

שיחה עם פרופ' חיים הררי, ראש המחלקה להוראת המדעים במכון ויצמן



[ ]

- [חרוזים מאת דב בעל מוח קטן מאד](#)
- [מי מורכב ממה](#)
- [יש טרנספורמציה גם מבחינת המסה ?](#)

- [לפני מהפכה חדשה](#)
- [בפיסיקה ?](#)
- [אבל מהו החומר ?](#)
- [אי שם](#)
- [מוכרח להיות סדר](#)
- [האם יודעים כיצד עובר המטען החשמלי מחלקיק אחד לשני ?](#)
- [פרופ' הררי, מדברים על ארבעה כוחות בטבע, מה הם ?](#)
- [מתי אתה מעריך נדע את התמונה הסופית ?](#)

## חרוזים מאת דב בעל מוח קטן מאד

ביום שבת, באור חמה  
 בי משתוממת הנשמה  
 אם נכונה היא השמועה  
 שמה זה מי ומי זה מה.

ביום ראשון, ביום ענן  
 נוקב בי שוב ספק ישן  
 ואנוכי שוקל ודן  
 אם שם זה פה ופה זה כאן.

ברוח קל ביום שני  
 הריני בא אל בית שכני  
 לשאול אותו בבכי ונהי  
 אם זוהי הוא או זהו היא.

ביום שלישי, בשלג צח  
 עת מנצנץ הכפור בסבך  
 הכל רואים — האח, האח, —  
 שכך זה איך ... אך איך זה כך ?

פו הדב

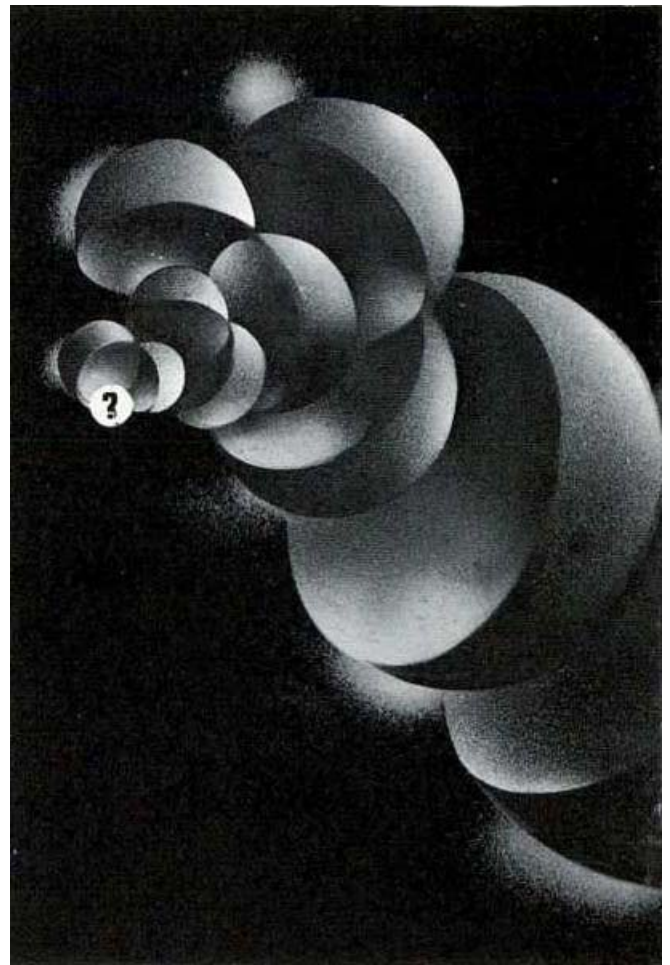
מאת : א. א. מילן

תרגום : י. ישראלית וא. ד. שפירא

הפיסיקה הגרעינית נולדה ב-1911, עם ניסויי המפורסם של לורד ראתרפורד בחלקיקי אלפא, אשר הוכיח כי המטען החיובי של האטום מרוכז בגרעין וכי האלקטרונים אינם משובצים ע"פ כל שטח האטום כצימוקים בעוגה, אלא נעים במסלולים סביב הגרעין.

אך האמנם גילה לורד ראתרפורד את האטומים או שברא אותם ? שואל סר ארתור אדינגטון. באיזו מידה יוצר החוקר את התגלית המדעית בעצם התערבותו בניסוי ? שאלה מוזרה, ועוד מפיו של אחד הפיסיקאים הגדולים בדורו. האיך הפיסיקאים יודעים במה הם עוסקים ? למדע הפיסיקה, אומר אדינגטון, יש רק ידיעה על מבנה וצורת הדברים ועל היחסים ביניהם אך לא על תוכנם. הגדרת האלקטרון כחלקיק, או כגל, אינה מתיחסת לאלקטרון עצמו, אלא לידיעה שלנו עליו.

מהו, אם כן, העולם הממשי ? מהו חומר ? ממה עשוי גופנו ? מהו הכסא שאנו יושבים עליו ? ואקום מושלם כמעט, אומר ארתור קסטלר. שהרי גרעין האטום, המרכז את כל המסה של האטום, תופש שטח של 1:100,000 בלבד משטח האטום.



ומה בדבר שטחו של האלקטרון? ובכן קשה לדבר על שטח של אלקטרון במרחב. ידוע שכאשר אטום של מימן בולע אנרגיה קופץ האלקטרון ממסלולו למסלול רחב יותר, אבל דבר זה מתרחש בלי שהאלקטרון יחצה את המרחב בין שני המסלולים; הוא פשוט נעלם מאחד ומתגלה בשני. מה קורה כאן? אם כל מהירות בטבע סופית, צריכה להתגלות שהות כלשהי בין ההעלמות להתגלות. האם עוסקים האטומים במעשי תעתועים? נראה שלא, אך אפשר שחוקי החומר ברמה תת-אטומית יוצרים תמונת עולם סתמית שאינה נתפשת ע"י חושינו ושכלנו. אומר אדינגטון: אנו מפרקים ומנתחים את העולם הסובב אותנו על פי כללים המוכתבים על ידי המבנה ההכרתי שלנו, וחוקים אלה — שיצרנו בעצמנו — אנו חושפים בטבע ומפענחים אותם.

טיעונו של אדינגטון, כאילו כובש השכל האנושי בטבע רק את מה שהוא עצמו הכניס לתוכו, עומד בניגוד גמור לטענת פיסיקאים אחרים הגורסים, כי התשובות של הפיסיקה כבר רשומות בספר הטבע, וכי כל מה שנדרש מהפיסיקאי לעשות הוא רק לגלות אותם.

האמנם יתכן שאין חוקי טבע זולת אלה שיצרנו? יתכן, אומר אדינגטון, אך הללו אינם רציונליים, ולכן נבצר מאתנו לרדת לסופם. כיצד קורה איפוא, שתמונת העולם הפיסיקלית עולה בקנה אחד עם המבנה האובייקטיבי של המתמטיקה? אה, אומר

לורד אחר, לורד ראסל; הפיסיקה היא מתימטית לא מכיוון שאנו יודעים עליה כל כך הרבה, אלא משום שאנו יודעים עליה כה מעט. ועל כן — רק את התכונות המתימטיות שלה אנו מסוגלים לגלות. והאטום? האטום, אומר הלורד הנכבד, הוא בעצם הקרינה שיוצאת ממנו (ואין טעם להתווכח כיצד יכולה הקרינה לצאת מלא כלום). ולכן החומר הוא נוסחה מוסכמת המתארת מה קורה במקום שהוא איננו.

לאיש מן הצד נשמעים דיבורים אלו כמו שפת סנסקריט. במקום שמושגי החומר יתבהרו וילכו ככל שהפיסיקאים יורדים בסולם החומר וקרבים אל הראשוני והיסודי יותר, הופכים הללו מופשטים יותר ויותר. מה שהיה קודם גוש חומר מוצק מתפרק לדואליזם מביך של חלקיקים וגלים, ההסתברות תופסת את מקום העובדות ואיבודאות עקרונית את הודאות.

פרופ' הררי, מהו חומר? באיזו מידה משקפת מפת החלקיקים את העולם הממשי? והאם חוקי הפיסיקה הם מחוייבי הטבע או מתחייבים ממבנה ההכרה וההגיון שלנו?

פרופ' חיים הררי: דעתי היא, שא-

נחנו יכולים ללמוד על חוקי הטבע רק מתוך הנסיון. אני לא מאמין שהלוגיקה והמחשבה בלבד יכולות לקבוע את חוקי הטבע. בהחלט יתכן, תאורטית, שקיים עולם אחר, שהוא לוגי וקונסיסטנטי עם עצמו ולא מוביל לשום סתירה הגיונית. אבל זה לא העולם שבו אנו חיים. יש אסכולה שלמה, בעיקר של פילוסופים ומתמטיקאים, שטוענת כאילו אפשר באמצעות מחשבה בלבד להגיע לכל חוקי הפיסיקה, בלי לבצע ניסוי. אני חושב שאלה דברים מוטעים. אחד מעקרונות היסוד, עליו מושתתת הפיסיקה, הוא הקונסיסטנטיות, העיקביות. כלומר, אם אתה מסיק מסקנה בדרך ההיקש משורה של עובדות ותיאוריות, ובהמשך לכך מגבא תוצאה מסויימת, מתחייב מהמבנה הפנימי של מדע הפיסיקה, שהתוצאה תאמת. אם לא, פרוש הדבר שאחת מנקודות המוצא — או אחד ההקשים — היתה מוטעית.

עם זאת, יש בהחלט מקרים, והיו כאלה בעבר, שלאור כל מה שאתה יודע, לאור כל החוקים שכבר הוכחת בניסיון, לאור כל העובדות שאתה מאמין בהם, ועל סמך מבנה

הגיוני ומצק, ניצבות לפניך מספר אלטרנטיבות; ואז בא הניסוי ומכריע ביניהם — ולא דווקא בעד הפתרון האסתטי והפשוט ביותר. מה גם שהמושגים "פשוט ביותר", "יפה ביותר" ו"אסתטי ביותר" הם מושגים יחסיים. מה שיפה ופשוט בעיני אינו חייב להיות כזה בעיניך, ומה שיפה ופשוט בעיני כולם היום עשוי להתברר כמסובך לאור התגליות בעוד 20 שנה, ולהיפך.

נדמה לי שאדינגטון לא מתוכח על תפקידו של הנסיון כפוסק בין ההנחות השונות. טענתו היא, שהכרעה זאת אינה אובייקטיבית ואינה משקפת את התמונה האמיתית של הטבע, כיון שאופי הניסוי שאנחנו עורכים, ההיקשים שאנו מעלים, העובדות שאנו מגלים — מוכתבים לנו ע"י המבנה המסויים של ההכרה שלנו, וזו מסוגלת לדלות מהטבע רק אותם חוקים התואמים את המבנה הלוגי שלה. ומכאן הטענה, שמתוך חקירת המבנה ההכרתי שלנו ניתן לחזות מראש את כל החוקים הפיסיקליים שאנו עשויים לגלות. לא. צריך להבחין בין גדלים פיסיקליים שאתה מודד בנסיון, כמו מהירות של משהו, אורך גל של קרינה או איזה גודל אחר, לבין ההשקפה שלך על מבנה החומר או על מבנה העולם. נסתכל למשל על מבנה האטום. מה שאתה מודד בניסוי, זה תמיד אורך גל של קרינה — שעליו לא יכול להיות ויכוח. עכשיו, מזה אתה מסיק או בונה תיאוריה על המבנה. אתה מתחיל לדבר על אלקטרונים שמתרוצצים שם, על פונקציות גל ועל כל מיני עקרונות יפים, שהם למעשה מודל מדעי, שמסביר את כל התופעות הפיסיקליות שאתה מודד. ועל התופעות הפיסיקליות שאתה מודד לא יכול להיות ויכוח. ויכוח יתכן רק על מודל שבנית. ואם אמנם יצליח משהו לבנות מודל של האטום, שמנבא במדויק את כל תוצאות הניסויים שנעשו ונעשים — כלומר: סוגי הקרינה שנפלטים ותוצאותיהם; ארכי הגל וכדומה — ומודל האטום שלו יהיה שונה תכלית שינוי מזה שרצינו, איש לא יתוכח אתו, או נכון יותר — יקרה אחד משני הדברים:



א. שהתוצאות הניתנות למדידה של שני המודלים יהיו זהות בכל, ואז אין שום אפשרות להכריע בין השניים, כי השאלה היא איך נוח לך יותר להסתכל על העולם.

ב. ששני המודלים זהים לגבי כל נס־יון שנתגלה עד היום, אך חלוקים לגבי ניבוי תופעה מסוימת בעתיד, ואז צריך לבצע נסיון והוא שיכריע ביניהם.

אלו אולי הברירות כאשר הפולמוס מתנהל בין שני יצורים בעלי תבנית הכרתית זהה, הבנויה מעצם טיבעה לקבל את אופני ההכרעה של חוקי הפיסיקה והמתימטיקה — שהיא בעצמה יצרה. אבל השאלה נשארת בעינה: האם הטבע כולו מתנהג לפי חוקים מתימטיים, או שהמתימטיקה היא רק אותו קטע בתוך הטבע שאנו מסוגלים לגלות, וכי העולם הממשי אינו דווקא זה המתגלה לחושינו. אבל מאחר שעל שאלה זאת יכול להשיב לנו רק יצור בעל מבנה הכרתי שונה משלנו, וכזה אין, אני מציע שנעבור לעולם החומר כפי שהוא נתפש על ידינו, ונתחיל בחלקיקים האלמנטריים. כמה חלקיקים ידועים לנו היום?

## מי מורכב ממה

טוב, כאן צריך להזהר, מפני שכל נושא החלקיקים נולד אמנם מתוך נסיון להבין את מבנה החומר, אבל איש אינו טוען שהחומר מורכב מחלקיקים אלה. צריך להבחין היטב היכן אנחנו עומדים. כשדובר על מבנה האטום דובר על חלקיקים שמהם מורכב האטום, כלומר: גרעינים ואלקטרונים. כשהגיעו למבנה הגרעין דובר על חלקיקים שמהם מורכב הגרעין, כלומר:

פרוטונים

ונייטרונים. אבל השלב הבא איננו המשך ישיר של ההתפתחות הזאת. כלומר, אנחנו לא מדברים היום על החלקיקים מהם מורכבים הפרוטונים והנייטרונים, משום שאל תוכו של הפרוטון עוד לא הצלחנו לחדור. ההתפתחות כאן היתה לרוחב ולא לעומק.

מה שקרה הוא, שהפיסיקה הגרעינית, החל משנות השלושים, הציבה לעצמה כמטרה להבין שלושה דברים: (א) מה הם החוקים שקושרים את הפרוטונים והנייטרונים בתוך הגרעין, (ב) מה הם הכוחות הבסיסיים שפועלים ביניהם, (ג) מה קורה בתוך הפרוטונים והנייטרונים והאם יש עוד תת מבנה בתוכם. עכשיו, השאלה הראשונה המתיחסת למבנה הגרעין הנה מיוחדת לתחום הפיסיקה הגרעינית; בשטח החלקיקים האלמנטריים אין אנו עוסקים בגרעינים. באשר לשאלה השניה — אף כי למדנו הרבה מאד — אין לנו תשובה. איננו מסוגלים אפילו לכתוב נוסחה פשוטה של הכוחות האלה, דבר שכל תלמיד תיכון יכול לעשות לגבי הכח האלקטרו-מגנטי. אבל, בחיפוש אחר הפתרונות לשאלת הכוחות שפועלים בין הפרוטונים ורד נייטרונים התגלו עוד ועוד חלקיקים. במילים אחרות, אתה יורה אלומה של פרוטונים במטרה של פרוטונים, נניח של מימן, ומההת-

נגשות ביניהם נוצרים במקרים מסויימים חלקיקים חדשים, שונים ומשונים. כאשר יש לך חלקיקים כאלה אתה יכול ליצור מהם אלומות ולגרום להם להתנגש אלה באלה, או אלה בפרוטונים, ושוב לקבל חלקיקים חדשים. וכך נוצרו עד היום, פחות או יותר, כמאה חלקיקים. אבל שים לב: איש לא טוען ולא מנסה לטעון, שהם חלק אינטגרלי של מבנה החומר. איש אינו טוען שגרעין של עופרת כולל משהו מלבד הפרוטונים והנייטרונים ברגע מסויים. אלא זאת, שהחלקיקים הללו עשויים להוצר, ולעיתים נוצרים, בהתנגשויות עם חלקיקים אחרים. לרובם יש זמן חיים קצר מאד והם מתפרקים, לכל היותר, לאחר מיליונית של שניה, בכמה מקרים לאחר 10 בחזקת מינוס 23



4

לוח צילום של תוצרי חלקיקים מקרינה קוסמית, שנעשה בידי פרופ' אייזנברג ממכון וייצמן בשנת 1954, היה קרוב לודאי הראשון שהנציח את מציאות החלקיק אומגה מינוס.



שנית, כך שקשה בכלל לומר שהם מרכיבים חומר — אפילו במובן חצי אינטואיטיבי של המושג. השיבות ההתבוננות בהם היא לגבי מבנה החומר, משום שכולם מפעילים זה על זה כוחות גרעיניים. ועכשיו לשאלה השלישית — באיזו מידה סייע לנו שפע זה של חלקיקים להבהיר מה קורה בתוך הפרוטונים והנייטרונים. מסתבר שהתשובה כיום מסובכת עוד יותר, משום שעכשיו אנחנו שואלים מה יש בתוך 100 החלקיקים שגילינו. אולם, כפי שלמנדלייב היה קל יותר לגלות את המערכת המחזורית של היסודות הכימיים, כאשר כבר היו בידו עשרות יסודות, כך אנו מקוים, שעל ידי מיון וסידור שיטתי של עשרות החלקיקים נגיע למשהו, כאשר המשהו הזה הוא המבנה הפנימי.

אמרת שאיש אינו מנסה לטעון שהחלקיקים הנוצרים מהתנגשויות בין חלקיקים מרכיבים את הפרוטונים והנייטרונים. בלומר, שאי אפשר לשאול אם קיים גבול תחתון להתחלקות החלקיקים. עם זאת מדברת הפיסיקה על כך שכל החלקיקים בנויים משלוש אבני יסוד — קווארקים. האין כאן סתירה ?

לא הייתי אומר סתירה, אלא שתי דרכי מחשבה. וביניהם יוכל להכריע רק הנסיון. זו דוגמה קלאסית למה שאמרנו קודם. קו מחשבה אחד אומר שיש אבני בנין יסודיות. זה לא מוכרח להיות קווארקים, קווארקים זה אחת התאוריות. בתאורית הקווארקים יש שלושה קווארקים ושלושה אנטי קווארקים. בסך הכל ששה חלקיקי יסוד, מהם מורכבים כל החלקיקים שאנחנו מכירים ; במידה רבה כשם שמאה ויותר היסודות הכימיים נבנים כולם משלושה חלקיקי יסוד:

אלקטרון פרוטון

ונייטרון. זה קו מחשבה אחד, שמבחינת גישתו הוא הפרימיטיבי יותר, כי הוא פשוט ממשיך צעד אחד קדימה את קודמו. הגישה השניה, שהוצעה לפני 10 שנים בערך,

היתה מהפכנית יותר. זאת הגישה של ה-בוטסטרפ (שרוכי המגפיים), שאומרת, שכל החלקיקים הללו הם סוף הסיפור מבחינה זאת שאין בתוכם דבר פנימי יותר, אלא הם מורכבים זה מזה, כלומר:

לובשים צורה

ופושטים צורה בלי הפסק. לפני שאסביר את עצמי, אני שוב מזהיר ברוח הדברים שאמרנו בהתחלה: זוהי רק תמונה שאנחנו מדמיינים לעצמנו בגלל אופיה הפרימיטיבי של החשיבה שלנו הזקוקה לתמונה כלשהי. אלא שוב, הקריטריון לנכונותה של התמונה הוא אם אנחנו יכולים לגזור ממנה נבואות שאפשר למדוד אותן. ובכן, גישת הבוטסטרפ אומרת, שמכיוון שהכוחות הגרעיניים הם כוחות חזקים מאד וכל טרנספורמציה שמתרחשת היא מהירה מאד, אז כשאתה "מסתכל" על פרוטון אתה "רואה" למעשה דבר שלובש ופושט צורה בקצב מדהים. כלומר, הוא קולט ופולט חלקיקים מחלקיקים שונים ללא הרף, ואגב קליטה ופליטה זאת הוא עשוי ליהפך לנייטרון, או לפאזילוס, ושוב לפרוטון וכך חוזר חלילה. במילים אחרות, החלקיקים יוצרים ביניהם קומבינציות חדשות ועוברים טרנספורמציה בלתי פוסקת.

## יש טרנספורמציה גם מבחינת המסה?

לא. המסה קבועה. אבל יש איזה טרנספורמציה מבחינת המהות של החלקיקים. ושוב אני חוזר, דברים אלה היו חייבים להחשב כדברי הבל גמורים אלמלא יכולנו לתרגם אותם לשפה שתאמר: אם כך, אז המסה חייבת להיות כך וכך והכח חייב להיות כך וכך, וכאן באה המדידה והיא מאשרת או מפריכה את הדברים. אמנם, גם כשהבאנו את הדברים למצב של השוואה עם הנס-יון, עדיין לא הגענו לתשובה חד ערכית, משום שעדיין נזקקים לצורך ההשוואה לכל מיני קירובים, אבל יש לנו מושג על מידת רצינותה של גישה זאת או אחרת. אם כן, נכון שיש שתי גישות, אבל אין זה נכון שהן עומדות בסתירה זו לזו. יתכן שהאחת נכונה, יתכן שהשנייה, ויתכן ששתיהן. דבר דומה קרה עם התאוריות על האור. היתה גישה גלית והיתה גישה חלקיקית, והיה קונפליקט ביניהן. היום אנחנו יודעים, שבמקרה שתיהן נכונות במובן מסויים, או שתיהן בלתי נכונות. כל אחת נכונה במובן זה שהיא אחת האספקטים של הדואליות של האור, והיא בלתי נכונה במובן זה שהיא כשלעצמה עדיין אינה נותנת את הסיפור כולו. יתכן מאד, שבענין החלקיקים אנחנו נמצאים במצב דומה. כלומר, שהפרוטון עשוי להיות בנוי משלושה קווארקים, ועם זאת לפשוט וללבוש צורה ולעבור טרנספורמציות בלתי פוסקות, תוך כדי בליעה ופליטת זוגות קווארקים ואנטי קווארקים.

## לפני מהפכה חדשה

### בפיסיקה?

אמרת כרגע, שפרוטון מורכב משלושה קווארקים. איך יתכן ששלושה קווארקים, אשר המסה של כל אחד מהם גדולה פי 10 מזו של הפרוטון, מרכיבים פרוטון?

תראה, התאוריה לא אומרת דבר על המסה של הקווארק. כשמדברים על זה שיש לקווארק מסה הרבה יותר גדולה מתכוננים פשוט לעובדה, שכל הנסיונות שנערכו עד היום לגלות קווארקים נעשו בגבולות של חמש פעמים מסת הפרוטון. כלומר, אם למשל יש קווארק בעל מסה של שמונה פעמים מסת הפרוטון, לא היו הנסיונות שלנו מצליחים לגלותו. למעשה, התאוריה היתה מעדיפה מאד קווארקים שהם בערך שליש ממסת הפרוטון, זה היה עושה את החיים הרבה יותר קלים. עכשיו, בהנחה שהקווארקים אמנם קיימים, לפנינו שתי אפשרויות: ראשית, אף כי הנסיון אומר שיש להם לפחות 5 פעמים מסת הפרוטון אין זה בהכרח כך. שנית, שהם כבדים פי



בתחום של עד חמש פעמים מסת

חמש מהפרוטון. נתחיל מהראשונה. העובדה שלא מצאנו אותם [5](#) הפרוטון יתכן שהיא נובעת מכך

שהם מצויים מעל התחום הזה, אך יתכן גם שאנו מחפשים אותם בשיטות לא נכונות, המבוססות על הנסיון שצברנו בהיווצרות החלקיקים הידועים לנו. יתכן מאד שעלינו לפתח גישה חדשה. זה מזכיר אגב, שכל הנסיונות בשנות ה-20 וה-30 לפצה את הגרעין נעשו תמיד על ידי פרוטונים. חשבו, שעם שיגבירו את האנרגיה של הפרוטונים יצליחו בסופו של דבר לפצה את הגרעין. וזה נכון, אבל איש לא חשב על דרך אחרת, פשוטה יותר מבחינה נסיונית: לפגוע בגרעין לא בפרו-טונים, הנדחים מהגרעין מבחינה חשמלית, אלא לפגוע בו בנייטרונים, שהם ניטרלים מבחינה חשמלית, וע"כ אינם נדחים.

כלומר, צריך לדעת איך להתקיף את הבעיה. ויתכן שאנחנו נוהגים כאותם שוטים, הלוחמים את הקרב החדש באסטרטגיה של המלחמה הקודמת, ולכן מפסידים אותה. באשר לאפשרות השנייה, שיש קווארקים והם כבדים פי חמש מהפרוטונים, במקרה זה מתחילה השאלה שלך להיות רלבנטית: איך שלושה קווארקים עושים פרוטון? אבל התשובה לא מסובכת. כי אנחנו יודעים שבדיוק אותו הדבר קיים עקרונית בגרעין. המסה של גרעין, שיש בו נאמר 17 פרוטונים ו-17 נייטרונים, אינה שווה ל-17 פעם מסת הפרוטון ועוד 17 פעם מסת הנייטרון. יש שם פחת של מסה או תוספת של מסה והפרש זה של מסה הוא-הוא זה שבא לביטוי בכורים גרעיניים ובפצצות גרעיניות בצורה של אנרגיה. כלומר, על פי תורת היחסות ועל פי עקרונות שאנחנו מכירים מהנסיון, אין שום הכרח שסכום המסות של אבני הבנין שבונות משהו צריך להיות שווה למסות של הדבר השלם. עכשיו, נכון שהאנרגיה שקושרת את שלושת הקווארקים בתוך הפרוטון צריכה להיות עצומה. עד היום — האנרגיה הזאת — אותה מסה שהפכה כאילו לאנרגית קשר — היתה קטנה מאד, בסדר גודל של אחוז או שניים מהמסה הכללית. כלומר, אם תקח גוש חומר, נגיד ק"ג אורניום, ותשאל כמה אנרגיה אפשר להפיק ממנו, תמצא שאתה יכול להפוך לכל היותר אחוז או שניים מהמסה שלו לאנרגיה, אחוז השווה להפרש שיש בין מסות כל הפרוטונים והנייטרונים המצויים בגוש האורניום לבין מסת הגוש כולו. אמנם זהו הפרש עצום, מפני שכל גרם אורניום הופך לכמות אדירה של אנרגיה, אבל הוא זעיר יחסית למה שאפשר היה לקבל אילו יכולת להפוך את כל החומר לאנרגיה. עכשיו, אם שלושה קווארקים מרכיבים פרוטון, ואם לקווארק יש באמת מסה גדולה פי חמש ממסת הפרוטון, אתה מקבל תיאורית חלקיק כבד פי 15 מהפרוטון. פרוש הדבר, ש-14 מתוך 15 חלקי המסה הזאת (החלק הנותר מייצג את המסה הנמדדת של הפרוטון — המערכת) או 95% ממנה — הופ-

כים לאנרגית קישור. ואז, ברגע שתצליח לפצה פרוטון, תשתחרר כמות אנרגיה אדירה מכל אשר ידענו, אשר תעמיד לפנינו בעיות שלא נתקלנו בהן אף פעם. זאת האנרגיה הסופר גרעינית, או אם תרצה — האנרגיה הקוורקית.

אבל, זה נכון בתנאי שהגישה שאני מפעיל כאן, הלקוחה מעולם הפסיקה הגרעינית, נכונה לגבי עולם הקווארקים. צריך לזכור, שכאשר נחשפה הפסיקה האטומית נתגלה לעינינו עולם חדש, אשר לצורך הבנתו נזקקנו לתורת היחסות מצד אחד ולתורת הקוואנטים מצד שני. לעומת זה המעבר מהפסיקה האטומית לגרעינית לא הצריך שום שנוי מהפכני כזה. לא נולדה שום מהפכה מחשבתית חדשה בפסיקה התאורטית. אבל יתכן מאד, שהצעד הבא לכיוון הקווארקים שוב יהיה כרוך במהפכה מחשבתית חדשה.

מה שאתה אומר, שכדי להבין את הכוחות החזקים בגרעין, הפועלים בטווח זעיר של 10-13 ס"מ, אנו זקוקים

קים למהפכה מחשבתית בפסיקה, עולה בקנה אחד עם דעת האסטרופיסיקאים הסבורים גם הם, שכדי להבין את צפיפות החומר המדהימה בקוסמוס, המגיעה בכוכבים מסויימים ל- 1013 גרם לסמ"ק, יש צורך

במהפכה מחשבתית של הפסיקה.

בדיוק כך.

## אבל מהו החומר ?

פרופ' הררי, האם המצדדים בתורת הקווארקים גורסים שחלקיקים אלה יסודיים יותר מאשר שאר החלקיקים האלמנטריים ?

יסודיים באותו מובן שהפרוטון יותר יסודי מהגרעין, ובמובן זה שהם מרכיבי היסוד של כל יתר החלקיקים. אבל זה לא אומר שלקווארק ולמרכיבים שלו אין מבנה פנימי. איש לא אמר שהקווארקים זה סוף הסיפור.

מבחינה תאורטית אפשר להמשיך בחלוקה כמו עם סדרה מתמטית של שברים. השאלה היא אם מבחינת העולם הממשי אפשר לחלק חומר לערבים יותר ויותר קטנים עד אין סוף.

תראה, אילולא עברנו את המהפכה הזאת כאשר הגענו לגבול האטום — שעה שחדלנו להסתכל על החומר בתור דבר שאפשר לראותו בעיניים, ואילולא עברנו את השלב של עיקרון איינהודאות ושאר הדברים שמונעים מאתנו לדבר על החומר בטרמינולוגיה של שלחנות וכסאות, אז הייתי אומר, שבאיזה שהוא מקום זה צריך להעצר.

אך כאמור, עברנו כבר מהפכה מחשבתית זאת. נכון הוא, שהדיבור על חומר והופך יותר ויותר זעיר, מעורפל מאד לגבי האינטואיציה שלנו. ובכלל; קשה לענות על השאלה הזאת, ראשית מפני שיתכן ונעצרו כבר עם הקווארקים, שנית, גם אם נמשיך לרדת עוד כמה שלבים, אפשר שנשאר עדיין בתחום תורת הקוונטים ותורת היחסות. אבל יתכן מאד שנמשיך לרדת, ובכל שלב תפתח איזו מהפכה מחשבתית חדשה. ואז, לנחש היום מה יקרה לסדרה אין סופית של מהפכות מחשבתיות, זה כבר באמת משהו שנשגב מבינת כולנו.

באופן אישי אינך נבהל מהמחשבה שאיבדת בעצם את הקשר בין החלקיקים שאתה חוקר לבין החומר הממשי ?

לא. כיון שלא איבדתי את הקשר. כאן צריך להדגיש דבר אחד. בכל שטח בפסיקה אתה משתמש בלא הרף במערכת עצומה של תרגומים בין המציאות במעבדה לבין העולם שאתה מדמיין לעצמך. אנחנו מדברים על חלקיקים שאיננו יודעים מה הם ומה צורתם. איננו יכולים לראותם<sup>6</sup>



תם, אבל יש לנו מכשירי מעבדה

שמאפשרים לנו לעקוב אחריהם. קח את המכשיר הכי פשוט מבחינה קונצפטואלית — את הצילומים מתא הבועות. בצילומים אלה אתה לא רואה אמנם חלקיק, אתה רואה בועות מימן שנוצרו בעקבות תנועתו של החלקיק בתא. אבל יש לך מנגנון תרגום, באמצעותו אתה למד שמעבר החלקיק יצר את הבועה, וכי מסלול הבועות מציין את מסלול החלקיק, ושעקמומיות המסלול מורה לך על האנרגיה שלו. וכך, לאט לאט, אתה בונה לך מערכת מושגים, המתרגמת את החלקיק — הנתפש בדמיוןך כמין כדור קטן — לאותו קו של בועות שאתה רואה בתצלום. משהגעת למצב זה, אתה חדל להרגיש שאינך רואה את החלקיקים. מכל מקום, יש לך הרגשה שאתה יודע על

עד כה דברנו רק על חלקיקי הגרעין. האם גם האלקטרון מורכב מקווארקים?

לא. עד כמה שידוע לנו, לא. ההבדל היסודי בין האלקטרון לבין הפרוטון והנייטרון ושאר החלקיקים הוא, שהאלקטרון לא משתתף בפעולת הכוחות הגרעיניים החזקים. כשם שיש חלקיקי גרעין ניטרלים מבחינה חשמלית ונטולי תכונות מגנטיות — כלומר, אינם משתתפים בפעולת הכוחות החשמליים — כך האלקטרון מנוטרל כאילו מבחינת הכוחות הגרעיניים.

נקודה שניה, כל התאוריות על ה־קווארקים נובעות מחקר הכוחות הגרעיניים, מחוק שימור, מסיסטמטיקה וכך הלאה. כיון שכך, אין לנו שום סיבה להניח שגם האלקטרון מורכב מקווארקים. עם זאת, יתכן שהאלקטרון מורכב גם כן מאיזה שהן אבני בנין יסודיות, לגמרי אחרות — בהחלט יתכן. תאר לעצמך אבני בנין יסודיות, בעלות מטען חשמלי (חיובי או שלילי). שלפצמים הן מסתדרות כך, שהסִיָּה נייטרלי והכח החשמלי לא פועל עליהן, ולפצמים הן מסתדרות כך, שיש מטען כללי והכח החשמלי כן פועל עליהן. עקרונית איפוא, אם רוצים להתפרע בספקולציות, יכולים לחשוב על אפשרות שקווארקים — או בדומה להם — קיימים גם ב־אלקטרון, אבל שם הם מסתדרים בצורה כזאת, שהסִיָּה נותן דבר נייטרלי מבחינת הכוחות הגרעיניים. אבל, כאמור, זו ספקולציה פרועה.

אם כבר מדברים על התחלקות של מסות לערכים קטנים יותר — מדוע המטען החשמלי, למשל, אינו מתחלק לערכים קטנים יותר?

אנחנו לא יודעים. אבל אם הקוואר־קיים קיימים, אז יש לנו כאן מקרה ראשון שבו המטען החשמלי היסודי הוא שלישי מהמטען שחשבנו שהוא היסודי. (כזכור, לשלושת הקווארקים שמרכיבים את הפרוטון יכולה להיות מסה כללית גדולה פי 15 ממסת הפרוטון, כאשר 14 חלקים מתבטאים באנרגיה, אך המטען החשמלי שווה ערך — המערכת).

אבל אני צריך לומר, שיש שורה שלמה של תופעות בפיסיקה, שאנחנו יודעים שהן קיימות משום שראינו אותן בניסוי, בלי שנבין ונדע מדוע הן קיימות. אחת מהן היא תופעת המטען החשמלי. איננו יודעים יש איזה מטען חשמלי אלמנטרי, ומה שיותר חשוב, אנחנו לא יודעים מדוע הערך שלו הוא כמו שהוא ולא פי שבע קטן יותר או פי 11 גדול יותר. פשוט אין לנו מושג. גם אם יתגלה הקווארק, וזה יהיה סוף הסיפור, יתברר לנו אמנם שהמטען החשמלי האלמנטרי הוא שלישי ממה שחשבנו קודם, אבל עדיין יש מטען אלמנטרי.

השאלה היא אם הפיסיקה מתעניינת בשאלת המדוע, שהרי אין לכך סוף. מדוע, למשל, מהירות האור היא 300 אלף ק"מ לשנייה ולא 320?

אמת. הפיסיקה יכולה לשאול והיא רוצה לענות, רק שיש הרבה דברים שאין להם עדיין תשובה.

האם באמת מתעניינת הפיסיקה במדוע ולא רק באיך?

הפיסיקה בהחלט מתעניינת במדוע. ליתר דיוק — הפיסיקה מנסה לקשור בין מספר גדול ככל האפשר של גדלים בסיסיים שונים. כשאתה אומר 300 אלף ק"מ לשנייה, השתמשת בעצם ביחידה שרירותית לגמרי — הקילומטר, לכן לא זאת השאלה. השאלה היא, למשל, אם השימוש במהירות האור כיחידת מהירות, מצד אחד, ובמטען האלקטרון, מצד שני, יאפשר לי לחשב איזה גודל בסיסי אחר של הטבע. כמובן, שאלת המדוע היא אחת הקשות בפיסיקה ואיננה שטח מחקר פורה, בו מתרחשים גילויים מדי יום ביומו, אך היא נוכחת תמיד בתור מטרה רחוקה.



## אי שם

## מוכרח להיות סדר

### האם יודעים כיצד עובר המטען החשמלי מחלקיק אחד לשני?

איננו יודעים. אנחנו יודעים איך נעשית ההעברה כאשר המטען צמוד לאלקטרונים. למשל באלקטרוליזה, כאשר האלקטרון מעביר את המטען מיון ליון (יון — אטום בעל מטען חשמלי חיובי או שלילי עודף — המערכת). אבל אם תדבר על תהליך

גרעיני, שבו פרוטון ונייטרון מתנגשים, וכתוצאה נוצרים שלושה חלקיקים, שהם נניח שני פרוטונים ואיזה חלקיק בעל מטען שלילי — אז כאן, באיזה שהוא מקום, המטען היחיד של הפרוטון ההתחלתי הפך לשני פלוסים ומינוס אחד. היכן זה קרה איננו יודעים. אבל שים לב, אנחנו לא יודעים היכן זה קרה, כשם שאנחנו לא יודעים מה בכלל קרה בתהליך הזה, כיוון שאנחנו לא מבינים את הכוחות הגרעיניים החזקים. כלומר, למרות ששאלת שאלה חשמלית אינני יודע לענות עליה, כי אני לא מבין את הכוחות החזקים. אנחנו מבינים שהפרוטון והנייטרון נכנסו כאן לתוך איזה מין קלחת רותחת שאיש לא יודע מה יש בה, ויצאו מתוכה שלושה חלקיקים. מה קרה כאן בפנים איננו יודעים. אבל אם תנסה לפרש את המאורע בעזרת תאוריית הקווארקים, הדבר מתברר. כי לכל קווארק יש מטען חשמלי משלו. ומה שקרה שם הוא, שבדרך כלשהי העביר הנייטרון קווארק אחד לחלקיק אחר, קיבל קווארק אחר במקומו וכך עבר המטען. כלומר, שלפי תאוריית הקווארקים עוברים המטענים החשמליים מחלקיק לחלקיק באותה דרך שעוברים המטענים באמצעות האלקטרונים בתהליך האלקטרוליזה.

ברגע שקווארק אחד, הנושא את המטען החיובי של הפרוטון, עוזב את הפרוטון ונצמד לנייטרון, הנייטרון הופך פרוטון, אך מה קורה לפרוטון המקורי?

אם קווארק אחד יעזוב את הפרוטון, הפרוטון לא ישאר פרוטון. הוא צריך לקבל משהו אחר במקומו וליהפך בעצמו לחלקיק אחר.



יש לנו בהתחלה כוח הגראביטציה ולאחריו הכוחות החשמליים, המאופיינים ע"י פעולתם של האלקטרונים והפרוטונים. ופעולה זו קובעת את התכונות הכימיות של החומר. בתוך הגרעין אנו פוגשים שני כוחות: הכוח הגרעיני החלש, האחראי לתופעות מסוימות של קרינה רדיו אקטיבית; כוח זה חלש אמנם מהכוחות החשמליים, אך הרבה יותר חזק מכוח הגראביטציה. ולבסוף, הכוח החזק ביותר בטבע — הוא הכוח הגרעיני החזק. כוח זה, החזק פי מאה בערך מהכוחות החשמליים, הוא הכוח שמלכד את הפרוטונים והנייטרונים בתוך הגרעין. עכשיו, הכוח הגרעיני, כאמור, חזק מאד, אבל הוא פועל בטווח קצר ביותר של 10<sup>-13</sup>

ס"מ, כלומר — בגבולות של גודל הגרעין. זו הסיבה בעצם, שעד 1930 לא ידענו כלל על קיומו. שכן, עד אז לא נחקרו תופעות פיסיקליות בטווח כה קצר. עכשיו, יתכן שקיים כוח עוד יותר חזק, הוא הכוח המלכד את הקווארקים, שטווח פעולתו עוד יותר קצר ולכן טרם גילינו אותו.

מאחר ששלושת הכוחות האחרונים פועלים באמצעות חלקיקים, האם יתכן שגם כוח הגראביטציה פועל באמצעות קרינה של חלקיקים ?

יתכן. הבעיה היא, שכוח הגראביטציה הוא כל כך חלש, שאם נרצה לגלות את נוכחות חלקיקיו נצטרך מכשירים מדויקים הרבה יותר מאלה הדרושים לחקירת הכוחות האחרים. אבל בהחלט יתכן, שכוח הגראביטציה בין שני פרוטונים, למשל, נובע מהחלפת חלקיק ביניהם, מן מאוזן כזה, שאמנם נוהגים לקרוא לו לפעמים גראביטון.

אם לסכם את השיחה, היש סיכוי שהמחקר בחלקיקים האלמנטריים יוכל לקרב אותנו בסופו של דבר לתשובה — כיצד נוצר החומר ?

קודם כל אנחנו צריכים להיות מספיק צנועים כדי לומר שזה לא יהיה סופו של דבר. כי מה שלא יקרה יהיה לזה המשך. השאלה היא כיצד זה יתפתח ; אם לכיוון זה שנמשיך לחדור פנימה דרך הקווארקים, אז זה יהיה מאד סימפטי — במובן זה שתימשך הנטייה לפשטות. כי אז יתברר, שכל מאה החלקיקים, המהווים תסבוכת נוראה ואיומה כל כך, נוצרו כולם בכל זאת משלוש אבני בנין. וכל מה שצריך לעשות הוא להבין את השלוש ואת הקומבינציות ביניהן. ואז נוכל לומר שהגענו לשלב ביניים, סגרנו מעגל, ונוכל לצפות לגילוייה של שכבה חדשה. אבל אם אין קווארקים, והתהליך הנוכחי ימשך, יהפוך הדבר ליותר ויותר מכוער, במובן זה שיתגלו עוד ועוד חלקיקים בלי שיתגלו הקשרים ביניהם.

עם זאת, אי שם מוכרח להיות סדר בעסק הזה. זה לא הפקר. אני חושב שתוך חמש, עשר, עשרים שנה, נגיע לאחד מן השניים. או אל המצב של הפיסיקה האטומית — במובן זה שנמצא את אבני הבנין ונבין מה קורה עד הדרג שהגענו אליו; או למצב של הפיסיקה הגרעינית — במובן זה שנוכל להשתמש בחוקים האמפיריים כפי שאנו משתמשים בפיסיקה הגרעינית לניצול אנרגיה וכדומה. אבל עדיין לא נפתור את הבעיה היסודית של מהו הכוח, איך הוא פועל ומה הם מרכיביו.

### **מתי אתה מעריך נדע את התמונה הסופית ?**

אינני מאמין שאי פעם נגיע לתמונה הסופית, לסוף פסוק.

ובעצם, למה ? מדוע צריך התהליך הזה להפסק אי פעם, באיזה שהוא מקום ?

