

研究種目：特別推進研究
 研究期間：2005～2009
 課題番号：17002003
 研究課題名（和文）発熱型荷電交換反応による時間的領域でのスピン・アイソスピン応答
 研究課題名（英文）Isospin-spin responses in charge-exchange exothermic reactions

研究代表者
 酒井 英行 (SAKAI HIDEYUKI)
 東京大学・大学院理学系研究科・教授
 研究者番号：90030030

研究成果の概要（和文）：原子核の特徴的な励起モードであるスピン・アイソスピン応答の研究を、内部エネルギーが高い不安定核ビームによる発熱型荷電交換反応を用いて、これまで未開拓であった高い励起エネルギー領域（時間的領域）で展開するのが目的である。これを実現するために高分解能磁気分析装置（SHARAQ スペクトロメータ）を設計・建設し、理化学研究所 RIBF 施設に設置した。新たなスピン励起モード探索を ($t, {}^3\text{He}$) 反応を使い遂行した。その結果、 β^+ 型スピン単極共鳴を発見した。並行し、二重ベータ崩壊核 ${}^{48}\text{Ca}$ and ${}^{116}\text{Cd}$ の中間状態の微視的構造の研究も進め、ニュートリノ質量決定に不可欠な核行列要素の情報を得た。

研究成果の概要（英文）：Spin-isospin responses in highly excited state of nucleus are studied by the exothermic charge-exchange (CE) reaction with unstable beam in the time-like region. To realize the study the high resolution magnetic spectrometer SHARAQ was designed and constructed. The SHARAQ was installed in the RIBF of RIKEN Nishina Center. A search for a new spin mode was made and the β^+ isovector spin monopole resonance was found. The nuclear matrix elements (NME) for the $2\nu 2\beta$ decay, ${}^{48}\text{Ca}$ and ${}^{116}\text{Cd}$, were studied by the (p, n) and (n, p) reactions. Obtained NMEs will play a decisive role in the determination of neutrino mass once $0\nu 2\beta$ decay were found.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	36,900,000	11,070,000	47,970,000
2006年度	184,332,500	55,299,750	239,632,250
2007年度	188,351,400	56,505,420	244,856,820
2008年度	45,030,000	13,509,000	58,539,000
2009年度	15,100,000	4,530,000	19,630,000
総計	469,713,900	140,914,470	610,628,070

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：スピン・アイソスピン応答、発熱型荷電交換反応、磁気分析器

1. 研究開始当初の背景

原子核のスピン・アイソスピン応答は核物質の性質について極めて重要な情報を与える。例えば、スピン単極巨大共鳴からは、核物質の（スピン）圧縮率が求まる。これは中性子星の状態方程式を決める重要なパラメータである。しかしながら、スピン単極巨大共鳴は高い励起エネルギーにあり、従来の実験手法では研究することができなかった。そこで、理化学研究所（理研）に世界最強の不安定核ビームが得られる加速器施設が完成するのを見越して、新たな実験手法として「発熱型荷電交換反応」を開拓し、高い励起エネルギー領域でのスピン・アイソスピン応答の研究を進めることとした。同時に、発熱型荷電交換反応で探索が可能になると考えられる二重ガモフ・テラー巨大共鳴に関連し、二重ベータ崩壊の中間状態核の微視的構造の研究を進めることとした。これはゼロニュートリノ二重ベータ崩壊が発見された際に、ニュートリノ質量を得るために必須である核行列要素の理論計算を較正するのに極めて貴重な情報を与える。

2. 研究の目的

不安定核ビーム(RI ビーム)が持つ他に類の無い特質を活かした発熱型荷電交換反応を用い、これまで未開拓であった時間的運動学領域でのスピン・アイソスピン研究を推進する。特に、高励起状態に焦点を絞り以下の二つの研究を行うのを最終目標とした。

- 1) 荷電ベクトル・スピン単極 (IVSM) 巨大共鳴の確立
- 2) 二重ガモフ・テラー (DGTR) 巨大共鳴の探索と二重ベータ崩壊の中間状態核の微視的理解

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)施設に高分解能磁気分析装置(SHARAQ スペクトロメータ)を設置し「発熱型荷電交換反応」による研究を遂行する。②米国国立超電導サイクロトロン施設に於いて、発熱型反応のテスト実験を遂行しその有効性を確かめる。③大阪大学核物理研究センターの NTOF 施設と(n,p)実験施設を使い、二重ベータ崩壊の中間状態核の微視的構造の研究を進める。

4. 研究成果

1) SHARAQ スペクトロメータの設計・建設

SHARAQ は本研究課題の中心的な装置である。平成 17 年度に、高いエネルギー分解能と同時に、縦・横とも 0.5 度以下の散乱角度分解能を実現するスペクトロメータの詳細設計を行った。それに基づき平成 18、19



年度に D2 電磁石ならびに回転架台を建設し、理化学研究所 RIBF 実験施設内に設置した。SHARAQ スペクトロメータの写真を示す。(総重量約 500 トン)

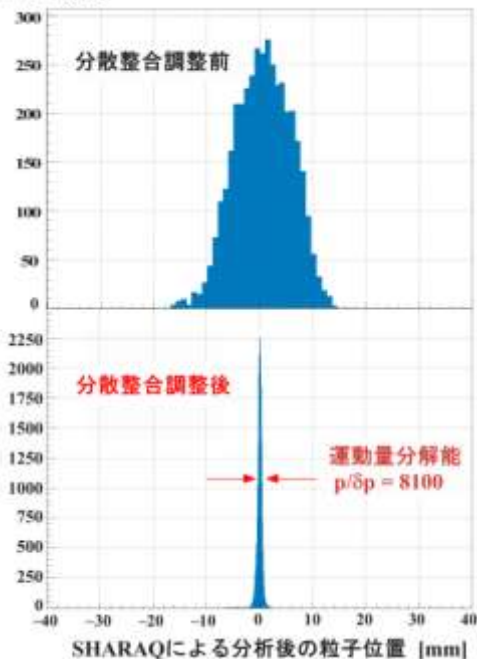
2) 分散整合ビームラインの設計と検出器

入射核破砕反応によって生成される不安定核ビームは、運動量が非常に大きな広がりをもつため、高分解能測定を行うには、その広がりを打ち消す分散整合（ビームラインと SHARAQ の運動量分散を利用する）の機能を二次不安定核ビームラインに持たせることが必須である。目的の分解能を達成する分散整合ビームラインの設計を行った。またビーム調整のために、極端に高い計数率で動作し且つ真空中でも作動する低ガス圧ビーム検出器を設計・開発した。

3) 分散整合の性能評価実験

分散整合性能の総合評価テストを ^{14}N ビームで平成 21 年 3 月と 5 月に実施した。その結果を図に示した。上図はビーム自体の運動量

粒子検出頻度



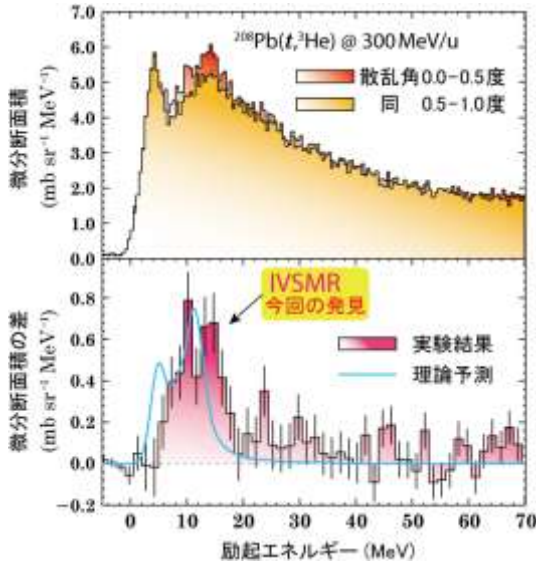
広がりを表すものであり、下図は分散整合の調整後である。約 1/8100 の運動量分解能が達成されたのを確認し、最終目標とした約 1/14,000 を達成できる目処が得られた。

4) 発熱型荷電交換反応の有効性テスト実験

米国国立超伝導サイクロトロン施設 NSCL に於いて、発熱型荷電交換反応の有効性を確認するテスト実験を平成 19 年 1 月に実施した。 $^{13}\text{C}(^{12}\text{N},^{12}\text{C})^{13}\text{N}$ 反応を利用したが、SHARAQ での荷電正型(β^+)IVSM 探索実験を遂行する際に考慮しておくべき有用な情報を得た。

5) 荷電ベクトル型スピン単極巨大共鳴の探索

β^+ IVSM は未発見である。そこで SHARAQ による最初の実験として 0.9GeV トリチウム (三重水素原子核) ビームによる $^{90}\text{Zr}, ^{208}\text{Pb}(t, ^3\text{He})$ 反応を用いて β^+ IVSM 共鳴の探索実験を平成 21 年秋に遂行した。図は $^{208}\text{Pb}(t, ^3\text{He})$ 反応の結果である。

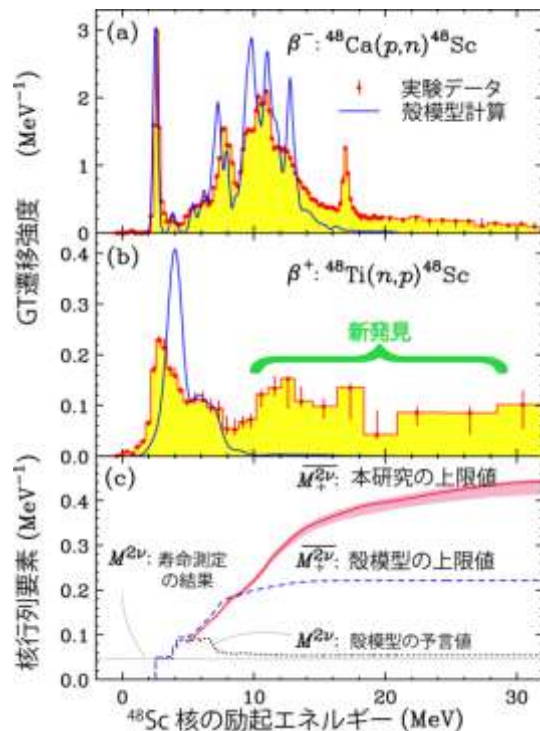


上図には散乱角度 0.0-0.5 度と 0.5-1.0 度の微分断面積の励起エネルギー分布 (スペクトル) を重ねて描いてある。IVSM 共鳴は超前方角度で現れると期待されることから、この 2 つの角度のスペクトルの差を取った分布を下図に示した。約 12MeV の励起エネルギーに 8MeV 程度の幅を持つピークが確認された。このピークは、理論で予測されていた β^+ IVSM 励起エネルギー分布とかなり良く一致することが明らかになった。このことからこのピークは β^+ IVSM 共鳴によるものと強く推測される。尚、このピークの大きさ (遷移強度) は多重極展開法による詳細な解析が今後必要である。いずれにせよ、この β^+ IVSM 発見により、核物質の圧縮率 (スピンと荷電スピンを伴う) に関する重要な情報が得られると期待される。荷電負(β^-)IVSM 共鳴については ($^{12}\text{N}, ^{12}\text{C}$) 反応で探索する計画である。実験計画は、理研 RIBF の課題評価委員会で既に採択されているが、加速器の運転スケジュール

の都合から H22 秋に実験が予定されている。 β^- IVSM と β^+ IVSM 共鳴の詳細な情報がえられると、中性子星の状態方程式を決める重要なパラメータ、「中性子スキン厚 (δ_{np})」を精度よく求めることが可能になる。今後の理論的發展が大いに期待される。

6) 二重 β 崩壊核の中間状態の微視的解明

二重 β 崩壊は、親核 \Rightarrow 中間核 \Rightarrow 娘核の連続するガモフ・テラー (GT) 型 β 崩壊で引き起こされる。この崩壊過程に於ける中間核の微視的構造は極めて重要であるが、現在までその全体像は測定が難しいため、現在まで全く知られていない。我々は、親核 \Rightarrow 中間核についての核構造情報を、(p, n) 反応で得られる β -GT 遷移強度から得た。また中間核 \Rightarrow 娘核についての核構造情報は、逆過程である娘核 \Rightarrow 中間核に対する (n, p) 反応による β -GT 遷移強度から求めた。具体的には、二重ベータ崩壊核 ^{48}Ca と ^{16}Cd それぞれについて中間核 ^{48}Sc と ^{116}In の構造研究である。実験は、最も反応機構に曖昧さが少ない中間エネルギーの 300MeV 陽子ならびに中性子ビームが得られる、大阪大学核物理研究センターの NTOF 施設と (n, p) 実験施設を使い行った。 $^{48}\text{Ca}(p, n)^{48}\text{Sc}$ 反応と $^{48}\text{Ti}(n, p)^{48}\text{Sc}$ 反応ならびに $^{116}\text{Cd}(p, n)^{116}\text{In}$ 反応と $^{116}\text{Sn}(n, p)^{116}\text{In}$ 反応の微分断面積の角度分布を高精度で測定し、多重極展開法を使い、 β^- ならびに β^+ ガモフテラー遷移強度を高励起状態まで世界で初めて導出するのに成功した。 ^{48}Sc 核について結果 (赤線) を図に示した。青実線は最も理論的に信頼性が高いと考えられている最新の殻模型計算の結果である。 β^- 側の GT 遷移強度の分布 (上図) が、GT 巨大共鳴を含めかな



りよく再現されておりが、その一方で β^+ 側の GT 遷移強度の分布(中図)が励起エネルギー 10MeV 以上で全く再現されないことが明らかになった。この結果は基底状態付近の低励起 GT 状態しか二重ベータ崩壊過程には効かないとされ無視されていた高励起 GT 状態の寄与が重要であることを如実に表わす結果であり、従来の理論的予想を完全に覆すものである。実験からは核行列要素の符号(+か-)は決められないので、加算的に足し合わせたものが下図である。核行列要素は 10MeV 以上の高励起領域で理論値の約 2 倍の寄与があることが明らかになった。これは、ニュートリノ質量を求める際に必要となる核行列要素の理論計算に大きな不定性あることを示すものである。この結果は、*Phys. Rev. Lett.* **103**(2009)12503 に発表した、核行列要素に強い制限を与える結果であるため大きく注目されている。

まとめ 当初の目標である、不安定核ビームによる発熱型反応を用いた新しい核分光学的手段の開拓はほぼ達成された。分散整合による高分解能も、ビーム輸送系と SHARAQ 電磁分析器の組み合わせで実現することができた。この新たな実験装置を使い、 β^+ 型荷電ベクトル・スピン単極共鳴を発見した。さらに二重ベータ崩壊核 ^{48}Ca と ^{116}Cd の中間状態の微視的構造の研究も (p, n) 反応と (n, p) 反応を使い進め、ニュートリノ質量決定に不可欠な核行列要素に関する情報を得ることもできた。

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 15 件)

- ① SHARAQ Spectrometer —Current status and future experimental plans—, T. Uesaka, S. Michimasa, S. Shimoura, H. Sakai, K. Yako, T. Kawabata, et al., AIP Conf. Proc. 1224, 573 (2010)
- ② Gamow-Teller strength distributions in ^{48}Sc by the ^{48}Ca (p, n) and ^{48}Ti (n, p) reactions and two-neutrino double beta decay nuclear matrix elements, K. Yako, H. Sakai, et al., *Phys. Rev. Lett.* **103**(2009)12503.
- ③ Gamow-Teller unit cross sections of the (p, n) reaction at 198 and 297 MeV on medium-heavy nuclei, M. Sasano, H. Sakai, K. Yako et al., *Phys. Rev. C* **79**(2009) 23602.
- ④ High-resolution spectroscopy using RI-beams - SHARAQ PROJECT, S. Shimoura, *J. Mod. Phys. E*, **18**(2009)2011-2014.
- ⑤ The high resolution SHARAQ spectrometer, T. Uesaka, S. Shimoura, H. Sakai, et al.,

- Nucl. Instrum. Meth.*, **266**(2008)4218-4222.
- ⑥ High resolution beam line for the SHARAQ spectrometer, T. Kawabata, G.P.A. Berg, T. Kubo, H. Sakai, et al., *Nucl. Instrum. Meth.*, B **266**(2008)4201-4204.
 - ⑦ Determination of the Gamow-Teller transition strength to ^{116}In (g.s.) by the ^{116}Cd (p, n) reaction at 300 MeV for the study of the nuclear matrix element of the two-neutrino double beta decay, M. Sasano, H. Sakai, K. Yako et al., *Nucl. Phys. A* **788** (2007) 76c-81c.
 - ⑧ SHARAQ project, A. Saito, S. Shimoura, T. Uesaka, H. Sakai et al., Proc. Tours Symposium on Nuclear Physics VI (TOURS2006), AIP Conf. Proc. **891** (2007) 131-137.
 - ⑨ Spin-isospin responses via (p, n) and (n, p) reactions, M. Ichimura, H. Sakai and T. Wakasa, *Prog. Part. and Nucl. Phys.*, **56**(2006)446-531.
 - ⑩ Neutron skin thickness of ^{90}Zr determined by the charge exchange reactions, K. Yako, H. Sagawa, and H. Sakai, *Phys. Rev. C* **74** (2006) 051303(R).

〔学会発表〕(計 26 件)

- ① スピン・アイソスピン応答の実験的研究 — 今と近未来 —, 酒井英行, 日本物理学会第 65 回年次大会、2010 年 3 月 22 日、岡山大学
- ② 300MeV/u における ^{208}Pb , ^{90}Zr (t, 3He) 反応を用いた荷電ベクトル型スピン単極巨大共鳴の探索、三木謙二郎、酒井英行、ほか、第 65 回年次大会、2010 年 3 月 21 日、岡山大学
- ③ SHARAQ 最終焦点面検出器の性能評価、道正新一郎、酒井英行、ほか、第 65 回年次大会、2010 年 3 月 21 日、岡山大学
- ④ Ion optical studies in the high resolution beam line and the SHARAQ spectrometer, Y. Sasamoto, H. Sakai et al., 2009/10/14, Waikoloa, Hawaii, U.S.A.
- ⑤ Field mapping measurement of SHARAQ dipole magnets, T. Uesaka, H. Sakai et al., 2009/10/14, Waikoloa, Hawaii, U.S.A.
- ⑥ Proposed experiment for the observation of the isovector spin monopole resonance via the exothermic charge-exchange reaction using the SHARAQ spectrometer, S. Noji, H. Sakai et al., 2009/10/17, Waikoloa, Hawaii, U.S.A.
- ⑦ 入射エネルギー 300MeV における (p,n)(n,p) 反応を用いた ^{116}Cd 二重ベータ崩壊核行列の研究、笹野匡紀、酒井英行、矢向健太郎、その他、日本物理学会第 61 回年次大会、2008 年 3 月 24 日、近畿大学

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
出願年月日：
国内外の別：

○取得状況 (計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

[その他]

ホームページ等

http://nucl.phys.s.u-tokyo.ac.jp/sakai_g/ichor.html より最近までの関連情報は、
http://nucl.phys.s.u-tokyo.ac.jp/sakai_g/。
SHARQA スペクトロメータについては、
<http://www.cns.s.u-tokyo.ac.jp/sharqa/>
<http://www.s.u-tokyo.ac.jp/movie.html?type=researcher&name=sakai080408&genre=phys>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井 英行 (SAKAI HIDEYUKI)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号：90030030

(2) 研究分担者

矢向 謙太郎 (YAKO KENATRO)
東京大学・大学院理学系研究科・助教
研究者番号：50361572

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
2006～2008 年度 研究分担者
2009 年度 連携研究者

上坂 友洋 (UESAKA TOMOHIRO)
東京大学・大学院理学系研究科・准教授

研究者番号：60322020
2005～2007 年度 研究分担者
2008～2009 年度 連携研究者

川畑 貴裕 (KAWABATA TAKAHIRO)
京都大学・大学院理学系研究科・准教授
研究者番号：80359645
2005～2007 年度 研究分担者
2005～2008 年度 連携研究者

井手口 栄治 (IDEGUCHI EIJI)
東京大学・大学院理学系研究科・講師
研究者番号：80360494
2005～2006 年度 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

(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