

آموزش فیزیک ذرات بنیادی III



آموزشی

آرت هابسون
ترجمه:
احمد توحیدی

چکیده

در شماره پیش مقاله‌ای درباره اجزای تشکیل دهنده ماده جهت آشنایی خوانندگان با این حوزه بسیار جذاب و هیجان‌انگیز فیزیک چاپ شد. اکنون در ادامه این بحث مقاله‌ای در مورد نیروهای حاکم در این حوزه و برهم‌کنش‌هایی بین ذرات بنیادی عرضه می‌شود. یکی از دل‌مشغولی‌های فیزیک‌دانان وحدت بخشیدن این نیروها بوده است که در این مقاله تلاش‌های به‌عمل آمده در این زمینه و دستاوردهایی که در این مورد وجود داشته بررسی می‌شود.

کلیدواژه‌ها: برنامه درسی، الکترودینامیک کوانتومی، نیروی الکتروضعیف، نظریه میدان کوانتومی، مدل استاندارد.

وحدت الکتروضعیف

در سال ۱۹۳۰ ولفانگ پاؤلی^۱ برای توضیح برخی ویژگی‌های واپاشی بتازا، پیشنهاد کرد که هسته علاوه بر ذره بتا، ذره‌ای کاملاً جدید گسیل می‌کند. ذره فرضی، که نوترینو نامیده شد تا ۲۵ سال بعد به طور تجربی کشف نشد. آشکارسازی نوترینوها راحت نیست، زیرا نه به نیروی الکترومغناطیسی EM و نه به نیروی قوی واکنش نشان نمی‌دهند. برای مثال، مسافت آزاد (میانگین مسافتی که ذره پیش از برهم‌کنش در ماده طی کند) یک نوع از نوترینوهای واپاشی بتازا در سرب جامد حدود ۱/۵ سال نوری است! انریکو فرمی^۲ استدلال کرد نوترینوها نشان می‌دهند که نیروی جدیدی در کار است. در سال‌های دهه ۱۹۳۰، او به سرعت ایده‌هایی را از نظریه تازه تدوین شده الکترودینامیک کوانتومی QED با این نیروی جدید تطبیق داد و آن را نیروی ضعیف نامید. نظریه فرمی می‌توانست نیمه عمر هسته‌های بتاگسیل و گستره انرژی ذرات بتای گسیل شده را پیش‌بینی کند.

در سال ۱۹۶۷، عبدالسلام^۳ فیزیکدان پاکستانی و استیون واینبرگ^۴ فیزیکدان آمریکایی هرکدام به طور مستقل ارتباط میان نیروی ضعیف و نیروی الکترومغناطیسی را نمایان ساختند. آن‌ها نظریه میدان نیروی کوانتومی (QFT) جدیدی را مطرح کردند که هر دو میدان نیروی الکترومغناطیسی و میدان نیروی ضعیف را در یک میدان نیروی «الکتروضعیف» ادغام می‌کرد و الکترون‌ها و نوترینوها را در یک میدان مادی الکتروضعیف جدید به هم می‌پیوست. این وحدت با وحدت نیروهای الکتریسیته و مغناطیس با هم در یک میدان الکترومغناطیسی در سده نوزدهم قابل مقایسه بود.

نظریه الکتروضعیف نسخه گسترده‌تر الکترودینامیک کوانتومی است. در این نظریه، برهم‌کنش‌های الکترون‌ها، پوزیترون‌ها، نوترینوها و پادنوترینوها بر اثر مبادله فوتون‌ها و سه نوع ذرات تبدالی جدید W^+ ، W^- و Z است. ذرات W^\pm و Z برخلاف فوتون جرم سکون دارند و در واقع جرم آن‌ها به‌طور شگفت‌انگیزی بزرگ و به ترتیب ۸۶ و ۹۸ برابر

تفاوت مهمی بین چگونگی ارتباط

گلوئون‌ها با نیروی قوی و ارتباط

فوتون‌ها با نیروی الکتریکی

وجود دارد: گلوئون‌ها نیروی

قوی را وارد و احساس می‌کنند،

در حالی که فوتون‌ها نیروی

الکتریکی را وارد و احساس

نمی‌کنند

جرم پروتون است. این جرم‌های بزرگ نشان می‌دهند که چرا برد نیروی ضعیف کوتاه است؟ به طور کلی مفهوم نیروهای ناشی یا («به میانجی‌گری») ذرات تبدالی در نظریه میدان کوانتومی شگفت‌انگیز است، زیرا به عبارت دقیق‌تر این مبادله پایستگی انرژی را نقض می‌کند. این موضوعی است که حتی برای دو الکترون برهم کنش‌کننده توسط نیروی الکترومغناطیسی روی می‌دهد. اگر الکترون‌ها ابتدا در حال سکون باشند، انرژی لازم برای مبادله فوتون‌ها از کجا می‌آید؟ این مشکل در مورد W^{\pm} و Z بسیار پیچیده‌تر است، زیرا دارای جرم‌های بزرگ و در نتیجه (بر پایه رابطه $E=mc^2$) انرژی‌های بزرگ‌تری هستند. الکترون‌ها یا نوترینوها چگونه می‌توانند ذرات W^{\pm} و Z را تولید کنند که دارای جرم چندین برابر الکترون‌ها یا نوترینوها هستند؟ اصل عدم قطعیت انرژی-زمان $\Delta E \cdot \Delta t \leq \frac{h}{2\pi}$ مشکل را حل می‌کند. این رابطه نشان می‌دهد که انرژی یک دستگاه کوانتومی می‌تواند به طور کاتوره‌ای به مقدار ΔE در مدت زمان Δt که در این نامساوی صدق می‌کند افزایش یا کاهش یابد. این افت‌وخیزهای انرژی پایستگی انرژی را نقض می‌کند، اما فقط برای یک زمان کوتاه. ذرات (کوانتوم‌های میدان) که بر اثر افت‌وخیزهای انرژی و نقض پایستگی انرژی تولید می‌شوند فقط می‌توانند برای مدتی محدود به عنوان «ذرات مجازی» وجود داشته باشند. همه ذرات تبدالی ذره‌های مجازی از این نوع هستند. چون حد پایینی برای انرژی فوتون‌ها وجود ندارد، Δt می‌تواند به دلخواه طولانی باشد، بنابراین برد نیروی الکترومغناطیسی بی‌نهایت است. اما جرم‌های W^{\pm} و Z ایجاب می‌کند نیرویی که این ذرات را مبادله می‌کند، فقط دارای برد $10^{-17} m$ ، یعنی حدود ۱٪ قطر پروتون باشد. این برد کوتاه یکی از دلایلی است که چرا آشکارسازی نوترینوها دشوار است.

چون نظریه الکتروضعیف الکترون‌ها و نوترینوها را در یک خانواده به هم می‌پیوندد و چون سه نسل از الکترون‌ها وجود دارند، حدس می‌زنند سه نسل از نوترینوها نیز وجود داشته باشد. این حدس خوبی است. جای شگفتی نیست، آن‌ها، نوترینوی الکترون، نوترینوی موئون و نوترینوی تاو نامیده شوند. جدول ۱ فهرست کامل ذرات را نشان می‌دهد.

جدول ۱. نظریه نیروی الکتروضعیف. دو میدان بنیادی الکتروضعیف عالم را فراگرفته است: میدان نیروی الکتروضعیف که کوانتوم‌های آن چهار ذره تبدالی و میدان ماده الکتروضعیف که کوانتوم‌های آن الکترون و نوترینوی الکترونی در جدول نوشته شده است. افزون بر این، نسل دوم و نسل سوم میدان‌های ماده‌اند که کوانتوم‌های آن در جدول ثبت شده است.

نسل	نوع ذره	جرم (پروتون = ۱)	بار (پروتون = +۱)
۱	الکترون	۰/۰۰۰۵	-۱
۱	نوترینوی الکترونی	a	۰
۲	موئون	۰/۱۱	-۱
۲	نوترینوی موئونی	a	۰
۳	تاو	۱/۹۰	-۱
۳	نوترینوی تاو	a	۰
ذرات تبدالی			
	فوتون	۰	۰
	W^+	۸۶	+۱
	W^-	۸۶	-۱
	Z	۹۸	۰

آزمایش‌هایی که در برخورددهنده بزرگ هادرونی (LHC) در نزدیکی ژنو انجام می‌شوند باید تا اعماق بیشتر جهان کوچک مقیاس نفوذ کرده و کشف کنند که آیا کوارک‌ها نیز دارای ساختارند

نیروی قوی

مشاهده‌هایی که تاکنون صورت گرفته با نقطه‌ای بودن الکترون‌ها و نوترینوها سازگاری دارد: یعنی به نظر می‌رسد که میدان نیروهای آن‌ها در یک نقطه متمرکز است که حجمی ندارد. (با این همه، توجه کنید که میدان‌های مادی آن‌ها همواره ناحیه‌ای از فضا با اندازه غیرصفر Δx را اشغال می‌کنند که می‌توان آن را به قیمت ΔP بسیار بزرگ به دلخواه بسیار کوچک کرد.) اما پروتون‌ها و نوترون‌ها متفاوتند. از سال‌های ۱۹۵۰ می‌دانیم که بار آن‌ها روی «گوی کرکی» ریزی به قطر حدود 10^{-15} m گسترده شده است. در سال ۱۹۶۷، ریچارد تیلور^۵، جرمی فریدمان^۶ و هنری کندال^۷ با استفاده از شتاب‌دهنده خطی الکترون در دانشگاه استنفورد با پرتاب الکترون‌ها به سوی پروتون‌ها این گوی را بررسی کردند. بعضی از الکترون‌ها به شدت پراکنده شدند که نشان می‌داد پروتون صرفاً لکه‌ای یکنواخت از ماده نبود. اندکی بعد در همان سال، تحلیل‌های نظری توسط جیمز بیورکن^۸ نشان داد که این پراکندگی می‌تواند ناشی از اجزای نقطه‌ای درون پروتون باشد، پیش از آن، در سال ۱۹۶۴، مورای گلمان^۹ و جورج زوایک^{۱۰} مستقل از هم مطرح کرده بودند که شاید پروتون‌ها و نوترون‌ها از چند موجود ساده‌تر، که گلمان «کوارک» نامیده بود ساخته شده باشند. اما ارتباط میان نتایج تجربی و کوارک‌ها رقیق بود و بیش از هشت سال بررسی‌های تجربی و نظری در چندین آزمایشگاه فیزیک با انرژی‌های بالا لازم بود تا بتوان کوارک‌ها را به عنوان اجزای نقطه‌ای واقعی تشکیل‌دهنده پروتون‌ها و نوترون‌ها تأیید کند. کل این ماجرا کشف سال ۱۹۱۱ رادرفورد را به خاطر می‌آورد که هسته ریز را در اعماق چیزی کشف کرد که گوی کرکی اتم بود.

آیا کوارک‌ها، واقعاً ذرات بنیادی‌اند و از ذرات باز هم کوچک‌تری ساخته نشده‌اند؟ نمی‌دانیم، باید آزمایش‌هایی که در شتاب‌دهنده پروتونی برخورددهنده بزرگ هادرونی LHC در نزدیکی ژنو انجام می‌شوند تا اعماق بیشتر جهان کوچک مقیاس نفوذ کرده و کشف کنند که آیا کوارک‌ها نیز دارای ساختارند.

با کشف کوارک‌ها، فیزیک‌دان‌ها تعبیری از نظریه میدان کوانتومی به وجود آوردند که بر هم کنش‌های میان کوارک‌ها را توضیح می‌داد و با همه آزمایش‌های طراحی شده برای آزمون آن‌ها سازگاری داشت. در این نظریه، نیروی قوی (که «نیروی رنگ» هم نامیده می‌شود) مستقیماً بین کوارک‌ها اعمال می‌شود و نیروی جاذبه بین پروتون‌ها و نوترون‌ها فقط

پیامد اعمال نیروی قوی بین کوارک‌های آن‌هاست. میدان نیرو (مشابه میدان EM الکترودینامیک کوانتومی) که در این نظریه کوانتیده است میدان نیروی قوی میدان ماده (مشابه میدان الکترون) که کوانتیده شده است میدان ماده قوی است. کوانتوم‌های میدان نیروی قوی (مانند فوتون‌ها) «گلوئون» نامیده می‌شوند. زیرا بین کوارک‌ها مبادله شده و آن‌ها را به هم «می‌چسبانند». در مقیاس بزرگ‌تر، گلوئون‌ها بین کوارک‌های متعلق به نوکلئون‌های مختلف مبادله می‌شوند و اجرای هسته را به هم پیوند می‌دهند. گلوئون‌ها مانند فوتون‌ها جرم سکون ندارند. کوانتوم‌های میدان ماده قوی دو نوع کوارک به نام‌های کوارک‌های بالا و کوارک‌های پایین d- و (پادذرات آن‌ها) هستند. نظریه پیش‌بینی می‌کند که دو پیکربندی پایدار کوارک‌های u و d وجود دارد. پروتون از دو کوارک u و یک کوارک d و نوترون از یک کوارک u و دو کوارک d ساخته شده‌اند.

اگرچه میدان‌های الکتروضعیف جدول (۱) فقط در نیروهای الکتروضعیف و گرانشی شرکت می‌کنند، میدان‌های قوی در هر نیروی شناخته شده یعنی قوی، الکتروضعیف و گرانشی مشارکت دارند. با شگفتی بسیار بار کوارک‌ها کسری است، بار کوارک $\frac{2}{3}u + \frac{1}{3}d$ بار پروتون بار کوارک $\frac{1}{3}d - \frac{2}{3}u$ بار پروتون است که حاصل جمع آن‌ها برابر +۱ برای پروتون و ۰ برای نوترون است. بنابراین بار مثبت هسته اتم و در نتیجه پیوند اتمی در شیمی مربوط به کوارک‌هاست. کوارک‌ها در جنبه نیروی ضعیف نیروی الکتروضعیف نیز شرکت دارند، برای مثال، در واپاشی بتازای هسته که در آن یکی از کوارک‌های پایین نوترون با گسیل یک ذره بتا الکترون به کوارک بالا و یک نوترینوی الکترون واپاشیده می‌شود، و در نتیجه نوترون را به پروتون تبدیل می‌کند.

تفاوت مهمی بین چگونگی ارتباط گلوئون‌ها با نیروی قوی و ارتباط فوتون‌ها با نیروی الکتریکی وجود دارد: گلوئون‌ها نیروی قوی را وارد و احساس می‌کنند، در حالی که فوتون‌ها نیروی الکترومغناطیسی را وارد یا احساس نمی‌کنند. به عبارت دیگر، گلوئون‌ها می‌توانند گلوئون‌ها را تولید یا نابود کنند، برخلاف فوتون‌ها، که نمی‌توانند فوتون‌ها را تولید یا نابود کنند. این موضوع یکی از مهم‌ترین ویژگی‌های شگفت‌انگیز کوارک‌ها را توضیح می‌دهد: هرچه دو کوارک از یکدیگر دورتر کشیده شوند، در فاصله بیشتر تر گلوئون‌های تبادل فرصت بیشتری برای تولید گلوئون‌های اضافی دارند، این موضوع افزایش سریع انرژی در میدان، نیروی قوی را ایجاد می‌کند.

a. سه نوع نوترینو جرم‌های در حالت سکون اندک ولی غیرصفر دارند، اگرچه مقدار آن‌ها معلوم نیست. مجموع جرم‌های همه سه نوع نوترینو کمتر از یک میلیونیم جرم الکترون است.

جدول ۲. نظریه نیروی قوی. سراسر عالم را میدان نیروی قوی فراگرفته است که کوانتوم‌های آن گلوئون‌ها و میدان ماده قوی که کوانتوم‌های آن کوارک‌های u و کوارک‌های d اند. پروتون‌ها از u-u-d و نوترون‌ها از u-d-d که به وسیله نیروی قوی که بین کوارک‌ها اعمال می‌شود به هم می‌پیوندند. افزون بر این، میدان ماده نسل دوم و نسل سوم نیرو وجود دارند که کوانتوم‌های آن در جدول نوشته شده است. فقط کوانتوم‌های نسل اول پایدارند و نقشی در ماده معمولی بازی می‌کنند. نسل دوم و نسل سوم در اولین لحظه‌های مهیابگ آغازین واپاشیده شده‌اند و امروز فقط در رویدادهای کوتاه‌مدت میکروسکوپی در انرژی‌های بالا وجود دارند.

نسل	نوع ذره	جرم (پروتون = ۱)	بار (پروتون = +۱)
۱	کوارک-u	۰/۰۰۲۱۴	$+\frac{2}{3}$
۱	کوارک-d	۰/۰۰۵۱۰	$-\frac{1}{3}$
۲	کوارک-c	۱/۴	$+\frac{2}{3}$
۲	کوارک-s	۰/۱	$-\frac{1}{3}$
۳	کوارک-t	۱۸۵	$+\frac{2}{3}$
۳	کوارک-b	۵/۰	$-\frac{1}{3}$
ذرات تبدالی: گلوئون (۸ نوع)			
		۰	۰

و نشان می‌دهد که همه چیز از میدان‌ها ساخته شده است.

جدول (۲) کل ساختار نیروی قوی را نشان می‌دهد. به شباهت‌های بسیار جدول‌های (۱) و (۲) توجه کنید. ساختار سه نسلی نظریه الکتروضعیف در نظریه نیروی قوی که هر نسل آن از یک زوج ذره ماده ساخته شده است حفظ شده است. در جدول (۲)، نسل دوم و سوم هر یک شامل دو کوارک‌اند، که شکل سنگین‌تر و ناپایدار کوارک‌های u و d و همین‌طور موئون و تاو که شکل سنگین‌تر و ناپایدار الکترون‌اند. افزون بر این، هر جدول چند نوع ذرات تبدالی و ذرات نیرو دارند مانند فوتون‌ها و گلوئون‌هایی که با سرعت نور حرکت می‌کنند. شباهت بین جدول‌های (۱) و (۲) نشان می‌دهد که ارتباط نزدیکی میان دو نیرو وجود دارد که نشان می‌دهد احتمالاً یک «نظریه وحدت بزرگ» میان همه نیروهای بنیادی غیر از گرانی را با هم ترکیب می‌کند. اما این نظریه هنوز از دسترس علم فرار می‌کند، مانند «نظریه همه چیز» که قرار است شامل گرانی باشد.

در این مرحله از تحولات، نظریه‌های میدان کوانتومی نیروهای الکتروضعیف و قوی که در جدول‌های (۱) و (۲) خلاصه شده‌اند، «مدل استاندارد» نامیده می‌شوند که عنوان ملال‌آوری برای نظریه‌ای با پیش‌بینی‌های باورنکردنی با دقتی خطاناپذیر است. شگفت آن‌که این نظریه همه پدیده‌های زیراتمی که تاکنون مشاهده شده است را دربر می‌گیرد. برخورددهنده بزرگ هادرون طوری طراحی شده است که فراتر از مدل استاندارد برود. جریان را دنبال کنید.

با گذر از نقطه‌ای معین این انباشت انرژی به حد کافی بزرگ می‌شود تا یک زوج کوارک-پادکوارک جدید تولید شود. اگر برای مثال، یکی از کوارک‌های u پروتون را از آن دور کنید، گلوئون‌هایی میان این کوارک u و کوارک‌های u+d باقیمانده مبادله می‌شوند. با دورتر کردن کوارک u، سرانجام یک زوج کوارک و پادکوارک u تولید می‌شوند که کوارک جدید u دوباره به u+d می‌پیوندد و یک پروتون تشکیل می‌دهد و پادکوارک u هم به کوارک u که می‌خواستید آن را جدا کنید یک زوج ناپایدار کوارک-پادکوارک تشکیل می‌دهند. این موضوع به خوبی توضیح می‌دهد چرا سال‌ها جست‌وجو برای یافتن کوارک‌های منزوی هرگز موفقیت‌آمیز نبوده است.

جرم سکون پروتون برابر با $\frac{938}{c^2} \text{Mev}$ است. یعنی انرژی پروتون در حال سکون $938/272 \text{ Mev}$ است، وقتی یکای انرژی را به ژول تبدیل و آن را بر c^2 تقسیم کنیم، جرم پروتون برحسب کیلوگرم به دست می‌آید. اما جرم‌های کوارک u و کوارک d به ترتیب، برابر با $\frac{2}{c^2} \text{Mev}$ و $\frac{4}{c^2} \text{Mev}$ است، بنابراین کل جرم سه کوارک پروتونی فقط $\frac{8}{81} \frac{\text{Mev}}{c^2}$ به دست می‌آید. باقیمانده جرم پروتون $\frac{929}{46} \frac{\text{Mev}}{c^2}$ مربوط به میدان نیروی قوی است که پروتون‌ها را به یکدیگر پیوند می‌دهد. بنابراین حدود ۹۹٪ از جرم ماده معمولی ناشی از انرژی میدان است. این مثال فوق‌العاده‌ای از رابطه جرم - انرژی اینشتین است

پی‌نوشت

1. Wolfgang Pauli
2. Enrico Fermi
3. Abdus Salam
4. Quantum Field Theory
5. Richard Taylor
6. Jerome Friedam
7. Henry Kendall
8. James Bjorken
9. Murray Gell-Mann
10. George Zweig

منبع

The physics Teacher
vol.42, March 2011

مرجع

Teaching Elementary
Particle physics
Arthoboson*