

مبانی نسبیت خاص

نظریه نسبیت خاص اینشتین

حسین شناور

گروه فیزیک، دانشکده علوم



دانشگاه هرمزگان

- خواهشمندم هرگونه اشتباه نوشتاری، مفهومی و یا محاسباتی را به آدرس ایمیل من ارسال کنید تا در ویرایش های بعدی تصحیحات لازم اعمال شوند:
h.shenavar@gmail.com
- از همکاران و دانشجویان محترم در دانشگاه هرمزگان، برای همفکری ها، حمایت ها و گوشزد نمودن نکات مفید سپاسگزارم.
- برای ضبط این درس ها از نرم افزار Camtasia استفاده شده است.

- ۱. نظریه نسبیت خاص اینشتین
- اصول نظریه نسبیت خاص
- برخی نتایج نظریه نسبیت خاص

آنچه تاکنون آموخته ایم.

- اگر فرض کنیم که تبدیلات گالیله درست هستند، آنگاه مجبوریم بپذیریم معادلات ماکسول فقط در یک دستگاه مرجع خاص (دستگاه مرجع مطلق متصل به اتر) درست هستند و در دستگاه های دیگر شکل آنها متفاوت است. یعنی اصل نسبیت گالیله درباره قوانین نیوتن صدق می کند ولی برای قوانین ماکسول درست نیست. در نتیجه باید یکی از موارد زیر درست باشد:
- ❶ اصل نسبیت درباره مکانیک صادق و درباره الکترومغناطیس ناصداق است. در نتیجه باید بتوان با آزمایشات الکترومغناطیسی و اپتیکی، اثر چارچوب اتر را به صورت تجربی یافت.
- ❷ یک اصل نسبیت ممکن است موجود باشد که تحت آن قوانین مکانیک و الکترومغناطیس هر دو صادق اند؛ ولی قوانین فعلی الکترومغناطیس ماکسول درست نیستند و باید قوانین درست EM را یافت. البته انحراف از قوانین ماکسول باید به صورت تجربی در آزمایشگاه ها تایید شود.
- ❸ یک اصل نسبیت ممکن است موجود باشد که تحت آن قوانین مکانیک و الکترومغناطیس هر دو صادق اند؛ ولی قوانین مکانیک نیوتن درست نیستند و باید قوانین مکانیکی را یافت. در این صورت، انحراف از قوانین مکانیک نیوتنی باید به صورت تجربی در آزمایشگاه ها تایید شود.
- ❹ تاکنون آموخته ایم که موارد ۱ و ۲ بنا به شواهد محکم تجربی مردود می باشند. بنابراین مجبوریم که مورد سوم را بپذیریم و این دقیقاً راهی است که اینشتین انتخاب کرد.

نسبیت خاص: تعمیم سینماتیک و نه دینامیک!

پیش از اینشتین، افراد مختلف (به ویژه لورنتس و ریتز) تلاش کردند پارادوکس های موجود را با استفاده از تعمیم دینامیک مساله (و مخصوصا با وارد کردن نیروهای جدید) برطرف کنند. هرچند، روش اینشتین کاملا متفاوت بود و او به سراغ تغییر در ”فرایند اندازه گیری و اصول سینماتیکی” مساله رفت. در واقع او مساله را برای یک ذره آزاد مطرح کرد و مشکل را از طریق بازنویسی اصل موضوعی مساله و برساختن یک سینماتیک جدید برطرف کرد.



$$\mathbf{F} = \frac{q_1 q_2}{4\pi\epsilon_0 r^2} \left[\left[1 + \frac{3-k}{4} \left(\frac{v}{c} \right)^2 - \frac{3(1-k)}{4} \left(\frac{\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}}{c^2} \right)^2 - \frac{r}{2c^2} (\mathbf{a} \cdot \mathbf{r}) \right] \frac{\mathbf{r}}{r} - \frac{k+1}{2c^2} (\mathbf{v} \cdot \mathbf{r}) \mathbf{v} - \frac{r}{c^2} (\mathbf{a}) \right]$$

یادآوری نظریه های اصل موضوعی



هندسه اولین علمی است که به صورت اصل موضوعی نوشته شده است.

اقلیدس، در کتاب اصول خود، برای اولین بار از ساختار اصل موضوعی استفاده کرده است. این ساختار شامل چهار قسمت است:

تعریف نشده ها و تعریف شده ها؛ مثل نقطه، خط، مربع، دایره و...

اصول موضوعه؛ مثل اصل اول اقلیدس: از هر ۲ نقطه فقط ۱ پاره خط می‌گذرد. و یا اصل پنجم اقلیدس: اصل پنجم - از یک نقطه خارج یک خط، یک خط و تنها یک خط می‌توان موازی با خط مفروض رسم کرد.

در ریاضیات فرض می‌شود که اصول موضوعه درست هستند؛ به عبارت دیگر، این اصول اثبات نمی‌شوند.

قوانین منطق؛ برای استنتاج صحیح نتایج.

قضایا: مثل قضیه فیثاغورس، قضیه نامساوی مثلث و ...

فیزیک به عنوان یک علم اصل موضوعی



مساله بازنویسی اصل موضوعی شاخه های مختلف فیزیک، و در نهایت کل فیزیک، یکی از جالب ترین مسائل مطرح شده در ریاضی-فیزیک است و به مساله ششم هیلبرت مشهور است. تاکنون تلاش های زیادی در این زمینه انجام شده و موفقیت های زیادی نیز حاصل شده است. ولی، همچنان بازنویسی اصل موضوعی فیزیک مدرن (مکانیک کوانتومی و نسبیت) مبحث چالش برانگیزی محسوب می شوند.



ساختار اصل موضوعی نظریات فیزیک معمولاً به صورت زیر بیان می شود:

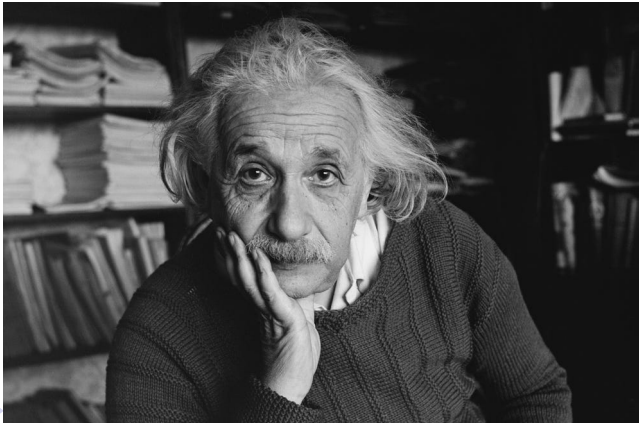
تعریف نشده ها و تعریف شده ها؛ مثل جرم، بار الکتریکی، سرعت، نیرو، شتاب، میدان های الکتریکی و مغناطیسی و در فیزیک، برخلاف ریاضی، تعریف شده ها و تعریف نشده ها کاملاً بر اساس تجربه بیان و اندازه گیری می شوند.

اصول موضوعه؛ مثل سه قانون حرکت نیوتن (قوانین اول تا سوم)، قوانین نیرو (قانون گرانش نیوتن، قانون هوک)، قوانین الکترومغناطیس ماکسول، اصل برهمنهی و در فیزیک، برخلاف ریاضی، اصول موضوعه کاملاً بر اساس تجربه بیان می شوند و ساختار اصل موضوعی که با تجربه در توافق نباشد، قابل قبول نیست.

نتایج: با استفاده از اصول موضوعه و روش های ریاضیاتی، می توان پدیده های طبیعی را پیش بینی و توجیه کرد.

اهداف این جلسه

- برای ساختن نسبیت خاص، اینشتین اصل موضوع نسبیت را به صورت نوینی معرفی کرد، یک اصل موضوع جدید (اصل ثبات سرعت نور) را بنیان نهاد و روش اندازه‌گیری فاصله و مفهوم هم زمانی را به کلی تغییر داد. در ادامه با این تغییرات آشنا می‌شویم. همچنین، با نتایج اولیه این نظریه آشنا خواهیم شد؛ هرچند، بررسی دقیق این نتایج را به جلسات بعد موکول خواهیم کرد.



تاثیر ماک بر اینشتین



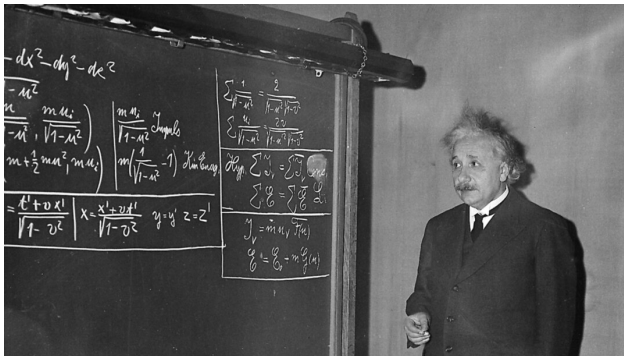
اینشتین در این دوره از زندگی خود کتاب ”دانش مکانیک“ نوشته ارنست ماک را مطالعه کرده بود و به شدت تحت تاثیر افکار او بود. در کتاب دانش مکانیک، ماک مکانیک نیوتنی را مورد نقادی دقیق قرار داد و تاکید کرد که چیزی به نام فضای مطلق (نیوتن) وجود ندارد چون قابل اندازه گیری نیست!

ماک یک ریاضی-فیزیکدان، فیزیکدان تجربی (به ویژه در آکوستیک و اپتیک)، فیلسوف، روانشناس (آزمایشات با سنسورها)، و حتی جراح بود که در اواخر عمر بر کرسی استادی فلسفه و تاریخ نشست. انتقادات بی امان او از نظریات فروید در روانشناسی و مکانیک نیوتنی همچنان مورد بحث است.

ماک یکی از بنیانگذاران مکتب پوزیتیویسم (positivism) در فیزیک و فلسفه است و معتقد بود که در علم، تنها باید از کمیت هایی استفاده کنیم که به صورت تجربی قابل مشاهده اند.

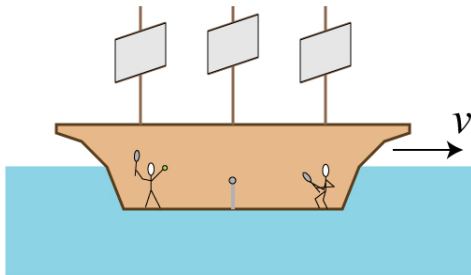
درباره الکترودینامیک اجسام متحرک

● در مقاله "درباره الکترودینامیک اجسام متحرک (۱۹۰۵)" اینشتین با اشاره به پارادوکس های موجود در فیزیک می نویسد: "هیچیک از ویژگی های مشاهده شده با مفهوم سکون مطلق ارتباطی ندارد..." و بنابراین مفهوم سکون مطلق (و یا دستگاه مرجع) را کنار می گذارد. در جاهای دیگر از این مقاله نیز تاثیر افکار ماخ قابل مشاهده است؛ به ویژه وقتی که او اصل ثبات سرعت نور را وارد می کند و روش اندازه گیری و مفهوم همزمانی را تغییر می دهد.



اصل نسبیت

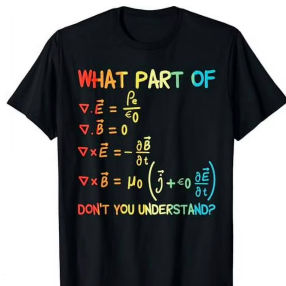
- اصل اول نسبیت خاص: قوانین فیزیک در تمام دستگاه‌های لخت یکسان هستند. هیچ دستگاه لخت مرجعی وجود ندارد. این را اصل نسبیت می‌نامند.
- دقت کنید که در اصل نسبیت نیوتنی فرض می‌شد که قوانین مکانیک (و نه کل فیزیک) در تمام دستگاه‌های لخت یکسان هستند. در واقع تفاوت دیدگاه اینشتین نسبت به پیشینیان این است که او اصل نسبیت را به تمام فیزیک تعمیم داد. بنا به این اصل، غیر ممکن خواهد بود که به وسیله اندازه‌گیری‌های فیزیکی بتوانیم حرکت و یا سکون یک دستگاه لخت را تعیین کنیم.
- توجه: تلاش اینشتین در نوشتن نسبیت عام این است که قوانین فیزیک را به صورتی بنویسد که در همه دستگاه‌ها (و نه فقط دستگاه‌های لخت) برقرار باشند.



اصل ثبات سرعت نور

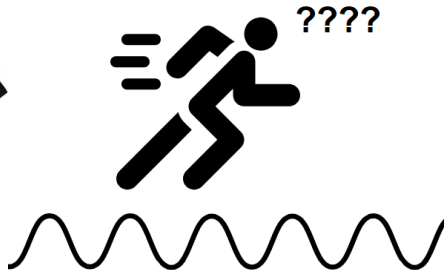
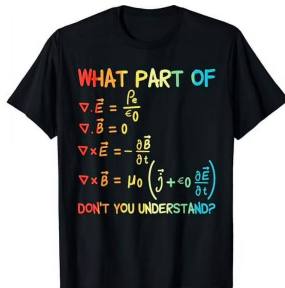
● اصل دوم نسبیت خاص: در فضای تهی مقدار سرعت نور در تمام دستگاه های لخت یکسان و برابر c است. این بیان را اصل ثبات سرعت نور می نامند.

● چرا اینشتین اصل ثبات سرعت نور را پذیرفت؟ پاسخ: ظاهرا اینشتین به مدت حدودا ده سال با این آزمایش ذهنی گلاویز بوده است که "فیزیک پدیده ها از دید ناظری که با سرعت نور در حال حرکت است چگونه است؟". چنین فرضی باعث نتایج متناقض بسیاری خواهد شد. مثلا از دید ناظری که با سرعت نور در حال حرکت است، امواج الکترومغناطیسی منجمد خواهند بود (یعنی با زمان تغییر نمی کنند). ولی این با معادله موج الکترومغناطیسی $\vec{\nabla} \times \vec{E} = \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \vec{B}}{\partial t}$ در تضاد است چون این موج در فضا تغییر کرده ولی در زمان ایستاست!



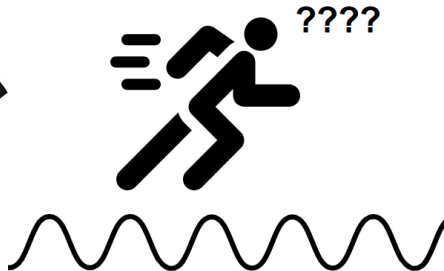
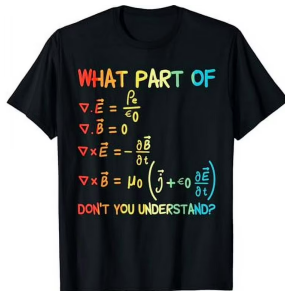
اصل ثبات سرعت نور

- اصل دوم نسبیت خاص: در فضای تهی مقدار سرعت نور در تمام دستگاه های لخت یکسان و برابر c است. این بیان را اصل ثبات سرعت نور می نامند.
- چرا اینشتین اصل ثبات سرعت نور را پذیرفت؟ ادامه پاسخ: همچنین ناظری که با سرعت نور در حال حرکت است، با معادلات ماکسول در خلاء نیز به مشکل برخورد خواهد خورد! چرا؟ بنا به این معادلات، در نقاطی از فضا که منبع بار و جریان موجود نباشند ($\rho = 0, \mathbf{J} = 0$)، و میدان ها نیز با زمان تغییر نکنند، عملاً نباید هیچگونه میدان الکتریکی و مغناطیسی داشته باشیم.

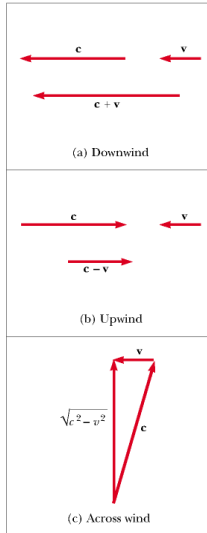


اصل ثبات سرعت نور

- اصل دوم نسبیت خاص: در فضای تهی مقدار سرعت نور در تمام دستگاه های لخت یکسان و برابر c است. این بیان را اصل ثبات سرعت نور می نامند.
- چرا اینشتین اصل ثبات سرعت نور را پذیرفت؟ ادامه پاسخ: برای جلوگیری از چنین پارادوکس هایی اینشتین اصل ثبات سرعت نور را معرفی کرد. در واقع این اصل تضمین می کند که هیچ ناظری نتواند با سرعت نور حرکت کند و بنابراین ناظر هیچوقت با چنین تضادهایی در فیزیک مواجه نمی شود.



تضاد ظاهری



در ابتدا به نظر می رسد اصل نسبیت با اصل ثبات سرعت نور در تضاد است؛ زیرا بنا به تبدیلات گالیه انتظار داریم که سرعت نور در دستگاه های مختلف متفاوت باشد. برای رفع این مشکل، اینشتین

۱ مفهوم همزمانی پدیده ها را تغییر داد و نسبیت همزمانی را بنیان نهاد.

۲ پروسه اندازه گیری بازه های مکانی را بازتعریف کرد.

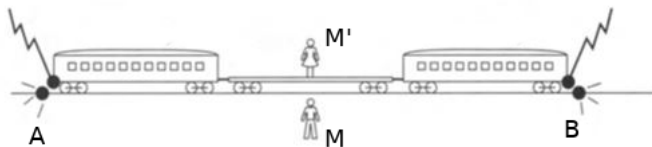
۳ در نتیجه تبدیلات جدیدی (تبدیلات لورنتس به جای تبدیلات گالیه) را معرفی کرد.

در ادامه این سه مورد را توضیح خواهیم داد.

استفاده از نور برای اندازه گیری فاصله ها

با توجه به اینکه فضا و زمان مطلق در نظریه نسبیت خاص دیگر وجود ندارند، ما بازه های زمانی و مکانی را با ارسال پالس های نوری اندازه می گیریم و با هم مقایسه می کنیم. اگر از ذرات برای ارسال پالس استفاده کنیم، آنگاه با این مشکل مواجه خواهیم شد که ذرات در دستگاه های مختلف سرعت های متفاوتی دارند. ولی بنا به اصل ثبات سرعت نور، همه ناظرها سرعت یکسانی را برای نور ثبت کرده و بر آن توافق دارند؛ بنابراین از پالس نوری استفاده می کنیم.

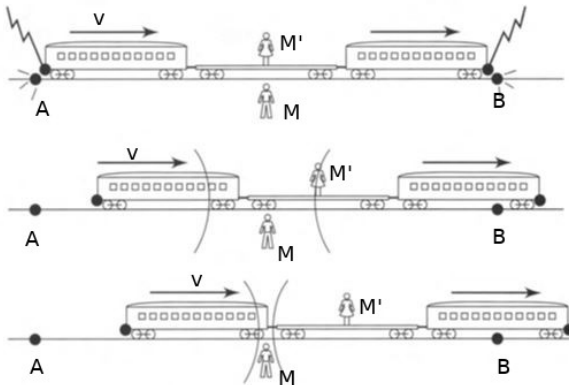
حالا فرض کنید می خواهیم طول یک قطار ساکن را اندازه بگیریم. در این صورت، با دو نفر با اسامی آلیس (A) و باب (B) که دو چراغ و ساعت همزمان دارند هماهنگ می کنیم تا راس ساعت ۱۲:۰۰ از دو سر قطار یک پالس نوری را به سمت من (M) که در وسط این فاصله قرار دارم، بفرستند. در این حالت، اگر پالس مورد نظر در زمان t پس از ساعت ۱۲:۰۰ به من برسد، نتیجه می گیرم که طول قطار برابر است با $L = 2ct$. دقت کنید که ناظر M' نیز که در قطار ساکن قرار دارد، همین طول را گزارش خواهد کرد. همچنین هر دو ناظر M و M' توافق دارند که دو پالس نوری به صورت همزمان ارسال شده اند.



ناظر متحرک و نسبیت همزمانی

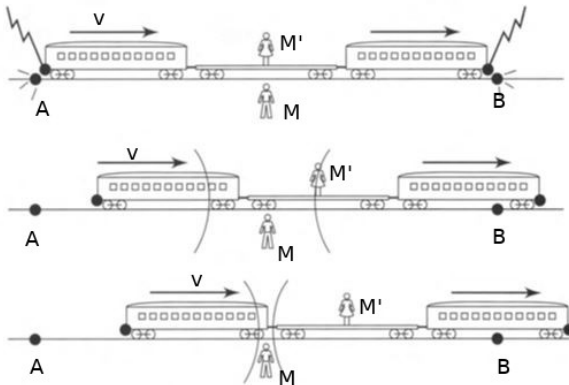
حالا فرض کنید که ناظر M' با سرعت v نسبت به من در حال حرکت است و می خواهیم طول یک قطار ساکن را اندازه بگیریم. در این صورت، دو پالس نوری باز هم به صورت همزمان به من می رسند و من می توانم طول قطار را اندازه گیری کنم. ولی ناظر M' گزارش می دهد که پالس سمت راست زودتر از پالس سمت چپ به او رسیده و بنابراین دو پالس همزمان نیستند!

به این پدیده در نسبیت خاص "نسبیت همزمانی" می گویند که "نتیجه مستقیم اصل دوم و روش اندازه گیری ویژه ماست".



ناظر متحرک و نسبیت همزمانی

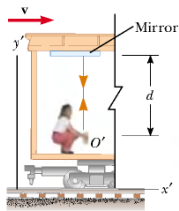
کدام ناظر درست می گوید؟ M یا M' ؟ بنا به نظریه نسبیتی خاص هر دو ناظر درست می گویند چون هر دو ناظر لخت هستند. در واقع هر دو ناظر می توانند توصیف های کاملاً خودسازگاری از پدیده ها به دست دهند؛ هرچند آنها بر روی همزمانی پدیده ها توافق نخواهند داشت. البته این قابل پیش بینی بود چون ما مفاهیم زمان و فضای مطلق نیوتنی را کنار گذاشته ایم؛ بنابراین انتظار نداریم که ناظرها بر همزمانی پدیده ها توافق کنند.



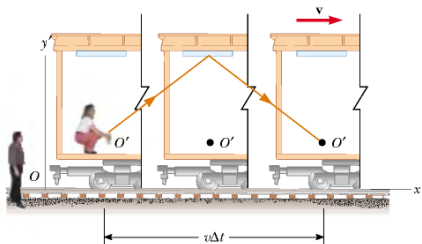
اتساع زمان

● به اندازه گیری بازه های زمانی توسط یک ناظر متحرک و یک ناظر ساکن دقت کنید. ناظر O' که با سرعت v در قطار در حال حرکت است، یک پالس نوری را مستقیماً به سمت بالا می فرستد. این پالس به اندازه d به بالا رفته و پس از برخورد به یک آینه به سمت پایین می آید و توسط یک گیرنده دریافت می شود. ناظر O' بازه رفت و برگشت نور را به اندازه $\Delta t' = 2d/c$ اندازه می گیرد. از طرفی ناظری که در کنار قطار ایستاده است، یک مسیر متفاوت را برای نور می بیند و برای این پالس نوری (با استفاده از قضیه فیثاغورس) می نویسد:

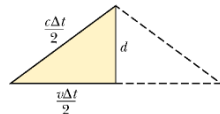
$$\left(\frac{c\Delta t}{2}\right)^2 = \left(\frac{v\Delta t}{2}\right)^2 + d^2 \Rightarrow \Delta t = \frac{2d}{c\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$



(a)



(b)



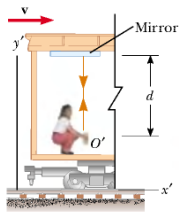
(c)

اتساع زمان

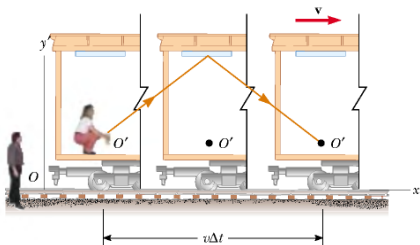
از اینجا نتیجه می شود که بازه زمانی اندازه گیری شده توسط این دو ناظر متفاوتند و با رابطه

$$\Delta t = \frac{\Delta t'}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} = \gamma \Delta t'$$

به هم مربوط می شوند. این پدیده که به لحاظ تجربی نیز اثبات شده است، را اتساع زمان می گویند: زمان اندازه گیری شده توسط یک ناظر متحرک نسبت به یک ساعت، طولانی تر از زمان اندازه گیری شده توسط ناظر ساکن نسبت به ساعت است. بعداً با شواهد محکم آزمایشگاهی برای اتساع زمان آشنا خواهیم شد.



(a)



(b)



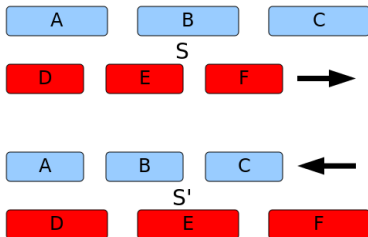
(c)

انقباض طول نسبیتی

طول ویژه جسم مقدار طولی است که توسط یک ناظر ساکن نسبت به جسم اندازه گیری می شود.

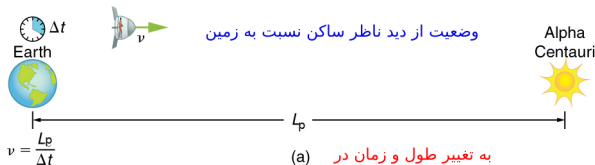
بنا به نظریه نسبیت خاص، مقدار فاصله بین دو نقطه نیز یک کمیت نسبی است. یعنی فردی که نسبت به جسم در حال حرکت است، مقدار طول (کمتری) را نسبت به فرد ساکن نسبت به جسم اندازه می گیرد. این پدیده را انقباض طول نسبیتی می نامند.

دقت کنید که ناظر S نسبت به اجسام A، B و C ساکن است و طول آنها را به صورت استاندارد (ویژه) می بیند. ولی اجسام D، E و F نسبت به ناظر S در حال حرکتند و ناظر S طول کوچکتری را (نسبت به حالت سکون) برای آنها اندازه گیری می کند. وضعیت برای ناظر S'، که نسبت به اجسام D، E و F ساکن است، برعکس است. به همین دلیل می گوئیم انقباض طول یک پدیده نسبی است.



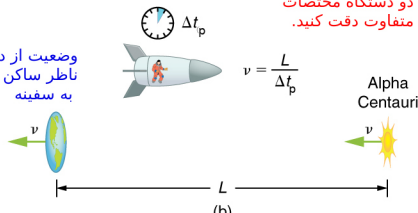
انقباض طول نسبیتی

● حال به اندازه گیری بازه های مکانی توسط دو ناظر ساکن و در حال حرکت دقت کنید. فرض کنید یک کشتی فضایی با سرعت v قصد دارد فاصله بین زمین و ستاره آلفا قنطورس (Alpha Centauri) را طی کند. این فاصله از دید ناظر ساکن زمینی برابر L_p می باشد. بنا به مشاهدات ناظر زمینی، زمان لازم برای سفینه فضایی برای طی فاصله مورد نظر برابر است با $\Delta t = L_p/v$. زمان اندازه گیری شده توسط ناظر همراه با سفینه همان زمان ویژه است Δt_p ؛ ولی از نظر ناظر زمینی این زمان برابر است با $\Delta t = \gamma \Delta t_p$.



به تغییر طول و زمان در
دو دستگاه مختصات
متفاوت دقت کنید.

وضعیت از دید
ناظر ساکن نسبت
به سفینه



انقباض طول نسبیتی

حالا وضعیت را از دید ناظر همراه با سفینه فضایی در نظر می گیریم. ناظر همراه با سفینه ادعا می کند که ساکن است و از نظر او ستاره آلفا قنطورس با سرعت v در حال حرکت به سمت اوست. از آنجا که ناظر همراه با سفینه در زمان Δt_p به ستاره مورد نظر می رسد، او لاجرم نتیجه خواهد گرفت که فاصله بین زمین و ستاره (L یعنی L_p) کمتر از L_p است، زیرا

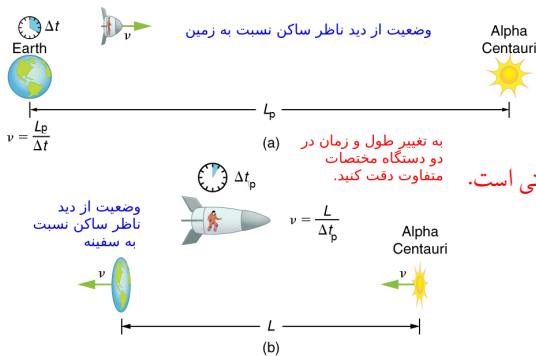
$$L = v \Delta t_p = v \frac{\Delta t}{\gamma}$$

حال از آنجا که از نظر ناظر زمینی داریم $\Delta t = L_p / v$ ، می توان نتیجه گرفت:

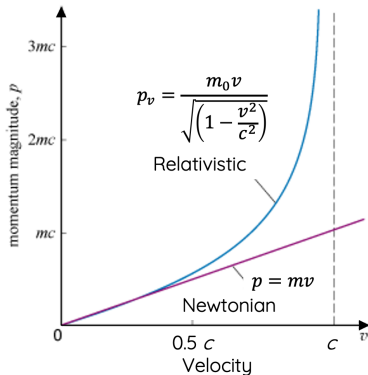
$$L = \frac{L_p}{\gamma} = L_p \sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}$$

این رابطه اصلی انقباض طول نسبیتی است.

یادآوری: انقباض طول فقط در راستای حرکت اتفاق می افتد.



جرم سکون، جرم نسبیتی و تکانه نسبیتی



در مکانیکی نسبیتی، مقدار جرم نیز به سرعت ناظر بستگی خواهد داشت. یعنی اگر یک ناظر ساکن جرم الکترون را به اندازه m_0 اندازه گیری کند، آنگاه ناظری که با سرعت v حرکت می کند، جرم الکترون را به اندازه

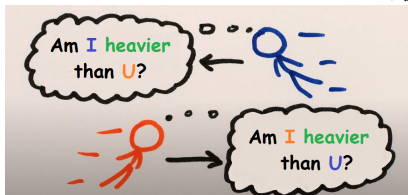
$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

اندازه خواهد گرفت.

همچنین، تکانه یک ذره نسبیتی به صورت زیر بازتعریف خواهد شد:

$$\vec{p} = \frac{m_0 \vec{v}}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

این فرمول ها را بعدا توضیح خواهیم داد و نتایج بسیار مهم آنها را مرور خواهیم کرد.

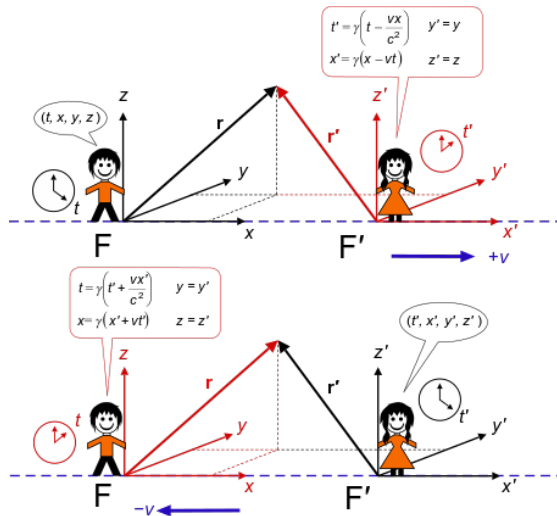


هم‌ارزی جرم و انرژی

- در یک مقاله دیگر در سال ۱۹۰۵، اینشتین نشان داد که یک رابطه مهم بین مقدار انرژی موجود در ماده و جرم آن وجود دارد. این یکی از مهم ترین نتایج نظریه نسبیت خاص اینشتین است.



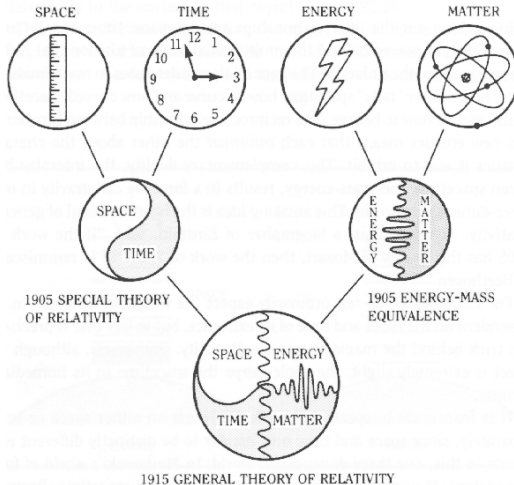
تبدیلات لورنتس و ناورداهای نسبیتی



البته همه کمیت ها نیز با تبدیل دستگاه های مختصات تغییر نمی کنند بلکه برخی کمیت های بسیار مهم (مانند سرعت نور، طول بازه های فضا-زمان، اندازه بردار چارتهانه و ...) بدون تغییر باقی خواهد ماند. همچنین، فرم کلی برخی از مهم ترین فرمول های فیزیکی تحت تبدیلات نسبیتی (تبدیلات لورنتس) بدون تغییر باقی می ماند. برای فهم درست این نکات باید با تبدیلات لورنتس و ویژگی های ریاضیاتی آن آشنا شویم. اینکار را در بخش دوم (سینماتیک و دینامیک نسبیتی) شروع خواهیم کرد.

وحدت فیزیک

- مسیر اینشتین به سوی نسبیت عام را می توان در نمودار شماتیک زیر خلاصه کرد. بخش عظیمی از این مسیر مرهون تلاش های مینکووسکی، گراسمان، هیلبرت و دیگر ریاضی دانان است که بعداً به آن خواهیم پرداخت.



نکات مهم این درس

انتظار این است که در انتهای این درس شما بتوانید اصول نظریه نسبیت خاص اینشتین و برخی نتایج مهم آن را به درستی توضیح دهید. به ویژه انتظار می رود که بتوانید پرسش های زیر را پاسخ دهید:

- ۱ درباره مساله ششم هیلبرت (Hilbert's sixth problem) تحقیق کنید.
 - ۲ سه تغییر مهم اینشتین در مکانیک نیوتنی برای برساختن نسبیت خاص چیست؟
 - ۳ اصل نسبیت اینشتین چیست؟ این اصل چه تفاوتی با نسبیت نیوتنی دارد؟
 - ۴ اصل ثبات سرعت نور را بیان کنید. دلایل تجربی و نظری برای پذیرش این اصل چیست؟
 - ۵ منظور از نسبیت همزمانی چیست؟
 - ۶ به نظر شما دلیل اصلی پدیده اتساع زمان در مکانیک نسبیتی چیست؟ فرمول اتساع زمان را بنویسید.
 - ۷ به نظر شما دلیل اصلی پدیده انقباض طول در مکانیک نسبیتی چیست؟ فرمول انقباض طول نسبیتی را بنویسید.
 - ۸ به نظر شما آیا پدیده های انقباض طول و اتساع زمان واقعا در طبیعت رخ می دهند؟ درباره این دو تحقیق کنید.
- اگر درباره هرکدام از مفاهیم یاد شده بالا مشکلی احساس می کنید، لطفا درس را یک بار دیگر مرور کنید.

فراموش نکنیم که بهترین راه برای درک و ” درونی سازی ” مفاهیم ریاضی و فیزیک، حل مساله است. به همین دلیل سعی کنید دانسته های خود را با حل سوالات زیر محک زده و تقویت کنید.

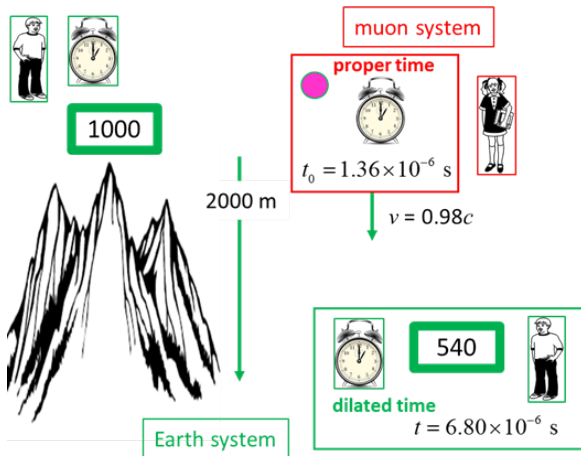


تمرین ها: زمان تحویل ۴ آبان ماه

- نشان دهید که شکل معادله موج سه بعدی تحت تبدیلات لورنتس تغییر نمی کند.
- نشان دهید که شکل معادلات ماکسول تحت تبدیلات لورنتس تغییر نمی کند.

مبحث بعدی: نتایج نظریه نسبیت خاص اینشتین

در جلسات بعد برخی از نتایج نسبیت خاص را به صورت دقیق تر بررسی کرده و شواهد تجربی برای درستی این نظریه را ارائه خواهیم کرد.



مراجع

- ➊ Introduction to Special Relativity; Robert Resnick
- ➋ Relativity: Special, General, and Cosmological; Wolfgang Rindler
- ➌ General Relativity: An Introduction for Physicists; M. P. Hobson, G. P. Efstathiou, A. N. Lasenby
- ➍ Introduction To Special Relativity; Markus Klute
<https://ocw.mit.edu/courses/8-20-introduction-to-special-relativity-january-ia>
- ➎ Leonard Susskind's Special Relativity, Find in YouTube

با سپاس از توجه شما

