

平成 30 年 6 月 4 日現在

機関番号：12601

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2016～2017

課題番号：16H06716

研究課題名(和文) Study of giant resonances in neutron drip line nuclei - Related detector development for real-time particle identification

研究課題名(英文) Study of giant resonances in neutron drip line nuclei - Related detector development for real-time particle identification

研究代表者

Stuhl Laszlo (Stuhl, Laszlo)

東京大学・大学院理学系研究科(理学部)・特任研究員

研究者番号：20785232

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,300,000円

研究成果の概要(和文)：中間エネルギーにおける荷電交換反応は原子核のスピン・アイソスピン研究の強力な手段である。逆運動学(p,n)反応により、エキゾチック核を高ルミノシティで研究することができるが、ガンマ線のバックグラウンドが存在する。中性子を明確にタグ付けすることをリアルタイムで行い、問題を解決する。私は新タイプのプラスチックシンチレータとデジタル読み出し系を組み合わせた装置を開発し、異なる粒子が作り出す信号の違いに感度を持たせた。このPANDORA(Particle Analyzer Neutron Detector Of Real-time Acquisition)システムのテストと最適化を行った。

研究成果の概要(英文)：The charge-exchange reactions at intermediate energies are a powerful tool to study the spin-isospin excitations of nuclei. The technique of inverse kinematics enables the (p, n) reactions on exotic nuclei with a high luminosity to be studied, but suffers from the large gamma-ray background. A clear tagging of low-energy recoil neutrons in realtime (i.e. prior to recording the event data by online neutron-gamma discrimination) may solve this problem. I developed a device based on novel plastic scintillators coupled to digital readout which is sensitive to the differences of the signals created by different particles. The first prototypes of the PANDORA (Particle Analyzer Neutron Detector Of Real-time Acquisition) system was constructed and tested. The parameter of particle identification method were optimized.

研究分野：実験核物理

キーワード：ガモフ・テラー共鳴 不安定核 荷電交換反応 中性子検出器 中性子・ガンマ線分離 飛行時間法 巨大共鳴

1. 研究開始当初の背景

理化学研究所、GANIL、ミシガン州立大 NSCL、GSI/FAIR の新施設において 2010 年頃から不安定核 (RI) ビームが利用可能となった。原子核の変形、単一粒子の軌道占有率、クラスター化などの静的な性質については研究が進展している。一方で、原子核の励起エネルギーが 10 MeV 以上となる巨大共鳴状態の励起といったダイナミックな性質については研究が始まったばかりであった。

巨大共鳴状態の研究手段として、逆運動学 (p,n) 反応は有力な反応で、出射粒子が中性子であるため、標的が比較的厚くても検出器まで中性子が届くというメリットがある。一方で、中性子が検出器に与える信号は小さくなく、ガンマ線等のノイズに埋もれてしまう問題が存在した。このため、ガンマ線を効率的に取り除いて信号・雑音比を向上する検出器が求められていた。

2. 研究の目的

原子核の巨大共鳴を中性子・陽子数の差の関数で系統的に調べ、巨大共鳴のベースとなっている残留相互作用を理解することが本研究の目標である。最も基本的な巨大共鳴としてガモフ・テラー共鳴を逆運動学 (p,n) 反応を通して調べる。

このため、100keV—1MeV 程度の低エネルギーの中性子検出を目的とした位置感応型検出器で、デジタル回路によりガンマ線と中性子をリアルタイムで弁別可能な新しい検出器システムを開発する。この検出器システムを PANDORA (Particle Analyzer Neutron Detector Of Real-time Acquisition) と名付けた。この際、逆運動学実験の運動学的要請から、角度分解能 1° 程度で、実験室角度範囲 (3° ~120°) を覆う形態が PANDORA の最終形となるため、個々のシンチレータの形状は細長い検出器バーとする。また、飛行時間 (TOF) 法により中性子の運動エネルギーを測定するため、飛行時間分解能 <1ns が必要である。カウンタの時間分解能 250 ps を目標とした。

3. 研究の方法

最近開発されている新しい Eljen 社プラスチックシンチレータ EJ-299 は、従来の液体シンチレータと同様、中性子・ガンマ線の弁別機能がある。これを CAEN 社製デジタル 1730D に入力して信号波形による弁別を行う。弁別方法は、PMT からの波形を電荷積分時間をかけて集計し、 Q_{short} と Q_{long} を算出したうえで、次の比で PSD 指標を求め判別に使うことが有効であることが知られている：

$$PSD = \frac{Q_{long} - Q_{short}}{Q_{long}}$$

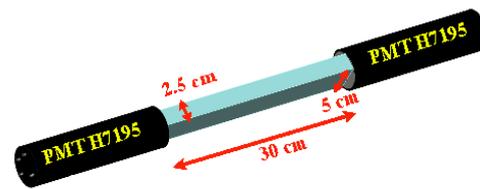


図 1：PANDORA 検出器の概略図。

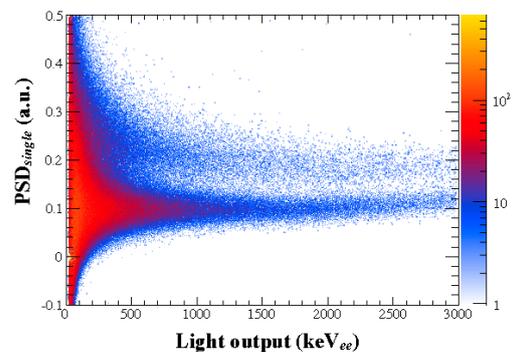


図 2：PSD 値と EJ-299-34 シンチレータ全発光量の相関。上側が中性子、下側がガンマ線である。

4. 研究成果

(1) 単一検出器の作製と最適化

PANDORA の中性子カウンタについて、サイズを 2.5 x 5 x 30 cm³ とし、両端に光電子増倍管アセンブリ (以下、PMT とする。浜松ホトニクス H7195) を接着したものを採用した。これをアルミナイズドマイラー膜で包み、黒色テープで遮光した。図 1 に PANDORA 検出器を示す。左右の PMT での光検出時刻の差から長手方向の位置を知ることができる。この PMT 出力を CAEN 社製デジタル 1730D に入力した。V1730D は 14 ビット、500 M サンプル/秒のフラッシュ ADC として動作させた。時間分解能が 1 ns より良いことが確認できた。

中性子線源 ²⁵²Cf で性能の評価を行った。 Q_{long} として電荷収集ゲート長を 500 ns とし、 Q_{short} について 48 ns としたときに、PSD による中性子-ガンマ線分離能が最適化された。シンチレータ発光量に対する PSD のプロットを図 2 に示す。性能の尺度となる Figure of Merit は、従来の背の低い円柱形状の検出器と比べて性能に遜色がないことも分かった。中性子判定の閾値を適当に設定することで、線源起源の 95% の中性子を同定する一方、ガンマ線の 94% をリジェクトできることが分かった。V1730D の設定をリアルタイム弁別モードに変え、トリガーレートを一桁下げることができることも確認した。

次に理化学研究所 RI ビームファクトリー (RIBF) SHARQA 実験施設にて、液体水素標的標的から距離 0.95 m の位置に PANDORA を置き

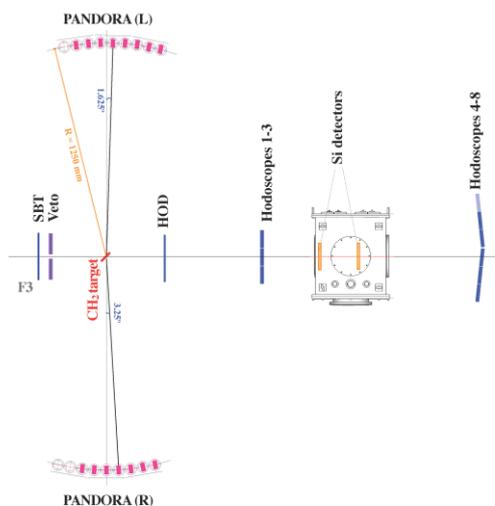


図 3. HIMAC でのパイロット実験のセットアップ。

てテストを行い、典型的な実験では、カウンターヒットのうち 70% はガンマ線であり、リアルタイム弁別が、信号-雑音比・測定効率の観点から非常に有効であるとの結論に達した。

(2) HIMAC でのパイロット実験

RIBF でのパイロット実験として、放射線医学総合研究所 HIMAC 施設で ${}^6\text{He}$ に関する測定を行った。実験には SB2 ビームコースを用い、運動エネルギー 160 A MeV の 1 次ビームの入射核破砕反応によって 123 A MeV の ${}^6\text{He}$ ビームを作成した。 ${}^6\text{He}$ の純度は 96%，強度は 2×10^4 であった。このビームを厚さ 5 mm のポリエチレン標的に照射し、周囲に設置した PANDORA 中性子検出器により散乱中性子検出した。反応生成物の ${}^6\text{Li}$ を同定するため、下流にはプラスチック検出器からなるホドスコープ設置した。

データ取得系により、エネルギー数十 keV 以上中性子を検出した。波形分別に PSD を用いたが、上下読み出しの平均値 PSDmean を基準とした。中性子の飛行時間と散乱角度(実験室系の角度範囲は 75-79 度であった)から残留核の励起エネルギーが算出された。図 4 に ${}^6\text{He}(p, n)$ 反応で期待される運動学的相関を示す。

ビーム粒子 ${}^6\text{He}$ と出射粒子 ${}^6\text{Li}$ を要求することにより、図 5(a) に示すような運動学相関が得られた。終状態が ${}^6\text{Li}$ の基底状態となる遷移(図 4 で 0 MeV と示したものの) S/N 比が改善した。さらに PSDmean に基づき中性子を選び出すことにより、図 5(b) に示すように PANDORA による PSD が有効に機能していることが確認された。

理化学研究所のビームタイムは 2018 年 5 月下旬にスケジュールされ、27 本のカウンタから成る PANDORA が投入される。

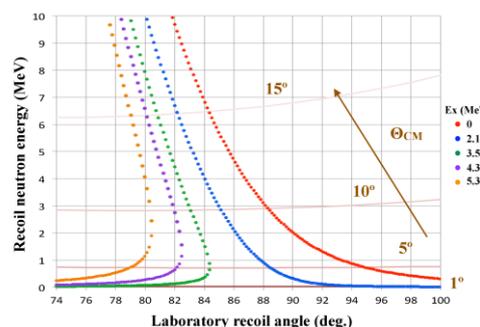


図 4. 逆運動学 ${}^6\text{He}(p, n)$ 反応で期待される運動学的相関。終状態の励起エネルギーごとに色を変えてプロットしている。

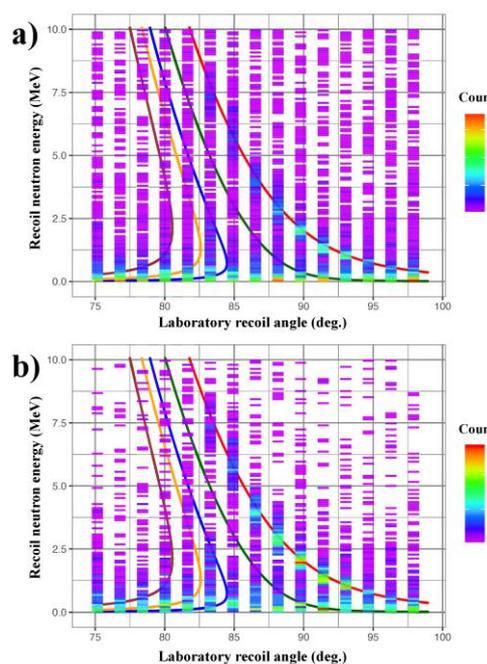


図 5. 図 4 を実験値とともにプロットしたもの。a) は PSD による中性子・ガンマ線弁別なし。b) は PSD による弁別あり。

5. 主な発表論文等

[雑誌論文] (計 4 件)

① Stuhl Laszlo, “Study of the Gamow-Teller transitions in ${}^6\text{He}$ with PANDORA system (17H391)”, 2017 Annual Report of the Research Project with Heavy Ions at NIRS-HIMAC, 掲載予定. 査読無し.

② Stuhl Laszlo, Sasano Masaki, Yako Kentaro, Yasuda Jumpei, Baba Hidetada, Ota Shinsuke, Uesaka Tomihiro, “A New Low-energy Plastic Scintillation Neutron Detector For Real Time Pulse Shape Discrimination”, Proceedings of Science 85, 1-6 (2017). 査読有り.
DOI: 10.22323/1.281.0085

③ Stuhl Laszlo, Yako Kentaro, Sasano Masaki, Yasuda Jumpei, Baba Hidetada, Ota

Shinsuke, Uesaka Tomihiro, “Experimental setup of the ${}^6\text{He}(p,n)$ measurement at HIMAC and identification of the charge exchange (p,n) reaction channel”, CNS Annual Report 2016, 63-64. 査読有り.

④ Stuhl L., Sasano M., Yako K., Yasuda J., Baba H., Ota S., Uesaka T., “PANDORA, a large volume low-energy neutron detector with real-time neutron-gamma discrimination”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A 866, 164-171 (2017). 査読有り.
DOI: 10.1016/j.nima.2017.06.01

[学会発表] (計 3 件)

① Jian Gao, Stuhl Laszlo et al., “Study of Gamow-Teller Transition on ${}^6\text{He}$ with PANDORA”, 日本物理学会第 73 回年次大会, 東京理科大, 2018 年 3 月 22 日-25 日.

(国際学会)

② Stuhl Laszlo, “Low-energy neutron detector with real-time neutron-gamma discrimination for radioactive beam experiments (PANDORA)”, International Conf. on Advances in Radioactive Isotope Science (ARIS2017), Keystone, USA, 2017.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

Stuhl, Laszlo (シュトゥール, ラスロー)
東京大学・大学院理学系研究科・特任研究員
研究者番号: 20785232