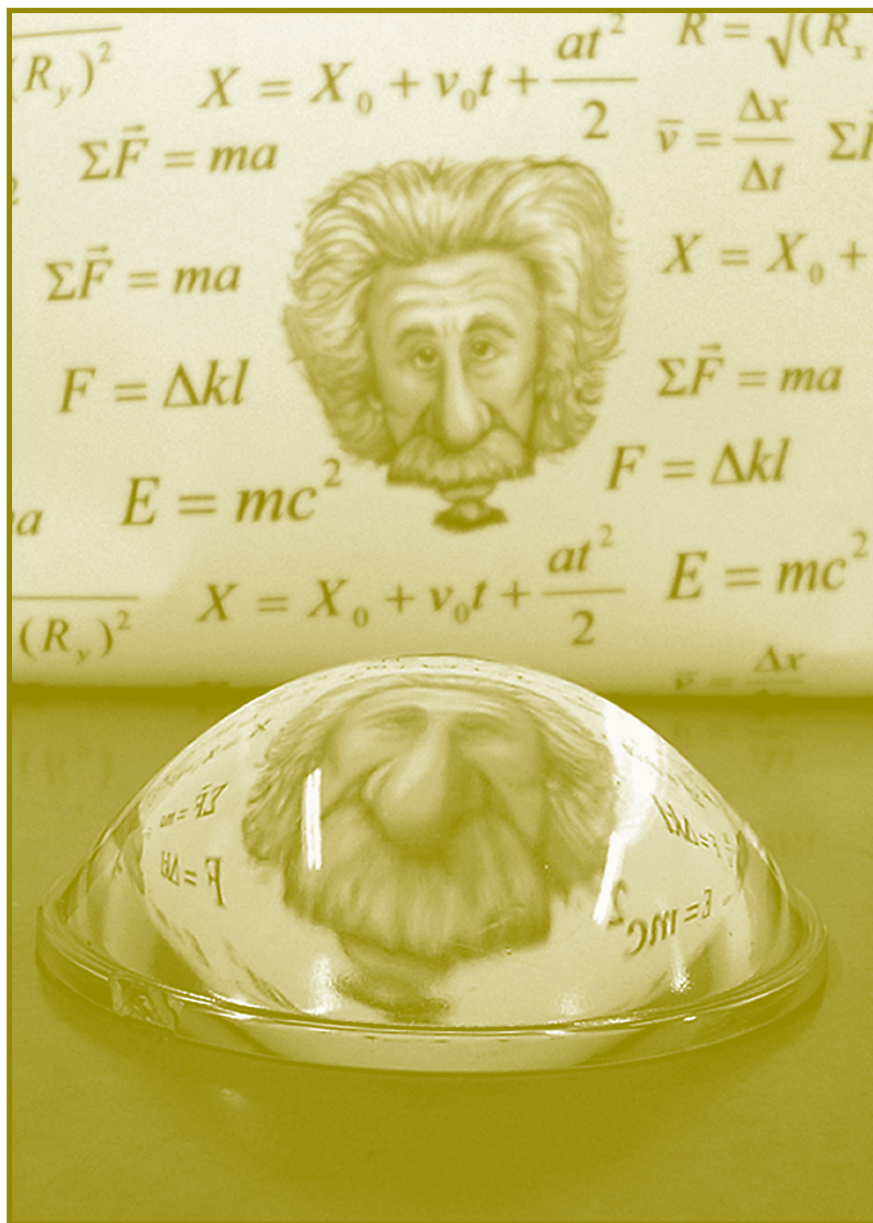




“ראש גדול”, צילום: דנאל לושי ונמרוד בן יהודה, תיכון הדרים, הוד השרון.

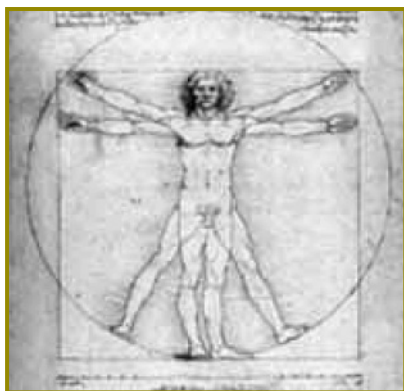
תחרות הצילום בפיסיקה (תשס"ו, 2006).

הסבר: צילום דיוקנו של הפיסיקאי אלברט איינשטיין המופיע על רקע נוסחאות פיסיקליות שונות, בעזרת עדשה מרכזת עבה שהיתה מונחת על שולחן. התאורה היא תאורה פלורסנטית רגילה המקבילה למשטח. בתמונה ניתן לראות את ה"ראש הגדול" דמות המתקבלת בעדשה. הדמות הפוכה מבחינת הכיוון ימין - שמאל, כפי שניתן לראות בדמות הנוסחאות. אך הדמות ישרה מבחינת הכיוון מעלה-מטה. הדמות היא דמות מדומה, המתקבלת כתוצאה מתהליך שבו האור המפוזר מהעצם (במקרה זה הדמות המודפסת על הדף) פוגע בעדשה ונשבר בהתאם לחוק השבירה של סנל.

על סימטריה ויופי

עילם גרוס

עם המפץ הגדול הופיעה סימטריה ביקום. היא נשברה כמעט מיד, ושבירה זו היא שאפשרה את הופעת החיים המוכרים לנו. עכשיו מחפשים הפיזיקאים את החלקיקים האחראים לאי סימטריה זה. חוקרים רבים מאמינים כי התשובה לכך קרובה, ועימה תמונת עולם מלאה.



רישום של ליאונרדו דה-וינצ'י. א-סימטריה בגוף האדם.
צילום: אימג' בנק ישראל

מחקר שטוען כי גברים מעדיפים באופן ברור את חצי הפנים הימני של האשה. ההסבר שניתן לכך הוא שהחצי הימני של הפנים נקלט על ידי העין השמאלית של המתבונן ומנותח על ידי מחצית המוח הימנית, שהיא המחצית שמגיבה ליופי ולאסתטיקה. מאחר שגברים, מאז שחר ההיסטוריה, העדיפו נשים שמחצית הפנים הימנית שלהן נעימה יותר למראה, האבולוציה דאגה לאי-סימטריה במבנה הפנים של האשה וגרמה לכך שהמחצית הימנית בדרך כלל יפה יותר. אם נחזור ונסתכל בציור של דה-וינצ'י, נראה שם באופן ברור שהמחצית הימנית של הפנים שונה לגמרי מזו השמאלית. לפני יותר משלושים שנה, בהיותי ילד, הלכתי לביקור שגרתו אצל רופא המשפחה, דר' סופר. הוא הסתכל עלי במבט בוחן והושיט את ידו למשש את עצמות לחי. כשמבט מודאג

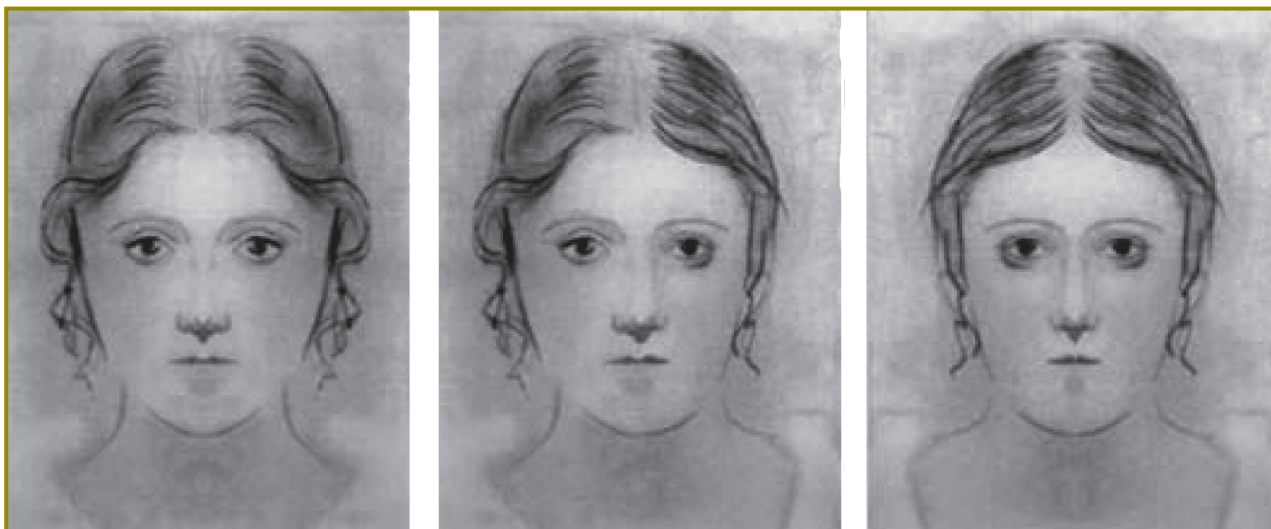
בני אדם תופסים בדרך כלל את הסימטריה כדבר מושלם, נקי ויפה. מכאן משוואה פשוטה: סימטריה קשורה ליופי ומשרה תחושה של אסתטיקה. האם זה אומר שכל דבר יפה חייב להיות כרוך בסימטריה? עיון קצר בתולדות האמנות מגלה שזה לא תמיד כך. במקרים רבים נראה כי שבירה של סימטריה יש בה לעתים יותר יופי מהסימטריה הגולמית שממנה היא נגזרת.

כך, למשל, אצל ליאונרדו דה-וינצ'י, שעסק רבות באנטומיה של גוף האדם: אחד מרישומיו היותר מפורסמים מראה את האדם תחום בריבוע או מעגל. בחינה מדוקדקת של הרישום מראה את האי-סימטריה העדינה, אבל כל כך חיונית, במבנה גוף האדם. האשך השמאלי, למשל, תלוי נמוך יותר מהימני, וטוב שכך – לו היו שני האשכים באותו גובה, ההליכה לא היתה נוחה במיוחד וגם ייצור הזרע עלול היה להיפגע. ייתכן שהאבולוציה שוברת את הסימטריה באופן עדין שמאפשר בסופו של דבר את קיומנו.

בני האדם נראים סימטרים במבט כללי. אבל מה שבסופו של דבר גורם לנו לחשוב שאשה אחת יפה יותר מחברתה הוא לפעמים דווקא השבירה העדינה באיזון בין ימין לשמאל. מניפולציות מחשב מאפשרות לנו כיום לבנות מתצלום או מציור של פנים שתי גרסאות של פנים סימטריות (ימין-ימין ושמאל-שמאל). האיור "אולגה" של פיקאסו (ראה עמ' 4) מראה שתי גרסאות ראי: ימין-ימין ושמאל-שמאל. האם הדמות שבתמונה האמצעית (ימין-ימין) חיננית יותר? קיים

פרופ' עילם גרוס, המחלקה לפיזיקה של חלקיקים מכון ויצמן למדע, רחובות.

באדיבות המגזין "מסע אחר" www.masa.co.il. גרסה מדעית מלאה של המאמר אפשר לקרוא באתר הבית של המחבר: www.eilamgross.com.

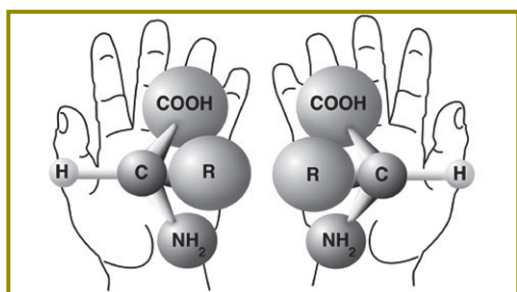


פני אישה המחצית הימנית של פניה ותמונת ראי של המחצית השמאלית של פניה ותמונת ראי של מחצית זו

החתול המורעב של אליסה

הא-סימטריה בחיצוניות של גופנו היא כאין וכאפס לעומת הא-סימטריה בפנימיות. אין כוונתי לכך שלבנו האחד נמצא בצד שמאל וכבדנו היחיד בצד ימין, וגם לא לכך ששני חצאי מוחנו מנתחים אינפורמציות שונות לחלוטין.

סקירה מהירה של המבנה הפנימי המולקולרי של הרקמות בגופנו ובגופם של בעלי חיים אחרים תחשוף לפנינו עולם א-סימטרי מובהק. "מראה" החומצות האמיניות המקודדות על ידי ה-DNA בגופנו מדבר בעד עצמו. הסלילים מהם מורכב ה-DNA הם ימניים - כלומר מסתלסלים כמו בורג בעל הברגה ימנית. כאשר תרכובת של חומצה אמינית



מולקולה של חומצה אמינית. רק הגירסה השמאלית מופיעה במין האנושי

מתפשט על פניו, שאל אותי אם ידוע לי שצד אחד של פני לא זהה לשני. דומני שמאז עד עצם כתיבת מאמר זה חייתי בהרגשה שמשו לא בסדר אצלי. עכשיו רווח לי, דר' סופר לא התמצא כנראה בציורים של פיקאסו.

מה זו בכלל סימטריה

מערכת היא סימטרית כאשר משהו מתרחש או קורה בה, אולם כלפי חוץ איננו מבחינים בשינוי. לדוגמה, כדור הינו גוף סימטרי. ליתר דיוק, יש בו סימטריה סיבובית תלת ממדית. שכן אם ניקח כדור ונסובב אותו סביב כל ציר שנבחר העובר דרך מרכזו, לא ניתן יהיה להבחין בין הכדור לפני ואחרי הסיבוב.

על פי הגדרה ביולוגית של אנציקלופדיה בריטניקה, סימטריה הינה הישנות של חלקים בגופו של בעל החיים או הצמח באופן מסודר. הסימטריה מתייחסת באופן ספציפי להתאמה של חלקי הגוף, בגודל, בצורה ובמיקום היחסי שלהם בשני צדדיו המנוגדים של קו הפרדה, או שהם מחולקים מסביב לציר או לנקודה מרכזית כלשהי.



הנויטרינו, שמסוגלים לחדור קירות ומבנים מוצקים כאילו לא היו (כולל כדור הארץ עצמו), הם כולם שמאליים: בתנועתם הפנימית הם מסתובבים נגד כיוון השעון (תמונת הראי שלהם תהיה לכן ימנית). מדוע? האם יש נויטרינו ימניים? למדע לא ידוע כיום על קיומם של נויטרינו מן הסוג הזה. האם ייתכן שיש לכך קשר בין האסימטריה הפיזיקלית ובין העובדה שבפלנטה שלנו התפתחו צורות החיים א-סימטריות? כאמור, התשובות לכך אינן ברורות. מה שכן ברור הוא שהימצאותה של א-סימטריה ביקום שלנו היא זו שכנראה מאפשרת את קיומם של החיים בו בצורה המוכרת לנו.

אנטי חומר והאנטיזם של אשר

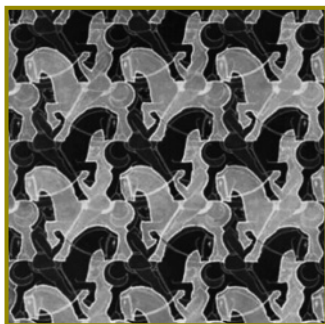
דוגמא מאלפת במיוחד לא-סימטריה הינה סיפורו של החומר והאנטי חומר. גילוי של האנטי חומר התאפשר לא מעט בעזרת עבודתו של פול דירק, פיזיקאי ומתמטיקאי ממוצא שווייצרי, בשנות העשרים של המאה הקודמת. דירק היה זה שעשה את הצעדים הראשונים למיזוג תורת הקוואנטים ותורת היחסות הפרטית של איינשטיין. הוא ניבא, בין היתר, את קיומו של חלקיק שהוא תמונת ראי מושלמת של האלקטרון, אבל מטענו הפוך, כלומר חיובי (לכן גם נקרא: פוזיטרון). כמה שנים אחר כך נתגלו האנטי חומר והאפשרות לייצרו בתנאי מעבדה.

עבודתו של הגרפיקאי ההולנדי המפורסם מוריץ קורנליס אשר מספקת לנו אינספור דוגמאות והמחשות ויזואליות מופלאות ליחסים המתקיימים בין עולם החומר והאנטי חומר לסימטריה והא-סימטריה. באיור הפרשים (ראו בעמוד הבא), אנו רואים סדרה של תמונות. המקור נמצא בצד ימין. הוא מייצג עבורנו את עולם החומר. הפרשים השחורים רוכבים שמאלה והלבנים ימינה. ואילו בעולם האנטי חומר, שחור הופך ללבן (הציור האמצעי) והפרשים השחורים רוכבים שמאלה. אם נשקף תמונה זו בראי (ציור שמאלי) נקבל שוב את המרקם המקורי – הפרשים השחורים רוכבים ימינה. העולם חוזר לעצמו כאשר הופכים חומר לאנטי חומר

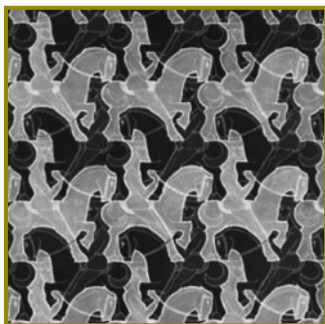
כגון אלנין נוצרת במעבדה, היא מופיעה בשתי צורות (ראו איור), אחת נקראת ימנית ואחת שמאלית – כאשר שתי הצורות מהוות תמונת ראי אחת של השנייה. מסיבות שאינן ברורות לנו לחלוטין – רק התרכובת השמאלית מופיעה במין האנושי.

כאשר אליסה בארץ המראות מלטפת את החתלתול שלה ושואלת אותו אם ירצה לחיות בארץ המראה, תוך שהיא מביעה את תקווה שחלב בארץ המראה הוא טוב לשתייה, היא איננה מודעת לכך שהוא עלול לגווע שם ברעב. הסיבה היא שהחלב עשוי ממולקולות ימניות והחתול שלה, בעל המולקולות השמאליות, לא יוכל לעכלו. ב-1956 הציגה חברת תרופות גרמנית סם הרגעה שאינו ממכר בשם תלידומיד. התרופה שווקה באירופה ובאמריקה הדרומית, ולמרבה המזל נאסרה לשימוש בארצות הברית. בארבע השנים שבהן שווקה התרופה היא גרמה למומים נוראיים בוולדים של נשים שנטלו את התרופה במהלך ההריון. התברר שמולקולת התלידומיד שניתנה לחולים מופיעה במעבדה בשתי צורות, שאחת היא תמונת הראי של חברתה. היום ידוע לנו שאחת מהתרכובות גורמת לנזק הנורא. בהמשך לכך, התרופה ניתנת כיום בצורה מבוקרת ובמקרים מסוימים לטיפול בחולי איידס וצרעת.

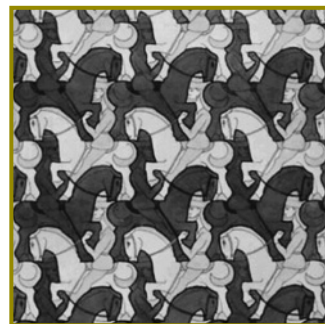
מה מקורה של האסימטריה הזאת? ב-28 בספטמבר 1969, בשעה שרוב תושבי העיירה מרצ'יסון (Murchison) האוסטרלית היו מכונסים בכנסייה לדרשה של יום ראשון בבוקר, ירד גשם של אבנים ברדיוס של כ-33 קילומטר רבוע בעיירה. המטאוריטים שנפלו מהשמים הכילו מינרלים, מים וחומצות אמיניות שהיו ברובן שמאליות. האם יכול להיות שהמקור לא-סימטריה בגופנו מצוי בחלל החיצון? האסימטריה הביולוגית היא רק היבט אחד של התעלומה. בחינת העולם הפיזיקלי שמסביבנו תגלה מיד שהוא מכיל תופעות רבות של אסימטריה. דוגמה מעניינת היא חלקיקים מוזרים, חסרי מסה ונטולי מטען חשמלי הקרויים **נויטרינו**. החלקיקים החמקמקים האלה נפלטים מהשמש שלנו תוך כדי תהליך של הפיכת פרוטונים לניטרונים.



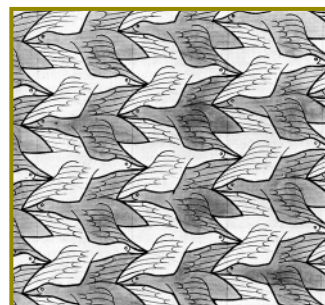
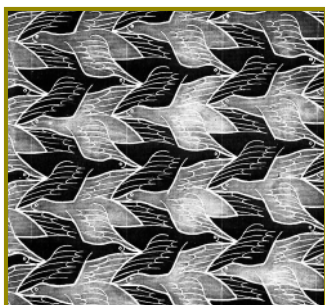
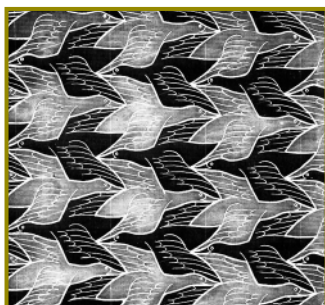
שיקוף עולם האנטי חומר במראה העולם
חוזר לעצמו כאשר הופכים חומר לאנטי
חומר ומשקפים אותו במראה



התמונה בהיפוך צבעים (שחור הופך
ללבן וההפך) מייצגת את האנטי
חומר



ה"פרשים" וה"אווזים" של אשר הציור
המקורי מייצג את החומר



כך או כך, למזלנו, ה"חומר" האקזוטי הזה המכונה "אנטי חומר" אינו בנמצא באופן חופשי בעולם שלנו מאחר שכל מפגש בין חומר לאנטי חומר יוביל מיד להשמדה הדדית תוך פליטת אנרגיה אדירה. למעשה, קיומנו בעולם תלוי באי קיומו של האנטי חומר.

כיום ידוע לנו, במידה רבה של ודאות, כי בעת המפץ הגדול - אותו אירוע קוסמי אדיר שיצר את היקום שלנו - היתה סימטריה מושלמת בין הכוחות וחלקיקי היסוד. רק בשלב מסוים, במהלך התקררותו של היקום, נשברה הסימטריה. גם האנטי חומר נעלם. משהו הפך את הסימטריה ותרם בכך תרומה, כנראה מכריעה, ליצירת תנאים לקיומם של חיים.

ארבעת כוחות היסוד

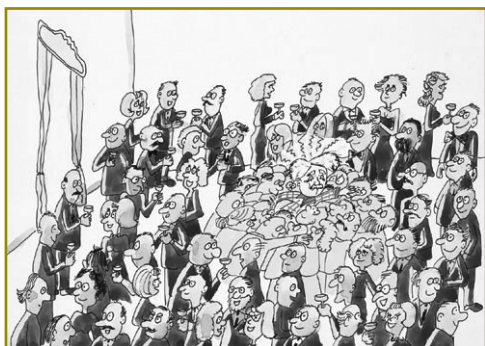
בשורות הבאות נצא למסע קצרצר אל היקום הקדמוני שנוצר מיד לאחר אותו "רגע הבריאה" - המפץ הגדול. החומר היה מורכב אז מאלקטרונים וקוורקים (החלקיקים

ומשקפים אותו בראי. בעולם הרוכבים של אשר החלפת חומר באנטי חומר ושיקופו בראי לא ניתנים להבחנה מעולם המקור. בעולם זה קיומם של נויטרונים שמאליים מחייב קיומם של אנטי-נויטרונים ימניים.

בציור האווזים של אשר המצב מעט שונה. בתמונה הימנית נראים האווזים המקוריים המשתלבים זה בזה. הכהים נעים שמאלה והבהירים ימינה. במרכז נמצאת ה"אנטי תמונה", בה הכהים עפים ימינה והבהירים שמאלה. בתמונה הימנית שיקפנו את האנטי אווזים במראה וחזרנו לכאורה לעולם המקור. האווזים הכהים עפים שמאלה... מבט נוקב יותר יגלה שהעולמות רק כמעט זהים - הזנב של האווזים הכהים שהצביע במקור כלפי מטה - מצביע כעת מעלה. כלומר הסימטריה כאן נשברת קלות. היא אינה מושלמת. על פי הציור לפחות, עולם האנטי חומר המשוקף לא זהה לעולם המקור. מצאנו סדק בסימטריית החומר - אנטי חומר. האם ניתן למצוא כאן אולי רמז לאחד הגורמים שהפרו את האיזון בין החומר לאנטי חומר מאז היווצרות היקום לפני כ-15 מיליארד שנה? שאלה פתוחה.

החיפוש אחר חלקיק היגס

באפריל 1993 הופיע גיליון של הירחון הבריטי "עולם הפיזיקה" שהכיל בין היתר כתבה על חלקיק שכונה "היגס" ועל למה אנחנו רוצים למצוא אותו. הכתבה היתה בהמשך לתחרות מוזרה עליה הכריז שר המדע הבריטי דאז, ובה הציע בקבוק שמפניה לפיזיקאי שיסביר בצורה הטובה ביותר (על גב מעטפה) את מהות החלקיק ומדוע מחפשים אחריו. מי שזכה בשמפניה בסופו של דבר היה הפיזיקאי האנגלי דייוויד מילר, שהציע דרך אלגנטית שמסבירה כיצד יכול חלקיק אקזוטי (היגס) להקנות מסה לחלקיקי החומר בטבע על ידי שבירת סימטריה ספונטנית.



מילר דימה את עולמנו לאולם גדול שבו נערך כנס פוליטי עמוס משתתפים. לצורך האנלוגיה, האנשים בכנס שהיו מפוזרים בכל מקום ברחבי האולם מהווים את חלקיקי ההיגס. בשלב מסוים עוברת שמועה כלשהי בחדר והאנשים נצמדים זה לזה כדי לשמוע מה קורה. תוך כדי כך הם מצירים זה את צעדיו של זה ומקשים על התנועה בחדר.

הם נעשים כבדי תנועה, ההיגס מקנה לעצמו מסה. השמועה היא שראש הממשלה מגיע לאולם. ואכן אחרי זמן מה נכנס ראש הממשלה לאולם וכל מוקיריו מקרב המון ההיגסים מקיפים אותו ומקשים על התקדמותו. בהיצמדותם לו הם מקנים גם לו מסה. מנהיג האופוזיציה נכנס אחרי זמן מה לחדר, אבל חשיבותו פחותה ודרכו קלה יותר, מסתו הנרכשת מקהל ההיגסים היא קטנה יותר. קצרה היריעה

מהם בנויים פרוטונים וניטרונים שמרכיבים את הגרעין). העולם היה חם אז עשרת מונים מהשמש ובטמפרטורות כאלה הגרעינים נקרעים כתוצאה מהתנגשויות אלימות. עם ההתקררות, החל להיראות הסדר המוכר לנו כיום. פרוטונים התחברו לניטרונים כדי ליצור גרעינים טעונים מטען חשמלי חיובי המושכים אליהם אלקטרונים ובונים את האטומים. גם ארבעת כוחות היסוד המוכרים לנו כיום היו אז כנראה שווים בגודלם: כוח הכבידה הפועל בין מסות (מסה אקוויוולנטית למשקל) וגורם לקריסת כוכבים לכדי חורים שחורים, הכוח החשמלי האחראי למשיכה בין הפרוטונים החיוביים לאלקטרונים השליליים באטום, הכוח החלש שמאפשר את הפיכתם של ניטרונים לפרוטונים בשמש תוך כדי פליטת אלקטרונים וניטרינו, והכוח הגרעיני החזק שאחראי לקיומם של הפרוטונים בגרעין.

ההתקדמות הדרמטית שחלה במאה השנים האחרונות בתחומי הפיזיקה מאפשרת לנו היום להשיב על השאלה כיצד היקום "עובד" במונחים של כוחות וחלקיקי חומר בצורה סבירה למדי. אולם כדי שהיקום "יעבוד" (ונקבל את העולם המוכר לנו) צריכים להתקיים יחסים מאוד מורכבים בין הכוחות וחלקיקים המרכיבים את החומר שבו. ישנן עדיין שאלות פתוחות רבות, חלקן נוגע בא-סימטריה המובהקת המתגלה בעולם החלקיקים. מדוע למשל יש מסות שונות לחלקיקים? אנו יודעים גם כי ישנם שלושה דורות של חלקיקים. כך, למשל, קיימים שלושה סוגי אלקטרונים שהם זהים לחלוטין, פרט למסה שלהם (אלקטרון, מיאון וטאו); כיצד זה קורה? ומדוע הפרוטון כבד פי אלפיים מהאלקטרון?

לפני כארבעים שנה, ב-1964, שלח פיזיקאי בריטי בשם פטר היגס מאמר לעיתון מדעי מכובד והציע בו מודל שמסביר את אופן הקניית המסה לחלקיקים. המודל של היגס לא התקבל לפרסום באותו עיתון והיגס נאלץ לשנותו ולשלחו פעם נוספת, אבל פתח את אחד ממבצעי החיפוש הגדולים של הפיזיקה המודרנית: החיפוש אחר מקור המסה.



כדי לגלות את החלקיקים, ובפרט את חלקיק היגס, עוסקים אלפי מדענים בבניית גלאי חלקיקים שהוא למעשה מעין עין ביונית משוכללת שמסוגלת לראות את תוצרי ההתנגשות ולפענח באמצעות אלקטרוניקה ומחשבים את תמונת החומר. גלאים מהסוג הזה הם מכונות ענקיות בגובה של שבע קומות ובאורך של עשרות מטרים. ישראל שותפה בגלאי המכונה אטלס, שחלקו תוכנן ונבנה במכון ויצמן בשיתוף פעולה עם אוניברסיטת תל אביב והטכניון.

המאיץ החדש, שיתחיל לפעול ב-2007, ייצור אנרגיות דמיוניות שיאפשרו ללא ספק לייצר את חלקיק היגס, ואולי אף יגלו לנו היבט חדש של היקום שלא ידענו בכלל על קיומו. באמצעות סימולציות מחשב ניתן כבר היום לראות איך יראה המחשב חלקיק היגס. התמונות שמתקבלות מההתנגשויות הללו הן מרהיבות. פרויקט בסדר גודל שכזה לא נופל מכיבוש החלל ונחיתת האדם על הירח, הן מבחינה טכנולוגית והן מבחינה מדעית; ומי יודע – אולי ייחשף בפנינו גן חיות חדש של חלקיקים שיעסיק את הפיזיקאים לאורך כל המאה ה-21. תמונת העולם תהא מלאה. במובן זה לפחות, זו תהא סימטריה מושלמת.

מלהכיל הסבר ממצה על הדרך בה מקנה חלקיק היגס מסה לכל חלקיקי החומר בטבע על ידי שבירת סימטריה ספונטנית. אבל מהאנלוגיה של מילר אפשר להבין שהוא עושה את זה תוך כדי שהוא נצמד אליהם (וגם לעצמו).

משחזרים את רגע הבריאה

אם אכן קיימים "שוברי סימטריה" הללו, המכונים היגסים, כיצד ניתן יהיה לאתרם? אחד המכשירים החדשים שעשוי לסייע לנו בכך הוא מאיץ החלקיקים החדש הנבנה בימים אלה באזור סרן (Cern) שבז'נבה.

במאיץ הנבנה בהשקעה של מיליארדי דולרים יתנגשו אלומות של פרוטונים בינם לבין עצמן. אם נדמה את ההתנגשות בין אלקטרונים להתנגשות חזיתית בין שני זוגות אופניים איטיים, הרי שההתנגשות בין פרוטונים (הכבדים פי אלפיים מהאלקטרונים) היא כמו התנגשות חזיתית בין שתי משאיות ענק במהירות הקרובה למהירות האור. המטרה העיקרית היא ליצור אנרגיה דומה לזו ששררה בעת המפץ הגדול, ומתוך כך להביא ליצירת חלקיקי חומר. פיזיקאים נוהגים לתאר זאת כניסוי שישחזר את רגע הבריאה.

שיר הלל לסימטריה



עשרים אלף עובדים עמלו במשך 17 שנה לבנות את הטאג' מהאל – מאוזוליאום המנציח את אהבתם הגדולה של מומטאז מהאל והקיסר שח'האן. הטאג' מהאל הוא שיר הלל לסימטריה. לבסיס המבנה יש סימטריה ריבועית שמגשימה את עצמה באמצעות ארבעה צריחים. הסימטריה הזאת נשברת לסימטריה של שיקוף מזרח-מערב על ידי שני מבנים כיפתיים. אחד מהם משמש מסגד ואילו השני נבנה אך ורק כדי לשמר את סימטריית השיקוף. סימטריית השיקוף נראית היטב גם בכניסה, שם ממוקמות שתי שורות עצים שמשקפות זו את זו לתוך בריכה שבמרכז מזרקות.

הסימטריה נשמרת בכל הארכיטקטורה: כך, למשל, לכל אחד מצריחיו ולכיפה המרכזית סימטריה מעגלית. כשמקיפים אותו מסביב מקבלים תחושת דדה-ו, תחושת "כבר הייתי כאן", משום שממזרח וממערב הוא נראה זהה. גם ההבחנה בין הטאג' מהאל ובין השתקפותו אינה אפשרית, בגלל הסימטריה. לו היינו מבקשים מתייר מזדמן להחליט אם הוא נמצא בעולם זה או בעולם שמעבר למראה, הוא לא היה יכול להחליט (אלא אם כן היה בודק באיזה צד הלב שלו).

תודת המחבר לפרופ' משה קוגלר מהמחלקה לפיזיקת חלקיקים במכון ויצמן למדע על הערותיו המאירות ולעמי בן-בסט ממערכת "מסע אחר" על תמיכתו ועידודו הבלתי נלאים שהביאו בסופו של דבר לכתיבת המאמר במתכונתו הנוכחית.