



中性子過剰核に現れる新魔法数 $N=16$

理化学研究所

谷畑 勇夫

tanihata@rikaxp.go.jp

1. はじめに

ケプラーは太陽の周りを回っている、水星、金星、地球、火星、木星、土星の軌道の長径が、水星を1として、金星はその約1.6倍、地球はさらに約1.6倍と、ほぼ同じ比で増してゆく事、そして、更に火星の1.6倍の軌道が抜けており、その軌道があるとすると、木星、土星も同じ規則性を持つ事を見つけた。そのことから、火星と木星の間には、まだ知られていない惑星があるはずだと予言した。その後、実際に小惑星と言われる一群の惑星があることが発見された。そして惑星の軌道の理解はニュートンによる万有引力の法則といわゆるニュートン力学の発展により理解されることになった。

また、メンデレフは元素の化学的性質を調べていくうちに、周期的に同じ性質の元素が現れることを発見し、周期律表を作った。これにより当時は知られていなかった元素の存在を予言した。現在でもこの周期律表は元素の化学的な性質を説明するもっとも重要な働きをしている。

このように自然界には、一見不思議な数字の並びが重要な働きをしていることが多く、「魔法数」と呼ばれる。たとえば元素では希ガスであるヘリウム(He)、ネオン(Ne)、アルゴン(Ar)、クリプトン(Kr)、キセノン(Xe)、ラドン(Rd)の原子番号2、10、18、36、54、86が魔法数と呼ばれる。魔法数を原子番号に持った元素は安定で化学反応を起こさないとする性質を持っている。さてこのような数字の列にどんな規則性があるのか？何故このような数が魔法数になるのかを理解するためには、原子が、その中心にある原子核とその周りを回っている電子で出来ており、クーロン力で引き合っていることを発見し、さらに、そのような微少な世界を記述する量子力学の発展を待たなければならなかった。逆に言えばこの魔法数を理解することが量子力学の発展を促す一つの要因であったと言ってもよい。

原子の中心にある原子核にも違った「魔法数」があることが知られている。原子核は陽子と中性子が核力（又は強い相互作用）により結合した集合体であるが、陽子や中性子の数が2、8、20、28、50、82のときに特に結合が強くなる事や、そのような数の陽子や中性子を持った原子核が、天然により多く存在することが発見され、「魔法

数」と呼ばれている。後で述べるが、魔法数は原子核の構造を決定する重要な基礎的な量となっている。

さて、このような原子核の魔法数は、自然界に存在する原子核の研究から発見されてきた。しかし原子核の中には寿命が短いために天然には存在しない原子核がある。これらの原子核は自然に崩壊して他の原子核に変化するため不安定核や RI (Radioisotope) と呼ばれる。天然に存在する原子核は安定で崩壊せず陽子の数と中性子の数のバランスがとれているが、不安定核は陽子と中性子の数のバランスがとれていない [図 1]。特に図 1 の安定原子核から遠く離れたものはエキゾチック核と呼ばれている。

最近、陽子に比べて中性数が多いエキゾチック核で、新しい魔法数 16 が発見された。これまでは、これらの不安定核でも魔法数は、変化せず安定核と同じであると考えられてきた。この新しい魔法数は、我々の知らない新しい規則があることを、示している可能性が大きい。ここでは原子核における魔法数の意味と、この新しい魔法数の発見がどのようになされたのかを、示そうと思う。

この発見は、最近の RI ビームという、全く新しい実験法の開拓によって、エキゾチック核の研究が急速に拡大され、可能となったのである。RI ビームは、10 数年前に発明された新しいものではあるが、その後急速に世界中に広がった。21 世紀の広い意味の核科学を支える、最も重要な研究法と考えられており、世界中で注目されている。

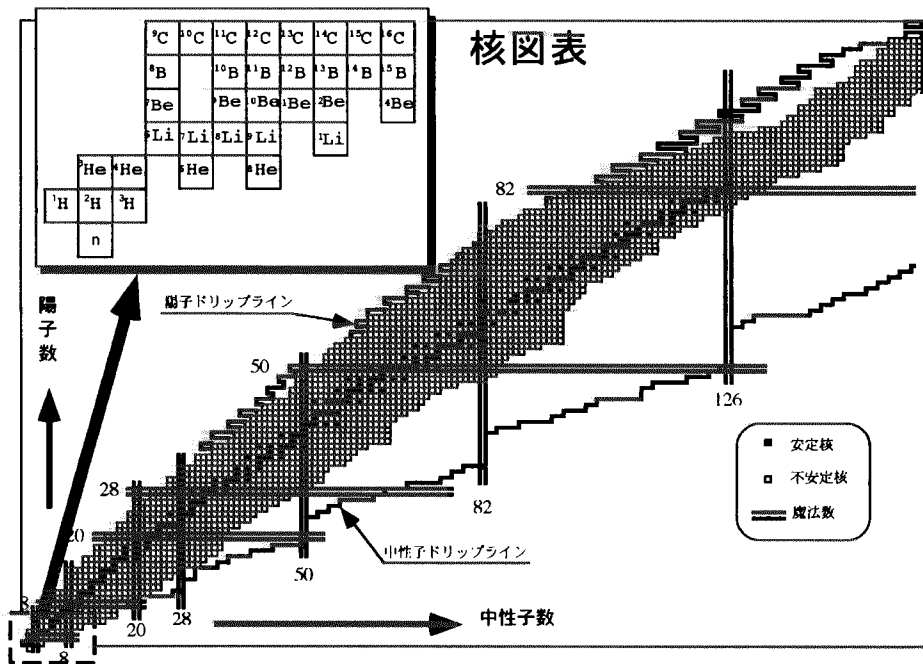


図 1 核図表

図 1 核図表.

2. 魔法数が変化する

2.1 原子核の基礎

ここで少し核図表(図1)を見ながら、原子核の基礎知識を振り返ってみよう。原子核は正の電荷を持った陽子(p 又は ${}^1\text{H}$)と電荷を持たない中性子(n)の結合体である。陽子と陽子、中性子と中性子の間には引力が働くが、その強さは十分でなく結合はしない。しかし陽子と中性子間の引力はつよく結合して重陽子(d 又は ${}^2\text{H}$)を作る。

重陽子は、陽子と結合しヘリウム-3(${}^3\text{He}$)をまた中性子と結合しトリチウム(${}^3\text{H}$)を作る。(図1に拡大部分)このように原子核は陽子の数(Z)と中性子の数(N)で分類され、図の中の一つ一つの四角が種類の原子核を表している。

陽子と中性子は質量がほぼ等しいので、陽子数と中性子数の和を、原子核の質量数(A)と呼ぶ。また陽子と中性子を区別せずに核子と呼ぶことがある。質量数は全核子の数でもある。質量数の小さいものを、軽い核、大きいものを、重い核と呼ぶ。同様に陽子数の大きい元素を、重い元素と呼ぶ。

図中黒で塗られた四角で示したものが、安定核と呼ばれるもので、結合が強く自然に崩壊して違った原子核になることはない。陽子と中性子の結合力が強いいため、軽い核では陽子数と中性子数がほぼ同じものが、安定核となる。重い核になると、陽子同士の電荷による反発力が強くなり、その反発力を弱めるために、中性子の数が少し多いものが安定核となっている。

それ以外の原子核は不安定で、放射線を出して崩壊により安定な原子核に変化していき、最後に安定核にたどり着く。安定核に比べて中性子の数が多い不安定核を、中性子過剰核と呼び、陽子が多いものを陽子過剰核と呼ぶ。

さて、ある安定核に中性子を加えてゆくと、もうこれ以上結合しなくなる極限がある。中性子を加えても、くっつかずにこぼれてしまうイメージから、これを中性子ドリップの極限と呼ぶ。陽子数の異なる原子核の、この極限をつないだものを、中性子ドリップ線と呼ぶ。また逆に、陽子を増した場合の極限を、陽子ドリップ線と呼ぶ。これらの極限は、これまでの原子核の理論で予測されたものであり、すべての原子核はこの二つの線の間に存在する。

不安定核のほとんどは地上に存在しない。地上にはそれを作り出す機構がないからである。不安定核は人工的に加速器や原子炉を使って作られる。図中白抜きの四角がそれを示している。地上に存在する原子核は約270種、これまでに人工的に作られたものは2000種を越すようになったが、予測される原子核の数は6000種とも8000種とも言われている。図から分かるように、まだ存在の確認すらされていない原子核の方が、多いのである。

2.2 魔法数とその起源

魔法数は、原子や原子核がシェル(殻)構造を持っていることに起因している。原子の場合をまず例としてみてみよう。原子は、正電荷を持った原子核の周りを、負電荷を持った電子が決まった軌道上を回っているものである。回っている電子の数は、原子核の正電荷をうち消すだけ必要であり、原子核の電荷量は、その中の陽子数で決まっている。原子番号は電子の数でもあり原子核の中にある陽子の数でもある。

電子は違った半径を持ち、違ったエネルギー状態にある粒子軌道にある。量子力学の決まりにより一つの粒子軌道に電子は決まった数しか入れない。この軌道がグループとなってシェルを作っている。おのおののシェルに入り得る電子の数が決まっているため、いっぱいになったところで殻が閉じてしまい、反応性がなくなる。それが原子における魔法数の意味であった。

原子核は、太陽系や原子のように、中心に特別重い物質があるわけではなく、同じ重さの陽子と中性子の集まりである。このようなときに、構造はどのようなものだろうか？最初はガスの固まりや、液滴のようなものであり、殻の構造は持たないと考えられた。ところが結合の強さや、粒子の分離エネルギー、地上における元素の存在比などから、やはり魔法数が存在することがわかった。すなわち、陽子数又は中性子数が2、8、20、28、50、82、126である。これらは図1で二本の平行線で囲んで示されている。魔法数の存在は、原子核が殻構造を持っていることの反映であり、同種類の粒子が集団で結合状態を作ったとき、ある秩序が表れることを示している。また陽子と中性子が、ともに魔法数である原子核を二重魔法核と呼び、特に結合が強い。

1948年メイヤー(Meyer)とイェンセン(Jensen)は、原子核を結合させている核力の中に、新しい相互作用(軌道・スピン相互作用)を導入することにより、マジックナンバーが導出できることを示し、その発見によりノーベル賞を得た。その理論は、すべての魔法数のみごとに説明し、それを基にした殻模型(シェルモデル)は、原子核の性質を説明する強力な道具となった。この模型のもとに、どのように魔法数が現れるのかを見てみよう。原子核中の陽子や中性子は、核力で作られるポテンシャルの中を、自由に運動しているとする。ポテンシャルは、原子核の核子の密度分布とほぼ同じであり、ウッズーサクソン型と呼ばれる図2に示すような形をしている。この形をしたポテンシャル中での粒子軌道を計算すると、エネルギーの順番として、s軌道、p軌道、sd軌道、fp軌道...の順序にならぶ。核子はフェルミ粒子なのでおのおのの軌道には2個、6個、12個、20個...の陽子又は中性子が入り得る。このままだと魔法数は2、8、20、40...となって20まではよいが、28は出てこず逆に40と言う余分なものが出てくるし、それ以上の魔法数も、あわなくなってしまう。

そこで、メイヤーとイェンセンは新しい力「スピン・軌道」相互作用を導入した。これはスピン角運動量と軌道角運動量の方向が、同じ時と逆向きの時では、エネルギーが

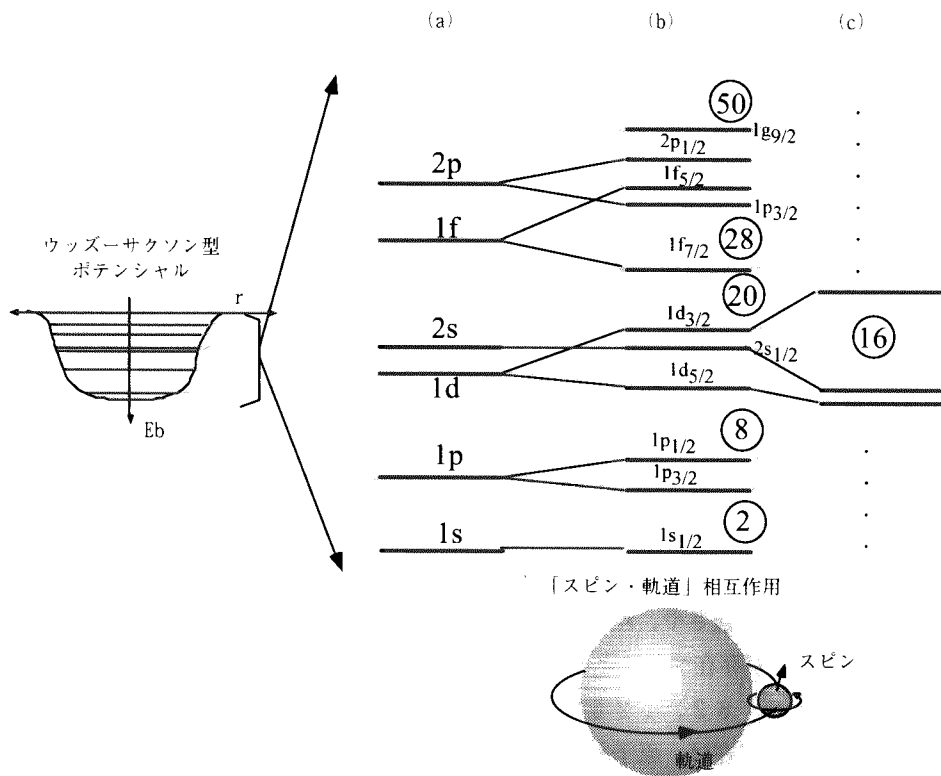


図2 原子核の粒子軌道の順序

変化する力である。回転しているボールを、もっと大きなボールの表面で走らせるとき、ボールの回転の方向へ走らせるのと、逆の方向へ走らせるのでは、必要な力が違うということと類似のものである。これにより、s軌道をのぞいて他の軌道はそれぞれ二つに別れてしまう。例えば $L=1$ であったp軌道には核子のスピン ($1/2$) が加わったものと差し引かれたもの、それぞれ $3/2$ と $1/2$ 、二つの違った全角運動量(J)を持った軌道に別れる。角運動量がそろったときには、エネルギーは下がり、逆の時にはエネルギーは上がる。また容易に想像できるように、角運動量が大きいくほど、この差は大きくなる。

このようにして計算された、軌道の順序は、図2の(b)のようになり、エネルギーの間隔が広がったところが、シェルを区切るところになる。見事にすべての魔法数が出現する。すなわち、原子核における魔法数の存在は、同種粒子が集まった系にも、軌道が存在すること、さらに核子を結びつけている力(核力)の中で、スピン・軌道力が重要であることを示しているのである。

またこの理解で重要なところは、陽子と中性子はおのおのの独立に運動しており、そのため魔法数も別々にある。すなわち陽子のマジックナンバーは、中性子数によらず、上記のような値を持ち、また中性子のマジックナンバーは、陽子数によらないと考えられ

た。

メイヤーとイェンセンのこの考えはシェル（殻）模型と呼ばれ、核構造を定量的に理解できる理論として、最も重要なものとなってきた。ただここで注意しておきたいのは、このような理論は、安定核とそのごく周辺の不安定核の研究により、作られてきたものであったと言うことである。

2.3 不思議な不安定核

さて最初に述べたように最近になって、不安定核のビーム（RI ビーム）が利用できるようになり、不安定核の研究が急速に進んだ。中でもそれまでは不可能であった、原子核の大きさや核子密度分布の研究が可能となり、いくつもの予想されなかった形の原子核が発見された。その中でも最も注目されているのが中性子スキンと中性子ハローである。

それまで、原子核の中では陽子と中性子は、一様に混合されたものであると信じられていた。そのため、前述のポテンシャルも、陽子と中性子ではほぼ同じものであり、またそのために魔法数は同じ数になっていた。ところが、ナトリウム(Na)のアイソトープでは、中性子が増すにしたがい半径が増していくのに、その中の陽子の分布半径ほとんど変化しない、と言うことが明らかとなった。これは、中性子の分布半径だけが、ぐんぐん増していき、中性子過剰なアイソトープでは、表面付近に中性子の層を作っていることを示している [図3参照]。この層は中性子スキンと呼ばれるようになった。今では中性子スキンは、中性子過剰核では一般的に存在すると考えられており、陽子過剰核では逆に陽子スキンがあるものと考えられる。何と、陽子の分布と中性子の分布が同じなのは、安定核だけの性質であったのである。

次に、中性子ドリップラインの近くの原子核、 ^{11}Li 、 ^{11}Be 、 ^{14}Be 、 ^{10}B 、 ^{10}C などの原子核では、半径が異常に大きくなっており、中性子ハローと呼ばれる、密度の非常に薄い（通常の原子核の $1/100$ 以下）中性子の霧が、原子核を取り巻いているせいであることが発見された。

これらの例が示すように、安定核では現れなかった性質を持った原子核が、次々と発見された。最初は、これらは特殊なものと考えられていたが、今となっては逆に、一般的と考えられていた安定核の性質や法則が、実は非常に限られた範囲（すなわち安定核とそのごく周辺）でのみ成り立つものであることがわかってきた。特に、陽子と中性子はいつもの同じふるまいをするわけではないことが、新しい事である。

原子核の性質を決める、基本的な量である、魔法数は大丈夫であろうか？

2.4 魔法数が消える？

まず最初に発見されたのは、中性子過剰な原子核では、中性子数 20 の魔法数が、な

なくなってしまうことであった。 $N=20$ の安定な核は ^{40}Ca ($Z=20$)、 ^{39}K ($Z=19$)、 ^{38}Ar ($Z=18$)、 ^{37}Cl ($Z=17$)、 ^{36}S ($Z=16$) と多くあり、これらの場合にも $N=20$ の魔法数は、はっきりとしている。ところがジュネーブにある CERN 研究所で、Na のアイソトープの質量の測定したところ $^{30,31,32}\text{Na}$ ($Z=11$, $N=19,20,21$) の質量に異常があり、魔法数がある場合とは違うことが、発見された。また立教大学の本林らの理研における ^{32}Mg ($Z=12$, $N=20$) の研究で、この原子核でも $N=20$ の魔法数は、消えていることが見出された。その後も研究は進められ、陽子の数を減らしてゆくと、Mg より陽子が少ないときには魔法数がないことが確認された。また、その原因としては、この付近の原子核が球形でなく（魔法数の原子核は球形であることが知られている。）フットボールのように変形していることが考えられている。

つづいて、中性子数 8 の場合にも、陽子数が 4 以下 (^{12}Be , ^{11}Li) で魔法数 $N=8$ が消えていることが見いだされた。 ^{11}Li やその周辺の原子核では、中性子ドリップラインに近く、前述の中性子ハローなど異常な構造が見つかっている。これらの原子核の構造を調べてみると、本来魔法数により分離されていた、違ったシェルの状態が、混ざり合っていることがわかった。また陽子、中性子共に魔法数であり、強い結合で存在すると期待されていた原子核 ^{10}He ($Z=2$, $N=8$) が、束縛状態としては存在しない理由が、魔法数の消滅にあると理解された。

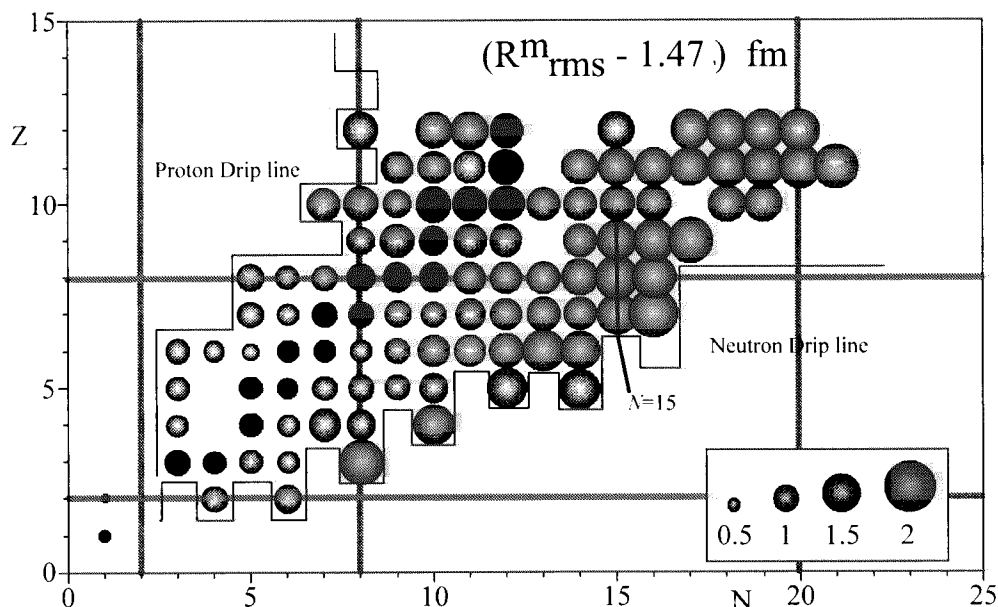


図3. 不安定核ビームを用いて測定された核半径。陽子中性子数の変化により原子核の半径が大きく変化することがわかる。中性子ドリップライン付近で特に大きい物が中性子ハロー核である。 $N=15$ で半径が急激に大きくなっていることがわかる。

さてこのように、中性子が過剰な原子核では、魔法数が消滅してしまうことが分かったが、これが大きな疑問を呈することとなった。中性子数が陽子数より極端に大きい核では、殻の構造が消えてしまって、秩序の無い（たとえば、ただ液滴のようにどこを見ても粗密の無いような）構造になってしまうのであろうか。それとも、まだ知られていない新しい秩序が表れるのだろうか？この疑問に答えるためには、新しい魔法数が存在するのかが決定的な証拠となる。

2.5 新しい魔法数 $N=16$ の発見

理化学研究所、新潟大学、東北大学の共同研究グループは、RI ビームを用いて原子核半径の測定を世界に先立って始め、これまで中性子ハローや、スキンなどを発見してきた。最近、このグループは窒素、酸素、フッ素などの不安定同位体の核半径の測定に初めて成功した。この結果、核半径が中性子数15、16で異常に大きくなることを発見した（図3）。また同時にこれらの原子核の安定度の指標となる中性子の分離エネルギーを解析したところ中性子過剰な場合のみ（フッ素は $Z=9$ 、酸素は $Z=8$ 、窒素は $Z=7$

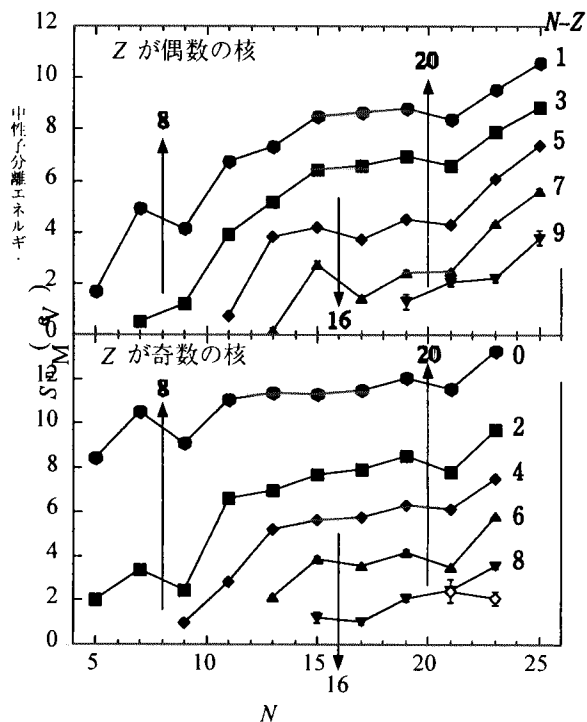


図4. 中性子の分離エネルギーを中性子数(N)の関数として示した。中性子数と陽子数(Z)の差により別の線で結合した。マジックナンバーはこの図で線の折れ曲がりとして現れる。

であり、中性子が陽子に比べて二倍程度多い) 中性子数が16のところでも特に安定であることが確認された。

図4にはまた種々の核種の中性子分離エネルギー(S_n)を中性子数の関数としてプロットしたものが示されている。中性子数と陽子数の差が同じ原子核の分離エネルギーが線で結ばれている。原子核が重くなるにつれ結合は少しずつ強くなってゆくために、各々の線はゆっくりとした右上がりになっている。しかし、陽子と中性子の数が同じか、差が小さな場合には、中性子数が8や20をすぎるところでコトンと下がっており、これがマジックナンバーの存在を示している。一方16のとこ

ろには、何ら特別な変化はみられない。ところが、中性子が陽子より多くなるに従って、8と20のこの変化は少なくなり消えてしまう。魔法数の消滅である。さらに、中性子が陽子より6個以上多いところでは、このコトンが16のところ突然現れる。新しいマジック数が現れたことがこのようにしてわかる。半径が異常に大きくなるのは、2s軌道という大きな広がりを持った軌道に中性子が入りそれが他の軌道と混合しないということを示しており、これもマジックナンバーの生成を示している。

中性子過剰な原子核に、新しい秩序が表れることが示されたのである。

2.6 魔法数の変化の理由

なぜこのような変化が起こるのかは興味のある問題である。図2では粒子の軌道による魔法数の説明を示したが、この場合16という数字が、どんな意味を持っているのか見てみよう。通常の原子核では、16はいわゆるsd殻と呼ばれる殻構造の中に埋もれている。すなわち8から20までの中性子数（や陽子数）を持ったものはs軌道とd軌道が混ざり合った状態であると考えられる。今回の発見は、何らかの理由で $s_{1/2}$ 軌道と $d_{3/2}$ 軌道の間隔が大きく広がり、マジックナンバーになったものと考えられる。また20の消滅は、元々大きな間隔があった $d_{3/2}$ とその上の軌道が、近づいて混合していることを示している。

軌道が変化する原因としては、1. 陽子や中性子の分布が変化することによるポテンシャルの形の変化、2. ドリップラインに近づいたための束縛エネルギーの変化、3. 原子核が球形から違った形への変形、4. 軌道・スピン相互作用の変化、5. 新しい相互作用の出現、などが考えられる。新マジックナンバー16の出現はこのうち1、2の影響ではないかと考えられるが、正確な理解のためには今後の研究を待たなければならない。

2.7 プロローグ

これまで変化しないと考えられていたマジックナンバーが、中性子過剰核では違う数に変わってしまうことが発見されたわけである。寿命の短い中性子過剰核では、これまで安定な原子核の研究で作られてきた理論が当てはまらない構造が次々と見つかってきていたが、このようにルールがただ壊れるだけでなく、新しい秩序として表れる事例が、初めて観測されたことになる。これにより、これまでのような安定核周辺だけではなく、中性子過剰核を含めた核構造の解明に大きな一歩が刻まれたことになる。

この度の発見は軽い元素によるものであるが、より重い元素でマジックナンバーがどのように変化しているかは今後の興味ある問題である。たとえば50や、82やその付近でのマジックナンバーの変化は、核構造の見地からだけでなく、宇宙における元素の合成という観点からも興味を持たれる。