



1. 「理学部案内」の分光シートについて

1) 波の振幅、波長

光は波の性質をもっていますので、より詳しく光について見ていく前に、波の性質を説明します。波の特徴を表すものは、3つあります。波長、振幅、位相です。波の一番高いところを山、一番低いところを谷と言います。山と谷のちょうど中間から、山もしくは谷までの長さを振幅と呼びます。

山から山、もしくは谷から谷までの距離のことを波長と言います。図1に、波長と振幅を図示します。また、波長が2倍の波と、半分の波を図2に重ねて示します。波長が長い波ほど、ゆったりと変化します。

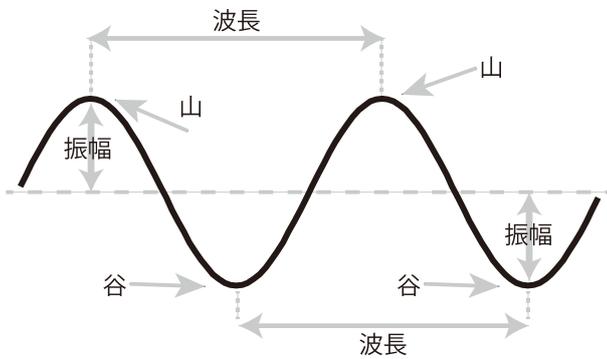


図1：波の波長、振幅

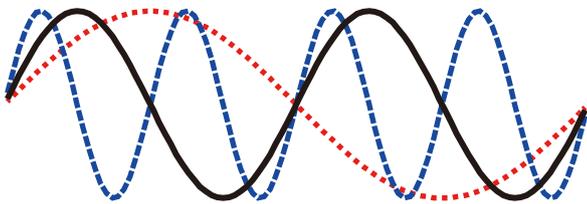


図2：黒色で示す波に対して、赤色で示す波は波長が2倍であり、青色で示す波は波長が半分である。

2) 波の位相

波の状態を表す特徴に、位相（いそう）と呼ばれるものがあります。これは、波の山から、どれだけの距離が離れているか表しています。例えば、谷の部分だと、波長の半分の長さほど進んだところですので、山から半波長分の位相がずれている点などと言います。実は、波の山から以外でも、谷や、山と谷のちょうど中間からでも位相のずれとしていきます。図3に、位相を波長の4分の1と、半分ずらした波を示します。波が1波長分ずれると、元の波と重なります。ですので、例えば、1.5波長分ずれている波と半波長分ずれている波とではまったく同じに見えます。

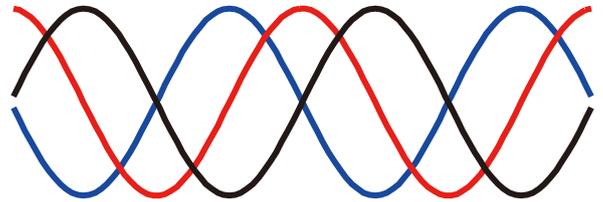


図3：黒色で示す波に対して、位相が波長の4分の1ずれている波を赤色、波長の半分ずれている波を青色で示す。

3) 波の重ね合わせ

2つの波があるとき、それぞれの波が別々にあるときの重ね合わせになります。山と山とが重なれば、大きな山に、谷と谷が重なれば大きな谷になります。位相が波長の半分ずれている波が重なった場合は、お互いに打ち消し合い、波はなくなってしまいます。位相がずれている2つの波が重なった場合について、図4に詳しく掲載します。

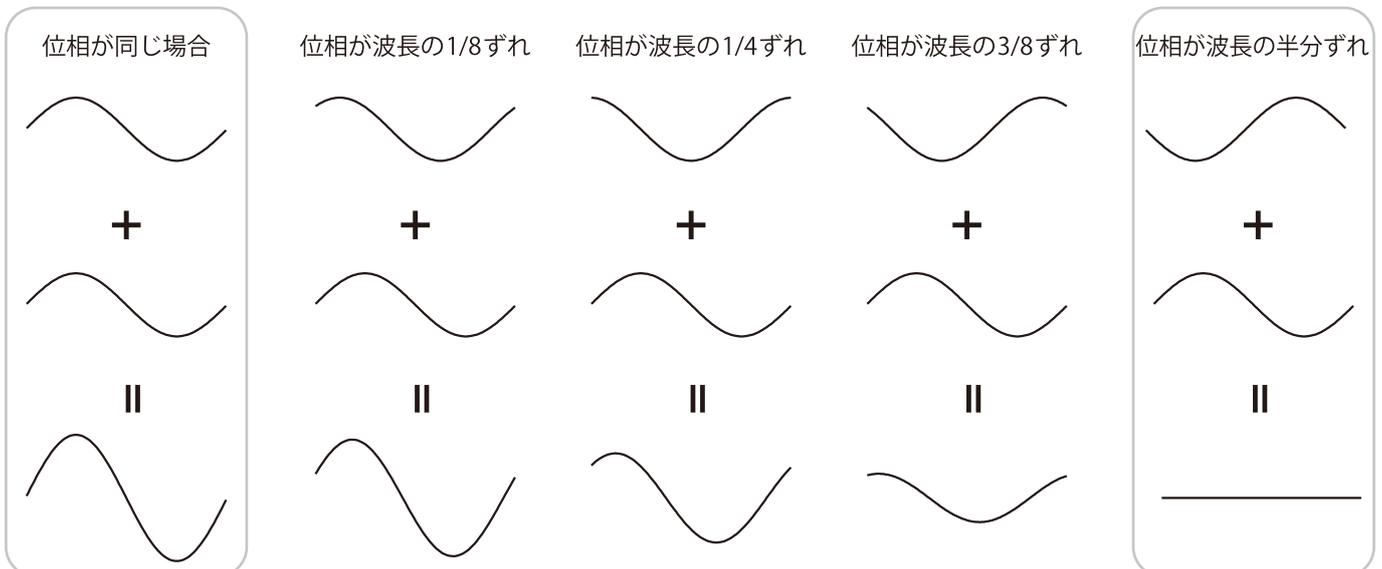


図4：波の重ね合わせ

4) 光の三原色

光は、赤色・青色・緑色が混ざると、白色に見えます。逆に、白色の光は、赤色・青色・緑色にわけられます。一般に光の色は、多くの色に分けられることが知られており、虹色（赤、橙、黄、緑、青、藍、紫）のようにもわけることができます。このように光を色によってわけを分光と呼びます。

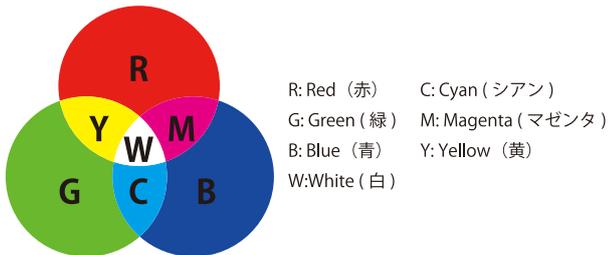


図5：光の三原色

5) 色と波長の関係

光の波長と色には、関係があります。波長が短く、 $0.38\mu\text{m} \sim 0.43\mu\text{m}$ の光は紫色にみえ、 $0.64\mu\text{m} \sim 0.77\mu\text{m}$ の光は赤色にみえます。このほか、青、緑、黄、橙についての波長の関係は下図のようです。人の眼では、波長が $0.38\mu\text{m} \sim 0.77\mu\text{m}$ の光をみることができます。 $0.38\mu\text{m}$ より波長が短い光は紫外線で、 $0.77\mu\text{m}$ より長い光は赤外線です。

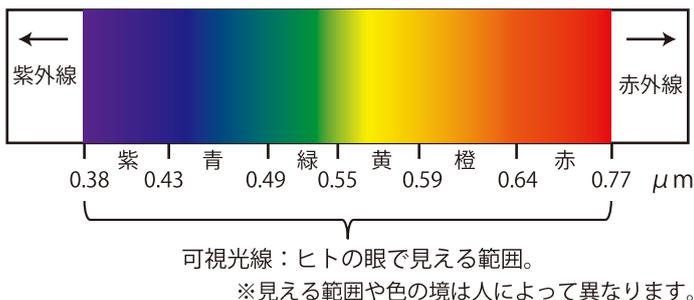


図6：色と波長の関係

Column

接頭語

c	m	μ	n	p	f
センチ	ミリ	マイクロ	ナノ	ピコ	フェムト
10^{-1}	10^{-3}	10^{-6}	10^{-9}	10^{-12}	10^{-15}
	k	M	G	T	P
	キロ	メガ	ギガ	テラ	ペタ
	10^3	10^6	10^9	10^{12}	10^{15}

赤外線よりもずっと波長が大きいものは、電波と呼ばれています。波長が約 0.1mm よりも長いものを電波と日本の法律では定義しているようです。携帯電話では、約 30cm の波長、デジタル放送では、約 $42\text{cm} \sim 64\text{cm}$ の波長の電波が用いられています。ラジオ放送では、約 4m の波長の電波です。

紫外線よりもずっと波長が短い、 $1 \times 10^{-12}\text{m} \sim 1 \times 10^{-8}\text{m}$ のものは X 線、 $1 \times 10^{-12}\text{m}$ より短いものは γ 線とよばれています。X 線はレントゲン写真に用いられています。

このように、眼に見える光、赤外線や電波、X 線などは、すべて電磁波と呼ばれる一つのもので、波長が異なっているものなのです。このように、異なっているかのようにみえるものに対して、一つの見方ができるようになったのは、マクスウェルが 1864 年に導き出したマクスウェル方程式のおかげです。

特に電波は、マクスウェル方程式から予言されたものであり、約 150 年の歳月を経て、いまは携帯電話の電波として日常生活で身近なものになっています。

6) プリズムと屈折

光は異なる物質に進むときに、進む向きが折れ曲がります。この折れ曲がりを屈折と呼びます。屈折により進む向きが変わる度合いは、波長によります。波長の短いものほど、大きく屈折し、波長の長いものほど、小さく屈折します。波長のかわりに色で言い換えると、赤色の光は小さく屈折し、紫色の光は大きく屈折します。この性質を利用して、分光する装置がプリズムです。

分光して得られた光の帯をスペクトルと呼びます。光の強さを量を表しますので、スペクトルをみると、何色がどのくらい含まれているのかを知る事ができます。

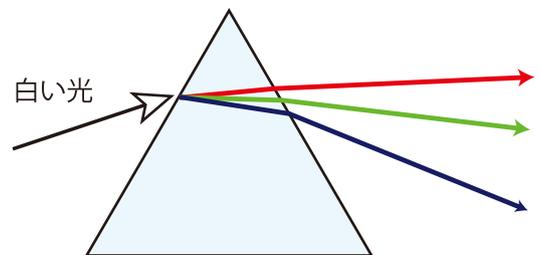


図7：プリズム。光がプリズムに入るところで、波長によって屈折する度合いが異なり、波長ごと、つまり光の色ごとにわかる。さらに、プリズムから出るときにも屈折し、光の色によって進む方向がわかる。

7) 光を感じる眼の仕組み

人の眼に入る光は、角膜を通り、水晶体でピントを調整されて、網膜に達します。網膜上に、光を感じる細胞が2種類あり、桿体（かんたい）と錘体（すいたい）と呼ばれています。桿体は明暗を感じ、錘体は色を感じます。錘体はさらに3種類の細胞にわかれており、赤錘体、緑錘体、青錘体と呼ばれています。それぞれが、光の特定範囲の波長に反応し、脳に信号を送りだします。

デジタルカメラの多くは、赤、青、緑の3種類のセンサーをもっています。また、テレビでも光を出している箇所を、虫眼鏡などで拡大してみると赤、青、緑の3種類からなっています。これらが3種類なのはヒトの眼が3種類の錘体からなっているからです。

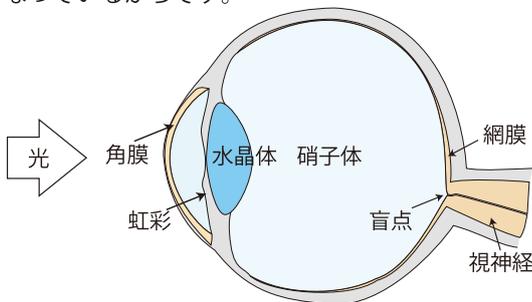


図8：人の眼を横からみたところ。

8) 分光シート（回折格子）

理学部案内の分光シートは、回折格子（かいせつこうし）と呼ばれているものです。回折格子には、透過型と反射型の2種類があります。いずれの型も表面に小さなギザギザが1mmに数百本刻まれています。理学部案内の分光シートは反射型で、ギザギザの部分では光が反射せず、平らの部分では光が反射します。詳しく反射型回折格子を見る前に、透過型の回折格子に光がまっすぐ入ってきたときについて説明します。

8) - 1 透過型回折格子

透過型の回折格子に入る光は、ギザギザの部分では光が透過せずに、平らな部分では、光が透過します。波は、波長と同じ程度の隙間を通ると、隙間を作っている壁の後ろに回り込むという性質（回折）があります。

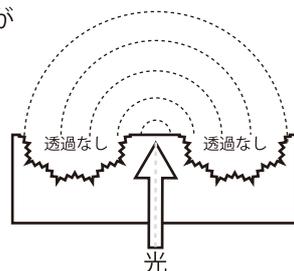


図9：回折。波長と同程度の大きさの隙間から出た光は広がる。図では、点線で波の広がる様子を表している。

回折格子では、ギザギザ部分と平面部分とが並んでいますが、光が通ってくる部分が複数有る場合には、光はどのような振る舞いを見せるのでしょうか？

隣り合う溝からの光が、波長の長さの整数倍だけずれていると、光の波の位相が同じになり強め合います。光の波長を λ 、光が回折格子を透過してまっすぐ進んだ向きからのずれを角度 θ とし、格子の間隔 d とすると、強め合うための条件は、

$$d \sin \theta = m \lambda \quad (m=1, 2, 3, 4 \dots)$$

と書けます。この条件から、ある決まった方向には、決まった波長の光のみが強め合うことがわかります。これが回折格子によって、光が分光される仕組みです。

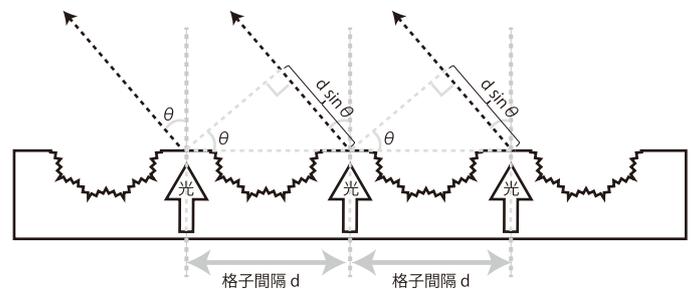


図10：位相が同じ波は強め合う。

8) - 2 反射型回折格子（理学部案内に付属）

理学部案内の分光シートは、反射型の回折格子といわれるタイプのもので、表面に1mmあたり約470本の溝が切られています。平らの部分では光は反射し、ぎざぎざの部分では光は反射しません。

角度 θ で入射した光は、平らな面で反射して角度 θ で出ていきます。このとき、可視光線は $0.38 \mu\text{m} \sim 0.77 \mu\text{m}$ ですので、溝の間隔 $d=2.1 \mu\text{m}$ とほぼ同じ程度の大きさです。

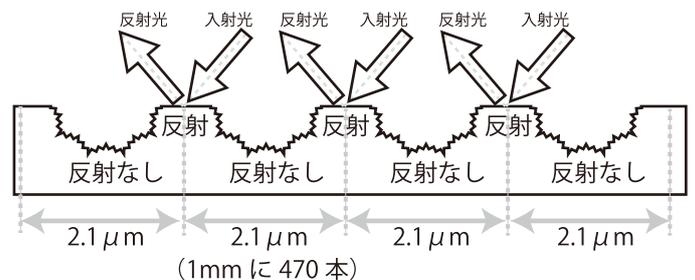


図11：理学部案内に付属の分光シート。

反射型の光の経路を追っていきましょう。先ほどとは異なり、反射型に斜めに光が入射した場合は、分光シートに達する前にも、隣合う光との経路差があることに注意しなければなりません。分光シートに垂直な線からの、入射した光の角度を α （アルファ）、分光されて出ていく光の角度を β （ベータ）とします。図 12 中の右側の光を光 A、左側の光を光 B とします。

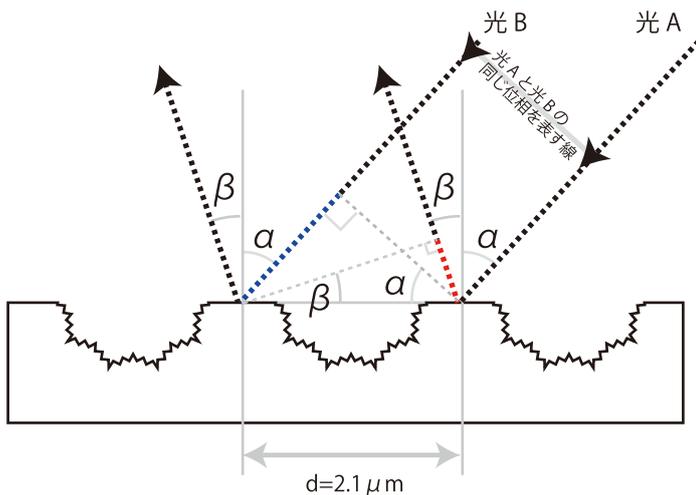


図 12：光 A と光 B とでは、光が進む距離が異なる。波長程度の物体からの反射では、透過の場合（図 9）と同じように波が広がります。

光 A は、光 B に対して、青点線の長さ $d \sin \alpha$ だけ先に分光シートに到達します。けれども、回折された光 A は、赤点線の長さ $d \sin \beta$ だけ光 B の回折された光より遅れます。よって、光 A と光 B の光の進む距離の差 L は、

$$L = d \sin \alpha - d \sin \beta = d (\sin \alpha - \sin \beta)$$

となります。この L が光の波長 λ の整数倍のとき、光は強め合います。これを数式で表すと、

$$d (\sin \alpha - \sin \beta) = m \lambda \quad (m=1, 2, 3 \dots)$$

となります。

例えば、角度 45 度で分光シートに入射した光 ($\alpha=45$ 度) で、波長の長さと同じだけずれている ($m=1$) の光は、青色光の波長 $\lambda=0.45 \mu\text{m}$ とすると、下記ようになります。

$$\sin \beta = \sin \alpha - \frac{m \lambda}{d} = \sin 45^\circ - \frac{1 \times 0.45 \mu\text{m}}{2.1 \mu\text{m}} = 0.49$$

これより、回折で分光された光は、分光シートに垂直な方向から $\sin \beta=0.49$ 、つまり 30 度の方向にできることがわかります。同様に、緑色光の波長 $\lambda=0.55 \mu\text{m}$ 、赤色光の波長 $\lambda=0.70 \mu\text{m}$ を代入すると、緑色は 26 度、赤色は 22 度の方向にできると計算できます。

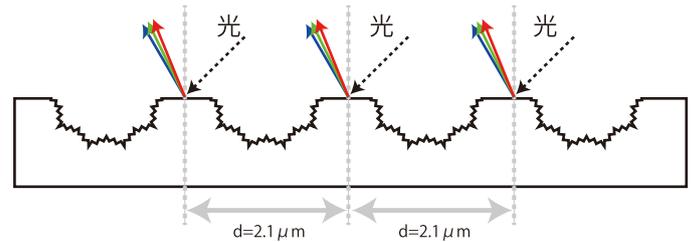


図 13：波長（色）により強め合う角度が異なる。

入射した光と、回折により分光された光を図示したのが図 13 です。

白熱電球、蛍光灯、水銀灯を分光した例を下記に示します。照明を分光してみると、照明の種類によって、その分光した結果は大きく異なります。光を詳しく調べること、含まれる物質を調べることができるのです。



水銀灯

蛍光灯電球色

白熱電球

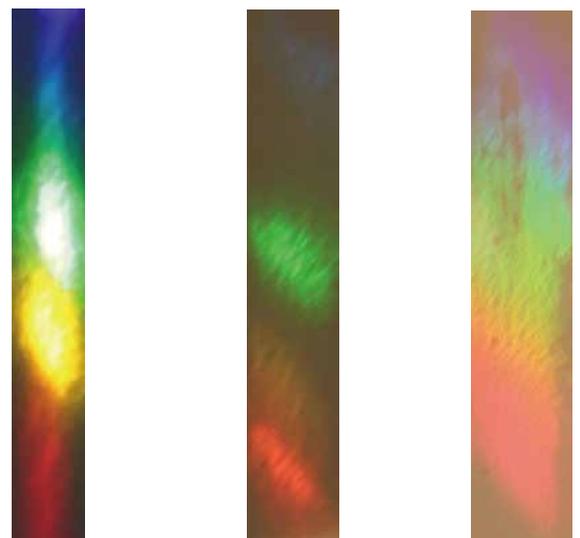


図 14：理学部案内の分光シートを使った観察例。観察時には 1 灯のみ点灯し、細い穴からのみ光が出るようにして分光シートに光を当て、デジタルカメラで撮影。

9) CD が虹色にみえるのも同じ

CD が虹色にみえるのも、CD が回折格子になっているためです。CD は、情報を記録するために溝があり、でこぼこの有る無しで、デジタルの1と0を表しています。この溝が、1mm あたり 625 本あります。溝ひとつの幅は、1.6 μm です。



図 15：CD も回折格子になっているので、虹色に光る。

10) 天文台の太陽観察用の回折格子

京都大学理学研究科附属花山天文台には、1mm あたり 1200 本もの溝が刻まれている高精細な回折格子があり、太陽の光を分光して、壁いっぱいには虹色の光を映し出します。この光の様子から、太陽活動の様子を知ることができます。

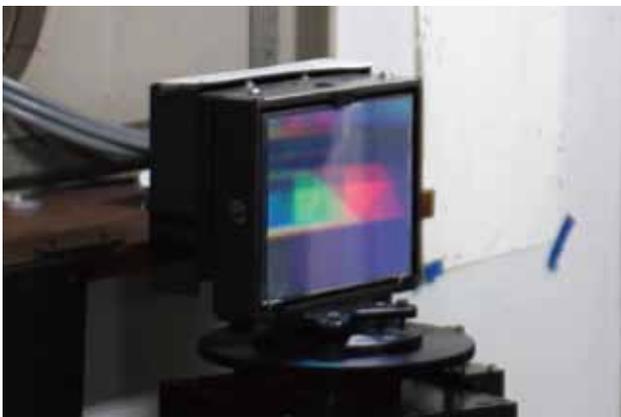


図 16：京都大学理学研究科附属花山天文台にあるシーロスタット望遠鏡に使われている回折格子。

11) X 線分光

理学部案内では、可視光線での分光を可能にする分光シートをつけていました。この中で、X 線分光は可視光線の分光と異なるという記述がありました。

それでは、X 線分光がどのように行われるか見ていきましょう。X 線分光には多くの種類がありますので、理学部案内で紹介されていた観測衛星すざく搭載の X 線分光について紹介します。

光は、波として性質をもつ一方で、粒子としての性質を持っています。光は 1 波長分の長さでもって、一粒だと考えることができます。波長が短いほど、一粒のもつエネルギーは大きく、波長が長いほどエネルギーは小さいです。可視光線に比べて、X 線の一粒は、ぐっとエネルギーが大きいです。

ところで、ビデオやデジタルカメラなどには、光を電気信号に変えるためのセンサー CCD (Charge Coupled Device) を搭載しています。可視光線では、このセンサーにあるひとつの素子に光を貯めて、電気信号に変えています。一粒のエネルギーが小さいので、何粒か貯めることによってでしか電気信号に変えることはできません。赤、青、緑に反応する素子を用意しておき、それぞれの色に入ったおおよそのエネルギーを電気信号に変えているのが可視光線 CCD です。

観測衛星すざくは X 線分光 CCD を搭載しています。X 線分光 CCD は、X 線が 1 粒で強烈なエネルギーをもつので、一粒ごとに電気信号に変えることができます。また、1 粒のエネルギーと電気信号の大きさに関係があるので、X 線一粒ごとに波長 (エネルギー) を測定することが可能なのです。このように、波長ごとに何発の X 線が来たのかを数えることができ、これでもって X 線分光と呼んでいるのです。

お問い合わせ先

京都大学大学院理学研究科 社会交流室
<http://cr.sci.kyoto-u.ac.jp>
 F A X : 075-753-3645
 電子メール : mail@cr.sci.kyoto-u.ac.jp

2012 年 7 月 1 日 第 1 版

執筆・写真・イラスト : 常見 俊直
 電子メール : tsunemi@sci.kyoto-u.ac.jp