

7 光の物理——光輪の正体は丸い虹なのか

波に関する物理の 2 回目として、ドップラー効果と光にまつわる話を紹介します。

7.1 ドップラー効果

救急車が近づくときや遠ざかるときに、聞こえる振動数が変化する。これは、音源が動くことによって、1 秒間に伝わる波の数が増えたり減ったり**ドップラー効果**と呼ばれる現象である。

法則 ドップラー効果

波源や観測者が移動することによって、本来伝わる波の振動数が大きくなったり、小さくなったりして観測される現象のことを**ドップラー効果**という。

- 音源と観測者が相対的に近づくとき、振動数は大きくなる。音波の場合は波源の出す音よりも高い音として聞こえる。
- 音源と観測者が相対的に遠ざかるとき、振動数は小さくなる。音波の場合は波源の出す音よりも低い音として聞こえる。

ドップラー効果
(Doppler effect)
Johann C. Doppler
(1803–53)

ドップラー効果で議論しているのは、音の高低の変化、すなわち振動数の変化である。音が大きくなったり小さくなったりするのは、音波の振幅の変化の影響であり、ドップラー効果ではない。

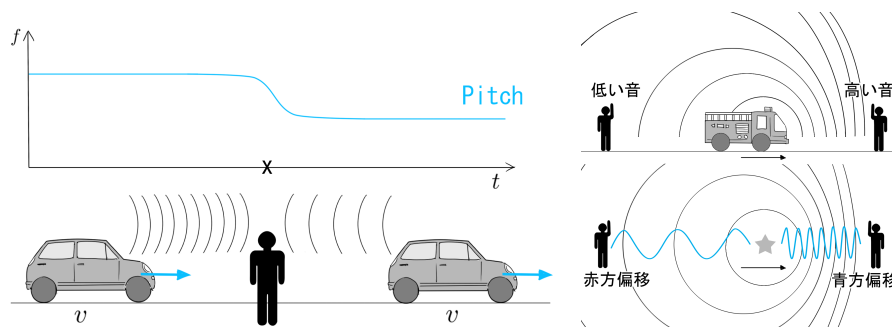


図 1: ドップラー効果.

Advanced ドップラー効果の式

音速を V [m/s], 音源の移動速度を V_S [m/s], 観測者の移動速度を V_O [m/s] とする。音源の音の振動数を f_0 [Hz], 観測者の受け取る音の振動数を f' [Hz] の間には,

$$f' = \frac{V + V_O}{V - V_S} f_0 \quad (1)$$

が成り立つ。 V_O と V_S の前の符号 (+, -) は、互いに近づくときの符号である。互いに離れるときは符号を逆にすればよい。

Topic

スピード測定器

野球でピッチャーが投げたボールの速さがすぐに表示されたり、自動車のスピード違反を検出したりするために使われているスピード測定器の原理は、ドップラー効果である。10¹⁰ Hz の電波（マイクロ波）を移動物体に当てて、その反射波をとらえることで、移動物体の速度がわかるしくみである。

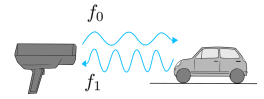


図 2: スピード違反の取り締まりはドップラー効果で、 $f_0 < f_1$ となるが、その変化の割合からスピードがわかる。

■光のドップラー効果

音だけではなく、光でもドップラー効果は生じる。次節で説明するが、光の振動数は色に対応している。したがって、

- 光源と観測者が相対的に近づくとき、波源の出す光よりも青色側に変化して観測される（**青方偏移**という）。
- 光源と観測者が相対的に遠ざかるとき、波源の出す光よりも赤色側に変化して観測される（**赤方偏移**という）。

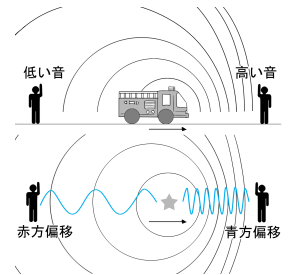


図 3: 光のドップラー効果。

青方偏移 (blue shift)
赤方偏移 (red shift)

Topic

宇宙膨張の発見は星の色のドップラー効果

宇宙全体が膨張していることの発見は、1920 年代の終わり、ルメートルやハッブルによって報告された。遠方の星や銀河を観測すると、遠方のものほど本来の色より赤方偏移していることがわかり、宇宙全体は風船がふくらむように、全体が膨張していることが明らかになった。

アインシュタインは、自らが創り上げた一般相対性理論の式が、宇宙は膨張しているという答えを出していたのにも関わらず宇宙膨張説には懐疑的だったが、観測結果を知ってようやく宇宙膨張を認めるようになったという。

Georges-Henri Lemaitre (1894–1966)
Edwin Powell Hubble (1889–1953)
Albert Einstein (1879–1955)

問題と研究

- 問 7.1 時速 90km で走る救急車が 960 Hz と 770 Hz の音でサイレンを出している。救急車が近づくときと遠ざかるとき、止まっている人が聞く周波数はいくらか。音速を 340 m/s とする。
- 問 7.2 私たちの銀河系の隣にあるアンドロメダ銀河は青色偏移している。何を意味しているか。
- 研 7.1 「遠方の銀河ほど赤方偏移している」というのが宇宙膨張の発見の理由であるが、「遠方の銀河ほど赤い星が多い」と考えなかった理由は何だろうか。

7.2 光 — 色の正体

普段直接感じることはないが、光も波である。色の違いは波長の違い、屈折や反射、重ね合わせや干渉など波のもつすべての性質を観察することができる。

7.2.1 電磁波の分類

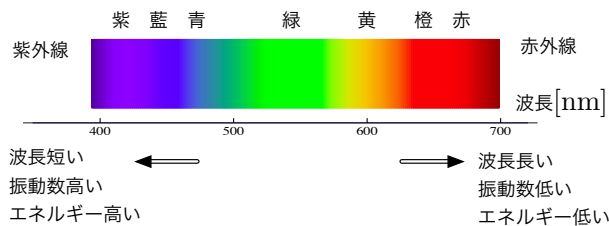
光は電磁波である。光の速度は一定で約 30 万 km (正確には 299792458 m/s) であり、光速には c の文字を使う。

光速 c は常に一定
 \Rightarrow §1.3.2

- 人間の目に感じるすることができる光を**可視光**と呼び、赤い色から青い色まで分布する。振動数が大きいと（波長が短いと）光は青く、エネルギーも高い。逆に振動数が小さいと（波長が長いと）光は赤く、エネルギーは低い。
- 青い光より振動数が大きい光を**紫外線**、逆に赤い光より振動数が小さい光を**赤外線**という。赤外線領域には電波がある。紫外線領域にはレントゲン線がある。

紫外線
 (ultraviolet rays)
赤外線
 (infrared rays)

波の速さの式 (2) は、光の場合 $c = f\lambda$ となる。 f は振動数、 λ は波長である。



	宇宙線	ガンマ線	X線	光			電磁波							
				紫外線	可視光線	赤外線	マイクロ波	超短波	短波	中波	長波	超長波		
波長[m]	10^{-13}	10^{-10}	10^{-9}	3.8×10^{-7}	7.7×10^{-7}	10^{-4}	1	10	10^2	10^3	10^4			
波長[nm]				380	770									
振動数[Hz]		3×10^{18}	3×10^{17}				3×10^{12}	3×10^8	3×10^7	3×10^6	3×10^5	3×10^4		
利用例		医療／食品照射	医療／X線写真	殺菌	光学機器	赤外線写真	携帯電話	電子レンジ	テレビ	F M ラジオ	短波ラジオ	A M ラジオ	電波時計	飛行機の通信

図 4: 〔上〕可視光の範囲 (カラーページ参照) 〔下〕可視光を含めたさまざまな電磁波の分類。

コラム 17 (紫外線)

紫外線を浴びることは骨を作るのに重要なビタミン D の生合成という良い面をもつが、長時間・大量に浴びると肌に影響を与える。

- 可視光より少し波長が短い紫外線 A(UVA) は、肌の奥まで侵入し、肌を黒くする日焼け (サンタン)、しわ、たるみ (光老化) の原因となる。日焼け止めの PA 値 (Protection grade of UVA) は、UVA を、どれほど防ぐかを示す。「PA+/PA++/PA+++」の順に効果が高くなる。
- UVA よりさらに波長の短い紫外線 B(UVB) は、強いエネルギーで肌表面の細胞を傷つけ、肌を赤くする日焼け (サンバーン) や皮膚癌の原因となる。日焼け止めの SPF 値 (Sun Protection Factor) は、UVB を、個人にとって何倍の時間防ぐかを示す。日焼け止めを塗らずに、20 分紫外線を浴びれば日焼けする人の場合、SPF15 は「 $20 \times 15 = 300$ 分 (5 時間)」紫外線 B を防いでくれる。SPF 値が高いほど肌への刺激も大きいので、単純に大きければ良いというわけではない。
- さらに波長の短い紫外線 C(UVC) は、生物に大きなダメージを与える。地球を取り巻くオゾン層は、宇宙線による UVC 被曝を防ぐ働きをしている。

7.2.2 色

ニュートンは、プリズムを通すと、太陽の**白色光**はさまざまな色に分割できることを発見した。このように光を分割することを**分光スペクトル**といい、分割された光を**スペクトル光**という。

ニュートンは、さらに次の事実を発見した。

- 白色光を分光し、再び重ねると白色になる。
- 白色光を分光し、赤色の光を除いて再び重ねると緑色になる。
- 白色光を分光し、緑色の光を除いて再び重ねると赤色になる。

このようにして、赤色と緑色は、**補色**の関係にあることがわかってきた。太陽光は分光するが、自然界には**単色光**もある。例えば、高速道路のトンネルで使われているナトリウムランプのオレンジ色の光は単色光である。(運転者の目に負担がかからないように、オレンジ色を使っているそうだ。) 赤は**単色**の場合もあり、**混色**の場合もある。他の色も同様である。

なお、光自体に色彩はなく、あくまでも色彩は、網膜の感覚器官に光が反応して認識される。「赤い光」が存在するのではなく、人間に「赤と認識される光」が存在すると考えるのがよい。

■色彩の客観的な表示

色彩を指定するためには、3 種類の情報を指示する必要がある。

- **色相 (色, Hue)** .
- **明度 (明るさ, Brightness/Value)** . 反射率の高さ。白がもっとも明るく、黒がもっとも暗い。
- **彩度 (鮮やかさ, Chroma)** . 色彩に混じる白や灰色の成分。

白色光 (white light) スペクトル (spectrum)

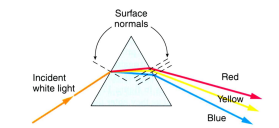


Figure 17.13 Light rays passing through a prism are bent at both surfaces, with blue light being bent more strongly than red.

図 5: 白色光はプリズムを通すと分光する。

補色 (complementary color) 単色光 (monochromatic light)



図 6: 色相, 明度, 彩度 (カラーページ参照)

■ 3原色

もっとも基本的な色は3つに絞られることが知られている。

- **光の3原色は、「赤、緑、青」(RGB; Red+Green+Blue)**。3色を重ねると白色になる。明るさも増す。光の混色は**加法混合**(加法混色, 加算混合)という。

テレビやディスプレイなど発光体の色の基本である。

- **色彩の3原色は、「赤、青、黄」**。3色を重ねると黒色になる。明るさは減る。色彩の混色は**減法混合**(減法混色, 減算混合)という。インクや絵の具など、元の光を遮る形で反射して色を識別させる場合の基本である。印刷業界では、シアン(澄んだ青緑色), マゼンタ(ピンクに近い紫), イエローと黒, すなわちCMYK(Cyan+Magenta+Yellow+Key)の4色が利用される。実際の印刷順は, YMCKの順になる。

Topic

青色LEDの発明

2014年のノーベル物理学賞は、「高輝度でエネルギー効率のよい白色光を実現する青色発光ダイオード(LED)の開発」の業績で、赤崎勇、天野浩、中村修二の3氏が受賞した。この3氏は、青色LEDの開発と量産化に貢献したのだが、ノーベル財団は、青色LEDが完成したことによって、それまでにできていた赤色LED、緑色LEDと合わせ、光の3原色がそろったことを『人類に最大の利益をもたらす発明』と評価した。

■ RGB 表色

原色をR(赤、700nm), G(緑、546.1nm), B(青、435.8nm)とする表色系が、パソコンにて最も多く用いられている。1色ごと0~255階調で、その組み合わせは、 $256^3 = 1677$ 万7216色になる。

なお、RGB表示では知覚できる色を完全に合成できないことも知られている。図9は、知覚できる色の領域の中で、RGB表示できる部分を三角形で示したものである。

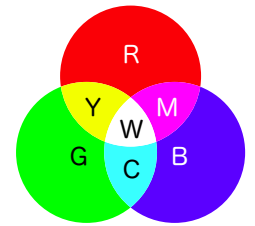


図7: 光の3原色 [加法混色 (RGB)]. [カラーページ参照]

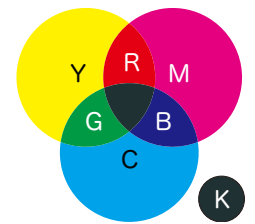


図8: 色彩の3原色 [減法混色 (CMYK)]. [カラーページ参照]

LED ⇒ 114 ページ

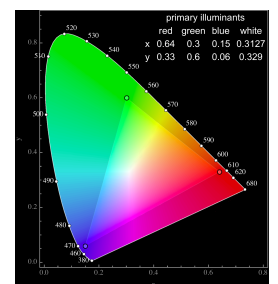


図9: CIE (国際照明委員会)のxy色度図. [カラーページ参照]

問題と研究

研 7.2 あなたが考える赤色と、隣人が考える赤色が同じ色かどうか、判定することはできるだろうか。赤色という色の名前は、教育されて知ることだが、感じる色バランスには個人差があるのだろうか。(著者にとって長年の謎なので、研究課題とした(笑)).

研 7.3 人間の色彩感覚と補色の関係について調べてみよう。

7.3 光の屈折・反射 — 虹のしくみ

光も波であるから、反射・屈折・回折現象を引き起こす。

■反射の法則, 屈折の法則

屈折の法則は (3) で示したが、もう一度記しておこう。

$$\frac{\sin \theta_0}{\sin \theta_1} = \frac{v_0}{v_1} = \frac{\lambda_0}{\lambda_1} = \frac{n_1}{n_0} = n_{01} \quad (3)$$

屈折率 n は、真空中での値を 1 としたときの、その媒質の「進みにくさ」を表す。空気の屈折率は 1.000270 (20 °C のとき)、水は 1.33, ガラスは 1.5 程度である。図 10 では、上側が空気で下側が水あるいはガラスと考えよう。

屈折が起きるのは、光の速度が遅くなるからだ。屈折率 n の物質中では、光の速度は c ではなく c/n になる。水中ならば真空中の約 3/4 になる。ホイヘンスの原理 (⇒§6.1.3) から、波は素元波の速度が遅くなる方へ屈折する。したがって、光は屈折率の大きな物質に向かって進む。

プリズム (ガラス) で光が分光するのは、光の波長 (色) ごとにわずかに屈折率が異なってくるからである (図 11)。

Topic 蜃気楼と逃げ水

空気の屈折率は、温度が上がるとわずかに下がる[†]。冬の海は海水温が低く、海の近くの空気の屈折率は高い。したがって、光は上向きに凸の形で進むことになる。遠方の海岸線の光景が浮き上がったり反転したりして見える蜃気楼の発生は、屈折率の違いによって光が曲がって進むからである。

夏の舗装道路や砂漠の表面では温度が高く、このようなときは逆に、光は下向きに凸の形で進む。「逃げ水」と呼ばれる現象は、遠くの道路を見たときに、上から屈折してきた光が反射して加わっているように見える現象である。近づくとこの反射がなくなって水が逃げたように見える。

Topic プールに入った人の足が短く見えるのは

私たちの目は、光が届く方向 (見かけの角度) を基準にして距離を把握している。誰かがプールに立っている時、足先から出た光は屈折してきているが、見た人は、光は直進して届いたと誤解してしまう。水の上に出ている頭と接続して映像にすると、短足に見えてしまうのである。

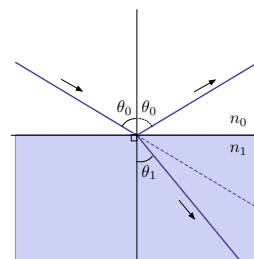


図 10: 反射と屈折。
(図 14 と同じ)。

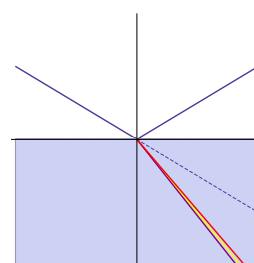


図 11: 正確には光の波長 (色) ごとに屈折率が異なる。

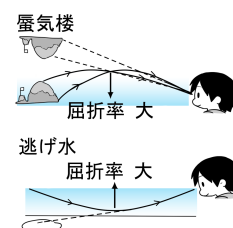


図 12: 蜃気楼と逃げ水



図 13: グラスに入れた
箸の屈折

■全反射

光が屈折率の大きい媒質から小さい媒質へ入射するとき、入射角によっては屈折角が90度になることがある。この角度を**臨界角**という。(3)より、臨界角 θ_c は、 $n_0 = 1$ とすれば、

$$\sin \theta_c = \frac{1}{n_1} \quad (2)$$

で与えられる。水($n = 1.33$)の場合、 $\theta_c = 49$ 度程度である。臨界角を越えると、光はすべて反射する。これを**全反射**という。

臨界角 (critical angle)
全反射
(total reflection)

Topic 全反射を利用した光ファイバー

家庭用のインターネット回線に、光ファイバーが普及してきた。光を全反射させながら遠方へ情報を伝えるケーブルである。従来の電話線と異なり、多くの光を重ねて通信できるので、格段に送受信できる情報量が増えるメリットがある。ただし、ケーブル内で全反射を繰り返すためには、光ファイバーは決して折り目をつけてたたくてはいけない。

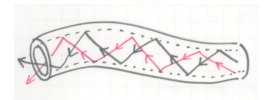


図 14: 光ファイバー。

Topic 魚眼レンズ

水中から水面より上を見上げると、光の屈折により、見込んだ角度よりも大きな範囲の光が目に入ることになる。魚から見ると、上から狙っている人間がよく見えている、ということだ。このような映像を写すレンズが魚眼レンズである。やや歪むが空一面を撮影することができる。

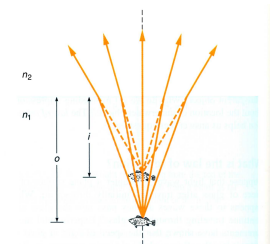


figure 17.9 Light rays coming from the fish are bent as they pass from the water to air, so that the rays appear to diverge from a point closer to the surface.

図 15: 魚眼レンズ (fisheye lens)

コラム

コラム 18 (虹の色は何色?)

私たちは、虹は7色だと思っている。しかし、それは幼い頃、親からそう教わったからだ。虹の色は、太陽の光(合成された白色光)がプリズム分光されたものと同じなので、波長によってさまざまに、数えられないくらいのグラデーションになっている。

虹の色を何色と数えるか、は文化によって異なるようだ。言語圏によっては5色、4色とするところもあるという。イギリスでは6色と数えるのが普通だが、ニュートンは7色と数えたようだ。

表 1: 虹の色の区別。鈴木孝夫『ことばと文化』(岩波新書、1973年)より。

日本, フランス	7色	赤, 橙, 黄, 緑, 青, 藍, 紫
イギリス, アメリカ	6色	赤, 橙, 黄, 緑, 青, 紫
ドイツ	5色	赤, 黄, 緑, 青, 紫

■虹のしくみ

雨上がり，強い太陽光が空気中に漂う雨粒に反射して虹が見える．これは光は雨粒内を「屈折・反射・屈折」して私たちの目に届くからだ（図 17〔上〕）．もっとも光が強く反射するのは，太陽光線の入射方向から 42 度の向きになる．色によって反射角は少しずつ異なり，これらの光が目に入るときには，外側が赤・内側が紫色の虹として見えることになる（図 17〔下〕）．

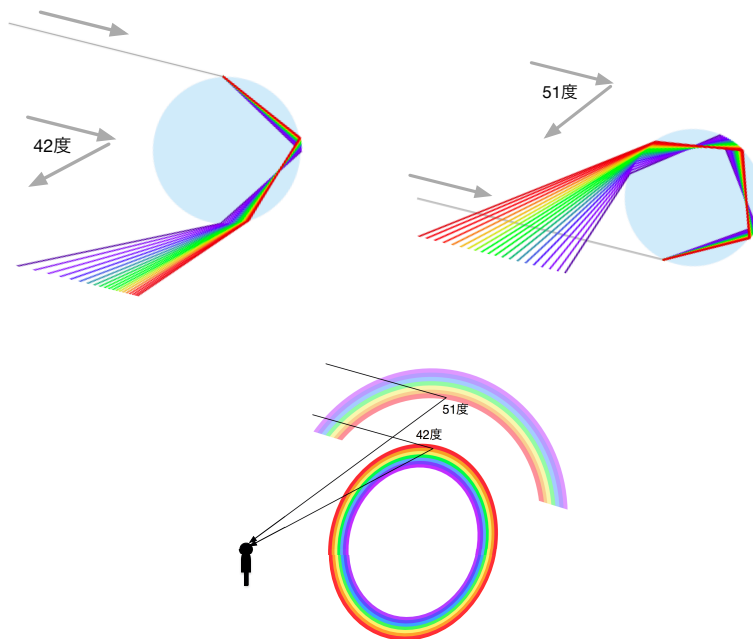


図 17: 〔上左〕主虹をつくる光の経路．太陽光線から 42 度の方向が最も強い反射光になる．〔上右〕副虹をつくる光の経路．51 度の方向が最も強い．〔下〕条件がよければ，主虹の外側に色の順が逆転した副虹が見えるはず．山の上ならば，円形の虹が見える可能性がある．

雨粒内を 2 回反射して私たちの目に届く光の経路も考えられ（図 17〔上右〕），こちらは反射角が 51 度の向きになる．色の順も逆になって，やや薄い虹が外側に見えることになる（図 17〔下〕）．これが副虹である．

Topic

ブロッケン妖怪 = 阿弥陀如来の光輪

霧に囲まれた山の中で背後から陽の光が射すと，自分の前には虹色の光の輪に囲まれた影が出現する．影は自分と同じように手を振る．ドイツのブロッケン山 (Brocken) では妖怪としてと恐れられていた．日本では，阿弥陀如来が出現して御光がさしたとありがたがられている．



図 16: 半円を描く主虹と副虹（長谷川能三氏提供）（カラーページ参照）



図 18: 後光がさして光輪に囲まれた妖怪．

7.4 光の散乱・偏光・干渉

■光の散乱

太陽から地球に届いた光線は、空気中の分子と衝突して一部は散乱してしまう。**レイリー散乱**と呼ばれるこの現象は、波長が長いほど散乱されやすい（正確には、散乱される確率は波長の4乗に反比例する*）。

Topic 朝焼け・夕焼けの空が赤いのは？

昼間の空を見上げると、波長の短い紫や青色の光がたくさん散乱されている。だから空は青い。（紫色の空になりそうだが、人間の視覚細胞が青色に感度が高いため、青く見える。）雲が白いのは、水滴の粒子が大きくて太陽光のどの色もほぼ同じ割合で散乱するからである。

逆に朝や夕方は、太陽からの光は、昼間よりも長く空気中を通過して私たちの目に届く。そうすると、先に散乱された青い光は遠いところにあり、手前には赤色が多く散乱されることになって空が赤く見えることになる。

Topic 昼間に見える白い月？ 皆既月食で赤く見える月？

上弦の月は昼間に出て深夜に沈む。午後には白い月が見える。これは、月からの光の色と青空の色が重なるためである。夜は無色の空を通過するので、黄色味を帯びた月になる。

満月で輝く月が地球の影にすっぽり入ると皆既月食になる。皆既中の月はうっすらと赤い。これは、地球の大気で屈折した光が月にあたり、その反射光を見ている現象である。赤くなるのは、大気を通過する距離が長く、夕焼けや朝焼けと同じように赤い色の光だけが残っているからだ。

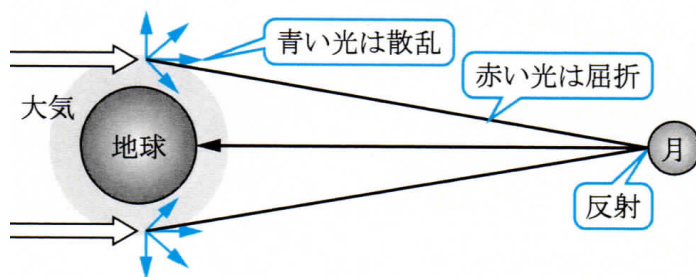


図 21: 皆既月食が赤く見えるのは、地球の大気を長く通った光の反射を見ることになるから。

散乱

(scattering)

レイリー散乱

(Rayleigh scattering)

John W.S. Rayleigh
(1849–1919)

* 可視光線の赤色と紫色とでは波長が 1.8 倍違うので、紫色の光の方が、 $1.8^4 = 13$ 倍も散乱される。

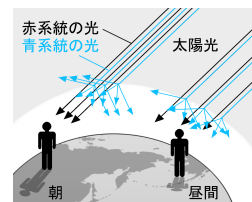


図 19: 朝焼け・夕焼けの空が赤い理由。



図 20: 皆既月食のときの月（樋谷則夫氏提供）
(カラーページ参照)

■光の干渉（2重スリット）

光は波であるので、音や水の波と同様、干渉して、強め合ったり弱め合ったりする。2つのスリットを通った光は回折し、スリットから同心円状に広がっていく。2つのスリットからの距離に応じて、光の波の山と山が重ね合うときは強め合い（光り）、山と谷が重なるところでは弱め合う（暗くなる）。結果として暗線がみえることになる。干渉条件は75ページで説明したことがそのまま成立する。

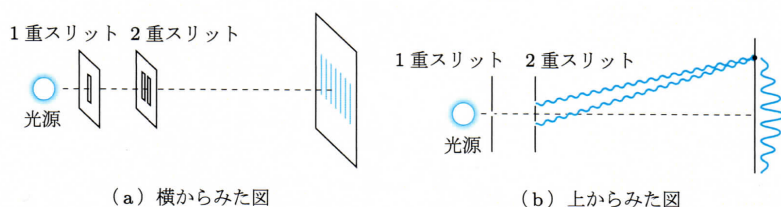


図 23: 光の2重スリット実験（ヤングの干渉実験）。

光の2重スリット実験

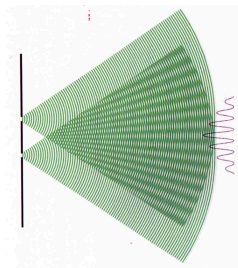


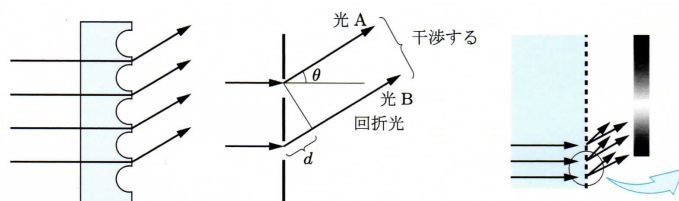
図 22: 2重スリットからの光の干渉。

■回折格子

ガラス板の片面に、等間隔で細い筋を平行につけたものを**回折格子**という（実際には、1 cm あたり 400~10,000 本程度の割合で溝を等間隔に刻んだ回折格子をつくる）。筋を付けられていないところを通る光が多重スリットの役割をして、光の干渉縞を作り出す（図 24 [左]）。実際には、回折格子を抜け出て屈折する光の角度は、光の色（波長）によって若干異なる。そのため、角度によって強めあう色合いは少しずつ異なり、結果として虹のように色が分光して見えることになる。

回折格子 (diffraction grating)

図 24(b) の経路差 d が半波長の整数倍となる角度 θ 方向に光が強めあって、分光したの見える。



(a) 平行光線の入射 (b) 干渉条件は角度で決まる (c) 分光する結果

図 24: 回折格子 (a) 等間隔の平行光線のみ格子を抜け出せるしくみ (b) 干渉して強めあう角度がいくつか生じることになる (c) 回折格子を抜け出て屈折する光の角度は光の波長によって異なるため、分光した光が観測できる。

Topic

CD や DVD の記録面が虹色に光って見える

CD や DVD の記録面が虹色に光って見えるのも、回折格子の原理である。デジタルの 0 か 1 かを記録する面が等間隔に細かくならんでおり、光が反射することによって分光効果が得られているのだ。

■偏光

光は横波である。太陽光や電球から出た光は、進行方向に対して横向きに（あらゆる方向に）振動している。このような光を**自然光**という。光を偏光シートに通すと、横向きの振動のうち、結晶構造に沿った1つの方向のみに振動する光を抽出できる。このように振動の向きが偏っている光を**偏光**という。

偏光
(polarization)
自然光
(natural light)

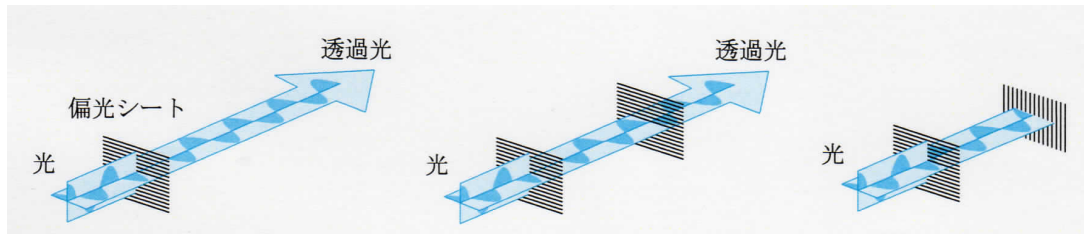


図 25: [左] 偏光シートは光の偏光方向を選び出す。[中/右] 偏光シート 2 枚を通過するときは、偏光方向が合わないと通過できない。

Topic 立体映像を見せる偏光板メガネ

人間は左右の目の受け取る光のわずかな角度差で立体感覚をもつ。映画館などで配られる立体映像視聴用のメガネのなかには、偏光板を利用したものがある。偏光の向きを縦方向と横方向に分けて右目用と左目用のレンズ代わりにする。そうすると、もとの映像に右目用の画像と左目用の画像を混ぜておいても分離されて目に届くしくみだ。



図 26: 偏光板を用いた 3D 映画のメガネ。

Topic 液晶のしくみ

電卓などの液晶は、90 度ずつ違いにずれた偏向板の間に液晶分子を 90 度ねじれて配置したしくみになっている (図??)。液晶分子に沿って光は通るのでスイッチを入れる前の液晶画面は透明である。しかし、電源を入れると液晶分子は一直線にならぶため、光は 2 枚の偏向板を通り抜けることができなくなり、黒い色になる。

液晶 (liquid crystal)

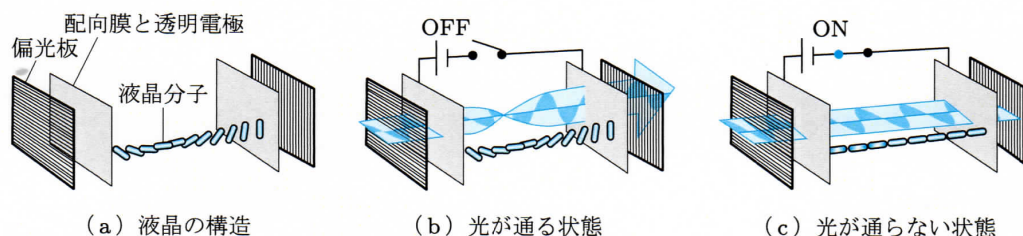


図 27: [左] 液晶分子は 90 度ねじれて配列されている。[中] 電源 off だと、光は曲がり、偏光板を通過して白色になる。[右] 電源 on だと、分子がそろい、光が通過できず黒色になる。

7.5 顕微鏡, 望遠鏡

■凸レンズ

虫眼鏡でおなじみの凸レンズは、レンズの中心が膨らんだ形をしている。光軸（レンズの中心を通り、レンズ直交する軸）に平行に入射した光は、すべて焦点 F を通過する。

凸レンズを通った光は、再び集光して像を結ぶ。凸レンズを通過した先にスクリーンを置くと、倒立実像が結ばれることがわかる。人間の目もカメラもこのしくみを利用して、映像を取得している。

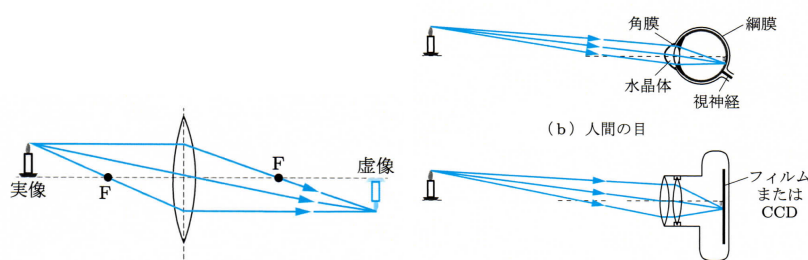


図 29: 凸レンズを通過した光による倒立実像。人間の目もカメラも同じしくみ。

■虫眼鏡

凸レンズを通して実物を覗き込むと、拡大された像として目に映る。この像は実際には光が集まっているわけではないので、虚像という。

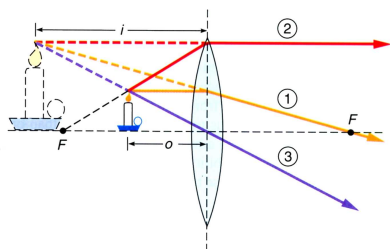


figure 17.17 A magnified virtual image is formed when the object lies inside the focal point of a positive lens. The emerging light rays appear to diverge from a point behind the object.

図 30: 虫眼鏡のしくみ 凸レンズを通して実物を覗き込むと、拡大された像として目に映る。

■望遠鏡・顕微鏡

凸レンズ（対物レンズ）を通過して結像したものを、別の凸レンズ（接眼レンズ）で覗き込むと、遠方のものが拡大された像として目に映る。これが望遠鏡や顕微鏡の原理である。

凸レンズ (convex lens)
光軸 (optical axis)
焦点 (focal point)

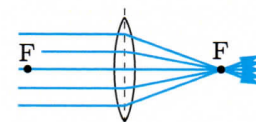


図 28: 光軸に平行な光線は、凸レンズを通過すると焦点 F に集まる。

実像
(real image)

虚像
(virtual image)

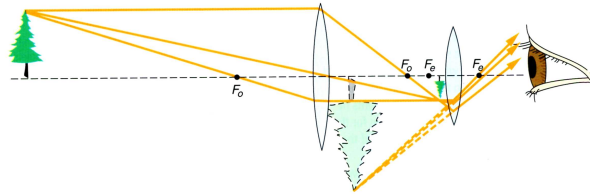


figure 17.29 The objective lens of a telescope forms a real, reduced image of the object, which is then viewed through the eyepiece. The real image is much closer to the eye than the original object. (Not drawn to scale.)

図 31: 望遠鏡や顕微鏡のしくみ 凸レンズ（対物レンズ）を通過して結像したものを、別の凸レンズ（接眼レンズ）で覗き込むと、遠方のものが拡大された像として目に映る。

■凹レンズ・凹面鏡

凹レンズを通る平行光は、あたかも焦点 F から出発した光のように広がりをながれ進む。そのため、凹レンズを通して実物を覗き込むと、縮小された像として目に映る（図 32）。

凹レンズ

(negative lens, concave lens)

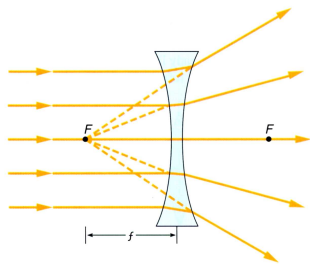


figure 17.18 Light rays traveling parallel to the axis are bent away from the axis by a negative lens so that they appear to diverge from a common focal point F .

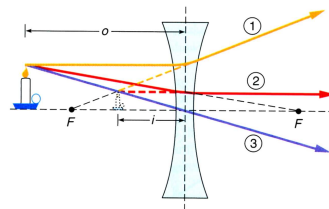


figure 17.19 Three rays are traced from the top of an object to locate the image formed by a negative lens. The virtual, upright image lies on the same side of the lens as the object and is reduced in size.

- (a) 光軸に平行な光線は、凹レンズを通過すると焦点 F から出発したように進む。
 (b) 焦点より外側に置いた物体の像は縮小されて映る。

図 32: 凹レンズを通る光線 F は焦点である。

凹レンズ面のような形状の（正確には放物線形状の）鏡（**凹面鏡**）に平行光線を当てると、手前の焦点に集光する。衛星放送を受信するときのパラボラアンテナは、このような原理を使って、微弱な電波を 1 点に集めている（図 33）。

凹面鏡

(concave mirror)

Topic

鏡は左右を逆転させるのに上下を逆転させないのはなぜ？

よくたずねられる質問だが、これは質問自体が間違っている。鏡は左右を反転させる像を映すのではなく、前後を反転させて映している。自分の像を鏡を見て、自分の右手を上げると像の自分が左手を上げているように思うのは、頭の中で反射像の自分に向きを変えて解釈してしまうからだ。手を鏡に近づければ、像は手を前に出す。反射像の背景は動かずに同じ側であることから、前後反転であることがわかる。

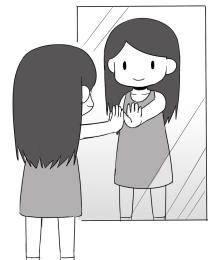


図 34: 鏡が上下を逆さにしないのはなぜ？

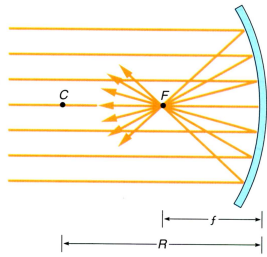


figure 17.20 Light rays approaching a spherical concave mirror traveling parallel to the axis are reflected so that they all pass approximately through a common focal point F . The focal length f is half the radius of curvature R .

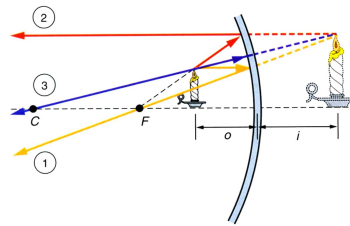


figure 17.21 Three rays are traced from the top of the candle placed in front of the mirror. Extending the reflected rays backward locates the top of the image behind the mirror.

- (a) 平行光線を当てると焦点に集光する。
 (b) 焦点より内側に置いた物体の像は拡大されて映る。

図 33: 凹面鏡を通る光線 C は鏡の中心, F は焦点である。

コラム 19 (フェルマーの原理)

屈折の法則が成り立つ説明として、フェルマー (Pierre de Fermat, 1607–1665) は、「光の経路は、2点を結ぶ光学的な距離が最短になるように選ばれる」という原理を発見した。言い換えると、「光は2点間を最短時間で結ぶ経路を選ぶ」となる。この話は次のような問題に例えてもよい。

「海水浴の監視員が浜辺から a の距離にいる。彼が、自分から見て右に b 、浜辺から c の距離におぼれている人を発見した。最短時間で救助するためには、どのような経路で向かえばよいか。ただし、彼が砂浜を走る速さは、泳ぐ速さの $n (> 1)$ 倍である。」

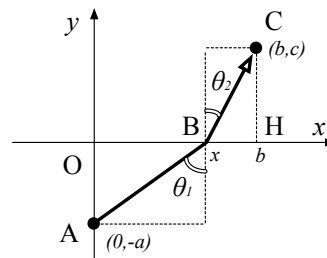
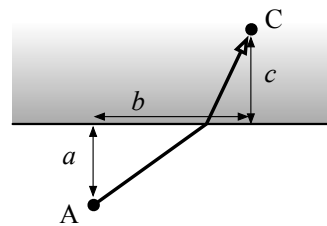


図 35: AC 間を最も短時間で到達する B 点の求め方は?

泳ぐより走る方が速いので、監視員は少し砂浜を長く走り、ある地点から泳いでゆくことになる。厳密に最短時間となる経路を計算すると、出てくる答えは屈折率 n の媒質へ入射する光の経路と同じものが得られる。

数学では、平面上の2つの点を結ぶ最短経路は直線である、と習う。しかし、曲面上では、最短経路の候補は、直線概念を拡張した測地線として得られる。ブラックホールや宇宙の時空構造を議論する一般相対性理論は、『光は曲がった空間での測地線を進む』という原理に基づいて構築されている。

カラー図版.

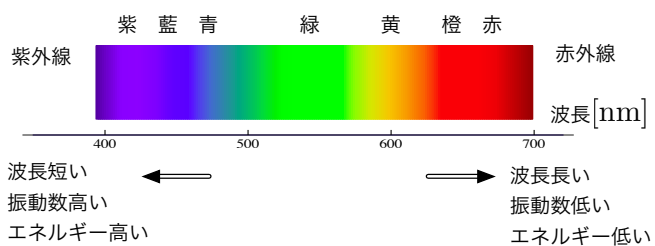


図 7.4 可視光の範囲.

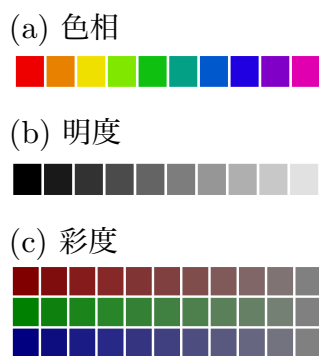


図 7.6 色相, 明度, 彩度

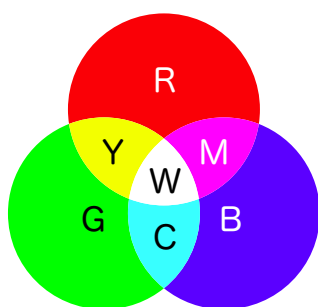


図 7.7 加法混色 (RGB/赤 + 緑 + 青).

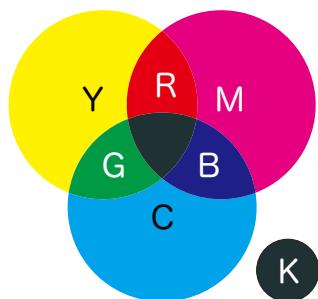


図 7.8 減法混色 (CMYK/シアン + マゼンタ + 黄 + 黒).

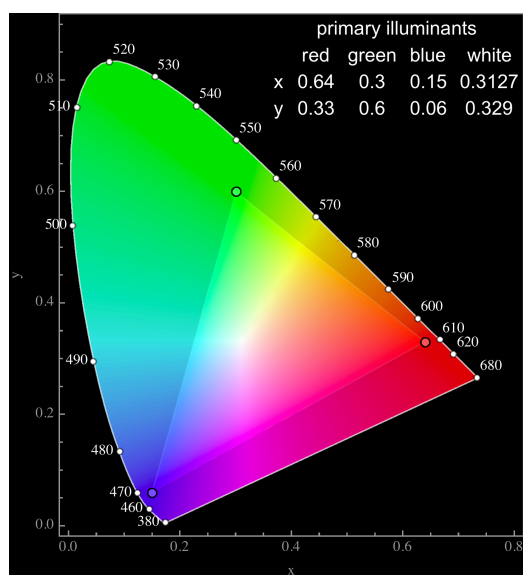


図 7.9 CIE の xy 色度図.

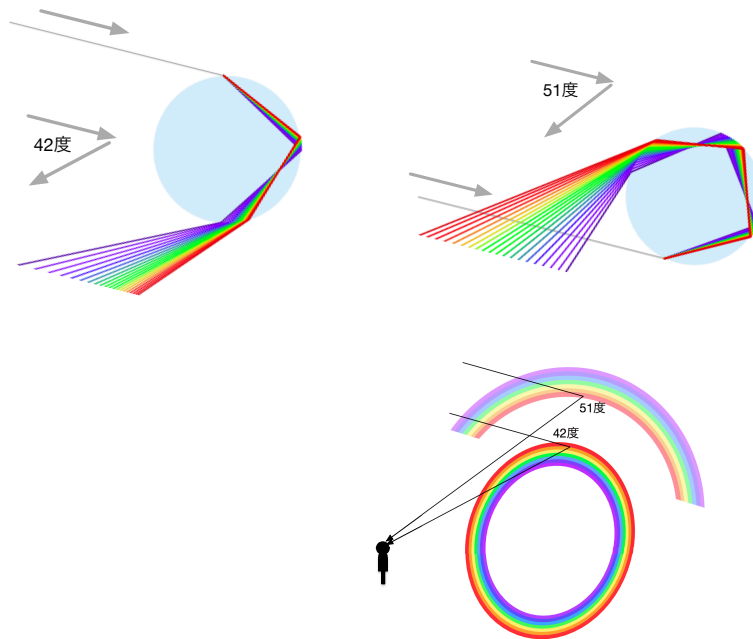


図 7.17〔上左〕主虹をつくる光の経路。太陽光線から 42 度の方向が最も強い反射光になる。

図 7.17〔上右〕副虹をつくる光の経路。51 度の方向が最も強い。

図 7.17〔下〕条件がよければ、主虹の外側に色の順が逆転した副虹が見えるはず。山の上ならば、円形の虹が見える可能性がある。



図 7.16 半円を描く主虹と副虹 (©長谷川能三)



図 7.20 皆既月食で赤く光る月 (©槌谷則夫)