تا بی‌نهـــــــــایت

کاوش در زیرساختار کوارک و لپتون

دون لینکولن/ ترجمهٔ احمد توحیدی

اشاره

اوُگوستوس دِمورگان، ریاضی‌دان دورهٔ ویکتوریایی، می‌گویـــد: «کک‌های بزرگ در پشـــت خود کک‌های کوچکـــی حمل می‌کنند که آن‌هـــا را نیش می‌زنند و کک‌های کوچک کک‌های کوچک‌تری و به همین ترتیب تا بی‌نهایت.»

اگرچه شعر طنزآمیز جاناتان سویفت (۱۷۳۳م) به نام «دربارهٔ شعر: یک سرود» به تاریخ ادبیات ربط دارد، اما به سادگی می‌توان آن را استعاره‌ای از طبیعت دانست. داســـتان بلند کاوش در اجزای سازندهٔ نهایی ماده تا ماجرایی طولانی در پی یافتن ساختاری بنیادی برای ماده بود اما به‌تدریج معلوم شـــد که ماده از آجرهای ســـاختمانی کوچک و کوچک‌تری ساخته شده است. یعنی ماده از ملکول‌ها و ملکول‌ها از اتم‌ها، و اتم‌ها نیز از الکترون‌ها و هسته‌ها تشکیل شده‌اند. تازه، هسته حاوی پروتون‌ها و نوترون‌هاســـت، و نوکلئون‌ها (هستک‌ها) نیز خود متشکل از کوارک‌ها هستند. این پیشروی به ساختار ریزتر در شکل شماره ۱ به تصویر درآمده است.

امروزه داستان هستهٔ اتم، در هر اثر علمی، دیگر یک داستان قدیمی شناخته‌شـــده است، اما جزئیات آن و جدیدترین شناخت ما از آجرهای ساختمان نهایی ماده هنوز به‌طور کامل درک نشده است، بنابراین ارزش آن را دارد که ایده‌های جدید در این مورد نقد و بررسی و بازخوانی شوند.

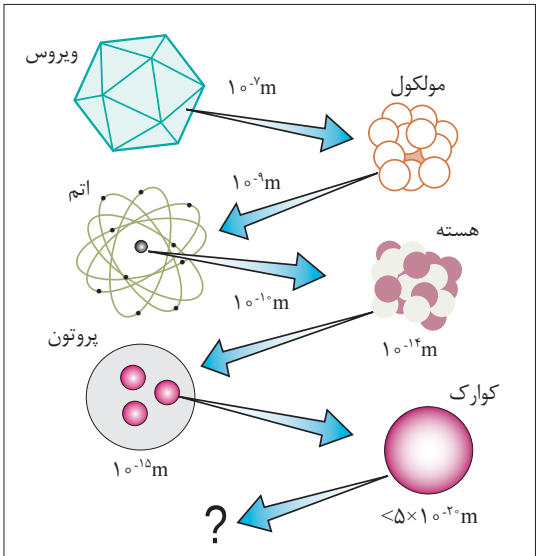
مدل استاندارد

با کشـــف پروتـــون و نوترون در ســـه دههٔ اول قرن بیســـتم دانشمندان تصور می‌کردند که شناختشان از زیرساختار اتمی ماده احتمالاً به خوبی کامل شده است. تا اینکه در دو دههٔ بعد (۱۹۳۰م تا ۱۹۵۰م) فیزیک‌دان‌ها شروع به کشف ذراتی کردند که تا آن زمان در ماده معمولی یافت نمی‌شد. این ذرات میون، پیون و دلتا نام گرفتند. بررسی‌هایی که با استفاده از باریکه‌های پرتوهای کیهانی فضایی و باریکه‌های حاصل از شتاب‌دهنده‌های پیشرفتهٔ نوین ذرات انجام شد پیامدش افزایش ناگهانی واقعی از ذرات غیرمنتظره بود. این ذرات مجموعهٔ گیج‌کننده‌ای از انواع جرم‌های گوناگون، بارهای الکتریکی، اسپین‌ها و برهم‌کنش‌های خاص بودند و ویژگی‌های بســـیاری را با خود همراه داشتند؛ از این‌رو دانشمندان به آن‌ها حیوانات وحشی نام دادند و در «باغ وحش ذرات» جایشـــان دادند. چگونگی کشف این ذرات خود داستانی جذاب است که با جزئیات خود در کتاب‌های فیزیک ذرات آمده است.

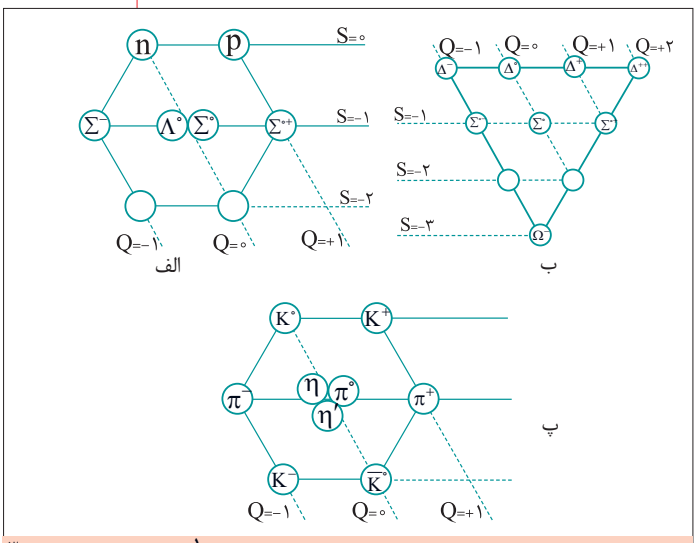
در سال‌های ۱۹۶۰م، معلوم شد دسته‌ای از ذرات، که به‌طور توضیح‌ناپذیری برهم‌کنش‌های یکسانی با نیروی هسته‌ای قوی، یعنی نیرویی که هسته را نگه می‌دارد، دارند، خودشان احتمالاً دارای ساختار درونی‌اند. دانشمندان این دسته از ذرات را به نام کلی «هادرون» نامگذاری کردند.

هادرون‌ها دو دسته‌اند: باریون‌ها و مزون‌ها*. شکل ۲ تعدادی از هادرون‌های شناخته‌شـــده را نشان می‌دهد. آن‌ها بر حسب بار الکتریکی (Q) و شـــگفتی(S) مرتب شـــده‌اند. شـــگفتی (strangeness) عددی کوانتومی است و برای توصیف طرح‌های مشاهده‌شـــده لازم اســـت که در ادامه، با استفاده از کوارک‌ها، توضیح داده خواهد شد.

این وضعیت تا میانهٔ دههٔ ۱۹۶۰م کاملاً مشـــخص نشده بود. آزمایش‌ها حاکـــی از این بود که باریون‌هـــا و مزون‌ها از ذرات کوچک‌تر درونی تشکیل شـــده‌اند: لذا این ذرات را «**پارتون**» نامیدند و آن‌ها را به‌عنوان قسمتی از پروتون محسوب کردند که در پی آزمایش‌های بســـیار در دسترس قرار می‌گرفتند. **موری گلمن**، فیزیک‌دان آمریکایی، (تصویر ۳)، از لحاظ نظری دستهٔ جدیدی از ذرات را به نام «**کوارک**» پیشنهاد کرد؛ به این شرح که باریون‌ها از سه کوارک تشکیل شده‌اند، در حالی که مزون‌ها متشـــکل از یک مادهٔ کوارکی و یک جفت پادمادهٔ کوارکی‌اند. زمانی طول کشید تا در اوایل دههٔ ۱۹۷۰م در آزمایش‌ها ثابت شد که پارتون‌های پیشنهادی اندازه‌گیری‌های اولیه و ساختار مشاهده‌شـــده در شـــکل ۲ در واقع همان کوارک‌های گلمن هستند، با این تفاوت که گلمن فقط سه کوارک پیشنهاد کرده بود، اما در آزمایش‌های بعدی معلوم شـــد در هر باریون شش کوارک وجود دارد. کوارک‌ها فرمیون‌هایی با اسپین $\frac{1}{2}$ هستند و نام‌هایی تفننی (شوخ‌آمیز) مثل بالا، پایین، شگفت، افسون، ســـر و ته دارند. بار الکتریکی کوارک‌های بالا، افسون و سه برابر با $+\frac{2}{3}$ بار پروتون است، در حالی که بار الکتریکی کوارک‌های پایین، شگفت و افسون برابر است با $-\frac{1}{3}$ بار پروتون. کوارک‌های



▲ شکل ۱. کاوش برای مشخص شدن آجرهای ساختمان نهایی ماده به یک سلسله احتمالات منجر شده، هرکدام از آن‌ها در ترازی کوچک‌تر از دیگری تا امروز جایگزین یکدیگر شده‌اند.



▲ شکل ۲. یک نمونهٔ کوچک از هادرون‌ها: الف) باریون‌ها با اسپین $\frac{1}{2}$، ب) باریون‌ها با اسپین $\frac{3}{2}$، و ج) مزون‌ها با اسپین ۰. آن‌ها به وسیلهٔ بار الکتریکی (Q) و شگفتی (S، که در مقاله به‌طور مختصر دربارهٔ آن توضیح داده می‌شود) مرتب شده‌اند و پروتون (P) و نوترون (N) در بالاترین ذراتِ (الف) قرار دارند. هادرون‌های شناخته‌شدهٔ بسیاری کشف شده‌اند، اما این طرح‌ها الهام‌بخش مدل کوارک بودند.

بالا و پایین در پروتون‌ها و نوترون‌ها یافت می‌شوند. پروتون از دو کوارک بالا و یک کوارک پایین و نوترون از یک کوارک بالا و دو کوارک پایین تشکیل شده است. چهار کوارک دیگر هم در آزمایش‌های فیزیک ذرات مشاهده شده‌اند؛ اما آن‌ها ناپایدارند و گسترهٔ طول‌عمرهایی از 10^{-8}s (کوارک‌های شگفت) تا 10^{-25}s (برای کوارک‌های سر) دارند. گسترهٔ جرم کوارک‌ها در جدول ۱ آورده شده است.

پژوهشگران افزون بر کوارک‌ها، دستهٔ دیگری از ذرات به نام «**لپتون**» را نیز کشف کردند. این دسته، در ابتدا به الکترون بسیار سبک و نوترینو محدود می‌شدند، اما امروز لپتون‌ها به‌عنوان ذراتی تعریف می‌شوند که نیروی قوی هسته‌ای را تجربه نمی‌کنند. مقدار بار الکتریکی شناخته‌شده‌ترین لپتون باردار، الکترون برابر با بار پروتون، اما از لحاظ علامت مخالف آن است. دو لپتون باردار الکتریکی دیگر «**میون**» و «**تأو**» نام دارند. همچنین «**نوترینو**»ها دسته دیگری از لپتون‌ها به‌شمار می‌روند که از لحاظ بار الکتریکی خنثی هستند و فقط نیروی ضعیف را تجربه می‌کنند. همهٔ لپتون‌ها «**فرمیون**»اند. ویژگی فرمیون‌ها در جدول ۱ نشان داده شده است.

این ذرات را می‌توان در سه خانوادهٔ مشخص به نام «نسل‌ها» گروه‌بندی کرد. نسل اول سازندگان مادهٔ معمولی و عبارت‌اند از کوارک‌های بالا و پایین، الکترون، و نوترینوی الکترون. نسل دوم شامل کوارک‌های افسون و شگفت و نیز میون و نوترینوی میون‌اند، و بالاخره نسل سوم شامل چهار ذره باقی‌ماندهٔ دیگر تأو و نوترنیوی تأو، کوارک‌های سر و ته است. یافته‌ها دانشمندان را به این تردید انداخته است که شاید کوارک‌ها و لپتون‌ها خود دارای ساختار ژرف‌تر هستند که تا حدودی دارای نظم بیشتری است.

جدول ۱ . ویژگی‌های کوارک و لپتون در یک نگاه. بار الکتریکی برحسب یکای بار الکتریکی پروتون و جرم (دریرانترها) برحسب یکای GeV است.

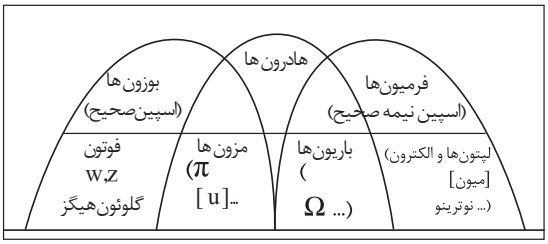
بار الکتریکی	نسل			ذره
	۳	۲	۱	
$+\frac{2}{3}$	سر (۱۷۳)	افسون (۱/۳)	بالا (۰/۰۰۲)	کوارک‌ها
$-\frac{1}{3}$	ته (۴/۲)	شگفت (۰/۰۹۶)	پایین (۰/۰۰۵)	
-۱	تأو (۱/۸)	میون (۰/۱)	الکترون (۰/۰۰۰۵)	لپتون‌ها
۰	نوترینوی تأو (<۰/۰۲۴)	نوترینوی میون (<۰/۰۰۰۱۷)	نوترینوی الکترون (<۰/۰۰۰۰۰۰۰۱۵)	

باغ‌وحش ذرات

سال‌های اوایل دهۀ ۱۹۶۰م زمان گیج‌کننده‌ای برای فیزیک‌دان‌ها بود. صدها ذره با مجموعۀ خیره‌کننده‌ای از خواص کشف شده بودند. ذراتی با «**اسپین**» صحیح (**بوزون‌ها**) و اسپین نیمه‌صحیح (فرمیون‌ها). ذرات دارای بارهای الکتریکی (۲، ۱، ۰، ۱-، ۲-) بر حسب یکای بار پروتون بودند. ذرات برهم‌کنش بسیار قوی (هادرون‌ها) از لحاظ الکترومغناطیسی (دارای بار الکتریکی) یا برهم‌کنش بسیار ضعیف (گوناگون) داشتند. برخی از ذرات دارای خواص عجیبی بودند. آن‌ها به آسانی تولید می‌شدند اما بسیار آهسته وا می‌پاشیدند. معمولاً ذرات با آهنگ مشابهی تولید یا واپاشیده می‌شوند. بنابراین به این ذرات عجیب «شگفت» نام دادند و لذا عدد کوانتومی جدیدی (شگفتی) برای آن‌ها ابداع شد. آن‌ها تابع موج ذرات تقریباً مشابه، پاریتۀ مثبت یا منفی یکسانی داشتند. در این چارچوب زمانی بسیار مشکل بود تا بفهمیم چه اتفاقی در حال روی دادن است.

در آغاز، فیزیک‌دان‌ها براساس اولین یا دومین خواص ذرات، پیوندی میان آن‌ها برقرار ساختند و اندکی برهم‌نهی میان دو گروه پیدا کردند. آن‌ها بدون شناخت نظریۀ کوارک و مدل استاندارد، بلکه با یک انتخاب طبیعی، ذرات را براساس جرم‌هایشان به چهار گروه دسته‌بندی کرده‌اند: بدون جرم، جرم پایین (در حدود MeV ۱)، جرم متوسط (در حدود MeV ۱۰۰) و جرم بالا (در حدود MeV ۱۰۰۰ یا بالاتر). البته امروز می‌دانیم که این طبقه‌بندی مناسب نیست.

در نهایت معلوم شد که مسئله دارای ابعاد چندگانه بالایی است و برای فهمیدن آن به قدرت نیرومند مدل استاندارد نیازمند است. اما طرح‌های (الگوهای) دسته‌بندی ذرات بودند که امکان ابداع مدل استاندارد را فراهم کردند. اگرچه، شکل زیر فاقد خواص بار الکتریکی و پاریته ذرات است، اما پیچیدگی برهم‌نهی و طبقه‌بندی آن‌ها را نشان می‌دهد.



▲ باغ‌وحش ذرات
ذراتی را که پیش از سال ۱۹۶۴م کشف شده‌اند می‌توان در دسته‌های مختلفی مرتب کرد. شکل بالا نشان می‌دهد که یک امکان جدید تقسیم ذرات به هادرون/غیرهادرون و فرمیون/بوزون است و این انتخاب منحصربه‌فردی نیست. میون (که زمانی مزون میون نامیده می‌شد) هم در طبقه‌بندی مزون و هم در طبقه‌بندی لپتون ظاهر می‌شود، زیرا جرمش ($108MeV$) مشابه مزون‌های دیگر است. اکنون دیگر می‌دانیم که میون یک لپتون است، چون تحت‌تأثیر نیروی هسته‌ای قوی قرار نمی‌گیرد. وقتی مدل کوارک پیشنهاد شد، به روشنی معلوم شد که میون حاوی کوارک نیست، بلکه یک مزون واقعی است. اکنون میون به‌عنوان یک لپتون شناخته می‌شود، که درواقع نمونه سنگین‌تر الکترون است.

جدول تناوبی

مدل کوارک بخشی از تعداد زیاد طرح‌های نهفته‌شده در باغ‌وحش ذرات مذکور در قبل را توضیح می‌دهد. به‌طور مشابه، طرح‌های تکراری نسل‌های لپتون و کوارک حاکی از ساختار نهفته‌شدۀ دیگری در آن‌هاست. اما شاید یک مثال تاریخی آشنا بهتر بتواند ارتباط میان آن‌ها را نشان دهد. در سال ۱۸۶۹م دیمیتری مندلیف، شیمی‌دان روسی، جدول تناوبی عناصر شیمیایی را، مشابه آنچه امروز به کار می‌بریم، پیشنهاد کرد. او عناصر شناخته‌شده آن روز را به‌صورت شبکه‌ای دوبعدی تنظیم کرد. در این جدول عناصر شیمیایی با واکنش‌پذیری مشابه در تعدادی ستون قرار گرفته‌اند. در هر ستون عناصر سبک‌تر در بالا قرار گرفته‌اند و با افزایش جرم رو به پایین حرکت می‌کنند. شکل ۴ جدول تناوبی را نشان می‌دهد و رنگ‌آمیزی آن ارتباط ساختار اتمی را که در شکل ۵ به‌طور آشکار به نمایش درآمده است، مشخص می‌سازد.

دانشمندان جوان اکنون می‌توانند ویژگی‌های جدول تناوبی را توضیح دهند، که در آن ستون‌ها برحسب پیکربندی مدارهای اتمی تعریف شده‌اند، در حالی که افزایش جرم در هر ردیف به دلیل افزایش تعداد پروتون‌ها و نوترون‌هاست. به‌طور خلاصه، اطلاعات ساختار اتمی عناصر است که نظم و ترتیب برقرارشده در جدول تناوبی را توضیح می‌دهد. در شکل ۵ ساختار اتمی با مدارهای کروی S، مدارهای قطبی P، مدارهای دو قطبی d و در آخر مدارهای f نشان داده شده است.

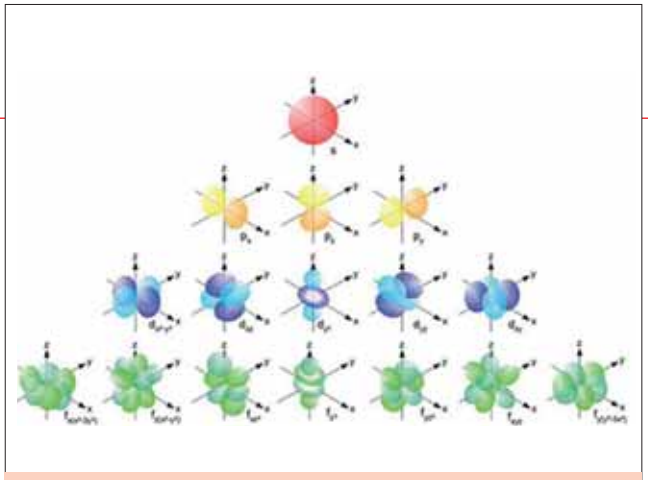
به هر حال تقریباً پیش از سال ۱۹۲۰م در همین حدود، یعنی قبل از کشف هستۀ اتم و پروتون و انتشار معادله **شرودینگر**، دانشمندان به مشاهده طرح‌های ساده در جدول تناوبی پرداختند بدون آنکه دلیل این طرح‌ها را درک کنند. تا اینکه با تلاش‌هایشان امکان درک طرح‌های دیده‌شده در جدول ۱ را فراهم کردند.

در جدول ۱، برخلاف جدول تناوبی شیمیایی، ردیف‌ها مشابه یکدیگرند و ذراتی که در یک ردیف قرار دارند بار الکتریکی یکسانی دارند. افزون بر این، جرم ذرات از نسل اول به دوم و سوم افزایش می‌یابد. این طرح‌ها توضیح داده نمی‌شوند، اما، با ادامۀ پیشینۀ تاریخی جدول تناوبی، طبیعی است که گمان کنیم زیرساختار داشتن کوارک‌ها و لپتون‌ها دلیل این طرح‌ها باشد. فراموش نشود که هیچ مدرک تجربی برای پشتیبانی این فرضیه نداریم، اما بی‌شک این نظریه پردازی پذیرفتنی است.

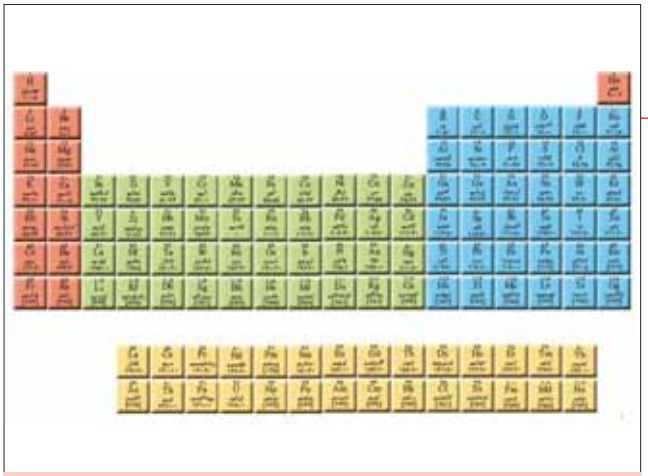
ایده‌های نظری

وقتی ایده‌ای به ذهن پربار فیزیک‌دان‌های خلاق وارد می‌شود، طولی نمی‌کشد که نظریه‌های پیشنهادی آن‌ها رخ می‌نماید و ایده‌های بسیاری ارائه می‌شوند. ایده‌های «ابر ریسمان‌ها» و «پریون‌ها» دو نمونه از این حدس و گمان‌ها هستند که با استفاده از آن‌ها می‌توان طرح‌های دیده‌شده در جدول ۱ را توضیح داد.

شاید ابر ریسمان‌ها شناخته‌شده‌ترین مدل باشند. «ابر ریسمان» عبارت کوتاه‌شده‌ای برای نظریۀ ابرتقارنی ریسمان است که نخست در سال ۱۹۷۱م پیشنهاد شد. ابر ریسمان یک تقارن نظری



▲ شکل ۴. جدول تناوبی ویژگی‌های تکرارشونده دارد، با عناصری مانند هیدروژن، لیتیم، سدیم و غیره که در ستونی شدیداً واکنش‌پذیر قرار دارند، در حالی که گروه هلیم، نئون، آرگون، و ... گازهای بی‌اثر (نجیب) و در ستون دیگری جای دارند. در این جدول مدارهای S، P، d و f به ترتیب با رنگ‌های صورتی، زرد و آبی و سبز مشخص شده‌اند.



▲ شکل ۵. ساختار اتمی ویژگی‌های کلیدی جدول تناوبی را توضیح می‌دهد. واکنش‌پذیری یک عنصر با تعداد الکترون‌هایی که مدارهای موجود دارد تعیین می‌شود. مدارهای S، P، d و f به ترتیب با رنگ‌های صورتی، زرد، آبی و سبز مشخص شده‌اند.

پیشنهادی است که هنوز مشاهده نشده است. یک نظریه وقتی ابرتقارن است که در معادله‌های توصیف‌کنندهٔ آن، بتوان عبارت توصیف‌کنندهٔ فرمیون‌ها و بوزون‌ها را با یکدیگر تعویض کرد بدون آنکه معادله‌های آن‌ها تغییر کند. شایان توجه است که هیچ نظریهٔ پذیرفته‌شدهٔ رایجی این تقارن را تأیید نمی‌کند.

خاستگاه «ریسمان» فرضیه‌ای ابتکاری است. برخلاف روند تاریخی این تصور که کوچک‌ترین آجر ساختمانی یک شبه ذرهٔ نقطه‌ای است، در واقع یک ریسمان، شیء بسیار کوچکی است که می‌توان در کل آن را یک رشته اسپاگتی پخته‌شده یا یک حلقهٔ هولاهوپ میکروسکوپی تصور کرد. این دو شکل هندسی به ترتیب ریسمان‌های باز و بسته نامیده شده‌اند.

نظریه ابرریسمان توضیح می‌دهد که کوارک‌ها و لپتون‌های مشاهده‌شده، به سادگی مدهای ارتعاشی، ساکن مختلف ریسمان‌ها هستند

واقعیت بسیار پیچیده است. تصور می‌شود که ابرریسمان‌ها اشیائی شش‌بُعدی‌اند و به بیان دقیق‌تر ارتعاش‌ها بعدهای چندگانه دارند. (گفته می‌شود نظریه ابرریسمان یازده‌بُعدی است، به‌ویژه چهار بُعد آشنای فضازمان، شش بُعد اختصاصی برای ریسمان‌ها و یک بُعد اضافی است که به نظریه‌پردازان اجازهٔ سازگاری نظریه‌های مختلف ریسمان را می‌دهد که واقعاً آن‌ها همچون چیز یکسانی‌اند.)

شش‌بُعد اضافی هر یک از ریسمان‌ها، بُعدهای فیزیکی با اندازهٔ بسیار کوچکی هستند که غالباً تصور می‌شود طول آن‌ها از مرتبهٔ طول پلانک است. در حالی که نظریهٔ ابرریسمان‌ها یک نظریه سودآور روشنفکرانه، با ویژگی توضیحی جذاب است، در عین حال از این واقعیت رنج می‌برد که با فناوری موجود فاقد پیش‌بینی‌های آزمودنی است. این انتقاد برخی از افراد را به جایی رسانده است که ادعا می‌کنند ابرریسمان یک نظریه علمی نیست.

به هر حال نظریهٔ ابرریسمان ایدهٔ بزرگی است، که اگر درست باشد، احتمالاً می‌تواند نظریهٔ همه‌چیز باشد. دیگر ایده‌های نظری چندان خواهان فراگیری ندارند. یکی از این ایده‌های نظری صرفاً به سادگی سطح کوچک‌تر دیگری از ماده را پیشنهاد می‌کند. در اصل نامی روی آن گذاشته شده است که ویژگی‌هایی برای اجزای سازندهٔ ذرات کوارک‌ها و لپتون‌ها را توصیه می‌کند. مدل‌های بسیاری با نام‌های مختلف برای ذرات پیشنهادی ارائه شده است، اما بیشترین نام پذیرفته‌شده «پریون» است.

یکی از نظریه‌های مربوط به پریون‌ها دو دسته پریون را پیشنهاد می‌کند: دسته اول پریون با بار الکتریکی برابر با $+\frac{1}{3}$ بار پروتون، دستهٔ دوم پریونی که از لحاظ بار الکتریکی خنثی است. پادمادهٔ پریون‌ها بار الکتریکی مخالف دارند. پریون‌ها و پادپریون‌ها در کوارک‌ها و لپتون‌ها در سه گروه یافت می‌شوند و برای مثال، سه پریون با مجموعه بار الکتریکی ۱+ ذره‌ای می‌سازند که «پوزیترون» نام‌گذاری شده است. دو پریون باردار و یک پریون خنثی کوارک بالا را می‌سازند. ساختار پریونی کوارک‌ها و لپتون‌ها در جدول ۲ دیده می‌شود.

افزون بر این، ظرفیت پریون پیشنهادی برای ذرات آن است که می‌تواند نیروهای بنیادی را با یکدیگر مبادله کند. بنابراین احتمالاً بر پایه نظریهٔ پریون می‌توان مانند آنچه در شکل ۶ نشان داده شده است برای فرایندهای شناخته‌شده، هم‌ارز طرح‌های نمودارهای فاینمن را رسم کرد. تولید یک جفت پوزیترون و نوترینوی الکترونی در فرایند نابودی یک کوارک بالا و پادکوارک پایین با مبادله بوزون w ($ud^- \to w^+ \to e^+ \nu_e$) را می‌توان با مبادلهٔ ضربدری دو پریون بازنمایی کرد.

در جامعهٔ علمی، نظریه‌های پریونی، به دلایل گوناگون، چندان مورد توجه قرار نمی‌گیرند: نخست اینکه هیچ شاهد تجربی از وجود (واقعیت) آن‌ها پشتیبانی نمی‌کند؛ دیگر آنکه مدل‌های پریونی گوناگونی با ویژگی‌های مختلف برای پریون‌ها پیشنهاد شده است. و بالاخره بیشتر مدل‌ها، مانند آنچه در مقاله توصیف شده است، به طور قطعی وجود (واقعیت) سه نسل کوارک‌ها را توضیح نمی‌دهند. نسل‌های اضافی می‌توانند وجود داشته باشند زیرا کوارک‌ها و لپتون‌ها حالات برانگیخته ساختار پریونی توصیف‌شده در مقاله‌اند و یا نسل‌های اضافی می‌توانند شامل پریون‌های اضافی باشند.

در میان انتقادهای بسیار جدی از پریون‌ها، یکی پرسش آماری فرمیون‌هاست. پریون‌ها به نظر می‌رسد فرمیون‌هایی با اسپین $\frac{1}{2}$ هستند. آن‌ها در گروه سه‌تایی می‌توانند ذراتی (اشیایی) با اسپین $\frac{3}{2}$ تولید کنند؛ همچنین می‌توانند ذراتی با اسپین $\frac{3}{2}$ نیز بسازند، لیکن چنین ذراتی هنوز مشاهده نشده‌اند. افزون بر این، با محدودیت‌های

در واقع یک ریسمان، شیء بسیار کوچکی است که می‌توان در کل آن را یک رشته اسپاگتی پخته‌شده یا یک حلقهٔ هولاهوپ میکروسکوپی تصور کرد. این دو شکل هندسی به ترتیب ریسمان‌های باز و بسته نامیده شده‌اند

یک مدل پریونی پیشنهادشده برای کوارک‌ها و لپتون‌ها. علامت (+) بازنمای یک پریون باردار، O و $\overline{O}$ بازنمای بار خنثی (ماده و پادماده) و علامت (–) بازنمای یک پادپریون باردار است.

محتویات پریونی	بار الکتریکی	ذره
+++	+۱	پوزیترون e^+ (پادماده الکترون)
++O	$+\frac{۲}{۳}$	کوارک بالا U
+OO	$+\frac{۱}{۳}$	پادماده کوارک پایین $\overline{d}$
OOO, $\overline{O}\overline{O}\overline{O}$	۰	Ve نوترینوی الکترون $\overline{Ne}$ پادنوترینوی الکترون
$-\overline{O}\overline{O}$	$-\frac{۱}{۳}$	کوارک پایین d
$--\overline{O}$	$-\frac{۲}{۳}$	پادماده کوارک بالا $\overline{U}$
---	-۱	الکترون $\overline{e}$

تجربی در مورد اندازهٔ کوارک‌ها و لپتون‌ها (در ادامه مقاله توضیح داده خواهد شد) بیشینهٔ اندازهٔ آن‌ها باید درست کمتر از $۱۰^{-۱۸}m$ باشد. با استفاده از استدلال‌های ساده‌ای بر پایه اصل عدم قطعیت هایزنبرگ یا رابطه دوبروی، می‌توان محدودیت‌های تقریبی گذاشته‌شده روی جرم پریون‌ها را به دست آورد.

ما با استفاده از رویکرد اصل هایزنبرگ $\Delta x.\Delta p \sim \frac{\hbar}{۲}$ و کاربرد یکاهای طبیعی (به‌طور مثال $c=۱$) شروع می‌کنیم. در محدودهٔ ذرات بدون جرم $E=pc$، می‌توان پیش‌بینی کرد که $\Delta x.\Delta E \sim \frac{\hbar c}{۲} \sim ۰/۲GeVfm$ است $۱fm=۱۰^{-۱۵}m$. اگر بیشینهٔ اندازهٔ پریون $۱۰^{-۱۸}m$ را در رابطه بالا قرار دهیم $\Delta E \sim ۲۰۰GeV$ به دست خواهد آمد. با استفاده از اصل هم‌ارزی انرژی/ جرم با تقریب یک مقیاس جرم از مرتبه ۲۰۰GeV یا بزرگ‌تر را می‌توان برای جرم طبیعی پریون‌ها به دست آورد.

جرم کوارک‌ها و لپتون‌های نسل اول را به یاد آورید. آن‌ها همه از مرتبهٔ ۱MeV یا پایین‌تر از آن‌اند. یعنی وقتی جرم‌های سه پریون را با جمع کنیم، احتمالاً جرم خالص را ۶۰۰MeV یا بیشتر به دست خواهیم آورد. برای اینکه جرم آخرین کوارک یا لپتون از مرتبه ۱MeV به دست آید باید انرژی بستگی (پیوندی) منفی و بزرگ باشد که با این شرایط امکان ندارد؛ بنابراین با توجه به این موضوع سطح اضافه دیگری از پیچیدگی به ایدهٔ پریون افزوده خواهد شد.

اعتراض‌های فنی دیگری نسبت به ایدهٔ پریون مطرح می‌شود. افزون بر این، هیچ دلیلی نداریم که فکر کنیم حتی اگر پریون‌ها وجود داشته باشند، آن‌ها آخرین لایه از ساختار زیراتمی‌اند. امکان وجود پیش پریون یا پیش از پریون‌هایی محتمل است، و این‌ها همه در مسیری رو به پایین در مقیاس ابریسمان قرار می‌گیرند و یا بسیار مشابه چیزی هستند که هنوز نقش آن به تصور ما در نیامده است. کوتاه سخن اینکه پریون مدل چیزی است که باید به آن با نگاهی تردیدآمیز نگریست.

نتایج تجربی

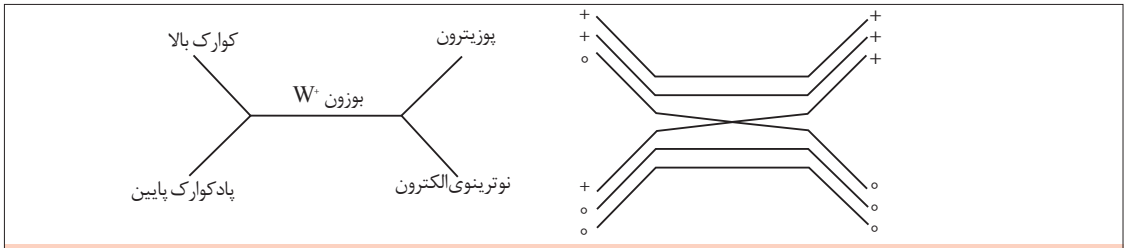
این واقعیت که باید برای وجود نسل‌های ذرات توضیحاتی داده شود، هنوز باقی مانده است. حتی باید با اظهار نظری بسیار متهورانه توضیح داده شود که چرا سه نسل کوارک و لپتون مورد نیاز مدل استاندارد است. به هر حال، بررسی کوارک‌ها و لپتون‌ها و کاوش برای انحرافات از رفتار شبه‌ذره‌ای آن‌ها به نگرشی خالی از تعصب و رویکردی تجربی نیازمند است. اگرچه این نوع بررسی پرسش زیرساختار کوارک و لپتون را حل نمی‌کند، لیکن شروع بررسی رفتار شبه‌ذره‌ای نبودن ذرات پیش‌درآمدی است برای آغاز درک ما از این پرسش.

این ایده‌ها تازه نیستند بلکه در اوایل سال‌های دهه ۱۹۸۰م پیشنهادشده‌اند.

بررسی‌های جدیدی در مورد آنچه «برهم‌کنش‌های تماسی» نامیده می‌شوند در برخوردهندهٔ بزرگ هادرونی، مشهور به LHC انجام می‌شود. برهم‌کنش‌های تماسی اشاره بر آن دارند که تکانهٔ هر ذرهٔ انتقال‌یافته در هر برهم‌کنش ناچیز است و فقط جرم آن اهمیت دارد. این موضوع کلاً مشابه نظریهٔ برهم‌کنش‌های ضعیف است که انریکوفرمی در سال ۱۹۳۳م پیشنهاد کرد. تفاوت میان فرمول‌بندی فرمی برای نیروی ضعیف و رویکردهای بسیار جدید، آن است که برداشت‌های جدید به‌طور آشکاری شامل تکانه‌های بوزون‌های مبادله‌کننده W و Z در مدت برهم‌کنش است. در برداشت فرمی انتقال انرژی در واپاشی تبازایی از مرتبه ۱MeV مورد بررسی قرار می‌گیرد که در مقایسه با جرم‌های بوزون W (۸۰/۳GeV) و بوزون Z (۹۱GeV) قابل چشم‌پوشی است.

به‌طور مشابه، در پژوهش‌های جدید، برای ساختار زیراتمی کوارک و لپتون قلمرویی را کاوش می‌کنند که در آن فیزیک نوین بسیار اهمیت دارد. این موضوع دلالت بر آن دارد که انرژی کافی برای تولید ذرهٔ تکثیرکننده که اساساً در حال سکون است وجود دارد. بنابراین نظریه بدون اشاره به برداشتن عبارت «تکانهٔ تکثیرکننده» فرمول‌بندی شده است.

شتاب‌دهندهٔ **LHC** بالاترین انرژی در جهان را تولید می‌کند و در آن اندازه‌گیری‌های بسیاری در شبکه‌های متعدد (مانند کوارک، لپتون‌ها در حالت نهایی) و در پیکربندی‌های اسپینی مختلف برای ذرات تکثیرکننده انجام می‌شود. گسترهٔ کمینه جرم‌های ذرات تکثیرکننده از چند TeV تا ۱۵TeV بالا می‌رود. برای انتخاب ۱۰TeV به‌عنوان مرتبه‌ای از مقیاس برای اندازهٔ جرم کمینهٔ یک ذرهٔ تکثیرکننده و ادامه دادن استدلالی مشابه آنچه در قسمت بالا مورد بحث قرار گرفت، که شامل اصل عدم قطعیت هایزنبرگ بود، می‌توان یک اندازهٔ بیشینه برای کوارک‌ها و لپتون‌ها (حدود $۲\times۱۰^{-۲۰}m$) در نظر گرفت. شاید شگفت‌آور باشد که محدوده‌های کوارک‌ها و لپتون‌ها اندازهٔ یکسانی دارند و این موضوع حاکی از آن است که کوارک‌ها توسط نیروی قوی تولید می‌شوند و لپتون‌ها که توسط نیروی بسیار ضعیف‌تر برهم‌کنش‌های الکترومغناطیسی تولید می‌شوند باید کمیاب‌تر باشند، اگرچه معلوم شده است که اندازه‌گیری لپتون‌ها بسیار ساده‌تر و دارای عدم قطعیت نظام‌مند ابزاری کوچک‌تری‌اند. این



شکل ۶. شکل (format) پریونیِ تراز آشنایِ کوارک و لپتون را می‌توان با استفاده از نمودارهای فاینمن نمایش داد. خطوط قرمز که با علامت + نشان داده شده‌اند بازنمای پریون‌ها با بار الکتریکی $+\frac{۱}{۳}$ هستند، در حالی‌که خطوط آبی که با علامت ○ نشان داده شده‌اند، بازنمای پریون‌ها با بار الکتریکی خنثی می‌باشند. شکل اشاره‌ای به ساختار پریونی بوزون‌های حامل نیرو دارد. در این حالت، بوزون W^+ حاوی ۶ پریون، با مشخصات (+++○○○) است.

وضعیت برخلاف ایدهٔ تولید عادی‌تر کوارک‌ها است که از آمار بالایی سود می‌برد. شاید اهمیت دارد که توجه کنیم محدوده‌های تجربی رایج فقط با ضریب دو یا سه یکسان‌اند و به‌طور ثابتی در حال پیشرفت هستند.

آینده

با توجه به محدودیت‌های سختی که روی بیشترین اندازهٔ کوارک‌ها و لپتون‌ها گذاشته شده است، آینده چه خواهد شد؟ نخست بسیار اهمیت دارد که بفهمیم شتاب‌دهندهٔ LHC تاکنون فقط ۳درصد از کل باریکه‌ای را که انتظار می‌رود در طول عمر خود توزیع کند ثبت کرده است. با رشد آمار و اصلاح نظام‌مند عدم قطعیت‌ها، می‌توان منتظر افزایش محدوده‌های گذاشته‌شده روی آزمایش‌های LHC، شاید از چند تا ده برابر، باشیم.

برخی از دانشمندان رویکرد دیگری را انتخاب کرده‌اند. به بیان دقیق‌تر آن‌ها به آزمایش‌های به اصطلاح فرادقیق روی میز نگاه می‌کنند که انتظار می‌رود اندازه‌گیری‌های انجام‌شده محدوده‌های قابل مقایسه‌ای با محدوده‌هایی که به وسیلهٔ LHC اکنون انجام می‌شود داشته باشند. غالباً این آزمون‌ها شامل اندازه‌گیری دقیق برهم‌کنش‌های اتمی پاریته یا پژوهش‌هایی برای شکست تقارن‌اند. این پژوهش‌ها نسبت به پژوهش‌های زیرساختار کوارک و لپتون هرچه بیشتر نظریه‌های فیزیک جدید را بررسی می‌کنند. جوهر (اصل ـ مغزه) این پژوهش‌ها اندازه‌گیری‌های دقیق نیروی ضعیف است؛ زیرا نیروی ضعیف تنها نیروی شناخته‌شده‌ای است که می‌تواند هویت لپتون یا کوارک را تغییر دهد (مثلاً، میون به الکترون و نوترینوی‌های همراهش وا می‌پاشد)، امکان بسیاری وجود دارد که انحراف‌هایی از پیش‌بینی‌های مدل استاندارد بتوانند اثرهای زیرساختاری کوارک و لپتون را حذف کنند. هنوز خیلی زود است که بدانیم بُروندادِ این اندازه‌گیری‌ها چه خواهد بود، اما آن‌ها بی‌شک رهگذر پژوهشی امیدوارکننده‌ای هستند.

از سوی دیگر، ایدهٔ ساختن شتاب‌دهنده‌ای حتی بزرگ‌تر از LHC به نام برخورددهنده هادرونی بزرگ (VLHe) در دست اقدام است و در این خصوص پیشنهادهای رقابتی دیگری ارائه شده است که نشان می‌دهد مکان‌های استقرار شتاب‌دهنده‌های آینده احتمالاً چین و یا نزدیک سرن است. پیش‌بینی می‌شود این شتاب‌دهنده‌ها برخورددهنده‌های پروتون با انرژی ۱۰۰GeV باشند که تقریباً هفت برابر بالاتر از انرژی ۱۳ یا ۱۴TeV برخورددهنده LHC‌اند. این شتاب‌دهنده‌ها اگر ساخته شوند، انرژی آن‌ها تقریباً از مرتبهٔ اندازهٔ اصلاح محدودیت‌های گذاشته‌شده روی اجزای سازندهٔ کوارک و لپتون است و با آنچه اکنون به وسیلهٔ LHC به دست می‌آید قابل مقایسه خواهد بود. اما افق زمانی برای این تسهیلات پیشنهادشده احتمالاً بیست یا سی سال است، بنابراین مدت زمانی پیش از تحقق بخشیدن به این پیشرفت‌ها وجود دارد.

خلاصه و تأملات شخصی

خوب، پاسخ چیست؟ آیا کوارک‌ها و لپتون‌ها ذراتی مرکب‌اند؟ (دارای اجزای سازنده‌اند؟) آیا لایهٔ دیگری در پیاز اتمی وجود دارد؟ اگر از من بپرسید فکر می‌کنم احتمالاً جواب مثبت است. اما نباید شما حرف مرا باور کنید. واقعاً من مطمئن نیستم. این خود یک خطای علمی است که شما بر پایهٔ اعتقاد به آنچه فکر می‌کنید ولی مطمئن نیستید مرتکب اشتباهی شوید. با وجود این، به جِدّ فکر می‌کنم این فرضیه‌ای است که ارزش آزمودن را دارد. اینکه چرا کوارک و لپتون نسل‌های چندگانه دارند رازی است و باید توضیح داده شود حرفی نیست.

جای امیدواری است که وقتی شتاب‌دهندهٔ LHC با انرژی اضافی کار کند به این پرسش پاسخ واضحی داده شود. اما من به مقاله‌های منتشرشده امیدواری کمتری دارم. مسلم است که دانشمندان، هم‌چنین من، به بررسی داده‌های LHC ادامه خواهند داد (بیست برابر یا بیشتر شدن داده‌ها چشم‌انداز هیجان‌انگیزی در پی خواهد داشت) اما به‌طور روزافزونی آشکار شده است که باید ایده‌های دیگری نیز بررسی شوند. شاید اکنون زمان آن رسیده است که گامی در جهت پیشنهادهای خلاقانه برداشته شود.

راز نسل‌های کوارک و لپتون و پرسش از زیرساختارشان برای استادان یا معلمانی که در دورهٔ کارشناسی و یا حتی در دبیرستان تدریس می‌کنند یک واقعیت است و احتمالاً پاسخ مشخصی برای آن تاکنون دریافت نشده است. برخلاف سازوکار **هیگز** و اَبرتقارن، برای این معما راه‌حل احتمالی و دائمی به‌دست نیامده است. به‌طور خلاصه، جامعهٔ پژوهشی حرفه‌ای برای این معما شانه‌هایش را بالا می‌اندازد و می‌گوید: «من نمی‌دانم». شاید همین حالا فردی که در کلاستان نشسته است منشأ بینش تازهٔ بعدی باشد؛ میدانی باز باز (حوزه‌ای که نتیجه‌اش نامشخص است).

منابع

1. And SoAdinfinitum: The Search for Quark and Lepton Substructure
2. Don Lincoln, Fermilab, Batavia.11
3. THEPHYSICS TEACHER *Vol.56,April2018

مرجع

یادداشت: خاستگاه این عبارات تاریخی است. باریون از واژه یونانی «barys» به معنای سنگین و مزون از واژهٔ «mesos» به معنای متوسط گرفته شده است. وقتی این ذرات کشف شدند، باریون‌ها (مثلاً پروتون و نوترون) در میان سنگین‌ترین ذرات زیراتمی قرار گرفتند، در حالی‌که مزون‌ها گرایش جرمشان در گسترهٔ ۱۰درصد تا ۴۰ درصد از جرم پروتون قرار داشت. برعکس ذراتی که در دسته لپتون‌ها (Leptos) به معنای سَبک، جای داشتند از باریون‌ها سبک‌تر بودند. الکترون که شناخته‌شده‌ترین لپتون است جرمی تقریباً در حدود $\frac{۱}{۲۰۰۰}$ جرم پروتون دارد. اما، با توجه به آنچه در مقاله توضیح داده شد آن معنای ضمنی فیزیکی که برای این نام‌ها پیشنهاد شده بود برای مدت طولانی باقی نماند.