

جایزه‌ی نوبل - فیزیک - 2004

امیرحسین - فتح‌اللهی

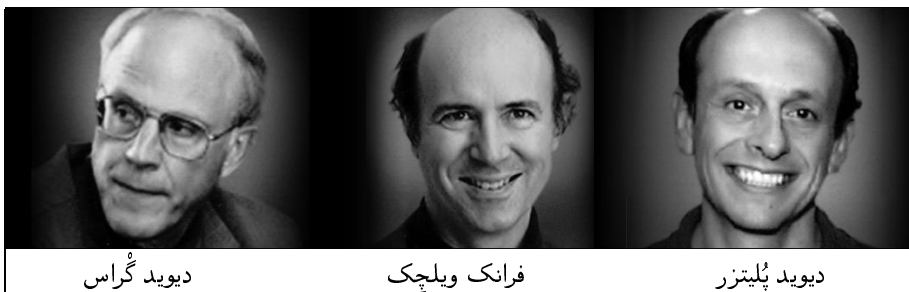
دیوید گراس⁽¹⁾، فرانک ویلچک⁽²⁾، و دیوید پلینتز⁽³⁾ با سهم مساوی جایزه‌ی نوبل - فیزیک در سال 2004 را بُردند. این جایزه برای کارهای این سه نفر در 1973 است، که در دو مقاله‌ی پیاپی در مجله‌ی فیزیکال ریویو لیترز⁽⁴⁾ چاپ شد؛ اولی از گراس و ویلچک [1] و دومی پلینتز به تنهایی [2]. در اعلان رسمی - بنیاد نوبل آمده است:

“... برای کشف آزادی - مجانبی در نظریه‌ی برهم کنش - قوی”

احتمالاً دو چیز باید در بالا توضیح داده شوند، آزادی - مجانبی، و برهم کنش - قوی. ابتدا سراغ دومی می‌رویم. تا جایی که می‌دانیم در طبیعت چهار نیروی - بنیادی هست: گرانش، الکترومغناطیس، نیروی - هسته‌ای - قوی، و نیروی - هسته‌ای - ضعیف. از این میان گرانش و الکترومغناطیس از همه آشناترند. گرانش ما را روی زمین، و زمین را دور خورشید نگه می‌دارد، و الکترومغناطیس نیرویی است که عامل تقریباً همه‌ی پدیده‌های اطراف ما است - از سخت بودن الماس گرفته، تا رساننده‌گی مس و ویژه‌گی‌های شیمیایی - مواد.

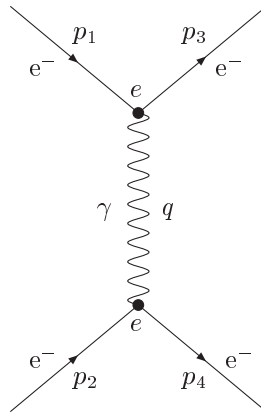
گرانش وقتی مهم می‌شود که جسم‌های مورد نظر خیلی سنگین باشند. پس در مورد ذرات بسیار کوچکی مثل الکترون‌ها و پروتون‌ها گرانش را کنار می‌گذاریم.

دو نیروی دیگر، نیروهای ضعیف و قوی - هسته‌ای، در پدیده‌هایی نقش دارند که ما با بعضی از آن‌ها آشناسیم. همه می‌دانیم که هسته‌ی اتم‌ها از تعدادی پروتون با بار مثبت و نوترون‌های خنثا تشکیل شده است. هم چنین شعاع هسته 10^{-4} تا 10^{-5} برابر شعاع اتم است. حال مسئله این است که چه طور پروتون‌های مثبت در کنار هم قرار می‌گیرند، و نه تنها هسته به خاطر دافعه‌ی الکتریکی پروتون‌ها از هم نمی‌پاشد، بلکه برای شکستن هسته انرژی هم باید صرف کرد. این نشان می‌دهد که وقتی پروتون‌ها و نوترون‌ها در هسته کنار هم جمع می‌شوند انرژی آزاد می‌کنند و یک حالت پایدارتر می‌سازند. این در واقع همان سازوکاری است که منشاء تولید انرژی در خورشید است. جواب سراسر است - مسئله‌ی بالا (این که چه چیزی پرتون‌های مثبت - هسته را کنار هم نگه می‌دارد) این است که لایه‌ی نیرویی قوی‌تر از الکترومغناطیس باعث کنار هم ماندن پروتون‌ها است - این همان چیزی است که به نیروی - قوی



هسته‌ای معروف شده است. در واقع این نیرو در مقایسه با نیروی الکتریکی "قوی" است. بیش‌تر هسته‌ها پایدارند، اما عنصرها ایزوتوپ‌های ناپایدار هم دارند — همان‌هایی که به ایزوتوپ‌های پرتوزا معروف شده‌اند. مواد پرتوزا سه نوع پرتو تولید می‌کنند، که به پرتوهای α و β و γ معروف‌اند. پرتوهای α هسته‌ی اتم هلیوم اند؛ پرتوهای β الکترون یا پادالکترون (پوزیترون) اند؛ و پرتوهای γ فوتون‌های پُرانرژی‌اند. در واقعیت دیده می‌شود که نوترون‌ها در حالت آزاد پایدار نیستند و واپاشیده می‌شوند. نیمه‌عمر نوترون‌ها حدود 15 دقیقه است، و در واپاشی خود پرتوهای β می‌گسیلند. این باعث می‌شود که حدس برزیم سازوکار واپاشی β به طور مستقیم به نوترون‌ها مربوط می‌شود. این جاست که نتیجه می‌گیریم به غیر از نیروی الکتریکی و نیروی قوی هسته‌ای، نیروی دیگری هم هست که مسئول ناپایداری نوترون‌هاست — این را نیروی ضعیف هسته‌ای می‌نامیم. این نیرو باید به نسبت دو نیروی دیگر ضعیف‌تر باشد، چون واپاشی β ی نوترون، نسبت به واپاشی‌هایی که مسئول آن‌ها نیروی الکترومغناطیسی و قوی هستند، آرام انجام می‌شود.

تا این‌جا تصویری از این‌که هر کدام از چهار نیرو مسئول چه نوع اتفاقاتی در طبیعت هستند پیدا کردیم. حال باید نظریه‌ای را که فیزیک پیشه‌ها برای توصیف و از آن مهم‌تر کمی کردن این نیروها به کار می‌برند یاد بگیریم. در مورد الکترومغناطیس، معادلات مکسول⁽⁵⁾ به هم‌راه معادله حرکت لورنتس⁽⁶⁾ اثر متقابل ماده‌ی باردار و میدان الکترومغناطیسی را، حداقل در حوزه‌ی فیزیک کلاسیک، توضیح می‌دهند. اما این‌ها نظریه‌های کلاسیک هستند، و باید کوانتومی شوند. زبانی که امروزه برای توصیف نیروها به کار می‌رود بر اساس نظریه‌ی میدان‌های کوانتومی است. بنا بر نظریه‌ی میدان‌های کوانتومی، وقت‌ی دو ذره از کنار هم رد می‌شوند، فرایندهای مختلفی ممکن است روی دهد. هر فرایند با احتمالی روی می‌دهد، و یک نظریه‌ی خوب نظریه‌ای است که بتواند دامنه‌ی این احتمال‌ها را حساب کند. پس نظریه عبارت است از فرمول‌هایی که به کمک آن‌ها می‌توان دامنه‌ی احتمال فرایندهای مختلف را حساب کرد. این فرمول‌ها بسیار پیچیده‌اند، و فیزیک پیشه‌ها برای راحت‌تر حفظ کردن این فرمول‌ها نمودارهایی می‌کشند. (به این ترتیب، کشیدن نمودار تازه شروع یک محاسبه‌ی بسیار طولانی است.) این نمودارها را نمودارهای فاینمن⁽⁷⁾ می‌نامند. بر اساس این نمودارها یک تصویر نسبتاً ساده و قابل نمایش از نظریه ساخته می‌شود. در ادامه برای توضیح

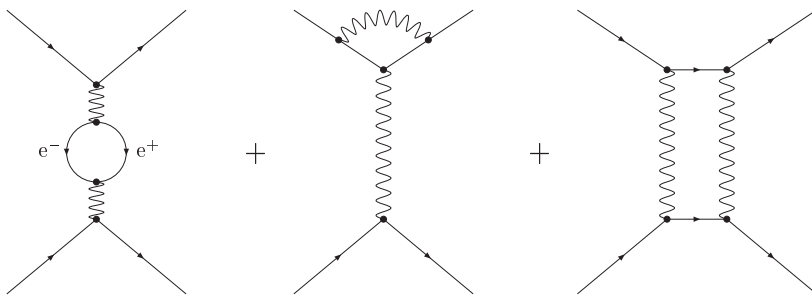


شکل ۱

مطلب از این تصویر ساده استفاده می‌کنیم، با این امید که ذکر نکردن محاسبات این اشتباه را به وجود نیاورد که فیزیک پیشه‌ها در حال قصه‌سرائی‌اند. براساس این تصویر وقتی دو ذره‌ی مادّی به هم نیرو وارد می‌کنند به‌خاطر یک ذره‌ی واسطی یا مبادله‌شونده است که بعضی وقت‌ها به آن “کوانتوم میدان” می‌گویند.

برای آشنا شدن با این مفهوم، از آشناترین نیرو، یعنی نیروی الکترومغناطیسی شروع می‌کنیم. وقتی دو الکترون از کنار هم می‌گذرند فرایندهای مختلفی ممکن است روی دهد. یکی از این فرایندها، که با نمودار شکل (1) نمایش داده می‌شود، این است که الکترون‌ها با مبادله‌ی یک فوتون (کوانتوم میدان الکترومغناطیسی) تکانه مبادله کنند، یعنی به هم نیرو وارد کنند. نمودار فاینمن این فرایند در شکل (1) کشیده شده است. در این شکل خط‌های صاف معرف الکترون‌ها (e^-) هستند و خط موجی معرف فوتون (γ) است. الکترون‌های ورودی تکانه‌های p_1 و p_2 و خروجی‌ها p_3 و p_4 دارند، و بنا بر بقای تکانه داریم $p_1 + p_2 = p_3 + p_4$ ، که در این صورت $q := p_1 - p_3 = p_4 - p_2$ می‌شود تکانه‌ی فوتون مبادله‌شده. دامنه‌ی احتمالی که قرار است با فرمول‌های متناظر با این نمودار محاسبه شود یک عدد مختلط است. برای محاسبه‌ی این عدد مختلط، در فرمول‌ها باید عدددهایی مثل بار، جرم، انرژی، تکانه، اسپین الکترون‌ها را در فرمول‌ها گذاشت. پس از محاسبه‌ی دامنه‌ی احتمال می‌توان مقادیر مختلف فیزیکی، از قبیل دامنه‌ی پراکنده‌گی را حساب کرد.

در نمودار شکل (1) دو رأس هست که با \bullet نمایانده شده‌اند. این رأس‌ها اهمیت خاصی دارند، به این معنی که در محاسبه هر رأس معادل یک e ، مقدار بار الکترون است، و در این صورت عددی که به این نمودار نسبت داده می‌شود متناسب با e^2 است. فرض کنید براساس محاسبه‌ی دامنه‌ی پراکنده‌گی بین دو الکترون بخواهیم نیروی بین آن دو را برحسب فاصله به دست آوریم. با محاسبه‌ی که در نظریه‌ی میدان براساس نمودار بالا انجام می‌شود، برای الکترون‌های تقریباً ایستا



شکل ۲

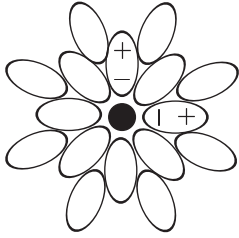
اندازه‌ی نیرو می‌شود

$$F_{ee}^{(1)} = c_0 \frac{e^2}{r^2},$$

که در آن r فاصله‌ی بین دو الکترون است، و c_0 ثابتی است که به انتخاب سیستم آحاد بسته‌گی دارد. در واحدهای cgs، که در فیزیک ذرات متداول‌تر است، $c_0 = 1$ [نگاه کنید به 3].

در رابطه‌ی بالا (1) در توان برای این است که توجه کنیم این نیرو در تقریب "اول" به دست آمده (جلوتر بیشتر توضیح می‌دهیم). عبارت بالا همان نیروی کولن⁽⁸⁾ است که می‌شناسیم. اما کار به همین جا ختم نمی‌شود، زیرا پراکنده شدن الکترون از الکترون فرایندی است که می‌تواند به طرق مختلفی روی دهد. به بیان دیگر، می‌توان نمودارهای دیگری هم کشید که همان مقدار نکانه را منتقل کنند. مثلاً نمودارهای شکل (2) را در نظر بگیریم. در نمودار طرف چپ فوتونی که مبادله می‌شود در بین راه به یک زوج الکترون و پوزیترون تبدیل می‌شود، و در ادامه با ترکیب این زوج، فوتونی به وجود می‌آید که جذب الکترون پائینی می‌شود. در نمودار وسطی یک فوتون اضافه از الکترون بالایی ساطع و جذب می‌شود. البته این کار می‌توانست در الکترون پائینی هم اتفاق بیفتد که یک نمودار دیگر می‌شد. در نمودار طرف راست هم انتقال تکانه توسط دو فوتون مبادله‌شونده اتفاق می‌افتد. نکته‌ی جالب توجه برای این نمودارها این است که در همه‌ی آنها یک حلقه وجود دارد. به این دلیل به این نمودارها تصحیحات یک حلقه‌ای به پراکنده‌گی الکترون-الکترون می‌گویند. هم‌چنین هر سه نمودار بالا چهار رأس دارند، و این یعنی نیرو از مرتبه‌ی e^4 است. در این جا نمی‌توان جزئیات محاسبات را آورد، ولی پس از انجام دیده می‌شود دامنه‌ی احتمال هم تابع r است، هم تابع یک مقیاس مرجع برای انرژی، که ما آن را μ می‌گیریم.

در cgs برای بُعد بار الکتریکی داریم $[e^2] = ML^3T^{-2}$ [3]. دو کمیت مهم دیگر در یک نظریه‌ی نسبیتی و کوانتومی c و \hbar هستند، که برای آنها داریم $[\hbar] = ML^2T^{-1}$ و $[c] = LT^{-1}$. کمیت زیر بدون بُعد است.



بار آزمون

•

$$Q \rightarrow Q' = \frac{Q}{K}$$

ضریب دی الکتریک: K

$$K > 1 \rightarrow Q' < Q$$

شکل ۳

$$\alpha = \frac{e^2}{\hbar c} \approx \frac{1}{137.036}$$

چون α بدون بُعد است مقدار آن در تمام سیستم‌های آحاد یکی است [3]. اگر خواسته باشیم تمام جملات شبیه نیروی کولن باشند، در این مرتبه از تقریب نیرو چیزی شبیه فرمول زیر است.

$$F_{ee}^{(2)} = \frac{e^2}{r^2} + \dots + \frac{e^4}{r^2} = \frac{e^2}{r^2} + \alpha c_2(\sigma) \frac{e^2}{r^2}$$

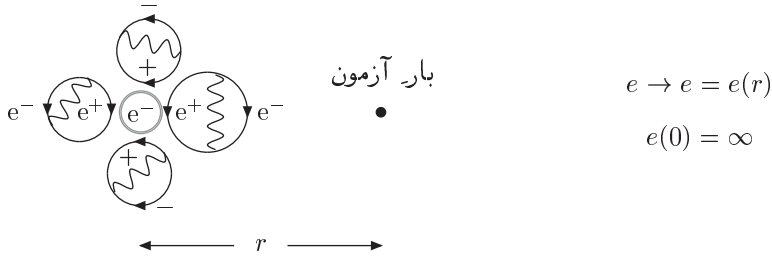
در این جا σ ترکیب بدون بُعد $\frac{\mu r}{\hbar c}$ است. پس c_2 ، به عنوان تابع σ ، بدون بُعد است. می‌توان رابطه‌ی کولن را بر حسب بار الکتریکی موثر نوشت.

$$F_{ee}^{(2)} = \frac{e_{\text{eff}}^2}{r^2}, \quad e_{\text{eff}}^2 = e^2 \left[1 + \alpha c_2(\sigma) \right].$$

به‌خاطر وجود تابع c_2 ، بار موثر تابعی از فاصله است. یکی از مهم‌ترین دست‌آوردهای نظریه‌های میدان‌های کوانتومی پیدا کردن تابع $c_2(\sigma)$ است. به‌طور مشخص، مشتق این تابع، که به صورت

$$\beta(r) = -r \frac{dc_2(r)}{dr}$$

تعریف می‌شود چه‌گونه‌گی تغییر مقدار بار موثر با عوض شدن فاصله را به ما می‌دهد. در مورد خاص برهم‌کنش الکترون‌ها با فوتون‌ها داریم $\beta(r) > 0$ ، و این یعنی بار موثر با تغییر فاصله رابطه‌ی معکوس دارد: فاصله‌ی بیش‌تر بار کم‌تر، و فاصله‌ی کم‌تر بار بیش‌تر. البته این بسته‌گی به فاصله، به این دلیل که از اثرات کوانتومی ناشی می‌شود، بسیار بسته‌گی کوچکی است. برای مثال، نسبت بار موثر الکترون در فاصله‌ی 10^{-16} cm به فاصله‌ی 10^{-12} cm در حدود 1.01 است؛ یعنی 1 درصد تغییر برای 4 مرتبه‌بزرگی تغییر در فاصله. برای این رفتار بار موثر یک تصویر وجود دارد، که آن را در زیر می‌آوریم. برای توضیح این تصویر ابتدا به یک مثال ساده‌تر، که اثر محیط دی الکتریک بر یک بار است می‌پردازیم. می‌دانیم که در یک دی الکتریک اطراف بار را دو قطبی‌های محیط می‌گیرند. این



شکل ۴

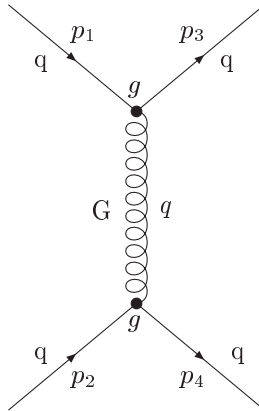
باعث می‌شود که مقدار موثر بار، با یک ضریب ثابت که به ثابت دی‌الکتریک معروف است، کاهش یابد - اثری که به پوشاننده‌گی محیط معروف است (نمودار شکل 3).

حال سراغ مسئله‌ی خودمان برویم. اولین مطلب این است که به دلیل اُفت‌وخیزهای کوانتومی میدان‌ها، خلاء مطلق وجود ندارد. بنابراین در فضایی که ممکن است به زعم ما هیچ باری وجود ندارد، زوج‌های الکترون و پوزیترون مرتباً تولید و نابود می‌شوند. حال فرض کنید این تولید و نابودی در حضور یک بار منفی مثل الکترون انجام شود. در این صورت انتظار بر این است که از الکترون و پوزیترون تولید شده، با احتمال بیشتر، پوزیترون نزدیک‌تر و الکترون دورتر از الکترون حرکت کنند تا دوباره نابود شوند. این تولید و نابودی دائماً اتفاق می‌افتد، و ماحصل آن این است که دوقطبی‌های لحظه‌ای دور الکترون مورد نظر ما را بگیرند؛ نمودار شکل (4). پس انتظار داریم که بار موثر کم‌تر از مقداری باشد که اگر اُفت‌وخیزها نبودند. البته چون در این‌جا دوقطبی‌ها رفتاری متفاوت با دوقطبی‌های موجود در محیط دی‌الکتریک دارند، تغییر بار فقط با یک ضریب ثابت نیست، بل که تابعی از فاصله است. به همین خاطر اگر بخواهیم با گذاشتن یک بار آزمون در فاصله‌ی r از این الکترون بار آن را اندازه بگیریم، مهم خواهد بود که r چه قدر است. در واقع در فواصل نزدیک‌تر سهم پوشاننده‌گی دوقطبی‌ها کم‌تر دیده می‌شود، و در نتیجه بار الکترون بیش‌تر برآورد می‌شود، و در فواصل دورتر، از آن‌جا که دوقطبی‌های بیش‌تری تولید و نابود می‌شوند، بار الکترون کم‌تر به نظر می‌رسد¹.

قبل از این‌که به نیروی هسته‌ای قوی پردازیم، مقداری در مورد تصحیحات مرتبه‌ی بالاتر در پراکنده‌گی الکترون‌ها صحبت می‌کنیم. با رسم نمودارهای پیچیده‌تر، تعداد حلقه‌ها و رأس‌ها بیش‌تر می‌شود، و در این صورت انتظار داریم توان‌های بالاتر e در تصحیحات ظاهر شود. در واقع می‌توان نشان داد که هم‌واره توان زوجی از e ظاهر می‌شود، و در این صورت بسط ما برای بار موثر به شکل زیر است:

$$e_{\text{eff}}^2 = e^2 \left[1 + \sum_{n=1}^{\infty} \alpha^n c_{2n}(\sigma) \right].$$

¹ البته با توجه به این‌که e یک کمیت بُعددار است، درست‌تر آن است که بگوییم α ی. موثر با فاصله تغییر می‌کند [3].



شکل ۵

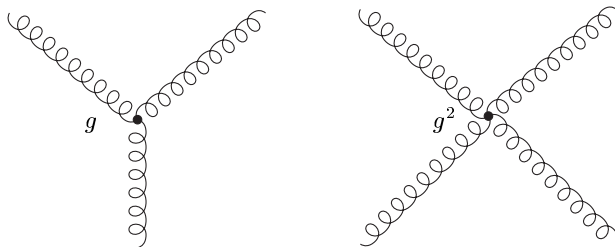
همان طور که می بینیم این بسط بر حسب توان های α است، و از آن جا که α عدد کوچکی است (1/137)، انتظار داریم که اولاً جملات با توان بزرگتر سهم کوچک تری داشته باشند، و ثانیاً سری بالا هم گرا شود. البته در عمل حساب کردن جملات با توان بالا بسیار سخت است، و تا کنون فقط چند جمله محاسبه شده است، اما جالب این جاست که با همین مقدار هم تطابق با آزمایش چنان عالی بوده است که فیزیک پیشه ها را قانع کرده که نظریه علی الاصول درست است.

حال به مثال نیروی هسته ای قوی می پردازیم. قدم اول این است که نیروی هسته ای قوی نیز به وسیله ی یک ذره ی مبادله شونده مانند فوتون وارد می شود. البته در این مورد اسم ذره ی مبادله شونده گلوئون⁽⁹⁾ است. قدم دیگر این است که نقش الکترون را در این جا ذراتی به نام کوارک که بار قوی دارند بازی می کنند. کوارک ها در واقع اجزای سازنده ی پروتون و نوترون هستند. در این صورت ممکن است نمودارهایی شبیه نمودار شکل (5) داشته باشیم، که در آن q و خط های صاف نماینده ی کوارک ها، G و خط فنری نماینده ی گلوئون هستند. هم چنین g چیزی است که به هر رأس نسبت می دهیم، و نظیر e در نیروی الکترومغناطیسی است.

قدم دیگری که مهم است مربوط به ماهیت غیر خطی نیروی هسته ای قوی است. همه ی ما با الکترومغناطیس مکتول آشنا هستیم. در الکترومغناطیس میدان های الکتریکی و مغناطیسی به صورت زیر از پتانسیل های اسکالر و برداری $A = (A, \phi)$ به دست می آیند.

$$\mathbf{E} = -\nabla\phi - \frac{1}{c}\frac{\partial\mathbf{A}}{\partial t}, \quad \mathbf{B} = \nabla \times \mathbf{A}.$$

ارتباط پتانسیل ها با چگالی بار ρ و چگالی جریان \mathbf{J} ، به عنوان چشمه های میدان، به صورت زیر است:



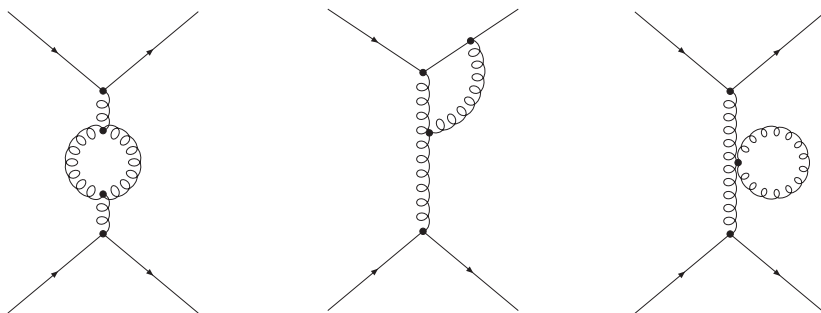
شکل ۶

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho, \quad \nabla \times \mathbf{B} = 4\pi\mathbf{J}.$$

اما ببینیم وضعیت در نیروی هسته‌ای چه گونه است. در آنجا باز هم پتانسیل و میدان وجود دارد، با این تفاوت که از چند نوع می‌توان نوع‌های مختلف را با یک شاخص جدید a مشخص کرد، مثلاً به شکل $(\mathbf{A}^a, \phi^a) = \mathbf{A}^a, \mathbf{E}^a, \rho^a$ و \mathbf{J}^a که در آن a اعداد 1 تا 8 را می‌گیرد. (حالا چرا اعداد 1 تا 8؟ این از یک نظریه‌ی بسیار پیچیده می‌آید.) نکته‌ی جالب این است که این مرتبه معادلات میدان نسبت به پتانسیل خطی نیستند، که ممکن است به شکل نمادین زیر نوشته شوند:

$$\begin{aligned} \nabla \cdot \mathbf{E}^a + [A^2]^a + [A^3]^a &= 4\pi\rho^a, \\ \nabla \times \mathbf{B}^a + [A^2]^a + [A^3]^a &= 4\pi\mathbf{J}^a. \end{aligned}$$

در فرمول بالا $[A^2]$ و $[A^3]$ به ترتیب نماینده‌ی جملات غیر خطی (شامل توان‌های 2 و 3 از پتانسیل‌ها) هستند. می‌توان این جملات را به طرف راست معادلات بالا برد، که در این صورت در کنار ρ و \mathbf{J} ، به عنوان چشمه‌های میدان‌های «الکتریکی» و «مغناطیسی» نیروی هسته‌ای قوی به حساب می‌آیند. (این‌ها میدان‌های الکترومغناطیسی معمولی نیستند.) با بردن این جملات به طرف راست دیده می‌شود که در نیروی هسته‌ای قوی میدان خود می‌تواند چشمه‌ی خودش باشد. این موضوع اثر مهمی در نظریه‌ی میدان‌های کوانتومی دارد، چون در این صورت در نمودارهای فاینمن این نظریه یک گلوئون می‌تواند از یک کوارک و یا از یک گلوئون دیگر ساطع شود. در این صورت در نظریه‌ی میدان مربوط به نیروی هسته‌ای قوی رأس‌های نشان داده شده در نمودارهای شکل (6) را داریم. اگر بخواهیم اثر تصحیحات یک حلقه‌ای برای پراکنده‌گی دو کوارک را در نظر بگیریم، علاوه بر چیزهایی شبیه به آنچه در نمودار (2) برای دو الکترون داشتیم - با این تفاوت که خط‌های موجی را باید با خط‌های فنری جای‌گزین کنیم - سه نمودار دیگر نیز باید اضافه کنیم که به خاطر رفتار غیر



شکل ۷

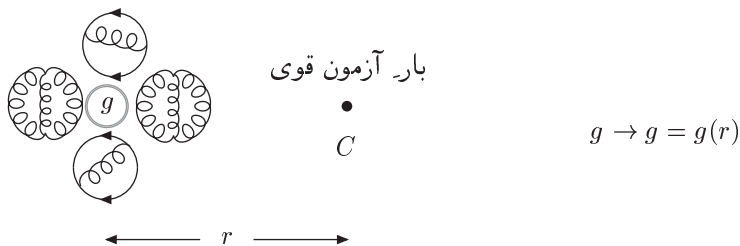
خطی- نیروی- قوی است؛ نمودارهای- شکل (7).

حال ببینیم این اثر غیر- خطی چه طور بار- موثر را عوض می کند. همان گونه که گفته شد در اطراف- یک بار دوقطبی های- لحظه ای درست می شود. برای- یک بار- نیروی- قوی علاوه بر چیزهایی شبیه- آن چه که در نیروی- الکترومغناطیسی داشتیم، حالا حلقه هایی فقط شامل- گلوئون هم داریم. در این صورت با وضعیتی روبه رو هستیم که ممکن است با نمودار- شکل (8) نمایش دهیم.

حال سوال این است که سهم- این حلقه های- گلوئونی به پوشاننده گی- بار چه گونه است. نکته ی بسیار جالب این است که سهم- این نمودارها منفی است، یعنی اثر- ضد- پوشاننده گی دارند! این همان چیزی است که گراس، ویلچک و پلینزر اولین بار پیدا و چاپ کردند.

این که بالاخره بار- قوی- موثر با فاصله کم می شود یا زیاد، بسته گی به این دارد که سهم- پوشاننده گی- حلقه های- دارای- کوارک به ضد- پوشاننده گی- حلقه های- گلوئونی غلبه می کند یا نه. در واقع با کار- سه نفر- فوق الذکر معلوم شد که برای- نظریه ای که به عنوان- نظریه ی قوی- هسته ای باید در نظر گرفت سهم- ضد- پوشاننده گی بیشتر است، و بر خلاف- مورد- بار- الکتریکی، بار- موثر- قوی با فاصله زیاد می شود! این نتیجه با شهود- ما در تضاد- است، زیرا برای- نیروهای- دیگر، مانند- الکترومغناطیسی و گرانش، با زیاد شدن- فاصله نیرو کم می شود، ولی در مورد- نیروی- قوی فاصله ی بیش تر نیروی- بیش تر وارد می کند. اگر این نتیجه را بخواهیم با تابع- $\beta(r)$ نمایش دهیم داریم: $\beta(r) < 0$. به این پدیده که بار- هسته ای- قوی در فواصل- بسیار کوچک، یا در پراکنده گی های- با انرژی و تکانه ی منتقل شده ی زیاد، به صفر میل می کند آزادی- مجانبی می گویند.

چرا این نتیجه برای- فهم- نیروی- قوی مهم است؟ همان طور که در ابتدا اشاره شد، نیروی- قوی عامل- پایداری- هسته ی اتم ها است، که از پروتون ها و نوترون ها تشکیل شده اند. در طی- دهه ی شصت و اوائل- هفتاد- میلادی فهمیده شد که پروتون ها از ذراتی به نام- کوارک ساخته شده اند. از مهم ترین آزمایش ها این بود که وقتی پروتون ها تحت- بمباران- الکترون های- بسیار پر انرژی قرار می گرفتند، پراکنده گی- الکترون ها از پروتون رفتاری از خود نشان می داد که تنها با فرض- این که داخل-



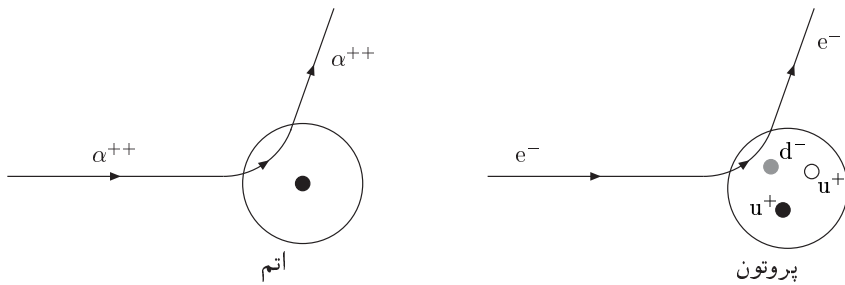
شکل ۸

پروتون ساختار- نقطه‌ای وجود دارد قابل- توضیح بود. این مشاهده بسیار شبیه- آن چیزی بود که ما را به کشف هسته‌ی درون- اتم راه‌نمایی کرد. در اوائل- قرن- پیش، رادرفورد⁽¹⁰⁾ پراکنده‌گی با زاویه‌ی زیاد- معدودی از ذرات- آلفا را به این نسبت داد که داخل- اتم باید یک بار- متمرکز مثبت وجود داشته باشد، تا وقتی ذرات- آلفا از نزدیکی- آن می‌گذرند انحراف- زیادی در مسیرشان به وجود آید. تقریباً همین ماجرا برای- کشف- کوارک در پروتون‌ها اتفاق افتاد (شکل- 9).

با کشف- کوارک‌ها دو سوال- اساسی مطرح شد، یکی این‌که چرا کوارک‌ها را نمی‌توان از پروتون بیرون کشید و وقتی آزاد هستند آن‌ها را آشکار کرد؛ دوم این‌که اگر کوارک‌ها به سختی در درون- پروتون مقید شده‌اند به طوری که نمی‌توان آن‌ها را جدا کرد، چرا در پراکنده‌گی- الکترون‌های- پراثری از آن‌ها مانند- یک ذره‌ی مستقل عمل می‌کنند، به طوری که انگار وابسته‌گی به پروتون ندارند (یادمان نرود اصولاً این رفتار- کوارک‌ها باعث شد تا آن‌ها را مانند- هسته‌ی اتم کشف کنند).

کار- گراس، ویلچک و پلینز به نوعی به هر دوی- این سوال‌ها جواب می‌داد. اول این‌که چرا کوارک‌ها نمی‌توانند از پروتون‌ها خارج شوند به این دلیل است که وقتی یک کوارک می‌خواهد از دیگر کوارک‌ها دور شود، و در نتیجه فاصله‌اش زیاد شود، بار- موثر- قوی‌اش زیاد شده، و در نتیجه هرچه دورتر می‌شود کار- بیش‌تری لازم است تا آن را دورتر کند؛ درست برخلاف- نیروی- الکتریکی و گرانش. این باعث می‌شود که نتوان یک کوارک را از بقیه‌ی کوارک‌ها دور کرد و به‌طور- آزادانه آشکار نمود. اما این‌که چرا در لحظه‌ی برخورد یک کوارک مانند- یک ذره‌ی مستقل عمل می‌کند را آزادی- مجانبی برای- ما توضیح می‌دهد. وقتی به یک کوارک، از طرف- مثلاً یک الکترون- پراثری، ضربه‌ای ناگهانی وارد می‌شود، و در نتیجه نسبت به دیگر کوارک‌ها تکانه‌ای بسیار بیش‌تر پیدا می‌کند، از نظر- دیگر کوارک‌ها بار- کم‌تری دارد، و در نتیجه برای- لحظاتی می‌تواند مانند- یک ذره‌ی مستقل عمل کند. البته این اتفاق فقط برای- مدتی ادامه پیدا می‌کند، زیرا هم‌چنان که این کوارک می‌خواهد آزادانه دور شود، به‌خاطر- افزایش- بار- موثر- قوی‌اش، دوباره به درون کشیده می‌شود.

ویلچک به عنوان- یک دانش‌جوی- 22 ساله‌ی گراس در مقاله سهم داشت. داستان از زبان- گراس



شکل ۹

به این شکل بیان شده است [4]:

... آزمایش‌های پراکنده‌گی فراناکشنسان سلک⁽¹¹⁾ تاثیر عمیقی روی من گذاشته بود. این آزمایش‌ها آشکارا نشان می‌داد که پروتون، وقتی در زمان‌های کوتاه مشاهده شود، مانند این است که از ذرات نقطه‌ای با اسپین نیمه صحیح ساخته شده است. ... من کاملاً قانع شده بودم که پروتون‌ها از کوارک ساخته شده‌اند ... اما چرا کوارک‌ها که در برخورد‌های سریع آزادانه رفتار می‌کنند، نمی‌توانند از درون پروتون بیرون آورده شوند؟ ... در اواخر 1972 من به اندازه‌ی کافی نظریه‌ی میدان یاد گرفته بودم ... فرانک ویلچک در پاییز 1972 کارش را با من شروع کرد. او به پرینستون به عنوان دانش‌جوی ریاضی آمده بود، اما به زودی کشف کرد که واقعاً فیزیک ذرات را دوست دارد. او به بخش فیزیک آمد، و پس از گذراندن درس نظریه‌ی میدان، کارش را با من شروع کرد. روش من این بوده و هست که دانش‌جویان‌ام را به‌طور جدی به کارهای تحقیقاتی که در دست دارم وارد کنم ... این در مورد فرانک هم بود، که از همان اول برای من مانند هم‌کار بود ... ما تصمیم گرفتیم تابع β نظریه‌ی ینگ⁽¹²⁾ - میلز⁽¹³⁾ را حساب کنیم ... کلمن⁽¹⁴⁾ که از پرینستون⁽¹⁵⁾ دیدن می‌کرد از من پرسید آیا کسی تابع β ینگ - میلز را حساب کرده است؟ من جواب دادم ما داریم روی آن کار می‌کنیم. او ابراز علاقه کرد، چون به شاگردش پلیترز گفته بود نتیجه‌ای را تعمیم دهد که یک قسمت لازم‌اش این بود که جریان بازهنجارش دانسته شود ... کار ما به آهسته‌گی پیش می‌رفت ... در آخر که نتایج‌مان را با پلیترز مقایسه کردیم دیدیم که می‌خواند.

همان‌طور که در ابتدا گفته شد، مقاله‌های این سه نفر در یک شماره و پشت سر هم چاپ شده‌اند. از جزئیات جالب ماجرای آزادی مجانبی این است که توفت⁽¹⁶⁾، که در 1999 به هم‌راه ولتمان⁽¹⁷⁾، به خاطر کارهای‌شان در نیروی هسته‌ای ضعیف برنده‌ی جایزه‌ی نوبل شدند، قبلاً اثر ضد پوشاننده‌گی حلقه‌های گلوئونی را کشف کرده بود، اما از آن‌جا که فکر می‌کرد دیگران هم آن را

می‌دانند اقدام به چاپ آن نکرد! باز هم داستان از زبان گراس [4]:

یکی دو ماه بعد از این زیمانسیک⁽¹⁸⁾ که از پرینستون⁽¹⁹⁾ می‌گذشت به ما گفت که توفت در خلال بحث‌هایی در یک گردهمایی پاییز گذشته (1972) در مارس (20) اشاره کرده است که آزادی مجانبی در نظریه ی ینگ-میلز نیز وجود دارد.

گراس و ویلیچک در یک مقاله‌ی بعدی [5] باز هم در 1973 در قسمت ارجاعات دوباره به این موضوع اشاره می‌کنند. با شناختی که از توفت و توانایی‌هایش وجود دارد، و این که می‌دانیم او در آن سال‌ها زمینه‌ی فعالیتش حول همین نظریه‌ها بوده، باور کردن این که او در این محاسبات پیش‌گام بوده ساده است؛ البته موضوع پیش‌گام‌بودن از نظر خود توفت کاملاً واضح است [6 و 7]. این طور که می‌گوید حتی رابطه‌ی دقیق را نیز در گردهمایی مارس روی تخته‌سیاه نوشته است [6]. به هر صورت شاهدان ماجرا را نمی‌توان نادیده گرفت!

قدردانی: نویسنده از محمد خرمی برای تصحیحات و مشورت‌ها سپاس‌گزار است.

یادداشت‌ها و مراجع

- [1] D. J. Gross and F. Wilczek, "Ultraviolet Behavior of Non-Abelian Gauge Theories," Phys. Rev. Lett. **30** (Jun. 1973) page 1343-1346.
- [2] H. D. Politzer, "Reliable Perturbative Results for Strong Interactions?," Phys. Rev. Lett. **30** (Jun. 1973) page 1346-1349.
- [3] ا.ح. فتح‌اللهی، "یادداشتی بر سیستم آحاد و ثوابت فیزیکی" گاما 2 (1383) ص. 59.
- [4] D. J. Gross, "Twenty Five Years of Asymptotic Freedom," talk delivered at the "QCD Euroconference 98" on "Quantum Chromodynamics", Montpellier, Jul. 1998, hep-th/9809060.
- [5] D. J. Gross and F. Wilczek, "Asymptotically Free Gauge Theories. I," Phys. Rev. **D8** (Nov. 1973) 3633-3652.
- [6] G. 't Hooft, "When was Asymptotic Freedom Discovered? or The Rehabilitation of Quantum Field Theory," talk delivered at the "QCD Euroconference 98" on "Quantum Chromodynamics", Montpellier, Jul. 1998, hep-th/9808154.
- [7] خ. توفت، "سخنرانی جایزه‌ی نوبل: رویارویی با بی‌نهایت‌ها" گاما 1 (1382) ص. 5.

اسامی - خاص:

¹⁾David Gross (1941-), ²⁾Frank Wilczek (1951 -), ³⁾H. David Politzer (1949 -), ⁴⁾Physical Review Letters, ⁵⁾Maxwell, ⁶⁾Lorentz, ⁷⁾Feynman, ⁸⁾Coulomb, ⁹⁾gluon, ¹⁰⁾Rutherford, ¹¹⁾SLAC, ¹²⁾Yang, ¹³⁾Mills, ¹⁴⁾Coleman, ¹⁵⁾Princeton, ¹⁶⁾'t Hooft, ¹⁷⁾Veltman, ¹⁸⁾Symanzik, ¹⁹⁾Marseille.

این عکس که با تله‌سکوپ هابل¹⁾ گرفته شده کهکشان M100 را نشان می‌دهد. به نظر شما ستاره‌ها ی- این کهکشان چه گونه به دور مرکز کهکشان می‌گردند؟ ساعت‌گرد، یا پادساعت‌گرد؟ بازوها ی- این کهکشان دارند از کل کهکشان عقب می‌مانند؟ یا جلو می‌افتند؟ آیا این رفتار در تمام کهکشان‌ها ی- ماریپچی یک‌سان است؟

¹⁾Hubble Space Telescope,

