**『　　光　　』**

　　　　　　　　　　　　　　　　平成14年12月12日 実施

**１．実験の目的**

　　　レーザーを使った簡単な実験によって、光の反射と偏光について学ぶ。また、レザーの波長を測定する。

**２．実験における使用器具**

(a) 半導体レーザー

約１mＷの赤い光(波長は約680nm)を出す。波長の広がりは２nm程度。スペクトルに多少のブロードがあるため、波長の測定は困難である。利点として偏光の制御が行える。

(b) ヘリウム・ネオンレーザー

　　0.5ないし3mWの赤色、橙色、黄色、緑色のいずれかの光を出す。波長の広がりは0.01nm以下。偏光の制御が行えないのが難点。利点はスペクトルがシャープなので、波長を正確に求めることができる。

(c) 偏光版

　　特定の方向(透過容易軸という)に電場をもつ光の成分だけを透過する。透過容易軸

　のだいたいの方向が、白い線で示されている。

(d) 測光器

　　入射光郷土に比例した電流を発生する検出器と、電流を電圧に変換する演算増幅

　　　器からなる。電圧は電圧計を用いて測定。光が検出器の中央に垂直に当たるように調節する。

　　(e) 電圧計と接続コード

　　　　針が振り切れたり、逆に振れると破損の原因になるので、極性を確認し接続する。

　　(f) ガラス板

　　　　裏面からの反射を防ぐために裏面を塗りつぶしてある。表面は反射させるので、汚れていないことを確認する。

**注意**：レーザーの光を覗き込んでみたり、人に対して向けたりしてはいけ

ない。

**３．実験の方法**

* + 1. **偏光**

１．図１のように、半導体レーザーと検出器の間に偏光板を設置し、検出器と電圧計を接続した。

２．半導体レーザーから縦方向(垂直方向)からのレーザーを出し、偏光版の角度を0から90°まで10°おきに測定した。このときにレーザが検出器に対して垂直に入射していることを確認した。

３．θ＝0 °のときの強度を1として、θと強度の関係を表・グラフにした。

　　　　　　　　　　　　　　　　　図１

**(2)　反射率**

１．図２のように、半導体レーザーと検出器の間にガラス板を設置し、検出器と電圧計を接続した。

２．半導体レーザー・ガラス板・検出器が一直線上に並ぶことを確認し、反射された光が垂直に入ることを確認した。またこの３つが一直線上に並んだ状態をθ＝90°とした。

３．ガラス板の角度を20°から70°まで5°おきに回転させ測定した。またレーザーを縦方向(垂直)、横方向(平行方向)の２つの種類の光で測定した。

４．θ＝20°における強度を１として、θと強度の関係を表・グラフにした。

　　　　＊反射させる前の電圧を測定し、とした。

　　　　　　　　　　　　　　　　　図２

**(3)　レーザーの波長**

　１．図３のようにヘリウム・ネオンレーザーから出る光を金尺で反射させ、その反射光をスクリーンに映して測定した。

　２．金尺のメモリの間隔をｄ、金尺からスクリーンまでの距離をLを測定した。

　　　ただしLは50cm以上となるように気をつけた。

　３．スクリーンに映った輝点の距離を測り、波長の測定を行った。金尺を用いて反射させる前の光を原点とした。原点からの距離は図４のように定めて計算に用いた。反射の方法によって最も明るい輝点よりも内側に点は現れたが、考えないものとした。

　　　　　　　　　　　　　　　　　図３

**４．実験結果**

**(1)　偏光**

　　　　　偏光板の回転角と透過光強度の関係を以下の表にまとめる。

　　　　　　表１　偏光板の回転角と透過光強度の関係

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 回転角　[°] | 透過光強度 [V] | ＊相対比 |
| ０ | 1.482 | １ |
| 10 | 1.397 | 0.943 |
| 20 | 1.216 | 0.870 |
| 30 | 0.979 | 0.850 |
| 40 | 0.732 | 0.748 |
| 50 | 0.465 | 0.635 |
| 60 | 0.238 | 0.512 |
| 70 | 0.0712 | 0.299 |
| 80 | 0,0079 | 0.111 |
| 90 | 0.0211 | 2.671 |

＊　θ＝0°のときの相対比を１としている。

相対比は**（**10×n°における透過光強度**）**と

**（**10×(n+1)°における透過光強度**）**の商で

求めている。(n=0.1.…8)

* θ＝90°において相対比が１を大きく超え

ている。このことに関して「５．考察」で

検討することにする。

別紙に回転角と透過光強度の相対比の関係をグラフにして載せ

ておく。同時に「５．考察」の理論値も載せる。（図a）

* + 1. **反射率**

半導体レーザーから出てくる光を縦(垂直)方向、横(平行)方向の

２つに分けて、入射角と光の反射率の関係を結果を以下の表に

まとめる。

　　表２　縦方向の光の入射角と反射率の関係

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 入射角　[°] | 光の強さ  [V] | 反射率 |
| 20 | 0.106 | 0.0398 |
| 25 | 0.118 | 0.0443 |
| 30 | 0.128 | 0.0480 |
| 35 | 0.153 | 0.0574 |
| 40 | 0.173 | 0.0649 |
| 45 | 0.215 | 0.0807 |
| 50 | 0.248 | 0.0931 |
| 55 | 0.319 | 0.120 |
| 60 | 0.425 | 0.159 |
| 65 | 0.510 | 0.191 |
| 70 | 0.635 | 0.238 |

* 反射率＝／として計算している。

　　　ただし測定結果より＝2.665 [V]であった

　　表３　横方向の光の入射角と反射率の関係

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 入射角　[°] | 光の強さ  [V] | 反射率 |
| 20 | 0.073 | 0.0309 |
| 25 | 0.070 | 0.0296 |
| 30 | 0.063 | 0.0267 |
| 35 | 0.051 | 0.0216 |
| 40 | 0.043 | 0.0182 |
| 45 | 0.035 | 0.0148 |
| 50 | 0.028 | 0.0119 |
| 55 | 0.026 | 0.0110 |
| 60 | 0.038 | 0.0161 |
| 65 | 0.064 | 0.0271 |
| 70 | 0.156 | 0.0660 |

* 測定結果より=2.362 [V]であった

別紙に入射角と反射率の関係をグラフにして載せておく(図ｂ)

* + 1. **レーザーの波長の測定**

レーザーの波長は次式で求められる。(「５．考察」で検討する)

　　――― ①

ただし今回の実験においてｄ,Lは一定値であるので今回は

　　　――― ②

　　　　　　　を先に求め、平均値を①式に代入して波長を求める。

　　　 ――― ③

また測定した結果、ｄ＝1.0 [mm]、L＝54 [cm]であった。

　　　　　　　　表４　輝点からの距離とその関係

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| ｍ | [cm] |  |
| 0 | 5.15 | ― |
| 1 | 5.83 | 3.96 |
| 2 | 6.36 | 3.85 |
| 3 | 6.80 | 3.74 |
| 4 | 7.22 | 3.74 |
| 5 | 7.73 | 3.99 |
| 6 | 8.05 | 3.89 |
| 7 | 8.40 | 3.90 |
| 8 | 8.73 | 3.91 |
| 9 | 9.06 | 3.94 |

　　　　　　　　よって以上の結果よりの平均を求めると

＝ 　であるので



　　　　　　　　これより波長は**665 [nm]** となる。

**５．考察**

**(1)　偏光**

　　　　光は進行方向と振動の方向が垂直である波、すなわち**横波**である。太陽光や白熱電球の光は、光源を構成する色々な原子によって放射されているものである。このように様々な振動方向を集めた光のことを**自然光**という。

これに対して、ポーライドはある特定の方向に振動している光だけを通す性質を持っている。なのでポーライドを通った自然光は**ある一方向**にだけ振動する。このような光を**偏光**といい、偏光をつくる板を偏光板という。

偏光板を通過する光は図４からもわかるように、光源における光のエネルギーをIとすると、****の光が通過できる。また光は波動性を持っているので、光の強度は光という波のエネルギーとして考えられる。光の振動の振幅をEとすると(ｋは比例定数)という関係をもっ

ている。すなわち光のもつエネルギーは光

の振幅の二乗に比例する。すなわち前者よ

り

　――― ④

　　　(ｋは比例定数)

となる。特にθ＝0°のときの光の強度を

とすると光の相対強度は

　――― ⑤　　　　　　　　　　　図４

で求めることができる。これが実験1の偏光の理論値である。

　　　　　　表５　実験値と理論値の比較

|  |  |  |
| --- | --- | --- |
| 回転角　[°] | 実験値 | 理論値 |
| 0 | １ | １ |
| 10 | 0.943 | 0.969 |
| 20 | 0.870 | 0.883 |
| 30 | 0.805 | 0.750 |
| 40 | 0.748 | 0.587 |
| 50 | 0.635 | 0.413 |
| 60 | 0.512 | 0.250 |
| 70 | 0.299 | 0.11 7 |
| 80 | 0.111 | 0.0302 |
| 90 | 2.671 | ０ |

　　　　回転角が90°に近づくにつれて相対比が小さくなっている。すな

わち縦(垂直)方向で出していた光であるので、回転角が大きくなるに

つれ、偏光板の影響が大きくなっていったのが読み取れる。しかし実

験値において90°のときに相対比が大きくなってしまっているのは、

偏光の原理に対して矛盾してしまっている。このことに関しては後に

検討する。

　この実験結果の値より、進行方向と縦(垂直)方向の関係を持ってい

る光は、偏光板の回転角が90°である(進行方向と平行な成分だけが

通過できる)とき、偏光板を通過することはできないことになる。

表から読み取れる通り、２つの値を比較すると角度が90°に近づ

くにつれ、２つの差が大きくなってしまっているように感じる。この

原因は検出器に対してレーザーの光が垂直に入っていなかったことが

考えられる。また微妙な角度のズレもあったのではないか予想できる。

θ＝90°における実験値の値が大きく１を超えていることについ

て考えてみると、原因は実験による失敗とは言い切ることはできない。

ここで僕の考える要因としては、「**道具の精度の問題**」ではないのだ

ろうか。偏光板に引かれている白線は偏光板の向きに対して平行に

引かれているらしいが、実際の偏光板の間隔と白線の太さは明らか

に白線の方が太いので、ここで誤差が生じる。さらに要因と考えら

れるのは、この白線が人間の手で引かれたことであろう。そのため

に正確な角度を一致しなかったために、大きな理論値との違いが生

じたのだろう。

　よって偏光板の回転角における**80°＜θ＜90°の間に本当に垂直**

**になる(完全に光が通過しない)角が存在**していることになる。

1. **反射率**

透明体表面に斜めに自然光を投射すると

一部は反射し、一部は屈折する。図５のよ

うに自然光が入射するとき、入射角、屈

折角は次のように定まる。ここで屈折率

をとすると

　――― ⑥　　　　　　　　　　図５

　　　　　さらにであるとき、偏光の度合いが最大になる。これが**完**

**全偏光**である。またこのとき





　　――― ⑦

このときの角度を**Brewster角**という。そして彼によって『**透明体の屈折率をとしたとき、入射角がを満たしているとき、反射光は完全偏光となる**』という法則が発見された。

ガラスの屈折率は程度であるので、Brewster角は約56°である。

今回の実験結果と比較してみると、θ＝55°付近で反射率が０になっていることが読み取れる。上で計算した理論値と実験値を比較してみても大きな違い生じていないように思う。

わずかなズレについて検討してみると、考えられる要因は１つめに検出器に対して、反射されたレーザーの光が垂直に入っていなかったことが考えられる。２つめにガラス板の表面の状態であろう。小さなキズがついてた、ホコリが表面に付着していた、などが考えられる。

1. **レーザーの波長**

**①式の導出**

　　　　図６のように、入射光と反射光が反

射面とそれぞれ,とするとき、隣り

合う２つの光路１－１`、２－２`の光

路差はであらわされ

る。ここでが十分い小さいときに、

　――― ⑧

　　　　(は弧度法である)　　　　　　　　　　　　　　図６

と近似できる。(テイラー展開より)

　今回の実験で,が十分に小さいとき、光路差は



　　――― ⑨

と近似することができる。この光路差が**整数倍**のとき、波動性をもっている光は強め合うように干渉するために、スクリーン上に輝点を生じる。そのためにｍ次の回折光の角は次式を満足する。

　――― ⑩

　　　　　　　　　（……）

　　　　　　次に図７を考えてみると、



　　　　　　と考えることができる。ここで

≫であるので

　――― ⑪　　　　　　　　　図７

　　　　　　また、特に０次光についてはであることより

　　　　――― ⑫

　　　　　　⑪、⑫式を連立して解くと

　――― ⑬

　　　　　　⑪式と⑬式を⑩式に代入し、波長の式に直すと①式を得ることができる。

　　　　　　ここで実験値の計算方法を異なった方法で計算してみることにする。①式において前者でも述べた通り、金尺とスクリーンまでの距離は一定であるので、変化する値を次の様に計算して求めることにしてみる。

横軸をｍ(ｍ次光として)、縦軸をとして定めると

　――― ⑭

この関係式が上に存在しているものと仮定すると⑭式で与えられることになる。

表６　最小自乗法における値

|  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |  |
| --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- | --- |
| 次 | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 合計 |
|  | 0 | 1 | 2 | 3 | 4 | 5 | 6 | 7 | 8 | 9 | 45 |
|  | 0 | 1 | 4 | 9 | 16 | 25 | 36 | 49 | 64 | 81 | 285 |
|  | 0 | 3.96 | 7.70 | 11.2 | 14.9 | 19.9 | 23.3 | 27.3 | 31.3 | 35.4 | 175.0 |
|  | 0 | 3.95 | 15.4 | 33.6 | 59.6 | 99.5 | 139.8 | 191.1 | 250.4 | 318.6 | 1112 |

　　　　　　実験値より値を整理すると上の表６のように整理される。

　　　　　　最小自乗法を用いると傾きA、切片Bは次のように定義される。





　　　　　　上の式と表６を用いて計算すると

　　　　　　　　　　　A＝3.927　　B＝－0,1467　――― ⑮

　　　　　　と求められる。この傾きAの結果を用いて波長を求めると、



　　　　　　これより、波長は**673 [nm]**となる。

　　　　　　　　＊　上の関係を別紙にグラフを載せる。(図ｃ)

　　　　　　「４．実験の結果」における波長と、最小自乗法を用いて求められた波長とを比較してみると、**665 [nm] 673 [nm]**で値が微妙に異なることになる。これに関して検討してみると、この違いは計算の方法に違いがあることから生じるのだと思う。前者の答えは変化する値の平均値から求めているのに対し、後者の答えは変化する値が、の直線上に存在するものとし、その近似直線の方程式を利用して、その傾きから変数を決定し、値を求めているので値が異なるのではないのだろうか。

　　　　　　　しかし大きな違いはないように思う。実際に誤差率を計算してみると98.8%となり、**ほぼ値は一致している**と考えても問題ないだろう。同時に今回の仮定であるようにの直線上に存在することが成り立つので、**比例関係**にあることもわかる。

**誤差の検討**

　ヘリウム・ネオンレーザーの実際の波長は約**632.8 [nm]**である。このことと実験値とを比較してみると、若干の値のズレが感じられる。次に今回の誤差について検討してみることにする。

　　　　　　　今回の実験値の計算方法は次式で考えられている。



　　　　　　この式の誤差を考えてみると、直接測っている値が４つあるので、１つ１つの誤差を求め誤差の伝播を利用するのが適切な方法のように思われる。よって誤差の伝播は次式で考えることができる。

　――― ⑯

　　　　　　　しかし今回の実験においてそれぞれの誤差を調べ切れなかったので、今回の実験においては誤差を測定することができなかった。

　　　　　　　また⑯式からもわかるように、Lは二乗で与えられているので、**波長の値を求める上で、スクリーンとの距離Lによる影響が最も大きい**ことがわかる。(による影響もLと同じように考えることはできるが、輝点間の距離からも求めることもできるので、Lの及ぼす影響の方が大きいと思う)。

**疑問点１**

　　　　　　　さて次に、最も輝いていた輝点の内側にも輝点が見える原因について考えてみることにする。

　　　　　　　θ→０のときは点が現れなかったのに対し、θを大きくすることで点が増えていった。この現象が起こるのはθ＞の時である。よって入射角が90°に近いときはθ＞とならないので、外側にしか輝点は現れない。

　　　　　　　入射角が90°より小さなとき、すなわちθ＞を満たすときには、光路差が、の２つが生まれるために内側にも輝点が生じるのである。

　　　　　　　よってθ＞の条件を満たすことによって、**光路差が２つ生じることが、内側にも輝点生じさせる**ことになるのである。

**疑問点２**

　　　　　　　金尺の幅を0.5 [mm]→1 [mm]と変えることで輝点間の距離が短くなることについて検討してみる。

　　　　　　　幅を倍にすることでどのようなことが起きているのであろうか。幅が倍になることはｄ→2d と考えればよい。この２つを①式に代入して考えてみると

　　　　

　　　　　　であることより

　　　　

　　　　　　よって中心から同じ位置の輝点について考えてみると左辺は等しいので

　　　　　　　　　　――― ⑰

　　　　　　となるので、0.5 [mm]の幅においてｍ番目の輝点の位置は、1 [mm]の幅において２ｍ番目の輝点になってしまうので、幅は狭くなるのである。

**６．その他**

**・　偏光についての応用**

　　　　　　　偏光は真夏の海面や、真冬のスキー場において利用されやすい。太陽の光が強い場所において、偏光レンズを含んだサングラスをかけると、今までは太陽の光で反射をしていて見ることのできなかった場所も見えるようになる。今回の実験でわかったように自然光である太陽の光を偏光することで、太陽の光の影響を遮ることが可能になったためである。

　　　　　　　鳥などが太陽の光を受けて見にくい海面付近にいる魚の位置を、空から猛スピードで飛び込んできても正確にとらえることができるのもこの偏光を利用したものである。

**・　レーザーとは何か**

　　　　　レーザー（**L**ight **A**mplifiction of **S**timulated **E**mission of **R**adiation）とは多数の原子から位相と方向のそろった強い光を出すようにした装置である。光は波動性をもっているので、レーザーにおいても「反射・屈折・偏光・干渉・回折」の現象も起こっている。

　　　　　始めから位相と方向がそろっているので、偏光板を用いなくてもレーザーをスリットに当てるだけで光の干渉を観察することができる。

**・　感想**

　　　　　今回の実験が4回目の実験でもあり、実験をスムーズに行えるようにもなってきたように思う。またレポートを書く上でも少しずつ工夫が入れられてきてるのではないのかと思う。

　　　　　今回はレーザーについてであったが、実際自分が生活を送っていく上で、レーザーを含め、光について考える機会は少なかった。同じように波動性をもっている波・音については日常生活の中でも「地震や救急車のドップラー効果」などで気に留めることもあった。しかし光については当然身の回りに存在しているのでもあり、新たなことを考えてみようという気持ちも持っていなかった。しかし多くの場面で音などと同等に考えてよいことを実験を通して感じることができた。

　　　　　最後にレポートを何度も読み直して間違いを確認しましたが、誤字脱字をみつけた際には、ご了承ください。

**・　参考文献**

　　　　　・　自然化学実験 物理学編　　　　　　　慶應義塾大学 理工学部

　　　　　・　　　　物理学　　　　　　兼松　 和男 　著　　　 　朝倉書房

　　　　　・　　　レーザー光線　　　　山中　千代衛　著　　　東海大学出版社