

עבודת גמר לבגרות

במסגרת תוכנית אלפא ירושלים

תחום דעת פיזיקה

נושא: מדידת קרינת ניטרينو קוסמית בעזרת שינויים בבסיס המיקום או המסה

מוגש על ידי זמר בריס

מספר תעודת זהות 331230110

כתובת רבי טרפון 8

דוא"ל zemer.baris@gmail.com

טלפון 0546663231

ביה"ס שפע מקור חיים

סמל בית ספר 615948

כיתה י"א

העבודה בוצעה באוניברסיטה העברית בהנחיית נועם חי

במעבדה של פרופסור מיכאל סמולקין

המעבדה לפיזיקה באנרגיות גבוהות



משרד החינוך

תוכן עניינים

3.....	תודות
4.....	חווייה אישית
5.....	תקציר
6.....	מבוא
6.....	תכונות הנייטריו
9.....	הופעת הנייטריו במדעים
10.....	קרינת הרקע הקוסמית
11.....	מדידת נייטריו
15.....	חקירה של חלקיקים בפיזיקה קוונטית
16.....	מטרת המחקר
16.....	שאלת המחקר
16.....	השערה
17.....	שיטות
17.....	הגדרת הסימולציה והצבת גבולות
19.....	חישוב ההזזה בזמן של משוואת שרדינגר
19.....	שיטת קראנק ניקלסון
20.....	טרנספורם פוריה מדורג (split step fourier transfrom)
22.....	תוצאות
22.....	פוטנציאל מדרגה
23.....	עיגול ורנדומליות
23.....	עיגול
24.....	רנדומליות
30.....	דיון
33.....	בביליוגרפיה

תודות

עבודת המחקר באלפא היתה אחד הדברים המאתגרים שיצא לי לעשות. אני רוצה להודות לכמה אנשים שעזרו לי לעבור את החוויה המאתגרת הזאת. ראשית לצוות התכנית שעזרו לי להגיע לרמת מחקר שלא דימינתי בחיי שאגיע אליה. לדוקטור יעל אברהם ולרכז דוקטור קית' האריס שעזרו לי רבות לחדד את הכתיבה והניסוח ובכך את הרמה של המחקר. תודה לכל צוות התוכנית ובין השאר לאלון ולכל שאר העוסקים בדבר שעזרו לתכנית הזאת להיות החוויה הטובה ביותר שהיא יכולה להיות.

תודה לחבריי לתוכנית וספציפית חברי למעבדה שעזרו לי רבות עם המתמטיקה והתכנות המסובכים כשלא הבנתי מה קורה ועזרו לי בכתיבה. לאורי על ששלח לי קודים מתוקנים כל פעם שהיה לי קושי בתכנות. ולדוד שעזר לי הרבה עם המתמטיקה המסובכת. תודה לכל מי ששלחתי לו את המחקר להערות וקיבלתי תגובות מועילות מאוד.

תודה לבית הספר שלי שלמרות הקושי הניכר שיחררו אותי להשתתף בכל הנוגע לתוכנית ותמכו בי בכתיבה לכל המורים שהתעניינו קראו והגיבו למחקר ועזרו לי במה שהם יכלו. תודה מיוחדת לרב אייל נתיב שהתוכנית שלו בבית הספר "בית מדרש של חול" היתה ההזדמנות הראשונה שלי במחקר מדעי ועזרה לי לפתח כלים בכתיבה מחקר ולמידה ברמה גבוהה. הלקחים מהתוכנית עדיין מלווים אותי במחקר הזה. הרב אייל ליווה גם את המחקר הזה ועזר לי בכתיבה ושמירת הזמנים.

תודה אחרונה לנעם שהנחה את המחקר. נועם עזר לי המון עם המחקר ועם שיפור כללי של היכולות שלי בחשיבה של מדעים ופיזיקה. נועם עזר גם ללמוד את החומר במתמטיקה ופיזיקה ובתכנות כל זה בזמן נמוך תוך שהוא נותן כמות גדולה מזמנו להסביר שוב ושוב את אותו הנושא. במהלך המחקר נעזרתי המון בנעם במדעי ובכתיבה ונעם תמך ברעיונות שהיה לי לכיוון המחקר ולדרכי העבודה. כאשר התעכבתי עם החומר ופיגרתי בעבודה נעם עזר לי מאוד להגיע מהר חזרה לרמה. וכל זה כמובן ברגע ובלי כעסים רק בעזרה לשיפור המחקר והחוויה של התכנית. וכמובן תודה רבה אחרונה לנעם על הסיורים שהוא אירגן לנו. הסיורים האלו היו ערך מוסף לחווית המחקר שנעם נתן מדעתו האישית לנו והעלה את החוויה של התוכנית בכמה רמות.

חוויה אישית

שמעתי על התוכנית מדוד נחשוני ילד בבית הספר שלי שדיבר איתי כמה פעמים והחליט שהתוכנית מתאימה לי מאוד. לא מאוד התחברתי לרעיון של תוכנית מחוץ לבית הספר ולא הכרתי אותו מספיק ולכן לא נרשמתי. דוד נחשוני המשיך לנסות ולשכנע אותי ולבסוף ביום האחרון להרשמה שוכנעתי ונרשמתי לתוכנית. ידעתי שאני רוצה לעסוק בפיזיקה הנושא עניין אותי כבר המון זמן. לאחר המחנה הראשון קיבלתי את המעבדה שרציתי בפיזיקה קוונטית ולמדתי דרך נועם חי המנחה שלי שיעורי בסיס במתמטיקה פיזיקה ותכנות. במהלך התוכנית למדתי להתמודד עם דחיות ותיקונים. ללמוד חומר ברמה גבוהה וכתובה ברמה מדעית. התוכנית כמובן גם כוללת חלק חברתי שנהניתי ממנו מאוד. חווית המחקר הייתה מהדברים המאתגרים שיצאו לי לעשות ובזכות הנחייה המעולה בתוכנית היא הייתה גם מהחוויות המהנות שיצאו לי לעשות. המחקר הזה הוא גדול יותר משדמיינתי שאוכל להגיע אליו במהלך מחקר בתיכון והידע שרכשתי הוא גדול בהרבה ממה שחשבתי שאגיע אליו. במהלך המחקר זכיתי גם לפגוש ולדבר עם אנשים בקומה לאנרגיות גבוהות שעזרו בכיווני מחקר וקיבלו אותנו התלמידים מאלפא בידיים פתוחות ועזרו לנו במחקר והתעניינו. אני שמח שזכיתי להשתתף בתוכנית הזאת ושבחרתי בכל זאת להירשם ולהיות מסוגל לעבור את החוויה הזאת.

תקציר

לאחר גילוי תיאורית המפץ הגדול קוסמולוגים חישבו כי ישנם חלקיקים חופשיים ביקום, אלה נקראים קרינת הרקע. בשנת 1964 הוכיחו שני פיזיקאים בזמן בניית אנטנה כי ישנה קרינה אלקטרומגנטית של חלקיקים המגיע באופן שווה מכל כיוון ובכך נתנו תמיכה משמעותית לתיאורית המפץ הגדול. משוער בקרב הקוסמולוגים כי חלקיקי נייטרינו מהמפץ הגדול גם הם מסתובבים בחופשיות ביקום ומגיעים באופן שווה מכל הכיוונים. חלקיקי נייטרינו מבצעים אינטראקציות חלשות מאוד עם חומרים וכוחות ברחבי היקום ועל כן קשה מאוד למדודם. פיזיקאים משערים כי חלקיקים אלו שמייצרים קרינה נמצאים בכמויות אדירות ברחבי היקום. עם זאת עוד לא נמדדה קרינת הנייטרינו הקוסמית ולא הוכח קיומה. דברים רבים לגבי התופעה לא ידועים לנו. במחקר התמקדתי בתופעה כי כאשר ישנו הפרש בין חלקיקי נייטרינו לאנטי נייטרינו בנקודה במרחב נוצר שם כוח-חלש שניתן למדוד. על מנת להפריד את חלקיקי הנייטרינו מהאנטי נייטרינו ניתן להציב חומר שיבצע אינטראקציה עם הקרינה ויפריד את החלקיקים. במחקר ניסיתי לבדוק איזה צורה של החומר היא אופטימלית למטרה זאת. במהלך המחקר השתמשתי בסימולציות על מנת למדל את האינטראקציה בין החלקיקים לחומר שאני מציב. את הסימולציות הרצתי לרוב בשני ממדים ושינתי את צורות החומר על מנת לבדוק את ההשפעה על עוצמת הכוח הנוצר. התחלתי מלהריץ את הסימולציה על עיגול ולאחר מכן שינתי את הצורה עם הפרעות רנדומליות על מנת למצוא צורות מיוחדות. מצאתי כי ככלל צורות עם כמות גבוהה של נקודות רנדומליות מפוזרות במרחב מייצרות כוח חזק יותר אך מפוזר מאוד. צורות ספציפיות מייצרות צורות כוח מעניינות ולא צפויות.

מבוא:

קיומו של הנייטרינו שוער לראשונה כאשר נמדד הפרש בין כמות האנרגיה הנפלטת בהתפרקות רדיואקטיבית לבין חישובי האנרגיה הצפויה להיפלט בתהליך. כתוצאה מן ההפרש שיער וולפגאנג פאולי כי ישנו חלקיק המבטא את האנרגיה העודפת. לחלקיק זה קרא נייטרינו שמשמעו חלקיק קטן. במהלך המפץ הגדול התבצעו תהליכים של התפרקות רדיואקטיבית שמשוער כי פלטו כמויות אדירות של נייטרינו. חלקיקים אלו מכונים קרינת הנייטרינו הקוסמית.

קיומם של חלקיקי נייטרינו קוסמיים (relic neutrino) שוער לראשונה על ידי שלושה פיזיקאים בשנת 1948². בהמשך ניתן לחלקיקי נייטרינו קוסמיים שנוצרו במפץ הגדול השם קרינת הנייטרינו הקוסמית (ν B). בימינו הקהילה המדעית מתייחסת לקרינת הנייטרינו כעובדה. עם זאת עוד לא התבצע עדין ניסוי המודד את קרינת הנייטרינו הקוסמית. מדידה של קרינת הנייטרינו הקוסמית תוכל לתת לנו מידע לגביי שלבים מוקדמים יותר של המפץ הגדול מאלה שאנו יודעים עליהם כיום. ישנם כמה הצעות כיצד למדוד את קרינת הנייטרינו הקוסמית. במחקר זה אתמקד באחת השיטות המוצעות. בשיטה משתמשים באי סימטריה של אינטרקציה בין נייטרינו ואנטי נייטרינו לכוחות הפועלים עליו. במחקר אנסה לחשב את הצורה האופטימלית של חומר על מנת להפריד את הנייטרינו מהאנטי נייטרינו.

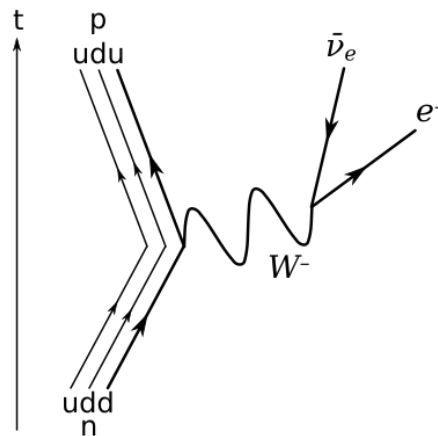
תכונות הנייטרינו:

על מנת למדוד את קרינת הנייטרינו הקוסמית נתאר את הנייטרינו ותכונותיו. נתחיל בתיאור החלקיקים היסודיים שהנייטרינו בכללם. חלקיקים יסודיים הינם אבני היסוד של החומר והאנרגיה ביקום. חלקיקים אלו נחשבים אבני היסוד מכיוון שלמיטב לידיעתנו הם אינם ניתנים לחלוקה. התיאוריה המתארת את החלקיקים היסודיים והאינטראקציות ביניהם נקראת המודל הסטנדרטי. במודל הסטנדרטי ישנם 16¹ חלקיקים יסודיים. החלקיקים היסודיים מחולקים למשפחות לפי אפיונים שונים. שתי המשפחות המרכזיות של חלקיקים יסודיים מכונות בוזונים ופרמיונים. הבוזונים והפרמיונים נבדלים זה מזה בספין של החלקיק, הספין מתאר את רמת החופש הפנימית של החלקיק. הבוזונים מתבטאים כאנרגיה והפרמיונים הם צורות של חומר. הנייטרינו הינו חלקיק יסודי מקבוצת הפרמיונים.

¹ ישנם 16 חלקיקים יסודיים לא כולל בוזון ההיגס.

אחד החלקיקים במודל הסטנדרטי הינו הנייטרינו. וולפגאנג פאולי היה הראשון ששיער את קיום הנייטרינו בשנת 1930. פאולי שיער כי הנייטרינו הינו התבטאות של האנרגיה העודפת בתהליך ההתפרקות רדיואקטיבית. התפרקות רדיואקטיבית הינה התהליך בו חומר פולט קרינת בטא. בתהליך פרוטון מגרעין האטום פולט אלקטרון ואנטי נייטרינו והופך לפרוטון (משוואה 1)

$$n \rightarrow p + e^- + \bar{\nu}_e \text{ (משוואה 1)}$$



איור 1 דיאגרמת פיינמן לתיאור תהליך התפרקות רדיואקטיבית

התפרקות רדיואקטיבית מתקיימת באופן ספונטני באיזוטופים של אורניום. לאחר גילוי התהליך בו איזוטופ אורניום פולט אלקטרונים באופן ספונטני ההבנה היתה שבאטום מתבצע תהליך של פליטת אלקטרון כאשר ניוטרון הופך לפרוטון (משוואה 2)

$$n \rightarrow p + e^- \text{ (משוואה 2)}$$

מדידות הראו כי ישנו פער בין כמות האנרגיה שאמורה להיות לאלקטרון לבין זו שנמדדה. את הפער הסביר וולפגאנג פאולי בתור חלקיק נוסף אותו כינה נייטרינו. החלקיק נקרא נייטרינו - ניוטרון קטן עקב המסה הנמוכה של החלקיק המשווער. לאחר פרסום הממצאים חישב אנריקו פרמי את תכונותיו של החלקיק. הוא חישב את מכלול האינטראקציות האפשריות לנייטרינו והראה שהסבירות לאינטרקציה בין הנייטרינו לבין כל חומר אחר נמוך עד כדי בלתי אפשרי. עקב כך אמר פרמי כי לא ניתן לזהות את הנייטרינו ותכונותיו ועל כן לא ניתן למדוד אותו. על אף הקביעה של פרמי בשנת 1956 נמדד ברוסיה אנטי נייטרינו³. האנטי נייטרינו נוצר בתהליך של ביקוע גרעיני במהלך פיצוץ מבוקר של פצצת אטום. תהליך ביקוע גרעיני הוא תהליך בו מתבצע התפרקות רדיואקטיבית עוצמתית שאיפשרה את המדידה של האנטי נייטרינו והוכחת קיומו של החלקיק. מדידת האנטי נייטרינו פתחה

את האפשרות למדוד את קרינת הנייטרينو הקוסמית. עם זאת עדין לא נתבצעה מדידה של קרינה זו.

הנייטרינו הינו חלקיק יסודי. על מנת לחקור את התנהגות הנייטרינו נתאר את תכונותיו ואת האינטרקציות בינו לבין כוחות במודל הסטנדרטי. מסה של חלקיקים נמדדת באלקטרון וולט (ev) אלקטרון וולט היא יחידה של אנרגיה מכיוון שישנו יחס המרה בין מסה לאנרגיה ניתן למדוד את מסת החלקיקים באנרגיה השקולה להם.

$$E = M * \frac{1}{c^2} \text{ כאשר } c \text{ הוא קבוע מהירות האור בריק (משוואה 3)}$$

לנייטרינו מסת מנוחה של 0.12 אלקטרון וולט⁴. הספין הינו תכונה של החלקיקים המתארת את האינטרקציה של החלקיק עם הכוחות שפועלים עליו. חישוב של הספין של חלקיק הינו תהליך מסובך במחקר זה אסתמך על מחקרים קודמים המחשבים את הספין והשפעתו על אינטרקציות. הספין נמדד בתנע זוויתי חלקי קבוע פלאנק (משוואה 4). לנייטרינו ישנו ספין של $0.5\hbar$ ⁴.

$$\hbar = \frac{2\pi}{h} \text{ כאשר } h \text{ הינו קבוע פלאנק (משוואה 4).}$$

תכונה נוספת של חלקיקים יסודיים הינה המטען האלקטרומגנטי שלהם המתאר את הדרך בה הם מבצעים אינטרקציה עם הכוח האלקטרומגנטי. מטען אלקטרומגנטי אפס משמעו שהחלקיק אינו מבצע אינטרקציות בהשפעת הכוח האלקטרומגנטי. המטען האלקטרו מגנטי של הנייטרינו הינו אפס. הנייטרינו משתייך לקבוצת הלפטונים. קבוצת הלפטונים היא תת קבוצה של הפרמיונים. המילה לפטונים מגיעה מהמילה לפטוס - בתרגום מילולי קל או קטן. השם הזה אינו מדויק אך ניתן לקבוצה לפני גילוי המסה של המיואון^{***}. קבוצת הפרמיונים מאופינת בספין חצי שלם. קבוצת הפרמיונים הינה קבוצת החלקיקים הייסודיים המתארים את מרכיבי החומר. קבוצת הלפטונים הינה קבוצה של כל הפרמיונים בעלי המטען האלקטרו-מגנטי השלם (אפס הינו מספר שלם). לאלקטרון מיואון וטאו שהם החלקיקים האחרים בקבוצת הלפטונים מטען אלקטרו מגנטי של מינוס אחד לאנטי החלקיקים שלהם בהתאמה מטען של אחד. אחד התכונות המרכזיות של הלפטונים הינו שהם אינם מבצעים אינטרקציות בכוח החזק. הכוח החזק הוא אחד מבין ארבעת הכוחות הבסיסיים של המודל הסטנדרטי. הכוח החזק הוא הכוח המאגד חלקיקים יסודיים על מנת לבנות את הניוטונים והפרוטונים. האלקטרון המיואון והטאו מבצעים אינטרקציות בשלושת הכוחות האחרים: הכוח החלש,

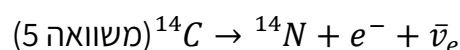
^{***}המיואון הינו לפטון בעל מסה של 105 Mev/c פי 875 אלף ev מאשר הנייטרינו

כוח הכבידה והכוח האלקטרומגנטי. הנייטרינו מבצע אינטרקציות רק עם שניים מהכוחות: החלש והכבידה.⁵

אחת התכונות המיוחדות בנייטרינו נקראת טעמים. טעמים הינם וריאציות שונות של הנייטרינו בעלי תכונות שונות.⁶ בין השאר המסה של טעמי נייטרינו שונים אינה שווה. לכל אחד מן הטעמים ישנו שם המקביל ללפטון אחר: נייטרינו אלקטרוני, נייטרינו מיואני ונייטרינו טאו. לכל אחד מן הטעמים האלו אנטי חלקיק מותאם. בעבודה זו אנו נתייחס לנייטרינו במצב ניטרלי ללא התייחסות לטעמים שלו. במחקר זה אתמקד רק באי הסימטריה שבין האינטרקציה של הנייטרינו והאנטי נייטרינו עם הכוח החלש. עקב זאת לא אתייחס לטעמים השונים ותכונותיהם במחקר על מנת לחסוך כוח חישוב וסיבוכים מיותרים שניתן להזניח. את הנייטרינו אסמן באות היוונית ν ואת האנטי נייטרינו נסמן ב $\bar{\nu}$. את טעם החלקיק ניתן לסמן בעזרת כתב תחתית עם הסימון של הלפטון המתאים. במחקר זה נתעלם מהבדל הטעמים של הנייטרינו.

הופעת הנייטרינו במדעים

הנייטרינו מופיע בכל תהליך מדעי הכולל התפרקות רדיואקטיבית. דוגמא לתהליך היא ההתפרקות הרדיואקטיבית של פחמן 14 הנוצר בטבע באופן טבעי. איזוטופ פחמן 14 אינו יציב והוא מתפרק לחנקן 14 בתהליך פליטת אלקטרון ואנטי נייטרינו (משוואה 5)



. זמן מחצית חיים של הפחמן הוא כ־5370 שנים (זמן זה הוא הזמן שבו לוקח למחצית מכמות האיזוטופ פחמן 14 להתפרק), זמן מחצית חיים ארוך זה משמש ביעילות לאיתור הגיל של הפחמן ועל ידי כך של החומר שאנו רוצים לשער את זמן קיומו. הנייטרינו נפוץ בתהליכים קוסמולוגיים רבים. הנייטרינו הוא חלק משמעותי בתהליך של היתוך גרעיני וביקוע גרעיני. דוגמא נפוצה היא השמש שלנו שמייצרת כמויות אדירות של נייטרינו. נייטרינו המיוצר על ידי השמש מכונה נייטרינו סולארי. בתחילת שנות השבעים התחילה ההקמה של גלאי נייטרינו ביפן.⁸ בין התאריכים ה־31 במאי 1996 וה־25 במרץ 1998 גלאי הנייטרינו ביפן מדד את כמות הנייטרינו האלקטרוני המגיע לכדור הארץ מן החלל. התוצאות הראו כי השמש מבצעת היתוך גרעיני הפולט נייטרינו כצפוי. בהמשך התגלו עוד תופעות קוסמולוגיות רבות המערבות נייטרינו. אחת מהן היא תופעת הסופרנובה. אסטרופיזיקאים שיערו כי

ספרונובה מייצרת כמויות גדולות של נייטרינו. בשנת 1987 מדדה קבוצת חוקרים נייטרינו מהסופרנובה A.1987⁹. מדידה זו הוכיחה כי תהליך הסופרנובה כולל ביקוע גרעיני.

קרינת הרקע הקוסמית.

מטרת המחקר שלפניכם היא ליעל תהליך של מדידת קרינת הנייטרינו הקוסמית. משוער כי קרינת הנייטרינו הקוסמית הינה חלק מתהליך המפץ הגדול. על פי ההשערה בחלקיקי שניות הראשונות למפץ הגדול נוצרו כמויות אדירות של נייטרינו. חלקיקים אלו ממשיכים להתקיים ביקום והם קרינת הנייטרינו הקוסמית. על פי תיאורית המפץ הגדול ותורת היחסות היקום מתרחב נהוג להגיד כי **יריעת המרחב-זמן נמתחת**. בהנחה כי קרינת הנייטרינו הקוסמית קיימת בתכונות שאנו מצפים ממנה הנייטרינו בקרינה יימתח עם המרחב-זמן. התוצאה היא חלקיקי נייטרינו בעלי רמת אנרגיה נמוכה מאוד¹. משוער כי הטמפרטורה של קרינת הנייטרינו הקוסמית היא בממוצע $1.6 \cdot 10^{-6}$ מעלות קלווין.

מדידה של קרינת הנייטרינו הקוסמית יכולה לאושש פרטים לגביי תיאורית המפץ הגדול ואף לעזור לייצר חישובים מדויקים יותר לגבי היקום המוקדם. ניתן ללמוד על התועלת במדידת קרינת הנייטרינו הקוסמית מקרינת הרקע. קרינת הרקע הקוסמית הינה קרינה שנוצרה כמה שניות לאחר קרינת הנייטרינו. קרינת הרקע היא קרינה אלקטרו-מגנטית ונמדדה לראשונה בשנת 1964¹¹. מדידת קרינת הרקע הקוסמית נחשבת לאחת ההוכחות המוצקות ביותר של תיאורית המפץ הגדול¹². עצם קיומה של קרינת רקע קוסמית אישש את הקיום של יקום מוקדם דחוס ולוהט מאוד². חישובים שהתבצעו בשנים לאחר הגילוי לגביי מבנה היקום המוקדם שמיצר קרינה מהסוג הזה התחברו טוב מאוד לתיאוריות קוסמולוגיות שנוצרו בסוף המאה העשרים. מדידות מדויקות יותר של הטמפרטורה ואורכי הגל הקיימים בקרינת הרקע הקוסמית עזרו רבות לדייק את המודלים הקוסמולוגיים הנפוצים בימינו. מדידה של קרינת הנייטרינו תוכל לתת לנו מידע לגבי היקום בחלקים אף יותר מוקדמים שלו. ניתן לשער כי קרינת הנייטרינו הקוסמית מושפעת בצורה נמוכה מאוד מתהליכים מאוחרים ויחסית לעצמים רבים אחרים שנוצרו קרוב למפץ הגדול יש בקרינת הנייטרינו הקוסמית יחסית מעט הפרעות כגון אינטרקציה עם פלנטות ומסות אחרות שנוצרות עקב תהליכים קוסמולוגיים מאוחרים.

מדידת נייטרינו

מדידת הנייטרינו הינו תהליך מסובך מכמה סיבות. מדידת חלקיק מתבצעת באמצעות ההשפעה שלו על חלקיקים אחרים בסביבתו. הנייטרינו מבצע אינטרקציות חלשות ונדירות עם הסביבה בשתי כוחות בלבד (הכוח החלש וכוח הכבידה). שני הכוחות הללו הינם הכוחות החלשים ביותר בטבע והכוח החלש פועל למרחקים קצרים בלבד. ועל כן קשה למדוד את השפעתו. הנייטרינו הינו החלקיק בעל המסה הנמוכה ביותר מבין החלקיקים בעלי מסה** ועל כן תהליכים הקשורים בכבידה ומסה חלשים מאוד וקשה למדודם.

ישנן כמה צורות שהוצעו במשך השנים למדידה של חלקיקי נייטרינו. השיטה הראשונה מתבססת על תהליכי דעיכה רדיואקטיבית ובה הוכיחו את קיומו של חלקיק האנטי נייטרינו. השיטה השנייה מתבססת על תופעה הנקראת קרינת צרנקוב בה חלקיקים במהירויות גבוהות פולטים חלקיקים כבדים באינטרקציה עם חומר. ישנה אופציה שלישית לגביי מדידה של נייטרינו והיא משתמשת בכוח הנוצר מפער בין כמות הנייטרינו לאנטי נייטרינו בנקודה במרחב. האופציה השלישית נשארה כיום בגדר תיאוריה בלבד ועוד לא נוצר גלאי המשתמש ברעיון זה שמדד נייטרינו. במחקר זה אנסה למצוא דרך להגדיר צורה להפרדת הנייטרינו מהאנטי נייטרינו בגלאים מסוג זה כך שהכוח הנוצר יהיה מדיד.

השיטה הראשונה מנצלת את תהליך ההתפרקות הרדיואקטיבית על מנת למדוד את הנייטרינו. תהליך דעיכת בטא מינוס הוא תהליך ספונטני של ניוטרון שמתפרק לפרוטון אלקטרון ואנטי נייטרינו (משוואה 5).

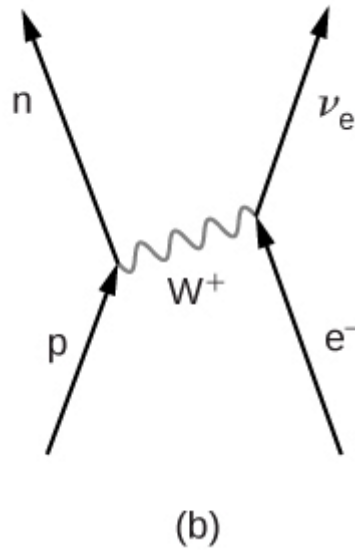
$$n^0 \rightarrow p^+ + e^- + \bar{\nu}_e \text{ (משוואה 5)}$$

תהליך זה נקרא דעיכת בטא מינוס. תהליך דומה הנקרא דעיכת בטא פלוס (משוואה 6)

$$p^+ \rightarrow n^0 + e^+ + \nu_e \text{ (משוואה 6)}$$

תהליך זה מתאר את המצב בו פרוטון מתפרק לניוטרון פוזיטרון נייטרינו.

** ישנם חלקיקים שאין להם מסה כלל, והם מתבטאים כאנרגיה בלבד



איור 2 דיאגרמת פיינמן לתיאור התהליך במשוואה 7 הסימטריה בזמן של תהליכים קוונטים מגדירה כי דיאגרמה זו והמשוואה המתאימה לה שוות אף על פי שהן הפוכות בכיוון הזמן

תהליכים של היתוך גרעיני מייצרים כמויות גדולות של חלקיקי נייטרינו. הוכחת קיום חלקיקי הנייטרינו השתמשה בפרץ הנייטרינו הזה שנוצר בפיצוץ גרעיני על מנת למדוד את הנייטרינו. מדידת הנייטרינו התבצעה בשני שלבים על מנת לאמת את קיומו. בשלב הראשון לאחר הפיצוץ האטומי פרץ נייטרינו מגיע למיכל של תערובת של כלור ומים. תערובות זו מוקמה כ-40 מטר מבור בו פוצצו את פצצת האטום¹³. כאשר הגיעו הנייטרינו הם הגיבו עם האטומים בתהליך ההפוך לדעיכה גרעינית. בתהליך זה האטום סופג את הנייטרינו הופך פרוטון לנייטרון ופולט אלקטרון (משוואה 7)

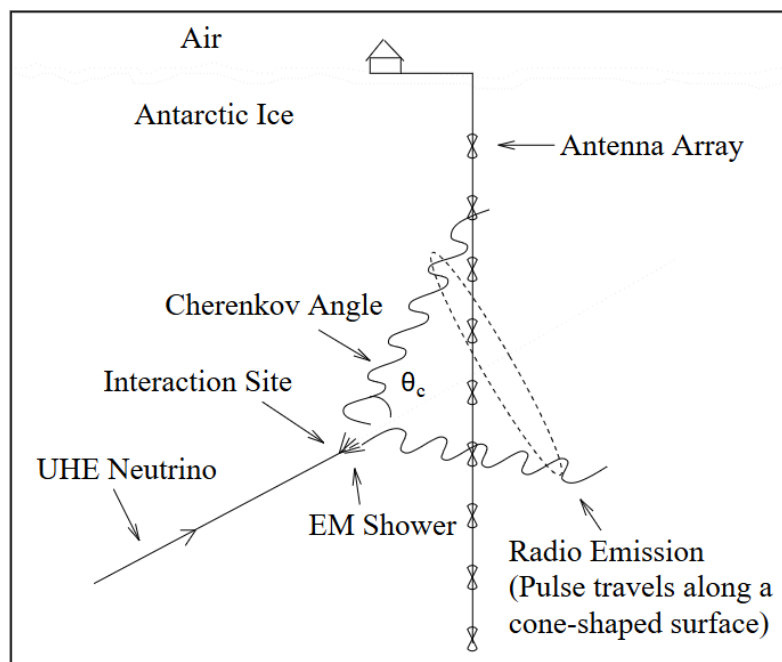
$$\bar{\nu} + p \rightarrow e + n. \quad (\text{משוואה 7})$$

את האלקטרון הזה ניתן למדוד בגלאי אלקטרונים פשוט יחסית. על מנת לוודא אף יותר אפשר לשים לב כי הנייטרוני העודף שנוצר בתהליך מגיב שוב פעם ופולט עוד אלקטרון בתהליך בטא מינוס דיכיי (משוואה 6) גם את אלקטרון זה ניתן למדוד. מדידה של שני האלקטרונים בזמן וברמת האנרגיה המתאימה היתה מה שהוכיח את קיומו של הנייטרינו.

שיטה זו שהוכיחה את קיומו של הנייטרינו עובדת באופן טוב מאוד על מנת למצוא נייטרינו מפיצוץ גרעיני אך יש בה בעייה מרכזית. מכיוון שהשיטה כוללת תהליך דעיכה רדיואקטיבית רמת האנרגייה של הנייטרינו צריכה להיות גבוהה מספיק כדי להתחיל את התגובה. הנייטרינו בקרינת הרקע הינו

ברמות אנרגיה נמוכות מידיי מכדי ליצר תהליך כזה ועל כן השיטה הזאת לא תוכל למדוד קרינת נייטרינו קוסמית.

השיטה שנייה למדידת נייטרינו שמשמשת כיום כשיטה מרכזית ועזרה רבות במחקר של הנייטרינו וקוסמולוגיה היא השיטה בה משתמשים בגלאי הנייטרינו באנטרטיקה. שיטה זו מתבססת על שני תופעות שונות. הראשונה היא שכאשר נייטרינו עובר דרך חומר הוא מבצע אינטרקציה שיכולה לפלוט חלקיקים קלים באופן יחסי אך כבדים בייחס אליו במהירויות גבוהות מאוד¹⁴. המהירויות האלו גבוהות עד כדי כך שהם עוברים את מהירות האור בקרח ומייצרות דבר שנקרא קרינת צרנקוב¹⁵.

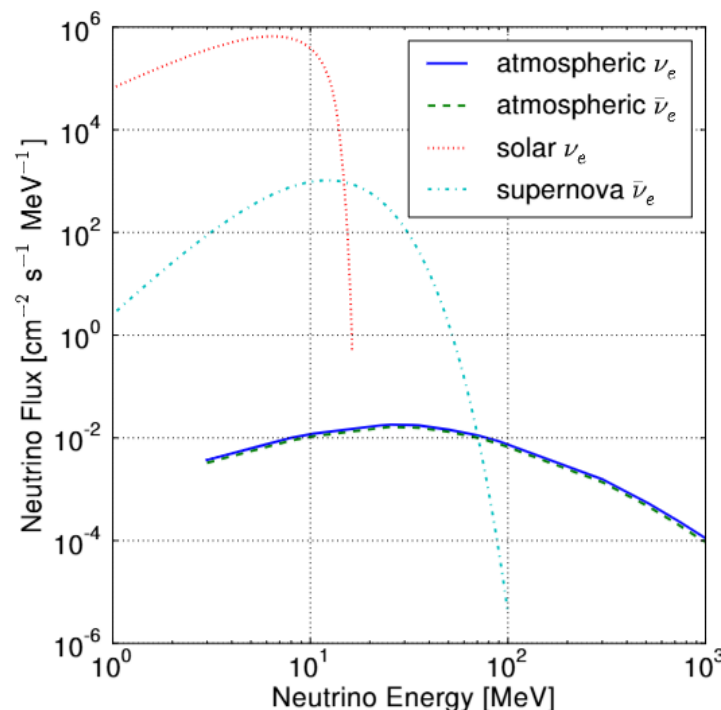


איור 3 דיאגרמה של מבנה הגלאי באנטרטיקה ודיאגרמת פיינמן של האינטרקציה מן הדוח לבניית הגלאי¹⁶

קרינת צרנקוב נוצרת כאשר חומר זז במהירות גבוה ממירות האור בחומר ומייצרת קרינה שאותה ניתן למדוד. בתוך הקרח ממוקמות מצלמות בצורה אסטרטגית שקולטות את הקרינה.

הקרח בגלאי הנייטרינו באנטרטיקה הינו נקי ובעל כמות מיזערית של זיהומים. תכונה זו מאפשרת לגלאים לקלוט בבהירות את הכיוון של הקרינה ועוצמתה ובעזרת חישובים ניתן למדוד תכונות רבות של הנייטרינו כגון הכיוון ממנו הגיע המסה שלו רמת האנרגיה שלו ועוד. כמו כן כמות הזיהומים הקטנה משמעה שהמידע שמגיע לגלאים הוא בעל כמות נמוכה מאוד של הפרעות או שבירה מה שמאפשר

למדענים להפריד את הנייטרינו השונים ולבודד את המידע לגביי נייטרינו בעלי תכונות מיוחדות בלבד. גלאי הנייטרינו באנטרקטיקה אחראי למרבית הגילויים המדעיים באסטרופיזיקה וקוסמולוגיה שקשורים לנייטרינו.¹⁷



(a)

איור 4 דוגמאה למדידה שנעשתה בגלאי החלקיקים ניתן לראות בכחול את עוצמתו של נייטרינו שמגיע מסופרנובה הפוגע בגלאי מדידה של עוצמת קרינת צרנקוב שלו וחישוב לאחור מראים לנו את עוצמת האנרגיה של הנייטרינו ונותנים מידע לגבי הסופרנובה ממנה הוא הגיע.¹⁸

כמו בשיטה הקודמת גם כאן קיימת בעיה דומה. אם כי גלאי הנייטרינו באנטרקטיקה מסוגל לזהות מגוון רחב יותר של נייטרינו ולקבל עליהם יותר מידע מאשר השיטה הראשונה רמת האנרגייה המשוערת של קרינת הנייטרינו הינה עדין מתחת לרדאר של גלאי הנייטרינו באנטרקטיקה.¹⁵ ניתן לראות באיור 4 כי הגלאי מזהה גם נייטרינו קוסמיים כגון נייטרינו סולארי באדום מקוקו ונייטרינו מסופרנובות כאן בתכלת מקוקו אך לא נמצאת קרינה קבועה נמוכה כפי שמשוער בקוסמולוגיה. אנו משערים כי היא לא נמדדת מכיוון שלנייטרינו אין אנרגיה מספיקה כדי לפלוט קרינת צרנקוב.

חקירה של חלקיקים בפיזיקה קוונטית

חקירה של חלקיקים בפיזיקה קוונטית מתבצעת בעזרת משוואת שרדינגר. משוואת שרדינגר הינה מקרה פרטי של פונקציות דיפרנציאליות הנקראות משוואות גלים. משוואת גל הינה פונקציית דיפרנציאלית המתארת סוגים רבים של גלים במרחב. אחת הפתרונות הקלאסיים לסוג פשוט של משוואת גל הינם פונקציות הסינוס והקוסינוס.

משוואת שרדינגר הינה משוואה המתארת את ההתפתחות בזמן של פונקציית הגל של חלקיק. משוואה זו מתארת תכונות רבות של החלקיק כגון מיקום ותנע. פונקציית הגל של חלקיק כשלעצמה לא נותנת לנו מידע לגבי החלקיק והיא הינה רק פונקציית אבסטרקטית המכילה את המידע. על מנת לגלות מידע פיזי יותר לגבי החלקיק אותו אנו חוקרים נצטרך לבצע על פונקציית הגל שלו פעולות על מנת לחלץ את המידע אותו אנו רוצים לבדוק.

פונקציית הגל היא פונקציה הסתברותית¹⁹. במילים אחרות פונקציית גל מאפשרת לחשב הסתברות של מאורעות, ועד כמה כל מאורע סביר. במכניקה קוונטית תכונות חלקיקים הן הסתברותיות. המשמעות היא שתכונות החלקיקים אינן מתקיימות באופן אבסולוטי אלא בהסתברות. לדוגמא אם נכניס כדור (חלקיק קלאסי) לקופסא הוא יהיה במיקום מסוים באופן קבוע ואבסולוטי, לגבי כל מיקום בקופסא ניתן לקבוע בוודאות האם יש שם את הכדור (1) או שאין (0) לעומת זאת לגבי מצב קוונטי אין ודאות שהוא יהיה במיקום מסוים. ניתן לקבוע בוודאות רק שהוא נמצא במקום כלשהו בקופסא. לגבי כל נקודה בקופסא ישנה הסתברות קטנה מ-1 שהוא יהיה בה. את ההסתברות שהחלקיק יהיה במקום כלשהו בזמן מסוים ניתן לתאר בעזרת מניפולציות על משוואת שרדינגר. מכיוון שתכונות החלקיקים אינן דטרמיניסטיות מצב החלקיק אינו מוגדר על ידי תכונות מדידות וקבועות אלא על ידי סט של תכונות והסתברות שהם מתקיימות. לכן מתארים תכונות של חלקיקים בעזרת סופרפוזיציה. סופרפוזיציה מתארת את תכונות החלקיק כסכום של מצבים והסיכויים שהם מתקיימים בחלקיק. סופרפוזיציה מוגדרת היטב במשוואת שרדינגר. משמעות הדבר שהפונקציה מתארת את הסופרפוזיציה של החלקיק והתכונה אותו היא מתארת. משוואת שרדינגר מקבלת ערך אפשרי של תכונה של חלקיק x ומחזירה ערך בין אפס לאחד. משמעות הערך המתקבל ממשוואת שרדינגר היא ההסתברות שבמידה של התכונה בחלקיק יתקבל הערך x . פונקציית הגל המסומנת לרוב בפסי Ψ היא הפונקציה המאחסנת את המידע על החלקיק בצורה הסתברותית. בעזרת פעולות על

הפונקציה אפשר "לחלץ" מידע ספציפי כגון מיקום או תנע של החלקיק. כך אפשר להפעיל פונקציות שונות על פסי ולמצוא הסתברויות למציאה של תכונות מסוימות של החלקיק כאשר נמדוד אותו .

מטרת המחקר

מטרת המחקר הינה למצוא את הפוטנציאל(צורת החומר) שתייצר אזורים מקומיים בעלי הפרש נייטרינו-אנטי נייטרינו גבוהה על מנת למדוד את הכוח הנוצר באזור.

שאלת המחקר

איזה פוטנציאל ייצר את ההפרש המקסימלי ובאיזו נקודה. מה היא ההשפעה של הגיאומטריה של הפוטנציאל על עוצמת ההפרש.

השערה

עיגול אינו צורה גיאומטרית הממקסמת את ההפרש וצורות השונות מעיגול בעיוותים רנדומליים יוכלו לתת מידע על הגיאומטריה המקסימלית ורנדומליות ורעש גבוהים מייצרים הפרש גבוהה אך כזה שלא ניתן יהיה למדוד ואינו ממקסם את ההפרש.

שיטות

במחקר זה כתבתי קוד בסביבת פיתון תוך שימוש בסביבת פיתוח משולבת Goggle Collab השתמשתי בספריית SciPy שכללה אינטגרציה של פונקציות בדידות וספריית NumPy שכללה טרנספורמציות פורייה ובניית מרחבים בתוכה.

מטרת הניסוי היא למצוא מקומות בהם הכי כדאי להניח גלאי נייטרונים. מקומות אלו מאופיינים בסיכוי גבוה להפרש מדיד בין חלקיקי הנייטרונים לאנטי נייטרונים. על מנת למצוא מקומות אלו אשתמש בקוד שמזיז את פונקציית הגל בזמן תוך שימוש במשוואת שרדינגר.

על מנת לחשב את ההפרש בנקודה מסוימת בין הנייטרונים לאנטי נייטרונים אחשב באופן נפרד את התפתחות הנייטרונים והתפתחות האנטי נייטרונים. התפתחות הנייטרונים והאנטי נייטרונים שונה זו מזו בפוטנציאל. ההבדל בין המערכת המאתרת נייטרונים לאנטי נייטרונים היא בצורת הפוטנציאל. הפוטנציאל ש"מרגיש" אנטי נייטרונים הינו הפוטנציאל שמרגיש נייטרונים כפול מינוס אחת. על מנת למצוא נקודות אלו אחשב צורות שונות המדמות מצבים פיזיים ואנסה למצוא את המקומות בהם ההפרש הנוצר מהפוטנציאל הוא מקסימלי.

בין הצורות האלו אשתמש בפוטנציאל מדרגה. מצב זה מתאר הצבה ידנית של חומר המפעיל אנרגיה פוטנציאלית על הנייטרונים אך כמו כן יכול לתאר את הנייטרונים בסביבה הקרובה מאוד של כדור הארץ. כמו כן אשתמש בצורות מעגליות כדי לתאר מצב של אנרגיה פוטנציאלית בצורת כדור ווריאציות של הצורה הזאת כגון. יותר מעיגול אחד וכמו כן עיגול בעל עייתים רנדומליים.

הגדרת הסימולציה והצבת גבולות

על מנת להפוך את הסימולציה לקרובה למציאות עד כמה שניתן ישנם כמה חלקים להגדרת המערכת. אחת מהן היא ההוספה של המהירות של הנייטרונים למערכת. עבור סימולציה מוגדרת יש צורך להגדיר את המהירות של החלקיק. המהירות של חלקיק מסויים בקרינת הנייטרונים הקוסמית אינה ידועה אך הצפיפות של חלקיקים במהירות מסוימת ימצא בקרינה ידוע ונתון על ידי התפלגות מאקסוול בולצמן. על מנת לחשב את הצורה שקרינת הנייטרונים הקוסמית מגיבה לפוטנציאל בהתחשב במהירות של החלקיקים נוכל להשתמש בשיטה הבאה. עבור כל הרצה של הסימולציה נגדיר לקרינה מהירות k . את פונקציית הגל שנקבל נכפיל בצפיפות החלקיקים בקרינה בעלי המהירות הזו.

הוא המהירות של החלקיק ψ_k הוא החישוב של פונקציית הגל בזמן $\psi = \int_0^\infty \psi_k * \frac{k^2}{e^{k/T+1}} dk$ עם המהירות k (משוואה 8)

$$\frac{k^2}{e^{k/T+1}} \quad (\text{משוואה 9})$$

האיבר השני במשוואה 8 (משוואה 9) הוא התפלגות מקווסל בולצמן שמתארת את הצפיפות של החלקיקים עם מהירות k בקרינה בטמפרטורה של T° קלווין. ההשערה היא שקרינת הנייטרינו הקוסמית היא בטמפרטורה של 1.6° קלווין עבור חישוב של התפלגות מהירויות החלקיקים¹⁰. משמעות האינטגרל היא ההתייחסות לכל המהירויות האפשריות וחיבור של כל המהירויות השונות בהתחשב בצפיפות. בקוד שלי אני אקרב את האינטגרל ואשתמש בגבולות סופיים dk כמספר קטן אך סופי על מנת לקרב את החישוב האינפטימלי.

עוד דבר שאעשה על מנת לתאר את המערכת הוא להתחשב בכיוונים. קרינת הנייטרינו הקוסמית מגיעה מכיוונים רבים. עבור הניסוי הזה נניח כי קרינת הנייטרינו מגיעה מכל הכיוונים באופן שווה. תיאור זה לפי ההערכות איננו רחוק מן המציאות ואף מתאר אותה באופן טוב למדי. על מנת לתאר את המערכת נריך את הסימולציה על כיוונים שונים כדי לתאר קרינה מכל הכיוונים.

ישנם כמה פונקציות המתארות חלקיקים במרחב אותם מציבים בסימולציות של פונקציות גל. במחקר זה אשתמש בשניים מן הפונקציות הבסיסיות האלו. הראשונה היא גל גאוסני. פונקציית אף על פי שאינה מתארת באופן מדויק את קרינת הנייטרינו כמו הפונקציית השנייה. פונקציית הגל הגאוסני עוזרת להבין את הדינמיקה בין החלקיק לפוטנציאל. פונקציית זו מתארת מקרה של חלקיק יחיד שאנחנו יודעים בוודאות גדולה למדי את מיקומו (הוודאות לגבי מיקומו היא פרמטר שניתן לשנות) בתחילת הניסוי ואת כיוונו עד כדי מידה מסוימת. מכיוון שאשתמש בפונקציית זאת פחות בחלק המרכזי של הניסוי ויותר בחלקים שוליים לא אתייחס אליו הרבה.

הפונקציית השנייה נקראת גל מרחבי והיא הפונקציית המרכזית שאשתמש בה בחלקים המרכזיים של הסימולציות. פונקציית הגל המרחבי מתארת את קרינת הנייטרינו בצורה יחסית מדויקת משני סיבות. הראשונה היא העובדה שפונקציית הגל המרחבי מתארת מצב התחלתי בו הסיכוי של החלקיק להימצא בכל נקודה במרחב היא שווה. תיאור זה הוא יותר מדויק לדבר כגון קרינת הנייטרינו הקוסמית מכיוון שהוא מתאר את הסיכוי השווה של החלקיק להימצא בכל נקודה במרחב ללא

התחשבות באינטרקציה עם חומר ואנרגיה. מכיוון שהקרינה מגיעה מכל נקודה במרחב התיאור הזה מתאר את סך הקרינה במקום חלקיקים יחידים ועבור סך הקרינה נוכל להכפיל את הפונקצייה הסופית בהשערה לנייטרין פר מטר רבוע. הסיבה השנייה שהגל המרחבי מתאר את קרינת הנייטרין בצורה טובה היא שגל מרחבי מתאר חלקיקים שנעים בכיוון אחד בלבד ויש ידיעה מוחלטת לגביי הגודל והכיוון של מהירות החלקיקים מה שמתאר לנו את האחידות של ה"שכבות" או מהירויות שונות של הנייטרין באופן מדויק.

במחקר כתבתי קוד שמתאר התפתחות בזמן של פונקציית גל בתוך גבולות מוגדרים. הקוד מקבל את פונקציית הגל ואת האנרגיה הפוטנציאלית המערכת הניסוי.

חישוב ההזזה בזמן של משוואת שרדינגר

שיטת קראנק ניקלסון

במחקר אשתמש בשיטות מרכזיות על מנת לחשב את ההתפתחות בזמן של פונקציית גל. השיטה הראשונה היא שיטת קראנק ניקלסון (Crank Nicolson) לפתירה נומרית של משוואות דיפרנציאליות. משוואת שרדינגר (משוואה 10)

$$H\psi = i \frac{\partial}{\partial t} \psi \quad (\text{משוואה 10})$$

מתארת את ההתפתחות בזמן של פונקציית . אם נבודד משהמשוואה את השינוי בזמן נוכל לראות שהשינוי בזמן של הפונקציה שווה לפונקציה כפול הימולטיניאן עד כדי קבועים (משוואה 11).

$$-iH\psi = \frac{\partial}{\partial t} \psi \quad (\text{משוואה 10 א})$$

כאשר ההמולטיניאן (משוואה 12)

$$H = \frac{p^2}{2m} + v(x) \quad (\text{משוואה 12})$$

על מנת לפתור את המשוואה בצורה נומרית נגדיר קבועים סופיים. את ההמשך של ההסבר אעשה בממד אחד על מנת להקל על ההסבר אך אותה השיטה עובדת גם בשניים ובשלושה מימדים. קבועים אלה dx ו dt מגבילים את רמת הדיוק של הפיתרון. ככל שנגדיר את קבועים אלו קטנים יותר נקבל פיתרון מדויק יותר אך כזה שייקח יותר זמן לחשב.

על מנת לפתור את המשוואה נרצה לייצר מצב שבו הנגזרת היחסית של הפונקצייה בזמן t שווה ל

$$\frac{\psi_{updated} - \psi}{dt} = -i * H * \psi \quad (\text{משוואה 10 ב})$$

נפתור עבור הפונקצייה המעודכנת ונקבל

$$\psi_{updates} = \psi - i * \psi * H * dt \quad (\text{משוואה 10 ג})$$

H הינו אופרטור ההימולטיניאן על הפונקציה (משוואה 12) נתאר את רכיב התנע של ההימולטיניאן (p^2) בתור אופרטור על הפונקציה פסי (ψ) (משוואה 11)

$$p^2 = \nabla^2 = \sum_u \frac{\partial}{\partial x^u} \hat{x}^u \quad (\text{משוואה 11})$$

נתאר את רכיב התנע בהימולטיניאן בתור הגרדיאנט לפונקציה הגל. הגרדיאנט מתאר את כיוון הזרימה של הפונקציה בעזרת הנגזרות החלקיות לאורך כל מימדי המרחב של הפונקציה. x^u הוא המימד המרחבי ה- u . מכיוון שהגרדיאנט הינו ווקטור כל נגזרת חלקית מוכפלת בווקטור הבסיס של המימד המתאים $\hat{x}^u$. על מנת להזיז את הפונקציה בזמן נשתמש במשוואה 10 ב ונציב $\hbar$ את התנע בתור הגרדיאנט (משוואה 11).

טרנספורם פוריה מדורג (split step fourier transform)

דרך שנייה להעריך נומרית את משוואת שרדינגר התלויה בזמן היא שיטת חצי מדרגה טרנספורם פורייה (split step fourier transform). במחקר זה אתשמש בשיטה זו בעיקר לשניים ושלושה מימדים. שיטה זו מפצלת את פעולת ההימולטיניאן לשני חלקים. להימולטיניאן ישנו שני חלקים. הראשון הוא התנע. השני הוא החלק של הפוטנציאל. אחת הבעיות הגדולות במחשוב היא כמות המחשוב העצום שלוקח להמיר את הפונקציה בין מרחבים של תנע ומיקום. בשיטה זו אנחנו מפצלים את העדכון של הפונקציה לשני חלקים. הראשון הוא הכפלה של הפונקציה בחלק של האנרגיה הפוטנציאלית. בחלק השני אנחנו ממירים את הפונקציה למרחב התנע מבצעים עליה את האופרטור במרחב התנע ומחזירים למרחב המיקום.

על מנת לחשב את אופרטור המיקום והתנע בשיטה זו אנחנו נחשב קירוב לפיתרון אנליטי של משוואת שרדינגר. פיתרון של משוואה מסוג נגזרת ראשונה של פונקציה שווה למכפלה של הפונקציה

$$f'(x) = af(x) \quad (\text{משוואה 12})$$

פתרוננו

$$f(x) = e^{x+c} \quad (\text{משוואה 13 א}) \quad \text{או} \quad f(x) = Ae^x \quad (\text{משוואה 13 ב}) \quad (\text{שניהם שווים}).$$

מכיוון שההימולטיניאן הינו אופרטור על הפונקציה הפתרון הזה אינו מדויק. לשם החישוב הנומרי הזה נתייחס לפיתרון הזה ונניח כי שני החלקים הינם אופרטורים על הפונקציה. מכיוון שמקדם ההחלפה של האופרטורים אינו שווה

$$[A, B] \neq 0 \text{ (משוואה 13)}$$

הניתן לכתוב גם

$$\hat{A}\hat{B}\varphi \neq \hat{B}\hat{A}\varphi \text{ (משוואה 13 ב)}$$

אין זה מדוייק להפריד את האופרטורים אך עבור הקירוב הזה נעשה זאת בכל זאת. בשלב הראשון נכפיל את הפונקציה באקספוננט של החלקים שהפרדנו בשיטה הראשונה (משוואה 10 ד)

$$\psi_{updated} = \psi - i * v(x) * dt \text{ (משוואה 10 ד)}$$

בחלק זה נשתמש רק בפוטנציאל שהוא במרחב המיקום. $v(x)$ בשלב השני נמיר את הפונקציה למרחב התדר (או התנע) ונכפיל את הפונקציה באקספוננט של החלקים שהפרדנו בשיטה הראשונה אך נשתמש רק באופרטור התנע במקום בכל ההימוליטיניאן. לאחר מכן נחזיר את הפונקציה לצורתה המקורית במרחב המיקום על מנת לחקור אותה.

תוצאות

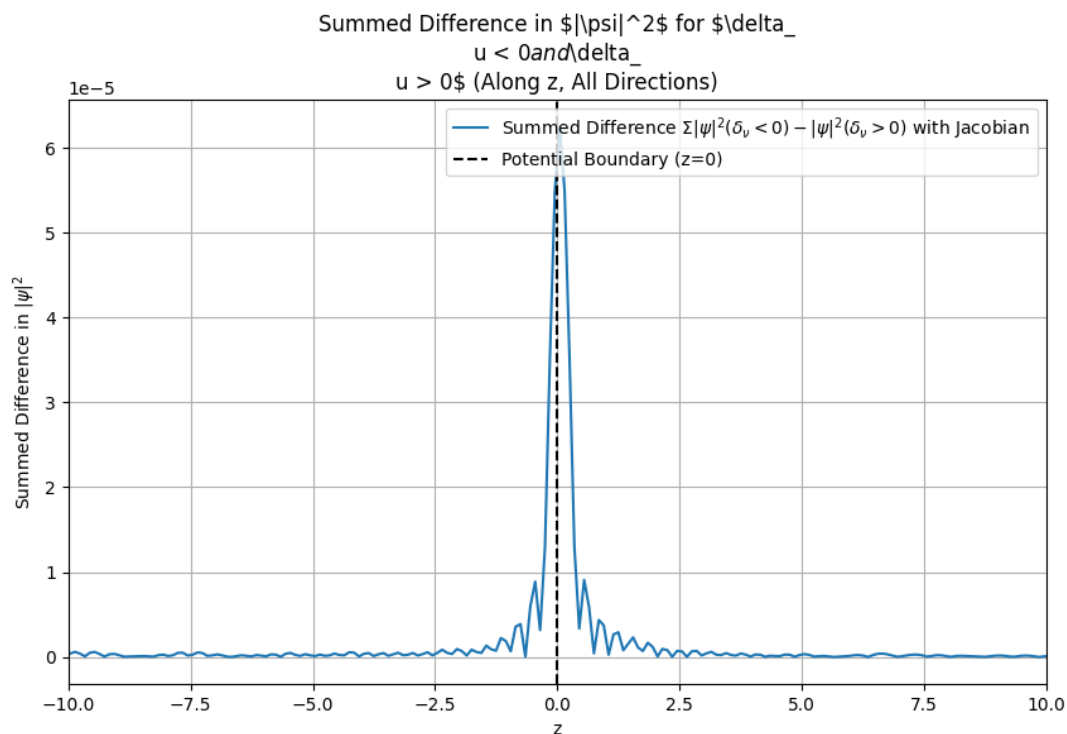
את הסימולציות הרצתי על מגוון של צורות בשני מימדים על מנת להבין את הדינמיקה של פונקציות הגל ובמיוחד ההפרש בין צפיפות של הנייטרינו לאנטי נייטרינו. מטרת הניסוי היא למצוא צורות המייצרות הפרש גבוהה ביחס בין נייטרינו לאנטי נייטרינו ואת הנקודות בעלי העוצמה הגבוהה של צורות ספציפיות. זה מכיוון שהפרש גבוהה הוא ביחס ישר לעוצמת האינטרקציה בנקודה מסוימת.

פוטנציאל מדרגה

פוטנציאל מדרגה הינו פוטנציאל מהסוג:

$$V = \begin{cases} 0, & x < 0 \\ \delta, & x \geq 0 \end{cases} \quad (\text{משוואה 14})$$

כאשר דלתא מסמנת את הגובה של המדרגה המחושב בהתאם למערכת הספציפית. מבנה זה של פוטנציאל מדרגה הינו זהה עבור כל המימדים. פוטנציאל מדרגה אחד הפוטנציאלים הקלאסיים ביותר לסימולציות. מכיוון שהרצה של פונקציית גל בשני מימדים לוקחת כוח מחשוב גדול בהרצות שכוללות כיוונים שונים או טמפרטורות אשתמש ברווחים גדולים למדיי של טמפרטורה או של זוויות.



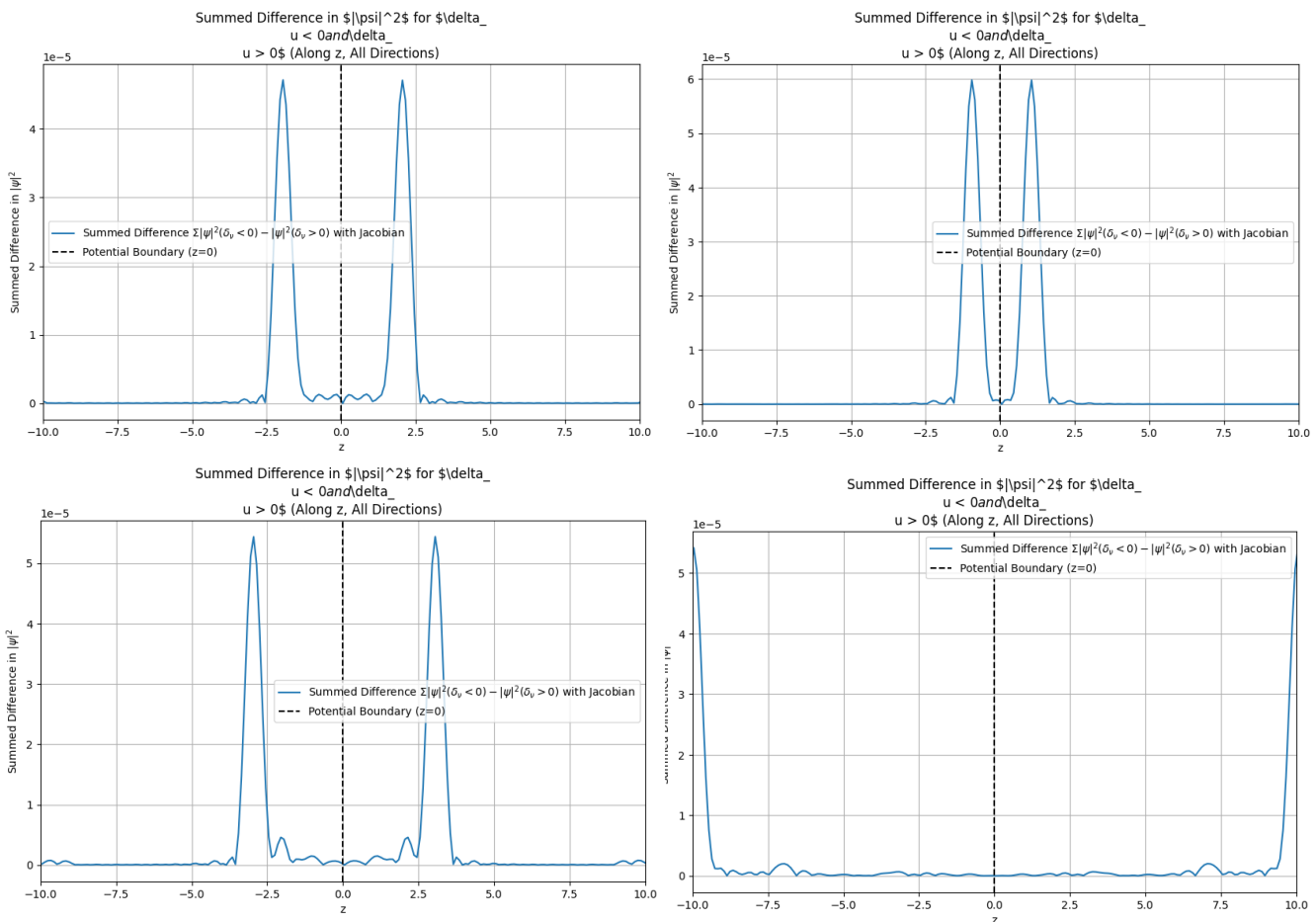
איור 5 – הפרדה של הנייטרינו מאנטי נייטרינו על ידי פוטנציאל מדרגה לאורך חתך בציר ה- z . הפיק של ההפרדה נמצא בקצה המדרגה ההרצה עם 30 כיוונים

עיגול ורנדומליות

עיגול

בשלב השני של המחקר דימיתי צורות שונות וניסיתי למצוא מרכיבים המייצרים הפרש גבוהה בצפיפות. השתמשתי בצורת העיגול ובצורות של עיגול עם עיוותים רנדומליים בעזרת פונקציות רנדומליות בעלי רמת רציפות אותה אוכל לשנות.

בתחילה הרצתי עיגולים בעלי רדיוסים שונים (איור 6). בכל החלק הזה של המחקר עיגולים ורנדומליות הסימולציה תריך 60 פונקציות גל. 30 כיוונים שמהם מגיע הקרינה פעם אחת עבור חישוב הנייטרינו ופעם אחת עבור חישוב האנטי נייטרינו. כל הגרפים המוצגים שאינם הפוטנציאל הם ההפרש בין הנייטרינו לאנטי נייטרינו.



איור 6 – הפרדה של הנייטרינו מאנטי נייטרינו על ידי פוטנציאל עיגול בחתך אורך. הגרפים השונים מתארים רדיוסים שונים של הפוטנציאל.

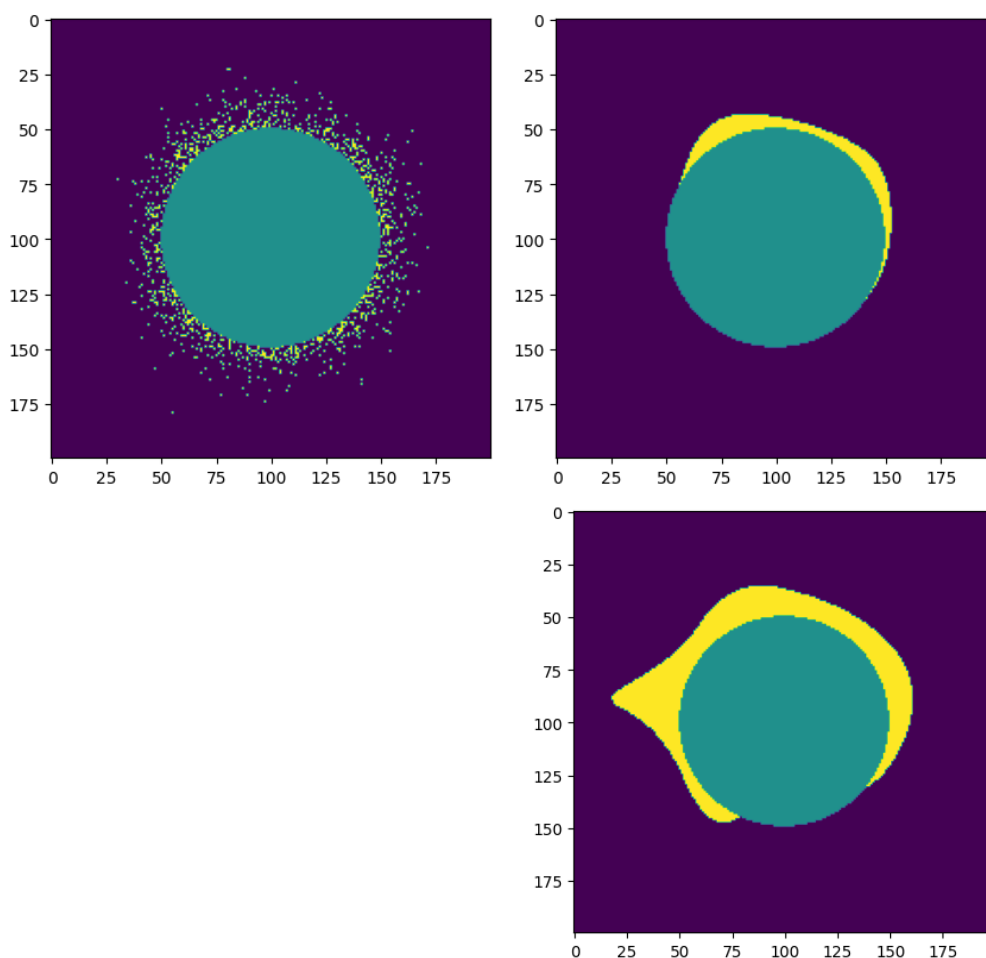
התוצאות בגרף 5 ובגרפים באיור 6 (איור 5)(איור 6) מתאימות למה שנמצא בספרות²¹ עד היום במאמרים רבים. ניתן לראות כי התוצאות אינם בדיוק אותו הדבר ובעלי הבדלים קטנים מהתוצאות בספרות. ההפרשים האלו נובעים מהגבלות המחשוב במחשב הביתי שלי. עם זאת סהכ התוצאות מספיק דומות כדי שנוכל להתייחס למחשוב שלי כקירוב טוב.

רנדומליות

לאחר מכן הרצתי את הסימולציה עם עיגולים בעלי הפרעות רנדומליות שונות את ההפרעות האלה ניתן לשנות לפי שני משתנים. הראשון הוא הערכים המקסימליים והמינימליים של הפונקציה שינוי של משתנים אלה משפיעה על העומק של השפעת ההפרעות מקצה העיגול. בסימולציות אותם הרצתי הגדרתי את המקסימום והמינימום של הפונקציות להיות שוות כלומר $\min = -\max$ המרחק המקסימלי מקצה העיגול המקורי שווה כלפי פנים וכלפי חוץ.

המשתנה השני אותו ניתן לשנות הוא הרציפות של הפונקציה. משתנה זה משפיעה על רמת ההפרעה בפונקציה ככל שמשתנה זה קטן יותר הפונקציה הינה בעלת כמות גדולה יותר של רעש רנדומלי ככל שמשתנה זה גבוהה יותר ישנו פחות רעש ומתקבלת פונקצייה חלקה יותר שהינה עדיין רנדומלית. במחקר זה אשנה את המשתנה הזה בין 0.001 ל 1 אך אין זו מגבלה פיזית של הפונקצייה אלא בחירה אישית למען הנוחות.

הערכים של הגובה המינימלי והמקסימלי של הפונקציה הרנדומלית משנים את תחום ההשפעה של הפונקציה הרנדומלית על הצורה כפי שניתן לראות באיור תחום ההשפעה הוא במרחק מקסימלי מקצה העיגול. ערך הרציפות של הפונקציה ניתן על ידי העוצמה של המסנן הגאוסיאני שמעבירים על פונקציה רנדומלית לחלוטין. ככל שהמסננת חזקה יותר נראה קירוב גדול יותר של הערכים בפונקציה והיא תהיה חלקה יותר ובעלת פחות רעשים וככל שנפעיל מסננת בעלת ערך נמוך יותר נקבל פונקציה רועשת יותר(איור 7).

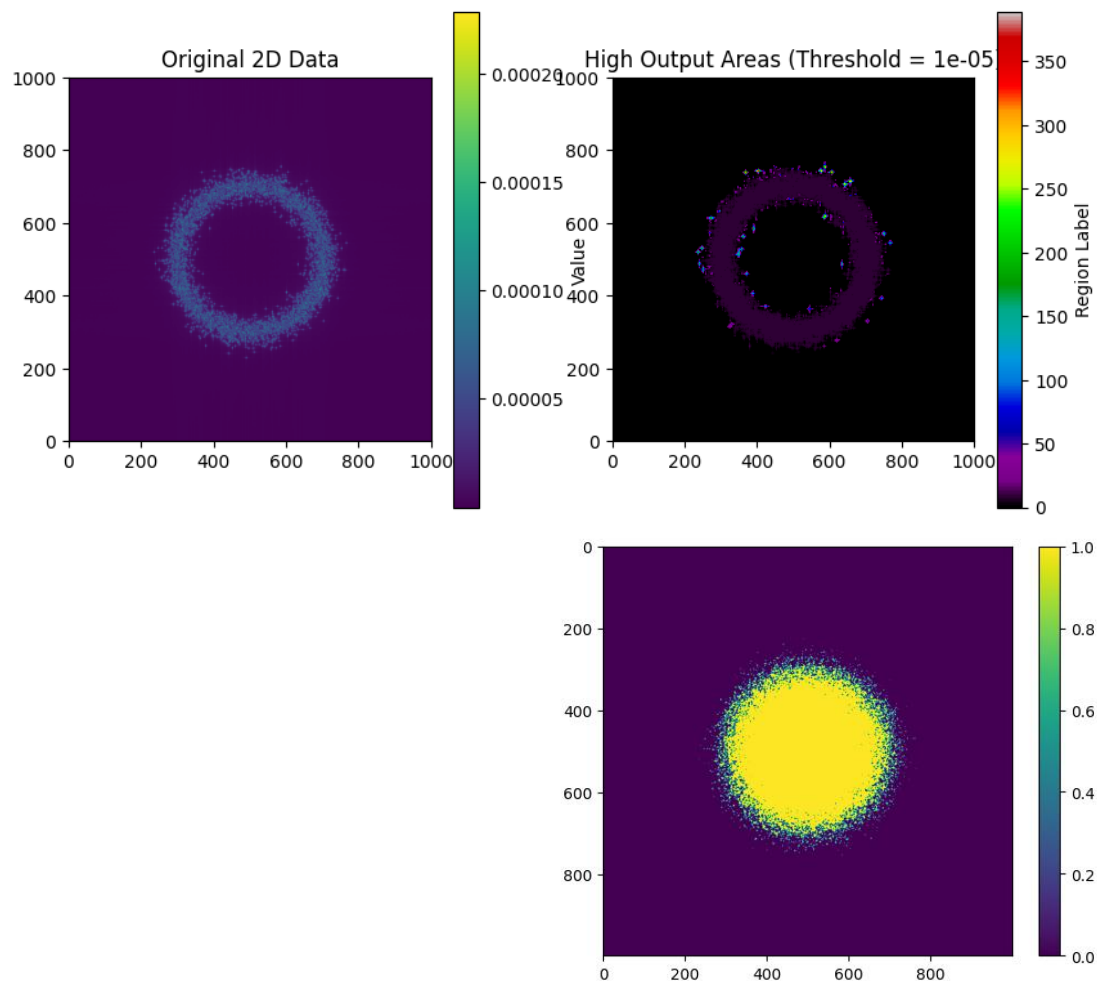


איור 7 פוטנציאלים עם הפרעות רנדומליות שמאל למעלה מראה את ההבדל בין עיגול ללא הפרעות לעיגול עם הפרעה רנדומלית בעלי גודל הפרעה גדול ימין למעלה מתאר קבוע רציפות גבוהה וגודל הפרעה קטן למטה מתאר גרף עם רציפות גבוהה וגודל הפרעה גדול

את ההפרש בין הסיכוי למציאת נייטרין לאנטי נחשב על ידי ההפרש בסיכוי למציאת הנייטרין מהאנטי נייטרין בנקודה. את הסיכוי למצוא נייטרין בנקודה נסמן v_n כמו כן נקרא לסיכוי למצוא אנטי נייטרין $\bar{v}_n$. הגרפים במחקר מציגים את ההפרש בין הסיכוי למצוא נייטרין בנקודה למציאת אנטי נייטרין (משוואה 15).

$$|v_n - \bar{v}_n| \text{ (משוואה 15)}$$

ככלל ההרצות בעלי רמת רציפות נמוכה מאוד היו הרצות עם רמות גבוהות יותר במובהק של הפרש בין הנייטרينو לאנטי נייטרينو (איורים 8 ו 9). ההבדל בין הרצות עם רמת רציפות גבוהה מאוד לבינונית היו פחות מובהקים ושניהם היו קרובים יחסית לתוצאות של עיגול רגיל עם עד 10 אחוז הבדל בגובה המקסימלי בין ההרצה לבין העיגול. התוצאה שמקסימום ההפרש בה היה הגבוהה ביותר היתה ההרצה עם גודל הפרעה 10 רציפות 0.01 (איור 8). ההרצה הזאת לא היתה ההרצה הרועשת עם גודל ההפרעה הגדול ביותר אך המקסימום בה היה הגדול ביותר.



איור 8 תוצאות ההרצה משמאל למעלה ההפרש בין הנייטרينو לאנטי נייטרينو מימין למעלה ההפרש עם דגשים על אזורים גבוהים משמאל למטה הפוטנציאל

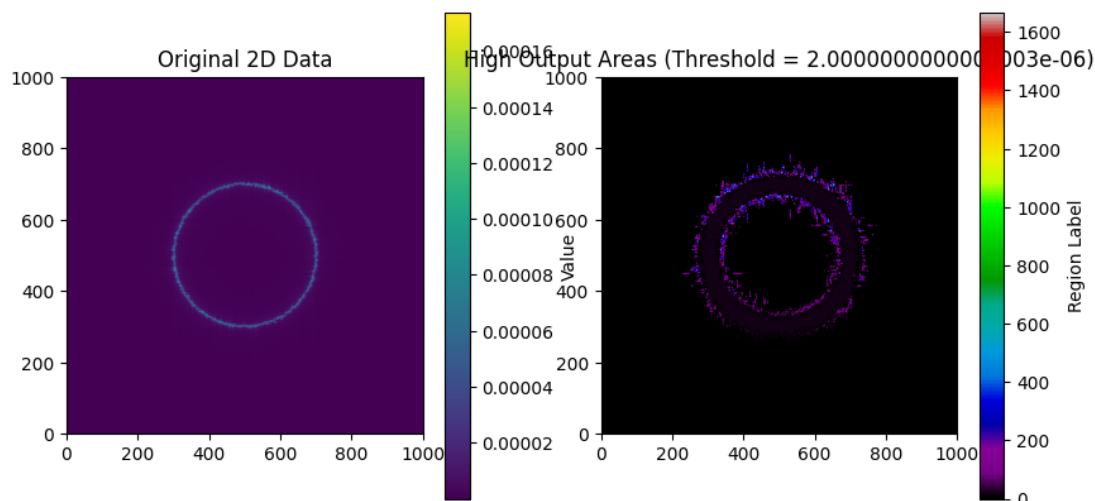
בהרצה זו היה נקודת מקסימום ההפרש בין הנייטרينو לאנטי נייטרينو היתה בעלת הפרש צפיפות גבוה ב 123 אחוז מהעיגול (איור 8).

כמו כן בכל הרצה בחנתי גם את הממוצע האזורי של ההפרש בשלוש גדלים. 4 פיקסלים בריבוע שהם 0.0016 אחוז מגודל כלל הגרף. ב 10 פיקסלים על 10 שהם 0.01 אחוז מהגרף ו 20 על 20 – 0.04 אחוז מהגרף.

המוצעים האזוריים בהרצה הזאת היו גבוהים אך לא הגבוהים ביותר בהרצה עם גודל הפרעה 20 היו מקסימום לממוצע האזורי גבוהים יותר אך ככלל לא בצורות משמעותיות חוץ בממוצע אזורי ארבע על ארבע שם בהרצה עם גודל 10 היה גדילה של 96 אחוז ובהרצה בגודל 20 היתה גדילה של 118 אחוז. המשמעות של הממוצע האזורי היא חדות האות על קצה הפונקציה. ככל שהממוצע האזורי גבוה מהממוצע האזורי בעיגול משמעו שהאות חדה פחות על קצה הפונקציה.

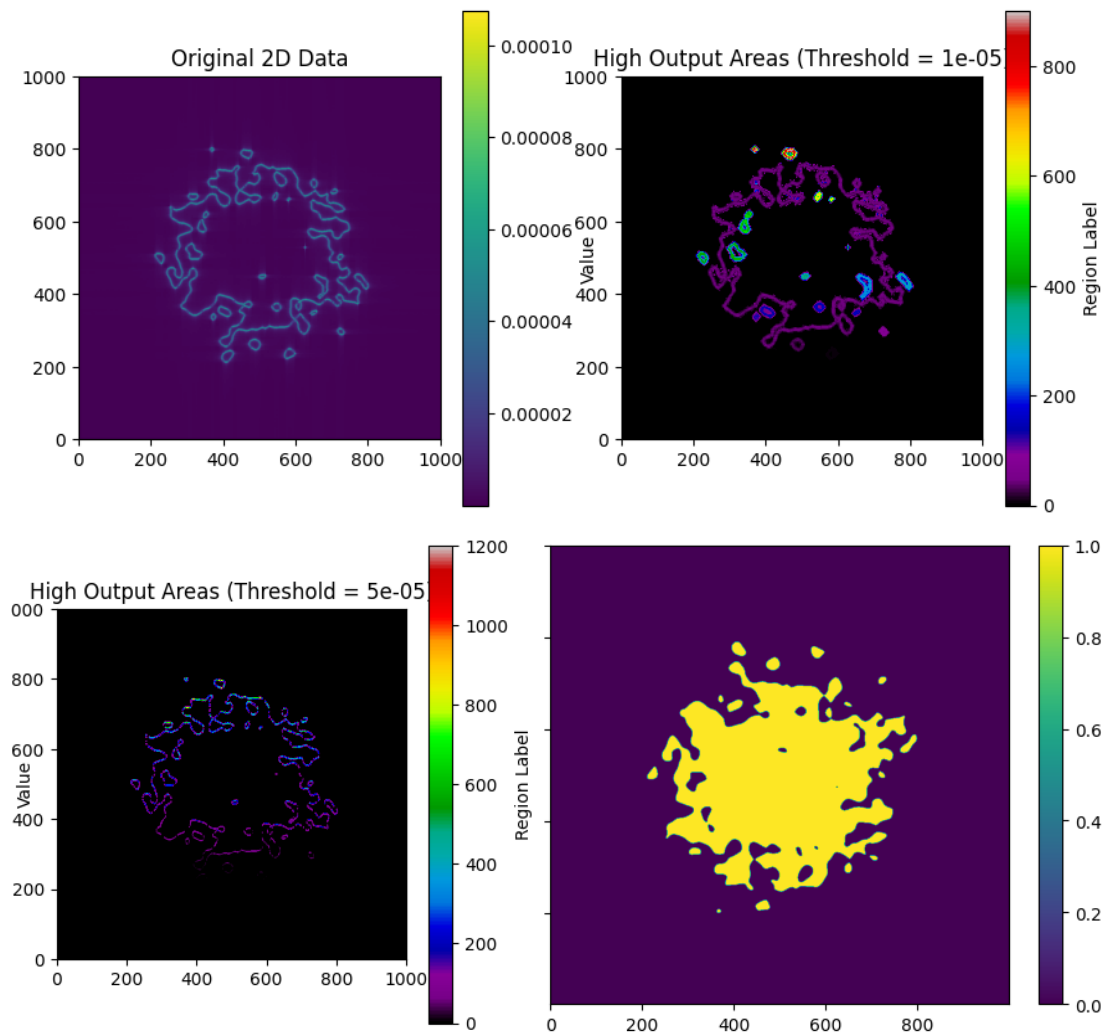
ההרצה נוספת עם רציפות של 0.01 וגודל הפרעה של 1 יצרה הפרש גדול ב 70 אחוז מעיגול רגיל (איור 9). ההפרעה בעיגול זה היא מאוד קטנה בערך 5 פיקסלים פנימה או החוצה מעיגול רגיל. אך עם זאת המקסימום יצא פי 1.7 מעיגול רגיל. ההפרש מרוכז מאוד על קצה האיזור של העיגול המקורי אם כי ניתן לראות שהוא משובש בעצמו לעומת ההפרש שנוצר מעיגול רגיל.

הממוצע האזורי בפונקציה הזאת עולה במידה דומה לעליית המקסימום.



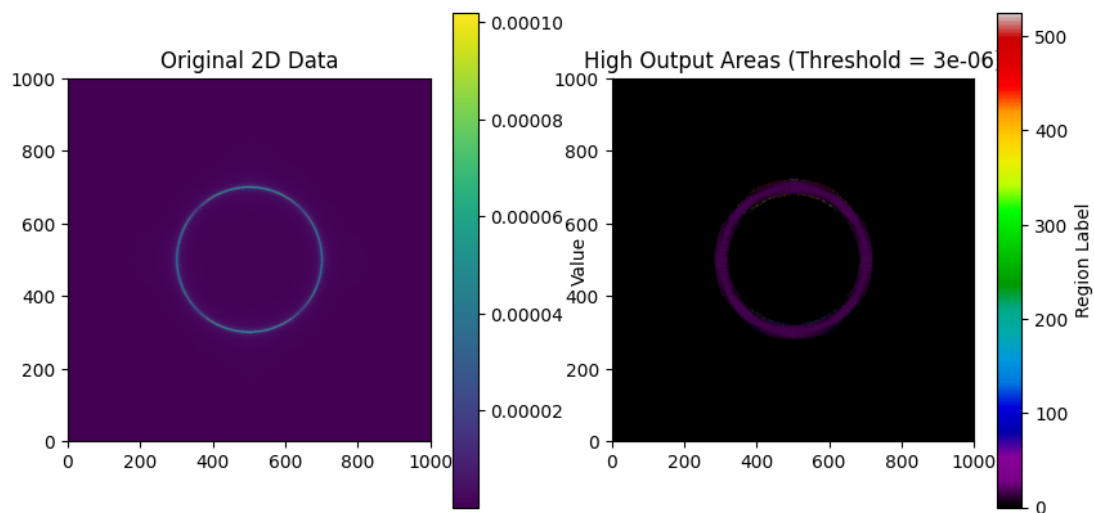
איור 9 תוצאות ההפרש בין הנייטרינו לאנטי נייטרינו בהרצה עם גודל הפרעה 1 רציפות של 0.01 משמאל תוצאות ההפרש מימין ההפרש לאחר צביעה של אזורים גבוהים

רוב ההפרעות עם רציפות גבוהה יותר יצאו עם נקודות מקסימום וממוצעים אזוריים קרובים מאוד לאלה של העיגול ללא ההפרעות כולל פונקציות עם שינויים חלקים גדולים מאוד בגודל של 20 וכאלה שפיצלו את הפוטנציאל לצורות רבות. רוב הפוטנציאלים האלה יצרו הפרש דומה לעיגול או גדול ממנו בחמש אחוז. יוצא הדופן הוא הרצה עם רציפות 0.1 וגודל 20 (איור 10). הרצה זאת העלתה את המקסימום ב 5 אחוז בלבד. הדבר המיוחד בהרצה הזאת הוא שהממוצע האזורי בה גדול בהרבה מאוד מזה של עיגול פי 1.6. ניתן לראות באיור 10 (איור 10) שהסיבה היא שלעומת ההפרש בעיגול שבו המקסימום הוא טבעת דקה מאוד שגבוהה מסביבתה (איור 11) כאן ישנם אזורים נרחבים מאוד ששווים לערכים הגבוהים האלה בריכוזים גבוהים ליד הגבול המרכזי של הפונקציה (איור 10).



איור 10 משמאל למעלה תוצאות ההפרש מימין למעלה תוצאות ההפרש עם צביעה של אזורים מעל 0.00001 משמאל למטה צביעה של אזורים עם תוצאה מעל 0.00005 מימין למטה הפוטציאל

לשם ההשוואה ככה נראה אותו הניתוח תוצאות עם עיגול חלק לגמרי ללא הפרעות. כל התוצאות בעיגול הם באיזור ה $6 * 10^{-5}$ הפרש בין צפיפות הנייטרינו לצפיפות האנטי נייטרינו בנקודה(משוואה 15).



איור 11 תוצאות של עיגול חלק משמאל ההפרש מימין ההפרש לאחר צביעה של אזורים גבוהים

ניתן לראות כאן בבירור כי ההפרש מרוכז בקצה העיגול באופן שווה יחסית וכמעט סימטרי חוץ מהבדלים קטנים שנוצרו מהגבלות המחשוב. ההפרש כאן הוא אחיד מאוד ואין הבדל בין חלקים שונים של הפוטנציאל (איור 11).

דיון

המחקר עוסק בהפרש שנוצר בין חלקיקי נייטרונים לאנטי נייטרונים כהשפעה מהפעלת כוח חזק עליהם. המחקר משתמש בשוני באינטראקציה בין הנייטרונים עם הכוח החלש לאינטראקציה בין האנטי נייטרונים עם אותו כוח חלש. ההבדל הבסיסי בהשפעה בין הנייטרונים לאנטי נייטרונים על ידי הכוח החלש היא בכך שהפוטנציאל במערכת עם אנטי נייטרונים שווה למינוס הפוטנציאל במערכת עם נייטרונים.

חישוב הפוטנציאל נעשה על ידי חוק וולפאינסטן אך עם הזנחה של כל הקבועים. צורת הפוטנציאל הראשונית הינה פוטנציאל עיגולי (איור 6). כל הפוטנציאלים הינם אחידים בגובהם. מטרת המחקר היתה לראות כיצד משפיעה גאומטריה הפוטנציאל על ההפרש הנוצר. את ההצלחה מדדתי בכמה מדדים הראשון הוא ההפרש המקסימלי הנוצר. כמו כן יצרתי תוכנה ליצירת גרף המבליט את ההפרש הנמצא מעל סף מסוים ובחנתי בעין את הגרפים שכוללים תוצאות מיוחדות על מנת לחקור אותם. עוד מדד הוא מקסימום של ממוצע אזורי. את הממוצע האזורי חישבתי בגדלים שונים והחזרתי גרף של הממוצעים האזוריים ואת המקסימום.

המקסימום המוחלט עבור הפרש נותן לנו מידע טוב על נקודות קיצון אבל מתאר לרוב נקודות מאוד קטנות בגרף שאפילו לפעמים לא ניתן לראות. לכן הממוצע האזורי יכול לתת לנו מידע על אזורים גדולים יותר שבהם יש כמות גדולה של נקודות הפרש גבוהה. ככלל יש קוראלציה גבוהה בין מקסימום גבוהה לבין מקסימום של הממוצע שגבוהה אך היחס אינו שווה ובהרצה 16 (איור 6) התוצאות מראות עליה של 5 אחוז במקסימום מוחלט אך של 60 אחוז במקסימום של ממוצע אזורי. בעוד בשאר ההרצות העליה במקסימום אזורי לעומת זאת של המקסימום הכללי נמוכה מ-60 ולפעמים אף שלילית.

כמו כן ניתן לראות לפי ההפרשים המקסימליים האזוריים כי האות בעיגול הינה חדה מאוד הרצות ברמת רציפות נמוכה כולם היו עם רוחב אות גדול יותר. כמו כן ככל שהגדלתי את גודל האזור לממוצע ההפרש בין עיגול לצורות רנדומליות גדל. זאת מכיוון שהאות בעיגול היא גם לא מאוד חזקה וביחס להפרעות רנדומליות היא גם מרוכזת מאוד.

על העיגול הפעלנו שינויים רנדומליים כששלטנו בגודל ההפרעה על העיגול ורציפות ההפרעה. ניתן לראות מאיורים 7 ו-8 כי פוטנציאלים עם רמות רציפות נמוכה במקרה זה חוזקת מסנן גאוסני של 0.01 יצרו כולם הפרש גדול מההפרש שנוצר בעיגול פי בין שתיים נקודה שלוש לאחד נקודה שבע. גם הפרעה מחוספסת בגודל קטן (איור 5) יצרו הפרש נייטרונים לאנטי נייטרונים גדול בהרבה מזה של עיגול פי 1.7.

ההרצה עם השיפור הגדול ביותר היתה עם הפרעה מחוספסת וגודל הפרעה של 10 יחידות מידה (איור 4). ההפרש גדל מבזה שנוצר בעיגול פי 2.23.

נקודות המקסימום הגבוהות ביותר נוצרו ביחס לעיגול היו בעלי רמת רציפות נמוכה מאוד. בגודל ההפרעה הנמוך ביותר 1 ששווה לשינויי נמוך מאוד של הפוטנציאל ועם זאת גודל ההפרש עלה ב70 אחוז. בגודל ההפרעה 10 בהרצה 16 (איור 8) נוצר ההפרש הגבוה ביותר 123 אחוזים גבוהה מזה שבעיגול. בין השאר ניתן להסיק כי עיגול אינו צורה גיאומטרית הממקסמת את ההפרש.

המחקר שלי עסק בגיאומטריה של גלאי למדידת נייטרינו קוסמי והשפעתו על טיב המדידה. מדידת נייטרינו קוסמי מסובכת מכיוון שהחלקיקים בעלי אנרגיה נמוכה ולכן האינטראקציה שלהם עם הסביבה חלשה מאוד. במחקר התבססנו על העובדה שהגלאי רגיש יותר אם מגדילים את היחס בין שטף חלקיקי הנייטרינו לאנטי-נייטרינו. בזכות עיקרון הדומה לשבירה של אור, ומשום שמקדם השבירה של הנייטרינו והאנטי-נייטרינו שונה, ניתן להגדיל את היחס בין החלקיקים שפוגעים בגלאי. הדרך שבה הקרן חלקיקים מתפזרת ועוצמתה תלויה גם בגיאומטריה של התווך המפזר שהוא חלק מהגלאי. במשוואת שרדינגר שמתארת את הדינאמיקה של החלקיקים, התווך מתבטא כפוטנציאל שמושרה עליהם. במחקר חיפשנו פוטנציאל שימקסם את האינטראקציה בין הנייטרינו לחומר ויגדיל את הפיזור. במחקר, לא הצלחתי להוכיח אף פוטנציאל שממקסם את ההפרש, יחד עם זאת הראיתי כי ביחס לפוטנציאל עם גאומטריה עגולה, פני שטח רנדומליים מפזרים טוב יותר מאפשר פני שטח חלקים. השינויים בעלי רציפות נמוכה יצרו הפרשים גדולים בין שטף הנייטרינו ואנטי-נייטרינו. אציין כי כל הצורות שחקרתי פחות יישומיים אבל יש להם חשיבות רבה משום שאלו בוחנים את הגבול תיאורטי האפשרי לגילוי הנייטרינו הקוסמי. עם זאת רבות מהתופעות שהצגתי כאן כדוגמאות תופעת ההגדלה של הממוצע האזורי באיור 10 (איור 10). קרו באופן קבוע למדי בהרצות שונות. ניתן ללמוד מהצורות שהצגתי כאן דברים על מנת למצוא צורה גיאומטרית ריאלית לבניית הגלאי.

ישנם כמה דרכים שונות להמשיך את המחקר. כרגע המחקר מתייחס לחלק מצומצם של האפקטיים הפיזיקליים הן במובן של חישוב התנהגות החלקיק והן בהזנחה של השפעת המהירות על הכוח הנוצר בהפרש. בחישוב התנהגות החלקיק ישנם כמה אלמנטים שניתן להכניס ואף הכנסתי את חלקם לקוד אך נאלצתי לוותר עליהם מסיבות מחשוב. מהירות החלקיק המגיע לכיוון הפוטנציאל אינה אחידה כפי שהצגתי ותלויה במשוואת מהירות מקסוול בולצמן. על מנת להכניס לחישוב את התפלגות מקסוול בולצמן צריך להריץ את המערכת עם מהירויות k שונות בתוך האיתחול של פונקציית הגל ולהכפיל את התוצאה בסיכוי של קיום החלקיק עם המהירות על פי ההתפלגות. כמו כן בחישוב של ה"כוח" הנוצר הזנחתי במחקר זה את השפעת המהירות אך ניתן להוסיף את השפעת המהירות בעזרת חישוב התפלגות המהירות הסופית השונה והכפלתן בהפרש הנוצר.

כמו כן כדאי לקחת בחשבון את משפט סטטיסטיקת הספינים של דיראק שיכול להיות כי משנה את האינטראקציה של הנייטרינו הקוסמי עם האטומים של החומר איתם הוא מבצע אינטראקציה.

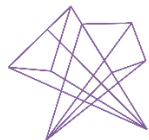
דרך שנייה להמשיך את המחקר היא לנסות להבין את ההשפעה של השינוי הספציפי של צורת הפוטנציאל על ההפרש. הרצות של יותר פוטנציאלים ועוד דרכים להשוות בין הצורות תוכל לתת לנו הבנה מעמיקה יותר של השפעת הגיאומטריה של צורת הפוטנציאל על הכוח הנוצר. אחת הדרכים

שניתן לעשות זאת היא באמצעות אלגוריתם שיזהה את השינויים הגאומטריים בצורה ואת השינויים הגאומטריים בצורת ההפרש ויוכל לתאר את משמעות כל שינוי גיאומטרי בצורה על ההפרש. לאחר מכן ניתן להבין מן האלגוריתם את הצורה היעילה ביותר תחת מגבלות פיזיקליות שנציב לו.

אלגוריתם כזה יאפשר לנו למצוא את הפוטנציאל המקסימלי בעזרת סדרה של פוטנציאלים רנדומליים. כך נוכל מאידך להסתמך על פוטנציאלים רנדומליים שאינם דורשים חישובים מסובכים ואף על פי כן לא רק לנסות למצוא את הפוטנציאל המקסימלי על ידי ניחוש אקראי אלא להיות בטוחים בוודאות גדולה כי זה הפוטנציאל המקסימלי.

1. Alpher, R. A., Herman, R. & Gamow, G. A. Thermonuclear Reactions in the Expanding Universe. *Physical Review* **74**, 1198 (1948).
2. Alpher, R. A. & Herman, R. Evolution of the Universe. *Nature* 1948 162:4124 **162**, 774–775 (1948).
3. Reines, F. & Cowan, C. L. The Neutrino. *Nature* **178**, 446–449 (1956).
4. Aker, M. et al. Direct neutrino-mass measurement with sub-electronvolt sensitivity. *Nature Physics* 2022 18:2 **18**, 160–166 (2022).
5. Gaillard, M. K., Grannis, P. D. & Sciulli, F. J. The Standard Model of Particle Physics. (1998).
6. Mondal, S. PHYSICS OF NEUTRINO OSCILLATION.
7. Hawkings, R. C., Hunter, R. F., Mann, W. B. & Stevens, W. H. THE HALF LIFE OF C14. <https://doi.org/10.1139/cjr49b-054> **27b**, 545–554 (2011).
8. Suzuki, Y. & Satellite, K. The Super-Kamiokande experiment. *Eur. Phys. J. C* **79**, 298 (2019).
9. Beauchêne, A. Diffuse Supernova Neutrino Background : From Foundations towards Detection & Discovery with Super-Kamiokande and Hyper-Kamiokande Experiments. (2024) doi:10.34894/VQ1DJA.
10. Gnedin, N. Y. & Gnedin, O. Y. COSMOLOGICAL NEUTRINO BACKGROUND REVISITED. *Astrophys J* **509**, 11–15 (1998).
11. Report of the Federal Radiation Council, S. Report 7: Background Materials for the Development of Radiation Protection Standards. Protective Action Guides for Strontium-89, Strontium-90 and Cesium-137, May 1965.
12. Brush, S. G. Prediction and Theory Evaluation: Cosmic Microwaves and the Revival of the Big Bang. *Perspectives on Science* **1**, 565–602 (1993).
13. Crane, H. R. & Halpern, J. New Experimental Evidence for the Existence of a Neutrino. *Physical Review* **53**, 789 (1938).
14. Frichter, G. M., Ralston, J. P. & McKay, D. W. On radio detection of ultrahigh energy neutrinos in Antarctic ice. *Physical Review D* **53**, 1684 (1996).
15. IceCube and Neutrinos – IceCube. <https://icecube.wisc.edu/outreach/neutrinos/>.
16. Frichter, G. M., Ralston, J. P. & McKay, D. W. On Radio Detection of Ultra-High Energy Neutrinos in Antarctic Ice. (1995).

17. Collaboration, I.-G. *et al.* IceCube-Gen2: A Vision for the Future of Neutrino Astronomy in Antarctica. 53 (2014).
18. Böser, S., Kowalski, M., Schulte, L., Strotjohann, N. L. & Voge, M. Detecting extra-galactic supernova neutrinos in the Antarctic ice.
19. Wave function | Definition & Facts | Britannica.
<https://www.britannica.com/science/wave-function>.
20. Johanåberg, J. Quantifying Superposition. (2006).
21. Arvanitaki, A. & Dimopoulos, S. The Cosmic Neutrino Background on the Surface of the Earth. *Physical Review D* **108**, (2022).



אלפא

תכנית למחקר בתחומים מדעיים

האוניברסיטה העברית לנוער
לקידום החינוך למדע
מרכז המעבדות למדעים ע"ש בלמונטה



תכנית מחקר המוגשת לאישור כעבודת גמר

במסגרת תוכנית "אלפא" ירושלים

נושא העבודה:

מדידת קרינת ניטרינו קוסמית בעזרת שינויים בבסיס המיקום

או המסה

תחום הדעת: פיזיקה

פרטי התלמיד:

שם: זמר שי בריס

ת"ז: 331230110

בית ספר: שפע מקור חיים ירושלים

סמל בית הספר: 615948

נייד: 054-666-3231

מייל: zemer.baris@gmail.com

עבודת גמר לא צמודה

פרטי המנחה:

שם: נועם חי (דוקטורנט)

ת"ז: 308288141

תחום התמחות: פיזיקה תאורטית באנרגיות גבוהות.

שם מוסד המחקר המלווה: האוניברסיטה העברית

שם ראש המעבדה: פרופסור מיכאל סמולקין

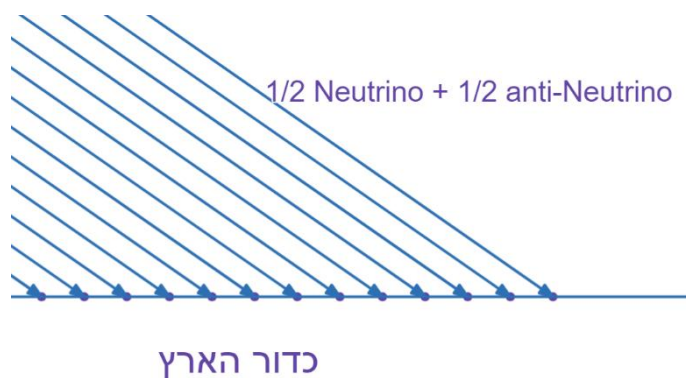
נייד: 0548008150

כתובת המייל: noam.chai@mail.huji.ac.il

שפת עבודת הגמר: עברית

מבוא

הנייטרינו הינו חלקיק יסודי. הנייטרינו לא משמש אף תפקיד באינטראקציה או חומר יומיומיים. הוא מוכר בעיקר בעולם המחקר. קיומו של הנייטרינו התגלה כתוצאה מהאנרגיה העודפת בחישובי תהליך ההתפרקות הרדיואקטיבית. במדידת ההתפרקות הרדיואקטיבית נמדדה פחות אנרגיה מהצפוי על פי חישוב המסקנה מכך היא שישנו חלקיק נוסף הנושא את האנרגיה שלא נמדדה. חלקיק זה מכונה נייטרינו ובצמוד לו קיים חלקיק אנטי חומר. קרינת הנייטרינו נוצרה במפץ הגדול וממשיכה להתקיים ביקום ומפוזרת באופן אחיד ביקום. האנטי נייטרינו קיים באותה כמות ומפוזר גם הוא באופן אחיד. לכן הקרינה של הנייטרינו והאנטי נייטרינו המגיעה לכדור הארץ הינה בכמויות שוות וקבועה (איור 1). מטרת הניסוי המתוכנן הינה למדוד את עוצמת הקרינה הזו.

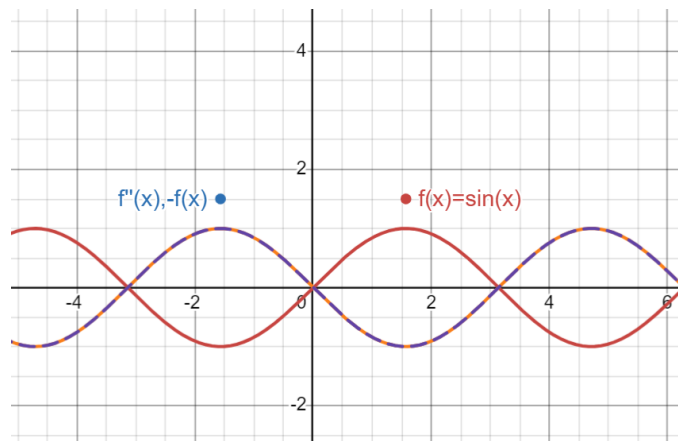


איור 1 קרינת הנייטרינו הקוסמית. קרינת הנייטרינו הקוסמית מגיעה בכמויות שוות של נייטרינו ואנטי נייטרינו

הנייטרינו שייך לקבוצת הפרמיונים¹. הוא בעל מסה מקסימלית נמוכה מאוד של 0.12 eV ² (אלקטרון וולט) לשם ההשוואה 510.9 eV הוא המסה-אנרגיה של אלקטרון. מבין החלקיקים בעלי המסה הנייטרינו הינו בעל המסה הנמוכה ביותר ככל הידוע לנו כרגע. כאשר חלקיק מושפע מכוח הוא משנה את תכונותיו בהתאם, לדוגמא המיקום שלו. שינוי המיקום יתבטא בתזוזה של מסלול הקרינה. הנייטרינו הינו ניטרלי מבחינה חשמלית ולכן השדה האלקטרומגנטי אינו משפיע עליו. הכוח החזק לא משפיע על הנייטרינו בגלל שאין לו "מטען חזק". לנייטרינו יש מסה על כן הוא מושפע משדה הכבידה ומהשדה החלש. כתוצאה מהמסה הנמוכה במיוחד ההשפעה של שדה הכבידה היא נמוכה מאוד ולמעשה לרוב בלתי מורגשת. בגלל שהוא לא מושפע מרוב הכוחות או מושפע באופן מינורי קשה מאוד למדוד את הנייטרינו עצמו.

המודל הסטנדרטי של הפיסיקה הקוונטית מתאר את כלל הכוחות והחומרים ביקום למעט כבידה בתור סט של חלקיקים. חלקיקים אלו הם אבני היסוד של היקום ומהווים חומר ואנרגיה גם יחד. חקר החלקיקים מביא להבנה של תכונות פיסיקליות של חומרים וצורות של חומרים וכוחות. ניתן לומר שחקר החלקיקים מביא להבנה מעמיקה של מבנה היקום ומהלכו. החלקיקים מתחלקים לשתי קבוצות הבוזונים והפרמיונים⁴. הבוזונים הם מרכיבי היסוד של כוח והפרמיונים הינם מרכיבי היסוד של חומר.

הבנה של התנהגות של חלקיקים באופן כללי ובכלל זה של נייטרינו מתאפשרת בעזרת משוואת שרדינגר⁵. משוואת שרדינגר הינה סט של משוואות מתוך כלל המשוואות הנקראות פונקציות גל. פונקציות גל הינן פתרונות של משוואות דיפרנציאליות מסוג $f''(x)\alpha - f(x)$. פונקציות גל הינן קבוצה של פונקציות שעבורן נכון יהיה להגיד "שהנגזרת השנייה של הפונקציה פרופורציונלית למינוס הפונקציה". ציור של פונקציות אלו מניב צורה שאפשר לתאר אותה כגל. לדוגמא המשוואות סינוס וקוסינוס הינן פונקציות גל. (איור 2)



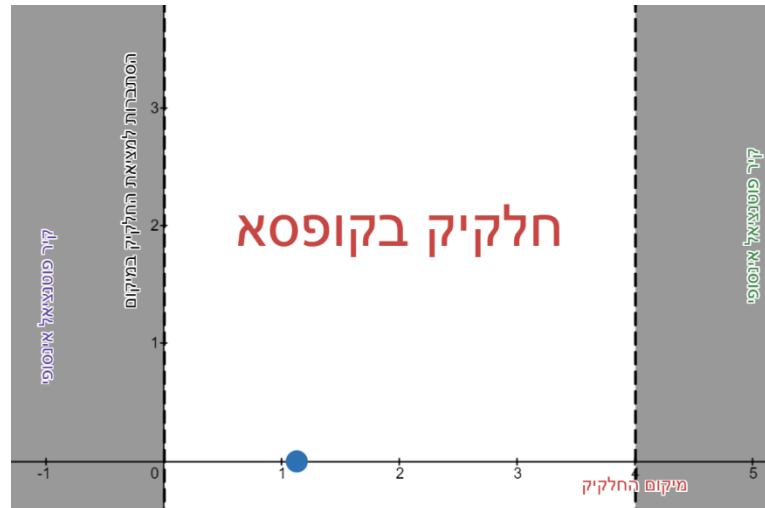
איור 2 דוגמא לפונקציית גל פונקציית הסינוס והנגזרת השנייה שלה השווה למינוס הפונקציה ניתן לראות שסינוס נראית כמו גל

משוואת שרדינגר (איור 3) הינה משוואה המתארת את כל תכונות החלקיק. המשוואה כשלעצמה אינה מתארת אף אובייקט פיזי והינה אובייקט אבסטרקטי בלבד. על משוואת שרדינגר מבצעים רצף של פעולות על מנת לייצר משוואה בעלת משמעות פיזית.

$$\hat{H}|\psi\rangle = i\hbar \frac{d}{dt}|\psi\rangle$$

איור 3: משוואת שרדינגר⁷⁻⁵

פונקציית הגל היא פונקציה הסתברותית⁵. במילים אחרות פונקציית גל מאפשרת לחשב הסתברות של מאורעות, ועד כמה כל מאורע סביר. במכניקה קוונטית תכונות חלקיקים הן הסתברותיות. המשמעות היא שתכונות החלקיקים אינן מתקיימות באופן אבסולוטי אלא בהסתברות. לדוגמא אם נכניס כדור (חלקיק קלאסי) לקופסא הוא יהיה במיקום מסוים באופן קבוע ואבסולוטי, לגבי כל מיקום בקופסא ניתן לקבוע בוודאות האם יש שם את הכדור (1) או שאין (0), (איור 4) לעומת זאת חלקיק קוונטי בקופסא אין כל



איור 4 חלקיק בקופסה חלקיק קלאסי בקופסה הסיכוי למוצאו בנקודה במרחב היא מוחלטת או אפס או אחד

ודאות שהוא יהיה במיקום מסוים. ניתן רק לקבוע בוודאות שהוא נמצא במקום כלשהו בקופסה. לגבי כל נקודה בקופסה ישנה הסתברות קטנה מ-1 שהוא יהיה בה. את ההסתברות שהחלקיק יהיה במקום כלשהו בזמן מסוים ניתן לתאר בעזרת מניפולציות על משוואת שרדינגר (איור 5). העובדה שהתכונות של חלקיקים הינן הסתברותיות נקראת סופרפוזיציה⁸. סופרפוזיציה מוגדרת היטב במשוואת שרדינגר. משמעות הדבר שהפונקציה מתארת את הסופרפוזיציה של החלקיק והתכונה אותו היא מתארת. משוואת שרדינגר מקבלת ערך אפשרי של תכונה של חלקיק x ומחזירה ערך בין אפס לאחד $f(x)$. משמעות הערך המתקבל ממשוואת שרדינגר $f(x)$ היא ההסתברות שבמידה של התכונה בחלקיק יתקבל הערך x . פונקציית הגל המסומנת לרוב בפסי⁸ Ψ היא הפונקציה המאחסנת את המידע על החלקיק בצורה הסתברותית. בעזרת פעולות על הפונקציה אפשר "לחלץ" מידע ספציפי כגון מיקום או תנע של החלקיק. כך אפשר להפעיל פונקציות שונות על פסי ולמצוא הסתברויות למציאה של תכונות מסוימות של החלקיק.

דוגמא לתיאור מלא של מערכת קוונטית.

נתאר את המקרה המכונה "בור פוטנציאל אין סופי". משמעו קופסה חד ממדית שקירותיה בלתי חדירים ובתוכה חלקיק. נגדיר קירות אינסופיים ובלתי חדירים (איור 4)

$$f(x) = \begin{cases} \infty, & x < 0 \\ \infty, & x > l \end{cases}$$

נחשב את משוואת שרדינגר של החלקיק ונתאר בעזרתה את מיקומו.

ננרמל את משוואת שרדינגר לצורה⁹

$$\Psi(x) = a \sin(bx) + c \cos(bx)$$

רמת האנרגיה למשוואת שרדינגר המנורמלת לצורה הזו היא⁹

$$\frac{(\hbar k)^2}{2m}$$

כאשר $\hbar$ שווה

$$\frac{h}{2\pi}$$

h הוא קבוע פיזיקלי שערכו :

$$h = 6.62607015 * 10^{-34} kg * m^2/s$$

קבוע פלאנק נמדד בתנע כפול מרחק

נציב את תנאי השפה :

1 הקירות בלתי חדירים מהנקודות $x = l$ ו $x = 0$

$$\Psi(l) = 0, \Psi(0) = 0$$

2 החלקיק נמצא בתוך הקופסא :

$$\int_0^l \Psi(x)^2 dx = 1$$

טענה א: $c = 0$

נתון :

$$\Psi(0) = 0$$

נובע כי

$$a \sin(0) + c \cos(0) = 0$$

נציב

$$\sin(0) = 0, \cos(0) = 1$$

ונקבל

$$0 + c = 0$$

$$c = 0$$

נובע כי

$$\Psi(x) = a \sin(bx)$$

טענה ב: $b = \frac{\pi n}{l}$ נגדיר n הוא מספר שלם

נתון :

$$\Psi(l) = 0$$

נציב

$$a \sin(bl) = 0$$

$$\sin(bl) = 0$$

נפתור עבור b

$$b = \frac{\pi n}{l}$$

נגדיר n הינו מספר שלם

ונציב

$$\Psi(x) = a \sin\left(\frac{\pi n}{l} x\right)$$

$$a = \sqrt{\frac{2}{l}} \text{ : טענה ג:}$$

נתון : החלקיק בתוך הקופסא

נתון : מציאת ההסתברות למיקום שווה לערך מוחלט של משוואת שרדינגר שלה בריבוע⁹

נתון : מציאת ההסתברות בתוך שווה לאינטגרל מציאת ההסתברות בין גבולותיו של התווך⁹

$$\int_0^l \Psi(x)^2 dx = 1$$

נציב

$$\int_0^l a^2 * \sin\left(\frac{\pi n x}{l}\right)^2 = 1$$

נחשב כי

$$\int a^2 * \sin(bx)^2 = a^2 \left(\frac{1}{2} x - \frac{1}{4b} \sin(2bx) \right)$$

$$\Psi(0) = 0$$

לכן קבוע האינטגרציה שווה לאפס:

$$C = 0$$

נציב עבור b

$$a^2 \left(\frac{1}{2} x - \frac{1}{4\pi n} \sin\left(2 \frac{\pi n}{l} x\right) \right) = a^2 \left(\frac{1}{2} x - \frac{l}{4\pi n} \sin\left(2 \frac{\pi n}{l} x\right) \right)$$

נציב עבור הגבולות של האינטגרל

$$a^2 \left(\frac{1}{2} l - \frac{l}{4\pi n} \sin\left(2 \frac{\pi n}{l} l\right) \right) = a^2 \left(\frac{l}{2} - \frac{l}{4\pi n} \sin(2\pi n) \right)$$

נוכח n מספר שלם נובע כי

$$\sin(2\pi n) = 0$$

נציב

$$a^2 \left(\frac{l}{2} \right) = 1$$

$$a^2 = \frac{2}{l}$$

$$a = \sqrt{\frac{2}{l}}$$

משוואת שרדינגר של החלקיק הינה $\Psi(x)$.

$$\Psi(x) = \sqrt{\frac{2}{l}} \sin\left(\frac{\pi n x}{l}\right)$$

האנרגיה במערכת היא?

$$\frac{\pi^2 \hbar^2}{2ml^2} n^2$$

נגדיר מסת החלקיק m

נוכח שגרף ההסתברות למיקום החלקיק הוא ערך מוחלט של משוואת החלקיק בריבוע נציב

$$\Psi(x)^2 = \frac{2}{l} \sin^2\left(\frac{\pi nx}{l}\right)$$

זוהי התפוזות ההסתברות למציאת חלקיק בתוך קופסא בעלת קירות בלתי חדירים באורך l / (איור 5)

הסימולציה תשתמש בשיטה נומרית לפטירת משוואת שרדינגר על ידי דיסקרטיזציה של המרחב (שיטת אוילר לקירוב משוואות דיפרנציאליות). המטרה היא לקרב את ההתפתחות של המשוואה בזמן בעזרת פירוק המרחב לחלקים דיסקרטיים בגדלים dx. לאחר מכן נעשה דיסקרטיזציה גם לזמן בצעדים dt. את הדיסקרטיזציה במרחב נעשה באמצעות העברת הפונקציה ממצב רציף לוקטור בו כל איבר הוא הפונקציה במיקום שלו כפול dx

$$\psi[i] = f(i * dx)$$

הדיסקרטיזציה בזמן תתבטא במעבר ממצב למצב באופן שאינו רציף בקפיצות הזמן dt. על מנת להזיז את הפונקציה בזמן אנחנו נכיל עליה את ההמולטינן. ההמולטינן מורכב מכמה חלקים במערכת וביחד הם המגדירים את ההתקדמות של החלקיק לאורך הזמן הגדרת ההמולטינאן היא:

$$H = \frac{p^2}{2m} + v(x)$$

אחד הדרכים לחשב אותו היא בעזרת ההגדרה:

$$p^2 = -\nabla^2 * \hbar^2 = \partial_x^2$$

את קבוע פלאנק המצומצם ננרמל לאחד על מנת להקל על האנליזה. המשוואה הזאת מראה כי p^2 הוא הנגזרת השנייה במרחב של פונקציית הגל. את פונקציית הגל אנחנו מתארים כרשימה ולכן במקום לעשות נגזרת על המשוואה עצמה אותה איננו יודעים והיא מסובכת מידי לגזור במקום זאת אנחנו נקרב את גזירת המשוואה. הגדרת הנגזרת היא:

$$f'(x) = \frac{f(x+h) - f(x)}{h}$$

במקום זאת כאן אנחנו נקרב את הנגזרת בעזרת:

$$f'[i] = \frac{f[i+1] - f[i]}{dx}$$

את הנגזרת השנייה נכתוב:

$$f''[i] = \frac{f[i+2] - 2f[i+1] + f[i]}{dx^2}$$

לשם הנוחות נוכל עכשיו להמיר את אופרטור הנגזרת לאופרטור מטריצה על מנת זאת נמצא מטריצה שתעשה את אותה הפעולה:

$$\nabla^2 = \frac{1}{dx^2} \begin{pmatrix} 2 & -1 & 0 \\ -1 & 2 & -1 \\ 0 & 2 & -1 \end{pmatrix}$$

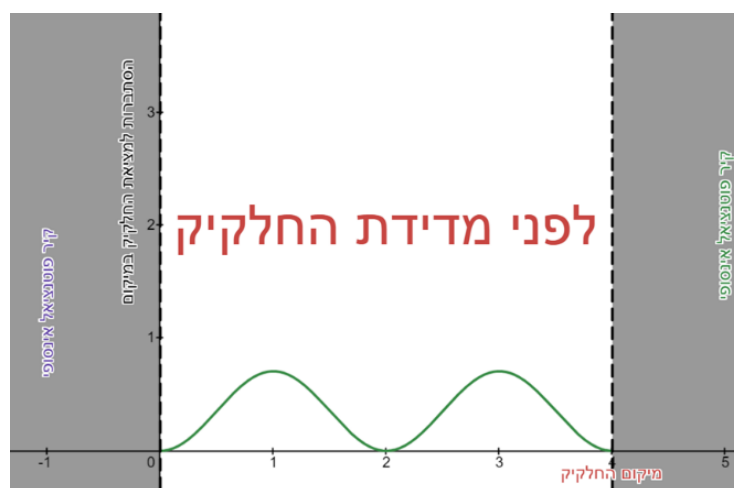
כמובן שהמטריצה הזאת צריכה להיות באורך של הרשימה שלנו. את הפוטנציאל אנחנו נלכסן בתוך מטריצה על מנת להוסיף אותו ולקבל את אופרטור הזמן. בעזרת חקירה נומרית של האופרטור והשפעתו על הסביבה נוכל להבין את מקדמי ההחזרה של הנייטרונים ואת הצורות שבהם יהיה ניתן לאתר אותם.

על מנת לתאר את ההתקדמות בזמן של החלקיקים. בסימולציה אגדיר את מקדם צפיפות הכוח על פי מחקרים קודמים. מטרת הסימולציות היא למצוא את המקומות בהם ישנו פער הגדול ביותר בין ניוטרונים לאנטי ניוטרונים היכול לייצר כוח מדיד. כמו כן אנסה לצייר תמונה כללית של האינטרקציה של החלקיקים עם המרחב על מנת להבין טוב יותר איך נוכל למדודם.

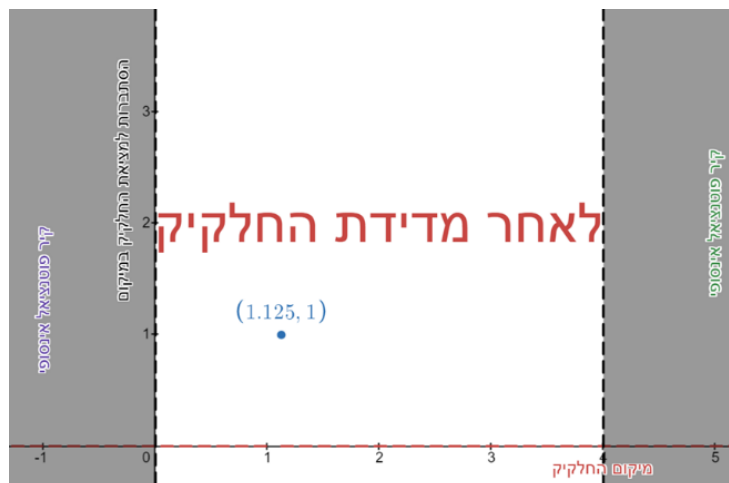
בצורה הקלאסית חלקיקים קוונטים צריכים להיות במשוואות יחסותיות. משוואות קשות הרבה יותר ממשוואות שרדינגר וקשה מאוד לחקור אותם. אך חלקיקי הניוטרונים הקוסמיים אותם אחקור שונים ואינם צריכים משוואות יחסותיות. זאת מכיוון שחלקיקי הניוטרונים הקוסמיים אותם אני חוקר נוצרו במאיות הראשונות למפץ הגדול חלקיקים מספרי הגל של אלו קטנו בהתאם להתרחבות היקום ביחד עם יריעות המרחב זמן מה שמוביל לרמות אנרגיה בהם היחסות היא זניחה לכן במהלך המחקר שלי אוכל לתאר את החלקיקים ביחסים עם גופים מאסיביים בלי הצורך לתאר את היחסותיות של החלקיקים.

עבור המחקר שלי אוכל לתאר את אינטרקציה החלקיקים בעזרת משוואת שרדינגר ומידע ממחקרים קודמים בצורה אפקטיבית המניבה את צורת התזוזה של החלקיקים על מנת לחקורם. עבור הפוטנציאלים אנסה לחקור אותם בלי להיכנס לפרטי איזה חומר אלא להסתמך על מקדמי החזרה ממחקרים קודמים.

הסתברות הינה תכונה המתארת דבר לא ידוע, לאחר שיש ידיעה אין משמעות לפונקציה הסתברותית המתארת את הסיכוי לכל אחד מהאירועים. תחזית מזג האוויר למחר הינה הסתברות שירד גשם ואילו תיאור מזג האוויר אתמול הינו אבסולוטי. באופן דומה לאחר מדידה של תכונה של חלקיק מחליפה המדידה את הפונקציה ההסתברותית (איור 6). תהליך זה מכונה קריסה של הפונקציה. במכניקת הקוונטים התכונות שנמדדו הם בערכים אבסולוטיים. לאחר הקריסה החלקיק חוזר למצב של אי וודאות¹⁰ והפונקציה חוזרת להיות הסתברותית. (איור 5)



איור 5 פונקציית המיקום של חלקיק בקופסא. ההסתברות למציאת חלקיק קוונטי בקופסא הגרף מתאר את ההסתברות למציאת החלקיק בנקודה במרחב



איור 6 קריסת פונקציית המיקום של חלקיק בקופסא לאחר מדידתו. תיאור ההסתברות של מציאת החלקיק הקוונטי בקופסא בנקודה מסוימת לאחר מדידתו

במכניקה קוונטית יש אופציה לתאר את פונקציית הגל בבסיסים שונים. הבסיסים הינם אובייקט מתמטי המיצג את התכונות הנחקרות. דוגמאות לבסיסים כוללים תכונות טריוויאליות כגון מיקום, תנע, אנרגיה, וגם תכונות מורכבות ולא טריוויאליות כגון מסה. כל תכונה של חלקיק יכולה לשמש כבסיס. בעבודה זו אשתמש בבסיס המיוחד לנייטרינו, הבסיס מכונה flavor base (בסיס הטעם) בסיס זה מתאר את ההסתברות לפיזור הסתברותי מסוים של מסה.¹¹

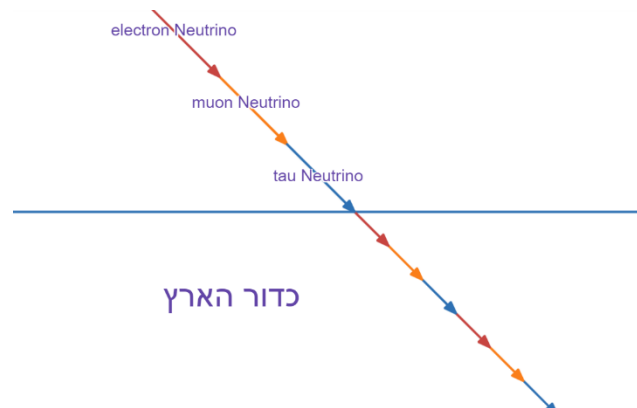
וולפגנג פאולי שיער את קיום הנייטרינו לראשונה בשנת 1930. הנייטרינו שוער כפיתרון לבעיה של האנרגיה העודפת בהליך ההתפרקות הרדיואקטיבית שתואר לעיל. לאחר כמה שנים חישב אנריקו פרמי את התכונות של החלקיק ששיער פאולי. פרמי הגיע למסקנה כי ההסתברות גבוה שהנייטרינו יהיה חלקיק בלתי מדיד. החישובים של פרמי הראו כי הנייטרינו מגיב באינטראקציות חלשות ביותר וכי הסיכוי לאינטראקציה עם נייטרינו קלוש. לאחר 25 שנה בשנת 1955 מדדו לראשונה את האנטי נייטרינו בכור הגרעיני של רוסיה ובכך הוכיחו את קיומו.¹²

המסה של הנייטרינו אינה קבועה לחלוטין, ישנם שלושה פיזורי מסה האופייניים לנייטרינו. תכונת פיזור המסה מוכנה טעם. הטעם של הנייטרינו משנה את תכונותיו. לכן למעשה יש שלושה סוגי נייטרינו המכונים טעמים או דורות. כל טעם מקושר לחלקיק אחר, לאלקטרון למימיון ולטאון. אחת התכונות המיוחדות שיש לנייטרינו היא היכולת לשנות בין הטעמים באופן מחזורי.¹¹ מחזורים אלו נקראים אוסילציות נייטרינו. מחישוב ההסתברות לאוסילציה ניתן ללמוד כמה דברים:

1. אוסילציות הם תכונה טבעית ובסיסית של נייטרינו. האוסילציות אינן נובעות מאינטראקציה עם חומר או כוח מסוים.¹¹(איור 7)

2. פונקצית ההסתברות היא מחזורית ביחס לזמן. והמשמעות היא שהאוסילציות עצמן מחזוריות ואינם שינוי חד פעמי של הנייטרינו.¹¹(איור 7)

באינטראקציות שונות ההסתברות לאוסילציות משתנה. ככל שהאינטראקציה חזקה יותר האוסילציות תדירות יותר. האינטראקציה מביאה באופן ישיר לאוסילציות מהירות יותר בהסתברויות גבוהות יותר. שינוי זה הוא מדיד. (איור 7)

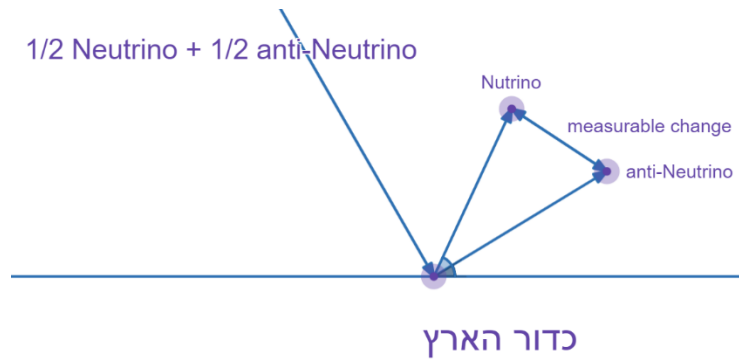


איור 7 תיאור האוסילציות של נייטרינו האוסילציות הם אירוע טבעי אך במעבר דרך חומר האוסילציות מתרחשות באופן תדיר יותר.

באינטראקציה של נייטרינו עם מסה ישנה הסתברות להחזרה (התרחקות מהמסה כמו אור שחוזר) או לחזרה של הנייטרינו אל המסה (כמו בקרינת רנטגן). זווית ההחזרה של נייטרינו החוזר מהמסה תלויה בתכונותיו (מהירות, תנע, חומר/אנטי חומר...) ובזווית ממנה הגיע.

שתי תכונות מרכזיות שתיארת לעיל זווית ההחזרה והשינוי באוסילציות לא בהכרח סימטרי בין נייטרינו לאנטי נייטרינו. מדידת ההפרש בין שינוי התוכנה בנייטרינו לשינוי התכונה באנטי נייטרינו תהווה אינדיקציה לקיומם של נייטרינו ואנטי נייטרינו באזור הנמדד.

בעזרת חומר המייצר את מקסימום ההפרש בין הנייטרינו לאנטי נייטרינו יהיה ניתן לייצר ניסוי המותאם לרמת הרגישות הטכנולוגית הקיימת באקדמיה בימנו. בניסוי כזה נוכל למדוד את ההפרש הנוצר בין הנייטרינו לאנטי נייטרינו או בין הטעמים השונים באזור מסוים. מדידה זו תהיה הבסיס לחישוב של עוצמת קרינת הנייטרינו. את עוצמת הקרינה נחשב בעזרת בדיקה נומרית שתתאר לנו איזו עוצמה של קרינה יכולה לייצר הפרש דומה לזה שקיבלנו. (איור 8)



איור 8: קרינת נייטרינו קוסמית פוגעת בפוטנציאל זווית ההחזרה של הנייטרינו מכדור הארץ שונה מזאת של האנטי נייטרינו בהתאם לתכונותיהם שינוי הריכוזים מדיד

מטרת המחקר

מטרת המחקר היא לתכנן ניסוי אשר ימדוד את הקרינה הקוסמית של הנייטרינו. המטרה היא לחשב נומרית ואנליטית את הפוטנציאל שיפריד את הנייטרינו והאנטי נייטרינו באופן מקסימלי. בעזרת חישוב הפוטנציאל ניתן יהיה לתכנן את הניסוי שימדוד את קרינת הנייטרינו הקוסמית. במחקר זה אתכנן את הניסוי אך לא אבצע אותו. בניסוי מציבים חומר שזהותו נובעת מהחישוב, החומר הזה מפריד בין הנייטרינו לאנטי נייטרינו בקרינת הנייטרינו הקוסמית. על ידי מדידת הכוח החלש במיקום שיחושב, ניתן יהיה לחשב גם את עוצמת קרינת הנייטרינו הקוסמית. ייתכן שיעלה מחישובי כי כדור הארץ כשלעצמו יוכל להוות חומר מתאים לניסוי.

שאלת המחקר

מהי השפעת מבנה החומר על ההפרדה בין סוגים שונים של נייטרינו ועל היכולת למדוד את קרינת הנייטרינו הקוסמית?

שיטות

- אייצג את המערכת בעזרת משוואת שרדינגר. כדי להגיע למשוואה המתארת את המצב הספציפי נשתמש בתנאי שפה ונשתמש בתכונות ידועות ממחקרים קודמים^{11,13,14} על מנת לקבוע ערכים בלתי ידועים במשוואה.
- אפתור את המשוואות שהתקבלו בצורה אנליטית או אקרב את פתרון בצורה נומרית בעזרת כלים לקירוב משוואות דיפרנציאליות. אאמת את התוצאות האנליטיות בעזרת קירוב נומרי.
- אבדוק את הדינמיקה והפיזור של הנייטרינו והאנטי הנייטרינו. אחשב את הצפיפות ונחלץ את עוצמת האינטראקציה של המערכת עם כלי המדידה.
- אשתמש בנומריקה כדי לאמת את התוצאות שקיבלנו באנליטי וכדי להרחיב את המידע למורכבויות שאין ביכולתי לפתור.
- אתאים את התוצאות האפשריות של המחקר לכלי מדידה קיימים על מנת לייצר את הפוטנציאל הפשוט ביותר העונה למטרות המחקר ויכול להימדד על ידי כלים הקיימים במעבדות בימינו.
- הנומריקה תתבסס על דיסקרטיזציה של המרחב ופתרון משוואות דיפרנציאליות ומשוואות גל מטריצות ערכים עצמיים ושימוש בידע של קורסים במתמטיקה לפיזיקאים ופתרון משוואות שרדינגר תלויה בזמן. המשוואות הינן תוצאת התהליך שתואר לעיל.
- אשתמש בידע של חשבון אינפטיסימלי, אלגברה לינארית ומדעי המחשב.

תכנון שעות העבודה:

50-60 שעות – קריאה, כתיבת הצעת מחקר...

50-60 שעות – עבודת מעבדה: תיאור המערכת בצורה ראליסטית

חישוב אנליטי ונומרי של המשוואות המתארות את המערכת

אימות התוצאה בעזרת סימולציה

20-40 שעות – עיבוד התוצאות, כתיבה וניתוח המסקנות העולות מהן

גאבט:

פעולה/חודש						
24/01	X	כתיבה והגשה הצעת מחקר				
24/02	X					
24/03	X					
24/04	X					
24/05				X		
24/06					X	
24/07					X	
24/08					X	
24/09						
24/10						
24/11						
24/12						
25/01						

ביבליוגרפיה:

1. Reines, F. & Cowan, C. L. The Neutrino. *Nature* 1956 178:4531 **178**, 446–449 (1956).
2. Aker, M. *et al.* Direct neutrino-mass measurement with sub-electronvolt sensitivity. *Nature Physics* 2022 18:2 **18**, 160–166 (2022).
3. CODATA Value: electron mass. <https://physics.nist.gov/cgi-bin/cuu/Value?me>.
4. Gaillard, M. K., Grannis, P. D. & Sciulli, F. J. The Standard Model of Particle Physics. (1998).
5. Wave function | Definition & Facts | Britannica. <https://www.britannica.com/science/wave-function>.
6. Hamiltonian function | Classical Mechanics, Lagrangian Formalism & Variational Principle | Britannica. <https://www.britannica.com/science/Hamiltonian-function>.
7. Faye, J. Copenhagen Interpretation of Quantum Mechanics.
8. Johanåberg, J. Quantifying Superposition. (2006).
9. 978-965-493-774-0 : מרוד מוסייב : נסודות לישומים : מכניקה קוונטית : magnespress.co.il : Books.
https://www.magnespress.co.il/book/%D7%9E%D7%9B%D7%A0%D7%99%D7%A7%D7%94_%D7%A7%D7%95%D7%95%D7%A0%D7%98%D7%99%D7%AA-5760.
10. מחשבות - הודאות האבודה של הטבע והאחדות הקוואנטית - ThinkIL.
<https://thinkil.co.il/texts/m055p004-025/>.
11. Mondal, S. Physics of Neutrino Oscillation. (2015).
12. Birth of the neutrino, from Pauli to the Reines-Cowan experiment - INSPIRE.
<https://inspirehep.net/literature/1774453>.
13. Huang, G. Neutrino-antineutrino Asymmetry of $C\$\nu\$\mathcal{B}$ on the Surface of the Round Earth. (2024).
14. Arvanitaki, A. & Dimopoulos, S. The Cosmic Neutrino Background on the Surface of the Earth. *Physical Review D* **108**, (2022).