

פיזיקה לפני המודל הסטנדרטי

בסוף המאה ה-19, הפיזיקה נראתה כמעט שלמה. חוקי התנועה והכבידה של ניוטון עמדו ללא ערעור במשך למעלה ממאתיים שנה. משוואות מקסוול איחדו את החשמל והמגנטיות לשדה אלקטרומגנטי אחד. התרמודינמיקה הסבירה חום, מנועים ואנטרופיה. פיזיקאי בטוח בעצמו בשנות ה-90 של המאה ה-19 יכול היה להאמין שהעקרונות היסודיים של הטבע ידועים בעיקרם, ונותרו רק פרטים קטנים למילוי.

המצב הרוחני תואר באופן מפורסם על ידי לורד קלווין, שהצהיר ב-1900 שהפיזיקה כמעט הושלמה, פרט לכמה "עננים באופק". באופן אירוני, אותם עננים עתידים היו לשחרר את הסערות ששינו את הפיזיקה לנצח.

ההצלחה של ניוטון ופריהליון כוכב חמה

חוקי התנועה והכבידה האוניברסלית של ניוטון היו חזקים להפליא. הם הסבירו את נפילת תפוח ואת מסלול הירח באותה נוסחה. הם חזו את חזרתו של שביט האלי, הנחו ניווט פלנטרי והיוו השראה לדורות של מדענים.

אבל לא הכל התאים בצורה מושלמת. מסלולו של כוכב חמה, הכוכב הקרוב ביותר לשמש, עבר תקדמות - הנקודה הקרובה ביותר לשמש זזה מעט בכל סיבוב. את רוב זה ניתן היה להסביר באמצעות מכניקת ניוטון ומשיכת הכבידה של כוכבי לכת אחרים. עם זאת, נותרה עודפות של 43 שניות קשת למאה שלא הוסברה. היו שהציעו כוכב לכת בלתי נראה, "וולקן", כדי להסביר זאת. אבל טלסקופים מעולם לא מצאו עולם כזה.

הפער הקטן הזה היה קל להתעלמות, אבל הוא היה אחד מהעננים של קלווין במסווה: אנומליה קטנה שרמזה על פגם עמוק יותר בתמונת הכבידה המיידית והמוחלטת של ניוטון - לחישה מוקדמת של מרחב-זמן מעוקל.

הקטסטרופה של הגוף השחור

ענן נוסף התבשל בעולם החום והאור. גוף שחור - עצם אידיאלי שסופג ופולט מחדש את כל הקרינה - זוהר עם ספקטרום אופייני התלוי בטמפרטורה שלו. הפיזיקה הקלאסית חזתה שבתדרים גבוהים, הקרינה הנפלטת תגדל ללא גבול, מה שהוביל למה שנקרא "קטסטרופת האולטרה-סגול". במילים אחרות, תנור חם אמור לזהור באנרגיה אינסופית באור אולטרה-סגול - ברור שזה מגוחך.

ניסויים הראו שגופים שחורים אמיתיים פולטים ספקטרום מוגבל ומוגדר היטב. הכישלון של הפיזיקה הקלאסית כאן היה בולט, ולא ניתן היה לתקן אותו ללא עקרונות חדשים.

מקס פלאנק, ב-1900, הציע בחוסר רצון פתרון נועז: האנרגיה אינה רציפה, אלא מגיעה בחבילות בדידות - קוונטות. הוא הרבה מאוחר יותר: **"הייתי צריך לפנות לסוג של ייאוש, מעשה של ייאוש"**. רעיון רדיקלי זה סימן את לידת תורת הקוונטום, אם כי פלאנק עצמו ראה בכך תכסיס, לא עדיין מהפכה. ענן נוסף התכהה, ממתין להתפרצות.

האפקט הפוטואלקטרי

ב-1905, אלברט איינשטיין העמיק את המכה הקוונטית לפיזיקה הקלאסית. אור, שהובן זה זמן רב כגל, יכול להתנהג גם כחלקיק. באפקט הפוטואלקטרי, הארת מתכת באור מפליטה אלקטרונים. התיאוריה הקלאסית אמרה שהאנרגיה של האלקטרונים המופלטים תלויה בעוצמת האור. במקום זאת, ניסויים הראו שזה תלוי בתדר. רק אור מעל תדר סף - ללא קשר לבהירות - יכול לשחרר אלקטרונים.

איינשטיין הסביר זאת בהצעה שהאור מגיע בחבילות אנרגיה, שנקראו מאוחר יותר פוטונים. **"נראה כאילו יש לקחת את קוונטות האור באופן מילולי,"** כתב.

זו הייתה חזרה מזעזעת לראיית חלקיקים של האור, והיא זיכתה אותו בפרס נובל. חשוב מכך, היא הראתה שדואליות גל-חלקיק אינה סקרנות אלא עיקרון יסודי. ענן נוסף הבזיק לברק.

אטומים והפתעת רתרפורד

בתחילת המאה ה-20, אטומים התקבלו כממשיים, אך מבנם היה מסתורי. מודל "פודינג השזיפות" של ג'יי ג'יי תומסון דמיין אלקטרונים משובצים במטען חיובי מפוזר. אך ב-1911, ניסוי רדיד הזהב של ארנסט רתרפורד ריסק תמונה זו. בירי חלקיקי אלפא על רדיד זהב דק, הוא מצא שרובם עברו דרכו, אך מעטים התפזרו בזוויות חדות - **"כאילו ירית פגז 15 אינץ' על פיסת נייר טישו והוא חזר,"** העיר רתרפורד.

המסקנה: לאטומים יש גרעין קטן וצפוף המוקף בעיקר בחלל ריק. אבל מדוע אלקטרונים המקיפים לא התערבלו פנימה לגרעין, תוך כדי פליטת אנרגיה? האלקטרודינמיקה הקלאסית לא נתנה תשובה. יציבות האטום הייתה תעלומה - עוד ענן של קלווין שהתנפח לסערה.

שני העננים הופכים לסערות

עד 1910, הסדקים היו גדולים מכדי להתעלם מהם. הפיזיקה הקלאסית לא יכלה להסביר:

- את מסלול כוכב חמה.
- קרינת הגוף השחור.
- האפקט הפוטואלקטרי.
- יציבות האטומים.

מה שנראה כאנומליות קלות התגלה כסימפטומים של כשלים עמוקים יותר. תוך שני עשורים, הם הובילו לשתי מהפכות: **תורת היחסות הכללית** להסבר הכבידה וגיאוטריית המרחב-זמן, ו**מכניקת הקוונטום** להסבר העולם המיקרוסקופי.

הפיזיקה לא הייתה כמעט גמורה. היא רק החלה לחשוף את המבנה המוזר והרב-שכבתי של המציאות.

לידת מכניקת הקוונטום

בשנות ה-20 המוקדמות, הסדקים בפיזיקה הקלאסית הפכו לחורים פעורים. קרינת הגוף השחור, האפקט הפוטואלקטרי, מבנה האטום - אף אחד מאלה לא ניתן להסבר על ידי מכניקת ניוטון או האלקטרומגנטיות של מקסוול. פיזיקאים נאלצו לאמץ סדרה של רעיונות נועזים יותר ויותר. מה שהתגלה לא היה תיקון קל, אלא דמיון מחדש מלא של המציאות: **מכניקת הקוונטום**.

הקוונטות של פלאנק: המהפכה הסרבנית

ב-1900, מקס פלאנק ניסה לפתור את בעיית הגוף השחור. הפיזיקה הקלאסית חזתה קרינה אינסופית בתדרים גבוהים - "קטסטרופת האולטרה-סגול". בייאוש, פלאנק הציג תכסיס מתמטי נועז: הניחו

שהאנרגיה אינה רציפה אלא נפלטת בחבילות בדידות, פרופורציונליות לתדר:

$$E = h\nu$$

פירוש בשפה פשוטה: קרן אור עם תדר ν יכולה להחליף אנרגיה רק בחתיכות בגודל $h\nu$; אור בתדר גבוה יותר נושא "גושים" גדולים יותר של אנרגיה.

פלאנק עצמו ראה בכך תיקון פרגמטי, לא שינוי רדיקלי. אבל זו הייתה הסדק הראשון בחומת הרציפות שהגדירה את הפיזיקה במשך מאות שנים.

קוונטות האור של איינשטיין

חמש שנים לאחר מכן, איינשטיין לקח את רעיון פלאנק ברצינות. כדי להסביר את האפקט הפוטואלקטרי, הוא הציע שהאור עצמו עשוי מקוונטות - שנקראו מאוחר יותר פוטונים.

זה היה מזעזע. האור הובן כגל מאז ניסוי השני חריצים של יאנג מאה שנה קודם לכן. אבל איינשטיין הראה שהוא יכול להתנהג גם כחלקיק. דואליות גל-חלקיק נולדה.

האפקט הפוטואלקטרי זיכה את איינשטיין בפרס נובל ב-1921, וסימן את הניצחון המכריע הראשון של השקפת הקוונטום - ענן נוסף שהפך לסערה.

האטום של בוהר

מבנה האטום נותר חידה. רתרפורד הראה שהגרעין קיים, אבל מדוע האלקטרונים המקיפים לא התערבלו פנימה?

ב-1913, נילס בוהר הציע פתרון נועז: אלקטרונים תופסים רק מסלולים בדידים מסוימים ויכולים לקפוץ ביניהם על ידי פליטה או ספיגה של קוונטות של אור. המודל שלו הסביר את קווי הספקטרום של מימן בדיוק מפתיע.

האטום של בוהר היה תערובת לא נוחה של מסלולים קלאסיים וחוקי קוונטום, אבל הוא עבד. זו הייתה רמז לכך שהקוונטיזציה אינה רק תכסיס - היא הייתה עיקרון יסודי. בוהר התבדח: **"מי שלא המום מתורת הקוונטום לא הבין אותה."** הלא, עבור בוהר, היה סימן שהיית קשוב.

הגלים של דה ברוי

ב-1924, לואי דה ברוי הפך את הדואליות על ראשה. אם גלי אור יכולים להתנהג כחלקיקים, אולי חלקיקים יכולים להתנהג כגלים. הוא הציע שלאלקטרונים יש אורכי גל, הניתנים על ידי:

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

פירוש בשפה פשוטה: חלקיקים עם מומנטום גבוה יותר p יש להם אורכי גל קצרים יותר; "כדורים" מהירים וכבדים נראים פחות גליים מאשר קלים ואיטיים.

רעיון זה אושר ב-1927 כאשר דוויסון וגרמר צפו בדיפרקציה של אלקטרונים מקריסטל. החומר היה גלי. החומה בין גלים לחלקיקים התמוטטה.

מכניקת המטריות של הייזנברג

ורנר הייזנברג, שעבד ב-1925, חיפש מסגרת עקבית שנצמדת למדידים - תדרים ועוצמות מדידות של קרינה שנפלטה - בלי לדמיין מסלולים של אלקטרונים שלא ניתן לצפות בהם. התוצאה הייתה **מכניקת מטריצות**: אלגברה חדשה שבה סדר הכפל חשוב ($AB \neq BA$).

המתמטיקה הרדיקלית הזו לכדה את הקפיצות הלא רציפות של אלקטרונים וחזתה ספקטרה בדיוק מפתיע. מבלבל? כן. אבל גם חוזה לעומק.

מכניקת הגלים של שרדינגר

כמעט במקביל, ארווין שרדינגר פיתח משוואת גל המתארת כיצד גלי החומר מתפתחים עם הזמן:

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi = \hat{H} \Psi$$

פירוש בשפה פשוטה: פונקציית הגל Ψ מקודדת את ההסתברויות של מערכת, והמילטוניאן $\hat{H}$ מראה כיצד ההסתברויות אלו משתנות עם הזמן.

הגישה של שרדינגר הייתה אינטואיטיבית יותר ממטריצות הייזנברג והפכה במהירות לשפה הסטנדרטית של מכניקת הקוונטום. בתחילה, שרדינגר חשב שהאלקטרונים הם ממש גלים מפוזרים, אך ניסויים הראו אחרת. פונקציית הגל לא הייתה גל פיזי בחלל אלא משרעת ההסתברות - סוג חדש של מציאות.

עקרון אי הוודאות של הייזנברג

ב-1927, הייזנברג הפך תוצאה מזעזעת לרשמית: לא ניתן לדעת בו זמנית את המיקום והמומנטום של חלקיק בדיוק שרירותי. **עקרון אי הוודאות** זה לא היה מגבלה של מכשירי מדידה אלא תכונה יסודית של הטבע:

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{\hbar}{2}$$

פירוש בשפה פשוטה: הידוק האחיזה במיקום מרפה בהכרח את האחיזה במומנטום, ולהפך; הטבע עצמו מציב גבול זה.

הדטרמיניזם, הבסיס של הפיזיקה הניוטונית, פינה את מקומו להסתברויות.

פרשנות קופנהגן

בוהר והייזנברג הציעו פרשנות: מכניקת הקוונטום אינה מתארת מציאויות מוגדרות, אלא הסתברויות של תוצאות מדידה. פעולת המדידה גורמת לקריסת פונקציית הגל.

פרשנות קופנהגן זו הייתה פרגמטית ומצליחה, אם כי מבחינה פילוסופית מטרידה. איינשטיין התנגד באופן מפורסם - "אלוהים לא משחק בקוביות" - אך הניסויים המשיכו לאשר את טבע ההסתברותי של מכניקת הקוונטום.

דיראק ותורת הקוונטום הרלטיביסטית

ב-1928, פול דיראק שילב את מכניקת הקוונטום עם היחסות המיוחדת, ויצר את משוואת דיראק. היא תיארה את האלקטרון בדיוק חסר תקדים וחזתה חלקיק חדש: הפוזיטרון, שנגלה ב-1932. הביטחון השקט

של דיראק - "החוקים הפיזיקליים הבסיסיים הנחוצים לתיאוריה המתמטית של חלק גדול מהפיזיקה וכל הכימיה ידועים לחלוטין" - לכד את השאפתנות של התקופה.

זו הייתה הרמז הראשון לכך שתורת הקוונטום יכולה להתאחד עם היחסות - הבטחה שתצמח לתורת השדה הקוונטי.

השקפת עולם חדשה

עד שנות ה-30, המהפכה הקוונטית הושלמה:

- האנרגיה הייתה מקוונטטת.
- האור והחומר היו גם גלים וגם חלקיקים.
- האטום היה יציב כי האלקטרונים תופסים מצבים קוונטיים בדידים.
- ההסתברות, לא הוודאות, שלטה בסקאלות היסודיות.

הפיזיקה הקלאסית לא נזרקה; היא התגלתה מחדש כגבול של מכניקת הקוונטום בסקאלות גדולות. זה היה הלקח הראשון של הפיזיקה המודרנית: תיאוריות ישנות לעולם אינן "שגויות", רק לא שלמות.

עם זאת, אפילו מכניקת הקוונטום, מבריקה ככל שהייתה, התמודדה עם אתגרים חדשים. כיצד חלקיקים מתקשרים, מתפזרים, מתבטלים וצצים מחדש? כיצד בונים מסגרת שבה מספר החלקיקים אינו קבוע ודרישות היחסות מתקיימות?

התשובה תגיע באמצע המאה ה-20 עם **תורת השדה הקוונטי**, שהובילה על ידי פיינמן ואחרים - הפרק הבא בסיפור שלנו.

ריצ'רד פיינמן ושפת תורת השדה הקוונטי

מכניקת הקוונטום ניצחה בהסברת אטומים ומולקולות, אך ככל שהניסויים התעמקו, הגבלותיה הפכו ברורות. אלקטרונים, פוטונים וחלקיקים אחרים לא רק ישבו במצבים קשורים - הם התקשרו, התנגשו, התבטלו ויצרו חלקיקים חדשים. כדי לתאר תהליכים אלה, היה צורך לשלב את מכניקת הקוונטום עם היחסות המיוחדת של איינשטיין. התוצאה הייתה **תורת השדה הקוונטי (QFT)**, המסגרת שבה נשענת כל הפיזיקה של החלקיקים המודרנית.

מדוע מכניקת הקוונטום לא הספיקה

מכניקת הקוונטום הרגילה התייחסה למספר החלקיקים כקבוע. אלקטרון יכול לנוע באטום, אך הוא לא יכול להיעלם או להשתנות פתאום. עם זאת, ניסויים במאיצי חלקיקים הראו בדיוק זאת: חלקיקים נוצרים ומתבטלים כל הזמן. ו- $E = mc^2$ של היחסות דרש שהתנגשויות אנרגטיות מספיק יכולות להפוך אנרגיה למסה חדשה.

QFT ענתה על ידי שינוי האונטולוגיה: **שדות הם היסודיים; חלקיקים הם עירורים**. כל מין של חלקיק תואם לשדה קוונטי שחוזר לכל המרחב.

- האלקטרון הוא גל בשדה האלקטרון.
- הפוטון הוא גל בשדה האלקטרומגנטי.
- גלואונים, קווארקים, בוזוני W ו-Z, והיגס - כל אחד הוא עירור של השדה שלו.

יצירה וביטול הפכו טבעיים: לעורר או לבטל את עירור השדה.

אלקטרו דינמיקה קוונטית (QED)

ה-QFT הרלטיביסטית הראשונה שהצליחה במלואה הייתה **אלקטרו דינמיקה קוונטית (QED)**, המתארת אינטראקציות של חומר טעון (כמו אלקטרונים) עם פוטונים. היא פותחה בשנות ה-40 על ידי ריצ'רד פיינמן, ג'וליאן שווינגר וסין-איטירו טומונגה - שחלקו את פרס נובל ב-1965 - ופתרה בעיה של חישובים מוקדמים: אינסופים.

המפתח היה **נורמליזציה**, דרך עקרונית לספוג אינסופים מסוימים בכמה פרמטרים שניתן למדוד (מטען, מסה), והשאירה חיזויים סופיים ומדויקים. התמורה הייתה היסטורית: QED חוזה את המומנט המגנטי של האלקטרון בדיוק יוצא דופן - אחת החיזויים המאומתים ביותר בכל המדע.

דיאגרמות פיינמן: דקדוק חדש של הפיזיקה

התרומה המשפיעה ביותר של פיינמן הייתה קונספטואלית. הוא המציא חישוב ציורי - **דיאגרמות פיינמן** - שהפך אינטגרלים אטומים לתהליכים ויזואליים וספירים.

- קווים ישרים מייצגים פרמיונים (אלקטרונים, קווארקים).
- קווים גליים מייצגים בוזוני גיג' (פוטונים, גלואונים).
- קודקודים הם נקודות אינטראקציה.

הדיאגרמות מפרטות "היסטוריות" אפשריות התורמות לתהליך, מהדהדות את מבט האינטגרל של פיינמן: תהליך קוונטי חוקר את כל המסלולים; משרעות מתווספות; ההסתברויות נובעות מהריבוע של הגדלים שלהן. מה שהיה אסור הפך למוחשי וניתן לחישוב.

מעבר ל-QED: לקראת הכוחות החזק והחלש

QED שלטה באלקטרו דינמיקה קוונטית. אבל אותו ערכת כלים - שדות, סימטריית גיג', נורמליזציה, דיאגרמטיקה - יכלה ללכת הלאה.

- **הכוח החלש:** אחראי להתפרקות בטא והיתוך סולרי, דרש מתווכים כבדים ($Z^0, W^\pm$) והפרת זוגיות - מוזרויות שדרשו הסבר מאוחד.
- **הכוח החזק:** שמחזיק קווארקים בתוך פרוטונים וניוטונים, היה בעל אופי שונה מאוד - חוזק עצום בטווח קצר, אך כמעט בלתי נראה בטווח ארוך.

המוטיב המאחד היה **סימטריית גיג'**: דרוש שהמשוואות ישמרו על צורתן תחת טרנספורמציות מקומיות, ושדות הגיג' הנדרשים (פוטונים, גלואונים, W/Z) ומבני האינטראקציה נופלים עם הכרח מפתיע.

הניצחון והמגבלות

עד סוף אמצע המאה, QFT הפכה לשפת האם של פיזיקת החלקיקים. היא ארגנה את העולם התת-אטומי ואפשרה חישובים מדויקים. אבל הכבידה התנגדה לקוונטיזציה - אותם תכסיסי נורמליזציה נכשלו - ותיאוריה קוונטית מלאה של מרחב-זמן נותרה חמקמקה. QFT הייתה ניצחון מפואר, מוגבל לתחום שלה.

כרומודינמיקה קוונטית והכוח החזק

ההצלחה של QED עודדה פיזיקאים להתמודד עם הגבול המבולגן של שנות ה-50 וה-60: "גן החיות של החלקיקים". האדרונים חדשים - פיונים, קאונים, היפרונים, תהודות - זרמו ממאיצים בשפע מבלבל. האם הכאוס הזה היה יסודי, או שניתן לארגן אותו כמו הטבלה המחזורית?

חידת הכוח החזק

הקשר הגרעיני הראה תכונות מוזרות:

- חוזק עצום בסקאלות פמטומטר, שנעלם במהירות מעבר לכך.
- רוויה: הוספת נוקליאונים לא הגדילה את הקשר לכל חלקיק באופן ליניארי.
- שפע של תהודות האדרוניות קצרות חיים.

אנלוגיות קלאסיות נכשלו. היה צורך בתמונה חדשה באופן רדיקלי.

מודל הקווארק

ב-1964, מורי גל-מן ובאופן עצמאי ג'ורג' זוויג הציעו שהאדרונים בנויים ממרכיבים פחותים ויסודיים יותר: **קווארקים**.

- בתחילה: שלושה טעמים - למעלה, למטה, מוזר - מסדרים מולטיפלטים של האדרונים כמו דפוסים מחזוריים כימיים.
- פרוטונים וניוטונים: שילובים של למעלה/למטה.
- קאונים והיפרונים: כוללים מוזר.

המודל ארגן את גן החיות. אך שום ניסוי לא בודד מעולם קווארק יחיד. האם הקווארקים היו "אמיתיים", או סתם רישום מועיל?

תעלומת ההסגר

גם כאשר פרוטונים נופצו באנרגיות גבוהות, גלאים ראו מקלחות של **האדרונים**, לא קווארקים חופשיים. נראה שהכוח שקושר קווארקים מתחזק ככל שמנסים להפריד אותם - כמו גומייה שמתהדקת ככל שמושכים אותה יותר. כיצד כוח יכול להתנהג כל כך שונה מאלקטרומגנטיות?

כרומודינמיקה קוונטית (QCD)

הפריצה הייתה תיאוריית גייג' לא-אבלית חדשה: **כרומודינמיקה קוונטית (QCD)**.

- קווארקים נושאים **מטען צבע** (תכונה מופשטת עם שלושה סוגים - אדום, ירוק, כחול).
- האדרונים הם שילובים **חסרי צבע** (כמו "אור לבן" מ-RGB).
- הכוח מועבר על ידי **גלואונים**, שנושאים צבע בעצמם - ולכן הם מתקשרים זה עם זה.

התכונה האחרונה הזו - בוזוני גייג' שמתקשרים בעצמם - הפכה את QCD לשונה באופן איכותי מ-QED ותמכה בתכונותיה הבולטות ביותר.

חופש אסימפטוטי והסגר

ב-1973, דייוויד גרוס, פרנק וילצ'ק ודייוויד פוליצר גילו **חופש אסימפטוטי**:

- במרחקים קצרים מאוד (אנרגיות גבוהות), **הצימוד החזק יורד**; קווארקים מתנהגים כמעט חופשיים.
- במרחקים גדולים יותר (אנרגיות נמוכות), **הצימוד עולה**; קווארקים קשורים בחוזקה - **הסגר**.

פירוש בשפה פשוטה: התקרב עם יותר אנרגיה, והקווארקים מחליקים מהרצועה; התרחק, והרצועה נמשכת חזק.

זה הסביר את תוצאות הפיזור הבלתי אלסטי העמוק של SLAC (מרכיבים דמויי נקודה בתוך פרוטונים) ואת היעדר קווארקים חופשיים. השלישייה זכתה בפרס נובל ב-2004.

ראיות ל-QCD

QCD התבגרה מרעיון אלגנטי לבסיס אמפירי:

- **ג'טים במאיצים:** קווארקים וגלואונים אנרגטיים צצים מהתנגשויות ומתאדרונים לג'טים ממוקדים - שדפוסייהם תואמים לחיזויים של QCD.
- **QCD סריגית:** סימולציות מחשבי-על מחלקות את המרחב-זמן, משחזרות מסות ואינטראקציות של האדרונים בדיוק מרשים.
- **פליזמת קווארק-גלואון:** בטמפרטורות וצפיפויות קיצוניות (RHIC, LHC), החומר עובר למצב לא מוסגר של קווארקים וגלואונים - הדים של היקום המוקדם.

האדרונים הפכו למשולבים, לא יסודיים; הגלואונים עשו את ההדבקה.

ניצחון דו-צדדי

QCD, בשילוב עם QED ותיאוריית האלקטרו-חלש, השלימה את **המודל הסטנדרטי (SM)**. זה היה הצלחה מדהימה, אך היא הדגישה חידות חדשות:

- **ההסגר** עדיין לא הוכח אנליטית מעקרונות ראשונים (אם כי הוא נתמך באופן מוחץ).
- **בעיית CP החזקה:** QCD נראית מאפשרת הפרת CP שניסויים לא רואים.
- **פערים קוסמיים:** QCD מסבירה חומר רגיל, לא חומר אפל.

התיאוריה הסבירה הרבה - אבל לא הכל.

איחוד אלקטרו-חלש ומנגנון היגס

בשנות ה-70 המוקדמות, QED ו-QCD עמדו על קרקע מוצקה. אבל **הכוח הגרעיני החלש** - אחראי להתפרקות רדיואקטיבית והיתוך כוכבי - נותר מוזר: טווח קצר, מפר זוגיות, מתווך על ידי בוזונים כבדים.

אחדות עמוקה יותר נראתה באופן. היא הגיעה **כתיאוריית האלקטרו-חלש**, אחד ההישגים המרשימים של הפיזיקה. החיזוי המרכזי שלה - **בוזון היגס** - ייקח כמעט חצי מאה לאישוש.

הכוח החלש: אינטראקציה מוזרה

הכוח החלש מופיע ב:

- **התפרקות בטא:** ניוטרון הופך לפרוטון, פולט אלקטרון ואנטי-ניוטרינו.
- **היתוך כוכבי:** פרוטונים הופכים לניוטרונים לבניית גרעינים כבדים יותר.

מאפיינים ייחודיים:

- פועל במרחקים זעירים ($\sim 10^{-3}$ פמטומטר).
- מפר זוגיות (סימטריית מראה) ואפילו סימטריית CP.
- מתווך על ידי שלושה חלקיקים כבדים: Z^0, W^-, W^+ .

מאיפה מקבלים בוזונים אלה את מסתם, בעוד הפוטון נשאר ללא מסה? זו הייתה חידה מרכזית.

איחוד אלקטרו-חלש: גלאשו, סלאם, ויינברג

בשנות ה-60, שלדון גלאשו, עבדוס סלאם וסטיבן ויינברג הציעו איחוד: אלקטרומגנטיות והכוח החלש הם שני פנים של אינטראקציה **אלקטרו-חלש** אחת.

רעיונות מפתח:

- באנרגיות גבוהות, השניים מתמזגים; באנרגיות נמוכות, הם נראים שונים.
- שדה חדש שחודר לחלל - **שדה היגס** - שובר את הסימטריה, נותן מסה ל- W ו- Z תוך השארת הפוטון ללא מסה.
- מתמטית: תיאוריית גיג' עם קבוצת סימטריה $SU(2)_L \times U(1)_Y$.

מנגנון היגס

שדה היגס הוא כמו מדיום קוסמי שממלא את כל החלל. חלקיקים שמתקשרים איתו רוכשים מסה אינרציאלית; אלה שלא (כמו הפוטון) נשארים ללא מסה.

- בוזוני W ו- Z מתחברים בחזקה לשדה היגס, רוכשים מסות של כ-80-90 GeV.
- פרמיונים משיגים מסה דרך **צימודי יוקאווה** - עוצמות ששונות לכל מין פרמיון.
- בוזון היגס עצמו הוא גל (עירור קוונטי) של שדה היגס.

פירוש בשפה פשוטה: המסה אינה "חומר" שניתן פעם אחת ולתמיד, אלא אינטראקציה מתמשכת עם שדה תמידי.

ניצחון ניסיוני: W, Z והיגס

ניסויים גבוריים בדקו את התיאוריה:

- **1983 (CERN, SPS)**: גילוי בוזוני $W^\pm$ ו- Z^0 , עם מסות ותכונות שתאמו לחיזויים. קרלו רוביה וסימון ואן דר מיר זכו בפרס נובל ב-1984.
- **2012 (CERN, LHC)**: CMS ו-ATLAS הכריזו על חלקיק חדש ב-125 GeV - **בוזון היגס** - עם ערוצי ייצור והתפרקות התואמים לציפיות המודל הסטנדרטי.

הגילוי השלים את רשימת החלקיקים של המודל הסטנדרטי. הסערה חלפה; המפה התאימה לשטח.

המודל הסטנדרטי במלואו

בשנות ה-2010, המודל הסטנדרטי עמד כאחת התיאוריות המצליחות ביותר של המדע:

• כוחות (שדות):

- אלקטרומגנטיות (QED)
- הכוח החזק (QCD)
- הכוח החלש (כחלק מהאלקטרו-חלש)

• חלקיקים:

- שישה קווארקים (למעלה, למטה, מוזר, קסם, תחתית, עליון).
- שישה לפטונים (אלקטרון, מיאון, טאו והניוטרינו שלהם).
- בוזוני גיג' (פוטון, שמונה גלואונים, Z, W).

◦ בוזון היגס.

כוח החיזוי שלו היה מדהים, מאומת על פני דורות של מאיצים וגלאים.

הסדקים מופיעים

אפילו כשפקקי השמפניה נפתחו ב-2012, הפיזיקאים ידעו שהמודל הסטנדרטי אינו שלם.

- הוא אינו כולל **כבידה**.
- **ניוטרינות בעלות מסה**, אך המודל הסטנדרטי המינימלי הופך אותם ללא מסה.
- **חומר אפל ואנרגיה אפלה** נעדרים.
- **בעיית ההיררכיה**: מדוע מסת היגס כה קלה בהשוואה לתיקונים קוונטיים בסקאלת פלאנק?
- **חידות טעם**: מדוע המסות והערבובים האלה? מדוע שלושה דורות?

גילוי היגס לא היה סוף, אלא התחלה - שלט שהמודל הסטנדרטי נכון **עד כמה שהוא מגיע**.

לקח בשיטה המדעית

מעגל הצנועים של קלווין למהפכות מלאות, הפיזיקה התקדמה על ידי התייחסות רצינית לאנומליות:

1. **נתונים מבלבלים** (תקדמות כוכב חמה, ספקטרה של גוף שחור, ספי פוטואלקטריים, יציבות אטומית).
2. **מסגרות תיאורטיות נועזות** (יחסות כללית; מכניקת קוונטום).
3. **פורמליזמים מאחדים** (תורת השדה הקוונטי; סימטריית גיג').
4. **ישויות חזויות** (קווארקים, גלואונים, W/Z , היגס).
5. **עשורים של מאמץ ניסיוני** (משולחן עבודה למאיצים של טרה-אלקטרונוולט).
6. **ניצחון - ושאלות חדשות**.

תיאוריות ישנות לא נזרקו אלא **קונוו** כמקרי גבול: ניוטון בתוך איינשטיין במהירויות נמוכות וכבידה חלשה, קלאסי בתוך קוונטי בסקאלות גדולות, קוונטי לא-רלטיביסטי בתוך QFT עם מספר חלקיקים קבוע.

הרהור סופי

מהיקום השעוני של ניוטון לקוונטות הנואשות של פלאנק; מפוטונים של איינשטיין לקפיצות הקוונטיות של בוהר; מדיאגרמות פיינמן לג'טים של QCD ונוכחות שקטה וכללית של שדה היגס - 150 השנים האחרונות מראות סערות שנולדו מעננים קטנים. כל אנומליה - מסלול כוכב חמה, ספקטרה של גוף שחור, אטומים לא יציבים, היגס החסר - הייתה רמז לכך שמשו עמוק יותר ממתין לגילוי.

היום, המודל הסטנדרטי עומד כניצחון, חיזויי מאומתים בדיוק מעולה. עם זאת, כמו ענני קלווין, מסתורין חדשים ממתינים: **חומר אפל, אנרגיה אפלה, מסות ניוטרינו, אסימטריית בריונים, כבידה קוונטית**. אם ההיסטוריה היא מדריך, הסדקים האלה לא יפירו שהפיזיקה גמורה - הם יפירו שהיא רק מתחילה מהפכה נוספת.

מקורות וקריאה נוספת

יסודות המודל הסטנדרטי ותורת השדה הקוונטי

- Peskin, M. E., & Schroeder, D. V. (1995). **An Introduction to Quantum Field Theory**. •
Westview Press
- Weinberg, S. (1995). **The Quantum Theory of Fields** (Vols. 1–3). Cambridge University •
Press
- Griffiths, D. (2008). **Introduction to Elementary Particles** (2nd ed.). Wiley-VCH •
- Feynman, R. P., Leighton, R. B., & Sands, M. (1963). **The Feynman Lectures on •**
Physics. Addison-Wesley

יחסות כללית וקוסמולוגיה

- Einstein, A. (1916). "The Foundation of the General Theory of Relativity." **Annalen der •**
Physik
- Misner, C. W., Thorne, K. S., & Wheeler, J. A. (1973). **Gravitation**. W. H. Freeman •
- Carroll, S. M. (2004). **Spacetime and Geometry: An Introduction to General •**
Relativity. Addison-Wesley