

# תעלומת האנטי-חומר החסר

י. ניר, המחלקה לפיסיקה של חלקיקים, מכון ויצמן למדע  
ה. קווין, SLAC, סטנפורד, קליפורניה, ארה"ב

והתקרה, עדיין התרחשה **השמדה זוגית** כאשר חלקיק פגש בבן-זוגו האנטי-חלקיק, אבל **יצירת זוגות** הלכה ונעשתה נדירה. לא נשארה קרינה בעלת אנרגיה גבוהה דיה לגרום לכך. בהדרגה היו כל החלקיקים והאנטי-חלקיקים אמורים להיעלם. הכוכבים והגלקסיות המאירים את שמינו לא היו קיימים היום אם החומר לא היה גובר באופן כלשהו על האנטי-חומר בזמן מוקדם מאוד בתולדות היקום. כיצד ומתי בדיוק זה

התרחש? שאלה זו, הקשורה בבסיס קיומנו, היא שאלה שעליה אין למדע עדיין תשובה ברורה וחד משמעית.

כיצד אנחנו יודעים שהיקום לא התחיל ממצב של חוסר איזון בין חומר לאנטי-חומר? ככל שאנחנו מבינים בצורה טובה יותר את ההיסטוריה המוקדמת של יקומנו, כך הולכת אפשרות זו ונעשית בלתי אפשרית.

- ראשית, אם היעדר הסימטריה בין חומר ואנטי-חומר היה מצב התחלתי, זה היה מצב התחלתי מיוחד במינו: לכל שלושים מיליון חלקיקי אנטי-חומר היו צריכים להיות שלושים מיליון ואחד חלקיקי חומר. זה נראה מאוד בלתי סביר שמצב מכוון בעדינות כזו הופיע באופן מקרי.

- שנית, אפילו אם תנאי התחלה כזה אכן התקיים, הוא היה נמחק בתקופת ההתפשטות המהירה של היקום הידועה בשם אינפלציה. יש עדות תצפיתית הולכת ומתעצמת המתבססת על תכונות של קרינת הרקע הקוסמית, שאינפלציה אכן התרחשה. אם כך, זה כמעט בלתי נמנע שהעודף הקטן של החומר על פני

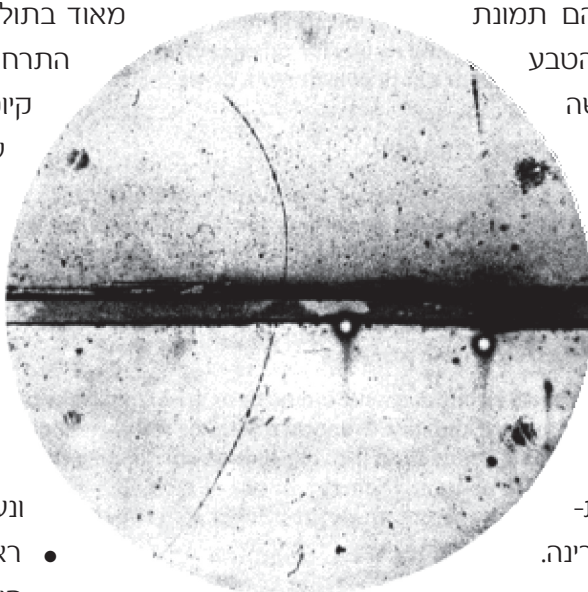
לכל חלקיק חומר קיים סוג תואם של חלקיק אנטי-חומר. אנטי-חומר דומה מאוד לחומר, פרט להיפוך מטענים. כך למשל, לאלקטרון בעל המטען החשמלי השלילי, קיים חלקיק אנטי-חומר תאום, הקרוי פוזיטרון (או אנטי-אלקטרון), בעל מסה זהה אבל מטען חשמלי חיובי. אנו מייצרים אנטי-חומר במעבדות המחקר שלנו, אך מוצאים מעט מאוד ממנו בטבע, במרחבי היקום. חוקי הטבע החלים על האנטי-חומר הם תמונת

מראה כמעט מדויקת של חוקי הטבע החלים על החומר. עובדה זו עושה את חוסר האיזון בין חומר לאנטי-

חומר ביקום למסתורין עמוק. בניסויי חלקיקים, אנחנו מסבים אנרגיית קרינה ליצירת זוג חדש של חלקיק והאנטי-חלקיק התואם. גם התהליך ההפוך מתקיים: כאשר אנטי-חלקיק פוגש את החלקיק התאום, הם יכולים להיעלם יחדיו, וכל אנרגיית-המסה שלהם הופכת להבזק קרינה.

כל חלקיקי האנטי-חומר הנוצרים במעבדות שלנו או בטבע כיום נעלמים תוך זמן קצר. סיכויי ההישרדות שלהם בסביבה הנשלטת על ידי החומר קטנים ביותר!

התיאוריות שלנו גורסות שבזמנים הקדומים ביותר בתולדות היקום המתפתח שלנו, חומר ואנטי-חומר - כל הסוגים האפשריים של חלקיקים ואנטי-חלקיקים - היו קיימים בכמויות שוות בפלסמה לוחטת, צפופה ואחידה מאוד. בטמפרטורות המאוד גבוהות ששררו ביקום המוקדם, יצירה והשמדה של חלקיקי חומר ואנטי-חומר אנרגטיים, כל התהליכים האפשריים שימשו כדי לשמר את כמויותיהם גדולות ושוות. כאשר היקום התפשט



תצלום עקבות הפוזיטרון בתא ערפל. הניסוי מהווה את ההוכחה הניסויית הראשונה לקיום הפוזיטרון ובוצע על ידי אנדרסן ב-1932.

האנטי-חומר נוצר באופן דינמי לאחר תום עידן האינפלציה.

כפי שציינו לעיל, נדרש רק עודף יחסי זעיר של חלקיקים על פני אנטי-חלקיקים ביקום המוקדם כדי להסביר את השליטה המוחלטת של החומר על פני האנטי-חומר ביקום הנוכחי. כאשר היקום מתקרר דיו, ייצור זוגות של חלקיק ואנטי-חלקיק נעצר, ואילו תהליך השמדת הזוגות נמשך. אבל גם הוא נעצר כאשר כלים כל חלקיקי האנטי-חומר. באין בני-זוג להשמדה, העודף המקורי הקטן של חלקיקי חומר שורד עד היום והוא מהווה את כל מבני החומר שאנו רואים: כוכבים, גלקסיות וצבירים. הסברנו שהעודף הזה אינו יכול להיות תנאי התחלתי של היקום. ניתן גם להראות שהעודף אינו יכול להיות מקומי, כלומר תכונה של סביבתנו הקרובה, שמתאזנת על ידי עודפי אנטי-חומר בחלקים רחוקים יותר של היקום הנצפה. גם פלוקטואציה קוונטית אקראית אינה יכולה לגרום לכמות החומר הנוכחית. אבל **אם היעדר הסימטריה בין חומר לאנטי-חומר איננו מקומי, איננו חלק מהמצב ההתחלתי, ואיננו פלוקטואציה אקראית, ההסבר כיצד הוא נוצר לאורך ההיסטוריה של היקום חייב להיות טבוע בחוקים היסודיים של הטבע.**

אנדרי סחרוב היה הראשון שניסה לפצח את התעלומה. הוא זיהה שלושה תנאים שחייבים להתקיים כדי לפתור אותה.

- ראשית, **אסור שיהיה חוק שימור שמבטיח הפרש קבוע בין מספר חלקיקי החומר ומספר חלקיקי האנטי-חומר** - התנאי הזה הוא מובן מאליו. (אחרת, יקום שמתחיל בהפרש אפס לא יוכל לעבור למצב בו ההפרש שונה מאפס). אכן, המודל הסטנדרטי של חלקיקים מנבא שאין חוק כזה. אומנם טרם צפינו בתהליכים ששוברים את חוק השימור במעבדות שלנו, כיוון שהם איטיים מדי בטמפרטורות הנמוכות המאפיינות את הניסויים שלנו. אבל התיאוריה מנבאת שהתהליכים האלה היו מהירים ביקום המוקדם, כשהטמפרטורות היו גבוהות דיון.

- שנית, **חוקי הטבע, בפעולתם על אנטי-חומר, חייבים להיות שונים מאלה הפועלים על החומר** אחרת, לכל תהליך המשנה את מספר החלקיקים, יש תהליך תואם המשנה את מספר חלקיקי האנטי-חומר

באותה מידה, ושני התהליכים קורים בדיוק באותו הקצב. שום חוסר איזון לא יכל להיווצר. אכן, ניסוי שנערך ב-1964 על ידי קרונין ופיטץ' (Cronin, Fitch), (אשר זכו בפרס נובל ב-1980) ושותפיהם סיפק הוכחה ראשונה להבדל כזה. בניסוי זה נצפתה דעיכה של חלקיקים הקרויים  $K_L$  לזוג חלקיקים הקרויים "פיונים". לדעיכה זו תורמות שתי אמפליטודות. אם חוקי הטבע לקוורקים ולאנטי-קוורקים היו זהים, ההתאבכות ההורסת בין שתי האמפליטודות הייתה מדויקת ומונעת את תהליך הדעיכה. העובדה שתהליך הדעיכה איטי אבל מתקיים מעידה שההתאבכות ההורסת אינה מדויקת, ומכאן שחוקי הטבע לקוורקים ולאנטי-קוורקים נבדלים במעט.

אכן, המודל הסטנדרטי אומר שיש אפקט קטן באינטראקציות החלשות אשר מבדיל את החוקים לקוורקים מאלה של האנטי-קוורקים. כדי שהאפקט יתקיים, מספרם של דורות הקוורקים (כלומר מספר הקוורקים הנושאים מטען חשמלי זהה אך בעלי מסות שונות) חייב להיות לפחות שלושה. תובנה זו הובילה בשנת 1973 את קובאיאשי ומאסקוואה (Kobayashi, Maskawa) להציע את קיומו של דור שלישי, זמן ניכר לפני שהושגה עדות ניסיונית ישירה לקיום קוורקים בני דור שלישי.

קובאיאשי ומאסקוואה הוסיפו וציינו שבהינתן שלושה דורות של קוורקים, יש רק פרמטר יחיד בתורה המבדיל בין קוורקים ואנטי-קוורקים. פירושו של דבר שכל ההבדלים בין חומר לאנטי-חומר הנמדדים בניסיון קשורים זה לזה. בעיקרון, מספיק למדוד תהליך אחד כזה, ואז התיאוריה מנבאת את הקצב של כל האחרים. תוצאות הניסוי של קרונין ופיטץ' אפשרו לנבא את הקצב של תהליכים נוספים המבטאים הבדל בין חומר לאנטי-חומר, ובמיוחד דעיכות של חלקיקים הקרויים "מזונים מסוג בי" (B-mesons). מחקרים ניסיוניים בשנים האחרונות במיתקנים הקרויים "בתי-חרושת ל-בי" ("B-factories"), האחד במעבדת המאיץ סלאק (SLAC) שבארה"ב והאחר במעבדת קיי.איי.קיי (KEK) שביפן, מדדו דעיכות רבות וסיפקו אישור ניסיוני משכנע לתיאוריה של קובאיאשי ומאסקוואה.

- לבסוף, התנאי השלישי של סחרוב קובע ש**חייבת להיות תקופה בהיסטוריה של היקום שבה לא**

## מתקיים האיזון הטבעי של שיווי משקל תרמי בין

**חומר לאנטי-חומר.** אנו יודעים על קיומו של רגע כזה, תקופת מעבר שבה חלקיק ההיגס ממלא תפקיד מכריע, כאשר השדה הנובע ממנו משיג ערך קבוע שונה מאפס בכל מרחבי היקום. חלקיקי החומר (הקוורקים, והלפטונים הטעונים דוגמת האלקטרון) והחלקיקים נושאי הכוח החלש (בוזונים מסוג Z ו-W),

שהיו חסרי מסה עד אותו הרגע, הופכים, בשל האינטראקציה שלהם עם שדה הכוח הקבוע של חלקיקי ההיגס<sup>1</sup>, לבעלי מסה. אנו מוצאים שבאותו זמן, כמיליונית של מיליונית שנייה לאחר המפץ הגדול, נוצרה בועה שבתוכה השדה הקשור לחלקיק ההיגס הוא בעל ערך שונה מאפס, והיא מתפשטת וממלאה את המרחב. חלקיקים ואנטי-חלקיקים חוזרים לתוך הבועה בהסתברויות שונות.

זהו סיפור נאה מאוד של כיצד הדברים היו יכולים

מהווה את אחד המרכיבים הדומיננטיים של היקום. דוגמה נוספת היא העובדה שנדרש כיוון עדין מדהים בדיוקו בין פרמטרים של המודל הסטנדרטי שאינם תלויים זה בזה כדי להעניק לנושאי הכוח החלש את המסות הנכונות. נקודות תורפה אלה ואחרות גורמות לפיסיקאי החלקיקים להיות משוכנעים שחייבת להיות "פיסיקה חדשה" מעבר לזו המתוארת על ידי המודל הסטנדרטי.

בעיית החומר האפל וחדית הכיוון העדין רומזות על קיומם של חלקיקים חדשים ואינטראקציות חדשות שהם אך במעט מעבר להישג ידם של ניסויים עכשוויים. לניסויי ה-Large Hadron Collider (LHC) במעבדת סרן (CERN) אשר בז'נבה, אשר יתחילו בפעולתם מאוחר יותר השנה, יש סיכוי טוב לגלות חלקיקים ואינטראקציות אלה. ב-LHC מתנגשים פרוטונים בפרוטונים. אנרגיית ההתנגשות, היכולה להגיע לערכים הגדולים פי ארבעה-עשר אלף ממסת הפרוטונים, ופי שבעה מהאנרגיה הגבוהה ביותר שהושגה בניסויים מסוג זה עד היום, יכולה לשמש ליצירת חלקיקים הכבדים בהרבה



בתוך ה-LHC ב-CERN, ג'נבה

מחלקיקי המודל הסטנדרטי. ה-LHC צפוי לגלות באופן ניסיוני את חלקיק ההיגס שאת קיומו מנבא המודל הסטנדרטי. התקווה הגדולה היא שהוא יגלה גם חלקיקים שאינם חלק ממודל זה.

לדוגמה, **סופרסימטריה** מהווה הרחבה של המודל הסטנדרטי שיכולה לפתור את שתי הבעיות - בעיית החומר האפל וחדית הכיוון העדין - באופן אלגנטי. סופרסימטריה היא סימטריה חדשה. אם, אכן, סימטריה זו מתקיימת בטבע, אזי חייבים להיות מספר רב של חלקיקים חדשים: לכל אחד מהקוורקים והלפטונים של המודל הסטנדרטי, ולכל אחד מהחלקיקים נושאי הכוח, דוגמת

להתרחש. הבעיה היחידה היא שהסיפור הזה לא עובד. כאשר אנו משתמשים לצורכי חישוב בפרמטרים של המודל הסטנדרטי, אנו מקבלים עודף של חומר על פני אנטי-חומר זעיר בהרבה סדרי גודל מאשר במציאות. זוהי אחת מסדרת העדויות שבגללן סבורים פיסיקאי החלקיקים שהמודל הסטנדרטי איננו התורה השלמה. אבל האם אנחנו יכולים למצוא דרך לתקן אותו?

הכישלון של המודל הסטנדרטי בניבוי כמות החומר ביקום איננו כישלון יחיד. המודל נכשל גם באתגרים אחרים. לדוגמה, לאף אחד מחלקיקי המודל הסטנדרטי אין התכונות הדרושות כדי שיוכל להיות החומר האפל אשר

הפוטון, נושא הכוח האלקטרומגנטי, חייב להיות "בן-דוד סופרסימטרי" הנושא מטען דומה, אך שונה בספין ובמסה. הסיבה האפשרית שלא ראינו חלקיקים כאלה בניסויים עד היום היא המסה הכבדה שלהם, אך - אם הם אכן קיימים בטבע - סביר שיווצרו בהתנגשויות הפרוטונים עתירות האנרגיה ב-LHC.

זה היה מספק ביותר אם סופרסימטריה הייתה פותרת גם את תעלומת היעדר האיזון בין חומר ואנטי-חומר. כדי לגלות אם אכן זה המצב, עלינו ראשית לגלות חלקיקים סופרסימטריים ב-LHC ואז למדוד את מסותיהם וקצב אינטראקציות רלבנטיות. ה-LHC ימלא תפקיד מכריע אבל, אפילו אם אכן תתגלה בו סופרסימטריה, יידרשו ניסויים נוספים כדי להשלים את הטיעונים שהתעלומה נפתרה, כלומר שהפרמטרים של ההרחבה הסופרסימטרית של המודל הסטנדרטי נמצאים בתחום בו האינטראקציות הקשורות בתורה זו ייצרו את העודף הנכון של חומר כאשר היקום היה בגיל הצעיר של  $10^{-11}$  שניות.

אבל יש גם אפשרות אחרת. כישלון אחר של המודל הסטנדרטי הוכח בסדרה יפהפייה של ניסויים לאורך ארבעים השנים האחרונות, ואשר בסימומה לא נותר כל ספק שהחלקיקים הקרויים נייטרינים<sup>2</sup> הם בעלי מסה. המודל הסטנדרטי מנבא שהנייטרינים הם חסרי מסה. הפרכת ניבוי זה מובילה לשרשרת של רעיונות תיאורטיים הכוללת הסבר שונה לחלוטין של תעלומת האנטי-חומר. הנייטרינים הם החמקניים ביותר מכל חלקיקי המודל הסטנדרטי. שלא כמו כל החלקיקים האחרים, לנייטרינים אין מטען חשמלי. הם אינם מושפעים מפעולת הכוח האלקטרומגנטי ואף לא מפעולת הכוח החזק. רק האינטראקציה החלשה פועלת עליהם. עובדה זו עושה את הנייטרינים שליחים מיוחדים במינם של אינפורמציה אסטרופיסיקלית. לדוגמה, תהליכי המיזוג בשמש ההופכים מימן להליום מייצרים הן פוטונים והן נייטרינים. הפוטונים מקפצים אנה ואנה, כאשר הם באים באינטראקציה עם אלקטרונים ועם פרוטונים בדרכם החוצה מליבת השמש, כך שדרכם אל פני השמש נמשכת למעלה ממאה אלף שנים. עד אז, הם מאבדים כמעט את כל המידע על התנאים השוררים בליבה. לעומתם, הנייטרינים עושים את דרכם למעשה ללא הפרעה, ובמהירות הקרובה למהירות האור. נייטרינו המיוצר בליבת השמש מגיע לכדור הארץ

כחלוף כשמונה דקות, כשהוא נושא אינפורמציה רבת ערך על תהליכי הבעירה בשמש.

אילו היינו יכולים להבחין בנייטרינים האלה בגלאים שלנו, היינו מיטיבים את הבנתנו את השמש באופן משמעותי. אך כאן מונחת בעיה. אם השמש שקופה לנייטרינים, כיצד נוכל אנחנו לעצור אותם בגלאים שלנו ולמדוד את תכונותיהם? התשובה היא שבעזרת גלאים ענקיים אנחנו יכולים לעצור חלק קטן מאוד של שטף הנייטרינים המגיעים מן השמש, ועלינו להבין היטב איזה חלק הצלחנו "לתפוס". ניסיונאים ברחבי העולם, החל מריי דייזל לפני כארבעים שנה בניסיון בארה"ב והמשך בניסויים שונים אחרים ביפן, רוסיה ואיטליה, התמודדו עם האתגר והצליחו. בכל הניסויים, שטף הנייטרינים המגיעים מן השמש היה קטן פי 2-3 מהתחזיות התיאורטיות. לבסוף הגיעו המדידות המכריעות בניסוי אס.אן.או (SNO) בקנדה, שהיו רגישות גם לסוגי נייטרינים שאינם נוצרים בבעירת השמש, ושכל הניסויים הקודמים לא היו רגישים אליהם.

המסקנה המפתיעה הייתה שהמודל התיאורטי של ליבת השמש, ובמיוחד האספקטים שלו שפותחו על ידי ג'והן בקול (John Bahcall), מתאים בצורה מעולה למדידות, ובפרט לשטף הכולל של נייטרינים המגיעים מן השמש. אבל המודל הסטנדרטי של נייטרינים שגוי. הוא מנבא שנייטרינים הם חסרי מסה, אבל ניסויי הנייטרינים מן השמש מראים באופן משכנע שיש להם מסה. השמש מייצרת רק סוג אחד של נייטרינים, אבל לכדור הארץ מגיע יותר מסוג אחד. זה אפשרי רק אם לנייטרינים יש מסה.

האתגר לתיאורטיקאים הוא עכשיו להרחיב את המודל הסטנדרטי באופן מתאים. הדרך הפשוטה ביותר היא להניח את קיומו של חלקיק חדש, שאיננו חלק מרשימת החלקיקים של המודל הסטנדרטי. חלקיקים חדשים אלה אינם רגישים לכוחות של המודל הסטנדרטי (החזק, האלקטרומגנטי והחלש). הם עושים אינטראקציה עם חלקיקים אחרים רק דרך חילוף של חלקיקי היגס. צריך גם להניח שיש לחלקיקים אלה מסות כבדות בהרבה מהמסות של כל חלקיקי המודל הסטנדרטי. חילוף חלקיקי היגס בין החלקיקים הכבדים האלה והנייטרינים נותן לנייטרינים מסות קלות מאוד.

אספקט יפה של תיאוריה זו הוא שהתיאוריה מציעה גם

הלפטונים. אם נצליח למדוד הבדל בדרך שבה נייטרינים ואנטי-נייטרינים מתקדמים על פני מרחקים גדולים, תהייה בידינו עדות ישירה שהאינטראקציות שלהם אכן שונות. אבל, בסופו של דבר, קשה לדמיין שנוכל אי פעם לייצר את החלקיקים הכבדים החדשים במעבדות שלנו ולצפות ישירות בדעיכות שלהם. הם כנראה כבדים עד מאוד, וחוזק האינטראקציות שלהם חלש עד מאוד, כך שלא נוכל לעשות זאת. פירוש הדבר שלא נוכל למדוד את הפרמטרים של התיאוריה שבהם תלויה התוצאה הכמותית, כלומר הערך המספרי של כמות החומר ביקום.

וכן לעכשיו, לתעלומה יש (לפחות) שני פתרונות אפשריים. ניסויים עשויים לבחור ביניהם, או אולי אפילו להפריך את שניהם ולשלוח אותנו בחזרה אל המחברות שלנו. אם סופרסימטריה מספקת את הפיתרון, קרוב לוודאי שנדע זאת בסופו של דבר. אבל אם לפטוג'נסיס הוא התסריט הנכון, אזי קרוב לוודאי שהוא יישאר לנצח מרכיב סביב, אך בלתי מוכח, של הקוסמולוגיה.

מאמר זה מבוסס על הספר:

The Mystery of The Missing Antimatter  
by Helen Quinn and Yossi Nir,  
Princeton University Press,  
Princeton & Oxford 2008.

## מראי מקום ולקריאה נוספת

1. <http://www.phy.uct.ac.za/courses/phy400/particle/higgs.htm>.
2. י. ניה, תעלומת חלקיקי הנייטרינו מן השמש, תהודה (2) 22, עמ' 5, 2001.
3. ש. אליצור, המודל התיקני - המסגרת המאוחדת של כוחות הטבע, תהודה (2) 16, עמ' 27, 1994.
4. ת. הררי, הנייטרינו החמקמק, תהודה (1) 20, עמ' 5, 1999.
5. ז. פרנקל, המפץ הגדול במעבדה? תהודה (1) 21, עמ' 33, 2000.

דרך חדשה לפתור את תעלומת האנטי-חומר החסר. החלקיק החדש הופיע בכמויות לא זניחות ביקום המוקדם. אבל האינטראקציות שלו חלשות מכדי לשמור אותו בשיווי משקל תרמי עם שאר החלקיקים המהווים את הפלזמה הבראשיתית. כך מתקיים התנאי של סחרוב של חריגה משיווי משקל תרמי.

החלקיקים החדשים מתקדמים באין מפריע עד לדעיכתם. כאשר הם דועכים, יכולים להיווצר נייטרינים, או תאומי האנטי-חומר שלהם, האנטי-נייטרינים, אך לא בהכרח בהסתברויות שוות. מצב זה מקיים את שני התנאים האחרים של סחרוב: אין חוק שימור שמקבע את ההפרש בין מספר חלקיקי החומר וחלקיקי האנטי-חומר, וחוזק האינטראקציה שונה בין חומר ואנטי-חומר. ניתן בקלות להתאים את התיאוריה כך שדעיכות החלקיקים הכבדים נותנות יותר אנטי-נייטרינים מאשר נייטרינים. באופן מוזר, זה המצב הנדרש כדי לפתור את הבעיה של עודף החומר על פני האנטי-חומר.

אם הפרמטרים מתאימים, כאשר כל החלקיקים החדשים הכבדים דעכו, יש ביקום עודף של אנטי-נייטרינים. המודל הסטנדרטי מנבא את קיומן של אינטראקציות אשר ישלימו את המלאכה: הן מסבות עודף של אנטי-נייטרינים לעודף של חלקיקי החומר, פרוטונים וניוטרונים. התסריט הזה קרוי "לפטוג'נסיס" (leptogenesis) כלומר יצירת לפטונים, כיוון שהאחריות להישרדות של החומר מוטלת על כתפי הנייטרינים, השייכים לקבוצת החלקיקים הקרויה לפטונים - חלקיקים שאינם רגישים לפעולת הכוח החזק. האם ניתן לבחון את רעיון הלפטוג'נסיס במעבדות שלנו? האינטראקציות המערבות את החלקיקים ההיפותטיים החדשים, את הנייטרינים ואת חלקיקי ההיגס, הן האחריות למסות הנייטרינים. לכן כמה מהמרכיבים של תהליך הלפטוג'נסיס מאולצים על ידי מדידות של מסות נייטרינים. על פי כל הידוע לנו עד כה, מרכיבים אלה מתאימים בצורה נאה ללפטוג'נסיס "מוצלח", קרי תהליך שמוביל לכמות הנכונה של חומר ביקום.

אנחנו יכולים לקוות ללמוד מעט יותר אם נצליח לצפות בתהליך המכונה "דעיכה כפולת- $\beta$  נטולת-נייטרינים", אזי תהייה בידינו הוכחה ישירה שאין חוק שימור למספר