

תוכן העניינים

ז	הקדמת המתרגמים: הפיזיקאי האוסטרי שכתב על ביולוגיה באנגלית – עכשיו בעברית!
1	מה הם החיים? ההיבטים הפיזיקליים של התא החי / ארווין שרדינגר
3	הקדמת המחבר
5	פרק 1: גישתו של הפיזיקאי הקלאסי לנושא
23	פרק 2: מנגנון התורשה
40	פרק 3: מוטציות
56	פרק 4: הראיות ממכניקת הקוונטים
68	פרק 5: המודל של דלברוק: דיון ובחינה
82	פרק 6: סדר, אי־סדר ואנטרופיה
93	פרק 7: האם החיים מתבססים על חוקי הפיזיקה?
105	אפילוג
111	אחרית דבר: ואתא שונרא – חומר, חיים ונפש בעולמו של שרדינגר / אבשלום אליצור

הקדמת המחבר

מדען אמור להחזיק בידע מקיף ויסודי בנושאים מסוימים וממקור ראשון, ומשום כך לרוב מצופה ממנו שלא לכתוב על נושאים שאיננו מומחה בהם. נהוג לומר שבמקרים אלו "האצילות מחייבת". לצורך המטרה הנוכחית אבקש להתכחש לאצילות, אם ישנה, ולהשתחרר מהמחויבות הכרוכה בה. ההצדקה לכך היא זו: ירשנו מאבות אבותינו את הכמיהה הכנה לידע מאוחד וחובק-כול. גם השם שניתן למוסדות ההשכלה הגבוהים ביותר מזכיר לנו שמאז העת העתיקה ובמשך מאות שנים ההיבט האוניברסלי הוא היחיד שזכה למלוא ההערכה. ברם, תהליך התרחבותו והעמקתו של הידע במגוון תחומים במהלך מאה השנים האחרונות הציב בפנינו דילמה משונה. אנו חשים בבירור שרק עכשיו אנחנו מתחילים להשיג את הנדרש כדי לאחות יחדיו את סך כל הידוע לכדי מהות שלמה; אבל מצד שני, זה הפך כמעט בלתי אפשרי עבור אינטלקט יחיד להכיל יותר ממנה קטנה ומוגבלת מתוכו. איני רואה דרך לחמוק מהדילמה הזו (מבלי שהיעדר האמיתי יאבד לנצח) מבלי להעז ולשאוף למזג עובדות ותיאוריות, גם אם על בסיס ידע חלקי ומיד שנייה – ותוך הסתכנות בכך שנשים את עצמנו ללעג.

עד כאן התנצלותי.

הקשיים בשפה אינם זניחים. שפת האם של כל אחד היא כמו חליפה התפורה למידותיו, ותחושת אי נוחות עולה כאשר זו אינה זמינה ויש להחליפה באחרת. תודותי נתונות לד"ר אינקסטר (Inkster) (טריניטי קולג', דבלין) ולד"ר פדראייג בראון (Padraig

Browne, סנט פטריקס קולג') ואחרון חביב, למר ס"ק רוברטס (S. C. Roberts). הם עברו תלאות רבות בניסיון להלביש עלי את החליפה החדשה, ועברו צרות רבות עוד יותר בהתמודדותם עם חוסר רצוני לוותר על סגנון "מקורי" משל עצמי מדי פעם. אם נותר לכך שריד חרף ניסיונות התיווך של חברי, יש להפנות את האשמה אלי ולא אליהם.

כותרות המשנה של הפסקאות הרבות נועדו במקור לשמש בתור סיכומי שוליים, ולכן יש לקרוא את הטקסט בכל פרק ברצף.

ארווין שרדינגר

דבלין

ספטמבר 1944

Homo liber nulla de re minus quam de morte cogitat; et ejus sapientia non mortis sed vitae meditatio est.

אין דבר שהאדם החופשי ממעט לחשוב עליו כמו המוות, וחכמתו אינה ההגות במוות, אלא ההגות בחיים.

– שפינוזה, אתיקה, חלק ד, משפט 67*.

* תרגם ירמיהו יובל, בני ברק: הקיבוץ המאוחד, 2003. גם יתר הציטוטים מהאתיקה לקוחים מתרגום זה. (כל ההערות המסומנות בכוכביות הן של המתרגמים. ההערות הממוספרות הן של המחבר.)

מדוע האטומים קטנים כל כך?

שיטה טובה לפיתוחם של "הרעיונות של הפיזיקאי הנאיבי" תהיה לפתוח בשאלה המשונה והכמעט מגוחכת: מדוע האטומים קטנים כל כך? בתור התחלה, הם בהחלט קטנים למדי. כל פיסת חומר מחיי היוםיום מכילה מספרים אדירים שלהם. דוגמאות רבות הוצעו להמחשת נקודה זו לקהל, ואין מרשימה מזו שבה השתמש הלורד קלווין (Kelvin): נניח שהייתם מסוגלים לסמן את המולקולות בתוך כוס מים; לאחר מכן, שפכו את תכולת הכוס לתוך האוקיינוס וערבבו אותו בצורה יסודית, כך שהמולקולות המסומנות יפוזרו בצורה אחידה ברחבי שבעת הימים; אם אז הייתם מוציאים כוס מים מכל מקום באוקיינוס, הייתם מוצאים בה כמאה מאותן מולקולות מסומנות.³

הגודל הממשי של האטומים⁴ מצוי בין $1/5000$ ו- $1/2000$ של אורך הגל של אור צהוב. זו השוואה משמעותית, משום שאורך הגל מעיד על הממדים של הגרגר הקטן ביותר שעדיין ניתן

3 לא הייתם מוצאים, כמובן, בדיוק מאה (אפילו אם זו הייתה התוצאה המדויקת של החישוב). אתם עשויים למצוא 88 או 95 או 107 או 112, אבל הרבה פחות סביר למצוא 50 או 150. ה"סטייה" או ה"תנודתיות" צפויה להיות מסדר גודל של השורש הריבועי של 100, כלומר 10. הסטטיסטיקאי יבטא זאת בקביעה שתמצאו 100 ± 10 . נכון לעכשיו ניתן להתעלם מהערה זו, אך נתייחס אליה מאוחר יותר, כשנספק דוגמה עבור חוק ה' \sqrt{n} '.

4 על פי התפיסה העכשווית אין לאטום גבולות חדים, כך ש"גודל" של אטום אינו מונח מוגדר היטב. אבל אנחנו רשאים לזהות אותו (או, אם תרצו, להחליף אותו) עם המרחק שבין מרכזי האטומים במוצק או בנוזל – כמובן שלא במצב גזי, שבו המרחק, תחת לחץ וטמפרטורה טיפוסיים, גדול בערך פי עשרה.

להבחנה תחת מיקרוסקופ. כך מתברר שגרגר שכזה עדיין מכיל אלפי מיליוני אטומים.*

אם כן, מדוע אטומים קטנים כל כך?

זוהי שאלה חמקמקה בכירור, שכן היא לא באמת נוגעת לגודלם של האטומים. היא עוסקת בגודלם של אורגניזמים, וליתר דיוק, לגודל שלנו עצמנו. אכן, האטום הוא קטן בהשוואה ליחידות האורך הנפוצות, למשל היארד או המטר. בפזיקה אטומית, מקובל להשתמש במה שמכונה אנגסטרם (Ångström, Å), שהוא אחד חלקי 10^{10} של המטר, או בכיתוב עשרוני: 0.000000001 מטר. קוטרם של אטומים הוא בטווח של 1-2 אנגסטרם. כך שאותן יחידות אורך נפוצות (שביחס אליהן האטומים הם כה קטנים) קשורות באופן הדוק לגודל הגוף שלנו. יש סיפור המקשר את מקורו של היארד לחוש ההומור של מלך אנגליה, שכאשר נשאל על ידי יועציו איזו יחידת מידה יש לאמץ – הוא פרש את ידו הצידה ואמר: "קחו את המרחק בין מרכז החזה שלי לקצות אצבעותי, וזה יעשה את העבודה".** נכון או לא, הסיפור הזה הוא בעל משמעות לצרכינו. המלך יחווה בטבעיות אורך בר השוואה לגופו שלו, בידיעה שכל אפשרות אחרת תהיה מאוד לא נוחה לשימוש. עם כל החיבה ליחידת האנגסטרם, הפיזיקאי מעדיף לשמוע מהחייט שהחליפה החדשה שלו תדרוש שישה וחצי יארד*** של בד – ולא שישים וחמישה אלף מיליון אנגסטרם.

מכאן יוצא שהשאלה שלנו מתמקדת בעצם ביחס שבין שני אורכים: זה של הגוף שלנו וזה של האטום – עם עדיפות בלתי ניתנת לערעור לקיום הבלתי תלוי של האטום, כך שהמשמעות

* המסקנה מבוססת על החישוב הבא: אם באורך הגל של אור צהוב (x) נכנסים סדר גודל של 1000 אטומים, הרי שבנפח של גרגר עם אורך צלע x נכנסים סדר גודל של מיליארד אטומים: $x^3 = 1000^3 = 1,000,000,000$.

** יארד היא מידת האורך הנהוגה בבריטניה; אורכה כ־0.91 מטר.

*** כך במקור; כנראה התכוון למטרים.

האמיתית של השאלה היא: מדוע גופנו חייב להיות כה גדול בהשוואה לאטום?

אני יכול לדמיין, שרבים הם התלמידים הנלהבים לפיזיקה או לכימיה שהצטערו מכך שכל אחד מאיברי החישה שלנו – המהווה חלק ניכר יותר או פחות מגופנו ולכן (לאור גודלו של היחס המדובר) בעצמו מורכב מאינספור אטומים – הינו גם מכדי להיות מושפע מאטום בודד. אנחנו לא יכולים לראות או להרגיש או לשמוע את האטומים הבודדים. ההיפותזות שלנו לגבי האטומים שונות למדי ממה שניתן לקלוט באמצעות איברי החישה המגודלים שלנו, ולא ניתן להעמיד אותן לבחינה ישירה.

האם הכרחי שכך יהיה? האם יש סיבה מהותית לכך? האם נוכל לעקוב אחר מצב עניינים זה עד לסוג של עיקרון ראשוני, במטרה לברר ולהבין מדוע שום דבר אחר אינו תואם את חוקי הטבע עצמם?

עכשיו, לשם שינוי, זו בעיה שהפיזיקאי מסוגל להתיר לגמרי. התשובה לכל השאלות היא חיובית.

תפקוד האורגניזם מצריך חוקים פיזיקליים מדויקים

אלמלא כן – לו היינו אורגניזמים רגישים עד כדי כך שאטום בודד, או מספר מועט של אטומים, היו מסוגלים לעורר בנו רושם חושי – שומו שמיים, כיצד היו נראים החיים! אם להתמקד בנקודה אחת: אורגניזם מסוג זה קרוב לוודאי שלא יוכל לפתח את סוג המחשבה הסדורה, אשר, לאחר שעברה דרך רצף ארוך של שלבים מקדימים, תסתיים לבסוף בהגיתו, יחד עם רעיונות רבים אחרים, של הרעיון של אטום.

למרות שאנחנו מתמקדים בנקודה הזו, השיקולים הבאים יחולו עקרונית גם על תפקודם של איברים נוספים פרט למוח ולמערכת החישה. על כל פנים, הדבר האחד והיחיד שיש לו חשיבות עליונה

בנוגע לעצמי שלנו הוא, שאנחנו מרגישים, חושבים ותופסים. ביחס לתהליך הפיזיולוגי האחראי על מחשבות ורגשות, כל שאר התהליכים הם משניים בחשיבותם, לפחות מנקודת המבט האנושית, אם לא מזו של הביולוגיה הטהורה. נוסף על כך, נוכל לקדם רבות את מטרתנו בכך שנבחן את התהליך הזה, המלונה באופן הדוק באירועים סובייקטיביים, אף שאיננו יודעים את טבעם האמיתי של יחסים הדוקים אלו. אכן, להשקפתי, הדבר שוכן מחוץ לגבולות מדע הטבע, ובסבירות גבוהה, מחוץ לגבולות ההבנה האנושית בכלל.* על כן אנחנו ניצבים בפני השאלה הבאה: מדוע איבר כמו המוח שלנו, ביחד עם מערכת החישה הנלווית אליו, מוכרח להיות עשוי ממספר עצום של אטומים, על מנת שהשינויים במצבו הפיזי יהיו בתיאום קרוב והדוק עם חשיבה מפותחת? על מה ניתן לבסס את הטענה שיש חוסר הלימה בין מטרה זו של אותו איבר – בכללותו או רק בחלקיו ההיקפיים, המקיימים יחסים ישירים עם הסביבה – לבין היותו מנגנון מעודן ורגיש עד כדי כך, שיוכל להגיב ולעמוד על השפעתו של אטום בודד מבחוץ?

הסיבה לכך היא, שמה שאנחנו קוראים לו חשיבה הוא, קודם כול, בעצמו דבר סדור, ושנית יכול לחול רק על מושאים שיש להם רמה מסוימת של סדירות, כמו תפיסות וחוויות. לכך יש שתי השלכות: ראשית, כדי שארגון פיזי יהיה בהלימה גבוהה עם חשיבה (כמו שהמוח שלי בהלימה עם המחשבה שלי), הוא צריך להיות מסודר מאוד, ומכאן שהאירועים המתרחשים בתוכו חייבים לציית לחוקים פיזיקליים נוקשים, לפחות במידה רבה של דיוק. שנית, הרשמים הפיזיים שגופים אחרים מבחוץ מותירים על אותה

* שרדינגר מתייחס כאן לבעיה הפסיכופיזית (הנקראת גם בעיית גוף-נפש, או "הבעיה הקשה"), הנוגעת בקושי שבהסברת הקשר בין תהליכים נפשיים-סובייקטיביים לתהליכים פיזיים-אובייקטיביים. הוא מציג עמדה פסימית לגבי עצם היכולת האנושית לפתור בעיה זו. ראו על כך בהרחבה בספרו, *Mind and Matter*, Cambridge: University Press, 1958.

מערכת פיזית מאורגנת היטב תואמים את התפיסות והחוויות של המחשבות התואמות להן, ובכך יוצרים את מושאיה, כפי שכיניתי אותם. לכן, ככלל, האינטראקציות הפיזיות בין המערכת שלנו לבין מערכות אחרות מחויבות לרמת סדירות מסוימת, כלומר, גם הן חייבות לציית לחוקים פיזיקליים נוקשים עד לרמת דיוק מסוימת.

חוקים פיזיקליים נשענים על סטטיסטיקה אטומית ולכן הם תקפים רק בקירוב

ומדוע כל זה לא יכול להתממש במקרה של אורגניזם המורכב ממספר קטן של אטומים בלבד ורגיש להשפעתו של אטום בודד או להשפעתם של אטומים ספורים?

מכיוון שכידוע כל האטומים נעים כל הזמן בתנועת חום* בלתי סדירה לחלוטין, וזו, כביכול, עומדת בניגוד להתנהגותם המסודרת ולא מאפשרת לאירועים המתרחשים בין מספר קטן של אטומים לציית לאף חוקיות ניתנת לזיהוי. רק בפעילותם המשותפת של מספר עצום של אטומים מתחילים חוקים סטטיסטיים לפעול ולשלוט בהתנהגותם של אותם צבירים, ברמת דיוק ההולכת וגוברת עם העלייה במספר האטומים המעורבים. זוהי הדרך שבה האירועים רוכשים מאפיינים סדורים באמת. כל החוקים הפיזיקליים והכימיים הידועים כבעלי חשיבות לחייהם של אורגניזמים הם מהסוג הסטטיסטי הזה; כל סוג אחר של חוקיות וסדירות שניתן לדמיין מצוי תחת הפרעה מתמדת, ואחת דינו: להתבטל בשל תנועת החום הבלתי פוסקת של האטומים.

* תנועת חום או תנועה תרמית (heat motion) היא תנועתם האקראית והבלתי פוסקת של אטומים. התנועה נובעת מאנרגיית החום של האטומים, התלויה בטמפרטורה שלהם. שרדינגר יתייחס לכך ביתר הרחבה בהמשך.