

# Elusive magic number

## 捕まえにくい魔法数

Robert V. F. Janssens



核準位のギャップは、陽子あるいは中性子の数が「魔法数」となる原子核をとくに安定化させるが、中性子を過剰にもつ核に対してはちがうようだ。しかし、そのようなエキゾチックな核種では、すべての魔法数が普通と異なるのだろうか。

Nature VOL 435(897-898)/16 June 2005

殻構造の考え方は、原子核を理解するうえで欠くことのできない補助手段としてしばしば使われる。しかし、特定の核の殻を満たすのに必要な陽子と中性子の正確な数は、まだはっきりとはわかっていない。中性子を過剰にもつケイ素  $^{42}\text{Si}$  の核の研究で、Fridmann たちはこの議論に大きく貢献した<sup>1</sup>。

殻構造の概念は原子論でよく知られている。最も外側の電子を原子から取り去るのに必要なエネルギーは、原子番号によって異なる。電子の外殻が満たされている特定の原子は、それ以外の原子よりも強固に束縛されており、それゆえ化学的にとくに安定で、たやすく他の原子と結合したり分子をつくったりしない。このような元素が希ガスである。ヘリウムやネオン、アルゴン、クリプトン、キセノン、ラドンがそうだが、それぞれ合計で、2個、10個、18個、36個、54個、86個の電子をもつ。

最も外側の陽子か中性子を原子核から取り去るのに必要なエネルギーは、核内の陽子数  $Z$  および中性子数  $N$  の関数として似たような不連続性を示す。陽子数か中性子数が 2、8、20、28、50、82 の天然に存在する核はより安定している。中性子では 126 もこのような魔法数であり、その 1 つの例として鉛の同位体  $^{208}\text{Pb}$  (陽子数 82、中性子数 126) がある。1963 年にノーベル物理学賞を受けた原子核の殻モデル<sup>2</sup> は、陽子と中性子が核ポテンシャルの明確な準位を占めると説明しているが、これら 2 つの殻の間のエネルギーに大きなギャップが生じると魔法数があらわれる。

ここ 10 年くらいの間に行われた研究によって、魔法数がこれまで考えられていたほど不変ではないことがわかってきた。これまでは、安定な原子核から大き

く異なる陽子数と中性子数をもつ軽い核に研究の主眼がおかれてきたが、それ以外の核が対象とされなかったわけではない<sup>3</sup>。魔法核であると予想されていたいくつかの核が、著しく強固には束縛されていないことが判明している (図 1)。これに対して、陽子数よりも中性子数がずっと多い「エキゾチック」核に、新しい魔法数があるという徴候がある (図 1)。このような実験報告から、魔法数を生みだす一連の核準位に存在するギャップは、陽子と中性子の間のバランスに左右されることがわかるが、その機構についてはさらに深い研究が必要である。しかし、エキゾチックな核種では、すべての魔法数が普通と異なるのだろうか。Fridmann たちの  $^{42}\text{Si}$  に関する研究<sup>1</sup> は、そうではないことを示している。

自然界では、ケイ素 ( $Z=14$ ) にはそれぞれ 14、15、16 個の中性子をもつ安定同位体が存在する。 $^{42}\text{Si}$  は、最も重い安定同位体より 12 個も多い 28 個の中性子をもつ。このような極端にアンバランスな核の生成とその研究は、近年になって初めて可能になった。Fridmann たちは中性子の過剰なカルシウム  $^{48}\text{Ca}$  のイオンを加速してベリリウムの標的に当て、破砕片分離装置<sup>4</sup> を用いて生じた破砕片からイオウ  $^{44}\text{S}$  を選別。それを別のベリリウム標的に向けた。2 番目のステップでは「2 陽子ノックアウト」反応を起こすことができ、 $^{42}\text{Si}$  が生成する。それは磁気分析器<sup>5</sup> で同定できる。この反応で最低エネルギー (基底) 状態のケイ素が生成するが、よりエネルギーの高い状態のケイ素も生成し、高エネルギー状態のケイ素は  $\gamma$  線を放出して、ほとんど瞬間的に基底状態に遷移する。標的をとりまく  $\gamma$  線検出器 18 台からなるアレー型検出器によって、この過程は検出される。

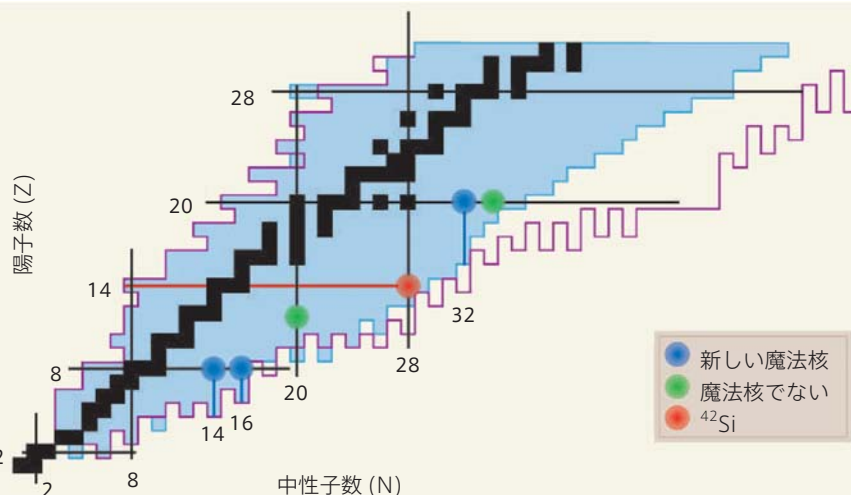


図1 核の図表

水素 (陽子数  $Z=1$ ) から亜鉛 ( $Z=30$ ) までの安定元素を黒いマスで示す。他のすべての束縛された核は、薄い青色の領域に含まれる。「ドリフライン」(紫色の線)では、中性子と陽子の間の力はもはや核を1つにまとめておくのに十分な強さが無い。黒の垂直線と水平線は、安定核に当てはまる魔法数 2、8、20、28 を示す。いくつかの予想された「魔法」核は、実際には魔法核ではない(緑の点)。ベリリウム同位体  $^{12}\text{Be}$  ( $Z=4$ , 中性子数  $N=8$ ) とマグネシウムのエキゾチック核  $^{32}\text{Mg}$  ( $Z=12$ ,  $N=20$ ) は、その例である。二重に魔法数をもつ普通の酸素同位体  $^{16}\text{O}$  ( $Z=N=8$ ) 以外に、中性子を 20 個もつ酸素同位体  $^{28}\text{O}$  もとくに安定であるはずだが、実験によって束縛すらされていないことが示されている。逆に、中性子が過剰な核の  $N=14$ 、16、32 のところに新しい魔法数が存在する徴候がある(濃い青色の点)。Fridmann たち<sup>1</sup>の研究の主たる対象であるケイ素同位体  $^{42}\text{Si}$  を赤い点で示す。

2陽子ノックアウトは実験中に起こる多くの反応の1つに過ぎず、別の反応ではイオウの原子核から陽子が1個取り除かれてリンの原子核  $^{43}\text{P}$  が生成した。Fridmann たち<sup>1</sup>は  $^{43}\text{P}$  の励起について研究し、役に立つ補足情報を得ることができた。

$^{44}\text{S}$  から2陽子ノックアウトが起こる確率は、実はきわめて低い。実験データを「アイコンナル」理論<sup>6</sup>を用いた計算と比較することで、Fridmann たちは  $^{42}\text{Si}$  が実際に魔法核の特徴をもっている場合でしか、このことを説明できないことを示した。アイコンナル理論は質量数 40 以上の入射角については詳細に検証されていないため、Fridmann たちは実験の対照標準として、 $^{46}\text{Ar}$  (最初の  $^{48}\text{Ca}$  ビームの別の破砕片) から構造のよくわかっている  $^{44}\text{S}$  への2陽子ノックアウトも計測した。

$^{42}\text{Si}$  の研究は、この核では中性子がきわめて過剰であるにもかかわらず、魔法数  $N=28$  が有効なままであることを示している。しかし、実験観測結果を十分に説明するには、陽子数  $Z=14$  も同様に魔法数である必要がある(これまででは、 $N=14$  だけがエキゾチック核の魔法数であることが示されていた)。したがって、このケイ素同位体は魔法数を二重にもち、核はほぼ球形であることになる。

このような結果から、核の殻構造を成る相互作用の特徴の一部は、安定核の性質からは容易には明らかにならないといえる。むしろ、このような特徴は安定な系から遠く離れて存在するエキゾチックな系で拡大

する。あらゆる核をうまく説明するには、陽子数と中性子数の変化にともなう核の殻構造の変化の原因となる機構を解明することが課題として残る。

核を束縛する力のこのような特徴が安定核ではさほど重要でないならば、どうして気にするのだろうか。その理由は、自然は安定核だけを扱っているわけではないからだ。つまり、恒星内部での核反応のような過程、とくに炭素や酸素よりも重い核を生成する星の爆発での核種合成過程には、しばしば安定からはほど遠いエキゾチック核が含まれているのだ。恒星内の条件下では反応の時間スケールは非常に短い場合が多く、そのためにいったん不安定核が生成すると、崩壊する前に核反応に巻き込まれる。宇宙で元素がつくられ続ける機構の解明には、元素生成の反応速度を計算する能力が必要である。このような反応速度はエキゾチック核の殻構造に決定的に左右される。だからこそ、ある魔法数が存在するかしないかは殻構造に大きな影響を及ぼすのである。 ■

アルゴン国立研究所 (米)、Robert V. F. Janssens

1. Fridmann, J. et al. *Nature* **435**, 922-924 (2005).
2. Mayer, M. G. & Jensen, J. H. D. *Elementary Theory of Nuclear Shell Structure* (Wiley, New York, 1955).
3. Warner, D. *Nature* **430**, 517-518 (2004).
4. Morrissey, D. J. et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **204**, 90-96 (2003).
5. Bazin, D. et al. *Nucl. Instrum. Methods Phys. Res. B* **204**, 629-633 (2003).
6. Hansen, P. G. & Tostevin, J. A. *Annu. Rev. Nucl. Part. Sci.* **53**, 219-261 (2003).