

^{54}Ca で発見した新しい魔法数

大塚 孝治

Otsuka Takaharu

1. はじめに

原子核は核力の豊かさを反映して、極めて複雑な多体系であり、複合核模型などにそれが表れている。しかし、一方では単純な規則性を合わせ持つ。特に M.G. メイヤーと J.H.D. イェンゼンによって 1949 年に提示された魔法数^{*1}と殻模型は、そのような規則性の典型である¹⁾。それ以来、メイヤー・イェンゼンの魔法数 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 は、全ての原子核に共通に成り立ち、それらの構造を基本的に規定するものと考えられてきた、と言っても過言ではない。

普遍的な魔法数・殻構造のパラダイムは、地球上の物質を構成する安定核^{*2}で成り立っているのは確かそうである。しかし、陽子数 (Z) と中性子数 (N) がアンバランスなエキゾチック

原子核^{*3}でそれが成り立つかどうかは、現代の原子核物理学が解明すべき基本命題の 1 つである。エキゾチック原子核は β 崩壊に関して短寿命なため、この命題への実験的なアプローチは決して容易ではない。特に ^{54}Ca はこれから述べる特別な重要性を持つにもかかわらず、半減期は 86 ms と短い。さらに、それを大量に生成することが難しく、それについての実験は長く実現しなかった。しかし、この度理化学研究所の世界最大最強の重イオン加速器 RIBF (Radioactive Ion Beam Factory) がその実験に世界で初めて成功した。その結果、新しい魔法数 $N=34$ の存在が確認され、その論文は雑誌 *Nature* に掲載された²⁾。ここでは、この成果について、その意義を含めて簡単に説明したい。

2. メイヤー・イェンゼンの魔法数

まず、メイヤー・イェンゼンによる魔法数・

^{*1} 魔法数： Z 又は N がその数になった時に、基底状態が特に安定になって、外から大きなエネルギーを与えないと励起できない数を指す。原子核内の陽子、中性子ともに、原子核全体から束縛された軌道上を運動している。それらは、図 1 に示されているような殻構造を成している。エネルギーの低い軌道から順に陽子、あるいは、中性子を詰めていく。ある軌道まで完全に詰めると、原子核を励起させるには上の軌道に粒子を持ち上げないといけない。隣り合った軌道間のエネルギーの差が大きいと、上記の状況となり、安定性が生じる。そこで、魔法数は、大きな軌道間エネルギー差と結びついている。

^{*2} 安定核：半減期が無限か、それに近いくらい長い原子核である。地球上の物質を構成する原子核は安定核であり、300 種くらいある。軽い核では、 Z と N が近く、重い核では $Z:N \sim 2:3$ くらいになる。

^{*3} エキゾチック核：安定核以外の原子核である。主として β 崩壊による半減期がある。 Z と N の比が安定核に比べてアンバランスである。クーロン斥力のために Z が N に比べてあまり大きくはならないが、 N は Z に比べて最大で 3 倍くらいになる。

殻構造を図1に示す³⁾。これはメイヤーとイェンゼン自身による解説図の一部であり、一粒子軌道エネルギーが下から順に模式的に示されている。魔法数は一番右端に示され、図の中央やや左寄りには軌道が示されている。魔法数20の上に $1f_{7/2}$ 軌道がある。 $1f_{7/2}$ の上には魔法数28があり、その上に3本の軌道 $2p_{3/2}$, $1f_{5/2}$, $2p_{1/2}$ がこの順に現れる。このようなパターンが現れるのはスピン軌道結合力 (ls 力) の効果のためである。核力の場合、軌道角運動量を l で表すと、スピン軌道結合力は $j_>=l+1/2$ の軌道の一粒子軌道エネルギーを下げ、 $j_<=l-1/2$ の軌道のそれを上げる。今の場合には $1f_{7/2}$ ($l=3$) と $2p_{3/2}$ ($l=1$) が押し下げられ、 $1f_{5/2}$ ($l=3$) と $2p_{1/2}$ ($l=1$) が押し上げられることになる。特に、 l が大きい $1f_{7/2}$ への効果が大きく、魔法数28が出現する。魔法数28はメイヤー・イェンゼンの魔法数の1つであり、以上述べてきたことはメイヤー・イェンゼンの描像にほかならず、原子核の教科書に必ず書かれていることである。

図2では、 $N=34$ の Fe ($Z=26$), Cr ($Z=24$), Ti ($Z=22$), Ca ($Z=20$) のアイソトーン (同調体) での一粒子

軌道エネルギーが示されている。図2の左端に示されている⁶⁰Feでは、中性子の $1f_{5/2}$ が $2p_{3/2}$ と $2p_{1/2}$ の間にあり、図1のとおりになっている。⁶⁰Feは半減期262万年のほとんど安定なアイソトープである。

3. テンソル力と一粒子軌道エネルギー

図1に示されている殻構造がどの原子核でも成り立つか、という問い掛けは極めて自然なはずであるが、長い間、少なくともまじめには取り上げられなかったようである。筆者自身、そういう問題があり得るということを学生時代の講義などで聞かされたことはなかった。実際、核力が2粒子間の距離だけに依存する中心力だ

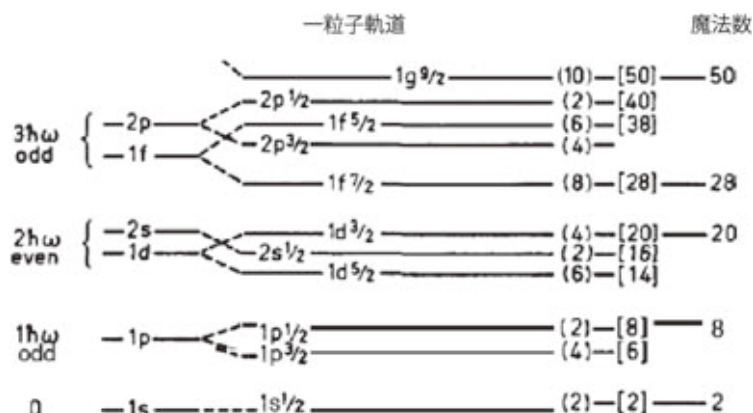


図1 原子核の一粒子軌道と魔法数
メイヤー・イェンゼンの教科書³⁾に掲載されている図のエネルギーの低い部分に基づいている

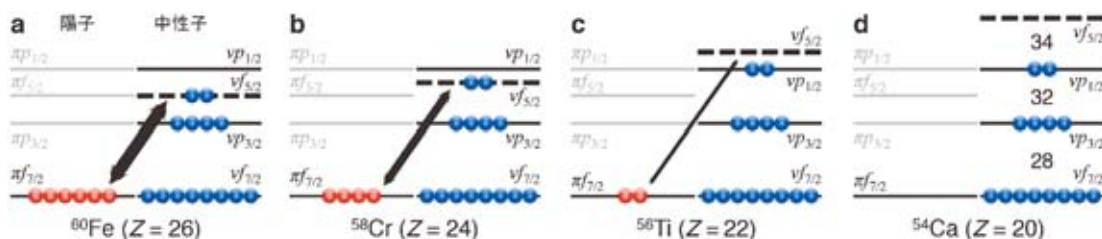


図2 Fe から Ca までの $N=34$ 同調体原子核での中性子の一粒子軌道エネルギー
赤丸は陽子を表し、青丸は中性子を表す。エネルギーの低い軌道から順に埋めていく場合を示している。中性子の $1f_{5/2}$ は破線で示されている。両方向の矢印は $1f_{7/2}$ にいる陽子と $1f_{5/2}$ にいる中性子間の力を表し、太さはその強さを模式的に表す。実験論文²⁾の図を基に作成した

けであれば、それは概ね正しい。

しかし、核力が中心力だけでないことは明らかである。2つの核子（陽子と中性子の総称）の間でパイ中間子が交換されることにより、テンソル力という不思議な力が発生する。テンソル力は2つの核子のスピンの向きが同じ方向を向いた時にのみ働く。2核子の間の距離にも依存するが、同じ距離でもスピンと同じ方向に2核子の位置がずれていれば引力、直角方向にずれていれば斥力になる。その性質から、図3に示されているように、陽子が $j_>=l+1/2$ に入ると、中性子のスピン軌道分岐が減少する⁴⁾。図3の効果はテンソル力のモノポール成分^{*4}によっており、それは $j_>$ 軌道にある陽子数に比例する。このような粒子数へのリニアな依存性はモノポール成分に特有なものである。

本稿で考えている場合に、テンソル力の効果を適用してみよう。ここから先に述べるメカニズムは、メイヤー・イェンゼンのモデルには含まれていない。陽子の $j_>$ を $1f_{7/2}$ とし、中性子の $j_<$ を $1f_{5/2}$ とした時に、そのエネルギーがどう変化するかを考えたい。図2の⁶⁰Feでは、 $1f_{7/2}$ に6個の陽子があり、図3の効果は既に発生している。つまり、鉄原子核の実験から知られている中性子の一粒子軌道エネルギーにはこの効果は含まれている。そうすると、そこから出発して、 $1f_{7/2}$ にある陽子を除いていくと何が起こるだろうか？ 図3の効果は弱まるので、 $1f_{5/2}$ のエネルギーが上がっていくことになる。元素で言えば、FeからCr、Ti、Caと陽子数(Z)が減るに従って、 $1f_{5/2}$ が上がっていくことになる。これは、ほとんど安定な⁶⁰Feから、β崩壊に対してより不安定な（短寿命な）同調体、すなわち、よりエキゾチックな原子核に進んで行く時の変化である。⁵⁶Tiの段階で $1f_{5/2}$ は

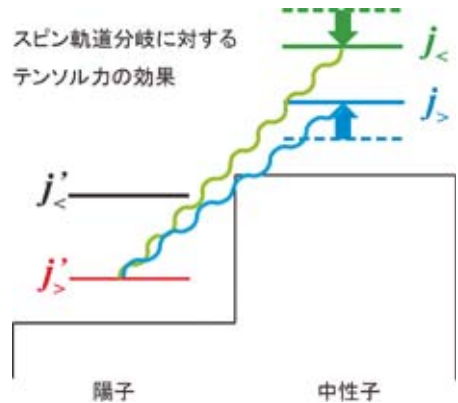


図3 スピン軌道分岐に対するテンソル力の効果の解説図
波線はテンソル力を表す

$2p_{1/2}$ の上に抜けてしまう。この結果、 $2p_{3/2}$ と $2p_{1/2}$ の間には軌道がなくなりエネルギー・ギャップが発生して、 $2p_{3/2}$ までの閉殻を作る魔法数 $N=32$ が発現する。この $N=32$ 魔法数は実験的には30年前から知られていた⁵⁾。

さらに、⁵⁴Caまでいくと $1f_{7/2}$ には全く陽子がなく、中性子の $1f_{5/2}$ のエネルギーは、上述のリニア依存性のために、更に上がって $2p_{1/2}$ との間のエネルギー・ギャップが大きくなる。その結果、 $2p_{1/2}$ までが完全に埋まった $N=34$ が魔法数となる。⁵⁴Ca原子核の場合、陽子数が $Z=20$ で魔法数になっているので、中性子数が $N=34$ で魔法数になると、二重魔法数となり、基底状態は二重閉殻構造を持ち、極めて安定な基底状態を持つことになる。つまり、⁵⁴Ca原子核は、β崩壊に関しては短寿命であるが、二重閉殻性という原子核内部の励起に関する安定性を、核力の特徴の結果として持つことになる。

以上が、 $N=34$ 魔法数が現れるメカニズムであり、それが⁵⁴Caにおいて起こり得る。核力による殻構造の変化は殻進化 (shell evolution) として2005年に筆者らによって提唱され、特にテンソル力による殻進化が理論的に示された⁴⁾。それに先立って、2001年にはテンソル力のモノポール効果が部分的に分かっており、それに基づく $N=34$ 魔法数の予言が成されている

*4 j 軌道と j' 軌道にある2つの核子の間に働く2体相互作用の行列要素を角運動量の z 成分について平均した量。2つの軌道の間に関与する相互作用の平均的強さを表す。

た⁶⁾。それ以来、魔法数の持つ重要性から、実験的な検証が世界中の重イオン加速器によって試みられてきたが、一向に成功しなかった。なかなか成功しないのを受けて、 $N=34$ 魔法数の存在への懐疑論も出て来たのである⁷⁾。

4. 理研 RIBF での実験的検証

理研 RIBF において行われた、D. Steppenbeck 氏と武内聡氏をスポークスパーソンとする実験では、安定核である ^{70}Zn ビームを光速の 60% 程度に加速してターゲットにぶつけて破碎し、その破砕片に含まれる $N=34$ 同調体の ^{55}Sc 及び ^{56}Ti を BigRIPS separator により分離して RI ビームとした²⁾。2次ビームであるこれらをベリリウム標的に当てて陽子を取り去り、 ^{54}Ca 原子核を生成した。それを ZeroDegree スペクトロメータも用いて粒子識別を行って他の原子核から分別し、 ^{54}Ca 原子核からの γ 線を DALI-2 γ 線測定器で捕えたのである。実際に測定した

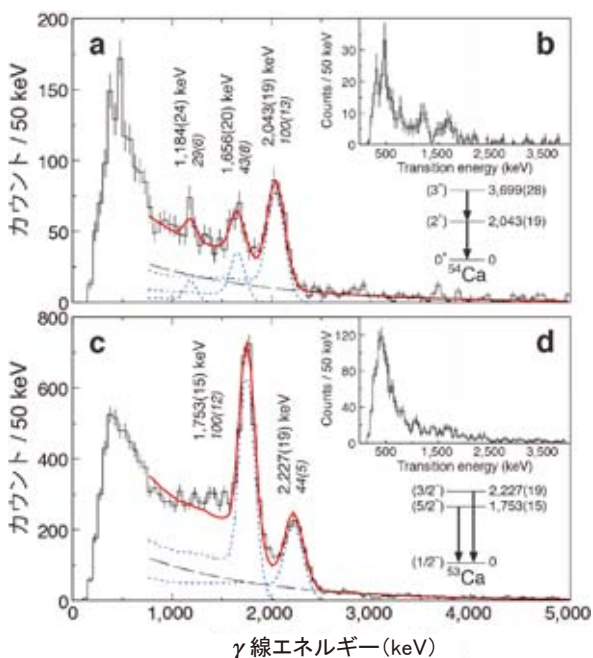


図4 γ 線スペクトラムと引き出されたエネルギーレベル図
実験論文²⁾の図を基に作成した

のは ^{54}Ca 原子核の第1番目の励起状態である 2^+ 状態から基底状態への (脱励起) γ 線である。基底状態が二重閉殻になると、励起状態は閉殻から見て最もエネルギーが低い軌道への (粒子空孔) 励起で基本的に表される。その場合の励起状態の量子数は 2^+ となることが多く、 ^{54}Ca の場合もそうである。 $N=34$ が魔法数になっていけば、エネルギー・ギャップが大きいので、励起エネルギーも大きくなるはずである。図4にはこのようにして得られた γ 線のスペクトルが示されている。 ^{53}Ca のスペクトルも得られており、本稿では述べないが以下の議論を補強する内容になっている。

図4で示されているように、 ^{54}Ca の一番低い励起状態の励起エネルギーは 2.043 MeV であることが分かった。この意味を明らかにするために、 2^+ 状態の励起エネルギーの系統的变化を陽子数を変えて見てみよう。図5にその結果が示されている。中性子数 (N) ごとに分類され、陽子数 (Z) の関数として、 2^+ 状態の励起エネルギーが示されている。 ^{52}Ca や ^{54}Ca において、励起エネルギーが急に増えるのが明らかであり、それぞれ Ca における $N=32$ と $N=34$ 魔法数の発現の証拠となるものである。

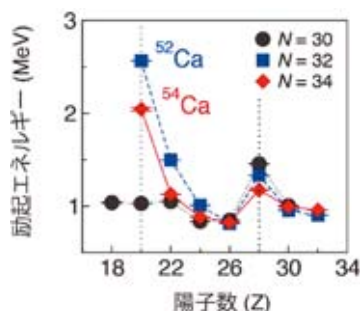


図5 実験で測定された励起エネルギーの系統的な変化
 ^{54}Ca のデータがこの度測定されたものである。
実験論文²⁾の図を基に作成した

5. まとめ

このようにして、 ^{54}Ca 原子核において $N=34$ 魔法数が現れることが、2001年の予言の後、10年以上に渡る探求の後、理研 RIBF によって実験的に検証された。 $N=34$ 魔法数がメイヤー・イェンゼンの魔法数に含まれていないことは明らかで、この結果は、ノーベル物理学賞も授与されたメイヤー・イェンゼンによる魔法数・殻構造の普遍性パラダイムがエキゾチック原子核では成り立たないことの大変重要な証拠となるものである。さらに、殻進化パラダイムの確立へ向けての大変重要な一里塚になる成果でもある。それゆえに、雑誌 *Nature* に論文が掲載されたと言えるであろう。また、 $N=34$ 魔法数の表れ方は、原子核物理学の最近の重要な課題である核力の中の3体力についての重要な知見を与えている。最後に、この実験の成功は、理研 RIBF がエキゾチック原子核を生成する圧倒的な力を持つことを改めて世界に見せつ

けることになった。今後も RIBF が、エキゾチック原子核の多彩で予想外の性質を明らかにしていくことを期待したい。

参考文献

- 1) Mayer, M.G., *Phys. Rev.*, **75**, 1969 (1949); Haxel, O., Jensen, J.H.D., and Suess, H.E., *Phys. Rev.*, **75**, 1766 (1949)
- 2) Steppenbeck, D., *et al.*, *Nature*, **502**, 207 (2013)
- 3) Mayer, M.G. and Jensen, J.H.D., *Elementary Theory of Nuclear Shell Structure*, Wiley, New York (1955)
- 4) Otsuka, T., *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **95**, 232502 (2005); Otsuka, T., *Phys. Scr.*, **T152**, 014007 (2013) (Proceedings of the 152nd Nobel Symposium)
- 5) Huck, A., *et al.*, *Phys. Rev. C*, **31**, 2226 (1985)
- 6) Otsuka, T., *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **87**, 082502 (2001)
- 7) Janssens, R.V.F., *Nature*, **459**, 1069 (2009)

(東京大学理学系大学院物理学専攻・
原子核科学研究センター)