

מבט שיטתי על סטטיות ודינמיות

בטור הקודם עסקתי בסם בק, בממאר שלו ובצירוי, ועמדתי על כך שהם מבטאים את היחס המורכב בין הסטטי לדינמי. אני עסקתי ביחס הזה בעבר, בעיקר במאמרי "חצו של זנון והפיזיקה המודרנית", ולאחר מכן גם בטור [32](#) שעסק בתשובה ובטור [170](#) שעסק ב"עבודה צורך גבוה" ועוד (חלק יובא בהמשך הטור). כאן ארצה להציע הצגה שיטתית יותר של הסוגייה העדינה הזאת, שיש לה היבטים פילוסופיים, מתמטיים ומדעיים. אם אמקד יותר, אני אנסה לדון בייצוג של הדינמי על ידי פריימים סטטיים (כמו שנעשה בקולנוע), ובבעיות המתמטיות, המדעיות והפילוסופיות שהדבר יוצר. הפילוסופיה האנליטית מלמדת אותנו שקשיים פילוסופיים לעולם נעוצים בשפה לא מדויקת ולא מושלמת (לדידה, אין קשיים פילוסופיים אמיתיים). אני חושב שזה מוגזם מאד, אבל ברור שיש בכך משהו. השפה היא ייצוג של המציאות, והייצוג מעצם היותו כזה הוא לא תמיד מוצלח ומדויק. לעתים הבעיה אינה בשפה אלא בצורת החשיבה שלנו, שיש לה גם ביטויים בשפה (ראו בסדרת הטורים [379](#) - [381](#), בטור [662](#) ועוד). כשאנחנו מייצגים תהליך דינמי על ידי פריימים סטטיים, חשוב לשים לב שמדובר בייצוג ושזה לא הדבר עצמו, שכן לעתים המודל מוליך אותנו שולל. אסור להיות שבויים של המודל, ועלינו לזכור שמדובר במודל, ושמה שמעניין אותנו הוא המציאות שהמודל אמור לייצג. זה נכון במדע, שכל כולו מודלים שמייצגים את המציאות (ואנחנו נוטים לראות בהם את המציאות עצמה), אבל זה נכון גם בפילוסופיה וכמובן בייצוגים מתמטיים של המציאות בכלל. ייצוג של דינמיקה על ידי פריימים סטטיים אינו יוצא מן הכלל, וכפי שנראה כאן גם הוא מעורר בעיות קשות במספר תחומים. אקדים ואומר שהטור הזה קצת קשה, שכן הוא נזקק לכמה יסודות של החשבון האינפיניטסימלי ושל תורת הקוונטים ואפילו קצת יחסות פרטית. ניסיתי להסביר באופן שגם הדיוטות יוכלו להבין, ואני מקווה שהצלחתי. דומני ששווה להתאמץ כי יש כאן כמה קישורים ותובנות חשובים מאד, שלדעתי גם אנשי מקצוע בתחומים הללו נכשלים בהם.

פרדוקס החץ במעופו

זנון מאיליאה מנסה לערער על מושג התנועה באמצעות כמה פרדוקסים. אחד מהם הוא פרדוקס החץ במעופו, שניתן לניסוח בערך כך. התבוננו על חץ שעף. בכל רגע הוא ממוקם בנקודה אחרת. אם כן, מתי בדיוק הוא עובר בין המקומות? מתי הוא נע? ההנחה היא שבכל רגע בדיד החץ אינו יכול לנוע, ולכן ברור שהוא עומד בנקודה בה הוא נמצא.

החץ והחשבון האינפיניטסימלי

ישנם ניסיונות לפתור את הבעיה תוך שימוש במושגים מתוך החשבון האינפיניטסימלי והבעייתיות של מושג הרצף. בניסוח פשוט ניתן לבטא זאת כך: הקו הרציף אינו מורכב מנקודות אלא מאינפיניטסימלים קטנים כרצוננו. ציר הזמן הוא קו רציף. ולכן אין כל משמעות לדון על מצבו של גוף בנקודת זמן בדידה. ואילו על פני קטע של זמן, קטן ככל שתמצאו, החץ יכול לנוע. ההגדרה הזאת של הרצף היא הכרחית במתמטיקה. הסתכלות על ציר רציף כאוסף של נקודות בדידות צפופות כרוכה בבעייתיות ולא ניתן להגדיר כך את הרצף. ועדיין קשה מאד לקבל שלא ניתן לדבר על נקודה בדידה על ציר רציף. הציר כן מורכב מאוסף של נקודות בדידות אלא שיש להוסיף לכך את תכונת הציפיפות. גם אם ההנחה שהרצף מורכב מקטעים אינפיניטסימליים ולא מנקודות מועילה מתמטית היא לא נראית כמו קביעה אונטית (על המציאות). לענייננו, לא סביר שאי אפשר לדבר על מצבו של החץ בנקודת זמן, ולכן בעייתו של זינון נותרת בעינה.

החץ ותורת הקוונטים

הפיזיקה הקוונטית מלמדת אותנו שלכל חלקיק אלמנטרי ישנן לפעמים תכונות של חלקיק ולפעמים תכונות של גל. נילס בוהר הציע כפתרון לדילמה זו את עקרון הקומפלמנטריות (ההשלמה) האומר, שלכל יצור כזה (הקרוי בפינו חלקיק. ראו הערתי על כך בטור [שלפני הקודם](#)) ישנן לפעמים תכונות של גל ולפעמים של חלקיק. והאופי שלו כפי שהוא מתגלה לעיני הצופה תלוי באופן המדידה ובגדלים

הנמדדים. ניסוח פורמלי וכמותי של עיקרון זה נקרא עקרון אי הוודאות של הייזנברג. עיקרון זה חזק יותר מעקרון הקומפלמנטריות,¹ אך כאן אתייחס רק לתוכן העקרוני של קביעות אלו ולא לצורה הכמותית הפורמלית שלהם. ניסוח פשוט של עקרון אי הוודאות: מהירותו ומיקומו של חלקיק (כמו עוד צמדי גדלים דואליים כאלה) אינם ניתנים לקביעה בעת ובעונה אחת. ובמילים אחרות, כאשר יש לחלקיק מקום מוגדר, מהירותו היא גודל בלתי מוגדר לחלוטין שלא ניתן לדבר עליו וודאי לא למדוד אותו, וההיפך.

תוכלו מייד לראות שניתן לקשור את העיקרון הזה לפרדוקס החץ במעופו בכמה רבדים:

(א) ברובד הסמנטי, לפי עיקרון זה לא ניתן לנסח משפטים הכוללים את מושג המהירות ברגע שבו ישנו מיקום מוגדר לחלקיק, שכן משפטים אלו מכילים מושג שאינו מוגדר: "מהירותו של החלקיק הנמצא במקום א". לפיכך, הטענה שלפיה החץ נע ברגע שבו הוא עומד הוא טיעון חסר משמעות.

(ב) ברובד הפיזיקלי, חלקיק יכול להימצא במקומות שונים בזמנים שונים, אף שבעת שמיקומו ידוע לא ניתן לייחס לו מהירות. דבר זה נובע מן העובדה שהמושג של החלקיק הנקודתי הנע אינו מוגדר היטב בתורת הקוונטים. במסגרת תורה זו, החלקיק מיוצג על ידי פונקציית גל המתארת את הסיכוי למצוא את החלקיק במקום מסוים. החוקים המתארים את תנועתו של עצם נקודתי אינם חוקי הקינמטיקה הקושרים בין מיקומו של העצם למהירותו ותאוצתו דרך החשבון האינפיניטסימלי (זהו התיאור במכניקה הניוטונית). חוקים אלו נכונים אמנם לגופים גדולים ברובד המקרוסקופי, אולם דינמיקה של חלקיקים קטנים מתוארת על ידי חוקי תורת הקוונטים (משוואת שרדינגר וכו'). חוקים אלו מתארים את הדינמיקה של אותה פונקציית גל המייצגת את החלקיק. מיקומו של החלקיק, שהוא רק גודל ממוצע, ניתן לחישוב מתוך פונקציה זו. אבל מיקום אמיתי שלו קיים רק אחרי מדידה.

לכאורה יש כאן פתרון פיזיקלי לפרדוקס החץ במעופו. ניסוח הפרדוקס משתמש בטענות או מושגים שאינם מוגדרים היטב, והם כנראה אלו שיוצרים את הקושי. ניתן כמובן לטעון שאם מדברים על חץ ולא על חלקיק אלמנטרי אין רלוונטיות לתורת הקוונטים. זו עוסקת רק בגופיפים מיקרוסקופיים, בעוד שגופים מקרוסקופיים מצייתים למכניקה הניוטונית. אך זה לא אמור להטריד אותנו שכן ניתן לנסח את הפרדוקס לגבי חלקיק אלמנטרי ושם הוא נפתר על ידי תורת הקוונטים. אם נעבור כעת לניסוח שלו לגבי חץ (שהוא כאמור גוף מקרוסקופי), זה לא באמת משנה את התמונה. היכולת שלנו להשתמש במכניקה הניוטונית לגבי חצים ולהתעלם מתורת הקוונטים נובעת רק מכך שאיננו מתעניינים במיקום וזמן מדויקים אל השערה. אם מדובר על נתונים מדויקים לגמרי של מיקום ומהירות, גם לגבי חץ הם לא יכולים להתקיים סימולטנית. כשמדברים על נקודה מדויקת של מיקום בנקודת זמן, זו אינה קיימת גם לגבי חץ ולא רק לגבי חלקיקים אלמנטריים.

אלא שזהו פתרון מפוקפק לפרדוקס שלנו. הסיבה לכך היא שתורת הקוונטים עצמה אינה ברורה לנו פילוסופית. להסביר את פרדוקס החץ באמצעות תורת הקוונטים, יכול להועיל לנו רק כדי להבהיר שהחץ אכן עף, אבל את זה אנחנו יודעים. אבל כדי לתת פשר שיפתור את הבעיה הפילוסופית שבעניין, איננו יכולים להשתמש בתורת הקוונטים שבעצמה טעונה פשר כזה. המשל החביב עליי לבעייתיות זו הוא מילון אנגלי-אנגלי, שהוא מילון שמסביר לנו מילה אחת שאיננו מבינים באמצעות עשר אחרות שאותן אנחנו מבינים עוד פחות.

כעת ארצה להתייחס ליחס בין החץ לתורת הקוונטים דווקא באופן שלישי, אולי מפתיע יותר. ראינו שהטיעונים (א) ו-(ב) דלעיל אינם יכולים לספק פתרון פילוסופי לבעיית החץ העף, אלא רק להצביע על הקשר של הבעייתיות הזו לזו שמלווה את עקרון אי הוודאות. מסיבה זו ננסה כעת להפוך את כיוון ההתייחסות ולומר שעקרון אי הוודאות אינו מסביר את פרדוקס החץ במעופו, אלא מוסבר על ידיו:

(ג) כידוע, עקרון אי הוודאות מביך רבים מן הפיזיקאים והפילוסופים של המדע במאה הזו, וראינו שזוהי בדיוק הסיבה לכך שאיננו יכולים להשתמש בו כדי להסביר ולהתיר פרדוקס פילוסופי (כאמור, זהו מילון אנגלי-אנגלי). אם כך, בהנחה שאצליח למצוא הסבר מספק לפרדוקס החץ, אני יכול להפוך את הכיוון ולהסביר באמצעות פרדוקס החץ את תורת הקוונטים ואולי לפזר

¹ עקרון זה קובע גם יחס בין מידות אי הוודאות של שתי התכונות הקומפלמנטריות, וזאת מעבר לקביעה העקרונית שלא ניתן לדעת את שני הערכים הללו בו זמנית.

מעט מהערפל סביבה. אך זה כמובן דורש פתרון של פרדוקס החץ באופן שאינו מניח את תורת הקוונטים (פתרון במסגרת החשיבה והמושגים הקלאסיים).

מהירות לא קבועה של גוף

לצורך הדיון אשתמש בדוגמה פשוטה מתחום המכניקה, אם כי הדברים נכונים לכל שני מושגים הקשורים זה לזה דרך מושג הנגזרת (בחשבון האינפיניטסימלי).
חשבו על גוף שנע במהירות קבועה כלשהי, V . הוא משנה מקום (X) כל הזמן, ויש יחס ישר בין מיקומו למהירותו:

$$X(t) = X_0 + V \cdot t$$

כאשר X_0 הוא מיקומו בזמן $t=0$. הגרף שמתאר את היחס בין המיקום לזמן (כשהמהירות קבועה) הוא כמובן קו ישר. מהי מהירותו של הגוף? מעבירים אגפים ומקבלים:

$$V = \frac{X - X_0}{t}$$

המהירות היא הפרש המיקומים שהגוף עבר חלקי הזמן שלקח לו לעשות זאת. המהירות היא השיפוע של הגרף הנ"ל.

מה קורה אם מהירות הגוף אינה קבועה (משתנה עם הזמן)? כאן היחס בין המיקום לזמן אינו קו ישר ולכן אי אפשר להגדיר שיפוע של הקו. בכל נקודה יש לו שיפוע אחר. במצב כזה מגדירים מהירות רגעית של הגוף בזמן t , שמסומנת $V(t)$, והיא מחושבת כיחס בין שינוי המקום לפרק הזמן שבו התרחש שינוי זה בקטע קטן מאד סביב הזמן t . בסימול מתמטי:

$$V(t) = \lim_{\Delta t \rightarrow 0} \frac{\Delta X}{\Delta t}$$

זהו בעצם השיפוע של המשיק באותה נקודה. ניתן לראות שגם כאן המהירות היא יחס בין מרחק לבין הזמן שלוקח לעבור אותו, אבל המרחק והזמן הם קטעים קטנים מאד סביב נקודת הזמן שבה מחושבת המהירות. התוצאה המתקבלת, $V(t)$, היא המהירות ברגע הזמן הזה. משמעות הדבר היא שבכל רגע של זמן יכולה להיות לגוף מהירות אחרת, שכן כפי שראינו המהירות היא שיפועו של הגרף שמתאר את היחס בין מיקום לזמן באותה נקודת זמן, ומכיוון שהגרף שמתאר את היחס בין המיקום לזמן אינו קו ישר בכל נקודה מוגדר לו שיפוע שונה.

זוהי למעשה הגדרת הנגזרת של פונקציית המיקום לפי הזמן (הנגזרת היא השיפוע המקומי של גרף הפונקציה). בה במידה ניתן לדבר על נגזרות של גדלים אחרים כפונקציה של משתנים אחרים. למשל, ניתן לדבר על השתנות של גובה לפי המקום, וגם את זה ניתן לייצג על ידי גרף. לגרף הזה יש שיפוע שמתקבל על ידי נגזרת של פונקציית הגובה לפי המקום. במקרה זה, מתקבל מה שאנחנו מכנים גם בשפת היומיום שיפוע. לדוגמה, שיפוע תלול של הר פירושו שיש שינוי מהיר מאד של הגובה שלו עם שינוי המקום (התקדמות של מטר אופקי כרוכה בשינוי גדול של הגובה). שיפוע מתון אומר שהשינוי אינו חד כל כך (אם תתקדמו מטר אופקי תעלו רק מעט בגובה). כמובן שבמקרה ששיפועו של ההר אינו קו ישר אלא שיפוע משתנה, לעתים חד יותר ולעתים פחות, אנחנו מגדירים שיפוע מקומי לפי הנגזרת באותו מקום.

משמעותו של התיאור הזה: מהירות מול שינוי מקום

ראינו שלצורך חישוב המהירות של הגוף היינו צריכים לצפות בו לאורך קטע זמן (גם אם קצר, אינפיניטסימלי) ולא מספיק היה לנו לדעת את מיקומו ברגע זמן אחד. לכאורה זה משקף את העובדה שאי אפשר לדבר על מהירות בנקודת זמן, בדיוק כפי שטען זינון. מאידך, התוצאה של החישוב היא פונקציית מהירות $V(t)$, כאשר בכל נקודת זמן זמתקבלת מהירות V שונה. שימו לב שהפונקציה הזאת נותנת לנו ערך של מהירות בכל נקודת זמן בדידה, ומשמעות הדבר שכן ניתן לדבר על מהירות בנקודת זמן. אם כך, לא נכון מה שהניח זינון שאם מתבוננים בנקודת זמן בדידה הגוף בהכרח עומד. אם כן, בניגוד להבנה האינטואיטיבית שלנו האומרת שמהירות היא גודל שמוגדר אך ורק לאורך קטע של זמן, לגוף ישנה מהירות מוגדרת היטב בכל רגע בדיד של זמן. הדרך לחשב מהירות זו מתוך מיקומו של הגוף היא שמאלצת אותנו להשתמש בקטע של זמן סביב אותו רגע. זה בעצם אומר שניתן להגדיר

שיפוע של גרף בנקודה בדידה, אבל החישוב שלו דורש מאיתנו להסתכל על סביבתה ולא רק עליה עצמה.

מובן מאליו שאין ברצוני לטעון שהגוף משנה את מקומו באותו רגע בדיד², אלא אך ורק שיש לו מהירות מוגדרת באותו רגע. מעבר שלו למקום אחר בהכרח ייקח זמן, כלומר הוא חייב להתרחש על פני קטע של זמן, קצר ככל שיהיה.

המסקנה היא שאמנם יש לגוף מהירות בנקודת זמן בדידה, אבל שינוי המקום שנגרם על ידי המהירות הזאת יופיע רק אם נתבונן בגוף לאורך קטע כלשהו של זמן (ולא בנקודה בדידה של זמן). למה זה כל כך מבלבל? מפני שהגדרת המהירות במכניקה נעשית דרך נגזרת של המיקום, כלומר נזקקת לקטע ולא נעשית בנקודה בדידה. אבל מדובר כאן בהגדרה במובן האופרציונלי (ביצועי) ולא המהותי. זוהי הדרך לחשב את המהירות אבל זו אינה ההגדרה שלה. הסיבה להבנה האינטואיטיבית השגויה, שלפיה מהירות מוגדרת רק על קטע זמן, היא ערבוב בין מושג ה"מהירות" למושג "שינוי המקום", ובין הגדרה אופרציונלית של מהירות לבין הגדרה מהותית שלה.

אם כך, המהירות שאנחנו מדברים עליה כאן אינה שינוי מקום, אלא פוטנציאל לשינוי מיקום. שינוי המקום הוא רק השלכה של העובדה שלגוף ישנה מהירות, כלומר שישנו פוטנציאל כזה לשינוי מקום. היציאה של הפוטנציאל הזה מן הכוח אל הפועל נעשית כשהגוף משנה את מקומו.

הפתרון לפרדוקס החץ

המסקנה שעולה מכאן היא שגם אם הגוף נמצא במקום מסוים ברגע מסוים, אין מניעה לומר שבו זמנית יש לו גם מהירות מוגדרת באותו רגע של זמן. הוא לא משנה את מקומו ברגע בדיד של זמן, אבל יש לו מהירות מוגדרת היטב. ומכאן שלא נכון להסיק מכאן שבכל רגע של זמן הגוף עומד, כפי שהניח זינון. הגוף בהחלט אינו יכול לשנות מיקום תוך כדי היותו בעל מיקום מוגדר, שהרי זהו משפט הנוגד את חוק הסתירה (הוא גם נמצא כאן וגם לא), אך בהחלט יש לו מהירות באותו רגע. אם כן, מצאנו את הטעות בטיעון של זינון. בכל רגע בדיד של זמן הגוף אמנם נמצא במקום מוגדר היטב ולא משנה את מיקומו, אבל יש לו מהירות. לשאלה מתי הוא נע, התשובה היא באותו רגע עצמו שהוא נמצא במקום X הוא גם בעל מהירות, כלומר הוא גם נע. העובדה יש לו מהירות, תבוא לידי ביטוי בשינוי מקום ברגעי הזמן הבאים. התנועה לא מתרחשת ברגע אחר מההימצאות במקום זה או אחר, אלא סימולטנית.

חשוב להבין שהפתרון שהצעתי כאן לפרדוקס החץ של זינון אינו מצריך חשבון אינפיניטסימלי וגם לא את תורת הקוונטים. מדובר בתיקון של טעות מושגית (ממש כמו שטוענת הפילוסופיה האנליטית). זינון טען שבכל רגע בדיד של זמן הגוף "עומד" במקום ספציפי כלשהו, אך זוהי טעות: בכל רגע של זמן הוא "נמצא" במקום ספציפי כלשהו, אבל לא בהכרח "עומד" שם. ההבדל בין 'נמצא במקום' לבין 'עומד במקום' הוא שהימצאות במקום יכולה להיות גם בגוף נע (כלומר בעל מהירות). כשאני אומר שהגוף עומד במקום כלשהו, פירושו של דבר שהוא נמצא שם וגם שמהירותו 0. זינון ערבב בין להימצא במקום לבין לעמוד במקום, ולכן נקלע לפרדוקס.

כאמור, בניגוד לשני ההסברים הקודמים (המתמטי והפיזיקלי), ההסבר הזה לפרדוקס החץ במעופו אינו קשור לבעייתיות של מושג הרצף. בטיעון המוצג כאן, הפרדוקס נתלה בבלבול המושגי בין "שינוי מיקום" ל"מהירות" או בין 'נמצא במקום' לבין 'עומד בו'. מבחינה זו בהחלט אפשר להמשיך ולאחוז בגישה שהזמן מורכב מאוסף נקודות בלתי מתחלקות המונחות בצפיפות זו ליד זו. אין בכונתי כאן לטעון לנכונותה של גישה זו, המעוררת כידוע בעיות אחרות, אלא אך ורק לנתק אותה מן הבעייתיות שבפרדוקס החץ במעופו.

בין 'לעמוד במקום' לבין 'להימצא בו': דוגמאות

מסקנתנו עד כאן היא שיש הבדל בין להימצא במקום כלשהו לבין לעמוד בו, ובה במידה יש הבדל בין להיות בעל מהירות לבין לשנות מקום. המהירות היא סיבתו של שינוי המקום (או פוטנציאל לשינוי

² כאשר הוא נע במהירות סופית הדבר מובן מאליו. אולם גם כאשר מהירותו אינסופית, נראה שלא ניתן לשנות מיקום ברגע זמן בלתי מתחלק אחד. במקרה זה ניתן לשנות מיקום בקטע זמן קצר כרצוננו, אך לא ברגע בלתי מתחלק. גוף נקודתי אינו יכול להימצא בשני מקומות באותו רגע זמן בלתי מתחלק: זוהי סתירה לוגית ולא חוסר יכולת פיזיקלי. לא מדובר במהירות אינסופית אלא במהירות לא מוגדרת. ממש כמו שבטור [340](#) הבחנתי בין אורכו של אינפיניטסימל שהוא 0, לבין אורכה של נקודה שבכלל אינו מוגדר.

מקום), אבל לא שמהירות היא עצמה שינוי מקום. כדי להבהיר מעט יותר את ההבחנות הללו אתן כעת שתי דוגמאות מעולם המכניקה שבהן לא יבוא שינוי מקום גם כאשר לגוף ישנה מהירות. מצבים כאלה ממחישים את הטענה שאין לזהות את המהירות עם שינוי מקום.

כאשר גוף מתנגש בקיר, הרי שגם אם מהירותו היא בעלת ערך מסוים השונה מאפס, הקיר עוצר אותו, כלומר לא מאפשר לו להוציא את פוטנציאל התנועה הזה מן הכוח אל הפועל ולנוע קדימה (לשנות מקום). זהו מקרה שבו ישנו הפוטנציאל (המהירות), אך ההשלכה שלו (שינוי המקום) לא מופיעה בעקבותיו. באותה צורה, כאשר גוף מתנגש בגוף אחר, חלק מן המהירות שיש לו יכול להימסר לגוף השני, כך שלא כל הפוטנציאל של הגוף הנע ייצא אל הפועל על ידי עצמו. חלק ייצא אל הפועל בגוף השני (שמתחיל לנוע, כלומר לשנות מקום, בעקבות ההתנגשות). בהתנגשויות פלסטיות (שבהן התנועה של הגוף, כלומר מהירותו, לא נשמר) המהירות מתורגמת לחום שמתפזר לסביבה או צורות אנרגיה אחרות, וזאת על חשבון שינוי המקום. במקרים אלו היא בכלל לא יוצאת אל הפועל בצורה של שינוי מקום.

בחזרה ליחס בין הדינמי לסטטי

כעת אוסיף עוד נקודה שמחזירה אותנו לשאלת הייצוג הסטטי של תהליכים דינמיים. כאשר אנו צופים בגוף נע, אנחנו בסך הכל צופים בכך שהוא נמצא במקומות שונים בזמנים שונים. העיניים שלנו תופסות תמונות סטטיות: בכל רגע בדיד של זמן הגוף נמצא במקום שונה. הדינמיקה של התמונה, הסרט, התחושה שיש כאן תנועה, נוצרת על ידי המוח שלנו שמבצע אינטרפולציה בין התמונות הסטטיות (המיקומים השונים ברגעים שונים). זוהי הסיבה לכך שהגדרת המהירות במכניקה היא על ידי נגזרת של פונקציית המיקום. התפיסה האנושית, נוח לה יותר במושגים סטטיים (כמו מיקום ברגע של זמן), ולכן גם את המושגים הדינמיים (כמו מהירות) היא מגדירה על ידי שימוש במושגים הסטטיים. זה בדיוק גם מה שבלבל את זינון שזיהה מהירות עם שינוי מקום. שינוי מקום הם אינדיקציה לכך שלגוף יש מהירות, אבל הם לא המהירות עצמה. אין לנו דרך ישירה להיווכח בכך שיש לו מהירות. זוהי הסיבה לכך שסרט נוצר תמיד על ידי סדרת פריימים סטטיים, כפי שהסברתי בטור הקודם.

במילים אחרות, בהחלט צודק זינון בכך שהתפיסה האנושית אינה יכולה להבחין במהירותו של גוף ברגע בדיד של זמן. אבל זה לא אומר שאין לגוף מהירות ברגע כזה. בהחלט יש לו מהירות, והקושי להבחין בה נובע מן האופן הסטטי שבו אנו חושבים. התודעה שלנו מחייבת אותנו לצפות רק בשינויי המקום הנגרמים על ידי המהירות, והם כמובן מתרחשים רק בקטעי זמן (אינטרוולים).

שימו לב לנקודה נוספת. במקרה של סרט, ראינו שהוא מורכב מפריימים שמוקרנים בתדירות גבוהה, אבל בסרטים יש מרווח זמן קצרצר בין כל פריימים לפריימים שבא אחריו. זה עדיין דיסקרטי (=בדיד) ולא רציף. כפי שהסברתי, התמונה הדינמית נוצרת רק במוח שלנו. לכן הפרדוקס של זנון אינו קיים ביחס לסרט, מפני שהמעבר בין הפריימים באמת נעשה ברגעי הזמן הקצרים שבהם לא קורה כלום (אלו הרגעים הריקים שבין פריימים לפריימים). חשבו על סרט של חץ שעף. שם באמת אין לחץ מהירות, שכן בכל רגע הוא עומד (ולא רק נמצא) במקום אחר. הבעיות הפילוסופיות נוצרות כאשר אנחנו מתייחסים לאירועים במציאות עצמה, ולא בסרט. חץ שעף במציאות ממשיך לעוף בכל רגע של זמן. אין שם מרווחים בין פריימים. הפריימים צפופים ללא מרווח ביניהם (זוהי תכונת הצפיפות שהזכרתי למעלה). במצב כזה התנועה היא רציפה ולא דיסקרטית, זוהי דינמיות אמיתית שקיימת בעולם עצמו (ולא רק במוח שלנו), וכאן רק הייצוג שלה אצלנו הוא דיסקרטי (דרך פריימים). שימו לב להבדל: בסרט מה שאמיתי הוא הסטטי (אוסף הפריימים), והדינמיות נוצרת במוח שלנו. לעומת זאת, בתנועה אמיתי של גוף המציאות היא דינמית, והפריימים קיימים רק אצלנו בהכרה פנימה. בסרט הסטטי אינו מודל לדינמי אלא הדינמיות היא אשליה שנוצרת אצלנו. במהירות של גוף אמיתי הייצוג הסטטי הוא מודל שמייצג את ההתרחשות האמיתית שהיא עניין דינמי.

זה מביא אותנו בחזרה לתורת הקוונטים.

השלכות: בחזרה לתורת הקוונטים

כפי שהסברתי למעלה, אם הצלחנו לפתור את פרדוקס החץ, ניתן כעת לצעוד בכיוון ההפוך, ולנסות להשליך מן ההבנה שפיתחנו לגבי החץ העף אל עקרון הקומפלמנטריות בתורת הקוונטים. לצורך כך, הבה ננסח מעט אחרת את הפרדוקס של החץ במעופו.³

נניח שאנחנו מסתכלים בחץ עף ומצלמים אותו ברגעים שונים (בדידים: המצלמה התיאורטית היא בעלת זמן חשיפה 0, נקודת זמן אחת בדידה. זוהי מצלמה אידיאלית). בכל צילום, החץ יראה עומד אלא שמיקומו בכל פעם משתנה. כעת נשאלת השאלה של זינון: מתי הוא נע בין המקומות השונים הללו? תשובתנו היא שהחץ נע (יש לו מהירות) ובו זמנית יש לו מיקום. את העובדה שאיננו רואים את תנועתו של החץ בצילום, יש לייחס לעובדה שמצלמה אינה המכשיר המתאים לצפייה בתנועה (או למדידת מהירות). מצלמה היא מכשיר המודד (או צופה) מיקומים, ממש כמו העין שלנו. ניתן כעת בדרך אנלוגית להגדיר מכשיר תיאורטי אחר, שאכנה אותו בהתאמה מסרטה אידיאלית. מכשיר זה מודד או צופה במהירותו של גוף ברגע בלתי מתחלק יחיד. כפי שהוסבר לעיל, תודעתנו פועלת בדרך סטטית ולכן קשה לנו לדמיין פעולה מעין זו. מכאן נובע שמסרטה רגילה כפי שאנו מכירים אותה פועלת למעשה כמצלמה המצלמת בקצב מהיר תמונות סטטיות (פריימים) עוקבות. לעומת זאת, המסרטה האידיאלית אינה מכשיר המודד מהירות דרך הפרשי מיקום מתוך שימוש בהגדרת המהירות כנגזרת של המיקום (כמו שפועלות המסרטות שבידינו הכפופות למגבלות הסטטיות של התודעה שלנו), אלא בצורה נקודתית. המסרטה מצלמת מהירות רגעית של גוף. נמשיך בדרך האנלוגיה ונאמר, שאם נצפה (נסרטי) דרך מכשיר כזה בגוף נע, נוכל לראותו נע בכל רגע אך לא נוכל להבחין במיקומו. דוגמה לדבר, מצלמה עם זמן חשיפה ארוך מראה שהעצם נע על ידי שובל שנוצר בתמונה, אך עדיין נראה רק אוסף של מיקומים ולא נדע ממש את המהירות.⁴ כך במסרטה נוכל לדעת בדיוק את מהירותו של הגוף אבל לא יהיה לנו מושג על מיקומו. מתוך האנלוגיה, תחושתנו היא שגם במסרטה אידיאלית אם נפתח אותה לזמן חשיפה ארוך (או לרוחב גדול של העינית) נבחין קצת גם במיקום.

נמצא אפוא, שהאינפורמציה שאנו מקבלים על הגוף הנע תלויה במכשיר שדרכו אנו צופים בו. התודעה שלנו, שכאמור היא סטטית בבסיסה, משמשת אותנו כמצלמה, ולכן נותנת לנו באופן ישיר רק אינפורמציה על מיקומים, ואילו המהירות מתקבלת באופן עקיף על ידי אינטרפולציה בין המיקומים השונים (מה שמתואר כפעולה של נגזרת). אם נמשיך את קו הטיעון הזה נוכל לומר שאף אם ניתן היה לדעת את מהירותו הרגעית של גוף על ידי שימוש במסרטה, הרי שאז לא ניתן היה לדבר בו זמנית על מיקומו. כעת נניח כהיפותיזה סבירה שכמו שהתודעה שלנו כפויה לפעול כמצלמה יכולה להיות תודעה של יצור אחר שפועלת כמסרטה אידיאלית (אצלו צילום סרט לא יעשה דרך פריימים אלא ישירות). כעת אוסיף ואומר שיש סתירה בין שני אופני התייחסות: לא ניתן להיות באופן פעולה של מצלמה ומסרטה אידיאליות בו זמנית. תוכלו כעת לראות שזהו הסבר אינטואיטיבי לעקרון הקומפלמנטריות, ששולל את האפשרות לדעת מיקום ומהירות של גוף בו זמנית. עקרון אי הוודאות מוסיף שכל שנדע ביתר דיוק את המהירות יהיה לנו פחות דיוק במידע על המיקום ולהיפך (זהו כימות של עקרון הקומפלמנטריות).

דומני שרמת הוודאות מקבילה לזמן החשיפה של המצלמה או המסרטה, כפי שהסברתי למעלה. הדיון בחץ הנע הוביל אותנו למסקנה שאם לגוף יש מיקום מוגדר ברגע נתון, אין משמעות לשאלה מתי הוא משנה את מיקומו. אבל הצד השני של עקרון אי הוודאות הקובע שאם לגוף יש מהירות מוגדרת אין משמעות לדיון מהו מקומו, אינו נובע ישירות מן הטיעון דלעיל. הגענו אליו בדרך של אנלוגיה בין מצלמה למסרטה ובין מיקום למהירות. למעשה, דומני שניתן להציג טיעון מקביל המתבסס על מושג האינטגרל (הגדרת המקום באמצעות המהירות) שיראה את הצד השני.

כפי שידוע לכל מי שמכיר את תורת הקוונטים, מתוך עקרון אי הוודאות נובע שישנן שתי צורות לתאר גדלים דינמיים: או בתמונת התנע (הפרופורציוני בדרך כלל למהירות), או בתמונת המקום. אלו שתי תמונות או שפות שבהן תכונות המערכת הפיזיקלית מאופיינות על ידי הסיכוי להימצא במהירות מסוימת, או הסיכוי להימצא במקום מסוים. בתמונת התנע (מהירות), כל הגדלים הפיזיקליים מתוארים מתוך שימוש בקואורדינטות של מהירות. כך, לדוגמה, האנרגיה E תתואר כפונקציה E(V). לעומת זאת, בתמונת המקום הכל מתואר בקואורדינטות של מיקום, למשל האנרגיה תהיה פונקציה E(X).

³ ראו גם בדינו של ברגסון ההתפתחות היוצרת, פרק 4.

⁴ דוגמה כעין זו הובאה בספרו של אהרן פינקר (לימים, הרבה אחרי שנכתב המאמר שלי, בנו היה שכן שלי בפתח תקווה), ספר האטום, ירושלים, ראובן מס. הפנה אותי לזה איתמר פיטובסקי ז"ל, מן האוניברסיטה העברית, שהיה המבקר (האנונימי) של מאמרי.

ידוע בתורת הקוונטים ששתי השפות או צורות התיאור הללו הן דואליות, כלומר מוציאות אחת את השנייה (בז'רגון המדעי: לא קומוטטיביות). כעת יש לנו פשר פשוט מאד לתוצאה המפתיעה הזאת: אי היכולת לדעת מיקום ומהירות של הגוף בו זמנית נובע מן העובדה שגדלים אלו שייכים למערכות מושגים (תמונות, או שפות) שונות אשר אינן "מדברות" האחת עם השנייה. את המיקום רואים במצלמה (שנותנת לנו את העולם בתמונת המקום) ואת המהירות רואים במסרטה (שנותנת לנו את העולם בתמונת התנועה). ראינו למעלה שאי אפשר להשתמש בשתי השפות סימולטנית, כלומר אי אפשר לצפות בעולם במצלמה ובמסרטה בו זמנית. הטיעון המוצג כאן נותן פשר גם לזוגות התמונות הדואליות המלוות בתורת הקוונטים את צמדי הגדלים הפיזיקליים הנמצאים ביחסי אי ודאות ביניהם.⁵

בשולי דבריי אומר שישנה אפשרות לומר שהמהירות ושינוי המקום (או ככלל, התהליך והשינוי שהוא גורם) אינם שני דברים שקיימים באותו מישור. התהליך הוא הדבר כשהוא לעצמו, ואילו השינוי הבא בעקבותיו הוא התופעה. אם קביעה זו נכונה, הרי שאין אפשרות לדבר על שני גדלים אלו כדואליים באופן שהאחד נתפס באמצעות מצלמה והשני באמצעות מסרטה. את הדבר כשהוא לעצמו לא ניתן לתפוס בשום מכשיר. ניתוח מפורט של קביעה זו מעלה כמה בעיות שאין כאן המקום לדון בהן.

השלכות של ההבחנה בין תהליך לבין שינוי מצב

כמו שהעיר כבר אנרי ברגסון בספרו **ההתפתחות היוצרת**, פרדוקס החץ העף אינו נוגע רק למושג המהירות, אלא לכל תהליך של שינוי. בסעיף זה ננסה לראות את השלכות של הניתוח שהוצג עד כה בסוגיות שאינן קשורות למהירות ולמכניקה בכלל.

אפתח בכך שבתמונה שהצגתי כאן ישנו מעבר בין מצבים, והוא מדגים את העובדה שיש ברקע תהליך דינמי. המהירות היא פוטנציאל לשינוי מקום, ושינוי המקום הוא תוצאה של יציאה מהכוח אל הפועל של הפוטנציאל הזה. אם כן, כעת נוכל לבחון בכל מצב דינמי, האם אנחנו מדברים על המהירות או על שינוי המצבים. בדרך כלל הם באים יחד, אבל כפי שנראה כעת עדיין יש מקום לדיון מי מהם הוא העיקרי ומי רק נספח.

דוגמה ראשונה תהיה הקביעה שבה נתקלים מדי פעם בספרים הדנים בניהול, האומרת שתהליך השינוי עצמו טוב לארגון. כלומר, גם אם אין כל בעיה במבנה הנוכחי של הארגון תצמח תועלת משינויו, וזאת בגלל עצם התהליך, ולא בגלל שהמצב הבא יהיה טוב יותר מזה הנוכחי. כלומר הדינמיות נדרשת לא כדי להגיע למצב סטטי משופר. המטרה אינה שינוי המצב אלא עצם הדינמיקה. כמובן ששינוי המוביל למצב סטטי גרוע (כמו למשל הרס כללי של המכונות במפעל) אינו משפר את מצב הארגון, אך אם נניח כי ישנה קבוצת מצבים של הארגון אשר אינם עדיפים אחד מן השני, עדיף לארגון להימצא במעבר ביניהם, ולא לקפוא באחד מהם. איני נכנס כאן לשאלה האם קביעה זו נכונה, אלא רק מנתח את משמעותה. לפנינו מקרה מובהק של תועלת הצומחת מקיומו של תהליך גם אם אינו מלווה בשינוי מצב (מהירות ללא שינוי מקום). נראה כי לתיאורה של תועלת כזו לא ניתן להשתמש במונחים של "שינוי מצבים" אלא רק באלו של "תהליכים", שהרי אין לנו צורך כלל במצב (מבנה) שונה אלא רק בעצם התהליך השינוי.

דוגמה מעניינת נוספת שבה ניתן להשתמש רק במונח אחד ולא בשני, היא בדיון בשאלת התשובה ובבעיית שלמות והשתלמות הא-ל (ראו על שני אלו בטור [170](#)). לגבי בעלי תשובה חז"ל אומרים לנו שבעל תשובה עדיף על צדיק גמור. אם מטרת התשובה הייתה רק לשפר את מצבנו הרוחני, אזי בעל

⁵ כעת עשויה להתעורר התנגדות מעניינת לפשר שניתן כאן לעקרון אי הוודאות: תפיסה מקובלת היום בקהילה המדעית היא, שעקרון אי הוודאות אינו מתאר אותנו אלא את החומר עצמו. זוהי אינה מגבלה שלנו, אלא חוסר אפשרות עקרוני. המהירות והמיקום לא רק שאינם מדידים בו זמנית, אלא גם אינם נמצאים (אינם מאייכים את הגוף) בו זמנית. מנגד, הטיעון שמועלה במאמר זה תולה את אי הוודאות במגבלות תודעיות של הצופה האנושי. כלומר, לפי הטיעון המוצג כאן, צופה שאינו סובל מן המגבלה לפיה לא תיתכן פעולה של התודעה באופן של מצלמה ומסרטה אידיאליות בו זמנית, יוכל למדוד סימולטנית את מיקומו ומהירותו של גוף נע.

פתרון אפשרי לבעיה זו, אם נשתמש בטרמינולוגיה קאנטיאנית, נמצא בהבחנה בין הפנומנה לנואמנה. ברור שאי הוודאות אינה יכולה להיות תכונתו של העצם כשהוא לעצמו (הנואומנון) שהרי אין לנו כלל גישה לתכונותיו. היא יכולה להיות אך ורק תכונתו של עולם התופעות, כלומר של העצם כפי שהוא מופיע לעינינו (פינומנון). אמנם גם בתוך עולם הפנומנה יש להבחין בין העצם הנמדד כפי שהוא מופיע בעינינו לבין מכשיר המדידה/הצפייה והצופה עצמו כפי שהם מופיעים לעינינו. הקביעה הפיסיקלית שאי הוודאות היא תכונתו של העצם ולא של המודד, עוסקת כולה בהבחנה שבתוך התודעה (או בתוך עולם התופעות). כלומר, גם אם נסכים שזו אינה בעיה טכנולוגית אלא עקרונית, נוכל לטעון שגם בעיה עקרונית זו מקורה בתכונות התפיסה האנושית שהיא המגדירה את הגדלים הנמדדים ואת המכשירים המודדים אותם. דיון מפורט יותר בסוגיה זו הוא עניין לעיון נפרד.

התשובה יכול להיות לכל היותר כמו צדיק גמור. אם הוא הצליח לגמרי הוא מגיע למצב מושלם והופך לצדיק גמור. די ברור שחז"ל רואים בתשובה תהליך דינמי שיש לו ערך מצד עצמו. הוא לא רק אמצעי כדי להגיע למצב רוחני משופר.

בטור הנ"ל דימיתי זאת לבעיית השלימות וההשתלמות של הרב קוק. הוא מנסח בעיה זו כך (אורות הקודש כרך ב, עמי תקלא):

יש שלמות של תוספת שלמות, שזה אי אפשר להיות באלוהות, שהרי השלמות המוחלטת האין סופית אינה מניחה מקום להוספה. ולמטרה זו, שהוספת השלמות גם היא לא תחסר בהווייה, צריכה ההווייה העולמית להתהוות.

הנחת היסוד היא שההשתלמות (כלומר ההתקדמות הרוחנית) היא אחת השלמויות, ולכן היא צריכה להיות קיימת גם באלוהות. מצד שני ברור שלא ניתן לדבר על השתלמות האל משתי סיבות: (א) לא יכול להתרחש באל שום שינוי; (ב) האל הוא מושלם, ולכן לא ניתן לדבר כלפיו במונחים של התקדמות רוחנית. ראינו בטור הנ"ל שהפתרון שהרב קוק מציע כאן לדילמה זו מקביל לזה המוצע לארגונים שנדונו לעיל: התהליך עצמו (או לפחות שורשו) קיים באל, אף שהשינוי, שבדרך כלל מלווה אותו, לא יכול להתקיים בו מן הסיבות דלעיל. כלומר, השלמות הרוחנית הבאה לידי ביטוי בהשתלמות היא בתהליך ולא בשינוי המצב, וזה יכול לאפיין גם את האל. שינוי המצב לא אפשרי אצלו (כי הוא לא יכול להפוך למושלם יותר), אבל התהליך נמצא גם בו. ממש כמו שראינו בגופים שיש להם מהירות שלא יכולה לצאת מן הכוח אל הפועל (למשל כשהם נתקלים בקיר).⁶

בטור [519](#) עסקתי ביחס בין דינמיות לסטטיות בהקשר של מחלוקת הרקליטוס ופרמנידס (בתוך ביקורת על דברי אספ ענברי על התגלות חילונית). גם שם עמדתי על הקשר בין הסוגיה הזאת לבין שאלת החץ ולמושג הנגזרת במתמטיקה. ישנן גם כמה דוגמאות מן התלמוד שבהן ניתן ליישם הבחנה זו בין שינוי מצב לבין תהליך. בטור הבא אדון בפירוט בדוגמה כזאת ובמשמעויותיה (ראו עליה בקצרה [כאן](#)).

על שני צירי זמן: ברגסון ואיינשטיין

לאחר שהוצגו כמה מן ההשלכות של ההבחנה בין 'שינוי מצב' לבין 'תהליך' בתחומים שאינם נוגעים לפיזיקה, אחזור כעת לנקודה חשובה נוספת, ושוב בעולם הפיזיקה, שבה באה לידי ביטוי הבחנה זו. כוונתי לתיאור הזמן במסגרת תורת היחסות של איינשטיין, ובשאלה האם הוא ממצה.

המאפיין הבולט ביותר של הזמן, לעומת המרחב או החלל, הוא היותו זורם. החלל נתפס אצלנו כסטטי וקפוא והזמן לעומתו זורם כל הזמן. הזמן נתפס כמהותה של הדינמיות, ויש שממש מזהים ביניהם (כלומר תופסים את הזמן לא כיישות קיימת אלא כצורת תיאור של התרחשויות דינמיות). ניתן אפילו להרחיק לכת ולטעון שמה שבאמת קיים בעולם הוא רק רצף של מצבים סטטיים, והזמן והדינמיות הם מושגים שאנחנו המצאנו לצרכינו, כדי לטפל ברצפים כאלה (ראו על כך קצת בטור [33](#)). טענה כזאת נסמכת על אותן צורות תפיסה שתוארו עד כאן. אני הנחתי שאלו תוצאות של מגבלות ההכרה שלנו, אבל בעלי גישות אלו טוענים שזוהי המציאות עצמה.

ריצ'רד טיילור בספרו **מטפיזיקה** (פרק 7) מראה כי החלל והזמן הם בעלי מאפיינים זהים, על ידי הטיעון הזה: בכל משפט המתאר תנועה או יחס בין מרחב לזמן, ניתן להחליף את היחסים הזמניים ביחסים מרחביים מקבילים וההיפך. אם עושים זאת באופן עקבי ובהתאמה, התוצאה היא תמיד משפט בעל מובן ברור ומוגדר היטב (ראו שם דוגמאות שונות לכך, וגם בטור [33](#)).

מכאן יכול הפוזיטיביסט להסיק, והוא אכן בדרך כלל עושה זאת, כי הזמן והמרחב הם בעלי תכונות זהות. כל מה שניתן לעשות במרחב ניתן לעשות גם בזמן, ולהיפך. זוהי למעשה גם התמונה המתקבלת מתורת היחסות של איינשטיין. בתיאוריה זו, הזמן הוא אחד מארבע קואורדינטות המתארות מאורע במרחב החלל-זמן של מינקובסקי. האובייקט הבסיסי בתיאוריה זו הוא "קו העולם" של הגוף, כלומר הקו המתאר את מיקומו של הגוף בכל הזמנים. בתמונה זו קו העולם נתפס כסטטי, והוא מתעלם מתופעת זרימת הזמן. הזמן מופיע שם כאחד מממדי המרחב.

⁶ אם נאמץ את התפיסה שהצגתי למעלה, שלפיה ה"תהליך" הוא הדבר כשהוא לעצמו של ה"שינוי", הרי שבא-ל נמצא הדבר כשהוא לעצמו באופן שההופעה שלו בעיני התודעה (השינוי) באה לידי ביטוי בנבראים. זוהי תפיסה פאנאנטיאיסטית הדומה יותר לזו שהוצעה על ידי הרב קוק שם.

אחד הטיעונים הפילוסופיים הנפוצים לדחייתה של תחושת חלוף הזמן וסיווגה כאשליה גרידא, הוא הטיעון הזה (גם על כך ראו בטור הנ"ל): "A משתנה" פירושו "A נמצא במצב אחד בזמן אחד, ובמצב אחר בזמן אחר". ובפרט, לומר "A נע" פירושו "A נמצא במקום אחד בזמן אחד, ובמקום אחר בזמן אחר".⁷ אם נרצה לדון בזרימת הזמן, עלינו להציב את הזמן עצמו כנושא (A) של אחד המשפטים הללו. אבל מה שמתקבל הוא כמובן טענה חסרת מובן, שכן הזמן עצמו לא יכול להימצא במצב/מקום כלשהו בזמן זה או אחר.

בטור 33 הצעתי את הטענה שחלוף הזמן מתואר לאורכו של ציר זמן שני, המשמש כאינדקס שמתאר את מצבו של הזמן הרגיל ואת תנועתו. אלא שכאן עולה הטענה לרגרסיה אינסופית, כיון שציר הזמן החדש יהיה נתון לאותה מתקפה, אם נרצה לייחס גם לו אותה תכונה של זרימה מתמדת. ניתן לעצור נסיגה זו באמצעות הקביעה, שישנו זמן אחד שמשמש רק כאינדקס ושאינו זורם, וזמן אחר הזורם על פניו של הראשון. אחד ממגיניה הבולטים של התפיסה הגורסת זרימה של הזמן (זמן יוצר או "זמן משך") היה אנרי ברגסון בספרו **ההתפתחות היוצרת**, אשר אף ניהל ויכוח עם איינשטיין שגרס ההיפך (למעלה כבר הזכרתי את הדיון שלו שם בפרדוקס החץ של זנון). כל אחד מן הצדדים בוויכוח זה טען לבלעדיות של תפיסתו, ואילו אני מציע כאן, כי כל אחד ייצג אספקט אחר של הזמן, או במילים אחרות, אחד משני סוגי הזמן שהוגדרו לעיל. תיאור מעט שונה של שני האספקטים (או שני הסוגים) של הזמן, הועלה על ידי מקטגרט כבר בשנת 1908,⁸ וישנו אפילו ניסיון מעניין לתת לו לבוש מתמטי-פיזיקלי מסוים.⁹ ראו על כך גם בטורים [465](#) – [466](#).

ענייננו כאן, בתיאור זה של הזמן, הוא ברלוונטיות של שני סוגי זמן אלה לתיאורם של תהליכים לעומת שינוי מצבים, כפי שהוגדרו למעלה. טענתי היא שהזמן הזורם "נושא על גבו" את התהליך, ואילו המצבים הסטטיים המשתנים מאופיינים על ידי אינדקס הנקרא גם הוא זמן, אשר מציין את "מיקומם" בציר הזמן הבסיסי. אינדקס זה הוא זמן מן הסוג השני.

גם כאן לכאורה ניתן לשאול, בדומה לתהייתו של זינון בפרדוקס החץ שלו, איך זורם הזמן. כלומר, בכל רגע בדיד נתון של זמן האינדקס (זמן איינשטיין) נמצא הזמן הזורם (זמן ברגסון) בזמן אחר. ואם כן מתי הוא משנה את האינדקס? נראה ששאלה זו חסרת מובן, שכן זמן ברגסון אינו גודל הזורם בזמן, אלא זוהי הזרימה עצמה. כל גודל דינמי נישא על גבי זמן ברגסון, ויוצר שינוי במצבים הסטטיים המאופיינים על ידי זמן איינשטיין. הרגשתנו שהזמן חולף פירושה שאנו חולפים על פניו של הזמן האינשטייני, והזמן הברגסוני הוא הנושא אותנו. ההשלכה של זרימתנו בזמן היא שאנו נמצאים כל פעם במצב זמן בעל אינדקס איינשטייני שונה.

משמעות הדברים היא שתחושת חלוף הזמן מבטאת את הדינמיות שביסוד המציאות שסביבנו, אלא שלנו קשה להבחין בזה בגלל אופייה הסטטי של הכרתנו. לכן אנחנו מסמנים שנתות על פני ציר הזמן, וכך יוצרים לעצמנו ייצוג סטטי (פריימיים) של הדינמיות שלו. אם היה באפשרותנו לקלוט באופן של מסרטה אידאלית, כלומר לצפות בתהליך עצמו, היינו יכולים לתאר את המהירות באופן ישיר כנישאת על ציר זמן ברגסוני. זוהי גם הסיבה שבתורת היחסות של איינשטיין מתואר רק זמן האינדקס, כיוון שזהו הזמן שיכול להתפס בתודעתנו באופן ישיר. המסרטה האידיאלית שתוארה לעיל פועלת לאורך זמן ברגסוני, ולכן יכולה לצפות במהירות (או בשינוי) בנקודת זמן אחת.

דומני שהתחושה כאילו איינשטיין גבר על ברגסון בוויכוח שלהם לגבי הזמן היא מוטעית. לאיינשטיין היה יתרון כמתמטיקאי ופיזיקאי, והוא הציג תיאוריה מדעית בעלת השלכות אמפיריות לתפיסת הזמן שלו, ולכן אנשים חשים שברגסון רק נאחז בקרנות המזבח הפילוסופי ומתנגד לממצאי המדע האמפירי. כאן ברצוני לטעון שאכן המדע עוסק בזמן של איינשטיין מפני שזהו הפנומון. זהו ההיבט שבו אנחנו יכולים לצפות אותו אנחנו יכולים לתפוס בהכרה הסטטית שלנו. לכן המהירות מבחינתנו מוגדרת כנגזרת של המיקום. אבל האמת היא שזו מגבלה של התפיסה שלנו, ולא טענה על המציאות כשלעצמה (הנואומון). כאן לדעתי צודק ברגסון, ואכן זה עניינם של פילוסופים ולא של פיזיקאים. זוהי אולי הסיבה לכך שהזמן של איינשטיין בתורת היחסות משתנה לפי מערכת הייחוס. כל צופה תופס אותו באופן אחר,

⁷ ראו אבשלום אליצור, **זמן ותודעה**, האוניברסיטה המשודרת, פרק 4.

J. E. McTaggart, *Philosophical Studies*, ed. S. V. Keeing, London, E. Arnold, 1934, chap. 5; ⁸ ומראה המקום מסי' 30 במאמר של הורביץ ארשנסקי ואליצור המופיע בהערה הבאה.

⁹ L. P. Horwitz, R. I. Arshansky and A. C. Elitzur, "On the Two Aspects of Time: The Distinction and Its Implications", *Foundations of Physics*, 18, 12 (1988): pp. 1159-1193

שכן זהו הזמן ששייך לפנומנון. לעומת זאת, הזמן של ברגסון הוא אובייקטיבי. לפי הורביץ ועמיתיו במאמר שצוין כאן למטה, הזמן הזה הוא ה'אינטרוול' בתורת היחסות (שבדרך כלל מסומן באות היוונית טאו), שהוא אינווריאנטה, כלומר לא משתנה בין מערכות הייחוס השונות. לפי הצעתי, זהו הנואמנון של הזמן. אם אשוב לטור [519](#) שעסק באסף ענברי, אוכל כעת לומר שהזמן הפרמנידי הוא הזמן המדעי (הזמן של איינשטיין), כלומר הפנומנון, וההרקלייטי הוא הזמן של ברגסון, הנואמנון.

סיום: בחזרה לאמנות

בטור הקודם עמדתי על שרשור של סדרת פריימים בטקסט או בציור לכלל סרט דינמי, ועל ציור (פריים) בודד שמצליח לבטא דינמיות דרך התמקדות ברגע אחד (הקפאה שלו) מתוך המכלול הדינמי. כעת ניתן לומר שהאמנות של בק ודומיו היא לייצג את הנואמנון, שבדרך כלל נעלם מאיתנו, ולהציבו באופן מוחשי לפני עינינו. זה מאפשר לנו לראות את זמן ברגסון דרך זמן איינשטיין. כשרואים ציור בודד ומצליחים לחלץ ממנו תחושה דינמית, פירוש הדבר שאנחנו בעצם פועלים במוד של מסרטה אידיאלית (וכך אין צורך בנגזרת, כלומר ביותר מפריים אחד, כדי להבין שיש מולנו תהליך דינמי).