



## שאלות פתוחות בפיסיקה\*

יקיר שושני, בית הספר הגבוה להנדסה ולעיצוב ע"ש שנקר, רמת-גן

להסביר באופן כמותי את תלות אנרגיית הקרינה באורך הגל הנפלט עלו בתוהו. ולא רק זאת, אלא שהתורות הפיסיקליות הקלאסיות הובילו לסתירה לאחד מחוקי הטבע הבסיסיים ביותר - חוק שימור האנרגיה. כידוע, היה זה פלאנק שחילץ את הפיסיקה ממשבר זה על-ידי השערתו המהפכנית שהאנרגיה האצורה בגלי האור אינה רציפה, ולכל אורך גל קיימת יחידת אנרגיה בסיסית שאינה ניתנת לחלוקה. בעזרת השערה זו ניתן היה להסביר באופן מלא לא רק את קרינת הגוף השחור אלא גם תופעות אחרות כמו האפקט הפוטו-אלקטרי, שהוסבר על ידי אינשטיין. השערה זו חוללה את המהפכה הפיסיקלית שהולידה את תורת הקוונטים. הסדק השני בבסיסה של הפיסיקה הקלאסית נפתח כאשר מייקלסון ומורלי (Michelson and Morley) גילו בניסויים המפורסם שכדור הארץ אינו נע ביחס לאתר. כידוע, תוצאה שלילית זו מצאה את הסברה המלא רק במסגרת תורת היחסות הפרטית שפיתח אינשטיין ב-1905. מצב עניינים זה מעורר את השאלה: האם גם כיום צפויים אנו למהפיכות פיסיקליות נוספות? האם עדיין קיימות שאלות פתוחות שאין ביכולת התיאוריות הקיימות לענות עליהן באופן משיביע רצון? שאלות אלו מעוררות את הצורך להבהיר מהי "שאלה פתוחה" בפיסיקה. אני סבור שלדיון בנושא זה ישנן השלכות חשובות הנוגעות להוראת הפיסיקה. אגע בהן בקיצור בקטע שיחתום את דברי.

ניתן לחלק את השאלות בהן עוסקים הפיסיקאים למספר קבוצות.

**הקבוצה הראשונה** כוללת את השאלות הנפוצות הקשורות לאישוש או להפרכה של השערות או תיאוריות קיימות. על-פי גישתם של פופר<sup>1</sup> וקמפבל (Popper and Campbell), קיימת מעין הקבלה בין התפתחות הידע המדעי להתפתחות בעלי החיים כאשר העיקרון המנחה הוא זה של דרווין - "המתאים ביותר שורד" (Survival of the fittest). על פי תיאוריה זו, המכונה לעיתים ה"אפיסטמולוגיה האבולוציונית", קיימת מעין "תחרות" בין תיאוריות מדעיות,

ראשית ברצוני להודות למפקח על הוראת הפיסיקה, מר דוד סלע, שהעניק לי את ההזדמנות לשתף אתכם במחשבותי בקשר לשאלות העומדות ביסודה של הפיסיקה. נקודת זמן טובה להתחלת הדיון בשאלות אלה היא סוף המאה ה-19. בתקופה זו היו לפיסיקאים סיבות טובות להיות מרוצים מעצמם. אחרי כ-400 שנה של פריחת המדעים הניסיוניים הצליחה הפיסיקה להסביר אינספור תופעות ארציות ושמימיות. בעזרת המכניקה של ניוטון, ששוכללה על ידי לגרנז' (Lagrange), המילטון (Hamilton) ואחרים, ניתן היה להסביר תנועות מסובכות כמו אלו של הסביבון, המטוטלת, וכוכבי הלכת. אמונת הפיסיקאים במכניקה היתה כל כך מוצקה שכאשר ב-1846 התגלו אי התאמות בין המסלול המחושב של צדק והמסלול הנצפה שלו, ניבאו אדמס (Adams) ולוריייה (Lavarrier), על סמך חוקי המכניקה, את קיומו של כוכב לכת נוסף שהיווה לדעתם את הגורם לסטיות. הם לא העלו כלל על הדעת שיש איזה שהוא דופי במכניקה. ואכן מספר שנים לאחר ניבוי זה התגלה נפטון. הצלחות מרשימות נחלה גם התורה האלקטרומגנטית שהגיעה לשיא תפארתה עם פרסומן של משוואות מקסוול שניבאו את קיומם של הגלים האלקטרומגנטיים שהתגלו (ב-1887) זמן קצר לאחר ניבויים על ידי הרץ. לא יפלא איפוא שאחד מהמדענים הבולטים בסוף המאה ה-19, הלורד קלווין, טען שלא נשארו שאלות יסודיות בלתי פתורות בפיסיקה. אמנם הוא הכיר מספר תופעות שהפיסיקה בזמנו לא יכלה להסביר, למשל, תנועת הפרצסיה של הפריהליון של כוכב חמה, או החוק המבטא את תלות קיבול החום הסגולי של מוצקים בטמפרטורה, בייחוד בטמפרטורות נמוכות, אך הוא סבר ששאלות אלו תבואנה על פתרונן עם שכלול התיאוריות הפיסיקליות שהיו ידועות בזמנו. אולם מספר עשורים לאחר מכן הסתבר ששאלות אלו יכלו להיפתר אך ורק במסגרת שתי התורות המהפכניות החדשות שפותחו בתחילת המאה ה-20.

הסדקים הראשונים באמונה בכוח ההסבר והניבוי של הפיסיקה, ניבעו בשלהי המאה ה-19 כתוצאה מחקר שתי תופעות. התופעה האחת היא קרינת גוף שחור. כל הניסיונות

\* הרצאה שניתנה במעמד הסיום של האולימפיאדה בפיסיקה, מרץ 2001.

בייחוד בעת משבר במדע, והתיאוריה המיטיבה להסביר את המציאות, זו שמספר ההפרכות של ניבוייה קטן ביותר, היא השורדת. ב"תחרות" כזו שהתרחשה בתחילת המאה העשרים "ניצחה" תורת היחסות של אינשטיין את המכניקה של ניוטון. כאמור, הכוח המניע של התפתחות זו של התיאוריות הפיסיקליות הן השאלות הקשורות לניבויים אפשריים של תיאוריות אלו, ולתהליך אישושם או הפרכתם. שאלות בולטות מסוג זה, בעשור האחרון, היו קשורות לגילוי ה-Top Quark מחד, ולחיפוש המתמיד אחר חלקיק Higgs שעדיין לא נמצא.

**בקבוצה השניה** נכללות שאלות הקשורות בקונסיסטנטיות של תיאוריות מקובלות שבהן מצוי, להערכתו, פוטנציאל למהפיכות מדעיות. כפי שהזכרתי, הולדתה של תורת הקוונטים נבעה מאי התאמה בין התיאוריה הקלאסית שהוצעה לקרינת גוף שחור לעקרון שימור האנרגיה. מעניין לציין שאי קונסיסטנטיות נוספת שהייתה ידועה בסוף המאה ה-19, הקשורה לכך שמשוואות מקסוול אינן אינווריאנטיות ביחס לטרנספורמציות גלילאו, הניבה תורה מהפכנית רק לאחר הניסוי של מיקלסון ומורלי.

יש פיסיקאים הסבורים שאי-קונסיסטנטיות כזו קיימת כיום בין תורת הקוונטים ותורת היחסות. פרדוקס EPR (ע"ש הפיסיקאים: אינשטיין, פודולסקי ורוזן) מייצג אי-קונסיסטנטיות בין שתי התורות הנזכרות. על פי תורת הקוונטים, כאשר מודדים תכונה של חלקיק (או גל) אי הפרש מחלקיק אחר ב', משנה עצם המדידה את הערכים הנמדדים המיוחסים לחלקיק ב'. כלומר, על פי תורת הקוונטים תיתכן השפעת גומלין **מיידיית** בין חלקיקים המרוחקים זה מזה, בניגוד לתחזית תורת היחסות לפיה השפעה כזו תיתכן רק לאחר פרק זמן משום שמהירות התפשטותה המרבית האפשרית היא מהירות האור. (בהקשר זה מעניין לציין שאפקט EPR אכן אושש במספר ניסויים, למשל בזה של Quil (ב-1993). ואכן, שאלות פתוחות נכבדות בפיסיקה של ימינו קשורות לאיחוד בין תורת הקוונטים לתורת היחסות, העשוי לפתור, בנוסף לבעיות שהוזכרו, בעיות נוספות, הקשורות לחלקיקים היסודיים ביותר ולחומר האפל ביקום.

**קבוצה שלישית** של שאלות פתוחות, יסודיות יותר להערכתו, נוגעת לבסיסן של תיאוריות קיימות. כך למשל, אחת השאלות המרכזיות ביותר בפיסיקה הקלאסית, הייתה: כיצד "עובר" כוח בין 2 גופים שאין ביניהם מגע, כמו הכוח הגרביטציוני בין כדור הארץ לשמש? ניוטון ייחס זאת לאלוהים מתוך אמונתו שהחלל הוא אחד מצורות ההתגלות של האל (המכונה

בעברית "מקום"). הפיסיקאים שאחריו חידשו את רעיון "הפחד מפני הריק" (שמקורו במטפיסיקה היוונית מלפני כ-2500 שנה) והניחו את קיומו של ה"אתר" כתווך שתפקידו להעביר את האינטראקציות. כיום מדובר בפיסיקה על חלקיקים מעבירי כוח (mediators) כמו הפוטונים או הגלואונים (המעבירים את הכוח החזק). מספר רב של שאלות הקשורות לבסיסן של תיאוריות ידועות נותרו עדיין ללא מענה. המודל הסטנדרטי לחלקיקים היסודיים מעורר מספר ניכר של שאלות מסוג זה: למשל, מדוע קיימים דווקא 6 קוורקים המתחלקים ל-3 זוגות ו-6 לפטונים? מדוע יש 3 אינטראקציות יסודיות (להוציא את הגרביטציה)? מהו מקור המסה של החלקיקים היסודיים? בקוסמולוגיה המודרנית השאלות הפתוחות קשורות בעיקר לפרק הזמן הקצרצר שלאחר המפץ הגדול ולתהליך האינפלציה של היקום שבא בעקבותיו. שאלה מעניינת במיוחד בהקשר זה היא האם המרחב ובעיקר הזמן "נוצרו" עם המפץ הגדול? שאלה זו קשורה באופן אמיץ לשאלה אחרת: האם יש בנמצא יקומים אחרים "מקבילים" לשלנו, כפי ששיערו לינדה ואחרים?

השאלות הקשורות לבסיסן של תיאוריות מובילות **לקבוצה הרביעית** של שאלות פתוחות מתחום המטפיסיקה. אלו הן שאלות שהעסיקו בעיקר פילוסופים במשך דורות רבים, ואני סבור שלאור התפתחות המדעים בעבר יש לדיון בהן השלכות מרחיקות לכת להתפתחותה העתידית של הפיסיקה. כך למשל נראה לי שלדיון בשאלות שהעלה קאנט (במאה ה-18) בדבר תפקידם של החלל והזמן בתיאור העולם יש חשיבות מרובה גם כיום. האם החלל והזמן קיימים כשלעצמם, בדומה לקיום חלקיקים, למשל, או שהם אינם אלא "צורות ההסתכלות" של ההכרה, כלומר אמצעים קוגניטיביים המאפשרים את גילוי החוקיות במציאות? גם לשאלה שהעלה הפילוסוף דויד יום (David Hume) השלכות מרחיקות לכת לפיסיקה העכשווית: מהו מקור עקרון הסיבתיות? הרי אין עיקרון זה יכול לנבוע מאיזה שהוא ניסוי או תצפית (המניחים את הסיבתיות) ולא מהלוגיקה (שהאכסיומות שלה אינן כוללות את מושגי החלל והזמן). מדוע אנו מאמינים איפוא בסיבתיות שבלעדיה אין פשר למדעים הנסיוניים? שאלות מטפיסיות אחרות קשורות להנחות "א פריורי" נוספות שאינן ניתנות להיגזר מאיזו שהוא ניסוי או תצפית: מדוע אנו מאמינים שיש מספר ישויות סופי שמהן מורכבים כל החומרים בעולם? כיצד ניתן להבין את הקשר בין ישות בסיסית ותכונותיה? האם הזמן הוא רציף או שיש יחידת זמן זערורית ("כרונון") שאין קטנה ממנה? ואולי השאלה המרכזית ביותר היא: האם

האינטואיטיבי שלהם. לסיכום אני רוצה לגעת בקיצור רב בחשיבות הדיון בשאלות פתוחות בהוראת הפיסיקה. שאלות כאלו מעוררות מטבען סקרנות, שהרי מה שידוע הופך להיות במהרה למשעמם למדי, ועל כן יש בכוחן להגביר את ההנעה של הלומדים. יתרה מזו, אחת המטרות החשובות של הוראת הפיסיקה בבית הספר התיכון, היא לזרוע את הזרע ממנו ינבטו מדעני העתיד. החינוך ליצירתיות, שבהרבה מקרים נובעת משאלות פתוחות, היא אחד מהאופנים הבולטים בהם ניתן להשיג מטרה חשובה זו.

### מראה מקום

1. Popper, Karl R., Sir, Objective Knowledge: An Evolutionary Approach, Oxford, Clarendon Press, 1972.

תהודה

תודעת האדם ניתנת להעמדה על חוקי הפיסיקה או שיש בה משהו "רוחני" שאינו ניתן לתיאור באמצעות חוקים אלו? ואם אכן קיים יסוד כזה, אולי בעתיד ניתן יהיה להרחיב את גבולות התיאוריות הפיסיקליות כך שיכללו אותו? אני מאמין שחקר השאלות המטפיסיות הללו ואחרות, והצעת מודלים לפתרונן, עשויים להאיר באור חדש את יסודות הפיסיקה, לספק פתרונות אפשריים לשאלות הפתוחות משלושת הקבוצות האחרות, ובכך להרחיב את האופק האינטלקטואלי של הפיסיקאי. בספרי "מחשבות על המציאות" (בספריית ה"אוניברסיטה המשודרת" בהוצאת: משרד הביטחון – ההוצאה לאור) הצעתי את ה"אפריוריקה" העוסקת בשאלות שהוזכרו ובאחרות, ועל בסיס הדיון בהן מציעה מודל חדש לישויות הבסיסיות ביותר ביקום ולתכונותיהן, ומנתקת את מושגי החלל והזמן מהמובן

## ארנולד ארונס - Arnold Arons

23.11 1916 - 28.02.2001

ארנולד ארונס הלך לעולמו ב-28 בפברואר השנה, כשהוא בן 84. אחרי שסיים את לימודיו בהנדסה ובכימיה פיסיקלית הקדיש את כל זמנו להוראת הפיסיקה, תחילה ב-Stevens Institute of Technology ואחר כך ב-Amherst College. כבר שם יצא שמעו כמורה מעולה. ב-1968 נתמנה כפרופסור לפיסיקה באוניברסיטת וושינגטון בסיאטל, שם עסק בהוראת סטודנטים ומורים לפיסיקה עד צאתו לגמלאות ב-1982, כאשר נתמנה לפרופסור אמריטוס. תרומתו להוראת הפיסיקה מוכרת לכל העוסקים בתחום זה. ארונס יזם תוכניות מוצלחות ביותר להוראה בבתי ספר תיכוניים כיסודיים. הוא ייחס חשיבות רבה לחינוך בכלל, ולטיפוח אוריינות מדעית בקרב לא-מדעני ס בפרט. במחקריו התייחס בעיקר להיבטים השונים של הוראה, למידה והתפתחות קוגניטיבית. הוא האמין בכל מאודו שהבנת מושגים מדעיים איננה מניפולציה של ביטויים מתמטיים ונוסחאות גרידא ואילו חשיבה איכותית ופנומנולוגית, המכוונת על ידי ההיסטוריה והפילוסופיה של המדע חיוניות להבנה אמיתית של מושגים בפיסיקה. פרופסור ארונס היה, בין היתר, חבר בחברה האמריקאית לפיסיקה ובאגודה האמריקאית של מורי הפיסיקה, וב-1967 שימש כנשיא האגודה, אשר העניקה לו ב-1972 את מדליית ארסטד (Oersted) כאות הוקרה על תרומותיו החשובות להוראת הפיסיקה. בתקופה בה שימש כפרופסור לפיסיקה במכללת אמהרסט, נכתב עליו מאמר גדול בשבועון הידוע TIME. הוא זכה בפרסים ובאותות הוקרה רבים אחרים. ארונס פרסם מאמרים וספרים רבים - רובם ככולם במתודולוגיה של הוראת הפיסיקה. אחד מספריו החשובים שיצא לאור ב-1997 הוא: Teaching Introductory Physics בהוצאת John Wiley & Sons, Inc. במסגרת השתתפותו הפעילה בכנסים רבים השתתף גם בכנס GIREP שהתקיים ברחובות ב-1978.