



אהרונוב. "אני יכול לעשות את ההכלה מחיאוריית הקונטנס ומחר שלעולם יש תכלית מסוימת ולא רק מצב היסטורי"



בעיה ממוקדת יותר, הנוגעת לקריסת פונקציית הגלגל: עצם הת' כוננת באלקטרון משנה את התנהגותו, וכל מרידה שלו משנה את מסלולו. זו בעיה אקוטית של הפיזיקה המודרנית, ועד כה אף אחד לא הצליח להתגבר עליה. אף אחד, חוץ מאהרונוב. שאתה כמעט לא מפריע לה כלל, אתה עדיין יכול לקבל עליה אינפורמציה, הוא מסביר איך זה עובד. "כשאתה מפעיל בדיקה כזאת על מספר גדול של מערכות, אתה כבר מקבל הרבה אינפורמציה. קראתי למדידות האלה מדידות חלשות ולתוצאות שלהן ערכים חלשים, אבל מתברר שהערכים נותנים הרבה מאוד דברים מפתיעים."

מה למשל?

"למשל, הסתה של אלומת אור העוברת דרך חלקיקי חומר בסיסיים ופוגעת בלוח צילום. עד היום לא היה ניתן לראות את הסטייה שמבצע פוטון אור כתוצאה מהפגיעה באטום, מאחר שמדובר בערכים מזעריים של אנגסטרים (10 בחזקת 8- ס"מ). בעזרת המדידות החלשות שהמצאתי, כשעושים אותן גם בעבר ובעתיד, ניתן לראות באופן משמעותי את הסטייה – ונצטרף פה יכולת הגברה משמעותית חדשה. זה פותח תחום שלם של מדידות שעד כה לא ניתן היה לראות בעזרת שום כלי". ואיך בפועל עושים ניסויים וחישובים של עבר ועתיד? "הצעתי שמצב החלקיק ברוחה יהיה ניתן לתיאור על ידי שתי פונקציית גל", הסביר אהרונוב בראיון לכתב העת "אדיסאון", "אתה שורמז מקריסת פונקציית הגל האחרונה בעבר אל הווה, והשנייה שזומת אחורה בזמן מהקריסה העתידית. התיאור הזה שונה באופן דרמטי, אף שהוא נותן בריוק את אותם ניבויים. הוא חזוב ומשמעותי משום שהוא פותח אפשרויות חדשות,



**חחשוב על חחול צשייר ב'אליס בארץ הפלאות'. איך יכול להיות חיוך בלי חחול? גיליתי את המקבילה הפיזיקלית לחופשה. במדידות חלשות על מצבי עתיד-הווה עבר הצלחתי ליצור מצב שספין של אלקטרון (הסיבוב של אלקטרון סביב עצמו, היוצר שדה אלקטרומגנטי) נמצא בקופסה אחת – בעוד האלקטרון עצמו נמצא באחרת"**

**"אי אפשר לדבר על זרימת זמן בפייזקה. אבל לנו יש תחושה חזקה שיש הווה משמעותי שזורם להווה משמעותי חדש. התיאוריה החדשה יכולה להסביר את הזרימה הזאת. היא גם יכולה להסביר את האינטואיציה: אם יש משהו בעתיד שמשפיע על ההחלטות שלנו בהווה, אולי הקשר הזה בא לידי ביטוי אצלנו בתחושת בטן ולא בידיעה בראש"**

מוגשים חרשים, שאלות חרושות וניסיונות חרשים המאפשרים הסתכלות אינטואיטיבית טובה יותר".

לגישה החדשנית הואת קורא אהרונוב "אפקט הגל הכפול", ובשילוב המדידות החלשות שהוצגו כדי לחזק אתה, הוא אומר, "היא פתרת זמון פרדוקסים של תורת הקוונטים שעד היום לא ידעו לפתור, כמו נסיעה בזמן". הבשורה, שנולדה לפני כ-15 שנה, היא התקבלה כקלות, ועדיין עשה את דרכה אל לב הפיזיקה המודרנית. "בתחלה היתה הרבה סקפטיזם", מודה אהרונוב, "אבל ככל שאני החוקרים במעבדות פיתחנו את התיאוריה הזו, כך הן זכו ליותר הכרה. בשנים האחרונות, כשהחל השלב הניסויי שהוכיח את היתכנותה, היא זוכה לתה' נעניינות רבה ברובי העולם. ארבע מעבדות – בארצות הברית, קנדה, אוסטרליה ויפן – עובדות כיום על הנושא של מדידות חלשות ומנסות לפתח אותו, בעיקר משום שמתקבלות תוצאות כל כך מעניינות בעזרת המדידות האלו".

## 4

**איך יכול להיות חיוך בלי חחול?**

הנה תוצאה מעניינת אחת שהתקבלה בעזרת המדידות. "חחשוב על חחול צשייר ב'אליס בארץ הפלאות'. השאלה

את הבשורה הוא מנסה כעת להפיץ, כדי להפוך את הפיזיקה החדשה, את הפיזיקה הבאה, לא רק למורכבת יותר ומ' דויקת יותר, חזוקת נושאים כמו מודעות, מותחן, אלא גם לאינטואיטיבית יותר. על הדרך, המדידות החלשות שלו – שכאמור יוצרות יכולת הגברה חדשה – גם עשויות ליצור מהפכת מועזר והגדלה שעליה אפילו לא העזנו לחלום.

## 6

**מהו החופש, בעידן הזמן החדש?**

המשחק הראשון שאהרונוב עושה במשמעויות הרחבות של הפיזיקה הקיימת נוגע לחופש הבחירה, אותו חופש שהיטלטל בין הרטרמיניזם ברוח ניוטון לאקראיות הקוונטית. לאן הגל הכפול שלו ייקח את חופש הבחירה האנושי עכשיו? הוא מת' חזל במדידה מדעית: "זה מוכיח לי את היספור של הפיזיקה שנמצא אשם ברצח, ולפני גוד ריגו הוא פונה אל השופט ואומר לו: 'אדוני השופט, אתה הרי יודע שניוטון לימד אותנו שאנו עשויים מאטומים והם אלה הקובעים מה נעשה, מכיוון שה' תנהגותם קבועה ומחלטת. לכן לא אני אשם ברצח, כי פשוט לא היתה לי אפשרות בחירה'. השופט מהרהר ברברי הנאשם ואומר: 'כן, גם אני עשוי מאטומים, ולכן אני לי ברירה אלא לגזור עליו עונש מאסר עולם'.

"אם אתה כאדם מחליט בין שתי בחירות באופן הגיוני, הרי אין כאן חופש, כי מי שמכיר אותך היטב יודע לחזות את הפ' עולות שלך. לכן נשאר לנו רק חופש אקראי, מהוסג של הטלת מטבע – אלא שזה לא חופש מעניין או מוחתי. אתי מאז וזה עולם העסיקה העצמי הוא: הרי' אנתנו מרגישים שיש לנו חופש מוחתי, ולא מהוסג הטרייוריאל, אז איפה הוא? "לאחר מחשבה ממושכת החלטתי שאולי הבעיה נעוצה בצורה שבה אנתנו תופסים את הזמן. אנתנו קיימים בהווה, העבר כבר איננו נאחזו צריכים להחליט על משהו שישפיע על העתיד או ייצור אותו. אבל מה אם זה לא כך? אמרתי: נניח שיש פיזיקה אחרת, כזו שבה הווהה נקבע על רק בעבר אלא גם בעתיד. מה אם העתיד הוא זה שמשפיע על ההחלטות שלנו בהווה, בדיוק כפי שהעבר עושה זאת? אם דבר כזה נכון, אזי כל היסוח של מהו חופש ומתי החלטה יצטרך להשתנות".

**ועכשיו, נמוק בתוך המח' קך, אתה יודע מתי החלטה? מוצאת את החופש? "אני עוד מחפש אותו. כל התיאוריה החדשה נובעת מה' סתכלות חדשה על הזמן. מרגע שנתפח פיזיקה מסתכלת אחרת על הזמן, נוכל לבצע את המהפכה הבאה במדע. אני כבר עובד על הניסוח הראשון, כי פיזיקה כזו,**

אבל רק כשננסח אותה במלואה נוכל להבין מהי החלטה ומהו חופש אמיתי. התיאוריה הזו מאפשרת להסביר את התחושות שלנו ככני אדם, שמרגישים שיש רצון חופשי, בר כבר עם חוקי הפיזיקה. אבל כל מה שעשיתי עד עכשיו הוא התחלה, כיוון, הוכחתי שיש דרך חדשה להסתכל על הזמן, אבל זו החלטת לא התוצאה הסופית. לא אמרתי שפתרתי את שאלת החופש, אבל הצבעתי על כך שיש אפשרות לפתור את הפרדוקס ההוא של החופש המתחתי".

## 7

**מדע שכולל גם את המודעות**

זה לא נגמר בחופש הבחירה. "עולה גם אם התחושה שיש לנו הכרה במשמעות של המודעות", אומר אהרונוב ומאיר: פער נוסף במפגש המרגע בין הפיזיקה לפילוסופיה. "במודעות הכוונה היא שיש לנו היכולת להיות מודעים לעצמנו. הפיזיקה מכירה רק במקרים של צופה ונצפה. אם אתה רוצה לראות משהו בעצמך אתה צריך לחלק את עצמך לשני חלקים כאלה. אלא שאם אתה רוצה לצפות בצופה, אתה מגיע מהר מאוד לאינסוף צופים. על פי ההיגיון הזה,

המוח שלנו, שמאפשר מודעות עצמית, צריך להיות המע' רכת הכי מורכבת שיש בטבע.

"הפיזיקה צריכה להתאים את עצמה למוח הזה ולחוויה האנושית, שהרי מרובר במערכות מורכבות לאין שיעור מאלה של אטומים, ולכן הן גם מערכות שמסוגלות לראות ולחוש תמונה רחבה יותר מוז שהפיזיקה מסוגלת כיום לה' סביר. אנתנו צריכים לעבור לעבודה על מערכות מורכבות לאין שיעור כדי להבין את טבעו האמיתי של היקום. כרגע אנתנו עובדים על חלקיקים אלמנטריים – ולכן רואים רק חלק מהמערכת הפיזיקלית. העבודה שלי' פותחת, לטעמי, את הדלת למעבר למערכות מורכבות יותר. יש לא מעט מקומות בהם המודעות האנושית היא מערכת מורכבת באי' ההתאמות הללו כדי לחפש כיוון למהפכת הפיזיקה הבאה, שתאפשר לנו להבין את עצמנו יותר טוב וגם להסביר את התכונות האמיתיות שלנו".

## 8

**האם בקצה העתיד יש תכלית שתחכיבה הכל?**

"מלבד תחושת הרצון החופשי יש עוד משהו שאנתנו ככני אדם מרגישים היטב והפיזיקה לא יכולה להסביר – הרעיון של זרימת זמן. שיש כרגע מסוים הווה, וברגע הבא יש הווה חדש וההווה הקודם נהפך לעבר. הפיזיקה טוענת שזו תחושה פסי' כולגית שאין לה מקום במדע. להגדרתה, הזמן הוא רצף של מצבים שאינם מחוברים או זורמים מכיוון אחד לאחד. אי אפשר ליכר על זרימת זמן בפייזקה. אבל לנו יש תחושה חזקה שיש הווה משמעותי שזורם להווה משמעותי חדש. התיאוריה החדשה יכולה להסביר זאת, כי העתיד זורם חזרה לעבר ומשפיע על הווה. היא גם יכולה להסביר את העובדה שאנתנו משתמשים באינטואיציה: אם יש משהו בעתיד שהמשפיע על קבלת החלח' טוח שלנו בהווה, אולי הקשר הסבתי הזה בא לידי ביטוי אצלנו בתחושת ולא בידיעה בראש, כמסגרת זרימת הזמן".

**בעצם עולה מתיאוריית הגל הכפול שאי' שם בעתיד יש, אולי, תכלית, מטרה, שוטרי שמכוון את התנועה.**

"אני יכול לעשות הכללה מתיאוריית הקוונטים ולומר של' עולם יש תכלית מסוימת ולא רק מצב היסטורי. כאילו הוא שואף לעבר עתיד מסוים, ליעדו. שאיפה של כל המערכת, של העולם או היקום, להגיע לאיזה מצב סופי. הרעיון אינו חדש, היו כבר פילוסופים שחשבו שאי אפשר להסביר את כל מה שנמצא בטבע בעזרת חוקי הטבע ומצב התחלתו, אלא צריך להוסיף מצב שהטבע שואף אליו. מרגע שניסחתי את זה לתוך הפיזיקה, יש מקום לדבר על זה ולכן יש אפשרות שזו קיים. "קח למשל את השאיפה של מערכות להגיע למקום מסוים, ושלב את זה עם אנשי מדע שטוענים שלא חלף מספיק זמן מהיווצרות כדור הארץ כדי שצורות חיים ת' פתחו בו אבולוציונית לפי התורה של דרווין. כשחושבים על זה, הברייה הטבעית מבקשת הזמן תנאים והזמן צעדים כדי שתהיה התקדמות אבולוציונית. נניח שנה אחד נגלה שאכן לא היה מספיק זמן להיווצרות החיים, אז נוכל לומר נבקעת רק לפי תנאי התחלה אלא גם על פי ייעוד, מצב סופי שמכתיב את העובדה שהיו חיים בפרק זמן קצר יותר מזה הנדרש להיווצרותם בתיאוריה".

## 9

**לחיות מערכת מורכבת**

**אז אפשר לומר שלא רתנגולת במקרה למחקר של פיזיקת קוונטים אלא דרכונת לשם?**

"בהחלט אפשר לומר את זה, בעיקר מתוך דתבוננת בפני' קציית הגל העתידית שלי, מהמדירה העתידית שלי. כשלמאתי בטכניון אחד המורים היה נתן רזון, פיזיקאי גדול שעבד עם אני' שטיין. בסיום הקורס, כשנגשתי לדבר איתו על עבודת הגמר שלי, שהי' רצינית לעוסק בבעיות טיור, הוא התנגד בתוקף ואמר לי שרק קנים מבורז צריכים לעוסק בזה. רגע לפני שעזבתי את הלימודים, נגלה ההתעקשות הכפולה של שטינו, הגיע לטכניון וריודד בהם. כשהוא שמע את הדעיונות שלי הוא אמר 'יפ', בוא נצטמו כשבו מאמר'. והשאר, כמו שאמרים, הוא היסטוריה".

**50 שנה אתה מתעסק עם חלקיקים. אם יכולת בהגלול הבא לחיות חלקיק, איזה חיות?**  
"שום חלקיק. אני תמיד ארצה להיות מערכת מורכבת".



**מתבונן**  
על העולם החדש

## שיזף רפאלי

**מתמטיקאי הוא מכונה שתכליתה הפיכת קפה לאלגוריתמים, הגדיר פעם המתמטיקאי פאול ארדוש. מתמטיקאים הם לרוב דמויות מתבודדות, ושתיית הקפה חכיבה גם על הסוציומטים שביניהם. האם הקשר בין קפה לחברה נשמר גם בעידן הגלובליזציה?**

מחקרו המעמיק (שלא לומר מהביל) מה' פרסמות בספר חדש: Everything but the Coffee: Learning about America from Starbucks.

אחד מטעיניו המעניינים ביותר של סיימון הוא שבתי הקפה ניסו לג' רום להפרדה וריבוד הרבה יותר מאשר לייטר, נמצא שמחירו עבר מומן את מחירי הקפה. האם הצלחתה המסחרית של הרשת הקשורה להתמכרות לקפאין, או שזוהו קפה לצורך טסטוס? האם היא קשורה לעיצוב בתי הקפה ולמיתוג המצמדי לסטארבקס המייצגים תחכום ואיננו?

התופעה הצרכנית של סטארבקס מייצגת מיתוג ומכירה ביוקר של מוצר שבאופן מסורתי היה זול וזקוק. אם נת' למימי הנמל כאקט של מרד. הקפה תפס את האימפריאליזם הבריטי, נזרק כבוו' למימי הנמל כאקט של מרד. הקפה תפס את המקום, ובית הקפה שפעם היה סממן אירופי, נעשה פופולרי גם באמריקה וכי מקומות המושפעים מהתרבות האמרי' קאית. הרשת הגלובלית של סטארבקס נהפכה למוכר בכל העולם. היא נפרסה ב-50 מדינות בקירוב עם יותר מ-16 אלף סניפים ויותר מ-100 אלף עובדים, שמשרתים 50 מיליון לקוחות בשבוע, יש ערים שבהן יש סניף סטארבקס כמעט בכל פינת רחוב, והולגו הירוק מוכר בכל היבשות.

מוכתם או מוקצף, ועוד חידושים לשוניים המייצגים תחכום ואיננו.

התופעה הצרכנית של סטארבקס מייצגת מיתוג ומכירה ביוקר של מוצר שבאופן מסורתי היה זול וזקוק. אם נת' למימי הנמל כאקט של מרד. הקפה תפס את המקום, ובית הקפה שפעם היה סממן אירופי, נעשה פופולרי גם באמריקה וכי מקומות המושפעים מהתרבות האמרי' קאית. הרשת הגלובלית של סטארבקס נהפכה למוכר בכל העולם. היא נפרסה ב-50 מדינות בקירוב עם יותר מ-16 אלף סניפים ויותר מ-100 אלף עובדים, שמשרתים 50 מיליון לקוחות בשבוע, יש ערים שבהן יש סניף סטארבקס כמעט בכל פינת רחוב, והולגו הירוק מוכר בכל היבשות.

מוכתם או מוקצף, ועוד חידושים לשוניים המייצגים תחכום ואיננו.

התופעה הצרכנית של סטארבקס מייצגת מיתוג ומכירה ביוקר של מוצר שבאופן מסורתי היה זול וזקוק. אם נת' למימי הנמל כאקט של מרד. הקפה תפס את המקום, ובית הקפה שפעם היה סממן אירופי, נעשה פופולרי גם באמריקה וכי מקומות המושפעים מהתרבות האמרי' קאית. הרשת הגלובלית של סטארבקס נהפכה למוכר בכל העולם. היא נפרסה ב-50 מדינות בקירוב עם יותר מ-16 אלף סניפים ויותר מ-100 אלף עובדים, שמשרתים 50 מיליון לקוחות בשבוע, יש ערים שבהן יש סניף סטארבקס כמעט בכל פינת רחוב, והולגו הירוק מוכר בכל היבשות.

מוכתם או מוקצף, ועוד חידושים לשוניים המייצגים תחכום ואיננו.

התופעה הצרכנית של סטארבקס מייצגת מיתוג ומכירה ביוקר של מוצר שבאופן מסורתי היה זול וזקוק. אם נת' למימי הנמל כאקט של מרד. הקפה תפס את המקום, ובית הקפה שפעם היה סממן אירופי, נעשה פופולרי גם באמריקה וכי מקומות המושפעים מהתרבות האמרי' קאית. הרשת הגלובלית של סטארבקס נהפכה למוכר בכל העולם. היא נפרסה ב-50 מדינות בקירוב עם יותר מ-16 אלף סניפים ויותר מ-100 אלף עובדים, שמשרתים 50 מיליון לקוחות בשבוע, יש ערים שבהן יש סניף סטארבקס כמעט בכל פינת רחוב, והולגו הירוק מוכר בכל היבשות.

מוכתם או מוקצף, ועוד חידושים לשוניים המייצגים תחכום ואיננו.

האם בתי הקפה המודרניים מספקים את הסחורה המסורתית הזאת של "מקום שלישי" מה הרמיון וההמשכיות בין סניפי סטארבקס, עם החיבור לאינטרנט ולחוט, לבין בתי הקפה של פעם שהיו מוסד חברתי, מקום מפגש של השכר' נה? איפה כסית או קליפורניה של פעם, אאיפה סטארבקס של היום?

**ההיסטוריון האמריקאי**

בדיינט סיימון שם לעצמו למטרה לח' קוד את בתי הקפה החדשים, ובעיקר את אלה של רשת סטארבקס, כדי לקבוע מה הפקדים בשיח הציבורי ובאינטראקציה חברתית. הוא הקדיש שנים לתצפית משתפת, שבמהלכה התנחל במוש' בים הנחיים של מאות מסניפי הרשת, כרה אלון לשיוות סביבו, רשם לעצמו את הרכב המסקאות שהזמנו, והשווה בין הלקוחות שנשארים בסניפים לאלה שלוקחים את מסקאותיהם עמם. תוצאות

**זהו פרדוקס** לא קטן, לנוכח

טעמו של הקפה האמריקאי הממוצע (ויש אומרים – למטה מממוצע). שנים רבות היה הקפה האמריקאי לשנינה ולקלס, עלבון לז'אנר ועוד תירוץ לאירופים להניד ראש ומולול לעבר האמריקאים. אלא שלאחרונה הגיע גם הקפה היוקר' תי, היקר והפולצני לחופי צפון אמריקה. כוסות קפה נמכרות בשלושה, המישה ואפילו שבעה דולרים, ולא רק במקומות שיש בהם יקרים אלא אפילו בטייקאוי ככוסות מקרטון, עד שמחירה של כוס קפה בארצות הברית נהפך למרד כלכי' לי שרק קנים מבורז צריכים לעוסק בזה. רגע לפני שעזבתי את הלימודים, נגלה ההתעקשות הכפולה של שטינו, הגיע לטכניון וריודד בהם. כשהוא שמע את הדעיונות שלי הוא אמר 'יפ', בוא נצטמו כשבו מאמר'. והשאר, כמו שאמרים, הוא היסטוריה".

50 שנה אתה מתעסק עם חלקיקים. אם יכולת בהגלול הבא לחיות חלקיק, איזה חיות?  
"שום חלקיק. אני תמיד ארצה להיות מערכת מורכבת".