

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：13101

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540337

研究課題名(和文) オンライン低温核偏極法による中性子過剰二重魔法数核の核構造研究

研究課題名(英文) Study of nuclear structure of neutron rich double closed shell nuclei by on-line low temperature nuclear orientation method.

研究代表者

大坪 隆(OHTSUBO, TAKASHI)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号：70262425

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,100,000円、(間接経費) 1,230,000円

研究成果の概要(和文)：原子核の陽子数及び中性子数が魔法数になる領域では核子が閉殻形成するため非常に安定になる。このような安定な領域では原子核内の微小な効果が見やすくなる。これまで安定核が中心だった研究を中性子過剰領域に進め、中性子過剰二重魔法数原子核48Ca近傍での原子核の電磁気構造を調べるため短寿命核49Sc(半減期57分)の磁気モーメントをオンライン低温核偏極法で測定した。得られた結果と原子核理論計算との比較から中性子過剰な48Ca近傍における理論計算の妥当性及び安定な二重閉殻近傍殻での理論の精密化の必要性を示した。

研究成果の概要(英文)：Around nucleus of which the number of protons and neutrons are the "magic number", the nuclear stability increases very well. In such nuclei, we can find the higher order effects in the nuclear structure. So far such study has been done around stable nuclear region; we apply it to neutron-rich region. We measured the magnetic moment of unstable nuclei 49Sc ( $T_{1/2} = 57m$ ) by the on-line nuclear orientation method. We compared the result with recent nuclear theoretical calculations. The calculations agree with our results but it shows a need for improvement in theoretical calculation around stable doubly closed shell nuclei.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

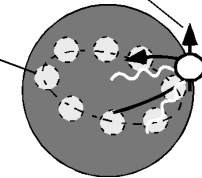
キーワード：不安定核 電磁気モーメント 偏極核

1. 研究開始当初の背景

原子核の電磁気モーメントは原子核中の電磁氣的構造を調べる良いプローブである。原子核を構成する陽子中性子数が共に魔法数の原子核(二重閉殻核)近傍では低次の効果が消えて、高次効果が明らかになる。(右図)

最後の核子で原子核全体の磁気モーメントが決まる。核内での高次効果が見えてくる。

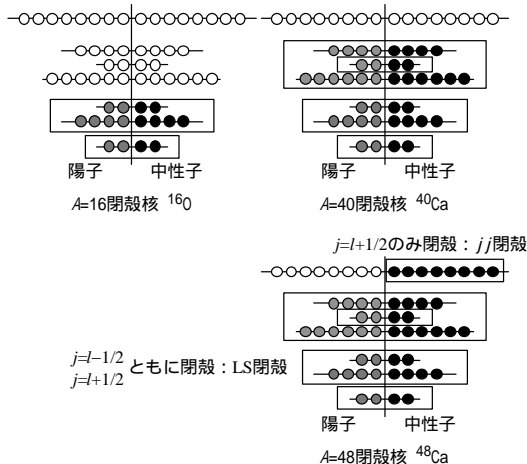
閉殻を作っている核子はお互いにキャンセルして磁気モーメントに寄与しない。



これまで安定核領域の<sup>16</sup>Oや<sup>40</sup>Ca近傍での核物質での磁気モーメント測定から、核内核子質量が自由空間中とは異なる振る舞いなどが観測されてきている。また原子核模型による理論計算との比較から模型の妥当性について議論されてきた。そこで中性子過剰側の二重閉殻核である<sup>48</sup>Ca近傍での電磁気モーメントの測定から、この領域での核内電磁氣構造について調べることを本研究の目的とした。この近傍ではK同位体核についてはレーザー分光より電磁気モーメントの測定が行われてきている。一方Sc同位体核については我々のグループにおいて低温核偏極法を用い、Fe中でのNMRを行い、<sup>48</sup>Scの磁気モーメントや緩和時間の測定を行ってきた。しかし二重閉殻+1核子核<sup>49</sup>Scについてはその半減期が1時間のため、我々のオフライン装置での測定が難しい。そこでCERN研究所ISOLDE施設にあるオンライン型低温核偏極装置NICOLEを用いて<sup>49</sup>Scを含むこの領域の不安定核の電磁気モーメントの測定を計画した。

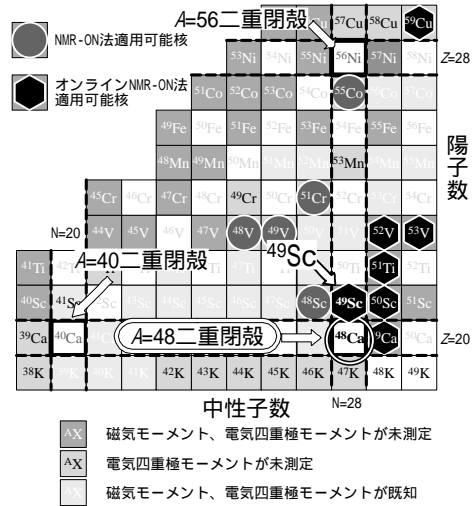
2. 研究の目的

原子核を構成する核子は、核内軌道をエネルギーの低い順に詰まっている。軌道が満ちた閉殻になる領域は魔法数と呼ばれ、このような原子核は非常に安定している。(下図)



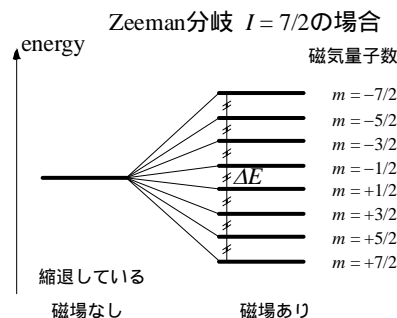
このような閉殻の近傍核では、単純な模型が良く成り立ち、精密な物理量測定から核内構造の高次効果を見ることが出来る。例えば、安定核近傍のA=16,40領域の電磁気モーメントの測定から高次の配位混合や核内核子の

質量変化、中性子スキン構造など議論されている[1]。中性子過剰の<sup>48</sup>Caも二重閉殻核で、このような中性子過剰領域での高次効果を調べるため、<sup>48</sup>Caの近傍核、特に<sup>49</sup>Scの電磁気モーメントの測定を行った。



3. 研究の方法

研究対象である<sup>48</sup>Ca近傍核では寿命が1時間程度と比較的長いため、電磁気モーメントの測定には低温核偏極磁気共鳴法(NMR-ON)が最適である。この方法では原子核を鉄などの強磁性体に埋め込み、この試料を磁場中で10mK程度の極低温まで冷却することで原子核スピンを整列させ、NMRを行うものである。Fe内の不純物原子核は巨大な内部磁場による磁気相互作用を受け、スピンIに対し2I+1本の等間隔のエネルギー準位に分裂する(ゼーマン分岐、下図)。



このときの磁気量子数 m でのエネルギー  $E_m$  は次の式で与えられる。

$$E_m = g \mu_N B$$

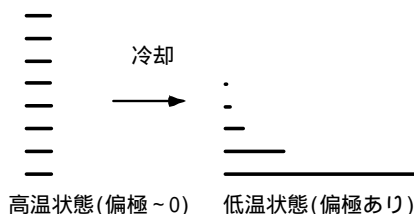
ここでgは原子核のg因子、 $\mu_N$ は核磁子、Bは原子核の感じる磁場(外部磁場+内部磁場)である。原子核の磁気モーメント $\mu$ はスピンIを用いて次のように表される。

$$\mu = g \mu_N I$$

各 m の準位の占有率  $P_m$  は次のボルツマン分布に従う。

$$P_m \propto \exp(-E_m/kT)$$

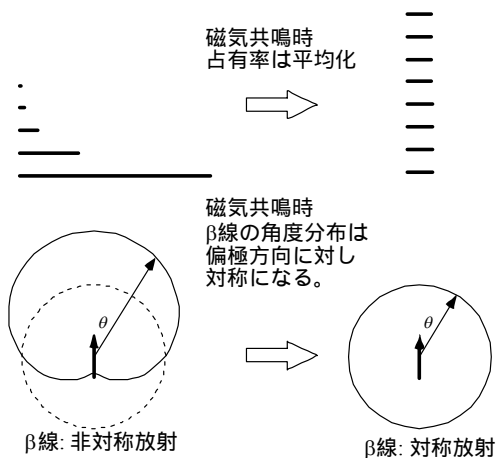
ここでkはボルツマン定数、Tは温度である。次の図に高温状態と低温状態での各準位の占有率の変化を示す。



Fe 中の内部磁場及び 10mK の極低温下では原子核の偏極は数十% のものが得られる。これは極めて大きな偏極量である。NMR では外部磁場に垂直な振動磁場を加える。この振動磁場のエネルギーと隣接準位間のエネルギー差が等しいと、準位間の遷移が起こり、占有率が平均化され偏極が崩れる。このときの振動数から磁気相互作用の大きさ、すなわち磁気モーメントが得られる。共鳴によりスピン整列が崩されるのを不安定核から放出される  $\beta$  線の非対称性の変化から検出する。偏極  $P$  を持った原子核からの  $\beta$  線の角度分布は

$$W_{\beta}(\theta) = \eta(1 + AP\cos\theta)$$

で与えられ、偏極方向に対し非対称となる。ここで  $\theta$  が偏極方向に対する  $\beta$  線の放出角度、 $A$  は  $\beta$  崩壊による非対称パラメータ、 $\eta$  は立体核などによる検出器補正である。そこで偏極方向に対し  $0^{\circ}$  と  $180^{\circ}$  に  $\beta$  線検出器を置き、その計数比を取ることで原子核の偏極、すなわち磁気共鳴をモニターできる。(下図)

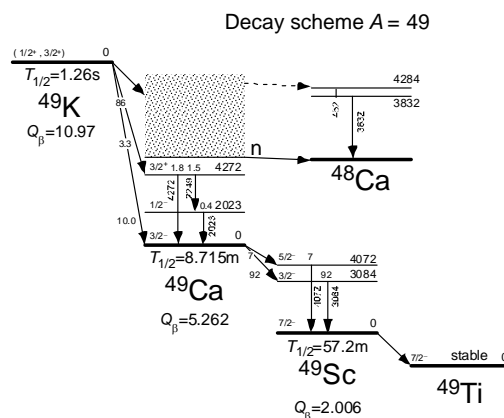


この手法の特徴は確実に偏極核が得られること、放射線検出を利用しているため感度が極めて高く少量の不安定核生成で観測できることが上げられる。

これまで我々のグループでは新潟大学にあるオフライン  $^3\text{He}/^4\text{He}$  希釈冷凍機を用いた NMR-ON 法で多くの不安定核について電磁気モーメントの測定を行ってきた。最近では  $^{48}\text{Sc}$  (半減期 44 時間) の磁気モーメント測定に成功した[2]。また、強磁性体金属 Fe 中における Sc の系統的研究にも行ってきた[3]。特にオンライン低温核偏極法で重要な Fe 内での緩和時間の測定を行いオンライン測定が可能であるかどうかを確認した。

今回の目的核である  $^{49}\text{Sc}$  の寿命(半減期)は 57 分と短く、我々の装置での測定は極めて困難である。そこで CERN 研究所の不安定核分離施設 ISOLDE にあるオンライン NMR-ON シ

ステム NICOLE[4]を利用した。強力な不安定核二次ビーム生成分離装置 ISOLDE に直結した NICOLE では直接不安定核を低温試料中に埋め込むことができる。ISOLDE では 1 GeV まで加速した陽子ビームを炭化ウランターゲットに照射することでさまざまな不安定核が生成する。これを適切な条件に加熱することで特定の元素をイオン化して取り出す。本実験では Sc をビームとして取り出すのが困難なため、 $^{49}\text{Sc}$  の親核である  $^{49}\text{Ca}$  をビームとして取り出した。なお  $^{49}\text{Ca}$  の親核である  $^{49}\text{K}$  は大強度のビームが可能であるが、崩壊様式に多くの中性子放出崩壊が含まれており、 $\beta$  線検出器にダメージを与えることから、 $^{49}\text{Ca}$  を選んだ。質量数  $A=49$  の崩壊形式を下図に示す。



ISOLDE からの Ca ビームを磁気分析して同位体  $^{49}\text{Ca}$  を分離する。NICOLE 装置は真空ビームラインで ISOLDE に接続されており生成した不安定核を直接装置内の Fe 箔に埋め込む。1 時間のビーム照射後、ビームシャットを閉じて測定を行った。 $^{49}\text{Ca}$  は半減期が 8.7m であるため  $^{49}\text{Ca}$  の崩壊を待って、NMR を行った。また  $^{49}\text{Ca}$  では  $^{49}\text{Sc}$  とは逆の  $\beta$  線非対称性を持つが、崩壊により混ざりが少なくなっていることと、Fe 中での Ca の緩和時間が長いことから、観測される非対称性への影響は 10% 程度と見積もった。

$\beta$  線の検出は冷凍機内に設置した二対の Ge 検出器を用いた。また冷凍機外には偏極方向に対し  $0^{\circ}$  及び  $90^{\circ}$  の位置に  $\gamma$  線検出用の Ge 検出器を計 4 台設置した。試料棒には温度測定用の  $^{60}\text{Co}$  の核温度計が取り付けられており、 $^{60}\text{Co}$  の  $\gamma$  線の非等方性から温度をモニターした。実験を通してほぼ 10mK に冷却されていた。高周波磁場の周波数に対する  $\beta$  線の非対称度の変化の測定から磁気共鳴スペクトルを得て、これをガウス関数フィッティングすることで共鳴周波数を得た。

Fe 中での Sc の内部磁場は  $^{44\text{m}}\text{Sc}$  を用いた NMR-ON で測定しており[3]、この値を用いて  $^{49}\text{Sc}$  の磁気モーメントを求めた。

本研究は我々が進めてきているオクスフォード大学、テネシー大学らとの NICOLE を用いた国際共同研究 [5]の一環として行った。本研究は大坪が筆頭者として 2010 年にビームタイム申請を行った、ISOLDE 共同研究番

号 IS503 のものである。

[1] T. Minamisono, T. Ohtsubo et al., Nuclear Physics A516, 365 (1990), T. Minamisono, T. Ohtsubo et al., Nuclear Physics A559, 239 (1993), D. Zhou, T. Minamisono et al., J. Phys. G34, 523 (2007)

[2] T. Ohtsubo, S. Ohya, S. Muto et al. Hyperfine Interactions 180, 79 (2007)

[3] S. Ohya, T. Ohtsubo, S. Muto et al., Hyperfine Interactions 180, 55 (2007)

[4] N.J. Stone Phys. Rev. C77, 014315 (2008)

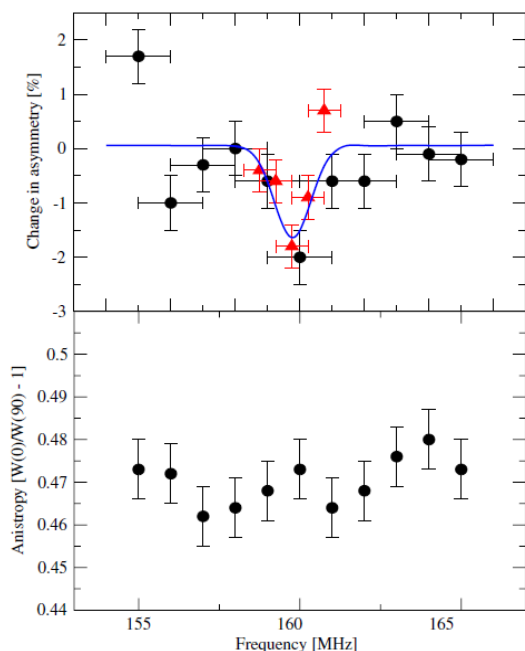
[5] T. Ohtsubo CERN/ISOLDE IS503 experiment, proposal:

<http://cdsweb.cern.ch/record/1232578/files/INTC-P-279.pdf>

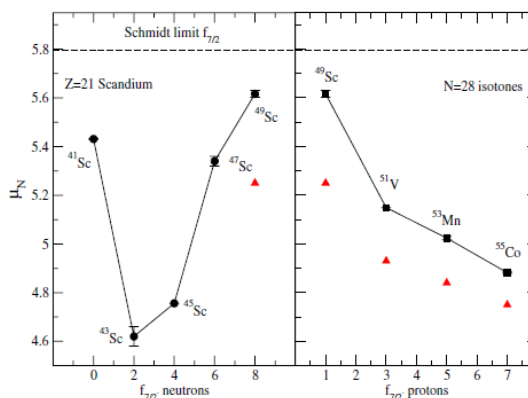
N.J.Stone CERN/ISOLDE IS460 experiment, proposal: <http://cdsweb.cern.ch/record/1156112/files/INTC-P-229-ADD-1.pdf>

#### 4. 研究成果

NMR-ON 法で測定された共鳴スペクトルを下图に示す。



上が  $\beta$  線の非対称度、下が  $\gamma$  線の非等方度について高周波磁場周波数を横軸にしたものである。 $\beta$  線に非対称度のスペクトルから共鳴周波数が得られ、これより求めた  $^{49}\text{Sc}$  の磁気モーメントの値は (+)5.616(25) $\mu\text{N}$  であった。これは単一粒子モデルでの計算値である Schmidt 値 5.79 $\mu\text{N}$  と比較すると 3%程小さく、これが高次の効果であると考えられる。次の図は近傍の原子核とあわせた磁気モーメントの実験値と理論計算との比較である。左が Sc 同位体で  $^{40}\text{Ca}$  二重閉殻 +1 核子核  $^{41}\text{Sc}$  から今回の  $^{49}\text{Sc}$  までの値を示す。質量数が増えるにつれていったん Schmidt 値から離れるが、 $^{49}\text{Sc}$  に向けて再び Schmidt 値に近づいているのがわかる。右は中性子数等しい原子核を示しており、 $^{49}\text{Sc}$  から離れるに従い Schmidt 値から外れていく。



原子核模型の Shell model において、芯偏極、中間子交換流などの効果を組み込んだ理論計算との比較では実験値をよく再現することがわかった。一方  $^{40}\text{Ca}$  近傍核である  $^{41}\text{Sc}$  においてのこの理論計算と実験値との比較では再現が不完全であった。これは  $^{48}\text{Ca}$  では陽子が  $LS$  閉殻(完全閉殻)、中性子が  $jj$  閉殻 ( $j=l+s$  飲み閉殻)に対し、 $^{40}\text{Ca}$  では陽子中性子ともに  $LS$  閉殻であることを考慮すると、 $LS$  閉殻における高次効果の更なる考慮の必要性を示した。

現在、NICOLE はその後生じた真空システムトラブルについて修理を行い、ISOLDE のグレードアップ工事に伴い移動していた本体装置の設置作業を行っており、今後低温冷却テストの後、次のビームタイム申請を行い、国際共同研究を継続していく予定である。

#### 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

〔雑誌論文〕(計 1 件)

Magnetic Dipole Moment of the Doubly-Closed-Shell Plus One Proton Nucleus  $^{49}\text{Sc}$

T. Ohtsubo, N. J. Stone, J. R. Stone, I. S. Towner, C. R. Bingham, C. Gaulard, U. Koester, S. Muto, J. Nikolov, K. Nishimura, G. S. Simpson, G. Soti, M. Veskovc, W. B. Walters, and F. Wauters  
Physical Review Letters, 査読有

109, 2012, 032504

DOI: 10.1103/PhysRevLett.109.032504

#### 6. 研究組織

(1)研究代表者

大坪 隆 (OHTSUBO Takashi)

新潟大学・自然科学系・准教授

研究者番号: 70262425

(2)研究分担者

武藤 豪 (MUTO Suguru)

高エネルギー加速器研究機構・物質構造科学研究所・講師

研究者番号: 90249904