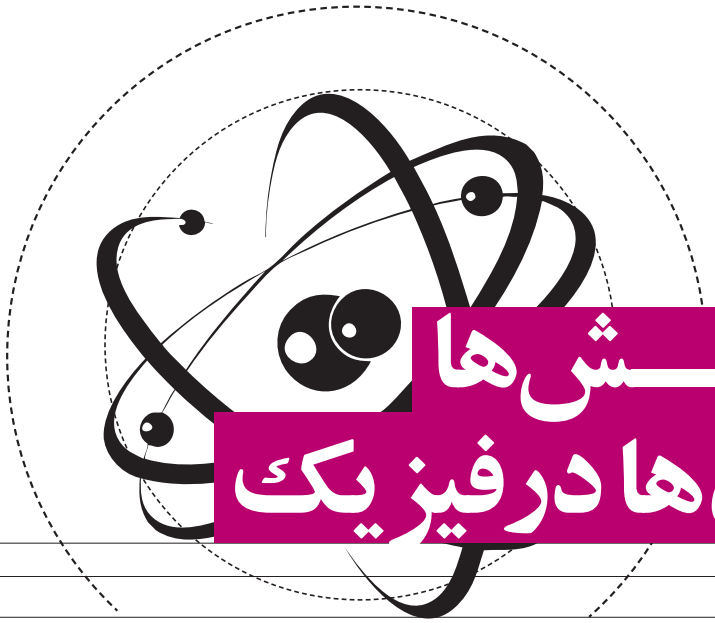

برهم‌کنش‌ها و تقارن‌ها در فیزیک

میلتون راتمن
ترجمه آرش ظهوریان پردل

اشاره

مهم‌ترین ویژگی عالم هستی قانونمند بودن آن است که نشان می‌دهد هرآنچه در آن به‌وقوع می‌پیوندد از قانون خاصی پیروی می‌کند. دانشمندان همواره در پی آن بوده‌اند که این قانون‌های طبیعت را کشف کنند. نکته شگفت‌انگیز آن است که با شناخت هرچه بیشتر آنچه در عالم رخ می‌دهد متوجه شده‌اند که اصول کلی اندکی بر این پدیده‌های گوناگون حکمفرماست. در پس هر قانون پایستگی حاکم بر آنچه در طبیعت به وقوع می‌پیوندد ناوردایی نسبت به یکی از مختصات فضا و زمان قرار دارد. در این مقاله برخی از این اصول کلی را به اجمال بررسی می‌کنیم.

کلیدواژه‌ها: برهم‌کنش‌ها، تقارن فضازمان، اصول پایستگی، ناوردایی.

برهم‌کنش‌های فیزیکی بدون برهم‌کنش، چیزی روی نمی‌دهد

در حین بررسی ویژگی‌های ذرات بنیادی و بسته‌های موج، از کنار مهم‌ترین موضوع بحث، با احتیاط عبور می‌کنیم. ما دربارهٔ اینکه چرا ذرات این‌گونه رفتار می‌کنند، حرف نمی‌زنیم. در طبیعت، هیچ‌چیز «خودبه‌خود» یا بدونِ دلیل اتفاق نمی‌افتد. عامل تمام فعالیت‌هایی را که در بزرگ ـ مقیاس رخ می‌دهند می‌توان در برهم‌کنش‌های میان اتم‌ها و مولکول‌ها، یا الکترون‌ها و پروتون‌ها جست‌وجو کرد که این بر هم‌کنش‌ها را نیز به نوبهٔ خود، می‌توان به‌صورت مجموع برهم‌کنش‌های بین جفت ذرات توضیح داد.

هرآنچه در عالم اتفاق می‌افتد، هر چقدر هم که پیچیده باشد، حاصل این برهم‌کنش‌های بنیادی است. تأکید می‌کنیم که برهم‌کنش‌ها، بین **جفت** ذره‌ها اتفاق می‌افتند. با اینکه بیشتر رویدادها شامل ذرات متعددی هستند، می‌توان آن‌ها را بر حسب برهم‌کنش بین جفت‌ها تحلیل کرد. تلاش‌ها برای شناسایی بر هم‌کنش‌های خاصی که شامل سه یا تعداد بیشتری ذره باشند، با شکست روبه‌رو شده‌اند.

عبارت «برهم‌کنش»، معنای خاصی در فیزیک دارد. برهم‌کنش، یک عبارت کلی‌ست و معنای آن چنین است:

«هر آنچه باعث شود اجسام حالت موجودیت خود را تغییر دهند.»

در ساده‌ترین حالت، برهم‌کنش عبارت است از فشار یا کشش ـ یعنی چیزی که باعث می‌شود وضعیت حرکت ذره تغییر کند.

یک نوع برهم‌کنش مشهود، نیروی گرانش است که باعث می‌شود تمام جرم‌ها به سوی یکدیگر شتاب بگیرند، و در شرایط خاصی که جسم به جایی تکیه ندارد، به زمین سقوط کند.

هنگامی که گرانش وارد کار می‌شود، پدیده‌ای که واقعاً مشاهده می‌کنیم، شتاب جسم تحت تأثیر گرانش است. برای توضیح این شتاب، مفاهیم سطح بالایی {پیشرفته‌ای} را ابداع می‌کنیم که بسته به نظریه‌مان، می‌توانند انواع مختلفی داشته باشند.

مثلاً در مکانیک کلاسیک، نتیجه می‌گیریم که شتاب را یک نیرو ایجاد می‌کند. در واقع، قانون دوم حرکت نیوتون، تعریفی رسمی از نیرو ارائه می‌دهد:

وقتی مشاهده می‌شود که جرم با آهنگ ثابت شتاب می‌گیرد، در این‌صورت نیرو، از لحاظ کمی برابر است با جرم ضربدر شتاب: (به بیان دقیق‌تر و برای اینکه شرایطی را که در آن‌ها جرم تغییر می‌کند نیز به‌حساب آوریم، می‌گوییم نیرو برابر است با آهنگ تغییر تکانه).

از نظر تاریخی، مفهوم «نیرو»، از نیروی مکانیکی بی‌واسطه‌ای سرچشمه می‌گیرد که وقتی کسی یا چیزی شما را هل می‌دهد، احساس می‌کنید. این مفهوم، بعدها توسط تخیل انسان گسترش پیدا کرد تا بتواند پدیدهٔ انتزاعی کنش از دور را توضیح دهد.

سپس، برای توضیح منشأ نیروها، مفاهیم انتزاعی دیگری ابداع شدند. مثلاً در نظریهٔ میدان کلاسیک، فرض می‌شود که

فضا، مملو از میدان گرانشی است، که این میدان گرانشی با اجرام {مختلف} برهم‌کنش می‌کند.

شدت و جهت این میدان در محلی که جرم مورد نظر قرار گرفته، اندازه و جهت شتاب آن جرم را تعیین می‌کند.

اما آنچه شدت و جهت خود میدان در آن نقطه را تعیین می‌کند، اندازه و موقعیت نسبی جرم‌های باقی‌مانده در فضاست.

از طرف دیگر، در مکانیک نسبیتی، واژهٔ «نیرو» اساساً زائد است، چراکه در تعبیر مکانیک نسبیتی، شتاب گرانشی به دلیل خمیدگی فضا {ـ زمان} ایجاد می‌شود. خمیدگی فضا، {به نوبهٔ خود} به‌دلیل حضور جرم‌های برهم‌کنش‌کننده به‌وجود می‌آید.

سرانجام، به تعبیر نظریهٔ کوانتومی گرانش می‌رسیم، که در آن مانند تمامی نظریه‌های کوانتومی نیروی عامل ایجاد شتاب بین جرم‌های شتابدار ناشی از تبادل دائم ذراتی به نام گراویتون است.

حتی در مکانیک کلاسیک نیز، برای توضیح حرکت اجسام، به مفهوم نیرو نیازی نیست. در واقع، علاوه بر قانون دوم نیوتون، دست‌کم ده روش مختلف برای فرمول‌بندی قانون‌های حرکت وجود دارند که همه به نتایج یکسانی می‌انجامند و می‌توان نشان داد که همهٔ آن‌ها هم‌ارزند.

در دو مورد از آن‌ها، یعنی روش لاگرانژی و روش هامیلتونی، عامل اصلی تغییر، انرژی است، نه نیرو.

برای تشکیل معادله‌های توصیف‌کنندهٔ حرکت اجسام گرانشی (مثل ماه و سیارات)، ابتدا عبارت ریاضی‌ای را می‌نویسیم که بیانگر انرژی پتانسیل گرانشی دستگاه در هر نقطه در فضاست. با افزودن انرژی جنبشی تمام اجسام به این عبارت، کمیتی را به‌دست می‌آوریم که هامیلتونی دستگاه نامیده می‌شود. (که در این مورد، برابر انرژی مکانیکی کل است).

اگر این هامیلتونی را در فرمول‌های استانداردی بگذاریم که «معادله‌های هامیلتونی» نامیده می‌شوند، با به‌دست آوردن جواب می‌توانیم جای هر یک از اجسام را در هر لحظه بدانیم. کار مشابهی را می‌توان با استفاده از روش لاگرانژی انجام داد که در آن، لاگرانژی ـ تفاوت انرژی جنبشی و انرژی پتانسیل ـ کمیت حائز اهمیت است.

هر دو روش، به توانایی ما در به‌دست آوردن فرمولی برای انرژی پتانسیل دستگاه در هر نقطه در فضا بستگی دارند.

روش‌های لاگرانژی و هامیلتونی، مبنایی برای حل مسائل مکانیک کوانتومی محسوب می‌شوند و به همین دلیل است که درحال حاضر، انرژی، مفهومی بنیادی‌تر از نیرو محسوب می‌شود. در واقع، در نظریهٔ کوانتومی، مفهوم «نیرو»، به کلی از بین می‌رود و آنچه باقی می‌ماند، مفهوم برهم‌کنش، بین دو جسم است که بسته به سرشت برهم‌کنش، یا به صورت هامیلتونی نمایش داده می‌شود یا به‌صورت لاگرانژی.

***

برهم‌کنش، صرفاً عاملی برای حرکت اجسام نیست و می‌تواند کارهای بیشتری هم انجام دهد. برخی برهم‌کنش‌ها باعث پدیدآمدن و ناپدید شدن ذرات، یا تبدیل آن‌ها به ذرات دیگر می‌شوند.

البته برهم‌کنش‌ها، باید بتوانند انرژی لازم را تأمین کنند؛ در واقع، می‌توان آن‌ها را به‌عنوان ابزاری برای انتقال انرژی از یک مکان به مکان دیگر در نظر گرفت.

در نگاهی کلی‌تر، مطالعهٔ ذرات بنیادی، چیزی نیست جز مطالعهٔ انواع و ویژگی‌های برهم‌کنش‌های بنیادی.

البته جای نگرانی نیست: تنها تعداد اندکی برهم‌کنش بنیادی {در طبیعت} وجود دارد. این واقعیت، نه تنها باعث شده تا فیزیک به‌طور چشمگیری ساده‌تر شود، بلکه توانایی ما را برای پیش‌بینی رویدادهایی که امکان وقوع دارند (و یا ندارند)، به‌طرز قابل توجهی افزایش داده است.

در مکانیک کلاسیک نیز، برای توضیح حرکت اجسام، به مفهوم نیرو نیازی نیست. در واقع، علاوه بر قانون دوم نیوتون، دست‌کم ده روش مختلف برای فرمول‌بندی قانون‌های حرکت وجود دارند

انواع برهم‌کنش

دانش قرن نوزدهم، انواع گوناگونی از نیرو و انرژی را به ما معرفی کرد: نیروی گرانشی، نیروی الکتریکی، نیروی مغناطیسی، نیروی وان ـ در ـ والس، نیروی هیدرولیکی، نیروی پنوماتیکی، نیروی گریز از مرکز، نیروی کوریولیس، نیروی کشش سطح، انرژی الکتریکی، انرژی شیمیایی، انرژی آزاد گیبس، انرژی تابشی، انرژی گرمایی و غیره ـ و البته ناگفته نماند: نیروی روانی.

در نیمهٔ نخست قرن بیستم، این گستردگی به چهار برهم‌کنش بنیادی فروکاسته شد. تشخیص این برهم‌کنش‌ها توسط فیزیک، برای کنترل {و توضیح} تمام رویدادهایی که در سطح اتمی به‌وقوع می‌پیوندند صورت گرفت و می‌توان آن‌ها را به تمام رویدادهای عالم تعمیم داد.

این چهار برهم‌کنش عبارت بودند از: برهم‌کنش‌های گرانشی، الکترومغناطیسی، هسته‌ای قوی و هسته‌ای ضعیف. همان‌طور که در بخش قبل توضیح دادیم، می‌توانیم آن‌ها را به صورت نیرو یا به صورت انرژی توصیف کنیم ـ بسته به اینکه کدام یک مناسب‌تر باشد. اگر انرژی پتانسیل را در تمام نقاط فضا بدانیم، می‌توانیم نیروی وارد بر هر نقطهٔ دلخواه را محاسبه کنیم و برعکس.

در نیمهٔ دوم قرن بیستم، برهم‌کنش‌های هسته‌ای ضعیف و الکترومغناطیسی، به‌عنوان جنبه‌های مختلف یک برهم‌کنش واحد شناخته شدند: **برهم‌کنش الکتروضعیف**. بنابراین، این چهار نیروی بنیادی، به سه نیرو فروکاسته شدند.

با توجه به این موفقیت، بسیاری از فیزیک‌دانان به این نتیجه رسیدند که در نهایت، می‌توان تمام این برهم‌کنش‌ها را به‌صورت یک برهم‌کنش کلی طبقه‌بندی کرد. {چنین

اندیشـــه‌ای}، تبدیل به انگیزه‌ای شد که مبنای پژوهش‌های فیزیک‌دانـــان برای رســـیدن به «نظریهٔ وحـــدت بزرگ»... و «نظریهٔ ابر ـ تقارن» را تشـــکیل می‌دهـــد. این نظریه‌ها، در حال حاضر، مرزهای فکری فیزیک ذرات را مشخص می‌کنند.

موفقیت این نظریه‌ها، برای فلســـفه، اهمیت فوق‌العاده‌ای دارد. اگر بتوان نشان داد که یک برهم‌کنش بنیادی، مسئول تمامی پدیده‌های عالم اســـت، در این‌صورت پیش‌بینی اینکه چه چیزی ممکن اســـت و چه‌چیزی ناممکن، بســـیار آسان خواهد شد.

با وجود این، چون شـــواهد دال بر یک نظریهٔ وحدت هنوز به‌دســـت نیامده‌اند، در ایـــن بحث چهار نیـــروی بنیادی ـ برهم‌کنش‌های گرانشی، الکترومغناطیسی، هسته‌ای قوی، و هسته‌ای ضعیف ـ را به‌عنوان عوامل تمامی رویدادها در نظر می‌گیریم. (ویژگی‌های برهم‌کنش‌های الکترومغناطیســـی و هسته‌ای ضعیف، به‌قدری با هم متفاوت‌اند که در اینجا آن‌ها را جدا در نظر می‌گیریم).

می‌خواهیم در این بحـــث، بر نیروهایی تمرکز کنیم که در توضیح وقایعی که معمولاً با آن‌ها سروکار داریم، نقش دارند: کارکرد ماشین‌ها، سازوکار اندام زنده و نیز فرآیندهای دستگاه عصبی، که مسئول درک، احساس، حافظه و آگاهی هستند.

امـــا برای اینکه مشـــخص کنیـــم کدام‌یـــک از این چهار برهم‌کنش، نقش بســـزایی در مسائل مربوط به زندگی دارند، باید چیزهایی دربارهٔ ویژگی‌هایشان بدانیم:

۱. برهم‌کنش‌های گرانشی

دو ویژگـــی برهم‌کنش‌هـــا که در این بحـــث حائز اهمیت هستند، عبارت‌اند از:

الف. شدت‌شـــان، و ب. وابستگی‌شـــان به مکان و ســـرعت ذرات برهم‌کنش‌کننده. (برای بررســـی و مقایســـه شـــدت برهم‌کنش‌های بنیادی، به جدول زیر مراجعه کنید)

برای آنکه نیروی الکتریکی توان خود را نشان دهد، برخی از الکترون‌ها باید از پروتون‌هایی که به آن‌ها مقیدند، جدا شوند؛ یعنی اتم باید یونیده شود

شدت نسبی برهم‌کنش‌ها	
برهم‌کنش	شدت نسبی
گرانشی	۱
هسته‌ای ضعیف	$۱۰^{۲۷}$
الکترومغناطیسی	$۱۰^{۳۸}$
هسته‌ای قوی	$۱۰^{۴۰}$

شدت برهم‌کنش گرانشی، نه تنها به جرم اجسام درگیر در برهم‌کنش بستگی دارد، بلکه به ویژگی‌های ذاتی برهم‌کنش، که شـــدت نیروی بین یک جفت جـــرم را تعیین می‌کند نیز وابسته اســـت. با اینکه برهم‌کنش گرانشـــی از چهار نیروی دیگر ضعیف‌تر است، در تعیین چگونگی حرکت منظومه‌های عظیمی چون ستارگان و سیارات، بر نیروهای دیگر غلبه دارد. شدت نیروی گرانشـــی، با عکس مجذور فاصلهٔ بین دو جرم تغییر می‌کند و به همین دلیل نیرویی بلند ـ بُرد است، بدان معنا که آثار گرانشی هر جرم دلخواه، به‌طور نامحدود در فضا گسترش می‌یابند.

مدار یـــک کهکشـــان، تحت‌تأثیـــر میدان‌های گرانشـــی کهکشان‌هایی‌ست که میلیون‌ها سال نوری از آن فاصله دارند.

نیروی کوریولیس (که توسط اجسامی که بر یک جسم در حال چرخش قرار دارند احســـاس می‌شود) و نیروهای لختی (همچون نیروی گریز از مرکز)، نمایشـــی از برهم‌کنش‌های گرانشی‌اند که به سرعت و شتاب جرم در حال حرکت بستگی دارند؛ سرعت و شتاب نسبت به بقیهٔ عالم.

۲. برهم‌کنش‌های الکترومغناطیسی

ابتدا گمان می‌رفت که نیروهای الکتریکی و مغناطیسی، دو نیروی جدا از هم هســـتند، اما کارهای ماکسول در نیمهٔ دوم قرن نوزدهم نشان داد که آن‌ها در واقع جنبه‌های مختلف از یک نیروی الکترومغناطیســـی‌اند. نیروی الکتریکی، به‌صورت جاذبه یا دافعه بین دو بار الکتریکی ظاهر می‌شـــود. این نیرو، عامل قوس الکتریکی، جرقهٔ الکتریکی و نیز انواع جریان‌های الکتریکی‌ست.

ایـــن واقعیت کـــه دو نوع بار الکتریکـــی ـ مثبت و منفی ـ وجـــود دارد، به این نتیجه‌گیری می‌انجامد که دو نوع نیروی الکتریکـــی ـ جاذبه و دافعه ـ نیز وجـــود دارد. دلیل اینکه ما معمولاً جاذبه و دافعهٔ الکتریکی را احســـاس نمی‌کنیم (حتی با وجود اینکه تمام ماده، از بارهای الکتریکی تشـــکیل شده است)، این است که مادهٔ معمولی (یونیده نشده)، از تعداد بار مثبت و منفی مساوی (الکترون و پروتون) تشکیل شده است.

ایـــن، یکـــی از تقارن‌های مبارک طبیعت اســـت، که به ما اطمینان می‌دهد بار یک الکترون، دقیقاً برابر بار یک پروتون اســـت. درنتیجه، جاذبه و دافعه بین اجزای ماده، همدیگر را خنثی می‌کنند.

برای آنکه نیروی الکتریکی توان خود را نشان دهد، برخی از الکترون‌ها باید از پروتون‌هایی که به آن‌ها مقیدند، جدا شوند؛ یعنی اتم باید یونیده شود. سپس، الکترون‌ها در تلاش و تقلا برای بازگشتن به حالت طبیعی‌شان، تمام کارهای مربوط به جریان‌های الکتریکی را انجام دهند.

وقتی بارهای الکتریکی برهم‌کنش‌کننده، نســـبت به ناظر

حرکت کنند، نیروی مغناطیسی ظاهر می‌شود.

در مـورد آهنربای دائمی، مثل آهنربـای میله‌ای یا نعلی، میدان مغناطیسی ناشـی از چرخش (اسپین) الکترون‌های درون ماده است.

در آهنربا، میدان‌هـای الکتریکی پروتون‌هـا و الکترون‌ها همدیگـر را خنثی می‌کنند، چون همان‌طور که گفته شـد، تعداد بارهای مثبت و منفی در آهنربا با هم برابرند. به همین دلیل اسـت که میدان مغناطیسـی، که در حالت عادی در مقایسه با میدان الکتریکی، ناچیز است، به میدان غالب تبدیل می‌شود.

گاهـی بارهـای الکتریکی، نه تنها حرکـت می‌کنند بلکه سرعت‌شـان هم تغییر می‌کند (یعنی شتاب می‌گیرند). در این‌صورت، امواج الکترومغناطیسی تولید می‌شود. این امواج با سـرعت نور از چشمه دور می‌شوند و حکم ابزاری را دارند که انرژی بـه کمک آن‌ها می‌تواند از جایی به جای دیگر منتقل شود.

امـواج الکترومغناطیسـی تنها موجـودات فیزیکی غیر از پرتاب‌هـای صلب و باریکه‌هـای ذرات تنظیم شـده‌اند که می‌توانند در فضای خالی، اطلاعات معناداری را از نقطه‌ای به نقطهٔ دیگر منتقل کنند. (امواج صوتی و کبوترهای نامه‌رسان، نمی‌توانند در فضای خالی حرکت کنند.)

به لحاظ نظری، موجوداتی چون امواج گرانشـی و پرتوهای مدوله شـدهٔ نوترینو نیز می‌توانند حامل اطلاعات باشند، اما تأثیرشـان به قدری ضعیف است که اسـتفاده از آن‌ها برای چنین هدفی، بسیار نامتحمل است.

در نظریهٔ کوانتومی، برهم‌کنش الکترومغناطیسی به‌عنوان محصول نهایی تبادل فوتون بیـن بارهای الکتریکی در نظر گرفته می‌شود. این برهم‌کنش، علاوه بر ایجاد جاذبه و دافعه بین بارها، عامل برخی فرآیندهـای بنیادی نظیر تولید زوج الکترون ـ پوزیترون و واکنش‌های فوتو ـ هسته‌ای نیز هست.

همچنین، برهم‌کنش الکترومغناطیسی، مسئول نیروی وان دروالس اسـت. این نیرو، مولکول‌هـا را در کنار یکدیگر نگه می‌دارد و الکترون‌ها و یون‌ها را در شبکه‌های منظم بلورین، به صف می‌کند.

بنابراین، اساسـاً وجود مایعات و جامدات را می‌توان حاصل برهم‌کنش‌های الکترومغناطیسـی دانسـت. خواص وسایل الکترونیکی‌ای مانند سلول‌های نوری، دیودها و ترانزیستورها نیز وابسته به برهم‌کنش‌های الکترومغناطیسی است.

تمام‌واکنش‌های شیمیایی، از جمله رویدادهای الکتروشیمیایی که اطلاعات را در دستگاه عصبی انسان منتشر می‌کنند، توسط نیروی الکترومغناطیسی کنترل می‌شوند.

شـدت این نیـرو (همان‌طور کـه در جدول نشـان داده شده)، 10^{38} بار بیشتر از شـدت نیروی گرانشی‌ست. این بدان معناست که اگر دافعهٔ الکتروستاتیک بین یک جفت پروتون را اندازه بگیرید، مقدار آن 10^{38} بار قوی‌تر از جاذبهٔ گرانشی بین آن دو خواهد بود.

اندازهٔ نیروی الکتریکـی، با عکس مجذور فاصلهٔ بین ذرات تغییر می‌کند. در نتیجه، این نیرو هم مانند نیروی گرانشی، نیرویی بلندبُرد است. در داخل اتم، جاذبه الکتریکی بین یک پروتون و یـک الکترون، 10^{38} بار قوی‌تر از جاذبهٔ گرانشـی آن‌هاست و به همین دلیل در محاسبات مربوط به رویدادهای داخـل اتم‌ها و مولکول‌ها، می‌توانیم برهم‌کنش گرانشـی را نادیـده بگیریم. (برای اینکه حدودا بفهمید 10^{38} چه معنایی دارد، این مثال را در نظر بگیرید: جرم زمین، 10^{38} بار از جرم یک دانهٔ شن بزرگ‌تر است).

از طـرف دیگر، وقتی با اجسـام بزرگی نظیر سـیارات و ماهواره‌ها سر و کار داریم، نیروی الکترومغناطیسی در مقایسه با نیروی گرانشی، فوق‌العاده کوچک خواهد بود. دلیل این امر، آن اسـت که ـ همان‌طور که قبلاً اشاره کردیم ـ خوشبختانه نیروهای الکتریکی در یک مادهٔ معمولی و بدون بار، همدیگر را خنثـی می‌کنند و در نتیجه، حرکت سـیارات را می‌توان تنها بر مبنای برهم‌کنش گرانشـی محاسـبه کرد. (البته در مورد ماهواره‌های کوچک، لازم است این واقعیت را به‌حساب بیاوریم که شاید این اجسام، تعدادی الکترون و یون سرگردان را بـه خود جذب کنند. این امر باعث می‌شـود بار الکتریکی حاصل، با میدان مغناطیسـی زمیـن برهم‌کنش انجام دهد. هرچند که این صرفاً اختلالی جزئی اسـت و تنها در صورت نیاز، آن را لحاظ می‌کنیم.)

از طرف دیگر، اگر بخواهیم عملکرد دسـتگاه عصبی یا هر دستگاه زیست‌شناختی دیگر را بررسی کنیم، در این صورت حرکت الکترون‌ها و یون‌ها اولویت اول خواهد بود. پس در این مورد، تنها چیزی که برای ما حائز اهمیت اسـت، برهم‌کنش الکترومغناطیسی است.

اگر بخواهیم عملکرد دستگاه عصبی و یا هر دستگاه زیست‌شناختی دیگر را بررسی کنیم، در این صورت حرکت الکترون‌ها و یون‌ها اولویت اول خواهد بود. پس در این مورد، تنها چیزی که برای ما حائز اهمیت است، برهم‌کنش الکترومغناطیسی است

۳. برهم‌کنش‌های هسته‌ای قوی

این برهم‌کنش، همان است که کوارک‌ها را به‌هم می‌پیوندد تـا پروتون، مزون و ذرات بزرگ‌تر دیگری را تشـکیل دهند. همچنین، عامـل جاذبهٔ بین پروتون‌ها و نوترون‌هاسـت که تشکیل هستهٔ اتم را امکان‌پذیر می‌کند.

شدت نسـبی 10^{40} که در جدول برای این برهم‌کنش ذکر شـده، به یک جفت نوکلئون {اجزای سازندهٔ هسته} که در تماس با یکدیگر قرار دارند اشاره دارد. این بدان معناست که در درون هسـتهٔ اتم، یک جفت پروتون را که در مجاورت هم قرار دارند یک نیروی هسته‌ای که صدها بار از نیروی الکتریکی دافعهٔ بین‌شان بزرگ‌تر است، به هم جذب می‌کند. به همین دلیل است که هسـته‌هایی با بیش از یک پروتون، می‌توانند

وجود داشته باشند. جاذبهٔ هسته‌ای، از دافعهٔ الکتریکی قوی‌تر است و لذا حکم «چسب»ی را دارد که تمام {اجزای} هسته را کنار یکدیگر نگه می‌دارد.

نیروی هسته‌ای قوی، نیرویی کوتاه‌بُرد است، بدان معنا که تنها توسط ذراتی که فاصله‌شان از هم کمتر از 10^{-15} متر باشد احساس می‌شود. در واقع، شعاع نوترون‌ها و پروتون‌ها، بر حسب بُرد نیروی هسته‌ای قوی تعریف می‌شود. در نتیجه، ذرات تشکیل‌دهندهٔ هسته، نیروی قوی را تجربه نخواهند کرد، مگر آنکه واقعاً همدیگر را لمس کنند. معنای چنین گفته‌ای این است که نیروی قوی، تنها در درون هستهٔ اتم یا در واکنش‌های با انرژی زیاد نقش دارد. (واکنش‌های انرژی زیاد، وقتی رخ می‌دهند که یک هسته، در آزمایش‌های شتاب‌دهنده‌ها، هستهٔ دیگری را بمباران کند).

چون نیروی قوی، تنها در داخل هسته عمل می‌کند، بنابراین هیچ تأثیری بر الکترون‌های مداری ندارد. این الکترون‌ها، مسئول تمام آن چیزی هستند که «شیمی» نامیده می‌شود. بنابراین، در مباحث مربوط به زیست‌شناسی، فیزیولوژی و روان‌شناسی، نیازی به درنظر گرفتن این نیروها نداریم. جز اینکه این نیرو وجود و رفتار برخی ایزوتوپ‌ها را مشخص می‌کند.

برهم‌کنش، مفهومی است که به‌فیزیک‌دانان، قدرت پیش‌بینی می‌دهد. با داشتن یک عبارت ریاضی که برهم‌کنش بین دو جسم را بیان می‌کند، فیزیک‌دانان می‌توانند رفتار این اجسام را در شرایط مشخصی در آینده، پیش‌بینی کنند

۴. برهم‌کنش‌های هسته‌ای ضعیف

یک برهم‌کنش کوتاه‌بُرد دیگر مربوط به نیروی هسته‌ای ضعیف است. این برهم‌کنش، باعث می‌شود نوترون، به یک پروتون، یک الکترون و یک نوترینو تبدیل شود ـ این واکنش، عامل واپاشی بتازا در بسیاری از هسته‌های پرتوزاست. برهم‌کنش هسته‌ای ضعیف، همچنین موجب واپاشی موئون به یک الکترون به اضافه یک جفت نوترینو ـ پادنوترینو می‌شود.

هیچ‌کدام از این واکنش‌ها در فرآیندهای شیمیایی نقشی ایفا نمی‌کنند و به همین دلیل، همچون واکنش هسته‌ای قوی، می‌توان در بحث فرآیندهای زیستی آن‌ها را نادیده گرفت.

***

با توجه به مطالب بالا، کاملاً واضح است که از بین چهار برهم‌کنش بنیادی، تنها برهم‌کنش الکترومغناطیسی می‌تواند بر فرایندهایی که در بدن انسان به‌وقوع می‌پیوندند، تأثیری داشته باشد: تمام ادراکات حسی، به‌واسطهٔ برهم‌کنش الکترومغناطیسی اتفاق می‌افتند؛

دیدن، زمانی رخ می‌دهد که نور (که خودش جریانی از فوتون‌هاست)، الکترون‌های درون شبکیه را جابه‌جا کند و این باعث می‌شود جریانی از الکترون‌ها و یون‌ها در عصب بینایی جاری شود؛ شنیدن انتقال انرژی امواج صوتی هوا، به اندام کورتی (واقع در گوش داخلی) است. خود امواج صوتی، از تراکم با چگالی زیاد چگال‌تر یا کم مولکول‌های هوا تشکیل شده‌اند و پردهٔ گوش را بمباران می‌کنند. هر مولکول، انرژی را به صورت یک برهم‌کنش، به پردهٔ گوش منتقل می‌کند که این برهم‌کنش، در نهایت الکترومغناطیسی است. نیروی مکانیکی‌ای را که یک جسم ماکروسکوپی بر جسم ماکروسکوپی دیگر وارد می‌کند می‌توان بر مبنای نیروهای الکترومغناطیسی بین اتم‌ها و سطوحی که با هم در تماس هستند، تحلیل کرد. بنابراین، احساس‌هایی نظیر درد یا لمس کردن را در نهایت می‌توان به برهم‌کنش‌های الکترومغناطیسی فروکاست.

خلاصه آنکه، تمام محرک‌های حسی، انتقال اطلاعات درون دستگاه عصبی و انتقال اطلاعات از یک شخص به شخصی دیگر، همه به‌واسطهٔ برهم‌کنش الکترومغناطیسی اتفاق می‌افتند.

***

آیا مفاهیمی چون «نیروی روانی» یا «انرژی روانی»، اساساً جایگاهی در فیزیک دارند؟

در یک کلام، خیر.

این‌ها صرفاً گزاره‌هایی شبه علمی‌اند که به وسیلهٔ پژوهشگران حوزهٔ روانی ابداع شدند تا به ادعاهای غیرمادی‌شان، اعتبار علمی ببخشند.

استفاده از عبارات «انرژی روانی» (تحت‌تأثیر کارل یونگ) تا امروز ادامه دارد، به‌ویژه در نوشته‌های روان‌شناسان یونگی و در برخی از نظریه‌های روان‌شناختی، این گزاره، کارکرد استعاری ویژه‌ای دارد. اما معنای تحت‌الفظی آن ـ یعنی نوعی انرژی فیزیکی، که قادر است پیغام‌ها را از یک ذهن، به ذهنی دیگر منتقل کند ـ باعث گمراهی بسیاری از افراد شده است. هیچ‌گونه دلیل فیزیکی دال بر وجود چنین انرژی‌ای وجود ندارد.

استفاده از چنین مفهومی، خواه‌ناخواه، به نظریهٔ دوگانگی در روان‌شناسی می‌انجامد؛ ایده‌ای که مطابق آن، ذهن و بدن، مقولاتی جدا هستند و آنچه ذهن انجام می‌دهد، با انرژی روانی عرفانی در ارتباط است.

۵. قاعده‌های برهم‌کنش

برهم‌کنش، مفهومی است که به فیزیک‌دانان، قدرت پیش‌بینی می‌دهد. با داشتن یک عبارت ریاضی که برهم‌کنش بین دو جسم را بیان می‌کند، فیزیک‌دانان می‌توانند رفتار این اجسام را در شرایط مشخصی در آینده، پیش‌بینی کنند. مثلاً با دانستن اینکه برهم‌کنش گرانشی بین زمین و یک ماهواره، بر حسب فاصلهٔ بین آن‌ها چگونه تغییر می‌کند و همچنین با دانستن مکان و سرعت ماهواره در یک لحظهٔ مشخص، فیزیک‌دانان می‌توانند پیش‌بینی کنند که در هر زمانی در آینده، این ماهواره

کجا خواهد بود و با چه سرعتی حرکت خواهد کرد.

(البته در شـرایط واقعـی، برهم‌کنش‌هایی که به‌واسـطهٔ خورشید و سیارات دیگر ـ به‌جز زمین ـ ایجاد می‌شوند، باید همانند اختلالات قابل توجه دیگر، در معادله‌ها لحاظ شوند.

ایـن چهار برهم‌کنش، هر کدام ویژگی خاص خود را دارند. مثلاً نیروی گرانشی به جرم اجسام برهم‌کنش‌کننده بستگی دارد. از سـوی دیگر، نیروی الکترومغناطیسی تنها به بارهای الکتریکی بستگی دارد، نه جرم‌ها).

اندازهٔ هر دو نیروی گرانشـی و الکتروسـتاتیک، با عکس مجذور فاصلهٔ بین اجسـام برهم‌کنش‌کننده تغییر می‌کند؛ اما همان‌طور کـه ملاحظه کردیم، در فاصلـهٔ برابر، نیروی الکتروستاتیک بسیار قوی‌تر از نیروی گرانشی است.

نیروی هسته‌ای قوی، رفتاری به نسبت عجیب دارد: هرچه فاصلهٔ کوارک‌ها از هم بیشـتر می‌شـود، اندازهٔ این نیرو هم بیشتر می‌شود.

درحالی‌که هـر یک از این نیروها، ویژگی‌های مخصوص به خود را دارند، قاعده‌های مشخصی وجود دارند که برای همهٔ آن‌ها یکسـان‌اند. در واقع، چنین اشـتراکی، بسیاری افراد را وسوسه کرده تا فکر کنند یک برهم‌کنش بنیادی، می‌تواند در پس همهٔ این برهم‌کنش‌ها وجود داشته باشد.

این قوانین مشـترک که اصول تقارن نامیده می‌شـوند، به تقارن‌هـای فضا و زمان، یا برخی ویژگی‌های انتزاعی‌تر مانند بار الکتریکی، پاریته، یا «شگفتی» مربوط‌اند.

برخـی از این قوانین، تحت هر شـرایطی کامـلاً معتبر و صادق‌انـد، در حالی‌که بقیه آن‌ها، در شـرایط خاص نقض می‌شوند و به همین دلیل، «تقارن‌های شکسته شده» نامیده می‌شوند.

برای اهدافی که ما در این بحث پی‌می‌گیریم، توصیف سـه مورد از مهم‌ترین تقارن‌ها، کافی به‌نظر می‌رسد:

***

۱. تقارن فضاـ زمان

برای نوشـتن معادلهٔ توصیف‌کنندهٔ انرژی پتانسـیل یک برهم‌کنش، ابتدا باید یک دسـتگاه مختصات در نظر بگیریم (که معمولاً دکارتی یا کروی‌ست).

در مـورد مختصات دکارتـی، به‌طور کلی فرمـول انرژی پتانسیل به سـه مختصهٔ فضایی (x, y, z) و همچنین زمان، بستگی دارد. اگر در شـرایط خاصی، انرژی پتانسیل از یکی از این مختصه‌ها (مثلاً X) مسـتقل باشد، دراین‌صورت مبدأ (صفر) دستگاه مختصاتمان را می‌توانیم در هر نقطهٔ دلخواهی روی محور بنا کنیم، بدون اینکه تأثیری بر شـکل معادله‌ها داشته باشد. در این صورت، می‌گوییم انرژی پتانسیل دستگاه (و در نتیجه هامیلتونی و لاگرانژی)، نسبت به جابه‌جایی مبدأ در بُعد، متقارن است.

می‌توانیم به‌طور ریاضی ثابت کنیم که قانون پایستگی تکانه، پیامد مستقیم این تقارن است. معنای این گفته آن است که اگر یک میدان نیرو به‌گونه‌ای باشد که انرژی پتانسیل آن به مختصه بستگی نداشته باشد، در این صورت تکانهٔ جسمی که در آن میدان قرار دارد، هیچ‌گاه در راسـتای X تغییر نخواهد کرد. (برای مثال، سرعت خودرویی که روی جادهٔ تخت افقی بی‌اصطکاکی قرار دارد، تغییر نمی‌کند).

اگر انرژی پتانسیل از تمام مختصه‌های x, y, z مستقل باشد، در این‌صورت فضا در تمام جهت‌ها متقارن، و تکانه درهر سه بُعد پایسته خواهد بود.

این، فضای خالی قانون اول نیوتون اسـت که بیان می‌کند یک جسم در حال سکون، به حال سکون باقی می‌ماند و یک جسم در حال حرکت، به حرکت با سرعت ثابت ادامه خواهد داد.

این مثال‌ها، نشان می‌دهند که تقارن‌های فضایی، چگونه به قانون‌های بنیادی پایستگی مربوط‌اند.

نـوع دیگر تقارن فضایـی، با اسـتفاده از مختصات کروی به‌دست می‌آید.

این مختصه‌ها به‌طور کلی عبارت‌اند از: (r,θ, φ)

شعاع r (فاصله از مبدأ)،

زاویهٔ θ (زاویهٔ میان قطب شمال و راستای موردنظر)،

و زاویهٔ ϕ (فاصله زاویه‌ای حول استوا).

یک دسـتگاه دارای تقـارن کروی خواهد بـود اگر انرژی پتانسیل آن از دست کم از یکی از مختصه‌های مزبور مستقل باشد ـ مثلاً انرژی پتانسیل تنها به شعاع بستگی داشته باشد. در این‌صورت، تکانهٔ زاویه‌ای دسـتگاه (جرم ضربدر سـرعت ضربدر شعاع) پایسته خواهد بود.

این بدان معناست که بدون توجه به تغییراتی که در دستگاه اتفـاق می‌افتد، تکانهٔ زاویه‌ای کل آن ثابت خواهد بود. همین عامل، باعث می‌شود که وقتی اسکی‌بازان روی یخ، بازوهایشان را به داخل جمع می‌کنند، سریع‌تر بچرخند. چرا که با این‌کار، شـعاع را کم می‌کنند و برای ثابت ماندن تکانهٔ زاویه‌ای‌شان، باید سرعت زاویه‌ای‌شان افزایش یابد.

در اینجا، عملاً شـاهد یک اصل کلی بزرگ هسـتیم: هر تقارن، با یک قانون پایسـتگی در ارتباط اسـت. این نتیجه، حاصل یک اثبات ریاضی سـفت و سـخت است و نیازی به تأیید تجربی ندارد.

***

یکـی از مهم‌ترین تقارن‌ها، تقارنی اسـت که در آن، انرژی پتانسیل دسـتگاه به زمان بستگی ندارد؛ یعنی مبدأ زمان را می‌تـوان در هر جای دلخواه {در هر نقطهٔ دلخواه روی محور زمان} تعریف کرد.

این تقارن، در تمامی برهم‌کنش‌های بین ذرات بنیادی نیز

یکی از مهم‌ترین تقارن‌ها، تقارنی است که در آن، انرژی پتانسیل دستگاه به زمان بستگی ندارد؛ یعنی مبدأ زمان را می‌توان در هر جای دلخواه {در هر نقطهٔ دلخواه روی محور زمان} تعریف کرد

همانند رویدادهای بزرگ‌مقیاس، صدق می‌کند؛ رویدادهای بزرگ‌مقیاسی که در آن‌ها اصطکاک وجود ندارد یا از نیروهایی که با زمان تغییر می‌کنند (مثل اعمال میدان‌های الکتریکی متغیر از بیرون دستگاه) خبری نیست.

در شرایطی که با این تقارن زمانی سروکار داریم، می‌توانیم با حل معادله‌های حرکت مرتبط (مثلاً معادله‌های هامیلتون) نشان دهیم که انرژی کل دستگاه در طول زمان تغییر نمی‌کند. بنابراین، پایستگی انرژی، پیامد تقارن زمان است.

***

در مکانیک نسبیتی، فضا و زمان، یک پیوستار چهاربُعدی می‌سازد. تقارن انتقال و چرخش در این فضای چهاربُعدی، تقارن پوانکاره نام دارد. این تقارن، با پایستگی تکانه، تکانهٔ زاویه‌ای و قانون‌های انرژی، ارتباط نزدیکی دارد.

رابطهٔ تقارن و قانون‌های پایستگی، از لحاظ عملی، اهمیت فراوانی دارد: چنین ارتباطی، به این معناست که قانون‌های پایستگی، صرفاً قانون‌هایی کاربردی و تجربی نیستند که ناگزیر باشیم آن‌ها را در تمامی شرایط ممکن بیازماییم. در عوض، می‌توانیم بگوییم که اگر برهم‌کنش بین ذرات بنیادی، از قوانین تقارن خاصی پیروی کند، در این‌صورت قوانین پایستگی خاصی هم برقرار خواهند بود و این قانون‌های پایستگی، برای تمام ماده‌ای که شامل این ذرات بنیادی‌ست، صادق‌اند.

***

بر مبنای اهداف موردنظر ما، آن تقارنی که برایمان حائز اهمیت است، تقارن زمان است. عبارات ریاضی توصیف‌کنندهٔ چهار برهم‌کنش بنیادی بین ذرات، شامل زمان نمی‌شوند. به همین دلیل، در این برهم‌کنش‌ها، انرژی باید پایسته باشد. علاوه بر آن، چون رویدادهای بزرگ‌مقیاس، چیزی جز مجموعه‌ای از این برهم‌کنش‌ها نیستند، می‌توان گفت که پایستگی انرژی، برای همهٔ پدیده‌های عالم برقرار است.

به همین دلیل، دیگر الزامی نداریم {صحت} پایستگی انرژی را تمام شرایط ممکن بیازماییم.

اکنون، برای این پرسش که «از کجا می‌دانید که امکان ندارد روزی، نوعی ماشین جدید و ناشناخته، بتواند از هیچ، انرژی خلق کند؟» پاسخ ساده‌ای داریم: اگر همه چیز توسط چهار برهم‌کنش بنیادی کنترل و اداره می‌شود، در این صورت، پایستگی انرژی کاملاً برقرار خواهد بود.

در اینجا، باید به یک نکتهٔ هشداردهنده اشاره کنیم:

ممکن است دانشمندان وسوسه شوند بگویند:

«طبیعت، تقارن را دوست دارد. پس این قانون‌ها باید کاملاً و مطلقاً درست باشند.» چنین استدلالی، می‌تواند به اشتباه‌های بزرگی بینجامد.

«طبیعت، تقارن را دوست دارد. پس این قانون‌ها باید کاملاً و مطلقاً درست باشند.» چنین استدلالی، می‌تواند به اشتباه‌های بزرگی بینجامد

در زمان‌های مختلف، مردمانی فرض کرده‌اند برخی از تقارن‌ها، به‌دلایل زیبایی‌شناختی صحیح‌اند، در حالی‌که بعداً معلوم شده است که چنین تقارن‌هایی تحت هر شرایطی برقرار نخواهند بود.

مثلاً در دههٔ ۱۹۵۰، به‌صورت تجربی ثابت شد که پایستگی پاریته ـ که همگان فرض می‌کردند درست است ـ در مورد رویدادهایی که به‌واسطهٔ برهم‌کنش هسته‌ای ضعیف رخ می‌دهند، صادق نخواهند بود. این نتیجهٔ نامطلوب، به درک بیشتر تقارن در سطح بنیادی انجامید.

***

سرشت طبیعت، «دوست داشتن» چیزها نیست. طبیعت، همان‌طور است که هست. این مردم هستند که می‌توانند تقارن‌ها را دوست داشته باشند. اما صرف دوست داشتن، موجب درست بودنشان نمی‌شود. بنابراین، هر تقارن را باید برای هر یک از چهار برهم‌کنش بنیادی آزمود. درمورد تقارن زمان، این موضوع به معنای آزمودن قانون پایستگی انرژی، برای ذرات بنیادی است.

در قرن گذشته، آزمایش‌های مهم فراوانی درباره چنین سرشتی، توجه فیزیک‌دانان را به خود جلب کرد. برخی از این آزمایش‌ها، شامل دقیق‌ترین اندازه‌گیری‌های تاریخ فیزیک بود. در نتیجه، حق داریم با اطمینان کامل، به پایستگی انرژی ایمان داشته باشیم. (در بخش بعدی، به توصیف یکی از این آزمایش‌های تجربی خواهیم پرداخت).

۲. ناوردایی لورنتس

تمام برهم‌کنش‌های بنیادی، باید از یک تقارن مهم، موسوم به ناوردایی لورنتس پیروی کنند. این تقارن، به ما اطمینان می‌دهد که قانون‌های طبیعت، در تمامی چارچوب‌های مرجعی که {نسبت به هم} با سرعت ثابت حرکت می‌کنند، شکل ریاضی یکسانی دارند.

پیامد این تقارن آن است که تمامی این چارچوب‌ها (که آن‌ها را چارچوب‌های لخت می‌نامیم)، با هم هم‌ارزند: غیرممکن است بتوانیم آزمایشی ترتیب دهیم که یکی از این چارچوب‌ها را، به‌عنوان چارچوبی خاص، از بقیه متمایز کند.

مثلاً، نمی‌توانید بگویید که یک چارچوب در حال سکون است و دیگران در حرکت‌اند. تنها چیزی که اهمیت دارد، حرکت چارچوب‌ها نسبت به یکدیگر است.

مثلاً، مسیر حرکت یک الکترون، که در میدان الکتریکی حاصل از یک الکترود باردار قرار دارد، توسط قانون دوم نیوتون تعیین می‌شود: آهنگ تغییر تکانهٔ الکترون، برابرست با نیروی وارد بر آن در این مورد، خودنیروی وارد، برابر است با بار الکترون متحرک، ضربدر شدت میدان الکتریکی. با وجود

این، ناظری که نسبت به الکترود باردار حرکت می‌کند، علاوه بر یک میدان الکتریکی، شـاهد یک میدان مغناطیسـی نیز خواهد بود.

نوع میدانی که ناظر می‌بیند، به وضعیت حرکتش بسـتگی دارد. البته ناگفته نماند که {ایـن} حرکت ناظر، تأثیری بر قانون دوم نیوتـون ندارد. اگر برای نیرویی که بر بار متحرک اعمال می‌شود، از معادله مناسب استفاده کنیم و برای تکانهٔ جسم مورد نظر، عبارت نسبیتی را منظور کنیم، ناظر متحرک در می‌یابـد که قانون دوم نیوتـون در چارچوب خودش نیز {مانند هر چارچوب دیگر}، برقرار است.

یک مورد خـاص ناوردایی لورنتس، ایـن حقیقت تثبیت شده اسـت که سـرعت نور، در تمامی چارچوب‌های مرجع (صرف‌نظر از سرعت‌هایشـان)، یکسان است. اصل نسبیت، از چنین واقعیتی نشئت می‌گیرد.

تأییدات تجربی این اصل، بسـیار گسترده‌اند و در سال‌های اخیر، کاملاً دقیق شـده‌اند. خلاصهٔ این شواهد را می‌توان در بسیاری از کتاب‌های نسبیت مشاهده کرد.

***

یک نتیجهٔ شناخته شدهٔ نسبیت، این است که امکان انتقال هرگونه ماده، انرژی یا اطلاعات، با سرعتی بیش از سرعت نور، ناممکن اسـت. این نتیجه را می‌تـوان به طرق مختلف ثابت کرد.

یکـی از متقاعدکننده‌ترین روش‌ها بـرای اثبات آن، این نمایش است که اگر امکان داشت بتوانیم پیغامی را با سرعتی بیشتر از سرعت نور به یک فضاپیما ارسال کنیم (فضاپیمایی که با سرعتی کمتر از نور، اما بیشتر از سرعت معینی حرکت می‌کند)، در این‌صورت این فضاپیما می‌توانسـت پاسخ آن را پیش از آنکه پیام اولیه از زمین فرسـتاده شـود، برایمان ارسال کند!

چنین وضعیتی، اصل علیت را که می‌گوید علت همیشـه باید قبل از معلولش وجود داشته باشد، نقض می‌کند و منجر به وقوع پارادوکس‌های معمول دربارهٔ سفر در زمان می‌شود.

مثلاً، سـناریویی به این صورت رقم می‌خـورد: فاجعه‌ای روی زمیـن اتفاق می‌افتد و بعد از آن، اعلام خطری از زمین به فضاپیمای متحرک ارسال می‌شـود و سپس به زمین باز می‌گردد. اگر فضاپیما به اندازهٔ کافی سریع حرکت کند، این پیغام قبل از خود رویداد به زمین می‌رسد. بنابراین، می‌توان پیش از وقوع فاجعه، جلوی آن را گرفت.

آیا فاجعه اتفاق افتاده یا نه؟

اگر نه، پس چرا پیغام خطر فرستاده شده بود؟

به‌جای آنکـه خودمـان را درگیر چنیـن پارادوکس‌های نامحتملـی کنیم، می‌گوییـم آن چیزی که بـه این قبیل تناقض‌ها می‌انجامد ـ یعنی سفر با سرعت بیش از سرعت نور ـ ناممکن است.

***

به‌رغم چنین پارادوکس‌هایی، نظریه‌ای مطرح شده است که فرض می‌کند ذراتی به‌نام تاکیون وجود دارند، که به‌دلیل جرم موهومی‌شـان، تنها می‌توانند با سرعت بیشتر از سرعت نور حرکت کنند.

اعتبار این نظریه، به جایی رسید که دربارهٔ نتایج مشاهده‌پذیر، پیش‌بینی‌های خاصی نیـز انجام داد. با وجود این، چون این نتایج و پیامدها هیچ‌گاه مشاهده نشده‌اند، نظریهٔ تاکیون، در حد یک گمان جذاب و وهم‌آلود باقی ماند.

۳. ناوردایی پیمانه‌ای

ناوردایی پیمانه‌ای، یک اصل تقارن اسـت که می‌توان آن را به نظریهٔ الکترومغناطیس اعمال کرد. قانون پایستگی‌ای که از این ناوردایی نتیجه می‌شـود، پایستگی بار الکتریکی‌ست؛ قانونی که می‌گوید بار الکتریکی کل یک دسـتگاه بسـته، نمی‌تواند تغییر کند. یعنی اگر n، تعداد بارهای الکتریکی منفی باشـد و n، تعداد بارهای مثبت درون سیستم، در این‌صورت تعداد بارها باید ثابت باشد (صرف‌نظر از واکنش‌هایی که درون دستگاه رخ می‌دهند).

پایسـتگی بار الکتریکی، به ما اطمینان می‌دهد که برخی واکنش‌های خـاص، رخ نخواهنـد داد. مثلاً، یـک نوترون نمی‌تواند به یک پروتون تبدیل شود، بدون آنکه الکترونی هم تولید کند: کمیت بار الکتریکی، اگر قبل از واکنش صفر باشد، بعد از واکنش نیز باید صفر بماند.

همین‌طور، یک فوتون نمی‌تواند به الکترون تبدیل شـود، بدون آنکـه به‌طور همزمان، یک پوزیتـرون هم تولید کند. (حتی اگر انرژی لازم ۰/۵۱۱ Mev برای چنین کاری را داشته باشـد). دلیل آن، الزام ثابت بودن بار الکتریکی کل دستگاه قبل و بعد از واکنش است.

***

شـمار دیگری از اصول تقـارن و قانون‌های پایسـتگی را می‌توان در حوزهٔ فیزیک ذرات به کار بسـت؛ در واقع، یکی از نگرانی‌های عمدهٔ دانشمندانی که در این زمینه کار می‌کنند، این اسـت که سرشـت تقارن‌های موردنظر را تعیین‌کنند و تشـخیص دهند کدام یک از این تقارن‌ها، برقرار و کدام‌یک شکسته شده‌اند.

در مقابل تقارن‌های فراوانی که تنها در سـطح زیرهسته‌ای اهمیت دارند، تقارن‌هایی قرار دارند که ما در این مقاله بررسی کردیم. چون این تقارن‌ها، برای فعالیت‌های بزرگ‌مقیاس نیز به‌کار می‌روند، برای ما اهمیت ویژه‌ای دارند.

پایستگی بار الکتریکی، به ما اطمینان می‌دهد که برخی واکنش‌های خاص، رخ نخواهند داد. مثلاً، یک نوترون نمی‌تواند به یک پروتون تبدیل شود، بدون آنکه الکترونی هم تولید کند