



ان‌شکل ساده‌ی پایستگی انرژی

نویسنده: یوجین هشت
ترجمه: معصومه قاسمی

بیان استاندارد پایستگی انرژی دربرگیرنده‌ی مفاهیم فرعی مانند انرژی جنبشی (KE)، کار (W)، انرژی گرمایی، انرژی داخلی و نیم دوجین انواع مختلف انرژی پتانسیل (PE) از قبیل کشسانی، شیمیایی، هسته‌ای گرانشی و... است. این کمیت‌ها طی دورانی که در آن این اصول گسترش یافته، شناخته شده‌اند. قانون پایستگی نهایی با این که دارای دقت مناسب است، اما باز نسبتاً پیچیده است. مهم‌تر از همه، این قانون سادگی نهفته‌ی زیربنایی را که فقط در دوران پس از نسبیت (۱۹۰۵) می‌توانست درک شود، نادیده می‌گیرد. انرژی معیار نرده‌ای تغییر فیزیکی است. با استفاده از نظریه‌ی نسبیت خاص می‌توان نشان داد که تنها دو طبقه‌بندی کاملاً فراگیر از انرژی وجود دارد: **انرژی سکون و انرژی حرکت** و می‌توان مفهوم پایستگی انرژی را تنها با استفاده از دو نوع انرژی که با کمیت‌های جرم و KE (انرژی جنبشی) کمی می‌شوند، در تمام فرایندهای فیزیکی به کار برد.

انرژی سکون و انرژی حرکت

دینامیک نسبیتی به چندین روش مختلف تفسیر شده است؛ در اینجا رهیافت جدیدتری را به کار می‌بریم که در آن جرم (m) ناوردای لورنتس است [۱]. یکی از نتیجه‌های کلی نظریه‌ی نسبیت خاص این است که کل انرژی یک دستگاه فیزیکی برابر با $E = E_0 + KE = \gamma mc^2$ و $\gamma = (1 - v^2/c^2)^{-1/2}$ است. در نتیجه، انرژی کل یک ذره یا مجموعه‌ای از ذرات - یک اتم یا یک آوکادو - برابر با انرژی سکون ($E_0 = mc^2$) و انرژی جنبشی (KE) آن است. جمله‌ی E_0 انرژی سکون دستگاه است. این انرژی شامل: الف) جرم ذره‌های آزاد تشکیل دهنده‌ی دستگاه، ضرب در c^2 ، و، ب) انرژی‌های پتانسیل (مثبت یا منفی) تمام اعضای برهم‌کنش‌کننده‌ی دستگاه، و ج) مجموع انرژی‌های جنبشی تمام ذره‌های تشکیل دهنده است که اغلب به صورت نامنظم در دستگاه حرکت می‌کنند [۲]. E_0 برخلاف انرژی داخلی ترمودینامیکی، شامل انرژی جرم تمام ذره‌های تشکیل دهنده است. عبارت $E_0 = mc^2$ نشان می‌دهد که انرژی سکون دستگاه به مثابه‌ی انرژی جرم خالص آن در نظر گرفته می‌شود. منظور از KE در فرمول E انرژی جنبشی سازمان‌یافته‌ی دستگاه به صورت یک پارچه است $(KE = \gamma mc^2 - mc^2)$.

بدون توجه به مشخصات فرمول‌بندی نسبیت [۱]، فرض می‌کنیم انرژی داخلی در جرم دستگاه است؛ در نتیجه، ترکیب الکترون و پوزیترون برای تشکیل پوزیترونیم باعث کاهش $6/18 \text{ eV}/c^2$ از جرم بر اثر برهم‌کنش الکترومغناطیسی می‌شود. وقتی اتم فوتونی را جذب می‌کند و به حالت برانگیخته می‌رود، جرم اتم به اندازه‌ی $h\nu/c^2$ افزایش می‌یابد. به همین ترتیب، کوک کردن ساعت سبب افزایش جرم آن و سرد کردن قوطی نوشابه سبب کاهش جرم آن می‌شود. این اثرها معمولاً جزئی هستند، اما وجود دارند و از دید فیزیکی و فلسفی دارای اهمیت زیادی هستند.

گرما، کار و فوتونها

انرژی به راه‌های مختلف (مثلاً از طریق گرما، کار و تابش الکترومغناطیسی) از دستگاهی، به دستگاه دیگر منتقل می‌شود [۳]. هر کدام از سازوکارها را می‌توان به‌عنوان انتقال جرم، انرژی جنبشی (KE) یا هر دو در نظر گرفت. انرژی جنبشی کاتوره‌ای ذره‌های تشکیل‌دهنده دستگاه، انرژی گرمایی نامیده می‌شود. گرما انتقال انرژی (از طریق برخوردهای ذرات) از دستگاه در دمای بالاتر به دستگاه با دمای پایین‌تر و در تماس با آن است. نسبت مستقل از چگونگی بیان آن - مدت‌هاست که مشخص کرده است که انرژی گرمایی مستقیماً با جرم دستگاه در ارتباط است [۴]. برای مثال، برای افزایش دمای آب به اندازه $1/0^{\circ}\text{C}$ ، $1/0\text{ kcal}$ یا $4/186\text{ kJ}$ انرژی گرمایی به آن اضافه شود و در نتیجه جرم آب به اندازه $4/66 \times 10^{-14}\text{ kg}$ $= 4/66 \times 10^{-14}\text{ kg}$ (که البته مقدار زیادی نیست) افزایش می‌یابد. تغییر انرژی گرمایی به صورت تغییر جرم نمایان می‌شود.

بسته به شرایط فیزیکی، انجام دادن کار روی یک جسم یا توسط آن سبب تغییر جرم یا انرژی جنبشی، یا هر دو می‌شود. معمولاً وقتی فنر ساکنی را متراکم می‌کنیم و می‌گوییم که انرژی پتانسیل کشسانی آن افزایش یافته است. در این حالت گرم شدن اندک فنر واقعی که ناشی از اصطکاک داخلی آن است نادیده گرفته می‌شود. با وجود این، اگر کار انجام شده روی فنر W باشد، جرم آن به اندازه $\Delta m = W/c^2$ افزایش می‌یابد [۵]؛ «اتلاف ناشی» از اصطکاک ΔPE هر دو در Δm سهیم‌اند.

وقتی سوپرمن روی یک «قطار پرسرعت» کار منفی انجام می‌دهد و باعث کاهش سرعت آن می‌شود، تغییر انرژی جنبشی قطار $-W$ است. لوکوموتیو روی «مرد فولادین» کار مثبت انجام می‌دهد و طبق پایستگی انرژی جرمش به اندازه $\Delta m = \Delta KE/c^2$ افزایش می‌یابد. اینکه او چگونه این کار را انجام می‌دهد، مسئله‌ای دیگری است. با کشیدن زه کمان مقداری از جرم شما به کمان منتقل می‌شود. اگر تیری را در فضایی رها کنید که نیروی دیگری به آن وارد نشود، به علت کاری که کمان روی تیر انجام می‌دهد، انرژی جنبشی تیر و در نتیجه جرم آن افزایش می‌یابد. اگر اتلاف‌ها را نادیده بگیریم، سهم اولیه شما در جرم اکنون به انرژی جنبشی منظم آن تبدیل می‌شود. سرانجام، بدون توجه به اینکه چگونه با انجام دادن کار روی دستگاهی آن را تغییر دهیم، این تغییر دستگاه به صورت تغییر در E (یعنی جرم)، یا در KE ، یا هر دو ظاهر می‌شود.

علاوه بر گرما و کار، انرژی به صورت جذب یا گسیل فوتونها نیز می‌تواند منتقل شود. چون جرم فوتون صفر است، انرژی آن کاملاً جنبشی است. با وجود این، وقتی فوتونی را جذب کند، جرم آن زیاد می‌شود و با گسیل فوتون جرم از دست می‌دهد [۶]. این بصیرت دیدگاه‌های تعدادی پژوهشگر مانند اچ. پوانکاره^۲ (۱۹۰۰)، آلبرت اینشتین^۳ (۱۹۰۵) و جی. ان لوییس^۴ (۱۹۰۸) حاصل شده است.

اصطکاک و انرژی پتانسیل

از جمله عوامل دیگر کنش نیروی الکترومغناطیسی، اصطکاک انرژی جنبشی را به جرم تبدیل می‌کند. دیسکی که روی سطح معمولی غلتانده شود، پس از لحظه‌ای متوقف می‌شود؛ در نتیجه هم سطح و هم دیسک گرم‌تر و جرم آن‌ها بیشتر خواهد شد. اصطکاک، انرژی جنبشی خارجی منظم را، که با جرم متفاوت است، به انرژی جنبشی داخلی نامنظم که معادل جرم است، تبدیل می‌کند. جعبه‌ای را در نظر بگیرید که با سرعت ثابت روی میزی هل داده می‌شود؛ کار انجام شده برای غلبه بر اصطکاک به دستگاه انرژی می‌دهد - شخصی که جعبه

تنها دو طبقه‌بندی کاملاً فراگیر از انرژی وجود دارد: انرژی سکون و انرژی حرکت و می‌توان مفهوم پایستگی انرژی را تنها با استفاده از دو نوع انرژی که با کمیت‌های جرم و KE (انرژی جنبشی) کمی می‌شوند، در تمام فرایندهای فیزیکی به‌کار برد

را هل می‌دهد، انرژی تأمین می‌کند و جرم $(\Delta m = W/c^2)$ را از دست می‌دهد. سطح‌های در تماس باهم گرم‌تر می‌شوند، در نتیجه جرم جعبه و میز افزایش می‌یابد (Δm). به‌طور خلاصه، $\Delta m \rightarrow KE \rightarrow \Delta m$. شکل‌های مختلف انرژی پتانسیل (PE)، که ناشی از برهم‌کنش‌های بین ذره‌های تشکیل‌دهنده‌ی دستگاه است، در جرم آن دستگاه سهیم‌اند. با کشیدن نواری لاستیکی، انرژی پتانسیل کشسانی و در نتیجه جرم آن را به‌صورت الکترومغناطیسی زیاد می‌کنید - **تغییر انرژی پتانسیل به‌صورت تغییر جرم ظاهر می‌شود و هم‌ارز آن است.** این موضوع برای تمام شکل‌های انرژی پتانسیل از هسته‌ای تا شیمیایی و گرانشی صادق است. اگر هسته‌ای (مثلاً ^{64}Cn) از حالت پایه به حالت برانگیخته برود، جرم آن (در این مثال به اندازه‌ی $7/16 \text{ keV}/c^2$) افزایش می‌یابد که این افزایش جرم در واقع با استفاده از دام پنینگ ۵ محاسبه شده است [۷]. به همین ترتیب هرگاه 1 kg هیدروژن در برهم‌کنش با 1 kg اکسیژن ترکیب شود تا آب تولید کند، تقریباً 10^8 J انرژی آزاد می‌شود که نظیر کاهش جرم $10^{-9} \text{ kg} \approx 10^8 / c^2$ است. تغییرات جرم روی زمین معمولاً کم‌اهمیت و جزئی، اما بدون شک واقعی است. آزاد شدن انرژی و کاهش جرم را در یک بمب اتمی در نظر بگیرید. یک بمب 20 کیلو تنی تقریباً 10^{14} J انرژی آزاد می‌کند که تقریباً معادل با 1 g است. بمب هسته‌ای جرم را به انرژی جنبشی تبدیل می‌کند.

پایستگی جرم و انرژی جنبشی

پایستگی انرژی انتقال یا تبدیل بخشی یا تمام جرم به انرژی جنبشی و برعکس را به حساب می‌آورد. برای توضیح بیشتر چند وضعیت را تحلیل می‌کنیم. در ابتدا توجه داشته باشید که ممکن است فرایندی رخ دهد که در آن انرژی (نه ماده!) از یک دستگاه به دستگاهی دیگر منتقل می‌شود - یعنی این فرایند تولیداً همان «انتقال» است؛ برای مثال سیخ داغی که در فنجانی از آب سرد فرو برده شود این کار را انجام می‌دهد. در مورد تبدیل جرم به انرژی جنبشی، شخصی را در نظر بیاورید که مستقیم بالا می‌پرد. نیروی شتاب‌دهنده‌ی عمودی که سطح نسبتاً صلب به شخص وارد می‌کند تقریباً کاری انجام نمی‌دهد. زیرا هیچ جابه‌جایی در نقطه اثر نیرو صورت نمی‌گیرد [۸]. زمین انرژی بسیار کمی به شخص برمی‌گرداند. شخص انرژی لازم را از تبدیل بخشی از جرمش (Δm) به انرژی جنبشی $(KE = (\Delta m)c^2)$ به‌دست می‌آورد. این موضع برای راه‌پیمایان، اسکیت‌بازان، قورباغه‌ها، اتومبیل‌ها، هواپیماها و قطارها صادق است؛ تمام چیزهایی که خود به‌خود به جلو پیش می‌روند، جرم را به انرژی تبدیل می‌کنند. در برخورد کشسان یک توپ بیلیارد و توپ ساکن دیگر می‌توان تصور کرد که بر اثر برخورد یک لحظه (در هنگام واپیچیده شدن توپ‌ها) انرژی جنبشی به جرم تبدیل می‌شود و سپس وقتی که توپ‌ها وامی‌جهند دوباره جرم به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود. به‌نظر می‌رسد در این برخورد انرژی جنبشی مستقیماً از یک توپ به دیگری منتقل شده است، اما این در واقع ساده‌انگاری است. **در تمام فرایندها (برای مثال برخوردها) تمام انرژی جنبشی یا بخشی از آن به جرم تبدیل می‌شود، که ممکن است، با توجه به ویژگی‌ها، دوباره تمام جرم یا بخشی از آن به انرژی جنبشی تبدیل شود یا نشود.** برخورد دو پروتون را در نظر بگیرید که در آن یکی از آن‌ها به‌سرعت حرکت می‌کند. چون پروتون‌ها همدیگر را دفع می‌کنند، با نزدیک شدن به هم انرژی جنبشی دستگاه کاهش و جرم آن افزایش می‌یابد. اگر انرژی جنبشی اولیه (ΔKE_1) زیاد باشد، پروتون‌ها می‌توانند به اندازه‌ی کافی به هم نزدیک شوند تا یک تا تعداد بیشتری ذره‌ی اضافی مثلاً یک پيون خنثی $\Delta m \pi^0 = \Delta KE / c^2$ ظاهر شود:

$$P + P + KE_i = P + P + \pi^0 + KE_f$$

اصطکاک، انرژی جنبشی خارجی منظم را، که با جرم متفاوت است، به انرژی جنبشی داخلی نامنظم که معادل جرم است، تبدیل می‌کند

که در آن $\Delta KE = KE_f - KE_i$ ، مقداری انرژی جنبشی از بین می‌رود و یک ذره مادی (π^0) دارای جرم پدید می‌آید. محتمل‌ترین واپاشی π^0 (در مدت 0.8×10^{-16} s) از طریق نیروی الکترومغناطیسی به دو فوتون است، در نتیجه m_{π^0} به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود. به‌طور خلاصه، $KE \rightarrow \Delta m \rightarrow KE$. اگر برخوردی ناکشسان بین دو الکترون صورت گیرد به جای پیون، یک فوتون اضافی تولید می‌شود:

$$KE \rightarrow \Delta m \rightarrow KE$$

بازیکنی را در نظر بگیرید که توپ بیسبالی را پرتاب می‌کند و با نادیده گرفتن اصطکاک، تولید صدا و غیره... تحلیلی ساده‌ای انجام می‌دهد. بازیکن هنگام پرتاب روی توپ کار انجام می‌دهد؛ او مقداری جرم (Δm) از دست می‌دهد و انرژی جنبشی توپ به همان اندازه زیاد می‌شود، $KE = (\Delta m)c^2$. برای سهولت فرض کنید توپ به‌صورت افقی به طرف دستکش بازیکن حرکت می‌کند. انرژی جنبشی منظم از بین می‌رود و توپ و دستکش (از طریق کنش نیروی الکترومغناطیسی) گرم می‌شوند و هر دو مقدار کمی جرم (Δm) به‌دست می‌آورند. این همان اتفاقی است که در برخوردهای ناکشسان اجسام ماکروسکوپی رخ می‌دهد؛ همواره بخشی از انرژی جنبشی به جرم تبدیل می‌شود [۹]. طولی نمی‌کشد که توپ و دستکش تعدادی فوتون دارای انرژی جنبشی تابش کنند و به‌سرعت به جرم‌های اولیه‌شان برگردند. سرانجام وزن پرتاب‌کننده توپ اندکی کمتر از قبل شده و انرژی فوتون هم‌ارز آن $(\Delta m)c^2$ در فضا جاری می‌شود. به‌طور خلاصه، $\Delta m \rightarrow KE \rightarrow \Delta m \rightarrow KE$. هنگامی که توپ دور می‌شود، انرژی موجود برای انجام کار در ارتباط با قانون دوم ترمودینامیک کم می‌شود.

نادیده گرفتن اثرهای مختصر گلوله‌ای را مستقیم به طرف بالا شلیک کنید. منفجر شدن باروت انرژی شیمیایی PE (که در همان جرم، Δm) را به انرژی جنبشی تبدیل می‌کند. گلوله در جهت مخالف جاذبه‌ی زمین بالا می‌رود و انرژی پتانسیل گرانشی PE در آن ذخیره می‌شود. دست کم آن را به شیوه‌ی سنتی به این شیوه توصیف می‌شود. با بالا رفتن گلوله انرژی جنبشی آن کاهش و جرم دستگاه زمین - گلوله افزایش می‌یابد. انرژی جنبشی گلوله در نقطه‌ی اوج صفر است و جرم دستگاه زمین - گلوله به اندازه Δm افزایش یافته است. این جرم، هنگام پایین آمدن گلوله کم‌کم به انرژی جنبشی تبدیل می‌شود. وقتی گلوله در برگشت به‌طور ناکشسان با لوله‌ی تفنگ برخورد می‌کند، انرژی جنبشی آن صفر می‌شود، دستگاه گلوله - تفنگ گرم می‌شود و جرم آن به اندازه Δm افزایش می‌یابد. به‌طور خلاصه،

$$\Delta m \rightarrow KE \rightarrow \Delta m \rightarrow KE \rightarrow \Delta m \rightarrow KE$$

یک چراغ قوه‌ی معمولی را در نظر بگیرید؛ انرژی شیمیایی ذخیره شده در باتری با کاهش جرم آن (Δm) به دلیل نیروی الکترومغناطیسی به انرژی الکتریکی تبدیل می‌شود. لامپ گرم می‌شود، جرمش افزایش می‌یابد و تابش می‌کند. فرایند کلی با تبدیل جرم باتری (Δm) به انرژی جنبشی (KE) فوتون متناظر است. چیز مشابهی هنگام اتصال خازن به باتری رخ می‌دهد. جرم باتری کاهش می‌یابد و خازن شارژ می‌شود، گرچه هیچ بار خالصی به خازن منتقل نمی‌شود، جرم خازن افزایش می‌یابد. اگر سیم رابط دارای مقاومت باشد، گرم می‌شود و فوتون‌هایی را تابش می‌کند که حامل انرژی جنبشی‌اند، و باعث می‌شوند که افزایش جرم خازن کمی کم‌تر از کاهش جرم باتری باشد.

یک نیروگاه هسته‌ای را در نظر بگیرید. جرم میله‌های سوخت بر اثر نیروی قوی کاهش می‌یابد. با نادیده گرفتن اتلاف‌ها (اصطکاک، مقاومت سیم‌ها، تابش و غیره) مقداری انرژی به الکترون‌های آزاد شبکه داده می‌شود. تلویزیون شما که به جریان الکترون‌های نوسان‌کننده متصل است، مقدار کمی از این انرژی جنبشی را می‌گیرد و جرمش افزایش می‌یابد و فوتون تابش می‌کند. این پدیده ($\Delta m \rightarrow KE \rightarrow \Delta m \rightarrow KE$) بسیار ساده شده است، اما این نکته را نشان می‌دهد که تمام یا قسمتی از جرم (سوخت اولیه) به انرژی جنبشی تبدیل شده است.

در تمام فرایندها
(برای مثال)
برخوردها تمام
انرژی جنبشی
یا بخشی از آن
به جرم تبدیل
می‌شود، که ممکن
است، با توجه به
ویژگی‌ها، دوباره
تمام جرم یا بخشی
از آن به انرژی
جنبشی تبدیل
شود یا نشود

اکنون نگاهی تازه به ماشین گرمایی (دو مخزن با دمای متفاوت و وسیله‌ی تولید کار که بین آن‌ها کار می‌کند) می‌اندازیم. گرما از ناحیه‌ی با دمای بالاتر از طریق دستگاهی به ناحیه‌ی با دمای پایین‌تر روان می‌شود که خروجی آن کار است. پس از مدتی جرم مخزنی که دمای بالاتری دارد، به اندازه Δm_H کاهش می‌یابد. در نتیجه بخشی از Δm_H به صورت کار (W) ظاهر می‌شود و بقیه‌ی آن، به دلیل اتلاف گرما طبق قانون دوم ترمودینامیک به مخزن با دمای پایین‌تر اضافه شود. قانون اول ترمودینامیک داریم $\Delta m_H - \Delta m_L = W / c^2$. کار خروجی، سرانجام جرم، انرژی جنبشی، یا هر دو آن‌هاست. اگر کار تولید شده صرف کوبیدن، کشیدن یا بالا بردن شود، خروجی عمدتاً جرم و اگر به صورت روشن کردن، هل دادن یا چرخیدن باشد، بیشتر انرژی جنبشی است.

نتیجه‌گیری

انرژی یک جسم شامل انرژی سکون / یا انرژی حرکتی آن است. این انرژی‌ها معادل انرژی جرم (mc^2) و انرژی جنبشی (KE) هستند. شکل‌های مختلف انرژی پتانسیل (PE) معادل با تغییرات جرم یک دستگاه دارای قسمت‌های برهم‌کنش‌کننده است. در تمام کاربردها می‌توان پایستگی انرژی را به صورت انتقال تمام یا بخشی از جرم و / یا تبدیل آن به انرژی جنبشی و برعکس بیان کرد. در مقیاس کیهانی، تبدیل انرژی به جرم و جرم به انرژی حرکت موزون و باشکوه عالم است.

منبع

The Physics Teacher, Vol. 46 , February 2008 pp 78-80

مراجع

۱. دو روش جایگزین برای تعریف تکانه در نظریه نسبیت وجود دارد: $p = \gamma m v$ (م جرم مستقل از سرعت کلاسیک است). به دلیل ضرورت‌های فیزیک ذرات جدید، اولی را انتخاب خواهیم کرد. در حالتی که: (۱) جرم از سرعت مستقل است، (۲) $E = \gamma m c^2$ و نه $E = mc^2$ (۳) $E = mc^2$ و نه $E = m c^2$ (۴) طبق نظریه پیمانه‌ای فوتون بدون جرم است و (۵) انرژی جنبشی خارجی منظم (که ناوردای لورنتس نیست) با جرم (ناوردای لورنتس) معادل نیست. هم‌چنین فرض خواهیم کرد: (۶) جرم می‌تواند به انرژی تبدیل شود و برعکس و (۷) یک قانون پایستگی انرژی وجود دارد که جرم و انرژی را دربرمی‌گیرد. احتمالاً بیشتر افراد با این طرز بیان موافق هستند، اگرچه آن‌هایی که موارد (۱) تا (۵) را نمی‌پذیرند، (۶) و (۷) را قبول دارند. کسانی که (۱) تا (۷) را قبول ندارند، فرض می‌کنند که جرم و انرژی جدا از هم پایسته‌اند، که در این مورد فوتون باید جرم داشته باشد و انرژی جنبشی به‌طور کلی جرم دارد.

2. L.D. Landau and E.M. Lifshitz, *The Classical Theory of Fields* (Addison-Wesley, Reading, MA, 1965), p. 28. E. Hecht, "Energy and change," *Phys. Teach.* **45**, 88-92 (Feb. 2007).

۳. نیروعامل تغییر است و در سطح زیر اتمی، تعدادی از سازوکارهای تبدیل انرژی را می‌توان به‌عنوان کار میکروسکوپی تعبیر کرد.

4. A. Einstein and L. Infeld, *The Evolution of Physics* (Simon and Schuster, New York, 1938), p.

208. R.H. Good, *Basic Concepts of Relativity* (Reinhold Book Corp., New York, 1968), p. 36.

5. L. Sartori, *Understanding Relativity* (University of California Press, CA, 1996), p. 205.

۶. تکانه و انرژی جنبشی جسم افزایش یا کاهش می‌یابد.

7. K. Blaum et al., "Population inversion of nuclear states by a Penning trap mass spectrometer," *Europhys. Lett.* **67** (4), 586 (2004).

۸. هرچه انرژی جنبشی از سطح خارج شود، هنگامی که با پریدن نیروی پایین سویی به آن اعمال می‌شود و سطح کشیده می‌شود، به آن بازگردانده می‌شود.

9. N.D. Mermin, *Space and Time in Special Relativity* (Waveland Press, Illinois, 1968), p.

216. W. Rindler, *Special Relativity* (Oliver and Boyd, Edinburgh, 1960), p. 91. W.G.V. Rosser, *Introductory Special Relativity* (Taylor & Francis, London, 1991), p. 159.

زیرنویس

1. Eugen Hecht
2. H. Poincare
3. A. Einstein
4. G.N.Lewis
5. Penning trap