

פיזיקה מעבר למודל הסטנדרטי

עד שנת 2012, המודל הסטנדרטי (SM) הושלם תיאורטית עם אישור קיומו של בוזון היגס במאיץ ההדרונים הגדול (LHC) ב-CERN. כל חלקיק שנחזה נמצא. המשוואות שלו עברו כל מבחן ניסיוני בדיוק מדהים.

אך עם זאת, התחושה בפיזיקה לא הייתה של סיום, אלא של חוסר שלמות. כמו חוקי ניוטון לפני איינשטיין או הפיזיקה הקלאסית לפני מכניקת הקוונטים, המודל הסטנדרטי היה מוצלח מדי בקני המידה שניתן לבדוק אותם, אך לא מסוגל לענות על שאלות עמוקות יותר. זו הייתה מפה כמעט מושלמת – אבל רק של חלק קטן מהנוף.

כבידה: הכוח החסר

ההשמטה הבולטת ביותר היא הכבידה.

- המודל הסטנדרטי מתאר שלושה מתוך ארבעת הכוחות היסודיים הידועים: אלקטרומגנטיות, הכוח החלש והכוח החזק.
- הכבידה, המתוארת על ידי **תורת היחסות הכללית (GR)** של איינשטיין, נעדרת לחלוטין.

זה יותר מסתם פספוס. תורת היחסות הכללית מתייחסת לכבידה כאל עקמומיות של המרחב-זמן, שדה גיאומטרי חלק, בעוד המודל הסטנדרטי מתייחס לכוחות כשדות קוונטיים המועברים על ידי חלקיקים. ניסיונות לקוונטט את הכבידה באותו אופן נתקלים באינסופים שאי אפשר לנרמל אותם.

המודל הסטנדרטי ו-GR הם כמו שתי מערכות הפעלה שונות – מבריקות בתחומן, אך בלתי תואמות ביסודן. ליישב ביניהן הוא אולי האתגר הגדול ביותר של הפיזיקה כיום.

מסת הנייטרינו

המודל הסטנדרטי חוזה כי לנייטרינו אין מסה. אך ניסויים, החל מגלאי סופר-קמיוקנדה ביפן (1998) ואושרו ברחבי העולם, הראו כי נייטרינו מתנדנדים בין טעמים שונים (אלקטרון, מיואון, טאון). תנודות דורשות מסה.

זה היה ההוכחה המאושרת הראשונה לפיזיקה מעבר למודל הסטנדרטי. הגילוי זיכה את קאג'יטה ומקדונלד בפרס נובל ב-2015.

הנייטרינו קלים להפליא, לפחות מיליון פעמים קלים יותר מהאלקטרון. מסתם אינה מוסברת על ידי המודל הסטנדרטי – אך עשויה להצביע על פיזיקה חדשה, כמו **מנגנון הנדנדה**, נייטרינו סטריליים, או קשרים ליקום המוקדם. בתרחישים מסוימים, נייטרינו כבדים של נדנדה מאפשרים **לפטוגנזה**, שבה נוצרת אי-סימטריה של לפטונים ביקום המוקדם, המומרת מאוחר יותר ל**אי-סימטריה של חומר-אנטי-חומר** הנצפית.

חומר אפל

החומר הנראה המתואר על ידי המודל הסטנדרטי מהווה פחות מ-5% מהיקום. השאר בלתי נראה.

- **חומר אפל** (~27% מהיקום) מתגלה רק דרך הכבידה: גלקסיות מסתובבות מהר יותר ממה שהחומר הנראה מאפשר, צבירי גלקסיות מכופפים אור יותר ממה שהם אמורים, ורקע המיקרוגל הקוסמי דורש מסה בלתי נראית נוספת.
- אף אחד מחלקיקי המודל הסטנדרטי לא יכול להסביר אותו. נייטרינו קלים מדי ומהירים מדי. חומר רגיל נדיר מדי.

תיאוריות מציעות חלקיקים חדשים: WIMPs (חלקיקים כבדים עם אינטראקציה חלשה), אקסיונים, נייטרינו סטריליים, או משהו מוזר יותר. אך למרות עשורים של חיפושים – גלאים תת-קרקעיים, ניסויי מאיץ, סקרים אסטרופיזיקליים – החומר האפל נשאר חמקמק.

אנרגיה אפלה

אפילו מסתורית יותר היא **אנרגיה אפלה**, הכוח שמניע את ההתפשטות המואצת של היקום.

- התגלתה ב-1998 באמצעות תצפיות על סופרנובות, אנרגיה אפלה מהווה כ-68% מהיקום.
- באופן עקרוני, ניתן להסביר אותה כ"אנרגיית הוואקום" של שדות קוונטיים. אך חישובים תמימים של QFT חוזים צפיפות אנרגיית ואקום גדולה ב-120 סדרי גודל – התחזית הגרועה ביותר בפיזיקה.

בעיית הקבוע הקוסמולוגי היא אולי הסתירה החריפה ביותר בין תורת השדות הקוונטית לכבידה. המודל הסטנדרטי לא אומר דבר על אנרגיה אפלה. זו חור פעור בהבנתנו את הקוסמוס.

בעיית ההיררכיה

תעלומה עמוקה נוספת טמונה בבוזון ההיגס עצמו.

מסת ההיגס נמדדה כ-125 GeV. אך תיקונים קוונטיים היו אמורים להעלות אותה קרוב למדרגת פלאנק (10^{19} GeV), אלא אם כן מתרחשים ביטולים מופלאים. מדוע היא כל כך קלה בהשוואה למדרגות האנרגיה הטבעיות של הכבידה?

זו **בעיית ההיררכיה**: ההיגס נראה מכוון בצורה לא טבעית. פיזיקאים חושדים בפיזיקה חדשה, כמו **סופר-סימטריה (SUSY)**, שיכולה לייצב את מסת ההיגס על ידי הכנסת חלקיקי שותפים שמבטלים תיקונים מסוכנים. (דיונים על **טבעיות** כוללים רעיונות מפתרונות דינמיים ועד לחשיבה **אנתרופית** בנוף אפשרי של ואקומים).

אי-סימטריה של חומר-אנטי-חומר

המודל הסטנדרטי מכיל כמה הפרות CP, אך הרבה פחות ממה שצריך כדי להסביר מדוע היקום מלא בחומר כיום ולא בכמויות שוות של חומר ואנטי-חומר. כפי שצוין לעיל, מנגנונים כמו **לפטוגנזה** (הקשורים לעיתים קרובות למקור הנדנדה של מסות הנייטרינו) מציעים דרך משכנעת שבה פיזיקה מעבר למודל הסטנדרטי מטה את הכף.

תמונה יפה, אך לא שלמה

המודל הסטנדרטי מכונה לעיתים "התיאוריה המוצלחת ביותר בפיזיקה". התחזיות שלו תואמות לניסויים עד 10-12 ספרות עשרוניות. הוא מסביר כמעט כל מה שאנו רואים במאיצי חלקיקים ובמעבדות.

אבל הוא לא שלם:

- הוא מתעלם מהכבידה.

- הוא לא יכול להסביר מסות של נייטרינו.
- הוא לא יכול להסביר חומר אפל או אנרגיה אפלה.
- הוא משאיר תעלומות עמוקות כמו בעיית ההיררכיה ואי-סימטריה של חומר-אנטי-חומר ללא פתרון.

פיזיקאים עומדים כעת ברגע מוכר בהיסטוריה. כפי שמכניקת ניוטון פינתה מקום ליחסות והפיזיקה הקלאסית למכניקת הקוונטים, המודל הסטנדרטי חייב בסופו של דבר לפנות מקום למשהו עמוק יותר.

הגביע הקדוש: תיאוריה מאוחדת

המטרה האולטימטיבית היא **תיאוריה מאוחדת גדולה (GUT)** או אפילו **תיאוריית הכל (ToE)**: מסגרת שמאחדת את כל ארבעת הכוחות, מסבירה את כל החלקיקים, ופועלת באופן עקבי מהקני מידה הקטנים ביותר (כבידה קוונטית) ועד הגדולים ביותר (קוסמולוגיה).

זהו הגביע הקדוש של הפיזיקה המודרנית. זו הסיבה שחוקרים דוחפים מאצים לאנרגיות גבוהות יותר, בונים גלאי נייטרינו ענקיים, ממפים את הקוסמוס עם טלסקופים, וממציאים מתמטיקה חדשה ונועזת.

הפרקים הבאים יחקרו את המועמדים המובילים:

- **סופר-סימטריה (SUSY)** – סימטריה בין חלקיקי חומר וכוחות.
- **תיאוריית המיתרים ותיאוריית M** – שבהם חלקיקים הם מיתרים רוטטים והגרביטון מופיע באופן טבעי.
- **ממדים נוספים** – מרעיון קלוזה-קליין המוקדם ועד לדגמי רנדל-סנדרום המודרניים.
- **גישות אחרות** – כמו כבידה קוונטית לולאית ובטיחות אסימפטוטית.

כל אחד מהרעיונות הללו לא נוצר כדוגמה, אלא כמדע במיטבו: שימת לב לסדקים, פיתוח תיאוריות חדשות, ובדיקתן מול המציאות.

סופר-סימטריה: הסימטריה הגדולה הבאה?

לפיזיקה היסטוריה ארוכה של איחוד דרך סימטריה. משוואות מקסוול איחדו חשמל ומגנטיות. היחסות הפרטית איחדה מרחב וזמן. התיאוריה האלקטרו-חלשה איחדה שניים מתוך ארבעת הכוחות היסודיים. כל התקדמות נבעה מגילוי סימטריה נסתרת בטבע.

סופר-סימטריה – או SUSY, כפי שפיזיקאים מכנים אותה בחיבה – היא ההצעה הנועזת שהסימטריה הגדולה הבאה מחברת בין שתי קטגוריות שנראות שונות: **חומר וכוחות**.

פרמיונים ובוזונים: חומר מול כוח

במודל הסטנדרטי, חלקיקים נחלקים לשתי משפחות גדולות:

- **פרמיונים (ספין 1/2):** כוללים קווארקים ולפטונים, אבני הבניין של החומר. הספין החצי-שלם שלהם פירושו שהם מצייתים לעקרון ההדרה של פאולי: שני פרמיונים זהים לא יכולים לתפוס את אותו מצב. זו הסיבה שלאטומים יש מעטפות מובנות, וזו הסיבה שהחומר יציב.
- **בוזונים (ספין שלם):** כוללים פוטונים, גלואונים, בוזוני W ו-Z, והיגס. בוזונים מעבירים כוחות. בניגוד לפרמיונים, הם יכולים להצטבר באותו מצב, ולכן קיימים לייזרים (פוטונים) וקונדנסטים של בוז-איינשטיין.

בקצרה: פרמיונים יוצרים חומר, בוזונים מעבירים כוחות.

ההשערה של סופר-סימטריה

סופר-סימטריה מציעה סימטריה שמחברת בין פרמיונים ובוזונים. לכל פרמיון ידוע יש שותף בוזוני. לכל בוזון ידוע יש שותף פרמיוני.

- קווארקים → סקווארקים
- לפטונים → סלפטונים
- גלואונים → גלואינואים
- מגזר מדידה/היגס → ניוטרלינואים (תערובת של בינואים, וינואים, היגסינואים; נייטרליים) וצ'רג'ינואים (תערובת של וינואים, היגסינואים; טעונים)

("פוטיונואים" ו"זינואים" הם כינויים ישנים למצבים מסוימים של מדידה; ניסויים מחפשים למעשה את **מצבי המסה** המוזכרים לעיל.)

מדוע להציע הכפלה כה קיצונית של עולם החלקיקים? משום ש-SUSY מבטיחה פתרונות אלגנטיים לכמה מהבעיות העמוקות ביותר שנותרו על ידי המודל הסטנדרטי.

פתרון בעיית ההיררכיה

אחת מהמשיכות הגדולות ביותר של SUSY היא היכולת שלה לפתור את **בעיית ההיררכיה**: מדוע בוזון ההיגס כל כך קל בהשוואה למדרגת פלאנק?

במודל הסטנדרטי, תיקונים קוונטיים מחלקיקים וירטואליים היו אמורים להעלות את מסת ההיגס לערכים עצומים. סופר-סימטריה מציגה חלקיקי שותפים שתרומותיהם מבטלות את ההתבדרויות הללו. התוצאה: מסת ההיגס מיוצבת באופן טבעי, ללא צורך בכוונון עדין (לפחות בספקטרומים "טבעיים" של SUSY).

SUSY ואיחוד גדול

מניע נוסף ל-SUSY נובע מאיחוד הכוחות.

- הקרנת קבועי הצימוד של הכוחות החזק, החלש והאלקטרומגנטי לאנרגיות גבוהות יותר מראה שבמודל הסטנדרטי, הם כמעט, אך לא ממש, מתכנסים בנקודה אחת.
- ב-SUSY, עם תרומות החלקיקים השותפים, הקבועים מתכנסים יפה בסביבות 10^{16} GeV.

זה מרמז שבאנרגיות גבוהות במיוחד, שלושת הכוחות עשויים להתמזג ל**תיאוריה מאוחדת גדולה (GUT)**.

SUSY כמועמד לחומר אפל

סופר-סימטריה מציעה גם מועמד טבעי ל**חומר אפל**.

אם SUSY נכונה, אחד מחלקיקי השותפים צריך להיות יציב וחסר מטען חשמלי. מועמד מוביל הוא ה**ניוטרלינו הקל ביותר**, תערובת של בינואים, וינואים והיגסינואים.

ניוטרלינואים מתקשרים רק בצורה חלשה, מה שמתאים לפרופיל של WIMPs (חלקיקים כבדים עם אינטראקציה חלשה). אם יתגלו, הם עשויים להסביר את 27% החסרים של חומר היקום.

חיפושים ניסיוניים עבור SUSY

במשך עשורים, פיזיקאים קיוו שחלקיקים סופר-סימטריים יופיעו מעט מעל קני המידה שנחקרו כבר.

- **LEP (CERN, שנות ה-90):** לא נמצאו חלקיקי SUSY עד ~ 100 GeV.
- **טבטרון (פרמילאב, שנות ה-2000-90):** לא נמצאו חלקיקי שותפים.
- **LHC (CERN, שנות ה-2010-2020):** התנגשויות פרוטון-פרוטון עד **13.6 TeV** (עיצוב: **14 TeV**). למרות חיפושים נרחבים, לא נמצאו עדויות לסקווארקים, גלואינואים או ניוטרלינואים עד לתחום הרב-TeV.

היעדר גילויים של SUSY ב-LHC היה מאכזב. רבים מגרסאות ה-SUSY הפשוטות, כמו "המודל הסטנדרטי הסופר-סימטרי המינימלי" (MSSM), מוגבלות כעת מאוד. ספקטרומים "טבעיים" הופכים כבדים יותר, מה שמרמז על כוונון עדין יותר אם SUSY נמצאת קרוב למדרגת ה-TeV.

עם זאת, SUSY לא נשללה. מודלים מורכבים יותר חוזים חלקיקי שותפים כבדים יותר או עדינים יותר, אולי מעבר להישג ידו של ה-LHC או עם אינטראקציות חלשות מדי מכדי להתגלות בקלות.

האלגנטיות המתמטית של SUSY

מעבר למניעים הפנומנולוגיים שלה, ל-SUSY יש אלגנטיות מתמטית עמוקה.

- זו ההרחבה היחידה האפשרית של סימטריות המרחב-זמן התואמות ליחסות ולמכניקת הקוונטים.
- תיאוריות סופר-סימטריות לעיתים קרובות ניתנות לחישוב יותר: הן מאלפות אינסופים וחושפות מבנים נסתרים ב-QFT.
- בתיאוריית המיתרים, SUSY הכרחית לעקביות: בלעדיה, התיאוריה מכילה טכיונים ופתולוגיות אחרות.

גם אם הטבע לא מממש את SUSY באנרגיות נגישות, המתמטיקה שלה כבר העשירה את הפיזיקה.

מצב הסופר-סימטריה

כיום, SUSY נמצאת במצב מוזר.

- היא נותרה אחת המסגרות המשכנעות ביותר לפיזיקה מעבר למודל הסטנדרטי.
- היא פותרת את בעיית ההיררכיה, תומכת באיחוד, ומציעה מועמד לחומר אפל.
- עם זאת, אין עדיין עדויות ניסיוניות.

אם ה-LHC וממשיכיו ימשיכו לא למצוא דבר, ייתכן ש-SUSY מתממשת רק בקני מידה הרבה מעבר להישג ידנו – או שאולי הטבע בחר בדרך שונה לחלוטין.

שיטה, לא דוגמה

סופר-סימטריה ממחישה את השיטה המדעית בפעולה.

פיזיקאים זיהו בעיות: בעיית ההיררכיה, איחוד, חומר אפל. הם הציעו סימטריה חדשה ונועזת שפותרת את כולן. הם עיצבו ניסויים לבדיקתה. עד כה, התוצאות היו שליליות – אך זה לא אומר שהרעיון בוזבז. SUSY חידדה את הכלים שלנו, הבהירה מה אנו מחפשים, והנחתה דורות של מחקר.

כמו האתר או האפיציקלים לפניו, SUSY עשויה להיות אבן דרך לאמת עמוקה יותר, בין אם היא שורדת כמילה האחרונה ובין אם לא.

תיאוריית המיתרים ותיאוריית M

פיזיקה מעבר למודל הסטנדרטי מונעת לעיתים קרובות על ידי תיקונים: פתרון בעיית ההיררכיה, הסבר על חומר אפל, איחוד קבועי מדידה. תיאוריית המיתרים שונה. היא לא מתחילה עם תעלומה ספציפית. במקום זאת, היא מתחילה עם מתמטיקה – ומסתיימת בשכתוב מלא של תפיסתנו את המרחב, הזמן והחומר.

מקורות: תיאוריה שנולדה מכישלון

תיאוריית המיתרים החלה, באופן מפתיע, לא כתיאוריית הכל, אלא כניסיון כושל להבין את הכוח הגרעיני החזק.

בסוף שנות ה-60, לפני ש-QCD פותחה במלואה, פיזיקאים ניסו להסביר את גן החיות של ההדרונים. הם הבחינו בדפוסים בנתוני הפיזור שהצביעו על כך שניתן למדל את הרזוננסות על ידי מיתרים רוטטים.

המודל של "רזוננס כפול", שהוצג על ידי ונציאנו ב-1968, תיאר אינטראקציות חזקות כאילו ההדרונים היו עירורים של מיתרים זעירים. זה היה אלגנטי, אך ננטש במהירות כאשר QCD התגלתה כתיאוריה האמיתית של הכוח החזק.

עם זאת, תיאוריית המיתרים סירבה למות. במשוואות שלה הסתתרו תכונות מדהימות שהצביעו מעבר לפיזיקה הגרעינית.

הגילוי המפתיע: הגרביטון

כאשר תיאורטיקנים קוונטו את רטטי המיתרים, הם גילו שהספקטרום כולל בהכרח **חלקיק ללא מסה עם ספין 2**.

זה היה מזעזע. תורת השדות הקוונטית הראתה שחלקיק ללא מסה עם ספין 2 הוא ייחודי: הוא חייב להיות הקוונטום של הכבידה, **הגרביטון**.

כפי שג'ון שוורץ ציין מאוחר יותר: **"אך עובדה מפתיעה התגלתה: המתמטיקה של תיאוריית המיתרים הכילה בהכרח חלקיק ללא מסה עם ספין 2 – גרביטון."**

מה שהתחיל כתיאוריה של הדרונים יצר בטעות את אבן הבניין של כבידה קוונטית.

הרעיון המרכזי: מיתרים, לא נקודות

בלב תיאוריית המיתרים, חלקיקים נקודתיים מוחלפים בעצמים חד-ממדיים זעירים: מיתרים.

- מיתרים יכולים להיות **פתוחים** (עם שני קצות) או **סגורים** (לולאות).

- מצבי רטט שונים של המיתר מתאימים לחלקיקים שונים.

- רטט מסוים מופיע כפוטון.

- אחר כגלואון.

- אחר כקווארק.

- ומצב אחד, בהכרח, כגרביטון.

שינוי פשוט זה – מנקודות למיתרים – פותר רבים מהאינסופים שמטרידים את הכבידה הקוונטית. הגודל הסופי של המיתר מפזר אינטראקציות שהיו מתפוצצות במרחק אפס.

סופר-סימטריה וסופר-מיתרים

גרסאות מוקדמות של תיאוריית המיתרים סבלו מבעיות: הן הכילו טכיונים (חוסר יציבות) ודרשו תכונות לא מציאותיות. הפריצה הגיעה עם הכנסת **סופר-סימטריה**, שהובילה בשנות ה-70 וה-80 ל**תיאוריית הסופר-מיתרים**.

סופר-מיתרים ביטלו טכיונים, שילבו פרמיונים והביאו עקביות מתמטית חדשה.

אך היה תפס: תיאוריית המיתרים עובדת רק בממדים גבוהים יותר. באופן ספציפי, **10 ממדי מרחב-זמן**.

- ארבעת הממדים שאנו רואים (שלושה ממדי מרחב, ממד זמן אחד).
- שישה ממדים נוספים, דחוסים או מגולגלים בקני מידה זעירים, בלתי נראים לניסויים הנוכחיים.

רעיון זה, קיצוני ככל שיראה, לא היה חדש לחלוטין. בשנות ה-20, **תיאוריית קלוזה-קליין** כבר רמזה שממדים נוספים יכולים לאחד כבידה ואלקטרומגנטיות. תיאוריית המיתרים החייתה והרחיבה רעיון זה באופן עצום.

חמש תיאוריות המיתרים

באמצע שנות ה-80, פיזיקאים גילו שתיאוריית המיתרים אינה ייחודית, אלא מגיעה ב**חמש גרסאות שונות**:

1. **סוג I** – מיתרים פתוחים וסגורים, כולל מיתרים מכוונים ולא מכוונים.
2. **סוג IIA** – מיתרים סגורים, מכוונים, לא-כיראליים.
3. **סוג IIB** – מיתרים סגורים, מכוונים, כיראליים.
4. **הטרוטית $SO(32)$** – מיתרים סגורים עם מבנה היברידי.
5. **הטרוטית $E_8 \times E_8$** – גרסה סימטרית מאוד, שלימים הפכה קריטית לחיבור לפיזיקת חלקיקים מציאותית.

כל אחת נראתה עקבית מתמטית, אך מדוע שהטבע יבחר באחת?

המהפכה הראשונה של הסופר-מיתרים

ב-1984, מייקל גרין וג'ון שוורץ הראו שתיאוריית המיתרים יכולה לבטל באופן אוטומטי אנומליות קוונטיות – משהו שתיאוריות שדות קוונטיות נאלצו לעצב בקפידה. גילוי זה הצית את **מהפכת הסופר-מיתרים הראשונה**, כשאלפי פיזיקאים פנו לתיאוריית המיתרים כמועמדת לתיאוריה מאוחדת של כל הכוחות.

זו הייתה המסגרת הרצינית הראשונה שבה כבידה קוונטית לא רק הייתה עקבית, אלא בלתי נמנעת.

המהפכה השנייה של הסופר-מיתרים: תיאוריית M

באמצע שנות ה-90, התרחשה מהפכה שנייה. אדוארד ויטן ואחרים גילו שחמש תיאוריות המיתרים השונות אינן מתחרות, אלא גבולות שונים של תיאוריה עמוקה יותר אחת: **תיאוריית M**.

מאמינים שתיאוריית M קיימת ב**11 ממדים** וכוללת לא רק מיתרים, אלא גם עצמים מממדים גבוהים יותר הנקראים **בריינים** (קיצור של ממברנות).

- בריינים חד-ממדיים = מיתרים.
- בריינים דו-ממדיים = ממברנות.
- בריינים מממדים גבוהים יותר עד 9 ממדי מרחב.

בריינים אלה פתחו אפשרויות חדשות ועשירות: יקומים שלמים עשויים להתקיים כבריינים תלת-ממדיים, צפים במרחב מממדים גבוהים יותר, כאשר הכבידה דולפת לתפזורת בעוד כוחות אחרים נשארים מוגבלים. תמונה זו עוררה השראה לדגמי ממדים נוספים מודרניים כמו **רנדל-סנדרום**.

דוגמאות בולטות: קלוזה-קליין ורנדל-סנדרום

- **קלוזה-קליין (שנות ה-20):** הציע ממד חמישי נוסף לאיחוד כבידה ואלקטרומגנטיות. הרעיון נזנח לשנים רבות, אך תיאוריית המיתרים החייתה אותו בצורה גדולה יותר. ממדים נוספים דחוסים נשארים מאפיין מרכזי של דגמי המיתרים.
- **רנדל-סנדרום (1999):** הציע ממדים נוספים "מעוותים", שבהם היקום שלנו הוא בריין תלת-ממדי המוטבע בממדים גבוהים יותר. הכבידה מתפשטת בתפזורת, מה שמסביר מדוע היא חלשה יותר מכוחות אחרים. דגמים כאלה חוזים אותות אפשריים במאיצי חלקיקים או סטיות מחוק ניוטון במרחקים קצרים מאוד.

רמזים ניסיוניים ואתגרים

תיאוריית המיתרים מעלה טענות נועזות, אך בדיקתן קשה להפליא.

- **ממדים נוספים:** עשויים להתגלות דרך אותות אנרגיה חסרים או **עירורים של קלוזה-קליין** – אולי עבור גרביטונים או **אפילו שדות של המודל הסטנדרטי**, תלוי בתצורה. מגבלות מאיצים מגיעות בדרך כלל לתחום **רב-TeV**.
- **גרביטונים:** חלקיק ללא מסה עם ספין 2 נחזה, אך זיהוי גרביטון בודד הוא מעבר לטכנולוגיה הניתנת לדמיון. השפעות עקיפות, כמו סטיות בגלי כבידה, אפשריות.
- **סופר-סימטריה:** תיאוריית המיתרים דורשת SUSY בקנה מידה כלשהו, אך ה-LHC עדיין לא מצא חלקיקי שותפים.
- **קוסמולוגיה:** היקום המוקדם, אינפלציה ורקע המיקרוגל הקוסמי עשויים לשאת טביעות של פיזיקת המיתרים, אם כי התוצאות עד כה אינן חד-משמעיות.

למרות האתגרים, תיאוריית המיתרים סיפקה קרקע פורייה למתמטיקה, והעניקה השראה להתקדמות בגיאומטריה, טופולוגיה ודואליות כמו AdS/CFT (המחברת כבידה בממדים גבוהים יותר עם תורת שדות קוונטית ללא כבידה).

יופי ומחלוקת

תומכים טוענים שתיאוריית המיתרים היא הדרך המבטיחה ביותר לתיאוריה מאוחדת: היא כוללת כבידה קוונטית, מאחדת את כל הכוחות, ומסבירה מדוע גרביטון חייב להתקיים.

מבקרים טוענים שבלי אישור ניסיוני, תיאוריית המיתרים מסתכנת בהתנתקות מהמדע האמפירי. "הנוף" העצום של הפתרונות האפשריים שלה (עד 10^{500}) מקשה על חילוץ תחזיות ייחודיות.

שני הצדדים מסכימים על דבר אחד: תיאוריית המיתרים שינתה את דרך החשיבה שלנו על פיזיקה וסיפקה שפה חדשה לאיחוד.

בדרך לתיאוריית הכל

אם סופר-סימטריה היא הצעד הבא מעבר למודל הסטנדרטי, תיאוריית המיתרים היא הצעד שאחריו: מועמדת ל**תיאוריית הכל** שחיפשנו זמן רב.

הטענה הנועזת ביותר שלה אינה רק שהיא כוללת את המודל הסטנדרטי והכבידה, אלא שאלה הם תוצאות בלתי נמנעות של מיתרים רוטטים בממדים גבוהים יותר. הגרביטון אינו תוספת – הוא מובנה. האם הטבע בחר בדרך זו, עדיין צריך להתגלות.

חקר הגבולות: ניסויים מעבר למודל הסטנדרטי

תיאוריות הן דם החיים של הפיזיקה, אך ניסויים הם פעימות הלב שלה. סופר-סימטריה, תיאוריית המיתרים וממדים נוספים הם מבנים מתמטיים יפים, אך הם חיים או מתים על ידי עדויות. אם הם אמורים להיות יותר מספקולציות, עליהם להשאיר עקבות בנתונים.

פיזיקאים פיתחו דרכים מתוחכמות לחפש אחר עקבות אלה – במאיצים, בקוסמוס, ובמבנה המרחב-זמן עצמו.

מאיצים: ציד חלקיקי שותפים וגרביטונים

מאיץ ההדרונים הגדול (LHC) ב-CERN הוא מאיץ החלקיקים החזק ביותר בעולם, המתנגש פרוטונים באנרגיות של עד 13.6 TeV (עיצוב: 14 TeV). זה היה הכלי העיקרי של האנושות לחקר פיזיקה מעבר למודל הסטנדרטי.

סופר-סימטריה ב-LHC

- **חיפוש אחר חלקיקי שותפים:** ניסויי ATLAS ו-CMS חיפשו בנתונים אחר סקווארקים, גלואינואים וניוטרלינואים/צ'רג'ינואים. אלה יופיעו לעיתים קרובות כחתימות של "אנרגיה חסרה", שכן חלקיקי SUSY חומקים מגילוי.
- **תוצאות:** לא נמצאו חלקיקי SUSY מאושרים עד לתחום הרב-TeV. זה שלל רבים מהמודלים הפשוטים ביותר של SUSY ודחף את SUSY "טבעית" לתחומים כבדים יותר, המצביעים על כוונות עדין יותר.

גרביטונים וממדים נוספים

- **מצבי קלוזה-קליין:** אם ממדים נוספים קיימים, גרביטונים או אפילו שדות של המודל הסטנדרטי עשויים להופיע כעירורים כבדים של KK, שניתן לזהות כרזוננסות בערוצי די-לפטונים, די-פוטונים או די-ג'טים.
- **אותות רנדל-סנדרום:** ממדים נוספים מעוותים עשויים לייצר רזוננסות גרביטונים עם דפוסי זווית אופייניים לספין 2.
- **תוצאות:** חיפושים ב-LHC לא מצאו עדויות עד כה, אך דחפו מגבלות לתחום **רב-TeV**, תוך הגבלת הגודל, העיוות והגיאוטריה של ממדים נוספים.

חורים שחורים מיקרוסקופיים

תיאוריות מסוימות מציעות שאם הכבידה הופכת חזקה בקנה מידה של TeV, חורים שחורים זעירים עשויים להיווצר בהתנגשויות LHC, להתאדות בפיצוצות חלקיקים. אירועים כאלה לא נצפו.

ניסויים מדויקים: בדיקת כבידה בקני מידה קטנים

אם ממדים נוספים קיימים, חוק הכבידה של ניוטון עשוי להתמוטט במרחקים קצרים.

- **ניסויי מאזן עקום ("Eöt-Wash"):** בודקים את חוק הריבוע ההפוך עד **קני מידה תת-מילימטריים** – כיום **עשרות מיקרומטרים ($\sim 50 \mu\text{m}$)**.
- **תוצאות:** לא נמצאו סטיות. ניסויים אלה **שוללים** מגוון רחב של תרחישי ממדים נוספים עם אורכים אופייניים **גדולים מ- 10^{-4} מטר** (תלוי במודל).

ניסויי שולחן אלה רגישים להפליא וחוקרים קני מידה שאינם נגישים למאיצים.

גלי כבידה: חלון חדש לכבידה קוונטית

גילוי גלי כבידה על ידי LIGO ב-2015 פתח גבול חדש.

- **קיטובים נוספים / התפשטות משתנה:** כמה מודלים של כבידה קוונטית או ממדים נוספים חוזים סטיות מ-GR (קיטובים נוספים, פיזור או צלצולים משתנים).
 - **ספקטרוסקופיה של צלצול:** "הצלצול" של חורים שחורים לאחר מיזוג עשוי לחשוף סטיות עדינות מ-GR.
 - **גלי כבידה ראשוניים:** גלים מהמפץ הגדול עשויים לשאת טביעות של פיזיקת המיתרים, הניתנות לגילוי על ידי מצפים עתידיים כמו LISA או טלסקופ אינשטיין.
- עד כה, התצפיות תואמות ל-GR** בתוך אי-הוודאויות הנוכחיות, אך דיוק גבוה יותר עשוי להביא הפתעות.

קוסמולוגיה: היקום כמעבדה

היקום עצמו הוא מאיץ החלקיקים האולטימטיבי.

- **רקע המיקרוגל הקוסמי (CMB):** תנודות זעירות ממפות את היקום המוקדם. כמה מודלים של מיתרים חוזים חתימות ספציפיות, כמו חלוקות לא-גאוסיות או תכונות מתנדנדות.
- **אינפלציה:** ההתפשטות המהירה של היקום עשויה להיות מונעת על ידי שדות הקשורים לתיאוריית המיתרים. זיהוי מצבי B ראשוניים ב-CMB יהיה רמז חזק.
- **חיפוש חומר אפל:** ניוטרלינואים מ-SUSY הם מועמדים מובילים לחומר אפל. ניסויים כמו XENONnT, LUX-ZEPLIN ו-PandaX מחפשים WIMPs דרך נסיגות גרעיניות.
- **אקסיונים:** תיאוריית המיתרים גם חוזה חלקיקים דמויי אקסיון, שניתן לזהותם דרך חללים תהודתיים או תצפיות אסטרופיזיקליות.

עד כה, השמיים שותקים. חומר אפל נותר לא מזוהה, ונתונים קוסמולוגיים תואמים למודל Λ CDM ללא טביעות אצבע ברורות של מיתרים.

המצב הנוכחי: מגבלות, לא אישורים

עשורים של חיפוש לא אישרו את SUSY, ממדים נוספים או אותות של מיתרים. אך היעדר עדויות אינו עדות להיעדר:

- SUSY עשויה להתקיים בקני מידה מעבר להישג ידו של ה-LHC או בספקטרומים פחות ברורים; תוצאות שליליות עד כה **מעדיפות גרסאות מכווננות יותר ("פחות טבעיות")** אם SUSY קרובה למדרגת ה-TeV.
- ממדים נוספים עשויים להיות קטנים יותר או מוסתרים בדרך אחרת מפני בדיקות נוכחיות.
- תיאוריית המיתרים עשויה להשאיר טביעות ניתנות לזיהוי רק ביקום המוקדם מאוד, הנגישות רק דרך קוסמולוגיה.

כמה **אנומליות מדויקות** (למשל, מדידת $(g-2)$ של המיואון וכמה **מתחים בפיזיקת טעמים**) נותרות **מסקרנות אך לא פתורות**; הן ממשיכות לעודד חקירה מבלי להפיל את המודל הסטנדרטי עד כה.

מה שניסויים עשו הוא **לצמצם את מרחב הפרמטרים**. הם סיפרו לנו היכן SUSY לא נמצאת, כמה קטנים ממדים נוספים חייבים להיות, וכמה חזק או חלש חומר אפל יכול או לא יכול להתקשר.

הדרך קדימה

ניסויים עתידיים מבטיחים לחקור עמוק יותר:

- **LHC בעל בהירות גבוהה (HL-LHC):** יאסוף פי 10 יותר נתונים, יחקור את SUSY עד למסות גבוהות יותר ותהליכים נדירים.
- **מאיץ מעגלי עתידי (FCC-hh):** מאיץ מוצע של 100 TeV, חזק מספיק כדי לחקור קני מידה אנרגטיים שבהם פיזיקת GUT עשויה להופיע.
- **LISA (שנות ה-2030):** מצפה גלי כבידה מבוסס חלל, רגיש לאותות ראשוניים מהיקום המוקדם.
- **גלאי חומר אפל מהדור הבא:** עם רגישות לאותות חלשים, הם עשויים סוף סוף ללכוד WIMP או אקסיון.

מדע כמסע

הסיפור הניסיוני של פיזיקה מעבר למודל הסטנדרטי אינו סיפור של כישלון, אלא של תהליך.

- תוצאות שליליות שוללות מודלים פשוטים ומחדדות את התיאוריות שלנו.
- כל מגבלה מנחה אותנו למסגרות מעודנות וחזויות יותר.
- היעדר SUSY או ממדים נוספים בקנה מידה של TeV לא הורג את הרעיונות – הוא דוחף אותם לשטח חדש.

כפי שניסויי נייר הזהב של רתרפורד ריסק את מודל עוגת השזיפים, או LIGO סילק ספקות לגבי גלי כבידה, הגילוי הגדול הבא עשוי להגיע פתאום – ולשנות הכל.

בדרך לתיאוריית הכל

במשך מאות שנים, הפיזיקה התקדמה דרך איחוד. ניוטון איחד את השמיים והארץ תחת חוק כבידה אחד. מקסוול איחד חשמל ומגנטיות. איינשטיין איחד מרחב וזמן. התיאוריה האלקטרו-חלשה הראתה ששני כוחות שונים מאוד הם היבטים של כוח אחד.

הצעד הטבעי הבא הוא הנועז ביותר עד כה: **איחוד כל ארבעת האינטראקציות היסודיות** – חזק, חלש, אלקטרומגנטי וכבידתי – במסגרת עקבית אחת. זהו הגביע הקדוש של הפיזיקה: **תיאוריית הכל (ToE)**.

מדוע ToE חשובה

איחוד מלא אינו רק אלגנטיות פילוסופית; הוא מתייחס לבעיות מעשיות ומושגיות עמוקות:

- **כבידה קוונטית:** תורת היחסות הכללית מתמוטטת בקנה מידה של פלאנק (10^{19} GeV). רק תיאוריה קוונטית של כבידה יכולה להסביר חורים שחורים וסינגולריות של המפץ הגדול.
- **טבעיות וכוונון עדין:** בעיית ההיררכיה ובעיית הקבוע הקוסמולוגי זועקות להסבר עמוק יותר.
- **פרמטרים של המודל הסטנדרטי:** מדוע לחלקיקים יש את המסות והמטענים שיש להם? מדוע שלוש דורות של קווארקים ולפטונים? ToE עשויה להסביר את התעלומות הללו.

- **קוסמולוגיה:** חומר אפל, אנרגיה אפלה ואינפלציה עשויים כולם להיות קשורים לפיזיקה בקנה מידה של איחוד.

ToE לא תאחד רק כוחות – היא תאחד קני מידה, מהמיתרים הקטנים ביותר של התיאוריה הקוונטית ועד למבנים הקוסמיים הגדולים ביותר.

סופר-סימטריה ואיחוד גדול

סופר-סימטריה (SUSY), אם היא מתממשת בטבע, מספקת אבן דרך ל-ToE.

- **פתרון בעיית ההיררכיה:** חלקיקי שותפים מבטלים תיקונים מתבדרים למסת ההיגס.
- **איחוד קבועי מדידה:** עם SUSY, עוצמות שלושת הכוחות מתכנסות יפה ב- 10^{16} GeV, מה שמרמז על **תיאוריה מאוחדת גדולה (GUT)**.
- **מועמד לחומר אפל:** הניוטרלינו מציע הסבר טבעי לחומר האפל הקוסמי.

GUTs בהשראת SUSY (כמו $SO(10)$, $SU(5)$ או E_6) מדמיינים שבאנרגיות גבוהות במיוחד, קווארקים ולפטונים מתאחדים לרב-צירופים גדולים יותר, והכוחות מתמזגים לקבוצת מדידה אחת.

אך SUSY עדיין לא הופיעה בניסויים. אם היא קיימת רק בקני מידה מעבר להישג ידנו, כוח האיחוד שלה עשוי להישאר מפתה אך מוסתר.

תיאוריית המיתרים: כבידה קוונטית וגרביטון

תיאוריית המיתרים הולכת רחוק יותר. במקום לתקן את המודל הסטנדרטי, היא כותבת מחדש את היסודות:

- **מיתרים, לא נקודות:** כל החלקיקים הם רטטות של מיתרים זעירים.
- **גרביטון מופיע באופן טבעי:** העירור ללא מסה עם ספין 2 הוא בלתי נמנע, כלומר כבידה קוונטית מובנית.
- **איחוד:** מצבי רטט שונים מייצרים את כל החלקיקים הידועים – קווארקים, לפטונים, בוזוני מדידה, היגס – במסגרת אחת.
- **ממדים נוספים:** תיאוריית המיתרים דורשת 10 ממדי מרחב-זמן; תיאוריית M דורשת 11, עם ממדים מוסתרים דחוסים או מעוותים.

בחזון זה, איחוד אינו מקרי – הוא גיאומטרי. כוחות שונים משום שמיתרים רוטטים בדרכים שונות, מעוצבים על ידי הטופולוגיה של ממדים נוספים.

תיאוריית M ועולמות בריינים

הגילוי שחמש תיאוריות המיתרים מחוברות על ידי דואליות הוביל לתיאוריית M, מסגרת גדולה עוד יותר:

- כוללת מיתרים, ממברנות ובריינים מממדים גבוהים יותר.
- מציעה שהיקום שלנו עשוי להיות בריין תלת-ממדי, צף בתפזורת מממדים גבוהים יותר.
- מספקת הסברים טבעיים מדוע הכבידה חלשה יותר (היא דולפת לתפזורת) וכיצד יקומים מרובים עשויים להתקיים ב"רב-יקום".

תיאוריית M עדיין לא מלאה, אך היא הצעד הנועז ביותר לעבר ToE שנוסה אי פעם.

דרכים אחרות לכבידה קוונטית

תיאוריית המיתרים ותיאוריית M אינן הדרכים היחידות. פיזיקאים חוקרים מסגרות מרובות, כל אחת עם חוזקות שונות:

- **כבידה קוונטית לולאתית (LQG):** מנסה לקוונטט את המרחב-זמן ישירות, חוזה שמרחב הוא בדיד בקנה מידה של פלאנק.
- **בטיחות אסימפטוטית:** מציעה שהכבידה עשויה להפוך לנוחה באנרגיות גבוהות עקב נקודה קבועה לא טריוויאלית.
- **טריאנגולציות דינמיות קוזליות (CDT):** בונות מרחב-זמן מאבני בניין גיאומטריות פשוטות.
- **תיאוריית טוויסטור ואמפליטודה:** מסגרות מתמטיות חדשניות שחושבות מחדש על מרחב-זמן ומשרעות פיזור.

אף על פי שאף אחת מהן לא משתווה עדיין להיקף האיחוד של תיאוריית המיתרים, הן ממחישות את עושר החיפוש.

תפקיד הניסוי

ToE חייבת בסופו של דבר להיות ניתנת לבדיקה. אף שקנה מידה של פלאנק נמצא הרבה מעבר לניסויים הנוכחיים, פיזיקאים מחפשים עדויות עקיפות:

- **מאצצים:** חלקיקי SUSY, ממדים נוספים, או חורים שחורים מיקרוסקופיים.
- **בדיקות מדויקות:** סטיות מחוק ניוטון בקני מידה קצרים.
- **גלי כבידה:** קיטובים אקזוטיים או הדים מממדים גבוהים יותר.
- **קוסמולוגיה:** טביעות של אינפלציה, מועמדים לחומר אפל, או אקסיונים שנחזו על ידי תיאוריית המיתרים.

עד כה, ToE נותרה מחוץ להישג יד, אך כל תוצאה שלילית מצמצמת את האפשרויות.

יופי ואתגר

ToE אמיתית לא תאחד רק את הפיזיקה – היא תאחד את **הידע האנושי**. היא תחבר בין מכניקת הקוונטים ליחסות, מיקרו למאקרו, חלקיק לקוסמוס.

אך היא ניצבת בפני פרדוקס: קנה המידה שבו מתרחש האיחוד עשוי להיות לנצח מחוץ להישג יד ניסיונית. מאיץ של 100 TeV חוקר רק חלק קטן מהדרך לקנה מידה של פלאנק. ייתכן שנצטרך להסתמך על קוסמולוגיה, עקביות מתמטית או אותות עקיפים.

החלום נשאר חי בזכות האלגנטיות העמוקה של המסגרות. כפי שויטן ציין, תיאוריית המיתרים אינה רק "סט של משוואות", אלא "מסגרת חדשה לפיזיקה".

מדע כשיטה, לא כדוגמה

החיפוש אחר ToE אינו על הכרזת תיאוריית המיתרים, SUSY או כל רעיון בודד כ"אמת". זה על **השיטה המדעית**:

- זיהוי סדקים בתיאוריות קיימות.
- הצעת מסגרות חדשות ונועזות.
- בדיקתן מול המציאות, זריקה או עידון לפי הצורך.

הסיפור רחוק מלהסתיים. אך דווקא הפתיחות הזו – הסירוב לראות בתיאוריה כלשהי כקדושה – היא שהופכת את הפיזיקה למדע חי, לא דוגמה.

האופק לפנינו

המאה הבאה של הפיזיקה עשויה לחשוף:

- עדויות לסופר-סימטריה או לחלופותיה.
- נתונים קוסמולוגיים שמאשרים או מפריכים תחזיות של מיתרים.
- ניסוח מחדש עמוק יותר של המרחב-זמן עצמו.

או שאולי ה-ToE האמיתית היא משהו שעדיין אף אחד לא דמיין.

אך החיפוש עצמו – הדחף לאחד, להסביר, לראות את הטבע כשלם – הוא חלק מהאנושות בדיוק כמו המשוואות עצמן.

הפניות וקריאה נוספת

סופר-סימטריה ואיחוד גדול

- וס, ג', ובגר, ג'. (1992). **סופר-סימטריה וסופר-כבידה**. הוצאת אוניברסיטת פרינסטון.
- באר, ה., וטאטא, א. (2006). **סופר-סימטריה בקנה מידה חלש: משדות-על לאירועי פיזור**. הוצאת אוניברסיטת קיימברידג'.
- ג'ורג'י, ה., וגלשו, ס. ל. (1974). "איחוד של כל כוחות החלקיקים היסודיים." **Physical Review Letters**, 32(8), 438.

תיאוריית המיתרים ותיאוריית M

- גרין, מ. ב., שוורץ, ג'. ה., וויטן, א. (1987). **תיאוריית הסופר-מיתרים** (כרכים 1 ו-2). הוצאת אוניברסיטת קיימברידג'.
- פולצ'ינסקי, ג'. (1998). **תיאוריית המיתרים** (כרכים 1 ו-2). הוצאת אוניברסיטת קיימברידג'.
- ויטן, א. (1995). "דינמיקות של תיאוריית המיתרים בממדים שונים." **Nuclear Physics B**, 443(1), 85-126.
- בקר, ק., בקר, מ., ושוורץ, ג'. ה. (2006). **תיאוריית המיתרים ותיאוריית M: מבוא מודרני**. הוצאת אוניברסיטת קיימברידג'.

כבידה קוונטית לולאתית וחלופות

- רובלי, ס. (2004). **כבידה קוונטית**. הוצאת אוניברסיטת קיימברידג'.
- תימן, ת. (2007). **יחסות כללית קוונטית קנונית מודרנית**. הוצאת אוניברסיטת קיימברידג'.
- אמבירון, ג', יורקביץ, ג', ולול, ר. (2005). "שחזור היקום." **Physical Review D**, 72(6), 064014.

גבולות ניסיוניים

- עד, ג', ואחרים. (שיתוף פעולה ATLAS). (2012). "תצפית על חלקיק חדש בחיפוש אחר בוזון היגס של המודל הסטנדרטי." **Physics Letters B**, 716(1), 1-29.
- צ'טרצ'יאן, ס., ואחרים. (שיתוף פעולה CMS). (2012). "תצפית על בוזון חדש במסה של 125 GeV." **Physics Letters B**, 716(1), 30-61.

- אבוט, ב. פ., ואחרים. (שיתוף פעולה מדעי LIGO ושיתוף פעולה Virgo). (2016). "תצפית על גלי כבידה ממיזוג חור שחור בינארי." **Physical Review Letters**, 116(6), 061102.

תיאורים פופולריים נגישים

- גרין, ב. (1999). **היקום האלגנטי: סופר-מיתרים, ממדים נסתרים, והחיפוש אחר התיאוריה האולטימטיבית**. W. W. Norton.
- רנדל, ל. (2005). **מעברים מעוותים: פתרון תעלומות הממדים הנסתרים של היקום**. Harper Perennial.
- רובלי, ס. (2016). **שבעה שיעורים קצרים על פיזיקה**. Riverhead Books.
- וילצ'ק, פ. (2008). **קלות ההווה: מסה, אתר, ואיחוד הכוחות**. Basic Books.