

平成 22 年 6 月 14 日現在

研究種目：若手研究 (B)
研究期間：2007～2009
課題番号：19760616
研究課題名 (和文) 中間エネルギー領域における中性子弾性散乱断面積に関する実験的研究
研究課題名 (英文) Neutron Elastic Scattering Cross Sections in Intermediate Energy Region
研究代表者
佐藤 大樹 (SATO DAIKI)
日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学研究部門・研究員
研究者番号：00370403

研究成果の概要 (和文)：実験データの不足が指摘されている約 100MeV 以上の中間エネルギー領域における中性子弾性散乱断面積を、準単色中性子ビームと液体有機シンチレータを利用して、高効率で精度よく測定するための手法を確立した。取得した実験データは、他の実験データと良く一致しており、既存の高エネルギー核データファイルの問題点を明らかにした。本測定手法を用いることで、系統的な中性子弾性散乱断面積データの整備が可能となった。

研究成果の概要 (英文)：We have established a high-efficiency experimental procedure to measure the neutron elastic scattering cross sections in the intermediate energy region above 100 MeV. The present results showed a good agreement with the other experimental data obtained by using a large and complicate experimental apparatus. Some discrepancies were pointed out between the experimental data and evaluated nuclear data.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007年度	1,600,000	0	1,600,000
2008年度	1,000,000	300,000	1,300,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
総計	3,100,000	450,000	3,550,000

研究分野：原子核工学

科研費の分科・細目：総合工学・原子力

キーワード：中性子、弾性散乱断面積、中間エネルギー領域、準単色中性子、液体有機シンチレータ

1. 研究開始当初の背景

弾性散乱断面積は、核反応計算の基礎となる光学模型ポテンシャル (OMP: Optical Model Potential) の決定に不可欠であり、核データ評価のための最も重要な物理量の一つである。そのため陽子入射に対しては既に多くの実験がなされており、その実験データを基に広いエネルギー範囲において様々な

質量数の標的核種に対応した陽子用 OMP が構築されている。しかし、中性子入射に対するデータはその重要性にもかかわらず、それに適した実験施設が少なく実験も容易でないことから十分に整備されていなかった。

当時、スウェーデン Uppsala 大学のグループが、準単色中性子ビームと反跳陽子テレスコープを基にした測定システムを開発し、

96MeV 中性子に対する弾性散乱断面積を測定していた。得られたデータは精度も良く大きな注目を集めたが、測定システムの性能上これ以上のエネルギー領域でのデータ取得には適用できないことが分かっていた。100MeV 以上のエネルギー領域で利用できる中性子弾性散乱断面積データは極めて少なく、米国 California 大学 (UC Davis) のグループが連続エネルギー中性子源を用いて行った 225MeV が上限である。このような現状から、実験の豊富な陽子入射データを基に中性子用 OMP を導出する研究も試みられたが、その精度は十分とは言えない。OMP の精度は、それを使用して計算される核データの精度に大きく影響するため、高精度な中性子用 OMP の構築とそのための弾性散乱断面積の測定は急務とされていた。

また、中性子弾性散乱断面積データは原子核物理の分野でも強く望まれている。OMP にはアイソスピン依存性を有する部分があり、アイソベクター項と呼ばれている。このアイソベクター項は、陽子と中性子の弾性散乱実験を行い、それぞれのデータを再現するように決めたポテンシャルの差を取ることで決定することができる。アイソベクター項のエネルギー依存性に関する知見は、中性子星冷却機構の解明や超新星爆発による r 過程元素合成の中性子捕獲反応断面積の信頼性向上に大きく貢献する。

このような背景を受け、約 100MeV 以上の中間エネルギー領域における系統的な中性子弾性散乱断面積データの整備に資する、簡便かつ高効率な測定手法の開発とデータ取得を開始した。

2. 研究の目的

大阪大学核物理センター (RCNP) の準単色中性子源を利用し、中間エネルギー領域の中性子弾性散乱断面積測定を測定する。系統的な断面積データを整備するためには、様々な入射中性子エネルギーで広い質量数の標的核種に対する実験データの取得が重要である。これを実現するためには、従来の反跳陽子テレスコープを基にした測定システムでは検出効率が低すぎる。よって、典型的な反跳陽子テレスコープ検出器に比べ 10^4 倍程度高い検出効率を持つ液体有機シンチレータに飛行時間法 (TOF: Time of Flight) を応用した測定システムを開発し、その性能を実験的に検証する。

3. 研究の方法

(1) 実験

実験は、RCNP 中性子 TOF 室にて実施した。図 1 に実験の模式図を示す。AVF サイクロトロンにて加速した陽子ビームを電磁石内に設置したリチウムターゲットに入射し、

${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応を利用して準単色中性子ビームを生成する。リチウムターゲットを透過した陽子ビームは、磁場により曲げられ、入射陽子数をモニターするファラデーカップに輸送される。中性子弾性散乱断面積測定時の陽子ビーム強度は約 700nA に設定した。

準単色中性子ビームのエネルギースペクトルは、NE213 液体有機シンチレータを用いた TOF 測定を別途行い決定した。この測定時、陽子ビームはビームチョッパーにより 1/5 に間引かれ、強度も 10nA まで減少させた。図 2 に 137MeV 陽子ビームを厚さ 1.0cm のリチウムターゲットに入射して生成した準単色中性子ビームのエネルギースペクトルを示す。ピーク中性子エネルギー 134MeV、ピーク半値幅 3.0MeV、ピーク中性子量は 1.05×10^{10} neutrons/sr/ μC である。250MeV 及び 392MeV 陽子ビームに対しても、同様に準単色中性子ビームのエネルギースペクトルを測定した。

生成した準単色中性子ビームはコリメータを通して、散乱標的と中性子検出器のある TOF 室に導かれる。コリメータの出口における直径は 5.5cm である。散乱標的は、リチウムターゲットから 10m 下流において、ポリエチレンラインを用いて保持した。

散乱標的において散乱した中性子は、各散乱角度に設置した直径 12.7cm 厚さ 12.7cm の NE213 液体有機シンチレータにより検出される。この際、中性子の飛行時間を測定することにより、弾性散乱中性子と遅れてやってくる非弾性散乱中性子を弁別することができる。飛行距離は、前方角度で 5m、後方角度で 2.5m とした。

散乱標的において生成された荷電粒子による事象を除去するために、中性子検出器の前方にプラスチックシンチレータを配置した。また、コリメータにおいて散乱した中性子の検出器への入射を避けるため、 $60 \times 100 \times 20\text{cm}^3$ の鉄製シールドをコリメータと検出器の間に配置した。

全てのデータは、NIM/CAMAC 電子回路を通してパーソナルコンピュータにイベント毎に記録された。

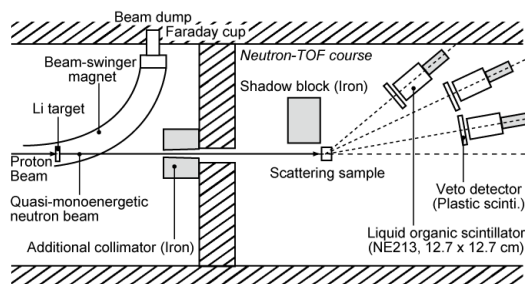


図 1 RCNP における実験配置図

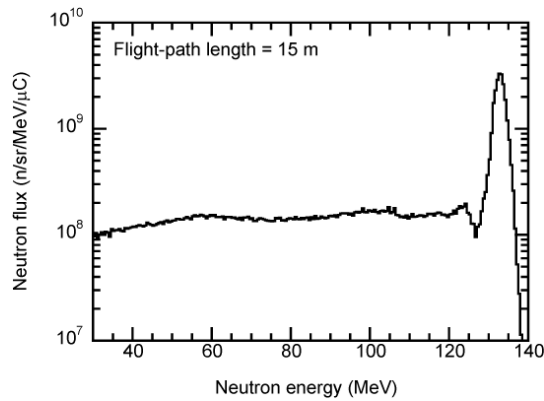


図 2 137MeV 陽子入射による ${}^7\text{Li}(p,n)$ 反応からの準単色中性子ビームのエネルギースペクトル

(2) データ解析

データ解析はオフラインで行った。図 3 にプラスチックシンチレータの波高分布による荷電粒子の弁別を示す。高発光量領域において観測される事象が荷電粒子によるものである。NE213 液体有機シンチレータは、中性子のみではなくガンマ線にも有感である。中性子に対する断面積を導出するためには、ガンマ線による事象を除去する必要がある。このため、ゲート積分法に基づく波形弁別 (PSD: Pulse Shape Discrimination) を採用した。図 4 に PSD 解析の結果を示す。中性子とガンマ線が適切に弁別されていることが分かる。

上記の粒子弁別を通して、中性子事象のみを取り出した後、図 5 に示すような TOF 分布を作成した。TOF チャンネルが大きい程、時間的に早い事象である。高チャンネルにみられるピークが弾性散乱中性子による事象であり、低チャンネル側に分布している事象が非弾性散乱中性子によるものである。図から分かるように、この解析により弾性散乱事象を選択的に取り出すことができる。これらの事象を用いて、最終的な中性子弹性散乱断面積を重心室系で導出した。

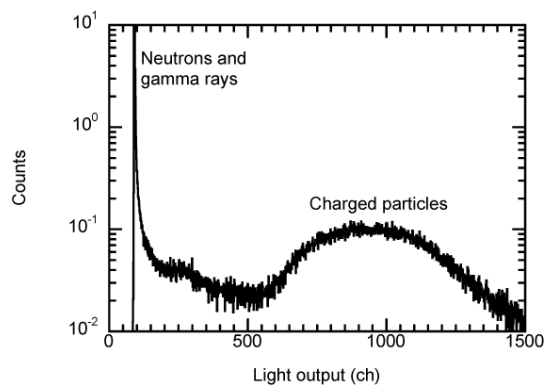


図 3 プラスチックシンチレータの発光量分布

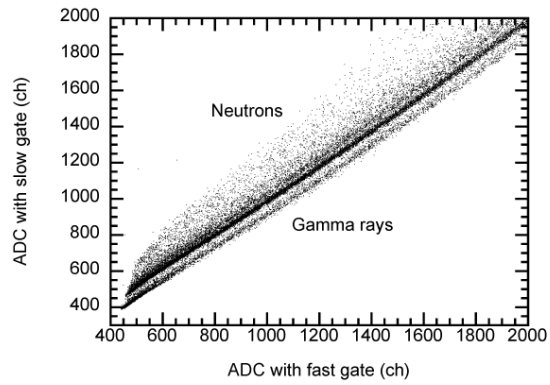


図 4 ゲート積分法による波形弁別の結果

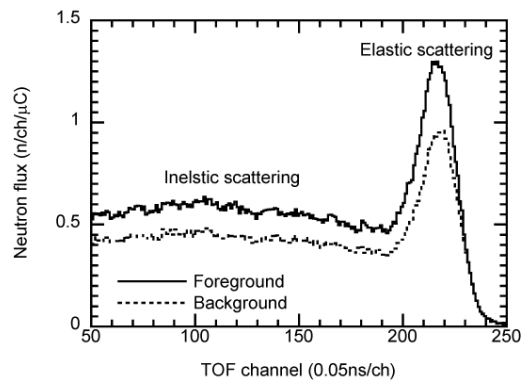


図 5 TOF 分布

4. 研究成果

(1) 中性子弹性散乱断面積の測定結果

図 6 に本研究により取得した 134MeV 中性子の炭素原子核に対する弾性散乱断面積を示す。データは、反跳陽子テレスコープを用いて測定した UD Davis グループの実験値及び核データファイル (JENDL/HE-2007, ENDF/B-VII.0) の評価値と比較した。図から分かるように、本研究の結果と UC Davis の結果は非常に良く一致した。このことから、本研究で開発した測定手法を用いて、中間エネルギー領域における中性子弹性散乱断面積を適切に測定できることが実験的に証明された。本研究の測定手法は、従来の反跳陽子テレスコープを用いる手法に比べ、セットアップが単純であり、また高効率で測定できるといった利点を有する。これにより、ビーム強度の弱い加速器施設においても高精度な測定が可能となり、今後の系統的な断面積データの整備において、極めて有益である。

核データファイルとの比較から、ENDF/B-VII.0 は前方角で実験値と一致する一方、後方角では過小評価していることが分かった。また、JENDL/HE-2007 は、前方角では 30% 程度過小評価しているが、後方角では実験値を良く再現している。このような不一致は、核データ評価の際に用いた OMP に

起因すると考えられる。本研究で開発した測定手法を用いて実験データを系統的に整備することにより、精度の良い中性子 OMP の構築及び核データファイルの高度化に資することができる。

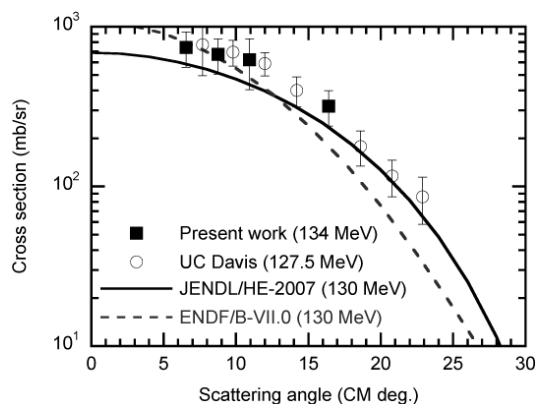


図6 134MeV中性子の炭素原子核に対する弾性散乱断面積

(2)得られた成果の位置づけ

本研究成果の普及のために参加した「11th Neutron and Ion Dosimetry Symposium (NEUDOS11)」において、同じく中性子弾性散乱断面積を測定している Uppsala 大学のグループと情報交換を行った。Uppsala 大学では、測定システムの大幅な改良により 175MeV 中性子の弾性散乱断面積の測定を開始していたが、反跳陽子テレスコープに基づく複雑な測定システムのため、最終的な断面積導出には至っていない。一方、本研究では既に 134MeV 中性子を用いた測定に成功しており、同じ施設において 250MeV 及び 392MeV 領域の測定も可能である。Uppsala 大学では加速器性能の制限から 175MeV 以上の測定は不可能であり、このエネルギー以上でのデータ取得が可能性であるのは、本研究のみである。

現在要求されている広範なエネルギー領域及び核種に対する実験データの整備という観点では、本研究の成果が適しているが、データのエネルギー分解能に関しては Uppsala 大学の手法が優っている。高精度な中性子 OMP 構築のためには、取得した実験データを相互に比較し、協力して研究を進めていく必要がある。

(3)今後の展望

RCNP における加速器ビームタイムの運営上の問題もあり、当初計画していた 250MeV 及び 392MeV 陽子ビームを利用した弾性散乱断面積の測定を実施することができなかった。しかし、本研究で実施した 137MeV 陽子ビームを用いた実験及びシミュレーション解析の結果から、より高いエネ

ルギー領域においても開発した測定手法が有効であることが示されている。また、この成果が認められ、既に RCNP における 250MeV 及び 392MeV 陽子ビームを用いたビームタイムを獲得している。本研究の成果を利用して、今後は様々な標的核種に対する系統的な断面積データの取得を実施する。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計2件)

佐藤大樹 (他 12 名), “Measurement of elastic neutron scattering cross sections for carbon at 134 MeV”, Radiation Measurement, 査読有り, Accepted, (2010).

佐藤大樹 (他 13 名), “Experimental method for neutron elastic scattering cross section measurement in intermediate energy region at RCNP”, Journal of Nuclear Science and Technology, 査読有り, Accepted, (2010).

[学会発表] (計4件)

佐藤大樹 (他 12 名), “Measurement of elastic neutron scattering cross sections for carbon at 134 MeV”, 11th Neutron and Ion Dosimetry Symposium (NEUDOS-11), 2009 年 10 月 12 日, Cape Town (South Africa).

佐藤大樹 (他 13 名), “Experimental method for neutron elastic scattering cross section measurement in intermediate energy region at RCNP”, The Fifth International Symposium on Radiation Safety and Detection Technology (ISORD-5), 2009 年 7 月 16 日, Kitakyushu (Japan).

佐藤大樹 (他 12 名), “中間エネルギー領域における中性子弾性散乱断面積の測定”, 日本原子力学会 2009 年春の年会, 2009 年 3 月 23 日, 東京 (日本) .

佐藤大樹 (他 2 名), “中間エネルギー領域における中性子弾性散乱断面積測定のための高効率中性子検出システムの性能試験”, 第3回高崎量子応用研究シンポジウム, 2008 年 10 月 9 日, 高崎 (日本) .

6. 研究組織

(1)研究代表者

佐藤 大樹 (SATO DAIKI)

日本原子力研究開発機構・原子力基礎工学研究部門・研究員

研究者番号: 00370403