

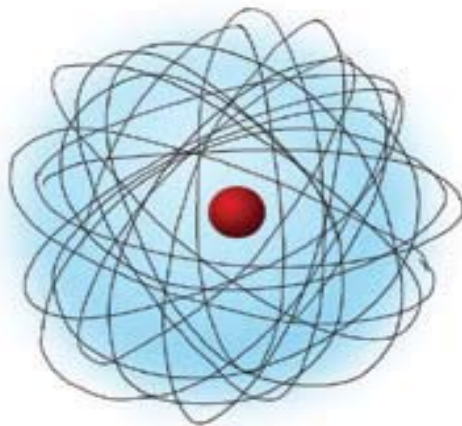
החיפוש אחר החלקיק האלוהי

מאת עילם גרוס

הניסיון המופלא שמתרחש בסרן שבשוויץ אמור לקרב את האנושות יותר מכל אל רגע הבריאה - הזמן שבו התרחש המפץ הגדול ונוצרו חלקיקי היסוד שמרכיבים את היקום שלנו. מיליארדי דולרים מושקעים במסע האדם להכרת עצמו, בניסיון להבין מאין באנו ולאן אנו הולכים.

לפני כ- 14 מיליארד שנה, 13.7 אם רוצים לדייק, נולד היקום. הוא נולד מנקודה ייחודית עתירת אנרגיה תוך כדי מפץ גדול. תנ"ך עדכני היה פותח בפסוק בראשית היה שום דבר, ויאמר אלוהים: יהי אור. ויהי מפיץ גדול, ויהי מרחב ויהי זמן ויהי מרחב-זמן. לאף אחד אין כרגע מושג מה קרה באמת בחלקיק השנייה האפסי והראשוני של הבריאה, אך מה שברור הוא שמתוך האנרגיה העצומה נוצרו התנאים ההכרחיים ליצירת חומר וכוחות, והחל התהליך הארוך שבסופו יושבים אנו, בני האדם, ומפענחים בעזרת שכלנו וחושינו את היסודות ואת אבני הבניין שמהם נוצרנו.

לפני 108 שנים, בשנת 1900, כמעט 14 מיליארד שנה לאחר המפץ הגדול, ניצב באולם הרצאות עמוס לעייפה בבניין החברה המלכותית הבריטית הלורד וויליאם תומסון קלווין בן ה-76 ונתן את אחת ההרצאות המפורסמות ביותר בתולדות הפיסיקה. בהרצאה זו ניבא קלווין את מותה של הפיסיקה. הוא טען ששני עננים קודרים מאפילים על הפיסיקה של המאה ה-19, ואם רק נפתור אותם - לפיסיקה לא יהיה יותר מה לגלות. שני העננים הקודרים ("הפעוטים") עליהם דיבר קלווין היו אי גילוי האתר - התווך שחשבו שבאמצעותו מתקדמים גלי האור, ואי ההבנה של קרינת הגוף השחור, שהיא הקרינה האחראית לאפקט החממה שבעטיו איננו מסוגלים להישאר אפילו דקה באוויר עם חלונות סגורים בחודשי הקיץ.



אלקטרון בבית הסוהר: הרדיוס של האלקטרון שבכדור הוא כמיליונית מעובי שיערה משערת ראשנו. ככל שהאלקטרון כבד יותר, כך קטן יותר מרחב המחיה שלו ולהיפך. לו האלקטרון היה כבד יותר, היה האטום קטן יותר. סקאלת הגרעין הייתה משתווה לסקאלת האטום וכל הדינמיקה הכימית הבין-מולקולרית הייתה משתבשת. לו האלקטרון היה קל יותר, היו

האטומים גדולים ורפים (loose) וכבר בטמפרטורות נמוכות היו המים מתאדים. לאלקטרון יש בדיוק את המסה שמאפשרת את קיומנו

לו היה קלווין נותן את הרצאתו היום, היה כנראה מספיד את הפיסיקה של המאה ה-20 תוך שהוא טוען שענן אחד בלבד מאפיל על שמי פיסיקת החלקיקים. רק נבין אותו ולא יהא יותר מה לחפש במחקר המבנה הבסיסי של החומר. השאלה שהיה מציג היא: איך קיבלו החלקיקים היסודיים מסה? עבורנו, חוקרי הפיסיקה של המאה ה-21, התשובה לשאלה זו הכרחית כדי לתת הסבר למה שהתרחש מייד אחרי המפץ הגדול ולהבנת היקום על-פי התיאוריה המקובלת של המודל הסטנדרטי.

מיותר לציין ששני ענני המאה ה-19 גרמו להולדתן של שתי התורות החשובות ביותר בפיסיקה המודרנית, תורת היחסות הפרטית של איינשטיין, לפיה אנרגיה שקולה למסה, ותורת הקוואנטים לפיה האור בנוי מחבילות (קוואנטים) של אנרגיה או חלקיקים שנקראים פוטונים. התשובה ל"עננה" המרחפת מעלינו כיום - איך מקבלים החלקיקים היסודיים מסה - תוביל ללא ספק לקפיצה מדרגה נוספת בפיסיקה ובהבנת היקום. אם צריך לתת סיבה אחת (ובהחלט יש יותר מאחת), הרי שבסרן שבשוויץ התכנסו בכירי הפיסיקאים והושקעו מיליארדי דולרים במסגרת הניסוי היקר ביותר בהיסטוריה, כדי לתת מענה לשאלה זו.

למה השאלה משמעותית כל-כך? מה אנו עושים כדי למצוא תשובה לשאלה? מהו חלקיק היגס ואיך יאפשר מאיץ החלקיקים בסרן לאשש את קיומו ולפענח את חידת מקור המסה של החלקיקים? מה יקרה למודל הסטנדרטי בפיסיקה אם החלקיק לא יתגלה? אתם מוזמנים להצטרף אלי למסע שיסביר מעט ממה שעובר במוחם הקודח של פיסיקאיי החלקיקים.

המפתח לטבע - מרכיבי האטום

בפיסיקה, כמו בתחומי מדע אחרים, מופיעה תיאוריה, שבמידה והיא משכנעת את חוקרי התחום (ביופייה, בקוהרנטיות שלה, בהיקף הניבוי שלה, בחדשנות שהיא מציעה וכדומה) היא הופכת לפרדיגמה שלטת. יכולת הניבוי של תיאוריה היא המרכיב החשוב שהופך אותה למעניינת ואטרקטיבית. תיאוריה המציגה ניבוי שניתן להעמידו לניסוי שיכול לאשש או להפריך אותה, מרכזת סביבה את מיטב הכוחות, שלצד המחקר התיאורטי ממתינים לביצוע הניסוי המכריע. כך המתין איינשטיין עם תורת היחסות הכללית עד לניסוי המפורסם של אדינגטון בשנת 1919, ניסוי שסיפק את התוצאות שחזה איינשטיין והוכיח סופית שאור מתעקם תחת גרביטציה, בדיוק בהתאם לתיאוריה שלו.

הפרויקט הגדול בסרן הוא הניסוי שנועד לאשש ובעצם להוכיח סופית את המבנה המורכב שחוקרי הפיסיקה המודרנית מתארים באמצעותו את יצירת היקום. זהו "המודל הסטנדרטי" שסביבו ובתוכו פועלים מרבית הפיסיקאים, ושלמיטב הערכתם הוא זה המתאר נכון את החלקיקים ואת אופן פעולת הכוחות בטבע.

כדי להבין את עקרונות המודל הסטנדרטי צריך לחזור אחורה. הפעם רק 2,500 שנה. האטום, *átomos* ביוונית, הומצא ביוון העתיקה על-ידי הפילוסוף דמוקריטוס כחלקיק הקטן ביותר, זה שאינו ניתן יותר לחלוקה. הרעיון הבסיסי נשמר עד לסוף המאה ה-19, אז גילה ג. תומסון את קיומו של האלקטרון והתברר כי האטום מורכב הרבה יותר ממה שחשבו וכי החלקיקים המרכיבים אותו, יחד עם היחסים ביניהם, קובעים את תכונותיו. מרגע זה מתחילה הפיסיקה המודרנית העוסקת בחקר מבנה האטום וביקועו למרכיביו, בניסיון להבין כיצד הם פועלים יחדיו ומתחברים למבנים הבסיסים ביותר של החומר.

בבית-הספר לימדו אותנו שהאטום בנוי מגרעין חיובי של פרוטונים ונויטרונים, שהם חלקיקים יסודיים, וסביב לגרעין נעים האלקטרונים השליליים שסובבים אותו במסלולים מעגליים. אין מצב כזה. ראשית, הפרוטונים והנויטרונים אינם חלקיקים יסודיים, אלא מורכבים **מקווארקים**, ושנית - אלקטרון שנע במסלול מעגלי פולט קרינה ורדיוס הסיבוב שלו קטן והולך עד שלכאורה היה צריך ליפול לתוך הגרעין. אם האלקטרון לא מסתובב ולא קורס פנימה, השאלה המתבקשת היא איפה בדיוק נמצא האלקטרון סביב הגרעין?

*מקור השם קווארקים, על-פי חתן פרס
נובל מורי" גלמאן, שטבע את השם לפי
שיר מיצירתו של ג'יימס ג'ויס, "טכס האשכבה
של פיניגן."*

תורת הקוואנטים גילתה לעולם את אחד מסודות הבריאה - עקרון אי-הוודאות. לא ניתן לדעת במדויק גם את מיקומו וגם את מהירותו של חלקיק. אי-הוודאות הזאת קטנה ככל שמסתו של החלקיק גדולה. לכן איננו מבחינים באי-הוודאות הזו בחיי היום-יום. אנו מאוד כבדים (מסתנו כאינסופית במשקפיים גרעיניות) ולכן ניתן לזהות במדויק את מיקומו. אבל אלקטרונים הם קלים ביותר, כמעט חסרי מסה (אלקטרון קל פי אלפיים מפרוטון או מאטום מימן), ולכן לא ניתן למקם אותם בבירור סביב הגרעין. האלקטרון לפיכך כלוא היכן שהוא בתוך כדור שהרדיוס שלו הוא כמיליונית מעובי שיערה משערות ראשנו.

כדי להמחיש את מצבו וגודלו של האטום נגדיל אותו עד שהגרעין שלו יהא בגודל של גרעין שעועית. כשהגרעין בגודל שעועית, יקבל האטום את המימדים של אצטדיון כדורגל, כשהאלקטרון הוא צופה זעיר שנע בתזזיתיות בתוך האצטדיון. בלי שניתן לקבוע בוודאות את מיקומו המדויק. יוצא מכך שהאטום הוא למעשה ריק. זו תוצאה והוכחה ברורה של עקרון אי-הוודאות של תורת הקוואנטים.

אלוהים, ברגע שנתן מסה לאלקטרון, אפשר את התחברותם של האטומים ומכאן את קיומם של חומר, כוכבים וגלקסיות. באמצעות המסה הוא קבע את מידת הריקנות בתוך החומר והכתיב את הכימיה של החיים. מסת האלקטרון המדויקת היא המפתח ליציבות המערכת הפיסיקלית-כימית שבה אנו חיים.

על-פי המודל הסטנדרטי, הייתה ליקום בראשיתו סימטריה מופלאה. כל החלקיקים היו חסרי מסה, וכוח אחיד ויחיד פעל בין חלקיקי החומר. היה סדר. ביקום סימטרי כזה אין לנו מקום. כדי לאפשר היווצרות חומר וחיים, הייתה הסימטריה הזאת חייבת להישבר. ואכן, סמוך להיווצרותו של החומר (זמן קצר מאוד אחרי המפץ), נשברה הסימטריה. האלקטרונים והקוורקים נעשו מאסיביים - כלומר קיבלו מסה. תודות למסה הזו אנחנו נמצאים כיום פה.

יצאנו לדרך בשאלה איך קיבלו חלקיקי היסוד את המסה? על-פי התיאוריה המקובלת היום, שבירת סימטריה היא שאפשרה לחלקיקים לקבל מסה, והיא נעשתה באמצעות שדה שנקרא על שמו של הפיסיקאי הבריטי, פיטר היגס. החלקיק ששדה ההיגס בורא נקרא חלקיק היגס ובעגה יש שמכנים אותו "חלקיק האלוהים". קיומו של חלקיק זה הכרחי על-פי הבנתנו הנוכחית את מערכת הכוחות והחלקיקים בטבע. בניסויים שנערכו בשנים האחרונות יש עדויות נסיבתיות לקיומו ופעילותו של החלקיק. הניסוי בסרן נועד בין השאר לברוא את החלקיק מאנרגיה באמצעות המאיץ ולנסות "ללכוד אותו" באמצעות הגלאים.

למרות שפיטר היגס הבריטי השאיל את שמו לחלקיק ולשדה היגס לפחות עוד שני פיזיקאים, פרנסואה אנגלר ורוברט ברו, היו מעורבים בתגלית ושלושתם קיבלו בכנסת ישראל בשנת 2004 את פרס וולף היוקרתי. היגס החרים את הטקס מסיבות פוליטיות.

התפקיד החשוב של ההיגס בתיאוריה הקנה לו את הכינוי המתיימר "חלקיק האלוהים" - "The God Particle" על-ידי חתן פרס נובל, לאון לדרמן. רוב הפיזיקאים מסתייגים מהכינוי הן בגלל הקונוטציות לכאורה דתיות שלו והן בגלל היומרות. אני משתמש במאמר זה בביטויים תנ"כיים ובמלאכים מסיבות ספרותיות לחלוטין. אני מאמין שהפיסיקה של היקום

מדהימה ביופייה ואין פסול בלהשתמש בלשון פואטית כדי לחבר אותה לאנשים שבסיסם יותר הומאני ורוחני. אני חושב שזו הייתה כוונתו של לאון לדרמן כשטבע את הביטוי.



האטום הריק: אם נגדיל את הגרעין לגודל של גרעין שעועית, יקבל האטום את המימדים של אצטדיון כשהאלקטרונים הם צופים זעירים שנעים בתזזיתיות איפשהו מסביב לגרעין. אנחנו למעשה בנויים מריק, שאומדנו מוכתב על ידי מסת האלקטרון

לפי התיאוריה של המודל הסטנדרטי, רגע לאחר המפץ, אחרי הוואקום הבראשיתי הגדול, בטמפרטורה העצומה, נוצרו מתוך השדות הקוונטיים צמדים של חלקיקים, אנטי-חלקיקים וחלקיקי אור הנקראים פוטונים. מיליארדית שנייה מאוחר יותר החל היקום להתקרר ולהירגע מעט, וניתן היה להבחין בחלקיקי היסוד המוכרים לנו היום ובפרט באלקטרונים ובקוורקים (שמהם עשויים הפרוטונים והנויטרונים). חלקיקים אלו היו חסרי מסה. כדי שיוכלו לקבל מסה, היה צורך בשבירת הסימטריה ביקום. שבירה זו נעשתה באמצעות שדה ההיגס. תוך כדי היצמדות לשדה ספחו האלקטרונים והקוורקים מסה. כתוצאה מזה נעשו הפרוטונים יציבים וחברו עם נויטרונים ואלקטרונים לאטומים, בפרט לאטומי מימן והליום, ומאטומים אלו נוצרו בסופו של דבר הגלקסיות ואבק הכוכבים שממנו אנו עשויים.

שדות ויצירת חלקיקים

שדה היגס? בואו נרחיב מעט בתהליך שהתרחש וננסה להבין יותר את מושג השדה. האלקטרון הנמצא אי-שם באצטדיון שלנו חש את הכוח החשמלי הקיים בגרעין האטום. הוא כמו צופה באצטדיון שמבחין בגרעין השעועית שמונח במרכז האצטדיון. איך הוא עושה את זה בלי משקפת? למעשה הוא לא מבחין בגרעין, אלא נלכד על-ידי "רשת" שפורש הגרעין.

בפיסיקה לא נדבר על רשת, אלא על שדה חשמלי. הגרעין מייצר שדה חשמלי שחש בכל מטען מסביבו ומפעיל עליו כוח. מהו אותו שדה חשמלי שבוגרי חמש יחידות בפיסיקה למדו עליו בתיכון גם אם לא כל-כך הבינו במה מדובר? לשם הדגמה נחשוב על תנור במרכז החדר שמייצר חום. באמצעות תרמומטר ניתן למפות את הטמפרטורה בכל מקום וזמן בחדר. הפונקציה הזאת של הטמפרטורה, או המיפוי הזה, הוא שדה הטמפרטורה. יש לו ערך בכל מקום בחדר.

גם גובה פני הים הוא שדה. כשהים רגוע והדגל שעל סוכת המציל לבן, לשדה יש ערך קבוע ועלול להיות די משעמם להיכנס למים, במיוחד לגולשים בינינו. אבל אם תעבור סירה ותחולל גל, הפרעה בשדה, הרי שהסירה תניע את פני המים מעלה מטה וההפרעה הזאת בגובה פני המים תתקרב אלינו במהירות ונוכל לרכוב על שיא הגל עד ליבשה. כמות המים בים לא השתנתה, אבל הפרעה בפני המים נושאת עימה אנרגיה, היא כמו כדור שמתקדם אלינו ואף מסוגל לדחוף אותנו.

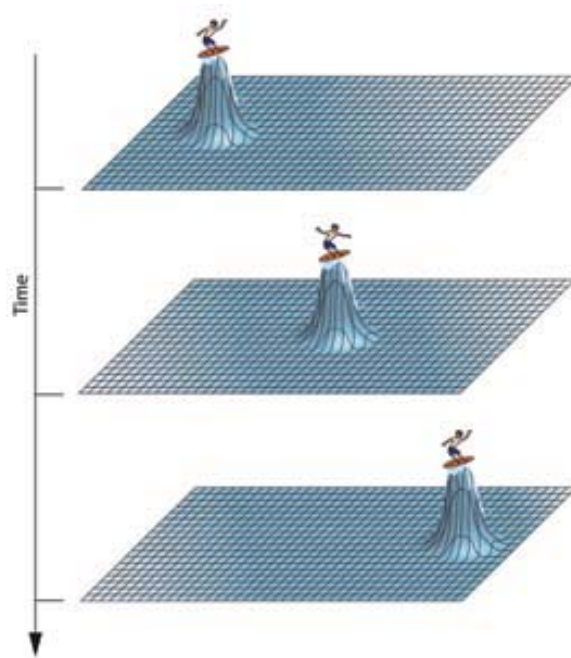
באותו אופן יוצרת הפרעה בשדה החשמלי גל אלקטרומגנטי. זה מה שקורה באנטנת שידור-אלקטרון שנע באנטנה הלוח חזור ומחולל גל אלקטרומגנטי המתפשט ונקלט אצלנו במקלט הרדיו. גל מים מועבר על-ידי תנועה של מולקולות המים, אבל במה מתבטא והיכן עובר השדה החשמלי או הגל האלקטרומגנטי? מה מתנגש? מה זורם? מהו התנוך בו הוא מתקדם?

זה לקח כמה מאות שנים ומוחות של ענקים (מקסוול, איינשטיין, דירק, פיינמן ואחרים) כדי להבין שלא צריך תווך (תורת היחסות הפרטית), ושהאור בנוי מחלקיקים - פוטונים (תורת הקוונטים). החתונה של תורת היחסות הפרטית עם תורת הקוואנטים הולידה את מושג השדות הקוואנטים שפרושים על פני כל המרחב-זמן, ושבתוכם מתקיימות הפרעות שהם תוצאתם של ערורים של השדה, שיוצרים או מחסלים חלקיקים. בשדה אלקטרומגנטי, ההפרעות אינם אלא פוטונים נושאי אנרגיה. אלקטרון מתקשר עם אלקטרון אחר באמצעות היצמדותו לפוטונים. בפיסיקה מדברים על אינטראקציה או על היצמדות בין חלקיקי חומר

(אלקטרונים) לחלקיקי כוח (פוטונים). במקרה של האטום, הפוטונים מתווכים בין הפרוטון שבגרעין לאלקטרון המרוחק.

תורת השדות הקוואנטים פתרה את המסתורין של הצופה המרוחק (האלקטרון), שרואה את גרעין השעועית המונח במרכז האצטדיון. האלקטרון "רואה" את הגרעין באמצעות החלפת פוטונים בתוך שדה אלקטרומגנטי.

בשפה ציורית אפשר לומר, **שאלוהים שברא את היקום, ברא גם את המלאכים השומרים (Guardian Angels) על-מנת שישמרו את הסימטריה והיציבות.** המלאכים הללו, הפוטונים, ממלאים את היקום כולו ובמקום שהם חשים סטייה קלה מהסימטריה, הם מייד דואגים לתקן את המצב. כדי שיוכלו להגיע לכל מקום ביקום ולשמר את הסימטריה, מרחב פעולתם חייב להיות אינסופי ולכן הם חייבים להיות חסרי מסה.



שדות וחלקיקים: אף אחד לא ראה מעולם חלקיק יסודי. האינטואיציה עלולה להטעות. חלקיק אינו כדור קשיח בעל מידות סופיות. בתפיסה של הפיזיקה החדשה, חלקיק הוא הפרעה, ערור של שדה, שנע במרחב-זמן; הוא כמו גל מים שנע בים שנברא במיוחד עבורו. האלקטרונים, למשל, הם ערורים של שדה האלקטרון במקומות שונים ובזמנים שונים. הפוטונים הם ערורים של שדה הפוטון, השדה האלקטרומגנטי. תנועה של פוטון ממקום אחד במרחב-זמן למקום אחר נקראת קרינה אלקטרומגנטית.

אבל לצורך קיומו של היקום שלנו, **חייבים** חלקיקים רבים להיות בעלי מסה. המסות של החלקיקים האלמנטריים מכתובות את טווח וטבע הכוחות, תוחמות את המידה של האטומים והגרעינים ומכתובות את הכימיה של האטומים והמולקולות. אי אפשר להפחית בערך

ובתפקיד המכניזם שמקנה לחלקיקים האלמנטריים את מסתם ושאחראי בעקיפין גם למאזן החיובי של החומר אנטי-חומר ביקום. המכניזם הזה התרחש ברגע מסוים בהיווצרות היקום על-ידי שדה שנקרא שדה היגס ושעירור שלו (ההפרעה הנעה בשדה) נקרא חלקיק היגס.

מה שמושך במכניזם הזה את ליבם של הפיסיקאים עד כדי הנכונות להשקיע מיליארדים רבים מאוד של דולרים על-מנת לגלות את חלקיקי ההיגס, הוא היופי התיאורטי שטמון בחובו והעדויות הניסיוניות שכבר הצטברו לקיומו. שדה ההיגס מאפשר לתת מסה גם לחלקיקי החומר (אלקטרונים וקוורקים) וגם לפוטונים שמעבירים את הכוח הרדיואקטיבי (חלש), ה-W וה-Z. מסתו של ה-W מנובאת על-ידי מכניזם ההיגס ומהווה למעשה עדות נסיבתית לקיומו.

הקניית המסה נעשית בלי לשבור באופן מפורש את הסימטריה של חוקי הפיזיקה שמכתיבים את הכוחות. אני מודע לערפולו של המשפט שכתבתי זה עתה. ההסבר המתמטי פשוט יחסית, אבל ההסבר והמשמעות הפילוסופית או האינטואיטיבית מורכבים וקשים.

במגילת פרס וולף 2004 נאמר שהפרס ניתן לאנג'לר, ברו והיגס על עבודתם החלוצית שגרמה להבנת יצירת מסה השונה מאפס בכל פעם שסימטריית כיוול לוקלית מתממשת באופן א-סימטרי בעולם החלקיקים התת-אטומיים. כשהתעניינתי מדוע הניסוח כל-כך מעורפל, נאמר לי שאחרת זה לא היה נראה מספיק רציני...

הסומברו

כשביקשתי מפרנסואה אנג'לר לעזור לי להסביר את מכניזם ההיגס לקהל של הדיוטות, הוא ניסה במשך כמעט חצי שעה להמציא הסבר ונכשל שוב ושוב. מאחר וקטונתי מלעמוד במקום בו גדולים ממני עמדו ונכשלו, אנסה ללכת בעקבות ההסבר המסורתי הקרוי "אינטרפטציית הכובע המקסיקני – הסומברו". אם לא תצליחו לעקוב אחר ההסבר, פשוט דלגו לראש הפרק הבא.

לסומברו, במבט מהפסגה שלו (הצ'ופצ'יק שבראשו), יש סימטריה מעגלית מושלמת. האיש הקטן שיושב בראשו מביט סביב ורואה סימטריה מוחלטת. הוא חש את האיזון העדין שבפסגה, שכל הפרה קטנה שלו תגרום לגלישה אל שיפולי הסומברו. לחוקי המכאניקה שפועלים על האיש שבפסגה אין כיוון מועדף מפאת הסימטריה שלהם, ולכן לא ניתן מראש לצפות לאן יחליק האיש.

ברגע שיופר האיזון למעלה, למשל אם הכיפה תרעד לחלקיק שנייה, ימצא עצמו אותו אדם באיזושהי נקודה בשיפולי הכובע ולפתע, למרות שחוקי הפיזיקה שגרמו לנפילתו נשארו

סימטריים לחלוטין, אדם זה כבר לא ימצא יותר במצב סימטרי. הוא בחר בעל-כורחו בכיוון מועדף, וכשהוא מביט לראש הכובע או לצדדיו, הוא מבחין בהבדלים סביב. אנו נאמר שהסימטריה נשברה באופן ספונטני.



שבירת סימטריה ספונטאנית: לסומבררו במבט מהפסגה יש סימטריה מעגלית מושלמת, שנשברת כאשר האיש הקטן מחליק למקום כלשהו בשיפולי הכובע. לחוקי הפיזיקה שפועלים על האיש שבפסגה אין כיוון מועדף מפאת הסימטריה שלהם, ולכן לא ניתן לצפות מראש לאן יחליק האיש. לשדה ההיגס במצב האנרגטי הנמוך ביותר שלו (שיפולי הכובע) יש ערך קבוע שונה מאפס (רדיוס הכובע, מרחק האיש מהמרכז), שבזכותו יש לחלקיקים היסודיים מסה שונה מאפס תוך כדי שמירה על סימטריית החוקים (סימטריית הכובע עצמו).

חוקי הפיזיקה נשארו סימטריים אבל מצב היסוד של המערכת, שבו האיש בקצה הסומבררו יציב ו"חסר אנרגיה", אינו משקף יותר את הסימטריה של החוק שהפר את איזון המערכת (הפיל את האיש).

דמיינו עכשיו שבכל נקודה - במרחב ובזמן שאופף אותנו - יש סומבררו כזה. האיש מייצג את שדה ההיגס ("השדה של אלוהים"), גובהו על פני הכובע מייצג את האנרגיה של השדה, ואילו מיקומו על פני הכובע (הרדיוס שלו, מרחקו ממרכז הסומבררו) מייצג את עוצמת השדה.

ליקום ברגע בריאתו יש אנרגיה עצומה וטמפרטורה עצומה. לאיש שעל הסומבררו לא נוח. הוא נע בתזזיתיות ימינה ושמאלה, קדימה ואחורה, מחפש מקום נוח להחליק ממנו, אבל לא מוצא. הטמפרטורה העצומה מחזיקה אותו בראש הסומבררו. במצב זה, עוצמת השדה הממוצעת היא אפס, אבל האנרגיה גבוהה.

היקום מתקרר ופחות ממיליארדית שנייה אחרי המפץ הגדול מצליח אותו אדם למצוא מנוחה איפה שהו בשיפולי הכובע. שדה ההיגס במינימום אנרגיה, אבל עוצמתו קבועה ואינה אפסית, מה שעושה אותו נוכח ומורגש. הסימטריות של הכוחות בטבע נשארו כמות שהן, אבל מצב היסוד של הטבע עצמו (שהיה בראש הסומבררו) איבד את הסימטריה שלו. הסימטריה נשברה באופן ספונטני ושדה ההיגס בחר כיוון מועדף תוך כדי קבלת עוצמה

קבועה ששונה מאפס . כדי להשלים את התמונה נציין שלשדה ההיגס מטען חלש (רדיואקטיבי), שמאפשר לחלקיקי החומר כגון האלקטרונים והקוורקים לחוש בערך השדה השונה מאפס ולרכוש לעצמם מסה. חלקיקים ללא מטען חלש אדישים לשדה ההיגס, ולכן למשל הפוטונים נשארים חסרי מסה (וחוק שימור המטען החשמלי נשאר תקף) ואילו ה- W וה- Z , מתווכי הכוח החלש, שנושאים מטען חלש, רוכשים גם הם מסה. יתירה מזאת, היות גם להיגס מטען חלש, הוא נצמד לעצמו, חש בקיומו שלו עצמו ומקנה לעצמו מסה, שכרגע, אגב, אין לנו מושג מהי.

וכך, שדה ההיגס שבחר לעצמו כיוון מועדף עם עוצמה שונה מאפס במצב היסוד שלו, נתן מסה גם לפוטוני הכוח החלש- W ו- Z , (והגביל בכך את טווח הכוח החלש), גם לאלקטרונים (מה שאפשר את התחברותם של אטומים ושל כימיה כפי שהיא מוכרת לנו), וגם לקווארקים (שקיבלו את המסה הנחוצה ליציבותם של הפרוטונים). אם שדה ההיגס יאבד את עוצמתו הקבועה במרחב ובזמן, יחזרו כל החלקיקים להיות חסרי מסה והיקום הנצפה שאנו מכירים יהפוך להיות בלתי אפשרי. **שדה היגס גם הוא לכן "מלאך שומר" המקנה לחלקיקים היסודיים את המסות הנדרשות לקיומו של היקום, ואנחנו בתוכו.**

השלמת הפאזל

המכניזם הזה שבו מוקנית המסה על-ידי שבירת הסימטריה הספונטנית התגלה בשנות ה-60 של המאה ה-20. הוא ניבא במדויק את מסתם של נושאי הכוח החלש, ה- W וה- Z , והללו אכן נתגלו ב-1983 בדיוק במסה הצפויה. המכניזם הזה הוא שמנבא את קיומו של חלקיק ההיגס הנעלם והמסתורי.

אזכיר כאן אנלוגיה מאוד פופולרית, שאני אישית לא נמנה על חסידיה. בשנת 1993 **איתגר** שר המדע הבריטי את קהילת המדענים הבריטים והבטיח בקבוק שמפניה למדען שיצליח להסביר לו על גב מעטפה מהו אותו חלקיק היגס ולמה שווה להשקיע מיליארדי דולרים כדי לגלותו. ההסבר המנצח היה של דיוויד מילר. שדה ההיגס על ערוריו, חלקיקי ההיגס, הוא כמו קהל רב של אנשים שמסתובבים באולם (ממלאים את היקום). לאולם נכנס איש חשוב (חלקיק, למשל אלקטרון), נאמר ראש הממשלה. תנועתו פשוטה ומהירה. האנשים באולם מתקרבים אליו כדי לראותו ולזכות בקירבתו ויוצרים בועה סביבו. תנועתו נעשית כבדה ואיטית, ובמובן זה הוא רכש מסה, שהרי ככל שמסה של גוף גדולה יותר כך קשה יותר לשנות את מצבו הנתון. ככל שהחלקיק שנכנס לחדר "חשוב" יותר. כך ייצמד אליו שדה ההיגס חזק יותר ויקשה יותר על תנועתו. באותו אופן אפשר לדמות את שדה ההיגס גם

לנוזל שממלא את היקום. חלקיקים שנעים בנוזל, תנועתם מתעכבת עקב צמיגות הנוזל, והם רוכשים מסה.

אם נסכם את המודל שתיארנו לעיל, היקום נוצר מחלקיקי חומר טעונים במטען חשמלי ורדיואקטיבי, כולם חסרי מסה והם נצמדים זה לזה באמצעות חלקיקי כוח חסרי מסה – פוטונים. שבירת סימטריה ספונטנית מקנה מסה הן לחלקיקי החומר, האלקטרונים והקוורקים, והן לפוטוני הכוח החלש ה-W וה-Z, וכל זאת בלי לפגום מפורשות בסימטריה של חוקי הטבע שהופכת להיות "חבויה".

המודל שלנו בנוי מאבני היסוד של הטבע, שהם בעקרון כל חלקיקי החומר: שישה קווארקים, שלושה אלקטרונים עם הנויטרינו שנצמדים אליהם, הפוטון, ה-W וה-Z, הגלואון (ה"מלאך השומר" של הכוח הגרעיני החזק, כוח הצבע, ראה איור "קוורקים בבית הסוהר"), ואחרון חביב - חלקיק ההיגס. כולם יחד מרכיבים פאזל בן 17 חלקים (אבני היסוד של היקום שלנו). תכונות החלקיקים, המסה שלהם והמטענים השונים, מהווים מעין קוד גנטי של האינטראקציות ביקום, שמתקשרות בין חלקיקי החומר השונים על-ידי פוטוני הכוחות השונים.

הבעיה היא שכשניגשנו לחבר את הפאזל מצאנו שחסרה בו חתיכה. כולם חיפשו בקופסה את החתיכה החסרה ובכל זאת החתיכה שעליה רשום היגס - H - לא נמצאה. המבנה התיאורטי שבנינו לא הושלם. הפיסיקאים החליטו שאין ברירה, אלא להתקשר ליצרן ולבקש את החתיכה החסרה. על הקופסה היה כתוב שהפאזל נוצר כעשירית של מיליארדית שנייה אחרי המפץ הגדול ונראה היה שבלתי אפשרי להגיע ליצרן. לא נותרה ברירה אלא לנסות ולהתכתב עם היצרן האלמוני באמצעות ייצור החתיכה החסרה בתהליך שמשחזר את חלקיק השנייה שאחרי המפץ הגדול.

בז'נווה שבשווייץ נבנתה במימון ובשיתוף בינלאומי מנהרה שבה ייצרו אלפי מדענים סביבה דומה ככל האפשר למצב היקום עשירית של מיליארדית שנייה אחרי המפץ הגדול. בסביבה זו הם מקווים לנסות לברוא את החלקיק החסר.

לראות את היגס

כדי "לראות" את חלקיק ההיגס, צריך קודם כל לברוא אותו מאנרגיה באמצעות השדה שלו ואחר-כך לגלות אותו באמצעות גלאי חלקיקים. גלאי החלקיקים הפשוט ביותר שאתם מכירים הוא אתם עצמכם, או ליתר דיוק העין שלכם. העין מגלה פוטונים של אור באמצעות קליטתם והמרתם לאותות שמגיעים למוח שלנו שמעבד אותם ויוצר מהם תמונה.



Made by God, 0.0000000001 sec AB ©:

הפאזל של המודל הסטנדרטי נוצר עשירית של מיליארדית שנייה אחרי המפץ הגדול, יחד עם החתיכה החסרה, חלקיק היגס.



פאזל המודל הסטנדרטי: כל החלקיקים היסודיים יכולים להרכיב פאזל פשוט שמתאים להרכבה על-ידי ילדים, אלא, שחתיכה אחת חסרה.

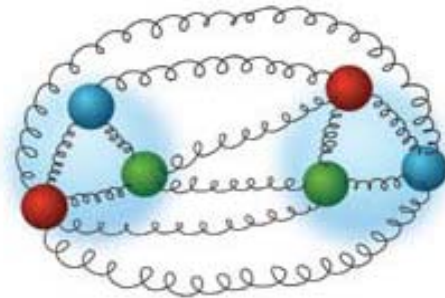
אין שום הבדל עקרוני בין העין שלנו לגלאי שנבנה בז'נווה ואשר נועד לגלות את חלקיק ההיגס פרט לעובדה שזה האחרון הוא גלאי משוכלל הרבה יותר מהעין שלנו, כי הוא מסוגל לגלות הרבה מעבר לפוטונים בתחום הנראה. הגלאי שנבנה בז'נווה הוא מעין עין **ביונית**.

שני גלאים נבנו ב-LHC לגילוי ההיגס. CMS ו-ATLAS. ישראל חברה

ב-ATLAS ובמאמר זה, למרות כלליותו, הדוגמאות והתצלומים מתייחסים ל-ATLAS

גילוי החלקיקים מתבצע על-ידי "העין הביונית", שמטרתה לזהות בנוסף לפוטונים גם קוורקים, גלואונים, אלקטרונים, מיואונים (אלקטרונים כבדים) וכו'. הזיהוי נעשה על-ידי המרת האנרגיה של החלקיקים במסלולם לאותות אלקטרוניים שמועברים למחשב. המרת האנרגיה לאותות מתבצעת על-ידי עצירתם וספיגתם בגלאי (פרט למיואון שהוא החלקיק היחיד שמשאיר את עקבותיו בגלאי עד לצאתו מחוץ לגלאי, והנויטרינו שלא משאיר שום עקבות). עצירתם של חלקיקים אנרגטיים כל-כך מחייבת גלאי עצום, שאורכו כ-50 מטרים וגובהו 25 מטרים, כגובהו של בניין בן שבע קומות.

הסיבה שלא גילינו עד היום את חלקיק ההיגס היא שכדי לברוא אותו יש להשקיע אנרגיה ששווה לפחות למסתו, ויש צורך לברוא כמה וכמה חלקיקי היגס על-מנת שנשתכנע בגילוי. עצם העובדה שלא גילינו עד היום את חלקיק ההיגס במאיצים הקיימים מצביעה על כך שהוא כבד יותר מהאנרגיה שהייתה נתונה בידינו על-מנת לברוא אותו.



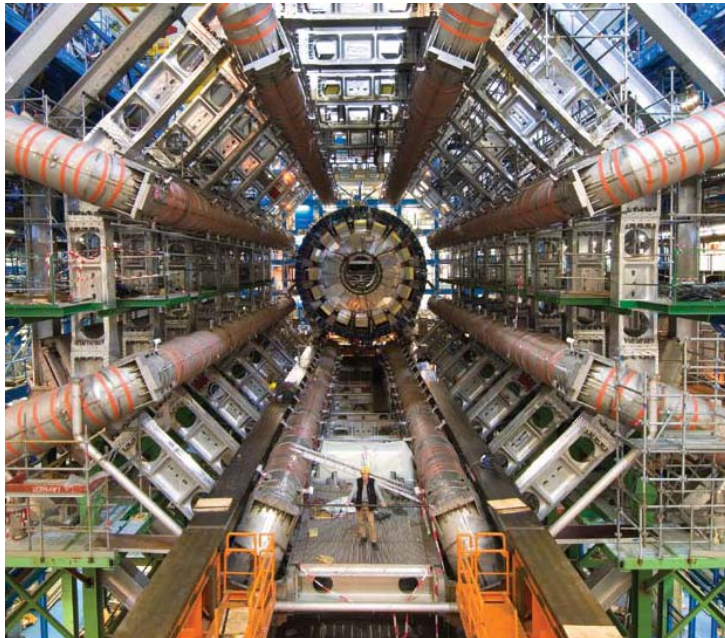
קוורקים בבית הסוהר: כל פרוטון בנוי משלושה קוורקים נושאי מטען שקרוי צבע, אדום, כחול או ירוק. הקוורקים נצמדים זה לזה באמצעות החלפת גלואונים, ה"מלאכים השומרים" שמשמרים את הצבע הלבן של הפרוטון (אדום+כחול+ירוק=לבן). מאחר וגם הגלואונים נושאים מטען של צבע הם תוחמים את הקוורקים בפרוטון ולא ניתן למצוא קוורק חופשי. באמצעות הגלואונים. הקוורקים בפרוטון אחד יוצרים אינטראקציה עם הקוורקים בפרוטון השכן בגרעין, שתוצאתה קשר משיכה. הגלואונים לכן אחראים לכוח המשיכה החזק בין פרוטון לפרוטון, שגדול עשרת מונים מכוח הדחייה החשמלי. אנרגית הקשר העצומה של הגלואונים בינם לבין עצמם אחראית גם לרוב המסה של הפרוטונים והנויטרונים.

אלפי פיסיקאים התכנסו לכן לבנות את ה-LHC - מאיץ חלקיקים חדש - מאיץ פרוטונים. הפרוטון כבד פי 2,000 מהאלקטרון, ולכן ההתנגשות בין שני פרוטונים עוצמתית פי כמה וכמה. אם נדמה את האלקטרונים לשני זוגות אופניים מתנגשים, הרי הפרוטונים הם כמו שתי משאיות ענק עמוסות חומר נפץ שמתנגשות זו בזו בעוצמה רבה.

הסיכוי ליצירת ההיגס בהתנגשות פרוטון בפרוטון הוא $1:1000000000000$, כלומר היגס אחד על כל טריליון התנגשויות. יוצא מכך שאם ברצוננו לגלות את ההיגס, יש ליצור טריליוני התנגשויות בין פרוטונים לפרוטונים ובאנרגיות גדולות דיין על-מנת לייצר את החלקיק.

מקור השם LHC – Large Hadron Collider על שם שפרוטונים שייכים למשפחה של חלקיקים שנקראים הדרונים

מאחר והפרוטונים כמעט נקודתיים, קשה מאוד למקד אותם כך שיפגעו זה בזה. לכן מגדילים את סיכויי ההתנגשות באמצעות יצירת אלומה של פרוטונים שמורכבת מצורות של כמעט טריליון פרוטונים בצורה צרורה. צורה כזו היא כסיכה ארוכה באורך של כשבעה סנטימטרים ובעובי של כ-15 מיקרונים – עובי שורה. בסופו של דבר (לקראת 2009), יהיו כמיליארד פרוטונים שיתנגשו במיליארד פרוטונים בכל שנייה.



גלאי אטלס בתחילת הבנייה שלו. ניתן לראות את המגנט המתומן העצום שעוטף אותו, שתפקידו לעקם את המיואונים ("האלקטרונים הכבדים") שיוצאים החוצה מהגלאי על מנת לאפשר את מדידת האנרגיה שלהם. צילומים: CERN

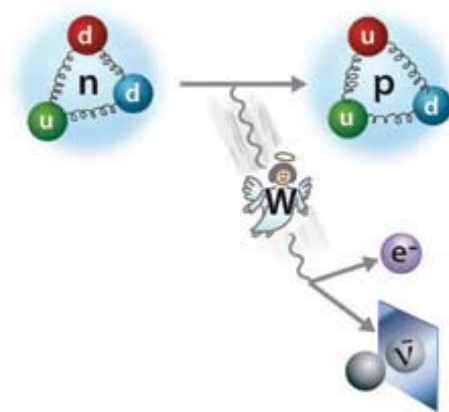


פרופ' ג'ורא מיקנברג ממכון ויצמן למדע, ראש הקבוצה הישראלית, מתלהב למראה המאורע הראשון בחדר הבקרה של הגלאי אטלס. צילומים: CERN

זהו מספר עצום. כדי להמחישו, דמיינו אדם כפרוטון ושכל אוכלוסיית העולם מתנגשת בכל אוכלוסיית העולם בכל שש שניות. מיליארד הפרוטונים הללו יישאו אנרגיה עצומה של פי 7,000 ממסת הפרוטון. אנרגיית התנגשות הראש בראש הזאת תוכל בקלות לערר (ליצור הפרעה) את שדה ההיגס וליצור את חלקיק ההיגס.

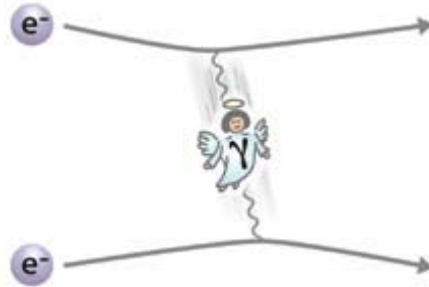
כשנוצר ההיגס, עקב מסתו הכבדה, יש לו מספיק אנרגיה עצמית שמאפשרת לו להתפרק לחלקיקים קלים יותר ממנו. לכן הוא מייד מתפרק לקוורקים כבדים או לנושאי הכוח החלש ה-W ו-Z (שהם עצמם מתפרקים לקוורקים, אלקטרונים ומיואונים שהם אלקטרונים כבדים). סביב נקודת ההתנגשות נבנה גלאי שמטרתו לגלות את תוצרי ההתנגשות הללו, להמיר את המסלולים שלהם לאותות אלקטרוניים שמועברים למחשב בצורת ביטים, שמתורגמים ל"תמונות" שהפיסיקאי המיומן יודע לתרגם ולזהות מתוכן את חלקיק ההיגס המתפרק.

לו היינו יכולים, היינו מתעדים את עקבות כל מיליארד ההתנגשויות לשנייה ומנתחים את הנתונים אחר-כך. פעולה זו אינה יעילה (גם לנתח את הנתונים לוקח זמן רב) וגם בלתי אפשרית טכנולוגית. מערכת עיבוד הנתונים והגלאי, שנבנו עם הטכנולוגיות החדישות ביותר נכון ללפני שנים ספורות, יכולה לרשום כ-300 מגה-בייטים בכל שנייה (שקול ל-CD בכל שתי שניות). אם נתרגם את הבייטים לאינפורמציה שנושאות ההתנגשויות, מדובר בכ-200 התנגשויות בשנייה. מכאן יש לסנן מעל 99.9998% מההתנגשויות שהולכות לאיבוד. האתגר המיידי פה הוא לא לאבד בסינון את חלקיקי ההיגס או כל התנגשות אחרת המעניינת מבחינת הפיסיקה.



חלקיק ההיגס, "המלאך השומר": נויטרון ופרוטון נבדלים זה מזה בהרכב הקוורקי. בעוד נויטרון בנוי משני קוורקים מטיפוס d ואחד מסוג u, הפרוטון בנוי משני קוורקים מטיפוס u ואחד מסוג d. ההבדל הזעיר (של כ-0.2%) בין המסות לטובת הנויטרון נובע מההבדל בין מסות ה-u וה-d. מסות הקוורקים מוקנות על-ידי שדה ההיגס. לולא קוורק ה-d היה כבד מה-u, לא היה הפרוטון יציב אלא היה דועך לנויטרון, ואנחנו כפי הנראה לא היינו פה. שדה ההיגס שומר על הפרש המסות החיוני הזה. התהליך המותר בטבע הוא התהליך הרדיואקטיבי. נויטרון חופשי דועך תוך כ-13 דקות לפרוטון, אלקטרון ואנטי-נויטרינו. הדעיכה מתעכבת כי המתווך של הכוח הרדיואקטיבי, "מלאך השרת" של הסימטריה החלשה (שאינה מבדילה בין נויטרון לפרוטון), ה-W, הוא מאסיבי, ולכן טווח האינטראקציה קטן אפילו ממימדי גרעין.

לצורך זה, האלמנט הראשון שמרכיב את גלאי החלקיקים הוא מערכת גלאים משנית, שתפקידה לסנן מהר את ההתנגשויות הלא-מעניינות ולהפעיל את מערכת הגלאי והמיחשוב רק עבור התנגשויות מעניינות, ביניהן ההיגס. אסור להחמיץ את ההתנגשות שתוצאתה חלקיקי ההיגס. חלק חשוב של מערכת הסינון הזאת, שמחליטה מתי ללחוץ על ההדק של



חוק שימור המטען החשמלי: הפוטונים הם "המלאכים השומרים" שמשמרים את הסימטריות. בתפיסה של הפיזיקה החדשה, הכוח החשמלי בין שני אלקטרונים מועבר על-ידי פוטונים שתפקידם לשמר סימטריה. כל שמירת סימטריה מתבטאת בטבע בחוק שימור. במקרה זה כמובן נשמר המטען החשמלי.

אקדח ה"הפעל גלאי ורשום נתונים" (שנקראת מערכת ה-trigger), פותח ונבנה בישראל ויוצא לסרן. גם אם תרומתה של ישראל לגלאי היא כאחוז, זהו אחוז חשוב ביותר שאנחנו בהחלט יכולים להיות גאים בו.

הגלאי הישראלי נבנה על ידי צוות מדענים מאוניברסיטת תל-אביב, הטכניון ומכון ויצמן. המימון חסר התקדים לפרויקט נעשה על ידי ות"ת והקרן הישראלית למדע, האקדמיה הישראלית למדעים, הועדה לאנרגיות גבוהות (בראשותו של הפרופ' אליעזר רבינוביץ) ומשרדי התעשייה והמדע.

אפילוג

ומה ייצא לנו אם נמצא את ההיגס? מה יקרה אם לא נמצא אותו? שאלות כאלו ואחרות נשאלות בחדרי-חדרים וגם מחוצה להן. עלינו לזכור שמדובר במדע צרוף. מדענים רואים תמורה מלאה למחקרם בעצם העמקת הידע האנושי והבנת מבנה היקום על חוקיו ותכולתו. הממשלות והסוכנויות המממנות רוצות גם לראות תוצאות שמושיות. אף אחד לא יודע באמת כמה עלה לבנות את ה-LHC. מדובר במיליארדי דולרים טובים, וזאת בלי לקחת בחשבון את עלויות כוח-האדם. בהשקעה כזאת לגיטימי לשאול "מה ייצא מזה?" ו"מה יקרה אם לא ייצא דבר?"

בשנת 1897, כשתומסון גילה את האלקטרון וספג ביקורת רבה בעקבות החיפוש של חלקיק כל-כך לא פרקטי – שהוא כה קטן שאיש לא יראה אותו מעולם – הוא בירך את גילוייו בהרמת כוסית תוך שהוא אומר: "To the useless electron". האם מישהו מטיל כיום ספק בחשיבות הגילוי ההוא? איפה היינו היום ללא גילוי האלקטרון וכל מה שבא אחריו?

מדע צרוף בדרך כלל לא נותן את תוצאותיו באופן מיידי. חולפות לעיתים עשרות שנים עד שאנו מבינים את מהות התגלית ומה ניתן לעשות איתה, וזאת מעבר לתועלת המיידית והצרופה שיש בהעמקת הידע.

עם זאת, אפשר לומר שהחיפוש אחרי חלקיק ההיגס כבר הניב פירות רבים גם טרם גילויו. ב-1990, מדען בריטי שעבד בסרן טים ברנדס לי, המציא את ה-www על ה-[http](http://www) שבבסיסו, במסגרת עבודתו לשיפור המיחשוב ופרוטוקול העברת הנתונים עבור הניסיונות הנוכחיים והעתידיים שיתקיימו בסרן לחיפוש ההיגס. בניסיון הנוכחי משתתפים כ-4,000 פיסיקאים. קשה לדמיון את עבודתם של 4,000 פיסיקאים בלי רשת האינטרנט.

קשה מאוד לענות על השאלה "ומה אם לא נמצא את ההיגס?" מרבית הפיסיקאים שעובדים בנושא כלל לא עוסקים בשאלה זו. עבורם, עצם העובדה שהמודל התקני (סטנדרטי), על ההיגס שבתוכו, כבר הניב תצפיות שהתאמתו באופן ניסיוני, מצביעה על קיומו באופן שלא ניתן לערעור. יתירה מזאת, המסה של נושאי הכוח החלש, ה-W וה-Z, שהתגלו כבר לפני למעלה מ-25 שנה, מהווה באיזשהו מקום מעין צל שמוטל על-ידי ההיגס לאורו של המודל התקני. הייתכן שאנו רואים צל, בלי שיהיה לו מקור או בלי שנוכל לזהות את הגורם שהטיל אותו?

פיסיקאים אחרים בטוחים שבלי קשר להיגס, יתגלו בניסוי הייחודי חלקיקים חדשים ואינטראקציות שלא הכרנו בין החלקיקים - כאלו שיעניקו לנו יכולות ניבוי והבנה מסוג חדש. אני נמנה עם המשוכנעים שבתוך שנים ספורות ביותר יתגלה לפחות ההיגס, אחרת לא הייתי מבלה את עשרים השנים האחרונות בחיפוש אחריו. ולמה אמרתי לפחות? כי אם נסתכל על הפאזל של המודל התקני, נראה שהחתיכות מתחברות יפה, אבל יש רווחים קטנטנים בין חתיכה לחתיכה. אם נסתכל במיקרוסקופ חזק (כמו ה-LHC) על החתיכות עצמן, נגלה שהן בנויות מאבני בנייה קטנות יותר. לכן יש מדענים שסבורים שגילוי ההיגס הוא ודאי והוא מהווה רק את קצה הקרחון.

כמו כמות המידע האדירה שמגיעה אלינו היום מרחבי החלל בזכות טלסקופים ארוכי טווח וחלליות שהגיעו אל גבולות היקום ושולחות אלינו נתונים שלא חלמנו שנזכה להם, כך סביר שתוך זמן קצר נתחיל לגלות גן חיות שלם של חלקיקים שעשויים להתגלות עוד לפני גילויו של ההיגס עצמו.

ובכל זאת? והיה אם לא? קשה לי לענות על כך. המודל התקני בהחלט יעמוד בפני שוקת שבורה. לתיאורטיקנים תהיה עבודה רבה והניסיונאים שבינינו עלולים למצוא את עצמם בפני

דלתות סגורות של קרנות מימון המחקר של המבנה היסודי של החומר. לא יתכן, זה לא יקרה. ההיגס יתגלה. Mark My Words.