

変形しながら殻進化 一磁気モーメントで探るエキゾチック核の「中身」—

市川 雄一 Ichikawa Yuichi

1. はじめに:原子核の構造と磁気モーメント

原子や電子,原子核は、「スピン」と呼ばれる自 転的性質,そしてその自転に起因する「磁気モーメ ント」という棒磁石に似た性質を持つ。原子核の中 で,核子(陽子や中性子)がどのような動きをして いるかは、スピンや磁気モーメントに反映されるた め、スピンや磁気モーメントを調べることで、原子 核の内部構造、すなわち「中身」を詳しく知ること ができる。

原子核では、核子数(陽子数や中性子数)に応じ た性質が現れ、「殻構造」や「魔法数」が存在する。 核子数が魔法数に近いときに、原子核は特に安定す る。陽子数が魔法数より1だけ大きい原子核では、 その最後の1個の陽子の性質によって、原子核全体 の性質が表される「一粒子的構造」^{1,2}となる。一粒 子的構造では、原子核全体の磁気モーメントは最後 の1個の陽子の運動で生じる磁気モーメントと一致 する。また、一粒子的構造をとるとき、原子核の形 状は球形となる。

原子核の殻構造は、当初は原子核の種類によらず 普遍的なものと考えられていたが、次第に陽子数や 中性子数の増減に依存して変化することが明らかに なった。これは「殻進化」³⁾と呼ばれ、エキゾチッ ク核で見られる多様な構造の原動力となり得る。殻 進化のほかにエキゾチック核の構造を生み出す特徴 として、「変形」⁴⁾がある。魔法数から離れるにし たがって、原子核を構成する核子全体が集団的な運 動モードを示し、変形した形状を示すことが多くな る。すると、もはや殻構造はかき消されてしまう。 この場合、全体的に電荷を持ち変形した核が自転す ることにより、磁気モーメントが生じる。 個々の核子の性質による殻進化と、核子全体の変 形は一見相反する特徴でありながら、実際のエキゾ チック核においては、この2つの特徴が競合しなが ら構造が発現すると考えられる。この競合を明らか にし、殻進化と変形を統一的に理解する上で決め手 となるのが、磁気モーメントの測定である。本稿で は、中性子過剰な銅同位体に注目し、その磁気モー メントから殻進化と変形の競合がどのように解明さ れるかを、実験的なブレイクスルーとなったスピン 操作した RI ビームの生成にも触れながら紹介する。

2. 中性子過剰な銅同位体

銅(Cu)同位体の中で,安定な核は中性子数36 を持つ $^{\circ}$ Cu であるが,それよりも中性子の多い(中 性子過剰な)銅同位体は特徴的な構造により注目を 集めている。Cu 同位体の陽子数は29 であり,魔法 数28 よりも1だけ多いことから,基底状態,及び 低励起状態に陽子の一粒子運動的性質が発現する。 しかし,中性子数が魔法数40 から50 まで($^{\circ}$ Cu か ら $^{\circ}$ Cu まで)変化していくうちに,ある程度の変 形の効果も生じているはずである。この中性子過剰 Cu 同位体の中で最も重要なものは,中性子数が 偶数である奇質量 Cu 同位体では、 $^{\circ}$ Cu まで基底状 態のスピンパリティは 3/2⁻⁻であるが、 $^{\circ}$ Cu で突然 5/2⁻へと変化する $^{5.0}$ 。

この⁷⁵Cuにおける基底状態の変化は、これまで は主に殻進化の帰結として説明されてきたが⁷⁷、変 形効果がどの程度影響しているかは分かっていな かった。⁷⁵Cuでは、基底状態のスピンパリティが 5/2⁻になった代わりに、スピンパリティ3/2⁻を持



図1 中性子過剰な奇質量銅同位体における低励起状態の励 起エネルギー変化

中性子数の増加とともに 5/2⁻状態の励起エネルギーが低下していき, ³Cu で基底状態のスピンパリティが 3/2⁻から 5/2⁻へと変化する^{5,0}。³Cu には 2 つのアイソマー励起状態が存在する。本実験の結果から 66.2 keV の励起状態がスピンパリティ3/2⁻を持つことが確認された。

つ状態が準安定なアイソマー励起状態として発現す る。既知の基底状態の磁気モーメントに加えて、こ のアイソマー励起状態の磁気モーメントを測定する ことで、³⁵Cuにおける突然の状態変化が、本当に殻 進化によるものなのか、あるいは変形の効果による ものなのかが判別可能になる。

3. スピン操作した RI ビームの生成

^{*}Cuのように、短い時間の間に放射線を出して崩 壊するエキゾチック核の磁気モーメントを測定する ためには、核スピンを操作し、その方向分布になん らかの偏り(配向)を作ることが実験的に必要であ る。放射性同位元素(RI)ビームを生成する際の入 射核破砕反応に伴って生じる運動量分布のうち特定 の成分を抜き出してくることで破砕片にスピン配向 を生成できることが発見され[®]、それ以来、比較的 安定線に近い原子核の磁気モーメント測定に利用さ れてきた。しかし、入射ビームとして使用可能な各 種は限られており、その核種から遠く離れた RI ビー ムを生成する場合、質量差が大きく反応機構が複雑 になるため、大きなスピン配向を得ることができな かった。

そこで,安定線から離れた RI ビームに対しても 普遍的に大きなスピン整列(2次の配向)を生成可 能な手法として,「分散整合2回散乱法」が開発さ れた⁹。この手法では,2段階の反応によって目的 核を生成するが、2段階目の反応が可能な限り単純 なメカニズムになるような反応経路をピックアップ し、更に反応後100 nsの飛行時間で特定の運動量 を選び出すことで、大きなスピン整列度を付与でき る。更にビーム輸送において運動量分散整合という 条件を満たすことによって、実現したスピン整列度 を維持したまま統計的な収量の増加を実現し、測定 の効率(Figure of Merit, FOM)を最大化できる。こ れにより, 自在な反応経路の選択性, そして短時間 でのスピン操作により、様々な RI ビームに対して スピン操作を行い、100 ns 程度の半減期の励起状態 まで磁気モーメントを測定することが可能になる。 この手法の実証実験では、1次ビーム 4°Ca から 33Al を経由し ³²AI を生成することで 8%のスピン整列度 を達成し、このときの FOM の向上は従来手法に比 べて 50 倍以上に上ることが確認された。

今回,この分散整合2回散乱法をスピン整列⁷⁵Cu ビームの生成に適用するにあたって,新たに第2反応における角運動量-スピン間の対応に着目した。 第2反応において,陽子数・中性子数ともに偶数で ある偶々核の基底状態(スピンパリティ0)を始状 態(入射核)として,角運動量*j*を持つ軌道核子を 抜き取ってスピン*I*を持つ終状態(破砕片)を生成 する場合を考えると,*j=I*となる軌道・状態の対応 が成り立つときに,核子が持ち去る運動量と破砕片 における生成角運動量の関係が直接的になる。つま り第2反応において,反応機構を極限まで単純化す ることで,スピン整列度の最大化が期待できる。今 回のケースでは,2次ビームとして⁷⁶Znを生成し, (*p312*軌道を占有する)一陽子抜き取り反応によって ⁷⁵Cuの3/2⁻アイソマー励起状態を生成する。

4. ⁷⁵Cu の磁気モーメント測定実験

この新たな機構を採用した実験を理化学研究所 RI ビームファクトリー(RIBF)の超伝導 RI ビーム 生成分離装置(BigRIPS)ビームラインで行った。 上述のように第2反応として⁷⁶Znからの一陽子抜 き取り反応によって⁷⁵Cuを生成したところ,30% という非常に高いスピン整列度を実現した。これは, 最も単純な反応機構を仮定したときに得られる原理 的な最大値41%に迫る大きさであった。

今回の実験では ⁷⁵Cu ビームは毎秒 50 個, そのう

ち励起状態にあるものは毎秒1個しか生成すること ができなかった。しかし、この極限まで高めたスピ ン整列度のおかげで、⁷Cuのように生成量が微弱な エキゾチック核に対しても、図3に示すように有意 な歳差運動信号を観測し、その励起状態の磁気モー メントを決定することができた。測定の効率はスピ ン整列度の2乗に比例し、今回30%のスピン整列 度を実現したことから、従来(8%)よりも10倍以 上効率が向上したことになる。



図 2 BigRIPS ビームラインにおける ⁷⁵Cu ビームの生成 理研 RIBF の BigRIPS ビームラインにおいて、1 次ビーム ³⁵⁰U から 2 次ビー ム ⁷⁵Zn を生成し、F5 焦点面における一陽子抜き取り反応によって ⁷⁵Cu を生成した。生成した ⁷⁵Cu ビームを F8 焦点面まで輸送し、磁気モーメ ント測定を行った。



図3 歳差運動スペクトル

スピン整列した原子核から放射される γ 線は放出角度異方性を持つので、 磁場中で歳差運動させることにより、歳差運動と同期した γ 線強度変化 を観測することができる。本実験では、³²Cu の 66.2 keV の励起状態(図 1 参照)からの脱励起 γ 線に対して、5 σ の信頼度で歳差運動を観測した。 歳差運動の周期から磁気モーメントを決定した。

5. 殻進化と変形

前述のように、Cu同位体は基本的には一粒子運動的性質を持つことが予想される。しかし、測定された磁気モーメントの値は、図4に示すように、純粋な一粒子運動的性質を仮定した値からある程度離れており、確かに原子核の変形が起きていることが分かった。そこで、この実験値及び既知の基底状態の磁気モーメントを、殻進化と原子核変形の双方の効果を含んだ、理論計算の結果と比較した。モンテカルロ殻模型の方法に基づき、スーパーコンピュータ「京」を用いた最新鋭のシミュレーション¹⁰を行った結果、実験データが高精度で再現されていることが確認された。

理論計算の解釈によると、中性子の魔法数40と 50の間の数を持つCu同位体(⁶⁰Cuから⁷⁰Cuまで) をニッケル(Ni)同位体(陽子数28)に1つ陽子 を加えた系と見なしたときに、Cu同位体とコアと なるNi同位体が同等の変形を持つことが明らかに なった。つまり、コアとなるNi同位体が、中性子 数40から50にかけて球形から変形し、再び球形に なるのにつれて、Cu同位体も同等の変形を追随す る中で、最後に追加された陽子は一粒子的性質を 保っていることになる。特に、⁷⁵Cuは基底状態、励 起状態ともこの描像が成り立っていた。つまり、中 性子過剰銅同位体では、中性子数の変化にしたがっ てコアの形状は変形しながらも、最外殻陽子に関す る殻進化が起こっていると考えることができる。

このように, 強力なスピン整列ビームを用いた励 起状態の磁気モーメント測定と最新鋭のモンテカル ロ殻模型計算の組み合わせによって, これまで明ら かになっていなかった変形効果の存在下での殻進化 の検証が実現した。

6. 今後に向けて

本研究では、魔法数近傍のエキゾチック核に対し て基底状態のみならず励起状態に対しても磁気モー メントを測定することで、変形の効果を踏まえた上 での殻進化の描像を提示した。エキゾチック核の見 せる多様性には、殻進化と変形の両者が競合しなが ら寄与する。本研究は、その統一的な理解への第一 歩となるものである。



図4 中性子過剰な奇質量銅同位体の磁気モーメント

横軸に質量数(中性子)変化,縦軸に核磁子を単位と磁気モーメントを 表す。数緑色のプロットは3/2⁻状態,青色のプロットは5/2⁻状態の磁 気モーメント実験値である。赤色のプロットが本研究での実験値である。 緑色の実線,青色の実線はモンテカルロ殻模型計算による理論値である。 緑色及び青色の1点鎖線はそれぞれ一粒子的構造を仮定したときの磁気 モーメントの値であり、ここからのずれが変形の効果であるとみなせる。 理論解析の結果,中性子過剰銅同位体では、中性子数の変化にしたがっ て、コアの形状は変形しつつも、最外殻陽子に関する殻進化が起こって いることが明らかになった。

今回対象とした ⁷⁵Cu から更に中性子を増加させると、中性子数 50 を持つ二重魔法数核 ⁷⁸Ni のごく近傍まで行き当たる。 ⁷⁸Ni 近傍核やその他の魔法数に近い核子数を持つエキゾチック核は、宇宙のおける元素合成過程において重要な鍵を握ると予想されている。今回の実験では角運動量 – スピン間対応を

導入した分散整合2回散乱法を用いることで,その ような魔法数近傍核に対して非常に高いスピン整列 度を得ることが実証されたことから,今後,他の魔 法数近傍核でも磁気モーメント測定を通じて,詳細 な内部構造の検証が可能となる。

宇宙元素合成過程においては、人工的に生成可能 な原子核を超えて更に中性子過剰なエキゾチック核 が関わっていると予想されている。そのようなエキ ゾチック核がどのような構造をとり、どのように元 素合成過程が進んでいくのかを解明するためには、 精度の高い理論的予言能力が必要となる。今後、殻 進化と変形の競合を取り入れたエキゾチック核の究 極の構造モデルを確立することで、この宇宙におけ る元素合成過程の解明に役立つと期待できる。

参考文献

- 1) M. G. Mayer, et al., Phys. Rev., 75, 1969-1970 (1949)
- 2) O. Haxel, et al., Phys. Rev., 75, 1766-1766 (1949)
- 3) T. Otsuka, et al., Phys. Rev. Lett., 95, 232502 (2005)
- A. Bohr, B. R. Mottelson, *Nuclear Structure*, Benjamin, New York (1969)
- 5) K. T. Flanagan, et al., Phys. Rev. Lett., 103, 142501 (2009)
- 6) S. Franchoo, et al., Phys. Rev. Lett., 81, 3100-3103 (1998)
- 7) T. Otsuka, et al., Phys. Rev. Lett., 104, 012501 (2010)
- 8) K. Asahi, et al., Phys. Lett. B, 251, 488-492 (1990)
- 9) Y. Ichikawa, et al., Nat. Phys., 8, 918-922 (2012)
- 10) Y. Tsunoda, et al., Phys. Rev. C, 89, 031301 (R) (2014)

(理化学研究所 仁科加速器科学研究センター)