

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 2 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740185

研究課題名（和文） 「アイソスピン一般化陽子弾性散乱」を用いた中性子スキン厚測定法の開発

研究課題名（英文） Measurement of neutron-skin thickness by isospin-generalized proton elastic scattering

研究代表者

坂口 聡志（SAKAGUCHI SATOSHI）

九州大学・大学院理学研究院・助教

研究者番号：70569566

研究成果の概要（和文）：

中性子スキン厚を決定する手法を開発するため、(p,n)反応によるアイソバリック・アナログ状態の励起に関する研究を行った。この反応は通常の陽子弾性散乱とアイソスピン対称性の下で等価であり、その微分散断面積の勾配は中性子と陽子の密度分布の差の平均二乗半径を反映すると期待される。錫 116,120 同位体からの(p,n)IAS 反応の微分散断面積を測定し、運動量移行の関数としてその勾配を比較したところ、後者の方が 4%程度急な傾きを示した。これは、錫 120 が錫 116 に比べて厚い中性子スキンを持つことの帰結として理解することができる。

研究成果の概要（英文）：

Charge-exchange (p,n) reaction to isobaric analog state has been investigated for the purpose of developing a new approach to the measurement of neutron-skin thickness. This reaction is equivalent to the proton elastic scattering under the isospin symmetry, and the slope of its differential cross section is expected to be determined by the root-mean-square radius of the isovector component of the density distribution. The differential cross sections of the (p,n) IAS reaction from ^{116}Sn and ^{120}Sn have been measured and compared as functions of the momentum transfer. It was found that the slope of ^{120}Sn is steeper than that of ^{116}Sn by 4%, which is expected to be the consequence of the fact that ^{120}Sn has a thicker neutron skin than ^{116}Sn .

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	700,000	210,000	910,000
年度			
年度			
総計	3,200,000	960,000	4,160,000

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：原子核（実験）、原子核（理論）、中性子スキン、弾性散乱、荷電交換反応

1. 研究開始当初の背景

原子核の発見以来長きに渡り、原子核は陽子と中性子がほぼ等量混ざった対称な核物質であり、陽子分布と中性子分布は同程度の半径を持つ、と考えられていた。一方、陽子

数と中性子数のアンバランスな原子核(不安定核)の生成技術の進歩に伴い、いくつかの中性子過剰な核が異常に大きな物質半径を持つことが見出された。例えば、 ^{11}Li の半径は19倍の質量を持つ ^{208}Pb と同程度である。

この事実から、中性子過剰核の表面には中性子の層(中性子スキンやハロー)が存在すると推察されている。

中性子スキンの厚さは、非対称核物質の状態方程式を表す重要な測定量であることが古くから指摘されており、その測定方法が広く探索されてきた。アプローチの一つは、双極子共鳴の励起エネルギーなどの測定量を核構造計算を通じて中性子スキン厚に関係づける方法であるが、核構造計算の不定性から逃れることができない。もう一つのアプローチは、陽子分布と中性子分布を独立に決定し、それらの半径の差分を取る手法である。安定核については、電子散乱を用いた陽子分布の測定がなされてきた。また近年、陽子弾性散乱によって核子分布(陽子分布と中性子分布の和)を導出する手法が確立され、安定な錫同位体に $0.1\text{-}0.2\text{ fm}$ ほどの薄い中性子スキンが存在することが実証された。

一方で、不安定核の中性子スキンの厚さを測定した例は存在しなかった。その原因は、不安定核に対する電子散乱の測定が現時点で技術的に不可能なためである。錫 ^{132}Sn などの非常に中性子過剰な不安定核は、 0.5 fm 以上の厚い中性子スキンを持つと予想されている。中性子スキンの厚さは、中性子過剰な核物質の性質を解明するための最も重要な量の一つであると示唆されており、大きな注目を集めている。また、中性子スキン厚は中性子星の構造にも強く関係しており、天文学からの興味も高まっている。中性子過剰核の中性子スキン厚の測定手法が切に必要とされている、というのが研究当初の背景であった。

2. 研究の目的

(1) 本研究で提案する手法とその概念

中性子過剰核のスキン厚測定が困難である最大の原因は、不安定核に対する電子散乱の測定(すなわち陽子分布の決定)が困難なためである。そこで本研究では、電子散乱を用いずに陽子・中性子分布を決定する手法を探索する。その一つの可能性として、研究代表者は (p,n) 荷電交換反応による荷電類似状態(IAS状態)への遷移(以下では (p,n) IAS 反応)に着目した。アイソスピン対称性の下、IAS 状態は標的核の基底状態と同じ波動関数を持つため、この反応は通常の陽子弾性散乱と等価である。陽子弾性散乱には光学ポテンシャルのアイソスカラー・アイソベクトル成分の両方が寄与するが、 (p,n) IAS 反応には後者のみが寄与を果たすため、測定量からその成分を決定することができる。さらに、光学ポテンシャルのアイソベクトル成分は、標的核のアイソベクトル密度分布(=陽子分布と中性子分布の差)と強く関係しているため、 (p,n) IAS 反応は中性子のスキン構

造に敏感であると期待される(図1を参照)。したがって、密度分布のアイソスカラー及びアイソベクトル成分に敏感な通常の陽子弾性散乱と (p,n) IAS 反応の2つの独立の測定量を組み合わせることで、陽子・中性子分布を同時に決定できる可能性がある。

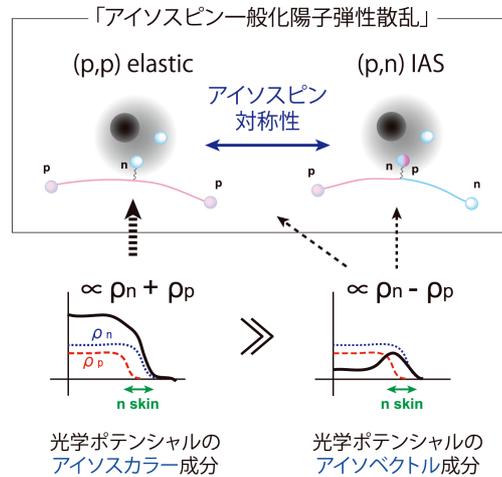


図1 「アイソスピン一般化」陽子弾性散乱を用いた中性子スキンの研究の概念図

(2) (p,n) IAS 反応の高精度データの取得

本研究では、密度分布や中性子スキン厚の知られた安定核を対象とし、手法の開発・検証を行う。スキン厚に関する情報を得るためには、断面積などのデータを高精度で取得する必要がある。一方で、 100 MeV を超える中間エネルギーにおいては、断面積が小さいこと・及び十分な励起エネルギー分解能を得ることが難しいために、角度領域及び統計誤差ともに非常に限られたデータしか存在しなかった。本研究の第一の目的は、高精度の (p,n) IAS 反応のデータを広い角度領域で取得することである。

(3) 中性子スキン厚に対する感度の評価

さらに、取得した (p,n) IAS データに、中性子スキンの厚さが反映されているかどうか明らかにすることを目的とする。スキン厚がどの測定量にどのような大きさの影響を与えているのか明らかにすることで、中性子スキン厚測定法としての可能性を議論することができる。

3. 研究の方法

大阪大学核物理研究センターにおいて、 170 MeV の偏極陽子ビームによる ^{160}Sn , ^{120}Sn (p,n) IAS 反応の微分散乱断面積・偏極分解能を角度領域 $0\text{-}15$ 度の範囲で測定した。ビームの入射エネルギーは、 100 MeV 以上を超えると断面積が減少すること、反対に 200 MeV 付近まで上げれば反応理論の不定性が小さくなること、の二つの効果を考慮して設定し

た。標的である錫 120, 116 は、同位体として選別された粉末を水素炉中で融解・還元し、圧延することで作成した。ビーム照射部分の標的厚の一様性は 1%程度であった。標的中の荷電交換反応により生じた中性子は、標的からおよそ 100m 先に設置した中性子検出器 NPOL3 により検出した。飛行時間から運動エネルギーを導出し、反応生成核の励起エネルギーを求めた。結果を次節に示す。



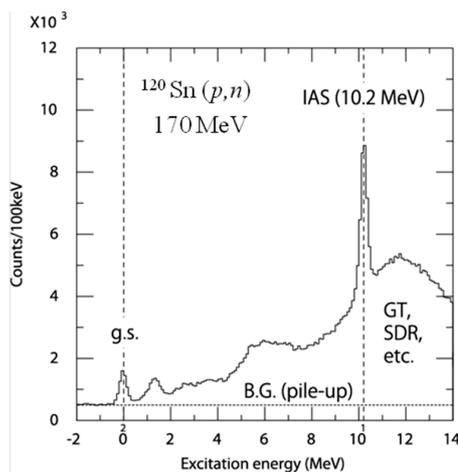
図2 水素炉中による試料の還元(左)と、融解・圧延の上で生成された錫標的(右)

4. 研究成果

(1) (p,n)IAS 反応の高精度データの取得

高分解能中性子検出器 NPOL3 を用いることで 350keV のエネルギー分解能を達成した。分解能に対する寄与は、ビームのエネルギー広がり(300keV)が支配的であり、中性子の飛行時間は十分な精度で測定できた。図3に、 ^{120}Sn (p,n) 反応による励起エネルギースペクトルを示す。10.2 MeV の状態にある幅の細いピークがアイソバリック・アナログ状態である。

上記の通り高エネルギー分解能を達成した結果、従来得ることが困難であった 150MeV 以上の中高エネルギーにおける (p,n) IAS 反応のデータを高精度で測定することに成功した。図4右側に、 ^{120}Sn (赤)・ ^{116}Sn (青) からの (p,n) IAS 反応の微分散乱断面積 (上)・偏極分解能 (下) を示す。図4左は同じ標的



を用いて測定した陽子弾性散乱のデータである。

図3 ^{120}Sn (p,n) 反応の励起エネルギースペクトル

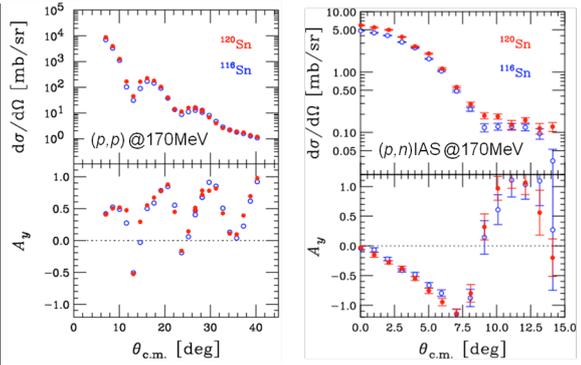


図4 [左]陽子弾性散乱、[右] (p,n) IAS 反応の微分散乱断面積(上)及び偏極分解能(下)。 ^{120}Sn は赤、 ^{116}Sn は青で示した。

(2) 小運動量移行領域における理論解析

通常の核子散乱の微分散断面積 $d\sigma/d\Omega$ は、下式のように、密度分布のアイソスカラー成分(陽子分布・中性子分布の和)のフーリエ変換 F_{IS} と散乱振幅 f_{pN} の積の二乗で表される。 q は運動量移行を表す。

$$\frac{d\sigma_{el}}{d\Omega} = |F_{el}(q)|^2 = |f_{pN}(q) F_{IS}(q)|^2$$

$$F_{IS}(q) = 4\pi \int_0^\infty (\rho_n(r) + \rho_p(r)) j_0(qr) r^2 dr$$

$$\approx A \left(1 - \frac{\langle r_{IS}^2 \rangle}{6} q^2 + \frac{\langle r_{IS}^4 \rangle}{120} q^4 + \dots \right)$$

したがって、陽子弾性散乱の断面積の勾配(運動量移行依存性)は、 $q \sim 0$ の領域においてアイソスカラー密度分布の平均二乗半径 $\langle r_{IS}^2 \rangle$ に対応する。この理論的取り扱いを (p,n) IAS 反応に拡張すると、その微分散断面積の勾配はアイソベクトル密度分布の平均二乗半径を反映していると期待される。

図5に、測定した微分散断面積を運動量移行の二乗の関数として示す。運動量移行 q が 0.5 fm^{-1} より小さい領域では、どちらの反応の微分散断面積も q^2 の指数関数として減少していることが分かる。これは、上式3行目における q^2 に比例する項によるものである。

図5の微分散断面積データから求めた勾配を、表1にまとめる。第一に、(p,n) IAS 反応の微分散断面積の勾配が陽子弾性散乱と比べて 30% 程度大きな値を持つことが分かる。これはアイソベクトル密度がアイソスカラー密度に比べて核の外側に分布していることに起因すると考えられる。第二に、(p,n) IAS 反応の断面積の勾配を錫 120, 116 の同位体間で比較すると、前者の方が 4% 程度急であることが見出された。これは、錫 120 のアイソベクトル密度が錫 116 のそれと比べて外側に分布していることに起因すると期待される。電子散乱・陽子散乱から得られて

いる既知の実験事実として、実際に錫 120 は錫 116 と比べて 0.04 fm ほど厚い中性子スキンを持つことが知られており、今回得られたデータは既知の実験事実と矛盾なく理解することができる。「アイソスピン一般化陽子弾性散乱」による中性子スキン厚測定法の可能性が、初めて実験データにより示唆された。上記の内容をまとめた論文を投稿予定である。

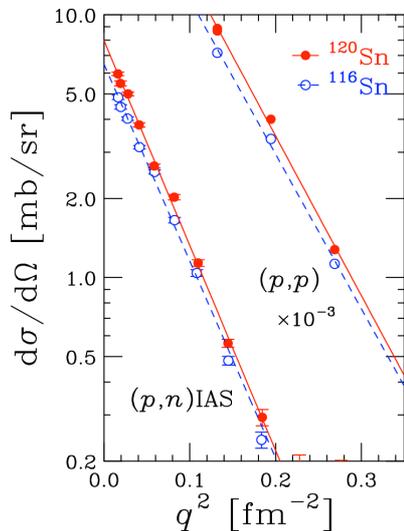


図5 錫 120, 116 からの通常の陽子弾性散乱及び (p, n) IAS 反応の微分散断面積。横軸は運動量移行の二乗。

表1 (p, p) 弾性散乱及び (p, n) IAS 反応の微分散断面積の傾き

	^{116}Sn	^{120}Sn
(p, p)	$13.5 \pm 0.1 \text{ fm}^2$	$14.0 \pm 0.1 \text{ fm}^2$
(p, n) IAS	$17.3 \pm 0.4 \text{ fm}^2$	$18.0 \pm 0.4 \text{ fm}^2$

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)

[学会発表] (計 4 件)

- ① 坂口聡志: “170MeV における錫同位体からの (p, n) IAS 反応”, 日本物理学会第 68 回年次大会, 広島大学, 平成 25 年 3 月 26 日
- ② S. Sakaguchi, T. Uesaka, H. Sakaguchi, T. Wakasa, M. Sasano, R. Chen, M. Dozono, K. Hatanaka, T. Kawabata, S. Kawase, Y. Kikuchi, Y. Maeda, H. Matsubara, H. Miyasako, Y. Nozawa, M. Okamoto, S. Ota, H. Sakai, T. Saito, H. Shima, T. Suzuki, A. Tamii, S. Terashima, H. Tokieda, K. Yako, Y.

Yasuda, and N. Yokota (poster), “Charge-exchange (p, n) reaction to isobaric analog state as probe for neutron-skin”, Direct Reactions with Exotic Beams (DREB2012), Pisa, Italy, (March 27, 2012)

- ③ S. Sakaguchi, T. Uesaka, T. Wakasa, H. Sakaguchi, R. Chen, M. Dozono, S. Kawase, Y. Maeda, H. Miyasako, M. Okamoto, S. Ota, H. Sakai, T. Saito, M. Sasano, T. Shima, T. Suzuki, A. Tamii, S. Terashima, H. Tokieda, K. Hatanaka, Y. Yasuda and K. Yako (poster), “Isospin-generalized proton elastic scattering from ^{116}Sn and ^{120}Sn at 170 MeV”, The 1st International Conference on Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS2011), Leuven, Belgium, (May 31, 2011)
- ④ 坂口聡志: “170MeV における $^{116}, ^{120}\text{Sn}$ のアイソスピン一般化陽子弾性散乱”, 日本物理学会 2010 年秋季大会, 九州工業大学, 平成 22 年 9 月 14 日

6. 研究組織

(1) 研究代表者

坂口 聡志 (SAKAGUCHI SATOSHI)
九州大学・大学院理学研究院・助教
研究者番号: 70569566

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし