

3.3 考察

フォトダイオード特性のグラフから、今回使用するフォトダイオードは光強度と出力電圧の関係が比例の領域と一定の領域があった。本実験ではフォトダイオードの出力電圧によって光強度を測定するので、光強度が比例領域内でなければ、異なる光強度なのに同じ電圧を出力してしまって正しい測定ができない。この後の実験ではレーザー光を反射や屈折によって弱めた光を測定するので、ND フィルター透過後の相対光強度が比例領域にあればよいことになる。したがって本実験ではこの後 ND70,50,20 の 3 枚を素子ホルダーにセットして相対光強度 0.07 のレーザー光で実験 2 の前半まで行った*1。また、式 (3) のマリユスの法則を実験が再現しているかを、図 2' のプロット図に式 (3) の式でフィッティングしたグラフを重ねて描いた (図 1)。

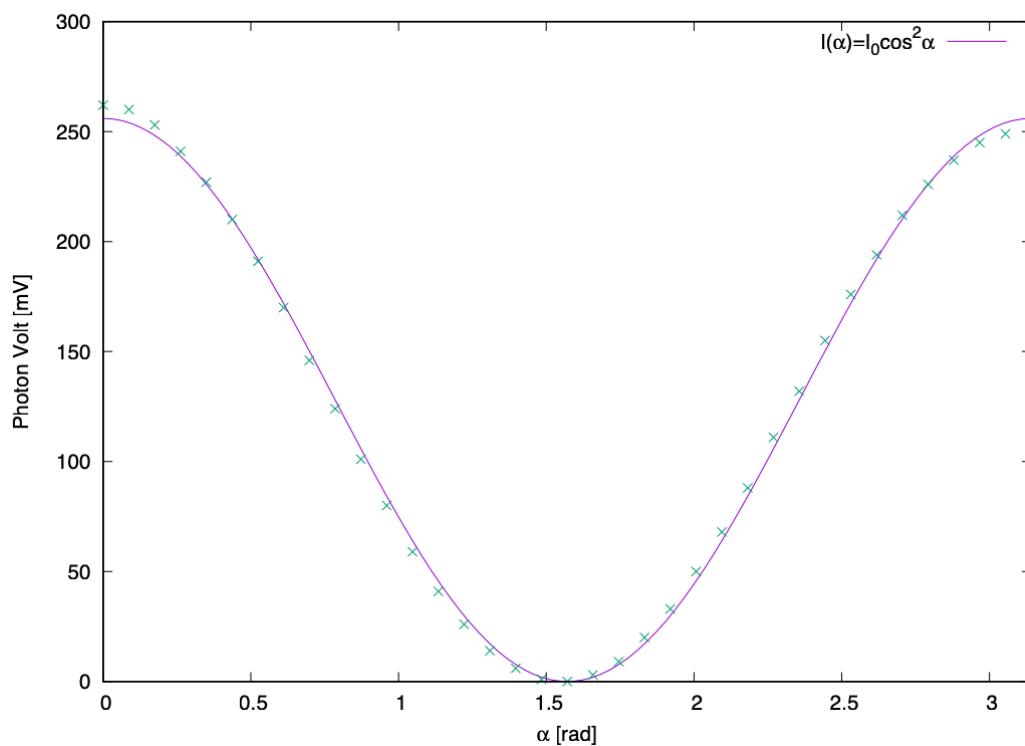


図 1 マリユスの法則と実験結果の比較

*1 実験 2 の後半からは光の強度は測定しない。また、なるべく光をはっきり見たいので ND フィルターを使わずに実験した。

§4 実験 2:反射と屈折

この図から、実験結果はマリュスの法則を再現していると言える。

4.1 方法

まずは強度反射率の角度依存性を調べた。レーザー、ND フィルター、偏光子、プリズムの順に配置した。ND フィルターは実験 1 の時と同様に相対強度が 0.07 となるようにした。初めに、偏光子の角度を 0° にして、P 偏光を透過させた。プリズムの回転ステージで入射角が 0° となる目盛を記録し、入射角 5° から 5° 間隔でフォトダイオードの電圧を測定した。P 偏光の場合、途中で電圧 0mV となる角度があったのでその角度付近になったら 1° 刻みにして測定した。その領域を過ぎた後は再び 5° 刻みで 90° 付近まで測定した。次に偏光子の角度を 90° にして S 偏光についても同様に測定した。S 偏光の場合は常に 5° 間隔で測定した*²。

続いて、プリズムによる最小偏角と、屈折率の波長依存性について実験した。まず新たに赤色のレーザーのスイッチをオンにした。その後鏡とビームスプリッターでビームスプリッター透過後のレーザー光 2 つが同軸上にぴったり重なるように調節した。その後、プリズムでレーザー光を屈折させてスクリーン上のビームの位置を方眼紙に写し取った。スクリーンとレーザー光はなるべく垂直になるように気を付けて、その距離はおおよそ 10cm とした。また、レーザー光をなるべくプリズムの頂点付近に入射させた*³。プリズムを回転させ、最小偏角となる角度を探し、その角度でスクリーン上のレーザー光の位置を方眼紙に写し取った。さらに、プリズムの頂点とスクリーンの距離 z とプリズムを經由しないときのスクリーン上のレーザー光の位置と屈折後のスクリーン上の位置の距離 x を定規で計った (図 2)。使用したプリズムは BK7。

*² レーザー光が机に対して平行ではないことに注意した。すなわち、プリズムとフォトダイオードの距離によっては、レーザー光がフォトダイオードに全て入射せずに正しい測定が行われない。常にフォトダイオードに全てのレーザー光が入射するように適宜フォトダイオードにの高さを調節しながら測定していった。

*³ これは偏角 $\delta = \arctan(x/z)$ の計算をより正確に実行するため。頂点付近で屈折させなければ、偏角を計算する際にプリズム内の光路も考慮しなければならなくなる。頂点付近であれば、プリズム内の光路は十分無視できる。

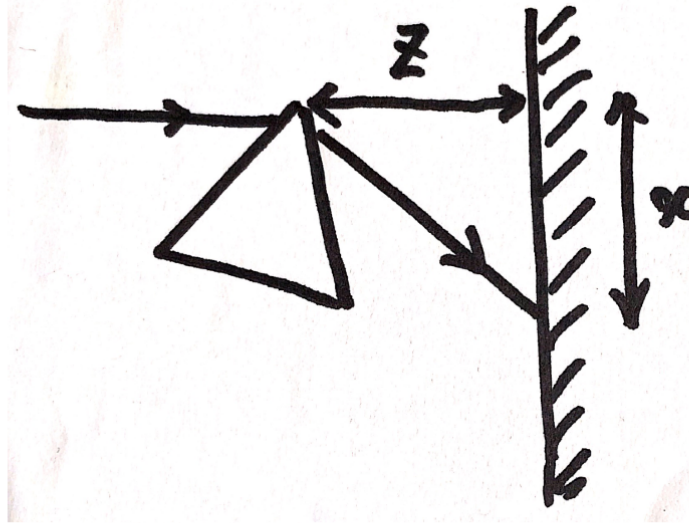


図2 最小偏角の測定

4.2 結果

バックグラウンドは 0.1mV 。反射率の測定結果は表 3・4 の通り。これらの結果を同一線形グラフ用紙にプロットしたのが図 3 である。P 偏光は入射角 $54^\circ \sim 57^\circ$ で強度反射率が 0 になった。また、入射角 0° に近づくにつれて P 偏光と S 偏光の強度反射率は等しい値に近づいていることも確認できる。

表 3 P 波の強度反射率の入射角度依存性

入射角°	電圧 mV	強度反射率
入射光	330.7	—
5	12.9	0.039008164
10	12.4	0.03749622
15	11.8	0.035681887
20	11	0.033262776
25	9.6	0.029029332
30	8.7	0.026307832
35	6.6	0.019957666
40	5.2	0.015724221
45	2.7	0.0081645
50	1.4	0.004233444
51	0.7	0.002116722
52	0.3	0.000907167
53	0.1	0.000302389
54	0	0
55	0	0
56	0	0
57	0	0
58	0.1	0.000302389
59	0.4	0.001209555
64	4.2	0.012700333
69	18	0.054429997
74	34.4	0.104021772
79	71.7	0.216812821
84	159.3	0.481705473

表 4 S 波の強度反射率の入射角度依存性

入射角	電圧 mV	強度反射率
入射光	426	—
5	17.2	0.040375587
10	17.6	0.041314554
15	18.3	0.042957746
20	19.8	0.046478873
25	21.6	0.050704225
30	24.5	0.057511737
35	27.6	0.064788732
40	32.6	0.076525822
45	37.8	0.088732394
50	46.4	0.108920188
55	57	0.133802817
60	72.1	0.169248826
65	90	0.211267606
70	120.2	0.282159624
75	155.2	0.364319249
80	210.9	0.495070423
85	274	0.643192488
86	299	0.701877934
87	309.1	0.725586854
88	318.2	0.746948357

次に、プリズムによる偏角の実験の結果を記述する。プリズムの頂点とスクリーンの距離 $z = 88.4 \pm 0.1\text{mm}$ 、プリズムが無い状態のレーザー光の位置と屈折後のレーザー光の位置の距離 $x_{green} = 68.8 \pm 0.2\text{mm}$ 、 $x_{red} = 67.6 \pm 0.2\text{mm}$ となった。したがって緑色レーザーの最小偏角 δ_{min} は*4

$$\delta_{min} = \arctan \frac{x_{green}}{z} \simeq 37.9^\circ \quad (16)$$

また、この時の赤色の偏角 δ_{red} は

$$\delta_{red} = \arctan \frac{x_{red}}{z} \simeq 37.4 \quad (17)$$

となった。波長が異なると屈折率も異なることが確認できた。また、緑色光よりも赤色光の方が波長が長い。したがって、波長が長いと屈折率は小さくなることが分かった。式 (12) から緑色光についてのプリズム BK7 の屈折率を求める。

$$n_{BK7} = \frac{\sin(\delta_{min}/2 + \pi/6)}{\sin(\pi/6)} \quad (18)$$

$$\simeq 1.51$$

となった。

*4 誤差評価は考察で行う。

4.3 考察

4.3.1 反射率測定について

プリズムの屈折率は式 (10) から求めることができる。ただし、垂直入射の場合の反射率は測定できなかったので、P 偏光と S 偏光が入射角 0° で反射率が一致するという事実と、入射角 5° のそれぞれの反射率の情報から垂直入射の強度反射率 R_0 を推定する。今回は 5° の時の P 偏光と S 偏光の強度反射率の平均を R_0 とする。

$$R_0 = \frac{0.0390 + 0.0403}{2} = 0.03965 \quad (19)$$

これを式 (10) に代入して n を求めると、

$$n = 1.497\dots \simeq 1.50 \quad (20)$$

となった。しかし、これはあくまでも推定の値であり、実験で実際に測定した値ではないことに注意すべきである。仮に R_0 の誤差 ΔR_0 として、

$$\frac{\Delta R_0}{R_0} = \frac{1}{10} \quad (21)$$

として考えると、 $\Delta R_0 = 0.00397$ となる。すると、屈折率の誤差 Δn は $\Delta n \simeq 1.13$ となる*⁵。すなわち、 $n_{BK7} = 1.50 \pm 1.13$ となる。

また、P 偏光の特性である Brewster 角からも屈折率を求めることができる (式 11)。表 3 から、Brewster 角 θ_B は $54^\circ < \theta_B < 57^\circ$ とわかる。よって、 $\theta_B = 55.5^\circ \pm 1.5^\circ$ とできる。したがって、式 (11) から屈折率は

$$n = \tan \theta_B = 1.455\dots \simeq 1.46 \quad (22)$$

となる。次に誤差を計算する*⁶。誤差 Δn は

$$\begin{aligned} \Delta n &= \frac{1.5\pi/180}{\cos^2 55.5^\circ} \\ &= 0.081\dots \\ &\simeq 0.08 \end{aligned} \quad (24)$$

となる*⁷。すなわち、 $n_{BK7} = 1.46 \pm 0.08$ となる。

4.3.2 最小偏角から屈折率を求める

ここでは誤差評価を行う。誤差伝播の式 (25) から誤差を求める。最小偏角 δ_{min} は z, x の 2 変数関数なので合成関数の偏微分を使って $\Delta \delta_{min}$ の関数形を求める。まずは一般論。

*⁵ 誤差も式 (10) から求めた。

*⁶ 強度反射率とは異なり、実験的に妥当で、推定ではない誤差がわかっているので真面目に評価する。式は誤差伝播の式

$$\Delta f(x_0, x_1, \dots, x_i, \dots) = \sqrt{\sum_i \left(\frac{\partial f}{\partial x_i} \Delta x_i \right)^2} \quad (23)$$

を用いた。

*⁷ 角度の単位の中で、rad のみが無次元量として扱えることに注意。すなわち、角度を sin, cos, tan などを含まずに計算に入れるときは必ず rad に変換しなければならない。

f を w の 1 変数関数とし、 w を x, z の 2 変数関数とする。この時 f の x での偏微分は、

$$\frac{\partial f}{\partial x} = \frac{df}{dw} \frac{\partial w}{\partial x} \quad (25)$$

で計算できる。 z も同様。

$$\frac{d}{dw} \arctan w = \frac{1}{w^2 + 1} \quad (26)$$

である。また、定規の目盛読み取り時の誤差の他に、スクリーンとレーザー光の直交性に関する誤差も存在する*8。直交からのずれを 1° と考えると、 $\Delta z = 0.1 + x \sin 1^\circ = 1.3\text{mm}$ となる。結局

$$\begin{aligned} \Delta\delta_{min} &= \frac{180}{\pi} \sqrt{\left(\frac{1}{(x/z)^2 + 1} \frac{1}{z} \Delta x\right)^2 + \left(\frac{1}{(x/z)^2 + 1} \frac{-x}{z^2} \Delta z\right)^2} \\ &= \frac{180}{\pi} \sqrt{\left(\frac{1}{(68.8/88.4)^2 + 1} \frac{1}{88.4} 0.2\right)^2 + \left(\frac{1}{(68.8/88.4)^2 + 1} \frac{-68.8}{88.4^2} 1.3\right)^2} \\ &= 0.266... \\ &\simeq 0.27 \end{aligned} \quad (27)$$

となる*9。したがって、 $\Delta\delta_{min} = 37.9^\circ \pm 0.3^\circ$ となる。次に屈折率の誤差伝播の式は、

$$\Delta n = \frac{dn}{d\delta_{min}} \Delta\delta_{min} = \cos\left(\frac{\delta_{min}}{2} + 30^\circ\right) \Delta\delta_{min} \quad (28)$$

となる。これを計算して*10、

$$\Delta n = 0.00309... \simeq 0.0031 \quad (29)$$

となる。すなわち、 $n_{BK7} = 1.51 \pm 0.0031$ となる。有効数字を 3 桁とすれば誤差は十分無視できるレベルである。

4.3.3 屈折率測定法でより精密な方法はどれか。また、さらに精度を高めるには？

上の 3 つの屈折率測定法の比較として屈折率と、屈折率 $n = n(y)$ の y を表にした。

表 5: 屈折率測定方法の比較

方法	測定結果 y	屈折率 n_{BK7}
強度反射率	$R_0 = 0.03965 \pm 0.00397$	$n_{BK7} = 1.50 \pm 1.13$
Brewster 角	$\theta_B = 55.5^\circ \pm 1.5^\circ$	$n_{BK7} = 1.46 \pm 0.08$
最小偏角	$\delta_{min} = 37.9^\circ \pm 0.3^\circ$	$n_{BK7} = 1.51 \pm 0.0031$

精密な測定法を選択する際に大事なことは誤差を小さくすることである。また、”実験”

*8 他にも、実験室系で机に対してレーザー光が平行ではないことから生じる誤差も存在するが、ここでは十分小さいとして無視している。

*9 $180/\pi$ は rad から $^\circ$ への変換時に生じる因子である。

*10 しつこいが角度を rad にすることに注意。

において推定した値は実測値と比べると、取るに足らない値である。これらの観点から、上の3つの測定法のうちより精密なものは最小偏角となる。そもそも、強度反射率は推定しかできていないのでまず選択肢から外れる。ここで、Brewster角と最小偏角の測定誤差の値が、同程度のオーダーだと仮定しよう。この時、誤差の大きさを決定するのは $n(y)$ の1階微分係数である。すなわち、最小偏角の場合、

$$\left(\frac{\sin(37.9^\circ/2 + 30^\circ)}{\sin 30^\circ} \right)' = \cos(18.95) \simeq 0.66 \quad (30)$$

Brewster角の場合、

$$\left(\tan(55.5^\circ) \right)' = \frac{1}{\cos^2 55.5^\circ} \simeq 3.12 \quad (31)$$

となる。すなわち、誤差は最小偏角の場合は0.66倍、Brewster角の場合は3.12倍されて屈折率に伝播する。本実験では、 θ_B と δ_{min} の誤差のオーダーが同程度である（しかも、すでに $\Delta\theta_B$ の方が大きい）。したがって、誤差伝播の観点からも最小偏角から屈折率を求めた方が精度が良くなる。

次に、最小偏角の測定でどのように工夫すれば誤差を小さくすることができるかを考える。この実験で最も簡単に操作できることは z である。式(27)の最小偏角 δ_{min} の誤差伝播の式に注目する。最小偏角 δ_{min} は一定なので x/z は一定である。したがって、 $\Delta x/z$ と $\Delta z/z$ を小さくすれば、 δ_{min} が小さくなって Δn_{BK7} も小さくなる。 z を変化させても、レーザー光の輝点広がりを見れば人間の距離読み取り時の誤差は変化しない。すなわち z を大きくするだけで誤差は小さくなる*11。

*11 より正確には、レーザーとスクリーンの直交性のずれからの誤差も考える必要がある。しかし結局、 $\frac{\Delta z}{z} = \frac{0.1+x \sin 2^\circ}{z} = \frac{0.1}{z} + \frac{x}{z} \sin 2^\circ$ となり、 x/z が一定ということから、 z の操作によって直交性からの誤差は変化しない。したがって、 z を大きくすることでは直交性から生じる誤差は小さくすることはできないが、全体的な誤差は必ず小さくなる。

§5 実験 3:屈折率の精密測定

5.1 方法

実験 2 ではプリズムとスクリーンの距離を約 10cm としていた。それを 2 倍の約 20cm に設定して、緑色レーザーのみで、実験 2 と同様の測定をした。使用したプリズムは P6。

5.2 結果

$z = 193.5 \pm (0.2 + x_{green} \sin 1^\circ \simeq 193.5 \pm 2.4\text{mm}$ 、 $x_{green} = 128.2 \pm 0.2\text{mm}$ となった。実験 2 と同様にまずは誤差評価せずにプリズム P6 の緑色光に対する屈折率を求める。

$$\begin{aligned} n_{P6} &= \frac{\sin(\delta_{min}/2 + \pi/6)}{\sin(\pi/6)} \\ &= \frac{\sin(\arctan(128.2/193.5)/2 + \pi/6)}{\sin(\pi/6)} \\ &\simeq 1.457 \end{aligned} \quad (32)$$

となった。

5.3 考察

実験 2 の考察と同様の計算により、 $\Delta\delta_{min}$ から Δn_{P6} を求める。

$$\begin{aligned} \Delta\delta_{min} &= \frac{180}{\pi} \sqrt{\left(\frac{1}{(x/z)^2 + 1} \frac{1}{z} \Delta x\right)^2 + \left(\frac{1}{(x/z)^2 + 1} \frac{-x}{z^2} \Delta z\right)^2} \\ &= \frac{180}{\pi} \sqrt{\left(\frac{1}{(128.2/193.5)^2 + 1} \frac{1}{193.5} 0.2\right)^2 + \left(\frac{1}{(128.2/193.5)^2 + 1} \frac{-128.2}{193.5^2} 2.4\right)^2} \\ &= 0.329\dots \\ &\simeq 0.33 \end{aligned} \quad (33)$$

したがって、 $\Delta\delta_{min} = 33.53^\circ \pm 0.33^\circ$ となる^{*12}。次に Δn_{P6} を求める。

$$\Delta n_{P6} = \frac{0.33\pi}{180} \cos\left(\frac{33.53^\circ}{2} + 30^\circ\right) \simeq 0.0039 \quad (34)$$

以上より、プリズム P6 の屈折率 n_{P6} は $n_{P6} = 1.457 \pm 0.0039$ となる。

^{*12} 一見実験 2 の最小偏角の誤差よりも大きくなっているように見えるが、これはそもそもプリズムが異なっているからである。すなわち、 $\arctan(x/z)$ のグラフを考えれば、 x/z が小さいほど一階微分係数は大きくなって誤差が大きく伝播する。実験 2 では $x/z = 68.8/88.4 \simeq 0.78$ だったのに対し、実験 3 では $x/z = 128.2/193.5 \simeq 0.66$ と小さく、確かに誤差が大きく伝わってしまう。

§6 実験 4:回折と構造解析

6.1 方法

緑色レーザー、素子ホルダー、スクリーンの順に配置する。素子ホルダーとスクリーンの距離を測ったところ、90.4cm だった。素子ホルダーに回折実験用スライド (S1,S2,S3,S4) を順番に取り付けてスクリーンに映った輝点をそれぞれ方眼紙に写し取った。輝点の焦点を合わせることに注意した。写し取った輝点パターンから、それぞれのスライドの構造を決定した。

6.2 結果

S1 は $\frac{\lambda z}{2\pi} \mathbf{a}' = (7.0, 0)\text{mm}$ とすれば、 $\frac{\lambda z}{2\pi} \mathbf{b}' = (3.5, 9.5)/\text{mm}$ となった。S2 は $\frac{\lambda z}{2\pi} \mathbf{a}' = (2.9, 0)\text{mm}$ とすれば、 $\frac{\lambda z}{2\pi} \mathbf{b}' = (0, 2.9)/\text{mm}$ となった。 $z = 90.4\text{cm}$ 、 $\lambda = 532\text{nm}$ ^{*13}である。また、S1~S4 のスクリーン上の輝点の画像は以下の通り。S2、S3、S4 で明暗が確認できた。

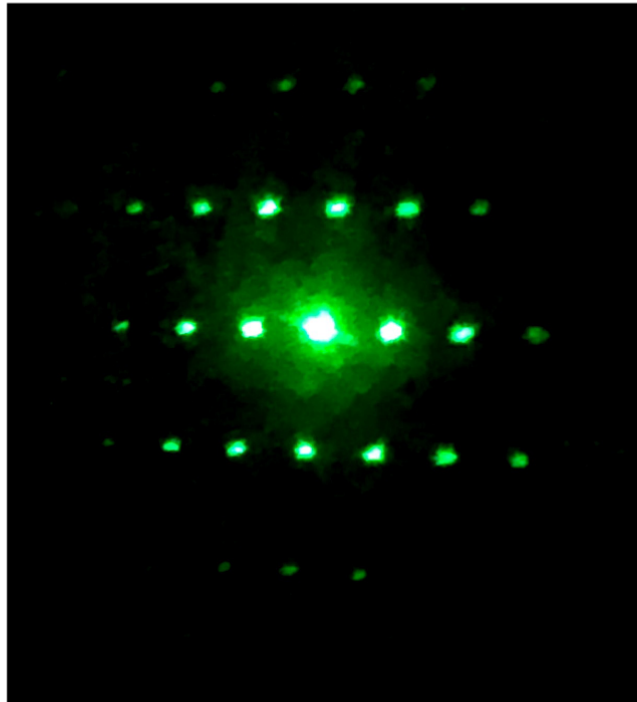


図 3 S1

^{*13} DPSS グリーンレーザー、532nm を出力 (テキスト p.57 より)。

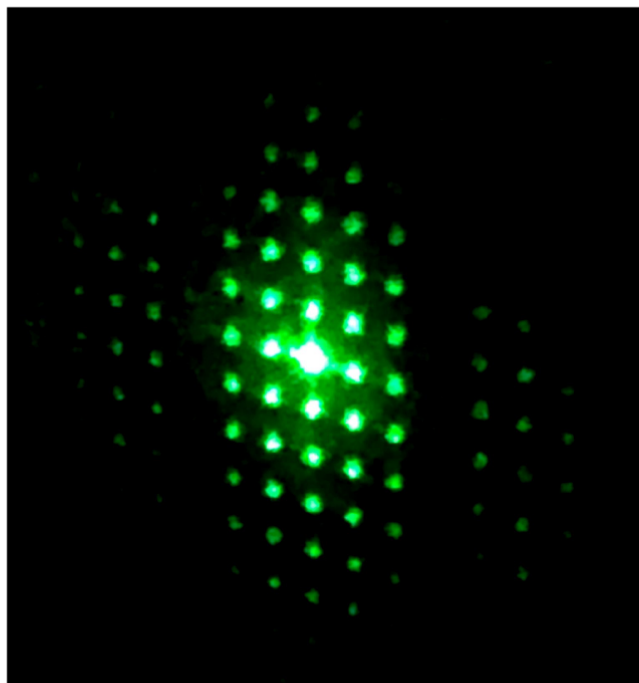


図 4 S2

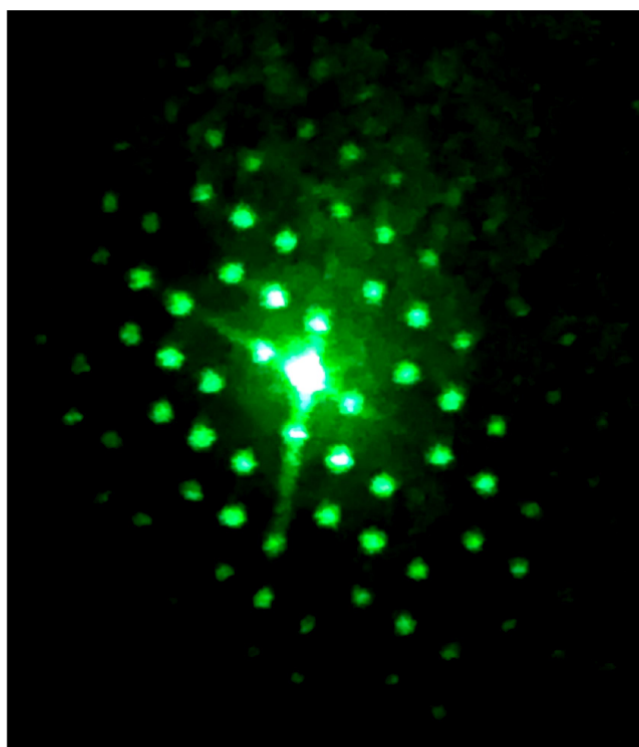


図 5 S3

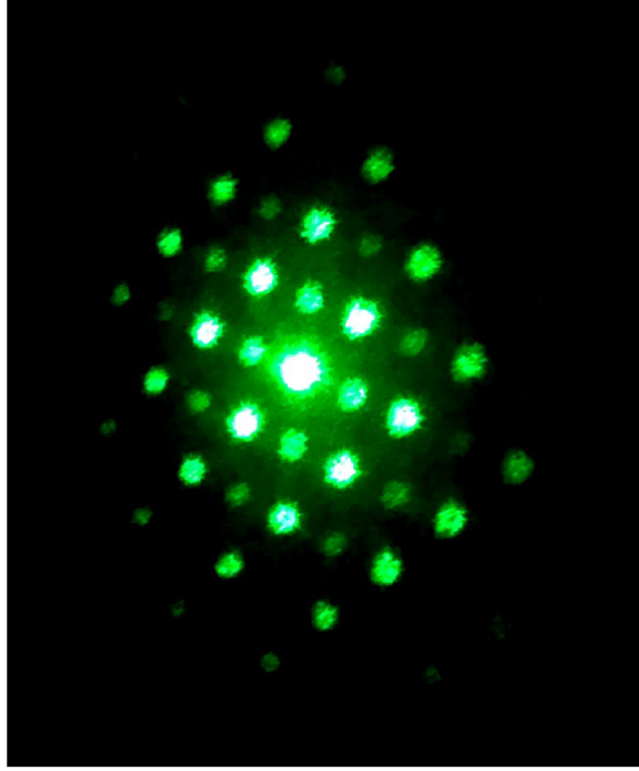


図6 S4

6.3 考察

6.3.1 S1,S2の単位胞

まず、S1 と S2 の単位胞の基本並進ベクトルの大きさを求める。S1 について、

$$\mathbf{a}' = \frac{2\pi}{\lambda z}(7.0, 0) = \frac{2\pi \times 10^4}{4.81}(7.0, 0)[\text{m}^{-1}] \quad (35)$$

$$\mathbf{b}' = \frac{2\pi \times 10^4}{4.81}(3.5, 9.5)[\text{m}^{-1}] \quad (36)$$

となり、式 (15) から基本並進ベクトル \mathbf{a} と \mathbf{b} を求めると、

$$\mathbf{b}' \times \mathbf{e}_z = \frac{2\pi \times 10^4}{4.81}(9.5, -3.5, 0)[\text{m}^{-1}] \quad (37)$$

$$\mathbf{a}' \cdot (\mathbf{b}' \times \mathbf{e}_z) = \left(\frac{2\pi \times 10^4}{4.81}\right)^2 \times 7.0 \times 9.5[\text{m}^{-2}] \quad (38)$$

$$\mathbf{e}_z \times \mathbf{a}' = \frac{2\pi \times 10^4}{4.81}(0, 7.0, 0)[\text{m}^{-1}] \quad (39)$$

であるから、

$$\mathbf{a} = \frac{4.81}{7.0 \times 9.5 \times 10^4}(9.5, 3.5, 0) \simeq 7.2 \times 10^{-6}(9.5, -3.5, 0)[\text{m}] \quad (40)$$

$$\mathbf{b} \simeq 7.23 \times 10^{-6}(0, 7.0, 0)[\text{m}] \quad (41)$$

となる。したがって S1 の基本並進ベクトルの大きさはそれぞれ、

$$\|\mathbf{a}\| \simeq 73 \times 10^{-6}[\text{m}] \quad (42)$$

$$\|\mathbf{b}\| \simeq 50 \times 10^{-6}[\text{m}] \quad (43)$$

となるので、73 μm 、50 μm となる。

続いて S2 の基本並進ベクトルの大きさを求める。計算方法は S1 と同様である。

$$\mathbf{a}' = \frac{2\pi}{\lambda_z}(2.9, 0) = \frac{2\pi \times 10^4}{4.81}(2.9, 0)[\text{m}^{-1}] \quad (44)$$

$$\mathbf{b}' = \frac{2\pi \times 10^4}{4.81}(0, 2.9)[\text{m}^{-1}] \quad (45)$$

となり、式 (15) から基本並進ベクトル \mathbf{a} と \mathbf{b} を求めると、

$$\mathbf{b}' \times \mathbf{e}_z = \frac{2\pi \times 10^4}{4.81}(2.9, 0, 0)[\text{m}^{-1}] \quad (46)$$

$$\mathbf{a}' \cdot (\mathbf{b}' \times \mathbf{e}_z) = \left(\frac{2\pi \times 10^4}{4.81}\right)^2 \times 2.9^2[\text{m}^{-2}] \quad (47)$$

$$\mathbf{e}_z \times \mathbf{a}' = \frac{2\pi \times 10^4}{4.81}(0, 2.9, 0)[\text{m}^{-1}] \quad (48)$$

であるから、

$$\mathbf{a} = \frac{4.81}{2.9^2 \times 10^4}(0, 2.9, 0) \simeq 57.2 \times 10^{-6}(0, 2.9, 0)[\text{m}] \quad (49)$$

$$\mathbf{b} \simeq 57.2 \times 10^{-6}(2.9, 0, 0)[\text{m}] \quad (50)$$

となる。したがって S1 の基本並進ベクトルの大きさはそれぞれ、

$$\|\mathbf{a}\| = \|\mathbf{b}\| \simeq 170 \times 10^{-6}[\text{m}] \quad (51)$$

となるので、両方 0.17mm となる。

6.3.2 消滅則から構造決定

S2 の消滅は $l' = \pm 3$ で生じている^{*14}。 \mathbf{b}' 方向では消滅していないので $m' = 0$ である。したがって、 $2pl'$ が奇数となるのは $p = 1/6$ の時である。S3 は縦方向も横方向も 4 個ごとに輝点が消滅している ($l' = m' = \pm 2$)。したがって、 $p = q = 1/4$ となる。S4 は輝点は完全には消滅していない。しかし、これも消滅則を適用できる。 $l' = m' = \pm 1$ で、縦方向も横方向も 2 個ごとに輝点の明暗がある。よって、 $p = q = 1/2$ となる。以上より、S2 ~ S4 のスライドの開口の構造は以下ようになる。

*14 各文字の意味は原理 2.3 回折と構造解析の通り。

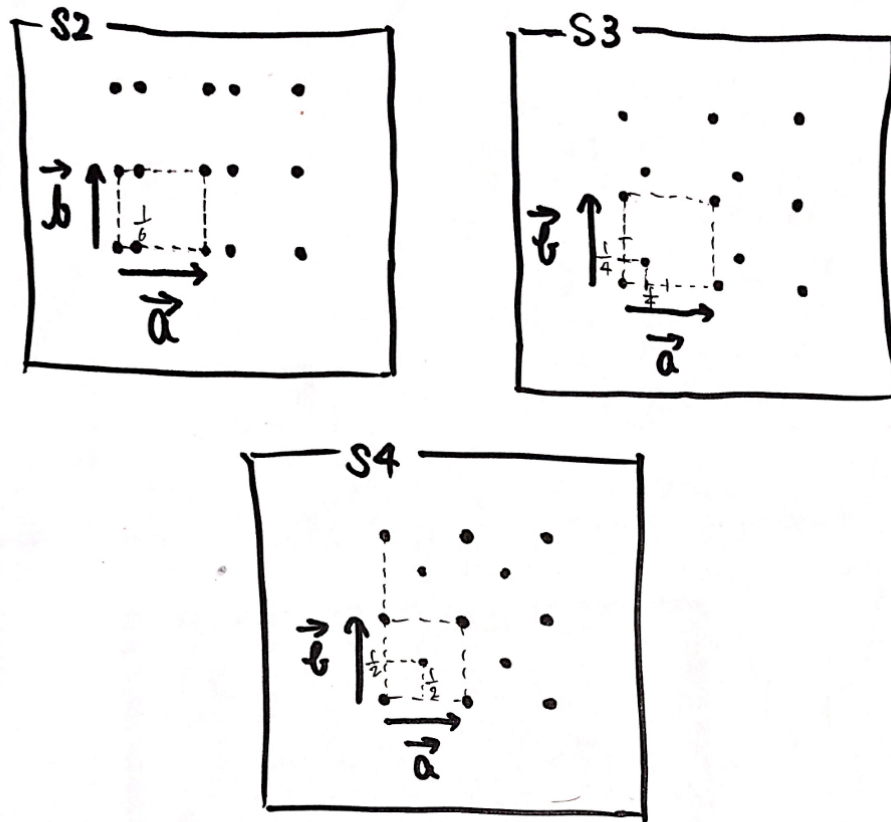


図7 S2~S4の構造

§7 レポート問題

7.1 問題 1

式 (2) を用いて本実験で使用した緑色レーザーの出力を求める。実験 1 で相対光強度が 1 の時の出力電圧は 3.11V なのでレーザー出力 I は、

$$I = \frac{3.11[\text{V}]}{0.39[\text{AW}^{-1}]100[\text{k}\Omega]} \simeq 0.078[\text{mW}] \quad (52)$$

テキスト p.57 の表 4 を参考にすると、このレーザーはクラス 2.2M のレーザーであると思われる。まばたき等の反射行動で眼を保護できるので、保護メガネを着用しなかったとしても危険ではない（本実験では保護メガネをしていなかった。）。

7.2 問題 2

水平面からの反射光はほとんど斜め方向から眼に入る。すなわち、入射角 45° 付近で反射した光が押さえたい光である。地面に立っている（または座っている）人に対して垂直な偏光は P 偏光で、水平な偏光は S 偏光である。図 3' からわかる通り、P 偏光は 45° 付近では Brewster 角が近いので反射率が 0 に近く、眼に入ってもほとんど影響がない。一方、水平な偏光（S 偏光）は反射率が 0 に近いわけではないので、眼に入ると邪魔である。したがって、水平偏光を遮断する（垂直偏光のみを透過する）サングラス (a) が適切な「偏光サングラス」である。

7.3 問題 3

クロスニコル法は高分子成形体の製造や鉱物やセラミックなどの分野で活用される手法である^{*15}。

§8 結論

マリユスの法則を実験で再現できた。また、屈折率は様々な方法で測定できたが、精度の良い方法と良くない方法があった。また、実験の空間スケールを大きくすることで測定誤差を小さくできた。さらに、逆格子ベクトルと消滅則を使って、周期的な構造を決定できた。

§9 参考資料

- ・「asta muse」 <https://astamuse.com/ja/keyword/10153923>
- ・2021 年度 物理学実験 I テキスト 東北大学理学部物理学教室

^{*15} 参考 <https://astamuse.com/ja/keyword/10153923>