

אסטרופיסיקה של נייטרונים: כלי חדש לחקר היקום

אלי וקסמן, הפקולטה לפיסיקה, מכון ויצמן למדע, רחובות

תקציר: בארבעת העשורים האחרונים נולד סוג חדש של אסטרונומיה. במקום טלסקופים המכוונים כלפי מעלה, אל השמים, בחיפוש אחר פוטונים (כלומר אור), משתמשים ב"טלסקופים" החבויים קילומטרים מתחת לפני האדמה או עמוק מתחת למים או לקרח. הם אינם מחפשים פוטונים אלא מחפשים חלקיקים הנקראים נייטרונים.

נייטרונים הם חלקיקים **כמעט** נטולי מסה והאינטראקציה שלהם עם חומר היא חלשה ביותר. גילוי נייטרונים שמקורם מן השמש ומסופרנובה קרובה יחסית, הניב מבחן ישיר של התיאוריה של התפתחות כוכבים והביא להרחבה ולעדכון של המודל התקני (סטנדרטי) המתאר את תכונות החלקיקים האלמנטריים.

כיום נמצאים בבנייה כמה גלאי נייטרונים גדולים מאוד, שמטרתם לגלות את המקורות החזקים ביותר של אנרגיה וחלקיקים ביקום, בתקווה שגילוי נייטרונים ממקורות חוץ-גלקטיים אלה, אשר קרוב לוודאי מונעים על ידי ספיחת מסה על חורים שחורים, יאפשר לנו לא רק ללמוד על המקורות אלא בדומה לנייטרונים מן השמש, גם יספק מידע חדש אודות תכונות בסיסיות של החומר.

מבוא

רוב האסטרונומים משתמשים בטלסקופים המכוונים מעלה, אל השמיים, בחפוש את האור הנפלט ממגוון רב של גרמים שמימיים המאכלסים את היקום. בארבעת העשורים האחרונים נפתח עידן חדש של אסטרונומיה, בה הטלסקופים חבויים קילומטרים מתחת לפני האדמה או המים. טלסקופים אלה אינם מחפשים פוטונים אלא חלקיקים - נייטרונים.

הנייטרונים הם חלקיקים **כמעט** נטולי מסה הנעים למעשה במהירות האור. **היתרון של אסטרונומיית הנייטרונים** קשור לאינטראקציה המאוד חלשה של הנייטרונים עם חומר. לדוגמה - נייטרונים הנוצרים במעמקי השמש יכולים להגיע אלינו לכדור הארץ כמעט ללא כל מעצור. מסיבה זו, באמצעות **פוטונים** אפשר לראות רק את **פני השמש** ואילו באמצעות נייטרונים ניתן "לראות" עמוק אל תוך ליבת השמש.

גילוי נייטרונים מהשמש היווה את תחילת "אסטרונומיית הנייטרונים". תודות לאסטרונומיית הנייטרונים יש בידינו מבחנים ישירים לתיאוריה המתארת את לידתם, חייהם ומותם של כוכבים.

אולם, בצד ההסברים צצה גם תגלית מפתיעה ובלתי צפויה: התברר כי "המודל התקני", המתאר את האינטראקציות הבסיסיות ואת התכונות של החלקיקים האלמנטריים, אינו שלם ומחייב הרחבה ועדכון. תגלית זו דחפה למאמצים לביצוע ניסויים בקנה מידה רחב על ידי שימוש בנייטרונים ממקורות אסטרופיסיקליים וארציים, שמטרתם אפיון מדויק של תכונות הנייטרונים אשר אך זה התגלו. בד בבד עם התפתחות מאמץ מחקר זה נפתחת כיום חזית חדשה של אסטרונומיית הנייטרונים. הולכים ונבנים גלאי נייטרונים גדולים במגמה לגלות מקורות חוץ-גלקטיים רחוקים מאוד, מעבר ליכולת ה"לכידה" של

הגלאים הקיימים. המטרה העיקרית של גלאי הענק החדשים היא לחקור את מקורות האנרגיה החזקים ביותר ביקום שהאנרגיה העצומה שלהם מקורה כנראה בתוספת מצטברת של מסה לחורים שחורים, וכן את מקורם ותכונותיהם של החלקיקים האנרגטיים ביותר ביקום.

בדומה למקרה של נייטרונים מהשמש, מקווים שגילוי נייטרונים ממקורות חוץ-גלקטיים יאפשר לא רק להעמיק בחקר של מקורות אלה אלא גם יספק מידע חדש על התכונות היסודיות של החומר.

התחלה של אסטרונומיית הנייטרונים - נייטרונים מן השמש.

תחילתה של אסטרונומיית הנייטרונים היא הניסיון לספק בדיקה ישירה של התיאוריה של מבנה הכוכבים והתפתחותם. על פי תיאוריה זו מקור האנרגיה של השמש הוא מיזוג גרעיני של מימן להליום, תהליך המתרחש בתוך ליבת השמש. ההפרש בין המסה של ארבעה גרעיני מימן ומסת גרעין הליום משתחרר כאנרגיה, על פי הקשר $E = \Delta mc^2$, שבזכותה השמש מאירה.

באמצע שנות ה-60 הוצע לבדוק מודל זה על ידי חיפוש נייטרונים, שאמורים להיפלט בתהליך המיזוג ואשר, בהבדל מהפוטונים, יכולים להימלט מתוך מעמקי השמש ולהגיע ישירות לגלאים על פני כדור הארץ. האינטראקציה החלשה מאוד של הנייטרונים עם חומר מקשה על גילויים. גילויים של הנייטרונים התאפשר עם בניית גלאים בעלי מסה של כמה קילוטון של החומר המגלה. היות שהסיכוי "ללכוד" נייטרונים העובר קילוטון של חומר, כלומר הסיכוי שנייטרון יעבור אינטראקציה עם חומר הגלאי, הוא קטן מאוד, הרי שלמרות השטף העצום של נייטרונים מהשמש, $\sim 10^{11}$ נייטרונים לס"מ² בשנייה, גלאי של

מספר קילוטון מאפשר את לכידתם של כמה מאות נייטרונים בשנה בלבד. מעבר למסתם הגדולה מאוד של הגלאים חייבים כל הגלאים להיבנות עמוק באדמה. על פני האדמה יש שטף גדול של חלקיקים אנרגטיים. חלקיקים אלה נוצרים בעיקר על ידי אינטראקציה של קרינה קוסמית, המורכבת מחלקיקים עתירי אנרגיה הנוצרים בחלל, עם האטמוספירה. חדירה של חלקיקים אלה אל תוך הגלאי עלולה להביא לאינטראקציות דמויות אלה של נייטרונים. הטמנת הגלאים בעומק האדמה חוסמת את הרקע, כי רק נייטרונים יכולים לחדור דרך שכבת האדמה בה טמון הגלאי.

גילוי הנייטרונים מן השמש היווה אישוש מרשים של ההשערה שמקור האנרגיה של השמש הוא מיזוג גרעיני. בצד ההצלחה צץ אתגר חדש - שטף הנייטרונים שנמדד היה בקירוב מחצית מהשטף שנחזה. זמן קצר אחרי שהתגלה פער זה ב-1968, עלתה הצעה שהפער הוא מגבלה של המודל התקני, המתאר את תכונות החלקיקים האלמנטריים.

קיימים שלושה סוגים או "טעמים" של נייטרונים: ν_e - נייטרון של אלקטרון, ν_μ - נייטרון של מיאון ו- ν_τ - נייטרון של טאו, עלתה המחשבה הבאה: למרות שכל הנייטרונים הנוצרים בתהליך המיזוג בשמש הם נייטרונים של אלקטרון, ν_e , מחצית מהם עוברים המרה ומשנים את "טעמם" לנייטרון של מיאון ν_μ או לנייטרון של טאו ν_τ , בדרכם אל כדור הארץ. המרה זו של "טעם" הנקראת "תנודה" (oscillation), לא נצפתה על ידי המודל התקני, והיא עשויה להסביר את הפער בין החישוב והמדידה, שכן הגלאים שנבנו היו רגישים רק לנייטרונים של אלקטרון - ν_e .

משמעויות מפתיעות: מסת הנייטרונים וערבוב

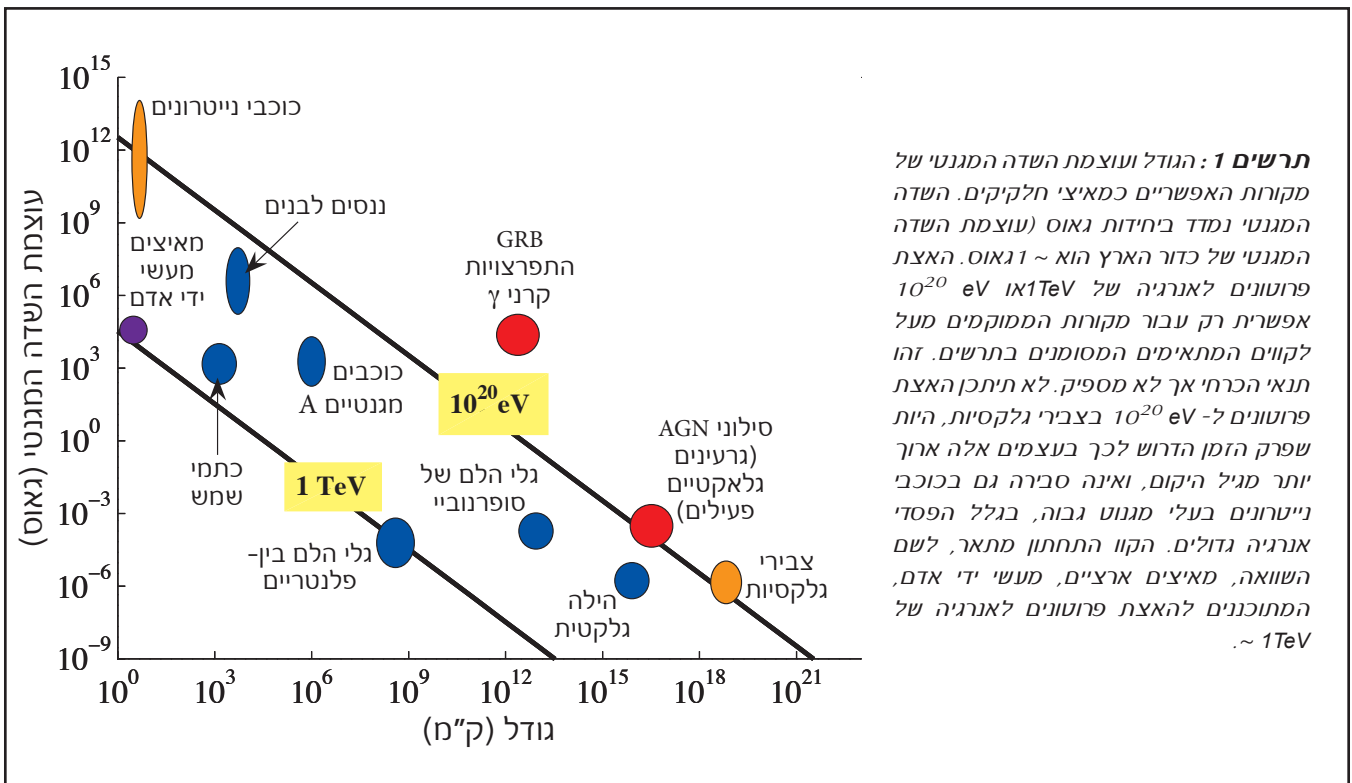
ההסבר של "תנודות" אושר ב-2001, עם הגילוי כי "חסר" בנייטרונים של אלקטרון - ν_e מהשמש מופיע בצורת השטף של נייטרונים של מיאון - ν_μ ונייטרונים של טאו - ν_τ . דבר זה נתגלה בעזרת גלאי הרגיש לכל סוגי הנייטרונים. עדות נוספת, בלתי תלויה בניסוי הקודם, הגיעה ממדידות של נייטרונים הנוצרים על ידי אינטראקציה של הקרינה הקוסמית עם האטמוספירה, שהעידה על המרה מ- ν_μ ל- ν_τ . "תנודות" הנייטרונים היא כיום הניסוי היחיד שאינו מוסבר על ידי המודל התקני. ההסבר המתבקש הוא מודל שבו קיימים שלושה סוגים של נייטרונים - ν_1, ν_2, ν_3 בעלי מסות שונות m_1, m_2, m_3 בהתאמה. הנייטרונים ב"טעמים" השונים נבנים על ידי ערבובים שונים של ν_1, ν_2, ν_3 . לדוגמה נייטרון של אלקטרון ν_e הוא בקירוב טוב ערבוב של חצי ν_1 וחצי ν_2 עם תרומה קטנה, אם בכלל, של ν_3 . בעקבות גילוי "תנודות" הנייטרונים שמקורם מהשמש או מהאטמוספירה, התגלתה תופעה זו גם במדידות של נייטרונים הנוצרים בכורים גרעיניים ובמאצני חלקיקים, מעשי ידי אדם.

ניסוי "תנודות" אינם יכולים לקבוע את הערכים המוחלטים של המסות ומהמידע שבידינו כיום גם איננו יכולים להבדיל בין שתי ההירארכיות $m_1 < m_2 < m_3$ ו- $m_1 < m_2 < m_3$. חסם עליון למסה של הנייטרון בעל המסה הגדולה ביותר הוא $m < 2eV/c^2$, אשר נקבע על ידי מדידות של התפרקות רדיואקטיבית של טריתיום. (חסם עליון דומה מתקבל מסקירות של ההתפלגות המרחבית בקנה מידה גדול של הגלקסיות: היקום מלא ב"רקע של נייטרונים", שארית של המפץ הגדול. מסת נייטרון גדולה מדי הייתה מונעת את יצירת המבנים העצומים (כמו גלקסיות, צבירי גלקסיות וכו') ביקום: "בריחת" הנייטרונים מבורות הפוטנציאל הכבידתיים הנוצרים על ידי הצטברויות מסה (כגון גלקסיות וצבירי גלקסיות) הייתה מדכאת, במקרה של נייטרונים מסה גדולה מדי, את גידול הצטברות המסה, ולא הייתה מאפשרת יצירת מבנים גדולים כאלה הנצפים כיום.

עדיין אין מודל המסביר את המקור של מסת הנייטרונים וערבובם. כדי להתקדם בבניית המודל, מתוכננים ניסויים בקנה מידה גדול של "תנודות" תוך שימוש בכורים ובאלומות מאיצים. מטרת ניסויים אלה הינה לקבוע את הירארכיות המסות וקביעה מדויקת של פרמטרי הערבוב. ניסויים אלה ינסו גם לענות על השאלה האם תכונות הערבוב של הנייטרון זהות לאלה של האנטי-חלקיק - האנטי-נייטרון. תשובה לשאלה זו חשובה לא רק לשם בניית המודל המסביר את הערבוב והמסה של הנייטרונים אלא תהיה אולי רלבנטית לגבי השאלה הפתוחה - מדוע עולמנו בנוי, ככל הנראה, בעיקר מחלקיקים ולא מאנטי-חלקיקים.

מן השמש אל קצה היקום

ב-1987 גילו, בגלאים התת-קרקעיים, התפרצות של נייטרונים מהתפוצצות סופרנובה קרובה יחסית. התפוצצות סופרנובה היא סיום חייו של כוכב שמסתו לפחות 10 מסות שמש. עקב ההתפוצצות נזרק רוב החומר ומתפזר בחלל ונותר כוכב נייטרונים שצפיפותו גבוהה מאוד ומסתו בערך כמסת השמש. התחזית על פי התיאוריה הייתה שרוב האנרגיה המשתחררת בפיצוץ נישאת מן הכוכב על ידי נייטרונים. התחזית התאמתה עם גילוי הנייטרונים שנפלטו על ידי הסופרנובה SN 1987A שהתפוצצה בענן המגלני הגדול, שהוא גלקסיית לוויין קטנה של הגלקסיה שלנו - גלקסיית שביל החלב, הנמצאת במרחק של כ-150000 שנות אור. האנרגיה האופיינית של נייטרונים הנוצרים בשמש או בפיצוץ סופרנובה היא בסדר גודל של $MeV (10^6 eV)$, שהיא האנרגיה המשתחררת בתהליך מיזוג או ביקוע גרעיני. בטכניקות הקיימות כיום בלתי אפשרי לגלות נייטרונים באנרגיה מסדר גודל של MeV ממאורעות המתרחשים בגלקסיות שמרחקן מאתנו הוא בין כמה מיליוני שנות אור (המרחק האופייני בין



תרשים 1: הגודל ועוצמת השדה המגנטי של מקורות האפשריים כמאיצי חלקיקים. השדה המגנטי נמדד ביחידות גאוס (עוצמת השדה המגנטי של כדור הארץ הוא ~ 1 גאוס). האצת פרוטונים לאנרגיה של 1 TeV או 10^{20} eV אפשרית רק עבור מקורות הממוקמים מעל לקווים המתאימים המסומנים בתרשים. זהו תנאי הכרחי אך לא מספיק. לא תיתכן האצת פרוטונים ל- 10^{20} eV בצבירי גלקסיות, היות שפרק הזמן הדרוש לכך בעצמים אלה ארוך יותר מגיל היקום, ואינה סבירה גם בכוכבי נייטרונים בעלי מגנט גבוה, בגלל הפסדי אנרגיה גדולים. הקוו התחתון מתאר, לשם השוואה, מאיצים ארציים, מעשי ידי אדם, המתוכננים להאצת פרוטונים לאנרגיה של ~ 1 TeV.

TeV. אנרגיה זו דומה לאנרגיה של כדור טניס הנחבט בעוצמה רבה. האתגר נולד מהדרישה הפשוטה שתנאי הכרחי להאצת חלקיקים הוא כליאתם (confinement) בתוך המאיץ במשך תהליך ההאצה. ברוב המודלים של מאיצים אסטרופיזיקליים החלקיקים המואצים הם בעלי מטען חשמלי, לדוגמה, פרוטונים ואלקטרונים. כליאתם נעשית באמצעות שדות מגנטיים. כדי לקיים כליאה מגנטית נדרש שהמכפלה של עוצמת השדה המגנטי של המאיץ בגודל המאיץ תהיה גדולה מערך מסוים, ההולך וגדל ככל שגדלה האנרגיה של החלקיק המואץ. תרשים 1 מראה מגוון של אובייקטים אסטרופיזיקליים המועמדים להיות "מאיצים קוסמיים". ידועים רק שני טיפוסים מקורות היכולים למלא את תנאי הכליאה המגנטית והם: התפרצויות קרינת γ (Gamma Ray Bursts או בקיצור GRB) וגרעינים גלקטיים פעילים (Active Galactic Nuclei או בקיצור AGN). אובייקטים אלה נמצאים במרחקים קוסמיים, במרחק ביליוני שנות אור והם האובייקטים הבהירים ביותר המוכרים ביקום.

GRB הם המקורות המוכרים החולפים (transient) הבהירים ביותר. הם יוצרים הבזקים קצרים (שמשכם הטיפוסי 1-100 שניות) בעלי נהירות (הספק הקרינה הא"מ - luminosity) הגדולה ב-19 סדרי גודל מזו של השמש. AGN הם המקורות היציבים המוכרים הבהירים ביותר. הם בעלי נהירות הגדולה ב-12 סדרי גודל מזו של השמש.

גלקסיות) ועד כמה ביליוני שנות אור (גודל היקום הנצפה). כדי לגלות נייטרונים בגבול היקום הנצפה, מתכננים ובונים טלסקופי נייטרונים של אנרגיות גבוהות. טלסקופים אלה נמצאים מתחת לקרח או מים, ומטרתם גילוי נייטרונים בעלי אנרגיות הגדולות מ- 10^{12} eV). טלסקופים אלה יהיו בעלי מסת גלאי הגדולה מ- 10^9 טון! המקורות המיועדים כמטרות לגלאי הנייטרונים בעלי אנרגיה הגבוהה מ-1 TeV הם "מאיצים קוסמיים", בהם חלקיקים מואצים לאנרגיות גבוהות ביותר.

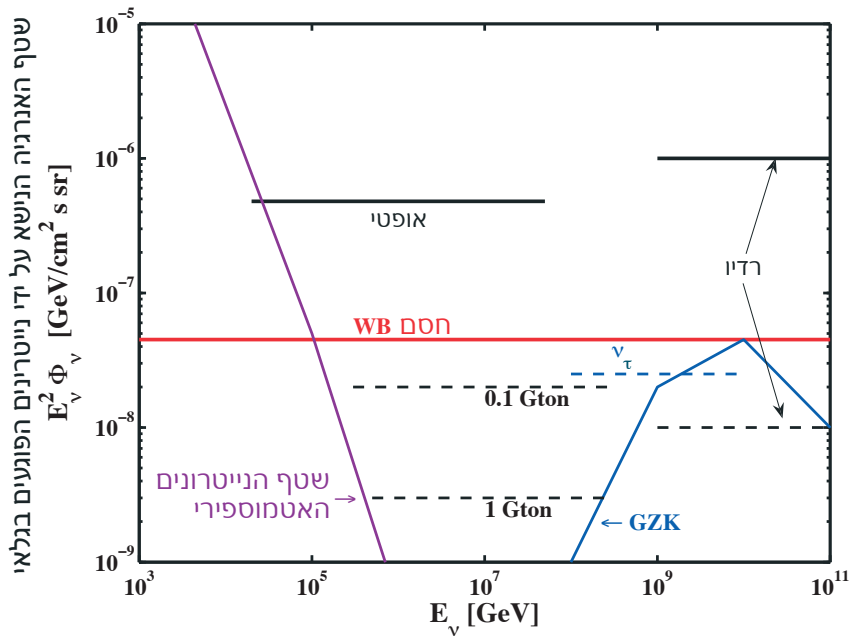
הזכרנו את הקרינה הקוסמית, המורכבת מחלקיקים בעלי אנרגיות גבוהות מאוד הנוצרים על ידי אובייקטים אסטרופיזיקליים ומגלים אותם על ידי האינטראקציה שלהם עם האטמוספירה של כדור הארץ.

עד היום לא זיהינו מהם המקורות של הקרינה הקוסמית ואיננו מבינים כהלכה את המנגנונים להאצת החלקיקים.

אחת המטרות העיקריות בבניית גלאי נייטרונים שלהם אנרגיה גבוהה מ-1 TeV היא לתת מענה לשאלות הפתוחות האלה.

"מאיצים קוסמיים": האתגרים

ניתן להבהיר את תמצית האתגר בבניית תיאוריה של האצת חלקיקים במקורות אסטרופיזיקליים על ידי התייחסות לחלקיקים בעלי האנרגיה הגבוהה ביותר שנצפו. הקרינה הקוסמית בעלת האנרגיה הגבוהה ביותר היא ככל הנראה פרוטונים שהאנרגיה שלהם גדולה מ- 10^{20} eV או 100 מיליון



תרשים 2: החסם העליון של שטף הנייטרונים אותו מסיקים מן התצפיות של הקרינה הקוסמית עתירת האנרגיה, (חסם WB), בהשוואה עם: חסמים ניסיוניים (קווים שחורים מלאים), המתקבלים על ידי הגלאים האופטיים המוצבים מתחת למים או לקרח ועל ידי גלאי רדיו, והרגישות הצפויה (קווים מרוסקים) של גלאים שונים: גלאים אופטיים בעלי מסה של 0.1 ג'יגה-טון ו-1 ג'יגה-טון המוצבים מתחת לפני המים לקרח ומערך של גלאי חלקיקים על פני הקרקע (הרגישים ל- ν_τ).

השטף ϕ_ν הוא מספר הנייטרונים ΔN_n ליחידת אנרגיה ΔE (הנמדדת ב-GeV), הפוגעים בשנייה ביחידת שטח (1 סמ"ר) של גלאי הצופה בזווית מרחבית של 1 סטרדיאן של השמיים. ציר ה- γ מצוין את שטף האנרגיה הנישא על ידי הנייטרונים הפוגעים בגלאי. יותר פרטים על הגלאים אפשר למצוא, לדוגמה, באתר <http://icecube.wisc.edu>.

העקומה המסומנת ב-GZK מראה את שטף הנייטרונים הצפוי להיווצר על ידי אינטראקציה של פרוטונים עתירי אנרגיה בקרינה הקוסמית עם קרינת הרקע הקוסמית השיורית (קרינת 3K) מן המפץ הגדול. כמו כן מסורטט הגרף המתאר את שטף הנייטרונים האטמוספירי, הנוצר על ידי אינטראקציות של הקרינה הקוסמית באטמוספירה והמהווה את מרבית הרקע.

נוצרים פיונים - חלקיקים המתפרקים למיזאונים ולנייטרונים. תצפיות הקרינה הקוסמית עתירת האנרגיה מובילות להערכה של שטף הנייטרונים האנרגטיים המצופה, ומכאן גם לגודל הגלאי הדרוש לגילויים. שטף הקרינה הקוסמית הנמדד מציב חסם עליון לשטף הנייטרונים הנוצר על ידי מקורות חוץ-גלקטיים. בתרשים 2 משווים חסם עליון זה, הנודע בשם **חסם וקסמן-בקול** (Waxman-Bahcall) עם הגבולות הניסויים כיום, ועם הרגישות המצופה של טלסקופי הנייטרונים המתוכננים. התרשים מלמד שדרושים טלסקופי נייטרונים של ג'יגה-טון (10^9 טון) לגילוי שטף הנייטרונים החוץ-גלקטי הצפוי בטווח של 1000TeV - 1TeV, ושעבור אנרגיות גבוהות יותר תידרש מסה אפקטיבית גדולה בהרבה של הגלאי. שטף בר השוואה לחסם הנמצא בגבולות $\sim 1000\text{TeV}$ - $\sim 1\text{TeV}$ ייצר מאות מאורעות כל שנה בגלאי שמסתו ג'יגה-טון. אם מקור הפרוטונים עתירי האנרגיה הוא GRB, מצפים לעשרות אחדות של מאורעות בשנה, שיתגלו בטלסקופים של ג'יגה-טון (10^9 טון). בדיקת

בעוד ש-GRB ו-AGN הם בגדר מועמדים סבירים כמאיצים קוסמיים, אין בידינו עדות ישירה להאצת פרוטונים במקורות אלה (או אחרים). קשה לקשר ישירות בין קרינה קוסמית לבין מקורותיה היות שבשונה מפרוטונים קרינה קוסמית אינה מתפשטת בקווים ישרים, ולכן אינה מצביעה על מיקום מקורותיה. שדות מגנטיים במרחב הבין-כוכבי והבין-גלקטי מסיטים את הקרינה הקוסמית בעלת המטען החשמלי מכיוונה המקורי, ולכן זיהוי בלתי אמצעי של המקורות אינו אפשרי. נייטרונים מאידך הם נטולי מטען חשמלי ולכן נעים בקווים ישרים ומצביעים אחורה אל מקורותיהם. יהיו המאיצים הקוסמיים אשר יהיו, אנו מצפים שהם גם מקורות לנייטרונים בעלי אנרגיות גבוהות ולכן ניתן יהיה לזהותם בעזרת פליטת הנייטרונים שלהם. ציפייה זאת מתבססת על העובדה שאינטראקציה של הקרינה הקוסמית עתירת האנרגיה עם קרינה או חומר גורמת ליצירת נייטרונים. לדוגמה, פרוטונים בעלי אנרגיה גבוהה יכולים לעבור אינטראקציה עם פוטונים, בה

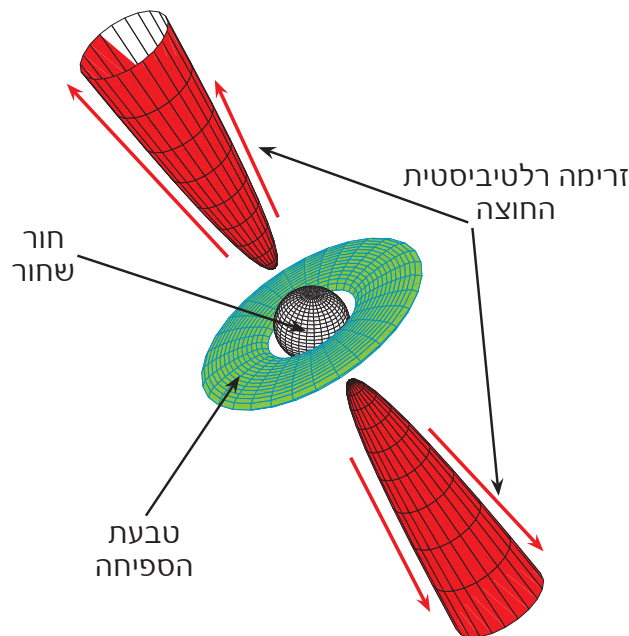
קורלציה בזמן ובכיוון של מאורעות אלה עם פוטונים שמקורם ב-GRB, תאפשר ניסוי חופשי למעשה ממאורעות רקע.

טלסקופי נייטרינים עתירי אנרגיה: תקוות

הגילוי של נייטרינים עתירי אנרגיה יחשוף את זהות המאצ'ים הקוסמיים האנרגטיים ביותר. הוא גם יאפשר לנו לבחון לעומק את תכונותיהם של מקורות אלה, ולתת מענה לשאלות פתוחות הקשורות לפיסיקה של המודלים המתארים אותם. חושבים ש-GRB ו-AGN מונעים על ידי ספיחת מסה על חורים שחורים. סביר ביותר שהאנרגיה של ה-GRB מסופקת על ידי הצטברות מסה בסדר גודל של חלק של מסת שמש בזמן של שניות בודדות על חור שחור בעל מסת שמש שאך זה נולד. לעומת זאת לגבי ה-AGN ההנחה היא שהם מקבלים את האנרגיה שלהם על ידי הצטברות מסה על חורים שחורים בעלי מסות של מיליון עד ביליון מסות שמש הממוקמים במרכזי גלקסיות רחוקות. מאפייני המודלים מתוארים בחלקם בתרשים 3. בעוד שמודלים מצליחים בדרך כלל להסביר את מרבית התצפיות, הם במידה רבה פנומנולוגיים, ושאלות חשובות מאוד עדיין פתוחות. שאלות אלה כוללות את המנגנון בו אנרגיה גרביטציונית מנוצלת להנעת הסילונים, את הרכב הסילונים, ואת המנגנון להאצת החלקיקים. הגילוי של נייטרינים עתירי אנרגיה ממקורות אסטרופיסיקליים

יאפשר בדיקות חדשות של התיאוריה של תנודות נייטרינים, ויתרום לקביעת פרמטרי העירבוב, למשל לפתרון אי-הבהירות של ההיראכיה של המסות ולזיהוי ההבדלים בהתנהגות חלקיקים לעומת אנטי-חלקיקים. כמו כן הוא יספק לנו בחינות של פיסיקה בסיסית שאינן בהישג ידנו על ידי שימוש במקורות ארציים מעשי ידי אדם. גילוי נייטרינים עתירי אנרגיה עשוי לאפשר לנו לבדוק חריגות מתחזיות של המודל התקני עבור חתך הפעולה של אינטראקציות נייטרינו-גרעין באנרגיות שאינן בנות השגה בעזרת מאצ'ים ארציים. גילוי נייטרינים מ-GRB עשוי לשמש גם לבדיקת הבו-זמניות של הגעת נייטרינים ופוטונים ברמת דיוק של $\sim 1s$. דבר זה יאפשר לבחון את נכונות ההנחה הבסיסית של תורת היחסות הפרטית, שלפוטונים ולנייטרינים אותה מהירות גבולית, בדיוק של חלק אחד מ- 10^{17} , ולבחון את עקרון האקוויולנטיות החלש, ההנחה הבסיסית של תורת היחסות הכללית, לפיה פוטונים ונייטרינים נתונים לאותה השהייה בעוברם בפוטנציאל גרביטציוני, בדיוק הגדול יותר מחלק אחד מ- 10^6 . מיישום קודם של רעיונות אלה לסופרנובה 1987A נתקבלו גבולות עליונים חלשים בהרבה מסדר גודל של 10^{-8} ו- 10^{-2} בהתאמה.

לבסוף, טלסקופי נייטרינים עשויים לתרום לגילוי "חומר אפל". כיום מאמינים שרוב המסה ביקום היא בצורת "חומר אפל", המורכב מחלקיקים אשר לא התגלו במעבדות על כדור



תרשים 3: משערים שמקור ההספק להנעת ה-GRB ו ה-AGN הוא ספיחת מסה לחורים שחורים. הצטברות מסה על חור שחור, דרך טבעת הצבירה, משחררת כמויות גדולות של אנרגיה כבידתית. אם החור השחור מסתובב במהירות גדולה נוצר מקור אנרגיה נוסף, האנרגיה הסיבובית עשויה להשתחרר על ידי האטת החור השחור באמצעות פעולת גומלין עם טבעת הצבירה. האנרגיה המשתחררת נזרקת כסילונים הנעים במהירויות יחסותיות. הקרינה הנצפית נוצרת כחלק מן האנרגיה הנישאת עם הסילונים והופכת הרחק מן החור השחור המרכזי לקרינה אלקטרומגנטית.

הארץ, ואשר האינטראקציה שלהם עם החומר הרגיל המוכר לנו, היא על ידי כוחות כבידה בלבד. חלקיקים מסיביים בעלי אינטראקציה חלשה (Weakly Interacting Massive Particles) ובקיצור WIMPS - הם המועמדים המובילים לחלקיקי החומר האפל. אם WIMPS מאכלסים את ההילה של הגלקסיה שלנו, השמש או כדור הארץ ילכדו אותם, ושם הם יתחסלו מדי פעם, תוך יצירת נייטרינים עתירי אנרגיה. קצב ההתחסלות תלוי בפרטי המודל. טלסקופי נייטרינים בעלי מסה של ג'יגה-טון הנמצאים עתה בבניה משלימים גלאים שנבנו לגילוי ישיר של WIMPS (כלומר, גילוי על ידי אינטראקציה בגלאי) על ידי הגעה לרגישות טובה למסות גדולות של WIMPS, באופן טיפוסי יותר ממאות אחדות של GeV.

לקריאה נוספת מתוך תהודה

1. קרינת הרקע הקוסמית, א. ליבוביץ, תהודה (2) 14, 1990.
2. המודל התקני - מסגרת מאוחדת לכוחות הטבע, ש. אליצור, תהודה (2) 16, 1994.
3. התפרצויות קרני- γ , צ. פירן, תהודה (1) 17, 1995.
4. הנייטרינו החמקמק, ח. הררי, תהודה (1) 20, 1999.
5. לידתם, חייהם ומותם של כוכבים, י. טוכמן, תהודה (1) 21, 2000.
6. תעלומת חלקיקי הנייטרינו מן השמש, י. ניר, תהודה (2) 22, 2001.