

شناسنامه

The Feynman Lectures on Physics, Vol. 1, Ch. 52

درسنامه‌های فیزیک فاینمن، جلد ۱، فصل ۵۲

مترجم: محمدمسعود هاشمی

ویراستار: یاسمین سادات پناهی، صالح شاملو احمدی

حروفچین: امیررضا محمودزاده

نسخه‌ی ۱۰۰ تابستان ۱۴۰۰

حلقه‌ی مترجمان ژرفا

این اثر با کسب مجوز از ناشر بین‌المللی به منظور انتشار رایگان نسخه‌ی الکترونیکی آن تهیه شده است و حق نشر آن برای انجمن علمی ژرفا مستقر در دانشگاه صنعتی شریف محفوظ می‌باشد. ایرادات این نسخه را با ما در میان بگذارید و در پیشبرد این پروژه‌ی عام‌المنفعه مشارکت کنید. برای دریافت ترجمه‌ی دیگر فصل‌های این کتاب به وبسایت ژرفا مراجعه کنید.

این صفحه از قصد خالی گذاشته شده است.

فصل ۵۲

تقارن در قوانین فیزیک^۱

۱.۵۲ عملیات تقارن^۲

موضوع این فصل، بحثی است که می‌توانیم آن را تقارن در قوانین فیزیک بنامیم. ما تاکنون ویژگی‌های معینی از تقارن در قوانین فیزیک را در ارتباط با آنالیز برداری (فصل ۱۱)، نظریه‌ی نسبیت (فصل ۱۶)، و چرخش^۳ (فصل ۲۰) مورد بحث قرار داده‌ایم.

چرا ما باید به تقارن توجه داشته باشیم؟ در وهله‌ی اول، تقارن برای ذهن انسان جذاب است، و هر کس اشیا یا الگوهایی را که به نوعی متقارن هستند دوست دارد. این یک واقعیت جالب است که طبیعت اغلب انواع معینی از تقارن را در اشیایی که در جهان اطرافمان پیدا می‌کنیم نمایش می‌دهد. شاید متقارن‌ترین شیء قابل تصور، کره است، و طبیعت پر از کره‌ها است — ستاره‌ها، سیارات و قطرات کوچک آب در ابرها. بلورهایی که در سنگ‌ها یافت می‌شوند انواع بسیار متفاوتی از تقارن را نشان می‌دهند، مطالعه‌ی آن‌ها، اطلاعات مهمی درباره‌ی ساختار جامدات در اختیار ما می‌گذارد. حتی دنیای حیوانات و سبزیجات نیز درجه‌ای از تقارن را نشان می‌دهد، گرچه تقارن یک گل یا زنبور عسل به اندازه‌ی یک بلور، کامل یا بنیادی نیست.

اما توجه اصلی ما در اینجا این واقعیت نیست که اشیاء طبیعت اغلب متقارن هستند. بلکه مایل هستیم به بررسی برخی از تقارن‌های قابل توجه‌تر جهان را بررسی کنیم؛ تقارن‌هایی در خودِ قوانین بنیادی وجود دارند که بر عملکرد دنیای فیزیکی حاکم هستند.

اولاً تقارن چیست؟ چگونه یک قانون فیزیکی می‌تواند «متقارن» باشد؟ مسئله‌ی تعریف تقارن مسئله‌ی جالبی است و ما قبلاً اشاره کردیم که ویل^۴ تعریف خوبی را ارائه می‌دهد، مفهوم آن این است که یک شیء، متقارن است اگر کاری وجود داشته باشد که بتوانیم روی آن انجام دهیم به‌طوری که بعد از انجام آن، همانند

^۳ rotation
^۴ Weyl

^۱ Symmetry in Physical Laws
^۲ Symmetry operations

گذشته به نظر برسد. به عنوان مثال، یک گلدان متقارن از چنین نوعی است. اگر آن را برگردانیم یا بچرخانیم، همانند آنچه قبلاً بوده به نظر خواهد رسید. سؤالی که می‌خواهیم در اینجا مطرح کنیم این است که ما با پدیده‌های فیزیکی یا با یک موقعیت فیزیکی در یک آزمایش، چه کار می‌توانیم بکنیم، که در عین حال نتیجه یکسان بماند. فهرستی از عملیات شناخته شده که تحت آن پدیده‌های مختلف فیزیکی ناوردا^۵ باقی می‌ماند در جدول (۱۰۵۲) نشان داده شده است.

جدول ۱۰۵۲: عملیات تقارن

انتقال در فضا

انتقال در زمان

چرخش در زاویه ثابت

سرعت یکنواخت در خط راست (تبدیل لورنتس)^۶

برگشت زمان^۷

بازتاب فضا^۸

تعویض^۹ اتم‌های یکسان یا ذرات یکسان

فاز مکانیک کوانتومی

ماده-پادماده^{۱۰} (همیوگی بار^{۱۱})

۲.۵۲ تقارن در فضا و زمان

اولین چیزی که ممکن است تلاش کنیم انجام دهیم، برای مثال، انتقال دادن یک پدیده در فضا است. اگر ما در یک منطقه معین آزمایش کنیم، و سپس دستگاه آزمایش^{۱۲} دیگری در جای دیگری در فضا برپا کنیم (یا دستگاه اصلی را جابجا کنیم)، در این صورت هر چه با ترتیب معینی تا یک زمان خاص برای یک دستگاه رخ دهد، برای همه به همان شیوه اتفاق می‌افتد، به شرط اینکه شرایط مشابهی را برقرار کنیم؛ با توجه کافی به محدودیت‌هایی که قبلاً ذکر کردیم: همه‌ی آن ویژگی‌های محیط را که باعث می‌شود محیط به همان روش رفتار نکند، تغییر داده‌ایم. ما دوباره‌ی چگونگی این شرایط صحبت کرده‌ایم، و مجدداً وارد این جزئیات نمی‌شویم.

به همین ترتیب، امروزه معتقدیم که جابه‌جایی در زمان هیچ تاثیری بر قوانین فیزیکی نخواهد داشت. (یعنی تا آنجا که امروزه می‌دانیم، تمام این قوانین همان‌طور هستند که امروزه می‌دانیم!) این بدان معنی است که اگر ما یک دستگاه آزمایش معین را برپا کنیم و آزمایش را در یک زمان مشخص، مثلاً در روز پنج شنبه در ۱۰:۰۰ صبح، شروع کنیم و سپس همان دستگاه را برپا کنیم و آزمایش را مثلاً سه روز بعد در همان شرایط شروع نماییم،

^{۱۲} apparatus

^۵ invariant

دو دستگاه حرکت‌های یکسانی خواهند داشت، دقیقاً به همان روش که یک تابع زمان بدون توجه به زمان شروع خواهد داشت، البته مجدداً به شرطی که شرایط محیطی نیز به‌طور مناسب در طول زمان اصلاح شده باشد. البته این تقارن به این معنی است که اگر انسان سه ماه پیش سهام جنرال موتورز^{۱۳} را می‌خرید، همان اتفاقی (برای آن سهام) می‌افتاد که اگر الان، آن را می‌خرید!

البته ما باید مراقب تفاوت‌های جغرافیایی نیز باشیم، چون تفاوت‌هایی در ویژگی‌های سطح زمین وجود دارد. بنابراین، برای مثال اگر میدان مغناطیسی را در یک منطقه‌ی معین اندازه‌گیری کنیم و دستگاه را به منطقه‌ی دیگری حرکت دهیم، ممکن است دقیقاً به همان روش کار نکند زیرا میدان مغناطیسی متفاوت است، اما ما می‌گوییم این، به این دلیل است که میدان مغناطیسی با زمین ارتباط دارد. می‌توانیم تصور کنیم که اگر تمام زمین و تجهیزات^{۱۴} را حرکت دهیم، این کار در عملکرد دستگاه تفاوتی ایجاد نمی‌کند.

چیز دیگری که ما با جزئیات قابل توجه بحث کردیم چرخش در فضا بود: اگر یک دستگاه را در یک زاویه بچرخانیم، درست به همان خوبی کار می‌کند، به شرط آن که هر چیز مرتبط دیگری را همراه آن بچرخانیم. در واقع، ما در مورد مسئله تقارن تحت چرخش در فضا با مقداری جزئیات در فصل ۱۱ بحث کردیم، و یک سیستم ریاضی به نام آنالیز برداری را ابداع کردیم تا بتوانیم این موضوع را تا جایی که ممکن است با دقت بررسی کنیم. در سطحی پیشرفته‌تر تقارن دیگری داشتیم، تقارن تحت سرعت یکنواخت در خط مستقیم. این پدیده‌ی نسبتاً جالب توجه، یعنی اینکه اگر ما یک قطعه دستگاه داشته باشیم که به روش معینی کار می‌کند و سپس همان دستگاه را ببریم و آن را در یک اتومبیل قرار دهیم، و کل اتومبیل، به علاوه‌ی تمام محیط مرتبط، با سرعت یکنواخت در یک خط مستقیم حرکت کند، در این صورت تا آنجا که پدیده‌های داخل اتومبیل مورد نظر باشند، تفاوتی وجود ندارد: تمام قوانین فیزیک یکسان به نظر می‌رسد. ما حتی می‌دانیم که چگونه این پدیده را به شیوه‌ی فنی‌تری بیان کنیم، و آن این است که معادلات ریاضی قوانین فیزیکی باید تحت تبدیل لورنتس بدون تغییر باقی بمانند. در واقع، این مطالعه‌ی مسئله‌ی نسبیت بود که توجه فیزیک‌دانان را شدیدتر بر تقارن در قوانین فیزیکی متمرکز نمود.

خاطر نشان می‌شود، تقارن‌هایی که در بالا گفته شد، همگی ماهیت هندسی دارند، زمان و مکان کم و بیش یکسان است، اما تقارن‌های دیگری از نوع متفاوت وجود دارد. به عنوان مثال، تقارنی وجود دارد که این واقعیت را توصیف می‌کند که ما می‌توانیم یک اتم را با اتمی دیگر از همان نوع جایگزین کنیم؛ به عبارت دیگر، اتم‌های مشابهی وجود دارد. گروه‌هایی از اتم‌ها هستند که اگر ما جای یک جفت را در آن‌ها جابه‌جا کنیم اتفاقی نمی‌افتد—این اتم‌ها یکسان هستند. هر چه که یک اتم اکسیژن از یک نوع معین بتواند انجام دهد، اتم اکسیژن دیگر از آن نوع هم می‌تواند انجام دهد. ممکن است بگوییم: «این مسخره است، این تعریف انواع یکسان^{۱۵} است!» این ممکن است صرفاً تعریف باشد، اما در این صورت ما هنوز نمی‌دانیم که آیا «اتمهایی از نوع یکسان» وجود دارد یا نه؛ واقعیت این است که اتم‌های از نوع یکسان بسیار زیادی وجود دارد. به این ترتیب، می‌خواهیم بگوییم که هیچ تفاوتی ندارد اگر ما یک اتم را با اتمی دیگر از همان نوع جایگزین کنیم. ذرات به اصطلاح بنیادی

equal^{۱۵}General Motors^{۱۳}
equipment^{۱۴}

که اتم‌ها از آن ساخته می‌شوند نیز به مفهوم بالا، ذرات یکسان هستند، تمام الکترون‌ها یکسان هستند؛ تمام پروتون‌ها یکسان هستند، همه پیون‌های مثبت یکسان هستند و غیره.

پس از چنین فهرست طولانی‌ای از چیزهایی که می‌تواند بدون تغییر پدیده‌ها انجام شود، ممکن است فکر کنیم که می‌توانیم عملاً هر چیزی را انجام دهیم؛ بنابراین اجازه بدهید بعضی از نمونه‌های مخالف را، فقط برای دیدن تفاوت ارائه کنیم. فرض کنید که بپرسیم: «آیا قوانین فیزیکی تحت یک تغییر مقیاس^{۱۶} متقارن هستند؟» فرض کنید ما یک قطعه معینی از دستگاه بسازیم، و سپس دستگاه دیگری که در هر قسمت پنج برابر بزرگ‌تر است بسازیم، آیا دقیقاً به همان روش کار خواهد کرد؟ پاسخ در این مورد، نه می‌باشد! به عنوان مثال، طول موج نور گسیل شده توسط اتم‌های داخل یک جعبه از اتم‌های سدیم و طول موج نور گسیل شده توسط گازی از اتم‌های سدیم با حجم پنج برابر، پنج برابر بلندتر نیست، بلکه در واقع دقیقاً مشابه هم است. بنابراین نسبت طول موج به اندازه‌ی گسیلنده^{۱۷}، تغییر خواهد کرد.

یک مثال دیگر: ما هر از چند گاهی در روزنامه، تصاویری از یک کلیسای بزرگ می‌بینیم که با چوب کبریت ساخته شده، یک کار هنری فوق‌العاده که در واقع توسط یک فرد بازنشسته انجام شده که فقط چوب کبریت‌ها را با چسب به یکدیگر می‌چسباند. این بنا از هر کلیسای واقعی استادانه‌تر درست شده و شگفت‌انگیزتر است. اگر تصور کنیم این کلیسای چوبی واقعاً در مقیاس یک کلیسای واقعی ساخته شده است، می‌بینیم که مشکل کجا است؛ این بنا دوام نمی‌آورد—همه چیز به دلیل این واقعیت که چوب کبریت‌های بزرگ شده به اندازه کافی قوی نیستند، سقوط خواهد کرد. ممکن است بگوییم «بله، اما ما همچنین می‌دانیم زمانی که تاثیری از خارج وجود دارد، بنا هم باید متناسب با آن تغییر کند!» ما در مورد توانایی جسم برای تحمل گرانش صحبت می‌کنیم. بنابراین کاری که باید انجام دهیم این است که اول مدل کلیسای ساخته شده با چوب کبریت و زمین واقعی را در نظر بگیریم و در این صورت می‌دانیم که این بنا پایدار است. قدم بعدی ما این است که کلیسای بزرگ‌تر و زمین بزرگ‌تر را در نظر بگیریم. اما در این صورت بدتر هم هست، چون گرانش بازم بیشتر افزایش می‌یابد! البته امروزه ما این واقعیت را درک می‌کنیم که به دلیل اینکه ماده ماهیثاً اتمی است، پدیده‌ها به مقیاس بستگی دارند، و مطمئناً اگر ما دستگاهی می‌ساختیم که آنقدر کوچک باشد که تنها پنج اتم در آن وجود داشته باشد، به وضوح می‌توانست چیزی باشد که ما نمی‌توانستیم به دلخواه آن را بزرگ یا کوچک کنیم. مقیاس یک تک اتم به هیچ‌وجه دلخواه نیست و کاملاً معین است.

این واقعیت که قوانین فیزیک با تغییر مقیاس تغییر می‌کنند توسط گالیله^{۱۸} کشف شد. او متوجه شد که مقاومت‌های مصالح دقیقاً متناسب با اندازه‌های شان نیستند، و این ویژگی‌ای را که ما الان در مورد کلیسای جامع چوب کبریت‌ها مطرح کردیم، با ترسیم دو استخوان نشان داد. استخوان یک سگ با تناسب مناسب برای نگه داشتن وزنش، و استخوان خیالی یک «آبرسگ^{۱۹}» که مثلاً ده یا صد برابر بزرگ‌تر از آن استخوان می‌باشد، شیء جامد با نسبت‌های کاملاً متفاوت. ما نمی‌دانیم که آیا او این بحث را به این نتیجه رسانده است که قوانین طبیعت باید یک مقیاس معین داشته باشد یا نه، اما او چنان تحت تأثیر این کشف قرار گرفت که آن را به اندازه

^{۱۸} Galileo
^{۱۹} super dog

^{۱۶} scale
^{۱۷} emitter

قوانین حرکت، با اهمیت دانست؛ زیرا هر دو در را در یک جلد به نام «درباره‌ی دو علم جدید»^{۲۰} منتشر کرد.

مثال دیگری که در آن قوانین متقارن نیستند و ما کاملاً خوب می‌دانیم این است: یک سیستم در حال چرخش با سرعت زاویه‌ای^{۲۱} یکنواخت همان قوانین ظاهری سیستمی که در حال چرخش نیست را نمایش نمی‌دهد. اگر ما یک آزمایش انجام دهیم و سپس همه چیز را در یک سفینه قرار دهیم و سفینه را در فضای خالی با سرعت زاویه‌ای ثابت بچرخانیم، دستگاه به همان شیوه کار نخواهد کرد زیرا همان‌طور که می‌دانیم، چیزهایی داخل تجهیزات توسط نیروهای گریزازمرکز^{۲۲} یا کوریولیس^{۲۳} و غیره به بیرون پرتاب می‌شوند و موارد دیگر. در واقع، ما با استفاده از یک آونگ معروف به فوکو^{۲۴}، می‌توانیم بدون نگاه کردن به بیرون، بگوییم که زمین در حال چرخیدن است.

بعد از آن ما به یک تقارن بسیار جالب اشاره می‌کنیم که به وضوح نادرست است، یعنی برگشت‌پذیری^{۲۵} در زمان. قوانین فیزیکی ظاهراً نمی‌توانند در زمان برگشت‌پذیر باشند زیرا همان‌طور که می‌دانیم، تمام پدیده‌های آشکار در مقیاس بزرگ برگشت‌ناپذیر هستند: «انگشت در حال حرکت می‌نویسد، و در حال نوشتن حرکت می‌کند.» تا آنجایی که می‌دانیم، این برگشت‌ناپذیری به دلیل تعداد بسیار زیاد ذرات درگیر است، و اگر ما بتوانیم مولکول‌های مجزا را ببینیم، نمی‌توانیم تشخیص دهیم که ماشین‌آلات جلو یا عقب می‌رود. برای دقیق‌تر کردن: ما دستگاه کوچکی می‌سازیم که می‌دانیم در آن همه اتم‌ها در حال انجام چه کاری هستند و ما می‌توانیم آن‌ها را در حال جنبش در آن مشاهده کنیم. اکنون دستگاه دیگری مانند آن را می‌سازیم، اما این دستگاه حرکتش را در حالت نهایی دیگری شروع می‌کند که تمام سرعت‌ها دقیقاً معکوس شده باشند. پس این دستگاه همان حرکت را خواهد داشت، اما دقیقاً در جهت معکوس. این موضوع را به روش دیگری توضیح می‌دهیم: اگر ما فیلمی‌با جزئیات کافی، از همه‌ی عملیات درونی تکه‌ای از ماده بگیریم و آن را بر روی پرده سینما به عقب برگردانیم، هیچ فیزیک‌دانی نمی‌تواند بگوید: «این مخالف قوانین فیزیک و اشتباه است». البته اگر ما تمام جزئیات را نبینیم، این وضعیت کاملاً روشن خواهد بود. اگر ببینیم تخم‌مرغ‌ها در پیاده‌رو، پخش می‌شوند و پوسته‌ها ترک می‌خورند و غیره، مطمئناً می‌گوییم: «این برگشت‌ناپذیر است، زیرا اگر ما فیلم را به عقب برگردانیم تمام تخم‌مرغ‌ها جمع‌آوری می‌شوند و پوسته‌ها جمع می‌شوند و بدیهی است که این مسخره است!» اما اگر ما به خود اتم‌ها جداگانه نگاه کنیم، قوانین کاملاً برگشت‌پذیر به نظر می‌رسند. البته این کشف بسیار سخت‌تری است که انجام شده است، اما ظاهراً این درست است که قوانین بنیادی فیزیک، در سطح میکروسکوپی و بنیادی، کاملاً در زمان برگشت‌پذیر هستند!

Coriolis^{۲۳}
Foucault^{۲۴}
reversibility^{۲۵}

On Two New Sciences^{۲۰}
angular velocity^{۲۱}
centrifugal^{۲۲}

۳.۵۲ تقارن و قوانین پایستگی^{۲۶}

تقارن‌های قوانین فیزیکی در این سطح خیلی جالب هستند، اما در نهایت معلوم می‌شود آن‌ها هنگامی که ما به مکانیک کوانتومی می‌رسیم، جالب‌تر و هیجان‌انگیزتر نیز می‌شوند. به دلیلی که نمی‌توانیم در سطح بحث فعلی آن را روشن کنیم، واقعیتی که برای بیشتر فیزیک‌دان‌ها هنوز تا حدی عجیب به نظر می‌رسد و بسیار عمیق و زیبا است، این است که در مکانیک کوانتومی برای هر یک از قواعد تقارن یک قانون پایستگی متناظر وجود دارد. ارتباط معینی بین قوانین پایستگی و تقارن‌های قوانین فیزیکی موجود است. ما در حال حاضر فقط می‌توانیم این را بدون هیچ تلاشی برای توضیح آن بیان نماییم.

برای مثال این واقعیت که قوانین انتقال در فضا با اضافه کردن اصول مکانیک کوانتومی متقارن هستند به این معنی است که تکانه پایسته است.

اینکه قوانین تحت انتقال در زمان متقارن هستند، در مکانیک کوانتومی یعنی انرژی پایسته است. ناوردایی^{۲۷} تحت چرخش با زاویه‌ای ثابت در فضا، متناظر با پایستگی تکانه‌ی زاویه‌ای است. این ارتباطات چیزهای بسیار جالب و زیبایی هستند، در میان زیباترین و عمیق‌ترین چیزها در فیزیک.

اتفاقاً، تعدادی تقارن وجود دارد که در مکانیک کوانتومی ظاهر می‌شوند و مشابه کلاسیکی و روش توصیفی در فیزیک کلاسیک ندارند. یکی از این موارد به شرح زیر است: اگر دامنه برای فرایندی ψ باشد می‌دانیم که مربع مطلق^{۲۸} ψ ، احتمال رخ دادن فرآیند خواهد داد. حال اگر شخص دیگری محاسبات خود را، نه با این ψ ، بلکه با ψ' که فقط در تغییر فاز متفاوت است (فرض کنید Δ یک ثابت است و $e^{i\Delta}$ را در ψ قدیمی ضرب کنید) انجام دهد، در این صورت مربع مطلق ψ' ، که احتمال آن رویداد است، برابر است با مربع مطلق ψ :

$$\psi' = \psi e^{i\Delta}; \quad |\psi'|^2 = |\psi|^2. \quad (۱.۵۲)$$

بنابراین اگر فاز تابع موج^{۲۹} با یک ثابت دلخواه تغییر کند، قوانین فیزیکی بدون تغییر هستند. این تقارن دیگری است. قوانین فیزیکی باید به گونه‌ای باشد که تغییر در فاز کوانتوم-مکانیکی، تغییری ایجاد نکند. همان طور که الان ذکر شد، در مکانیک کوانتومی یک قانون پایستگی برای هر تقارن وجود دارد. به نظر می‌رسد قانون پایستگی که با فاز کوانتوم-مکانیکی مرتبط است پایستگی بار الکتریکی باشد. این واقعیت در مجموع موضوع بسیار جالبی است!

۴.۵۲ بازتاب‌های آینه‌ای^{۳۰}

اکنون سؤال بعدی که برای بیشتر بخش‌های دیگر این فصل به ما مربوط می‌شود، سؤال تقارن تحت بازتاب در فضا است. مسئله این است: آیا قوانین فیزیکی تحت بازتاب متقارن هستند؟ این را می‌توانیم به این روش بیان

^{۲۹} wave function
^{۳۰} Mirror reflections

^{۲۶} conservation laws
^{۲۷} invariance
^{۲۸} absolute square

کنیم: فرض کنید قطعه‌ای از تجهیزات، مثلاً یک ساعت با تعداد زیادی چرخ‌ها و عقربه‌ها و اعداد، را بسازیم، این ساعت تیک تاک می‌کند، کار می‌کند، و اجزای درون آن به هم اتصال دارند. ما به ساعت در آینه نگاه می‌کنیم. سؤال این نیست که این ساعت در آینه چگونه به نظر می‌رسد. اما فرض کنید واقعاً ساعت دیگری بسازیم که دقیقاً مشابه ساعت اول است آن‌طور که در آینه به نظر می‌رسد. هر وقت یک پیچ^{۳۱} با دندانه^{۳۲} راست‌گرد^{۳۳} در یکی از ساعت‌ها وجود دارد، ما از یک پیچ با دندانه چپ‌گرد^{۳۴} در جای متناظر در ساعت دیگر استفاده می‌کنیم؛ در جایی که علامت «۲» بر روی یک صفحه است، ما علامت «۲» را در صفحه‌ی ساعت دیگر قرار می‌دهیم؛ هر یک از فنرهای پیچ خورده در یک ساعت به یک جهت پیچ خورده است و در ساعت مصوّرآینه‌ای^{۳۵} در جهت دیگر. وقتی ما تمام این کارها را به پایان برسانیم، دو ساعت داریم، هر دو فیزیکی، که رابطه‌ی یک شی و تصویر آینه‌ای آن را با یکدیگر دارند، اگر چه تأکید می‌کنیم آن‌ها هر دو اشیاء واقعی و مادی هستند. حالا سؤال این است: اگر دو ساعت در شرایط یکسان راه‌اندازی شده، فنرها تا فشردگی‌های متناظر پیچیده شوند، این دو ساعت از این به بعد همیشه به عنوان تصاویر آینه‌ای دقیق تیک تاک کرده و کار می‌کنند؟ (این یک سؤال فیزیکی است، نه یک سؤال فلسفی.) بینش ما درباره‌ی قوانین فیزیک حاکی از این است که همین‌طور خواهد بود و جواب مثبت است.

ما حدس می‌زنیم که حداقل در مورد این ساعت‌ها، بازتاب در فضا یکی از تقارن‌های قوانین فیزیکی است، که اگر همه چیز را از «راست» به «چپ» تغییر دهیم و تغییر دیگری ندهیم و سایر چیزها را به همان صورت واگذاریم، نمی‌توانیم تفاوتی قایل شویم. بنابراین اجازه دهید برای لحظه‌ای فرض کنیم که این حدس درست است. اگر این درست باشد، پس تشخیص دادن «راست» و «چپ» برای هر پدیده‌ی فیزیکی غیرممکن خواهد بود، درست همان‌طور که به عنوان مثال، غیرممکن است یک سرعت مطلق خاص را به‌وسیله‌ی یک پدیده فیزیکی تعریف کنیم. بنابراین تعریف دقیق ما از «راست» در مقابل «چپ» توسط هر پدیده‌ی فیزیکی باید غیرممکن باشد، زیرا قوانین فیزیکی باید متقارن باشند.

البته جهان الزاماً نباید متقارن باشد. برای مثال با استفاده از آنچه که ما «جغرافی» می‌نامیم، مطمئناً «راست» را می‌توان تعریف کرد. به عنوان نمونه، ما در نیواورلئان^{۳۶} ایستاده و به شیکاگو نگاه می‌کنیم، در این صورت فلوریدا طرف راست ما است (زمانی که پاهای ما بر روی زمین هستند!). بنابراین ما می‌توانیم «راست» و «چپ» را به‌وسیله‌ی جغرافی تعریف کنیم. البته وضعیت واقعی در هر سیستم، نباید تقارنی که ما در مورد آن صحبت می‌کنیم داشته باشد. سؤال این است که آیا قوانین متقارند؛ به عبارت دیگر، آیا داشتن کره‌ای مانند زمین با «دوران چپ‌گرد» و شخصی مانند خود ما که ایستاده از مکانی مانند نیواورلئان به شهری مانند شیکاگو نگاه می‌کند، اما در حالی که همه چیز سمت دیگر باشد، به‌طوری که فلوریدا در طرف دیگر باشد، مخالف قوانین فیزیکی است؟ به وضوح غیرممکن و مخالف قوانین فیزیکی به نظر نمی‌رسد که همه چیز از چپ به راست تغییر داده شود.

left-handed^{۳۴}
mirror-image^{۳۵}
New Orleans^{۳۶}

screw^{۳۱}
thread^{۳۲}
right-handed^{۳۳}

نکته‌ی دیگر این است که تعریف ما از «راست» نباید به تاریخ بستگی داشته باشد. یک راه آسان برای تشخیص راست از چپ این است که به یک کارگاه ماشین‌سازی بروید و پیچی را به‌طور تصادفی بردارید. احتمالاً این پیچ، دندان‌ه راست‌گرد دارد، نه لزوماً اما داشتن یک دندان‌ه راست‌گرد بسیار محتمل‌تر از دندان‌ه چپ‌گرد است. این سؤالی مربوط به تاریخ و یا قرارداد است، و یا روشی است که اتفاقاً پیچ‌ها این‌طور شده‌اند، و بازهم سؤالی مربوط به قوانین بنیادی نیست. همان‌طور که ما می‌توانیم به خوبی درک کنیم، هر کسی می‌تواند شروع به ساخت پیچ‌های چپ‌گرد کند!

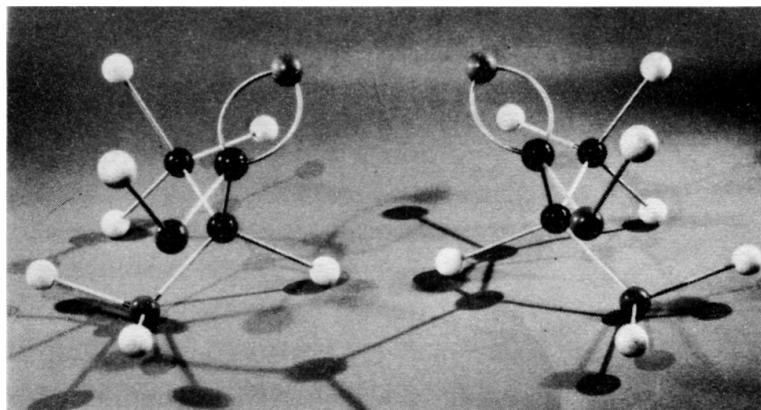
بنابراین ما باید سعی کنیم پدیده‌ای را پیدا کنیم که ذاتاً «راست‌گرد بودن» را در خود داشته باشد. امکان بعدی که ما بحث می‌کنیم، این واقعیت است که نور قطبیده^{۳۷} همان‌طور که مثلاً از میان آب قند عبور می‌کند، صفحه‌ی قطبش‌اش^{۳۸} را می‌چرخاند. همان‌طور که در فصل ۳۳ دیدیم، صفحه‌ی قطبش در یک محلول شکر معین، مثلاً به سمت راست می‌چرخد. این یک روش تعریف «راست‌گرد» است، زیرا ممکن است مقداری شکر را در آب حل کنیم و سپس قطبش به سمت راست می‌رود. اما شکر از موجودات زنده حاصل می‌شود، و اگر ما سعی می‌کنیم به‌طور مصنوعی شکر تولید کنیم، در این‌صورت متوجه می‌شویم که این شکر صفحه‌ی قطبش را نمی‌چرخاند! اما اگر بعد از آن همان شکر را که به‌طور مصنوعی ساخته شده و صفحه‌ی قطبش را نمی‌چرخاند بگیریم، و باکتری‌ها را در آن قرار دهیم (آن‌ها مقداری از شکر را می‌خورند) و سپس باکتری‌ها را فیلتر کنیم، متوجه می‌شویم که ما هنوز شکر را باقی گذاشته‌ایم (تقریباً نیمی از آنچه قبلاً داشتیم)، و در این زمان شکر صفحه‌ی قطبش را می‌چرخاند، اما در جهت دیگر! این موضوع بسیار گیج‌کننده به نظر می‌رسد، اما به‌راحتی توضیح داده شده است.

مثال دیگری در نظر بگیرید: یکی از موادی که برای همه موجودات زنده مشترک است و برای زندگی ضروری است پروتئین است. پروتئین‌ها شامل زنجیره‌های اسیدهای آمینه^{۳۹} هستند. شکل (۱۰۵۲) یک مدل اسید آمینه را نشان می‌دهد که از پروتئین ناشی می‌شود. این اسید آمینه آلانین^{۴۰} نامیده می‌شود، و اگر از یک پروتئین موجود زنده‌ی واقعی تولید شده باشد، آرایش مولکولی آن شبیه شکل (۱۰۵۲) به نظر می‌رسد. از سوی دیگر، اگر ما تلاش کنیم آلانین را از دی‌اکسید کربن^{۴۱}، اتان^{۴۲} و آمونیاک^{۴۳} تولید کنیم (و ما می‌توانیم آن را تولید کنیم، زیرا مولکول پیچیده‌ای نیست)، کشف می‌کنیم که مقادیر برابری از این مولکول تولید می‌کنیم و یک نمونه در شکل (۱۰۵۲) (ب) نشان داده شده است! اولین مولکول، که از موجود زنده به دست می‌آید، ال-آلانین^{۴۴} نامیده می‌شود. یک مولکول دیگر که از نظر شیمیایی یکسان است، در خودش همان انواع اتم‌ها و همان اتصالات اتم‌ها را دارد، در مقایسه با ال-آلانین «چپ‌گرد»، مولکولی «راست‌گرد» است، و دی-آلانین^{۴۵} نامیده می‌شود. جالب اینجاست که وقتی آلانین را در آزمایشگاه از گازهای ساده تولید می‌کنیم، مخلوط مساوی از هر دو نوع بدست می‌آوریم. با این حال، تنها چیزی که زندگی از آن استفاده می‌کند، ال-آلانین است. (این دقیقاً درست نیست. کمابیش

ethane^{۴۲}
ammonia^{۴۳}
L-alanine^{۴۴}
D-alanine^{۴۵}

polarized light^{۳۷}
polarization^{۳۸}
amino acids^{۳۹}
alanine^{۴۰}
carbon dioxide^{۴۱}

در موجودات زنده کاربرد خاصی برای دی-آلانین وجود دارد، اما بسیار نادر است. تمام پروتئین‌ها منحصراً از ال-آلانین استفاده می‌کنند. حالا اگر ما هر دو نوع را تولید کنیم، و مخلوط را به حیوانی که دوست دارد ال-آلانین «بخورد» یا استفاده کند و نمی‌تواند از دی-آلانین استفاده کند بخورانیم، بنابراین تنها از ال-آلانین استفاده می‌کند؛ این چیزی است که به شکر ما وارد شده است — بعد از اینکه باکتری‌ها شکری را که برای آن‌ها خوب کار می‌کند می‌خورند، فقط نوع «اشتباه» باقی می‌ماند! (شکر چپ‌گرد طعم شیرینی دارد، اما نه به اندازه‌ی شکر راست‌گرد).



شکل ۱۰۵۲: الف) ال-آلانین (چپ) و ب) دی-آلانین (راست).

بنابراین به نظر می‌رسد پدیده‌های زندگی، اجازه‌ی تمایز بین «راست» و «چپ» را می‌دهند، یا شیمی اجازه تمایز می‌دهد، زیرا دو مولکول از لحاظ شیمیایی متفاوتند. اما نه، این‌طور نیست! تا آنجا که اندازه‌گیری‌های فیزیکی می‌تواند انجام شود، مانند اندازه‌گیری انرژی، آهنگ‌های^{۴۶} واکنش‌های شیمیایی و غیره، اگر ما هر چیز دیگر را در یک تصویر آینه‌ای هم بسازیم، دو نوع دقیقاً به طرز مشابه کار می‌کنند. یک مولکول، نور را به سمت راست می‌چرخاند و دیگری آن را از طریق همان مقدار شاره^{۴۷} دقیقاً به همان مقدار به چپ می‌چرخاند. بدین ترتیب، تا آنجایی که به فیزیک مربوط می‌شود، این دو اسید آمینه به یک اندازه رضایت‌بخش هستند. تا آنجا که ما امروزه درک می‌کنیم، طبق مبانی معادله‌ی شرودینگر^{۴۸} این دو مولکول باید دقیقاً به شیوه متناظر رفتار کنند، به‌طوری که چرخش یکی به سمت راست است همان‌طور که چرخش دیگری به سمت چپ است. با این وجود، در زندگی همه چیز یک طرفه است!

تصور می‌شود دلیل این موضوع به شرح زیر است. اجازه بدهید برای مثال فرض کنیم زندگی به‌طریقی در یک لحظه در شرایط معینی است که در آن تمام پروتئین‌ها در برخی موجودات، اسیدهای آمینه‌ی چپ‌گرد دارند و همه‌ی آنزیم‌ها^{۴۹} کج^{۵۰} هستند — هر ماده در موجودات زنده کج است — متقارن نیست. بنابراین هنگامی که

^{۴۹} enzyme
^{۵۰} lopsided

^{۴۶} rates
^{۴۷} fluid
^{۴۸} Schrödinger

آنزیم‌های گوارشی سعی می‌کنند مواد شیمیایی را در غذا از یک نوع به نوع دیگر تغییر دهند، یک نوع ماده‌ی شیمیایی با آنزیم «سازگار می‌شود»، اما نوع دیگر نمی‌شود (مانند سبندرلا^{۵۱} و کفش، با این تفاوت که این «پای چپ» است که ما آزمایش می‌کنیم). تا آنجا که می‌دانیم، اصولاً می‌توانیم قورباغه‌ای بسازیم که، به عنوان مثال، در آن هر مولکول وارونه شده است، همه چیز مانند تصویر آینه‌ای «چپ‌گرد» یک قورباغه‌ی واقعی است؛ ما یک قورباغه «چپ‌گرد» داریم. این قورباغه «چپ‌گرد» برای مدتی بسیار خوب به پیش می‌رود، اما چیزی برای خوردن پیدا نمی‌کند، زیرا اگر مگسی را ببلعد، آنزیم‌هایش برای هضم آن ساخته نشده‌اند. این مگس «نوع» اشتباه اسیدهای آمینه را دارد (مگر اینکه ما به قورباغه یک مگس چپ‌گرد بدهیم). بنابراین تا آنجا که می‌دانیم، اگر همه چیز وارونه باشند، فرایندهای زندگی و شیمیایی به همان روش ادامه می‌یابند.

اگر زندگی کاملاً یک پدیده‌ی فیزیکی و شیمیایی باشد، ما می‌توانیم از این ایده که در ابتدا برخی از مولکول‌های زنده، به‌طور تصادفی ایجاد شدند و تعداد کمی باقی ماندند، درک کنیم که پروتئین‌ها همه به یک شیوه ساخته شده‌اند. جایی یک بار یک مولکول آلی به روش معینی کج شده، و از این چیز خاص سمت «راست» اتفاق می‌افتد که در جغرافیای ویژه‌ی ما تکامل می‌یابد. یک حادثه تاریخی خاص، یک طرفه بوده؛ و از آن زمان تاکنون این کجی^{۵۲} خود را گسترش داده است. وقتی به حالتی که اکنون در آن است وارد شود، البته آن را همیشه ادامه خواهد داد—تمام آنزیم‌ها موجوداتِ راست^{۵۳} را هضم کرده، و تولید موجوداتِ راست می‌کنند: زمانی که دی‌اکسید کربن و بخار آب و غیره، به برگ‌های گیاهان داخل می‌شوند، آنزیم‌هایی که شکرها را می‌سازند آن‌ها را کج می‌سازند زیرا این آنزیم‌ها کج هستند. اگر هر نوع جدیدی از ویروس یا موجود زنده در زمان بعد به وجود بیایند، تنها در صورتی باقی می‌مانند که بتوانند آن نوع ماده زنده را که از قبل وجود دارد بخورد. بدین ترتیب، آن هم باید از همان نوع باشد.

پایستگی تعداد مولکول‌های راست‌گرد وجود ندارد. یک بار که شروع شود، ما می‌توانیم افزایش تعداد مولکول‌های راست‌گرد را حفظ کنیم. بنابراین فرض این است که پدیده‌ها در مورد زندگی عدم تقارن در قوانین فیزیکی را نشان نمی‌دهند، اما برعکس، طبیعت جهانی و عمومیت منشأ نهایی همه موجودات روی زمین را، به معنای شرح داده شده در بالا، نشان می‌دهند.

۵.۵۲ بردارهای قطبی و محوری^{۵۴}

اکنون جلوتر می‌رویم. مشاهده می‌کنیم که در فیزیک، بسیاری جاهای دیگر وجود دارد که قواعد «راست»‌گرد و «چپ»‌گرد داریم. در واقع، زمانی که ما در مورد آنالیز برداری آموختیم، فهمیدیم که باید از قواعد راست‌گرد استفاده کنیم تا تکانه‌ی زاویه‌ای، گشتاور، میدان مغناطیسی و غیره درست در بیایند. به عنوان مثال نیروی وارد بر یک بار در حال حرکت در میدان مغناطیسی، $\mathbf{F} = q\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ است. در یک وضعیت معین، که در آن ما

^{۵۳} right
Polar and axial vectors ^{۵۴}

^{۵۱} Cinderella
^{۵۲} lopsidedness

F ، v و B را می‌دانیم، این معادله برای تعریف راست‌گردی کافی نیست؟ در واقع، اگر ما به عقب برگردیم و به جایی که بردارها آمده‌اند نگاه کنیم، می‌دانیم که «قاعده‌ی راست‌گرد» فقط یک قرارداد و ترفند بود. کمیت‌های اصلی، مانند تکانه‌های زاویه‌ای و سرعت زاویه‌ای و چیزهایی از این نوع، در واقع اصلاً بردار نیستند! همه آن‌ها به‌نحوی با یک صفحه‌ی معین ارتباط دارند، و این به این علت است که سه بعد در فضا وجود دارد که ما می‌توانیم آن کمیت را با جهت عمود بر آن صفحه مرتبط کنیم. از دو جهت ممکن، ما جهت «راست‌گرد» را انتخاب می‌کنیم. بنابراین اگر قوانین فیزیک متقارن باشند، ما باید دریابیم که اگر شیطانی^{۵۵} مخفیانه به همه آزمایشگاه‌های فیزیک بیايد و کلمه «راست» را در هر کتابی که در آن «قواعد راست‌گرد» داده شده‌اند با «چپ» جایگزین کند، و در عوض ما از «قواعد چپ‌گرد» استفاده کنیم، در این صورت ابداً نباید در قوانین فیزیکی تفاوتی ایجاد شود.



شکل ۲.۵۲: یک بردار مکان^{۵۶} در فضا و تصویر آینه‌ای آن.

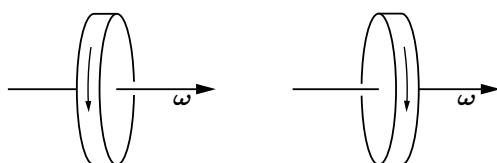
بیايد موضوع را با مثالی تشریح کنیم. دو نوع بردار وجود دارد. یک نوع، «بردار راستین»^{۵۷} است، به عنوان مثال بردار مکان r در فضا. اگر در دستگاه ما قطعه‌ای در اینجا و چیز دیگری در آن طرف وجود داشته باشد، در این صورت در یک دستگاه آینه‌ای تصویر قطعه و تصویر آن چیز دیگر وجود خواهد داشت، و اگر ما برداری از «قطعه» به «چیز دیگر» بکشیم، یک بردار تصویر آینه‌ای بردار دیگر است (۲.۵۲). بردار جهت خود را تغییر می‌دهد، درست همان‌طور که کل فضا وارونه می‌شود، چنین برداری را بردار قطبی می‌نامیم.

اما نوع دیگری از بردار که با چرخش‌ها ارتباط دارد، ماهیت متفاوتی دارد. به عنوان مثال فرض کنید که در سه بعد چیزی در حال چرخیدن است، همان‌طور که در شکل (۳.۵۲) نشان داده شده است. سپس اگر در یک آینه به آن نگاه کنیم، همان‌طور که نمایش داده می‌شود در حال چرخش خواهد بود، یعنی به‌صورت تصویر آینه‌ای چرخش اصلی. اکنون ما توافق کرده‌ایم که چرخش آینه‌ای را با همان قاعده نشان دهیم، این «بردار» است که در بازتاب تغییر نمی‌کند، آن‌طور که یک بردار قطبی تغییر می‌کند، اما نسبت به بردارهای قطبی و هندسه‌ی فضا وارونه شده است؛ چنین برداری بردار محوری نامیده می‌شود.

اکنون اگر قانون تقارن بازتاب در فیزیک درست باشد، باید این هم درست باشد که معادلات باید به گونه‌ای طراحی شوند که اگر علامت هر بردار محوری و هر حاصل ضرب خارجی^{۵۸} بردارها را تغییر دهیم، که همان عملیات آینه کردن تصویر است، هیچ اتفاقی نخواهد افتاد. برای مثال، زمانی که فرمولی می‌نویسیم که می‌گوید تکانه زاویه‌ای $L = r \times p$ است، این معادله کاملاً درست است، زیرا اگر دستگاه مختصات را به یک دستگاه مختصات چپ‌گرد تبدیل کنیم علامت L را تغییر می‌دهیم، اما p و r تغییر نمی‌کنند؛ بنابراین علامت حاصل ضرب برداری

^{۵۷} honest vector
^{۵۸} cross-product

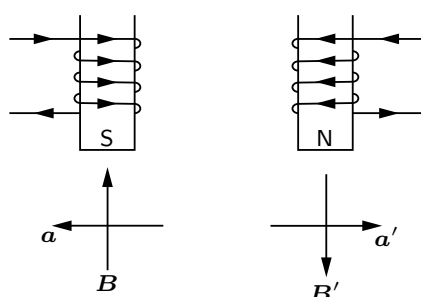
^{۵۵} demon
^{۵۶} step



شکل ۳۰۵۲: یک چرخ دوار و تصویر آینه‌ای آن. توجه داشته باشید که جهت «بردار» سرعت زاویه‌ای وارونه نشده است

تغییر کرده است، زیرا ما باید قاعده‌ی راست‌گرد را به قاعده‌ی چپ‌گرد تغییر دهیم. به عنوان مثالی دیگر، ما می‌دانیم که نیروی وارد بر بار در حال حرکت در یک میدان مغناطیسی $F = qv \times B$ است، اما اگر دستگاه راست‌گرد را به چپ‌گرد تبدیل کنیم، چون F و v به عنوان بردار قطبی شناخته می‌شوند، تغییر علامت مورد نیاز برای حاصل ضرب برداری باید با تغییر علامت در B خنثی شود، که بدان معنی است که B باید یک بردار محوری باشد. به عبارت دیگر، اگر ما چنین بازتابی ایجاد کنیم، B باید به $-B$ تبدیل شود. بنابراین اگر مختصاتمان را از راست به چپ تغییر دهیم، باید قطب‌های آهنربا را نیز از شمال به جنوب تغییر دهیم.

بگذارید با یک مثال ببینیم که این چگونه کار می‌کند. فرض کنید مانند شکل (۴۰۵۲) دو آهنربا داریم. یکی آهنربایی است با پیچه‌ای^{۵۹} که در جهت معینی پیچیده شده است، با جریانی در یک جهت مشخص. آهنربای دیگر مانند بازتاب آهنربای اول در یک آینه به نظر می‌رسد—پیچه در جهت دیگری پیچیده شده است، هر چیز که در درون پیچه اتفاق می‌افتد دقیقاً وارونه می‌شود، و جهت جریان همان‌طور که نشان داده شده می‌باشد. اکنون از قوانین مربوط به تولید میدان‌های مغناطیسی، که ما هنوز رسماً نمی‌دانیم، اما به احتمال زیاد در دبیرستان آموخته‌ایم، معلوم می‌شود که میدان مغناطیسی همان‌طور که در شکل نشان داده شده می‌باشد. در مورد یک قطب، در یک آهنربا قطب مغناطیسی جنوب است، در حالی که در آهنربای دیگر جریان در جهت دیگری جاری می‌شود و میدان مغناطیسی وارونه است—در این حالت قطب مغناطیسی شمال است. بنابراین می‌بینیم که وقتی از راست به چپ می‌رویم در واقع باید شمال را به جنوب تغییر دهیم!



شکل ۴۰۵۲: یک آهنربا و تصویر آینه‌ای آن.

تغییر شمال به جنوب اهمیتی ندارد؛ اینها فقط قرارداد هستند. اجازه دهید در مورد پدیده‌ها بحث کنیم.

فرض کنید که الکترونی داریم که در یک میدان در حال حرکت است و داخل صفحه می‌رود. سپس، اگر از فرمول $\mathbf{v} \times \mathbf{B}$ برای نیرو استفاده کنیم، (به یاد داشته باشید که بار منفی است)، متوجه می‌شویم که الکترون در جهت مشخص شده مطابق با قانون فیزیکی مذکور منحرف می‌شود. بنابراین ما پیچهای داریم با جریانی که در یک جهت مشخص جاری می‌شود و الکترونی که در مسیر معینی خمیده می‌شود—این فیزیک است—اهمیتی ندارد که چطور همه چیز را نام‌گذاری می‌کنیم.

اکنون اجازه دهید آزمایش مشابهی با یک آینه انجام دهیم: یک الکترون را در یک جهت متناظر داخل می‌فرستیم، اگر نیرو را از همان قاعده محاسبه کنیم، اکنون وارونه می‌شود، و این بسیار خوب است، زیرا در این صورت حرکات متناظر، تصاویر آینه‌ای هستند.

۶.۵۲. کدام دست، دست راست است؟

بنابراین واقعیت این است که در مطالعه‌ی هر پدیده همیشه دو قاعده‌ی راست‌گرد، یا تعداد زوجی از آن‌ها، وجود دارد، و نتیجه‌ی نهایی این است که پدیده‌ها همیشه متقارن به نظر می‌رسند. بنابراین به‌طور خلاصه، ما نمی‌توانیم راست را از چپ تشخیص دهیم، اگر قادر نباشیم شمال را نیز از جنوب تشخیص دهیم. با این حال، ممکن است به نظر برسد ما می‌توانیم قطب شمال یک آهنربا را تشخیص دهیم. برای مثال قطب شمال عقربه‌ی قطب‌نما، چیزی است که به شمال اشاره می‌کند. البته این باز خاصیتی محلی است که باید به جغرافیای زمین وابسته باشد؛ این درست مثل صحبت کردن در مورد این است که شیکاگو در کدام جهت است، بنابراین به حساب نمی‌آید. اگر عقربه‌ی قطب‌نما را دیده باشیم، ممکن است متوجه شده باشیم که قطب شمال‌یاب، نوعی رنگ آبی است. اما این فقط ناشی از شخصی است که این آهنربا را رنگ کرده است. این‌ها همه معیارهای قراردادی و محلی هستند.

با این حال، اگر آهنربایی این ویژگی را داشته باشد که اگر به آن از فاصله‌ی به اندازه‌ی کافی نزدیک نگاه کنیم، بتوانیم موهای کوچکی ببینیم که در قطب شمال این آهنربا رشد می‌کنند نه در قطب جنوب آن، و اگر این قاعده‌ای عمومی بود، یا اگر هر راه منحصر به فردی برای تشخیص قطب شمال از قطب جنوب آهنربا وجود داشت، در این صورت می‌توانستیم بگوییم که ما واقعاً کدام یک از این دو مورد را داریم، و این پایان قانون تقارن بازتاب خواهد بود.

برای نشان دادن باز هم روشن‌تر کل مسئله، تصور کنید که ما با یک مریخی یا کسی که خیلی دور است با تلفن صحبت می‌کنیم. ما مجاز نیستیم هیچ نمونه‌ی واقعی برای بررسی برای او ارسال کنیم، به عنوان مثال، اگر می‌توانستیم نوری بفرستیم، ما می‌توانستیم نور با قطبش دایره‌ای^{۶۰} راست‌گرد بفرستیم و بگوییم: «این نور راست گرد است، فقط مسیری که این نور طی می‌کند را ببینید.» اما ما نمی‌توانیم چیزی را به او بدهیم، ما می‌توانیم فقط با او صحبت کنیم. او دور است، یا در مکانی عجیب و غریب است، و چیزهایی را که ما می‌توانیم ببینیم

^{۶۰} circularly polarized light

نمی‌تواند ببیند. به عنوان مثال، ما نمی‌توانیم بگوییم، «به دُبِ اکبر^{۶۱} نگاه کن، حالا ببین که چگونه این ستاره‌ها مرتب شده‌اند. منظور ما از «راست» این است...». ما فقط اجازه داریم به او تلفن کنیم.

اکنون ما می‌خواهیم همه چیز را درباره‌ی خودمان به او بگوییم. البته اول شروع به تعریف اعداد می‌کنیم و می‌گوییم «تیک، تیک، دو، تیک، تیک، تیک، سه، ...» به‌طوری که به تدریج می‌تواند تعدادی از کلمات را درک کند و غیره. بعد از مدتی ممکن است با این شخص خیلی آشنا شویم، و او می‌گوید: «شما آدم‌ها چطور به نظر می‌رسید؟» ما شروع به توصیف خودمان می‌کنیم «خب، قد ما شش پا است». او می‌گوید «یک دقیقه صبر کنید، شش پا چه چیزی است؟ آیا می‌توان به او گفت که شش پا چیست؟ قطعاً! ما می‌گوییم «شما در مورد قطر اتم‌های هیدروژن می‌دانید، ما به بلندی ۱۷,۰۰۰,۰۰۰,۰۰۰ اتم هیدروژن هستیم!» این ممکن است، زیرا قوانین فیزیکی تحت تغییر مقیاس ناوردا نیستند، و بنابراین ما می‌توانیم یک طول مطلق را تعریف کنیم. و بدین شکل ما می‌توانیم اندازه‌ی بدن را تعریف کنیم، و به او می‌گوییم که شکل عمومی آن بدن چگونه است—این بدن چنگال‌هایی با پنج برآمدگی بر روی انتها دارد و غیره، و او ما را همراهی می‌کند، و ما احتمالاً بدون برخورد به هیچ مشکل خاصی، به توصیف اینکه از بیرون چگونه به نظر می‌رسیم پایان می‌دهیم. او حتی مدلی از ما را وقتی با ما همکاری می‌کند می‌سازد. او می‌گوید: «به به!، شما مسلماً اشخاص خیلی زیبایی هستید؛ حالا چه چیزی در داخل بدن شما است؟» بنابراین ما شروع به توصیف اندام‌های مختلف داخل بدن می‌کنیم، و متوجه قلب می‌شویم، و شکل آن را به دقت توصیف می‌کنیم، و می‌گوییم «حالا قلب را سمت چپ بگذار». او می‌گوید «اممم... سمت چپ؟» حالا مشکل ما این است که برای او توصیف کنیم که قلب کدام سمت قرار می‌گیرد بدون آن که او هرگز چیزی که ما می‌بینیم دیده باشد، و بدون اینکه هرگز هیچ نمونه‌ای از آنچه را که منظور ما از «راست» است برای او فرستاده باشیم، بدون شیء راست‌گرد استاندارد. آیا می‌توانیم این کار را انجام دهیم؟

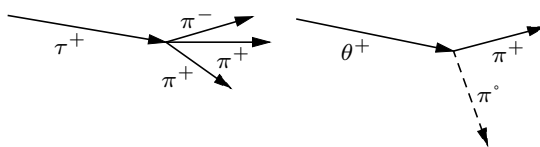
۷.۵۲ پاریته^{۶۲} پایسته نیست!

معلوم شده که قوانین گرانش، قوانین الکتریسیته و مغناطیس، نیروهای هسته‌ای، همه اصل تقارن بازتاب را برآورده می‌کنند، پس این قوانین یا هر چیزی که از آن‌ها نتیجه شده است، نمی‌تواند مورد استفاده قرار گیرد. اما در ارتباط با بسیاری از ذراتی که در طبیعت یافت می‌شوند پدیده‌ای هست که واپاشی بتا^{۶۳} یا واپاشی ضعیف^{۶۴} نامیده می‌شود. یکی از نمونه‌های واپاشی ضعیف، در ارتباط با یک ذره کشف شده در حدود سال ۱۹۵۴، معمایی شگفت‌انگیز مطرح کرد. ذره‌ی باردار معینی وجود داشت که به سه مزون π ^{۶۵} فروپاشی^{۶۶} کرده بود، همان‌طور که به‌طور طرحواره در شکل (۵.۵۲) نشان داده شده است. این ذره برای مدتی مزون τ نامیده می‌شد.

اکنون خاطر نشان می‌شود در شکل (۵.۵۲)، ذره‌ی دیگری نیز مشاهده می‌کنیم که به دو مزون فروپاشیده می‌شود؛ طبق اصل پایستگی بار، یکی از آن‌ها باید خنثی باشد. این ذره مزون θ نامیده می‌شد. بنابراین در یک طرف ما ذره‌ای به نام τ داریم که به سه مزون π فروپاشیده می‌شود، و یک ذره‌ی θ که به دو مزون π فروپاشیده می‌شود. به زودی کشف شد که τ و θ تقریباً جرم برابری دارند؛ در واقع در محدوده‌ی خطای آزمایش آن‌ها برابر

^{۶۴} weak decay
^{۶۵} meson
^{۶۶} disintegrate

^{۶۱} Ursa major
^{۶۲} Parity
^{۶۳} beta decay



شکل ۷.۵۲: نمودار طرح کلی فروپاشی ذرات τ^+ و θ^+

هستند. سپس کشف شد مدت زمانی که طول می‌کشد تا آن‌ها به سه π و دو π فروپاشی نمایند، تقریباً کاملاً یکسان است و آن‌ها زمان یکسانی عمر می‌کنند. سپس این کشف شد که هر زمان آن‌ها ایجاد شوند، با نسبت یکسان ایجاد می‌شوند، مثلاً ۱۴ درصد τ به ۸۶ درصد θ .

هر شخص خردمندی، فوراً متوجه می‌شود که آن‌ها باید ذره‌ای یکسان باشند، یعنی ما صرفاً یک شی را که دارای دو روش متفاوت فروپاشی است تولید می‌کنیم، نه دو ذره متفاوت. بنابراین این شی که می‌تواند به دو روش مختلف فروپاشی کند، طول عمر و نسبت تولید یکسان دارد (زیرا نسبت تولید به سادگی نسبت احتمال‌هایی است که ذره با آن به این دو نوع واپاشیده می‌شود).

اما با این وجود از اصل تقارن بازتاب در مکانیک کوانتومی ممکن بود خلاف آن را اثبات کنیم، این که غیرممکن است این‌ها هر دو از ذره‌ای یکسان ناشی شده باشند، و ذره‌ی یکسان نمی‌تواند به هر دوی این روش‌ها واپاشی نماید (و ما در اینجا اصلاً نمی‌توانیم در مورد چگونگی آن توضیح دهیم). قانون پایستگی متناظر با اصل تقارن بازتاب چیزی است که مشابه کلاسیک ندارد، و بنابراین این نوع پایستگی کوانتوم-مکانیکی، پایستگی پاریته نامیده می‌شد. بنابراین، این نتیجه‌ای از پایستگی پاریته، یا دقیق‌تر، تقارن معادلات کوانتوم-مکانیکی واپاشی‌های ضعیف تحت بازتاب بود، که ذره‌ی یکسان نمی‌تواند به هر دو مسیر برود، پس این باید نوعی انطباق تصادفی جرم‌ها، طول‌عمرها و غیره برای ذرات باشد. اما با مطالعه‌ی بیشتر، انطباق چشم‌گیرتر می‌شد و این تردید به تدریج زیاد می‌شد که احتمالاً قانون عمیق تقارن بازتاب طبیعت ممکن است نادرست باشد.

در نتیجه‌ی این شکست ظاهری، فیزیک‌دانان لی^{۶۷} و یانگ^{۶۸} پیشنهاد دادند که آزمایشات دیگری در واپاشی‌های مربوطه انجام شود تا بررسی گردد آیا این قانون در موارد دیگر درست است یا نه. اولین آزمایش این چینی توسط خانم وو^{۶۹} از کلمبیا طراحی، و به روش زیر انجام شد. با استفاده از یک آهنربای بسیار قوی در دمای بسیار پایین، معلوم می‌شود که ایزوتوپ معینی از کبالت^{۷۰}، که با گسیل یک الکترون فروپاشی می‌کند، مغناطیسی است و اگر دمای آن به اندازه‌ی کافی کم باشد که نوسانات حرارتی آهنرباهای اتمی را خیلی به ارتعاشات سریع تبدیل نکنند، آن‌ها در میدان مغناطیسی به صورت مرتب قرار می‌گیرند. بنابراین اتم‌های کبالت همه در این میدان قوی به صورت مرتب قرار می‌گیرند. سپس آن‌ها با گسیل الکترون فروپاشی می‌کنند، و کشف شده زمانی که اتم‌ها در یک میدان که جهت بردار B آن به سمت بالا می‌باشد به صورت مرتب قرار می‌گیرند، بیشتر الکترون‌ها در جهت پایین گسیل می‌شوند.

Wu^{۶۹}
cobalt^{۷۰}

Lee^{۶۷}
Yang^{۶۸}

اگر کسی واقعاً نسبت به جهان آگاه نباشد، چنین سخنی برای او اهمیتی ندارد، اما اگر کسی از مسائل و چیزهای جالب توجه جهان خوشش بیاید، در این صورت می‌بیند که این یک کشف بسیار مهیج است: وقتی ما اتم‌های کبالت را در یک میدان مغناطیسی بسیار قوی قرار می‌دهیم، بیشتر الکترون‌های فروپاشی به پایین می‌روند تا بالا. بنابراین اگر آن را در آزمایشی متناظر در یک «آینه» قرار دهیم، که در آن اتم‌های کبالت را در جهت مخالف به صورت مرتب قرار می‌دهند، آن‌ها الکترون‌هایشان را به بالا پرتاب می‌کنند، نه پایین؛ کنش نامتقارن است. آهنربا مو درآورده است! قطب جنوب آهنربا از آن نوعی است که الکترون‌ها در فروپاشی β تمایل دارند از آن دور شوند؛ این ویژگی، به روشی فیزیکی قطب شمال را از قطب جنوب متمایز می‌کند.

پس از این، بسیاری آزمایش‌های دیگر انجام شد: فروپاشی π به μ و ν ؛ به یک الکترون و دو نوترینو؛ امروزه، Λ به پروتون و π ؛ فروپاشی Σ ‌ها؛ و بسیاری فروپاشی‌های دیگر. در واقع کشف شده تقریباً در همه مواردی که می‌توان انتظار داشت، هیچکدام از واپاشی‌ها از تقارن بازتاب پیروی نمی‌کنند! اساساً قانون تقارن بازتاب، در این سطح در فیزیک، نادرست است.

به طور خلاصه می‌توانیم به مریخی بگوییم که قلب را در کجا قرار دهد. می‌گوییم، «گوش کن، خودت یک آهنربا بساز، و پیچه‌هایی را در آن قرار بده، و جریان را به آن اعمال کن، و سپس مقداری کبالت را بردار و دما را پایین بیاور. آزمایش را طوری ترتیب بده که الکترون‌ها از پا به سر بروند، در این صورت جهتی که جریان از میان پیچه‌ها عبور می‌کند، جهتی است که از آنچه ما سمت راست می‌نامیم وارد می‌شود و از سمت چپ خارج می‌شود.» بنابراین، اکنون با انجام آزمایشی از این نوع، تعریف کردن راست و چپ ممکن است.

ویژگی‌های بسیار دیگری وجود دارد که پیش‌بینی شده بودند. برای مثال، معلوم می‌شود که اسپین^{۷۱} یا تکانی زاویه‌ای^{۷۲} هسته‌ی کبالت قبل از فروپاشی ۵ واحد $\hbar$ است، و پس از فروپاشی ۴ واحد است. الکترون، تکانی زاویه‌ای اسپینی^{۷۳} حمل می‌کند، و یک نوترینو نیز دخیل است. از اینجا فهمیدن اینکه الکترون، همچنین نوترینو، باید تکانی زاویه‌ای اسپینی خود را همراه با جهت حرکت خود حمل کنند آسان است. پس به نظر می‌رسد الکترون به سمت چپ می‌چرخد، و این موضوع نیز تأیید شد. در واقع، این موضوع درست همین جا در دانشگاه کلک^{۷۴} توسط بوهم^{۷۵} و واپسترا^{۷۶} تأیید شد، که الکترون‌ها غالباً به چپ می‌چرخند. (تعدادی آزمایش‌های دیگر بودند که جواب متضاد دادند، اما آن‌ها اشتباه بودند!)

البته مشکل بعدی پیدا کردن قانون شکست پایداری پاریته بود. کدام قاعده به ما می‌گوید که این شکست چقدر قوی خواهد بود؟ قاعده این است: این شکست فقط در واکنش‌های بسیار آهسته، که واپاشی‌های ضعیف نامیده می‌شوند، اتفاق می‌افتد و زمانی که این اتفاق می‌افتد، قاعده این است که ذراتی که اسپین حمل می‌کنند، مانند الکترون، نوترینو، و غیره، با اسپین متمایل به چپ خارج می‌شوند. این قاعده‌ای کج^{۷۷} است، قاعده‌ای که سرعت برداری قطبی و تکانی زاویه‌ای برداری محوری را به هم مرتبط می‌کند، و می‌گوید که بیشتر احتمال دارد تکانی زاویه‌ای مخالف سرعت باشد تا اینکه درامتداد آن باشد.

Boehm^{۷۵}
Wapstra^{۷۶}
lopsided^{۷۷}

spin^{۷۱}
angular momentum^{۷۲}
spin angular momentum^{۷۳}
Caltech^{۷۴}

اکنون قاعده این است، اما امروزه ما واقعاً چراها و دلایل آن را درک نمی‌کنیم. چرا قاعده‌ی صحیح این است، دلیل اساسی آن چیست و چگونه به هر چیز دیگری مرتبط است؟ در این لحظه ما از این واقعیت که این چیزی نامتقارن است آنقدر شوکه شده‌ایم که قادر به تجدید قوای کافی برای درک اینکه این قاعده با توجه به سایر قاعده‌ها چه معنی می‌دهد نیستیم. با این حال، این موضوع جالب، مدرن و هنوز حل نشده است، بنابراین مناسب به نظر می‌رسد که در مورد برخی از سؤالات مرتبط با آن بحث کنیم.

۸.۵۲ پادماده

وقتی یکی از تقارن‌ها از دست رفته باشد، اولین کاری که باید انجام داد این است که بلافاصله به فهرست تقارن‌های شناخته‌شده یا پنداشته‌شده برگردیم و بررسی کنیم که آیا هیچکدام از تقارن‌های دیگر از دست رفته است؟ اکنون ما یک کنش^{۷۸} را در فهرست خود ذکر نکردیم، که اتفاقاً باید مورد سؤال قرار گیرد، و آن ارتباط بین ماده و پادماده است. دیراک^{۷۹} پیش‌بینی کرد که علاوه بر الکترون‌ها باید ذره‌ی دیگری نیز، به نام پوزیترون^{۸۰} (کشف شده در کلکت توسط اندرسون^{۸۱})، وجود داشته باشد که الزاماً مرتبط با الکترون است. تمام ویژگی‌های این دو ذره از قواعد تناظر معینی پیروی می‌کنند: انرژی‌ها برابر هستند؛ جرم‌ها برابر هستند؛ بارها قرینه هم هستند؛ اما مهم‌تر از هر چیز، وقتی این دو به هم می‌رسند، می‌توانند یکدیگر را نابود کرده و کل جرم خود را به شکل انرژی، مثلاً پرتوهای γ ، آزاد کنند. پوزیترون پادذره^{۸۲} الکترون نامیده می‌شود، این‌ها ویژگی‌های یک ذره و پادذره آن است. از استدلال دیراک واضح بود که بقیه‌ی ذرات در جهان نیز همگی باید پادذرات متناظر داشته باشند. به عنوان مثال، برای پروتون باید یک پادپروتون^{۸۳} وجود داشته باشد، که اکنون توسط نماد $\bar{P}$ مشخص شده است. $\bar{P}$ دارای بار الکتریکی منفی و جرم یکسان با پروتون، و مانند این‌ها می‌باشد. با این حال مهم‌ترین ویژگی این است که یک پروتون و یک پادپروتون که به هم می‌رسند می‌توانند یکدیگر را نابود کنند. دلیل اینکه ما بر این موضوع تأکید می‌کنیم این است که وقتی ما می‌گوییم یک نوترون و نیز پادنوترون^{۸۴} وجود دارد، مردم آن را درک نمی‌کنند، زیرا آن‌ها می‌گویند: «نوترون خنثی است، بنابراین چگونه می‌تواند بار مخالف داشته باشد؟» قاعده‌ی «پاد بودن»^{۸۵} فقط این نیست که بار مخالف داشته باشد، مجموعه‌ی معینی از ویژگی‌ها را دارد که همگی مخالف هستند. پادنوترون از نوترون به این روش متمایز می‌شود: اگر دو نوترون را به هم برسانیم، آن‌ها فقط به صورت دو نوترون باقی می‌مانند، اما اگر یک نوترون و یک پادنوترون را به هم برسانیم، آن‌ها یکدیگر را با یک انفجار بزرگ انرژی آزاد شده، با مزون‌های π گوناگون، پرتوهای γ ، و غیره، نابود می‌کنند.

حال اگر پادنوترون‌ها، پادپروتون‌ها و پادالکترون‌ها را داشته باشیم، اصولاً می‌توانیم پاداتم‌ها را درست کنیم. آن‌ها هنوز ساخته نشده‌اند، اما این کار اصولاً امکان‌پذیر است. به عنوان مثال، اتم هیدروژن یک پروتون در

^{۸۲} antiparticle
^{۸۳} antiproton
^{۸۴} antineutron
^{۸۵} rule of the “anti”

^{۷۸} operation
^{۷۹} Dirac
^{۸۰} positron
^{۸۱} Anderson

مرکز دارد با الکترونی که دور آن می‌چرخد. حالا تصور کنید که در جایی می‌توانیم یک پادپروتون با پوزیترونی که می‌چرخد درست کنیم، آیا می‌چرخد؟ خب، اول اینکه از نظر الکتریکی، پادپروتون منفی و پادالکترون مثبت است، بنابراین آن‌ها یکدیگر را متقابلاً جذب می‌کنند—جرم‌ها همه با اتم عادی یکسان هستند؛ همه چیز یکسان است. این یکی از اصول تقارن فیزیک است، به نظر می‌رسد معادلات نشان می‌دهند که اگر از یک طرف مثلاً یک ساعت از ماده ساخته شود، و سپس ما همان ساعت را از پادماده بسازیم، این ساعت به همان شکل کار می‌کند (البته اگر ساعت‌ها را کنار هم قرار دهیم، یکدیگر را نابود می‌کنند، اما این فرق می‌کند).

سپس فوراً یک سؤال به وجود می‌آید. ما می‌توانیم دو ساعت از ماده بسازیم، یکی «چپ‌گرد» و دیگری «راست‌گرد». برای مثال، ما می‌توانستیم ساعتی بسازیم که به روشی ساده ساخته نشده باشد، اما دارای کبالت و آهنرباها و آشکارسازهای الکترون است که حضور الکترون‌های واپاشی β را آشکار کرده و آن‌ها را شمارش می‌کند. هر بار که یک الکترون شمارش شود، عقربه ثانیه شمار حرکت می‌کند. پس ساعت آینه‌ای، با دریافت تعداد الکترون‌های کمتر، با همان آهنگ کار نمی‌کند. بنابراین به وضوح می‌توانیم دو ساعت را طوری بسازیم که ساعت چپ‌گرد با راست‌گرد منطبق نباشد. بگذارید از ماده، ساعتی بسازیم که آن را ساعت استاندارد یا راست‌گرد می‌نامیم. اکنون بیایید بازهم از ماده ساعت دیگری، که آن را ساعت چپ‌گرد می‌نامیم، بسازیم. ما اکنون دریافته‌ایم که به‌طور کلی این دو به یک روش کار نمی‌کنند؛ قبل از این کشف فیزیکی معروف، تصور می‌شد که آن‌ها به یک روش کار می‌کنند. همچنین تصور می‌شد که ماده و پادماده هم‌ارز^{۸۶} هستند. یعنی اگر ما یک ساعت پادماده‌ی راست‌گرد، به همان شکل درست کردیم، این ساعت مانند ساعت ماده‌ی راست‌گرد کار می‌کند، و اگر ما همان ساعت را چپ‌گرد بسازیم همان‌طور کار می‌کند. به عبارت دیگر، در ابتدا اعتقاد بر این بود که تمام این چهار ساعت یکسان هستند، البته اکنون می‌دانیم که ساعت راست‌گرد و چپ‌گرد ماده نیز یکسان نیست. بنابراین احتمالاً پادماده‌ی راست‌گرد و پادماده‌ی چپ‌گرد یکسان نیستند.

بنابراین سؤال واضح این است، هرکدام از ساعت‌ها با کدام ساعت دیگر هماهنگ می‌باشد؟ اگر چنین هماهنگی وجود داشته باشد. به عبارت دیگر، آیا ماده‌ی راست‌گرد به همان روش پادماده‌ی راست‌گرد رفتار می‌کند؟ یا ماده‌ی راست‌گرد همانند پادماده‌ی چپ‌گرد رفتار می‌کند؟ آزمایشات واپاشی β ، با استفاده از واپاشی پوزیترون به جای واپاشی الکترون، نشان می‌دهند که این ارتباط متقابل به این صورت است: ماده‌ی «راست‌گرد» مانند پادماده‌ی «چپ‌گرد» کار می‌کند.

بنابراین واقعاً صحیح است که، در طولانی مدت، تقارن راست و چپ هنوز هم حفظ می‌شود! اگر یک ساعت چپ‌گرد بسازیم، اما آن را از نوع دیگری از ماده، پادماده به جای ماده، بسازیم به همان روش کار می‌کند. پس چیزی که اتفاق افتاده این است که به جای داشتن دو قاعده‌ی مستقل در فهرست تقارن‌های ما، دو مورد از این قواعد برای ایجاد یک قاعده‌ی جدید متحد شده‌اند، که می‌گویید ماده‌ی «راست‌گرد» با پادماده‌ی «چپ‌گرد» متقارن است.

بنابراین اگر مریخی ما از پادماده ساخته شده باشد و ما به او دستوراتی را برای ساختن این الگوی «راست‌گرد

مانند خودمان بدهیم، در نهایت برعکس این مسئله از آب در می‌آید. وقتی بعد از تبادل گفتگوهای زیاد هرکدام از ما به دیگری آموخته‌ایم که سفینه بسازیم، و در نیمه راه فضای خالی همدیگر را ملاقات کنیم، چه اتفاقی می‌افتد؟ ما یکدیگر را به سنت‌های خود راهنمایی کرده‌ایم، و مانند آن، و سپس دو نفر از ما برای دست دادن با عجله بیرون می‌رویم. خب، اگر او دست چپ خود را دراز کرد، مراقب باش!

۹.۵۲ تقارن‌های شکسته‌شده^{۸۷}

سؤال بعدی این است که ما از قوانینی که تقریباً متقارن هستند، چه می‌توانیم بفهمیم؟ نکته‌ی شگفت‌انگیز درباره تمام این‌ها این است که برای چنین گستره‌ی وسیعی از پدیده‌های مهم و قوی—نیروهای هسته‌ای، پدیده‌های الکتریکی و حتی پدیده‌های ضعیف مانند گرانش—در سرتاسر گستره‌ی عظیمی از فیزیک، همه‌ی قوانین برای اینها متقارن به نظر می‌رسد. از طرف دیگر، این قطعه‌ی کوچک اضافی می‌گوید، «نه، قوانین متقارن نیستند!» چگونه است که طبیعت می‌تواند تقریباً متقارن باشد، اما نه کاملاً متقارن؟ از این چه می‌فهمیم؟ اول، آیا ما مثال‌های دیگری داریم؟ پاسخ این است که ما در واقع چند مثال دیگر داریم. برای نمونه، بخش هسته‌ای نیروی بین پروتون و پروتون، بین نوترون و نوترون، و بین نوترون و پروتون، همگی دقیقاً یکسان هستند—تقارنی برای نیروهای هسته‌ای وجود دارد، یک مورد جدید، که می‌توانیم نوترون و پروتون را با یکدیگر تبادل کنیم—اما بدیهی است که این تقارنی کلی نیست، زیرا رانش^{۸۸} الکتریکی بین دو پروتون با فاصله، برای نوترون‌ها وجود ندارد. بنابراین به‌طور کلی درست نیست که ما همیشه می‌توانیم پروتون را با نوترون جایگزین کنیم، بلکه فقط با تقریب خوبی درست است. چرا خوب؟ زیرا نیروهای هسته‌ای بسیار قوی‌تر از نیروهای الکتریکی هستند. پس این هم یک تقارن «تقریبی» است. بنابراین ما مثال‌هایی در موارد دیگر هم داریم.

ما در ذهن‌مان تمایل به پذیرش تقارن به عنوان نوعی از کمال داریم. اتفاقاً این مانند ایده‌ی قدیمی یونانیان است که دایره‌ها بی‌نقص هستند، و باور کردن اینکه مدارهای سیاره‌ها دایره نیستند، بلکه فقط تقریباً دایره‌اند، نسبتاً وحشتناک بود. تفاوت بین دایره بودن و تقریباً دایره بودن کوچک نیست، بلکه تا آنجا که به ذهن مربوط می‌شود، یک تغییر اساسی است. نشانه‌ای از کمال و تقارن در دایره وجود دارد که در لحظه‌ای که دایره کمی از شکل دایره خارج شود، دیگر وجود ندارد، این پایان آن است و این شکل دیگر متقارن نیست. پس سؤال این است که چرا مدار سیارات فقط تقریباً دایره است—این سؤال بسیار سخت‌تری است. به‌طور کلی حرکت واقعی سیارات باید بیضی باشد، اما به مرور زمان، به دلیل نیروهای جزر و مد و غیره، تقریباً متقارن شده‌اند. حال سؤال اینجاست که آیا ما در اینجا مسئله‌ی مشابهی داریم یا خیر. اینجا مسئله از منظر دایره‌ها این است که اگر آن‌ها دایره‌های کامل بودند، هیچ چیز برای توضیح وجود نداشت و مسئله به‌وضوح ساده بود. اما از آنجایی که آن‌ها فقط به‌طور تقریبی دایره هستند، چیزهای زیادی برای توضیح وجود دارد، و معلوم می‌شود نتیجه، یک مسئله بزرگ دینامیکی است و اکنون مسئله ما این است که با توجه به نیروهای جزر و مد و غیره توضیح دهیم

repulsion^{۸۸}Broken symmetries^{۸۷}

که چرا آن‌ها تقریباً متقارن هستند.

بنابراین مسئله ما توضیح این است که تقارن از کجا ناشی می‌شود. چرا طبیعت این چنین تقریباً متقارن است؟ هیچ کس ایده‌ای ندارد که چرا. تنها چیزی که ممکن است پیشنهاد دهیم چیزی شبیه این است: دروازه‌ای در نایکو^{۸۹} در ژاپن وجود دارد، که گاهی توسط ژاپنی‌ها زیباترین دروازه در کل ژاپن خوانده می‌شود، که در زمانی ساخته شده که تأثیر زیادی از هنر چینی وجود داشته است. این دروازه بسیار استادانه ساخته شده است، با شیروانی‌ها و دیوارهای سه گوش و کنده‌کاری‌های زیبای بسیار و ستون‌ها و سرازدها و شاهزاده‌های کنده‌کاری شده روی ستون‌های بسیار و غیره. اما وقتی انسان به دقت نگاه می‌کند، می‌بیند که در یک طرح استادانه و پیچیده، در امتداد یکی از ستون‌ها، یکی از عناصر کوچک طراحی وارونه حک شده است؛ در غیر این صورت این شیء کاملاً متقارن بود. اگر کسی بپرسد که چرا اینگونه است، داستان این است که این عنصر وارونه حکاکی شده است برای اینکه خدایان به کمال انسان حسادت نکنند. بنابراین آن‌ها عمداً خطایی در آنجا می‌گذارند تا خدایان نسبت به انسان‌ها حسادت نکنند و خشمگین نشوند.

شاید دوست داشته باشیم که این ایده را معکوس کنیم و فکر کنیم که توضیح درست تقارن تقریبی طبیعت این است که: خداوند قوانین را تقریباً متقارن وضع کرده است برای اینکه ما نباید به کمال او حسادت کنیم!

