

מה יילד יום?

הרהורים על טבע הזמן בפיזיקה של המאה העשרים ואחת^א

אבשלום אליצור ושחר דולב

תקציר: כל קביעה לפיה הזמן זורם מובילה לסתירה עצמית. לכן אין להיבט הדינמי של הזמן כל ביטוי בחוקי הפיזיקה. מצד שני, הפיזיקה המודרנית עצמה אינה נקייה מסתירות. מאמר זה מבאר כמה אפקטים ידועים מתורות היחסות, הקוונטים והתרמודינמיקה, המצביעים על פרדוקסים שטרם נפתרו. על פרדוקסים אלה נתמכת הטענה שהיא כיום דעת מיעוט, לפיה מעבר הזמן הוא תופעה אמיתית שכל תיאוריה פיזיקלית בעתיד תצטרך להביא בחשבון.

Any statement about time's apparent passage leads to self-contradiction, hence this aspect of time is absent in physics' formalism. However, modern physics itself is riddled with contradictions. This article explains some well-known effects from relativity theory, quantum mechanics and thermodynamics, which point at some unresolved paradoxes. These paradoxes support the non-mainstream view, according to which time's passage is a real phenomenon, which every future physical theory will have to take into account.

א. נוסח מורחב, אפריל 2009. נוסח קודם פורסם בספר *הזמן*. עורכת: אמיליה פרוני. ירושלים: מוסד ואן-ליר והוצאת הקיבוץ המאוחד, 2004.

מבוא

"בזבזתי את הזמן, ועכשיו הזמן מבזבז אותי!"

המילים המצמררות האלה ששם שייקספיר בפי המלך ריצ'רד השני מזכירות לכולנו את הצד הקודר של הזמן בחיינו: שגיאות גורליות שלא ניתן לתקן, אנשים יקרים שמתו והזדמנויות שהוחמצו. הזמן הוא מצרך יקר, ובכל זאת יש אנשים המתייחסים אליו בקלות-דעת. וכשהם מתעוררים אל המציאות, היקיצה היא מכאיבה. כהד לשייקספיר עונה המלחין הצרפתי ברליוז: "הזמן הוא מורה טוב, אבל הוא הורג את תלמידיו."

מצד שני, קשה שלא לרחם על אלה שכל חייהם עוברים בהצצה בלתי-פוסקת בשעון ומפסידים את הצד היפה של הזמן: את הלידות החדשות, את חסד השנים המוסיפות חוכמה וניסיון חיים, ואפילו את האפשרות סתם "להסתלבט" בלי לחשוב על הזמן. בזיכרון עולה עתה משפט ברוח מנוגדת: אמירתו השובבה של ג'ון לנן "זמן שנהנית לבזבז, לא בזבז."

אנחנו, לפיכך, מקדישים לא מעט זמן להבנת הזמן. מזה שנים רבות שאנו מסתובבים סביבו, כחתולים סביב כד חלב סגור, בניסיון לפתור כמה חידות הקשורות בו. גייסנו את תורות היחסות, הקוונטים, התרמודינמיקה והקוסמולוגיה, ומהן למדנו לשאול כמה שאלות חדשות וגם מצאנו דבר או שניים, ואחרי שהצגנו אותם בכמה כינוסים בינלאומיים וקיבלנו לפעמים שבחים ולפעמים ההיפך (ובכינוס אחד, שהיה פה בירושלים, אפילו צעקות!), הגענו למסקנה שיש משהו בדברינו. מעט ממה שהעלינו ננסה לתאר במאמר זה.

א. הזמן לעומת החלל.

מהי תכונתו הבולטת ביותר של הזמן? התשובה ברורה: הזמן עובר, זורם, רץ; אי-אפשר להישאר ברגע אחד בזמן ובוודאי אי-אפשר ללכת אחורנית בזמן. בכך שונה הזמן בבירור מהחלל: בכל אחד מממדי החלל, יכולים אנו להישאר באותו מקום או לנוע, קדימה או אחורה, לפי בחירתנו. לא כך בנוגע לזמן: הזמן, פשוט, בורח לנו כל הזמן.

והנה, בהיגד הכל-כך הגיוני הזה הזה יש פגם לוגי אחד קטן: הוא מופרך. **הזמן, מעצם הגדרתו, לא יכול לעבור, לא לזרום ולא לברוח.** כי מה מובנם של כל מושגי התנועה האלה? "תנועה" פירושה להיות במקום אחד **בזמן אחד** ובמקום אחר **בזמן אחר**. אם אדם אומר שנסע מביתו אל בית סבתו, כוונת הדברים היא שברגע מסוים היה בביתו, ברגע אחר בבית סבתו, ובכל רגע של זמן נסיעתו היה במקום אחר בין שני הבתים. הזמן על רגעיו, כמו החלל על המטרים שלו, הוא המודד את התנועה. וכאן הבעיה: אם נרצה לומר שה**זמן** עבר/זרם/ברח לגבי אותו אדם, הרי בהתאם להגדרה לעיל נצטרך לומר שה**זמן** היה במקום אחד **בזמן אחד** ובמקום אחר **בזמן אחר**, וזו כמובן שטות. נסו לחשוב, למשל, על השאלה "באיזו מהירות זרם הזמן?", ותראו איך אתם מסתבכים. לשם כך תצטרכו להניח את קיומו של מין זמן-על, שלפי אותו היגיון גם הוא יצריך זמן-על משלו, וכך הלאה בחד-גדיא אין סופי.

לא נצא מהתסבוכת גם אם נאמר שאנו עצמנו נעים בזמן, שכן אז פירוש הדבר יהיה שהזמן עצמו הוא ממד חלל כלשהו שעליו אנו נעים, ושוב תישאל השאלה: באיזו מהירות נעים אנו על ציר הזמן? ושוב נזדקק לממד זמן נוסף וכך לא יהיה לדבר סוף.

והנה, הפיזיקה עושה דבר פשוט עם מעבר הזמן: היא מתעלמת ממנו. לשווא נחפש באיזה חוק מחוקיה התייחסות כלשהי למעבר הזמן. כל מה שנותנים לנו חוקי הפיזיקה הוא כללי התאמה: אם נתונה מערכת מסוימת, ונתונים תנאי ההתחלה שלה, נוכל לומר מה יהיה מצב המערכת בכל רגע ורגע. אבל בכך אין שום רמז שהזמן זורם. קל להמחיש זאת בדוגמה של מפה גיאוגרפית. המפה נותנת לנו התאמה בין קווי האורך או הרוחב של אזורים מסוימים לבין הגובה שלהם מעל פני הים. כך למשל, בישראל, ככל שננוע מזרחה, נמצא את עצמנו במקום יותר ויותר גבוה מעל פני הים ואחר כך יותר ויותר נמוך, עד שנגיע אל הבקעה. אין כאן שום טענה שהארץ "עולה" או "יורדת". גובה הארץ קבוע בכל מקום. הוא "משתנה" רק כשעוברים ממקום למקום. בדיוק באופן זה, הפיזיקה איננה אומרת לנו שום דבר על תנועתו של הזמן אלא רק על ההתאמה בין רגעי הזמן לבין מצבים פיזיקליים שונים. אם ידוע לנו, למשל, הגובה שבו נמצאת אבן מעל לקרקע ברגע שנעזוב אותה נוכל לדעת היכן תימצא האבן בכל רגע נתון:

$$h = h_0 - \frac{1}{2}gt^2$$

במקום h_0 נציב את הגובה ההתחלתי, במקום g נציב את התאוצה הנגרמת ע"י הכבידה (9.8 מטר לשנייה בכדור הארץ), במקום t נציב את השנייה בה אנחנו רוצים לדעת היכן האבן ואז נכפיל את המספר הזה בעצמו. כל שנותר הוא לחלק את כל התוצאה לחצי ואז יתקבל הגובה בו תהיה האבן באותה שנייה. יש לנו, אם כן, שורה של נקודות גובה בהן נמצאת האבן בכל נקודה בזמן. אבל במשוואה זו, כמו בכל שאר משוואות הפיזיקה, אין שום רמז לכך שהזמן עצמו זורם!

כך נוצרת סתירה מהותית בין החוק הפיזיקלי לבין חווייתנו בכל רגע. החוויה אומרת "המצבים השונים של האבן מופיעים ונעלמים בזה אחר זה" ועל כך עונה הפיזיקה: "בחוקים שלי אין זכר להופעה ולהיעלמות הזאת של המצבים. מבחינתי כל הרגעים קיימים יחד ולכל רגע המצב שלו, ממש כמו שכל המקומות במפה קיימים יחד, ובכל מקום קיים הגובה שלו."

ב. איך הזמן הפך בתורת היחסות לממד

בצר לנו, נפנה אל המהפכה המדעית האדירה ביותר שחלה בהבנת הזמן, תורת היחסות. כאן תלך בעייתנו ותחריף. המחיר שתובעת תורת היחסות מהשכל הישר בנושא מעבר הזמן גבוה הרבה יותר מההתעלמות שנוהגת בו הפיזיקה הקלאסית. נקדים ונאמר שדווקא איינשטיין, בניגוד לפיזיקאים רבים, הודה שהמחיר הזה שתובעת תורת היחסות הוא מכאיב במיוחד, אבל לא הציע לכך פיתרון.

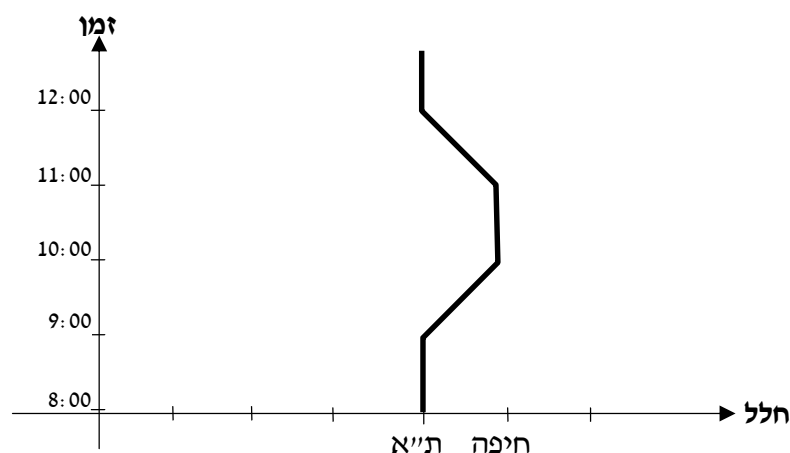
לא כאן המקום להציג את עיקרי תורת היחסות הפרטית – עשינו זאת במקום אחר¹ – ולכן נציג רק את מסקנתה הנוגעת ביותר לענייננו: הזמן, לצד ממדי החלל, הוא הממד הרביעי של היקום.

כדי להסביר כיצד זמן וחלל שלובים ללא-הפרד בתורת היחסות, עלינו להסביר כאן מהו מרחב מינקובסקי, ותחילה נספר משהו על האיש שעל שמו קרוי מרחב זה. הרמן מינקובסקי היה מתמטיקאי ב-ETH בציריך בתחילת המאה העשרים, והוא לא רווה נחת מאחד הסטודנטים שלו שנראה לו עצלן גדול, וששמו היה במקרה אלברט איינשטיין. עברו שנים ומינקובסקי שמע שאותו עצלן פיתח תורה ששמה תורת היחסות. מינקובסקי התלהב מאוד מהתורה החדשה וחיש-מהר

מצא דרך לייצגה באופן גיאומטרי. תארו לעצמכם, אמר, עולם דו-ממדי, רק אורך ורוחב, שהממד השלישי, הגובה, הוא לגביו הזמן. בעולם כזה, "העתיד" פירושו "למעלה" ו"העבר" פירושו "למטה", וה"עכשיו" הוא רק חתך דו-ממדי דק של העולם התלת-ממדי. כל נקודה בעולם שטוח זה היא בעצם קו בממד השלישי, המתמשך מהעבר אל העתיד. קו זה נקרא "קו-העולם" של הנקודה. אם כן, **נקודה** בעולם הדו-ממדי היא **קו** בעולם התלת-ממדי, וצורות דו-ממדיות **כעיגול ומשולש** הן יריעות תלת-ממדיות בצורת **גליל ומנסרה**, וגם צורות תלת-ממדיות אלה מתמשכות מהעבר אל העתיד.

עד כאן המשל, ועכשיו לנמשל. גם ביקום שלנו, אמר מינקובסקי, החלל התלת-ממדי שלנו הוא רק חתך מתוך מרחב ארבע-ממדי הקרוי חלל-זמן. כל הצורות התלת-ממדיות שאנו רואים בעולמנו הן בעצם גופים ארבע-ממדיים, שהם קווי-העולם המתמשכים בחלל-זמן מן העבר אל העתיד. השיפועים והעיקומים של קווי-העולם האלה מתארים את התנועות והתאוצות של העצמים בזמנים השונים.

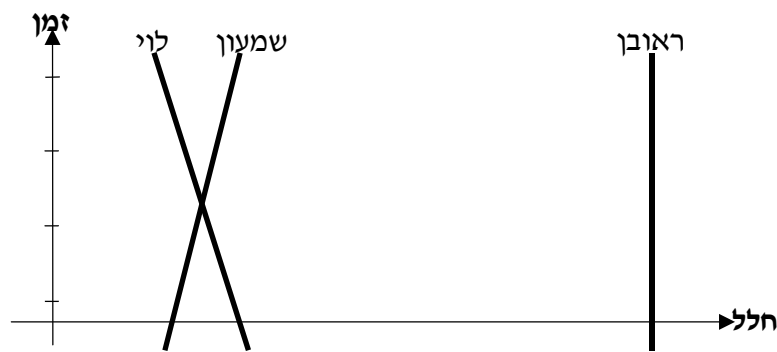
אם נשוב לנקודה, ניתן לראות שקו-העולם שלה מכיל את ההיסטוריה שלה: אם בשעה 9:00 הקו מתעקם לימין ואחר כך מתיישר, פירוש הדבר שהנקודה נעה ימינה מהשעה 9:00 עד 10:00 ואחר כך נעצרה, ובשעה 11:00 החלה הנקודה לנוע חזרה למקומה הקודם. בשיטה זו נוכל לתאר, למשל, את מסעו בן ארבע השעות של אדם מתל-אביב לחיפה ובחזרה (תמונה 1).



תמונה 1

בתמונה 1 השמטנו לצורך הפשטות שניים מתוך שלושת ממדי החלל. החלל כולו מיוצג אם כן ע"י ציר יחיד, אופקי, ואת הזמן מייצג הציר הניצב. לייצוג כזה של החלל-זמן הארבע ממדי בדיאגרמה דו-ממדית קוראים דיאגרמת מינקובסקי. כל זה פשוט ואפילו משעמם.

מבחינת תורת היחסות מתחילים העניינים להתחמם כשמדובר בכמה צופים הנעים במהירויות שונות. בתמונה 2 מיוצגים שלושה צופים. הקו הישר מימין הוא קו-העולם של ראובן, העומד כל הזמן במקומו. שני הקווים משמאל הם קווי-העולם של שמעון ולוי, ומהם ברור ששמעון נע ימינה ולוי נע שמאלה. אפשר גם לראות שבשלב מסוים חלפו שמעון ולוי זה על פני זה.



תמונה 2

נקל לראות כי במרחב מינקובסקי אין זכר לזרימת הזמן: כל הרגעים קיימים יחד. בתמונה 1 ראינו את כל הרגעים בזמן נסיעתו של צופה אחד, וכל רגע קיים לצד הרגעים האחרים מ"למטה" עד "למעלה". לו שרטטנו את כל קו-העולם המפותל של ראובן המייצג את נדודיו בימי חייו היינו רואים את כל הרגעים בחייו – ראובן התינוק, הילד והנער לצד ראובן הבוגר, הקשיש והישיש – קיימים יחד לאורך הקו המפותל ממש כשם שכל המקומות קיימים מבחינתנו יחד.

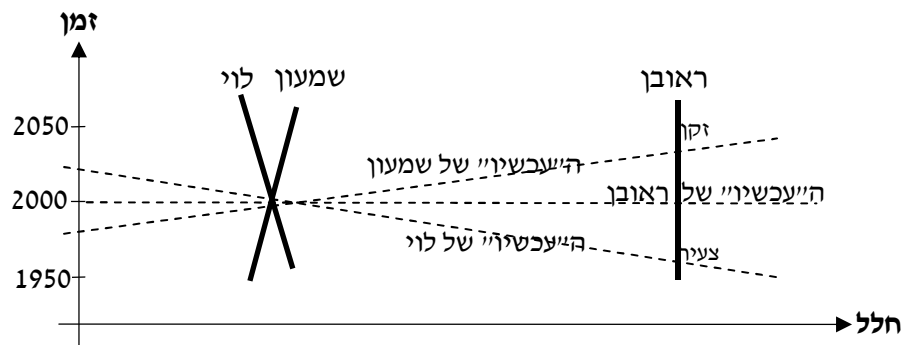
תאמרו: לא ייתכן! הרי ברור שיש רגע מיוחד הקרוי "עכשיו". זו בדיוק הבעיה: במרחב מינקובסקי אין שום רגע מיוחד. אם יהיה רגע כזה, העובר על פני הזמן מהעבר לעתיד (כמו שאומר השעון הטלפוני: השעה שש... השעה שש ודקה... השעה שש ושתי דקות... וכו'), נסתבך שוב בפרדוקסים בהם נתקלנו קודם: באיזו מהירות עובר ה"עכשיו" על פני הזמן? הפיזיקה הקלאסית, כזכור, התעלמה מה"עכשיו", והנה באה היחסות ועושה את ה"עכשיו" עוד יותר בעייתי: יש הרבה "עכשיו"ים.

הנה שאלה הנראית פשוטה: מה עושה ראובן "עכשיו"? תשובת היחסות היא: תלוי מי שואל ובאיזו מהירות הוא נמצא. הנה תמונה 3: מבחינתו של ראובן, הנמצא **במנוחה**, מושג ה"עכשיו" הוא פשוט: המישור האופקי החותך את קו-העולם שלו, נאמר, בשעה 00:00 בראשון לינואר 2000, מייצג את כל האירועים ביקום המתרחשים, מבחינתו, "באותו רגע". אבל כשאנו דנים בשמעון ולוי, הנמצאים הרחק משם **בתנועה**, אומרת היחסות משהו מוזר: ה"עכשיו" של כל צופה – **הקו המקווקו בתמונה – הוטה באלכסון בהתאם למהירותו.**

(במאמר מוסגר, למרות שאיננו מסבירים כאן את יסודות תורת היחסות אלא רק כמה ממסקנותיה הרלוונטיות, נזכיר מהי הנחת-היסוד הייחודית של התורה שממנה נובעות מסקנות אלה: **מהירות האור קבועה לכל הצופים.** כלומר, אם תמדדו את מהירותה של קרן-אור בעודכם עומדים, או בורחים מפניה, או רודפים אחריה – תמיד תקבלו 300,000 ק"מ בשנייה. כדי לעמוד בדרישה מטורפת זו של איינשטיין, נאלץ הטבע ליצור את כל עיוותי החלל והזמן שיתוארו להלן. את הדרך בה נובעות המסקנות מהנחה זו לכו ולמדו בעצמכם.)

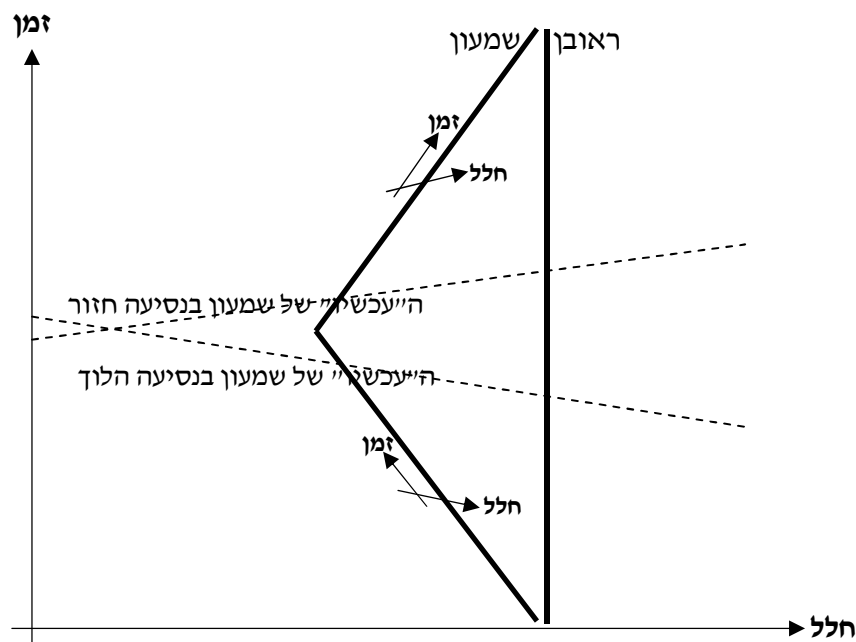
נשוב אם כן לרגע בו חולפים שמעון ולוי זה על פני זה. כדי שהפרדוקס יהיה מורגש נניח שניהם נעים במהירויות הקרובות למהירות האור – כי במהירויות אלה נעשים האפקטים של היחסות מורגשים – וכי שניהם נמצאים במרחק הרבה מיליוני קילומטרים מראובן (תמונה 3). נשאל את שניהם באותו רגע: "מה עושה ראובן עכשיו?" על פי ההיגיון היחסותי, ישיב שמעון:

ראובן יושב עכשיו על ספסל בבית-אבות עם חבריו הזקנים, שותה תה ומפליג בדיבורים על מחושיו. ואילו לוי יאמר: לא, ראובן יושב עכשיו עם מוצץ בעגלה בה מובילה אותו אמו לפעוטון! אם כן, בחיי ראובן – ובחיי כל אחד מאתנו – יש אינספור רגעים ובהם אינספור מצבים, מינקות עד זקנה, ועל פי תורת היחסות כולם אמיתיים באותה מידה כי כל אחד מהם הוא "עכשיו" לגבי צופה כלשהו, איפשהו מתישהו.



תמונה 3

נו באמת, אתם אומרים, אלה סתם התפלספויות. אבל תורת היחסות מבטיחה – ומקיימת – שאם אכן ינועו עצמים במהירויות קרובות-אור, אכן תתגלנה תוצאות ממשיות של שינויי הזמן שתוארו לעיל. הנה נפשט את המקרה הקודם ונסתפק רק בשני צופים: ראובן נשאר גם הפעם במצב מנוחה ואילו שמעון מתרחק ממנו תחילה ואחר-כך שב אליו במהירות קרובת-אור (תמונה 4).



תמונה 4

מה יקרה בזמן נסיעתו של שמעון הלאה מראובן? אם יציץ אחורנית אל שעון ראובן, יראה שזה האט את מהלכו. תלונה דומה ישמיע ראובן על שעונו של שמעון המתרחק. לכאורה אלה הן

סתם אשליות אופטיות: כשאדם בורח מפני שיעון, רק טבעי הדבר שאותות האור הרודפים אחריו ישיגו אותו בתדירות נמוכה יותר וכך יהיה נדמה לו שהשיעון מאט. וכן להיפך: כשהוא רץ לקראת השיעון, אותות האור מהשיעון יגיעו לעיניו בתדירות גבוהה יותר ולכן יהיה נדמה לו שהשיעון ממחר. הוא הדבר כשהצופה עומד והשיעון בורח ממנו או רודף אחריו: השיעון יראה מאיט או ממחר.

בשביל זה צריך את תורת היחסות? כן, כי תורה זו מודיעה: כשמדובר במהירויות קרובות-אור, זו כבר לא אשליות אופטית – השיעונים **באמת** ימהרו ויפגרו בצורה מורגשת! רוצים הוכחה? בבקשה: כשיהפוך שמעון את ההגה וישוב אל ראובן, תתהפך התופעה ושיעון ראובן יחל למהר בעיניו. ראובן, מצדו, יודיע גם הוא ששיעונו של שמעון החל למהר בעיניו. לכאורה הכל יתאזן, אבל לא: התמונה אינה סימטרית מפני שרגע המעבר מ"איטי" ל"מהיר" לא יופיע אצל שני הצופים באותו רגע. שמעון יראה את שיעון ראובן עובר מ"איטי" ל"מהיר" הרבה לפני שראובן יראה שינוי זה בשיעונו של שמעון. ולכן, החשת שיעון ראובן בעיני שמעון בחלק השני של מסעו (החזרה הביתה) תארך יותר מהפיגור שפיגר בחלק הראשון (היציאה לחלל). עשו בבקשה גם אתם את החישוב ותגלו אסימטריה זו בעצמכם. התוצאה: **סך-כל שינויי הזמן היחסיים האלה של שני הצופים צריך להסתכם בפיגור "נטו" בשיעונו של שמעון**. אשליות אופטית? ממש לא – המדובר בתוצאה פיזיקלית: כשיחזור שמעון ויפגוש את ראובן, יגלה ששיעונו מפגר "על באמת" ביחס לשיעון חברו. וכמובן שלא מדובר כאן רק בשיעונים אלא גם **בזמן עצמו**: בשובו יגלה שמעון שראובן, הצעיר ממנו, הוא כבר ישיש מופלג ואילו לגבי שמעון נמשך כל המסע לחלל רק כמה ימים! את הניסוי הזה כבר הצליחו לעשות – אמנם לא עם אנשים, כי עוד לא קיימת הטכנולוגיה המאפשרת מסע במהירויות כאלה, אלא עם חלקיקים הנעים במהירויות קרובות-אור – והאטת הזמן היחסותית הוכחה בדיוק מלא.

אם צופה כלשהו יכול לטעון שה"עכשיו" שלו חל בו-זמנית עם העבר של צופה מרוחק, יש כאן הזמנה לכל מיני פרדוקסים. אפשר למשל, שלוי ישלח לראובן הילד מסר ובו הוא מספר לו בלגלוג כי חטף אותו בבגרותו ומכר אותו לשודדים בירכתי הגלקסיה, מה שיגרום לינוקא לשלוח טיל שיחסל מראש את החוטף המרושע, ובכך ליצור תסבוכת לוגית: מי לגלג על ראובן?

אל תסתבכו, משיבה תורת היחסות, כי אני פשוט לא מאפשרת מצבים כאלה. כדי שמישורי ה"עכשיו" של שמעון ולוי יהיו שונים לגבי ראובן, צריכים שמעון ולוי להיות **רחוקים** מראובן הרבה שנות אור. במצב זה, אמנם לוי יידע לחשב כי "עכשיו" ראובן עודו ילד, אך אם ירצה לשלוח אליו מסר, המסר יגיע לא לראובן הילד אלא לראובן הזקן. הוא הדבר לגבי שמעון: מבחינתו, "עכשיו" ראובן ישיש מופלג, אך הוא ייאלץ לחכות שנים רבות עד שיגיעו אותות האור מישיש זה. בדרך זו, למרות כל האפקטים המוזרים המתחייבים ממנה, שומרת היחסות על שפיות בסיסית של היקום. בשפה המקצועית: היא משמרת את יחסי הסיבה-תוצאה, וזו בהחלט התחשבות נחמדה מצידה.

העובדה שמישור ה"עכשיו" מוטה בהתאם למהירותו של הצופה אומרת משהו חשוב על החלל והזמן: הם יכולים להתערבב זה בזה. חשבו, לדוגמא, על האורך והרוחב של עצם כלשהו. הרי "אורך" ו"רוחב" הם, בסך הכל, ממדים שרירותיים: רשאי אדם להטות 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" של צופה אחד

הוא תערובת של ה"זמן" וה"חלל" של חברו הנע לעומתו. חשוב לזכור, עם זאת, כי תערובת הזמן והחלל בתורת היחסות אינה תערובת פשוטה של מימדים: **הזווית בין צירי הזמן והחלל, שבמערכת נחה נראית לצופה זווית של 90 מעלות, נעשית זווית חדה או קהה יותר לפי תנועת העצם או הצופה**. לכן, בתמונה 4 הוספנו לצד קו-העולם של שמעון את מערכת הצירים שלו (בהקטנה), השונה בבירור מזו של ראובן המצוי במצב מנוחה.

מה, בסופו של יום, הרווחנו מהוספת הממד הרביעי לשלושת ממדי היקום? איינשטיין עצמו שאל שאלה זו, ובנימה לגלגנית, כששמע על התיאוריה של מורו לשעבר: "שמעתי שמתמטיקאי אחד הצליח לעשות את תורת היחסות שלי בלתי-מובנת." לא מדויק: מינקובסקי טען שבדרך זו ניתן להראות בצורה ברורה יותר את האפקטים היחסותיים המופיעים כשגוף נע במהירות קרובת-אור, כמו התקצרות הסרגלים או האטת השעונים. כפי שיתברר מיד, הצדק היה אתו: הייצוג הגאומטרי הוא חיוני לתורת היחסות.

כמה שנים חלפו (סליחה: על-פי שני מוריניו המכובדים, **נדמה** היה שחלפו). מינקובסקי, כמה חבל, נפטר צעיר, ואיינשטיין מצא את עצמו עובד ממש בפרך על פיתוח תורה רחבה יותר, שתוכל לטפל בתנועות שלגביהן לא ידעה תורת היחסות הפרטית מה לומר. היחסות הפרטית עוסקת רק בתנועות **קבועות**. עכשיו דרש איינשטיין לדעת מה קורה כשיש **תאוצות**, כלומר תנועות שבהן המהירות או הכיוון משתנים. רק אחרי עבודה של הרבה שנים שהיו בה הרבה נפילות ועליות, למד איינשטיין להעריך את ההישג של מורו. הוא הבין **שהכבידה היא עיקום של החלל-זמן הארבע-ממדי סביב המאסה**. אם עזבתם משהו והוא נפל לרצפה, המשהו הזה לא באמת נפל. הוא נשאר במקומו כפי שמורה החוק הראשון של ניוטון. אולם, בשל עיקום החלל-זמן, ה"במקומו" הזה קרוב יותר לאדמה בכל רגע וכך מתקבלת התנועה המואצת של נפילה. הציצו בקווי-העולם בתמונות הקודמות ודמיינו שהנייר או המסך שעליו אתם קוראים מאמר זה נעשה קצת שקוע משני צדי קו-העולם. בדרך זו נוצר שקע מוארך, שקו-העולם עובר במרכזו, ושקע זה מעקם קווי-עולם אחרים כלפי מרכזו. כך תקבלו מושג אינטואיטיבי על הרעיון המדהים של איינשטיין בנוגע לכבידה. כך נולדה תורת היחסות הכללית.

אגב, יש פיזיקאים, כמו ג'ון וילר המנוח, שמאוד כועסים כשמישהו מדמיין ממד נוסף כדי להסביר את עיקום ארבעת הממדים של החלל-זמן: "שיהיה ברור", הם מזהירים, "**אין** ממד חמישי!" אפילו היום, כשתורת המיתרים ממציאה כל מיני ממדים חדשים, אלה הם ממדים "מכורבלים" (אל תבקשו מאתנו להסביר את זה, אנחנו ממילא לא מתפעלים מהתורה הזאת) ואין יותר משלושה ממדי חלל. בכל זאת, לצרכי ההבנה, לא יקרה שום אסון אם תסביר לעצמכם בדיוק בדרך זו את הרעיון המרכזי של היחסות הכללית: דמיינו את החלל-זמן כציור דו-ממדי שהמשטח עליו ציירתם נעשה **שקוע** בכל מקום בו ציירתם קו-עולם.

הבה נסכם: תורת היחסות הכללית מראה שהחלל-זמן הוא לא סתם מין לא-כלום כזה שדברים קורים בו. החלל-זמן הוא עצמו **משהו**, שנעשה עקום במקומות בהן יש מאסה ומשפיע על תנועתן של מאסות אחרות. דומה הדבר לבמה השוקעת או מתרוממת מתחת לרגלי השחקנים המציגים עליה. כך הופך החלל-זמן אף הוא לשחקן פעיל במחזה ששמו "היקום".

ג. מדוע הזמן לא עובר

ברור, אם כן, איך ההצגה הגאומטרית של החלל-זמן בתורת היחסות מסלקת לחלוטין את מהותו החולפת של הזמן. ביחסות הפרטית מתואר היקום כאוסף של מצבים, מימי קדם ועד העתיד הרחוק, שכולם קיימים "עכשיו" באותה מידה. באה היחסות הכללית ומחמירה עוד יותר את ביטול זרימת הזמן: החלל-זמן הארבע-ממדי הוא לא סתם הפשטה מתמטית אלא מין "יריעה" ממשית, שמתעקמת סביב מאסות, "מתנקבת" בלב חורים שחורים, ומי-יודע, אולי גם יוצרת מנהרות ממקום וזמן אחד למקום וזמן אחר.

לכן, למרות שהיחסות אינה מאפשרת פרדוקסים של נסיעה בזמן, כמה פיזיקאים ידועים חיפשו דרכים מתוחכמות לעשות מסעות כאלה. כך, למשל, מצא המתמטיקאי קורט גדל (מגלה משפט אי-השלמות הידוע) פתרונות לתורת היחסות הכללית שבהם החלל-זמן מתעקם סביב עצמו בצורה המאפשרת לאדם לחזור לעברו.² עתה החל גדל להוגיע את מוחו בשאלה מה יקרה, למשל, אם יחזור אדם לעבר ויהרוג את אביו. הוא "פתר" את הבעיה פשוט ע"י הנחה שרירותית שאדם כזה תמיד ייכשל, למשל, שהכדור ייתקע לו באקדח וכדומה. הסיפור, כידוע, נגמר לא טוב: גדל סיים את חייו באופן טראגי אחרי שאיבד את שפיותו, עם או בלי קשר לאובססיה על אנשים המחוסלים בידי צאצאיהם. סטיבן הוקינג וקיפ תי'ורן³ הציעו גם הם תרחישים פנטסטיים המבוססים על תורת היחסות הכללית. לכאורה, אלה מודלים נועזים, אבל בכל הקשור לשאלת מעבר הזמן הם שמרניים עד שיעמום. מי שטוען שניתן לנסוע אל העבר כשם שניתן לנסוע להודו, מניח שאירועי העבר קיימים לצד אירועי ההווה כשם שהודו קיימת לצד ישראל. חזרנו, אם כן, לתמונת היקום הקפוא של איינשטיין ומינקובסקי.

פילוסוף נודע, הנס רייכנבאך, סיפר איך באמצע הסרט "רומיאו ויוליה", לפני שיוליה שתתה את הרעל, צעק אליה מישהו מהקהל: "אל תעשי את זה!" כולנו מגחכים על טעות כזאת, אמר רייכנבאך, אבל אנחנו צריכים להבין שגם העולם הממשי שלנו הוא כמו הסרט. כל מה שיהיה בעתיד "כבר" קיים, לצד מה שקורה עכשיו ולצד מה שכבר קרה בעבר. כל המצבים קיימים יחד לאורך ממד הזמן, כשם שכל המקומות קיימים יחד לאורך ממדי החלל, כמו תמונות בסרט.

הקץ, אם כן, למושג ה"אני" היחיד. אם יאמר מישהו "הבוקר אכלתי דייסה ובערב אוכל שניצל" נצטרך לומר לו כי אותו אדם שאכל דייסה "עודו" אוכל אותה, זה שיאכל שניצל "כבר" אוכל אותו, ואילו זה המדבר אלינו הוא קטע אחר מקו-העולם של אותו אדם. אם ניקח אמירה זו ונפתח ממנה תמונת עולם עקבית, נגיע למסקנה הבאה: כל אחד מאתנו איננו "אני" אחד, אלא הרבה "אני"ים. בכל רגע ורגע של חיינו קיים "אני" אחר, דומם וקפוא, כמו תמונה בודדת בסרט, החווה את מה שקורה באותו רגע.

מהיכן, אם כן, האשליה שהזמן עובר? גם לכך יש לפיזיקה תשובה משכנעת. החוק השני של התרמודינמיקה, שעוד נתעמק בו בהמשך, גורם לכך שהזיכרונות האגורים במוחם של ה"אני"ים הרגועים האלה מסודרים כך שכל אחד מהם נושא זיכרונות של ה"אני"ים הנמצאים בעבר ולא של אלה הנמצאים בעתיד. מכאן האשליה שאנו "אני" אחד: כל "אני" רגעי נושא את הזיכרונות של קודמיו. לא לחינם אמר הפיזיקאי הנודע אדינגטון כי המשפט "כל יום אני מרגיש טוב יותר" צריך, על פי תורת היחסות, להתנסח כך: "הצד של קו-העולם שלי הפונה לעתיד מרגיש יותר טוב מהצד הפונה לעבר." כך מקיץ גם הקץ לרעיון הבחירה החופשית: **העתיד לא ניתן לשינוי יותר**

מאשר העבר. שימו לב שזוהי טענה שאי-אפשר להוכיח או להפריך אותה. אם יחליט אדם סתם כך לנגוח את הקיר כדי להוכיח שיש לו רצון חופשי, נסביר לו באדיבות כי גם ההחלטה לנגוח את הקיר, שבאה בעקבות ההתמרמרות על הידיעה שהעמיד כבר קיים, הייתה אף היא "כבר" קיימת בזמן.

השקפה זו ידועה כהשקפת "היקום הקפוא" (Universe Block) והיא מקובלת על הרוב הגדול של הפיזיקאים. שיהיה ברור: הדברים הללו אינם פרשנות מסוימת לתורת היחסות. **הם נובעים ממנה באופן לוגי.** איינשטיין עצמו היה מוטרד מכך שבפיזיקה אין מקום למעבר הזמן. הפילוסוף רודולף קרנאפ, ששוחח אתו בנושא זה, סיפר שאי-יכולתו של המדע להסביר את ההתנסות שלנו, שלפיה ה"עכשיו" שונה מן העבר ומן העתיד, הייתה בעיני איינשטיין "עניין של ויתור כאוב." "יש משהו ב'עכשיו', אמר איינשטיין, 'שפשוט נמצא מחוץ לתחום המדע'".⁴

ד. מדוע דווקא כן

הכל טוב ויפה, התמונה הזאת באמת עקבית ולא ניתן לסתור אותה, ובכל זאת היא משאירה אותנו עם תחושה לא נוחה שמישהו פה לא מבין משהו. נכון, היחסות הראתה שהזמן הוא אחד מארבעת ממדי היקום, לצד ממדי החלל. ובכל זאת יש הבדל עקרוני בין ממדי החלל והזמן: בחלל יכול אדם לעמוד במקומו או לנוע קדימה ואחורה, בעוד שאין דרך לעמוד בזמן ובוודאי שלא ללכת אחורנית ולשוב אל העבר. אם הזמן הוא רק ממד, מדוע אנחנו חווים אותו בצורה כה שונה משאר הממדים?

ואכן, היחסות עצמה מבדילה את הזמן משאר הממדים בכך שקווי-העולם מתמשכים תמיד לאורך הזמן (אם כי הם יכולים לנטות עד 45 מעלות, שיפוע המייצג את מהירות האור), אבל לעולם לא נראה קו-עולם הנמתח לאורך אחד מממדי החלל. בנוסף יצרה היחסות הבדל עמוק אף יותר בין הזמן לבין שאר הממדים: משפט פיתגורס, כידוע, מורה איך למצוא את המרחק בין שתי נקודות בחלל התלת-ממדי: נמדוד את הבדלי האורך, הרוחב והגובה ביניהן, נעלה כל אחד מהגדלים האלה בריבוע, נחבר אותם וכך נמצא את ריבוע המרחק בין הנקודות:

$$l^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2$$

בחלל-זמן, לעומת זאת, אם אנו רוצים למצוא את ההפרש בין אירוע במקום אחד ובזמן אחד לבין אירוע אחר במקום שני ובזמן שני, עלינו לחזור על התרגיל בארבעה ממדים, אבל את ממד הזמן בריבוע נצטרך לא להוסיף אלא להחסיר!

$$\Delta s^2 = \Delta x^2 + \Delta y^2 + \Delta z^2 - \Delta t^2$$

עכשיו, אם תציצו שנית בתמונה 4, תבינו דבר חדש: איזה קו-עולם ארוך יותר? בגאומטריה הרגילה, ברור שזה קו-העולם של שמעון. אך על-פי "גאומטריית המינוס" לעיל, קו-העולם של

שמעון הוא דווקא **הקצר** יותר, ולכן יוצא שמעון הצעיר מבין השניים!⁷ זו גם הסיבה למה כל קרן אור, שהייתה במרחב מינקובסקי היא, כזכור, 45 מעלות) עוברת בעצם **אפס מרחק** בחלל זמן.

אף אחד לא נתן עדיין הסבר של ממש ל"מינוס" הזה של ממד הזמן, אבל עבורנו יש כאן עוד חיזוק לחשד שיש משהו בזמן שהפיזיקה – כולל, עם כל הכבוד, תורת היחסות – פשוט לא מבינה עדיין.

ה. על מוקדם ומאוחר בתורת הקוונטים

אם היחסות מאכזבת את המבקש הוכחה למעבר הזמן, מה אומרת על כך יריבתה ההיסטורית, מכאניקת הקוונטים? האם הזמן עובר בעולם התופעות הזעירות? תשובתה של התורה הזאת היא – כמה לא מפתיע – "כן ולא".

תורת הקוונטים היא מסובכת,⁵ אבל הפרדוקסים הנובעים ממנה הם פשוטים מאוד: כל אחד יכול להבינם במעט מאמץ, וזו בדיוק הסיבה שהם כל כך חמורים! נציג כאן כמה מהניסויים המפורסמים של תורה זו, המביאים לתוצאות פרדוקסליות, ונבחן את השלכותיהם לגבי טבע הזמן.

הבה נפצל תחילה קרן-אור לשתיים. איך מפצלים אלומת אור? פשוט: אם קרן-אור פוגעת בזכוכית שקופה, היא עוברת כולה. אם היא פוגעת בראי, היא מוחזרת כולה. לפיכך, אם היא פוגעת בראי חצי-חדיר, חציה עובר וחציה מוחזר (תמונה 5).

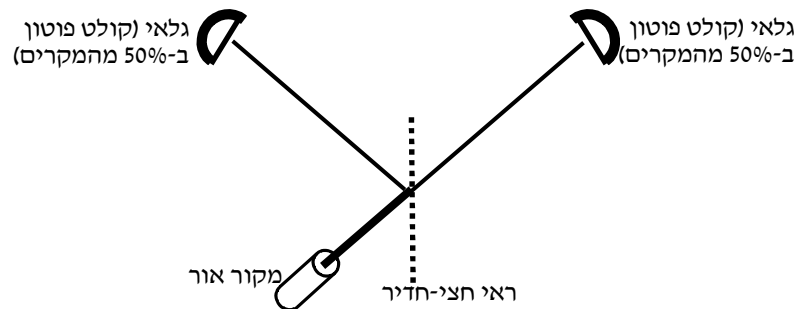
עכשיו נחזור על כל הסיפור באופן קוונטי: נעשה את האור חלש, ויותר חלש, ויותר חלש, ויותר חלש... עד שנגיע ליחידה המינימלית של האור, "קוונט אחד של אור", ובקיצור פוטון. זה הכי קצת אור שאפשר – כך גילה איש טוב אחד בשם פלאנק. לכן, אין דבר כזה חצי פוטון אלא פוטון **אחד**, כמה פוטונים או **אפס**. ולכן, אם נציב שני גלאי-אור רגישים משני צדי הראי החצי-חדיר, תמיד יקלוט רק אחד מהם פוטון בודד, שלם. מתי יהיה זה גלאי ימין ומתי גלאי שמאל? תורת הקוונטים היא תורה הסתברותית: ב-50% מהמקרים יהיה זה הימני, וב-50% השמאלי.

כבר תוצאה פשוטה זו גררה אינסוף ויכוחים בין איינשטיין לחברו הטוב, נילס בוהר. איינשטיין האמין שהפוטון הפוגע בראי החצי-חדיר **פשוט פונה ימינה או שמאלה**. אנחנו, לעומת זאת, פשוט לא יודעים לאן הוא פונה, ולכן כל הסטטיסטיקה הקוונטית היא רק ביטוי לאי-ידיעה

ב. קוראים הבקיאים ביחסות בוודאי ישימו לב כי בניתוח זה טמון גם הפיתרון ל"פרדוקס התאומים" הנודע: אם ראובן ושמעון תאומים בני אותו גיל, למה לא לומר, על-פי תורת היחסות, ש**ראובן** הוא זה שיצא למסע ושב אל שמעון שנותר עומד, ולכן שמעון הוא זה שצריך להיות הישיר בסוף הניסוי? ספרי לימוד רבים פונים כאן ליחסות הכללית ומשיבים כי, מכיוון שרק שמעון הוא החש תאוצה בזמן היפוך ההגה, ברור שתנועתו ולא תנועת ראובן היא המוחלטת. תשובה זו אינה מספקת: אם נאריך מאוד את נסיעות ה"הלוך" וה"חזור" של שמעון, אבל נשאיר את מהירותו בעינה, הרי התאוצה הרגעית ברגע היפוך ההגה תהיה בדיוק אותה תאוצה כמו במסע הקצר (דמיינו שהזיגזג שעושה שמעון בתמונה 4 ארוך יותר אבל הזווית שלו נותרת בעינה). למרות זאת, ההבדל בזמנים יהיה גדול בהרבה. מסקנה: לא התאוצה אלא **המהירות עצמה**, וכן **משך זמן התנועה**, הם הגורמים הקובעים בהאטת הזמן. הפיתרון לפרדוקס התאומים נמצא, אם כן, כבר ביחסות הפרטית, והוא מתקבל מהניתוח שעשינו בפרק הקודם להאטת והחשת אותות השעון המגיעים אל כל אחד משני הצופים, וכן מ"גאומטריית המינוס" שהוסברה לעיל: הקו של שמעון "קצר" יותר ביחס הפוך לאורכו בתמונה.

זו. בוהר, מנגד, טען שהפוטון הוא בסופרפוזיציה, כלומר גם פונה לימין וגם פונה לשמאל, עד שהוא פוגש בשני הגלאים, ורק אז "נסגר על עצמו" מבחינת איפה הוא בחיים, מתממש לגמרי בצד אחד ונעלם בצד השני.

נשמע משוגע? זה בדיוק מה שאיינשטיין אמר, ובקולי-קולות, אבל שלא כמו במקרה של היחסות, הטבע לא מיהר לעבור לדום בכל פעם שאיינשטיין הואיל לומר משהו על הקוונטים. הקטנטנים האלה העדיפו לציית דווקא לבוהר.

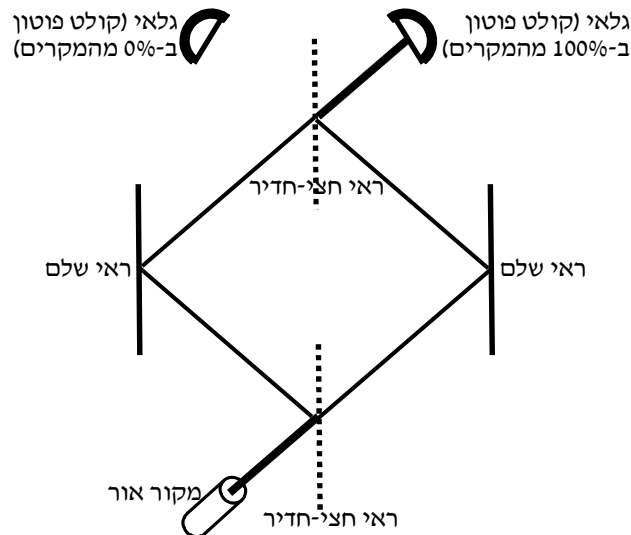


תמונה 5

ובאמת היה זה איינשטיין שמצא, לצערו, נימוק לטובת חברו, והגיש לו בחריקת-שיניים טיעון זה כדי שיוכלו להמשיך בוויכוח. אתם בוודאי מבינים מכך שהיחסים בין שני החברים הטובים נעשו מאוד מורכבים, אפילו טיפה חולניים, ככל שנעשו שניהם זקנים, כי כל אחד מהם כבר למד להיכנס לראש של השני ולדעת מה יהיה צעדו הבא, וכמובן שחברו עשה לו בדיוק אותו דבר, והפיזיקה הרוויחה המון מקרב-המוחות הזה.

אמר איינשטיין: הנה הטיעון המחזק – לצערי – דווקא את בוהר. בואו נשכח לרגע מתורת הקוונטים ונעשה ניסוי בפיזיקה קלאסית הקרוי "התאבכות". נשים משני צדדי הראי החצי-חדיר שתי מראות שלמות, שתהיינה קצת מעליו, וקצת מעליהן עוד ראי חצי-חדיר, ועוד קצת מעליו שני גלאי-אור משני הצדדים. מתקבל מעוין מדויק של מראות (תמונה 6), הקרוי "מתקן מאך-זנדר". למעוין הזה, כפי שגילו שני ממציאיו לפני שנים רבות,³ יש תכונה נחמדה: אם קרן אור פוגעת באלכסון בראי החצי-חדיר התחתון, היא מתפצלת לשני חצאים, הפוגעים בשתי המראות השלמות ומוחזרים בשלמותם אל הראי החצי-חדיר העליון. כאן מתפצלת כל מחצית קרן-האור לשני רבעים, אבל כל ארבעת הרבעים הללו מצטרפים זה אל זה בדרך השונה מהחשבון המוכר לנו: שני הרבעים מצד אחד מבטלים זה את זה ("התאבכות הורסת"), וכך מתקבל אפס אור בגלאי שבאותו צד, ואילו שני הרבעים מהצד השני מחזקים זה את זה ("התאבכות בונה") ויוצרים אלומות אור שלמה הנקלטת בגלאי הנגדי. החישוב עצמו קצת מסובך ומצריך מספרים הקרויים "דימיוניים", אבל תוצאת החישוב היא פשוטה: **כל אלומת אור שתיכנס למתקן הזה מלמטה מכיוון שמאל, תצא ממנו מלמעלה לימין, וכן להיפך.**

ג. זה לא ארנסט מאך הידוע אלא בנו, הרופא לודביג מאך, וגם לזנדר קראו לודביג.



תמונה 6

כל זה ידוע יפה מתורת הגלים של הפיזיקה הקלאסית ולא קשה להסבר. והנה, איינשטיין, כשהעביר בדימונו פוטון בודד במתקן זה, מצא תמיכה מפתיעה דווקא לתורת הקוונטים. תארו לעצמכם פוטון הנכנס למתקן מצד שמאל למטה. לעולם, כזכור, לא נמצא חצי פוטון. לפיכך היינו מצפים שהפוטון יעבור רק באחד המסלולים של מאך-זנדר. אבל הוא **תמיד** יוצא למעלה מימין, ונקלט בגלאי שממול (תמונה 6). נראה, אם כן, שהפוטון הבודד מצליח ליצור התאבכות עם עצמו בכך שהוא מצליח, באיזושהי דרך כישופית, לעבור בשני המסלולים בעת ובעונה אחת!

מבולבלים? אל דאגה. מיד זה יהיה הרבה יותר גרוע. מה שעושה את תורת הקוונטים לתורה פיזיקלית כוללת היא העובדה ש**כל הדברים המוזרים שאמרנו על הפוטון נכונים לגבי כל חלקיק: אלקטרונים, פרוטונים וכל החלקיקים הידועים לנו כחלקיקים בעלי מאסה, ואפילו אטומים ומולקולות שלמות, מתנהגים כגלים לכל דבר כשבודקים את תכונותיהם הגליות**. במילים פשוטות: הם יעברו בשני מסלולים (או באלף מסלולים) בעת ובעונה אחת בכל פעם שיעברו במתקן מאך-זנדר או בכל מתקן המאפשר התאבכות. כפל-פנים מפורסם זה – "דואליות החלקיק-גל" – המאפיין את כל חלקיקי החומר והאטומים הידועים לנו, הוא העושה את תורת הקוונטים לתורה בעלת תוקף כללי.

יכולת זו של חלקיק בודד לעשות צחוק מאינטואיציות בסיסיות של זמן וחלל ממש מזמינה את הפיזיקאי להמציא בעזרתה תעלולים שונים ומשונים. ב-1991 הציעו אליצור ו-וידמן⁶ ניסוי שבו מונחת על אחד המסלולים של מתקן מאך-זנדר פצצה כה רגישה עד שדי בפוטון יחיד לפוצץ אותה. האם אפשר לדעת על קיומה של פצצה כזאת על אחד המסלולים **מבלי לפוצץ אותה?** ההיגיון הפשוט אומר, כמובן, שאם הפצצה מגיבה אפילו לאינטראקציה החלשה ביותר, לא ניתן לגלות אותה וגם להשאיר אותה שלמה. אבל, בהסתמך על התהליך הקוונטי שבו פוטון יחיד "עובר" איכשהו בשני מסלולים, הראו אליצור ו-וידמן איך להגיע למצב שפוטון בודד יוצא מהמערכת דווקא מהצד האסור, קרי, למעלה משמאל. אם הסיפור לא נגמר בפיצוץ, אות היא שהפוטון עבר במסלול שבו לא הייתה הפצצה, אבל כיוון שהוא יצא מהצד האסור, אות היא שהוא

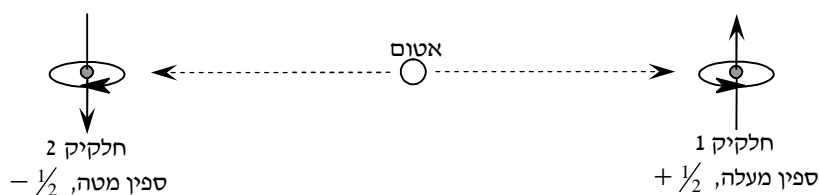
בכל זאת חש בקיומה! בשכלול נוסף הצליחו אנטון ציילינגר וחבריו להעלות את יעילותה של שיטה זו לבדיקת פצצות סופר-רגישות עד כמעט 100%.

נחזור למתקן מאך-זנדר. שינוי קטנטן בו יניב עוד ניסוי מוזר, "ניסוי הברירה המאוחרת". גם כאן, הרעיון המקורי הוא של איינשטיין, אבל ג'ון וילר פיתח אותו בצורה המדגישה את פרדוקס הזמן הנובע ממנו. נתאר לעצמנו מתקן מאך-זנדר גדול מאוד, כזה שנדרשות שנים רבות לפוטון הבודד כדי לעבור אותו. למעשה, טען וילר, יש ביקום כוכבים רבים המפצלים פוטונים העוברים לידם ומאחדים אותם בדיוק כמו מתקן מאך-זנדר, רק שהמרחקים במקרה זה נמדדים במיליוני שנות אור. לכן, כשהפוטונים הללו מגיעים לכדור הארץ, הם מספקים ניסוי ברירה מאוחרת בקנה-מידה אסטרונומי.

נציץ שוב בתמונה 6. נדמה לעצמנו, שוב, שמערך המראות משתרע על פני מיליונים רבים של קילומטרים, וכן נדמיין נסיין היושב ליד הראי החצי-חדיר העליון ומחליט ברגע האחרון, סתם לפי החשק, אם להסיר את הראי או להשאירו במקומו כשיגיע אליו הפוטון. אם יסיר אותו, ייקלט הפוטון באופן אקראי באחד משני הגלאים. פירוש הדבר הוא שהפוטון **התקדם כחלקיק במשך כל השנים** ועבר רק במסלול הימני או השמאלי. לעומת זאת, אם ישאיר הנסיין את הראי החצי-חדיר על כנו, יתגלה הפוטון רק בגלאי הימני, ופירוש הדבר הוא שהפוטון **התקדם כגל במשך כל השנים**, עבר בשני המסלולים ויצר התאבכות עם עצמו. הנה, למעשה, חלומם של כל הסטאליניסטים לדורותיהם: החלטה בהווה משנה את ההיסטוריה כרצוננו! ניתן לומר כי אנחנו המחליטים אם הפוטון "היה" חלקיק או "היה" גל במשך כל התקופה בה עשה את דרכו אלינו.

הניסוי הבא שנציג הוא ניסוי איינשטיין-פודולסקי-רוזן (EPR). הוא הומצא ע"י איינשטיין ותלמידיו כדי להקניט את בוהר, אבל שוב, עם הזמן התברר שתוצאות הניסוי דווקא תומכות בפירושו של בוהר למכניקת הקוונטים.

דמיינו אטום הפולט שני חלקיקים בעלי ספינים⁷ הפוכים: אם חלקיק אחד מצביע כלפי מעלה, השני מצביע כלפי מטה ולהיפך. ניתן לראות זאת בתמונה 7. נניח לשני החלקיקים להתרחק זה מזה מרחק רב כרצוננו ואז נמדוד את הספין של אחד מהם. אם הוא פונה למעלה נדע שהספין של החלקיק השני פונה מטה, וכן להיפך.



תמונה 7

ד. "ספין" הוא תכונה פנימית של חלקיקים, הדומה לסיבוב החלקיק סביב עצמו כסביבון. חלקיקים בעלי ספין $\frac{1}{2}$ הנמצאים בשדה מגנטי יכולים להסתובב רק בשתי צורות: עם כיוון השעון, מה שנקרא ספין $+\frac{1}{2}$ או "ספין מטה", או נגד כיוון השעון, כלומר ספין $-\frac{1}{2}$ או "ספין מעלה".

כאן התחדש הוויכוח בין שני החברים המיתולוגיים במלוא עוזו. פירוש של איינשטיין לניסוי היה פשוט: לשני החלקיקים היו **מראש** ספינים מוגדרים. זו, כמובן, תשובת השכל הישר. כך, אם העלה אדם נעל ימנית מהמגירה, הוא יודע שהנעל שנותרה היא שמאלית. ברור, אמר איינשטיין, שהמדידה לא שינתה את **מצב החלקיקים** אלא רק את **ידיעתו של הצופה** לגבי הספין האחד ולפיכך גם את הידע שלו לגבי הספין השני.

בוהר, איך לא, טען להיפך: המדידה אינה סתם **מגלה** תכונה שהייתה קבועה מראש אלא ממש **יוצרת** אותה ברגע המדידה. כאן, באחד התעלולים המדהימים בתולדות החשיבה הפיזיקלית, ארב איינשטיין לחברו בפינה: אם המדידה **יצרה** את הספין של חלקיק אחד, אמר לו, ואם לחלקיק השני חייב להיות ספין הפוך, אזי חייבת המדידה ליצור, **באופן מיידי**, גם את הספין של החלקיק השני, אחת היא כמה הוא מרוחק! זה היה תעלול נבזי אבל מוחץ, כי ההתנגשות עם תורת היחסות היא בלתי-נמנעת: היחסות הציבה את מהירות האור כגבול העליון למהירות, בעוד שכאן מהירות ההשפעה של חלקיק אחד על משנהו היא אינסופית.

ניסוי EPR היה במקורו ניסוי מחשבתי בלבד, שלא היה טעם לבצעו, כי המחלוקת לא הייתה על התוצאות – שני הספינים חייבים לצאת הפוכים – אלא רק על משמעותן. לכאורה מילא הניסוי את תפקידו בכך שגרם עוגמת-נפש גדולה לבוהר ושמחה אין-קץ לאיינשטיין. אבל שנים רבות מאוחר יותר, כששני החברים כבר לא היו בחיים, בא ג'ון סטיוארט בל ומצא סידור מדידות יותר מורכב, שנותן תוצאה אחת אם הפירוש של איינשטיין צודק, ותוצאה שונה אם נכון יותר פירוש של בוהר! מרגע זה, נוצר אתגר מלהיב לפיזיקאים הניסיוניים. ואכן, החל משנות השמונים נעשה הניסוי פעמים רבות והתוצאות חזרו ואוששו את תורת הקוונטים, בניגוד לציפייתו של איינשטיין.

מה אומר הניסוי הזה על טבע הזמן? במהלך השנים הוצעו לו פירושים שונים וגם משונים. נסתפק כאן בהערה אחת: יש בניסוי זה סתירה עקיפה לתורת היחסות. אנו אומרים "סתירה עקיפה" כי למרות שהניסוי הזה מוכיח שמדידת חלקיק אחד משפיעה בזמנית על החלקיק השני, לא ניתן להעביר אינפורמציה בדרך זו. לכן מחזיקים פיזיקאים רבים בעמדה פוזיטיביסטית, זו של החוק היבש, האומרת שלא הוכחה כאן הפרה אמיתית של האיסור על מהירויות גבוהות ממהירות האור. לדעתנו, זוהי עמדה מתחמקת. ברור שאיינשטיין, לו היה חי לראות את תוצאות הניסוי, היה מודה שתורת היחסות אינה נותנת תיאור שלם של הזמן.

האם יש בזמן משהו החורג מהיחסות והמתיר אפקטים כאלה? כמה חוקרים, בהם יקיר אהרונוב, סבורים שניסוי EPR מתאר מעין "זיגזג" בזמן: המדידה של חלקיק אחד משפיעה, אחורנית בזמן, על המקור המשותף של שני החלקיקים ומשם חוזרת ומשפיעה על החלקיק השני. שנים רבות התייחסו הפיזיקאים בספקנות לצורת הסתכלות זו, והסיבה ברורה: היא חורגת מהתיאור הקפוא של החלל-זמן וטוענת שגם בחלל-זמן "קורים" דברים, מה שמצריך לכאורה זמן-על כפי שצויין בתחילת המאמר. אהרונוב, מצדו, מצביע על שורת תוצאות ניבויים ניסיוניים מפתיעים הנובעים מהתיאוריה שלו, ניבויים שלאחרונה מצאו אישוש בניסוי.⁷ לפנינו תחום ספר של הפיזיקה שעוד ירבה להעסיקנו בשנים הבאות.

ו מדוע אין לזמן כיוון

אבל בואו נודה שלא התקדמנו הרבה עד עתה 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 פתרון לבעיה. ובאמת, אילו הייתה זו הבעיה היחידה הקשורה בזמן, היינו מניחים אותה לפילוסופים. אבל מתברר שיש עוד בעיה הקשורה בזמן, והיא דווקא שייכת לתחום המחקר הניסיוני. זו הבעיה הידועה בשם "אסימטריית הזמן".⁴ אם נלמד אותה, היא בוודאי תשפוך אור על הבעיה הראשונה.

לפני שנבין למה האסימטריה היא בעיה, הבה נראה מה כל כך טוב בסימטריה. חוקי הטבע אינם מבדילים בין ימין, שמאל, למעלה, למטה וכדומה. לו היו עושים הבדלה כזאת זה היה עצוב, כי אז לא היינו יכולים לנסח חוקי טבע כלליים. במילים אחרות: **האדישות של חוקי הטבע היסודיים לכיווני החלל היא-היא שעושה אותם לחוקי-יסוד.**

הנה דוגמא. יושב אדם אל שולחנו ומשחק במצפן, ואחרי מספר ניסיונות הוא רושם חוק טבע חשוב: "מחט המצפן מצביעה תמיד שמאלה." בא חברו לבקרו והוא מראה לו את החוק שניסח, אבל החבר רואה שהמצפן מצביע דווקא ימינה, שהרי הוא מביט בו מעברו השני של השולחן! יש כאן, אם כן, שני חוקי טבע לגבי אותה תופעה, התלויים במיקומו של הצופה, וזו לא תוצאה מרשימה במיוחד. נעריך יותר את הישגם של שני החוקרים הללו כאשר, אחרי הרבה חקירות ודרישות, יגיעו לניסוח חוק כללי יותר: "מחט המצפן מצביעה תמיד צפונה." חוק זה הוא יותר אינווריאנטי (בלתי משתנה) מקודמו, בכך שאינו תלוי במיקומו של הצופה ביחס לשולחן. אבל לא לעולם חוסן: כשיצאו שני המדענים הדגולים, מצוידים במצפנים, לסיבוב הרצאות בעולם להרצות על חידושם, ויגיעו במקרה לאולם הרצאות המצוי באי אלף רינגנס (Ellef Ringness) צפונית לקנדה, יגלו שההדגמה נכשלת ושני המצפנים מצביעים – שוד ושבר – זה לכיוונו של זה! לא יתעצלו השניים ויחפרו תחתיהם עד לעומק כדור הארץ ויגלו שהוא בעצם מגנט ענק המשפיע על כל המצפנים, ושהצפון המגנטי נמצא דווקא באותו אי צפוני. נחוץ, אם כן, חוק אינווריאנטי אף יותר, שלא יאבד את תוקפו אפילו בקטבים המגנטיים. החוק הבא שלהם יאמר, אם כן, כך: "מחט המצפן מצביעה לכיוון הקוטב הדרומי של השדה המגנטי בו היא נמצאת." וזה ללא ספק חוק כללי עוד יותר, שכוחו יפה גם על מאדים ואפילו על נוגה, למקרה שיתחשק לשני החברים לנסוע ולהרצות גם שם על התנהגות המצפנים.⁵

וכמו שאין "צפון" או "דרום" אוניברסליים, אין גם "למעלה" ו"למטה" אוניברסליים. אמנם, כל הדברים שסביבתנו נופלים "למטה" ולא "למעלה", אבל מעברו השני של כדור הארץ, באוסטרליה, שם גרים אנשים טובים שראשם "למטה" ורגליהם "למעלה", נופלים הדברים מבחינתנו, "למעלה." לכן נחוץ גם כאן חוק טבע אינווריאנטי: במקום "דברים נופלים למטה"

ה. למען השלמות נציין כי כדי לעשות את החוק אינווריאנטי לחלוטין, תידרש עוד הרחבה שלו, וזאת למקרה שייקלעו שני החברים לאיזורים ביקום העשויים מאנטי-חומר (אטומים שהאלקטרונים שלהם בעלי מטען חיובי וגרעיניהם בעלי מטען שלילי). הניסוח האינווריאנטי ביותר של חוקי הפיזיקה נשען על משפט ה-CPT (Charge, Parity, Time) לפיו כל תהליך מציית לחוקי הפיזיקה אם נהפוך את כל מטעני החשמליים מחיובי-שלילי ללילי-חיובי, את כל צדדיו מימין-לשמאל ולהיפך, ואת כיווני הזמן מעבר-לעידוד ולהיפך.

נאמר "דברים נופלים לכיוון המאסה המפעילה עליהם כוח כבידה." וכך, במקום מושגים סובייקטיביים, תלויים בצופה, נתנה לנו הפיזיקה מערכת חוקים אובייקטיבית, תקפה לכל צופה, ומשום כך סימטרית לחלוטין.

אם חוקי הטבע הם סימטריים בחלל, הם צריכים להיות סימטריים גם בזמן, כלומר, לא להבחין גם בין "עבר" ו"עתיד". ואמנם, אם נצלם בווידיאו התנגשות אלסטית בין שני כדורי ביליארד, או את תנועתו של כוכב-לכת סביב השמש (בחרנו שתי דוגמאות נטולות חיכוך מסיבות שיובהרו בהמשך), נגלה שהסרט שבידינו ניתן להקרנה מההתחלה לסוף ומהסוף להתחלה מבלי שהתופעה המוקרנת תסתור שום חוק מחוקי הטבע.

פיזיקאית ידועה, אמי נתר, הוכיחה שהסימטריות הללו קשורות לחוקי השימור היסודיים של הפיזיקה. כך, למשל, הסימטריה בזמן נובעת מחוק שימור האנרגיה. כשאנו אומרים "אנרגיה אינה נוצרת יש מאין ואינה נעלמת" כאילו אמרנו "אם הייתה x אנרגיה בתחילת התהליך, תהיה x אנרגיה גם בסופו."

עכשיו, אם נזכור כי בתורת היחסות הפך הזמן לעוד ממד כמו ממדי החלל, מה הפלא שהסימטריה השולטת בחלל חלה גם על הזמן? נחזור שנית לדוגמאות שהזכרנו לעיל: ההתנגשות בין שני כדורי ביליארד ותנועתו של כוכב לכת סביב השמש. שני התהליכים הם א) סימטריים בחלל, כי אם נשקף אותם בראי יהיה התהליך המשוקף תואם את חוקי הטבע בדיוק כמו התהליך המקורי, וכן ב) סימטריים בזמן, כי אם נצלם אותם בווידיאו ונריץ את הסרט אחורנית יהיה התהליך המהופך תואם את חוקי הטבע בדיוק כמו התהליך המקורי.

הקץ, אם כן, לכל כיווני החלל והזמן. מעתה, "ימין", "שמאל", "קדימה", "אחורה", "למעלה", "למטה", וכן "עבר" ו"עתיד" אין להם משמעות בחוקי הפיזיקה. חוקים אלה אינם תלויים בצופה והם חלים על כל ההתרחשויות במידה שווה.

ז. מדוע דווקא יש לו

וכאן מתחילה בעיה המטרידה את הפיזיקה מזה שנים רבות: אמנם הסימטריה בזמן שולטת במקרים האידיאליים, כגון כוכבי-לכת הנעים בחלל הריק, או כדורי ביליארד הנעים ללא חיכוך, או חלקיקי-יסוד, אך די במבט חטוף סביבנו כדי לגלות כי, בחיי היומיום, סימטריה זו פשוט אינה קיימת! כל התהליכים המוכרים לנו, גם אם אינם מבדילים בין "ימין" ו"שמאל", "למעלה" ו"למטה", בהחלט מבדילים בין "עבר" ו"עתיד": אם נצלם בווידיאו קוביית קרח הנמסה במים חמים והופכת אותם לפושרים, הרי הסרט ההפוך – מים פושרים המתחממים מאליהם בעוד שבאמצעיתם נוצרת לה קוביית קרח מבהיקה – הוא מופרך בעליל. כך לגבי גפרורים חדשים ההופכים לפחם ועשן, כך לגבי מאכלים המעלים עובש וכך, למרבה השערוריה, לגבי בני-אדם המזקינים ומתים. לכל הדברים הללו אין היפוכי זמן. אפילו כדורי הביליארד, עקב החיכוך עם השולחן, מציגים אסימטריה, אמנם חלשה, אך היא תלך ותגבר עם הזמן עד שהכדורים ייעצרו. ולא עוד אלא שבכל מקום ביקום בו נסתכל, מצביע חץ הזמן לאותו כיוון: שמשות מתקררות, סלעים מתפוררים, ואם נזכה לגלות שם יצורים חיים, אין ספק שגם ספלי הקפה שלהם יתקררו וגופיהם ייאבקו באותם חוקי בלייה.

זה אם כן מצב חמור: אין "צפון" יקומי או "למעלה" יקומי או כל כיוון חללי אחר שהוא שליט ביקום, שכן כיוונים אלה הם סובייקטיביים ומשתנים ממקום למקום. אבל יש בהחלט "עבר" יקומי ו"עתיד" יקומי. הזמן נבדל, אם כן, מממדי החלל בעוד תכונה מהותית. לגבי האיש מן הרחוב אין בכך שום הפתעה אבל הפיזיקאי השומע חדשות אלה מתעצב אל לבו. אם תורת היחסות שילבה כל כך יפה את כל הממדים, למה בכל זאת שונה הזמן מממדי החלל?

החוק האחראי לקיומו של חץ-זמן זה ולקיומן של התופעות המצערות שמנינו לעיל, נקרא "החוק השני של התרמודינמיקה", וזו לשונו: "בכל מערכת סגורה, יכולה האנטרופיה רק לעלות עם הזמן." (כמה הבהרות: א) "אנטרופיה" לצורך זה זהה עם "אי-סדר." ב) התנאי "מערכת סגורה" בא להוציא מן הכלל מערכות שבהן מתערב מישו, כגון בעל-בית העושה סדר בביתו. בבית זה תלך האנטרופיה ותקטן, אבל בסביבה שמחוץ לבית, שהאשפה מהבית הוצאה אליה והחום שהפעיל בעל הבית נפלט אליה, האנטרופיה תגדל, וכך ייצא החוק השני צודק גם במקרה זה. ג) הניסוח "לעלות עם הזמן" הופך את החוק השני לחוק ייחודי בין כל חוקי הפיזיקה, כי משתמע ממנו שעליית האנטרופיה מבדילה יפה בין עבר ועתיד, כפי שנוכח למגינת-לבו כל מי שאינו מתערב באנטרופיה שבביתו: האנטרופיה בסוף השבוע תמיד תהיה גדולה יותר מזו שבתחילתו ולעולם לא תהפוך. לא הוגן, אבל אלה החיים.

הבעיה מחריפה לאור העובדה שהחוק השני של התרמודינמיקה אינו המקור היחיד לאסימטריות-זמן בעולמנו.⁴ למשל, העובדה שהיקום מתפשט ולא מתכווץ מוסיפה חץ זמן משלה, וניתן לחשוב על עוד כמה תופעות כאלה. האם החיצים האלה נובעים זה מזה? אם כן, מהו חץ-הזמן היסודי? ואולי יש תהליך נוסף שאיננו יודעים עליו, שהוא האבא של כל חיצו הזמן?

השאלה מסובכת מאוד ולכן נתמקד באסימטריית-הזמן הבולטת ביותר, זו של עליית האנטרופיה. ניסיונותיהם של הפיזיקאים להסביר מדוע יוצרת עליית האנטרופיה "חץ זמן" יקומי, בעוד אין שום חץ יקומי כזה בחלל, הביאו ליצירת שתי תשובות מנוגדות, שעל פיהן נחלקה הקהילה המדעית כיום לשני מחנות.

ח. הדעה המקובלת: חץ הזמן הוא מדומה

בתשובה הראשונה מצדדים רוב הפיזיקאים מפני שהיא פשוטה והגיונית. נתחיל בעובדה הידועה: כל אינטראקציה יסודית בודדת היא סימטרית לחלוטין בזמן. התנגשות בין שני אלקטרונים, למשל, כמוה כהתנגשות בין שני כדורי ביליארד אידיאליים, נטולי חיכוך: אם נסריט את ההתנגשות ישר והפוך לא יהיה שום הבדל בין שני התסריטים. כך לגבי פגישה בין אלקטרון והאנטי-חלקיק שלו, הפוזיטרון: שני החלקיקים ירוצו בשמחה זה לקראת זה ויאיינו זה את זה ובמקומם יינצר פוטון, אבל הפוטון הזה יכול, מתי שרק יתחשק לו, להתפרק מחדש לזוג אלקטרון-פוזיטרון שינוסו זה מפני זה על נפשם באותה מהירות בה רצו קודמיהם אל סופם.

מהסימטריה המושלמת הזאת, השולטת בחלקיקים בודדים, הבה נתקדם עוד צעד לעבר התופעות האסימטריות המוכרות לנו בעולם המאקרוסקופי. הנה, למשל, ספל הקפה החם: על פי החוק השני של התרמודינמיקה, צריך הקפה להתקרר בהדרגה ולהעביר את חומו לאוויר החדר. ברמה המיקרוסקופית נראה הדבר כך: "חם" פרושו כי בממוצע, המהירות של המולקולות היא גבוהה. מולקולות המים המהירות פוגעות מידי פעם במולקולות האוויר האיטיות יותר (או

במולקולות דופן הספל, הפוגעות בתורן במולקולות האוויר). בהתנגשויות האלה מאבדות המולקולות המהירות חלק מהאנרגיה שלהן ומעבירות אותה למולקולות שבהן התנגשו, וכך מתקרר הקפה ומתחמם האוויר שסביבו.

עכשיו, אם נתבונן בהתנגשויות המולקולריות הבודדות, נגלה שלא כתוב בשום מקום שלא יכול לקרות ההיפך, לאמור, שמולקולה מהירה של אוויר תפגע במולקולה איטית של מים ותכניס אותה להילוך גבוה. מדוע, אם כן, איננו רואים ספלי קפה קר שואבים חום מאוויר החדר ומתחממים מאליהם? כאן מתערבת תורת ההסתברות: אמנם מדי פעם קורה שמולקולת אוויר מהירה מתנגשת במולקולת מים איטית ומעבירה לה את האנרגיה הקינטית שלה, אבל **רוב** מולקולות האוויר **אינן** מהירות ממולקולות המים, ולכן הסיכוי שמספר גדול של מולקולות אוויר מהירות יפגעו במולקולות המים בזמן מסוים הוא נמוך: לא אפסי, אבל מתקרב מאוד לאפס. נצטרך לשבת כמה מיליארדי שנים – זמן ארוך יותר מגיל היקום – ולצפות בכוס קפה קרה כדי שמשוה מעין זה יתרחש פעם.

החוק השני הוא, אם כן, חוק הסתברותי, החל על גופים גדולים המכילים מספר עצום של אטומים. לכן, כשמדובר בחלקיק בודד, הסיכויים להתרחשותו של תהליך קדימה או אחורה בזמן הם בדיוק 50:50, אבל עם כל חלקיק המתווסף לו משתנים הסיכויים לרעת התהליך ההפוך: בגרם מים, שבו כ- 10^{25} מולקולות, ההסתברות היא $(\frac{1}{2})^{10^{25}}$ שהיא כ- $\frac{1}{10^{1,000,000,000,000,000,000,000,000}}$! כדי להמחיש את סדרי הגודל בהם מדובר: מאז ראשית היקום עוד לא עברו 10^{18} שניות...

אם נחזור עתה ונשאל מדוע מתנהג ספל הקפה באופן אסימטרי, תהיה תשובת הפיזיקאי לכך פשוטה: **האסימטריה בזמן הוכנסה לתהליך זה כבר מלכתחילה**. הרי מלכתחילה היה רוב החום מרוכז בקפה ורק מעט באוויר החדר, ולכן מתקדמים הקפה והאוויר לקראת שיווי משקל. אילו התחלנו בשיווי משקל, היו הסיכויים לשני התרחישים – הקפה מחמם את האוויר והאוויר מחמם את הקפה – שווים. על כן, איזורים זעירים של הקפה הקר היו אמנם מתחממים, אך איזורים אחרים היו מתקררים, הכל על פי המקרה, וכך היה הקפה נשאר בממוצע באותה טמפרטורה של אוויר החדר.

יתרה מזאת, בהחלט ניתן לחשוב על מצב שבו **האוויר מחמם את הקפה** אפילו אם האוויר קר והקפה חם. כל מה שצריך לעשות הוא לסדר מראש את מולקולות האוויר **בדיוק רב מאוד** במיקומים ובמהירויות המתאימים כך שברגע מסוים תתנגשנה טריליוני מולקולות אוויר מהירות במולקולות מים איטיות. זה אמנם בלתי אפשרי בטכנולוגיה של ימינו, אבל בהחלט אפשרי ברמת העיקרון. במילים אחרות, ייתכנו תנאי התחלה מסוימים, אחרי סידור נאות של כל המולקולות ביקום, שיגרמו למציאות הפוכה מזו המוכרת לנו: ספלי קפה פושרים מתחממים בעוד שהאוויר סביבם מתקרר, גפרורים שרופים שואבים עשן ואור מהאוויר ונעשים חדשים, זקנים מצעירים ומתים קמים לתחייה.

אם כך, תהיה השאלה הבאה, מדוע היקום שלנו הוא דווקא כזה ולא אחר? על כך תהיה התשובה: המדע אינו עוסק בתנאי ההתחלה. זו גישה פוזיטיביסטית, כלומר, תשובה של נוהל, אך היא בהחלט מתקבלת על הדעת. כל מה שהמדע יכול לומר הוא "בהינתן תנאי התחלה כאלה וכאלה, יקרה כך וכך (למשל, בהינתן אבן המושלכת למעלה במהירות x ובזווית y היא תגיע חזרה

ארצה תוך ז' דקות).⁷ אבל תנאי ההתחלה עצמם הם עניין שרירותי. ובמיוחד אמורים הדברים כשמדובר ביקום כולו. היקום החל במפץ הגדול עם אנטרופיה נמוכה ולכן יכולה האנטרופיה רק לעלות. באותה מידה יכול היה היקום להתחיל עם אנטרופיה גבוהה אבל עם אטומים מסודרים בצורה מדויקת כך שהאנטרופיה תלך ותדע עם הזמן.

אבל אם כך, יתעקש השואל, מדוע באמת לא החל היקום כך? ועל כך ניתן יהיה לענות לו: זו תשובה שמעבר למדע. נתונים לנו תנאי ההתחלה של היקום, אבל אי-אפשר לדעת מה היה קודם להם, במיוחד אם מביאים בחשבון שבמפץ 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 החוקרים⁸ לשאלת האסימטריה של הזמן: חוקי הטבע עצמם הם סימטריים לחלוטין, ולכן כל האינטראקציות הבודדות בטבע אינן מבדילות בין עבר לעתיד. את האשם באסימטריה יש לתלות באותו מפץ גדול שהתחיל את היקום. אז, מסיבה כזו או אחרת, נוצרו תנאים של אנטרופיה נמוכה ומאז היא יכולה רק ללכת ולגדול. ואם יתעקש איזה נודניק לשאול מה היה לפני המפץ הגדול, שבו נוצר הזמן עצמו, הוא יסתבך כל כך בפרדוקסים לוגיים עד שלא יטריד אותנו יותר.

ט. הדעה הלא-מקובלת: חץ זמן חלש מתחבא בכל תהליך

אבל יש גם תשובה שנייה, והיא אומרת דבר הרבה יותר נועז: **מי אמר בעצם שהאינטראקציות היסודיות הן באמת סימטריות בזמן?**

ברעיון כפירה זה מחזיק, בין השאר, רוג'ר פנרוז איש אוקספורד.⁹ הוא חושד שאפילו באינטראקציות הנראות לנו סימטריות, כגון התנגשות בין שני אלקטרונים, מתחבאת אסימטריה חלשה. לכן, אם קפה חם מתקרר מאליו וקפה קר אינו מתחמם מאליו, הרי זה משום שבכל אחת מההתנגשויות המולקולריות המרכיבות את שני התהליכים, התנגשויות שהן לכאורה סימטריות לחלוטין, יש בכל זאת מין "זיוף" קל מאוד, בלתי-מורגש בכלים של היום.

בטענה זו מסתמך פנרוז על עוד שתי תופעות שאינן סימטריות בזמן: (א) קיימת אסימטריה זעירה בעולם החלקיקי, הקשורה בכוח הגרעיני החלש.¹⁰ זוהי אסימטריה מפליאה מאוד, שהרי היא קיימת גם בחלקיק הבודד ולכן התשובה הסטטיסטית המקובלת (פרק ח) אינה תקפה לגביה. (ב) הפיזיקאים המחפשים תורת שדה מאוחדת, שתסביר את כל כוחות הטבע הידועים כביטויים של כוח אחד, טרם הצליחו במשימתם מפני שעד היום אין ביטוי קוונטי לכבידה. אמר פנרוז: זה בוודאי לא מקרה שהכבידה עצמה יוצרת אסימטריה בזמן: כשהרבה חומר נדחס במקום אחד, הכבידה שלו מושכת אליו עוד חומר, החומר נעשה יותר צפוף, הכבידה הגוברת שלו מושכת עוד חומר, וכך הלאה עד שכל החומר נדחס לנקודה בגודל אפס, שהכבידה שלה כל כך חזקה עד שעיקום החלל-זמן סביבה על פי היחסות הוא בעצם אינסופי – בקיצור, לפנינו **חור שחור**. אל החור הזה יכולים דברים ליפול, אבל לא לצאת ממנו, כי לשם כך יצטרכו לנוע מהר יותר ממהירות האור. הנה, אומר פנרוז, גם בכבידה מתחבא משהו אסימטרי בזמן!

לכן מסיק פנרוז כך: נכון, הסימטריה בזמן היא עיקרון חשוב ומועיל, אבל אם רצוננו להתקדם הבה נשקול את האפשרות שעולמנו, ברמה היסודית ביותר שלו, דווקא **אינו** סימטרי

בזמן, ולכן, כשתגלה סוף-סוף תורת הגרוויטציה הקוונטית, שהיא השדה המאוחד, היא תהיה אסימטרית בזמן.

מרבית הפיזיקאים מתייחסים אל ההצעה הזאת בנוגע לפיזיקה העתידית בערך כמו שיתייחס יהודי מאמין לטענה כי כשיבוא המשיח יהיה מותר לאכול חזיר.¹ מה גם שעדיין לא ברור אם וכיצד אפשר יהיה לקשור אסימטריה קוונטית שכזו לאסימטריה המאקרוסקופית של החוק השני של התרמודינמיקה. לא ייפלא אם כך, שדעה זו נותרה דעת מיעוט.

י. מה קורה כשחושבים על שתי השאלות יחד?

עד כה פעלנו לפי אסטרטגיה מחקרית מסוימת. ראינו שאין פתרון לבעיית מעבר הזמן, ולכן רוב הפיזיקאים רואים בה בעיה פילוסופית ואינם מוטרדים ממנה. אמרנו, אם כן, כך: הבה נלמד את בעיית האסימטריה בזמן, שהיא בעיה ניסויית מובהקת, ונראה מה ניתן להקיש ממנה על הבעיה האחרת. התקווה הייתה ברורה: בכך שנחשוף כישלון אחד של הפיזיקה הקשור בטבע הזמן, אולי נצליח להזיז אותה מעמדתה השמרנית בנוגע למעבר הזמן. לאכזבתנו, התגלה ההיפך: קיומה של אסימטריה הזמן רק מאפשר לפיזיקה להתבצר ביתר שאת בשלילת מעבר הזמן!

כדי להבין איך זה קורה הבה נסתכל בשגיאה מפורסמת של הוקינג, שממנה חזר בפומבי לפני שנים רבות. הוקינג חשב תחילה שגילה הסבר פשוט לחוק השני של התרמודינמיקה: היקום התחיל במצב מסודר מאוד, אבל גם צפוף מאוד. ככל שהיקום מתפשט, נוצר יותר חלל ריק, וכך החל החומר החם לפלוט את חומו לחלל שסביבו. במילים פשוטות יותר, עצם התפשטות היקום יצרה יותר מקום, ולכן יותר אפשרויות לבלגאן, שהוא האנטרופיה.

הוקינג חזר בו מטענה זו בגלל תלמיד שלו, דני לפלאם, ששאל אותו מה יהיה אם יתחיל היקום יום אחד להתכווץ חזרה, כפי שיש תסריטים החוזים שיקרה. האם אז יתהפך כיוון עליית האנטרופיה? אם יש לפנינו ספל קפה ההולך ומתקרר, ובדיוק ברגע זה החל היקום להתכווץ, איך ידעו המולקולות להפוך בדיוק באותו רגע את מהלכן כדי שכוס הקפה תחזור ותתחמם? למשמע שאלה זו נאלץ הוקינג להודות שההסבר שלו היה, איך לומר, די מגוחך. סביר יותר שהאנטרופיה תמשיך לעלות גם ביקום מתכווץ. עליית האנטרופיה, אם כן, אינה נובעת מהתפשטות היקום.

והנה, במהלך דיונים אלה העלה הוקינג טיעון אפיסטמולוגי פשוט אבל גורלי: **אם אכן יתכווץ היקום ויחד אתו תרד האנטרופיה, אנחנו לא נרגיש בכך!** אחרי הכל, איך יודעים אנו שהזמן עובר? רק בגלל עליית האנטרופיה: גלי אור וקול חודרים לאברי החושים שלנו, ושינויים כימיים מתאימים נוצרים בנוירונים שלנו בצורת זיכרונות. אבל אם יתהפך כיוון האנטרופיה ביקום כולו, הוא יתהפך גם בסביבתנו, ובתוך גופנו, ובתוך מוחנו, וכך נלך וניעשה צעירים מרגע לרגע, אבל גם נשכח מרגע לרגע את מה שקלטנו קודם, ולא נרגיש שום היפוך!

1. לטובת הפיזיקאים שאכן זו תחושתם, נציין שדעה כזאת ממש אכן קיימת ביהדות ("אור החיים" ויקרא י"א 8): "למה נקרא שמו חזיר? שעתיד להחזיר להיות מותר."

אם כך, עולה מיד שאלה מטרידה : **כיצד ניתן לדעת שזה לא מה שקורה בדיוק עכשיו?** כיצד יודעים אנו שאיננו חיים ביקום מהופך שהכל בו הולך אחורנית? התשובה מטרידה עוד יותר : אי אפשר לשלול אפשרות כזאת!

בצר לנו, נפנה אל חוקי ההסתברות. אם אי-אפשר לשלול אפשרות כזאת באופן עקרוני, אולי ניתן להראות שהיא מגוחכת מבחינה הסתברותית? לכאורה, זו דרך מוצלחת. כולנו יודעים ש :

א. לא סביר שכל החלקיקים במערכת כלשהי יימצאו ברגע ההתחלתי בתיאום מושלם כך שהאנטרופיה של המערכת תלך ותקטן מאליה.

המשפט הזה הוא נכון וכל הסתכלות במתרחש סביבנו תאשר אותו. אחרי הכל, מעולם לא ראינו כוס מים פושרים שבמקרה התחממה מאליה ויצרה קוביית קרח נאה באמצעיתה. עכשיו, כמדענים, עלינו לתת למשפט הזה ביטוי כמותי. הבה נקשור את ההסתברות לגודל המערכת :

ב. עוד יותר לא סביר שהדבר יקרה במערכת גדולה. ככל שגדל מספר החלקיקים, כך קטנה ההסתברות להיפוך כזה של האנטרופיה.

וגם זה נכון, ומשוואות התרמודינמיקה מאשרות זאת. מה יותר טבעי, אם כן, מאשר להמשיך להחיל משפט זה על המערכת הגדולה ביותר הידועה לנו? נכליל, אם כן, ונאמר :

ג. הכי לא סביר שהדבר יקרה ביקום כולו.

והנה, במשפט ג' יש טעות קטלנית : הוא חסר משמעות לחלוטין! כי איך אנו מבדילים בין תהליך נורמאלי שבו האנטרופיה עולה לבין התהליך המהופך? כשאדם מסתכל על סרט שבו חביתות הופכות מחדש לביצים שלמות, ועשן נשאב חזרה לארובת רידינג, הוא מבין שזה סרט מהופך מפני שהוא מסתמך על חץ הזמן המוכר לו, של גופו ושל היקום סביבו. אבל על מה יסתכל מי שחי בתוך יקום שכולו מהופך? עצם המילים "ישר" ו"מהופך" הן חסרות-משמעות כשמדובר בכל היקום, כי אין לנו שום מסגרת חיצונית לשפוט את מצב היקום על פיה!

כאן בא הפיזיקאי האורתודוקסי ואומר בחיוך של עליונות : אמרתי לכם! כל הדיבורים האלה על מעבר הזמן הם חסרי משמעות ורק מבלבלים את כולם. אם ניפטר ממעבר הזמן, יהיה לנו יקום ארבע-ממדי שכל האירועים בהיסטוריה שלו – עבר, הווה ועתיד – קיימים יחד ומסודרים לפי הסדר על פני ממד הזמן. מי שירצה, יכול לקרוא אותם מה"התחלה" אל ה"סוף", ולטעון שהאנטרופיה עולה, ומי שירצה, יכול לקרוא אותם מה"סוף" אל ה"התחלה" ולטעון שהאנטרופיה יורדת. שתי הדרכים נכונות באותה מידה.

אפשר להמחיש את העיקרון הזה במכתב שכתב ר' אברהם אבן-עזרא לאדם ששאל אותו מה הדין עם חבית דבש שנפל לתוכה זבוב. הראב"ע קבע שהדבש כשר, והוא ניסח זאת כך :

ו	נ	ש	ר	פ
נ	ת	ב	ע	ר
ש	ב	ד	ב	ש
ר	ע	ב	ת	נ
פ	ר	ש	נ	ו

את המסר הזה ניתן לקרוא ישר או הפוך מכל צד והוא יישאר בעינו: "אנו קובעים שהיצור הזללני שהיה בדבש בטל ומבוטל." כך, על פי הפיזיקה המקובלת, ניתן לקרוא גם את ההיסטוריה של היקום פנים ואחור בציר הזמן. מותר לומר:

1. ה'יה היה יקום שבו החלקיקים היו מסודרים במצב המאוד מיוחד בו יש להם אנטרופיה נמוכה. גלקסיות גז לוהט יצרו שמשות חמות שפלטו בהדרגה חום אל החלל הקר עד שקפאו. הפיזור הסופי של החלקיקים ביקום היה לכאורה ערבוביה גמורה, אבל ערבוביה זו שימרה בדייקנות את עקבות המצב המסודר שהיה בתחילה. בין לבין, אנשים נולדו, הזקינו ומתו, וספלי הקפה החם ששתו התקררו אם שתו אותם מאוחר.

ומותר באותה מידה לומר:

2. ה'יה היה יקום מבולגן-לכאורה, שתנועות החלקיקים המפוזרים בו היו מתואמות בצורה כל כך מדויקת עד שיצרו בהדרגה שמשות שהלכו והתחממו עד שיצרו גלקסיות של גז לוהט בעוד האנטרופיה של כל היקום הולכת ונעשית נמוכה. בין לבין, מתים קמו מקבריהם, הצעירו ונעשו תינוקות שחזרו לבטן אמותיהם, והקפה שפלטו מבטנם אל הספלים היה קר אם פלטו אותו מוקדם אבל הלך והתחמם.

שני התיאורים מתייחסים לאותו יקום ארבע-ממדי, ושניהם שווי-ערך ממש כמו הדרכים ההפוכות בהן ניתן לקרוא את ריבוע הקסם של אבן-עזרא. בשניהם פועלים אותם חוקי הפיזיקה, והפעם, כיוון שמדובר ביקום כולו, גם **אותם חוקי ההסתברות**. לפיכך, אם צדקו איינשטיין ומינקובסקי והזמן אינו עובר, שני התיאורים נכונים באותה מידה.

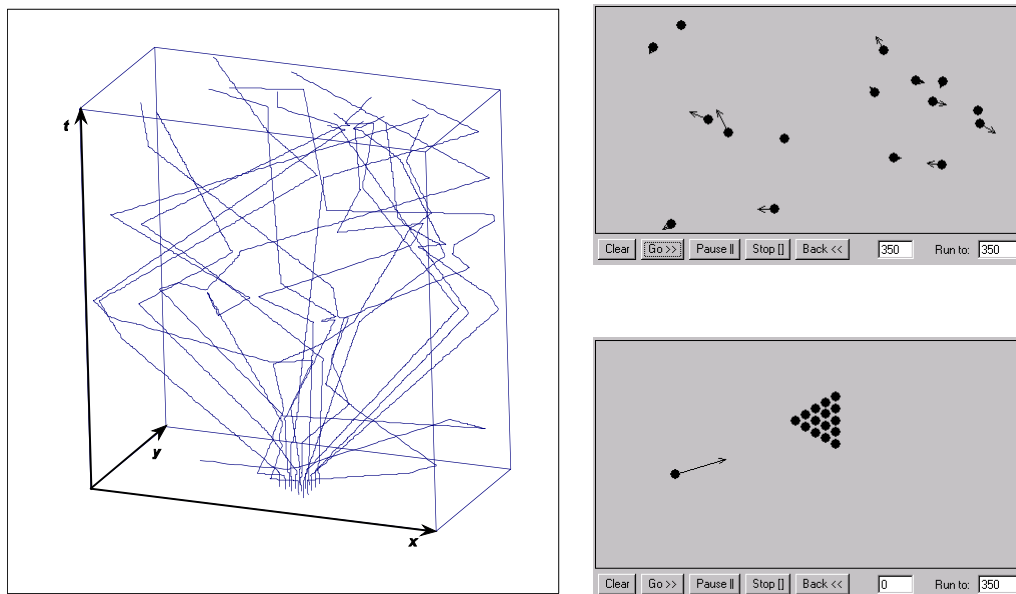
הגענו, אם כן, למבוי סתום: קיווינו שהבעיה הפתוחה של האסימטריה בזמן, שכל הפיזיקאים מודים בה, תאפשר לנו להיאחז במשהו כדי להוכיח שמעבר הזמן אינו אשליה, והנה התברר שהאסימטריה בזמן דווקא נותנת נימוקים טובים לאלה השוללים את מעבר הזמן. עכשיו יש לפיזיקאי השמרן תמונה עקבית מושלמת: יקום דומם וקפוא, שכל האירועים בו – עבר, הווה ועתיד – קיימים יחד לאורך ממד הזמן. כל אחד מאתנו הוא אוסף של אינספור "אני"ים דוממים כאלה, שמהם מורכב קו-העולם שלו המתמשך מהעבר אל העתיד. החוק השני של התרמודינמיקה משתלב כאן בטבעיות ומסביר יפה מדוע יש לנו אשליה שהזמן עובר: כל מקורות האור, הקול וכדומה, מפזרים אנרגיה בכיוון אחד בלבד – שנקרא לו "עתיד" – ולכן אינפורמציה אינה יכולה להגיע אלינו אחורנית מכיוון העתיד. זאת ועוד, החוק השני גם קובע שאם רישום כלשהו (מראה, צליל) הוטבע במוחנו, הוא ישאיר אנטרופיה גבוהה במוחנו, בצורת זיכרונות, בעתיד ולא בעבר. מסיבה זאת, אם נזכור כי על פי תורת היחסות כל אחד מאתנו הוא רצף של "אני"ים רגועים

דוממים, ברור למה בכל "אני" רגעי כזה טבועים זיכרונות ה"אני"ים הרגועים הקודמים, ומכאן האשליה שהזמן עובר.

ובכן, לוותר? להודות שמעבר הזמן הוא אשליה? לא כדאי למהר, כי בתוך התמונה הכמעט-מושלמת הזאת גילינו, לפני שנים אחדות, פגם אחד המסוגל להפוך את כל המצב על פיו. ובעשותנו כן, גם הכנסנו את ראשינו בין שניים מענקי הפיזיקה המודרנית המתכתשים בנושא זה מזה למעלה מעשרים שנה מבלי שאיש מהם יבחין בפגם הזה.

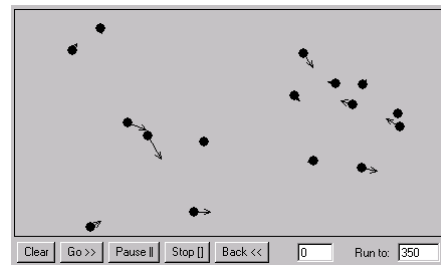
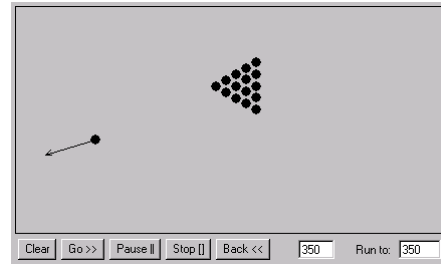
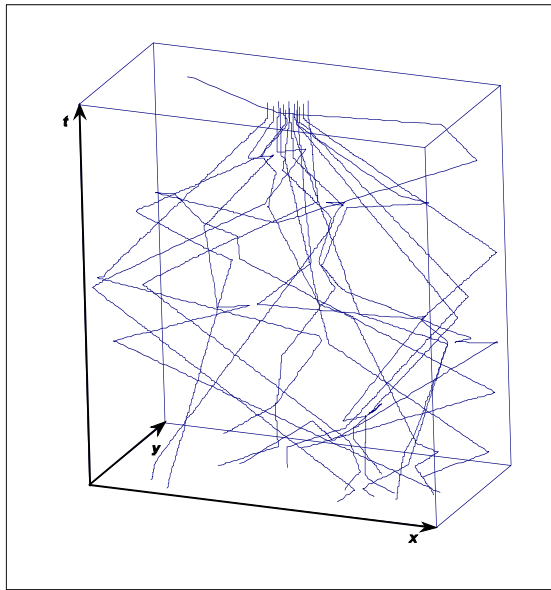
יא. המפנה: שאלת הסיבתיות

כדי להבין כיצד ייתכן מהפך כזה, הבה נכניס לדיון שאלה נוספת הנוגעת לאושיות הפיזיקה המודרנית: האם עולמנו נשלט לחלוטין ע"י הסיבתיות? במילים 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 "האם אלוהים משחק בקוביה" – היא שאלה בלתי-פתורה ולא נתיימר לפסוק בה כאן, אבל איננו יכולים שלא להעיר בתמיהה על העובדה שבכל הספרות העצומה הדנה בחץ הזמן ובמעבר הזמן, אין כמעט התייחסות לשאלת הסיבתיות, למרות שגם אדם שאינו מדען ירגיש מייד באופן אינטואיטיבי ששתי השאלות קשורות קשר הדוק זו אל זו.

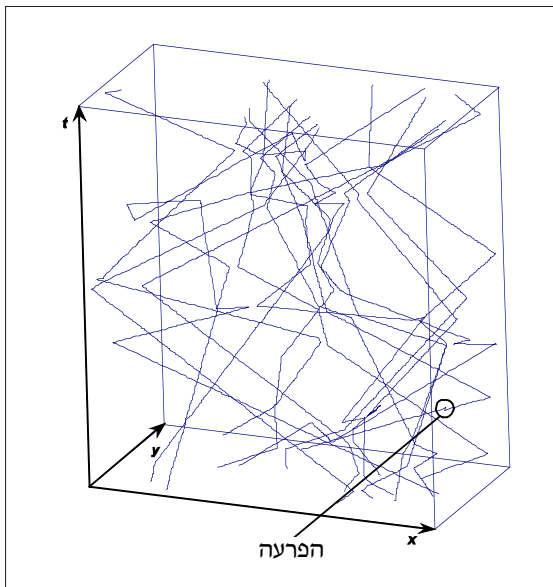


תמונה 8א.

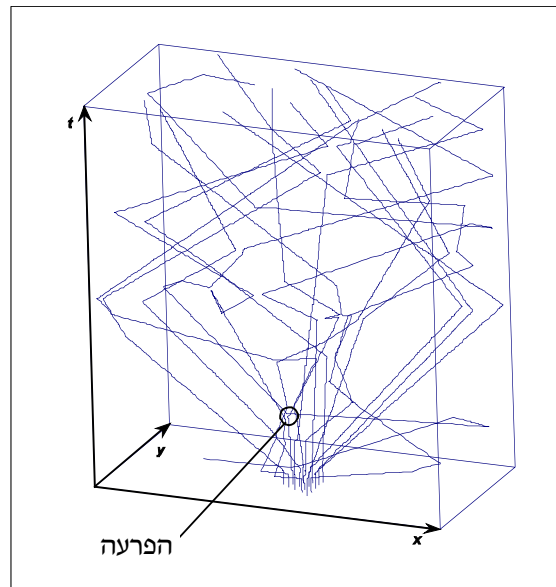
ז. לפני שנים אחדות פרסמנו מאמר בכתב-עת חשוב בפיזיקה (Physical Review) ובו השתמשנו בפרפראזה על אמירתו זו של איינשטיין. על סמך הניסוי שהצענו הסקנו שאולי אלוהים לא רק משחק בקוביה אלא גם מרשה לעצמו להמשיך ולטלטל אותה עד הרגע האחרון לפני נפילתה. העורך כה נבהל מהאמירה ה"דתית" הזאת שעייב את פרסום המאמר עד שסילקנו כל רמז לאלוהים.



תמונה 8ב.



תמונה 9ב.



תמונה 9א.

תמונה 8א ממחישה טענה זו. זוהי הדמיית מחשב המתארת את תנועתם של כדורי ביליארד. מימין למטה ניתן לראות קבוצת כדורי ביליארד מסודרים בצורת משולש, עד שכדור נוסף פוגע בהם ומפזר אותם לכל רוח (ימין למעלה). האנטרופיה, בבירור, עלתה בתהליך זה. מצדה השמאלי של התמונה ניתן לראות דיאגרמת חלל-זמן של התהליך, כלומר את מסלוליהם של הכדורים לאורך הזמן.

בתמונה 8ב הפכנו את הכיוון. בסימולציה ניתנה הפקודה לכדורים בשלב הסופי להפוך את כיווני תנועתיהם. חיש-מהר, יתארגן הבלגאן מחדש למשולש יפה שיפלוט חזרה כדור בודד למקום שממנו בא. גם כאן, משמאל התמונה מופיעה דיאגרמת חלל-זמן של התהליך המהופך.

מה שנזכיר עכשיו הוא כמעט טריוויאלי, וכל סטודנט מתחיל למדעים יודע אותו, ובכל זאת, כמעט איש מבין הפיזיקאים הדנים בשאלת מקורו של חץ-הזמן לא שם אליו לב: **בעולם שאינו סיבתי לחלוטין, תהליך א' הוא אפשרי בהחלט בעוד שתהליך ב' נדון לכישלון.** הנה איור 9א: חזרנו על התהליך הראשון בתוספת "זיוף" קל – הזזנו מעט את אחד הכדורים במהלך הניסוי. התוצאה: ההבדל אינו מורגש כי האנטרופיה גדלה גם הפעם. לעומת זאת, באיור 9ב הכנסנו את הזיוף לתהליך ההפוך, שהיה אמור להוריד אנטרופיה, והתוצאה היא הרת אסון: מרגע ההתערבות, השתלט מחדש האי-סדר והרס את כל ההיפוך.

בניסוח המקובל על הפיזיקאים נאמר כך: תהליך נורמלי, שהאנטרופיה שלו עולה עם הזמן, אינו רגיש לתנאי ההתחלה, ואילו אותם תהליכים נדירים שהאנטרופיה שלהם יורדת עם הזמן, הם רגישים ביותר: כל תהליך כזה מחייב תנאי התחלה מדויקים לאין-שיעור וכל סטייה מתנאים אלו תגרום לו להפוך מחדש לתהליך נורמאלי, מגדיל אנטרופיה. יקיר אהרונוב ביטא עיקרון זה בצורה קולעת: אם נוציא תולעת אחת מקברו של אדם, אזי שום היפוך בזמן של התהליכים הקורים בקבר לא יחזיר אותו לחיים.

נכון, זה ידוע לכל, אבל יש לעיקרון זה השלכה מיידית על טבע הזמן: **בהינתן מערכת סגורה שיש בה אירוע לא-סיבתי אחד, אזי האנטרופיה שלה תלך ותגדל, החל מאותו אירוע, ללא קשר לתנאי ההתחלה של אותה מערכת!** למרות שחץ הזמן באותה מערכת הצביע תחילה לכיוון ההפוך מזה של היקום, הרי מהרגע בו הופיע האירוע הלא-סיבתי, חזר חץ-הזמן היקומי והשתלט מחדש על המערכת, למרות שהמערכת מבודדת לחלוטין מיקום זה.

מכאן נובעת באופן לוגי מסקנה לא פחות מרחיקת-לכת לגבי היקום כולו: **אם קיימת אי-שם אפילו אינטראקציה אחת שאינה סיבתית, היקום כולו אינו אסימטרי בזמן. מכאן שהדרך המקובלת לקרוא את ההיסטוריה של היקום (גרסת "היה היה 1" בפרק הקודם) היא הנכונה ואילו הדרך המהופכת ("היה היה 2") היא מופרכת.**

נשארה אם כן רק שאלה קטנה: האם היקום בו אנו חיים הוא סיבתי? כמובן שזו לא שאלה קטנה כלל, וכבר הודינו שהיא למעלה מיכולתנו. אבל היה מי שכן פסק בשאלה זו, והוא לא אחר מאשר סטיבן הוקינג הנודע. האיש הטוב הזה טוען בתוקף שחוקי הטבע מאפשרים את קיומו של אינדטרמיניזם יסודי, כלומר, תהליך שאינו סיבתי.

יפה. כל מה שאנו אומרים בשולי דבריו הוא שטענה זו סותרת את טענתו השנייה, לפיה אין חץ זמן יסודי.

יב . הוקינג והתנדפות החורים השחורים

תחילה הערה על מעמדה של הסיבתיות בפיזיקה כיום. נהוג לחשוב שתורת הקוונטים כבר ערערה על הסיבתיות, אך אין זה מדויק. הפורמליזם של תורת הקוונטים, לאמור, מערכת החוקים שלה, משמר את הסיבתיות. נכון, בהינתן מצב קוונטי מסוים, A, ניתן רק לחזות את ההסתברויות של תוצאותיו האפשריות, B או C, אבל אין בכך כדי לשלול את האפשרות שכבר מלכתחילה הייתה רק אחת מהן התוצאה האפשרית היחידה של A, ורק חוסר ידיעתנו מונע מאתנו מלנבא איזו היא משתייהן. זוהי השערת ה"משתנים הנסתרים" שאינשטיין השתעשע בה בתקווה להפריך את

תורת הקוונטים, אך כיום, לא רק שהשערה זו לא הוכחה אלא שאף הוגבלה (כגון ההוכחה של ג'ון בל שמשנתנים נסתרים כאלה חייבים לפעול ממרחק, לכאורה בניגוד לתורת היחסות – ר' פרק ה לעיל),

למרות זאת, מאמינים רוב הפיזיקאים כי הסיבתיות קיימת איפה שהוא ברמה המיקרו-מיקרוסקופית, ורק אנחנו איננו יכולים לראותה. זוהי השערת שימור האוניטאריות, שבשפה היום-יומית ניתן לנסח כשימור האינפורמציה. כך, למשל, אם השלכנו ספר למדורה, הרי המידע הכתוב בספר לא נעלם לחלוטין. הוא נשמר בפוטונים היוצאים מהאש. בלתי אפשרי אמנם לשחזר את המידע הזה בטכנולוגיה של ימינו, אבל **בעיקרון** המידע הזה לא אבד אלא רק **התערבב** עם כמות אדירה של מידע אחר ("רעשי"). עד כמה ניתן לשחזר מידע כזה, זו שאלה טכנולוגית ולא יותר. בעיני הפיזיקה התיאורטית, מידע לא נעלם לעולם.

והנה, לפני כשלושים שנה הודיע הוקינג כי יש מקרה מיוחד שבו האוניטאריות אינה נשמרת, לאמור, יש תהליך שבו אינפורמציה ממש **נעלמת** ולא סתם מתערבבת עם רעש. התהליך הזה הוא התנדפותו של חור שחור. לפיזיקאים היה ידוע זמן רב קודם לכן כי כשנוצר חור שחור, הרי כל מה שנזרק לתוכו – קליפות בננה, אופניים, חברי כנסת – יאבד את כל תכונותיו הפיזיקליות (צבע, ריח, צורה וכו') ויוסיף רק לשלוש התכונות היחידות של החור השחור: מאסה, תנע סיבובי ומטען חשמלי. לכאורה יש כאן איבוד אינפורמציה מובהק, אבל הפיזיקאים הניחו שתכונותיהם האבודות של החפצים שנפלו לחור השחור נשארות חבויות איפה שהוא בתוכו, מעבר להישג ידו של היקום הנראה. והנה בא הוקינג, בעקבות גילוי של יעקב בקנשטיין (כיום מהאוניברסיטה העברית), והוכיח כי חורים שחורים מתנדפים בתהליך קוונטי מפליא ופשוט. לא נחזור על פרטי התהליך – הם מוסברים יפה ב"קיצור תולדות הזמן".¹¹ מה שחשוב לענייננו הוא שהחלקיקים הנפלטים מהחור השחור והגורמים לכיליונו נוצרים על **שוליו**, הרחק מהבנוות, האופניים והח"כים שנבלעו **במרכזו**. כאן, אמר הוקינג, יש אובדן אינפורמציה אמיתי. בעוד הפוטונים היוצאים מהאש משמרים עדיין את תוכן הכתוב בספר, הפוטונים היוצאים משולי חור שחור אינם יכולים לשמר מאומה מתכונות הגופים שנבלעו הרחק משם במרכזו. וכך, ככלות החור השחור, תיעלם לחלוטין כל האינפורמציה שנבלעה בו.

והנה אירוניה: מזה שנים רבות שהוקינג ופנרוז מנהלים ויכוח על מקורו של חץ הזמן. הוקינג, הצעיר בין השניים, דווקא נוקט בעמדה השמרנית (פרק ח) בעוד שפנרוז, כפי שראינו, מעלה את ההשערה הנועזת יותר (פרק ט). הוויכוח הממושך הזה (שכמו הוויכוח המפורסם בין איינשטיין ובוהר, נעשה מתוך ידידות והערצה הדדית), התנהל מעל במות ציבוריות ואף יצא כספר.¹² אבל לאורך כל הויכוח לא הבחין פנרוז איך הוקינג מגיש לו בבלי-דעת, שוב ושוב, את הטענות התומך דווקא בגישתו שלו!

הלוגיקה כאן פשוטה בתכלית. נדמיין לעצמנו שתי מערכות סגורות. אחת מהן עוברת התפתחות נורמלית, כך שהאנטרופיה שלה תגבר עם הזמן. הבה ניתן למערכת זו מספיק מאסה וזמן שיאפשרו לחור שחור להתהוות ולהתנדף. כשנפתח את המערכת לאחר זמן מספיק ונבדוק את האנטרופיה שלה, נמצא שהאנטרופיה גדלה. זה לא מפתיע: אם ההשערה של הוקינג נכונה, החלקיקים שאליהם התנדף החור השחור לא יכלו לשמר את האינפורמציה על האובייקטים

שנבעו קודם לכן ע"י החור השחור. לפיכך, התנדפות החור השחור פשוט הוסיפה לאנטרופיה של המערכת, בדרך זהה לזו של ההפרעה הבודדת בתמונה 7א שבעטייה הופרעה השרשרת הסיבתית.

המערכת השניה תהיה ההיפוך המדויק של המערכת הראשונה: מערכת סגורה בה המצבים והמהירויות של כל החלקיקים מתואמים-מראש במירב הדיוק, כך שהאנטרופיה שבמערכת תקטן עם הזמן (ספלי קפה מתחממים, מתים קמים מקבריהם וכל שאר מעשי הליצנות שהזכרנו). גם כאן יהיו כמויות החומר ומשך הזמן המוקצים למערכת מספיקים להתהוות והתנדפות חור שחור. והנה, בפתיחת המערכת בתום הניסוי אנו מוצאים שהיפוך הזמן נכשל: האנטרופיה גדלה גם במקרה הזה.

הסיבה ברורה: האפקט משמיד האינפורמציה של החור השחור הרס את ההתאמות המסודרות-מראש בהן הוכן המצב ההתחלתי. תהליך זה מקביל למקרה שראינו בתמונה 9ב, בהבדל החשוב, שכישלון הסיבתיות שנגרם ע"י החור השחור משפיע לא רק על חלקיק אחד אלא על חלקיקים רבים.

וכאן, כפי שאומרים עורכי-הדין, we rest our case. אם התרחש אי-פעם אי-שם ביקום אפילו אירוע אחד שאינו דטרמיניסטי לחלוטין – תהא זו התנדפותו של חור שחור, פיהוקו של חתול או דמעות שהזילה עקרת בית אחרי קילוף בצל – אזי מאבדים היחסים הסיבתיים **בכל היקום** את סימטריית הזמן שלהם. אירוע כזה שקול להפרעה שהצגנו במסלולו של כדור ביליארד בודד: עם הזמן הוא משפיע על כל האירועים האחרים. כך יכולים אנו לשלול את האפשרות שאנו חיים ביקום מהופך מהסוג שהזכרנו בפרק י, וכך יכולים אנו סוף-סוף לתת הצדקה פיזיקלית למה שכבר מזמן יודע כל אדם ברחוב: אירועים בעבר גורמים לאירועים בעתיד ולא להיפך.

ברצוננו לשוב ולהדגיש את פשטותו של הטעון הזה: היקום אינו שונה משולחן הביליארד שבתמונה 8 אלא רק במספר מרכיביו. כל אירוע שאינו סיבתי באופן מוחלט דינו כדין ההפרעה הקלה שהפרענו למהלכם של כדורי הביליארד. אם מופיע אירוע לא-סיבתי כזה, אזי משולש יפה ההופך לערבוביית כדורים (או, בעולמנו, ספלי קפה מתקררים ואנשים מזדקנים ומתים) הוא אפשרי, בעוד שהתהליך ההפוך מצריך התערבות מחושבת היטב ומתמשכת מצד כוח תבוני עליון.

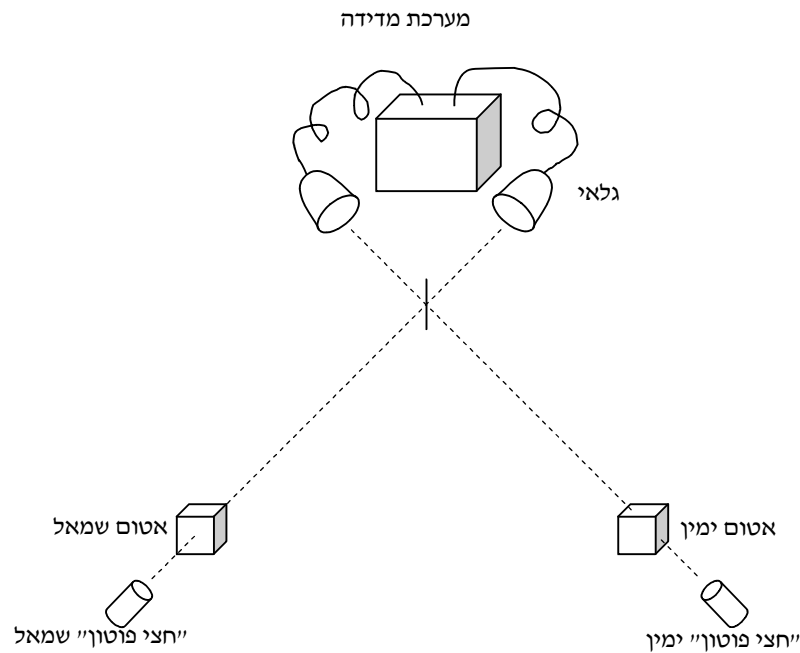
מנקודה זו, שבה צריכה הפיזיקה המקובלת לגייס צירופי מקרים ניסיים, יש רק שתי דרכים לחזור אל המדע. מצד אחד, אולי יתברר שהוקינג ודומיו טועים והאינפורמציה נשמרת אפילו בהתנדפות החור השחור (רעיון הנתמך לאחרונה על-ידי תורת המיתרים, המנסה לתת תאור מפורט של החורים השחורים). אנחנו כמובן מקווים שלא כך יהיה, אבל כרגע נותר רק לחכות ולראות מה יילד יום. מצד שני, אם יתברר שהצדק היה דווקא עם הוקינג המוקדם, והאינפורמציה נהרסת, אזי קורסת גם הטענה השמרנית השולטת בפיזיקה של ימינו, דהיינו שאירועי העתיד קיימים לצד אירועי ההווה והעבר כשם שערי הצפון קיימות לצד ערי הדרום. ואם כך, אם העתיד אינו קיים, תחזור התורה האומרת כי הזמן נתון להתהוות ותאלץ את הפיזיקה לחרוג מגבולותיה הנוכחיים.

יג . עוד הפתעה קוונטית

לסיום נתאר תוצאה קוונטית חדשה שלנו עצמנו. לפני כמה שנים פרסמנו ניסוי שהניב פרדוקס שכמותו, ככל הידוע לנו, טרם נראה בתורת הקוונטים,¹³ ושהבנתו מחייבת חשיבה מחדש על טבע הזמן ברמה הקוונטית.

בניסוי זה הצענו היפוך בזמן של ניסוי איינשטיין-פודולסקי-רוזן שפגשנו בפרק ה. בניסוי ההוא, כזכור לכם, היה לשני החלקיקים מקור משותף בעבר, שהוא האחראי להתאמה ה"טלפאטית" ביניהם בהווה. שאלתנו הייתה: ומה אם לשני החלקיקים יהיה אירוע משותף **בעתיד**? האם גם אז יקיימו ביניהם קשר "טלפאטי" כמו ב-EPR הרגיל?

תורת הקוונטים מאפשרת לנו ליצור EPR מהופך כזה (שקראנו לו RPE) אם נעשה את המדידות בצורה זהירה: נמדוד את הספינים של שני אטומים, אבל לא נסתכל ישירות בתוצאות המדידות אלא נשמור אותן בשני מקומות מבודדים. אחר כך ניצור אינטראקציה בין שני האטומים, ורק אז נלך ונסתכל בתוצאות המדידות ששמרנו. נגלה כי התוצאות הללו, שחיכו לנו "מוקפאות" כל הזמן הזה, מקיימות את אי-שוויון בל המפורסם: ההסתכלות באחת מהן משנה, **באותו רגע**, את תוצאת הבדיקה השנייה, אחת היא כמה היא מרוחקת.



תמונה 10

למעשה עשינו כאן דבר אפילו יותר מרחיק לכת: האטומים עצמם אינם מגיבים זה עם זה כלל. תחת זאת, פוטון יחיד יוצא באותו רגע משני מקורות אור מרוחקים אל מטרה אחת, ובדרכו הוא נוגע בו-זמנית בשני האטומים המרוחקים (תמונה 10).

הקורא הסבלן, שעדיין לא סגר את המאמר הזה בייאוש, בוודאי הבחין שהמשפט האחרון שאמרנו נשמע בלתי-שפוי לחלוטין: "פוטון יחיד יוצא באותו רגע משני מקורות אור מרוחקים אל מטרה אחת"? היה זה כאילו אמרנו שנהג מונית בודד יצא לדרכו באותה עת גם מבאר-שבע וגם

מחיפה והגיע לבסוף לתל-אביב. מה לעשות, תורת הקוונטים אכן מאפשרת מצב כזה שבו אותו פוטון יוצא משני מקורות בעת ובעונה אחת ומגיע למקום שלישי כחלקיק אחד. זוהי למעשה הרחבה של הלך שמלמד אותנו ניסוי הברירה המאוחרת של וילר (פרק ה): כשאנו מבצעים ניסוי התאבכות, אנו יוצרים אי-ודאות לא בקשר לעתיד, כפי שאנו רגילים לחשוב, אלא בקשר **לעבר**: מהרגע שנצפתה ההתאבכות של פוטון יחיד, לא ניתן לדעת אם הפוטון הגיע אלינו מצד ימין או מצד שמאל. גם במקרה שלנו, אם פוטון **בודד** הגיע אלינו מאחד משני מקורות אפשריים, ובהגיעו הציג תופעת התאבכות שאינה מאפשרת לדעת מהיכן הגיע, אזי **שתי ההיסטוריות הסותרות של הפוטון אמיתיות באותה מידה ושתיהן תורמות לתוצאה הסופית**.

ולכן, אם על שני מסלוליו הסותרים של הפוטון היחיד עמדו שני אטומים, שאחד מהם יכול היה לבלוע או לא לבלוע את הפוטון, יהפכו עכשיו שני האטומים לזוג EPR לכל דבר: מדידה של האחד משפיעה מיידית על השני.

ההפתעה בניסוי הזה היא שבחלק ניכר מהמקרים, מתברר שאחד האטומים **חסם** את אחד ממסלוליו של הפוטון, כך שהפוטון היחיד יכול היה לעבור רק במסלול השני. במילים אחרות: הפוטון שהגיע לאתר ההתאבכות יצא לדרכו רק ממקור-האור השמאלי ומעולם לא מהמקור הימני, כי המקור הימני היה חסום ע"י האטום. אבל, לפי ההוכחה המפורסמת של ג'ון בל לניסוי EPR, ה"החלטה" של אטום אחד לחסום את מסלולו של הפוטון נקבעה ע"י ה"החלטה" של האטום השני שלא לחסום את המסלול השני. הדבר מביא לשלוש קביעות שאינן יכולות להיות נכונות בו זמנית:

א. מסלולו הימני של הפוטון חסום ע"י אטום ימין ולכן הפוטון מעולם לא עבר שם אלא במסלול השמאלי, הבלתי-חסום;

ב. לפיכך, אין כל תהליך שמקשר בין שני האטומים;

ג. אולם, על פי ההוכחה של בל, עצם ההחלטה לחסום את הדרך לפוטון, המנתקת את הקשר בין אטום ימין לאטום שמאל, נקבעה ע"י התאמה בין אטום ימין לאטום שמאל!

לפרדוקס זה קראנו "פרדוקס השקרן הקוונטי" על שם "פרדוקס השקרן" הידוע מהלוגיקה: "משפט זה הוא שקרי". אם המשפט שקרי הוא אומר אמת ולהיפך. "משפט" דומה מבטאים האטומים בניסוי שתואר לעיל: **"הקישור בינינו מלמד שאין בינינו קישור"**.

מה שנאמר עכשיו יישמע אולי שחצני אבל אנחנו עומדים מאחוריו: "פרדוקס השקרן הקוונטי" הוא חמור יותר מכל הפרדוקסים הקוונטיים שהתגלו עד היום (התאבכות חלקיק בודד, ניסוי הברירה המאוחרת, חתול שרדינגר וניסוי EPR) בכך שהוא מתאר תהליך שבו תורת הקוונטים לא רק סותרת את תורת היחסות או את הפיזיקה הניוטונית, אלא **מציגה תהליך שסותר את עצמו**.

ההסבר שאנו הצענו לתופעה זו מסתמך על פירוש ה"זיגזג" של אהרונב שהזכרנו סוף פרק ה', לפיו יש היסטוריות הנקבעות לא רק ע"י אירועי העבר אלא גם רטרואקטיבית ע"י אירועים בעתיד. על כך הוספנו את ההשערה כי לפעמים, מקטע כזה של היסטוריה עובר רוויזיה, מעין "שכתוב", ובמקרים נדירים כגון זה משאיר השכתוב סתירות המעידות על התיקונים המאוחרים.

אנחנו מאמינים, בכל הצניעות המתבקשת, שהמודל שלנו, המניח שמעבר הזמן הוא תופעה אמיתית ולא אשליה, מציע לראשונה דרך פשוטה להפליא שבה הן האפקטים של תורת הקוונטים והן אלו של היחסות נובעים מאותה תכונה של הזמן. בקצרה: אם אירועי העתיד עדיין לא קיימים, אזי, על-פי עיקרון מפורסם של מאד, גם הזמן והחלל עדיין לא קיימים בעתיד. מכאן משתמעת גרסה חדשה של המפץ הגדול, לפיה היקום לא רק מתפשט מבחינת ממדי החלל שלו, אלא שהוא גם "מתפשט" בזמן, כך שכל שנייה חדשה מגדילה את נפחו על ציר הזמן. אם כך, נפתחת הדרך להבנה חדשה של היישות הקוונטית המוזרה הקרויה "פונקציית גל" האחראית לכל התופעות הפרדוקסליות שמנינו לעיל: **אולי פונקציית-הגל אינה מתפתחת בחלל-זמן ריק, אלא לפני היווצרות החלל-זמן? אולי כל שנייה ביקום נוצרה מהתגובה בין פונקציות-גל שהגיבו ביניהן ב"לא כלום" האמיתי, ורק אז, אחרי ה"קריסה", הופיעו אירועים של ממש יחד עם החלל-זמן שסביבם?**

זו כמובן השערה מרחיקת-לכת, אבל הפרדוקס שגילינו ראוי לתשומת-לב בפני עצמו. הוא מצטרף לשאר הרמזים שמנינו עד עתה, לפיהם הגיע הזמן לתיאוריה מקיפה יותר של הזמן.

יד . מה צופן הזמן?

"מהו הזמן יודע אני," אמר אוגוסטינוס הקדוש (שבמציאות לא היה קדוש אלא קנאי דת מרושע), "אבל כששואלים אותי איני יודע." אלף ושש מאות שנה מאוחר יותר, כשמאחרינו שתי מהפכות גדולות בפיזיקה של המאה העשרים, גם אנחנו איננו יודעים עדיין מהו הזמן, ובכל זאת זו אי-ידיעה מורכבת, עשירה ומסקרנת יותר.

אנו יודעים, לפחות, מה הזמן **איננו**: החלל והזמן אינם סתם במה פאסיבית שעליה מתחוללים האירועים. תורת היחסות הראתה שהחלל-זמן הוא מעין יריעה דינמית, המשתתפת באופן פעיל במה ש"מצויר" עליה ע"י הקיפולים והעיקומים הרוחשים בה סביב כל קו. תורת הקוונטים הוסיפה והראתה שהחלל-זמן עושה דבר יותר מפליא: ברמה הקוונטית, הרבה מתחת ליכולת הצפייה שלנו, יוצר החלל-זמן אינספור זוגות חלקיקים "וירטואליים" המופיעים ומתאיינים ללא הפסק לפרקי-זמן קצרים מכל שיעור. החלל-זמן, אם כן, הוא "חי" ויוצר ללא הרף. תורת המיתרים, אותה תורה שאפתנית המנסה לאחד את תורות הקוונטים והיחסות, מנסה אף להרחיק לכת יותר ולהראות כי בעולמנו אין, למעשה מאומה מלבד החלל-זמן, רק שמספר ממדיו הוא גדול יותר ממה שחשבנו, וכל החלקיקים והכוחות הידועים לנו אינם אלא פיתולים זעירים ביותר של חלל-זמן רב-ממדי זה. לתורת היחסות ולתורת הקוונטים מצטרפות התורות הגדולות האחרות של הפיזיקה, דהיינו, התרמודינמיקה והקוסמולוגיה, וגם להן יש מה לומר על הזמן, על כיוונו ועל מוצאו, וגם הן מחכות להשתלב עם התורות האחרות לפיזיקה חדשה, שאינן יודע כיצד תיראה.

במאמר זה סקרנו שתי מגמות סותרות המתרוצצות בהתפתחויות אלה. הגישה היחסותית, המאחדת את החלל והזמן ואולי עוד ממדים, "מקפא" את המציאות הפיזיקלית למכלול אירועים שהחוקים החלים עליו הם, למעשה, חוקיה הפשוטים, הסימטריים והיפהפיים של הגיאומטריה. מנגד, תורת הקוונטים, עם אי-הוודאות המהותית בתמונת-העולם שלה, עם הספק

שהיא מטילה על קיומן של תופעות לפני שצפינו בהן, מכניסה ליקום ממד של **התהוות ויחידוש** בכל רגע.

איזה מודל יתברר כנכון יותר? נדמה כאילו עדיין ממשיכים שני גדולי הפילוסופיה הקדם-סוקראטית להתווכח במסדרונות המחלקות לפיזיקה, מאיצי החלקיקים ומצפי הכוכבים המודרניים של ימינו: "השינוי", אומר פארמנידס, "הוא רק אשליה. העולם האמיתי, שחושינו משיגים רק בצורה חלקית, הוא נצחי, מושלם ונטול-שינויים." "בדיוק ההיפך!" משיב לו הראקליטוס. "הכל זורם. הדבר היחידי הקבוע בעולמנו הוא השינוי." מי קלע קרוב יותר לאמת? נטיית לבנו, כאמור, היא אחרי הדעה השנייה, דעת המיעוט כיום, האומרת שהתיאור המודרני של הזמן עדיין לוקה בחסר. לנו, כמו לאדם מהרחוב, נראה כי העתיד באמת אינו קיים וכי אנו היוצרים אותו מדי רגע. לעתיד הזה, הפתוח עדיין ומחכה למה שנעשה, אנו חותרים בחיפוש אחר תשובות לחידת הזמן.

מחקרינו על הזמן הושפעו מעבודתו רבת-השנים של פרופ' יקיר אהרונוב, חתן פרס ישראל, פרס וולף ופרסים מדעיים נוספים, בעבר מנחה הדוקטוראט של אחד מאתנו וכיום מורה וחבר יקר לשנינו. ליקיר אנו מקדישים מאמר זה ומאחלים לו עוד הרבה שנים של יצירה מדעית.

טו . אחרית-דבר (2009)

את המחלוקת שלנו עם הוקינג פרסמנו בשני כתבי-עת לפיזיקה ב-1999. הוקינג לא הגיב וכמובן שגם לא ציפינו לכך. לכן נקל לתאר כמה הופתענו כשב-2005 הכריז הוקינג כי מצא פיתרון לפרדוקס אותו ילד בשלושים שנה קודם לכן. בכך – ואיננו מניחים כי לנו הייתה יד בדבר – נחלץ הוקינג מהסתירה עליה הצבענו בין שתי עמדותיו הקודמות, לאמור, (א) חץ הזמן תלוי בתנאי ההתחלה (ו-ב) אינפורמציה נשמדת במהלך התנדפות חור שחור. עכשיו, משנסוג מהטענה השנייה, נעלמה הסתירה.

מהו הפיתרון שהציע הוקינג לפרדוקס של עצמו? נודה ולא נבוש: לא הבנו אותו כראוי. מעניין לציין, עם זאת, שהפיתרון לא התקבל על דעת כל החוקרים בתחום, אפילו לא על דעת רובם. משמעותית אף יותר, לדעתנו, היא העובדה שהפיתרון הוא נורא מסובך בעוד הפרדוקס עצמו, כפי שהבאנו לעיל, הוא פשוט. מובן שזו לעצמה אינה סיבה להתנגד לפיתרון, אבל בכל זאת, זה לא מה שהיינו מצפים מפיתרון מוצלח.

ובכן, האם הפיתרון של הוקינג נכון? בכנות: אנחנו מקווים שלא. אם יתברר שאינפורמציה נשמדת במהלך התנדפות החור השחור, כפי שסבר הוקינג המוקדם ובניגוד להוקינג המאוחר, תהיה זו הוכחה כי חץ-הזמן טבוע בכל אינטראקציה פיזיקלית, ולכן משהו יסודי חסר בתמונת העולם הנוכחית של הפיזיקה. ימים יגידו, לכל היותר עוד כמה שנים.

אבשלום אליצור עשה את הדוקטורט בתורת היחסות ובפיזיקה קוונטית באוניברסיטת תל-אביב בהדרכת יקיר אהרונוב ושימש כמרצה ופרופסור-אורח באוניברסיטאות בארץ ובחו"ל. **שחר דולב** עשה דוקטורט בתורת הקוונטים באוניברסיטת בר-אילן בהדרכת אבשלום אליצור ועבודות פוסט-דוקטורט באוניברסיטאות העברית וחיפה. שניהם נמנים, יחד עם קבוצת מדענים מאוניברסיטאות שונות בישראל, על מייסדי "אייר, המכון הישראלי למחקר מתקדם" המיועד לקדם את המחקר העיוני בישראל.

Avshalom C. Elitzur has earned his Ph.D. in relativity theory and quantum mechanics in Tel-Aviv University under the guidance of Yakir Aharonov, and served as lecturer and visiting professor in several universities in Israel and abroad. **Shahar Dolev** has earned his Ph.D. in quantum mechanics in Bar-Ilan University under the guidance of Avshalom Elitzur, and post-doctoral works in The Hebrew and Haifa Universities. Both, together with a group of scientists from various universities in Israel, are among the founders of "Iyar, The Israeli Institute for Advanced Research" aimed at promoting theoretical research in Israel.

-
1. אליצור, א., דולב, ש., ולניר, א. (2009) "השעה אינה שעה והמטר אינו מטר": על כמה סוגיות בתורת היחסות לאור פילוסופיית המדע של זאב בכלר. <http://www.a-c-elitzur.co.il/site/siteArticle.asp?ar=137>
 2. גולדסטיין, ר. (2006) *ההוכחה והפרדוקס*. תל-אביב: אריה ניר.
 3. Thorne, K. (1994) *Black Holes and Time Wraps: Einstein's Outrageous Legacy*. New York: Norton.
 4. Zeh, H. D. (2007) *The Physical Basis of the Direction of Time*. p. 200. New York: Springer.
 5. אונא, י. (1993) *פיסיקת הקוונטים*. תל-אביב: האוניברסיטה המשודרת.
 6. ניסוי אליצור-ויידמן. *הוויקיפדיה העברית*.
 7. Aharonov, Y., & Rohrlich, D. (2005) *Quantum Paradoxes: Quantum Theory for the Perplexed*. New York: Wiley.
 8. פרייס, ה. (2004) *חץ הזמן ונקודת ארכימדס – כיוונים חדשים לפיזיקה של הזמן*. תל-אביב: זמורה-ביתן.
 9. Penrose, R. (2005) *The Road to Reality: A Complete Guide to the Laws of the Universe*. New York: Knopf.
 10. Gardner, M. (2005) *The New Ambidextrous Universe*. New York: Dover.

11. הוקינג, ס. (1989) קיצור תולדות הזמן: מן המפץ הגדול עד חורים שחורים. תל-אביב: מעריב.

12. Hawking, S., & Penrose, R. (1996) *The Nature of Space and Time*. Princeton: Princeton University Press.

13. Elitzur, A.C., & Dolev, S. (2005) Quantum phenomena within a new theory of time. In Elitzur, A.C., Dolev, S., & Kolenda, N. [Eds.] *Quo Vadis Quantum Mechanics?*, 325-350. New York: Springer.