

ספק אונטי ואפיסטמי א: מבוא מדעי ומושגי

בטורים הבאים ארצה לגעת ביחס בין ספק אפיסטמי (הכרתי) לספק אונטי (מציאותי-עובדתי) בהקשר ההלכתי ובכלל. בטור הזה אקדים הקדמה מדעית ומושגית לנושא.¹ הדברים אינם דורשים ידע, אבל אני מניח שיש קוראים שנרתעים מחומר מדעי וסימול מתמטי. קוראים אלו יכולים לקרוא ולהתמקד בהסברים שלי. מקדמים ומשוואות אינם באמת נחוצים להבנת העניין (אם כי זה מועיל).

חוסר יכולת ניבוי במערכות כאוטיות

דוין פרמר, אחד מראשוני תורת הכאוס, חבר בקבוצת סנטה קרוז שהמשיגה את הכאוס לראשונה, מתאר את תחושתו כשהוא וחבריו התחילו להבין שמצויה תחת ידם תיאוריה בעלת משמעות פיזיקלית מרחיקת לכת (ראו בספר **כאוס**, ג'יימס גליק, עמ' 253):

ברמה הפילוסופית, זו נראתה לי כמו דרך מעשית להגדיר רצון חופשי, באופן שמאפשר לך להשלים בין 'הרשות נתונה' לבין 'הכל צפוי'. המערכת דטרמיניסטית, אבל אתה לא יכול לומר מה היא תעשה ברגע הבא...יש כאן מטבע אחד עם שני צדדים. כאן יש סדר שאקראיות מגיחה מתוכו, ובמרחק של צעד אחד יש אקראיות שסדר מונח ביסודה.

פרמר טוען שהמרווח הזה בפיזיקליזם, שמאפשר לנו למצוא תופעות ללא אפשרות חיזוי בתוך הפיזיקה הקשיחה, הוא מובלעת אקראית בתוך חוקי הפיזיקה, והוא רואה בו פתח אפשרי להבנת תופעת הרצון החופשי.

אבל על אף ההתלהבות שלו, הקישור אותו עושה כאן פרמר בין אקראיות לבין חופש רצון הוא חסר שחר, מכמה סיבות. ראשית, חופש בחירה אינו אקראיות, אלא מכניזם אחר. זהו חוסר הבנה פילוסופי לגבי משמעותו של רצון חופשי, מה שבהחלט אפשרי אצל פיזיקאי. אך מה שחמור יותר הוא חוסר הבנה פיזיקלי במשמעותו של הכאוס. מערכת כאוטית אינה באמת אקראית. במערכת כזאת אמנם אין לנו יכולת לנבא את התנהלותה בעתיד לאור המצב בהווה, אבל זה רק בגלל סיבוכיות החישוב והרגישות לתנאי ההתחלה. אין כאן שום חופש אמיתי. פרמר מעררב כאן בין חוסר אפשרות לנבא לבין חופש. מה שמביא לטעות שלו הוא העובדה שאם לאדם יש בחירה חופשית באמת אי אפשר לנבא את התנהגותו. אבל הקשר ההפוך אינו נכון: זה שאי אפשר לנבא את התנהגותו לא אומר בהכרח שיש בה חופש (כלומר שהיא אינה דטרמיניסטית).

חשבו על הטלת מטבע או קובייה. אין לנו דרך מעשית לנבא את התוצאה שנקבל, ולכן רבים מתייחסים לתופעות הללו כתופעות אקראיות, ומנתחים אותן באמצעות כלים הסתברותיים. אבל כמובן אין כאן שום דבר אקראי. הטלת מטבע או קובייה הם תהליכים דטרמיניסטיים לגמרי, ואפילו פשוטים באופן עקרוני. מדובר בחוקי ניוטון ותו לא. הסיבה לסיבוכיות בחישוב התוצאה היא גם הרגישות הגדולה לתנאי ההתחלה (לאיזה כיוון ובאיזו מהירות הטלת את המטבע או הקובייה), וגם החישוב הטכני עצמו (שתלוי בצורת העצמים הללו, בהשפעת זרמי האוויר וכדומה). היבטים אלו מונעים מאתנו לעשות את החישוב, אבל ברור לכל שעקרונית ישנו חישוב כזה. בשפה התלמודית ניתן לומר ש"כלפי שמיא גליא" מה תהיה התוצאה, כלומר שהקב"ה יודע אותה. אם להשתמש במטבע הלשון של לפלס, ניתן לומר שאם תתנו לי מחשב-על עם כוח חישוב וזיכרון אינסופי (ונתונים מדויקים על המטבע, על הקובייה ועל תנאי ההתחלה) אוכל לומר לכם בוודאות מהי התוצאה שתקבלו. נכון שאין לי את כל אלו ולכן איני יכול לעשות את החישוב, אבל עדיין ברור שיש חישוב כזה. זו אינה מערכת שיש בתוכה חופש כלשהו.

ספק אפיסטמי וספק אונטי

מהי הסיבה לפער בין אי יכולת ניבוי לבין חופש? מה בדיוק פספס דוין פרמר? העובדה שבמקרים כמו הטלת קובייה או מטבע איני יכול לנבא את התוצאה נובעת מחוסרים כלשהם שלי ולא מעמימות

¹ ראו על כך בפרקים 9-10 בספרי **מדעי החופש**.

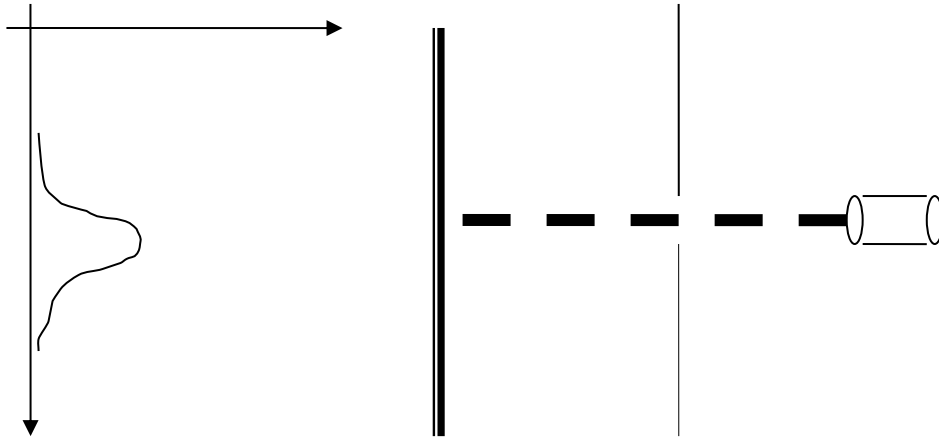
במציאות עצמה. המציאות עצמה היא קבועה באופן חד ערכית, כלומר לכל מצב נתון יש תוצאה אחת ויחידה שמוגדרת היטב על בסיס המצב העכשווי. הלאקונה היא אצלנו, בני האדם. מכאן והלאה אומר שזהו ספק (=חוסר מידע) הכרתי, ובמינוח פילוסופי זהו ספק אפיסטמי (אפיסטמולוגיה היא תורת ההכרה). במינוח הזה, במערכות כאוטיות מדובר על ספק אפיסטמי. מי שמצויד בכל המידע ובכל יכולת החישוב יכול לדעת עליהן הכל. כדי להבין את הטעות של פרמר, עלינו לזכור שתפיסה ליברטאנית שדוגלת בקיומו של רצון חופשי (לעומת הדטרמיניזם) סבורה שהמציאות עצמה אינה חד ערכית. גם בהינתן מערכת נסיבות מסוימת ומידע מלא אודותיה, עדיין האדם יכול לבחור באופן חופשי האם לעשות X או Y. אם כן, לא מדובר כאן בהיעדר של מידע אצלנו (חוסר יכולת לנבא), אלא במציאות שבעצמה אינה חד ערכית. במינוח התלמודי הנ"ל, גם הקב"ה לא באמת יודע מה האדם יעשה, ובוודאי שמחשב-על עם כוח חישוב אינסופי לא יסייע לנו בזה. במצב כזה העניין הוא לא שאין לנו את התשובה הנכונה, אלא שבכלל אין תשובה אחת. מצב כזה נכנה כאן ספק אונטי (אונטולוגיה היא תורת היש, חלק מהמטפיזיקה), כלומר משהו שאינו חד ערכי במציאות עצמה, זאת בניגוד לספק האפיסטמי שעוסק בהכרה שלנו את המציאות ולא בה עצמה. כדי לחדד יותר את ההבדל, אני לא אתייחס למצב כזה כספק אלא כעמימות. מכאן והלאה, ספק מתאר עבורנו מצב של חוסר מידע אצל האדם, ולעומת זאת עמימות היא תיאור של אי היקבעות של המציאות עצמה במצבים כאלו. בשולי דבריי אעיר שמצבי ספק מתוארים על ידי הסתברות, ומצבי עמימות מתוארים על ידי לוגיקה עמומה (fuzzy logic).

עמימות בתוך הפיזיקה: תורת הקוונטים

מספרים על [ארתור אדינגטון](#) (אסטרופיזיקאי בריטי, מראשוני תורת היחסות), שכשאמרו לו שיש שלושה בעולם שמבינים את תורת היחסות הוא שאל מי השלישי (בנוסף אליו ולאיינשטיין, כמובן). פיזיקאי ידוע אחר, צעיר יותר, [ריצ'רד פיינמן](#), אמר שאת תורת היחסות דווקא לא כל כך קשה להבין, אבל את תורת הקוונטים אף אחד לא מבין. לכל היותר מתרגלים אליה. אחת התכונות המוזרות של תורת הקוונטים היא שלפחות על פי הפרשנויות המקובלות אליה זהו התחום היחיד בפיזיקה שבו ניתן למצוא עמימות במציאות עצמה (ולא רק מגבלות על יכולת החישוב שלנו). יש שם מרווח אונטי בפיזיקה, ולא רק מרווח אפיסטמי. אנסה כאן להסביר בתמצית את ההיבט הזה של תורת הקוונטים (ושוב, אני נסמך כאן על הפרשנויות המקובלות).

ניסויי שני הסדקים

כפי שנהג לומר ריצ'רד פיינמן, הדרך הטובה ביותר להסביר את תורת הקוונטים היא באמצעות ניסויי שני הסדקים. יש לניסוי הזה היסטוריה מעניינת והפכפכה מאד. היא מתחילה כבר מתקופתו של ניוטון, אז התנהל ויכוח בין פיזיקאים על טיבו של האור. היו שטענו שהוא מורכב מחלקיקים (כמו ניוטון) והיו שראו אותו כגל (התיאוריה של פרנל-הויגנס). בשנת 1801, 74 שנים לאחר מותו של ניוטון, ערך תומאס יאנג את ניסוי שני הסדקים הראשון כדי להכריע בסוגיה זו. במערך הניסוי בו השתמש יאנג ישנו הבדל מובהק בין גל לבין קרן חלקיקים, ובדיוק בגלל זה הוא היה שימושי כדי להכריע את המחלוקת אודות האור. זוהי בדיוק גם הסיבה לכך שמערך הניסוי הזה ימצא שימושי להפליא גם במאה הבאה בהכרעת מחלוקת דומה, והפעם לגבי טיבם של חלקיקים כמו האלקטרון (האם הם בעלי טבע גלי או חלקיקי). כדי להבין זאת, נתחיל במקרה הפשוט יותר, של סדק בודד. בציר שלמטה מתואר מקור (הגליל בצד ימין) ששולח קרן של חלקיקים או גל (הקו המקווקוו העבה) לכיוונה של מחיצה ובה סדק. מאחורי המחיצה יש מסך (שמתואר בקו כפול), בעצם זהו סוג של סרט צילום שרגיש לפגיעת הגל או החלקיקים.



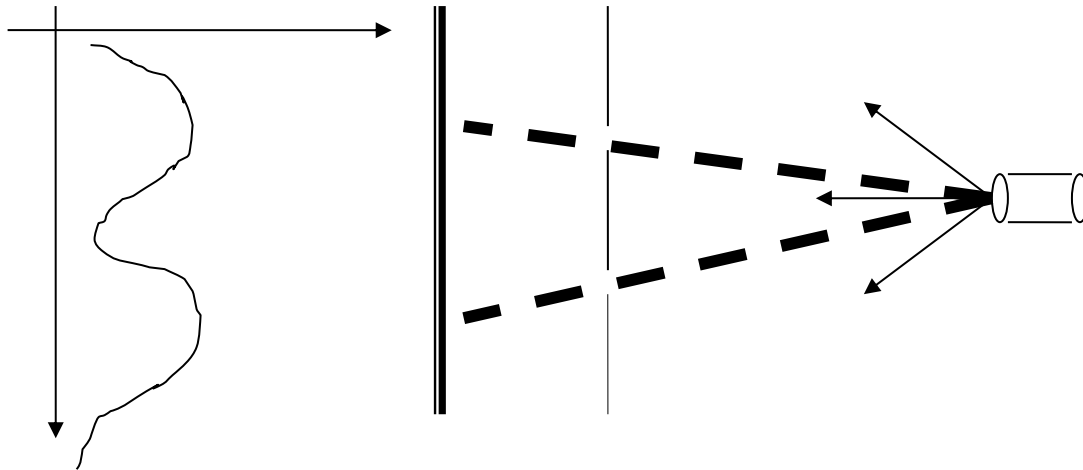
ציור 1: מערך הניסוי של סדק בודד

הגרף בשמאל הציור מתאר את תוצאות הניסוי במקרה של סדק בודד. גובהו (על ציר y) מייצג את כמות החלקיקים או עוצמת הגל שמתקבלת בכל נקודה על המסך (כל נקודה על ציר ה- x של הגרף מייצגת את הנקודה המקבילה לה על המסך).

ניתן לראות שהכמות הגדולה ביותר מתקבלת בדיוק מול הסדק, ומשני צידיה הכמות הולכת ופוחתת (זה מייצג חלק מהאור או החלקיקים שסטו מעט הצידה). תמונה זו נכונה בין לאלומת חלקיקים ובין לאלומה גלית. הרעיון של יאנג היה להבחין בין אלומת חלקיקים לבין גל באמצעות ניסוי דומה, אלא שבו מציבים מחיצה שבה שני סדקים. כדי להבין את העניין עלינו להכיר משהו שמייחד את התופעות הגליות, ההתאבכות. כאשר שתי אלומות חלקיקים נעות במרחב, סך החלקיקים הכולל בכל נקודה הוא סכום מספרי החלקיקים משתי האלומות באותה נקודה. לעומת זאת, כאשר שני גלי אור מסתובבים במרחב, עוצמת האור הכוללת בכל נקודה אינה סכום פשוט של עוצמות האור של שני הגלים בנקודה הנדונה. העוצמה בכל נקודה במרחב תעלה ותרד כתוצאה מאפקט ההתאבכות בין הגלים.² כך למשל ייתכן מצב שבו שני גלים בעוצמה גבוהה יסתכמו לאפס, שכן האחד הוא חיובי והשני שלילי. במקומות מסוימים העוצמה של שני הגלים מבטלת אחד את השני, ובמקומות אחרים הם מחזקים אחד את השני (העוצמה הכללית גדולה יותר מסכום העוצמות).

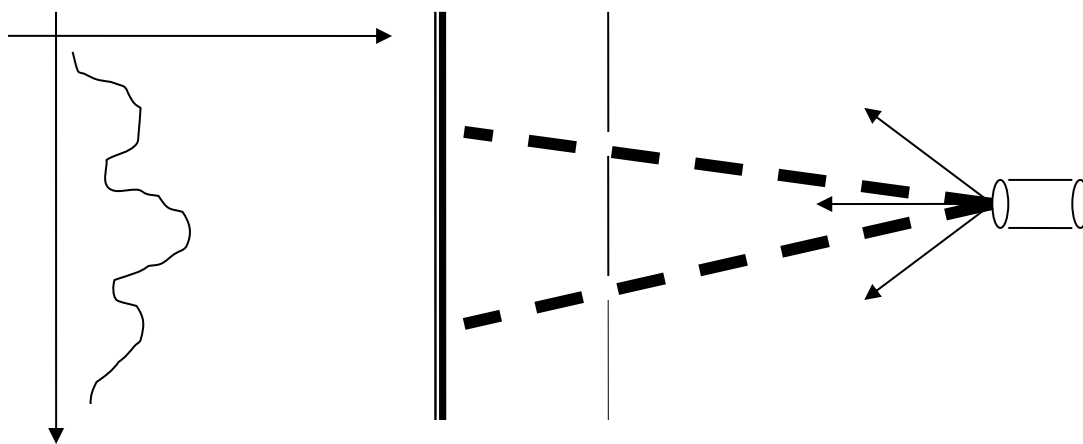
חשבו קעת על מערך הניסוי שהציע יאנג, שכולל מחיצה עם שני סדקים. אם המקור שמימין פולט אלומת חלקיקים (כמו אלקטרונים, כדורי טניס, או פילים), חלקם יעבור דרך כל אחד משני הסדקים. סביב כל סדק כמות החלקיקים תתפלג כמו בגרף של הסדק הבודד (ראה בגרף שבציור 1). אם כן, בניסוי עם שני סדקים, בכל נקודה נתונה על המסך מספר החלקיקים שיגיע אליה יהיה סכום החלקיקים שהגיעו מהסדק הימני ומהסדק השמאלי. לכן התמונה על המסך תיראה כסכום התמונות של שני הסדקים הבודדים, כלומר אנחנו נקבל גרף עם שני שיאים שווים, כמתואר בציור 2:

² הגלים מסתכמים על ידי סכום של ערכי הפונקציה שמתארת את הגל, אבל העוצמות הן ריבועי ערכי הפונקציה. לכן ברור שסכום העוצמות של שני הגלים (סכום ריבועי הערכים של שתי הפונקציות) אינו שווה לעוצמה של הגל שמורכב משניהם (ריבוע הסכום של ערכי הפונקציה).



ציור 2: ניסוי שני סדקים עם אלומת חלקיקים

לעומת זאת, כאשר המקור שולח אלומה גלית, תופעת ההתאבכות תגרום לכך שהתמונה תיראה שונה לגמרי, כמתואר בציור 3:



ציור 3: ניסוי שני סדקים עם אלומה גלית

במקרה הגלי שמתואר בציור 3,3 דווקא במרכז בין שני הסדקים (במקום בו התמונה החלקיקית כמעט מתאפסת. ראו בציור 2) מופיעה העוצמה המקסימלית. משני צידיו של המרכז ישנן אונות צדדיות ששיאיהן הולכים ויורדים. אם כן, ניסוי שני סדקים מספק לנו הבחנה חדה בין אלומת חלקיקים לבין אלומה גלית.

בניסוי יאנג, שנערך כאמור בתחילת המאה ה-19, בוצע ניסוי שני הסדקים ביחס לגל אור, והתוצאה שהתקבלה הייתה חד משמעית: התקבלה שם תמונה גלית (ציור 3). כך הוכרע הוויכוח בין ניוטון להויגנס (שכבר היו זה מכבר בין המתים), ונקבע כי האור הוא תופעה גלית. אבל אל תדאגו לניוטון, הוא עוד ישוב. מעל מאה שנים אחר כך, בתחילת המאה העשרים, החלו להצטבר ראיות וטיעונים שונים לטובת התמונה שרואה את החלקיקים כגלים. בשנת 1924 נסיך צרפתי בשם לואי דה ברויי (de Broglie) בעבודת הדוקטורט שלו מציע לראות את האלקטרון כגל ואף מציע תיאור מתמטי של פונקציית הגל שלו.

³ כדי שהתפלגות העוצמות תהיה כמתואר כאן בגרף 3, נדרש מרחק מסוים בין שני הסדקים, שתלוי באורך הגל של האלומה הגלית. אני לא נדרש לפרטים הללו כאן כדי לא לסבך את התיאור.

כעת מתחיל ויכוח הפוך מזה שהתנהל בין ניוטון להויגנס, האם עצמים שהתרגלו לראות אותם כחלקיקים (לדוגמה, האלקטרון) הם בעצם בעלי טבע גלי? כדי לבחון את השאלה הזאת, נעשו שוב ניסויי שני סדקים, אך הפעם עם אלומת אלקטרונים. הציפייה הייתה שהתמונה תיראה כמו בציור 2 למעלה, שכן לכאורה האלקטרונים הם חלקיקים. התוצאות היו מדהימות. התברר שהתמונה שהתקבלה הייתה דומה לציור 3. עלה מכאן שגם אלקטרונים הם בעצם בעלי טבע גלי. אם כן, האלקטרונים מתנהגים כמו גלי אור, ובעצם ההבדל בין חלקיק לגל לכאורה נמחק. לא היה ברור כיצד ייתכן שאלומת חלקיקים מתאבכת עם עצמה? כפי שצינתי, התאבכות היא תכונה של גלים ולא של חלקיקים.

בשלב כלשהו עלתה השערה שההתאבכות היא תוצאה של העובדה שמדובר באלומת אלקטרונים, ולא באלקטרון בודד. אלקטרונים שונים מפריעים זה לזה, ומהפגישה ביניהם נוצרת מעין תמונת ההתאבכות. היתרון של הפיזיקה הוא שמדובר במדע אמפירי, ולכן כדי לבדוק את ההצעה הזו, חזרו על ניסוי שני הסדקים כאשר אלומת האלקטרונים נורית מהמקור בקצב מאד איטי ודליל. במצב כזה, בכל פעם פגע במסך אלקטרון אחד, ובו זמנית לא היה שם אלקטרון נוסף. לכן לא יכולה הייתה להיווצר התאבכות בין שני אלקטרונים. למרבה התדהמה, התברר שעדיין מתקבלת תמונה גלית (כמו ציור 3). כלומר האלקטרון הבודד גם הוא גל, שכן הוא מתאבך עם עצמו. המסקנה המדהימה היא שהאלקטרון אינו חלקיק קטנטן שנמצא במקום מסוים (מין כדורון), כפי שחשבו עד אותה עת, אלא הוא גל שמצוי בכל המרחב, בדיוק כמו האור (אנחנו כמובן עוד זוכרים את פרנל-הויגנס ואת יאנג).

אם אכן האלקטרון מתאבך עם עצמו, פירוש הדבר הוא שהאלקטרון הבודד הוא בעצם גל שעובר דרך שני הסדקים גם יחד. לכן שני החלקים של הגל האלקטרוני (הגל של האלקטרון הבודד) מגיעים למסך ממקומות שונים ויוצרים תבנית של התאבכות (ציור 3). זה כבר נראה בלתי נסבל. כדור טניס עובר בכל פעם אך ורק דרך אחד הסדקים. כיצד ייתכן שחלקיק עובר דרך שני הסדקים בו זמנית?

כדי לבחון את השאלה הזאת, עלינו לבחון כל פעם דרך איזה משני הסדקים עובר האלקטרון שלנו, או שמא הוא עובר דרך שניהם. אם כן, אנחנו כמובן שבים למעבדה. כעת ערכו שוב את הניסוי, אבל הפעם הציבו גלאי ליד אחד הסדקים (נכנה אותו סדק A). כאשר האלקטרון עובר דרך הסדק הגלאי קולט אותו, והוא מדווח לנו שהאלקטרון עבר דרך הסדק A. אם הגלאי לא הודיע כלום, המסקנה היא שהאלקטרון עבר דרך סדק B. חזרו על ניסוי שני הסדקים בנוכחות הגלאי, וכאן התדהמה כבר הייתה מוחלטת. הגלאים אכן הראו לנו באיזה סדק עבר האלקטרון, אלא שעל המסך התקבלה הפעם תמונה חלקיקית, כלומר הגרף שבציור 2. תופעת ההתאבכות של האלקטרון עם עצמו (ציור 3) נעלמה. האלקטרון הפסיק להיות גל, וחזר להתנהג כמו חלקיק בן תרבות (כמו כדור טניס קטנטן).

ברור שבכדורי טניס המצב הוא שונה. אם נערוך ניסוי שני סדקים בכדורי טניס, אם או בלי גלאי, התוצאה תהיה תמיד חלקיקית (ציור 2). המסקנה היא שכדור טניס אינו חלקיק קוונטי. אבל האלקטרון, לפחות כל עוד אין גלאי ליד אחד הסדקים, מתנהג כמו גל. לכן האלקטרון הוא חלקיק קוונטי. כשיש גלאי שבודק אותו הוא חוזר להתנהג כמו כדור טניס מהוגן, אבל כשאף אחד לא מסתכל עליו הוא ממש מתפרע. אבל שימו לב שגם כאשר יש גלאי ליד הסדק, עדיין האלקטרון אינו לגמרי כדורון טניס. גם אם נירה את האלקטרון מהמקור לכיוון סדק A, בניגוד לכדור טניס, ישנו סיכוי כלשהו שהאלקטרון בכל זאת יעבור דרך סדק B. כשיש גלאי, האלקטרון הבודד אמנם לא יעבור דרך שני הסדקים, אבל אתה אינך יכול לדעת בוודאות דרך איזה מהם הוא יעבור. רק אחרי שהגלאי מדד את מיקומו הוא מתחיל להתנהג כמו חלקיק קלסי רגיל (כלומר אם הוא עבר דרך הסדק A הוא כמובן יפגע במסך מול אותו סדק ולא בצד השני). אבל כל עוד הוא לא נמדד בפועל, יש סיכוי שהגלאי יגלה אותו ב-A ויש גם סיכוי שהוא יתגלה ב-B.

לפני שאמשיך, רק אעיר על נפלאות המטוטלת ההיסטורית, ואומר שאחרי שנוסחה תורת הקוונטים, התברר שגם האור אינו לגמרי גל. ישנם מצבים שהוא מתנהג כאוסף של חלקיקים (פוטונים), וגם שם זה תלוי בשאלה האם שמים גלאי פוטונים ליד אחד הסדקים או לא. לחינם חנטו חנטיא, ניוטון חזר מן המתים.

בפרשנות המקובלת שהתפתחה אחר כך לתורת הקוונטים (שמכונה "פשר קופנהגן", בעקבות הפיזיקאי הדני נילס בוהר ובית מדרשו) הגיעו למסקנה שמשמעות התוצאות הללו היא שההבחנה בין חלקיק לגל איבדה את משמעותה האונטולוגית. במציאות עצמה אין באמת שני סוגי יצורים כאלה.

היישים הפיזיקליים המיקרוסקופיים, מתנהגים לפעמים כך ולפעמים כך. במילים אחרות, גל וחלקיק הם מצבים שונים של אותו יש (פוטון או אלקטרון) ולא שני סוגי ישים.

תורת הקוונטים: פשר ראשוני

המסקנה אותה הסיקו הפיזיקאים מהתמונה המבלבלת הזאת, היא שכל עוד לא מסתכלים עליו (לא מציבים גלאי) האלקטרון אכן עובר דרך שני הסדקים גם יחד. פירוש הדבר הוא שהאלקטרון נמצא במצב שמכונה סופרפוזיציה, שהוא סכום של מצבים חלקיקיים טהורים. מצב חלקיקי הוא מצב בו האלקטרון מתנהג כמו כדורון טניס, וזוהי תפיסת החלקיקים בפיזיקה הקלאסית. יש לחלקיק מקום מוגדר במרחב בכל רגע זמן נתון, ואם נצייר גרף של מיקומו כפונקציה של הזמן נקבל מסלול מוגדר במרחב, ממש כמו במקרה של כדור טניס. במצב חלקיקי טהור (=מצב קלסי) – מסלול האלקטרון עובר דרך סדק A, כלומר הוא נע במסלול כמו כדור טניס מהמקור אל המסך. נסמן את המצב הזה כך: $|A\rangle$. במצב חלקיקי טהור אחר, שנסמן אותו $|B\rangle$ – מסלול האלקטרון עובר דרך סדק B, בדיוק באותה צורה. בשני המקרים האלו האלקטרון מתנהג כמו כדורון טניס. אלא שמצב חלקיקי טהור כזה מתקבל רק כאשר אנחנו מודדים את מיקומו של האלקטרון באמצעות גלאי: אם הגלאי מראה לנו שהחלקיק עבר בסדק A פירוש הדבר הוא שהאלקטרון נמצא במצב החלקיקי הטהור הראשון. ואם הגלאי מראה שהאלקטרון עבר דרך סדק B פירוש הדבר שהאלקטרון נמצא במצב החלקיקי הטהור השני.

מה קורה אם כלל לא מדדנו את מיקומו של האלקטרון (על ידי גלאי)? במקרה כזה האלקטרון נמצא בסופרפוזיציה בין מצבים חלקיקיים טהורים כאלו: המסלול שלו הוא סכום המסלולים A ו-B, והמצב שלו הוא סכום של שני המצבים החלקיקיים. בשפה יומיומית נוהגים לתאר זאת כאילו החלקיק עובר גם דרך A וגם דרך B, ולכן הוא גם מתאבך עם עצמו כמו גל. המצב הרגיל של אלקטרון מורכב מצירוף של הרבה מאד מצבים חלקיקיים (מסלולים), ולא רק שניים. הצירוף הזה של מצבים חלקיקיים טהורים יוצר תמונה שדומה לגל. האלקטרון כביכול מתפצל, וכל חלק שלו עושה מסלול שונה. כך האלקטרון שלנו עושה גם את המסלול שעובר דרך A וגם את המסלול שעובר דרך B, ועוד הרבה מסלולים אחרים, ולכן בעצם הוא נמצא בכל המרחב. ממש כמו גל (או כמו שנתן יונתן הגדיר זאת: "ממש כמו חוף"). זאת כל עוד לא מדדנו את מיקומו של החלקיק. אבל כאשר אנחנו מודדים את מיקומו, הוא פתאום "קורס", כלומר מקבל צורה של מצב חלקיקי טהור אחד מבין אלו שהרכיבו את הסופרפוזיציה שלו (פונקציית הגל שלו). איזה מהמצבים החלקיקיים זה יהיה? פונקציה הגל מגדירה הסתברות לקבל כל מצב חלקיקי. הצבת הגלאי ליד הסדק פירושה בעצם ביצוע הגרלה שבוחרת מצב חלקיקי אחד מבין אלו שמרכיבים את פונקציית הגל, כשההסתברות לקבל כל מצב מוגדרת על ידי ערכי הפונקציה. אם לא שמנו גלאי, החלקיק נוצר פרוס על פני כל המצבים החלקיקיים ביחד.

לצורך ההמשך, נסמן את מצב הסופרפוזיציה בין שני מצבים חלקיקיים באופן הבא:

$$|\psi\rangle = \alpha |A\rangle + \beta |B\rangle$$

כאשר מצב $|A\rangle$ הוא מסלול שבו החלקיק מתנהג כמו חלקיק נקודתי שעובר דרך סדק A, והסיכוי לקבל אותו (אם שמים גלאי ליד הסדק) מוגדר על ידי α , ומצב $|B\rangle$ הוא מצב שבו החלקיק מתנהג כמו חלקיק נקודתי שעובר דרך סדק B, והסיכוי לקבל אותו (אם שמים גלאי ליד הסדק) מוגדר על ידי המקדם β . המצב הכללי $|\psi\rangle$ הוא סכום סופרפוזיציה של שני המצבים הללו. אם נשים גלאי, החלקיק יעבור או רק דרך הסדק A (וזוהי יקרה בהסתברות α^2) או רק דרך הסדק B (וזוהי יקרה בהסתברות β^2). כדאי לשים לב שמצב הסופרפוזיציה אין פירושו שהחלקיק עבר דרך שני הסדקים גם יחד, אלא שפונקציית הגל שלו מורכבת משתי פונקציות שכל אחת מהן מתארת מצב של חלקיק שעובר דרך אחד הסדקים. בשפה היומיומית ניתן לומר שחלק מהחלקיק עובר דרך כל סדק.

תורת הקוונטים: עמימות אונטית

בניסוי המחשבתי הידוע בשם "[החתול של שרדינגר](#)", שמים חתול בתיבה סגורה עם מבחנת רעל אטומה. כשהפקק של המבחנה נשלט על ידי תהליך קוונטי והמצב שלו $|\psi\rangle$ מתואר על ידי סכום של שני מצבים פשוטים (קלסיים), כמו במשוואה שלמעלה. אלא שכאן המצב $|A\rangle$ הוא שהמבחנה פתוחה והמצב $|B\rangle$ הוא שהיא סגורה. אבל אם המבחנה פתוחה הרעל מתפשט בתיבה והורג את החתול,

כלומר החתול מת. ואם המבחנה אטומה אזי החתול חי. משמעותו של מצב סופרפוזיציה היא שהחתול נמצא במצב שהוא סכום של מצב חי ומצב מת. ושוב, לא מדויק לומר שהחתול גם חי וגם מת, אלא שמצבו הקוונטי (פונקציית הגל שלו) מורכב משני מצבים קלאסיים: <חי> + <מת>].
כעת עלינו לשים לב להבדל בין תורת הקוונטים לבין מה שראינו בכאוס. לפחות לפי הפרשנות המקובלת, במקרה של תורת הקוונטים לא מדובר בספק אפיסטמי, כלומר חוסר במידע שלנו. זה לא רק שאנחנו לא יודעים דרך איזה סדק החלקיק עבר, או האם החתול חי או מת. זוהי עמימות במציאות עצמה, כלומה החלקיק באמת עובר דרך שני הסדקים והחתול נמצא בסכום של שני המצבים. זה לא מתאר הסתברות שנובעת מחוסר במידע שלנו על המציאות. זהו המצב במציאות עצמה. כזכור, אפילו אם יש גלאי, עדיין החלקיק יכול לעבור בסיכוי כלשהו דרך כל אחד משני המצבים, כלומר הוא עדיין לא חלקיק קלאסי פשוט. אם כן, בניגוד למה שראינו לגבי הכאוס, תורת הקוונטים היא הקשר פיזיקלי שבו ניתן לפגוש עמימות במציאות עצמה.

כדי להבין זאת טוב יותר, חשבו על חלקיק שיכול להיות בצבע צהוב או בצבע כחול (סופרפוזיציה של <צהוב> + <כחול>). כאשר נמדוד אותו נוכל לקבל כל אחת משתי תוצאות: צהוב או כחול. אם לא מדדנו הוא נמצא בסופרפוזיציה של צהוב וכחול, אבל זה לא בדיוק צבע ירוק, כי לא נכון שהחלקיק הוא תערובת של כחול וצהוב. התיאור הנכון יותר הוא שמצבו הוא סכום של מצב חלקיק כחול ומצב חלקיק צהוב. לעומת זאת, כאשר תכניסו נוזל של הרבה כדורים כאלה למיכל גדול, הצבע של הנוזל כולו יהיה כמובן תמיד ירוק, לפי חוק המספרים הגדולים.⁴

בחזרה לשאלת הדטרמיניזם

בספרי **מדעי החופש** (בפרק העשירי) עסקתי בשאלה האם ניתן להכניס דרך תורת הקוונטים את הרצון החופשי לתוך הפיזיקה. כאן כבר מצאנו מרווח אוניטי (עמימות) בתוך הפיזיקה ולא רק מרווח אפיסטמי כמו בכאוס, ולכן רבים טוענים שכן. בקצרה אומר שלדעתי אי אפשר להשתמש בתורת הקוונטים כדי לעשות זאת, משתי סיבות עיקריות: התופעות הקוונטיות מופיעות רק בסקלות מאד קטנות. הבחירה שלנו לא מתרחשת בסקלות הללו (אפילו נירון בודד הוא מאד גדול ביחס לסקלה הקוונטית). מעבר לזה, תורת הקוונטים נותנת לנו לכל היותר מרווח של אקראיות (עם פונקציית התפלגות עבור התוצאות) בתוך הפיזיקה, אבל כפי שראינו בחירה חופשית אינה אקראיות. לשון אחר, לפי תורת הקוונטים התוצאה נקבעת לפי ההתפלגות (המקדמים α ו- β במשוואה שלמעלה), ולא נתונה לבחירתם החופשית של בני האדם.

המסקנה היא שאם מישהו דוגל בליברטאניזם עליו לוותר על הפיזיקליזם, כלומר עליו להניח שיש בעולם משהו מעבר לחומר ולחוקי הפיזיקה. נראה שבתוך חוקי הפיזיקה לא ניתן להכניס רצון חופשי.

לענייננו כאן די לי בהגדרת המושגים מרווח אפיסטמי (ספק) ומרווח אוניטי (עמימות) בפיזיקה. אני אשתמש בהם בטורי ההמשך בהקשרים הלכתיים, ושם נראה שההקדמה הזאת מאד מועילה להבין את התופעות ההלכתיות הנדונות, ואולי לא פחות מכך הן מועילות להבין את הבלגן ששורר בתורת הקוונטים.

⁴ זו אחת הסיבות לכך שבמערכות גדולות, כלומר שמורכבות מהרבה חלקיקים, לא רואים תופעות קוונטיות. הן נמרחות על ידי חוק המספרים הגדולים, והתוצאה המתקבלת היא התוצאה הקלאסית. לכן כדור טניס, שהוא גוף שמורכב מהמון חלקיקים קטנים, מתנהג כמו שאנחנו מכירים ולא משתולל כמו שראינו לגבי האלקטרונים.