. הייתה בן עשרים ומשהו, בלי שום תואר אקדמי, ואפילו تعודת בגרות לא הייתה לי כי נשרתי מבית-הספר בסוף כתה י'. עם רקע מרשימים כזה, כתיבת מאמר שיעשה פעם ולהתميد סדר בתורת הקונטנים נראית לי מעשה לגמרי טבעי. עברו הרבה שנים מאז, ואולי יש מקום להסביר מה השתנה מאז אותו מאמר.

עבדתי בהםים בכל מיני עבודות מודגנות. במקום לימודים סדריים בלעדי ספרים, בינויהם ספרי כמה מחברים ישראלים. מדי פעם תלפנתי אל אחד מהם וביקשתי רשות לשאול כמה שאלות.-column ש macho לדבר על ספריהם, הפנו אותי לספרים נוספים ולפעמים הזמינו אותי לפגישה. כך זכיתי בכמה מורים שאפשר היה רק לחלום עליהם. זה היה הפסיכיאטר יהודה פריד ז"ל (1900-1990), שלו לא מותו בטרם-עת היה נחשב כיום לדמות מובילת ברפואה ובפילוסופיה בעולם. מי שטיפה אותו ביוםיו היה שלמה גיורא שומר מאוניברסיטת תל-אביב, לימים חתן פרס ישראל בקרימינולוגיה. האיש הזה, המבריק, הממוסדר והכובטה, השולט בשש שפות (כולל ערבית יפהפייה אותה קנה בשבי הלגיון הירדני), נקשר אליו באהבה מזורת.¹⁰ עד היום, כל פגישה בינוינו היא קולנית במידה שאנשים מהמסדרון מתלחשים בדאגה. שומר צירף אותו לחבורה חתרנית שהיתה נפגשת אחת בשבועיים בדירה כלשהי ומקשiba להרצאה של אחד החברים. מדי פעם היו מזומנים להרצאות בפנינו מארונות גדולים: ישעיהו ליבובי' ז"ל (1903-1994) ויבדלו לחיים יוסף אגסי, בן-עמי שרפסטיין,ASA כשר, יעקב רוז, חיים חזן ואילן גולני. ברבות הימים נעשו רבים ממשתתפי הקבוצה לחוקרים בולטם בתחוםיהם.

*

גם לי יש נושא להרצאה, אמרתי לשומר בסוף אחת הפגישות. יש לי תיאוריה המאחדת את הפיזיקה עם הפסיכולוגיה, ובהזדמנות מתקנתת את תורה האבולוציה ופותרת את בעיית התודעה, וכל אלה נונטו בסיס מדעי מוצק לתופעות הפרפסיכולוגיות.נו, קדים, אמר שומר, זורח מהנהה על בן-טיפוחיו הצנוע כמעט כמו הוא. בפעם הבאה תורך לדבר. לידנו עמד המרצה-אורח של אותו ערב, פיסיקאי מאוניברסיטת תל-אביב עם בלורית ווקנ Kan سنטר, שהזכיר לי את דרטאנין מהמוסקרנים. גם הוא הופיע בפעם הבאה כדי לשמע את בשורת הגאון הtower. בסבלנות הקשיב להרצאה וכששימתי שאל שאלת הבני. ניסיתי לענות. "לא ענית לשאלת שלי", אמר וחזר על שאלתו. ניסיתי שוב לענות. "סליחה, אתה שוב לא עונה לי", קטע אותי בקוצר-רוח. "אני שואל אותך פעם שלישיית... זה היה בז'יון שלא שכחתי, וגם שיעור חשוב. כך הכרתי את יקיר אהרוןוב.

*

באוטו זמן מצאתי עבודה חלקית במכון וייצמן כעובד מעבדה זוטר. בעיני רוב העובדים נחכתי לשוטה בלתי מזיך המבלה שעotta בספריה. תחילת התעניינתי בפסיכולוגיה. נשכתי

בקסם כתבי פרויד, עשיתי אנלויזה עצמית כמה שנים עד שיכולתי לשלם על טיפול מקצועי, ואז החלטתי לכתוב ספר על פסיכואנלויזה. "לפני ולפנים, עיונים פסיכואנאליטיים במקרא וביהדות"¹⁰ עתיד היה להפוך לרבות-מכר, אבל קדמו לכך הרבה הרבה שנות עבודה בבדיקות. התלהבותי מהפסיכואנלויזה, בתוספת ביטחון עצמי מופרז, הביאה אותה לשדר כמה אנשים לעבר אצלי "טיפול" בחינם. לצעריהם תמיימים אלה, תלמידים-סטודנטים-חברים בערבוביה חסרת-אחריות, קראתי לה "סטרה אהרא" שלי, ואני מודה למזל הטוב על כך שרובם, כמובן, בראים בנפשם. תיאור מהימן שלי מאוחם ימים מצאתי בעבר שנים רבות באתר האינטרנט של מי שהיה לו זמן קצר אחד מאותה "סטרה אהרא". "שמואל ואקנין היה חיל בסדר שהופיע בחברותו של שומם. האינטלקט והידע המדעי שלו הדהימו את כולנו. לעומתו הרגשטי אידiot. תקופה קצרה התידדנו ואז נסע לחו"ל. תחילת פנה לעסקים, הסתבך, שבארצה, הסתבך שוב ונשלח לכלא, נסע שוב, נעשה כלכלן, מתוויך, יועץ למשלת סלובניה והשד יודע מה עוד, ומماז לא שב. בין כל עסקיו פרסם קובץ סיפורים על חייו, "בקשה מאשה אהובה",¹¹ שזכה להצלחה ולשבחים ניכרים. באתר האינטרנט שלו¹² מצאתי עוד כמה סיפורים לא פחות מתרתקים, וביניהם "אליצור שוטף מבהנות". הוא מספר בו ביושר נוקב ואצורי על פגישה שהייתה לנו ואיך בחר בדרך-חיים הפוכה זו שלי, ככלומר חיפוש אחריו התעשרות מהירה. התיאור שלי אינו מחייב, בלשונו המועטה, אבל רווי הבנה וחלמה. הוא עורר بي מחשבות. איך, באoten שנים, מוקף בחברות המעריצים שננתנו בי אמון כזה, לא הפקתי ל"גורו" נוכל המנצל אותם לרעה? נזכרתי באמרה (ירושלמי סנהדרין ד) "היה זנב לאריות ולא ראש לשועלים". איזו שמחה לראות את שועליך לשעבר והנה רובם כיום אריות בזכות עצם!

*

עוד לפני שגמרתי את ספרי הראשון החלטתי לכתוב עוד ספר, בו אציג את אותה תיאוריה גאנונית שלי המציבה אלטרנטיבת לפיסיקה הקיימת. זו הייתה תיאוריה שהכatta بي כהתגלות והבשילה בתוך כמה ימים, וכל מה שלמדתי עד אז השתלב בה לתורת-על שהייתה מסוגלת לפתור כל בעיה מדעית. לא, לא ניתן היה להפריך אותה, וכן, גם אני קראתי את ה-DSM-DSM ואני יודע מה זה אומר, אבל שאר הסימנים לא ממש מתאימים. וחוץ מזה, עד היום מוצבצת לפעמים במאמרי המדעיים אחת התובנות שהצמיחה התורה היא.

*

אבל זכרתי את המפגש הטריאומטי בחוג של שומם ואני אהרוןוב עשה מני קציצות, והחליטתי לשכלל ולתקן את התיאוריה. לשם כך, חשבתי, לא יזיק אם אקרא מאמר או שניים ואראה מה אומרת תורה הקונטינטטיבית הזאת. אז קראתי מאמר או שניים וgem הבנתי מהם דבר או שניים, והיה לי ברור שיש לי פיתרון לפزادוקס איינשטיין-פודולסקי-רוזן. כתבתי מאמר ובו הפיתרון שמננו נבעה דרך להעברת אינפורמציה מהר יותר מהאור – בדיקות שאינשטיין אמר אסור – ושלחתו אותו ללא אחר מאשר נתן רוזן המנוח (1909-1995), אהרון השלישיה המתולוגית, שעוד היה אז אמריטוס בטכניון בחיפה.
למאמר צירפתី חמשייר:

Dear Sir, since you are
 The distinguished R of the EPR ,
 Pray, read this essay
 And hesitate not to say:
 Have I really gone too far?

תשובתו של האיש שמורה אתי עד היום: מכתב מודפס באנגלית עם כמה השגות, בעיקר טכניות, ובסופו, בכתב-יד ילדותי, שורה בעברית: "לפי דעתך זה טוב מאוד שאתה מקדיש זמן ומחשבה לתורת הקונטנים ואני מאמין לך הצלחה בהמשך".

סטודנט לפיזיקה בשם מריאס אוֹשֶׁר (כיום פרופסור לפיזיולוגיה במלחת בירקון) עשה אז תואר שני באוניברסיטה תל-אביב. يوم אחד, בחדר המדרגות, רأיתו עם המנהה שלו, לורנס פול הורביץ. הוא עשה בינו היכרות. לבסוף הזה, אמר להורביץ, יש תיאוריה חדשה על הקונטנים. הלו, חיך אליו האיש כאילו היינו מקרים ותיקים, בדיקן דיברנו על... דיון התפתח על המדרגות עד שאנשים דחקו בנו לעלות או לרדת. האם אני רוצה להצטרף אליהם לאירוע-צהרים? אחריו מה ששמעתי הייתה מכך גם אילו הזמנתי להצטרף אליהם לעונש מסר בקצירות. להורביץ הייתה תיאוריה שהניחה את קיומו של זמן נוסף על זה המתואר ביחסות כמימד רביעי. השיחות בינו הודיעו לבסוף מאמר ארוך על הזמן,^א שזכה להתייחסות נוספת במאמר של רוזן.^ב נסענו יחד לחיפה לבקר את האיש. הוא היה אז בן שנותים ומשהו, עירני וחד-מחשבה. הם דיברו על "גשר איינשטיין-רוזן", מין פיתול של המרחב-זמן שאינשטיין והוא הראו אכן ניתן (במידה והוא קיים) לעبور בו מזמן אחד לאחר. הבנתי מעט מאד מشيخם, אבל הרגשתי מרוחק מחוץ למרחב-זמן.

הביטחון העצמי שלי עלה וה"יצירה" על הקונטנים המשיכה להתגלגל. שלחתתי אותה לייר אהרוןוב, בתוקוה שבינתיים הספיק לשכוח את אותו ערבי (הוא לא), לאשר פרס ז"ל (1934-2005)^ג מהטכניון ולמשה ימיר יבדל"א מהאוניברסיטה העברית. מה חשבו אלה על השבחן האלמוני אפשר רק לנחש. ואז בא הטוב והנאמן שב"סטרא אחרא" שלי, ירוון מאיר, והעביר את היצירה לאחד ממורים באוניברסיטה העברית. אם אני מתחילה ביום בהזكري כמה אנשים קראו את הבלוי, לעולם יהיה אסיר-תודה לירון על שהביא אותי אל גدعון כרמי. גدعון היה פיזיקאי שעשה דוקטורט יחד עם יקיר אצל דיוויד בום אבל אחר-כך עבר לתחום החינוך, שם גילתה דרכיהם להקנות לפעוטות מושגים מורכבים שעלה-פי הפיזיולוגיה המקובלות היו עדין מעבר להשגתם. מאז היה לו חלום: לפתח מודל של במידה שיתבסס על תורה הקונטנים. יום אחד נפגש עם ריצ'רד פוקס מפילדלפיה, אחד החורמים הגדולים לאוניברסיטה טמפל באותה עיר, שהחליט להקים בה את "המרכז למדעים חדשניים" (The Center for Frontier Sciences) שיעודו מחקרים בתחוםים שמהווים זרם המركזי של המדע. גדעון נבחר לעמוד בראש המרכז ונסע לפילדלפיה לרגל תפkickו החדש. הוא קרא את המאמר שלי ושאל את יקיר אודוטוי. מכאן התגלגלו הדברים כמו חלום. קיבלתי הזמנה לבינוי בינלאומי בתורת הקונטנים. הצעתי בראשית המזומנים והייתי בטוח שמשיחו עושה מני צחוק: יקיר אהרוןוב, רוג'ר פנרטון, ברנאר קספניא, דיוויד בום, הילרי פטנס, אבנר שמעוני – ולאלה, כל חברי הספרים שקרהתי לאחרונה היו שם! טוב, היו גם כמה שמות

^a. פרס זכור כמלומד תקין וחד-לשון. בספרו --- מופיע הערך "אי-זאות" באינדקס פעם אחת בלבד, והוא מפנה לאותו עמוד עצמו... רק מעתים הכירו את צדו הסנטימנטלי. אחרי מותו התברר שקנה מבועד חלקת קבר ליד מورو וידידו נתן רוזן.

שלא הכרתי, מן הסתם פיסיולוגיים ידועים שטרם קראתי את עבוזותיהם. צלצלתி בלילה למספר הטלפון שהופיע בראש המכתב ומישחו ענה בנוצרית "בוקר טוב" מהצד השני של העולם. בוא'נה, זה על באמת! הלכתי לארוז.

במהלך הכנוס, שבו, למזרלי, כבר הייתי נבון מספיק כדי לסתום את פי ולהקשיב (כבר מלאו לי שלושים), התודעתי אל גدعון ומיד הלכתי שבוי אחרי עמוק חשיבותו וקסמו האישני. קצת פחות הבנתי למה הזמן לכינוס אנשים שעסקו בריפוי מחלות שונות בעזרת מכשירים שפעלו לטענתם על עקרונות קוונטיים. בתום הכנס הזמין אותו גדעון לגור בביתו לכמה ימים. הוא סיפר לי על המרכז והזמן אותו להציג. בוא העשה אחי דוקטורט, אמר. הזדמנות זאת נופלת על בנadam פעם בחיים. סיכמנו שהוא יישע ארצתה להסדר כמה עניינים, בשובו אסע אני להביא את הפצוי, ואז נתחיל בעבודה.

היהתי מאושר עד הגג. גדעון היה בוס טובעני מאד, אבל גם DAG שאוכל אוכל בראיא ושתלבש כיאות בימי השlag. לא אחת ספגתי ממנו נזיפות בסגנון זה"ל כשלא מילאי כראוי את הוראותיו, אבל כשראיתית את שעות העבודה המטוטפות שלו, לקחתי על עצמי מטלות נוספות כדי שהוא יוכל להתפנות לדברים החשובים.

נסוי קולנֶה, מזכירתו של גדעון, התגלתה באישיות מדהימה בפני עצמה. שקטה, טובת-לב ובעלת כוח רצון אדיר שבודאי הושפע מأدיקותה הקתולית. כשהגענו גדעון ארצת הפkid אותו למלא את מקומו. נסוי עשתה את העבודה היומיומית ואני התבטתי רוב הזמן במשרדו, מצצלץ מדי-פעם למשרדי הנהלה באמתלה כלשהו רק כדי לשמעו את עצמו אמר בטון תקין "שלום, מדובר מנהל המרכז למדעים חדשניים..."

בין הפרויקטים עליהם הופקדתי היה ארגון כינוס בברמודה שעסק בחילומו היישן של גדעון: למצוא דרך שבעזרתה יוכל עקרונות קוונטיים להסביר תופעות מוזרות כמו ההומואופתיה, הטלפתיה והותמצאות שהשיג ב厰קוריו עם ילדים. אני כבר הייתי ספקן הרבה יותר והצלחתי למתן אותו בבחירת המזומנים, אבל כשהפיסיקאי בראין ג'וזפסון (-1940, נובל 1973) והנוירופיזיולוג ג'ון אקלס (1903-1997, נובל 1963) ענו בחוב, נראה היה שהדרך סוללה להצלחה נוספת של המרכז החדש.

יום אחד קיבלתי מכתב ממוען לגדעון. השולח היה אנדראה פורהץ', שהציג עצמו כרופא. נזכרתי: זה היה מחברו של ספר¹¹ שסיפר איך קיבל אורי גלן תשדורות מהיזרים שסייעו לישראל לניצח במלחמה ששת הימים. פרופסור קרמי היקר, כתב האיש במתוך-שפטים, אני עוסק בשיטה הדשנית לריפוי סרטן המתבססת על תורה המיתרים ואשמה להציג אותה בכנס שלק. עד היום אני מכח על חטא על שלא הייתי נאמן יותר לפטרוני ולא זרמתי את המכתב המאושם לאשפפה. תחת זאת רק כתבתי עליו באדום "גדעון, משודיך מאיש זה!!" כמה עצוב: גדעון, המבריק והנווץ, התגללה כנדיב מדי במתן אמון. כשם שהשתכנע שהרבנן האלמוני מרוחבות ראי להציג את הגיגיו בפני גולי הדור כך החלטת עתה להזמין את הנוכל הבינלאומי לכינוס. נסעתו ארצת להביא את הפצוי ומכאן שמעתי על מה שאירע. פורהץ' בא לכנס, המטיר את שטויותיו מעל הבמה הנכבדה שקיבל וגרם למבוכה איומה. זה היה סוף כהונתו של גדעון כראש המרכז וסוף החלום האמריקני שלי.

*

הכינוס קירב אותו ליקיר ומעטה הייתה נכנס אליו לפעם לשאול שאלת זו או אחרת. כך התודעתי אל עבוזתו. יקיר הפק להליך מההיסטוריה של תורה הקונטיניטים כשגילה ב-1959, בהיותו דוקטורנט אצל דייוויד בום בבריסטול, את אפקט אהרונוב-בום,¹¹ שהוא תוכלו להבין במקל על סמך דיוינו בפרקם הקודמים. כשהורם עבר דרך סליל, הוא יוצר שדה מגנטי סביבו (פרק #). עכשו דמו לעצמכם סליל כזה העובר דרך הדף כמו בציור. משני עברי הסליל זהה נניח לפונקציית-הgel של אלקטרון בזד לבור במתוך מאך-זנדר המודד התאבכות (פרק #). ערכו של השדה המגנטי באזוריים בהם עוברים שני חלקים הgel הוא אפס, ובכל זאת, בתמונה התאבכות תגליה המUIDה על כך שהל שניי בפaza היחסית של שני חלקים הgel, למרות שעל פי הפיסיקה הקלסית אינם יכולים להיות מושפעים מהשדה שבאמצעם. ההסבר לכך הוא שבתורת הקונטיניטים, בנוסף לשדה שערכו הוא אפס באיזוריים בהם עוברים הgelים, קיים גם מהו ערטילאי יותר הקרוי "פוטנציאל", והוא אמרור להשתרע גם על אזוריים שעוברם לתחום השדה. פוטנציאל זה נחשב תחילה ליישות מתמטית בלבד, עד שבאו יקיר ומورو ונתנו לו ממשות פיסיקלית.

תחילה החבל הגילוי בספקנות. פינמן היה בין הראשונים שהשתכנעו בנכונותו ושלחה מברך לפיסיקאי הצער: "יפה, כל כך יפה, אין לא חשבנו על כך קודם". אחר כך באו הניסויים ואוששו את הניבו. עכשו, על-פי הנוהלים המקובלים במתן פרס נובל, היה ראוי להעניק את הפרס לשני מגליו של האפקט הפיסיקלי החדש. "אל תזכיר בנסיבות יקיר את הנובל", יעצו לי עמיתיו בגיהוץ. "זה נושא רגיש מבהינתו". לא רגיש ולא נעלים. יקיר טען בפשטות שנעשה לו עול. הקהילה המדעית ניסתה בארץ ובעולם לפצות אותו בפרס ישראל, פרס וולף ובשורת אחרות-כבוד נוספים. אפילו כתבת-העת הנודעת Nature ייעץ לוועדה בשטוקהולם, במאמר-מערכת חריף,¹² להעניק לאהרונוב ובום את הפרס כדי למונע מעצמה מבוכה. לשוא.

יקיר גם הביס את הסטטיסטיקה המקובלת בתחוםו בכך שפוריותו לא ירצה עם השנהים. הוא פיתח את שיטת המדידה החלשה, המאפשרת למדוד תוכנה מסוימת של חלקיק בלי לשלם את מלאה המחיר שתובע עיקרונו אי-יהודים. גם "מכונה-זמן" רשומה על שמו, המאפשרת למי שנכנס לתוכה -----

*

יום אחד נכנסתי למשרדו של יקיר ופגשתי גם את שוהם. השניים הסתכלו עליי במבט חשוב. החלפנו כמה מילוטים והוא הודיע לי יקיר הוודה ששיננתה את חייו. הוא מוכן לחתות אותו לדוקטורט אחרי שהצליח לכופף את הנוהלים באוניברסיטה תל-אביב, שמצאה עצמה מקובלת סטודנטים רבים לא עשה תואר שני או ראשון ואפילו לא סימן תיכון. "זו הזדמנויות של פעם בחיים, يا פסקודניאק!" שאג עליי שוהם. "תוכיח שאתה ראוי לה!"

*

פהחתי. דבר אחד הוא להתרברב ברעיונות מהפכנים ודבר לגמרי אחר להתר מסטר מסודר של קורסים והגשת תזה למחקר, שבסופו קיימת אפשרות ריאלית של כישלון. מי שנסה כי אומץ היו המורים שקניתו באותו ימים. לארי הורביז עוזד אותו: אתון לך קורסים פרטיים במתמטיקה. ג'ו רוזן, בנו של נתן, היה אז פרופסור לפיסיקה באותו פקולטה. סרתי

אליו פעם לשאול שאלה והרוויחתי גם מורה פרטיה וגם חבר יקר. ג'ו התענין וכותב הרבה בשאלות היסוד של היחסות, הקונטנים והקוסМОЛОגיה. כל טוותה מאמר שנותתי לו חזרה אליו מנוمرة בהערות בעט אדום על כל טוות בפיזיקה, בהיגיון או אפילו באנגלית. אפילו כיום, כשאני מקפיד להודות לו בספר זה על ביקורתו הבונה ועל המחשבות בהן שיתף אותה במרוצת השנים, אני בטוח אם נתתי ביטוי נאות להשפעתו עלי.

שני מנהים מונו לי לדוקטורט. לצד יקיר היה היסטוריון המדע עמוס פונקנשטיין ז"ל (1937-1995). הוא היה איש "מדעי-הרוח" אמיתי, מהסוג שכבר לא מייצרים כיום. בימיו, לימים להואר שני ושלישי בפילוסופיה או בהיסטוריה היו ממשיכים שנים רבות כדי להשתלט על הספרות בשפות המקור, בניגוד לאופנת ה"דكونסטרוקציה" הריקנית הרווחת כיום. עמוס דיבר ברהיטות לטינית יוונית וכותב בעברית, אנגלית, צרפתית וגרמנית. התמחותו השתרעה על מחשבת ימי-הבנייה, הפסיכולוגיה של הרנסנס ותקופת ההשכלה היהודיית, ולצד אלה התמצאה היטב בפסיכה מודרנית. הוא גדל בבית דתי ויצא לשאלת, אבל שמר את המיטב שבחינוך הדתי. שנות היהי מקשיב מרותק להרצאות בהן תיאר את הדמיון בין התרבות היוונית העתיקה לתרבות היהודית שהתפתחה מתకופת בית שני ואילך: = = =

כשנתיים נמשך הקשר ביןינו ואז חלה בסרטון הריאה. ביקרתי אותו בברקלוי, שם עשה את השבתון, ודיברנו כSSH שעות על ליבניין, על מאך ועל אי-שוויון בלב עוזו מכתיב לי רישימת קריאה שהלכה והתארכה. בעבר כמה חדשים בא לביקור בארץ. ייצאו עם אסתה רועיתו לבית קפה בשינקין. בזכרוני נחרתה הסיכה הקטנה של פרס ישראל אותה הצמיד לדש מעילו. בעבר זמן לא רב הביאו החדשנות את הבשורה ממנה התיראת. אחד מגדולי ההיסטוריונים בעולם הילך בטרם-עת לעולמו.

*

כמה פעמים התברר לי ספריים שהיחס מכוון וייצמן נעלמו לאותו מקום. "זה עוד אצל ליפסון", "רטנה הספרנית". "ציריך לציצל ולהזכיר לו שיחזיר אותם". רציתי לראות מי הבנאים שמתעניין בהם נושאם כמווני והנדבותי ללחצ וلهזכיר לו ספריים ציריך להחזיר. הקשייש שענה ב"יבוא" רועם לנקיisha על דלתו היה אחד הדברים המכיתים שקרו לי בחיים. שניואר ליפסון היה ממוקמי מכוון וייצמן למדע ומיסד האוניברסיטה הפתוחה. הרושם הראשון שטבע בי היה ההומור היפה-יפה שלו. כשביר ליפסון זכה בפרס ישראל הוסף: "חוז"ל אמרו שככל הרודף אחרי הכבוד הכבוד בורה ממנו וכל הבודה מפני הכבוד הכבוד רודף אחריו. גם אני בורה מפני הכבוד אבל עכשו כשהנחייתי זקן אני כבר לא רץ מהר כמו פעם".

הוא שאל לסייעת התעניינות בספר. אמרתי לו. הוא הסביר לי בחביבות למה אני טועה. הסברתי לו בחביבות לא-פחotta שימושו מה אכן טועה וזה במקרה לא אני. שעה וחצי אחר-כך עוד היינו שקוועים בוויכוח שנעשה יותר ויתר קולני. הייתה תשוש, והוא מש לא. בחוץ כבר היה חושך. "תשתח מההו?" שאלתי בנימוס. לרוגע השתקה ותקע بي מבט מבולבל ואז התרחב הגיחוך הקבוע על פניו לחיק גдол. "בזודאי! איזה קפה אתה אהוב? בוא אתי!" שניואר, כיאה למי שנולד נתין האימפריה הטורקית, נהג לשאת את כוס הקפה שלו מהמטבח המחלקט אל משרדו על מגש דיקט מאולתר שהיה תלוי על ארבעה חוטים מוצלבים. עם כוס קפה מלאה עד גודתיה היה מנגע בחופשיות את המתקן המgowך, כנהוג

בבתי-הקפה הערביים, מבל' שתישפך טיפה, וכל הרואה את המזהה היה מקבל מיד הרצאה על תורת היחסות הכללית ועל שווון-הערך בין תאוצה וככידה (ר' פרק 14).

מילדותו, סיפר לי, הוקסם מתורת האבולוציה ובעיקר משאלת מוצא החיים, ומזהה כמה שנים היה שקוע בכתיבת מאמר על הנושא. כשהשמע שאני מתעניין בתرمודינמיקה הציע שנבוד ייחד. כך זכיתי בשרות יועץ במכון וייצמן, שהתרוכה למשך כל שנות הדוקטורט בתל-אביב. הברותנו הלכה והעמיקה. שנייר גדל בבית דתי, התפרק בגיל ההתbergות ונעשה אתאיסט קיזוני. בתו, כפי שקרה לא-אחד במרקם כאלה, חזרה בתשובה ונעשה חרדי. מה שנחן לי השראה להרבה בדיות מרושעות אותן סבל בזומיה. כدرכם של זקנים היה מפליג בשעות ארוכות של שיחה. אבל עולמו היה כל כך עשיר שתמיד יצאתי ממנה עם ידיעות נוספות ועוד חומר למחשבה. עם הזמן למד אותה לשפט טוב יותר ראיות מדעית וכך נטהתי את התפקיד בפרפסיכון. אשתו חנה תיבDEL^א הייתה פרופסור למתמטיקה ולעולם היה אסיר-תודה לה על השעות הרבות שהשקיעה בי בעוזה בקורס הראשון שלקחת בהשbonו דיפרנציאלי ואנטגרלי.

המחלקה לפיסיקה כימית במכון וייצמן נחשבת לאחת המעלות בתחוםה בעולם. כמה מחקריה, שבנוסף לבולטות המדעית הtagלו גם אנשים נזימים, הגיעו היט לתורת הקונטים. למדתי להקשיב להם, לקרוא ולהשוו. מהשיחות בין שנייר נולדו מאמרי בהם ביטאנו דעתות אך הוינו זה זהה. מאמרי הפיסיקלי הראשון^ה הצבע על היבט חדש בפרדוקס ה-EPR, זה של תורה האינפורמציה. במאמרי הראשון בפילוסופיה^ה מצאתי תיומך מפתיע לדואלים, בניגוד לחוקי הפיסיקה הבסיסיים. כתבת-עת אליו שלחתי את המאמר צירף אותו למערכת שלו. מאמרי הראשון בביולוגיה, שניתח תהליכי אבולוציוניים בכלים תרמודינמיים^ה התקבל גם הוא לפרסום בלי שינוי. התגובה הופעה בעבר שנה בדמות המאמר הבוטה והמעלב ביותר שקרים מיימי^ה ובו הcientים "גוליבר", "המפטי-דמפט" ו"פו-פה" – כולם מכונים אליו. המחבר, יוברט יוקי (1916-1967), פיסיקאי פרויקט "LOSE-ALMOS" לשעבר, הקדיש מאמר שלם להראות כמה אני בור. קראתי את המאמר בעיון גיליתי ש-א) באמת עשית כמו שגיאות טיפשיות ו-ב) יוקי תקף במאמרי הקודמים את שנייר ואת מנפרד אייגן (1927, נובל 1967). ישתי וכתבת מאמר תשובה^ה בו תיקנתי את טעויותיו ובאותה הזדמנות יצאתי באירוע להגנת שניי "עמיתי". אנחנו – כלומר, אלצ'ור, ליפסון ואייגן – ממש מזועזעים מסגנונו של פרופסור יוקי!

פורטונה המשיכה לחיך אליו. פרופ' מאיר להב מהפקולטה לכימיה הזמן אחד לheeiber במכון וייצמן קורס בפילוסופיה של המדע, ועד היום הקורס הזה הוא עבורי אחד החלקים הנעימים ביותר בשנת-הלימודים. עכשו תארו לעצמכם מה חשתי, בתחלת הרצאתי הראשונה, כשראיתי את שנייר מתישב בקהל לראות איך יתמודד בן-טיפוחיו עם תפקיד שנראה גדול עליו בעליל. היכיתי בלב הולם לשיחה שתבוא בעקבות ההרצאה. זו אכן באה, מזיגה אופיינית של נזיפות, שבחים ושאלות קשות. עם הנסים באו הזמנות להרצאות נוספות בסמינרים וב考לוקוויומים של המכון ולאט-לאט התרגלתי למראהו של מורי הנערץ נתן בי מבט קפפני ולמדתי להתכוון לשאלותיו.

ספריו "זמן ותודעה"^ה הוקדש לו ליום הולדתו השמוניים. קיוויתי להגשים לו מתנה דומה לעשור חייו הבא אבל הסרטן ממנו החלים שנים רבות קודם לכן שב והכח. הוא נפטר

בשלווה בפברואר 2002, בן שמונים ושבע ובלוא אוננו הרוחני. מה לא הייתה גותן,
מאסטרו, עבר עוד שעה אחת של ויכוח קולני על הספר זה!

*

בפילדלפיה לא התפתחו הדברים יפה. תחת גدعון הtmpנהה כמנהלת המרכז בברלי רובייק, חוקרת אינטלקטואלית ומקורית אבל כעסנית ובודה. ננסי כתבה לי כי היא נתונה להתקפות- זעם חמורות מצד הבוסית החדש. המצב הגיע לפיצוץ ב-1995 וגם המנהלת השנייה פוטרה. עתה הוחלט לא למנות מדען לתפקיד אלא להעלות את ננסי לדרגת מנהלת אדמיניסטרטיבית. היא מידה מינתה ועד מנהל מדעי ובו פריז-אלברט פופ, ביופיזיקאי גרמני וחברו של גדען, ואני. פוקס הוסיף לוועך כמה מחבריו מיימי מלחמת העולם השנייה.

פגישת הוועד הראשונה התקיימה באינטלקט, הידוע לכל קוראי "מובי דיק". פוקס החזק שם בית-נופש אליו ניגט לטוס בעצמו במותו הפטרי. במהלך היום שהינו באיזאת לכמה טיולים רגליים עם חבריו הוועד והתהתי על קנקנם. אחר-כך הלכתי לננסי ואמרתי לה: יקירתי, אני מכיר לך עדינה לומר לך זאת: בוועך שלך יש א) רופא-אליל הגונב את כספם של חולמים סופניים, ב) פרופסור לאנטומולוגיה עם שיטיו מתקדם ו-ג) בוגר קון-הוקוקיה המכצלם עב"מים. שני השפויים היחידים בוועך הם, למייב הבנתי, פופ ואני. אני, במקורה, גם מומחה לתמהוניים ואני מודיעך הgingit שעם הנבחרת הזאת יש לך סיכויים מצוינים לסיים את תפקידך כמו קודמיך. לא הייתי מפתלא אליו היה שיחזה זו סוף קשרי עם המרכז. אבל ראיתי את האישה הנפלאה מקשיבה לי בכובד-ראש. האם תעזר לי? שאלה. כל עוד תרצוי בי, ענית. היא חיבקה אותי ומלמלה: אני מודה לאלוהים שהגעית אלינו. כך החלטה אחת הידידות האמיתות שידעתה בחיי. מאז הייתה מתיעצת בפופ ובו בעניינים המדעיים. הפכנו את ביתאון המרכז לכתב-עת מדעי שחייב כל מאמר לעבור רפרנטורה מקצועית, התחלנו לארגן נסימ ברמה ביןלאומית ועמדנו בפרק בפני נוכלים ותמהוניים שניסו לנצל את המרכז לצרכיהם.

*

בהדרגה החל יקיר לקרב אותו אליו ולא משפטו. פעם הזמן לחת הרצאה פומבית. הלכתי לשמעו אותו בתקווה שאצליח להבין יותר מעבודתו. אחרי הרצאה הציע לי טרמן לאוניברסיטה.

נו, איך הולך? שאל בדרך.

חשתי שהוא הזמן לקטע קצר וייעיל של התבכינות. או הקורסים קשים, אני צריך לנסוע פעמיים בשבוע מרוחבות, באוטובוס מאסף, מוקדם בוקר, וזה זמן מבוזבז כי בזמן הנסעה אני יכול לקרוא ו...>.

האיש נעצ بي מבט עgom שמיד היה בזכרוני את הפיאסקו המכונן של חי בחוג של שותם.

"או תחשוב!" אמר בטון של מורה למפרטים.
התחלתי לחשוב.

רעם פצצה שלא התפוצצה

בשום מקום אין הטבע מציג בצורה גלויה את תלומותיו כמו במרקמים בהם הוא מראה את עקובתו בעבודתו מחוץ לשביל הכביש. ויליאם הארוויי, מגלה מהזור הדם

כל מרצה לפיזיקה מכיר את הסיטואציה: סטודנט או סטודנטית מגישים לך תכנית ל„פרפטואום מובילה“, מכונה המיצרת אנרגיה יש אין, ומקשים לדעתך איפה כאן הטבע. הניסיון במהלך השנים הראה לי כלל: אם הם בני פחות מעשרים וחמש, יש לך עסק עם אינטלקט מעוללה. אם הם מבוגרים יותר, זה עלול להתפתח עם הזמן לאחד מאותם מקרים עגומים של „אידיאה פיקס“ כרונית, תמהונים אינטיגנטיים הנדחים אל מחוץ לשולי האקדמיה וממלאים פורומים שונים באינטרנט בטיעונים אובסיביים יותר ויותר. דרמה דומה, בערך באותו הגילים, מתרחשת בהוראת התורה הקונטינט: פרדוקס EPR, אליו התוודענו בפרק #, ממש מהיבר מעבר של השפעה פיסיקלית מהאור, ובכל זאת הפרה לכך של תורה היחסות אינה נצפית לעולם באופן ישיר. ניתן להוכיח אותה רק בדיעבד, אחרי שהניסויים נעשו והتوزאות הושוו. רקطبعו הוא שטודנט זהה עתה נחשף לפרדוקס יתחיל מיד לחפש דרך שבה הפהה היחסותית תיראה באופן גלי.

אני הייתי כבר קרוב לשולשים כשקמתי בקדחתנות בניסיון זהה, מה שיכול להוות הוכחה שגם אני תמהוני חסר-תקנה. הנسبות המkalות היו שرك התחלתי ללמידה פיזיקה באותו זמן, כך שניתן היה לראותם בי סטודנט מתחילה. לכן, הרשות בידכם להחליט גם את הביטוי הלא-מfragן luck על מה שיבוא בהמשך.

1.21 אחד פחות זה דודקאו יוטר
התחלתי במקרה הקונטני הפשט ביותר שבו קיימת לכארה השפעה על-אורית: פוטון בודד פוגע בראוי חצי-חדר. על-פי תורה הקונטינט, פונקציית-הgel שלו נחmittת לשניים כמו גל אור רגיל ומגיע אל שני הgalאים. אם הראי הוא בדיק חצי-חדר, ההתפלגות הסטטיסטית בין הgalאים תהיה 50%-50% אבל בכל מקרה בודד רק גלי אחד, כמובן ישמע קליק.

אתם בודאי זכרם את הדילמה במקרה זה: איינשטיין קיווה להראות שהפוטון הוא סתם חלקיק, שבפגעו בראי החצי-חדר פונה בפשטות ימינה או שמאלה. זה לא עבד: התברר שהפוטון הוא יוצר פיסיקלי מוזר שבאיוזו דרך לא-ברורה מתחלק לשניים ופונה לשני הכוונים, ורק כשהוא פוגע בגלאים הוא „מחליט“ להתמש כלו מצד אחד ולהיעלם למגרמי הצד השני. את העובדה שהפוטון היחיד עבר איליכו בשני המסלולים הוכיח איינשטיין עצמו ע"י ניסוי-מחשבה של ההtabכות, המראה שני המסלולים האפשריים של הפוטון תורמים יחד לנטייתו לצאת מהמתkan באותו כיוון בו נכנס אליו מלכתחילה (ר' ציור).

אבל נשוב במקרה הראשון שבו שני מסלולי הפוטון אינם מתלכדים אלא פוגשים בשני גלאים. כיוון ש„החלטת“ הפוטון באיזה מסלול להתמש נופלת רק ברגע הפגיעה עם הgalאים, חייבת להיות כאן איזו הפהה של היחסות: אם הפוטון מתmesh הצד ימין הוא חייב להיעלם באותו רגע מצד שמאל ולהיפך (זכרו שגם תורה הקונטינט מציאות לחוקי השימור, ולכן אם יצא מהמקור פוטון אחד לא יתכן שלבסוף יתגלה יותר או פחות מפוטון אחד). במילים אחרות: שני חלקיק פונקציית-הgel חייבים להודיע זה זה על החלטתם ב מהירות אינסופית.

באوها עת כבר התחלתי להפניהם את הסימטריה הגלומה ביחסות הפרטית, וכך שמתי לב שהיא מחייבת לומר גם היפך: אם הפוטון לא התממש מצד אחד, הוא חייב כן להתממש, שוב באותו רגע, מצד השני. השילוב בין תורות הקוונטים והיחסות, אם כן, מלמד אותנו כאן דבר חדש: **לא רק לאירוע יש השפעה סיביתית, גם לא-אירוע!**

כעבור זמן התבכר לי שתובנה זו אינה מקורית. פיסיקאי בשם מאוריצ'וס רניינגר (-1905-1987) הסב את תשומת-לבו של איינשטיין לטענה זו: יהא פוטון שפונקציית-הgel שלו מתרשת ככדור במרחב. אם חלק מגל זה פגע בכיפה כלשהי שמצידה הפנימי מרוח חומר צילום, הרי אם לא הופעה נקודת החוף הכיפה, גזל הסיכון להופעת הפוטון בחלק הנוחר של הgel הכספי. גם המדידה השלילית יוצרה שניוי פיסיקלי. פיסיקאי נודע אחר, רוברט דיקי (), כינה תופעה זו "מדידה ללא אינטראקציה".

אבל האם אפשר להוכיח את ההשפעה הסיביתית זו את הלא-אירוע? במקרים אחרים: אם חלק מפונקציית-הgel פגעה בגלאי והгалאי לא עשה קליק, האם ניתן להוכיח שעצם השתיקה של הгалאי גרמה לתוצאה פיסיקלית בחלק אחר, מרוחק, של אותה פונקציית-gel? נזכרתי במתוךן מאך-זנדר ובכישלון של איינשטיין להפריך באמצעותו את עיקרון אי-הוודאות (פרק #). איינשטיין, כזכור לכם, הציב בעניין רוחו שני גלאים הולשים על שני מסלולי האפשרויות של הפוטון כדי לגלות גם מאייזה צד עבר הפוטון (חכונה חלקית) וגם כדי לראות את הת庵בותות שלו (חכונה גלית). בורר הראה לו שבמקרה זה, אחד הgalאים אכן יסגור את המסלול בו עבר הפוטון, אבל כתוצאה לכך תיעלם הת庵בותות. במקרים אחרים: אםם ב-50% מהמרקם יקליק הгалאי הימני וב-50% האחרים יהיה זה השמאלי, אבל כתוצאה לכך יתנגדו שני הgalאים שאחרי ההחלטה-חדר בצורה שונה: במקום ההתפלגות הראשונית של 50%-50% תופיע ההתפלגות האקראיית 0-100%.

חזרתי והפulti את החשיבות היחסותית על ניסוי הת庵בותות כמו שעשית במקרה הראשון: אם אחד הgalאים הקליק, השני חייב לשתק, וכן להיפך: אם אחד שתק, השני חייב להקליק. מיד הבזיקה במחשבתית שאלה פשוטה: **ומה יהיה אם אשמייט גלאי אחד?** הדבר הראשון שעליה בדעתה בתגובה לשאלת הזאת היה: **לא ייתכן שאף אחד לא חשב על זה עד עכשו!** בכל זאת, רציתי לדעת מה תהיה התוצאה. וככל שעקבתה במחשבתית אחר תוצאות הניסוי נראה הדברים שונים יותר ויתר.

נניח שהгалאי הבודד שנותר ניצב הצד ימין. ב-50% מהמרקם הוא יקליק. אנו יודעים, אם כן, שהפוטון עבר במסלול ימין. האם, על-פי עיקרון אי-הוודאות, עלינו לשלם את המהיר על ידיעה זו? בודאי: הת庵בותות תיהרס, וב-50% מהמרקם י יצא הפוטון מהצד השמאלי של ההחלטה-חדר, הצד שמננו לא היה יוצא לעולם אליו פעלת הת庵בותות.

עכשו, מה בקשר ל-50% המarkerים הנותרים בהם הгалאי לא הקליק? ראשית, גם הפעם אנו יודעים באיזה מסלול עבר הפוטון: השמאלי. האם אנו יודעים זאת בודאות? ובכן, אם הוא יצא מהמקור ולא עבר במסלול הימני, אין אפשרות אחרת. האם עלינו לשלם את המהיר שתובע במקרה זה עיקרון אי-הוודאות? אמנם, העיקרון מדבר על "מדידה" וכן נראה שלא הייתה מדידה במובן המקביל. טוב, זה יהיה נורא נחמד אם יתברר שהתגלתה פה דרך לעקוף את עיקרון אי-הוודאות, ובודאי קיבל מתיישבו הזמן לשוטוקהולם להציג את ההישג הזה, אבל הלכתי על האפשרות הצנואה יותר, שהעיקרון תקף גם כאן.

אם זה המצב, הוא בהחלטת מזוזר: הגלאי לא החקיק, ולכן אנו יודעים בוודאות שם נחפש את הפוטון נמצא אותו במסלול השני, כמובן, לא היה מגע בין הפוטון לבין הגלאי. ובכל זאת, כשהגיעו הפוטון לראי החזי-חדיר השני, התנהגותו הושפעה בבירור מโนחות הגלאי במקומות בו לא אמר היה בעבר!

כדי להמחיש את הפרדוקסליות שבסיטואציה בואה נוציא לרגע את התקע של הגלאי מהSKU שבquier. מה יקרה עכשו אם יעבור פוטון במערכת? כמובן, לא כלום. הגלאי הכווי לא יגלה דבר, ותמונה התאבכות לא תיפגע. עכשו נחזיר את השטקר. במחצית המקרים ישחוק הגלאי גם במצב זה. אבל הפעם זו שתיקה מסווג אחר: עצם אי-התגובה של הגלאי דיב בה כדי להרים את תמונה התאבכות, על אף שלכאורה גם הפעם לא קרה כלום. יש לנו, אם כן, שני סוגים "כלום": הכלום הקלאסי, שאינו גורם לשינוי במצב החקיק, והכלום הקונטני, שכן גורם לשינוי. כדי להבדיל ביןיהם הבה נenna אותם, כמקובל, בשמות לוועזים: הכלום הקלאסי, שאין לו שום תוצאה פיסיקלית, נקרא *nothing* ואילו הכלום הקונטני, היוצר חריגה ממשית מדוגם התאבכות, יקרא *meutha gurnisht*.

ושוב, אמרתי לעצמי, לא ייתכן שאף אחד לא חשב על זה קודם. הריאינשטיין ובור דשו בניסוי הזה כל כך הרבה, ופיניימן שיחק בכל מני ורייציות שלו בהרצאותיו המפורסמות.¹⁰ ובכל זאת, כבר הכרתי את הספרות די טוב כדי לומר שאילו היה ניסוי פשוט זהה, כבר הייתה ידוע עליו. חיפשתי אם כן סיטואציה שבה ניתן היה להחריף את המזוזר של הממצא החדש.

2. 21 להציג את הפצתה
נניח שיש לנו פצתה כל כך רגילה עד שאילו הנגיעה החלשה ביותר בה תפוץץ אותה. מה הנגיעה החלשה ביותר שמכירה הפיסיקה? תארו לעצמכם פוטון יחיד שעובר ליד הפצתה ורק מדגדג אותה ומוסט מעט במסלולו. איפלו אינטראקציה חלה כזאת די בה לגרום לפיצוץ. צריך, אם כן, לשמר את הפצצות האלה החל מרגע יצורן בחושך מוחלט. עכשו תארו לעצמכם מנהל מפעל לייצור פצצות כאלה, שהעובד שלו בא ומספר לו שחללה תקללה בתהליך הייצור וחלק מהפצצות התקלקלו. "אילו מהן?" שואל המנהל בחרדה. "אינו יודעם," עונה העובד. מה עושים? הדרך היחידה לבדוק אילו פצצות פועלות היא פשוט להoir עליהן, מה שכמובן יפוץין אותן הן תקינות. המשך יכול בדרך זו לדעת איזו פצתה הייתה תקינה, אבל קשה לומר שהוא יעריך את זה במוחך. הפיסיקה הקליסטית – למעשה ההיגיון הקלאסי – אינם מותרים לו ברירה אחרת.

כאן בדיקון יכולה תורה הקונטנים לעשות את הבלתי-אפשרי ולומר לנו בוודאות אילו פצצות הן תקינות בלי לפוץין אותן.

לשם כך נחזור לניסוי התאבכות לעיל ובמקום הגלאי הבודד נעמיד פצתה כזאת, נתפוש מרחק בטוח ונניח לפוטון יחיד לעبور דרך המערכת. נניח שמדובר בפיצצה תקינה. במחצית המקרים נשמע קול נפץ ונגיד: נו טוב, זו הייתה פצתה תקינה. אבל במחצית الآخرת של המקרים לא יקרה כלום. עכשו נסתכליפה בתוצאות התאבכות. מה נראה שם? אם נראה שהפוטון גמר בgalaxy ב', הרי שזה המקום בו אסור היה לו להיות אילו הייתה התאבכות. זה אפקט *gurnisht* מובהק. אנו אווראים, אם כן, את הפצתה בוחרות, מבאים למנהל ומודיעים לו באחריות: תקינה לחלוטין.

תוצאה כזו תתקבל בربע מן המקרים שבهم ההצלחות הן תקיןות. החישוב הוא פשוט: בחצי מהקרים הן יתפוצזו ובחצי השני לא. במקרה השני דוגם ההתארכות יירס, ולכן יהיה לפוטון סיכוי שווה לגם הון בgalai א' והן ב-ב'. ל-ב' הגיעו אפוא פוטון במחצית מזמן מחצית המקרים, שהם רביע. מה לגבי הרביע השני, כמובן, המקרים בהם לא התפוצצה הצלחה והפוטון גמר galai א'? כאן איןנו יודעים: או שמדובר בפיצה מוקלקלת שלא מדרה כלום פשוט ממש שאינה יכולה למדוד, כלומר תוצאה nothing, או שמדובר בפיצה תקינה שאכן הרסה את התארכות, שהיא תוצאה gurnish, אבל הפוטון בחר במקרה להגיע למקום שאליו היה מגיע גם אילו הייתה התארכות. מה לעשות? פשוט, נזוזר למקום המסתור שלנו, נעביר פוטון נוסף במערכת, ועל פי השיקולים לעיל, שוב נמצא שברבע מן המקרים הגיע הפוטון אל galai ב', ומכאן שהפיצה תקינה. לרבע הבטוח שלנו נוכל עתה להוסיף עוד רביע מרבע, וכך הלאה. סדרה זו, ..., $\frac{1}{16} + \frac{1}{64} + \dots$, מכאן שנייה להציג שלישי מההצלחות התקינות.

יקיר לא היה אז בארץ. סיפרתי על הצלחה ללב ויידמן שגמר דוקטורט עם יקיר כמו שנים קודם לנו. הוא התלהב. למה אתה משתמש בראי שהוא בדיק חצי-חדר? שאל. אם השחק עם מקדם השקיפות שלו יוכל לקבל הצלחה טוביה יותר. הוא חישב ומצא שגם היה מקדם השקיפות של הראי החצי-חדר הראשון 25% וזה של הראי השני 75%, ניתן היה להעלות את מספר ההצלחות שיניצלו לכדי מחצית.

כתבנו יחד מאמר קצר ותמציתי על הצלחה ושלחנו אותו, כרגיל, לכתב-העת היוקרתי ב/יותר בפיזיקה, *Physical Review Letters*. הוא נדחה.⁸ שלחנו אותו לכתב-העת *Physica Letters* וגם שם נזרקנו. בשלב הזה החל לב לשלוח העתקים מהמאמר באופן פרטיא לחצי האנושות. תוך זמן לא רב החלו מאמריהם שונים לצטט את ה-preprint, כפי שנוהג לפרסם מאמר שטרם פורסם. השיא היה כשיצא ספרו המפורסם של פנרו "צללי המתודעה" ובו הוקדש דיון נרחב לניסוי בתוספת הערת: כיון שהמחברים הם מאוניברסיטאות ישראליות,

צילינגר

3. 21 פרשנות
מה באמת קורה בתוך מתיקן התארכות כשבוכר בו פוטון יחיד ומודד את מצב הצלחה?
לכשתהיה לשאלת זו תשובה מספקת, היא תהיה גם הפתרון הכללי לחידות הקוונטים.
כפי שציינה

⁸. אני לא יכול לומר שאין את הנימוק שנתן אחד השופטים לדחיה: הניסוי יכול להיכשל כי אם יעבור גל גרווייטציה בסביבה הוא ישנה את המרחק בין המראות. אני סברתי שזו דוגא סיבה טובה לפרסם את המאמר שכן עד היום לא הצליח איש להוכיח את קיומם של גלי הגרווייטציה אותם זהה איינשטיין! אף אחד, כרגע, לא שמע לי.

4. 21 וריאציות ווישומים
באותם ימים בהם עבדתי על מאמרי הראשונים היה לוסיאן הארדי דוקטורנט מתחיל באוניברסיטה דרהאם שבאנגליה. המנחה שלו היה יואן סקוירס, פיסיקאי סקוטי קשיש שהגילה את תורת הקוונטום בגיל מאוחר יחסית ובכל זאת נעשה בה דמות רבת-השפעה. שלחתני עותק מהמאמר לסקוירס שהראה אותו גם לתלמידו. הארדי קרא ומיד המציא וריאציה שלו על ניסוי הפעזה שהतפרסה מכבר זמן קצר. וריאציות נוספות נספנות באו אחר-כך, בינהן יישום של הניסוי להוכחה חדשה של האילוקאליות בלי שימוש באיל-שיוון כל. הארדי, ידידותי וגולי כדרון, הקפיד לשלווה לי עותק מכל מאמר לפניו פרסומו. מעולם לא הרגשתי קנהה עצה בעמיה. הבחוור היה פשוט גאון, חרוץ ויסודי. הוא עט על רמז חשוב שהוא במאמר שלנו. סוד כוחו של האפקט בניסוי הפעזה היה היפוך התפקידים: הפוטון, החלק הקוונטי בניסוי, לא היה האובייקט הנמדד אלא האובייקט המודד, בעוד הגלאי או הפעזה, שהם עצמים מאקרו-скопיים, הפכו לאובייקט הנמדד. סברתי הייתה, לפיך, שניתן יהיה לקבל תוצאות יותר פרדוקסליות אם יהיו שני חלקים ניסוי – המודד והמדד – קוונטיים. במאמר המקורי הזכירה אפשרות זו והארדי מיהר לישם אותה. הנה דוגמה

בדלפי ניסיתי לשנות את העבר

אם בנית מגדלים באוויר, אין זאת אומרת שעבודתך הייתה לחינם. שם צרכיהם היו להיות. עכשו הנה את היסודות תחתיהם. הנרי דיוויד ת'רוו

גבעה עטורות אורנים מוזכרת מתוך שדה חורש רחוב, מוקפת גומא ושיחי שיטה סבוכים. היא מושכת בחבל קסם את האיש שעבר למקום השכם בובוקר. הוא מהנה את מכונתו בשולי הכביש, משאיר בה את מעילו ונכנס לקסם של טiol בשום-מקום באמצע הדרך. למה הוא מתחוויה לעלות אל הפסגה הזאת? כמו שאומרם כל מטפסי הרים: כי היא שם. הדחף הוא כה בלתי-נשלט, חווית הכיבוש כל כך מרוממת – רק מי שעשה את זה יודע.

במאז מפלס הוא את דרכו בשדה. חריציות ופרגימ מתחוללים סביבו בצהוב זהר ואדום משכר, וברקע עוננות המרגניות בלובן זהר. הנה נעשה השדה תלול, כמעט גבעה קטנה שלפני זו הגדולה, אבל אחריה ניתן לראות שיפוע מתון יותר המוביל אל הפסגה. מתנסם ושתוף זעה חוצה האיש עוד חומת שיחים ומתחילה בטיפוס בעליה. החזה מתרחב, אויר השדה מלא את הלב בהרגשת ניצחון קרב.

רק אז רואה ההלך שהוא הגורם לו להרגיש אוילי ומגוחך. את השדה הרחוב חותך כביש ארבע-מסלולי המוביל אל שכונת וילות פלסטיק חדשנות מצד דרום. לכל העוברים ושבים במקום, ה"פסגה" הנישאה אליה חתר מהעמק למטה היא סתם תלולית לצד הכביש. ואכן שכר הטיפוס בהגיעו אל עצי האורן הוא צפוי: עירימות פסולת, פחיות משקה ושאר עקבות לא-נעימים של האדם.

cosaht ai'reu li p'umim: p'um ba'ofen meshi leid zeron-ye'ak, ve'p'um ba'ofen metpori b'cheinot rab-mish'thafim, b'dalpi ha'utika sh'bivon.

*

הלב התרחב מגאווה כשהגיע פקס מוביל נאמן ז"ל (1925-2006): "קרן סולני, שאני אחד ממנהליה, מקיימת בשנה הבאה כינוס על תקשורת קוונטיית. אם ברצונך להציג בכנס אנא שלח לי תקציר של הרצאה המוצעת".

סולני! רק אتمול לימדתי בכתיבה על הויכוחים ההיסטוריים שהתחוללו בכנס האקדמי הזה. פלאנק, איינשטיין, בוהר, הייזנברג, דיראק – כולם היו שם והתווכחו מבוקר עד עבר, ועכשו נחשו מי מזמן. ללא קושי שכנעתי את שחר להצטוף. בדוקטורט שלו היו התייחסויות רבות לויכוחי סולני, ועכשו יכול לתרום לדיוונים בעצמו.

וכאילו לא די בمشק הזה של כנפי ההיסטוריה, הכנס נערך הפעם בDALPI שביוון, ערש המדע-Collo. אם חסעו פעם הארץ ותיהנו מחויפה המרהיבים, מהמזון, מהמוסיקה וההיסטוריה, הקשייבו גם לשפה ותשאלו את עצמכם איך זה שmedi-פעם מתרבר שאתם כבר מכירים מילה זו או אחרת. בוגר-התupeה מצבי השומר על היציאה ואומר "אקסודוס". וכשנהג המונית מצבי על המזודה הגדולה קולטת האוזן את המילה "מֶרְלוֹ", גדול, כמו ב"מגולםינה". ואם "פילוס" פירשו ביוונית חבר או חברה ו"פילה" היא נשיקה, אין זו אותה תחילית שבמילה "פילוסופיה"? העברית היא אמן, אבל היוונית, חurf כל המלחמות בין אתונה וירוסלים, הייתה לנו המינקת.

*

ידעתו מיד מה אני הולך להציג בפני באי סולני: את התוצאה הקונטינית הכי מהפכנית שלו, את ה-EPR ההפוך.

*

זו הייתה עוד הזדמנות להיפגש עם יובל נאמן. הכרתו לראשונה שכחנו ערכיהם לכרך המילאים האחרון של האנציקלופדיה העברית. הוא קרא את הערכים שכתחתי והעיר עליהם והעורך, דוד שחם, העביר שאלות ותשובות בינו עד שהתחלנו בדילוג ישיר. אחר-כך פגשתי בו בכינוס בוושינגטון בו היה אורח הכבוד. דיברנו כמובן הרבה על פיסיקה אבל ממש גלשנו לפוליטיקה והוא שטה בפני את השקפת-עלמו הקיזונית. בשלב מסוים השתי צמרמותה קלה כשטייר לפנוי בלא-מעט לגלוג איך, בהיותו ראש אמ"ן, שיחק פעם משחק מלחה מול יצחק רבין, הוא בתפקיד סוריה ורבין בתפקיד ישראל. "ניצחתי אותו," הפטיר ביוובש.

יובל בא בלויית רعيיתו המקסימית דבורה, ש/הייתה מוכרת לרבים משומעי הרצאותיו

אבו שושא, כפר פלסטיני דרומי לרמלה

הוא תיאר בדיק – אבל בדיק – את הניסוי שחשבתי שאנחנו המצאננו! חשתי מהלומה
אגروف בבטני.

באوها תקופה הציקה לי גם חרדה אחרת. פיזיקאים ומתמטיקאים משיגים בדרך-כלל את הישגים החשובים לפני גיל שלושים. לי כבר מלאו ארבעים והרגשתי שפוריותי כפיזיקאי יורדת. כמה מאמרם שנשלחו לפרסום כבר נדחו, די בזדק, ורւינות חדשים לא באו. ה-EPR ההפוך יכול היה להיות מעין פרידה יפה מהפיסיקה אם יתברר שכוחו עצוב אותו ואוצרך לעبور לתחומים הרכים יותר בהם עסקתי, כמו פילוסופיה או פסיכולוגיה.

מחשבה עלתה بي פתאום: אם אף אחד לא הרגיש עדיין בדבר, למה שלא אעמיד פנים שאיני מכיר את עבודות קודמי? הרי זולר וסיראק ממילא לא התכוונו לעסוק בהיפוך-זמן

אלא בטכניתה של שיפור הטלפורטציה... האם אצ'יח לשכנע את שחר למסור את מאמרנו לדפוס כמוות שהוא ולהתעלם מ

ניגשתי אל סיראק והושטתי לו יד. "אייגנאסיו," אמרתי בקול חנוק, "אתה בוודאי מבין כמה מטופש אני מרגיש אחרי כל הברואדו שעשית אתמול. את כל מה שתיארתי כניסי מחשבה אתם כבר עשיתם במצבות, ואני בכלל לא ידעת והציגתי את זה בשחנותך כרעיון מקורי! אתה מאמין לי שזה היה בתום לב?"

הספרדי הצער הסתכל بي נרגש בעצמו. "אבל זה קורה במדע לכל אחד," אמר בקול רם. "כל אחד!" הוא החזיק עוד רגע בידי, כאילו תובע ממני להירגע. חשתי איך המהווה האצ'ילית מחזקת אותו. לחצתי שוב את היד שבידי והצלהתי להHIGH.

בארוחת-הערב ישבתי ליד נאמן. איך היה היום? שאל. או, קרה לי דבר לא נעים, השבתי והתחלה לספר על מה שאירע. פתאום הצלבו עיניי בעניין דבורה ואז הבנתי שוב את גודל איולתי: מה שקרה לי היה אירוע פער וחרס-חшибות לעומת פרס-הנובל שחמק מיובל ב-1969 רק בשל השבועיים בהם הקדים אותו מריו גל-מאן (1929) בגילוי חליקן האוונגה-מינוס. יובלHIGH בהבנה ואני מיהרתי לעبور לנושא אחר. שני שיעורים בצדנויות ביום אחד הם, לדעתו, מינון לא בריא.

וכאילו להוסיף מלח על פצעיי קיבלתי כעbor שנה דוא"ל נרגז מטל מוער מהטכניון: סליחה, אבל אנחנו כבר

שחר, אפלטוני כהמיד, לא התרגם.

.23

פרק נ עטן השקרן

המושג דבר קלה מפיו, געל אבוי-אבוי-אבוי!
הגששים

הلقנו להראות את הפרדוקס ליקיר. שלא בפתיע, הוא לא היה מופתע. זו עוד וריאציה, אמר, למשפחה הפרדוקסים שנולדה מהשיטה שלי לחקור את מצבו של חלקיק בפרק-זמן שבין שתי מדידות לא-חלופיות.

אני מסכימ עם יקיר שהפרדוקס שלנו שייך למשפחה הפרדוקסים שגילה (אם כי לדעתו הוא החrif שביניהם), אבל באותה מידה אני סבור שהפירוש הרדיוקלי של שחר ושל פרדוקס השקרן חל באותה מידה, אם הוא נכון, על כל המשפחה:

.24 קווינטיים ויחסות: שונאים, אבל נעשים יחד יядים

מי יתנו וממשיכם רק חייה היה אקדמי!
או לו לחשוף אקדמי היסודות שהתקפרדו
(אשר אין זה כי התקפרדו בנסיבות ריב ומדון)
ההאקדמי ולשוב עתה ונקי שמייהם אחד.
אך היה כזאת כי רוחות מלאי תבונה ושלל,
רוחות באפס פקלית, יתקפרדו אם מוכם עתה?
אם לא כאחים נייחם ברוחכם וחכונתכם?
אם לא במדה אחת העוז לכם ונצחה?
לורד ביירון, "קין". תרגם אברהם פרישמן

הסיפור קיבל תפנית מוזרה בספרם של גילדר וגילדר מ-2006. הם עשו אנגלוזה של שערות משפט-הأدירים של ברהה ומשער ראשו וגילו כמוניות הריגות של כספית שננספו בגוף כתריסר ימים לפני המוות. הם גם מצטטים מכתבים מאותה תקופה המלדים כי כבר בני אותו דור חשו כי ברהה הורעל. השאלה המתבקשת היא למי הייתה גישה אל המנוח, והשאלה המעניתית יותר: *Qui bono?*, כמובן, מי מרוויח ממוות? למחברים אין ספק: קפלר! הם מתאימים להראות שברהה היה איש טוב-לב (הוא לא) ושיהודים החושפנויים של קפלר מלמדים שהוא חסר-מצפון (שטריות). הוא היה מוכן לשלם כל מחיר על דבקותו בפרוטסטנטיות. בקיצור, המהברים לא הרימו את נטל ההוכחה, אבל הם מצליחים לשכנע שבארמון של ברהה הגיעו כל מיני דברים אפילו שכדי לחקור.



לא זכייתי באור מון-פהפקר,
אף לא-בא לי בירשה מאבי,
בי מסלען וצורי נקרתיו
ונצבתיו מלכבי.

אחד אחד

ושוב אעמד נפעם לפני עולם פלאי בטהרן,
נון גועל וחתום, זרוע חידות ופלאים,

לא-חלה בכם יד ולא-גשא אליהם דבר שפטים,
לבבי יפלה המון ותמהון אליהם על-פni,
בעיני תזרח הדרעה ובנפשי תרואה נאלמה.

לנספח:

אבל מה לגבי מהירות יהסית? אם אני נע ב-60% מהירות האור וחברי נע ב-60% מהירות האור בכיוון הנגדי, מהירותנו היחסית צריכה להיות 120% מהירות האור. זה, כמובן, איינשטיין לא יסכים.

הנה חוק חיבור המהירות של גלילאו,

$$v = v_1 + v_2$$

(אם הן נעים בכיוונים מנוגדים נציב כמובן סימן חיסור). עכשו, אם שני הזרים האלה נעים ב מהירותם הקרובות לאור צריכה מהירותם היחסית להיות גבוהה מהירות האור, אבל ככל שאנו עוסקים ב מהירות גביהות יותר הולך ומשתלט علينا חוק חיבור המהירות של איינשטיין:

$$v = \frac{v_1 + v_2}{1 + \frac{v_1 v_2}{c^2}}$$

גם כאן, c הוא מהירות האור, ואם תשחקו עם המשוואה ובמילים הביטויים v_1 ו- v_2 תציבו מהירותיות יומיומיות, המספר שמתחתיו لكו השבר יהיה קרוב מאוד ל-1 ולכנן כמעט שלא יהיה הבדל בין החוקים של איינשטיין וגלילאו. רק כשהשני הזרים יגבירו את מנועיהם ויתקרבו ל מהירות האור, יגלו שאנכם יכולים להתרחק או להתרחק זה מזה ב מהירות האור ובוודאי לא יותר ממנה. זו הסיבה, אגב, למה מהירות האור קבועה גם לצופים הטסים לקראת קרן אור או בורחים ממנו: הזרים c ב מקום אחד המהירות ותראו.

אם נסמן את הזמן מחוץ לקרון ב- t' ואת זמנו של דוד ב- t , את מהירותו של דוד ב- v ואת מהירות האור ב- c , אז

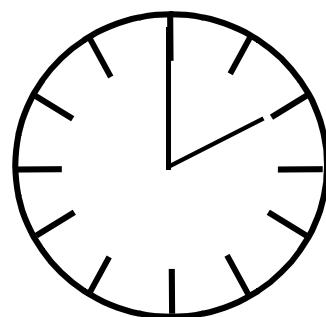
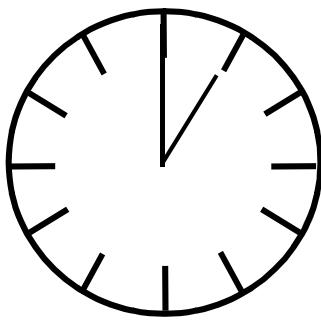
$$t_{David} = t_{Moses} \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

ובמילים: כדי לדעת כמה זמן אורכת השעה של דוד לנכפיל את מהירותו של דוד בעצמה, את התוצאה נחלק ב מהירות האור המוכפלת בעצמה, ואת התוצאה נהסר מאחד, ומהنتוצאה נוציא שורש (כלומר נמצא את המספר שהכפלתו בעצמו נותנת אותה) ואת התוצאה נכפיל באורך השעה של משה.

שוב, נסמן את אורךו של סרגל סטנדרטי המוצב מחוץ לקרוון ב- l ואת אורךו של סרגל זהה שדזנד לקח בנסיונו ב- l' , ונקבל משווהה שותת-ערך לקודמת:

$$l' = l \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

חלומות מתגשים. לו לא היה הדבר אפשרי, לא היה הטבע מעוררנו ל החלום אותם.
ג'ון אפדייק



ניטון: **שינויי אישיות פוסט-פסיכוטיים**

.25

המייתרים מצטרפים לסייעוניה

ו אלה תולדות האידiom

“אם כך, אתה מכיר את האהבה”, אמר הנער.

“זאני מכיר את נשמת העולם, כי אנחנו משוחחים הרבה בזמן המשע האינסופי הזה ביקום. היא מספרת לי שהבעיה הגדולה ביותר שלה היא שעד עכשו רק הדומם והצומח הבינו שהכל אינו אלא דבר אחד. ובגלל זה אין צורך שברזיל יהיה כמו נחושת ונחושת תהיה כמו זהב. כל אחד מלא את תפקידו המיחוז, והכל יהיה יכול להיות כמו סימפוניה של שלום אילו הייתה היד שכתבה את כל אלה עצרת ביום החמשי של הבריאה.”

“אתה חכם כי אתה משקיף על הכל ממרחך”, אמר הנער, “אבל אתה לא מכיר את האהבה. אילו לא היה היום השישי, האדם לא היה קיים; הנחושת הייתה תמיד רק נחושת, והעופרת רק עופרת. נכון שכל דבר יש לו הייעוד שלו, אבל יבוא יום והייעוד הזה יוגשם, אז יצטרך כל דבר להפוך את עצמו למשהו יותר טוב ולקלbil ייoud חדש, עד שיום אחד תהיה נשמת העולם דבר אחד בלבד.”

פבלו קוואלו, האלמייא, תרגמו רינה וגدعון ברוך ואנטוניו קוסטה

אנחנו קרוביים לסוף מסענו. היינו בכל מיני מקומות וזמנים, פגשנו הרבה אנשים ופשוט-עם, גאונים וטיפשים, טובים ומנולים, למדנו כל מיני דברים שאFIELD לא העלינו בדמיונו כשייצאנו לדרך, וייקח לנו זמן לעכל אותן. לומר את האמת, חוששתי שאני עצמי אצטרך מתישחו לקרוא שוב את הספר הזה.

כחוט-השני עבר במסענו החיפוש של הפיסיקה אחרי תיאוריה שתסביר כמה שייתר דברים בכמה ש/פחות הנחות-יסוד. ככל שתיאוריה כזאת הצלחה יותר במשימה זו, היא נראה יפה יותר. היפוי המדעי, ראיינו בפרק #, מצטיין בכך מאפיינים המשותפים לו וליפוי האמנותינו:

- א. החלקים יוצרים הרמונייה ביןיהם.
- ב. כל פרט הוא במקומו, אפילו הכרחי.
- ג. הוא אומר יותר ויותר.

וכן בכמה מאפיינים המייחדים אותו:

- א. הוא מתגבר
- ב.

nishowi המתמטיקה לפיזיקה: עם הדיקן גודלות הצרימות, וכך גדלה הפריכות של התוצאות. “אלוהים נמצא במספרים הקטנים.”

כמו במקרים אחדים בספר, נצטרך פה ושם לחזור מעט מהמסגרת הכרונולוגית

| הבעיה החדשת שהתעוררה | ההישג | הויתור המושגי | המהלך / התאורה / הטעון | הבעיה | החיקר |
|---|---|---------------------------------------|---|--|-------------------------------|
| עירוב התהומות ואינווש הטבע הדומם מקשם על החשיבה הסיביתית הייפוש סיבות קוסמיות פוגע בהבחנה בסיבות אריזות הניבוים אינם פריכים | אחדות ניבוים לגבי תנועות גרמי השמים | דוחית הבכורה של רשמי החושים | חיפוש סדריות עמוקות יותר, קורלציות וקשרים סיבתיים בין תופעות שונות האמונה הדתית : היקום, והאדם במרחב, נשלטים בידי האלים. האסטרולוגיה: לכוכבים יש נפשות והם משפיעים על גוף האדם, נפשו ונרגלו. | סדריות בתנועות גרמי השמים לעומת סדריות פחות מובהקות בפעולות הגוף ובתהליכיים הנפשיים, ואקריאות גבואה בגוף האדם נפשו ונרגלו. | 1 כוהנים בבליים, מצרים ואחרים |
| | גילוי סדר נסתר בסוד התופעות איחוד היבטים שונים של המיציאות במסגרת חוקים משותפים | cn"ל, לצד דוחית קשרים סיבתיים מודומים | האסטרונומיה : החלת ההנדסה והחשבון הארכיטים על היקום כולם. הם גם ליסוד דראשו. כל היסודות האחרים הם רק היבטים שונים שלהם. | ריבוי שרירותי ואי-סדר במציאות הפיסיקלית הנגלית, לעומת הכרחה הלוגי השלט בעולם המספרים והצורות, ולעומת חווית הטבעיפה | 2 פלס |
| מספרים אירציונליים | cn"ל הצבתה ורישות הדיווק מניבה ניבויים החשובים יותר ל מבחנה הפרכה | cn"ל | חוק לצורות והמספרים שלולים בכל איבטי העולם הפיסיקלי. היפוי מבטא חוקיות המתמטית הנומרולוגיה: לערכים אנשיים יש מקור בעולם המספרים והצורות. | cn"ל | 3 פירוגוס |
| | אחדות תופעות רבות תחת מספר קטן של אינטראקציות סדרות | cn"ל | כל החומרם בנויים מאחד או יותר מארבעה יסודות, וכל יסוד אטומיים חמוחדים לו. הכימיה : חוקיות שלטת בתנויות בין דיסולות. | ריבוי שרירותי ואי-סדר בחכונות החומר הנגלה | 4 אמפדוקלס |

| <u>הבעיה החדשנית שהתעוררה</u> | <u>ההישג</u> | <u>הויתור המושגgi</u> | <u>המהלך / התאורה / הטעון</u> | <u>הבעיה</u> | <u>החיקר</u> |
|--|---|--|--|---|--------------|
| סילוק האיכות המשנים מהחומר הופך את התודעה ליחידה | כנ"ל | כנ"ל | החולם בני מיחידות-יסוד זהות ובבלתי-משתנות. הריך מלא תפקוד בקביעת תכונות החומר. הדווקצינום: ניתן להבין את טבעו של דבר ע"י פירוקו ליסודות קטנים יותר. | כנ"ל | 5 דמוקריטוס |
| זיהוי היפה עם האמיתיגורם לבול בין קביעות אובייקטיביות להתרשומות אישיות | אחדות תורה האסודות (4) עם התורה האוטומית (5) ואחדות התורה החדשנית עם הARMONIA הפיתגוראית (3) החוקיות המספרית מצמצמת את מספר הצורות האפשריות | יחסים משותלים למופשט קונקרטיים יותר מאשר לעצמים העצומים נבראו על פי האידיאות. היופי קשור לאמת. | האידיאלים: לצורות, מספרים ומושגים דקיקים לאורה רק בנפש קיום אובייקטיבי יותר מאשר לעצמים מוחשיים. העצומים נבראו על פי האידיאות. | שליטת המחשבה במעשה | 6 אפלטון |
| יצירת מחיצות בין תחומי-דעת שונים | פשתות הבחנה בקורסיות מדומה ואקרואות ניבויים פריכים | יותר על היופי | על עצמים יש מטבעם "שאיפה" לדמיות במקומות ובמצבים מסוימים. הלוגיקה: הקשר בין חזדים משrique את הקשר בין הדברים במציאות אליהם הם מתיחסים. | פרוכות במודלים הפיתגוראים () והאפלטוניים () | 7 אריסטו |
| כנ"ל | סימטריה בזמן ניבויים פריכים | יותר על האחדות | התכליות כסוג משלים של סיבתיות אורגניזמים מושפעים גם מסיבות עתידיות | סתירה בין חוקי עולם הדומם () לתהליכי ביולוגיה | 8 אריסטו |

| הבעיה החדשנית שהתעוררה | ההישג | הויתור המושגי | המהלך / התאוריה / הטעון | הבעיה | החיקר |
|---|---|----------------------------------|---|---|------------------------|
| | איחוד חוקים רבים במסגרת בסיס אקסיומטי מוצמצם | ויתור על האינדוקציה כשיתות הוכחה | האריתמטיקה: כל המשפטים הנוגעים למספרים נתונים להוכחה על סמך אחד או יותר מהמשך אקסיומות | שרירותיות-לכוארה בחוקי עולם המספרים פרוכות בנוומロלוגיה () | 9 אוקלידס |
| אקסיומה אחת נראית מיותרת | כנ"ל | כנ"ל | הגאומטריה: כל המשפטים הנוגעים לצורות נתונות להוכחה על סמך אחד או יותר מהמשך פושטולטים. | שרירותיות-לכוארה בחוקי עולם הצורות | 10 אוקלידס |
| | כנ"ל | כנ"ל | עקרונות דו-ממדיים שונים דוגמתם של אותו גוף תלת-ממדי | הסرونנות בגאומטריה (10) בנוגע לצורות עיקומות | 11 אפולוניוס |
| תחילת הניסוח המתמטי של חוקי הפסיקה אחדות גוברת דיקוגובר | | | הטכнологיה: יישום המתמטיקה והגאומטריה לשימושים מעשיים ומתוך כך חיזוק הבסיס המתמטי של הפסיקה | אי-סדריות בתופעות הסטטיקה, המכניקה, ההידרולוגיה והאופטיקה לעומת החקוקות במתמטיקה (9) ובגאומטריה (10) (11) | 12 ארצימנדס |
| הגבהה המחזיקה האריסטוטלית () בין פיסיקה "ארצית" ו"שמיימית" אפייציקלים הולכים ומתרבים | סדיירות ודיקוגברם בתנויות גומי השמייניבויים ניסיוניים | | העמקת הסינזה בין הגיאומטריה (), האסטרונומיה () והאסטרולוגיה () המעגל הוא צורה יסודית. התנועה הקזובה היא תנועה יסודית. מרחב כדור-הארץ הוא מרחב יקום. חריגת מתנועה מעגלית נובעת ממגעלי-משנה. בשמות שורת קבועה. | שרירותיות בתנויות גימי השמים לעומת רמזים לחוקיותם (1) ולעומת ההרמונייה בגאומטריה האוקlidית (10) | 13 פטולמיאוס |

| הבעיה החדשנית שהתעוררה | ההישג | הויתור המושגי | המהלך / התאורה / הטעון | הבעיה | החיקר |
|-----------------------------------|---|---|---|---|--|
| | אחדות סדריות ודיקוגרפים בראקציית בין חומרים ניבויים נסיווניים | | <u>האלכימיה</u> : לחומר יש תכונות ראשוניות של חיים ונפש. חזותיות מתרכזים לפ' חוויה מתמטית (9) ואסטרטולוגית (1). | חוקיות שלטת בהתרמת חומר למשנהו, סדרות בתגובה החומרים ובפעולות גופ האדם, ולעומתם אקרואיות נראית שלטת בבריאות האדם () | 14 מלומדים בתקופות שונות |
| | יכולת לטפל בשפע בעיות חדשות | קבלת האפס, המספרים השליליים והדמויניים | <u>האלגברה</u> : | חסרים באריתמיקה () ובגאומטריה () | 15 מתמטיקים הודים, כווריזמי, קדאנן, טרטיליה ואחרים |
| שוב אפיזיקליים | פתרונות, דיקוגר | ابדן מרכזיות הארץ ומרכזיות האדם דחית עדות החווים על מנוחת האדמה | הארץ היא אחד מכוכבי-הලכת במערכת שהמשש נמצאת במרקחה | פרוכות במודל הפטולמי (13) | 16 קופרניקוס |
| | הגדלת האחדות ביקום הערכה נcona יותר של גודל היקום ניבוי ניסיוני: קיימות מערכות- שימוש נוספת | ابדן מרכזיות מערכת השימוש | השימוש היא אחד מכוכבי-השbeta | היעדר הפרלקסה של כוכבי- השbeta במודל הקופרנקי (16) | 17 ברונו |

| הבעיה החדשנית שהתעוררה | ההישג | הויתור המושגי | המהלך / התאוריה / הטעון | הבעיה | החיקר |
|-----------------------------------|---|---|---|--|--|
| | פתרונות וдиוק גוברים, היעלמות האפיזיקלים חוקי טبع ראשונים החורגים מכדור-הארץ ניבוי נסוני מהויתור על מרכזיות הארץ: כוח כבידה יקומי | ויתור על פשוטות המנגנון תחילת הויתור על ניבוי האסטרטולוגיה (1) | יציקת תוכן פיסיקלי לגאומטריה של הצורות העקומות (11) האילפסה היא צורה כללית יותר של מעגל. רוב הסדריות בתנועות כוכבי-הלכת נשפט רק ע"י נתונות מתמטיות. | סתירות בין האסטרונומיה הקופרnickאית (16) לבין הפילוסופיה הפיתגוראית () והאפלטונית () מחד, ולנתוני המדידות מאידך פער בין "פיזיקה ארצית" ר"פיזיקה שמיימת" בתרות אריסטו (7) | 18 קפלר |
| | הגדלת הדיווק איחוד האסטרונומיה והפיזיקה | | האופטיקה: דאור מצית לחוקים גאומטריים בדומה לנפם. | ניסויי ארכימדס באור (12) גיאומטריה האוקlidית (10) | 19 קפלר |
| | הגדלת הפשטות, הסימטריה והדיווק אישוש ניבוי ברונו (17) לגביו אישוש כוכבי-השבת מרחק ניבוי קפלר (12) בכוכבי-לכת חדשים, אסטרואידים וככ' | ויתור על עליונות השיקול העיוני לטובת הניסוי ויתור על מושגיו התנוועה והמנוחה המוחלטת | מתן הבכורה לניסוי ולתצפית יש הבדל מכריע בין תנועה קבועה לתנועה. כל תנועות הקזיבות מצויות לאינוריאנטיות אחת | סתירות אפילו בתוך "הפיזיקה הארצית" של אריסטו (7) פרוכות בתרות קופרnickוס (16) | 20 גיללאו |
| | תחילת איחוד הידרודינמיקה והאקוטיקה עם המכניקה דיווק גובר ניבויים פריכים | | ניסוח חוקי תנועה בנזלים גזים, וגלי קול | חסרונות בפיזיקת הזורמים | 21 לאונרדו גיללאו בويل ד. ברנולי מרSEN |
| | העמדת הגאומטריה (10) (11) על המתמטיקה (9) | | האלגברה הליניארית צורות ייחסים מרחביים, כולל צורות עקומות (11) נתנים לביטוי מתמטי | חסרונות בגאומטריה (10) ובמתמטיקה (9) | 22 דקרט |

| הבעיה החדשת שהתעוררה | ההישג | הויתור המושג | המהלך / התאורה / הטעון | הבעיה | החיקר |
|--|---|--|--|---|--------------------------------|
| | העמדת הפיזיקה על המתמטיקה הקרטזית (22) שלילת הפעולה מරחק הסברת תנועות מעגליות במערכת השימוש וסביר המגנטי אייחוד האופטיקה והכבידה במסגרת תורה זרמים (21) | דוחית מושג החלל הרייך ויתור על קיומם "כמה חיים" לא-פיזיקלי (בלבד באדם) | קיים מלא באחד הנושא את האור וההשפעות בין הנגפים ע"י זרמים ומערבולות. | חסרונות באופטיקה (19) ובמכניקה (20) | 23 דקרט |
| חיצוי בין העולם הפיזיקלי והנפשי, ובין האדם ושאר היצורים החיים, שני הסברים לאוთה תופעה | הסבר | דוחית האחדות | <u>הדווליזם</u> הנפש היא מהות נפרדת מהגוף ומתערבבת בנעשה בו | הപער בין התודעה לעולם החוmr () | 24 דקרט |
| הצלחת השיטה הסטטיסטית מביאה לעיתים לאיובן עניין בסיבותות המיקרוסקופית | אחדות, הגדלת הדיקוק ויכולת הניבוי פחח להבנות חדשות לגבי מקרים בודדים | ויתור על הבנת גורמי המקרה הבודד הרבה מסקנות נוגדות - איןטואיציה בוג� לאירועים בודדים | <u>תורת ההסתברות</u> בסדרות גודלות של דברים אלקראיים-לכארה מתנגלת חוקיות חדש ומצקה. | חסרונות המתמטיקה (9) בנייה תופעות אקראיות | 25 פרמא פסקל הברנולים |
| | דיקוק | קבלת המושג "גדול מאפס אבל קטן מכל מספר אחר" | <u>החשבון הדיפרנציאלי והאנטגרלי</u> כל שניי ותנעעה ניתנים לחקירה בכל מידת דיקוק של התנועה | חסרונות בעבודות אריכמדס (12), קפלר (18) ואחרים על מתמטיקה לא-רציפה, ובאנליזה הקרטזיאנית (23) | 26 ניוטון לייבניץ |

| הבעיה החדשת שהתעוררה | ההישג | הויתור המושגי | המהלך / התאורה / הטעון | הבעיה | החיקר |
|--|---|---|--|---|-----------------------------------|
| סילוק המערבולות מהזיר את הפעולה מරחיק תייחסן היעלמות אנרגיה, ונדרשת התערבות אלוהית להזרתה | דיקט פשטות אחדות כל האינטראקציות האפשריות השערת קפלר (18) הכוח שפע ניבויים ניסיוניים | פחות מקום להתערבות אלוהית ביקום ויתור על המערבולות של זכרט | <u>המכניקה הקלסית</u> החולת החשבון הדיפרנציאלי והאנטגרלי (26) על הפיזיקה שלושת חוקי התנועה חוק הבדיקה העולמי | פרוכות בתורות קופרניקוס (16), קפלר (18), גלילאו (20) ודקרט (23) | 27 ニュートン |
| מספר חלקי האור כמספר הצבעים השונים עקיפה והتابכיות אין מוסברות כראוי | אחד האופטיקה (19) (23) עם המכניקה הקלסית (27) | | האור מורכב מחלקים | חסרונות באופטיקה () | 28 ニュートン |
| | סימטריה | דוחית מושג החלל הריך ויתור על מוחלטות המרחב והזמן | העצמים מגידים את המרחב והזמן | החלל והזמן המוחלטים בתורת ニュートון (27) אינם ניתנים לציפה | 29 לייבור |
| | אחד | | | חסרונות הדואליות הקרטזיאני (0) | 30 לייבור |
| | אחד | | | | 31 פרמא מופרטואי המילטון |
| | אחד ניסיומי פריכים | | השיעור הפלוגיסטון החומר הוא מעין נוזל העובר מחומר לחומר | אי-שימוש לכ准确性 בתהליכי בעירה () ותהליכי ביולוגיה | 32 פריסטלי |

| הבעיה החדשת שהתעוררה | ההישג | הויתור המושגי | המהלך / התאורה / הטעון | הבעיה | החיקר |
|---------------------------------|--|--|--|--|------------------------|
| | פשוטות אחדות דיאק | ויתור על חלומות האלכימאים () החלפת הויתור על יחום הכימי של החיים | חוק שימור החומר | סתירות בין האטומים היווני () לכימיה החדשה פרוכות בתורת הפלוגיסטון (32) | 33 דלאון לבואזיה |
| | אחדות הgalim () | אחדות הgalim () | הארך הוא גלים. | פרוכות באופטיקה הניוטונית (28) | 34 ינג |
| | אחדות | | חוק שימור המטען | | 35 פרנקלין |
| | הכבسة מושג השדה, וכן הקטנת הביעתיות של הפעולה ממרחך אחדות כל סוג מגנטיות אחדות כל סוג החשמל אחדות המגנטיות והחשמל | | כל האינטראקציות מתרחשות בערת שדות. החליל הריק הוא מוליך. | פעולה מרוחקת בפיזיקה הניוטונית (27) סוגים שונים של מגנטיות והחשמל | 36 פרדוי |
| היכן האטר בו מתפשטים הgalim? | אחדות האופטיקה galit () עם תורת השדה של פרדי () (36) ניבוי סוג קריינה חדשים | | יישום החדו"א () להבנת השינויים בשדה של פרדי () <u>האלקטرومגנטיות</u> שינויים בשדה מגנטיים הפרעות מתפשטות ב מהירות c. | היעדר ניסוח מתמטי לתופעות החשמל והмагנטיות | 37 מקסול |
| | | | | | 38 |

| הבעיה החדשת שהתעוררה | ההישג | הויתור המושגי | המהלך / התאורה / הטעון | הבעיה | החיקר |
|--|---|---|--|---|---|
| | צמצום הבסיס האקסיומטי של הגאומטריה ומכאן הרחבת אפשרויותיה | | <u>גאומטריה במספר רב יותר של מדימס</u> <u>גאומטריה של משטחים עקומים</u> | הסرونות הגאומטריה () | 39 גאוס רימן |
| | הסתירות כעיקרון יחיד | יותר על ה��ליות 0 渴求 the חוקיות 渴求 היסטיות () בתהילכי החיים | <u>תורת האבולוציה</u> יצורים חיים מתפתחים על פי חוקי הפיסיקה בלבד ובצורה אקראית | ריבוי, שרירותיות וAKERAIOT בעולם החיים לעומת חוקיות הפסיכילית | 40 דארווין |
| | גילוי סדריות חדשות בכימיה של היסודות () על בסיס תורת האטום () ניבוי יסודות חדשים | | | AKERAIOT בתכונות החומריות: משקל סגול, ערכיות כימית ותכונות נוספות | 41 מנדלייב |
| גיל המשמש סותר את ההערכה של תורת האבולוציה ומואהר יותר את נתוני האסטרונומיה עצמה | זיהוי ישות אחת העומדת ביסוד תופעות רבות יכולת חישוב | | <u>תרמודינמיקה: כל צורות האנרגיה מצויות לאותם חוקים.</u> חוק שימור האנרגיה | צורות שונות של תנואה, חום, אור, חשמל וכי מופיעות ונעלמות הלמהולץ | 42 מאיר ג'אול הלמהולץ |
| מקור האסימטריה בזמן נותר לא ברור "קטстроפת הסגול" | העמדת הפיסיקה של הגזים והגזלים (21) על המכניקה הניתונית (27) | | יישום תורת ההסתברות (25) לפיסיקה של האטומים (33) | אי-התאמה בין חוקי המכניקה () לתרמודינמיקה () | 43 קלאויזיס בולצמן מקסול קלוון אינשטיין |
| | | | | | 44 |
| | | | | | 45 |

| <u>הבעיה החדשנית שהתעוררה</u> | <u>ההישג</u> | <u>הויתור המושגי</u> | <u>המהלך / התאורה / הטעון</u> | <u>הבעיה</u> | <u>החיקר</u> |
|---------------------------------------|---|-----------------------------|---|--|-----------------------------|
| | | | | | 46 |
| ארגון שמקורה לא ברור נפלט מהומר דומם | אחדות הכימיה () עם האלקטרומגנטיות () והעמדתו על הфизיקה הניתונית () | | התורה האוטומית האוטומם מרכיבים מפרוטונים ונייטرونים בגרעין ואלקטרונים הנעים בקליפות, لكن המagnet עשי מאלקטרומגנטיים זעירים. | | 47 קירי וקירי רתרפורד |
| האתר עדין לא ניתן לגילוי | סתימת הפרצה | | גופים מתקזרים ותהליכי מאטים בהשפעת תנועת האתר | כישלון גילוי האתר | 48 לורנץ פיצ'רלד פואנקרה |
| פעולה מרחק | | | ייחוס תאוצה לקיום של גופים אחרים | התאוצה () אינה תואמת לאינוריאנטיות של גלילאו () | 49 מאך |
| התאוצה נשאה מוחלטת התעלומות מעבר הזמן | האפקטים המיויחסים לאחר () הם סימטריים לכל תנועה יחסית איחוד המסה () והארגון () בחוק שימור אחד | ויתור על מוחלטות החלל והזמן | תורת היחסות הפרטית קבוע מקסול () מועלה למעמד חוק טبع וכן חייב לציאות לאינוריאנטיות | אי-התאמה בין האינוריאנטיות הגלילאית () לבין משוואות מקסול () חדת מקור הארגזיה הרדיואקטיבית () והשימושית () | 50 איינשטיין |
| הכחשת מעבר הזמן | אחדות החלל () עם הזמן | | יציקת תוכן פיסיקלי לגיאומטריות לא-אוקלידיות () | אי-התאמה בין היחסות הפרטית () לבין הגאומטריה האוקלידית () | 51 מינקובסקי |

| הבעיה החדשת שהתעוררה | ההישג | הויתור המושggi | המהלך / התאורה / הטעון | הבעיה | החיקר |
|---|--|---|--|---|---------------------------|
| הכחשת מעבר-זמן מתחייב קיום חורים שחורים | הכללת התואזה בהסבר היחסותי ויציקת תוכן פיסיקלי לשווין מאר (0), בלי הפעלה מרחק אחדות הכלבידה (27) עם ההתמדה (27) תוכן פיסיקלי לגנטריות לא אוקלידיות (0) | דוחית הבכורה של הגנטראיה האוקלידית 0 0 0 | ישום גיאומטריה מינקובסקי (לטאור מרחב-זמן עקום (0) <u>תורת היחסות הכללית</u> המרחב-זמן הוא ישות פיסיקלית | אי-התאמה בין עקרונות היחסות הפרטית (51) לבין התואזה (0) “ <u>צירוף מקרים</u> ”: המסה התמדית זהה למסה הכניתית | 52 איןשטיין |
| יחודיות בה מתמטים כל חוקי הפיסיקה | ניבוי שהוכחה | | חורים שחורים חייבים להתקיים | קיימים המרחב-זמן (0) באזורי בهم נדחשת המסה מעבר לכמויות קריטיות מוביל להתמותות | 53 שורצשילד |
| היחודיות (0) הראשונית היא קוונטית, ובכך סותרת את אופיו הניטוני של היקום. היחודיות (0) הראשונית היא ראשית היקום כולם וכך נעשית מהוין להישג-יך הפיסיקה. | --- ניבוי שהוכחה (בדיעבד): היקום מתפשט | ויתר על יציבות היקום, בסתרה לחוקי השימור (0) | <u>המבחן האגדול</u> היקום יכול לנצל מייחדיות. | אי-יציבות היקום לפי כמוות המסה שבו | 54 איןשטיין דה סייר |
| הויתורים המושגים עצם | אחד חלקו של הפיסיקה של גלים וחלקיקים הטבע ² | ויתר על הסיבתיות ³ ויתר על התיאור האווביקטיבי של התבונת | <u>תורת הקוונטיים</u> ישום תורת הגלים (0) ל תיאור הסתרות (0) מוחל גם על עצם בודד | הפרצת ניבוי האלקטромגנטיות (0) והתרמודינמיקה (0) בקצת הספקטרום | 55 פלנק איןשטיין |

³. לא התקבל על דעת כולם.
². לא התקבל על דעת כולם.

| הבעיה החדשנית שהתעוררה | ההישג | הויתור המושגי | המהלך / התאוריה / הטעון | הבעיה | החיקר |
|--|--|--|---|--|---------------------------------------|
| כב"ל | איחוד נוספים של הפיזיקה של גלים וחלקיים | כנ"ל | תורת הקונטיניטם ישום תורת הגלים () לחלקיקי החומר תיאור הסתרות () מוחל גם על עצם בודד | הפרצת ניבוי האלקטרומגנטיות () והתרמודינמיקה () בקצת הספקטרום | 56 בור היינברג |
| כב"ל | איחוד נוספים (עדין לא שלם) של הפיזיקה של גלים וחלקיים | כנ"ל | | | 57 היינברג דה-ברואן שרדינגר |
| | | | CPT-אינוリアנטיות כל אינטראקציה בין חלקיקים תציג לחוק הфизיקה באותה מידת אם י"הפכו המטען ומיפוי המרחב והזמן. | | 58 פאולי |
| החרפת השאלה בדבר האסימטריות במציאות הנצפית | יציקת תוכן פיסיקלי לרעיון מתמטי | | שמור פירושו סימטריה השימור 0 0 0 0 | שרירותיות-לכארה בחוקי השימור | 59 נתר |
| | הצבעה על יסודות חז" - מתמטים במתמטיקה ^a פעללה לא מינית של מוח האדם ^b | ויתור על האפשרות למערכת לוגית עקבית שלמה | הוכחת אי-השלמות | כישלון האksiומטיזציה של הגאומטריה () והמתמטיקה () | 60 גדל |
| | | | | | 61 DIRAK פינמן |

^a. דעת גדול עצמו. שינוי בחלוקת.

^b. לא ברור אם זו הייתה דעת גדול עצמו. שינוי מאוד בחלוקת.

| הבעיה החדשנית שהתעוררה | ההישג | הויתור המושגי | המהלך / התאורה / הטיעון | הבעיה | החיקר |
|---|--|----------------------|--|--|--|
| | | | | ריבוי שרירותי של חלקיקים בתורה האטומית () | 62 פינמן, שוינגר וטומונאגה |
| אסימטריה חלשה נותרת ב--- | אחדות הכוחות האלקטרומגנטי והחלש | | | כנ"ל, ריבוי כוחות יסוד | 63 סלאם ולגלאשו |
| | | | | | 64 |
| | היחס בין מולקולות, אטומים, החלקיקים וחלקיקי-יסוד הוא גם יחס קרונולוגי. | | <u>תורת המycz' הגדוֹל</u> סינתזה בין הקוסmolוגיה ופיסיקת החלקיקים | תורות החלקיקים () | 65 גמוב וחבי |
| אולי אסימטריית-זמן התרמודינמית אינה תולדה מקירת של תנאי ההתחלה אלא מביעה על מאפיין עמוק ויתר של המיציאות הפיסיקלית. ^a אולי אינפורמציה אובדת בenthalק התנדפות החור השחור ^b | רמזים לאחדות היחסות, הקוונטים והתרמודינמיקה | | חרורים שחורים מצויתם לחזק התרמודינמיקה, וכך אין שחורים לגמרי. האפקט המשולב של תורות הקוונטים והיחסות הכלכלית מצית לחוק השלישי של התרמודינמיקה. | | 66 בקנשטיין הוקינג אונרו |

^a. דעתו של בקנשטיין, הוקינג אינם שותף לה.

^b. דעתו המוקדמת של הוקינג. הוא עצמו חוזר בו אבל מעתים עוד מחזיקם בה.

| הבעיה החדשנית שהתעוררה | ההישג | הויתור המושג | המהלך / התאורה / הטעון | הבעיה | החיקר |
|---|--------------|--|--|---|-------------------------------------|
| אין ניבויים ניסיוניים היקום, אך לומר, רחוק מליהות מקום נעים | | זרה אל מושגים פרא- קופרניקניים () בדבר מרכזיות האדם ביחס למילויים | העיקרונות האנתרופוי | קבועים שרירתיים-לכארה של היקום שרק בזכותם הוא מוחקים | 67 קרטר בארו וטיפלר |
| | | | | | 68 גות |
| | | הסימטריה בזמן אינה תקפה | הכבידה מעורבת בקריסט פונקציית-הgel. התודעה והיצירתיות מביעים מהליך קוונטי חורף מהמאנ וומן. | סתירות בין היחסות הפרטית () והכללית () לתורת הקונטנים () סתירות בין תורת הקונטנים () למתרחש בעולם המאקרו-סקופי () היינדר קשור בין הכבידה () לשלוות כוחות היסוד الآחרים () בעיית התודעה | 69 פנרו |

| הבעיה החדשנית שהתעוררה | ההישג | הויתור המושגgi | המהלך / התאורה / הטעון | הבעיה | החיקר |
|--|--|---|--|--|------------------------------------|
| אין ניבויים ניסיוניים בטוחה הנראת לעין הפרדוקסים הקונטיניטים נותרו בעינם | כמה קבועי טبع וחלקיים נובעים מהמשוואות אפשרות לאיחודיים נוספים | נסיגה חילקית מהפשתות | <u>תורת הגעל-מיתרם</u> היישות הבסיסית ביותר היא המיתר, שרטיטומי השונות הם החלקיים השונים. הוא הדבר גם לובי כוחותsis. המרחב-זמן מרכיב מספר רב יותר של ממדים מרחבי, שבום מכובלים. | סתירות בין היחסות הפרטית () והכללית () לתורת הקונטנים () סתירות בין תורה הקונטנים () למתרחש בעולם המאקרוסקופי () סתירות בין המודלים הקוסmolוגיים () לתחפויות האסטרונומיות העדר קשר בין הכבידה () לשילוש כוחות היסוד الآחרים () | 70 קלוצה קלין נציגנו שוורץ ויטן |
| אין ניבויים ניסיוניים בטוחה הנראת לעין הפרדוקסים הקונטיניטים נותרו בעינם | כנ"ל | האינטראציה היא יסודית יותר מהמרחבות-זמן בו היא מתהשתת | תורת הלולאות | כנ"ל | 71 סמלין וחבי |

| הבעיה החדשנית שהתעוררה | ההישג | הויתור המושגי | המהלך / התאוריה / הטעין | הבעיה | החיקר |
|-----------------------------------|---------------|----------------------|------------------------------------|--|------------------------|
| (מלא את החסר) | (מלא את החסר) | (מלא את החסר) | (מלא את החסר) | <p>סתירות בין היחסות הפרטית () והכללית () למסורת הקונטינט ()</p> <p>סתירות בין תורת הקונטינט () למתרחש בעולם () המאקרוסופי ()</p> <p>סתירות בין המודלים הקוסmolוגיים () לתוצאות האסטרונומיות החדשניות</p> <p>היעדר קשר בין הכיתה () לשילוש כוחות היסוד الآחרים () אסימטריות-זמן שונות (תרמודינמית, כבידתית, קוסmolוגית ועוד) שלא ברור הקשר ביניהן ומוצאן, בנגד ליסטריה של חוקי הטבע ()</p> <p>היעדר התיאסות לחלוּף-^a</p> <p>היעדר התיאסות למשפט גדול^b</p> <p>^c הבעיה הפסיכיסטית</p> | 72 (מלא את החסר) |

^a. לא כולם מסכימים שמדובר בעיה אמיתי.

^b. לא כולם מסכימים שמדובר בעיה אמיתי.

^c. לא כולם מסכימים שמדובר בעיה פיסיקלית.

ג'ון ארץ'יבלד וילר

ודאי באחד הימים, יכולים אנו להאמין, נתפסת את הרעיון העיקרי של כל זה כמשהו כל כך פשוט, כל כך יפה וכל כך כובש עד שנאמר זה לזה: "אوه, איך אפשר אחרת! איך יכולנו להיות עיוורים כל כך הרבה זמן!"⁽²⁸⁾

באשר תלך, השאיר את עקבות לך ולא את עקבות מגפה.
אלמוני

מר איינשטיין הבא היקר,

ראשית, סליחה על הכינוי הטיפשי. אני יודע שאתה לא תהי איינשטיין השני ממש כמו שאיינשטיין לא היה ניוטון השני ונויוטון לא היה גלילאו השני. כל יוצר הוא אדם יהודי בפנוי עצמו ואין מקום להשואות. בכלל, אני יודע אם תהיה אדם אחד או כמה אנשים, כי לא כל המהיפות נעשו על ידי גאון היחיד. ואולי גם אני צריך לפנות אליך בלשון זכר? נשים הופכות כיום לרוב בפקולטות למדעי החיים, וגם במידעיהם המדויקים עולה מספרן, כך שייתכן שאתה גברת. ובאיזה שפה לפנות אליך? לאור העובדה שעדיום יש רק שלושה חתני פרס נובל ישראליים למדע, בוגר לאחוזו היהודי בין מקבלי הפרס בעולם, זה יהיה מאד נחמד אם תהיה ישראלי, אבל נשמה גם אם תהיה רק יהודי. אצלונו, כמובן לך, מאוד מעריצים את הקטע של לעשות כבוד לחברך, במיוחד בתקופה הזאת שבה יש כמה אנשים שעושים לנו בשות.

או רק לצורך הדיאלוג אני מעדיף אותך כאבלרט ההוא, אולי סטודנט אלמוני השקוע בשאלות הגדולות של הפיזיקה, אולי נער דלפון איפה שהוא ענייה ונחשלת הננהנה מהגישה לאוצרות הידע שהאינטרנט נותן לו, אולי עדין ילד מתבזבז שכולם קוראים לו "מעופף", ואולי אתה עדין רק מבט שובב בעיניהם של אבא ואמא שלו. כך או אחרת, בבואה היום תסתכל סביבך, תראה את השמנה הגדולה שהשתלטה על הפיזיקה ביובל השנים האחרונות, ותחילה בذرיך משליך, שבוספה תכרייז על הבנה חדשה של חוקי הפיזיקה שתסייע את כל הסתריות הקיימות כיוון בין תורה היחסות ותורת הקוונטים במסגרת תורה חדשה.

מה תהיה התורה הזאת? לו ידעת, הייתי רוקד עכשווי בעצמי עם המלכה בשטווהולם במקומם לכתחוב באמצע הלילה מכתבים לאנשים שאני לא מכיר. אבל אני בכל זאת יודע משחו על אותה תורה: היא תהיה א) פשוטה, ככלומר: מעט הנחות יסוד, שמתוכן נוצר כל השאר בצורה שכל פיסיקאי יאמר: איך לא חשבתי על כך קודם! ב) יהיו לה ניבויים ניסיוניים, ו-ג) היא תהיה יפה. אתה, אני בטוח, נמנה על המהנה שלנו, האפלטוניים אוהבי היופי.

או תרשה לי לחלוק אותך כמה ניחושים משליל לגבי חלקיים מסוימים בתורה הזאת, רעיון נושא לוי באופן אינטואיטיבי במהלך הרבה שנים של מחשבה ויש לי הרגשה שטמוניים בהם רמזים שואלי תמצא בהם עניין.

1. 27 פיסיקה بلا נחת
נפתח בפוגמים הבולטים ביותר לעיני בתמונה-העולם הקיימת, שאני מנהש שלפוחות בחלקום הם גם פגמים בעיניך. הנה קריסט פונקציית-הgel. אתה, אני יודע, איןך הולך בדרכים הקЛОות של העולמות המרוביים, "דקוהרנציה" ומודלים דומים המנסים להימנע מהרענון הבועיתי הזה. אתה מאמין שבאמת, שכשהפוטון הארוור יוצא מהמנורה, הוא באמת יוצא לדרכו כגל ההולך ומתרפש וنمצא בהרבה מקומות בבת אחת, ואז, אחרי האינטראקציה עם עצם או עצמים כלשהם, פתאום יש לנו חלקיק אחד במקום אחד וכל פונקציית-הgel נעלמת ללא שריד. אתה יודע שהקריסה הזאת, הסיום של כל פיסיקאי, מתרחשת, עם כל הבועיתויות העצומה שהיא מעוררת לגבי היחסות והסימטריה של הזמן.

רק למקורה שאינך בטוח בכך, ל McKenna ש/אתה מאמין שמשיחו יום אחד ימצא דרך לעקוות את הקriseה ע"י חזרה לאיזו תורה של משתנים חבויים, אביה לפניך הוכחה שהעלנו דולב ואני¹⁰ ושיש לה תוקף של משפט כללי. נניח ש:

הנחה א: בכל קriseה, של פונקציית-גָל מעורבים משתנים סיבתיים חבויים.
כך שגם פוטון פוגע בראי חצ-חדר, ישנו גורמים סמוים, הפועלים ברגע FAGIUTA הפטון
בראי ו/או ברגע FAGIUTA בגלאי הימני ו/או ברגע FAGIUTA בגלאי השמאלי, הקובעים איזה מושן
הגלאים יקליק בסופו של דבר. --- --- ---

אמנם בוודאי גג מאד הרבה אותו זו פחות טט יהיה כל כך לכך למכובן יתכן סס עז פפ
בקיצור: קצת יותר שיש ביוור
גג זו טט לאל סס עז פפ שיש

עד היום, אין סתרה של ממש בין היחסות והקובuntsים רק בגלל שלא ניתן למדוד את
המשתנים האלה. אבל אני מבין איך, עד היום, לא הסיק איש מכך את המסקנה ההכרחית:
מסקנה 1: כל פיסיקה שבה המשתנים הקובuntsים החבויים לא יהיו חבויים מסתור את היחסות
הפרטית.

נדמה לי שברגע ששמעת את המשפט אתה מבין שהוא נכון: ברגע שנייתן יהיה לראות או
למדוד את המשתנים החבויים, ניתן יהיה לקבוע בוודאות אילו אירועים הם בו-זמניים וכך
להבדיל בין תנועה למנוחה. לפיכך, אם קיימים משתנים חבויים, אזי, בכלל פיסיקה עתידית
שהיחסות תהיה מקרה פרטי שלו, עליהם להיות משתנים חבויים-לעולם. בקיצור, "כי לא
יראני האדם והי" (שמות ל"ג 20). זה רציני לדעתך? את האתר זרקו על סיבות יותר קטנות!
ולכן, אם משתנים חבויים אינם קיימים, קריסט פונקציית-גָל היא בדיק מה שהרבה
אנשים לא רוצחים להאמין: זהו תהליך שבו מידע אובד – לא סתם מתערבב ונעשה בלתי זמין
אלא אובד ממש – כמו שהוקינג חשב לגבי התנדפות חור שחור וחזר בו. וזה קורה לא רק
במקרים האקזוטיים של התנדפות חור שחור אלא בכל מקרה שבו אירוע קוונטי עבר הגדלה
לרמתות מאקרו- קופיות. לכן גם המסקנה הבאה ברורה:

מסקנה 2: כל אינטראקציה יסודית היא אסימטרית בזמן בלי קשר לתנאי ההתחלקה שלה.
הנה עוד דרך בה ניתן לדוחק את הפיסיקה לפינה בעניין זה: ביקום שלנו שללותות כמה
אסימטריות מרחביות מטרידות: אסימטריית הכוח החלש, וכן העבודה שהחומר ביקום אינו
מפוזר באופן שווה. אומרים אנשים: בתחילת היקום היו תנודות מיקרוסkopיות אקריאיות,
והתפשטות היקום הגדילה אותן למדדים מאקרו- קופיים.יפה, אבל שוב אני מבין למה אף
אחד לא מוכן להתחזק עם השאלה המתבקשת: עד כמה אקריאיות היו תנודות אלה? רוב
הפיסיקאים מעדיפים להאמין באקריאיות מודומה בלבד. בrama עמוקה יותר, הם אומרים, זה
סבירי לגמרי. אבל אז, אם האסימטריה הופיעה מסיבה כלשהי, פירוש הטענה הוא שהיקום
היה אסימטרי מלכתחילה! ג'ו רוזן¹¹ פרסם הוכחה כזו לפני שנים רבות ועד היום לא
התמודד אתה איש ברצינות. במילים אחרות, הן הדטרמיניזם והן האינדטרמיניזם מובילים אל
האסימטריה, במרחב או בזמן או בשנייהם.

ncou, hisimtria yikra maoz lelbo shel kol fisika'i

2. 27 דרך אחת

כל זה לא היה אמור להפתיע. ממה שקרהת בעמודים הקודמים הבנת שאני משוכנע שבמרכיב הזה של המציאות הקורי "זמן" יש משהו שהפיסיקה – כולל תורה היחסות – עוד לא נגעה בו. אני מאמין שהתחווה של האיש הפשטוט, שהזמן אינו סתום מימד אלא התהווות אמיתית של עולמנו, רגע אחריו רגע, אינה אשלה אלא נובעת ממשו מהסתור שבסמת קיים בטבעו של הזמן. אני מקווה שהוכחה החקיקת השבאותי בפרק 18 שכנהה גם אותו בדבר הזה (אגב, שמת לב איך אנשי המיתרים האלה כל כך לארגנים בממדיהם מרחב? עשר, אחד-עשרה, עשרים וארבעה! אבל בזמן איש איןנו מעז לגעת).

אם הדבר הזה נכון, והARIOUIS אינם קיימים יחד במרחב מינקובסקי, אלא ממש נוצרים, כפי שאומרת לנו תחושתנו, בזה אחר זה באופן כלשהו, הצעד הבא הוא פשוט. אם אנו אומרים:

הנחה-יסוד א': אילוי העתיד עדין אינם קיימים,

אז, על-פי עיקרון מאק שככל כך הרשים את קוודמן, לפיו

הנחה-יסוד ב': אין קיום אובייקטיבי למרחב ולזמן כשלעצמם ללא עצמים שיגדירו אותם,

אנו חייבים גם לומר:

מסקנה 2: המרחב והזמן בעתיד אינם קיימים.

ואז התמונה המתבקשת היא של מרחב-זמן ה"గדל" לכיוון העתיד.

3. 27 מפק גדול תמיידי

אם תיאור זה מזכיר לך במשהו את המפץ הגדול, זה נכון! התמונה של מרחב-זמן מתפשט מתישבת בצורה מעניינת עם הרעיון שהזמן עצמו נתון להתחווות. המרחב-זמן גדול לא רק בכך שיש יותר ויותר מרחב אלא גם בכך (סליחה על הדימוי הילדותי) יותר ויותר "עתיד" מתווסף בזמן.

בהשערה הזאת חבויה תכנית מחקר פשוטה: בדוק מה אמורים הקוסМОЛОגים על רגע היוצרים היקום, יש מאין, ונסה להחיל אותו על היוצרים של כל רגע בזמן. מיד תראה כמה סוגיות שבהן הפיסיקה תקועה מתעוררות לחים חדשים לאור השערה זאת!

בדרך הזאת אני בטוח שאפשר גם להציג על הביעות של "זמן-על" שבחן מאויימים הפיסיים האורתודוקסיים על כל מי שמנסה לחשב על הזמן כמשהו שבאמת נع. על השאלה הנפוצה "מה קרה לפני המפץ הגדול?" אנו עונים כי "לפנוי" הוא מושג הקשור בזמן, אבל הזמן עצמו נוצר במפץ הגדול. כך גם לגבי התהווות הזמן. אבל לא אכנס לזה כרגע. בוא רק נסכים שאם AIROUIS אכן מתחווים ולא סתום קיימים במרחב-זמן, גם המרחב-זמן עצמו מתחווה יחד אתם.

4. 27 מפק גדול תמיידי

מה שאני רוצה להסביר אליו את תשומת לבך הוא שהרעיון שהמרחב-זמן עצמו מתחווה יחד עם האירועים שבתוכו תואם בצורה מפליאת קרייסת פונקציית-הgal. חשוב רגע: אנחנו מדמיינים את פונקציית gal מתפשתת לתוכה מרחב זמן ריק, שהוא קיים מלכתחילה, ובתוכו היא קורסת, ואז אנחנו שוברים את הראש בהתמודדות עם הביעות שהטייר הזה יוצר מבחינות תורה היהדות וחוץ הזמן. אז מדוע לא לחשוב ההפק? אני מתכוון, אולי פונקציית-**gal אינה מתפשתת לתוכה מרחב-זמן אלא התפשטותה היא-היא היוצרות המרחב-זמן?**

אתה מכיר את ניסוי המדידה ללא אינטראקציה שוידמן ואני המציאנו עם הפעצה? מה שהניסוי הזה אומר הוא שגם גלויז של לא-כלום משפיע על פונקציית-gal כולה. אפשר כמובן להסביר את זה בדרכים הרגילות, אבל לי יש הרגשה שאפילו כאן יש רמז: פונקציית **gal יוצרת לא רק את החלקיק במקום שבו הוא מתגלה אלא גם את כל המוקומות בהם הוא היה יכול להיות.**

או התמונה המתבלטת היא ממשו כזה: היקום הוא מרחב-זמן ארבע-מדי ובו אירועים וקווי-עולם, כמו שאומרת היהדות, רק שהיקום הזה מתרחב – לא רק במרחב המרחבים אלא גם בזמן הזמן שלו: הוא "גדל" לכיוון העתיד. בrama הקונטיניטי יראה הדבר כך: העתיד נוצר ע"י אינספור פונקציות-gal של חלקיקים היוצאות מה"עכשו", עשות בינוין אינטראקציות אבל לא במרחב-זמן שלנו. אם, אתה שואל? אין לי שום מושג. תחשוב קצת גם你自己. אבל התחושה החזקה שלי היא זאת: **האינטראקטיות האלה יוצרות גם את החלקיקים וגם את יחסיו המרחב והזמן ביניהם.**

מה קורה עכשו? לא ייאמן: פתאום מתרבר לנו שבלי להרגיש אנחנו מדברים גם יהדות?

ועכשיו הדבר המדויים: התיאור הזה מציע לא פחות מאשר בסיס חדש לתורת השדה המאוחד כי **חלקיקים יכולים למשוך וגם לדחות זה את זה פשוט בדרך שבה הם יוצרים את המרחב-זמן שביניהם.**

במקרה זה תיתכנה שלוש אפשרויות: א) ניבויי תורה התחווות יסתרו את ניבויי תורה היהדות. במקרה כזה תctrיך תורה התחווות לעוף מיד לפח האשפה, כי הניסויים כבר הוכחו את היהדות. ב) ניתן יהיה ליישב את ניבויי תורה התחווות עם ניבויי תורה היהדות. זו לא תהיה חכמה גדולה. אבל האפשרות המענינית ביותר היא ג) ניבויי תורה היהדות ינבעו באופן לוגי מניבויי תורה התחווות.

מחשבה טובה תגידי איפה את
נעימת ולא השארת סימן לאף אדם
וקשה לי להמשיך בלבד
מחשبة טובה חזורי מיד
מחשبة טובה חזורי ותני לי יד

מחשבה טובה אם את מקשייה
תני לי רק סימן שאתה עדיין בסביבה
ותגידי לי שאין סיבה
ותגידי לי שיש תקווה
ותני לי רק סימן שאתה עוד בסביבה.

כל זה היה ההקדמה למבוא של הפתיחה. כמו שאתה מבין אני עדיין עובד על זה. יש ימים שנדרה לי שאו-טו-טו אני מצליח להציג תיאוריה שלמה וכל היקום יוצא במחול, אפלטון באתונה מkapts' כתיש עם בקבוק אוזו סביב נהג מושךורי ומצטרף אליה בדואט ל"AMILISMO", ניוטון ולייבניץ עושים פסים סגולים בשיער ומצטרפים לדנדת סקס טנטרי בגואה, איינשטיין בטברנה מלאוה בכינור את מריו הופקיןס השירה For in our hearts the dreams are still the same ימים ששומם דבר לא הולך לי ואז אני שונא את כל העולם ומכלל את אבות הפסיכיקה הראשונים-ראשון ואחרון-אחרון, כולל אותו. איך זה אצלה? אם במקרה יכול ליזק מכתב זה כשהאתה עדיין שוקד על עבודתך ותרצה לקפוץ אליו לשיחתה תמיד מזמן ואם תרצה לעשות משהו ביחד נראה אשמה. אולי שמעת על היוזמה שלי עם כמה חברים להקים מכון חדש ללימודים מתקדמים, שבו אפשר לעשות הרבה כמו שקדמוני הגודלים אהבו לעשות, ואם תהיה לך איזו עצה גם בעניין הזה נבקש לך בשמה. כך או אחרת, אני מאוד מבקש, ונדמה לי שזו בהחלט לא בקשה מוגזמת, שהמהפכה שלך תהיה עוד בקדנציה שלי.

שלך בידיות,
אבשלום

נ.ב. סתם מחשבה: אולי שמת לב שיש דמיון בין היעדר מעבר הזמן בתיאור הפיסיקלי של כל תהליך לעוד דבר חשוב שנעדר מכל תיאור פיסיקלי בתחום יותר ספציפי. אני מתכוון לתיאור הפיסיקלי של התהליך המוחי, שהוא אלפיים שנה שאנשים שוכרים את הראש למזהה, או החוויה הסובייקטיבית, מעולם לא נובעת אפילו מהתיאור הכיו מפורט מהסוג הזה. כמובן שהוא מוגזם לצפות שהמהפכה הבאה בפסיכיקה תפתר גם את החידה העתיקה הזאת, אבל אולי לא? למנחה שלי, יקיר, יש אובססיה בנושא הזה והוא הדביק בה גם אותה. כבר עשרים שנה שאני מתלבט בשאלת ה兹את ולמרות שאין לי הוכחות של ממש אני משוכנע יותר ויודע שהדמיון בין שתי הבעיות הוא לא מקרי. כתבתי על זה בספר קטן שפרסמתי לפני עשר שנים.

נ.ב. לג.ב. כמובן שככל העניין הזה של נ.ב.ים הוא סתום העמדת-פנים בתקופה ה兹את שהכל נכתב במעבדי-תמלילים ואפשר היה להכניס את זה לטקסט, אבל במקרה ה兹אה רציתי לתת כבוד לשתי הפלאים האלה, הזמן והזדהה.

צבע החgorה הוא הדרגה הניתנת לאמן הקרוата, כשהשחורה היא הגבואה ביותר. לדרגה זו יש דרגות משנה, דוגמת, כשהגבואה ביותר הוא העשירי. תשאלו מה לגבי מי שהתעללה מעבר לדרגה זו? אמרו היפנים: ניתן לו חgorה לבנה. והרי לבנה היא למתהילים? אמרו היפנים: נכון, עד עכשיו הוא התקדם בשליטה על גופו ועם עכשיו צבע החgorה שלו משקף את שליטתו בגוף היריב. במובן זהה כבר עטו שני הזקנים האלה חgorות לבנות.

נספח מתמטי I

לפרק ב הוקי האלגברה

“חוק החילוף: אין חשיבות לסדר המספרים בפעולות החיבור והכפל”,

$$[7] ab=ba, \text{ וכן } a+b=b+a$$

“חוק הקיבוץ: אין חשיבות לסדר הפעולות בחישוב שכלו חיבור או כפל”

$$[8] (ab)c=a(bc), \text{ וכן } (a+b)+c=a+(b+c)$$

ו“חוק הפילוג: מכפלת סכום שווה לסכום המכפלות”,

$$[9] a(b+c)=ab+ac$$

בפתרון משווה ניתן לעשויות פעולה על אגף אחד של המשווה בתנאי שאotta פעולה מבוצעת על האגף הנגדי. כתוצאה, אבר מאגף אחד עובר לאגף הנגדי תוך שינוי הסימן מהיווי לשיליי ולהיפך, או מכופל למחוק ולהיפך. כך ניתן לבדוק את הנעלם, אותו אנו מבקשים למצוא, לבחון באגף שמאל בעוד כל המספרים עוברים לאגף ימין ומהם ניתן לחשב את ערכו. ניתן לחתמצת את הרעיון מאחרוי כלליים אלה כך: העובדה שאיננו יודעים את ערכו של גלעם אין פירושה שהוא אכן מציאות להוקים החלים על המספרים אותם אנחנו כן יודעים, וכך נבער עליינו כל פעולה שנמצא לנוכח עוד לפני שאנו יודעים את ערכו, עד שנדע אותו.

המעגל והכדור

היקף המעגל:

$$[10] C = 2\pi r$$

שטח העיגול:

$$[11] A = \pi r^2$$

שטח פני הכדור:

$$[12] S = 4\pi r^2$$

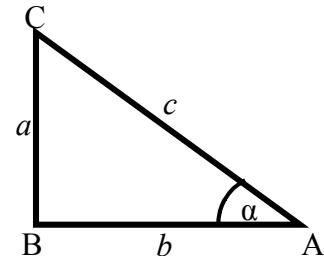
נפח הכדור:

$$[13] V = \frac{4}{3}\pi r^3$$

*. באלגברה, כאשר האברים הםאותיות, נהוג לוותר על סימן הכפל \times כדי שלא נתבלבל ביןו לבין הנעלם הנפוץ x . סוגרים מורים שהפעולה שבתוכם נעשית ראשונה. כן נהוג להזכיר מספרים לנעלמים.

לפרק א
הטריגונומטריה עוסקת בקשרים בין זוויות וצלעות המשולש.

במשולש ישר-זווית, שתי הצלעות הסמכות לזוית הישרה קרויות **ניצבים** בעוד הצלע שמלול היא היתר. נהוג לסמן



צלעות באזיות לטיניות קטנות, קודקודים באזיות גדולות וזוויות באזיות יווניות. היחסים בין זוויות וצלעות מובטאים ע”י

פונקציות טריוגונומטריות כמו:

$$[1] \sin \alpha = a/c$$

$$[2] \cos \alpha = b/c$$

$$[3] \tan \alpha = a/b$$

וכך, בהזדמנות זו, נבטא את משפט פיתגורס:

$$[4] a^2 + b^2 = c^2$$

[5] **שمانנו** נובעים יחסים מעניינים בין הפונקציות הטריגונומטריות, כמו

$$[6] (\sin \alpha)^2 + (\cos \alpha)^2 = 1$$

להבנת שיטות המדידה-מרוחוק של תלס נניח שיש עץ מעבר לנهر ואנו רוצחים למדוד את ריחוקו מatanנו. נסמן את מיקומו ב-C. נבחר נקודה על הגדרה שלנו מול העץ ונסמנה ב-B. עכשו נשרט על החוף קו ישר מ-B המאונך לקו BC. נכנה את הנקודה בסופה A וنمדוד את אורך הקו AB (הצלע a בתרשים). עכשו נמדד גם את הצלע מהנקודה A לנקודה C מעבר לנهر. נקרא לזוית זו α . לפני לנו משולש ישר-זווית. על-פי [3], האורך שאנחנו מבקשים שמדדנו על החוף. אם לדוגמה, הזוית הייתה 60° , הטנגנס הוא 1.732. נוכל לעשות חישוב עצלנים ולדאו שהנקודה A תהיה במקום שמןנו הזוית עם C תהיה 45° , ואז הטנגנס יהיה פשוטה 1, מה שאומר שמדדנו על החוף. AB שמדדנו על החוף.

אתגר: האם תוכלו להשתמש בטריגו' כדי למדוד את גובה העץ?

$$\Delta r = \frac{\Delta C}{2\pi} \quad [16]$$

שלא כמשוואות שטח העיגול [11] או נפח הכדור [13] שהן ריבועיות, משווהות היקף המרجل היא ליניארית ולכן "עיוורת" לגודל המרجل.

לפרק 5 החוק השלישי של קפלר

$$\frac{r^3}{T^2} = K \quad [17]$$

כש- r הוא המרחק מהשמש ו- T זמן ההקפה. ערכו של הקבוע K תלוי ביחידות בהן נמדד זמן ומרחק (שעות, קילומטרים וכד'). האסטרונומייםקבעו לנוזחותם "זיהה אסטרונומית" שהיא המרחק הממוצע של הארץ מהשמש: 150 מיליון ק"מ. אם נמדד את המרחק ביחידות אסטרונומיות ואת הזמן בשנים, ערכו של K יהיה 1.

חוק היפוך ריבוע המרחק

אם נקמה את האור לכדור ההולך ומתרפעט, שטח פניו ההפוך גדול לפני [12], וכמות האור הקיימת חייבת להתפזר עלייו במידה שווה. לכן, אם עוצמת האור במקור היא P , תהא עוצמת האור במרחב r ממנה:

$$I_r = \frac{P}{4\pi r^2} \quad [18]$$

לפרק 6 תנועה ותאוצה

כדי למדוד מהירותו علينا למדוד את הדרך שעבר הגוף בפרק זמן כלשהו ולחلك אותה באותו פרק זמן. אם נשימוש בקיצורם למלילים האנגליות *velocity*, *distance* ו- *time*, אז, ל מהירות קבועה,

$$v = \frac{d}{t} \quad [19]$$

את התאוצה, אם כן, נמדד ע"י מדידת השינוי ב מהירות בפרק זמן מסוים. נסמן תאוצה (acceleration) ב- a , ואז, אם הגוף החל מ מצב מנוחה ועבר לתנועה בתאוצה קבועה, התאוצה הממוצעת תהיה

$$a = \frac{v}{t} \quad [20]$$

רק חמישה פאונים מושלמים?

הגדרות: מצולע משוכלל = צורה דו-ממדית שכל צלעותה וכל זוויותה שוות. פאון משוכלל = צורה תלת-ממדית המורכבת מצולעים משוכללים שווים המהווים לה "פאות".

נדון תחילתה בקודקוד ("שפיץ") של פאון כזה. תסכימו ש- a) הוא חייב להיות מפגש של לפחות שלושה מצולעים – לאחר זו תהיה צלע ולא קודקוד; ב) סכום זוויות המצולעים הנגאים בו חייב להיות פחות מ- 360° , לאחר זה לא יהיה קודקוד אלא מישור שטוח או משטח מקופל; ג) כיוון שלכל מצולע צרכיים לפחות שלושה קודקודים, חייבת הזווית של כל קודקוד להיות לכל היותר שליש של 360° , כלומר 120° . לכן, כשהזווית לפאון שלנו ונשאל איזה מצולעים יכולים להרכיב אותו, מגלה (ב) מוציאה מכלל חשבון את המשוואה, שזויתו היא 120° , וכמוון את כל המצולעים הגדולים יותר שזוויותיהם גדולות יותר. מה נשאר? המשולש, הריבוע והמחומש. זווית המשולש המשוכלל היא 60° , כך שלפי (ב) ניתן ליצור קודקוד מ-3, 4, או 5 משולשים – אלה הם הטטרדרון, האוקטהדרון והאיקוסהדרון. זווית הריבוע היא 90° , לכן ניתן ליצור קודקוד רק מ-3 ריבועים – והרי הקובייה. זווית המחומש היא 108° , מה שמאפשר ליצור קודקוד רק משולשה כאלה, וזה הדודקהדרון.

חידת החבל

על-פי [10] ניתן לקבל את הרדיוס מהיקף

$$r = \frac{C}{2\pi} \quad [14]$$

נסמן את הפרש ההיקפים, לפני ואחרי מתיחת החבל, ב- ΔC . ואת הפרש הרדיוסים ב- Δr ואז

$$r + \Delta r = \frac{C + \Delta C}{2\pi} \quad [15]$$

לכן

המהירות ברגע מסוים שווה לתאוצה כפול הזמן,

$$v_t = at \quad [24]$$

עתה, נציב את הביטוי "תאוצה כפול זמן" במשוואת [24] במקומ "מהירות הסופית" שב-[23] ונקבל את התשובה:

$$d = \frac{att}{2} = \frac{at^2}{2} \quad [25]$$

המרחק שעבר הגוף שווה בזמן שעבר הגוף כפול התאוצה כפול הזמן מחולק בשתיים.

הפרבולה

אם תנועת האבן הנופלת היא צירוף של א) תנועה אופקית קבועה ו-ב) תנועה אנכית מואצת, המתמטיקה מאפשרת לשרטט את המסלול המדויק שיוצרות שתי התנועות. הדרך שעושה הגוף בתנועה קבועה נתונה ע"י משוואת [22], וכדי לבטא אותה בשפת הגрафים נשימוש ב- x לצוין מיקומו של הגוף במרחב האורכי:

$$x = vt \quad [26]$$

נעלה את שני האגפים בריבוע (מיד תבינו למה):

$$x^2 = v^2 t^2 \quad [27]$$

אם כך, אז

$$\frac{x^2}{v^2} = t^2 \quad [28]$$

וגם את [25] אפשר לבטא בצורה זו, אחרי שנחליף את d ב- y , המציג את הממד האנכי בגרף:

$$d = \frac{2y}{a} = t^2 \quad [29]$$

ואם [28] ו-[29] שוים לאותו דבר הם שווים גם זה לזה:

$$\frac{x^2}{v^2} = \frac{2y}{a} \quad [30]$$

ולכן:

$$y = \frac{a}{2v^2} x^2 \quad [31]$$

לאמור, בכל נקודת אורך יהיה גובה האבן שווה לתאוצה (במקרה שלנו זו התאוצה האנכית g) כפול ריבוע המרחק האופקי

וכשנציב את [19] ב-[20] נקבל שבר בתוך

שבר, אותו נצמצם:

$$a = \frac{d}{t} = \frac{d}{\frac{t}{t}} \times \frac{1}{t} = \frac{d}{t^2} \quad [21]$$

לאמור, התאוצה שווה למרחק אותו עבר הגוף חלקו הזמן בו עבר את המרחק בריבוע.

נחשב עתה את הדרך שעושה הגוף נع. כשהתנוועה קבועה, פשוט נכפיל את המהירות בזמן:

$$d = vt \quad [22]$$

אבל מה אם הגוף נע בתאוצה? גלילאו פתר את הבעיה בצורה פשוטה. נתחיל מהמקרה הקלאסי: גוף נע במהירות קבועה של 5 מטרים לשנייה במשך 10 שניות. לפי [22] הוא עבר 50 מטר. ניתן לציין תוצאה זו ע"י מלבן, שארכו הוא הזמן שהלך ורוחבו הוא המהירות, ואז שטח המלבן, שהוא מכפלת שני הגדלים, ייתן את המרחק.

עכשו, אם נניח שהמהירות הגוף הייתה בתחילת 0 ורק בהדרגה גדלה ל-5 מטרים בשנייה, יהיה علينا לייצג את המהירות ע"י קו אלכסוני המתחילה ב-0 ומסתיים ב-5. המרחק שעבר הגוף הפעם אינו שטח מלבן אלא שטח משולש שהוא בדיק חצי משטח המלבן. הצלע האחת של המשולש היא המרחק והצלע השנייה היא המהירות הסופית. הנוסחה הפעם, לגוף הנע בתאוצה, תהיה: המרחק שעבר הגוף שווה בזמן שעבר כפול המהירות הסופית מחולק בשתיים,

$$d = \frac{vt_f}{2} \quad [23]$$

עכשו אנחנו מבינים שאט האבר שבמונה, המהירות הסופית, אנחנו יכולים לחשב לפי התאוצה. נניח שהגוף מתחילה ממהירות 0, בתוקן שנייה עובר למהירות של חצי מטר לשנייה, בשנייה הבאמה מהירותו היא מטר לשנייה וכן הלאה. בKİצ'ר: בכל שנייה הגוף מגביר את מהירותו בעוד חצי מטר לשנייה, ככלומר $a=0.5m/sec$. אם כך,

ההגדרה שקבענו, בתואוצה. אם נדע בדיקות את מידת התואוצה הזאת, נחלקה במסת הכוכב וכך נדע בדיקות את עוצמת הכבידה הפעולות עליו. ואם נעשה את החישוב הזה על כמה כוכבי-לכת בעלי מסות שונות, נוכל לגוזר חוק כללי עוד יותר שיקשר בין מסה לכבידה.

נניח אם כן שכדור-הארץ סובב סביב השימוש במ审核 מדויק. את התואוצה המעלית ניתן לגוזר ממשוואת התואוצה הרגילה [20]. לא נעשה את הגזירה כאן (שוב פיתגורס [4] וכו'), ורק נביא את המשוואת, אותה ניסח לראשונה האוקנס: תהא מהירות הגוף v , ורדיווס המ审核 r , אז

$$a = \frac{v^2}{r} \quad [38]$$

אבל כיון שהאייר a כולל במשוואת המפורסתה [37], נציב את [38] בתוך [37]. נקבל

$$F = m \frac{v^2}{r} \quad [39]$$

עכשו אפשר לעשות גם את v (מהירות) מפורש יותר, כי מהירות היא דרך מחולקת בזמן [19]. כדור-הארץ עושה审核 שלם בזמן פרק זמן הידוע לנו (שנה), ואם נדע את רדיוס审核 נוכל לחשב את הדרכ שעשה בזמן זה על-פי ממשוואת היקף审核 [10], כך נעשה ממשוואת מהירות כדור-הארץ מפורשת יותר:

$$v = \frac{2\pi r}{T} \quad [40]$$

נציב אותה בתוך [39], נצמצם, ושוב נצמצם:

$$[41]$$

$$F = m \frac{\left(\frac{2\pi r}{T}\right)^2}{r} = m \frac{\frac{4\pi^2 r^2}{T^2}}{r} = \frac{4\pi^2 mr}{T^2}$$

אבל כאן כדי לרשום את המשוואת דוקא בצורה פשוטה תמציתית. נפרק אותה כך:

$$F = \frac{m 4\pi^2}{r^2} \times \frac{r^3}{T^2} \quad [42]$$

אם הביטוי הבודד מימין זכור לכם מאיפה שהוא? ניטוון נזכר: זה החוק השלישי של הרענון פשוט: אם כוכב-לכת סובב סביב המשמש,审核 או באלייפסה, הוא נעה על-פי

שבירה האבן, הכל מחולק בריבוע מהירות כפול שתים.

לפרק 7 חתכי החריש

המעגל, המוגדר כ"אוסף כל הנקודות במישור הנמצאות מרחק שווה מנקודה נתונה", מבוטא בשיטת דקרט (ובהסתמך על משפט פיתגורס [4]) כך:

$$x^2 + y^2 = r^2 \quad [32]$$

האליפסה, "אוסף כל הנקודות שסכום מרחקי הנקודות נתונות (המקדים) הוא שווה":

$$\frac{x^2}{a^2} + \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad [33]$$

הפרבולה, "אוסף כל הנקודות הנמצאות במרחק שווה מנקודה נתונה ומישר נתון":

$$y^2 = 4ax \quad [34]$$

ההיפרבולה, "אוסף כל הנקודות שהפרש בין המרחקים שבין כל אחת מהן לשתי נקודות קבועות (המקדים) הוא קבוע":

$$\frac{x^2}{a^2} - \frac{y^2}{b^2} = 1 \quad [35]$$

הנוסחה הכללית היא

$$[36]$$

$$Ax^2 + Bxy + Cy^2 + Dx + Ey + F = 0$$

(כש- A ו- C אינם שלושים אפס). ואז, אם $A - C < 0$ זו אליפסה, ובקרה יותר ספציפי שבו $C = A$ וגם $B = 0$ זה审核, אם $B^2 - 4AC = 0$ פרבולה ואם $B^2 - 4AC > 0$ זו היפרבולה.

ניתן לסכם את היחס בין חתכי החרוט ביתר פשטוות כך: תהא "אקסצנטריות" מידת חריגתו של החתך מה"מעגליות", ואז ל审核 יש אקסצנטריות 0, לאלייפסה מעלה 0 ומתחת ל-1, לפרבולה 1 ולהיפרבולה גדולה מ-1.

לפרק 8 החוק השני

$$F = ma \quad [37]$$

ניסוח חוק הכבידה

הרעיון פשוט: אם כוכב-לכת סובב סביב השמש,审核 או באלייפסה, הוא נעה על-פי

המאות שליהם, כפול המספר הקבוע G, חלקו המרחק ביניהם בربוע.

אפשרות אחרת

יש אומרים שniton התקדם כך: מהירות נפילתו של התפוח בשניה הראשונה היא בערך 5 מ'/שניהם. באיזו מהירות "ונפל" הירח, ככלומר מה מידת הסטיה של מסלולו מהקו הישר שהחיב החוק הראשוני? הנתונים האסטרונומיים שהיו בידי ניוטון הורו על סטייה של 1.3 מ' מ' לשניהם. מהיכן ההבדל בין נפילת התפוח והירח? ברור, מניסוי גלילאו (ר' גם להלן), שזה לא נובע מההבדל בין מואות התפוח והירח!

אולי המדובר בהבדלי המרחק מכדור הארץ? נזכיר שהנקודה הקובעת לגבי המרחק היא מרכזו המאסה של כדור-הארץ (ר' בגוף הפרק), ולכן מרחק התפוח ממרכזו כדור-הארץ הוא 6500 ק"מ, ואילו מרחק הירח מרכזו כדור-הארץ הוא 390000 ק"מ, ככלומר, בערך פי 60 מרחק התפוח. לא הולך: ההבדל בין נפילות הגוף גדול מזה בהרבה.

נסה אם כן לעיר את "חוק ריבוע המרחק" שראשיתו בקפלר והמשכו בחישוביהם של הוק ולהלי. שמא ההבדל בין נפילות התפוח והירח הוא 60^2 , ככלומר 3600? ביגנו!

זרה לגליליאו

נשאר לנו עוד לסגור חוב עם גליליאו ולהראות בצורה מתמטית למה כל המשקלות שהפיל ייחד חייבת להגיע לקרע ייחד. אם נפיל משקלות של ק"ג אחד ומשקלות של שני ק"ג, אומרת משווה [46] שהכוח הפועל על השניה גדול פי שניים מזה הפועל על הראשונה – זו הסיבה קשה פי שניים להרים את השניה. אבל חוק-היסוד של ניוטון [37] אומר: התאוצה הפעלת על גוף שווה לנוכח הפעול עליו המחולק במתת הוגף. לכן, כמשמעות בכוח הכבידה, דרושת משווה [37] שההתאוצה הפעלת על שתי המשקלות תחולק במסות שלהן. המסה מופיעה אם כן גם מעל לקו

קפלר (משוואה [17]) הקשר בין מהירותו של כוכב-לכת לריבוקו מה着他. הוא הציב אותו ב-[42] וקיבל

$$[43] \quad F = \frac{4\pi^2 K}{r^2} m$$

הנה שוב מידוענו "חוק היפוך ריבוע המרחק": עוצמת הכבידה יורדת ביחס ישיר למרחק בין הגופים כפול עצמו. ניוטון ידע עכשו שהוא על הדרך הנכונה כי חוק כוח בדיקת גילה קפלר (משוואה [18]) ביחס לאור. גם הכוח החדש מצית לחוקיות המוכרת של שטח פניו הגדוד.

עכשו אפשר להציב מספרים במקום כמה מהאותיות בנוסחת כוח הכבידה: α שווה ל- 3.14159, את ערכו של K אנו יודעים כבר מהוק קפלר ואת r ו- m כבר נתנו לנו האסטרונומיים היוונים וממשיכיהם. פתרון המשוואה הזאת נתן לנו את עצמת הכוח המושך את כדור-הארץ אל השימוש.

עכשו, אמר ניוטון, ניתן גם את משווה [8] בצורה פחות תמציתית:

$$[44] \quad F = \frac{4\pi^2 K}{M} \times \frac{mM}{r^2}$$

מה הרווחנו בתוספת הזאת של אותו אבר למונה ולמכנה? כך, מшиб ניוטון, הפרדנו בין המסה של כדור-הארץ (m) לו של השימוש (M). עכשו, כנסו בינו כוכבי-לכת שונים במערכת השימוש, נוכל לרשום את הביטוי השמאלי בצורה קובעה, האות G, המבטאת את היחס בין המסה של גוף לכבידה שהוא מפעיל על גופים אחרים:

$$[45] \quad \frac{4\pi^2 K}{M} = G$$

עכשו, אם במקום M גודלה ו- m קטנה נציג את המואות של שני הגוף בסימון ניטרלי יותר וגם "רדיוס" (r) נחליף במושג הכללי יותר "מרחק" (D), נקבל, לא פחות, חוק כללי התקין לכל הגוף ביחס:

$$[46] \quad F = G \frac{m_1 m_2}{D^2}$$

זה חוק הכבידה האוניברסלי: בין כל שני גופים בעולם פועל כוח השווה למכפלה

$$s = \frac{y_1 - y_2}{x_1 - x_2} . \quad [48]$$

מצין "הפרש" באות היוונית Δ ונתקבל

$$s = \frac{\Delta y}{\Delta x} . \quad [49]$$

כאשר Δ "שואף לאפס", כלומר מתקרב לאפס ככל האפשר אבל אין אפס, נתונים המתמטיקאים לביוטי דוחוק את הזרה הפюטה

$$s = \frac{dy}{dx} . \quad [50]$$

ושוב, אם נקטין את Δ לאפס, יאמר כל ברא דעת של אפס מרחק יש אפס שיפוע, וכשירהה שגם המכנה הוא אפס, יאמר שככל הביטוי הוא במקרה הטוב חסר-משמעות. איך הצליח ניוטון לדאוג ש- d יהיה הכח קטן

שאפשר ובכל זאת לא אפס? עסקת ה"בירה תמורה סיגריות" של ניוטון בzerosהה המקורית היא זו. ניקח את המשוואה הריבועית הפюטה ביותר

$$x^2 = y , \quad [51]$$

ונבדוק מה קורה כ- x -ו- y מקבלים את התוספת ה"כמעט אפסית":

$$y + dy = (x + dx)^2 \quad [52]$$

$$= x^2 + 2xdx + (dx)^2 \quad [53]$$

כיוון ש-[51], נפחית את y מאגף שמאל ואת x מימין ונשאר עם

$$dy = 2xdx + (dx)^2 . \quad [54]$$

עכשו טען ניוטון בלי להניד עפער: אם dx הוא מספר קטן, כאמור שבר, אז $(dx)^2$, שהוא שבר בריבוע, קטן הרבה יותר, כך שכך ש- dx יתרך לאפס, ייעלם $(dx)^2$ לפניו, וכך יישאר רק

$$dy = 2xdx . \quad [55]$$

ועכשיו רק הערכה אלגברית פשוטה מאגף לאגף מפרידה ביןינו לבין הלא-ייאמן:

$$\frac{dy}{dx} = 2x . \quad [56]$$

זהו השיפוע של כל נקודה על פני הפרבולת הזאת, שאין בה שום קטע ישר.

כמו כן, הטענה שקיים מספר פיצוף שהוא גדול מ-0 אבל מכפלתו בעצמו (וחזקות גבהות יותר שלו) תנתן אף היא מופרכת.

השער גם מתחתיו וההבדל בין שני הגוף הנופלים מתקובל.

הכוח הצנטריפוגלי הלא-קיים

ולבסוף, תרגיל מתמטי פשוט יותר: רנרד פון בראון (1912-1977), אבי תכנית החלל האמריקנית (וטיפוס מפוקפק שבונה בצעירותו טילים להיטלר), כתב ספר פופולארי ובו נקט בדרך מהירה יותר לגוזר את כוח המשיכה מהנתונים האסטרונומיים: אם הירח סובב סביב הארץ, פועל עליו כוח צנטריפוגלי המאים להעיף אותו החוצה. על-פי משוואת האוכנס, הכוח הצנטריפוגלי פרופורציוני למסת הנוף, לרדיוס המगעל ול מהירות סיבובו, קבוע כלשהו K :

$$F = K \frac{mr}{T^2} . \quad [47]$$

אם נציב במשוואה את רוחוק הירח מאננו, את המסה שלו ומהירות סיבובו סביב כדור הארץ, נקבל את עצמת הכוח הצנטריפוגלי, וכיוון שהירח לא עף החוצה ולא נופל, הכוח הזה שווה לבדוק לכוח המשיכה! כך אפשר לחשב לגבי שאר גשמי השמיים ולמצוא את הקבוע הנכוף G . על הגזירה הזאת ספג פון-בראון הרבה ביקורת, כי הכוח הצנטריפוגלי אינו כוח אמיתי אלא "כוח שקול" (ר' בגוף הפרק). בקיצור, המרגיל איננו נכון מבחינה פיסיקלית טהורה. ובכל זאת, הוא עובד, והרבה יותר מהר מהגזירה ה"נכונה" שהבאו לנו כאן! האם זה לא אומר שהוא על כוחה של החשיבה המתמטית? אני תוהה אם איינשטיין לא היה מוצא כאן עוד אישוש לצורת החשיבה של היחסות הכללית.

התעלול של ניוטון

נדיר תחילה את תוכנותיו הפרודוקסליות של השיפוע המבוקש. אנחנו מחפשים שיפוע של קו עקום. בברור שהSHIPוע יהיה מדויק יותר ככל שקטע הקו יהיה קצר יותר, והכי מדויק כאשר רק הקטע הוא נקודה. בשפה של דקארט, השיפוע בנקודה a פירושו: הפרש האורך מוחלק בהפרש הרוחב,

חוק הפעולה המכנימלית

$$S = \int_{t_B}^{t_A} (T - V) dt \quad [61]$$

משוואת מילגרום

את החוק השני של ניוטון [37] מציע מילגרום להחליף בחוק אחר:

$$F = \frac{ma^2}{a_0}. \quad [62]$$

a_0 יהיה מעתה קבוע חדש של הטבע. כל עוד התאוצה גדולה יחסית, כמו התאוצות שאנו רואים בחיי היום-יום, הוא יהיה זניח, אבל בתאוצות קטנות מאוד הוא יתרט ויתן תוצאה השונה מזו של חוק התאוצה המקורי.

אז למה החדו"א בכל זאת עובד? התשובה המודרנית גם היא חכמולוגית, אבל עקבית. נתחיל מההפרש הנורמלי המשומן ב- Δx וונבדוק מה קורה למשווהה [51] כאשר Δx געשה אפס:

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{(x + \Delta x)^2 - x^2}{\Delta x} \quad [57]$$

בשלב זה Δx עדין אינו אפס. נפתח סוגרים:

$$\frac{\Delta y}{\Delta x} = \frac{x^2 + 2x\Delta x + \Delta x^2 - x^2}{\Delta x} = 2x + \Delta x \quad [58]$$

עבשו נטען ש- Δx הוא אפס ושוב נקבל אותה תוצאה כמו ב-[56].

הוא הדבר בנוגע לאפס שמתחבא באינטגרל.

לפרק 9

משוואת לייבניץ

על-פי ניוטון, לגוף נע יש תנע, שהוא מכפלת המASA שלו ב מהירותו היחסית:

$$p = mv. \quad [59]$$

כך שגם מכוניות במשקל אלף ק"ג נעה ב מהירות 100 קמ"ש, יש לה תנע השווה ל- 100,000 כפול קבוע כלשהו. המומנטום, סבר ניוטון, אינו משתמר. לכן, אם שתי מכוניות כאלה מתנגשות זו בזו חזיתית, הרי שמהירותה של האחת שלילית לעומת זו של חברתה וכך יש להפחית את המומנטום של אחת מזו של השנייה והתוצאה תהיה 0.

לייבניץ הראה שם אם המומנטום אינו נשמר, האנרגיה הקינטית נשמרת. את האנרגיה הזאת ביטא כך:

$$F = \frac{mv^2}{2} \quad [60]$$

זזה אל המכוניות, עצמאית ההתנגשות בינהן נקבעת ע"י האנרגיה הקינטית של שתיהן, וכיוון שהביוטוי "בריבוע" מבטיח שהאנרגיה הקינטית תמיד חיובית, בלי קשר לכיוונה היחסית, אנרגיה זו תמיד נשמרת ולכל היותר יכולה להפוך לאנרגיה קינטית מיקרוסкопית, ככלומר לחום. כיוון ידוע שגם התנע נשמר.

ביבליוגרפיה

הערהביבליוגרפיה

התחום בו עוסק ספר זה קרווי “יסודות הฟיזיקה (foundations of physics)”. זהו תחום עיסוקם של מעתים (אם כי הם הפיזיקאים היווניים הבולטים בדורנו, כמו פנרו, הוקינג וסמולין) והוא משתרע על פני תורת היחסות הפרטית והכללית, תורת הקוננטים, פיסיקת החלקיקים, הקוסМОЛОגיה והתרמודינמיקה, תורת המיתרים והתורות המתחרות בה על כתר תורת השדה המאוחד, וכמוון יש לו נגיעה לשאלות רבות מתחום הפילוסופיה. הוא סובל מזלזולו של הרוב הבינוני של הפיזיקאים הנרחעים משאלות-יסוד, ולכן אין זוכה להכרה ולמשמעות להם זוכים תחומיים שימושיים יותר כמו המצב המוצק, לייזרים ועוד’, וכמעט אין ניתן בתוכניות לימודים אוניברסיטאיות בארץ. לפיכך, אם השאלה בספר זה מסקנותו אותה וברצונך ללמידה עוד, בתוספת ללימודיך האקדמיים או במקומם, לבדוק או (כדי מאד) בקבוצת לימוד בצוותא, הנה רשימת מקורות התחלתיות.

נתחיל בעברית. להיכרות ראשונית וקללה מאוד עם הפיזיקה, “מילדיות לבגרות בשילוב הحلב” הוא ספר נפלא של טימותי פריס⁴³ המסביר את עקרונות-היסוד של הפיזיקה הקלסית והמודרנית. הספר לימוד, חוברות הקורס “מבוא למדעי הטבע” של האוניברסיטה הפתוחה¹ הן אכן מבוא מעולה לפיזיקה לענפיה השונים, ערכות בוצרה מגונת ומעניינת, שמותאת הדגש על הבנה אינטואיטיבית ומולילות תרגילים רבים וגם כמה ניסויים. חוברות הקורס “יסודות הפיזיקה” של קירש⁴⁷ באותה הוצאה הן מתקדמות יותר ומומלצות אחרי קורס המבוא. אם רצונך בספר ללמידה בכרך אחד, “פיזיקה לכל” של היואיט²⁰ הוא פשוט נפלא, כתוב בהומור ובאהבה לזכר בנו, וגם הוא שם את הדגש על ההבנה לפני הניסוחים המתמטיים והתרגילים.

³⁶ להכרת ההיסטוריה של הפיזיקה השתמשתי באנתולוגיה המונומנטלית של סמברסקי, המביאה תרגומים לעברית של כתעים חשובים מספריהם של גדולי הפילוסופים והפיזיקאים מיימי קדם עד ימינו, עם מבואות והערות. בודאי שמת לב במהלך הספר שאינשטיין היה גם מורה מעולה ולכן כדי לקרוא את רישומותיו הקצרות על הפיזיקאים שקדמו לו.⁴ את ספרו של בclr¹⁰ יש ללמידה בביבליות ולא לקבל כਮובנת מלאיה את גישתו הפנאטית, אבל זה הספר המרתך ביותר בהיסטוריה ובפילוסופיה של הפיזיקה שנכתב בעברית, וכל קריאה חוזרת בו תגללה לך רבדים חדשים.

לגביו התחומיים המודרניים יותר של הפיזיקה, “היקום בклиפת אנז” של הוקינג¹⁰ נותן מושג ראשוני על התיאorias הקיימות. ספריו המעלמים של בריאן גרין¹⁰ יקחו אותך למסע מאלף וידיותי מאד למחוזות הספר של תורה המיתרים של ימינו.

אם שליטך באנגלית טובה, הרצאותיו של פיינמן הם מבחינות רבות ספר הלימוד לפיזיקה הטוב בעולם, לא מעט בזכות הפשטות וההמור, והוא מקיף את כל הפיזיקה הקלסית עם היחסות והקוננטים.

כמה פיזיקאים יווניים בני ימינו הצליחו לכתוב ספרים על עבודותיהם והמכונים הנקראים על שמם המדענים והן לציבור רחב יותר של קוראי מדע. הבולט בהם הוא רוג'ר פנרו שכתב שלושה ספרים גדולים,¹⁰ שבהם, במיוחד בראשון, הוא מתאר בבהירות את הידע

הקיים לפני שהוא מציע את התיאוריות שלו. הספרים כתובים ברמה מדעית גבוהה ויחד עם זאת בצורה מרתקת והומוריסטית וניתנים להבנה גם ע"י קוראים שאינם אנשי-מקצוע. סמולין כתב ספר דומה על החיפוש אחרי הכבידה הקונטינטית. אחריו כתב ספר חתני ושמו "חזרה עם פיזיקה", בו מתח ביקורת קטלנית על תורות המיתרים והצביע על הכיוון הרצוי לדעתו. كيف ת'ורן¹ הוא עוד דוגמא למחברים מחייבים ומרתק.

באינטרנט יש כמה אתרים מצוינים ללימוד פיזיקה. בעברית הקים זאב קרקובר אתר כמעט לא-ידעו, "ההערה היומיית בפיזיקה ובהוראתה":

/http://my.ort.org.il/mop/physics/daily

מחברו של האתר MathPages (<http://www.mathpages.com>) איןו מזדהה, אבל בראשתו נודע בשם קוון בראון. למרות שהמחבר אינו מدعן בעל הסמכה מוכרת, המיידע המתמטי והפיזיקלי באתר מהימן מאוד ועליו נוספים חיבורים מקוריים מאוד של בעליון ההיסטורי. מעוללה כמוזו הוא האתר של אריך וייסטינן,

/http://scienceworld.wolfram.com/physics

/http://mathworld.wolfram.com

אתר אינטראקטיבי בו ניתן לעשות חישובים ממשיים הוא

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hframe.html>

<http://hyperphysics.phy-astr.gsu.edu/hbase/hph.html>

וכן, להרצת סימולציות ויזואליות מריהבות, בעברית

/http://braude.ort.org.il/physlet

לבסוף, באתר שלי ריכוזי מאמרים, הרצאות ומצגות הנוגעות לנושאים אלה:

./<http://www.ac-elitzur.com>

בצלחה!

- .1. אביב, ר, בן-צבי, נ, קדם, ד, גולן, מ (1976) מבוא למדעי הטבע (5 כרכים). תל-אביב: האוניברסיטה הפתוחה.
- .2. אברון, א (1998) משפט גודל ובעיית היסודות של המתמטיקה. תל-אביב: האוניברסיטה המשודרת.
- .3. אדמוניס, ד, ואידינאו, ג' (2005) הדוקן של ייטגנשטיין. תל-אביב: ידיעות.
- .4. איינשטיין, א (2005) רעיונות ודעות. ירושלים: מאגנס
- .5. אליצור, א.כ---עמלק
- .6. – (2002) על שמונה הבלתי פוסט-מודרניסטים. <http://www.ac-elitzur.com/philosophy-46.htm>.
- .7. – (2005) וף על-פי כן, קיימת המציאות כשלעצמה: הדיאלוג הפילוסופי בין אלברט איינשטיין והרברט סמולא. אימנו, <http://www.e-mago.co.il/e-magazine/einsam.html>.
- .8. אングלר, ג (2004) שתי תקופות של יווני במדוע. גלילאי, 72, 42-34.
- .9. בילצקי, ע (1998) פרזוקטם. תל-אביב: האוניברסיטה המשודרת.
- .10. בבלר, ז (1999) שלוש מהפכות קופלנקיניות. חיפה: אוניברסיטת חיפה ומורה-ביתן.
- .11. גולדשטיין, ר (2006) ההוראה והפרזוקט. תל-אביב: אריה ניר.
- .12. ג'ונסון, פ (1996) אינטלקטואלים. תל-אביב: דברי.
- .13. גינגריץ, א (2004) הספר שאיש לא קרא. תל-אביב: אריה ניר.

- גליק, ג' (2007) *אייזק ניוטון*. תל-אביב: אריה ניר. 14.
- גליקר, י' (1985) *פרק מבוא לאפלטון*. תל-אביב: האוניברסיטה המשודרת. 15.
- דולב, ש. 16.
- דוקינס, ר (2001) *לפנום את הักษת בענן*. תל-אביב: הד הארץ. 17.
- הוקינג, ס (1989) *קייזר תעלות הזמן*. תל-אביב: מעריב. 18.
- (2003) *היקום בקליפת אגנו*. תל-אביב: מעריב. 19.
- היוואיט, פ' ג' (1997) *פיסיקה לכל*. ירושלים: מכון ברנקו וייס. 20.
- וורם, א (2004) *רצינליות וקדמה במדע*. תל-אביב: האוניברסיטה המשודרת. 21.
- ורטהיימר, מ (1965) *איינשטיין: החשיבה שהובילה לתורת היחסות*. מתוך: *החשיבה* (עורך מ. כספי). ע' 329-297. ירושלים: בית"ס לחינוך של האוניברסיטה העברית. 22.
- זיף, צ' (2000) *אפס. רעננה: מיאן*. 23.
- כהן, ב (1966) *ליידתה של פיסיקה חדשה*. תל-אביב: עם עובד. 24.
- LIBOVITZ, י () *נפש: הבעה הפסיכופתית*. תל-אביב: האוניברסיטה המשודרת. 25.
- LIBVINSKY, מ (2003) *חטוך הזהב*. תל-אביב: אריה ניר. 26.
- (2006) *שפת הסימטריה*. תל-אביב: אריה ניר. 27.
- לשם-רמתי, ע (2005) *אייזק ניוטון ובית המקדש*. מגדל: רזיאל. 28.
- מיזב, מ, ברוש, ג, ונצ'ר, ח (1988) *היקום*. תל-אביב: רמות. 29.
- AMILGROM, מ (2006) *החוור האפל באור החדש*. הוויה 25/2: 4-10. 30.
- מקלצ'לאן, ג' (1997) *גיללא גיללי*. תל-אביב: ידיעות אחרונות. 31.
- סובל, ד (2003) *כמן של גיליאן. אור-יהודה: כנרת*. 32.
- סטור, א (1983) *הدينאמיקה של היצרה*. תל-אביב: פועלים. 33.
- (1999) *הכלב השחור של צ'רצ'יל*. תל-אביב: דבר. 34.
- סיגון, ק (1997) *עולם דודף-שדים*. תל-אביב: ידיעות אחרונות. 35.
- סמובסקי, ש (1972) *המחשבה הפיסיקלית בהתווותה*. ירושלים: מוסד ביאליק. 36.
- (1987) *חוקות שמים ואڑן*. ירושלים: מוסד ביאליק. 37.
- (1989) *הפיסיקה של המאה ה-17*. תל-אביב: האוניברסיטה המשודרת. 38.
- STEYERART, א (1999) *המספרים של הטבע*. תל-אביב: הד הארץ. 39.
- פאלק, ד (2002) *היקום על חילצת טריון*. ירושלים: כתר. 40.
- פוייר, ל ס (1979) *איינשטיין ובני דורו*. תל-אביב: אופקים. 41.
- פופר, ק (1988) *밀דות לבגרות בשבייל החלב*. תל-אביב: מעריב. 42.
- צ'רניבסקי, א' (1965) *בין מדע ועדת*. תל אביב: יהושע צ'צ'יק. 43.
- קאסטי, ג' () 44.
- קונ, ת (2005) *המבנה של מהפכות מדעיות. מהזרה חדשה*. תל-אביב: ידיעות אחרונות. 45.
- קירש, י (2003) *יסודות הפיסיקה 6 (רכבים)*. תל-אביב: האוניברסיטה הפתוחה. 46.
- (2006) *היקום על-פי הפיסיקה המודרנית*. תל-אביב: עם עובד. 47.
- קסטלה, א (1970) *יהודנס קפלר*. תל-אביב: ידיעות אחרונות. 48.
- קריסטיאנסון, ג (2000) *אייזק ניוטון והמחפה המדעית*. תל-אביב: ידיעות אחרונות. 49.
- שייא, א, ושלונסקי, ד (ח'ה) *שני מאורות: ארכימedes וניוטון*. תל-אביב: עם עובד. 50.
- שרפשטיין, ב-ע (1984) *פילוסופים בני-אדם*. תל-אביב: זמורה ביתן. 51.
53. Aharonov, Y, & Rohrlich, D (2005) *Quantum Paradoxes*. New York : Wiley-VCH.
54. Alpher, R A, Bethe, H, and Gamow G (1948) The origin of chemical elements. *Physical Review*, 73, 803-804.
55. Beck, G, Bethe, H, and Riezler, W (1931) Remarks on the quantum theory of the absolute zero of temperature. *Die Naturwissenschaften*, 2, 38-9.
56. Bodanis, D. () *Passionate Minds*.
57. Caspar, M (1993) *Kepler*. New York: Dover.
58. Chandrasekhar, S (1987) *Truth and Beauty*. Chicago: Univ. of Chicago Press.
59. Deacon, R (1986) *The Cambridge Apostles*. London: Farrar, Straus and Giroux.
60. Dirac, P A M (1963) The evolution of the physicist's picture of nature. *Scientific American* 208(5), 45-53.

61. Elitzur, A C (2005) When form outlasts its medium: A definition of life integrating Platonism and thermodynamics. In Seckbach, J. (Editor) *Life as We Know it*. Dordrecht: Kluwer Academic Publishers.
62. Elitzur, A C () Consciousness makes a difference.
63. Field, J V (1988) *Kepler's Geometrical Cosmology* Chicago: University of Chicago Press.
64. Guillen, M (1983) *Bridges to Infinity*. LA: Tracher.
65. --- (1995) *Five Equations that Changed the World*. New York: Hyperion.
66. Hofstadter, D (1999) *Gödel, Escher, Bach*. (A 20th anniversary re-edition) New York: Basic Books.
67. Laertius, D. (12??/1895) *The Lives and Opinions of Eminent Philosophers* (trans. C.D. Yonge). London: George Bell & Sons. <http://classicpersuasion.org/pw/diogenes/>
68. Leshem, A *Newton on Mathematics and Spiritual Purity*. London: Kluwer.
69. Manuel, F (1968) *A Portrait of Isaac Newton*. Cambridge, MA: Harvard University Press
70. Penrose, R (2004) *The Road to Reality*. New York: Knopf.
71. Rosen, J (1991) *The Capricious Cosmos*. New York: McMillan.
72. – (1995) *Symmetry in Science*. New York: Springer.
73. Westman, R S (1975) The Melanchthon circle, Rheticus, and the Wittenberg interpretation of the Copernican theory. *Isis* **66** (232), 165-193.
74. Wigner, E (1960) The unreasonable effectiveness of mathematics in the natural sciences, *Communications on Pure and Applied Mathematics*, 13, 1-14.

- אלדר, א Adler, A
 אהרוןוב, י Aharonov, Y
 אוֹרֶם, נ Oresme, N
 אוֹטוֹ Otto
 אָוְקַלִּידָס Euclid
 איינשטיין, א Einstein, A
 אלפר, ר. Alpher, R. A.
 אנקסגורס Anaxagoras
 אפלטון Plato
 אריסטו Aristotle
 ארכימedes Archimedes
 בור, נ. Bohr, N.
 בובאר, א. Bouvard, A.
 בראון, תנוועת Baranow, Tenuat
 בטה, ה. Bethe, H.
 ג'אול, ג'. Joule, J. P.
 גאMOV, ג'. Gamow G.
 גורקי, מ. Gorky, M.
 דה ברויי, ל. De Broglie, L. V.
 דו שטלה, א. du Châtelet, A.
 דו פיי, ש. du Fay, C. F.
 דולב, ש Dolb, Sh
 דיראק, פ. Dirac, P.A.M.
 האוכנס, ק. Haocens, K.
 הויגנס, ר' הויגנס, R' Haocens
 הורביץ, ל. Horwitz, L. P.
 הלמוהולץ, ה. Helmholtz, H. L F.
 הרצל, ב. ז. Herzl, T. B. Z.
 ובר Weber
 וויטנִה, ר' יהנן-פאולוֹס Witten, R' Yohanan-Paulos
 וולטֵר, פ. Voltaire, F. M. A.
 וולשצ'ן, א. Wolszczan, A.

וַיִּדְמֹן, ל. Vaidman, L.

חוֹקָרֵיכִים דָּס

חוֹקִיָּי קְפָלָר

חוֹקִיָּי נִוּטוֹן

טוֹלְסְטוֹי, ל. Tolstoy, L.

יוֹהָנָן-פָּאוֹלוֹס הַשְׁנִי (ק. וּוִיטִּיה)

לְאַנְגְּלוֹן, פ. Langevin, P.

לְנוֹן, ג.

מַאיִיר, ר. Mayer, J. R.

מַהְרָ"ל (ר' יְהוָה לִיוֹא)

ר' מַנְדָּל מַקוֹצָק

מֶרְסֶן, מ. Mersenne, M.

נוֹטְוֹן, א. Newton, I.

סּוֹקְרָטָס Socrates

סְפִינּוֹזָה, ב.

פָּנְרוֹז, ר. Penrose, R.

פְּרוּיד, ז. Freud, S.

פְּרוּינְדְּלִיךְ, א.

פְּפָל, א. Foppl, A.

פְּרָקִיִּי, מ. Faraday, M.

צְוּוִיִּג, ס. Zweig, S.

צְ'כּוֹב, א. Chekhov, A. P.

קְלִיפּוֹרְד בָּרְנִי, ג. Clifford Barney, N.

רְבָנוֹתָם (ר' יְעָקָב בֶּן מַאיִיר)

רְטִיקּוֹס, ג. Rheticus, G.Y.

רְשַׁבְ"ם (ר' שְׁמוֹאֵל בֶּן מַאיִיר)

רְמַבְ"ם (ר' מְשָׁה בֵּין מִימּוֹן)

שְׁפִינּוֹזָה ר' סְפִינּוֹזָה

תְּוּרוֹ, ה. Thoreau, H.D.

תְּלָס Thales