

## 科学研究費補助金研究成果報告書

平成23年 8月9日現在

機関番号：14401  
 研究種目：基盤研究（A）  
 研究期間：2008～2010  
 課題番号：20244030  
 研究課題名（和文） 隠されていた核相互作用の研究（中性子過剰物質とテンソル力）  
 研究課題名（英文） Study of hidden nuclear interactions  
 (Neutron rich nuclei and the tensor forces)  
 研究代表者  
 谷畑 勇夫 (TANIHATA ISAO)  
 大阪大学・核物理研究センター・教授  
 研究者番号：10089873

## 研究成果の概要（和文）：

核物理研究センターでの高エネルギー（200～400MeV）陽子を用い $^{16}\text{O}(p, d)^{15}\text{O}$ 反応の測定を行い正パリティの終状態の遷移に異常が見られる事を発見した。この異常は核内のテンソル力の寄与なしには説明できないものであり、テンソル力の重要性を示すものと成った。

また、ドイツのGSI研究所ではNiの中性子過剰核のビームを用いて、陽子弾性散乱の実験を行い、初めて中重不安定核の密度分布を決定できる精度の角度分布が測定できた。

## 研究成果の概要（英文）：

At RCNP, we study  $^{16}\text{O}(p, d)^{15}\text{O}$  reaction at  $E_p = 200 \sim 400$  MeV. The cross section of transitions to the discrete excited states in  $^{15}\text{O}$  have been measured. The abnormal enhancement of the cross section has been observed in the transition to the positive parity states at high energy. This anomaly is understood quantitatively as an effect of high-momentum nucleon produced by the tensor force and thus suggests a direct evidence of the tensor force in a nucleus.

At GSI, measurements of proton elastic scattering have been made to study the density distribution of neutron rich Ni isotopes. We could have extended the measurement up to  $^{70}\text{Ni}$ . The data are under analysis. We will obtain density distribution of medium mass neutron-rich nuclei for the first time.

## 交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	19,000,000	5,700,000	24,700,000
2009年度	14,500,000	4,350,000	18,850,000
2010年度	4,300,000	1,290,000	5,590,000
総計	37,800,000	11,340,000	49,140,000

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：核構造、不安定核ビーム、テンソル力、中性子過剰物質、状態方程式、  
固体水素標的

## 1. 研究開始当初の背景

不安定核ビームを用いた反応研究の開始は数多くの発見を生み出した。中性子ハローや中性子スキンの発見など原子核の基本的な性質である密度分布の常識が覆され、そのような構造の変化による核励起（例えばソフトな励起の）や反応過程ダイナミクス（融合反応確率の変化）の変化も見出されてきた[1]。そのような不安定核の研究の進展とともに、ついこの前まで不動のものと考えられてきた魔法数が、中性子過剰核では、大きく変化することが発見された。[2]

核構造の理論では、中心力を最も重要な相互作用と考え、それには含まれない残留相互作用を摂動として取り入れる殻模型や平均場模型が成功を収めてきた。しかしながら、原子核を結合させている強い相互作用には、パイオン交換による力が重要な部分を占めており、これには強いテンソル相互作用があることが知られている。また、核物質の飽和性や、最近軽い核では可能となったいわゆる *Ab Initio* 計算を用いた核構造の理論研究でも、テンソル力の寄与は大きく、結合エネルギーの重要な部分を占めることがわかってきた。しかし、広い質量範囲で成功をしている殻模型や平均場模型では、テンソル力は必要なときに摂動として取り入れること以外には無視されてきた。

最近になってテンソル力を摂動として取り入れる核模型が提唱されているがその方法では強いテンソル力の反映が十分でないだけでなく、テンソル力による核内核子の高運動量成分の寄与が全く無視されている。高運動量における原子核の構造は1970年代に研究が進められたが、そのときにはテンソル力のことは無視されていた。しかし、テンソル力を核構造論として陽に含めるためには高運動量成分を無視することは出来ない。

これまで、高運動成分とテンソル力の関連に目をつけた研究はほとんどなされていなかったが、最近になっていくつかの理論計算でテンソル力による高運動量成分の計算がなされるようになってきた。それらと比較できる実験データを出すことが望まれるようになってきた。

魔法数の変化は、これまで隠されていた相互作用が現われ殻構造を変化させているという、新しい見方を生み出した。中性子過剰核での魔法数 8, 20 の消滅と 16 の出

現は、価陽子と価中性子数の閉める軌道が大きく違うために、テンソル力の効果が大きく現れたとの見方で説明が可能である[3]。しかしながら、元々核力の中で半分程度もあるテンソル相互作用を摂動として取り扱うのが正しいのかどうか、大きな疑問が生まれる。

実際そのような疑問に答えようとする理論的取り組みがあり、パイオンを含めた平均場模型やテンソル力をはじめから含めた新しい殻模型の構築が始まっている[4]。テンソル力を明白な形で理解することが核物理の基礎として必要とされるようになった。

魔法数は原子核が殻構造を持っていることの反映であるが、その基礎は一粒軌道が決めている。粒子軌道の詳細はこれまで安定な原子核において、非弾性散乱や核子移行反応を用いて研究されてきた。しかしながら、不安定核においてはそのビーム強度の制限により広い範囲での研究はまだなされていない。その制限を打ち破る方策は世界中で高強度の低エネルギーRI ビーム用の加速器計画が進行しているが、その歩みはおそい。核子移行反応などの研究を中性子過剰核に伸ばすことは原子核構造物理学者にとって最も重要な課題の一つとなった。

- [1] Special issue of Physics with RI Beams, Edited by I. Tanihata, Nucl. Phys. A 693 (2001)
- [2] New Magic Number  $N=16$ , near the Neutron Drip Line, A. Ozawa, T. Kobayashi, K. Suzuki, K. Yoshida, I. Tanihata, Phys. Rev. Letters 84 (2000) 5493.
- [3] Evolution of Nuclear Shells due to the Tensor Force, T. Otsuka, T. Suzuki, R. Fujimoto, H. Grawe, and Y. Akaishi Phys. Rev. Letters, 95 (2005) 232502.
- [4] Tensor Correlation in He isotopes, T. Myo, K. Kato, H. Toki, and K. Ikeda, J. Phys. G: Nucl. And Part. Phys. 31 (2005) s1681.
- [5] Chiral dynamics and nuclear matter, N. Kaiser, S. Fritsch, and W. Weise, Nucl. Phys. A 697 (2002) 255.

## 2. 研究の目的

上記のような状況の下で私たちの研究の目標は、

- I. 核内核子の波動関数中のテンソル力で生じる中高運動量成分の確立、

- II. 荷電変化断面積を測定し、中性子過剰核の陽子分布半径を決定する。それと核子分布半径との比較から中性子スキンの系統的な研究を行う、
- III. 陽子弾性散乱の結果と併せてテンソル力の効果が大きく変化する中性子過剰核物質の状態方程式(EOS)を決定する、
- IV. 中性子過剰核の精密分光により核構造の系統的变化を観測し、テンソル力の効果と隠された相互作用をあぶりだす、とした。

### 3. 研究の方法

I. の課題については大阪大学核物理研究センターで  $^{16}\text{O}(p, d)^{15}\text{O}$  及び  $^{12}\text{C}(p, d)^{11}\text{C}$  の実験を行った。入射ビームエネルギーは 200-400 MeV とし、散乱角を 10 度にとることによりテンソル力の効果が大きいと考えられる運動量移行が 400 MeV/c を含めるようにした。

実験には核物理研究センターのリングサイクロトロンと大型スペクトロメータ(大雷電)を用いた。

この反応の断面積のエネルギー依存性をいくつかの終状態について測定し、それらの相対的な強度を見ることとした。

同時に深く束縛された状態からの中性子ピックアップ反応を見るために、後方角にプラスチックのホドスコープを置き反跳陽子を検出し(p, pd)反応の測定も行った。

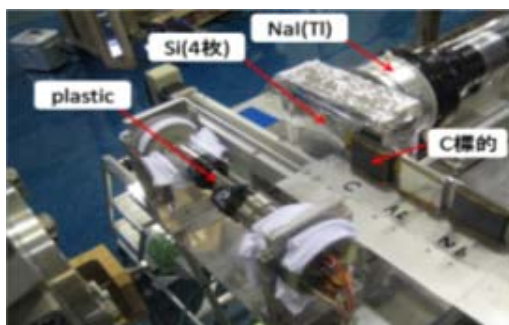


図 3.1 荷電変化断面積測定用検出器の設置写真

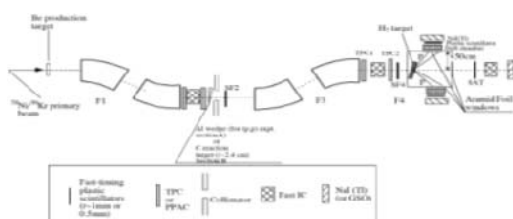


図 3.2 GSI における陽子弾性散乱実験の装置

II. の課題については Li, Be, B の荷電変化断面積を測定した。核物理研究センターのリングサイクロトロンからの重イオンビーム (~100A MeV) を用い、RI ビーム分離器である EN コースを用いて実験を行った。このビームラインは核子あたり数十 MeV の不安定核のビームを効率よく実験に供することが出来る、ユニークな装置である。

荷電変化断面積は入射粒子の同定を行い炭素標的の後でその荷電数(Z)が変化しないものを 4 枚の Si 半導体検出器で同定計数し、いわゆる通過法で断面積の決定を行った。(図 3.1) 測定は核子あたりのエネルギー 40 MeV で行った。

III. の研究においては、ドイツ国 GSI 研究所のシンクロトロン(SIS)と RI ビーム分離器(FRS)をもちいて、 $^{58,66,70}\text{Ni}$  のビームを作りそれを固体水素標的に照射して、陽子弾性散乱の角度分布を測定した。入射エネルギーは核子あたり 300 MeV であった。GSI における実験装置は図 3.2 に示した。

この反応測定はいわゆる逆運動学的反応として行ったものであり、このようなエネルギーにおける中重核では世界で初めての試みである。入射核は  $^{58}\text{Ni}$ ,  $^{86}\text{Kr}$  を用いた。FRS で分離された Ni ビームを F4 にある水素標的に導き、そこで起こる反応からの陽子を検出した。低いエネルギーの反跳陽子を効率よく測定するために 2 標的を串刺しに使い、一つは固体水素標的を使用もう一つは薄いポリエチレン膜を用いた。水素標的の厚さは 1 mm であった。このように薄い標的を安定に使用するために、水素ガスは液化中に、熱伝導の良いパラ水素のみに変換して使用した。陽子の検出には Si ストリップと、NaI(Tl) シンチレーション検出器を用いた。弾性散乱の識別には角度の測定とエネルギーの測定を組み合わせで行った。

IV. の実験に関しては核物理研究センターの EN コースからの核子あたり 30 MeV 程度の中性子過剰ビームを用いて移行反応の測定を可能とするために検出器の開発を行った。開発には、低いエネルギーの散乱粒子を良い角度分解能で測定するためのストリップ検出器を製作し、多チャンネルの信号を読み出すための回路を作成した。

### 4. 研究成果

I.  $^{16}\text{O}(p, d)^{15}\text{O}$  反応の断面積のエネルギー依存性を  $^{15}\text{O}$  の種々の状態について測

定することが出来た。中性子をピックアップする反応では空孔状態が強く励起され<sup>150</sup>の場合には通常の核模型では負のパリティ状態が作られる。実際、これまでの低いエネルギーの実験では正のパリティの状態は非常に弱くしか励起されなかった。ところが今回の高いエネルギーでの実験によると、正パリティの状態が強く励起されることが観測された。その状況を断面積の比として示したものが図 4.1 である。400 MeV では、負パリティの<sup>150</sup>の基底状態よりも強く励起されている。(比が 1 より大きい) すなわち正のパリティの状態への遷移強度と負パリティ状態への遷移強度のエネルギー依存性が大きく違うことを見いだした。正パリティの状態への遷移が他のものより高エネルギーになるほど数十倍相対的に強くなっており、通常の核模型を用いた反応計算では再現できない。

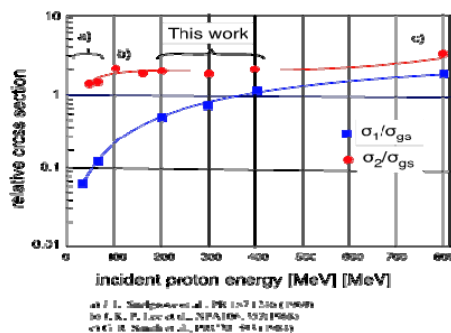


図 4.1 <sup>160</sup>(p, d)<sup>150</sup>反応の散乱角 10 度における断面積の比を入射ビームエネルギーとして示したもの。

$\sigma_1$ ,  $\sigma_2$ ,  $\sigma_3$  はそれぞれ、基底状態 ( $1/2^-$ )、第一第二励起状態 ( $1/2^+$ ,  $5/2^+$ )、第三励起状態 ( $3/2^-$ ) への遷移の微分断面積を示している。

この正パリティの状態は、<sup>160</sup>の基底状態に混ざっているテンソル力による 2 粒子-2 空孔励起状態であるとして、その状態から中性子がピックアップされるとすると、観測された断面積の相対的増加を定性的に説明することが出来る。とくにテンソル力により混ざっている波動関数には高い運動量成分が多いので高いエネルギーになるほど相対強度が増すことと矛盾しない。

II. 荷電変化断面積の測定はすべての Li, Be アイソトープおよび B, C, O の中性子過剰核において行った。当初 2 回行った

測定の結果が一致せず解析の時間を予想以上に費やしてしまった。しかし、その後の GSI での測定を行いそれとの比較から 2 回目のデータの不備であることが解り測定データとして完成した。これまでの結果として <sup>10, 11, 12, 14</sup>Be の荷電変化断面積を決定できた。それによると、<sup>11</sup>Be から中性子過剰になるにつれて陽子分布半径も単調に増加することが解った。

III. 陽子弾性散乱の実験は 2010 年春に開始し <sup>58, 66, 70</sup>Ni 核全部の陽子弾性散乱の測定を完了した。これらの中性子過剰な Ni のアイソトープは GSI 研究所の SIS シンクロトロンで加速された、核子あたり 400 MeV の <sup>86</sup>Kr ビームを一次粒子として用い、Be 標的に照射して二次ビームとして生成し、RI ビーム分離器 FRS を用いて選別、同定し使用した。実際の散乱標的での Ni ビームのエネルギーは 300 MeV とした。現在データは解析中である。

IV. 核子移行反応や非弾性散乱の測定のため実験装置の開発を行った。

ストリップ Si 検出器を用いて低エネルギー粒子の散乱角を正確に決定できるようにした散乱槽と検出器システムである。高エネルギーの粒子に関してはストリップ検出器の後ろに CsI (Tl) の検出器を置いて  $\Delta E-E$  法による粒子識別が可能ないようにもした。また、粒子のエネルギーロスと同じにしたときに最も標的数の多い固体水素固体水素標的も製作した図 4.2 は散乱槽の概念図と完成したチャンバーの一部である。

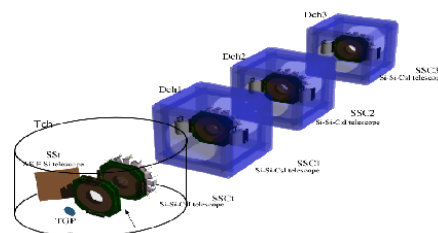


図 4.2 散乱槽の概念図

標的としては固体水素標的を開発した。核物理研究センターでの使用に適した 1mm 厚のものと、TRIUMF での実験に使用する 100  $\mu\text{m}$  ものを両方に使える装置を開発製作した。

## 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 4 4 件)

- ① I. Tanihata, “Searching for effect of tensor forces in nuclei” Modern Physics Letters A 25 (2010) 186.
- ② K. Tanaka, I. Tanihata et al., “Density distribution of Ne-17 and possible shell-structure change in the proton-rich sd-shell nuclei”, Phy. Rev. C 82 (2010) 044309.
- ③ Y. Kondo, H. J. Ong et al., “Low-lying intruder state of the unbound nucleus  $^{13}\text{Be}$ ”, Physics Letters B 690, 245 (2010).
- ④ H. J. Ong, N. Imai, D. Suzuki et al., “Anomalously hindered E2 strengths in  $^{16,18}\text{C}$ ”, International Journal of Modern Physics A 24 (2009) 2168.
- ⑤ H. J. Ong, N. Imai, D. Suzuki et al., “Observation/confirmation of hindered E2 strengths in  $^{18}\text{C}/^{16}\text{C}$ ”, European Physical Journal A 42 (2009) 393.
- ⑥ Roger, T., H. Savajols, I. Tanihata et al., “Mass of  $^{11}\text{Li}$  from the  $^1\text{H}(^{11}\text{Li}, ^9\text{Li})^3\text{H}$  reaction.” Physical Review C 79 (2009) 031603 (R).
- ⑦ Ong, H. J., N. Imai, D. Suzuki et al., “Lifetime measurements of the first excited states in  $^{16,18}\text{C}$ ”, Physical Review C 78 (2008) 014308.
- ⑧ Tanihata, I., M. Alcorta, et al. “Measurement of the Two-Halo Neutron Transfer Reaction  $^1\text{H}(^{11}\text{Li}; ^9\text{Li})^3\text{H}$  at 3A MeV.” Physical Review Letters 100: 192502 (2008).
- ⑨ Tanihata, I. “Radioactive beam science, past, present and future.” Nuclear Instrument and Method in Physics Research B 266(19-20): 4067-4073 (2008)

〔学会発表〕 (計 5 5 件)  
〔国際会議〕 (計 2 6 件)

- ① I. Tanihata, “How nuclear physics has changed in these 20 years --a role and hope for cyclotrons--” Invited talk, September 6-10th, 2010 International Cyclotron conference CYCLOTRONS10, IMP-Lanzhou, China
- ② I. Tanihata, “Looking for the Effect of Tensor Forces in Nuclei”, Invited talk, April 6-10th, 2010, ECT\* workshop on Reactions and Nucleon Properties in Rare Isotopes, Trento, Italy.

- ③ I. Tanihata, “International Symposium Forfront of Researches in Exotic Nuclear Structures -Niigata2010-”, March 1 - 4, 2010, Tokamachi, Niigata, Japan. Invited Talk: “Looking for the Effect of Tensor Forces in Nuclei”.
- ④ I. Tanihata, “GSI colloquium 2009: February 3, 2009, GSI Germany, colloquium talk “At the limit of existence = Wonderland of Neutron Rich Nuclei =”.
- ⑤ I. Tanihata, “12th International Conference on Nuclear Reaction Mechanisms”, June 15 - 19, 2009, Varenna, Italy. Invited talk: “Ikeda, the Partner for Exploring the Nuclear Highland far from the Valley of Stability”.
- ⑥ I. Tanihata, “Asia-Pacific Symposium on Radiochemistry '09” November 29 - December 4, 2009, Invited talk “Looking for the Effect of Tensor Forces in Nuclei =Revisiting the base of nuclear structure models=”.
- ⑦ H. J. Ong, and N. Imai, D. Suzuki et al.. “The Fifth International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses (ENAM08)”, September 7 - 13, 2008, Ryn, Poland. Oral+Poster presentation: “Observation/confirmation of hindered E2 strengths in  $^{18}\text{C}/^{16}\text{C}$ ”.
- ⑧ I. Tanihata, “50th Anniversary Symposium on Nuclear Sizes and Shapes”, June 23-25, 2008, University of Surrey, Guildford, UK, Invited Keynote talk “Radii and Density Distributions of Unstable Nuclei and Halos”.
- ⑨ I. Tanihata, “APS meeting at St. Louise” April 11-15, 2008, Invited talk “Measurement of two-halo neutron transfer  $p(^{11}\text{Li}, ^9\text{Li})t$  reaction at 3A MeV”.

(国内学会等) (計 2 9 件)

- ① 「(p, d)反応によるテンソル力の探索」王惠仁、谷畑勇夫、他 25 名。RCNP 研究会「核構造の真の理解に向けて—テンソル力と高運動量成分」。大阪大学、大阪。2010 年 11 月 26 日。

- ②「荷電変化断面積測定による Be 同位体の陽子分布半径の研究」、内藤卓眞、王恵仁、谷畑勇夫、他 20 名。日本物理学会第 65 回年次大会。岡山大学、岡山。2010 年 3 月 23 日
- ③2010 年日本物理学会第 65 回年次大会「荷電変化断面積測定による Li-C 同位体の荷電半径の研究」 2010 年 3 月 23 日、岡山大学、口頭発表：王 恵仁 他 20 名
- ④2010 年日本物理学会第 65 回年次大会「荷電変化断面積測定による  $^{15}\text{C}$   $^{17}\text{C}$  同位体の荷電半径の研究」 2010 年 3 月 23 日、岡山大学、口頭発表：谷口愛実 他 20 名
- ⑤平成 21 年度放射線安全管理研修会 「元素はどうやって作られたかわかる? = 星のかけらの私たちが=」 東京、2009 年 11 月 15 日 招待講演：谷畑勇夫
- ⑥日本物理学会科学セミナー「越境する科学」2008 年 8 月 23-24 日、東京大学駒場、招待講演「原子核を知ることとは自分の起源を知ること」谷畑勇夫
- ⑦日本物理学会第 63 回年次大会 近畿大学本部 2008 年 3 月 22-26 日、原著講演「 $^{11}\text{Li}$  核ハローの 2 中性子移行反応の測定」谷畑勇夫、他 24 名
- ⑧日本物理学会第 63 回年次大会、2008 年 3 月 22 日 - 26 日、近畿大学本部、大阪原著講演：「 $^{16,18}\text{C}$  の第一  $2^+$  励起状態の寿命測定」王 恵仁、他 22 名
- ⑨日本物理学会第 63 回年次大会 近畿大学本部 2008 年 3 月 22-26 日、実験核物理・理論核物理領域 合同シンポジウム「パイ中間子の役割から見える原子核の新しい描像」、招待講演「テンソル力の効果を見る新しい実験」谷畑勇夫

〔図書〕（計 1 件）

- ① ”新・物理学事典：原子核物理学”、  
谷畑勇夫、土岐博、BLUE BACKS B-1642  
講談社 2009, 6, 20 78-173 ページ、  
大槻義彦、大場一郎編

〔産業財産権〕

○出願状況（計 0 件）

〔その他〕

ホームページ等

<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/>

<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/Divisions/cnp/>

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

谷畑勇夫 (TANIHATA, ISAO )  
大阪大学核物理研究センター  
宇宙核物理部門 教授  
研究者番号： 10089873

### (2) 研究分担者

小林俊雄 (KOBAYASHI, Toshio )  
東北大学理学系研究科 教授  
研究者番号： 30186754

### (3) 連携研究者

小沢頭 (OZAWA, Akira)  
筑波大学 数理物質科学研究科 教授  
研究者番号： 80260214

松田健策 (MATSUTA, Kensaku)  
大阪大学理学研究科  
准教授  
研究者番号： 50181722