

こんなところが物理学

真貝寿明 (大阪工業大学, 武庫川女子大学)

<http://www.oit.ac.jp/is/~shinkai/>

身の回りに見られる現象から宇宙まで, 1つの方程式で運動を表すことができる, というのが物理学の魅力です. 今年の夏に話題となる「火星の大接近」や「7月30日の皆既月食」の話を含め, 「光」の話を中心に物理学を紹介します.

参考資料: 『日常の「なぜ」に答える物理学』(真貝寿明, 森北出版, 2015)

1 2018年夏 注目の天体現象

1.1 火星大接近

2018年は15年ぶりに大接近. 7月31日が最接近. 夏の間, 大きく明るく(不気味に赤く)光る.

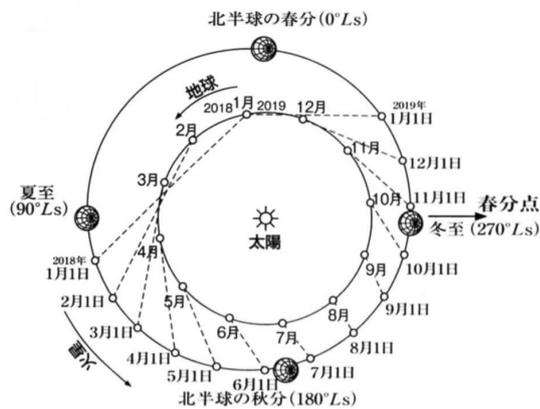


図1 2018年 地球と火星の位置

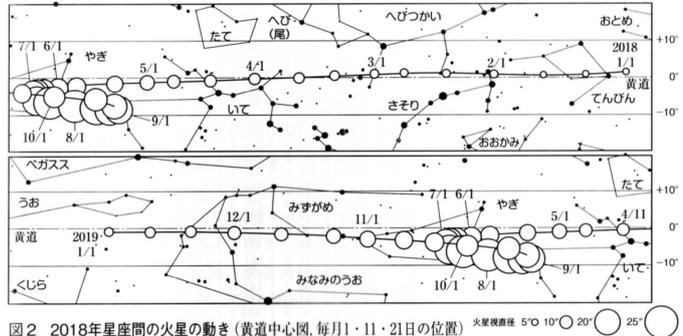


図2 2018年星座間の火星の動き (黄道中心図, 毎月1・11・21日の位置) 火星視直径 5'' 10'' 20'' 25''

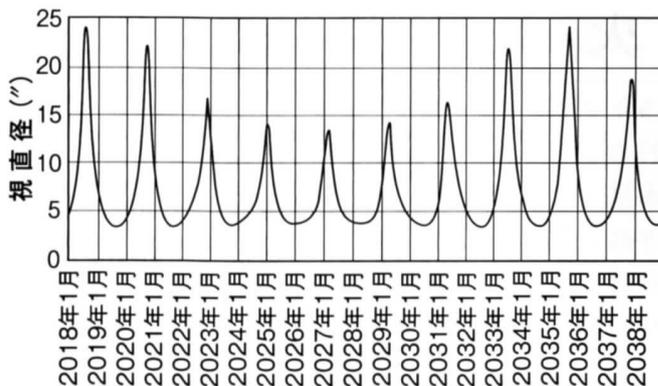
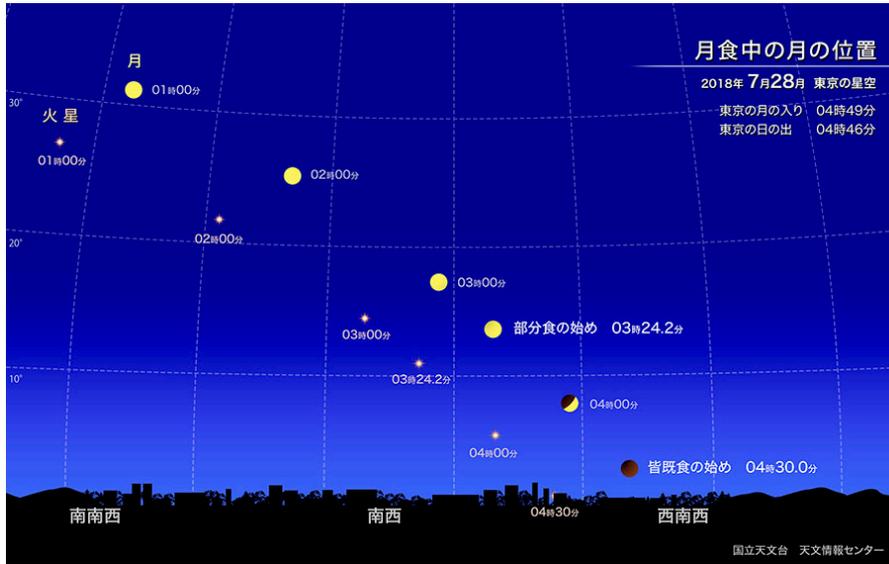


図3 火星の視直径の変化 (2018年~2038年)

図は『天文年鑑 2018』
(誠文堂新光社) より

1.2 2018年7月28日の皆既月食

明け方、日の出前に皆既月食。(天文台のwebページから). 皆既になることには日の出. 赤い月が見えるかどうかは微妙.



西宮市での皆既月食データ. (緯度:35.6500 度, 経度:139.7333 度)

日時		方向角[°]			月[°]		視半径["]				その他	
年月日	時刻	北極	極頂	天頂	高度	方位	半影	本影	月	角距離	食分	備考
2018/7/28	2 ^h 13.1 ^m	87	33	53	23.7	219.6	4271	2344	883	5154	0.000	半影食の始め
2018/7/28	3 ^h 24.2 ^m	89	43	45	13.6	233.1	4271	2344	883	3226	0.000	部分食の始め
2018/7/28	4 ^h 30.0 ^m	97	50	47	2.8	243.6	4272	2344	883	1461	1.000	皆既食の始め
2018/7/28	4 ^h 48.9 ^m	105	52	53	-0.2	246.3	4272	2344	883	972	1.277	月の入り

1.3 2018年の流星群

出現規模の大きなペルセウス座もふたご座も今年是最良. 『天文年鑑2018』(誠文堂新光社)より.

表1 主な流星群

流星群名	出現期間	極大		輻射点		予想HR	極大日の月齢 12 ^h (JST)	流星性状	観測条件
		時刻 (JST)	太陽黄経 (2000.0)	赤経	赤緯 (2000.0)				
1 しぶんぎ座	1月1日~1月7日	1月4日05時	283.15	230°	+49°	30	17	中~速	最悪
2 4月こと座	4月16日~4月25日	4月23日03時	32.32	271	+34	15	6	中~速	最良
3 みずがめ座η	4月25日~5月20日	5月6日17時	45.5	338	-1	10	20	速・痕	最悪
4 みずがめ座δ南	7月15日~8月20日	7月30日20時	127.0	340	-16	7	17	中	最悪
5 やぎ座α	7月10日~8月25日	7月30日20時	127.0	307	-10	3	17	緩	最悪
6 ペルセウス座	7月20日~8月20日	8月13日10時	140.0	48	+58	60	2	速・痕	最良
7 はくちょう座κ	8月8日~8月25日	8月18日15時	145.0	286	+59	5	7	緩	良
8 9月ペルセウス座ε	9月5日~9月17日	9月10日02時	166.7	60	+47	5	0	速・痕	最良
9 りゅう座	10月5日~10月13日	10月9日09時	195.4	262	+54	5	29	緩~中	最良
10 オリオン座	10月10日~11月5日	10月22日02時	208.0	95	+16	15	13	速・痕	最悪
11 おうし座南	10月15日~11月30日	11月6日	223	52	+15	3	28	緩	最良
12 おうし座北	10月15日~11月30日	11月13日	230	58	+22	5	5	緩	良
13 しし座	11月5日~11月25日	11月18日08時	235.27	152	+22	15	10	速・痕	良
14 ふたご座	12月5日~12月20日	12月14日21時	262.2	112	+33	70	7	中	最良
15 こぐま座	12月18日~12月24日	12月23日06時	270.7	217	+76	3	16	緩	最悪

2 速度・加速度

■速さ（平均的速さ）

「速い」「遅い」を区別する言葉は、速さ v （スピード）である。速さは

定義 速さ

$$\text{速さ } v = \frac{\text{移動した距離 [m]}}{\text{かかった時間 [s]}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} \quad (1)$$

として決める。国際単位系では、速さの単位は、[m/s]（メートル毎秒）を使うのが基本である。

表 1: 知っておくと便利な速さ

人の歩く速さ	分速 80 m（不動産広告で徒歩〇分というときの基準） 時速 4 km（江戸時代の距離の単位 = 1 里）
マラソン選手	分速 280 m（=42.195 [km] / 150 [分]）
新幹線	時速 180 km = 3000 [m/分] = 50 [m/s]
旅客機	時速 900 km
音速	340 m/s（温度 T によって若干変化する）
光速	30 万 km/s（1 秒間で地球を 7.5 周）

Topic 稲妻までの距離

稲妻がピカッと光ってから、ゴロゴロゴロと音が届くまでの時間差は、光の速度と音の伝わる速度との違いである。表 1 にあるように、光は一瞬で伝わるが、音速は 340 m/s である。稲妻が光ってから 10 秒後に音が聞こえたら、稲妻は自分の位置から

$$\text{距離} = \text{速度} \times \text{時間} = 340[\text{m/s}] \times 10[\text{s}] = 3400[\text{m}]$$

先にいることになる。

Topic 太陽が消えても...

地球上では光速は無限に速く感じられるが、宇宙空間では光でさえも伝わるのには時間がかかる。太陽から出た光が地球に届くまでには、

$$\text{時間} = \frac{\text{距離}}{\text{速度}} = \frac{1 \text{ 億 } 5 \text{ 千万 [km]}}{30 \text{ 万 [km/s]}} = 500[\text{s}] = 8 \text{ 分 } 20 \text{ 秒}$$

経過する。つまり、地球に届いている光は 8 分 20 秒前に太陽を出た光だ。太陽が今この瞬間に消失しても、地球では 8 分 20 秒の間、その事実が伝わらない。

速さ v (speed)

単位

速さ・速度は [m/s]
(メートル毎秒)。

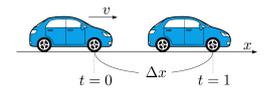


図 1: 位置と距離、時刻と時間

物理では、時間の単位は [s]（秒）を使うのが普通である。[m/s] と書いて、「メートル毎秒」と読む。日常生活では、秒速のほか、分速や時速もよく使う。



図 2: 光速と音速。



図 3: 太陽と地球。

■加速度＝速度の変化の割合

定義 加速度

速度の増減の具合を加速度として定義する。

$$a = \frac{\Delta v}{\Delta t} = \frac{\text{速度の変化 [m/s]}}{\text{かかった時間 [s]}} \quad \text{単位は [m/s}^2\text{]} \quad (2)$$

加速度が正ならば、速度は増加する。加速度が負ならば、速度は減少する。等速運動ならば、加速度はゼロである。

例えば、時速 36 km (= 秒速 10 m) の車が急ブレーキを踏んで 2 秒後に停止した、としよう。このときの加速度は、

$$a = \frac{0 \text{ [m/s]} - 10 \text{ [m/s]}}{2 \text{ [s]}} = -5 \text{ [m/s}^2\text{]} \quad \text{となる。}$$

表 2: おもな加速度の大きさ。

乗り物	加速度 [m/s ²]	加速度 [G]
通勤電車 (発進時)	0.7~1.5	0.71~0.15
エレベータ	< 1.0	< 0.10
乗用車 (発進時)	1.5~2.0	0.15~0.20
旅客機 (離陸時)	2.0	0.20
ジェットコースター	< 60	< 6.12
スペースシャトル (打ち上げ時)	30~40	3.06~4.08

■重力加速度 g

モノを投げると、地球から重力を受けて落下するが、これは地球から「下向きに加速度を受ける」ことでもある。地球上で重力によって生じる加速度を重力加速度といい、値を g の文字で表したり、この大きさを 1G として他と比較したりする。 g の大きさは、およそ 9.8 m/s^2 である。

Topic 加速度センサー

スマートフォンの向きを変えると画面の向きが変わったり、ゲーム機のコントローラを振ると画面を操作できるのは、機械に「加速度センサー」が組み込まれているからである。センサーが加速度を検出すれば、その経過時間から速度や位置（向き）が計算できるのだ。

自動車には衝突による事故から運転手を守るために、エアバッグの装着が義務づけられている。エアバッグも急な減速を加速度センサーが検出することで作動する。

加速度 a (acceleration)

加速度が生じているということは、力を受けていることである (⇒ 運動方程式 §3.2)。

単位

加速度は [m/s²]
(メートル毎秒毎秒)。

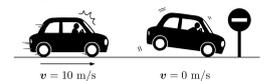


図 4: 秒速 10 m から 2 秒で静止すれば、加速度は、 -5 m/s^2 。

重力 (gravity)

重力加速度
(gravitational acceleration)

$$g = 9.8 \text{ [m/s}^2\text{]}$$

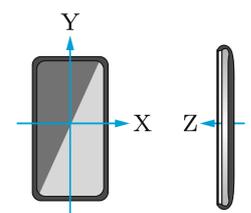


図 5: こんなところに加速度センサー。

3 運動の法則 — 力を加えると、生じるのは加速度だった

普通の人なら、「力を加えたら、物体は動く」とか「力を加えたら、物体には速度が生じる」と考えてしまうかもしれない。ニュートンが偉かったのは、「力を加えた時に、物体には速度が生じるのではなく、加速度が生じるのだ」と見抜いたことだ。

3.1 運動の第1法則：慣性の法則

力がはたらかないときは、物体はどのような運動をするだろうか。答えは、「いつまでもどこまでもそのまま」である。それをきちんと述べたのが、慣性の法則である。

法則 ニュートンの運動法則 (第1法則)：慣性の法則

物体は慣性を持つ (そのままの運動状態を保とうとする)。
力を加えなければ、物体は等速直線運動を行う。

日常では、摩擦や空気抵抗のため、水平面上でボールを転がしたとしてもボールはいずれ静止してしまう。慣性の法則が成り立つことを示すのは実際にはとても難しい。慣性の法則にはじめて気づいたのは、ガリレオ・ガリレイである。彼は次のような論法でこの法則を導いた。

斜面に球を置いて手をはなすと、球は加速しながら転がり落ちる。斜面の角度を急にすれば加速は一層速くなる。一方で斜面上向きにボールを放つとボールは減速してゆく。この場合も減速は斜面の角度に依存する。それでは、水平面ならば、ボールはどのように動くだろうか。—加速も減速もせず、そのままの運動を保ち続けると考えるのが自然である。(『天文対話』1632年)

走っている電車の中でモノを落としても足下に落下する(後方には落下しない)。また、地球は自転し、太陽のまわりを公転しているが、地球上に住んでいる私たちはそのことに気がつかない。どちらも、「運動状態を保とうとする」慣性が原因である。

テーブルクロス引き **実験**

だるま落としでは、一番下のブロックを勢い良くたたいても上のブロックが慣性の法則により留まり、そのまま下に落下する。テーブルクロス引きの芸も同様である。勢い良く引いたクロスの上の皿やコップがそのまま残るのは慣性の法則である。被害を最小にするため、机の上でペンなど載せた紙を引っ張って確かめよう。

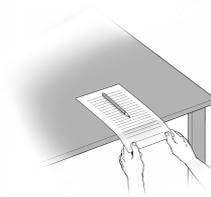


図 8

慣性 (inertia)
慣性の法則
(law of inertia)

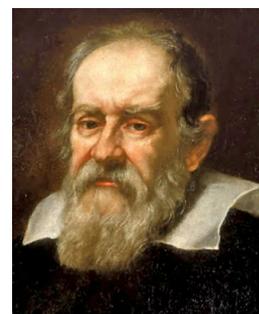


図 6: ガリレイ
Galileo Galilei
(1564-1642)

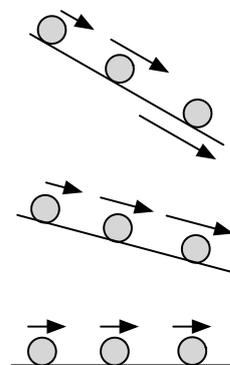


図 7: 斜面の角度を小さくすれば加速が少なくなる。傾きゼロでは等速運動となるはずだ。

3.2 運動の第2法則：運動方程式

■力を加えると、物体には加速度が生じる： $F = ma$

物体に力を加えると動くことは誰でもわかる。「動く＝速度がある」ことだ。しかし、ニュートンは、

- 力を加えると、物体には「加速度」が生じる。
- 生じる加速度の大きさは、物体の質量に反比例する。

という2つの事実を見抜いた。同じ力を加えたとしても、思い扉を押すときと、軽い扉を押すときでは、扉の動き方が違う。違いは速度ではなくて、加速度である、という発見である。

法則 ニュートンの運動法則 (第2法則)：運動方程式

物体に力 F を及ぼすと、物体の質量 m に反比例した加速度 a が生じる。

$$F = ma \quad (3)$$

物理学でいちばん重要な式である。方程式と呼んでいるのは、どのような加速度が生じるかを解く式になるからである。質量が1 kgの物体に、加速度 1 m/s^2 を発生させる力の大きさの単位を1 [N] (ニュートン) と呼ぶ。力の単位は [N] (ニュートン) である

太陽系の惑星の運動も、蹴り上げたサッカーボールの運動も、私たちがふだん目にする物体の運動は、ニュートンが発見した1つの方程式、**運動方程式**で説明することができる。

Topic 月はなぜ落ちてこないのか

万有引力を考えると、すべての物体は近づいていくように思える。地球と月も万有引力で引っ張り合っているのにも関わらず、なぜ月が地球に落下してこないのか。この問題はニュートンも悩ませた。

ニュートンの次の理由を考えた。速いスピードで物体を投げると遠くまで届く。投げる速さをどんどん大きくしていけば、やがて、地球を一周するほどになるだろう。したがって、例え引力で引き合っている、必ずしも落下して衝突するとは限らない。

この説明は正しく、実際に地球表面で秒速 7.9 km (時速 28400 km) の速さでモノを投げると、地球表面を周回運動する。月は地球に落下し続けているのである。

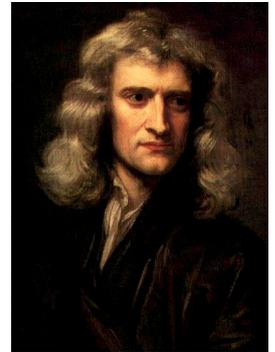


図9: ニュートン
Isaac Newton
(1642–1727)

運動方程式
(equation of motion)

力 F (force)
単位は [N]
(ニュートン)
質量 m
単位は [kg]
加速度 a
単位は [m/s^2]



図10: 速さが大きければ落下しつつも地球を周回する。

4 光の屈折・反射 — 虹のしくみ

■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。

■反射の法則，屈折の法則

光は、空気中から水やガラスに進むと、進む速度が遅くなり、屈折して進む。屈折の法則は、次の式で示される。

$$\frac{\sin \theta_0}{\sin \theta_1} = n$$

屈折率 n は、真空での値を 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 12 では、上側が空気の下側が水あるいはガラスと考えよう。

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 13）。

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、

白色光 (white light)
スペクトル
(spectrum)

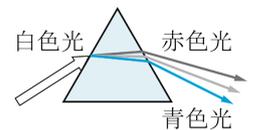


図 11: 白色光はプリズムを通すと分光する。

補色
(complementary color)
単色光
(monochromatic light)

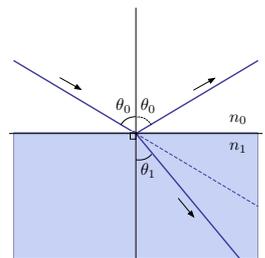


図 12: 反射と屈折。

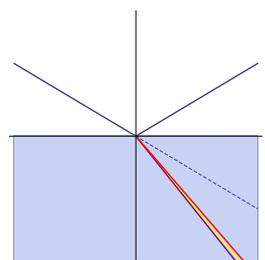


図 13: 正確には光の波長（色）ごとに屈折率が異なる。

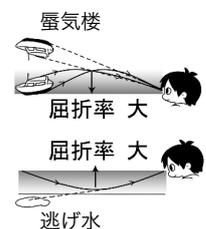


図 14: 蜃気楼と逃げ水

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。

■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。屈折の法則より、臨界角 θ_c は、 $n_0 = 1$ とすれば、

$$\sin \theta_c = \frac{1}{n_1} \quad (4)$$

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。

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んではいけない。

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。



図 15: グラスに入れた箸の屈折

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

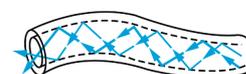


図 16: 光ファイバー。

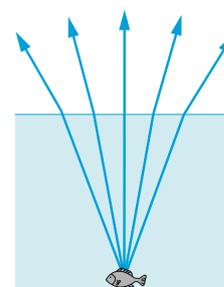


図 17: 魚眼レンズ (fisheye lens)

■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 19〔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 19〔下〕）。

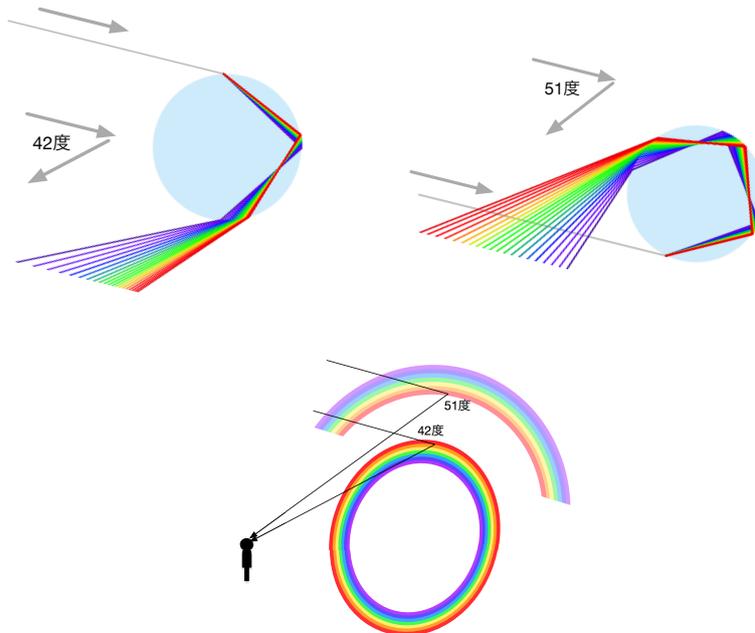


図 19: 〔上左〕主虹をつくる光の経路。太陽光線から 42 度の方向が最も強い反射光になる。〔上右〕副虹をつくる光の経路。51 度の方向が最も強い。〔下〕条件がよければ、主虹の外側に色の順が逆転した副虹が見えるはず。山の上ならば、円形の虹が見える可能性がある。

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 19〔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 19〔下〕）。これが副虹である。

Topic ブロッケンの妖怪＝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 18: 半円を描く主虹と副虹（長谷川能三氏提供）



図 20: 後光がさして光輪に囲まれた妖怪。

■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。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。).

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。

満月に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。

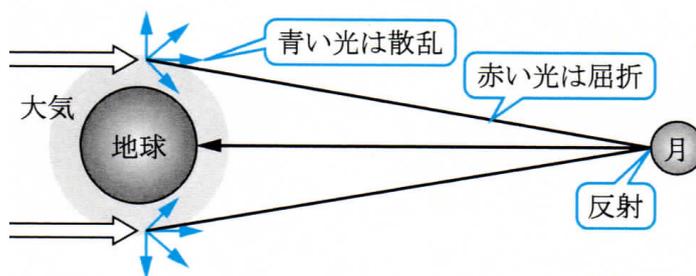


図 23: 皆既月食が赤く見えるのは、地球の大気を長く通った光の反射を見ることになるから。

散乱
(scattering)
レイリー散乱
(Rayleigh scattering)

John W.S. Rayleigh
(1849–1919)

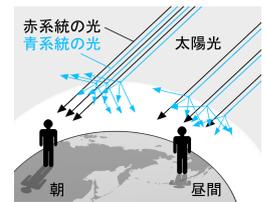


図 21: 朝焼け・夕焼けの空が赤い理由。



図 22: 皆既月食のときの月（榎谷則夫氏提供）

5 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。

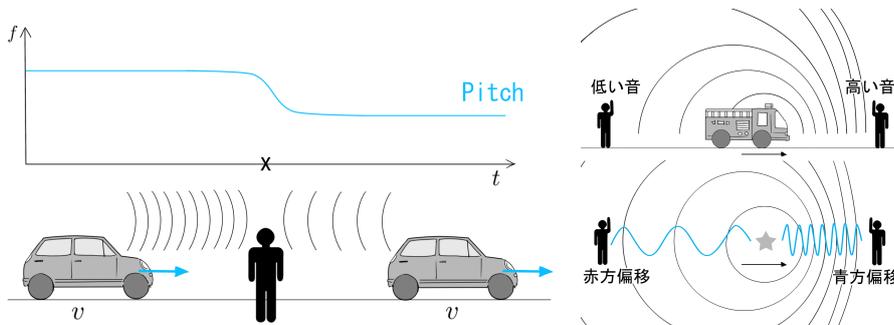


図 24: ドップラー効果。

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、

$$f' = \frac{V + V_O}{V - V_S} f_0 \quad (5)$$

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。 10^{10} 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。

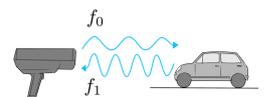


図 25: スピード違反の取り締まりはドップラー効果で、 $f_0 < f_1$ となるが、その変化の割合からスピードがわかる。

■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）。

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)



図 26: 宇宙の中心はどこ？

Topic 太陽系外惑星探査

最近数年で、太陽系以外の惑星系がたくさん観測で発見されるようになった。地球のように生命が存在しそうな惑星の発見も報告されている（生命がいるかどうかはまだ不明である）。自ら光ることのない惑星を望遠鏡で見つけるのは難しいが、その検出方法の1つとして使われているのが主星（太陽のように光る恒星）のドップラー効果である。惑星が周回運動すると、主星も重心のまわりを周回運動するのでわずかに前後にも移動する。望遠鏡で観測していると、ドップラー効果で周期的に恒星の発する光の振動数がずれるのだ。

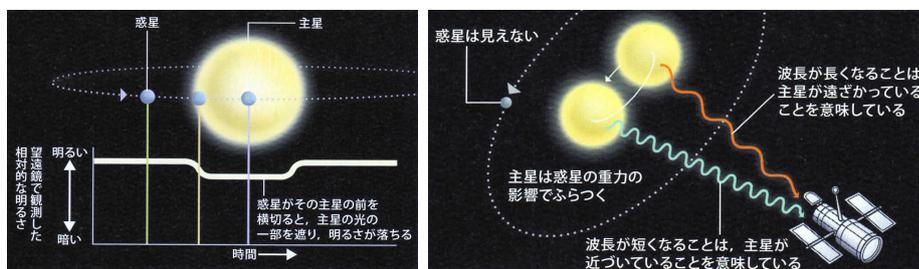


図 27: [左] トランジット法（食検出法）による惑星検出。恒星の手前を惑星が横切れば、恒星が暗くなる。木星サイズの惑星ならば約1%の減光を生じるが、地球サイズの惑星なら0.01%の減光になる。[右] ドップラー偏移法（視線速度法）による惑星検出。恒星がふらつくことによるドップラー偏移を検出する。