

再考：ヤングの二重スリット実験

勝 田 仁 之

(katsuda.phys.edu@gmail.com)

〈キーワード〉 ヤングの実験 二重スリット 単スリット

0. はじめに

0-1. 本稿の目的

本稿では、ヤングの実験における単スリット、および二重スリットの役割について再考する。著者が高3物理の授業でヤングの実験を教える際、単スリットの役割が「光の位相をそろえる」とされていることに疑問をもった。そもそも光の位相がそろうとはどういうことなのか、またどこから出る光のことを言及しているのか、著者には理解できなかった。また、ヤングの実験に関連して次のような疑問も覚えた。

- スリットを通る光が回折するが、スリットの幅は可視光の波長よりもはるかに長い。これは、教科書の記述「波は波長より狭い、あるいは同程度の隙間を通過する際に回折する」と矛盾しているのではないか。
- ヤングの実験系を実際に組む際、単スリットと二重スリットの距離はどのようにして決めるべきなのか。(著者は干渉縞が見えるまで色々と試ただけであった)
- 単スリットを通ると光の位相がそろうというのなら、二重スリットの各スリットを通るだけでも光の位相はそろうのではないか。
- 単スリットを通るだけで簡単に光の位相がそろうのならば、人類がレーザーを開発する必要はなかったのではないか。
- レーザーを用いれば、(単スリットなしに)直接二重スリットに入射させるだけで干渉縞が観察できる。しかしこの事実と、レーザーが位相の揃ったコヒーレント光であることとの因果関係がわからない。
- 回折格子を通して天井の蛍光灯を覗き込むと、明瞭な1次の分光スペクトルが観測される。このとき単スリットがない上に、蛍光灯は単スリットよりもはるかに太い。それなのにどうして干渉縞が観察できるのか。

これらの疑問を解決するため、各スリットの役割について再考してここにまとめた。

なお、本稿は2017年度の夏期研究大会(物理教育研究会)、及び第34回物理教育研究大会(日本物理教育学会)での発表と、その発表を受けての議論を主としている。

0-2. 本稿の構成

本稿の長さのせいで読者が道筋を見失わないように、本編に進む前に本稿の構成を俯瞰しよう。時間のない読者においては、以下で構成を把握し、本編は興味のある部分だけを参照されたい。

まず次章では、高校教科書で扱われているヤングの実験の実験系、およびその物理的解釈を確認する。

次に第2章では回折現象の一般論について議論する。高校物理における回折はスリットの幅と波長の大小関係から説明される。この説明はヤングの実験における回折を扱うには不十分であり、本稿では対象とする空間のスケールも合わせて議論する。

その後、第3章では二重スリットの役割について再考する。2つの光源を用意して同時にスクリーンを照射しても、干渉縞は観測できない。これがどうしてなのかということを、発光のメカニズムから考える。この議論を踏まえて、二重スリットを用いるとどうして干渉縞が生じるのかを示す。また、この議論において光のコヒーレンス性は重要でないことを示すために、あえてコヒーレンス性の議論も付け加える。これは、後でレーザーについての誤解を議論するためである。

二重スリットについての再考を経て、第4章では単スリットの役割を議論する。単スリットには光の位相をそろえることはできないことを確認する。そして単スリットの役割は光源の見かけの太さを絞っているに過ぎないことを示す。これは、二重スリットの各スリットに入射する光の「位相差の差」を揃えているのであり、位相を揃えているのではないということである。また、場合によっては単スリットが不要であることを述べ、定量的な解析も簡単に行う。

最後に第5章では、これまでの内容を踏まえて3つの問題提起を行う。1つ目は、「高校物理におけるヤングの実験の取り扱いについて」である。各スリットの役割を高校生に理解させようとする自体に無理があるのではないか、授業や大学入試での扱いが踏み込み過ぎていないかということである。

2つ目は、「多くの教員がレーザーを用いたヤングの実験において、レーザーの役割を誤解しているのではないか」というものである。ヤングの実験において注目すべきレーザーの性質は、コヒーレンス性ではない。指向性と強度が電球などの光源に比べてはるかに優れていて、高い視認性が得られるという点である。単スリットが不要なのは、単にレーザー光源は小さな光源であるからだ。

3つ目は、「二重スリット実験の量子力学的解釈にも誤解があるのではないか」というものである。というのも、量子力学的な見地からすると単スリットは必要である、というコメントを複数の方から頂いたのだ。量子力学における波束の収縮や同時観測可能性について、

シュテルン－ゲルラッハの実験を例として確認し、単スリットが量子状態をもつれさせることとはないことを示す。

1. ヤングの実験の確認

次章以降での議論の見通しをよくするため、ここで高校物理におけるヤングの実験について、実験系の設定と物理的解釈を確認しておこう。

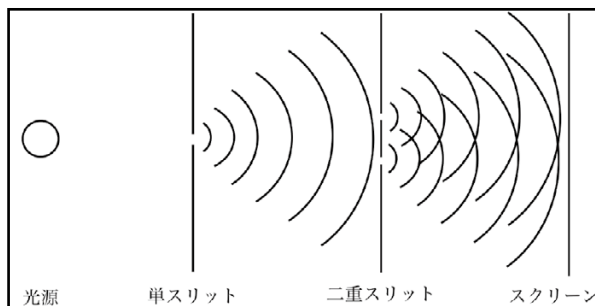


図1 ヤングの実験の見取り図。

1-1. ヤングの実験系の確認

ヤングの実験系の設定は、図1のようになっている。光源から出た光が単スリットに入射し、その回折光が二重スリットに入射する。二重スリットの各スリットから出た回折光が干渉して、スクリーン上に明暗の縞が観測される。

スクリーン上の明点位置を求めよう。通常、定量的な解析は以下のように行う。

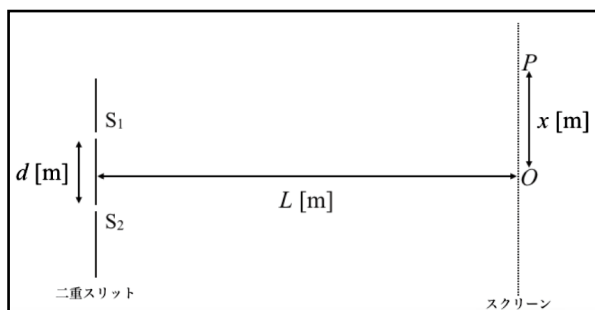


図2 ヤングの実験において、明点位置を求めるための設定。通常、 $L \gg d, x$ が仮定される。

図2のように、二重スリットの各スリット S_1, S_2 の間隔を d とする。スクリーンに沿って x 軸を定め、二重スリットの垂直二等分線との交点を原点 O とする。スクリーンと二重スリットの距離を L とし、 $L \gg d, x$ とする。この条件のもとで、スクリーン上の位置 x にある点 P へ到達する光の両スリットからの経路差は、1 次の近似で

$$|S_1P - S_2P| = \frac{d}{L}x$$

と書ける。これが波長の整数倍となる位置に明点が現れるので、明点位置と明点間隔は次のように求まる。

$$\text{明点位置 } x = \frac{mL\lambda}{d} \quad (m = 0, 1, 2, \dots) \quad \text{明点間隔 } \frac{L\lambda}{d}$$

1-2. 単スリットから二重スリットへの入射においても光路差が生じる場合

前節で紹介した議論では、暗に単スリットからの回折光が、二重スリットの各スリットへ位相差なく入射することを仮定している。実際には二重スリットの垂直二等分線上へ単スリットを正確に設置することはできないだろうし、二重スリットは回折光の伝播方向に対して完全に垂直にはならない。そこで、単スリットからの回折光が二重スリットへ位相差をもって入射する場合に、明点位置がどのようにずれるかを求めておこう。これは後で光源の幅が干渉縞にもたらす影響を議論する際に本質的となる。

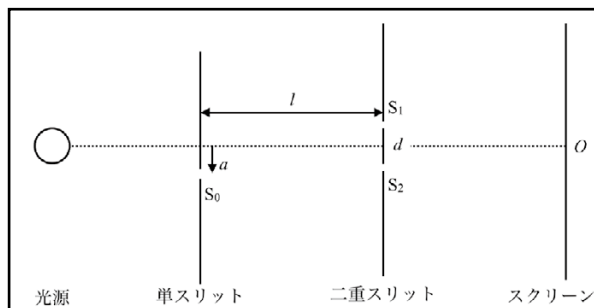


図3 ヤングの実験において、単スリット S_0 の位置を a だけ下方にずらした様子。単スリットからの回折光は二重スリットの各スリットへ位相差をもって入射する。

右図のように、単スリット S_0 の位置が二重スリットの中心から a

だけ下方にずれているとしよう。また、単スリットと二重スリットの距離を l とする。このとき $l \gg a, d$ とすれば、前節で光路差を求めたのと同様な手続きで、単スリットから二重スリットの各スリットに入射する光の経路差は、

$$|S_0S_1 - S_0S_2| = \frac{d}{l}a$$

と求まる。すると、スクリーン上の明点位置は、次の様に修正される。

$$x = \frac{mL\lambda}{d} + \frac{L}{l}a \quad (m = 0, 1, 2, \dots)$$

つまり、単スリットから二重スリットへ入射する際の光路差を反映して、明点位置が $\frac{L}{l}a$ だけずれるのである。なお、明点間隔は $\frac{L\lambda}{d}$ のままである。

2. 回折理論

本章では、波の回折について議論する。高校物理における説明、「波は波長と同程度かそれよりも狭い隙間を伝わる際に回折する」はヤングの実験状況と矛盾していることを指摘する。そこで、波長と隙間の幅に加えて、空間スケールも合わせて議論する必要性を主張する。この議論は主にフラウンホーファー回折の見地から行う。

2.1. 高校物理における、回折理論をヤングの実験に適用することの矛盾

高校物理において波の回折は、波長 λ の平面波が幅 s の隙間に入射する場合のみを扱う。特に教科書において、力学的な波の回折が次の様に説明されている。

波は波長と同程度、あるいはそれより狭い隙間を通過するときによく回折する。波長よりも広い隙間を通過する際は波が直進し、回折波は目立たない。

実際の教科書に掲載されている図を、図4として右に引用した。

ここで、ヤングの実験の状況を思い出してみよう。ヤングの実験において、通常は光源に可視光を選ぶので、 $\lambda \sim 10^{-6}\text{m}$ 程度である。一方でスリット幅はカミソリの刃先程度なので、 $s \sim 10^{-4}\text{m}$ である。大雑把に見積もってもスリット幅 s は、波長 λ の $10^2 \sim 10^3$ 倍は広いのである。つまり、ヤングの実験における「単／二重スリットから回折光が放射される」という前提は、「回折は波長がスリット幅と同程度かそれより小さいときに起こる」という説明と矛盾をきたしている。

我々教員は、少なくともこの矛盾を明確に認識した上で授業に臨む必要があると、著者は考える。

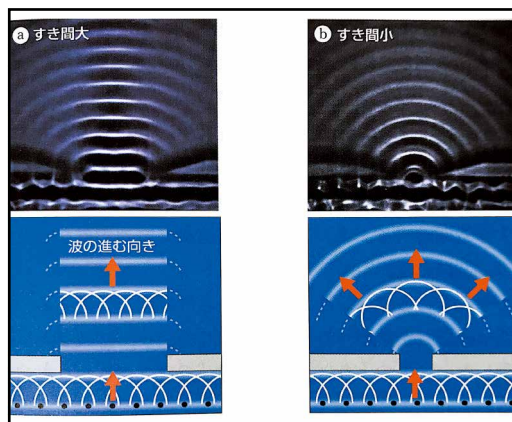


図4 高校教科書に掲載されている、波長 λ と隙間 s の関係による回折波の分類。上図は水波実験の写真、下図は模式図。左側の状況は $s \gg \lambda$ であり回折波は目立たず、右側の状況 $s \leq \lambda$ においてはよく回折するとされている。(図は「物理」東京書籍, 2012 から引用)

2.2. 空間スケールも考慮した回折の議論

前節で指摘した様に、高校物理における回折理論は、ヤングの実験にそのまま適用すると矛盾してしまう。この矛盾を解消するためには、波長と隙間の幅に加えて、空間のスケールも考慮した議論を展開する必要がある。以下、詳しく見ていこう。

まず、直感的な解釈から始めよう。右図5の様に、平面波がその波長 λ よりも広い隙間 s のスリットに入射したとしよう。スリットを過ぎても、波は平面波として直進している。

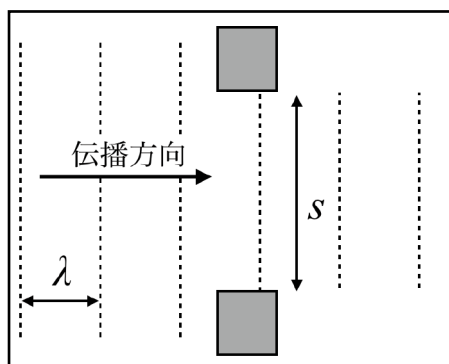


図5 平面波がその波長 λ よりも広い隙間 s のスリットに入射する様子。スリット付近では、回折波は目立たない。

回折波は目立たない。では、スリットを通過した波は、いつまでたっても平面波として伝播していくのだろうか？

答えはもちろん NO である。スリットから離れたところへ伝播していくにつれて、波面が球面に近づいていくのは直感的にも明らかである。想像してみてほしい。図5において、十分にスリットから右へ離れた位置に立ってスリットを覗き込んだら、どのように見えるだろうか？きっと、点状の波源が振動しているようにしか見えないだろう。スリットの間隔 s が波長 λ より広かろうと狭かろうと、スリットから十分に離れた位置から観察すれば点状の波源と同等なのである。したがって、スリットから十分に離れた位置に伝播する波は、点状の波源が放射する球面波とほとんど区別ができないはずだ。これが、ヤングの実験においてスリットから球面波の回折光が放射されると考えてよい理由である。もちろん、逆のことも言える。波長に比べて十分に狭いスリットから放射される波も、スリットのごく近傍で観測すればほとんど平面波のままである。

そもそも、波や光が「回折する」とか「回折しない」という議論が物理的にはおかしい話だ。どんな状況であれ回折は必ず起こるのである。例えば、晴れた昼間に地面にできた建物の影を観察しても、光が建物から地面に届く間に回折するから影の縁は必ずぼやけている。もしも回折がまったく起こらない状況があるとすれば、その波の波長は無限小である。この極限は、波動光学を幾何光学に収束させる極限である。つまり我々は普段、対象としている光学現象において、波動光学的な側面と幾何光学的な側面のどちらが本質的であるかを考えているのであって、自然の光を幾何光学と波動光学に完全に分類することはできない。だから、波や光が回折するかしないか、などという議論ができるはずがない。

おそらく、高校教科書の著者たちはこの点を認識しているだろう。だから、教科書の表現は「よく回折する」とか「回折は目立たない」といった、ぼかした表現を採用している。とはいえ、そんな配慮が初学者に伝わる訳はない。確かに、高校物理において物理の真実をすべて正確に書くことはできないので、ぼかした表現に留めざるを得ないことは頻繁にあるだろう。しかし本節の内容については、高校生にも直感的な理解が可能であるのだし、何よりヤングの実験の理解のためにはどうしても必要な考え方である。ぼかした表現をする必要はない。正面から真実を教えるべきだと著者は考える。

2.3. 回折の定量的な扱い：フレネル回折とフラウンホーファー回折

前節において、スリットから放射される回折波の波面が球面波となるかどうかは、観測地点がスリットに近いか遠いかで決まるということを述べた。本節では、この「近い」とか「遠い」ということをある程度定量的に扱ってみよう。

右図6のように、波長 λ の平面波が幅 s のスリットに垂直入射する。この波が、スリット

から L だけ離れた地点に伝播する際、前節の議論から L が大きい時には球面波が伝播し、 L が小さい時には平面波が伝播する。では、 L が大きいかわ小さいかを判断する際に、 L と比較すべき特徴的な長さは何だろうか？答えは $\frac{s^2}{\lambda}$ （レイリー距離）

である。この導出は本稿では省略するので、興味のある読者は適当な波動光学の教科書を参照してもらいたい。大学生向けの教科書であれば、どの教科書でも言及されているはずだ。

スリット付近で観測しているとき、すなわち $\frac{s^2}{\lambda} \gtrsim L$ の際、回折波の波面はスリットの形を強く反映したものとなる。これをフレネル回折と呼ぶ。スリットから遠く離れた点で観測しているとき、すなわち $L \gg \frac{s^2}{\lambda}$ のとき、回折波の波面はスリットの形状によらない球面波となる。これをフラウンホーファー回折と呼ぶ。

高校物理において、回折が波長 λ とスリット幅 s の大小関係のみで議論されるのは、図4のようにスリットから数波長程度離れた位置への伝播のみを考えているからだろう。 $L \sim \lambda$ であれば、回折がフレネル級かフラウンホーファー級かを判断するには、 $\frac{s^2}{\lambda}$ と λ の大小関係を比較することになる。これはつまり、波長とスリット幅の大小関係を比較していることと同等である。つまり、高校物理の回折理論は、 $L \sim \lambda$ の領域においてのみ、妥当性が保証されている。一方でヤングの実験においては、 $\frac{s^2}{\lambda} \sim \frac{(10^{-4} \text{ m})^2}{10^{-6} \text{ m}} = 1 \text{ cm}$ よりも100倍程度遠い位置にスクリーンを設置するので、フラウンホーファー回折の理論がよく当てはまる。この事実は、波長とスリット幅の大小関係だけに注目しては絶対に理解できない。

2.4. 単スリットにおけるフラウンホーファー回折像

前節では波長 λ とスリット幅 s を比較することは、観測地点のスリットからの距離が $L \sim \lambda$ の領域において、回折がフレネル級かフラウンホーファー級かを判断することに対応すると述べた。本節では、単スリットのフラウンホーファー回折像の解析から、波長とスリッ

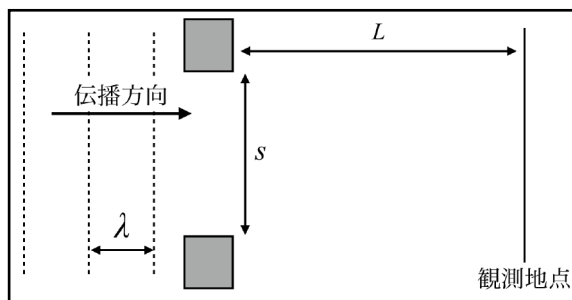


図6 波長 λ の平面波が幅 s のスリットへ入射し、スリットから L だけ離れた地点に伝播する波を観測する。 $L \ll s^2/\lambda$ の際に回折はフラウンホーファー級となり、それ以外ではフレネル級となる。

ト幅を比較することに対してもう1つの物理的解釈を与える。

単スリットにおけるフラウンホーファー回折像を考えよう。もしも読者が単スリットにおける回折像を見たことがなければ、単スリットにレーザー光を入射させてスクリーンに映してみてほしい。スクリーン上にはヤングの二重スリット干渉実験のように干渉縞が生じるはずだ。但し、単スリット回折像の特徴として、0次の明線のみが他の明線に比べて2倍太くなる。

どうして単スリット回折の場合には波源が1つなのに、干渉縞が生じるのであろうか？それは、ホイヘンスの原理の考え方から理解できる。単スリットの隙間 s には連続的に波源が並んでいて、それぞれから放出される無限個の素元波が干渉し合うためだ。

定量的な解析を行う。右図7のように、単スリットから L 離れた観測地点において、単スリット s の垂直二等分線との交点を原点 O とする座標系をとる。原点から x だけ離れた地点に伝播する回折波

は、単スリット上に並んだ波源が放出する素元波を積分して重ね合わせることで得られる。 $L \gg x, s$ の条件のもとでは、スリットから位置 x に伝播する素元波の伝播方向は互いに平行であるとみなすことができる。位置 x における光の明度 $I(x)$ は波振幅の2乗であるから、

$$I(x) \propto \left| \int_{-s/2}^{+s/2} \frac{1}{s} \exp\left(-i \frac{2\pi x}{\lambda \sqrt{L^2 + x^2}} x'\right) dx' \right|^2 = \left(\frac{\sin \alpha(x)}{\alpha(x)} \right)^2$$

となる。ただし、 $\alpha(x)$ は、

$$\alpha(x) = \frac{\pi x s}{\lambda \sqrt{L^2 + x^2}}$$

である。 $\left(\frac{\sin \alpha}{\alpha} \right)^2$ のグラフを、図8に示した。 $\alpha = -\pi \sim +\pi$ に渡って広いピークが見られ、その隣の副極大($\alpha = \pm 3\pi/2$)においても強度は主極大($\alpha = 0$)の5%程度である。

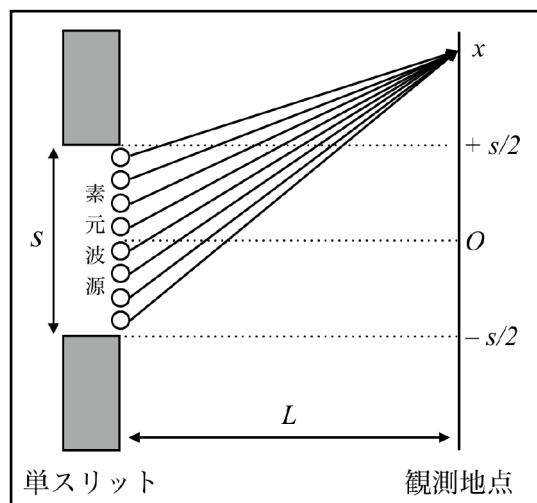


図7 単スリット回折像を考えるためのモデル。位置 x に伝播する回折波は、単スリット上に連続的に並んだ波源から放出された素元波の重ね合わせである。

さて、図7の観測地点において、この0次のピークに対応する回折光に晒される領域はどこだろうか？ $-\pi \leq \alpha(x) \leq +\pi$ の領域に対応するので、この不等式を満足する x の領域が0次の回折光に晒されることとなる。 $\alpha(x) = \pm \pi$ に対応する x の値は、次式の解である。

$$\alpha(x) = \frac{\pi x s}{\lambda \sqrt{L^2 + x^2}} = \pm \pi \quad \Rightarrow \quad \frac{1}{\sqrt{\frac{L^2}{x^2} + 1}} = \frac{\lambda}{s}$$

上式は明らかに、 $\lambda > s$ のとき解を持たない。つまり、波長よりも狭い幅のスリットを通過する際には、観測地点全域が0次の回折光に明るく照らされることとなる。高校物理の教科書ではこのことを、「よく回折する」と表現しているのだろう。逆に、 $\lambda \ll s$ のときは、 $x \ll L$ となり、非常に狭い範囲のみに0次の回折光が到達することとなる。既習者から見れば、誰が最初に考えたのかちょっと知りたくなるくらい、まことによくできた話である。しかしながら、高校教科書は初学者の高校生に向けて書かれていることは忘れてはならない。

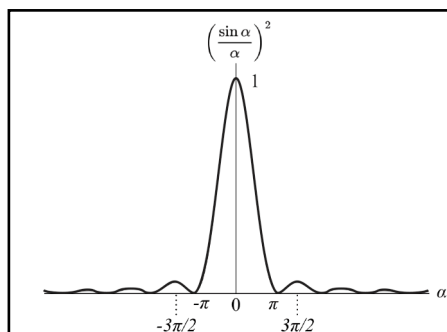


図8 横軸を α 、縦軸を $(\sin \alpha / \alpha)^2$ としたグラフ。 $-\pi$ から $+\pi$ に渡って、0次のピークが見られ、それ以降のピークは主極大に比べて弱い。

さて、ヤングの実験状況においてはどの領域が0次の回折光に晒されるであろうか？ヤングの実験状況において上式は、 $\frac{\lambda}{s} \sim 10^{-2}$ であるから、 $\frac{L}{x} \sim 10^2$ となる解を持つ。つまり、スリットから観測地点までの距離に対してたかだか数%程度の領域しか照らされない。ヤングの実験においては、二重スリットの各スリットから放射される0次の回折光が重なり合う位置に明瞭な干渉縞が観測され则认为られる。よって、ヤングの実験においては二重スリットの間隔を広くとってはならない。

3. 二重スリットの役割

本章では、ヤングの実験における二重スリットの役割を再考する。二重スリットの役割を理解するために、2つの点光源でスクリーンを照らしても干渉縞が観測できないのはどうしてなのかを議論する。その際、発光のメカニズムにまで踏み込んだ議論を展開する。さらにその後、光のコヒーレント性について述べ、ヤングの実験においては光源のコヒーレント性は本質的ではないことを示す。

3-1. 2つの点光源からの光による干渉縞が観測できないこと

本節では、二重スリットの役割を理解する準備として、2つの点光源からの光による干渉を考える。2つの点光源を用意して、それぞれの光をスクリーン上に照射しても、干渉縞は観測されない。これはどうしてだろうか。

2つの点光源からの光を重ね合わせても干渉縞が観測されない理由として、まず、次の説明が考えられる。

いくら点光源とはいえ、実際には無数の発光体から構成されている。つまり、点光源から出てくる光の中には、様々な位相の光が混ざり合っている。2つの点光源からの光を重ね合わせても、強め合う光もあれば弱め合う光もある。よって、干渉縞は観測されない。

上記の説明は、直感的には受け入れやすいものであろうと著者は考える。しかし、実は上記の説明はヤングの実験の本質を捉えていない。点光源の中には様々な位相の発光体が存在することが問題になるなら、本当の意味で「2つの」発光体—たとえば原子—を用意すれば、干渉縞は観測されるのであろうか？ 答えはNOである。

右図9において、2つの波源AとBから輻射される球面波を考えよう。この空間が例えば水面であり、AとBの位置を一定のリズムで叩くのだとすれば、観測地点において定常波の腹と節が交互に観測される。一方で、AとBに同一の原子を1つずつ置き、輻射される光を考えるときは事情が大きく異なる。その本質は、原子からはランダムに、途切れ途切れのタイミングで光が輻射されることにある。言うなれば、原子の発光は水面を一定のリズムで叩くのではなく、AとBをそれぞれ好き勝手なリズムとタイミングで叩いているようなものである。すると、AとBから輻射された波が観測地点で重なり合う際、互いの位相差は毎回変化する。つまり、腹と節の位置も毎回変化する事となる。

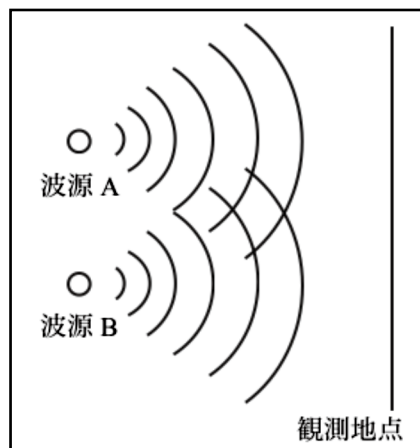


図9 2つの波源からの球面波を重ね合わせて、干渉縞を作る様子。水面を一定のリズムで叩いて干渉させるのであれば、波源AとBの位相差は一定に保たれ、干渉縞が観測される。一方で波源AとBが原子であるとすると、それぞれの発光のタイミングはランダムであり、位相差が常に変化する。この場合、干渉縞は観測されない。

では、2つの原子からの光が重なり合う際、この腹と節の位置はどれくらいの時間間隔で変化するのだろうか？ 答えは、 $10^{-9} \sim 10^{-10}$ 秒である。この時間間隔は我々の視覚の分解能をはるかに超えている。よって、我々の眼には、スクリーン上で干渉縞の位置が急速に変化しているのではなく、全体が光っているように見

えると考えられる。実際に2つの小さな光源でスクリーンを照らしてみると、全体が光って見える。これで、2つの点光源からの光を重ね合わせても干渉縞が観測されない理由が説明できた。

なお、電球に代表される熱輻射による光源の場合、発光体は原子（内の電子）であるとは限らない。熱輻射は理想的には黒体輻射であり、電子の他にも例えば励起したフォノンなど、様々な粒子から輻射される光が重なり合っている。しかしながら、本節の議論は発光体が原子か、フォノンかなどということによって変更を受けない。2つの点光源からの光を重ね合わせても干渉縞が観測されない理由が、本質的に説明できている。

3.2. 二重スリットの役割について

本節では前節の議論を踏まえて、干渉縞の観察における二重スリットの役割を述べる。

前節で、2つの点光源からの光は位相差がランダムに変化すること、それに伴い干渉縞の位置が急速に変化することを述べた。では、どうすれば干渉縞の位置を固定できるだろうか？

2つの光源の光を重ね合わせてもうまくいかないのだから、1つの光源から出た光を2つ重ね合わせるしかない。つまり、単一の光源からの光を二重スリットへ入射させ、各スリットからの回折光を重ね合わせればよい。

右図 10 に実験の様子を示した。前節で議論したように、光源からの光の輻射はランダムなタイミングで行われるので、二重スリットに入射する光の位相はランダムに変化する。一方で、光源と二重スリットの位置は固定され

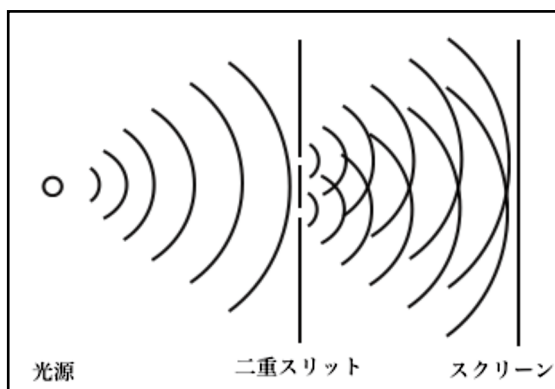


図 10 単一の光源からの光を二重スリットへ入射させ、回折光を重ね合わせる様子。この場合、二重スリットへ入射してくる光の位相はランダムに変化しても、2つのスリットからの回折光同士の位相差は一定に保たれる。

ているので、二重スリットからの回折光同士の位相差は常に一定である。第 1-2 節で述べたように、干渉縞のできる位置について問題になるのは回折光の位相そのものではなく、回折光の位相差である。よって、二重スリットを利用すれば、一定の位置に干渉縞を作り出すことができる。これがヤングの実験における二重スリットの役割である。実際に、暗室に小さな光源を置き、二重スリットを通して覗き込むと、干渉縞が観察できる。スクリーンに映えるかどうかは遮光と光量による。

3-3. 光のコヒーレント性について

本節では、光のコヒーレント性の視点から、ヤングの実験を検討する。その結果として、光源が電球であるかレーザーであるかということはヤングの実験にとって本質的ではないということを示す。

コヒーレント性とは、伝播する光が、位相をどれくらいはっきりと保っていられるかを表すものである。正確には、ある地点（時刻）での位相と、そこからある距離（時間）だけ進んだ地点（時刻）での位相の間にどの程度相関があるかを表す。空間に関するものを「空間的コヒーレンス」と呼び、直感的には光の波面の一様さを表している。同様に時間に関するものを「時間的コヒーレンス」と呼び、直感的には光電場の周期性がどれくらいの時間に渡って保たれるのかを表す。

二重スリット実験の干渉縞の位置は、2つのスリットからの回折光同士の位相差によって決まる。つまり、回折光のコヒーレント性が失われるにつれて干渉縞はぼやけてくる。コヒーレント性が失われると干渉縞は観測されなくなる。よって、第1.1節の図2に示したヤングの実験系においては、二重スリットのスリット同士の間隔 d や二重スリットとスクリーンの距離 L を、回折光のコヒーレント性が失われないようなスケールで設計する必要がある。

では、ヤングの実験において明瞭な干渉縞を観測するためには、どの程度のコヒーレント性が要求されるであろうか？大雑把には、次のように見積もることができる。二重スリットからの回折光がスクリーン上のある点で重なり合う時、その点までの両スリットからの経路差は、どんなに大きくてもスリット間隔 d より小さい。よって、明瞭な干渉縞に要求されるコヒーレント時間 τ は、光速を c として：

$$\tau \sim \frac{d}{c} \sim \frac{10^{-4} \text{ m}}{3 \times 10^8 \text{ m/s}} \sim 10^{-13} \text{ s}$$

と見積もれる。我々が光源として利用しているもの－例えば電球－の固体における発光において、典型的なコヒーレント時間は 10^{-10} 秒程度である。それに対して要求されるコヒーレント時間は3桁程度短く、ヤングの実験においては特にコヒーレント性に関する問題は生じないことがわかる。

ここまでの議論から、我々がヤングの実験においてレーザーを光源に選ぶ理由に、コヒーレント性は全く関係ないということは明らかである。確かにレーザー光のコヒーレント時間は、通常の電球などの光源に比べて桁違いに長い。しかしながら、通常の電球などを光源に用いても、そのコヒーレンス時間は干渉縞が明瞭に観測するために要求されるコヒーレント時間（ 10^{-13} 秒）に比べて十分長い。よって、レーザー光のコヒーレント性は、ヤングの実験において全く本質的ではない。

レーザー光を用いるとヤングの実験が簡単に行える理由は、レーザー光の優れた指向性による局所的な光強度の強さにある。簡単に言えば、「そこまで暗くない部屋でも干渉縞がよく見える」ということだ。

一方、巷ではヤングの実験における干渉縞が、レーザー光のコヒーレント性によって実現されているかのような記述・議論が少なからぬ頻度で見受けられる。それらはすべて誤りである。「レーザー光のコヒーレント性が他の光源に比べて桁違いに良いこと」、「レーザー光を用いるとヤングの実験が簡単にできること」、これらはどちらも事実である。しかし、両者の間に因果関係はない。

なお詳しくは後章で議論するが、二重スリット実験に量子力学における観測問題を持ち込んだとしても、レーザー光のコヒーレント性はヤングの実験において本質的ではないことに注意されたい。

4. 単スリットの役割

本章では、ヤングの実験における単スリットの役割について考察する。まず、巷で言われている「単スリットが光の位相を揃える」ということが間違いであることを確認する。そして単スリットの役割は光源の見かけの太さを絞っているに過ぎないことを示す。これは、二重スリットの各スリットに入射する光の「位相差の差」を揃えているのであり、位相を揃えているのではないということである。また、場合によっては単スリットが不要であることを述べ、定量的な解析も簡単に行う。

なお、本章での解析と同等な議論は、既に遠山によって報告されている。「ヤングの光の干渉実験における単スリットの幅の限界について」：物理教育 **26**, 4 (1978) を参照されたい。

4.1. 単スリットは光の位相を揃えないこと

巷で言われている「単スリットが光の位相を揃える」ということが間違いであることを確認するために、図 11 の状況を考えよう。2つの点光源 A, B が周波数 ω_A, ω_B で振動していて、 θ の位相差を以て単スリットに入射したとする。それぞれの振幅も A, B とすると、単スリットから輻射される光は：

$$\begin{aligned} & A e^{i\omega_A t} + B e^{i(\omega_B t + \theta)} \\ &= (A + B^{i(\omega_B - \omega_A)t + \theta}) e^{i\omega_A t} \end{aligned}$$

となる。明らかに、単スリットから輻射される光は、振幅に時間依存性のある、うなりの波である。また、単スリット入射前から存在していた位相差 θ も依然として残っている。つまり、

「位相を揃える」という効果は単スリットにはない。

そもそも、上で行った計算は「重ね合わせの原理」のみに基づいたものであり、単スリットがあろうとなかろうと結果は変わらない。単スリットが光に直接作用して光学的性質を変えると、このようなことがあるわけがない。

今後の議論の見通しをよくするために、ここで理想的な光学スリットとは何か、定義しておこう。

定義：理想的な光学スリット

「スリット部分以外に入射した光を反射も透過もなく完全吸収し、スリット部分においては一切光との相互作用はなく、完全に通過させるもの」

本来であれば、この定義に加えて「スリットが無限に細いこと」を加えるべきであろうが、本稿では単スリットの太さも議論するので、あえて定義では言及しない。

4.2. ヤングの実験における単スリットの役割

では、ヤングの実験における単スリットの役割とは何であろうか？ 答えは、「光源の見かけの太さを絞ること」である。このことを理解するために、2つの点光源からの光を単スリットを通さずに、直接二重スリットに入射させたときにできる干渉縞を考えよう。

光学系を図12に示す。互いに a だけ離れて置かれた点光源1, 2からの光が、光源から l の距離に置かれたスリット幅 d の二重スリットへ入射し、 L だけ離れたスクリーン

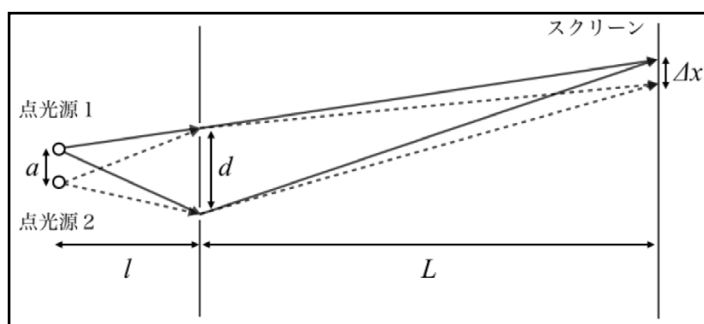


図12 単スリットの役割を理解するための光学系。互いに a だけ離れて置かれた点光源1, 2からの光が、光源から l の距離に置かれたスリット幅 d の二重スリットへ入射し、 L だけ離れたスクリーンにそれぞれが干渉縞を作る。点光源1からの光を実線で、2からの光を破線で表した。互いの明点位置のずれを Δx とし、この値は光源の太さによる「明点のぼやけ」に対応する。

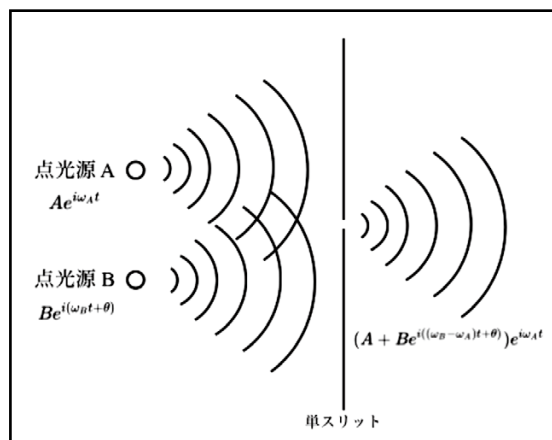


図11 周波数の異なる2つの点光源からの光を単スリットへ入射させると、単スリットからはうなりをもった光が輻射されるだけであり、位相が揃うはずがない。

にそれぞれが干渉縞を作る。互いの明点位置のずれを Δx とする。

実際の光源には必ず有限の太さがあり、その太さを a と考えれば、点光源 1, 2 は光源の両端を表現していることになる。よって、点光源 1, 2 がつくる明点位置のずれ Δx は、光源の太さによる「明点のぼやけ」を表している。この明点位置のずれ Δx の値を求めよう。 $a, d \ll l, L$ の条件の下では、2つの点光源から二重スリットに光が入射するまでに、互いに $\frac{d}{l}a$ の経路差が生じることに注意すれば：

$$\Delta x = L \frac{a}{l}$$

と求まる。

明点のぼやけを考慮した上で、干渉縞が観測されるかを考えよう。さて、どういう場合に「干渉縞ができた」と言えるのであろうか？直感的には下図 13 のように、ぼやけた明点と明点の間に暗い領域があって、ぼやけた明点同士が区別できれば干渉縞として認識できるであろう。



図 13 光源の太さによる明点のぼやけを考慮した上で、干渉縞が認識できるかどうか。左側では、ぼやけた明点同士が重ならず区別できる。一方、右側ではぼやけた明点同士が重なってしまっ、全体に明るく照らされるだけで干渉縞としては認識されない。

よって、2つの点光源 1, 2 が作る互いの明点位置のずれが、単一の点光源の作る明点同士の間隔よりも小さければ、干渉縞が観測できるということになるので：

$$L \frac{a}{l} < L \frac{\lambda}{d}$$

が満たされれば、光源に太さがあっても、干渉縞ができることになる。なお、右辺については 1.1 節の議論に基づく。上式を、光源の太さ（2つの点光源同士の距離） a について解くと：

$$a < \frac{l \times \lambda}{d}$$

となる。つまり、二重スリット実験において干渉縞を観測するためには、光源の太さが上式

右辺の値より細くしなければならない。実際の実験においても、直線状の細いフィラメントを持つ透明ガラスの電球の光を二重スリットに通せば干渉縞が観測できるが、大きな曇りガラスの電球の光を二重スリットに通しても、スクリーンが白色の回折光に照らされるだけで干渉縞は観測できない。

では、細い光源が手に入らない時、あるいは何らかの理由で太い光源の光を分光したい場合にはどうすればよいのだろうか？その時こそ、単スリットの出番である。光源と二重スリットの間に単スリットを置いてやれば、光源の見かけの太さは単スリットの幅に絞られるので、干渉縞を観測することができる。

ここまでの議論で明らかになったように、単スリットの役割は「光源の見かけの太さを絞る」ことであり、「位相を揃える」というようなはたらかしは無い。あえて言うならば、光源の各点から二重スリットに入射する光同士の「位相差の差」を揃えているのである。

4.3 単スリットを利用せずに干渉縞を観測する

前節で議論したように、二重スリット実験において干渉縞を観測するためには、光源の太さ a が下式を満たす必要がある。

$$a < \frac{l \times \lambda}{d}$$

よって、上式を満たすような細い光源を用いるか、あるいは単スリットを利用して光源の見かけの太さを絞る必要がある。

ところで、上の議論においては光源の太さ a を実験系における可変パラメータとみなしている。一方、二重スリットのスリット間隔 d や、光源と二重スリットの距離 l を調整することもできる。具体例として、曇りガラスの白熱電球から単スリットを用いずに干渉縞を得る条件を考えよう。

例：曇りガラスの白熱電球から単スリットを用いずに干渉縞を得る条件

上の光源の太さ a についての不等式を、二重スリットのスリット間隔 d について解き直すと：

$$d < \frac{l \times \lambda}{a}$$

となる。右辺の各パラメータに実際の値を代入して、スリット幅 d の上限値を求めよう。白熱電球の太さは、かなり大きいものでも $a \sim 10\text{cm}$ 程度である。二重スリットと電球の距離は、実験室の環境を鑑みると $l \sim 1\text{m}$ 程度であろう。白熱電球からの光を分光する場合、可視光

全域にわたり分光したいので $\lambda \sim 400\text{nm}$ と見積もう。すると、二重スリット幅 d は：

$$d < \frac{1\text{ m} \times 400\text{ nm}}{10\text{ cm}} = 4\mu\text{m}$$

の条件を満たす必要がある。

マイクロメートルオーダーの二重スリットを自作することはかなり難しいが、回折格子であれば $d \sim 1\mu\text{m}$ 程度のものも容易に手に入る。回折格子を用いれば、大きな光源でも容易に干渉縞を観測できることは周知の事実であろう。実際、回折格子を目の前にかざして天井の電球や蛍光灯を覗き込めば容易に干渉縞が観測できるが、自作の二重スリットでは困難である。一方で、直線状のフィラメントを持つ電球のような非常に細い光源を用いれば、自作の二重スリットを通して覗き込むだけで干渉縞が観測できる。

念のため注記しておくが、回折格子や二重スリットを目の前にかざして光源を覗き込むという方法は、ヒトの眼の効果も影響している。例えば上記の白熱電球を回折格子で分光する実験は、二重スリットからの回折光をスクリーンに映す方法で行うのは困難である。なぜならば干渉縞の明点間隔は、回折格子の格子間隔を $1\mu\text{m}$ とすれば：

$$\frac{L}{d}\lambda \sim \frac{1\text{ m}}{1\mu\text{m}} \times 400\text{ nm} \sim 40\text{ cm}$$

と見積れる。レーザー光のような輝度の高い光源を利用するならばともかく、白熱電球を利用して数十 cm スケールの間隔の干渉縞が肉眼で観察できるような実験環境を用意することはかなり困難である。光量の確保についても、遮光の領域の広さについても、現実的ではない。一方、目の前にかざした二重スリットからの光を直接眼に入射させて、眼のレンズを通して網膜に干渉縞を映し出せば、容易に干渉縞が観測できる。（例はここまでで終わり）

上の例からも分かるように、「単スリットがなぜ必要か？」との問いに対して、「光源が太すぎるから」とも言えるし、「二重スリットのスリット間隔が広すぎるから」と答えることもできる。同様に、「光源と二重スリットの距離が近すぎるから」と答えることもできる。さて、大学入試問題で単スリットの役割を問われた際、「二重スリットのスリット間隔が広すぎるから」という解答があったら、正解とされるだろうか？

5. 二重スリット実験に関する問題提起

本章では、二重スリット実験に関するこれまでの議論を踏まえて3つの問題提起を行う。

1つ目は、「高校物理におけるヤングの実験の取り扱いについて」である。各スリットの

役割を高校生に理解させようとする事自体に無理があるのではないか、授業や大学入試での扱いが踏み込み過ぎていないかということである。

2つ目は、「多くの教員がレーザーを用いたヤングの実験において、レーザーの役割を誤解しているのではないか」というものである。ヤングの実験において注目すべきレーザーの性質は、コヒーレンス性ではない。指向性と強度が電球などの光源に比べてはるかに優れていて、高い視認性が得られるという点である。

3つ目は、「二重スリット実験の量子力学的解釈にも誤解があるのではないか」というものである。というのも、量子力学的な見地からすると単スリットは必要である、というコメントを複数の方から頂いたのだ。量子力学における波束の収縮や同時観測可能性について、シュテルン-ゲルラッハの実験を例として確認し、単スリットが量子状態をもつれさせることとはないことを示す。

5.1. 高校物理におけるヤングの実験の取り扱いについて

高校物理における、ヤングの二重スリット実験を取り扱う目的は何であろうか？言うまでもなく、「光の波動性」のもっとらしさを示すための教材であろう。二重スリットの各スリットからの回折光が重なり合い、干渉縞ができる。また、色により明点間隔が異なることから、光の色と波長の対応付け、さらには分光学への動機付けとなる。さて、今述べたような、高校物理におけるヤングの実験の位置づけを鑑みて、各スリットの役割はどの程度取り扱われるべきであろうか？

二重スリットについては、2つのスリットがそれぞれ波源とみなせるという理解は必要であろう。また、二重スリットのスリット同士の間隔を変化させると干渉縞の幅がどう変わるかを生徒に考えさせることは、2次元（例えば水面）の定常波とヤングの実験を接続させる意味でも良い教材であろう。一方で3.1節で議論したような、なぜ2つの光源を用意するのではなく、二重スリットを利用する必要があるのかということは、高校生にとって難しすぎると著者は考える。物理としては本質的な議論ではあるが、少なくとも通常授業の範囲で扱うことは現実的ではないだろう。「PSSC 物理」では、なぜ二重スリットが必要なのかという議論も、原子の発光と関連付けながら解説されている。発展的な取り扱いとして、きちんと時間を確保して指導するのであれば高校物理で触れることも不可能ではないが、基本事項を一通り学んだ後での取り扱いとなるだろう。

単スリットに関しては、少なくとも初学者への導入としては扱う必要はないと、著者は考える。単スリットの役割については4.2節で議論したが、そもそも点光源から二重スリットへ入射した光のつくる干渉縞の仕組みを理解していなければ、この議論は展開できない。ヤングの二重スリット実験は、波動光学、特に干渉の単元の冒頭に扱われるであろうから、そ

の導入の時点では単スリットの役割を理解することは不可能である。4.2, 4.3 節でも述べたように、二重スリット実験それ自体は、適切に光源を選べば単スリットが無くても可能である。直線状のフィラメントを持った電球や、レーザーのような平面波光源を利用すればよい。そのような光源が用意できなければ単スリットを利用することにはなるが、その際に単スリットの物理的な役割は伏せておくべきであろう。あくまで、二重スリットの各スリットからの回折波の干渉の理解に集中するべきである。その段階を踏まずに、単スリットの役割を詳細に説明しても、満足するのは教員だけであろう。

問題集や大学入試問題での出題に関しても考察したい。(あえて、特定の大学や問題集を参考文献にあげることはしない。) まず、本節においても既に述べたように、各スリットの役割を問うような問題は、不特定多数の高校生に向けた出題は無理があると著者は考える。高校生にスリットの役割を問うことは、本稿の第3章及び第4章の内容と同等な理解を求めるものであり、明らかに高校物理における波動光学の位置づけを超越したものになってしまうからだ。また、問題集の模範解答あるいは解説に、「単スリットは光の位相を揃える」と明記されているものも複数見受けられる。これはもう、論外である。

同様に高校物理における波動光学の位置づけを超越した出題として、単スリットの回折によるフラウンホーファー像を扱った問題や、干渉縞の強度分布を問うものが挙げられる。フラウンホーファー像に関しては、非常に優秀な高校生に限れば、ホイヘンスの原理からの丁寧な誘導があれば解くことも可能ではある。しかしながら、実験でフラウンホーファー回折像を見たことがない生徒に、その場かぎりの理論問題として問うことは教育的ではない。強度分布に関しては、高校生に何を求めて出題しているのか、著者には理解できない。

高校生への出題としては、スリットや光源の位置をずらした際の干渉縞の変化といった、2次元空間の2つの波源が作る定常波との関連付けで解ける問題や、波長と色の関係から考える分光の問題に、範囲をとどめるべきであろう。ヤングの実験を本気で扱おうとすると、高校物理の範疇をどうしても超えてしまう。

最後に、高校物理の教科書の記述についても少し踏み込んだことを述べる。ヤングの実験の見取り図は通常、光源－単スリット－二重スリット－スクリーンという順で光学系が組まれている。実際にヤングの組んだ実験系を簡略化した結果なのであるが、実際に単スリットを利用したヤングの実験の光学系を授業で組んでいる教員はほとんどいないのではないだろうか。また、先にも述べたように、単スリットの存在は波動光学の導入の段階では本質的ではなく、むしろ理解の妨げになる。いっそ、教科書の記述においても単スリットは削除し、光源－二重スリット－スクリーンだけの光学系から始めてはどうだろうか。ちなみに著者は自身の授業で、単スリット込みのヤングの実験系も使用しているが、やはり単スリットがない方が導入の説明はうまくいく。

5.2. ヤングの実験におけるレーザー光の使用について

既に3.3節で議論したように、レーザー光の最大の特徴である「コヒーレンス性」は、ヤングの実験においては特に寄与しない。自作二重スリットのスリット同士の間隔が0.1 mm程度のオーダーなので、通常の白熱電球などの光源のコヒーレンス時間で十分である。

レーザー光源を利用すれば、手軽に二重スリット実験が行えるのは事実である。しかしその理由は、レーザー光が狭い（しかしスリット間隔より広い）範囲で平面波として伝播していくことと、何よりもその輝度である。二重スリット実験による干渉縞の高次の明点でも肉眼で観察できるほどの輝度は、教室でカーテンを閉めて電灯を消す程度の遮光で生徒全体に示すことが手軽に行える。つまり限られた授業時間の中で演示実験を行うには大きな利点である。今日では、このレーザー光を用いた二重スリット実験は、高校では光源－単スリット－二重スリット－スクリーンという光学系を組むものに比べて、はるかに普及している。

ひょっとすると、「単スリットが光の位相を揃える」と主張する人々は、このレーザー光を用いた二重スリット実験の普及の際に、次のような誤解をしてしまったのではないだろうか？

考察：「単スリットが光の位相を揃える」という誤解？

まず、次の2つの命題は真である。

- (i) レーザー光は、位相の揃ったコヒーレントな光である。
- (ii) レーザー光を利用すると、単スリットがなくても二重スリット実験ができる。

この2つの命題を組み合わせても、「単スリットが光の位相を揃える」という命題は導くことはできない。できないのだが、誤解してしまうことはありそうなものである。想像してみよう。ある時までずっと単スリットを利用した二重スリット実験を行なっている人が、未知なる発明「レーザー」の普及に伴い単スリットが不要になったとする。そのレーザーの特徴は位相の揃ったコヒーレントな光であるという。そんなとき、どこかで「単スリットが光の位相を揃える」と書いてあるのを目にしたとする。「ああ、そういうことだったのか！」と合点がいてしまいそうなものではないだろうか？

（考察はここまでで終わり）

5.3. 二重スリット実験の量子力学的解釈

最後に、二重スリット実験を量子力学における観測と波束の収縮の問題と絡めて議論したい。というのも、2017年夏に日本物理教育学会やAPEJの大会で本稿の内容を発表した際、「単スリットがなければ、量子力学的には二重スリット実験の干渉縞は観測できない」とか、「単スリットは量子力学的な位相を揃えているのである」というような反論を、複数の人から受

けたのである。もちろんそれらの考えは誤りであるが、量子力学的な解釈についても二重スリット実験を再考したい。二重スリット実験の量子力学的な解釈についても、ひょっとすると誤解が蔓延しているのではないだろうか。ここで、二重スリット実験の量子力学的な解釈を議論する前に、シュテルン－ゲルラッハの実験（Sakurai, 1989 に詳細かつ直感的な記述がある）を紹介したい。こちらを先に考察した方が、より量子力学の基本的な世界観を理解しやすいからである。

紹介：シュテルン－ゲルラッハの実験

1921 年にシュテルンにより考案され、翌年にゲルラッハと共同で実現された「シュテルン－ゲルラッハの実験」系の見取り図を、下図 14 に示す。

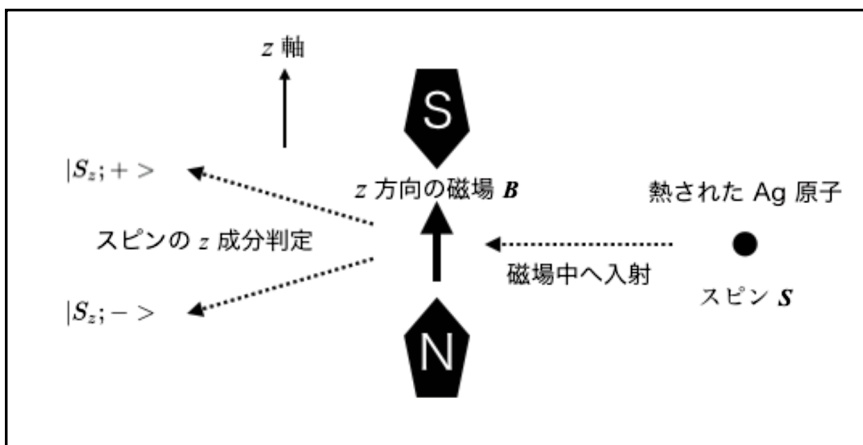


図 14 シュテルン－ゲルラッハの実験の見取り図。スピン 1/2 の粒子である銀原子が z 方向にかかった磁場の中に入射すると、磁場とスピンの相互作用により、 z 軸方向の軌道が上下に分かれ、 $|S_z; +\rangle$ の状態と $|S_z; -\rangle$ の状態を選別することができる。

この実験において、本質的に寄与する Ag 原子の角運動量は、最外殻電子 1 つのスピンのみである。電子はスピン 1/2 なので、本質的に二準位の量子系である。今、量子化軸を z 軸方向に選ぶと、銀原子の量子状態 $|\psi\rangle$ は：

$$|\psi\rangle = c_+ |S_z; +\rangle + c_- |S_z; -\rangle$$

と表せる。但しここで、

$$|c_+|^2 + |c_-|^2 = 1$$

かつ

$$\hat{S}_z |S_z; \pm\rangle = \pm \frac{\hbar}{2} |S_z; \pm\rangle$$

である。もちろん $\hat{S}_z$ はスピン演算子 $\hat{\mathbf{S}}$ の z 成分である。つまり、銀原子の量子状態はスピン up の状態 $|S_z; +\rangle$ と、スピン down の状態 $|S_z; -\rangle$ の重ね合わせである。

この Ag 原子が、 z 方向を向いた外部磁場 $\mathbf{B}$ の中に垂直に入射する。すると Ag 原子の磁気双極子モーメント $\boldsymbol{\mu}$ と外部磁場 $\mathbf{B}$ とが相互作用する。そのハミルトニアンは：

$$\hat{H} = -\hat{\boldsymbol{\mu}} \cdot \mathbf{B}$$

である。今、磁場 $\mathbf{B}$ は古典的に取り扱える。磁気双極子モーメント $\boldsymbol{\mu}$ はスピン $\mathbf{S}$ に比例すること、磁場は z 方向のみを向いているので $\mathbf{B} = B_z \mathbf{e}_z$ と書けることに注意すると、ハミルトニアンは次のように書き直すことができる：

$$\hat{H} = \frac{e B_z}{m_e c} \hat{S}_z$$

ここで、 e は電気素量、 m_e は電子質量、 c は光速である。この相互作用はつまり、定数部分を除けば外部磁場の z 成分と Ag 原子のスピン z 成分の積である。スピンの z 成分は up と down の 2 準位なので、磁場を通り抜けた後の銀原子は 2 通りの軌道に別れる。 z 軸の上方向と下方向である。磁場と同じ向きに曲がった軌道で運動してきた Ag 原子は、スピンが磁場と同じ方向を向いているということなので、スピン up の状態 $|\psi\rangle = |S_z; +\rangle$ であると確定される。逆に、磁場と逆向きに曲がった軌道で運動してきた Ag 原子はスピン down の状態 $|\psi\rangle = |S_z; -\rangle$ であると確定される。

つまり、外部磁場に入射する前の Ag 原子はスピン up と down の状態の重ね合わせ、 $|\psi\rangle = c_+ |S_z; +\rangle + c_- |S_z; -\rangle$ であったが、この実験を通して up か down かどちらかの状態に収縮してしまうのである。これは、量子力学的な「観測」に対応する。元々は複数の量子（固有）状態の重ね合わせであった系が、観測を通していずれかの状態に収縮するのである。どの状態に収縮するかは、観測するたびランダムに変わる。但し、観測を何度も繰り返した時、各状態の係数に対応した比で各状態が観測される。今の例であれば、スピン up の状態とスピン down の状態が $|c_+|^2 : |c_-|^2$ の比で観測される。これが、量子力学における「確率解釈」であり、重ね合わせの係数は $c_{\pm}$ 「確率振幅」とも呼ばれる。

さて、このシュテルン-ゲルラッハの実験系は全体としてスピンの「 z 成分選別器」とみなすことができる。また、ここまで紹介した例では外部磁場を z 軸に沿ってかけていたが、外部磁場の方向を変えれば「 x 成分選別器」や「 y 成分選別器」とすることも、もちろん可能である。ここで、銀原子をまず一度「 z 成分選別器」にかけて、スピン up

の状態だけを選別し、その後さらに選別器にかけるという実験を考えてみよう。

まず、下図 15 のように、 z 成分選別器にかけてスピン up の状態だけを選び出した後、もう一度 z 成分選別器にかけることを考える。

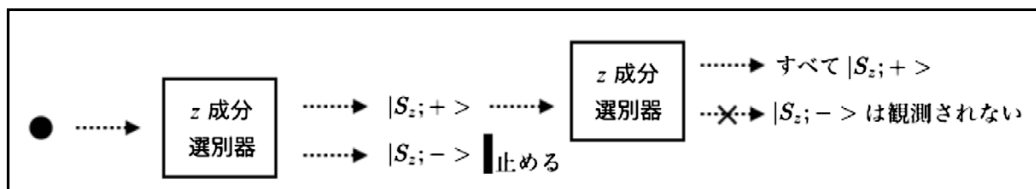


図 15 はじめに z 成分選別器にかけてスピン up の状態だけを選び出し、その後さらに z 成分選別器にかける。当然ながら、2 度目の選別機を通して、スピン up の状態しか観測されない。

当然ながら、最初の選別器においてスピン up の状態だけを選び出し、2 つ目の選別器に入射するすべての Ag 原子は $|\psi\rangle = |S_z; +\rangle$ の状態に確定しているの、2 つ目の選別器にかけてもスピン up の状態しか観測されない。

次に下図 16 のように、 z 成分選別器にかけてスピン up の状態だけを選び出した後、さらに x 成分選別器にかけることを考える。

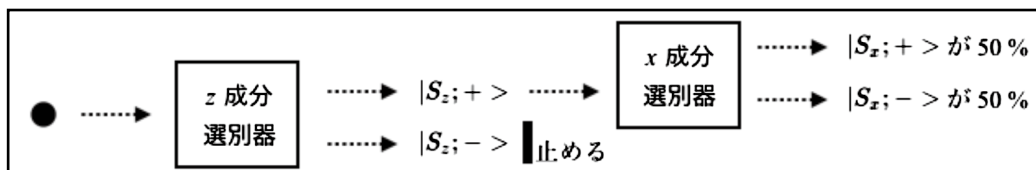


図 16 はじめに z 成分選別器にかけてスピン up の状態だけを選び出し、その後さらに x 成分選別器にかける。すると、 $|S_x; +\rangle$ と $|S_x; -\rangle$ の状態が 50: 50 の確率で観測される。

すると、 $|S_x; +\rangle$ の状態と、 $|S_x; -\rangle$ の状態が 50 : 50 の割合で観測される。これは、観測する量子化軸を z 軸から x 軸に変更したので、それに対応して基底を $|S_z; \pm\rangle$ から $|S_x; \pm\rangle$ に変更して表現すると理解しやすい：

$$|S_z; +\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|S_x; +\rangle - |S_x; -\rangle \right)$$

$$|S_z; -\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|S_x; +\rangle + |S_x; -\rangle \right)$$

つまり、スピン up の状態 $|S_z; +\rangle$ は、 $|S_x; +\rangle$ の状態と、 $|S_x; -\rangle$ の状態を同じ重みで重ね合わせたものである。先の実験はこの結果を反映して、 x 成分選別器を通過した後

には $|S_x; +\rangle$ の状態と、 $|S_x; -\rangle$ の状態が 50 : 50 の確率で観測されるのである。

最後に下図 17 のように、 z 成分選別器にかけてスピン up の状態だけを選び出した後、さらに x 成分選別器にかけて $|S_x; +\rangle$ の状態だけを選び出し、再び z 成分選別器にかけを考える。

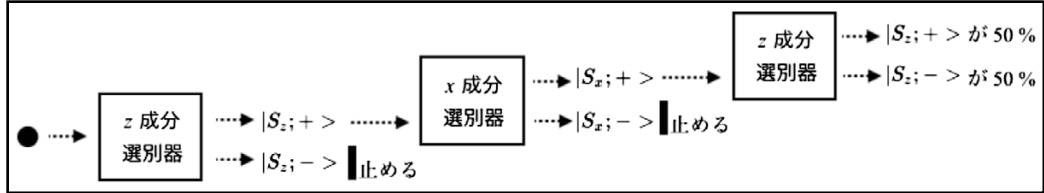


図 17 はじめに z 成分選別器にかけてスピン up の状態だけを選び出し、その後さらに x 成分選別器にかけて $|S_x; +\rangle$ の状態だけを選び出し、さらに z 成分選別器にかけ。はじめの z 成分選別器においてスピン down の状態は排除したにも関わらず、最後には up と down の状態が再び 50 : 50 の確率で観測される。

はじめの z 成分選別器でスピン up の状態 $|S_z; +\rangle$ のみを選び出しておいたにも関わらず、 x 成分選別器で $|S_x; +\rangle$ の状態のみを選び出して再び z 成分選別器を通してみると、スピン up の状態 $|S_z; +\rangle$ とスピン down の状態 $|S_z; -\rangle$ が 50 : 50 の確率で観測される。

この結果は、古典物理学の範囲では理解できない。注意すべきことは、はじめの z 成分選別器でスピン up の状態 $|S_z; +\rangle$ を選び出して、さらに x 成分選別器で $|S_x; +\rangle$ を選び出したことは、「スピンの z 成分も x 成分も同時にプラスの状態」を選び出したことにはならないということである。というのも、量子力学において交換関係がゼロにならない物理量同士は同時に観測できない。スピンの z 成分と x 成分の交換関係は：

$$[\hat{S}_z, \hat{S}_x] = \hat{S}_z \hat{S}_x - \hat{S}_x \hat{S}_z = i\hbar \hat{S}_y \neq 0$$

であるから、スピンの z 成分と x 成分を同時に確定することはできない。 x 成分選別器で $|S_x; +\rangle$ を選び出した時点で、最初の z 成分選別器での観測結果は“白紙に戻って”しまうのである。 $|S_x; +\rangle$ の状態を、再び $|S_z; \pm\rangle$ の基底で書き直すと：

$$|S_x; +\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \left(|S_z; +\rangle + |S_z; -\rangle \right)$$

である。スピン up と down の状態が、同じ重みで重ね合わさっている。

(紹介はここまでで終わり)

さて、議論を二重スリット実験に戻そう。量子力学における、二重スリット実験とは次のようなものである。下図 18 に概念図を示す。

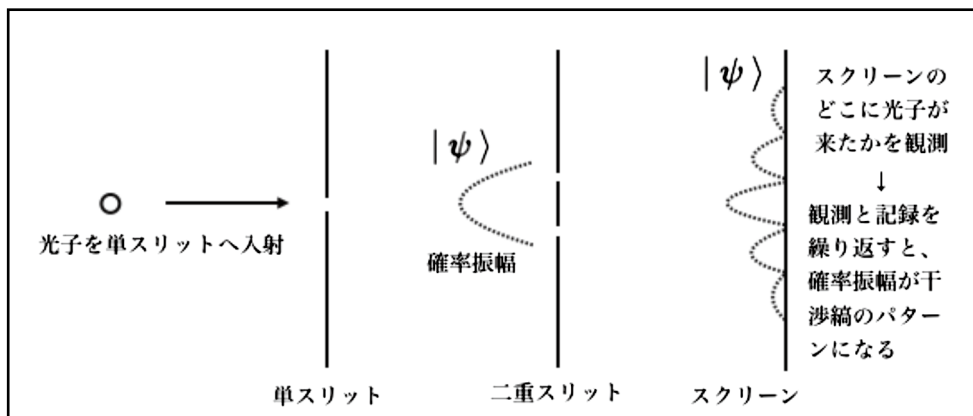


図 18 量子力学的な二重スリット実験の概念図。単スリットを通して二重スリットに入射した光子は、二重スリットのどちらも通り得るため、二重スリットを通過後の量子状態は上側のスリットを通過した状態と下側のスリットを通過した状態の重ね合わせとなり、スクリーン上での存在確率は、干渉縞のパターンに一致する。

まず、光を極限まで弱めて、光子を 1 つ、2 つ…と数えられるようにする。この光を、単スリットに向かって入射する。シュテルン–ゲルラッハの実験における Ag 原子とは異なり、光子は質量のない光速で運動する粒子であるから、運動を“軌道”として確定することができない。光子の位置には常に量子力学的な揺らぎがあり、二重スリットを通過する際にも、上図 18 のように存在確率が空間的に分布するような確率振幅で、連続的に量子状態が重ね合わさっている。よって、二重スリットを通過後には上側のスリットを通過した状態と、下側のスリットを通過した状態が重ね合わさった状態となっている。すると、スクリーン上での存在確率は、極大と極小を周期的に繰り返すような確率振幅となっている。スクリーン上で光子を観測すると、その確率振幅の分布に応じた確率で状態が選出され、その位置状態で波束が収縮する。光子が観測された場所に点を打ち、また次の光子を入射させることを繰り返すと、スクリーン上にはちょうどヤングの二重スリット実験における干渉縞と同様のパターンが現れる。ヤングの実験における明点は確率振幅が極大となる点に、暗点は極小となる点に対応する。なお、この実験は 1982 年に浜松ホトニクスで実現され、同社 web ページにて動画も視聴できる。

さて、シュテルン–ゲルラッハの例に倣って、下図 19 のように操作をしてみよう。



図 19 二重スリットのどちらのスリットを通過したか観測すると、波束が収縮し、二重スリットを通過しても上下の各スリットを通った状態の重ね合わせではなくなってしまう。すると、スクリーン上での存在確率は、連続分布となり、干渉縞のパターンは現れない。

二重スリットに物理的な仕掛けを用意して、上下どちらのスリットを通ったか観測し、どちらかのスリットを通った状態に波束を収縮させる。すると、二重スリットを通過しても、量子状態は上下の各スリットを通った状態の重ね合わせではなくなってしまう。それに伴い、スクリーン上での観測結果は、連続的に分布した存在確率となり、干渉縞のパターンは現れない。

このように量子力学的な視点からヤングの二重スリット実験を再考してみると、単一の光子が二重スリットを通過する際、上下それぞれのスリットを通過した状態が重ね合わさっていることが肝要であり、観測によってどちらかの状態に確定させてはならないことが理解できる。

ここで、今までの議論に「単スリットが位相をそろえる」などというはたらきはどこにも出てきていないことに注意されたい。単スリットには、量子力学的な位相に影響を与えるような機構があるわけがない。さらに、もし仮に単スリットあるいは別の装置によって量子力学的な位相が影響を受けたとしても、この実験結果は何も変わらない。なぜなら、二重スリットに入射する前の光子の量子状態 $|\psi\rangle$ の量子力学的な位相を θ だけ変化させて、

$$|\psi\rangle \rightarrow e^{i\theta}|\psi\rangle$$

としても、今までの議論に何の影響も及ぼさないからである。観測によって波束を収縮するかどうかで干渉縞が観測できるか否かが決まるという量子力学的な問題は、あくまで二重スリットについてのものであり、単スリットは量子力学的な二重スリット実験においてもあくまで“絞り”としての役割しか果たしていない。

最後に、下図 20 の思考実験を行おう。

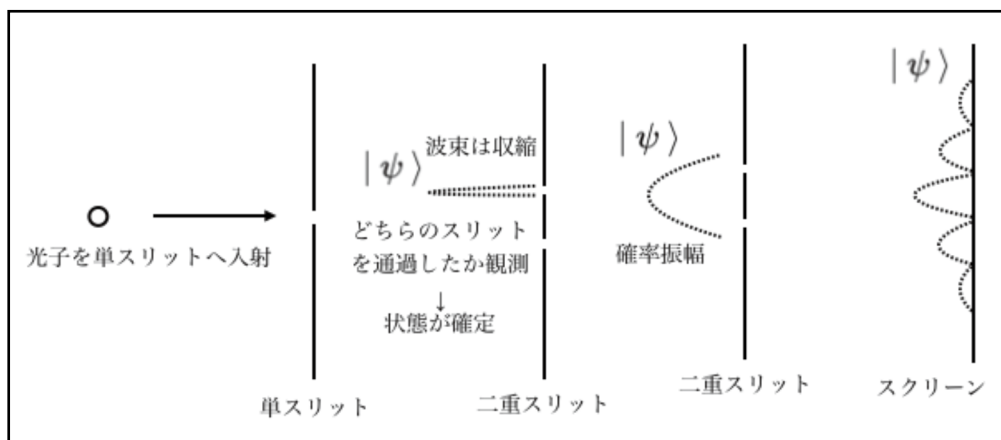


図 20 二重スリットのどちらのスリットを通過したか観測して状態を確定させた後に、再びただの二重スリットに入射させれば、スクリーン上の存在確率には干渉縞のパターンが現れる。

二重スリットを通過する際に、どちらのスリットを通過したか観測して状態を確定させた後に、再びただの二重スリットを通過してスクリーンへと光子を導けば、スクリーン上での存在確率には干渉縞のパターンが現れるはずだ。ここで、1つ目の二重スリットと2つ目の二重スリットの間には単スリットなど存在しないし、1つ目の二重スリットでの観測によってそろったのは、量子力学的な「位相」ではなく「状態」であることに注意されたい。

以上の議論により、「単スリットがなければ、量子力学的には二重スリット実験の干渉縞は観測できない」とか、「単スリットは量子力学的な位相を揃えているのである」という考えも、すべて誤りであるということが理解できた。そもそも、量子力学的な現象の中には、古典物理の範疇では理解できない現象はいくつも（例えばシュテルン-ゲルラッハの実験）あるが、古典物理での結果を量子力学を用いて説明できないということは、ちょっと著者には考えられない。古典物理学での明確な実験事実を、「量子力学的には～」と言って話をあやふやにするのは、自然への真摯な向き合い方ではないように思える。

6. まとめ

最後に、本論文の内容をまとめたい。

本論文では、著者がヤングの二重スリット実験において単スリットの役割が「光の位相を揃える」とされていることに疑問を持ったのをきっかけに、二重スリット実験について徹底的に再考した。

第1章では通常の高校物理でのヤングの実験の取り扱いを確認した。

第2章では、回折について再考した。高校物理では回折について、波長とスリットの隙間

の広さの大小関係のみで議論している。波長よりも狭い隙間を通り抜ける際に波が回折するという記述になっているが、空間スケールも合わせて議論する必要性を述べた。ヤングの実験において、スリット幅は光の波長の $10^2 \sim 10^3$ 倍のスケールであるから、単純に波長とスリットの大小関係だけを問題にすると、解説が起こらないことになってしまう。

第3章では、二重スリットの役割について再考した。干渉縞を作るためには、2つの光源を独立に用意しても位相差が一定とならず、二重スリットを利用することによって1つの光を一定の位相差を持つ2つの光に分けることが肝要であることを説明した。併せて、光のコヒーレント性についても議論し、レーザー光の高いコヒーレント性は、ヤングの実験において本質的な寄与をしないことを明らかにした。

第4章では、単スリットの役割について再考した。「単スリットが光の位相を揃える」というのは明確な誤りであることを示した。さらに、単スリットは光源の見かけの太さを小さくするための“絞り”であることを示した。この議論を発展させ、単スリットを使わなくてもすむ方法としてはじめから細い光源を利用する方法や、光源が太くても二重スリットのスリット間隔やスクリーンと光源の距離を調整する方法を紹介した。

第5章では、これまでの議論を踏まえて、ヤングの二重スリット実験についての問題提起を行った。1つ目は、高校物理でのヤングの実験の向き合い方について、2つ目は、ヤングの実験におけるレーザー光のコヒーレント性と単スリットの必要性について、3つ目は、二重スリット実験の量子力学的な解釈についてである。

これまでの議論を通して、ヤングの二重スリット実験は、本気で踏み込んで考えてみると、非常に豊富な物理を含んでいることが分かる。もちろん高校生には提示すべきものでない、複雑な物理もいくつもある。しかしながら、教員としてはそれらのことを理解した上で、本質を損なわないように取捨選択しながら、ヤングの実験の授業を設計すべきだろう。

教員生活5年目にして、ようやく二重スリット実験に対して真摯に向き合うことができた。残りの35年の間に、高校物理のすべてのテーマと真摯に向き合うことができるであろうか甚だ疑問ではあるし、次年度のヤングの実験の授業をどのように再構成するかも全く見当がつかない。悩ましいものだが、本稿が読者の教材研究の助けになることを願いつつ、筆を置く。

謝辞

本稿の内容は、多くの物理教育関係者との有意義な議論によるところが大きい。特に、山本明利氏（北里大学）、岸澤眞一氏（拓殖大学）、市原光太郎氏（東京学芸大学附属高校）、有澤哲郎氏（早稲田大学高等学院）との議論では、自身になかった多くの視点をいただけた。深く感謝を申し上げる。また、学会発表の際に光の回折についての定理を教えてくださいました栗田和好氏（立教大学）、単スリットについて原稿や問題提起をいただいた中田勝夫氏、大倉宏氏（大阪市立科学館）に対しても、御礼を申し上げる。この他にも多くの方々と議論させていただいたのだが、紙面の都合で名前をあげられないことをお詫びする。

参考文献

- ・三浦登ら,「物理」(東京書籍,2012)
- ・ロッシ,「光学」,福田国弥ら 訳 (吉岡書店,1967)
- ・ファインマンら,「ファインマン物理学Ⅱ 光 熱 波動」,富山小太郎 訳 (岩波書店,1986)
- ・Physical Science Study Committee,「PSSC 物理 第2版」(岩波書店,1967)
- ・M. フォックス,「量子光学」,木村達也 訳 (丸善,2012)
- ・遠山 武,「ヤングの光の干渉実験における単スリットの幅の限界について」物理教育 **26**,4 (1978)
- ・山田 茂夫,「2スリットによる光の干渉縞の成立条件」物理教育 **19**,4 (1971)
- ・J. J. Sakurai,「現代の量子力学」,上巻第1章 (吉岡書店,1989)
- ・浜松ホトニクス株式会社,「フォトン (光子) の二重性」,
<http://photonterrace.net/ja/photon/duality/> (2018. 01. 08. 取得)

