

"לה' הארץ ומלואה" משמעות גילוי בוזון היגס לאדם המאמין

דניאל תורגמן, מכוון ויצמן, CERN

ההבנה היסודית שלנו את החומר עברה מהפך במאה השנים האחרונות. מהפך זה הגיע לשיאו ב־2012 (תשע"ב), עם גילוי של בוזון היגס – ההוכחה למנגנון יצירת המסה של החלקיקים. המסקנה, מבחינת ההבנה שלנו את החומר, היא שאין דבר כזה 'חומר'. בחלק הראשון של המאמר נביא את התיאוריה המדעית, ובחלק השני נעיין במשמעות האמונית של תפיסה חדשה זו, הקשורה למושגים 'אחדות ה', 'עלמא דשקרא' ו'יחידוש העולם'.

הקדמה

בתפיסה האנושית ישנה חלוקה ברורה בין חומר לאור. החומר הנו בעל מסה, ממוקם בגבול מסוים ונשמר (מה שמכונה "חוק שימור החומר"). לאור, לעומת זאת, אין מסה, הוא מתפשט במרחב, וניתן ליצירה ובליעה. חלוקה ישנה זו החלה להיסדק במשוואתו המפורסמת של איינשטיין $E=mc^2$ והתמוטטה כליל עת התגלה בוזון היגס ביולי 2012 (תשע"ב). להלן אנסה להציג בקצרה את התיאוריה הפיזיקלית מאחורי אמירה זו ואת משמעותה בתפיסת עולמו של האדם המאמין.

א. פיזיקה

חוק שימור החומר

מאז ימיו של לבואזיה¹ ידוע שסך המסה של תוצרים של ריאקציה כימית חייב להיות שווה לסך המסה של מגיביה (החומרים שיצרו את הריאקציה). אם בריאקציה מסוימת

1 אנטואן-לורן דה לבואזיה; התק"ג-התקנ"ד (1743-1794), כימאי צרפתי שנחשב לאבי הכימיה האנליטית, זכור בעיקר בשל עבודתו על גזים, אבק שרפה ובעירה. לבואזיה קבע לראשונה את חוק שימור החומר, ותרם לשינוי מקיף במינוחים בכימיה. הוא נתן את השמות (הלועזיים) לחמצן ומימן והסביר את תפקיד החמצן בבעירה. (העורך עפ"י ויקיפדיה)

“לה’ הארץ ומלואה”

תימדר לתוצרים מסה שונה מזו של המגיבים, אזי יש לחפש מסה זו בתוצרים נוספים שלא זוהו – ואכן, כך התגלה קיומו של החמצן. החומר מסוגל ללבוש צורה ולפשוט צורה, אבל לא “להיעלם” או להיווצר. מאז, בטלה האפשרות לשאול “מהו מקור המסה של החומר?”, שהרי בביטוי ‘מקור המסה’ מונחת הנחה שהמסה נוצרה ממה שהו שאינו מסה – הנחה שנוגדת לחלוטין את עיקרון שימור החומר המתואר לעיל.

$$E=mc^2$$

בתחילת המאה הקודמת, עם פרסום תורת היחסות הפרטית של איינשטיין, חל שינוי דרמטי בתפיסה זו. שהרי $E=mc^2$, אנרגיה שווה למסה כפול מהירות האור בריבוע. במילים אחרות משוואה זאת אומרת לנו כי (במערכת ייחוס שבה הגוף נמצא במנוחה) מסתו של גוף הנה פרופורציונלית לסך כל האנרגיה שלו: קפיץ דרוך הנו מסיבי יותר מכאשר הוא משוחרר, וגוף חם הנו מסיבי יותר מכאשר הוא 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 אלו מוחזקים ומתוחמים יחד על ידי כוח חזק המכונה ‘הכוח החזק’². בגלל האנרגיה של כוח זה, מסתו של הפרוטון גדולה פי 100 ממסתם של הקווארקים המרכיבים אותו. הוא הדין לגבי הנייטרון. העובדה שכמעט כל המסה של החומר שאנו מכירים מקורה בפרוטונים ונייטרונים (שהרי החומר שאנו מכירים מורכב גם מאלקטרונים, אך המסה שלהם קטנה פי 2000), מביאה למסקנה שכמעט כל המסה של החומר שאנו מכירים הנה בעצם אנרגיה. זוהי מסקנה מרחיקת לכת ביותר מבחינת תפיסת העולם שלנו. מרחיקת לכת, אך לא מהפכה טוטאלית של ממש, שהרי תמיד יהיו רכיבים יסודיים (האלקטרונים והקווארקים) אשר הנם בעלי מסה עצמית. לכאורה.

כדי להמשיך אסביר מעט על מה קורה בתוך מאיץ החלקיקים הגדול של CERN, שבו אני חוקר. במסלול מעגלי תת־קרעי באורך 27 ק”מ מאיצים צברים של פרוטונים עד מהירויות של 99.999998% ממהירות האור, בשני כיוונים מנוגדים של המסלול. מביאים פרוטונים אלו להתנגשות בשתי נקודות שבהן שוכנים גלאי ענק, שם האחד CMS ושם השני ATLAS.³ להתנגשות ראש בראש של פרוטונים תוצרים שהגלאי קולט ורושם, והם מועברים להמשך אנליזה בידי פיזיקאים. מה שחשוב לדעת מכל זה הנו שאין אנו מביאים את הפרוטונים לידי התנגשות כדי לשבור אותם ולגלות מה יש בתוכם. אנחנו יודעים מה יש בתוכם וממה הם מורכבים (הקווארקים כנ”ל). אנחנו מביאים אותם לידי התנגשות כדי לייצר חלקיקים חדשים, אחרים, שלא היו בתוך הפרוטונים כלל. למשל, מהתנגשות של פרוטונים יכולים לצאת אלקטרונים או מיאונים או בוזוני היגס, ועוד שלל חלקיקים שאינם קשורים לפרוטון עצמו. כיצד זה אפשרי? גם כאן אנו משתמשים במשוואתו של איינשטיין $E=mc^2$, אך הפעם על ידי אנרגיה אנו מייצרים מסה. הסיבה שאנו מביאים פרוטונים לידי התנגשות אינה כדי לחקור את מרכיביהם, כאמור, אלא מפני שקל להאיץ אותם, ועל ידי המהירות שנקנה להם נצליח לרכז כמות אנרגיה גדולה מאוד באזור קטן מאוד, ומהריכוז הגדול של

2 למדענים לא תמיד יצירתיות יתרה בקריאת שמות...

3 למדינת ישראל תרומה מכובדת בניסוי של הגלאי ATLAS.

אנרגיה זו יוצאים חלקיקים חדשים. אך עדיין יש לשאול: כיצד זה עובד? מה המנגנון? שאלה זאת מצריכה אותנו להיכנס מעט לתחום של תורת השדות הקוונטיים, תחום שדרכו נוכל גם לגעת בתפקידו של 'בוזון היגס' המפורסם.

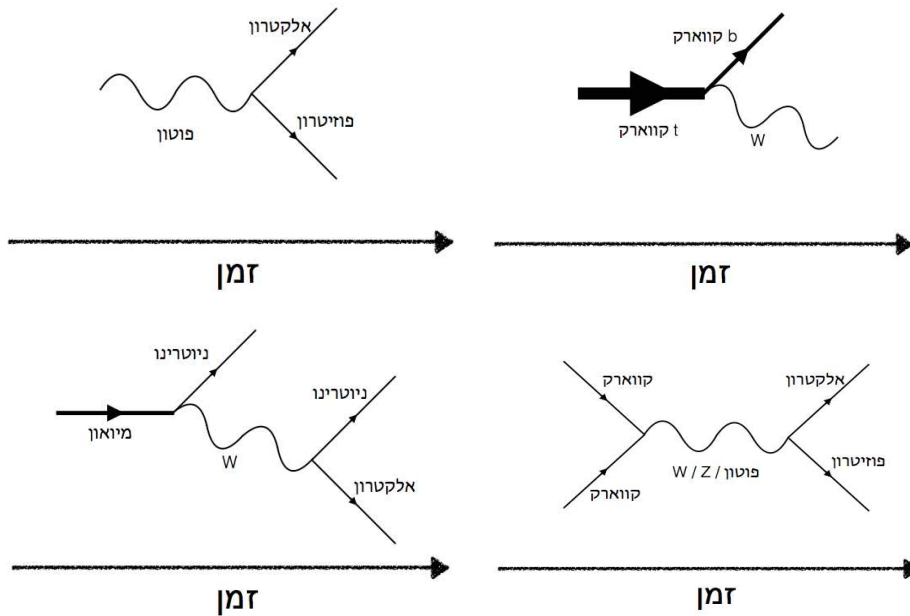
תורת השדות הקוונטיים

כדי לתאר את המציאות כפי שהיא, הצליחו מדענים לפתח תורה הכוללת גם את תורת הקוונטים וגם יחסות פרטית. איחוד זה הוליד את הצורך לדבר על הרכיבים היסודיים של החומר בתור שדות הפרושים על כל המרחב.⁴ החלקיקים המוכרים הנם בעצם עירורים בשדות אלו (שינויים ממצב היסוד של השדה) כמו גלים על פני הים. משל לים שאנו מביטים בו מהצד, ומסוגלים לראות רק מה שמעל פני המים. מדי פעם יגיחו במים עירורים הנקראים גלים, הלא המה ה"חלקיקים" של ה"שדה" הימי. אם במקביל יגיחו 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 הנו עירור שלו. כך גם האלקטרונים, הקווארקים וכו' שאנו רואים הנם עירורים של שדות האלקטרון, הקווארק וכו' המתפשטים בכל היקום. כל האלקטרונים שאנו רואים הנם בעצם גלים של אותו שדה. זאת הסיבה שאלקטרון (או כל חלקיק אחר) הנוצר פה בכדור הארץ הנו זהה בדיוק לאלקטרון הנוצר בגלקסיה בקצה הקוסמוס – שניהם עירורים של אותו השדה. לגלים אלה גם אפשרות לעשות אינטראקציה עם גלים אחרים, ואפילו עם השדות של גלים אחרים. עד כאן תיאור ראשוני ל'תורת השדות הקוונטיים' אשר הנה המסגרת, שיחד עם ההגדרה אילו שדות קיימים ואילו אינטראקציות יש ביניהם משלימים את 'המודל הסטנדרטי' לתיאור המציאות.

כאשר כך הם פני הדברים, ניתן כבר 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 האלקטרונים מתבצעת דרך שלב ביניים של שדה שלישי המתווך את המעבר (כגון הפוטון, ה- W או ה- Z). מעברים אלו מתקיימים לא רק בהתנגשויות כפי שהזכרתי לעיל, אלא גם בדעיכות: מיואון (בן דורו המסיבי של האלקטרון) ידעך מעצמו לאלקטרון ו- 2 נייטרינו (חלקיקים קלים מאוד ללא מטען), וקווארק t (הקווארק המסיבי ביותר) ידעך מעצמו לקווארק b ו- W . כמו כן, פוטון אנרגטי יכול לייצר זוג – אלקטרון ופוזיטרון (פוזיטרון הוא האנטי-חלקיק של האלקטרון – הוא בעל אותן תכונות, רק עם מטען חיובי). בדיאגרמות דלהלן משורטטים התהליכים שהוזכרו לעיל. מטרת הבאתם כאן להמחיש לקורא את יכולת המעבר בין סוגים שונים של "חלקיקים" יסודיים ואת חוסר היציבות שלהם. תופעה שקשה ליישבה עם התפיסה הפשוטה שחלקיקים הנם כדורים קטנים, אבל כן מתקבלת כאשר מבינים שחלקיקים הנם עירורים בשדות, כמובא לעיל.

4 שדה הוא משהו שיכול להיות בעל ערך מסוים בכל נקודה במרחב.

"לה' הארץ ומלואה"



מסה ומבוכה

עכשיו, בחזרה לעניין המסה. בפרק זה נראה שמתברר שבאמת אין לחלקיקים מסה מצד עצמם, ובפרק הבא נסביר איך בכל זאת שדה ההיגס מקנה להם מסה.

כפי שפירטנו לעיל, חלקיקים הנם עירורים בשדות. תיאורטית, במשוואות, ניתן היה לייחס להם מסה. במשוואות אפשר לכתוב:

$$[\text{איבר תנועה}] + [\text{איבר מסה}] + [\text{איבר אינטראקציה עם שדות אחרים}]$$

הנה, אכתוב את איבר המסה:

$$m \cdot f$$

f מייצג שדה כלשהו ו-m את ערך המסה שלו. הפוטון, לדוגמה, הוא חסר מסה, ולכן אצלו m=0. כאשר כותבים איבר מסה במשוואות בצורה זו, ערך המסה הנו 'נתון' – תכונה עצמית של השדה הנידון. כאן ישאל הקורא: מבחינה רעיונית, כיצד אפשר לייצר משהו עם מסה באופן ספונטני? איך פוטון אנרגטי חסר מסה הופך לשני חלקיקים בעלי מסה (דיאגרמה לעיל)? המשוואות מאפשרות זאת, אבל משהו נראה חסר... התשובה היא שאכן מתברר שאין זאת התמונה השלמה. מכל הניסויים שנעשו עולה תמונה ברורה לגבי המשוואות המתארות את העולם שלנו: אין אפשרות לכתוב בהן איבר מסה.⁵ בקצרה נאמר שקיומו של איבר מסה ייתכן רק בתנאי מסוים, תנאי

5 ההסבר הטכני לכך אינו נחוץ להבנת המשך המאמר, אולם נביא אותו כאן לטובת המתעניינים: כדי להסביר כיצד מגיעים למסקנה זו, שלא ניתן לכתוב איבר מסה במשוואות, יש להקדים: לכל החלקיקים המרכיבים את החומר (לענייננו: הקווארקים והאלקטרונים) ישנה תכונה עצמית של סיבוב קוונטי. יש שהסיבוב טובב עם כיוון התנועה, כמו בורג ("ימניים"), ויש שהסיבוב הופכי לזה של בורג ("שמאליים"). איבר המסה מערבב בין שתי תכונות אלו, ובעצם מחייב התייחסות אליהם כאל

של סימטריה כלשהי, אשר מתברר שהמציאות אינה מקיימת. אילו הייתה המציאות מקיימת את הסימטריה הזאת, יכולנו לכתוב איבר מסה, והיינו מבינים שמסה הנה 'נתון' – תכונה עצמית של החלקיק. אולם מאחר שהטבע הראה לנו שיש בו אסימטריה, אי אפשר לכתוב איבר מסה, מכיוון שהוא בנוי על סימטריה שאיננה. כאן מיד כל אחד יהיה נבוך: הרי לכל החלקיקים יש מסה!⁶ אכן כן, אבל זה נובע מאיבר אינטראקציה, כפי שנראה מיד.

ויהי מסה

נביא שוב את המשוואה הכללית בצורה סכמתית:

$$[\text{איבר תנועה}] + [\text{איבר מסה}] + [\text{איבר אינטראקציה עם שדות אחרים}]$$

ראינו שאיבר המסה אינו יכול להתקיים, עכשיו נשים מבטינו לאיבר האינטראקציה. איבר האינטראקציה בין שדות יראה כמו:

$$g \cdot f_1 \cdot f_2$$

כאשר f_1 ו- f_2 מייצגים שני שדות שונים, ו- g הנו קבוע המייצג את חוזק האינטראקציה ביניהם. זהו האיבר האחראי, למשל, על הקליטה של גלי רדיו⁷ באנטנה של מכונתכם.

שני צדדים של אותו מטבע. איבר המסה אומר לנו שהחלקיק הוא האלקטרון (או הקווארק), אשר יש בו תכונת סיבוב של "הברגה" ימנית או שמאלית, אבל אלו שתי אפשרויות של אותו חלקיק. תמונה זאת נובעת מתורת היחסות הפרטית. אפשר לנסות לתת לכך הסבר אינטואיטיבי: כל חלקיק בעל מסה בהכרח נע בפחות ממהירות האור. אם כך, מתחייב שיש מערכות ייחוס שרואות את החלקיק נע בכיוונים הפוכים. לכן גם כיוון הסיבוב ביחס לתנועה (כיוון "ההברגה") מתהפך: אם צופה העומד על הקרקע יראה חלקיק נע קדימה בהברגה ימנית, אזי צופה הנע במהירות ועוקף את החלקיק יראה את החלקיק נע אחורה, בהברגה שמאלית.

התייחסות זו של איבר המסה לחלקיק מסתדרת יפה עם הכוח האלקטרומגנטי והכוח החזק. כוחות אלו אינם מבדילים בין תכונה זו של סיבוב ימני או שמאלי, ולכן אפשר להמשיך ולהתייחס לאלקטרון או לקווארק כאל חלקיק אחד בעל תכונת סיבוב שמאלית וימנית גם יחד. אולם מתברר שישנו כוח אחר שכן מבדיל בין תכונת סיבוב שמאלית וימנית גם יחד. התייחסות אליהם כאל שני חלקיקים שונים ומפיל את האפשרות לכתוב איבר מסה. הכוח הזה הוא הכוח החלש אשר אחראי על דעיכות רדיואקטיביות. כל הניסויים מסוף שנות החמישים מראים אסימטריה מובנית בטבע לגבי הכוח החלש. הראשון שבהם היה ניסוי שערכה פרופ' וו (WU). היא הראתה שבתהליכי דעיכה מעורבים רק אלקטרונים "שמאליים". לא רוב הזמן "שמאליים", אלא רק "שמאליים". האסימטריה מוחלטת. מאז, עשרות ניסויים הראו שוב אסימטריה מוחלטת זו, וגם עבור כל סוגי החלקיקים האחרים שמרכיבים את החומר. הכוח החלש מדבר רק עם חלקיקים שמאליים. לשמאליים יש מטען של הכוח החלש ולימניים אין. הם פשוט לא קיימים מבחינתנו. אסימטריה זו שגילו בטבע אינה מאפשרת לכתוב את איבר המסה שהובא לעיל בגוף המאמר. זאת מכיוון שאיבר המסה מערבב בין שני הרכיבים, השמאליים והימניים, כפי שהסברנו לעיל, ומתייחס אליהם כאל שני צדדים של אותו חלקיק. אבל עכשיו זה כבר בלתי אפשרי – לאחד יש מטען ולאחר אין. אין זה משנה שיש להם תכונות זהות ביחס לכוח האלקטרומגנטי ולכוח החזק. ברגע שמבחינת כוח כלשהו הם שונים (ובטבע זה קורה בצורה המקסימלית ביותר – לאחד יש מטען של הכוח החלש ולשני אין) אזי הם פשוט שני יצורים נפרדים לגמרי.

כדי לחדר את הנקודה אסכם: אם היו רק כוחות סימטריים בטבע, כגון הכוח האלקטרומגנטי והכוח החזק, היינו יכולים לכתוב איבר מסה והיינו מבינים שמסה היא 'נתון' – תכונה עצמית של החלקיק. משהטבע הראה לנו שיש בו אסימטריה, אסימטריה שנמצאה בצורה מוחלטת בכוח החלש, אי אפשר לכתוב איבר מסה, מכיוון שהוא בנוי על סימטריה שאיננה.

עבור פיזיקאים, הבאתי את הפורמליזם המתמטי בנספח בסוף המאמר.
6 לפחות כך מזהירים אותנו הדיאטנים...
7 גלי רדיו הנם גלים אלקטרומגנטיים בטווח תדרים מסוים.

“לה’ הארץ ומלואה”

פוטונים של גלי הרדיו נמצאים באינטראקציה עם האלקטרונים שבאנטנה, וגורמים להם לזרום בתדרים שונים. מכל מקום, משנות ה-70 המודל הסטנדרטי של החלקיקים חזה תהליך המאפשר נתינת מסה לחלקיקים דרך איבר האינטראקציה. אם יהיה קיים שדה, נקרא לו היגס⁸ (ונסמנו באות H), לשדה זה יש אינטראקציה עם כל החלקיקים המרכיבים את החומר:

$$g \cdot H \cdot f$$

(לדוגמה $g_e \cdot H \cdot e$ יהיה איבר האינטראקציה בעל חוזק g_e בין שדה היגס לאלקטרון 'e', ו- $g_t \cdot H \cdot t$ יהיה איבר האינטראקציה בעל חוזק g_t בין שדה היגס לקווארק מסוג t), ואם על ידי מנגנון ידוע לפיזיקאים⁹ הערך של שדה זה יתקבע סביב ערך מסוים קבוע, נקרא לו v, אזי איבר האינטראקציה יקבל צורה ויתנהג אפקטיבית כמו איבר מסה:

$$g \cdot H \cdot f$$

↓

$$g \cdot v \cdot f$$

↓

$$(g \cdot v) \cdot f$$

↓

$$"m" \cdot f$$

כאשר עכשיו, כביכול, המסה של החלקיק 'm' אינה אלא $g \cdot v$, 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 היגס. למשל בדוגמאות לעיל, קווארק ה-t הנו פי 300,000 יותר מסיבי מן האלקטרון מפני שמידת הקישוריות שלו להיגס, g_t , גדולה פי 300,000 ממידת הקישוריות של האלקטרון להיגס, g_e . מקובל להשוות זאת לשני גופים המנסים לשחות ולהתקדם במים – האחד דג חלקלק והאחר אדם הלובש מעיל דובון. הדג, כמובן, ישחה הרבה יותר מהר, מכיוון שמידת הקישוריות שלו למים קטנה – הוא הרי חלקלק. ידידנו לבוש הדובון יתקדם לאט בגלל הקישוריות הגדולה שלו למים שסביבו. כך גם אנו, כולנו "שוחים" בים הזה של שדה היגס.

8 על שם פיטר היגס, אחד מתוך כמה מההוגים של המנגנון המבוסס על שדה זה. ייתכן שדווקא הוא זה שזכה שהשדה והמנגנון ייקראו על שמו בזכות אוכור קטן במאמרו. הוא ציין שלשדה האמור צריך להיות עירור / חלקיק משל עצמו, חלקיק שקיבל את השם בוזון היגס, ובכך פילס דרך לברוק את המנגנון בניסוי.

יש לציין שמתחילה השדה הנ"ל הוצע בידי פיטר היגס וכל שאר ההוגים כמקור המסה לחלקיקי ה-W וה-Z בלבד, ועל ידי מנגנון מעט שונה ממה שמתואר כאן. זה גם נכון, ההיגס אחראי גם על המסות של ה-W וה-Z, אבל אין זה מעניינו של המאמר שלנו. המאמר שלנו עוסק במקור המסות של החלקיקים המרכיבים את החומר, האלקטרונים והקווארקים. רק בשנות ה-70 הבינו ששדה היגס יכול להיות אחראי גם על המסות שלהם.

לבוגרי הערה 5 נעיר כאן ששדה היגס הנו גם בעל מטען של הכוח החלש, ובכך יכול לנטרל מטען זה של החלקיקים השמאליים. נטרול זה מאפשר ערבוב של החלקיקים הימניים והשמאליים על ידי האיבר המתנהג כאיבר מסה שיובא בהמשך.

9 מובא בנספח.

חלקיקים בעלי קישוריות נמוכה להיגס הנם מסיביים פחות, ואלה בעלי הקישוריות הגדולה הנם מסיביים יותר. מודל זה הוכח בארבעה ביולי 2012 על ידי אחד המאמצים המשותפים הגדולים והיקרים בתולדות האנושות. שני גלאי הענק שהוזכרו לעיל, ATLAS ו-CMS, חזו במקביל, וכל אחד על ידי חמישה ערוצים שונים, יצירה מרובה של בוזון היגס. בוזון היגס הנו העירור בשדה ההיגס והעדות הישירה על קיומו.

ב. משמעות הפיזיקה

אין חומר בעולם כלל

העולה מכל האמור עד כה הוא שלחלקיקים המרכיבים את החומר אין מסה "עצמית". המסה אינה אלא תופעה אפקטיבית של אינטראקציה בין שדות. עוד הבאנו, שעל פי תורת השדות הקוונטיים, השדה הפרוש על פני תבל הוא הישות הממשית, ואילו ה"חלקיקים" אינם אלא עירורים בו.¹⁰ החלוקה הברורה השלטת בתפיסה האנושית בין חומר לאור שהצגנו בפתיחת המאמר מתבררת כלא נכונה. המציאות מתנהגת כאילו הברלים אלו קיימים, אבל אין זה כך ביסודם של דברים. אין זו אם תחפושת המסתירה את טבעו האמתי של החומר, הדומה יותר לאור הנמצא באינטראקציה עם שדה היגס, מאשר משהו גשמי. מכל האמור יוצא שאין בקיום דבר כזה 'חומר'. במובן מסוים, אפשר לומר שהעולם שבו אנו חיים דומה יותר לסוג של דמות אור, מאשר לאוסף חלקיקים.¹¹

חשוב להדגיש שמסקנות אלו אינן עולות לא מתורת הקוונטים בפני עצמה ולא מתורת היחסות בפני עצמה, ואפילו לא מתורת השדות הקוונטיים בלי מנגנון שדה ההיגס שתואר לעיל. במהפכה של תורת הקוונטים אכן השתנתה פלאים תפיסתנו את החומר וכן תפיסתנו את החוקים המנהיגים אותו, אך המסה של חלקיק נשאר '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 ו'חוק שימור החומר' עומד בעינו – ההבדל התהומי בין אור לחומר עדיין קיים.

גם תורת היחסות הפרטית הראתה לנו שיש קשר בין חומר לאנרגיה, אבל חסר המנגנון. המשוואה $E=mc^2$ אינה מסבירה לנו איך החלקיקים המסיביים שאנו רואים אינם אלא אנרגיה, היא רק מזהירה שכך הדבר. יתרה מכך, אפשר לטעון שאפילו את זה אינה עושה – המשוואה רק מציינת את יחס ההמרה בין מסה לאנרגיה, אך אפשר

10 יש להעיר, שמבחינה אונטולוגית ייתכן שהישות הממשית האמתית הנה משהו עמוק יותר. למשל, תורת המיתרים ב-10 ממדים, כאשר המיתרים הנם הפרעות במרחב זמן. רצוני לומר, ההבנה של חלקיקים ככדורים קטנים נשללה. המציאות מתנהגת כשדות הנתונים לעירור, אבל ייתכן שיש כאן משהו עוד יותר רחוק מהדמיון הפשוט. במובן זה פיזיקה יסודית דומה לתוארי האיל על פי הרמב"ם – ייתכן שאין התארים מתארים את המהות, אלא שוללים הבנות פשוטות יותר. מכל מקום, הניתוחים במאמר זה רלוונטיים גם לתאוריות יסודיות יותר.

11 ההבדל בין דמות אור לבין המציאות שלנו היא שהפוטונים בדמות העשויה מאור אינם מקיימים אינטראקציה זה עם זה, ואילו הדמויות במציאות שלנו עשויות מהשדות של האלקטרון והקווארקים, אשר כן מקיימים אינטראקציה זה עם זה. לכן תוכלו להעביר יד דרך דמות העשויה מאור, אבל לא תוכלו להעביר יד דרך קיר.

"לה' הארץ ומלואה"

עדיין לראות את המסה כדבר העומד בפני עצמו (בדומה להמרת מט"ח, שכל מטבע קיים ועומד בפני עצמו).

גם המציאות הפנטסטית על פי תורת השדות הקוונטיים אינה מספקת מצד עצמה. זכורני שבמהלך הקורס הראשון שלמדתי בתורת השדות הקוונטיים התקשיתי להבין כיצד זה ייתכן שחלקיקים מסיביים יכולים פשוט לקפוץ ולהופיע מתוך שדה. השתעשעתי במחשבה ש"יהי שדה קוונטי של פרות. פרה יכולה להיווצר ולהופיע פתאום מתוך הריק". מובן 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 מצד עצמם, והם מקבלים מסה אפקטיבית דרך מנגנון היגס, מתבהרת התמונה של המציאות. הייתי אומר שעוד לפני ההבנה של מנגנון היגס היה אפשר לטעון טענה פילוסופית: אם חלקיקים אכן יוצאים משדות, אזי לא יכולה להיות להם מסה עצמית; המסה שלהם חייבת להיות תופעה אפקטיבית כלשהי. טענה זו אינה מוכרחת מתוך המשוואות, אלא מוכרחת פילוסופית-תפיסתית. לסיכום, רק לאחר ההבנה השלמה שמסה הנה תופעה אפקטיבית של אינטראקציה בין שדות יכול אדם להבין ולצייר בעין שכלו איך ולמה המסות של החלקיקים היסודיים אינן אלא אנרגיה. קביעות אלו משפיעות על האופן שבו אנו תופסים את העולם שבו אנו חיים גם מהבחינה האמונית, כפי שיבואר בהמשך.

'עלמא דשקרא'

קיבלתי מרבי, הרב קובי דנה, שהמושג 'עלמא דשקרא' אינו בא לומר שיש לעולם מגמות ודוניות של מרמה ושקר. המושג 'עלמא דשקרא' בא לומר שהעולם אינו מבטא ואינו משקף את מה שהוא באמת. 'עולם' מלשון היעלם – העולם מעלים את טבעו האמתי. 'היעלם' זה מתבטא ביחס בין טוב לרע, בין קודש לחול וגם בין רוח לחומר. בסיסה של תפיסה זו הוא שעל אף כל מה שאנו רואים למראה עיניים בעולם, באמת יסודו של העולם אינו אלא הקודש, הטוב והרוח. אמנם השדות שדובר עליהם בתיאוריה הפיזיקלית אינם 'רוח', אך כן כבר עוקרים הם את התפיסה שיסודו של העולם בחומר. מתוך טענה פילוסופית-אמונית זו, אפשר כבר לעשות ניבוי בר הפרכה מדעית: מתוך אמונתנו שיסודו של העולם אינו בחומר, כל מסה של חלקיקים אחרים שיתגלו בעתיד בהכרח לא תהיה מסה עצמית, אלא תופעה אפקטיבית כלשהי. טענה זו תהיה תקפה לכשיבינו מהו 'חומר אפל', וכשיגלו את התיאוריה של המסה הקטנה של הנייטרינו. אלו חלקיקים שלא דיברנו עליהם עד כה במאמר מכיוון שהם מתגלים רק בניסויים מדעיים ותצפיות קוסמולוגיות, ואינם נוגעים לעולם המוכר לקורא. מכל מקום, מתוך תפיסה של השתלשלות כלל הבריאה מן הרוח אל החומר מתחייב שגם להם לא יכולה להיות מסה עצמית.

אחדות ה'

החומר נתפס כדבר דומם ו"מת", אשר אפילו אם נברא בעבר הרחוק בידי הבורא, כעת הוא עומד בפני עצמו, סגור ומנותק מן האלוקות. אך אמונתנו, אמונת אחדותו יתברך, אינה מסתכמת במונותאיזם גרידא. "וידעת היום והשבת אל לבבך כי ה' הוא הא-להים בשמים ממעל ועל הארץ מתחת אין עוד" (דברים ד, לט) – אין הכוונה שאין עוד אלוהים אחרים מלבדו, אלא שאין עוד מלבדו. היטיב לבטא זאת השל"ה הקדוש:

הנה סברת העולם היא כך: הבורא ברוך הוא חידש הכל יש מאין המוחלט [...] וכביכול זוהי ידו מהם, רק אם לעת מהעתים רוצה לשדר אותם, וכל זמן שאינו משדר, אז מנהיגם בכח שהושג להם בעת הבריאה.

אמנם אמיתת האמונה הנראה בעיני, הוא: השם יתברך מחדש בטובו בכל יום תמיד מעשה בראשית, בכונה מכוונת, שופע שפע, ואילו היה מונע רגע אחד, היה הכל כלא היה, בטל המציאות. והוא פירוש הפסוק (דברים ד, לט) 'וידעת היום והשבת אל לבבך כי ה' הוא האלהים בשמים ממעל ועל הארץ מתחת אין עוד'. אין הפירוש כי אין אלוה זולתו [...] אלא רצה לומר, שאין עוד מציאות בעולם זולת מציאותו יתברך.

(עשרה מאמרות, מאמר ראשון)

עמדה זו מחייבת לראות את הכול, אפילו החומר הדומם, כמתחיה באופן תמידי מא-ל חי העולמים:

כח הפועל בנפעל תמיד להחיותו ולקיימו ובחי' זה הוא דבר ה' ורוח פיו שבעשרה מאמרות שבהן נברא העולם ואפילו ארץ הלזו הגשמית ובחי' דומם שבה חיותו וקיומו הוא דבר ה' מ' מאמרות המלוכש בהן ומקיימן להיות דומם ויש מאין ולא יחזרו לאין ואפס ממש כשהיו וז"ש האריז"ל שגם בדומם כאבנים ועפר ומים יש בהם בחי' נפש וחיות.

(תניא, איגרת הקודש פרק כה)

אך כאמור, בתפיסה פירונית, שלפיה החומר מורכב מחלקיקים מסיביים, מעין כדורי ביליארד קטנים, קשה להבין כיצד ומניין ממשך ומחיה הבורא את הבריאה. בדור האחרון היו שניסו לראות בכוחות האלקטרוסטטיים הנותנים לחומר את מבנהו עדות לחיות המחיה את כל החומר בכל רגע. אמנם באמת אין זה פותר דבר, שהרי החלקיקים היסודיים עצמם אינם אלא דומם, והדרא קושיא לדוכתא. אך לאחר ההבנה שיש רק שדות הנפרשים מסוף העולם ועד סופו, אשר עירורים בהם הנם מה שאנו קוראים 'חלקיקים', אפשר לומר שהמציאות דומה יותר להולוגרמה מאשר לצבר חלקיקים. מכאן זכות ניתנה לדורנו לא רק להאמין, אלא גם לדעת ולהבין כיצד נדרשת 'חיות' תמידית לקיומם של עצם חלקיקי החומר. זאת מכיוון שהחלקיקים אינם קיום בפני עצמם, אלא ענפים ההווים תמיד מן שדות אשר הנם שורשיהם.

תיאור פיזיקלי זה מזכיר מאוד את תיאורו של רמח"ל בספר דרך ה':

והנה מן העיקרים הגדולים שבידנו בעניין זה הוא, שכנגד כל מה שנמצא בנמצאים השפלים, נמצאים למעלה כוחות נבדלים, שמהם משתלשלים ויוצאים בסדר אחד של השתלשלות שגורה חכמתו יתברך, השפלים האלה, הם ומקריהם, ונמצאים הכוחות ההם שורשים לנמצאים השפלים האלה, והנמצאים השפלים ענפים ותולדות לכוחות ההם, ונקשרים זה בזה כטבעות השלשלת.

(פרק ה, בחלקי הבריאה ומצביהם)

לא עולה במחשבה צורה קרובה יותר לתיאור המציאות כפי שאנו מכירים אותה כיום, בלשון תקופתו של רמח"ל. אכן, היום אנו מתייחסים לחלקיקים היסודיים לא כקיימים מצד עצמם, אלא כענפים ותולדות לשדות ההם.

כאמור, תיאור זה הושלם מבחינה פילוסופית רק לאחר שהבנו את תפקידו של שדה ההיגס. כיצד היינו מבינים שהחלקיקים היסודיים אינם קיימים מצד עצמם, אלא כ"ענפים ותולדות" לשדות, אם לחלקיק הייתה תכונה עצמית של מסה? כאילו היינו אומרים ש"שדה כדורי הביליארד" הפרוש על פני כל המרחב גורם ליצירה פתאומית של כדורי ביליארד מסיביים. תיאור זה אינו מתקבל, ו"כל השומע יצחק". עוד, גם לו היינו מקבלים תיאור תמוה זה, מרגע שנוצר כדור ביליארד מסיבי – היינו מסתכלים

"לה' הארץ ומלואה"

עליו כאל דבר העומד בפני עצמו, כ"סברת העולם" המובאת בדברי השל"ה לעיל, שלאחר בריאת דבר מה יש מאין, הרי הוא עומד וקיים בפני עצמו. לפני כן לא היה גוף מסיבי, כעת יש גוף בעל תכונה עצמית של מסה. אמנם, לאחר שהבנו שגם המסה אינה תכונה עצמית אלא תופעה אפקטיבית של אינטראקציה בין השדות, כבר מפולשת הדרך להבין איך כל מה שיש נהיה באופן תמידי משורשו. "אדון הנפלאות, בורא כל הנשמות, ריבון כל המעשים, הבוחר בשירי זמרה, מלך יחיד א-ל חי העולמים".

נהיה או נהיה?

השלכה הלכתית לתפיסה זו התעוררה לפני כ-400 שנה. בעל חידושי 'חכמת מנוח', ר' מנוח הנדיל, דייק לנקד את המילה 'נהיה' שבברכת 'שהכול נהיה בדברו' בסגול. זאת מכיוון שבברכת 'שהכול' עלינו להודות לה' גם על שמהווה את הכול תמיד, בהווה. ברכת 'שהכול' מצטרפת אפוא לרוב ברכות הנהנין אשר ניתקנו בלשון הווה, כגון 'המוציא לחם מן הארץ' ועוד. את הדיון בגמרא (ברכות לח ע"א) סביב היות ברכת 'המוציא' בלשון עבר ראה בעל 'חכמת מנוח' כדרישה שתהיה לשון הברכה גם בלשון עבר. ובכך לשון הברכה מכוונת על עבר, הווה ועתיד. כך ראו סוגיה זו גם ראשונים כגון תוס' רי"ד ו'שיטה מקובצת'. על פי הבנה זו, היו מגדולי אשכנז שהנהיגו לכרך 'שהכל נהיה בדברו'. כך מובא על הגר"א בספר 'מעשה רב' (ע"ו), וכך מביא בעל 'ערוך השולחן':

ונראה לי בהכתוב תפס זה שהוא כולל גם לשון הווה, מפני שהקדוש ברוך הוא מחדש בכל יום תמיד מעשה בראשית, וכן בורא בכל עת ובכל שעה, שהשגחתו אינו נפסק אפילו רגע אחת, ולכן אומרים לשון שכולל הכל, דעל דבר זה שאוכל הוא לשון עבר ועוד הוא לשון הווה, כלומר שגם כעת ברגע זו בורא.

ולכן גם בברכת 'שהכל' צריך לומר 'נהיה' בסגול, שהוא לשון בינוני, כמו 'בורא' (מגן אברהם סימן רד סק"ד, וכן כתב במע"צ ובמחצית השקל), ויש רוצים לומר 'נהיה' היו"ד בקמ"ץ (עיין מגן אברהם סק"ח) שהוא לשון עבר גמור, ואינו עיקר, והעיקר לומר בסגול היו"ד.

(או"ח קסז, ז)

רואים שתפיסה זאת שורשית כל כך, עד שראו לנכון גדולי עולם לשנות מניקוד הברכה המקובלת. אמנם מצד דקדוק הלשון אפשר להבין גם 'נהיה' כמתייחס להווה, ו'נהיה' כמתייחס דווקא לעתיד.¹² אם כן, אפשר עדיין להחזיק בקמ"ץ ולתפוס בתפיסה שהקב"ה מהווה הכול תמיד.

שונה היא גישתו של היעב"ץ:

בודאי הדין עמהם מאחר שהיא ברכה כוללת לכל המציאות ואיך יתכן לומר שהכל מתהווה ונעשה עכשיו בדברו. והלא העולם בכללו כבר עשוי מששת ימי בראשית ואינו מקבל הווייתו להווה (ואף שאנו אומרים המחדש בטובו בכל יום מעשה בראשית, הוא ד"א שהרי אין אנו אומרים העושה או מהווה בכל יום מ"ב וזה ברור). על כן אין ספק שצ"ל נהיה בקמ"ץ.

(חלק א סימן צד)

לענ"ד יש כאן השפעה של תפיסה פיזית של המציאות, שהרי עינינו רואות את ד"ר הולך ודור בא והארץ לעולם עומדת" (קהלת א, ד), אם כן "איך יתכן לומר שהכל מתהווה ונעשה עכשיו בדברו?" – תפיסה זו היא שגורמת לאחוזו כהבנה מסוימת של

12 ר' אוריאל פרנק "חומרות, הידורים ושיבושים בלשון העברית: על תיקוני שגיאות ועל שגיאות מתקנים" בפרק "נראה לי שהכל נהיה בדברו".

הברכה המכוונת לעבר. אשרינו שדורנו זכה ולו נגלים מוסדות תבל. יודעים אנו שלא רק "ייתכן", אלא כך הוא באמת: הכול נהיה בדברו – גם בהווה.

השפעה אמונית-מוסרית

לתפיסה זו השפעה אמונית-מוסרית על האדם, השווה לזו של אמונת חידוש העולם. לא מפני היותו עובדה היסטורית חידוש העולם הנו מיסודות האמונה, שהרי עובדות היסטוריות ישנן הרבה שאינן מיסודות האמונה, אלא מפני היותו בעל משמעות עמוקה ומקיפה כול, כפי שכותב הראי"ה קוק זצ"ל:

החידוש המוחלט, בלא קדימת חומר ושום ישות כל דהי, הרי הוא מבסס את המחשבה האידיאלית, שאין מצוי אמת כי אם הטוב הגמור.

(ערפילי טוהר מט)

במקומות אחרים מתאר הרב כיצד ידיעה זו נוסכת אמונה בעולם וביטחון בתיקונו השלם:

כי מאחר שאין שום מציאות, לא כללית ולא פרטית, נמצאת כי אם מידי ד', יוצר ובורא כל, והוא ב"ה הוא מקור הצדק והמוסר, א"כ אין שום מציאות בעולם, שהצדק והמוסר לא יתגשמו בעולם בחיים ובמציאות.

(עולת ראייה א עמ' קיד)

היסוד הישראלי, מחידוש העולם מיסודו ושרשו, מאפס המוחלט, השוללת כל חומר וכל כח, רק הכל מעשה אלהים המה. וכיון שהכל בא מסוד הידיעה האלהית מדבר ד', הכל מוביל אליו.

(שמונה קבצים, קובץ ה, קמג)

זוהי המשמעות העמוקה של יסוד חידוש העולם בכתבי הרב. עד כדי כך שהנצרות, אף על פי שמצהירה כל היום כולו על אמונתה בכתוב ב'בייבל', עדיין "זונה אחרי קדמות החומר" (שם). זאת מכיוון שהיא מדברת על גאולה מן העולם והתייאשה מתיקונו. לא כאלה חלק יעקב, אשר מאמינים בתיקון עולם שלם ובמקורו האלוהי: "לא בגזירות דוגמתיות אנו באים כ"א בשטף חיים של הכרה פנימית שהם שבים ובאים אלינו מתוך גלי האור של אוצר התורה" (שם, קובץ ו, קפח).

קדמות החומר, או תפיסתו כמשהו עצמאי הקיים ועומד בפני עצמו, חוסמת את אור ה' מלהופיע בתוך העולם:

שהנה להדעה הכוזבת שיש חומר קדום [...] לא הי' אפשר להיות גם בנבראים יחש פנימי אל בוראם ית', שהרי היסוד החומרי, לפי זה הטעות, הוא נמצא זולתו, והוא יסוד הקיום הפנימי של הנבראים. נמצא שהטעות בדעה זו הנפסדת דומה כמי שאין לו אלוה, כי לא יוכל לרומם נפשו להכיר את קונה מאמתת מציאותה וקיומה הפנימי. (עין איה ברכות א' קלב)

מכאן החשיבות הרבה והמשמעות האמונית-מוסרית של ההבנות והגילויים של הפיזיקה החדשה. גירשנו את העננים הכבדים של האלילות, הננו הולכים ומנצחים גם את ענני החושך הקלים מהם של החומריות.

"לה' הארץ ומלואה"

נספח: פורמליזם מתמטי

איבר מסה

הזכרנו (בהערה 5) שאיבר המסה אינו יכול להתקיים בגלל הכוח החלש. הדרך הישירה להראות זאת היא בפורמליזם של הלגראנג'יאן מפני שהיא צריכה להיות אינוואריאנטית. לאחר חלוקה לקיראליות ימנית ושמאלית, איבר המסה בלגראנג'יאן עבור פרמיונים נראה כך:

$$m\psi_R^\dagger\psi_L$$

כאשר m הוא המסה ו- ψ_L ו- ψ_R הנם הפרמיונים השמאליים והימניים בהתאם. מיד ניתן לראות שאיבר המסה מערבב בין קיראליות ימנית לשמאלית. מצד עצמו איבר זה הוא אינוואריאנטי ויכול להתקיים. הבעיה היא כאשר מבינים ש- ψ_L הוא בעצם דובלט של סימטריית כיוול $SU(2)$ (סימטריה המעורבת בכוח החלש) ו- ψ_R הוא סינגלט. למשל, עבור אלקטרונים:

$$\psi_R = e_R, \quad \psi_L = \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix}$$

כאשר נבוא לכתוב את איבר המסה לא נקבל משהו אינוואריאנטי תחת $SU(2)$.

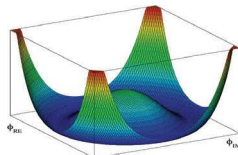
איבר אינטראקציה עם ההיגס

$$\Phi = \begin{pmatrix} \phi^+ \\ \phi^0 \end{pmatrix} \quad \text{ההיגס הנו דובלט של } SU(2)$$

אשר יושב בפוטנציאל:

$$V(\Phi) = m^2\Phi^\dagger\Phi + \lambda(\Phi^\dagger\Phi)^2$$

אם מקדם האיבר הריבועי הנו שלילי, ההיגס ישב בפוטנציאל בצורת ה"סומבררו" המפורסמת:



ומצב היסוד יקנה להיגס ערך סביב גודל קבוע v :

$$\Phi = \begin{pmatrix} 0 \\ h + v \end{pmatrix}$$

כעת, איבר אינטראקציה ייראה כמו:

$$g\psi_L^\dagger\Phi\psi_R = g(\bar{\nu}_L\bar{e}_L) \begin{pmatrix} 0 \\ h + v \end{pmatrix} e_R = g\bar{e}_L h e_R + gv\bar{e}_L e_R$$

האיבר האחרון יתנהג כמו איבר מסה, אשר $m=gv$. ויהי מסה.