תורת הקוונטים לכולם

ד"ר יואב קלינברגר

26 ביוני 2012

תקציר

מטרת המסמך הזה היא לתת לציבור הרחב ידע מדוייק על תורת הקוונטים, על מנת לסייע לו להתגונן בפני טענות שמושמעות חדשות לבקרים על-ידי הוגים "רוחניים" למיניהם, בין אם מדובר בפנג שוי, בתורת הקבלה, או במטיפי דת, או הסרט ?what the bleep do we know, או אדם שמנסה לתת לקהל רושם, כאילו תורת הקוונטים מגבה את ההצהרות שלו.

לפיכך, בפעם הבאה שזה יקרה לכם, חישבו על מה שקראתם במאמר הזה, ותשאלו את עצמכם (בצדק) "אבל מה הקשר לקוונטים בעצם?"

רשיון לשימוש במסמך זה

תוכן עניינים

1 קבלות 2
2 הקדמה 2
2.1 תיאוריה מדעית 3
2.2 מכניקה ניוטונית 4
2.3 מכניקה קוונטית 5
3 תורת הקוונטים ללא-מדענים 6
3.1 מקריות 6
3.2 מספרים מרוכבים 7
3.3 איך מחשבים סיכויים? 10
3.4 משוואת שרדינגר והקריסה של פונקצית הגל 11
3.5 תורת הקוונטים: סיכום 13

1 קבלות

אני נאלץ כאן, למען האמינות, להציג את המקורות שמהם אני שואב סמכות להרצות בענייני תורת הקוונטים.

אני מחזיק בתואר דוקטור בפיזיקה מאוניברסיטת תל-אביב. את התואר הראשון שלי בפיזיקה קיבלתי מאוניברסיטת תל-אביב, בהצטיינות. את הדוקטורט עשיתי במסלול הישיר (שמדלג על תואר שני). למדתי ארבעה קורסים על תורת הקוונטים (שניים בתואר ראשון ושניים במהלך הדוקטורט), נבחנתי על ידיעותי, והציונים שלי הם 94, 80 (בתואר ראשון) ו-100 ועוד 100 בדוקטורט.

מעבר לקורסים, שימשתי כמתרגל של הקורס "קוונטים 1" במשך 6 שנים, מתשס"ד ועד תשס"ט. ועל כך יעיד אתר מערכת השעות של האוניברסיטה[1]. כמובן שכאשר אתה גם מלמד נושא, אתה מעמיק בו הרבה יותר, משום שעליך להיות מסוגל לענות לשאלות התלמידים, שהן לעיתים שאלות עמוקות וקשות.

בקיצור, יש לי קבלות. ועכשיו לעסק.

2 הקדמה

אנו נעסוק כאן ב"מכניקת הקוונטים", שלעיתים גם קוראים לה "תורת הקוונטים". ספרים רבים נכתבו בנסיון להציג את מכניקת הקוונטים לקהל הרחב. מבין אלה שאני קראתי, יש רק ספר אחד שבאמת ניסה לתת הצגה נאמנה למקור, ולא "למרוח" את הקורא בכל מיני משפטים פנטסטיים, וזהו ספרו של הפיזיקאי חתן פרס-הנובל, ריצ'רד פיינמן "התאוריה המוזרה של אור וחומר". אני אנסה להתבסס על הגישה שלו, כדי להבהיר לקורא במה באמת מדובר, אם כי אסטה מעט מהדרך שהוא התווה, משום שאני מבקש להבהיר מושגים מתמטיים מסויימים.

התיאור שלי של מכניקת הקוונטים יהיה קצר ויבש, ומטרתו בעיקר לשמש מין "מילון" שמתרגם מעולמם של הפיזיקאים אל עולמו של הקורא. לא תהיה כאן סקירה

[1] http://www2.tau.ac.il/yedion/yedion.html

מעמיקה של ההיסטוריה, או של המשמעויות המהפכניות של התיאוריה הזו. את אלה הקורא יכול למצוא בשפע בספרות הפופולרית. מה שיש כאן שאין שם זה תיאור מדוייק יותר, ומודרני יותר של מה שפיזיקאים באמת עושים.

זו גם הזדמנות טובה להתעכב על שמו של הספר של פיינמן, "התאוריה המוזרה של אור וחומר", ולהבהיר מה הכוונה במילה "תיאוריה". בציבור הרחב "תיאוריה" משמשת בביטוי "זה רק תיאוריה", כלומר דבר-מה שאין להסתמך עליו יותר מדי. במדע "תיאור-יה" משמשת באופן שונה, כקיצור של הביטוי "תיאוריה מדעית".

2.1 תיאוריה מדעית

ובכן, מהי "תיאוריה מדעית"? תיאוריה מדעית היא אוסף של עקרונות וכללים, בדרך כלל בצורת משוואות, שלפיהם לכאורה מתנהג הטבע[2]. תיאוריה מדעית טובה מקיימת את התכונות הבאות:

1. היא מסבירה מספר גדול מאוד של עובדות.

   הכוונה ב"הסבר" כאן היא, שאם אני מקבל את התיאוריה כנכונה, אז ברור לי למה העובדות הן כפי שהן. למשל, המכניקה של ניוטון יכולה להסביר מדוע מטוטלת מתנדנדת מצד לצד בדיוק באופן שבו היא מתנדנדת, מדוע מטוס לא נופל, מדוע ציר הסיבוב של כדור-הארץ מסתובב אף הוא, וכולי.

2. היא מסוגלת לנבא עובדות חדשות, כך שיהיה אפשר לבדוק את הניבוי בניסוי או בתצפיות.

   למשל, על פי המכניקה של ניוטון ותיאוריות הגרביטציה שלו, ניתן לחשב מראש את הזמן המדוייק והמקום של כל ליקויי החמה בעשר השנים הקרובות (זה הניבוי), וכמו כן ניתן לרשום האם באמת בסופו של דבר היה ליקוי חמה (זו הבדיקה).

3. ניתן עקרונית להפריך אותה ע"י ניסוי או תצפיות.

   נמשיך עם הדוגמא הקודמת: אם מחשבים את הפרטים של ליקויי החמה הצפוי-ים ברמת דיוק של דקה, ובמשך אותה דקה אין ליקוי חמה בסופו של דבר, הרי שאו שטעינו בחישוב, או שהתיאוריה של ניוטון לא נכונה. אם יצטבר גוף משמ-עותי של ראיות מהסוג הזה, לא היה מנוס מלסייג את התיאוריה של ניוטון או אפילו לזנוח אותה.

   אוקיי, סטופ. אני יודע שבדרך כלל תופסים את המדע כמשהו ש"מוכיח" דברים, ולא כמשהו שניתן להפריך אותו. זה לא מדוייק: ההבדל בין המדע לבין עיסוקים אחרים הוא שהמדע אמנם "יודע" דברים מסויימים, אבל הוא תמיד יודע עד איזו רמה של דיוק הוא יודע אותם, כלומר אנו יודעים שהמכניקה של ניוטון מנבאת בהצלחה ליקויי חמה בדיוק של דקה. בדיוק של עשירית שנייה, אולי היא כבר לא עושה את העבודה. מאחר שאנו לא יודעים מה יהיה בעתיד, למעשה לא ניתן "להוכיח" מדעית שום דבר, במובן של הוכחה מתמטית מוחלטת.

---

[2] "הטבע" הוא כל מה שסביבינו. כלומר לא הכוונה כאן רק לעצים ואבנים אלא גם לשולחן, מטוס, מחשב, בן-אדם. מדע הפיזיקה עוסק בכל מה שיש מסביב.

הנקודה זאת חשובה מאוד. היא אומרת לנו שלמרות שלעולם לא נדע שתיאוריה מדעית "צודקת", הרי שאפשר לפחות לדעת שהיא טועה! ההתקדמות המדעית במידה רבה היא ביטול טעויות שהאמנו בהן בעבר, והקמת תיאוריות חדשות, עד שתתגלה הטעות הבאה. בדרך זו אנו מקווים שאנו מתקדמים לקראת משהו נכון.

בצורה זו המדע התקדם שנים. תיאוריות מועלות ומופרכות, והטובות שבהן מחזיקות מעמד ומשתכללות. אם, למשל כמו במקרה של המכניקה הניוטונית, תיאוריה צוברת הצלחות כבירות בהסברים וניבויים, במשך זמן רב, האמון שלנו בה מתחזק, ואנו מתי-יחסים אליה, לכל צורך ועניין כ"נכונה", לעת עתה.

לעת עתה, מכיוון שאנו כבר יודעים, גם עקרונית וגם מהניסיון, שגם תיאוריות מצוינות עלולות יום אחד להיות מופרכות, כאשר יבדקו את הניבויים שלהן בנסיבות חדשות. לכן תיאוריה מדעית היא דבר שאיננו בטוחים בוודאות שהוא נכון, אם כי תיאוריות מסויימות יכולות לזכות למעמד גבוה מאוד של אמון, אם הן הוכיחו את עצמן.

תיאוריות טובות שכאלה (כגון המכניקה הניוטונית), נשארות בסביבה גם לאחר שנתגלה שהן חלקיות - המכניקה הניוטונית אמנם איננה מדוייקת, אך בהרבה נסיבות היא עד כדי כך קרובה לאמת, שאנו ממשיכים להשתמש בה. תיאוריה מדעית היא אמנם "רק תיאוריה", במובן שלא-לעולם-חוסן, אך ה"רק תיאוריה" של ניוטון מסוגלת לנבא ליקויי חמה שנים מראש, בדיוק מדהים (ועוד לעשות הרבה דברים חוץ מזה, אבל זה לא הנושא שלנו כרגע). כלומר, למרות שאין במדע וודאות במובן פילוסופי/מתמטי, יש בו וודאות גבוהה מאוד במובן המעשי, וכמו כן יש וודאות כמעט מוחלטת לגבי מה לא נכון.

עם זאת חובה לציין: הישגי המדע והטכנולוגיה (כגון מטוסי סילון, טלפונים סלולרי-ים, מזגנים וכולי) הם מדהימים, הם מרקיעי שחקים, ואין עוד עיסוק אנושי שהגיע רחוק כל כך.

שימו לב עד כמה המדע שונה משיטות חשיבה שטוענות לכתר "הנכונות" כגון שיטות מיסטיות או דתיות: המדע מחפש טעויות בתוך עצמו, מתוך הכרה ברורה שאין לו אמת מוחלטת, וכך הוא מתקדם.

2.2 מכניקה ניוטונית

לפני שנגיע לקוונטים, הבה נמשיך לרגע עם המכניקה הניוטונית. "מכניקה" הוא המדע שעוסק בתנועתם של גופים: כיצד ניתן לתאר באופן מדוייק תנועה, מה הסיבות לתנועה, האם יש סוגים מיוחדים של תנועות שמהן ניתן להרכיב את כל התנועות האחרות, וכו'.

מאז המאה ה-17 ועד תחילת המאה ה-20, הצליחה המכניקה של ניוטון הצלחה מסחררת בפתרון השאלות האלה. גם היום היא מאפשרת לנו לדעת איזו מהירות להעניק ללווין כדי שישאר במסלול, איזה עומס גשר יכול לשאת, באיזו זווית יש לכוון תותח כדי לפגוע במטרה מסויימת וכן הלאה.

איך זה עובד? כיצד המכניקה מאפשרת את כל זה? ובכן, חשבו על הדוגמא של

הלווין. חוקי-ניוטון הם למעשה שלוש משוואות. כאשר מציבים לתוך המשוואות את הנסיבות של הלווין (מרחק כך-וכך מפני כדור הארץ), אפשר לפתור את המשוואות עבור המהירות שיש לתת לו כדי שלא יפול.

באופן כללי חוקי ניוטון מאפשרים לנו, אם יש לנו נתונים על המיקום והמהירות הנוכחיים של גוף מסויים, לדעת בדיוק היכן הוא יהיה ואיזו מהירות תהיה לו בכל רגע בעתיד. בצורה זו ניתן לחזות ליקויי חמה, ולדעת מראש שהלווין אמנם יכנס למסלול ולא יפול.

2.3 מכניקה קוונטית

כפי שציינתי, המכניקה הניוטונית (שגם נקרא לה "קלאסית"), נחשבה לנכונה ומדוייקת עד תחילת המאה ה-20. מה קרה בתחילת המאה ה-20? ובכן, הטכנולוגיה שהשתפרה, התחילה לתת למדענים גישה לניסויים בקנה מידה של אטומים. למעשה ב-1900 עוד לא היו בטוחים המדענים שבכלל באמת יש אטומים (מה שהיום נחשב כאמת מובנת מעצמה כמעט).

אינני רוצה כאן להביא את כל ההיסטוריה של התפתחות המכניקה הקוונטית, ואסתפק רק בכמה נקודות. בתחילה, במיוחד לאחר הניסויים המפורסמים של המדען האנגלי ארנסט רת'רפורד, התקבל מודל של האטום כחלקיק קטן, המורכב עצמו מגרעין עם מטען חשמלי חיובי המוקף אלקטרונים שליליים שסובבים אותו. לכאורה, מודל מכני שבו האטום עשוי מחלקיקים - גרעין ואלקטרונים.

אלא שכאשר ניסו להבין כל מיני תכונות של אטומים בעזרת המכניקה שהיתה אז ידועה - המכניקה הקלאסית של ניוטון, התחזיות של התיאוריה לא התישבו עם מה שנצפה בניסויים. עד מהרה הצטבר גוף גדול מספיק של ראיות, וכך הסתבר שיש צורך בתיקונים לתורתו של ניוטון.

אחת התופעות המוזרות היתה, שאת חלק מהניסויים היה אפשר להבין מתוך תיאוריה אחרת שהיתה באותו זמן, של תנועת גלים (בדומה לגלי מים, או גלי רדיו). במקביל, דברים שהובנו בעבר בעזרת תיאוריה של גלים, נוצר צורך להבין אותם במונחי חלקיקים בחלק מהניסויים החדשים (זו תרומתו הגדולה של איינשטיין, שהגה את הרעיון של הפוטון - חלקיק אור). על הנושא הזה שנקרא "דואליות גל חלקיק" תוכלו למצוא מידע בכל ספר פופולרי על תורת הקוונטים, ואין בכוונתי להרחיב בו, משום שבסופו של דבר, ה"דואליות" היא רעיון שעבר זמנו, מרגע שמכניקת הקוונטים הגיעה לבשלות ב-1930 עם פרסום ספרו החשוב של הפיזיקאי האנגלי הגדול, פול דיראק (Dirac), "עקרונות מכניקת הקוונטים".

ההיסטוריה של מכניקת הקוונטים מתחלקת אם כן לשני חלקים חשובים: עד שלהי שנות ה-1920, היתה תקופה של מבוכה, והצלחה חלקית מאוד של מה שהיום נקרא "תורת הקוונטים הישנה" (old quantum theory), שמניחי היסודות שלה הם מקס פלנק ואלברט איינשטיין, והיא הגיעה לשיא עם המייסד הבולט ביותר שלה, המדען הדני נילס בוהר. בתקופה זו שלטה ההשקפה של "דואליות גל/חלקיק", דהיינו שהחומר הוא איכשהו גם חלקיק וגם סוג של גל, אם כי לא ברור בדיוק איך.

בשלהי שנות ה-1920 התפתחה "מכניקת הקוונטים החדשה", שהיא למעשה תורת הקוונטים שאנו מכירים היום, ומפתחיה הראשונים הם שרדינגר (עדיין עם זיקה

לגלים), הייזנברג (עם גישה מתקדמת יותר) והמנסח האולטמטיבי שלה הוא פול דיראק, שעיצב את הצורה המתמטית של התאוריה עד ימינו אנו.

מכניקת הקוונטים הזו הצליחה מאוד, ובעזרתה הצליחו המדענים להבין, להסביר ולנבא מגוון אדיר של תופעות הקשורות למה שמתרחש בממלכת האטומים והחלקיקים התת-אטומיים: תכונות של חומרים, התפרקויות רדיו-אקטיביות, לייזרים, ריאקציות גרעיניות בתוך תוכה של השמש, וכן הלאה.

בחלק הבא אני אתרגם את הניסוח של פול דיראק למונחים שאמורים להיות מובנים לכל אחד שמוכן לקרוא ולהתאמץ להבין. אני מודע לכך שהדרך שבה אציג זאת תיראה מוזר ואפילו אבסורד, אבל זו האמת לאמיתה. זה מה שלומדים באוניברסיטה בקורסים, וזו התיאוריה הטובה ביותר שיש בידינו כיום, ושבעזרתה אנו מבינים את התנהגותם של חלקיקי היסוד של הטבע.

דרך אגב, מדוע קוראים לזה "קוונטים"? הסיבה היא היסטורית. אחת התגליות הראשונות שהובילה לפיתוח התיאוריה הזו היתה שהאור מעביר אנרגיה לאלקטרונים ב"מנות" שאיינשטיין כינה "קוונטה" (quanta), שזה הרבים של "קוונטום" (quantum), שפירושו פשוט "כמות". השם הזה פשוט נשאר, למרות שמאז התיאוריה התפתחה והשתכללה בהרבה.

3 תורת הקוונטים ללא-מדענים

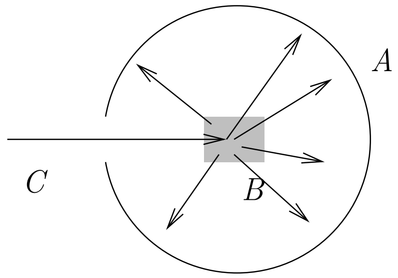
מטרתי כאן היא לתת סיכום קצר וקולע של עקרונות מכניקת הקוונטים כפי שהם מיושמים על-ידי מדענים. אינני הולך לדון בכל ההשלכות המעניינות והמוזרות של החוקים האלה, ואינני הולך להסביר את השיקולים שהובילו אליהם. מטרתי כאן היא רק להציג אותם כפי שהם, כמיטב יכולתי.

3.1 מקריות

אמרנו שבמכניקה ניוטונית אנו יכולים לחשב בדיוק רב את תנועתם של גופים, כלומר את מיקומם ומהירותם כפונקציה של הזמן. במכניקה הקוונטית, ההסתכלות היא שונה. נניח למשל, שהניסוי שלנו הוא כזה: אנחנו שמים גוש עופרת בתוך מיכל, שם-ים מסביב גלאי-אלקטרונים בכל הכיוונים, ועכשיו מפציצים את העופרת בקרן של אלקטרונים, הפוגעים בגוש העופרת, ומתפזרים ממנו לכל הכיוונים ונקלטים במערך הגלאים שלנו (ראה איור 1) .

ההשקפה הניוטונית היא שאם יהיו לנו את הנתונים של אלקטרון מסויים, נוכל לחשב מתוך הידע שלנו על הכוחות הפועלים בין האלקטרון לעופרת לאיזה גלאי האל-קטרון יגיע. מסתבר שזה לא המצב, ושאפילו שני אלקטרונים עם בדיוק אותו מצב התחלתי יכולים להגיע לגלאים שונים. תורת הקוונטים מאפשרת לנו לחשב את הסיכוי של כל אלקטרון להגיע לגלאי מסויים, אך היא אינה מסוגלת (ונכון להיום מאמינים שזה בלתי אפשרי) לדעת מראש לאיזה גלאי הוא יגיע בפועל.

- **חוק 1:** לא ניתן לדעת בוודאות מה יקרה אפילו אם הנסיבות ידועות. ניתן לחשב את הסיכוי לכל מאורע ומאורע, זה הכל.



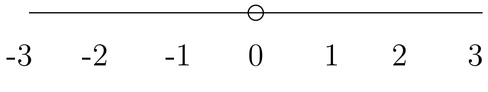
איור 1: אלומת אלקטרונים C פוגעת בגוש עופרת B, מתפזרת לכל הכיוונים ונקלטת במערך גלאים A.

אם כך כיצד בודקים את הנבויים של תורת הקוונטים? פשוט מאוד: זורקים הרבה אלקטרונים (ולא חסרים אלקטרונים בעולם) על העופרת, בכל פעם שגלאי מצפצף זה נרשם במחשב, ולאחר זמן מה עוצרים את הניסוי, ומעבדים את הנתונים סטטיסטית, ורואים האם הסטטיסטיקה שתורת הקוונטים מנבאת היא אכן זו שנמדדה. מבחינה מסוימת, מדובר בנסיגה של הפיזיקה מהעמדה הניוטונית, שבה חשבנו שאנו יכולים לחשב מה באמת יתרחש, ולא רק סיכויים. בין אם זו נסיגה או לא נסיגה, זה המצב.

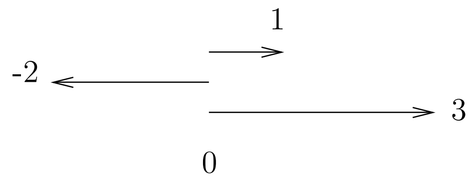
בקיצור, מה שקורה בפועל הוא מקרי, אך הסטטיסטיקה של המקריות הזו ידועה מראש. מבחינה נסיונית, תורת הקוונטים מנבאת בדיוק מדהים את הסטטיסטיקה הזו.

3.2 מספרים מרוכבים

בחלק הבא אני רוצה להסביר כיצד הפיזיקאים מחשבים את הסיכוי לכל דבר. לצורך כך אני צריך קודם כל להציג את הכלים החישוביים שהם משתמשים בהם. הכלי החשוב ביותר הוא מה שנקרא "מספרים מרוכבים". כדי להבין מהם מספרים מרוכבים, נתחיל מהמספרים הרגילים שאנו מכירים, למשל: $0.5, 1, 3.5 \ldots$ וכולי. יש גם מספרים שליליים, -0.2, -1.5, -4 וכולי. בתור נקודת פתיחה נביט במשהו שמוכר לנו היטב, ציר המספרים:

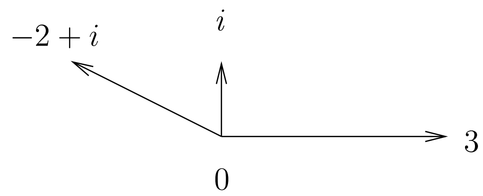


עכשיו, תנסו לחשוב על כל מספר בתור חץ, שיוצא מהנקודה האמצעית (המספר 0) ואורכו שווה למספר שאותו החץ מייצג, והכיוון שלו הוא ימינה אם זה מספר חיובי, ושמאלה אם זה מספר שלילי. הנה כמה מספרים:

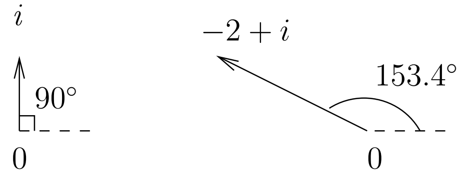


שימו לב: אם אני נותן לכם חץ אתם יכולים להגיד לי איזה מספר הוא מייצג כך: ראשית, מדדו את אורכו (נניח 3), שנית, הביטו אם זה חץ ימינה (מספר חיובי, כלומר 3) או שמאלה (מספר שלילי, כלומר -3). יוצא מכך שחץ הוא יצוג נאמן של מספר.

עכשיו, מספרים מרוכבים הם כמו החיצים האלה, אלא שמותר להם לא רק להיות ימינה או שמאלה, אלא בכל הכיוונים. הנה כמה מספרים מרוכבים (מה שעוד לא ברור יתבהר מיד, בינתיים הביטו בחיצים בלבד):



אם כן מופיעים באיור המספר 0, שהוא הנקודה המרכזית (אפשר לחשוב על זה כמו על חץ באורך 0), המספר 3, ושני מספרים מרוכבים חדשים. דרך אגב, המספרים 0 ו-3 גם הם נחשבים מספרים מרוכבים, רק שכמובן מה שמעניין אותנו זה החיצים הלא-אופקיים. אם קודם הסכמנו שמה שמאפיין את המספרים הרגילים זה אורך החץ וכיוון החץ (ימינה או שמאלה), עכשיו מה שמאפיין את המספרים הוא אורך החץ והזווית שהחץ נמצא בה יחסית לכיוון "ימינה". הנה שני המספרים החדשים שלנו, עם הזוויות שלהם.



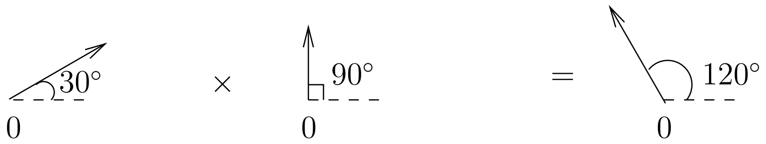
המספר שגודלו 1 ונמצא בזווית של $90°$ הוא מיוחד, ונתנו לו שם משלו: i.

עכשיו, כל אחד יודע שמספרים אפשר לחבר, לחסר, להכפיל ולחלק. אנחנו נלמד עכשיו רק לחבר ולהכפיל, וזה יספיק לנו.

חיבור: (הסתכלו בציור תוך כדי קריאה) כדי לחבר שני מספרים מרוכבים, לוקחים חץ אחד, שמים את ההתחלה שלו על הסוף של החץ השני, ואז מותחים חץ מההתחלה של החץ השני ועד סוף החץ הראשון. הציור מיד יבהיר למה הכוונה:

$$i \quad + \quad -2 \quad = \quad -2+i$$

עכשיו צריך להיות ברור מדוע סימנתי את החץ הזה $-2+i$ באיורים הקודמים.
אם כך, למדנו כיצד לחבר מספרים מרוכבים.
כפל: כדי להכפיל שני מספרים מרוכבים, לוקחים חץ אחד, מכפילים את הגודל שלו בגודל של החץ השני, ואת הזווית של המספר החדש לוקחים להיות הסכום של שתי הזוויות. למשל:



בציור הזה אורכו של החץ הקצר הוא 1, ושל הארוך 1.5, כך שהאורך של התוצאה הוא $1 \times 1.5 = 1.5$, והזווית שלה היא $90° + 30° = 120°$. אוקיי. עכשיו אנו יודעים להכפיל וגם לחבר מספרים מרוכבים, כלומר יש לנו את הכלים הבסיסיים של חשבון.
שימו לב למשוואה הבאה,

כלומר

$$i \times i = -1$$

או $i^2 = -1$. זו התכונה המיוחדת של מספרים מרוכבים: ניתן להעלות מספר בריבוע ולקבל תוצאה שלילית, בניגוד למספרים רגילים:

$$(-1)^2 = 1$$

טוב. עד כאן עם מספרים מרוכבים ובחזרה לפיזיקה.

3.3 איך מחשבים סיכויים?

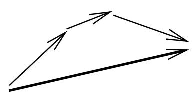
עכשיו אני יכול להסביר איך המכניקה הקוונטית עובדת, ואיך מחשבים סיכויים. אני לא באמת אסביר כאן איך ממש מחשבים את הסיכוי לכל דבר, רק את ההליך הטכני, כלומר איך הפיזיקאים מייצגים מתמטית מצב פיזיקלי בעזרת מספרים מרוכבים, ואיך הם מחשבים מתוך היצוג הזה הסתברויות.

ניזכר בניסוי עם האלקטרונים והעופרת. אנו שואלים את השאלה "מה הסיכוי שאלקטרון יקלט בגלאי X?" ובכן, ניתן לנתח את המצב באופן כזה: נביט בכמה דרכים שונות האלקטרון יכול להגיע ל-X, וכמו כן נביט בכמה דרכים הוא יכול להגיע לכל גלאי אחר חוץ מ-X. נניח, למשל, שמצאנו של-X מובילות 8 דרכים, ולכל שאר הגלאים מובילות 92 דרכים. אז יש 100 אפשרויות סך הכל (8+92), מתוכן בדיוק 8 מובילות ל-X, כלומר הסיכוי להגיע ל-X הוא 8%.

ההסבר שכרגע נתתי הוא דוגמה לחישוב קלאסי של הסתברויות. הוא מתבסס על כך שיש כך וכך דרכים אפשריות להגשים מאורע מסויים (האלקטרון מגיע ל-X), ושאם המאורע אמנם התרחש, אז כמובן שהאלקטרון הלך באחת הדרכים שמנינו.

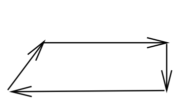
הדבר המוזר הוא, שכאשר מודדים ניסוי כזה במעבדה, זה לא מה שקורה. לא מודדים 8%.

אני אסביר עכשיו את אופן החישוב הקוונטי של הסיכוי, ואז נעמוד על משמעויותיו. בדומה למתמטיקאי העוסק בהסתברות, גם הפיזיקאים מסתכלים על כל הדרכים שבהן האלקטרון יכול להגיע לגלאי X. אלא שבמקום פשוט למנות אותן, הפיזיקאי מתאים לכל אחת מהדרכים מספר מרוכב, כלומר חץ מהסוג שראינו קודם. כאשר הפיזיקאי רוצה לחשב את הסיכוי שהאלקטרון יגיע ל-X, הוא מסכם את החיצים, כלומר הוא מציב את החיצים בזה אחר זה, ובסופו של דבר מותח חץ מנקודת ההתחלה ועד לנקודת הסוף - וזה החץ הסופי. באיור לדוגמא, ישנן שלוש דרכים, לכל אחת מהן יש חץ, והחץ הסופי מודגש:



לאחר שיש לנו את החץ הסופי, הסיכוי של המאורע מחושב כך: לוקחים את אורכו של החץ, ומעלים בריבוע. כלומר אם אורכו של החץ היה למשל 4, אז הסיכוי שהוא מייצג הוא $4^2 = 4 \times 4 = 16$, כלומר 16 אחוזים.

הדברים מתחילים להיות מעניינים כאשר קורה מקרה כמו באיור הבא:



מה קורה כאן? החיצים מסתכמים באופן כזה, שנקודת ההתחלה ונקודת הסוף היא אותה נקודה. אורכו של החץ הסופי במקרה כזה הוא אפס. כלומר, וזו תמצית

המוזרות הקוונטית: **לעיתים מאורע מסויים** לעולם לא יתרחש **משום** שהדרכים השונות בהן היה יכול להתרחש מבטלות זו את זו. **זה נקרא "התאבכות הורסת", וזה דבר משונה מאוד.**

מדוע זה משונה כל כך? משום שמה שתורת הקוונטים מלמדת אותנו הוא, שמ-צד אחד, כדי להגיע לתוצאה הנכונה, עלינו להתחשב בכל הדרכים שבהן משהו יכול להתרחש. בו בעת, אנו לא יכולים לחשוב שהמאורע אמנם התרחש באחת מהדרכים הללו - אלא הוא מתרחש במין ערבוביה שלהן, שלעיתים מסתכמת באפס!

אולי יכולתם לחשוב שאם זה המצב, אז הדרכים שמתבטלות כנראה לא מייצגות משהו אמיתי. אבל אפשר להוכיח שכן בצורה פשוטה: משנים את הניסוי כך שחוסמים את אחת מהדרכים, ואז מודדים שוב. מסתבר שהתוצאה המתקבלת עכשיו היא בדיוק לפי הסיכום של כל הדרכים שלא נחסמו! ביחד עם הדרך שנחסמה הן מסתכמות לאפס, אבל משזו יצאה מהמשחק, החץ הסופי אינו אפס, והמאורע אכן מתרחש בהתאם לסיכוי שהחץ הסופי נותן.

לסיכום, כאשר הפיזיקאים רוצים לחשב את הסיכוי שדבר מה יתרחש, הם (א) מונים את כל הדרכים שבהן הדבר יכול לקרות, (ב) כל אחת מהדרכים הללו מקבלת חץ (ג) מסכמים את החיצים לקבלת חץ סופי, ו-(ד) אורכו של החץ הסופי בריבוע, הוא הסיכוי המבוקש.

הדבר שהשמטתי כאן הוא איך לעזאזל הפיזיקאים יודעים איזה חץ לרשום עבור כל דרך. זו נקודה טכנית שלא משנה את המהות, ולא ניכנס אליה כאן. נסכם את מה שלמדנו בחלק זה כך:

- חוק 2: הסיכוי לכל תוצאה מתקבל ע"י סיכום של חיצים, אחד לכל דרך שבה התוצאה יכולה לקרות, והעלאה בריבוע של אורכו של החץ הסופי.

3.4 משוואת שרדינגר והקריסה של פונקצית הגל

הבה נחזור לאלקטרון שלנו. אמרנו שאנו יודעים כיצד לחשב את הסיכוי שלו להגיע מהנקודה שבה הוא נכנס למערכת לגלאי מסויים X. נובע מהתיאור הזה, שאני יודע איפה האלקטרון היה בתחילת הניסוי (אותה "נקודה שבה הוא נכנס למערכת"), וכמו כן אני יודע איזה מצב סופי מעניין אותי - "האלקטרון הגיע לגלאי X".

כמו כן, לפי מה שראינו בחלק הקודם, גם אם האלקטרון אמנם מגיע לגלאי, אין לי שום הבנה איך הוא עשה זאת, משום שהוא לא הלך באף דרך אחת מהדרכים האפשריות, אלא במין ערבוביה שלהן. מצב האלקטרון במהלך הניסוי אינו ידוע, אבל אנו יודעים לחשב את הסיכוי שיגיע למצב מסויים בסוף הניסוי. למעשה השאלה הנכונה היא לא "מה הסיכוי להגיע לגלאי X" אלא "מה הסיכוי להגיע לגלאי X בפרק זמן מסויים".

ובכן, הפיזיקה לא לגמרי חסרת אונים, והיא יודעת לתאר את ה"עירבוביה" שה-זכרתי מבחינה מתמטית. אתם יכולים לתאר לכם חיצים של הדרכים השונות, שנמתחים ומסתובבים ככל שעובר הזמן. בכל רגע ורגע, ניתן לסכם את החיצים לחץ סופי ולקבל תשובה לשאלה "מה הסיכוי להגיע לגלאי X בפרק הזמן שחלף עד עכשיו". אוסף החיצים האלה הוא מה שהפיזיקאים קוראים לו "פונקצית הגל", (מסיבות היסטוריות,

אין באמת קשר לגלים). הדרך המדוייקת שבה החיצים משתנים עם הזמן מתוארת על ידי משוואה מפורסמת, הידועה בשם "משוואת שרדינגר".

מהי, אם כן, ה"קריסה"? נניח שגלאי X צפצף. אני יודע עכשיו את מצבו של האל-קטרון - הוא בדיוק הגיע לגלאי X. מצבי עכשיו כמדען דומה למצב שהיה בתחילת הניסוי, אז ידעתי שהאלקטרון בדיוק נכנס למערכת שלי. למעשה, בכל פעם שמדידה מתבצעת, המצב של המערכת כאילו עובר איזה מין "איתחול", והחיצים שתיארו את האלקטרון עד עכשיו נעלמים - ומופיע חץ חדש, שמייצג את מצבו הנוכחי של האל-קטרון.

מרגע זה ואילך, אם אני רוצה להתעניין בגורל האלקטרון ולשאול "מה הסיכוי שהאלקטרון שהיה ב-X יגיע תוך זמן מסויים ל-Y", הסיפור מתחיל מהתחלה. כל עוד שהוא לא יגיע לגלאי אחר, מצבו יהיה מעורפל, וכל מה שאדע זה רק את התיאור המתמטי של חיצים שמשתנים עם הזמן. השאלה מה הסיכוי להגיע ל-Y תלוייה אך ורק בזמן שחלף מאז שהוא היה ב-X, וב-X עצמו. היא לא תלוייה בכלל בכל מה שקדם להופעתו של האלקטרון ב-X. ה"איתחול" הזה של מצב האלקטרון, שבו הוא "שוכח" את מה שקרה לפני הופעתו ב-X, הוא מה שנקרא "קריסת פונקצית הגל".

למעשה, בכל פעם שנמדד מצב האלקטרון, מתרחש קריסה שכזו, שבה האלקטרון עובר ממצב "מעורפל", שאנו יודעים לתאר מתמטית אבל מתקשים להבין אותו, למצב "ברור" שבו האלקטרון נמצא בגלאי מסויים. תופעה זו היא מה שמיסטיקנים אוהבים להיתלות בו ולאמר "התודעה קובעת את המציאות! אם לא היינו מסתכלים האלקטרון לא היה קורס!"

ובכן, לא ממש. הניסוח "אני מודד ואז האלקטרון קורס למצב מסויים" הוא קצת מוטעה. נוח לנו, כמדענים שמודדים דברים במעבדות, לדבר כך. יותר נכון יהיה לאמר, שקריסות מתרחשות מדי פעם, לא ברור איך ומדוע, וחלק מהקריסות האלה גורמות לגלאים במעבדות לצפצף. ניתן לקעקע עוד את טענת המיסטיקנים לשליטתה של התודעה במציאות אם נזכיר את העובדה, שכאשר מודדים, לא יודעים מראש איזה גלאי יצפצף, וכמו כן החישוב של הסיכויים הוא עניין מתמטי טהור ואובייקטיבי לחלו-טין. כל פיזיקאי שיחשב, יקבל את אותה תוצאה, ללא קשר למצבו התודעתי או הנפשי. האנשים שיפעילו את ציוד הניסוי יקבלו את אותן מדידות, גם אם הם כלל לא פיזי-קאים ורק לוחצים על כפתורים. בקיצור, למרות רצונם של חובבי המיסטיקה להאמין שהמחשבות שלהם משפיעות בדרך מסתורית על עולם החלקיקים, אין שום ראיות מדעיות לתמוך בכך. עניין הקריסה ממשיך, אגב, להציק לפיזיקאים תיאורטיים, וה-מחקר בתחום זה נמשך גם היום. נוכל לסכם על ידי תוספת של שני חוקים לאוסף שלנו:

- חוק 3: בין מדידה למדידה, מצב המערכת (החיצים השונים) משתנה בזמן לפי משוואת שרדינגר.
- חוק 4: כאשר מתבצעת מדידה, המערכת "קורסת" מהמצב המעורפל שהיתה בו, למצב ברור שמתאים לתוצאת המדידה.

3.5 תורת הקוונטים: סיכום

בארבעת החוקים שמניתי יש פחות או יותר את המבנה הטכני של תורת הקוונטים. נסכם זאת כך:

- חוק 1: לא ניתן לדעת בוודאות מה יקרה אפילו אם הנסיבות ידועות. ניתן לחשב את הסיכוי לכל מאורע ומאורע.
- חוק 2: הסיכוי לכל תוצאה מתקבל ע"י סיכום של חיצים, אחד לכל דרך שבה התוצאה יכולה לקרות, והעלאה בריבוע של אורכו של החץ הסופי.
- חוק 3: בין מדידה למדידה, מצב המערכת (החיצים השונים) משתנה בזמן לפי משוואת שרדינגר.
- חוק 4: כאשר מתבצעת מדידה, המערכת "קורסת" מהמצב המעורפל שהיתה בו, למצב ברור שמתאים לתוצאת המדידה.

אלה הם עקרונות היסוד של תורת הקוונטים.