نظریه‌ی ذره‌ی تبادلی

فرهنگ لران

دانش‌کده‌ی فیزیک، دانش‌گاه صنعتی اصفهان

چکیده: با مرور توضیح پلانک و اینشتین برای تابش جسم سیاه نظریه‌ی ذره–تبادلی را که برای توصیف برهمکنش‌های الکترومغناطیسی به کار می‌رود معرفی می‌کنم. همچنین به طور کیفی نشان می‌دهم که چرا بایستی انتظار داشته باشیم این برهمکنش‌ها در انرژی‌های بالاتر با آن‌چه که از آزمایش کولن و در فیزیک اتمی با آن آشنا هستیم متفاوت باشند. تعمیم نظریه به برهم‌کنش قوی هسته‌ای و شواهد وجود نظریه‌ی وحدت بزرگ را مرور می‌کنم.

از مکانیک کلاسیک می‌دانیم که نوسانات هر ذره حول وضعیت تعادلش را می‌شود با یک نوسانگر هم‌آهنگ ساده تقریب زد. به عنوان مثال برای توصیف نوسانات ذره‌ای با یک درجه‌ی آزادی که در یک کمینه‌ی موضعی پتانسیل $V(x)$ در تعادل پای‌دار قرار دارد می‌شود به ساده‌گی و به کمک بسط تیلور دید که

$$V(x)=V(x_0)+(x-x_0)V'(x_0)+\frac{1}{2}(x-x_0)^2V''(x_0)+\cdots,$$

که در آن x_0 نقطه‌ی تعادل موضعی دست‌گاه است و $V'(x_0)$ مقدار مشتق اول پتانسیل محاسبه شده در نقطه‌ی x_0 و $V''(x_0)$ مشتق دوم پتانسیل محاسبه شده در نقطه‌ی x_0 را نشان می دهد. هم‌چنین چون به نوسانات کوچک حول نقطه‌ی تعادل علاقه‌مند هستیم از جملات بالاتر در بسط تیلور پتانسیل بر حسب $(x-x_0)$ چشم‌پوشی کرده‌ایم. چون x_0 نقطه‌ی تعادل موضعی دست‌گاه یعنی کمینه‌ی موضعی پتانسیل است $V'(x_0)=0$ و $V''(x_0)>0$. از آن جا که جمله‌ی ثابت $V(x_0)$ تأثیری بر حرکت ذره ندارد می‌شود آن را کنار گذاشت و به این ترتیب دید که

$$V(x)\approx\frac{1}{2}k(x-x_0)^2$$

که در آن $k\equiv V''(x_0)$ ثابت فنری است که نوسان‌های ذره حول نقطه‌ی تعادلش را به طور مؤثر می‌دهد. تعمیم این نتایج به دست‌گاهی با درجات آزادی بیشتر کار آسانی است.

در سال ۱۹۰۰ پلانک نشان داد که بسته‌گی آهنگ تابش جسم سیاه به بسامد تابش را می‌شود با این فرض به دست آورد که نوسانگرهای دیواره‌ی جسم سیاه در هر بسامد ν انرژی را در بسته‌هایی به انرژی $E=nh\nu$ می‌تابانند که در آن h ثابت پلانک است و n هم هر عدد طبیعی می‌تواند باشد. شاید این اولین باری بود که پس از شکست مدل ذره‌ای نیوتن برای نور، کسی فرض می‌کرد که دست‌کم نوعی از تابش الکترومغناطیسی به صورت بسته‌ای منتشر می‌شود. ضمن این که چنین فرضی، تنها راه توضیح یک پدیده‌ی تجربی یعنی تابش جسم سیاه بود که تا زمان پلانک برای نزدیک به ۴۰ سال بی‌پاسخ مانده بود. اینشتین جسورانه ادعا کرد که کوانتیده بودن تابش الکترومغناطیسی پدیده‌ای ویژه ی تابش جسم سیاه نیست و امواج الکترومغناطیسی هم‌واره کوانتیده هستند. او نشان داد که این دیدگاه آزمایش‌های بسیاری را توضیح می دهد. به عنوان مثال کوانتیده بودن تابش به آسانی پدیده‌ی فوتوالکتریک را توضیح می‌دهد. اما ۱۸ سال طول کشید تا پیش‌نهاد او قاطعانه پذیرفته شد و آن هم زمانی بود که کامپتون پراکندگی نور از یک الکترون را مطالعه کرد. در این آزمایش که به پراکنده‌گی کامپتون معروف است دیده می‌شود که تابش پراکنده شده در هر زاویه ی θ دو مؤلفه دارد. یک مؤلفه که طول موج آن با طول موج تابش فرودی که با λ نشان می دهیم یکی است و مؤلفه‌ی دیگری که طول موج آن که با λ' نشان می‌دهیم طبق رابطه‌ی زیر به زاویه‌ی پراکندگی بسته‌گی دارد،

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos\theta)$$

m در این رابطه جرم الکترون و c سرعت نور است. هر چند نظریه‌ی الکترودینامیک کلاسیک هیچ توضیحی برای وجود مؤلفه‌ی دوم نداشت اما پیش‌نهاد اینشتین در کنار نسبیت خاص او، آن را به ساده‌گی توضیح می‌داد. طبق نظریه‌ی نسبیت خاص، کوانتای تابش الکترومغناطیسی که فوتون نامیده می‌شود ذره‌ای بی‌جرم است که انرژی و تکانه‌ی آن با رابطه‌ی $E = pc$ به یک‌دیگر مربوطند. حالا اگر کسی قوانین پایستگی انرژی و تکانه‌ی خطی را برای برخورد فوتون–الکترون بنویسد و نهایتاً فرض کند که $p = h/\lambda$ و $E = h\nu$ که در آن λ و ν به ترتیب طول موج و بسامد فوتون اند رابطه‌ی پراکندگی کامپتون به سادگی به دست می‌آید.

اگر پیش‌نهاد اینشتین مبنی بر کوانتیده بودن امواج الکترومغناطیسی، نسبیت خاص و اصل عدم قطعیت در مکانیک کوانتمی را بپذیریم به نتایج جالبی درباره‌ی ماهیت برهم‌کنش‌های الکترومغناطیسی می‌رسیم که توجیه‌کننده‌ی نظریه‌ی «ذره–تبادلی» است.

برای آن‌که محتوای نظریه‌ی ذره–تبادلی را به‌تر بفهمیم یادآوری می‌کنم که در نظریه‌ی الکترومغناطیس کلاسیک به هر ذره‌ی باردار، دو میدان برداری به نام‌های میدان الکتریکی و میدان مغناطیسی منتسب می‌شود که مقدار و جهت آن‌ها با معادلات ماکسول بر حسب بار و سرعت ذره‌ی باردار و شرایط مرزی داده می‌شود. در این نظریه نیروی وارد بر ذرات باردار با قانون نیروی لورنتس محاسبه می‌شود. این نظریه آن‌قدر خوب است یعنی آن چنان با تجربه هم‌خوانی دارد که علم مخابرات تماماً برپایه‌ی آن استوار شده است. البته همان‌طور که در بالا دیدیم دامنه‌ی درستی این نظریه تا قلم‌رو مکانیک کوانتمی ادامه نمی‌یابد. برای همین است که باید کل نظریه را از نو و براساس فرض‌های نو بنویسیم منتها این نظریه‌ی نو بایستی در محدوده‌ی درستی نظریه‌ی الکترومغناطیس ماکسول با آن «انطباق» داشته باشد.

در نظریه‌ی ذره–تبادلی فرض وجود میدان‌های الکتریکی و مغناطیسی را به عنوان کمیت‌های بنیادی کنار می‌گذاریم و در عوض فرض می‌کنیم که برهم‌کنش ذرات باردار نتیجه‌ی تبادل فوتون‌هایی بین آن‌ها است. تنها کاری که این فوتون ها می‌کنند این است که تکانه و انرژی را بین دو ذره‌ی باردار مبادله می‌کنند و به این ترتیب اثری را ایجاد می‌کنند که ما به آن می‌گوییم «برهم‌کنش». این که در یک برهم‌کنش چند فوتون مبادله می‌شود و هر فوتون چه‌قدر انرژی و چه‌قدر تکانه جابه‌جا می‌کند معلوم نیست چرا که این روی‌داد یک فرآیند کوانتمی است. پس تنها کاری که می‌شود کرد این است که دامنه‌ی احتمال هر فرآیند ممکنی را حساب کنیم و از مجموع آن‌ها یک دامنه‌ی احتمال کل به دست بیاوریم. سپس با یک محاسبه در چارچوب مکانیک کوانتمی باید بتوانیم به کمک این دامنه‌ی احتمال کل، یک توصیف کمّی از روی‌دادهای آزمایش‌گاهی ارائه بدهیم.

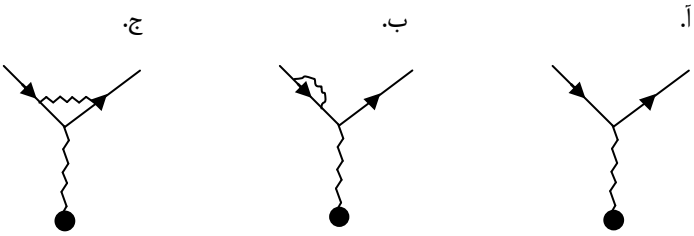
برای آن‌که سازوکار «نهفته» در نظریه‌ی ذره–تبادلی را به‌تر بفهمیم، بیایید دنیا را از نگاه یک الکترون ببینیم. این الکترون مرتب با ارسال فوتون‌هایی اظهار وجود می‌کند. اگر دست کم یکی از این فوتون‌ها به یک ذره‌ی باردار دیگر برسد می‌گوییم این دو با هم برهمکنش الکترومغناطیسی کرده‌اند. اما تعداد این فوتون‌ها نامعلوم است و به علاوه اصلاً معلوم نیست که به مقصدی هم برسند. فرض کنید که اصلاً هیچ ذره‌ی بارداری آن دور و بر نباشد. چه اتفاقی می‌افتد؟ تعداد زیادی فوتون از جانب الکترون صادر شده‌اند که هر کدام مقداری انرژی و تکانه با خود می‌برند. الکترون این مقدار انرژی و تکانه را از کجا می‌آورد؟ بگذارید این سؤال‌ها را به گونه‌ی دیگری مطرح کنیم. اگر در دست‌گاه سکون الکترون باشیم مادامی که الکترون با ذره‌ی باردار دیگری بر هم‌کنش نکرده است به واسطه‌ی قانون بقای انرژی و تکانه، ساکن باقی می‌ماند. اما می‌دانیم الکترون در حال فوتون–پراکنی است. می‌شود فرض کرد که فوتون‌ها طوری منتشر می‌شوند که الکترون از جایش تکان نخورد اما انرژی این فوتون‌ها از کجا می آید؟ الکترون که تحلیل نمی‌رود! ما هر وقت جرم الکترونی را اندازه بگیریم مقدار معلومی به دست می‌آید که به آن جرم الکترون می‌گوییم و یکی از ثوابت فیزیک به شمار می‌آید. اگر اصلاً فوتونی منتشر نمی‌شد هم هیچ‌گاه برهم‌کنشی در کار نمی‌بود. مگر آن که بگوییم الکترون تنها در صورتی که «بداند» ذره‌ی بارداری دور و برش است تنها برای او و نه در هیچ راستای دیگری فوتون گسیل می‌کند!

این جا است که اصل عدم قطعیت $\Delta E\,\Delta t \approx \hbar$ راه‌گشا است. این اصل می‌گوید که درستی قانون بقای انرژی را تنها در یک بازه‌ی زمانی طولانی $\Delta t \to \infty$ می‌شود تحقیق کرد و در یک بازه‌ی زمانی محدود Δt الکترون می‌تواند قانون بقای انرژی را به اندازه‌ی $\Delta E \approx \hbar/\Delta t$ نقض کند. در این بازه‌ها الکترون می‌تواند فوتون‌هایی گسیل کند. اگر این فوتون‌ها به ذره‌ی باردار دیگری برسند انرژی و تکانه‌شان را با آن ذره مبادله می‌کنند. به این ترتیب الکترون با آن ذره برهم‌کنش کرده و انرژی و تکانه‌اش به شکلی که با قوانین بقای تکانه و انرژی سازگار باشد تغییر می‌کند. اما اگر این فوتون ها به جایی نرسند بایستی پیش از آن که وقت بگذرد دوباره به الکترون برگردند! به نمودارهای زیر توجه کنید.

شکل ۱:

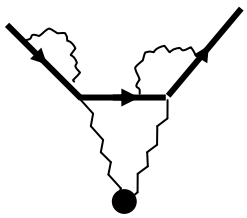
نمودار (۱-آ) الکترونی را نشان می‌دهد که فوتونی را گسیل کرده و دوباره جذب می‌کند. نمودار (۱.ب) الکترونی را نشان می‌دهد که دو فوتون گسیل کرده و دوباره جذب می‌کند. در شکل (۲) سه حالت ممکن در بر هم‌کنش یک الکترون با یک پروتون نشان داده شده است.

شکل ۲:



نمودار (۲.آ) برهم‌کنش یک الکترون و یک پروتون به واسطه‌ی یک فوتون مبادله‌ای را نشان می‌دهد. نمودار (۲.ب) همان برهم‌کنش است. در این‌جا الکترون پیش از مبادله یک گسیل ناموفق داشته است. در نمودار (۲.ج) هم اولین گسیل موفق نبوده است اما الکترون این فوتون را پس از آن که گسیل دومش به پروتون می رسد باز پس می‌گیرد.

شکل ۳:



شکل (۳) یک بر هم کنش با دو فوتون مبادله‌ای را نشان می‌دهد. در این نمودار دو گسیل ناموفق هم وجود دارد. تمامی این روی‌دادها مجاز است. در یک برهم‌کنش واقعی روی‌دادهای زیاد دیگری هم به جز این‌ها می‌تواند اتفاق بیفتد. بر اساس مکانیک کوانتمی ما بایستی تمامی این رویدادها را برای محاسبه‌ی برهم‌کنش یک الکترون و پروتون در نظر بگیریم، دامنه‌ی احتمال وقوع همه‌ی آن را حساب کنیم و با هم جمع بزنیم تا دامنه‌ی احتمال

برهم‌کنش را به دست بیاوریم. اما این که این دامنه‌ها چه‌طوری حساب می‌شوند به جزئیات نظریه‌ی الکترودینامیک کوانتمی برمی‌گردد که فراتر از بحث کیفی ما در این مقاله است.

فوتون‌های مبادله‌ای موجودات عجیبی هستند. جنس آن‌ها از همان جنس فوتون‌های معمولی است که دور و برمان را پر کرده‌اند و مثلاً باعث می‌شوند که ببینیم و یا در مخابره‌ی پیام‌های رادیویی توسط آنتن‌ها ارسال و دریافت می‌شوند. اما به لحاظ ملاحظات دینامیکی یک فرق اساسی بین این دو دسته از فوتون‌ها وجود دارد. فوتون‌های نور یک چراغ در نظریه‌ی نسبیت خاص ذرات بی‌جرمی محسوب می‌شوند که تکانه و انرژی‌شان با رابطه‌ی $E = pc$ به هم مربوط اند. این تساوی را از نظریه‌ی الکترومغناطیس ماکسول هم می‌شود به دست آورد. این فوتون‌ها به اصطلاح حقیقی هستند و روی «لاک حرکت» شان قرار دارند یعنی از رابطه‌ی کلی $E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$ پیروی می‌کنند. اما می‌شود دید که فوتون‌هایی که نیرو را مبادله می‌کنند روی لاک حرکت نیستند و برای این فوتون‌ها $E^2 - p^2c^2 < 0$. برای تحقیق این مطلب به روی‌داد شکل (۲.آ) توجه کنید. فرض کنید که در این فرآیند تکانه‌ی الکترون به اندازه‌ی q تغییر کند. هم‌چنین فرض کنید که جرم پروتون بی‌اندازه بزرگ باشد.[۱] در این صورت، هرچند تکانه‌ی پروتون هم به اندازه‌ی q تغییر کرده است اما انرژی پروتون تغییری نمی‌کند. نتیجه‌ی این حرف این است که تکانه‌ی فوتون مبادله‌ای $|\vec{p}| = q$ و انرژی آن $E = 0$ بوده است. از این‌رو

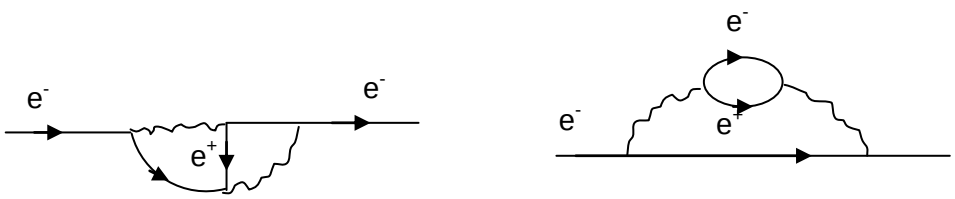
$$E^2 - p^2c^2 = -q^2c^2 < 0.$$

به این دلیل، به فوتون‌های مبادله‌ای، «فوتون مجازی» می‌گویند. البته در یک برهم‌کنش به جز فوتون‌های مجازی که برهم‌کنش را حمل می‌کنند فوتون‌های حقیقی هم منتشر می‌شوند. با این پدیده از الکترومغناطیس ماکسول آشنا هستیم. در آن جا ذراتی که برهم‌کنش می‌کنند شتاب می‌گیرند و در اثر این شتاب امواج الکترومغناطیسی ساطع می‌کنند که هم‌ارز انتشار فوتون‌های حقیقی در نظریه‌ی کوانتمی هستند.

سؤالی که مطرح می‌شود این است که آیا تمام داستان برهم‌کنش ها به نمودارهایی از نوع نمودارهای شکل‌های (۱)، (۲) و (۳)، یعنی نمودارهایی که از ترکیب نمودارهای گسیل و جذب فوتون به دست می‌آید محدود می شود؟ پاسخ این پرسش را باید در کوانتمی بودن نظریه جستجو کرد. یک فوتون به واسطه‌ی رابطه‌ی $E = mc^2$ می‌تواند در میانه‌ی راه به یک زوج ذره–پادذره تبدیل شود. این زوج ذره–پادذره اصولاً مجازی هستند و اگر برهم‌کنشی با ذره‌ی دیگری نهایتاً رخ ندهد این زوج باید دوباره یک‌دیگر را نابود کنند و فوتون حاصل از این نابودی جذب الکترون اولی شود تا قانون بقای انرژی در $\Delta t \to \infty$ برقرار باشد. اما چون تمام الکترون‌های عالم شبیه هم هستند معلوم نمی‌شود که پوزیترون، کدام الکترون را نابود می‌کند، آن الکترونی که با خودش متولد شده است و یا آن الکترون اولیه را. به هر حال نتیجه آن است که قبل و بعد از همه‌ی این اتفاقات ما یک الکترون با انرژی و تکانه‌ی پایسته داریم. نمودارهای شکل (۴) را ببینید.

آ. ب.

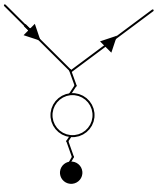
شکل۴:



[۱] این فرض عملاً به این معنا است که برای یک پروتون معمولی محاسبه را در دستگاه مرکز جرم الکترون–پروتون انجام بدهیم. با توجه به این که مقدار $E^2 - p^2c^2$ ناوردای لورتس است نتیجه‌ی نهایی بحثی که در پی می‌آید عمومی خواهد بود و از فرض بی‌نهایت بودن جرم پروتون بی‌نیاز است.

این فرآیند تولید و نابودی زوج می‌تواند برای فوتون‌هایی که در گسیل های موفق هم شرکت می‌کنند رخ بدهد. یک نمونه‌ی ساده‌ی آن در شکل (۵) نشان داده شده است.

شکل ۵:



پس ما باید در محاسبه‌ی برهم‌کنش بین یک الکترون و پروتون احتمال تشکیل زوج ذره–پادذره در میانه‌ی راه را هم در نظر بگیریم. تنوع زوج ذره–پاد ذره به الکترون و پوزیترون ختم نمی‌شود. هر آن‌چه که با قوانین بقای بار الکتریکی و دیگر قوانین بقا از این دست سازگار باشد ممکن است در این میان پدیدار شود. دوباره تنها کاری که می‌توانیم انجام بدهیم محاسبه‌ی دامنه‌ی احتمال کل به صورت جمع دامنه‌ی احتمال هر روی‌داد است. مقدار عددی این دامنه‌ها علی‌الاصول تابعی از تکانه و انرژی فوتون‌های تبادلی است. پس می‌شود انتظار داشت که برهم‌کنش الکترون–پروتون در انرژی‌های زیاد با آن‌چه که از آزمایش کولن آموخته‌ایم و در فیزیک اتمی کاربرد دارد متفاوت باشد. چرا که مثلاً در تمام روی‌دادهایی که مانند نمودار شکل (۳) یا شکل (۵) متناظر با مبادله‌ی یک فوتون هستند، بیش‌ترین مقدار ممکن برای تکانه‌ی فوتون تبادلی، دو برابر اندازه‌ی تکانه‌ی الکترون تابیده شده به پروتون است. پس در برهم‌کنش‌هایی که در انرژی‌های کم رخ می‌دهد مثل آن‌چه که در اتم‌ها اتفاق می‌افتد، تکانه‌ی انتقالی به هر حال ناچیز است. اما در پراکنده‌گی‌هایی که در خروجی شتاب‌دهنده‌ها رخ می‌دهد اندازه‌ی این تکانه‌ها نوعاً زیاد است. از این رو دامنه‌ی احتمالی که اندازه‌ی چنین برهم‌کنشی را می‌دهد با آن‌چه که مربوط به برهم‌کنش‌های اتمی است، متفاوت می‌باشد. این تفاوت، بیشتر در بسته‌گی مقدار بار الکتریکی الکترون به انرژی‌ای که در آن انرژی، بار الکترون در بر هم‌کنش با پروتون سنجیده می‌شود نمایان می‌شود. هرچه‌قدر انرژی الکترونی که از یک پروتون پراکنده می‌شود بیشتر باشد، الکترون و پروتون بار الکتریکی بیش‌تری از خود «نشان خواهند داد». رابطه‌ی زیر این بسته‌گی را به روشنی نشان می‌دهد:

$$\alpha\left(Q^2\right)=\frac{\alpha\left(\mu^2\right)}{1-\frac{\alpha(\mu^2)}{3\pi}\log\left(\frac{Q^2}{\mu^2}\right)}.$$

در این رابطه $Q^2=-q^2>0$ که در آن q چاربردار تکانه‌ی فوتون تبادلی است.[۲] α ثابت ساختار ریز است که طبق رابطه‌ی زیر به بار الکتریکی الکترون مربوط می‌شود:

$$\alpha=\frac{1}{4\pi\,\varepsilon_0}\frac{e^2}{\hbar c}$$

μ^2 به اصطلاح نقطه‌ی مرجع است و اگر فرض کنیم که μ^2 اندازه‌ی چار بردار فوتون‌های تبادلی در برهم‌کنش‌های کم انرژی باشد آن‌گاه

$$\alpha\left(\mu^2\right)=\frac{1}{137}.$$

این عدد با جای‌گذاری مقدار بار الکتریکی الکترون $e=1.6\times10^{-19}$ کولن که مثلاً در فیزیک اتمی به دست می آید محاسبه شده است. از بسته‌گی α به Q^2 معلوم می‌شود که با افزایش Q^2 مقدار بار الکتریکی دیده شده در آزمایش‌های پراکندگی افزایش می‌یابد.

---

[۲] توجه کنید که چون فوتون مبادله ای، یک ذره‌ی مجازی است $q^2=\left(E_{\text{photon}}^2-\left|\vec{q}_{\text{photon}}\right|^2c^2\right)<0$.

این مشاهده‌ی نظری که در آزمایش‌گاه با قطعیت تأیید شده است چشم‌انداز تازه‌ای را در برابر دیدگان نظریه پردازان فیزیک ذرات بنیادی گشوده است. در واقع ایده‌ی ذره‌ی تبادلی در قالب نظریه‌ی الکترودینامیک کوانتمی که با نام اختصاری QED شناخته می‌شود بسیار موفق بوده است به طوری که نظریه‌ی الکترودینامیک کوانتمی و تعمیم آن به برهم‌کنش‌های ضعیف هسته‌ای که به نظریه‌ی الکتروضعیف معروف است از به‌ترین نظریه‌های فیزیکی از لحاظ توافق با تجربه به شمار می‌آیند. برای توصیف کمّی برهم‌کنش های قوی هسته‌ای هم نظریه‌ای به نام «دینامیک رنگی کوانتمی» با نام اختصاری QCD ساخته شده است. در این نظریه فرض می‌شود که سنگ بنای باریون‌ها[۳] کوارک‌های رنگ دار هستند و ذرات تبادلی که در این نظریه گلوئون خوانده می‌شوند به این رنگ‌ها جفت می‌شوند همان‌طور که در QED فوتون به بار الکتریکی ذرات جفت می شود و ذرات بی‌بار را نمی‌بیند. فرض بر این است که هشت جور گلوئون داریم که مسؤول تبادل نیروی هسته‌ای هستند. برخلاف برهم‌کنش های الکترومغناطیسی که در آن ها ثابت ساختار ریز در انرژی‌های پایین کوچک است ($\alpha = 1/137$) در برهم‌کنش‌های هسته‌ای ثابت ساختار ریز در انرژی‌های کم عدد کوچکی نیست و آن را برای باریون‌ها برابر یک می‌گیرند. به این ترتیب ما قادر نیستیم در انرژی‌های کم، نظریه را حل کنیم و آن را با داده‌های تجربی که از مطالعات فیزیک هسته‌ای به دست می‌آید بسنجیم. به این ترتیب به نظر می‌رسد که این نظریه، به درد نخور است چرا که به کمک آزمایش‌گاه قابل تأیید یا رد نیست. به چنین نظریه‌ای ابطال‌ناپذیر می‌گویند. ولی چنین قضاوتی در مورد QCD درست نیست. در واقع می‌شود نشان داد که به واسطه‌ی آثار کوانتمی، α_s ثابت ساختار برهم‌کنش‌های رنگی، با افزایش انرژی در پراکنده‌گی‌ها کاهش می‌یابد. رابطه‌ی زیر را ببینید:

$$\alpha_s\left(Q^2\right)=\frac{\alpha_s\left(\mu^2\right)}{1+\frac{\alpha_s(\mu^2)}{12\pi}(33-2n_f)\log\left(\frac{Q^2}{\mu^2}\right)}.$$

در این رابطه μ^2 نقطه‌ی مرجع است که می‌شود آن را به فیزیک باریون‌های معمولی مربوط کرد یعنی فرض کرد که $\alpha_s\left(\mu^2\right)=1$. n_f در این رابطه تعداد طعم‌های کوارکی[۴] را نشان می‌دهد. این رابطه می‌گوید مادامی که $n_f < 33/2$ باشد، با افزایش Q^2 ثابت ساختار ریز کاهش می‌یابد. معنی این حرف این است که نظریه در انرژی‌های بالا قابل محاسبه است و می‌شود درستی‌اش را در پراکنده‌گی‌هایی که در شتاب‌دهنده‌ها رخ می‌دهد سنجید. امروز درستی این نظریه کاملاً پذیرفته شده است و نظریه پردازان در جستجوی روش‌هایی برای محاسبه‌ی آن در انرژی‌های پایین هستند. چنان‌که این امکان به وجود بیاید طبعاً انتظار داریم که نظریه با داده‌های فیزیک هسته‌ای بخواند هرچند ممکن است در این‌جا دروازه‌ای به دنیایی جدید نهفته باشد. به رفتار

$$\lim_{Q^2\to\infty}\alpha_s\left(Q^2\right)\to 0$$

آزادی مجانبی می‌گویند که پس از نزدیک به سی سال از کشف نظری آن جایزه‌ی نوبل فیزیک را در سال ۲۰۰۴ برای یابنده‌گانش به ارمغان آورد. آزادی مجانبی در کنار بسته‌گی ساختار ریز برهم‌کنش‌های الکتریکی به Q^2 نشان داد که در انرژی معلومی مقدار ثابت‌های جفت‌شده‌گی الکتریکی و رنگی مساوی خواهد بود. نظریه‌پردازان این مشاهده را جدی گرفتند و ادعا کردند که در انرژی‌های بالاتر از $10^{15}\mathrm{GeV}$ برهمکنش‌های الکتریکی و رنگی یکی خواهند بود. به چنین گمانی وحدت بزرگ می گویند که البته شامل نیروی ضعیف هسته‌ای هم می شود. در واقع می‌شود به طور نظری دید که ثابت‌های جفت‌شده‌گی الکتریکی، ضعیف هسته‌ای و قوی هسته‌ای در انرژی وحدت بزرگ با دقت خوبی مساوی هستند و این که سه منحنی

---

[۳] باریون‌ها به دو دسته‌ی هادرون‌ها و مزون‌ها تقسیم می‌شوند. در مدل کوارکی که نظریه‌ی دینامیک رنگی کوانتمی روی آن سوار شده است، فرض بر این است که هر هادرون از سه کوارک رنگی به رنگ‌های سبز، قرمز و آبی ساخته می‌شود. پروتون و نوترون سبک‌ترین هادرون‌ها هستند. مزون‌ها از یک کوارک و یک پادکوارک ساخته شده‌اند که اگر رنگ کوارک مثلاً قرمز باشد رنگ پادکوارک، پادقرمز خواهد بود. پایون‌ها و ذره ی η سبک‌ترین مزون‌ها هستند.

[۴] کوارک‌ها به جز بار الکتریکی و رنگ، طعم (flavor) هم دارند. تا امروز شش طعم کشف شده‌اند که به نام‌های بالا (up)، پایین (down)، شگفت (strange)، افسون (charm)، زیبا (beauty) و سر (top) شناخته می شوند. انتظار نداریم که تعداد طعم‌ها بیش‌تر از این باشد.

یک‌دیگر را تقریباً در یک نقطه قطع کنند واقعاً نشان‌دهنده‌ی وقوع وحدت در آن انرژی است. در دهه‌ی ۶۰ شمسی چندین نظریه ی وحدت بزرگ نوشته شدند که به خوبی نشان می‌دادند چه‌طوری در انرژی‌های کم‌تر از انرژی $10^{15}\mathrm{GeV}$ این سه نیرو از هم جدا می‌شوند. این که کدام نظریه درست است را آزمایش‌گاه تأیید می‌کند. البته ما هیچ‌گاه به انرژی $10^{15}\mathrm{GeV}$ نخواهیم رسید. [۵] اشکال مشترک همه‌ی این نظریه‌ها این است که نیمه عمر پروتون را در به‌ترین حالت، حدود 10^{33} سال به دست می‌دهند؛ در حالی که از مشاهدات نجومی و با توجه به عمر عالم می‌دانیم که نیمه عمر پروتون از این مقدار بیش‌تر است.

این روزها تعمیم‌های مختلفی از نظریه‌ی وحدت ارائه شده است که مثلاً با فرض وجود ابرتقارن یا ابعاد بیشتر از چهاربعد نوشته شده‌اند. برخی از ویژگی‌های نظریه‌های ابعاد بالاتر را پیش‌تر در مقاله‌ای در مجله‌ی «فرآیند» مرور کرده‌ام.

[۵] بالاترین انرژی در دسترس ما در ۲۰۰۸ نزدیک به $14\mathrm{TeV}$ و در شتاب‌دهنده‌ی LHC خواهد بود.