

זמן וסיבתיות בפיסיקה

לפעמים נראה שעם התקדמות המחקר, תמונת העולם שמציירת הפיסיקה המודרנית נעשית יותר ויותר זרה לחוויה האנושית. הפיסיקה מציעה דרך ברורה לחקר העולם: מצד אחד ניסוח של תיאוריות פיסיקליות בשפה מתמטית, ומצד שני עימות של מסקנות התיאוריות עם תוצאותיהם של ניסויים ותצפיות. הצלחת שיטה זו הפכה במאות האחרונות לאבן יסוד בחשיבה האנושית. אך מאז תחילת המאה העשרים, עולמם של הפיסיקאים המנסחים את התאוריות היסודיות הולך ומתורקן ממושגים מוכרים מחיי היומיום, ומתמלא במדקומם במושגים מתמטיים מופשטים.

מצב זה מציב אתגר בפני פיסיקאים ופילוסופים, המנסים לקרוא בתיאוריות הפיסיקליות סיפור על טיבו של העולם. אחת הדרכים להתמודד עם האתגר היא התמקדות באותם אלמנטים של החוויה האנושית, שהצליחו לשמור על מקום מרכזי גם בפיסיקה בת-ימינו. כאן נעסוק בשני מושגים כאלו: מושג הזמן ומושג הסיבתיות. תיאור העולם, כמאורעות המ־תרחשים בזמנים שונים וקשורים זה לזה בקשרים של סיבה ומסובֵּב, משותף גם לדרך בה אנו לומדים על העולם בעזרת החושים מגיל ינקות, וגם לניתוח החוקיות בעולם המופיעה בתיאוריות הפיסיקליות בנות ימינו, בהן נעסוק.

זמן, סיבתיות ויחסות

תורת היחסות הפרטית שפרסם אלברט איינשטיין בשנת 1905, היוותה קו שבר משמעותי בין התפיסה האנושית הב־לתי-אמצעית של העולם, לבין הדרך בה מתארת אותו הפי־סיקה. בבסיס התורה עומדת ההנחה שמהירות האור היא קבועה ושווה בערכה ביחס לכל הצופים. על פניו זוהי קביעה מוזרה. דמיינו למשל רכבת הנוסעת מחיפה לתל אביב. אם הרכבת נוסעת במהירות 120 קמ"ש, משמעות הקביעה היא שבכל דקה הרכבת מתרחקת מרחק של 2 ק"מ מחיפה. זו לא תהיה המהירות שלה ביחס לגוף נע. למשל, צופה היושב ברכב הנוסע במקביל לרכבת ובאותו הכיוון במהירות 60 קמ"ש, יראה אותה מתרחקת ממנו רק ק"מ אחד בכל דקה – כלומר, הוא ימדוד ערך של 60 קמ"ש בלבד עבור מהירות הרכבת. ההיגיון והניסיון מראים, אם כן, כי שני צופים הנעים זה ביחס לזה, לא אמורים להסכים על מהירות של עצם שלי־שי. איך יוכלו, אם כן, להסכים על מהירות האור?

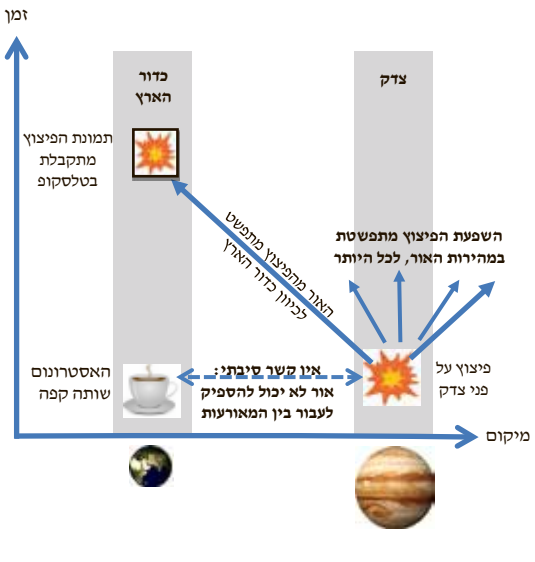
ההנחה שצופים נעים יסכימו לגבי ערכה של מהירות האור, יכולה להתקיים בתורת היחסות רק בזכות תכונה מוזרה עוד יותר שלה: הצופים לא יסכימו לגבי אופן מעבר הזמן. אפשר להגיד שהשעונים שלהם יתקתקו בקצב שונה. לתופעה זו הש־פעה הניתנת למדידה כאשר הגופים נעים במהירויות גבוהות. בפרט, צופים הנעים במהירויות שונות לא יסכימו על סדר ההתרחשות של מאורעות הרחוקים זה מזה. נסביר באמד צעות דוגמה: נניח כי ברגע מסוים אסטרואידי קטן מתרסק אל פניו של כוכב הלכת צדק, וגורם לפיצוץ הנמשך מספר שניות (אירועים כאלו תועדו בשנים האחרונות). מאות מיליוני קילומטרים משם יושב אסטרונום בכדור הארץ ליד הטלסקופ ושותה קפה, בלי להיות מודע להתרחשות על פני צדק. בגלל

המרחק הרב בין צדק לכדור הארץ, עוברות כ-45 דקות עד שהאור מהפיצוץ מגיע לכדור הארץ. רק בתום זמן זה האסט־רונום רואה את הפיצוץ בטלסקופ, והוא מסיק שהוא התרחש בזמן שהוא היה שקוע בשתיית הקפה. לפי תורת היחסות, אבחנה זו של האסטרונום היא סובייקטיבית: צופים אחרים לא יסכימו שהפיצוץ ושתיית הקפה התרחשו באותו הזמן. למשל, צופה הנמצא בחללית מהירה מאוד הנעה מכדור הארץ לכיוון צדק היה מסיק מתצפיותיו שהפיצוץ התרחש עוד לפני שכוס הקפה של האסטרונום הייתה מוכנה. צופה הנע בכיוון ההפוך היה רואה את האסטרונום מסיים את כוס הקפה שלו לפני שהפיצוץ התרחש. עקרון חשוב בתורת היחסות הוא שאף אחד מהתיאורים האלו אינו נכון יותר מהאחרים. כל הצופים יסכימו שהאסטרונום שתה קפה, וכולם יסכימו שאסטרואידי גרם לפיצוץ – אך הם לא יסכימו על סדר המאורעות.

הסובייקטיביות של הסימולטניות, והאופן בו תורת היחסות מתייחסת אל הזמן בדומה לכיווני המרחב, הם סיבה עיקרית לעלייתה של גישה המכונה 'היקום כגוש' (Block Universe) בפילוסופיה של הזמן. גישה זו שוללת את התפיסה לפיה קיים רגע מיוחד בזמן, הוא ההווה, שרק מה שמתקיים בו ממשי. המאורעות המתרחשים בכל הזמנים ממשיים כולם, בדומה לנקודות במקומות שונים על גבי תמונה. לפי הדוגלים בגישה זו, החוויה האנושית לפיה 'הזמן עובר', עתיד נהפך להווה והווה לעבר, קשורה לאופן בו התודעה תופסת את העולם, ולא לתהליך פיסיקלי של מעבר זמן. איינשטיין עצמו כתב במכתב תנחומים למשפחת חברו שנפטר: "לנו, המאמינים בפיסיקה, ההבחנה בין עבר הווה ועתיד אינה יותר מאשליה מתמדיה בעיקשותה".

הסובייקטיביות של סדר המאורעות עשויה להיראות מ־רידה במיוחד כאשר סיבתיות נלקחת בחשבון. נחזור, למשל, לפיצוץ בצדק ולאסטרונום. האסטרונום חישב שעברו כ-45 דקות מרגע הפיצוץ עד שתמונת הפיצוץ נקלטה בטלסקופ שלו. זה היה יכול להיות מטריד ביותר, אילו לפי צופים אחרים תמונת הפיצוץ נקלטה בטלסקופ עוד לפני רגע הפיצוץ – הרי הפיצוץ הוא הסיבה להופעת התמונה! תורת היחסות, מסתבר, לא מאפשרת היפוך סדר הזמנים במקרה כזה. כל הצופים יסכימו שהפיצוץ אירע לפני הופעת התמונה בט־לסקופ, משום שבמקרה זה יש קשר סיבתי בין המאורעות. איך זה עובד? בתורת היחסות, מהירות האור היא המהירות המכסימלית בה יכולה לעבור השפעה מנקודה אחת לאחרת. האור לא יכול להספיק לעבור בין מאורע הפיצוץ למאורע שתיית הקפה, ולכן לא יתכן קשר סיבתי בין המאורעות, והסדר שלהם יהיה שונה עבור צופים שונים. לעומת זאת, בגלל שאור מהפיצוץ מגיע לכדור הארץ לפני הופעת התמונה בטלסקופ, כל הצופים יסכימו על סדר המאורעות.

תורת היחסות מציעה לנו להסתכל על היקום כעל תמונה גדולה, הכוללת את כל המאורעות שהתרחשו ושתרחשו בכל מקום במרחב ובכל הזמנים (ב'מרחב-זמן'). אפשר אולי למצוא בתמונה כיוונים של 'עבר' ו'עתיד', אך לא רגע של הווה. צופים הנעים במהירויות שונות לא יסכימו על סדר



ההתרחשות של מאורעות שונים, באופן שניתן להמשיל לחר־סר ההסכמה בין המתבוננים בתמונה מכיוונים שונים בשאלה מה נמצא בצד שמאל ומה בצד ימין. מאידך, יש בתמונה גם סדר אובייקטיבי מוסכם על כל הצופים: אלו הם הקשרים הסיבתיים בין ה'נקודות' שבתמונה.

תורת הקוונטים

תורת הקוונטים, שראשיתה בעבודותיהם של ארווין שר־דינגר וורנר הייזנברג מ-1926, היא התיאוריה הפיסיקלית העוסקת בחלקיקים מיקרוסקופיים, ובעיקר בתופעות המת־רחשות בגדלים של מיליונית הסנטימטר ומטה. בבסיסה של התורה, שיטה מתמטית המאפשרת לחשב ולנבא תוצאות ניסויים, שהוכיחה עצמה כדיוק חסר-תקדים.

לעולם הקוונטי תכונה מעניינת, לפיה חֶזְרָה שוב ושוב על ניסויים המוכנים באופן זהה נותנת תוצאות שונות בכל פעם. תורת הקוונטים מאפשרת לחשב את ההסתברויות לתוצאות שונות, אך בדרך-כלל לא את התוצאה הפרטנית בניסוי מסוים. אפשר, למשל, לשלוח קרן של חלקיקים זהים שיפגעו במכשול ויתפזרו לכיוונים שונים. התורה מאפשרת לחשב במדויק מה יהיה אחוז החלקיקים שיתפזרו בכל כיוון. עבור חלקיק בודד, התורה תאפשר לחשב את ההסתברויות לפיזור בכיוונים שונים, אך לא לדעת בוודאות מה יעלה בגורלו של החלקיק.

מנקודת מבטו של מי שמחפש סיבתיות, יש כאן משהו מת־סכל. הניסויים המבוצעים באוסף גדול של חלקיקים, והאופן בו מחושבות ההסתברויות, מקשים על תיאור של תהליך סיבתי המתאים למקרה מסוים. נראה שלמרות הצלחת התיאוריה, הסיפור האמיתי על המתרחש בעולם המיקרוסקופי, נותר נסתר ובלתי מושג מאחורי הקלעים של הטכניקה המתמטית. עם השנים התרבו העדויות כי מקור החידתיות של עולם החלקיקים הקוונטיים אינו נעוץ בקושי טכני, המונע מאיתנו לעקוב אחר החלקיקים באופן ישיר. מקורה הוא בכך שה־עולם הקוונטי מאוכלס בעצמים הנראים ומתנהגים אחרת מכל דבר שאנחנו מכירים מחיי היום יום. למעשה, התנהגות החלקיקים מוזרה גם ביחס למחזריות שפיסיקאים מכירים מתורות פיסיקליות אחרות. דוגמה מעניינת עלתה ממחקר של הפיסיקאי ג'ון פֶּל שפורסם ב-1976 (כהמשך למחקר ידוע

יותר שלו מ-1964), אשר מסקנתו מעמידה בסימן שאלה את האפשרות שהשפעות סיבתיות מהסוג שמתירה תורת היח־סות, מתאימות לתאר את חוקי הטבע היסודיים.

בל תיאר מצב בו התוצאות בסדרת ניסויים הנערכת במ־קום מסוים נראות אקראיות, אך למרות זאת יש להן התאמה גבוהה (קורלציה) עם התוצאות של סדרת ניסויים אחרת המ־תבצעת במקום מרוחק. התאמה כזו יכולה עקרונית להתקיים גם בלי השפעה ישירה של סדרת ניסויים אחת על האחרת, בזכות גורם משותף בעברן של המדידות. בל הראה שבתורת הקוונטים גורם כזה אינו מספיק כדי להסביר את ההתאמה בין התוצאות. התאמה זו אינה יכולה לעלות בקנה אחד עם ההנחה שההסתברות לקבל תוצאה מסוימת במדידה, תלויה רק בעבר הסיבתי של מאורע המדידה – כלומר, רק באותם המאורעות שתורת היחסות מאפשרת להם להשפיע על המ־דידה במהירות האור, לכל היותר.

כדי להבין עד כמה מצב זה מוזר, דְמיינו צי של מאה רכ־בים הנוסעים ברחבי הארץ כאשר בכל שעה מחושב המרחק הממוצע של כלל הרכבים מהמשרד הראשי של החברה. אם מרחק ממוצע זה גדל ב-130 ק"מ תוך שעה אחת, ניתן להסיק שלא יתכן שכל הרכבים נסעו כחוק כל הזמן. למרות זאת, לא ניתן לדעת מתי, איפה או על-ידי מי בוצעו עבירות תנועה. גם תוצאות הניסויים בחלקיקים קוונטיים אינם מספקים לנו עדות ישירה על מקרה מסוים, בו קיימת השפעה מהירה מהאור הסותרת את תורת היחסות, אך אם נגביל עצמנו להשפעות סיבתיות יחסותיות – נראה שלא נוכל להסביר את ההתאמות בין תוצאות הניסויים המרוחקים.

אחת הדרכים המעניינות שהוצעו על-ידי פיסיקאים ופילוסופים של הפיסיקה להסביר תוצאות כאלו, היא על-ידי סיבתיות הפועלת אחורה בזמן. על-פי גישה זו, מכשיר המדידה משפיע על מצב החלקיקים לפני פעולת המדידה. בגישה הסטנדרטית לתורת הקוונטים, כל ניסוי משפיע על המערכת הנמדדת בדרך שלא ניתן לחזות מראש. בגישה הכר־ללת סיבתיות אחורה בזמן – הניסוי משפיע לא רק על עתיד המערכת, אלא גם על עברה. התורה בנויה כך שהשפעה זו אינה מאפשרת לשלוח מסרים אל העבר, בגלל שהאפשרות למדוד השפעה זו מוגבלת. אחת הדרכים המרכזיות להבנת תורת הקוונטים באופן זה הוצעה על-ידי הפיסיקאי הישראלי יקיר אהרנוב מאוניברסיטת ת"א.

השפעה על העבר עשויה להיראות לנו מוזרה ביותר, משום שאנו רגילים לחשוב על הזמן כתהליך המתקדם מה־עבר לעתיד. אך השפעה כזו היא בהחלט ברוח תפיסת ה'יקום כגוש' לפיה העבר, ההווה והעתיד קיימים וממשיים באותה המידה. נראה שתפיסה זו משתלבת באופן טבעי עם תיאור הזמן בתורות הפיסיקליות. היא עדיין שנויה במחלוקת בקרב העוסקים בנושא, מול הגישה הנגדית לפיה קיים רגע הווה אובייקטיבי ותהליך פיסיקלי של מעבר זמן.

למרות השינויים המהפכניים בתפיסת מושג הזמן שמ־ציעה לנו הפיסיקה, היא עדיין מתארת יקום שיש בו חוסר סימטריה בכך שהעבר נראה שונה מהעתיד. גם תפיסת הסי־בתיות מבוססת על חוסר סימטריה – כחץ המכוון מהסיבה אל התוצאה. הפיסיקה החדשה מעלה את האפשרות לפיה למרות שאנחנו רגילים לחשוב על כיוון הזמן ועל כיוון ההש־פעה הסיבתית כעל אותו כיוון – הם לפעמים יכולים דווקא להצביע בכיוונים מנוגדים.

^[1] גיא חצרוני הוא חבר המחלקה למדעי הטבע והחיים