

琉球大学理学部 世界物理年記念 公開講座

この100年の物理の歩み

百年前にアインシュタイン
が成し遂げたこと

<http://phys.sci.u-ryukyu.ac.jp/WYP2005/>

今年(2005)は世界物理年



1905年のアインシュタインの論文

- **光量子仮説** (3月)
- 粘性のある溶液の拡散 (4月・博士論文)
- **ブラウン運動** (5月)
- **特殊相対性理論** (6月)
- 特殊相対性理論の第2論文 (9月)
- ブラウン運動の第2論文 (12月)



Albert Einstein
(1879–1955)

光量子仮説とブラウン運動

この二つの論文は、どちらも「〇〇は粒でできている」と主張するもの

光量子仮説：光が「光量子」（現在の言い方では光子）という粒でできているという仮説。

ブラウン運動の理論：水や空気が分子という粒でできているために、ブラウン運動が起きる。

この二つは、現在の物理学にとっては「常識」。しかし1905年には、そんな常識はなかった。

ブラウン運動 (アインシュタイン以前)

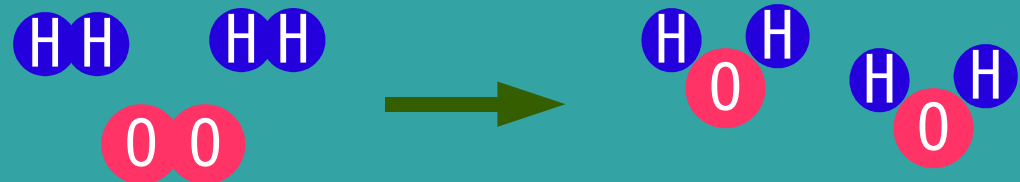
当時、分子の存在は常識ではなかった

誰が原子を見た
と言うんだ??

ドルトンの原子説 (1808)
ブラウン運動の発見 (1828)



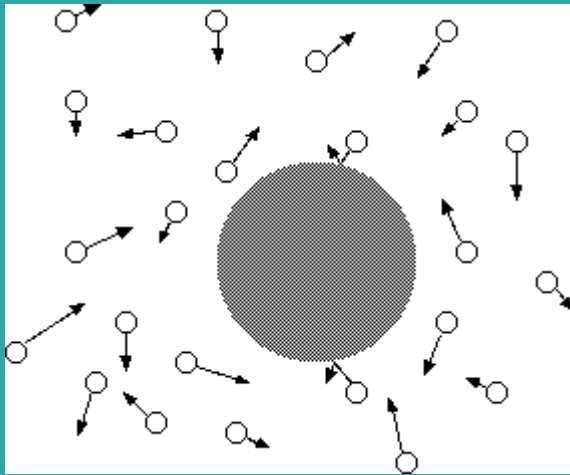
マッハ



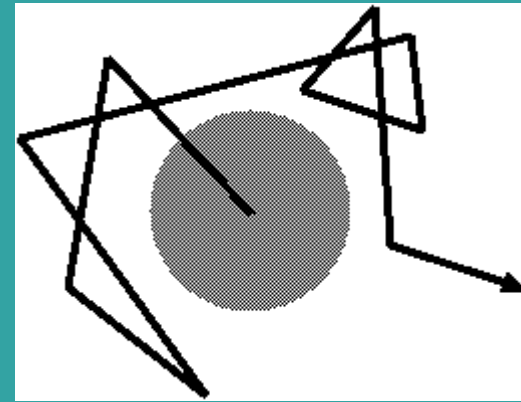
当時の物理学者たちは、「原子・分子」という考え方は「化学反応を考える時に便利」ということはわかっていたものも、「本当に分子がある」という確信は持てないでいた。

では、どのようにして分子があることを証明しようか？

ブラウン運動はなぜ起こる？ (アインシュタインの論文)



水が分子でできているなら、
水中の粒は分子に衝突される
だろう。

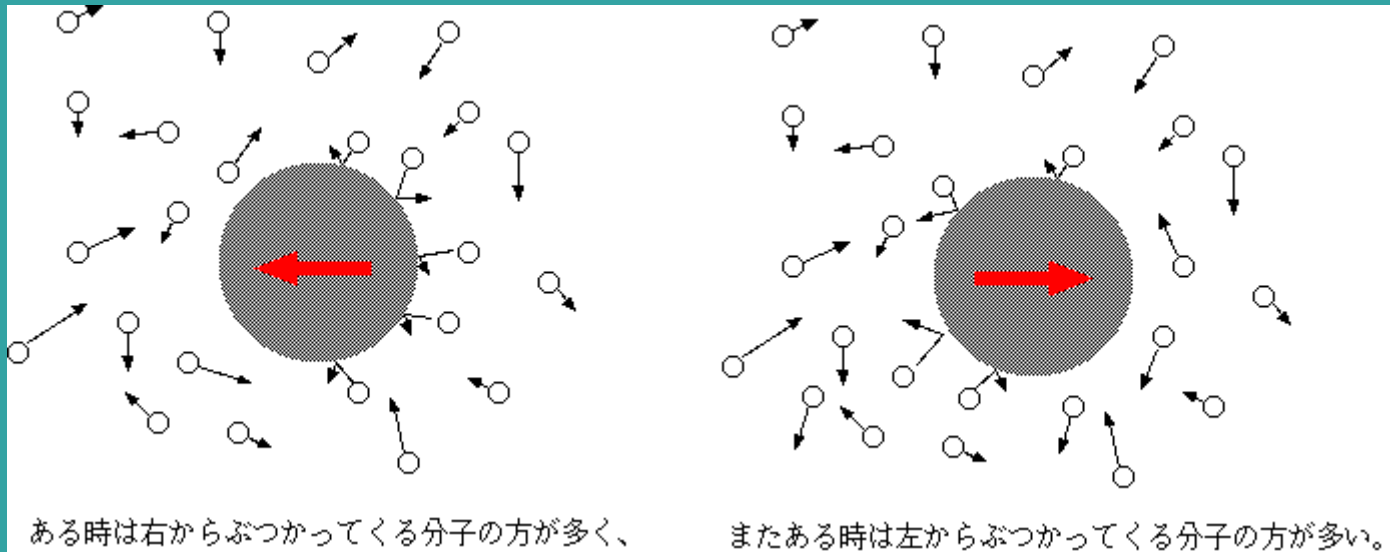


粒はふらふらと動き回るよう
な動きをする。

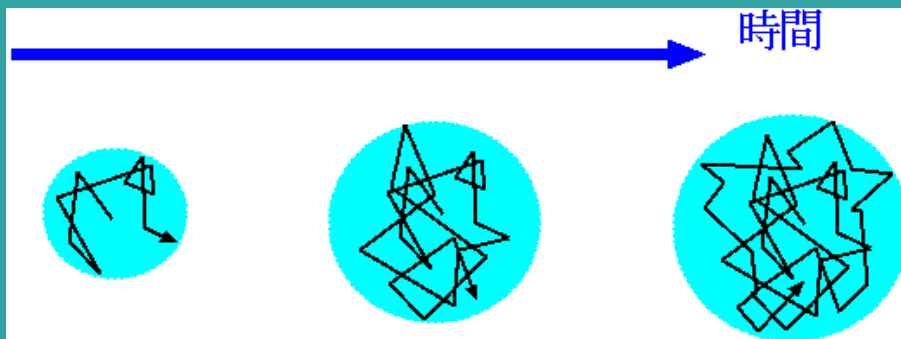
この動きを見れば、水分子の大きさを推測できる！

少ない情報を手がかりに、目に見えないミクロな実体をつかもうとする考え方は、光量子仮説に通じるものがある。

運動している粒子は、水分子に比べ10万倍ぐらい重い。つまり、水分子一粒があたっただけでは動いたりしない。



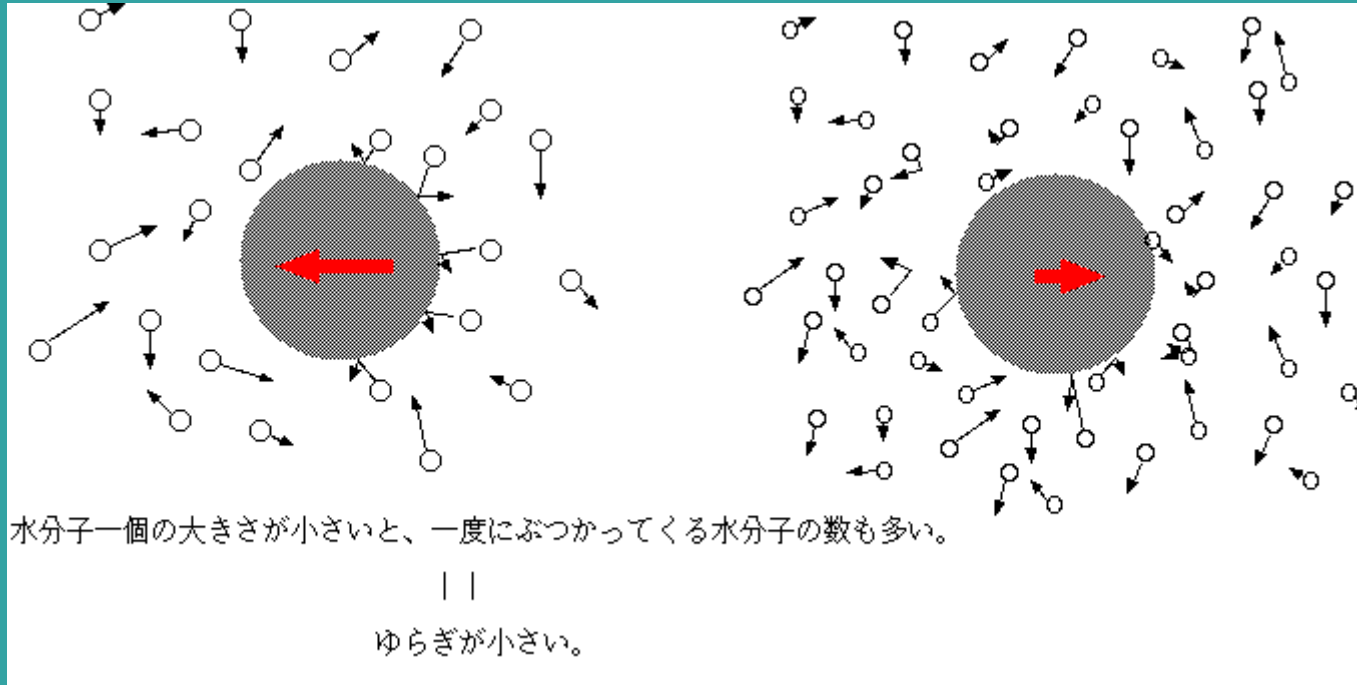
ブラウン運動の原因は、水分子の運動の「ゆらぎ」にある。
この広がりの面積が



(時間) に比例。
(絶対温度) に比例。
(温度が高いと分子が速い)

(アボガドロ数) に反比例。
(分子が小さいと動かしにくい)

アボガドロ数 $\doteq$ 18 g の水の中の水分子の数
 $\doteq$ 1 g の水素の中の水素原子の数



アインシュタインは、分子の大きさを計算するための計算式を作った。



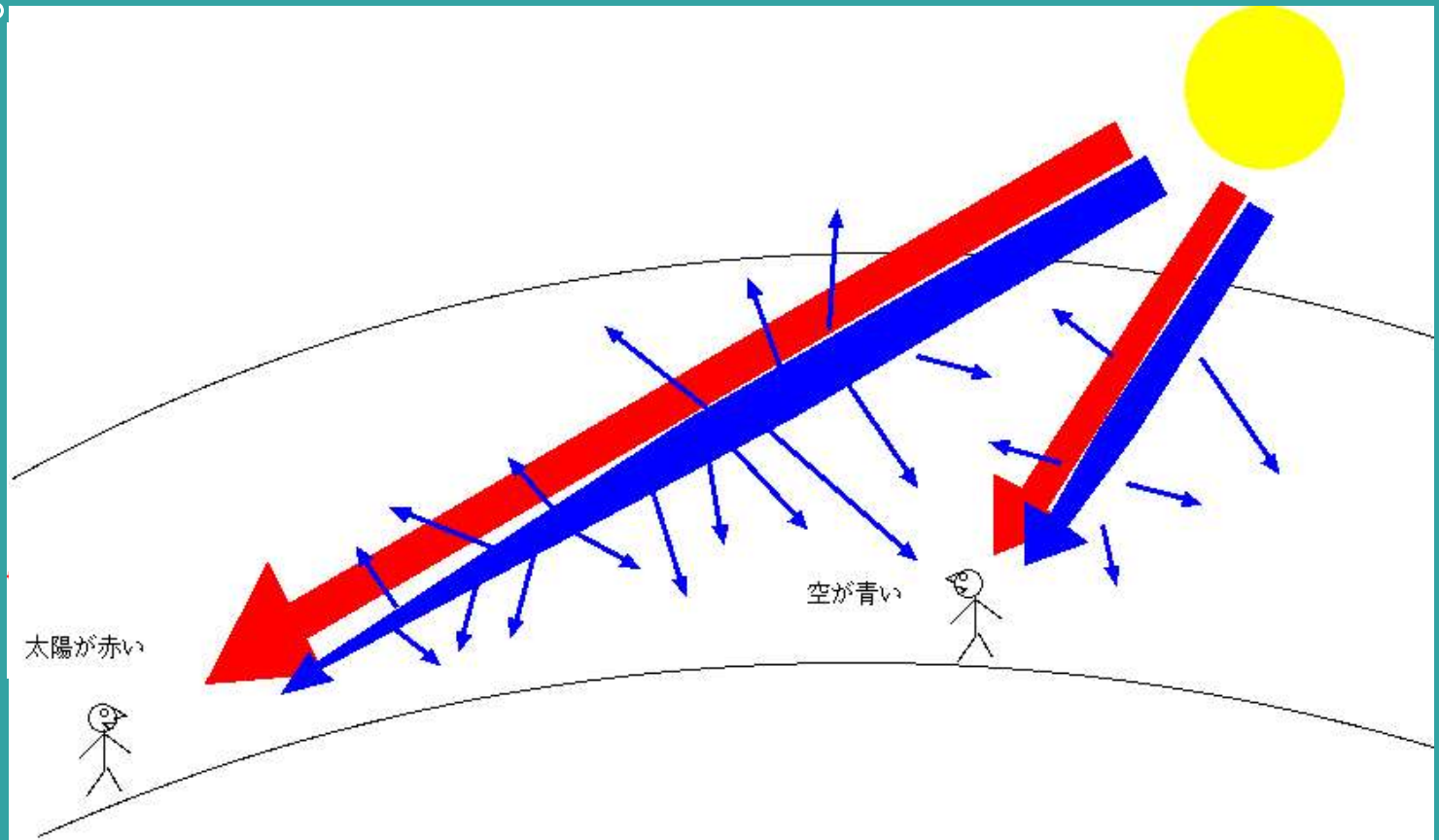
アインシュタインの出した式が正しいことは、ペランによりすぐに実験的に検証され、物質が分子でできていることが決定的に。
(ペランはこの業績でノーベル賞を獲得)

空の青さも分子のせい？

空気分子にあたった光は少しだけ
だが反射する。

波長の短い光
ほど、よく散
乱する。

もし、空気が
粒でできてい
なかったら、
光速が遅くな
るだけで、散
乱は起きない。



空の青さから空気分子の大きさを計算することもできる。
(1910年にアインシュタインが計算)

ついに分子の存在を確認

- ブラウン運動
- プランクの黒体輻射の式
- 粘性溶液の拡散 (アインシュタインの博士論文)
- 空の青さの研究

いろんな方法で計算したアボガドロ数（分子の大きさを表す数字）が全て（ほぼ）一致。

ついに原子否定論者も沈黙せざるを得なくなる。

このようにして「物質が原子・分子でできている」ということが決定的になるのは、1900～1910年ぐらいのこと。

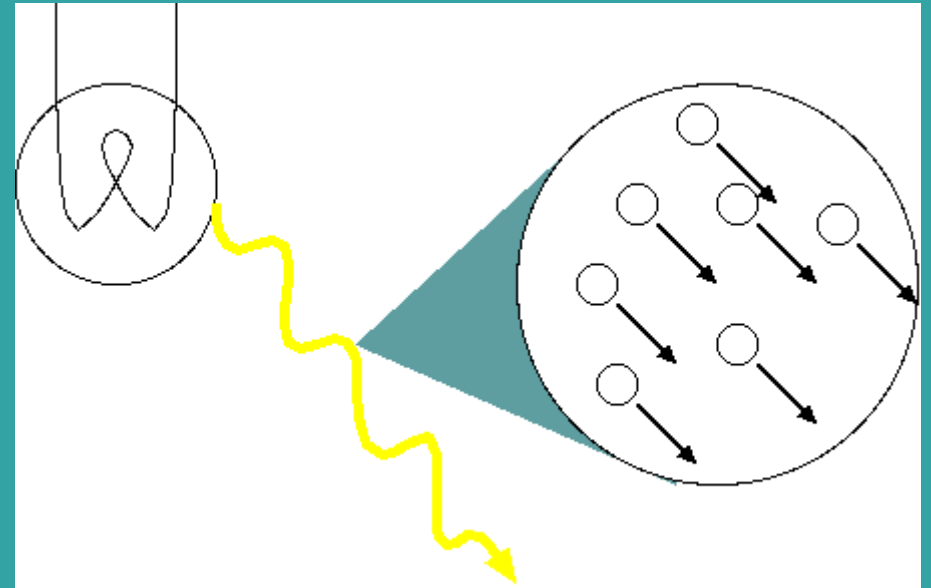
アインシュタインの論文は、原子否定論に最後のとどめを刺したのである。

光量子仮説：光は粒である

水や空気だけではなく、光も「光量子」という粒でできている。

いろんな証拠が出ていて、決定打を待っていただけだった物質の分子論と違って、こんな仮説を唱えたのはアインシュタインが初めて。

光が粒である証拠は、1900年頃から少しずつ現れ始めていた。



アインシュタイン以前の光の理論

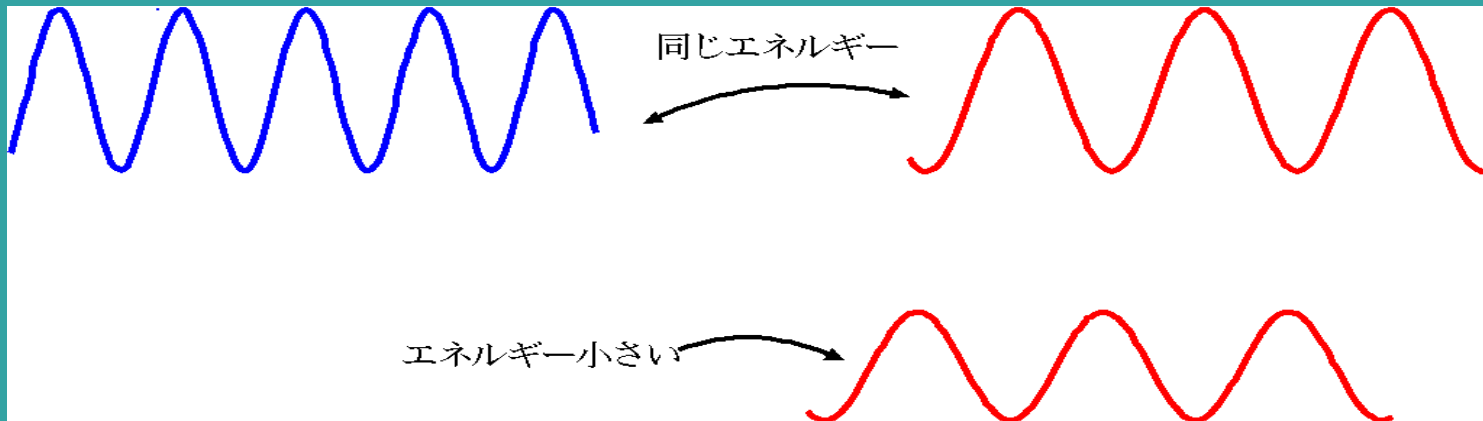
赤 橙 黄 緑 青 藍 紫

波長
振動数

←長い
←小さい

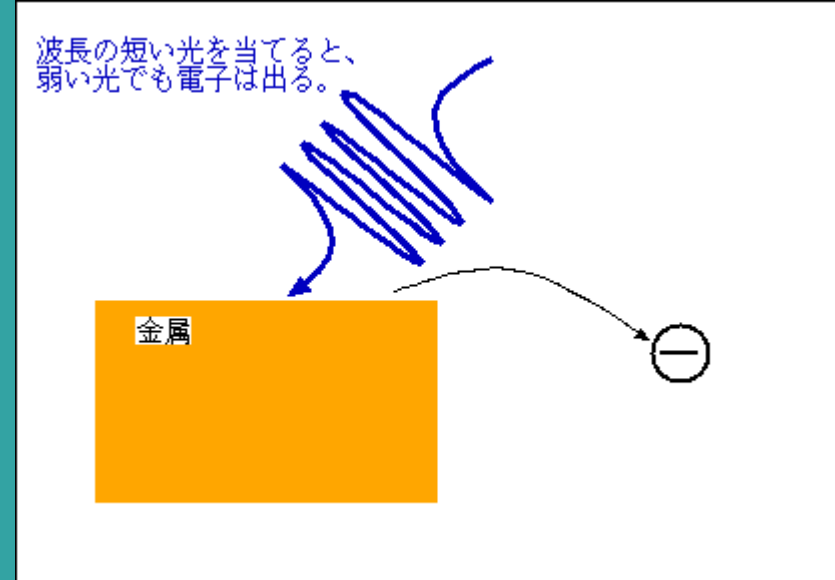
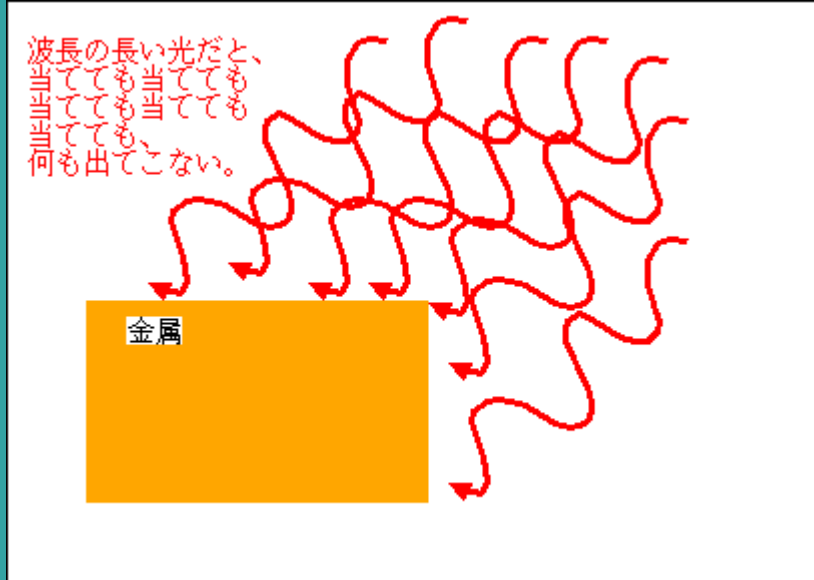
短い→
大きい→

溶鉱炉を覗くと、赤いのはなぜ？



当時の考え方（古典電磁気学）では、光のエネルギーは波長や振動数に関係なく、電磁波の振幅だけで決まった。

光電効果の謎



なぜ波長の短い光は特別なのか？？？ **(謎)**

同様に、波長の短い光（紫外線など）でしか起きない

生物 現象と言え、、、？？？

光が粒であることは、**日焼け、紫外線の殺菌効果**にも関係ある

光が粒子の一粒のエネルギーは、 私たちにどう影響するのか？

紫外線はエネルギーが大きすぎて、細胞を破壊

眼が見えるのは眼の中にある物質の化学反応
(つまり、光の粒の運んでくるエネルギーのおかげ！)

赤外線ではエネルギーが小さすぎて、生物が利用できない。

太陽がちょうどいいエネルギーの粒の光を出している
おかげで、地球上に生物が繁栄することができる。

光電効果の実験的研究



1887 光電効果の発見（ヘルツ）

1899 電子が飛び出したことの確認（トムソン）



1902 飛び出してくる電子のエネルギーは光の強さと無関係だとわかる（レナルト）

アインシュタインが論文を書いた 1905 年では、

- ・ 飛び出してくる電子のエネルギーは光の強さによらない。
- ・ 光の振動数が高くなると、電子のエネルギーも増える。
（ただし、どういう関数かまではわかってない）

というところまで判明していた。

光量子仮説(アインシュタイン)

- ・ 光のエネルギーが $h\nu$ という不連続な幅を持って変化するのなら、一塊のエネルギーが $h\nu$ であるような「粒」と考えなくてはいけないのではないか？
- ・ 光電効果の不思議に説明がつくのではないか？
- ・ 光子が $h\nu$ のエネルギーを電子に与えて、そのうち W が消費されるので、電子は $E = h\nu - W$ のエネルギーを持つ
- ・ アインシュタインは他にも、光量子の存在を確認するための実験を提案している。

が、、、

そのような実験結果はまだ出ていなかった。

光量子仮説に対する反応



プランク

作用量子の意味を真空中に求めようとは思わない。
真空中で起こることはマックスウェル方程式で
記述できるはずだ

プランクの式までは信じるが、
光が粒として伝播することは思えない



ローレンツ



光量子仮説は実験にあっているが、、、
筋が通らない様に思える。

ミリカン（アインシュタインの式 $E=h\nu-W$ を実験で確かめた人）

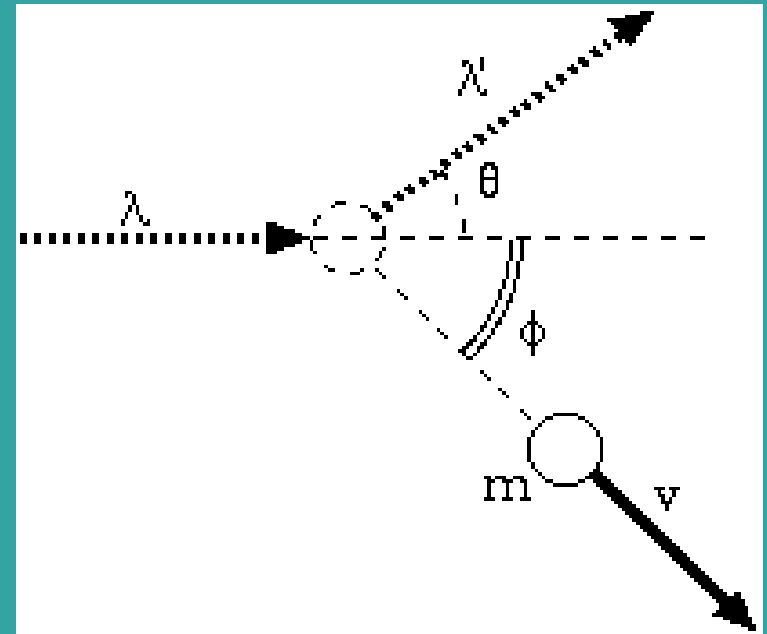
1920 年ぐらいまで、光量子という考え方は妥当だとは思われていなかった。

理由は「実験」がなかったこと

1922 年のコンプトン効果の発見で、やっと「光は粒である」と認められるようになる。なんと 17 年！

コンプトン効果とは、X 線を電子に当てると電子がはねとばされる現象。

同じ角度ではねとばされた時には、電子は同じ速さで飛ばされるし、X 線は常に同じだけエネルギーが少なくなっていることが確認できた。



ここまでのまとめ

アインシュタインが成し遂げたこととは??

光と物質が、それぞれ粒子でできていることを明らかにした。

物質が分子でできていることに関しては

とどめの一撃

光が光子でできていることに関しては

最初の一撃

をアインシュタインが加えたと言える。

この二つによって、人類の物質のとらえ方は大きく変わった。
古典物理学から現代物理学へとつなぐ、大きな発展である。

ここまででも十分すごかったのだが、、、、

特殊相対性理論前夜の状況

光は波である

波である証拠：干渉、屈折、反射

波ということは、
いったい何の振動
なんだろう？

音 = 空気の振動

光 = ? ? ? ? の振動

↑
「エーテル」と名付けよう

だとすると、地球はエーテルに
対して運動してないの???

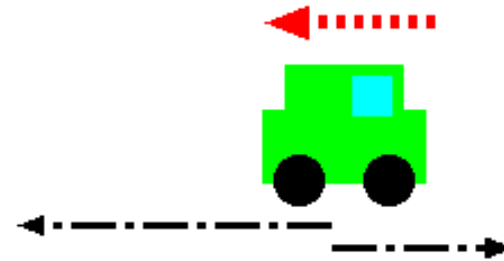
ボールと音の違い

静止している空気の中で車が動くのなら



音の速さはどちらも同じ

車上では風が吹いているように感じる。

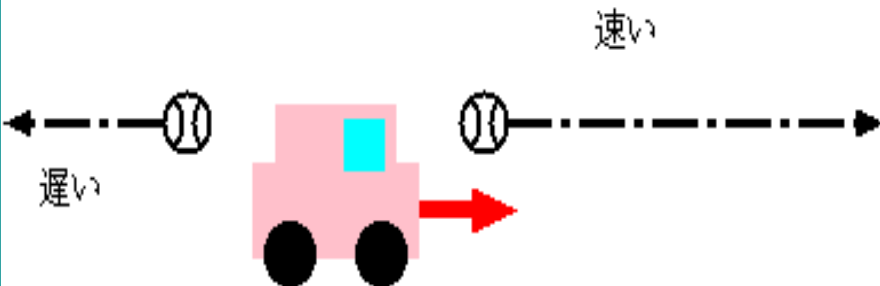


速い音（追い風）

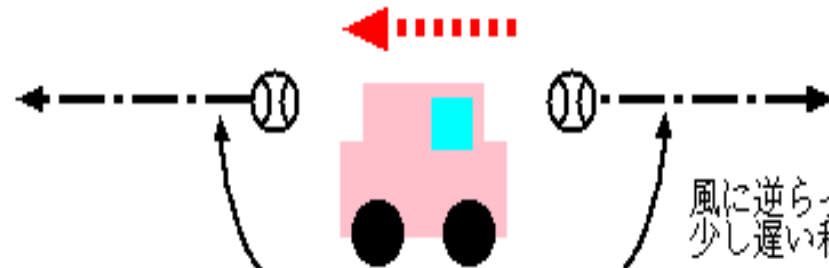
遅い音（向かい風）

音は物体が伝わっているのではなく、空気の振動が伝わっている。

車からボールを投げると



車上では風が吹いているように感じる。



風に逆らって投げる分だけ、
少し遅い程度。

車から見たら（ほぼ）同じ速さ

音と光は同じか？

静止している空気の中で車が動くのなら



音の速さはどちらも同じ

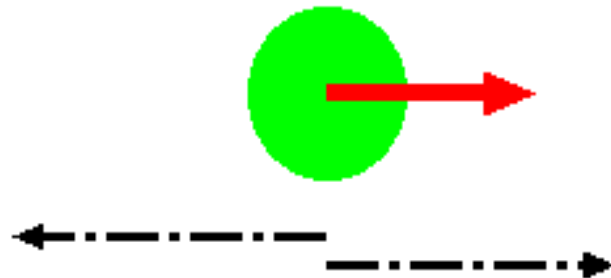
車上では風が吹いているように感じる。



速い音（追い風）

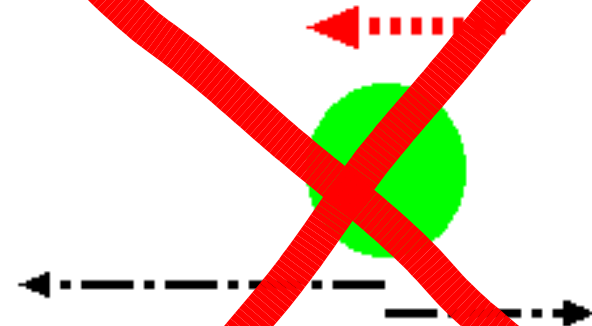
遅い音（向かい風）

静止しているエーテルの中で地球が動くのなら



光の速さはどちらも同じ

地球上ではエーテルの風が吹くように感じる。



速い光（追い風）

遅い光（向かい風）

この差を測定したい！！（マイケルソンとモーリー）

マイケルソン・モーレーの実験は否定的結果に終わった。



1881（マイケルソン） 120 センチの干渉計

1887（モーリーも加えて） 反射により 11 メートルの干渉計

1904 丘の上の実験（モーレー & ミラー）

1921 ウィルソン天文台で（ミラー）

今の技術なら、もっと精密な実験ができるし、実際やられているが、それでも光速が変化するという結果は出てこない。

いやむしろ、、、、

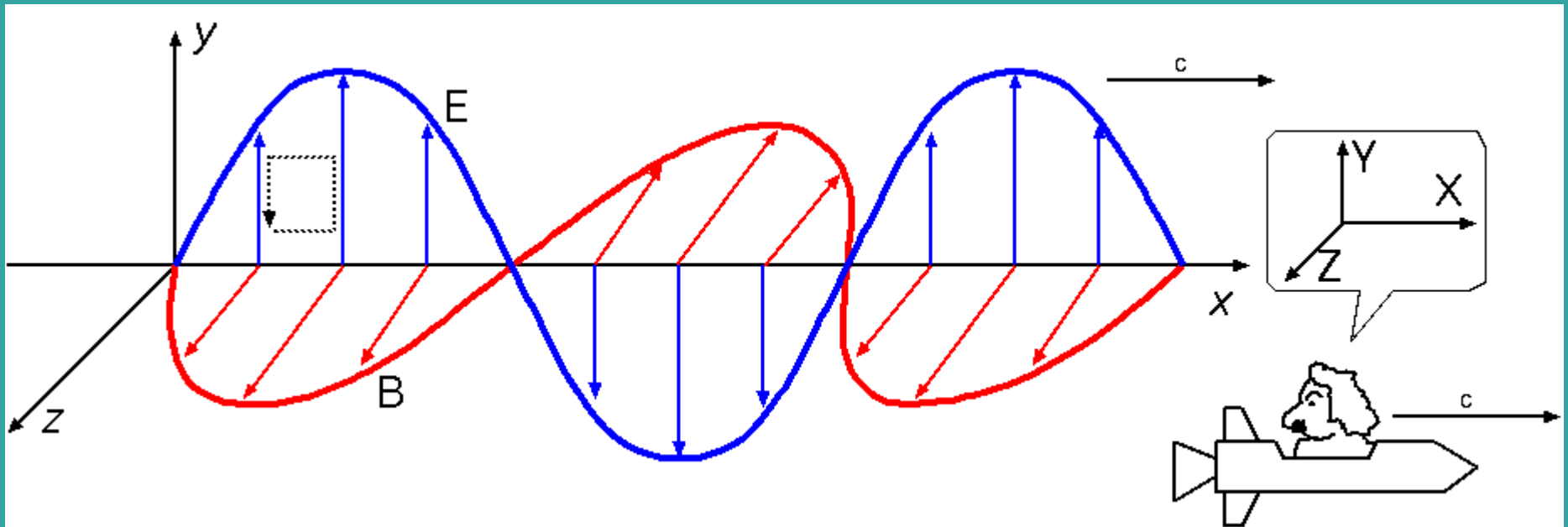
光速が不変であることを前提にして設計された機械がちゃんと動いている。

例：GPS（カーナビの機械）

アインシュタインはそんな機械もない 100 年以上前に「光速は変化しない」という本質を見抜いていた。

16歳のアインシュタインが考えたこと

光速で走る人が電磁波を見たら
何が見えるのか？

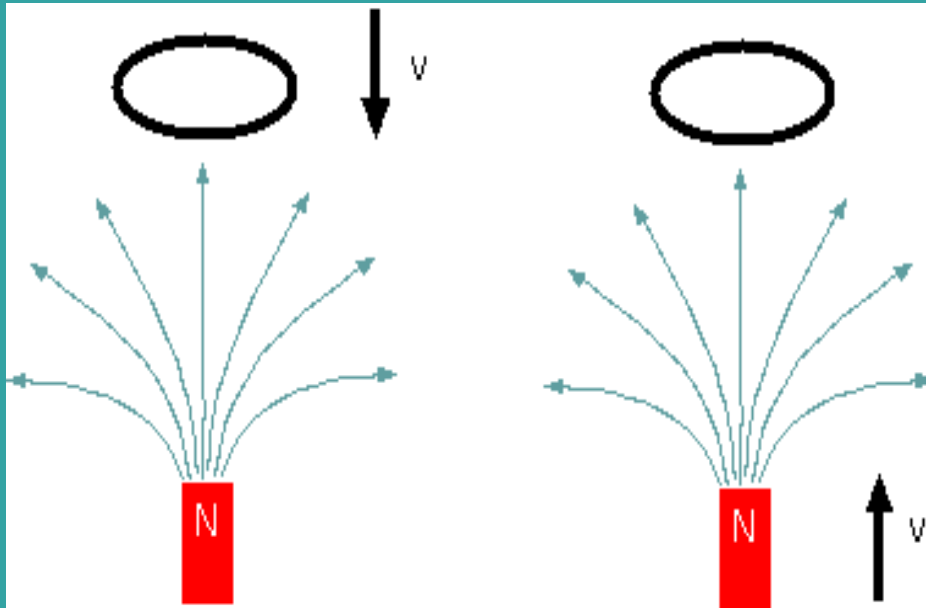


止まっている電磁波はマックスウェル方程式を満たさない。

「光が一定の速度で進む」も物理法則の一部？

この疑問をアインシュタインは10年考え続けたことになる。いったん答が見つかり、計算して論文を書くには5週間しかかからなかった。

1905 年のアインシュタインが考えたこと



どちらの場合もコイルに電流が流れる。

実験してもそうなるし、電磁気の方程式（マックスウェル方程式）を使って計算してもそうなる。

物理法則は
「相対的」
でなくっちゃ！

マックスウェル方程式とは

- ・ 電気と電気が押し合い、引き合う。
- ・ 磁石と磁石が押し合い、引き合う。
- ・ 電流の周りに磁界ができる。
- ・ 磁界が変化すると電流が発生する。

のような物理法則を式にまとめたもの。



相対性原理から始めよう

どんな立場で見てもマックスウェル方程式は正しい！！

マックスウェル方程式は光速を決める

じゃあ、光速は誰から見ても同じなんじゃない??

「どんな立場で見ても物理法則は同じ。
だからどんな立場で見ても光速は同じ」

という考え方（**相対性原理**）から出発して、
物理を作り直してみようじゃないか！

相対性原理だけから出る！

{ **ローレンツ短縮**
同時刻の相対性
ウツツ効果

アインシュタインが成し遂げたこととは??

1905年だけで、

光量子仮説

古典力学から量子力学へ

特殊相対性理論

ニュートン力学から相対論的力学へ

ブラウン運動

分子を仮説から実在のものに

1905年以降にも

一般相対性理論

ボース・アインシュタイン凝縮

EPR パラドックス

etc.

奇跡を起こすには何が必要だったのか？

常識にとらわれないこと！！

「分子は存在していたとしても小さすぎて眼に見えないから、あるのかわからないのかかわからない」という常識

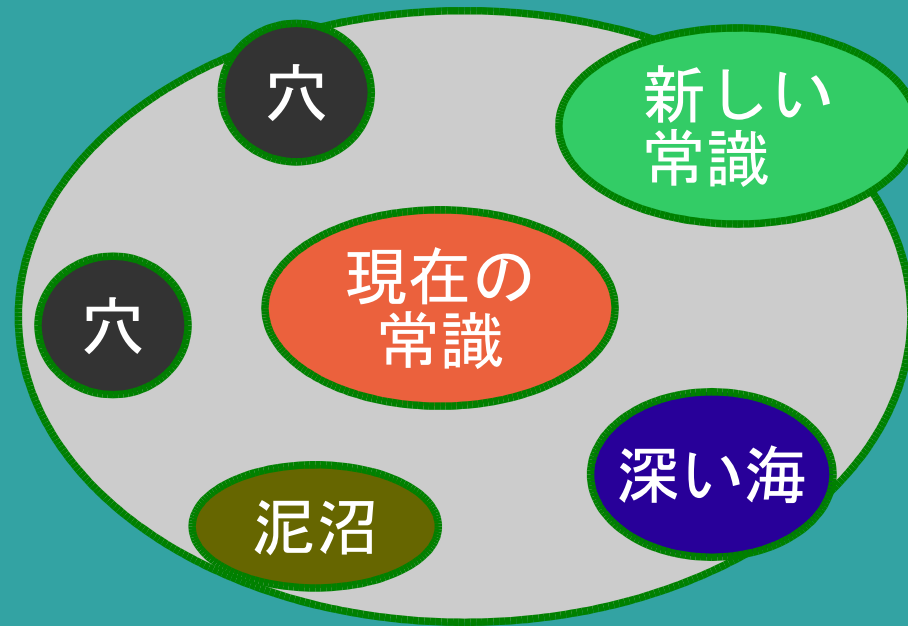
「光は波で、連続的なエネルギーを持つ」という常識

「時間は誰から見ても同じように進む」という常識

「常識」に従って作られた理論が行き詰まりを見せた時には、誰かが「常識」を疑ってかかることも必要。

常識を乗り越えるのは想像以上に難しい。アインシュタイン自身も古典力学的常識から最後まで抜け出せなかった（EPRパラドックス）

常識から外れたからといって、正しい方法に進んでいるとは限らない。



「正しい方向に足を踏み外す」 ことができるためには「現在の常識」を極めなくてはだめ。

また、新しい理論ができる前にはその兆しがいろんなところに見えているものである（ローレンツ・ポアンカレの教訓）。

アインシュタインの場合、統計力学と電磁気学を身につけ、その本質を見抜いていたことが、正しい方向へ進めた理由。

私の好きな アインシュタインの言葉

私が賢かったからじゃない。

私はずっと問題のそばにいた。
それだけなんだよ。