

ניסויים מטרידים: התאבכות (סופרפוזיציה) וקריסה קוונטית

חישוב קוונטי, ובפרט אלגוריתמים קוונטיים, נמצא בנקודת המפגש שבין מדעי המחשב והפיזיקה. הרקע שלנו - שלכם ושלי, הוא במדעי המחשב, ולא בפיזיקה, ולמזלנו אין צורך בידע מוקדם במכניקה קוונטית כדי לעסוק בתחום זה. טוב שכך: אנחנו מורגלים לחשוב במונחים של אלגוריתמים ומכונות טיורינג, ופחות במושגים כמו תנע זוויתי, פונקציית גל או שדה מגנטי. אם משהו מכל אלה נשמע מוכר - זה כנראה מזיכרון רחוק מתקופת התיכון או מקורס או שניים מהתואר הראשון.

ובכל זאת, סיפורו של המחשוב הקוונטי מתחיל בפיזיקה. כדי להבין את יסודותיו ולהעריך מעט מן השינוי העמוק בתפיסת המציאות עצמה, נפתח את הקורס בתיאור כמה ניסויים פיזיקליים ששינו את הדרך שבה אנו מבינים את העולם. ניסויים אלה ערערו את ההיגיון הקלאסי והובילו למהפכה אינטלקטואלית-פילוסופית, אשר אתגרה את הדטרמיניזם של הטבע-תפיסה ששלטה מאז ימי ניוטון-וכן היבטים פילוסופיים נוספים, כמו ריאליזם מקומי, שעליו נדבר בהמשך.

ישנם שני ניסויים מרכזיים בתחום. אולי המוכר יותר הוא ניסוי שני הסדקים, שראשיתו עוד במאה ה-19, אך קיבל פרשנות חדשה בזכות לואי דה-ברויי (1924), שהציע שחלקיקים כמו אלקטרונים מתנהגים גם כגלים. ממש בזמן כתיבת שורות אלו הוענק פרס נובל לשלושה חוקרים על תגלית קשורה - מינהור קוונטי בקנה מידה "גדול". לענייננו, הניסוי הזה חשף את הרעיון של דואליות גל-חלקיק - שהתנהגות החומר תלויה באופן שבו אנחנו בוחנים אותו. ניסוי סטרן-גרלך (1922), שבוצע שנתיים קודם לכן, נועד לבדוק האם התנע הזוויתי של אטומים יכול לקבל רק ערכים בדידים. התוצאה הייתה מפתיעה וחשפה תופעה פיזיקלית חדשה לחלוטין: הספין הקוונטי של האלקטרון.

אני לא אתאר כאן אף אחד משני הניסויים, שכן הם דורשים הבנה ואינטואיציה פיזיקליות. עם זאת, אני ממליץ לקרוא עליהם-יש אינספור מקורות מצוינים. כך או כך, סדרת הניסויים שאציג מבוססת על קורס מבוא במכניקה קוונטית שהועבר ב-MIT בשנת 2013 על-ידי פרופ' אלן אדמס, ותאפשר לנו להכיר את המוזרויות של הטבע בלי צורך בידע מוקדם בפיזיקה. ואכן, את הניסויים נציג בשפה מופשטת, מנותקת מן הפרטים הפיזיקליים של ההתקן עצמו. ההפשטה איננה (רק) תירוץ כדי להימנע מן הפן הפיזיקלי שאיננו בליבת המומחיות שלנו, אלא כלי עבודה שמאפשר למקד את המבט בעיקר: דפוסי ההתנהגות העמוקים שהניסויים חושפים. כך נבנה אינטואיציה ונראה את התמונה הגדולה, מבלי להיתקע בדיונים טכניים על שדות מגנטיים או על המכשור הניסויי.

נראה בהמשך כיצד הניסויים האלה מובילים אותנו להכיר שני מושגים יסודיים שיחזרו שוב ושוב לאורך הקורס: התאבכות (superposition) - האפשרות שחלקיק, או מצב חישובי, נמצא בו זמנית בכמה מצבים; וקריסת המצב (collapse) - השינוי הדרמטי שמתרחש כאשר אנחנו מודדים את המערכת, והיא נאלצת "לבחור" מצב אחד בלבד. שני הרעיונות האלה, שהתגלו דרך ניסויים בפיזיקה לפני מאה שנה, הם הלב הפועם של החישוב הקוונטי כפי שאנחנו מבינים אותו כיום.

1 Setting-ה הניסויים

למרות שלא נתמקד בצד הפיזיקלי, נתאר את הניסוי עצמו כאילו נערך על אלקטרונים. אנחנו נתעניין בשתי תכונות שלהם, שנקרא להן לצורך הדיון "צבע" ו"קושי". מניסויים ידוע שכל אלקטרון שנצפה אי פעם הוא או שחור או לבן – ואין צבע אחר. בנוסף, אלקטרון שנבחר באקראי צפוי להיות שחור בהסתברות של חצי.

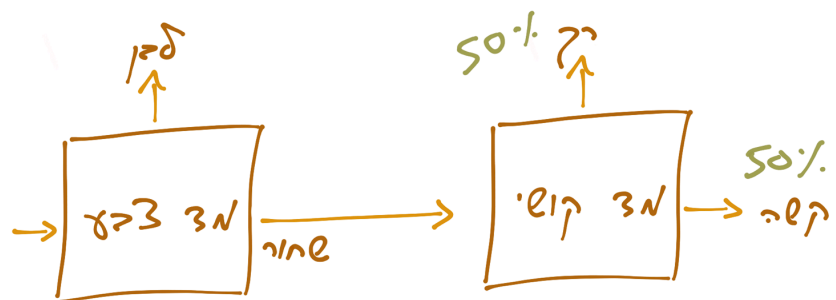
כאשר אני אומר שלכל אלקטרון יש "צבע", הכוונה היא למשמעות אופרטיבית של המושג: יש לנו קופסה למדידת צבע. אם מזינים לתוכה אלקטרון – והיא "מודדת" את תכונת הצבע שלו – אזי אם האלקטרון לבן הוא יצא מצידה האחד של הקופסה, ואם הוא שחור הוא יצא מצידה האחר. כלומר, הקופסה ממירה את תכונת הצבע למיקום פיזי. בפועל, במעבדה הדבר נעשה למשל באמצעות שדות מגנטיים מקוטבים בכיוון מסוים, אך אנחנו נמנע מלהיכנס לפרטים הללו – הם אינם דרושים להבנת הרעיון.

חשוב להבין כיצד אנחנו מתייחסים לצבע כתכונה של האלקטרון: אם נחבר שתי קופסאות מדידת צבע בזו אחר זו, אז אלקטרון שנכנס לקופסה הראשונה ויצא לבן, יימדד שוב כלבן בוודאות של 100 אחוז גם בקופסה השנייה. במובן האופרטיבי הזה של מדידה – שבה אנחנו מזהים את הצבע לפי מיקום היציאה – אפשר לומר שלאלקטרון יש צבע.

אותו עיקרון חל גם על קושי: כל אלקטרון הוא או רך או קשה, וההגדרה שוב היא אופרטיבית – באמצעות קופסה למדידת קושי שפועלת על אותו עיקרון בדיוק.

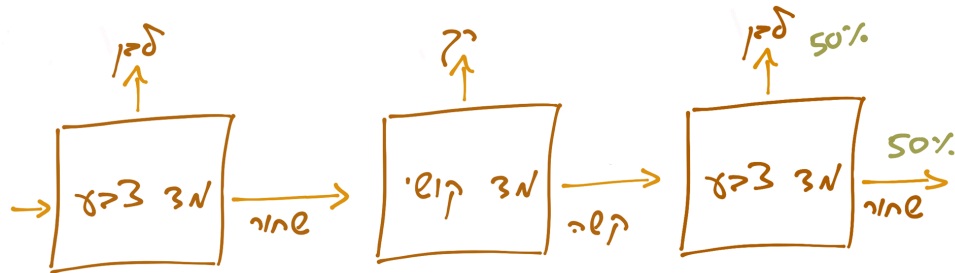


מניסויים עולה כי אין כל מתאם בין צבע לקושי. כלומר, אם אלקטרון נמדד כבעל צבע לבן, אין בכך כדי לנבא דבר על מידת הקושי שלו – ולהפך.



1.1 השפעות המדידה

עם זאת, מתברר שהדברים מורכבים יותר, כפי שמודגם בניסוי הבא. מסתבר שמדידת הקושי שבאמצע משפיעה איכשהו על הצבע של האלקטרון. כלומר, אף שאין מתאם בין צבע לקושי במונח שתיארנו קודם, עצם המדידה של הקושי משנה את הצבע.



איור 1: ניסוי מספר 1 - מדידת הקושי של אלקטרון "מוחקת" את צבעו.

ידיעת הצבע אינה מאפשרת לחזות את הקושי—ולחפך. ובכל זאת יש ביניהן קשר: מידע על אחת התכונות משפיע על השנייה. חשוב: התופעה מתרחשת ללא תלות באיכות מדידת הקושי. עצם המדידה—גם אם נעשתה ביד-אמן—מוחקת את תכונת הצבע ומחליפה אותה בערך אקראי. לא רק שהצבע אינו נשמר כפי שהיה (למשל, שחור), אלא שהוא נעשה אקראי לחלוטין.

1.1.1 משתנים חבויים?

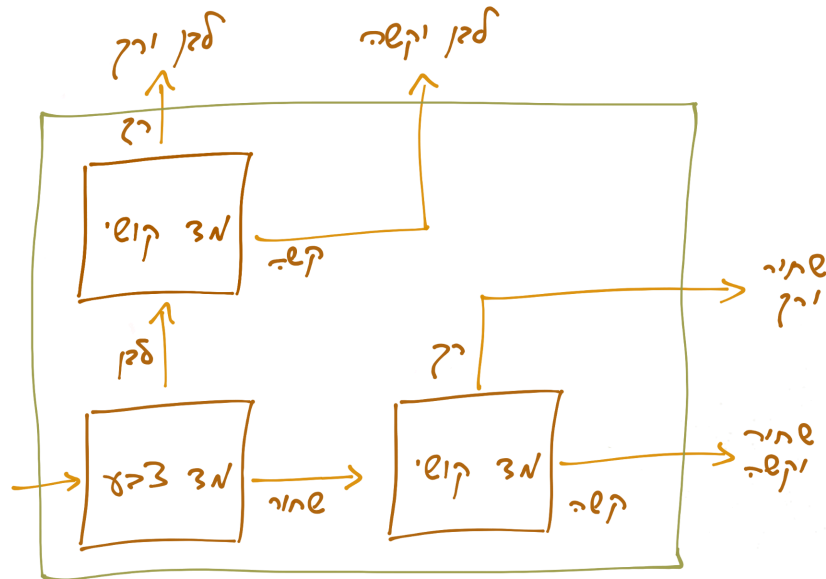
דרך אחת לנסות להסביר את הניסוי האחרון היא באמצעות ההנחה בדבר קיומו של "משתנה חבוי" (hidden variable). כלומר, ייתכן שקיימת תכונה מסוימת של האלקטרון, שממנה נגזרים הצבע והקושי, ואם רק נצליח לזהות ולמדוד אותה בהינתן האלקטרון בתחילת הניסוי – נוכל לחזות מראש את תוצאת הניסוי, כלומר באיזה צבע יצא האלקטרון מהניסוי. אולם מתברר שההשערה הזו אינה נתמכת בניסויים: אין שום ניסוי המסוגל, בהינתן אלקטרון הנכנס למערכת, לחזות אם הוא יצא לבן או שחור בסוף התהליך. יתרה מזאת, קיימים ניסויים – ונכיר אותם בהמשך – שמראים באופן ברור שאין משתנה חבוי כזה כלל. הצבע שבו נמדד האלקטרון בסוף התהליך הוא אקראי לחלוטין.

1.1.2 הלך הדטרמיניזם

עצם העובדה הזו סותרת את העיקרון הדטרמיניסטי שבבסיס הפיזיקה הקלאסית, ובפרט הפיזיקה הניוטונית. על-פי ההנחה הקלאסית, אילו היה בידינו כל הידע הדרוש על מצבה של מערכת פיזיקלית, היינו יכולים לחזות בדיוק את התנהגותה. הניסוי הזה נוגע בקצה הקרחון של שבירת ההנחה הזו – של המעבר מעולם דטרמיניסטי לעולם שבו האקראיות היא חלק בלתי נפרד מהטבע עצמו.

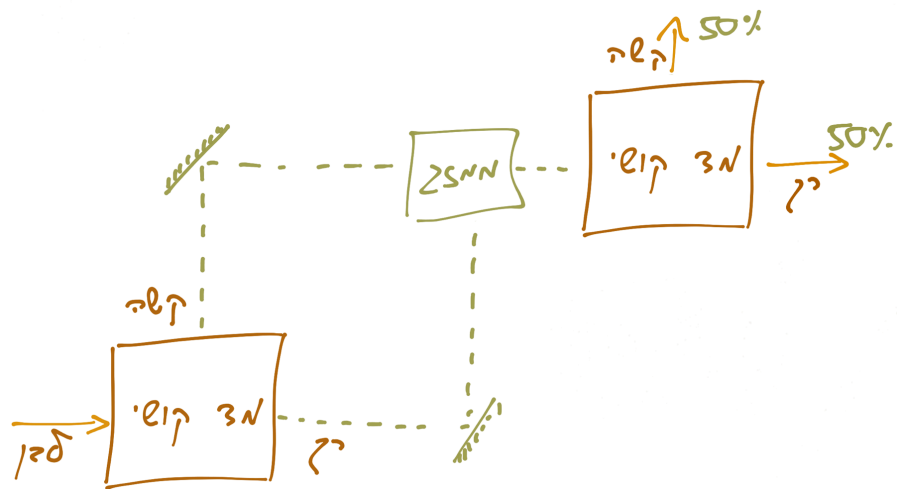
1.1.3 עיקרון אי-הודאות של הייזנברג

מסקנה מעניינת היא שלא ניתן לבנות קופסה שמודדת את הצבע והקושי של אלקטרון בו־זמנית – לפחות לא באופן אינטואיטיבי כפי שהיינו מצפים, וכפי שמתואר באיור. יתרה מזאת, עצם העובדה שלא ניתן לבנות קופסה כזו כלל – במיוחד כאשר מעניקים למושגים האבסטרקטיים של "צבע" ו"קושי" משמעות פיזיקלית ממשית – מהווה ביטוי ישיר לעיקרון אי-הודאות של הייזנברג.

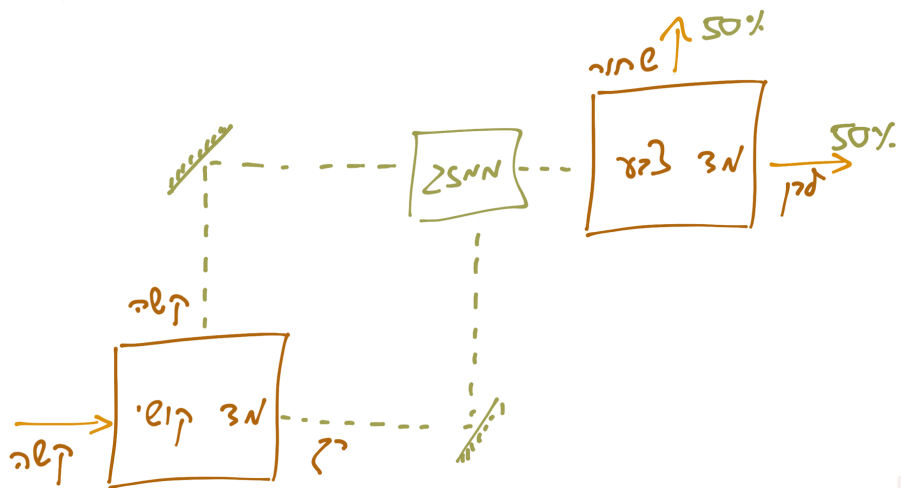


1.2 התאבכות ומדידה

זו רק ההתחלה: בהמשך ניכנס לעובי הקורה, אבל נפתח בכמה ניסויים פשוטים ומוכרים שלא אמורים להפתיע אתכם. ואכן, שני הניסויים הבאים מתיישבים היטב עם האינטואיציה שלנו. באיור, המראות והממזג אינם משפיעים על תכונות האלקטרונים, אלא רק על כיוון תנועתם.

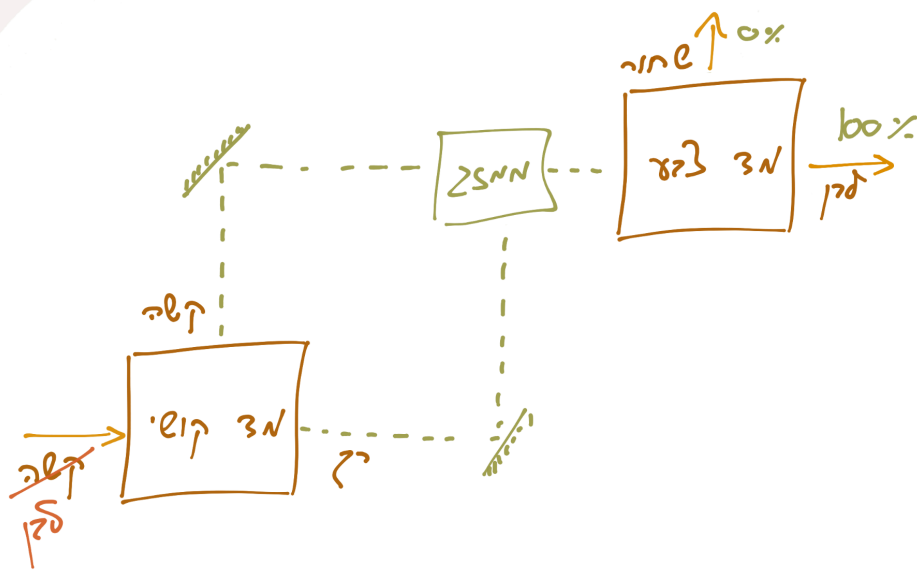


איור 2: ניסוי מספר 2



איור 3: ניסוי מספר 3

הניסוי הבא מטלטל את האינטואיציה. מבחינת הפרוטוקול אין שינוי מניסוי 3; השינוי היחיד הוא בהכנה: האלקטרון נכנס במצב "לבן" ולא במצב "קשה".



איור 4: ניסוי מספר 4 - כמו ניסוי מספר 3 פרט לכך שהאלקטרון הנכנס הוא לבן.

לכאורה, ההסבר הטבעי הוא כזה: תחילה אנו מודדים את הקושי של האלקטרון שנכנס במצב לבן. המדידה, כזכור, מוחקת את תכונת הצבע: אילו נמדוד כעת את הצבע, נקבל לבן או שחור בהסתברות שווה. ללא תלות בתוצאת מדידת הקושי, האלקטרון ינותב לאחד משני המסלולים—"הרך" או "הקשה"—יעבור דרך הממזג (שאינו משנה אף אחת מתכונותיו), ולבסוף נמדוד את הצבע. ולכן היינו מצפים לקבל לבן או שחור בהסתברות שווה גם בשלב זה. אלא שבפועל—וזה הנקודה המפתיעה—בכל חזרה על הניסוי נמדד לבן, תמיד.

וככל שחושבים על זה יותר, זה נעשה מוזר יותר—ואף נראה כסותר ניסויים קודמים. נניח שאנו מבצעים את אותו ניסוי, אלא שעכשיו מציבים מחסום בנתיב הרך כך שכל אלקטרון שמגיע לשם נבלע. הדבר הראשון שנצפה הוא שרק כמחצית מן האלקטרונים יעברו את הניסוי—וזה אכן קורה, בלי הפתעות. אבל מה לגבי הצבע של היוצאים? מצד אחד, לפי הניסוי הקודם (ללא מחסום), כלומר ניסוי מספר 4, כל האלקטרונים שיצאו היו לבנים, אז היינו מצפים שוב ללבן. מצד שני, אם מסתכלים על המערך עם המחסום, זהו ניסוי שכבר ערכנו בעבר, ניסוי 1 (עם אלקטרון קשה במקום לבן אמנם), שם התוצאה הייתה 50 אחוז לכל צבע. מתקבל אפוא מתח בין שתי תחזיות תקפות לכאורה.

כדי לחדד את העניין נשאל: מאיזה מסלול עבר האלקטרון? דמיינו ניסוי בקנה מידה גדול מאוד: המסלולים ארוכים, והמחסום—אם נחליט להציב אותו—ממוקם אי-שם באמצע המסלול הרך, הרחק מהמסלול הקשה. אם האלקטרון עבר במסלול הקשה, אז מחסום במסלול הרך לא אמור להשפיע על התנהגותו (כאן אנו מניחים שאינפורמציה לא עוברת מהר ממהירות האור - אכן יסוד בתורת היחסות). מצד שני, עצם קיומו של המחסום קובע איזה מן שני הניסויים אנו מבצעים, ואנחנו יודעים שלשני הסידורים מתקבלות תוצאות שונות. מכאן שלא ייתכן שהאלקטרון עבר במסלול הרך. באופן סימטרי, לא ייתכן שעבר במסלול הקשה. אולי הוא "התפצל"—חלקו ברך וחלקו בקשה? גם זה לא מתיישב עם הממצאים: בכל ניסוי שבוצע בו בדקנו בפועל באיזה מסלול הוא עובר (באמצעות גלאים), הוא נמצא באחד—ובדיוק אחד—משני המסלולים. יוצא אפוא שלא במסלול הרך, לא במסלול הקשה, לא בשניהם

יחד, ולא ב"אף אחד מהם". זה ממצה את כל האפשרויות הלוגיות...

2 עצה מריצ'רד פיינמן

ביחידות הבאות נציג את עקרונות היסוד של תורת הקוונטים. לאחר שנבנה על בסיסם מודל פורמלי, נראה כיצד הוא מסביר את תוצאות הניסויים. נסכם את היחידה בעצה של ריצ'רד פיינמן, מתוך הרצאה שנשא ב־1964:

*?If you will simply admit that maybe nature does
behave like this, you will find her delightful,
entrancing thing. Do not keep saying to yourself,
if you can possibly avoid it, 'But how can it be
like that?' because you will get 'down the drain',
into a blind alley from which nobody has
escaped.?*

Richard P. Feynman —