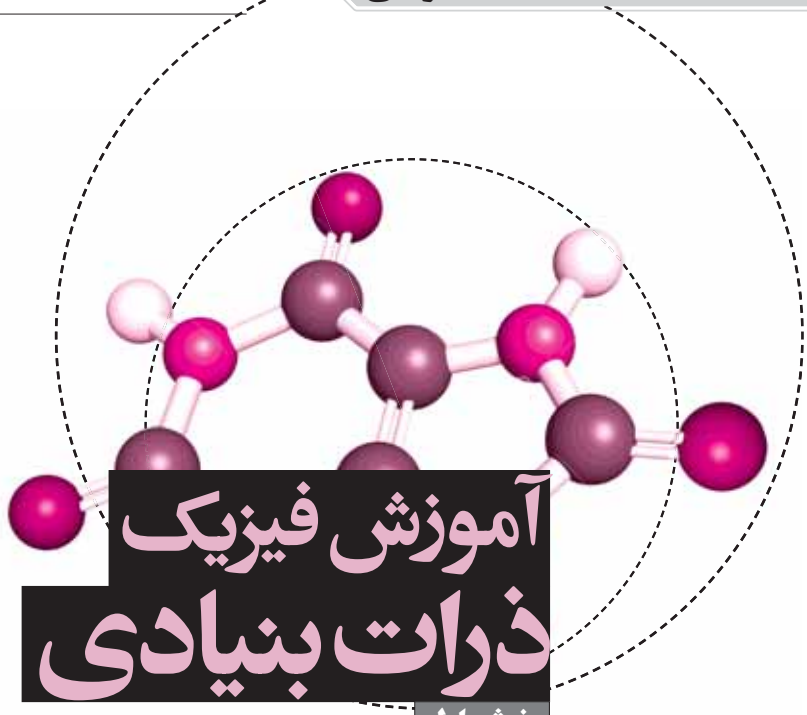


آموزش فیزیک ذرات بنیادی

بخش اول

آرت هابسون
ترجمهٔ مرجان روح‌نواز

اشاره

فیزیک ذرات بنیادی یکی از مباحث فیزیک جدید است که توجه و علاقه دانش‌آموزان و عموم مردم را به خود جلب کرده است و شناخت مفاهیم مربوط به آن بدون پرداختن به جزئیات ریاضی می‌تواند نقش مؤثری در فیزیک دورهٔ دبیرستان داشته باشد.

کلیدواژه‌ها: ذرات بنیادی، نظریهٔ میدان کوانتومی، فیزیک جدید، الکترودینامیک کوانتومی

در این مقاله پیشنهادهایی برای آموزش فیزیک ذرات بنیادی، که اغلب فیزیک انرژی‌های زیاد نامیده می‌شود، برای شاگردان دبیرستان یا دانشجویان سال‌های اول رشته‌های غیر علوم مطرح می‌شود. در برخی موارد در این مورد صرفاً فهرستی از ذرات مختلف همراه با ویژگی‌های آن‌ها ارائه می‌شود بدون اینکه به ساختار فراگیر آن‌ها اشاره شود. باید گفت این رهیافت تهیهٔ فهرست کلی روش مناسبی برای بی‌معنا جلوه‌دادن یک موضوع علمی جذاب است! شاگردان برای درک سازوکار ذرات بنیادی به چارچوبی بنیادی نیاز دارند که نظریهٔ میدان کوانتومی[1] (QFT) است. هم معلمان و هم شاگردان با ذکر این مطلب بر خود می‌لرزند، اما صبور باشید. ما در اینجا تنها دربارهٔ شناخت مفاهیم این نظریه بحث خواهیم کرد نه جزئیات ریاضی آن، و اگر قرار باشد همکاران دیگر جزئیات ریاضی را به این مطلب بیفزایند، باید مطالب آن‌ها ساده و قابل فهم برای همگان باشد. گرچه این مفاهیم ساده و قابل درک همگان است، ولی شاید عادت کردن به کاربرد آن‌ها زمان‌بر باشد، اما مطالب ساده‌اند و هر شخص باسواد، چه لوله‌کش باشد یا حقوق‌دان، موسیقی‌دان یا فیزیک‌دان آن‌ها را می‌فهمد.

نسبیت (از جمله نسبیت عام) و فیزیک کوانتومی (شامل میدان‌های کوانتومی)، اساس شناخت عالم در سدهٔ اخیر را تشکیل می‌دهند، بنابراین تعجب‌آور است که هنوز در برخی درس‌های فیزیک پایه، توضیح این پدیده‌ها از دیدگاه فیزیک«جدید» پس از سال‌های ۱۹۰۰ کنار گذاشته می‌شوند. در این درس‌ها، مفاهیم معاصر زمان، فضا، ماده، تابش، ذرات زیراتمی، میدان، انرژی، علیت[2]، جایگزینی[3] و حتی منشأ، ساختار و تکامل عالم نادیده گرفته شده است. به عبارت دیگر، این دوره‌های آموزشی در آموزش عالم فیزیکی واقعی که اکنون جهان می‌شناسد ناموفق‌اند. اما آیا هدف آموزشی ما همین چیز نیست؟ درست است که شاگردان سطوح پایه باید کار را با مفاهیم کلاسیک مانند قانون اول نیوتون سرعت، شتاب و انرژی شروع کنند، اما چرا باید در کلاس‌های فیزیک بیش از حد بر این مطالب تأکید و فیزیک جدید و معاصر، به‌ویژه در دوره‌های مقدماتی، کنار گذاشته شود. در واقع، اجتناب از مفاهیم فیزیک جدید در این کلاس‌ها با توجه به محبوبیت آن‌ها در کتاب‌هایی چون عالم موزون[4] برایان گرین[5] که در رتبهٔ چهارم کتاب‌های پرفروش نیویورک تایمز[6] قرار داشت تعجب‌آور است. عالم موزون نسبیت عام، نظریهٔ میدان کوانتومی و نظریهٔ ریسمان را بدون توجه به معادله‌ها و با توضیح مفهومی دقیق بیان می‌کند که در بسیاری از دوره‌های پایه سنتی مبتنی بر ریاضی خالی است.

فیزیک جدید مخصوصاً برای شاگردان رشته‌های غیرعلمی ضروری است، زیرا این دوره‌ها تحت‌تأثیر فشار انتظارات حرفه‌ای قرار ندارند و می‌توانند از عصر طلایی اکتشاف عالم، از کوارک‌ها گرفته تا کیهان بهره‌مند شوند. از سپیده‌دم تاریخ، و بدون شک صدها هزار سال پیش از آن، بشر در این فکر بوده که عالم از چه ساخته شده و چگونه به‌وجود آمده است. این پرسش معنای انسان بودن را تعریف می‌کند. اکنون علم کم‌کم پاسخ به این پرسش‌ها را پیدا می‌کند. باید امکان لذت بردن از این شناخت را در اختیار شاگردان خود بگذاریم.

دلیل وجود ذرات

همان‌طور که استیون واینبرگ[7] گفته است، «میدان‌ها اجزای بنیادی سازندهٔ طبیعت‌اند؛ ذرات پدیده‌هایی مشتق از آن‌ها هستند. شاگردان باید قبلاً با میدان‌های معمولی

(یا کلاسیک) آشنا شده باشند. به آن‌ها گوشزد کنید که میدان‌ها در ناحیه‌ای از فضا گسترده شده‌اند، و لازم نیست آن ناحیه شامل ماده یا هر «چیز» دیگر باشد. یک میدان وضعیتی از فضاست، نوعی تنش در فضا. به عنوان مثال، در هر نقطه‌ای که بار الکتریکی نیرویی را احساس کند یک میدان الکتریکی وجود دارد حتی اگر واقعاً باری وجود نداشته باشد که نیرو را حس کند، به آن‌ها یادآور شوید که میدان‌ها از نظر فیزیکی به همان اندازهٔ انرژی و تکانه واقعی هستند. از این موضوع بدین جهت آگاه‌ایم که می‌دانیم آن‌ها حامل انرژی و تکانه‌اند. به‌عنوان مثال، اگر یک سیگنال رادیویی را به مریخ بفرستم، شاید زمان مسافرت آن ۲۰ دقیقه طول بکشد. اما سیگنال‌های رادیویی انرژی و تکانه را از منبع به گیرنده منتقل می‌کنند. اگر انرژی پایسته است، پس باید در جایی باشد. اینجا کجاست؟ پاسخ این پرسش در میدان الکترومغناطیسی حامل سیگنال است. این استدلال ماکسول و اینشتین را متقاعد کرد که میدان‌ها واقعی هستند. همین استدلال در مورد هر نیرویی که بی‌درنگ منتقل نشود به کار می‌رود.

اساس نظریهٔ میدان کوانتومی را این ایدهٔ عجیب تشکیل می‌دهد که عالم فقط از میدان ساخته شده است. اگر از دیدگاه میکروسکوپی به میز مقابل بنگریم آن را مجموعه‌ای از میدان‌های مرتعش شبیه میدان‌های نامرئی اطراف یک آهنربا می‌بینیم. با این همه، وقتی به میز ضربه می‌زنید دستتان از آن نمی‌گذرد زیرا، در فاصله‌های کوتاه، میدان‌های تشکیل‌دهندهٔ میز میدان‌های دست شما را دفع می‌کنند.

اما میدان‌های فیزیک کوانتومی (QFT) میدان‌های کلاسیک نیستند، بلکه میدان‌های کوانتومی‌ای هستند که آن‌ها را توصیف خواهیم کرد.

شاگردان شما احتمالاً در این مرحله چیزی دربارهٔ فیزیک کوانتومی می‌دانند. در حالت ایده‌آل، باید از همان اول آشنایی آن‌ها با فیزیک کوانتومی شامل دیدگاه کامل QFT باشد، زیرا QFT تنها راه‌حل پارادوکس‌های بدیهی مانند دوگانگی موجی- ذره‌ای است. ایدهٔ کلی آن به اختصار به شرح زیر است.

یک راه مناسب برای شروع آموزش فیزیک کوانتومی با کوانتیده کردن تابش الکترومغناطیسی (EM) است. طرح تداخلی که در آزمایش یانگ به دست می‌آید نشان می‌دهد که نور پدیده‌ای موجی است، و الکترومغناطیس کلاسیک آن را به صورت یک موج در میدان EM توصیف می‌کند. فیزیک کوانتومی این گزاره را تغییر نمی‌دهد. اما وقتی آزمایش یانگ را با نور ضعیف و با استفاده از تصویربرداری با فاصلهٔ زمانی انجام دهیم، در می‌یابیم که طرح تداخل از تعداد زیادی برخوردهای نقطه مانند، مشابه نقاشی‌های نقطه‌چینی متشکل از تعداد زیادی نقطه‌های کوچک، تشکیل شده است. توصیف این پدیده به اصل فیزیکی جدیدی نیاز دارد: تمام میدان‌های EM «کوانتیده‌اند». برای یک میدان EM تکفام «کوانتیده بودن» به معنی آن است که انرژی میدان منحصر به مقادیر، hf، ۲hf، ۳hf، و مانند آن است. (به اضافهٔ «انرژی خلأ hf/۲»). این بدان معناست که میدان در برهم‌کنش با صفحه نمایش باید بلافاصله درست hf (یا ۲hf و مانند آن) ژول انرژی از دست بدهد. به‌عنوان مثال، نمی‌تواند ۰/۹hf یا ۱/۱hf انرژی از دست بدهد. انرژی برهم‌کنش hf ژول را یک «کوانتوم» میدان انرژی می‌نامند که «فوتون» هم نامیده می‌شود. این کوانتوم ناشی از کل میدانی است که درست پیش از برهم‌کنش به‌صورت پیوسته روی سراسر صفحه گسترده شده است. در هنگام برهم‌کنش کوانتوم با قرار دادن انرژی خود روی یک اتم صفحه ناگهان «فرومی‌ریزد» زیرا کوانتوم با تجزیه شدن به بخش‌های مختلف اصل کوانتیده بودن را نقض می‌کند.

هر فوتون مربوط به هر دو شکاف است (یعنی از هر دوی آن‌ها می‌گذرد)، که پارادوکس ظاهری موجی- ذره‌ای را حل می‌کند. این فرایند بسیار ناجایگزیده است: hf ژول از انرژی میدان در ناحیهٔ میکروسکوپی مقابل صفحه نمایش بلافاصله فرو می‌ریزد.

و فرایند برهم‌کنش، همان‌طور که در توزیع کاتوره‌ای برخوردها نمایان می‌شود، احتمالاتی است و احتمال برهم‌کنش بین فوتون و یک اتم خاص صفحه نمایش با شدت میدان EM در محل اتم متناسب است. این سه جنبهٔ جدید یعنی ناجایگزیدگی، فروریزش میدان، و احتمالاتی بودن در یک طرح آماری قابل پیش‌بینی، جنبه‌های اصلی فیزیک کوانتومی‌اند. همهٔ آن‌ها ناشی از اصل کوانتیده بودن هستند.

اکنون به کوانتیده بودن ماده می‌پردازیم، در سال ۱۹۷۴، آزمایش تداخل یانگ با یک باریکهٔ ماده- یک باریکهٔ الکترون- به جای باریکهٔ نور انجام شد. نتیجهٔ این آزمایش درست مانند آزمایش یانگ با نور، یعنی آزمایش دو شکاف یانگ بود. در سال ۱۹۸۹ این آزمایش با باریکهٔ ضعیف انجام و مشاهده شد (همان‌طور که انتظار می‌رفت) طرح تداخل باز هم متشکل از تک‌تک برهم‌کنش‌های نقطه‌مانند است. توجیه این آزمایش به مفهوم جدید دیگری نیاز دارد: نوع جدیدی از میدان در طبیعت، که با نام‌های گوناگون مانند تابع موج، پسی، یک میدان مادی، یا یک میدان الکترون-پوزیترون معروف است. این میدان مانند همهٔ میدان‌های بنیادی واقعی (همان‌طور که آزمایش نشان می‌دهد) کوانتیده است. اما این بار کوانتوم‌ها «الکترون» نامیده می‌شوند. هر کوانتوم میدان، یعنی هر

نسبیت و فیزیک کوانتومی اساس شناخت عالم در سدهٔ اخیر را تشکیل می‌دهند، بنابراین تعجب‌آور است که هنوز در برخی درس‌های فیزیک پایه، توضیح این پدیده‌ها از دیدگاه فیزیک جدید پس از سال‌های ۱۹۰۰ کنار گذاشته می‌شوند

الکترون، از هر دو شکاف می‌گذرد و طرح تداخلی را روی صفحهٔ نمایش تشکیل می‌دهد، و سپس روی صفحه‌نمایش به‌صورت ناجایگزیده و کاتوره‌ای به بخش کوچکی از صفحه فرو می‌ریزد.

شاگردان باید درک کنند که به عبارت دقیق‌تر، نه فوتون‌ها ذره‌اند و نه الکترون‌ها، بلکه در واقع همواره تکه‌ها (یا بسته‌هایی) از میدان‌اند که در ناحیهٔ Δx از فضا گسترده شده است و از اصل عدم قطعیت پیروی می‌کند. به‌عنوان مثال، الکترون‌ها فقط از این نظر «ذرات نقطه‌ای» نامیده می‌شوند که Δx را می‌توان به دلخواه کوچک کرد، البته همواره به قیمت ΔP بزرگ‌تر و بزرگ‌تر (و در نتیجه انرژی بیشتر). این کوانتوم‌های میدان با ذرات نابودنشدنی و تغییرناپذیری که نیوتون و بسیاری از مردمان امروز گمان می‌کنند جهان از آن‌ها ساخته شده است تفاوت بسیار دارند. توصیف این تصویر درست‌تر معماری جهان میکروسکوپی یکی از وظایف مهم آموزش فیزیک است. میدان‌های کوانتیده مادی هم مانند میدان‌های کوانتیده EM دارای ویژگی‌های ناجایگزیدگی، فروریزش میدان، و کاتوره‌ای بودن (عدم قطعیت) هستند.

از سپیده‌دم تاریخ، و بدون شک صدها هزار سال پیش از آن، بشر در این فکر بوده که عالم از چه ساخته شده و چگونه به وجود آمده است

الکترودینامیک کوانتومی

در بخش قبل فیزیک کوانتومی غیر نسبیتی در زمینهٔ مناسب به‌صورت جنبه‌ای از QFT توصیف شد. ارائهٔ فیزیک کوانتومی به این صورت هیچ یک از فرمالیسم مکانیک کوانتومی استاندارد را تغییر نمی‌دهد، اما معنای چند قلم از آنچه را در این فرمالیسم ظاهر می‌شود عوض می‌کند. به‌عنوان مثال، معادلهٔ شرودینگر معادله میدان مربوط به میدان مادی برای ذرات مادی غیرنسبیتی است، و تابع موج پسی یک میدان فیزیکی واقعی است و نه صرفاً یک دامنهٔ احتمال ریاضی برای یافتن یک ذره.

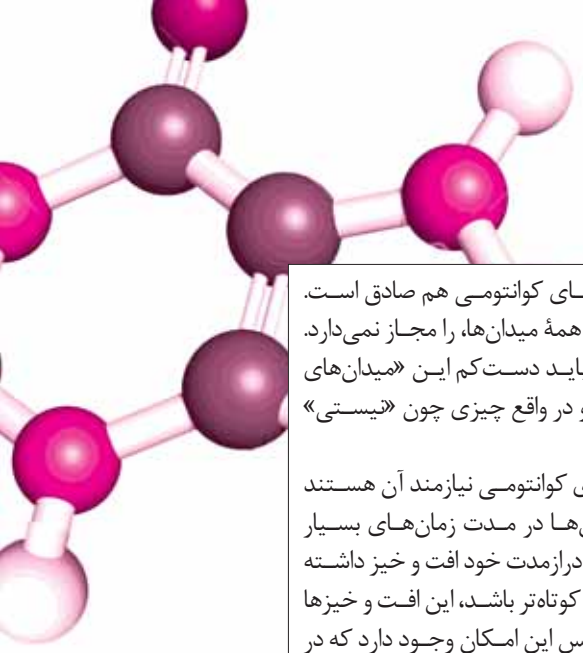
نسبیت چه تأثیری در این تشکیلات دارد؟

الکترودینامیک کوانتومی(QED) به لحاظ تاریخی اولین QFT نسبیتی است؛ این نظریه به تحقیق به لحاظ کمی دقیق‌ترین نظریهٔ علمی همهٔ دوران است. نظریه با دو میدان سروکار دارد، میدان EM و میدان مادی الکترون و برهم کنش‌های آن‌ها. از نظر کلاسیک، مسیر حرکت الکترون را نیروهایی تعیین می‌کنند که میدان‌های EM در مسیر بر آن وارد می‌سازند. دیدیم که با توجه به QFT، میدان EM متشکل از کوانتوم‌های میدان موسوم به فوتون است. پس شاید تعجب‌آور نباشد که بدانیم اصل بنیادی QED آن است که تمام نیروهای EM وارد بر الکترون ناشی از خلق و نابودی فوتون‌ها هستند. در این نظریه «بارالکتریکی» به معنای «توانایی خلق و نابودی فوتون‌هاست» و فوتون‌ها به‌صورت ذرات حامل نیرو برای نیروی الکتریکی در می‌آیند. به‌طور دقیق‌تر، فوتون‌ها حامل انرژی و تکانه‌اند، بنابراین خلق یا نابودی فوتون توسط الکترون باید (به علت پایستگی انرژی و تکانه) باعث تغییر مسیر الکترون شود. در مورد دو الکترونی که تحت‌تأثیر نیروی EM متقابل‌شان حرکت می‌کنند، خلق و نابودی فوتون توسط الکترون‌ها باعث تغییر مسیرهایی می‌شود که به‌طور میانگین، نیروی دافعه‌ای را ایجاد می‌کند. این فرآیند را اغلب به صورت «تبادل» فوتون‌ها بین دو الکترون بیان می‌کنند، و فوتون‌های خلق و نابود شده را «ذرات مبادله‌ای» می‌نامند. بنابراین، QED انتقال انرژی و تکانهٔ لحظه‌ای، کوانتیده و غیرقابل پیش‌بینی در زمان‌های کاتوره‌ای را جایگزین نیروهای EM پیوسته و قابل پیش‌بینی کلاسیک می‌کند. در حد انرژی‌های کم و میدان‌های ضعیف، این مسیر غیرقابل پیش‌بینی به‌صورت مسیر هموار نظریهٔ کلاسیک درمی‌آید.

اساس QED به صورت شگفت‌انگیزی ساده است. هیچ نیرویی وجود ندارد؛ فقط خلق و نابودی فوتون‌ها وجود دارد. و گاهی چیزهای شگفت‌انگیزتری نمایان می‌شود. نسبیت خاص ایجاب می‌کند که نوع جدیدی از ذرهٔ مادی باید در طبیعت وجود داشته باشد. استدلال مربوط به این موضوع مبتنی بر تقارن و نمونه‌ای از مسائل خاص فیزیک جدید است.

برای اینکه QFT از نسبیت خاص پیروی کند باید تحت تبدیل وارونی زمان متقارن باشد. یعنی QFT باید در عالمی درست مانند عالم ما که در آن زمان در جهت عکس حرکت می‌کند هم معتبر باشد. ریچارد فانیمن نشان داد الکترونی که تصور می‌کنیم در زمان عقب می‌رود درست همان ویژگی‌های قابل مشاهدهٔ ذره‌ای مانند الکترون را دارد، فقط حامل بار مثبت است. و در زمان جلو می‌رود برای اینکه قانون‌های فیزیک تحت تبدیل وارونی زمان ناوردا باشند، این الکترون مثبت یا «پوزیترون» باید وجود داشته باشد. مانند مورد دو الکترون، QED نیروی دافعهٔ بین دو پوزیترون، همین‌طور نیروی جاذبهٔ بین یک الکترون و یک پوزیترون را ناشی از خلق و نابودی فوتون‌ها می‌داند.

این موضوع QFT را به لحاظ کیفی متفاوت از همهٔ نظریه‌های فیزیک پیشین می‌سازد. نظریه‌های قبلی، از جمله نظریه‌های نسبیتی یا کوانتومی، فقط بیان می‌کردند که چیزها بر حسب زمان چگونه تغییر می‌کنند. QFT نه تنها چگونگی حرکت اشیا را توضیح می‌دهد، بلکه بیان می‌کند چه نوع چیزهایی می‌توانند وجود داشته باشند.



شرط اینکه QFT تحت تبدیل وارونی زمان ناوردا باشد ایجاب می‌کند که برای هر ذرهٔ موجود باید پادذره‌ای مانند پوزیترون وجود داشته باشد، و مانند آن.

در هنگام برهم‌کنش یک میدان EM و یک میدان الکترون، (یک چیز که می‌تواند اتفاق بیفتد آن است که میدان EM می‌تواند انرژی خود را (به‌صورت فوتون‌ها) به میدان الکترون منتقل کند. در انرژی‌های کم، این موضوع صرفاً انرژی هر الکترون موجود را زیاد می‌کند. اما اگر میدان EM فوتون‌های با انرژی به اندازهٔ کافی زیاد را به میدان الکترون منتقل کند، چیز جدیدی رخ می‌دهد: کوانتوم‌های مادی اضافی (به‌صورت الکترون‌ها یا پوزیترون‌ها) می‌توانند به وجود آیند. با این همه، آزمایش‌ها نشان می‌دهند که بار الکتریکی کل در بر هم کنش‌های میکروسکوپی پایسته است، بنابراین همواره زوج‌های الکترون- پوزیترون به‌وجود می‌آیند. QED احتمال وقوع این رویداد را به‌دست می‌دهد.

برعکس آن، میدان الکترون می‌تواند انرژی خود را مانند وقتی که الکترون فوتونی را به وجود می‌آورد، به میدان EM بدهد. راه دیگر وقوع این رویداد نابودی الکترون و پوزیترون و تولید یک یا چند فوتون است.

بنابراین، هم تولید و هم نابودی زوج الکترون- پوزیترون با احتمال‌هایی که QED پیش‌بینی می‌کند امکان‌پذیر است. یک فوتون بسیار پرانرژی می‌تواند به‌صورت یک یا دو زوج الکترون- پوزیترون و مانند آن، یا صرفاً به‌صورت یک فوتون نمایان شود: نوسان کاتوره‌ای بین این جلوه‌های مختلف انرژی وجود دارد که با «ذرات صلب، جرم‌دار، سخت، و غیر قابل نفوذ متحرک» نیوتون که «خداوند در ازل خلق کرده است» و «چنان سخت‌اند که هرگز فرسوده یا شکسته نمی‌شوند» تفاوت بسیار دارد.

وجود پادذرات امکان وجود پادماده را ایجاب می‌کند که درست مثل ماده اما متشکل از پادپروتون‌ها و مانند آن است. در واقع، اکنون دانشمندان گاهی هزاران اتم پادهیدروژن را بررسی و طیف و سایر ویژگی‌های آن را مطالعه می‌کنند.

پادذرات تصویری از دیدگاه عجیب فضای «خالی» را ترسیم می‌کنند. به‌عنوان مثال، انرژی‌های ممکن میدان EM تکفام عبارت‌اند از hf/۲، ۳hf/۲، ۵hf/۲... وقتی میدان دارای کمترین انرژی hf/۲ باشد، فقط نیمی از انرژی یک فوتون را دارد، بنابراین هیچ کوانتوم میدانی موجود نیست؛ و نمی‌تواند با مبادلهٔ یک فوتون با جسم بارداری بر هم کنش کند، و مثلاً نمی‌تواند درخشی را روی صفحهٔ نمایش به وجود آورد. پس این مورد یک «حالت خلأ» میدان است. هیچ کوانتوم واقعی میدان (فوتون) وجود ندارد، اما با این وصف میدان موجود است، انرژی دارد، و می‌تواند آثار قابل مشاهده مانند انتقال لمب اتم هیدروژن را ایجاد کند. این موضوع برای سایر میدان‌های کوانتومی هم صادق است.

عالم خلأ واقعی، یعنی نبود همهٔ میدان‌ها، را مجاز نمی‌دارد. بنابراین هر ناحیه از فضا باید دست‌کم این «میدان‌های نقطهٔ صفر» را داشته باشد و در واقع چیزی چون «نیستی» وجود ندارد.

به علاوه عدم قطعیت‌های کوانتومی نیازمند آن هستند که انرژی همهٔ این میدان‌ها در مدت زمان‌های بسیار کوتاه حول مقدار میانگین درازمدت خود افت و خیز داشته باشند. هر چه بازهٔ زمانی کوتاه‌تر باشد، این افت و خیزها می‌توانند بزرگ‌تر باشند. پس این امکان وجود دارد که در هر نقطه از فضای تهی یک فوتون یا یک زوج ذره- پادذره خودبه‌خود برای مدتی کوتاه به‌وجود آید یا از بین برود. فضای تهی سرشار از فعالیت است.

QED نه تنها الکترون‌ها و پوزیترون‌ها بلکه موئون‌های الکترون- مانند را که جرمی ۲۰۷ برابر الکترون دارند، و ذرات تأو الکترون- مانند را که جرمشان ۳۵۰۰ برابر الکترون- و تقریباً دو برابر پروتون است- همراه با پادذره‌شان توصیف می‌کند. هیچ‌کس نمی‌داند که چرا باید این دو «نسل» اضافی از مادهٔ الکترون- مانند وجود داشته باشد و چرا جرم آن‌ها چنین است. چنانکه بعداً خواهیم دید، طرح سه نسلی ذرات مادی در نظریهٔ میدان الکتروضعیف و نظریهٔ نیروی قوی نیز تداوم می‌یابد. شواهد اخترشناسی برای دقیقاً سه نسل وجود دارد: همان‌طور که فیزیک هسته‌ای پیش‌بینی و رصد ستارگان پیر را تأیید می‌کند، در چهار دقیقه نخست مهبانگ ۷۵ درصد هیدروژن و ۲۵ درصد هلیم به اضافهٔ مقدار اندکی لیتیم تولید شد که پس از آن هیچ عنصری دیگری تا پیدایش نخستین ستارگان به وجود نیامد. اگر تعداد نسل‌ها بیشتر شود کسر هلیم موجود پیش‌بینی شده بیشتر می‌شود. وجود سه نسل، کسر هلیم مشاهده شده را به دست می‌دهد، در حالی‌که تعداد کمتر از سه نسل به کسر اندک هلیم و تعداد بیش از سه نسل به مقدار بسیار زیاد هلیم می‌انجامد، موئون و تأو ناپایدارند- آن‌ها خودبه‌خود به کوانتوم‌های با انرژی کمتر واپاشیده می‌شوند. بنابراین اکنون متداول نیستند، و فقط برای مدتی کوتاه در آزمایش‌های شتاب‌دهنده و دیگر رویدادهای پرانرژی مولد آن‌ها مشاهده می‌شوند. اما احتمالاً دو نسل اضافی در طی مهبانگ تعیین‌کننده بوده‌اند. شاید آن‌ها علاوه بر کمک به تولید کسر هلیم مشاهده شده، نقش مؤثری در به‌وجود آمدن مقدار اندک مادهٔ بیش از پادماده داشته باشند. بدون این مقدار اضافی، ماده به سرعت با پادماده نابود می‌شد و نه من و نه شما در اینجا نبودیم تا دربارهٔ این چیزها فکر کنیم.

نسبیت خاص ایجاب می‌کند که نوع جدیدی از ذرهٔ مادی باید در طبیعت وجود داشته باشد

پی‌نوشت‌ها

1. quantum field theory
2. causality
3. locality
4. Elegant universe
5. Brian Greene
6. New york Times
7. Stephen weinberg

منبع

1. Art Hobson, Teaching Elementary particle physics: partI. *The physics Teacher*, vol49. Jan. 2011, pp 12-14