آموزشی

دربارهٔ تعریف جرم

یوجین هکت
ترجمهٔ احمد توحیدی

مفهوم جرم با آنکه موضوعی اساسی برای هرگونه پیشرفتی در آموزش فیزیک است، هنوز به‌خوبی درک نشده است. در عمل معلوم شده است تعریف درست جرم از آنچه در کتاب‌های درسی کنونی نوشته شده است و ما پذیرفته‌ایم بسیار ابهام‌آمیزتر است؛ از این روست که هنوز هم بحث دربارهٔ چیستی جرم در همهٔ حوزه‌های پژوهشی فیزیک با شدت ادامه دارد. بیشتر شور و هیجانی که فضای برخورد دهندهٔ هادرونی را در سرن فراگرفته، با کشف سازوکار مسئول جرم‌های ذرات بنیادی ارتباط دارد.

این مقاله نخست تعریف‌های اصلی جرم را به‌طور مختصر بررسی می‌کند و به نارسایی آن‌ها می‌پردازد. سپس با بهره‌گیری از نظریهٔ نسبیت برای جرم تعریفی مفهومی – برای جلب توجه جامعه فیزیک‌دان‌ها – ارائه می‌دهد که بر پایه مفهوم بنیادی‌تر انرژی قرار دارد، از این رو بنیادی‌تر که هر چیزی که جرم داشته باشد انرژی هم دارد، اما شاید هر چیزی که انرژی دارد جرم نداشته باشد.

کلیدواژه‌ها: جرم، تعریف جرم، انرژی

تعریف‌های معمولی

معمولاً برای تعریف جرم سه رهیافت متداول وجود داشته است: ۱. به‌عنوان مقدار ماده، ۲. به‌عنوان چیزی که در مقابل تغییرات حرکت مقاومت می‌کند و ۳. به‌عنوان آنچه باعث برهم‌کنش گرانشی است. اولین رهیافت مربوط به قرون وسطی، در حکمت و آثار هنری آشکار شده است. دومین تعریف، به زمان کپلر (۱۶۱۸ م)، دینامیک نیوتونی و کمی پس از آن، در رابطهٔ F=ma، برمی‌گردد. سومین تعریف، به‌تدریج از قانون گرانش عمومی، $\text{نیرو} = \frac{\text{جرم}_1 \times \text{جرم}_2}{\text{فاصله}^2}$ شکل گرفته است. نوشته‌ها دربارهٔ نارسایی رهیافت‌ها بحث کرده‌اند و ما در اینجا آن‌ها را به اختصار بررسی می‌کنیم. بیشتر مشکلات مفهومی وقتی به‌وجود می‌آید که بخواهیم این تعریف‌های کلاسیک را وارد بافت فیزیک معاصر مانند نظریهٔ نسبیت، کرومو دینامیک کوانتومی (QCD) و نظریهٔ پیمانه‌ای برهم‌کنش قوی کنیم.

معمولاً وقتی که تعریف‌های جرم به‌عنوان مقدار ماده ارائه می‌شوند، با «مقدار جنس» ارتباط پیدا می‌کنند. اما چون طبق نظریهٔ نسبیت وقتی گلولهٔ توپ گرم شد و انرژی سکون و در نتیجه جرم به‌دست می‌آورد، این رهیافت آشکارا مسئله‌ساز است. تعداد یکسان از اتم‌های یکسان، اکنون که با سرعت بیشتری حرکت می‌کنند، جرم بیشتری دارند. چنانکه خواهیم دید بیشتر جرم مادهٔ معمولی در عالم از انرژی محصورشدگی کوارک‌ها به‌دست می‌آید، پدیده‌ای که اغلب آن را با بی‌خیالی «جرم بدون جرم» می‌نامند. یعنی جرم «مقدار ماده» نیست، اگرچه بدون شک دارای نوعی رابطه با آن است.

دومین تعریف دقیق‌تر که اغلب در کتاب‌ها و کلاس‌های درس بی‌شمار وجود دارد مبنی بر ایدهٔ لختی. جرم یک جسم معیار و باعث ایجاد مقاومت در برابر تغییر حرکت جسم است؛ رابطهٔ F=ma، پیشینهٔ تجربی پرباری دارد و احتمالاً ایدهٔ سنتی «لختی» را کمّی می‌سازد. اما، عبارت دقیق قانون دوم نیوتون برحسب آهنگ تغییر تکانه یعنی $\text{نیرو} = \frac{\text{آهنگ تغییر تکانه}}{\text{زمان}}$ است نه $\mathbf{F}=m\mathbf{a}$. رابطهٔ اخیر تقریب سرعت کم است و به‌طور کلی m ضریب تناسب میان $\mathbf{F}$ و $\mathbf{a}$ نیست. این دو کمیت برداری شاید حتی موازی هم نباشند. از نسبیت می‌دانیم که رابطهٔ بین F و a درواقع به جهت F نسبت به $\mathbf{v}$ بستگی دارد، و بردار سرعت جهت خاصی را در فضای همسانگرد مشخص می‌کند. شتاب گرفتن الزاماً در امتداد خط اثر نیرو صورت نمی‌گیرد. وقتی که F و v بر عمودند، $\text{شتاب} = \frac{\text{نیرو}}{\gamma \times \text{جرم}}$ و وقتی F و v موازی‌اند، $\text{شتاب} = \frac{\text{نیرو}}{\gamma^3 \times \text{جرم}}$، دراینجا $\gamma = (1 - \frac{\text{تندی}^2}{\text{نور}^2})^{-\frac{1}{2}}$ است. اگر هنوز کسی بر تعریف «لختی» یا (ml) در روش کلاسیک معمول با $F=m_1 a$ تأکید داشته باشد، m_1 در مقایسه با m که کمیت اسکالر است باید تانسور مرتبه دو باشد. این مقایسه بدین‌معنا نیست که مفاهیم لختی و جرم با یکدیگر ارتباطی ندارند، آن‌ها قطعاً به هم وابسته‌اند. بلکه بدان معناست که رابطهٔ ساده تعریف سرراستی

از جرم ارائه نمی‌دهد.

فرض کنید فضاپیمایی موتور پرتاب با پیش رانش ثابت خود را روشن کند، مادام که فضاپیما در جهت سرعت شتاب می‌گیرد، سرعتش افزایش پیدا می‌کند، γ افزایش می‌یابد و اگرچه F و m ثابت باشند، شتاب a پیوسته کاهش می‌یابد تا v هرگز به سرعت نور c نرسد. برعکس، اگر a باید ثابت بماند، F با افزایش v، افزایش می‌یابد، فقط وقتی $v \approx 0$ و $\gamma = 1$ است. $ک \approx \frac{ت}{ع}$ خواهد شد. افزایش اندازه سرعت یک جسم در حالی‌که جرمش ثابت است، به واسطهٔ سرشت فضا – زمان (یعنی اتساع زمان)، حفظ شتاب را مشکل و مشکل‌تر می‌سازد، در نتیجه «لختی» جسم افزایش می‌یابد. به عبارت دیگر، با تغییر جرم یک دستگاه لختی آن را تغییر می‌دهید، اما لختی دستگاهی که به‌طور خطی شتاب می‌گیرد حتی در صورت ثابت ماندن جرم تغییر می‌کند. چنان‌که اینشتین و اینفیلد[1] گفته‌اند «اگر دو جسم جرم سکون یکسانی داشته باشند، آن‌که انرژی جنبشی بیشتری دارد در مقابل نیروی خارجی مقاومت بیشتری از خود نشان می‌دهد.» ظاهراً جرم و لختی کاملاً شبیه یکدیگر نیستند.

سومین رهیافت، اگرچه متداول، اما کمتر طرف توجه است، و با رابطهٔ $ت = \frac{ک ژ}{لا}$ بیان می‌شود و طبق آن جرم باعث برهم‌کنش گرانشی می‌شود. اما قانون گرانش نیوتون با نسبیت عام جایگزین شده است. از چشم‌انداز دوم آنچه گرانی را مشخص می‌کند تا نسور انرژی – تکانه است (یا تنش – انرژی). یک جسم متحرک در فضا – زمانی حرکت می‌کند که با حضور مادهٔ خمیده شده است. حرکت آزاد آن در امتداد خط ژئودزیک و متناظر با مستقیم‌ترین مسیر ممکن است، مسیری که خمیدگی فضا – زمان را دنبال می‌کند. جسم صرفاً در فضا به نرمی حرکت می‌کند و آنجا چیزی به‌عنوان میدان گرانشی وجود ندارد.

بر پایهٔ نظریه جان ا. ویلر «توزیع‌های جرم – انرژی و جریان‌ها بر میدان گرانشی تأثیر می‌گذارند.» همچون پیش، جرم مشارکت خود را دارد، البته نه از طریق نیرو. جرم نقش مهمی ایفا می‌کند که البته به سادگی چیزی که در قانون نیوتون انجام می‌دهد نیست. از سوی دیگر گرانی کوانتومی، نیروی گرانشی را با مبادلهٔ گراویتون‌ها به وضع اول برمی‌گرداند، اگرچه هنوز نظریهٔ کلی و دقیقی از چگونگی به وقوع پیوستن آن وجود ندارد و هیچ شاهد سرراستی برای انجام این کار وجود ندارد. همهٔ این مشکلات مانع از فرمول‌بندی تعریف دقیق جرم مبنای برهم‌کنش گرانشی می‌شود.

جرم برحسب انرژی

پیش از آنکه از رابطهٔ $E=mc^2$ استفاده کنیم، باید موضوعی وابسته به آن را سر و سامان دهیم. این رابطه می‌تواند گمراه‌کننده باشد. همچون همیشه E انرژی کل دستگاه

$$ک = (1 - \frac{ن^2}{ع^2})^{-\frac{1}{2}}$$ جرم نسبیتی آن است. تعبیر این رابطه کاملاً مشکل‌آفرین است. اینشتین خودش هرگز از «جرم نسبیتی» در هیچ یک از آثارش استفاده نکرد. در فرمول‌بندی نسبیتی اینشتین که به‌کار می‌بریم، جرم m مستقل از سرعت و بنابراین ناورداست (یعنی، برای همهٔ ناظران لخت یکسان است، «ناوردا» به معنای تغییرناپذیر یا ثابت نیست). به علاوه، $E=mc^2$ که در آن E_0 انرژی سکون (انرژی دستگاه که ناظر همراه آن اندازه می‌گیرد) است. وقتی دستگاه به‌طور کلی حرکت می‌کند به طوری که انرژی جنبشی انتقالی (KE) باشد. $E=E_0+KE$ و $E \neq E_0$ و E_0 و m هر دو ناوردا هستند. از سوی دیگر، نه KE و نه $E=\gamma mc^2$ ناوردا نیستند.

برای مشاهدهٔ مفاهیم گستردهٔ معادلهٔ $E_0=mc^2$ در بحث مورد نظر ما با توجه به ماهیت جرم، یک پروتون را در نظر بگیرید. پروتون از سه کوارک تقریباً بدون جرم (شواهد دال بر آن است که جرم کوارک‌های بالا و پایین تقریباً $\frac{ژ ع^2}{4}$ و $\frac{ژ ع^2}{8}$ است.) تشکیل شده است که گلوئون‌های بدون جرم مبادله می‌کنند. اما ابر پرهیاهوی برهم‌کنش‌های پیچیده، جرم قابل توجه حدود $\frac{ژ ع^2}{938/27}$ را نشان می‌دهد که اکنون آن را به برهم کنش داخلی (از طریق QCD) پروتون نسبت می‌دهند که مربوط به انرژی محصورشدگی کوارک‌ها است. همین موضوع درمورد نوترون نیز صدق می‌کند. محاسبه‌های استثنایی (نوامبر ۲۰۰۸) با استفاده از روشی به نام شبکه QCD جرم نوکلئون‌ها و چند هادرون سبک را با تقریب ۴ درصد پیش‌بینی می‌کند.

چون جرم ماده اتمی معمولی – درختان، هواپیماها و انسان‌ها – اساساً جرم نوکلئون‌هاست و عمدتاً از برهم‌کنش‌هایی به‌دست می‌آید که منشأ آن‌ها به انرژی سکون و در نتیجه جرم است، بنابراین جرم کیلوگرم استاندارد بیشتر از انرژی محصورشدگی کوارک‌ها می‌شود. یا چنان‌که فرانک ویلچک در سخنرانی «آزادی مجانبی: از معما تا الگو» هنگام دریافت جایزه نوبل فیزیک ۲۰۰۴ بیان کرد «بیشتر جرم ماده معمولی ۹۰- درصد یا بیشتر - ناشی از انرژی ناب $ک = \frac{ژ}{ع^2}$ است.» او تأکید کرد «قانون انیشتین امکان توضیح جرم برحسب انرژی را مطرح می‌کند؛ این کار صحیحی است زیرا در فیزیک جدید مفهوم انرژی بنیادی‌تر از جرم است.»

دو معادلهٔ اساسی دینامیک نسبیتی عبارت‌اند از:

$$پ^2 = ع^2 گ^2 + ع^4 ک^2 \qquad (1)$$

$$پ = گ ع^2 , ژ \qquad (2)$$

در اینجا v بردار سرعت است که می‌تواند اطلاعات زیادی

دربـارهٔ جرم در اختیار بگذارد. با بازآرایی رابطه (۱) عبارتی برای جرم ذره به‌دست می‌آید.

$$\text{ک}=\frac{(\text{ع}^{۲}\text{خ}^{۲}-\text{پ}^{۲})^{\frac{۱}{۲}}}{\text{ع}^{۲}} \qquad (۳)$$

توجه کنید برای یک تک‌فوتون $E=h\nu=pc$ و $m=۰$ است.

برای فرمول‌بندی معادله‌ای برای جرم ناوردای m دستگاهی از ذرات (مثلاً، هسته اتم یا یک گاز) از جمع‌پذیری انرژی و تکانه استفاده می‌کنیم. بنابراین، i امین ذره را در نظر بگیرید که دارای انرژی Ei و تکانهٔ pi است. فرض کنید انرژی و تکانهٔ کل دستگاه به ترتیب

$$\text{گ}=\sum_{\text{ف}}\text{گ}_{\text{ـ}} \text{ و } \text{پ}=\sum_{\text{ف}}\text{پ}_{\text{ـ}} \qquad (۴)$$

باشـد. در اینجا تکانهٔ دسـتگاه به‌طور کلـی جمع برداری تک‌تک از اجزای سـازنده دستگاه است. با توجه به روابط (۳) و (۴) و جمع‌بندی همهٔ موجوداتی که دسـتگاه را ساخته‌اند، جرم کل (که جمع‌پذیر نیست) برابر است با

$$\text{چ}=\frac{(\text{ع}^{۲}\text{خ}^{۲}-\text{پ}^{۲})^{\frac{۱}{۲}}}{\text{ع}^{۲}} \qquad (۵)$$

شکل رابطه بالا با رابطهٔ (۱) جور درمی‌آید، اگرچه معنای هـر یـک از اجزای آن متفاوت اسـت. ذراتی کـه جرم دارند (مانند پروتون) ناگزیر می‌توانند در حالت سکون وجود داشته باشـند، و ذرات دیگری که بدون جرم هستند (مانند فوتون) نمی‌توانند در حالت سـکون وجود داشـته باشـند. بنابراین، ایده‌هـای «جرم» و «سـکون» بـه یکدیگر وابسـته‌اند. برای دسـتگاهی که جرم دارد، می‌توان چارچوب مرجع مناسـبی یافت که در آن برآیند بردار تکانهٔ اجزای سازندهٔ دستگاه صفر باشد. می‌گوییم دستگاه از منظر آن چارچوب در حال سکون است. چون $E=E_{o}+KE$، $KE=E-Mc^{۲}$، $E_{o}=Mc^{۲}$ و رابطهٔ (۵) خواهیم داشت:

$$\text{پ}\,\text{ج}=(\text{چ}^{۲}\text{ع}^{۴}+\text{گ}^{۲}\text{ع}^{۲})^{\frac{۱}{۲}}-\text{چ}\,\text{ع}^{۲} \qquad (۶)$$

یک دستگاه می‌تواند منقبض یا منبسط شود، یا اجزای آن به‌طور کاتوره‌ای به هر طرف حرکت کنند و با این حال هنوز هم می‌تواند در حالت سـکون باشـد. جعبه‌ای را در نظر بگیرید که محتوی گاز و در حال سکون است، اگر تکانهٔ خالص دستگاه صفر باشد، با توجه به رابطهٔ (۶) انرژی جنبشی انتقالی آن KE به‌طور کلی صفر و انرژی سـکون خالص کل دسـتگاه $E=E_{.}$ می‌شود. در اینجـا $E_{.}$ انرژی سـکون خالص کل دسـتگاه یعنی مجموع انرژی‌های سـکون هر یک از اجزای تشـکیل‌دهندهٔ دسـتگاه، به‌علاوهٔ انرژی جنبشی داخلی هر یک از آن‌ها، به‌اضافهٔ انرژی‌های پتانسیل هر یک به واسطهٔ برهم‌کنش‌های متقابل است. با توجه به معادلهٔ (۵) و با شـرط $P=۰$ جرم خالص دستگاه $\text{چ}=\frac{\text{پ}^{۰}}{\text{ع}^{۲}}$ اسـت. چون انرژی سـکون به‌طور کلی فقط مجموع انرژی‌های سکون تک‌تک بخش‌ها نیسـت، پس **جرم جمع‌پذیر نیست**.

جرم دستگاهی از اجسام دارای جرم فقط در صورتی برابر مجموع هر یک از جرم‌هاسـت که همهٔ آن‌ها نسبت به یکدیگر در حال سکون باشند و با هم برهم‌کنش نکنند. هنوز، **جرم ناورداست**، و جرم که در چارچوبی با تکانهٔ صفر تعیین می‌شود، جرم آن در هر دستگاه مرجع لخت دیگر است.

انرژی فوتون کاملاً جنبشی است، $E=pc$، هیچ چارچوبی با تکانهٔ صفر برای یک فوتون منفرد وجود ندارد. این موضوع برای باریکه‌ای موازی از فوتون‌ها که جرم خالص آن‌ها صفر اسـت هم صدق می‌کند. افشانه‌ای از فوتون‌های با انرژی مساوی که به‌طور همسـانگرد از یک منبع نقطه‌ای سـاکن خارج می‌شوند دارای چارچوبی با تکانهٔ صفر است که به‌صورت ثابت در مرکز منبع قرار دارد. به‌طور کلی ابر در حال انبساط فوتون‌های بدون جرم، انرژی سـکون خالص و جرم خالص دارند. این موضوع برای یک فوتون «گاز» در یک اجاق ساکن که به‌طور کج و معوجی در امتدادهای مختلف حرکت می‌کند نیز صادق است و یک چارچوب با تکانهٔ صفر را نشان می‌دهد.

نیرو، انرژی، ماده و جرم

در بنیادی‌ترین سـطح با ماده، برهم‌کنش و تغییر سروکار داریـم. همهٔ ماده برهم‌کنش می‌کند و در نتیجه آن برهم‌کنش تغییر قابل مشـاهده اسـت. اگـر ماده برهم‌کنـش نکند، هیچ راهی بـرای آگاهی از وجود آن در اختیـار نداریم. یک نمونه از ماده را به کمک شـدت برهم‌کنش‌هایش از دیگری تشـخیص می‌دهیم. چهـار نیروی بنیادی با تغییرات مشـاهده‌پذیری که تولید می‌کنند شناخته می‌شـوند. گرانی را «نمی‌بینیم»، بلکه اجسـامی را مشـاهده می‌کنیم که فـرو می‌افتند. بـرای درک دنیـای تجربـی، برهم‌کنش‌های بنیادی را بـا آن جهان مربوط می‌کنیم، کمیت‌هایی به نـام «ویژگی‌های ماده» ابداع می‌کنیم که مشـاهده‌پذیرند و یا دست‌کم می‌شـود آن‌ها را به آسانی از مشاهده‌پذیرها به‌دست می‌آورد. مقدار ماده را می‌توان از آثار قابل مشاهدهٔ برهم‌کنش‌های مختلف آن دریافت. این رفتار (تغییرات و مقاومـت در برابر تغییرات) بـا ویژگی‌های بنیادی ماده (جرم، بار، اسـپین، و غیره) در ارتباط اسـت. اگر برهم‌کنش‌ها نباشند، ویژگی‌هـا هم وجود نـدارد و اگر ویژگی‌ها نباشـند موجودیت فیزیکی آشکار نمی‌شـود. بنابراین، منطقی است فرض کنیم از ویژگی‌های هر موجود مشـخصاتی اسـت که از برهم‌کنش‌های داخلی و یا بیرونی آن به‌دست می‌آید.

نیرو عامل تغییر اسـت، یعنی عاملی است که باعث تغییر، یعنی تغییـر مکان با غلبه بر یک برهم‌کنش، تغییر حرکت و یا تبدیل (مثلاً، تبدیل یک کوارک به کوارک دیگر) می‌شود. *انرژی معیار تغییر اسـت*. معمولاً به فرایندهایی سـروکار داریم که در دسـتگاه‌های موجود روی می‌دهند و با افزودن یا گرفتن انرژی

همراه هستند. برای مثال، انرژی یک فوتون با مشاهدهٔ تغییر یک مشاهده‌پذیر هنگام جذب آن نمایان می‌شود. چون انرژی پایسته است، بنابراین انرژی با تغییری که روی داده یا در شرف روی دادن است ارتباط دارد. در این مورد با این واقعیت روبه‌رو می‌شویم که انرژی و زمان متغیرهای مزدوج هستند (که برای مثال، با استفاده از اصل عدم قطعیت شاهد آن هستیم).

افزایش یا کاهش انرژی یک دستگاه معیار تغییر حالت (به هر شکل که روی دهد) آن بر اثر یک یا همهٔ برهم‌کنش‌هایی است که در معرض آن‌ها قرار می‌گیرد. به‌صورت فعال‌تر می‌توان گفت: **انرژی معیار توانایی یک دستگاه برای به‌وجود آمدن تغییر است**. هر ماده، چه یک ذرهٔ بنیادی باشد یا دستگاه مرکب، دارای انرژی است. تغییر انرژی یک دستگاه ظرفیت آن دستگاه قرار گرفتن در معرض یک تغییر خودساخته است.

برای مثال، اگر یک فنر کشیده شده اندکی جمع شود، در آینده انرژی جنبشی کمتری به گلولهٔ منتظر ماشین‌بازی Pin Ball می‌دهد و در نتیجه تغییر سرعت کمتری تولید می‌کند.

ماده به شکل «ذرات» ظاهر می‌شود و ذرات هر کدام ویژگی‌های فیزیکی گوناگونی (مانند جرم، طول عمر، طول موج، انرژی، بار و غیره) از خود نشان می‌دهند. همراه با شرودینگر، بورن، دوبروی، پاؤلی و دیگران، فوتون‌ها را گذراترین شکل ماده در نظر می‌گیریم. بنابراین دو نوع ماده مختلف را مشاهده می‌کنیم، ماده‌ای که می‌تواند در حال سکون وجود داشته باشد و ماده‌ای که فقط در حال حرکت وجود دارد.

بنابراین، در این بحث صرفاً می‌گوییم که *ماده چیزی است که ویژگی‌های فیزیکی قابل اندازه‌گیری دارد* و یا هم ارز آن **ماده چیزی است که برهم‌کنش می‌کند**. برخی از ویژگی‌های ذرات همیشه کوانتیده، ثابت و پایسته هستند (به‌طور مثال، بار، اسپین، عدد باریونی، شگفتی و افسون)، درحالی‌که ویژگی‌های دیگر (مثلاً، جرم، طول عمر، طول موج، انرژی و تکانه) همواره کوانتیده، ثابت و یا پایسته نیستند، علاوه بر این، همهٔ اعداد کوانتومی غیرصفر می‌توانند مثبت یا منفی باشند (که شامل پاد ماده هم می‌شود) برعکس آن، جرم (هم برای ماده و هم برای پادماده) به‌طور کلی مثبت است. همهٔ اشیا «حقیقی» (در مقابل مجازی) غیر از فوتون، جرم دارند (برای مثال، کوارک‌ها، لپتون‌ها و فیل‌ها). این کلیت برای هیچ یک از ویژگی‌های کوانتیده درست نیست. مثلاً، پیون‌ها بدون اسپین و نوترینوها بدون بار هستند. ویژگی جرم بسیار متفاوت از باره اسپین یا شگفتی است.

جرم یک ویژگی ماده است که به‌طور کلی یا جزیی از برهم‌کنش‌ها ناشی می‌شود. اکنون به‌طور گسترده اما نه کلی، فرض می‌شود جرم بعضی از ذرات بنیادی – کوارک‌ها، لپتون‌ها و بوزون‌های W و بوزون‌های Z- حاصل برهم‌کنش با میدان هیگز است. بنابراین اگر این موضوع ثابت شود، جرم همهٔ چیزهای شناخته شده در این جهان کاملاً ناشی از برهم‌کنش‌هاست. به عبارت دیگر، کوارک‌ها و لپتون‌ها جرم‌هایشان را از برهم‌کنش بوزون‌های افسانه‌ای هیگز، و نوترون‌ها و پروتون‌ها هم جرم‌های اضافی‌شان را از انرژی محصورشدگی کوارک به دست می‌آورند. اما البته، وجود میدان هیگز هنوز بسیار موقتی و در انتظار تأیید است. از سوی دیگر، برخی بر این باورند که جرم یک جسم ناشی از برهم‌کنش گرانشی آن با بقیهٔ عالمی است که با آن جفت شده است (از طریق اصل ماخ). این ایدهٔ خوشایندی است زیرا بدون مطرح کردن نیرویی جدید باعث وحدت دو مظهر مشاهده‌پذیر جرم یعنی گرانی و لختی می‌شود. در هر مورد، جرم ناشی از برهم‌کنش‌هاست.

چون هر ذره می‌تواند نابود شود، شاید هیچ بخشی از جرم هر موجود به «ماده» دارای اندازهٔ ذاتی وابسته نباشد. این موضوع اساساً موردنظر انیشتین است وقتی که می‌نویسد «معلوم شده است که لختی نه ویژگی بنیادی ماده (مانند بار و اسپین) است و نه درواقع یک اندازهٔ فروکاستنی، بلکه یک ویژگی انرژی است.» پنرز[۲] و ریندلر[۳] از چشم‌اندازی متفاوت به همین نتیجه رسیده‌اند. «این رفتار ماده گونهٔ انرژی به شدت نشان می‌دهد که همهٔ جرم سکون ناشی از انرژی داخلی و چیزی که «مقدار ماده» نامیده شده است موجودیت مستقل ندارد بلکه شکلی از انرژی سکون است.»

رابطه بین برهم‌کنش‌ها و جرم با آفرینش جرم در فرایند تولید زوج بیشتر مورد تأکید قرار می‌گیرد. اگرچه تولید زوج اغلب از طریق میدان الکترومغناطیسی انجام می‌گیرد، اگر نظر استیون هاوکینگ[۴] درست باشد، میدان گرانشی شدید اطراف یک سیاهچاله هم می‌تواند باعث تولید زوج شود و به تولید جرم بینجامد. از سوی دیگر، خود- گرانی زمین باعث شده است که هنگام جمع شدن به‌صورت کره جرم آن با ضریب $۴/۲\times۱۰^{-۱۰}$ کاهش پیدا کند. ظاهراً هر نوع برهم‌کنش می‌تواند بر جرمِ یک دستگاه، چه یک نوکلئون یا یک سیاره، تأثیر بگذارد.

یک تعریف جدید جرم

با توجه به رابطهٔ $E_o=mc^۲$، معادلهٔ (۵) و این واقعیت که جرم یک ویژگی ماده ناشی از برهم‌کنش‌ها و در نتیجه وابسته به انرژی است، پس دست‌کم می‌توان جرم را از چشم‌اندازی جدید تعریف کرد:

جرم ناوردای هر جسم – بنیادی یا مرکب – معیاری از کمترین مقدار انرژی لازم برای خلق جسم در حال سکون به صورتی است که در آن لحظه وجود دارد.

با نادیده گرفتن تأثیر دما، دست‌کم در حدود $۱۰^{۱۴}$ ژول، کمترین مقدار انرژی لازم برای تولید یک گرم الماس، یک گرم دوتریم و یک گرم گل نرگس است. پیچیدگی ساختار جسم یا اینکه جسم از چه چیزی ساخته شده است اهمیت ندارد.

تعریف بالا با این واقعیت سازگار است که دستگاه متشکل از

یک تک فوتون دارای جرم صفر است، چون چارچوبی وجود ندارد که در آن حرکت نکند. درواقع، دستگاه مرکبی که در آن هر ذره با سرعت c در یک جهت حرکت می‌کند (طبق معادله‌های (۲) و (۵)) بدون جرم است. چون انرژی پایسته است، *جرم هر جسم در حال سکون معیاری از بیشترین انرژی جنبشی است که در فرایند نابودی آن جسم می‌تواند آزاد شود.*

فرض کنید یک فرایند فیزیکی در ناحیه‌ای منزوی روی دهد. از دو چشم‌انداز مکمل می‌توان دریافت چه اتفاقی روی می‌دهد. می‌توان به‌طور مجازی بیرون از دستگاه ایستاد و آن را در کل بررسی کرد یا می‌توان داخل آن قرار گرفت و روی هر یک از قسمت‌ها جداگانه تمرکز کرد. وقتی دستگاه در کل (به‌صورت یکپارچه) در نظر گرفته شود (یعنی از جایی که مجازاً «بیرون»می‌نامیم)، هر چقدر انرژی جنبشی KE داخل دستگاه وجود داشته باشد، متعلق به انرژی جنبشی داخلی KE است، بنابراین در انرژی سکون و در نتیجه جرم دستگاه سهیم است. یک گلولهٔ توپ داغ جرمی بیشتر از گلولهٔ سرد دارد و این موضوع با تعریف جرم هماهنگ است. زیرا انرژی یک گلوله داغ در حالت سکون بیشتر از انرژی یک گلولهٔ سرد مشابه است (زیرا برای تولید تا یک گلولهٔ توپ داغ در حال سکون انرژی بیشتر از گلولهٔ سرد مشابه لازم است).

برعکس، وقتی که اندازه‌گیری از «داخل» یک دستگاه انجام می‌شود KE انرژی جنبشی KE است و جرمی به آن وابسته نیست. بر مبنای تعریف پیشنهادی، جرم هر جسم، جرم سکون آن و در همه حال ثابت است، جرم یک گلولهٔ توپ پیش و پس از پرتاب یکسان است، جرم ناورداست. بنابراین، وقتی اندازه‌گیری انجام می‌شود، یک فوتون بدون جرم است، حتی اگر انژری جنبشی KE آن بتواند در جرم خالص قسمت محاط شدهٔ دستگاه مشارکت داشته باشد. این نکته ظریف به سردرگمی بسیار زیادی انجامیده است. تعریف پیشنهادی مطابق آنچه باید باشد، شامل دستگاه‌هایی می‌شود که حاوی موجودات بدون جرم‌اند، با این همه انرژی جنبشی KE آن‌ها می‌تواند در جرم کلی دستگاه مشارکت داشته باشد این پدیده کاملاً نسبیتی است که همتای کلاسیک ندارد.

برای اینکه ببینیم چگونه مطالب گفته شده با هم جمع می‌شوند، یک پیون خنثای منزوی به جرم m_{π} را در نظر بگیرید. چارچوبی که دستگاه پیون، در آن حرکت نمی‌کند چارچوب خود پیون است. پیون بدون بار می‌تواند به دو فوتون هر کدام با بسامد ν واپاشیده شود که در جهت مخالف هم حرکت می‌کند. از دیدگاه بیرون دستگاه انرژی سکون خالص حالت اولیه دستگاه، $m_{\pi}c^2$ پیون است. انرژی سکون حالت نهایی دو فوتون، پس از واپاشی برابر با $2h\nu$ و جرم دستگاه $\frac{2h\nu}{c^2}$ است. علاوه بر این چون انرژی کل یک دستگاه منزوی پایسته است پس $E_{\pi} = \frac{2h\nu}{c^2}$. چون انرژی پایسته است، وقتی که چارچوبی با تکانهٔ صفر وجود دارد، پس $E_{\pi} = pc^2$ و لازم است که جرم پایسته باشد. چنانکه اینشتین متذکر می‌شود، این دو قانون پایستگی دیگر مستقل از هم نیستند. با نگاه از بیرون در دستگاه فوتون ← پیون جرم پایسته و با تعریف بالا سازگار است یعنی مقدار انرژی لازم برای تولید دستگاه در حالت سکون در تبدیل تغییر نمی‌کند، بنابراین جرمش تغییر نمی‌کند. با نگاه از داخل دستگاه، پیون با جرم m_{π} نابود و دوفوتون بدون جرم ظاهر می‌شود. جرم به انرژی جنبشی KE تبدیل شده است. این تبدیل هم با تعریف بالا سازگار است زیرا جرم پیون m_{π} است و هر یک از فوتون‌ها بدون جرم هستند.

چون انرژی جنبشی داخلی KE می‌تواند در جرم خالص یک دستگاه مرکب سهیم باشد، امکان دارد، درست درحالی‌که جرم کل ثابت می‌ماند، مجموع جرم هر یک از اجزای سازندهٔ دستگاه کاهش (یا افزایش) یابد در حالی که انرژی جنبشی خالص KE به همان نسبت افزایش (یا کاهش) پیدا می‌کند. این چیزی است که هنگام انفجار هر نوع بمب روی می‌دهد. درواقع، در *همهٔ فرایندهایی که شامل یک موجود دارای جرم (مانند یک لول (قطعه) دینامیت، یک شمع یا یک پیون) است جرم بعضی از بخش‌های اجزای سازنده و دستگاه به انرژی جنبشی KE و یا برعکس تبدیل می‌شود.*

وقتی که دینامیت منفجر می‌شود، انرژی پتانسیل شیمیایی داخلی ناشی از برهم‌کنش‌های الکترومغناطیسی که خود را به شکل جرم نشان می‌دهند به انرژی جنبشی KE تبدیل می‌شود. اگر می‌توانستیم همهٔ قطعات در حال سکون (یعنی، قطعاتی که جرم دارند) پس از انفجار را جمع کنیم، جرم خالص آن‌ها از جرم اولیه‌شان کمتر بود و مقدار این کاهش معادل انرژی جنبشی KE آزاد شده (بخشی از آن مربوط به فوتون‌های همراه)، یعنی قدرت انفجار بود.جرم به انرژی جنبشی KE تبدیل می‌شود. هنوز، وقتی که دستگاه پس از انفجار شامل همهٔ قطعات متحرک ماده باشد، انرژی جنبشی داخلی KE وابسته (شامل فوتون‌ها) در کل انرژی سکون مشارکت می‌کند و جرم دستگاه – بمب – را بدون تغییر نگه می‌دارد. به عبارت دیگر، وقتی از دیدگاه بیرون دستگاه نگاه کنیم، جرم دستگاه پایسته است. و این موضوع با تعریف بالا مطابقت دارد زیرا انفجار مقدار انرژی لازم برای خلق دستگاه را تغییر نمی‌دهد، انفجار صرفاً شکل انرژی نمایان شده را تغییر می‌دهد. برعکس، وقتی دو گلوله بیلیارد محکم به یکدیگر برخورد می‌کنند و متوقف می‌شوند، با بررسی جداگانه گلوله‌ها می‌توان با اطمینان گفت که انرژی جنبشی KE به جرم تبدیل شده است. این موضوع صادق است گرچه طبق تعریف جرم دستگاه دو گلوله منزوی تغییر نمی‌کند.

کیهان‌شناسان می‌گویند بیشتر انرژی عالم آغازین (دستگاه منزوی غایی) زمانی به گرداب فروزان فوتون‌های بدون جرم مربوط بود. امروز تقریباً پس از ۱۳/۷ میلیارد سال، جرم‌های ستارگان، اتومبیل‌ها، و گلوله‌های توپ پیشینهٔ تاریخی سال‌های سال تبدیل و تغییر هستند و این هم با تعریف ما سازگار است.

منابع مربوط به مقاله در دفتر مجله موجود است.

پی‌نوشت‌ها

1. Infeld
2. Penrose
3. Rindler
4. Stephen Hawking

مرجع

THE PHYSICS TEACHER.Vol.49. JANUARY 2011