

国際物理オリンピック過去問シリーズを開始します

本シリーズでは、国際物理オリンピックでこれまで出題された問題を取り上げて、解説します。

国際物理オリンピック¹⁾は、世界中の高校生を対象にした、年1回行われるイベントです。開催国が、理論および実験の問題を用意し、各国の選考会²⁾を勝ち抜いた高校生たちが取り組みます。2022年には、日本で初めて開催される予定であり、³⁾日本物理学会も共催しています。より多くの方々に、国際物理オリンピックに興味をもっていたければ幸いです。

国際物理オリンピックで出題される問題は、各国の物理の関係者が作成しています。たとえば、ノーベル賞を受賞したテーマに関連した問題もあります。様々な分野の話題をどのように高校生向けの問題にしているか、興味深いところです。本シリーズでは、問題文と解答だけでなく、背

景についても解説があり、他の国の教育の様子を知ることができます。大学教員にとっては、問題や解説から、日々の授業や学生実験のヒントが得られるかもしれません。あるいは、定期試験や入学試験の問題作成の参考になるかもしれません。

また、国際物理オリンピックの問題を純粋に楽しんで解く方もいらっしゃると思います。このシリーズを多くの方々が読んでくださることを期待しています。

参考文献

- 1) <https://www.ipho-new.org/>
- 2) 日本国内の選考は、<http://www.jpoho.jp/>
- 3) <https://ipho2022.jp/>

(2020年5月21日原稿受付, 文責: 会誌編集委員会)

考える実験試験——国際物理オリンピック2006の実験問題

長谷川修司[†] (東京大学大学院理学系研究科 shuji@surface.phys.s.u-tokyo.ac.jp)

1. はじめに

高校や大学初年次の物理実験では、テキストに書いてある手順に従って実験していけば自然と結果が出る、といったパターンが多い。その背景となる物理をよく理解してなくても実験ができるし、それなりの結果も出るというので、「何も考える必要がない」、「必要なのは手先の器用さだけだ」、といった声を学生・生徒から聞くこともある。

2006年の国際物理オリンピック・シンガポール大会での実験問題は、日本選手にとっても引率した我々役員にとっても衝撃的だった。¹⁾ 上記の日本流物理実験と全く違って、実験のテーマであるマイケルソン干渉計の原理だけ示して、問題冊子には装置の組み立て方や実験手順を全く示していないという問題だった。選手たち(高校生)は、原理図を頼りに、実験器具をどう並べて何をどう測ったらよいか、自分で考えなければならない。また、「測定値の誤差(不確かさ)を求めよ」、という問いではなく、「指定された測定誤差以下で測定せよ、そのためにはどうしたらよいか」、という問いもあった。測定自体を題材に考えさせる実験問題であり、とても新鮮だったので、本稿ではその一部を紹介する。

問題冊子と解答冊子とともに、図1に示すような実験キットが収められている段ボール箱が選手一人ひとりに配られる。マイクロ波発信器や受信器、マイクロ波に対する反射鏡や半透鏡、レンズ、プリズム、定規付光学レールなど、すべての実験器具にはアルファベットの記号が付けられ、それらが何であるか、問題冊子に説明されている。しかし、実験手順や実験器具の配置の仕方は説明されていないため、選手たちは、それぞれの実験目的を理解して、器具を適切に机の上に配置するところから考えなければならない。

マイクロ波の波長は数cmなので、マクロな物体や距離で可視光やX線と同様の干渉や反射、回折の実験ができる、極めて教育的な実験試験であった。課題1では、マイケルソン干渉計を組み立ててマイクロ波の波長を測定する。課題2では、マイクロ波を使った「薄膜の干渉」実験を行い、そこから薄膜の屈折率を算出する。課題3では、マイクロ波の全反射のときに発生するエバネセント波の減衰係数を求める。課題4では、結晶に見立てた金属棒の格子にマイクロ波を当ててブラッグ回折を起こして「格子定数」を求める。本稿では紙面の制限から、課題1と課題3のみを紹介する。問題の全文および解答例は、物理オリンピック日本委員会のホームページ上で公開されている。²⁾

[†] 公益社団法人物理オリンピック日本委員会

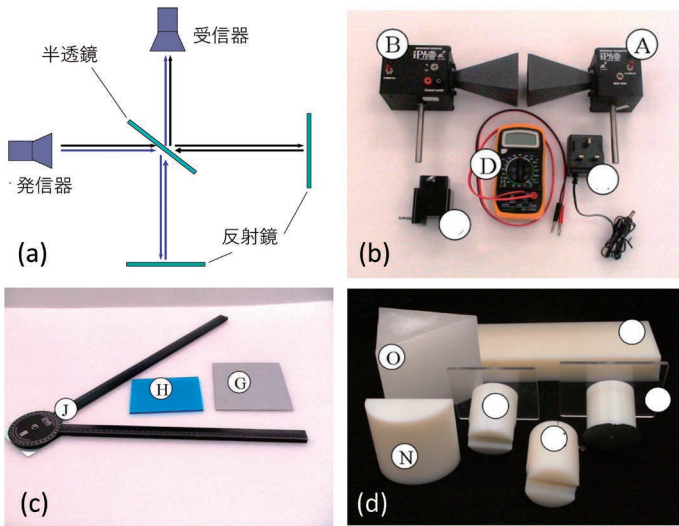


図1 (a) マイケルソン干渉計の原理図。(b)-(d) 実験器具。A: マイクロ波発信器, B: マイクロ波受信器, D: デジタルマルチメータ, G: 反射鏡, H: 半透鏡, J: 角度可変型簡易光学レール (定規付), N: 半円筒型レンズ, O: 三角プリズムなど。

2. 問題

2.1 マイクロ波の波長の測定

【問題文】 空気中におけるマイクロ波の波長 λ を決定するために、図1(a)に示したマイケルソン干渉計を組み立て、(a) 器具の配置を模式図に描きなさい。(b) つぎに、光路差を変えながら測定した受信器の出力値を表にしなさい。(c) それをもとにして波長 λ を求めなさい。(d) その際、光学レールの定規の最小目盛の1/2が読み取り誤差であることを考慮し、多数回測定して、求めた波長の最終的な誤差 $\Delta\lambda$ が0.02 cmより小さくなるようにしなさい。

【ポイント】

- (1) まず、マイケルソン干渉計の原理図(図1(a))だけを頼りに、光学レールを利用してマイクロ波発信器や受信器など必要な部品を適切に配置して、実際にマイケルソン干渉計を組み上げられるか。
- (2) 干渉計の一方の反射鏡の位置を変えて2本の腕の長さの差を変化させることで光路差を変えられることを理解しているか。それによって、2本の腕から来た波が干渉して受信器の出力が変化することを理解しているか。
- (3) 光路差を連続的に変えたときに、受信器の出力が周期的に強弱を繰り返す、その1周期に対応する鏡の移動距離が波長の半分に相当することを理解しているか。そのときの反射鏡の移動距離を測れるように光学レールを適切に利用しているか。
- (4) 光学レールについている定規の最小目盛は1 mmなので、その読み取り誤差は ± 0.5 mmであるが、どうやって波長の測定精度を0.2 mm以下にするのか。

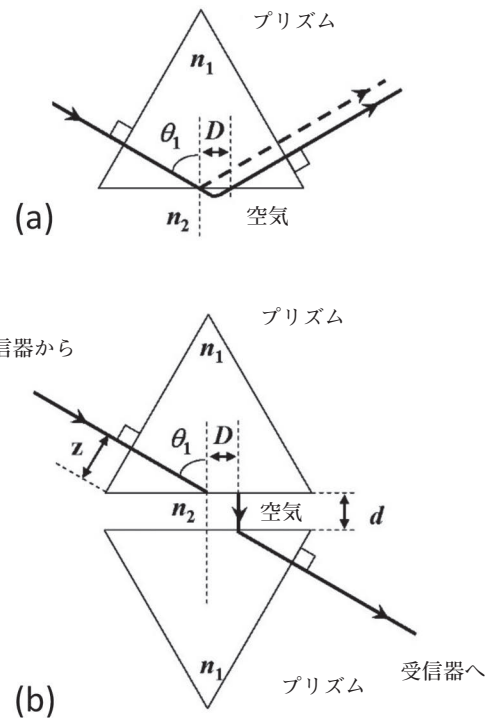


図2 (a) プリズムによる内部全反射。(b) 内部全反射のエバネセント波を第2のプリズムを近づけることによって進行波として取り出せる(不完全な内部全反射)。

2.2 全反射でのエバネセント波の減衰係数の測定

問題冊子には、問題文の前に全反射に関する以下の解説がある。

全反射という現象は、光学的に密な物質から疎な物質へ平面波が入射したときに生じる。しかし実際には、幾何光学によって予想される全反射とは違って、入射波は光学的に疎な物質側にしみ出し(エバネセント波)、少しの間、境界に沿うように進んでから、散乱して光学的に密な物質側に戻る(図2(a)、プリズムの屈折率 $n_1 >$ 空気の屈折率 n_2)。この効果は、反射波のずれ D で表される「グース=ヘンヒェンのずれ」として知られている。

図2(b)に示すように、同じ屈折率をもつ(同じ物質でできている)2つのプリズムを、わずかな距離 d だけ離れた位置におくと、1番目のプリズムの内部での全反射によって表面からしみ出たエバネセント波が、2番目のプリズムの中に進行波として侵入するという現象が起こる。この不思議な現象は、「不完全な内部全反射(Frustrated Total Internal Reflection, FTIR)」とよばれる。2番目のプリズムに伝播する波の強度 I_t は、距離 d が増加するとともに、次の式で示されるように指数関数的に減少する。

$$I_t = I_0 \exp(-2\gamma d) \quad (1)$$

ここで、 I_0 は入射波の強度を示し、 γ は減衰係数である。

【問題文】「不完全な内部全反射」における2つのプリズム間の距離 d の関数として、2番目のプリズムに侵入する波の強度 I_t を測定するための装置を組み立て、(a) その模式図を描きなさい。(b) $d=0.6$ cm からデータを取り始めて d を大きくしていき、受信器の出力であるデジタルマルチメータの読みが 0.20 mA 以下になったら測定をやめなさい。(c) 距離 d と強度 I_t のデータをグラフにプロットしなさい。その際、光学レールの定規の読み取り誤差をグラフ中に示して描きなさい。(d) これをもとにして減衰係数 γ およびその誤差を求めなさい。

【ポイント】

- (1) 題意を理解して、実験器具を適切に配置できるか。とくに、距離 d を正確に変化させるために光学レールの定規を適切に利用できるように器具を配置しているか。
- (2) グラフをプロットするときに、 d 対 I_t をそのままプロットするのではなく、片対数スケールのグラフにプロットできるか。
- (3) そのグラフの直線の傾きから、要求されている物理量 γ を算出できるか。
- (4) 定規の読み取り誤差による誤差棒をグラフに描き、そこから直線の最大と最小の傾きを求めて γ の測定誤差を導けるか。

3. 解答例

3.1 マイクロ波の波長

マイケルソン干渉計の一方の反射鏡を少しずつ動かしながら受信器の出力を測定した結果をグラフにすると図3(a)となる。移動すべき反射鏡を光学レール上に載せ、他方の固定反射鏡はレールに載せない配置にして、移動反射鏡の位置を正確に測定できるようにすることが肝心である。

図3(a)に示された強度の振動のうち、何周期まで測定すればよいのかがポイントである。測定精度を上げるためには、1周期だけではなく、たくさんの周期に対応する鏡の移動距離を測定したほうがよいが、何周期分が必要なのか。ここが、 $\Delta\lambda$ に関係する。

図3(a)では、11周期分までのピークが測定されているので、11周期分に対応する反射鏡の移動距離 $L = (103.6 - 87.8) = 15.8$ cm できりあえず計算してみよう。 $L = 11 \times (\lambda/2)$ なので、 $\lambda = 2L/11 = 2.87$ cm とマイクロ波の波長が算出できる。

次に誤差の見積もりだが、 L の読み取り誤差が定規の最小目盛 (1 mm) の $1/2$ なので、 ± 0.5 mm、つまり、移動距離の測定値 L は $L = 15.80 \pm 0.05$ cm となる。よって不確かさの幅は $\Delta L = 0.5 \times 2 = 1$ mm となる。また、 $\lambda = 2L/11$ なので、 $\Delta\lambda = 2\Delta L/11$ である。よって、 $\Delta\lambda = 0.18$ mm と得られる。これは要求されている $\Delta\lambda$ より小さい値なので題意を満たしている。これが、もし10周期より少ない周期分しか測らなかった場合には測定誤差は $\Delta\lambda = 2\Delta L/10 = 0.2$ mm より

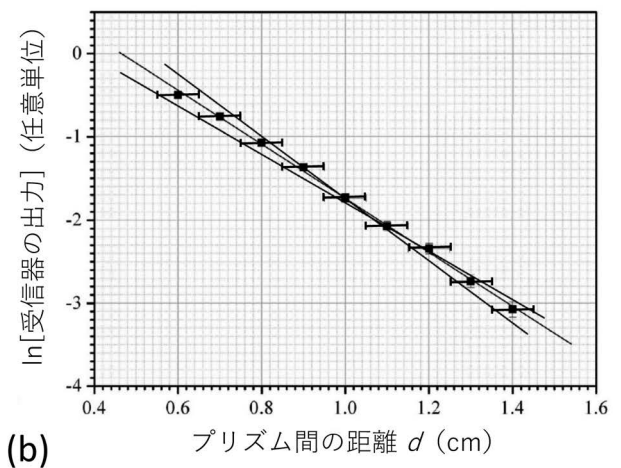
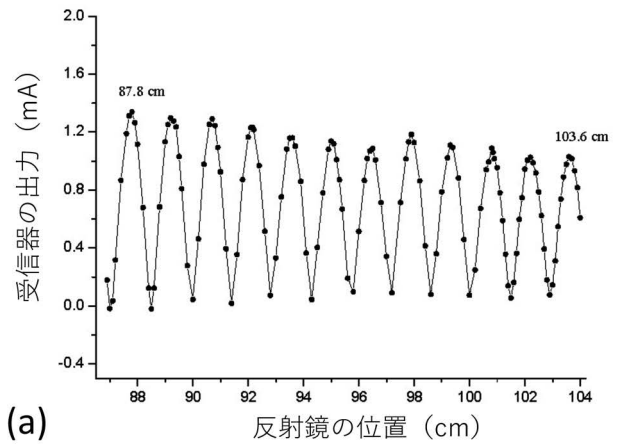


図3 (a) マイケルソン干渉計で一方の反射鏡を移動させながら測定した受信器の出力のデータ。(b) 2つのプリズム間の距離 d を変えたときの受信器の出力データの対数値。

大きくなって題意を満たさないので、減点対象になる。

ここで一つ測定のコツがある。図3(a)に示すように、たくさんの測定点を取る必要はない。11周期分に対応する反射鏡の移動距離を求めればよいので、途中のピークの位置をいちいち測定する必要はない。すなわち、反射鏡を移動させながら受信器の出力を目視し、出力値が周期的に変化している回数をかぞえて11回目のピークでの反射鏡の位置だけを測定すればよい。このような要領の良さは、時間が限られている実験試験では決定的に重要である。もちろん解答用紙には、11周期を測定したことがわかるような記述をする必要がある。

3.2 エバネセント波の減衰係数

2番目のプリズムを光学レール上で少しずつ移動させて2つのプリズム間の距離 d を変え、それぞれの d での受信器の出力 I_t を記録する。プリズムの移動範囲は問題文で指定されているが、移動の刻み幅は指定されていないので、測定しながら自分で決めるしかない。データ点が少なすぎると減点対象になり、多すぎると時間の浪費になる。

式(1)の両辺の対数を取れば、

$$\ln I_t = \ln I_0 - 2\gamma \cdot d$$

なので、それぞれの出力の値 I_i の自然対数 $\ln I_i$ を電卓で計算し、 d に対する $\ln I_i$ のグラフ (図3(b)) を描けば直線になるはずなので、その傾きから γ の値を求める。

このような場合、日本では片対数グラフ用紙が使われることが多いが、国際物理オリンピックでは関数電卓が選手一人ひとりに与えられるので、上記のように電卓で対数値を計算して方眼紙にプロットすることが多い。

図3(b)では、定規の読み取り誤差を誤差棒 (± 0.5 mm) で描いている。ちなみに、 $\ln I_i$ の誤差はデータ点に隠れるほど小さいので、このグラフでは横軸の誤差棒だけを考えればよい。この誤差棒の範囲を考慮して、最適の傾きの直線をはさんで、考えられる最大の傾きの直線と最小の傾きの直線の合計3本の直線を目視で引く (もちろん30 cm 定規も選手一人ひとりに与えられている)。これによって、求めたい γ の値の上限値と下限値、つまり測定誤差を見積もることができる。国際物理オリンピックでは選手たちはパソコンを使えないので、エクセルでの誤差見積もりができない。そのため、このような3本の直線による目視法で誤差の見積もりを行うのが定番となっている。

4. おわりに

この記事をごここまで読んでこられた読者は、何を感じているだろうか。高校や大学で物理実験の教育に携わっている読者も多いことと思うが、少なからず違和感をもったのではないかと想像する。

冒頭で述べたように、実験方法や手順、実験装置の組み立て方を一から十まで懇切丁寧に説明しているテキストを片手にやる高校や大学での実験は、確かにほとんど何も考える必要がない。自分で工夫する必要もない。優秀な学生が実験に魅力を感じなくなる大きな理由であると思う。一方、実験方法を指定せずに実験試験をさせようとする、生徒や学生が想定外のことをやって危険な状況にならないかと心配する必要があり、安全を確保するのは出題側の重要なポイントとなる。

今回取り上げた例では反射鏡を動かす範囲や刻み幅など、実験に必要なパラメータも指定されていない。それらを自分で決めなければならないのが物理オリンピックである。代表選手 (候補者) の研修では、まずは大雑把に測って全体像をつかんでから、重要なパラメータ範囲を細かく刻んで測るといったコツも教えている。パラメータを動かすべき全範囲を始めから終わりまで細かな刻みで「精密に」測定していたのでは時間の浪費になる。このようなコツは、実

は時間制限のある実験試験だけでなく、大学院での研究でも重要なポイントになる。要領の良い学生と悪い学生では、修士課程2年間で極めて大きな差が出ることがある。

大学生での卒論研究や大学院での研究ではパソコンを自由に使えるので、物理オリンピックのようなグラフを手で描き、目視でデータ解析することに何の意味があるのか、という声も聞こえてきそう。しかし、何をやっているのかわからないけれどエクセルが自動的に直線フィッティングと誤差を出してくれるので、エクセルをブラックボックスとして利用している大学生が多いと聞く。上述の物理オリンピックでのデータ解析のプロセスを一度は経験すべきだと思うのは私だけではないはずだ。計測器の最小目盛の1/2を読み取り誤差と定め、それを出発点として誤差の伝搬やグラフでの解析を学ぶのは非常に教育的であり、日本でも広めるべき事項と思う。ガウスの誤差関数や信頼区間の知識をもっている、実際のデータを前にして誤差をどう求めるのか途方に暮れる大学生が多いと感じているのは私だけではないと思う。

読み取り誤差を最小目盛の1/2とするのは物理オリンピックのルールであり、これも日本では馴染みのない概念だ。日本の中学校や高校の教科書には、「定規や計測器の最小目盛の1/10まで正確に読み取りなさい」と書いてあるものもある。これは日本のローカルカルチャーのようだ。世界的にはむしろ逆で、定規や計測器の目盛はそれほど正確に作られていないことを前提にするのがグローバルスタンダードだ。「物理オリンピックではレベルの高い問題を扱っているので、実験試験では非常に精密に測定する必要がある」といった多くの生徒がもつであろう漠然としたイメージとは全く違うことを実際にはやっている。求めた値がどれだけ正確かではなく、どれだけ信頼できるのかを示すのが実験で求められていることであり、物理オリンピックの実験試験ではそこが問われる。

物理オリンピック日本委員会は、日本代表選手およびその候補者に対して、このような実験試験対策の研修を通して、実験に固有な身に着けるべき知識とスキルを教えて国際大会に送り出している。それは、大学に進学してからも有用な基礎力となっていると思う。

参考文献

- 1) 長谷川修司, バリテイ 21(12), 52 (2006).
- 2) <http://www.jpho.jp/>

(2020年3月7日原稿受付)