آموزش مفاهیم پایهٔ فیزیک ذرات

(بخش دوم)

آرت هاپسون

برگردان مرجان روح‌نواز

در بخش اول این مقاله، بحث‌هایی اساسی در مورد دلیل وجود ذرات بنیادی را مطالعه کردید که در آن به الکترودینامیک کوانتومی و نسبیت اشاره شده است.

اتحاد الکترو ضعیف (نظریه‌های الکترومغناطیسی و نیروی ضعیف)

برای توضیح ویژگی‌های واپاشی پرتوزای بتا، ولفگانگ پاولی در سال ۱۹۳۰ پیشنهاد کرد که هسته، علاوه بر ذرهٔ بتا، ذرهٔ کاملاً جدیدی را هم گسیل می‌کند. این ذرهٔ فرضی که نوترینو نامیده شد تا ۲۵ سال بعد در هیچ آزمایشی یافته نشد. یافتن نوترینوها کار آسانی نیست چرا که نه به نیروی الکترومغناطیسی و نه به نیروی قوی واکنش نشان نمی‌دهد. برای مثال، مسافت آزاد میانگین (فاصله نفوذ میانگین پیش از برهم‌کنش) یک نوترینوی حاصل از واپاشی بتازا که از ورقهٔ سربی می‌گذرد نزدیک به ۱۰۵ سال نوری است! انریکو فرمی استدلال کرد که نوترینوها نشانگر وجود یک نیروی جدید هستند. در دهۀ ۱۹۳۰ وی مواردی از نظریه رو به تکامل و جدید الکترودینامیک کوانتومی را با این نیروی جدید سازگار کرد و آن را نیروی ضعیف نامید. نظریه فرمی قادر بود تا نیمه‌عمر هسته‌هایی که پرتو بتا تابش می‌کنند و همچنین گسترهٔ انرژی‌های ذرات بتای گسیل‌شده را پیش‌بینی کند.

در سال ۱۹۶۷ دو فیزیک‌دان پاکستانی و آمریکایی به نام‌های عبدالسلام و استیون واینبرگ[1] به‌طور مستقل، ارتباط میان نیروی ضعیف و نیروی EM را کشف کردند. آن‌ها نظریهٔ QFT جدیدی را پایه‌ریزی و پیشنهاد کردند که هر دو میدان EM و نیروی ضعیف را در یک میدان نیروی «الکتروضعیف» و الکترون‌ها و نوترینوها را نیز در یک میدان مادی الکتروضعیف متحد می‌کرد. این اتحاد با اتحاد الکتریسیته و مغناطیس در یک میدان EM واحد در قرن نوزدهم قابل مقایسه بود.

نظریه الکتروضعیف نسخهٔ گسترش‌یافتهٔ QED است. در این نظریه برهم‌کنش الکترون‌ها، پوزیترون‌ها و نوترینوها و پادنوترینوها از تبادل فوتون‌ها به همراه سه گونه ذره تبادلی جدید به نام‌های W^+، W^- و Z ناشی می‌شود. برخلاف فوتون‌ها ذرات $W^\pm$ و Z دارای جرم شگفت‌انگیز به ترتیب برابر با ۸۶ و ۹۸ برابر جرم پروتون هستند. این جرم‌های زیاد به معنای بُرد کوتاه نیروی ضعیف است. چرایی آن در زیر توضیح داده شده است.

کل مفهوم نیروی ناشی از تبادل ذره (یا منتقل شده به‌وسیلهٔ آن) از دیدگاه نظریهٔ میدان کوانتومی (QFT) کاملاً عجیب و دور از انتظار است، چرا که سبب نقض قانون پایستگی انرژی می‌شود. این مسئله حتی برای برهم‌کنش دو الکترون تحت تأثیر نیروی EM نیز به‌وجود می‌آید: اگر این الکترون‌ها نخست در حال سکون باشند آنگاه انرژی فوتون‌های تبادلی از کجا می‌آید؟ این سردرگمی دربارهٔ $W^\pm$ و Z بسیار بیشتر است، چرا که جرم آن‌ها بسیار زیاد است و بنابراین (بر پایهٔ $E = mc^2$) انرژی‌های زیادی نیز باید داشته باشند. چگونه

ممکن اســت که الکترون‌ها یا نوترینوها سبب آفرینش $W^{\pm}$ یا Z شــوند در حالی‌که این ذرات تبادلی بســیار سنگین‌تر از الکترون‌ها هستند؟

دلیــل آن در اصل عدم قطعیت انرژی - زمان $\Delta E\,\Delta t \geq \hbar$ نهفتــه اســت. این رابطه بیــان می‌کند که انرژی دســتگاه کوانتومی می‌تواند به‌طور کاتــوره‌ای به مقدار ΔE و در زمان Δt که در معادلهٔ بالا صــدق کند افزایش یا کاهش یابد. این افت و خیزهای انرژی، فقط برای مدتی کوتاه، پایستگی انرژی را نقض می‌کنند. ذرات (یا کوانتوم‌های میدان) ناشــی از افت و خیزهای انرژی که پایستگی انرژی را نقض می‌کنند و تنها برای زمان محدودی وجود دارنــد، «ذرات مجازی»[۲] نامیده می‌شــوند. تمام ذرات تبادلی، ذرات مجاز از این نوع هستند. چــون برای فوتون‌ها حد پایین انــرژی وجود ندارد، Δt برای فوتون‌های تبادلی می‌تواند به دلخواه طولانی باشد و بنابراین نیروی EM گســتره یا بُرد نامحــدود دارد. اما جرم‌دار بودن $W^{\pm}$ و Z به این معناست که برد نیرویی که حامل آن هستند یعنــی نیروی ضعیف، فقط می‌تواند $10^{-17}\,\mathrm{m}$ یعنی حدود ۱٪ قطر پروتون باشــد. این برد کوتاه یکی از دلایل آشکارسازی دشوار نوترینوهاست.

چون نظریهٔ الکتروضعیف، الکترون‌ها و نوترینوها را در یک خانواده گرد می‌آورد و از آنجا که سه نسل از الکترون‌ها وجود دارد، می‌توان حدس زد که سه نسل نوترینو نیز وجود دارد. این حدس خوبی هم هســت، در واقع این سه گونه نوترینو همان‌طــور که در جدول ۱ آمده اســت، نوترینوی الکترون، نوترینوی موئون و نوترینوی تاو هستند.

نیروی قوی

تاکنون تمام مشــاهده‌ها بــا نقطه‌ای بــودن الکترون‌ها و نوترینوها سازگار هستند. به این معنا که میدان نیروی آن‌ها در یک نقطه متمرکز است و خودشان حجمی ندارند (با این همه توجه کنید که میــدان ماده آن‌ها، یک ناحیه فضایی با مقدار غیر صفر Δx را اشــغال می‌کند و می‌تواند به نرخ Δp بســیار بزرگ به مقدار دلخواه کوچک شود.) اما مسئله برای پروتون‌ها و نوترون‌ها متفاوت است. از دههٔ ۱۹۵۰ معلوم شده است که بار آن‌ها در ناحیهٔ کوچک و گوی‌مانند «شولیده‌ای» به قطر حدود $10^{-15}\,\mathrm{m}$ گسترده شــده است. در سال ۱۹۶۷، ریچارد تیلور[۳]، جروم فریدمن[۴] و هنری کندال[۵] با به‌کارگیری شــتاب‌دهندهٔ خطی الکترون دانشگاه اســتنفورد[۶] این گوی شــولیده را با پرتاب الکترونٍ به پروتون کاویدند. نتیجه این بود که برخی الکترون‌ها کاملاً پراکنده شدند که نشان می‌داد پروتون صرفاً ســاختار مادی یکنواخت و یکپارچه‌ای ندارد. همان سال جیمز بیورکن[۷] با تحلیلی نظری پیشنهاد کرد که این پراکندگی می‌تواند ناشــی از وجود اجزای تشکیل‌دهندهٔ نقطه مانند در پروتون باشــد. پیش‌تر، در سال ۱۹۶۴ ماری گلمان[۸] و جرج تسوایگ[۹] به‌طور مستقل پیشنهاد کرده بودند که چند ذرهٔ ســاده‌تر که گلمان آن‌ها را «کــوارک» نامید، می‌توانند اجزای تشکیل‌دهندهٔ پروتون‌ها و نوترون‌ها باشند. اما ارتباط میان نتایج تجربی و وجود کوارک‌ها بسیار دشوار بود و هنوز به ۸ سال آزمایش و نظریه‌پردازی در چند آزمایشگاه فیزیک ذرات پرانرژی نیاز داشت تا کوارک‌ها از نظر فیزیکی به‌عنوان ذرات نقطه‌ای ســازندهٔ پروتون و نوترون‌ها شناخته شوند. کل این ماجرا کشف هسته کوچک در آنچه گوی شولیدهٔ اتم در نظر گرفته می‌شد توسط رادرفورد در سال ۱۹۱۱ را به یاد می‌آورد.

اکنون می‌توان پرسید که آیا به راستی کوارک‌هــا ذراتی بنیادی هســتند و خود از ذرات کوچک دیگری ساخته نشــده‌اند؟ پاســخ را نمی‌دانیــم. آزمایش‌هایــی که قرار اســت در شــتاب‌دهنده پروتــون برخورد دهندهٔ بــزرگ هادرونی (LHC) در نزدیکی شــهر ژنو[۱۰] انجام شود، می‌تواننــد به عمق ماده نفوذ و این مسئله را روشن کنند که آیا کوارک‌ها هم اجسام مرکبی هستند یا خیر؟

با کشــف کوارک‌ها، فیزیک‌دانان روایت دیگــری از QFT را پایه‌ریــزی کردنــد کــه برهم‌کنــش بین کوراک‌ها را توضیح می‌داد و با نتایج تمام آزمایش‌هایی که تاکنون طرح‌ریزی و انجام شده، سازگار اســت. در این نظریه، نیروی قوی (کــه «نیروی رنگ» هم نامیده می‌شود) مستقیماً بین کوارک‌ها عمل می‌کند و نیروی جاذبهٔ بین پروتون‌ها و نوترون‌ها، تنها پیامد وجود نیروی قوی بین کوارک‌هاســت. میدان نیرو در این نظریه (مانند میدان EM در نظریهٔ QED) کوانتیده و میدان نیروی قوی اســت و میــدان ماده (مانند میدان الکترون) کوانتیده و میدان ماده قوی اســت. کوانتوم‌های میدان نیروی قوی، گلوئون نامیده می‌شود (مانند فوتون‌ها). چون تبادل آن‌ها توسط کوارک‌ها، آن‌ها را به هم می‌چسباند. در مقیاسی بزرگ‌تر تبادل گلوئونی بین کوارک‌های هســته‌های متفاوت، هسته را یکپارچه نگه مــی‌دارد. گلوئون‌ها نیز همانند فوتون جرم ســکون ندارند.

در سال ۱۹۶۷ دو فیزیک‌دان پاکستانی و امریکایی به نام‌های عبدالسلام و استیون واینبرگ به‌طور مستقل، ارتباط میان نیروی ضعیف و نیروی EM را کشف کردند

کوانتوم‌های میدان ماده قوی دو گونه کوارک به نام‌های کوارک بالا (u)[۱۲] و کوارک پایین (d)[۱۳] و پادذره‌های آن‌ها هستند. این نظریه پیش‌بینی می‌کند که تنها دو پیکربندی پایدار از کوارک‌های u و d وجود دارد: پروتون‌ها از دو کوارک u و یک کوارک d و نوترون‌ها از یک کوارک u و دو کوارک d ساخته شده‌اند.

در حالی‌که میدان‌های الکتروضعیف جدول I تنها با نیروی الکتروضعیف و نیروی گرانشی برهم‌کنش دارند، میدان‌های قوی با تمام نیروهای شناخته شده یعنی نیروی قوی، ضعیف و گرانشی برهم‌کنش می‌کنند. شگفت اینکه، بار کوارک‌ها کسری است: کوارک u، +۲/۳ بار پروتون و کوارک d، -۱/۳ بار پروتون را دارد که حاصل جمع بار آن‌ها +۱ برای پروتون و ۰ برای نوترون می‌شود. در نتیجه می‌توان گفت بار مثبت هسته اتم و نیروی بستگی اتمی و شیمی در نهایت ناشی از ویژگی‌های کوارک‌ها هستند. همچنین کوارک‌ها در برخی جنبه‌های نیروی ضعیف نیروی الکتروضعیف شرکت دارند. برای مثال در واپاشی بتازای هسته، یکی از کوارک‌های پایین نوترون با گسیل یک ذره بتا (الکترون) و پادنوترینوی الکترون به یک کوارک بالا وا می‌پاشد و در نتیجه نوترون تبدیل به پروتون می‌شود.

نظریهٔ الکتروضعیف نسخهٔ گسترش‌یافته QED است. در این نظریه برهم‌کنش الکترون‌ها، پوزیترون‌ها، نوترینوها و پادنوترینوها از تبادل فوتون‌ها به همراه سه گونه ذره تبادلی جدید به نام W^-، W^+ و Z حاصل می‌شود

رابطهٔ گلوئون‌ها با نیروی قوی تفاوت مهمی با رابطهٔ فوتون‌ها با نیروی الکتریکی دارد:

گلوئون‌ها هم نیروی قوی را اعمال و هم آن را حس می‌کنند اما فوتون‌ها نیروی EM را وارد یا حس نمی‌کنند. به عبارت دیگر گلوئون‌ها می‌توانند گلوئون‌های دیگر را خلق یا نابود کنند در حالی‌که فوتون‌ها نمی‌توانند باعث خلق یا نابودی فوتون‌های دیگر شوند. این یکی از جالب‌ترین ویژگی‌های کوارک‌هاست: وقتی دو کوارک از یکدیگر دور شوند، فاصله بیشتر به معنای زمان تبادل بیشتر برای آفرینش گلوئون‌های دیگر است که به معنای افزایش سریع انرژی میدان نیروی قوی است. پس از یک نقطهٔ مشخص این انرژی به اندازه کافی افزایش می‌یابد تا یک زوج کوارک - پادکوارک به وجود آورد. اگر مثلاً یکی از کوارک‌های u پروتون را از آن بیرون بکشید، از تجمع گلوئون‌ها بین این کوارک و کوارک‌های باقی‌مانده u+d پدید می‌آید. هرچه کوارک u را دور و دورتر کنید، سرانجام یک زوج «u- پادu» آفریده می‌شود و یک u جدید به مجموعهٔ u+d اضافه و یک پروتون تشکیل می‌دهد و یک پاد u به u ای که می‌خواستید از پروتون جدا کنید، می‌پیوندد و یک زوج ناپایدار «u- پادu» را تشکیل می‌دهد. این توضیحی زیبا و البته عجیب برای این پرسش است که چرا سال‌ها جست‌وجو برای یافتن تک‌کوارک به نتیجه نرسیده است.

جرم سکون پروتون‌ها ۹۳۸٫۲۷۲ Mev/C^2 است. یعنی انرژی سکون آن‌ها ۹۳۸٫۲۷۲ Mev است. اگر این عدد را به ژول تبدیل و تقسیم بر C^2 کنیم، جرم پروتون برحسب کیلوگرم به‌دست می‌آید. اما جرم کوارک u و d به ترتیب برابر است با: ۲٫۰۱Mev/c^2 و ۴٫۷۹Mev/c^2 و بنابراین جرم کل سه کوارک پروتون تنها ۸٫۸۱Mev/c^2 است. باقی‌ماندهٔ ۹۲۹٫۴۶ Mev/c^2 از جرم پروتون انرژی میدان نیروی قوی است که پروتون‌ها را به یکدیگر می‌پیوندد. در نتیجه نزدیک به ۹۹٪ جرم مادهٔ معمولی ناشی از انرژی میدان است. این یک مثال عالی از کاربرد رابطهٔ جرم - انرژی اینشتین است و نشان می‌دهد که همه‌چیز از میدان ساخته شده است.

جدول II کل ساختار نیروی قوی را نشان می‌دهد. به نکته‌های همسان بین جدول‌های I و II توجه کنید: ساختار سه‌نسلی نظریهٔ الکتروضعیف در نظریهٔ نیروی قوی نیز حفظ شده است یعنی هر نسل یک زوج ذرات ماده تشکیل شده است. در جدول II، نسل دوم و سوم هر یک شامل دو کوارک سنگین‌ترند و برخلاف کوارک‌های u و d گونه‌های ناپایدار هستند. همان‌طور که موئون‌ها و تاوها، گونه‌های سنگین‌تر و ناپایدار الکترون هستند. افزون بر این هر جدول ذرات تبادلی یا ذرات حامل نیروی چندی مانند فوتون و گلوئون که با سرعت C حرکت می‌کنند را در بردارد. این همانندی جدول‌های I و II ارتباط نزدیک میان این دو نیرو را نشان می‌دهد که باید یک نظریه وحدت‌یافته (GUT)[۱۴] شامل همه نیروهای بنیادی غیر از گرانی باشد. اما چنین نظریه‌ای مانند نظریهٔ «همه چیز»[۱۵] (TOE) که دربرگیرندهٔ همه نیروهای گرانی باشد تاکنون از دسترس دانش دور مانده است.

در مرحلهٔ کنونی نظریهٔ QFT شامل نیروهای الکتروضعیف و قوی آنچنان که در جدول‌های I و II نشان داده شده است «مدل استاندارد» نام دارد که نامی کسل‌کننده برای نظریه‌ای با پیش‌بینی‌های عجیب و دقت بی‌خطاست. اما شگفت اینکه، این مدل، تمام پدیده‌های اتمی تاکنون مشاهده شده را به خوبی توضیح می‌دهد. اکنون که برخورددهنده بزرگ هادرونی برای دستیابی به جنبه‌هایی فراتر از مدل استاندارد طراحی شده است گوش به زنگ باشید!

جدول I. نظریهٔ نیروی الکتروضعیف، دو میدان بنیادی الکتروضعیف عالم را فراگرفته است: یک میدان نیروی الکتروضعیف که کوانتوم‌های آن چهار ذرهٔ تبادلی فهرست شده‌اند، و یک میدان مادهٔ الکتروضعیف که کوانتوم‌های آن الکترون و نوترینوی الکترون است. به علاوه، نسل دوم و سومی از میدان‌های ماده وجود دارند که کوانتوم‌های آن فهرست شده‌اند:

جدول I

نسل	نوع ذره	جرم (پروتون=۱)	بار پروتون=۱+
۱	الکترون	۰/۰۰۵	-۱
۱	نوترینوی-الکترون	a	۰
۲	موئون (الکترون موئون)	۰/۱۱	-۱
۲	نوترینوی‌موئون	a	۰
۳	تأو (الکترون تأو)	۱/۹۰	-۱
۳	نوترینوی تأو	a	۰
	ذرات تبادلی:		
	فوتون	۰	۰
	W^+	۸۶	+۱
	W^-	۸۶	-۱
	Z^0	۹۸	۰

a سه نوع نوترینو دارای جرم سکون اندک اما غیرصفرند، گرچه مقدار آن معلوم نیست. می‌دانیم که مجموع جرم‌های سه نوع نوترینو کمتر از ۱ میلیونیم جرم الکترون است.

در مرحلهٔ کنونی نظریهٔ QFT شامل نیروهای الکتروضعیف و قوی آنچنان که در جدول‌های I و II نشان داده شده است «مدل استاندارد» نام دارد که نامی کسل‌کننده برای نظریه‌ای با پیش‌بینی‌های عجیب و دقت بی‌خطاست

جدول II. نظریهٔ نیروی قوی. در سراسر عالم یک میدان نیروی قوی وجود دارد که کوانتوم‌های آن گلوئون‌ها و یک میدان مادهٔ قوی است که کوانتوم‌های آن کوارک‌های u و کوارک‌های d هستند که با نیروی قوی موجود در بین کوارک‌ها به هم می‌پیوندند. به‌علاوه، میدان‌های مادهٔ نسل دوم و سومی هم وجود دارند که کوانتوم‌های آن‌ها فهرست شده است. فقط کوانتوم‌های نسل اول پایدارند و نقشی در مادهٔ معمولی ایفا می‌کنند. نسل دوم و سوم در لحظهٔ اولیهٔ مهبانگ واپاشیده شده‌اند و اکنون فقط در رویدادهای میکروسکوپی پر انرژی به مدت کوتاه به‌وجود می‌آیند.

جدول II

نسل	نوع ذره	جرم (پروتون=۱)	بار (پروتون = ۱+)
۱	کوارک u	۰/۰۰۲۱۴	+۲/۳
۱	کوارک d	۰/۰۰۵۱۰	-۱/۳
۲	کوارک c	۱/٤	+۲/۳
۲	کوارک s	۰/۱	-۱/۳
۳	کوارک t	۱/۸۵	+۲/۳
۳	کوارک b	۵/۰	-۱/۳
	ذرات تبادلی (۸ نوع) گلوئون	۰	۰

پی‌نوشت‌ها

1. Steven Weinberg
2. Virtual particles
3. Richard Taylor
4. Jerome Friedman
5. Henry Kendall
6. Stanford University
7. James Bjorken
8. Murray Gell - Mann
9. George Zweig
10. Geneva
11. Gluon
12. UP quark
13. Down quark
14. Grand Unified Theory
15. Theory of Everything