

על תורת הקוונטים וטענות/אמונות סתירות

מבוא

תורת הקוונטים מלאה מוזרויות, ורבים רואים בה אפילו סתירות לוגיות. עקרון אי הוודאות קובע שיש צמדי גדלים פיזיקליים שלא ניתן לייחס ערכים מוגדרים שלהם לאותו גוף בו זמנית. כך לדוגמה לא ניתן לייחס לגוף מסוים מיקום מוגדר ומהירות מוגדרת בו-זמנית. אם יש לו מיקום מוגדר אין לו מהירות מוגדרת ולהיפך. כך גם לגבי אנרגיה וזמן ועוד. זהו עיקרון מוזר וקשה לתפוס אותו, אבל על פניו אין בו סתירה לוגית. אין הכרח לוגי שיהיו לגוף מיקום ומהירות בו-זמנית (להלן אערער על כך). לכאורה זהו רק קושי אבל לא סתירה, בדומה למציאות של ארבעה ממדים שמאד קשה לנו לתפוס ובוודאי לדמיין, אבל אין במציאות כזאת משום סתירה. חוסר היכולת לדמיין זאת יסודו כנראה במגבלות התפיסה שלנו. לעומת זאת, עקרון הקומפלמנטריות (=ההשלמה), שמיוחס לפיזיקאי הדני נילס בוהר, נראה כמו סתירה לוגית של ממש. העיקרון הזה קובע שגוף כלשהו יכול להיות גם חלקיק וגם גל. ובאופן כללי יותר, ייתכן מצב שיש שני תיאורים סותרים של המציאות ששניהם נכונים. כאן כבר צעדנו צעד אחד הלאה, מעבר לעקרון אי הוודאות, שכן כאן אנחנו טוענים אודות המציאות טענה שיש בה סתירה לוגית. חלקיק אינו גל וגל אינו חלקיק. הטענה שחלקיק הוא גל, או שאובייקט כלשהו הוא גם גלי וגם חלקיקי נראית דומה לטענה שקיים במציאות (או אפילו בעולם המושגים או בעולם האידאות של אפלטון) רווק נשוי, או משולש עגול.

פיזיקאים ופילוסופים שונים מציעים להסביר את המוזרויות של תורת הקוונטים על בסיס הבעיות הלוגיות שקיימות בה. הם טוענים שתורת הקוונטים מבוססת על לוגיקה שונה מזו המוכרת לנו.¹ הלוגיקה הזאת אינה מקיימת חלק מהעקרונות הלוגיים שכלולים בלוגיקה הקלאסית. ישנן כמה הצעות ללוגיקות כאלה, וביניהן הצעות שהיא אינה מקיימת את חוק הסתירה (שלא ייתכן שטענה X והיפוכה שתיהן אמיתיות בו זמנית) או את חוק השלישי הנמנע (שאו שטענה X נכונה או שהיא לא נכונה, ואין אפשרות שלישית). הגישה הרווחת מציעה לוגיקה שמוותרת על תכונת הדיסטריוטיביות שקיימת בלוגיקה הרגילה (מה שמכונה בעברית 'חוק הפילוג'): $(P \rightarrow Q) \wedge (P \rightarrow R) \rightarrow (P \rightarrow (Q \vee R))$.²

פרשנויות מן הסוג הזה קרויות בשם כולל "לוגיקה קוונטית", וככלל הן מניחות שהטענה שתורת הקוונטים מבוססת על לוגיקה שונה מהווה הסבר למוזרויות שלה ולסתירות שאנחנו מוצאים בה.

מכאן קצרה הדרך בעיני הוגים רבים להסיק שחוקי הלוגיקה או האילוצים הלוגיים שאנחנו כל כך רגילים אליהם ולא רואים דרך להיחלץ מהם, אינם באמת כה דרקוניים וכה מוחלטים. על פי טענות אלו, תורת הקוונטים מאפשרת לנו לטעון טענות סתירות ולא צריך להיבהל מכך. יש למסקנה הזאת יישומים מתבקשים בתיאולוגיה, שכן תיאורים שונים של האלוהים מובילים מטבע הנושא לסתירות, ולכאורה יש לנו דרך פשוטה להתמודד עם סתירות כאלה: הקב"ה הוא מעל הלוגיקה, וכך למשל הוא גם נמצא בכל העולם וגם רק מחוצה לו, הוא גם יודע

¹ ראו על כך למשל בספרו של לואיס ס' פויר, **איינשטיין ובני דורו**, תרגום: גד לוי, ספרית אפקים, עם עובד, תל אביב תשל"ט, בפרק "המהפכה הלוגית נגד הדטרמיניזם", עמ' 174 - 181.

² בנוסחה למעלה, הסימן * מייצג 'גם', והסימן U מייצג 'או'.

מראש מה נבחר וגם יש לנו בחירה חופשית, הוא גם מושלם וגם משתלם וכדומה. רבים סבורים שהטענות הללו אינן כה מופרכות, שהרי אפילו הפיזיקה שלנו (בפרט תורת הקוונטים) לא תמיד מצייתת ללוגיקה. ישנה כאן הנחה שחוקי הלוגיקה אינם שונים עקרונית מחוקי הפיזיקה, וכמו שהקב"ה יכול לחולל ניסים, כלומר לפעול נגד חוקי הטבע, הוא יכול גם לפעול באופן שסותר את חוקי הלוגיקה.

במאמר זה ברצוני לבחון את הטענה העקרונית הזאת, ולהתמקד בפרשנויות הלוגיות לתורת הקוונטים. כדי לחדד את הדברים אציב כבר כאן את טענתי העקרונית: פרשנות שמבוססת על לוגיקה שונה אינה אלא נונסנס (שיח חסר פשר), הן ביחס לתורת הקוונטים והן ביחס לפילוסופיה ותיאולוגיה. אלו סתם צירופי מילים חסרי פשר. עמדתי היא שאין שום אפשרות לטעון טענה שלא מצייתת לחוקי הלוגיקה, לא בהקשר תיאולוגי ולא בכלל.³

הדיאלקטיקה היהודית-נוצרית לגבי ייחוס סתירות לאלוהות

בכתבי כמה מהראשונים ניתן למצוא טענות נחרצות כנגד ייחוס סתירות לוגיות לאלוהים. עד כמה שזה מפתיע, מדבריהם עולה שגם הוא כפוף לחוקי הלוגיקה. כאן אביא דוגמה בולטת אחת מדברי הרמב"ם במורה הנבוכים ח"ג פט"ו:⁴

לנמנע טבע קיים קיום עומד, אינו מפעולת פועל, אי אפשר השתנותו כלל, ומפני זה לא יתואר השם ביכולת עליו, ואין חולק על זה אחד מאנשי העיון כלל, ולא יוכל זה אלא מי שלא יבין המושכלות.

כאן קובע הרמב"ם שאין לייחס לקב"ה סתירות לוגיות. הוא רואה בזה עניין מוסכם, ומי שחולק על כך לדעתו "אינו מאנשי העיון" ואינו מבין במושכלות.

אך מיד לאחר מכן הוא מוסיף שבכל זאת יש מקום למחלוקות בעניינים כאלה:

ואמנם מקום המחלוקת בין בעלי העיון כלם, הוא הרמז אל מין אחד מן המדומים, כי קצת אנשי העיון אומרים שזה מכת הנמנע אשר לא יתואר השם ביכולת עליו, ויאמרו אחרים שהוא מכת האפשר אשר נתלת יכולת השם בהמצאתו כאשר ירצה.

מחלוקת כזאת אינה עוסקת בייחוס סתירות לקב"ה. זה אינו אפשרי לכל הדעות. ניתן לחלוק רק בשאלה האם אכן מדובר בסתירה לוגית ("נמנעת לוגית") או רק בעניין לא מובן (או משהו שסותר את חוקי הטבע. "נמנעת פיזיקלית").⁵ אבל אם הגענו למסקנה שזה מן הנמנעות (סתירה לוגית), אזי גם הקב"ה "לא יתואר ביכולת עליו".

בהמשך הוא מביא דוגמאות לייחוס סתירות לקב"ה (כגון שהוא יכול לעשות מרובע שאלכסונו כצלעו) ובהמשך גם מזכיר סוגיות שלגביהן יש מחלוקת בין פילוסופים האם הן שייכות למישור הלוגי או הפיזיקלי. ניתן להוסיף בהקשר זה את שאלת הידיעה האלוהית וחופש הבחירה שלנו (ראו רמב"ם פ"ה מהל' תשובה ה"ה, וגם בטורים 299-303 באתר שלי) ועוד שאלות שיוזכרו בהמשך המאמר.

לעומת זאת, בהגות הנוצרית רווחת מאד התפיסה שלפיה אלוהים אינו כפוף לחוקי הלוגיקה ובהחלט ניתן לייחס לו גם סתירות לוגיות. ביטוי מובהק לכך מצוי בתורת "אחדות הניגודים"

³ ראו בעניין זה את ספרו של ישראל נתנאל רובין, **מה שאלוהים לא יכול: בעיית כפיפותו של אלוהים לחוקי הלוגיקה והמתמטיקה בפילוסופיה והתיאולוגיה היהודית**, ראובן מס, ירושלים 2016. הדברים נדונו גם בכמה מקומות באתר שלי, **שו"ת ומאמרים** (ראו למשל בטורים 549-550 ועוד הרבה).

⁴ הדברים כמעט מועתקים בשו"ת הרשב"א ח"א סי' ט וסי' תיח, וכן שם בח"ד סי' רלד.

⁵ על ההבחנה הזאת ראו במאמרה של יהודית רונן, "הכל צפוי והרשות נתונה", בתוך האסופה **בין דת למוסר**, דניאל סטטמן ואבי שגיא (עורכים), אוניברסיטת בר-אילן, תשנ"ד, עמ' 43-35. הדברים נדונו גם בספר הרביעי בסדרת לוגיקה תלמודית, **לוגיקה של זמן בתלמוד** (עמ' 50 והלאה).

או "חפיפת הניגודים" (Coincidentia Oppositorum) של ניקולאוס קוזאנוס, פילוסוף, תיאולוג ומתמטיקאי קתולי בן המאה החמש-עשרה. גם טרטוליאן, מאבות הכנסייה (במאה השנייה-שלישית לספירה), הרחיק לכת עוד יותר וקבע: "אני מאמין מפני שזה אבסורד" (Credo quia absurdum). שימו לב, לא "למרות שזה אבסורד" אלא "מפני שזה אבסורד". הוא רואה את מהות האמונה באבסורד. לא רק שאמונה באבסורדים היא אפשרית, אלא אמונה מתייחסת בעיקר לאבסורדים. כנראה שבעיניו משהו שאינו אבסורדי לא שייך למישור של אמונה אלא של ידיעה, מדע, או חשיבה הגיונית. גם בפילוסופיה האקזיסטנציאלית של סרן קירקגארד הדני מהמאה התשע-עשרה, ניתן למצוא את התפיסה הזאת, שכן במשנתו "אביר האמונה" (דמות המאמין המושלם שמיוצגת על ידי אברהם אבינו, בעיקר בעקידה), נדרש לעקוד את ההיגיון שלו ואת האתיקה שלו לטובת האבסורד שדורשת האמונה. גם מבחינתו תמצית משמעותה של אמונה היא חיים (ולא רק אמונה) באבסורד.

בקצרה אומר שבדורות האחרונים נכנס הרעיון הזה ביתר שאת גם להגות היהודית, ורבים מדברים על אחדות הניגודים בספרות החסידית, אצל הרב קוק ועוד.⁶ מבחינתי, העובדה שמקורו של רעיון כלשהו הוא נוצרי או שהוא נוצר בהשפעה נוצרית אינה פוסלת אותו. רעיון או גישה צריכים להיבחן לגופם, יהא מקורם אשר יהא. אני מתנגד לרעיון של אחדות הניגודים, בלי קשר למקורו, פשוט מפני שמדובר במלל חסר פשר. כעת אראה שאין באמת רעיון כזה, ומי שמעלה אותו רק מניע שפתיים אבל לא אומר כלום.

הסבר לאי האפשרות של סתירות, או: מהם 'חוקי הלוגיקה'?

מה שמבלבל אנשים בבואם לדון בסתירות לוגיות באלוהות הוא ההנחה שמכל יכולתו של הקב"ה ומהיותו מקור כל המציאות וכל החוקים הנוהגים בה, נובע שלא ייתכן שמערכת חוקים כלשהי תגביל אותו ותחייב אותו, כלומר שהוא יהיה כפוף לה. מכאן לכאורה עולה המסקנה שגם חוקי הלוגיקה לא יכולים להגביל אותו, ולכן ניתן לייחס לו גם יכולות או תכונות שכוללות סתירות לוגיות.

בבסיס הטיעון הזה מונחת התייחסות לחוקי הלוגיקה כאילו הייתה כאן מערכת חוקים שדומה לחוקי הפיזיקה, או חוקי המדינה. אך זוהי טעות. משולש אינו עגול לא מפני שיש חוק שאוסר עליו להיות כזה, אלא מפני שהוא פשוט לא כזה. אם הוא היה עגול הוא לא היה משולש. אי קיומו של משולש עגול אינו תוצאה של חוק כלשהו, ולכן גם אין אף אחד שחוקק זאת. זוהי תוצאה של הגדרת המושגים עצמם. המונח 'חוקי הלוגיקה' הוא ערבוב מושגי מבלבל ולא מוצלח. הוא נובע מכך שהחל מאריסטו ועד ימינו הלוגיקה הפכה לתחום עיון ומחקר עצמאי, וכמו כל תחום גם שם יש חוקי יסוד. אבל אנשים מתעלמים מההבדל הגדול: בכל התחומים האחרים יש חוקים שהם תוצר של חיקוק, ובבסיסם עומד מחוקק סמכותי. אפילו חוקי הטבע הם כאלה, כאשר כאן המחוקק הוא הקב"ה בכבודו ובעצמו. ומכאן שהם גם יכולים היו להיות אחרים (תלוי בהחלטת ה'מחוקק'). כך גם לגבי חוקי המדינה או חוקי גילדה כלשהי, הם תוצר של חיקוק ויכלו להיות אחרים. כל אלו הם מערכות 'חוקים' במובן המקובל. אבל את 'חוקי הלוגיקה' לא חוקק אף אחד, שכן הם לא יכולים היו להיות אחרים. ומכאן שאמנם גם הקב"ה

⁶ ראו למשל במאמרו של מאיר מוניץ, "היסוד הלוגי לאחדות הניגודים בתורת הרב קוק", **עליון שבות** 143-144, תשנ"ה. תוכלו למצוא גם התייחסויות בספרו של בנימין איש שלום, **הרב קוק: בין רציונליזם למיסטיקה**, עם עובד, הדפסה שניה, 1990 (יצאה גם מהדורה שנייה, רסלינג 2019). מוניץ מציע במאמרו 'יסוד לוגי' לאחדות הניגודים (בעיניי זה אוקסימורון), אבל גם איש שלום תולה את הגישה הזאת בלוגיקה התלת-ערכית של הלוגיקן הפולני לוקשביץ. להלן אעיר על כך.

לא יכול לחרוג מהם, אבל הם לא 'מחייבים' אותו ולא כפויים עליו. פשוט מפני שאין מה שיהיה כפוי עליו. מי שלא יכול להתגבר על חוקי הטבע אינו כל יכול כי הוא כפוי לעשות משהו. אבל מי שלא יכול 'להתגבר על חוקי הלוגיקה' אינו חסר יכולת, ולו רק מפני שאין דבר כזה "להתגבר על חוקי הלוגיקה".

מכאן תוכלו להבין שלא נכון לומר שמשולש עגול לא קיים. משולש עגול הוא מושג חסר פשר, ולכן איני יכול לומר עליו דבר. לא שהוא קיים ולא שאינו קיים, לא שהוא יפה או רחב לב, וגם לא שהוא יצור נדיר. כל משפט שמכיל את הצירוף "משולש עגול" לא יכול להיות אמיתי אבל גם לא שקרי. אם במשפט כלשהו כלול מושג סתירתי הוא הופך בכך לחסר פשר.⁷ כשאני אומר שמשולש עגול אינו קיים, אין כוונתי לטעון טענת עובדה כלשהי אלא רק לומר שהמושג הזה אינו מוגדר.

אי אפשר לומר שהקב"ה יכול ליצור קיר שעוצר כל פגז וגם פגז שחודר כל קיר, לא מפני שיש חוסר כלשהו ביכולתו, אלא מפני שאין אפשרות לוגית לקיומם הסימולטני של קיר ופגז כאלה. זוהי סתירה לוגית. הוא הדין לאמירה שהוא לא יכול לעשות משולש עגול. לכן האמירה שהוא לא יכול ליצור קיר שעוצר ככל פגז ופגז שחודר כל קיר, או שהוא לא יכול ליצור משולש עגול, אינה חוסר ביכולותיו. כשאומרים שמישהו הוא כל יכול, פירוש הדבר יכולת לבצע כל מה שמוגדר (או כל מה שניתן לדמיין). אבל מה שאינו מוגדר לא שייכת לגביו יכולת, וכשאומרים שהקב"ה לא יכול ליצור קיר ופגז כאלה, או משולש עגול, לא מתכוונים ל"לא יכול" במובן של יכולת חסרה. מושג היכולת עצמו אינו רלוונטי לגבי מצבים או מושגים כאלה. בתרגום מדויק יותר ניתן לומר שהמשפט "אלוהים לא יכול לעשות משולש עגול", פירושו: "הטענה 'אלוהים יכול לעשות משולש עגול' היא חסרת פשר". זו לא טענה על אלוהים ויכולותיו אלא על צירוף המילים 'משולש עגול'.

דוגמה: האבן שאלוהים לא יכול להרים

מכאן גם נוכל להבין מדוע הסופיזם הנדוש לגבי האבן שאלוהים לא יכול להרים (פרדוקס הכל יכולת. The omnipotence paradox), מבוסס על אותה טעות בהבנת חוקי הלוגיקה. אנשים תוהים האם אלוהים יכול ליצור אבן שהוא עצמו לא יכול להרים. הטענה היא שאם הוא יכול לעשות זאת אז יש אבן שהוא לא יכול להרים ולכן הוא אינו כל יכול. ואם הוא לא יכול לעשות זאת אז שוב הוא אינו כל יכול. המסקנה היא שהטענה "אלוהים הוא כל יכול" אינה נכונה (כי היא מובילה לסתירה לוגית).

אציג את הטעות בטיעון הזה בשתי רמות. ראשית, יש לשים לב לכך שזהו ערעור על מושג הכל יכולת עצמו, בלי קשר לאלוהים. הטענה היא שהמושג הזה חסר פשר (התוכן הרגיל שלו מוביל לסתירה לוגית). אלא שאם כך אז לכל היותר ניתן לטעון שהמשפט "אלוהים הוא כל יכול" הוא חסר מובן, כי אנחנו משתמשים במושג ריק או סתירתי. אבל זוהי טענה עליו ולא עליו. זה לא אומר שאלוהים הוא חסר אלא רק שבשפה שלנו לא יכול להימצא המושג 'כל יכול'.

שנית, חשבו על הוויכוח בין המאמין לאתאיסט כוויכוח בין שני אנשים: ראובן המאמין סובר שאלוהים הוא כל יכול, ושמעון האתאיסט מעלה טיעון שתוקף אותו. הוא אומר לראובן כך:

⁷ בפילוסופיה אנליטית קיים ויכוח על הטענה הזאת, אבל רק בגלל שהמונח 'פשר' אינו מוסכם. לענייננו כאן זה לא חשוב.

לשיטתך, שאלוהים כל יכול, האם הוא יכול ליצור אבן שהוא עצמו לא יכול להרים? הנחתו של שמעון היא שראובן יכול לענות לו או כן או לא, ואין אפשרות שלישית (זהו חוק השלישי הנמנע). אבל בין אם יענה כן ובין אם יענה לא המסקנה היא שאלוהים אינו כל יכול, כלומר שראובן טועה. זה מה שמכונה בלוגיקה 'טיעון דילמה'.

אלא שלמרבה הפלא כאן שתי התשובות אינן נכונות. לא בגלל שיש אפשרות שלישית (חוק השלישי הנמנע נכון גם כאן כמובן). הסיבה לכך היא שאין אבן כזאת.⁸ זה כמו לשאול אם אלוהים יכול ליצור משולש עגול. הן התשובה החיובית והן השלילית אינן רלוונטיות כאן. ראובן שמניח שאלוהים כל יכול, לא יכול להבין את המושג 'אבן שאלוהים לא יכול להרים', שכן לשיטתו הוא מתורגם למושג 'אבן שהכל יכול לא יכול להרים'. לכן מבחינתו זה כמו משולש עגול. שמעון האתאיסט כמובן יכול להבין את המושג הזה כי הוא מניח שאלוהים אינו כל יכול. לשיטתו אין כל סתירה במושג 'אבן שאלוהים לא יכול להרים'. אבל מתקפה לוגית אמורה לצאת מהנחותיו של המותקף (ראובן) ולהראות שהן מובילות לסתירה. להוכיח שאלוהים אינו כל יכול בהנחה המקדמית של שמעון שהוא לא כל יכול זו סתם הנחת המבוקש. אבל כפי שראינו אם יוצאים מתוך הנחותיו של ראובן, המתקפה הזאת חסרת משמעות ופשר. תשובתו של ראובן לשמעון תהיה: אנא הסבר לי את המושג 'אבן שהכל יכול לא יכול להרים', ואז אוכל לנסות ולענות לך אם אלוהים יכול ליצור אבן כזאת או לא. שמעון כמובן לא יוכל לעולם להסביר לראובן את המושג הזה. הוא יוכל להסביר לו את המושג 'אבן שאלוהים לא יכול להרים', אבל זה רק בהנחה שלו שאלוהים אינו כל יכול. גם שמעון עצמו לא יכול להבין את המושג 'אבן שהכל יכול לא יכול להרים'. בקיצור, שאלתו היא חסרת פשר.

ההבדל בין שתי התשובות שנתתי כאן הוא שהתשובה הראשונה גורסת שהמושג 'כל יכולת' פשוט אינו מוגדר. במובן הזה אכן המאמין טעה כשהשתמש בו, אם כי זו אינה מכת מוות לאמונתו. הוא רק צריך לתקן את השפה שלו. לעומת זאת, התשובה השנייה מוכנה לקבל את המושג 'כל יכולת' כמושג מוגדר ולא סתירתי, ועדיין דוחה את המתקפה הלוגית על המאמין. זה מראה לנו שהאתאיסט פשוט התבלבל. בעצם הוא רואה את הסתירה הלוגית כמשהו שאמור להיות ביכולתו של האלוהים הכל יכול, אבל זוהי טעות. סתירה לוגית אינה בתחום יכולותיו, לא בגלל שיש חוסר כלשהו ביכולותיו אלא מפני שטענות עם סתירות לוגיות הן חסרות פשר. כפי שראינו למעלה, הטענה "אלוהים אינו יכול ליצור אבן שהוא עצמו לא יכול להרים", מתפרשת כך: "הטענה 'אלוהים יכול ליצור אבן שהוא עצמו לא יכול להרים' היא חסרת מובן".

חשבו למשל על סיפור הילדים הידוע, "החתול במגפיים". בסיפור הזה החתול מגיע לארמונו של הקוסם הנורא, תוהה באוזניו האם הוא יכול להפוך את עצמו לעכבר, ומשהקוסם עושה זאת החתול טורף אותו וכך נפטר ממנו. ובנמשל, חשבו על השאלה הבאה: האם אלוהים יכול להפוך את עצמו לאדם? אם כן, אזי ניתן לירות לו בראש ולהרוג אותו. אפשר היה אולי לטעון שהוא יכול להפוך לאדם, אבל כשיירו בו הוא לא ימות. אלא שאז הוא לא באמת הפך לאדם (שכן אדם שירים בו – מת). התשובה הנכונה היא שהוא אינו יכול כמובן להפוך את עצמו לאדם רגיל. יצור שקיומו הכרחי והוא כל יכול, לא יכול להביא למצב שהוא עצמו ייכחד. בה במידה, הוא כנראה גם לא יכול להפוך את עצמו ללא מושלם או להגביל את יכולותיו. אבל כל

⁸ פילוסופים אנליטיים שואלים האם המלך הנוכחי של צרפת הוא קירח. אם נבחן את קבוצת הקירחים לא נמצא אותו שם, אבל גם אם נבחן את קבוצת השעירים הוא לא יימצא בה. וזאת מפני שאין מלך נוכחי לצרפת. שימוש בחוק השלישי הנמנע לגבי אובייקט לא קיים הוא מתעתע.

ה"חסרונות" הללו אינם מהווים פגיעה בכל יכולתו שכן מדובר בסתירות לוגיות. גם אלוהים אינו יכול לסתירות לוגיות. באומרי "אלוהים לא יכול להפוך לאדם", כוונתי בעצם לומר: "הטענה 'אלוהים יכול להפוך לאדם' היא חסרת פשר".

מסקנת ביניים: מה עושים עם סתירות?

השאלה היסודית בה אנחנו עוסקים כאן היא מה עלינו לעשות כאשר אנחנו מגיעים לשתי מסקנות הגיוניות שסותרות זו את זו. שימו לב שאם טענה X וטענה Y סותרות זו את זו, זה כשלעצמו אינו בעייתי. עלינו פשוט לבחור אחת מהן ולדחות את השנייה. לכל היותר נהיה בדילמה את מי מהן לבחור ועל מי לוותר, אבל זו אינה סתירה אלא ספק. הבעיה נוצרת כאשר כל אחת משתי הטענות הללו נראית לנו הגיונית מאד ואנחנו נוטים לאמץ את שתיהן. במצב כזה אנחנו נמצאים במבוכה אינטלקטואלית. ישנם הוגים או אנשים שבמצב כזה בוחרים להכריז על 'אחדות הניגודים' ולראות בכך פתרון לבעייתיות שתיארת. הם טוענים שיש דברים שהם מעל השכל או מעל הלוגיקה, בפרט אם מדובר באלוהים.

אבל כפי שכתב רודולף אוטו, בהקדמה למהדורה האנגלית של ספרו, **הקדושה**, 'אחדות הניגודים' היא מפלטו של העצל. כאשר אדם ניצב בפני סתירה מהסוג שתיארת, אם הוא לא מוצא לה פתרון או מתעצל לחפש אותו, קל לו מאד להכריז על אחדות הניגודים ולראות בזה סוג של פתרון. זה נשמע מאד עמוק ומסתורי, ולכאורה מציל אותו ממצב מביך (סתירה ללא פתרון). זה גם מאפשר לו להחזיק בשתי הטענות ההגיוניות גם יחד בלי לוותר על אף אחת מהן.

אבל כפי שראינו למעלה בעצם זהו נונסנס. כאשר יש בפנינו שתי טענות סותרות זו את זו, יש לנו אחת משתי אפשרויות: או לאמץ אחת מהן ולדחות את השנייה, או להראות שהייתה לנו טעות ובעצם אין כאן סתירה לוגית. לפעמים קשה להראות זאת, ולכן יש שבוחרים במקום זה להכריז על 'אחדות הניגודים' ובכך הם פוטרים את עצמם מהמאמץ הלוגי. אבל אם אין פתרון עלינו לדחות אחת מהן. ניתן אולי לתלות זאת בקוצר דעתנו. אבל הכרזה שאלוהים הוא מעל הלוגיקה או שאנחנו יכולים להחזיק בשתי טענות סותרות בלי להיות מחויבים ללוגיקה, אינה אלא ביטוי לעצלות מחשבתית, שכן מדובר באוסף מילים חסרות פשר.

ומה עם תורת הקוונטים?

המסקנה הזאת מביאה אותנו לתורת הקוונטים. לכאורה שם אנחנו פוגשים טענות מדעיות שכוללות סתירה לוגית. אם עצם כלשהו יכול להיות גם חלקיק וגם גל (עקרון הקומפלמנטריות), כי אז סתירות לוגיות הן לכאורה בעלות משמעות. על פי צורת החשיבה הזאת, תורת הקוונטים מראה לנו ש'חוקי הלוגיקה' גם הם חוקים במובן הרגיל. מכאן צצה שוב האפשרות לייחס סתירות לאלוהים, וכמובן בפרט גם חוזר ועולה פרדוקס הכל יכולת (פרדוקס האבן).

אבל כפי שראינו למעלה, זה לא ייתכן. טענות סתירות הן חסרות פשר, והעובדה שהן נטענות במסגרת מדעית כלשהי (כמו בתורת הקוונטים) לא יכולה לשנות זאת. אנסח זאת אחרת. גם אנשי תורת הקוונטים אינם פטורים מסילוק סתירות במשנתם. גם אצלם שימוש באחדות הניגודים הוא נונסנס חסר פשר. צריך להבין שתורת הקוונטים עצמה מבוססת על כלים מתמטיים ועל כלי תצפית שפותחו על בסיס הלוגיקה הרגילה, כלומר לוגיקה שבה

מתקיימים חוק הסתירה וחוק השלישי הנמנע. אם הלוגיקה הרגילה אינה נכונה כי אז אין גם אפשרות להשתמש בכל מה שהגענו אליו בדרך השלילה. הוכחה בדרך השלילה מראה שהנחה X מובילה לסתירה ולכן בהכרח לא נכון ש- X . אבל אם יש אפשרות שלישית אז הוכחה זו נופלת כמובן. הוא הדין לתכונת הדיסטריוטיביות של הלוגיקה שלנו. יתר על כן, גם כלי המדידה שבהם אנחנו משתמשים במעבדה, ובאמצעותם גילינו גם את תורת הקוונטים עצמה, פותחו על בסיס עקרונות הלוגיקה הרגילה (שהרי הם לא תוצרים של תורת הקוונטים אלא הם הבסיס שעליו היא עצמה נבנתה). לכן ברור שגם בתורת הקוונטים ברגע שהוכחנו ש- X אינו נכון, ניתן להסיק מכך ש'לא X ' הוא נכון. אם זה לא היה המצב, לא הייתה כל משמעות לממצאי תורת הקוונטים שהרי ניתן היה לאמץ במסגרתה טענה והיפוכה.

באופן כללי יותר, הלוגיקה (הקלאסית) מלמדת אותנו שאם אנחנו מאמצים מערכת טענות שכוללת בתוכה סתירה לוגית, אזי ניתן לגזור ממנה כל מסקנה שהיא. זו הסיבה לכך שמתמטיקאים עובדים כל כך קשה כדי להוכיח עקביות (=היעדר סתירה) בכל מערכת לוגית ומתמטית. אם באמת הייתה בתורת הקוונטים סתירה כלשהי, אזי ניתן היה לגזור ממנה כל טענה שהיא, ובפרט טענה והיפוכה. יכולנו לגזור שהאלקטרון הוא חלקיק בעל מטען 0 או שהוא חלקיק בעל מטען אחר, ויכולנו גם לאמץ את שתי הטענות הללו ביחד. יתר על כן, מכאן גם היה יוצא שתורת הקוונטים נטולת ערך מדעי ותוכן מדעי. אם ניתן לגזור מתורה מדעית כלשהי כל מסקנה, אזי אין לה שום ניבוי מה יקרה בניסוי עתידי. אבל אז גם אי אפשר להעמיד אותה למבחני הפרכה (לערוך ניסוי שיבחן האם ניבוייה מתגשמים או לא), ולפי ההגדרה המקובלת בפילוסופיה של המדע (בעקבות קרל פופר) זו לא הייתה תורה מדעית.

המסקנה היא שכפי שראינו 'חוקי הלוגיקה' אינם חוקים במובן הרגיל. אין אפשרות לחרוג מהם (לעבור על החוק), וטענות שעומדות בניגוד להם הן חסרות פשר. חוקי הלוגיקה הם הבסיס שעליו מבוססת המחשבה שלנו ולכן אי אפשר למדוד את חוקי הלוגיקה במעבדה, ולא ניתן להסיק חוקי לוגיקה כלשהם מממצאים מדעיים אמפיריים. ההסקה הזאת עצמה הייתה נעשית באמצעות הלוגיקה (הרגילה). לכן לא החשיבה ולא התצפית אינן יכולות להראות לנו שהלוגיקה שלנו שגויה. אם נשוב לתורת הקוונטים, עלינו להבין שהיא ענף של הפיזיקה, וככזו היא תחום מדעי. לעומתה, חוקי הלוגיקה אינם שייכים למדע אלא מהווים בסיס אפריורי (קודם לתצפית) לחשיבה המדעית ולחשיבה בכלל. לכן אין שום אפשרות לגזור חוקי לוגיקה אחרים על בסיס תורת הקוונטים.

בשולי דבריי רק אעיר שתיאורים מדויקים יותר של לוגיקה קוונטית אכן לא מתייחסים אליה כהסבר לתורת הקוונטים, וגם לא כלוגיקה אלטרנטיבית. הם מציגים אותה כמערכת פורמלית שמאפשרת לנו להציג את היחסים בין טענות שונות בתורת הקוונטים. כך למשל מוצאים בתחילת ויקיפדיה באנגלית (בערך 'quantum logic'):

Quantum logic is a set of rules for manipulation of propositions inspired by the structure of quantum theory.

אין למבנה הלוגי הזה שום קשר ללוגיקה כתיאור של החשיבה שלנו. זהו כלי טכני להצגת הממצאים (המוזרים) של תורת הקוונטים, ותו לא.

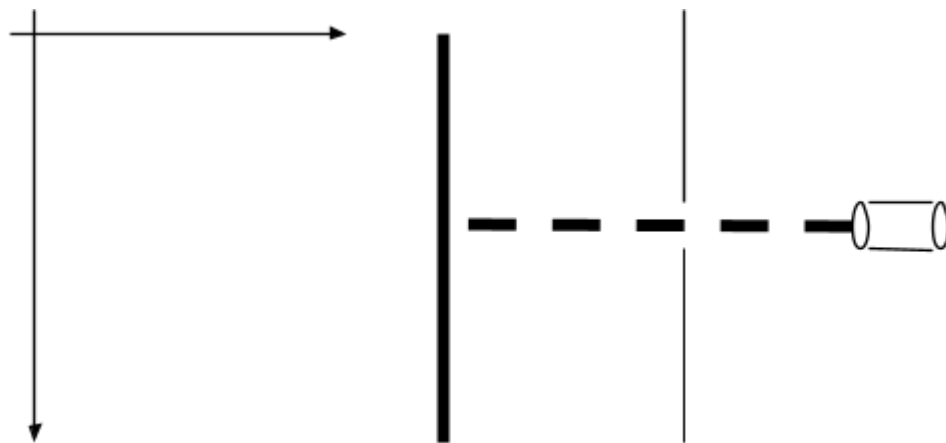
המסקנה היא שאם התצפיות בתורת הקוונטים מניבות טענות סתירות, כלומר ממצאים שעומדים בניגוד ללוגיקה, ההסבר צריך להימצא במקום אחר, הוא חייב להתנסח תחת אותה לוגיקה ידועה ומוכרת. משמעות הדברים היא שאם אכן יש בפנינו פתולוגיות לוגיות בתורת

הקוונטים, כמו למשל טענה והיפוכה, אזי עלינו לנקוט אחת משתי דרכים: או להבין שבכל זאת שתי הטענות לא יכולות להיות נכונות ביחד, ואז לאמץ צד אחד ולדחות את השני, או להראות שאין כאן סתירה לוגית. ובוודאי לא ניתן להסתמך על תורת הקוונטים כדי לבסס פילוסופית טענות שמכילות סתירה, בין אם הן עוסקות באלוהים ובין אם לאו. טענות כאלה הן חסרות פשר. כעת נתבונן בכמה פתולוגיות בתורת הקוונטים, ונראה כיצד באה בהן לידי ביטוי התמונה הזאת.

ניסוי שני הסדקים⁹

כפי שנהג לומר ריצ'רד פיינמן, חתן פרס נובל לפיזיקה ומהחוקרים שהשתתפו בפרויקט הגרעין (בלוס אלאמוס), הדרך הטובה ביותר להסביר את תורת הקוונטים היא באמצעות ניסוי 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 טיבו של 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).

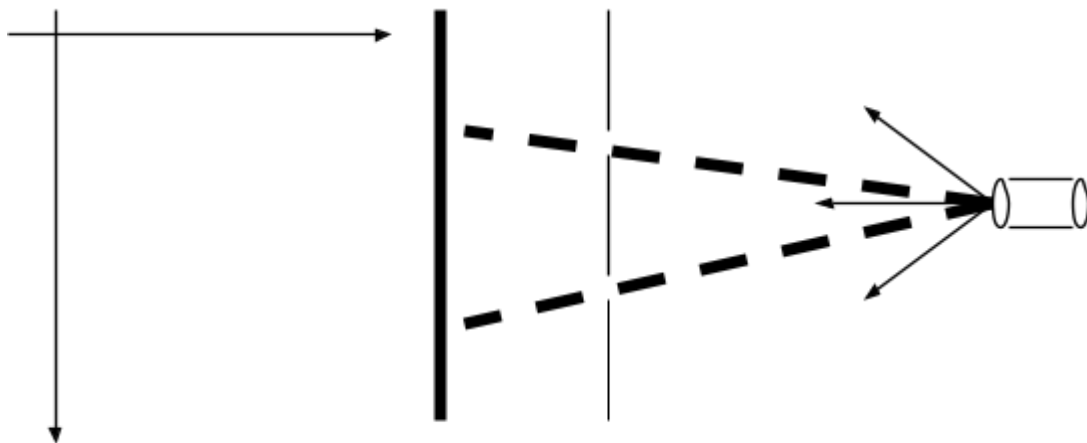
כדי להבין זאת, נתחיל במקרה הפשוט יותר, של סדק בודד. בציור שלמטה מתואר מקור (בצורת גליל בצד ימין) ששולח קרן של חלקיקים או גל (הקו המקווקוו העבה) לכיוונה של מחיצה ובה סדק. מאחורי המחיצה יש מסך (שמתואר בקו כפול), בעצם זהו סוג של סרט צילום שרגיש לפגיעת הגל או החלקיקים.



ציור 1: מערך הניסוי של סדק בודד

⁹ ראו עליו באתר שלי בטור 302.

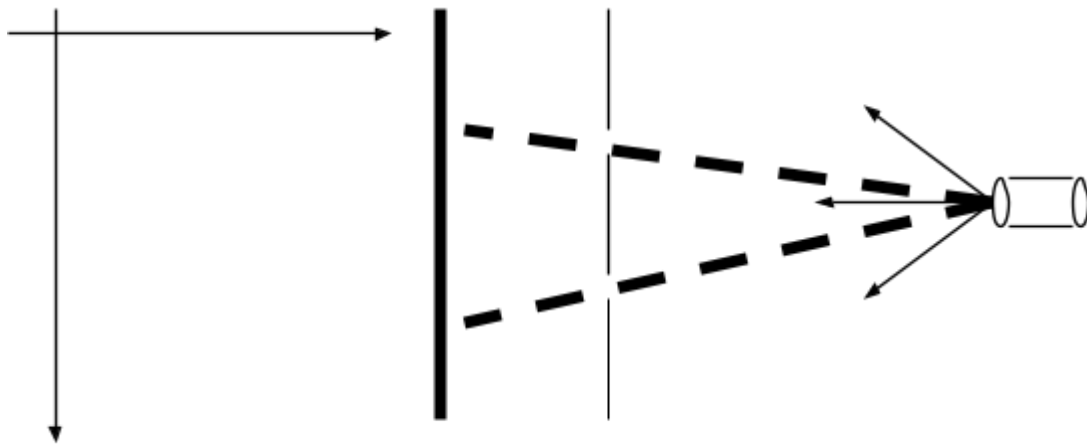
הגרף בשמאל הציור מתאר את תוצאות הניסוי (מה שרואים על המסך) במקרה של סדק בודד. גובהו (על ציר y) מייצג את כמות החלקיקים או עוצמת הגל שמתקבלת בכל נקודה על המסך (כל נקודה על ציר ה- x של הגרף מייצגת את הנקודה המקבילה לה על המסך). ניתן לראות שהכמות הגדולה ביותר מתקבלת בדיוק מול הסדק, ומשני צדיה הכמות הולכת ופוחתת (זה מייצג חלק מהאור או החלקיקים שסטו מעט הצידה). תמונה זו נכונה בין אלומת חלקיקים ובין לאלומה גלית. הרעיון של יאנג היה להבחין בין אלומת חלקיקים לבין גל באמצעות ניסוי דומה, אלא שבו מציבים מחיצה שישנם בה 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 גלים מסתובבים במרחב, עוצמת השדה (הגל) הכוללת בכל נקודה אינה סכום פשוט של העוצמות של שני הגלים בנקודה הנדונה. העוצמה בכל נקודה במרחב תעלה ותרד כתוצאה מאפקט של 'התאבכות' בין הגלים.¹⁰ 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 (ואז העוצמה הכללית גדולה יותר מסכום העוצמות). חשבו כעת על מערך הניסוי שהציע יאנג, שנראה דומה לזה שראינו למעלה אבל הפעם יש במחיצה 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:



ציור 2: ניסוי שני סדקים עם אלומת חלקיקים

¹⁰ 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).

לעומת זאת, כאשר המקור שולח אלומה גלית, תופעת ההתאבכות תגרום לכך שהתמונה תיראה שונה לגמרי, כמתואר בציור 3:¹¹



ציור 3: ניסוי שני סדקים עם אלומה גלית

במקרה הגלי שמתואר בציור 3,¹² דווקא בין שני הסדקים (במקום בו התמונה החלקיקית כמעט מתאפסת. ראו בציור 2) מופיעה העוצמה המקסימלית. משני צדדיו 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. מעל מאה שנים אחר כך, בתחילת המאה העשרים, המצב החל להתהפך. החלו אז 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. כעת מתחיל ויכוח הפוך מזה שהתנהל בין ניוטון להויגנס, האם עצמים שהתרגלנו 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.

¹¹ גם כאן וגם בהמשך אני מציג תמונה מאד פשוטה וסכמטית. התוצאות האמיתיות של ניסוי שני סדקים מורכבות יותר. יש אונות רבות בין הסדקים, והמרחקים ביניהן והגובה שלהן תלויים באורך הגל, במרחק ובזווית של מקור האלומה ובמרחק בין הסדקים. התיאור כאן הוא סכמטי, ולצרכינו כאן הוא מספיק.

¹² 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.

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 רק אלקטרון אחד, ולכן לא יכולה הייתה להיווצר ההתאבכות בין שני אלקטרונים. למרבה התדהמה, התברר שעדיין מתקבלת תמונה גלית (כמו בציור 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 ההתאבכות (ציור 3). זה כבר נראה בלתי נסבל. כדור טניס עובר בכל פעם אך ורק דרך אחד הסדקים. כיצד ייתכן שאם ישנם במסך שני סדקים החלקיק 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). מדי פעם הגלאי הראה שהאלקטרון עבר בסדק A ואז הייתה הצטברות מול אותו סדק, ובפעמים אחרות הגלאי הראה שהוא עבר דרך סדק B ואז ההצטברות הייתה מול סדק B. באלומת חלקיקים מתקבלת התמונה שבציור 2.

רק כדי לחדד, בכדורי טניס המצב כמובן 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 חלקיק (כדור טניס) מהוגן, אבל כשאף אחד לא מסתכל עליו הוא ממש מתפרע. 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 אינך יכול לדעת בוודאות דרך איזה מהם הוא יעבור. רק אחרי שהגלאי מדד את מיקומו הוא מתחיל להתנהג כמו חלקיק קלאסי 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. למרבה ההפתעה, אחרי כמאתיים שנה ניוטון חזר מן המתים.

הפרשנות המקובלת

הפרשנות לממצאיה המוזרים של תורת הקוונטים אינה מוסכמת עד ימינו. לפי הפרשנות המקובלת שהתפתחה אחרי הניסויים הללו (שמכונה "פשר קופנהגן", בעקבות הפיזיקאי הדני נילס בוהר ובית מדרשו), ההבחנה בין חלקיק לגל קרסה. האלקטרון הוא גם חלקיק וגם גל, וזה תלוי במערכת הניסויית שמודדת אותו. זהו ביטוי מסוים לעקרון הקומפלמנטריות (ההשלמה) של נילס בוהר. לאחר מכן התברר שאין לנו דרך למדוד את מהירותו ומיקומו של אלקטרון בו זמנית, וזהו עקרון אי הוודאות שגם הוא נכנס תחת עקרון הקומפלמנטריות. זהו ביטוי נוסף לכך שהאלקטרון הוא גם חלקיק (גוף שיש לו מיקום מוגדר) וגם גל (גוף ללא מיקום מוגדר). כשמודדים את מיקומו הופכים אותו לחלקיק, וכשלא מודדים מיקום (אבל אפשר למדוד מהירות) או אז הוא גל.

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. הוא בעצם סכום של שני חלקיקים, האחד עובר דרך סדק A והשני דרך סדק B. אגב, אם היינו שמים שלושה סדקים הוא היה סכום של שלושה חלקיקים כאלה וכן הלאה. בניסוח מדויק יותר, האלקטרון הוא חלקיק אחד כמובן, אבל מצבו של האלקטרון הוא סכום על שני מצבים חלקיקיים (זה מבחינתנו כבר מצב גלי). אבל זה רק כל עוד לא שמנו גלאי. כאשר שמים את הגלאי, האלקטרון 'קורס' לאחד מהמצבים החלקיקיים, ומחליט בדרך כלשהי להפוך לחלקיק קלסי שעובר דרך A או לחלקיק קלסי שעובר דרך B. ההחלטה לאיזה משני המצבים החלקיקיים הוא יקרוס היא סוג של הגרלה, ותורת הקוונטים יכולה גם לתאר לנו את הסיכויים לשתי התוצאות הללו. הם מתוארים על ידי 'פונקציית הגל' שמתארת את האלקטרון (או הפוטון).

אנו מסמנים את מצב הסופרפוזיציה בין שני מצבים חלקיקיים באופן הבא:

$$[\psi] = \alpha * [A] + \beta * [B]$$

כאשר מצב $[A]$ 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 $[B]$ 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 $[\psi]$ הוא סכום, או סופרפוזיציה, של שני המצבים הללו. אם נשים גלאי, החלקיק יעבור או רק דרך הסדק A (וזוה יקרה בהסתברות α^2) או רק דרך הסדק B (וזוה יקרה בהסתברות β^2).

שתי הערות

בשולי דבריי עוד שתי הערות שאינן חשובות לדיון שלנו, אבל נחוצות להשלמת התמונה:

1. בסקולות הגדולות, כאשר מדובר על עצמים מהעולם הרגיל שלנו (יונה, כיסא, אדם, חיידק, תא חי, או כדור פינג פונג) האפקטים הקוונטיים בדרך כלל נעלמים. הסיבה לכך היא שגם אם החלקיקים שלנו הם קוונטיים, מערכת גדולה שמכילה המוני חלקיקים (כל גוף מקרוסקופי הוא כזה), מצבה הוא סכום מצבי החלקיקים. סכום של המון תוצאות מקריות נותן תוצאה ממוצעת פשוטה (זהו 'חוק המספרים הגדולים' בהסתברות). זהו האפקט המכונה decoherence (או dephasing) קוונטי.
2. בעבר עלו הצעות (שמצוטטות עד ימינו) שלפיהן האדם המודד משפיע על תוצאות הניסוי. אנשים הסיקו מכאן מסקנות מרחיקות לכת על טלקינזיס (השפעה לא פיזיקלית של הרוח על עצמים ואנשים מרוחקים), על טיבה של המציאות (הבחנתו של קאנט בין הדבר כשהוא לעצמו (הנואומנה) לבין הדבר כפי שהוא מופיע לעינינו (הפנומנה) ועוד. לא אכנס כאן לכל ההשלכות הללו, אלא אומר שכיום מקובל שכל זה לא נכון. ניסויי שני הסדקים בוצע כאשר התוצאות שמדד הגלאי נמחקו מיד, כלומר לא הייתה תודעה אנושית שצפתה בהן, ובכל זאת התברר שעצם הצבתו של הגלאי גרמה לקריסה של פונקציית הגל למצב חלקיקי.¹³ מכאן נראה שמקור המוזרות אינו בהכרח תודעה אנושית אלא עצם פעולת המדידה.¹⁴

הסתירה ופשרה

אם חוזרים ומתמקדים בסקולות הקטנות, הקוונטיות, על פניו נראה שישנה כאן סתירה לוגית. חלקיק הוא גוף בעל תכונות מסוימות (נתייחס אליו לצורך הפשטות כנקודת חומר שממוקמת במקום מוגדר כלשהו), ואילו גל הוא יש בעל תכונות אחרות (הפוכות), ובפרט אין לו מיקום מוגדר. בתורת הקוונטים, ישות בעלת אופי גלי טהור (כמו פוטון בעל אורך גל מוגדר) פרושה על פני כל העולם. אז מיהו בעצם האלקטרון (וגם הפוטון), זה או זה? הוא לא יכול להיות שניהם.

התשובה שאציע כאן לשאלה הזאת היא שהאלקטרון אינו חלקיק וגם לא גל. זוהי ישות אחרת, שיכולה להימצא בשני סוגים שונים של מצבים: מצב חלקיקי או מצב גלי. לפי הפרשנות הזאת, מצב של סופרפוזיציה אין פירושו שהחלקיק עבר דרך שני הסדקים גם יחד (זוהי סתירה לוגית), אלא שפונקציית הגל שלו מורכבת משתי פונקציות שכל אחת מהן מתארת מצב של חלקיק שעובר דרך אחד מהסדקים. בשפה היומיומית ניתן לומר שחלק מהחלקיק עובר דרך כל סדק.

אם כן, אין כאן סתירה אלא מורכבות שקשה לתפוס. זה לא חלקיק שעובר דרך שני הסדקים, שזה מצב פרדוקסלי (סתירתי לוגית), אלא יישות שמצבה מתואר כסופרפוזיציה בין שני מצבים חלקיקיים. בזה אין שום סתירה. חלקיק וגל אינן יישויות אלא מצבים של יישויות. אבל מהו בדיוק היש שאלו מצביו? איך הוא נראה? מהן תכונותיו האמתיות? אין לנו דרך לדעת או לתאר זאת. אתם רואים שעברנו מסתירה לוגית לקושי בתיאור (כמו בדוגמת ארבעה הממדים שהובאה למעלה).

¹³ ראו למשל כאן: R. H. S. Carpenter, Andrew J. Anderson (2006). "The death of Schrödinger's cat and of consciousness based quantum wave-function collapse", *Annales de la Fondation Louis de Broglie*, 31 (1).

¹⁴ אמנם לפי זה לא ברור מהי בכלל ההגדרה של מדידה, שכן הגלאי מצד עצמו הוא סתם עצם פיזיקלי. בלי שיש כאן מודד אין כאן מדידה. לחידה הזאת, ככל הידוע לי, אין פתרון מוסכם עד היום.

החתול של שרדינגר וקידושין שלא מסורים לביאה

בניסוי המחשבתי הידוע בשם "החתול של שרדינגר", שמים חתול בתיבה סגורה עם מבחנת רעל אטומה. הפקק 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 $A <$ הוא שהמבחנה פתוחה והמצב $B <$ 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. כאשר נפתח את התיבה ונמדוד את מצבו של החתול, אזי נגלה חתול חי או חתול מת, אבל לא שניהם. אבל לפני הפתיחה הוא היה במצב של חי ומת גם יחד. כפי שראינו, לא מדויק לומר שהחתול גם חי וגם מת, אלא שמצבו הקוונטי (פונקציית הגל שלו) מורכב משני מצבים קלסיים: $|\text{חי}\rangle + |\text{מת}\rangle$. זה נחשב כפרדוקס מפני שמצב כזה כבר קשה יותר לעיכול. חתולים הם יצורים מקרוסקופיים קלסיים, וחשבנו שלפחות יצורים כאלה אנחנו מבינים. או שהם חיים או שהם מתים. בניגוד לפוטון או אלקטרון שאף אחד מאתנו לא ראה אף פעם, חתול הוא אובייקט שנדמה לנו שאנחנו מכירים, והוא לא יכול להיות חי ומת בו זמנית.

ניתן להציע פתרונות שונים לפרדוקס הזה, אבל בכולם אנחנו לא נשארים עם סתירה לוגית. אפשרות ראשונה היא שאכן גם לגבי חתול כל עוד לא צפינו בו מדובר ביישום אחרת ממה שאנחנו מדמיינים. תמונת החתול המוכרת לנו היא תוצר של 'מדידה' (הסתכלות בעיניים), וכאן יש רק אחת משתי תוצאות אפשריות: חי או מת. המדידה מקריסה את פונקציית הגל של החתול לאחד משני המצבים הללו. אבל חיים ומוות הם מצבים של החתול ולכן חתול חי וחתול מת אינם שני סוגי חתולים אלא שני מצבים שונים של יישום שאינה חתול במובן שמוכר לנו. יישום כזאת אכן יכולה להימצא בסופרפוזיציה של חי ומת.

ישנה גם אפשרות אחרת. הרעל שמתפשט בתיבה פועל על תאים או מכניזמים בגופו של החתול ובכך מביא למותו. אבל תאים או חלקיקים בחתול הם יישים קטנים שלגביהם רלוונטית תורת הקוונטים. ייתכן שהם באמת נמצאים במצב של סופרפוזיציה, אבל זה לא אומר שהחתול כמכלול נמצא במצב של סופרפוזיציה. מצבו של החתול הוא סכום על מצבי תאיו וחלקיקיו, וכאן מתקבלת תוצאה מקרוסקופית אחת (זהו אפקט ה-decoherence שהזכרתי למעלה), חי או מת. כשנמדוד נגלה איזו משתיהן. כך או כך, מה שחשוב לענייננו הוא שלא מדובר כאן בסתירה לוגית.

ישנה גם דוגמה הלכתית שמציירת מצב לגמרי זהה, קידושין שלא מסורים לביאה (ראו עליה באתר שלי בטור 303). חשבו על מצב שבו לראובן יש שתי בנות, רחל ולאה. כעת בא אליו שמעון ונותן לו פרוטה ואומר לו שהוא מקדש בפרוטה הזאת אחת משתי בנותיו (בלי להגדיר מי מהן). נוצרת כאן בעיה, שכן אם הוא נשוי לרחל, אזי לאה היא אחות אשתו שיחסי אישות עמה אסורים עליו כערוה. וכך גם להיפך, אם לאה היא שנשואה לו, כי אז רחל היא אחות אשתו שאסורה עליו. בגלל שאין דרך לדעת מי מהן היא אשתו, הרי שמספק אסור לו לקיים יחסי אישות עם אף אחת מהן. אלו קידושין שלא מסורים לביאה, וישנה מחלוקת האם הם תופסים או לא. בכל מקרה אסור לו לקיים יחסי אישות עם שתיהן, השאלה היא האם שתיהן נשותיו והוא צריך לתת לשתייהן גט מספק, או שהן כלל לא נשואות לו.

המפרשים דנים בטיבו של המצב הזה. מהתלמוד נראה שמדובר במצב של ספק, שהרי איננו יודעים מי מהשתיים היא אשתו. אבל מבט נוסף מגלה שזה אינו מצב רגיל של ספק. בספק

רגיל ישנה תשובה נכונה אחת, אלא שאנחנו לא יודעים אותה. חשבו על אדם ששלח שליח לקדש לו את אחת משתי הבנות. השליח הגיע לאב וקידש אחת מהן, נאמר את לאה, וכעת האב והשליח מתו. אף אחד לא יודע מי מהשתיים היא אשתו. זהו מצב של ספק רגיל, שכן יש תשובה נכונה אחת (הקב"ה יודע שלא היא שהתקדשה לו), ורק אצלנו נוצר ספק בגלל מידע חלקי. ספק הוא חוסר במידע. אבל בקידושין שלא מסורים לביאה אין בכלל תשובה נכונה, גם לא באופן תיאורטי. אפילו הקב"ה בכבודו ובעצמו אינו יודע מי מהשתיים מקודשת, שכן אין אחת משתיים שמוגדרת כאשתו. ניתן לומר שזהו מצב של עמימות (שהיא תכונה של המציאות עצמה) ולא של ספק (שהוא תכונה של חוסר במידע אצל האדם).

במינוח שלנו, ניתן לומר שקידושין שלא מסורים לביאה הוא מצב של ספק קוונטי, שכן שתי התשובות נכונות. זה לא ספק אם רחל היא אשתו או לאה היא אשתו. לכאורה שתיים נשיות. אבל זה לא יכול להיות כי אדם לא יכול להיות נשוי לשתי אחיות. נכון יותר לתאר זאת כמצב של סופרפוזיציה קוונטית: אשתו היא יישות שלישית, והיישות הזאת היא הרכבה של שתי יישויות רגילות: רחל ולאה. זהו סכום של שני מצבים, האחד שהוא נשוי לרחל והשני שהוא נשוי ללאה. אבל כפי שראינו בתורת הקוונטים, התיאור הנכון הוא שאשתו היא סכום של שני מצבים, ולא שגם רחל וגם לאה הן נשיות. בדיוק כמו שלא נכון לומר שהחלקיק עבר דרך שני הסדקים גם יחד, אלא שמצבה של היישות (אלקטרון) הוא סכום של שני מצבים חלקיקיים, האחד שבו החלקיק שעובר דרך סדק A והשני דרך סדק B.

החץ במעופו ועקרון אי הוודאות

הזכרתי כבר שאחד העקרונות היסודיים של תורת הקוונטים הוא עקרון אי הוודאות, שקובע שישנם צמדי גדלים שלא ניתן לייחס אותם בו זמנית לאותו גוף. כך, לדוגמה, לא ייתכן שיהיו לגוף כלשהו מהירות מדויקת ומיקום מדויק בו זמנית. יש כאן שיקוף של עקרון הקומפלמנטריות, שכן מהירות מדויקת מיוחסת לאלקטרון כשהוא במצב גלי ומיקום מדויק קיים אצלו רק כשהוא במצב חלקיקי. עקרון אי הוודאות גם קוצב מידה לרמות אי הוודאות בשני המאפיינים הללו, אבל כאן לא אתייחס לכך.

במאמרי "חצו של זינון והפיזיקה המודרנית" (עיון מו, תשנח, עמ' 425), עמדתי על הקשר בין עקרון אי הוודאות לפרדוקס החץ במעופו של זנון. אתייחס לזה כאן בקצרה, מפני שגם שם ישנו פתרון לסתירה בתורת הקוונטים, ושוב ניתן להיווכח שם בטענה שאחדות הניגודים היא מפלטם של עצלים.

הפילוסוף היווני זנון מאיליאה (תלמידו של פרמנידס בן המאה החמישית לפנה"ס) הציג כמה פרדוקסים שמאתגרים את מושגי התנועה והזמן, ורצה לטעון שתנועה אינה אלא פיקציה. היא קיימת רק בהסתכלות שלנו אבל לא יכולה להיות קיימת במציאות עצמה. אחד מהפרדוקסים הללו הוא פרדוקס החץ במעופו, ואציג כאן ניסוח פופולרי שלו. אם נתבונן בחץ שעף, בכל רגע (בדיד) שנתבונן בו נמצא שהוא עומד במקום אחר. אז באיזה רגע בדיוק הוא משנה את מיקומו? כיצד הוא עובר ממקום למקום? הרי אם הוא עומד אז הוא אינו נע בשום רגע, ואיך ייתכן שבכל זאת בכל רגע אנחנו רואים אותו במקום אחר?

ראשית, אשאל האם זוהי סתירה לוגית או קושי פיזיקלי? על פניו נראה שמדובר בסתירה לוגית. החלקיק גם עומד וגם נע. מהירותו באותו רגע היא גם 0 וגם לא אפס. אם כן, זהו קושי שלא ניתן לחיות איתו ויש לחפש לו פתרון. הפתרונות שהוצעו לקושי הזה מתבססים בין

היתר על החשבון האינפיניטסימלי (ציר הזמן הוא רצף. אין באמת נקודות זמן מבודדות) ועל עקרון אי הוודאות בתורת הקוונטים (שלפיו אי אפשר לדבר על מיקום ומהירות של החץ בו זמנית). במאמרי הנ"ל הסברתי ששני אלו לא יכולים להוות פתרון. כאן רק אומר שבעצם זו אותה טענה שהצגתי למעלה: אין אפשרות לחיות עם סתירה לוגית. החשבון האינפיניטסימלי מציע לנו תיאור חף מסתירה של המציאות, אבל כפי שהסברתי במאמרי הנ"ל, הדבר משול לאימוץ שפה שבה אסור יהיה לבטא את הפרדוקס. זה אינו פתרון אמיתי עבורי.

עקרון אי הוודאות לכאורה כן מציע פתרון. ראינו שלפיו לא ניתן לייחס לגוף כלשהו מהירות ומיקום מדויקים בו זמנית. אם כן, אם החץ ממוקם במקום מוגדר אין לו מהירות ולהיפך. זה שומט את הקרקע מתחת לניסוח הפרדוקס שהצגתי למעלה. אבל צדה השני של המטבע הוא שהפרדוקס הזה מראה מדוע עקרון אי הוודאות בעצמו הוא בעייתי, ובעצם סתירתי. יש לנו גוף נקודתי ובאופן תיאורטי אין שום מניעה לדבר על מיקומו בנקודה כלשהו ועל מהירות שיש לו (מהירות היא קצב שינוי המקום). מה פירוש שאין לו מהירות? האם הוא לא משנה את מקומו? הרי עינינו הרואות שהוא כן. ומה לגבי המיקום? מה עוד שחץ הוא עצם מקרוסקופי, ולכן אין מניעה לייחס לו מיקום ומהירות בו זמנית. ראינו שתורת הקוונטים אינה רלוונטית בסקלות הללו. כפי שהערתי למעלה, העובדה שהסתירה מופיעה גם במסגרת דיון מדעית אינה פתרון עבורה. גם תורה מדעית לא יכולה להכיל סתירות. אם ישנה סתירה בתורת הקוונטים, זו רק עוד סיבה לחפש לה יישוב הולם והגיוני. במאמרי שם הצעתי להפוך את צורת ההסתכלות: לחפש פתרון הגיוני לפרדוקס, ובאמצעותו להסביר את המוזרות של עקרון אי הוודאות בתורת הקוונטים.

שורש הבעיה בפרדוקס הזה נעוץ בחוסר אבחנה בין שני מושגים שנראים דומים: עמידה והימצאות. כשאומרים שהגוף עומד במקום X בזמן T , זה אינו שקול לאמירה שהוא נמצא במקום X בזמן T . במילים אחרות, גוף יכול להימצא במקום כלשהו בזמן כלשהו במהירות 0 (ואז נאמר שהוא 'עומד' באותו מקום) או להימצא שם במהירות אחרת כלשהי (ואז נאמר שהוא 'נמצא' שם). כשאומרים שהגוף נמצא במקום זה לא אומר בהכרח שהוא עומד. הוא יכול להימצא שם בתנועה. כשאומרים שהגוף עומד במקום X בזמן T , פירושו של דבר שהוא נמצא שם במהירות 0. כעת תוכלו לראות שהפרדוקס פשוט מתפוגג. לשאלה באיזה רגע הגוף נע, התשובה היא בכל רגע ורגע. אין סתירה בין האמירה שבכל רגע הוא נמצא (אבל לא עומד) במקום אחר, לבין האמירה שבאותם רגעים עצמם הוא גם נע.

מה שמבלבל כאן הוא שאי אפשר לומר שבכל רגע הגוף משנה את מקומו. שינוי מקום לוקח זמן כלשהו, ולא יכול להיעשות ברגע בודד של זמן. במילים אחרות, הטענה שגוף נמצא בשני מקומות באותו רגע היא סתירתית לוגית ולא רק נמנעת פיזיקלית. כאן לא מדובר על מהירות אינסופית אלא על שתי טענות סותרות (כמו החלקיק שעובר דרך שני הסדקים). אם כן, גוף לא יכול לשנות את מקומו ברגע זמן בדיד אחד, אבל הוא כן יכול להימצא בתנועה ברגע בדיד של זמן. מה שמבלבל אותנו בעניין הזה הוא שמהירות (הימצאות בתנועה) אינה שינוי מקום. מהירות היא גודל שקיים גם ברגע בדיד אחד, והיא פוטנציאל לשינוי מקום. אבל שינוי מקום דורש קטע של זמן, ומהירות קיימת לגוף גם ברגע זמן בדיד אחד. משמעות האמירה שיש לגוף כלשהו מהירות ברגע מסוים היא שיש לו פוטנציאל לשינוי מקום, ולכן הוא כנראה ישנה

את מקומו ברגע הבא.¹⁵ במאמרי שם הסברתי את הבעייתיות הזאת במונחי מושג הנגזרת מהחשבון האינפיניטסימלי שמשמש להגדרת מהירות במכניקה. שם מגדירים מהירות דרך הפרשי מיקום חלקי הזמן שלוקח לעבור אותם, וכשהמהירות אינה קבועה יש לקחת קטעי זמן קטנים מאד (ששואפים לאפס). אבל כפי שהסברתי שם, זוהי רק הגדרה חישובית (אופרציונלית) של המהירות (כלומר זהו האופן לחשב מהירות) אבל לא הגדרת מושג המהירות עצמו. המסקנה היא שפרדוקס החץ במעופו הוא תולדה של בלבול מושגי ותו לא. בהמשך המאמר הסברתי לאור ההבחנה הזאת את עקרון אי הוודאות בתורת הקוונטים. הסיבה לכך שאין לנו אפשרות לייחס לאותו גוף מהירות ומיקום בו זמנית, היא מפני שמדידת מהירות דורשת התבוננות שונה ממדידת מיקום. מדידת מיקום היא בעצם צילום של הגוף בכל רגע (במצלמה עם זמן חשיפה שהוא רגע זמן בדיד אחד). כאשר מתבוננים על העולם במצלמה סטטית כזאת אין שום אפשרות לראות תנועה או מהירויות (כמו שראינו בפרדוקס החץ). מצלמה היא עיוורת לעניין התנועה. לעומת זאת, מדידת מהירות דורשת ממני הסרטה של הגוף,¹⁶ וזה בהכרח דורש מעקב אחריו לאורך קטע של זמן. את זה לא ניתן לעשות על פני רגע בדיד של זמן. המסרטה היא עיוורת למיקומים (כי רואים רק את התנועות. ממש הפוך ממצלמה). בכל אופן, אלו שתי צורות הסתכלות שמוציאות זו מזו, ולכן אי אפשר לקצוב מהירות ומיקום בו זמנית: או שאני מתבונן על הגוף (ועל העולם) דרך מצלמה או שאני מתבונן בו דרך מסרטה.¹⁷

הראיתי שם שמשמעותה של החלוקה בין שתי נקודות המבט שתיארתי (המצלמה והמסרטה) היא מה שמכונה בתורת הקוונטים 'תמונת המקום' ו'תמונת התנע' (המהירות). בתמונת המקום מתארים את כל המציאות הפיזיקלית במונחי המיקום המרחבי של החלקיקים בכל רגע. אין שם אפשרות לדבר על מהירויות. לעומת זאת, בתמונת התנע מתארים את כל המציאות רק במונחי מהירויות של החלקיקים בכל רגע, ואז אין אפשרות לדבר על מיקומים. זה ממש מקביל למצלמה והמסרטה שלנו. גם בתורת הקוונטים אלו שתי תמונות שמוציאות זו מזו, ולא ניתן לתאר את הגוף בשתייהן בו זמנית. אדם צריך לבחור נקודת מבט או תמונה. אמנם ניתן לעבור מאחת לשנייה, אבל לא להשתמש בשתייהן סימולטנית.

הבחנה בין שתי זוויות מבט אינה סתירה

משמעות הדבר היא שכמו שראינו לגבי עקרון הקומפלמנטריות כך גם לגבי עקרון אי הוודאות. גם כאן לא מדובר בסתירה אלא בתמונה מורכבת. ברקע יש שתי זוויות מבט שונות שמוציאות זו מזו, אבל אין כאן שתי אמיתות סותרות בו זמנית. לכן עקרון אי הוודאות אינו מבטא סתירה לוגית אלא לכל היותר מצב שקשה לנו לדמיין אותו. ההסבר שהצעתי כאן לאור פרדוקס החץ אפילו מקרב זאת קצת יותר לשכל ולדמיון שלנו. בשורה התחתונה, המסקנה

¹⁵ לחלופין, הוא ייתקע בקיר שלא מאפשר לו לנוע, ואז האנרגיה שלו תצא בצורה אחרת, כמו למשל פיזור חום לסביבה.

¹⁶ הסברתי שם שמדובר במסרטה אידאלית. המסרטות שלנו בונות את הסרט מצילומים סטטיים עוקבים, כלומר מדובר בשימוש בלתי פוסק במצלמה. לענייננו זו הסתכלות של מצלמה, ובהסתכלות הזאת מקבלים את הפיזיקה הקלאסית, שבה אין אי וודאות בין מיקום למהירות.

¹⁷ אני יכול להיכנס כאן בפירוט לשאלה האם זו מגבלה שלנו (אנחנו לא יכולים לקבוע מיקום ומהירות בו זמנית), כלומר טענה אפיסטמית, או שזהו עיקרון אונטולוגי, כלומר עיקרון שעוסק במציאות עצמה. זהו ויכוח ישן בין חוקרי תורת הקוונטים, וכיום הנטייה היא שמדובר בעיקרון אונטולוגי. ההסבר שנתתי כאן נראה לכאורה כמו עיקרון אפיסטמי, אבל זה בהחלט לא הכרחי. ההבחנה בין מצלמה למסרטה אינה נעוצה במגבלה שלנו אלא מצביעה על משהו בטבע הגדלים הללו (מיקום ומהירות) עצמם.

היא שתורת הקוונטים לא מכילה סתירות או חריגות מהלוגיקה המקובלת, וממילא גם לא יוצרת אפשרות לטעון טענות סתירות או להחזיק באמונות סתירות.

כעת אביא שלושה יישומים שמחדדים את ההבדל בין החזקה בסתירה לבין שתי זוויות מבט שונות. הראשון היא משל ידוע לגבי ויכוח בין שני אנשים שמתארים פיל. ראובן טוען שזו חיה בעלת שתי רגליים מרוחקות זו מזו, עם עין אחת. שמעון טוען כנגדו שזהו בעל חיים עם שתי רגליים סמוכות זו לזו ושתי עיניים. לכאורה אלו שני תיאורים סותרים, אבל בעצם מדובר בהסתכלות על אותו פיל משתי זוויות מבט שונות. ראובן רואה אותו מהצד, ולכן רגליו מרוחקות זו מזו ויש לו רק עין אחת (זה מה שרואים מהצד). ואילו שמעון רואה אותו מהחזית, ולכן הוא רואה שתי רגליים סמוכות (שתי הקדמיות) ושתי עיניים. התיאורים הם לכאורה סותרים, אבל בעצם מדובר בתיאורים של אותו עצם משתי נקודות מבט שונות. כל אחד מהתיאורים הוא חלקי, והתיאור השלם הוא הצירוף של שניהם.

יישום שני ניתן לראות במאמר חז"ל "אלו ואלו דברי אלוהים חיים". במקורו נאמר הדבר לגבי מחלוקות ב"ש וב"ה (בעירובין יג ע"ב), ובסוגיית גיטין ו ע"ב לגבי פילגש בגבעה. כידוע, המפרשים מיישמים זאת לגבי כלל המחלוקות בתלמוד ואולי גם אחריו. התמיהה על מאמר זה ידועה, והמקור המובהק שמציג אותה הוא הריטב"א בחידושיו לעירובין שם, שכותב:

אלו ואלו דברי אלהים חיים. שאלו רבני צרפת ז"ל היאך אפשר שיהיו שניהם דברי אלהים חיים וזה אוסר וזה מתיר, ותירצו כי כשעלה משה למרום לקבל תורה הראו לו על כל דבר ודבר מ"ט פנים לאיסור ומ"ט פנים להיתר, ושאל להקב"ה על זה, ואמר שיהא זה מסור לחכמי ישראל שבכל דור ודור ויהיה הכרעה כמותם, ונכון הוא לפי הדרש ובדרך האמת יש טעם וסוד בדבר.

גם כאן לכאורה מדובר בסתירה לוגית. אבל למען האמת הקושי הזה נעלם אם נתבונן בסוגיה המקבילה, שהיא היחידה בתלמוד שבה מובא גם הסבר לכלל הזה, בגיטין ו ע"ב:

דכתיב ותזנה עליו פילגשו רבי אביתר אמר זבוב מצא לה ר' יונתן אמר נימא מצא לה ואשכחיה ר' אביתר לאלהיו א"ל מאי קא עביד הקדוש ברוך הוא א"ל עסיק בפילגש בגבעה ומאי קאמר אמר ליה אביתר בני כך הוא אומר יונתן בני כך הוא אומר א"ל ח"ו ומי איכא ספיקא קמי שמיא א"ל אלו ואלו דברי אלהים חיים הן זבוב מצא ולא הקפיד נימא מצא והקפיד.

התנאים חלוקים בשאלה מה בדיוק מצא אותו אדם לפילגש. מה עורר את זעמו? אחד אומר שהוא מצא נימא והשני אומר שמצא לה זבוב. אליהו הנביא מגלה שהקב"ה עצמו העלה את שתי האפשרויות, אבל זה אינו ספק אלא קביעה כפולה: הוא מצא לה גם זבוב וגם נימא, ורק שניהם יחד יצרו את הקפיידא שלו.¹⁸ כל אחד מהצדדים תפס רק תמונה חלקית, והתמונה המלאה היא הצירוף של שתיהן. אמנם זוהי סוגיה אגדית, אבל מתוכה נראה שזהו ההסבר למימרא "אלו ואלו דברי אלהים חיים" גם בהקשריה ההלכתיים. ובאמת למעלה יותר באותו עמוד בסוגיית עירובין מובאת האפשרות למצוא נימוקים נכונים רבים נגד הלכה פסוקה, כמו קנ טעמים לטהר את השרץ, למרות שהתורה עצמה קובעת שהוא טמא. ההסבר לכך הוא שאכן יש קנ טעמים לטהר ויש גם קנ טעמים לטמא אותו. בשורה התחתונה הוא טמא, כי טעמי הטומאה גוברים על טעמי הטהרה. אבל זה לא אומר שטעמי הטהרה אינם נכונים. הטעמים לכלל הכיוונים הם נכונים, וההלכה היא התוצאה המשוקללת של כולם. שוב יש כאן

¹⁸ כך הפשט להבנתי, ולא שהנימא לבדה הביאה לקפיידא שלו.

הסתכלות מורכבת מזוויות מבט שונות, שכל אחת היא חלקית בלבד. הסתירה לכאורה (השרץ גם טמא וגם טהור) אינה באמת סתירה אלא מורכבות שנוצרת מצירוף של נקודות מבט סותרות.¹⁹

היישום השלישי מופיע במאמרי "מהי 'חלות'?" הלכה, לוגיקה ודבקות בה' ", צהר ב, תשס. הבאתי שם את דבריו של רבי שמעון שקופ לגבי אישה שמתגרשת בתנאי. טענתו היא שעד קיום או אי קיום התנאי מצבה של האישה הוא אשת איש וגרושה גם יחד. זהו בעצם מצב סופרפוזיציה קוונטי, כפי שתיארתי אותו למעלה. אם היא מקיימת את התנאי – פונקציית הגל 'קורסת' למצב של גרושה, ואם לא – היא 'קורסת' למצב של אשת איש. אני מסביר שם כיצד ייתכן צירוף של שני מצבים סותרים, אשת איש וגרושה, ביחד. לכאורה זה בלתי אפשרי, שהרי אם היא אשת איש היא אינה גרושה, ולהיפך. טענתי שם שיש על האישה שתי חלופות, חלות אשת איש וחלות גרושה. המצב המשפטי שנוצר הוא הרכבה של שתיהן, ובמצב כזה אין שום סתירה. דימיתי זאת למצב שבו יש בתבשיל מלח וסוכר, שהוא כמובן אפשרי לגמרי. לא ייתכן מצב שהתבשיל הוא גם מלוח (לגמרי) וגם מתוק (לגמרי). הסתירה קיימת בהשלכות, אבל עצם קיומם של שני ההיבטים אינו סתירה. 'חלות' היא סוג של יישות, ולכן קיומן של שתי חלופות סותרות על אותה אישה באותו זמן אין בו שום בעיה (כמו מלח וסוכר באותו תבשיל). ההשלכות ההלכתיות כמובן לא יכולות להיות סתירות, והן אכן נוטות תמיד לאחד מהצדדים (אני מסביר שם לאיזה מהשניים).

בניסוח אחר ניתן לומר שיש במצבה של האישה הזאת טעם אחד להתייחס אליה כגרושה וטעם אחר לראות אותה כאשת איש. כמו שראינו למעלה, קיומם של טעמים שמובילים לכיוונים סותרים אינו מצב של סתירה. גם כאן לא מדובר בסתירה אלא בשני היבטים (בעלי מאפיינים סותרים) ששניהם יכולים להתקיים במקביל.

השלכות ודוגמאות: כמה סוגי סתירות

משמעות התמונה שתיארתי כאן היא שאין שום מקום לטענות סתירות, לא באמונה, לא בתורת הקוונטים ולא בכלל. כאשר אנחנו פוגשים סתירה עלינו לבחור את אחד מהצדדים ולזנוח את השני, או לחלופין להראות שלא מדובר בסתירה, ואז ורק אז ניתן להחזיק בשניהם. היתלות בלוגיקה אחרת (קוונטית למשל), או שימוש בביטויים כמו 'אחדות הניגודים' אינם מועילים מפני שהם לא אומרים שום דבר. אם מדובר בניגודים לוגיים אין מקום לאחד ביניהם, ואם לא – אז יש להראות זאת ובכך להתיר את הסתירה המדומה. אנשים שלא מצליחים להראות שאין סתירה לוגית בין הטענות ובכל זאת רוצים להחזיק בשתייהן, מעדיפים, כנראה בגלל עצלות מחשבתית, לדבר במונחים הריקים הנ"ל. אחת הסיבות לבלבול הזה היא השימוש הפזיז שעושים רבים במושג 'סתירה'. ברוב ככל המקרים שבהם מדובר על 'אחדות הניגודים' אין זו סתירה לוגית אלא לכל היותר עניין שקשה להבינו. במקרים שאין לנו הסבר מפורש ובכל זאת נראה לנו ששני הצדדים נכונים ואין לוותר על אף אחד מהם, עלינו לפחות להראות שאין ביניהם סתירה לוגית אלא מדובר בקושי, או ב'סתירה' רכה יותר (נמנעת פיזיקלית, או רק עניין שקשה לדמיין כמו ארבעה ממדים וכדומה).

¹⁹ ראו על כך בטורים 248 – 247 באתר שלי, ובמאמרי "האם ההלכה היא פלורליסטית?", המעין תשסז.

לא אוכל להיכנס כאן ביתר פירוט להבחנה בין סוגי הסתירות (נמנעות לוגיות מול נמנעות פיזיקליות או קושי לדמיון), אבל להשלמת התמונה רק אוסיף שבמאמרי "האם אמונה בסתירות לוגיות היא אפשרית?" (מופיע באתר שלי), אני מגדיר סוג נוסף של סתירה, תוך שימוש במינוח קאנטיאני: ישנם מצבים שבהם הסתירה בין שתי הטענות אינה לוגית (אנליטית) וגם לא תצפיתית-מדעית, אלא אפריורית. הסתירה נוצרת בגלל עיקרון אפריורי (כמו עקרון הסיביות), אבל אין זה אומר שהצירוף של שתי הטענות הוא מחוסר מובן. סתירה אנליטית היא מלל ריק, כפי שהסברתי במאמר זה, אבל לסתירה אפריורית יש משמעות מצד עצמה ולכן אין לשלול אותה, לפחות ביחס לקב"ה. לסיום המאמר, אביא כעת כמה דוגמאות לשימושים פזיזים כאלה במושג 'סתירה', ולמשמעותה של התמונה שהצעתי כאן.

הדוגמה הראשונה היא דברי חז"ל על פרה אדומה. חז"ל משתמשים בדין של פרה אדומה כדי לדבר על סתירות שאיננו יכולים להבין. כך למשל בפסיקתא דרב כהנא ד, בפתיחתא לפרשת פרה, אנו מוצאים (ראו גם במדבר רבה יט, א):

תמן תנינן: בהרת כגריס טמא פרח בכלו טהור. מי עשה כן, מי צוה כן, מי גזר כן, לא יחידו של עולם?

תמן תנינן: האשה שמת וולדה בתוך מעיה והושיטה החיה את ידה ונגעה בו, החיה טמאה טומאת שבעה, והאשה טהורה עד שיצא הולד.

המת בבית טהור, יצא מתוכו הרי הוא טמא. מי עשה כן, מי צוה כן, מי גזר כן, לא אחד, לא יחידו של עולם.

ותנינן תמן: כל העסוקין בפרה מתחילה ועד סוף מטמאין בבגדים, היא עצמה מטהרת טמאים. אלא אמר הקב"ה: חוקה חקקתי וגזירה גזרתי ואין את רשאי לעבור על גזירתי – "זאת חקת התורה אשר צוה ה' לאמר" (במ' יט:ב).

כל אלו הן דוגמאות לסתירות (חלקן מובאות במדרש אחר כקושיות מלגלגות של קורח על משה רבנו, עם עוד דוגמאות נוספות. ראו למשל בירושלמי סנהדרין פרק י). בטומאת צרעת אם יש בבשרו של אדם בהרת בגודל גריס היא מטמאת, אבל אם היא פרוחה בכל הגוף הוא טהור. הדוגמה השנייה היא מיילדת שנטמאת מנגיעה בעובר המת, זאת לעומת האישה שנושאת אותו ברחמה שהיא טהורה עד שהוא יוצא. הדוגמה השלישית היא כשיש מת בבית הבית טהור, והוא נטמא כשהמת יוצא ממנו. פרה אדומה היא דוגמה רביעית, שכן היא מטמאת את הטהורים שעוסקים בה אבל כל עניינה הוא שהיא מטהרת את הטמאים. כל הדוגמאות הללו נראות כמו סתירות לוגיות, ולכן המדרש תולה אותן בקב"ה, יחידו של עולם. לכאורה זוהי ממש קביעה של 'אחדות הניגודים' שמניחה שהקב"ה אינו כפוף לאילוצי הלוגיקה.

אבל במבט נוסף מגלים שלא מדובר כאן בסתירה לוגית. וכי יש סתירה בין הטענה שפרה מטמאת את הטהורים לבין הטענה שהיא מטהרת את הטמאים? סתירה הייתה קיימת רק אם היינו אומרים שהיא גם מטהרת את הטמאים וגם לא מטהרת אותם. לטהר את הטמאים ולטמא את הטהורים הוא עניין לא מובן, אבל לא סתירה לוגית. וכך הוא גם ביחס לכל שאר הדוגמאות שהובאו במדרש הנ"ל. ההתייחסות שלנו למקרים כאלה כאילו היו כאן סתירות היא פזיזה. אם אכן היו אלה סתירות לוגיות, כי אז לא יכולנו לאמץ את שני צדי הסתירה בו זמנית. אחד מהם היה שגוי. כאשר העניין אינו מובן, אך לא סתירתי, אין מניעה להחזיק בשני

צדי ה'סתירה' גם יחד. לאחר מכן אפשר לנסות אפילו להבין את הרעיון, אבל ההבנה כאן אינה תנאי לאימוץ שני הדינים המדוברים. ניתן לומר שבסתירות רכות כגון אלו, הן מותרות אותנו בשאלה אבל לא בקושיה או סתירה.

הלוגיקן הפולני, יאן לוקשביץ, פיתח לוגיקה תלת ערכית, כלומר לוגיקה שבה לכל טענה יכולים להיות שלושה ערכי אמת (אמת, שקר ומשהו שלישי). הוא הראה שניתן להציג לוגיקה עקבית שאינה בינארית (כלומר לא מקיימת את חוק השלישי הנמנע), והיו שראו בזה ערעור על הלוגיקה הקלסית (הבינארית). מחברים רבים בבואם לדון בסתירות במשנתו של אדם, משתמשים בלוגיקה תלת ערכית כדי להסביר זאת. כביכול יש כאן הצדקה למשנה סתירתית. היו אפילו כאלה שרצו להשתמש בלוגיקה הזאת כדי להציע פתרון לפרדוקסים. לשיטתם, טענה פרדוקסלית אינה אמתית ולא שקרית, אבל זה לא אמור להטריד אותנו כי ניתן להצמיד לה את ערך האמת השלישי (T – אמת, F – שקר, P – פרדוקס).

אבל כפי שהסברתי למעלה, לוגיקה כזאת לא יכולה להיות הסבר לכלום. גם לוקשביץ עצמו, כשהוא בנה את הלוגיקה שלו הוא השתמש בלוגיקה הרגילה. הלוגיקה שלו אינה מחליפה את הלוגיקה הרגילה אלא מהווה מבנה פורמלי שיכול לשמש אותנו ככלי מועיל בהקשרים מסוימים (כמו שראינו למעלה לגבי הלוגיקה הקוונטית). כך לדוגמה יש המתייחסים גם להסתברות כלוגיקה מסוג שונה, שכן בתורת ההסתברות טענות יכולות לקבל רצף של ערכים (מספר בין 0 ל-1). האם הסתברות מערערת על הלוגיקה הרגילה שלנו? ודאי שלא. זהו כלי לטפל במצבי אי וודאות, אבל לא שינוי של עקרונות הלוגיקה. לכן ברור שהיתלות בלוגיקה תלת ערכית לא יכולה להוות הסבר למשנה סתירתית או לפרדוקסים.

בספרו של פויר (לעיל הערה 1) מובאים דבריו של לוקשביץ עצמו, שאמר שהמוטיבציה שלו לפתח את הלוגיקה התלת ערכית הייתה התחושה שהדטרמיניזם שכופה עלינו הלוגיקה הבינארית הקלסית (אמת או שקר) מקפיא את המחשבה. חבריו ועמיתיו השתמשו בלוגיקה שלו כבסיס להבנת תורת הקוונטים שניפצה את הדטרמיניזם שהיה מקובל עד אותו זמן. תוכלו לראות אצל פויר שם כמה רעיונות התבססו ונתלו בלוגיקה הזאת, על לא עוול בכפה. בניגוד לדברי יוצריה וגם ההוגים שבאו אחריהם, לוגיקה כזאת לא יכולה להוות בסיס לשום רעיון עלי אדמות, אלא אולי להוות מקור השראה לחשיבה שיוצאת מחוץ לקופסה (אבל לא הקופסה הלוגית כמובן). אין שום אפשרות לחרוג מהלוגיקה המקובלת, לא מחוק הסתירה ולא מחוק השלישי הנמנע. כך, למשל, גם בפיתוח הלוגיקה של לוקשביץ ניתן היה להשתמש בהוכחות בדרך השלילה (שמתבססות על חוק השלישי הנמנע).

אין פלא שמחברים כמו בנימין איש שלום, בספרו **הרב קוק בין רציונליזם למיסטיקה** (לעיל הערה 5), מציע להסביר כך כמה מרעיונותיו הבסיסיים של הרב קוק, שנראים לנו סתירתיים. בכמה מקומות (ראו הערה 71 לפרק הראשון והערה 133 לפרק השלישי) הוא קושר את עמדותיו של הרב קוק לרעיונות של אחדות ניגודים ברובד הלוגי, ואף מזכיר בהקשר זה את הלוגיקה התלת ערכית של לוקשביץ. כך גם אבי שגיא, בספרו **אלו ואלו** (ספריית הילל בן חיים, הקיבוץ המאוחד, 1996. ראו שם בפרק 2 מהחלק השלישי) מתייחס לאמירה התלמודית "אלו ואלו דברי אלוהים חיים" כביטוי לאחדות ניגודים, שלפי ר' צדוק הכהן מלובלין אינה "כפותה לחוקי הסתירה" כמו החשיבה האנושית. הוא הדין לסוגיות פילוסופיות וקבליות כמו הניגוד בין תמונה של "סובב כל עלמין" (טרנסצנדנציה) לבין תמונה של "ממלא על עלמין" (אימננטיות).

מאיר מוניץ במאמרו (לעיל הערה 5), פותח במובאות מכתבי הרב קוק שמדברות על אחדות הניגודים באלוהות, בניגוד לחוק הסתירה במחשבה האנושית. הוא גם מביא שם מספרו הנ"ל של בנימין איש שלום ארבע דרכים להבנת הסתירות במשנתו של הרב קוק, שהרביעית היא הנועזת מכולן שמדברת על קבלת אחדות ניגודים (הוא מערבב בין ניגודים בטבע, במחשבה ובלוגיקה) בלי לפתור את הפרדוקס. טענתו היא שתפיסה של אלוהות מחייבת אותנו להיכנס לסתירות לוגיות, בנושאים של חירות וכורח, סופיות ואינסופיות, שלימות והשתלמות וכדומה. כחלק מההסבר ה"לוגי" שלו הוא מביא מדברי הוגו ברגמן בספרו **מבוא לתורת ההיגיון – המדע העיוני של הסדר** (מוסד ביאליק, ירושלים, 1953), שמעלה כמה טענות נגד חוק השלישי הנמנע וחוק הסתירה. לא אוכל כאן להיכנס לעיון ביקורתי בטענות הללו (לחלקן התייחסתי כאן, כמו למשל פרדוקס החץ), אבל אפרוירי ברור שכל טענותיו שם אינן יכולות להחזיק מים. הן עצמן נטענות על בסיס הלוגיקה הקלסית הבינארית שלנו, ומה שנאמר מחוצה לה הוא פשוט חסר פשר.

ברוב ככל המקומות הללו לא באמת מדובר בסתירות לוגיות, ולכן במקום להיתלות באמירות מעורפלות על 'אחדות הניגודים' או בלוגיקה תלת ערכית, עדיף היה לחפש הסבר ולהראות שלא מדובר בסתירה לוגית. בלי הסבר כזה – אכן מדובר בסתירה לוגית (זהו המקרה של בעיית השלימות וההשתלמות. ראו עליה באתר שלי, בטורים 170, 278, 519 ועוד). במצב כזה אין שום תועלת לנפנף במושגים כמו 'אחדות הניגודים' ו/או בלוגיקות שונות. אחת מקרני הדילמה שגויה ויש לזנוח אותה. ואילו אם כן מצאנו הסבר – אזי אין צורך באחדות הניגודים או בשינוי של עקרונות הלוגיקה, מפני שאין כאן סתירה ליישב.

אוסף עוד שבמקרים רבים הבעיה היא פרשנית. מחבר כלשהו מדבר על 'אחדות ניגודים' אבל אין כוונתו לטעון טענה במישור הלוגי (כאילו יש לוגיקה שונה) אלא רק להשתמש במטפורה הזאת כדי לחדד את התמונה המורכבת שהוא משרטט. כוונתו להציע שלא נחשוב שאם יש סתירה מיד עלינו לזנוח את אחד מהצדדים שלה. להיפך, יש לחפש פתרון וההסבר ולהראות שלא מדובר בסתירה. במקרים אלו 'אחדות הניגודים' היא מטפורה בלבד. מוניץ בתחילת מאמרו מביא שש מובאות כאלה (ראו עוד מקורות בהערה 2 שלו) מכתבי הרב קוק. ניתן לראות זאת בכל אחד מהם. כאן אטול כדוגמה, את הציטוט מספרו של ראי"ה, **ערפלי טהר**, עמ' צה, שם הוא כותב:

אין להיבהל מקיבוץ הפכים גדולים כפי המפורסם, כי כל הנראה לרבים כדברים חלוקים והפוכים הוא רק מפני קטנות שכלם וצמצום השקפתם, שאינם רואים כי אם חלק קטן מאד של השלימות העליונה. וגם זה החלק בצורה מקולקלת מאד. אבל בעלי הדיעה המחווירת, מחשבתם מתפשטת למקומות שונים ומרחבים גדולים. ותופסים את אוצרות הטוב שבכל מקום. ומאחדים את הכל ביחד ביחודא שלים.

האם הכרח הוא לפרש זאת כתזה לוגית? בה במידה יכולתי להסביר שכוונתו להצביע על קוצר יכולתם של כמה אנשים שמפאת צמצום השקפתם לא מצליחים להבין שאין כאן סתירה, זאת לעומת "בעלי הדיעה המחווירת" שכן מוצאים הסבר ומיישבים את הסתירה. חשוב להבין שפרשנות כזאת לדבריו שונה מהותית מהפרשנות הלוגית שמציע מוניץ, שכן לפי הפרשנות הלוגית אין טעם לחפש הסבר שהרי אין הסבר נגיש לבני אדם קרוצי לוגיקה שכמונו. רק הקב"ה אינו כפוף לאילוצי הלוגיקה. לפי פרשנות זו, לא ברור מיהם "בעלי הדעה המחווירת" שעליהם מדבר הרב קוק. הרי אין אנשים שיכולים להתעלות על פני הלוגיקה, כמו

האלוהים בכבודו ובעצמו. לכן הפרשנות הסבירה יותר לדברי הראי"ה היא דווקא זו שאני הצעתי, שלפיה בכוונתו להמריץ אותנו כאן לחפש פתרון, ולא להסתפק בהסתכלות שטחית, להצהיר על אחדות הניגודים ולשבת בשקט. אם אנחנו פוגשים סתירה, עלינו לחפש הסבר ולהראות שאין כאן סתירה אמתית (ובכך להיות מבין "בעלי הדיעה המחווירת"). יכולתי כעת לעבור על כל הסתירות לכאורה שהוזכרו במקורות הנ"ל ו'הוסברו' באמצעות לוגיקות שונות או נתלו ב'אחדות הניגודים', ולהראות מדוע כולן נופלות לאחת משתי הקטגוריות הללו: מיעוטן הן סתירות לוגיות, ואז עלינו לדחות את אחת מהטענות. והשאר, רובן ככולן, הן סתירות מדומות, ולגביהן אין צורך באחדות ניגודים. עשיתי זאת למעלה לגבי תורת הקוונטים, שהיא אחד מהמקרים הקשים יותר, וגם לגבי המימרא התלמודית "אלו ואלו דברי אלוהים חיים". ניתן ללמוד משני המקרים הללו לשאר הדוגמאות הקלות יותר. אבל לענייננו די בכך ואין כאן המקום להיכנס לשאר הדוגמאות בפירוט.