

1-2



すべての物質は素粒子に行き着く

—— フェルミ粒子

素粒子とは、物質を細かくバラしていったときに最終的に行き着く、これ以上分けることのできない、つまり構造を持たない最小にして最終のツブツブである微粒子のことです。

その大きさはまだはっきりとは解明されていないのですが、少なくとも $0.0000000000000000001 = 1 \times 10^{-19}$ mm以下とされています。これはもう粒とは言えないほど小さいモノです。

● 素粒子には3グループある

しかし、おぼろげにとはいえ、原子構造が見えるようになって100年、素粒子もおぼろげながら見えるようになってきました。

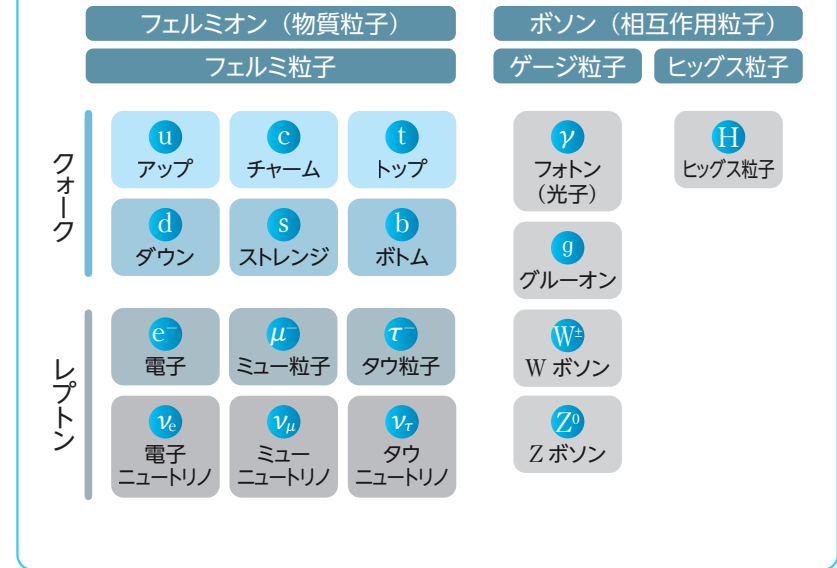
それによると、素粒子には大きく分けて3つのグループがあると言います。それは、

- ・物質をつくる素粒子：フェルミ粒子
- ・力を伝える素粒子：ゲージ粒子
- ・質量を与える素粒子：ヒッグス粒子

の3種類の特徴を持つグループです。

それぞれのグループを図1-2-1にまとめました。

図1-2-1・素粒子の標準理論(1-4節参照)



● 物質をつくる「フェルミ粒子」

物質をつくる素粒子は何種類かありますが、まとめて「**フェルミ粒子**」と呼ばれます。

フェルミ粒子はまた、「**クォーク**」というグループと「**レプトン**」というグループに分かれます。

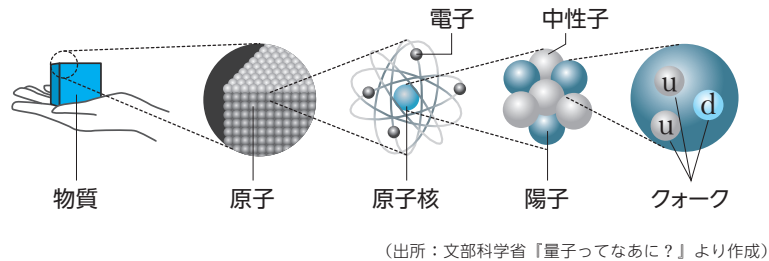
そしてクォークとレプトンには、それぞれ6種類ずつの素粒子があります。したがってフェルミ粒子は全部で12種類あることになります。

各種素粒子の集合体である原子を例にとって具体的にしてみると、原子は原子核とその周りにある電子(雲)からできています。この電子がレプトン族の素粒子です。

そして原子核は、陽子と中性子という2種の粒子でできていま



図 1-2-2 • 物質は何からできているか



			素粒子の組成
原子	電子		レプトン族 (単体)
	原子核	陽子	クォーク族 (アップクォーク2+ダウンクォーク1の構造体)
		中性子	クォーク族 (アップクォーク1+ダウンクォーク2の構造体)

すが、この陽子と中性子はクォーク族の3つの素粒子でできています。つまり「陽子は2個のアップクォークと1個のダウンクォーク」、「中性子は1個のアップクォークと2個のダウンクォーク」からできています。

したがって、高校化学で習う、原子をつくっている3種類の粒子、電子、陽子、中性子のうち、素粒子と呼ぶことができるのは電子だけなのです。

陽子と中性子はそれぞれ、少なくとも「2種類3個の素粒子」からできた構造体なのです。

1-3



素粒子を集めているのも素粒子だった

—— 力を伝えるゲージ粒子

最終粒子探求の旅の目標は、「世界をつくっている最小・最終の粒子」を求めることでした。それならば、物質をつくる素粒子であるフェルミ粒子を発見したところで終わりになるはずですが。

ところが旅を始めてみると、素粒子がつくっているモノは「物質」だけではないことがわかってきました。

● 粒子をつくる素粒子の力

素粒子が集まって陽子や中性子のような粒子をつくるためには、互いを寄せ集める「力」が必要であり、その力をつくっていたのもまた素粒子だったのです。

これは相対性理論で有名なアインシュタインの式、

$$E=mc^2$$

(E : エネルギー 〈力〉、 m : 質量 〈物質〉、 c : 光速)

を見れば納得がいくでしょう。相対性理論によれば、物質と力は互換性がある、最終的には同じモノということなのです。

つまり、素粒子はこの世のあらゆる「力」をも伝えているのです。



力を伝える素粒子のグループを、「**ゲージ粒子**」と呼びます。

この世界にはいろいろな種類の力があるように思えますが、実はたったの「4種類」しかないのです。その4種類の力とは、①「**電磁気力**」、②「**強い力**」、③「**弱い力**」、④「**重力**」の4つです。

①電磁気力を伝える素粒子「フォトン（光子）」

電磁気力とは、**電気力と磁力の総称**です。

電気力というのは、プラスとマイナスは引き合い、プラスとプラス、マイナスとマイナスは反発し合うという力です。

磁力とは、磁石の南北が引き合い、南と南、北と北は反発するという力です。これらの力を伝えるのが「**フォトン**」という素粒子なのです。ちなみに日本語では、**光子**のこともフォトンと言います。**目に見えているような光はフォトンによって伝えられています。**もしフォトンがなければ、この世は真っ暗闇ということになります。

②強い力を伝える素粒子「グルーオン」

「強い力」の意味は、上の**電磁気力と比べて力が大きい**ということです。具体的には、**原子核の中の中性子と陽子をくっつける力**のことです。この力を伝えるのが「**グルーオン**」という素粒子なのです。

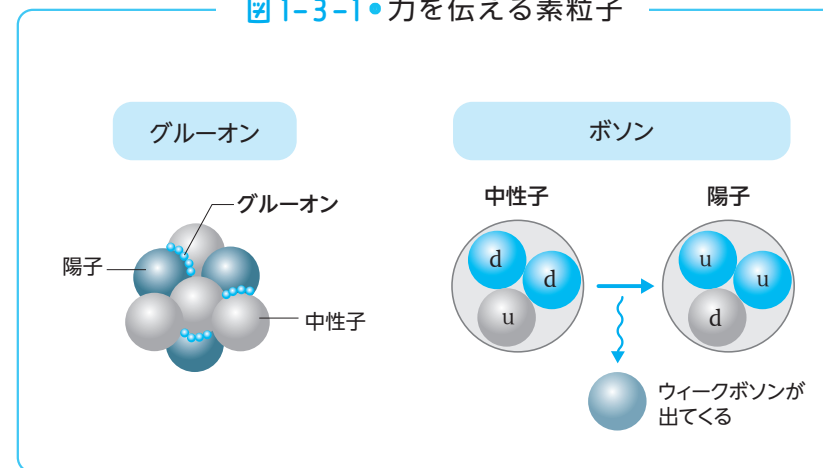
③弱い力を伝える素粒子「W ボソン、Z ボソン」

「弱い力」というのも、**電磁気力と比べて力が小さい**ことから名づけられました。具体的には、放射性物質が β 崩壊をした際に出てくる力のことを言います。

この弱い力を伝えるのが「**Wボソン**」や「**Zボソン**」という素粒

子で、まとめて「**ウィークボソン**」と言います。ウィークボソンは中性子が陽子に変換されるときに放出されます。

図 1-3-1・力を伝える素粒子



④重力を伝える素粒子「グラビトン」

私たちは地球の中心に引っ張られています。これは地球の重力によるもので、この力を伝えるのが「**グラビトン**」という素粒子です。

ただし、グラビトンはまだ発見されていません。理論的に予言されているだけです。世界中に指名手配されて世界中の科学者が探しているのです、そのうち見つかることでしょう。

●質量を与える素粒子「ヒッグス粒子」

質量とは、あるモノの持っている量のことです。日常的には重さ、重量などと言ったりもします。しかし、質量と重量は違います。

a 質量と重量

質量とはその物質が持っている「**固有の量**」のことで、周りが





変わっても質量が変わることはありません。「質量 100g」の物質は、日本にあらうとも月にあらうとも、同じ「質量 100g」です。

一方、日本で「重量 100g」の物質は、月では「重量約 16.7g」になります。それは、重量は 2 つの物質のあいだに働く引力によるもので、地球の引力と月の引力は異なるからです。

もちろん、日本とアメリカのあいだでも重量は異なります。ですから科学的な話では重量は用いず、質量で話をします。

b ヒッグス粒子と質量

1Lのペットボトルの水は1000gという質量、1円玉は1gという質量を持っています。そしてこれらの物質は、フェルミ粒子という素粒子できています。ただし、フェルミ粒子とウィークボソン以外の素粒子は、自分自身の質量を持っていません。つまり、重さのない幽霊のような存在なのです。

しかし、私たちの身の回りに質量のない「物質」は、今わかっていない素粒子を除いて他にありません。これを矛盾なく説明するにはどうしたらよいのでしょうか？

そこで考えられたのが、あらゆる素粒子に質量を与える素粒子があればいいのではないか、ということです。このようにして考え出されたのが「ヒッグス粒子」という素粒子です。

ヒッグス粒子の存在が予言され



●ピーター・ヒッグス (1929～2024)：素粒子の「質量の起源」を説明するヒッグス粒子の発見で2013年にノーベル物理学賞を受賞した。

(出所：Bengt Nyman)

たのは1964年のことでした。以来、探しまわること半世紀、ようやく発見されたのは2012年のことでした。待ってましたとばかりに、2013年に予言者であるイギリスの理論物理学者ピーター・ヒッグス博士と同僚にノーベル賞が与えられました。

c ヒッグス粒子の働き

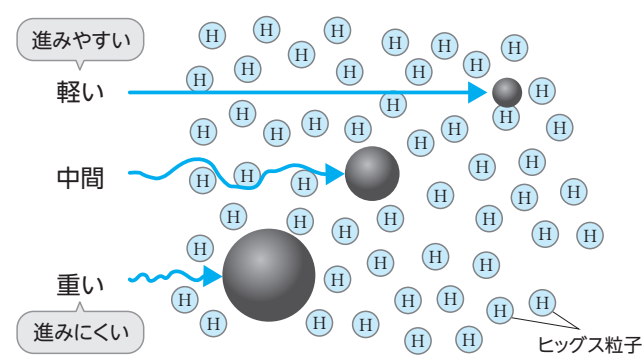
それでは、ヒッグス粒子は他の物質にどうやって質量を与えるのでしょうか？ 実はヒッグス粒子は何をするわけでもありません。じっと存在しているだけなのです。言葉で説明してもわかりにくいだけなので、例で考えてみましょう。

人ごみの中を手ぶらでまっすぐ進もうとする場面を想像してみてください。次に、大きい荷物を持って、同じように人ごみの中を進もうとするところを想像してみてください。

当然、荷物を持っているほうが進みづらいはずです。

質量の大きさとは、この「進みづらさの度合い」にあたと喩えられます。

図 1-3-2 • 質量を与える素粒子・ヒッグス粒子



つまり、「人ごみの1人ひとり」がヒッグス粒子にあたるのです。ですから、ヒッグス粒子は私たちの身の回りに当たり前にあります。

それなのに、空気のように目に見えず耳に聞こえなかったので、とにかく探すのがとても難しく、ここ最近になるまで発見されなかったのです。

もしヒッグス粒子が存在せず、物体に質量がなかったらどうなることでしょうか？ すべてのモノが光の速さで勝手に飛び回ってしまうことになります。当然、私たちの体も例外ではありません。

ただし素粒子のうち、フォトン(光子)とグルーオンだけはヒッグス粒子と衝突しないので、ヒッグス粒子が存在する空間でも光速で移動することができます。

りょうしの世界の窓

世界はデジタルか？ アナログか？

最近の世界はデジタルで動いているようです。電子機器関係は0か1かのデジタルオンリーです。でも昔人間の私はデジタルに馴染めず、できるだけアナログで賄っています。

好きな音楽もレコードで聞きたいのですが、30分ごとにレコードを交換するのが大変なのでCDです。しかしアンプは完全真空管式でKT66だとか6336Aだとかの大型真空管を並べて見入っています（真空管は眺めるもので、聞くものではありません）。

この世は原子という粒子でできているのですからデジタルなのでしょう。しかし、その粒子を見ると、電子の存在範囲は確率で表わされ、これは領域不確定のアナログみたいなものです。

アナログの粒子でできた世界はアナログなのでしょうが？ それともデジタルなのでしょうが？

1-4



世界の成り立ちを説明する 「標準理論」以降の発見

—— ニュートリノ振動

これまで紹介してきたような、素粒子の振る舞いを説明するモデルを「標準理論」と言います。標準理論は1970年頃に組み立てられた理論であり、物質を構成する素粒子、力を伝える素粒子、質量を生む素粒子から成り、世界の成り立ちをほぼ説明することに成功しています。

しかし、強い力と弱い力の統一が未達成なこと、重力を同じ枠に組み入れていないことなど、不完全な点も多くあります。

また、この理論では、3種類の素粒子ニュートリノはともに質量を持たないことになっています。ところが最近、ニュートリノ振動という現象が発見され、ニュートリノが質量を持つことがわかりました。ということは、標準理論を見直す必要が出てきたことを示すものです。

● フェルミ粒子の「世代」

前述したように、物質を形づくる基本粒子はフェルミ粒子と呼ばれ、クォーク、レプトン各6種の計12種があります。

これらの粒子は、2種類のクォークと2種類のレプトンを1つ





原子の構造と 原子核の構造

—— 原子雲・原子核と陽子・中性子

原子は**電子雲**という軽くてフワフワした(密度が小さい)部分と、それに囲まれるように存在する小さくて重い(密度が大きい)粒子からできています。この小さくて重い粒子を**原子核**と言います。

原子を構成する電子(雲)は、自分自身が1個の素粒子ですが、原子核は素粒子ではありません。

電子と原子核は両方とも固有の反応をします。しかし原子核の反応は**原子核反応**と言われ、特殊で、滅多に起きず、その代わり起きると莫大なエネルギーを発することから、普通の化学では扱いません。

それに対して**普通の化学反応は、電子(電子雲)だけが起こすものであり、原子核は一切関与しません。**

高校の化学では原子や電子のことは教えますが、原子核についてはほとんど触れません。それは、原子の性質や化学反応のすべては電子の挙動によるものであり、原子核は、いわゆる「化学反応」にはまったくと言っていいほど関与していないからです。

● 原子核の大きさは原子の1万分の1

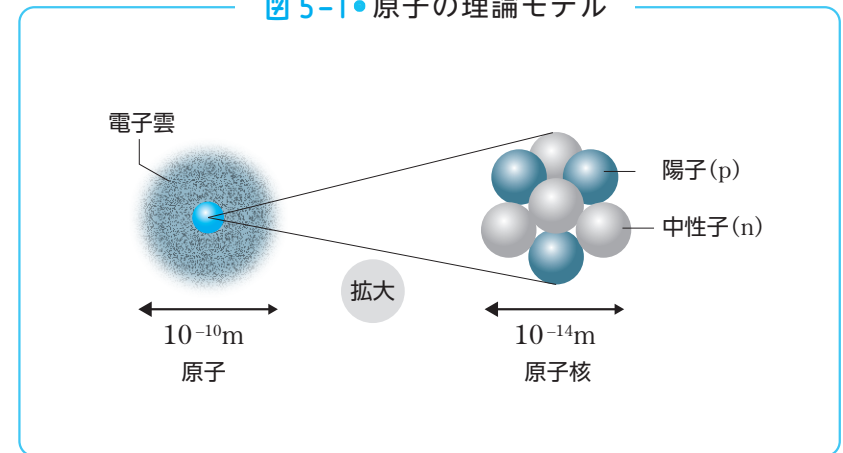
原子は非常に小さいものです。原子とピンポン玉の直径の比は、ピンポン玉と地球の直径の比とほぼ同じです。

しかし、原子核は原子よりさらに小さいものです。その直径は原子のおよそ1万分の1です。すなわち、原子核の直径を1cmとすると、原子の直径は1万cm、つまり100mになってしまうのです。

東京ドームを2つ貼り合わせた巨大ドラ焼きを原子とすると、原子核はピッチャーマウンド上に転がるビー玉くらいの大きさしかありません。

しかし、**原子の重さの99.9%は原子核の重さ**です。原子核を重くて小さいと言ったのはこのような理由からです。

図5-1・原子の理論モデル



● 原子核をつくるもの

原子が電子雲と原子核からできているように、原子核もいろいろなものからできています。

ここでは、原子核をつくる主なものとして、**陽子**(記号p)と**中性**

子(記号 n)をあげておきましょう。

陽子と中性子はまとめて^{かくし}核子と呼ばれることもありますが、素粒子ではありません。陽子と中性子はともに3個ずつの素粒子、つまり**フェルミ粒子**であるクォークが集まってできたものです。クォークは電荷を持っており、その値はアップクォーク $=+\frac{2}{3}$ 、ダウルクォーク $=-\frac{1}{3}$ ですから、陽子と中性子の電荷はそれぞれ以下のようになります。

・陽子：2個のアップクォーク + 1個のダウルクォーク

$$2 \times \frac{2e}{3} - \frac{e}{3} = e \text{ (電荷 = 1)}$$

・中性子：1個のアップクォーク + 2個のダウルクォーク

$$\frac{2e}{3} - 2 \times \frac{e}{3} = 0 \text{ (電荷 = 0 : 中性)}$$

このように、陽子と中性子では互いに素粒子の種類は異なりますが、両者の重さはほぼ同じです。これを**質量数 A がともに 1 である**と表現します。

しかし、電荷に関しては陽子と中性子ではまったく異なります。1個の陽子は+1の電荷を持っていますが、中性子は電荷を持たず、電氣的に中性です。

そして陽子と中性子を引きつけ合わせるのは**グルーオン**という**ゲージ粒子**になります。

5-2

原子核をどう表現するか

—— 原子番号・質量数・同位体

原子を表わす記号に元素記号がありました。同様の記号が原子核にもあります。ただしそれは、**元素記号に添え字をつけただけのもの**です。

● 原子番号 Z と質量数 A

原子核を構成する陽子の個数を、その原子の「原子番号」と言い、記号 Z で表わします。ですから原子番号 Z の原子の原子核は、電氣的に $+Z$ に荷電していることになります。

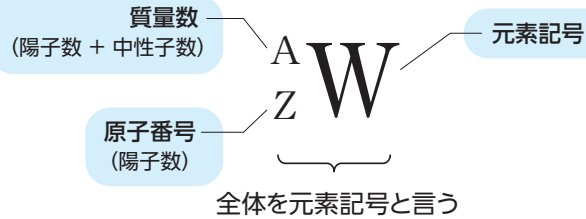
そして原子は、原子番号と同じ個数の電子からできた電子雲を持っています。1個の電子の電荷は -1 ですから、**原子番号 Z の原子の電子雲の電荷は $-Z$ となり**ます。したがって原子は、原子核の電荷と電子雲の電荷が相殺され、電氣的に中性になるのです。

一方、**陽子と中性子の個数の和を「質量数」と言い、記号 A で表わします。したがって、質量数から原子番号を引けば中性子数**になります。

原子番号は元素記号の左下、質量数は元素記号の左上に小さい添え字で書く約束になっています。



図 5-2-1 • 原子核を表わす記号



つまり、 ${}^3\text{H}$ だとか ${}^{131}\text{I}$ だとか ${}^{235}\text{U}$ だとかの、元素記号の左上の数字は質量数です。

普通の化学のように、原子の化学反応を扱うときには原子番号 Z が重要になります。しかし、原子核の反応を扱う場合には質量数が非常に大きな役割を果たすことになります。

元素記号がわかれば原子番号は自明です。しかし、同じ元素に属する原子でも、質量数の異なる原子があり、原子核反応ではこの質量数が非常に重要な役割を演じます。そのため元素記号には質量数は明記しますが、原子番号は省略するのが普通です。もし知りたければ周期表を見てください。

● 同位体の化学的性質はまったく同じ

原子番号 Z が同じで質量数 A が異なるものを、互いに「**同位体**」と言います。

原子核は重くてズッシリとして、いかにも原子の主のような顔(?)をしています。実は原子の性質や反応性を支配するのは、原子核ではなく電子なのです。ですから、原子番号の同じ同位体は、同じ電子雲を持つことになり、その化学的性質はまったく同じです。

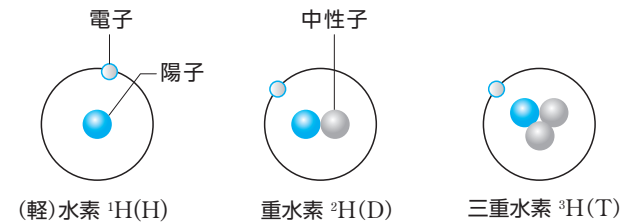
例えば、水素は原子番号が1ですが、3種の同位体があります。すなわち、質量数1（中性子数0個）の(軽)水素 ${}^1\text{H}$ 、質量数2（中性子数1個）の重水素(デューテリウム) ${}^2\text{H}$ (D)、そして質量数3の三重水素(トリチウム) ${}^3\text{H}$ (T)の3種です。

普通の水素の中には、この3種の水素が特定の割合で混じっています。

これら水素の3種の同位体の化学的性質や化学反応性はまったく同じです。したがって化学的性質の違いを使ってこれらの同位体を分離することはできません。

しかし、 ${}^1\text{H}$ と ${}^2\text{H}$ では重さが2倍違いますから、物理的な性質、すなわち運動速度や結合の振動強度などは違ってきます。そのため、このような運動性を利用して分離することは可能です。

図 5-2-2 • 同位体



元素名	水素			炭素		酸素		塩素		ウラン	
記号	${}^1\text{H}$ (H)	${}^2\text{H}$ (D)	${}^3\text{H}$ (T)	${}^{12}\text{C}$	${}^{13}\text{C}$	${}^{16}\text{O}$	${}^{18}\text{O}$	${}^{35}\text{Cl}$	${}^{37}\text{Cl}$	${}^{235}\text{U}$	${}^{238}\text{U}$
陽子数	1	1	1	6	6	8	8	17	17	92	92
中性子数	0	1	2	6	7	8	10	18	20	143	146
存在度 [%]	99.98	0.015		98.89	1.11	99.76	0.20	75.53	24.47	0.72	99.28
原子量	1.008			12.01		16.00		35.45		238.0	



5-3



原子核の構造はどこまでわかっているか

—— 原子核物理学の「魔法数」とは

原子は、1個の原子核と複数個の電子からなる力学系です。原子核と電子のあいだに働く力は、異なる電荷に基づく力(化学では静電引力、素粒子論では電磁気力と言います)です。

しかし量子論によれば原子核と電子のあいだには複雑な関係が生じ、その結果、原子は先に見たように複雑な電子構造となりました。

原子核も2種類の核子、すなわち複数個の陽子と複数個の中性子からなる力学系です。陽子と中性子も、単に素粒子グルーオンの力によって寄り集まって原子核をつくっているのではなく、何か、原子のような構造を持っているのではないのでしょうか？

● 原子物理学の「魔法数」とは？

原子核が原子のような、何らかの構造を持っているのか、あるいは構造はなく、単に2種類の核子が寄り集まっているだけなのかは、誰もが見つ疑問です。しかし20世紀中頃までは、原子核に構造はないと思われていました。

というのは、原子核に関する各種の実験が、この無構造モデルを支持していたからです。現に原子爆弾を完成した頃は無構造モデル

が全盛であり、そのモデルを前提に原爆がつくられ、一応の成功をおさめました。

しかし、その後、原子核の研究で「魔法数(magic number)」という数字があることがわかりました。魔法数とは、原子核物理学において、原子核が特に安定となる陽子と中性子の個数のことを言います。

現在、広く承認されている魔法数は 2、8、20、28、50、82、126 の7つで、原子番号がこれらにあたる元素は、原子番号が魔法数の周辺にある元素に比べて多くの安定同位体を持つことが知られています。

中性子数が魔法数に該当する同中性子体についても同様です。

例えば、原子核から1個の中性子を引き離すのに必要なエネルギーは、中性子数が各魔法数からそれぞれ1個増加したときに極小となります。

このような現象は、原子核が何がしかの構造を持っていないと現れないことです。ということで、現在は原子核にも構造があるとの説が有力ですが、その構造の詳細はまだ明らかにはなっていません。

● 原子核の可能な構造とは

原子を構成する粒子のあいだに静電引力が働いたように、原子核を構成する核子のあいだにも力が働きます。

それはプラスの電荷を持つ陽子のあいだに働く静電斥力(せきりょく反発する力)と、すべての核子のあいだに働く「核力」です。これらの条件を基にいろいろな可能性を考慮すると、原子核の構造として次の

