درس گفتار

دوره‌ی آشنایی مقدماتی با نظریه‌ی نسبیت عام انیشتین

ارائه کننده: فرهنگ لران

تهیه کننده: مریم اشرفی

جلسه‌ی ۲

نسبیت خاص

مفهوم ناظر

برای اندازه گیری طول یک میله باید دو سر آن را به طور همزمان اندازه گیری کرد. بدین منظور فرض کنید که دو لامپ در دو انتهای میله قرار داده باشیم. برای اندازه گیری طول میله باید این دو را به طور همزمان روشن کنیم. به دلیل متناهی بودن سرعت نور، با اندازه گیری اختلاف زمانی میان دو تپ نوری به سادگی می‌توان طول میله را اندازه گیری کرد. اما نکته ی مهم در اینجا این است که شخص آزمایش کننده چگونه می‌تواند از همزمان روشن شدن این دو لامپ اطمینان حاصل کند؟

یک راه برای تعیین هم‌زمانی این است که شخص در وسط میله بایستد و همراه با آن حرکت کند. بدین سان اگر دو تپ نوری هم‌زمان به او برسند به این معنا است که دو لامپ هم‌زمان روشن شده اند. در این روش تنها افردی که با میله حرکت می‌کنند می‌توانند طول آن را اندازه‌گیری کنند. مشکلی که در اینجا وجود دارد این است که افرادی که با میله حرکت می‌کنند مرجح هستند. درحالی که در نسبیت گالیه‌ایی همه‌ی ناظر های لخت هم ارزهستند. بدین ترتیب یک فرد به تنهایی نمی‌تواند هم‌زمان بودن دو رویداد را مورد بررسی قرار دهد. روش دیگر برای تعیین همزمانی این است که در همه‌ی نقاط فضا افرادی که مجهز به ساعت‌های هم‌زمان شده هستند قرار دهیم. هنگامی که دو سر میله روشن می‌شود افرادی که دو سر میله مقابل آنها است زمان روشن شدن را ثبت می‌کنند. اگر زمانی که این دو فرد گزارش می‌کنند یکی باشد در این صورت دو لامپ هم‌زمان روشن شده‌اند و با اندازه‌گیری فاصله‌ی میان این دو فرد می‌توان طول میله را اندازه‌گیری کرد. مزیت این روش این است که مسئله‌ی متناهی بودن سرعت نور در آن مطرح نیست. بدین ترتیب، یک فرد به تنهایی ناظر نیست.

در فضای هم‌گن «ناظر» مجموعه‌ایی از ساعت‌های هم‌زمان شده است

که در تمام نقاط فضا قرار گرفته اند و نسبت به هم ساکن هستند.

هم‌گنی فضا به این معناست که هر دونقطه‌ی دلخواه فضا شبیه هم هستند. یعنی هیچ یک از نقاط فضا بر دیگری مرجح نیست. بدین ترتیب، ساعت‌های ساکنی که در نقاط مختلف فضا قرار دارند مزیتی بر یکدیگر ندارند و با آهنگ یکسان کار می‌کنند.

در هرنقطه‌ایی از فضا یک ساعت وجود دارد هنگامی که یک اتفاق در یک نقطه‌ی فضا رخ می‌دهد ساعتی که در آن نقطه قرار دارد زمان وقوع آن را ثبت می‌کند که این، «رویداد» نامیده می‌شود.

«رویداد» یک اتفاق است که در یک لحظه و در یک نقطه‌ی مشخص از فضا رخ داده است.

نکته‌ی مهمی که در اینجا باید به آن توجه کرد این است که مسئله‌ی هم‌زمانی به دلیل متناهی بودن سرعت نور مطرح می‌شود. زیرا اگر سرعت نور نامتناهی باشد هر کسی با هر فاصله‌ای از لامپ،روشن شدن آن را آناً گزارش می‌کند. در این صورت یک فرد به تنهایی یک ناظر است.

▪ اصول موضوعه‌ی نسبیت خاص

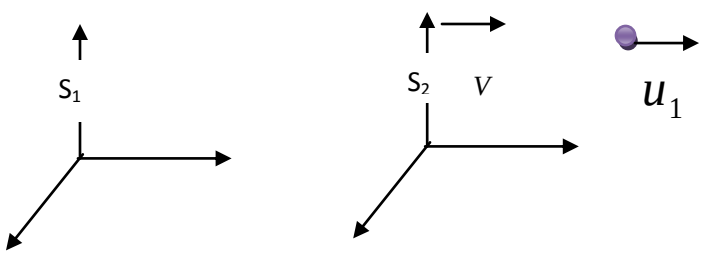
در نسبیت گالیه‌ای که حوزه‌ی آن مکانیک است دو اصل زیر وجود دارد:

۱. همه‌ی ناظرهای لخت معتبر و هم ارز هستند.
۲. ضرب آهنگ زمان از نظر همه‌ی ناظر ها ی لخت یکسان است.

در فضای هم‌گن ضرب آهنگ زمان برای مجموعه‌ی افرادی که نسبت به هم ساکن هستند و یک ناظر را تعریف می‌کنند، یکسان است. در نسبیت گالیله‌ایی فرض بر این است که ضرب آهنگ زمان برای دو ناظر لخت که نسبت به هم حرکت می‌کنند نیز یکسان است. نتیجه‌ی این دو اصل جمع نسبی سرعت ها است.

دو ناظر را در نظر بگیرید که با سرعت ثابت نسبت به یکدیگر حرکت می‌کنند اگر سرعت جسمی از نظر ناظر ۱ برابر با u_1 باشد و سرعت ناظر ۲ از نظر ناظر ۱ برابر با V باشد در این صورت سرعت گلوله از نظر ناظر ۲، u_2 برابر است با

$$u_2 = V - u_1$$



شکل ۱

قوانین مکانیک تحت تبدیلات گالیله تغییر ناپذیر هستند. سوالی که در اینجا مطرح می‌شود این است که آیا نظریه‌ی ماکسول نیز تحت این تبدیلات ناوردا است؟

در نظریه‌ی ماکسول سرعت نور ثابت است:

$$c = \frac{1}{\sqrt{\varepsilon_0 \mu_0}}$$

که در آن $\varepsilon_0 = 8.8\times10^{-12}$ و $\mu_0 = 4\times10^{-7}$ به ترتیب گذردهی خلأ و تراوایی مغناطیس خلأ هستند که مقادیر آنها برای همه‌ی ناظرهای لخت یکسان است.[1] بدین سان، سرعت نور برای همه‌ی ناظرهای لخت یکسان است. یکسان بودن سرعت نور برای ناظرهای مختلف با قانون جمع سرعت نسبی گالیله‌ای در تضاد است. برای رفع این مشکل دو راه حل وجود دارد:

۱. معادلات ماکسول به شکلی که ماکسول ارائه کرده درست نیستند و سرعت نور نیز ثابت نیست.
۲. اصول نسبیت گالیله صحیح نیستند.

آزمایش‌های زیادی چون آزمایش مایکلسون-مورلی برای رد ثابت بودن سرعت نور صورت گرفت. اما همه‌ی آنها ناکام ماند. همچنین درستی معادلات ماکسول از طریق آزمایش‌های متعددی ثابت شده است. بنابراین اصول گالیله درست نیستند. از نظر انیشتین اصل دوم گالیه صحیح نبود. از این رو، انیشتین اصول موضوعه‌ی خود را به شکل زیر بیان کرد

۱. همه‌ی ناظرهای لخت معتبر و هم ارز هستند.
۲. سرعت نور برای همه‌ی ناظرهای لخت یکسان و برابر با c است.

در نظریه‌ی نسبیت خاص انیشتین سرعتی بیشتر از سرعت نور وجود ندارد و هر ذره‌ی بدون جرمی با سرعت نور حرکت می‌کند.

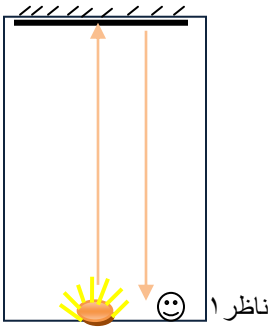
از پیامدهای این اصول موضوعه اتساع زمان و انقباض طول است که این دو نتیجه از نظر تجربی نیز به اثبات رسیده است. در ادامه به بررسی این دو پدیده می‌پردازیم.

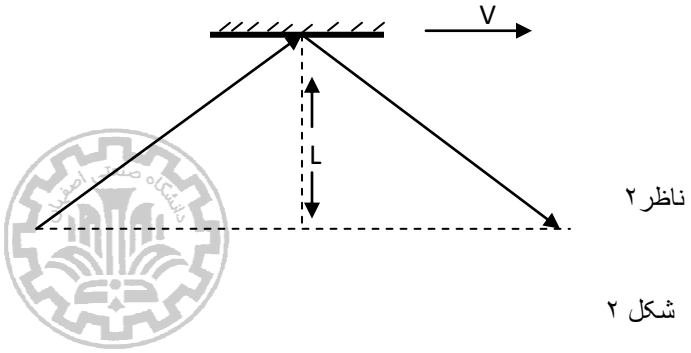
---

[1] برای ناظرهای نالخت مقدار این دو متفاوت است. زیرا خلأ ناظر لخت از نظر ناظرهای نالخت خلأ نیست بلکه حاوی تابش‌های الکترومغناطیس است.

▪ اتساع زمان

در نسبیت خاص انیشتین اصل هم‌زمانی ضرب آهنگ یکسان همه‌ی ناظرهای لخت کنار گذاشته می‌شود. بدین ترتیب، سوالی که در اینجا مطرح می‌شود چگونگی تغییر ضرب آهنگ زمان برای ناظرهای لخت است. بدین منظور یک جعبه که در بالای آن یک آینه متصل شده است (شکل۲) را درنظر بگیرید. لامپی که با فاصله‌ی زمانی مشخص خاموش و روشن می‌شود را در پایین جعبه قرارمی‌دهیم. همچنین آشکار سازی در پایین جعبه قرار گرفته است که هنگامی که لامپ روشن می‌شود و وقتی که نور از آینه بازتاب می‌شود، یک تیک می‌زند.





شکل ۲

بدین سان ما یک ساعت نوری داریم. اگر طول جعبه برابر با L باشد آنگاه فاصله‌ی زمانی میان فرستادن نور و دریافت آن برابر با $\Delta t = \frac{2L}{c}$ است. حال جعبه‌ی دیگری مشابه با این جعبه درنظر بگیری که با سرعت V حرکت می‌کند. از نظر ناظری که با جعبه حرکت می‌کند (ناظر ۲) آنگاه فاصله ی زمانی میان فرستادن نور و دریافت آن برابر با $\Delta t = \frac{2L}{c}$ است. از نظر ناظر ۱ فاصله‌ی این زمانی برابر است با

$$\Delta t' = \frac{2d}{c} = 2\frac{\sqrt{\frac{V^2 \Delta t'^2}{4} + L^2}}{c}$$

$$\Delta t' = \frac{\frac{2L}{c}}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}} = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}} > \Delta t$$

بنابراین فاصله‌ی میان دو تیک متوالی ساعت ناظر ۲ از نظر ناظر ۱ کند شده است. به دلیل نسبی بودن سرعت ، از نظر ناظر ۲ ناظر ۱ با سرعت $-V$ حرکت می‌کند و ضرب آهنگ ساعت آن کند شده است. از نظر ناظر ۲ رویدادها هم‌مکان هستند. زیرا فرستادن و دریافت نور از نظر این ناظر در یک مکان رخ داده است (ناظر همراه). این رویداد هم‌مکان نامیده می‌شود. درحالی که از نظر ناظر ۱ رویدادها هم‌مکان نیستند. و روشن است که زمانی که ناظرهای غیر هم‌مکان اندازه‌گیری می‌کنند از زمانی که ناظر هم‌مکان اندازه‌گیری می‌کند بیشتر است. از این رو، به زمان اندازه‌گیری شده توسط ناظری که رویدادها از نظر آن هم‌مکان هستند «**زمان ویژه**» نامیده می‌شود.

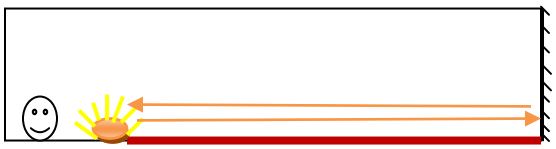
زمانی که همه‌ی ناظرها اندازه‌گیری می‌کنند از زمانی که ناظر همراه اندازه‌گیری

می‌کند، یعنی از زمان ویژه ، بزرگتر است. که این پدیده اتساع زمان نامیده می‌شود.

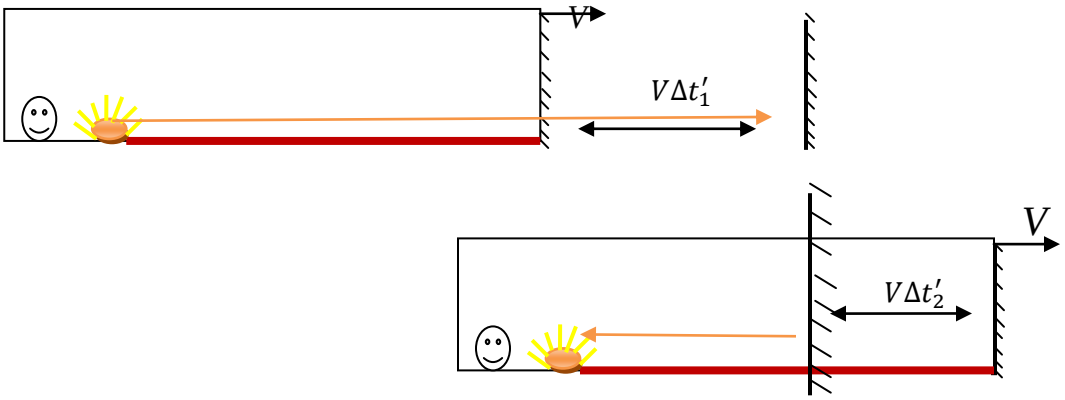
اندازه‌گیری نیم‌عمر میون‌ها تأییدکننده‌ی اتساع زمان است.در جو زمین در اثر تابش‌های پرانرژی، ذراتی به نام میون تولید می‌شوند. این ذرات با سرعتی نزدیک سرعت نور حرکت می‌کنند. میون‌ها ذراتی با بارالکتریکی برابر با بار الکترون و جرم ۱۰۵ مگا الکترون ولت هستند. نیم عمر آن‌ها (زمانی که جمعیت میون‌ها نصف می‌شود) در آزمایشگاه برابر با 10^{-6}ثانیه است. اگر نسیبت گالیله‌ای را درنظر بگیریم، تعداد میون‌هایی که از جو می‌آیند پس از طی مسافت ۳۰۰ متر نصف می‌شوند. بنابراین انتظار نداریم که در آزمایشگاه میون‌های تولید شده در جو را آشکار کنیم. در حالی که ما این میون‌ها را آشکار می‌کنیم که این به معنای بزرگتر شدن نیم‌عمر میون‌ها از نظر ناظر آزمایشگاه است.

▪ انقباض طول

در این بخش می‌خواهیم طول یک میله را از نظر ناظرهای مختلف محاسبه کنیم. بدین منظور مطابق شکل ۳ در انتهای میله یک آینه وصل می‌کنیم. زمان رفت و برگشت نور از نظر ناظر ساکن نسبت به میله برابر با $\Delta t = \frac{2L}{c}$ است.



شکل ۳



شکل ۴

حال دستگاهی مشابه این درنظر بگیرید که با سرعت V نسبت به ناظر ۱حرکت می‌کند. از نظر ناظری که در دستگاه ۲ قرار گرفته، زمان رفت و برگشت نور برابر با $\Delta t = \frac{2L}{c}$ است. حال می‌خواهیم طول میله‌ی متحرک را از نظر ناظر ۱ بدست آوریم. از نظر این ناظر هنگامی که تپ نوری فرستاده می‌شود، هم‌زمان آینه نیز به اندازه‌ی $V\Delta t_1'$ به سمت راست حرکت می‌کند؛ که $\Delta t_1'$ زمانی است که از نظر ناظر ۱ نور به آینه برخورد می‌کند. اگر L' طول میله از نظر ناظر ۱ باشد، $\Delta t_1'$ از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\Delta t_1' = \frac{L' + V\Delta t_1'}{c} \quad \Rightarrow \quad \Delta t_1' = \frac{L'}{\left(1 - \frac{V}{c}\right)}$$

زمانی که نور به آینه می‌خورد و به آشکار ساز می‌رسد را با $\Delta t_2'$ نشان می دهیم. در این مدت میله به اندازه‌ی $V\Delta t_2'$به سمت راست حرکت کرده است. بنابراین $\Delta t_2'$از رابطه‌ی زیر بدست می‌آید:

$$\Delta t_2' = \frac{L' - V\Delta t_2'}{c} \quad \Rightarrow \quad \Delta t_2' = \frac{L'}{\left(1 + \frac{V}{c}\right)}$$

بدین ترتیب کل زمان رفت و برگشت نور از نظر ناظر ۱ برابر است با

$$\Delta t' = \Delta t_1' + \Delta t_2' = \frac{L'}{\left(1 - \frac{V}{c}\right)} + \frac{L'}{\left(1 + \frac{V}{c}\right)} = \frac{2L'}{\left(1 - \frac{V^2}{c^2}\right)}$$

با استفاده از رابطه $\Delta t' = \frac{\Delta t}{\sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}}$ و جایگذاری در رابطه‌ی بالا چنین داریم

$$L' = \sqrt{1-\frac{V^2}{c^2}}L$$

بنابراین از نظر ناظر ۱ طول میله کوتاه شده است. این پدیده انقباض طول نامیده می شود. در اینجا L طول ویژه است. منظور از طول ویژه طولی است که ناظر همراه اندازه‌گیری می‌کند.

طول اجسام متحرک نسبت به طول ویژه، در راستای حرکت منقبض می شود.

▪ رویدادهای علی

با بکارگیری تبدیلات میان دستگاه های لخت به این نتیجه ی مهم می رسیم که خیز مانند یک دوران در فضا زمان است.

یک میله که دو سر آن لامپ متصل شده است را در نظر بگیرید. اگر از نظر ناظر همراه روشن شدن این دو لامپ هم‌زمان باشد، $\Delta t = 0$، آشکار است که از نظر ناظری که میله نسبت به آن به سمت راست حرکت می‌کند نور سر میله زودتر از نور انتهای میله به آن می‌رسد. بدین‌ترتیب هم‌زمانی یک مفهوم نسبی است. بنابراین رابطه‌ی بین این نوع رویدادها نمی‌تواند علّی باشد. در چنین رویدادهایی

$$C^2\Delta t^2 - \Delta x^2 < 0$$

این رویدادها «فضا گونه» نامیده می شود و ترتیب وقوع آن‌ها از نظر ناظرهای لخت مختلف، متفاوت است.

به روی‌دادهایی که برای آن‌ها،

$$.C^2\Delta t^2 - \Delta x^2 > 0$$

زمان‌گونه می‌گوییم. چون برای این رویدادهای ناظری وجود دارد که $\Delta x = 0$ است. به بیان دیگر، اگر یک ناظر ادعا کند که رویداد ۱ قبل از رویداد ۲ رخ داده است، در این صورت همه ناظرهای لخت نیز ادعا می‌کنند که رویداد ۱ قبل از رویداد ۲ رخ داده است. رابطه‌ی بین این روی‌دادها می‌تواند علّی باشد.

به رویدادهایی که برای آنها $C^2\Delta t^2 - \Delta x^2 = 0$ *نورگونه گفته می شود.*

ترکیب $\Delta t^2 - \Delta x^2$ تحت خیز ناوردا است یعنی از نظر همه‌ی ناظرهای لخت یکسان است. که این مشابه ناوردایی طول، تحت دوران در فضای اقلیدسی است

مرجع:

فصل دوم «فیزیک جدید» نوشته‌ی کنت اس. کرین. ترجمه‌ی منیژه رهبر و بهرام معلمی، مرکز نشر دانشگاهی.