

Picc.

Fl.

Ob.

E.H.

Bass Ob.

Cl.

Bcl.

Bn.

Dbn.

Hrn.

Trp.

Ten.Trb.

Base Trb.

Ten.Tub.

Bass Tub.

Timp.

Xyl.

Cymb.

B.D.

Vns.

Vas.

Vc.

Db.

Adagio 原子物理学

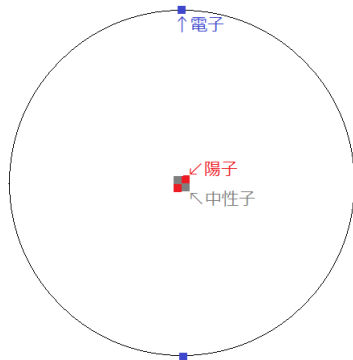
~ミクロの世界~

北海道 manavee

～まえがき～

少し化学の世界に入ろう。化学は天文学・物理学に次いで芽生えたものだと考えられている。古代エジプトでは、酒の製造・ガラスの製造・染色・金属の精製が盛んに行われ、多くの技術が培われていた。これらのエジプトの技術は古代ギリシャに伝わり、科学的な哲学思想を掻き立てた。その代表例が「四元素説」である。火、水、空気、土を元素とする考え方で、それらは互いに移り変わることはないと考えた。さらにアラビアでは、エジプトの技術、ギリシャの科学思想を基に「錬金術」が生まれた。鉛や水銀などの卑金属を金などの貴金属にしてみようという考え方である。もちろん錬金術は失敗に終わったが、「酸・塩基」の考え方、フラスコ、ピーカーといった器具や装置を数多く発明した。

錬金術の時代が終わると、近代化学の門が開いた。ボイルは「気体の圧力と体積は反比例する」という法則を見出し、ラボアジエは「質量保存の法則」を見出した。さらに時代が進み、「すべての物質は原子という分割することのできない粒子が複数個結合してできている」という考えまで挙げられた。



化学の世界における最大の関心事は化学反応であるのだろうが、物理学は、分割することができないとされていた「原子」にも構造があるのではないかと注目した。すると、He原子では、左図のような構造を持つことが分かった。原子の中には「陽子」、「中性子」、「電子」という粒子が存在するということが分かったのだ。

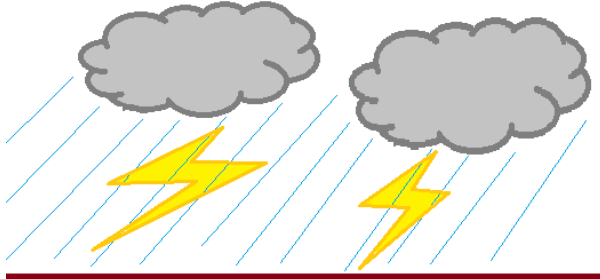
今となっては常識なことだが、当時の科学界では大きな発見であった。

現代物理の範囲は、もはや我々の感覚からは逸脱している。ミクロの世界では、どうしても感覚的には理解しがたい内容がたくさんあるが、それでも楽しく学習できる範囲である。この授業では、受験で原子物理が扱われても怖がることの無いように、基礎的な部分を中心に編集したので、ぜひ参考にしていきたい。

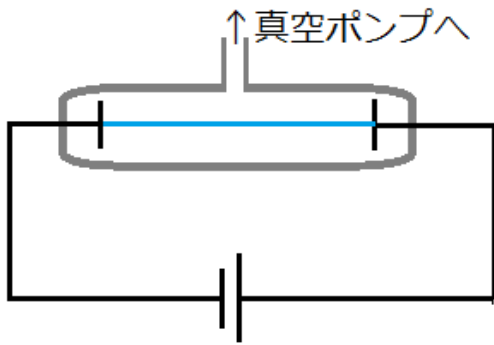
♪：“Adagio”とは、「ゆるやかに演奏せよ」という音楽表記です。「歩くようにゆっくりと」という意味を持つイタリア語に由来しています。歩く速さ、「ゆっくり」の感覚度合は人それぞれであるが、気楽に楽しく科学の世界に触れていただけると嬉しいです。

第一章：電子の振る舞い

1-1：陰極線



空気などの気体は、ふつう電気は通さない。しかし、高い電圧がそこにかかると、電流が流れることがある。気体の中で電流が流れることを気体放電というが、その例に雷がある。雲と雲の間、あるいは雲と地表との間に高い電位差が生じることで光と音と電流を発生させる。とても恐ろしい。

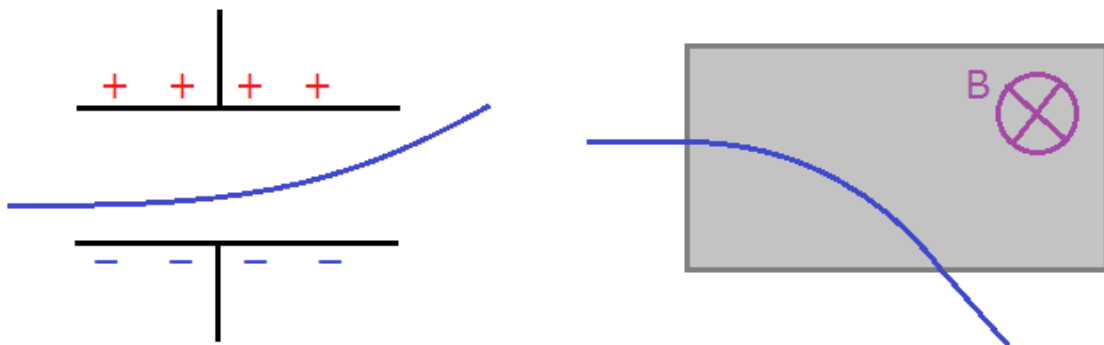


しかし物理学者は、「気体で放電するのはわかったが、真空ではどういう振る舞いをするのだろうか」ということに興味を沸かせた。

ファラデーは左のような実験装置で、真空での放電（真空放電）の実験を行った。管内の気圧を徐々に下げていくと、陰極から陽極に向かって何かビームのようなものが出ているということがわかった。ゴールドシュタインはこのビームを

「 」と名付けた。

陰極線には以下のような性質を持つ。



- 陰極線が電場内を通過すると、進路は電場の向きとは逆向きに曲がる。
- 磁場内を通過させると、その磁場により進路が曲げられる。
- 原子や分子に当たってイオンを作り、蛍光物質に当たれば蛍光を示す。
- 写真フィルムを感光させる（X線、放射線も同じ）。

→ 陰極線の正体は何なんだ？

1-2：トムソンの実験

陰極線の正体を暴くべく様々な議論がされた。特に「陰極線は光波の一種である」とした意見や、「陰極線は負の電荷をもった粒子である」とした意見に二分された。「粒子」派であった JJ トムソンは、以下のような実験を用いて、自分の意見を説明した。

陰極線粒子の電荷を $-e[C]$ 、質量を $m[kg]$ とする。ブラウン管の陽極 A の小穴を速度 $V_0[m/s]$ で通過した粒子が、長さ L_1 の偏向板コンデンサー間の電場に入射し、電場によって向きが変えられる。また、粒子は電場の向きに対して垂直に入射し、電場の大きさを $E[N/C]$

とする。電場内で粒子が受ける力の大きさ F は [] $[N]$ なので、電子が得る加速度は、

P 方向に [] $[m/s^2]$ である。粒子が電場から出る時の、上下方向の位置のずれは

図中の y 軸上の CR に相当し、粒子が電場内を通過するのにかかる時間を $t[s]$ とすると、

$$CR = \text{[]}$$

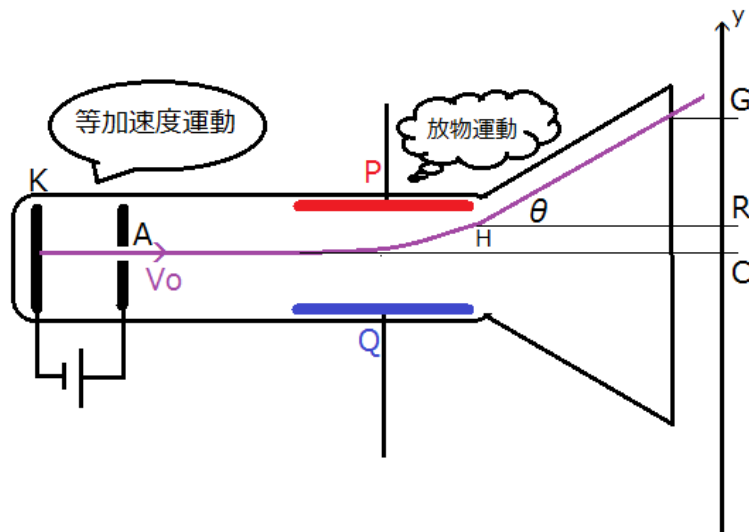
である。また、粒子が電場から出た場所 H における速度の y 成分 V' は、

$$V' = \text{[]} \quad \text{ゆえに、} RG = \text{[]}$$

である（コンデンサーの中央部と y 軸までの距離 $= L_2$ ）。

$$\text{これより、} CG = y = CR + RG = \text{[]}$$

$$\text{ゆえに、} \frac{e}{m} = \text{[]} \text{ かなりたつ(比電荷} = 1.76 \times 10^{11} [C/kg])。 \dots \text{①}$$



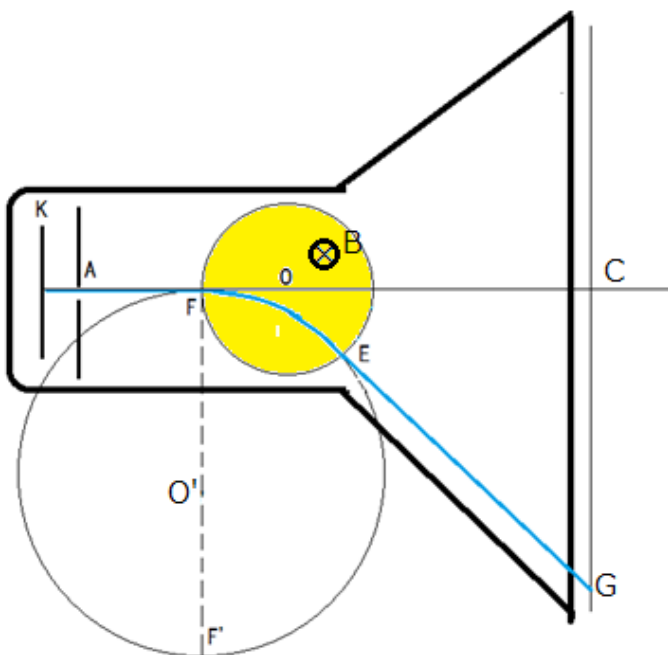
1-3：磁場による陰極線の振れ

【例題】 次の文を読んで、下記の文 (1) ～ (8) の中の{ }に適した式または文字を入れ、また、問 1、2 の問題を解きなさい。

磁場による陰極線のふれの測定を考える。ブラウン管の陽極 A の小穴を速度 v_0 [m/s] で通過した陰極線粒子が、直径 d [m] の円 O の領域 (磁束密度 B [Wb/m²] の磁場) に入射し、軌道を変え、蛍光面上の G 点に輝点を生じたとする。粒子の経路の磁場内の一部分 FE は円の一部分であり、その円の中心を O'、半径を R[m] とすると、向心力とローレンツ力が釣り合うことから、{ (1) } となり、 $\frac{1}{R} = \{ (2) \}$ となる。粒子が磁場から出る時の上下方向のずれの大きさを y' [m]、F を通る円 O' の直径を FF'、E から FF' おろした垂線の足を H、E から直線 AC に向けて下した垂線とその交点を D とすると、 $\frac{EH}{FH} = \{ (3) \}$ となる。位置のずれ y' が小さく、点 E は中心軸の近くにあるとすると、 $EH \approx d$ である。また、 $FH = DE = y'$ 、 $HF' = FF' - FH = 2R - y'$ より、 $d^2 = \{ (4) \}$ となる。 $y' \ll R$ とすると、 $(y')^2$ は無視できるので、 $d^2 = \{ (5) \}$ であるから、 $\frac{1}{R} = \{ (6) \}$ と書き換えられる。これを前述のローレンツ力による式に代入すると、 $y' = \{ (7) \}$ となる。磁場を出ると粒子は等速直線運動をして G 点で蛍光面にあたる。蛍光面の中心を C とする。粒子の経路 EG を逆に延長すると磁場の中心 O を通るので、 $\triangle OED$ と { (8) } は相似である。

問 1 CG= y [m]、CO= L [m] とすると、 y' はいくらになるか。d, L, y を用いて表せ。

問 2 y を B, d, e, L, m, v_0 を用いて表しなさい。…②



以上①、②で、比電荷と v_0 の値以外は測定可能な量であるので、両式①、②より電子の比電荷および v_0 の値を求めることができる。

すると、陰極線粒子の速度は光速のおよそ 2000 分の 1 倍であることがわかり、陰極線は光波の一種であるという説は否定された。

その後さまざまな研究により、陰極線の正体は [] の流れであることが判明した。

1-4：ミリカンの実験

今度は電子の電荷に注目しよう。アメリカの物理学者ミリカンは、電荷を与えた不揮発性の小さな油滴が電場内で運動する様子を観察し、正確な電子の電荷を測定した。

霧吹きによって作られた細かい粒を、水平におかれた 2 枚の金属板の上から落とし、その金属板の間に電場をかけたりして、荷電油滴の振る舞いを観察する。

(1) 電場 off の場合

この場合、油滴は重力と抵抗力を受けて、しばらく時間が経つと、鉛直下向きに等速運動（終端速度 v_1 ）で落下する。油滴の質量を m とすると、つりあいの式から、

$$mg = kv_1 \dots \textcircled{1}$$

が成り立つ。

(2) 電場 on の場合

極板間に電場 E を生じさせることで、(1) で落下していた油滴が鉛直上向きに等速 v_2 で上昇すると考えよう。すると油滴の電気量を q とすると、つりあいの式から、

$$qE = mg + kv_2 = kv_1 + kv_2 \dots \textcircled{2}$$

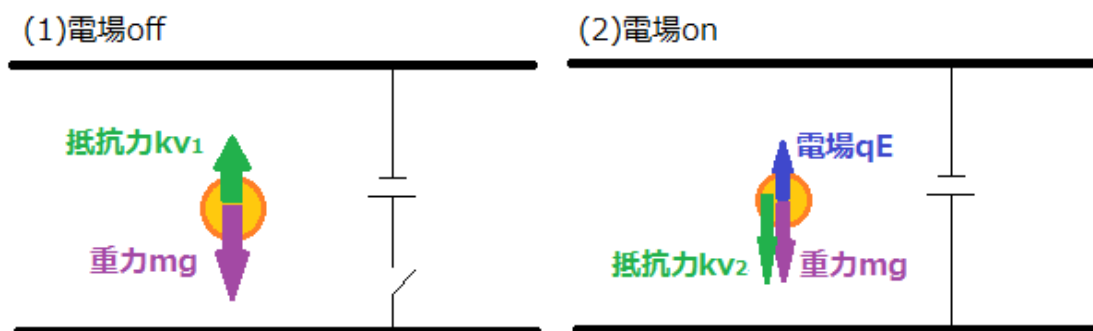
が成り立つ。ここで、油滴の密度、半径を ρ 、 r とすると、①より k を求めると、

$$\frac{4\pi r^3}{3} \rho g = kv_1 \dots \textcircled{1}' \quad \rightarrow \quad k = \frac{4\pi r^3}{3v_1} \rho g$$

が成り立つ。また、②より q を求めると、

$$qE = q \frac{V}{d} = \frac{4\pi r^3}{3v_1} \rho g (v_1 + v_2) \quad \rightarrow \quad q = \frac{4\pi r^3 d}{3v_1 V} \rho g (v_1 + v_2)$$

となる。



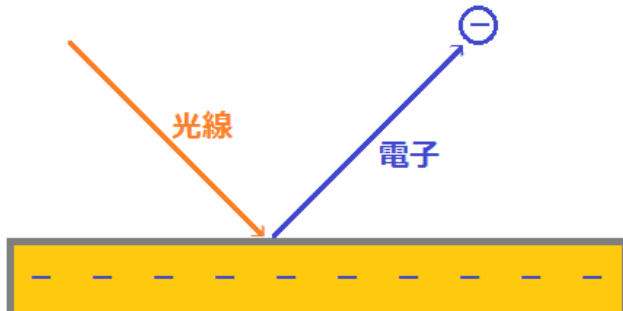
ミリカンはこの実験を繰り返し、多くの油滴の電荷 q を測定したところ、 q の値は、ある電気量 e の整数倍であること、そしてその e より小さい値が存在しないことを発見した。これより、 e が自然界に存在する電気量の最小単位であると考え、これを**電気素量**ということにした ($e=1.60 \times 10^{-19}[C]$)。

第二章：光の二重性

2-1：光電効果

その昔、ニュートンは「光は粒子である」と言い、ホイヘンスは「光は波である」といった。この 2 つの考えは議論を呼び、ヤングの実験によって光は波の振る舞いを持つということが分かった。これにより長い間「光は波である」という考えが常識となっていた。

しかし 19 世紀、フランスの物理学者ベクレルは、とある電解質溶液に浸した 2 つの電極の片方に光を当てると起電力が生じ、電流が流れることが分かった（ベクレル効果）。また、負に帯電した金属面に光線を当てると負電荷は失われ、金属面から電子が放出されることが分かった。



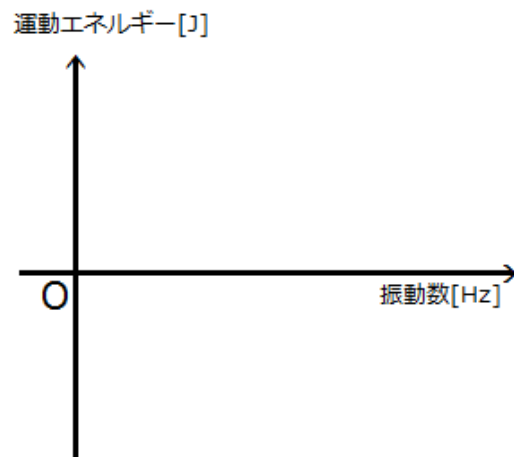
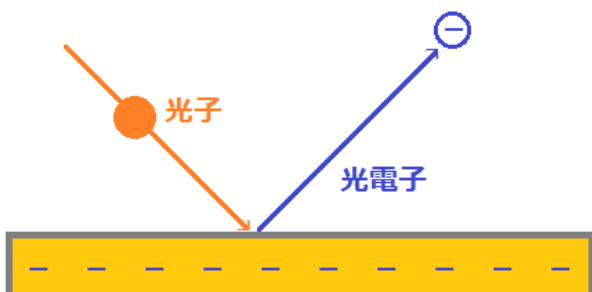
さらに実験を進めていくと、以下のような実験結果が得られた。

- ・物質に一定の振動数以上の光を当てないと、金属板から電子は放出しない。
- ・放出される電子の数は、照射される光の強さに比例しそう…。
- ・放出される電子の最大運動エネルギーは、光の振動数にのみ依存する。

この現象は「光電効果」と言われ、「光は波である」という考えではもはや説明できない。

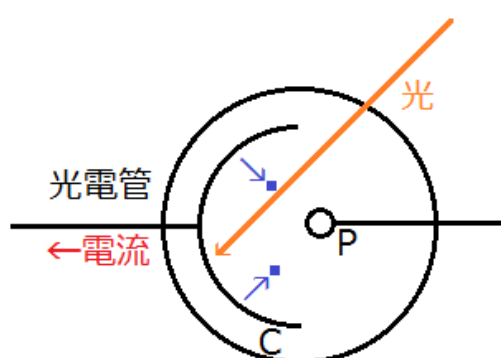
そこで、1905 年アインシュタインは、光電効果を次のように説明した。

- ・ []
- ・ []
- ・ []



プランク定数 $h = 6.6 \times 10^{-34} [\text{J} \cdot \text{s}]$ である。

2-2：光電管



図のような光電管に光を当てると、電極 C から電子が飛び出し、光電流として外部の回路に電流が流れる。外部の回路を調節して P の電位を C に対して下げていると、回路に流れる電流はしだいに

[]。

・初速度 0 の 1 個の電子が、電位差 1[V] の 2 点間で加速され、運動して得られる運動エネルギーの大きさは、

[] である。

この量を、エネルギーの単位として、電子ボルト[eV]と言い、電子や原子などの微小な粒子の運動や、光子のエネルギーを表す単位としてよく用いられる。

[]

・P の電位が電極 C に比べて $-V_0$ [V] の時、光電流は 0 となった。電子の質量を m [kg] とし、電気素量を e [C] とすると、光電子が PC 間の電場から受ける仕事は [] [J] であるから、エネルギー保存則より金属表面を飛び出すときの光電子の速さの最大値を v_m [m/s] とすると、[] が成り立ち、 v_m [m/s] = [] である。

・当てる光の振動数を ν_1 、 ν_2 [Hz] とし v_m を考え、光電子の最大エネルギーを決めたら、それぞれ K_1 [J]、 K_2 [J] となった。以上のことより、光電方程式から

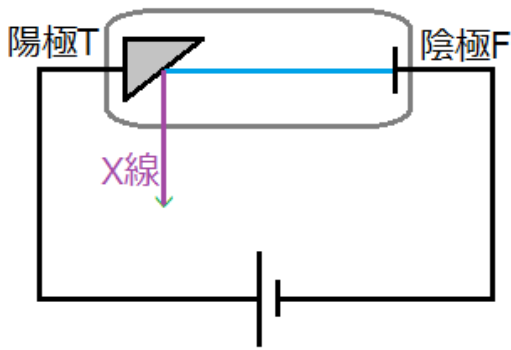
$$K_1 = \boxed{}, \quad K_2 = \boxed{}$$

がなりたち、電子 1 個を金属内から取り出すために必要なエネルギー W [J] は、

$W = []$ である。

→ これによって、光は「波動性」・「粒子性」の二重性をもつことが分かった。

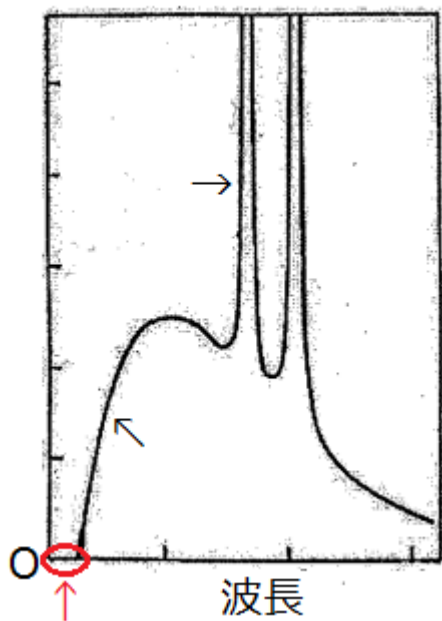
2-3 : X線の発見



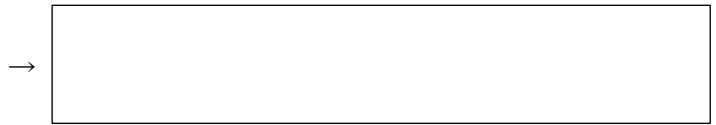
ドイツの数学・物理学者のレントゲンも陰極線の研究をしていた。放電管を黒い紙で包んで実験していたところ、この放電管からかなり離れた場所に置いてあった白金シアン化バリウム（蛍光物質）が塗られた紙が光っていた。その原因を調べたところ、陰極線が当たる陽極 T から、陰極線とはまた別なビームが出ていることが分かった。そのビームは X 線と名付けられた。

次のグラフは、モリブデン陽極から発生する X 線のスペクトル（X 線に含まれる波長の強度分布）の様子を示している。このグラフからわかるように、広い波長域にわたって分布している【 】と、特定の波長で鋭いピークを持つ【 】がある。

X線の強さ



・連続 X 線



発生 X 線の振動数を ν とし、入射電子の入射前と後でのエネルギーを E 、 E' とすると、

$$[\quad \quad \quad]$$

という関係が成り立つ（エネルギー保存則）。

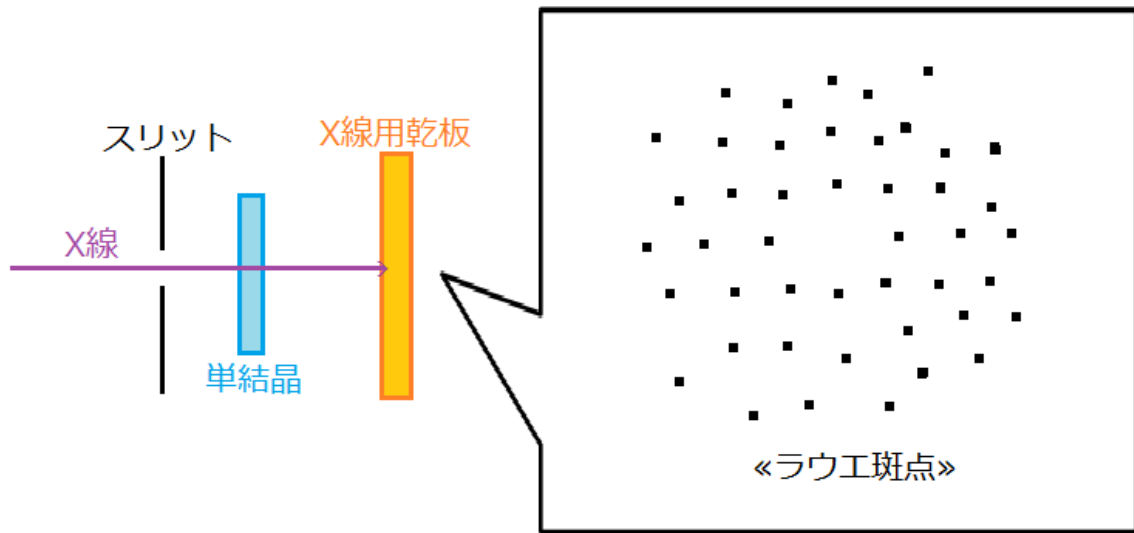
・固有 X 線

→ 陽極 T の物質によって分布が変わる。

X 線には以下のような性質がある。

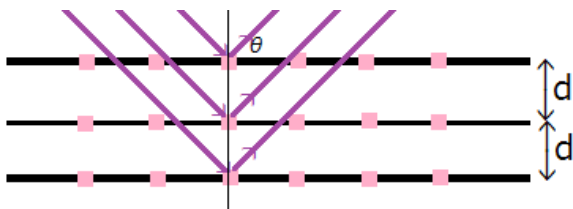
- ・ X 線が蛍光物質に当たると蛍光がでる。
- ・ 電子や分子に X 線があたるとイオンに電離される。→ 生物体に影響
- ・ X 線は光に対して不透明な物質でもよく透過する。

2-4 : X線の波動性



X線の進路は電場や磁場の影響を受けない。これより、レントゲンは「X線は波なのではないか」と考えた。実際に波動性を実証したのはドイツの物理学者ラウエであった。ラウエは結晶の規則正しい原子の配列は、X線に対して立体的な回折格子になると考え、上のような実験装置で、X線の回折・干渉を行った。すると、特定の波長のX線が、特定の方向で強め合い、乾板上に規則的に並んだ多くの斑点【
】が得られた。

X線の反射による物理現象に注目したのがイギリスの結晶学者ブラッグ父子であった。X線を結晶に投射すると、結晶内の格子面においてX線は下図のように反射する。入射X線・反射X線が格子面と θ の角度をなすとき、第1の格子面で反射したX線と、第2の格子面で反射したX線との経路差 L は、格子面間距離を d とすると、



【
】

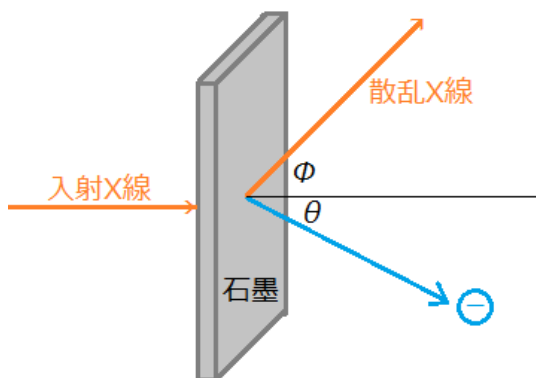
となる。この経路差が波長の整数倍となると、各格子面からの反射X線の干渉の結果、それらは強め合って、強いX線として観察される。

このような反射を、**ブラッグの反射**と言い、この時の反射の条件（ブラッグの条件）は、

【
】と表せる。

2-5 : X線の粒子性 (コンプトン効果)

X線の蛍光作用、電離作用から、X線にも粒子性があるのではないかと考えられた。アメリカの物理学者であったコンプトンは、「X線を原子量の小さな物質に入射させると、物質中の電子が飛び出し、散乱したX線の波長は入射したX線の波長よりも長い」ということを発見した。もちろんこれはX線を波動として考えていては説明できない現象である。X線を石墨に入射させると、下図のようにX線と電子が散乱した。



入射 X 線の振動数、散乱 X 線の振動数をそれぞれ ν 、 ν' 、飛び出す電子の質量を m 、速さを v とすると、エネルギー保存則より、

が成り立つ。

X線の速さを c とし、入射 X 線、散乱 X 線の波長をそれぞれ λ 、 λ' とすると、

運動量保存則より、以下の 2 式が成り立つ。

入射方向の成分：

入射方向に垂直な成分：

以上の 3 式より、入射 X 線と散乱 X 線の波長の差 ($\Delta \lambda$) を求める。

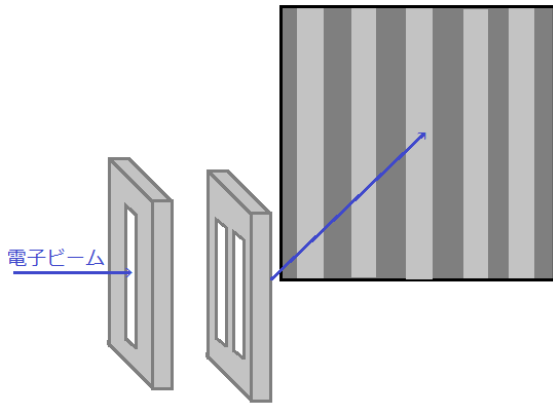
その際、 $\frac{\lambda}{\lambda'} + \frac{\lambda'}{\lambda} \approx 2$ という近似を使う。

$\Delta \lambda =$

第三章：粒子の波動性

3-1：物質を波として考える…？

波だと考えられていた光は粒子のようにもふるまうというのは、アインシュタインやコンプトンによって分かった。それならば、粒子・物質と考えられていたものは、波として考えることはできないのだろうか。この考えを提唱したのが、フランスの物理学者であるルイ・ド・ブロイである。



左図のように、電子の流れの中に2本のスリットを置き、2本のスリットを通過した2つの流れが合流する場所に置いてある検出面に到達した電子を観察すると、あたかもヤングの実験の結果と同じように干渉縞が形成されているのが分かった。つまり、電子の場合にも、干渉縞という波動現象は、電子を発見する確率の大小の空間的な分布として現れるということだ。

質量 m 、速度 v の電子ビームが波動性を示すときの波長 λ は、光波の時と同様で、

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

である。この波長を「ド・ブロイ波長」といい、その波のことを「物質波」という。

実際に身の回りにある物質を波動として考えてみる。

- ①：例えば秒速 22[m/s] で投げられた質量 0.15[kg] の野球ボールをド・ブロイ波長は、

- ②：例えば速さ 10^6 [m/s]、質量 9.1×10^{-34} [kg] の電子線のド・ブロイ波長は、

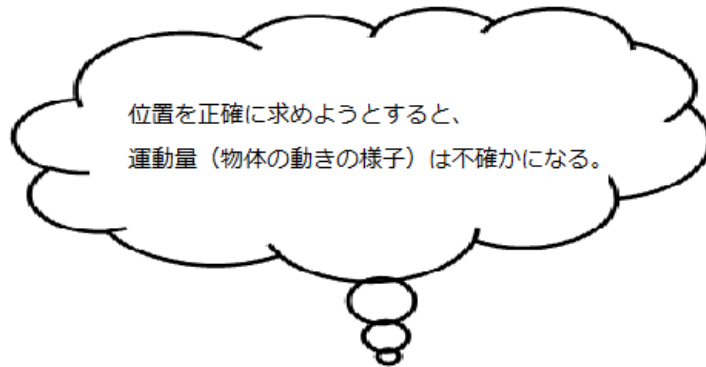
となる。①で求めた波長はあまりに短いので、物理学的に意味を持たない。すなわち、野球ボールの波動性は問題にならない。しかし、②で求めた波長は、結晶中の原子の間隔程度なので、結晶に当たったとき回折して波動性を示す（デビソン-ガーマーの実験）。

3-2：ハイゼンベルクの不確定性原理

ある物体の位置を精密に測定しようとする、細く絞った光線を物体に当てる必要があるが、波長 λ の光線の幅は、 $\frac{\lambda}{2\pi}$ 程度までしか絞れないということが、光学の研究でわかっている。つまり、波長 λ の光を使って物体の位置を測定した時の測定値には、 $\frac{\lambda}{2\pi}$ 程度の不確定さ（誤差） Δx が存在する。一方、光には粒子性があるため、光子を1個以下に減らすことはできない。光子1個のもつ運動量は $\frac{h}{\lambda}$ なので、物体に波長 λ の光を当てると、物体の運動量が増え、物体の運動量の測定値には $\frac{h}{\lambda}$ 程度の不確定さ（誤差） Δp が存在する。

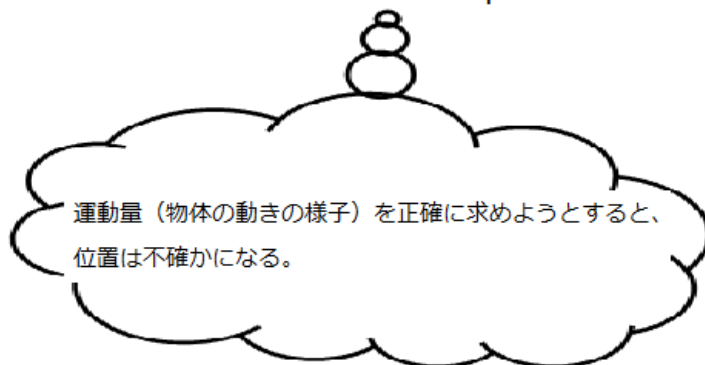
ドイツの物理学者ハイゼンベルクは、原子物理の世界では、短波長の光で物体の位置を正確にきめようとする、運動量の不確定さが大きくなり、長波長の波で物体の運動量を正確にきめようとする、物体の位置の不確定さが大きくなってしまふことに注目した。つまり、電子のような微小なものの「位置」と「運動量」の両方を同時に正確に測定することはできないということだ。つまり、以下の式が成り立つ。

$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$



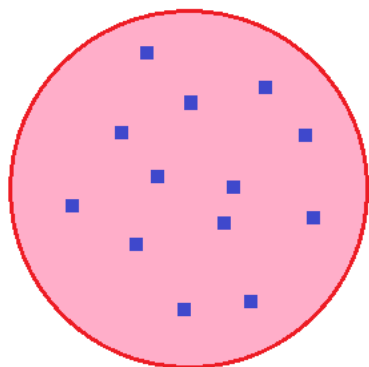
$$\Delta x \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

$$\Delta X \cdot \Delta p \geq \frac{h}{4\pi}$$

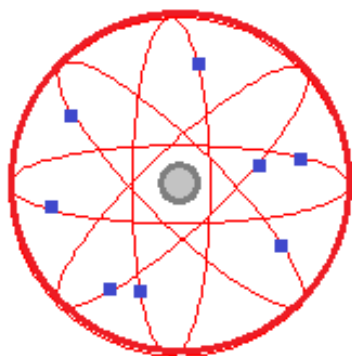


3-3：原子模型

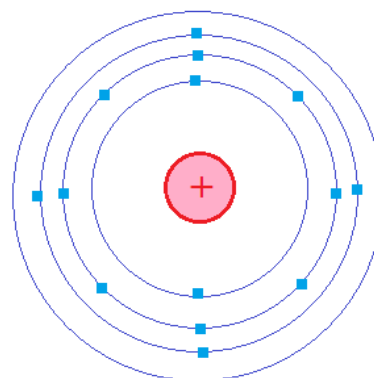
「電子」というものが発見されたということは、「原子」にも構造があるということの意味する。電子の発見以来、原子構造の模型がいろいろと考えられた。電子を発見した張本人である JJ トムソンは、正電荷を帯びた原子の雲のような球状なものの中に負電荷である電子が散在している、という「ぶどうパンモデル」を提唱した。



これに対し、日本の物理学者である長岡半太郎は、正電荷をもつ原子核の周りに電子が存在し、原子核の周りを飛び回っているという考えを提唱した。長岡が考えた「原子核」の存在は、イギリスの物理学者であるラザフォードによって確かめられ、惑星型の原子モデルが確立した。



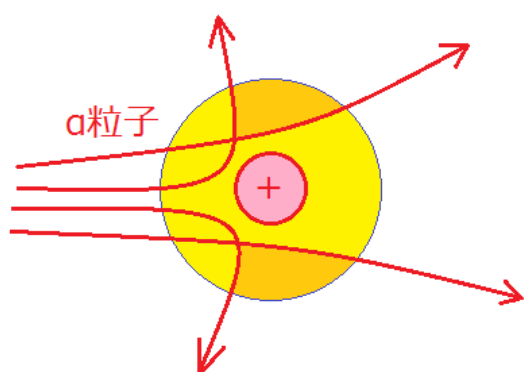
長岡模型



ラザフォード模型

・ラザフォードが行った実験

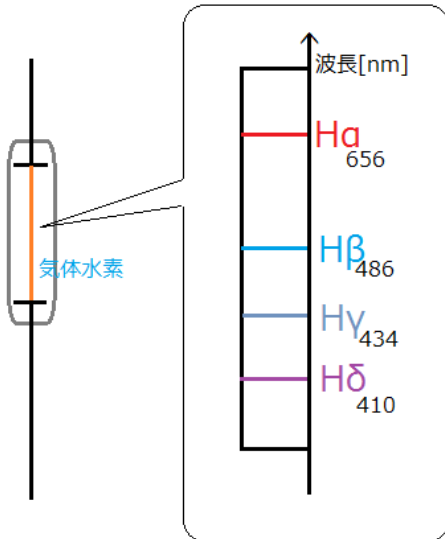
ラザフォードは α 粒子 ($+2e$ [C]の電荷をもつ He 原子核) を薄い金属箔に照射すると、左



図のような散乱が見られる。この実験で、散乱する α 粒子の中に、非常に大きく散乱するものが見られた。これは、原子の中はほとんど空白（真空）で、その中心に正電荷を持つ小さな塊（核）が存在することを意味している。その核のことを原子核と言ひ、そこは、電気素量 e の整数倍の正電荷をもつことが分かった。

3-4：水素原子の構造

原子模型の議論が進む中、原子のベースとなる水素原子についての研究がすすめられた。



バルマーは気体水素を入れた放電管内の光を調べると、可視部から紫外線部にわたる輝線スペクトルの一群があることを発見し、そのスペクトル線の波長には

$$\lambda = 3.646 \times 10^{-7} \times \frac{n^2}{n^2 - 2^2}$$

という式が当てはまることを見出した($n=3,4, \dots$)。

その後、スウェーデンの物理学者リュードベリは、波長の代わりに波数(波長の逆数)を用い、上の式を

と書き直した。

R は水素のリュードベリ定数という。

さらに、振動数を ν 、光速を c とすると、上の式は

と書き直される。

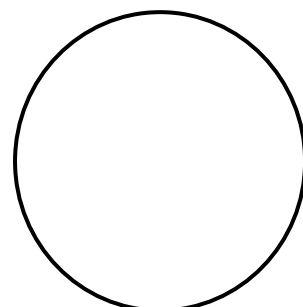
すなわち、スペクトルは連続的なものではなく、トビトビの値を取る。

・原子の発光機構

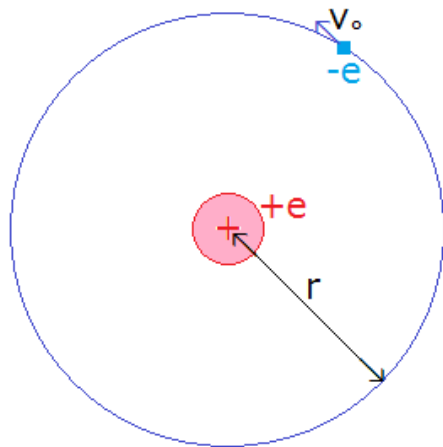
上述のようなスペクトルの成因を、原子模型から説明しようと試みがなされたが、長岡やラザフォードの原子模型では説明ができなかった。デンマークの物理学者であるボーアは、以下のような仮説を挙げた (**ボーアの仮説**)。

- ・
- ・

→ 電子が安定な円軌道を運行するのは、軌道の円周の長さが電子波の波長の整数倍に等しい時である。その条件を満たさない軌道は存在しない (“量子”の考え方)。



3-5: ボーアの理論



水素原子は+e[C]を持つ原子核と、その周りを回る質量 m[kg]、電荷-e[C]の電子からなる。電子は原子核の周りを半径 r[m]、速度 v₀[m/s]で等速円運動しているとみなすと、

$$\left[\quad \quad \quad \right]$$

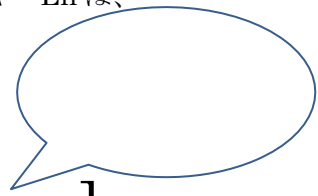
がなりたつ。また、量子条件より

$$\left[\quad \quad \quad \right]$$

がなりたつ。また、静電気力による電子の位置エネルギーを U とすると、無限遠をこの位置エネルギーの

基準とすると、U=

E=



これより、v を消去すると、円軌道半径 r =]...★

ゆえに、E_n =]となる (エネルギー準位)。

この式を、振動数条件の式に代入すると、

$$h \nu = \left[\quad \quad \quad \right] \quad (n' = n+1, n+2, n+3 \dots) \text{ となるので、}$$

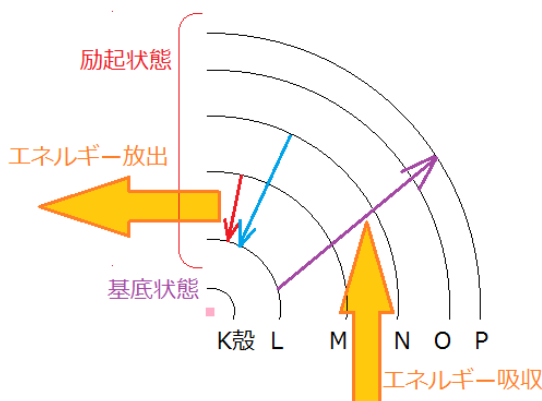
$$\nu = \left[\quad \quad \quad \right] \rightarrow \frac{1}{\lambda} = \left[\quad \quad \quad \right]$$

この波数の式は、リュードベリの式と同形である。

★式は、原子内の電子が核の周りをまわるのができる円軌道の半径を示す。

また、量子数 n が 3、4、5...の軌道にあった電子がより小さな軌道に移るときに、エネルギーを放出し、スペクトル線が観測される。

エネルギーが放出され、原子の持つエネルギーが最低になる状態を]といい、エネルギーを吸収し、高準位の定常状態に移った時の状態を]という。

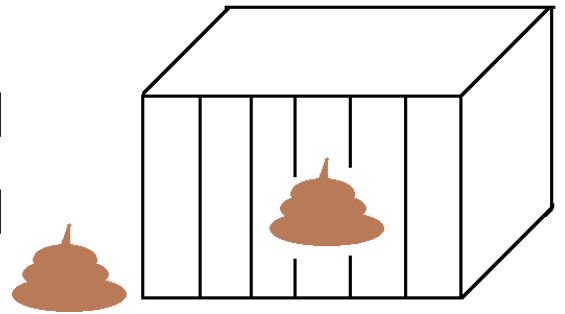


第四章：原子核と核反応

4-1：放射能と放射線

・放射能： []

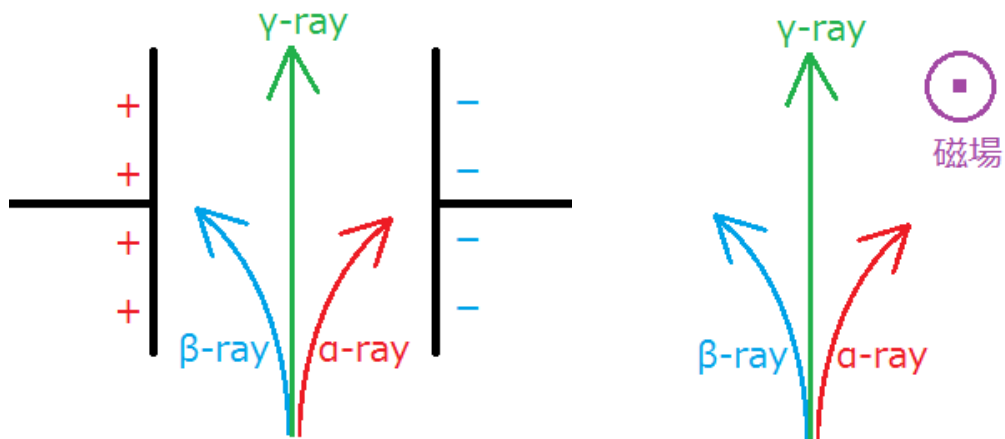
・放射線： []



- ・シーベルト：生体の被曝による生物学的影響の大きさ
- ・ベクレル：放射性物質が1秒間に崩壊する原子の個数

★：天然に存在する放射性物質からは3種類の放射線がある。

→ α線・β線・γ線の3種類である。



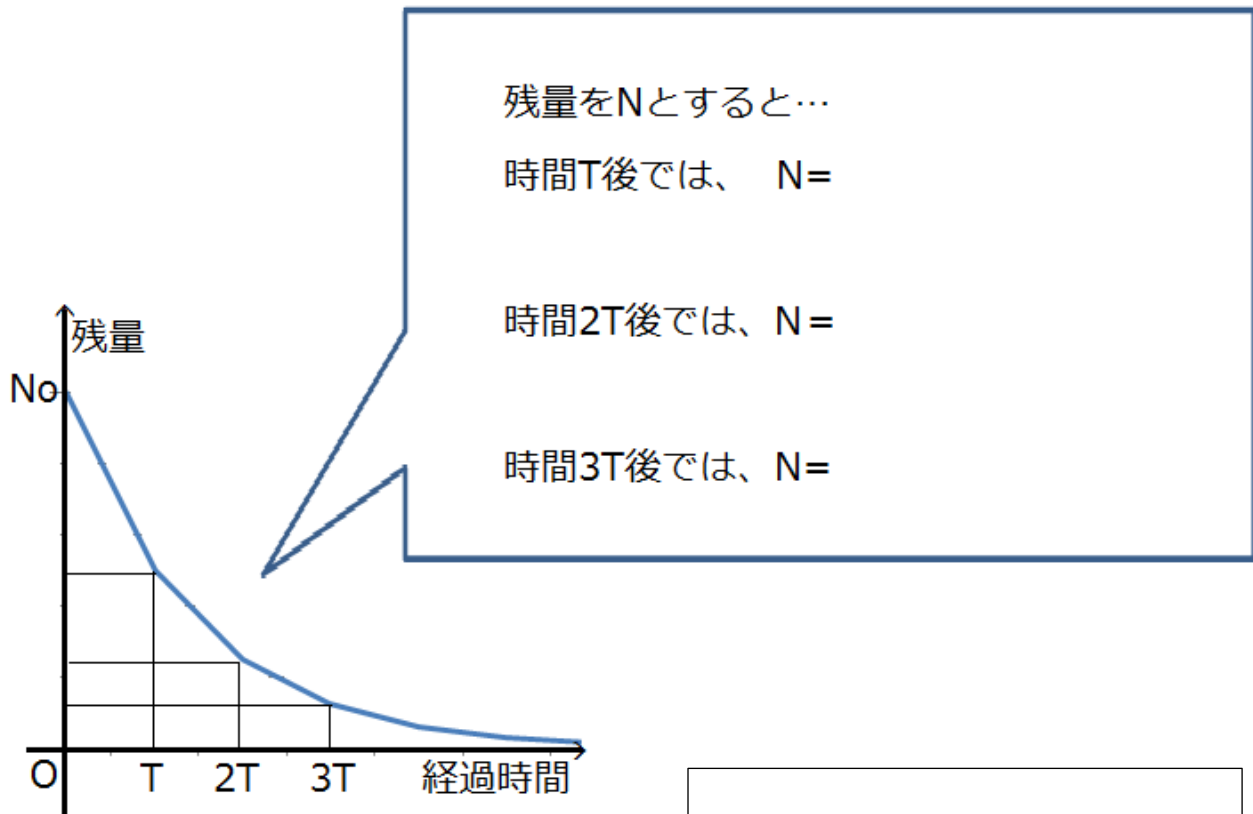
以上のような実験装置で、その3種類は分別される。

	α線	β線	γ線
本体			
質量			
電荷			
透過能			
蛍光・電離・写真作用			

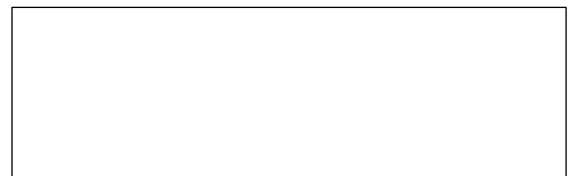
4-3：半減期

放射性同位体は、その個々の原子核がいつ崩壊するかは全く予測できず、崩壊は偶然的である。また、放射性同位体が崩壊する確率は、その同位体の種類によってさまざまである。つまり、半減期を調べると、放射性元素が何なのかが同定できる。

放射性同位体の原子核は、一定時間 T （半減期）で残量の半分ずつ減っていく。



・これより、時間 t 後には、次のようになる。

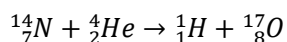


Q：ある遺跡から発見された木材中の、 ^{12}C に対する ^{14}C の割合を調べたところ、現在の木材の 16 分の 1 であった。この遺跡はいまから何年前のものなのだろうか？

A：木材中の ^{14}C が崩壊して減少していく。半減期は 5.7×10^3 年であるので…

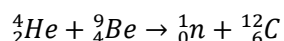
4-4：核反応

原子が分割不可能なものではなく、原子核と原子から構成されているということが分かった。さらに、放射能の発見から、放射性元素が崩壊して別の元素になってしまうことから、原子核も分割可能であることが分かった。ラザフォードは、原子核を人工的に変換できるかどうかを実験し、次の式を挙げた。



つまり、窒素の原子核に α 線を当てると、陽子と酸素の原子核が生成されるのだ。また、核反応では、**反応前後で「質量数の和」、「原子番号の和」は不変である。**

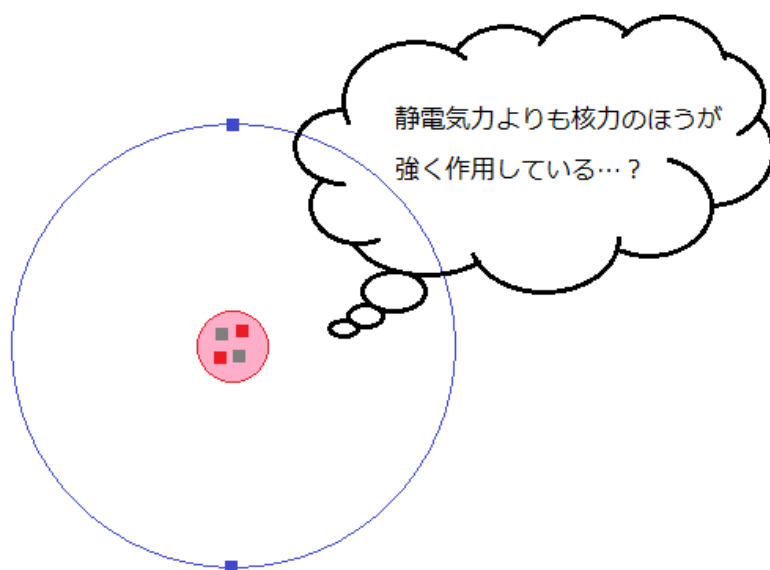
さらにイギリスの物理学者チャドウィックは、ベリリウムに α 線を当てると、陽子とほぼ同じ質量をもつ中性な粒子（中性子）が飛び出てくることを発見した。



上の式の **n** は中性子を意味し、これらの結果から、原子核は、陽子と中性子からできていることを意味している。陽子と中性子のことをあわせて核子という。

・「核力」

日本の物理学者湯川秀樹は、陽子は正電荷で電子は負電荷であり、お互い引力がかかり合う関係なのにもかかわらず、なぜ陽子は中性子と集まって原子核を形成することができるのか、ということに注目した。核子の間に作用して、核子を結び付けて原子核を構成する原因となる力を核力というが、核力は静電気力でもなく（中性子は電氣的に中性であるから）、万有引力でもない。湯川は、パイ中間子という素粒子が核子の間でキャッチボールのようにやりとりされることが核力の原因と考えた。この発表で湯川は日本人初のノーベル賞を獲得した。



4-5：核のエネルギー

原子核の質量はその原子の質量数にほぼ比例し、構成する核子の質量の和にほぼ等しい。しかし、原子核の質量を厳密に計測すると、原子核の質量は、構成する核子の質量の和よりも小さい。…？

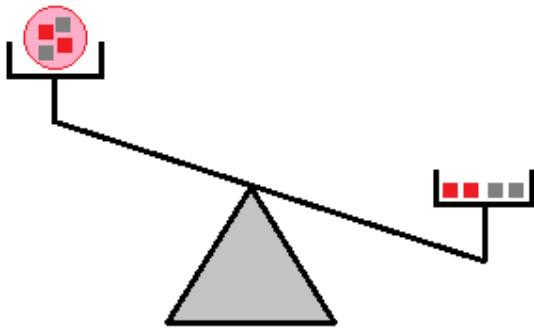
例えばヘリウム原子核の質量を M 、陽子、中性子の質量をそれぞれ m_p 、 m_n とすると、

$$M < 2(m_p + m_n)$$

という関係になるということだ。ここで、任意の核の原子番号を Z 、その質量数を A とすると、核内の陽子の数は Z 、核内の中性子の数は $(A-Z)$ なので、質量差 Δm は、

$$\Delta m = Zm_p + (A - Z)m_n - M$$

と表される。この差を**質量欠損**という。



この事実は長い間物理学の世界で議論されたが、アインシュタインの**特殊相対性理論**によって解決された。彼は質量とエネルギーの等価性に注目した。アインシュタインは

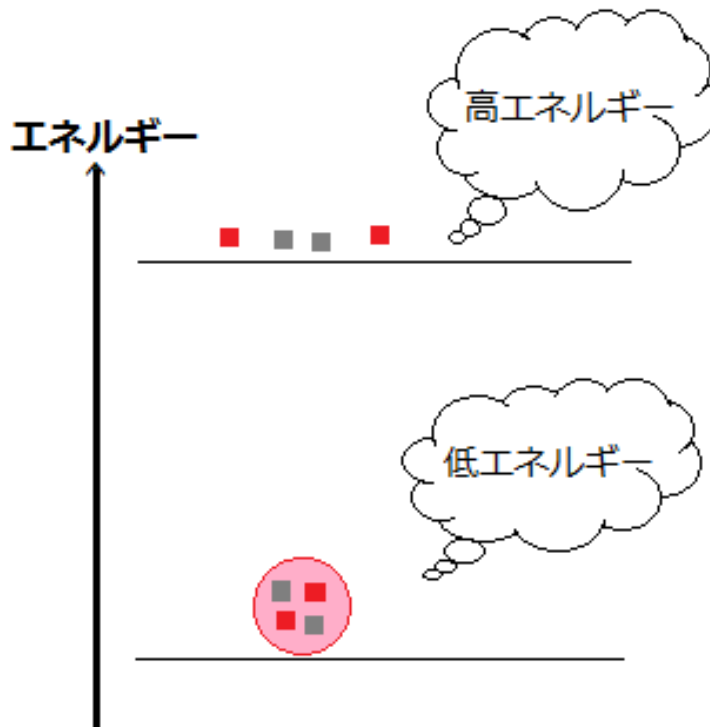
「原子核にエネルギーを与えることで核子はバラバラになる」と考えた。

$$M[kg] + E[J] = 2(m_p + m_n)[kg]$$

しかし、このままでは計算ができないので、 $E=mc^2$ という考えより (c : 光速)、

$$Mc^2[J] + E[J] = 2(m_p + m_n)c^2[J]$$

とすると、エネルギー計算ができる (質量とエネルギーの等価性)。

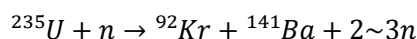


4-6：核分裂反応・核融合反応

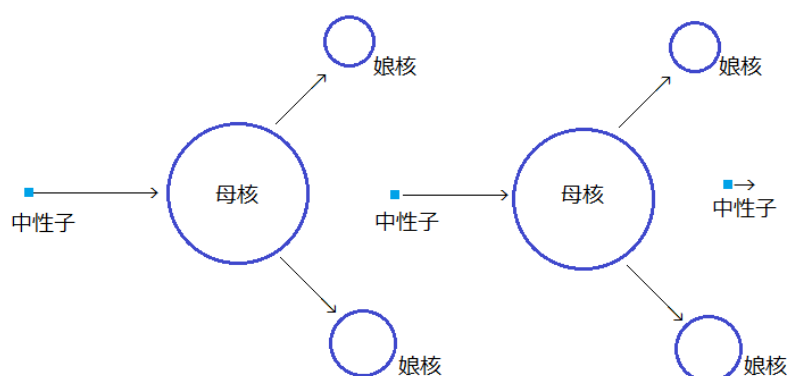
・核分裂反応

4-5のような関係を利用した発電法が原子力発電である。

ある原子力発電では、ウラン 235 に 1 つの中性子を吸収させて、ウランを不安定な状態にして核分裂させる。その後、クリプトン 92 とバリウム 141 に分裂したと考える。



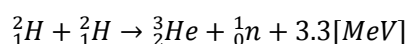
この反応でさらに中性子が放出され、また別のウラン 235 に吸収され、反応が連鎖していく。この連鎖反応が起きる状態を【 】という。また、この反応が光速で進むと、短時間でたくさんのエネルギーを放出することができる。



・核融合反応

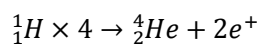
軽い原子核、すなわち原子番号が小さい元素の原子核どうしが核反応を起こし、それらよりも原子番号の大きい原子核ができる反応を核融合反応という。

例えば、重水素 D どうしの反応によってヘリウム 3 を生じる場合、



という反応のもと、約 3.3[MeV]のエネルギーが放出される。

太陽から放射されるエネルギーも、核融合反応によるものである。太陽の内部にある大量の水素が核融合して He になる (e⁺は陽電子)。



この反応前後における質量差が、放射されるエネルギーになっていると考えられている。一回のプロセスで放出されるエネルギーは約 25[MeV]である。

～あとがき～

みんなは「シュレディンガーの猫」を知っているだろうか？当時のオーストリア・ハンガリー帝国の物理学者シュレディンガーが提唱した、「量子力学」の世界の不思議さを表した考え方である。

例えばここに大きな部屋があり、その中には放射性物質であるラジウムと、それから放射される α 粒子を感知するガイガーカウンターと呼ばれる計測器を用意する。さらに、ガイガーカウンターが α 粒子をキャッチすると、それと連動して青酸ガス発生器が作動してしまう、というとんでもない状況を考えていただきたい。もちろん青酸ガスが発生してしまったら猫は死んでしまうが、ラジウムから α 粒子が飛んでこなかったら、猫は生きている。さて問題。一定時間が経った後、果たして猫は生きているのだろうか…？

量子力学の範囲では、「猫が生きている状態」と「猫が死んでいる状態」が「重ね合わさっている」と答える。部屋の中での猫の安否は部屋を開けて実際に確認するまで分からないというわけだ。ん？部屋の中で「猫が生きている状態」と「猫が死んでいる状態」が混在することがあり得るのか？

しかしこのような「重ね合わさっている」という状態は量子力学にはよくあること（コペンハーゲン解釈）。ニュートンが確立した古典物理学では、与えられた条件が全く同じなら、実験を何度繰り返しても結果は同じである。例えサイコロでも、同じ高さ同じ環境同じ投げ方であれば何度も同じ目が出る。しかし量子力学の範囲では、与えられた条件が全く同じで実験をしたにも関わらず、結果が確率的に変化する。つまり、「A という結果になる確率はX%、B という結果になる確率はY%」というふうに、いつも同じ結果になるとは限らないということだ。ボーアは「実験が始まった時には実験結果はまだ誰も分からず、実際に結果を測定し確認してはじめて、結果が確率的に分かる」と説明した。

その考えに怒ったのがおなじみアインシュタイン。彼は「我々の知らない、現在の科学技術では未だに測ることのできない何かの物理量のせいで、結果に差が出たのだ」と考え、さらに以下のような言葉を残した。

Der Alte würfelt nicht.

「神はサイコロを振らない」

現代物理学はわりと特有の色が濃い分野である。一度ドツボにはまると夜も眠れなくなるという。しかし、そこに興味を抱けると楽しいのだろう。

物理学者たちの物語はこれからも続いていく…

♪おわり♪