

## سخنرانی جایزه ی نوبل: رویارویی با بی‌نهایت‌ها<sup>1</sup>

خرارد توفت

جایزه ی نوبل سال 1999 مشترکاً به خِرارد توفت و مارتینوس ولتمن داده شد. این متن سخنرانی استاد توفت در مراسم اعطای جایزه است.

### 1 انگیزه

نخستین کوشش‌ها برای ساختن مدل‌های منطبق بر واقعیت برهم‌کنش‌های ضعیف ذرات بنیادی شکست خورد، چون وقت ی می‌خواستند تصحیح‌های تابشی را حساب کنند نتیجه بی‌نهایت می‌شد، که بی‌معنی است. با کشف بازهنجارش‌پذیری مدل‌های متکی بر نظریه‌های پیمانه‌ای و سازوکار هیگز<sup>1</sup>، بی‌نهایت‌های مزاحم ناپدید شدند؛ در واقع هم‌دیگر را حذف کردند. به نظر می‌آمد این موفقیت یک جادوی ریاضیات باشد، اما شاید توضیح بینش فیزیکی بی‌که در واقع اساس آن است، جالب باشد.

### 2 مقدمه

این بالاترین افتخار ممکن برای دانشمندی در رشته‌ی من است که این‌جا باشد و این سخنان را ایراد کند. توصیف سپاس‌گزاری م — نه تنها از کمیته ی نوبل و فرهنگ‌ستان سلطنتی علوم سوئد، بلکه از فیزیک‌پیشه‌گان و دوستان بسیاری که کار ما را در مرتبه ای دانستند که آن را نامزد دریافت این جایزه کنند — بسیار دشوار است. در این سخنرانی می‌خواهم کوشش‌های لازم برای رام کردن نظریه‌های پیمانه‌ای، و علت موفقیت‌های مان در این زمینه، و درس‌هایی که باید یاد بگیریم را منعکس کنم. البته من از خطر این کار آگاه ام. در گذشته اغلب پیش‌رفت دقیقاً به خاطر نادیده‌گرفتن درس‌های قبلی به دست آمده است. با این وجود، فکر می‌کنم این درس‌ها اهمیت زیادی دارند، و اگر پژوهش‌گران آینده

<sup>1</sup> این مقاله ترجمه ای است از

Gerard 't Hooft; "Nobel lecture: a confrontation with infinity", *Reviews of Modern Physics*, vol. 72, no. 3, pp. 333–339 (April 2000)

مترجم: کامران کاویانی

بخواهند آن‌ها را نادیده بگیرند، باید بدانند دارند چه می‌کنند.

وقت ی وارد رشته‌ی فیزیک ذرات بنیادی شدم، هیچ نظریه‌ی دقیقی برای برهم‌کنش‌های ضعیف وجود نداشت. (برای شرح ی از تاریخ‌چه‌ی پیشرفت‌ها در این زمینه به [1] رجوع کنید.) می‌گفتند هر نظریه‌ی ای برای برهم‌کنش‌های ضعیف بازبهنجارش ناپذیر از آب در می‌آید. یعنی چه؟ عملاً یعنی وقت ی تصحیح‌های دامنه‌های پراکنده‌گی محاسبه می‌شد، عبارت‌ها بی به دست می‌آمد که از نظر فیزیکی ناممکن بود. از نتایج محاسبه چنین بر می‌آمد که این دامنه‌ها بی نهایت می‌شود. نوعاً چنین انتگرال‌ها بی پیدا می‌شد.

$$\int d^4 k \frac{\text{Pol}(k_\mu)}{(k^2 + m^2)[(k + q)^2 + m^2]} = \infty \quad (1)$$

که در آن  $\text{Pol}(k_\mu)$  یک چند جمله‌ای بر حسب متغیرهای انتگرال‌گیری  $k_\mu$  است. این از نظر فیزیکی بی معنی است. در هر محاسبه‌ی ای، اگر اثرهای مربوط به پدیده‌های ثانویه بی نهایت قوی از آب در آیند، معنی آن این است که چنین پدیده‌ی ثانویه ای آن قدر که به نظر می‌رسد بی اهمیت نیست؛ این پدیده را باید به شکل نادرست ی در مدل نمایش داده باشند. پس باید به چیزها بی که در ابتدا ناچیز شمرده می‌شدند توجه بیش‌تری کنیم و مدل را به‌تر کنیم. بی نهایت‌های نظریه‌ی برهم‌کنش‌های ضعیف، به خاطر برهم‌کنش‌های ذرات مجازی در انرژی‌های بسیار زیاد اند. انرژی زیاد یعنی تکانه‌ی زیاد، و در کوانتم‌مکانیک این یعنی کوتاه‌بودن طول‌موج وابسته به این ذرات. پس باید نتیجه می‌شد ساختار فاصله‌های کوچک نظریه‌های موجود درست فهمیده نشده است.

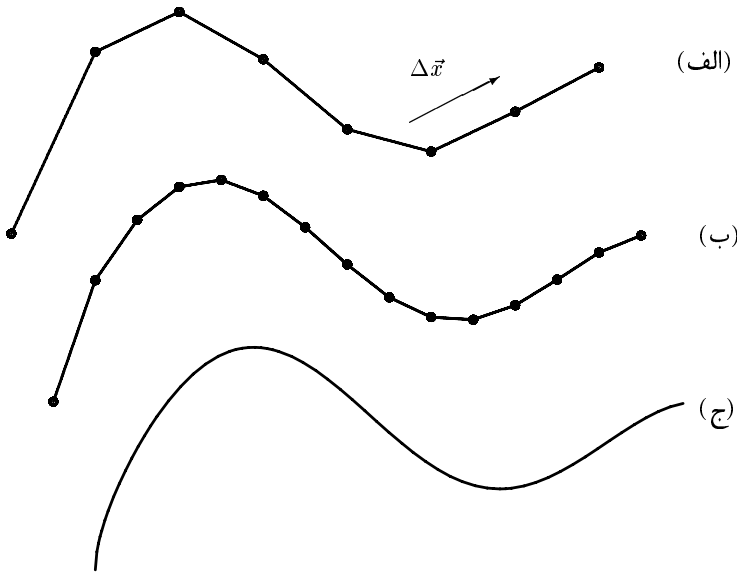
بازه‌های کوتاه مکانی و زمانی را اولین بار نیوٹن<sup>(2)</sup> و لیبِنیتس<sup>(3)</sup>، با معرفی مفهوم مشتق‌گیری وارد فیزیک کردند. در توصیف حرکت سیاره‌ها و ماه‌های‌شان می‌بایست بازه‌ی زمانی کوچک  $\Delta t$  و جابه‌جایی جسم در این بازه  $(\Delta \vec{x})$  را بررسی می‌کردند، شکل ۱ (الف). مشاهده‌ی کلیدی این بود که در حد  $\Delta t \rightarrow 0$ ، نسبت

$$\frac{\Delta \vec{x}}{\Delta t} = \vec{v} \quad (2)$$

بامعنی است. ما به آن سرعت می‌گوییم. در واقع می‌شود دوباره نسبت تغییر سرعت  $(\Delta \vec{v})$  در بازه‌ی زمانی کوچک  $\Delta t$  به این بازه را ساخت و باز هم نسبت

$$\frac{\Delta \vec{v}}{\Delta t} = \vec{a} \quad (3)$$

در حد  $\Delta t \rightarrow 0$  وجود دارد. ما به آن شتاب می‌گوییم. کشف بزرگ آن‌ها این بود که می‌شود معادله‌ها بی بامعنی بین شتاب، سرعت، و مکان نوشت، و این که در حد ی که  $\Delta t$  به صفر میل می‌کند، مدل‌های خوب ی برای توصیف حرکت جرم‌های سماوی به دست می‌آید، شکل ۱ (ج). از این‌جا بود که ریاضیات معادلات دیفرانسیل رشد کرد و امروز اهمیت این شاخه‌ی ریاضیات در فیزیک نظری چنان است که اغلب یادمان می‌رود آن مشاهده‌های اولیه چه قدر مهم و نابدی‌هی بوده اند. در نظریه‌های جدید



شکل ۱

فیزیک مدام بازه‌های مکانی و زمانی را به صفر میل می‌دهیم. در نظریه‌ی میدان‌های چندبُعدی هم فرض بر این است که معادلات دیفرانسیل کار می‌کنند. اما گاهی پیش می‌آید که همه چیز اشتباه از آب در می‌آید و به نظر می‌رسد حدها بی‌کیفیت می‌گردند که فکر می‌کردیم بلد ایم وجود ندارند. در این موارد باید رفتار مدلمان در مقیاس‌های زمانی و فضایی بسیار کوچک را دوباره بررسی کنیم.

ظهور انتگرال‌های بی‌نهایت در نظریه‌ی ذرات جدید نبود. بارها به آن‌ها برخورد کرده بودیم، و در بعضی نظریه‌ها هم فهمیده بودند چه گونه باید با آن‌ها رفتار کرد. (به عنوان مثال، رجوع کنید به [2]). به کاری که باید انجام می‌شد بازبهنجارش می‌گویند. تصور کنید ذره‌ای مثل الکترون به شکلی کروی کوچک‌تری به شعاع  $R$  و جرم  $m_{\text{bare}}$  است. حالا یک بار الکتریکی به اندازه‌ی  $Q$  روی آن می‌گذاریم. انرژی میدان الکتریکی می‌شود

$$U = \frac{Q^2}{8\pi R} \quad (4)$$

بنا بر نظریه‌ی نسبیت خاص آینشتین<sup>(4)</sup>، این انرژی یک جرم اضافی به الکترون می‌دهد. مقدار این جرم اضافی  $U/c^2$  است، که در آن  $c$  سرعت نور است. پس جرم کلی ذره و میدان می‌شود

$$m_{\text{phys}} = m_{\text{bare}} + \frac{Q^2}{8\pi c^2 R} \quad (5)$$

این جرم — جرم فیزیکی — است، که آزمایش‌گران با استفاده از قانون نیوتن (یعنی  $\vec{F} = m_{\text{phys}} \vec{a}$ ) به

دست می آورند. چیزی که باعث نگرانی است این است که مقدار تصحیح جرم الکترون به خاطر بارش، وقت ی شعاع  $R$  به صفر میل می کند بی نهایت می شود. اما ما می خواهیم  $R$  صفر باشد، چون بر اساس نظریه ی نسبیت خاص آینشتین سرعت انتشار نیروهای وارد بر ذره باید کم تر از سرعت نور باشد، و اگر  $R$  مخالف صفر باشد، به حساب آوردن این سرعت انتشار محدود دشوار است. اگر این ذره انعطاف پذیر باشد، آن وقت دیگر بنیادی نیست. پس ذرات ی که اندازه ی شان غیر صفر باشد پایه ی خوب ی برای یک نظریه ی موجودات بنیادی نیستند.

به جز این، پدیده ی دیگری هم هست که بار الکتریکی ذره را تغییر می دهد. به این پدیده قطبش خلأ می گویند. در بازه های زمانی فوق العاده کوتاه، افت و خیزهای کوانتمی باعث خلق و در پی آن نابودی زوج ذره - پادذره می شوند. اگر این ذره ها بار الکتریکی داشته باشند، آن ها بی که بارشان مخالف بار ذره ی مورد نظر ما است به طرف این ذره حرکت می کنند، تا به این ترتیب بار آن را خنثا کنند. این پدیده معمولاً خیل ی کوچک است، ولی به هر حال خلأ می خواهد بار ذره ی مورد نظر را بپوشاند. پی آمد این پدیده ی پوشاندن آن است که ذره ای که بارش  $Q_{bare}$  است، در فاصله ی دور شبیه ذره ای دیده می شود که بارش  $Q_{phys}$  است. رابطه ی بین  $Q_{phys}$  و  $Q_{bare}$  هم، مثل رابطه ی جرم های ذره به  $R$  بسته گی دارد. بازه نجارش بار هم وقت ی شعاع  $R$  به صفر میل می کند بی نهایت می شود (هرچند این پدیده برای  $R$  های مخالف صفر معمولاً بسیار کوچک است).

تازه در نیمه ی اول قرن بیستم بود که فیزیک پیشه ها در یافتند تنها خواص قابل سنجش در آزمایش گاه ذره ای مثل الکترون، جرم فیزیکی  $m_{phys}$  و بار فیزیکی  $Q_{phys}$  اند. پس کاری که باید بکنیم این است که  $R$  را به صفر میل دهیم و  $m_{phys}$  و  $Q_{phys}$  را ثابت نگه داریم. این که در چنین حد ی بر سر  $m_{bare}$  و  $Q_{bare}$  چه می آید اهمیت ی ندارد، چون این کمیت ها را هرگز نمی توان مستقیماً سنجید.

البته در این بحث اشکال ها بی هم وجود دارد. اگر در معادله ی (5) مقدار  $R$  را به صفر میل دهیم ولی  $m_{phys}$  را ثابت نگه داریم،  $m_{bare}$  باید به منفی بی نهایت میل کند. اما آیا ممکن است نظریه ای که در آن جرم ذره ها منفی است پای دار باشد؟ جواب منفی است، ولی خوش بختانه در نظریه ی کوانتمی به جای معادله ی (5) معادله ی دیگری به دست می آید. در نتیجه ی آن معادله  $m_{bare}$  به صفر میل می کند نه منفی بی نهایت.

### 3 گروه بازه نجارش

روش مدرن بحث در مورد ساختار فاصله های کوچک انجام تبدیل های مقیاس، با استفاده از گروه بازه نجارش است، [3] و [4]. این را هم می شود با بررسی معادله ی حرکت سیاره ها روشن کرد. فرض کنید بازه های زمانی معین ی به اندازه ی  $\Delta t$  بگیریم و معادله ها بی برای جابه جایی  $\Delta x$  در این مدت بیابیم. فرض کنید می خواهیم حد  $\Delta t \rightarrow 0$  را به دقت مطالعه کنیم. برای این کار ممکن است ابتدا

تصمیم بگیریم همه ی  $\Delta t$  ها و  $\Delta x$  ها را بر 2 تقسیم کنیم، شکلی ۱ (ب). مشاهده می کنیم اگر بازه های اولیه به حد کافی کوچک باشند، نتیجه ی محاسبه با مقدرهای جدید بسیار نزدیک به نتایج قدیم است. علت این است که در بازه های زمانی کوچک، سیاره ها و ماه ها بخش های کوچک ی از مدارشان را طی می کنند که خیلی نزدیک خط راست است. اگر آن ها دقیقاً بر خط راست حرکت می کردند تقسیم بر 2 کردن بازه ها هیچ تفاوت ی به وجود نمی آورد. اما سیاره ها روی خط راست حرکت می کنند، اگر نیرویی بر آنها وارد نشود. علت این که اصولاً کاربرد معادلات دیفرانسیل برای سیاره ها موفق بوده این است که در بازه های زمانی و مکانی بسیار کوچک می شود از اثر نیروها (یعنی برهم کنش ها) چشم پوشید.

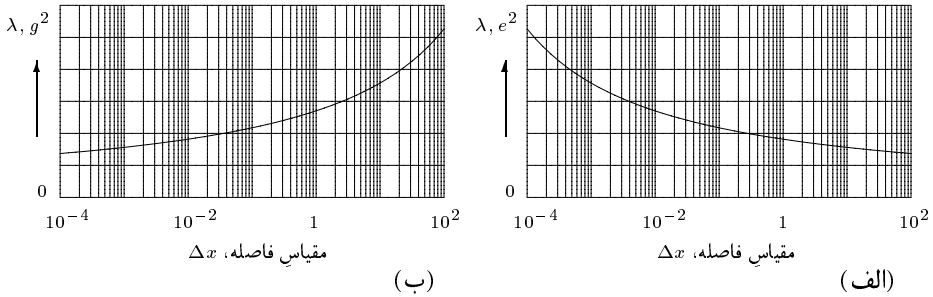
در نظریه های کوانتومی میدان برای ذرات بنیادی، یاد گرفته ایم چه گونه کار مشابه ی بکنیم. باز هم دست گاه ذره های برهم کنش دار را در بازه های زمانی و مکانی بسیار کوچک بررسی می کنیم. اگر در مقیاس های به حد کافی کوچک بشود از برهم کنش ذرات چشم پوشید، آن گاه می شود فهمید حد به سمت صفر این مقیاس ها چه طور به دست می آید. در این مقیاس ها، چون از برهم کنش می شود چشم پوشید، همه ی ذره ها بی مزاحمت حرکت می کنند و فیزیک پدیده ها قابل درک است. چنین نظریه ها یی را می شود بر اساس ریاضیات دقیق ی بنا کرد. می دانیم چه گونه می توان با تقریب زدن فضا و زمان با تقسیم کردن شان به بازه های محدود محاسبه کرد و در پایان حد نتیجه را به دست آورد.

اما این جا وضع چه طور است؟ آیا برهم کنش های ذرات بنیادی در مقیاس های به حد کافی کوچک قابل چشم پوشی است؟ شگفتی یی که فیزیک پیشه ها باید یاد بگیرند چه گونه با آن کنار بیایند این است: نه قابل چشم پوشی نیستند.

در واقع بسیاری از نظریه ها در مقیاس های کوچک رفتار بسیار بد ی از خود نشان می دهند. یک سرمونه ی ساده ی این نظریه ها به اصطلاح مدل تک دست است. (توصیف ی از آن را می شود در [5] پیدا کرد). در چنین مدل ی یک میدان اسکالر چند مؤلفه ای هست، که از یک قید تبعیت می کند؛ طول کلش ثابت است:

$$\sum_i |\phi_i|^2 = R^2 = \text{ثابت} \quad (6)$$

در مقیاس طول های بزرگ، اثر این قید ملایم است، چون افت و خیزهای کوانتومی نسبت به  $R$  کوچک اند. اما در مقیاس طول های کوچک، افت و خیزهای کوانتومی نسبت به  $R$  بزرگ اند و این باعث می شود این اثرهای غیرخطی بسیار شدیدتر احساس شود. پس چنین نظریه ای در مقیاس طول های کوچک برهم کنش های قوی دارد و برعکس. پس چنین نظریه ای در مقیاس طول های بی نهایت کوچک بیمار است، و این مدل برای توصیف درست ی از ذرات بنیادی مناسب نیست. از جمله ی دیگر مدل ها یی که رفتار مقیاس کوچک بد ی دارند، مدل قدیمی برهم کنش چهار فرمیونی برای برهم کنش های ضعیف است، و نیز بیش تر مدل ها یی که قرار است شکل کوانتومی نظریه ی گرانش آینشتین باشند.



شکل ۲: مقیاس‌بندی شدت جفتش بر حسب تغییرات مقیاس فاصله، (الف) برای نظریه‌های  $\lambda\phi^4$  و کیوای دی، (ب) برای نظریه‌های یانگ - میلز

اما بعضی از مدل‌های به‌دقت طراحی شده آن‌قدرها هم بد نیستند. از جمله، مدل‌ی با ذرات بی‌اسپین، که برهم‌کنش میدان‌شان ( $\phi$ ) تنها به شکل جمله‌ی  $\lambda\phi^4$  در لاگرانژی است؛ و مدل‌ی که در آن ذرات باردار از طریق معادلات مکسول برهم‌کنش دارند (کوانتم‌الکترودینامیک، کیوای دی). به‌طور کلی مقیاس فاصله را به شکلی پارامتری به اسم  $1/\mu$  می‌گیریم. یک تبدیل مقیاس به اندازه‌ی ضریب ۲ به معنی افزودن  $\ln 2$  به  $\ln \mu$  است. اگر مقیاس طول  $\Delta x$  باشد، آن‌گاه

$$\mu \frac{d}{d\mu} \Delta x = -\Delta x \quad (7)$$

طی دهه‌ی ۱۹۶۰، معلوم شد در همه‌ی نظریه‌های موجود در آن زمان پارامترهای برهم‌کنش — مثلاً ضریب  $\lambda$  در نظریه‌ی  $\lambda\phi^4$  یا ضریب  $e^2$  در کوانتم‌الکترودینامیک برای الکترونها‌یی که بارشان  $e$  است — بر حسب  $\mu$  تغییر می‌کنند و تغییرات‌شان تابع‌ی مثبت است، [۶]. به این تابع تابع  $\beta$  می‌گویند:

$$\mu \frac{d}{d\mu} \lambda = \beta(\lambda) > 0 \quad (8)$$

از مقایسه‌ی این رابطه با معادله‌ی (۷) دیده می‌شود  $\lambda$  با کاهش  $\Delta x$  زیاد می‌شود. در مدل‌های بسیارخاص‌ی که از آن‌ها نام بردیم، رفتار تابع  $\beta(\lambda)$  در  $\lambda$ ‌های کوچک به شکل  $\lambda^2$  است، که البته آن‌قدر کوچک است که وقت‌ی از یک مقیاس به مقیاس دیگری می‌رویم، جفتیده‌گی فقط اندک‌ی تغییر می‌کند. این باعث می‌شود هر چند در مقیاس‌های هر قدر کوچک هم برهم‌کنش وجود دارد، این برهم‌کنش مضر نباشد. نتیجه این که این نظریه‌ها باز بهنجارش‌پذیر اند. اگر بسط اختلالی برای  $\lambda$ ‌های کوچک را به کار ببریم، ضریب هر جمله‌ی بسط به‌طور یکتا تعریف می‌شود. این ممکن است ما را اغوا کند که چنین نظریه‌ها بی‌مشکل واقعی ندارند.

اما آن موقع بسیاری از متخصص‌های این زمینه به علت محکم‌ی نگران بودن: اگر  $\beta$  مثبت باشد، آن‌گاه مقیاس‌ی وجود خواهد داشت که در آن شدت جفتیده‌گی ذرات واگرا می‌شود. در این حالت

— شکل ۲ (الف) — جواب معادله ی (8) می شود

$$\lambda(\mu) = 1/(C - \beta_2 \ln \mu), \quad \text{if } \beta(\lambda) = \beta_2 \lambda^2 \quad (9)$$

در این معادله  $C$  یک ثابت انتگرال گیری است. اگر  $\lambda(1)$  مقدار  $\lambda$  ای باشد که در مقیاس  $\mu = 1$  سنجیده می شود، آن گاه  $C = 1/\lambda(1)$ . دیده می شود که در مقیاس  $\{\exp[1/(\beta_2 \lambda(1))]\}$ ، جفتیده گی شدیداً بزرگ می شود. از آن جا که برای  $\lambda(1)$  کوچک، این مقیاس به شکل نمایی از ما دور است، مشکل در فرمول بندی اختلالی دیده نمی شود، اما معلوم شد اگر  $\lambda$  خیلی کوچک نباشد — مثل نظریه های واقعی فیزیک ی — در مقیاس معین ی مشکل واقعی خواهیم داشت. پس این نتیجه گیری دور از عقل نبود که این نظریه های میدان کوانتمی بیماراند و برای توصیف نظریه های ذرات باید دنبال روشهای دیگری بود. من به علت ساده ای هرگز چنین نگرانی ها یی نداشتم. در 1971، محاسبات م درباره ی خواص مقیاس بندی نظریه های میدان را انجام دادم و اولین نظریه ای که به آن پرداختم نظریه ی یانگ - میلز بود. یافته های من — با نمادگذاری مدرن — این بود که برای چنین نظریه های یی

$$\beta(g^2) = Cg^4 + O(g^6), \quad C < 0 \quad (10)$$

به شرط ی که تعداد گونه های فرمیونی کمتر از 11 [برای SU(2)] یا  $16\frac{1}{2}$  [برای SU(3)] باشد. این محاسبه — که در اولین مقاله ی من در مورد نظریه های یانگ - میلز جرم دار [7] به آن اشاره شده — هر چند از نظر فنی ظرایف ی دارد از نظر مفهومی چندان مشکل نیست. آن موقع احتمالاً نمی توانستم تصور کنم چه گنج ی در اختیار دارم. هیچ یک از متخصص ها هم نمی دانست ممکن است  $\beta$  منفی شود، چون آن ها همیشه خودشان را به مطالعه ی فقط نظریه های میدان اسکالر و کوانتم الکترو دینامیک محدود کرده بودند، که در آن ها  $\beta$  مثبت است.

## 4 مدل استاندارد

اگر می خواستیم مشکل بی نهایت های حاصل از محاسبات مان در مورد فرآیندهای برهم کنش ضعیف را حل کنیم، مجبور بودیم وارد چالش ی برای یافتن مدل ی برای برهم کنش های ضعیف شویم، که در مقیاس طول های بزرگ به شکل درست ی با نیروهای الکترومغناطیسی مخلوط شود، اما در فاصله های کوچک به حد کافی ضعیف باشد. راه حل استفاده از شکست خودبه خودی تقارن بود. به بیان دقیق تر، به سازوکار تولید جرم ی که در اینجا مورد بحث است نباید شکست خودبه خودی تقارن گفت. چون در این نظریه ها خلا تقارن پیمانهای را نمی شکند. تقارن پنهان عبارت مناسبتری است [8]. ما به این سازوکار، سازوکار هیگز می گوییم. در این سازوکار میدان ی به کار می رود که با خودش برهم کنش ی از درجه ی چهار دارد، ولی جمله ی جرمی ش منفی است. بنابراین در حالت با انرژی کمینه مقدار میدان

غیرصفر است. این را که از چنین میدان‌هایی می‌شود برای جرم‌دار کردن ذرات برداری استفاده کرد، از پیش می‌دانستند. اما در منابع علمی به طور وسیع به آن نپرداخته بودند. این را هم می‌دانستند که با استفاده از این روش می‌شود مدل معقولی برای برهم‌کنش‌های ضعیف ساخت. البته آن موقع فکر می‌کردند این مدل‌ها زشت اند و هنوز نمی‌دانستند این‌ها تنها راه‌حلی مسئله‌ی مان‌اند.

این مدل‌های دوباره جان گرفته، هم نوع جدیدی از برهم‌کنش‌های ضعیف را پیش‌بینی کردند — که تا آن موقع ناشناخته بود — و هم یک ذره‌ی اسکالر جدید را (بُزون هیگز، [9] تا [11]). تنها چند سال طول کشید تا وجود این برهم‌کنش ضعیف جدید — برهم‌کنش جریان‌خنثا — با آزمایش تأیید شد، اما تا زمان نوشتن این متن، بُزون هیگز هم‌چنان فراری است. بعضی از پژوهش‌گران شک دارند که اصولاً چنین ذره‌ای وجود داشته باشد. اگر چنین باشد، به جای میدان هیگز باید یک میدان تک‌دست بگیریم — میدان‌ی که طول‌ش ثابت است. هم‌چنین می‌توان گفت این معادل است با حالت حدی‌یی که در آن جرم هیگز به بی‌نهایت میل کند. ذره‌ای با جرم بی‌نهایت را نمی‌شود تولید کرد، و به همین علت است که چنین ذره‌ای پیدا نشده است. اما چنان‌که قبلاً دیدیم، نظریه‌های تک‌دست رفتار کوچک مقیاس بدی دارند. می‌شود این طور گفت که شدت برهم‌کنش در فاصله‌های کم با جرم هیگز متناسب است؛ اگر این جرم را بی‌نهایت بگیریم، رفتار کوچک مقیاس نظریه غیرقابل کنترل می‌شود. چنین مدل‌هایی عملاً کار نمی‌کنند. شاید آزمایش‌گران نتوانند ذره‌ی هیگز را تولید و آشکار کنند. اما پی‌آمد چنین چیزی آن است که برای توصیف ساختار کوچک مقیاس نظریه‌ی کاملاً جدیدی لازم است. نامزدهای بی‌چنین نظریه‌ها بی‌پیش‌نهاده‌اند. این‌ها فعلاً چندان جذاب به نظر نمی‌رسند، اما کسی چه می‌داند، شاید این به خاطر محدودیت‌های فعلی دانش‌مان است. نظریه‌های جدید هم وجود تعداد زیادی ذره‌ی تاکنون ناشناخته را پیش‌بینی می‌کنند، و آزمایش‌گران از کشف و بررسی چنین چیزهایی خوش‌حال خواهند شد. در این مرحله نمی‌شود عقب‌نشینی کرد. یا هیگز یا ذره‌های دیگری منتظر کشف شدن‌اند، شاید هم خیلی زود (مثلاً [12] و [13]).

در مورد برهم‌کنش‌های قوی هم همین روش کار می‌کند، اما نتیجه‌ی استدلال‌ها خیلی متفاوت است. به خاطر رفتار خوب مقیاس‌بندی در نظریه‌های پیمانانه‌ای خالص — شکل ۲ (ب) — می‌شود مدل‌ی ساخت که در آن برهم‌کنش در مقیاس طول‌های بزرگ به طور نامحدود قوی می‌شود، اما در فاصله‌های کوچک به صفر کاهش می‌یابد (هر چند فقط به طور لگاریتمی). چنین نظریه‌ای می‌تواند نیروهای پیونددهنده‌ی کوارک‌ها را توصیف کند. معلوم شد مقدار این نیروها در فاصله‌های بسیار بزرگ ثابت خواهد شد، در حالی که نیروهای کولنی با قانون عکس مجذور فاصله کوچک می‌شوند. پس کوانتم کرمودینامیک — یک نظریه‌ی یانگ — میلز با گروه پیمانانه‌ی  $SU(3)$  — می‌توانست نامزد مناسبی برای نظریه‌ی برهم‌کنش‌های قوی باشد. این نظریه تنها مدل مجازی است که در آن شدت جفتیده‌گی بزرگ است و با این حال ساختار کوچک مقیاس آن تحت کنترل است.

بر خلاف نیروهای قوی، با افزایش فاصله‌ی بین ذره‌های دارای برهم‌کنش ضعیف، نیروی ضعیف



بین آن‌ها به طورِ نمایی کم می‌شود. با نظریه‌های پیمانه‌ای می‌شود مدل‌ها یی ساخت که رفتارشان در فاصله‌های کوچک از نظر فیزیکی قابل قبول است، و رفتار نیروهای‌شان در فاصله‌های بزرگ به شکل یکی از این سه حالت متفاوت است.

(۱) نیرو به طورِ نمایی کم می‌شود، مثل برهم‌کنش‌های ضعیف؛

(۲) نیرو با قانونِ عکسِ مجذورِ فاصله کم می‌شود، مثل الکترومغناطیس؛ یا

(۳) نیرو به مقدارِ ثابت ی میل می‌کند، مثل برهم‌کنش‌های قوی.

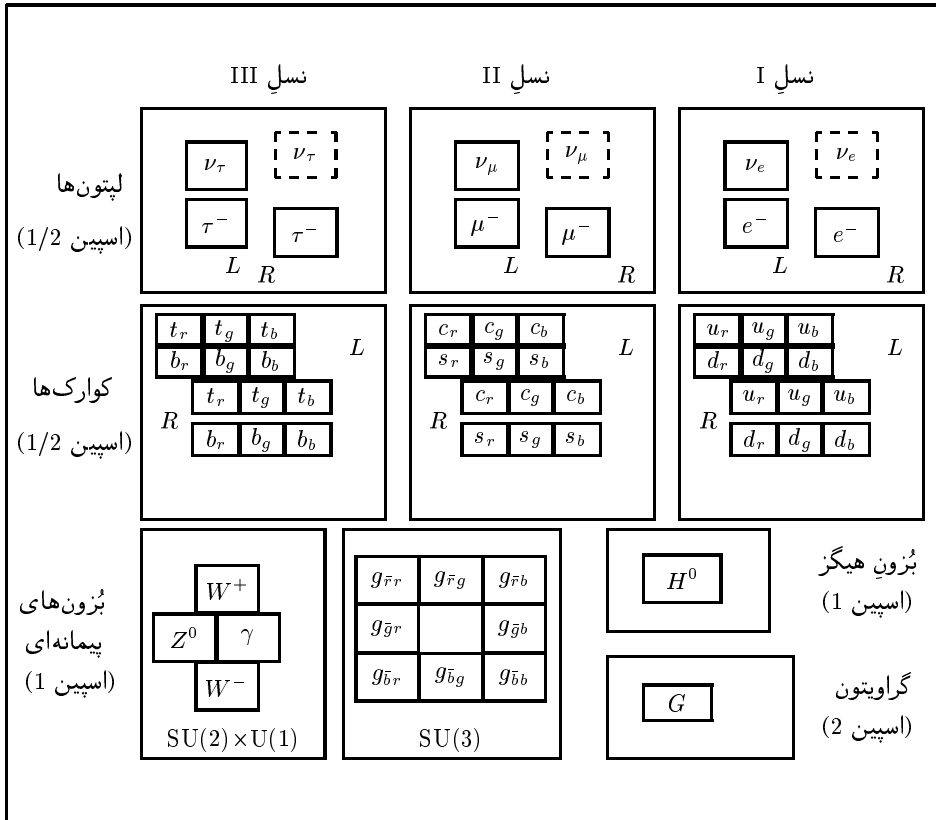
در حال حاضر، مدل استاندارد دقیق‌ترین مدل ی است که طبیعت را توصیف می‌کند. این مدل دقیقاً بر اساس قاعده‌های شکلی ۳ ساخته شده است. اصول کارمان این است که داده‌ها یی که از طریق آزمایش در باره ی ذرات بنیادی به دست آمده، به رفتار فاصله‌های بزرگ این ذرات مربوط است. ساختار فاصله‌های کوچک نظریه را به عنوان اصل وارد می‌کنیم و تقاضا می‌کنیم این ساختار تا آن جا که ممکن است منظم باشد، بی آن که اصول ی مثل برآوردن کاملی علیت و لرنیتس‌ناوردایی را نقض کند. نه تنها پی‌آمدهای چنین مدل‌ها یی را به دقت می‌شود محاسبه کرد، بلکه معلوم می‌شود طبیعت واقعاً این طور ساخته شده است. از جهات ی به نظر می‌رسد این نتیجه زیادی خوب است، به‌تر از آن که درست باشد. حدس می‌زنیم تعداد زیاد ی ذره و نیرو وجود دارد، که هنوز نتوانسته ایم در مدل استاندارد جای‌شان بدهیم، و ساختار فاصله‌های کوچک مدل استاندارد به اصلاح نیاز دارد. در ادامه دلیل‌های مان برای این ادعا را به اختصار می‌آوریم.

## 5 شتاب‌دهنده‌های آینده

نظریه پردازان بسیار مشتاق اند همه ی چیزها یی که می‌خواهند در مورد ساختارهای فاصله‌های کوچک بدانند را با تفکر محض و بر اساس اصول بنیادی به دست آورند. متأسفانه بینش کنونی ما به طور نامیدکننده ای کم است، و تنها چیزی که داریم، مشت ی حدس پراکنده است. مطمئناً آینده ی این رشته هنوز به گسترده گی به بینش‌ها یی بسته گی دارد که باید از آزمایش‌های جدید به دست آیند.

آزمایش‌های کنونی در برخورددهنده ی بزرگ الکترون پزیترون<sup>(۵)</sup> (لیپ) در سرن<sup>(۶)</sup>، دارد تمام می‌شود. [در زمان ترجمه تمام شده است، مترجم]. در این آزمایش‌ها سنجش‌های دقیق ی انجام شد که نه تنها تأیید زیبا یی بر مدل استاندارد اند، بلکه راه ی برای برون‌یابی رفتار انرژی‌های زیاد هم فراهم می‌کنند. این یعنی می‌توانیم به ساختارها در کوچک‌ترین فاصله‌های فعلاً قابل دسترس هم نظری بیان‌دازیم. مهم‌ترین نتیجه این است که این ساختارها هم‌وار اند و برهم‌کنش‌های جدید ی آشکار نشده است. این نشان می‌دهد جرم هیگز خیلی زیاد نیست و انگیزه ای است برای ادامه ی کوشش‌های تجربی در راه کشف آن.

در آینده ی نزدیک هم انتظار می‌رود نتیجه‌های تجربی جالب ی به دست آید، ابتدا از



برخورددهنده‌ی توآترون<sup>(7)</sup> در فرمی‌لب در نزدیکی شیکاگو، و سپس از برخورددهنده‌ی هادرونی بزرگ<sup>(8)</sup> (ال‌اچ‌سی) در سرن. بخش مهمی از کار هر دو شتاب‌دهنده، تلاش برای یافتن ذره‌ی فراری هیگز است. این که کدام‌شان اول هیگز را کشف می‌کنند، به جرم هیگز و پارامترهای دیگر آن بسته‌گی دارد، که مقدارشان را هنوز دقیقاً نمی‌دانیم. از تحلیل دقیق دانسته‌های کنونی مان چنین بر می‌آید که به احتمال قابل‌ملاحظه‌ای فرمی‌لب<sup>(9)</sup> اولین آشکارکننده‌ی هیگز خواهد بود. ال‌اچ‌سی، تقریباً به‌یقین نه تنها این ذره را آشکار خواهد کرد، بلکه بسیاری از خواص آن از جمله جرم‌ش را هم با دقت زیادی خواهد سنجید. اگر ذره‌های آرتقارن هم وجود داشته باشند، ال‌اچ‌سی برای آشکارکردن‌شان در موقعیت خوب است. سنجش‌های ال‌اچ‌سی قرار است کم‌ی پس از سال 2005 شروع شود.

اما این دست‌گاه‌ها هم — هر چند ساختارهایی را آشکار می‌کنند که تا کنون دیده نشده — محدودیت‌هایی دارند. کار آن‌ها درست جایی تمام می‌شود که نظریه‌های ما تازه جالب می‌شوند و نیاز به پیش‌تر رفتن احساس می‌شود. مثل گذشته، دو انتخاب داریم: برخوردادن هادرون‌ها — مثلاً

پرتون با پادپرتون — با این مزیت که به خاطر جرم زیاد هادرون‌ها می‌شود به انرژی‌های بیش‌تری رسید، یا برخورد دادن لپتون‌ها — مثلاً برخورد  $e^+$  و  $e^-$  — با این مزیت که به خاطر نقطه‌ای بودن لپتون‌ها علامت‌های حاصل از برهم‌کنش آن‌ها برای سنجش‌های دقیق مناسب‌تر است [14]. البته باید هر دو روش را به کار برد. یک طرح جاه‌طلبانه‌تر برخورد دادن میون‌ها است — برخورد دادن  $\mu^+$  به  $\mu^-$ . این‌ها لپتون اند، اما جرم‌شان زیاد است. اما برای این کار باید مشکلات فنی زیادی حل شود. برای شتاب دادن به ذرات تا انرژی‌های هر چه بیش‌تر، دست‌گاه‌های بسیار بزرگی لازم است. به ویژه الکترون‌های پرانرژی را به‌سختی می‌شود در مسیرهای دایره‌ای گذاشت. به همین علت طراحی شتاب‌دهنده‌های آینده بیش‌تر متمایل به شتاب‌دهنده‌های خطی است تا شتاب‌دهنده‌های دایره‌ای. یک خاصیت جالب این شتاب‌دهنده‌های خطی این است که در آینده‌ی دورتر می‌شود بزرگ‌ترشان کرد.

امیدوارم در آینده، کوشش و شور برای طراحی و ساخت چنین دست‌گاه‌ها بی‌کم نشود. تا آن‌جا که ممکن است باید از هم‌کاری بین‌المللی استفاده کرد. یک پیش‌نهاد الیزاترون<sup>(10)</sup> است [15]. این دست‌گاه یک تونل دایره‌ای غول‌پیکر است، که با آن می‌شود به انرژی‌های عظیمی رسید. با این دست‌گاه می‌شود حد تفکیک فضایی را صد بار به‌تر کرد. چیزی که مرا نگران می‌کند این است که عملاً یک گروه یا یک ملت پیش‌قدم می‌شود و سپس از گروه‌ها و ملت‌های دیگر می‌خواهد به طرح بپیوندند، اما نه در طراحی بلکه بیش‌تر در دادن کمک مالی. بر من واضح است که به‌ترین هم‌کاری بین‌المللی وقت‌ی به وجود می‌آید که همه‌ی هم‌کاران از اولین مراحل کار درگیر آن باشند. به‌ترین موفقیت‌ها در مؤسسه‌ها بی‌به دست می‌آید که نزدیک‌ترین تقریب به به‌اصطلاح دست‌گاه جهانی اند. سرن مدعی است چنین چیزی است. و در واقع علت موفقیت زیاد آن هم همین بوده است. امید که در آینده هم این موفقیت ادامه پیدا کند. متأسفانه در اسم سرن هنوز حرف ای (E) — مخفف اروپا — دیده می‌شود. این ای باید به همان اندازه‌ی ان (N) — مخفف هسته‌ای — بی‌معنی شود. (مدت‌ها است فیزیک‌ی که در سرن به آن می‌پردازند فیزیک هسته‌ای نیست بلکه فیزیک زیرهسته‌ای است.) منظورم این نیست که اسم سرن را عوض کنند، بلکه این که اسم سرن تنها باید یادآور تاریخ‌چه‌ی پربار آن باشد.

## 6 و رای مدل استاندارد

طرح‌های علمی دیگری هستند که همین قدر جالب اند و ماهیتاً چندملیتی اند: طرح‌ی برای ساخت باریکه‌ی نوترینو بی‌که از یک طرف زمین وارد آن شود و در طرف دیگر آشکار شود. به این ترتیب می‌شود اثر نوسان‌های ظریف نوترینو به خاطر جرم کوچک آن بر تبدیل یک نوع نوترینو به نوع‌ی دیگر را بررسی کرد. ساخت دست‌گاه‌های جهانی رقابت را حذف نخواهد کرد. اما رقابت، به جای این که بین ملت‌ها باشد بین گروه‌های مختلف‌ی خواهد بود که برای پاسخ به پرسش‌های فیزیک دست‌گاه‌ها و رهیافت‌های مختلف‌ی به کار می‌برند.

جالب‌ترین و مهم‌ترین آزمایش‌ها آن‌ها بی‌اند که خروجی‌شان را به دقت نمی‌توانیم حدس بزنیم. وضعیت آزمایش‌های ال‌اچ‌سی در آینده‌ی نزدیک دقیقاً همین است. چیزی که می‌دانیم این است که مدل استاندارد به شکل فعلی‌ش نمی‌تواند کاملاً درست باشد، هر چند برهم‌کنش‌های آن در مقیاس طول‌های فوق‌العاده کوچک هم ضعیف می‌مانند. ضعیف‌بودن برهم‌کنش‌ها در فاصله‌های کوچک کافی نیست! مقدار معینی پای‌داری هم می‌خواهیم. بیایید دوباره مانسته‌گی حرکت سیاره‌ها بر مدارهای‌شان را به کار ببریم. بر این تأکید کردیم که در یک بازه‌ی زمانی بسیار کوچک، نیروهای وارد بر سیاره‌ها اثر ناچیزی بر سرعت‌شان دارند، چنان‌که سیاره‌ها طی این بازه تقریباً بر یک خط راست حرکت می‌کنند. در نظریه‌های کنونی مان، وضع این است که گویا در بازه‌های زمانی کوچک چندین نیروی بسیار قوی به سیاره‌ها وارد می‌شود، اما به علتی این نیروها هم دیگر را خنثا می‌کنند. نیروی برآیند چنان ضعیف است که اثرش بر سرعت سیاره‌ها تنها پس از گذشت زمان زیاد ی — روزها، هفته‌ها، ماه‌ها — آشکار می‌شود. اما در چنین وضعیتی باید علتی برای این خنثاشدن نیروها در مقیاس‌های زمانی کم پیدا کرد. فعلاً وضعیت ذرات بنیادی شبیه این است که خنثاشدن این نیروها صرفاً تصادفی است. این تصادف غیر قابل توضیح است. در طبیعت هیچ مثال دیگری از این نوع نمی‌شناسیم — دست‌کم با این مقیاس — پس معقول است به این فکر بیفتیم که مدل استاندارد ساختار واقعی فاصله‌های کوچک را به دقت بیان نمی‌کند، بلکه تعداد زیاد ی ذره و نیروی دیگر در کار اند، که ماهیت‌شان هنوز روشن نیست. این ذره‌ها و نیروها در یک الگوی تقارنی جدید قرار می‌گیرند، و همین تقارن است که خنثاشدن نیروهای فاصله‌های کوچک را توضیح می‌دهد.

عموماً معتقد اند جذاب‌ترین سناریو در این مورد مدل ی هم‌راه آبرتقارن است. آبرتقارن ذره‌های فرمیونی — با اسپین برابر با یک عدد صحیح به اضافه‌ی یک دوم — را به ذره‌های بُرونی — با اسپین صحیح — مربوط می‌کند. (دوباره‌ی آبرتقارن منابع زیاد ی وجود دارد. مثلاً رجوع کنید به مجموعه‌ی مقاله‌های [16]). اگر برهم‌کنش ذره‌های بنیادی ضعیف باشد، این نهایتقارن ی است که با آن می‌شود کارهای لازم را در حضور میدان‌های اسکالری که سازوکار هیگز را ایجاد می‌کنند انجام داد. اما اگر برهم‌کنش‌ها بالأخره قوی شوند، سناریوهای دیگری مطرح می‌شوند. در این حالت ممکن است چیزی که نقش ذره‌ی هیگز را بازی می‌کند دیگر موجود بنیادی بی نباشد بلکه مرکب باشد، چیزی شبیه زوج کوپر — الکترون‌های مقید به هم — که در جامدهای فراسرد سازوکار هیگز را اجرا می‌کنند و به آبرتقارنی منجر می‌شوند. چون چنین پدیده‌ها بی در فیزیک شناخته شده اند، نمی‌توان از این سناریو به سادگی چشم پوشید. اما چون فعلاً هیچ شاهدی برای وجود یک برهم‌کنش جدید قوی در مقیاس انرژی TeV وجود ندارد، پیش‌تر پژوهش‌گران نظریه‌ی هیگز حالت مقید را دوست ندارند. یکی از مشکلات سناریوی آبرتقارن، سازوکار شکست آبرتقارن است. چون در مقیاس‌ها بی که آزمایش‌های کنونی انجام می‌شود آبرتقارن دیده نشده، پس این تقارن شکسته است. فرض بر آن است که این شکست ترم است، یعنی اثر آن فقط در فاصله‌های بزرگ دیده می‌شود، و تنها در مقیاس طول‌های بسیار کوچک است که می‌شود

این تقارن را دید. از نظر ریاضی چنین چیزی ممکن است، اما هنوز هیچ توضیح فیزیکی قانع‌کننده‌ای برای آن وجود ندارد. تنها توضیح، ممکن است از یک نظریه در مقیاس طول‌های باز هم کوچک‌تر بیاید، مقیاس‌هایی که در آن نیروهای گرانشی هم مهم می‌شوند.

تا اوایل دهه‌ی 1980، نویدبخش‌ترین مدل برای نیروهای گرانشی یک شکلی اَبَرمتقارنِ گرانش بود: اَبَرگرانش ([16] جلد 2). آن موقع به نظر می‌رسید بی‌نهایت‌ها بی که در گرانش معمولی رفع‌نشده‌اند، در اَبَرگرانش حذف می‌شوند. اما عجیب این که به نظر می‌رسید کنترل بی‌نهایت‌ها به خاطر افزایش تقارن است نه به خاطر به‌ترشدن ساختار فاصله‌های کوچک نظریه. ثابت نبودن در این نظریه‌ها — حتا اگر با یک میدان دیلتون کنترل شود — بُعددار است، که باعث می‌شود برهم‌کنش‌های قوی در مقیاس طول‌های کوچک خارج از کنترل بمانند. چون ساختار فاصله‌های کوچک نظریه به‌درستی فهمیده نشده بود، تقریباً غیرممکن به نظر می‌رسید از آن نتایج بی‌بیرون بیاید که بتواند چیزی در باره‌ی واقعیت‌های تجربی جهان ما بگوید.

به دنبال آن دوره‌ی آغاز شد که حدس‌های گستاخانه‌تری در باره‌ی ماهیت نیروی گرانش را در بر داشت. محبوب‌ترین و بالقوه قوی‌ترین نظریه در این مورد — با فاصله‌ی زیاد بی با نظریه‌های دیگر — نظریه‌ی اَبَرریمان است. (مثلاً به [17] رجوع کنید.) این نظریه از آن‌جا شروع کرد که هر ذره یک تکه ریمان (باز یا بسته) است. وجود فرمیون‌ها روی ریمان یک الگوی اَبَرمتقارن به آن می‌دهد، که ممکن است منشأ اَبَرمتقارن تقریبی بی باشد که در نظریه‌های مان به آن نیاز داریم. حالا می‌دانیم تنها در فرمول‌بندی اختلالی است که ذره‌ها شبیه ریمان به نظر می‌رسند. به نظر می‌رسد در فرمول‌بندی غیراختلالی نه تنها ریمان بلکه چیزهایی با ابعاد بیش‌تر — مثل غشا — هم لازم است. اما بسط اختلالی مورد نظر دقیقاً چیست؟ منظور تقریب بی نیست که در فاصله‌های بی‌نهایت کوچک به کار آید. در واقع به نظر می‌رسد فاصله‌های کوچک از طریق رابطه‌های دوگانی به فاصله‌های بزرگ مربوط می‌شوند. اَبَرریمان‌ها را مسئول نیروی گرانش هم می‌دانند، و وجودشان فضا و زمان را چنان خمیده می‌کند که به نظر می‌رسد بررسی فاصله‌های کوچک نسبت به مقیاس پلانک<sup>(11)</sup> بی‌معنی است.

یک بی از ویژگی‌های طبیعی و اجتناب‌ناپذیر نظریه‌ی اَبَرریمان این است که نمی‌شود به‌درستی در باره‌ی مقیاس طول‌های کوچک‌تر از مقیاس پلانک حرف زد و نباید نگران این بود. وقت بی آدم‌های بیگانه یا هم‌کاران بی از دیگر شاخه‌های فیزیک به نظریه‌ی اَبَرریمان می‌تازند، من از آن دفاع می‌کنم. مفهوم‌های آن بسیار قوی و نویدبخش‌اند. اما بین دوستان که هستم این انتقاد را دارم. چون نظریه‌ی ریمان به‌گسترده‌گی از معادلات دیفرانسیل استفاده می‌کند، روشن است که در آن نوع بی پیوسته‌گی فرض شده است. باید بکوشیم فرمول‌بندی کوچک مقیاس به‌بود یافته‌ای برای نظریه‌هایی از این نوع بیابیم، حتا اگر تنها برای توجیه استفاده از معادلات دیفرانسیل یا حتا انتگرال‌های تابعی باشد.

به جای آن که این‌ها را انتقاد بی بر نظریه‌های موجود بدانیم، باید از مشاهده‌های مان برای این استفاده کنیم که ببینیم کجا باید به دنبال پیش‌رفت‌های جدید بود. تأکید بر کاستی‌های ساختارهای

موجود، به‌ترین راه یافتنِ روش‌های جدید و به‌بودیافته است. تنها به این وسیله است که می‌توانیم امیدوار باشیم به نظریه‌هایی برسیم که ساختارهای مشاهده‌شده‌ی مدلِ استاندارد را توضیح می‌دهند و پیش‌بینی‌های جدیدی هم دارند، چنان که بتوانیم به دوستانِ آزمایش‌گرمان بگوییم کجا دنبال ذره‌ها و نیروهای جدید بگردند.

Gerard 't Hooft; Institute for Theoretical Physics, University of Utrecht,  
3584 CC Utrecht, The Netherlands e-mail: g.thooft@fys.ruu.nl

## 7 مراجع‌ها

- [1] R. P. Crease & C. C. Mann; “The second creation: makers of the revolution in twentieth-century physics”, (Macmillan, New York, 1986)
- [2] A. Pais; “Inward bound: of matter and forces in the physical world”, (Oxford University Press, London, 1986)
- [3] K. G. Wilson & J. Kogut; Phys. Rep. **12** (1974) 75
- [4] H. D. Politzer; Phys. Rep. **14** (1974) 129
- [5] B. W. Lee; “Chiral Dynamics”, (Gordon and Breach, New York, 1972) 60–67
- [6] D. J. Gross; in “The rise of the standard model”, (Cambridge University Press, Cambridge, 1997) 199
- [7] G. 't Hooft; Nucl. Phys. **B35** (1971) 167
- [8] S. Coleman; “Secret symmetries” in “Laws of hadronic matter”, edited by A. Zichichi (Academic, New York/ London, 1975)
- [9] P. W. Higgs; Phys. Lett. **12** (1964) 132
- [10] P. W. Higgs; Phys. Rev. Lett. **13** (1964) 321
- [11] P. W. Higgs; Phys. Rev. **145** (1966) 1156
- [12] E. Accomando *et al.*; Phys. Rep. **299** (1998) 1

- [13] P. M. Zerwas; “Physics with an  $e^+e^-$  linear collider at high luminosity”, (Cargèse lectures 1999), preprint DESY 99-178
- [14] J. Ellis; “Possible accelerators at CERN beyond the LHC”, preprint CERN-TH/99-350, hep-ph/9911440
- [15] A. Zichichi; “Fifty years of subnuclear physics: from past to future and the ELN project” in “Highlights of subnuclear physics: 50 years later: proceedings of the international school of subnuclear physics”, edited by A. Zichichi (World Scientific, Singapore and River Edge, London, 1999) 161
- [16] S. Ferrara, Ed.; “Supersymmetry”, vols. 1 & 2 (North Holland, Amsterdam, 1987)
- [17] J. Polchinski; “String theory, vol. 1, an introduction to the bosonic string”, Cambridge Monographs on Mathematical Physics, edited by P. V. Landshoff *et al.* (Cambridge University Press, Cambridge, 1998)

## نام‌های خاص

- <sup>1)</sup> P. W. Higgs, <sup>2)</sup> I. Newton, <sup>3)</sup> G. W. Leibnitz, <sup>4)</sup> A. Einstein, <sup>5)</sup> Large Electron Positron Collider (LEP), <sup>6)</sup> CERN (Conseil Européen pour Recherches Nucléaires), <sup>7)</sup> Tevatron, <sup>8)</sup> Large Hadron Collider (LHC), <sup>9)</sup> Fermilab, <sup>10)</sup> ELOISATRON, <sup>11)</sup> M. Planck

خود - گیبس فکرمی کرد در سیستمی که همه‌ی - ناورداها یش به صورت - مختصه‌ها ی -  
 اضافه حذف شده باشد، تقریباً تمام - مسیرها ی - فضا ی - فاز از تمام - نقطه‌ها ی - آن  
 فضا می‌گذرند، و این فرض را فرض - ارگندیک نامید؛ از کلمه‌ها ی - یونانی  $\epsilon\rho\gamma\omicron\nu$  به  
 معنی ی - 'کار' و  $\omicron\delta\omicron\varsigma$  به معنی ی - 'مسیر'.

Norbert Wiener, *Cybernetics, or control and communication in the animal and the machine*; 2<sup>ed</sup> ed., MIT Press, Cambridge, 1965, p. 49.