

§ 5.4 波動光学

4 A) 偏光と複屈折

(1) 反射による光の偏り：ガラス板からの反射による偏光

光学用実験板（図 5-34）に裏面をスリガラスにして黒く塗ったガラスを固定し、スライドプロジェクターからの光を、様々な角度から照射し、偏光板を透過した反射光を観察する。

ガラス板とスクリーンとの間に置いた偏光板を回転させると、偏光板の方向によって、スクリーン上の反射光の明るさが変化する。

光学用実験板を回転させて入射角 θ を変えると、偏光板の回転によってほぼ完全に反射光を消すことができる θ が見つかる。

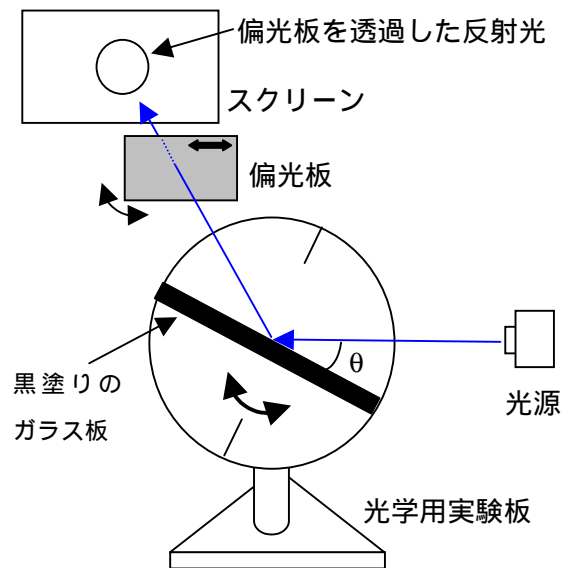


図 5-47 反射による偏光実験

このときの反射光の偏光状態を「直線偏光」と言う。また、このときの入射角を「偏光角」と言う。 <ガラス面での偏光角は 56° と 57° の間>

(2) ガラス板を透過した光の偏り：複数枚ガラス板による偏光

複数のガラス板に対して偏光角で入射すると、透過光もほぼ直線偏光にできる。

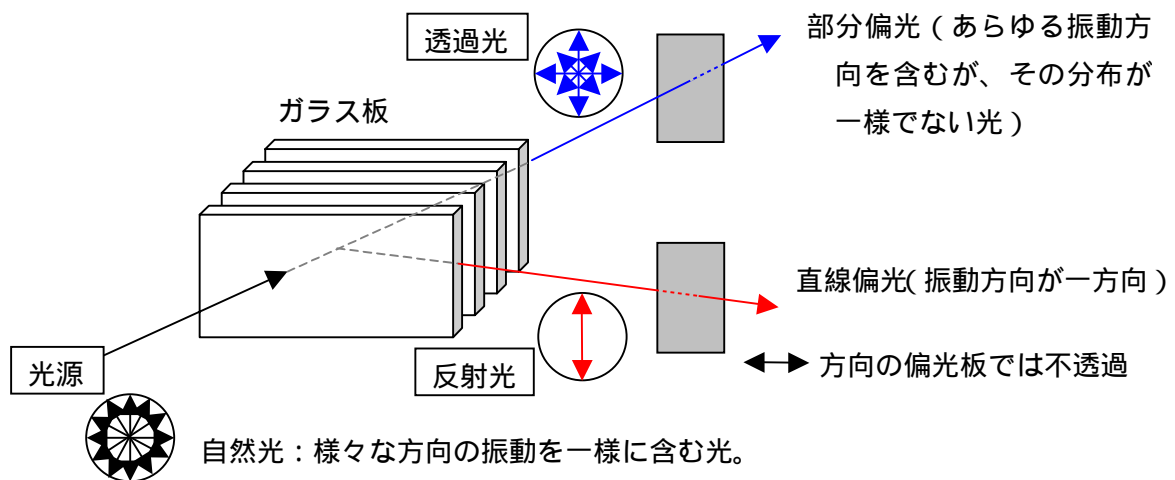


図 5-48 複数枚のガラスによる反射光と透過光

部分偏光は偏光板の方向を変えても完全に消えることはない。
直線偏光は偏光板の方向によって完全に消える。

(3) 方解石による複屈折

方解石に入った自然光は結晶の異方性のために常光線 (ordinary ray : O 光線) と異常光線 (extraordinary ray : E 光線) に分かれて進む。2つの光線に対する屈折率が異なるため、光を入射すると複屈折が起こり、屈折波が2つにわかれる。この複屈折により、方解石を文字の上に置くと文字が二重に見える。

また、偏光板を通して文字を読むと、偏光板の方向によって、文字のだぶりがなくなることから、2つの屈折波は直線偏光していることが確認できる。



図 5-49 方解石による二重像

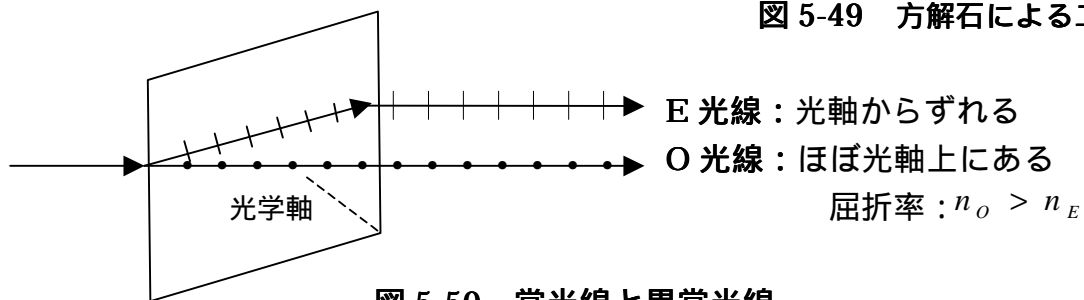


図 5-50 常光線と異常光線

O 光線は、結晶の構造によって決まる光学軸 (O 光線、E 光線の法線速度が等しくなる方向) と波面法線によってできる主断面に垂直に振動するのに対して、E 光線は主断面に平行に振動する。

複屈折の観察

複屈折によってできるピンホールの2つの像の違いを観察する。

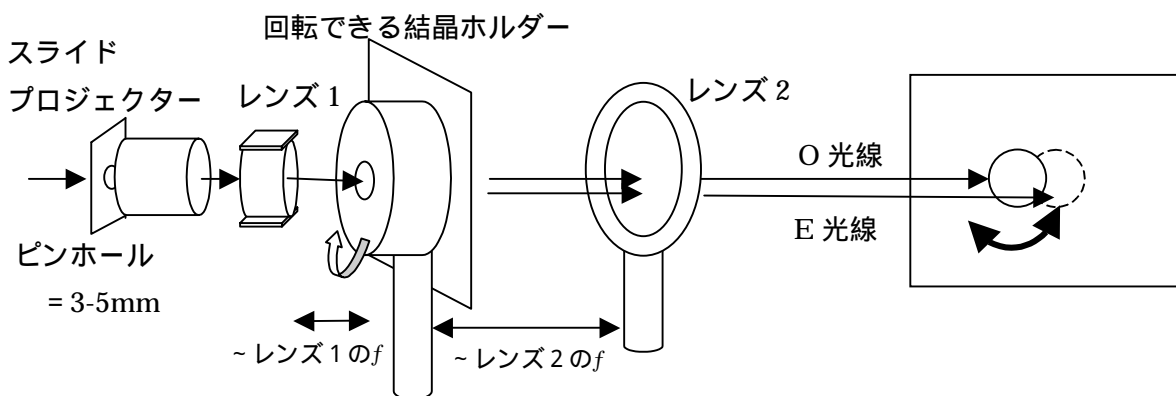


図 5-51 複屈折の観察装置

方解石を入れた缶ケースを回転させると、E 光線による像の位置も回転する。(O 光線による像は光軸上にあるためその位置はほとんど変わらない。)

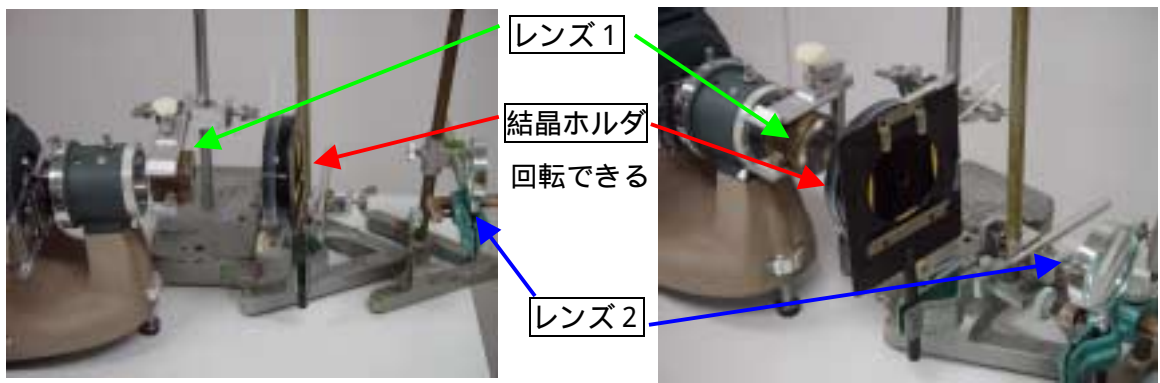


図 5-52 複屈折の実験の様子

(4) 偏光プリズム

スライドプロジェクターからの光線を回転できるホルダにセットした偏光プリズムを通して観察する。

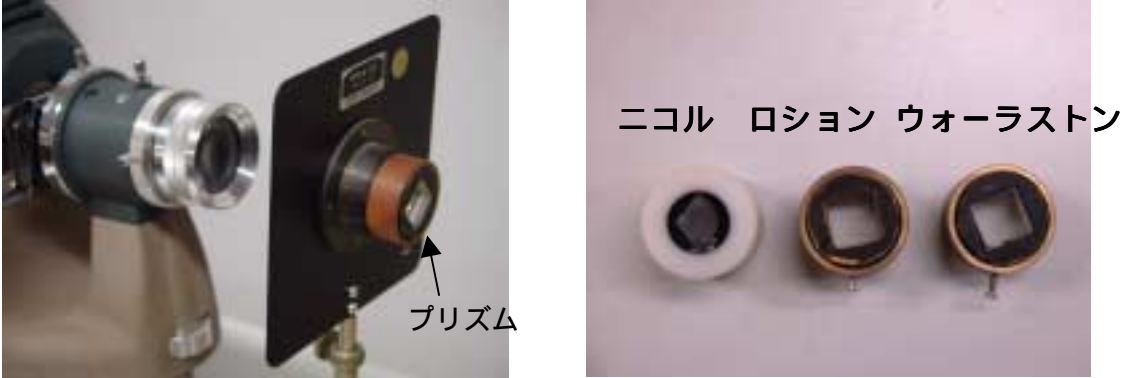


図 5-53 偏光プリズムの実験装置と偏光プリズムの種類

(a) ニコルプリズム

方解石の結晶の 71° の面角を研磨して 68° にしてある。O 光線は 2 枚のプリズムの接着面で全反射されるため、複屈折は起きているが、E 光線による像だけが観察できる。ニコルプリズムは精密実験等における偏光子(偏光を作る光学素子)や検光子(偏光状態を検査する光学素子)として利用されている。

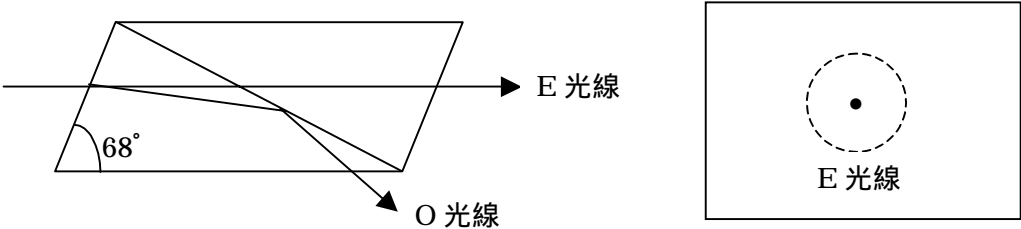


図 5-54 ニコルプリズムの構造

(b) 紫外線に対するプリズム

紫外線に対する偏光プリズムとして、ロッシュンプリズムとウォーラストンプリズムが知られている。いずれも2つの水晶のプリズムを、互いの結晶軸が直交するように組み合わせて作られている。

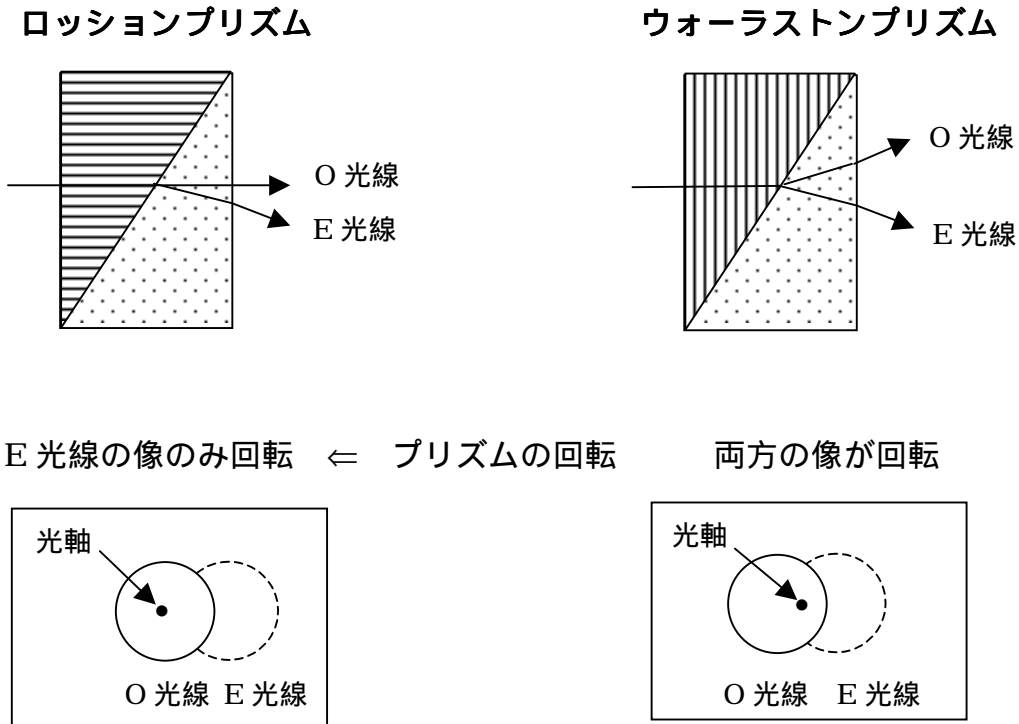


図 5-55 紫外線に対する偏光プリズム

4 B) 散乱による偏光

レイリー (Rayleigh) 散乱: 波長よりも小さい粒子 (~ 1/10 以下) に光が当たったときに起こる散乱で、波長は変化しない。電磁波の電場によって粒子内の電子が振動子 (電気双極子) としてふるまう。この振動する電気双極子からの放射を考えると、散乱強度が波長の 4 乗に反比例することが計算される。このため、青い光 (≈ 400nm) は赤い光 (≈ 700nm) に比べて約 9.4 倍散乱される。

大気を構成している酸素や窒素の気体分子の大きさは、可視光線の波長の 1/1000 のオーダーであり、レイリー散乱を起こす。このため、太陽光中の青い光は赤い光よりも多く大気中の気体分子によって散乱される。散乱された青い光は、あらゆる方向から目に入り、空は青く色づいて見える。実際には、空の青さには大気の密度のゆらぎによ

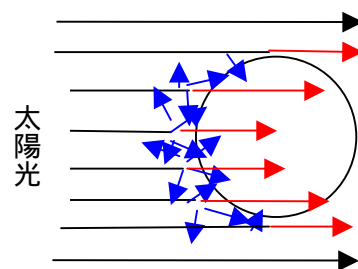


図 5-56 地球大気による散乱

る散乱も関与していると考えられている。

レイリー散乱の実験：夕日のモデル

チオ硫酸ナトリウム溶液に希硫酸を加えると、化学反応によって徐々に硫黄の微粒子が沈殿(白色)し始める。この混合液中にスライドプロジェクターから光を照射する。

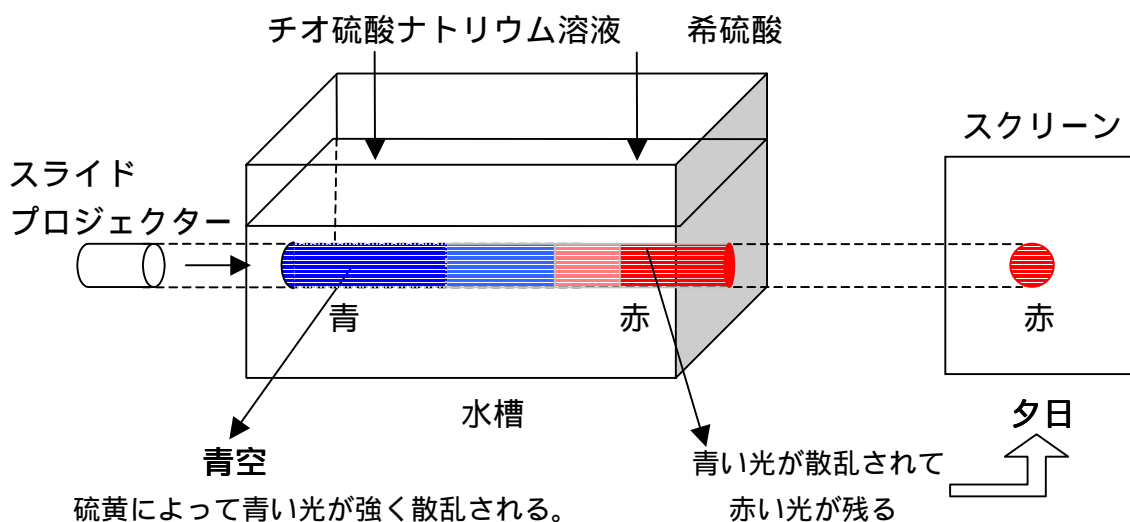


図 5-57 レイリー散乱の波長依存性

夕方は、太陽光線が大気圏(空气中)を通過する距離が日中よりかなり長く(約35倍)なるので、青い光のほとんどが散乱されてしまい、残った赤色が夕日の色として見える。

偏光板による散乱光の観察

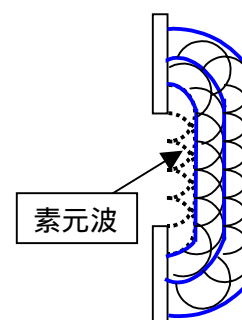
いろいろな角度から来る散乱光を、偏光板を通して観察する。散乱光は、散乱角が大きいほど偏光しており、 90° 方向では直線偏光となっている。

4 - C) 光の干渉、回折

光が波動であることを示す典型的な現象は、光の干渉と回折である。干渉と回折は、本質的に同じ現象であるが、ここでは少数の光束の間の重ね合わせの場合を干渉、多数の光線の干渉を積分して扱う場合を回折として区別する。

(1) ホイヘンス(Huygens)の原理

ホイヘンスは、光を媒質の運動である波動と考え、波面上の各点から二次的な素元波が出ているとして、光の直進、反射、屈折などを説明した。ある瞬間の波面上の全ての点から送り出される素元波の包絡面(共通に接する曲面)が、次の瞬間の波面になる。

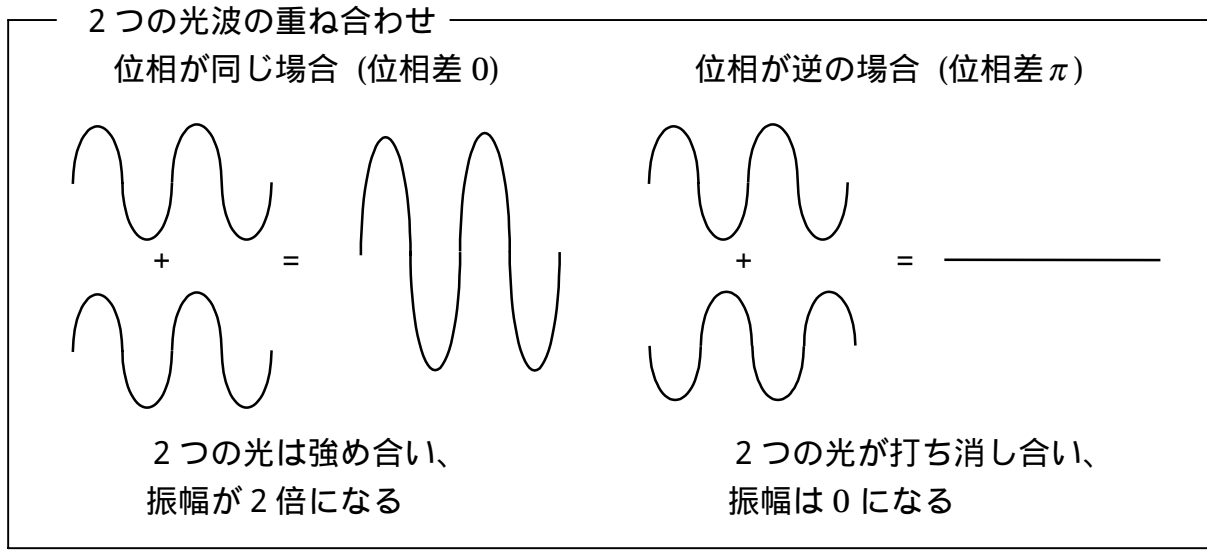


素元波：波面の各点から出る球面波。

図 5-58 ホイヘンスの原理

(2) 2 光束の干渉

ひとつの光源から出た光(干渉可能な光:コヒーレント光)の波を2つに分けた後、重ね合わせると、互いの位相関係で強め合ったり弱め合ったりする。



(a) V字スリットを用いたヤングの実験

干渉縞を観測し、光の波動性を検証するためにヤングが行った2光束の干渉実験を簡単にしたものを示す。

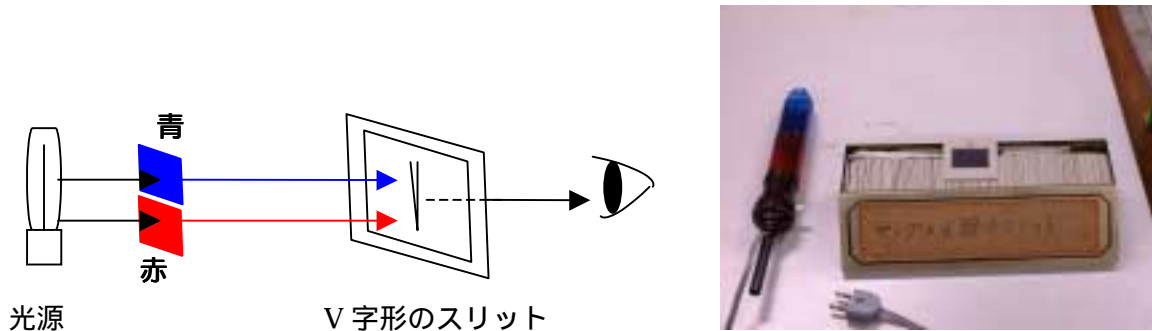


図 5 - 59 V字スリットによる干渉実験

電灯の光(白色光)を青と赤のフィルターに通して、青い光と赤い光を作る。実際の実験では青と赤のセロハン紙を貼り付けた電灯を使用し、上側に青い光・下側に赤い光が入射するようにする。

このとき、目をスリットに近づけて遠くを見るようにする。こうすることによって、目のレンズを利用して網膜上に干渉縞を作る(レンズの後側焦平面とフラウンホ

ーファー回折の項参照)。

原理

光源から出た波長 λ の光は、2つの近接したスリット S_1, S_2 に同位相で達したのち、さらに回折して広がるので、 S_1 と S_2 から出た光の波は、スクリーン上の各点で重なり合って干渉する。もし2つの光の波の山と山(谷と谷)が重なれば、明るくなるが、山と谷が重なれば暗くなる。重ね合わせるのは振幅であるのに対して、観測される明るさは、光の強度(振幅の2乗に比例)であることに注意する。

光源に波長 λ の単色光を用いると、スクリーン上には、明暗の縞ができる。これを干渉縞という。単色光の代わりに白色光を用いると、干渉する位置が波長によって異なるので、着色した干渉縞を生じる。

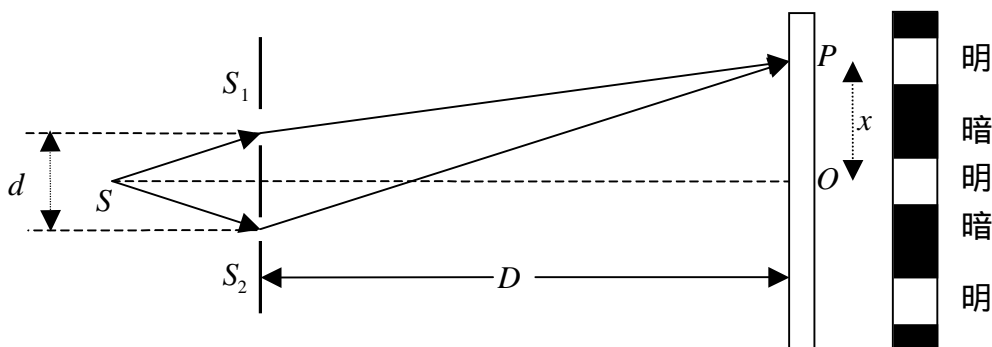


図 5-60 干渉縞の間隔の計算原理

$$\overline{S_1P} = \sqrt{\left(x - \frac{d}{2}\right)^2 + D^2} = D \left\{ 1 - \frac{1}{2} \left(\frac{x - \frac{d}{2}}{D} \right)^2 + \dots \right\}$$

$$\overline{S_2P} = \sqrt{\left(x + \frac{d}{2}\right)^2 + D^2} = D \left\{ 1 + \frac{1}{2} \left(\frac{x + \frac{d}{2}}{D} \right)^2 - \dots \right\}$$

光路差は、 $\overline{S_2P} - \overline{S_1P} \approx \frac{dx}{D} \dots$

(1) 点 P が明線になる条件：光路差が半波長の偶数倍(波長の整数倍)のとき

式より $\frac{dx}{D} = m\lambda \dots \left(x = \frac{m\lambda D}{d} \right)$

明線の間隔 Δx は、 $\Delta x = \frac{(m+1)\lambda D}{d} - \frac{m\lambda D}{d} = \frac{\lambda D}{d} \dots$

(2) 点 P が暗線になる条件：光路差が半波長の奇数倍のとき

式より
$$\frac{dx}{D} = \left(m + \frac{1}{2}\right)\lambda \dots$$

実際の見え方

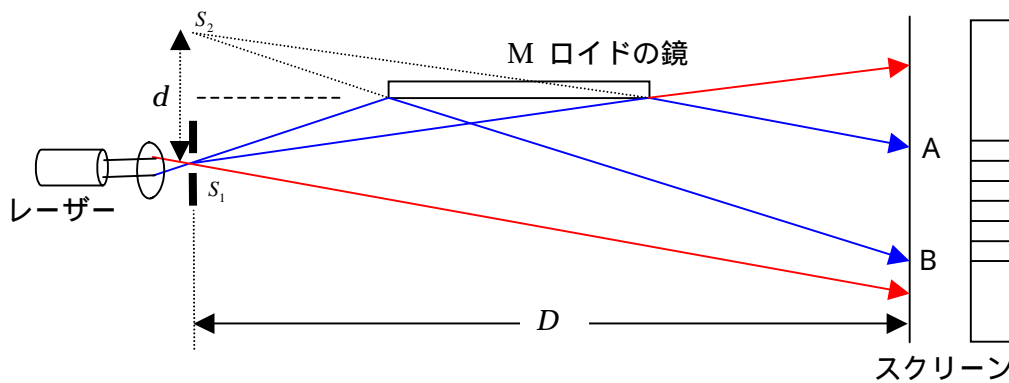


式より、干渉縞の間隔は波長に比例し、スリットの間隔に逆比例することがわかる。

(b) ロイドの鏡を用いた2光束の干渉

2光束干渉縞を得る方法の一つで、ヤングの実験で用いたスリットの代わりに、鏡を利用して実際の光源と仮想的な光源からの光を干渉させる。

各装置の配置



まず、レーザー、集光レンズ、鏡をセットし、スクリーンに適当な2光束の重なりができるようにする。その後、スタンドを軸に鏡を左右に回転させて、干渉縞が最も見やすい場所を探す。さらに、スリットを入れて調節する。

図 5-61 ロイドの鏡による2光束の干渉実験

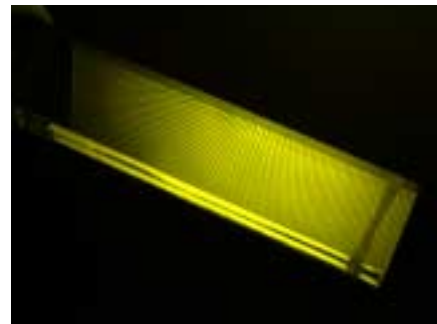
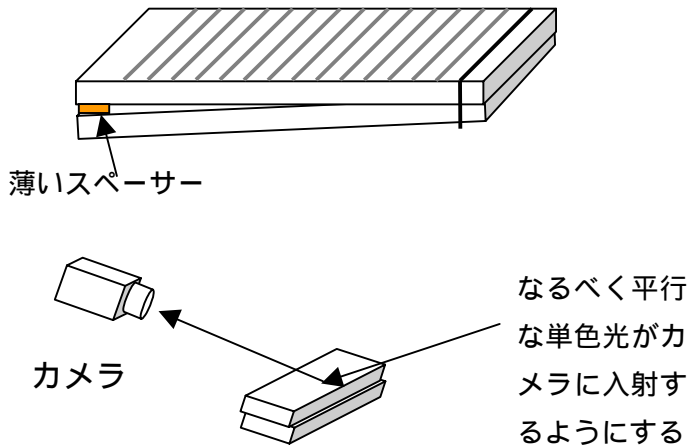
光源からの光束は、鏡で反射される部分と直接広がっていく部分に分けられる。この両者が重なり合う部分 (A B間) にスクリーンを置くと、どこでも干渉縞が見られる。この干渉は点光源 S_1 と S_1 の M による虚像 S_2 をコヒーレントな2光源としたヤングの実験と同じで、 S_1 と S_2 を結ぶ線から D の距離にあるスクリーン上に波長 λ の光がつくる干渉縞の間隔は、(a) の式と同じになる。ただし、鏡による反射で位相

が反転するため、明暗はヤングの実験の場合と逆になっている。

(3) 等厚干渉

(a) 楔形の空気層による干渉縞 <島津製>

干渉膜の厚さにしたがって明暗が決まり、干渉縞ができる場合を等厚干渉という。
2枚のガラスの間に挟まれた空気層(楔形の層)による干渉。



光源としては、Na ランプの前にすりガラスを置いたものや、パソコンのモニター画面を利用する。

図 5-62 楔形の空気層による等厚干渉縞の観察

平行光線で2枚のガラスの隙間が完全な楔形だと干渉縞は等間隔に現れる。

ガラスを押すと圧力によってガラスが歪む(空気層の厚みに変化が生じる)ので、干渉縞の形が変化する。

(b) ニュートン環 <島津製>

曲率の小さい(曲率半径 50cm)球面と平面からなる平凸レンズをガラス平板の上におくと、凸面と下の平面ガラスの間に小さな隙間ができる(図 5-53 のように隙間は非常に狭い)。そこに上から光を照射すると、平凸レンズの球面で反射される光と下の平面ガラスで反射される光が干渉して、同心円状の干渉縞が現れる。透過光の場合も干渉縞が現れる。

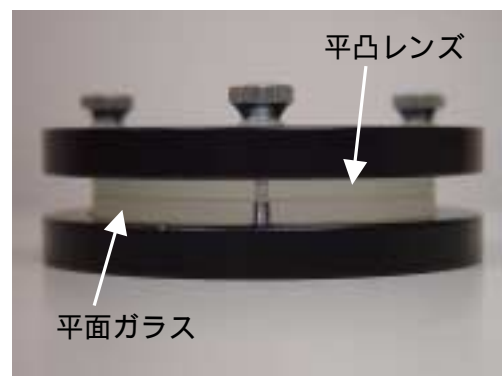


図 5-63 横から見たニュートン環

反射光による干渉縞のコントラストの方がはっきりして明暗が見やすい。

100 の光を照射したとすると、96 は透過する。
 反射では 0 と 4 での明暗 透過では 96 と 100 での明暗

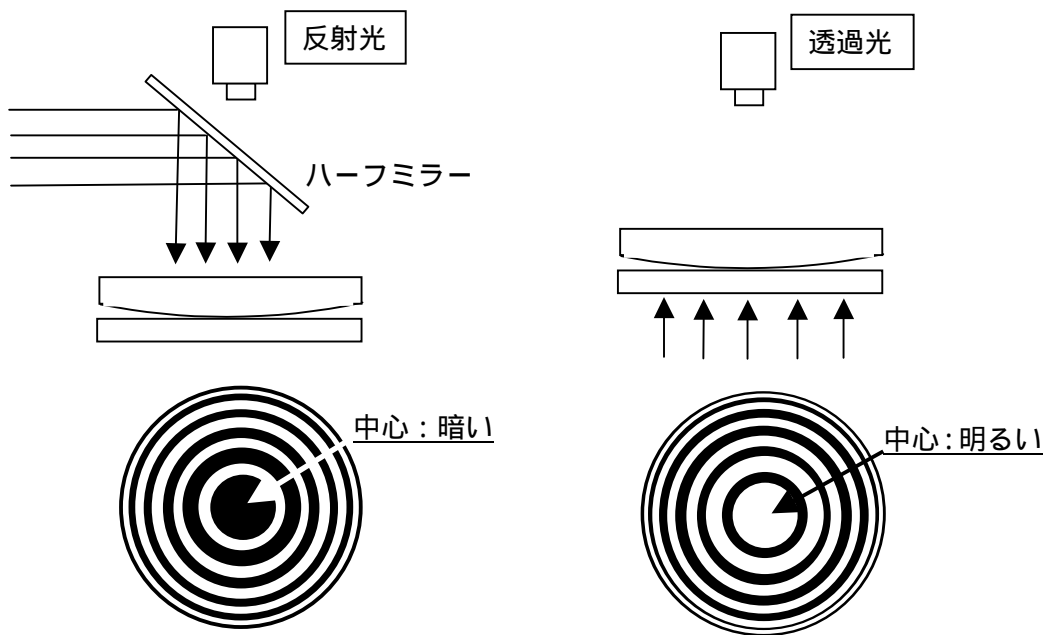


図 5-64 ニュートン環による干渉縞の観察

原理

B 点での反射光と D 点での反射光が干渉する。
 B 点での反射は位相変化なく、D 点での反射は
 位相変化 を伴うので、BD 間の光路差 Δ は

$$\Delta = 2d - \frac{\lambda}{2} \quad (n=1)$$

平凸レンズの曲率半径を R 、 $CD=r$ とすると、
 $r^2 = R^2 - (R-d)^2 = (2R-d)d \approx 2Rd \quad (d \ll R)$

よって $2d = \frac{r^2}{R}$

干渉縞の明暗の条件

$\left. \begin{aligned} \frac{r^2}{R} &= (2m+1) \frac{\lambda}{2} && \text{明} \\ \frac{r^2}{R} &= 2m \cdot \frac{\lambda}{2} && \text{暗} \end{aligned} \right\} m = 0, 1, 2, \dots$

d または r 変化に応じて、O を暗い中心とする明暗の同心環が見える。

透過光による明暗の条件は反射光の明暗の条件と反対になる！！

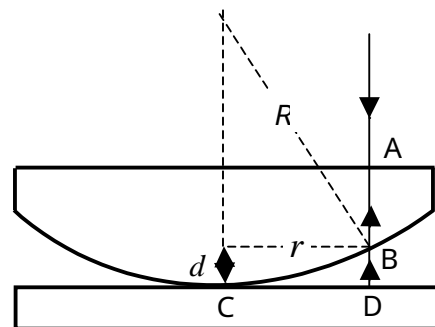


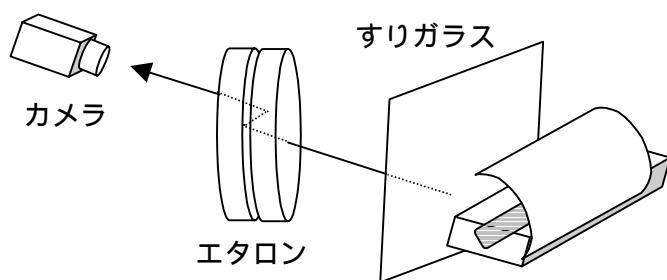
図 5-65 ニュートン環の原理

設問) 透過光による明暗の条件が反射光の明暗の条件と反対になる理由を考えよ。

(4) 等傾角干渉

ファブリ・ペローのエタロン

2枚の平行平面ガラス板の間に一定の厚みの空気層を作ったもので、入射光の角度によって、干渉縞の明暗が決まる。干渉縞は角度によるので、エタロンの特定の場所にあるわけではない。



Na ランプ < 中村理科工業(株) >

図 5-66 ファブリ・ペローの干渉計による干渉縞の観察

図 5-66 のように Na ランプを用いているいろいろな方向から単色光を入射し、カメラの焦点を無限遠に合わせると、くっきりした同心円状の干渉縞が観察できる。干渉縞の間隔は、中心から離れるにしたがって狭くなる。

(5) マイケルソン干渉計 < 島津製 >

相対性理論の光速度不変を示す Michelson-Morley の実験に使用された 2 光束干渉計で、レーザーの位相がそろっていることを利用している。この干渉計の発明によって始めて、干渉する 2 光束の光路が明確に分離された。ここでは、マイケルソン干渉計を用いて光の波長を測定する。

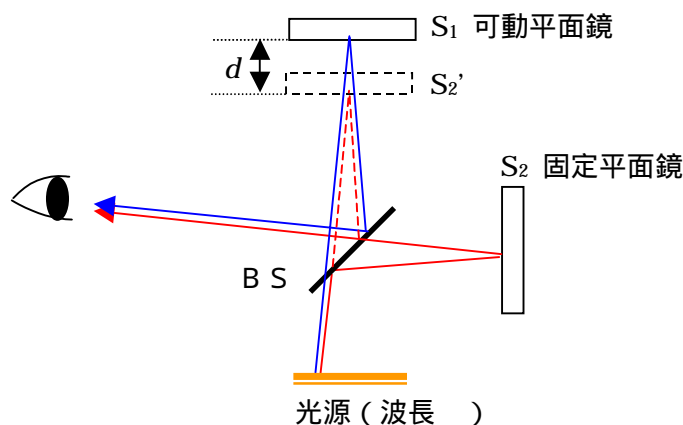


図 5-67 マイケルソン干渉計の原理

光源からの光はビームスプリッターBSに入射し、2つのビームに分かれる。

ビーム1(赤線) 光源 BS透過 平面鏡 S_1 BS反射 検出器
 ビーム2(青線) 光源 BS反射 平面鏡 S_2 BS透過 検出器

ビーム1は、仮想的に考えた平面鏡 S_2 によって反射されたビーム(赤点線)と同じ光路長を持つので、結局 S_1 と S_2 による反射光の間の干渉とみなせる。これは、ファブリ・ペローの干渉計の場合と同様等傾角干渉となり、同心円状の干渉縞を生ずる。すなわち、干渉は図5-67の d の厚みの空気層によって生じると考えられる。

平面鏡に垂直に入射する光線では、光の波長 λ に対し光路差 $2d$ が $\lambda/2$ 変化するとともに明暗が反転する。平面鏡 S_1 を光軸にそって d (光路差 $2d$)動かしたとき、干渉縞の中心の明暗が n 回反転(明暗明または暗明暗を1回)したとすると、

$$\text{光の波長 } \lambda = \frac{2\Delta d}{n}$$

d と n を測定することによって、光の波長 λ を求めることができる。

(6) 光回折

(a) フレネル回折とフラウンホーファー回折

ホイヘンスの原理では、素元波によって反射波や屈折波がどのような方向に進むのか説明できたが、ヤングの干渉実験などを説明するためには不十分であり、素元波という考えに加えて各素元波間の干渉を考慮する必要がある(ホイヘンス・フレネルの原理)。このホイヘンス・フレネルの原理を数学的に定式化したものが、キルヒホッフの回折理論である。キルヒホッフの回折理論で、光源とスクリーンが無限遠にある場合(フラウンホーファー回折)には、回折像と実像は互いにフーリエ変換の関係になる。光源とスクリーンが無限遠にあると見なせない場合の回折は、フレネル回折と呼ばれる。レーザーを利用して平行光線を試料に照射し、回折光をレンズに入射すると θ 方向に回折された光は後側焦平面で1点に収束する(3-Fの(4))ので、レンズの後側焦平面にフラウンホーファー回折を観察することができる。

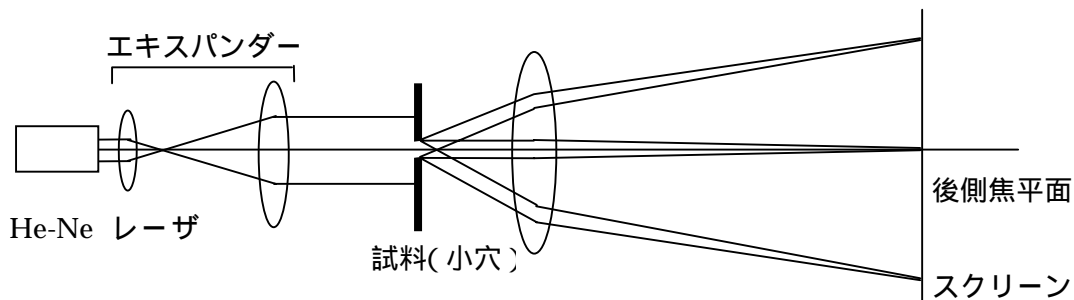


図 5-68 レンズを用いたフラウンホーファー回折の観察

(b) 1つの小穴による回折 エアリー像

He-Ne レーザー ($\lambda = 632.8\text{nm}$) からの光線をエキスパンダーで 1cm 程度の平行光線に広げ、直径が 1mm 以下の円形の穴を開けた試料に入射する。試料からの回折光を焦点距離 1m のレンズに入射し、その後側焦平面にスクリーンまたはレンズを付けないカメラを置いて回折像を観察する。1つの円形の小穴によるフラウンホーファー回折像は、エアリー像と呼ばれる同心円状のパターンとなる。エアリー像の強度がゼロの位置は、等間隔ではなくベッセル関数によって記述される。

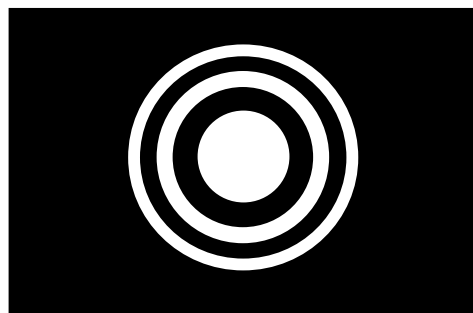


図 5-69 エアリー像

(設問) このとき、試料の位置を上下左右に動かすと回折像はどうなるか。

(c) スリットによる回折

(b) と同様に細いスリットの回折像を観察する。スリットの幅を変えてみると、幅が狭いほど、回折像の反射ピークの間隔が広がる。

V字スリットによるヤングの実験とは違い、スリットに垂直方向に細く伸びた回折像になっていることに注意する。これは、光源の可干渉性(光の位相がどのくらいよく揃っているかに対応する)の違いによっている。レーザー光は普通の電灯の光に比べて位相が非常によく揃っており、スリットと平行方向にも干渉が起こるために、このような違いが生じる。

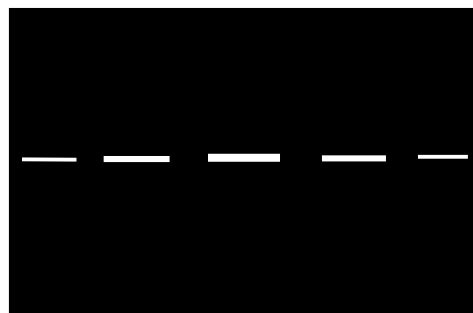


図 5-70 スリットの回折像

(d) 2つの小穴による回折

2つの小穴がある場合は、それぞれの小穴によって作られるエアリー像が重なり合うが、エアリー像の各点における両者の位相が異なっているために干渉が起こり、エアリー像のパターンの中に明暗の縞ができる。干渉縞の間隔は、基本的にヤングの干渉実験の場合と同様な計算になる。

このように、回折像の全体の強度分布は、1つの基本となるユニット(ここでは1つの円形の小

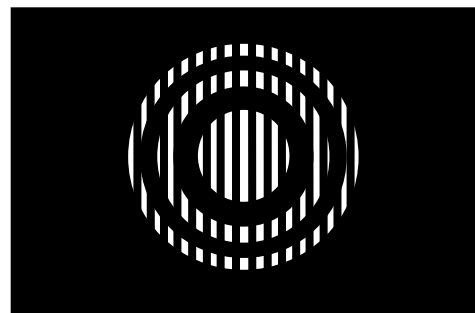


図 5-71 横方向に並べた

穴)によって決まる。このような基本単位は、 λ 2つの小穴による回折像
 線回折では、ユニットセルと呼ばれる。

(f) 光ろ過

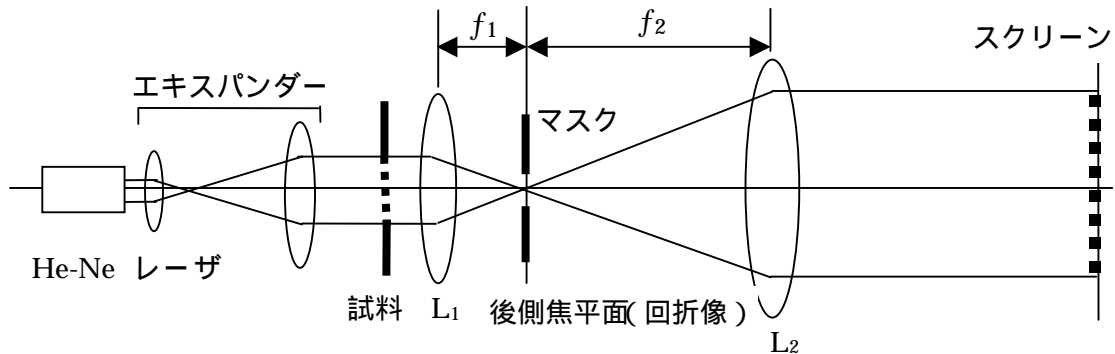


図 5-72 光ろ過の実験

レンズ 1 の後側焦平面：試料の回折像

スクリーン：試料の拡大像（実像）。倍率は、 f_2 / f_1

レンズ 1 の後側焦平面の位置にマスクを入れることにより、回折パターンの一部のみを透過させると、試料の中から選択的に特定のパターンを抽出することができる。

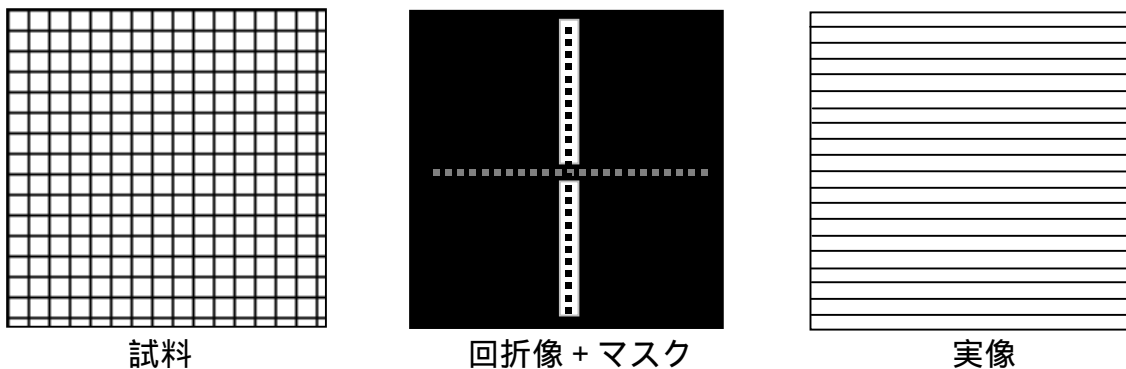


図 5-73 縦方向の回折パターンのみ透過させる光ろ過

§ 5.5 量子光学

5 - A) 原子スペクトル

1900 年の Planck による量子仮説の発表以来、ミクロな世界の物理学は量子力学として発展し、エレクトロニクスをはじめとする現代科学技術を基礎付けてきた。ミクロな原子内の電子状態の情報は、そこから放出される光（原子スペクトル）を調べることによって得られる。ここでは放電管からの光を回折格子を用いて分光することにより、原子のエネルギーレベルと放出される光の関係について理解する。

実験

水銀ランプ、Naランプ、ネオン管などを用意し、スリットを通したこれらの光源からの光を反射回折格子に入射する。回折光は、カメラで検出する。

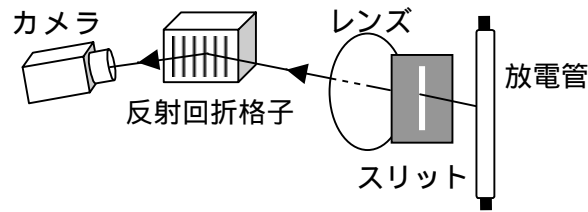


図 5-74 回折格子を用いた原子スペクトルの観察

原子に特有の輝線スペクトルが観察でき、原子のエネルギーレベルが飛び飛びであることがわかる。

5 - B) レーザー光

現代光学は、レーザー光源抜きには考えられない。Townes らの理論に基づき、1960年 Maiman が実際にルビーレーザー(694.3nm のパルス光)を発光させて以来、レーザー(LASER: Light Amplification by Stimulated Emission of Radiation)は急速発展し、様々な分野で応用されている。

(1) レーザー発振の原理

原子や分子の準安定なエネルギー準位に電子を励起(ポンピング)することにより、低い準位よりも高い準位にある電子数が多い状態(反転分布)を作り出す。この準位間の遷移によって放出された光に誘導されて誘導吸収と誘導放出が起こるが、反転分布のために誘導放出の方が多く起こり光が増幅される。

よく使われる He-Ne レーザーでは、放電によって電極から放出された電子が He に衝突して、He を励起する。

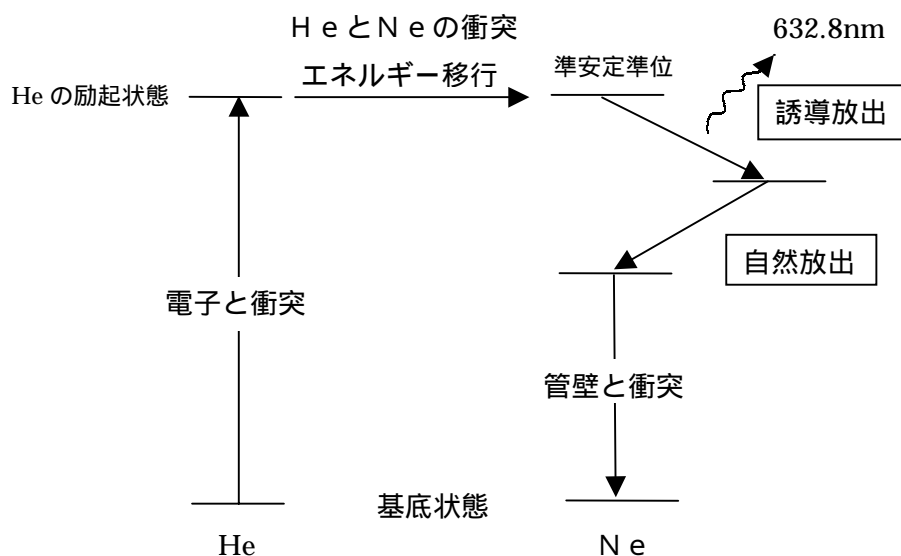


図 5-75 He-Ne レーザー発振の原理

レーザーの特徴

- (a) 単色光である。
- (b) 位相がそろっている。
- (c) エネルギー密度が高い (高密度)

レーザー光のこれらの特徴を利用して、様々な応用がなされている。物体からの光の位相情報を記録して3次元像として再生するホログラフィー、光通信、ディスクからのデジタル情報の読み取り、干渉現象を利用した計測装置、高エネルギー密度を利用した材料加工、レーザーメスなどの医療機器、核融合など応用例は無数にある。上述の光回折実験などでもレーザーは、光源として欠かすことができないものである。

(2) レーザー光の広がり (電灯との比較)

光エネルギーが光源からの距離によってどのように変わるか測定することによって、レーザー光の特徴を探る。

実験装置

光検出ダイオード、デジタルボルトメータ (またはエネルギーメータ)
200 ワット電球、 5mW ヘリウムネオンレーザー、ものさしなど

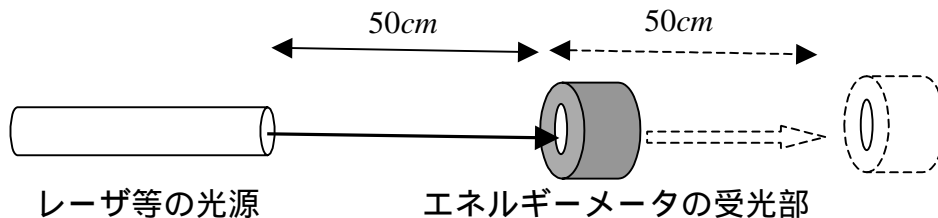


図 5 - 76 光エネルギーの測定実験

実験手順

- (a) 光源として電球をセットし、光源から 50 cm、100cm の所に検出ダイオードをおいて電流の目盛りを読む。測定した電力が $1/4\pi r^2$ に比例することを確認する。
- (b) 同じことをレーザーの出口からの距離を変えて行う。
- (c) 2m の位置でどちらのエネルギーが大きいのか？ また波長 10nm あたりのエネルギー (波長に対するエネルギー密度) で考えよ。He-Ne レーザーは波長 632.8nm の単色光であるのに対して、電球の光の波長は 200 ~ 1000nm に広がっている。



図 5 - 77 エネルギーメータ
(受光部の直径 8 mm)