

静電引力(クーロン力)

正電荷と負電荷の間に働く力。各電荷の大きさに比例し、距離の二乗に反比例する。重力が、2つの物体の間に働き、各物体の質量に比例し、距離の二乗に反比例するのと似ているが、重力よりも何十桁も強い。原子核の周囲に電子が捉えられたり、原子の間に結合ができるのは、すべてクーロン力による。磁力と同様、電子のクーロン力は原子の中で相殺するため、クーロン力の本当の強さを体感することはほとんどない。

初期の原子モデルの限界

電子は、クーロン力で核にとらえられ、核の周囲を周回している(長岡/Rutherfordモデル)

→ 電子の軌道を曲げると光を放射してエネルギーを失う(制動放射)ので、電子はどんどん波長の短い光を放射しながら、一瞬で核に落ちこんでいくはず。だが、現実にはそんな光は観測されたことがない。

原子の発する光

原子の発する光を分光すると、輝線スペクトル(特定の波長だけを含むスペクトル)となる。含まれる輝線の波長は元素によって全く異なる。

光

光は電磁波の一種。電波からガンマ線まで波長の範囲は非常に広いが、目に見える光は波長400~650nmの範囲。これは太陽から地球に届く電磁波が最も強い範囲と重なる。携帯電話(2.4 GHz帯)の電波の波長は10 cm、プラチナバンド(800 MHz帯)だと40 cm。波長が短いほど直進性高い。

光速度は一定 $c = 3 \times 10^8$ m/s

振動数と波長

振動数 ν ニュー 波が1秒間に振動する回数

波長 λ ラムダ 波の山から山の距離

振動数と波長の関係式: $\lambda\nu = c$ (波の速度)

回折と干渉

波は障害物の背後に入りこむ。(回折)

2つのスリットから入った波が、干渉して縞模様を作る。

どちらも粒子では起こりえない。

光電効果

金属に光(紫外線)を当てると、電子が飛びだす。電子の持つエネルギーは次の式に従う。

$$E = h\nu - E_0$$

ただし、 ν は光の振動数、 h と E_0 は定数。

飛びだす電子の数は、光の強さに比例する。ただし、

1. 振動数がある値よりも少ない($\nu < E_0 / h$)光では、どんなに強い光でも電子は出ない。

2. 振動数がある値よりも多い($\nu > E_0 / h$)光では、どんなに弱い光でも電子が出る。

光が波であれば、波長が長くても十分強い光をあてれば電子が出るはず。

このことから、アインシュタインは光が波と粒子の両方の性質を持つという仮説を導入した(光量子仮説)

光の強さ(明るさ)と波長(光子の波としてのエネルギー)とは別物。明るい光は光子の数が多い。波長の短い光は光子1つのもつエネルギーが大きい。

太陽系
重力相互作用
 $F = -G \frac{Mm}{r^2}$

原子
静電相互作用
 $F = k \frac{Q_1 Q_2}{r^2}$

初期の原子モデル

Plum Pudding Model by J.J. Thomson (1897)

土星モデル by 長岡半太郎 (1904)

- 原子の放つ光をプリズムで分ける
- 不連続な“スペクトル”
元素によって全く異なる

白熱電球 (連続スペクトル)
水素H (線スペクトル)
ヘリウムHe (線スペクトル)
ナトリウムNa (線スペクトル)

波長と色 <http://science.com>

Increasing energy
Increasing wavelength

0.0001 nm 0.01 nm 10 nm 1000 nm 0.01 cm 1 cm 1 m 100 m

Gamma rays X-rays Ultra-violet Infrared Radio waves Radar TV FM AM

Visible light
400 nm 500 nm 600 nm 700 nm

回折と干渉
単色の光 (レーザー光)

- 振動数と波長の関係式
 $\lambda\nu = c$ (速度)
- 波長が長いほど回折しやすい。

光の性質

- 光電効果 (ハルヴァックス, 1888)
金属に光を当てると電子が飛びだす。

光の二重性

光は粒子としての性質も持つ。

光の運動エネルギー $E = h\nu$

ただし、 h はプランク定数 7×10^{-34} J·s、 ν は光の振動数。

(光子には質量がないので、通常の粒子の運動エネルギー $\frac{1}{2}mv^2$ とは異なる)

粒子の二重性

de Broglieの主張 (1924): 「すべての粒子は波をとまなう」

あるいは「すべての粒子は波とみなせる」

すべての粒子にドブロイの関係式が成り立つ

$$p = mv = h / \lambda$$

p は粒子(光子)の運動量、 m は粒子の質量、 v は粒子の速度、 h はプランク定数、 λ は物質波(光波)の波長。質量 m が大きいほど、波長 λ は小さくなる。¹

電子もまた、波である

電子はクーロン力で、原子核に捉えられている。有限領域に閉じこめられた波は、共鳴しないと相殺して消えてしまう。(定在波の条件)

1、2、3次元の定在波

弦(1次元)、膜(2次元)の振動から、原子核にとらえられた電子の定在波(3次元)の形を類推する。(実際には、定在波の形は理論計算で求められる)

ボーアの原子模型

電子は、原子核の周囲で、多数ある定在波のうちのいずれかの形になる。通常はもっとも低いエネルギー=最も節の少ない定在波が選ばれる。電子が複数ある場合は、それぞれが異なる定在波を選ばなければいけない。そのため、すべての電子が最も低いエネルギーの定在波を選ぶことはできない(パウリの排他原理)。原子内の電子のとりうるエネルギーには下限がある。それぞれの定在波のことを電子の「軌道」と呼ぶ。定在波なので、電子のエネルギーはとびとびの値しかとれない。(粒子性、量子性)

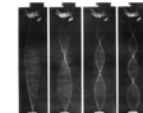
高エネルギー(高振動数、節が多い)軌道の電子は、より低エネルギーの軌道が空いていれば、そちらに移ることができる。その時に、エネルギーの差が光子として放出される。→**輝線スペクトルの原因**

逆に、光子を受けると、より高エネルギーの軌道に上がることもできる。光子から受けるエネルギーが非常に高い場合には、電子は最も上の軌道を越え、原子から飛びでてしまう→**光電効果**

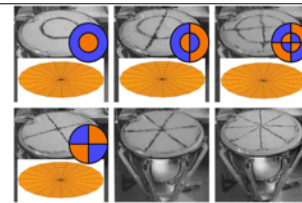
エネルギーの高い軌道ほど空間的に広がっている。(軌道半径が大きい)
原子番号が大きいほど、電子は核に強くひきよせられ、軌道半径は小さくなる。ただし、原子の大きさは、最も外側の電子の軌道半径で決まる。
(古典的な周回軌道の図も、今でも使われている。)

弦の振動

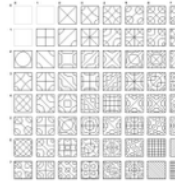
一次元の定在波の波長は、弦の長さで決まる。
http://www.meta-synthesis.com/webbook/34_qn/qn_pt.html



振動数多い=音が高い=波長が短い=エネルギー高い

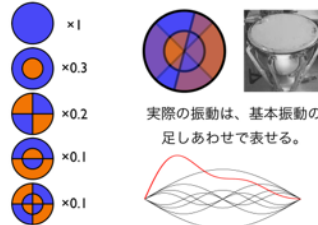


太鼓の膜の定在波。黒線は節を表す。
節が多いほど高振動数・高エネルギー
http://www.meta-synthesis.com/webbook/34_qn/qn_pt.html




Keywords:
"Chladni"
"Cymatics"

四角い鉄板の定在波。
境界条件が違くと、節の形も変わる。
Walker, M. D. (1961) Chladni Figures. A study in symmetry. London: C. Bell & Sons.

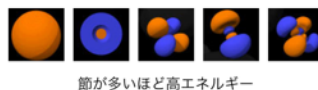


実際の振動は、基本振動の
足しあわせで表せる。

膜の定在波

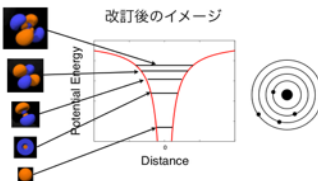


3次元の核電場に捉えられた電子の定在波



節が多いほど高エネルギー

改訂後のイメージ



下限(基底状態)よりも低いエネルギーにはならない
エネルギーの高い軌道ほど広がっている
原子番号が大きいほど、軌道は小さくなる

¹ 物質波の波長が、その物体の運動する領域程度まで長い場合には、物質波同士の干渉など、波としての性質を無視できなくなるが、電子よりも大きな物体では無視できる。