

תעלומת חלקיקי הנייטרינו מן השמש

יוסף ניר, המחלקה לפיסיקה של חלקיקים, מכון ויצמן למדע, רחובות

החלקיקים היסודיים נושאים מטען נוסף הקרוי בתורת החלקיקים "צבע". מטען הצבע קובע את עוצמת פעולתו של הכוח החזק על חלקיק. הקוורקים נושאים צבע, אבל הלפטונים הטעונים וחלקיקי הנייטרינו הם חסרי צבע. משמעות עובדה זו היא שחלקיקי הנייטרינו אינם חשים גם בפעולת הכוח החזק. עיוורונם של חלקיקי הנייטרינו לכוח החזק ולכוח האלקטרומגנטי הוא מקור חמקמקותם. הכוח המשמעותי היחיד הפועל עליהם הוא הכוח החלש.** אלא שהכוח החלש כשמו כן הוא, חלש לאין ערוך מהכוח החזק והכוח האלקטרומגנטי. הכוח החלש אמנם ממלא תפקיד מרכזי בתהליך בעירת השמש ולכן נוצרים חלקיקי נייטרינו בתהליך זה – אבל אין בכוחו כמעט להשפיע על מהלכם של חלקיקים אלה אחרי שנוצרו במסעם דרך החומר שבשמש או בכדור הארץ.

2. מסת הנייטרינו

לא רק היעדר פעולת הכוח האלקטרומגנטי מייחד את חלקיקי הנייטרינו משאר חלקיקי החומר. גם תכונת המסה שונה מאוד עבור חלקיקי הנייטרינו: הנייטרינים קלים בהרבה מכל החלקיקים היסודיים הטעונים. ייתכן אפילו שמסת חלקיקי הנייטרינו היא אפס.

מבחינה ניסיונית, אין בידינו שום עדות ישירה שמסת הנייטרינו שונה מאפס. הניסויים המחפשים אחר סימנים למסת נייטרינו השיגו עד עתה רק חסמים עליונים. חסמים אלה חזקים דיים כדי להראות שאם יש לחלקיקי הנייטרינו מסה, היא קטנה בהרבה ממסת חלקיקי החומר האחרים. מבחינה תיאורטית, המצב מעניין ביותר. עלינו להבדיל בהקשר זה בין המודל הסטנדרטי לבין מודלים של פיסיקה חדשה.

המודל הסטנדרטי נהגה לפני כשלושים שנה על ידי גלשו, ווינברג וסלם (Glashow, Weinberg, Salam), שזכו בפרס נובל

בכל שנה עוברים דרך כף ידנו כ- 10^{14} חלקיקי נייטרינו הנוצרים בשמש. אבל כף ידנו שקופה לחלקיקים אלה: הכוח המופעל על ידי כף ידנו חלש כל כך שאף לא אחד מתוך שטף החלקיקים העצום נעצר בה לאורך חיינו! לא רק כף ידנו שקופה לחלקיקי הנייטרינו. השטף האדיר חולף דרך כדור הארץ כמעט ללא הפרעה. גם השמש כמעט ואיננה "מדגדת" את חלקיקי הנייטרינו. הם נוצרים ברובם בסמוך למרכז השמש ומתפזרים משם החוצה במהירות קרובה למהירות האור בלי שיזוו ממסלולם. החמקמקות המדהימה והמיוחדת כל כך של חלקיקי הנייטרינו היא אחת הסיבות לעניין שבהם. אם נצליח לצפות בחלקיקי הנייטרינו המגיעים מן השמש, נוכל ללמוד באופן ישיר על תהליכי הבעירה המתרחשים במרכז השמש. אבל החמקמקות הזו היא גם מקור של קושי ניסיוני עצום: כיצד נבנה גלאי שיעצור את חלקיקי הנייטרינו וימדוד את תכונותיהם? סיפורם של ניסויים אלה, התוצאות המפתיעות שהושגו בהם וההשלכות המהפכניות של תוצאות אלה לתורת החלקיקים הם נושא מאמר זה.

1. חלקיקים וכוחות יסוד בטבע

הנייטרינו הוא אחד מהחלקיקים היסודיים בטבע. חלקיקי החומר מתחלקים לארבעה סוגים שונים הנבדלים במטען החשמלי שלהם*. קוורקים מסוג "מעלה" ($top\text{-}1\ charm, up$) נושאים מטען חשמלי $+2/3$. קוורקים מסוג "מטה" ($bottom\text{-}1\ strange, down$) נושאים מטען חשמלי $-1/3$. הלפטונים הטעונים ($tau\ lepton\text{-}1\ muon, electron$) נושאים מטען חשמלי 1 - וחלקיקי הנייטרינו ($\mu\text{-}neutrino$ electron-neutrino ו- $\tau\text{-}neutrino$) אינם נושאים מטען חשמלי כלל. המטען החשמלי הוא מידה לעוצמה בה פועל הכוח האלקטרומגנטי על חלקיק. פרוש הדבר הוא שהקוורקים והלפטונים הטעונים מגיבים דרך פעולת הכוח האלקטרומגנטי אבל חלקיקי הנייטרינו אדישים לכוח זה.

* המטען החשמלי של הפרוטון, שאיננו חלקיק יסודי, משמש כיחידת המטען החשמלי.

** הכוח היסודי הרביעי – כוח הגרביטציה – חלש בסדרי גודל רבים משלושת הכוחות האחרים באנרגיות הנמוכות המאפיינות את התהליכים הרלבנטיים למאמר זה.

ב-1979 על הישגם התיאורטי. המודל מבוסס על עקרונות סימטריה המקנים לו יופי מתמטי. אבל ההישג האמיתי של המודל אינו ביופי המתמטי אלא בעובדה שהמודל סיפק תחזית לאלפי תוצאות ניסיוניות, ובכולן אוששו הניסויים את התחזיות. המודל מתאר את פעולת הכוחות החזקים, החלשים והאלקטרומגנטיים. בכל המדידות של התהליכים המתרחשים באמצעות כוחות אלה, אין אפילו תוצאה אחת שסותרת את המודל הסטנדרטי. המודל ניבא את קיומם של חלקיקים שונים שנצפו אחר כך בניסיון*.

המודל הסטנדרטי מנבא שמסת הנייטרينو היא אפס. אבל כמעט כל הפיסיקאים העוסקים בתורת החלקיקים מאמינים בכל ליבם (ושיכלם) שהמודל הסטנדרטי אינו התורה השלמה של הטבע. הסיבות לכך רבות ומגוונות. סיבה אחת היא שהמודל הסטנדרטי מחייב "כיוון עדין" – שוויון מקרי כמעט מוחלט בין שני קבועים יסודיים בטבע – כדי להסביר מדוע הכוח הגרביטציוני חלש כל כך לעומת הכוח החלש. סיבה אחרת היא שהמודל הסטנדרטי מתקשה להסביר את התהליך הקוסמולוגי שבו נעלם האנטי-חומר מן היקום והשאיר אחריו רק חומר, ממנו עשויות הגלקסיות. כדי להסביר חידות אלה, ורבות אחרות, הגו הפיסיקאים מודלים שונים, הרחבות של המודל הסטנדרטי, בהן ניתן לפתור את הבעיות שמעורר המודל הסטנדרטי. אלה הם מודלים של "פיסיקה חדשה". אלא ששיקולים תיאורטיים אין די בהם כדי להוכיח את נכונותו של מודל. עולם הפיסיקה מייחל להוכחות ניסיוניות לקיום פיסיקה חדשה. הוכחות אלה יכולות להיות גילוי חלקיק יסודי שאיננו נכלל במודל הסטנדרטי, או מדידת תכונה של חלקיק הסותרת את הניבוי של המודל הסטנדרטי.

העובדה המעניינת היא שכמעט כל הרחבה של המודל הסטנדרטי מנבאת שלחלקיקי הנייטרינו יש מסה שונה מאפס. המרכיב החשוב בהרחבות אלה, שאינן קיים במודל הסטנדרטי, הוא קיומם של חלקיקים יסודיים שאינם לא רק לפעולת הכוח החזק והכוח האלקטרומגנטי אלא גם לפעולת הכוח החלש. מצד אחד, קיומם של חלקיקים כאלה הוא תוצאה כמעט בלתי נמנעת של כל ניסיון למצוא תורה יסודית או רחבה יותר מהמודל הסטנדרטי. מצד שני, אם קיים חלקיק כזה, הוא יכול להעניק מסה לחלקיקי הנייטרינו

על ידי חילוף של חלקיקי היגס ביניהם.** בנסיבות אלה, החיפוש הניסיוני אחר מסות הנייטרינו הוא בעל חשיבות עצומה. אם נוכיח בניסוי שאכן מסת הנייטרינו שונה מאפס, נראה בכך שהמודל הסטנדרטי אינו מספק תיאור מלא של הטבע. זו תהיה העובדה הניסיונית הראשונה שתעמוד בסתירה למודל הסטנדרטי. מסת הנייטרינו תספק עדות לקיומם של חלקיקים יסודיים שאינם נכללים במודל הסטנדרטי. יתירה מכך, הערך המספרי של המסה ילמד אותנו על אופייה של הפיסיקה החדשה שאיננה נכללת במודל הסטנדרטי.

3. דורות וטעמים

הזכרנו כי קיימים ארבעה סוגי חלקיקים הנבדלים במטענים שלהם.

קוורקים מסוג מעלה נושאים מטען צבע ומטען חשמלי $+2/3$;
קוורקים מסוג מטה נושאים מטען צבע ומטען חשמלי $-1/3$;
לפטונים טעונים חסרי צבע ונושאים מטען חשמלי -1 ;
חלקיקי נייטרינו חסרי צבע וחסרי מטען חשמלי.

רמזנו גם כי מכל סוג של חלקיק יש שלושה חלקיקים שונים. התכונה העיקרית המבדילה בין שלושת החלקיקים היא מסתם. בעגה המקצועית נהוג לומר כי **לכל סוג של חלקיק שלושה טעמים, אלה שלושת החלקיקים זה-הי-מטען ושוני-מסה.**

שלושת טעמי הקוורק מסוג **מעלה** הם (מן הכבד אל הקל):
up, charm, top.
שלושת טעמי הקוורק מסוג **מטה** הם: strange, bottom, ו-down.

שלושת טעמי הלפטון הטעון הם: μ -lepton, τ -lepton, ו-electron.
המודל הסטנדרטי אומר גם כי קיימים שלושה טעמי נייטרינו***. אבל, כיוון שבמסגרת המודל הזה חלקיקי הנייטרינו חסרי מסה, הגורם המבדיל ביניהם הוא אופי פעולת הכוח החלש עליהם.

הכוח החלש פועל על ידי חילוף של אחד משלושה חלקיקים נושאי הכוח: W^+ , W^- ו- Z^0 . נושאי הכוח החלש מסוג W מעניינים במיוחד. כאשר לפטון טעון פולט חלקיק W, הוא הופך לנייטרינו. תופעה מיוחדת במינה זו מאפשרת להבדיל בין שלושת טעמי הנייטרינו במסגרת המודל הסטנדרטי. הנייטרינו הנוצר כאשר אלקטרון פולט חלקיק W נקרא

* האחרון בחלקיקי המודל הסטנדרטי שטרם נצפה בניסוי, חלקיק ההיגס, הוא המטרה של מצוד ניסיוני עתיר-היקף בניסויים בשוויץ ובארה"ב.
** אם מסת חלקיקי הנייטרינו קשורה, אכן, לקיום חלקיקים חסרי כל מטען, אזי ניתן גם להבין מבחינה תיאורטית מדוע מסה זו צפויה להיות קטנה בהרבה ממסותיהם של חלקיקים טעונים.
*** קיום שלושה טעמים היה עוד אחת מהתחזיות המוצלחות של המודל הסטנדרטי. האישוש הניסיוני לקיום הטעם השלישי הושלם רק בשנת 2000.

כל החומר המרכיב את הגלקסיות שביקום עשוי כנראה מחלקיקי הדור הראשון בלבד. מדוע קיימים אפוא שלושה דורות? זוהי אחת החידות הפתוחות בתורת החלקיקים. עובדה מעניינת היא שההבדל בין חוקי הטבע לחומר ולאנטי-חומר קשור לקיום שלושה דורות, אבל זה נושא למאמר אחר. נחזור אפוא על עיקרי הדברים: הנייטרונים הם חלקיקים יסודיים שאינם חשים בפעולת הכוח החזק ואף לא בפעולת הכוח האלקטרומגנטי. תכונה זו מייחדת אותם משאר החלקיקים הידועים. הם מגיבים רק באמצעות הכוח החלש. מספרם שלושה: נייטרינו-אלקטרון (ν_e), נייטרינו-מיואון (ν_μ) ונייטרינו-טאו (ν_τ). על פי המודל הסטנדרטי הם חסרי מסה. אבל תחזית זו של המודל הסטנדרטי "שבירה" במיוחד. כמעט

נייטרינו של אלקטרון (ν_e). טעמו של נייטרינו הנוצר בפליטת W ממיואון הוא נייטרינו של מיואון (ν_μ). כאשר לפטון-טאו פולט W, נוצר נייטרינו של טאו (ν_τ).

מושג נוסף שמרבים להשתמש בו בתורת החלקיקים הוא **דור**. דור הוא קבוצה של ארבעה חלקיקים יסודיים, כל אחד מסוג שונה.

הדור הראשון כולל את שלושת החלקיקים הטעונים הקלים ביותר: up, down ו-electron, ואת הנייטרינו הקשור לאלקטרון. **הדור השלישי** כולל את שלושת החלקיקים הטעונים הכבדים ביותר: top, bottom ו-tau-lepton, ואת הנייטרינו של טאו.

הדור השני כולל את ארבעת החלקיקים הנותרים:

charm, strange, muon ו-mu-neutrino.

חלקיקי החומר היסודיים⁽¹⁾

לפטונים			קוורקים			
מסה [MeV]	מטען חשמלי	שם	מסה [MeV]	מטען חשמלי	שם	
0.5	-1	electron	5	$+\frac{2}{3}$	up	דור ראשון
$< 10^{-6}$	0	ν_e	10	$-\frac{1}{3}$	down	
106	-1	muon	1500	$+\frac{2}{3}$	charm	דור שני
< 0.17	0	ν_μ	150	$-\frac{1}{3}$	strange	
1777	-1	tau-lepton	175,000	$+\frac{2}{3}$	top	דור שלישי
< 15	0	ν_τ	5,000	$-\frac{1}{3}$	bottom	

נושאי הכוחות

כל התורות שמנסות להעמיק ולהרחיב את המודל הסטנדרטי מנבאות אומנם שחלקיקי הנייטרינו קלים במיוחד אך מסתם אינה אפס.

4. תנודות של נייטרינו

התהליך פסיקלי מוזר ומעניין הוא תנודות של נייטרינו, שקיומו אפשרי במסגרת תורת הקוונטים. קשה יהיה במסגרת המאמר הזה לתת תיאור מפורט ומעמיק של התהליך. אנחנו נסתפק בהסבר אינטואיטיבי ובתיאור התוצאות שלו. במסגרת המודל הסטנדרטי, יש רק דרך אחת להגדיר את ההבדל בין שלושת טעמי הנייטרינו – על פי פעולת חלקיקי

מסה [MeV]	חלקיק	כח
0	(8) גלואונים	חזק
0	(1) פוטון	אלקטרומגנטי
80,000	W^-, W^+	חלש
91,000	Z^0	
$> 100,000$	(1) היגס	יוקווה

* ראה מראה מקום 1.

מייצרים נייטרונים מסוג **אלקטרון**. הנייטרונים מתקדם במרחב ובזמן עד שהוא מגיע אל הגלאי שלנו. לאורך ההתקדמות, הנייטרונים משנה את טעמו והוא עשוי להגיע אל הגלאי כנייטרונים מסוג **מיזון**. נניח שהגלאי שלנו רגיש ל- v_e בלבד, מתגלית כאן תופעה מפליאה: למרות שייצרו v_e , הנייטרונים המגיע לגלאי לא יותיר בו שום סימן! תופעה זו, שינוי הטעם של הנייטרונים תוך כדי התקדמות, נקראת "תנודות נייטרונים".

5. נייטרונים מהשמש

השמש זורחת על ידי הפיכת פרוטונים לחלקיקי α . כשש מאות מיליון טונות של מימן נשרפות מידי שנייה כדי לספק את קרינת השמש. פיסיקאי גרעין עמלו כמחצית מאה כדי לקבוע את פרטי התהליך.

באופן יותר מפורש, תהליך הבעירה של השמש הוא בעיקרו תהליך הפיכתם של ארבעה פרוטונים לחלקיק α , שני פוזיטרונים, שני חלקיקי נייטרונים מסוג אלקטרון ופוטונים באנרגיה כוללת של כ- 25 MeV *. הפוטונים מהווים את קרינת השמש. אלה נושאי האור והחום המגיעים אלינו מהשמש. מרבית המידע שיש בידינו על השמש נובע מחקרית הפוטונים. אולם, חשוב לדעת שהפוטון הוא נושא הכוח האלקטרומגנטי ובתור שכזה הוא מרבה להגיב עם חלקיקי החומר הטעונים שבשמש – פרוטונים ואלקטרונים. אינטראקציה זו גורמת לפוטון לשנות כיוון ואנרגיה. דרכו של פוטון מרגע ייצורו בבעירת השמש ועד שהוא נחלץ מהשמש ופותח בדהרה אל כדור הארץ אורכת בממוצע כמאה אלף שנים. לעומת הפוטונים, חלקיקי הנייטרונים המיוצרים בבעירה דוהרים החוצה מן השמש למעשה ללא הפרעה. כתוצאה מכך, הם משמרים בתכונותיהם (בפרט ספקטרום האנרגיה שלהם) אינפורמציה ייחודית על המתרחש בלב השמש. כמה נפלא היה לו יכולנו לחקור באופן ניסיוני את חלקיקי הנייטרונים המגיעים מן השמש.

6. ניסויים

האתגר הניסויי שבעצירת נייטרונים ולימוד תכונותיו הוא גדול. הגלאי חייב להיסמך על פעולת הכוח החלש. רק גלאים עצומים, עם מספר ענק של חלקיקי מטרה, יכולים לצבור מספר מאורעות מספיק לחקירה מדעית (מאורע הוא הכינוי למקרים שבהם חלה תגובת כוח חלש בין נייטרונים פוגע וחלקיק מטרה שהגלאי רגיש אליה).

ה-W, נושאי הכוח החלש, עליהם. אבל, במסגרת מודלים של פיסיקה חדשה (ואולי אף בטבע עצמו, אם מודלים אלה נכונים), יש דרך נוספת. אם לחלקיקי הנייטרונים יש מסות שונות, ניתן להשתמש בתכונת המסה כדי להבחין בין שלושת חלקיקי הנייטרונים.

נבחן לדוגמה את חלקיק הנייטרונים בעל המסה הקטנה ביותר. חלקיק הנייטרונים הנ"ל אינו ה- v_e .

הוא גם אינו אחד מתוך שני הטעמים האחרים. למעשה, חלקיק הנייטרונים הקל צפוי להיות מורכב משלושת הטעמים גם יחד. כך גם חלקיק הנייטרונים הבינוני וחלקיק הנייטרונים הכבד – כל אחד מהשלושה הוא הרכב (שונה) של שלושת הטעמים שהגדרנו קודם. באופן דומה, כל אחד משלושת טעמי הנייטרונים המוגדרים על פי פעולת הכוח החלש, אינו אחד מתוך קל – בינוני – כבד אלא צרוף מסוים של שלושתם. אי התאמה, השוני, בין שני אופני ההגדרה נקרא בפי הפיסיקאים "ערבוב".

קיומם של שני תיאורים אלה נגזר מתורת הקוונטים. אף אחת משתי דרכי ההגדרה אינה "יסודית" או "נכונה" יותר. בניית תהליכים פיסיקליים ניתן להשתמש בכל אחת משתי ההגדרות: שתיהן מובילות לאותם ניבויים. הבחירה באיזו הגדרה להשתמש היא בעיקר שאלה של נוחות. כך למשל כאשר אנו דנים בתהליכים בהם נוצרים נייטרונים או בתהליכים בהם אנו מגלים נייטרונים בניסוי, נוח להשתמש בהגדרת הטעם. הסיבה היא שתהליכי הייצור והגילוי קשורים בפעולת הכוח החלש. כאשר אנו דנים בהתקדמות של נייטרונים במרחב ובזמן נוח להשתמש בהגדרת המסה. הסיבה היא שחלקיק בעל מסה נתונה אינו משנה את מסתו תוך התקדמות חופשית.

נדגיש כי המלה "טעם" בהקשר של חלקיקי הנייטרונים תמשך לציין את המצבים המוגדרים על פי אופי פעולת האינטראקציה החלשה ולא את המצבים המגדירים את המסה שלהם. זאת בניגוד לקוורקים והלפטונים הטעונים שהמילה "טעם" לגביהם מציינת את המצבים בעלי המסה השונה.

העובדה שחלקיק בעל מסה נתונה שומר את מסתו כל עוד לא פועל עליו כוח, והעובדה שנייטרונים בעל מסה נתונה הוא ערבוב של טעמי נייטרונים שונים מובילה, דרך תורת הקוונטים, לתוצאה המפתיעה הבאה: טעמו של חלקיק נייטרונים משתנה כאשר הוא נע ממקום למקום. נבחן למשל ניסוי שבו אנחנו

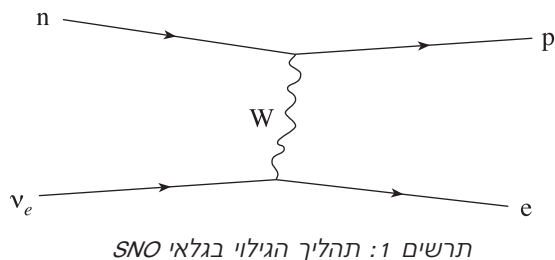
* MeV הוא יחידת אנרגיה השווה לכ- 10^{-13} J. בתורת החלקיקים משתמשים במונח MeV גם לציין מסה השווה לכ- 10^{-30} kg.

8. טעות במודל של השמש

מנקודת הראות של אסטרופיסיקה, ההסכמה בין תצפיות הנייטרונים והתיאוריה טובה. האנרגיות הנמדדות של נייטרונים מן השמש תואמות את הערכים המנובאים על ידי התיאוריה. הקצב בו מגיעים חלקיקי הנייטרונים נמוך כאמור מהצפוי אבל לא בגורם גדול. קצב ההגעה של נייטרונים מן השמש לכדור הארץ תלוי בערך בחזקה ה-2.5 של הטמפרטורה במרכז השמש. ההסכמה, עד כדי גורם 3 בערך, בין השטף הנמדד לתיאוריה, פירושה שלמעשה מדדנו את הטמפרטורה במרכז השמש בדיוק של כמה אחוזים!

האם ייתכן אפוא ששינויים קטנים במודל של השמש יתקנו את החישוב התיאורטי של שטף הנייטרונים כך שיתאים לתוצאות הניסיוניות? לאורך השנים הצטברו נימוקים רבים שהסבירות לאפשרות כזו נמוכה. אבל ההתפתחות הדרמטית של החודשים האחרונים היא שהשוואה ישירה בין תוצאות הניסוי SNO שבקנדה ותוצאות הניסוי Super-Kamiokande ביפן מבטלת אפשרות זו לחלוטין, וללא צורך בטיעונים מורכבים.

בניסוי SNO המטרה מורכבת ממים כבדים (D_2O). במים כבדים מוחלף כל אחד מאטומי המימן המרכיבים את מולקולת המים (H_2O) בדאוטרון (D_2O). הדאוטרון מורכב מפרוטון ונייטרון. אחד התהליכים באמצעותם מגלים חלקיק נייטרונים מהשמש הוא תגובה בין הנייטרונים לדאוטרון שהחלקיקים הנוצרים בה הם שני פרוטונים ואלקטרון. תגובה כזו מתרחשת על ידי חילוף חלקיק W נושא הכוח החלש בין הנייטרונים לדאוטרון, שכתוצאה ממנה הופך הנייטרון לאלקטרון (והנייטרון שבדאוטרון לפרוטון). רק נייטרונים של אלקטרון יכול להשתתף בתהליך כזה.



בניסוי Super-Kamiokande המטרה מורכבת ממים. תהליך הגילוי כאן הוא תגובה בין הנייטרונים לאלקטרון הנמצא במים שכתוצאה ממנה מקבל האלקטרון מהירות גבוהה. תגובה כזו מתרחשת באחת משתי דרכים: הראשונה, חילוף חלקיק W נושא הכוח החלש. בתהליך זה משתתף רק נייטרון-של-אלקטרון. השנייה, חילוף חלקיק Z נושא הכוח החלש. לתהליך

בשנת 1964 הוציעו שניים: הניסיונאי דייוויס (Davis) והתיאורטיקאי בקול (Bahcall), ניסוי. הגלאי המוצע היה 100,000 גלונים של נוזל ניקוי (פרהכלורואתילן, C_2Cl_4). דייוויס הקים את הניסוי כשהמטרה – המכל עם נוזל הניקוי – ממוקם עמוק במכרה הזהב "Homestake" שבדרום דקוטה. המיקום התת קרקעי חיוני לניסויים אלה כדי למנוע מאורעות שמקורם בקרניים קוסמיות ולא בנייטרונים מהשמש. כאשר חלקיקי הנייטרונים מגיבים עם כלור, הם מייצרים מידי פעם איזוטופ רדיואקטיבי של ארגון. מידי מספר חודשים, במשך כעשרים שנה, הוציאו דייוויס ושותפיו מספר קטן של אטומי ^{37}Ar , בערך 10, מתוך המספר הכולל של יותר מ- 10^{30} אטומים במכל. הניסיונאים היו חייבים להיות חכמים במידה בלתי רגילה כדי למצוא את "המחט בערמת השחת"...

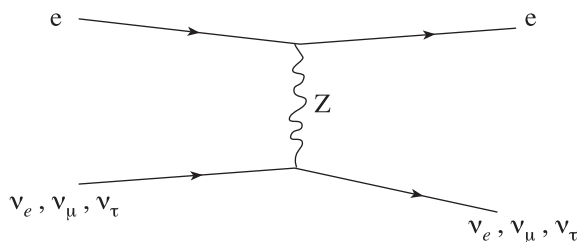
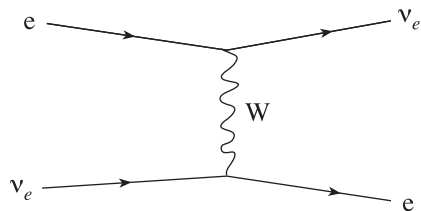
דייוויס מדד שטף של נייטרונים הקטן בערך פי שלושה מהשטף שבקול, אבי "המודל הסטנדרטי של השמש", ניבא. מה מקור ההבדל בין הניסוי לתיאוריה? שלושה הסברים שונים יכולים לתת את התשובה. ראשית, ייתכן שהניסיונאים טעו ותוצאות המדידה שלהם שגויות. זו האפשרות המאכזבת מכולן. שנית, ייתכן שהאסטרופיסיקאים טעו והמודל של השמש שגוי. שלישית, ייתכן שתורת החלקיקים שגויה בדרך בה היא מתארת את תכונות הנייטרונים. זו האפשרות המסקרנת מכולן.

7. טעות בניסוי?

הסבירות שמקור הסתירה בין הניסוי לתיאוריה הוא בטעות ניסויית הלכה וירדה בחלוף השנים. בשנת 1986 החל לפעול ניסוי שני בהנהגת הפיסיקאי היפני קושיבה. כמטרה משמש במקרה זה מכל של כשלושת אלפי טון מים במכרה קמיוקה שבאלפים היפניים. נייטרונים עשוי לפגוע באלקטרון שבמים ולהעניק לו תנע ואנרגיה גבוהים. קרינת האור הנובעת מהאלקטרון המהיר נקלטת בחיישנים הממוקמים סביב המכל ומאפשרת לא רק את ספירת המאורעות אלא גם את מדידת הכיוון והאנרגיה של הנייטרונים הפוגע. גם בניסוי זה היה השטף הנמדד קטן באופן משמעותי מהשטף המנובא.

מאז, הצטרפו חמישה ניסויים נוספים למרדף אחר הנייטרונים מהשמש: ניסויים ברוסיה (SAGE), באיטליה (GALLEX) ואחר כך (GNO) שוב ביפן (Super-Kamiokande) ולאחרונה בקנדה (SNO). לכל ניסוי מאפיינים אחרים אבל כולם קלטו נייטרונים מהשמש, ובכל גלאי מספר חלקיקי הנייטרונים הנצפה נמוך יותר מאשר הניבוי של התיאוריה הסטנדרטית.

המספר הרב של ניסויים והעובדה שכולם מאששים את התוצאה הראשונית לפיה השטף קטן מהצפוי, מבטלת את האפשרות של טעות ניסיונית.



תרשים 2: תהליך הגילוי בגלאי Super-Kamioande

השמש, זאת כיוון שרתיעת האלקטרונים היא בהמשך כיוון הגעת הנייטרינים. שנית, ניסויי הפיזור נותנים את זמן ההגעה המדויק של כל מאורע ומאורע. כך ניתן לבחון אפשרויות כמו שינוי בשטף בין היום והלילה או בין הקיץ לחורף. שלישית, האנרגיה של האלקטרונים הנרתעים משקפת במידה מסוימת את הספקטרום של הנייטרינים. האינפורמציה על זמני ההגעה והאנרגיה מאפשרת להבחין בין הסברים שונים לתעלומת הנייטרינים מן השמש שמנבאים כולם את אותו השטף בניסויים הרדיוכימיים.

9. טעות במודל הסטנדרטי!

אם המודל הסטנדרטי "שוגה" בכך שהוא מנבא שמסת חלקיקי הנייטרינו היא אפס, אזי ניתן להסביר בצורה פשוטה מדוע השטף הנמדד של נייטרינים מן השמש קטן מן הצפוי ומדוע השטף הנמדד ב-SNO שונה מזה הנמדד ב-SK. ראשית, נזכיר מספר עובדות שהוסברו קודם. אם מסות הנייטרינים שונות מאפס, אזי כל מצב בעל מסות נתונות הוא ערבוב של מצבים בעלי טעמים שונים. כתוצאה מהערבוב, מתאפשר קיומה של תופעת "תנודות נייטרינו" – טעמו של חלקיק הנייטרינו משתנה כשהוא מתקדם ממקום למקום. שנית, נדגיש כי רוב הגלאים המשמשים בניסויי הנייטרינו מהשמש גישים אך ורק ל- ν_e . אם ν_μ או ν_τ פוגע בגלאי של ניסויי SAGE, GNO, Gallex, Homestake ו-SNO, הוא אינו יכול להשאיר סימן בגלאי. יוצאי הדופן היחידים הם ניסויי המים, Kamiokande ובפרט Super-Kamiokande, שלהם רגישות גבוהה ל- ν_e , ורגישות נמוכה יותר, אך שונה מאפס, ל- ν_μ ול- ν_τ . שלישית, נזכיר כי בתהליך הבעירה של השמש נוצרים אך ורק ν_e .

עכשיו נחבר את שלושת חלקי התצפיה ונקבל הסבר פשוט לכל התוצאות הנסיוניות. השמש אכן משגרת שטף אדיר של

זה, וזהו ההבדל המכריע, תורמים שלושת טעמי הנייטרינו: ν_e, ν_μ, ν_τ .

אם מודל השמש שגוי, הנייטרינים המגיעים מן השמש הם כולם נייטרינים-של-אלקטרון, אך מספרם קטן מן הצפוי. במקרה כזה השטף הנמדד בכל אחד משלושת התהליכים שתוארו כאן: חילוף W ב-SNO, חילוף W ב-SK וחילוף Z ב-SK יהיה קטן מן הצפוי, ובדיוק באותו שיעור: היחס בין השטף האמיתי לשטף שחושב במודל השגוי. המסקנה היא שטעות במודל של השמש תביא בדיוק לאותה הפחתה יחסית בין התיאוריה למדידה בשני הניסויים. אם ההפחתה הנמדדת שונה בין ניסוי SNO לניסוי SK, לא ניתן להסביר זאת על ידי תיקון כלשהו, סביר או בלתי סביר, למודל של השמש.

בשמונה עשר ביוני 2001 פירסם ניסוי SNO את התוצאות הראשונות שלו. השטף הנמדד ב-SNO נמוך בכ-25% מהשטף הנמדד ב-SK. (שני השטפים נמוכים במידה ניכרת מהניבוי התיאורטי). האפשרות שההבדל בתוצאות נובע מטעות ניסויית נמוך מאוד, על פי הערכת הנסיונאים. ההבדל בין תוצאות שני הניסויים אינו ניתן להסברה על ידי מרכיבים חדשים במודל של השמש. נותרת אפוא רק אפשרות אחת: תכונות הנייטרינים שונות מאלה שמייחס להם המודל הסטנדרטי. הסתירה הניסיונית המיוחלת למודל הסטנדרטי הושגה.

בניסוי SK (ובאחד התהליכים ב-SNO) מגלים את הנייטרינים הבאים מן השמש על ידי פיזור נייטרינו - אלקטרון. תהליך זה מספק אינפורמציה נוספת שלא ניתן להשיגה בניסויים הרדיוכימיים (SAGE, GNO, Gallex, Homestake). ראשית, ניסויי הפיזור מראים באופן ישיר כי הנייטרינים הפוגעים באים מן

* בניסוי SNO יש אפשרות למדוד תהליכים נוספים, מעבר לאחד שתואר קודם, בהם יש רגישות לכל טעמי הנייטרינו.

10. מילות סיום

כשאול שהלך לחפש אתונות ומצא מלוכה, כך ניסויי הנייטרינים מהשמש ששאפו (ואף הצליחו) ללמוד על המתרחש בלב השמש ולהוסיף נדבך לידע באסטרופיסיקה, מצאו סתירה למודל הסטנדרטי ובכך הביאו לפריצת דרך בתורת החלקיקים.

כאמור, קיום מסות לנייטרינים נותן הסבר פשוט וסביר לתוצאות הניסויים. זוהי ההוכחה הניסויית הראשונה לכך שהמודל הסטנדרטי של תורת החלקיקים אינו יכול להיות תיאור מלא של הטבע וכי יש "פיסיקה חדשה". הערך המספרי של מסת הנייטרינו עשוי לרמוז לכיוון של "התיאוריות המאוחדות הגדולות" שבהן הכוח החזק, הכוח החלש, והכוח האלקטרומגנטי אינם אלא פנים שונות של כוח אחד ויחיד. לתוצאות הניסויים יש גם השלכות רבות בקוסמולוגיה ובאסטרופיסיקה בפרט. הסבירות שחלקיקי הנייטרינו מהווים חלק משמעותי מ"החומר האפל" ומשפיעים על היווצרות מבני החומר ביקום הופכת קטנה: המסות המתאימות להסבר ניסויי הנייטרינים מהשמש קטנות מכדי שתהיה להן חשיבות קוסמולוגית.

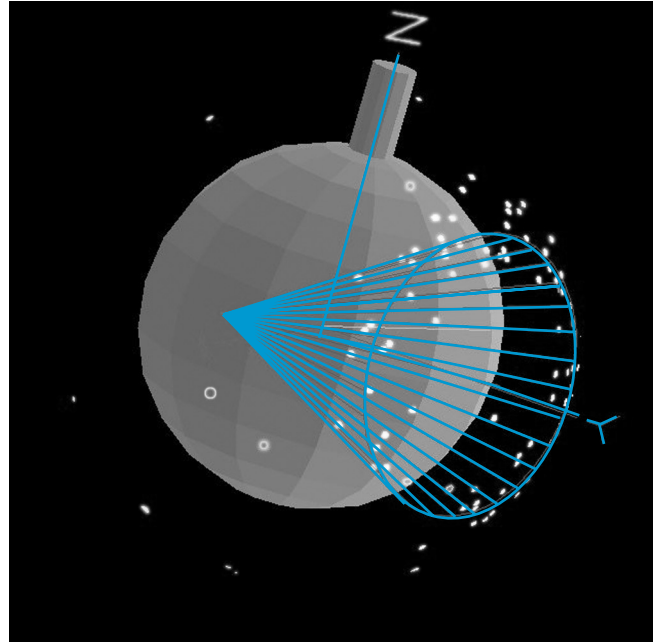
ניסויי הנייטרינים מהשמש נמשכים ומשתכללים. הם מהווים כיום את חוד החנית בחיפוש אחר פיסיקה חדשה הקשורה באנרגיות גבוהות מאוד ובזמנים מוקדמים מאוד בתולדות היקום. אנו מקווים כי ניסויי הנייטרינים ימשיכו להפתיע אותנו ולהעמיק את הבנתנו את הטבע.

מראה מקום

1. אליצור, ש., המודל התקני, מסגרת מאוחדת לכוחות הטבע. תהודה 16 (2) 1994.

לקריאה נוספת

1. אליצור, ש., מאה שנה לגילוי האלקטרון. תהודה (2) 18(2) 1997.
2. הררי, ח., הנייטרינו החמקמק תהודה (1) 20(1) 1999.
3. נאמן, י., וקירש, י., צידי החלקיקים. הוצאת מסדה, גבעתיים 1983.



תרשים 3: באחד משלושת סוגי האינטראקציה של הנייטרינים בגלאי SNO, מפוזר נייטרינו מאלקטרון שבמים הכבדים. אלקטרון זה יוצר הבזק אור בצורת חרוט פוטונים של קרינת צ'רנקוב (Cherenkov) המגיעים אל 60 עד 150 מתוך 10,000 גלאי האור של SNO, הממוקמים על שטח פני כדור, מחוץ למים הכבדים. אותות הגלאים נותנים מידע מדויק על כיוון הנייטרינו, המקום והזמן בהם התרחשה האינטראקציה

חלקיקי ν_e המתאים למודל של השמש. אלא שבדרכם מנקודת הייצור עד לגלאים שעל פני כדור הארץ עוברים חלקיקי הנייטרינו את תהליך התנודות וחלקם משנים את טעמם. שטף הנייטרינים המגיע לארץ תואם את הניבוי התיאורטי, אלא שחלקו מגיע בטעם ν_μ או ν_τ . הגלאים "עיוורים" לטעמים אלה ומודדים רק את שטף ה- ν_e , שהוא חלק קטן (כשליש) מהשטף הכולל.

ההבדל בין תוצאות SNO ותוצאות SK נובע מהעובדה שה- ν_μ וה- ν_τ תורמים לשטף הנמדד ב-SK אך לא לזה הנמדד ב-SNO. לכן אנו מצפים שהשטף הנמדד ב-SNO יהיה נמוך מזה הנמדד ב-SK, וזהו אכן המצב.

המסקנה היא כי לנייטרינים יש מסות, והנייטרינים המוגדרים על פי מסתם הם ערבוב של הנייטרינים המוגדרים על פי טעמם. הערך הנמדד של ההפחתה בשטף הנייטרינים מרמז לנו על ערכן של המסות עצמן. במודלים הפשוטים ביותר של פיסיקה חדשה אנו מסיקים כי מסת הנייטרינו קטנה פי מאה מיליון או יותר ממסת האלקטרון, שהוא הקל שבחלקיקים היסודיים הטעונים. אכן - מסה זעירה ביותר, אבל ההשלכות של היותה שונה מאפס מרחיקות לכת.