

## **ריצ'רד האמינג "אתה והמחקר שלך"**

מאנגלית: טמיר בכר

ב-7 במרץ 1986, ריצ'רד ו' האמינג הרצה כחלק מסדרת סמינרי המחקר של בל-מחקר-תקשורת. ההרצאה הוקלטה, ולאחר מכן תומללה על ידי ג'יימס פ' קייזר, על מנת להפוך אותה לנגישה יותר לציבור. החלטתי לתרגם אותה לעברית על מנת להפוך אותה לנגישה עוד יותר.

הגרסה המקורית סבלה מהמעבר מקול לכתב. גרסה זו סובלת גם מתרגום לעברית. לכן אני ממליץ, למי שחפץ בכך, לקרוא את המקור האנגלי או למצוא גרסה מוקלטת של ההרצאה (שתי האפשרויות זמינות דרך האינטרנט, וקישורים מופיעים בסוף המסמך).

במהלך ההרצאה, האמינג מזכיר שמות רבים של מדענים. חלק מהם שמות מוכרים במיוחד, חלקם מוכרים רק בחוגים מדעיים ספציפיים, וחלקם הם פשוט אנשים שהוא פגש. חשוב לציין שאין כמעט חשיבות להיכרות עם כל השמות המוזכרים מכיוון שהאמינג מקפיד להסביר לנו מה הוא חושב על כל אדם שהוא מזכיר בהרצאה. בכל אופן, רשימה מלאה של השמות המוזכרים במאמר, כולל השמות האנגליים, מופיעה בסוף המסמך.

### **ההקדמה: מי הוא ריצ'רד האמינג**

כדובר בסדרת סמינרי המחקר של בל-מחקר-תקשורת, דר' ריצ'רד ו' האמינג מבית הספר של הצי ללימודים מתקדמים במונטריי, קליפורניה, הוצג על ידי אלן ג' צ'ינוות', סגן הנשיא למדע שימושי בבל-מחקר-תקשורת.

אלן ג' צ'ינוות': שלום לעמיתי, וכן לרבים מעמיתי לשעבר במעבדות בל, שעד כמה שאני מבין, נמצאים אתנו היום כדי לקחת חלק במאורע משמח במיוחד. אני שמח מאוד להציג לכם חבר ותיק וקולגה מזה שנים רבות מאוד, ריצ'רד האמינג, או דיק האמינג כמו שתמיד קראנו לו.

דיק הוא אחד הגדולים ביותר בתחומים של מתמטיקה ומדעי המחשב, אבל אני בטוח שאין צורך להזכיר את זה לקהל. הוא עשה את התארים המוקדמים שלו באוניברסיטאות של שיקגו ונברסקה, ואת הדוקטורט באילינוי. לאחר מכן הוא הצטרף ללוס-אלמוס [פרויקט מנהטן, הפצצה האטומית] במהלך המלחמה. ב-1946 הוא הצטרף למעבדות בל. ושם, כמובן, פגשתי אותו – כשהצטרפתי למחלקת הפיזיקה במעבדות בל. בימים ההם, היה לנו הרגל לאכול ביחד צהריים בקבוצה של פיזיקאים, ומסיבה כלשהי, הבחור המוזר הזה ממחלקת המתמטיקה תמיד הצטרף אלינו. אנחנו שמחנו לארח אותו כי הוא הביא כל כך הרבה רעיונות וגישות יוצאי דופן. ארוחות הצהריים האלו היו מגרות מחשבתית, אני יכול להבטיח לכם.

למרות שדרכינו המקצועיות לא היו קרובות במיוחד לאורך השנים, תמיד זיהיתי את דיק במסדרונות של מעבדות בל והייתה לי הערכה עצומה למה שהוא עושה. אני חושב שההישגים שלו מדברים בעד עצמם. יש יותר מדי הישגים כדי להיכנס לכל הפרטים, אבל תנו לי לציין, לדוגמא, שהוא כתב שבעה ספרים, ומתוך שבעת הספרים האלו, שמדברים על תחומים שונים במתמטיקה ומחשבים וקידוד ותורת האינפורמציה, שלושה כבר הודפסו במהדורה שניה. זאת עדות אמיתית לפוריות ולשיעור הקומה של דיק האמינג.

אני חושב שפגשתי אותו לאחרונה – זה היה לפני משהו כמו עשר שנים – בכנס קטן ומוזר בדבלין שבאירלנד שבו שנינו הרצינו. כמו תמיד, הוא היה מבדר בצורה יוצאת דופן. רק עוד דוגמא אחת למחשבות הפרובוקטיביות שיש לו: אני זוכר שהוא אמר, "יש אורכי גל שאנשים לא יכולים לראות, יש צלילים שאנשים לא יכולים לשמוע, ואולי למחשבים יש מחשבות שאנשים לא יכולים לחשוב". טוב, כשדיק בסביבה, אנחנו לא צריכים מחשב. אני חושב שהולכת להיות לכולנו הרצאה מהנה במיוחד.

### **ההרצאה עצמה: "אתה והמחקר שלך", מאת דר' ריצ'רד ו' האמינג**

תענוג להיות כאן. אני בספק שאעמוד בציפיות של ההקדמה. הכותרת של ההרצאה שלי היא "אתה והמחקר שלך", אבל היא לא עוסקת בניהול של מחקר, אלא בדרך בה אתם בעצמכם חוקרים. אני יכול להעביר הרצאה גם על הנושא השני, אבל ההרצאה הזאת עוסקת בכך. אני לא מדבר על מחקר רגיל; אני מדבר על מחקר גדול, משמעותי. כדי להבין למה אני מתכוון בזה אתם יכולים לחשוב על סוג המחקר שזוכה בפרס נובל. המחקר לא באמת חייב לזכות בפרס בשביל להיות משמעותי, אבל זה סוג המחקרים שאני מחשיב למשמעותיים. תורת האינפורמציה של שאנון, אם תרצו, היא מסוג המחקרים שאני מדבר עליהם.

עכשיו, איך הגעתי לעסוק בנושא הזה? הגעתי ללוס-אלמוס כדי להריץ את מכונות החישוב שאנשים אחרים כבר הפעילו, כדי שאותם מדענים ופיזיקאים יוכלו לחזור לעסוק בדברים חשובים יותר. ראיתי שאני כלי-שרת. ראיתי שלמרות שפיזית הייתי בדיוק כמו המדענים הגדולים שעבדו שם, הם היו שונים. פגשתי את פיינמן. פגשתי את פרמי וטלר. פגשתי את אופנהיימר. האנס בתה היה הבוס שלי. הייתי מוקף בכמות מכובדת של אנשים מוכשרים, כך שבמהרה התחלתי לתהות מה מבדיל את האנשים שהצליחו באמת מאלו שהיה להם סיכוי אבל לא עשו זאת.

כשהגעתי למעבדות בל, הגעתי למחלקה מאוד פרודוקטיבית. בודה היה ראש המחלקה באותה תקופה, גם שאנון היה שם, והיו עוד אנשים. גם שם המשכתי לחקור את השאלות: "למה?", "מה ההבדל?". קראתי ביוגרפיות, אוטוביוגרפיות, ושאלתי אנשים שאלות כמו "איך הגעת לעשות את זה?". ניסיתי למצוא את ההבדלים. זה הנושא של ההרצאה.

עכשיו, למה ההרצאה הזאת חשובה? אני חושב שהיא חשובה בגלל שעד כמה שאני יודע, כולם חיים רק פעם אחת. גם אם אתם מאמינים בגלגול נשמות, זה לא עוזר לכם להתקדם מגלגול אחד למשנהו! אז למה שלא תעשו משהו משמעותי בחיים, משהו שתוכלו להגיד שהייתה לו חשיבות אמיתית? אני לא הולך להגדיר חשיבות בעצמי – אני סומך עליכם שתדעו למה אני מתכוון. אני אדבר בעיקר על מדע כי זה תחום העיסוק שלי. אבל עד כמה

שאני יודע, ולפי מה ששמעתי גם מאחרים, הרבה ממה שאני אומר רלוונטי לתחומים נוספים. עבודה יוצאת דופן מאופיינת בצורה דומה מאוד ברוב התחומים, אבל אני אגביל את עצמי למדע.

כדי שההרצאה הזאת תשפיע עליכם כראוי, אני חייב לדבר בגוף ראשון. אני צריך לגרום לכם לזנוח את הצניעות ולהגיד לעצמכם: "כן, אני רוצה לעשות עבודה ממעלה ראשונה". החברה שלנו מסתכלת בעין עקומה על אנשים שמנסים לעשות עבודה טובה באמת. אתם לא אמורים לעשות את זה. אתם אמורים להתקדם בהתאם למזל שלכם. טוב, זה דבר די טיפשי להגיד, לא? אני אומר, למה שלא תנסו לעשות משהו משמעותי? אתם לא צריכים להגיד את זה לאנשים אחרים, אבל למה שלא תגידו לעצמכם: "כן, אני רוצה לעשות משהו משמעותי"?

כדי להגיע לחלק השני, אני חייב לזנוח את הצניעות שלי ולדבר בגוף ראשון על הדברים שראיתי, עשיתי ושמעתי. אני הולך לדבר על אנשים, את חלקם אתם מכירים, ואני משוכנע שבשנסיים לא תצטטו אותי כמי שאמר חלק מהדברים שאגיד פה.

תנו לי להתחיל לא לוגית, אלא פסיכולוגית. אני חושב שאחת הבעיות העיקריות היא שאנשים חושבים שמדע מתקדם באמצעות מזל. הכל עניין של מזל. טוב, תחשבו על איינשטיין. תחשבו כמה דברים שונים הוא עשה שהיו מוצלחים. הכל היה מזל? זה לא נראה קצת עקבי מדי? ותחשבו על שאנון. הוא לא הגה רק את תורת האינפורמציה. מספר שנים לפני זה הוא יצר כמה דברים שעדיין תופסים חלק משמעותי בקריפטוגרפיה. הוא עשה הרבה דברים מוצלחים.

אתם יכולים לראות שוב ושוב, שאנשים מצליחים יוצרים יותר מדבר מוצלח אחד. לפעמים יש אדם שעושה רק דבר מוצלח אחד כל חייו, ואנחנו נדבר על זה בהמשך, אבל במקרים רבים יש חזרה. אני טוען שמזל לא יכול לכסות הכל. ואני אצטט את פסטר שאמר: "המזל מעדיף את המוכנים לבואו". אני חושב שזה מה שאני מאמין בו. קיים כמובן גורם של מזל, אבל במקביל הוא אינו קיים. אדם שמתכוון היטב מוצא בסוף משהו משמעותי ועושה אותו. אז כן, זה מזל. הדבר הספציפי שתעשו יהיה מזל, אבל עצם העובדה שאתם עושים משהו לא.

לדוגמא, כשהגעתי למעבדות בל, חלקתי משרד עם שאנון. באותו הזמן הוא עבד על תורת האינפורמציה ואני על תורת הקודים. זה חשוד ששנינו עשינו את זה באותו זמן – זה היה באווירה. ואפשר להגיד, "כן, זה היה מזל". מצד שני אפשר להגיד, "אבל למה, מתוך כל האנשים בבל, אלו השניים שעשו את זה?" כן, זה היה בחלקו מזל, ובחלקו מוכנות; אבל ה"חלק" הוא הדבר השני שאני הולך לדבר עליו. אז למרות שאני אחזור למזל עוד מספר פעמים, אני רוצה להיפטר מהעניין הזה. מזל הוא לא הקריטריון היחיד שקובע אם תעשו עבודה חשובה או לא. אני טוען שיש לכם שליטה בנושא, גם אם לא שליטה מלאה. ולסיכום, אצטט את ניוטון בנושא. ניוטון אמר: "אם אחרים היו מתאמצים כמוני, הם היו מגיעים לתוצאות דומות".

אחד המאפיינים שאתם יכולים לראות, ולהרבה אנשים יש אותו, כולל מדענים דגולים, הוא שבדרך כלל כשהם היו צעירים היו להם מחשבות עצמאיות והיה להם גם האומץ לא לזנוח אותן. איינשטיין, לדוגמא, התחיל לשאול את עצמו סביב גיל 12 או 14, "איך תיראה קרן אור אם אסתכל עליה בזמן שאני נע במהירות האור?". הוא ידע שתורת האלקטרומגנטיות קובעת שלא יכול להיות שיא (מקסימום) מקומי ניח. אבל אם הוא ידע יחד עם האור,

הוא יראה שיא מקומי. כבר בגיל 12, 14, או משהו כזה הוא ראה שיש שם סתירה, שמשהו לא מסתדר ושיש משהו יוצא דופן במהירות האור. האם זה מזל שהוא יצר בסוף את תורת היחסות הפרטית? כבר בשלב מוקדם, הוא הניח חלק מהיסודות על ידי חשיבה על חלקים ממנה. זה צעד הכרחי, אבל לא מספיק. כל הנושאים שאני אדבר אליהם כוללים מזל, אבל לא רק.

מה לגבי להיות ממש חכם? נשמע טוב. רובכם כנראה מספיק חכמים כדי לעשות עבודה ממעלה ראשונה. אבל עבודה גדולה דורשת משהו מעבר לחוכמה. חוכמה נמדדת בדרכים שונות. במתמטיקה, פיזיקה תיאורטית, אסטרופיזיקה, "חוכמה" מקבילה בד"כ ליכולת לבצע מניפולציות על סמלים. ולכן גם מבחן IQ טיפוסי ייתן ציון גבוה לאותם אנשים. מצד שני, בתחומים אחרים חוכמה היא משהו אחר. ביל פפאן, לדוגמה, הבחור שחשב על zone-melting, נכנס יום אחד למשרד שלי. היה לו רעיון של מה שהוא רוצה לעשות, והיו לו כמה משוואות. היה לי מאוד ברור שהוא לא היה מוצלח במתמטיקה וגם לא רהוט במיוחד. אבל הבעיה שהוא הציג נראתה מעניינת, אז לקחתי אותה איתי הביתה ועבדתי עליה קצת. בסופו של דבר הראיתי לו איך להשתמש במחשב כדי לחשב את התוצאות בעצמו. נתתי לו את היכולת לחשב. הוא המשיך לעבוד, בלי תמיכה מהמחלקה שלו, ובסופו של דבר גרף את כל הקופה. ברגע שהוא התחיל כמו שצריך, הביישנות שלו, המוזרות שלו, חוסר הרהיטות שלו, נעלמו כלא היו והוא הפך להיות הרבה יותר פרודוקטיבי. הוא בהחלט הפך להיות רהוט יותר.

ואני יכול לצטט אדם נוסף באותה צורה. אני מאמין שהוא לא בקהל, בחור בשם קלוגסטון. פגשתי אותו בזמן שעבדתי על בעיה עם הקבוצה של ג'ון פירס ולא חשבתי שהוא טוב במה שהוא עושה. שאלתי אלו מבין חבריי שלמדו איתו, "הוא היה ככה גם בלימודים?" "כן", הם ענו. אני הייתי מפטר את הבחור, אבל פירס היה חכם והשאיר אותו. בסופו של דבר קלוגסטון המציא את כבל קלוגסטון. אחרי זה הוא המשיך להעלות רעיונות טובים. הצלחה אחת נתנה לו את הביטחון והאומץ שהוא היה צריך.

אחד המאפיינים של מדענים מצליחים הוא אומץ. ברגע שאתה מפתח אומץ ומאמין שאתה יכול לפתור בעיות משמעותיות, אתה יכול. אם אתה חושב שאתה לא יכול, כמעט בטוח שלא תצליח. אומץ הוא אחד הדברים שהיו לשאנון במיוחד. תחשבו על התיאוריה העיקרית שלו. הוא רוצה ליצור שיטה לקידוד, אבל הוא לא יודע מה לעשות אז הוא יוצר קידוד אקראי. ואז הוא תקוע. ואז הוא שואל את השאלה הבלתי-אפשרית, "איך יעבוד הקידוד האקראי הממוצע?". ואז הוא מוכיח שהקידוד האקראי הממוצע הוא טוב במידה שרירותית, ולכן חייב להיות לפחות קידוד אחד טוב. מי, חוץ מאדם בעל כמות אינסופית של אומץ, היה מעז לחשוב על משהו כזה? זה המאפיין של מדענים דגולים; יש להם אומץ. הם יתקדמו תחת תנאים מדהימים; הם יחשבו וימשיכו לחשוב.

גיל הוא גורם נוסף שפיזיקאים נוטים לדאוג בגללו במיוחד. הם תמיד אומרים שאתה צריך לעשות את הדברים המשמעותיים כשאתה צעיר או שלא תעשה אותם לעולם. איינשטיין עשה דברים בגיל צעיר מאוד, וכל האנשים שעבדו על תורת הקוונטים היו צעירים כשהם עשו את מיטב העבודה שלהם. רוב המתמטיקאים, הפיזיקאים התיאורטיים, והאסטרופיזיקאים עושים את מה שהם מחשיבים לעבודה הטובה ביותר שלהם בעודם צעירים. זה לא שהם לא עושים עבודה טובה בגיל מאוחר יותר, אבל בדרך כלל הדברים המוערכים יותר שהם עושים נעשים בעודם צעירים. מצד שני, במוזיקה, פוליטיקה וספרות, האמונה הרווחת היא שמיטב העבודה נעשה בגיל מבוגר. אני לא יודע איך התחום שאתה עוסק בו מתאים בטווח הזה, אבל לגיל יש השפעה.

אבל תנו לי להגיד למה נראה שלגיל יש את ההשפעה שנראה שיש לו. ראשית, אם תעשה עבודה טובה, תתחיל למצוא את עצמך בכל מיני ועדות וכנסים ולא תוכל להמשיך לעבוד. יכול להיות שתגיע למצב שברטיין נמצא בו לאחר שקיבל את הנובל [על המצאת הטרנזיסטור]. ביום שהכריזו על הפרס כולנו התאספנו באודיטוריום ארנולד; כל שלושת הזוכים קמו ונשאו נאומים. השלישי, ברטיין, עם דמעות בעיניים, אמר, "אני מכיר את 'אפקט-פרס-הנובל' הזה ואני לא אתן לו להשפיע עלי; אני הולך להישאר אותו אדם שהייתי". "זה טוב", אמרתי לעצמי. אבל אחרי כמה שבועות ראיתי שזה משפיע עליו. עכשיו הוא יכול לעבוד רק על "בעיות גדולות".

כשאתה מפורסם קשה לעבוד על בעיות קטנות. זה מה שחיסל את שאנון. אחרי תורת האינפורמציה, מה אתה עושה כהדרן? הרבה מהמדענים הגדולים עושים את השגיאה הזאת. הם מפסיקים לשתול את הבלוטים הקטנים שמהם גדלים עצי אלון כבירים. הם מנסים להגיע ישר לדבר הגדול הבא. וזאת לא הדרך בה דברים עובדים. כך שזאת סיבה נוספת שבגללה נראה שפרסום בגיל צעיר מונע הצלחה עתידית. למעשה, המכון ללימודים מתקדמים בפרינסטון, לדעתי, הרס יותר מדענים טובים מאשר מוסד כלשהו הצליח ליצור, אם שופטים לפי הדברים שהם עשו לפני שהם הגיעו אליו והדברים שהם עשו אחרי. זה לא שהם לא היו טובים אחרי, אבל הם היו מעולים לפני, ואחרי זה הם היו רק טובים.

זה מעלה, אולי לא בסדר הרצוי, את הנושא של תנאי עבודה. תנאי העבודה שנחשבים לטובים ביותר על ידי מרבית האנשים, דווקא אינם כאלה. דבר זה ברור כי לרוב אנשים הם פרודוקטיביים במידה המרבית דווקא כאשר תנאי העבודה גרועים. אחת התקופות הטובות ביותר של מעבדות קיימברידג' לפיזיקה הייתה כשהם היו בצריפים - בתקופה ההיא הם עשו חלק מהפיזיקה הכי מוצלחת אי פעם.

אני אספר לכם סיפור מהחיים הפרטיים שלי. כבר בשלב מוקדם היה לי ברור שבמעבדות בל לא הולכים לתת לי דונם של מתכנתים שיכתבו תוכנות בקוד בינארי. היה ברור שזה לא יקרה, למרות שזאת הייתה הדרך שבה כולם עבדו באותה תקופה. הייתי יכול ללכת לחברה אחרת ולקבל את זה, אבל האנשים המעניינים היו בבל. במשך תקופה ארוכה חשבתי "האם אני רוצה לעבור או לא?" ותהיתי איך אני יכול לקבל את המיטב משני העולמות. בסופו של דבר אמרתי לעצמי, "האמינג, אתה מאמין שמכונות יכולות לעשות הכל. למה שלא תוכל לגרום להם לכתוב תוכנות?" מה שנראה בתחילה כבעיה דחף אותי לעבר תכנות-ממוכן כבר בשלב מוקדם מאוד. מה שנראה בתחילה כתקלה, מתברר לעיתים קרובות, לאחר שינוי של נקודת המבט, כאחד הנכסים הגדולים שעומדים לרשותך. אבל כנראה לא תסתכל עליו ככזה בפעם הראשונה, כשתבין את המצב ותגיד: "אוי לי, אני לעולם לא אקבל מספיק מתכנתים, אז איך אני אוכל לעשות משהו משמעותי בתחום, משהו גדול?"

ויש עוד סיפורים דומים רבים; לגרייס הופר יש סיפורים כאלו. אני חושב שאם תסתכלו בשימת לב תוכלו לראות שאצל הרבה מדענים גדולים, הסתכלות שונה על הבעיה הפכה תקלה למעלה. לדוגמא: הרבה מדענים, כשהם גילו שהם לא יכולים לפתור בעיה מסוימת, התחילו לחקור למה לא. לאחר מכן הם אמרו: "ברור! זאת הדרך בה זה עובד!" ורשמו לזכותם תוצאה חשובה. כך שלמעשה תנאי עבודה אידיאליים הם משהו מוזר. התנאים שאתה רוצה הם לא תמיד אלה שטובים בשבילך.

עכשיו לנושא של הנעה. אתם יכולים לראות שלמרבית המדענים הגדולים הייתה הנעה חזקה במיוחד. עבדתי עם ג'ון טוקי במעבדות בל. היה לו הינע מדהים. יום אחד, שלוש או ארבע שנים אחרי שהצטרפתי, גיליתי שג'ון צעיר ממני בהפרש קטן. הוא היה גאון, ואני באופן ברור לא הייתי. ישר אחרי זה התפרצתי למשרד של בודה ואמרתי: "איך משהו בגילי יכול לדעת כל כך הרבה כמו ג'ון טוקי?" הוא נשען אחורה בכיסא, שילב ידיים מאחורי הראש, חייך חיוך קטן, ואמר: "אתה תופתע, האמינג, כמה הרבה אתה תדע אם תעבוד קשה כמוהו כל כך הרבה שנים". ואני חמקתי לי בזריזות מהמשרד.

מה שבודה אמר, למעשה, היה: "ידע ופרודוקטיביות הם כמו ריבית דריבית". בהינתן שני אנשים עם יכולות זהות, פחות או יותר, ובהינתן שאחד מהם עובד עשרה אחוזים יותר, זה שעובד יותר ישיג יותר מאשר פי שניים מזה שלא. כמה שאתה יודע יותר, כך אתה לומד יותר; ככל שאתה לומד יותר, כך אתה יכול לעשות יותר; ככל שאתה יכול לעשות יותר, כך יש יותר הזדמנויות להצליח – זה דומה מאוד לריבית דריבית. אני לא רוצה לתת לכם יחס, אבל זה יחס מאוד גבוה. בהינתן שני אנשים עם יכולת זהה, זה שמצליח להשקיע שעה יותר כל יום בחשיבה יהיה יותר פרודוקטיבי בהפרש עצום אם נמדוד לאורך תקופה של חיים שלמים. לקחתי את ההערה של בודה ברצינות, והעברתי חלק משמעותית גדול יותר מהזמן שלי במשך כמה שנים בעבודה מאומצת יותר, וגיליתי, למעשה, שאני יכול להספיק הרבה יותר. אני לא אוהב להגיד את זה לפני אשתי, אבל קצת הזנחתי אותה לפעמים; הייתי צריך ללמוד. אתה חייב לזנוח דברים אם אתה מתכוון לסיים את מה שאתה רוצה לעשות. אין שאלה בנדון.

בנושא של הנעה אדיסון אמר: "גאונות היא אחוז אחד השראה ותשעים ותשעה הזעה". אולי הוא הגזים, אבל הרעיון הוא שעבודה טובה, לאורך זמן, תיקח אותך רחוק באופן מפתיע. ההשקעה הקבועה של מאמץ עם טיפה יותר עבודה, שמנוצל באופן חכם, היא מה שעושה את ההבדל. זאת גם הבעיה: הנעה, כשהיא מנוצלת לא נכון, לא תביא אותך לשום מקום. לעיתים קרובות תהיתי למה הרבה מחברי הטובים בבל, שעבדו קשה כמוני או אפילו יותר, לא הגיעו לשום תוצאה משמעותית. ניצול לא נכון של מאמץ הוא עניין משמעותי מאוד. עבודה קשה בלבד זה לא מספיק – צריך לנצל אותה באופן מושכל.

יש עוד גורם שאני רוצה לדבר עליו; הגורם הזה הוא רב-משמעות. לקח לי זמן מה לגלות את החשיבות שלו. רוב האנשים מאמינים שמהוה הוא או נכון או לא-נכון. מדענים דגולים מסוגלים להכיל גם רב-משמעות, או דו-משמעות, בצורה טובה מאוד. הם מאמינים בתיאוריה מספיק כדי להתקדם; הם מפקפקים בה מספיק כדי לשים לב לשגיאות וליצור תיאוריה חלופית. אם אתם מאמינים יותר מדי, לא תשימו לב לפגמים; אם אתם מפקפקים יותר מדי פשוט לא תתחילו את העבודה. נדרש כאן איזון מקסים. אבל רוב המדענים הדגולים מודעים היטב לסיבות שבגללן התיאוריות שלהם נכונות, וגם לבעיות וחוסר ההתאמות ואינם שוכחים אותן. דרווין כתב באוטוביוגרפיה שלו שהוא גילה שהוא חייב לכתוב ממצאים שסתרו את האמונה שלו, כי אחרת הם היו פורחים מזכרוננו. כשאתם מגלים דברים שנראים כמו פגמים בתיאוריה, אתם חייבים להיות רגישים ולהמשיך לעקוב אחרי אותם פגמים, לראות איך התיאוריה מצליחה להסביר אותם או איך צריך לשנות את התיאוריה כדי להתאים אותה אליהם. אלו במקרים רבים התרומות הגדולות לתיאוריה. התקדמות משמעותית בדרך כלל אינה מושגת על ידי שיפור קטן לדיוק. זה מתמצה במחויבות רגשית. רוב המדענים הדגולים היו מחויבים באופן מלא לפתרון הבעיות שעליהן עבדו. אלו שלא נעשים מחויבים כמעט ולא מגיעים לתוצאות משמעותיות מהמעלה הראשונה.

ושוב, מחויבות רגשית אינה מספיקה, אבל נראה שהיא תנאי הכרחי. ואני חושב שאני יכול להגיד לכם למה. כל מי שחקר יצירתיות יאלץ להגיד בסופו של דבר, ש"יצירתיות מגיעה מהתת-מודע". איכשהו, פתאום, היא שם. היא פשוט מופיעה. טוב, אנחנו יודעים מעט מאוד על התת-מודע; אבל דבר אחד שאתם יודעים זה שגם החלומות מגיעים משם. ואתם גם יודעים שהחלומות שלכם הם במידה רבה עיבוד חוזר של חוויות היום. אם אתם שקועים ואפופים בנושא שאתם מחויבים לו, יום אחרי יום אחרי יום, לתת-המודע שלכם אין ברירה אלא להתעסק בבעיה שלכם. ואז אתם מתעוררים בוקר אחד, או אחר-צהריים אחד, והתשובה פשוט שם. עבור אלו שלא משקיעים את עצמם בבעיה שהם עובדים עליה, התת-מודע יכול לעסוק בדברים אחרים ולא להגיע לתוצאה המשמעותית. לכן הדרך הנכונה להתנהל כשיש לכם בעיה חשובה באמת היא לא לתת לשום דבר לחדור למרכז תשומת הלב שלכם - תחשבו רק על הבעיה. תרעיבו את התת-מודע שלכם ככה שהוא יהיה חייב לעבוד על הבעיה שלכם, ככה תוכלו ללכת לישון בשקט ולקום בבוקר עם התשובה, בחינם.

אלן צ'ינוווט' הזכיר את העובדה שנהגתי לאכול בשולחן של הפיזיקאים. אכלתי עם המתמטיקאים וגיליתי שאני יודע כבר די הרבה מתמטיקה; למעשה, לא למדתי הרבה. השולחן של הפיזיקאים היה, כמו שהוא אמר, מקום מלהיב, אבל אני חושב שהוא הגזים בתרומה שלי לשולחן. היה מאוד מעניין להקשיב לשוקלי, ברטיין, ברדין, ג'ון ברטרנד ג'ונסון, קן מק'קיי, ואנשים נוספים, ולמדתי המון. אבל לרוע המזל הגיע פרס נובל, וקידום, וכל מה שנשאר היה הסחלה. אף אחד לא רצה את מה שנשאר. טוב, אז אין כבר סיבה לאכול איתם!

בצד השני של חדר האוכל היה שולחן הכימיה. עבדתי עם אחד מהחבר'ה, דייב מק'קאל; מעבר לזה, הוא בדיוק חזר אחרי המזכירה שלנו באותו הזמן. הגעתי לשולחן שלהם ואמרתי: "אכפת לכם שאני אצטרף?" הם לא יכלו לסרב, אז התחלתי לאכול איתם. ואז התחלתי לשאול: "מה הבעיות החשובות בתחום שלכם?" ואחרי בערך שבוע, "מה הבעיות החשובות שאתם עובדים עליהן?" ואחרי זמן נוסף באתי יום אחד ושאלתי: "אם מה שאתם עושים לא חשוב, ואם אתם לא חושבים שהוא הולך להוביל למשהו חשוב, למה אתם עובדים עליו?" מיותר להגיד שלא הייתי מוזמן לשולחן שלהם יותר; הייתי צריך למצוא משהו אחר לאכול איתו. זה היה באביב.

בסתיו, דייב מק'קאל עצר אותי במסדרון ואמר: "האמינג, מה שאמרת נכנס לי מתחת לעור. חשבתי על זה כל הקיץ, זאת אומרת, מה הבעיות החשובות בתחום שלי. לא שיניתי את המחקר שלי, אבל אני חושב שיש לו ערך". ואני אמרתי: "תודה דייב" והמשכתי. לאחר מספר חודשים הוא הפך לראש המחלקה שלו. לאחר מכן הוא הפך גם לחבר באקדמיה הלאומית להנדסה. ראיתי שהוא הצליח. מעולם לא שמעתי את השם של אף אחד אחר מהשולחן ההוא מוזכר בחוגים המדעיים. הם לא היו מסוגלים לשאול את עצמם "מה הבעיות החשובות בתחום שלי?"

אם אתה לא עובד על בעיה חשובה, לא סביר שתעשה עבודה חשובה. זה ברור כשמש. מדענים דגולים חשבו באופן מעמיק וזהיר, על מספר בעיות חשובות בתחום שלהם, והקפידו תמיד לראות איך אפשר לתקוף אותן. אני מזדוהר אתכם, המונח "בעיות חשובות" חייב להיות מנוסח באופן זהיר. שלושת הבעיות החשובות ביותר בפיזיקה, במובן מסוים, מעולם לא זכו לתשומת לב בזמן שעבדתי בבל. ב-"חשובות" אני מתכוון לפרס נובל מובטח ולכמות הכסף שהן יכולות להכניס. לא עבדנו על (1) מסע בזמן, (2) טלפורטציה, ו-(3) אנטי-כבידה. אלו לא בעיות חשובות כי אין לנו דרך לגשת אליהן. אלו לא ההשלכות שהופכות בעיה לחשובה, אלא העובדה שיש לך דרך סבירה לגשת אליה. זה מה שהופך בעיה לחשובה. כשאני אומר שרוב המדענים לא עובדים על בעיות חשובות

אני מתכוון לכך במובן הזה. המדען הממוצע, עד כמה שאני יודע, מעביר את רוב הזמן שלו בעבודה על בעיות שהוא לא מאמין שהן חשובות וגם לא מאמין שהן יובילו למשהו חשוב.

דיברתי קודם על שתילת בלוטים כדי שיצמחו אלונים. אתה לא יכול לדעת תמיד איפה להיות, אבל אתה יכול להיות פעיל במקומות שבהם יש סיכוי שיקרה משהו. ואפילו אם אתה מאמין שמדע מוצלח הוא עניין של מזל, אתה יכול לעמוד על פסגת ההר בו פוגעים הברקים; אתה לא חייב להתחבא בעמק איפה שבטוח. אבל המדען הממוצע עושה עבודה שגרתית ובטוחה כמעט כל הזמן ולכן הוא (או היא) לא עושים הרבה. זה עד כדי כך פשוט. אם אתם רוצים לעשות עבודה גדולה, אתם חייבים לעבוד על בעיות חשובות, וכדאי שיהיה לכם רעיון.

מתוך התחשבות ברעיונות אלו, ועם קצת דחיפה מג'ון טוקי ואחרים, אימצתי בסופו של דבר את מה שקראתי לו "זמן המחשבות הגדולות". מהשעה בה הלכתי לאכול בשישי בצהריים, הייתי מתעסק רק במחשבות גדולות. במחשבות גדולות אני מתכוון למחשבות כמו "מה יהיה התפקיד של מחשבים בחברת AT&T?", "איך מחשבים ישנו את המדע?". באותה תקופה ראיתי, לדוגמא, שתשעה מתוך כל עשרה ניסויים נעשו במעבדה ורק אחד במחשב. אמרתי לסגן המנהל בזמנו, שיום אחד זה יתהפך – תשעה מכל עשרה ניסויים יתבצעו במחשב ורק אחד יהיה במעבדה. הם ידעו שאני מתמטיקאי משוגע ללא תפיסת מציאות. אני ידעתי שהם טועים, ועם חלוף הזמן זה יתברר. הם בנו מעבדות כשהם לא היו צריכים אותן. אני ראיתי שמחשבים משנים את המדע בגלל שהעברתי הרבה זמן בשאלות כמו "מה תהיה ההשפעה של מחשבים על המדע ואיך אני יכול לשנות את זה?". שאלתי את עצמי "איך זה הולך לשנות את מעבדות בל?" ציינתי לעצמי שעד שאני אעזוב את בל, יותר ממחצית העובדים יעבדו באופן צמוד עם מחשבים. טוב, לכולכם יש מחשבים היום. חשבתי הרבה וחזק על הכיוונים שהתחום שלי הולך אליהם, איפה היו ההזדמנויות, ומה היו הדברים החשובים שאפשר לעשות. תנו לי ללכת לשם כדי שיהיה לי סיכוי לעשות דברים חשובים.

מרבית המדענים הגדולים מכירים הרבה בעיות חשובות. הם מחפשים זווית תקיפה עבור 10 או 20 בעיות חשובות. וכשרעיון חדש עולה, אפשר לשמוע אותם אומרים "זה עוזר בבעיה הזאת!". הם עוזבים את כל הדברים שהם עובדים עליהם ותוקפים את הבעיה בכל הכוח. עכשיו אני יכול לספר לכם סיפור שסיפרו לי אבל אני לא יכול לוודא את האמינות שלו. ישבתי בשדה תעופה ודיברתי עם חבר שלי מלוס-אלמוס על המזל שהיה לנו שעשו את הניסון בביקוע גרעיני באירופה בזמן שעשו אותו, כי זה הניע אותנו לעבוד על הפצצה בארצות הברית. הוא אמר "לא; בברקלי אספנו כמות די גדולה של מידע; לא היה לנו זמן לנתח אותו כי היינו עסוקים בבניה של ציוד נוסף, אבל אם היינו מנתחים את המידע היינו מגלים את הביקוע". היה להם את זה בידיים אבל הם לא ניצלו את זה. הם סיימו במקום השני!

המדענים הדגולים, כשהם מזהים הזדמנות, רודפים אחריה. הם עוזבים את כל הדברים האחרים. הם נפטרים משאר הדברים והולכים עם הרעיון כי הם כבר חשבו על זה עד הסוף. המחשבה שלהם מוכנה; הם רואים הזדמנות והם מנצלים אותה. ברור שבחלק גדול מהמקרים זה לא מצליח, אבל מספיק להצליח בחלק מהמקרים כדי לעשות מדע גדול. זה די קל. הטריק העיקרי הוא לחיות הרבה זמן!



יש מאפיין נוסף, ולקח לי הרבה זמן להבחין בו. שמתי לב למספר עובדות בנוגע לאנשים שעובדים עם דלת פתוחה ולא להעבודה עם דלת סגורה. הבחנתי שאם אתם עובדים עם דלת המשרד שלכם סגורה, תספיקו יותר עבודה היום ומחר, ותהיו יותר פרודוקטיביים מהרוב. אבל עשר שנים אחר כך לא תדעו על איזה בעיות שווה לעבוד; כל העבודה הקשה שלכם היא לא משמעותית במיוחד. לעומת זאת, מי שעובד עם דלת פתוחה, חשוף כל הזמן להפרעות והסחות דעת, אבל גם מקבל מדי פעם רמזים למה שקורה בעולם ומה יכול להיות חשוב. אני לא יכול להוכיח את הסיבות כי אתם יכולים להגיד "דלת סגורה מסמלת חשיבה סגורה". אני לא יודע. אבל אני יכול להגיד שיש קורלציה די טובה בין אלו שעובדים עם דלת פתוחה לבין אלו שעושים עבודה חשובה, למרות שאלו שעובדים עם דלת סגורה בד"כ עובדים קשה יותר. אבל איכשהו נראה שהם תמיד עובדים על משהו שהוא לא בדיוק הדבר הנכון - לא בהפרש גדול, אבל מספיק כדי לפספס את התהילה.

אני רוצה לדבר על נושא נוסף. הוא מבוסס על שיר שאני חושב שהרבה מכם מכירים: "It ain't what you do it's the way you do it". אני אתחיל עם דוגמא משלי. הונו אותי וגרמו לי לעבוד על מחשב דיגיטלי, ועוד בימים של קידוד בינארי, על פתרון לבעיה שהמחשבים האנלוגיים הטובים ביותר של אותו זמן לא יכלו לפתור. והצלחתי לקבל את התשובה. כשחשבתי לעצמי "אתה יודע, האמינג, אתה תצטרך להגיש דו"ח על העבודה הצבאית הזאת; אחרי שתשקיע הרבה כסף תצטרך לדווח עליו, וכל מקום עם מחשב אנלוגי הולך לבדוק את הדו"ח שלך ולוודא שאין בו פגמים". ביצעתי את האינטגרציה המדוברת בשיטה די רעועה, אם להיות עדינים, אבל קיבלתי את התשובה. והבנתי שבעצם המטרה שלי היא לא רק לקבל את התשובה; אלא להראות בפעם הראשונה, ומעבר לכל ספק, שאני יכול לנצח את המחשבים האנלוגיים במגרש שלהם באמצעות מחשב דיגיטלי. כתבתי מחדש את השיטה לפתרון; התוצאות לא השתנו. הדו"ח שפורסם הכיל שיטה אלגנטית שנודעה לאורך שנים בשם "השיטה של האמינג לאינטגרציה של משוואות דיפרנציאליות". היא מיושנת עכשיו, אבל למשך תקופה היא נחשבה לשיטה מאוד טובה. על ידי שינוי קל של הבעיה, יכולתי לעשות עבודה חשובה במקום עבודה טריוויאלית.

בצורה דומה, בעבר, כשהשתמשתי במכונה שעכשיו בעליית הגג כדי לעשות חישובים, פתרתי בעיה אחרי בעיה; הרוב הגדול היה מוצלח והיו גם כמה כישלונות. הלכתי הביתה ביום שישי אחד אחרי שהצלחתי לפתור בעיה, ובאופן תמוה לא הייתי מרוצה; הייתי מדוכא. יכולתי לראות חיים שהם רצף של בעיה אחרי בעיה אחרי זמן מה של חשיבה החלטתי, "לא, אני צריך לעבוד על הייצור ההמוני של מוצר משתנה. אני צריך לעבוד על כל הבעיות של השנה הבאה, לא רק על אלו שאני רואה כרגע". על ידי שינוי השאלה עדיין קיבלתי תוצאות זהות או טובות יותר, אבל שיניתי את הדברים ועשיתי עבודה חשובה. תקפתי את הבעיה המרכזית - איך אני פותר מראש את כל הבעיות של שנה הבאה באמצעות מכונות, כשאני לא יודע מה הבעיות הולכות להיות? אין אני מתכוונ לזה? איך אני עובד על זה כדי להצליח? איך אני מציית לחוק של ניוטון? הוא אמר: "אם ראיתי רחוק יותר מאחרים, זה רק כי עמדתי על כתפיהם של ענקים". בימים אלו אנחנו דורכים אחד לשני על הרגליים!

אתם צריכים לעשות את העבודה שלכם בצורה כזאת שאנשים אחרים יוכלו לבנות עליה דברים חדשים, כדי שהם יאמרו: "כן, עמדתי על כתפיו של זה וזה וראיתי רחוק יותר". המדע מטבעו הוא מצטבר. על ידי שינוי קל של הבעיה אתם יכולים לעשות במקרים רבים עבודה משמעותית וגדולה במקום סתם עבודה טובה. במקום לעבוד

על בעיות מבודדות, נדרתי שלעולם לא אפתור עוד בעיות מבודדות, אלא אם זה בתור מאפיין של מחלקה גדולה יותר של בעיות.

אם אתם מתמטיקאים אתם בוודאי יודעים שהמאמץ להכליל אומר לעיתים קרובות שהפתרון הוא פשוט. הרבה פעמים אפשר לעצור ולהגיד "זאת הבעיה שהוא רוצה לפתור, אבל היא אופיינית לזה וזה. כן, אני יכול לגשת למחלקת הבעיות הזאת באמצעות שיטה הרבה יותר יעילה מאשר לבעיה הספציפית כי קודם הייתי שקוע בפרטים מיותרים". העיסוק בהפשטה הופך דברים לפשוטים יותר לעיתים קרובות. זאת ועוד, שמרתי את השיטות שלי בצד והתכוננתי לבעיות עתידיות.

כדי לסיים את החלק הזה, אני אזכיר לכם, "עובד גרוע מאשים את הכלים שלו – עובד טוב ממשיך לעבוד, עם מה שיש לו, ומגיע לתוצאה הטובה ביותר שהוא יכול". ואני טוען שבאמצעות שינוי הבעיה, על ידי הסתכלות שונה על הנושא, אתם יכולים לשפר משמעותית את הפרודוקטיביות שלכם, בגלל שאתם יכולים או לעשות את זה כך שאנשים באמת יוכלו להיעזר במה שאתם כבר עשיתם, או בצורה כזאת שהאדם הבא שיתמודד עם זה יצטרך לחזור על כל העבודה שלכם. זה לא עניין של העבודה בלבד, זה גם איך שאתם מתעדים אותה, הדרך שאתם כותבים מאמר, כל הגישה שלכם. ביצוע עבודה כוללת ומקיפה הוא קל בדיוק כמו ביצוע עבודה על מקרה ספציפי. אבל זה הרבה יותר מספק ומתגמל!

עכשיו אני מגיע לנושא שמתלווה אליו טעם רע; זה לא מספיק לעשות את העבודה, צריך גם למכור אותה. "למכור", עבור מדען, זה דבר מוזר לעשות. זה מאוד מכוער; אתם לא אמורים להצטרך לעשות את זה. העולם אמור לחכות, וכשאתם עושים משהו גדול, הם אמורים לרוץ אליכם ולהלל את זה. אבל העובדה היא שכולם עסוקים בעבודה שלהם. אתם חייבים להציג את העבודה שלכם כל כך טוב שהם ישימו בצד את מה שהם עושים, יסתכלו על מה שאתם עשיתם, יקראו את זה, ואז יבואו ויגידו, "כן, זה טוב". אני מציע שכשאתם קוראים כתב-עת, כשאתם עוברים בין הדפים, תשאלו את עצמכם למה אתם קוראים מאמרים מסוימים ולא אחרים. כדאי שתכתבו את המאמר שלכם ככה שכשהוא יפורסם ב-"Physical Review", או בכל מקום אחר, הקוראים שמדפדים לא ידלגו על המאמר שלכם אלא יעצרו ויקראו אותו. אם הם לא יעצרו ויקראו, לא תזכו לקרדיט.

יש שלושה דברים שאתה חייב לעשות כדי למכור. אתה צריך ללמוד לכתוב טוב וברור מספיק כדי שאנשים יקראו את מה שאתה כותב, אתה צריך להעביר הרצאות רשמיות במידה מספקת, ואתה צריך ללמוד להעביר הרצאות פחות רשמיות. היו לנו הרבה "מדענים של החדר האחורי". בקבוצה הם היו שותקים. שלושה שבועות אחרי שהתקבלה החלטה הם היו מגישים דו"ח שאומר למה צריך לעשות ככה וככה. טוב, כבר היה מאוחר מדי. הם מעולם לא עמדו באמצע שיחה לוהטת, באמצע הפעילות, ואמרו, "אנחנו צריכים לעשות את זה מהסיבות הבאות". אתה חייב לשלוט גם בצורה הזאת של תקשורת, בנוסף ליכולת להעביר הרצאות.

כשהתחלתי להרצות, נעשיתי ממש חולה בכל פעם שנאמתי, והייתי מאוד, מאוד לחוץ. הבנתי שאני צריך ללמוד להעביר הרצאות בצורה חלקה או שזה יפגע לי בקריירה. בפעם הראשונה ש-IBM ביקשו ממני להרצות בניו-יורק ערב אחד, החלטתי שאני הולך לתת נאום ממש מוצלח, אחד שהם רוצים לשמוע, לא משהו טכני אלא משהו רחב יותר, ובסוף, אם הם יאהבו אותו, אני אגיד בשקט, "אני יכול להעביר הרצאות נוספות מתי שרק תרצו".

כתוצאה מזה, צברתי הרבה מאוד ניסיון בהרצאה לקהל קטן והתגברתי על הפחד שלי. מעבר לכך, יכולתי ללמוד ולגלות אילו שיטות היו יעילות בהרצאה ואילו לא.

כשהלכתי לפגישות כבר התחלתי לחקור למה מאמרים מסוימים נשארו בזיכרון בזמן שהרוב לא. האדם הטכני רוצה לדבר בדרך כלל על נושא טכני מאוד מוגבל. ברוב המקרים הקהל רוצה הרצאה רחבה יותר, ומתעניין בדרך כלל בהרבה יותר רקע וסביבה ממה שהמרצה רוצה לתת. כתוצאה, הרבה הרצאות הן לא אפקטיביות. המרצה מציין נושא, ומיד צולל לתוך הפרטים הטכניים שהתעסק בהם. מעט מאוד אנשים בקהל יכולים לעקוב. אתם צריכים לצייר תמונה כללית ולהסביר למה זה חשוב, ולאחר מכן להציג באיטיות תמונה כללית של מה שעשיתם. רוב האנשים יגידו, "כן, ג'ו עשה את זה", או "מרי עשתה את זה; אני מבין מה המשמעות של זה; מרי העבירה הרצאה מעולה; אני מבין מה מרי עשתה". הנטייה היא לתת הרצאה מאוד מוגבלת ובטוחה; זה בדרך כלל לא יעיל. מעבר לכך, בהרבה הרצאות יש הרבה יותר מדי מידע. אז אני אומר שהרעיון הזה של מכירה הוא ברור מאליו.

תנו לי לסכם. אתם חייבים לעבוד על בעיות חשובות. אני מתנגד לרעיון שזה הכל מזל, אבל אני מודה שיש לו חלק משמעותי בתוצאות. אני מאמין באמירה של פסטר: "המזל מעדיף את המוכנים לבוא". אני מאמין לחלוטין במה שעשיתי, בשישי אחר הצהריים במשך שנים – מחשבות גדולות בלבד – מה שאומר שהעברתי בערך 10% מהזמן שלי בניסיון להבין את הבעיות הגדולות בתחום שלי, מה חשוב ומה לא. גיליתי שבימים המוקדמים האמנתי ב-"זה" ובכל זאת העברתי את כל השבוע צועד בכיוון ה-"הוא". זה היה די טיפשי. אם אני באמת מאמין שכל האקשן שם, למה אני הולך לכיוון אחר? הייתי צריך לשנות את המטרות שלי או את מה שאני עושה. אז שיניתי את מה שעשיתי וצעדתי בכיוון שחשבתי שהוא חשוב. זה עד כדי כך קל.

עכשיו אתם יכולים להגיד לי שאין לכם שליטה על מה אתם עובדים. טוב, כשאתם מתחילים, יכול להיות שאין לכם. אבל אחרי שהשגתם כמה הצלחות, דורשים מכם יותר תוצאות ממה שאתם יכולים לספק ויש לכם את האפשרות לבחור, אבל לא לחלוטין. אני אספר לכם סיפור על זה, והוא עוסק גם בנושא של חינוך הבוס שלכם. היה לי בוס שקראו לו שלקונוף; הוא היה, והוא עדיין, חבר מאוד טוב שלי. מישהו מהצבא ניגש אלי ודרש תשובות עד יום שישי. טוב, כבר הקציתי את כל משאבי המחשוב שלי לעיבוד נתונים עבור קבוצה של מדענים; הייתי שקוע עד הברך בקבוצה של בעיות קצרות, קטנות וחשובות. האיש מהצבא רצה שאפתור את הבעיה שלו עד סוף היום ביום שישי. אמרתי, "לא, אני אתן לך את התוצאות ביום שני. אני יכול לעבוד על זה בסוף השבוע. אני לא הולך לעשות את זה עכשיו". הוא הלך לבוס שלי, שלקונוף, ושלקונוף אמר, "אתה חייב לעשות את זה בשבילו; הוא צריך את זה ליום שישי". אמרתי לו, "למה אני חייב?"; הוא אמר, "אתה חייב". אמרתי, "בסדר, סרגיי, אבל אתה הולך לשבת במשרד שלך בשישי אחר הצהריים ולקחת את האוטובוס המאוחר הביתה כדי לראות את הבחור הזה יוצא מהדלת". נתתי לבחור מהצבא את התשובות בשישי אחר הצהריים, ואז הלכתי למשרד של שלקונוף והתיישבתי; כשהאיש יצא אמרתי, "אתה רואה שלקונוף, הוא לא לקח איתו שום דבר, אבל אני נתתי לו את התשובות". ביום שני שלקונוף קרא לו ואמר, "הגעת לעבוד בסוף השבוע?" יכולתי לשמוע פאזזה קצרה כשהבחור ניסה להבין מה עומד לקרות; אבל הוא ידע שהוא היה צריך להירשם אם הוא הגיע, ושלא כדאי לו לשקר, אז הוא אמר שהוא לא. מאז שלקונוף תמיד אמר, "אתה קובע את הדד-ליינים שלך; אתה יכול לשנות אותם".

שיעור אחד הספיק כדי לחנך את הבוס שלי ולגרום לו להבין למה לא רציתי להשקיע משאבים בדברים גדולים שפגעו במחקר, ולמה היה מוצדק לסרב לעבודות דחופות שהצריכו את כל כוח החישוב של המעבדה. אני העדפתי להשתמש במחשבים כדי לפתור מספר גדול של בעיות קטנות. שוב, בימים ההם, היו לי משאבי מחשוב מוגבלים והיה ברור, בתחום שלי, ש"למתמטיקאי אין שימוש במכונות". אבל הייתי צריך יותר כוח חישוב. כל פעם שהייתי צריך להגיד למדענים מתחום אחר, "אני לא יכול; אין לי מספיק מכונות פנויות" והם התלוננו, אמרתי להם "לכו ותגידו לראש התחום שלכם שהאמינג צריך יותר כוח חישוב". אחרי זמן מה יכולתי לראות מה קורה בפסגה; הרבה אנשים אמרו לראש התחום שלי "האיש שלך צריך יותר כוח חישוב", אז קיבלתי.

בנוסף עשיתי עוד משהו. כשהשאלתי את כוח החישוב שהיה לנו כדי לעזור בימים המוקדמים של המחשבים, אמרתי, "המתכנתים שלנו לא מקבלים את ההכרה שהם ראויים לה כשאתם מפרסמים מאמרים. אתם תודו למתכנתים או שלא תקבלו ממני עוד עזרה. אתם הולכים להודות למתכנתים לפי שם; הם עבדו קשה". חיכיתי כמה שנים. אחר כך עברתי על שנה שלמה של מאמרים ב-BSTJ [כתב העת הטכני של בל-מערכות] וספרתי כמה מהם הודו למתכנתים. לקחתי את זה לבוס ואמרתי, "זה התפקיד המרכזי של מחשבים במעבדות בל. אם ה-BSTJ חשוב, אז זה כמה שמחשוב חשוב". הוא לא יכול שלא להסכים איתי. אתם יכולים לחנך את הבוסים שלכם. זאת עבודה קשה. בהרצאה הזאת אני רק מסתכל מהתחתית למעלה; אני לא מסתכל מלמעלה למטה. אבל אני אומר לכם איך אתם יכולים לקבל מה שאתם רוצים למרות ההנהלה. אתם צריכים למכור את הרעיונות שלכם גם להם.

עכשיו אני מגיע לנושא, "האם ההשקעה הדרושה כדי להיות מדען גדול שווה את זה?" כדי לענות על זה, אתם חייבים לשאול אנשים. אחרי שמתגברים על הצניעות, רוב האנשים יגידו, "כן, לעשות עבודה ממעלה ראשונה, ולדעת את זה, זה כמו יין טוב, נשים ושירה ביחד", או אם תשאלו אישה, היא תענה "זה טוב כמו יין, גברים ושירה ביחד". ואם תסתכלו על הבוסים, הם נוטים לחזור או לבקש דוחות, לנסות לקחת חלק ברגעים האלו של התגלית. הם תמיד חוסמים לכם את הדרך. ולראיה מי שעשה את זה [עבודה ממעלה ראשונה] רוצה לעשות את זה שוב. אבל זה מידע מוגבל. מעולם לא העזתי ללכת ולשאול את אלו שלא הצליחו לעשות עבודה משמעותית לדעתם בנושא. זאת דגימה מוטת, אבל אני עדיין חושב שזה שווה את המאמץ. אני חושב שזה בהחלט שווה לנסות ולעשות עבודה ממעלה ראשונה כי האמת היא, שהערך האמיתי הוא במאמץ יותר מאשר בתוצאות. למאמץ להפוך את עצמך למשהו יש ערך משל עצמו. ההצלחה וההתילה הם סוג של דיבידנדים, לדעתי.

אמרתי לכם איך לעשות את זה. זה כל כך קל, אז למה אנשים, עם כל הכישרון שלהם, נכשלים? לדוגמא, לדעתי, עד היום הזה, יש במחלקת המתמטיקה בבל מספר לא מבוטל של אנשים יותר מוכשרים ומצוידיים ממני, אבל הם לא הצליחו להפיק כל כך הרבה. חלק מהם כן הצליחו להשיג יותר ממני; שאנון השיג יותר ממני, ועוד כמה השיגו הרבה, אבל אני הייתי מאוד פרודוקטיבי ביחס להרבה אנשים שהיו מצוידיים יותר טוב. אז למה זה? מה קרה להם? למה כל כך הרבה אנשים מבטיחים נכשלים?

טוב, אחת הסיבות היא הנעה ומחויבות. האנשים שעושים עבודה גדולה עם פחות יכולת אבל יותר מחויבות, משיגים יותר מאשר בעלי הכישרון שלא משקיעים, אלה שעובדים ביום ואז חוזרים הביתה ועושים דברים אחרים ואז חוזרים לעבוד ביום הבא. אין להם את המחויבות העמוקה שכנראה דרושה כדי לעשות עבודה ממעלה

ראשונה באמת. הם עושים המון עבודה טובה, אבל תזכרו שאנחנו מדברים על עבודה ממעלה ראשונה. יש הבדל. אנשים טובים, אנשים מאוד מוכשרים, כמעט תמיד יעשו עבודה טובה. אנחנו מדברים על העבודה יוצאת הדופן, סוג העבודה שמשגיגה לך פרס נובל והכרה עולמית.

הדבר השני הוא, לדעתי, פגמים באישיות. אני אצטט עכשיו משהו שפגשתי באירוויין, קליפורניה. הוא היה הראש של מרכז חישוב וכיהן אז באופן זמני כעוזר מיוחד של נשיא האוניברסיטה. היה ברור שיש לו עתיד מזהיר בעבודה שלו. פעם אחת הוא לקח אותי למשרד שלו והראה לי את השיטה שלו לטפל במכתבים ואיך הוא שומר על קשר. הוא ציין כמה בלתי יעילה המזכירה שלו הייתה. הוא שמר את כל המכתבים שלו אצלו; הוא ידע איפה הכל נמצא. והוא כתב בעצמו את כל המכתבים שלו. הוא התרברב כמה זה היה נהדר וטען שהוא יכול לעשות הרבה יותר עבודה בלי ההפרעות של המזכירה. טוב, מאחורי הגב שלו, דיברתי עם המזכירה. המזכירה אמרה, "ברור שאני לא יכולה לעזור לו; אני לא מקבלת את הדואר שלו. הוא לא נותן לי את מה שצריך כדי לאסוף אותו; אין לי מושג איפה הוא שם אותו. ברור שאני לא יכולה לעזור לו". אז הלכתי אליו ואמרתי לו, "תראה, אם תאמץ את הגישה הנוכחית ותעשה כל מה שאתה יכול לעשות בעצמך, תוכל לעשות רק את מה שאתה יכול לעשות בעצמך ולהגיע רק עד איפה שאתה יכול לקחת את עצמך. אם תלמד לנצל את המערכת, תוכל להמשיך ולהגיע רחוק יותר בזכות התמיכה של המערכת". והוא מעולם לא התקדם משם. היה לו פגם באישיות שגרם לו לרצות להיות בשליטה מלאה ולא היה מוכן להכיר בזה שהוא צריך את התמיכה של המערכת.

אפשר לראות את זה קורה פעם אחר פעם; מדענים טובים נלחמים במערכת במקום ללמוד לעבוד אתה ולנצל את מה שיש לה להציע. ויש לה הרבה מה להציע, אם אתה לומד לנצל זאת. זה דורש סבלנות, אבל אתה יכול ללמוד להשתמש במערכת בצורה טובה מאוד, ואתה יכול ללמוד איך לעקוף אותה. אחרי הכל, אם אתה רוצה שיגידו לך "לא", פשוט לך לבוס שלך ותקבל את ה-"לא" בקלות. אם אתה רוצה לעשות משהו, אל תשאל, תעשה. תציג לבוס שלך את העובדה המוגמרת. אל תיתן לו הזדמנות להגיד לך "לא". אבל אם אתה רוצה "לא", קל מאוד לקבל "לא".

פגם אישיות נוסף הוא אגו ואני אדבר עליו מהניסיון שלי. הגעתי מלוס-אלמוס ובימים המוקדמים השתמשתי במכונה שהייתה בשדרות מאדיסון 590 בניו יורק ששכרנו עליה זמן חישוב. עדיין לבשתי בגדים מערביים, עניבת שרוך וכל הדברים האלה. הבחנתי במעורפל שאני לא מקבל שירות טוב כמו שאר האנשים. אז החלטתי למדוד. היית מגיע ומחכה לתור שלך; הרגשתי שאני לא מקבל עסקה הוגנת. אמרתי לעצמי, "למה? אף בכיר ב-IBM לא אמר 'תנו להאינג' יחס גרוע'. אלו הפקידים בתחתית שאחראים לזה. כל פעם שיש זמן פנוי - הם ממהרים ונותנים אותו למישהו. אבל לא לי. אבל, למה? לא פגעתי בהם בשום צורה". התשובה הייתה שהייתי לבוש בצורה שלדעתם לא הלמה את המצב. זה הגיע לזה - לא התלבשתי כמו שצריך. הייתי צריך לקבל החלטה - האם אני הולך לשמור על האגו שלי ולהתלבש בדרך שאני רוצה, ועל ידי כך להסיט מאמצים מהעבודה המקצועית שלי, או להתלבש בצורה מתאימה יותר? החלטתי לעשות את המאמץ להיראות מתאים יותר. ברגע שעשיתי את זה, קיבלתי שירות הרבה יותר טוב. והיום, כברנש זקן ומעניין, אני מקבל שירות יותר טוב מאשר אנשים אחרים.

עליכם להתלבש בהתאם לציפיות של הקהל שלכם. אם אני הולך להרצות במרכז המחשוב של MIT, אני לובש עניבת שרוך וז'קט קורדרוי ישן או משהו כזה. אני יודע מספיק כדי לא לתת לבגדים שלי, למראה שלי, או לנימוסים שלי לעמוד בדרך של משהו שאני רוצה. מספר עצום של מדענים מרגישים שהם צריכים לבטא את עצמם ולעשות הכל בדרכם. הם מרגישים שהם חייבים לעשות דבר זה או אחר, והם משלמים על זה מחיר באופן קבוע.

ג'ון טוקי התלבש כמעט תמיד בצורה מאוד יומיומית. הוא היה נכנס למשרד של מישהו והיה לוקח הרבה זמן עד שהבחור הבין שעומד מולו מדען ממעלה ראשונה וששווה להקשיב לו. במשך תקופה ארוכה ג'ון היה צריך להתמודד עם הסוג הזה של עוינות. זה מאמץ מבוזבז! לא אמרתי שאתם צריכים להתיישר לנורמה; אמרתי ש-"להיראות כאילו שאתם מתיישרים הנורמה יכול לעזור לכם מאוד". אם אתם בוחרים לבטא את האגו שלכם בדרך כלשהי, "אני הולך לעשות את זה בדרך שלי", אתם משלמים מחיר קטן וקבוע לאורך כל הקריירה המקצועית שלכם. והמחיר הזה, שמצטבר לאורך חיים שלמים, הופך לכמות מאוד גדולה של צרות מיותרות.

בזכות זה שהשקעתי את המאמץ בלספר בדיחות למזכירות ולהיות קצת חברותי, קיבלתי עזרה יוצאת דופן מהמזכירות. לדוגמא, פעם אחת כל מכוונות הצילום במורי-היל [Murray Hill] היו תפוסות. אל תשאלו אותי איך, אבל זה היה המצב. ואני רציתי לעשות משהו. המזכירה שלי התקשרה למישהו בהולמלד [Holmdel], לקחה את הרכב של החברה, עשתה נסיעה של שעה לשם, צילמה את זה בשבילי, וחזרה. זה היה בזכות הזמן שהשקעתי בניסיון לעודד אותה, לספר לה בדיחות ולהיות ידידותי; זאת הייתה ההשקעה הזאת שהשתלמה לי. אם אתם מבינים שאתם חייבים לנצל את המערכת ומשקיעים זמן בניסיון להבין איך לגרום למערכת לעבוד בשבילכם, אתם מגלים איך להתאים את המערכת לצרכים שלכם. או שאתם יכולים להילחם בה באופן קבוע, מעין מלחמה לא מוצהרת, למשך כל החיים שלכם.

אני חושב שג'ון טוקי שילם מחיר נורא ללא צורך. הוא היה גאון בכל מקרה, אבל אני חושב שהיה הרבה יותר טוב, והרבה יותר פשוט, אם הוא היה מוכן לקבל את המוסכמות קצת יותר ולוותר על האגו. הוא הולך להתלבש כמו שהוא רוצה ומתי שהוא רוצה. זה תקף לא רק ללבוש אלא לעוד אלפי דברים קטנים; אנשים ממשיכים להילחם במערכת. לא שלא צריך לעשות את זה לפעמים!

כשהזיזו את הספרייה מאמצע מורי-היל לקצה הרחוק, אחד מחבריי הגיש בקשה לאופניים. טוב, הארגון לא טיפש. הם חיכו קצת ואז שלחו לו מפה של המתחם וביקשו, "בבקשה ציין לנו על המפה את הנתיבים שאתה הולך לנסוע בהם כדי שנוכל לבטח אותך". עוד כמה שבועות עברו. אז הם שאלו "איפה אתה הולך לאחסן את האופניים ואיך אתה הולך לנעול אותם?". בסופו של דבר הוא הבין שהם הולכים לקבור אותו בבירוקרטיה וויתר. בסופו של דבר הוא הפך לנשיא של מעבדות בל.

ברני אוליבר היה אדם טוב. פעם אחת הוא כתב מכתב ל-IEEE. באותו זמן למדפים במעבדות בל היה גובה מסוים, והספרים של ה-IEEE Proceedings היו גבוהים יותר; ומכיוון שלא היה אפשרי לשנות את גודל המדפים הסטנדרטי, הוא כתב לגוף הפרסום של ה-IEEE מכתב שאומר ש"מכיוון שכל כך הרבה חברים ב-IEEE נמצאים במעבדות בל, ומכיוון שאין במדפים מקום לספרים, צריך לשנות את הגודל של הספרים". הוא שלח את זה לבוס

שלו כדי לקבל את חתימתו. הוא קיבל חזרה עותק עם החתימה של הבוס שלו, אבל הוא עדיין לא יודע אם המקור נשלח או לא. אני לא אומר שאתם לא צריכים לעשות שינויים או מחוות. אני אומר שמהמחקר שלי על אנשים בעלי יכולות עולה שהם לא משקיעים את עצמם בסוג הזה של מלחמות. הם משחקים בזה קצת ואז עוזבים את זה וחוזרים להתמקד בעבודה שלהם.

הרבה אנשים מדרג שני נתפסים באיזה שטות במערכת, ונגררים עם זה למלחמה של ממש. הם מוציאים את האנרגיות שלהם על פרויקט טיפשי. עכשיו אתם תגידו בוודאי שמישהו חייב לשנות את המערכת. אני מסכים; מישהו חייב. אבל מי אתם רוצים להיות? האדם שמשנה את המערכת או האדם שמגיע להישגים מהמעלה הראשונה? איזה מין אנשים אתם רוצים להיות? כשאתם נאבקים במערכת, חשוב שתבהירו לעצמכם מה אתם עושים, כמה רחוק אתם מוכנים להגיע מתוך שעשוע, וכמה מאמץ אתם מוכנים לשרוף על הלחימה. העצה שלי היא לתת למישהו אחר להתעסק בזה ולהשקיע את כל מרצכם בהפיכה למדענים מהמעלה הראשונה. למעט מאוד אנשים יש את היכולת להפוך למדענים מהמעלה הראשונה בזמן שהם נאבקים במערכת.

מצד שני, אי אפשר תמיד להיכנע. יש זמנים בהם רמה מסוימת של מרדנות היא הגיונית. ראיתי שבמעט כל המדענים נהנים להתגרות קצת במערכת פשוט כי זה כיף. בסופו של דבר, לא יכול להיות מישהו שהוא מקורי מאוד בתחום אחד, בלי להיות מקורי בכלל בתחומים אחרים. מקוריות זה להיות שונה. אתם לא יכולים להיות מדענים מקוריים בלי שיהיו לכם עוד כמה תכונות מקוריות. אבל במקרה של מדענים רבים הביטוי של המוזרויות האלו בתחומים אחרים עולה הרבה יותר מהתמורה שהם מקבלים לאגו שלהם. אני לא מתנגד לביטוי עצמי; רק לסוגים מסוימים.

עוד פגם הוא כעס. לעיתים קרובות מדענים מתחילים לכעוס, וזאת לא דרך להתמודד עם דברים. שעשוע, כן, כעס, לא. כעס הוא משולל כיוון. אתם צריכים לשתף פעולה עם המערכת במקום להתנגד לה כל הזמן.

עוד דבר שאתם צריכים לחפש זה את הצד החיובי של דברים במקום הצד השלילי. כבר נתתי לכם מספר דוגמאות, ויש עוד הרבה, הרבה מאוד; איך, בהינתן סיטואציה, יכולתי, על ידי שינוי הדרך שאני מסתכל עליה, להפוך פגם ליתרון. אני אתן לכם עוד דוגמא. אני אדם בעל אגו מפותח; אין ספק בנושא. ידעתי שרוב האנשים שלקחו שנת שבתון כדי לכתוב ספר לא סיימו אותו בזמן. אז לפני שעזבתי, אמרתי לכל החברים שלי שבשנתי אחזור, הספר כבר יהיה גמור! כן, אני אסיים אותו – אני אהיה מבושש אם אני אחזור בלעדיו! ניצלתי את האגו שלי כדי לגרום לעצמי להתנהג בצורה שרציתי. התרברבתי במשהו אז הייתי חייב לעמוד בו. גיליתי שבמקרים רבים, כמו חולדה במלכודת, היו לי יכולות מרשימות באופן מפתיע. גיליתי שמשתלם לי להגיד "אה, כן, ברור שתהיה לי תשובה עד יום שלישי!" גם כשלא היה לי מושג מה לעשות. ביום ראשון בערב כבר הייתי משקיע את כל מרצי בניסיון להבין איך אני נותן תשובה עד שלישי. לעיתים קרובות סיכנתי את הגאווה שלי, ולפעמים נכשלתי, אבל כפי שאמרתי, כמו חולדה במלכודת הופתעתי מזה שלעיתים מאוד קרובות עשיתי עבודה טובה. אני חושב שאתם צריכים ללמוד להשתמש בעצמכם. אתם צריכים ללמוד איך לשנות את ההסתכלות שלכם על סיטואציה בצורה שתגדיל את סיכויי ההצלחה שלכם.

עכשיו, אנשים משלים את עצמם לעיתים מאוד, מאוד קרובות. יש אין ספור דרכים לשנות משהו, לעבוד על עצמכם, ולגרום לו להיראות כמו משהו אחר. כשאתם שואלים "למה לא עשית את זה ואת זה" לאדם השני יש אלף תירוצים. אם תסתכלו על ההיסטוריה של המדע תראו שבדרך כלל יש 10 אנשים שכבר ממש שם, ואנחנו משלמים לזה שהגיע ראשון. התשעה האחרים יכולים רק להגיד "טוב, היה לי את הרעיון הזה אבל לא עשיתי את זה" ועוד כל מיני תירוצים. יש כל כך הרבה תירוצים. למה לא הייתם ראשונים? למה לא עשיתם את זה נכון? אל תנצלו תירוצים. אל תשלו את עצמכם. אתם יכולים להגיד לאחרים את כל התירוצים שאתם רוצים. לא אכפת לי. אבל נסו להיות כנים עם עצמכם.

אם אתם באמת רוצים להיות מדענים מהמעלה הראשונה אתם צריכים להכיר את עצמכם, את החולשות שלכם, את החוזקות שלכם, ואת הפגמים העיקריים שלכם, כמו האגו שלי. איך אתם יכולים להפוך פגם לנכס? איך אתם יכולים לגרום לסיטואציה שבה אין לכם מספיק כוח אדם להתקדם בדיוק לכיוון שאתם צריכים? אני אומר שוב שראיתי, בשלמדתי את ההיסטוריה, שמדענים מצליחים שינו את ההסתכלות שלהם והפכו את הפגמים ליתרונות.

לסיכום, אני טוען שחלק מהסיבות שכל כך הרבה אנשים שקרובים לגדולה לא מצליחים הן: הם לא עובדים על בעיות חשובות, הם לא מושקעים רגשית, הם לא מנסים להפוך את מה שקשה לסיטואציה אחרת שניתן לפתור בקלות אבל היא עדיין חשובה, והם ממשיכים לספר לעצמם תירוצים. הם ממשיכים להגיד שזה עניין של מזל. אמרתי לכם כמה זה קל; בנוסף, אמרתי לכם איך להשתנות. ועכשיו, לכו ותהפכו למדענים דגולים!



### **מדענים המוזכרים בטקסט, לפי סדר א"ב:**

אדיסון, תומס אלווה – Thomas Alva Edison  
אוליבר, ברני – Barney Oliver  
אופנהיימר, רוברט – Julian Robert Oppenheimer  
איינשטיין, אלברט – Albert Einstein  
בודה, הנדריק וויד – Hendrick Wade Bode  
ברדין, ג'ון – John Bardeen  
ברטיין, וולטר האוסר – Walter Houser Brattain  
בטה, האנס – Hans Bethe  
ג'ונסון, ג'ון ברטרנד – John Bertrand Johnson  
דרווין, צ'רלס – Charles Darwin  
האמינג, ריצ'רד (דיק) ווסלי – Richard Wesley Hamming  
הופר, גרייס – Grace Hopper  
טוקי, ג'ון – John Tuckey  
טלר, אדוארד – Eduard Teller  
ניוטון, אייזק – Isaac Newton  
מק'קאל, דייב – Dave McCall  
מק'קיי, קן – Ken McKay  
פיינמן, ריצ'רד – Richard Feynman  
פירס, ג'ון רובינסון – John Robinson Peirce  
פסטר, לואי – Louis Pasteur  
פפאן, וויליאם (ביל) גרדנר – Willian Gardner Pfann  
פרמי, אנריקו – Enrico Fermi  
צ'ינוות, אלן ג' – Alan G. Chynoweth  
קייזר, ג'יימס פ' – James F. Kaiser  
קלוגסטון, אלברט – Albert Clogston  
שאנון, קלוד – Claude Shannon  
שוקלי, וויליאם – Willian Shockley  
שלקונוף, סרגיי – Sergei Alexander Schelkunoff

### **ארגונים ומונחים המוזכרים בטקסט, לפי סדר א"ב:**

בל מחקר תקשורת – Bell Communications Research  
מעבדות בל – Bell Labs  
תורת המידע – Information Theory  
תורת הקודים – Coding Theory

Institute of Electrical and Electronics Engineers – IEEE  
בהנדסת חשמל ובאלקטרוניקה  
IEEE Proceedings – פרסומים של ה-IEEE  
Physical Review Letters – כתב עת מדעי נחשב

### **קישורים שימושיים:**

התרגום:

<https://github.com/tmr232/Targum>

המאמר המקורי:

<https://www.cs.virginia.edu/~robins/YouAndYourResearch.html>

וידאו של האמינג מעביר הרצאה זהה:

<https://www.youtube.com/watch?v=a1zDuOPkMSw>

The Art of Doing Science and Engineering – ספר של האמינג באותו נושא:

<http://worrydream.com/refs/Hamming-TheArtOfDoingScienceAndEngineering.pdf>