

## 第8章 光と相対性理論

電磁気学の応用は電気や磁気の現象だけではありません。電磁気学は電磁波を予言しました。そして、現在電磁波は様々に利用されています。携帯電話も電磁波で通信していますね。今回はこの電磁波についての物理現象を理解してみましょう。意外なことに、電磁気は、ただ単に電気や磁気のための理論ではなく、光の現象も説明してしまうことがわかります。

人間は歩いたりすれば簡単に位置を変えられます。一方、時間に関しては別で、ある時間からある時間まで行くといったことはできません。たとえば、ある時間ごとの位置というのはありますが、時間は位置と別のものであるということが常識的な考え方です。しかし、1905年にアインシュタインは時間と空間についての基本的な考え方を変えてしまいました。当初それは、光速に近いくらいスピードが大きいところでのみ差が出る効果だと思われていましたが、質量とエネルギーの等価性は、原子エネルギーの基本となる考え方となり、私たちの生活にも少なからず影響を与えています。相対性理論は難しいと思っっている方も多いでしょうが、もう100年以上も前の理論で古典的な理論と言えます。今回はこの相対性理論について見てみましょう。



## 電磁波と光

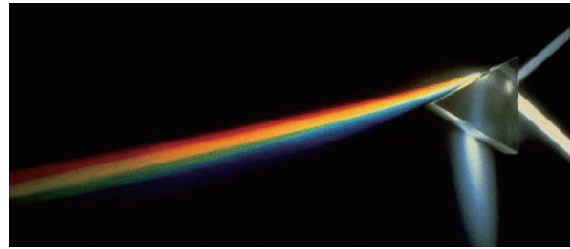
電磁波と光の関係は図のようになります。電磁波の中でごく特殊な領域の光を人間は観ることができるのです。

## 光を見るとき

古代ギリシャ人たちは、ものが見えるということは、目からその物体に光が達しているものだと考えていました。もちろん今では、物体からの光が目が届き、光は目の網膜で電気信号にかえられることがわかっています。

## 色のスペクトル

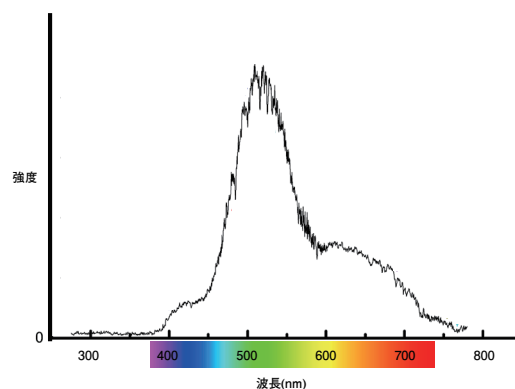
太陽からの光をプリズムに入射させると、虹色の縞模様になります。このそれぞれの色を色のスペクトルと言います。7色とは言いますが、実際にはほぼ6色で、赤、オレンジ色、黄色、緑、青、紫が見えます。また、太陽からの光は白色光と呼ばれます。白色光とは、さまざまな色の光の集まりであることがわかります。



図では太陽からの振動数による光のエネルギーを表しています。人間は、進化の過程でエネルギーの大きな光の振動数を、色として認識できるようになったのです。太陽からの光で一番エネルギーの大きいのは緑色です。人間は、この緑色を一番明るく見えるように進化しました。つまり、緑色の方が同じエネルギーでも赤などよりも明るく見えるのです。最近講義でもレーザーポインタを使いますが、赤色のレーザーよりも緑色の方が明るく見えるのはこのためです。また、蛍光灯などのメーカーでは、蛍光灯では、太陽光よりも緑色を多く出して、全体として明るく見えるような工夫をしています。

単位 nm (ナノメートル)

赤	625-740
オレンジ	590-625
黄色	565-590
緑	500-565
シアン	485-500
青	440-485
紫	380-440



## 黒い色はどうして見える？

それでは、黒はどういう色でしょうか？黒は光が目には届かない状態です。つまり、他からの光をすべて吸収すると、黒く見えます。この活字も黒です。紙面では光をほとんど反射し白いのですが、黒い活字のところでは光のほとんどを吸収しているわけです。ほとんどすべての物質は、その物質特定の波長の光を吸収します。たとえば、草の葉はクロロフィルを含んでおり、光合成に必要な、赤や紫の波長の光を主に吸収し、緑色の光を反射します。このため、葉っぱは緑色に見えるのです。このように、さまざまな色ごとに吸収する率が異なるので、反射された色も様々になり、物質ごとの色の違いになわけです。

また、反射による色は、光源によって異なります。白色光のもとでは、さまざまな色にみえても、白熱灯の元では、色の見え方が異なるのです。実際、トンネル証明などに使われるナトリウム灯では、橙色一色だので、反射されたものすべてが橙色になることを経験した人は多いとでしょう。

## 海水魚に赤い魚が多いわけは？

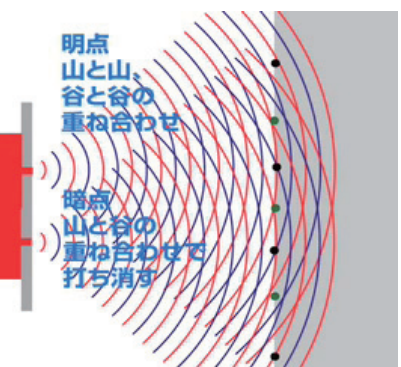
魚屋さんに行くと、カニ、エビ、たこを始め、金目鯛など真っ赤な生物が数多く存在します。赤いのは目立ちそうなので、他の魚にすぐ見つかって食べられそうで、一見して生存には不利な気がしますが、しかし、これは逆に自然選択の結果なのです。



水は透明に見えますが、光を吸収します。特に赤い光 金目鯛など赤い魚は深海ではの方が吸収が激しく、このため水の中が青く見えるので 見えない魚となります。赤い魚とは赤い光を主に反射する魚ですね。深海では太陽からの光には赤い光はないため、赤い魚では光は反射されません。このため、赤い魚は海中では何も光を反射しない、見えない魚となるのです。このため、赤い魚は敵に見つかりにくく、生存に有利なのです。赤い魚が海中では見えない魚であるとはすこし驚きですね。

## トーマス ヤング (1773-1829)

イギリスで10人兄弟の長男として育ちました。非常に語学が堪能で、ギリシャ語やラテン語の他11カ国語を解したようです。最初は薬事学を学びましたがその後物理学を学び、物理も勉強します。その後、叔父の跡を継いで医師として開業します。1801年に王立協会の自然哲学の教授に任命されまが、1803年には医師としての活動の妨げになるとしてやめてしまいます。その後も医師として活動しました。光の分野における彼の功績はなんといっても、光の波動性を確認したことです。それまで、ニュートンの、光の粒子説が信じられてきました。これでも屈折や反射などの現象は説明できたからです。光は蛇非常に間隔の小さな2つのスリットから出た光が、水の波と同様に干渉して強さの強弱模様が確認できたのです。これにより光が波であることが確認されました。

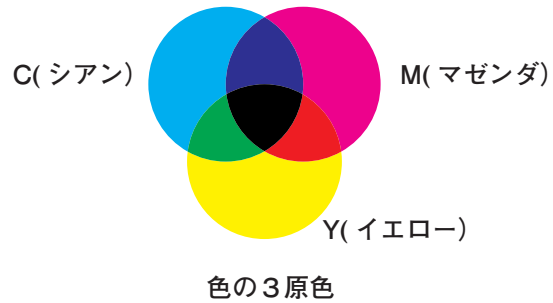
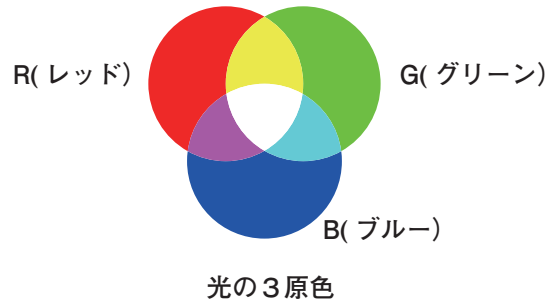


## 色の混合と光の三原色

様々な色を足し合わせると白になります。しかし、さまざまな色のうち、赤 (R)、緑 (Y)、青 (B) を混合しても白になります。この RGB 3つの色を**光の三原色**と言います。これは、白色光を3つの領域に分けて考えたことに対応します。

図のように赤と、緑が混ざり合うと黄色になります。また、赤と青を混合すると赤紫、マゼンダと言われる色となり、緑と青では、水色シアンとなります。

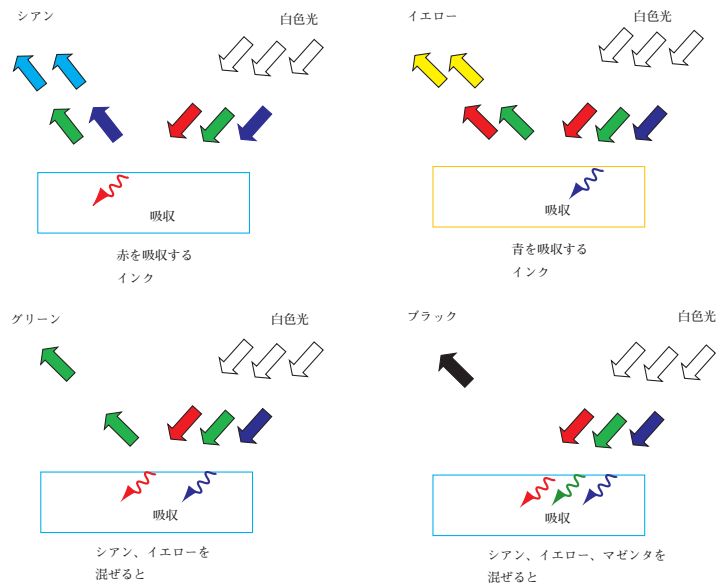
テレビの画面の光は背後から透過してきて私たちの目に届きます。このようなときは、この光の3原色を混合してによって色を作り出しています。



## 色の三原色とは？

テレビなどのように透過した光を映し出すものは別にして、通常の物体の色は、物体より反射された色を言います。印刷物も同様ですので、印刷するときの塗料などもこの反射の原理に基づいて作られます。物質の色は何を吸収するかで決まっています。そのため、塗料としては、何を反射するかというより何色を吸収するかということで色が決まっているわけです。たとえば、光の三原色の一つである青を放出させるには、赤と緑を吸収する塗料を使う必要があります。このためには、赤を吸収する塗料と、緑を吸収する塗料を混ぜ合わせればよいわけです。そこで、塗料などでの基本的な色としては、赤を吸収する黄色 (Y)、緑を吸収するマゼンダ (M)、青を吸収するシアン (C) を基本的な色とするのが便利なわけです。この YMC

の3つの色を**色の三原色**と言います。この方法だと YMC の3色を混ぜると RGB の色すべてを吸収するので、黒になります。印刷などに用いる実際の塗料では理想的な色の3原色を表していないので、3つ合わせても完全な黒にならずに焦げ茶色になってしまいます。また、活字として黒はよく用いるので3色混ぜて使うのもったいないですね。そこで印刷では、色の三原色に黒 (K) を合わせた **YMCK** を基本的な塗料に用いています。自宅でカラープリンタを持っている人はインクの色を調べてみるといいでしょう。



## カメラと目の構造

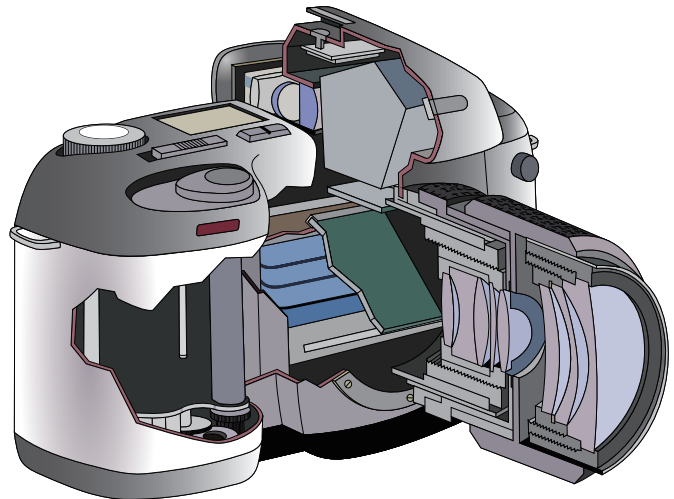
デジタルカメラでは、レンズで屈折し、**CCD(Charge coupled Devise)**の上で像を結びます。CCDでは3色のそれぞれを検知する素子が一面に引き詰められており光が電気信号に変えられます。やってくる光の量が少ないと、CCDは反応せずに、黒っぽくなり、また、光が強すぎるとすべての素子で信号が起こり真っ白となってしまいます。このためスクリーンに集まる光の量を調整する必要があります。これは**絞り**と呼ばれています。

目の仕組みもほぼ同様です。角膜や水晶体がレンズの役割をしており、**虹彩(こうさい)**と呼ばれる部分により目に入ってくる光の量を調節しています。図のように明るいところと暗いところでは黒目の大きさが異なるのが解るでしょう。

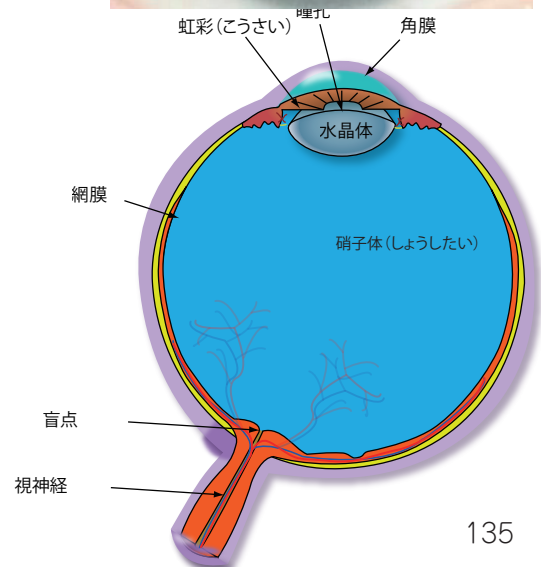
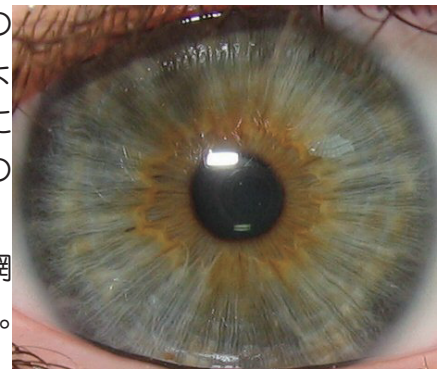
デジタルカメラのCCDに対応するのが**網膜**です。網膜には、光の波長により反応する細胞が集まっています。光の波長などの情報は電気的な信号として視神経を通して脳に送られて、色を伴った像として再構成されます。

色の識別は、生存競争に有利に働いたことにより、生命の進化の過程で身につけたものです。なぜ特定の電磁波の領域を検知するするのかは、色として認識できる波長の領域は太陽からの電磁波の中で最も強い領域であることと関係があります。可視光が見えるというのは進化の中で最も都合が良かったからなのです。

鳥などは3色だけでなく、紫外線も検知する視細胞を持っています。霊長類では、これを退化させてきたものと考えられています。



カメラ内部の構造



## 光と物質の相互作用は？

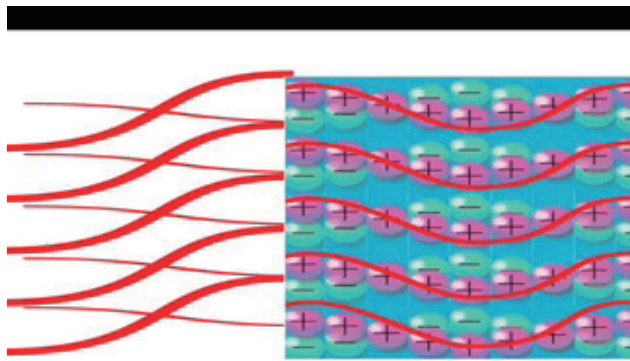
光は物質に当たるとどのように相互作用するのでしょうか？光の相互作用の仕方は大まかに分けて次の4種類です。透過、吸収、反射、散乱です。このうち反射と散乱は原理から言えばほぼ似ていますが、物質全体で起こるのを反射と言い、分子の一部で起こるのが散乱です。

## 透明な物質と透明でない物質の違いは？

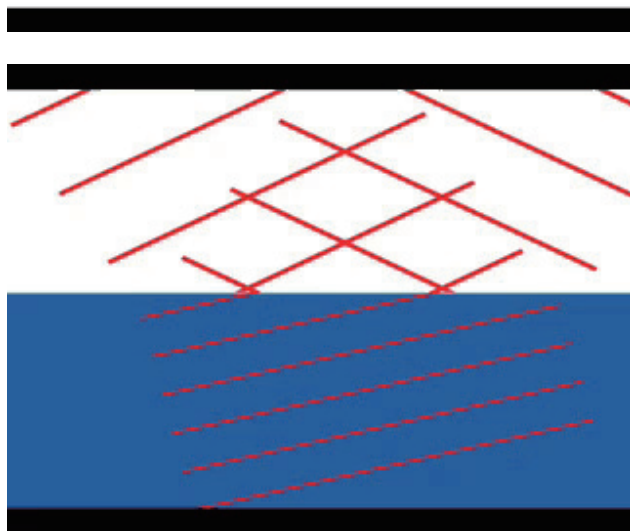
ガラスや水では、可視光の光では、分子中の電子が振動するだけで、吸収があまりありません。そのため、光が透過していき透明になります。ガラス中の電子は、紫外線の周波数でなら大きく振動できます。このため、ガラスでは紫外線を吸収したり反射させたりして、透過する量が少なくなります。また、赤外線も同様です。水もまた赤外線を吸収するので、太陽からの光で水が温められるのは、太陽からの赤外線のためです。

## 透明な物質中での光の速度

透明な物質では、可視光などでは電子が自由に動くことができません。そのため、電磁波による電場で分極し、その分極が新たに電場を作り、全体の電場の大きさを小さくします。このように電場の行く手を邪魔するので、物質中の光の速さは、真空中での速さより小さいのです。動画でみてわかるように**屈折**はこの光の波の速さが異なることによって起こるのです。



ちなみに、水は、ゆっくりとした電場の変化では、水の分子の向きを変えることにより大きな分極を作り出しますが、可視光などのように振動数が大きいと、分子は素早く方向を頻繁に変えることができないので、全体としてあまり大きな分極による電場を作れなくなります。このように、誘電体中では、光の振動数（波長）によって光の速さが異なります。これを**光の分散**と言います。屈折する角度は一般に光の速さの違いが大きいほど大きく屈折します。このため、プリズムで光が分かれるのも虹が見えるのも光の分散が原因です。



## 不透明な物体

私たちを含めてほとんどの物質は、透明でない物質です。透明な物質では、光は反射または吸収します。吸収された光のエネルギーは、原子の振動にかわり、熱エネルギーとなります。太陽の光で暖められるのもこのためです。このように、光が物質と相互作用する形には、透過、反射、そして吸収があるのです。

## 金属と誘電体での反射

分子中の原子や電子は、光の波長に応じて振動します。たとえば金属では自由に動ける電子があるので、光がやってくると電場の方向に振動し、この振動によりおこる電磁波により内部の電場をほぼ完全に打ち消してしまいます。また、その振動によって生じる光は外部にも発せられます。これが反射です。通常の鏡は、アルミフィルムの上にガラスを張り保護しています。鏡による反射はこの自由電子による電磁波の放射のためなのです。

ガラスや水などの誘電体（自由電子は自由電子は無いが、分極する物質）では、光の変動する電場に電場によって振動し、これが内部の光の電場や磁場を弱めると同時に外部に反射波を放出します。つまり、金属と異なり自由に振動できないので、内部や外部に放出する光が少なくなります。このように、反射など光の性質は電磁気学によって説明できるのです。光の学問である光学と、電磁気学は融合されているのです。

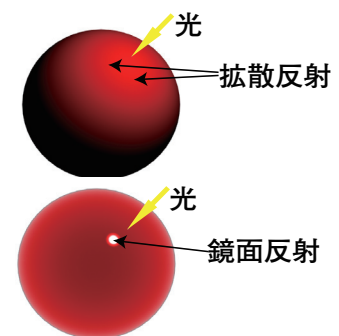
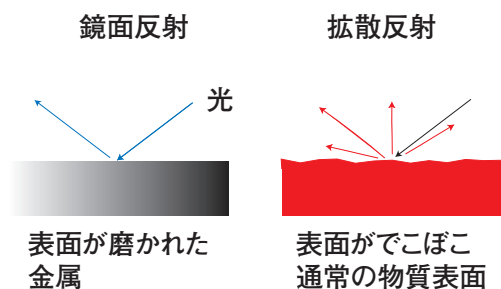
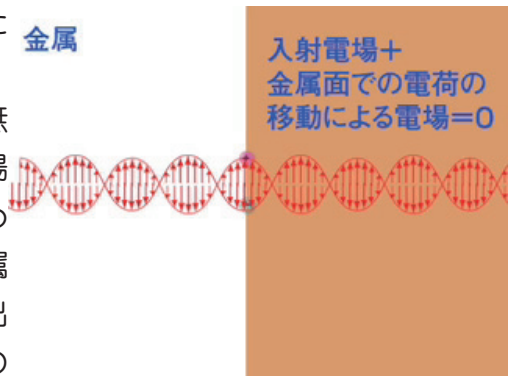
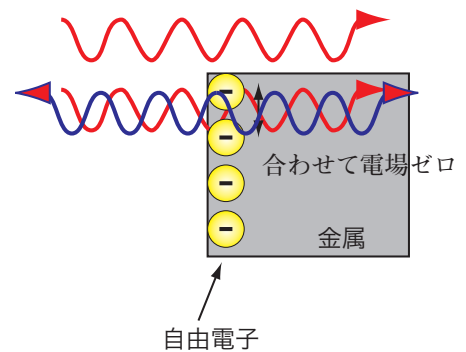
一見何の関連のない自然現象が、実はつながっているということがサイエンスを学ぶ醍醐味の一つでしょう。ニュートンは天空の運動と地上の運動とを統一しました。そして、エルステッドやファラデーは磁気と電気の現象を統一しました。そして、マックスウェルは、電磁気をさらに突き詰めると、光学も電磁気と統一されることを示したのです。

## 鏡面反射と拡散反射とは？

鏡や通常のガラスなど表面が平らなところで反射した光の角度は入射した光の角度と等しくなります。これを**反射の法則**と言い、このような反射を**鏡面反射**と言います。

一方、通常の物体では、表面はでこぼこしています。このようなときには、光は図のように様々な方向に反射します。したがって、光源と目との位置が反射の法則と異なっても、物体の反射光を見ることができます。このような反射を**拡散反射**と言います。ためしに、1つのライトで図のように球を照らしてみます。図のように球の中心付近で明るく見えるのは、ライトから鏡面反射してきた光です。もし、鏡面反射だけならそこだけしか見えません。逆に言うとはかの部分が見えるのは、拡散反射のおかげです。光源からの

光は、さまざまな所から拡散反射し、またそれがほかの物体で拡散反射して全体を明るくするのです。このように、私たちが様々なものが見えるのは拡散反射のおかげなのです。



## 紫外線とは？

可視光で波長が短くなるにしたがい、青、紫となっていきます。波長が400nmよりも小さいと、もはや人間の目には見えなくなります。可視光より波長が短く見えない光を**紫外線**と言います。英語では Ultraviolet ですから通常 **UV** と訳されたりします。紫外線は生物的な効果によりさらに波長を、UVA,UVB,UVC と分けられます。UVA は、波長が比較的長くエネルギーが小さく、皮膚の活性化を行う反面、老けやすさを招きます。UUB は、皮膚の比較的奥まで透過しメラニン色素を形成させ日焼けの元になります。またこれも、加齢現象を引き起こしたりしてあまりよいことはありません。UBC は波長がより短く、一番エネルギーが大きく危険ですが、オゾン層などで吸収されているため地表にはほとんど届きません。最も紫外線は悪いことばかりではありません。ビタミンDの形成などのよい点もあります。人類は元々白色人種だったのですが、温暖化と共に白色人種は日差しの少ない方に移動し、進化した有色人種だけがアフリカにとどまったという説があります。

大気は可視光や赤外線は通しますが、非常に高い周波数の紫外線は透過させません。そのため、あまりひどい日焼けがおこりにくくなっています。また、雲は紫外線を一部透過させるので、曇りでも日焼けすることがあります。また、**紫外線は地面でも反射するので、日傘をさして直射日光を防いでいても日焼けするので注意が必要です。**

紫外線の利用法としては、蛍光灯があります。これについては後の章で見ましょう。また、紫外線は虫を引き寄せる作用があり、害虫を電気ショックで駆除する装置としても使われています。また、医療現場などでは、殺菌にも使われます。これは、紫外線により細菌のDNAを破損させることができるためです。また、食品の殺菌などに使用されることもあります。

## X線

**X線**は、紫外線よりもさらに波長が短く、エネルギーも大きく透過する能力が非常に高くなります。X線は次のようにして発生します。真空管などで数万ボルトの電圧によりマイナス極から放出した電子を他の電子に加速させ+極の金属に衝突させます。衝突後の電子の加速度は非常に大きく、そのときエネルギーの大きなX線が放出されます。

このX線の最大の利用法は、**診断**でしょう。通常のX線による撮影では、全体の平面的な写真しか撮れませんが、様々な角度から撮影することにより、コンピュータで処理して、断面の写真をとることができます。これを、X線コンピュータ断層撮影(Computed Tomography, X線**CT**)と言います。CT検査では、MRIなどの比較して短時間で検査ができますが、被爆の可能性があるので短期間で多くの検査をすることはできません。また、原子の構造解析のために(X線回折)にも用いられます。

## ガンマ線

**ガンマ線**は、非常に波長の短くエネルギーの高い電磁波です。波長が短く、後で述べるようにむしろ粒子的に振る舞います。**ガンマ線は主に原子核内で作られます。**高速な電子の衝突から作られるのがエックス線で、核反応によって出来るのがガンマ線です。ガンマ線は最近では医療用としても良く用いられます。発ガン作用があり放射線の一種でもあります。



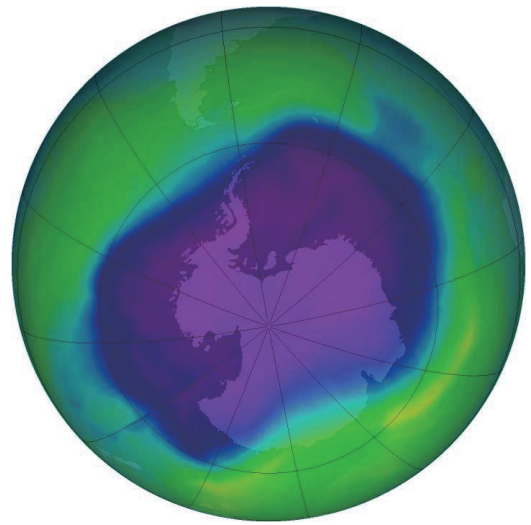
## オゾンホール

クロロフルオロカーボン (CFC) は、冷蔵庫の冷媒として1928年に開発されました。他の物質と反応しにくいいため、生物には無害です。また、非常に安価に製造できるためヘアスプレーやペンキのスプレーなどにも広く使われました。

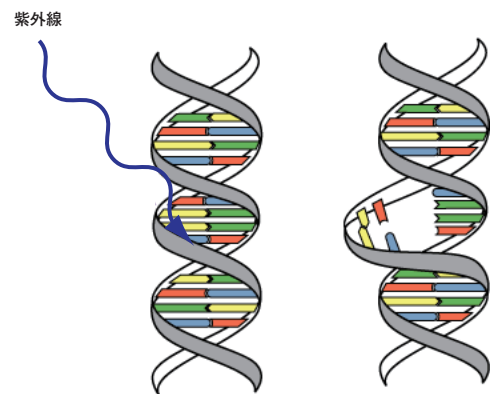
成層圏では、太陽から降り注ぐ約99パーセントの紫外線を遮断しています。成層圏では、オゾン層があり、これらが紫外線を吸収しています。これらのオゾン層は、酸素がよりエネルギーの高い紫外線を吸収し分解されることによって生成されています。

1970年代になって科学者たちは、クロロフルオロカーボンが、オゾン層を破壊している事実に関心を持つようになりました。CFCが、紫外線によって分解されると塩素イオンを放出します。すると塩素がオゾン層を酸素にする触媒として働くようになります。一つの塩素が平均して10万個ものオゾン層を破壊すると言われています。1985年には、南極上空の50パーセントのオゾン層が破壊され、強烈な紫外線が地上に降り注いでいることを報告し、フロン製造中止を呼びかけました。

紫外線は、DNAに衝突するとDNAを損傷させることがあります。細胞はDNAの修復機能を持っていますので、多くのDNAは修復されますが、修復されずに細胞分裂でも残ってしまうことがあります。たとえば、二組のDNAの情報が一度に破壊されると、修復のときの模範がなくなるため修復不能となります。こうしたDNAの変異が皮膚ガンなどを引き起こすのです。これは、白色人種などのように皮膚にメラニン色素などの紫外線吸収が少ない人種では深刻です。そのため、1987年にモントリオール議定書で、フロン製造中止への道筋が決定されました。しかし、成層圏の塩素は安定で、オゾンが復活していくまで数十年かかるものと言われています。



南極上空のオゾンホール



紫外線によるDNAの損傷

## 電磁波と健康

紫外線エックス線やガンマ線は DNA を破損させ、ガン（がん）のリスクを高めることは言うまでもありません。それでは、周波数の比較的少ない電波などはどうでしょうか？たとえば皆さんの使っている電流は交流ですので、内部の電子は行ったり来たりして加速度を持っています。そのためわずかながらも電磁波を放出しています。これらは体には害はないのでしょうか？発電所や変電所を管理する人たちはこうした低周波の電磁波を浴びています。しかし、こうした人たちに目立ってガンが多いというデータはどの国でも報告されていません。また、電波でも同様です。電波くらいでは DNA を破壊するだけのエネルギーはないからなのです。現在のところ、電波は体には無害だといっているでしょう。

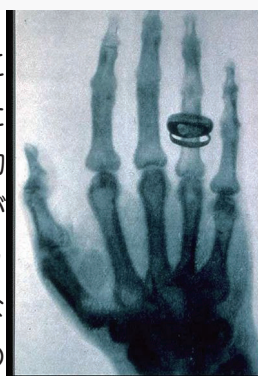
## 電磁気と光学の統一

電磁波が波長や発生機構によって様々に分類され、利用されてきていることを見てきました。これらの利用は 100 年前には考えもしないことでした。これからもさらに技術が発達していくことでしょう。

電磁気学とは、ただ単に電気と磁気（じき）が一つのものであるというものではありません。光に関する現象も、電磁気学によって説明されてしまうのです。つまり、電磁気学は光の物理も含んでしまいます。科学では、全く異なると思われる現象が実はつながりがあるということがあります。こうした統一的な観点が科学の醍醐味の一つでもあるのです。

### ウィルヘルム レントゲン (1845-1923)

レントゲンは、ドイツラインランドの小さな待ちに生まれました。1868 年に工科大学を卒業し、1889 年チューリッヒ大学で博士号を受け、その後助手を務めたりして 1875 年にドイツの小さな大学の物理学教授になりました。こうして特別優れているわけではないけれども順当な学問生活をしていたのです。そして、1888 年にベルツブルク大学に移り研究を続けます。1895 年 11 月 8 日、レントゲンは真空管の一種を操作していましたが、その光が外に漏れないように黒いボール紙で覆っておきました。部屋は完全に暗くしてありましたが、彼は真空管から離れたところのスクリーンが蛍光するのを見たのです。なんとこの新種の放射線は、人間の体を通し骨をスクリーンに映しだします。彼は自分の発見が信じられず、彼の妻にも黙っていたようです。そして彼は何回も実験を繰り返し、写真に撮ることに成功してやっと一息つきます。写真のような証拠なしに発表したら、頭がおかしくなったと思われるだけだと思ったようです。彼は今ではエックス線と知られるレントゲン線を発見したのです。彼の発見は大変な反響を巻き起こしました。人々は自分の骨まで見えるという放射線のことを知ったときどんなに驚いたことでしょう。ある人は、子供の頃神様は体の中のことまで見通せるんだと聞いても信じなかったが、レントゲンを見たときこれを信じるようになったそうです。1901 年に第一回目のノーベル賞を受賞した。逆にベクレルなどのように、もっと早くから同様の実験をしていた研究者もいたのですが、おしくもエックス線の発見を逃していました。科学の発見にはこうした偶然発見できた例が数多くあるのです。



## 相対性の考え方

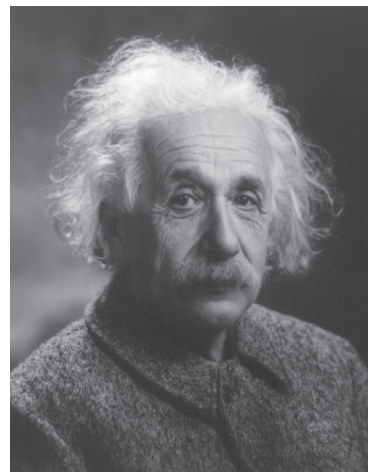
以前にも登場した考え方ですが、私たちの日常における運動の基準は地面です。日常生活では、地面に対して動いていると運動していると言います。しかし、地球は太陽の周りを回っているので、静止しているというのは相対的な考え方です。たとえば、電車の中で消しゴムを真上に投げて受け止める人がいるとしましょう。この場合、消しゴムを上を投げると急に電車後方に消しゴムが跳んでいってしまうなんてことになりません。一定の速度で進んでいるうちは、自分が静止したものだと思っていってもいっこうにかまわないわけです。また、電車の電車の中で消しゴムを真上に投げる運動を、電車の外からみると、放物運動となります。電車の中で移動していても電車の外にいてもニュートンの法則はそのまま成り立つわけです。つまり、一定の速度が違うだけなら、速度の変化、加速度はどちらでも同じですので、等速運動している人同士では加速度と力の関係などはそのまま成り立つわけです。

力を受けていない場合、慣性の法則が成り立つ空間であるので、力を受けていない系を**慣性系**と言います。ただし、実際には私たちのいる地上では、重力がいつも働いているわけです。しかし、今しばらくは重力がない状態を考えてみましょう。そして、重力は第15章で再び見てみましょう。

重力が働いていない状況をはっきりさせるためにまず、宇宙に出てみます。もちろん、実際には行けないので想像してみましょう。宇宙遊泳に友達と二人で出かけたとします。友達を押してみると押し返されて自分も友達から離れていくでしょう。こちらから見ると友達が離れていき、友達からみるとこちらが離れていきもう2度と会えないなんていけば悲しい話となりますね。ともかくどちらが静止しているといった言い方はできません。そのため、運動というの、誰かを基準にしてそこからのずれを問題にしているだけです。この意味ですべての運動が相対的で、絶対的に優位な人はいません。また、これはある程度実験で確かめられた仮説として、宇宙には中心がないと言えます。これはすべての人や物に対する平等の考えかたです。これを相対性と言います。これは、絶対王政から、だれもが平等な民主主義というのに似ていますね。絶対的な立場の人から全人民が平等になったわけです。相対性の考え方は、物理法則というよりも哲学に属している考え方とも言えるでしょう。相対性によれば、自分から見たら相手がどう見えるかといった現象と全く同じことが相手から見て自分の身に起こるわけです。この意味で**相対性理論を学ぶ上で重要なのが、相手の身になって考えるということになります。**

## アルベルト アインシュタイン(1879-1955)

アルベルトアインシュタインは、1879年にドイツのウルム市に生まれました。5歳まで言葉を話さなかったと言われます。小学校では特別できる少年ではありませんでした。また、中学のときには、教師たちのドイツ式の教え方が気に入らず、教師たちと折り合いが悪かったと言われます。1896年にチューリッヒ工科大学を受験しましたが、総合成績が悪かったせいで不合格でした。しかし、数学と物理が抜群の成績でしたので入学資格を取るためにスイスのギムナジウムにはいり、その後やっと工科大学に入学しました。得意な科目と不得意な科目の差が激しい学生でした。たとえば、物理実験では最低の1（可）であったと言われます。大学を卒業してから、代用教員や家庭教師をしていましたが、その後特許局につとめ始めます。ここで、仕事の傍ら、物理の研究をじっくり始めています。特に1905年に出した3つの論文は、どの一つとっても不朽の名作とされます。一つは、光によって電子が金属から放出される、光電効果の説明であり、量子論の基礎となりました。2つめは、ブラウン運動という、液体の中で浮遊している微粒子の運動によって、原子の実在性の証明とエネルギーと温度の換算定数である、ボルツマン定数の新しい決定法を示したものです。そして3つめの論文は、ご存じ特殊相対性理論の論文です。ニュートンの運動方程式は、アインシュタインの理論の中にも組み込まれることができました。



万有引力の法則を相対性理論と融合させることができたのは実に特殊相対性理論から11年後になります。アインシュタインはたった一人でこの問題と立ち向かいました。重力の問題に関しては、アインシュタインは1916年に一般相対性理論の論文を書きます。一般相対性理論は、現代の宇宙の歴史解析の基礎であり、またブラックホールも予言されました。アインシュタインは時代のヒーローであったと言ってもいいでしょう。

家庭人はあまり優秀ではなく、離婚をしています。人間で完全な人はいないものです。

晩年は、量子論に反対したり、統一理論を作ろうとしたりして失敗しました。

ある物理学者が、アインシュタインはまず結果がわかってしまってそれに対して論理を組み立てるタイプの人だろうと言っていました。晩年には間違った結果を予想したためにうまくいきませんでした。これは天歳の一典型を示しています。

## 光の速さの不思議

ウサギとカメの問題を解いてみましょう。

ウサギは1時間に8 km走り、亀は1時間に2 km走る。同じ方向に同時に走ると、1時間後に両者の間は、何キロメートル違うか？

答えは8 km マイナス 2 km = 6 km となりますね。

ではこれを違う言い方にしてみます。

ウサギは1時間に8 km走り、亀は1時間に2 km走る。同じ方向に同時に走ると、亀から見てウサギの時速は？

亀から見て1時間に6 km進むので亀から見てウサギは時速6 kmです。

それではウサギの代わりに光の場合を見てみます。

亀が時速2 kmで走ると同時に、光を同じ方向に発射する。亀からみての光の速さは？

ウサギと同様、光速から亀の速さを引いたものとなりそうだがそうはなりません。亀から見ても光の速さは地上での光速のままなのです。先ほどの例のように、一秒後にどの位置にいるのかを見て判定してみると、1時間後にいる位置の間隔は明らかに

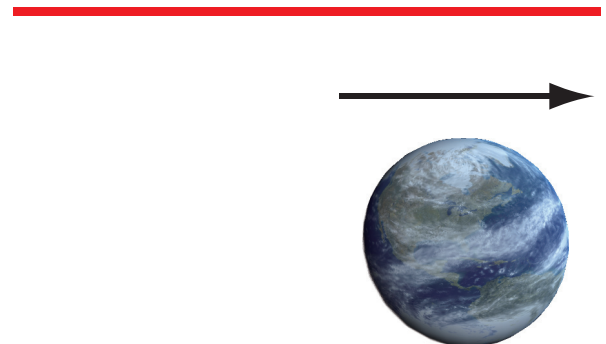
光が1時間に進む距離—2 km

となると思うのが普通ですね。しかし実際の実験ではやはり光の速度となるのです。

光の速さが一定であることは、地球が太陽の周りを秒速約30キロメートルで回っているために容易に観測できます。これは、太陽が中心だと思った場合の光速と、地球での光速には食い違いがでるはずだからです。しかし、実験ではそうした違いが観測されなかったのです。そのため、慣性系では光速はいつも等しいという実験事実を受け入れざるを得ないのです。

実はこのことは、11章に現れるように、電磁気学により理論的に導出されます。マックスウェルの電磁気学では電磁波を予言することができます。しかもそのスピードが光の速さだとわかったので、マックスウェルは光も電磁波の一種だと予言しました。しかし、問題はその速さは誰が見た速さなのかということです。電磁気学から出てくる光の速さは、誰が見ても同じなのです。そのため、ローレンツは、電磁気学の法則をどの慣性系でも一定に保つ変換を考えました。そしてかなり恣意的に見えるその変換に物理的な解釈を与えたのがアインシュタインでした。端的に言えば、時間の進みが異なるとすれば、光の速さが一定であることが説明できることが後でわかります。

光線



移動している地球から見ても光の速さはどの方向に対しても等しい

## 相対性理論の第一の仮説とは？

船に乗っていると船が動いているのではなく周りが後方に移動しているといった錯覚することがあります。しかしこれはある意味で錯覚ではないのです。何に対して動いているかというのは地面を絶対視しているからであって、自分から見て地面が動いていると考えてかまわないのです。また、地球は、宇宙の中心にいるわけではなく、銀河系の端の方の標準的な恒星である太陽の周りを回っています、太陽もまた銀河の中心の周りを回っていますし、銀河系もまた銀河団に属してお互いに引き合っています。地球を世界の中心としておくのではなく、どここの点でも平等です。この全世界皆平等の原則を自然界全体に対して謳うのが、相対性です。アインシュタインの特殊相対性理論における第一の仮説は

**力を受けていない、等速で運動する系である慣性系において、すべての物理法則は等しい**

というものです。

## 相対性理論の第2の仮説は？

第一の仮説である相対性そのものはアインシュタインの専売特許ではありません。実際、ガリレオ、ニュートンもある意味で相対性を謳っています。この意味で第一法則自信は、なにも新しい物ではありません。新しいのは、次の第2の仮説です。相対性理論の第2の仮説は、

**すべての慣性系において光の速さは等しい**

というものです。

それまでは、ウサギとカメの例でもわかるように物質の速さはみる系によって変わるといのが通例なので、ここまで平等にすることはないだろうという仮説ですね。しかし、光の速さが移動している人に対しても一定というのは仮説といっても実験で確かめることができます。そのためこれは実験的事実と言っても良いものなのです。

地球他太陽の周りを秒速約30 kmで回っています。このため太陽からの光が光速でやってきたとしたら、移動する私たちにとってはその光の速さは方向によって変わってくるはずですが、しかし、移動する地球から見てもどの方向に対しても光の速さは一定であるのです。また、対応自身も銀河の中心に対しても秒速200 kmで移動していますので、光が秒速30万キロで進むという絶対的な基準の系が銀河系であれば太陽からの光の速度は秒速300 kmだけ食い違わずです。しかし、これも観測されません。

このように、相対性理論の仮説は科学というよりも哲学的なところがあります。この哲学が実際に自然界に実現していることが見て取れるのです。

相対性理論の  
仮説って物理  
と言うより  
哲学だわ！



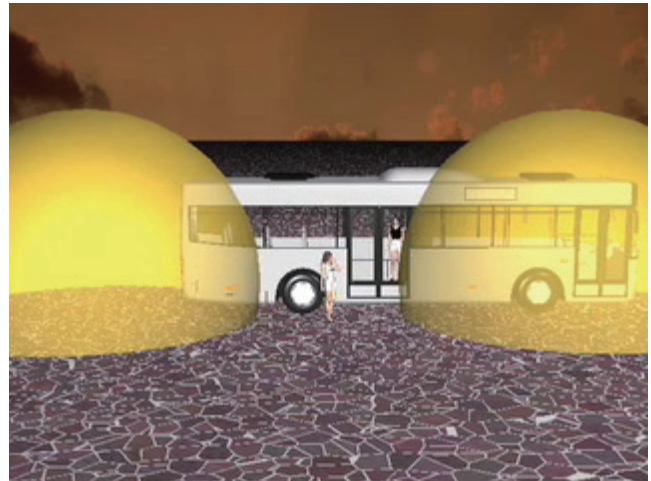
## 同時性が破れる？

光の速さは1秒間に30万キロで、日常的には光の伝わりは一瞬と思ってもかまいません。そこで、この光をスローモーションで考えてみましょう。なぜそうするかというと、一瞬の現象を一瞬のうちに説明できないからです。

図のようにバスの中央に人が乗っています。そして、停留所にももう一人女性がいて、バスを待っています。このバス停をバスが通過するとき、あら大変、バスの両端に同時に雷が落ちました。図のようにこの距離はバスを待つ人からは等距離なので、その落ちた光は同時に見えるはずですね。一方、バスに乗っている人にとっては、まず先頭からの光が最初に見えて次に真ん中の人には、図のように、最初に前の光がみえ、その後、後方からの光が見えますね。

つぎに、これをバスと同じ速度で移動しているカメラから見てみましょう。もっとも気をつけなければいけないのは、このカメラからも光の速さは先ほどとかわらず一定であることです。バスの両端からの光が真ん中まで伝わる時間は前も後ろも等しいわけです。バスに乗っている人はこのカメラでいつも静止していて、外の人が移動しています。まずもし同時に落ちてしまうとどうなるか考えてみます。同時に落ちると、光は同じ速さですので、バスに乗っている人には同時に雷が落ちることになってしまいますね。これでは、先ほどの経験と矛盾しますね。

それではどう見えなければならないのでしょうか？もう解りますね。そう、最初に前方に雷がおち、つぎに後方に雷がおちると、真ん中の人における光が見えるの時間差が説明できます。つまり、この移動する系の人には先ほど見た雷が落ちた現象は同時ではありません。このように、異なる位置における同時や時間の順序という概念は、慣性系によって変わるのです。これを**相対論的同時性の破れ**と言います。これは単なる錯覚ではなく、仮説からの帰結であるので注意しましょう。



## 時間が遅れる？

先ほどの例ではバスのスピードが光に近いのでしたら違いは顕著ですが、実際のバスのスピードでは違いはほとんど見られません。バスの速さが光の速さに近くないと実際にはほとんど同時というわけですね。そこで今度は、より現実的かどうかは別にして、宇宙ステーションのから光を発射してみます。そして、光は非常に離れた位置の鏡に跳ね返って戻ってきたとしましょう。もっとも、考えやすくするための状況設定なのでなぜ鏡があるかなどと深く考えないようにしましょう。

まず鏡まで到達する時間を計ってみます。すると、光の速さは光速ですので、鏡までの距離は、

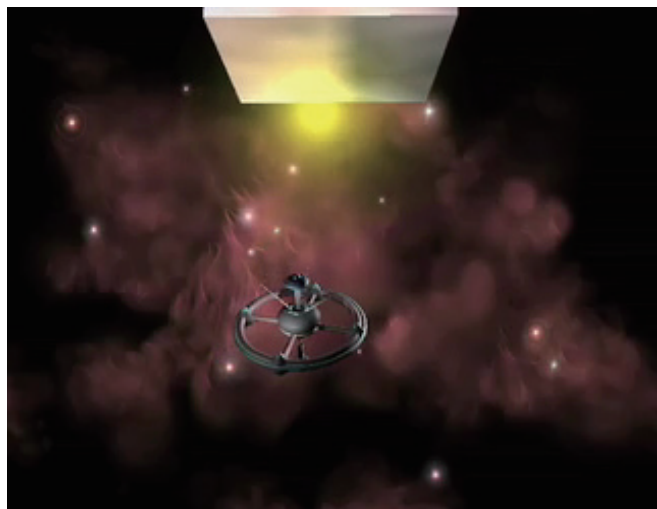
**鏡までの距離 = 光速 × 宇宙ステーションでの鏡までの時間**

ですね。

次にこの宇宙ステーションに対してある速さで移動している観測者から見てみます。

この観測者からは宇宙ステーションも鏡も右側に移動していきます。そのため、光は図のように斜めに進むこととなります。斜めに進むと、もちろん長い距離になるのがわかりますね。さて、この観測者にとっても光の速さは先ほどと同じ光速です。すると、光は長い距離を移動するので、反射して戻ってくるまでに先ほどより長い時間がかかるわけです。つまり、反射して戻ってくるまでにかかる時間が違うのです。これは光を一定の速さと感じて暮らしているわけですから、宇宙ステーション内で起こっていることすべてが、このロケットから見ると遅くなることを意味します。このように、**慣性系によって時間の進み方が異なるのです**。これを**相対論的時間の遅れ**といいます。

この時間の遅れは、素粒子実験で確かめることができます。非常に不安定で他の粒子に非常に速く崩壊してしまう粒子でも、加速器で加速して光速に近いスピードにすると、崩壊するまでの時間が長くなることが確認できます。そして、その粒子の寿命は実際に相対論での計算結果と正確に一致するのです。





## 相対論的長さの短縮

ロケットがある速度で、ある距離の星まで旅にでる場合を考えてみます。地球で見たときには所用時間は、速さは1秒間に進む距離ですので、

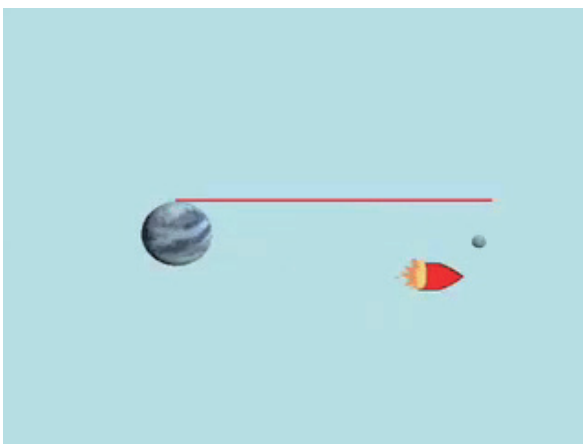
$$\text{地球での所要時間} = \text{星までの距離} \div \text{速さ}$$

ですね。星までの距離のなかに1秒間に進む距離がいくつ入っているのかを計算しているわけです。

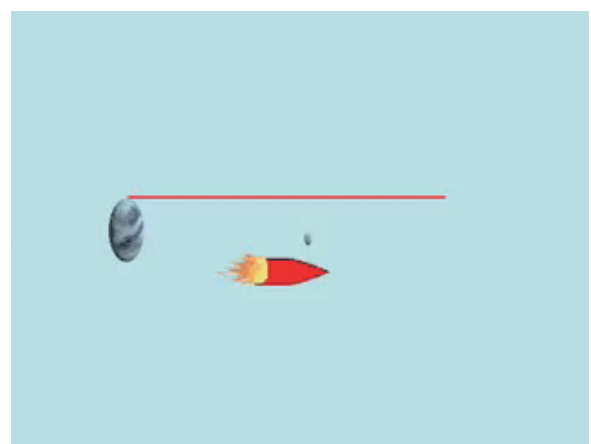
しかし、ロケットの中の人の時間では、どうでしょうか？相対論的時間の短縮により、ロケットの内部の人にとっては、短い時間で到達してしまいますね。しかも、自分からみて地球はやはり同じ速さで遠ざかっているわけですから、速さは変化していません。これはどうしてでしょうか？

これは、星までの距離がロケットに乗っている人にとって短くなっているとすると納得できます。つまり、ロケットが高速で動くと、星が手前に寄ってくるわけです。いま、ある星までの距離で見ましたが、月まででも、身近なものでも同じです。動いている系の人から見ると、その動いている方向の長さは短くなるのです。このように、移動している物体の長さは、静止しているときに比べて短くなります。これを**相対論的長さの短縮**といいます。日常的な速さではこの長さの短縮は観測されないくらいごくわずかなのですが、動く速度が光速に近くなると、長さは非常に短くなり、時間の短縮の度合いも大きくなります。

この長さの短縮も素粒子実験で確かめることができます。加速器の中で粒子の束が加速されていくと、加速する粒子の束は光の速さに近いところまでペしゃんこになっていくことが確認できるのです。



地球から見ると



ロケットから見ると

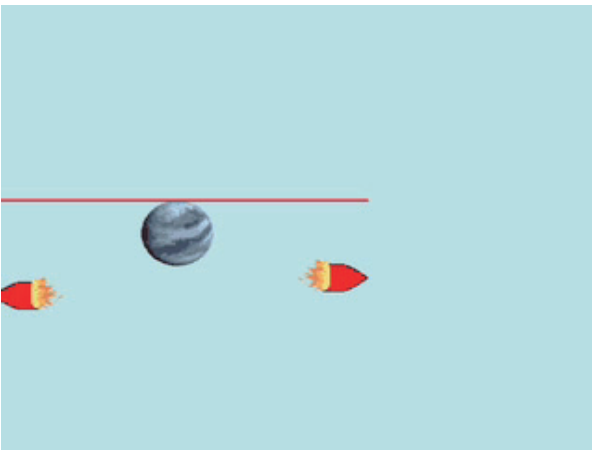
## 対論的速度の合成とは？

時速 60km で走っている車をその車からみて時速 20km で追い越してゆく車の速さは時速  $(60+20)$ km です。このように通常では、速度は見る人を変えたとき足し算で行える。これは、一秒後のそれぞれの位置を見れば納得できます。

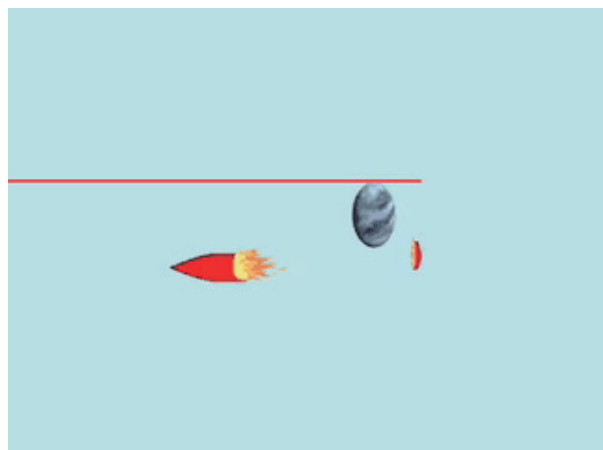
しかし、相対性理論ではこの関係が変わってきます。左図のように地球から光の速さに近いスピードで2つのロケットが、互いに逆向きに発射されたとしましょう。上に見えるのが光線です。通常感覚では、左のロケットから見た右のロケットの速度はそれぞれの速さを足したもので、ロケットの速さの2倍になります。実際、左のロケットと右のロケットの間は光線の距離より大きいので、左のロケットからみると、右のロケットの速さは光の速さを超えているようにみえます。

右の図は、実際に左のロケットと同じスピードで移動するカメラからの図です。地球も右のロケットも右側に移動しています。しかし、このロケットから見ても、光の速さは先ほどと変わらないことに注意してください。しかも、右側のロケットは、光を追い越していません。つまり、左側のロケットからみても、左のロケットの速さは光の速さよりも小さいこととなります。このように一般に、速度を合成しても光の速さになったり超えたりすることができません。日常感覚では、二つの物体がそれぞれ逆方向に遠ざかっていくとき、一方から見た他方のスピードは二つの速さの和になります。しかし、相対性理論では二つの物体がそれぞれの速度で遠ざかって行くとき、一方の物体から見た他方の速度は、その二つの速度の和よりも小さくなり、光速を超えることはできません。これを、**相対論的速度の合成**と言います。

これも加速器を用いた実験で確認できます。どんなに加速していても粒子は光の速さに近づいていきますが、光の速度になることはありません。このようにすべての情報は光の速さを超えて伝わることはないのです。



地球から見ると



左のロケットから見ると

## エネルギーと質量の等価性

今みたように速度には限界があることがわかりました。静止した状態からロケットを加速していてもいつまでたっても光速には近づけません。しかしエネルギーが保存していればロケットは噴射によってどんどん大きな運動エネルギーとなっていきます。一方ニュートンの力学では運動エネルギーは、速度の二乗に比例していましたので、このままでは運動エネルギーに限界があることになってしまいます。これはどうしたらよいのでしょうか？まず、運動エネルギーが質量に比例していたことを思い出しましょう。質量というのは通常速度によりませんが、質量が速度によると考え、光の速さに近いときには無限に重くなると考えればよいことがわかります。すると一定の力で加速していった場合にも光の速さに近づくと、質量が非常に大きくなり、加速しにくくなっていき、光の速さを超えられません。正確には、相対論的な運動方程式から導かないといけないので計算は省略します。結構面倒な計算のすえ、答えは、

$$\text{運動する物体のエネルギー} = \text{運動する物体の物体の質量} \times \text{光速の二乗}$$

となります。ここで、運動する物体の質量というのは速度を上げると大きくなる速度で、速度が小さいときには、静止質量×光速の二乗と通常の運動エネルギーの和という形に書くことができます。この静止質量×光速の二乗は、運動していないときにもあるエネルギーなので**静止エネルギー**と言います。また、このことを**質量とエネルギーの等価性**と言います。

この静止エネルギーの大きさを実感してみましょう。まず、消しゴムを思いっきり壁に投げてみます。むしゃくしゃしているひとは、もっと重い物でもいいでしょう。ただし物を壊さないようにします。いくら速くても野球の選手でもない限り、その速さは秒速10m以下でしょう。このときの消しゴムのエネルギーが壁に衝撃を与えますね。これがボールの運動エネルギーの大きさです。静止エネルギーとは、この消しゴムを光速（一秒間に地球7周半）で投げたときの運動エネルギーくらいに相当する大きさです。実際には光速で投げられませんが、仮に投げたらだれも受け止めることができないのは確かでしょう。

このように静止エネルギーに比べると、通常の運動エネルギーは非常に小さな量です。ただ、つまり、日常生活における運動エネルギーは、静止エネルギーの残りかすのようなものなのです。

相対性理論によると、質量とエネルギーという一見何の関係もない量が結びついてしまうのは驚くべきことです。

## キーワード

光の三原色、色の三原色、YMCK、CCD、絞り、虹彩、網膜、光の分散、反射の法則、鏡面反射、拡散反射、紫外線、エックス線、CT、ガンマ線、慣性系、同時性の破れ、相対論的時間の遅れ、相対論的長さの短縮、相対論的速さの合成、静止エネルギー、エネルギーと質量の等価性