

תעלומת הנויטרינו

מגישות תמרה קוליקוב
אורית מרחבקה

מנחה מדעית ד"ר הגר לנדסמן,

מנחה פדגוגית ד"ר דיאנה לאופר.

תוכן

1. היסטוריה של פרס נובל. 3
2. מהו נויטרינו. 6
3. המודל הסטנדרטי של פיזיקת החלקיקים. 9
4. שיטות לגילוי נויטרינו. 12
5. גילוי ניסיוני של נויטרינו. 18
6. איך נוצרים נויטרינו מהשמש. 18
7. תעלומה של נויטרינו. 21
8. פתרון הבעיה. 21

רקע תאורתי בנושא תעלומת נויטרינו

1. היסטוריה של פרס נובל.

בנובמבר של שנת 2015 הועדת פרסי נובל הכריזה כי הפיזיקאי היפני טקאקי קאגייטה (Takaaki Kajita) מאוניברסיטת טוקיו ואסטרופיזיקאי קנדי ארתור ברוס מקדונלד (Arthur B. McDonald) מאוניברסיטת קינגסטון זכו בפרס נובל לפיזיקה לשנת 2015.

מה זה פרס נובל ?

”בכל רכושי הנותר הניתן למימוש ינהגו כדלהלן.

הכספים יושקעו על ידי מנהלי עזבוני בהשקעות בטוחות אשר יהוו קרן, הריבית על קרן זו תחולק מדי שנה כפרסים לאלה, אשר בשנה שקדמה לקבלת הפרס, הנחילו את התועלת הרבה ביותר לבני האדם. סכום הריבית יחולק לחמישה חלקים שווים, אשר יוענקו באופן הבא: חלק אחד לאדם אשר תרם את התגלית או ההמצאה החשובה ביותר בתחום הפיזיקה, חלק אחד לאדם אשר תרם את התגלית או ההמצאה החשובה ביותר או שיפור בתחום הכימיה, חלק אחד לאדם אשר תרם את התגלית החשובה ביותר בתחום הפיזיולוגיה או הרפואה; חלק אחד לאדם אשר יצר בתחום הספרות את היצירה האידאלית ביותר, וחלק אחד לאדם אשר עשה את המרב או את העבודה הטובה ביותר לאחוה בין האומות, לביעור או הפחתת הכוח החמוש וכן לקיום וקידום כינוסי שלום.

הפרסים בפיזיקה ובכימיה יוענקו על ידי האקדמיה השוודית למדעים; הפרס לעבודות פיזיולוגיות או רפואיות על ידי מכון קרולינסקה בסטוקהולם; והפרס לאבירי השלום על ידי ועדה של חמישה אנשים אשר ייבחרו על ידי חבר הנבחרים הנורווגי. זהו רצוני המפורש כי בהענקת הפרסים לא יינתן כל משקל ללאומיות המועמדים, כך שהמתאים ביותר יקבל את הפרס, בין אם הוא סקנדינבי ובין אם לאו.”

אלפרד נובל

אלפרד נובל (Alfred Bernhard Nobel) נולד ב-1833 בעיר בירה של שוודיה סטוקהולם במשפחת מהנדסים. בשנת 1842 משפחתו של נובל עברה לסנקט פטרבורג. שם הקים אביו מפעל לייצור מוקשים ימיים. אלפרד ושלוש אחיו קיבלו חינוך פרטי ולמדו מדעים, שפות

וספרות. את השכלתו ככימאי המשיך אלפרד בפרס. באותו זמן עבד נובל במעבדה של כימאי מפורסם שהמציא חומר שנקרא ניטרוגליצרין - חומר נוזלי שמתפוצץ בקלות רבה.

עם סיום הלימודים חזר אלפרד לשבדיה. שם החל בחקר ייצורם של חומרי נפץ ובפרט לייצורו של ניטרוגליצרין. כמה מהניסויים, אשר נערכו במעבדתו גרמו לתאונה בה נספו מספר פועלים במפעל, ביניהם אחיו הצעיר - אמיל. בעקבות התאונות האלה אסרה ממשלת שבדיה על קיום הניסיונות בחומר הנפץ בתחומי העיר סטוקהולם, ונובל נאלץ להעביר את מעבדתו למקום אחר - הוא העביר אותה לסירה שעגנה באגם בקרבת העיר.

תוך כדי מחקריו הצליח נובל לקבל חומר נפץ מוצק אשר השימוש שלו בטוח יותר כדי לפוצץ סלעים, בעבודות בנייה, בכריית מכרות, הקמת גשרים וכדומה.

בשנת 1867 רשם פטנט על המצאה זו, שאותה כינה דינמיט. בעקבות המצאתו והוא צבר הון רב.

עם הזמן הבין נובל שהמצאתו שנועדה לעזור לבני האדם בהקמת מבנים, מנוצלת למטרות מלחמה - ליצירת פצצות ופגזים, וזאת לא הייתה כוונתו.

בצוואתו ביקש נובל לתקן מעט את העוול שהביאה המצאתו לעולם. הוא תרם את כספו לקרן מיוחדת, המעניקה מדי שנה פרסים יקרי ערך למי שתרים תרומה חשובה לאנושות.

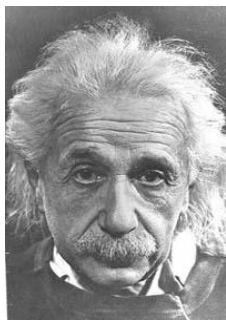
פרס הנובל הראשון הוענק בשנת 1901. מאז הוענק הפרס למאות אנשים מוכשרים שהפכו את העולם למקום טוב יותר כפי שהתכוון אלפרד נובל לעשות בהמצאתו.



- הזוכה הראשון בפרס נובל ב-1901 לפיזיקה,

עבור גילוי קרני ה-X שמאוחר יותר נקראו על

שמו היה **רנטגן** (בגרמנית Wilhelm Conrad Röntgen).



- הזוכה המפורסם ביותר בפרס נובל לפיזיקה בשנת 1921, **אלפרד איינשטיין (Albert Einstein)** קיבל פרס עבור עבודתו בפיזיקה בנושא האפקט הפוטואלקטרי. עבודתו נחשבת לפריצת דרך בתחום הפיזיקה המודרנית והפיזיקה התיאורטית.

רשימת פרסי נובל המוזכרים בעבודה

שנת זכייה	שם החתן פרס נובל	מדינה	תיאור
1935	<i>Sir James Chadwick</i>	אנגליה	עבור גילוי נויטרון
1938	<i>Enrico Fermi</i>	איטליה	הוכחת קיום של חומרים רדיואקטיביים חדשים, גילוי של תגובות גרעיניות בהשפעה של נויטרונים איטיים.
1958	<i>Pavel Cherenkov Igor Tamm Ilia Frank</i>	ברית המועצות	גילוי אפקט צ'רנקוב ופירושו.
1988	<i>Leon Max Lederman Melvin Schwartz Jack Steinberger</i>	ארצות הברית ארצות הברית גרמניה	גילוי נויטרינו מיוני
1995	<i>Frederick Reines</i>	ארצות הברית	40 שנה אחרי גילוי ניסיוני של נויטרינו
2002	<i>Raymond Davis Jr Koshiba Masatoshi</i>	ארצות הברית יפן איטליה	גילוי נויטרינו המגיעים מחלל החיצון
2015	<i>Kajita Takaaki Arthur McDonald</i>	יפן קנדה	גילוי אוסילציות של נויטרינו המוכיח של נויטרינו יש מסה

ישנה השערה שפרס נובל של 2015 אינו פרס אחרון, כך ב – 2013 בגלאי IceCube באנטרקטיקה הצליחו לזהות נויטרינו שהגיעו מחלל החיצון.

2. מהו נויטרינו.

• מקורות

בין החלקיקים הידועים לנו הים חלקיקי נויטרינו הם הרבים ביותר ביקום. הם ומפגיזים את כדור הארץ ללא הרף. מיליארדים של חלקיקי נויטרינו זורמים דרך גופינו למרות שלא ניתן לחוש בהם או לראותם. הם נעים במהירות קרובה למהירות האור ואין להם כמעט אינטראקציה עם חומר.

נויטרינו אפשר למיין לפי המקור היווצרותם לקבוצות בסיסיות:

I. נויטרינים ממקורות מחוץ לכדור הארץ :

(1) נויטרינו קוסמי (הקשורים למפץ הגדול),

(2) נויטרינים המגיעים מהשמש,

(3) נויטרינים ממקורות אסטרופיזיקליים,

II. נויטרינו ממקורות ארציים :

(1) גאו- נויטרינים,

(2) נויטרינים הנוצרים באטמוספירה כתוצאה מפגיעת קרינה קוסמית,

(3) נויטרינים הנפלטים כתוצאה של התפרקות רדיואקטיבית במאיצים ותחנות כוח

גרעיניות.

(4) נויטרינים הנוצרים מהתפרקות רדיואקטיבית של חומרים רדיואקטיביים טבעיים.

כל סוגי הנויטרינו שברשימה הנ"ל הם נחקרים. לפי סוג המחקר של הנויטרינו ניתן לקבל מידע :

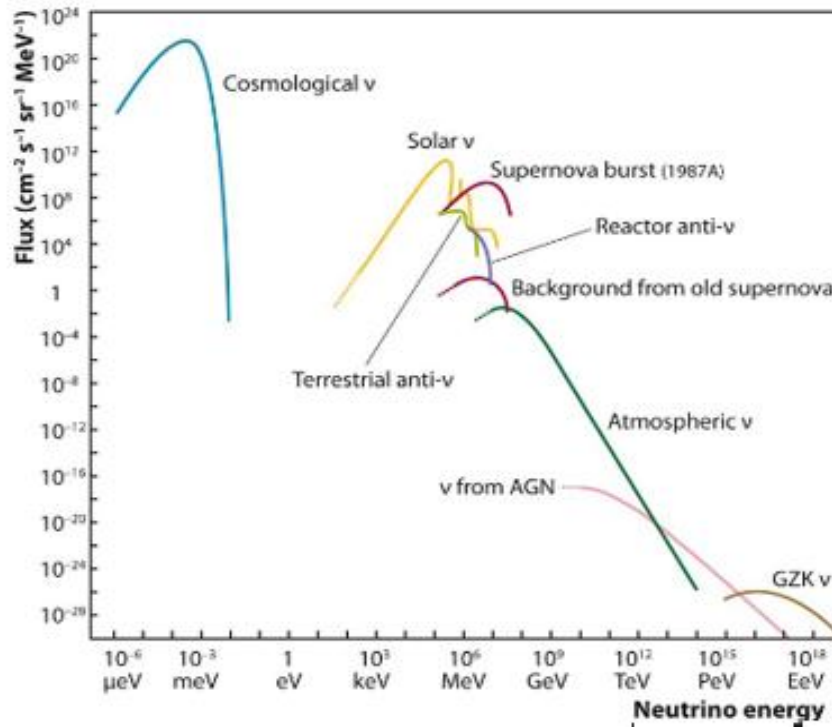
- על השמש,

- על היקום,

- על מקורות אסטרופיזיקליים,

- על תכונות חלקיקים יסודיים והאינטראקציות ביניהם.

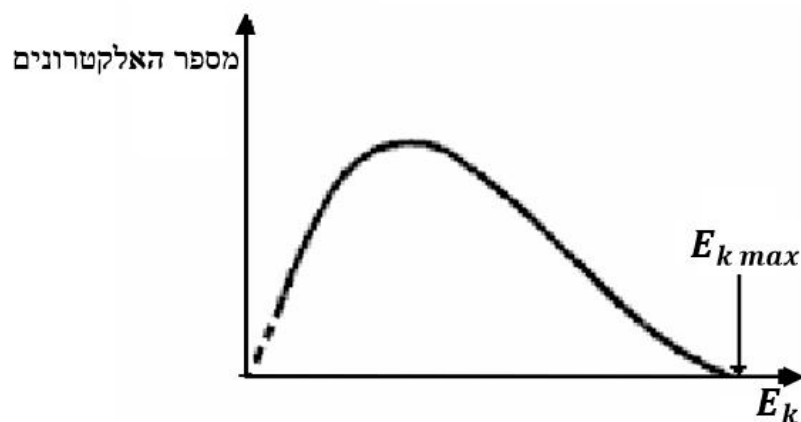
התרשים הבא מתאר ספקטרום אנרגיות של נויטרינו ממקורות שונים.



מהגרף אפשר להסיק שככל שאנרגיה של נויטרינו גבוהה יותר השטף קטן יותר, הדבר מקשה על גילוי נויטרינים בעלי אנרגיות גבוהות ודורש לבנות גלאים בנפחים גדולים.

• **היסטוריה**

במהלך חקירת התפרקות β התברר שאלקטרונים הנפלטים בתהליך הם בעלי ספקטרום רציף של אנרגיה החל מ-0 ועד לאנרגיה המקסימלית. אפשר לתאר את התפלגות האנרגיה על ידי גרף הבא



בחישוב ההפרש בין מסת גרעין האב לבין סכום מסות של גרעין בת והאלקטרון הנפלט מקבלים ערך האנרגיה השווה ל - $E_{k \max}$. זאת אומרת האלקטרונים הנפלטים בתהליך תמיד צריכים להיות בעלי אנרגיה מקסימלית ($E_{k \max}$). אבל למעשה רוב האלקטרונים נפלטים עם אנרגיה נמוכה מ - $E_{k \max}$, הדבר נראה סותר את חוק שימור האנרגיה. המדענים התחילו לחפש תשובה לשאלה: "לאן נעלם הפרש האנרגיה?" פאולי (Wolfgang Pauli) העלה רעיון של קיום חלקיק ניטרלי במטרה להסביר את התופעות הסותרות את חוקי השימור. לפי השערתו בתהליך התפרקות β נוצר חלק ניטרלי נושא עמו חלק מהאנרגיה וכינהו "נויטרון". מסת החלקיק צריכה להיות קטנה מאוד (או אפסית). מאוחר יותר השתנה השם של החלקיק ל"נויטרינו".

מאוחר יותר התברר שהאלקטרון הנפלט בהתפרקות β בדרך כלל אינו נע בכיוון הפוך לתנועת הגרעין הנרתע. הדבר סותר את חוק שימור התנע.

בשנת 1932 גיימס צ'דוויק (James Chadwick) גילה חלקיק שונה לגמרי ונתן לו שם נויטרון. גילוי נויטרון על ידי צ'דוויק גרם להתפתחות מודל האטום. לפי המודל החדש גרעין האטום מכיל פרוטונים ונויטרונים. הדבר מעיד על כך שבמהלך התפרקות β הנויטרון הופך לפרוטון.

בשנת 1934 אנריקו פרמי הציע תיאוריה של התפרקות β .

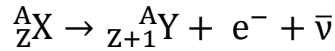
לפי תיאוריה של פרמי :

- בנוסף לכוח משיכה בין הנוקלאונים בגרעין (כוח חזק) קיים כוח נוסף המשתתף בתהליך הפיכת נויטרון לפרוטון. כוח זה הוא הגורם להתפרקות β (היום הכוח הזה מכונה בשם "הכוח החלש").
- בתהליך נפלט חלקיק נוסף, בעל תכונות הבאות :

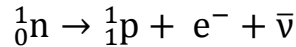
- חסר מטען חשמלי.
- בעל מסה קטנה מאוד.
- בעל ספין $\frac{1}{2}$.

▪ הנוטל חלק מהאנרגיה ומהתנע המשתחררים בתהליך התפרקות.

המשוואה המתארת את התפרקות β :



הנויטרון עצמו מתפרק לפי משוואה :



אנריקו פרמי נתן שם חדש לחלקיק זה – **נויטרינו** שמאיטלקית מסמל נויטרון קטן.

כדי להדגיש את ההבדל בין נויטרינו לנויטרון נסכם :

הנויטרון - חלקיק זה מצוי בגרעין האטום וגם מסתו גדולה בערך פי 2000 ממסת האלקטרון. הנויטרון נייטרלי מבחינה חשמלית (ומכאן שמו).

אחד התהליכים החשובים שבו נוצר נויטרינו הוא התפרקות הנויטרון לפרוטון ואלקטרון. הנויטרינו מאזן חוק שימור האנרגיה, חוק שימור התנע, וחוק שימור הזוויתי וחוק שימור המטען.

אפשר להשוות בין נויטרון לנויטרינו על ידי טבלה הבא :

נויטרון	נויטרינו	
מורכב קוורקים	חלקיק יסודי	הרכב
$1.67 \cdot 10^{27} kg$	קטנה מאוד	מסה
חסר מטען חשמלי	חסר מטען חשמלי	מטען חשמלי
מרכיב את גרעין האטום	נוצר בתהליכים רדיואקטיביים שונים	מיקום החלקיק

3. המודל הסטנדרטי של פיזיקת החלקיקים.

המודל הסטנדרטי הוא התיאוריה המודרנית של מבנה ואינטראקציות של חלקיקים אלמנטריים. התיאוריה מבוססת על מספר פוסטולטים ומאפשרת חיזוי של תהליכים רבים המתרחשים בעולם של החלקיקים האלמנטריים. ברוב המקרים הניסוי מאמת את החיזוי.

לפי המודל הסטנדרטי, החלקיקים היסודיים של החומר הם תכונות של **פרמיונים** :

▪ בעלי ספין חצי שלם,

▪ מקיימים עקרון איסור פאולי (שני פרמיונים אינם יכולים להימצא באותו מצב קוונטי).

פרמיונים מתחלקים לשתי קבוצות: קווארקים ולפטונים. לפי המודל הסטנדרטי קיימים שלושה "דורות" של פרמיונים.

חלקיקים נושאי כוחות הנקראים **בוזונים**.

המודל הסטנדרטי כולל שלושה סוגים של כוחות יסודיים המתוארים על ידי תורת השדות הקוונטית:

▪ כוחות חזקים,

▪ כוחות אלקטרומגנטיים,

▪ כוחות חלשים.

כוח גרביטציוני אינו מוסבר על ידי מודל סטנדרטי.

על פי תורת השדות הקוונטית והמודל הסטנדרטי, שלושת הכוחות היסודיים בטבע נישאים על ידי שלוש משפחות של בוזונים (שהם 13 חלקיקים תת-אטומיים אלמנטריים):

▪ פוטון - נושא את הכוח האלקטרומגנטי,

▪ גלואון - נושא את הכוח הגרעיני החזק (ישנם שמונה סוגים),

▪ בוזוני W ו-Z - נושאים את הכוח הגרעיני החלש (ישנם שני סוגי W וסוג אחד של Z),

תכונות של בוזונים:

▪ בעלי ספין שלם.

▪ עשויים להיות חלקיקים אלמנטריים או מורכבים מתת-חלקיקים אחרים.

▪ לא מקיימים עקרון איסור פאולי (כמה בוזונים יכולים להיות באותו מצב

קוונטי)

מקום מסוים תופס בוזון היגס, (קוונט של שדה היגס) הקובע את מסתם של שאר החלקיקים. חשוב לציין שקיימים בוזונים מורכבים למשל **מזונים**.

אפשר לתאר את המודל הסטנדרטי באופן סכמתי :

בזזנים	פרמיונים			
γ פוטון	t קווארק עליון	c קווארק קסום	u קווארק למעלה	קווארקים
W בזזון W	b קווארק תחתון	s קווארק מזר	d קווארק למטה	
Z בזזון Z	τ טאו	μ מיואון	e אלקטרון	לפטונים
g גלואון	ν_τ נייטרינו טאואוני	ν_μ נייטרינו מיואוני	ν_e נייטרינו אלקטרוני	
H בזזון היגס	דור שלישי	דור שני	דור ראשון	

מיקומו של נייטרינו במודל הסטנדרטי

לפי המודל הסטנדרטי נייטרינו הוא לפטון חסר מטען חשמלי, בעל ספין $\frac{1}{2}$ (כלומר פרמיון). מסתו של הנייטרינו אינה ידועה, אך ידוע שהיא נמוכה מאוד ביחס לכל החלקיקים האחרים.

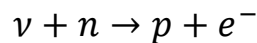
היום ידוע שקיימים שלושה סוגי הנייטרינו שונים (המסומנים על ידי אות יוונית ν): הנייטרינו האלקטרוני ν_e , הנייטרינו המואוני ν_μ והנייטרינו הטאואוני ν_τ . נהוג לייחס לכל אחד מהם גם אנטי-חלקיק. אנטי נייטרינו מסמנים $\bar{\nu}$.

4. שיטות לגילוי נויטרינו.

קיימים שלוש שיטות לגילוי נויטרינו:

- (1) רדיו-כימי,
- (2) גלאים המבוססים על קרינת צ'רנקוב,
- (3) גלאים המבוססים על סינטילציות (scintillation).

1. הגלאים הרדיו-כימיים נבדלים על פי חומר כימי פעיל: כלור או גליום. כל תהליך רדיו-כימי מבוסס על תגובה הבא:



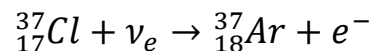
השיטה לא מאפשרת חישוב ישיר של נויטרינו הנלכד. גילוי נעשה על פי איסוף נתונים – חלק מהנויטרינו שעברו נכנסים לאינטראקציה עם חומר פעיל, בתוך הגלאי נאגר תוצר של תגובה כימית. בתום התהליך מנתחים את כמות התוצרים שחולצו מתוך הגלאי. שיטה זו לא נותנת מידע על כיוון תנועת הנויטרינו אלא רק על גודל של מהירותם.

דוגמאות של הגלאים החשובים הרדיו-כימיים הם:

▪ גלאי מבוסס על תגובה בין נויטרינו ל- $^{37}_{17}\text{Cl}$.

בשנת 1964 שני מדענים אמריקניים ריימונד דייוויס (Raymond Davis) וג'ון באקול (John Norris Bahcall) הציעו ניסוי בחיפוש נויטרינו במטרה לבדוק את התיאוריה הסטנדרטית של השמש שהועלתה על ידי באקול ותיארה את תהליכי היתוך המתרחשים בליבת השמש. הניסוי מכונה "Homestake experiment".

הגלאי מוקם בעומק של 2073 מטר מתחת לקרקע (כדי להימנע מהרעש הצפוי מחלקיקים אחרים) הגלאי מהווה מיכל ענק המכיל 380,000 ליטר של החומר פארכלוראטילין (C_2Cl_4) המשמש כחומר ניקוי. כאשר נויטרינו אלקטרוני מתנגש באטום כלור הוא הופך אותו לאטום רדיואקטיבי של ארגון 37 (תוך כדי שחרור אלקטרון) לפי תגובה הבאה:



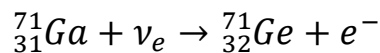
חשוב לציין שהניסוי רגיש רק לנויטרינו אלקטרוני. הנויטרינים הנוצרים בתגובה, בעלי אנרגיה נמוכה יחסית.

- שני גלאים נוספים המבוססים על תגובה עם גליום הם :

בבקסן (הנמצא בהרי קווקז שאז היה בברית המועצות)

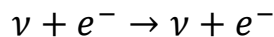
הגלאים הנמצאים מתחת לרכס הרים **גראן סאסו** שבאיטליה.

הגלאים היו מבוססים על תהליך שבו נויטרינו ניתפס על ידי אטום ${}^{71}_{31}\text{Ga}$ תוך כדי שחרור אלקטרון והפיכתו לאטום ${}^{71}_{32}\text{Ge}$:



סף הרגישות האנרגטי של הגלאי הזה נמוך יותר מסף הרגישות של הגלאי הקודם. הוא גילה ספקטרום אנרגיות רחב יותר של נויטרינו מהשמש.

2. הגלאים המבוססים על קרינת צ'רנקוב. באופן כללי אפשר לנסח את התגובה :



הסבר להיווצרות קרינת צ'רנקוב :

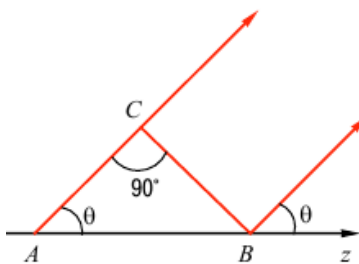
חלקיק טעון נע במהירות קבועה בתווך שקוף במהירות גבוהה ממהירות האור באותו תווך יוצר קרינה אלקטרומגנטית. הדבר בלתי אפשרי בריק, מכיוון שבריק החלקיקים לא יכולים לעבור את מהירות האור, זה נובע מתורת היחסות של איינשטיין.

מהירות האור בתווך מסוים תלויה במקדם שבירה: $v = \frac{c}{n}$ כאשר $c = 3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$ - מהירות האור בריק ו- n מקדם שבירה של תווך בו מתפשט האור.

לפי תורה קלסית של גלים חלקיק טעון הנע מהווה מקור נקודתי של גלים אלקטרומגנטיים המתפשטים לכל הכיוונים

במהירות $\frac{c}{n}$. אפשר לתאר

סכמתית :



הפרש דרכים של הקרניים היוצאות מנקודות A ו-B קובע האם התאבכות היא בונה או הורסת .

בתנאי שאפרש דרכים שווה למספר שלם של אורכי גל או 0 נוצרת התאבכות בונה, זאת אומרת הגלים מחזקים זה את זה.

באמצאות חישובים הפשוטים אפשר לחשב את הזווית שבא הגלים מחזקים אחד את השני :

$$\Delta l = \frac{c}{n} (t_A - t_B) = v_{\text{אור}} \Delta t$$

$$\Delta l = AB \cos \theta = v \Delta t \cos \theta$$

$$\frac{c}{n} \Delta t = v_{\text{חלקיק}} \Delta t \cos \theta$$

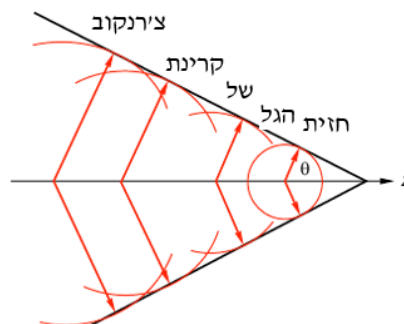
$$v_{\text{אור}} \Delta t = v_{\text{חלקיק}} \Delta t \cos \theta$$

$$v_{\text{חלקיק}} = \frac{v_{\text{אור}}}{\cos \theta}$$

מהעובדה ש- $\cos \theta \leq 1$ ומהביטוי שקיבלנו אפשר להסיק שאפקט מתקיים כאשר מהירות החלקיק גדולה ממהירות האור בחומר בעל מקדם שבירה n .

אפשר להשתמש בעקרון היגנס

הבא :



כדי להבין את התופעה

המתואר בתרשים

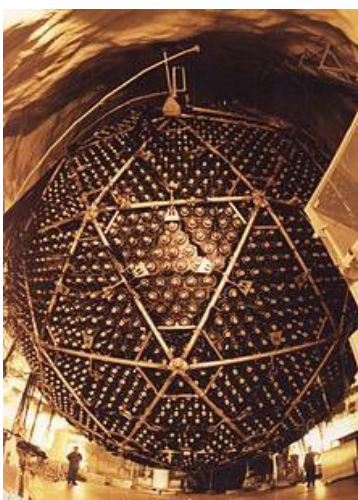
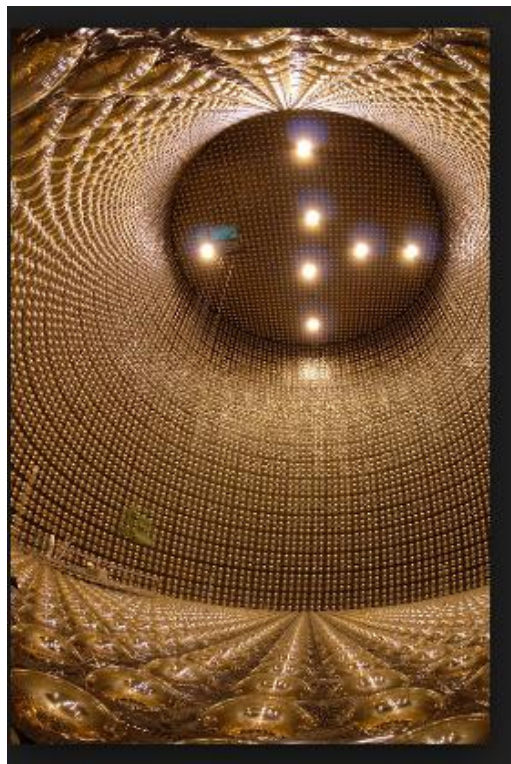
חזית הגל של קרינת צירניקוב היא משטח העבר דרך גלים משניים .

אפשר לקבל תוצאות דומות מאוד על סמך שיקולים קוונטיים .

התכונות של קרינת צירניקוב :

- בעלת ספקטרום רציף עם מקסימום בתחום סגול .
 - היא מקוטבת וכיוון הקיטוב זהה לכיוון תנועת החלקיק .
 - עוצמתה לא תלויה בחומר ולא תלויה בטמפרטורה.
- דוגמאות חשובות של הגלאים המבוסס על קרינת צ'רנקוב הם :

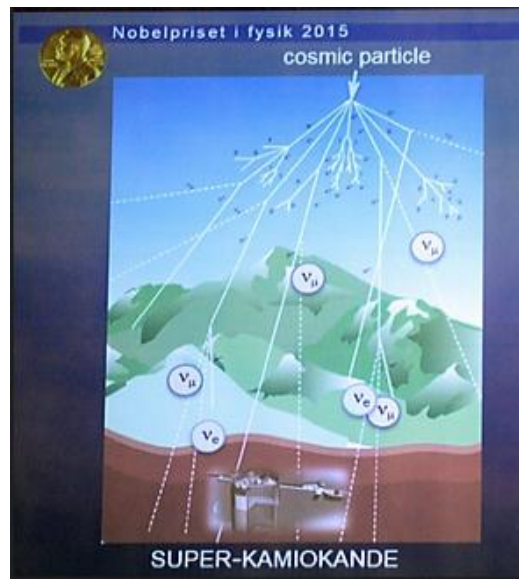
- **גלאי קמיוקנדה** שהופעל ביפן בשנת 1989. כתוצאה של התנגשות הנויטרינו עם אטומים הנמצאים במולקולת המים הגרעין של אטום נדחה והאלקטרון האף ממעטפת יצר קרינת צ'רנקוב בתוך המים .



- **גלאי סבדרי (Sudbury Neutrino Observatory)** הופעל בשנת 1999. הגלאי המבוסס על מדידות קרינת צ'רנקוב הנוצרת באינטראקציה בין נויטרינו לבין מים כבדים. בגלאי זה משתמשים בשלושה סוגים של תהליכים על מנת לאתר את הנויטרינו.
 - הראשון הוא כמתואר בגלאי המבוסס על מים טהורים.

- בתהליך השני הנויטרינו פוגע באטום הדויטריום ומשחרר אלקטרון.
 - בשלישי נויטרינו המפרק דויטריום למרכיביו (פרוטון ונויטרון).
- כל שלושת התהליכים מתבססים על הפעולה של החיישנים הרגישים לקרינת צ'רנקוב. גלאי זה מאתר את כל שלושת הסוגים של נויטרינו.

- **גלאי סופרקמיוקנדה** הופעל ביפן בשנת 1998. לממצאים שהתקבלו בגלאי הזה ישנה חשיבות מיחדת לפתרון תעלומת הנויטרינו.



- **גלאי IceCube**.

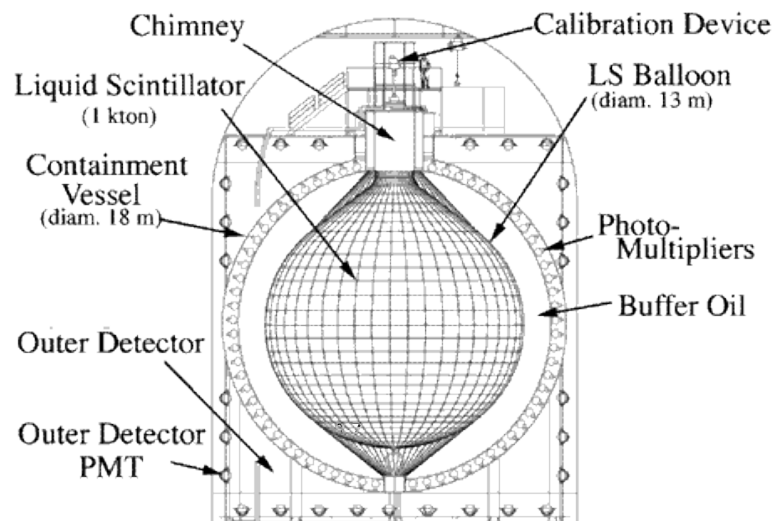
הנויטרינו בעוצמה גבוהה נדירים הרבה יותר מהנויטרינים מהשמש, כדי לזהות אותם דרוש מכשור מסדר גודל אחר. הוא צריך להיות גדול מאוד (כדי להגדיל את הסיכוי לגלות חלקיקים נדירים יחסית), וצריך להיות שקוף, כדי שהגלאים הפזורים בו יוכלו לקלוט את האור הקלוש של התפרקות הנויטרינו. המדיום המתאים ביותר הוא קרח (או מים), ולפיכך נבנה הגלאי הענקי בעומק הקרח של אנטארקטיקה, סמוך מאוד לקוטב הדרומי. הגלאי, המכונה IceCube, מורכב למעשה מ-86 מיתרים, שעל כל אחד מהם מורכבים 60 חיישני אור משוכללים, כל אחד בכדור גדול מעט מכדורסל. כל שרשרת כזו הורדה לתוך פיר שעומקו כ-2.5 ק"מ, ליצירת קובייה של קילומטר מעוקב, המורכבת מ-5,160 גלאים, וחלקה העליון שוכן קילומטר וחצי מתחת לקרקע (ראו תרשים). הגלאי

הושלם בשנת 2010. הנויטרינו יספק מידע נוסף על הקרינה הקוסמית; על פיצוצים מאוד אנרגטיים המתרחשים בחלל כמו מפרצי קרינת גמא; ועל תופעות אנרגטיות נוספות המתרחשות מחוץ לגלקסיה שלנו.



3. גלאים המבוססים על סינטילציות (scintillation).

הנויטרינו העובר דרך החומר (סינטילטור) ליינון ועירור של אטומי החור. כשהאטומים חוזרים למצב היסוד הם פוטונים של האור הנראה (הנקרא סינטילציות). חיישנים קולטים הבזקי אור ומונים אותם, ומודדים אמפליטודת של הפולסים. השיטה מאפשרת למדוד את אנרגיה של הבזקים, ולשחזר את מיקומם. הדוגמה של הגלאים העובדים לפי השיטה הזאת KamLand - גלאי הנמצא ביפן.

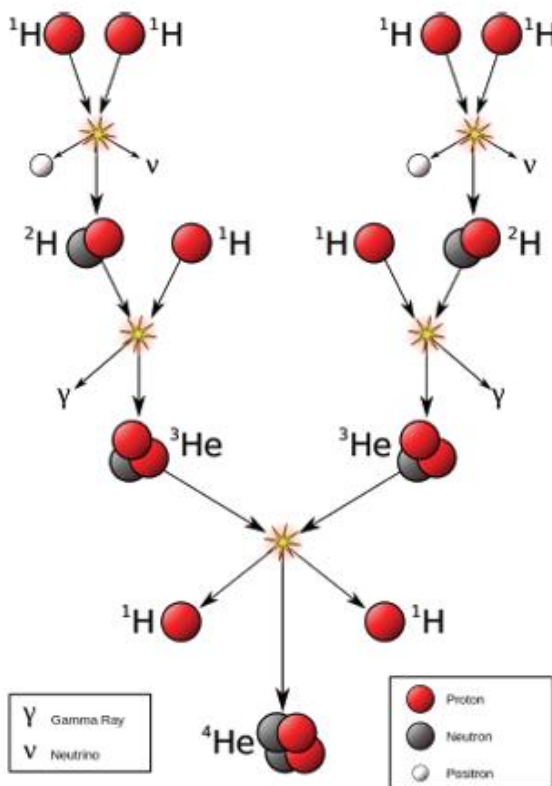


5. גילוי ניסיוני של נויטרינו.

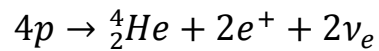
הנויטרינו התגלה ניסיונית רק בשנת 1956, על ידי צוות של פרדריק ריינס (Frederick Reines) וקלייד קוואן (Clyde Cowan) בניסויים שנערכו בכור גרעיני "סוואנה ריבר" הממוקם במדינת קרולינה דרומית שבארצות הברית (South Carolina). המקום נבחר בשל קרבתו לכור גרעיני, מכיוון שהוא מהווה מקור הפולט כמויות גדולות של חלקיקי נויטרינו. הם שימשו כגלאי מיכל גדול, שבו נמלא כ-400 ליטרים תמיסה מימית של כלוריד קדמיום. על פי תיוריה של פרמי חלקיקי נויטרינו הפוגעים בפרוטון של גרעין שמקורו במי תמיסה קדמיום כלוריד גורמים להיווצרות ניטרון ופוזיטרון. הפוזיטרון יתנגש באלקטרון שמקורו בתמיסה, שניים ייעלמו תוך כדי שחרור אנרגיה בצורת קרינת גמא. הנויטרוני הנוצר בתהליך המתואר יתלכד עם גרעין קדמיום וכתוצאה תשתחרר קרינת גמא בעלת אורך גל שונה מהקרינה הקודמת. בעזרת גלאי קרינת גמא שהותקן בדופן המיכל ניתן לאתר שתי קרינות המופיעות אחת אחר שניה במרווח זמן קצר מאוד (שבריר של שנייה). המיכל חייב להיות מבודד מחלקיקים שונים המגיעים מהכור ומהחלל שאינם חלקיקי נויטרינו. בשנת 1956 לאחר ניסויים ממושכים ומייגעים המדענים הצליחו לגלות את חלקיק נויטרינו.

נוצרים נויטרינו מהשמש.

6. איך



האנרגיה בצורת האור והחום המגיע לכדור הארץ מהשמש הינה תוצר לוואי של תהליך היתוך גרעיני של שתי מולקולות מימן ליצירת מולקולת הליום . במהלך תהליך נפלט נויטרינו . אפשר לתאר את התהליך על ידי ניסוח הבא :

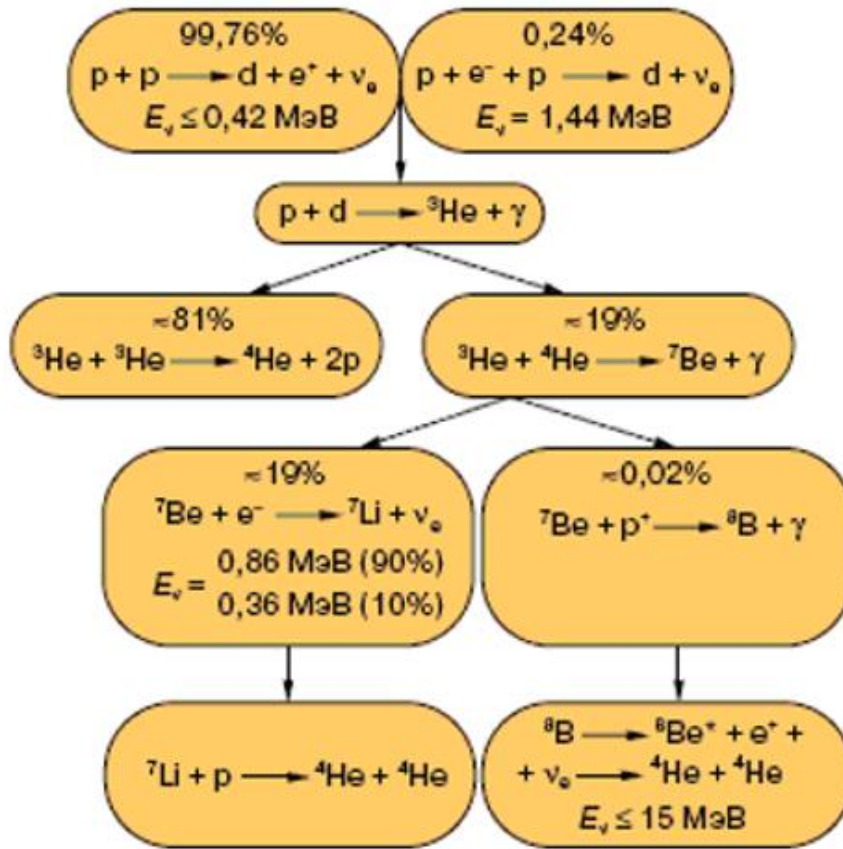


המדען האנגלי ארתור אדינגטון (Arthur Stanley Eddington) שם לב שמסת תוצרי התהליך נמוכה ממסת המגיבים לכן , לפי נוסחת איינשטיין התהליך מלווה בפליטת אנרגיה.

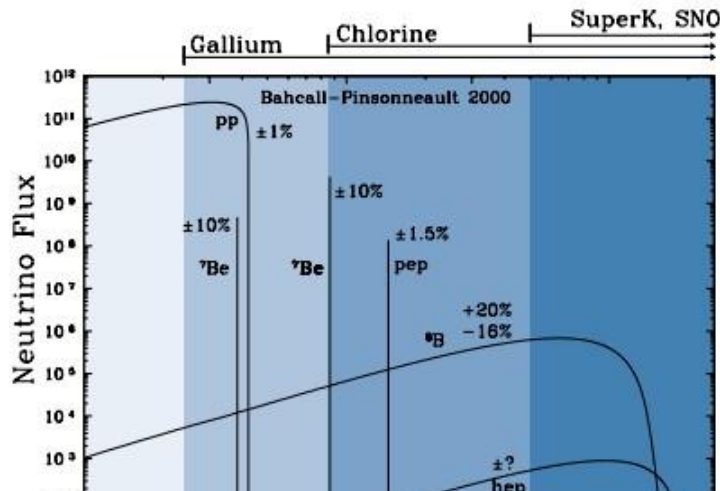
למעשה הסיכוי להתנגשות של ארבעה פרוטונים נמוך מאוד והניסוח הנ"ל מתאר את סיכות של

שרשראות
התגובות אשר
לתאר
באמצעות
הבא :

ניתן
תרשים



מהתרשים רואים שהנויטרינו הנוצרים בשרשרת ימנית המכונה שרשרת בריליום-בור הם בעלי אנרגיה גבוהה יחסית לנויטרינו הנוצרים בשרשרת השמאלית, שרשרת פרוטון-פרוטון. אבל האחוז גדול יותר באופן משמעותי של נויטרינו נוצר בשרשרת פרוטון-פרוטון. התפלגות האנרגיות ניתנת על ידי גרף :



10^{38} חלקיקי נויטרינו, בערך, נפלטים כל שנייה מהשמש, זאת אומרת $7 \cdot 10^{10}$ נויטרינו עוברים דרך כל סנטימטר מרובע של כדור הארץ. אבל אנו לא מרגישים אותם מכיוון שנויטרינו כמעט לא מגיבים עם החומר דרכו הוא עובר.

האינטראקציה החלשה של הנויטרינו עם חומר מאפשרת לקבל מידע ישיר על מקום היווצרם. נויטרינו מהשמש נושאים עמם מידע חשוב על התנאים במרכזו. ומדידות של אנרגיות הנויטרינו מהשמש והשטף שלהם מאפשרות לחקור המבנה הפנימי של השמש.

7. תעלומה של נויטרינו.

באמצעות התיאוריה באקול חישוב את מספר נויטרינו מן השמש. לפי החישובים רוב נויטרינו נוצרים בתגובת היתוך של פרוטונים. בניסוי למדידת השטף הנויטרינו מהשמש ריימונד דייוויס וגיון באקול הצליחו לתפוש נויטרינו, אבל מספרם היה קטן כמעט פי 3 ממספר המחושב. הוצעו שלוש סיבות אפשריות לאי התאמה:

1. שגיאות בחישוב נויטרינו הנובע ממודל לא נכון של שמש.
2. שגיאת משמעותית בניסוי.
3. התנהגות שונה של נויטרינו במעבר משמש לכדור הארץ.

הבדיקה בקפדנות פסלה את שתי אפשרויות ראשונות.

הפתרון לבעיה הוצע על ידי גריבוב (Roman Gribov) ופונטוקורבו (Bruno Pontokorvo) בשנת 1969 ואומת בניסויים בשנת 2002. גריבוב ופונטוקורבו הניחו שבדרך מהשמש לכדור הארץ, שני שלישים מהנויטרינו משנים את זהותם כתוצאה מאוסצילציות.

8. פתרון הבעיה.

כמות הנויטרינו שהצליחו למדוד בגלאי סופר קמיוקנדה היה רק מחצית מהכמות המצופה. לא נפתרה בעיית תעלומת נויטרינו.

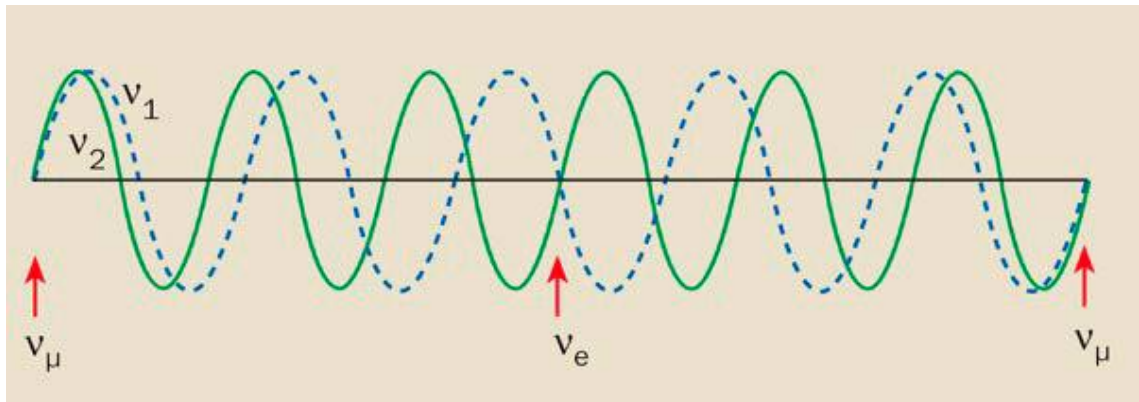
ביוני של 2001 קבוצה של פיזיקאים אמריקאים ויפנים הכריזה שנפתרה תעלומה של נויטרינו מהשמש. הם התבססו על התוצאות שהתקבלו במצפה הנויטרינו באגן סאדברי שבקנדה.

התוצאות של המדידות שנערכו במצפה סאדברי הוכיחו שהנויטרינו במעבר משמש לכדור הארץ משנים את זהותם. הנויטרינו האלקטרוני הנוצר בליבת השמש הופך לנויטרינו המיואוני ν_μ ולנויטרינו הטאואוני ν_τ . התהליך נקרא תנודות (אוסצילציות) של נויטרינו.

קיום תנודות של נויטרינו אפשרי רק בתנאי שנויטרינו הם חלקיקים בעלי מסה.

הסיבה לאוסצילציות של הנויטרינו היא שלנויטרינו בעל סוג מסוים כגון אלקטרוני, אין מסה קבועה. זהו סופרפוזיציה של מצבי הנויטרינו בעלי מסות שונות, אך מוגדרות: ν_1, ν_2, ν_3 . הנויטרינו המיואוני - גם סופרפוזיציה של אותם ν_1, ν_2, ν_3 , רק סופרפוזיציה שונה. בתגובות גרעיניות נוצרים נויטרינים מסוג אחד, אבל מופצים בחלל נויטרינים בעלי מסה מסוימת.

כאשר נוצר הנויטרינו האלקטרוני טהור, שלושת המרכיבי המסה שלו מסונכרנים אחד עם השני. במשך התנועה הסנכרון מופר, והנויטרינו אלקטרוני רוכש מידה מסוימת תכונות של הנויטרינו המיואוני. חוסר איזון התואר לעיל יכול להתרחש רק אם שלושת המצבים ν_1, ν_2, ν_3 בעלי תדרים מרחביים שונים, ובכך המסות שונות

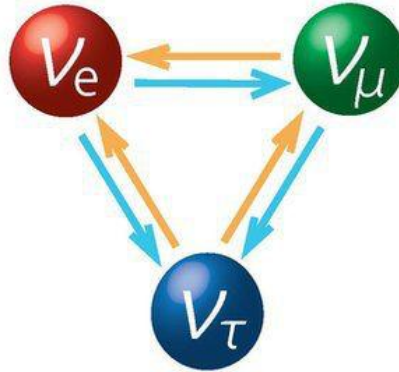


איור 1. נויטרינו מיואוני הופך לנויטרינו אלקטרוני.

התצפית הניסיונית של התנודות - היא הוכחה לכך שלנויטרינו יש מסה, וכי המסות הן שונות. מדידת עוצמה והתדירות התנודות יאפשר לגלות את ההבדל בין המסות, והפרמטרים של סופרפוזיציות של הנויטרינו. המהות המיקרוסקופית של התופעה זו היא דמיון לערבוב קוורקים, רק תנודות הקוורק מתרחש במרחקים קצרים מאוד ולכן לא ניתן לצפתו,

אוסצילציות של הנויטרינו, המופץ למרחקים גדולים, בקני מידה של קילומטרים מאפשר לזהות את התופעה .

מניסויים עולה, כי חלקיקי הנויטרינו משנים את סוגם בתהליך הנקרא אפקט מיקיב - סמירנוב-וולפנסטיין (באנגלית Mikheyev-Smirnov-Wolfenstein effect). מדידות אלו נמצאות בהתאמה נפלאה למודל הסטנדרטי של השמש.



גילוי מהפכני שהנויטרינו הוא חלקיק בעל מסה נוגד למודל הסטנדרטי, שדורש שמסתו של הנויטרינו תהיה אפסית. הגילוי חשף את הדרכים החדשות לפיתוח המודל הסטנדרטי . שאלות הבאות שעליהן יש לענות למדענים הן :

- מהי מסתו של הנויטרינו?
- מדוע הם כל – כך קלים?
- האם קיימים סוגים נוספים של נויטרינו?
- האם הנויטרינו הם גם האנטינויטרינו של עצמם?
- במה הם נבדלים מחלקיקים אחרים?

התגלויות החדשות ישנו את ההבנה שלנו של היסטוריה, מבנה והעתיד של יקומינו.

Bibliography

Bahcall, J. N. (2004). *Solving the Mystery of the Missing Neutrinos*. www.nobelprize.org.

Pontecorvo, B. M. (1967). *Neutrino experiments and the problem of conservation of leptonic charge*.
Moscow: Zh.Exp.Teor.Fiz.

W.Pauli. (1933). *Rapports de Physique Solvay*. Brussel.

ו.פאולי. (1931). *מכתב ל...*

-
- אלפרד נובל.. ויקיפדיה, האנציקלופדיה החופשית.
https://he.wikipedia.org/w/index.php?title=%D7%90%D7%9C%D7%A4%D7%A8%D7%93_%D7%A0%D7%95%D7%91%D7%9C&oldid=19307372.
- המודל הסטנדרטי. ויקיפדיה, האנציקלופדיה החופשית.
https://he.wikipedia.org/w/index.php?title=%D7%94%D7%9E%D7%95%D7%93%D7%9C_%D7%94%D7%A1%D7%98%D7%A0%D7%93%D7%A8%D7%98%D7%99&oldid=18692749
- נייטרינו. ויקיפדיה, האנציקלופדיה החופשית.
<https://he.wikipedia.org/w/index.php?title=%D7%A0%D7%99%D7%99%D7%98%D7%A8%D7%99%D7%A0%D7%95&oldid=18526518> .
- גלאי נייטרינו. (2014, יוני 20). ויקיפדיה, האנציקלופדיה החופשית.
https://he.wikipedia.org/w/index.php?title=%D7%92%D7%9C%D7%90%D7%99_%D7%A0%D7%99%D7%99%D7%98%D7%A8%D7%99%D7%A0%D7%95&oldid=18731492
- אסטרופיזיקה של נייטרינו: כלי חדש לחקר היקום
http://www.google.co.il/url?sa=t&rct=j&q=&esrc=s&source=web&cd=3&ved=0ahUKEwi9zZji2JHQAhXEcRQKHdRGD78QFggrMAI&url=http%3A%2F%2Fptc.weizmann.ac.il%2F_Uploads%2FdbstatchedFiles%2F12-17.pdf&usg=AFQjCNFy0cEmI0J3EmhlaoigtEBITgdLzw
- קרינת צ'רנקוב. (2015, מאי 9). ויקיפדיה, האנציקלופדיה החופשית.
https://he.wikipedia.org/w/index.php?title=%D7%A7%D7%A8%D7%99%D7%A0%D7%AA_%D7%A6%27%D7%A8%D7%A0%D7%A7%D7%95%D7%91&oldid=19461248.