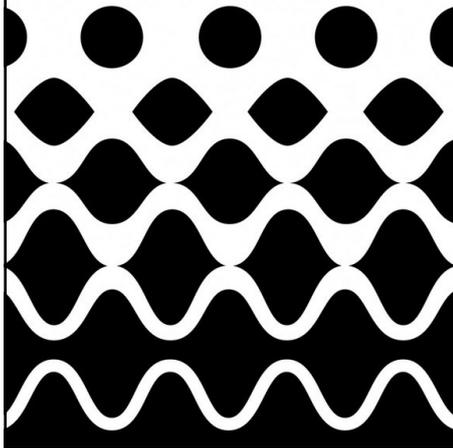
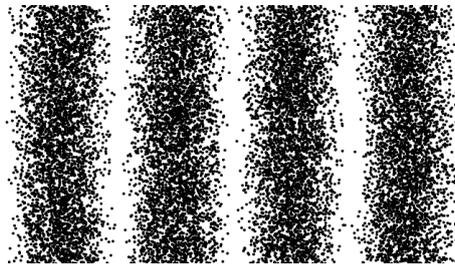


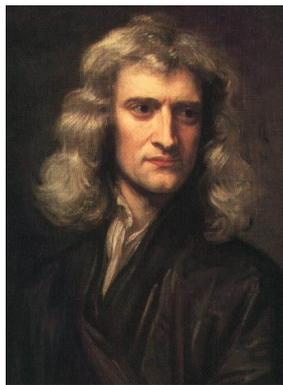
光のduality ～粒子性と波動性～



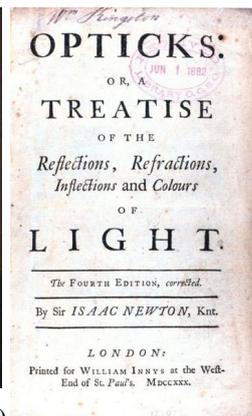
LIGHT IS A
PARTICLE!



光の粒子説



Sir Isaac Newton (1643-1727)



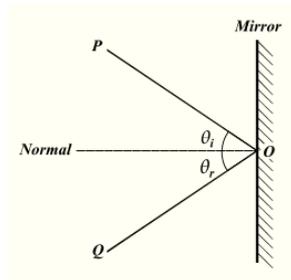
Published in 1704

1666年は“Annus Mirabilis”
(奇跡の年)

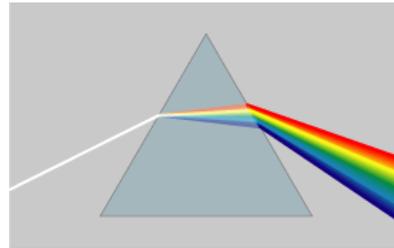
- ・1665年年始: 級数展開
二項定理
- ・1665年5月: 切線の方法
- ・1665年11月: 微分学
- ・1666年1月: 色の理論
- ・1666年5月: 積分学
- ・1666年年末: 月の運動、
惑星の軌道と万有引力
($1/r^2$ 則)

光の粒子説

Reflection



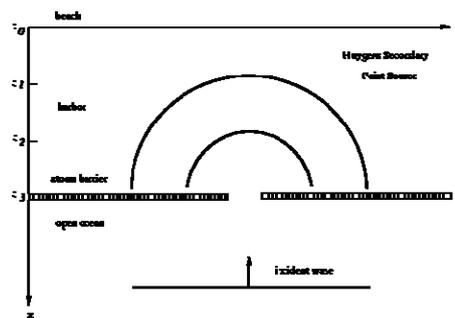
Dispersion



光の波動説

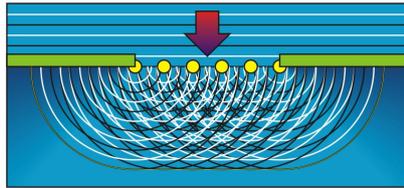


Christian Huygens (1629-1695)

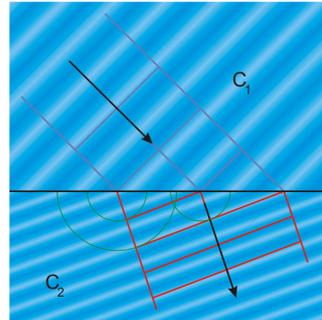


Each point on the existing wave-front can be considered to act as a source of waves (sometimes referred to as "secondary wavelets").

光の波動説



回折

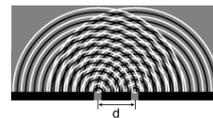
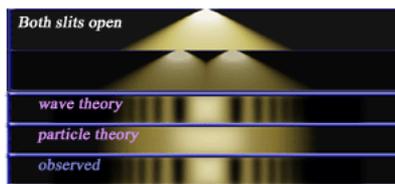
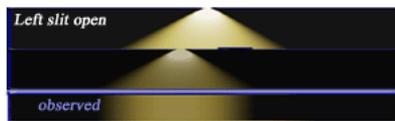
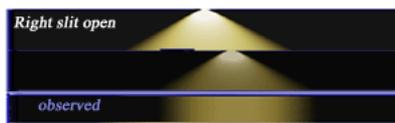


屈折

ヤングの干渉実験



Thomas Young
(1773-1829)



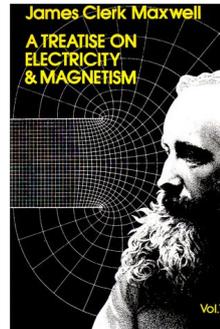
Light is a wave!

どんな波？

光は電磁波である



$$\begin{aligned}\nabla \cdot \mathbf{E} &= \frac{\rho}{\epsilon_0} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0 \\ \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{\partial t} \\ \nabla \times \mathbf{B} &= \mu_0 \mathbf{j} + \mu_0 \epsilon_0 \frac{\partial \mathbf{E}}{\partial t}\end{aligned}$$

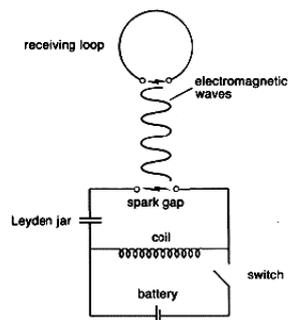


“This velocity is so nearly that of light, that it seems we have strong reason to conclude that light itself (including radiant heat, and other radiations if any) is an electromagnetic disturbance in the form of waves propagated through the electromagnetic field according to electromagnetic laws.”

電磁波の発見



Heinrich Hertz (1857
- 1894)

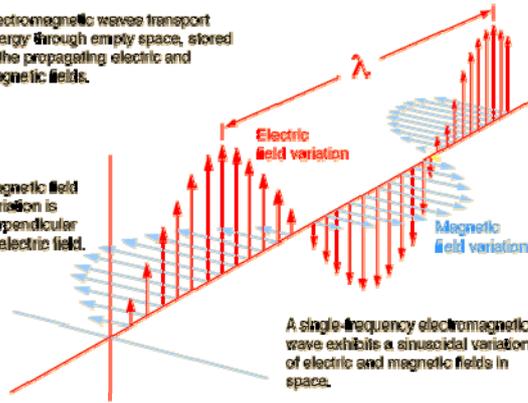


"I do not think that the wireless waves I have discovered will have any practical application."

電磁波

Electromagnetic waves transport energy through empty space, stored in the propagating electric and magnetic fields.

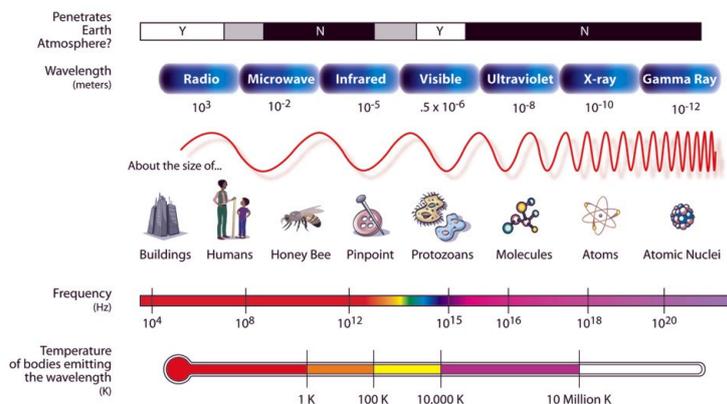
Magnetic field variation is perpendicular to electric field.



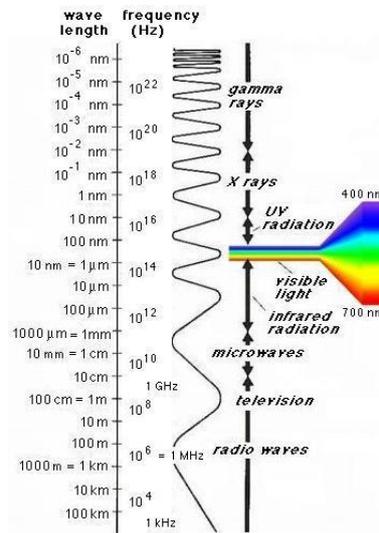
$$v = \frac{c}{\lambda}$$

電磁波のスペクトル

THE ELECTROMAGNETIC SPECTRUM



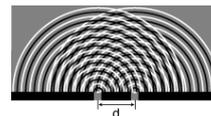
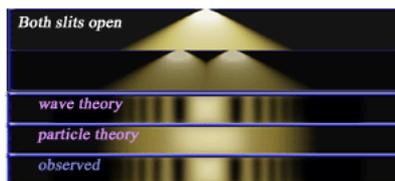
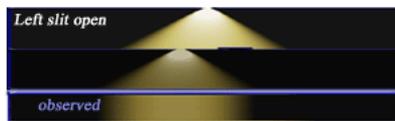
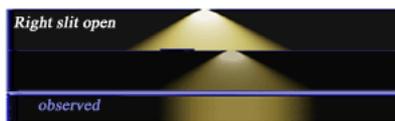
電磁波のスペクトル



ヤングの干渉実験

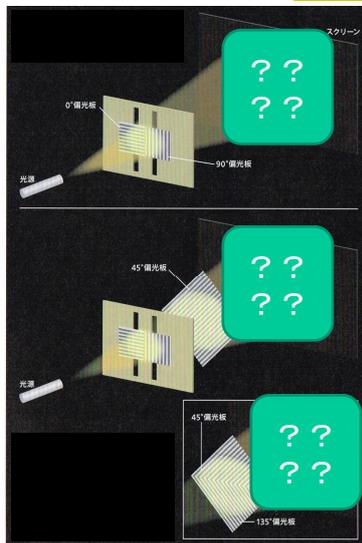
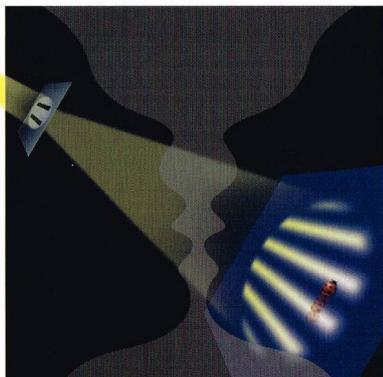


Thomas Young
(1773-1829)



Light is a wave!

ヤングの干渉実験



日経サイエンス別冊「量子の逆説」

光は本当に波？

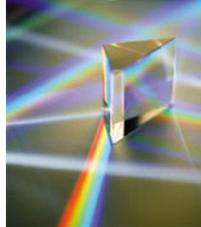
回折: diffraction



屈折: refraction



分散: dispersion

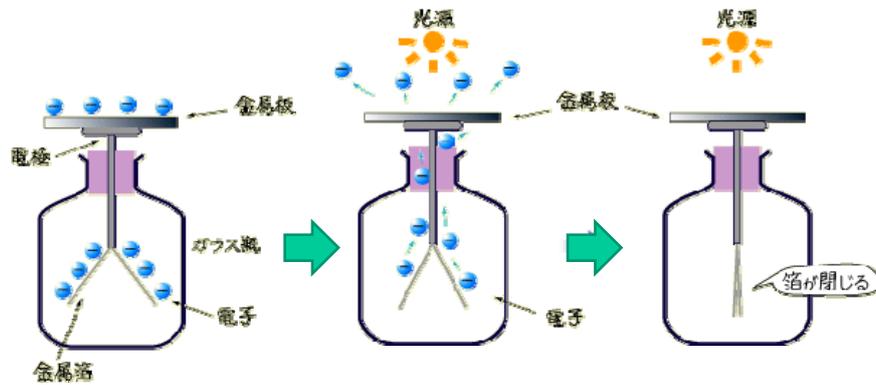


反射: reflection



(再び) 光の粒子論

光電効果

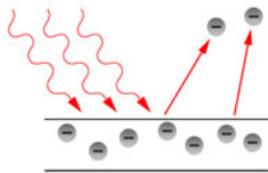


光が当たると箱が閉じる。
(…そのあと、どうなるでしょう?)

<http://hooktail.sub.jp/quantum/photoelectric1/>

(再び) 光の粒子論

光電効果

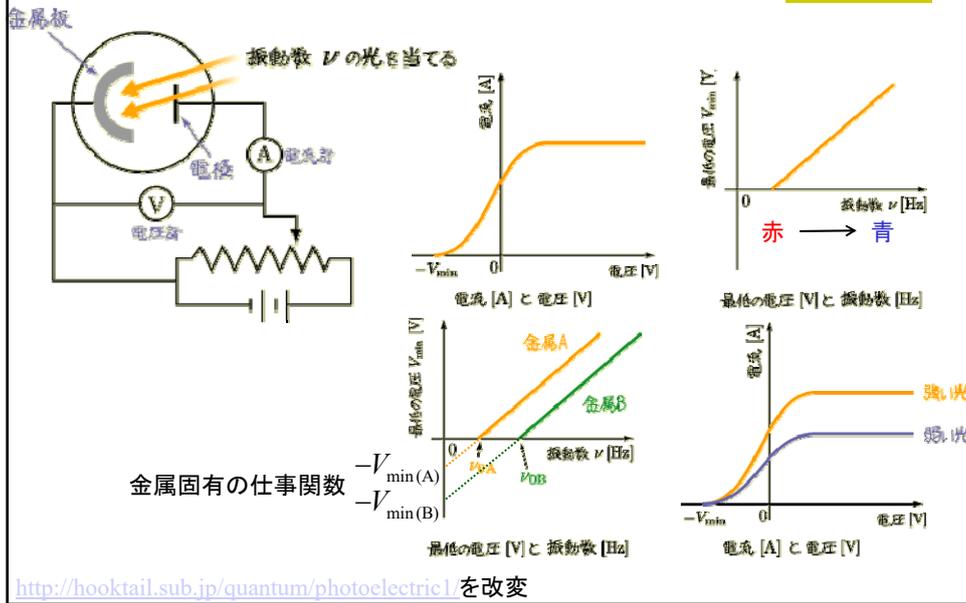


光により電子が飛び出す現象

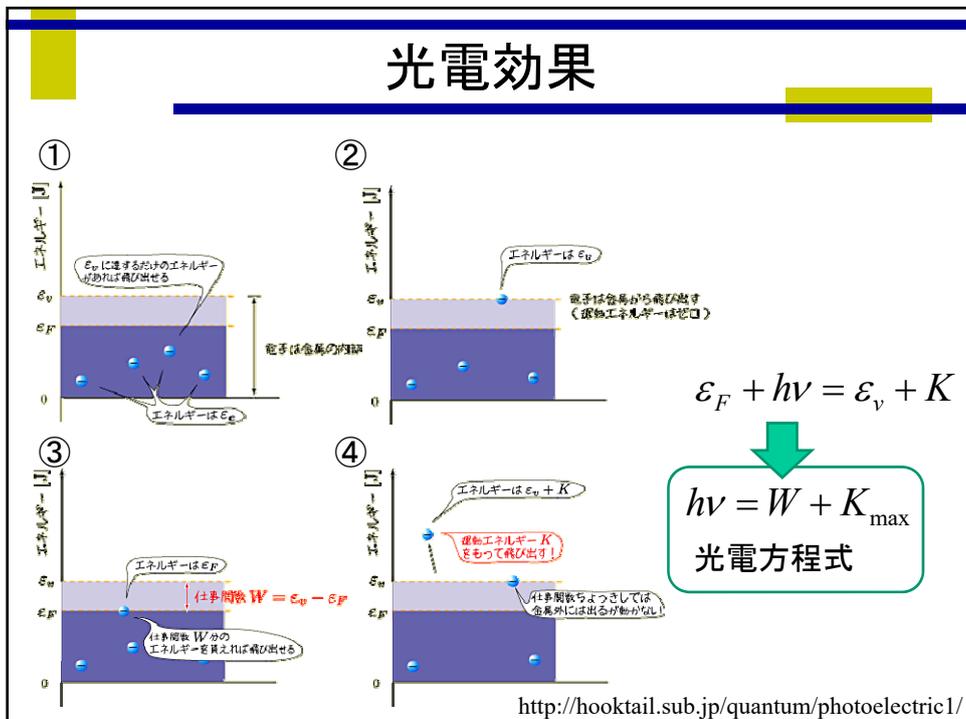
- (1) 光を当てた瞬間に電子が出てくる。
- (2) 電子の数は、光の強さに比例。
- (3) 波長がある値より長い光では、
どんなに光を強く(明るく)しても
出てこない。
- (4) 波長がある値より短い光では、
どんなに光を弱く(暗く)しても出てくる。

…光のエネルギー塊(光量子)と電子との
一対一の相互作用

光電効果



光電効果



Planck(プランク)の量子仮説

- Planck (1900)

- 振動数 ν の振動子が持つエネルギーは離散的な値に限られる。

$$\varepsilon = nh\nu \quad \text{エネルギーの量子化}$$

$$n=0,1,2,\dots$$

$$h = 6.62607 \times 10^{-34} \text{ J}\cdot\text{s}$$

Planck 定数

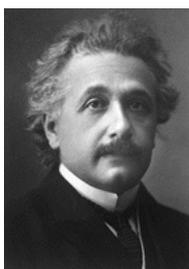
「やむをえない。我々は量子論を受け入れなければならない。しかも、それはもっとひろがるだろう。光学だけに限られず、あらゆる分野へひろがっていこう。

我々はそれに耐えねばならない」

(素粒子物理学をつくった人々)



Atoms of light



“On a Heuristic Viewpoint Concerning the Production and Transformation of Light”, Einstein, 1905

- Light is composed of light quanta $E = h\nu$
- Light is electromagnetic radiation “associated with singular points just like the occurrence of electrostatic fields according to the electron theory”

“I therefore take the liberty of proposing for this hypothetical new atom, which is not light but plays an essential part in every process of radiation, the name **photon**”, Gilbert N. Lewis (chemist), 1926

光子 (Photon)

電磁波における周波数と波長の関係:

$$\nu = \frac{c}{\lambda}$$

光子のエネルギーと周波数との関係:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda}$$

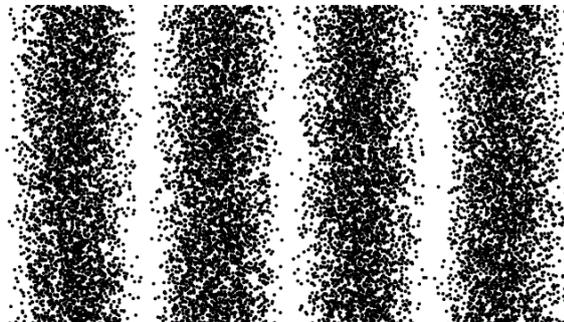
複数の光子は同じ“状態”を持つことができる(ボゾンの性質):

$$E_{\text{tot}} = nh\nu$$

Photon interferes with itself.



Dirac



ド・ブロイ波の導出

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv}$$



- 光子の“質量”？:

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \qquad E = mc^2$$

$$m = \frac{E}{c^2} = \frac{hc/\lambda}{c^2} = \frac{h}{\lambda c}$$

...光子の質量は
実際はゼロです
 $E = \sqrt{m^2c^4 + |p|^2c^2}$

- 光子の運動量:

$$p = mc = \frac{h}{\lambda}$$

- 電子などの粒子の波長は？(ド・ブロイ波):

$$\lambda = \frac{h}{p}$$

ド・ブロイ波の例

物体	質量 (kg)	速さ (m/s)	ド・ブロイ波 (pm)
自動車	1000	27.8	2.38×10^{-26}
野球のボール	0.142	25.0	1.87×10^{-22}
10 kVで加速された電子	9.284×10^{-31}	5.85×10^7	12.2
100 Vで加速された電子	9.109×10^{-31}	5.93×10^6	123



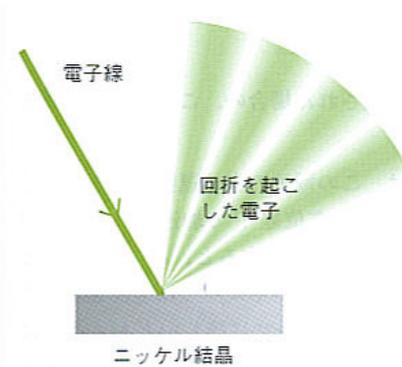
X線と同程度の波長

電子の波動性

• 実験結果その1.

– Davisson(デヴィッソン)とGermer(ガーマー)
(1925)

- 電子線をNi結晶表面に照射すると、規則的なパターンが出現



図の出典:アトキンス物理化学

電子の波動性

• 実験結果その2.

– G. P. Thomson(トムソン:J.J.Thomsonの息子)
(1927)

- 電子線を金箔に照射して、同様な現象を観測

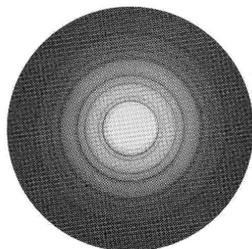


図1 Au金属薄膜による電子回折像
(提供:朽津耕三氏)

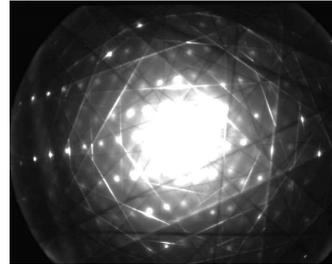


DavissonとG. P. Thomsonは1937年に
ノーベル物理学賞受賞

図の出典:77講

電子の波動性

- 実験結果その3.
 - 菊池正士 (1927)
 - 薄い雲母箔を用いて観測



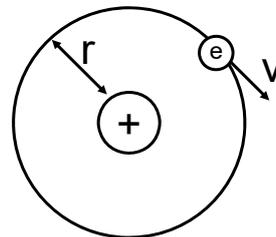
IF (極低炭素)鋼に見られる菊池線

どの実験も、
規則的な原子配列を反映

<http://www.kahaku.go.jp/news/2006s-tec-people/05.html>

ボーアの量子条件

- 水素原子に関する理論を提出 (1913)

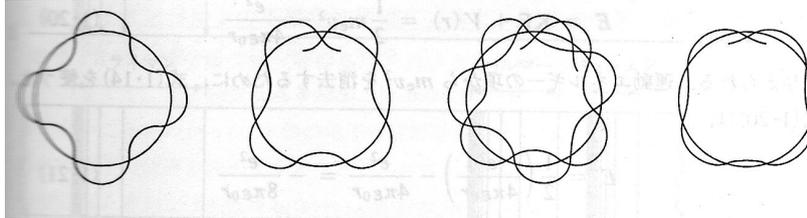


- Bohrのおいた仮定の一つ
 - 量子条件: 電子の角運動量について、以下が成り立つ

$$L = mvr = n \left(\frac{h}{2\pi} \right) \equiv n\hbar \quad (n = 1, 2, 3, \dots)$$

ボーアの量子条件

量子条件の直感的な説明



軌道運動する電子のド・ブロイ波は、
電子が軌道を一周したときにぴったり重なる。

$$2\pi r = n\lambda$$



...量子条件が出てくる

$$\lambda = h/mv$$

図の出典：
マッカーリ・サイモン

ハイゼンベルグの不確定性原理

古典力学における測定

ボールの位置を測定する。光を当てると正確に像を結び、ボールの運動量は変化しない。

スクリーン

ボールの位置は正確に測ることができる。

光

ボール

運動量

光を当ててもボールの運動量は変わらない。

ある時刻の位置と運動量を正確に知るができる

未来は予測できる

古典力学の決定論的世界観

ハイゼンベルクの思考実験(1927年)

電子の位置を測定する。光を当てて顕微鏡で見ると電子の像はぼやけて降り、測定誤差が生じる。一方、電子は光子に撞かれて運動量が不規則に乱れる。

スクリーン

誤差 ϵ_q

光

電子

光の回折効果によって電子の像はぼやける。ぼやけた像の大きさで位置の誤差が生じる。

誤差 $\epsilon_q \propto \lambda$

光子が当たって跳ね返るときに電子に運動量を与える。その大きさは光子の運動量に比例する。

乱れ $\eta_p \propto \frac{h}{\lambda}$

運動量の乱れ η_p

ハイゼンベルクの測定

$\epsilon_q \eta_p \sim h$

↓

不確定性原理

$\epsilon_q \eta_p \geq \frac{h}{4\pi}$

ある時刻の位置と運動量を双方正確に知ることはできない

未来はわからない

新たな量子力学の世界観

もうひとつの不確定性原理

電子の位置も運動量も、測定するが否かにかかわらずある幅でゆらいている。そのゆらぎ同士にも不確定性関係が成立する。

電子

位置のゆらぎ σ_q

電子

運動量のゆらぎ σ_p

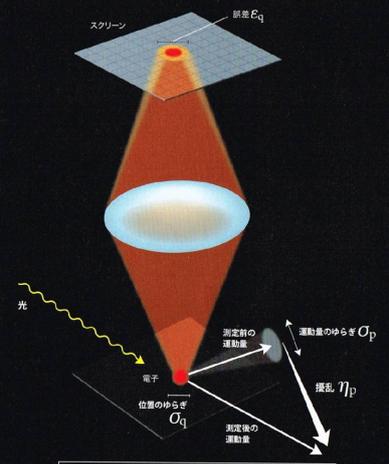
ケナードの式 $\sigma_q \sigma_p \geq \frac{h}{4\pi}$

日経サイエンス別冊「量子の逆説」

ハイゼンベルグの不確定性原理

小澤の不等式(2003年)

小澤は思考実験によって不等式を作り出したわけではないが、小澤の式がハイゼンベルクの式とどう違うかは、頭後頭の思考実験を考えるとわかりやすい。ハイゼンベルクの思考実験では電子は古典的だったが、小澤の式では測定前の電子の位置のゆらぎと、運動量のゆらぎが考慮されている。



$$\text{小澤の不等式 } \epsilon_q \eta_p + O_q \eta_p + O_p \epsilon_q \geq \frac{h}{4\pi}$$



注目を集めた記者会見 2012年1月13日、東京・霞が関の文部科学省で。

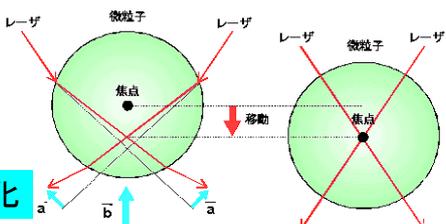
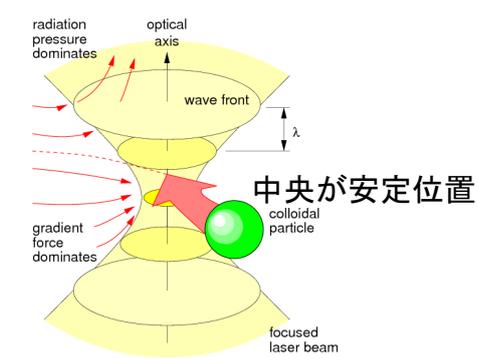
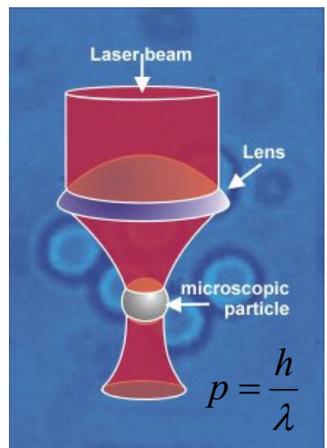
$$\epsilon_q \eta_p + O_q \eta_p + O_p \epsilon_q \geq h/4\pi$$

ϵ_q : 位置の測定誤差
 η_p : 運動量の擾乱
 O_q : 位置の量子ゆらぎ
 O_p : 運動量の量子ゆらぎ
 h : プランク定数

日経サイエンス別冊「量子の逆説」

光ピンセット

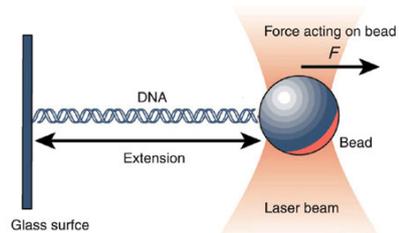
• 光で“押す”



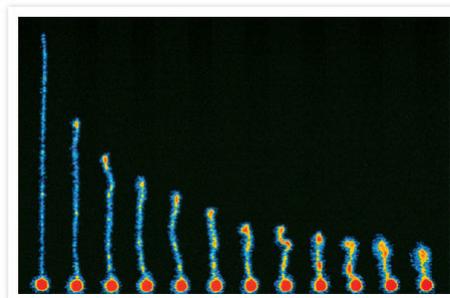
光の運動量変化

光ピンセット

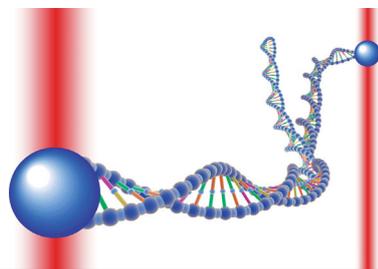
- DNAを引っ張る



<http://jolifukyu.tokai-sc.jaea.go.jp>



<http://ja.invitrogen.com/>



<http://www.nature.com/nphys>