

原子物理学 β ver.1.2.2

ヒカル@ヒカルの家/Hikaru's House

平成 26 年 3 月 23 日

概 要

原子物理分野は最近の大学受験では問われることが少ないため、余り勉強に時間を割けなかったり、そもそもほとんど扱われないこともある。しかし物理をより深く理解する上でより小さな世界を学ぶことは非常に重要である。これまでマクロで古典的な世界を考えてきたが、これからよりミクロな世界についてみていこう。

あくまでまだまだ β 版です。推敲等しておりませんので、ご利用される際はご注意ください。

1 電子

1.1 比電荷

ガイスラーはガラス管の両端に電極を封入し、電極間に高い電圧を加えた。そのままガラス管内の気圧を上げていくと、陰極から陽極に向かって管壁が黄緑色の蛍光を発するようになった。この陰極から出ているものを陰極線と呼ぶ。

陰極線に対して電場や磁場を加えると曲がることが実験的に確認された。このような性質から陰極線は負電荷をもつ粒子の流れであることがわかった。この粒子を電子と呼ぶようになり、陰極線とはすなわち電子線のことである。

電子が電場・磁場中で力を受けるのは電磁気学で学んだとおりである。最初に、図 1 のように電場空間中を移動する電子について考えよう。電場 $(-E_0, 0)$ がかかっている空間に、初速 $(0, v)$ で電子を入射する。この電子が、 x 軸方向に距離 L 進む間にどのような運動をするか。運動方程式を書けば、次のようになる。

$$m\ddot{x} = 0 \quad (1)$$

$$m\ddot{y} = eE_0 \quad (2)$$

x 軸方向に L 進むのにかかる時間は L/v なので、その間に進む y 方向距離は、

$$y = \frac{eE_0L^2}{2mv^2} \quad (3)$$

となる。これより、 e と m に比・比電荷は

$$\frac{e}{m} = \frac{2yv^2}{E_0L^2} \quad (4)$$

となる。 L, v, E_0 は初期条件で決まる値なので、 y を測定することによって比電荷を求めることができる。

1.2 ミリカンの実験と素電荷

電子の電荷を求める実験はミリカンによって行われた。ミリカンは平衡コンデンサー間に電圧を加えて一様な電場を作り、そこに油滴を散布した。油滴周辺の空気に X 線を当ててイオン化させる。イオンは油滴に帯電し、電

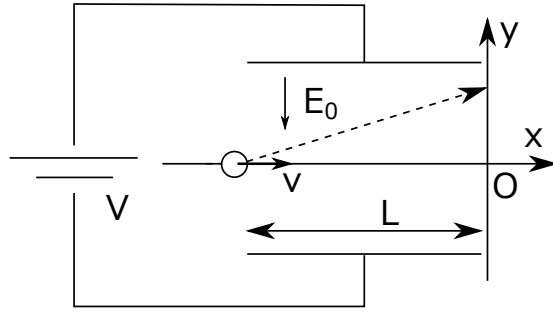


図 1: 比電荷を求めるための実験の図。速さ v で電荷を入射させ、スクリーン上に到達した時の y 座標を調べる。これより、比電荷を求めることができる。

場から力を受ける。このとき油滴の質量を m 、電荷量を q とする。電圧を変化させ、油滴が静止する状態をつくりだす。油滴に作用している力は静電気力・重力・空気抵抗である。これをすべて式にすると、

$$qE = \frac{4\pi}{3}r^3\rho g + 6\pi\eta r v \quad (5)$$

となる。ただし、 r は油滴の半径、 ρ は油の密度、 η は空気の粘性、 v は油滴の速さである。これを簡略化して、

$$qE = mg + kv \quad (6)$$

と書こう。油滴の上昇する速さを一定 v_E に保てば、

$$q = \frac{d}{V}(mg + kv_E) \quad (7)$$

となる。これを複数の油滴について電荷 q 測定し、素電荷 $e = 1.6 \times 10^{-19}\text{C}$ を推測した。この電気量を電気素量という。

ミリカンの実験のあとも行われた電子の比電荷の精密な測定により、

$$\frac{e}{m_e} = 1.758820150 \times 10^{11}\text{C/kg} \quad (8)$$

であるとわかった。これと先に求めた結果を合わせると、次のようになる。

$$e = 1.602176487 \times 10^{-19}\text{C} \quad (9)$$

$$m = 9.10938215 \times 10^{-31}\text{kg} \quad (10)$$

ただし、素電荷についてはより詳細な実験結果を用いた。

2 電子波と原子の構造

2.1 電子の波動性

これまで電子は「粒子」であるとして扱ってきた。粒子であるならば電子の運動は古典力学ですべて表記できるが、現実はずしもそうではない。電子のように非常に小さい粒子は必ずしも古典力学には従わず、波と同じ性質を示す。これが電子の波動性である。ではどうしてこのようなことが起きるのか、それは量子力学的な部分に足を踏み込む必要がある。

これまでの古典力学では物体の位置と運動量は同時に測定することが出来た。ここでは簡単のため、それぞれ x, p とする。では非常に小さい物体、とても小さく目では到底見えないような物体の位置と運動量を得たい場合、

どうすればいいだろうか。その答えは、同程度に小さな粒子をぶつけてやることである。跳ね返ってきた粒子の状態から、測定したい対称の位置と運動量を知ることができる。

ところが、光を当てたことで物体の位置および運動量が変化してしまう。つまり、同時に性格な物体の位置と運動量を得ることは出来ないのである。これを不確定性原理という。

金属の表面に光を当てると、電子が金属から飛び出してくる。これを光電効果という。この効果の研究から、振動数 ν [Hz] の光は $h\nu$ [J] のエネルギーを持つとみなせるようになった。 h はプランク定数と言い、 $h = 6.63 \times 10^{-34}$ [J・s] である。光は電磁波であるが、このように光を粒子として考える時、光子と呼ぶ。なお、物体表面に光をあてて電子を飛び出させるために必要な最低エネルギーは決まっており、それを仕事関数という。

波と考えられてきた光が粒子の性質を持つことは非常に興味深い事実である。ここに光子が波動性と粒子性の二重性を持つことから、ド・ブロイは粒子と考えられてきたものにも波動性があると考えた。このように粒子が波動として振るまう時の波を物質波 (ド・ブロイ波) とよび、特に電子の場合は電子波という。

一般に質量 m kg, 速さが v m/s, 運動量を p , 物質波の波長 (ド・ブロイ波長) を λ m とすると、次の式が成り立つ。

$$\lambda = \frac{h}{p} \quad (11)$$

2.2 原子の構造

電子のモデルについては色々なものが考えられたが、その中で有名なモデルとして J.J. トムソンと長岡半太郎を紹介する。トムソンは一様に正に帯電した球の中を電子が回っているモデルを発表した。一方長岡半太郎は正電荷を持った球の周りを電子が回っているモデルを発表した。

また、ラザフォードの研究室では原子の構造を調べるために高速の α 粒子を金箔に当てた。金箔に到達した α 粒子は通り抜けるか曲がるかという振る舞いをし、この様子を観測した。結果、ほとんどの α 粒子は透過したが、90 度以上曲げられる粒子も存在した。 α 粒子は電子に比べ非常に重いため、電子によって大きく曲げられることはない。そこでラザフォードは、 α 粒子は原子核の狭い部分に集中した正電荷から力をうけており、さらにそこに原子の質量の大部分が集中していると考えた。この結果、原子は正電荷を持つ原子核とその周囲をまわる電子とからなるとする、ラザフォードの原子模型が生まれた。

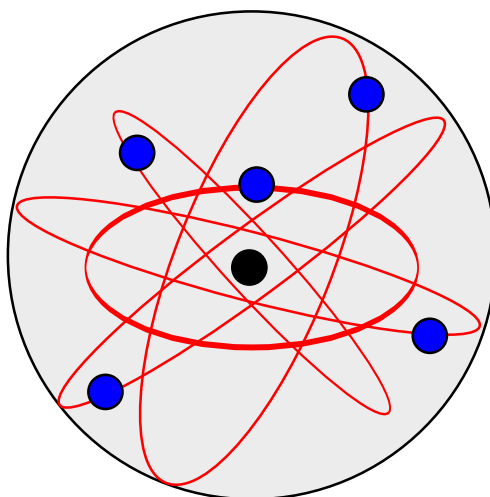


図 2: ラザフォードの原子模型。これまでのモデルと違い、原子の中央に原子の質量の大部分を占める原子核を持つ。その周囲を電子が飛び交っている。

2.3 原子のスペクトルとエネルギー準位

高温の気体は特定波長の光を発し、また吸収する。これは気体の原子が光を発する、または吸収するからであり、それぞれの元素によって決まった波長に対応する。

最も簡単な原子である水素原子について、バルマーは水素原子の線スペクトルの波長が

$$\lambda = 3.65 \times 10^{-7} \times \frac{n^2}{n^2 - 2^2} \quad (n = 3, 4, 5, \dots) \quad (12)$$

で表わされることを発見した。

その後広い波長帯で色々な線スペクトルが発見され、

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n'^2} - \frac{1}{n^2} \right) \quad (n' = 1, 2, \dots, n = n' + 1, n' + 2, \dots) \quad (13)$$

となることがわかった。このとき、 $R = 1.10 \times 10^7 \text{1/m}$ であり、リュドベリ定数と呼ばれる。

ここで、ラザフォードの原子模型には重大な難点があった。原子核の周囲を回転する電子は電磁場を放出し、エネルギーを失い、電子の軌道半径はどんどん小さくなる。これでは安定な原子核を維持することは出来ない。そこでボーアは水素原子のスペクトルに着目し、これらの難点を解決した。

ひとつは量子条件である。原子には定常状態があり、その状態では電磁波を出さない。電子の質量 $m \text{kg}$, 速さ $v \text{m/s}$, 軌道半径 $r \text{m}$, 電子波の波長を λm とすると、

$$2\pi r = n\lambda = n \frac{h}{mv} \quad (n = 1, 2, 3, \dots) \quad (14)$$

が成り立つ時、定常状態であるとした。これは「軌道円周が波長の整数倍に等しい時」となる。このように許される定常状態はとびとびになるので、定常状態の電子がもつエネルギー $E_n [\text{J}]$ もとびとびの値になる。 n を量子数、定常状態もしくはそのエネルギー E_j をエネルギー準位という。

もう一つは振動条件である。電子がエネルギー準位 E_n からそれよりも低い E_m に移る時、この差のエネルギー

$$E_n - E_m = h\nu \quad (15)$$

を持つ光子を放出する。一方これに対応する光子を吸収することでエネルギー準位が E_m から E_n に移る。

ボーアは水素原子内の電子の運動方程式から水素原子のエネルギー準位を求め、

$$E_n = -\frac{Rhc}{n^2} \quad (16)$$

となることを導いた。 $n = 1$ の時が最低であり、このエネルギー準位を水素の原子の基底状態という。一方 $n = 2, 3, \dots$ となると電子のエネルギーは大きくなり、励起状態になる。

最後に電子殻についての話をしよう。水素原子以外の原子は2つ以上の電子を持つ。一般の原子では量子数 n の等しい電子軌道が複数存在する。同じ n を持つ軌道の集まりを殻または電子殻という。

電子波ひとつの軌道に一つしか入れないという規則を持っている。一つの電子殻が決まった数の電子で満たされると、残りの電子はより高いエネルギー軌道に入る。最外殻電子殻にある電子を価電子という。

3 固体の性質と電子

3.1 結晶

固体はそれを構成する原子や分子の並び方によって結晶と非結晶のふたつに分けられる。原子が規則正しく並びそれが周期的に繰り返されるのが結晶、ガラスやゴムのように原子の並びに規則性のないものが非結晶である。

固体は多数の原子が結合してできたものであるから、原子または分子間の結合力が必要である。この結合力が高いものほど固体は硬くなり、また融点は高くなる。

結晶に X 線のような波長の短い光を入射すると、規則正しく並ぶ原子が回折格子として作用し、解説した X 線による干渉が起きる。X 線を用いるこのような干渉現象を X 線回折といい、結晶の構造を調べたり未知の X 線の波長を求めるのに使われたりする。

3.2 導体・不導体・半導体

物質は電気抵抗の種類によって、導体・不導体・半導体の 3 つに分けられる。抵抗率が低く電気をよく通す物体を導体という。金属などがこれにあたり、導体中では自由電子が飛び回ることによって電気を伝える。一方抵抗率が高く電気通しにくい物質を不導体という。これにはプラスチックなどがあたり、電気を遮るという意味で「絶縁体」ともよぶ。最後に、抵抗率が導体と不導体の間にあるようなケイ素やゲルマニウムを半導体という。物質による電気伝導率の違いは物質中電子の状態が異なるからである。例えば、導体中では温度が上がると分子運動が増すため、一般に抵抗率はあがる。一方、半導体は温度があがると抵抗率は減少する。

3.3 半導体

ケイ素やゲルマニウムは低温では抵抗率が高いが、温度が上昇すると電気を通すようになる。このような半導体を真性半導体という。

一方、ケイ素やゲルマニウムに微量のリンやアルミニウムといった不純物を混ぜると、真性半導体に比べて電気を通しやすくなる。これらを不純物半導体といい、ダイオードやトランジスタに用いられる。

不純物半導体は、ドーピングした不純物によって n 型半導体と p 型半導体に分けられる。

3.3.1 n 型半導体

ケイ素やゲルマニウムに微量のリンやアンチモンをドーピングしたものが n 型半導体である。ケイ素やゲルマニウムの最外殻原子核には 4 個の価電子を持ち、共有結合をつくることで結晶を作る。リンやアンチモンは 5 個の価電子をもち、ケイ素やゲルマニウムの結晶に入るとそのうち 4 個が共有結合を作り、残り 1 個が自由電子として振る舞う。これによって電流が流れるのである。半導体中で電流を流す荷電粒子の役割を担うものをキャリアといい、n 型半導体においてキャリアは電子である。

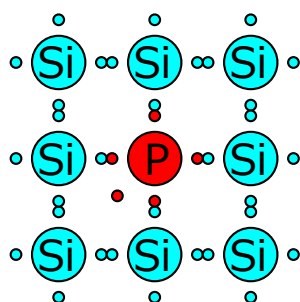


図 3: n 型半導体のモデル。ケイ素の結晶の中に微量のリンが入っている。ケイ素の最外殻には 4 つの電子があるが、リンの最外殻には 5 つの電子がある。共有結合をつくっていくと最終的に電子がひとつ余るため、これが半導体中で電流を流す荷電粒子の役割をなす。

3.3.2 p 型半導体

ケイ素やゲルマニウムに 3 価のアルミニウムやインジウムを混ぜたものが p 型半導体である。このとき共有結合に 1 つ電子が足りず、電子のないところができる。これをホール (正孔) という。電場を加えるとエネルギーが高い共有結合の電子が移動する。結果としてホールが移動した形になり、これによって電流が流れる。このように、p 型半導体におけるキャリアはホールである。

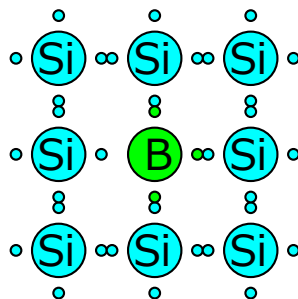


図 4: p 型半導体のモデル。ケイ素の決勝の中に微量のリンが入っている。ケイ素の最外殻には 4 つの電子があるが、ホウ素の最外殻には 3 つしか電子がない。共有結合をつくっていくと最終的に電子がひとつ足りない。これがホールである。このホールの位置が次々移動することにより、電流が流れる。

3.4 半導体ダイオード

p 型半導体と n 型半導体を隣接させて両端に電極をつけたものを半導体ダイオードという。¹ p 型が正、n 型が負に鳴るように電圧を加える。すると p 型からホールが、n 型から電子が接合面に向けて流れる。接合面ではホールと電子が対になって消滅する。一方、電圧がかかっていることで p 型半導体には常にホールが、n 型半導体には常に電子が供給される。これによって電流が流れる。また、電流が流れる方向を順方向という。

一方、n 型が正、p 型が負になるように電圧を加える。すると n 型半導体中の電子が正電極へ、p 型半導体中のホールが負電極へと移動する。電子は正電極に吸い込まれ、ホールは負電極から流れてきた電子と対になって消滅する。すると n 型半導体中では正の電荷が、p 型半導体中では負の電荷が増える。これによって pn 接合面で電位差が生じる。このことは瞬間的に生じるため電流は流れない。このように電流が流れない方向を逆方向という。

半導体ダイオードの役割としては特定方向にしか電流を流さないことにある。これを電流の整流作用という。また、逆方向に電圧をかけた時に生じる電位差は半導体ダイオードによって決まっている。これを利用して回路の中で特定電圧をかけることが可能である。²

3.5 トランジスタ

3 つの不純物質半導体を組み合わせたものをトランジスタという。2 つの p 型半導体の間に n 型半導体を挟んだものを pnp 型トランジスタ、2 つの n 型半導体の間に p 型半導体を挟んだものを npn 型トランジスタという。図 hogehoge はトランジスタの構造と記号を示したものである。それぞれエミッタ (E)、ベース (B)、コレクタ (C) という。

¹p 型半導体と n 型半導体を接合したものを pn 接合という。

²ここでは簡単に書いたが実際に回路を組む際には様々な注意が必要である。まず順方向にダイオードを組み込む時、電源とダイオードしかないような回路は作ってはならない。ダイオードは順方向に抵抗としては作用しないので、この場合非常に大きな電流が流れてしまう。以前無知だった筆者は 5V と GND の間に LED をボンとつないで見事に壊したことがある。

また逆方向に電圧をかけた時、ある一定以上の電圧をかけると急激に電流が流れるようになる。この電圧を降伏電圧またはブレイクダウン電圧とよぶ。ブレイクダウン領域においては電流の変化に対してダイオードにかかっている電圧の変化が非常に小さくなる。この効果を用いてダイオードを定電圧源として利用するのがツェナーダイオードである。

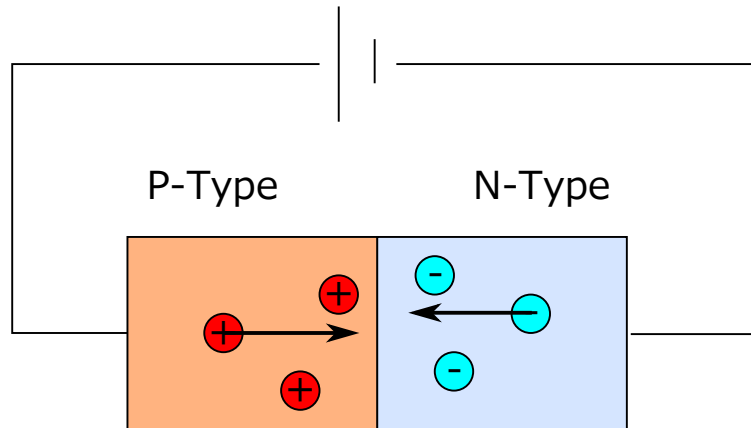


図 5: 順方向に電圧をかけた時のダイオードの様子。p 型半導体からは正電荷が供給され、n 型半導体からは負電荷が供給される。この 2 つが pn 接合面でペアになり、消滅する。こうして順方向に電圧が流れる。

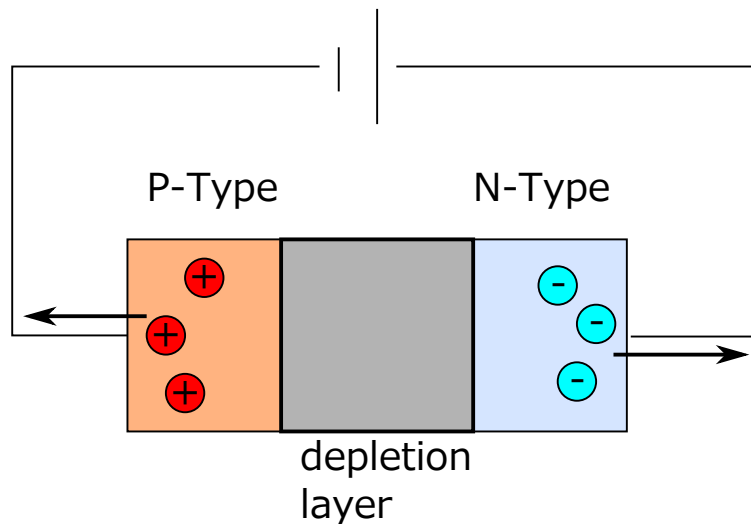


図 6: 逆方向に電圧をかけた時のダイオードの様子。p 型半導体からは正電荷が吸いだされ、n 型半導体からは負電荷が吸いだされる。結果として pn 接合面に電荷が不足した絶縁領域が生じる。これを空乏層という。空乏層自体は pn 接合面にもともとみられる領域であるが、逆電圧をかけることで一層広がる。この絶縁領域の存在により、逆方向の電流が流れにくくなる。これがダイオードの整流作用である。実際の素子では逆方向に電圧をかけると微量ながら電流が流れる。さらに電圧をかけると急激に電流を流すようになる。このときダイオード内で起きている現象をツェナー降伏（雪崩降伏）という。この現象が始まる電圧を降伏電圧（ブレイクダウン電圧）という。ブレイクダウンが起きている領域では電流の変化に対して電圧の変化が小さい。この性質により、回路内で定電圧を生成することができる。

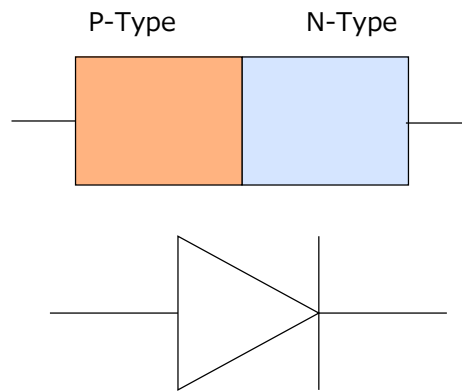


図 7: ダイオードの回路記号。順方向に電流が流れることを示すような記号である。

トランジスタのベースに電圧を加えると、ベースへ流れる電流の微量な変化を、コレクタを流れる電流の大きな変化に変えることができる。これを増幅作用という。

4 光の粒子性

電子が波のように振る舞う話はしたが、今度は光が粒子の用に振る舞う話をしよう。これまで光は波であるとして進めてきたが、粒子のような性質も持つ。この違いはどうして生まれるかというと、量子力学的な話にまで足を踏み込むことになる。

4.1 光量子説

光を含め電磁場は電場・磁場の振動であり、光の強さは振幅によって決まる。これまで波の振幅というのは連続的であると学んできたが、いくらでも弱くできるわけではない。

光を弱くしていくと電場・磁場の波動性は飛び飛びになり、ほぼ同一な粒子の集まりとしての性質が顕著に現れてくる。この粒子を光子（光量子）という。

振動数 ν の光子の持つエネルギー E は

$$E = h\nu = \frac{hc}{\lambda} \quad (17)$$

となる。ただし、 c は光速であり、 λ は光の波長である。また、 h はプランク定数といい、次の式で表される。

$$h = 6.63 \times 10^{-34} [\text{Js}] \quad (18)$$

これらの式からわかるように波長が短い（＝振動数の大きい）青い光ほどエネルギーが高いことがわかる。

このように光は波動性を持つと同時に粒子性を持つ。このことはプランクやアインシュタインによって認識され、光量子説と呼ばれる。

4.2 光電効果

よく磨いた金属表面に光を当てると、電子が金属が飛び出してくる。これを光電効果といい、この時飛び出してくる電子を光電子という。このとき飛び出してくる電子のエネルギー E は次の式で表される。

$$E = h\nu - W \quad (19)$$

$h\nu$ は入射した光のエネルギーで、 W を超えたエネルギーの光が入射した時のみ、この式が適用される。入射した光のエネルギーが W 以下の場合には光電子は飛び出さない。このエネルギー W を仕事関数といい、光を当てられる物質によって決まる値である。

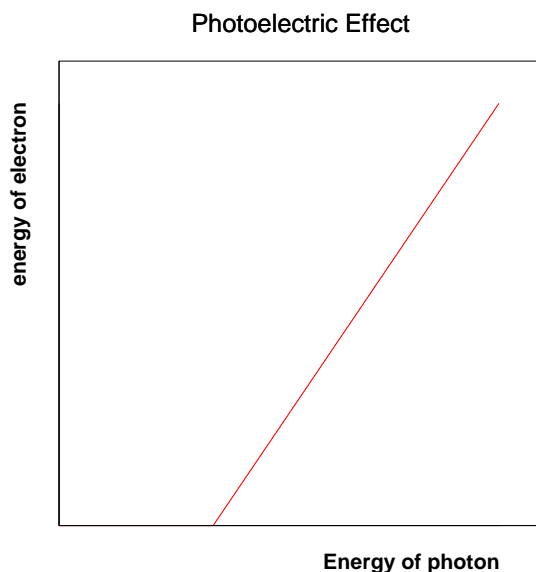


図 8: 光電効果における入射光子と光電子のエネルギーの関係。入射光子のエネルギーが低いと光電子は出ないが、入射光子のエネルギーが仕事関数を超えると光電子が飛び出すようになる。。

4.3 電子ボルト

電子などのエネルギーは我々の身近のエネルギーと非常に小さい。そういったエネルギーを表現する単位として、電子ボルト eV がある。電子ボルトとジュールの関係式は次のようになる。

$$1[\text{eV}] = 1.60 \times 10^{-19}[\text{J}] \quad (20)$$

これは電子 1 個を 1V の電圧によって加速された時に得るエネルギーに等しい。

4.4 光電効果の具体例

光電効果が何かは分かってもらえたと思うが、これだけでは具体的にどのような場所で起きているかはわからないだろう。なので、具体的な場面を考えてみる。宇宙は中性の水素が大量に存在しているが、このうち一部は光を受けて電子を放出し、電離する。光子が水素を電離するのに必要なエネルギーは 13.6eV (波長で言うと 912\AA) であり、これが水素の仕事関数に相当する。また、水素を電離できる 13.6eV 以上の光を一般的に電離放射線と呼ぶ。

5 高エネルギーの光

光はそのエネルギーによって名前をかえるが、その中でも最も高いエネルギーを持つのが X 線・ γ 線である。

5.1 X 線と γ 線

1895 年、ドイツのレントゲンは新たな放射線を発見した。レントゲンはこの新たな放射線を未知を表す X を冠し、X 線と呼んだ。X 線は可視光に対して不透明な物質中でも通過し、かつ電場や磁場の影響を受けないことから可視光でもないことがわかっていった。のちに X 線は紫外線よりも短い電磁波であることがわかった。X 線はその高い透過性を利用して医療を始めとした色々な場所で使われている。

1900 年、フランスのヴィラールは透過性が高く電荷を持たない放射線を発見し、1903 年にイギリスのラザフォードによって γ 線と名付けられた。 γ 線と X 線はその波長帯が重なるが、その区別は発生機構によって決まる。そのため、波長から X 線と γ 線を区別することは出来ない。

5.2 X 線と γ 線の発生機構

X 線の発生機構は大きく 3 つに分けられる。

ひとつは電子の励起準位の差によるものである。原子核の周囲を回る電子はそのエネルギー状態によって異なるエネルギー準位をとる。例えば外側の電子殻から内側の電子殻に電子が移動する時、その差分のエネルギーが光として放出される。この時放出される光が X 線である。なお、この過程は逆も存在し、光が当たることによって内側の電子が外側に励起することもできる。

次が運動エネルギーによるものである。電子を磁場などによって運動の方向を変えるなど加速度運動を行うと X 線が放射される。これを制動放射という。

最後が熱的なものである。例えば宇宙にある高温のプラズマなどからは X 線が放出される。ブラックホールなどの周辺では高温になったガスから X 線を始めとした広い波長の光が放出される。

一方、 γ 線は原子核崩壊する際に放出される放射線である。放射性原子が原子核崩壊を起こして質量・陽子・中性子の量に変化を起こした時、大量のエネルギーを放出する。これが γ 線である。放出される γ 線のエネルギーは原子によって様々であり、かつ複数のエネルギーの γ 線を出すものも存在する。

此处から先は主に X 線についてを中心に述べる。

5.3 ブラッグ条件

X 線は波長の短い電磁場であるから波動性を示し、回折や干渉といった現象を起こす。しかし X 線は非常に波長の短い光であるから人工的なものではなかなか回折・干渉といった現象を起こすことは出来なかった。

ドイツのラウエは結晶に細かく絞った X 線を照射し、多数の斑点からなる模様の写真を得た。これをラウエ斑点といい、結晶中で規則正しく並ぶ原子によって散乱した X 線が干渉することによって生じたものである。このような現象を X 線回折という。

結晶に入射した光が回折して干渉する条件を考えよう。結晶面の間隔を d として、反射した時の光路差を考える。 n 番目の面と $n+1$ 番目の面で反射した光の光路差は $2d \sin \theta$ である。これが X 線の波長の整数倍であればいいから、

$$2d \sin \theta = n\lambda \quad (21)$$

となる。これをブラッグの条件といい、この条件を満たす方向にラウエ斑点ができる。

原始間隔のわかっている結晶を使って X 線回折の実験をすると未知の X 線の波長がわかる。一方で既知の波長の X 線を結晶に当てることによってその結晶の構造を知ることができる。

5.4 コンプトン効果

X 線は先に述べた波動性以外に強い粒子性を示す。特に X 線は強いエネルギーを持つので、それによって光電効果を起こすとそれによって生じた光電子もまた大きなエネルギーを持つ。

X 線の持つ粒子性を示す良い例が、1923 年にアメリカのコンプトンによって発見された。コンプトンは物質によって散乱された X 線に、もとの X 線よりも低エネルギーの X 線が含まれることに気付いた。これは X 線が物質中の電子に衝突して弾き飛ばした時にエネルギーの一部を落とすからであり、これをコンプトン散乱と呼ぶ。

コンプトン散乱をより具体的に考える。X 線光子がエネルギー $h\nu$ 、運動量 p を持つとしよう。このとき、次の関係式が成り立つ。

$$p = \frac{h\nu}{c} = \frac{h}{\lambda} \quad (22)$$

X 線光子が質量 m_e の電子と弾性衝突した時、両者のエネルギーと運動量の和がそれぞれ保存されるから、次の式が成立する。

$$\text{エネルギー保存} : h\nu = h\nu' + \frac{1}{2}m_e v^2 \quad (23)$$

$$x \text{ 軸方向の運動量保存} : \frac{h\nu}{c} = \frac{h\nu'}{c} \cos \phi + mv \cos \theta \quad (24)$$

$$y \text{ 軸方向の運動量保存} : 0 = \frac{h\nu'}{c} \sin \phi + mv \sin \theta \quad (25)$$

この式から v, θ を消去すると、以下の式を得る。

$$\lambda' - \lambda = \frac{h}{mc}(1 - \cos \phi) \quad (26)$$

コンプトンはこの計算結果が実験結果とよく合うことを示した。

6 粒子の波動性

6.1 物質波

これまで光の波動性と粒子性について述べてきた。これより仮に粒子と考えられているものであっても波動としての性質を持つのではないかと予想される。このことに気付いたのはフランスのド・ブロイで、質量 m 、速さ v で大きさ $p = mv$ の運動量をもつ粒子は、次の式で表される波長を持つ波としての性質を持つと考えた。

$$\lambda = \frac{h}{p} = \frac{h}{mv} \quad (27)$$

この波長を特にドブロイ波長という。

物質粒子が波動として振る舞う時の波を物質波といい、特に電子が波として振る舞う時、それを電子波という。

6.2 電子の干渉・回折

仮に電子が波としての性質を持つならば、干渉や回折といった性質が見られるはずである。そこでデビッドソン（アメリカ）、ガーマ（アメリカ）、菊池正士（日本）らは結晶に電子線を当て、散乱または透過した電子線の強度を測定してラウエ斑点と同じ結果を得た。これは結晶中の原子や分子がスリットの役割をしているからである。以上のことより物質波が仮想のものではなく、実在することが示された。

6.3 電子顕微鏡

小さなものを見る道具としては光学顕微鏡があるが、これは光の波長よりも小さなものを見ることは出来ない。これは回折が起こるためで、分解能³は 10^{-7}m 程度である。これよりも小さな物を見るためには光よりも小さな波長を持つものを使用する必要がある。

そこで使われているのが電子波による電子顕微鏡である。電子顕微鏡は電子を加速して電子波の波長を短くすることでより細かい世界を見ることに成功した。その分解能は 10^{-10}m に達する。

7 原子の構造とエネルギー準位

7.1 ラザフォードの原子模型

1911年、ラザフォードはJ.J. トムソンの発表した原子模型モデルは正しくないとし、自身の原子模型モデルを提唱した。これがラザフォードの原子模型である。ラザフォードの原子模型は原子量の大部分と電荷が原子の中心(原子核)に集中しているモデルであった。ラザフォードの原子模型の図については、図2を参照して欲しい。

7.2 水素原子スペクトル

原子中の電子がその軌道を変える時、エネルギーを放出もしくは吸収する。特定の電子が放つ光を分光してみると、この放出エネルギーに対応する光が見える。

最も単純な例として、水素原子スペクトルについて考えよう。水素原子の発光スペクトルはリュードベリによって与えられる波長によって、いくつかのスペクトル系列に分けられる。

$$\frac{1}{\lambda} = R \left(\frac{1}{n^2} - \frac{1}{m^2} \right) \quad (28)$$

この式をリュードベリの式と言い、 R をリュードベリ定数という。 m は始状態のエネルギー準位、 n は終状態のエネルギー準位である。この式によって、エネルギー準位の変化があった時に放出もしくは吸収される光の波長がわかる。なお、 $n=1$ をライマン系列、 $n=2$ をバルマー系列、 $n=3$ をパッシェン系列、...というように、終状態のエネルギー準位によってスペクトルの種類が変わる。

7.3 ボーアの原子理論

ラザフォードの原子模型は中心に正電荷を持つ核があり、その周囲を電子が回っているというものであった。しかし古典電磁気学に従うのであればこの模型は至極不安定であり、周回する電子が連続的な光を発してエネルギーを失い、最終的に電子が核に落ちてしまう。ボーアはこの矛盾を解消するために、軌道運動は古典力学に従うが、角運動量が量子化されて $h\nu$ の整数倍となった軌道のみが安定軌道として存在するモデルを提唱した。図7.3がそのモデルである。これによって線スペクトルの説明が可能になったが、電子の運動を古典力学的に扱うことに無理があった。後にこの電子の運動は量子力学によって説明されることになる。

8 原子核

8.1 原子核の構成

原子核は電子とともに原子を構成するものである。原子の中心に位置すると考えられる核子の塊であり、正の電荷を帯びている。原子核自体は陽子と中性子によって構成され、その構成比によってどんな原子かが決まる。

³隣接した2つのものが別のものであると判別できる最小の距離。

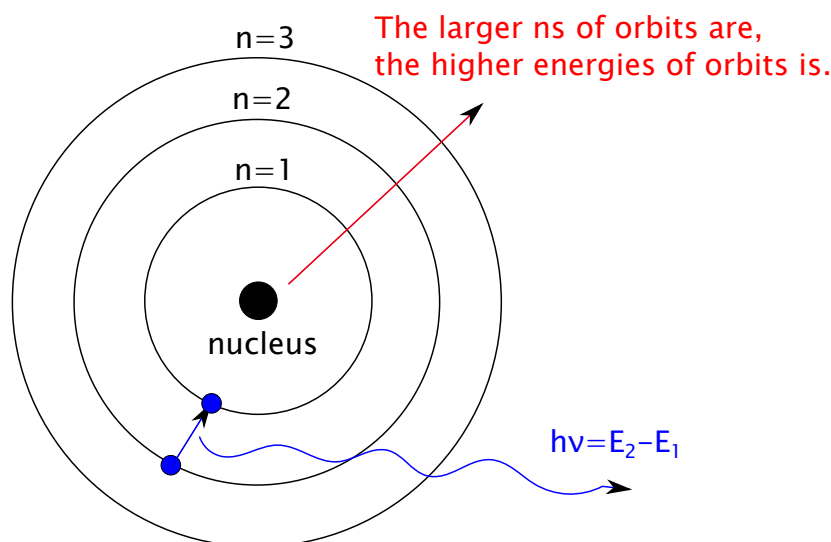


図 9: ボーアの原子模型。ラザフォードの原子模型の矛盾を解消するために考案されたモデルである。角運動量が $h\nu$ の整数倍となった軌道のみが安定な軌道として存在するモデルである。軌道上の電子が軌道を遷移する時、その差分のエネルギー $h\nu$ に相当する光を放出もしくは吸収する。軌道上の電子が持つエネルギーは外側に行くほど高い。

原子の大きさがおよそ 10^{10}m 程度なのに対し、原子核の大きさは 10^{-15}m 程度である。すなわち、原子に比べて原子核は非常に小さい。このことはラザフォードの散乱実験によっても確かめられている。1911年にラザフォードの助手であったガイガーと学生だったマースデンは金の薄い箔に α 線を照射した。その結果、 α 線の大部分は金箔を透過したが、一部は大きな角度で産卵された。このことから原子の内部に正の電荷を持つ原子核の存在が示された。 α 線が金の原子を通過する際、大部分は原子核から遠いところを通るのでほとんど影響を受けないが、原子核の近傍を通過しようとした α 線は正電荷同士の強い斥力によって大きく軌道が曲げられるのである。

8.2 同位体

同じ原子番号であっても、原子核の中性子の数が異なる原子が存在する。これら中性子の数が異なる核種のことを、同位体あるいは同位元素と呼ぶ。同位体には放射性物質である放射性同位体とそうではない安定同位体の2種類がある。放射性同位体は時間とともに原子核崩壊を起こす。どちらも自然界に存在するが、特に安定同位体については自然界で一定の割合をもって安定に存在する。

同位体の表記方法は元素名に続いて質量数を記すか、元素記号の左上に質量を記す。例えば、通常水素は ^1H であるが、その同位体である重水素は ^2H と示す。

8.3 原子量

原子量とは一定の基準によって原子の質量を定めたものである。現在では質量数 12 の炭素の同位体 ^{12}C の原子量を 12 とし、これを基準に各元素の原子量を定めている。

9 放射能とその性質

9.1 原子核崩壊

高いエネルギーを持った原子核は非常に不安定である。これらの原子核は放射線 (α 線、 β 線、 γ 線) を出すことによって安定な原子核へと変化する。この現象を原子核崩壊という。

9.1.1 α 崩壊

原子核がヘリウム原子核を放出する原子核崩壊を α 崩壊という。ヘリウム原子核は陽子 2 個と中性子 2 個からなるので、もとの原子核から陽子が 2 個、中性子が 2 個減る。また、このとき飛び出したヘリウム原子核を α 線という。原子番号 Z , 質量数 A の元素 X が元素 Y に α 崩壊するときの様子を示すと、次のようになる。



9.1.2 β 崩壊

原子核の核子が他の核子に変化する原子核崩壊の総称を β 崩壊という。原子核中の中性子が陽子に変化するときの崩壊を電子が出ることから β^- 崩壊、原子核中の陽子が中性子となるものを陽電子がでることから β^+ 崩壊という。この時飛び出す電子/陽電子を β 線と呼ぶ。

単に β 崩壊といった場合、 β^- 崩壊をのことを言う。このとき、中性子が陽子と電子と反電子ニュートリノ $\bar{\nu}_e$ が発生する。



この β^- 崩壊が原子核内で起こった場合、原子核の陽子がひとつ増えることから原子番号がひとつ増える。

9.1.3 γ 崩壊

原子核のもつ過剰なエネルギーを電磁波として放出することで、原子核は安定状態に移れる。この過程を γ 崩壊とよび、放出される非常に短い電磁波を γ 線と呼ぶ。

9.2 放射線検出器

放射線を計測するための道具を放射線検出器という。その計測方法は様々であるが、基本は放射線のエネルギーを電気信号に変換し、それを測定することにある。ここでは実際に使われている放射線検出器とその仕組みを説明しよう。

9.2.1 シンチレータ

シンチレータとは放射線の入射により光 (シンチレーション光) を発する物質の総称である。シンチレータに放射線が入射すると、そのエネルギーをシンチレータが吸収し、吸収したエネルギーに応じた光を発する。このとき出てくる光子の波長はシンチレータによって決まり、光子の個数はエネルギーによって決まる。こうして単一波長に変換された光を光電子増倍管などの光を電気信号に変える道具を使って測定する。

9.2.2 半導体検出器

半導体を利用した放射線検出器を、半導体検出器という。主にシリコンまたはゲルマニウムが用いられる。他の放射線検出器に比べてエネルギー分解能が非常に高いというメリットがある。PN 接合された半導体に逆電圧をかけると、キャリアがほとんどなく電氣的に絶縁された領域が出現する。この領域を空乏層という。空乏層中に荷電粒子や放射線が入射すると、飛跡にそってホールと電子をつくる。このホールと電子がそれぞれ負極、正極にむけて流れることによって電気信号に変換する。入射した粒子の持つエネルギーに比例してホールと電子が生成されるために、エネルギー分解能がよくなる。

9.2.3 霧箱

霧箱は蒸気の凝結作用を用いて荷電粒子の飛跡を検出するための装置である。飽和水蒸気量に達した気体中を荷電粒子や放射線を入射させると、入射粒子の飛跡に沿って気体分子のイオン化が起きる。そのイオンを核として、その周囲の気体分子が凝結する。このようにして入射粒子の飛跡が観測できる。

この霧箱はウィルソンのによって実用化がなされたことから、ウィルソン霧箱とも呼ぶ。

9.2.4 ガイガー・ミュラー管

1928 年、ドイツのガイガーとミュラーは新たな放射線計測器を開発した。それがガイガー・ミュラー管である。ガイガーカウンタ、GM 計数管とも呼ばれる。

仕組みは至極簡単である。筒の中に不活性ガスを封入し、筒の中心に電極を取り付ける。そして陽極と陰極の間に高電圧をかける。筒に対して放射線が入射してくると中の不活性ガスを電離させ、陽極と陰極の間にパルス電流が流れる。このパルス電流を数えることで、線量を計測することができる。

ガイガーカウンタの特徴としては非常に簡単な構成である一方、測定している放射線のエネルギーまでを調べることは出来ない。

9.3 半減期

ある量の放射性物質が原子核崩壊を起こして、そのうち半分が別の核種に変わるまでの時間を半減期という。ただし原子核崩壊は確率過程であるため、半減期の倍の時間が経過すれば必ず手の放射性物質が原子核崩壊を起こしてしまいますわけではない。半減期の倍の時間が経過したとすれば、放射性物質の量は $1/4$ に成るだけである。

半減期をより具体的に定義しよう。ある時刻 t に放射性物質の原子数が $N(t)$ であったとする。原子核崩壊は確率過程であるから、単位時間あたりに λ の割合で崩壊するとしよう。すると、微小時間 Δt の間に崩壊する原子数 ΔN は次のように表される。

$$\Delta N = N(t + \Delta t) - N(t) = -\lambda N(t) \Delta t \quad (31)$$

$$\therefore \frac{\Delta N}{\Delta t} = -\lambda N(t) \Delta t \quad (32)$$

この極限をとれば、

$$\frac{dN}{dt} = -\lambda N(t) \Delta t \quad (33)$$

$$\therefore N(t) = N_0 e^{-\lambda t} \quad (34)$$

となる。これより、半減期の倍の時間がたっても決してすべての原子が原子核崩壊するわけではないことがわかるだろう。

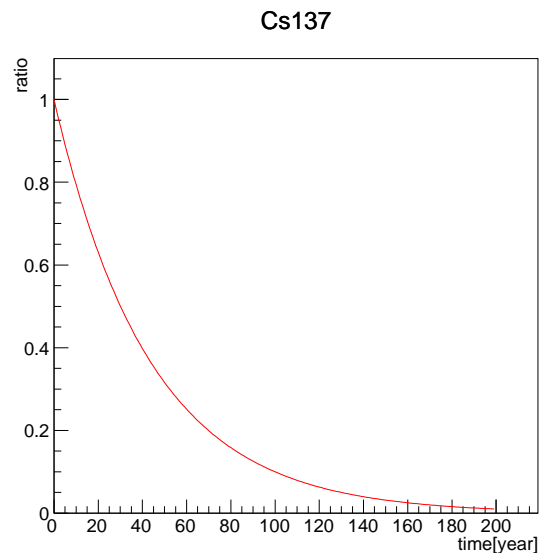


図 10: Cs137 の崩壊の様子。最初に存在した Cs137 の量を 1 とし、それが 1 年毎にどれだけ減っていくかをプロットした。グラフを見ればわかるが、200 年経てば Cs137 の量はだいぶ減るがそれでも完全にはなくなりしない。

9.4 放射能

原子核崩壊を起こして放射線を出す能力のことを放射能という。また、ある元素の同位体が放射能をもつとき、放射性同位体あるいは放射性物質と呼ぶ。放射性物質が 1 秒間に原子核崩壊する原子の個数が放射能に相当し、その単位はベクレル [Bq] である。

物質が放射線にさらされた時にうけるエネルギーについても単位がある。単位質量あたりが受けたエネルギーの単位をグレイ [Gy]=[J/Kg] とよぶ。さらに人体が放射線にさらされた場合は受けた放射線の種類と体組織によって影響が異なる。そのため、人体への影響はグレイに放射線の種類及び体組織による修正係数をかけることによって算出する。この単位をシーベルト [Sv] という。

9.5 放射線による障害

放射線を受けたら即人体に悪影響が生じるわけではない。自然界にはもともと放射性物質が微量存在しており、環境放射線という形で日々私達の肉体は放射線にさらされている。それに対して私達の体も耐えられる構造になっているので、放射線がすべて悪だという考え方は間違いである。しかし、何事においても限度というものがあり、放射線に対してもそれは言える。一般人が 1 年間に被曝する放射線量は 1mSv とされており、同程度の被曝量であれば健康に害がでるようなことはそうないだろう。しかし、これを大きく上回るような線量、例えば数 Sv を一瞬で浴びたりすれば確実に死に至る。さらに数百 Sv を超えるような放射線を浴びると、ほぼ即死である。放射線は X 線などの医療にも用いられる反面、使い方を謝れば大変な危険にさらされるのである。

9.6 放射線利用

放射線の利用は医療現場をはじめさまざまな場所で利用されている。例えばレントゲン撮影が例にあげられるだろう。X 線は感光体を黒くする。X 線を人体を挟んで感光体に向けて照射すると X 線が通過した部分は黒くなる。一方で体が X 線を阻止した部分は白くなる。X 線の透過率が高い組織には皮膚や筋肉があるが、骨などは X 線の透過率が低いので、結果としてレントゲン撮影をすると骨の様子がわかる。

10 核反応と核エネルギー

10.1 核反応

入射粒子が標的の原子核と衝突して起こる反応のこと。入射粒子としては原子核、核子、光子など色々なものがある。原子核反応が起こった際は電荷、質量数、全エネルギー、全運動量は保存される。

原子核反応はおおまかに弾性散乱・非弾性散乱・変換反応に分けられるが、核反応過程は多彩で統一的に記述することはできない。

10.2 質量とエネルギーの等価性

1905 年、アルベルト・アインシュタインは電磁気学の理論として特殊相対性理論を発表した。その帰結として述べられていたのが、

$$E = mc^2 \quad (35)$$

という関係式である。これは質量とエネルギーが本質的に同等のものであることを示している。

そもそも、特殊相対性理論は「物理法則はすべての慣性系で同一である」という特殊相対性原理と「真空中の光の速さはすべての慣性系で等しい」という光速一定の原理を満たすことを出発点として構築された。その結果編み出されたのが空間 3 次元と時間 1 次元を合わせた 4 次元空間上における力学である。この力学において示されたのが、運動していない物体において成り立つ式 $E = mc^2$ である。特殊相対性理論の本質は質量が変化すると考えた点である。その結果質量は速度に比例して増加し、物体の質量そのものがエネルギーと等価であることが示された

10.3 核エネルギー

原子核の分裂や融合の時に放出されるエネルギーを核エネルギーという。核分裂・融合する原子核の種類により異なるがそのエネルギーは莫大である。

10.4 核分裂反応

中性子過剰核をはじめとする重い原子核が分裂し、軽い元素を複数つくりだす反応のことを核分裂反応という。この反応は主に 3 つの過程によって進む。

1. 電子もしくは陽電子を放出してわずかに軽い核になる。 $(\beta$ 崩壊)
2. α 粒子を放出して軽い粒子に成る。 $(\alpha$ 崩壊)
3. α 粒子よりも重い核を放出して更に軽い核になる。

原子核分裂といった場合、一般には最後の一つを指す。

不安定な原子核が中性子を吸収すると、一定の割合で原子核分裂を起こし、同時に中性子を放出する。この中性子が別の原子核に吸収され、連鎖的に反応が起こる。この崩壊過程は発熱反応であるため、この連鎖反応を利用すれば大量の熱を生成することができる。これは原子力発電や原爆の基本原理解である。

10.5 核融合反応

軽い核種同士が融合してより重い核種になる反応である。一般に核融合と言われる。

原子核同士がある程度近づくと引力(核力)が斥力(クーロン力)を超え、2つの原子が融合する。融合する原子の組によっては大量のエネルギーを得ることができる。水素爆弾に使われているのも核融合反応である。核分裂反応に比べて反応を起こすために必要な温度や圧力が高いため技術的なハードルは高い。

宇宙空間では鉄が最も安定な物質であり、宇宙初期においては水素やヘリウムばかりであったことから本来鉄より重い元素は宇宙に存在し得ない。しかし、星の最後である超新星爆発が起きると、星の内部では非常に高い圧力・温度が実現される。その結果、鉄より重い元素が宇宙空間に作られる。超新星爆発によって離散した星の破片が再集合して新たな星を作ること、鉄よりも重い元素が星の内部に取り込まれる。例えば、地球で採掘されているウランなども過去に起きた超新星爆発によって作られたものである。

11 素粒子と宇宙

11.1 素粒子

原子説に立ち返れば原子は物質の最小単位と考えられるが、電子や原子核の発見により原子は物質の最小単位でないことがわかった。さらに陽子や中性子の発見から原子核も物質の最小単位ではない。このようにして物質を細かくしていった最小単位として考えられるのが素粒子と呼ばれる物質である。

かつては電子や陽子が素粒子と考えられたが、後に光子や陽電子も素粒子の仲間に加えられた。その後も高エネルギー実験や宇宙線の研究により素粒子の探索が行われていった。

この結果見つかった粒子は核力などの強い力の働くハドロン⁴と、強い力の働かないレプトン、力を伝達するゲージ粒子に分類される。現在では各粒子の物理を表す表式は存在するが、粒子全体の物理を表すいわゆる「大統一理論」と呼ばれる理論は未だ見つかっていない。この大統一理論を構築してあらゆる事象を説明することが現在物理学で探求されている究極の目標である。

11.2 クォーク模型

ハドロンに属する粒子をバリオンと中間子に分類し説明する模型としてクォーク模型がある。これは素電荷の $1/3$ や $2/3$ の電荷を持つ新粒子クォーク⁵の存在を予見したものであり、バリオンはクォーク3個から、中間子はクォーク1個と反クォーク1個⁶からなると考える模型である。

クォークは単独で取り出すことは出来ないが、陽子の内部に素電荷の $1/3$ や $2/3$ の電荷量を持つ粒子が存在することを確認した。また、2つのクォークを強い力で結びつける存在として、ゲージ粒子が存在するらしいことも分かった。

今日では6種類のクォークと6種類のレプトン、それらの反粒子、および力を媒介するゲージ粒子が素粒子であると考えられている。

11.3 4つの力

物理法則として働く力は4つある。そのうち2つはよく知っている重力と電磁気力、残る2つは強い力と弱い力である。強い力とは原子核をつくるために働く核力であり、弱い力とは β 崩壊などではたらく力である。

4つの力は宇宙の初期ではひとつだったと考えられる。マクスウェルが古典電磁気学を確立したように、現在では大統一理論確立に向けた研究が行われている。

⁴ハドロンは更に細かくわけて、バリオン(重粒子)と中間子に分けられる。

⁵クォークの電荷は素電荷の $1/3$ や $2/3$ の電荷を持つが、バリオンや中間子として成るときは足しあわせて素電荷の整数倍として存在する。

⁶クォークの反粒子のこと。

11.4 宇宙

物質の究極に微細な世界を突き詰める素粒子論と、広い宇宙における現象を探索する宇宙論は一見関係がないように思えるが、宇宙の始まりを突き詰めるという意味では根本は同じ研究である。先に述べたように素粒子論は超大統一理論を確立し、宇宙の始まりを探求することが目的である。一方で何光年も先の宇宙を探索することは、それだけ昔の宇宙を見ることにつながる。つまり遠くの宇宙をみれば見るほど初期宇宙の様子がわかる。以上のように、素粒子論と宇宙論の最終到達点は同じである。

さて、では宇宙について研究する方法をいくつか説明しよう。宇宙の情報を得るためには、宇宙から地球に対して降り注ぐものを観測することになる。例えば宇宙線や光を使う。

11.4.1 宇宙シャワー

宇宙には電子や陽子を始めた荷電粒子が飛び交っている。それが宇宙空間で磁場によって曲げられ、地球に飛んでくる。このように、宇宙から地球に入射してくる宇宙線を一次宇宙線という。この1次宇宙線のエネルギーは非常に高く、数 TeV にも及ぶ。1次宇宙線が地球大気に入射すると大気と相互作用をおこし、新たな粒子を生成する。この時生成された粒子がまるでシャワーのように地上に降り注ぐ様から、これを宇宙シャワーと呼ぶ。また、宇宙シャワーとして地上に降り注ぐ粒子を2次宇宙線という。この宇宙シャワーを観測するためには地上にたくさん検出器を広範囲で配置することで行う。各検出器がどのような検出を行ったかを解析することで、宇宙シャワーや宇宙を飛び交う高エネルギー荷電粒子について知ることができる。

11.4.2 宇宙からくる光

また、宇宙の様子を知る手段としては光を使用することもできる。光はその波長によって呼び方が変わる。波長が長い方から電波、赤外線、可視光、紫外線、X線、 γ 線と名前がつく。波長が短くなるほど光の持つエネルギーは高くなり、例えば紫外線が肌に悪影響を与えるのは可視光よりも高いエネルギーを持つからである。ここで気になるのがX線や γ 線である。確かにX線や γ 線は紫外線よりも高いエネルギーを持ち、大量に浴びることは人体にも良くない。しかし、これらが紫外線のように肌ケアの対象として騒がれることは少ない。これはなぜかという、大気中における光の特性が関係している。

X線や γ 線というのは大気中を長距離通過することは出来ず、例えば γ 線だと大気中でせいぜい数100m程度しか届かない。地球の大気は高エネルギーの光を通しにくく、可視光程度かそれよりも長い波長の光しか通さない。だから、地上で宇宙からくる光を観測しようと思ったら可視光や電波に対応した望遠鏡を作ることになる。⁷一方、X線や γ 線は地上では見えないわけだが、これは大気があることが原因である。なので、X線や γ 線を観測するためには宇宙に行く必要がある。

11.4.3 高エネルギー天文衛星

これまで多くのX線・ γ 線観測衛星が打ち上げられてきた。例えば現在稼働しているもので言えば日本のすざく衛星 (Astro-E2)、欧州の INTEGRAL 衛星や XMM-Newton 衛星、NASA の Swift 衛星や Chandra 衛星がある。こういった衛星で何を観測するかというと、例えばブラックホールやガンマ線バーストなどがそれにあたる。ブラックホールはよく知られた現象であるが、ブラックホールの周辺には引力によって引き寄せられた物質が円盤上に回転している。そこでは物質同士の摩擦によって内側ほど高温になり、X線を発する。これを観測することにより、ブラックホールの特性を調べることができる。ガンマ線バーストは宇宙で発生する突発現象の一つで、現在知られている中で宇宙最大の爆発現象である。その発生機構は未だ明らかにはなっていないが、超新星爆発や

⁷もちろん、可視光等であろうと完全に地球大気の影響を受けないわけではない。空気は可視光に対して比較的に透明ではあるが、100%透明なわけではなく、いくらか減光する。また大気中のゆらぎが光に影響してくるため、巨大な望遠鏡では大気のゆらぎに対する補正が必要である。

中性子連星の合体などではないかと考えられている。ガンマ線バーストは爆発の瞬間に大量の X 線・ガンマ線を放出し、これを観測することでその背後にある物理を明らかにすることが期待されている。遠方のガンマ線バーストを観測すればするほど過去の宇宙のことがわかるのである。



図 11: すざく (Astro-E2) 衛星の概観図 (ISAS)。日本の X 線天文衛星のうち、2013 年時点での主な衛星。観測は実施しているが最近発電力が減少し、電力が賄えなくなっている。現在では不要な機器の電源を落とすことによってバランスをとっているが、いつ運用不可能になるかは不明。そのため、次期天文衛星 Astro-H 衛星の打ち上げが期待されている。



図 12: Swift 衛星の概観図 (NASA)。ガンマ線バースト観測衛星で、毎日宇宙で突発現象を探している。3 つの検出器を持っていて、突発現象が起きると全天をカバーする検出器 (BAT) で検知し、位置を決める。その後姿勢を変えて残り 2 つの検出器で観測を行い、さらに詳細な位置情報を決定する。決定された位置情報はすぐに地上に落とされ、インターネットを介して世界中に伝えられる。伝えられた情報を元に各地の地上望遠鏡が突発現象の観測に当たる。

11.4.4 可視光・赤外・電波望遠鏡

可視光・赤外・電波望遠鏡を作る場合、地上につくるか宇宙につくるかのふたつの選択肢がある。地上に作る場合、大規模な望遠鏡が比較的安価でつくれ、かつメンテナンスが用意だという特徴がある。例えば現在稼働しているものであればすばる望遠鏡 (8.2m、可視光・赤外、ハワイ)、Very Large Telescope (8.2m、紫外 中間赤外、チリ)、グリーンバンク望遠鏡 (100m ほど、電波、アメリカ) などがある。地上に望遠鏡を作った際のメリットは



図 13: XMM-Newton 衛星の概観図 (ESA)。欧州宇宙機関による X 線天文衛星。1999 年の打ち上げ当初、衛星の寿命は 2 年であったが、2013 年 11 月現在も運用中である。主な成果としては地球から数十億光年の距離にある大質量銀河団の発見がある。重さ 3800kg、全長 16m、長さ 10m の X 線望遠鏡を 3 台搭載している。

前述したとおりだが、その一方デメリットも存在する。例えば大気による影響である。光が大気中を通過する際に影響を受けて揺らいでしまう。また大気中の水蒸気などによる光の吸収も起こる。こういったことを避けるために、宇宙にも望遠鏡が作られている。現在稼働しているものと太陽観測衛星ひので、高赤外線探査衛星 WISE、ハッブル宇宙望遠鏡などがある。こういった衛星は地上望遠鏡のデメリットである大気の影響を完全に除外し、かつ望遠鏡を低温に冷やしておくことが可能である。しかし、故障や一基あたりの価格が非常に高いという欠点がある。例えばハッブル望遠鏡を一つ撃ち上げよりも、地上望遠鏡を 10 基作るほうが安上がりだろう。⁸ これらの望遠鏡を用いて、広い宇宙の研究をしている。

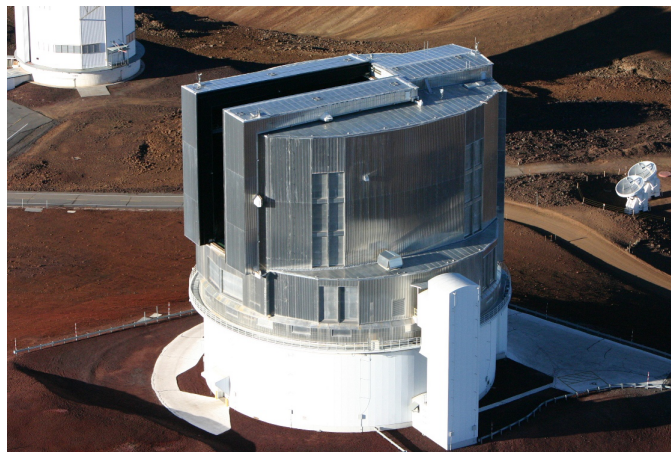


図 14: すばる望遠鏡の概観写真 (NAOJ)。日本が誇る世界最大級の望遠鏡。ハワイのマウナ・ケア山の上に位置し、空気の薄い環境で観測を行っている。望遠鏡の口径は 8.2m。1991 年から建設が始まり、1999 年から運用が始まった。巨大な主鏡は裏面からコンピュータ制御で支えられており、傾けた時に生じる歪みを補正し、常に理想的な形に保たれる。また、建物自体の形も工夫されており、空気の乱れを防ぐことで星からの光が揺らがないように工夫している。

⁸基本的に衛星は一度故障が起これば修理することはできない。しかし一部の衛星は宇宙飛行士が出向いて行って修理をしている。例えばハッブル宇宙望遠鏡は 1990 年の打ち上げからこれまでに何度か修理を行っている。



図 15: Very Large Telescope の概観写真 (ESO)。ヨーロッパ南天天文台の望遠鏡。チリのパラナル天文台にある。計 4 台の望遠鏡からなり、紫外から中間赤外までを観測できる。口径は 8.2m。1998 年に最初の 1 台が完成し、運用が始まる。その後 2000 年までに残り 3 台が完成し、順次運用が始まった個々の望遠鏡を独立に観測に用いることができる一方で、4 台の望遠鏡をつないで巨大な干渉計として使うこともできる。



図 16: ハッブル宇宙望遠鏡の概観図 (NASA)。1990 年にスペースシャトル・ディスカバリーによって打ち上げられた衛星。これまでに何度かの修理を経て、地上 600km にていまなお稼働中である。予定では数年以内で大気圏に突入させることにはなっている。