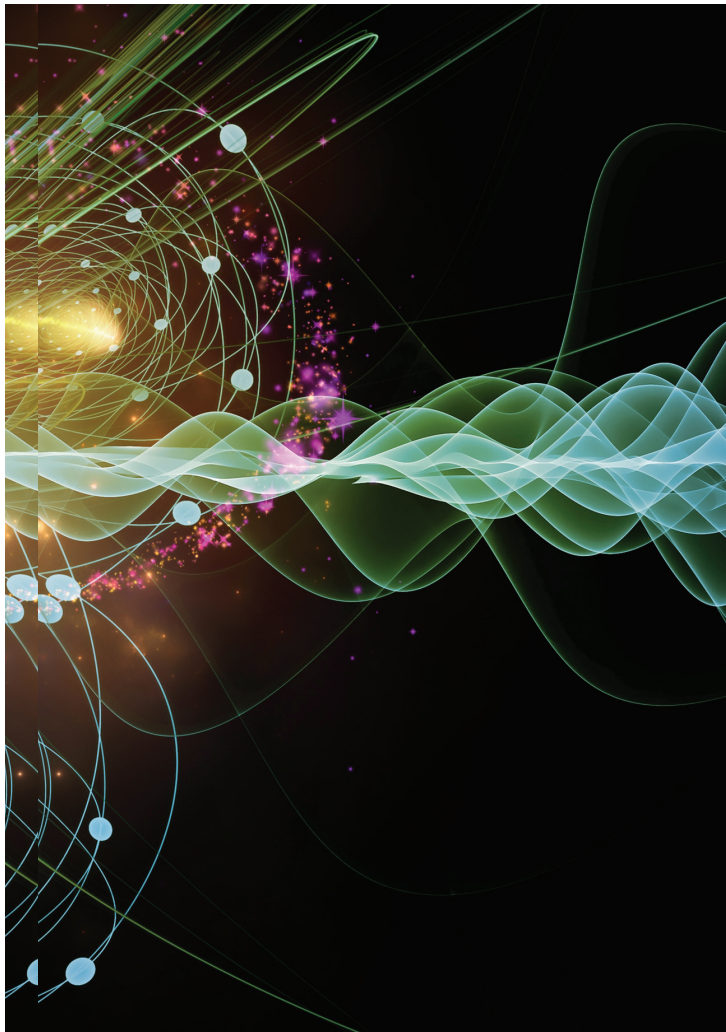


אור, חומר ובוזון היגס

ביולי 2012 רעש עולם המדע בעקבות
גילוי בוזון היגס, ההוכחה למנגנון
יצירת המסה של החלקיקים. הכל על
משמעות הגילוי

דניאל תורג'מן



1 תפישה האנושית קיימת חלוקה ברורה בין חומר לאור. לחומר יש מסה, הוא ממוקם בגבולות מסוימים והכמות שלו נשמרת (חוק שימור החומר). לאור, לעומת זאת, אין מסה, הוא מתפשט במרחב, ואפשר ליצור אותו (למשל כשמדליקים נורה) ולהשמיד אותו (כבליעת אור). חלוקה ישנה זו החלה להיסדק במשוואתו המפורסמת של איינשטיין: $E=mc^2$, והתמוטטה כליל עת התגלה הבוזון היגס ביולי 2012. אנסה להציג בקצרה את התיאוריה הפיזיקלית מאחורי אמירה זו והשפעתה על האופן שבו אנו תופשים את העולם שבו אנו חיים.

חוק שימור החומר

מאז ימיו של אנטואן לבואזיה (Lavoisier) ידוע שסך המסה של תוצרים של תהליך כימי שווה לסך המסה של המגיבים (החומרים שנכנסו לתהליך הכימי). אם בתהליך מסוים תימדד לתוצרים מסה שונה מזו של המגיבים, אזי יש לחפש תוצרים נוספים שלא זוהו – ואכן כך התגלה קיומו של הגז חמצן. החומר מסוגל ללבוש צורה ולפשוט צורה, אבל לא "להיעלם" או להיווצר. מאז, השאלה "מהו מקור המסה של החומר?" הפכה לכאורה ל"בלתי חוקית". שהרי בביטוי "מקור המסה" מונחת הנחה שהמסה נוצרה ממשווא שאינו מסה – הנחה שנוגדת לחלוטין את עיקרון שימור החומר.

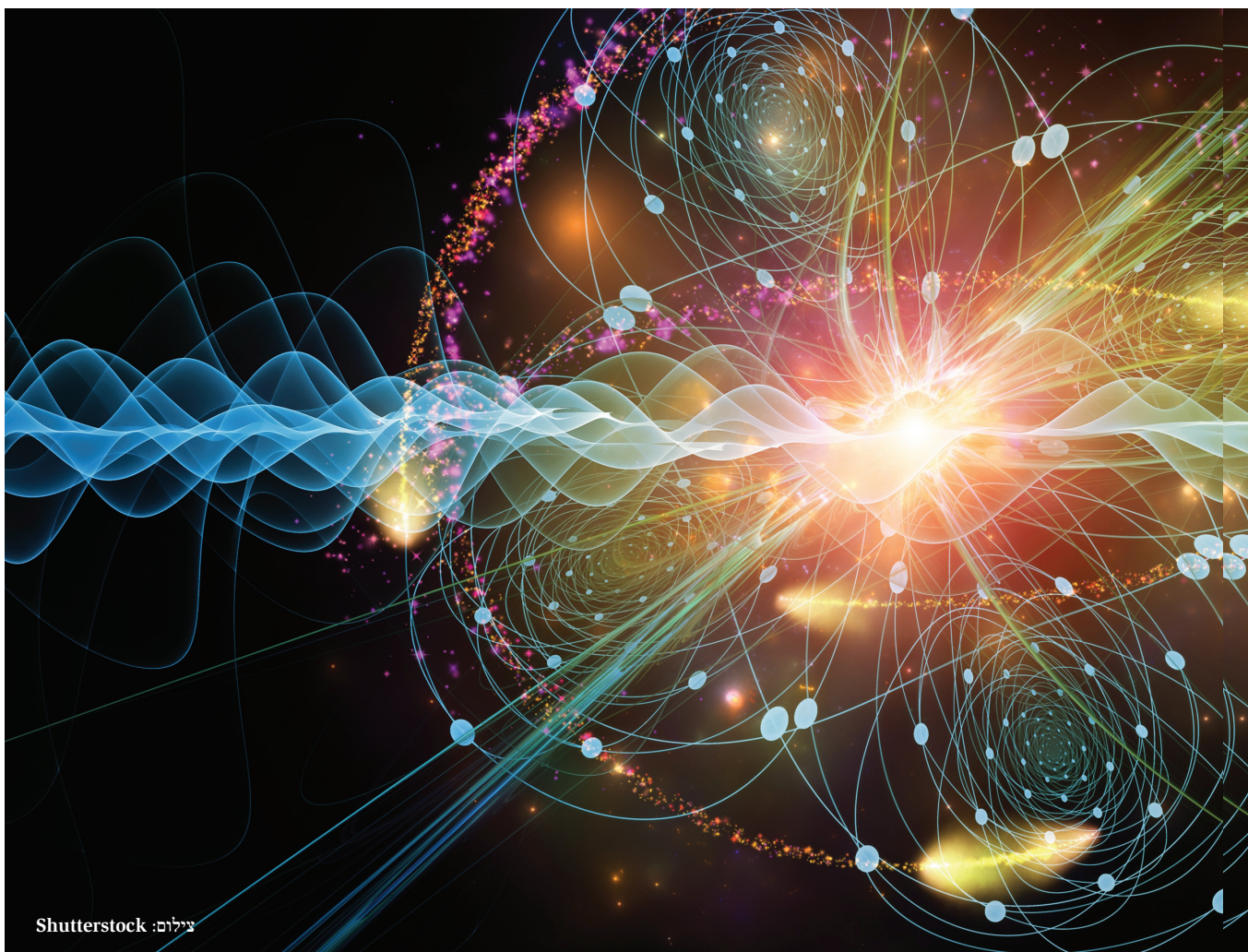
$E=mc^2$

בתחילת המאה הקודמת, עם פרסום תורת היחסות הפרטית של איינשטיין, חל שינוי דרמטי בתפישה זו. $E=mc^2$ – אנרגיה שווה למסה כפול מהירות האור בריבוע. במילים אחרות, משוואה זו אומרת לנו כי המסה של גוף (כמערכת ייחוס שבה הגוף נמצא במנוחה) פרופורציונית לסך כל האנרגיה שלו: קפיץ דרוך הוא מסיבי יותר (בעל מסה גדולה יותר) מאשר אותו קפיץ כשהוא משוחרר; גוף חם מסיבי יותר מאותו גוף כשהוא קר. זאת בגלל האנרגיה הפוטנציאלית והתרמית שלהם. במציאות, תוספת המסה בדוגמאות אלו זניחה, אבל במקרה של הפרוטון כלל וכלל לא. הפרוטון מורכב משלושה חלקיקים יסודיים המכונים קווארקים. כמו קפיץ דרוך, קווארקים אלה מוחזקים ומתוחמים יחד על ידי כוח המכונה הכוח החזק. בגלל האנרגיה הנובעת מכוח זה, מסתו של הפרוטון גדולה פי 100 ממסתם של הקווארקים המרכיבים אותו. הוא הדין לגבי הנויטרון. העובדה שכמעט כל המסה של החומר שאנו מכירים מופיעה בצורת פרוטונים ונויטרונים (החומר שאנו מכירים מורכב גם מאלקטרונים, אך המסה של אלקטרון קטנה בערך פי 2,000 ממסה של נוקליאון – פרוטון או נויטרון), מביאה למסקנה שכמעט כל המסה שאנו מכירים היא בעצם אנרגיה אצורה כ"קפיץ דרוך". זוהי מסקנה מרחיקת לכת מבחינת תפישת העולם שלנו. מרחיקת לכת, אך לא מהפכה טוטאלית, שהרי תמיד יהיו רכיבים יסודיים (האלקטרונים והקווארקים) שהם בעלי מסה עצמית. לכאורה.

עתה נעשה דילוג קל למאיץ החלקיקים הגדול של CERN, שבו אני חוקר. במסלול מעגלי תת קרקעי באורך 27 ק"מ מאיצים אלומות של פרוטונים עד 99.999998 אחוז ממהירות האור בשני כיוונים מנוגדים של המסלול. פרוטונים אלו מובאים להתנגשות בשתי נקודות שבהן שוכנים גלאי ענק, שם האחד CMS ושם השני ATLAS

(לניסוי הגלאי ATLAS יש תרומה ישראלית חשובה). בהתנגשות ראש בראש של פרוטונים נוצרים תוצרים שהגלאים קולטים ורושמים, ומהם מועבר המידע להמשך אנליזה בידי פיזיקאים. חשוב לדעת שאיננו מביאים את הפרוטונים לידי התנגשות כדי לשבור אותם ולגלות מה יש בתוכם – אנחנו יודעים מה יש בתוכם ומה הם מורכבים (קווארקים), אלא אנו גורמים להם להתנגש כדי לייצר חלקיקים חדשים, אחרים, שכלל לא היו בתוך הפרוטונים. למשל מהתנגשות של פרוטונים יכולים להיווצר אלקטרונים או מיאונים או בוזוני היגס, ועוד שלל חלקיקים שאינם חלק מהפרוטון עצמו. כיצד זה אפשרי? גם כאן אנו משתמשים במשוואתו של איינשטיין

כדי לתאר את המציאות כפי שהיא, הצליחו מדענים לפתח תורה הכוללת גם את תורת הקוונטים וגם את תורת היחסות הפרטית. איחוד זה הוליד את הצורך לדבר על הרכיבים היסודיים של החומר בתור שדות הפרושים על כל המרחב



צילום: Shutterstock

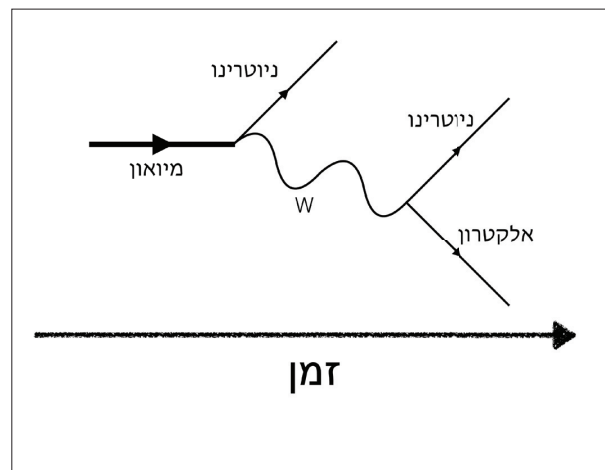
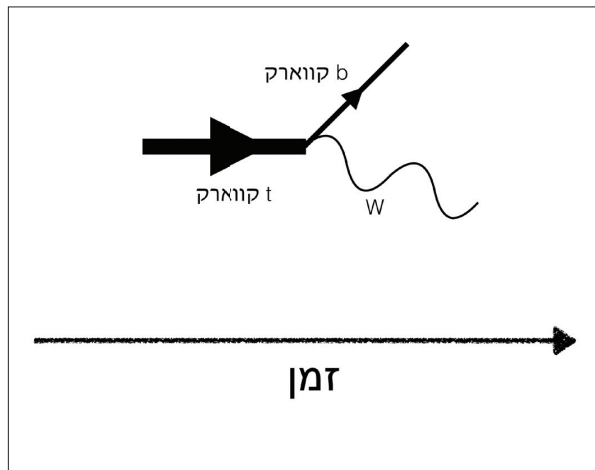
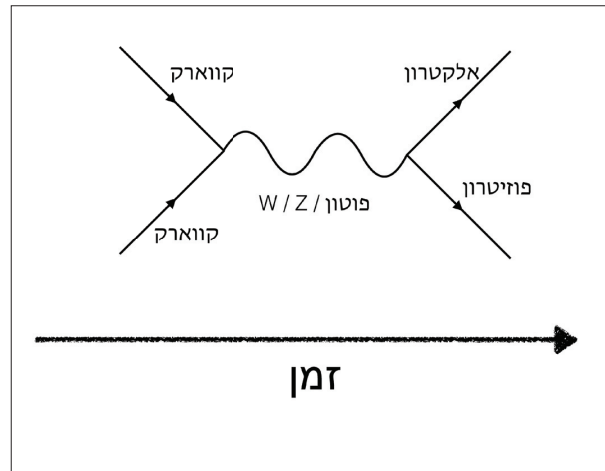
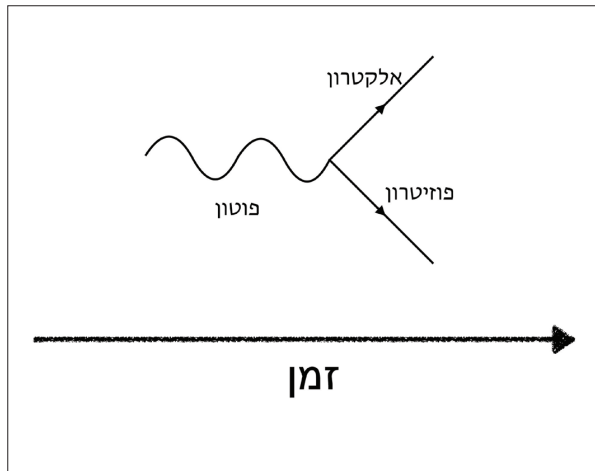
של השדה הימי. אם במקביל יגחו גם גלים (עירורים) אדומים, נאמר שבמקביל מתפרש על פני כל המרחב גם ים (שדה) אדום. כך לגבי כל צבע שונה של גל שנראה – נאמר שיש במקביל גם שדה באותו צבע, שהגל הוא עירור שלו. כך גם האלקטרונים, הקווארקים וכו' שאנו רואים – הם עירורים בשדות האלקטרון, הקווארק וכו' המתפשטים בכל היקום. כל האלקטרונים שאנו רואים הם גלים של שדה האלקטרונים. זאת הסיבה שאלקטרון (או כל חלקיק אחר) הנוצר פה בכדור הארץ זהה בדיוק לאלקטרון הנוצר בגלקסיה בקצה היקום – שניהם עירורים של אותו השדה. לגלים אלה גם אפשרות לעשות אינטראקציה עם גלים אחרים, ואפילו עם השדות של גלים אחרים. עד כאן תיאור ראשוני לתורת השדות הקוונטיים.

אם כך, אפשר להבין כיצד מאיצים פרוטונים ומהתנגשותם יוצאים אלקטרונים. אנרגיה של עירור בשדה אחד מועברת לשדה אחר ובכך מעוררת בו גלים (חלקיקים) חדשים. הסיכוי שהתנגשות בין קווארקים תעורר גלים דווקא בשדה אחר מסוים תלוי בחוזק האינטראקציה עם השדה ההוא ובחוקי שימור, כגון שימור אנרגיה ומטען. בפועל אין אינטראקציה ישירה בין הקווארקים לאלקטרונים, ולכן יצירת

$E=mc^2$, אך הפעם על ידי אנרגיה אנו מייצרים מסה. הסיבה שאנו מביאים פרוטונים לידי התנגשות אינה כאמור כדי לחקור את מרכיביהם אלא מפני שקל להאיץ אותם, ועל ידי המהירות נצליח לרכז כמות אנרגיה רבה מאוד באזור קטן מאוד; מהריכוז העצום של אנרגיה נוצרים חלקיקים חדשים. אך עדיין יש לשאול: כיצד זה עובד? מה המנגנון? שאלה זאת דורשת מאיתנו להיכנס לתחום של תורת השדות הקוונטיים. תחום שדרכו נוכל גם לגעת בתפקידו של הבוזון היגס המפורסם.

תורת השדות הקוונטיים

כדי לתאר את המציאות כפי שהיא הצליחו מדענים לפתח תורה הכוללת גם את תורת הקוונטים וגם את תורת היחסות הפרטית. איחוד זה הוליד את הצורך לדבר על הרכיבים היסודיים של החומר בתור שדות הפרושים על כל המרחב. החלקיקים המוכרים הם בעצם עירורים (שינויים ממצב היסוד) בשדות אלה, כמו גלים על פני הים. כשאנו מביטים בפני הים מהצד אנו מסוגלים לראות רק מה שמעל פני המים. מדי פעם יגחו במים עירורים הנקראים גלים, הלא הם החלקיקים



ואיבר אינטראקציה עם שדות אחרים:
[איבר תנועה]+[איבר מסה]+[איבר אינטראקציה עם שדות אחרים].

את איבר המסה אפשר לכתוב כך:

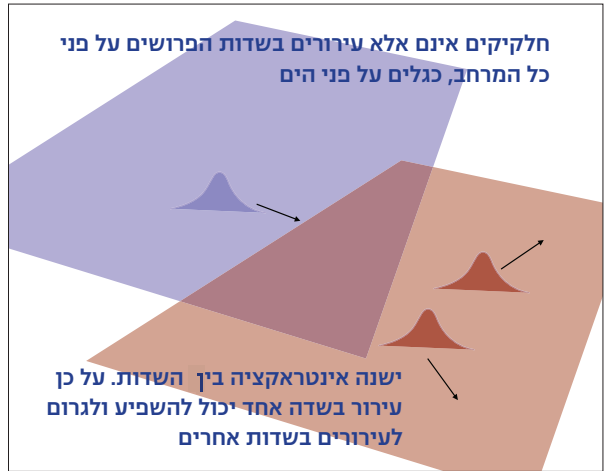
$$m \cdot f$$

כאשר f מייצג שדה כלשהו ו- m את ערך המסה של החלקיק המיוחס לו. הפוטון, לדוגמה, הוא חסר מסה ולכן עבורו $m=0$. כאשר כותבים איבר מסה במשוואות בצורה זו, ערך המסה הוא תכונה עצמית של השדה הנדון. ואולם כיצד אפשר לייצר משהו עם מסה באופן ספונטני? איך פוטון אנרגטי חסר מסה הופך לשני חלקיקים בעלי מסה (כפי שמתואר בשרטוט)? משהו נראה חסר.

ואכן מתברר שזו אינה התמונה השלמה. מכל הניסויים שנעשו עולה תמונה ברורה לגבי המשוואות המתארות את העולם שלנו: אין אפשרות לכתוב בהן איבר מסה. נאמר כאן בקצרה (וראו הרחבה במסגרת) שקיומו של איבר מסה ייתכן רק בתנאי של סימטריה מסוימת, שמתברר כי במציאות אינו מתקיים. אילו הייתה המציאות מקיימת את הסימטריה הזאת, יכולנו לכתוב איבר מסה והיינו מבינים שמסה היא תכונה עצמית של החלקיק. אולם מאחר שהטבע הראה לנו שיש בו אסימטריה, אי

האלקטרונים נעשית דרך שלב ביניים של שדה שלישי המתווך את המעבר (שדה מתווך, כגון הפוטון, כוזון W או בוזון Z). מעברים אלו מתקיימים לא רק בהתנגשויות, אלא גם בדעיכות: מיואון (בן דודו המסיבי של האלקטרון) דועך מעצמו לאלקטרון ולשני חלקיקי ניוטרינו (חלקיק קל מאוד וחסר מטען חשמלי); קווארק t (הקווארק המסיבי ביותר) דועך מעצמו לקווארק b ולבוזון W . כמו כן פוטון אנרגטי יכול לייצר זוג – אלקטרון ופוזיטרון (פוזיטרון הוא האנטי חלקיק של האלקטרון). בשרטוט מתוארים תהליכים הממחישים את אפשרות המעבר בין סוגים שונים של חלקיקים יסודיים ואת חוסר היציבות שלהם – תופעה שקשה ליישבה עם התפישה שלפיה חלקיקים הם מעין כדורים קטנים, אך נעשית יותר מובנת אם רואים בחלקיקים עירורים בשדות.

ובחזרה לעניין המסה. מתברר שבאמת אין לחלקיקים מסה מצד עצמם, ובהמשך נסביר איך בכל זאת שדה ההיגס מקנה להם מסה. כאמור, חלקיקים הם עירורים בשדות. תיאורית במשוואות אפשר היה לייחס להם מסה. במשוואות המתארות את התפתחות החלקיק בזמן ישנה תרומה משלושה סוגים שונים של איברים: איבר תנועה, איבר מסה



והערך של שדה זה יתקבע סביב ערך מסוים קבוע, נקרא לו v , אזי איבר האינטראקציה יקבל צורה ויתנהג כמו איבר מסה:

$$\begin{aligned} &g \cdot H \cdot f \\ &\downarrow \\ &g \cdot v \cdot f \\ &\downarrow \\ &(g \cdot v) \cdot f \\ &\downarrow \\ &"m" \cdot f \end{aligned}$$

כאשר עכשיו מה שמסומן כ-" m " הוא המכפלה $g \cdot v$, כלומר חוזק האינטראקציה בין החלקיק לשדה היגס כפול הערך שסביבו התקבע ההיגס. קיבלנו משהו שנראה ומתנהג כמו איבר מסה, בלי שהוא באמת איבר מסה. המשמעות מהממת: אין דבר כזה מסה. כל המסות של החלקיקים היסודיים ביותר אינן אלא תופעה אפקטיבית של אינטראקציה בין שדות. מה שקובע את ההבדלים במסות בין החלקיקים אינו אלא חוזק האינטראקציה, g , בינם לבין שדה ההיגס. מקובל להשוות זאת לשני גופים המנסים לשחות ולהתקדם במים - האחד דג חלקלק והאחר אדם הלובש מעיל דובון. הדג ישחה כמובן מהר בהרבה מכיוון שמידת הקישוריות שלו למים קטנה - הוא הרי חלקלק. ירידנו לבוש הדובון יתקדם לאט בגלל הקישוריות הגדולה שלו למים שסביבו. כך גם אנו, כולנו שוחים בים הזה של שדה ההיגס. חלקיקים בעלי קישוריות נמוכה להיגס הם מסיביים פחות, ואלה בעלי קישוריות גדולה הם מסיביים יותר.

מודל זה הוכח ב-4 ביולי 2012 בעקבות אחד המאמצים המשותפים, הגדולים והיקרים בתולדות האנושות. שני גלאי הענק ATLAS ו-CMS, חזו במקביל, וכל אחד על ידי חמישה ערוצים שונים, יצירה מרובה של בוזוני היגס. בוזון היגס הוא העירור בשדה ההיגס והעדות הישירה לקיומו.

אין חומר בעולם כלל

העולה מכל האמור הוא שלחלקיקים המרכיבים את החומר אין מסה עצמית. המסה אינה אלא תופעה אפקטיבית של אינטראקציה בין שדות. על פי תורת השדות הקוונטיים, השדה הפרוש על פני כל



אפשר לכתוב איבר מסה. הכיצד זה ייתכן? הרי לכל החלקיקים יש מסה! (כך לפחות מזהירים אותנו הדיאטיקנים). ניווכח מיד שעניין זה מסתדר באמצעות איבר אינטראקציה.

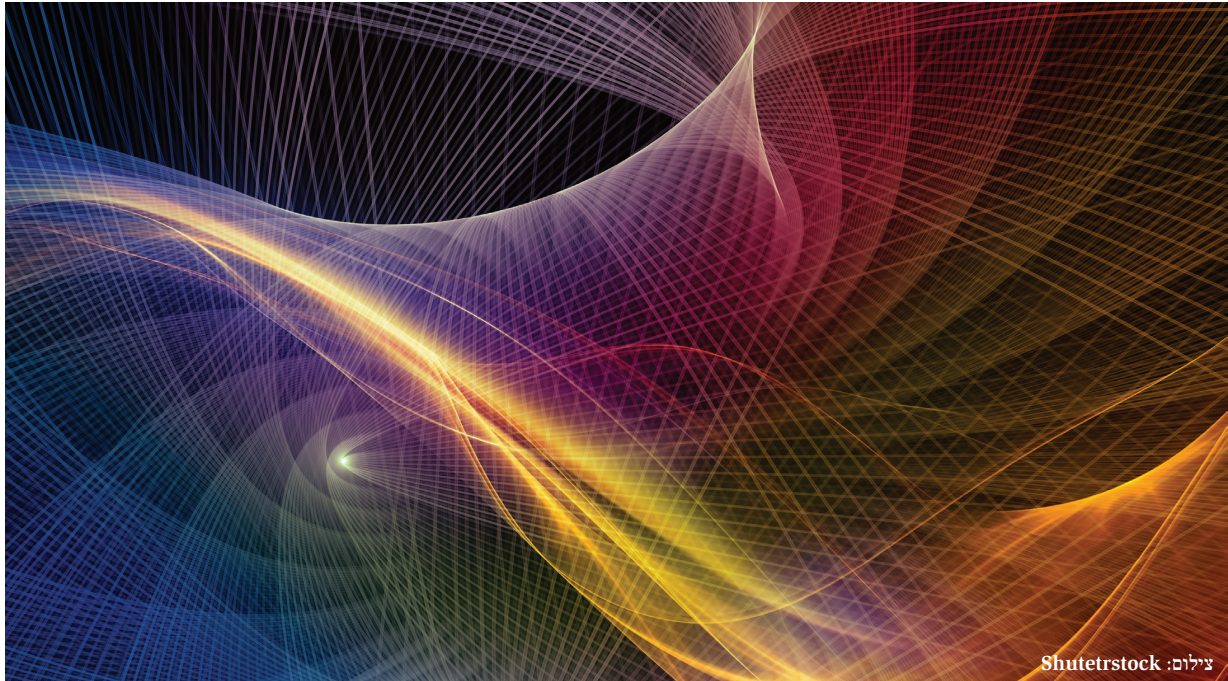
ויהי מסה

נוכחנו כי איבר המסה אינו יכול להתקיים. נתבונן עתה באיבר האינטראקציה. איבר האינטראקציה בין שדות יראה כמו:

$$g \cdot f_1 \cdot f_2$$

f_1 ו- f_2 מייצגים שני שדות שונים ו- g הוא קבוע המייצג את עוצמת האינטראקציה ביניהם. זהו האיבר האחראי למשל על הקליטה של גלי רדיו באנטנה של מכונת. פוטונים של גלי הרדיו נמצאים באינטראקציה עם האלקטרונים שבאנטנה וגורמים להם לזרום בתדרים שונים. משנות ה-70 המודל הסטנדרטי של החלקיקים חזה תהליך המאפשר נתינת מסה לחלקיקים דרך איבר האינטראקציה. אם יהיה קיים שדה, נקרא לו היגס (ונסמנו באות H), ולשדה זה יש אינטראקציה עם כל החלקיקים המרכיבים את החומר:

$$g \cdot H \cdot f$$



צילום: Shutetrstock

להמרת מט"ח שכל מטבע קיים ועומד בפני עצמו). גם המציאות הפנטסטית על פי תורת השדות הקוונטיים אינה מספקת מצד עצמה. במהלך הקורס הראשון שלמדתי בתורת השדות הקוונטיים התקשיתי להבין כיצד ייתכן שחלקיקים מסיביים יכולים פשוט לקפוץ ולהופיע מתוך שדה. השתעשעתי במחשבה ש"יהי שדה קוונטי של פרות. פרה יכולה להיווצר ולהופיע פתאום מתוך הריק". כמובן שזו הגזמה, אבל זה היה נשמע כמהות של מה שתורת השדות הקוונטיים מתארת - יצירת חלקיקים מסיביים מתוך שדות. רק לאחר ההבנה שלחלקיקים/גלים באמת אין מסה משל עצמם, והם מקבלים מסה אפקטיבית דרך מנגנון היגס, מתבהרת התמונה של המציאות. הייתי מנסח זאת כך: עוד לפני ההבנה של מנגנון היגס, היה אפשר לטעון טענה פילוסופית שלפיה אם חלקיקים אכן יוצאים משדות, אזי לא יכולה להיות להם מסה עצמית, אלא המסה שלהם חייבת להיות תופעה אפקטיבית כלשהו. טענה זו אינה עולה בהכרח מתוך המשוואות אלא טענה פילוסופית תפיסתית בלבד, אשר מתבררת כאמיתית במציאות.

לסיכום, רק לאחר ההבנה השלמה שמסה היא תופעה אפקטיבית של אינטראקציה בין שדות יכול אדם להבין ולצייר בעין שכלו איך ולמה המסות של החלקיקים היסודיים אינם אלא אנרגיה. לקביעה זו השפעה על האופן שבו אנו תופשים את העולם שבו אנו חיים - ומתברר שבעולם שסביבנו אין כלל "חומר".

התבל הוא הישות הממשית, ואילו החלקיקים אינם אלא עירורים בו. המאפיינים הברורים של חומר המכילים אותו מאור - מסה, חוק שימור החומר ומיקום - מתבררים כלא נכונים. המציאות מתנהגת כאילו הברלים אלה קיימים אבל אין זה כך ביסודם של דברים. אין זו אלא תחפושת המסתירה את טבעו האמיתי של החומר, הרומה יותר לאור היכול לעשות אינטראקציה עם שדה היגס, מאשר למשהו גשמי. מכל האמור יוצא שלא קיים דבר כזה "חומר". במובן מסוים, אפשר לומר שהעולם שבו אנו חיים יותר דומה לסוג של דמות אור מאשר לאוסף חלקיקים.

חשוב להדגיש שמסקנות אלו אינן עולות לא מתורת הקוונטים בפני עצמה ולא מתורת היחסות בפני עצמה, ואפילו לא מתורת השדות הקוונטיים ללא מנגנון שדה ההיגס. במהפכה של תורת הקוונטים אכן השתנתה פלאים תפישתנו את החומר וכן תפישתנו את החוקים השולטים בו, אך המסה של חלקיק נשארה נתון - תכונה עצמית של החומר. כמו כן, לא משנה כמה תהפוך את משוואת שרדינגר (המשוואה המתארת את התפתחות החלקיק בזמן על פי תורת הקוונטים) עדיין תישאר עם אותו חלקיק - אין בליעה ויצירה של חלקיקים. החומר נשאר מסיבי וחוק שימור החומר עומד בעינו - ההבדל התהומי בין אור לחומר עדיין קיים.

תורת היחסות הפרטית הראתה לנו שיש קשר בין חומר לאנרגיה אבל חסר בה המנגנון. המשוואה $E=mc^2$ אינה מסבירה איך החלקיקים המסיביים שאנו רואים אינם אלא אנרגיה, היא רק מצהירה שכך הדבר. יתרה מכך, אפשר לטעון שאפילו את זה אינה עושה - המשוואה רק מציינת את יחס ההמרה בין מסה לאנרגיה, אך אפשר עדיין לראות את המסה כדבר העומד בפני עצמו (בדומה

דניאל תורג'מן הוא דוקטורנט במחלקה לפיזיקה של החלקיקים ואסטרופיזיקה של מכון ויצמן וחוקר במאיץ חלקיקים הגדול ב-CERN.

Daniel.Turgeman@weizmann.ac.il

<https://madabatorah.wixsite.com/main>

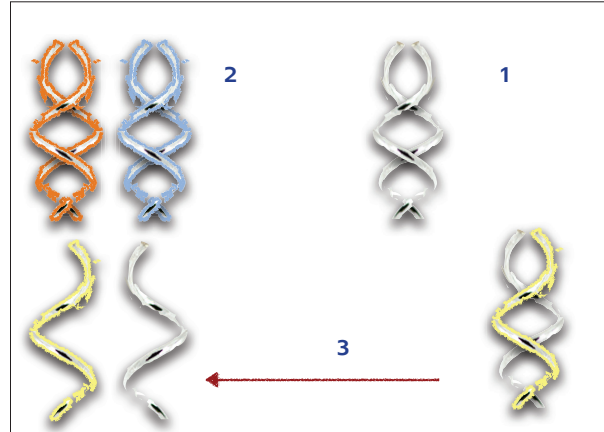
האיסימטריה של הכוח הגרעיני החלש ובעיית המסה

לכל החלקיקים המרכיבים את החומר (לענייננו: הקווארקים והאלקטרונים) יש תכונה עצמית של סיבוב קוונטי. יש שהסיבוב עם כיוון התנועה כמו בורג ("ימניים"), ויש שהסיבוב הופכי לזה של בורג ("שמאליים"). איבר המסה מערבב בין שתי תכונות אלו ובעצם מחייב התייחסות אליהן כאל שני צדדים של אותו מטבע. איבר המסה אומר לנו שהחלקיק הוא האלקטרון (או הקווארק), אשר יש בו תכונות סיבוב של הברגה ימנית או שמאלית, אבל אלו שתי אפשרויות של אותו חלקיק.

ההתייחסות זו של איבר המסה לחלקיק מסתדרת יפה עם הכוח האלקטרומגנטי והכוח החזק. כוחות אלו אינם מבדילים בין סיבוב ימני לשמאלי, ולכן אפשר להמשיך ולהתייחס לאלקטרון או לקווארק כחלקיק אחד בעל תכונות סיבוב שמאלית וימנית גם יחד.

אולם מתברר שישנו כוח אחר שכן מבדיל בין תכונות סיבוב ימנית או שמאלית - דבר שמחייב התייחסות אליהם כאל שני חלקיקים שונים, וכך מבטל את האפשרות לכתוב איבר מסה. הכוח הזה הוא הכוח הגרעיני החלש, אשר אחראי על דעיכות רדיואקטיביות מסוימות. כל הניסויים שנערכו מסוף שנות ה־50 של המאה ה־20 מראים איסימטריה מובנת בטבע לגבי הכוח החלש. הניסוי הראשון שבהם שהצביע על כך היה של פרופ' טשיין־שיונג ווא (Wu). היא הראתה שבתהליכי דעיכה מעורבים אך ורק אלקטרונים שמאליים. האיסימטריה מוחלטת. מאז, עשרות ניסויים הראו איסימטריה מוחלטת זו וגם עבור כל סוגי החלקיקים האחרים שמרכיבים את החומר. הכוח החלש מתקשר רק עם חלקיקים שמאליים. לשמאליים יש מטען של הכוח החלש ולימניים אין - הם פשוט לא קיימים מבחינתו. איסימטריה זו שנתגלתה בטבע אינה מאפשרת לכתוב את האיבר מסה שאותו תיארו קודם. זאת מכיוון שאיבר המסה מערבב בין שני הרכיבים, השמאליים והימניים, ומתייחס אליהם כאל שני צדדים של אותו חלקיק. אבל עכשיו זה כבר בלתי אפשרי - לאחד יש מטען ולשני אין. אין זה משנה שיש להם תכונות זהות ביחס לכוח האלקטרומגנטי ולכוח החזק. ברגע שמבחינת כוח כלשהו הם שונים, אזי הם שני יצורים נפרדים לגמרי.

כדי לחדד את הנקודה אסכם: אם היו רק כוחות סימטריים בטבע, כגון הכוח האלקטרומגנטי והכוח הגרעיני החזק, היינו יכולים לכתוב איבר מסה והיינו מבינים שמסה היא תכונה עצמית של החלקיק. אך מאחר שבטבע מתגלה איסימטריה בכוח הגרעיני החלש, אי אפשר לכתוב איבר מסה מכיוון שהיא מתבססת על סימטריה שאינה קיימת.



1. לחלקיקים המרכיבים את החומר תכונות סיבוב ימנית ושמאלית. איבר המסה מערבב ביניהם ומתייחס אליהם כאל שני צדדים של אותו המטבע. 2. מבחינת הכוח החזק והכוח האלקטרומגנטי אין הבדל בין כיווני הסיבוב, לכן אין מניעה להתייחס אליהם כשני צדדים של אותו מטבע, ולכן איבר המסה יכול להתקיים. 3. אמנם אנו מגלים שאלה באמת שני חלקיקים שונים - לאחד יש מטען של הכוח החלש ולשני אין. על כן לא יכול להיות איבר מסה המתייחס אליהם כאל שני צדדים של אותו מטבע

היגס - האיש והשדה

הבוזון היגס קרוי על שם פיטר היגס (Higgs), אחד מכמה פיזיקאים שהגו את המנגנון המבוסס על שדה זה. הוא זכה שהשדה והמנגנון ייקראו על שמו כנראה בזכות אזכור קטן במאמרו. הוא ציין שלשדה האמור צריך להיות עירור/חלקיק משל עצמו, חלקיק שקיבל את השם בוזון היגס, ובכך פתח דרך לבדוק את המנגנון בניסוי.

יש לציין שבתחילה, שדה זה הוצע על ידי פיטר היגס ופיזיקאים אחרים כמקור המסה לבוזונים W ו- Z בלבד, ועל ידי מנגנון מעט שונה ממה שמתואר כאן. ואכן, ההיגס אחראי גם על המסות של ה- W וה- Z , אבל עניין מאמר זה הוא מקור המסות של החלקיקים המרכיבים את החומר - האלקטרונים והקווארקים. רק בשנות ה־70 הבינו ששדה ההיגס יכול להיות אחראי גם על המסות של חלקיקים אלה.

נעיר כאן, בהמשך למה שמופיע במסגרת על הכוח החלש, ששדה ההיגס הוא בעל מטען של הכוח החלש, ובכך מנטרל מטען זה של החלקיקים השמאליים. נטרול זה מאפשר ערבוב של החלקיקים הימניים והשמאליים על ידי האיבר המתנהג כאיבר מסה.