

原子分野— Quantum and nuclear physics —

この分野に興味を持ったら、ぜひ一冊読んでみよう！

マンガ量子論入門 (ブルーバックス)・量子論を楽しむ本 (PHP 研究所)・相対論を楽しむ本 (PHP 研究所) などがおすすめ。

○ 電子の発見 —量子力学の始まりは、電子について詳しく調べることからはじまる—

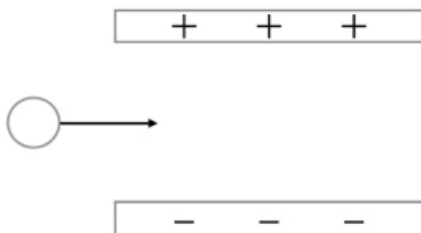
1869年、ガラス管 (ガイスラー管) の中を真空にして、高電圧をかけると () 極から紫色の光線が観察される。この線を () という。



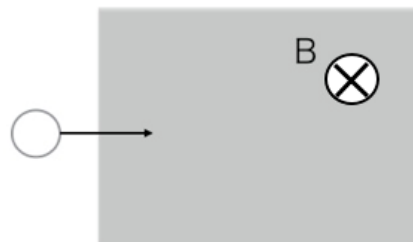
この陰極線の正体が マイナスの電荷を持つ粒子の集まり であることが、次の2つの実験からわかった (みなさんはこの正体が () であることは、知っていますよね)。

問題 陰極線を電場または磁場のある空間を通した。マイナスの電荷を持つ場合、(1)電場の中に入射させたときと、(2)磁場の中に入射させたときでは、それぞれどちらに曲がるか。

① 電場の中



② 磁場の中



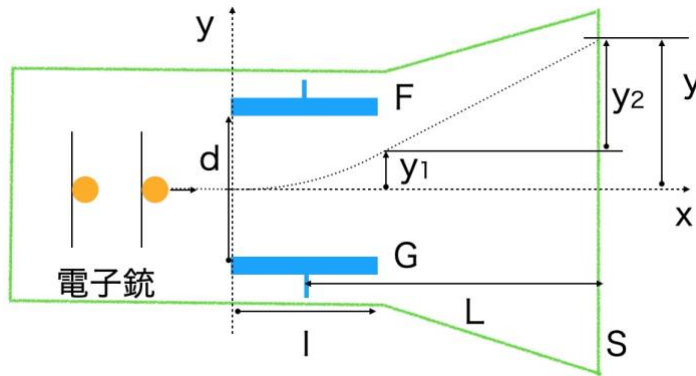
この粒子のことを () と名付けた。

陰極線が発見されると、次はこの電子について定量的な研究が行われた。1897年、トムソンは陰極線に電界や磁界をかけて、陰極線の変位を調べた。この実験から電子の電気量 e [C] と質量 m [kg] の比 (e/m) を求めることができた。これを () という。

○ 電子の比電荷 (q/m) は、どのようにして測定されたのか？

実験 A

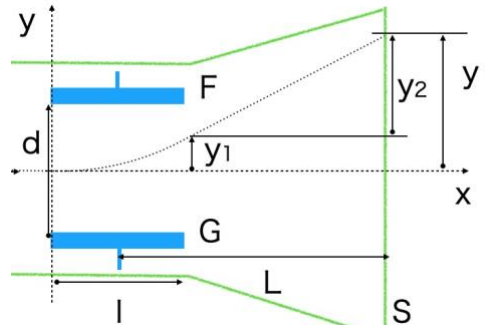
真空管の K・P は加速器で、陰極 K を初速 0 で離れた電子が加速され、陽極 P を初速度 v_0 で通過し、 x 方向に進みます。平行板電極 F と G の間には電位差 V によって $-y$ 方向に一様な電場が加えられ、ここで電子は軌道を曲げられた後、さらに直進して蛍光面 S に当たり輝点を生じます。電気素量を e 、電子の質量を m 、電極板の間隔を d 、長さを l 、電極板の中央から蛍光面までの距離を L とします。



① 電極 FG の間での電子の加速度の大きさ a を求める。

② 電極 FG 間を抜けたときの電子の y 座標 y_1 を求める。

③ y_2 を求める



④ 電子が蛍光面に当たった位置の y 座標 y (y_1+y_2) を求める。

⑤ ④の式を $\frac{e}{m}$ について式変形すると

$$\frac{e}{m} = (\quad) \text{ ㉔}$$

電子の y, d, V, l, L は、実験で測定できる。初速度 v_0 が測定できれば e/m までたどり着く。

実験 B v_0 を求めてみよう

1つの荷電粒子に対して電場と磁場をかけて、荷電粒子が直進し続けるときの電場 E や磁束密度 B を測定すると v_0 がわかる。極板間隔を d とする。電場から受ける力とローレンツ力のつり合いから、

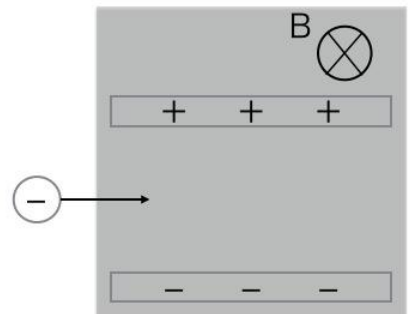
$$(\quad = \quad)$$

$$v_0 = (\quad) \text{ ㉕}$$

となる。㉕の速度 v_0 を㉔に代入すると、比電荷は

$$\frac{e}{m} = (\quad)$$

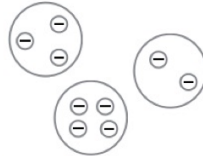
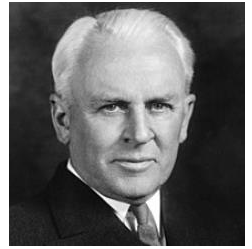
となる。実際に測定した数値を代入する、 $\frac{e}{m} = 1.76 \times 10^{11}$ [C/kg] という値になった！



この計算は繰り返しやって覚えよう！

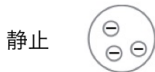
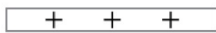
○ ミリカンの実験（電気素量 e の測定）

1897年トムソンによって比電荷(e/m)の値はわかったが、 e や m のそれぞれの値がどうか知りたい。科学者のミリカンは、1910年に電子1つの電気量（これを（ ）という）を調べるために、次のような実験を行った。霧吹きで油を空气中に飛ばすと、油は飛び出すときに（ ）に帯電する。



この油の粒（油滴という）を飛ばして、落ちる前に上向きの電場をかけ、空气中で静止（または等速度直線運動）するように、電圧を調整する。

① 油滴（電気量 $-q$ ）を空气中で静止させるような電圧 E をかけたとき、油滴の質量を m 、重力加速度を g とすると、



力のつり合いより (=) . . . ①

② スイッチを切って電場を 0 にして、油滴を落下させて速度が一定で落ちているときの速度 v を測定し、空気抵抗 公式 $F =$ (k は空気抵抗の定数) と力のつり合いを考えると、



力のつり合いより (=) . . . ②

式①、②より、電気量 q について求めると、

となる。 k は粒の大きさによる定数で実験をして調べることができる。 E と v はこの実験から測定すればわかる。

この実験を繰り返すと、油1つ1つの電気量 q を求めることができ、このデータを集めることによって、電気素量の大きさがわかる。大量のデータからどうやって電気素量を見つけ出したのか？

ミリカンは60日連続で170データをとりそのうち58データから実証した。実験は大変！

この結果から、電気素量 e の大きさは、 $e = (\quad) [C]$ ということがわかった。

またこの値と比電荷 $\frac{e}{m} = 1.76 \times 10^{11} [C/kg]$ を使って電子の質量を計算すると、 $9.1 \times 10^{-31} [kg]$ ！

なんと陽子や中性子 ($1.6 \times 10^{-27} [kg]$) よりも小さな粒子であることがわかった！大発見。

光の2面性

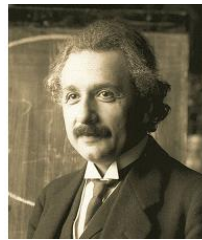
○ クイズ！私は誰でしょう？

古典物理（～18世紀ころ）

量子物理（19世紀～）



古典力学の父。
主な業績として力学の確立や
微積分法の発見がある。



現代物理学の父。
相対性理論を確立したこと
で知られている。



電磁気学での分野での貢献で
知られている。



水素原子の線スペクトルを
記述する実験式によって知
られている。もとは高校の数
学教師。



古典電磁気学を確立した。



波動性を加味した原子の構造
モデルを提唱した。



2つのスリッドから入射した
光の干渉について考察し、光
が波動性持つことを示した。

○ 今までの物理がうまく説明できない現象が発見される！

18世紀中程まで、あらゆる物体の運動は今まで高校で学習してきた『古典力学』（ニュートン力学）で説明できると考えられていた。しかし放射熱や原子レベルのミクロな世界については古典力学では説明できないことがわかってきた。例えば古典力学では光は（ ）だと思われてきた。しかし、19世紀に入り光が（ ）としての性質を示す決定的な証拠となる現象が発見された！

これから光について扱います。

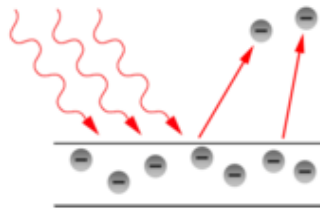
復習 波の式 $v = (\quad)$

光波の場合 $c = (\quad)$ ※ 光の速さ $c = (\quad)$ m/s

※ 光だけは特別で、速度は c 、振動数は（ ）という文字をあてる

○ 金属に光を当てると電子が飛び出す現象（ ）

金属に光をあてると、電子が金属から飛び出してくるという物理現象が発見された。光を明るくすれば電子がたくさん飛び出してくるのか？と考えられるが、そう単純ではなかった。いろいろな種類の光や明るさを変える実験をすると、次のようなことがわかる。



A どんなに**明るい光**をあてても、波長の（ ）光（赤）では光電効果は起こらない。

B **暗い光**であっても、波長の（ ）光（紫）だと光電効果が起こる。

C 波長の短い光で光電効果を起こしておき、光をさらに**明るくすると**、たくさんの電子が飛び出してくる。

光電効果のこの不思議な現象について、アインシュタインが光は波の性質ももつが、同時に（ ）の性質も持っているとして仮説を立てて、光電効果の現象について見事に説明した。

○ 光電効果に対するアインシュタインの説明！

光は粒子のように振る舞う（これを（ ）と呼ぶ）と考えて、光子の持つエネルギーは、その光の（ ）に比例していると仮定すると、A と B の現象は説明できると考えた。



ν 大 ← 振動数 → ν 小

光子の持つエネルギーの公式 $E = ()$ [J]

ここで、 h は（ ）定数（ $=6.63 \times 10^{-34}$ [J · s]）という定数である。

○ 光電効果の原理のアインシュタインの説明（光量子仮説という）

光子と電子は、1 粒と 1 個で衝突すると仮定してみる。



エネルギーの収支の式

(=)

光子のエネルギー = 金属表面から振り出すエネルギー + 電子の運動エネルギー

※ ここで、 W は（ ）という。

W : 電子が金属表面から飛び出すのに必要な最低限のエネルギー

実際に同じ光で実験をしてみると、金属表面から飛び出す電子の速度（＝運動エネルギー）は遅いものもあれば速いものもある。このエネルギーの式の電子の運動エネルギー $\frac{1}{2}mv_{max}^2$ は、飛び出した電子の中で最大の運動エネルギーを決めるものであることに注意！

○ アインシュタインの考えでA~Cの現象を考えてみると…

Aの答え

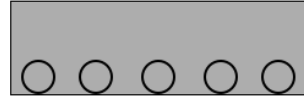
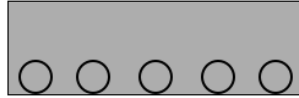
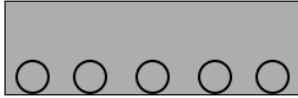
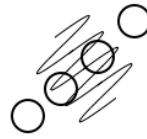
Bの答え

Cの答え

振動数が小さくて明るい

振動数が大きくて暗い

振動数が大きくて明るい



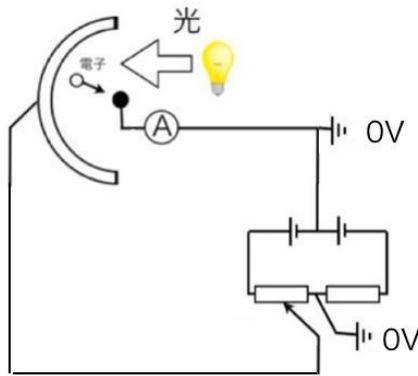
$$h\nu_{小} < W$$

ポイント：明るい光というのは、光子の数が（ ）ということ。光子1つ1つの持つエネルギーとは関係がない。

○ 光電効果に関する実験

光量子仮説によるエネルギー収支の式は本当に正しいのだろうか？現象はうまく説明できたけれど…。そこで次のような実験が行われた。

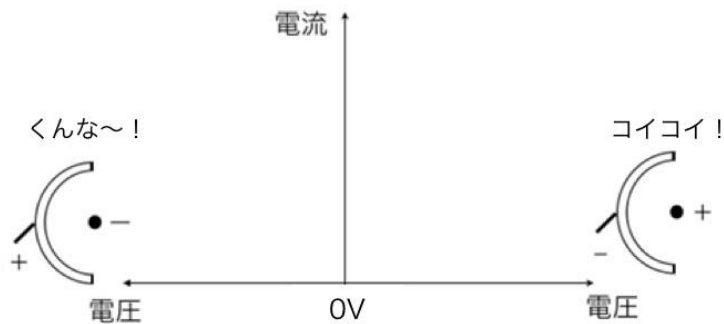
実験① 光の振動数を変えずに、極板間の電圧を変えて回路に流れる電流がどうなるかを調べる。



例えば100Vの電池が2個あったとする。矢印の位置を帰ると…、

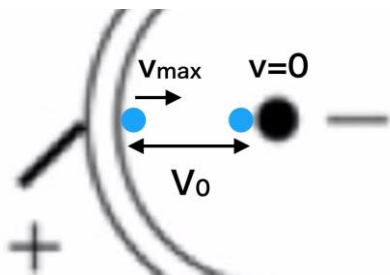
<p>例) 左側の抵抗につけると、</p> <p>電子の飛び出しを ()</p>	<p>例) 右側の抵抗につけると、</p> <p>電子の飛び出しを ()</p>
--	--

電圧をいろいろ変えて実験をしてみると、次のようなグラフとなる。



飛び出た電子が電位差によって妨げられ、検出される電流が0になるときの電圧を、() という。

同じ光をあてた場合にもいろいろな電子が飛び出してくることが考えられるが、飛び出してきた電子の運動エネルギーの最大値 $\frac{1}{2}mv_{\max}^2$ との関係は、素子電圧を使うと次のように表せる。

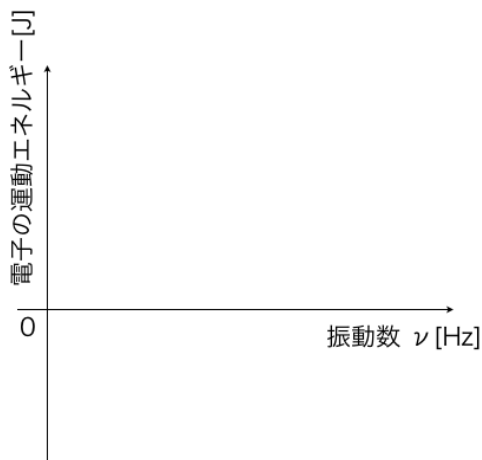


() 式①

実験②

当てる光子のエネルギー（光の振動数 ν ）を様々に変えて、その阻止電圧を測定する。式①をつかって、飛び出る電子の運動エネルギーを調べてグラフにまとめる。

すると次のようなグラフを得ることができる。



() …光電効果が起こるぎりぎりの振動数のこと。

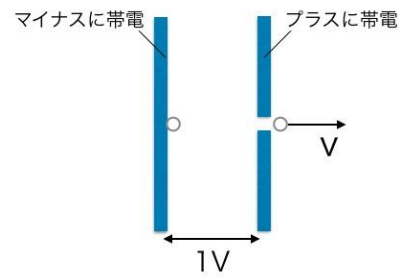
この実験から得られたグラフと、アインシュタインの光電効果のエネルギー収支の式と比較すると、

$$\text{光電効果の関係式 } h\nu = W + \frac{1}{2}mv_{\max}^2$$

$$\frac{1}{2}mv_{\max}^2 = (\quad)$$

このように1次関数になっていることがわかる（理論と実験が一致）。この結果、グラフの傾きは（ ）という定数を、切片の絶対値は（ ）を表していることがわかる。hのことをプランク定数という。

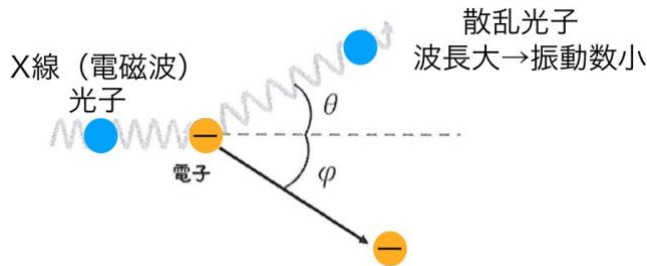
○覚えておきたい単位「エレクトロンボルト (eV)」について
原子分野は小さなエネルギー量を扱うので、小さなエネルギーの単位が必要になる。それが（
）である。1eVは電子1個を1Vの電圧で加速したときに電子が持つエネルギー（運動エネルギー）のことである。



問 1 eVは何Jでしょうか。ただし電子の電荷は $-1.6 \times 10^{-19} \text{C}$ とする。

○ 光（電磁波）の粒子性を示す光電効果以外の実験（コンプトン効果）

電磁波（光）を電子にぶつけると、電磁波のエネルギーの一部を電子に与えて、電子が飛び出してくる。ぶつかった後の電磁波の波長が（ ）なる現象が起こる。これを（ ）という。



この現象は今まで波だと考えられてきた電磁波には（ ）性があることを示す。電磁波（光）を1種の素粒子として考えるとき、（ ）という。

※ 原子・陽子・中性子など、「子」は物理では「小さな粒」という意味を持つ。



アーサー・コンプトン (Arthur Holly Compton, 1892年9月10日 - 1962年3月15日) は、アメリカの実験物理学者。1920年からセントルイス・ワシントン大学、1923年からはシカゴ大学で教職に就いた。兄のカール・テイラー・コンプトンも物理学者。

○ 電磁波（光子）のもつ運動量

光が粒子（光子）だとすると、エネルギー ($E = h\nu$) の他にも、運動量 P もあるはず。

光子の持つ運動量の公式 $P = (\quad)$ 覚える

参考 光のもつ運動量と $E = mc^2$ (相対性理論) とのつながり

光子のエネルギー $h\nu = mc^2$ ①

光子の $P = mv = mc$ ②

①と②より

※コンプトン効果の解き方は力学の運動量保存の問題と同じ！

まとめ

	波動性	粒子性
光	<u>古典物理学</u> 光は波である 波の式 $v = (\quad)$ 波長 : λ 振動数 : $\nu \rightarrow c = (\quad)$ 速さ : c	<u>量子物理学</u> 光は粒子の性質を持つ エネルギー : $E = (\quad)$ 運動量 : $P = (\quad)$

○ 物質（電子）も波の性質を持っている！？

アインシュタインは光電効果により「光」が波と粒子の両方の性質を持っていることを示した（粒子と波の性質をあわせ持った、とても小さな物質やエネルギーの単位のことを（ h ）という）。

これを受けて、ド・ブロイは、光だけでなく「電子」（物質）も粒子性と（ h ）性があると提唱した。



実験 電子（物質）をスリットに通すと、（ h ）が生じた。
 （ヤングの干渉実験と同じ）
 → 電子は波の性質を持っているという証拠である！



○ 物質波

物質も波の性質をもっているとするなれば、波長 λ はどのように表せるのだろうか。

光子（粒子）のエネルギー : $E = (\quad) \quad \dots \textcircled{1}$

光の運動量（粒子） : $P = (\quad) \quad \dots \textcircled{2}$

光波（波）の式 $c = (\quad) \quad \dots \textcircled{3}$

また古典力学で物質の運動量は、

物質の運動量 : $P = (\quad) \quad \dots \textcircled{4}$

光同様、物質も波としてふるまうとすると、その波長 λ は、 $\textcircled{2}$ と $\textcircled{3}$ から、 $P = \quad ,$

これと④より、 λ について解くと、 $\lambda =$ 。

物質波の公式 $\lambda = (\quad)$

ド・ブロイさん、光の式をつかって物質の運動量と結びつけちゃうなんて、そんなことをしている？単なる文字式の組み合わせで遊んでいるだけじゃないの？という批判が当時あった。

ド・ブロイは、物質も光と同じように小さな世界では、量子として振る舞うのではないかと考えていた。

→ その後、原子の構造を理解するときに、この物質波が大きく関係していた！

○ もし物質が波の性質をもっているなら、なぜ私達は日常で物質を波のように感じないのうだろう？

目の前にある消しゴムが、波のように見えることはない。物質波の波長について、実際に数値で計算をしてみよう。たとえば、1 kg の物質（牛乳1本の質量）が1 m/s の速さで運動しているときの物質波の波長を求めてみると、

※プランク定数 $h = 6.63 \times 10^{-34} [\text{J} \cdot \text{s}]$





※ これは非常に短いので、実際に生活の中でこの波長を感じることはできない。

では、電子だと物質波の波長はどのくらいになるのだろうか？

問題 速さ $1.0 \times 10^5 \text{ m/s}$ で動く電子の、物質波（電子波）の波長 λ は何 m か。プランク定数を $6.6 \times 10^{-34} \text{ J} \cdot \text{s}$ 、電子の質量を $9.1 \times 10^{-31} \text{ kg}$ とする。

○ ボーアの原子モデル

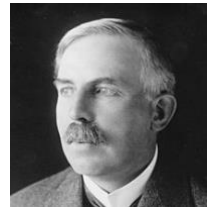
原子の構造がわかっていないとき、次の2つのモデルが提唱された。

() モデル	() モデル
  <p>JJ トムソン</p>	  <p>長岡半太郎・ラザフォード</p>

どうやって原子の中身の構造を確かめればいいのか？

<ラザフォードの実験>

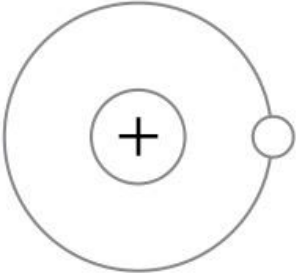
金ばくに α 粒子（高速で飛び出すヘリウム）をぶつけてみたところ、 α 粒子の反射の様子から、() モデルのほうが正しいことがわかった。



○ モデルは確定したけれど・・・

しかし次なる問題発生！もし土星型モデルが正しいのなら、

疑問1 なぜ電子が+に落ちていかないのか？

	<p>① 電子が動く = () が流れる</p> <p>② () が発生するはず→電場→磁場・・・ (電磁波 (光) 発生！)</p> <p>③ 電磁波放出によるエネルギー減、電子は原子核に落ちていくはず。 → でも実際の水素原子は安定している。なぜだ？</p>
---	---

疑問2 またなぜプラス原子が中心に固まっているのだろう？

疑問1の②で電磁波が発生することになるが、たしかに水素原子を観察すると、電磁波が出てくることがある。でも、決まった値の電磁波しか出てこない！なぜじゃ～。



$$\lambda_1 = 6562.8 \times 10^{-10} [\text{m}]$$

$$\lambda_2 = 4861.3 \times 10^{-10} [\text{m}]$$

$$\lambda_3 = 4340.5 \times 10^{-10} [\text{m}]$$

$$\lambda_4 = 4101.7 \times 10^{-10} [\text{m}]$$

例えば、 λ_1 と λ_2 の間の光は観測できない。

※ これらの波長の並びをバルマー系列（後に説明）という。

○ 天才教師！登場！

高校数学教師バルマーが $\lambda_1 \sim \lambda_4$ の数列の規則性を発見。

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \text{ただし、} n > 2$$

R は定数で値は 10967776

自然界の裏側に数学が潜んでいるようだ。きっと何か理論がきっとあるはずだ！

まとめ

原子は土星型モデルであり安定しているようだ。そして原子は特定の規則性をもった電磁波を放出する。きっと原子の仕組みと関係があるに違いない！

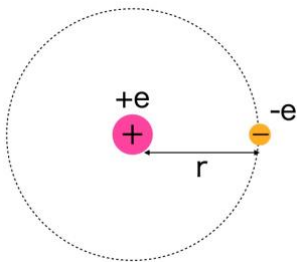
そんな中、天才（ ）の登場！

これらの問題を一気に解決する理論を作る！



○ ボーアの考えた土星型モデルのメカニズムと放出される電磁波の理論

最も単純な水素原子を使って、力学のように考えてみよう。



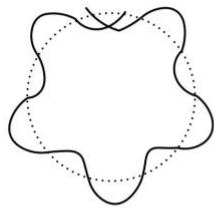
・円運動する電子の運動方程式は、電子の質量を m 、電気量を $-e$ 、半径を r とすると、

$$\left(\quad = \quad \right)$$

…①

※ 向心力が静電気力による

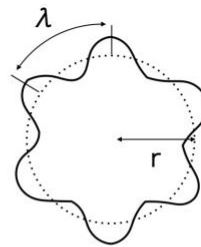
ただし、このままだと電子は原子核に落ち込んでしまい存在できないことになる。ボーアは、電子が持つ波動性に注目した（ド・ブロイの提唱した物質波）。電子が波の性質をもっているとすると電子の軌道は波長の整数倍でなければいけないと考えた。



スタートとゴールで
波長が合わない



この軌道は波が打ち消し合っ
て存在できない



スタートとゴールで
波長が合う



この軌道は存在できる

この条件を量子条件という。

	$2 \pi r_1 = (\quad)$ $2 \pi r_2 = (\quad)$ $2 \pi r_3 = (\quad)$ <p style="text-align: center;">...</p> <p>n 番目の軌道について成り立つ式は、</p> $2 \pi r_n = (\quad)$
--	--

ここで電子の物質波の波長の式 () を代入すると…

量子条件 () …②

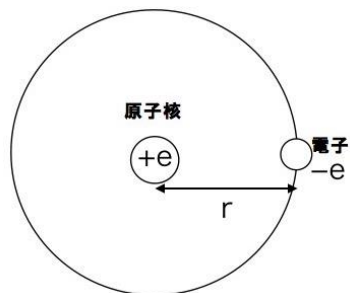
なんだこれは！と思うかもしれないが、バルマーの式の解明が今の目的で、とにかく量子条件が必要だと仮定したということが大切。②から、電子の速さ v を消去して、ある軌道の原子の半径 r_n を求めてみよう。

<計算スペース>

計算スペース

$$r_n = \quad \text{なお } n = 1, 2, 3 \dots$$

次に、ある n 軌道 (半径 r_n) を速度 v でまわる電子の持つエネルギー E_n に注目してみる。電子を粒子だと考えると、電子は運動エネルギーと位置エネルギーを持っている。



$$E_n = \frac{1}{2}mv^2 + \left(-k\frac{e}{r_n}e\right) \dots \textcircled{4}$$

補足 電子の持つ位置エネルギーについて

電気量 Q [C] の電荷から距離 r_n [m] の点の電位は、比例定数を k とすると、

$$V = \left(\quad \quad \quad \right)$$

$-q$ [C] の電荷が電位 V [V] の点で持つ位置エネルギー U [J] は、無限遠を基準 (0) とすると、

$$U = qV = \left(\quad \quad \quad \right)$$

①式をつかって④式の v を消す。

<計算スペース>

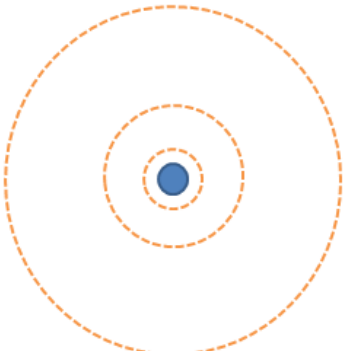
これを⑤式の結果にあてはめると、

$$E_n = \left(\quad \quad \quad \right)$$

この式は何を示しているのだろうか。 n は軌道番号しか入らないから、 $n=1.5$ などの数字は存在しない。ということは、「**電子の持つエネルギーは連続量ではない**」ということが示された。

次に電子の放つ光について考えてみよう。もっとも内側の軌道 ($n=1$) のエネルギー状態を () 状態と呼ぶ。なにかのきっかけ (電磁波の照射、熱など) でエネルギーをもらおうと、電子は高い軌道 ($n=2,3,4\cdots$) に上がる (これを () という) ことがあるが、やがてまた下の軌道に落ちてくる。このとき失ったエネルギーは光として放出される。

n 番目の軌道 (外側の軌道) から n' 番目の軌道 (内側の軌道) に落ちてくるときに、原子から放出される光のエネルギー ($h\nu$) の式は次のようになることが考えられる

	$h\nu = (\quad)$
---	--------------------

放出される光の波長 ($1/\lambda$) を求めてみよう。

計算スペース

$\frac{2\pi^2 m k e^4}{ch^3}$ はすべて定数なので、これを R とおくと、

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right)$$

となる。R のことをリュードベリ定数という。

電卓で計算してみよう

$$R = \frac{2\pi^2 m k^2 e^4}{ch^3} = \frac{2 \times 3.14^2 \times 9.1 \times 10^{-31} \times (9.0 \times 10^9)^2 \times (1.6 \times 10^{-19})^4}{3.0 \times 10^8 \times (6.6 \times 10^{-34})^3} =$$



参考 バルマーの式と比較してみよう。

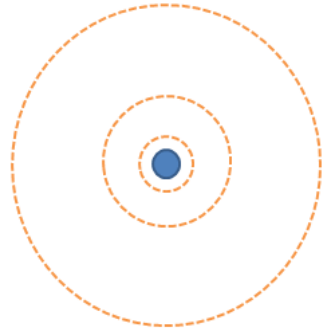
$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{2^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad \text{ただし、} n > 2$$

R は定数で値は 10967776

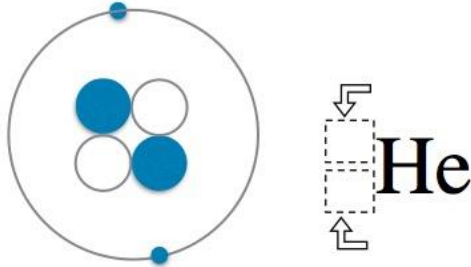
この式はボーアの導いた式の内側の軌道の n' に 2 を代入した式（ある軌道から $n=2$ の起動に電子が落ちてきたときの式）である。ボーアの理論により、この式を完璧に説明することができた！

つまり頭で想像することは困難であるものの、電子は波の性質を持っていると考えたほうがよさそうだ。

○ 様々な系列



○ 原子を構成する粒子



例) ヘリウムの場合

- () … 原子核を構成する粒子の1つ。電気量は $+e$ 。
- () … 原子核を構成する粒子の1つ。電気量は0。
- () … 原子核のまわりをまわっている粒子。電気量は $-e$ 。電子の質量は陽子の質量の1/1840倍である(電子は非常に軽い) →素粒子の一つ

※ () の数が原子の種類を決めている。また中性子の数は、原子の種類には関係ない。同じ元素で中性子の数が異なるものを () という。

疑問 なぜ \oplus の電荷を持つ陽子が原子核の中に集まっていられるの? 静電気力によって反発するはず…。 ⇒ () という静電気力よりも強い力がはたらいているから。

○ 4つの力

自然界に存在する力として、次の4つの力が発見されている。

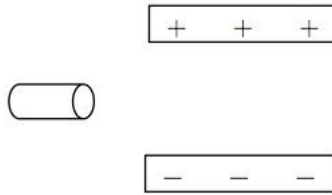
()、()、()、()

○ 放射線の種類

原子核から放出される放射線として危険となるのは、中性子線の他に次の3つがある(なお高速の電子を金属にぶつけるとX線という放射線が発生する)。

- ① () → 高速で飛び出す ()。電子を帯びておらず () 電荷を持つ。
- ② () → ()。() の電荷を持つ。
- ③ () → ()。エネルギーの高い光の一種。

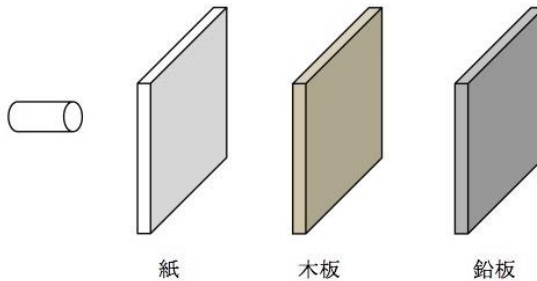
問題 放射線源において、3つの放射線 α ・ β ・ γ 線に電場を加えると、3つの放射線を分類することができます。 α 線を赤で、 β 線を青で、ガンマ線を黒で、下の図に書き込みなさい。



○ **放射線の性質**

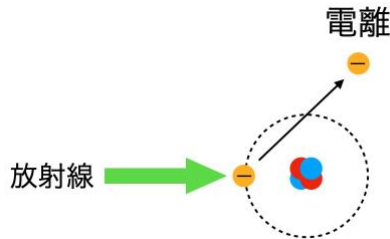
・() → 物質を突き抜けることができる強さ。強いほど、防ぎにくい。

①～③の放射線の上記の性質の強い順番に並べてみよう



() 線 > () 線 > () 線

・() → 他の原子から電子をはじき飛ばして、その原子をイオン化する働きのこと。



強い順番に並べてみよう。

() 線 > () 線 > () 線

※放射線が近くを通ると、周りの原子がイオン化され、細胞のDNAなど重要な生体分子を傷つける。

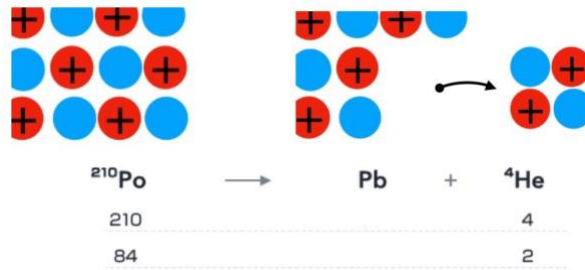
○ **放射性崩壊**

ウランやラジウムのように、原子核には不安定なものがあり、放置しておくと放射線を出して別の原子核に変わっていく。この現象を() **崩壊**、自然に放射線を出す性質を

()、放射能を持つ同位体を**放射性同位体** (ラジオアイソトープ) という。

○ 原子と放射性崩壊

α崩壊…α線（ヘリウム原子核）を出して崩壊する。質量数は（ ）減る。原子番号は（ ）減る。



β崩壊…中性子（±0）→陽子（+e）+電子（-e）に分裂し、β線（電子線）が飛び出る。質量数は（ ）。原子番号は（ ）。



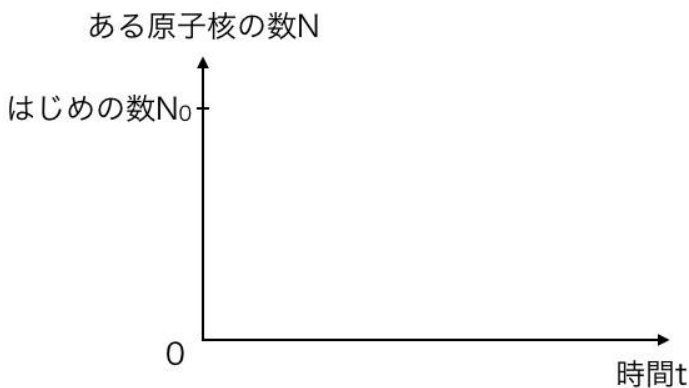
※ 反電子ニュートリノは素粒子。小さいので質量数等に影響を及ぼさない。

γ線放出…原子核のエネルギーが高い状態から低い状態に変化するとき、エネルギーの差ΔEがγ線（電磁波）として放出する。電磁波を出しているだけなので、質量数も原子番号も変化はない。

○ 時間と放射性崩壊

（ ）→ 原子が崩壊によって他の原子に変わるとき、もとの原子核の数が半分になるまでの時間のこと。この時間をTとすると…

経過時間 t (秒)	0	T	2T	3T	… t
原子核の残存個数 N	N_0				…



半減期の式（ ）

参考 放射線の単位

Bq (ベクレル) : 原子核が毎秒一個の割合で崩壊するときの放射能の強さを 1 Bq という。

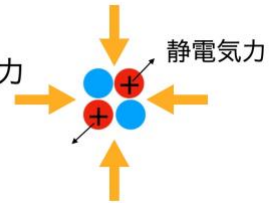
Gy (グレイ) : 放射線が物質に吸収されるときに、放射線が物質に与えるエネルギーで、吸収したエネルギーが物質 1kg あたり 1J のときの吸収線量を 1 Gy という。

Sv (シーベルト) : 人体が吸収した放射線の影響度を数値化した単位で、一般人が 1 年間にさらされてよい人工放射線の限度を 1.0mSv とする。

○ 核反応と核エネルギー

陽子や中性子(核を作っている粒子(核子))は、近づけると電磁力の 100 核力

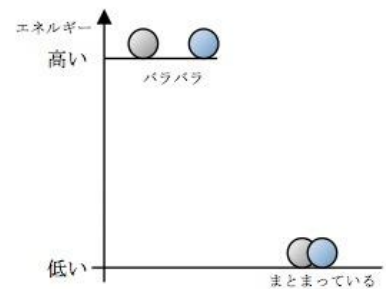
倍ほどの大きさの力はたたく。この力を
() という。核力の及ぶ範囲は隣の核子までしか届かない(電磁気力や重力は無限に届く)。



○ 質量欠損

まとまった核子をばらばらにするには、非常に大きなエネルギーを与える必要がある(核力のため)。つまりまとまった方が、ばらばらのときよりもエネルギーは

()。またまとまった核子のペアの質量と、バラバラにしたときの核子は、バラバラにしたときのほうが()
ことがわかった。



$$\Delta m = \text{ばらばらのときの質量} - \text{まとまったときの質量}$$

このときの Δm を () という。

○ 相対性理論が示すもの

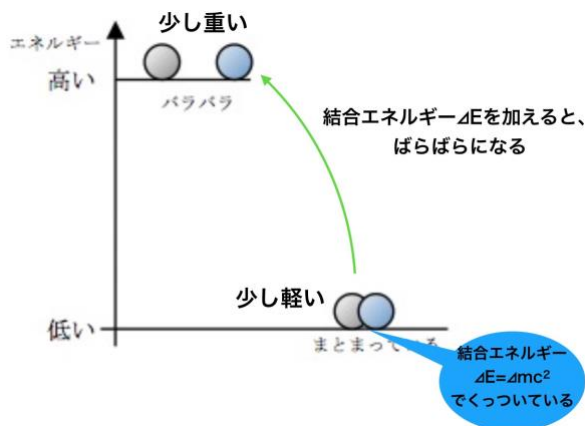
アインシュタインの相対性理論によると、質量とエネルギーとは同等のものであることが導かれる。

$$\text{公式} \quad (\quad)$$

質量 $m[\text{kg}]$ の物体は、静止状態においても、次の式で表されるエネルギー $E[\text{J}]$ をもつことになる。これを静止エネルギーという。

まとまっているときに質量がわずかに Δm 小さくなるのは、結合するためのエネルギー ΔE () に質量が変化しているためである。

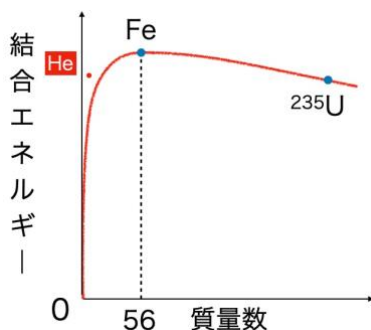
$$\Delta E = (\quad)$$



参考

$E=mc^2$ から1gの物質がもつ質量エネルギーを計算すると、およそ90兆ジュール。これは22万トンの水を0℃から100℃まで沸騰させることができる量。例えば1円玉6枚(6g)の質量をすべてエネルギーにできたとすると、東京ドームにためた0℃の水が沸騰する。

○ 核子1個あたりの結合エネルギー Δmc^2 (核子1個あたりの質量欠損 Δm に相当)



- ・鉄(質量数約56)がもっとも小さい(質量欠損も大きい) → よくくっついて安定
- ・陽子2個、中性子2個のセット、ヘリウムは例外的に安定 → α 線として飛び出す
- ・鉄よりも質量数が多くなると、結合エネルギー Δm が小さくなり、不安定。これは陽子同士の反発する力()力が強くなるためである(核力はとなりの核子までしか届かない)。
 - ():ウラン型原子爆弾
- ・鉄よりも質量数が少ないと、結合エネルギーが小さくなり不安定。
 - ():水素爆弾

原子質量[U] (ユニット)

核子の質量を考えるためにはkg単位では大きすぎる。しかし陽子や中性子は1つ1つ独立して存在しておらず、普通核を形成するためくっついている。くっついていると陽子や中性子の質量は、くつき方によって微妙に違ってくる(質量欠損による)。そこで基準として、 $^{12}_6\text{C}$ の原子1個の質量を12で割ったものを1[U] (ユニット) と決めた。

$$1[\text{U}] = 1.66 \times 10^{-27} \text{kg}$$