چگونه اجسام سنگین می‌شوند؟ سرشت جـــــرم

دون لینکین[1]
ترجمهٔ احمد توحیدی

اشاره

فیزیک می‌تواند علم وزینی باشد، سرشـــار از جوهر و منزلـــت. بنابراین شاید کاملاً منطقی باشـــد که جرم، یک مبحث مهم آموزشی به شـــمار آید. اما واقعاً، جرم چیست؟ خاســـتگاه و سرشت مهم‌ترین جنبه جهان اطرافمان چیست؟ و آیا تعجب‌آور است که باید به بررسی عمیق این پرسش بپردازیم؟

در این مقاله، امیدوارم هر خواننده را دست‌کم یک بار هم که شده شگفت‌زده کنم.

همهٔ ما شناختی شـــهودی از آنچه جرم است داریم. جرم، مقدار «ماده»ای است که چیزی را می‌سازد. در حالی‌که شاید فیزیک‌دان‌ها شناخت بسیار متنوعی از آن داشته باشند. درک روزمره‌مان دربارهٔ جرم به خویشاوند نزدیک آن یعنی وزن گره خورده اســـت. اشیا با جرم بیشـــتر وزن زیادتری دارند. درک ارتباط میان جرم و وزن از نیمهٔ هزاره گذشـــته آغاز و معلوم شـــد که موضوعی بسیار اساسی و شـــناخته نشده است که گاهی اهمیتی کمتر از ساختار عالم ندارد. بعداً به این موضوع خواهیم پرداخت.

جرم نقشـــی هم در لختی، یعنی تمایل یک شی به حرکت یا ســـکون، دارد و هم در وزن، که نیرویی است که به واسطهٔ گرانی به جســـم وارد می‌شود. ارسطو در سدهٔ چهارم پیش از میلاد ثابت کرد که اشیا با سرعتی متناسب با جرمشان سقوط می‌کنند (و درواقع منظور او از جرم چیزی اســـت که اکنون وزن می‌نامیم).

آزمایش‌های گالیله (شـــکل ۱) در اواخر ســـدهٔ شـــانزدهم همهٔ چیزها را تغییر داد. در ســـال‌های (۱۵۹۲ ـ ۱۵۸۹/ ۹۷۱ تا ۹۶۸) گالیله رفتار اشیاء مختلف را هنگام سقوط تحت‌تأثیر نیروی گرانی بررسی کرد. او دریافت که آن‌ها مستقل از جرمشان سقوط می‌کنند. این تأییدکنندهٔ حس شهودی او بود که به کمک یک آزمایش فکری به دست آورده بود. هر جسم صلب را می‌توان متشکل از دو جسم مجزا در نظر گرفت که وزن یکی از آن‌ها دو برابر دیگری است. وقتی جسم رها می‌شود، هر دو قطعه با آهنگ یکسانی ســـقوط می‌کنند. افزون بر این، گالیله مجسم کرد که اگر واقعاً دو قطعه از هم جدا شـــوند، ســـپس با ریسمانی به هم متصل و بار دیگر رها شـــوند، با هم سقوط می‌کنند نه با آهنگ‌های مختلف. او با این اســـتدلال انتظار داشت بتواند نظریهٔ ارسطو را باطل کند، که همان چیزی بود که در نهایت مشاهده کرد.

▲ شکل ۱. نخستین بینش‌های واقعی دربارهٔ ارتباط جرم، وزن و حرکت به نام گالیله ثبت شده است.

در ســـال (۱۶۵۴/ ۱۰۳۳) وینچنتـــو ویویانـــی شـــاگرد و زندگی‌نامه‌نویس گالیله در کتابـــش داســـتان سقوط گوی‌های گالیله را از بُـــرج کج پیزا نقل کرد. چنین داستانی در نوشته‌های خود گالیله نیامده است. او در کتاب *دو علم نوین* که در سال (۱۰۱۷/ ۱۶۳۸) منتشر

شد تا اندازه‌ای به توضیح آزمایش‌هایی با استفاده از گوی‌های برنزی و سطح شیبدار تخته‌ای می‌پردازد. اگرچه معلمان فیزیک جدید تشخیص خواهند داد که بَرداشت مناسب از این آزمایش‌ها مستلزم در نظر گرفتن ویژگی‌های دورانی جسم است. دو نتیجه اساسی دیگر گالیله آن بود که اجسام با ابعاد یکسان، حرکت مشابهی را (مستقل از جرمشان) خواهند داشت و مسافت پیموده شده توسط جسم به مجذور زمان طی شده بستگی دارد.

نیوتن و هوک

در طول یک دهه یا بیشتر، ایزاک نیوتون (شکل ۲) و رابرت هوک به‌طور مستقل روی نظریهٔ نیروی گرانی کار کردند. آن‌ها رابطه‌ای دوستانه نداشتند و مطالب زیادی دربارهٔ اینکه کدام‌یک اولین بار به این ایده پرداخت نوشته شده است. هوک تندخو و نیوتون بسیار موفق‌تر و کمی کینه‌جو بود به طوری که گفته می‌شود حتی تنها نقاشی از چهرهٔ هوک را از بین برده است. معمولاً تاریخ‌نویس‌ها بر این باورند که هوک نخست فرض کرد نیروی گرانی میان دو جسم به عکس مجذور فاصلهٔ بین آن‌ها بستگی دارد و نیوتون با استفاده از نظریهٔ حسابان پیشرفته جدیدش توضیح داد که این فرضیه درست است. اما نیوتون تحقیق بسیار ژرف‌تری دربارهٔ این موضوع کرد.

قطع نظر از اسناد، فیزیک‌دان‌های جدید از توصیف نیوتون برای یک جسم سبک، به جرم m که دور جسم سنگینی به جرم M در حرکت است استفاده می‌کنند. می‌توان قانون گرانش عمومی نیوتون، $F=\frac{GmM}{r^2}$ را با قانون دوم حرکت نیوتون (برای حرکت دایره‌ای)، $F=ma=\frac{mV^2}{r}$ ترکیب کرد. با مساوی قرار دادن آن دو معادله، می‌بینیم که سرعت جسم سبک در مدار دایره‌ای $V=\sqrt{\frac{GM}{r}}$ است، که در آن r فاصله میان مراکز دو جسم و G ثابت گرانشی است. می‌بینیم که سرعت مداری جسم سبک‌تر به جرمش بستگی ندارد.

این نتیجهٔ شناخته شده‌ای است، اما وارسی دقیق‌تر آن کاملاً شگفت‌انگیز است. دلیل این وضعیت آن است که این محاسبه ساده دو مفهوم متفاوت را با یکدیگر ترکیب می‌کند. اولی جرم گرانشی یعنی کمیت مؤثر در ایجاد نیروست.

اصولاً، جرم گرانشی بار نیروی گرانی است. مفهوم دیگر یعنی جرم لختی، کمیتی است که در برابر تغییر حرکت شی مقاومت می‌کند. به لحاظ نظری، هیچ دلیلی برای یکسان بودن این دو مقدار وجود ندارد. بنابراین، باید با احتیاط بیشتر قانون نیروی گرانی:

$$F=\frac{G\,m_{\text{گرانی}}.M_{\text{گرانی}}}{r^2} \qquad (۱)$$

و معادله نیوتون را برای حرکت دایره‌ای

$$F=ma=\frac{m_{\text{لختی}}V^2}{r} \qquad (۲)$$

بازنویسی کنیم. ما با انتخاب رهیافت دقیق‌تر متوجه می‌شویم که درواقع سرعت جسم با جرم کمتر که در مدار جرم جسم سنگین‌تر می‌گردد عبارت است از:

$$V_{\text{جرم سبک}}=\sqrt{G\left[\frac{m_{\text{گرانی}}}{m_{\text{لختی}}}\right]\frac{M_{\text{گرانی}}}{r}} \qquad (۳)$$

این واقعیت که اجسام با جرم لختی مختلف، اطراف یک جسم سنگین با سرعت یکسانی می‌گردند آشکارا حاکی از آن است که لختی m = گرانی M. چنانچه بعداً خواهم گفت این تأکید که با آزمون‌های تجربی جدی روبه‌رو شده است، نقشی اساسی در نظریهٔ نسبیت عام اینشتین دارد (شکل ۳).

شاید این ایده شناخته شده باشد، اما بیانگر نکته‌ای بسیار بنیادی دربارهٔ نیروهای حاکم بر عالَم است. برای مثال، فرض کنید، همان تحلیلی را که پیش از این استفاده شد، در مورد یک جفت ذرهٔ تحت‌تأثیر نیروی الکتریکی مورد استفاده قرار گیرد. ما باید نیروی کولنی را جایگزین قانون گرانی نیوتون کنیم. k ثابت کولن و $q_{\text{سبک}}$ و $q_{\text{سنگین}}$ به ترتیب بازنمای بارِ جرم‌های سبک و سنگین‌اند، معادله (۳) به‌صورت زیر درمی‌آید:

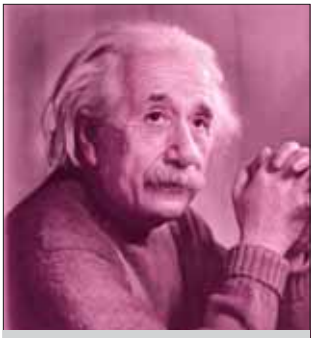
شکل ۲. ایزاک نیوتون و رابرت هوک رقیبان سرسختی بودند که هرکدام مدعی شناخت واقعی رفتار نیروی گرانی هستند. در اینجا تصویر نیوتون می‌بینید که گفته می‌شود تنها نقاشی چهرهٔ هوک را نابود کرده است

$$V=\sqrt{k\left[\frac{q_{\text{سبک}}}{m_{\text{لختی}}}\right]\frac{q_{\text{سنگین}}}{r}} \qquad (۴)$$

در این مورد می‌بینیم که نسبت بار به جرم جسم سبک $\frac{q}{m}$ را داریم و انتظار هم نداشتیم که حذف شوند. این مثال تأکید می‌کند که از چهار نیروی بنیادی شناخته شده (گرانی، الکترومغناطیسی و نیروهای قوی و ضعیف هسته‌ای)، فقط نیروی گرانی به لختی بستگی دارد که پیامدهای عمیقی در شناخت ما از ساختار عالم به همراه دارد.

نظریهٔ نسبیت خاص اینشتین

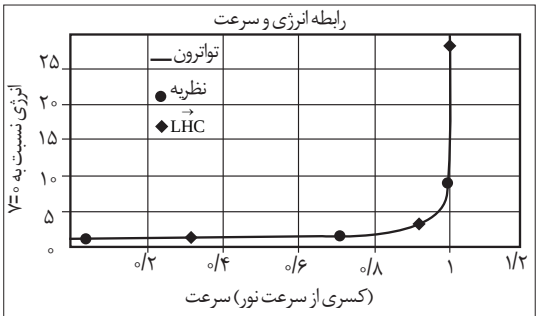
جرم نقشی اساسی در مکانیک بازی می‌کند، اما در حوزهٔ نسبیت هم نقشی بر عهده دارد. شاید بیشترین تأکید نسبیت خاص این باشد که جرم یک جسم با افزایش سرعتش افزایش می‌یابد. این ادعا صرفاً حقیقت ندارد. من این را با کمی نگرانی بیان می‌کنم چون تجربه‌های طولانی و تأسف‌آور به من می‌گویند که شکاکان نسبیت برداشت غلطی از این گزاره می‌کنند. شما نباید این گفته را به‌عنوان نشانه‌ای از عدم پذیرش پیش‌بینی‌های بدون استثنا موفق نسبیت خاص از طرف من بدانید. من چنین نمی‌گویم. نسبیت درست است. آنچه نادرست است بیشتر تعبیرهای رایج از معادله‌های آن است.



▲ شکل ۳. نظریه‌های نسبیت خاص و نسبیت عام اینشتین شناخت مهمی را دربارهٔ ماهیت جرم و نقشی که در بافت واقعیت به عهده دارد در اختیار می‌گذارند.

درست است که گزارهٔ «جرم یک جسم با افزایش سرعت آن افزایش می‌یابد» ولی از لحاظ کیفی و ساده‌لوحانه معقول است، اما چنانکه در شکل ۴ دیده می‌شود افزایش سرعت جسم از ۹۰ تا ۹۵ درصد سرعت نور از افزایش صفر تا ۵ درصد سرعت نور مشکل‌تر است و انرژی بیشتری می‌خواهد (دقیقاً بیشتر از ۷۲۵ مرتبه).

افزون بر این، امکان ندارد جسم را با سرعت‌های بیشتر از سرعت نور شتاب دهیم. اما این گزاره‌ها واقعاً دربارهٔ جرم نیست بلکه دربارهٔ لختی است و در اینجا من علاقه‌مندم دو نکته را بیان کنم، اولاً، در سرعت‌های پایین، جرم و لختی



▲ شکل ۴. نظریهٔ نسبیت اینشتین نشان می‌دهد که رابطه‌ای بسیار غیرخطی بین سرعت و انرژی وجود دارد که اغلب به غلط گفته می‌شود ناشی از تغییر جرم جسم است. داده‌ها نقطه‌های نمودار خروجی برخی اندازه‌گیری‌های انجام شده در شتابدهنده‌های تواترون آزمایشگاه فرمی و مجتمع LHC است.

رابطه‌ای مستحکم با هم دارند. ثانیاً، جرم کمیتی قابل اندازه‌گیری است، در حالی که لختی صرفاً این مفهوم است که اجسام در مقابل تغییر حرکت مقاومت می‌کنند.

بنابراین درست‌تر است که بگوییم *لختی* با افزایش سرعت زیاد می‌شود نه جرم، و فیزیک‌دان‌ها، معلمان و ساده‌نویسان فیزیک باید برای این اشتباه مفهومی سرزنش شوند. منشأ این اشتباه مربوط به دشواری‌هایی است که هنگام ارائه زمینه‌های غیرشهودی نسبیت خاص به دانش‌آموزان روی می‌دهد. معمولاً پس از اینکه تبدیل‌های لورنتس آموزش داده شد، استادان تکانه و انرژی را مورد توجه قرار می‌دهند. معادله‌های نسبیتی برای تکانه، P، و انرژی کل، E، عبارت‌اند از:

$$P=\gamma mV \qquad (۵)$$
$$E=\gamma mc^{۲}$$

که در آن‌ها m جرم، v سرعت، C سرعت نور و $\gamma = \sqrt{۱-(\frac{V}{C})^{۲}}$ است.

وقتی که $v \longrightarrow ۰$ میل می‌کند، $\gamma \longrightarrow ۱$ میل خواهد کرد.

پس، در سرعت‌های پایین، معادله‌ها می‌توانند به‌صورت معادله‌های شناخته شدهٔ $P=mv$ و $E=mc^{۲}$ بازنویسی شوند.

بنابراین چیزی به نام جرم نسبیتی ابداع می‌شود که $m=\gamma m$. جرم جسم در حالت سکون (یعنی وقتی $v=۰$ است) m سکون نامیده می‌شود. معادله‌های شناخته شده نسبیتی $P=mV$ نسبیتی و $P=mC^{۲}$ را می‌توان با این رهیافت بازیافت. آشنایی با این معادله‌ها تکیه‌گاهی برای شاگردان فراهم می‌کند که آن‌ها با پیش‌بینی‌های غیرشهودی نسبیت خاص آشنا شوند. درواقع، فقط یک جرم وجود دارد و آن جرم سکون است. چون یک جرم (لختی) وجود دارد که فقط با نشانه m مشخص می‌شود و لختی در دستگاه‌های نسبیتی γm است.

ایده جرم وابسته به چارچوب را اغلب افرادی با حسن‌نیت اما برداشت غلط از نسبیت، مورد سوءاستفاده قرار می‌دهند. شاید آن‌ها جرم نسبیتی را مثلاً با قانون گرانی نیوتون ترکیب می‌کنند و به نتایج بی‌معنایی می‌رسند. پس شاید توجه به گفت‌وگوی پرشور مفهوم جرم نسبیتی و بحث دربارهٔ امتیازات این مفهوم که در نوشته‌ها یافت می‌شوند ارزشمند باشد.

معادله‌ای دیگر در نسبیت وجود دارد که بینش‌های جالب توجهی را عرضه می‌کند. این معادله، انرژی، تکانه و جرم سکون (که اکنون می‌بینیم تنها جرم است) را به یکدیگر مربوط می‌سازد. این معادله عبارت است از:

$$E^{۲}=(pC)^{۲}+(mC^{۲})^{۲} \qquad (۶)$$

پیام اصلی این معادله را می‌توان ابتدا با بیان آن در دستگاه

یکایی که در آن همهٔ سرعت‌ها برحسب کسری از سرعت نور (به‌طور مثال C=۱) بیان شده‌اند نوشت و سپس عملیات جبری روی آن انجام داد تا به‌صورت زیر درآید.

$$m^2=E^2-p^2 \qquad (۷)$$

این معادله که در هر چارچوبِ مرجعی صحیح است، درواقع، به معنای آن است اگر تکانه و انرژی ذره‌ای را در هر چارچوبی اندازه‌گیری کنید، می‌توانید جرم آن را تعیین کنید. شاید این گزاره از لحاظ ریاضی بدیهی باشد که جرم سکون یک عدد خاص است. اما می‌توان با استفاده از تبدیل‌های لورنتس برای انرژی و تکانه بررسی و تأیید کرد که جرم یک ناوردای لورنتسی در هر چارچوب مرجع یکسان باقی است.

معادله (۷) بسیار مهم است، زیرا در طرف چپ آن یک ناوردای لورنتسی غیرقابل تغییر و در طرف راست آن متغیرهای وابسته به چارچوب مرجع قرار گرفته‌اند. این معادله همچنین ارتباط آشکاری میان انرژی، تکانه و جرم برقرار می‌کند. در ادامهٔ مقاله به اهمیت فوق‌العاده این رابطه خواهیم پرداخت.

نسبیت عام

نظریه نسبیت خاص اینشتین برای محیط بدون نیروی گرانی است. معمولاً نسبیت خاص در چارچوب‌های مرجع بدون شتاب به‌کار گرفته می‌شود، اگرچه معادله‌های آن را می‌توان تعمیم داد.

در سال (۱۹۱۵/ ۱۲۹۴)، اینشتین نیروی گرانی را به نظریهٔ پیشین خود افزود که نتیجهٔ آن به نسبیت عام انجامید. اینشتین از اصل هم‌ارزی استفاده کرد. بر پایهٔ این اصل فرض می‌شود که هم‌ارزی کاملی میان یک میدان گرانشی و یک دستگاه مرجع شتابدار برقرار است. به‌طور خلاصه، ایدهٔ یکسان بودن جرم لختی و جرم گرانشی مؤلفه بدون قید و شرط نسبیت عام است که به پیامدهای شگفت‌انگیز کُند شدن زمان در نواحی میدان‌های گرانشی شدید می‌انجامد که لزوم انعطاف‌پذیری فضا و زمان را می‌طلبد.

اگرچه، بحث در جزئیات خارج از چارچوب این مقاله است، اما نقل سه روایت از اصل هم‌ارزی و اختلاف میان آن‌ها شایان ذکر است.

é هم‌ارزی ضعیف: فرض می‌شود جرم لختی و جرم گرانشی هم‌ارزند. افزون بر این، اثرها موضعی‌اند، به عبارت دیگر آن‌ها در حجم‌های به حدّ کافی کوچک به‌کار برده می‌شوند به طوری که گرادیان میدان گرانشی آن‌ها بارز نیست. سرانجام، اجسام فقط به وسیله نیروهای غیرگرانشی به هم می‌پیوندند. یعنی می‌توان انرژی بستگی گرانشی را نادیده گرفت.

é هم‌ارزی اینشتین: فرض می‌شود اصول هم‌ارزی ضعیف برقرار است و این شرط هم اضافه می‌شود که پیامد یک آزمایش غیرگرانشی در یک آزمایشگاه در حال سقوط آزاد مستقل از سرعت محل آزمایش در فضا ـ زمان است. این هم‌ارز آن است که اصل هم‌ارزی ضعیف را با ناوردایی لورنتس ترکیب کنیم.

é هم‌ارزی قوی: فرض می‌شود بعضی از اصول هم‌ارزی اینشتین برقرار است، اما برخی از شرایط آن تخفیف یافته است. در اولین تغییر، اجسام در دست بررسی می‌توانند با نیروهای گرانشی به یکدیگر پیوند داشته باشند. همچنین این امکان وجود دارد که در حالی‌که قانون‌های گرانش مستقل از سرعت و مکان‌اند، حرکت جسمِ مورد آزمون می‌تواند به هر دو وابسته باشد.

آزمون‌های انجام شده روی انواع مختلف این اصول هیچ نشانه‌ای از غلط بودن آن ندارند. آزمون‌های اصل هم‌ارزی ضعیف شامل همان اصولی است که در آزمایشگاه‌های فیزیک پایه انجام می‌شود. انداختن دو وزنهٔ مختلف و دیدن اینکه آن‌ها با سرعت یکسانی سقوط می‌کنند، بارزترین مثال این مورد در سال (۱۳۵۰/۱۹۷۰) توسط دیوید اسکات[۲] فضانورد انجام شد. او همزمان یک پَر و یک چکش را در سطح کرهٔ ماه رها کرد. آزمون‌های اصول هم‌ارزی اینشتین ابتدا تایید اصل هم‌ارزی ضعیف را می‌طلبند، اما مستلزم آن هم هستند که با انجام آزمایش نشان داده شود که نسبت ضرایب ثابت بدون بُعد و نسبت جرم‌ها با زمان تغییر نمی‌کند و ثابت است. این آزمون‌ها شامل نسبت جرم الکترون به جرم پروتون یا ثابت ساختار ریز است که با شواهد جمع‌آوری شده از تماشای اختروش‌های دوردست و یا به‌وسیلهٔ اطلاعاتی که از راکتور طبیعی شکافت هسته‌ای اُکلو[۳] به‌دست آمده تعیین شدند. این راکتور در واقع یک معدن اورانیم در گابن است که در حدود دو میلیارد سال پیش واکنش‌های هسته‌ای طبیعی در آن روی داده است. آزمون دیگر هم‌ارزی اینشتین آزمایش پوند - ربکا[۴] است که یکسان بودن قانون‌های فیزیک را وقتی که اجسام انتقال پیدا می‌کنند بررسی می‌کند. این روش همچنین می‌تواند انتقال به سرخ‌گرانشی را بیازماید.

آزمون‌های اصل هم‌ارزی قوی در جست‌وجوی تغییرات گرانشی G برحسب زمان است. یکی از آن‌ها از دستگاه‌های ردگیر فاصله زمین و ماه ناسا استفاده کرد. آزمون‌های دیگر در جست‌وجوی «نیروی پنجم» است که به معنای تغییر سرشت نیروی گرانی از رفتار $\frac{۱}{r^۲}$ مورد انتظار است.

موفقیت‌های نسبیت ما را وامی‌دارد نتیجه بگیریم اصل هم‌ارزی جرم لختی و جرم گرانشی که نخست در کلاس‌های فیزیک مقدماتی ارائه می‌شود خودش پیوندی نزدیک با بافت

نظریه نسبیت خاص اینشتین برای محیط بدون نیروی گرانی است. معمولاً نسبیت خاص در چارچوب‌های مرجع بدون شتاب به‌کار گرفته می‌شود، اگرچه معادله‌های آن را می‌توان تعمیم داد

کیهان دارد. اما نمی‌دانیم چرا؟ این صرفاً یک اصل اثبات‌شده نسبیت عام است و این ایده که لختی به‌وسیلهٔ عواملی به نیروی گرانی ارتباط دارد که با دیگر نیروها اختلاف دارد، می‌تواند سرنخی واقعی در این مورد باشد که نظریه غایی فیزیک باید چگونه باشد.

میدان هیگز

تاکنون، موضوع بحث‌مان به رفتار جرم محدود بوده است، اما هنوز به خاستگاه جرم نپرداخته‌ایم. برای انجام این کار نیازمندیم از دستاوردهای فیزیک نیم قرن گذشته کمک بگیریم.

در سال‌های ۱۹۶۰ فیزیک‌دان‌ها راه‌هایی را بررسی می‌کردند تا ثابت کنند نیروی ضعیف و نیروی الکترومغناطیسی دارای خاستگاه مشترکی هستند. پژوهشگران با استناد کردن به یک اَبَربار ضعیف و یک ایزواسپین موفق به وحدت این دو در قالب اَلکتروضعیف شدند، گرچه به نظر می‌رسد تلاششان حاوی یک نقص جدی است. معلوم شد که ذراتِ منتقل‌کنندهٔ نیروهای ضعیف و الکترومغناطیسی بی‌جرم و در نتیجه دارای بُرد بی‌نهایت هستند. اگرچه، این ویژگی برای فوتون وجود داشت، اما این پیش‌بینی با اندازه‌گیری‌های بُرد ضعیف که از مرتبهٔ 10^{-18} متر به‌دست آمد کاملاً ناسازگار بود. این اختلاف در سال ۱۹۶۴ وقتی حل شد که گروهی از دانشمندان متشکل از رابرت براوت،[5] فرانسوا انگلرت[6] و پیتر هیگز[7] میدان‌های اسکالری را مطرح کردند که به لحاظ نظری با بوزون‌های پیش‌بینی شده الکتروضعیف برهم‌کنش می‌کردند و فوتون‌های مشاهده شدهٔ بدون جرم نیروی الکترومغناطیسی و بوزون‌های جرم‌دار نیروی ضعیف W و Z را تولید می‌کردند.

میدان جرم‌دهنده کوانتیده است و باعث تولید ذره پیش‌بینی شده‌ای می‌شود که اکنون بوزون هیگز نام دارد. کشف بوزون هیگز در سال ۲۰۱۲ اعلام شد. اندازه‌گیری‌های انجام شده در بین این سال‌ها، نتیجه‌گیری‌هایی را که طی نیم سدهٔ گذشته با کشف بوزون هیگز پیش‌بینی شده بود تقویت کردند.

هنوز معماهایی در نظریهٔ هیگز باقی‌مانده است. اگرچه اکنون ما بر این باوریم که کوارک‌ها، لپتون‌های باردار، و بعضی از بوزون‌های حامل نیرو در میدان هیگز دارای جرم می‌شوند، اما کاملاً درک نمی‌کنیم چرا بعضی از ذرات جرمی بیشتر از دیگران دارند. آسان‌ترین پاسخ آن است که، هر ذره باید دارای نوعی بار باشد که با میدان هیگز برهم‌کنش می‌کند. آن‌هایی که با میدان هیگز بیشتر برهم‌کنش می‌کنند در نهایت جرم بیشتری به‌دست می‌آورند. البته باید به نکته مهمی توجه کرد. اغلب گفته می‌شود هر چه جرم اجسام بیشتر باشد برهم‌کنششان با میدان هیگز بیشتر است. اما در اینجا رابطهٔ علت و معلولی برعکس شده است. برهم‌کنش علت، و جرم معلول است. بر پایهٔ این ویژگی بار هیگز بنیادی‌تر از جرم است. هنوز نظریهٔ تأییدشده‌ای وجود ندارد که این بارها را به‌طور پیشینی پیش‌بینی کند.

اگر شما بخواهید بفهمید منشأ جرمتان چیست، باید اتم‌هایی را در نظر بگیرید که از آن تشکیل شده‌اید. اگر جرم اتم‌ها را جمع کنید، به مقداری مساوی جرمتان دست خواهید یافت

نیروی قوی

شاید فکر کنید با کشف بوزون هیگز شناخت ما از خاستگاه جرم کامل و به پایان خود نزدیک شده است. با این همه، ساده‌سازی‌های علمی اخیر در این مورد آسیب بزرگی به شیفتگان علم و حتی معلمان فیزیک و دیگر مصرف‌کنندگان نه‌چندان فرهیختهٔ علم رسانده است. معلوم شده است که میدان هیگز علت به‌وجود آمدن جرم مادهٔ معمولی نیست.

اگر شما بخواهید بفهمید منشأ جرمتان چیست، باید اتم‌هایی را در نظر بگیرید که از آن تشکیل شده‌اید. اگر جرم اتم‌ها را جمع کنید، به مقداری مساوی جرمتان دست خواهید یافت. در کاوش ژرف‌تر درون اتم، با پروتون‌ها، نوترون‌ها و الکترون‌ها روبه‌رو خواهید شد. پروتون‌ها و نوترون‌ها در هسته و دارای جرم تقریباً یکسان‌اند، بنابراین می‌توانیم آن‌ها را در یک گروه مشترک به نام نوکلئون‌ها جمع کنیم. برعکس، جرم الکترون فقط حدود ۵ صدم درصد جرم یک نوکلئون است و بنابراین سهم جرم الکترون‌ها در جرم ماده معمولی ناچیز است. با این حال، اگر جرم نوکلئون‌هایتان را با هم جمع کنید، به عددی نسبتاً نزدیک به جرمتان خواهید رسید.

در کاوش باز هم ژرف‌تر در کوچک‌ترین ذرات شناخته‌شدهٔ ماده، به کوارک‌ها خواهیم رسید. می‌دانیم که نوکلئون‌ها از سه کوارک تشکیل شده‌اند. بنابراین انتظار داریم که جرم هر کوارک در حدود یک سوم جرم هر نوکلئون باشد. اما در اینجا است که با وضعیت جالب توجهی روبه‌رو می‌شویم. اگر جرم کوارک‌هایی که بدنتان از آن‌ها تشکیل شده است را با هم جمع کنید، به جرمی در حدود یک یا دو درصد جرم بدنتان دست خواهید یافت. این کاملاً خلاف چیزی است که هنگام جمع کردن جرم نوکلئون‌های تشکیل‌دهنده بدنتان روی داد.

بنابراین، منشأ جرمتان از کجاست؟ دربارهٔ آنچه در هر نوکلئون اتفاق می‌افتد کمی فکر کنید. در ساده‌ترین مدل، هر نوکلئون دارای سه کوارک است که در کره‌ای با شعاعی از مرتبه فمتومتر (10^{-15} m) محصور شده‌اند. آن‌ها با سرعتی نزدیک به سرعت نور حرکت می‌کنند. با استفاده از معادله (۵) خواهید که γ بزرگ است و بنابراین آن‌ها انرژی قابل ملاحظه‌ای به‌ویژه از نوع جنبشی خواهند داشت. افزون بر این، این ذرات در حجم کوچکی محصور شده‌اند و با سرعتی تقریباً نزدیک به سرعت نور حرکت می‌کنند. این وضعیت مستلزم وجود نیروهای بستگی بسیار قوی است که به مقدار انرژی پتانسیل فوق‌العاده‌ای در هر نوکلئون می‌انجامد.

به‌علاوه، وقتی از حرکت کوارک‌ها در یک نوکلئونِ در

حال سکون انتگرال‌گیری کنیم، می‌بینیم که مجموع تکانه متوسطشان صفر می‌شود. بنابراین می‌توان با استفاده از معادله (۷) مقدار عظیم انرژی را که خاستگاه ۹۸ تا ۹۹ درصد از جرم بدنتان است پیدا کنید. به‌طور خلاصه، جرم شناخته شده، تقریباً ناشی از انرژی جنبشی و پتانسیل کوارک‌های درون بدنتان است.

منشأ بقیهٔ جرم برهم‌کنش بارهای هیگز کوارک‌ها و لپتون‌ها در میدان هیگز است. این برهم‌کنش‌ها شبیه همان برهم‌کنش بارهای الکتریکی در میدان‌های الکتریکی است که انرژی پتانسیل را به‌وجود می‌آورد. بنابراین، مجبوریم نتیجه بگیریم که کاملاً صحیح نیست بگوییم جرم و انرژی هم‌ارزند. بلکه درست‌تر آن است که بگوییم جرم چیزی نیست جز انرژی متراکم. اگر آگاهی به‌دست آمده را با پیروزی‌های مشاهده شده در نسبیت عام ترکیب کنیم می‌توانیم نتیجه بگیریم، انرژی متراکم است که فضا زمان را واپیچیده می‌کند.

معماهای باقی‌مانده

با توجه به آشنایی معمولی با موضوع به نظر می‌رسد بررسی جرم بسیار کسل‌کننده باشد. اما، چنانکه مشاهده کردیم، شاید بررسی‌های سرشت جرم در سطح ژرف و بنیادی باعث شگفتی‌مان شود. اینجا پرسش‌هایی را مطرح می‌کنیم که هنوز به آن‌ها پاسخ داده نشده است.

در حالی‌که خاستگاه جرم اتم‌های ماده معمولی را می‌دانیم، این را هم می‌دانیم که جرم ماده معمولی فقط ۵ درصد از مادهٔ عالم را تشکیل می‌دهد. طبق برآوردهای جدید جرم مادهٔ تاریک که ورا روبین[8] آن را عامه‌پسند کرد (شکل ۵)، ۵ برابر ماده معمولی است. ماده تاریک عملاً هنوز کشف نشده است. بنابراین باید جانب احتیاط را رعایت کنیم، اما باید متوجه باشیم که بر فرض که وجود داشته باشد، خاستگاه این ماده عجیب را نمی‌دانیم. آیا ماده تاریک جسم مرکبی مانند نوکلئون است؟ آیا مادهٔ تاریک جرمش را از برهم‌کنش با میدان هیگز به دست می‌آورد؟ یا در اینجا پدیدهٔ دیگری تأثیرگذار است؟

دومین معما به نوترینوها مربوط می‌شود، نوترینوها، بخش شناخته‌شده‌ای از گروه مادهٔ معمولی هستند. اما اینکه جرمشان را از کجا به دست می‌آورند هنوز مشخص نشده است. آن‌ها می‌توانند جرمشان را از برهم‌کنش‌هایی با میدان هیگز به‌دست آورند، اما به نظر می‌رسد که نوترینوها با کوارک‌ها و لپتون‌های دیگر فرق دارند. فوتون و گلوئون (ذره‌ای که کوارک‌ها را به یکدیگر پیوند می‌دهد) بدون جرم‌اند، در حالی‌که الکترون، سبک‌ترین لپتون، جرمی در حدود $۵۱۱\frac{kev}{c^۲}$ دارد و جرم کوارک بالا (سبک‌ترین کوارک) در حدود $۱۷۲\frac{Gev}{c^۲}$ است. برعکس، مجموع جرم‌های سه طعم نوترینوها کم‌تر از $۰/۰۳\frac{ev}{c^۲}$ است.

شکل ۵. ورا روبین اندازه‌گیری‌های مهم سرعت‌مداری ستارگان داخل کهکشان‌ها را بر حسب فاصله‌هایشان از مرکز کهکشان انجام داد. متأسفانه او که اخیراً در گذشته است پاسخ به پرسش‌های ناشی از کشفیات خود را نخواهد دید.

به نظر می‌رسد با توجه به اینکه جرم لپتون‌های باردار، کوارک‌ها، بوزون‌های حامل نیرو از مرتبه یک MeV تا چند صد Gev است، جرم بسیار پایین اما غیرصفر نوترینوها دست‌کم این امکان را به‌وجود می‌آورد که آن‌ها جرمشان را از منبع دیگری به‌دست می‌آورند. اینکه این چه سازوکاری می‌تواند باشد هنوز شناخته نشده است، اما چندین ایدهٔ خلاقانه پیشنهاد شده است. یکی از پیشنهادها به دسته‌ای از نوترینوها که هنوز کشف نشده‌اند اشاره دارد که نوترینوهای سترون نامیده می‌شوند. آن‌ها برخلاف نوترینوهای معمولی که با نیروی ضعیف برهم‌کنش می‌کنند، جرم کمی دارند و فقط دارای اسپین‌های چپگردند. نوترینوهای سترون با نیروی ضعیف برهم‌کنش نمی‌کنند، جرم دارند و دارای اسپین‌های راستگردند. جرم نوترینوهای معمولی به نوترینوهای سترون با یک معادله مربوط می‌شود، *مقداری ثابت* = سترونm × معمولm. بنابراین اگر جرم یکی زیاد شود (مثلاً نوترینوهای سترون) جرم دیگری کم خواهد شد. به این رابطه به شوخی سازوکار الاکلنگی گفته می‌شود.

سرانجام، فیل بزرگی در اتاق تاریک فیزیک نظری قرار دارد. نسبیت عام در جهان کوانتومی کارساز نیست. بنابراین، اگرچه، هم‌ارزی جرم لختی و جرم گرانشی در مقیاس‌های بزرگ به وضوح نشان داده می‌شود و پیامد آن به سازگاری فضا و زمان و نظریه نسبیت عام می‌انجامد، اما آنچه در مقیاس‌های کوچک (زیراتمی) روی می‌دهد برایمان ناشناخته است. می‌دانیم که جرم زیراتمی در واقع صرفاً انرژی است و همچنین جرم لختی ذرات زیراتمی را اندازه‌گیری کرده‌ایم، اما نمی‌دانیم چگونه نیروی گرانی در قلمرو زیراتمی تأثیر می‌گذارد. پس شاید وقتی نظریهٔ مناسبی برای گرانی کوانتومی پرداخته شود هم‌ارزی جرم لختی یا گرانشی / انرژی نقض شود. اما این را هنوز نمی‌دانیم. در واقع بدون شک جرم مفهوم آشنایی است، اما از موضوع‌هایی است که اغلب در سطح بنیادی ناشناخته مانده است. ادامهٔ بررسی‌های مجدد، چیزهای زیادی را دربارهٔ ژرف‌ترین اسرار عالم برایمان خواهد گفت.

پی نوشت‌ها

1. Don Lincoin
2. David Scott
3. Oklo
4. Pound - Rebka
5. Robert Brout
6. Francois Englert
7. Peter Higgs
8. Vera Rubin

* How Things Get Heavy: The Nature of Mass Don Lincoin

منبع

The PHYSICS TEACHER. Vol 55, OCTOBER 2017.