

レーザーの干渉距離ってそんなに短い？

学生の A 君は、研究室に配属されて間もないある日、先生に言われてマイケルソン干渉計を作り始めました。柵から He-Ne レーザー、ビームエキスパンダー、ビームスプリッター、平面反射鏡 2 枚を探してきた A 君は、他の実験の邪魔にならないようにと、光学テーブルの隅のほうに干渉計を組み始めました。まずレーザーを固定し、エキスパンダーでビームを広げ、ビームスプリッターで分岐して、各々のアームに反射鏡を置いて、2 つの反射光が再び重なるようにミラーのアライメントを調整しました。ここで干渉縞を見ようとしていた A 君は、ミラーのアライメントを調整しても一向に干渉縞が見えず、困っていました。そこへ先生が実験室に来て、A 君の作った干渉計を見るなり「おいおい、これじゃ縞は見えないだろう」と言ったのでした。どうやら A 君は何かを見落としていたようです。先生はすぐに気が付いたようですが、A 君はいったいどこを見落としていたのでしょうか？

答えはレーザー光源の干渉性です。今回は、レーザーの縦モードと可干渉距離について考えてみましょう。

レーザー光はよく「単色光」であるといわれていますが、スペクトルを観察すると、必ず有限の広がりをもっています。また、レーザーの場合、2 枚の反射鏡による縦モードスペクトルを考える必要があります。もともと、干渉縞というのはレーザー光が純粋なスペクトル分布をもつことから見られていたわけですから、複数本の縦モードスペクトルが干渉縞に影響を及ぼさなければなりません。では、どのように影響が出るのか、順番に考えてみましょう。

レーザー光源からの出力光の電界を $E_0(t)$ としますと、干渉縞が現れる位置での電界は

$$E_i(t) = 1/2 \{ E_0(t - \Delta t_1) + E_0(t - \Delta t_2) \} \quad (1)$$

となります。ここで、 Δt_1 、 Δt_2 は各々、アーム 1、2 の光波の伝搬による時間遅れで、アームの光路長に比例します。 $E_i(t)$ はトータルの電界強度です。一般に、 $E_0(t)$ は縦モードと呼ばれる複数の周波数成分からなっています。簡単のために、ここでは ω_1 と ω_2 という 2 つの周波数成分からなるものとしましょう。つまり、

$$E_{0i}(t) = E' / 2 \{ \exp(i \omega_1 t) + \exp(i \omega_2 t) \} \quad (2)$$

とします。このレーザー光は、非常に近い周波数 ω_1 と ω_2 の 2 つのレーザー光が同じ光軸上に射出されていると考えてよいので、得られる干渉縞はそれぞれのレーザー光から得られる干渉縞の重ね合わせとして得られます。したがって、一方のレーザー光 ω_1 で明となる位置で、他方のレーザー光 ω_2 で暗となるような条件を考えてみましょう。つまり干渉縞が消える条件です。レーザー光 ω_1 で明となる条件、レーザー光 ω_2 で暗となる条件はそれぞれ

$$\exp(i \omega_1 (\Delta t_1 - \Delta t_2)) = 1$$

$$\exp(i \omega_2 (\Delta t_1 - \Delta t_2)) = -1$$

となります。つまり、両式を互いに割ってやることで、

$$\exp(i(\omega_1 - \omega_2)(\Delta t_1 - \Delta t_2)) = -1$$

が得られ、

$$\Delta t_1 - \Delta t_2 = \pi(2m + 1) / (\omega_1 - \omega_2)$$

が得られます。さらに干渉縞が消える光路長差 ΔL を求めると

$$\begin{aligned} \Delta L = c|\Delta t_1 - \Delta t_2| &= \pi(2m + 1)c / |\omega_1 - \omega_2| \\ &= (2m + 1)c / 2\Delta f \end{aligned} \quad (3)$$

となります。ここで Δf は 2 つのスペクトルの周波数差で縦モード間隔といわれ、レーザーの共振器長を L とすると

$$\Delta f = c / 2L$$

ですから、

$$\Delta L = (2m + 1)L \quad (4)$$

となります。したがって、 $\Delta L = 0$ で明瞭な干渉縞が得られますが、光路長差が伸び始めると縞のコントラストが次第に低下し、ついには $\Delta L = L$ ($m = 0$) で縞が消失してしまうことがわかります。さらに光路長差が伸びると再び縞がはっきりし始め、その後は $2L$ 毎に縞が消えることがわかります。また、 m の値が大きくなるにつれて縞のコントラストは低下していきます。

つまり A 君は、共振器長が 20~30 cm の He-Ne レーザーを使ってテーブルの端に干渉計を組んだというスペース上の制約があって、片側の腕が短く、もう片側の腕が長いという構成になっており、偶然にも（不運にも？）この光路長差がレーザーの共振

器長の奇数倍になったために干渉縞が見えなかったのです。さらにレーザーの発振縦モードの本数が増えると、光路長差と縞のコントラストはもう少し複雑な関係になります¹⁾。

レーザーの教科書に書かれている“レーザーの可干渉距離は非常に長い”という言葉を鵜呑みにせず、不思議な現象に巡り会ったときには物事の本質に迫る気迫と粘りが必要ではないでしょうか。

最後に、キロメートルにわたる光路長差で明瞭な干渉縞を観測するにはどうすればよいのでしょうか。もうおわかりですね。発振縦モードが1本の短い共振器のレーザーを使えばいいのですね。さら

に、レーザーの発振周波数が制御されていれば、なおさら安定した干渉縞が観測できること請け合いです。

この記事に関してのご意見は下記のメールアドレスまでお寄せください。umeda@cc.tuat.ac.jp, または kikuta@measure.mecha.osakafu-u.ac.jp

文 献

- 1) J. W. Foreman: "Optical path-length difference effects in photomixing with multimode gas laser radiation," Appl. Opt., **19** (1967) 821-826.