

## מהגדול ביותר לקטן ביותר – מה מלמד המאיץ הגדול שב"סרן" - על מבנה החומר –

פרופ' אהוד דוכובני. 10.4.2018

למרות שאני לא רגיל לעמוד בזמנים, אתחיל. ביקשו ממני להציג את עצמי, זה ייקח חצי שעה... אני עשיתי את התואר ראשון באוניברסיטה העברית, מסטר ודוקטורט, נסעתי אחר כך לז'נבה, עשיתי את הפוסט דוקטורט בסרן. כל הרצאה תתעסק בדברים אלה. חזרתי למכון, ומאז אני בצורה זו או אחרת עובד פה, חוקר.

לפי הגיל אני חושב שאתם מכירים את ז'ול ורן, נכון? הוא כתב ספרים מדהימים על מסע על הירח, על המסע למעמקי הים, עם קפטן קוק, מסע בתוככי אדמה. ספר אחד הוא לא כתב, על המסע אל תוך החומר, לחלקיקים קטנים יותר ויותר. בעונותיי אין לי 10 אחוז מהכישרון שלו, אז אעשה מה שאני יכול. קודם כל על מה נדבר. תחום המדע שאני מתעסק בו הוא פיזיקה של חלקיקים. זו פיזיקה מעניינת, כי הנושא – מה שאנחנו מדברים עליו – כל פעם משתנה. זה מחקר של הדברים הכי קטנים. מה שפעם היה ידוע כחלקיקים הכי קטנים, משתנה. הפוקוס זז ליותר גרעינים ואטומים וכך הלאה. אבל יש בזה רצינות, כי החשיבה המדעית אומרת שאם אני מביא את הדבר הכי קטן, אפשר להביא משהו שבא ממנו. בעיקרון, אם עושים את זה כמו שצריך, תמיד אפשר לחלק הכל. זה רק בעיקרון, נגיד שהבנתי את כל נושא החלקיקים, עדיין לחשב מה קורה הלאה זה בלתי אפשרי.

זה ציור של אומן שמתחיל מתחומים שמדברים על בני תמותה (סוציולוגיה, פסיכולוגיה) וזז ימינה לכיוון המתמטיקה, שבלי ספק עוסקת בדברים אחרים, אנחנו יושבים פה, בין מתמטיקה ושאר התחומים, ומרגישים עליונים על כולם.

התחום הזה הוא תחום מדהים, ההצלחה שלנו מדהימה. אני לא חושב שיש תחום מדעי שבו ניתן היה לכתוב תיאוריה שתנבא תוצאות של עשרות אם לא מאות מדידות, בדיוק של 3-4 ואפילו 5 ספרות אחרי הנקודה. אם העבודה שלנו כל כך טובה ויודעים הכל טוב, למה אני עוסק בזה, מה מעניין פה. אם יודעים הכל, לך תעשה משהו אחר. או כמו שאחד החבר'ה אמר, בוא נלך ונעשה מקרמה.. זו תמצית הרצאה שלי. זו הכותרת של ההרצאה: מה אנחנו יודעים? איך השגנו את הידע הזה, מה נותר לעשות.

החלק ראשון, שהוא חלק יותר קשה, זו הסקירה שלי של מה אנחנו יודעים. אחר כך אדבר איך השגנו את הידע הזה, זה יותר תמונות. בסוף נדבר על מה נותר לעשות. בשקף יש אילוסטרציה של המסע מהגדול לקטן. התחלנו בדנ"א – אלה מכם שבאים להרצאות באופן קבוע יודעים על דנ"א טוב ממני – מזה יש אטומים, פרוטונים וניטרונים, זה אזור שעדיין אנחנו לא יודעים עליו.

כמו שאמרתי ואתם יודעים, במכון ויצמן לא צריך להגיד זאת, הכל עשוי מאטומים. הם קטנים מאוד ויש גרעין כבד באמצע ואלקטרונים מסביב. זה בעצם כימיה שמתעסקת בפתרונות של המערכת הזאת, כל התכונות הכימיות של האטומים נגזרים מהמבנה הזה.

הגרעין גם הוא מסתבר שניתן לפיצול, והוא מורכב משני סוגי חלקיקים, פרוטונים שהם חיוביים וניטרונים. לא אתפתה להסביר יותר. גם פרוטונים וניטרונים אינם בסיסיים, הם ניתנים לחלוקה, פשוט צריך יותר כוח.

הפרוטונים והנויטרונים עשויים משני חלקיקים (קווארקים) מסוג U ו-D. U מייצג up ו-D מייצג down. הפרוטון מורכב משני U ו-D אחד. הנויטרון מורכב משני U ו-D אחד. צריך שלושה חלקיקים לאלקטרון כדי להסביר את כל החומר שאנחנו נתקלים בו, כל החומר שמרכיבים את העולם. עם זה כל העולם מתעסק. זה הנושא של כל העולם.

בשלב הזה כל ילד ישאל – אבל מה זה אומר? אם יש U ו-D, משהו מורכב ממשו, לפעמים זה הולך לאינסוף, לפעמים לא. אם זה נעצר, למה זה נעצר? כל מיני שאלות שאני לא יודע את התשובה עליהם. לא גמרנו לעשות את העבודה שלנו. חשבנו על זה. חיים הררי, שהיה נשיא המכון, פיתח מודל יפהפה שהסביר איך פרוטונים בנויים משני חלקיקים, שהוא קרא להם "ראשונים". המודל יפהפה מאוד, אבל לא עובד.

לעת עתה אין לנו מושג אם הקווארקים מורכבים ממשו, כמה שיודעים כרגע, לא הצלחנו לשבור אותם ולפרק אותם.

משהו חסר. מה חסר? יש שלושה חלקים, נויטרון ושני פרוטונים, מזה אפשר לחבר את כל העולם. משהו עוד חסר. מה זה?

מה שחסר זה משהו שיחזיק את כל החלקיקים האלה ביחד. מה קושר את האלקטרונים השליליים לגרעין? זה הכוח האלקטרומגנטי, הכוח שיושב מאחורי הכימיה וכמעט כל דבר שאתם יכולים להעלות על הדעת. נביט לגרעין, הגרעין הפשוט הזה מורכב משני פרוטונים, שזה העיגולים הכחולים פה בשקף, ושני נויטרונים. הפרוטונים הם חיוביים, לנויטרונים אין מטען. אם אני יוצר מערכת הזאת, הפרוטון הזה ילך לכיוון אחד, הפרוטון ילך לכיוון השני והנויטרונים יישארו כאן, מה חסר? כוח שאוגד דברים אלה ביחד. עם הרבה דמיון, נקרא לזה כוח גרעיני. מכיוון שהכוח הזה חזק יותר מכוח חשמלי רגיל, קראנו לזה כוח גרעיני חזק. זה לא סוד.

מה גורם לנויטרון להתפרק? את זה קצת יותר קשה להסביר, הנויטרון בתוך הגרעין הוא יציב. כאשר אני מוציא אותו מהגרעין, חכו 1000 שניות, הוא יתפרק לפרוטון, נויטרון ואלקטרון, יש איזשהו כוח שגורם לזה להתפרק. זה לא הכוח החזק. אם זה היה כוח חזק, זה היה מתפרק תוך מיליארדית שנייה ולא אלף שניות. יש כוח נוסף שהוא יותר חלש, לכן קוראים לו הכוח החלש, זה הכוח הרדיואקטיבי.

אז קיימים שלושה כוחות – הכוח החשמלי (אלקטרומגנטי), הכוח הגרעיני (חזק) והכוח הרדיואקטיבי (חלש), וכוח הכובד. לכוח הכובד יש סיפור ארוך, הבעיה שלנו איתו שהוא כל כך חלש – שני פרוטונים מושכים אחד את השני, אבל זה כוח כל כך חלש, הכוח הגרביטציוני הוא חלש פי 1 עם בערך 40 אפסים אחריו. זה מספר עצום. אחד עם 40 אפסים זה מספר עצום, כוח הגרביטציה הוא מאוד חלש. אחת הבעיות של הפיזיקה שאין לנו מושג מה לעשות איתו. שוב, עם הרבה דמיון...

אני אחזור אליו עוד פעם פעמיים ואזכיר אותו, אבל בגדול יש שלושה כוחות. מה זה כוח?

איך פועל כוח? אני שם פה אלקטרון, ונותן גם לך להחזיק אלקטרון, והם ידחו אחד את השני. איך האלקטרון ששמתה פה יודע שקיים עוד אלקטרון? משהו חייב לעבור בין שני האלקטרונים. איך זה עובד? ניקח שני יצורים שכל אחד נמצא בסירה והם במרחק כלשהו זה מזה. נגיד שהיצור השמאלי פה זורק כדור ליצור הימני. שניהם נמצאים בסירה כדי שלא יהיה חיכוך. אפשר לשים אותם גם על הקרח, אבל שמתי אותם על סירה. ברגע שיצור השמאלי זורק כדור ימינה, הסירה והוא נדחפים שמאלה, מחליקים שמאלה. הבחור הימני תופס את הכדור, צריך לתפוס את הכדור שבא בכוח, ולכן נדחף קצת אחורנית. לכן הוא נע עכשיו אחורנית. עכשיו השמאלי מחזיר את הכדור, כשהוא זורק את הכדור הוא נדחף ימינה,

דחיפה אחת מאיפה שקיבל את הכדור, בדחיפה נוספת הוא זז עוד ימינה, עכשיו הוא בכיוון הזה יותר ימינה. כשהשמאלי קולט את הכדור, יש לו כבר מרחק של שתי דחיפות, דחיפה אחת שזרק את הכדור, והשנייה כשהוא תפס את הכדור, אז הוא זז עוד שמאלה. אפשר להסביר את כוח הדחייה בצורה פשוטה על ידי חילופים של זריקת כדור. אי אפשר לעשות את זה בכוח של קוונטים, זה יותר מסובך כאשר מדובר בקוונטים אבל ככה זה קורה.

מישהו רוצה לשאול שאלה? (לא שומעים את השאלה).

פרופ' אהוד דוכובני: כוח הקוונטים הוא במערכת שבה יש מערכת של גרעין ואלקטרונים סביבו.

שאלה: במרחקים מסוימים?

פרופ' אהוד דוכובני: כדי להבין את המערכת של האטום, המציאו את הפתרון שאלקטרונים צריכים להיות שונים זה מזה, ולכן לא כולם יושבים קרוב לגרעין. זו מערכת מורכבת, זה התחלה של העניין.

כדי להבין את העניין, צריך להכניס שחקן חיזוק שזה סימטריה. במונחי ספורט, זה מסביר את חוקי השימור. אנחנו יודעים שהשאלה למה יש חוקי שימור אנרגיה היא לא שאלה לגיטימית, זה כמו השאלה מי ברא את העולם. אבל מתברר שזו שאלה לגמרי לגיטימית – שימור האנרגיה נובע ישירות מהסימטריה בזמן. אם אני עושה את הניסוי היום או עוד שנה או לפני שבועיים, זה לא משנה. תוצאות הניסוי לא תלויות במועד בו נערך הניסוי. מזה נובע חוק שימור אנרגיה. חוק שימור התנע זה אותו הדבר, כשאדם קולט את הכדור הוא נדחף אחורה, כי הכדור זז מימין לשמאל, רוצה להמשיך לנוע הלאה, והאדם שקולט אותו נע גם כן באותו כיוון. שימור התנע נובע מהסימטריה במרחב, אם עושים את הניסוי פה או בניו יורק או בפתח תקווה, התוצאות הן אותן תוצאות, לא תלויות במקום שבו נערך הניסוי.

אבל יש סימטריות מורכבות יותר. מי שעשה עבודה בסימטריה, זה אפשר שהוא אומן גדול. אתם רואים את התמונה (במצגת) – אם עושים שתי פעולות סימטריות, למשל להפוך את כל השחור ללבן ואת כל הלבן לשחור, תחליפו בין צד שמאל לצד ימין, תקבלו משהו סימטרי תחת שתי הפעולות האלה. זה מזכיר את חוק שימור התנע. אם התמונה גדולה, לא אראה איפה אני נמצא, אני לא יודע על איזה דג אני נמצא, זה מזכיר את זה שחוקי התנע לא תלויים במקום.

הנה עוד עבודה של סימטריה של אשר, שהיד הזאת גוררת על ידי רישום את היד הזאת, שגוררת על ידי רישום את היד הזאת, זה מסביר מי ברא את העולם... ופה (התמונה השמאלית בשקף) זו הסימטריה הכי מורכבת, הוא עשה עיבוד מתמטי לכל המרחב, אפשר לראות שהאדם הגדול שעומד מצד שמאל זהה לאדם שנמצא בחלון.

הזהירו אותי בכל הרצאה כזאת לא לשים נוסחאות, ובכל זאת שמת, אבל זו נוסחה פשוטה אז אני מניח שלא אאבד חצי קהל פה. יש נוסחה מוכרת -  $Y$  שווה ל- $X$  בריבוע. כשאני לוקח את  $X$  ומחליף אותו במינוס  $X$ , אז אני מקבל מינוס  $X$  כפול מינוס  $X$ , שזה גם  $X$ . לכן  $X$  בריבוע שווה למינוס  $X$  בריבוע. הפרבולה שמייצגת את זה היא סימטריה. בנוסחה  $Y$  שווה  $X$  בריבוע, לא משנה אם לוקחים  $X$  או מינוס  $X$ , התוצאה היא אותה תוצאה. לא צריך סימטריות מורכבות כדי להראות שסימטריות זה משהו מאוד יפה. לא צריך ללכת לסימטריות הרבה יותר מורכבות, אפשר להראות שהכוח האלקטרומגנטי, חלש וחזק, הם תוצאה של סימטריה מתמטית של המשוואות המתארות את החלקיקים.

אפשר לקחת אלקטרונים שלא יודעים אחד מהשני ואין ביניהם שום כוח, אתה אומר: אני רוצה שמערכת הזאת תהיה סימטרית תחת אותה סימטריה שאני מזכיר ולא כותב. אחרי שאתה מכניס את הסימטריה הזאת, אתה עושה נוסחה מתמטית ומקבל את התוצאה.

יש מערכת של 4 חלקיקים,  $d, u$ , אלקטרון ונייטרינו אלקטרון. זה מרכיב את כל העולם. זה היופי של התיאוריה, היא מאוד פשוטה, יש רק 4 חלקיקים, רק 3 כוחות. מאוד קל ללמוד את זה. מה לעשות שהטבע לא פשוט כל כך, לא מבינים למה יש עוד רביעיית חלקיקים –  $s, c$ , מיז ונייטרינו אלקטרון. זו תחילת ההשפעה היהודית, זה בחור יהודי שכתב את זה. ויש כאן עוד רביעייה –  $b-t$  – שזה אמת ויופי,  $truth \& beauty$  – וגם טאו וטֵטָא,  $up-down$ . זו שאלה פתוחה שאין עליה תשובה.

המודל הסטנדרטי – יש פה כאן את 4 החלקיקים שמרכיבים את כל העולם. אחרי זה את שני הכוחות. אמרתי שהכוחות עוברים כמו כדור שנזרק מאחד לשני. שכחתי לעשות את החיבור, הכוח האלקטרומגנטי, הכדור שעובר בין שני חלקיקים זה הפוטון שמוכר לחלקכם. בעצם זה הפוטון המוכר והאהוב. לגבי הכוח החזק, גלואון הוא החלקיק היסודי הנושא את הכוח החזק. המודל הזה שדיברנו עליו קובע ששני החלקיקים האלה – הגלואונים – הם חסרי מסה. ה- $g$  הוא ממש חסר מסה; זה הרבה יותר מורכב אבל בעיקרון הוא חסר מסה.

מה שעובר בין שני חלקיקים שהכוח ביניהם הוא חלש, זה שני סוגים של חלקיקים,  $Z$ - $W$ . למרבה הפלא זה לא נותן את האות באמצע. בהתפתחות המודל הסטנדרטי, אמרו אנשים: יופי של מודל, אבל הוא לא עובד, הם צריכים להיות חסרי מסה. עד שבאו כמה אנשים, ביניהם שניים שקיבלו פרס נובל ב-2013, ואמרו שיש דרך, הוסיפו את  $H^0$ , הוסיפו חלקיק נוסף למודל, ובאמצעות החלקיק הזה פתרו את בעיית המסה. זה לא חלקיק כוח ולא חומר, זה חלקיק מיוחד שהוא מיקס. זה המודל הסטנדרטי. אפשר לעשות עם זה נוסחאות גדולות (כמו שרואים בשקף) ואז לא צריך להסביר כלום...

האמת היא שדי מדהים שבאמצעות נוסחה אחת, מסובכת ככל שתהיה, אפשר להסביר את כל האינטראקציות של הטבע. זה מהמם. כל אחד מחלקי הנוסחה מתעסק במשהו. פה יש אלקטרון, זה קשור לגישה של אלקטרון עם שני  $W$ . כל אחד מהם אחראי לחלק מהאינטראקציות. בתוך הדיבור הזכרתי הרבה בעיות של המודל הסטנדרטי, שהוא חלש. יחד עם זאת, זו הצלחה גדולה, ויש עשרות ומאות תגליות שחזינו נכון. אבל למרות ההצלחה הזאת, יש דברים שלא יודעים. לא יודעים למה יש שלושה העתקים של אותו מבנה. מסיבות של אסטרופיזיקה צריכים להיות פחות מ-40 אלף חלקיקים. כמה שנים אחרי זה, קבוצת המכון היתה אקטיבית במדידה שהראתה שיש בדיוק שלושה העתקים.

לא יודעים גם איך למדוד מסות. המסה של החלקיק הזה שהוא הכבד בחבורה, הוא פי חצי מיליון גדולה יותר מהמסה של חלקיק זה. הנייטרינים הם חסרי מסה, אבל יש להם מסה, היא בסדר גדול של מיליון פעם יותר קטנה מהמסה של  $E$ . בכלל לא מבינים את כל הנושא של מסות. הנייטרינים אמורים להיות חסרי מסה במודל הסטנדרטי, בשעה שהתברר שיש להם מסה.

היקום מתפתח, עברו 13-14 מיליארד שנה, איפה נעלם כל האנטי חומר? חומר יש ביקום ואנטי חומר אין. לא מבינים למה. המודל הסטנדרטי יכול להסביר את זה קצת אבל לא את האפקט כולו. העובדה שהיקום מורכב מחומר ואין אנטי חומר ביקום, זו תעלומה מאוד גדולה. יש בעיה קשה יותר, המסה של הבוזון של היגס, קשה להבין למה הוא יושב ואיפה הוא יושב.

גם אם היינו מבינים הכל, מבינים את הסימטריה ואת האנטי חומר, מבינים הכל, גם כל מיני דברים שלא רשמתי כאן, עדיין יש תעלומה מדהימה באסטרופיזיקה. יודעים מה המסה של היקום. אנחנו יכולים למדוד מה המסה של החומר ביקום, כמה גלקסיות יש, יודעים כמה כוכבים יש בכל גלקסיה, את מסת הכוכב, מכפילים את זה פי 2, 3, 4, מוסיפים גז שלא רואים אותו; אחרי שגמרנו את כל הבוכלטריה, אנחנו יכולים

לחשב ולהבין שהחומר הרגיל מהווה רק 5 אחוז מהמסה של היקום. כך ש-95 אחוז מהמסה של היקום אין לנו שום מושג מה זה. כשאני אומר אין מושג, אין שום מושג. יש תיאוריות, ויש קבוצה במכון שמחפשת את החומר האפל, שיכולה להסביר בערך רבע מהמסה של היקום; הם עושים יופי של עבודה, לא יודעים אם ימצאו משהו.

בזה סיימתי את החלק הראשון של ההרצאה, שאומר מה אנחנו יודעים בערך. בואו נעבור לחלק שבו יש תמונות, שמדבר על איך השגנו את הידע הזה. ההליך הוא פשוט: בונים מאיץ, התחלנו עם אנרגיות נמוכות, לאט-לאט האנרגיה עלתה. המאיץ הוא סוג של מיקרוסקופ, עליו בונים גלאי, סוג של עין ביונית כזאת שמביטה מה קורה. אפשר לראות את החלקיקים האלה שהם קטנים מאוד, יותר קטנים מגרעין האטום, ממש קטנים, עפים במהירות אדירה וגם מתפרקים במהירות אדירה. בכל זאת, למרות שהם עפים במהירות האור, ומתפרקים במיליארדי מיליארדיות של שנייה, מצליחים עם העין הביונית הזאת "לראות" אותם. זה פלא טכנולוגי. גם המאיץ הוא פלא טכנולוגי, וגם הפעולה שלו היא פלא.

איך עובד כל המאיץ? זה אלקטרון גאון, זו מערכת מורכבת. לוקחים חוט, הוא מתחיל לזרוק אלקטרונים החוצה. האלקטרון נכנס לגליל, שיש לו מטען חיובי; החלקיק שלילי, הגליל חיובי, הוא זז. וכשהוא בפנים, כמו שנכנסים עם פלאפון למעלית, בעצם הפלאפון במעלית זה משהו שקשור למטענים. אתם נמצאים בגליל שהוא המעלית – אומרים לכם לא לדבר בפלאפון במעלית. הקליטה נתקעת, כי האלקטרונים מבחוץ לא יכולים להיכנס ולצאת. כשהאלקטרון נמצא בפנים פה בגליל, הוא מבודד מכל העולם. כשהאלקטרון יוצא, הגליל כבר מטען שלילי והוא חיובי. אם זה שלילי וזה שלילי, האלקטרון נדחף ימינה. אם זה חיובי וזה חיובי, הוא נדחף ימינה. שני הכוחות האלה דוחפים את האלקטרון לכיוון ימין. כשאנחנו עושים את זה, אנחנו משנים את הפולאריות, את הקוטביות, כך האלקטרון צובר יותר ויותר אנרגיה. זה העיקרון של המאיץ, מאז שנות ה-30 של המאה הקודמת עד היום קרו המון שינויים. היום זה מתוחכם נורא, אבל זה העיקרון.

כך בונים את המאיץ (רואים בשקף). בדרך כלל יש מאיצים שבונים בטבעת כזאת במעמקי האדמה. בונים אותם באדמה לא מסיבות בטיחות, אפשר היה להתגבר על בעיות הבטיחות גם לא בתוך האדמה, אבל על פני האדמה יש המון אנשים שכל אחד רוצה את החלקה שלו, מתחת לאדמה אפשר לעשות מה שרוצים.

פה בשקף רואים את המאיץ בתמונה מהאוויר. זה גבול שוויץ צרפת, כאן CERN, כשאני נוסע לז'נבה אני נוחת כאן, לוקח רכב ונוסע לסרן למשרד, שבוע אחרי זה אני לוקח את האוטו וחוזר לכאן, למקום שנחתתי בו. זה קו המיתאר של המאיץ. יש לו כ-8 כניסות, מסיבות חוקיות כולן נמצאות בצד השוויצרי. פה רואים את אחת הכניסות.

כשאנחנו מייצרים דבר כזה, שוכרים מכונה כזאת (בשקף), זה סוג של אָת. אנחנו לא צריכים דבר כזה גדול, לנו יש משהו קטן, 4 מטר רוחב. פה רואים את תהליך החפירה, בערך 10 מטר ליום, שמנו שתי מכונות - אחת בצד הזה, אחת בצד הזה – כל אחת חופרת 10 מטר ליום. אחת פגעה באיזשהו שלב בנחל תת קרקעי וכל העסק התמלא מים. זאת סיבה לעשות את זה בארץ כי לא היינו מוצאים מים... אחרי שפֹּרְרִים תעלה, מְבַטְנִים אותה, ואז מורידים את המגנטים העיקריים שתפקידם לגרום לפרוטונים או האלקטרונים לנוע כמו שאנחנו רוצים. הם צריכים לרוץ בעיגול, אנחנו רוצים שירוצו אחרת, הדבר הזה

מפעיל שדה מגנטי, 8.5 טסלה, זה הרכיב העיקרי של המאיץ. רואים אותו בתוך התעלה של המאיץ, זה 30 קילומטר.

התעלה הזאת היא יחסית קטנה, אי אפשר לעשות כאן ניסוי. כדי לעשות ניסוי צריך לבנות עין ביונית שהיא ענקית. במקרה של הניסוי שלי, העין הביונית היא באורך 4 מטר, רוחב 22 מטר. תחשבו על הייצור של זה. זה עצום. פה רואים כרייה של האולם שבתוכו עושים את הניסוי. זה פתח שדרכו מורידים את חלקי הניסוי ואת המכשירים, זו התעלה של המאיץ. את כל הגובה הזה צריכים לחפור למטה כדי שאפשר יהיה לבנות את הניסוי.

עכשיו אתן לכם מושג איך בנוי מאיץ כזה. מכונת ענק, 30 קילומטר בערך, מי שהשתעשע במחשבה לבנות אחד כזה, זה בערך 5 מיליארד דולר, משהו כזה. כאן תפסתי בן-אדם, והעמדתי אותו מול המכונה, ואז מבינים שזה באמת דבר עצום. הנפח הוא כמו בית דירות של 10 קומות. וכל סנטימטר מעוקב של הדבר הזה הוא גרעין תחום עם אלקטרוניקה מדהימה.

כאן בשקף אתם רואים את הגלאי. שלא תחשבו שאין מתח בפיזיקה, הורדנו את הדבר הזה, היה צריך לסובב אותו באוויר. זה שוקל המון, האורך הוא 26 מטר וזה שווה 30 מיליון דולר. צריך להוריד את זה לתעלה תוך כדי סיבוב, כאשר זה גובל 15 סנטימטר מהקיר, אין הרבה מרווח, אם זה נוגע בקיר הלך הכל. חברת הביטוח אמרה שהיא מוכנה לבטח אותו ב-30 מיליון דולר. אמרנו: זה עולה 30 מיליון, נבטח ב-30 מיליון? אבל הצלחנו לעשות את זה. אתם רואים את 8 הצינורות האלה, ובגדול זה המתח הכי גדול בעולם מבחינת אנרגיה. זה החלק המרכזי של הניסוי.

היה כאן איפשהו בנאדם, תראו אותו, כדי שתהיה לכם פרספקטיבה. זה אדם עם גובה נורמלי, 1.70 מטר, אבל האיש הזה לא נורמלי שהוא עומד שם...

בתוך כל הדבר העצום הזה גם לישראל יש תפקיד – ישראל בכלל ומכון ויצמן בפרט. אתם רואים פה שלושה לוחות עצמאיים, את הגלאים האלה אנחנו בנינו. (הכוונה לגלאים שנראים פה בשקף בסגול). בנינו 70 גלאים כאלה.

זה גלאי שהוא פשוט בעיקרון. הפשטות הזאת נתנה את פרס הנובל לז'ורז' שרפק לפני כמעט 30 שנה. יש פה חוטים, שיש מעליהם מתח חיובי גבוה, יש כאן פלטות שאין להן מתח, הן מחוברות לאדמה בהארקה, באמצע עובר גז מיוחד, מקבלים סיגנל על החוט ועל הלוחות האלה.

לא מצאתי תמונות מהפרויקט הנוכחי שלנו. התמונות שאני מראה הן מהפרויקט הקודם, פה רואים גלאי כזה בבנייה. השחור זה הפלטה החיצונית, והקווים האלה שומרים את שני הלוחות שלא יגעו אחד בשני, מלפפים כאן את החוטים, ליפוף שנעשה בארץ. פה רואים את הלוח בצבע זהב. לא כל מה שנראה זהב הוא זהב, אבל פה זה אכן ציפוי זהב. כל העסק מתעגל לנו, פה רואים ארבעה גלאים מוכנים. כאן רואים את הגלאים במקום, זה הגלגל העצום שדיברתי עליו (בשקף), הנה פה בן אדם. זה משטח שהמנוף השחור הזה מרים, על המשטח עומדים שני חבר'ה שמטפלים בגלאים. כל הגלאים שיש להם ריבוע נייר כזה לבן, נבנו בארץ. האחרים נבנו ביפן. יש גם גלאים שנבנו בסין ועוד מקומות.

פה בשקף רואים גלגל. בתמונה הימנית רואים יותר מקרוב, שני חבר'ה שלנו שמטפלים בגלאים אלה. נוסף ל-4 הגלגלים ענקיים, יש גם גלגל קטן כזה, של 8 מטר. כאן רואים שאנחנו מכניסים אותו פנימה, הולכים להוציא אותו החוצה ולזרוק לזבל, כי הוא לא טוב, כי בעתיד תהיה מערכת טובה יותר. כשהזכרתי את הפרויקט הנוכחי, חלק מהאנשים במעבדה שלנו עובדים בשיתוף עם קבוצות בקנדה, סין ורוסיה, ביחד בונים חצי מהגלגל הקטן החדש, שזה פרויקט אדיר.

בשקף הבא רואים קתדרלה ענקית מול החלק שלנו בפרויקט. מבחינת הסקלה זה בערך ההפרש, אבל מבחינת מורכבות יש לנו חלק נכבד בפרויקט.

זה נראה מוצלח, אבל לא הכל מצליח. התחלנו להריץ את המאיץ החדש בשנת 2009 (אלה התמונות שראיתם), היתה פאניקה בעולם, פחדו שנייצר חורים שחורים שיפגעו בעולם. אנשים נכנסו למקלטים, מחשש שיהיה חור שחור, יש טענה שמישהי התאבדה מרוב פחד. אבל לא היה צורך, כי עצרנו את העניין לבד. היה פיצוץ גדול באזור, בערך מאה מטרים של מאיץ נהרסו. צריך היה לעצור לשנה בערך, לתקן, להחליף בערך 50 מגנטים, לשלם בערך 100 מיליון דולר על התיקון, ובשנת 2010 התחלנו להריץ את זה מחדש. רואים את זה כאן בגרף, זה לא הלך, ציר ה-X זה הזמן, ציר ה-Y זה luminosity (בהירות). אתם רואים שבשנת 2011 המצב לא טוב. ב-2012 יותר טוב. ב-2013 ו-2014 לא הרצנו, כי תיקנו את השגיאה שגרמה לפיצוץ. אחרי שבזבזנו שנתיים בתיקון התקלה, ב-2015 התחלנו להריץ את המאיץ, רואים ששנת 2015 לא יותר מדי טובה. ב-2016 זה מה שצפינו וזה מה שקיבלנו, הרבה יותר טוב. לא מצאתי תוצאות ותמונות של 2017, אבל בשנת 2017 יהיה יותר טוב, ב-2018 אנחנו מקווים שיהיה עוד יותר טוב. ב-2019, 2020, 2021, אנחנו עושים שדרוג גם של המאיץ וגם של הגלאי.

שאלה: מי מממן את כל הפרויקט?

פרופ' אהוד דוכובני: אנחנו. סרן זה סיפור ארוך נורא. סרן זה ארגון בינלאומי שהוקם בתחילת שנות ה-50. אירופה היתה אחרי הטראומה של המלחמה, רצו לייצר איחוד אירופי מחדש. לא רצו לשים את זה באחת הארצות החזקות, אנגליה, צרפת, איטליה או גרמניה. התלבטו, בסוף היה צריך להחליט בין בלגיה ושווייץ והחליטו על שווייץ. בהתחלה היו שבע חברות ולאט לאט זה גדל. כל חברה תורמת לזה איזשהו חלק מהתל"ג שלה, לפי פרופורציה. היום בריטניה, גרמניה, צרפת ואנגליה מממנות את הרוב. אני לא אחראי לשנים, אבל בערך ב-2014 היו 20 מדינות, כולם מדינות מאירופה. CERN זה ראשי תיבות (בצרפתית) של Conseil Européen pour la Recherche Nucléaire. אז התחלנו במאבק ב-1992, ב-2014 זה הבשיל, וסרן קיבלה את ישראל בתור חברה, החברה הראשונה הלא אירופית. שברנו את המחסום הזה. עכשיו יש 23 מדינות, ויש עוד מדינה מחוץ לאירופה.

קריאה: הודו.

פרופ' אהוד דוכובני: הודו מועמדת. רוסיה מועמדת. ארה"ב משלמת 25% מתקציב סרן אבל לא חברה. החלק הישראלי זה 14 מיליון דולר לשנה. שאלו אותנו אם אנחנו מעוניינים, אמרנו שכן, זה עבר למשרד החוץ, חשבו חצי שנה, אחרי זה החליטו שישאלו תיכנס לסרן, אנחנו אחראים לזה. בגדול המאבק הצליח, נשיאת שווייץ היהודייה היתה מתנגדת חריפה לזה, אבל אנחנו שם.

אז הבנו מה אנחנו יודעים ואיך השגנו את הידע הזה. מה נותר לעשות? יש לנו רשימה ענקית של בעיות. דבר ראשון, כשהתחלנו את העסק לא ידענו, ראינו הוכחות גדולות לקיומו של ההיגס, אבל לא היו לנו הוכחות שהוא קיים, לא ראינו את המסה שלו. המטרה העיקרית היתה לגלות את ההיגס. זה קרה ביוני 2012, אנחנו מייצרים היגס, כשאתה לוקח את שני הפוטונים האלה עם המסה שלהם, מקבלים 20 GeV, זה בציר X, זה מספר הפוטונים שיש להם אנרגיה. פה יש 10, והיה 7900 שראינו. אתה מצפה שהעקומה תהיה חלקה לגמרי, לא קו מקווקו. פה יש נקודות שנמדדות, פחות העקומה החלקה שיושבת כאן, פה רואים מין "הר" יפה, זה אומר שמהו נוסף נוצר. יש תהליכים שגורמים לזה שנוצרים שני פוטונים, פוטון אחד בדרך כלל לא יודע מהפוטון השני, אין להם מסה שמאפיינת אותם. פה יש משהו שיוצר זוגות אלקטרונים שהמסה שלהם תמיד אותו דבר, בערך באזור 10. אלה התאים לחישובים של ההיגס, פעם

בכמה אלפי היגסים יש שינוי, הרבה יותר קל לראות את זה. גילינו את ההיגס. ב-2013 אנגלר – שוב יהודי – והיגס קיבלו על זה פרס נובל, כי חזו את החלקיק הזה בשנות ה-60. בהחלטה של ועדת הנובל נאמר שהפרס מוענק בעבור התגלית.

מה מעבר למודל הסטנדרטי? אנחנו יודעים שהפיזיקה שיש לנו לא טובה מספיק, היא עובדת נפלא אבל נכשלת בכל מיני שאלות יותר עמוקות. השאלה מה הפתרון. מספרים על איינשטיין שאחרי שכתב את תורת היחסות הכללית, הוא חזה שקרני אור שעוברות ליד השמש יתעקמו, ושאפשר לגלות את התופעה רק כשיש ליקוי חמה מלא. ואז מישהו טס לאמריקה לראות ליקוי מלא. קריאה: נסע לאפריקה.

פרופ' אהוד דוכובני: הוא טס לשם לנסות למדוד את זה. הוא אכן ראה את היקום כפי שאיינשטיין ציפה, לא היו אז טלפונים, הוא שלח טלגרמה שמודיעה שאיינשטיין צדק. באו לאיינשטיין בהתרגשות ואמרו: הרינגטון מאשר את התיאוריה שלך. והוא אמר: מי זה הרינגטון. הוא היה בטוח כל כך שהתיאוריה שלו נכונה, שלא היה צריך חיזוקים. לנו אין סיטואציה כזאת, אין לנו מודל להגיד: וואו זה המודל הנכון, ככה זה יעבוד. יש כל מיני אופציות כמו סופר סימטריה, כמו האפשרות להרחיב את מספר המימדים שזה נשמע אבסורדי. או מה שנקרא GUT, זאת תיאוריה שרוצה לחבר את כל הלוחות ביחד למערכת נוספת באיזושהי גרביטציה. לא מדבר על זה. מספר המודלים הוא ענק, יש המון מודלים שמנסים לפתור דברים, אף אחד לא עונה על הכל, לכל אחד יש בעיות כאלה או אחרות. אתן מבט קצרצ'יק על הדברים האלה. האפשרות השנייה היא להשתמש במה שיש כדי לראות את מה שאין. גילינו את היגס, ההיגס הוא אשנב שדרכו קל להביט על הפיזיקה. רוב הפיזיקות שמעבר למודל צריכות להשפיע על היגס. בגראף (בשקף) ציר X זה הסטייה, 1 זה מה שאנחנו מצפים, 2 זה הסטייה, זה סיגנל אחד יותר ממה שצפינו. 66% מזה, זה התוצאה שקיבלתי. מה שמעניין אותנו זה חריגות, רואים שהתוצאות יפות – אלו סטיות טיפוסיות, בדרך כלל זה לא פוגע. כל דברים אלה, הם יושבים קרוב מאוד לפרדיקציה. פה רואים את המדידות שהן 2 מיליונים, הקו הכחול פה מסמן את השגיאה. זה הערך שמדדנו, השגיאה ענקית. גם זה לא אומר שיש סטייה.

פה מחברים את כל התוצאות, רואים שאנחנו יושבים קרוב מאוד לצפי. אבל אם יש פיזיקה מעבר למודל הסטנדרטי, יש סיכוי טוב שאחת המדידות האלה קרובה לערך האמיתי. התוכנית שלנו ל-15 שנים הבאות – תוכנית מרתקת – היא להקטין ולהקטין את השגיאות, עד שהשגיאות יהיו קטנות מאוד, ואם הערך האמיתי נמצא כאן, זה יהיה קרוב מאוד לערך האמיתי.

חלק מהחיפוש הוא חיפוש עקיף. כמו סיפור העם שמספר שראו סטיות במסלול של כוכב הלכת אורנוס, ואז מישהו חכם – לא זוכר מה שמו, צרפתי – אמר שאפשר להסביר את זה על ידי הנחה שקיים עוד כוכב לכת יותר רחוק שיותר קשה לצפייה. הוא חישב את המסלול של הכוכב הזה, ואז לקחו טלסקופים ומצאו כוכב. זו תגלית בעקיפין. גם כאן, אם נראה שיש סטייה משמעותית זה יתגלה בעקיפין.

סופר סימטריה זה מודל רחב מאוד, זו משפחה של מודלים. לכל חלקיק של המודל הסטנדרטי – כשהחלקיקים נמצאים פה בשקף – יש בן זוג זהה לו פרט לספין. יש איזושהי סופר סימטריה שמשנה את הספין – שזה תנועה סיבובית של חלקיקים. כך שאם לאלקטרון יש ספין וחצי בעולם שלנו, אם לוקחים את זה בסופר סימטריה לאלקטרון לא יהיה ספין. אי אפשר לבנות מערכת יציבה לחלוטין, אבל המערכות חזקות שלנו עשויות להיווצר. הדבר המדהים במודל הזה, הוא שיש לו כוח אדיר, הוא פותר הרבה בעיות. הוא פותר את בעיית המסה של ההיגס. אמרתי שמתוך המסה של היקום מכירים רק 5%, ורן בודניק



וקבוצתו מחפשים חומר אחר, וזה 25%, החלקיקים שאני מחפש נקראים SUSY – Super SYmmetry particles, זה החלקיק הקטן מכל המשפחה הזאת, זה בדיוק אותו חלקיק. אם הסופר סימטריה נכונה, היא פותרת את הבעיה של חומר אפל. אותי זה שיכנע, לכן מההיגס עברתי לעבוד ב-SUSY. בכל אופן המודל הוא יפהפה, הוא פותח פתח לאיחוד עם כוח הכובד. זה מודל שהוא מאוד טוב, יודעים איך לחפש אותו, זו משפחת מודלים לכן לא יודעים בדיוק, אבל זה יכול לעזור לנו למצוא את החומר האפל. יש עוד אופציה, וזה להניח שיש עוד מימדים. לנו יש שלושה, ומוזר לחשוב שיש עוד. הנה מימדים נוספים, מדברים על ארבעה מימדים. תחשבו על צינור, יש לו 3 מימדים, אם אני מביט עליו מרחוק, הוא נראה חד מימדי. מימדים יכולים להיעלם אם אני מתרחק או אם הדבר הוא קטן, ההנחה היא שמימדים נוספים הם קטנים מאוד ולכן לא רואים אותם.

יש עוד הנחה שאין לה סיבה, למען האמת, חוץ מזה שהיא מובילה לפתרון. התוצאה מוכיחה שרק כוח הכובד יכול להתפשט במימדים הנוספים האלה. הזכרתי שאחת הבעיות של פיזיקה היא שכוח הכובד חלש מאוד, פי 1 עם 40 אפסים יותר חלש מכוחות אחרים. אם יש מימדים נוספים, ואם רק כוח הכובד יכול להתפשט במימדים האלה, פתרנו את הבעיה. לפי זה, בעצם כוח הכובד חזק, אבל הולך לאיבוד במימדים נוספים. אם ההנחה של מימדים נוספים היא נכונה, זה יפתור את הבעיה של המסה של היגס, שקשורה לבעיית כוח הכובד החלש; וזה גם מקל על איחוד כוחות. יש לנו כל מיני פרדיקציות, אחת אומרת שעלולים לייצר חורים שחורים שמיד מתפרקים, יש חורים שאנחנו מחפשים אחריהם ועד עכשיו לא ראינו. עכשיו בנינו את המאיץ, בשנת 2021 המאיץ יעבוד הרבה יותר טוב, ורוצים לעשות עוד שיפור משמעותי בשנים שאחרי כן, ב-2037 – יש לזה בהחלט סיכוי.

לסיכום, ראינו שבגדול זה סיפור הצלחה מדהים. יודעים לחשב את החלקיקים. אנחנו במצב ייחודי, שאנחנו יודעים בדיוק מה אנחנו לא יודעים. זו סיטואציה מיוחדת מאוד. אנחנו יודעים שאנחנו יודעים מעט מאוד, למרות ההצלחה. וישראל ומכון ויצמן – ישראל בכלל והמכון בפרט – תורמים לשטח הרבה מעבר לגודלה היחסי של המדינה. תודה. מחיאות כפיים.

שאלה: איפה אפשר לקרוא וללמוד עוד על הדברים האלה?

פרופ' אהוד דוכובני: יש המון באינטרנט. אנחנו מודעים לכך שאנחנו צריכים יחסי דיבור, זה עולם אחר. תיכנס לאתר של CERN, תמצא המון דברים. כמו כן, יש די הרבה ספרים פופולריים, בשמחה אתן לך שם של ספר. אפשר להיכנס גם אתר שלנו, גם שם יש חומר. עוד שאלות? טוב, תודה רבה.