

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(A)

研究期間：2007～2010

課題番号：19204024

研究課題名(和文) 不安定核の二次核反応による中性子多体系の研究

研究課題名(英文) Study of neutron many-body system via reaction of unstable nuclei

研究代表者

下浦 享 (SHIMOURA SUSUMU)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：10170995

研究成果の概要(和文)：中性子多体系のダイナミクスの情報を得るために、不安定原子核の内部エネルギーを利用した原子核反応-発熱型荷電交換反応-を用いて軽い中性子過剰核および4中性子系の生成過程を調べることが目的である。これを実現するために、反応高分解能磁気分析装置(SHARAQ スペクトロメータ)および高分解能ビームラインにおいて飛跡を分析する検出器を設計・製作し、4中性子系の生成に最も適した原子核反応(${}^8\text{He}$, ${}^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$)で測定する2個の α 粒子の検出システムを開発した。発熱型荷電交換反応による高励起状態および二重荷電交換反応による中性子過剰核 ${}^{12}\text{Be}$ の生成に成功し、2012年前半に実施予定の4中性子系生成実験の礎が固められた。

研究成果の概要(英文)：Process of exothermic charge exchange producing neutron-rich nuclei and multi-neutron system was investigated for understanding dynamics of multi-neutron system. Tracking detectors for high-resolution magnetic spectrometer (SHARAQ) and beam-line were developed as well as an intelligent detection system for two coincident alpha particles. Populations of highly excited states via an exothermic charge exchange reaction and of light neutron-rich nuclei via double charge exchange reaction were demonstrated, which is a basis for the experiment of tetra-neutron system scheduled in early 2012.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	11,800,000	3,540,000	15,340,000
2008年度	13,000,000	3,900,000	16,900,000
2009年度	5,700,000	1,710,000	7,410,000
2010年度	4,100,000	1,230,000	5,330,000
年度			
総計	34,600,000	10,380,000	44,980,000

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：不安定核ビーム、中性子多体系、荷電交換反応、磁気分析器、中性子ドリフトライン、荷電粒子飛跡検出器

科学研究費補助金研究成果報告書

1. 研究開始当初の背景

中性子星の内部で実現していると考えられている中性子物質の性質の解明は、非対称原子核の構造および宇宙における核現象の理解のための基本的で重要な課題である。中性子物質の性質を決める素過程は、中性子-中性子相互作用であるが、核子多体系においては、三体以上の多体力が重要な役割をはたすと考えられている。実際、3核子の束縛系である³Heや³Hおよび軽い原子核に対する第一原理計算によると、それらの束縛エネルギーを再現するためには三体力が必要であることが明らかになっている。また、重い中性子過剰核に対する最近の理論では、密度が希薄なところで2中性子間の対相互作用が重要な役割を果たし、原子核の表面でのダイニュートロンの存在が予言されている。しかしながら、孤立した中性子(少数)多体系は束縛状態をつくらず、多体の散乱状態としてのみ存在するために、その生成および測定が困難であり、素過程から出発した中性子多体系の系統的实验研究はほとんどなされていない。生成の困難は主に、安定な原子核同士の反応では、中性子多体系の生成のために大きな運動量(衝撃)を与えてしまうという運動学的制限に起因する。大きな内部エネルギーをもつRIビームを用いると、ビームの持つ内部エネルギーを標的に移行することによりこの制限をはずされ、ほとんど静止した4中性子系を生成することが可能となり、理化学研究所RIBF施設の稼働にあわせて本研究を進めることとした。

2. 研究の目的

中性子多体系の情報を与える4中性子系を無反跳で生成することを目指し、

- (1) 中間エネルギー不安定核ビームの発熱型荷電交換反応による原子核の高励起状態の生成
- (2) 重イオンの二重荷電交換反応による軽い中性子過剰核の生成

を行い、反応機構を分析し、反応条件および測定器システムの最適化、収量評価および分析手法を確立し、実験を実施可能にすることを研究期間内の最終目的とした。

3. 研究の方法

この目的を達成するために、①理化学研究所のRIビームファクトリー(RIBF)施設に建設した高分解能磁気分析装置(SHARAQスペクトロメータ)および高分解能ビームラインに高精度の飛跡検出器を開発・設置し「発熱型荷電交換反応」による研究を遂行する。②大阪大学核物理研究センターの高分解能磁気分析器Grand RAIDEN施設を用いて、重イオン二重荷電交換反応により、軽い中性子過

剰核の生成機構を調べる。③SHARAQの焦点面検出器で、⁸Be核の崩壊で生成される2つのα粒子を同時測定できるシステムを開発する。

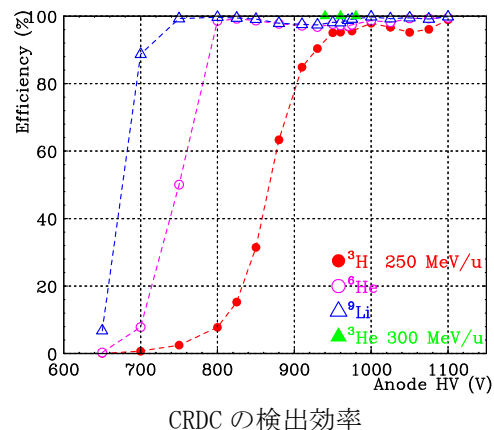
焦点面検出器の開発は、フランス重イオン研究所(GANIL)との共同研究で実施する。

4. 研究成果

- (1) SHARAQ 焦点面検出器および高分解能ビームライン飛跡検出器の開発

運動量および角度が広がっているRIビームの核反応を高分解能で測定するために、真空中で動作する低物質質量、高位置分解能の飛跡検出器を開発した。

SHARAQ 焦点面検出器は、有感領域にワイヤがなく検出効率が一律で位置分解能のよいカソード読み出し型ドリフトチェンバー(CRDC)2台で構成されており、フランスのGANIL 研究所との共同研究として製作された。ビーム照射による性能評価テストの結果、ガス圧30Torrで、焦点面における位置分解能0.4mm(FWHM)、角度分解能1mrad(FWHM)が得られ、設計性能が達成された。

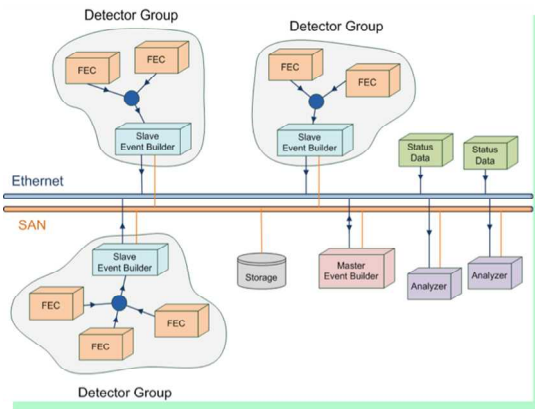


剰核の生成機構を調べる。③SHARAQの焦点面検出器として、低圧動作型多芯線ドリフトチェンバー(LP-MWDC)を開発した。性能評価テストにより、高計数率下(1MHz以上)で、飛跡再構成効率90%以上、位置分解能0.5mm(FWHM)という要求性能を満たすことが実証された。

- (2) データ収集システムの開発

全長100mのビームラインの各焦点面に配置した飛跡検出器、二次標的まわりの反応生成物検出器、およびSHARAQ焦点面検出器からのデータ収集のために、検出器システム毎のデータ収集系を統合し、イベントを再構築できるシステムを構築した。イベントの同期および論理演算が可能なモジュールおよびビームライン検出器のデータ収集系の不感時間を最小化するための電荷時間変換器を開発し、多ヒット収集可能な時間デジタル変換

器および VME バスに直結したデータ収集 CPU を導入した。それぞれの検出器をそれぞれのデータ収集系を一体化することにより、スケラブルで汎用性の高いデータ収集システムが構築された。

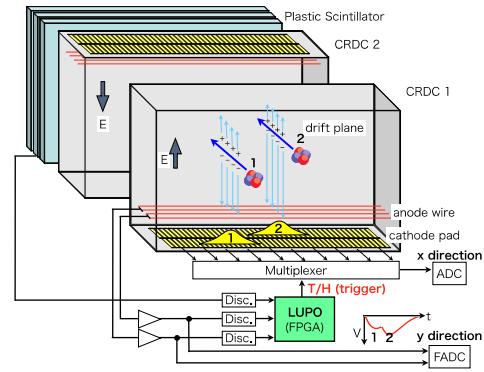
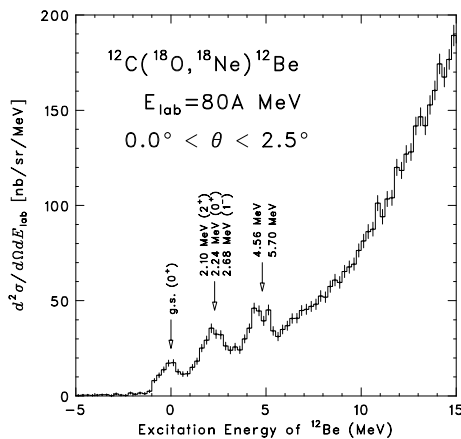


(3) 発熱型荷電交換反応による原子核の高励起状態の生成

理研 RIBF 施設において核子あたり 200MeV の不安定核 ^{12}N ビームを用いた発熱型荷電交換反応 $^{90}\text{Zr} (^{12}\text{N}, ^{12}\text{C})$ の測定を行い、 ^{90}Nb の高励起エネルギー領域 (約 30MeV) に (p, n) 反応に比べ強度の大きな成分が見つかった。これは、ガモフ-テラー巨大共鳴の高調波である、アイソベクトルスピン単極共鳴の候補と考えられる。

(4) 重イオン二重荷電交換反応による軽い中性子過剰核の生成

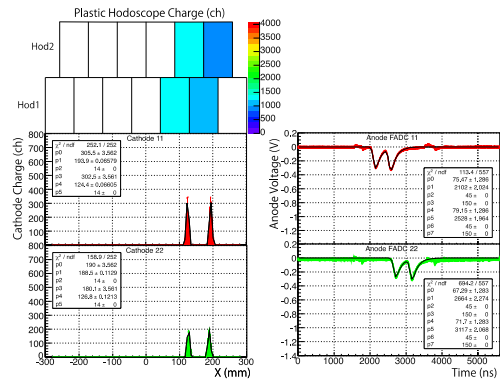
大阪大学核物理研究センターの核子あたり 80MeV の ^{18}O ビームを用いて二重荷電交換反応 $^9\text{Be}, ^{12}\text{C} (^{18}\text{O}, ^{18}\text{Ne})$ を測定し、中性子過剰核 $^9\text{He}, ^{12}\text{Be}$ の核分光を行った。束縛系である ^{12}Be の基底状態および励起状態が観測されたが、非束縛核 ^9He については、単調な連続スペクトルが得られた。二重荷電交換反応による核分光の有効性が示されるとともに、反応に関与する一粒子状態の違い等の新たな研究課題が明らかになった。



(5) 発熱型二重荷電交換反応 ($^8\text{He}, ^8\text{Be} \rightarrow 2\alpha$) の測定のための実験条件の最適化

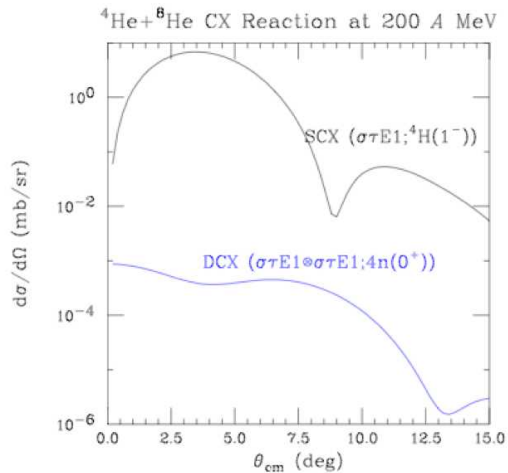
4 中性子系を無反跳条件で生成するための反応 $^4\text{He} (^8\text{He}, ^8\text{Be}) 4n$ の測定のために、SHARAQ の焦点面で、 ^8Be から崩壊する 2 つの α 粒子を同時に測定する。この測定のため、SHARAQ の 4 重極磁石の設定、標的および焦点面の位置の最適化を行った。その結果、運動量アクセプタンス $\pm 2\%$ の領域で、 ^8Be に対する実効立体角 4.2msr が得られることを明らかにした。これは、ビームの運動量拡がり $\pm 1\%$ としても、50MeV にわたる励起エネルギー領域で、1 粒子とほぼ同じ検出効率で ^8Be が測定可能であることを示している。

2 粒子を識別するために、(1) で開発した CRDC の読み出しシステムを高度化した。核反応で生成した様々な粒子のうち、2 粒子の事象を同定し、飛跡が近接した 2 粒子の識別能力を検証し、水平方向に 10 mm、垂直方向に 5 mm 以上離れた粒子が識別可能で、 ^8Be に対して 95% の事象が識別できることが示された。



(6) 反応断面積のシミュレーション

殻模型に基づく遷移密度および 2 重畳み込み法に基づく光学ポテンシャルを用いて、チャンネル結合計算による荷電交換反応のシミュレーション計算を行い、実験に必要なビームタイムを見積もった。このフレームワークによる計算は項目 (3), (4) の実験結果とも整合している。



まとめ

当初の目標である、不安定核ビームによる発熱型荷電交換反応を用いた新しい核分光学的手段の基礎づけがなされた。開発した飛跡検出器をビーム輸送系と SHARAQ スペクトロメータに設置し、開発したデータ収集システムにより高分解能測定が実現可能となった。この新たな実験装置を使い、発熱型荷電交換反応 (^{12}N , ^{12}C) の測定が行われ高励起状態の生成過程の情報が得られた。また、重イオン二重荷電交換反応による中性子過剰核の分光が可能であることが示された。本研究により最適化された実験条件および 2α 収集システムの開発に基づき、2012年4月に、4中性子系の生成実験が予定されている。

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 5 件)

(1) K. Miki, H. Sakai, T. Uesaka, H. Baba, G. P. A. Berg, N. Fukuda, D. Kameda, T. Kawabata, S. Kawase, T. Kubo, S. Michimasa, H. Miya, S. Noji, T. Ohnishi, S. Ota, A. Saito, Y. Sasamoto, M. Sasano, S. Shimoura, H. Takeda, H. Tokieda, K. Yako, Y. Yanagisawa, R. G. T. Zegers, Measurement of the Isovector Spin Monopole Resonance via the $^{208}\text{Pb}, ^{90}\text{Zr}(t, ^3\text{He})$ Reactions at 300MeV/u, Proceedings of the International Nuclear Physics Conference 2010 (INPC2010), J. Phys.:Conf. Ser. **312** 092940 (2011)

(2) T. Uesaka, S. Michimasa, S. Ota, S. Shimoura (11 番目), 他(計 31 名), SHARAQ Spectrometer - Current Status and Future Experimental Plans, Proc. Int. Symp. on Exotic Nuclei, AIP Conf. Proc. **1224**, 573-581 (2010)

(3) H. Baba, T. Ichihara, T. Ohnishi, S. Takeuchi, K. Yoshida, Y. Watanabe, S. Ota, S. Shimoura, New data acquisition system for the RIKEN Radioactive Isotope Beam Factory, Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. **A 616**, 65-68 (2010)

(4) S. Shimoura, High-resolution spectroscopy using direct reactions of RI beams, Proc. 6th Japan-Italy Symposium on Heavy-Ion Physics, AIP Conf. Proc. **1120**, 59-63 (2009)

(5) S. Shimoura, SHARAQ spectrometer and GRAPE, Proc. XVth Int. Conf. on Electromagnetic Isotope Separators and Techniques Related to their Applications (EMIS2007), Nucl. Instr. Meth. in Phys. Res. **B 266**, 4131-4136 (2008)

[学会発表] (計 9 件)

(1) S. Shimoura, High-resolution spectroscopy using direct reactions of RI beams, 11th International Symposium on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEGG11), Nov. 14-17, 2011, RIKEN, Wako, Japan

(2) 木佐森慶一、下浦享、道正新一郎、大田晋輔、野地俊平、時枝紘史、横山輪、馬場秀忠、「4 中性子系質量欠損核分光実験に向けた、検出器読み出しシステムの開発と性能評価」、日本物理学会 2011 年秋季大会, 2011. 9. 16-19, 弘前

(3) H. Kamada, Solution of Wolfenstein parameters from observables, 21st European Few-Body problem in Physics (EFB21), Aug. 31, 2010, Salamanca, Spain

(4) S. Michimasa, SHARAQ Overview and Scientific Programs, JUSEIPEN Workshop, 2009. 9. 9-10, LBNL, Berkeley, USA

(5) S. Shimoura, High-resolution spectroscopy using direct reactions of RI beams, The 6th Italy-Japan Symposium on Heavy Ion Physics, 2008. 11. 11-15, Tokai, Ibaraki, Japan

(6) S. Michimasa, Low-pressure tracking detectors for SHARAQ, ICHOR-EFES Inte. Symp. on New Facet of Spin-Isospin Responses (SIR2008), 2008. 10. 29-31, RIKEN, Wako, Japan

(7) S. Shimoura, High-resolution spectro-

scopy using RI beams - SHARAQ project,
Japanese French Symposium on New paradigms
in Nuclear Physics, 2008.9.29-10.2,
Institut Henri Poincaré, Paris, France

(8) S.Michimasa, Focal plane and beamline
detectors of SHARAQ, TORIJIN-EFES-FJNSP
LIA Joint Workshop on Next Generation
Detector System for Nuclear Physics with
RI beams, 2008.2.14-15, GANIL, Caen,
France

(9) S.Shimoura, Direct reactions of
Borromean nuclei, International Symposium
on New Facet of Three Nucleon Force - 50
years of Fujita-Miyazawa Three Nucleon
Force - (FM50), 2007.10.29-31, Univ. of
Tokyo, Tokyo, Japan

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ等

<http://www.cns.s.u-tokyo.ac.jp/~shimoura/>

<http://www.cns.s.u-tokyo.ac.jp/sharaq/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

下浦 享 (SHIMOURA SUSUMU)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号：10170995

(2) 研究分担者

道正 新一郎 (MICHIMASA SHINICHIRO)
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号：80392140
2007 年度：研究分担者
2008～2009 年度：連携研究者

鎌田 裕之 (KAMADA HIROYUKI)
九州工業大学・工学部・准教授
研究者番号：80343333
2007 年度：研究分担者
2008～2009 年度：連携研究者

(3) 連携研究者

大田 晋輔 (OTA SHINSUKE)
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号：60548840
2009 年度：連携研究者