



ניטרינו: חלקיקי הרפאים המרכיבים את היקום שלנו

Art McDonald*

המחלקה לפיזיקה, פיזיקה הנדסית ואסטרונומיה, אוניברסיטת קווינס, קינגסטון, אונטריו, קנדה

סוקרים צעירים

RYAN

גיל: 15



בתחום האסטרופיזיקה החלקיקית, מדענים מנסים להבין את נקודת ההתחלה של היקום, וכיצד הוא פועל ברמה הבסיסית ביותר. אנו משתמשים בחלקיקים ממקורות אסטרופיזיים כדי ללמוד על אודות חוקי הפיזיקה בקנה המידה הקטן ביותר האפשרי של החומר. כמו כן אנו מפתחים נוסחאות מתמטיות המתארות את מערכות היחסים בין החלקיקים היסודיים המרכיבים את היקום שלנו. עמיתי ואני חקרנו את חלקיקי הניטרינו, שהם בין אבני הבניין הבסיסיות ביותר ביקום. מחקר זה מסייע לנו להבין איך היקום התפתח מאז שהחל במפץ הגדול, לפני כ-13.8 מיליארד שנים. במאמר זה, אספר לכם על אודות 'חלקיקי הרפאים' המכונים חלקיקי ניטרינו – מהם, כיצד אנו מודדים אותם, ומדוע התגלית שלנו הובילה לשינוי גדול בשיטות המדידה שהיו מקובלות עד אז. בתהליך זה, תיוכחו כיצד היסודות החמקמקים ביותר סביבנו עשויים להיות לעיתים גם הכי חשובים.

פרופסור ארט מקדונלד זכה בפרס נובל בפיזיקה לשנת 2015, במשותף עם פרופסור טקאקי קג'יטה, עבור תגלית תנודות חלקיקי הניטרינו, המראה כי לחלקיקים הללו יש מסה.

חלקיקי נְיִטְרִינוֹ: חלקיקים יסודיים

ממה מורכב היקום, ואיך הוא התפתח מאז המפץ הגדול? אלו הן השאלות המרתקות ביותר שאנו יכולים לשאול את עצמנו. כדי לענות עליהן מבחינה מדעית, ביכולתנו להשתמש בכמה גישות ובשיטות שונות. אני מגיע מתחום האסטרופיזיקה החלקיקית – תחום מחקר חדש יחסית, שבו חוקרים את החלקיקים הבסיסיים שנעים בחלל, ובמיוחד את החלקיקים המגיעים לכדור הארץ. החוקרים בתחום זה מנסים להבין את טבעם של החלקיקים הבסיסיים המרכיבים את החומר, ולהתחקות אחר הכוחות השולטים במערכות היחסים בין החלקיקים הללו. באופן כללי, אנו מנסים לפתח שיטות ניסוי שמטרתן למצוא את החלקיקים הקטנים ביותר, המכונים **חלקיקי יסוד** – חלקיקים שלא ניתן לחלקם לחלקיקים קטנים יותר. בהסתמך על הממצאים שמתקבלים, אנו מפתחים 'מוֹדֵל תֵּיאֹרֵטִי'. זהו מערך של רעיונות ומשוואות המסביר כיצד החומר נוצר מחלקיקי היסוד הללו. אף פעם איננו אומרים שהמודל שלנו הוא המיטבי, כיוון שכל גרסה של המודל מבוססת על רמת ההבנה הנוכחית שלנו, הנסמכת על רגישות מכשירי המדידה שיש לנו בזמן נתון, או על יכולת המיקוד שלהם. לאורך השנים, מפתחים מכשירים יותר ויותר רגישים, וכתוצאה מכך אנו לומדים דברים חדשים ומרגשים על אודות אבני הבניין היסודיות של החומר, ולגבי היקום שבו אנו חיים.

המודל הוותיק המאגד את החלקיקים ואת הכוחות הפועלים ביניהם מכונה **המוֹדֵל הֶסְטֵנְדֵרְטִי של חלקיקי היסוד [1]** (להלן: 'המודל הסטנדרטי'). לחצו כאן כדי ללמוד עוד על אודותיו). לפי מודל זה, כל החומרים, ובכלל זה האטומים המרכיבים את גוף האדם, האוויר שאנו נושמים והאור שאנו מקבלים מהשמש, מורכבים מחלקיקי יסוד. החלקיקים הללו נוצרו במהלך **המפץ הגדול**, לפני כ-13.8 מיליארד שנים, ובמהלך האבולוציה של היקום שהתרחשה אחריו.

עם חלקיקים היסוד נמנים אֶלֶקְטְרוֹנִים, קווארקים ו**חלקיקי נְיִטְרִינוֹ (איור 1A)**, כמו גם חלקיקים אחרים שאולי שמעתם עליהם דוגמת פוטונים, בוזונים, גלואונים וחלקיקי היגס. במאמר זה נתמקד בחלקיקי נייטרינו. כל חלקיקים היסוד משפיעים זה על זה באמצעות ארבעה כוחות יסוד המכונים 'הכוח החזק'; 'הכוח החלש'; 'הכוח האלקטרוֹמְגְנֵטִי' ו'כוח הכבידה'. קווארקים הם אבני היסוד של הפרוטונים ושל הניטרונים. הפרוטונים והניטרונים מרכיבים את גרעיני האטומים, המוקפים אלקטרונים (**איור 1B**).

חלקיקי נייטרינו נפלטים מחומרים שבאופן טבעי הם **רַדְיוֹאֶקְטִיבִּים**, ובמהלך תגובות מסוימות שביכולתנו לייצר במכשירים מדעיים המכונים 'מאיצים'. אך צורת ההיווצרות הנפוצה ביותר של חלקיקי נייטרינו היא בתגובות גרעיניות המתרחשות בשמש, בתהליך שנקרא 'היתוך גרעיני'. במסגרת תהליך זה, גרעינים של שני אטומים משתלבים ויוצרים אטום אחד, כבד יותר. בתוך כך הם משחררים כמויות עצומות של אנרגיה ושל חלקיקים, לרבות חלקיקי נייטרינו. לחלקיקי הנייטרינו הללו נדרשות שתי שניות לצאת מהשמש, וכ-8 דקות להגיע לכדור הארץ. מספרם עצום – כדי לתת לכם מושג, בכל שנייה, 65 מיליארד חלקיקי נייטרינו סולאריים (כלומר מהשמש) חוצים כל סנטימטר רבוע על פני כדור הארץ!

חלקיקי נייטרינו הם חלקיקי יסוד יוצאי דופן, כיוון שפעולתם ההדדית על חומר מתרחשת רק על ידי שניים מתוך ארבעת כוחות היסוד – כוח הכבידה והכוח החלש (הכוח החלש יכול לאפשר לנייטרינו לשנות נייטרון לפרוטון ולאלקטרון). כיוון שלחלקיקי הנייטרינו כמעט

חלקיקי יסוד (Fundamental particles)

החלקיקים הקטנים ביותר שמרכיבים את כל החלקיקים האחרים.

המוֹדֵל הֶסְטֵנְדֵרְטִי של החלקיקים היסודיים (Standard model of fundamental particles)

מודל של חלקיקים היסוד והאינטראקציות ביניהם באמצעות כוחות הטבע.

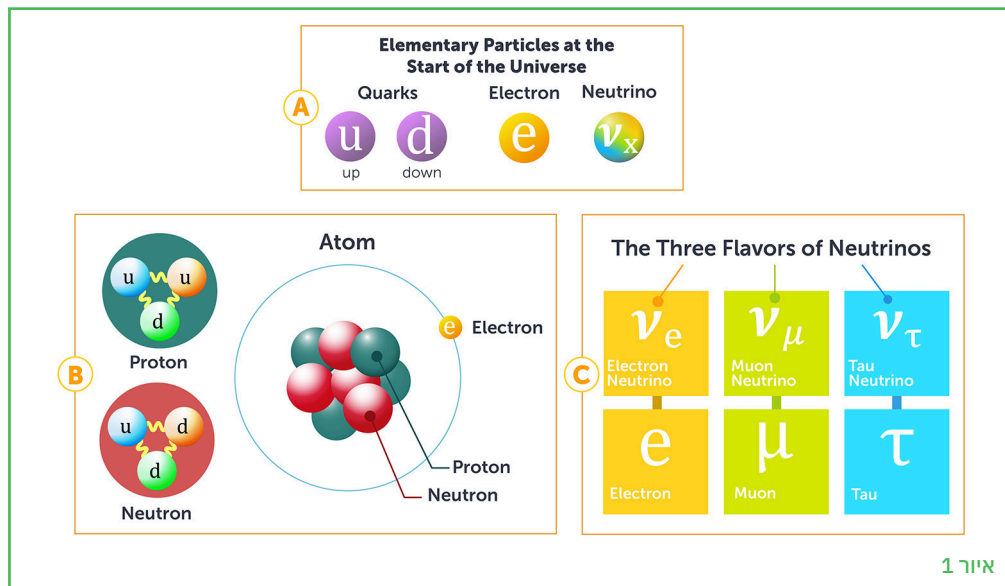
חלקיקי נְיִטְרִינוֹ (Neutrinos)

חלקיקי יסוד המקיימים אינטראקציה באמצעות כוח הכבידה והכוח החלש.

רַדְיוֹאֶקְטִיבִּיּוּת (Radioactivity)

פליטה ספונטנית של חלקיקי אנרגיה הנובעת מהתפרקות גרעין האטום.

איור 1



איור 1

חלקיקי יסוד (A) לפי המודל

הסטנדרטי, היקום החל בהיווצרות חלקיקי יסוד המכונים קווארקים (Quarks), אלקטרוני (Electron), וחלקיקי נייטרינו (Neutrino). ישנם כמה סוגי קווארקים בהם קווארק למעלה (Up quark) המסומן כ-u; וקווארק למטה כ-d; המסומן כ-d; ושלושה סוגים של חלקיקי נייטרינו המסומנים כ-ν_x, כאשר ה-ν מציין את הנייטרינו, וה-X מייצג אחד משלושה סוגים. (B) קווארקים הם אבני הבניין הן של הפרוטונים (Proton) הן של הנייטרונים (Neutron).

הפרוטונים והנייטרונים מרכיבים את גרעיני האטומים (Atom), והאלקטרונים חגים סביב גרעין האטום. (C) ישנם שלושה סוגים, או 'טעמים', של חלקיקי נייטרינו, והם פועלים בהשפעה הדדית על שלושה חלקיקי יסוד: האלקטרון (Electron Neutrino), המיואון (Muon Neutrino), והטאו (Tau Neutrino). מקרא:

Elementary particles at the start of the universe = חלקיקים היסוד שנוצרו בתחילת היקום
The three flavors of Neutrinos = שלושת ה'טעמים' של חלקיקי נייטרינו.

'טעמים' (של חלקיקי נייטרינו) (Neutrino flavor)

מאפיין של חלקיקי נייטרינו המגדיר את סוגיהם. ישנם שלושה טעמים מובחנים: נייטרינו אלקטרוני, נייטרינו מיואון, ונייטרינו טאו.

אין מָסָה, כוח הכבידה שהם מפעילים הוא קטן מאוד וכמעט בלתי ניתן לאיתור. באשר לכוח החלש – על חלקיקי הנייטרינו להיות קרובים מאוד לפרוטונים, נייטרונים או אלקטרונים אחרים כדי שתרחש אינטראקציה (פעולה הדדית) ביניהם. מסיבות אלו, קשה מאוד לאתר את חלקיקי הנייטרינו [2]. ניתן לומר שהם יכולים לעבור דרך חומר רגיל כמעט כאילו היו 'שקופים'. למעשה, הפעולה ההדדית בין חלקיקי נייטרינו לחומר מתרחשת רק כאשר הם פוגעים ישירות בגרעין האטום או באלקטרונים הסובבים אותו. זה קורה לעיתים די נדירות, כיוון שמרבית נְפֶח האטום הוא חלל ריק. במקרים אחרים, חלקיקי נייטרינו עוברים דרך החומר ללא הפרעה – ובכלל זה מיליארדים רבים מהם שחולפים דרך גוף האדם מְדֵי שנייה! היות שחלקיקי נייטרינו נקלטים על ידי הַגְלָאִים שלנו בצורה כה חלשה, קשה מאוד לראותם ולמדוד את תכונותיהם. הודות לאינטראקציות הנדירות שלהם עם חומר, יש אנשים המכנים את חלקיקי הנייטרינו 'רוחות הרפאים של היקום'.

על אף שהם חמקמקים ומאֶתגרים למדידה, חלקיקי נייטרינו ממלאים תפקיד מרכזי ביצירת היקום, ומסייעים ליצור מבנים כמו כוכבים וּגְלַגְלִיּוֹת. הם גם עזרו ליצור חלק מהיסודות הבסיסיים שנוצרו בראשית היקום, במהלך המפץ הגדול.

נהוג לסווג את חלקיקי הנייטרינו לשלושה סוגים, או 'טעמים': נייטרינו אלקטרוני; נייטרינו מיואון ונייטרינו טאו. כל 'טעם' מקיים אינטראקציה עם החלקיק היסודי התואם – אלקטרון, מיואון וטאו (איור 1C) [3]. איננו יודעים בדיוק מדוע ישנם רק שלושה סוגי חלקיקי נייטרינו, אך אלו הם הסוגים שגילינו עד כה, והם תואמים את תחזיות המודל הסטנדרטי. כפי שתראו בהמשך, התגלית החשובה שלנו, שזיכתה אותי ואת פרופסור טקאקי קג'יטה בפרס נובל בפיזיקה לשנת 2015, קשורה לשינויים ב'טעמים' של חלקיקי הנייטרינו כאשר הם נעים בחלל, מליבֶת השמש אל כדור הארץ.

הדרך שבה מדדנו את חלקיקי הנייטרינו

כאשר התחלנו לחקור את חלקיקי הנייטרינו, הייתה בעיה בלתי פתורה בתחום האסטרופיזיקה החלקיקית, בשם 'בעיית חלקיקי הנייטרינו הסולאריים' [4]. כדי למדוד את

חלקיקי הנייטרינו נִבְּנוּ גִּלְאִים מְיוֹחָדִים, אֲךָ הֵם הֻצְבְּעוּ עַל כֵּךְ שֶׁמִּסְפַּר חֲלֻקֵי הַנֵּיטְרִינוֹ הֵאֱלֶקְטְרוֹנִים הַמְגִיעִים מֵהַשֶּׁמֶשׁ שֶׁנִּמְדָד, הִיָּה נִמּוֹךְ בְּהִרְבֵּה מֵהַמִּסְפָּר אֲשֶׁר לוֹ צִיפִינוּ. אֵת הַשְּׁעֵרָתֵנוּ לַגְּבִי מִסְפָּר זֶה בִּיסָסְנוּ עַל חִישובִים אֲמִינִים מְאֹד שֶׁל הַשְּׁרָפָה הַמֵּתְרַחֶשֶׁת בַּשֶּׁמֶשׁ. הַסְתִּירָה שְׁבִין הַמִּסְפָּר הַמְצוּפָה שֶׁל חֲלֻקֵי הַנֵּיטְרִינוֹ הַמְגִיעִים מֵהַשֶּׁמֶשׁ לַכְדוֹר הָאָרֶץ, לַמִּסְפָּר שֶׁהִתְקַבַּל בַּמִּדְדוֹת שֶׁעֲרַכְנוּ, הִיָּתָה עֲשׂוּיָה לְהַצְבִיעַ עַל אַחַת מִשְׁתֵּי אִפְשָׁרוּיֹת: אֹדוּת שֶׁהִיָּה צוֹרֵךְ לְעֲדֹךְ אֵת הַמּוֹדֵל הַסְטַנְדָּרְטִי וְלִשְׁנוֹת אֵת הַדֶּרֶךְ שֶׁבָּהּ אֲנוֹ חוֹשְׁבִים עַל אֹדוּת חֲלֻקֵי הַנֵּיטְרִינוֹ, אֹדוּת שֶׁהִיָּה צוֹרֵךְ לִשְׁנוֹת אֵת הַדֶּרֶךְ שֶׁבָּהּ אֲנוֹ מְחַשְׁבִים אֵת מִסְפַּר חֲלֻקֵי הַנֵּיטְרִינוֹ הַמְגִיעִים מֵהַשֶּׁמֶשׁ. לִשְׁתֵּי הַאִפְשָׁרוּיֹת הַיּוֹ שֶׁלִּכּוֹת מִשְׁמַעוֹתֵי עַל הָאֹפֶן שֶׁבּוֹ אֲנוֹ מְבִינִים אֵת הַיְקוּם, וְלִכְן, רַבִּים מַחֻקְרֵי הָאֶסְטְרוֹפִיזִיקָה הַחֲלֻקִיקִית הַתֵּאֲגָדוּ לְמִשְׁימָה מִשׁוֹתֶפֶת – תַּכְנוֹן נִיסוּי שִׁפְתוֹר אֵת בְּעִיַת חֲלֻקֵי הַנֵּיטְרִינוֹ הַסּוּלָאֲרִיִּים.

כְּפִי שֶׁהַזְכֵּרְתִי קוֹדֵם לִכְן, לֹא נִיתַן לְמַדוֹד אֵת חֲלֻקֵי הַנֵּיטְרִינוֹ עַל יְדֵי אֵינְטְרָאֲקִיצִיָּה יִשִּׁירָה עִם הַגִּלְאִים שֶׁלֵּנוּ. בְּמִקוֹם זֶה, בַּדֶּרֶךְ כִּלְלִי מוֹדְדִים אֵת חֲלֻקֵי הַנֵּיטְרִינוֹ בְּצוּרָה עֵקִיפָה, עַל יְדֵי שִׁימוּשׁ בַּהֲשַׁפְעוֹת הַמֵּתְרַחֶשׁוֹת כְּאֲשֶׁר חֲלֻקֵי יִסוּד מִשְׁתַּחֲרָרִים בְּתֵהִלִּים רַדִּיֹאֲקֵטִיבִיִּים. לְדוּגְמָה, אִפְשָׁר לְמַדוֹד נֵיטְרִינוֹ אֶלְקֵטְרוֹנִי כְּשֶׁמִּשְׁתַּמְשִׁים בְּתֵהִלִּיךְ רַדִּיֹאֲקֵטִיבִי בְּשֵׁם **דְּעִיכַת בְּטָא**, שֶׁבְּמֵהִלְכוֹ נִפְלַט אֶלְקֵטְרוֹן. אֲזִי, אֲנוֹ יוֹכִלִים לְמַדוֹד אֵת הָאֲנֵרְגִיָּה שֶׁל הָאֶלְקֵטְרוֹנִים שֶׁהִשְׁתַּחֲרָרוּ. בְּמִקוֹר, מִדְּעֵנִים הָאֲמִינוּ כִּי רַק אֶלְקֵטְרוֹנִים נִפְלָטִים בְּתֵהִלִּיךְ זֶה, לִכְן הֵם צִיפּוּ לְמַדוֹד אֲנֵרְגִיָּה בּוֹדְדַת עֵבּוֹר כֹּל הָאֶלְקֵטְרוֹנִים שֶׁנִּפְלָטוּ. בְּמִקוֹם זֶה, הֵם קִיבְּלוּ מְנַעַד שֶׁלֵּם שֶׁל אֲנֵרְגִיָּה נִמּוּכוֹת יוֹתֵר מֵהָאֶלְקֵטְרוֹנִים שֶׁהִשְׁתַּחֲרָרוּ! כְּדִי לְהַסְבִיר אֵת מִנְעַד הָאֲנֵרְגִיָּה שֶׁהִשְׁתַּחֲרָרוּ, הַמְדְּעֵנִים הִנִּיחוּ כִּי יִשְׁנוּ **חֲלֻקֵי נוֹסָף** (הַנֵּיטְרִינוֹ הָאֶלְקֵטְרוֹנִי) שֶׁנִּפְלָטוּ. כֵּךְ הֵם מִדְּדוּ בְּצוּרָה עֵקִיפָה אֵת חֲלֻקֵי הַנֵּיטְרִינוֹ הָאֶלְקֵטְרוֹנִי, עַל יְדֵי בַחִינַת 'הָאֲנֵרְגִיָּה הַחֲסֵרָה' שֶׁל הָאֶלְקֵטְרוֹנִים שֶׁנִּפְלָטוּ בְּמֵהִלֵּךְ דְּעִיכַת בְּטָא.

הַנִּיסוּי שֶׁלֵּנוּ, שֶׁהִתְקִיִּים בְּ**מִצְפֵּה חֲלֻקֵי הַנֵּיטְרִינוֹ בְּסַדְבְּרִי** (SNO, Sudbury Neutrino Observatory), נֶעֱרַךְ בְּעוֹמֵק שְׁנֵי קִילוֹמֵטְרִים בְּמַעֲבֵה הָאֲדָמָה בְּקִנְדָּה **אִיּוֹר 2A וְנִסְפָּח**). הַשְּׁתַּמְשָׁנוּ בּוֹ בְּגִישָׁה דוּמָה כְּדִי לְמַדוֹד חֲלֻקֵי הַנֵּיטְרִינוֹ בְּאֹפֶן עֵקִיפִי, דֶּרֶךְ הַשְּׁפַעְתָּם עַל סוּג מְסוּיִם שֶׁל מִיָּם, הַמְכּוּנִים **מִיָּם כְּבִדִים**. כְּפִי שֶׁאַתֶּם יוֹדְעִים, מִיָּם רְגִילִים (H_2O) מוֹרְכָבִים מֵאֶטוֹם אֶחָד שֶׁל חֲמָצָן (O) וּמִשְׁנֵי אֶטוֹמִים שֶׁל מִיָּמָן (H). בְּגִרְעִין הַמִּיָּמָן יֵשׁ פְּרוֹטוֹן אֶחָד. לְעוֹמַת זֶה הַמִּיָּם הַכְּבִדִים (D_2O) מְכִילִים אֶטוֹם אֶחָד שֶׁל חֲמָצָן, אֲךָ שְׁנֵי אֶטוֹמִים שֶׁל דְּיֹאֲטֵרִיּוֹם (D). נוֹסַחְתָּם הַכִּימִיָּתִי שֶׁל מִיָּם כְּבִדִים נִכְתַּבְתָּ גַּם כֵּךְ: 2H_2O . בְּגִרְעִין הַדְּיֹאֲטֵרִיּוֹם יֵשׁ פְּרוֹטוֹן אֶחָד וְנֵיטְרוֹן אֶחָד (בְּמִילִים אַחֲרוֹת, זֶהוּ אֶטוֹם מִיָּמָן עִם נֵיטְרוֹן נוֹסָף) הַמוֹסִיף 10% לְמִשְׁקַל הַמִּיָּם, אֲךָ לֹא מִשְׁנָה כֹּל כֵּךְ אֵת תְּכוּנוֹתֵיהֶם הַכִּימִיּוֹת. הַמִּיָּם הַכְּבִדִים נוֹצְרִים בְּאֹפֶן טְבְּעִי – אַחַת מִתּוֹךְ 6,400 מוֹלְקוּלוֹת שֶׁל מִיָּם הִיא מוֹלְקוּלוֹת D_2O .

בְּנִיסוּי שֶׁעֲרַכְנוּ ב־SNO, מִילָאנוּ מְקַלְ גְּדוֹל בְּמִיָּם כְּבִדִים טְהוּרִים, וּמִדְּדוּ אֵת הַשְּׁפַעוֹת הַהֵתְנַגְּשׁוּיֹת בֵּין חֲלֻקֵי הַנֵּיטְרִינוֹ שֶׁהִגִיעוּ מֵהַשֶּׁמֶשׁ, לְמִיָּם הַכְּבִדִים. לְמַעֲשָׂה, מִדְּדוּ שְׁתֵּי תְּגוּבוֹת הַמֵּתְרַחֶשׁוֹת כְּאֲשֶׁר חֲלֻקֵי הַנֵּיטְרִינוֹ מִתְנַגְּשִׁים עִם מִיָּם כְּבִדִים. בְּתְּגוּבָה הָרֵאשׁוֹנָה, חֲלֻקֵי הַנֵּיטְרִינוֹ אֶלְקֵטְרוֹנִי מְקִיִּים אֵינְטְרָאֲקִיצִיָּה עִם אֶטוֹם הַדְּיֹאֲטֵרִיּוֹם שֶׁל הַמִּיָּם הַכְּבִדִים. אֵינְטְרָאֲקִיצִיָּה זֹאת מִשְׁנָה אֵת הַנֵּיטְרוֹן בְּגִרְעִין הָאֶטוֹם לְפְרוֹטוֹן, וְלֹאֶלְקֵטְרוֹן מֵהִיר-תְּנוּעָה שְׁמִיָּצֵר אֹר **אִיּוֹר 2B**, תְּגוּבָה 1). מִדְּדוּ אֵת הָאֹר שֶׁהָאֶלְקֵטְרוֹן הַזֶּה מִיָּצֵר. בְּתְּגוּבָה הַשְּׁנִיָּה, חֲלֻקֵי הַנֵּיטְרִינוֹ מְכִל שְׁלוֹשֶׁת הַטְּעָמִים (אֶלְקֵטְרוֹנִים, מִיּוֹאֲנוֹנִים וְטְאוֹאֲנוֹנִים) מְקִיִּימִים אֵינְטְרָאֲקִיצִיָּה עִם אֶטוֹם הַדְּיֹאֲטְרִיּוֹם. בְּאֵינְטְרָאֲקִיצִיָּה זֹאת גִּרְעִין שֶׁל אֶטוֹם הַדְּיֹאֲטְרִיּוֹם מִתְחַלֵּק לְפְרוֹטוֹן וְלֵנֵיטְרוֹן הַנֶּעַ בְּחוֹפְשִׁיּוֹת. אֵת הַנֵּיטְרוֹן הַחוֹפְשִׁי, הַנֶּעַ דֶּרֶךְ הַמִּיָּם הַכְּבִדִים, זִיהֵנוּ בְּדִרְכִים שׁוֹנוֹת

מִיָּם כְּבִדִים (Heavy Water)

מִיָּם הַמְכִילִים אֶטוֹמִים שֶׁל דְּיֹאֲטְרִיּוֹם בְּמִקוֹם אֶטוֹמִים שֶׁל מִיָּמָן. בְּגִרְעִין שֶׁל אֶטוֹם הַדְּיֹאֲטְרִיּוֹם יֵשׁ פְּרוֹטוֹן אֶחָד וְנֵיטְרוֹן אֶחָד, בְּעוֹד שְׁבִגְרָעִין אֶטוֹם הַמִּיָּמָן יֵשׁ רַק פְּרוֹטוֹן אֶחָד. מִבְּחִינָה כִּימִיָּה, הַדְּיֹאֲטְרִיּוֹם מִתְנַהֵג כְּמוֹ מִיָּמָן.

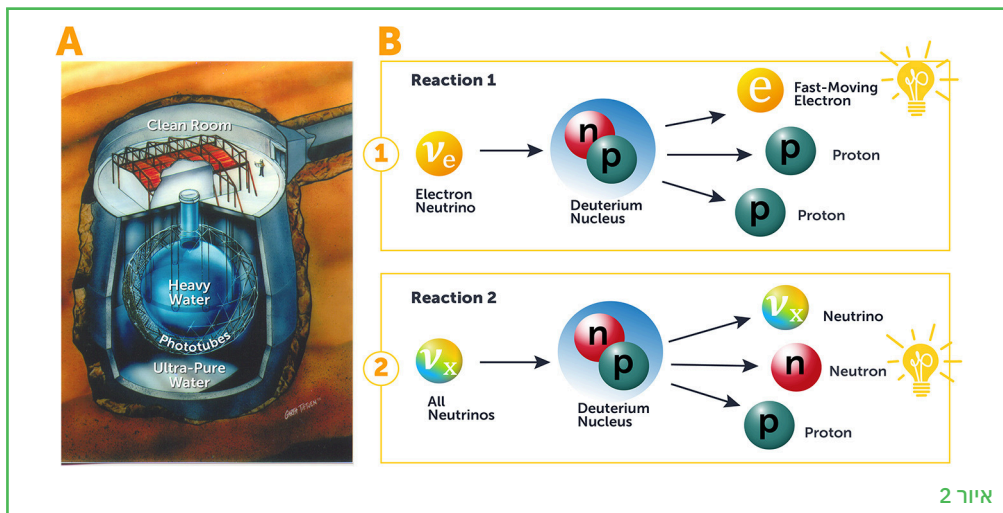
איור 2

מצפה הנייטרינו

התת-קרקעי בסדברי לזיהוי חלקיקי נייטרינו. (A) ניסוי חלקיקי הנייטרינו ב-SNO התקיים כ-2,100 מטרים מתחת לפני הקרקע. הוא תוכנן לאתר חלקיקי נייטרינו סולאריים באינטראקציות שלהם עם מים כבדים. המצפה כולל חדר נקי (Clean room) שממנו המדענים יכלו להנמיך ציוד לתוך אזור המדידה, ואזור מדידה מלא במים אולטרה-טהורים (Ultra-pure water) במטרה לחסום את הרדיואקטיביות הבוקעת מהסלעים סביב. מילאנו את כדור האקריליק שבמרכז במים כבדים (Heavy water), והקפנו אותו בכדור המכיל צינורות פוטואלקטריים (Phototubes) כדי למדוד את השפעות חלקיקי הנייטרינו הפוגעים במים הכבדים (קרדיט לתמונה: פרופסור מקדונלד). (B) מדדנו שתי תגובות: (1) האינטראקציות בין חלקיקי נייטרינו אלקטרוניים (Electron Neutrino) והדאוטריום (Deuterium nucleus), ו-(2) האינטראקציות של כל שלושת 'טעמי' חלקיקי הנייטרינו (All Neutrinos) עם גרעין הדאוטריום. מקרא: Reaction = תגובה = Fast-moving electron = אלקטרון מהיר-תנועה.

צינורות פוטואלקטריים (Phototubes)

חיישני אור שעוזרים לנו למדוד את האור שנוצר כתוצאה מהאינטראקציה בין חלקיקי נייטרינו למים הכבדים.



איור 2

בשלושת שלבי הפרויקט. בשלב הראשון, הנייטרון נלכד על ידי אטום אחר של דאוטריום, ומייצר אור בעל תכונות שונות מאלה של האור הנוצר בתגובה 1 (איור 2B, תגובה 2).

נסכם עד כה – קיבלנו שתי תגובות של חלקיקי נייטרינו עם מים כבדים. תגובות אלה יצרו אור. הצלחנו למדוד אותו באמצעות גלאי האור שלנו, הנקראים צינורות פוטואלקטריים. מכך נובע כי יכולנו למדוד באופן עקיף את נוכחותם של חלקיקי הנייטרינו.

השקענו מאמץ רב כדי לוודא שמדדנו רק את ההשפעות של חלקיקי הנייטרינו, ולא של אף מקור קרינה אחר. כיוון שנאלצנו להגן על הגלאים שלנו מפני הרדיואקטיביות המגיעה מהסביבה החיצונית, היה עלינו למקם את הגלאים בעומק של כ-2 קילומטרים מתחת לפני האדמה, בלב הסלע (איור 2A). רצינו גם לוודא שאיננו מודדים את הרדיואקטיביות המגיעה מהסלע עצמו. לצורך כך היה עלינו להגן באופן מיוחד על אזור המים הכבדים שלנו מפני אורניום ותוריום – שני יסודות רדיואקטיביים המצויים בסלעים. כדי לעשות זאת, הקפנו את מכל המים הכבדים שלנו במים אולטרה-נקיים. אלו מים הנקיים מיסודות רדיואקטיביים פי מיליארד בהשוואה למי ברז. מים אלה לכדו את הרדיואקטיביות מהסלע. כמו כן, בָּנינו את הגלאי מחומרים שבחרנו בקפידה, המתאפיינים ברדיואקטיביות נמוכה. יצרנו אוויר אולטרה-נקי, והעובדים שלנו עברו תהליך של ניקיון, שְׁכָלל ביצוע מקלחות ולבישת ביגוד נטול מוץ (מצבור סיבי בד הנושרים מהבגד).

כדי למדוד את האור שנפלט כתוצאה מהאינטראקציה בין חלקיקי הנייטרינו למים הכבדים, התקנו צינורות פוטואלקטריים רבים סביב מכל המים הכבדים. היה מאתגר מאוד ליצור את המערך הניסיוני הזה – הוא כלל גם אתגר הנדסי משמעותי, וגם ניסוי פיזיקלי מורכב (כדי ללמוד עוד על אודות ההיבט ההנדסי של הפרויקט, ראו בנספח).

איפה חלקיקי הנייטרינו החסרים?

כפי שצינתי קודם, האתגר שעמד בפנינו היה לפתור את בעיית חלקיקי הנייטרינו הסולאריים, שלפיה מספר חלקיקי הנייטרינו האלקטרוניים הנמדדים כשהם מגיעים לכדור

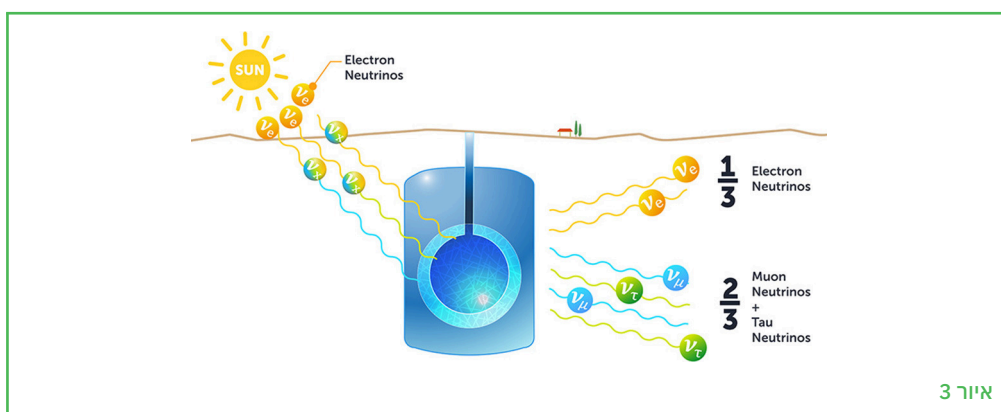
הארץ היה קטן בערך פי שלושה מהמספר הצפוי. הנחנו כי ייתכן שהניסוי או התיאוריה (או שניהם) אינם נכונים, או שאולי חלקיקי הנייטרינו האלקטרוניים מהשמש שינו את 'טעמיהם' ולא זוהו בניסויים שמטרתם הייתה לאתר רק, או בעיקר, חלקיקי נייטרינו אלקטרוניים.

בניסוי שלנו, רצינו לבדוק אם שינוי ה'טעמים' התרחש לפני שחלקיקי הנייטרינו הגיעו לכדור הארץ. ידענו כי בליבת השמש נוצרים רק חלקיקי נייטרינו אלקטרוניים (מיואונים וטאוונים כבדים יותר מאלקטרוניים, ולכן נדרשת יותר אנרגיה מזו שקיימת בשמש כדי לייצר אותם ואת חלקיקי הנייטרינו המקושרים אליהם). המשמעות היא שאם חלק מחלקיקי הנייטרינו המגיעים מהשמש אינם חלקיקי נייטרינו אלקטרוניים, הם ודאי שינו את סוגיהם במסע מליבת השמש אל כדור הארץ. ככלל, חלקיקי נייטרינו משנים את 'טעמיהם' באופן מחזורי, במסגרת תופעה קוונטית בשם 'תנודת חלקיקי נייטרינו' (תוכלו לקרוא על כך עוד כאן). כיוונו את הגלאים שלנו לטווח מסוים של אנרגיה, וכך הצלחנו לזהות את ההשפעות של חלקיקי נייטרינו שמקורם בשמש, ולא במקורות אחרים (כמו קרינה קוסמית שפולטת חלקיקי נייטרינו באנרגיות גבוהות יותר). באנרגיות שחקרנו, השמש היא זו שמייצרת את רוב חלקיקי הנייטרינו שמגיעים לכדור הארץ.

באחת המדידות שערכנו בגלאי שלנו, הבחנו באינטראקציה של חלקיקי נייטרינו אלקטרוניים עם אטומים של דאוטריום, שהובילה לפליטה של אלקטרון חופשי מהיר-תנועה, כפי שתארנו קודם לכן. במדידה נפרדת, צפינו באינטראקציות של חלקיקי נייטרינו משלושת הסוגים עם אטומי הדאוטריום, שהובילו לפליטה של נייטרוון חופשי. במילים אחרות, המדידה הראשונה הצביעה על כמות חלקיקי הנייטרינו האלקטרוניים המגיעים מהשמש, בעוד המדידה השנייה הצביעה על המספר הכולל של כל חלקיקי הנייטרינו המגיעים מהשמש. כשהשוונו את התוצאות, גילינו כי רק שליש מהכמות הכוללת של חלקיקי נייטרינו שמקורם בשמש הם חלקיקי נייטרינו אלקטרוניים. כלומר שני שלישים מחלקיקי הנייטרינו שינו את 'טעמיהם' מחלקיקי נייטרינו אלקטרוניים, לחלקיקי נייטרינו מיואונים או טאוונים (איור 3) [2, 5]. הניסוי שלנו הראה כי נייטרינו אלקטרוני יכול לשנות את סוגו כשהוא נע. אם כן, זה הפתרון לבעיית חלקיקי הנייטרינו הסולאריים!

איור 3

חלקיקי הנייטרינו משנים את 'טעמיהם' כשהם נעים מליבת השמש לכדור הארץ.



אחת ההנחות המקוריות במסגרת המודל הסטנדרטי הייתה כי לחלקיקי נייטרינו אין מסה, וכי הם נעים במהירות האור. כאשר מביאים בחשבון שיקולים הנובעים מתורת היחסות של איינשטיין, התגלית של תנודות חלקיקי הנייטרינו רמזה על כך שלחלקיקי נייטרינו יש מסה. במאמר זה לא אסביר בפירוט מדוע העובדה שלפיה החלקיקים הללו משנים את 'טעמיהם'

במסעם בחלל, מלמדת על כך שיש להם מסה. אולם אציין כי באופן כללי, תורת היחסות של איינשטיין קובעת כי השינוי המחזורי הזה ב'טעם' מצביע על כך שמבחינת חלקיקי הנייטרין, הזמן חולף. אם חלקיקי הנייטרין חווים זמן, המשמעות היא שהם נעים לאט יותר ממהירות האור, ולכן יש להם מסה. הניסוי שלנו, כמו גם מדידות מניסוי הסופר-קמיוקנדה שנערך ביפן, שאיתו חִלְקְנו את פרס נובל, סיפקו את הֶרְאָיוֹת הראשונות לכך שהפיזיקה חורגת מעבר למודל הסטנדרטי. הרחבת המודל הסטנדרטי תספק לנו הבנה מלאה יותר של היקום שלנו, ברמה בסיסית ביותר. אנשים רבים עבדו במשך תקופה ארוכה כדי להגיע להישג הגדול הזה. אני אסיר תודה לכל המעורבים בפרויקט חשוב זה, ומרגיש בר מזל על חלקי בו. אומנם זכיתי בפרס נובל, אך אני רואה את עצמי כנציג של כל עמיתיי המוכשרים והמסורים, שתרמו להצלחת הפרויקט.

המלצות למוחות צעירים

גדלתי בעיר קטנה מאוד בקנדה שהתמחתה בייצור פלדה. תושבי המקום הביעו כבוד גדול לערך החינוך, אף אף אחד לא ציפה כי מי מהם יזכה בפרס נובל. המסר שאני מבקש להעביר לכם הוא שאם תעבדו מספיק קשה, ותמצאו עמיתים מצוינים לעבודה משותפת, תהיה בידי כל אחת ואחד מכם האפשרות להפוך את החיים למשמעותיים מאוד, ואולי אפילו לזכות בפרס כמו פרס נובל.

כדי לבחור קריירה מתאימה, אני מציע לכם לחשוב על כמה דברים שאתם שמחים לעשות עם ההתעוררות בבוקר, ולנסותם. כך תראו במה אתם טובים! זה מה שאני עשיתי, ואני מאמין שזו דרך מצוינת לבחירת קריירה. לאחר שבחרתם משהו, התמידו בנתיב הזה, וטפחו מערכות יחסים חיוביות וחבריות עם האנשים שסביבכם – יש להם תפקיד מרכזי בהצלחתכם.

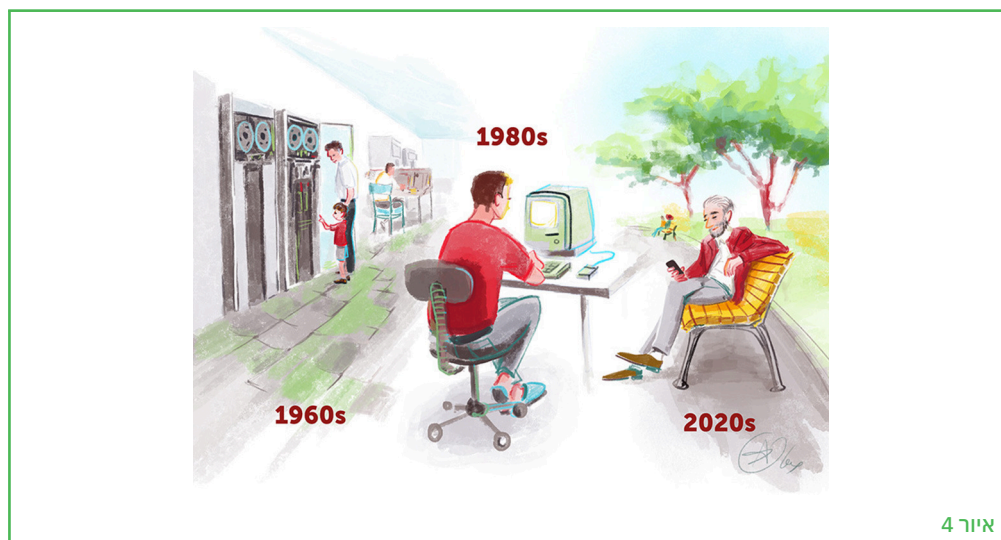
חשוב מאוד גם להישאר סקרנים לאורך החיים, כיוון שהעולם, והמדע בפרט, ממשיכים להשתנות במהירות. אולי לא תאמינו, אבל כשלמדתי באוניברסיטה בשנת 1964, האוניברסיטה קיבלה את המחשב הראשון שלה. הוא היה כה גדול וכבד, שהיה צריך להרים אותו עם מנוף, ולהוריד אותו אל תוך בניין הפיזיקה דרך הגג! כיום, לרבים מכם ודאי יש מחשבים ניידים, או אפילו טלפונים ניידים שהם חזקים הרבה יותר, וקטנים משמעותית מהמחשבים המוקדמים הללו (איור 4). זו אחת הדוגמאות לשינויים המדעיים הגדולים שהתרחשו במהלך הקריירה שלי, ואני מעריך שהקצב המסחרר הזה יישמר. מסיבה זו, המשיכו להיות סקרנים, ללמוד דברים חדשים ולהסתגל לפיתוחים חדשים. יתרה מזו זכרו שאתם, הצעירים, עולים על כולם בעבודה עם טכנולוגיות חדשות ובפיתוחן, לכן אתם יכולים לתרום המון! אל תהססו ללמוד כמה שיותר על אודות הטכנולוגיות הכי חדשניות, ונסו להעביר את הידע הזה הלאה וללמד אחרים – אפילו את עמיתכם המבוגרים יותר.

חומרים לקריאה נוספת

[Ain't no stopping them now with Art McDonald \(Nature video\).](#)

איור 4

שִׁמְרוּ עַל סִקְרָנוֹת, כִּיּוֹן
שֶׁעוֹלָם מִשְׁתַּנֵּה בְּמַהֲרָה.
הַטֶּכְנֹלוֹגְיָה הַתְּפֹתָחָה
בְּמַהֲרָה מֵאֵז שֶׁהֵיִיתִי
סְטוּדֵנֵט בְּשָׁנֹת הַ-60' שֶׁל
הַמָּאָה הַקּוֹדֶמֶת. אֲנִי מֵאֲמִין
שֶׁהַקֶּצֶב הַמְהִיר הַזֶּה יִשְׁמַר
גַּם בְּעֵתִיד.



איור 4

תודות

ברצוני להודות לננועה שגב על עריכת הריאיון שהיווה את הבסיס למאמר זה, ועל כתיבה משותפת של המאמר. תודה לאלכס ברנשטיין עבור (איורים 1-4).

מקורות

1. Cottingham, W. N., and Greenwood, D. A. 2007. *An Introduction to the Standard Model of Particle Physics*. New York, NY: Cambridge University Press.
2. McDonald, A. B. 2016. Nobel lecture: the Sudbury Neutrino Observatory: observation of flavor change for solar neutrinos. *Rev. Modern Phys.* 88:030502. doi: 10.1103/RevModPhys.88.030502
3. Acker, A., and Pakvasa, S. 1997. Three neutrino flavors are enough. *Phys. Lett. B* 397:209–15. doi: 10.1016/S0370-2693(97)00174-3
4. Haxton, W. C. 1995. The solar neutrino problem. *Annu. Rev. Astron. Astrophys.* 33:459–503.
5. Ahmad, Q. R., Allen, R. C., Andersen, T. C., Anglin, J. D., Barton, J. C., Beier, E. W., et al. 2002. Direct evidence for neutrino flavor transformation from neutral-current interactions in the Sudbury Neutrino Observatory. *Phys. Rev. Lett.* 89:011301. doi: 10.1103/PhysRevLett.89.011301

פורסם אונליין: 22 ביולי 2024

נערך על ידי: Idan Segev

מנחים מדעיים: Kalee Tock

ציטוט: McDonald A (2024) ניטרינו: חלקיקי הרפאים המרכיבים את היקום שלנו. Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2022.1034181-he

תורגם והותאם מ: McDonald A (2023) Neutrinos: The Ghost Particles That Make Up Our Universe. Front. Young Minds 10:1034181. doi: 10.3389/frym.2022.1034181

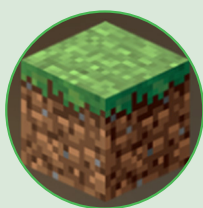
הצהרת ניגוד אינטרסים: המחברים מצהירים כל המחקר נערך בהעדור כי קשר מסחרי או פיננסי שיכול להתפרש כניגוד אינטרסים פוטנציאלי.

זכויות יוצרים © 2023 © 2024 McDonald. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון **Creative Commons Attribution License (CC BY)**. השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקרים צעירים

RYAN, גיל: 15

אני נהנה מאוד לכתוב קוד מחשב, ואוהב קוביות הונגריות. אני גם נהנה מאוד לשחק במיינקראפט.



הכותבים

ART MCDONALD

פרופסור ארט מקדונלד הוא אסטרופיזיקאי קנדי שנולד ב-1943 בסידני, נובה סקוטיה, קנדה – עיר באי קייפ ברטון המונה כיום כ-30,000 תושבים. בסידני הייתה קהילה נפלאה – בטוחה, חברתית ותומכת, והיו בה הרבה מורים מצוינים. פרופ' מקדונלד זוכר במיוחד את מר Bob Chafe, שהיה המורה שלו למתמטיקה. כנער מתבגר, מקדונלד השתייך למועדון שארגן ריקודים קהילתיים בערב שבת, ב-YMCA. שם הוא פגש את אשתו לעתיד, Janet. לפרופ' מקדונלד תארים ראשון ושני בפיזיקה מאוניברסיטת דלהוסי בהליפקס, נובה סקוטיה, קנדה, ותואר שלישי בפיזיקה מהמכון הטכנולוגי של קליפורניה (Caltech) בפסדינה, קליפורניה, ארה"ב. בסיום לימודי הדוקטורט קיבל משרת מחקר במעבדות האטומיות של Chalk River של החברה לאנרגיה אטומית של קנדה (AECL). שם הוא עסק במחקר בסיסי במתקן מאיץ החלקיקים. ב-1982 פרופ' מקדונלד עבר לאוניברסיטת פרינסטון בניו ג'רזי ארה"ב, והתמנה בה לפרופסור. במהלך שנות ה-80 של המאה הקודמת הצטרף לפרויקט בניית מצפה חלקיקי הנייטרינו בסדברי (SNO) באונטריו, קנדה, במטרה לחקור את בעיית חלקיקי הנייטרינו הסולאריים. ב-1989 התמנה לפרופסור באוניברסיטת קווינס בקינגסטון, אונטריו, קנדה, וכן למנהל מתקן ה-SNO. ב-1999 מצפה ה-SNO החל במדידת חלקיקי נייטרינו. הממצאים שהתקבלו הובילו את פרופ' מקדונלד ואת צוותו למסקנה כי חלקיקי הנייטרינו משנים את 'טעמיהם', מה שמרמז על כך שיש להם גם מָסָה סופית. מסקנות אלו סתרו את תחזיות המודל הסטנדרטי. במהלך הקריירה שלו, פרופ' מקדונלד זכה בשורה של פרסים בכללם מדליית בנג'מין פרנקלין (2007); מדליית הנרי מרשל טורי (2011); פרס נובל בפיזיקה (2015) ופרס פריצת הדרך בפיזיקה יסודית (2016). כיום, פרופ' מקדונלד הוא פרופסור אמריטוס באוניברסיטת קווינס בקנדה. הוא ממשיך לפעול בתחום המחקר הבסיסי של חלקיקי הנייטרינו ושל חומר אפל. באביב 2020, במהלך מגפת הקורונה, מקדונלד היה אחד ממובילי פרויקט לייצור המוני של מכונות הנשמה מכניות בעלות נמוכה, שלא היו

זמינות באותה תקופה. לפרופ' מקדונלד ולאשתו ארבעה ילדים ותשעה נכדים, המסיבים להם שמחה רבה. [*art@snolab.ca](mailto:art@snolab.ca)

מוזיאון המדע ע"ש בלומפילד ירושלים
متحف العلوم على اسم بلومفيلد القدس
Bloomfield Science Museum Jerusalem



הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK

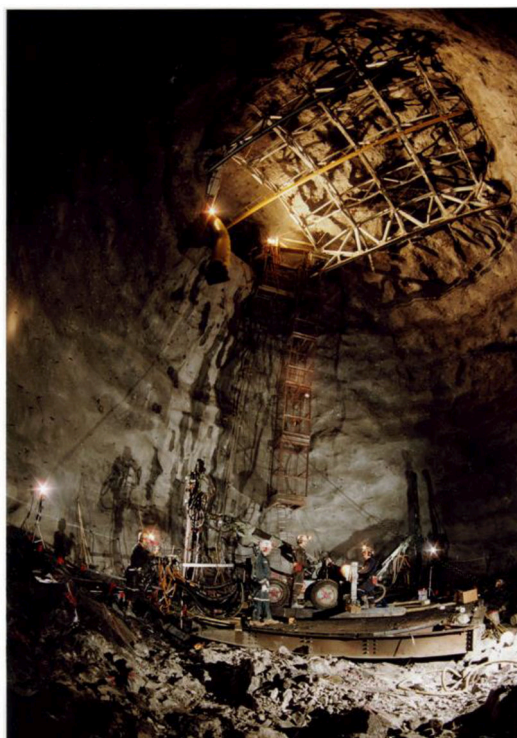
נספח

סקירה כללית: הניסוי במצפה חלקיקי הנייטרינו בסדברי

הניסוי שנערך ב-SNO למדידת חלקיקי הנייטרינו ו'טעמיהם', היה מאמץ משותף עצום. בכל רגע נתון, יותר מ-150 אנשים עסקו בניסוי, כאשר כל אחד מהם היה אחראי על חלק מסוים. ראשית, היה עלינו לחפור חלל ענק, בעומק של 2 קילומטרים מתחת לפני האדמה במכרה נטוש בסדברי, קנדה. צוות הבנייה נדרש לקדוח חורים ברצפת המערה, ולמקם שם חומרי נפץ. אז, היה על חברי הצוות להוציא את כל הציוד שלהם מהחלל, לפוצץ את חומרי הנפץ כדי להעמיק את החלל ולהרחיבו, ולפנות את החצץ שנוצר מהפיצוץ. נדרשו כשנתיים וחצי ושמונה מחזורים של פיצוצים כדי ליצור את החלל הזה, שגובהו 34 מטרים (גובה של גורד שחקים בן עשר קומות), ורוחבו 22 מטרים.

איור נספח 1

צוות הבנייה ממקם את חומרי הנפץ כדי ליצור את החלל שיועד ל-SNO.



איור נספח 1

אחרי שיצרנו את החלל, היה עלינו לבנות את כדור האקריליק שיועד להכיל את המים הכבדים. בנינו אותו מ-120 חלקים שגודל כל אחד מהם קטן דיו כדי שנוכל להוריד אותם במעלית לתוך המכרה.

אז הצטרכנו לבנות כדור גאודזי (קשור לגיאומטריה של משטחים שאינם מישוריים) סביב כדור האקריליק. זאת במטרה למקם בו את חיישני האור שימדדו את השפעות התגובה בין חלקיקי הנייטרינו למים הכבדים. השתמשנו במעליות כדי להתקין עשרת אלפים חיישני אור על הכדור הגיאודזי.

בסופו של דבר, מילאנו את כדור האקריליק באלף טונות של מים כבדים טהורים (D_2O). המים היו כה טהורים, שאירעה פחות מדעיכה רדיואקטיבית ספונטנית אחת ליום לטונה של מים – כלומר מים אלה היו טהורים פי מיליארד ממי ברז. אפילו עם כמות כה גדולה של מים כבדים טהורים, הצלחנו למדוד את ההשפעה של נייטרינו בודד בלבד המגיע מהשמש בכל שעה, כיוון שהאינטראקציה של חלקיקי הנייטרינו עם חומר היא נדירה.

איור נספח 2

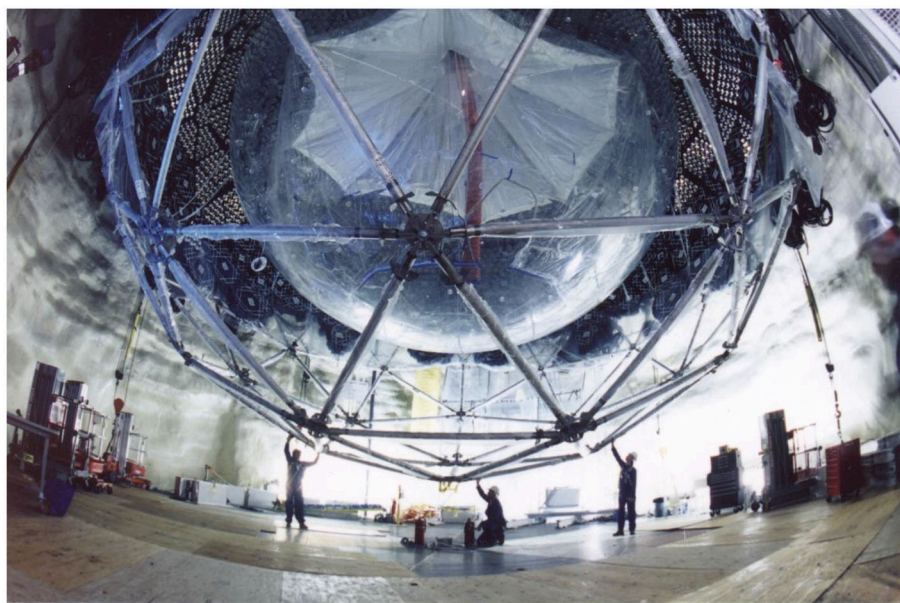
התקנת 60 החלקים העליונים (מתוך 120), של כדור האקריליק שיועד להכיל את המים הכבדים.



איור נספח 2

איור נספח 3

בניית הכיפה הגיאודזית סביב כדור האקריליק, לפני התקנת חיישני האור שיועדו לזהות את חלקיקי הנייטרינו.

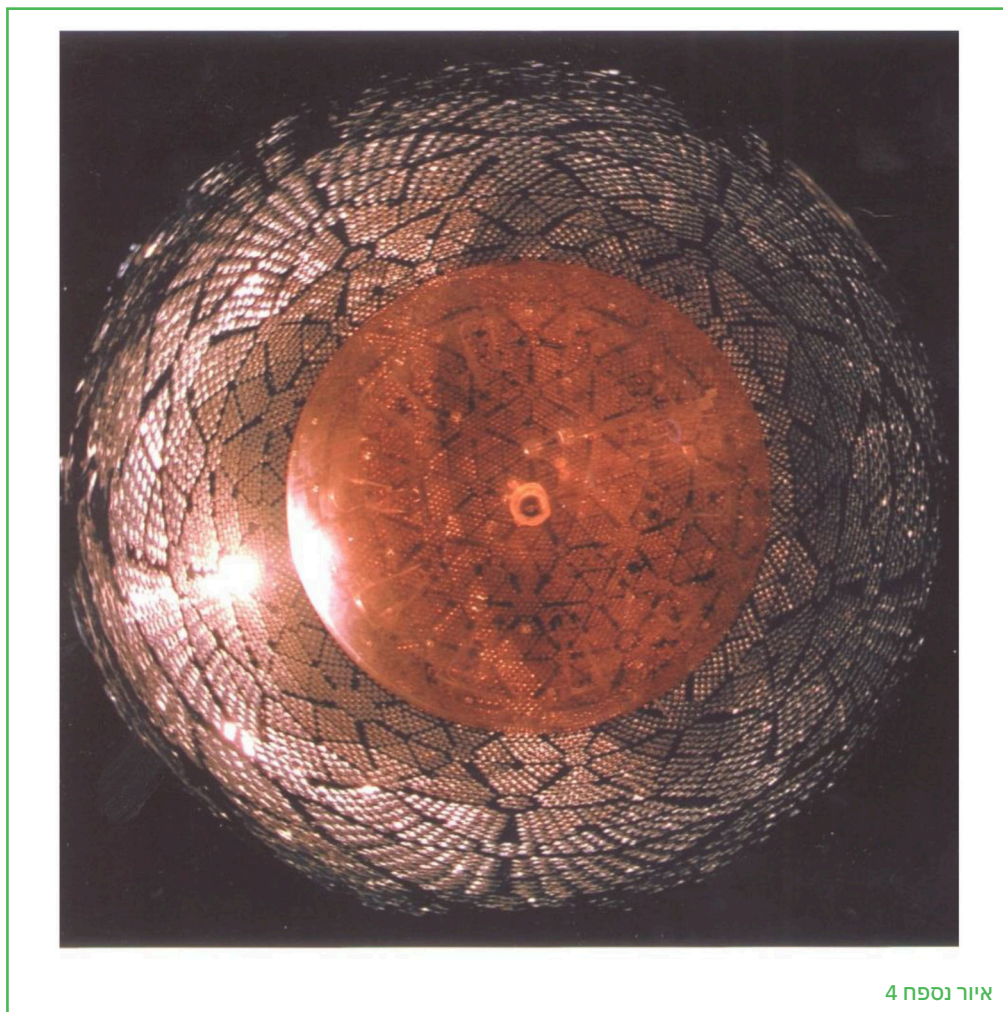


איור נספח 3

כפי שתוכלו להתרשם, פרויקט זה זָמַן אתגר הנדסי מורכב לצד ניסוי בפיזיקה יסודית. אנשים רבים שלקחו חלק בפרויקט הפגינו מקצועיות ומסירות, ושיתפו פעולה כדי להגשים מטרה משותפת בעלת משמעות, לתחושתם. במקרים רבים נדרשנו לבחור איך לבצע חלק כלשהו בניסוי. כדי לעשות זאת הצגנו זה לזה את הפתרונות החלופיים בצורה מפורטת, עד שהתבהר איזו דרך הקבוצה העדיפה על פני הדרכים האחרות. למרבה המזל, לאחר שקיימנו דיונים מעמיקים, הצלחנו להגיע להסכמות. העבודה המשותפת והתקשורת הטובה בין העמיתים הניבו הצלחה גדולה, ובעקבותיהן גילינו דבר חדש ומשמעותי על אודות אבני הבניין היסודיות של היקום שלנו.

איור נספח 4

צילום בעדשה רחבה
המכונת כלפי מעלה.



איור נספח 4

בצילום ניתן לראות את חלקו התחתון של כדור האקריליק (אדום), המוקף עשרת אלפים חיישני אור ששימשו לזיהוי נוכחות חלקיקי הנייטרינו.