

مبانی نسبیت خاص

آزمایش مایکلسون-مورلی

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.

- 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.

- برای ضبط این درس ها از نرم افزار Camtasia استفاده شده است.

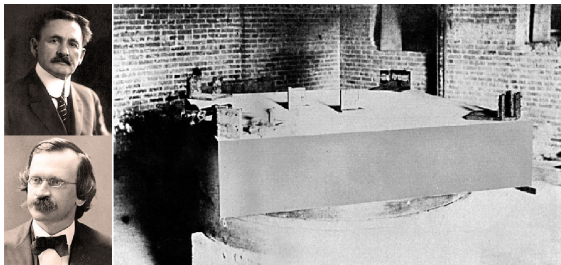
- ۱. آزمایش مایکلسون-مورلی
- ایده فرنل و آزمایش فیزو
- آزمایش مایکلسون-مورلی
- نتیجه آزمایش مایکلسون-مورلی

آنچه گذشت: معادلات ماکسول و امواج الکترومغناطیسی

- 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 درست و درباره الکترومغناطیس نادرست 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 درستند؛ 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 درست مکانیکی را یافت. در این صورت، انحراف از قوانین مکانیک نیوتنی باید به صورت تجربی در آزمایشگاه ها تایید شود.

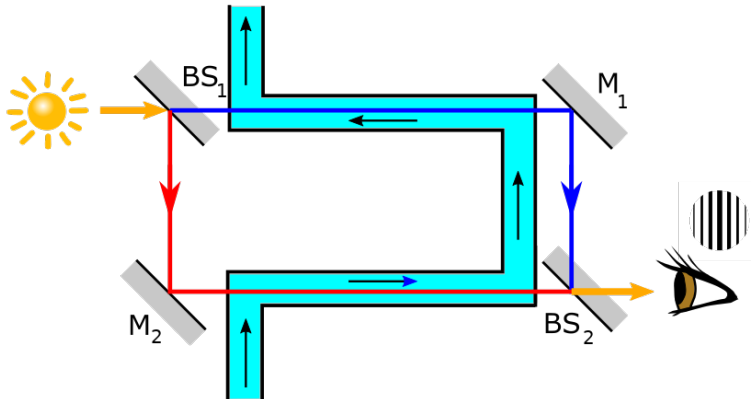
اهداف این جلسه

در این جلسه می خواهیم مشهورترین آزمایش برای درک اثر اتر را بررسی کنیم. این آزمایش همان آزمایش مایکلسون و مورلی است که نتیجه منفی آن به عنوان مهم ترین دلیل برای عدم وجود اتر (عدم وجود چارچوب مرجع مطلق) تفسیر شد. این آزمایش تلاش می کند اثر جابجایی زمین در اتر حامل نور را نشان دهد. البته پیش از آن نشان خواهیم داد که انتشار نور در محیط های متحرک را می توان واقعا در آزمایشگاه دید. این را آزمایش فیزو می نامند که بر اساس ایده و محاسبات فرنل بنا شده است. نتیجه مثبت آزمایش فیزو و نتیجه منفی آزمایش مایکلسون-مورلی (و البته آزمایشات دیگر) نشان داد که باید فرضیه اتر را به سود نسبیت خاص کنار گذاشت.



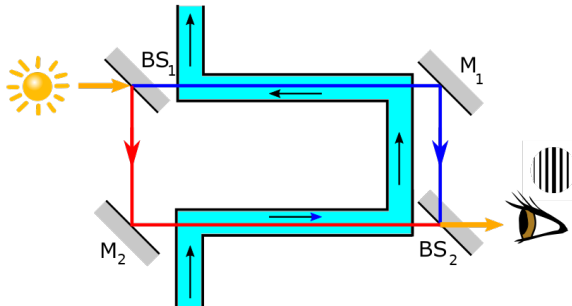
انتشار نور در محیط مادی متحرک

- در جلسه قبل توضیح دادیم که اگر محیط حامل نور حرکت کند، آنگاه می توان اثر این حرکت را در سرعت انتشار نور دید. فرنل (Fresnel) اولین بار این اثر را در سال ۱۸۱۷ پیش بینی و محاسبه کرد و فیزو (Fizeau) نیز آن را در سال ۱۸۵۱ در آزمایشگاه تایید نمود.



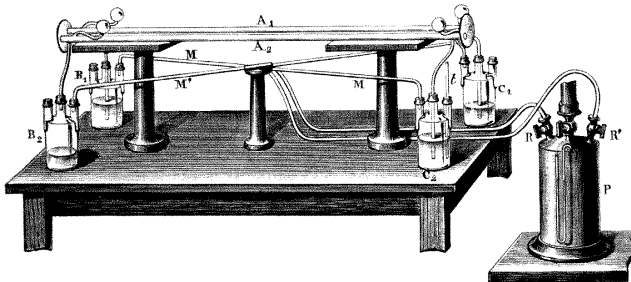
طرح آزمایش فیزو

- آزمایش بدین صورت طرح شده است: جریان آب از پایین به بالا (بخش آبی رنگ) در شکل زیر را در نظر بگیرید. فرض کنید نور از منبع خود به آینه نیمه نقره اندود BS_1 وارد شده و بخشی از آن از درون آب به آینه M_1 رسیده، سپس وارد آینه نیمه نقره اندود BS_2 شده و نهایتاً به چشم مشاهده گر (تلسکوپ) می رسد. بخش دیگری از نور ورودی نیز پس از ورود به آینه نیمه نقره اندود BS_1 به آینه M_2 وارد شده و سپس وارد محیط آبی در حال حرکت شده و در نهایت پس از عبور از آینه نیمه نقره اندود BS_2 به چشم مشاهده گر می رسد.



نتیجه آزمایش فیزو

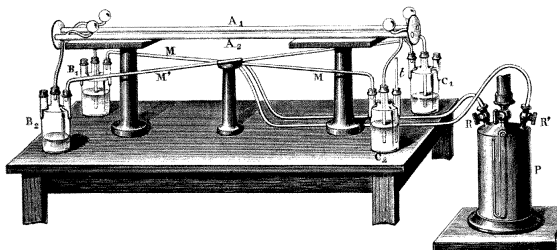
- اگر ضریب شکست نور در آب را با n نشان دهیم، آنگاه سرعت نور در آب ساکن برابر c/n خواهد بود. حال اگر سرعت جریان آب در لوله را با v_w نشان دهیم، بنا به تبدیلات گالیلئ انتظار داریم که سرعت نور درون آب وقتی هم جهت جریان آب حرکت می کند برابر $v_+ = \frac{c}{n} + v_w$ و سرعت نور درون آب وقتی در خلاف جهت جریان آب حرکت می کند برابر $v_- = \frac{c}{n} - v_w$ باشد. ولی چنین چیزی کشف نشد. در عوض به صورت آزمایشگاهی کشف شد که سرعت نور درون آب به صورت $v_{\pm} = \frac{c}{n} \pm v_w (1 - \frac{1}{n^2})$ تغییر می کند. این یک فرمول شهودی (Heuristic) است؛ یعنی منحصر چنان تنظیم شده است که با اطلاعات موجود منطبق باشد.



نتیجه آزمایش فیزو

ضریب $1 - \frac{1}{n^2}$ پیشتر هم در مشاهده ابیراهی نور ظاهر شده بود. این ضریب را ضریب کشش فرنل می نامند زیرا فرنل اولین بار با ایده کشش اتری تلاش کرد آن را توضیح دهد. بعدا درباره چالش های این فرضیه فرنل بحث خواهیم کرد.

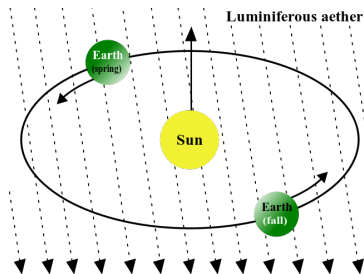
فعلا به یاد داشته باشید که سرعت اندازه گیری شده برای سرعت نور در آب متحرک با انتظار ما از تبدیلات گالیلئ همخوانی ندارد؛ هرچند بالاخره نشان می دهد که اثر حرکت محیط حامل نور می تواند باعث تغییر سرعت نور شود. دانشمندان همین انتظار را برای حرکت نور در اتر داشتند، ولی آزمایش مایکلسون-مورلی چنین چیزی را نشان نداد. یکی از تفاسیر منفی بودن آزمایش مایکلسون-مورلی می توانست این باشد که اتر وجود ندارد!



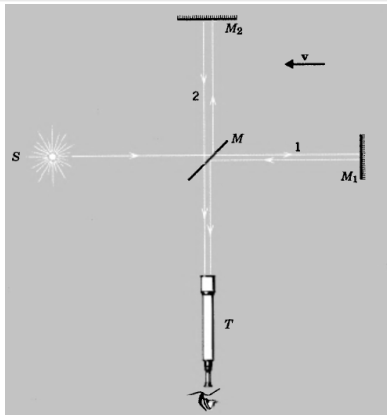
باد اتری

● آزمایش مایکلسون-مورلی در واقع تلاشی است برای یافتن اثر باد اتری. یعنی اگر زمین در محیط اتری حرکت کند، آنگاه باید بتوان به طریقی اثر حرکت نسبی زمین و اتر را اندازه گرفت. این اثر بسیار شبیه است به وقتی که ما در هوای کاملاً آرام دوچرخه سواری می کنیم. با وجودی که باد در محیط نمی وزد، ولی ما همچنان نسیمی را بر صورت خود احساس می کنیم. این البته به دلیل حرکت ما به محیط است. مایکلسون-مورلی انتظار داشتند که بتوانند با دستگاه خود حرکت زمین نسبت اتر را نشان دهند.

● مورد مشابه دیگر، حرکت هواپیما نسبت به جریان هواست. این مورد به عنوان تمرین در جلسه اول مطرح شد.



تداخل سنج مایکلسون-مورلی

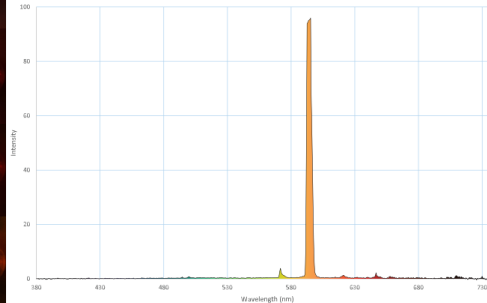
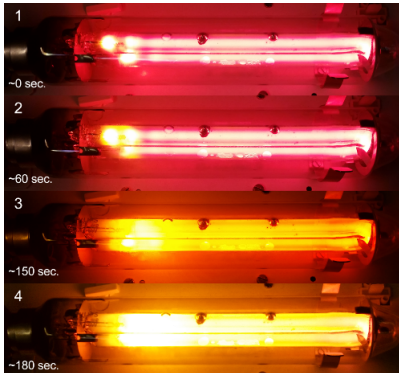


شکل مقابل نشان دهنده طرح کلی تداخل سنج مایکلسون-مورلی است. باریکه نور از منبع آزمایشگاهی S به آینه نیمه نقره اندود M وارد شده و دو مسیر متفاوت را می پیماید (زاویه آینه M با باریکه ورودی $\pi/4$ است). در مسیر ۱، باریکه به آینه M_1 برخورد کرده و پس از برخورد مجدد به آینه نیمه نقره اندود M وارد تلسکوپ می شود. در مسیر ۲، باریکه به آینه M_2 برخورد کرده و پس از برخورد مجدد به آینه نیمه نقره اندود M وارد تلسکوپ می شود. دو مسیر ۱ و ۲ بر هم عمود هستند. دو باریکه ۱ و ۲ پس از ورود به تلسکوپ، تداخل کرده و نقش فریز را به ما می دهند. این نقش را در اسلایدهای بعد ببینید. تداخل دو باریکه نور، بسته به اختلاف فاز دو باریکه، می تواند سازنده یا ویرانگر باشد.

اهمیت تداخل سنج مایکلسون-مورلی در دقت آن است؛ به ویژه اینکه این تداخل سنج می تواند تا مرتبه $(v/c)^2$ را اندازه گیری کند.

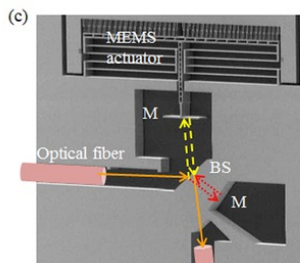
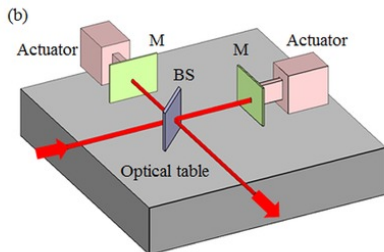
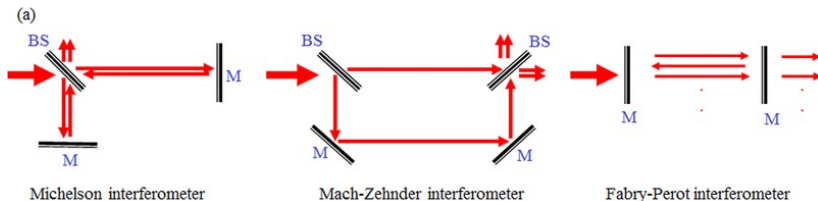
چشمه نور: لامپ بخار سدیم

- مایکلسون و مورلی از لامپ بخار سدیم به عنوان منبع نور خود استفاده کردند. این لامپ در فشار پایینی می تواند نور نسبتاً تک رنگی را فراهم کند. در حال حاضر از لیزرها برای چنین آزمایشاتی استفاده می کنند زیرا نور لیزر تا حد امکان تک رنگ است.

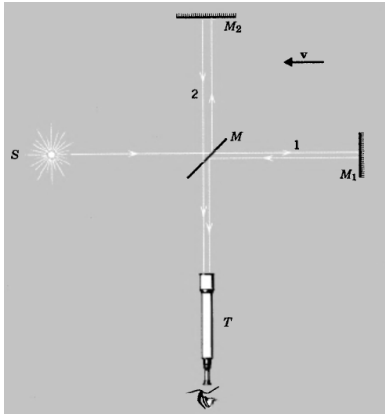


تداخل سنج ها

در باره انواع تداخل سنج ها تحقیق کنید. مدرن ترین نوع تداخل سنج، آشکارساز امواج گرانشی لایگو LIGO است.



آزمایش مایکلسون-مورلی

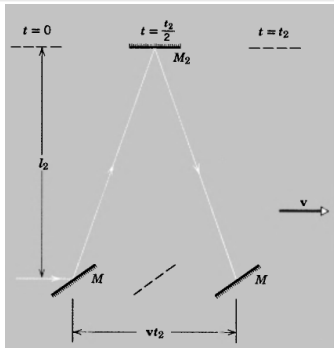


اکنون می خواهیم اختلاف فاز بین باریکه های ۱ و ۲ را محاسبه کنیم. برای اینکار لازم است در ابتدا زمان طی شده در مسیرهای ۱ و ۲ را بیابیم. فرض کنید باد اتری از سمت راست به چپ در شکل مقابل می وزد. در این صورت سرعت نور در جهت باد اتری برابر $c + v$ و سرعت نور درخلاف جهت باد اتری برابر $c - v$ می باشد. بنابراین، زمان طی شده توسط باریکه از M به M_1 و بالعکس برابر است با

$$t_1 = \frac{l_1}{c - v} + \frac{l_1}{c + v} = \frac{2l_1}{c} \left(\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)$$

این محاسبه در چارچوب تداخل سنج انجام شده است. وضعیت در مورد مسیر ۲ کمی متفاوت است. اسلاید بعد را ببینید.

آزمایش مایکلسون-مورلی



برای محاسبه زمان طی شده در مسیر ۲ توسط باریکه نور از M به M_2 و بالعکس، با توجه به شکل مقابل و با استفاده از قضیه فیثاغورس داریم:

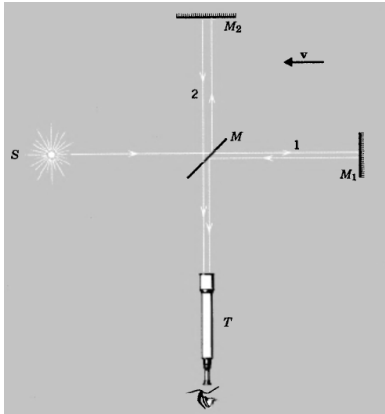
$$(c \frac{t_2}{2})^2 = l_2^2 + (\frac{vt_2}{2})^2$$

از اینجا می توان زمان t_2 را یافت:

$$t_2 = \frac{2l_2}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2l_2}{c} \left(\frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right)$$

محاسبه t_2 در چارچوب اتر انجام شده است (چرا؟؟؟؟!). البته زمان نیوتنی مطلق است و ما لازم نیست نگران چارچوب های مختلف برای اندازه گیری زمان باشیم (همه ساعت های نیوتنی با هم توافق دارند). این وضعیت در سینماتیک نسبیتی تغییر خواهد کرد.

آزمایش مایکلسون-مورلی



اختلاف دو زمان یاد شده برابر است با

$$\Delta t = t_2 - t_1 = \frac{2}{c} \left(\frac{l_2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} - \frac{l_1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} \right)$$

ما در واقع همین کمیت را نیاز داریم و باید در آن شرط $l_1 = l_2$ را به دقت رعایت کنیم. با توجه به دقت فوق العاده آزمایش چنین امکانی عملاً در قرن نوزدهم فراهم نبوده است. در عوض، مایکلسون و مورلی دستگاه را به اندازه $\pi/2$ چرخانیدند. دستگاه در مقدار بسیار زیادی جیوه شناور بوده است و چرخش دستگاه به راحتی قابل انجام بوده است. در صورت چرخش 90° درجه ای دستگاه می توان مقدار زیر را برای اختلاف زمان دو مسیر ۱ و ۲ به دست آورد:

$$\Delta t' = t'_2 - t'_1 = \frac{2}{c} \left(\frac{l_2}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{l_1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right)$$

آزمایش مایکلسون-مورلی

بنابراین، چرخش 90° درجه ای تداخل سنج تفاضل های زمانی بین دو مسیر را تغییر می دهد. مقدار این تغییر برابر است با:

$$\Delta t' - \Delta t = \frac{2(l_1 + l_2)}{c} \left(\frac{1}{1 - \frac{v^2}{c^2}} - \frac{1}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \right)$$

مقدار این کمیت تا درجه دوم نسبت سرعت ها یعنی v/c برای ما مهم است. اگر از بسط دو جمله ای نیوتن

$$(1 \pm x)^n = 1 \pm \frac{nx}{1!} + \frac{n(n-1)x^2}{2!} + \dots \quad (x^2 < 1)$$

$$(1 \pm x)^{-n} = 1 \mp \frac{nx}{1!} + \frac{n(n+1)x^2}{2!} \mp \dots \quad (x^2 < 1)$$

استفاده کنیم خواهیم داشت:

$$\Delta t' - \Delta t = \frac{2(l_1 + l_2)}{c} \left(1 + \frac{v^2}{c^2} + \dots - \left(1 + \frac{v^2}{2c^2} + \dots \right) \right) = \frac{l_1 + l_2}{c} \left(\frac{v^2}{c^2} \right) + \mathcal{O}\left(\frac{v}{c}\right)^4$$

از آنجا که رابطه فازی بین باریکه های ۱ و ۲ در اثر چرخش تداخل سنج تغییر می کند، این تکنیک بسیار جالب باعث جابجایی فریزها می شود.

آزمایش مایکلسون-مورلی

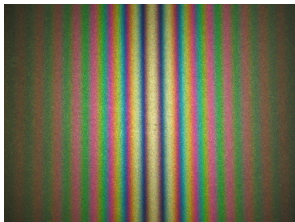
• حال می توان مقدار جابجایی فریزها را برای یک باریکه نور به طول موج λ و دوره تناوب T اندازه گرفت:

$$\Delta N = \frac{\Delta t' - \Delta t}{T} = \frac{l_1 + l_2}{\lambda} \left(\frac{v^2}{c^2} \right)$$

در طرح آزمایش مایکلسون و مورلی، طول راه نوری $l_1 + l_2$ تا حدودا ۲۲ متر رسیده بود. همچنین، اگر فرض کنیم اثر ثابت و زمین با سرعت $v = 30 \text{ m/s}$ در حال حرکت است، داریم $v/c = 10^{-4}$. به علاوه اگر طول موج نور مورد استفاده $\lambda = 5.5 \times 10^{-7} \text{ m}$ باشد، جابجایی فریزها تقریبا برابر

$$\Delta N = \frac{\Delta t' - \Delta t}{T} = \frac{l_1 + l_2}{\lambda} \left(\frac{v^2}{c^2} \right) = \frac{22 \text{ m}}{5.5 \times 10^{-7} \text{ m}} \times 10^{-8} = 0.4$$

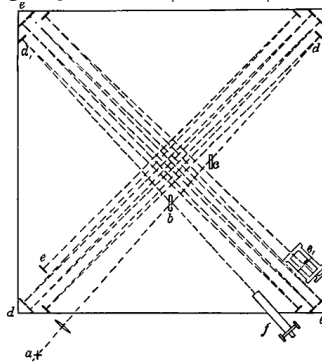
خواهد بود. وضعیت فریزهای تشکیل شده را در شکل زیر ببینید.



آزمایش مایکلسون-مورلی

● نتیجه آزمایش مایکلسون مورلی منفی بود؛ یعنی هیچ جابجایی فریزی مشاهده نشد!

● برای افزایش دقت، آزمایشگران آینه هایی را اضافه کردند به طوری که باریکه های نور تا هشت بار در رفت و برگشت بودند. اینکار باعث می شد که راه نوری افزایش یابد و جابجایی هایی به کوچکی 0.01° فریز آشکارسازی شوند. مشاهدات در ساعات مختلف شب و روز، فصل های مختلف و در مکان های مختلف انجام شد. باز هم نتیجه آزمایش منفی بود: اثر باد اتری کشف نشد!



تلاش های دیگر

به جز تلاش های زیر، در طی دو قرن اخیر آزمایشات با طرح های کاملاً متفاوتی برای یافتن اثر اتر مطرح شدند؛ ولی همگی با شکست مواجه بودند. برخی از این آزمایشات در انتهای این درس به عنوان منبع تحقیق آورده شده اند.

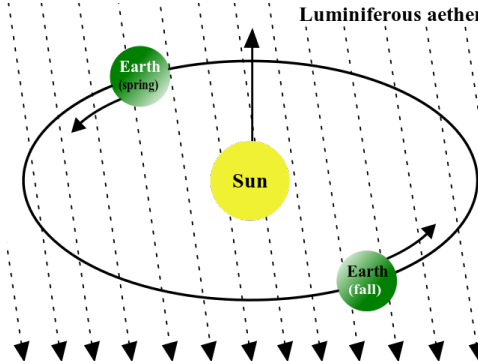
جدول ۱۰۱ کوششهای مربوط به آزمایش مایکلسون-مورلی *

رزنیک

آزمایش کننده	سال	محل آزمایش	l (متر)	جابجایی پیشگویی شده فریزرها توسط نظریه اتر	حد بالای جابجایی مشاهده شده فریزرها
مایکلسون	۱۸۸۱	پوتسدام	۱۲	۰.۰۴	۰.۰۲
مایکلسون و مورلی	۱۸۸۷	کلیولند	۱۱۰	۰.۴۰	۰.۰۱
مورلی و میلر	۱۹۰۲-۱۹۰۴	کلیولند	۳۲۲	۰.۱۳	۰.۰۱۵
میلر	۱۹۲۱	مونت ویلسون	۳۲۰	۰.۱۲	۰.۰۸
میلر	۱۹۲۳-۱۹۲۴	کلیولند	۳۲۰	۰.۱۲	۰.۰۳۰
میلر (با نور خورشید)	۱۹۲۴	کلیولند	۳۲۰	۰.۱۲	۰.۰۱۴
توماسک (با نور ستاره)	۱۹۲۴	هایدبرگ	۸۶	۰.۳	۰.۰۲
میلر	۱۹۲۵-۱۹۲۶	مونت ویلسون	۳۲۰	۰.۱۲	۰.۰۸۸
کندی	۱۹۲۶	پاسادنا و مونت ویلسون	۲۰	۰.۰۷	۰.۰۰۲
اپلینگه و رت	۱۹۲۷	پاسادنا	۲۰	۰.۰۷	۰.۰۰۰۴
پیکارد و استاهل	۱۹۲۷	مونت ریچی	۲۸	۰.۱۳	۰.۰۰۶
مایکلسون و همکاران	۱۹۲۹	مونت ویلسون	۲۵۹	۰.۹	۰.۰۱۰
یوس	۱۹۳۰	پنا	۲۱۰	۰.۷۵	۰.۰۰۲

نتیجه آزمایش مایکلسون-مورلی

- ممکن است تصور شود که شاید سرعت نسبی حرکت زمین و اتر به صورت مقطعی صفر باشد (هیچ حرکت نسبی بین این دو نباشد). ولی ما می دانیم که زمین در منظومه شمسی در حال حرکت بیضوی است و تکرار آزمایش مایکلسون و مورلی در ساعات، فصل ها و سال های مختلف، و همچنین در مکان های متفاوت، ما رو مطمئن می سازد که حرکت نسبی زمین-اتر همیشه صفر است (با این وجود، فرضیه کشش اتری را در جلسات آینده ببینید).



نتیجه آزمایش مایکلسون-مورلی

به نظر می رسد که سرعت نور در تمام دستگاه های لخت، و در تمام جهات، یکی است و این نتیجه ای بود که اینشتین به آن رسید (هرچند، ظاهراً به دلایل متفاوت!). به عبارتی دستگاه مرجع مطلق وجود ندارد، یعنی اتر وجود ندارد! هرچند، این نتیجه به شدت با تبدیلات گالیلله در تضاد است؛ و این یعنی زیر سوال رفتن مکانیک نیوتنی با همه موفقیت هایش! ولی دانشمندان با عجله مفهوم اتر را کنار نگذاشتند بلکه تلاش بسیاری در جهت توضیح پدیده ظاهر شده در آزمایشگاه (در چارچوب فیزیک کلاسیک) داشتند. در جلسه بعد این تلاش ها را مرور خواهیم کرد.



نکات مهم این درس

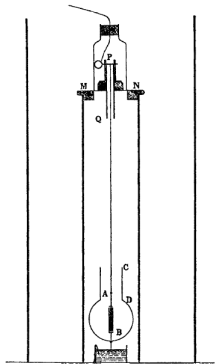
انتظار این است که در انتهای این درس شما بتوانید مفاهیم مربوط به آزمایش مایکلسون-مورلی را به درستی توضیح دهید. به ویژه انتظار می رود که بتوانید پرسش های زیر را پاسخ دهید:

- ۱ درباره فرضیه اتری فرنل تحقیق کنید.
 - ۲ بر اساس تبدیلات گالیلئ انتظار داریم که چه تغییر در سرعت نوری را در آزمایش فیزو مشاهده کنیم؟
 - ۳ تحقیق کنید که ضریب فرنل $1 - \frac{1}{n^2}$ در چه پدیده های اپتیکی دیگری مشاهده می شود.
 - ۴ منظور از باد اتری چیست؟
 - ۵ توضیح دهید که چطور انتظار می رود که در آزمایش مایکلسون-مورلی باد اتری را کشف کنیم.
 - ۶ مایکلسون-مورلی چه اقداماتی را برای افزایش دقت آزمایش خود انجام دادند؟
 - ۷ شباهت آزمایش مایکلسون-مورلی را با هواپیمایی که در باد در حال حرکت است (تمرین جلسه اول) توضیح دهید.
 - ۸ درباره نمونه های پیشرفته تر تداخل سنج مایکلسون-مورلی تحقیق کنید.
 - ۹ چرا چرخاندن میز آزمایش مایکلسون-مورلی به اندازه 90° درجه لازم است؟
 - ۱۰ دقت آزمایش مایکلسون-مورلی تا چه مرتبه ای از v/c می باشد.
 - ۱۱ معنای نتیجه منفی آزمایش مایکلسون-مورلی چیست؟
- اگر درباره هر کدام از مفاهیم یاد شده بالا مشکلی احساس می کنید، لطفا درس را یک بار دیگر مرور کنید.

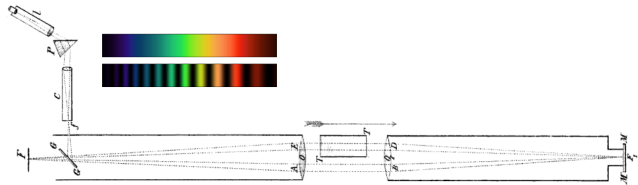
فراموش نکنیم که بهترین راه برای درک و ”درونی سازی“ مفاهیم ریاضی و فیزیک، حل مساله است. به همین دلیل سعی کنید دانسته های خود را با حل سوالات زیر محک زده و تقویت کنید.



تمرین ها: زمان تحویل ۴ آبان ماه



- اختیاری: درباره آزمایش مارتین هاگ (Martin Hoek ۱۸۶۸) که ویرایش جدیدتری از آزمایش فیزو می باشد تحقیق کنید.



- اختیاری: درباره آزمایش تروتون-نوبل (Trouton – Noble)، که تلاش دیگری برای نشان دادن حرکت زمین در اتر است، تحقیق کنید.
- یک آزمایش آکوستیکی شبیه به آزمایش مایکلسون-مورلی پیشنهاد کنید. چه انتظاری از جابجایی فریزها دارید؟
- مسائل شماره ۹، ۱۰ و ۱۳ از کتاب رزنیك را حل کنید.
- درباره تداخل سنج های فابری-پرو و ماخ زندر تحقیق کنید.
- درباره آشکارسازهای امواج گرانشی مانند LIGO و VIRGO تحقیق کنید.

مبحث بعدی: فرضیه انقباض لورنتس-فیتزجرالد

- نتایج منفی آزمایش هایی که به دنبال اتر بودند، نظریه پردازان را ناامید نساخت و آنان برای حفظ مفهوم چارچوب مرجح اتر، و در واقع برای حفظ مکانیک کلاسیک و همه موفقیت هایش، در چند جهت کوشش نمودند. ما برخی از این فرضیه سازی ها (فرضیه انقباض لورنتس-فیتزجرالد، فرضیه کشش اتری، تلاش برای تصحیح الکترودینامیک) را در ادامه بحث خواهیم کرد. درک این روند، به عنوان شاهد مهمی بر شیوه کارکرد دانش و دانشمندان، بسیار مهم است.



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