



איתור נייטרינואים דמויי רוחות רפאים: שליחים זעירים מהיקום

Milind Vaman Diwan^{1*}, Karen McNulty Walsh²

¹המחלקה לפיזיקה, המעבדה הלאומית של ברוקהייבן, אפטון, ניו-יורק, ארצות הברית
²המשרד למדיה ותקשורת, המעבדה הלאומית של ברוקהייבן, אפטון, ניו-יורק, ארצות הברית

סוקרים צעירים

ANUSHKA

גיל: 12



RIK

גיל: 13



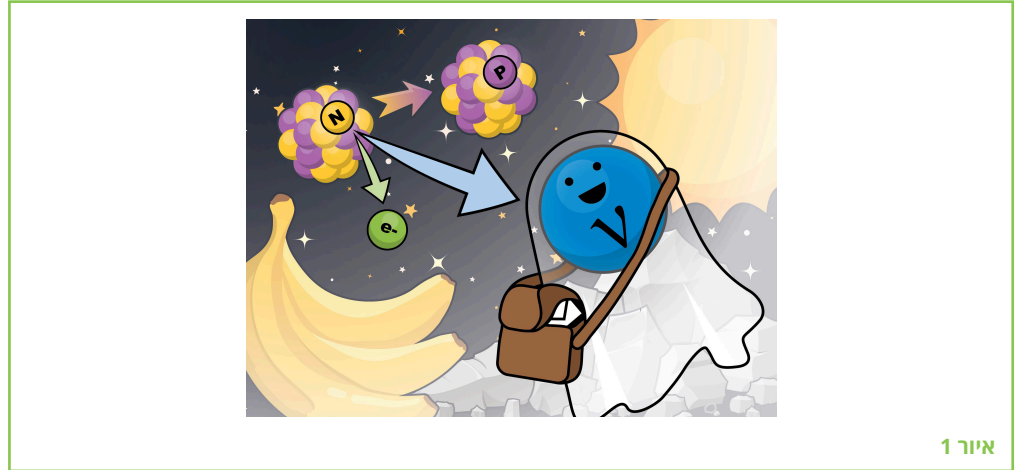
נייטרינואים הם חלקיקים זעירים, תת-אטומיים. מיליארדים מהם עוברים דרכנו בכל שנייה – מרביתם מגיעים מהשמש שלנו. אולם שלא כמו אור השמש שאנו יכולים לראות בקלות, קשה מאוד לִאֶתֵר נייטרינואים. כדי "לראות" אותם, אנו צריכים לבנות גְּלָאִים גדולים מאוד ולחסום אותות מכל החלקיקים האחרים. מדענים עושים זאת על ידי בניית חיישני נייטרינו עמוק מתחת לאדמה. במאמר הזה, אתם תלמדו כיצד הגלאים העצומים האלה יכולים לסייע לפענח את ה"הודעות" שהחלקיקים דמויי רוחות הרפאים האלה שולחים לגבי ההרכב של הכוכבים, הגלקסיות, היקום, וההיסטוריה שלהם.

הקדמה

נייטרינואים הם חלקיקים זעירים, תת-אטומיים, שנראים כמעט כמו רוחות רפאים. מיליארדים מהם עוברים דרכנו בכל שנייה בלי להותיר סימן!

איור 1

דעיכה של אטום רדיואקטיבי, אשלגן 40 - שנמצא בבננות ויש לו 40 פרוטונים (p) וניוטונים (n) בגרעין - אל סידן 40, פלוס אלקטרון (e-) וחלקיק שליח נייטרלי דמוי רוח רפאים שנקרא נייטרון (האות היוונית: ν שמבוטאת כ-nu). הבנת ההתנהגות של נייטרונים עשויה לסייע לחשוף סודות חשובים של היקום. קרדיט: טיפאני באומן, המעבדה הלאומית ברוקהייבן.



איור 1

תגובות גרעיניות (Nuclear Reactions)

תגובות גרעיניות מתרחשות כאשר גרעינים אטומים מגיבים זה עם זה ויוצרים גרעינים אחרים. בשמש, גרעיני מימן (פרוטונים) משתלבים כדי ליצור גרעיני הליום ולשחרר אנרגיה - חום ואור שמש.

מרביתם מגיעים מהתגובות הגרעיניות שמתדלקות את השמש שלנו. אולם שלא כמו אור השמש שאנו רואים ומרגישים על הפנים שלנו, החלקיקים דמויי רוחות הרפאים האלה לעיתים קרובות לא מתקשקים עם חומרים רגילים. כדי "לראות" נייטרונים, מדענים בונים גלאים גדולים מאוד ורגישים, לעיתים קרובות עמוק מתחת לאדמה. החומר שמרכיב את כדור הארץ מסייע לסנן אותות מחלקיקים אחרים, כך שלאותות שנובעים מהאינטראקציות הנדירות של נייטרונים יש סיכוי להיות מאותרים. הגלאים העצומים האלה מסייעים למדענים לאתר את ה"הודעות" שהחלקיקים דמויי רוחות הרפאים האלה נושאים. כאשר מדענים מפענחים את ההודעות, הם לומדים על הקשר בין נייטרונים לבין ההרכב של כוכבים, גלקסיות היקום וההיסטוריה שלהם.

מהו נייטרון?

נייטרונים הם חלקיקים קלים מאוד ללא מטען חשמלי. הם נפלטים כאשר גרעין אטום לא יציב דועך. **דעיכה רדיואקטיבית** כזו מתרחשת כל הזמן סביבנו. מינרלים בסלעים ואפילו אשלגן בבננות דועכים ומייצרים נייטרונים (ראו איור 1). אולם הרבה יותר נייטרונים מגיעים מהתגובות הגרעיניות בשמש מאשר מכל מקור אחר.

דעיכה רדיואקטיבית (Radioactive Decay)

הגרעינים של הרבה אטומים אינם יציבים, ובמהלך הזמן הם מתפרקים ומשחררים חלקיקים אנרגטיים כמו למשל קרני אלפא, בטא וגמא. התהליך הזה של התפרקות נקרא דעיכה רדיואקטיבית.

לא משנה מה המקור שלהם, נייטרונים הם לגמרי לא מזיקים מאחר שהם לא מתחברים יחד או מתקשקים עם כמעט שום דבר. הם מגיעים מהשמש ומהחלל החיצון ועוברים ישירות דרך חומר רגיל - אפילו דרך הגוף שלנו ודרך כדור הארץ עצמו - בלי שנדע. באופן הזה, הם קצת כמו רוחות רפאים - כאן, ובכל זאת בלתי נראים. אולם מאחר שנייטרונים נושאים מידע על מה שמתרחש בתוך הליבות של כוכבים ושל גלקסיות, מדענים רוצים לדעת עליהם הרבה יותר. נייטרונים עשויים אפילו לסייע לנו להבין מה התרחש כאשר היקום שלנו נוצר לפני כמעט 14 מיליארדי שנים!

איך לתפוס חלקיק דמוי רוח רפאים

נייטרונים לעיתים רחוקות מתקשרים עם חומר רגיל, ולכן קשה מאוד לאתר אותם.

אם תמקמו כוס מים על שולחן, מיליארד נייטרינואים יעברו דרכה בכל שנייה. מרבית החלקיקים המיסטוריים האלה נעים ישר דרך החומר בלי ליצור קול או להשאיר סימן. אולם לעיתים נדירות ביותר, בסביבות פעם אחת בכל עשרה מיליון-מיליארד פעמים, נייטרינו יכה באחד מהאטומים שמרכיבים את מולקולת המים. האינטראקציה הנדירה הזו עשויה ליצור הבהוב אור זעיר או להותיר מטען חשמלי חופשי. ההבהוב הזה חלש מכדי לראותו בעיניים. אולם מדענים יכולים לבנות גלאים רגישים מאוד במטרה לאתר את האותות החלשים האלה. כמו משהו מהסרט "מכסחי השדים", האלקטרוניקה שבתוך הגלאים מגבירה את האותות כדי להפוך את "רוחות הרפאים" הבלתי נראות לנראות!

אולם המתנה להתרחשות של אחת מתוך עשרה מיליון-מיליארד אינטראקציות יכולה לארוך זמן רב מאוד. כדי לתפוס מספיק נייטרינואים במטרה ללמוד משהו עליהם, מדענים צריכים "כוס מים" גדולה יותר – מכלים ענקיים שמלאים במיליוני ליטרים! והם צריכים לשים את מכלי הגלאים העצומים עמוק מתחת לאדמה.

אנטי-חומר (Antimatter)

לכל סוג של חלקיק חומר טעון יש חלקיק משלים שטעון במטען ההפוך. החלקיקים הזוהים אך טעונים הפוך האלה הם אנטי-חומר (או אנטי-חלקיקים). לדוגמה, האנטי-חומר המשלים של מיאון (שטעון שלילית) הוא אנטי-מיאון (שטעון חיובית). לנייטרינואים אין מטען, אולם יש להם אנטי-חלקיקים; הבנת האופי של האנטי-נייטרינואים האלה היא אחת התעלומות החשובות ביותר בפזיקה.

טעמים של נייטרינו (Neutrino Flavors)

נייטרינואים מגיעים בשלושה טעמים, או סוגים, שנקראים על שם סוגים שונים של חלקיקים טעונים שהם מייצרים כשהם מתקשרים עם חומר רגיל. שלושת החלקיקים היסודיים הטעונים שלילית הם האלקטרון, המיאון וחלקיק הטרטאו. הם זהים בכל מובן, פרט לכך שהמיאון כבד פי 200 מהאלקטרון, וחלקיק הטרטאו כבד פי 3,500 מהאלקטרון.

מדוע? מאחר שנייטרינואים הם לא החלקיקים היחידים שחוצים את כדור הארץ. הרבה חלקיקים אנרגטיים אחרים שידועים כקרינה קוסמית גם זורמים מהחלל החיצון. כל אחד מחלקיקי הקרינה הקוסמית האלה יכול לגרום לאינטראקציה עם הגלאים. אם מְכַל הגלאי היה מעל לאדמה, מיליוני אינטראקציות של חלקיקי קרינה קוסמית היו ממסכים בקלות את אותות הנייטרינו הנדירים. אולם כאשר הגלאים עמוק בתוך האדמה, הקרינה הקוסמית נעצרת על ידי אינטראקציות עם האטומים של כדור הארץ, בעוד שהנייטרינואים עוברים ישר הלאה ומשאירים את חותמם בגלאים.

סוגים שונים של נייטרינואים וגלאים

לנייטרינואים יש טווח גדול של אנרגיות. הווריאציה הזו יכולה להוביל או להבהוב אור זעיר, או להבהוב בהיר מאוד בגלאים שמלאים במים. נייטרינואים גם מגיעים בשלושה סוגים שונים, שנקראים "טעמים". מדענים למדו כיצד לבנות גלאים שמתאימים לכל סוג של נייטרינו ולטווח האנרגיות הרחב שלהם.

האינטראקציה של כל סוג שונה של נייטרינו מייצרת סוג אחר של מטען טעון שלילית. נייטרינו אלקטרוני מייצר אלקטרון (די פשוט, לא?). שני סוגי הנייטרינו האחרים נקראים על שם חלקיקים תת-אטומיים אחרים, כבדים יותר: נייטרינו מיאוני מייצר חלקיק מיאון; ונייטרינו טאואוני מייצר חלקיק טאו.

ישנן גם גרסאות אנטי-חומר לשלושת טעמי הנייטרינו. אלו בדיוק אותו הדבר כמו נייטרינואים רגילים, פרט לכך שהם מייצרים חלקיקים טעונים חיובית בגלאים.

מדענים יכולים להבחין בין החלקיקים האלה מאחר שכל סוג משאיר תבנית שונה בגלאי. לדוגמה, מיאון משאיר עקבות ישרות, אלקטרוני נראים כמו מטחים, וחלקיקי טאו דועכים במהירות ומייצרים מספר עקבות ישרות. באמצעות תבניות שונות, מדענים יכולים לפענח את טעמי הנייטרינו ואת ההודעות החבויות שנישאות על ידי כל חלקיק דמוי רוח רפאים.

איור 2

מדען עומד בתוך גלאי ה-ProtoDUNE במעבדת CERN האירופית לפני שהוא מולא בנוזל ארגון נקי וקר (-186°C)! המדען בוחן את פני השטח הפנימיים, שנמצאים בקופסה מבודדת העשויה פלדת אל-חלד נקייה מאוד. כאשר החיישן ממולא ופעיל, המשטחים האלה מופעלים במתח גבוה כדי לגרום לחלקיקים הטעונים שמוצרים על ידי יינון של הארגון הנוזלי להיסחף ולהיאסף על ידי אלקטרוניקה רגישה, כך שמדענים יוכלו לתעד אותם. קרדיט: מעבדת פרמי למאיץ הלאומי.

ארגון נוזלי (Liquid Argon)

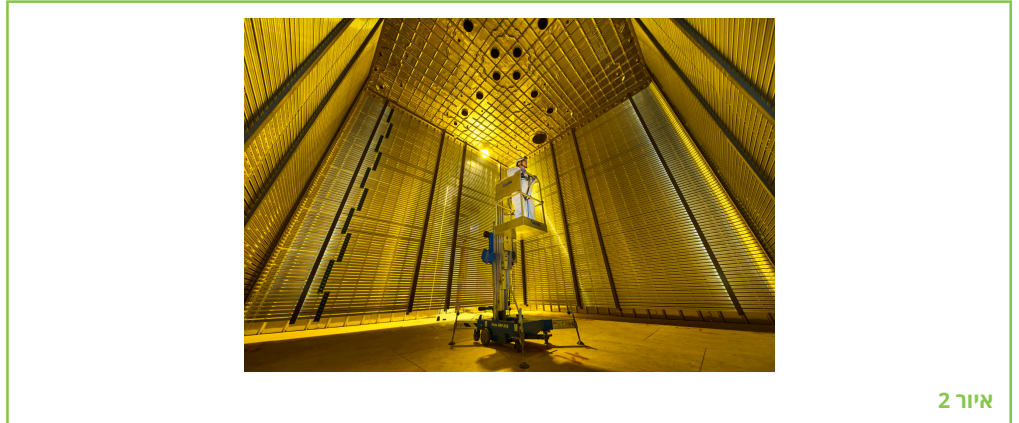
ארגון הוא גז אינרטי שמרכיב אחוז אחד מהאטמוספירה של כדור הארץ. הוא נעשה נוזלי ב- -186°C ויש לו מראה צלול כמו של מים. הוא טוב לאיתור נייטרונים מאחר שהיינון נשאר בתוכו זמן רב מספיק כדי להיות מאותר.

יינון (Ionization)

יינון מתרחש כאשר חלקיקים אנרגטיים מעיפים אלקטרונים מאטומים. התוצאה היא יונים טעונים חיובית ואלקטרונים חופשיים.

1 וידאו

האיור הזה מראה את מסלוליהם של הרבה חלקיקי קרינה קוסמית שעוברים דרך גלאי ה-ProtoDUNE. הנתונים האלה שימשו לבחון את ביצועיו של הגלאי. הצבעים קשורים לעוצמת היינון בנוזל הארגון (אדום מורה על עוצמה קטנה יותר, וכחול על עוצמה גדולה יותר). היינון מוזז על ידי הפעלת שדה חשמלי חזק על הגלאי. התמונה התלת-ממדית הזו נוצרה על ידי ניתוח ושילוב של אותות אלקטרוניים מאלפי חושים על הקירות, שמתנהגים כמו פיקסלים במצלמה דיגיטלית. קרדיט: צ'או ז'האנג, המעבדה הלאומית של ברוקייבן. אתם יכולים לראות את הנתונים האלה בשלושה ממדים בקישור הזה.



איור 2

אלקטרוניקה רגישה מצלמת תמונות בתלת-ממד

קבוצת מדענים בונה כיום גלאי נייטרונים ענק עמוק מתחת לאדמה בדרום דקוטה בארצות הברית. הניסוי הזה ידוע בתור DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment). הגלאי שלו יהיה מלא בארגון נוזלי.

גז ארגון מרכיב 1% בלבד מהאטמוספירה שלנו, אולם מדענים יכולים לאסוף אותו וליצור גז ארגון נקי מאוד. הנוזל הסופר-קר הזה (-186°C) מקל על איתור הנתונים של המטענים הטעונים שמוצרים על ידי אינטראקציות נייטרונים. הסיבה לכך היא שכאשר חלקיקים טעונים מהירים נעים דרך הארגון הם מייננים את אטומי הארגון בדרך שלהם. היינון הזה מאפשר לנתבים שהם משאירים להופיע כמו "ברקים".

אולם בניית חיישני ארגון נוזלי היא אתגר גדול. כדי לוודא שהעיצוב החדש הזה יעבוד, הצוות הבינלאומי בנה ובדק לאחרונה גרסה קטנה, שידועה כ-ProtoDUNE (ראו איור 2). הם צילמו סוגי חלקיקים שונים דרך הגלאי הזה במעבדה האירופית לפיזיקת חלקיקים בוועידה האירופית למחקר גרעיני (CERN). אלקטרוניקה שתוכננה בקפידה איתרה את האותות ומדדה אותם, והמחשבים המירו את המדידות האלה לתמונות תלת-ממדיות יפהפיות (ראו וידאו 1) – כמו מצלמה דיגיטלית של חמישה מגה פיקסלים שעובדת בשלושה ממדים!

שליחים מהשמש, מהאטמוספירה, מכורים גרעיניים וממאיצים

ב-50 השנים האחרונות, מדענים השתפרו באיתור נייטרונים. הם מדדו אותם כשהם הגיעו מהשמש, מהתנגשויות של קרינה קוסמית עם אטומים באטמוספירה של כדור הארץ, ומתגובות גרעיניות שמיצרות חשמל (ראו איור 3). הם גם למדו ליצור נייטרונים אנרגטיים מאוד במאיצי חלקיקים עוצמתיים.

כל סוג של מקור מייצר טעמי נייטרונים שונים באנרגיות שונות. על ידי ספירה זהירה של נייטרונים בכל טעם במרחקים שונים מהמקורות האלה, מדענים גילו שתי תגליות מדהימות על נייטרונים. ראשית, הם גילו שנייטרונים משלושה סוגים שונים משנים צורה אחד לשני כשהם מטיילים דרך החלל! במילים אחרות, ההזדעות שנייטרונים נושאים משתנות כשהם

איור 3

ארבעת המקורות של נייטרינאים

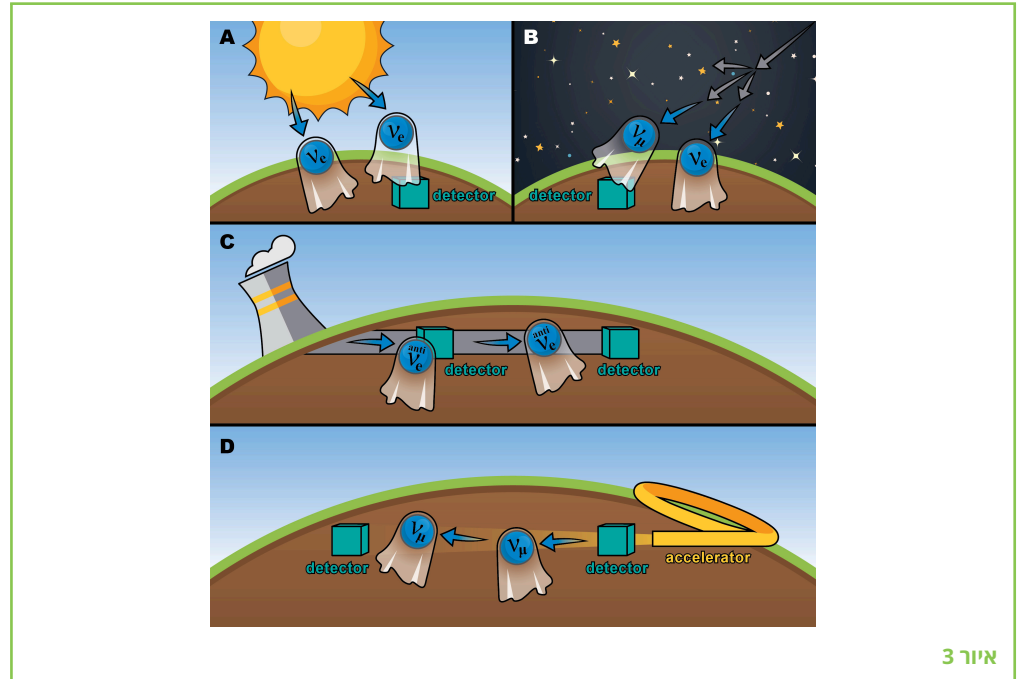
שמששמים בניסויים. (A)

השמש מייצרת נייטרינו אלקטרוני (ν_e). (B)

נייטרינאים משני סוגים, נייטרינו מיואנוני (ν_μ) ואלקטרוני (ν_e) מיוצרים על ידי התנגשויות של קרינה קוסמית באנרגיה גבוהה עם אטומים באטמוספירה של כדור הארץ. (C)

כורים גרעיניים פולטים אנטי-נייטרינו אלקטרוני ($\bar{\nu}_e$). (D)

מאיצי פרוטונים באנרגיות גבוהות מייצרים אלומת נייטרינו מיואנוני (ν_μ) שמנובתת דרך כדור הארץ. גלאים ממוקמים במרחקים שונים מהמקורות. קרדיט: טיפאני בואמן, המעבדה הלאומית של ברוקהייבן.



איור 3

מאיצים

(Accelerators)

מאיצים הם מכונות שבהן החלקיקים טעונים, כמו למשל אלקטרונים ופרוטונים, מואצים למהירויות שמתקרבות למהירות האור. מדענים יכולים ליצור התנגשויות בין אלומות חזקות מאוד של חלקיקים כאלה במטרה להפיק חלקיקים תת-אטומיים אחרים, כולל נייטרינאים אנרגטיים.

עפים. שנית, הם גילו שלנייטרינאים יש מסה קטנה מאוד! כל חלקיק נייטרינו שוקל פחות ממיליונית ממסתו של אלקטרון.

הניסוי הראשון שאיתר בהצלחה נייטרינאים מהשמש, אשר נערך על ידי ריימונד דיוויס במעבדה הלאומית של ברוקהייבן בשנות ה-1960, מצא הפתעה: הרבה מהנייטרינאים שמדענים ציפו לֶאֱתֵר היו איכשהו "חסרים". אולם זה לא היה בגלל שהגלאי לא עבד. המדענים עיצבו את הגלאים שלהם כך שיקבלו רק סוג אחד של נייטרינאים מסוג נייטרינו אלקטרוני שיוצרו בליבת השמש. הם יכלו לחשב בדיוק כמה נייטרינאים אלקטרוניים אמורים להיות מאותרים. אולם רק כשליש מהנייטרינאים האלקטרוניים הצפויים התגלו בגלאי.

באמצעות ניסויי המשך, מדענים בסופו של דבר למדו מהי הסיבה מאחורי התעלומה הזו: חלק מהנייטרינאים האלקטרוניים שינו צורה לאחד משני הסוגים האחרים (מיואנוני או טאונוני) בזמן שהיו במסע שלהם מהשמש. מאחר שהגלאי היה עיוור לשני הסוגים האחרים האלה, נדמה היה שהם חסרים!

תגליתו של דיוויד לגבי "המחסור בנייטרינו סולרי" הייתה, תחילה, שנויה מאוד במחלוקת. היא הייתה צריכה להיבחן בניסויים נוספים. ניסויים אחרים השתמשו בנייטרינאים אטמוספריים, בנייטרינאים בכורים גרעיניים ובנייטרינאים במאיצים. בכל הניסויים האלה, מדענים מצאו שטעמי הנייטרינאים היו "נעלמים", והופכים לטעמים אחרים לאורך מרחק גדול.

ניסוי ה-DUNE החדש בארצות הברית, וניסוי ההיפ-קמיוקנדה ביפן, יגלו פרטים נוספים על התנהגות שינוי הצורה של נייטרינאים ואנטי-נייטרינאים. אם מדענים ימצאו הבדל בין האופן שבו נייטרינאים ואנטי-נייטרינאים משנים צורה, זה עשוי לפתור את אחת התעלומות החשובות ביותר ביקום: מדוע היקום מורכב רק מחומר ולא מאנטי-חומר.

המפץ הגדול (The Big Bang)

המפץ הגדול הוא שמו של האירוע שהתחיל את היקום מנקודה בודדת שמלאה במצב חומר חם ודחוס לפני כ-14 מיליארד שנים. כל החלקיקים והחומר שאנו רואים היום, כולל כל הגלקסיות, הכוכבים, כוכבי הלכת ועוד, נוצרו כאשר המצב הדמוי נקודה הזו התפשט והתקרר.

מדענים חושבים שגם חומר וגם אנטי-חומר נוצרו בכמויות שונות במפץ הגדול. כמויות שוות של שני ההפכים האלה היו צריכות להרוס זו את זו ולהשאיר רק אור! לכן, הקיום של חומר כיום הוא ראיה לכך שהיה עודף קטן של חומר. ייתכן שההבדל בין נייטרינואים לבין אנטי-נייטרינואים גרם לעודף הקטן הזה בזמן שהיקום התפשט והתקרר. אם זה נכון, אנו צריכים להודות לנייטרינואים על היקום שיש לנו היום, שמלא בכל הדברים שאנו רואים סביבנו, כולל סלעים, צמחים, חיות ואנשים!

פורסם אונליין: 07 בפברואר 2022

נערך על ידי: Joey Shapiro Key

מנחה מדעי: Renata Koontz, Ila Mishra

ציטוט: Diwan MV and McNulty Walsh K (2022) איתור נייטרינואים דמויי רוחות רפאים: שליחים זעירים מהיקום. Front. Young Minds. doi: 10.3389/frym.2020.00045-he

תורגם והותאם: Diwan MV and McNulty Walsh K (2020) Detecting Ghostlike Neutrinos: Tiny Messengers From the Universe. Front. Young Minds 8:45. doi: 10.3389/frym.2020.00045

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

COPYRIGHT © 2020 © Diwan and McNulty Walsh 2022. זהו מאמר בגישה פתוחה שמופץ תחת תנאי רישיון Creative Commons Attribution License (CC BY). השימוש, ההפצה או ההעתקה מותרים לשימוש בפורומים אחרים ובלבד שיינתן קרדיט למחברים (ים) המקוריים ולבעל זכויות היוצרים, ושהפרסום המקורי בעיתון זה מצוטט בהתאם למקובל באקדמיה. השימוש, ההפצה או ההעתקה אינם מותרים אם הם אינם עומדים בתנאים אלה.

סוקרים צעירים

ANUSHKA, גיל: 12

היי, קוראים לי Anushka. יש לי תחביבים רבים כמו קריאת סיפורת; שירה ושחייה. אני אוהבת לבלות עם חברים שלי. אני רוצה להיות מדענית כשאגדל.

RIK, גיל: 13

קוראים לי Rik ואני בן 13. אני מנחש שזה אומר לכם שאני חנון מתמטי. נגינה על גיטרה, משחק כדורגל ומשחק תיאטרון הם חלק מהדברים שאני הכי אוהב לעשות.



הכותבים

MILIND VAMAN DIWAN

Milind Diwan גדל בעודו משחק גולות עם חבריו מתחת לעץ תמרנד בהודו. הייתה שמועה שהעץ מהווה בית לרוחות רפאים. אחרי שהגיע לאמריקה, Diwan התחיל להתעניין בפיזיקה והלך לבית ספר ללימודים מתקדמים באוניברסיטת בראון כדי לעשות דוקטורט בנושא נייטרינואים דמויי רוחות רפאים. כיום הוא פיזיקאי בכיר במעבדת ברוקהייבן. הוא עבד על הרבה ניסויי חלקיקים בפיזיקה וגלאים רבים ברחבי העולם. הוא הוביל את הרעיונות שהוליכו לפרויקט DUNE אשר ישלח אלומה חזקה של נייטרינואים ברחבי ארצות הברית לגלאי תת-קרקעי ענק. [*diwan@bnl.gov](mailto:diwan@bnl.gov)



KAREN MCNULTY WALSH

Karen McNulty Walsh תמיד אהבה ללמוד על מדע, אולם לא רצתה להיות מדענית. אחרי שלמדה ביולוגיה בקולג' וואסר, היא הלכה לתוכנית עיתונות מדע, בריאות וסביבה באוניברסיטת ניו-יורק כדי להיות כותבת מדע. היא בילתה 10 שנים בכתיבת כתבות מדעיות לילדים - בעיקר במגזין Scholastic's Science World magazine (שנקרא בכיתות ו-Zillions גרסת ילדים של Consumer Reports שסקר צעצועים, חטיפים ומוצרי ילדים אחרים). כעת היא כותבת על המחקר במעבדה הלאומית ברוקהייבן, ואוהבת לחלוק את ההתלהבות שלה בזמן שהיא לומדת על מוליכי-על, חלקיקים תת-אטומיים, סוללות, דלקים ביולוגיים ועוד.



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



הוצאת פרונטירז מדע לצעירים ישראל
Hebrew version provided by



THE SAGOL NETWORK