سرعت نور

پارسا رنگریز

آزمایشگاه فیزیک ۳، دانشکده فیزیک، دانشگاه صنعتی شریف

۱ مقدمه

نور با سرعت بسیار بالایی (در حدود 3×10^8) حرکت می‌کند. اندازه‌گیری این سرعت با استفاده از کرنومتر و تعیین جابجایی ممکن نیست. روش‌هایی از گذشته برای اندازه‌گیری سرعت نور ارائه شده است. یکی از روش‌های بی‌نتیجه، پیشنهاد گالیله بود.در این پیشنهاد فردی با یک فانوس و پارچه‌ای مقابل آن، در فاصله دوری از یک شخص دیگری با یک ساعت می‌ایستد و بر اساس قرار قبلی در زمان مشخص پارچه را از فانوس کنار می‌زند. هنگامی که مشاهده‌گر نور را دید، زمان را ثبت می‌کند و با استفاده از اختلاف زمان می‌توانند سرعت نور را بدست بیاورند. طبق نتایج این آزمایش گالیله نتیجه گرفت که انتقال نور به صورت آنی صورت می‌گیرد و یا سرعت آن به حد غیر قابل تصوری زیاد است.

اولین راه موثر اندازه‌گیری سرعت نور در سال ۱۶۷۶ میلادی توسط رومر ارائه شد. برای این منظور او دوره تناوب داخلی ترین قمر مشتری با نام آیو را هنگامی که مشتری در حال نزدیک شدن به زمین است و هنگامی که در حال دور شدن از زمین است اندازه‌گیری کرد. خوشبختانه این دوره تناوب‌ها متفاوت بود و بر این اساس رومر نتیجه گرفت که نور قطر مدار زمین به دور خورشید را در ۲۲ دقیقه طی می‌کند. کریستیان هویگنس با استفاده از این اطلاعات و تخمین قطر زمین توانست به عدد $2.2 \times 10^8 m/s$ دست پیدا کند که در حدود ۲۶ درصد با مقدار واقعی آن تفاوت داشت. نیوتون در کتاب نورشناسی خود محاسبات دقیق‌تری از رومر انجام داد و زمان رسیدن نور از خورشید به ما را بین ۷ الی ۸ دقیقه عنوان کرد. (عدد دقیق آن ۸ دقیقه و ۱۹ ثانیه است).

یکی از روش‌های مشهور برای فیزو و فوکو است. در این روش نور از بلکه یک چرخ‌دنده چرخان عبور داده می‌شود و در ۵ مایلی با یک آینه به سمت چرخ‌دنده بازتاب می‌شود. نور در صورتی به منبع باز می‌گردد که سرعت چرخ‌دنده مقدار مشخصی داشته باشد. یعنی نور بتواند از لبه آن عبور کند.

در حال حاضر با استفاده از تداخل و یا جعبه تشدید می‌توان سرعت نور را به راحتی محاسبه کرد.

۲ مدل و نظریه

فرض کنید که یک موج تخت (باریکه نور لیزر) با سامد ω و عدد موج k در راستای x حرکت می‌کند. معادله موج مربوط به میدان الکتریکی این نور لیزر به شکل زیر است:

$$\mathbf{E} = \mathbf{E}_0 e^{i(\omega t - kx)} \tag{۱}$$

بر این اساس اگر نور این لیزر مسافت d_1 را پیموده و پس از برخورد به بازتاب‌گری (آینه یا شب رنگ) بازتاب شود و همین مسیر را بازگردد تا به منبع برسد، میدان بازگشتی به شکل زیر خواهد بود:

$$\mathbf{E}_r = \mathbf{E}_0 e^{i(\omega t - 2kd_1)} \tag{۲}$$

میدان بازگشتی برای وقتی که محل بازتاب‌گر نسبت به منبع d_2 باشد نیز به شکل زیر می‌شود:

$$\mathbf{E}_r = \mathbf{E}_0 e^{i(\omega t - 2kd_2)} \quad (۳)$$

پس اختلاف فاز این دو حالت برابر می‌شود با

$$\Delta\phi = 2k(d_2 - d_1) = 2k\Delta d \quad (۴)$$

با دانستن این اختلاف فاز و Δd می‌توان عدد موج لیزر را بدست آورد. از روی عدد موج لیزر نیز سرعت نور به راحتی به دست خواهد آمد.

$$\Delta\phi = \frac{4\pi f}{c}\Delta d \quad (۵)$$

حالا فرض کنید که میان مسیر این نور لیزر که رفت و برگشت می‌کند یک ماده با ضریب شکست n قرار دهیم. اگر طول این ماده برابر با l باشد، حضور این ماده اختلاف فازی در موج ایجاد می‌کند. این اختلاف فاز از اختلاف عدد موج نور در هوا و عدد موج نور در داخل ماده Δk بدست می‌آید. در واقع نور یک بار هنگام رفت و یک بار هنگام برگشت مسافت l را داخل ماده طی می‌کند، این منجر به ایجاد اختلاف فازی برابر با $\Delta k(2l)$ می‌شود. به طور دقیق‌تر اگر k_0 عدد موج نور در هوا و k_m عدد موج نور در ماده باشد، اختلاف فاز نور رسیده به حس‌گر هنگام عبور از ماده با حالت بدون ماده بر اساس رابطه زیر بدست می‌آید.

$$\Delta\phi = 2(k_m - k_0)l \quad (۶)$$

با استفاده از این رابطه می‌توان سرعت نور را داخل ماده نیز اندازه‌گیری کرد.

$$\Delta\phi = 4\pi f(\frac{1}{c} - \frac{1}{v}) \quad (۷)$$

۳ روش آزمایش

دستگاه لیزر و گیرنده نوری را در انتهای ریل سوار کنید. شبرنگ (بازتابگر) را روی پایه متصل کرده و پایه را روی ریل قرار دهید.

جعبه و گیرنده دارای دو دکمه دارای دو دکمه Mode و Calibration است. دکمه Mode حالت دستگاه را عوض می‌کند. با هربار فشار دادن این دکمه حالت دستگاه به یک مرحله بعد می‌رود. این وسیله دارای ۴ حالت است. در حالت اول لیزر روشن می‌شود و بسامد نور آن نوشته می‌شود. در حالت بعدی دستگاه اختلاف فاز نور رسیده با همین حالت را نشان می‌دهد. حالا اگر بازتاب‌گر را جابجا کنید اختلاف فاز با حالت قبلی نشان داده خواهد شد. دو حالت بعدی مربوط به محاسبات است، دستگاه مقدار جاجایی مربوط به این اختلاف فاز و یا اختلاف زمان ایجاد این اختلاف فاز را نیز می‌تواند در این دو حالت نشان بدهد. فقط به واحدهای دستگاه توجه نمایید.

برای شروع از اولین حالت دستگاه که بسامد لیزر را می‌نویسد استفاده کنید. دقت کنید نور منبع دقیق روی شبرنگ بیفتد. ممکن است لازم باشد ارتفاع شبرنگ و یا زاویه تابش نور به شبرگ را عوض کنید تا نور دقیقا روی شبرنگ بیفتد. برای مطمئن شدن دست خود را در مقابل شبرنگ گرفته تا محل برخورد لیزر دقیق دیده شود. علاوه بر این می‌توانید برای تنظیم دست خود را نزدیک منبع گرفته و به تدریج از آن دور کنید تا ببینید که زاویه لیزر درست است و یا به اصلاح نیاز دارد. با قرار دادن شبرنگ در دورترین نقطه از منبع مطمئن شوید که نور لیزر موازی با ریل تابانده می‌شود و جابجایی شبرنگ باعث عدم بازگشت نور به منبع نمی‌شود.

خوشبختانه شبرنگ این خاصیت را داراست که برای بازگرداندن نور به منبع نیازی نیست که زاویه آن درست باشد. پس نیازی به تغییر زاویه شبرنگ ندارید.

۱.۳ سرعت نور در هوا

بر اساس قسمت قبل دستگاه را تنظیم کرده و شبرنگ را روی صفر خطکش ریل قرار دهید. برای این کار از خط روی پایه شبرنگ می‌توانید استفاده کنید. حالت دستگاه را عوض کنید تا اختلاف فاز را نشان دهد. دکمه Calibration را زده تا دستگاه کالیبره شود. حالا شبرنگ را در ۲۰ سانتی‌متر خطکش قرار دهید و اختلاف فاز را یادداشت کندی. این کار را برای فواصل دیگر انجام داده و نتایج خود را در جدول ۱ یادداشت نمایید. سعی کنید از کل ریل برای جابجا کردن شبرنگ استفاده کنید تا نتایج دقیق‌تری داشته باشید.

۲.۳ سرعت نور داخل ماده

شبرنگ را در انتخای ریل قرار دهید. دو پایه نگه‌دارنده استوانه را روی ریل سوار نمایید. دستگاه را در حالت اختلاف فاز گذاشته و آن را کالیبره نمایید. ماده‌ای را در بین رفت و برگشت لیزر قرار دهید. (شیشیه یا استوانه آب). با این کار باید در نور بازگشتی اختلاف فازی ایجاد شود. این اختلاف فاز را یادداشت کرده و از استفاده از رابطه ۵ سرعت نور داخل ماده را اندازه‌گیری کنید.

۴ هدف آزمایش

بدست آوردن سرعت نور در محیط‌های مختلف

۵ جدول داده‌ها

جدول ۱: ارتباط بین اختلاف فاصله و اختلاف فاز

$\Delta\phi$	$\Delta\phi/^o$	$\Delta d/m$
0.40	23	0.2
0.84	48	0.4
1.26	72	0.6
1.69	97	0.8
2.09	120	1.0
2.46	141	1.2
2.86	164	1.4
3.32	190	1.6

۶ خطا

به طور کلی اگر y یک تابعی از x_i تا x_n باشد و برای هر کدام از x_iها، $\langle x_i \rangle$ و Δx_i مشخص باشند، آنگاه Δy اینگونه محاسبه می‌شوند:

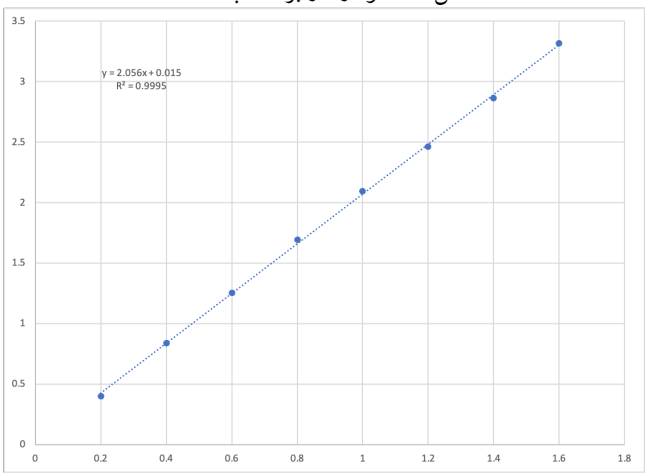
$$\Delta y = \sqrt{\sum_{i=1}^{n} \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2} \qquad (۸)$$

بنابراین در تمامی جداولی که میانگین حساب می‌شده این مقدار خطا محاسبه گشته و سپس با خطای دستگاه‌ها مقایسه شده و بیشینه این خطا بعنوان خطا گزارش شده است.
برای محاسبه خطای خط برازش در نمودارها می‌توان نوشت:

$$\Delta b = b\sqrt{\frac{1}{n-2}\left(\frac{1}{R^2}-1\right)} \tag{۹}$$

۷ نمودار داده‌ها

شکل ۱: نمودار فاز بر حسب فاصله



۸ نتیجه‌گیری

با داشتن فرکانس دستگاه که $5 \times 10^7 Hz$ اندازه‌گیری شد می‌توان سرعت نور را از روی شیب بدست آمده حساب کرد.

$$c = \frac{4\pi f}{b} \implies b = 2.06 \pm 0.02 \implies c = (3.05 \pm 0.03) \times 10^8 \frac{m}{s} \tag{۱۰}$$

اکنون می‌خواهیم ضریب شکست را بدست آوریم.

$$\Delta\phi = bl(n-1) \implies l_{glass} = 49cm, \quad l_{water} = 50cm \tag{۱۱}$$

بنابراین برای آب و شیشه داریم:

$$n_{glass} = 1.21 \pm 0.01, \quad n_{water} = 1.36 \pm 0.01 \tag{۱۲}$$