

平成 30 年 6 月 6 日現在

機関番号：82401

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15H03672

研究課題名(和文)アイソマービーム製造技術の確立による励起状態からのGT遷移測定

研究課題名(英文)GT transitions built on excited states by establishing isomer beam experiments

研究代表者

酒井 英行 (SAKAI, Hideyuki)

国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・部長

研究者番号：90030030

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 11,700,000円

研究成果の概要(和文)：原子核のアイソマー励起状態を使って励起状態からの核反応を実現するための基礎技術を確立することである。具体的には、励起状態にあるアイソマーの弁別手法(TOF法)の基盤的技術開発とアイソマー状態をより多く含む破砕核反応を実験的に見つけるのが目的である。ダイヤモンド検出器と高速回路系により、時間分解能(2台の検出器合計)40ps(FWHM)を実現した。52Fe(12+)アイソマー比Rの高い破砕核反応を、58Ni, 59Co, 82Krを一次ビームとし系統的に調べ、82Kr→52Fe(12+)+10p20nに於いてR～35%であることを得た。

これにより当初目標は達成された。

研究成果の概要(英文)：The main aim of this research is to establish a technical method to discriminate an isomeric state via a TOF measurement in the beam line and to find a fragmentation reaction to have a large isomeric ratio.

We achieved the time resolution of 40 ps in FWHM by utilizing a diamond detector and a fast preamplifier system. This value is enough for the future isomer-(p,n) measurement. We searched for a fragmentation reaction which has a high isomer ratio R for 52Fe(12+). The systematic study was made for the primary beams of 58Ni, 59Co and 82Kr. We finally found that the fragmentation reaction of 82Kr→52Fe(12+)+10p20n has about R～35%. This R value is the minimum value that can be applied for the future experiment.

Thus the initial aims are completely fulfilled.

研究分野：原子核物理学

キーワード：実験核物理 アイソマービーム 破砕核反応 ダイヤモンド検出器

1. 研究開始当初の背景

高温高密度状態にある星の内部や(超)新星爆発過程では、原子核の励起状態を経由する核反応やベータ崩壊は重要な寄与をする。しかしながら、励起状態核を標的とする核反応実験は従来不可能だと考えられ研究されたことがなく情報が全くなかった。

2. 研究の目的

本研究は原子核のアイソマー励起状態を使って励起状態からの核反応を実現するための基礎技術を確認することである。具体的には、励起状態にあるアイソマーの弁別手法(アイソマータグging)の基盤的技術開発とアイソマー状態をより多く含む破碎核反応を実験的に見つけるのが目的である。最初の研究例として、反応生成率の観点から最も現実的な、逆運動学(p,n)荷電交換反応による励起状態からのガモフ・テラー(GT)遷移測定を想定しとを準備し、可能なら予備的測定に進む。GT 遷移は星の様々な進化過程に於いて重要な役割を果たす。

3. 研究の方法

理研 RIBF 施設で製造する不安定核製造分離装置(BigRIPS)による二次ビームと100m長の高分解能ビームラインならびに高分解能SHARAQ 電磁スペクトロメータを利用して実験することを想定し、研究計画を立案した。

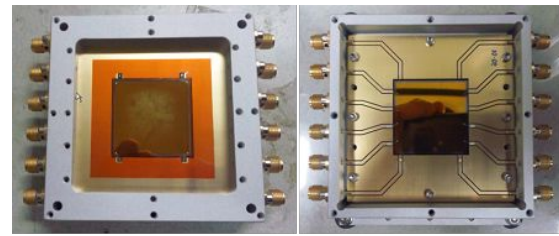
破碎核反応で製造された二次ビームの粒子が、アイソマー状態にあるのか基底状態にあるのかの弁別は、ビームラインを利用した粒子の飛行時間測定(TOF 法)を利用して粒子の全質量を求めることで行う。それには超高速ビーム検出器とその測定回路系が本質的役割を果たす。そのために応答速度の早い検出器と回路系の整備・開発を行う。因みに必要となる時間分解能は40ps(FWHM)である。

一方、アイソマー状態核の製造には破碎核反応が使われる。そのアイソマー製造効率IR(目的とする核の中でアイソマー状態にある核の比率)は、概ねIR=30-50%程度であることが知られている。実験には、当初は¹²Beのアイソマー状態の利用を想定していたが、最も質量分離がしやすい高い励起エネルギー(約7MeV)を持つ⁵²Fe(12+)アイソマー状態を使うこととした。より大きなIR値(>30%)を持つ破碎核反応を探索・確認することが肝要である。

4. 研究成果

超高時間分解能検出器系の開発

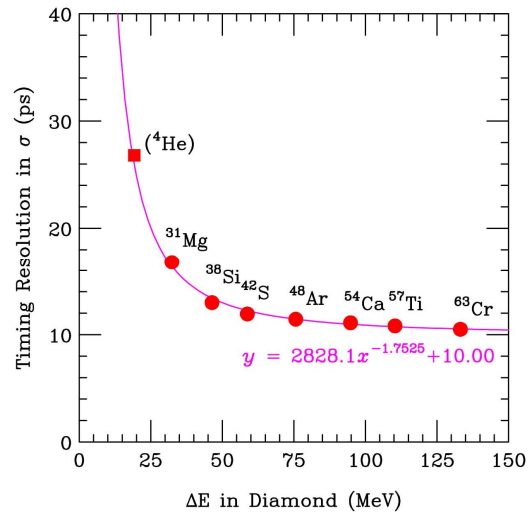
高粒子計数率かつ高時間分解能を持つダイヤモンド検出器を時間測定に利用する。そこでまず、当初手持ちであった小型多結晶ダイヤモンド検出器(有感面積28mm×28mm、厚さ0.2mm)を用いて、理研RIBFからの二次RIBビームを用いてその性能テストの実験を行った。写真はダイヤモンド検出器である。



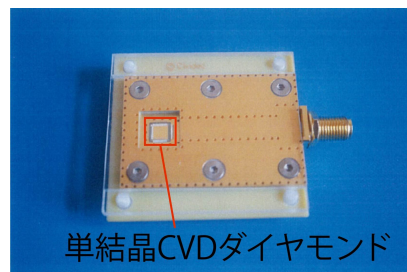
Side A

Side B

その結果、例えば⁵⁴Ca近傍核で、ダイヤモンドの固有時間分解能5ps(シグマ)、ダイヤモンド+TOF計測システムによる時間分解能12ps(シグマ)という結果を得ることができた。この結果から、更に時間分解能を上げるには、回路系の改良が不可欠であると考え早い回路(高速プリアンプCIVIDEC社製)系の整備と開発を行った。その結果、28ps(FWHM)時間分解能(2台の検出器合計で40ps(FWHM))を実現し、当初目標を達成できた。これによりほぼ最終形に近い検出器と測定系を整備することができた。

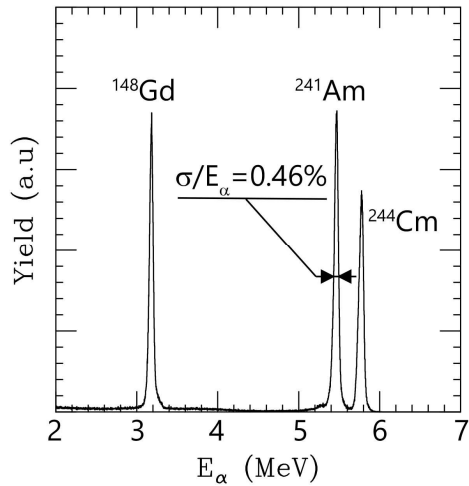


その一方で、多結晶ダイヤモンド検出器は、エネルギー分解能が約20%程度であり、粒子識別E検出器としての利用は困難であった。時間測定だけでなくE検出器としてもダイヤモンド検出器が利用できると実験的なメリットは非常に大きい。そこで、ダイヤモンド検出器の素材を従来の多結晶タイプでなく単結晶タイプのものも試してみることにした。単結晶ダイヤモンド検出器(有感面積4mm×4mm、厚さ0.14mm アドフューテック社製)を開発・購入しエネルギー分解能ならびに時間分解能を調査した。



単結晶CVDダイヤモンド

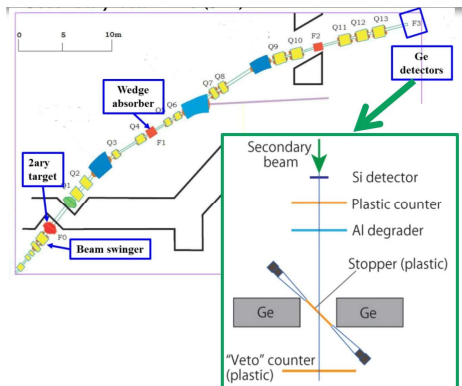
写真は、その単結晶ダイヤモンド検出器である。
この検出器のエネルギー分解能を、三種混合線源(Gd, Am, Cm)を用いて測定した。その結果のエネルギースペクトラムを下図に示す。



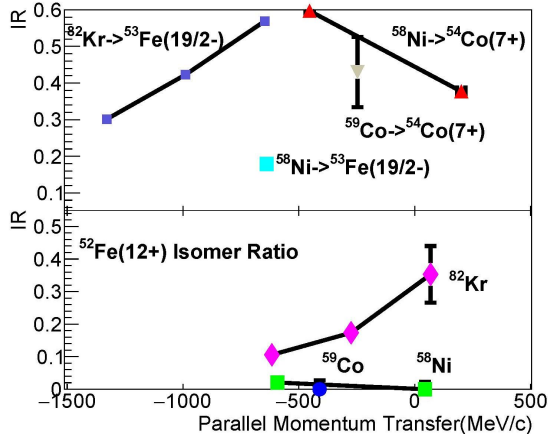
0.46% (シグマ)、半値幅として約 1% というシリコン検出器並みの高いエネルギー分解能を得た。単結晶ダイヤモンド検出器が超高時間分解能をもち、且つ高いエネルギー分解能も合わせ持つ、ほぼ理想的なアイソマー分離検出器であることが明らかになった。しかしながら検出器サイズが 4mm x 4mm と小さいので、今後実用には大面積 (25mm x 25mm 程度) 化に向けた開発が必須である。

高アイソマー比 IR を持つ破砕核反応の探索

様々な核のアイソマーについて、実験的には概ね IR=30-50% 程度であることが知られていた。しかしながら、一次ビーム種やエネルギーについての IR 値の系統的な測定はなされたことはなかった。また本研究を開始した当時 $^{52}\text{Fe}12+$ アイソマーについての IR 値測定の報告も無かったこともあり、まず $^{52}\text{Fe}12+$ の IR 値測定から始めることにし、一次ビームの核種選択が重要であるが、我々は不純物アイソトープの交じりが少なく純度の高い ^{58}Ni 核を一次ビームとして選択した。破砕核反応としては、6 核子移行反応 $^{58}\text{Ni} \rightarrow ^{52}\text{Fe}(12+) + 2p4n$ である。



IR 値測定は、放射線医学研究所に設置されている HIMAC から ^{58}Ni 重イオンビーム (350 MeV/u) を利用した。不安定核生成ビームラインと検出装置の概略図を示した。アイソマー状態の同定は、アイソマーからの脱励起ガンマ線を Ge 検出器で測定することで行った。一次標的は Be (7mm 厚) である。



^{52}Fe の 12+ アイソマー状態についてアイソマー比 IR を求める測定を縦運動量移行について 0 MeV/c から 1 GeV/c の広い範囲で遂行した。その結果の一部を下図に示した。

驚いたことに IR 値が 2% 以下という予想外に小さな製造効率であることが明らかになった。その一方で同時に測定されていた、 $^{53}\text{Fe}(19/2-)$ 、励起エネルギー 3MeV のアイソマー比は IR=18% であり、 $^{54}\text{Co}(7+)$ 、励起エネルギー 0.2MeV のアイソマー比は IR=60% であることも明らかになった。

これを受けて、 $^{52}\text{Fe}(12+)$ アイソマーの IR 値が小さいのは、励起エネルギーが 7 MeV と高く、またスピン値が 12+ と大きいことによるのではないかと考え、以下の系統的測定を実施した。

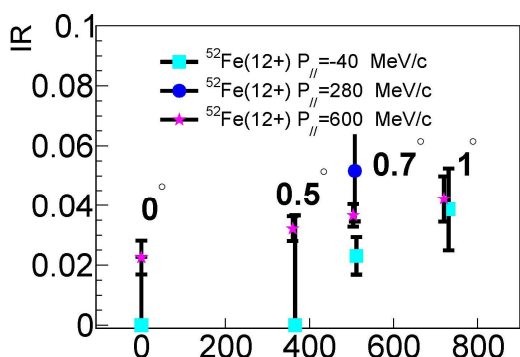
1) スピンを持った一次ビーム $^{59}\text{Co}(7/2-)$ による $^{52}\text{Fe}(12+)$ アイソマー比 IR 値測定を行った。その結果 (上図) は ^{58}Ni ビーム時と変わらず、入射粒子スピンの効果は無く IR~0 であった。

2) 横運動量移行、つまり有限角度での $^{58}\text{Ni}(0+)$ 破砕核反応による $^{52}\text{Fe}(12+)$ アイソマー比 IR 値測定も実施した。有限角度での破砕核反応の測定には、入射一次ビームの Be 標的への入射角度を変えることが必要であり、そのためには標的直前にビームスインガーが設置されていなければならない。幸いにして HIMAC には設備されており、0.0, 0.5, 0.7, 1.0 度について測定を行うことができた。結果を次ページの図に示した。

横運動量の導入することで IR \leq 4% 程度のアイソマー比を得ることができたが、残念ながらアイソマー励起核からの (p,n) 反応測定には十分な大きさではない。

3) そこで、多量の粒子損失を伴う、 ^{82}Kr を一次入射ビームとする測定を行った。 $^{82}\text{Kr} \rightarrow ^{52}\text{Ni} + 10p20n$ 破砕核反応であり 30 粒子

損失である。結果は上前図に示したが、IR~36%という非常に大きな値を得ることができた(赤紫◇印)。この程度のIR値があれば、アイソマー励起核からの(p,n)反応測定は可



Transverse Momentum Transfer(MeV/c) 能だと考えられる。

本研究は、励起状態にあるアイソマーの弁別手法の基盤の技術開発とアイソマー比IRの高い破砕核反応を実験的に見つけるのが目的であったが、ほぼ目的を達成した。これにより、最終目標である原子核の励起状態(アイソマー)を経由する(p,n)反応によるGT励起測定に目途がついたと言える。

一方、本研究で得た様々な一次ビーム(^{58}Ni , ^{59}Co , ^{82}Kr)や有限角度測定による横運動量導入によるアイソマー比の測定は前例がなく、初めての系統的な測定である。アイソマー状態は核構造を強く反映するとも考えられており、破砕核反応によるアイソマー励起の反応機構解明に極めて貴重な基礎データを提供することとなった。

5. 主な発表論文等

[学会発表](計 7件)

酒井英行,

「Isomer ratios in Fe Region by Projectile Fragmentation」, Topical Workshop on Modern Aspects in Nuclear Structure, 2018/2/23, Bormio (Italy)

川田敬太, 矢向謙太郎, 大田晋輔, 酒井英行, 道正新一郎, その他,

「 ^{59}Co の入射核破砕反応による高スピンアイソマービームの開発」, 日本物理学会, 2018/03/23, 東京理科大学(野田キャンパス)

酒井英行,

「Gamow-Teller excitation built on isomeric state」, Ito Int. Symposium on Perspectives of the Physics of Nuclear Structure, 2017/11/4, Tokyo

川田敬太, 矢向謙太郎, 大田晋輔, 酒井英行, 道正新一郎, その他,

「 ^{58}Ni の入射核破砕反応による高スピンアイソマービームの開発」, 日本物理学会, 2017/09/14, 宇都宮大学(宇都宮)

川田敬太, 矢向謙太郎, 大田晋輔, 酒井英行, 道正新一郎, その他,

「入射核破砕反応によるアイソマービーム開発」, 日本物理学会, 2017/3/20, 大阪大学(豊中)

道正新一郎,

「SHARQA spectrometer: High-resolution spectroscopy using exotic beams and reactions」

Int. Nuclear Physics Conf. (INPC2016), 9/14, 2016, Adelaide (Australia)

道正新一郎, その他

「多結晶ダイヤモンド検出器の開発」, 日本物理学会, 2016/3/19, 東北学院大学(仙台)

6. 研究組織

(1) 研究代表者

酒井英行 (SAKAI, Hideyuki) 国立研究開発法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・部長、東大名誉教授

研究者番号：90030030

(2) 研究分担者

無し

(3) 連携研究者

矢向謙太郎 (YAKO, Kentaro) 東京大学理学系研究科・原子核科学研究センター・准教授

研究者番号：50361572

道正新一郎 (MICHIMASA, Shin'ichiro) 東京大学理学系研究科・原子核科学研究センター・助教

研究者番号：80392140

(4) 研究協力者

大田晋輔 (OTA, Shinsuke) 東京大学理学系研究科・原子核科学研究センター・助教

川田敬太 (KAWATA, Keita) 東京大学理学系研究科・原子核科学研究センター・大学院生