

شناسنامه

The Feynman Lectures on Physics, Vol. 1, Ch. 16

درسنامه‌های فیزیک فاینمن، جلد ۱، فصل ۱۶

مترجم: نادر صفری‌نیا

ویراستار و حروفچین: علی باقری کوچکسرائی

نسخه‌ی ۱۰ بهار ۱۳۹۹

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.

www.Zharfa90.ir

این صفحه مخصوصاً خالی گذاشته شده است.

فصل ۱۶

تکانه و انرژی نسبیتی

۱۰.۱۶ فلاسفه و نسبیت

در این بخش، ما بحث در رابطه با اصل نسبیت انیشتین و پوانکاره را، به این دلیل که بر نظریات ما در رابطه با فیزیک و سایر شاخه‌های اندیشه‌ی بشری تأثیر گذاشته، ادامه خواهیم داد.

پوانکاره این جمله را در رابطه با اصل نسبیت بنانهاد: ”بنابر اصل نسبیت، قوانین پدیده‌های فیزیکی باید برای یک ناظر ثابت همانند ناظر دومی که حرکتی یکنواخت نسبت به ناظر اول دارد، باشد. بنابراین ما هیچ ابزاری برای فهم اینکه احتمالاً با چنین حرکتی همراه شده‌ایم نداریم و نمی‌توانیم داشته باشیم.“

زمانی که این ایده به جهانیان عرضه شد، سبب جنبشی عظیم در میان فلاسفه گردید. به‌خصوص فلاسفه‌ی ساده‌انگاری که می‌گویند: ”آه، این بسیار ساده است: نظریه انیشتین می‌گوید که همه چیز نسبی است.“ در حقیقت، تعداد وسیعی از فلاسفه، نه تنها کسانی که در مهمانی‌های ساده‌ی می‌خوارگی شرکت می‌کنند (اما به جای دستپاچه‌کردن آنان، تنها آنان را ”فلاسفه‌ی ساده‌لوح“ خواهیم نامید)، می‌گویند: اینکه همه چیز نسبی است از نتیجه‌گیری‌های انیشتین بوده و تأثیرات عمیقی بر روی نظرات ما دارد. به‌علاوه معتقدند: این موضوع در فیزیک اثبات شده است که یک پدیده بستگی به چارچوب مرجع شما دارد. ما این مطلب را زیاد می‌شنویم، اما مشکل است دریابیم که این جمله به چه معنی است. احتمالاً چارچوب مرجع که به آن اشاره شد، در اصل سیستم مختصات است که ما برای تحلیل نظریه‌ی نسبیت استفاده می‌کنیم. پس این حقیقت که ”همه چیز به چارچوب مرجع شما بستگی دارد“ به نظر می‌آید که تأثیر عمیقی روی افکار جدید داشته باشد. یک نفر ممکن است تعجب کند که چرا؟ زیرا گذشته از همه‌ی این مسائل، اینکه همه چیز به نقطه‌نظر یک شخص بستگی دارد، آنقدر نظر ساده‌ای است که قطعاً نیازی به وجود آن نبود تا تمامی مشکلات نظریه‌ی نسبیت را در راستای کشف خود، بر خود هموار نماید. این موضوع که هر آنچه یک شخص می‌بیند به چارچوب مرجع او بستگی دارد، قطعاً برای هر فرد عادی شناخته‌شده است، او نزدیک شدن یک عابر را ابتدا از روبه‌رو و سپس از پشت سر می‌بیند؛ در اینجا هیچ فلسفه‌ای عمیق‌تر از این بیان که ”یک شخص از روبه‌رو متفاوت دیده می‌شود تا از پشت سر“ وجود ندارد که گفته شده باشد که از نظریه‌ی نسبیت استنباط گردیده است. آن داستان قدیمی درباره فیلی که چندین آدم نابینا هر یک به‌گونه‌ای توصیفش می‌کردند، شاید یک مثال دیگری از نظریه نسبیت از دیدگاه فلاسفه باشد.

اما مطمئناً در اینجا باید یک مسئله‌ی عمیق‌تری در نظریه‌ی نسبیت باشد تا این گفته‌ی ساده که ”یک

شخص از روبه‌رو متفاوت دیده می‌شود تا از پشت سر". البته که نسبیت پیچیده‌تر از این است، به این دلیل که ما می‌توانیم پیش‌بینی‌های قطعی به وسیله‌ی آن انجام بدهیم. قطعاً این نظریه بیشتر قابل بیان می‌بود اگر ما می‌توانستیم پیش‌بینی‌هایی از رفتار طبیعت تنها از طریق همین مشاهده‌ی ساده بیان کنیم.

یک دسته‌ی دیگر از فلاسفه وجود دارند که نسبت به نظریه‌ی نسبیت حس ناخوشایندی دارند. نظریه‌ای که از این موضوع که ما نمی‌توانیم سرعت مطلق خود را بدون نگاه‌کردن به چیز خارجی بیان کنیم دفاع می‌کند. کسانی که معتقدند: "این واضح است که یک نفر نمی‌تواند سرعتش را بدون نگاه به خارج اندازه‌گیری کند. این امر به خودی خود واضح است که صحبت درباره‌ی سرعت چیزی بدون نگاه به بیرون بی‌معنی است؛ فیزیکدان‌هایی که به‌گونه‌ای دیگر فکر می‌کنند نسبتاً احمق هستند، اما در همین لحظه به ذهن آنان خطوط کرد که مسئله همین‌جا است. اگر فقط ما فلاسفه می‌فهمیدیم مشکلاتی که فیزیکدانان داشتند چه بود، می‌توانستیم با فکرکردن به سرعت به این نتیجه برسیم که این امر غیرممکن است که بگویید که شیء با چه سرعتی حرکت می‌کند، بدون آنکه به بیرون از آن توجه کنیم و در نتیجه ما می‌توانستیم یک سهم عظیم در فیزیک داشته باشیم." این فلاسفه همواره با ما هستند، در کنار ما همواره تقلاکنان تلاش می‌کنند تا به ما چیزی را بگویند، اما آنان هرگز به راستی متوجه عمق و دشواری مشکل نمی‌شوند.

عجز ما در رابطه با شناسایی حرکت مطلق، نتیجه‌ی تجربه‌ی ماست نه نتیجه‌ی یک فکر ساده، که ما به سادگی بتوانیم آن را بیان کنیم. در اولین قدم، نیوتون به این موضوع اعتقاد داشت که عدم توانایی یک شخص در بیان سرعت حرکتش اگر با یک سرعت یکنواخت بر روی خط راست در حال حرکت باشد، حقیقت دارد. در حقیقت نیوتون برای نخستین بار اصل نسبیت را اظهار داشت و نقل‌قولی که در بخش گذشته گنجانده شده است یک جمله از نیوتون می‌باشد. چرا تمامی این التهاب‌ها و نگرانی‌ها در رابطه با اینکه "همه چیز نسبی است" و یا هر چیزی شبیه به این در زمان نیوتون ایجاد نگردید؟ زیرا از زمان نظریه‌ی الکتروپوینامیک ماکسول بود که قوانین فیزیکی ایجاد گردید که پیشنهاد می‌کردند یک شخص می‌تواند سرعتش را بدون نگرستن به خارج اندازه‌گیری کند: خیلی زود به‌طور که این امر غیرممکن است.

حال، آیا به‌طور مطلق، قطعی و فلسفی لازم است که یک شخص نتواند بدون نگاه به خارج بگوید که با چه سرعتی در حال حرکت است؟ یکی از نتایج نظریه‌ی نسبیت پیشرفت اندیشه‌ی فلسفی بود که بیان می‌داشت، "شما تنها می‌توانید چیزی را تعریف کنید که بتوانید آن را اندازه‌گیری نمایید! به این دلیل که این امر به خودی خود مشهود است که یک شخص نمی‌تواند سرعت یک شیء را اندازه‌گیری کند بدون آنکه بنگرد آنچه او دارد اندازه می‌گیرد به چه چیزی مرتبط است، لذا روشن است که هیچ معنی و مفهومی برای سرعت مطلق وجود ندارد. فیزیکدانان باید متوجه می‌شدند که تنها می‌توانند در رابطه به اموری صحبت کنند که می‌توانند آنها را اندازه‌گیری نمایند." اما تمام مشکل این است: اینکه آیا یک شخص می‌تواند سرعت مطلق را تعریف کند یا خیر همانند این مشکل است که آیا یک شخص می‌تواند این را در یک آزمایش شناسایی کند یا خیر، بدون نگرستن به خارج، که آیا او در حال حرکت است. به عبارت دیگر اینکه آیا یک چیز قابل اندازه‌گیری هست یا خیر، امری نیست که با تفکر مجرد قبلی قابل تصمیم‌گیری باشد، بلکه چیزی است که تنها توسط تجربه قابل بیان است. با دانستن این حقیقت که سرعت نور ۱۸۶۰۰۰ مایل بر ثانیه است، یک شخص تعداد فلاسفه‌ی اندکی خواهند بود که با آرامش اظهار دارند این خود مشهود است که اگر نور با سرعت ۱۸۶۰۰۰ مایل بر ثانیه در داخل یک اتومبیل با سرعت ۱۰۰ مایل بر ثانیه در حال حرکت باشد، آنگاه نور با سرعت ۱۸۶۰۰۰ مایل بر ثانیه از کنار یک شخص ثابت بر روی زمین خواهد گذشت. این یک حقیقت تعجب‌برانگیز است: بسیار کسانی که ادعا می‌کنند این موضوع آشکارا پیداست، هنگامی که شما آنان را با یک واقعیت خاص روبه‌رو می‌کنید، درمی‌یابند که به هیچ‌وجه واضح نیست.

در نهایت، در اینجا حتی فلسفه‌ای وجود دارد که می‌گوید یک شخص هیچ حرکتی را بجز با نگاه‌کردن

به بیرون نمی‌تواند شناسایی کند. این موضوع به سادگی در فیزیک صادق نیست، در حقیقت، یک شخص نمی‌تواند یک حرکت یکنواخت روی خط راست را درک کند، اما اگر تمام فضا در حال چرخش بود، به سادگی آن را متوجه می‌شدیم، تمام موجودات به سمت کناره‌ها پرتاب می‌شدند. آنجا انواع تأثیرات گریز از مرکز وجود خواهد داشت. اینکه زمین روی مدارش در حال چرخش است، بدون نگرستن به ستاره‌ها قابل تشخیص است، به عنوان مثال توسط وسیله‌ای به نام آونگ فوکو، لذا، این درست نمی‌باشد که ”همه چیز نسبی است“. تنها سرعت یکنواخت است که بدون نگاه به خارج قابل شناسایی نیست. گردش یکنواخت روی یک مدار قابل شناسایی است. زمانی که این موضوع به یک فیلسوف گفته شود، او خیلی ناراحت می‌شود که این موضوع را متوجه نشد، زیرا برای او غیرممکن به نظر می‌آید که یک شخص باید بتواند گردش حول یک مدار را بدون نگاه کردن به خارج تشخیص دهد. اگر آن فیلسوف به اندازه‌ی کافی حرفه‌ای باشد، پس از طی مدت زمانی خواهد گفت: ”من متوجه شدم، ما واقعاً چیزی تحت عنوان چرخش مطلق نداریم؛ ما در واقع در حال چرخش نسبت به ستاره‌ها می‌باشیم. و بنابراین برخی تأثیراتی که توسط ستارگان بر روی یک شیء به‌کار برده می‌شود باید سبب این نیروی گریز از مرکز باشد.“

حال، ما می‌دانیم که این موضوع برای همه درست است؛ ما در حال حاضر هیچ راهی نداریم که بگوییم آیا نیروی گریز از مرکز همچنان وجود خواهد داشت اگر هیچ ستاره و یا سحابی در اطراف ما نبود. ما دارای این توانایی نیستیم که آزمایشی انجام دهیم و در آن سحابی‌ها را برداشته و سپس چرخشمان را اندازه‌گیری کنیم. پس به سادگی می‌گوییم، نمی‌دانیم. ما باید بپذیریم که ممکن است حق با فیلسوف باشد. او برمی‌گردد و با لذت می‌گوید: ”کاملاً ضروری است که در نهایت جهان این‌گونه باشد: چرخش مطلق معنایی ندارد؛ آن گردش فقط نسبت به سحابی‌ها است که معنی پیدا می‌کند.“ سپس ما خواهیم گفت: ”حال دوست من، آیا این واضح است که سرعت یکنواخت روی خط راست نباید هیچ اثری در داخل اتومبیل ایجاد کند یا خیر؟“ حالا، اینکه این حرکت دیگر مطلق نیست بلکه یک حرکت نسبت به سحابی‌ها است، تبدیل به یک مسئله‌ی رمزآلود شده است، سؤالی که تنها با آزمایش قابل پاسخ‌گویی است.

پس تأثیرات فلسفی نظریه نسبیت چیست؟ اگر ما خودمان را به تأثیرات نظریه نسبیت محدود کنیم به این معنی که چه نوع پیشنهادها و ایده‌های جدید توسط اصل نسبیت برای فیزیکدانان ایجاد شده است؛ توصیف ما برای برخی از آنان به شرح زیر است. اولین کشف این است که، در اصل، حتی آن نظراتی که برای مدت‌های مدیدی پابرجا بودند و به‌طور دقیق تأیید شده بودند ممکن است اشتباه باشند. این یک کشف اعجاب‌انگیز بود: بله، قوانین نیوتون اشتباه هستند، بعد از تمام سال‌هایی که به نظر آمد دقیق باشند. البته این روشن است که آزمایش‌های آنها اشتباه نبوده، بلکه آنها روی سطح محدودی از سرعت‌ها قابل اعتماد بودند، آنقدر کوچک که تأثیرات نسبیتی نباید مشهود باشند. اما با این وجود، ما اکنون نظر فروتنانه‌تری نسبت به قوانین فیزیکمان داریم – هر قانون فیزیکی‌ای می‌تواند اشتباه باشد!

در مرحله‌ی دوم، اگر ما یک نظریه‌ی ”عجیب و غریب“ داشته باشیم، همانند این نظر که وقتی یک شخص حرکت می‌کند، زمان برای او کندتر می‌گذرد، و غیره، این سؤال که آیا ما به این نظریات علاقه نشان می‌دهیم و یا نمی‌دهیم یک سؤال نامربوط است، تنها سؤال مرتبط این است که آیا این نظریات با آنچه که از طریق تجربه به‌دست آمده‌اند هم‌خوانی دارند یا خیر؟ به عبارت دیگر این ”نظریه‌ی عجیب و غریب“ تنها موافقت با تجربه را نیاز دارد و تنها دلیل اینکه ما باید در رابطه با رفتار زمان‌سنج‌ها و غیره بحث کنیم این است که نشان دهیم با وجود اینکه مفهوم گسترش زمان مفهومی عجیب است، آن مطابق با روشی است که ما زمان را اندازه‌گیری می‌کنیم.

در نهایت، در اینجا پیشنهاد سومی وجود دارد که اندکی فنی‌تر است اما تبدیل به سودمندترین ابزار ما در آموختن سایر قوانین فیزیک شده است، و آن این است که ما به تقارن قوانین بنگریم و یا، به‌طور ویژه‌تر، به دنبال راه‌هایی بگردیم که در آنها قوانین فیزیک بتوانند تبدیل شوند و شکلشان را به‌طور همزمان ترک کنند. زمانی که ما درباره‌ی نظریه‌ی بردارها صحبت می‌کنیم، متوجه می‌شویم که قوانین پایه‌ای حرکت، زمانی که ما سیستم مختصاتی را دوران می‌دهیم، تغییر نمی‌کنند، و حالا ما درمی‌یابیم زمانی که متغیرهای فضا و زمان را از یک طریق ویژه که تبدیل لورنتس نام دارد تغییر می‌دهیم، آنان تغییر نمی‌کنند. پس ثابت شده است این نظریه که مطالعه‌ی الگوها و یا عملگرها تحت شرایطی که قوانین پایه تغییر نکرده است می‌تواند بسیار مفید باشد.

۲۰۱۶ پارادوکس دوقلوها

در ادامه‌ی بحثمان در رابطه با تبدیل لورنتس و تأثیرات نسبیتی، ما یک به اصطلاح “تضاد” مشهور را در نظر می‌گیریم: “تضاد” پیترو و پاول، کسانی که فرض شده است، دوقلو هستند و در یک زمان به دنیا آمده‌اند. زمانی که آنقدر بزرگ شده‌اند که یک کشتی فضایی را برانند، پاول با سرعتی بسیار زیاد به سمت فضا پرواز می‌کند. به این دلیل که پیترو، کسی که روی زمین مانده است، پاول را می‌بیند که با سرعت در حال دور شدن است، از منظر پیترو به نظر می‌رسد که تمام ساعت‌های پاول به کندی حرکت می‌کنند. البته، پاول هیچ مسئله‌ی غیر معمولی را احساس نمی‌کند، اما اگر او به سفر برود و سفرش برای مدتی طولانی به درازا بینجامد و سپس به زمین برگردد، او جوان‌تر از پیترو خواهد بود. این موضوع در حقیقت درست می‌باشد؛ این موضوع یکی از نتایج نظریه‌ی نسبیت است که به صورت شفاف نشان داده شده است. درست شبیه به مزون‌های μ که وقتی حرکت کنند طولانی‌تر عمر می‌کنند، پاول هم زمانی که در حال حرکت است طولانی‌تر عمر می‌کند. این چیزی است که تضاد نامیده می‌شود البته تنها توسط مردمی که اعتقاد دارند اصل نسبیت یعنی آنکه هر چیزی نسبی است؛ آنها می‌گویند، “هه، هه، هه، از نقطه نظر پاول، آیا ما نمی‌توانیم بگوییم که پیترو در حال حرکت بوده و بنابراین سن او باید کمتر به نظر می‌رسد؟ با در نظر گرفتن تقارن، تنها نتیجه‌ی ممکن این است که هر دوی آنان باید یکدیگر را در یک سن ملاقات کنند.” اما به منظور اینکه آنان برگردند و مقایسه را انجام بدهند، پاول یا باید در انتهای سفرش توقف کند و مقایسه را انجام دهد و یا، به‌طور ساده‌تر، او باید برگردد، و کسی که برمی‌گردد باید کسی باشد که حرکت را آغاز نموده است و او از این مطلب آگاهی دارد، زیرا اوست که باید برگردد. زمانی که او برگشت، تمام اتفاقات غیرمنتظره در کشتی او روی می‌دهد – راکت‌ها به جای خود باز می‌گردند، اشیاء در مقابل دیوارها جمع می‌شوند و الی آخر – در حالی که پیترو هیچ چیز را احساس نمی‌کند.

بنابراین راه توضیح و شرح این قانون آن است که اظهار داریم مردی که شتاب را احساس کرده و دیده است همه چیز در مقابل دیوار قرار می‌گیرد و الی آخر، آن کسی است که جوان‌تر خواهد بود؛ این تفاوت بین آنها در یک مفهوم “مطلق” است، و این مطمئناً درست است. وقتی ما درباره‌ی این حقیقت که مزون‌های μ متحرک عمر طولانی‌تر دارند بحث می‌کنیم، حرکت روی خط راست آنها در داخل جو را به عنوان یک مثال استفاده می‌کنیم. اما ما قادریم که این مزون‌های μ را در داخل آزمایشگاه ایجاد کرده و سبب شویم که آنها توسط یک آهنربا در یک منحنی حرکت کنند و حتی تحت این حرکت شتابدار، آنها دقیقاً به بلندی زمانی که روی یک خط راست حرکت می‌کنند، دوام دارند. اگرچه هیچ کسی آزمایش صریحی را ترتیب نداده است که ما بتوانیم از این تضاد رهایی یابیم. اما هر کسی می‌تواند یک مزون μ را که در جایی ثابت

است با مزون μ دیگری که در حال چرخش به دور دایره است مقایسه کند، و او به‌طور قطع در خواهد یافت مزون μ ای که در حال چرخش است عمر طولانی‌تری دارد. اگرچه ما در حقیقت هنوز آزمایشی را با استفاده از یک دایره‌ی کامل انجام نداده‌ایم، این کار واقعاً نیاز نیست، البته، به این دلیل که همه چیز باهم مطابقت دارند. این موضوع ممکن است کسانی را که اصرار دارند هر حقیقت مجرد باید به‌صورت مستقیم نشان داده شود راضی ننماید، اما ما با اطمینان نتایج آزمایشی که در آن پاول روی یک دایره‌ای کامل حرکت می‌کند پیش‌بینی می‌نماییم.

۳.۱۶ تبدیل سرعت‌ها

تفاوت اصلی بین نسبیت انیشتین و نسبیت نیوتون در این است که قوانین تبدیلی که مختصات و زمان‌ها را بین سیستم‌های متحرک نسبی به هم مربوط می‌سازند در نسبیت انیشتین و نیوتون باهم تفاوت دارند، قانون تبدیل درست که به لورنتس تعلق دارد، بدین‌گونه است

$$\begin{aligned}x' &= \frac{x - ut}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}, \\y' &= y, \\z' &= z, \\t' &= \frac{t - ux/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}.\end{aligned}\tag{۱.۱۶}$$

این معادلات به مورد نسبتاً ساده‌ای مربوط‌اند که در آن حرکت نسبی ۲ مشاهده‌گر در راستای بردار x مشترک بین آنها است. البته سایر جهت‌های حرکت نیز امکان‌پذیر هستند، اما عمومی‌ترین تبدیل لورنتس با چهار کمیت که تمامشان باهم ترکیب شده‌اند نسبتاً پیچیده است. ما استفاده از این شکل ساده‌تر را ادامه خواهیم داد، زیرا تمامی ویژگی‌های ضروری نسبیت را داراست.

بیاید بیشتر درباره‌ی نتایج این تبدیل صحبت کنیم. در ابتدا، جالب است که ما این معادلات را به‌صورت معکوس حل کنیم که به این صورت است، در اینجا یکسری معادلات خطی موجودند، چهار معادله همراه با چهار مجهول، آنها می‌توانند به‌صورت معکوس حل شوند، برای x, y, z و t برحسب x', y', z', t' . نتیجه بسیار جالب است، زیرا به ما می‌گوید که یک دستگاه مختصات در حالت “ایستا” از منظر یک دستگاه مختصات “متحرک” چگونه به نظر می‌رسد. البته، چون که حرکات نسبی بوده و دارای سرعت یکنواخت می‌باشند، کسی که “متحرک” است، اگر مایل باشد، می‌تواند ادعا کند که طرف مقابل کسی است که متحرک بوده و او در حال ایستا می‌باشد، و چون او دارد در جهت مخالف حرکت می‌کند، باید تبدیل یکسانی را دریافت کند، اما با علامت سرعت مخالف، این دقیقاً چیزی است که ما با دستکاری درمی‌یابیم،

پس سازگار است. اگر آن نتیجه بدین نحو حاصل نمی‌گردید، ما علت واقعی برای نگرانی داشتیم!

$$\begin{aligned}x &= \frac{x' + ut'}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}, \\y &= y', \\z &= z', \\t &= \frac{t' + ux'/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}.\end{aligned}\quad (2.16)$$

سپس ما در رابطه با مشکل جالب سرعت‌های اضافی در نسبیت بحث می‌کنیم، حتی اگر آنان در حرکت‌های نسبی باشند، ما به یاد می‌آوریم که یکی از معماهای اصلی این بود که نور در همه‌ی دستگاه‌ها با سرعت ۱۸۶۰۰۰ مایل بر ثانیه حرکت می‌کند، این یک مورد ویژه از یک مشکل عمومی‌تر است که به صورت زیر ارائه گردیده است. در نظر آورید که یک شیء در داخل یک سفینه‌ی فضایی با سرعت ۱۰۰ مایل بر ثانیه حرکت می‌کند و خود سفینه‌ی فضایی نیز با سرعت ۱۰۰ مایل بر ثانیه در حال حرکت است؛ از نقطه نظر یک ناظر خارجی، شیء درون یک سفینه فضایی با چه سرعتی در حال حرکت است؟ ما ممکن است بگوییم ۲۰۰ مایل بر ثانیه، که سریع‌تر از سرعت نور است. این موضوع خیلی بی‌فایده است، زیرا قرار نیست که سریع‌تر از سرعت نور حرکت شود! مشکل کلی به شرح زیر است.

بیایید در نظر بگیریم که شیء موجود در داخل کشتی فضایی، از منظر یک شخص در داخل آن، با سرعت v در حال حرکت است، و خود سفینه‌ی فضایی هم نسبت به زمین دارای سرعت u است. ما می‌خواهیم بدانیم که این شیء از دید ناظر روی زمین با چه سرعت v_x ای در حال حرکت است. این هم البته، یک مورد خاص است که در آن حرکت در راستای محور x می‌باشد، در اینجا تبدیلاتی برای سرعت‌های در راستای محور y نیز خواهد بود، یا برای هر زاویه‌ای؛ اینها می‌توانند برای هر نیاز ما کارایی داشته باشند. در داخل سفینه‌ی فضایی سرعت $v_{x'}$ است، بدین معنا که جابه‌جایی در راستای x با ضرب سرعت در زمان است:

$$x' = v_{x'} t'. \quad (3.16)$$

حال تنها باید محاسبه کنیم که موقعیت و زمان از منظر یک ناظر خارجی برای یک شیء که دارای ارتباط (۲.۱۶) بین x' و t' است چه می‌باشد. پس به سادگی (۳.۱۶) را در (۲.۱۶) جایگذاری می‌کنیم و داریم:

$$x = \frac{v_{x'} t' + ut'}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}. \quad (4.16)$$

اما در اینجا درمی‌یابیم که x برحسب t' بیان شده است. به جهت اینکه سرعت مشاهده شده توسط شخص بیرون سفینه فضایی را دریابیم، باید فاصله‌اش را بر زمانش تقسیم کنیم، اما نه بر زمان شخص دوم! پس ما باید زمان دیده شده از خارج سفینه‌ی فضایی را هم بدین صورت محاسبه کنیم:

$$t = \frac{t' + u(v_{x'} t')/c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}. \quad (5.16)$$

حال باید نسبت x به t را بیابیم، که برابر است با:

$$v_x = \frac{x}{t} = \frac{u + v_{x'}}{1 + uv_{x'}/c^2}, \quad (6.16)$$

ریشه‌های دوم حذف شده‌اند، این قانونی است که ما به دنبال آن بودیم: سرعت حاصل، “جمع” دو سرعت، تنها جمع جبری دو سرعت نیست (ما می‌دانیم که این‌گونه نمی‌تواند باشد، یا در غیر اینصورت به مشکل برمی‌خورديم)، بلکه با عبارت $1 + uv/c^2$ “اصلاح” شده است.

حال، ببینیم چه اتفاقی روی می‌دهد. در نظر آورید که شما در داخل یک سفینه‌ی فضایی با سرعتی معادل نیمی از سرعت نور در حال حرکت هستید، و خود آن سفینه‌ی فضایی نیز با سرعتی معادل نیمی از سرعت نور در حال حرکت است. بنابراین u برابر $\frac{1}{2}c$ و v برابر $\frac{1}{2}c$ است، اما در مخرج uv برابر $1/4$ است و پس داریم:

$$v = \frac{\frac{1}{2}c + \frac{1}{2}c}{1 + \frac{1}{4}} = \frac{4c}{5}.$$

پس در نسبت، “نیم” و “نیم” “یک” را به وجود نمی‌آورند، تنها “ $5/4$ ” را ایجاد می‌کنند. البته سرعت‌های پایین با روشی مشابه به سادگی قابل اضافه کردن هستند. زیرا آنقدر که این سرعت‌ها در مقایسه با سرعت نور کوچک می‌باشند که ما می‌توانیم فاکتور $(1 + uv/c^2)$ را در نظر نیاوریم؛ اما همه چیز در سرعت‌های بالا کاملاً متفاوت و جالب خواهد بود.

بیایید یک مورد محدودکننده را در نظر بگیریم. صرفاً برای تفریح، در نظر آورید که یک شخص در داخل سفینه فضایی در حال حرکت با سرعت نور باشد. به عبارت دیگر، $v = c$ ، در عین حال سفینه‌ی فضایی در حال حرکت است. این صحنه از نظر شخصی بر روی زمین چگونه به نظر می‌آید؟ جواب برابر خواهد بود با:

$$v = \frac{u + c}{1 + uc/c^2} = c \frac{u + c}{u + c} = c.$$

لذا اگر چیزی در حال حرکت با سرعت نور در داخل سفینه‌ی فضایی باشد، از نظر شخصی که بر روی زمین قرار دارد هم به نظر خواهد رسید که در حال حرکت با سرعت نور است. این خوب است، زیرا، در حقیقت، این همان چیزی است که نظریه‌ی نسبیت انیشتین در مرحله‌ی اول قصد داشت انجام دهد. پس این نظریه عملکرد بهتری داشت!

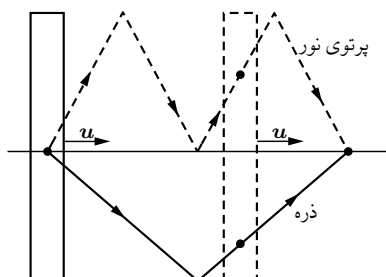
البته، مواردی هم وجود دارند که در آنها حرکت در راستای تبدیل یکنواخت نیست. به عنوان مثال، ممکن است یک شیء در داخل سفینه‌ی فضایی موجود باشد که فقط در حال حرکت “به طرف بالا” با سرعت $v_{y'}$ نسبت به سفینه‌ی فضایی، که در حال حرکت افقی است، باشد. حالا، به سادگی از همان روش قبلی استفاده می‌کنیم، تنها جایگذاری y به جای x و در نتیجه:

$$y = y' = v_{y'} t'$$

به طوری که اگر $v_{x'} = 0$ باشد، داریم:

$$v_y = \frac{y}{t} = v_{y'} \sqrt{1 - u^2/c^2}. \quad (7.16)$$

بنابراین سرعت دیگر $v_{y'}$ نیست بلکه $v_{y'} \sqrt{1 - u^2/c^2}$ می‌باشد. ما این نتیجه را با جایگذاری و ترکیب معادلات تبدیل به دست آوردیم، اما به دلیل زیر ما می‌توانیم نتیجه را به طور مستقیم از اصل نسبیت استخراج کنیم (این امر همیشه مفید است که ما نتیجه را دوباره بررسی کنیم و دریابیم که آیا می‌توانیم دلیل آن را پیدا کنیم یا خیر). ما قبلاً درباره این موضوع بحث کردیم (شکل ۳-۱۵) که چطور ممکن است یک زمان سنج



شکل ۱۰.۱۶: مسیرهای توصیف شده توسط پرتوی نور و ذرات درون یک ساعت متحرک.

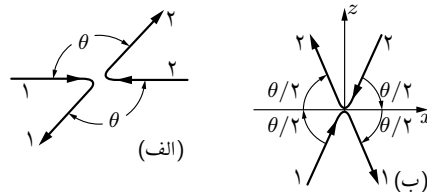
در حال حرکت کار بکند؛ چنین به نظر می‌رسد که نور با سرعت c با زاویه در یک سیستم ثابت حرکت کند، در حالی که به سادگی در یک سیستم متحرک با همان سرعت به صورت عمودی حرکت می‌کند. ما این را دریافته‌ایم که جزء عمودی سرعت در یک سیستم ثابت کمتر از سرعت آن نور با ضریب $\sqrt{1 - u^2/c^2}$ است (معادله‌ی ۳.۱۵ را ببینید). اما حالا فرض کنید که ما به ذره‌ای مادی اجازه دهیم که در یک چنین زمان‌سنجی به جلو و عقب حرکت بکند، اما برحسب تقریباً کسر صحیح $1/n$ از سرعت نور (شکل ۱۰.۱۶). پس زمانی که آن ذره یکبار به جلو و عقب برود، نور دقیقاً n بار این حرکت را انجام می‌دهد. به این معنی که هر "تیک" زمان‌سنج برای ذره با هر n "تیک" زمان‌سنج نوری مصادف خواهد شد. این حقیقت باید زمانی که کل سیستم در حال حرکت است نیز درست باشد. زیرا پدیده‌های هم‌رویداد فیزیکی در هر شرایطی مطابق خواهند بود. از این رو، به این دلیل که سرعت c_y کمتر از سرعت نور است، سرعت v_y ذره هم باید با همان نسبت ریشه‌ی دوم کمتر از سرعت مشابه باشد! این دلیل آن است که چرا ریشه‌ی دوم در هر سرعت عمودی ظاهر می‌شود.

۴.۱۶ جرم نسبیتی

ما در بخش قبل یاد گرفتیم که جرم یک شیء همراه با افزایش سرعت افزایش می‌یابد، اما هیچ‌گونه اثباتی برای آن ارائه نگردید. به این معنا که ما استدلالی مشابه با آنچه که در رابطه با نحوه‌ی رفتار زمان‌سنج ارائه کردیم، ارائه ننمودیم. اما ما می‌توانیم نشان دهیم، به عنوان نتیجه‌ای از نسبیت به همراه تعدادی فرضیات منطقی دیگر، که جرم باید بدین‌گونه تغییر نماید. (اگر انتظار داریم که استنباط‌های منطقی به وجود آوریم باید گفت "یک تعداد فرضیات دیگر" زیرا نمی‌توانیم هیچ چیزی را اثبات کنیم مگر اینکه قوانینی در اختیار داشته باشیم که فرض کنیم درست باشند). برای اجتناب از نیاز به آموختن قوانین تبدیل نیرو، ما یک برخورد را تحلیل خواهیم نمود، جایی که نیاز نداریم چیزی درباره‌ی قوانین نیرو بدانیم، بجز اینکه پایداری تکانه و انرژی را خواهیم پنداشت. همچنین، فرض خواهیم کرد که تکانه‌ی یک ذره که در حال حرکت است یک بردار بوده و همواره با جهت سرعت هم‌جهت می‌باشد. اما ما برخلاف نیوتون تصور نمی‌کنیم که تکانه یک ثابت زمانی در سرعت است، بلکه تنها در نظر می‌گیریم که آن تابعی از سرعت است. بنابراین ما بردار تکانه را برابر با ضریب زمانی مشخصی در بردار سرعت می‌نویسیم:

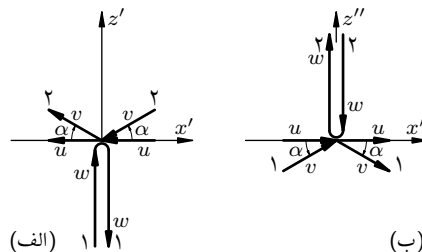
$$\mathbf{p} = m_0 \mathbf{v}. \quad (۸.۱۶)$$

ما یک اندیس v برای ثابت خود قرار می‌دهیم تا به ما یادآوری نماید که آن تابعی بر حسب سرعت است، و توافق می‌کنیم که ثابت m_v را “جرم” بنامیم. البته زمانی که سرعت کم است، این جرم همانی خواهد بود که ما در آزمایش‌های سرعت پایین اندازه می‌گرفتیم. حال سعی می‌کنیم اثبات نماییم که فرمول محاسبه‌ی m_v باید به صورت $m_0 / \sqrt{1 - v^2/c^2}$ باشد، با استفاده از این اصل نسبیت که قوانین فیزیک باید برای هر دستگاه مختصاتی یکسان باشند.



شکل ۲.۱۶: دو نمایش از یک برخورد کشسان بین دو شیء برابر که با سرعت‌های یکسان در جهت‌های مخالف حرکت می‌کنند.

فرض کنید که ما ۲ ذره را در اختیار داریم، مانند ۲ پروتون که کاملاً یکسانند، و با سرعت‌های برابر به سمت یکدیگر حرکت می‌کنند، جمع تکانه‌ی آنها صفر است. حال چه اتفاقی می‌تواند بیفتد؟ بعد از برخورد جهت حرکت آنها باید دقیقاً مخالف یکدیگر باشد، اگر دقیقاً مخالف یکدیگر نباشد، یک بردار تکانه‌ی نهایی غیرصفر وجود خواهد داشت، و تکانه پایسته نخواهد ماند، همچنین آنان باید سرعت‌های یکسانی داشته باشند، زیرا آنان اشیاء کاملاً شبیه به هم هستند؛ در حقیقت، آنان باید با سرعت‌های یکسانی شروع به حرکت کرده باشند، چون ما در نظر گرفته‌ایم که انرژی در این‌گونه برخوردها پایستار است. پس نمایی از این برخورد یکسان، برخورد برگشت‌پذیر، شبیه شکل ۲.۱۶ (الف) خواهد بود: تمام پیکان‌ها یک طول دارند، تمامی سرعت‌ها برابرند. ما فرض خواهیم کرد که یک چنین برخوردهایی همواره قابل چیده‌شدن هستند، به نحوی که برای هر زاویه θ قابل انجام هستند، و اینکه هر سرعتی در چنین برخوردی قابلیت استفاده کردن را داشته باشد. سپس توجهمان را به این نکته معطوف می‌نماییم که این برخورد می‌تواند با چرخاندن محورها به صورت دیگری هم نمایش داده شود، و فقط برای راحتی کار ما محورها را به نحوی می‌چرخانیم، که محور افقی آن را به ۲ قسمت مشابه تقسیم نماید، مانند آنچه که در شکل ۲.۱۶ (ب) نمایش داده شده است. این همان برخورد نمایش داده شده است، با این تفاوت که محورها چرخانده شده‌اند. حال نیرنگ واقعی همین‌جا است: بیایید به این برخورد از منظر کسی که در حال راندن یک ماشین با سرعتی برابر مؤلفه افقی سرعت یکی از آن دو ذره است، بنگریم. آنگاه این برخورد چگونه به نظر می‌رسد؟



شکل ۳.۱۶: دو منظره دیگر از برخورد، از خودروهای در حال حرکت

فصل ۱۶. تکانه و انرژی نسبیتی

این گونه که ذره فقط مستقیم به سمت بالا می رود، زیرا مؤلفه افقی خود را از دست داده است، و دوباره مستقیماً به سمت پایین می آید، باز هم به این دلیل که آن مؤلفه افقی را ندارد. این برخورد، همان گونه که در شکل ۳.۱۶ (الف) نشان داده شده است رخ می دهد. ذره ی ۲ اما، مسیر دیگری را طی می کند و به محض اینکه ما از کنار آن عبور می کنیم به نظر می رسد که آن ذره با سرعت فوق العاده زیاد و با یک زاویه ی کوچکی از کنار ما اوج می گیرد. اما می توانیم خرسند باشیم از اینکه زوایا قبل و بعد از برخورد با یکدیگر برابر هستند. بیایید با u مؤلفه ی افقی سرعت ذره ی ۲ را از مؤلفه ی قائم سرعت ذره ی ۱ که با w نشان می دهیم تفکیک کنیم.

حال سؤال این است که، مؤلفه ی عمودی سرعت $u \tan \alpha$ چه مقداری دارد؟ اگر آن را می دانستیم، می توانستیم بیان صحیحی از تکانه ارائه نماییم، با استفاده از قانون پایستگی تکانه در جهت عمودی، به وضوح مؤلفه ی افقی تکانه پایسته است: برای هر دو ذره قبل و بعد از برخورد مقدار یکسانی دارد، و برای ذره ی اول صفر است. پس نیاز داریم که قانون پایستگی را تنها برای سرعت بالاسوی $u \tan \alpha$ استفاده کنیم. اما ما قادریم این سرعت بالاسو را به راحتی با نگاه کردن به همان برخوردی که به نحوی دیگر صورت می گیرد به دست آوریم. اگر برخورد شکل ۳.۱۶ (الف) را از منظر یک ماشین که با سرعت u از سمت چپ شروع به حرکت می کند نگاه کنیم، همان برخورد را می بینیم، به استثنای "واژگونی"، همان چیزی که در شکل ۳.۱۶ (ب) نشان داده شده است. حال ذره ی دو، ذره ای می باشد که با سرعت w به سمت بالا و پایین حرکت می کند، و ذره ی یک در بردارنده ی سرعت افقی u است. البته، ما حالا می دانیم که سرعت $u \tan \alpha$ چه مقداری را دارد: این عبارت برابر $w \sqrt{1 - u^2/c^2}$ می باشد (معادله ی (۷.۱۶) را ببینید). می دانیم تغییر در تکانه عمودی یک ذره که دارای حرکت عمودی است برابر است با:

$$\Delta p = \gamma m_w w$$

(۲)، به این دلیل که آن ذره ابتدا به سمت بالا و سپس به سمت پایین حرکت می کند). ذره ای که به طور مورب حرکت می کند یک سرعت مشخص v دارد که مؤلفه هایش همان طور که ما آنها را پیدا کردیم u و $w \sqrt{1 - u^2/c^2}$ می باشد، و جرمش m_v است. از این رو تغییر در تکانه ی عمودی این ذره $\Delta p' = \gamma m_v w \sqrt{1 - u^2/c^2}$ است زیرا، در توافق با قانون از پیش پنداشتیمان (۸.۱۶)، مؤلفه ی تکانه همیشه برابر جرم متناظر با اندازه ی سرعت لحظه ای در مؤلفه ی سرعت در جهت مورد علاقه ی ماست. بنابراین برای اینکه تکانه ی کل صفر شود تکانه ی عمودی باید حذف گردد و نسبت جرمی که مربوط به حرکت با سرعت v است به جرمی که مربوط به حرکت با سرعت w است باید از اینرو برابر شود با

$$\frac{m_w}{m_v} = \sqrt{1 - u^2/c^2}. \quad (۹.۱۶)$$

بیایید مورد محدودتری را در نظر بگیریم که w بی نهایت کوچک است اگر w واقعاً کوچک باشد، واضح است که u و v عملاً باهم برابرند. در این مورد $m_w \rightarrow m_u$ و $m_v \rightarrow m_o$. نتیجه مهم این است که:

$$m_u = \frac{m_o}{\sqrt{1 - u^2/c^2}}. \quad (۱۰.۱۶)$$

این یک تمرین جالب است بررسی کنیم که آیا معادله ی (۹.۱۶) واقعاً برای هر مقدار اختیاری w ، با فرض اینکه معادله (۱۰.۱۶) فرمول درستی برای جرم باشد، صادق است یا خیر. توجه کنید که سرعت v مورد

نیاز در معادله‌ی (۹.۱۶) می‌تواند از طریق مثلث قائم‌الزاویه اندازه‌گیری شود:

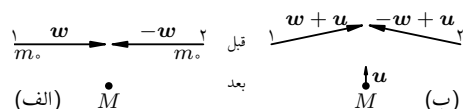
$$v^2 = u^2 + w^2 (1 - u^2/c^2).$$

این معادله به صورت خودبه‌خود واری خواهد شد، اگرچه ما آن را در حد سرعت‌های پایین w استفاده خواهیم نمود.

حالا، بیایید قبول کنیم که تکانه پایستار بوده و جرم مطابق معادله‌ی (۱۰.۱۶) به سرعت بستگی دارد، و به دنبال این برویم که چه چیز دیگری را می‌توانیم محاسبه کنیم. بیایید به این موضوع رسیدگی کنیم که به طور عمومی به چه چیزی تکانه‌ی غیرکشسان اطلاق می‌گردد. برای سادگی کار، در نظر می‌گیریم که دو شیء از یک نوع، با سرعت برابر w در جهت مخالف هم حرکت می‌کنند، به یکدیگر برخورد کرده و به هم چسبیده، به یک شیء تازه و ساکن تبدیل می‌شوند همان طور که در شکل ۴.۱۶ (الف) نشان داده شده است. جرم m هر کدام از آنها بر حسب w همان طور که می‌دانیم، برابر $m_0/\sqrt{1 - w^2/c^2}$ است. اگر پایستگی تکانه و اصل نسبیت را در نظر بگیریم، می‌توانیم یک حقیقت جالب را در رابطه با شیء جدیدی که به وجود آمده نشان دهیم. یک سرعت u بی‌نهایت کوچک که با w زاویه قائمه می‌سازد را در نظر می‌گیریم (ما قادریم همین کار را با مقادیر متناهی u انجام دهیم، اما درک کردن با سرعت بی‌نهایت کوچک آسان‌تر است)، سپس به چنین برخوردی از دید کسی که در یک آسانسور با سرعت $-u$ در حال حرکت است نگاه می‌کنیم. آنچه که ما می‌بینیم در شکل ۴.۱۶ (ب) نشان داده شده است. شیء مرکب یک جرم ناشناخته‌ی M دارد. حال، شیء ۱ با یک مؤلفه‌ی بالاسو با سرعت u و یک مؤلفه‌ی افقی که عملاً برابر w است شروع به حرکت می‌کند، شیء ۲ نیز با همین شرایط شروع به حرکت می‌کند. بعد از برخورد، جرم m با سرعت u به سمت بالا در حال حرکت است، که در مقایسه با سرعت نور و همچنین w بسیار کوچک در نظر گرفته شده است، تکانه باید پایسته باشد، پس اجازه بدهید که تکانه در جهت بالاسو را قبل و بعد از برخورد تخمین بزنیم. قبل از برخورد ما داریم $p \approx 2m_w u$ و بعد از برخورد تکانه از قرار معلوم $p' = M_u u$ است، اما M_u ضرورتاً برابر M است، زیرا u بسیار کوچک می‌باشد این تکانه‌ها باید به دلیل پایستگی برابر باشند و لذا

$$M_0 = 2m_w. \quad (۱۱.۱۶)$$

جرم شیئی که شکل گرفته زمانی که ۲ شیء به هم برخورد می‌کنند باید ۲ برابر جرم یکی از آن ۲ شیء که به هم برخورد کرده‌اند باشد. ممکن است بگویید "بله، البته، این نشان‌دهنده‌ی پایستگی جرم است." درست است اما غیر از گفتن ساده‌ی "بله، البته"، زیرا به جرم آنها افزوده شده است و جرم آنها بیشتر از جرمی است که در حالت سکون دارند، هنوز هم آنها باهم ترکیب می‌شوند تا به جرم نهایی M برسند، اما نه با جرمی که آنان در حالت سکون دارند، بلکه بیشتر. ممکن است گیج‌کننده به نظر بیاید، به منظور اینکه پایستگی تکانه عملی باشد زمانی که ۲ شیء به یکدیگر می‌رسند، جرم شیئی که آنان شکل می‌دهند باید بیشتر از باقیمانده جرم آن ۲ شیء باشد، اگرچه اشیاء بعد از برخورد ساکن باقی بمانند!



شکل ۴.۱۶: دو منظره از برخورد غیرکشسان بین اشیاء هم جرم

۵.۱۶ انرژی نسبیتی

ما در بخش پیش ثابت کردیم که به عنوان نتیجه وابستگی جرم به سرعت در قوانین نیوتون درمی یابیم که تغییرات در انرژی جنبشی یک شیء در نتیجه کار کل انجام شده نیروها روی آن برابر است با

$$\Delta T = (m_u - m_0) c^2 = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - u^2/c^2}} - m_0 c^2. \quad (۱۲.۱۶)$$

ما حتی پیش تر رفتیم و حدس زدیم که انرژی کل برابر جرم بر حسب زمان در c^2 است. حال این بحث را ادامه می دهیم.

فرض کنید دو شیء هم جرم ما که به یکدیگر برخورد کرده اند هنوز هم در داخل M "قابل دیدن" باشند. برای مثال یک پروتون و یک نوترون به یکدیگر "متصل" شده اند، اما هنوز در حال چرخیدن در درون M هستند. پس، اگرچه در ابتدا ممکن است انتظار داشته باشیم که جرم M برابر $2m_0$ باشد، ما به این موضوع پی برده ایم که جواب $2m_0$ نیست، بلکه $2m_w$ است. با وجود اینکه $2m_w$ چیزی است که در این موضوع نقش داشته، اما $2m_0$ جرم باقیمانده ی اشیائی هستند که در درون M قرار دارند، جرم اضافی شیء مرکب برابر انرژی جنبشی است که وارد کار شده است. البته، این بدین معناست که انرژی سکون دارد. ما در فصل گذشته درباره ی گرم شدن گازها بحث کردیم، نشان دادیم که چون مولکول های گاز در حال حرکت بوده و اشیاء متحرک سنگین تر هستند، زمانی که ما به یک گاز انرژی می دهیم، مولکول هایش سریع تر حرکت کرده پس گاز سنگین تر می شود. اما در حقیقت این بحث کاملاً عمومی است، و بحث ما در مورد برخوردهای ناکشسان نشان می دهد که جرم آنجا موجود است، چه نیروی جنبشی باشد و چه نباشد. به عبارت دیگر، اگر دو ذره به یکدیگر برسند و انرژی پتانسیل و یا هر نوع دیگری از انرژی تولید کنند؛ اگر سرعت قطعه های مختلف با صعود از ارتفاع ها و یا کارکردن در جهت مخالف نیروهای درونی یا هر چیز دیگری کم بشود، این امر هنوز هم درست است که جرم برابر انرژی کل که مداخله کرده است می باشد. پس مشاهده می کنیم پایداری جرمی که آن را در بالا استنباط کردیم با پایداری انرژی هم ارز است، و لذا جایی در نظریه ی نسبیت به طور دقیق برخلاف مکانیک نیوتونی، در نظریه نسبیت جایی برای برخورد غیرکشسان وجود ندارد. بنابر مکانیک نیوتونی این امر درست است حالتی که دو شیء به هم برخورد کرده و سپس یک شیء با جرم $2m_0$ را شکل می دهند اصلاً با حالتی که از اتصال آرام آن ۲ شیء حاصل می شود تفاوت ندارد. البته باز هم از قانون پایداری انرژی می دانیم که انرژی جنبشی در حالت اول بیشتر است، اما بنابر قانون نیوتونی بر جرم تأثیر نمی گذارد. اما حالا درمی یابیم که این موضوع غیرممکن است؛ به دلیل انرژی جنبشی که در این برخورد درگیر شده است، شیء حاصله سنگین تر خواهد بود؛ لذا شیء دیگری خواهد شد. وقتی که ما به آرامی آن دو شیء را به یکدیگر متصل می کنیم آنان چیزی را می سازند که جرمش $2m_0$ است. وقتی که با اعمال نیرو آن دو را به یکدیگر متصل می کنیم، آنها چیزی را می سازند که جرمش بزرگتر است. زمانی که جرم تفاوت داشته باشد، ما می توانیم بگوییم که آن شیء تفاوت دارد. پس، لزوماً، پایداری انرژی در نسبیت باید همراه

پایستگی تکانه باشد.

این موضوع نتایج جالبی را در بر دارد. برای مثال، در نظر آورید که ما یک شیء داریم که جرمش M اندازه‌گیری شده است. فرض کنید اتفاقی می‌افتد که آن شیء به ۲ قسمت یکسان که با سرعت w حرکت می‌کنند تقسیم می‌شود، به‌طوری که هر کدام از آنها جرم m_w دارند. حال در نظر آورید که این قسمت‌ها با اندازه کافی ماده مواجه شوند که سرعت آنان را کم می‌کند تا اینکه بایستند؛ پس آنان جرم m_0 را خواهند داشت. چه مقدار انرژی به آن مواد داده خواهد شد زمانی که آن تکه را متوقف کرده‌اند؟ هرکدام مقدار $c^2(m_w - m_0)$ را خواهند داد، طبق قضیه‌ای که قبلاً ثابت کردیم. این مقدار انرژی در آن مواد به‌صورت اشکالی مانند گرما، انرژی پتانسیل و یا هر چیز دیگر باقی می‌ماند. حالا $2m_w = M$ ، پس انرژی آزاد شده برابر $E = (M - 2m_0)c^2$ است. برای مثال این معادله برای تخمین مقدار انرژی که در شکافتن هسته اتم در بمب اتم آزاد خواهد شد استفاده می‌شده است. (اگرچه تکه‌ها کاملاً یکسان نیستند، تقریباً برابرند.) جرم اتم اورانیوم شناخته شده بود - پیش تر از این اندازه‌گیری شده بود - و اتم‌هایی که اورانیوم پس از شکافتن به آنها تبدیل شده یعنی ید و زنون و غیره، همگی جزء اتم‌هایی بودند که جرمشان اندازه‌گیری شده بود، با گفتن جرم، منظور ما جرمی نیست که آنان در حال حرکت دارند، منظور ما جرمی است که آنان در هنگام توقف دارا می‌باشند، به عبارت دیگر هر دوی M و m_0 شناخته شده هستند. پس با جایگذاری این دو عدد هر کسی می‌تواند اندازه‌گیری نماید که چه مقدار انرژی آزاد خواهد شد اگر بتوان M را مجبور کرد که به "دو نیم" تقسیم شود. به همین دلیل انیشتین بیچاره به عنوان "پدر" بمب اتمی در تمام روزنامه‌ها معرفی گردید. البته، تمام قصد او این بود که جلوتر از زمان خود به ما بگوید که چه مقدار انرژی آزاد خواهد شد اگر ما به او بگوییم که چه فرآیندی روی می‌دهد. انرژی که باید آزاد گردد زمانی که یک اتم اورانیوم دچار شکافت هسته‌ای می‌شود ۶ ماه قبل از اولین آزمایش مستقیم تخمین زده شده بود و به محض اینکه این انرژی به‌طور واقعی آزاد شد، یک نفر آن را مستقیماً اندازه‌گیری کرد (و اگر فرمول انیشتین کار نکرده بود، آنان در هر صورت آن را اندازه‌گیری می‌کردند)، و لحظه بعد از اندازه‌گیری دیگر به آن فرمول نیازی نداشتند. البته، ما نباید انیشتین را کوچک کنیم، بلکه باید از این روزنامه‌ها و توصیفات عامیانه از چیزهایی که سبب آنچه در تاریخ فیزیک و تکنولوژی گردید، انتقاد نماییم. مشکل اینکه چطور یک شیء را مجبور به رویدادن در یک مسیر ویژه و در یک شیوهی سریع بکنیم، کاملاً مسئله‌ی متفاوتی می‌باشد.

این نتیجه همان قدر در شیمی اهمیت دارد. به عنوان مثال، اگر ما قادر بودیم که کربن دی‌اکسید را وزن کنیم و جرم کربن و اکسیژن مقایسه کنیم، قادر بودیم دریابیم زمانی که کربن و اکسیژن، کربن دی‌اکسید را شکل می‌دهند چه مقدار انرژی آزاد خواهد شد. تنها مشکل در اینجا این است که تفاوت‌ها در اجرام آنقدر کوچک است که انجام این کار به‌طور فنی بسیار مشکل می‌باشد.

حالا بیایید به این سؤال برگردیم که آیا ما باید $m_0 c^2$ را به انرژی جنبشی اضافه کرده و از هم اکنون بگوییم که انرژی کل یک شیء mc^2 است. در ابتدا، اگر هنوز بتوانیم جرم باقیمانده‌ی m_0 قطعات جزئی درون M را ببینیم، پس می‌توانیم بگوییم که قسمتی از جرم M شیء مرکب برابر جرم باقیمانده‌ی مکانیکی اجزاء مختلف، قسمتی از آن انرژی جنبشی اجزاء مختلف و قسمتی از آن انرژی پتانسیل اجزاء مختلف است. اما ما کشف کرده‌ایم، در طبیعت، ذراتی از انواع مختلف تحت تأثیر واکنش‌هایی درست شبیه آنچه که در بالا بحث کردیم، قرار می‌گیرند که با وجود تمام مطالعات در تمام نقاط جهان، ما نمی‌توانیم اجزاء درونشان را ببینیم. برای مثال زمانی که مزون K به دو پيون تجزیه می‌شود آن کار را بر اساس قانون (۱۱۰۱۶) انجام می‌دهد، اما این نظر که K از 2π اش سر در آورده است یک نظر بی‌فایده است، زیرا آن همچنین به 3π اش

فصل ۱۶. تکانه و انرژی نسبیتی

هم تجزیه می‌شود.

لذا ما یک نظر جدید داریم: ما نباید بدانیم که اشیاء از چه چیزهایی در درونشان ساخته شده‌اند؛ ما قادر نیستیم و نیازی هم نداریم که تشخیص بدهیم، در درون یک ذره، کدام انرژی، انرژی باقیمانده‌ی اجزاء مختلف است و به چه چیزی تجزیه خواهد شد. این راه درستی نیست و اغلب ممکن نیست که انرژی mc^2 کل یک شیء را به باقیمانده‌ی انرژی تکه‌های درونی‌اش، انرژی جنبشی آن تکه‌ها، و انرژی پتانسیل آن تکه‌ها تقسیم کنیم؛ به جای آن ما به سادگی از انرژی کل یک ذره صحبت می‌کنیم، ما "منشأ انرژی را تغییر می‌دهیم" با اضافه کردن ثابت $m_0 c^2$ به هر چیز، و می‌گوییم که انرژی کل یک ذره برابر جرم ذره در حال حرکت در c^2 است و زمانی که آن ذره ساکن ایستاده است، انرژی برابر جرم ذره در حالت ایستا در c^2 است.

در نهایت، ما درمی‌یابیم که سرعت v ، تکانه‌ی P و انرژی کل E به یک راه نسبتاً ساده‌ای به یکدیگر مرتبط‌اند. اینکه جرم در حال حرکت با سرعت v برابر جرم m_0 در حالت ایستا تقسیم بر $\sqrt{1 - v^2/c^2}$ می‌باشد، به اندازه‌ی کافی شگفت‌انگیز است، اما به ندرت استفاده می‌شود. به جای آن، روابط زیر به راحتی اثبات شده، و به معادلات بسیار مفیدی تبدیل شده‌اند:

$$E^2 - P^2 c^2 = m_0^2 c^4 \quad (13.16)$$

و

$$Pc = Ev/c. \quad (14.16)$$

Summary Lect 16. Mom + Energy in Rel.

If A moves u_1 relative to B, and B moves u_2 rel to C, then A moves $\frac{u_1 + u_2}{1 + u_1 u_2 / c^2}$ rel to C

In Rel. collision Mom. + Energy (including rest energy) are both conserved.

$$E_{(total)} = \frac{m_0 c^2}{\sqrt{1 - v^2/c^2}} = m_v c^2 ; \quad \vec{P} = m_v \vec{v} = \frac{E}{c^2} \vec{v}$$

$$\frac{E^2}{c^4} - \frac{P^2}{c^2} = m_0^2$$