

## ساختار درونی کوارک‌ها

## دُن لینکلن

## برگردان: امید برومند

بر اساس آموزه‌های مدل استاندارد، کوارک‌ها و لپتون‌ها نه انبساطی دارند و نه ساختاری. نشانه‌هایی در دست‌اند که این قضیه می‌تواند به‌گونه‌ی دیگری باشد. شاید شتاب‌دهنده‌ی هادرونی بزرگ LHC در آینده‌ای نزدیک به دنیای پنهان ذرات به‌مراتب کوچک‌تری برخورد کند.

مدل استاندارد فیزیک ذرات یکی از موفق‌ترین نظریاتی است که تا کنون طراحی شده است. فیزیک‌دانان با پیوند فقط تعداد انگشت‌شماری از اصول، مدلی تشکیل داده‌اند که مشخصه‌اش سادگی آن بوده و تشریح‌کننده‌ی تمامی ذرات بنیادی شناخته شده در جهان و اکثر برهمکنش‌های بین آنها است. این مدل اساسن دو نوع ذرات غیرقابل تقسیم، یعنی کوارک‌ها و لپتون‌ها را در انواع مختلف مورد فرض قرار می‌دهد. کوارک‌ها سنگ‌بنای پروتون‌ها و نوترون‌ها هستند و از الکترون می‌توان به‌عنوان مثالی برای لپتون‌ها نام برد. با ترکیب درست لپتون‌ها و کوارک‌ها، هر نوع اتم و بدین ترتیب هر ماده‌ای در جهان را می‌توان ایجاد کرد.

ضمنن، چهار نیروی عمل‌کننده‌ی بنیادین وجود دارند. با دو نیرو از این چهار تا، یعنی گرانش و برهمکنش الکترومغناطیسی آشنایی نزدیک داریم. دو نیروی دیگر، یعنی نیروی قوی و ضعیف هسته-ای از آشنایی کمتری برخوردارند. فیزیک‌دانان سه نیروی آخر نام‌برده را به‌لحاظ ریاضی و از طریق تبادل بوزون‌ها تشریح می‌کنند. تمام کوشش‌ها برای وارد کردن گرانش به این مدل با شکست مواجه شده‌اند. مدل استاندارد همچنین چند سوال دیگر را بدون جواب گذاشته است: چرا درست چهار نیرو و نه کمتر و یا بیشتر وجود دارند؟ چرا به‌جای یکی، دو نوع ذرات بنیادین وجود دارند؟



دان لینکلن دانشمند ارشد در فرمی‌لاب در نزدیکی شیکاگو است و همچنین در مرکز تحقیقاتی سرن در ژنو تحقیق می‌کند. ده‌ها سال است که او در تلاش برای پیدا کردن ساختار درونی کوارک‌ها و لپتون‌ها می‌باشد. او در سال 2013 به‌خاطر نشر مطالب عامه‌پسند علمی خود، جایزه HEPP Outreach Award از انجمن فیزیک اروپا را دریافت نمود.

آیا کوارک‌ها (در تصویر به رنگ آبی نشان داده شده) در درون خود رازی نهفته دارند؟ برخی از محققان بر این باورند که کوارک‌ها ذرات دیگری، یعنی پروتون‌ها را در درون خود گنجانیده‌اند (ذرات زرد رنگ).

بدون شک این‌ها پرسش‌های مهمی‌اند. اما مدت‌ها است که معمای دیگری من و همکاران فیزیک‌دانم را شیفته‌ی خود کرده است. نشانه‌هایی در دست‌اند که احتمالاً **کوارک‌ها و لپتون‌ها (1)** که در مدل استاندارد نقطه‌ای شکل و تقسیم‌ناپذیر در نظر گرفته می‌شوند، خود از اجزای کوچک‌تری تشکیل شده‌اند. در صورت درست بودن این نکته و بنیادین نبودن **کوارک‌ها و لپتون‌ها**، مدل استاندارد باید به‌طور اساسی اصلاح شود که این خود پیامدهای عملی پراهمیتی را در پی خواهد داشت. همان‌گونه که قبل از کشف ساختار اتم در سال 1911 توسط ارنست رازرفورد، ایجاد و توسعه‌ی فناوری انرژی هسته‌ای غیر قابل تصور بود، کشف سطح پایین‌تری از ماده، چیز جدیدی را به ارمغان خواهد آورد.

اما آیا واقعاً این سطح از ماده وجود دارد؟ فیزیک‌دانان برای پاسخ به این پرسش نیازمند ابزاری برای مشاهده‌ی درون **کوارک‌ها** هستند که تاکنون موجود نبوده‌اند. **برخورد دهنده‌ی هادرونی بزرگ (LHC)** در مرکز تحقیقاتی **سرن** در ژنو که در سال 2012 ذرات **هیگز** در آن کشف شدند، احتمالاً به‌زودی توانایی انجام این کار را خواهد داشت.

### مقدار کافی برای ایجاد کل ماده

فیزیک‌دانان اولین نشانه‌ها از ساختار درونی **کوارک‌ها و لپتون‌ها** را ده‌ها سال قبل کشف کردند. **فوتون‌ها و نوترون‌ها** از دو نوع **کوارک** یعنی **کوارک بالا (Up-Quarks)** و **کوارک پایین (Down-Quarks)** تشکیل شده‌اند. **کوارک‌های بالا** دارای  $2/3+$  بار پروتون و **کوارک‌های پایین** دارای  $1/3-$  این بار هستند. از ترکیب دو **کوارک بالا** با یک **کوارک پایین** و یا دو **کوارک پایین** با یک **کوارک بالا**، پروتون یا نوترون حاصل می‌شوند. این دو نوع **کوارک** همراه با **الکترون‌ها**، برای تشکیل کل ماده در کیهان کافی‌اند.

اما محققان **کوارک‌های** دیگری پیدا کردند. در این رابطه می‌توان از **کوارک شگفت (Strange-Quark)** که دارای بار یکسانی همانند **کوارک پایین** اما سنگین‌تر از آن است و همچنین از **کوارک ته (Bottom-Quark)** که به‌مراتب سنگین‌تر است، نام برد. **کوارک بالا** نیز دارای خویشاوندان سنگینی است، که **کوارک افسون (Charm-Quark)** و **کوارک سر (Top-Quark)** نام دارند. اما این چهار **کوارک** بسیار سنگین‌وزن ناپایدارند و در کسر کوچکی از ثانیه به **کوارک بالا** و **کوارک پایین** تجزیه می‌شوند. **الکترون** نیز دارای خویشاوندان سنگین‌وزن و ناپایدار یعنی **میون** و **لپتون تاو** سنگین‌تر از **میون**، است. علاوه بر این ذرات، فیزیک‌دانان سه نوع **نوترینوی** بسیار سبک و خنثی به لحاظ الکتریکی را نیز می‌شناسند.

هنگامی که تنها **کوارک بالا**، **کوارک پایین** و **الکترون** برای ایجاد کل مواد در جهان کافی‌اند، ظاهر این فراوانی زائد است. اما با این حال چرا به این اندازه تنوع ذرات وجود دارد؟ **ایزیدور ایساک رابی** فیزیک‌دان آمریکایی و برنده‌ی جایزه نوبل، بعد از کشف **میون** این سوال را به‌طور مشخص مطرح کرد: "Who ordered that?"، «این را چه کسی سفارش داده؟».

معلوم نیست که چگونه این فراوانی مرموز را می‌توان توضیح داد. بنابر یکی از رویکردها، این ذرات می‌بایستی قاعده‌مند و بر طبق خواص-شان، در جدولی همانند جدول تناوبی عناصر ردیف شوند (نگاه شود به «در یک نگاه»، صفحه 4). جدول تناوبی عناصر به‌نوبه‌ی خود اولین نشانه‌هایی را در این مورد به‌دست داد که عناصر شیمیایی احتمالاً به‌مفهوم دقیق کلمه، ابتدایی و پایه‌ای نیستند. عناصر ردیف شده در هر سطر یا ستون این الگو نشان‌دهنده‌ی وجه اشتراک‌هایی هستند که حکایت از مدل قاعده‌مند (سیستماتیک) ساختار درونی اتم‌ها دارند.

جدول مشابهی برای **کوارک‌ها و لپتون‌ها** دارای سه ستون است. هر کدام از ستون‌ها نشان‌دهنده‌ی به اصطلاح نسلی از ذرات‌اند. تنوع زیاد و اسرارآمیز ذرات بمثابه‌ی مشکل نسل نام‌گذاری شده است. در ستون سمت چپ، نسل اول مشاهده می‌شود که شامل **کوارک بالا**، **کوارک پایین**، **الکترون** و **نوترینو** است، یعنی تمام سنگ‌بناهایی که برای توضیح جهان شناخته شده، مورد نیازند. در میان نسل دوم، نوع سنگین‌تر این ذرات و در میان نسل سوم سنگین‌ترین آن‌ها دیده می‌شوند. همانند جدول تناوبی، الگوهای موجود در این جدول نشان‌دهنده امکان گردهم‌آبی سنگ‌بناهای به‌مراتب کوچک‌تر ماده در پیکربندی‌های گوناگون در درون ذره بوده که بدین طریق تفاوت بین نسل‌های مختلف را توضیح می‌دهند.

چه بسا که کشف فروپاشی رادیو اکتیو، یک نمونه‌ی تاریخی دیگر در جستجو به دنبال ساختار درونی کوارک‌ها بود. در آستانه‌ی قرن بیستم در مورد فرآیند مرموزی گمانه‌زنی می‌شد که امر غیر قابل تصویری یعنی تبدیل یک عنصر شیمیایی به عنصر دیگر را تحقق بخشیده بود. امروزه، رویای کیمیاگران قرون وسطی برای تبدیل سرب به طلا تحقق پذیر است. برای این کار باید فقط تعداد پروتون‌ها و نوترون‌ها در هسته‌ی اتم تغییر یابند. کیمیاگری هسته‌ای قادر است با کمک نیروی هسته‌ای ضعیف حتی نوترون را به پروتون و بالعکس تبدیل کند. برای

نقشه راهنمای ذرات

فیزیک ذرات، بر پایه‌ی نظریه‌ای جامع، یعنی به اصطلاح مدل استاندارد بوده که توصیف کننده‌ی تمامی ذرات شناخته شده و همچنین نیروهای عمل کننده بین آنها به استثنای گرانش، است. این مدل از دو خانواده ذرات، یعنی فرمیون‌ها که شامل تمامی اجزای بنیادین ماده و بوزون‌های حامل نیروها، تشکیل شده است. فرمیون‌ها در سه به اصطلاح نسل تقسیم بندی می‌شوند. جرم ذرات نسل به نسل افزایش می‌یابد.





**در یک نگاه****در جستجوی پرتون‌ها**

1- دیمیتری مندلیف شیمی‌دان معروف، در سال 1869 متوجه شد که ترتیب عناصر در یک طرح معینی - منظور سیستم تناوبی عناصر - نشان دهنده‌ی الگوی آشکاری از خواص عناصر است. فیزیک‌دانان بعدها این خواص را با ساختار اتمی عناصر توضیح دادند.

2- خواص ذرات آشنای ماده نیز پیرو الگوها هستند، از این رو مورد مشابه‌ای همانند الگوی مطرح شده در بالا برای این ذرات قابل تکرار است. آیا این نکته نشان از آن دارد که این ذرات، واقعن بنیادین و پایه‌ای نبوده و اجزای به‌مراتب کوچک‌تری یعنی پرتون‌ها را درون خود دارند؟ یافته‌های موجود، البته خلاف این فرض را نشان می‌دهند.

3- آزمایش‌ها در برخورد دهنده‌ی هادرونی بزرگ (LHC) در ژنو، به‌زودی توانایی پاسخگویی به پرسش در مورد موجودیت پرتون‌ها را خواهد داشت.

این کار کافی است که کوارک‌ها در درون این ذرات بنیادین، هویت خود را تغییر دهند. لپتون‌ها نیز به یک‌دیگر تبدیل‌پذیرند. فقط تبدیل کوارک‌ها به لپتون‌ها و عکس آن امکان‌پذیر نیست.

آیا همان‌گونه که توانایی دگرگونی در عناصر شیمیایی نشان دهنده ساختار اتمی درون آنها است، دگردیسی در کوارک‌ها و لپتون‌ها نیز نشانی از ساختار درونی این ذرات دارد؟ محققان تا کنون پیشنهادهای گوناگونی برای ذرات فرضی تشکیل‌دهنده‌ی کوارک‌ها و لپتون‌ها مطرح کرده‌اند. این ذرات نام-های گوناگونی دارند و تحت واژه‌ی پرتون‌ها (Preons) جمع‌بندی می‌شوند. در سال 1979 مدل ساده‌ای برای پرتون‌ها تنظیم شد. حیم جراری اسرائیلی که در آن زمان در مرکز ستاب‌دهنده خطی دانشگاه استنفورد تحقیق می‌کرد و مایکل شیوپ آمریکایی از دانشگاه ایلینویز، جدا و مستقل از یک‌دیگر این مدل را ایجاد کردند (نگاه شود به «پرتون‌ها برای مبتدیان» در صفحه‌ی 6). جراری در سال 1981 همراه با دانشجوی اش نیتان سایپرت، که هر دو در آن زمان در موسسه علوم ویزمن در اسرائیل مشغول به کار بودند این مدل را بسط و گسترش دادند.

طبق این مدل دو نوع پرتون موجودند: یکی با بار الکتریکی  $1/3+$  و دیگری

بدون بار الکتریکی. علاوه بر این، هر یک از پرتون‌ها دارای هم‌ارزی از پادماده است که دارای بار الکتریکی متضاد یعنی  $1/3-$  و همچنین صفر است. پرتون‌ها، فرمیون (2) یعنی ذرات ماده هستند. هر کوارک و هر لپتون از یک ترکیب متفاوتی از سه پرتون تشکیل شده‌اند. بطور مثال، از ترکیب دو پرتون با بار الکتریکی  $1/3+$  و یک پرتون با بار الکتریکی خنثی، یک کوارک بالا نتیجه می‌شود. نقطه مقابل کوارک بالا که از پادماده تشکیل شده است، متشکل از دو پرتون با بار الکتریکی  $1/3-$  و یک پرتون با بار الکتریکی خنثی است.

نقطه‌ی مقابل فرمیون‌ها، بوزون‌ها (3) هستند. فرمیون‌ها ایجادکننده ماده و بوزون‌ها انتقال‌دهنده‌ی نیروها هستند. طبق مدل، بوزون‌ها از ترکیبات شش‌تایی پرتون‌ها تشکیل شده‌اند. به‌طور مثال بوزون  $W$  با بار الکتریکی مثبت و انتقال‌دهنده‌ی نیروی هسته‌ای ضعیف تأثیرگذار بر روی کوارک‌ها و همچنین لپتون‌ها، از سه پرتون با بار الکتریکی  $1/3+$  و سه پرتون دیگر با بار الکتریکی خنثی تشکیل شده‌اند.

جراری و شیوپ براساس یک سری پیش‌فرض‌های معتبر، فرضیه‌ای در مورد ترکیبات مربوطه‌ی تمامی ذرات نسل اول ایجاد کردند. حتی گلوئون‌ها، انتقال‌دهندگان نیروی قوی هسته‌ای و از این رو ترکیب‌کنندگان کوارک‌ها به پروتون‌ها و نوترون‌ها، طبق مدل دو محقق، از پرتون‌ها ساخته شده‌اند. این امر برای بوزون‌های دیگر انتقال‌دهنده‌ی نیرو نیز صادق است.

نکته مهم در رمزگشایی ساختار درونی کوارک‌ها، لپتون‌ها و بوزون‌ها، در نظرگیری برهمکنش‌های پی‌شمار این ذرات است. به‌عنوان مثال در برخورد یک کوارک بالا با یک کوارک پایین از پادماده، یک بوزون  $W$  مثبت ایجاد می‌شود. بوزون  $W$  به‌نوبه‌ی خود به یک آنتی‌کترون یعنی پوزیترون و یک الکترون - نوترینو فرو می‌پاشد. در مدل جراری و شیوپ برای پرتون‌ها، دو کوارک تصادم‌کننده با یک دیگر هر کدام با سه پرتون، به یک بوزون  $W$  که ترکیب‌کننده‌ی هر سه بار الکتریکی  $1/3+$  و همچنین سه بار خنثی به یک بار مثبت بنیادی (4) کامل یعنی  $1+$  است، ادغام می‌شوند. فروپاشی متعاقب بوزون  $W$  مجدداً منجر به شکل‌بندی جدید 6 پرتون می‌شود: آن‌ها به یک پوزیترون با سه بار  $1/3+$  و یک الکترون - نوترینو با سه بار خنثی تقسیم می‌شوند.

تا کنون این نکته همانند بازی با اعداد بوده و ظاهرن به نظر می‌رسد که موضوع فقط بر سر درست بودن همه چیز به لحاظ عددی است. از یک مدل برای پرتون‌ها انتظار بیشتری می‌رود: این مدل باید کوارک‌ها و لپتون‌ها را با مقدار کمی سنگ‌بناهای بنیادی و تعداد اندکی

قاعده تشریح کند، و ذرات ظاهرن متفاوت را در یک چارچوب توضیحی مشترک برای آشکار ساختن نظم پایه‌ای آن‌ها، گرد هم آورد. مدل **جراری - شیوپ** و همچنین فرضیه‌های رقیب، حداقل برای نسل اول در این مورد موفق‌اند. اما با نگاه به نسل‌های دوم و سوم **کوارک‌ها و لپتون‌ها**، موضوع پیچیده‌تر می‌شود.

**جراری و شیوپ**، نسل‌های بالاتر را بمنابۀ حالت‌های تحریک شده‌ای از نسل اول تفسیر کردند، همانند **الکترونی** که در گردش به دور یک اتم، از سطح پایین‌تری از انرژی به سطح بالاتری از آن برانگیخته می‌شود. قابل تصور است که **پرتون‌های** ذرات نسل‌های بالاتر به دلیل هنوز ناشناخته‌ای، انرژی بیشتر و طبق معادله‌ی اینشتین درباره رابطه جرم و انرژی (5) در نتیجه جرم بیشتری را دارا باشند.

### طراحی مدل‌های فراوان برای پرتون‌ها توسط فیزیک‌دانان

این توضیح ممکن است کاملن دلبخواه به نظر برسد، بویژه به این خاطر که بسیاری از جزئیات طرح هنوز مبهم‌اند. این نکته لزومن مخالفت با این پیشنهاد نیست که اکثر تحقیقاتی که در ابتدای نظریه‌ی **کوارک‌ها** انجام گرفتند، مشکلات مشابهی را با خود به همراه داشتند. شرح‌های دقیق‌تر ریاضی همانند نیروی هسته‌ای قوی، اغلب پسان‌تر به آن اضافه شدند. با این وجود مشکل نسل را باید هنوز حل نشده به حساب آورد. بدین جهت فیزیک‌دانان طرح‌های رقابت‌کننده‌ای همانند **پرتون‌ها**، که دارنده‌ی عددی برای نسل مربوطه‌اند و یا به اصطلاح **فرا رنگی (Hyperfarbe) (6)** که نوع جدیدی از بار و پیوند دهنده‌ی **پرتون‌ها** به **کوارک‌ها** و **لپتون‌ها** است را پیشنهاد کردند.

نظریه‌ی ارائه شده‌ی **پرتون‌ها** در این‌جا، بطور قطع تنها نظریه‌ی موجود نیست. به معنای واقعی کلمه، صدها اثر منتشر شده، ارائه‌کننده‌ی مدل‌های گوناگونی از **پرتون‌ها** هستند. آن‌ها اغلب تفاوت کمی با یکدیگر دارند. برخی از مدل‌ها بجای  $1/3$  بار (طرح شده در مدل **جراری - شیوپ**)  $1/6$  بار و بقیه بجای سه **پرتون**، پنج **پرتون** را برای ترکیب شدن به **کوارک‌ها** و **لپتون‌ها** پیش‌فرض می‌گیرند. نظریه‌های دیگر، ترکیبی از **پرتون‌های فرمیونی** و **بوزونی** را پیشنهاد می‌کنند. برخی از فیزیک‌دانان **پرتون‌ها** را به روش دیگری نسبت به جدول صفحه بعد، به **بوزون‌ها** ترکیب می‌کنند. تعیین مدل نشان‌دهنده‌ی مسیر درست، بدون داده‌های تجربی بیشتر، امکان‌پذیر نیست.

بسیاری از پژوهش‌گران شیفته‌ی اندیشه‌ی امکان‌تشکیل به‌ظاهر کوچک‌ترین واحدهای ماده، از ذرات به‌مراتب کوچک‌تری هستند. آن‌ها همچنین به دلیل دیگری نسبت به **پرتون‌ها** علاقه نشان می‌دهند. در صورتی که این ذرات واقعن وجود داشته باشند، ارائه‌دهنده‌ی اطلاعاتی درباره‌ی راز دیگری خواهند بود. در مدل استاندارد فیزیک ذرات، **میدان هیگز (7)** به عنوان منبع جرم ذرات بنیادین به حساب می‌آید. طبق این مدل، ذرات دارای جرم به هنگام عبور از این میدان همه جا حاضر، نوعی مقاومت حس می‌کنند، در صورتی که مثلن **فوتون‌های بی‌جرم**، بدون ممانعت در این میدان به پرواز خود ادامه می‌دهند.

در صورت یکسان بودن **پرتون‌های** تشکیل‌دهنده‌ی ذرات نسل‌های دوم و سوم با **پرتون‌های** نسل اول، یا باید آن‌ها از لحاظ انرژی برانگیخته شده باشند که به این خاطر جرم بیشتری دارند، و یا این‌که **پرتون‌های** نسل‌های بالاتر با ردیف شدن و یا «پیکربندی» شدن به نحو ویژه‌ای، بطور مثال باعث برهم‌کنش قوی‌تر **کوارک** نسبت به **کوارک بالا** با **میدان هیگز** می‌شوند و بدین طریق **کوارک** **سر جرم** بیشتری خواهد داشت. در تشبیهی می‌توان تصور کرد که با بیرون نگاه داشتن دست از پنجره یک ماشین در حال حرکت، بسته به جهت دست نسبت به باد، برهم‌کنش باد با دست گاهی قوی‌تر و گاهی آهسته‌تر است. اگر روزی ساختار پنهان **کوارک‌ها** و **لپتون‌ها** و تفاوت بین نسل‌ها را بهتر دریابیم، اطلاعات زیادی نیز درباره‌ی **میدان هیگز** به‌دست خواهیم آورد.

مدل‌های **پرتون‌ها** مانند نظریات دیگر مشکلات خود را دارند. تمامی تلاش‌ها در کشف این ذرات فرضی با شکست مواجه شده‌اند. اما این شاید فقط مشکل امکان‌آزمایشی باشد. برخی از مشکلات خود به‌طرز جدایی‌ناپذیری با نظریه مرتبط‌اند، یکی از آن‌ها در رابطه با «حبس شدن» (Confinement) ذرات است. چنین ذراتی با هم نوع خود، حجمی را همانند **کوارک‌های** حبس شده در یک **پروتون** یا **نوترون**، به اشتراک می‌گذارند و اصولن خود را از یک‌دیگر منزوی و مجزا نمی‌کنند و از این‌رو بمنابۀ یک ذره‌ی آزاد یافت نمی‌شوند. در هر «نظریه‌ی حبس» (confining theory) (8) جرم‌های تعیین‌کننده، تناسب معکوسی نسبت به بزرگی حجم دارند: هر چه حجم کوچک‌تر باشد، جرم بزرگ‌تر است. **پرتون‌های** محصور شده در **کوارک‌ها** و در نتیجه خود **کوارک‌ها** نیز می‌بایست جرم بسیار بزرگی داشته باشند. **جرم کوارک‌های بالا** و **کوارک‌های پایین** در **پروتون** قابل اندازه‌گیری و بسیار کوچک‌اند. چگونه ممکن است یک شیء کوچک‌تر از جمع اجزای تشکیل‌دهنده‌ی خود به‌نظر آید، و عجیب‌تر از آن، حتی کوچک‌تر از هر یک از اجزای تشکیل‌دهنده‌ی خود باشد؟

### پرتون‌ها برای مبتدیان

احتمالاً کوارک‌ها و ذرات بنیادین دیگر از پرتون‌ها تشکیل شده‌اند. فیزیک دانان برای توصیف ذرات همچنان فرضی، طرح‌های متفاوتی را تنظیم و ایجاد کرده‌اند. یکی از این آن‌ها، مدل جِرای-شاپ است که به سال 1979 برمی‌گردد. بر اساس این مدل دو نوع پرتون موجودند که هر یک از آنها دارای پادذره خود هستند. پرتون‌ها از طرفی تشکیل‌دهنده‌ی ذرات ماده یعنی فرمیون‌ها (به جدول بالایی در همین‌جا نگاه شود) بوده و از طرف دیگر تشکیل‌دهنده‌ی بوزون‌ها (جدول پایینی در همین‌جا) نیز هستند. بوزون‌ها مسئول انتقال نیروهای بنیادین-اند.

### فرمیون‌ها: ذرات ماده

دو پرتون این مدل را می‌توان بعنوان + و 0 (صفر) نشان داد. پرتون + بار الکتریکی  $1/3+$  و پرتون 0 به لحاظ الکتریکی خنثی است. به علاوه، هر دو این پرتون‌ها دارای همراه مربوطه‌ی خود، از پادماده و با بار مخالف الکتریکی یعنی  $1/3-$  و 0 برای پرتون خنثی هستند. در مدل جِرای-شاپ برای تشکیل هر یک از کوارک‌ها و لپتون‌ها، از سه پرتون استفاده می‌شود.

ذره	محتوای پرتون‌ها	بار الکتریکی
Antielektron (Positron)	+++	+1
Up-Quark	++0	+2/3
Anti-Down-Quark	+00	+1/3
Elektron-Neutrino	000	0
Anti-Elektron-Neutrino	000	0
Down-Quark	-00	-1/3
Anti-Up-Quark	--0	-2/3
Elektron	---	-1

### بوزون‌ها، ذرات انتقال دهنده‌ی نیرو

بوزون‌ها نیز طبق این مدل از پرتون‌ها تشکیل شده‌اند. پرتون‌های گرد آمده در گروه‌های دوتایی یا شش‌تایی، فوتون (ذرات نیروی الکترومغناطیس)، گلوئون (نیروی هسته‌ای قوی) و  $W^-$ ،  $W^+$  و بوزون Z (که هر سه نشان‌دهنده‌ی نیروی ضعیف هسته‌ای‌اند) را تشکیل می‌دهند. جزئیات موجود در ارتباط با گلوئون، ذره‌ی ایجادکننده نیروهای پیوند بین کوارک‌ها در هسته‌ی اتم، در این‌جا نشان داده نمی‌شوند.

ذره	محتوای پرتون‌ها	بار الکتریکی
W-Boson مثبت	+++000	+1
W-Boson منفی	---000	-1
Z-Boson (نوع 4)	---000 +++--- ++--00 +-0000	0
Photon	+-	0

مشکل ظاهر غیر قابل حل است. اما فیزیک دانان تا کنون یک‌بار از چنین مانع مشابه‌ای گذشته‌اند. پیون بمثابه‌ی یک بوزون ویژه، از یک کوارک و آنتی کوارک تشکیل می‌شود و در این جریان همچنین مسئله‌ی حبس پدیدار می‌شود. اندیشه‌ی طراحی شده توسط جفری گلد استون انگلیسی در سال 1961 در سِرِن، باعث شد که بعضی نظریه‌پردازان به این فکر برسند که تقارن‌های موجود در نظریه‌ی پایه‌ای، بر این مشکلات غلبه خواهند کرد. با این دید، چرم اندک پیون واقعن دیگر باعث حیرت و شگفتی نبود.

متأسفانه این اندیشه تنها برای بوزون‌ها صادق است و نه برای فرمیون‌هایی مانند کوارک‌ها. در سال 1979 جراردوس تی هوفت از دانشگاه اوترخت، در ایالت نیدرزاکسن آلمان روی کرد مشابه‌ای را عرضه کرد، که برای فرمیون‌ها نیز صدق می‌کند. در مورد قابل استفاده بودن طرح او بر روی ذرات حقیقی هنوز تصمیم‌گیری نشده است. اما احتمالاً دشواری‌های نظری‌ای که توسط مشکل چرم کوارک‌ها مقابل ما قرار می‌گیرند، آن‌طور که در وحله‌ی اول به نظر می‌رسد، چندان بزرگ هم نیستند.

### همزیستی میان ابرریسمان‌ها و پرتون‌ها؟

فیزیک دانان برای حل مشکل نسل‌ها، از راه‌های دیگری استفاده کرده‌اند. طرح مشهوری، کوچک‌ترین سنگ-بناهای ماده را نه به مثابه ذرات، بلکه به مثابه رشته‌های در حال ارتعاش که ابرریسمان (9) نام دارند، در نظر می‌گیرد. بنابراین هر ذره در مدل استاندارد را می‌توان به مثابه نُتی از موسیقی تصور کرد که بر روی چنین ریسمانی به صدا درمی‌آید. واقعیت در بیان کمی شاعرانه از آن، نمایش ارکستری از سمفونی کیهانی ابرریسمان‌ها خواهد بود. ابرریسمان‌ها و پرتون‌ها لزومن به معنای حذف متقابل یکدیگر نبوده، بلکه قادر به همزیستی مسالمت‌آمیزند. چرا که ابرریسمان‌ها نسبت به کوارک‌ها و لپتون‌ها بسیار کوچک‌ترند و اصولن این دو، از لحاظ واحد اندازه‌گیری با مقیاس‌های بسیار متفاوتی سنجیده می‌شوند. در صورت واقعیت داشتن وجود ابرریسمان‌ها، نه تنها کوارک‌ها و لپتون‌ها بلکه حتی پرتون‌ها، پیش-پرتون‌ها و یا پیش-پیش-پرتون‌ها و بسته به این‌که هنوز چه مقدار لایه‌ی کشف نشده از ماده وجود دارد، می‌توانند از آن‌ها تشکیل شده باشند.

### ساندنس بیلسون تامپسون پژوهش‌گر از دانشگاه

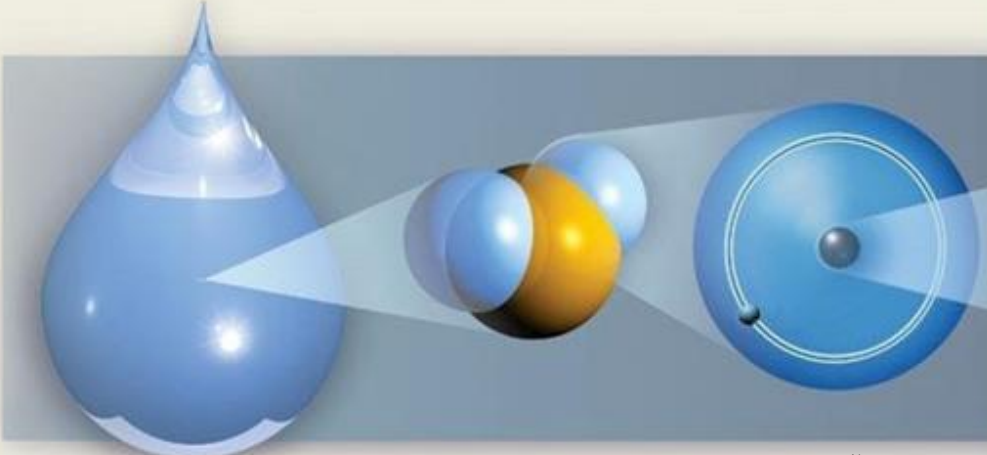
آدلاید در استرالیای جنوبی، در نظریه‌ی جایگزین دیگری، پرتون‌ها را به مثابه‌ی گیسوان پیچیده‌ای در فضا-زمان توصیف کرد. مدل او که برای اولین بار در سال 2005 ارائه شد، هنوز دوران ناپختگی خود را می‌گذراند. با وجود این، فیزیک دانان به ویژه با داشتن امید به پیدا کردن

احتمالی نظریه‌ی کوانتومی گرانش، که زمان درازی است در جستجوی آن‌اند، و بدین طریق ادغام گرانش در مدل استاندارد، پیامدهای این مدل را اکنون بررسی می‌کنند.

در نهایت فیزیک بعنوان علم تجربی باقی خواهد ماند. یک نظریه هر چقدر هم پیچیده باشد، در صورت مناسب نبودن برای اندازه‌گیری‌ها، در حقیقت در آزمون تعیین کننده رد شده است. پس آزمایش‌گران در رد یا اثبات پرتون‌ها چه کار می‌توانند کنند؟ آن‌ها باید انحراف‌های کوچک در پیش‌بینی‌های مدل استاندارد، یعنی تَرَک‌های خُرد در بنای فیزیک ذرات را جستجو کنند. چرا که احتمالاً این پرتون‌ها هستند که توانایی توضیح این انحراف‌های کوچک در پیش‌بینی‌های مدل استاندارد را دارند.

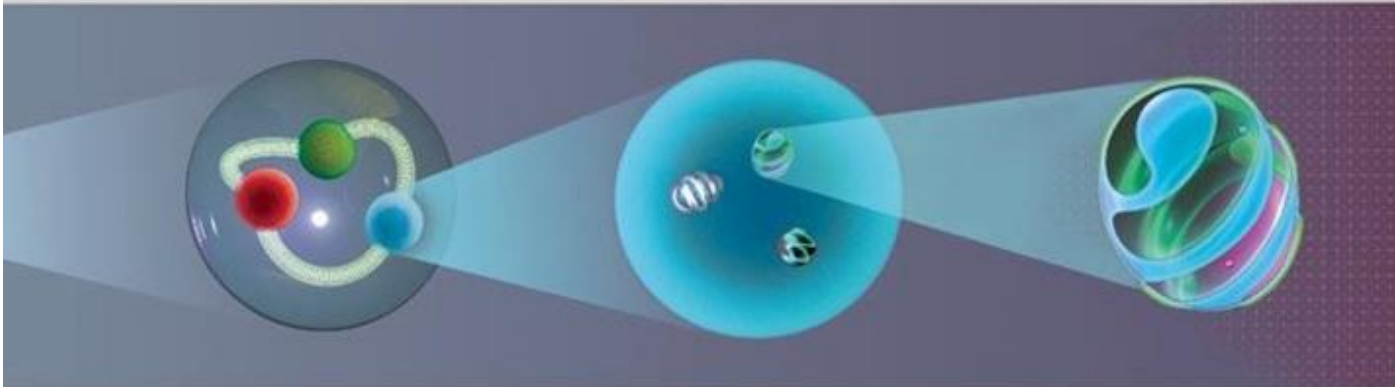
**ماده زیر ذره بین**

پرتون‌ها در صورت موجودیت‌شان به صورت غیرقابل تصویری خُردند. آن‌ها باید نهایتاً در کوارک جا شوند! کوارک‌ها هم باید به نوبه خود به اندازه‌ی کافی خُرد باشند تا بتوانند در پروتون جای گیرند. با این حال آزمایش‌های تاکنون انجام شده تاییدی بر بزرگی احتمالی برابر با صفر کوارک‌ها هستند، بدین جهت ساختار درونی برای این ذرات غیرممکن خواهد بود. با این حال فیزیک دانان با آزمایش‌های آتی درون کوارک‌ها را دقیق‌تر بررسی خواهند کرد. در صورت کشف انبساط کوارک‌ها، فرضیه‌ی پرتون‌ها شدیداً تقویت شده و باعث رشد آن خواهد شد.



مولکول آب  
 $2,8 \times 10^{-10}$  متر

اتم آب  
 $1,1 \times 10^{-10}$  متر



پروتون  
 $1,7 \times 10^{-15}$  متر

کوارک  
 $1,7 \times 10^{-18}$  کوچک‌تر از

پرتون (فرضی)  
نقطه‌ای شکل، یا تشکیل شده از اجزای به مراتب کوچک‌تر



به‌ویژه دو جنبه، ارزش بررسی دقیق‌تر را دارند؛ در وهله‌ی اول اندازه. همان‌گونه که قبلاً ذکر شد مدل استاندارد، کوارک‌ها و لپتون‌ها را به مثابه‌ی ذرات نقطه‌ای، بدون ساختار درونی و با اندازه صفر مورد بررسی قرار می‌دهد. این ذرات در صورت دارا بودن اندازه‌ی متناهی و محدود، دلیل مهمی برای وجود پرتون‌ها ارائه خواهند داد. بر اساس اندازه‌گیری‌های انجام شده در شتاب‌دهنده‌های ذرات، شعاع پرتون‌ها و نوترون‌ها حدود  $10^{-15}$  متر است. بارها برای به‌دست آوردن نشانه و سرنخی از یک بزرگی قابل اندازه‌گیری برای کوارک‌ها و لپتون‌ها کوشش‌هایی شده است. بر اساس آزمایش‌های تا به حال انجام شده، در هر صورت این اندازه کوچکتر از  $1/1000$  و حتی  $0.2/1000$  بزرگی پرتون است. کوارک‌ها و لپتون‌ها یا بسیار بسیار خردند و یا انبساطی برابر با صفر دارند. برای تمایز بین این دو امکان، اندازه‌گیری‌های بسیار دقیق‌تری لازم‌اند. مقدار عظیم اطلاعات LHC و سطح‌های بالاتر انرژی حاصل شونده بعد از مرحله‌ی سرویس و تعمیرات، فرصتی برای انجام این اندازه‌گیری‌های دقیق‌تر را فراهم می‌کنند.

در وهله‌ی دوم، محققان باید اسپین (10) و گشتاور مغناطیسی ذرات را حداقل بر روی لپتون‌هایی مانند الکترون دقیق‌تر بررسی کنند. الکترون را می‌توان در شکل بسیار ساده شده‌ای، همانند گوی چرخانی تصور کرد که بنا بر گفته‌ی فیزیک‌دانان، اسپینی برابر با  $1/2$  دارد. علاوه بر این، ترکیب اسپین و بار، به الکترون گشتاور مغناطیسی می‌بخشد که معنای اش رفتاری همانند آهن‌ریا یا قطب‌های شمال و جنوب برای الکترون است. اگر الکترون واقع نقطه‌ای شکل و دارای اسپینی به اندازه‌ی  $1/2$  باشد، گشتاور مغناطیسی اش مقدار کاملن مشخصی را نشان خواهد داد. در صورت ظاهر شدن نتایج متفاوت در اندازه‌گیری‌ها بر روی الکترون (و همچنین بر روی میون) دلیل مهمی در رد نظریه‌ی نقطه‌ای بودن ذره بدست خواهد آمد.

گشتاورهای مغناطیسی الکترون و میون واقع تفاوت کمی نسبت به گشتاور مغناطیسی یک ذره‌ی نقطه‌ای دارند. اما این تفاوت کوچک هیچ ربطی به پرتون‌ها نداشته و در چارچوب مدل استاندارد قابل توضیح است. هر لپتون با نوعی ابر در حال ارتعاش احاطه شده که در آن ذرات به اصطلاح مجازی، بطور دائم از هیچ به وجود آمده و فوراً دوباره ناپدید می‌شوند. از آنجا که این ابر ذرات فرضی دارای اندازه‌ی متناهی و محدودی است، گشتاور مغناطیسی لپتون را تغییر می‌دهد. این تاثیرگذاری در محدوده‌ی یک هزارم می‌باشد. تاثیرات پرتون‌ها به مراتب کمترند، با این وجود به اثبات رسیده‌اند؛ به‌عنوان مثال در آزمایش Myon-g-2 در فرمی‌لاب در نزدیکی شیکاگو، که دقتی بیش از چهار برابر اندازه‌گیری‌های قبلی را نشان می‌دهد.

### فضایی امیدوارکننده‌تر پس از چند دهه رکود

احتمالاً پرتون‌ها در فروپاشی ذرات دیگر، بطور مثال در فروپاشی یک میون به یک الکترون و یک فوتون، نیز ظاهر می‌شوند. این در صورتی امکان پذیر است که نسل‌های بالاتر، حالت‌های برانگیخته‌شده‌ی نسل اول باشند. فیزیک‌دانان در جستجوی چنین فروپاشی‌ای، با زیر و رو کردن حجم عظیمی از اطلاعات به‌دست آمده در شتاب‌دهنده‌های ذرات، تا کنون نتیجه‌ی مثبتی نگرفته‌اند. در صورت وجود داشتن این فروپاشی، احتمال رخ دادن اش کمتر از یک به 100 میلیارد است.

تمام اندازه‌گیری‌های تا به امروز انجام شده در همخوانی با فرضیه‌ای است که طبق آن کوارک‌ها و لپتون‌ها ذره‌ی نقطه‌ای شکل با اسپینی برابر با  $1/2$  هستند. به همین جهت چند دهه‌ی گذشته، برای کسانی که ما به آن‌ها مشکل نسل‌ها را با شور و شوق به مثابه‌ی نشانه‌ای از پدیده‌های فیزیکی ناشناخته عرضه کردیم، ناامیدکننده بودند. اما اوضاع در این زمینه دوباره در حال تغییر است.

در سال 2011 در LHC در سرن، دسته‌هایی از پرتون‌ها با انرژی‌ای به اندازه‌ی هفت تریلیون الکترون ولت (7 TeV) با یکدیگر برخورد کردند. این 3.5 برابر بیشتر از رکورد جهانی تیوترون (Tevatron) در فرمی‌لاب بوده که برای مدت بیش از ربع قرن دوام آورد. تنها در آن سال در ژنو، تعداد برخوردهای به ثبت رسیده به اندازه‌ی حدود نصف کل تعداد برخوردهای ثبت شده در عرض 28 سال فعالیت شتاب-دهنده‌ی آمریکایی بوده‌اند.

در سال 2012 انرژی LHC با مقدار کمی افزایش به هشت تریلیون الکترون ولت (8 TeV) افزایش داده شد. این افزایش برای جستجوی پرتون‌ها مهم و به معنی افزایش پنج برابری تعداد برخوردها تحت شرایط بالاترین مقدار انرژی بود. به‌خصوص در این برخوردها، برهم-کنش‌هایی در مقیاس‌هایی رخ می‌دهند که تحت آن‌ها، پرتون‌ها می‌توانند خود را آشکار سازند.

علاوه بر این، بهبودهای صورت گرفته در عملیات شتاب‌دهنده در سال 2012، موجب افزایش چهار برابری برخوردها نسبت به قبل شدند. هر دو این‌ها، برخوردهای جالب برای جستجوگران پرتون‌ها را به بیش از 20 بار افزایش دادند. ارزیابی برخوردها تا کنون حد بالای



اندازه‌ی احتمالی پرتون‌ها را به نصف آن کاهش داده است. این مقدار را بار دیگر به‌زودی به نصف آن می‌توانیم تقلیل دهیم – و یا این‌که خود پرتون‌ها را کشف خواهیم کرد.

اگر چه تیوترون واقع شده در فرمی‌لاب در آمریکا، از سال 2011 به حالت تعطیل درآمده و شتاب دهنده‌ی فرمی‌لاب دیگر در مسابقه برای تعیین بالاترین سطح انرژی شرکت نمی‌کند، اما در آینده از فرمی‌لاب برای تحقیقات در این زمینه نیز همچنان استفاده خواهد شد. به‌جای آن، محققان توجه خود را بر روی افزایش شدت پرتوها متمرکز کرده‌اند، تا بدین طریق پدیده‌های نادر را با دقت بی‌سابقه‌ای تحت نظر بگیرند. دو آزمایش برای جستجوی پرتون‌ها از اهمیت ویژه‌ای برخوردارند، از یک‌سو آزمایش پیش‌گفته‌ی Myon-g-2 برای اندازه‌گیری گشتاور مغناطیسی میون‌ها، از سوی دیگر جستجو به‌دنبال میون‌هایی که با فروپاشی به الکترون‌های مجزا، نوترینوی در این فرآیند تولید نمی‌کنند.

شکار زیرساختارهای کوارک‌ها و لپتون‌ها دوباره در حال شتاب گرفتن است. هنگامی که شما در حال مطالعه‌ی این مقاله هستید، من و همکارانم در آشفته بازار عظیم اطلاعات بدست آمده در LHC، در جستجوی نشانه‌ها و تأییدی برای اندازه‌ی متناهی و محدود کوارک‌ها و لپتون‌ها هستیم.

علاوه بر این، ما خواهان مشخص کردن این نکات‌ایم:

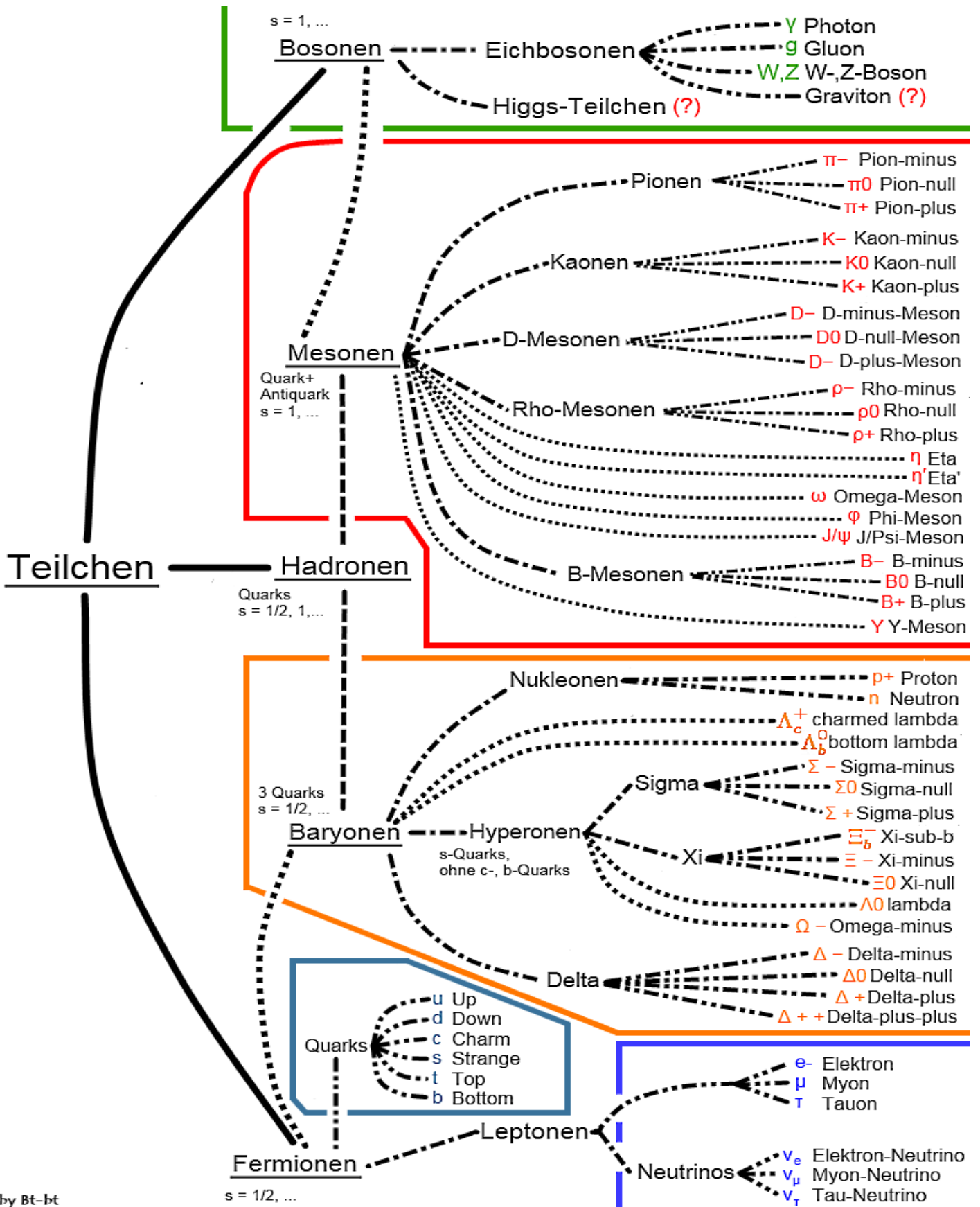
- آیا نسل چهارمی از این ذرات وجود دارد یا نه.
- آیا بوزون‌های انتقال دهنده‌ی نیرو نیز در نسل‌هایی ردیف شده‌اند یا نه.
- و این‌که بخصوص بوزون‌های W و Z از نیروی هسته‌ای ضعیف، دارای خویشاوندان سنگین‌تری هستند یا نه.

همانند زمان آغاز بهره‌برداری از تیوترون در سه دهه‌ی قبل، ماجراجویی علمی دیگری از نو شروع می‌شود. این بار مسیر جستجو، در قلمروی به مراتب عمیق‌تری در درون ذرات زیراتمی خواهد بود. زمان‌های هیجان‌انگیزی در انتظار کسانی است که در جستجوی سنگ بناهای واقع بنیادین جهان‌اند.

منشور علم، فیزیک- ریاضیات-فناوری شماره 1-2015

پی‌نوشت‌ها:

1- این نمودار ذرات زیر اتمی مربوط به قبل از سال 2012 است. (ویکی‌پدیا)



## 2- فرمیون (ویکی‌پدیا)

### انریکو فرمی



در فیزیک ذرات، فرمیون (نامی که توسط پل دیراک با الهام گرفتن از نام خانوادگی انریکو فرمی ابداع شد) به ذره‌ای گفته می‌شود که توسط آمار فرمی-دیراک مشخص شود. مهم‌ترین ویژگی این ذرات پیروی از اصل طرد پاولی است. فرمیون‌ها همه کوارک‌ها و لپتون‌ها و هر ذره مرکبی که از ترکیب تعداد فردی از این‌ها تشکیل شود (مانند باریون‌ها و اتمها و هسته‌های اتمی) را شامل می‌شوند. تفاوت فرمیون با بوزون در این است که بوزون‌ها از آمار بوز-اینشتین پیروی می‌کنند.

یک فرمیون ممکن است یک ذره بنیادی باشد، مانند الکترون یا ممکن است که یک ذره مرکب باشد مانند پروتون. طبق قضیه اسپین-آمار، ذرات با اسپین صحیح بوزون هستند و ذراتی با اسپین نیمه صحیح فرمیون‌های نوترین هستند. در قضیه اسپین - آمار، نشان داده می‌شود که یک تابع موج، با تعویض جای دو فرمیون همسان، منفی می‌شود. البته در سیستم‌های بوزونی، با جابه جایی دو بوزون، تابع موج هیچ تغییری نمی‌کند.

علاوه بر این ویژگی اسپین، فرمیون‌ها یک ویژگی خاص دیگر دارند: اعداد کوانتومی باریون یا لپتونی

پایسته دارند؛ بنابراین آنچه از آن به رابطه اسپین آمار یاد می‌شود، در واقع یک رابطه اسپین آمار-عدد کوانتومی است.

در نتیجه اصل طرد پائولی، در یک لحظه معین، تنها یک فرمیون می‌تواند یک حالت کوانتومی خاص را اشغال کند. بدین معنی که اگر چند فرمیون توزیع احتمال فضایی یکسانی داشته باشند، حداقل یک ویژگی هر فرمیون، مانند اسپین باید با سایرین متفاوت باشد. فرمیون‌ها را معمولاً به ماده نسبت می‌دهند در حالی که بوزون‌ها معمولاً حامل نیرو هستند، اگرچه که در وضعیت کنونی فیزیک ذرات، تمایز میان این دو مفهوم روشن نیست. در دماهای پایین فرمیون‌ها، در ذرات بدون بار ابرشارگی، و در ذرات باردار، ابررسانایی از خود نشان می‌دهند. فرمیون‌ها مرکب مانند پروتون و نوترون سنگ بنای ماده معمولی هستند.

در مدل استاندارد، دو گونه فرمیون بنیادی وجود دارد: کوارک‌ها و لپتون‌ها. در کل ۲۴ فرمیون متفاوت وجود دارد: ۶ کوارک و ۶ لپتون، که هر کدام با پاد ذره متناظرش همراه است.

۱۲ کوارک:

۶ ذره  $(u \cdot d \cdot s \cdot c \cdot b \cdot t)$  به همراه ۶ پاد ذره متناظر  $(\bar{u} \cdot \bar{d} \cdot \bar{s} \cdot \bar{c} \cdot \bar{b} \cdot \bar{t})$

۱۲ لپتون:

۶ ذره  $(e^- \cdot \mu^- \cdot \tau^- \cdot \nu_e \cdot \nu_\mu \cdot \nu_\tau)$  به همراه ۶ پاد ذره متناظر  $(e^+ \cdot \mu^+ \cdot \tau^+ \cdot \bar{\nu}_e \cdot \bar{\nu}_\mu \cdot \bar{\nu}_\tau)$

## 3- بوزون (ویکی‌پدیا)

در فیزیک ذرات، بوزون‌ها (Boson) ذره‌هایی با عدد اسپین درست هستند که از آمار بوز-اینشتین پیروی می‌کنند و بر اساس نام ساتیندرا بوز نام‌گذاری شده‌اند. در مقابل آن‌ها فرمیون‌ها با عدد اسپین نیم-درست هستند که از آمار فرمی-دیراک پیروی می‌کنند. بوزون‌ها برخلاف فرمیون‌ها از اصل پاولی پیروی نمی‌کنند و می‌توانند چندین بوزون هم‌زمان در یک حالت یا آستانش (state) کوانتومی قرار گیرند. بوزون‌ها ممکن است ساده و بنیادین باشند مانند فوتون‌ها، یا مرکب باشند مثل مزون‌ها. همه بوزون‌ها دارای اسپین صحیح هستند؛ برخلاف فرمیون‌ها که دارای اسپین نیم-صحیح هستند. این با قضیه اسپین-آمار مطابقت دارد: در تئوری میدان کوانتوم نسبیتی ذره‌ها با اسپین صحیح بوزون هستند و ذره‌ها با اسپین نیمه صحیح فرمیون هستند. همه بوزون‌ها ذرات مرکب‌اند به جز ۵ ذره بنیادی که در مدل استاندارد ذرات آمده‌اند:

- ۴ بوزون پیمان‌ه‌ای:
- گلوئون  $g$
- $Z$
- $W^\pm$
- فوتون  $\gamma$
- بوزون هیگز  $H$ .

#### 4- بار الکترون (ویکی‌پدیا)

بار بنیادی یکی از ثابت‌های مهم و معروف در علم فیزیک است و مقدار آن در دستگاه اس‌آی می‌باشد؛ این مقدار برابر با بار الکتریکی یک پروتون یا قدر مطلق بار الکتریکی الکترون. قابل توجه است که بار الکترون یا پروتون یا هر ذره دیگر ناوردا است یعنی با داشتن سرعت بار آن تغییر نمی‌کند. مقدار بار بنیادی در دستگاه سی‌جی‌اس برابر با  $4/80.320.425 \times 10^{-10}$  استت کولن است. نخستین اندازه‌گیری دقیق بار الکترون توسط رابرت میلیکان در سال ۱۹۰۹ انجام گرفت. در آزمایش قطره روغن، در اثر برخورد پرتوهای ایکس با مولکول‌های تشکیل دهنده هوا الکترون‌ها تولید می‌شوند. قطره‌های بسیار ریز روغن با گرفتن الکترون بار منفی به دست می‌آورند. این قطره‌ها میان دو صفحه افقی جای می‌گیرند و جرم یک قطره با اندازه‌گیری سرعت سقوط آن معین می‌شود. وقتی که صفحه‌ها بردار می‌شوند، سرعت سقوط قطره بردار تغییر می‌کند، زیرا قطره بردار دارای بار منفی به وسیله صفحه بالایی که دارای بار مثبت است جذب می‌شود. مقدار بار صفحه‌ها را می‌توان طوری تنظیم کرد که قطره‌های روغن به صورت معلق باقی بمانند و سقوط نکنند. بار روی قطره روغن را از روی جرم قطره و بار صفحه‌ها پس از انجام تنظیم بار می‌توان محاسبه کرد.

#### 5- هم‌ارزی جرم و انرژی (ویکی‌پدیا)

در فیزیک، معادله جرم-انرژی مفهومی فرمول‌بندی شده توسط آلبرت اینشتین است که رابطه میان جرم و انرژی را توضیح می‌دهد. این معادله بیانگر اصل هم‌ارزی جرم و انرژی است که از فرمول زیر پیروی می‌کند  $E=mc^2$ . به عبارتی، انرژی برابر است با حاصل ضرب جرم در مجذور سرعت نور در این فرمول E به معنای انرژی یک سامانه فیزیکی، m جرم سیستم و c سرعت نور در خلاء تقریباً  $3 \times 10^8$  m/s می‌باشد. از آنجا که سرعت نور در مقایسه با واحدهای روزمره عدد بسیار بزرگی است، این فرمول نشان می‌دهد که هر مقدار کوچکی از ماده حاوی مقدار بسیار زیادی از انرژی است. مقداری از این انرژی ممکن است به صورت نور و گرما توسط فرایندهای شیمیایی یا هسته‌ای آزاد شود. همچنین این فرمول بیان می‌کند که یک‌هائی از جرم به یک‌هائی از انرژی (بدون توجه به اینکه کدام یک از سامانه‌های اندازه‌گیری بکار رود) تبدیل می‌شود. هم‌ارزی جرم و انرژی در اصل به عنوان یک پارادوکس در نسبیت خاص بوده که توسط آنری پوانکاره شرح داده شده و اینشتین آن را در سال ۱۹۰۵ در مقاله آیا اینرسی یک جسم به انرژی درونش بستگی دارد؟ ارائه کرده‌است. اینشتین اولین کسی بود که پیشنهاد داد هم‌ارزی جرم و انرژی یک اصل کلی بوده و نتیجه‌ای از تقارن فضا-زمان است.

#### 6- فرارنگی (Hyperfarbe) (ویکی‌پدیا)

تنها 3 "بار" بنیادین (و نیروهای مرتبط با آنها) در طبیعت وجود دارند- رنگ، فرارنگ و الکتروسیته. نیرویی که کوارک‌ها و لپتون‌ها را منسجم و به هم پیوسته نگاه می‌دارد بقایای نیروی حتی قوی‌تر بین بارهای فرارنگ می‌باشد. فرارنگی خود را با انرژی بسیار بالایی مانند هزار میلیارد الکترون ولت و همچنین در فاصله‌ای کمتر از  $10^{-17}$  سانتیمتر آشکار می‌سازد...

<https://www.zeit.de/1981/33/tohuwabohu-im-innern-der-materie/seite-3>

#### 7- میدان هیگز (1-ویکی‌پدیا) (2- سایت بیگ‌بنگ - bigbangpage.com)

• توضیح اول - بر اساس نظریه‌ی "پیتر هیگز" فیزیک‌دان اسکاتلندی که در سال ۱۹۶۴ مطرح شد، میدان هیگز، از لحاظ نظری میدانی از انرژی است که در سرتاسر کیهان نفوذ کرده است. به گزارش بیگ‌بنگ، هیگز معتقد است این میدان تعریفی برای ذرات بنیادی کیهان است که چگونه جرم‌دار شده‌اند، زیرا در دهه ی ۱۹۶۰ در واقع مدل استاندارد فیزیک کوانتوم نتوانست دلیلی برای جرم این ذرات پیدا کند. او پیشنهاد کرد که این میدان در کل فضا وجود دارد و ذرات این جرم را در اثر فعل و انفعالات‌شان با آن، بدست می‌آوردند. در حالی که در ابتدا هیچ آزمایشی مبنی بر درستی این تئوری وجود نداشت، در طول زمان به تنها توضیح برای جرم تبدیل شد و به طور گسترده‌ای سازگار با مدل استاندارد تلقی شد. با این‌که بسیار عجیب است، عملکرد هیگز (یا همان



میدان هیگز) در میان عموم فیزیک‌دانان و همچنین در مدل استاندارد مورد قبول واقع شده است.

- توضیح دوم - یک نتیجه این تئوری این است که میدان هیگز می‌تواند به عنوان یک ذره ظاهر شود، همان‌طور که این اتفاق برای میدان‌های دیگر در فیزیک کوانتوم می‌افتد، این ذره بوزون هیگز نام دارد. کشف بوزون هیگز یک هدف بزرگ برای فیزیک تجربی است، ولی مشکل این‌جاست که این تئوری چرم بوزون هیگز را پیش‌بینی نمی‌کند. اگر شما ذرات را در شتاب‌دهنده ذرات با انرژی کافی برخورد دهید، بوزون هیگز باید آشکار شود. ولی بدون دانستن چرم آن، دانشمندان نمی‌دانند چقدر انرژی برای برخورد لازم است. یکی از امیدهای دانشمندان این بود که با برخورددهنده هادرونی بزرگ (LHC) به اندازه کافی انرژی برای تولید بوزون هیگز تولید شود، چون نسبت به بقیه شتاب‌دهنده‌های ذرات ساخته شده بسیار قوی‌تر بود. در ۴ جولای ۲۰۱۲، فیزیک‌دانان برخورددهنده هادرونی بزرگ بیان کردند که نتایج تجربی سازگار با ذره بوزون هیگز کشف کردند، سپس شواهدی برای تایید این ذره افزایش یافت و منجر به کسب جایزه نوبل فیزیک سال ۲۰۱۳ برای پیتر هیگز و فرانسوا انگلر شد. همان‌طور که فیزیک‌دانان در صدد یافتن ویژگی‌های بوزون هیگز هستند، هم‌زمان ویژگی‌های فیزیکی میدان هیگز را نیز درک می‌کنند.

<https://bigbangpage.com/astromy/%D9%85%DB%8C%D8%AF%D8%A7%D9%86-%D9%87%DB%8C%DA%AF%D8%B2-%DA%86%DB%8C%D8%B3%D8%AA%D8%9F>

## 8- Confinement (ویکی‌پدیا)

Confinement به معنی حبس یا محدودیت در فیزیک ذرات است و پدیده‌ای را تشریح می‌کند که ذرات با دارا بودن بار رنگ بصورت مجزا یافت نمی‌شوند. بدین‌گونه، کوارک‌ها و گلوئون‌ها فقط در حالت ارتباط و پیوند وجود دارند و اصولن نمی‌توانند به عنوان ذره آزاد اندازه‌گیری شوند.

### یافته‌های تجربی

تا به حال در طبیعت و در آزمایش‌ها تنها اجسام به لحاظ رنگی خنثی یعنی منزون‌ها (یک کوارک و یک پادکوارک) و یا باریون‌ها (سه کوارک) مشاهده شده‌اند. کوارک‌ها و گلوئون‌ها تنها به شکل "حبس شده" در این حالت‌ها و نه بصورت آزاد یافت می‌شوند. تلاش‌ها برای "جدا کردن" کوارک‌ها تحت انرژی‌های بالا باعث جفت شدن خود بخود و ناگهانی کوارک‌ها و آنتی کوارک‌ها می‌شود. فرض بر این است که گلوئون‌ها می‌توانند گوی گلوئون یا گلوئونیم (\*) یعنی حالت‌های پیوندی قابل اندازه‌گیری بدون کوارک‌های ظرفیتی (valence quark) (\*\*\*) را شکل دهند.

(\*) - گوی گلوئون یا گلوئونیم در فیزیک ذرات، ذره فرضی‌ای می‌باشد که از گلوئون‌ها (و کوارک‌های دریایی) تشکیل شده است. (\*\*\*) - کوارک‌های ظرفیتی، کوارک‌هایی هستند که مهم‌ترین خواص یک هادرون مانند چرم، تکانه، بار الکتریکی، اسپین (اسپین از خاصیت‌های بنیادی ذرات زیراتمی است که معادل کلاسیک ندارد و یک خاصیت کوانتومی به‌شمار می‌آید. نزدیک‌ترین خاصیت کلاسیک به اسپین اندازه حرکت زاویه‌ای است) را معین می‌کنند. در پروتون این وظیفه‌ها را یک کوارک پایین و دو کوارک بالا انجام می‌دهند. نام‌گذاری بر اساس الکترون‌های ظرفیتی (ظرفیت الکترون یا والانس تعداد الکترون‌هایی است که یک اتم باید دریافت کند یا از دست بدهد تا به حال پایدار برسد. مقدار والانس برای هر عنصر مشخص و ثابت است ولی می‌تواند چند مقدار را قبول کند مثلاً اکسیژن برای رسیدن به حالت پایدار باید دو اتم بگیرد، پس دوظرفیتی است) در فیزیک اتمی که اصولن مسئول خواص شیمیایی اتم‌ها می‌باشند، انجام می‌گیرد.

<https://de.wikipedia.org/wiki/Confinement>

<https://de.wikipedia.org/wiki/Valenzquark>

<https://de.wikipedia.org/wiki/Valenzelektron>

<https://fa.wikipedia.org/wiki/%D8%A7%D9%84%DA%A9%D8%AA%D8%B1%D9%88%D9%86%E2%80%8C%D9%87%D8%A7%DB%8C%D8%B8%D8%B1%D9%81%DB%8C%D8%AA>

<https://fa.wikipedia.org/wiki/%DA%A9%D9%88%D8%A7%D8%B1%DA%A9>

## 9- نظریه ابررسمان (ویکی‌پدیا)

نظریه ابررسمان (Superstring theory) تلاشی در زمینه توضیح همه ذرات و نیروهای بنیادی طبیعت در قالب یک نظریه یکتا، از طریق مدل کردن آنها به صورت لرزشهای ریزمانهای ابرمتقارن، می‌باشد. نظریه ابررسمان، نامی کوتاه شده برای نظریه رسمان ابرمتقارن است، زیرا برخلاف نظریه رسمان بوزونی، این نظریه نسخه‌ای از نظریه رسمان است که مفاهیم فرمیون و ابرتقارن را دربرمی‌گیرد. از زمان انقلاب دوم ابررسمان، پنج نظریه ابررسمان به عنوان حدود متفاوت یک نظریه یکتا به نام نظریه ام، در نظر گرفته می‌شوند.

### ابعاد اضافی

فضای فیزیکی ما تنها سه بُعد دارد و یک نظریه فیزیکی باید این مسئله را در نظر داشته باشد. اما هیچ چیز یک نظریه فیزیکی را از داشتن بیش از چهار بُعد باز نمی‌دارد. در مورد نظریه رسمان، سازگاری اقتضا می‌کند که فضا-زمان ده بُعد  $(1+3+6)$  داشته باشد. این واقعیت که ما تنها سه بُعد فضا را می‌بینیم، ممکن است بتوان با یکی از این دو مکانیزم توضیح داد: یا ابعاد اضافی در مقیاس بسیار کوچکی فشرده شده‌اند، و یا در غیر این صورت جهان ما ممکن است بر روی یک زیرخمینه سه بُعدی زندگی کند که متناظر با یک غشا است که تمام ذرات شناخته شده به علاوه گرانش در آن محصور شده‌اند. اگر ابعاد اضافی فشرده شده باشند، شش بُعد اضافی باید شکل خمینه کالابی-یائو داشته باشند. در چارچوب کامل تر نظریه ام، این ابعاد باید شکل یک خمینه جی را داشته باشند. نظریه ابررسمان تنها نظریه‌ای نیست که ابعاد اضافی پیشنهاد می‌دهد. می‌توان آن را به عنوان توسعه نظریه کالوزا-کلین دانست که نظریه‌ای  $4+1$  بُعدی از گرانش را ارائه کرد.

## 10- اسپین (ویکی‌پدیا)

اسپین از خاصیت‌های بنیادی ذرات زیراتمی است که معادل کلاسیک ندارد و یک خاصیت کوانتومی به‌شمار می‌آید. نزدیک‌ترین خاصیت کلاسیک به اسپین اندازه حرکت زاویه‌ای است. در مکانیک کوانتوم عملگر اسپین درست از همان قانون جابجایی عملگر اندازه حرکت زاویه‌ای پیروی می‌کند. از لحاظ ریاضی اسپین‌های گوناگون جنبه‌های نمایش یافته (Representation) مختلف گروه  $SO(3)$  هستند در حالی که اندازه حرکت زاویه‌ای از جبر لی  $SO(3)$  پیروی می‌کند. همان‌طور که ذره‌های بنیادی جرم و بار متفاوت دارند، اسپین متفاوت نیز دارند. اسپین یک ذره می‌تواند صفر یا هر عدد صحیح و نیم صحیح بزرگ‌تر از صفر باشد، یعنی  $1/2$  یا  $1$  یا  $3/2$  و الی آخر. مثلاً اسپین الکترون  $1/2$  و اسپین فوتون  $1$  و اسپین گراویتون  $2$  است. به ذراتی که اسپین نیم صحیح دارند اصطلاحاً فرمیون و به ذراتی که اسپین صحیح دارند بوزون می‌گویند. ثابت می‌شود که فرمیون‌ها و بوزون‌ها از قوانین آماری متفاوتی پیروی می‌کنند که به اولی آمار فرمی-دیراک و به دومی آمار بوز-اینشتین می‌گویند.