

# 原子核

## 1. 原子核

### (1) 原子核の構造

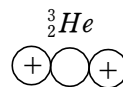
原子は静電気を持った原子核を中心としてその周りを複数の電子が回っている。この電子の配置によって原子の化学的性質が決定している。ここでは、原子核についていろいろと調べてみよう。

原子核には陽子と中性子がそれぞれ何個か存在している。そのうち、陽子の数が決まれば、その周りを回る電子の数、配置が決まり、その原子の化学的性質が決定する。そのため、陽子数を持って原子番号と呼んでいる。中性子数に関しては原子番号に関係がないため、同じ陽子数であるが、中性子数が異なる原子が存在する。これらの原子は電子配置が同じため同じ化学的性質を持ち同じ原子番号である。このように陽子・中性子・電子などの粒子を素粒子と呼んでいる。次に陽子・中性子の性質を確認してみよう。

陽子は水素原子 ${}^1_1H$ では、単独で原子核を構成している。単独で安定して存在できる素粒子である。 $+e[C]$ の( $e$ は電気素量)電気量を持っているので、陽子どおしは互いに反発する性質を持つ。

中性子は単独では存在できない。中性子を単独で置いておくと平均十数分で陽子と電子に崩壊する。中性子は不安定な素粒子である。右図は ${}^3_2He$ 原子核を

模式的に描いたものである。2個の陽子と1個の中性子からできている。陽子2個はともに反発力を持っているので、中性子が接着剤の役割をしていることが分かる。



「中性子は接着剤の役割をする。」

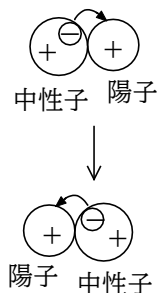
といえる。

中性子は不安定なのに原子核の中ではなぜ安定に存在しているのであろうか？これは次のように説明されている。(詳しくは後述)

中性子は崩壊するときに陽子と電子になる。

ということは、陽子に電子がくっついたものと考えられる。

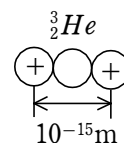
(実際は電子ではなく中間子と呼ばれている素粒子)中性子はこの粒子を一定時間で放出するが、その放出した粒子を隣にいる陽子が受け止め陽子が中性子に変わり、粒子を放出した中性子は陽子に変わる。原子核内では中性子と陽子が粒子を交換しながら存在していると考えるのである。この粒子を交換するとき生じる力を**核力**と呼んでいる。



(核力は陽子どおしにもはたらくので、厳密に言えば中性子のみが接着剤とはいえない)

### (2) 核力の大きさの推定

${}^3_2He$ の例で考えてみよう。原子核の大きさは $10^{-15}m$ ほどである。陽子は互いにクーロンによる反発力を持っているため、核力が存在しないとたちまち原子核は壊れてしまう。この核力の大きさは陽子の反発力と等しいとすればその大体の大きさを求めることができる。



# 原子核

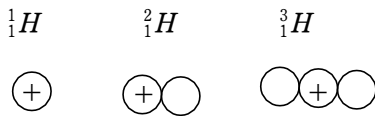
$$F = k \frac{e^2}{r^2} = 9 \times 10^9 \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{(10^{-15})^2} = 230 \text{ N}$$

230Nといえば23kgの物体を持ち上げる力にほぼ等しい。これだけの力がないとクーロン力で反発する陽子を狭い原子核内に閉じ込めておくことはできないのである。たいしたことないと思われるかも知れないが、この力は原子核内の1個の陽子に作用している力なのである。むしろ莫大な力であるといえよう。

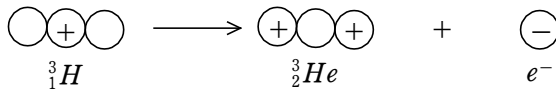
### (3) 安定な原子核

中性子は陽子どおしをつなぎとめる接着剤の役割を果たしているが、常に陽子と粒子(中間子)交換していないと崩壊することになる。いろいろな原子で安定かどうかを考えてみよう。

#### 1. 水素原子



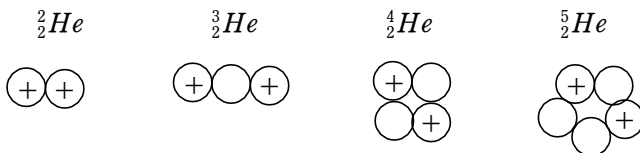
${}^1_1\text{H}$ は陽子1個で陽子は安定であるから安定な原子核となる。 ${}^2_1\text{H}$ は中性子が陽子と粒子交換できるから安定な原子核となる。 ${}^3_1\text{H}$ の場合は、二つの中性子があるが陽子と粒子交換できるのは1個であるから、残る1個の中性子が崩壊する。よって、 ${}^3_1\text{H}$ は不安定な原子核となる。 ${}^3_1\text{H}$ の1個の中性子が陽子と電子に崩壊し陽子はそのままだ原子核内に残るが電子は原子核外に放出される。



このように中性子が崩壊して電子を原子外に放出する原子核崩壊をβ崩壊といい、そのときに放射される放射線をβ線という。β線は電子の流れである。ベータ崩壊では中性子が陽子になるので質量数は変わらず、原子番号が一つ大きくなる。

「β崩壊は電子を放出し、質量数は同じで、原子番号が1大きくなる。」

#### 2. ヘリウム原子

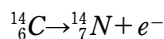


${}^2_2\text{He}$ は接着剤となる中性子が存在しないため、このような原子核自体存在しない。 ${}^3_2\text{He}$ は中性子は交換する陽子があり、陽子は中性子によって結合させられているために安定した原子核となる。 ${}^4_2\text{He}$ も同様に安定である。 ${}^5_2\text{He}$ は中性子の数が多すぎるためにβ崩壊を起こす。

## 原子核

### 3. 炭素原子

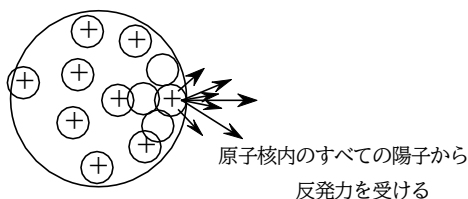
モデルは複雑になるので描かないが、 $^{11}_6\text{C}$ は陽子6個に対して中性子が5個であり、陽子の反発力を抑えるだけの中性子数が足りない。よって、この原子核は陽子の反発力によって崩壊する。 $^{12}_6\text{C}$ は陽子と中性子が同数であり安定に存在する。 $^{13}_6\text{C}$ は中性子数の方が陽子数よりも1個多いが数多くの陽子が存在している場合は中性子の交換相手となる陽子を別の陽子にすることができる。そのために原子番号が大きくなるほど中性子数が陽子数よりも多くなっても安定になりうるのである。 $^{14}_6\text{C}$ では、中性子数が二つ多い。この原子番号で中性子が二つ多ければさすがに安定できず、中性子が崩壊し、ベータ崩壊が起こる。



### (3) 巨大原子核の核崩壊

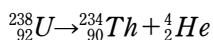
原子番号が大きくなった場合は陽子数よりも中性子数の方が多くなる。たとえば、 $^{56}_{26}\text{Fe}$ では中性子が陽子より4個多いのに対し $^{238}_{92}\text{U}$ では、中性子の方が54個も陽子より多くなっている。巨大原子核になればなるほど中性子の方が多くなるのである。これはなぜであろうか？

右図のように巨大原子核になった場合そこにある陽子は原子核内のすべての陽子からクーロン反発力を受けるがそれに対抗する核力のほうは隣に接触している中性子から受けるだけなのでそれほど大きく



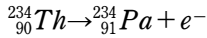
はならない。よって、巨大な原子核の陽子には強い反発力が作用しているのでより多くの中性子が必要になるのである。しかし、中性子の数が多すぎると、中性子の崩壊が起こるので、あまりに巨大な原子核は安定には存在できなくなる。安定な原子核で最も原子番号が大きいのは83番Biである。

$^{238}_{92}\text{U}$ はこれだけ中性子が多くても陽子による反発力が優勢である。そのために、陽子の放出が起こる。陽子が放出するといっても実際は中性子をくっつけたまま $^4_2\text{He}$ の形で放出される。 $^4_2\text{He}$ は極めて安定な原子核であるためにこの原子核が塊となって放出される。このように $^4_2\text{He}$ を放出する核崩壊を、 $\alpha$ 崩壊といい、そのときで放射線を $\alpha$ 線という。 $\alpha$ 線とは $^4_2\text{He}$ 原子核の流れである。 $^{238}_{92}\text{U}$ 原子核の $\alpha$ 崩壊は次の通りである。



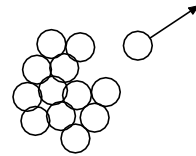
$\alpha$ 崩壊は $^4_2\text{He}$ を放出するために崩壊後の原子核は陽子2個中性子2個が減っている。よって、質量数4減、原子番号2減となる。 $^{238}_{92}\text{U}$ は238個の核子（陽子と中性子の総称）中146個が中性子であるため、原子核中の中性子の割合は61.3%で $\alpha$ 崩壊後の $^{234}_{90}\text{Th}$ は核子234個中144個が中性子であり、61.5%が中性子である。このように $\alpha$ 崩壊を起こすことにより原子核内の中性子の比率が高くなる。 $\alpha$ 崩壊を起こす原子核は中性子の接着力よりも陽子の反発力の方が優勢な原子核であり、このような原子核が何回か $\alpha$ 崩壊をすることにより中性子の接着力が優勢になる。その結果中性子の数が多くなりすぎ次に $\beta$ 崩壊が起こる。

# 原子核



${}_{91}^{234}\text{Pa}$ は234個の核子中中性子は143個であるので、61.1%が中性子である。このように、 $\beta$ 崩壊がおこると、中性子が陽子に変わるのであるから中性子の比率が下がり、陽子の反発力が優勢になるのである。このように巨大原子核は $\alpha$ 崩壊、 $\beta$ 崩壊を繰り返しながら次第に安定な原子核に変わる。

$\alpha$ 崩壊、 $\beta$ 崩壊が起こった後の原子核は右図のように核子の位置バランスが悪い。右図の場合は原子核に穴が開いている。このような場合核子は原子核内で安定になるように位置変動が起こる。このとき、あまったエネルギーが光子の形で放出される。この放射線を $\gamma$ 線という。 $\gamma$ 線が出る場合、原子核内で核子が動いただけであるから、陽子数、中性子数の変動はない。



## 2. 半減期

### (1) 半減期とは

放射性原子核は時間とともに少しずつ壊れていく。その壊れる速さについて考えてみよう。不安定な同じ原子核でも早く壊れる原子核もあれば長時間壊れない原子核もある。原子核がある時間内に壊れるかどうかは確率で表わすことができる。たとえば、ある原子核が1時間以内に崩壊する確率が50%であったとする。この原子核が最初に100個あったとすると、1時間以内に壊れる確率が50%であるから、1時間後は50個になっているはずである。壊れた50個は別の原子核になっている。1時間以内に壊れる確率50%は1時間過ぎても同じであるから、残った50個の原子核が1時間以内に崩壊する確率も50%である。よって、2時間後は25個になっている。この原子核の場合、1時間たったら元の原子核数の $\frac{1}{2}$ になり、

次の1時間も残った原子核数の $\frac{1}{2}$ になる。このパターンでの原子核崩壊は永久に続く。崩壊の速さを計算しやすくするには元の原子核の $\frac{1}{2}$ になるまでの期間で核崩壊の速さを表わせばよいことになる。この期間を半減期という。半減期が短い原子核は速く崩壊するので核崩壊時に放出される放射線は強い。半減期が長い原子核はなかなか崩壊しないので、放射線は弱くなる。

<半減期 $T$ 年の原子核が $N_0$ 個あったとき、 $t$ 年後の残った原子核数>

この場合の各時間における残った原子核数は時間 $T$ 立つごとに半分になるため数表にすると、下のようになる。

期間	0	$T$	$2T$	$3T$	$4T$	$5T$
残った原子核	$N_0$	$\frac{1}{2}N_0$	$\left(\frac{1}{2}\right)^2 N_0$	$\left(\frac{1}{2}\right)^3 N_0$	$\left(\frac{1}{2}\right)^4 N_0$	$\left(\frac{1}{2}\right)^5 N_0$

これより、 $nT$ 年後の原子核数は $\left(\frac{1}{2}\right)^n N_0$ であることになる。ここで、 $t = nT$ であるから、

## 原子核

$n = \frac{t}{T}$ である。よって、 $t$ 年後の原子核数 $N$ は

$$N = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} N_0$$

と表わされる。

これは、厳密には数学の漸化式を用いて求めることもできる。 $t$ 年後の原子核数を $N_{(t)}$ とすると、 $t+T$ 年後の原子核数はその半分であるから、

$$N_{(t+T)} = \frac{1}{2} N_{(t)} \quad N_{(0)} = N_0$$

ここで、 $N_{(t)} = N_{(Tn)} = M_{(n)}$ とおくと、 $N_{(t+T)} = N_{(T(n+1))} = M_{(n+1)}$

これより、

$$M_{(n+1)} = \frac{1}{2} M_{(n)} \quad M_{(0)} = N_0$$

これを解くと、

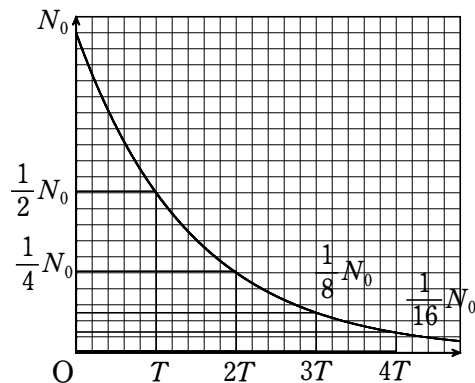
$$M_{(n)} = N_0 \left(\frac{1}{2}\right)^n$$

よって、

$$N_{(t)} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} N_0$$

となる。

この式をグラフにすると、右のようになる。指数関数である。



(2) 単位時間に原子核が崩壊する確率

時刻 $t$ における残存原子核数は  $N = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} N_0$  であらわされる。

両辺 $t$ で微分すると、

$$\frac{dN}{dt} = -\frac{1}{T} \log_e 2 \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} N_0 = -\frac{\log_e 2}{T} N$$

崩壊原子数 $dN$ は

$$dN = -\frac{\log_e 2}{T} N dt$$

## 原子核

よって、1秒間あたりの崩壊原子数は $\frac{\log_e 2}{T}N$ となり、1秒間に原子が崩壊する確率は

$$\frac{\log_e 2}{T}$$

であらわされる。

<例>

C14は半減期5730年の放射性元素である。生体内の炭素中 $1.2 \times 10^{-12}$ の割合で存在している。ある遺跡から出土した炭素1gから0.2Bqの放射線が検出された。この時、この遺跡の年代を推定してみよう。

生体内の炭素1gに含まれるC14の原子数は

$$\frac{1}{12} \times 6.02 \times 10^{23} \times 1.2 \times 10^{-12} = 6.02 \times 10^{10} \text{個}$$

放射線量0.2Bqは1秒間あたりの崩壊原子数を意味し、これは $\frac{\log_e 2}{T}N$ なので、

$T = 5730 \text{年} = 5730 \times 365 \times 24 \times 3600 \text{秒}$ である。

$$\frac{\log_e 2}{5730 \times 365 \times 24 \times 3600} N = 0.2$$

これより、 $N = 5.21 \times 10^{10}$ 個

時刻 $t$ における残存原子核数は  $N = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{T}} N_0$ なので、

$$5.21 \times 10^{10} = \left(\frac{1}{2}\right)^{\frac{t}{5730}} \times 6.02 \times 10^{10}$$

これを解くと  $t = 1190 \text{年}$  前の遺蹟となる。

### 3. 核エネルギー

原子核が変化するとき多量のエネルギーが出てくる。このエネルギーについて考えてみよう。

#### (1) クーロンによる位置エネルギー

原子核は陽子どおしが $1.0 \times 10^{-15} \text{m}$ ほどの距離に接近している。このときのクーロン力による位置エネルギーはどれほどであろうか、計算してみよう。クーロンの位置エネルギー

は $U = k \frac{e^2}{r}$ であるので、数値を代入して、

$$U = 9 \times 10^9 \times \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{1.0 \times 10^{-15}} = 2.3 \times 10^{-13} \text{J} = 1.4 \times 10^6 \text{eV} = 1.4 \text{MeV}$$

また、核力を元にエネルギーを考えると、核力は前項の計算により230Nほどであった。核力が $10^{-15} \text{m}$ の間で一定の力で作用しているとすると、核力の位置エネルギーは

$$U = 230 \times 10^{-15} \text{J} = 2.3 \times 10^{-13} \text{J}$$

となり両者は等しい。この核力の位置エネルギーは核子間距離が $10^{-15} \text{m}$ ほどで、核力は距離に関係なく一定であるとしているので正確なものではない。いずれにしても原子核内

## 原子核

の陽子1個当たりこの値に近いエネルギーを持っていることになる。

### (2) 原子質量単位

原子の質量は化学では原子量を使う。これは、 $^{12}_6\text{C}=12$ とした各原子の平均相対質量である。同位体はすべて平均されている。この原子量を元に質量を計算したのでは同位体個々の質量を扱いには不適である。そこで、 $^{12}_6\text{C}$ 原子の質量の $\frac{1}{12}$ を原子の質量の単位として各原子核の質量を計算してみようと思う。この質量を**原子質量単位**といい記号uで表わす。

$1\text{u}=1.66\times 10^{-27}\text{kg}$ である。明らかに $^{12}_6\text{C}$ 原子の質量は12uである。

各素粒子を原子質量単位で表わすと、

陽子p=1.00728u 中性子n=1.00866u 電子e=0.00055u

である。

主な原子の質量は

$^1_1\text{H}=1.00783\text{u}$   $^2_1\text{H}=2.01410\text{u}$   $^3_1\text{H}=3.01605\text{u}$

$^3_2\text{He}=3.0150\text{u}$   $^4_2\text{He}=4.00260\text{u}$   $^{12}_6\text{C}=12\text{u}$   $^{14}_7\text{N}=14.0031\text{u}$

である。個々にあげた原子の質量は原子核の質量ではないことに注意する必要がある。つまり、原子核の質量に電子の質量が加わっているのである。

### (3) 質量欠損

$^1_1\text{H}$ 原子は原子核の陽子の質量と電子の質量を合計すれば得られる。

陽子pの質量+電子eの質量=1.00728u+0.00055u=1.00783u= $^1_1\text{H}$ 原子の質量  
と等式は成立している。

ところが $^2_1\text{H}$ となるとそうはいかないのである。 $^2_1\text{H}$ は陽子と中性子が結合した原子核の周りを電子が回っているのである。単純に考えると陽子と中性子と電子の和が $^2_1\text{H}$ の質量になるはずである。確認してみよう。

pの質量+nの質量+eの質量=1.00728u+1.00866u+0.00055u=2.01649u

$^2_1\text{H}=2.01410\text{u}$ であるから、明らかに異なる。差をとってみると、

$\Delta m=2.01649\text{u}-2.01410\text{u}=0.00239\text{u}=3.97\times 10^{-30}\text{kg}$

電子4個分の質量が消えたことになる。他の原子で計算してもすべて同じことである。原子核は核力で結合するときになんか軽くなっているのである。これを**質量欠損**という。

### (4) 質量とエネルギーの等価原理

アインシュタインは相対性理論を発見する中で光速に近い速度で動く物体の質量が静止時より大きくなることを見つけた。これは、物体の運動エネルギーが質量に転化しているというものであった。このことから、質量とエネルギーは同じものであるという概念が生まれた。物質はエネルギーに変わりエネルギーは物質に変わるというものである。それでは、質量とエネルギーはどのような関係があるといえるのであろうか？

## 原子核

光の運動量は $\frac{h}{\lambda}$ であり、運動エネルギーは $\frac{hc}{\lambda}$  ( $c$ は光速)である。光の場合運動量に光速をかけたものが運動エネルギーになるのである。今質量 $m$ の物体が光になったとすると、その運動量は $mc$ と考えられるので、光のエネルギー $E$ は、 $E=mc^2$ と考えられる。よって、

$$E=mc^2$$

となる。これは、簡易的な誘導であり正式なものではない。正式には相対性理論から導かれるものである。

この式より次のことがいえる。 $c=3.00\times 10^8\text{m/s}$ として、

$$\begin{aligned} 1\text{u} &= 1.66\times 10^{-27}\text{kg} \\ &= 1.66\times 10^{-27}\times (3.00\times 10^8)^2 = 1.49\times 10^{-10}\text{J} \\ &= \frac{1.49\times 10^{-10}}{1.60\times 10^{-19}} = 9.34\times 10^8\text{eV} \\ &= 934\text{MeV} \end{aligned}$$

この値を使えば簡単に質量とエネルギーの変換ができる。

${}^2_1\text{H}$ の質量欠損はエネルギーに直してどれだけであろうか？

$$\Delta m = 0.00239\text{u} = 0.00239\times 934\text{MeV} = 2.23\text{MeV}$$

となる。最初に求めた核力による位置エネルギーが $1.4\text{MeV}$ 程度であるから、大体近い値を示している。核力による位置エネルギーは無限遠を基準とすると、核力は引力であるから、万有引力同様負のエネルギーとなる。質量欠損の分だけ負の位置エネルギーになっていると考えられる。陽子と中性子の結合過程は次のように説明できる。

陽子 $p=1.00728\text{u}$ と中性子 $n=1.00866\text{u}$ が結合することにより、 $0.00239\text{u}$ だけのエネルギーが外部に放出され、その分だけ負の位置エネルギーとなり結合した。式で表わすと次のようになる。

$$p+n \rightarrow {}^2_1\text{H} + \text{エネルギー} \quad \text{数値では } 1.00728\text{u} + 1.00866\text{u} = 2.01355\text{u} + 0.00239\text{u}$$

ここで、 $2.01355\text{u}$ は ${}^2_1\text{H}$ 原子核の質量である。これは同時に

$$p+n - \text{位置エネルギー} \rightarrow {}^2_1\text{H} \quad \text{数値では } 1.00728\text{u} + 1.00866\text{u} - 0.00239\text{u} = 2.01355\text{u}$$

この等式はどちらも正しく成立する。つまり、

**「 $p$ と $n$ の結合時に $0.0239\text{u}$ のエネルギーを外部に放出したということと、核力による位置エネルギーが $-0.00239\text{u}$ であるということは同じことである。」**

この核力による位置エネルギーを結合エネルギーという。

<例>  $\alpha$ 粒子の運動エネルギー

$$\text{各原子核の質量を } {}^{238}_{92}\text{U} = 238.04573\text{u}, \quad {}^4_2\text{He} = 4.00150\text{u}, \quad {}^{234}_{92}\text{U} = 234.04095\text{u}$$

核反応式は

$${}^{238}_{92}\text{U} = {}^{234}_{92}\text{U} + {}^4_2\text{He} + E$$

$$238.04573\text{u} = 234.04095\text{u} + 4.00150\text{u} + E$$

$$E = 0.00328\text{u} = 0.00328\times 1.49\times 10^{-10} = 4.89\times 10^{-13}\text{J}$$



# 原子核

原子核の速さを $V$ 、 $\alpha$ 粒子の速さを $v$ とすると、

$$\text{エネルギー保存則} \quad \frac{1}{2} \times 234.04095uV^2 + \frac{1}{2} \times 4.00150uv^2 = 4.89 \times 10^{-13}$$

$$\text{運動量保存則} \quad 234.04095uV = 4.00150uv$$

$$\text{これを解くと} \quad V = \frac{8.38 \times 10^{-9}}{\sqrt{u}} = 2.06 \times 10^5 \text{m/s} = 206 \text{km/s}$$

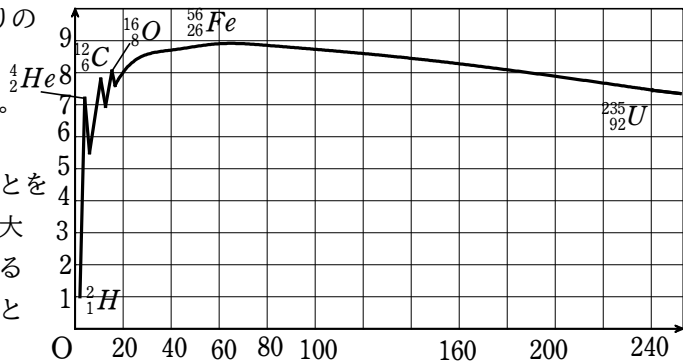
$$v = \frac{4.90 \times 10^{-7}}{\sqrt{u}} = 1.20 \times 10^7 \text{m/s} = 1.20 \times 10^4 \text{km/s}$$

かなりの高速で $\alpha$ 粒子が飛んでくることになる。破壊力も大きい。これが、放射線である。

## 4. 核子1個あたりの結合エネルギー

前項までの内容により ${}^2_1\text{H}$ における質量欠損（結合エネルギー）は2.23MeVであることが分かった。 ${}^2_1\text{H}$ は核子（陽子・中性子）2個で形成されているので、核子1個あたりの結合エネルギーを計算すると、1.12MeVとなる。このように各原子核の核子1個あたりの結合エネルギーを計算しておく、核反応時のエネルギー量の計算がしやすい。

各原子核の核子1個あたりの結合エネルギーは右のグラフのようになっている。グラフの上にある原子核は結合エネルギーが大きいことを意味し、結合エネルギーが大きいことは強く結合しているので安定な原子核であることを意味している。



これを見ると、 ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ がピークであり、それより、軽い原子核は核子1個あたりの結合エネルギーがより小さくなるために原子核が結合したほうがより安定となる。よって、軽い原子核は核融合を起こしやすいことになる。逆に ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ より巨大な原子核は巨大になればなるほど核子1個あたりの結合エネルギーが小さくなるため、原子核が分裂したほうが安定となる。このような原子核は核分裂しやすいといえる。

## 5. 核分裂

### (1) 巨大原子核の安定度

原子核は陽子の反発力を中性子のかかわる核力で押しえ込んで安定に存在している。しかし、前項で述べたように原子核が巨大になるとある特定の陽子にはすべてのほかの陽子の反発力が作用するが、核力はすぐ隣にある中性子からしか受けない。そのために、陽子の反発力が優勢になりやすく、陽子数に対して中性子数が多くなるのである。しかし、中性子は陽子とペアを組まなければ安定に存在できないために、陽子数に比べて中性子数があまりに多くなりすぎると中性子の崩壊が起こる。

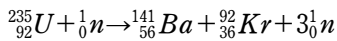
このように巨大原子核は大変不安定になっているのである。陽子の反発力が核力に対して優勢な場合 $\alpha$ 崩壊を起こしやすく、中性子の数が多すぎる場合は $\beta$ 崩壊を起こしやすい。

## 原子核

ウランで考えてみると、 $^{238}_{92}\text{U}$ はウランの同位体の中で最も多く存在するものであるが、陽子の反発力が優勢であるために $\alpha$ 崩壊を起こしやすい。これよりも中性子数が3個も少ない $^{235}_{92}\text{U}$ が存在している。この原子核は $^{238}_{92}\text{U}$ よりもさらに陽子の反発力が優勢である。このような原子核は他の原子核よりもさらに不安定で原子核がほぼ二分割しやすい原子核となる。このように原子核がほぼ二分割する核反応を**核分裂**と呼んでいる。

$^{235}_{92}\text{U}$ がほぼ均等に分割した場合、 $^{117}_{46}\text{Pd}$ および $^{118}_{46}\text{Pd}$ となるが、きれいに分割されるとは限らないので、原子番号が35～55前後の原子核に分裂する。パラジウムPdの場合、安定な原子核の質量数は106前後であるので、分裂した後の原子核は中性子数が異常に多いことが分かる。そのため、核分裂反応のとき数個程度の中性子が放出されることになる。また、核分裂後の原子核は中性子が多すぎるため $\beta$ 崩壊を起こすことになる。これが放射性廃棄物である。

<核分裂反応の例>



$^{235}_{92}\text{U}$ の核子1個あたりのエネルギーは約7.6MeVであり、 $^{141}_{56}\text{Ba}$ は約8.3MeV、 $^{92}_{36}\text{Kr}$ は約8.5MeVである。結合エネルギーは負であることに注目して式に直すと、

$$-7.6 \times 235 = -8.3 \times 141 - 8.5 \times 92 + E$$

これは、 $E = 1.7 \times 10^2 \text{MeV}$ となる。

このことより、 $^{235}_{92}\text{U}$ 1個が核分裂を起こしたときのエネルギーは約170MeVであることが分かる。

純粋な $^{235}_{92}\text{U}$ 1kgがすべて核分裂反応をしたとき放出されるエネルギーはどれほどであろうか。 $^{235}_{92}\text{U}$ 1molが235gであるから、1molの放出エネルギーは

$$1.7 \times 10^2 \times 10^6 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 6.0 \times 10^{23} = 1.6 \times 10^{13} \text{J}$$

となる。よって、 $^{235}_{92}\text{U}$ 1kgの放出エネルギーは

$$1.1 \times 10^{13} \times \frac{1000}{235} = 6.9 \times 10^{13} \text{J}$$

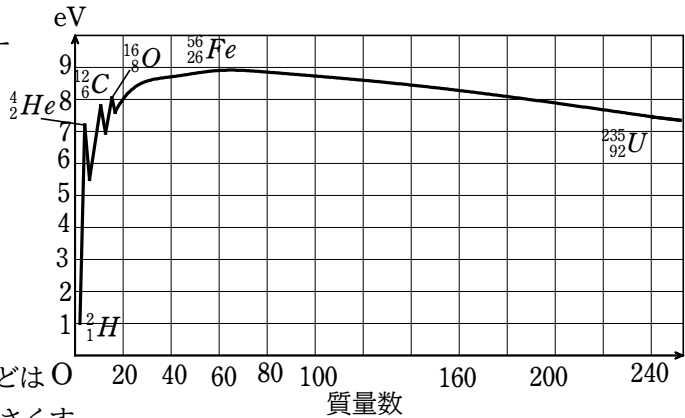
である。石油1kgが完全燃焼したときに放出されるエネルギーが $4.2 \times 10^7 \text{J}$ であることから考えると、約160万倍のエネルギー放出となる。核分裂反応によって放出されるエネルギーは膨大なものである。

# 原子核

## 6. 核融合

右図は前頁にあった核子1個あたりの結合エネルギーを原子の質量数ごとにまとめたものである。

結合エネルギーが大きい壊れにくく安定な原子核であり、結合エネルギーが小さいほど不安定な原子核である。



質量数が多いU原子などはO分裂や崩壊して質量数を小さく

ることによって安定になる。そのため核分裂しやすくなる。これに対して質量数の小さい原子核は原子核どおしが合体して大きな質量数の原子核になったほうが結合エネルギーが大きく安定な原子核となる。このように質量数の小さい原子核どおしが合体して大きな原子核になることを核融合という。

原子核を合体させるには核力が作用するほど近い距離まで原子核を接近させなければならないが、原子核には陽子が存在し正の電荷を持っているために原子核どおしが反発し、通常の状態では原子核どおしを結合させることはできない。そこで高速で原子核どおしをぶつける必要が出てくる。

ここで、二つの重水素原子核 ${}^2_1H$ を互いに逆向きに同じ速さでぶつけて核融合させる場合を考えてみよう。核融合させるためには二つの原子核が原子核の大きさ $1.0 \times 10^{-15}m$ 程度まで接近しなければならない。 ${}^2_1H = 2.01410u$ 、 $1u = 1.66 \times 10^{-27}kg$ とする。

クーロン力の位置エネルギー $U$ は、 $U = k \frac{Qq}{r}$ であるから、 $1.0 \times 10^{-15}m$ に接近させるのに必要なエネルギーは、 $Q = q = +e[C]$  (水素原子核なので陽子数1)

$$U = k \frac{Qq}{r} = 9.0 \times 10^9 \frac{(1.6 \times 10^{-19})^2}{1.0 \times 10^{-15}} = 8.6 \times 10^{-14}[J]$$

このエネルギーを二つの原子核の運動エネルギーから得るようにするには、

$$2 \times \frac{1}{2}mv^2 = 8.6 \times 10^{-14}[J] \quad \text{となればよい。}$$

ここで、 ${}^2_1H$ の質量 $m$ は ${}^2_1H = 2.01410u$ 、 $1u = 1.66 \times 10^{-27}kg$ を利用して、

$$m = 2.01410 \times 1.66 \times 10^{-27} = 1.33 \times 10^{-27}kg$$

よって、

$$v = \sqrt{\frac{8.6 \times 10^{-14}}{1.33 \times 10^{-27}}} = 8.1 \times 10^6 m/s$$

となる。これ以上の速さで原子核が衝突しなければ核融合は起こらないことになる。

原子核の速さをこの速さにするには、加速器で加速する方法もあるが、これでは多くの

## 原子核

核融合をさせることはできない。物質の温度を上げて核融合を起こさせる。気体分子運動論より、分子の速さと絶対温度との間には

$$\frac{1}{2}mv^2 = \frac{3}{2}kT \quad (k \text{はボルツマン定数 } 1.38 \times 10^{-23} \text{ J/K})$$

の関係がある。この式を使うと

$$T = \frac{mv^2}{3k} = \frac{8.6 \times 10^{-14}}{3 \times 1.38 \times 10^{-23}} = 2.1 \times 10^9 \text{ [K]}$$

この温度は21億度という超高温である。しかしながら、分子の速さは同じではなく速い分子もあれば遅い分子もある。平均の速さが  $8.1 \times 10^6 \text{ m/s}$  になるのが21億度ということなので、実際は1億程度で一部の原子核で核融合反応が起こる。核融合反応を起こすにはこれほどの温度が必要ということである。

2つの ${}^2_1\text{H}$ 原子核が核融合した場合 ${}^2_1\text{H}$ は ${}^4_2\text{He}$ になると考えがちであるが、次のような核融合反応が起こる。



中性子が1個飛び出すのである。 ${}^3_2\text{He} = 3.0150\text{u}$ であることから、この核融合で発生するエネルギーを計算してみよう。 ${}^2_1\text{H} = 2.0141\text{u}$ 、 ${}^1_0\text{n} = 1.00866\text{u}$ を用いると、

上の核反応式にそのまま質量を代入すると

$$2 \times 2.0140\text{u} = 3.0150\text{u} + 1.0087\text{u} + E \quad E: \text{放出エネルギー}$$

$$E = 0.0043\text{u} \quad \text{となる。} \quad 1\text{u} = 934\text{MeV} = 1.49 \times 10^{-10}\text{J} \text{なので、}$$

$$E = 0.0043\text{u} = 4.01\text{MeV} = 4.47 \times 10^{-13}\text{J}$$

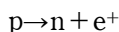
このエネルギーが核融合反応にて放出されることになる。

### 7. 恒星内における元素の合成

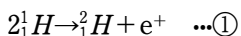
#### (1) 太陽の熱核融合反応

太陽の中心部の温度は1500万度である。核融合は1億度以上でないと起こらないが、密度は水の100倍 ( $100\text{g/cm}^3$ ) であるため1000万度以上あれば核融合反応が起こる。温度を高くすることにより起こる核融合反応を特に熱核融合反応という。

水素の同位体は ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^2_1\text{H}$ 、 ${}^3_1\text{H}$ である。存在比率は圧倒的に ${}^1_1\text{H}$ が多い。太陽中心部では ${}^1_1\text{H}$ による核融合反応が起こっている。 ${}^1_1\text{H}$ には中性子がいないため2個の ${}^1_1\text{H}$ は結合しないように思えるが、 ${}^1_1\text{H}$ に高いエネルギーが加わった場合、次のような反応が起こる。

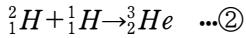


ここで、 $e^+$ は陽電子と呼ばれており、電子と同じ質量で電荷が逆の粒子である。 $\beta$ 崩壊の逆の反応と考えることもできる。2個の ${}^1_1\text{H}$ が反応するとき、片方の ${}^1_1\text{H}$ が $e^+$ を放出して中性子に変わり、その中性子ともう1個の ${}^1_1\text{H}$ が結合して ${}^2_1\text{H}$ ができるのである。反応式で表わすと

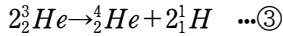


ここで生じた ${}^2_1\text{H}$ にさらに ${}^1_1\text{H}$ が融合して ${}^3_2\text{He}$ が生じる。

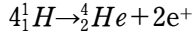
## 原子核



最後に2個の ${}^3_2\text{He}$ が結合して ${}^4_2\text{He}$ 1個と ${}^1_1\text{H}$ 2個生じる。



①×2+②×2+③を計算すると、最終的に



の反応が起こっていることになる。ここで、 $\text{e}^+$ は通常電子 $\text{e}^-$ と反応して $\gamma$ 線（光）になるのでこれも放出するエネルギーに加える。

次にこの核融合反応によって発生するエネルギーを計算してみよう。 ${}^1_1\text{H}$ の核子1個あたりの結合エネルギーは結合していないので0。これに対して ${}^4_2\text{He}$ の核子1個あたりの結合エネルギーは7.2MeVである。結合エネルギーはマイナスであるので、結合することにより7.2×4MeVエネルギーが低くなっていることになり、低くなった分だけエネルギーが外部に放出されたことになる。よって、7.2×4=28.8MeVのエネルギーが放出されることになる。

水素ガス1kgが完全に核融合反応を起した場合に発生するエネルギー量は水素原子4個で28.8MeVであるから、1個あたりでは

$$7.2\text{MeV} = 7.2 \times 1.6 \times 10^{-19} \times 10^6 = 1.15 \times 10^{-12}\text{J},$$

1g (1mol) あたりではアボガドロ数をかければよいので、

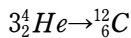
$$1.15 \times 10^{-12} \times 6.0 \times 10^{23} = 6.9 \times 10^{11}\text{J}$$

1kgあたりでは  $6.9 \times 10^{14}\text{J}$  となり、 ${}^{235}_{92}\text{U}$ 1kgあたりのエネルギー $6.9 \times 10^{13}\text{J}$ の10倍である。

太陽はこの熱核融合反応を起すことにより輝いているのである。

### (2) 恒星における元素の合成

太陽は熱核融合反応を起して輝いているが、燃料である水素が尽きてしまうと輝くことができなくなる。あと50億年ほどは今のように輝くことができるであろうといわれている。水素が燃え尽きた後は今まで燃えカスであった ${}^4_2\text{He}$ が燃料となり核融合反応が起こる。



このとき ${}^{12}_6\text{C}$ の核子1個あたりのエネルギーは7.8MeVであるのでこの核融合で発生するエネルギーは各原子核に核子1個あたりのエネルギーに質量数をかけた数を代入して、

$$3 \times (-7.2) \times 4 = 12 \times (-7.8) + E$$

これより、 $E=7.2\text{MeV}$ となり、水素の核融合のエネルギーよりもかなり少ない。この核融合反応をする機関は短くなる。

${}^4_2\text{He}$ の核融合が終わった後は  ${}^{12}_6\text{C} + {}^4_2\text{He} \rightarrow {}^{16}_8\text{O}$  が起こる。太陽はここまで核融合が起こった時点でこれ以上の反応を起すことができないので燃え尽きてしまう。しかし、もっと質量の大きい恒星では ${}^4_2\text{He}$ 、 ${}^1_1\text{H}$ 、 ${}^2_1\text{H}$ などが結合することによりさらに大きな原子核が合成され、最終的に ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ まで合成される。

${}^{56}_{26}\text{Fe}$ よりも核子1個あたりの結合エネルギーの大きい原子核は存在しないので、 ${}^{56}_{26}\text{Fe}$ が

## 原子核

合成されてしまえば核融合でエネルギーを発生させることはできない。そのため、恒星は一挙に崩壊をはじめそのときの熱で恒星全体が爆発（超新星爆発）する。この爆発時のエネルギーを吸収してさらに ${}^4_2\text{He}$ が結合して ${}^{238}_{92}\text{U}$ などの原子核が合成される。

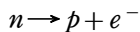
現在地球上に存在しているこれら元素は太陽系ができる前に存在した恒星が超新星爆発をしたときに生成された元素である。宇宙に拡散したこれら元素が再び集まることによって太陽系ができたのである。

### 8. 素粒子

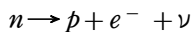
#### (1) 素粒子とは

原子を構成する陽子（記号 $p$ ）中性子（記号 $n$ ）電子（記号 $e$ ）や光子（記号 $\gamma$ ）などの物質を構成する基本粒子を素粒子という。素粒子どおしの反応にも、質量を含めた**エネルギー保存則**、**運動量保存則**、**電荷保存則**が成立する。

中性子は安定な粒子ではなく、単独で存在しているとき十数分で陽子と電子に崩壊する。このときの反応は $\beta$ 崩壊でよく知られている。反応式は



である。しかし、観測精度が上昇するにつれ、この反応は電荷は保存されているが、運動量とエネルギーが反応後は反応前に比べごくわずかに少ないことが分かった。1931年パウリは観測にかからない道の粒子がさらに放出されているためと考えこの粒子をニュートリノ（記号 $\nu$ ）と名づけた。この粒子は20年後実際に観測された。この反応式は正しくは



となる。

電荷にはクーロン力が作用するが、クーロン力は電場によって作用する力である。力が作用すれば電荷が移動するために周辺の電場が変化する。力の作用と電場の変化は同時におこるために、電場が変化するから力が作用すると考えても差し支えない。電場の変化は電磁波であるので、クーロン力は電磁波を媒介して作用していると考えても良いことになる。また、波と粒子の二重性より電磁波は光子と考えてよいのでクーロン力は電荷間を光子が往復することによって作用すると考えてもよいことになる。

現在ではすべての力は力が作用する物体間を何らかの粒子が往復することによって作用すると考えられている。たとえば、重力の場合は重力波の振動で重力子と呼ばれる素粒子の往復と考えられている。

湯川秀樹はこの考え方を核力に応用した。原子核内の陽子と中性子の間に作用する力は莫大な力であるが、何か未知の粒子が往復することによって作用していると考えた。その粒子のエネルギーは核力の大きさと作用する距離の積（仕事）に匹敵するものでなくてはならない。核力が余りに大きな力であるためにこのエネルギーは大きなものとなり、質量に換算すると、電子の200倍程度の質量を持った粒子となることを予想し、この粒子を中間子と名づけた。数年後この粒子が宇宙線内で発見され、湯川秀樹はこの業績によりノーベル物理学賞を受賞することになった。

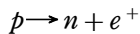
当初数種類に過ぎなかった素粒子はこのような理論的予測されたり、さまざまな実験により新しく見つかったりして現在では数百種類に達している。素粒子はその種類が多くな

## 原子核

ったことと素粒子どおしの反応から推察して、素粒子の内部に更に構造があることが予測されるようになった。

### (2) 反粒子

太陽の中心部において起こっている熱核融合反応の中に陽子が中性子に変わる過程がある。中性子は不安定なために自然に崩壊するが、陽子は安定なために外部からエネルギーが加わらない限り反応は起こらない。熱核融合反応が起こるといふ超高温下においては陽子に多量のエネルギーが加わるために陽子が中性子に変化する反応が起こる。



このときに出てくる $e^+$ は正電荷を持った電子で陽電子と呼ばれている。この粒子の性質をあげてみると次のようなものである。

- ① 質量は電子と全く等しい
- ② 電荷は電子と逆である。
- ③ 電子と陽電子が衝突すると光を発生して（光子になる）消滅する。（対消滅）
- ④ 空間のある一点に高いエネルギー（光）を集中させると、電子と陽電子が対になって発生する（対発生）

このような性質から考えて電子と陽電子は反対の性質を持つ粒子であることが分かる。このような粒子を**反粒子**という。最初は電子の反粒子が見つかったが、後のさまざまな実験により陽子の反粒子である反陽子、中性子の反粒子である反中性子などが見つかかり、現在では光子以外のすべての素粒子に反粒子があることが知られている。粒子と反粒子の間には次のような性質がある。

- ① 質量は全く等しい
- ② 電荷を持つ粒子は電荷が逆である。
- ③ 対消滅する
- ④ 対発生する。

光子以外のすべての粒子に反粒子があることから、反陽子と反中性子で原子核（反原子核）を作ることが可能となる。反原子核の周りを陽電子が回る原子（反原子）も可能であり、反原子で構成された反分子も考えられる。反分子で構成された物質を反物質という。反物質は通常物質と接触すると光を発生して消滅することになる。反物質は現在の科学ではまだ合成されていない。

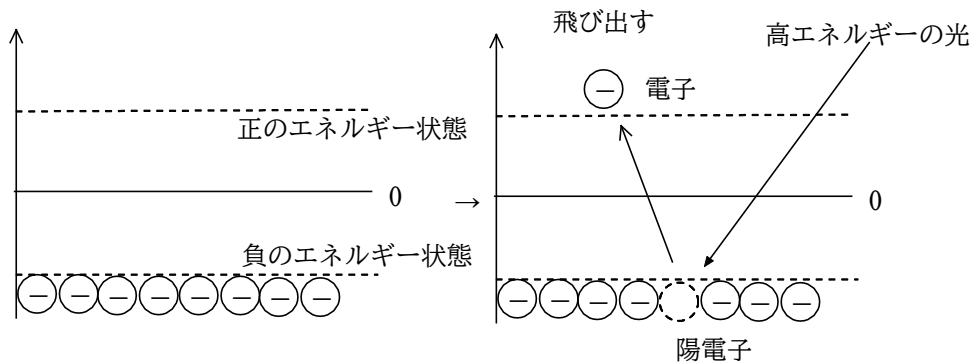
### (3) 反粒子に対するディラックの考え方

反粒子の存在はどのように考えたらよいのであろうか。ディラックは反粒子の性質を説明できるディラックの海の考え方を提唱した。

真空とは何もないものと考えているが、マイナスのエネルギーを持った粒子で埋められていると考えるのである。粒子は高いエネルギー状態から低いエネルギー状態に落ちようとする性質があるが、マイナスのエネルギー状態で真空が埋められていることにより、マイナスに落ちられないことから正のエネルギーを持った粒子が存在することになるのである。もし真空がマイナスのエネルギーの粒子で埋められていなければ、この世に存在する

## 原子核

すべての粒子はマイナスエネルギー状態におちてしまうはずである。



この状態で真空が埋められているとき、真空のある一箇所を高エネルギーの光が集中したとき、負のエネルギー状態にある電子にエネルギーが与えられてその電子が正のエネルギー状態に移る。これが対発生である。正のエネルギー状態に移った電子は通常電子として振る舞う。このとき、マイナスのエネルギー状態の海には電子の穴が開いている状態になる。この穴はマイナスの電荷の中にある穴であるから外部から見ると正の電荷を持つように見える。これが陽電子である。このように考えると反粒子が質量が同じで逆の電荷を持つことが説明できる。

通常電子と陽電子が出会うということは通常電子が電子の穴に落ち込むことになり、このときにあまったエネルギーが光の形で放出される。これが対消滅である。

ディラックのこの考え方は反粒子の性質をよく説明できる。素粒子には電子以外に陽子や中性子があるがこれらもマイナスのエネルギー状態にある粒子で埋められていると考えるのである。このように考えると電子、陽子、中性子がマイナスエネルギー状態で同じ位置に存在しなければならないがそのようなことはあるのか？という疑問を持つが、粒子は波動としての性質を持つ。波動は重ねあわせができるために同時刻に同じ位置に存在することが可能なのである。

### 9. クォーク

素粒子は種類が多く、素粒子同士の反応も起こるので素粒子内部に構造があることが予想された。素粒子の性質を上手に説明するためにクォークというさらなる基本粒子の存在を考えた。陽子と中性子の性質は2種類のクォークが3個存在すればうまく説明できる。この2種類のクォークをアップクォーク（記号 $u$ ）とダウンクォーク（記号 $d$ ）と呼ぶことにし、陽子がアップクォーク2個、ダウンクォーク1個で、中性子がアップクォーク1個、ダウンクォーク2個で構成されているとする。反粒子はそれぞれの反クォークで構成されているとする。この考え方を利用して陽子・中性子の性質を説明してみよう。

#### ① 電荷

陽子の電荷は $+e$ で中性子は電荷を持たない。クォークではどうなるのであろうか。アップクォークの電荷を $u$ 、ダウンクォークの電荷を $d$ とすると、

$$\text{陽子に関して} \quad 2u + d = +e$$

$$\text{中性子に関して} \quad u + 2d = 0$$



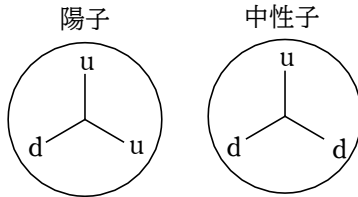
# 原子核

この連立方程式を解くと、 $u = +\frac{2}{3}e$ 、 $d = -\frac{1}{3}e$ となる。クォークはこの電荷を持っていると考える。

## ② 核力

中性子は単独の場合不安定であるが、原子核内では陽子と入れ替わりながら安定して存在している。また、陽子と中性子の間に強力な核力が作用している。この状態をクォークで説明してみよう。

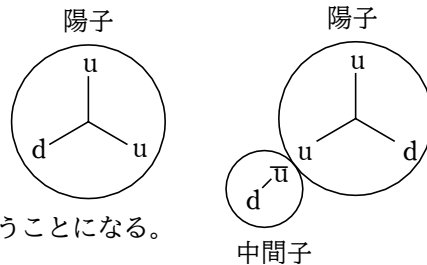
陽子、中性子はアップクォークとダウルクォークでできているその状態を図示すると右図のようになる。



陽子、中性子はアップクォークとダウルクォークでできているが、いかなる実験を行ってもこれらのクォークを単独で取り出す

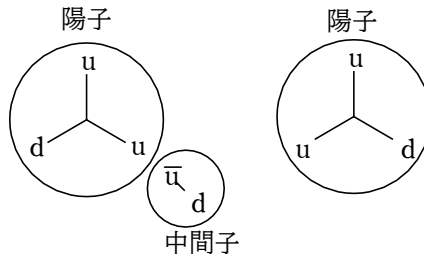
ことに成功していない。これを元に、中性子からdクォークを引き抜く場合を想定してみよう。クォークどおしはかなり強く結合していることが予想されるために、dクォークを引き抜くための力は莫大なものが必要となる。莫大な力で動かすことになるので、莫大なエネルギーが必要となる。そのエネルギーが余りに大きいため中性子内でクォークの対発生が起こることが考えられる。

右図のようにdクォークを引き抜く時にuクォークと反uクォークが引き抜くためのエネルギーで対発生すれば中性子は図のように陽子に変わることになる。このときのdクォークと反uクォークのペアとなった粒子が中間子ということになる。



中性子から分離した中間子は隣にある

陽子に接近し、陽子のuクォークと中間子の反uクォークが対消滅する。この対消滅のときに発生したエネルギーが中間子が右側の陽子に戻るときの対発生に使われるのである。



このように考えると、中間子を媒介として核力が存在していることが説明できる。

## 10. 基本的な粒子の分類

### (1) クォークとレプトン

物質を構成する素粒子は大きく分けて3つに分類されている。陽子や中性子のように核子を構成する粒子の仲間をバリオンといい、中間子の仲間をメソンという。バリオンとメソンはクォークで構成されている。バリオンは3つのクォークで構成され、メソンはクォ

## 原子核

ークと反クォークで構成されている。バリオンとメソンを総称してハドロンと呼んでいる。

これに対して電子やその仲間は内部に構造を持たないと考えられており、レプトンと呼ばれている。現在ではクォークが6種類、レプトンが6種類あることが知られている。

クォークとレプトン

	電荷	第一世代	第二世代	第三世代
クォーク	$\frac{2}{3}e$	アップクォーク	チャームクォーク	トップクォーク
クォーク	$-\frac{1}{3}e$	ダウンクォーク	ストレンジクォーク	ボトムクォーク
レプトン	$-e$	電子	$\mu$ 粒子	$\tau$ 粒子
レプトン	0	電子ニュートリノ	$\mu$ ニュートリノ	$\tau$ ニュートリノ

これら粒子によってすべての素粒子の性質が説明できるのである。

### (2) ゲージ粒子

世の中にはさまざまな力が存在している。抗力、張力などの力は原子・分子間に作用する力である。これらの力は電荷のクーロン力である。クーロン力は電場の変化によって生じる力であるので電磁波が伝わることによって作用すると考えてよく、電磁波は光子であるので、光子が媒介する力と考えることができる。このように力を媒介する粒子を**ゲージ粒子**という。

重力は重力場の振動によって伝わる力である。重力場の振動を重力波といい、重力波は重力子と呼ばれる粒子が媒介していると考えられている。この**重力子**もゲージ粒子である。

陽子・中性子は粒子内で3つのクォークが結合している。また中間子はクォークと反クォークが粒子内で結合している。このようにクォークどおしを強烈にひきつける力を**強い力**といい、グルーオンという粒子が媒介していると考えられている。

中性子は陽子と電子とニュートリノに分裂（ $\beta$ 崩壊）する。逆に言うと、中性子は陽子と電子とニュートリノが結合したものと考えることができる。陽子はクォークでできており、電子とニュートリノはレプトンである。このようにクォークとレプトンをつなぐ力を**弱い力**と呼んでいる。弱い力を媒介する粒子を**ボソン**という。

力には重力、電磁気力、強い力、弱い力の4種類が存在し、それぞれゲージ粒子と呼ばれる重力子、光子、グルーオン、ボソンという粒子で媒介されている。