

فیزیک فراتر از مدل استاندارد

تا سال ۲۰۱۲، با تأیید وجود بوزون هیگز در برخورددهنده بزرگ هادرون (LHC) در سرن، مدل استاندارد (SM) از نظر نظری کامل شده بود. هر ذره پیش‌بینی‌شده‌ای کشف شده بود. معادلات آن هر آزمون تجربی را با دقت حیرت‌انگیزی پشت سر گذاشته بودند.

با این حال، حس و حال در فیزیک، حس پایان نبود، بلکه حس ناکامل بودن بود. مانند قوانین نیوتن پیش از اینشتین یا فیزیک کلاسیک پیش از مکانیک کوانتومی، مدل استاندارد در مقیاس‌هایی که می‌توانیم آزمایش کنیم بیش از حد موفق بود، اما قادر به پاسخگویی به سؤالات عمیق‌تر نبود. این یک نقشه تقریباً بی‌نقص بود - اما تنها از بخش کوچکی از منظره.

گرانش: نیروی غایب

بارزترین غفلت، گرانش است.

- مدل استاندارد سه نیروی بنیادی از چهار نیروی شناخته‌شده را توصیف می‌کند: الکترومغناطیس، نیروی ضعیف، و نیروی قوی.
- گرانش، که توسط نسبیت عام (GR) اینشتین توصیف می‌شود، کاملاً غایب است.

این چیزی فراتر از یک غفلت ساده است. نسبیت عام گرانش را به‌عنوان انحنای فضا-زمان، یک میدان هندسی صاف، در نظر می‌گیرد، در حالی که مدل استاندارد نیروها را به‌عنوان میدان‌های کوانتومی که توسط ذرات واسطه می‌شوند، در نظر می‌گیرد. تلاش‌ها برای کوانتیزه کردن گرانش به همان شیوه با بی‌نهایت‌هایی مواجه می‌شوند که نمی‌توان آن‌ها را نرمال‌سازی کرد.

مدل استاندارد و نسبیت عام مانند دو سیستم‌عامل متفاوت هستند - در حوزه‌های خودشان درخشان، اما اساساً ناسازگار. آشتی دادن آن‌ها شاید بزرگ‌ترین چالش فیزیک امروز باشد.

جرم نوترینوها

مدل استاندارد پیش‌بینی می‌کند که نوترینوها بدون جرم هستند. اما آزمایش‌ها، که از آشکارساز سوپرکامیوننده در ژاپن (۱۹۹۸) آغاز شد و در سراسر جهان تأیید شد، نشان داد که نوترینوها بین طعم‌ها (الکترون، میون، تاو) نوسان می‌کنند. نوسان به جرم نیاز دارد.

این اولین شواهد تأییدشده از فیزیک فراتر از مدل استاندارد بود. این کشف جایزه نوبل ۲۰۱۵ را برای کاجیتا و مک‌دونالد به ارمغان آورد.

نوترینوها فوق‌العاده سبک هستند، حداقل یک میلیون برابر سبک‌تر از الکترون. جرم آن‌ها توسط مدل استاندارد توضیح داده نمی‌شود - اما ممکن است به فیزیک جدیدی اشاره کنند، مانند مکانیسم الاکلنگ، نوترینوهای استریل، یا ارتباطاتی با

جهان اولیه. در برخی سناریوها، نوترینوهای سنگین الکلنگ امکان لپتوژنز را فراهم می‌کنند، جایی که عدم تقارن لپتونی در جهان اولیه ایجاد شده و بعداً به عدم تقارن ماده-پادماده مشاهده شده تبدیل می‌شود.

ماده تاریک

ماده مرئی که توسط مدل استاندارد توصیف می‌شود، کمتر از ۵٪ جهان را تشکیل می‌دهد. بقیه نامرئی است.

- **ماده تاریک** (~۲۷٪ جهان) تنها از طریق گرانش خود را نشان می‌دهد: کهکشان‌ها سریع‌تر از آنچه ماده مرئی اجازه می‌دهد می‌چرخند، خوشه‌های کهکشانی نور را بیش از حد خم می‌کنند، و زمینه میکروویو کیهانی به جرم اضافی نامرئی نیاز دارد.
- هیچ یک از ذرات مدل استاندارد نمی‌توانند آن را توضیح دهند. نوترینوها بیش از حد سبک و سریع هستند. ماده معمولی بیش از حد کمیاب است.

نظریه‌ها ذرات جدیدی را پیشنهاد می‌کنند: WIMPها (ذرات سنگین با تعامل ضعیف)، اکسیون‌ها، نوترینوهای استریل، یا چیزی عجیب‌تر. اما با وجود دهه‌ها جستجو - آشکارسازهای زیرزمینی، آزمایش‌های برخورددهنده، بررسی‌های اختربیزیکی - ماده تاریک همچنان گریزان باقی مانده است.

انرژی تاریک

حتی مرموزتر انرژی تاریک است، نیرویی که انبساط شتابدار جهان را هدایت می‌کند.

- در سال ۱۹۹۸ از طریق مشاهدات ابرنواختر کشف شد، انرژی تاریک حدود ۶۸٪ جهان را تشکیل می‌دهد.
- در اصل، می‌توان آن را به‌عنوان “انرژی خلاء” میدان‌های کوانتومی توضیح داد. اما محاسبات ساده نظریه میدان کوانتومی چگالی انرژی خلاء را ۱۲۰ مرتبه بزرگ‌تر از حد انتظار پیش‌بینی می‌کنند - بدترین پیش‌بینی در فیزیک.

این مسئله ثابت کیهانی شاید تندترین برخورد بین نظریه میدان کوانتومی و گرانش باشد. مدل استاندارد هیچ چیزی درباره انرژی تاریک نمی‌گوید. این یک شکاف عظیم در درک ما از کیهان است.

مسئله سلسله مراتب

یک معمای عمیق دیگر در خود بوزون هیگز نهفته است.

جرم هیگز با ۱۲۵ گیگا الکترون‌ولت اندازه‌گیری شده است. اما اصلاحات کوانتومی باید آن را به نزدیکی مقیاس پلانک (10^{19} گیگا الکترون‌ولت) برسانند، مگر اینکه لغوهای معجزه‌آسایی رخ دهد. چرا نسبت به مقیاس‌های انرژی طبیعی گرانش این قدر سبک است؟

این مسئله سلسله مراتب است: هیگز به‌طور غیرطبیعی تنظیم دقیق به نظر می‌رسد. فیزیکدانان به فیزیک جدیدی مشکوک هستند، مانند ابرتقارن (SUSY)، که می‌تواند جرم هیگز را با معرفی ذرات شریک که اصلاحات خطرناک را خنثی می‌کنند، پایدار کند. (بحث‌ها درباره طبیعی بودن شامل ایده‌هایی از راه‌حل‌های پویا تا استدلال انسان‌محور در یک “منظره” احتمالی از خلأها است.)

عدم تقارن ماده-پادماده

مدل استاندارد شامل برخی نقض‌های CP است، اما به هیچ وجه کافی نیست تا توضیح دهد چرا جهان امروز پر از ماده است به جای مقادیر برابر ماده و پادماده. همان‌طور که در بالا ذکر شد، مکانیسم‌هایی مانند لپتوژنز (که اغلب به منشأ الاکلنگ جرم نوترینوها مرتبط است) یک مسیر جذاب ارائه می‌دهند که در آن فیزیک فراتر از مدل استاندارد تعادل را به هم می‌زند.

تصویری زیبا اما ناکامل

مدل استاندارد گاهی اوقات “موفق‌ترین نظریه در فیزیک” نامیده می‌شود. پیش‌بینی‌های آن با آزمایش‌ها تا ۱۲ رقم اعشار مطابقت دارند. تقریباً همه چیزهایی که در شتاب‌دهنده‌های ذرات و آزمایشگاه‌ها می‌بینیم را توضیح می‌دهد.

اما ناکامل است:

- گرانش را نادیده می‌گیرد.
- نمی‌تواند جرم نوترینوها را توضیح دهد.
- نمی‌تواند ماده تاریک یا انرژی تاریک را توضیح دهد.
- معماهایی عمیق مانند مسئله سلسله‌مراتب و عدم تقارن ماده-پادماده را حل نشده باقی می‌گذارد.

فیزیکدانان اکنون با لحظه‌ای آشنا در تاریخ مواجه هستند. همان‌طور که مکانیک نیوتنی راه را به نسبت داد و فیزیک کلاسیک به مکانیک کوانتومی، مدل استاندارد نیز باید در نهایت به چیزی عمیق‌تر راه دهد.

جام مقدس: نظریه‌ای یکپارچه

هدف نهایی یک نظریه یکپارچه بزرگ (GUT) یا حتی یک نظریه همه‌چیز (ToE) است: چارچوبی که هر چهار نیرو را یکپارچه می‌کند، همه ذرات را توضیح می‌دهد، و به‌طور پیوسته از کوچک‌ترین مقیاس‌ها (گرانش کوانتومی) تا بزرگ‌ترین مقیاس‌ها (کیهان‌شناسی) کار می‌کند.

این جام مقدس فیزیک مدرن است. به همین دلیل است که محققان برخورددهنده‌ها را به انرژی‌های بالاتر می‌برند، آشکارسازهای عظیم نوترینو می‌سازند، کیهان را با تلسکوپ‌ها نقشه‌برداری می‌کنند، و ریاضیات جسورانه جدیدی اختراع می‌کنند.

فصول بعدی نامزدهای پیشرو را بررسی خواهند کرد:

- ابرتقارن (SUSY) - تقارنی بین ذرات ماده و نیرو.
- نظریه ریسمان و نظریه M - جایی که ذرات، ریسمان‌های مرتعش هستند و گراویتون به‌طور طبیعی ظاهر می‌شود.
- ابعاد اضافی - از ایده اولیه کالوزا-کلاین تا مدل‌های مدرن راندال-ساندرام.
- رویکردهای دیگر - مانند گرانش کوانتومی حلقوی و ایمنی مجانبی.

هر یک از این ایده‌ها نه به‌عنوان یک دگم، بلکه به‌عنوان علم در بهترین حالت خود پدید آمدند: توجه به شکاف‌ها، ساخت نظریه‌های جدید، و آزمایش آن‌ها در برابر واقعیت.

ابرتقارن: تقارن بزرگ بعدی؟

فیزیک سابقه طولانی در یکپارچه‌سازی از طریق تقارن دارد. معادلات ماکسول، برق و مغناطیس را یکپارچه کردند. نسبیت خاص، فضا و زمان را یکپارچه کرد. نظریه الکتروضعیف دو نیروی بنیادی از چهار نیرو را یکپارچه کرد. هر جهش رو به جلو از کشف یک تقارن پنهان در طبیعت سرچشمه گرفت.

ابرتقارن - یا SUSY، همان‌طور که فیزیکدانان با محبت آن را می‌نامند - پیشنهاد جسورانه‌ای است که تقارن بزرگ بعدی دو دسته به ظاهر متمایز از ذرات را به هم متصل می‌کند: ماده و نیروها.

فرمیون‌ها و بوزون‌ها: ماده در برابر نیرو

در مدل استاندارد، ذرات به دو خانواده بزرگ تقسیم می‌شوند:

- **فرمیون‌ها (اسپین ۱/۲):** شامل کوارک‌ها و لپتون‌ها، بلوک‌های سازنده ماده. اسپین نیم‌صحیح آن‌ها به این معناست که از اصل طرد پائولی پیروی می‌کنند: دو فرمیون یکسان نمی‌توانند در یک حالت قرار گیرند. به همین دلیل اتم‌ها پوسته‌های ساختاری دارند و ماده پایدار است.
- **بوزون‌ها (اسپین صحیح):** شامل فوتون‌ها، گلوئون‌ها، بوزون‌های W و Z ، و هیگز. بوزون‌ها نیروها را واسطه می‌کنند. برخلاف فرمیون‌ها، آن‌ها می‌توانند در یک حالت جمع شوند، به همین دلیل لیزرها (فوتون‌ها) و کندانسات بوز-اینشتین وجود دارند.

به‌طور خلاصه: فرمیون‌ها ماده را تشکیل می‌دهند، بوزون‌ها نیروها را منتقل می‌کنند.

فرضیه ابرتقارن

ابرتقارن تقارنی را پیشنهاد می‌کند که فرمیون‌ها و بوزون‌ها را به هم متصل می‌کند. برای هر فرمیون شناخته‌شده، یک شریک بوزونی وجود دارد. برای هر بوزون شناخته‌شده، یک شریک فرمیونی.

- کوارک‌ها → اسکوارک‌ها
- لپتون‌ها → اسلپتون‌ها
- گلوئون‌ها → گلوینوها
- بخش گیج/هیگز → نوترالینوها (مخلوطی از بینو، وینو، هیگزینوها؛ خنثی) و شارژینوها (مخلوطی از وینو، هیگزینوها؛ باردار)

(“فوتینو” و “زینو” نام‌های مستعار قدیمی برای حالت‌های خاص گیج هستند؛ آزمایش‌ها در واقع به دنبال حالت‌های خاص جرم ذکرشده در بالا هستند.)

چرا چنین دوبرابر شدن رادیکال دنیای ذرات پیشنهاد می‌شود؟ زیرا SUSY راه‌حل‌های ظریفی را برای برخی از عمیق‌ترین مشکلات باقی‌مانده از مدل استاندارد ارائه می‌دهد.

حل مسئله سلسله‌مراتب

یکی از بزرگ‌ترین جذابیت‌های SUSY توانایی آن در حل مسئله سلسله‌مراتب است: چرا بوزون هیگز نسبت به مقیاس پلانک این قدر سبک است؟

در مدل استاندارد، اصلاحات کوانتومی از ذرات مجازی باید جرم هیگز را به مقادیر عظیمی سوق دهند. ابرتقارن ذرات شریکی را معرفی می‌کند که این واگرایی‌ها را خنثی می‌کنند. نتیجه: جرم هیگز به‌طور طبیعی پایدار می‌شود، بدون نیاز به تنظیم دقیق (حداقل در طیف‌های “طبیعی” SUSY).

SUSY و یکپارچگی بزرگ

انگیزه دیگر برای SUSY از یکپارچگی نیروها ناشی می‌شود.

- اجرای ثابت‌های جفت‌شدگی نیروهای قوی، ضعیف و الکترومغناطیسی به انرژی‌های بالاتر نشان می‌دهد که در مدل استاندارد، آن‌ها تقریباً اما نه کاملاً در یک نقطه تلاقی می‌کنند.
 - در SUSY، با مشارکت ذرات شریک در محاسبات، ثابت‌ها به زیبایی در حدود 10^{16} گیگاالکترون‌ولت تلاقی می‌کنند.
- این نشان می‌دهد که در انرژی‌های بسیار بالا، هر سه نیرو ممکن است در یک نظریه یکپارچه بزرگ (GUT) ادغام شوند.

SUSY به عنوان نامزد ماده تاریک

ابرتقارن همچنین یک نامزد طبیعی برای ماده تاریک ارائه می‌دهد.

اگر SUSY درست باشد، یکی از ذرات شریک باید پایدار و از نظر الکتریکی خنثی باشد. یک نامزد پیشرو سبک‌ترین نوترالینو است، مخلوطی از بینو، وینو و هیگزینوها.

نوترالینوها تنها به صورت ضعیف تعامل می‌کنند، که با مشخصات WIMP‌ها (ذرات سنگین با تعامل ضعیف) مطابقت دارد. اگر کشف شوند، می‌توانند ۲۷٪ گمشده ماده جهان را توضیح دهند.

جستجوهای تجربی برای SUSY

برای دهه‌ها، فیزیکدانان امیدوار بودند که ذرات ابرتقارنی درست بالای مقیاس‌های انرژی که قبلاً کاوش شده‌اند ظاهر شوند.

- LEP (سرن، دهه ۱۹۹۰): هیچ ذره SUSY تا حدود ۱۰۰ گیگاالکترون‌ولت یافت نشد.
- تفاترون (فرمیلب، دهه‌های ۱۹۹۰-۲۰۰۰): هیچ ذره شریکی یافت نشد.
- LHC (سرن، دهه‌های ۲۰۱۰-۲۰۲۰): برخوردهای پروتون-پروتون تا ۱۳.۶ تراالکترون‌ولت (طراحی: ۱۴ تراالکترون‌ولت). با وجود جستجوهای گسترده، هیچ شواهدی از اسکوارک‌ها، گلوینوها یا نوترالینوها تا مقیاس‌های چند تراالکترون‌ولت یافت نشد.

عدم کشف SUSY در LHC ناامیدکننده بوده است. بسیاری از ساده‌ترین نسخه‌های SUSY، مانند “مدل استاندارد ابرتقارنی حداقل” (MSSM)، اکنون به شدت محدود شده‌اند. طیف‌های “طبیعی” به سمت سنگین‌تر شدن سوق داده شده‌اند، که اگر SUSY نزدیک به مقیاس تراالکترون‌ولت باشد، به تنظیم دقیق‌تری اشاره دارد.

با این حال، SUSY کنار گذاشته نشده است. مدل‌های پیچیده‌تر ذرات شریک سنگین‌تر یا ظریف‌تری را پیش‌بینی می‌کنند، شاید فراتر از دسترسی LHC، یا با تعاملاتی که بیش از حد ضعیف هستند تا به راحتی شناسایی شوند.

زیبایی ریاضی SUSY

فراتر از انگیزه‌های پدیده‌شناختی‌اش، SUSY دارای ظرافت ریاضی عمیقی است.

- این تنها بسط ممکن تقارن‌های فضا-زمان است که با نسبیت و مکانیک کوانتومی سازگار است.
- نظریه‌های ابرتقارنی اغلب قابل محاسبه‌تر هستند: آن‌ها بی‌نهایت‌ها را رام می‌کنند و ساختارهای پنهانی را در نظریه میدان کوانتومی آشکار می‌کنند.
- در نظریه ریسمان، SUSY برای سازگاری ضروری است: بدون آن، نظریه شامل تاکیون‌ها و دیگر آسیب‌شناسی‌ها می‌شود.

حتی اگر طبیعت SUSY را در انرژی‌های قابل دسترسی پیاده‌سازی نکند، ریاضیات آن قبلاً فیزیک را غنی کرده است.

وضعیت ابرتقارن

امروز، SUSY جایگاه عجیبی دارد.

- همچنان یکی از جذاب‌ترین چارچوب‌ها برای فیزیک فراتر از مدل استاندارد است.
- مسئله سلسله‌مراتب را حل می‌کند، از یکپارچگی حمایت می‌کند و یک نامزد ماده تاریک ارائه می‌دهد.
- با این حال، هنوز هیچ شواهد تجربی یافت نشده است.

اگر LHC و جانشینان آن همچنان چیزی پیدا نکنند، ممکن است SUSY تنها در مقیاس‌های انرژی بسیار فراتر از دسترسی ما محقق شود - یا شاید طبیعت مسیری کاملاً متفاوت را برگزیده باشد.

روشی، نه دگما

ابرتقارن روش علمی را در عمل نشان می‌دهد.

فیزیکدانان مشکلات را شناسایی کردند: مسئله سلسله‌مراتب، یکپارچگی، ماده تاریک. آن‌ها تقارن جدیدی را پیشنهاد کردند که همه آن‌ها را حل می‌کند. آزمایش‌هایی را برای آزمایش آن طراحی کردند. تاکنون نتایج منفی بوده‌اند - اما این به این معنا نیست که ایده هدر رفته است. SUSY ابزارهای ما را تیز کرده، آنچه را که به دنبالش هستیم روشن کرده و نسل‌های کامل تحقیق را هدایت کرده است.

مانند اثر یا اپی‌سیکل‌ها پیش از آن، SUSY ممکن است سنگ‌پایی به سوی حقیقت عمیق‌تر باشد، چه به عنوان کلمه نهایی باقی بماند یا نه.

نظریه ریسمان و نظریه M

فیزیک فراتر از مدل استاندارد اغلب با وصله‌ها انگیزه می‌گیرد: حل مسئله سلسله‌مراتب، توضیح ماده تاریک، یکپارچه کردن جفت‌شدگی‌های گیج. نظریه ریسمان متفاوت است. با یک معمای خاص شروع نمی‌شود. در عوض، با ریاضیات شروع

می‌شود - و در نهایت کل مفهوم ما از فضا، زمان و ماده را بازسازی می‌کند.

ریشه‌ها: نظریه‌ای متولد شکست

نظریه ریسمان، به‌طور شگفت‌انگیزی، نه به‌عنوان نظریه همه‌چیز، بلکه به‌عنوان تلاشی ناموفق برای درک نیروی هسته‌ای قوی آغاز شد.

در اواخر دهه ۱۹۶۰، پیش از توسعه کامل QCD، فیزیکدانان در تلاش بودند تا باغ‌وحش هادرون‌ها را توضیح دهند. آن‌ها الگوهایی را در داده‌های پراکندگی مشاهده کردند که نشان می‌داد رزونانس‌ها می‌توانند توسط ریسمان‌های مرتعش مدل‌سازی شوند.

“مدل رزونانس دوگانه”، که توسط ونتزیانو در سال ۱۹۶۸ معرفی شد، تعاملات قوی را طوری توصیف می‌کرد که گویی هادرون‌ها تحریکات ریسمان‌های کوچک هستند. این مدل زیبا بود اما به‌سرعت کنار گذاشته شد هنگامی که QCD به‌عنوان نظریه واقعی نیروی قوی ظاهر شد.

با این حال، نظریه ریسمان از مرگ سر باز زد. در معادلات آن ویژگی‌های قابل‌توجهی پنهان بود که به نظر می‌رسید فراتر از فیزیک هسته‌ای اشاره دارند.

کشف شگفت‌انگیز: گراویتون

هنگامی که نظریه‌پردازان ارتعاشات ریسمان را کوانتیزه کردند، دریافتند که طیف به‌طور اجتناب‌ناپذیر شامل یک ذره بدون جرم با اسپین ۲ است.

این تکان‌دهنده بود. نظریه میدان کوانتومی نشان داده بود که یک ذره بدون جرم با اسپین ۲ منحصر به فرد است: باید کوانتوم گرانش، گراویتون باشد.

همان‌طور که جان شوارتز بعداً اظهار داشت: “اما یک واقعیت شگفت‌انگیز آشکار شد: ریاضیات نظریه ریسمان به‌طور اجتناب‌ناپذیر شامل یک ذره بدون جرم با اسپین ۲ - یک گراویتون - بود.”

آنچه به‌عنوان نظریه هادرون‌ها آغاز شده بود، به‌طور تصادفی بلوک سازنده گرانش کوانتومی را تولید کرده بود.

ایده اصلی: ریسمان‌ها، نه نقاط

در هسته خود، نظریه ریسمان ذرات نقطه‌ای را با اشیاء یک‌بعدی کوچک جایگزین می‌کند: ریسمان‌ها.

- ریسمان‌ها می‌توانند باز (با دو نقطه انتهایی) یا بسته (حلقه‌ها) باشند.
- حالت‌های ارتعاشی مختلف ریسمان به ذرات مختلف *correspond* می‌کنند.
 - یک ارتعاش خاص ممکن است به‌عنوان فوتون ظاهر شود.
 - دیگری به‌عنوان گلوئون.
 - دیگری به‌عنوان کوارک.

○ و یک حالت، به طور اجتناب ناپذیر، به عنوان گراویتون.

این تغییر ساده - از نقاط به ریسمان ها - بسیاری از بی نهایت هایی را که گرانش کوانتومی را آزار می دهند، حل می کند. اندازه محدود ریسمان تعاملاتی را که در غیر این صورت در فاصله صفر منفجر می شدند، پخش می کند.

ابرتقارن و ریسمان های فوق العاده

نسخه های اولیه نظریه ریسمان مشکلاتی داشتند: آن ها شامل تاقیون ها (ناپایداری ها) بودند و ویژگی های غیرواقعی را می طلبیدند. پیشرفت با معرفی ابرتقارن به دست آمد که در دهه های ۱۹۷۰ و ۱۹۸۰ به نظریه ریسمان فوق العاده منجر شد.

ریسمان های فوق العاده تاقیون ها را حذف کردند، فرمیون ها را در بر گرفتند و سازگاری ریاضی جدیدی به ارمغان آوردند.

اما یک مشکل وجود داشت: نظریه ریسمان فقط در ابعاد بالاتر کار می کند. به طور خاص، ۱۰ بعد فضا-زمان.

- چهار بعدی که ما می بینیم (سه بعد فضایی، یک بعد زمانی).
- شش بعد دیگر، فشرده یا پیچیده شده در مقیاس های کوچک، نامرئی برای آزمایش های کنونی.

این ایده، هرچند رادیکال به نظر می رسد، کاملاً جدید نبود. در دهه ۱۹۲۰، نظریه کالوزا-کلااین قبلاً اشاره کرده بود که ابعاد اضافی می توانند گرانش و الکترومغناطیس را یکپارچه کنند. نظریه ریسمان این ایده را احیا کرد و به طور عظیمی گسترش داد.

پنج نظریه ریسمان

تا اواسط دهه ۱۹۸۰، فیزیکدانان دریافته بودند که نظریه ریسمان یکتا نیست، بلکه در پنج نسخه متمایز ظاهر می شود:

1. نوع I - ریسمان های باز و بسته، شامل ریسمان های جهت دار و غیرجهت دار.
2. نوع IIA - ریسمان های بسته، جهت دار، غیرکایرال.
3. نوع IIB - ریسمان های بسته، جهت دار، کایرال.
4. هتروتیک $SO(32)$ - ریسمان های بسته با ساختار هیبریدی.
5. هتروتیک $E_8 \times E_8$ - نسخه ای با تقارن بالا، که بعداً برای اتصال به فیزیک ذرات واقعی حیاتی بود.

هر یک از نظر ریاضی سازگار به نظر می رسید، اما چرا طبیعت باید یکی را انتخاب کند؟

انقلاب اول ریسمان فوق العاده

در سال ۱۹۸۴، مایکل گرین و جان شوارتز نشان دادند که نظریه ریسمان می تواند ناهنجاری های کوانتومی را به طور خودکار لغو کند - چیزی که نظریه های میدان کوانتومی باید با دقت مهندسی می کردند. این کشف انقلاب اول ریسمان فوق العاده را به راه انداخت، و هزاران فیزیکدان به نظریه ریسمان به عنوان نامزدی برای نظریه یکپارچه همه نیروها روی آوردند.

این اولین چارچوب جدی بود که در آن گرانش کوانتومی نه تنها سازگار بود بلکه اجتناب ناپذیر.

انقلاب دوم ریسمان فوق العاده: نظریه M

در اواسط دهه ۱۹۹۰، انقلابی دوم رخ داد. ادوارد ویتن و دیگران دریافتند که پنج نظریه مختلف ریسمان رقیب نیستند، بلکه حدهای متفاوتی از یک نظریه عمیق‌تر واحد هستند: **نظریه M**.

اعتقاد بر این است که نظریه M در ۱۱ بعد وجود دارد و نه تنها شامل ریسمان‌ها بلکه اشیاء با ابعاد بالاتر به نام **برین‌ها** (مخفف غشاها) می‌شود.

- برین‌های یک‌بعدی = ریسمان‌ها.
- برین‌های دوبعدی = غشاها.
- برین‌های با ابعاد بالاتر تا ۹ بعد فضایی.

این برین‌ها امکانات جدید و غنی را به وجود آوردند: کل جهان‌ها می‌توانند به‌عنوان برین‌های سه‌بعدی شناور در فضای با ابعاد بالاتر وجود داشته باشند، در حالی که گرانش به توده نشت می‌کند در حالی که نیروهای دیگر محدود باقی می‌مانند. این تصویر مدل‌های مدرن ابعاد اضافی مانند **راندال-ساندرام** را الهام بخشید.

نمونه‌های برجسته: کالوزا-کلاین و راندال-ساندرام

- **کالوزا-کلاین (دهه ۱۹۲۰):** بعد پنجمی اضافی را برای یکپارچه کردن گرانش و الکترومغناطیس پیشنهاد کرد. این ایده برای دهه‌ها کنار گذاشته شد، اما نظریه ریسمان آن را به شکلی بزرگ‌تر احیا کرد. ابعاد اضافی فشرده‌شده همچنان ویژگی اصلی مدل‌های ریسمان هستند.
- **راندال-ساندرام (۱۹۹۹):** ابعاد اضافی “پیچ‌خورده” را پیشنهاد کرد، که در آن جهان ما یک برین سه‌بعدی است که در ابعاد بالاتر جاسازی شده است. گرانش در توده پخش می‌شود، که توضیح می‌دهد چرا ضعیف‌تر از نیروهای دیگر است. چنین مدل‌هایی سیگنال‌های احتمالی در برخورددهنده‌های ذرات یا انحرافات از قانون نیوتن در فواصل بسیار کوتاه پیش‌بینی می‌کنند.

سرنخ‌ها و چالش‌های تجربی

نظریه ریسمان ادعاهای جسورانه‌ای دارد، اما آزمایش آن‌ها فوق‌العاده دشوار است.

- **ابعاد اضافی:** می‌توانند از طریق سیگنال‌های انرژی گمشده یا تحریکات کالوزا-کلاین خود را نشان دهند - احتمالاً برای گراویتون‌ها یا حتی میدان‌های مدل استاندارد، بسته به تنظیمات. محدودیت‌های برخورددهنده معمولاً به محدوده چند تراالکترون‌ولت می‌رسند.
- **گراویتون‌ها:** یک ذره بدون جرم با اسپین ۲ پیش‌بینی می‌شود، اما تشخیص یک گراویتون واحد فراتر از فناوری قابل‌تصور است. اثرات غیرمستقیم، مانند انحرافات در امواج گرانشی، ممکن است.
- **ابرتقارن:** نظریه ریسمان به SUSY در مقیاسی نیاز دارد، اما LHC هنوز ذرات شریکی پیدا نکرده است.
- **کیهان‌شناسی:** جهان اولیه، تورم، و زمینه میکروویو کیهانی ممکن است اثراتی از فیزیک ریسمان داشته باشند، اگرچه نتایج تاکنون غیرقطعی هستند.

با وجود چالش‌ها، نظریه ریسمان زمین حاصلخیزی برای ریاضیات فراهم کرده است، که الهام‌بخش پیشرفت در هندسه، توپولوژی، و دوگانگی‌هایی مانند AdS/CFT (اتصال گرانش در ابعاد بالاتر به نظریه میدان کوانتومی بدون گرانش) بوده است.

زیبایی و جنجال

حامیان استدلال می‌کنند که نظریه ریسمان امیدوارکننده‌ترین مسیر به سوی یک نظریه یکپارچه است: شامل گرانش کوانتومی است، همه نیروها را یکپارچه می‌کند، و توضیح می‌دهد چرا گراویتون باید وجود داشته باشد.

منتقدان استدلال می‌کنند که بدون تأیید تجربی، نظریه ریسمان در معرض خطر جدا شدن از علم تجربی قرار دارد. “منظره” عظیم آن از راه‌حل‌های ممکن (تا 10^{500}) استخراج پیش‌بینی‌های منحصر به فرد را دشوار می‌کند.

هر دو طرف در یک چیز توافق دارند: نظریه ریسمان نحوه تفکر ما درباره فیزیک را تغییر داده و زبان جدیدی برای یکپارچگی فراهم کرده است.

به سوی نظریه همه چیز

اگر ابرتقارن گام بعدی فراتر از مدل استاندارد باشد، نظریه ریسمان گام بعدی پس از آن است: نامزدی برای نظریه همه چیز که مدت‌ها در جستجوی آن بودیم.

جراثیمندانه‌ترین ادعای آن این نیست که فقط مدل استاندارد و گرانش را در بر می‌گیرد، بلکه این‌ها نتایج اجتناب‌ناپذیر ریسمان‌های مرتعش در ابعاد بالاتر هستند. گراویتون یک افزودنی نیست - بلکه درونی است.

اینکه آیا طبیعت این مسیر را انتخاب کرده است، هنوز باید کشف شود.

کاوش در مرزها: آزمایش‌های فراتر از مدل استاندارد

نظریه‌ها رگ حیات فیزیک هستند، اما آزمایش‌ها ضربان قلب آن هستند. ابرتقارن، نظریه ریسمان، و ابعاد اضافی ساختارهای ریاضی زیبایی هستند، اما با شواهد زنده می‌مانند یا می‌میرند. اگر قرار است بیش از گمانه‌زنی باشند، باید ردپاهایی در داده‌ها به جا بگذارند.

فیزیکدانان روش‌های هوشمندانه‌ای برای جستجوی این ردپاها ابداع کرده‌اند - در برخورددهنده‌ها، در کیهان، و در خود ساختار فضا-زمان.

برخورددهنده‌ها: شکار ذرات شریک و گراویتون‌ها

برخورددهنده بزرگ هادرون (LHC) در سرن قدرتمندترین شتاب‌دهنده ذرات جهان است که پروتون‌ها را در انرژی‌های تا ۱۳.۶ تراالکترون‌ولت (طراحی: ۱۴ تراالکترون‌ولت) به هم می‌کوبد. این ابزار اصلی بشریت برای کاوش در فیزیک فراتر از مدل استاندارد بوده است.

LHC در ابرتقارن

- جستجوی ذرات شریک: آزمایش‌های ATLAS و CMS داده‌ها را برای یافتن اسکوآرک‌ها، گلوینوها، و نوترالینوها/شارژینوها بررسی کرده‌اند. این‌ها اغلب به‌عنوان سیگنال‌های “انرژی گمشده” ظاهر می‌شوند، زیرا ذرات SUSY از تشخیص فرار می‌کنند.

- **نتایج:** هیچ ذره SUSY تأییدشده‌ای تا مقیاس چند تراالکترون‌ولت یافت نشده است. این بسیاری از ساده‌ترین مدل‌های SUSY را رد کرده و SUSY “طبیعی” را به قلمروهای سنگین‌تر و تنظیم‌شده‌تر سوق داده است.

گراویتون‌ها و ابعاد اضافی

- **حالت‌های کالوزا-کلاین:** اگر ابعاد اضافی وجود داشته باشند، گراویتون‌ها یا حتی میدان‌های مدل استاندارد ممکن است به‌عنوان تحریکات سنگین KK ظاهر شوند، که به‌عنوان رزونانس‌هایی در کانال‌های دی‌لیتون، دی‌فوتون یا دی‌جت قابل تشخیص هستند.
- **سیگنال‌های راندال-ساندرام:** ابعاد اضافی پیچ‌خورده می‌توانند رزونانس‌های گراویتون با الگوهای زاویه‌ای مشخص اسپین ۲ تولید کنند.
- **نتایج:** جستجوهای LHC تاکنون هیچ شواهدی نیافته‌اند، اما محدودیت‌ها را به محدوده چند تراالکترون‌ولت رسانده‌اند، که اندازه، پیچ‌خوردگی و هندسه ابعاد اضافی را محدود می‌کند.

سیاه‌چاله‌های میکروسکوپی

برخی نظریه‌ها پیشنهاد می‌کنند که اگر گرانش در مقیاس تراالکترون‌ولت قوی شود، سیاه‌چاله‌های کوچک می‌توانند در برخوردهای LHC شکل بگیرند و در انفجارهای ذرات تبخیر شوند. چنین رویدادهایی مشاهده نشده‌اند.

آزمایش‌های دقیق: آزمایش گرانش در مقیاس‌های کوچک

اگر ابعاد اضافی وجود داشته باشند، قانون گرانش نیوتن ممکن است در فواصل کوتاه فروپاشی کند.

- **آزمایش‌های تعادل پیچشی (“Eöt-Wash”):** قانون مربع معکوس را تا مقیاس‌های زیر میلی‌متر آزمایش می‌کنند - در حال حاضر ده‌ها میکرومتر (~۵۰ میکرومتر).
- **نتایج:** هیچ انحرافی یافت نشده است. این آزمایش‌ها طیف وسیعی از سناریوهای ابعاد اضافی با طول‌های مشخصه بزرگ‌تر از 10^{-4} متر را رد می‌کنند (وابسته به مدل).

این آزمایش‌های رومیزی به‌طور شگفت‌انگیزی حساس هستند و مقیاس‌هایی را کاوش می‌کنند که برای برخورددهنده‌ها غیرقابل دسترسی هستند.

امواج گرانشی: پنجره‌ای جدید به گرانش کوانتومی

کشف امواج گرانشی توسط LIGO در سال ۲۰۱۵ یک مرز جدید را گشود.

- **پلاریزاسیون‌های اضافی / انتشار اصلاح‌شده:** برخی مدل‌های گرانش کوانتومی یا ابعاد اضافی انحرافات GR از پیش‌بینی می‌کنند (پلاریزاسیون‌های اضافی، پراکندگی، یا زنگ‌زدن‌های اصلاح‌شده).
- **طیف‌سنجی زنگ‌زدن:** “زنگ” سیاه‌چاله‌ها پس از ادغام ممکن است انحرافات ظریفی از GR را آشکار کند.
- **امواج گرانشی اولیه:** امواج ناشی از بیگ‌بنگ ممکن است اثراتی از فیزیک ریسمان را حمل کنند، که توسط رصدخانه‌های آینده مانند LISA یا تلسکوپ اینشتین قابل تشخیص هستند.

تاکنون، مشاهدات با GR در محدوده عدم قطعیت‌های کنونی سازگار هستند، اما دقت بالاتر ممکن است شگفتی‌هایی به همراه داشته باشد.

کیهان‌شناسی: جهان به‌عنوان آزمایشگاه

خود کیهان شتاب‌دهنده نهایی ذرات است.

- زمینه میکروویو کیهانی (CMB): نوسانات کوچک، جهان اولیه را نقشه‌برداری می‌کنند. برخی مدل‌های ریسمان سیگنال‌های خاصی مانند غیرگوسی بودن یا ویژگی‌های نوسانی پیش‌بینی می‌کنند.
 - تورم: انبساط سریع جهان ممکن است توسط میدان‌هایی مرتبط با نظریه ریسمان هدایت شده باشد. تشخیص حالت‌های B اولیه در CMB سرنخ قدرتمندی خواهد بود.
 - جستجوی ماده تاریک: نوترالینوهای SUSY نامزدهای اصلی برای ماده تاریک هستند. آزمایش‌هایی مانند XENONnT، LUX-ZEPLIN و PandaX به دنبال WIMP‌ها از طریق پس‌زنی‌های هسته‌ای هستند.
 - اکسیون‌ها: نظریه ریسمان همچنین ذرات شبیه اکسیون را پیش‌بینی می‌کند که می‌توانند از طریق حفره‌های رزونانسی یا مشاهدات اخت‌فیزیکی تشخیص داده شوند.
- تاکنون، آسمان خاموش است. ماده تاریک تشخیص داده نشده و داده‌های کیهان‌شناختی با مدل Λ CDM بدون اثر انگشت واضح ریسمان سازگار است.

وضعیت کنونی: محدودیت‌ها، نه تأییدات

ده‌ها سال جستجو، SUSY، ابعاد اضافی یا سیگنال‌های ریسمان را تأیید نکرده است. اما فقدان شواهد، شواهد فقدان نیست:

- SUSY ممکن است در مقیاس‌هایی فراتر از دسترسی LHC یا در طیف‌های کمتر آشکار وجود داشته باشد؛ نتایج منفی تاکنون نسخه‌های تنظیم‌شده‌تر ("کمتر طبیعی") را ترجیح می‌دهند اگر SUSY نزدیک به مقیاس تراالکترون‌ولت باشد.
 - ابعاد اضافی ممکن است کوچک‌تر، پیچ‌خورده‌تر یا به‌نحوی از کاوشگرهای کنونی پنهان باشند.
 - نظریه ریسمان ممکن است تنها در جهان بسیار اولیه اثراتی قابل تشخیص به جا بگذارد که فقط از طریق کیهان‌شناسی قابل دسترسی است.
- چند ناهنجاری دقیق (مثلاً اندازه‌گیری $(g-2)$ میون و برخی تنش‌های فیزیک طعم) همچنان جذاب اما حل‌نشده هستند؛ آن‌ها بررسی مداوم را بدون واژگونی مدل استاندارد انگیزه می‌دهند.
- آنچه آزمایش‌ها انجام داده‌اند تنگ کردن فضای پارامترها است. آن‌ها به ما گفته‌اند SUSY کجا نیست، ابعاد اضافی چقدر باید کوچک باشند، و ماده تاریک تا چه حد می‌تواند یا نمی‌تواند تعامل کند.

مسیر پیش رو

آزمایش‌های آینده نوید کاوش عمیق‌تر را می‌دهند:

- **LHC با درخشندگی بالا (HL-LHC):** حدود ۱۰ برابر داده بیشتر جمع‌آوری خواهد کرد، SUSY را تا جرم‌های بالاتر و فرآیندهای نادر کاوش می‌کند.
- **برخورددهنده دایره‌ای آینده (FCC-hh):** برخورددهنده پیشنهادی ۱۰۰ تراالکترون‌ولت، به اندازه کافی قدرتمند برای کاوش مقیاس‌های انرژی که ممکن است فیزیک GUT در آن ظاهر شود.
- **LISA (دهه ۲۰۳۰):** رصدخانه امواج گرانشی مبتنی بر فضا، حساس به سیگنال‌های اولیه از جهان اولیه.
- **آشکارسازهای ماده تاریک نسل بعدی:** با حساسیت به سیگنال‌های ضعیف، ممکن است سرانجام یک WIMP یا اکسیون را شکار کنند.

علم به‌عنوان یک سفر

داستان تجربی فیزیک فراتر از مدل استاندارد، داستان شکست نیست، بلکه فرآیند است.

- نتایج منفی مدل‌های ساده را رد می‌کنند و نظریه‌های ما را تیز می‌کنند.
- هر محدودیت ما را به سوی چارچوب‌های تصفیه‌شده‌تر و پیش‌بینی‌کننده‌تر هدایت می‌کند.
- نبود SUSY یا ابعاد اضافی در مقیاس تراالکترون‌ولت این ایده‌ها را نابود نمی‌کند - آن‌ها را به قلمروهای جدید سوق می‌دهد.

همان‌طور که آزمایش فویل طلای رادرفورد مدل پودینگ آلو را درهم شکست، یا LIGO شک و تردید درباره امواج گرانشی را از بین برد، کشف بزرگ بعدی ممکن است به‌طور ناگهانی رخ دهد - و همه‌چیز را تغییر دهد.

به سوی نظریه همه‌چیز

برای قرن‌ها، فیزیک از طریق یکپارچگی پیشرفت کرده است. نیوتن آسمان و زمین را تحت یک قانون گرانش یکپارچه کرد. ماکسول برق و مغناطیس را یکپارچه کرد. اینشتین فضا و زمان را یکپارچه کرد. نظریه الکتروضعیف نشان داد که دو نیروی بسیار متفاوت جنبه‌هایی از یک نیروی واحد هستند.

گام طبیعی بعدی جسورانه‌ترین تاکنون است: یکپارچه کردن **هر چهار تعامل بنیادی** - قوی، ضعیف، الکترومغناطیسی و گرانشی - در یک چارچوب خود-سازگار. این جام مقدس فیزیک است: **نظریه همه‌چیز (ToE)**.

چرا ToE مهم است

یکپارچگی کامل صرفاً ظرافت فلسفی نیست؛ مشکلات عملی و مفهومی عمیقی را حل می‌کند:

- **گرانش کوانتومی:** نسبت عام در مقیاس پلانک (10^{19} گیگاالکترون‌ولت) فرو می‌پاشد. تنها یک نظریه کوانتومی گرانش می‌تواند سیاه‌چاله‌ها و تکینگی بیگ‌بنگ را توضیح دهد.
- **طبیعی بودن و تنظیم دقیق:** مسئله سلسله‌مراتب و مسئله ثابت کیهانی برای توضیح عمیق‌تر فریاد می‌زنند.
- **پارامترهای مدل استاندارد:** چرا ذرات جرم‌ها و بارهایی که دارند را دارند؟ چرا سه نسل از کوارک‌ها و لپتون‌ها؟ یک ToE ممکن است این معماها را توضیح دهد.
- **کیهان‌شناسی:** ماده تاریک، انرژی تاریک و تورم ممکن است همگی به فیزیک در مقیاس یکپارچگی مرتبط باشند.

یک ToE نه تنها نیروها را یکپارچه می‌کند - بلکه مقیاس‌ها را از کوچک‌ترین ریسمان‌های نظریه کوانتومی تا بزرگ‌ترین ساختارهای کیهانی یکپارچه می‌کند.

ابرتقارن و یکپارچگی بزرگ

ابرتقارن (SUSY)، اگر در طبیعت محقق شود، سنگ‌پایی به سوی ToE فراهم می‌کند.

- مسئله سلسله‌مراتب حل شد: ذرات شریک اصلاحات واگرا به جرم هیگز را خنثی می‌کنند.
 - جفت‌شدگی‌های گیج یکپارچه شدند: با SUSY، قدرت‌های سه نیرو به زیبایی در 10^{16} گیگاالکترون‌ولت همگرا می‌شوند، که به یک نظریه یکپارچه بزرگ (GUT) اشاره دارد.
 - نامزد ماده تاریک: نوترالینو توضیح طبیعی برای ماده تاریک کیهانی ارائه می‌دهد.
- GUT‌های الهام‌گرفته از SUSY (مانند $SO(10)$ ، $SU(5)$ یا E_6) تصور می‌کنند که در انرژی‌های فوق‌العاده بالا، کوارک‌ها و لپتون‌ها در چندگانه‌های بزرگ‌تر یکپارچه می‌شوند و نیروها در یک گروه گیج واحد ادغام می‌شوند.
- اما SUSY هنوز در آزمایش‌ها ظاهر نشده است. اگر فقط در مقیاس‌های فراتر از دسترس ما وجود داشته باشد، قدرت یکپارچه‌کننده آن ممکن است وسوسه‌انگیز اما پنهان باقی بماند.

نظریه ریسمان: گرانش کوانتومی و گراویتون

نظریه ریسمان فراتر می‌رود. به جای وصله کردن مدل استاندارد، پایه را بازنویسی می‌کند:

- ریسمان‌ها، نه نقاط: همه ذرات ارتعاشات ریسمان‌های کوچک هستند.
- گراویتون به‌طور طبیعی ظاهر می‌شود: تحریک بدون جرم با اسپین ۲ اجتناب‌ناپذیر است، به این معنا که گرانش کوانتومی درونی است.
- یکپارچگی: حالت‌های ارتعاشی مختلف همه ذرات شناخته‌شده را - کوارک‌ها، لپتون‌ها، بوزون‌های گیج، هیگز - در یک چارچوب تولید می‌کنند.
- ابعاد اضافی: نظریه ریسمان به ۱۰ بعد فضا-زمان نیاز دارد؛ نظریه M به ۱۱ بعد نیاز دارد، با ابعاد مخفی فشرده یا پیچ‌خورده.

در این چشم‌انداز، یکپارچگی تصادفی نیست - بلکه هندسی است. نیروها متفاوت هستند زیرا ریسمان‌ها به روش‌های مختلفی ارتعاش می‌کنند، که توسط توپولوژی ابعاد اضافی شکل گرفته‌اند.

نظریه M و جهان‌های برین

کشف اینکه پنج نظریه ریسمان توسط دوگانگی‌ها به هم متصل هستند، به نظریه M منجر شد، چارچوبی حتی بزرگ‌تر:

- شامل ریسمان‌ها، غشاها و برین‌های با ابعاد بالاتر است.
- پیشنهاد می‌کند که جهان ما می‌تواند یک برین سه‌بعدی باشد که در یک توده با ابعاد بالاتر جاسازی شده است.
- توضیحات طبیعی ارائه می‌دهد که چرا گرانش ضعیف‌تر است (در ابعاد اضافی پخش می‌شود) و چگونه ممکن است جهان‌های متعددی در یک "چندجهانی" وجود داشته باشند.

نظریه M هنوز ناقص است، اما جسورانه‌ترین گام به سوی ToE است که تاکنون امتحان شده است.

مسیرهای دیگر به گرانش کوانتومی

نظریه ریسمان و نظریه M تنها مسیرها نیستند. فیزیکدانان چارچوب‌های متعددی را کاوش می‌کنند، هر یک با نقاط قوت متفاوت:

- **گرانش کوانتومی حلقوی (LQG):** تلاش می‌کند فضا-زمان را مستقیماً کوانتیزه کند، پیش‌بینی می‌کند که فضا در مقیاس پلانک گسسته است.
- **ایمنی مجانبی:** پیشنهاد می‌کند که گرانش ممکن است در انرژی‌های بالا به دلیل یک نقطه ثابت غیربدیهی رفتار خوبی داشته باشد.
- **تریانگولاسیون‌های دینامیکی علی (CDT):** فضا-زمان را از بلوک‌های سازنده هندسی ساده می‌سازد.
- **نظریه توییستر و آمپلیتوهدرا:** چارچوب‌های ریاضی نوین که فضا-زمان و دامنه‌های پراکندگی را بازاندیشی می‌کنند.

اگرچه هیچ‌کدام هنوز با دامنه یکپارچه‌کننده نظریه ریسمان رقابت نمی‌کنند، اما غنای جستجو را نشان می‌دهند.

نقش آزمایش

یک ToE در نهایت باید قابل آزمایش باشد. اگرچه مقیاس پلانک بسیار فراتر از آزمایش‌های کنونی است، فیزیکدانان به دنبال شواهد غیرمستقیم هستند:

- **برخورددهنده‌ها:** ذرات SUSY، ابعاد اضافی، یا سیاه‌چاله‌های میکروسکوپی.
- **آزمایش‌های دقیق:** انحرافات از قانون نیوتن در مقیاس‌های کوتاه.
- **امواج گرانشی:** پلاریزاسیون‌های عجیب یا پژواک‌های ابعاد بالاتر.
- **کیهان‌شناسی:** اثراتی از تورم، نامزدهای ماده تاریک، یا اسیون‌های پیش‌بینی‌شده توسط نظریه ریسمان.

تاکنون، ToE خارج از دسترس باقی مانده است، اما هر نتیجه منفی امکانات را محدود می‌کند.

زیبایی و چالش

یک ToE واقعی نه تنها فیزیک را یکپارچه می‌کند - بلکه **دانش بشری** را یکپارچه می‌کند. مکانیک کوانتومی و نسبیت، میکرو و ماکرو، ذره و کیهان را به هم متصل می‌کند.

با این حال، با یک پارادوکس مواجه است: مقیاسی که یکپارچگی در آن رخ می‌دهد ممکن است برای همیشه خارج از دسترس تجربی باشد. یک برخورددهنده ۱۰۰ تراالکترون‌ولت تنها کسری از مسیر به سوی مقیاس پلانک را کاوش می‌کند. ممکن است مجبور شویم به کیهان‌شناسی، سازگاری ریاضی، یا سیگنال‌های غیرمستقیم تکیه کنیم.

رویا به دلیل ظرافت عمیق چارچوب‌ها زنده می‌ماند. همان‌طور که ویتن اظهار داشت، نظریه ریسمان صرفاً “مجموعه‌ای از معادلات” نیست بلکه “چارچوبی جدید برای فیزیک” است.

علم به عنوان یک روش، نه دگما

جستجو برای ToE درباره اعلام نظریه ریسمان، SUSY، یا هر ایده واحدی به عنوان “حقیقت” نیست. درباره روش علمی است:

- شناسایی شکاف‌ها در نظریه‌های موجود.
- پیشنهاد چارچوب‌های جدید جسورانه.
- آزمایش آن‌ها در برابر واقعیت، دور انداختن یا تصفیه کردن در صورت نیاز.

داستان هنوز به پایان نرسیده است. اما دقیقاً این باز بودن - امتناع از مقدس دانستن هر نظریه - است که فیزیک را به یک علم زنده تبدیل می‌کند، نه یک دگما.

افق پیش رو

قرن بعدی فیزیک ممکن است آشکار کند:

- شواهدی از ابرتقارن یا جایگزین‌های آن.
- داده‌های کیهان‌شناختی که پیش‌بینی‌های ریسمان را تأیید یا رد می‌کنند.
- بازنویسی عمیق‌تر خود فضا-زمان.

یا شاید ToE واقعی چیزی باشد که هنوز هیچ‌کس تصور نکرده است.

اما خود جستجو - انگیزه برای یکپارچه کردن، توضیح دادن، دیدن طبیعت به طور کامل - به اندازه خود معادلات بخشی از انسانیت است.

مراجع و مطالعه بیشتر

ابرتقارن و یکپارچگی بزرگ

- وس، ج.، و باگر، ج. (۱۹۹۲). ابرتقارن و گرانش فوق‌العاده. انتشارات دانشگاه پرینستون.
- بائر، ه.، و تاتا، ایکس. (۲۰۰۶). ابرتقارن در مقیاس ضعیف: از میدان‌های فوق‌العاده تا رویدادهای پراکندگی. انتشارات دانشگاه کمبریج.
- جورجی، ه.، و گلاشو، اس. ال. (۱۹۷۴). “وحدت همه نیروهای ذرات بنیادی.” نامه‌های بررسی فیزیکی، ۳۲(۸)، ۴۳۸.

نظریه ریسمان و نظریه M

- گرین، ام. بی.، شوارتز، ج. اچ.، و ویتن، ای. (۱۹۸۷). نظریه ریسمان فوق‌العاده (جلدهای ۱ و ۲). انتشارات دانشگاه کمبریج.
- پولچینسکی، ج. (۱۹۹۸). نظریه ریسمان (جلدهای ۱ و ۲). انتشارات دانشگاه کمبریج.
- ویتن، ای. (۱۹۹۵). “دینامیک‌های نظریه ریسمان در ابعاد مختلف.” فیزیک هسته‌ای ۸۵-۱۲۶(۱)، ۴۴۳. B.
- بکر، ک.، بکر، ام.، و شوارتز، ج. اچ. (۲۰۰۶). نظریه ریسمان و نظریه M: مقدمه‌ای مدرن. انتشارات دانشگاه کمبریج.

گرانش کوانتومی حلقوی و جایگزین‌ها

- روولی، سی. (۲۰۰۴). گرانش کوانتومی. انتشارات دانشگاه کمبریج.
- تی‌من، تی. (۲۰۰۷). نسبیت عام کوانتومی کنونی مدرن. انتشارات دانشگاه کمبریج.
- آمبیورن، ج.، یورکیویچ، ج.، و لول، آر. (۲۰۰۵). “بازسازی جهان.” بررسی فیزیکی ۰۶۴۰۱۴، ۷۲(۶)، D.

مرزهای تجربی

- عا، ج.، و دیگران. (همکاری ATLAS). (۲۰۱۲). “مشاهده یک ذره جدید در جستجوی بوزون هیگز مدل استاندارد.” نامه‌های فیزیکی ۱-۲۹، ۷۱۶(۱)، B.
- چاترچیان، اس.، و دیگران. (همکاری CMS). (۲۰۱۲). “مشاهده یک بوزون جدید با جرم ۱۲۵ گیگا الکترون‌ولت.” نامه‌های فیزیکی ۳۰-۶۱، ۷۱۶(۱)، B.
- ابوت، بی. پی.، و دیگران. (همکاری علمی LIGO و همکاری Virgo). (۲۰۱۶). “مشاهده امواج گرانشی از ادغام سیاه‌چاله دوتایی.” نامه‌های بررسی فیزیکی، ۱۱۶(۶)، ۰۶۱۱۰۲.

گزارش‌های عمومی قابل دسترسی

- گرین، بی. (۱۹۹۹). جهان ظریف: ریسمان‌های فوق‌العاده، ابعاد مخفی، و جستجو برای نظریه نهایی. دبلیو. دبلیو. نورتون.
- راندال، ال. (۲۰۰۵). گذرگاه‌های پیچ‌خورده: گشودن اسرار ابعاد مخفی جهان. هارپر پرنیال.
- روولی، سی. (۲۰۱۶). هفت درس کوتاه در فیزیک. ریورهد بوکس.
- ویلچک، اف. (۲۰۰۸). سبکی وجود: جرم، اتر، و یکپارچگی نیروها. کتاب‌های پایه.