

ה'יבִּשֶׁת' המסתורית של מכניקת הקוונטים

Zohar Maliniak*

הפקולטה לפילוסופיה, אוניברסיטת חיפה, ישראל

סוקרים צעירים

MAOR

גיל: 13

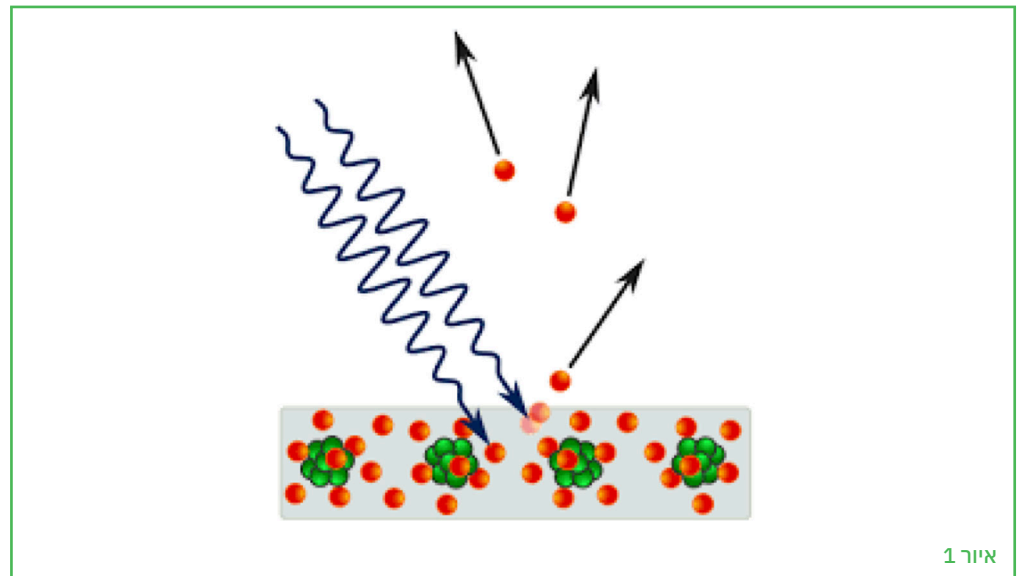


פיזיקה היא מאמץ אנושי לגלות את החוקים הבלתי-משתנים של היקום. מאז הוגי הדעות היוונים לפני 2,000 שנים, מעת לעת מתרחשים שינויים יסודיים בחוקים שמדענים נטו לחשוב כי הם קבועים. זאת כשהתרבות האנושית נפגשת עם 'יבִּשֶׁת' פיזיקלית חדשה, שבה נִשְׁפַּע תופעות בלתי-צפויות, המאתגרות את התפיסה הפיזיקלית הרווחת באותה עת, וסותרות אותה. אחד מהשינויים הגדולים אי-פעם, המבקש לחשוף 'ארץ' חדשה ומלהיבה, הִחֵל לפני כ-120 שנים, וממשיך עד ימינו. במאמר זה אנסה 'לשים על השולחן' חלק מהתופעות והתוצאות המוזרות שהכריחו אותנו לשנות את האופן שבו אנו חושבים על החומר ומבנים אותו. בין השאר על אנרגיה; מהי מדידה מדעית, ומה בבסיס המציאות היסודית של חפצים סביבנו. אשאר לכם לחשוב לגבי המשמעות המשותפת של כל אותן תופעות. זאת כיוון שאין מי שיודע בבטחה ובוודאות את התשובה המדויקת, וטובי הפיזיקאים חלוקים על כך.

האיזינו לפודקאסט על המאמר: קישור לפודקאסט

איך החלה תורת הקוונטים?

במאמר שלפניכם אשתדל לענות על השאלה מהי התפיסה שמקשתת תורת הקוונטים. מה עושה פיזיקאי טוב, בעל מחשבה חופשית ויצירתית, כשמתגלות תופעות שאינן עולות בקנה אחד עם מה שהיה ידוע לו עד כה? ראשית, הוא מנסה להסביר את התיאוריה הקיימת כך שתתאים לתופעות החדשות, אך לעיתים הוא מעז ומציע נקודת מבט חדשה לגמרי. זאת ממש כשם שאייזק ניוטון, הפיזיקאי והמתמטיקאי האנגלי בן המאה ה-17, הציע השקפה שהייתה שונה לחלוטין מהאופן שבו התבונן בעולם אריסטו, שחי ביוון לפני 2,000 שנים ונחשב אבי המדע המודרני. אריסטו תפס את העולם כגוף אורגני שבו הכול קשור להכול, כמו למשל צמח פורח, או גוף האדם. בסוף המאה ה-19, שני פיזיקאים גרמנים, **מקס פלאנק** ואלברט איינשטיין (שמוצאו יהודי), הציעו להתבונן בתופעות הבלתי-מוסברות בדרך חדשה, מפתיעה ולא צפויה. התופעות שאותן ניסו להסביר היו קרינה של גוף שחור, והאפקט הפוטואלקטרי (איור 1).



מה בדיוק התרחש בשתי התופעות הללו? מעט קשה לתאר זאת בכמה מילים, אך את האפקט הפוטואלקטרי ניתן לראות בתמצית **איור 1**, ואילו קרינת גוף שחור קשורה בקרינה שפולט גוף, אשר בולע בצורה מושלמת קרינה בכל אורכי הגל (מכונה 'גוף שחור'). התפלגות הקרינה שנפלטת מגוף שחור הייתה שונה לחלוטין ממה שחזתה תורת הגלים שהתפתחה במאה ה-19.

חשוב לדעת כי כל מה שהיה ידוע בפיזיקה באותו זמן, לא יכול היה להסביר תופעות אלו. נקודות המבט שהציעו פלאנק ואיינשטיין מסמנות את ראשיתה של תיאוריה חדשה ומהפכנית-תורת הקוונטים. תיאוריה זו, שצמחה צעד אחר צעד, הייתה שונה לגמרי מכל מה שפיזיקאים חשבו וציפו לו עד אז. באותה תקופה של תחילת המאה ה-20 שררו בתחום הפיזיקה שמחה ויצירה לצד מבוכה ואי-וודאות. זה מה שקורה לא פעם כשמהפכה חדשה מתחוללת, לא רק במדע.

עד אז חשבו על **האור כגל**. פלאנק ואיינשטיין הציעו לחשוב על האור כעל 'חבילה' של אנרגיה ללא חומר בכלל, אשר לא ניתן לחלקה כלל-או שהחומר מקבל את כל החבילה

מקס פלאנק

(Max karl ernst ludwig planck)

פיזיקאי גרמני (1858-1947) שזכה בפרס נובל לפיזיקה ב-1918 על פיתוח רעיון קוונט האנרגיה. בזכות רעיון זה הוא הצליח לפתור את הבעיה של קרינת גוף שחור.

האפקט הפוטואלקטרי (Photoelectric effect)

ב-1887 גילה היינריך הרץ, פיזיקאי גרמני ממוצא יהודי, שכשקרינה על-סגולה פוגעת באטומים, האוויר הופך להיות טעון בחשמל (אלקטרונים בעלי מטען שלילי). בשנת 1905 איינשטיין הסביר את התופעה בעזרת עקרונות חדשים שהניחו את המסד לתורת הקוונטים.

איור 1

האפקט הפוטואלקטרי. קרינה על-סגולה (UV) פוגעת באטומי מתכת מוליכה, ו'שולפת' משם אלקטרונים שבתנאים מתאימים יוצרים זרם חשמלי.

האור כגל

(Light as a wave)

ב-1801 גילה הפיזיקאי האנגלי תומאס יאנג שהאור מתנהג כגלי-ים. דמיונו שני גלים הנפגשים: לעיתים תוצאת המפגש היא חיזוק הדדי (התאבכות בונה), ולעיתים ביטול הדדי (התאבכות הורסת). תופעה דומה גילה יאנג לגבי אור השמש, אחרי מעברו דרך שני חריצים קטנים.

בבת אחת, או שאינו מקבל דבר. לחבילה קראו פוטון או קוֹנְט של אנרגיה ('חלקיק' שאין בו חומר אלא אנרגיה בלבד). באופן מפתיע התברר כי ההצעה המוזרה הזו, אפשרה לפתור את הבעיות שצצו ועלו בשתי התופעות שהזכרתי קודם לכן, וכמו כן הצליח צמד המדענים לפתור באמצעותה תופעות מוזרות נוספות. אולם הדברים לא הסתיימו ברעיון המפתיע והחדשני של איינשטיין ופלאנק. אט-אט התגלו עוד ועוד תופעות חדשות וחרירות, ובדיעבד ניתן לחשוב על כך כעל קרחון שרק קצהו בלט מעל פני המים, ורובו הגדול היה שקוע בהם. על שתי התופעות המוזרות שתוארו לעיל התווסף בתוך שנים מועטות אוסף עצום של תופעות שעד אז לא נודעו ולא הוכרו. החלה להתגלות 'יבשת' חדשה בעלת חוקים חדשים-בדומה לגילוי יבשת אמריקה על ידי כריסטופר קולומבוס, במאה ה-15. העולם המסודר והצפוי של ניוטון, שהזכיר מכונה ענקית המורכבת מהמון חלקים קטנים, התחלף בארץ לא נשֶׁבֶת, מלאה הפתעות... [1].

הפיזיקאים לא גנזו את **חוקי ניוטון**, הם עדיין יכלו להסביר ולחזות באמצעותם הרבה מאוד תופעות ותנועות (למשל את תנועת הירח סביב כדור הארץ, ואת נפילת האבן על פני האדמה). אולם מתחת לעולם הזה התגלתה 'יבשת' עצומה שהיוותה את הבסיס לעולם שאותו גילה ניוטון, יבשת אשר עד לאותה עת הייתה חבויה מעיני הפיזיקאים.

תעלומת הקפיצה הקוונטית

נתאר כעת את **האָטוֹם**: בתחילת המאה הקודמת התגלה האטום כחלקיק היסודי העומד בבסיסו של כל החומר הקיים. משמע, כל חומר שאתם מכירים התברר כמורכב מאינספור אטומים שדומים במבניהם למערכות שמש (מערכות שבהן גופים שאינם כוכבי-שבת כגון שביטים, אסטרואידים או כוכבי לכת מצויים במסלול המקיף כוכב). אך בניגוד למערכות שמש אמיתיות, האטומים כמובן קטנים כל כך שלא ניתן לראותם אפילו בעזרת מיקרוסקופ עוצמתי מאוד. החלקיקים הדומים ל'כוכבי הלכת' ב'מערכות השמש' הקטנות סביב לגרעין, היו אלקטרונים. התגלה כי אלו יכולים לעבור ממסלול קרוב יותר לגרעין למסלול רחוק יותר ממנו, ולהפך. זאת בדומה ללוויינים שנעים במסלול קרוב לכדור הארץ ומאיצים ועוברים למסלול רחוק יותר מהכדור שלנו, ויכולים להאט ולעבור שוב למסלול קרוב יותר. הפלא שהתגלה בעולם הקוונטי הוא שאותם 'לוויינים קטנים' (האלקטרונים) עוברים ממסלול למסלול בבת אחת, בקפיצה אחת בלתי-מחולקת, ותמיד יימצאו במסלול קרוב יותר לגרעין האטום או רחוק יותר ממנו, ולא באמצע הדרך, או בשליש הדרך, או ברבע ממנה. כמעשה קסמים, רגע אחד הם קרובים ל'שמש'-גרעין האטום, אותו חלק באטום שנמצא במרכז ולכן דומה לשמש במערכת כוכבים אמיתית, ובמשנהו הם במסלול מרוחק יותר. לתופעה הזו ניתן השם '**קפיצה קוונטית**' (איור 2).

ומה קורה בין לבין? נכון להיום, לאף אחד אין תשובה טובה על כך. זו אחת התעלומות הגדולות של תורת הקוונטים: מה קורה לאלקטרון בזמן הקפיצה ממסלול למסלול, האם הוא 'מת' ו'נולד' שוב מחדש במסלול רחוק יותר? האם הוא נע מהר כל כך שהמכשירים שלנו לא מצליחים לעקוב אחריו?

ואולי תוכלו אתם לחשוב על רעיון יצירתי לפתרון התעלומה?

בכך לא תם המסתורין של ה'יבשת' הקוונטית, ולאורך השנים היא זימנה תעלומות מסעירות נוספות.

חוקי התנועה של ניוטון (Newton's laws of motion)

הפיזיקאי האנגלי אייזק ניוטון (1642-1727) ניסח את שלושת חוקי המכניקה שחוללו מהפכה בתפיסה של הפיזיקה. החוק הראשון-חוק ההתמדה; החוק השני-חוק התאוצה; החוק השלישי-חוק הפעולה והתגובה.

אטום (Atom)

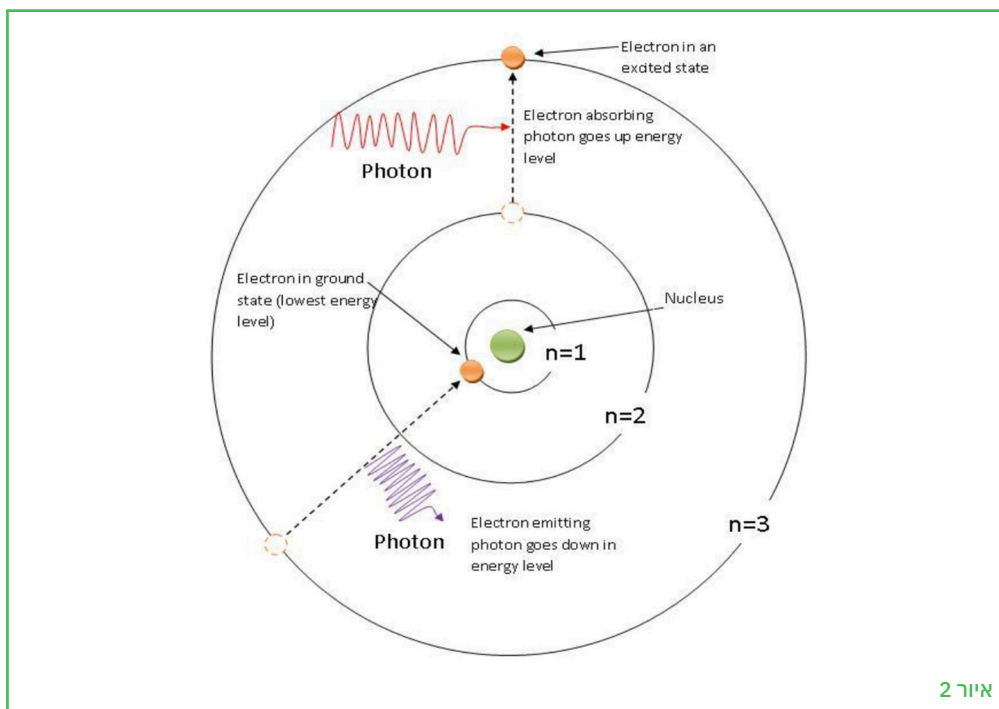
במרכז כל אטום ישנו גרעין האטום המורכב מחלקיקים קטנטנים (פרוטונים ונויטרונים). את הגרעין סובבים חלקיקים מזעריים עוד יותר, בעלי מטען חשמלי שלילי-האלקטרונים.

קפיצה קוונטית (Quantum jump/excitation)

אנו יכולים לחזות בתחילתה או בסופה, אך לא בשום נקודה בין ההתחלה לסוף. הדבר היחיד שמתרחש בין ראשית התהליך לסיומו, הוא פליטה או קליטה של 'חבילת אנרגיה' (פוטון), שהאלקטרון פולט או קולט.

איור 2

קפיצה קוונטית של אלקטרון באטום מימין. גרעין האטום מסומן ב-(+) כדי לציין שמדובר במקטען חשמלי חיובי של החלקיקים המרכיבים אותו. אלקטרון שהג סביב לגרעין במעגל מספר 1 'בולע' פוטון (Photon absorbed) וקופץ 'קפיצה קוונטית' כהרף עין למסלול מספר 3.



הטלפתיה שבין צמדי חלקיקים

תופעה נוספת מוזרה ומופלאה מתרחשת בין צמדים של חלקיקים מיקרוסקופיים, למשל בין שני אלקטרונים, או שני אטומים. תופעה זו מזכירה מאוד טלפתיה בין שני אנשים.

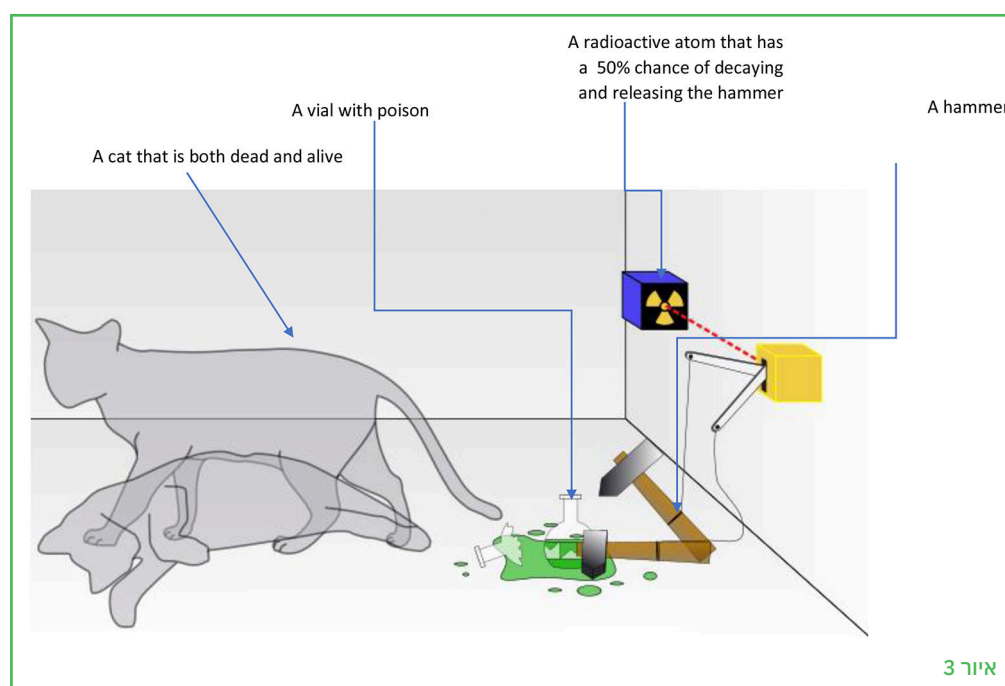
האם אתם מאמינים בטלפתיה? ייתכן; אך מדענים מתחום הפיזיקה הם אנשים רציונליים והגיוניים מאוד, ורובם הגדול סבור כי טלפתיה בין אנשים היא תופעה לא מדעית, לא רציונלית ובלתי הגיונית. במקרה זה, 'היבשת החדשה' של תורת הקוונטים הפגישה את הפיזיקאים עם טלפתיה בין חלקיקים. תארו לעצמכם שני חלקיקים שנגדמו אותם לשני אנשים, המצויים במרחק רב זה מזה, נניח קילומטר ואף הרבה יותר מכך, ואנו מודדים תכונה מסוימת של אחד החלקיקים (למשל את המהירות של החלקיק השמאלי). באינספור ניסויים שנערכו התברר כי בחלק מהתכונות שנמדדו, אם מצאנו בחלקיק השמאלי שהערך של התכונה הנמדדת הוא (+1) אז תמיד כאשר נמדוד את הערך של אותה התכונה מימין הוא ייצא הפוך, כלומר (-1). למה הדבר דומה? אם האיש משמאל ירים את יד ימין אז באותו רגע ממש האיש מימין ירים את יד שמאל, ואם יקרה ההפך והאיש משמאל ירים את יד שמאל אז האיש מימין ירים תמיד את יד ימין; וזאת למרות ששניהם אינם יודעים איזו יד ירים כל אחד מהם [2].

אתם עשויים לחשוב כי אולי החלקיקים היו מתואמים מלכתחילה באותן תכונות כך שתתקבלנה תוצאות הפוכות. אולם ניסויים רבים שנערכו הובילו למסקנה הברורה שלא ייתכן כי היה כאן תיאום מראש, אלא שברגע הבדיקה של החלקיק השמאלי נניח, הושפע מיידית החלקיק הימני גם אם הוא נמצא במרחק גדול מאוד מהחלקיק השמאלי. לתופעה הכל כך מוזרה ומיוחדת הזו ניתן השם 'שְׁזִיָּרָה קוונטית'. אפשר לשאול האם כל שני חלקיקים מיקרוסקופיים נמצאים במצב של שזירה קוונטית? התשובה היא שלא. מצב זה

מתרחש בצמדים של חלקיקים המצויים מלכתחילה במצב מיוחד (כמו תאומים), שנקרא מצב סִינְגְּלֵט. יתרה מזו, המצב האמור רגיש ו'שביר' מאוד, וכל כניסה של חלקיקים חיצוניים למערכת הניסוי גורמת לשזירה להיהרס. נדרש שמערכת הניסוי תהיה מבודדת לחלוטין מהעולם החיצוני. בעת הזו נעשה מאמץ אדיר ויקר לִבְנוֹת מחשב קוונטי. מאמץ זה קשור קשר הדוק ליכולת של מחשב כזה להיות מבודד לחלוטין מהפרעות מחוץ למחשב שגורמות להֶרְס ה'שזירה הקוונטית', אשר עומדת בלב פעולת המחשב הקוונטי.

שאלות קיומיות לגבי חתולים

מסתורין נוסף הכרוך ב'יבשת' הקוונטית חֶקֶר הפיזיקאי האוסטרי ארווין שרדינגר. שרדינגר תיאר סיטואציה מוזרה מאוד, שבה חתול שקשור עם מערכת קוונטית עשוי להיות במצב שהוא גם חי וגם מת, ורק כשאנו פותחים את מערכת הניסוי ומתבוננים בו נמצא אותו באחד המצבים: חי או מת (איור 3).



שאלת השאלה—מה היה מצב החתול כאשר לא התבוננו בו, כלומר אחרי שהחתול כבר הוכנס לתוך הקופסה וזו נסגרה? האם הוא היה גם חי וגם מת? האם רק בכך שהתבוננו בו גרמנו לו להימצא במצב אחד ויחיד?

חשוב להבהיר כי שרדינגר הציע ניסוי מחשבתי זה כדי להבהיר שתורת הקוונטים הנוכחית אינה נותנת הסבר מְסֻפֵּק. זאת כיוון שעל פי המתמטיקה של תורת הקוונטים, ששרדינגר עצמו היה מהמפתחים הראשונים והמרכזיים שלה, כדי לנתח במדויק מה צפוי להתרחש בניסוי כזה, עָלִינוּ להניח שהחתול בקופסה נמצא במצב של גם חי וגם מת עד לרגע שבו הקופסה נפתחת. מצב כזה מכונה סופרפוזיציה, ובו החלקיק הקוונטי נמצא מתמטית בכל המצבים האפשריים לו. המזרחות במקרה זה נובעת מכך שהחלקיק הקוונטי נמצא בשזירה עם החתול כולו, ואמור לגרום לכך שגם החתול הופך להיות בעל שתי משמעויות בו בזמן—הן חי הן מת.

ארווין שרדינגר

(Erwin Schrödinger)

פיזיקאי אוסטרי (1887-1961), מאבות תורת הקוונטים. ב-1926 פיתח את 'משוואת שרדינגר', שהיא כלי מרכזי לחקירת תורת הקוונטים והבנתה. המציא את הניסוי המחשבתי 'החתול של שרדינגר'. חתן פרס נובל לפיזיקה לשנת 1933.

איור 3

ניסוי החתול של שרדינגר. קופסה סגורה ואטומה שבה חתול, כמוסת רעל, ואטום רדיו-אקטיבי בעל סיכוי של 50% להתפרק במהלך הניסוי. אם האטום מתפרק הוא פוגע בכמוסת הרעל, מנפץ אותה, הרעל מתפשט והחתול מת. אם האטום לא מתפרק החתול נותר חי.

האם תיתכן אי-ודאות בעולם הפיזיקה?

תופעה קוונטית מרהיבה נוספת היא עיקרון שניסח פיזיקאי גרמני בשם **ורנר הייזנברג**, המכונה 'עיקרון אי-הוודאות'. במסגרת עיקרון זה קבע הייזנברג כי ישנם מצבים קוונטיים מיוחדים שבהם אם אנו יודעים לדוגמה מהי בדיוק המהירות של חלקיק קוונטי (אלקטרון למשל), אנו מאבדים כל ידיעה לגבי באיזה מקום הוא נמצא. לפי עיקרון זה גם ההפך נכון – אם אנו מודדים ויודעים בדיוק היכן נמצא האלקטרון, אנו מאבדים כל יכולת לדעת ולומר מהי המהירות שלו! אבל, אם אנו יודעים פחות או יותר מהי מהירות האלקטרון, יש באפשרותנו לדעת פחות או יותר מה מקומו [1].

בכלל, המדידה בעולם הקוונטי היא משהו מוזר ושונה לחלוטין מהמדידה שהפיזיקה הקלאסית הכירה עד אז. ב'יבשת' הישנה יכולנו לצלם אבן נופלת, והצילום לא היה משפיע על האבן – היא הייתה ממשיכה ליפול כאילו לא קרה דבר. לא כך כאשר מצלמים אלקטרון – הצילום משפיע באופן מהותי על המקום של האלקטרון או על מהירותו. עד היום פיזיקאים לא הצליחו למצוא דרך 'לעקוף' את ההפרעה הזו של המדידה.

בהקשר זה עולה השאלה: מהי המשמעות של המדידה? האם היא מודדת משהו, או אולי הופכת להיות חלק מהדבר שאותו היא מנסה למדוד, וככזו היא למעשה תמיד משנה את מה שהיא מנסה למדוד? אם כן, מה היה האלקטרון לפני שמדדנו אותו? אולי הוא היה דבר-מה שונה לגמרי שאין לנו שום מושג מהו, ורק עצם המדידה גרמה לו 'להיות אלקטרון'?

פיזיקאים אהבים לשאול שאלה מוזרה בהקשר תורת הקוונטים, המעוררת תהייה – אם עץ נפל ביער ואף אחד לא שמע אותו נופל, האם הוא השמיע קול?

אומנם חידה כזו נדמית מוזרה וכמעט מופרכת, אך כשחושבים על עולם התופעות הקוונטיות, אין זה מופרך כל כך. זו גרסה אחרת של השאלה: 'אם הכנסנו חתול לקופסה כפי שמוצגת באיור 3, וערכנו את הניסוי המתואר שם, מה היה מצב החתול לפני שפתחנו את הקופסה?' [3].

מהי המשמעות של כל זה?

הבאתי בפניכם רק טעימה קטנה מעולם התופעות הקוונטי, ואני נותר עם השאלה: מֶהן המשמעות והתפיסה שעולות מתוך עולם התופעות הזה?

במאמר נגענו 'על קצה המזלג' בכמה תופעות קוונטיות מוזרות: האפקט הפוטואלקטרי; 'קפיצה קוונטית' של אלקטרונים באטום; ניסוי 'החתול של שרדינגר'; טלפתיה בין חלקיקים מיקרוסקופיים 'שזורים'; 'עיקרון אי-הוודאות'; המוזרות של מדידה קוונטית. על מה כל זה מצביע? רבים מהפיזיקאים חושבים שתורת הקוונטים אינה אומרת דבר, והיא אך ורק 'מתכון' לחזות תוצאות, בדומה למתכון מעולם הבישול. למה הכוונה? שאין לנו הפיזיקאים שום דרך לדעת מה מתרחש במערכת הקוונטית ולדון על כך, כשאיננו מודדים את המערכת הזו. ביכולתנו אך ורק לחשב את הסיכוי שיקרה דבר מה (למשל בניסוי 'החתול של שרדינגר' מה הסיכוי שכשנפתח את הקופסה נראה חתול חי, ומה הסיכוי שנראה חתול מת), ולדון לגבי כך.

ורנר הייזנברג (Werner Karl Heisenberg)

פיזיקאי גרמני
(1901-1976), מאבות תורת
הקוונטים וחתן פרס נובל
לפיזיקה לשנת 1932. ניסח
את 'עיקרון אי-הוודאות'
ומסלול מתמטי מקביל לזה
של שרדינגר לחקר תופעות
קוונטיות, שנקרא 'מכניקת
המטריצות'. היה שותף בכיר
בפרויקט הגרעין של
המשטר הנאצי.

כשלמדתי פיזיקה באוניברסיטה, לפני יותר משלושים שנה, אחד הפרופסורים אמר לי דברים ברוח זו: תורת הקוונטים היא כמו מכשיר מיקרוגל לעקר הבית או לעקרת הבית. הם יודעים להשתמש בו נהדר, אבל אין להם שמץ מושג למה ומדוע מנגנון הפעולה שלו וביצועיו הם כפי שהם.

חלק מהפיזיקאים סבורים כי כל התוצאות האפשריות של ניסוי קוונטי מתרחשות בו בזמן, אבל ב'עולמות' נפרדים ונבדלים שאין ביניהם שום קשר. לפי תפיסה זו אנו נמצאים באחד העולמות ויודעים אך ורק עליו, אך עותק שלנו נמצא בכל העולמות האפשריים האחרים. למשל בניסוי 'החתול של שרדינגר', אם מצאתי שהחתול בקופסה חי ישנו עולם נוסף שאין לי שום חיבור אליו ויָדַע על אודותיו, שבו אני פותח את הקופסה ומוצא חתול מת.

אחרים טוענים כי מה שמיוחד בתורת הקוונטים הוא הצופה האנושי, שבגללו נוצרת כל המוזרות. התומכים בטענה הזו חושבים כי כל המוזרות הקוונטיות לא היו קיימות בעולם שבו לא היו בני אנוש, והתוצאות המוזרות קשורות לכך שאנו בעלי מוח אנושי.

זיכרו את השאלה שהצגתי בפניכם קודם-אם עץ נפל ביער ואף אדם לא היה בסביבה לשמוע אותו נפל, האם הוא השמיע קול? המחזיקים בגישה האחרונה יענו על כך בשלילה-אם אף אחד לא היה בסביבה, העץ לא השמיע קול! לפי גישה זו האדם הוא מידת הדברים ומרכז היקום הפיזיקלי. אלברט איינשטיין לא אהב את התפיסה האמורה, ופעם הפנה לחברו שאלה בסגנון: האם אתה באמת מאמין שהירח איננו קיים כאשר אני לא מביט בו?

ישנם כאלו, ואני בהם, שטוענים כי אם חושבים על העולם הקוונטי כמתאגר מציאות שבה הכול מחובר ושלם ולא נפרד ומחולק, אז התופעות נראות לפתע פתאום טבעיות והגיוניות. לפי גישה זו, בניסוי 'החתול של שרדינגר' גם בזמן שאיננו רואים אותו החתול הוא או חי או מת, במשך כל הזמן. לפי הגישה האמורה ישנו גל שקיים בכל המרחב, ומקשר באופן מיידי (טלפתי) את כל החלקים והחלקיקים. למשל בניסוי עם החלקיקים 'התאומים', גל זה יכול לקשר באופן מיידי שני מקומות רחוקים מאוד זה מזה (לדוגמה הירח וכדור הארץ) [3].

ומה אתן ואתם חושבים על כל זה?

מקורות

1. Bohm, D. 1989. *Quantum Theory*. Mineola, NY: Dover Publications Inc.
2. Sakurai, J. J. 1985. *Modern Quantum Mechanics*. Boston, MA: Addison-Wesley Company, Inc. p. 223–32.
3. Bell, J. S. 1986. "Six possible worlds of quantum mechanics," in *Proceedings of the Noble Symposium 65: Possible worlds in Arts and Sciences*. Stockholm.

פורסם אונליין: 28 ביולי 2023

נערך על ידי: Idan Segev

מנחים מדעיים: Deborah Karaim

ציטוט: Maliniak Z (2023) ה'יבִּנְשֵׁת' המסתורית של מכניקת הקוונטים. Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2023.1195350-he

תורגם והותאם מ: Maliniak Z (2023) The Mysterious "Land" of Quantum Physics. Front. Young Minds 11:1195350. doi: 10.3389/frym.2023.1195350

הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כל המחקר נערך בהעדור כי קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

זכויות יוצרים © 2023 © Maliniak 2023. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון [Creative Commons Attribution License \(CC BY\)](https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקרים צעירים

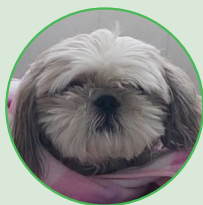
MAOR, גיל: 13

אני גרה בראשון לציון. נהנית לקרוא על נושאים שונים, בעיקר בתחומי מדעי החברה ומדעי הרוח. אני מנויה למגזין 'אֶפּוֹק', שהתוכן שלו נע מגיאופוליטיקה עד למדע וטכנולוגיה. בזמני הפנוי אוהבת ללמוד, וגם כותבת הרבה (בכיתה ג זכיתי בתחרות הכתיבה הארצית על שיר שכתבתי, ועד היום אני כותבת גם שירים). לומדת את השפה הבינלאומית אֶסְפֶּרָנטו. כמו כן השתתפתי בקורס מקוון בנושא תורת המשחקים, ואני שמחה מאוד לקחת חלק במיזם הזה!

הכותבים

ZOHAR MALINIAK

בן 65, חי בכפר יהושע, אב לארבעה בנים וסב לנכד. בימי חיי נעתי בין מקומות רבים ולא מעט עיסוקים: הייתי פועל בניין וטייח; שותף בהקמת יישובים חדשים—אחד בדרום המדינה והשני בצפונה; גרתי בשלל מקומות בארץ—בצפון, בדרום, במרכז ושוב בצפון; למדתי לתארים ראשון ושני בפיזיקה, ועשיתי דוקטורט בפילוסופיה של תורת הקוונטים. ניהלתי שני בתי ספר ולימדתי במשך 20 שנה מתמטיקה ופיזיקה בבתי ספר תיכוניים, ולא מעט שנים מלמד במכללה להכשרת מורים. תמיד שאלתי שאלות על משמעות החיים בכלל וחיי שלי בפרט, ומשמעויות תורת הקוונטים והבנתה 'מדליקים' ומאתגרים אותי זה עשרות שנים. בשנים האחרונות התחביב והתרפיה שלי הם לגדל ירקות, עצי פרי ותרנגולות שמספקות לנו ביצים. [*zoharmaliniak@gmail.com](mailto:zoharmaliniak@gmail.com)



מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem



הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK