

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 19 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610053

研究課題名(和文)電子ビームによる短寿命不安定核の光吸収断面積測定新手法の開発

研究課題名(英文)A new method for total-photoabsorption measurement of exotic nucleio

研究代表者

須田 利美(SUDA, Toshimi)

東北大学・電子光理学研究センター・教授

研究者番号：30202138

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000円

研究成果の概要(和文)：本研究の最終的な目的は、電磁プローブである電子ビームを使用した短寿命不安定核の光(線)吸収断面積の測定である。電子弾性散乱による不安定核研究の実現のために発明したSCRIT法を利用すれば、不安定核の光吸収反応測定も可能になる着想を得、その実験手法の研究を行った。電子散乱用ルミノシティ、 10^{27} /cm²/s、のもとで、超前方に散乱された電子を加速器内で検出し、仮想光子理論を用いて散乱断面積を光吸収断面積に焼き直す手法である。本研究は、200 mAの周回電子ビーム近傍でも原子核励起でエネルギーを非弾性散乱起源の電子を検出可能であることを示し、この新手法が利用可能であることを確認した。

研究成果の概要(英文)：The final goal of this research is to measure the photoabsorption cross section of short-lived exotic nuclei covering the giant dipole resonance for the first time using electron beam. The SCRIT scheme we have invented for the structure studies of exotic nuclei by electron scattering was found to provide a new way to measure their photo-absorption cross section. Under the luminosity of 10^{27} / cm² / s, needed for elastic electron scattering, inelastically scattered electrons at ultra-forward direction are detected inside the accelerator, and the measured inelastic cross section is converted to that of photoabsorption cross section by using virtual photon theory. It was clearly shown that inelastically scattered electrons resulting target-nucleus excitation can be detected even in the vicinity of the circulating electron beam of 200 mA. This clearly demonstrate that this ground-breaking new method for photonuclear reaction of exotic nuclei can be used for future experiment.

研究分野：原子核物理学 実験

キーワード：短寿命不安定核 光核反応断面積 仮想光子法 SCRIT 電子散乱

1. 研究開始当初の背景

原子核の光(線)吸収は最も単純で基本的な原子核反応である。電磁遷移は良く理解されているため、断面積や線エネルギー(E)依存性から基底状態や励起状態に関する豊富な情報を得ることができる。

安定核に対しては電子ビームや線を使って広いE範囲の測定が行われ、 $E \leq 30\text{MeV}$ のエネルギー領域で双極子巨大共鳴(陽子群と中性子群が互いに振動する集団運動)と呼ばれる集団運動が発見された。これは許容される遷移強度のほぼ100%に対応する巨大な断面積を持つ。また基底状態で変形した核の場合、線吸収確率のE依存性には、長径、短径に対応する振動周波数が違うため2つの山が観測される。このように光吸収断面積やE

依存性の測定から、励起状態や基底状態の形状など基本的な情報を得ることができる。いままで知られていなかった特異な変形や構造が発見、示唆されている短寿命不安定核でも、光吸収断面積測定は形状に関する知見や新しい集団運動の発見をもたらすと考えられている。しかしながら、現在まで線や電子ビームによる光吸収断面積の直接測定が不可能だったため、反応機構に不定性(強い相互作用の関与、多段階反応の寄与等)が残る重イオン衝突時のクーロン散乱の利用が唯一の測定法であった。

2. 研究の目的

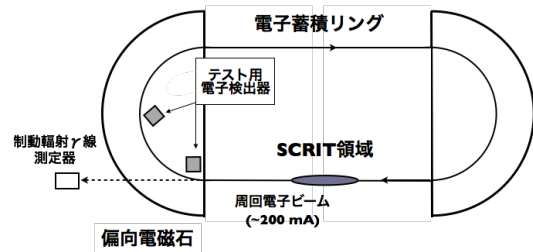
本挑戦的萌芽研究の目標は、最もクリーンな電磁プローブである電子ビームを使用した短寿命不安定核の光(線)吸収断面積の測定を目指し、電子ビームによる測定という前例のない研究を実現するための新手法の開発であった。

1. 「研究開始当初の背景」で述べたように光吸収断面積は外場に対する原子核の最も基本的な応答であり、原子核の基底状態や励起状態に関する豊富な知見を与える。特異な形状や構造が発見されつつある短寿命不安定核の光吸収断面積は、電子ビームや線による直接測定が不可能だったために、専ら(反応機構に問題が残る)重イオン衝突でのクーロン散乱を利用した測定が行われてきた。本萌芽研究は、この壁を打ち破り、クリーンで信頼度の高い電子ビームによる不安定核の光吸収断面積測定の実現を目標とした。

3. 研究の方法

我々が短寿命不安定核の電荷密度分布を電子弾性散乱で決定するために世界に先駆けて発明した新型イオン捕獲メカニズム、SCRIT法(Self Confining RI Target)を利用した電子散乱実験施設が理化学研究所のRIビームファクトリー内に完成した。これは生成が難しく短寿命で崩壊してしまう不安定核の内部構造を電子散乱という最も優れた手法で解明する世界初且つ現時点で世界唯一の実験施設である。

本研究は重イオン核反応を利用する以外に方法がなかった短寿命不安定核の光核反応を電子線利用により実現するため、標的原子核を励起し超前方(実質的に0度)に散乱された電子を検出することが可能かを検証することにあつた。下図参照。



SCRITで捕獲された標的核を励起し超前方(〜0度)に散乱されたエネルギーの下がった電子を、偏向電磁石内での検出することで、捕獲標的核による光吸収事象同定を試みる。超前方への電子散乱断面積は、仮想光子理論を適用することで、線吸収断面積に焼き直すことができる。

原子核励起でエネルギーを失いほぼ0度に散乱された電子を検出するには、電子蓄積リング内部でそれらを検出する必要がある。200mAという大電流電子ビーム($E_e=150\text{MeV}$)が蓄積されている電子蓄積リングで、検出器が正常に動作しこれらの事象を検出、同定することができるのか、また、たとえ大電流電子ビーム起源バックグラウンドを押さえ込んでも、散乱電子測定のみでは弁別不可能な制動放射過程起源の事象の除去あるいは弁別の可能性を探ることが本研究の主題であった。

本実験では、開発研究であるため不安定核は用いず ^{132}Sn ($Z=50$)と同質量数また原子番号も近い安定核、 ^{133}Cs ($Z=53$)や ^{132}Xe ($Z=54$)を標的とした。約 10^8 ヶの標的イオンをSCRIT法で電子ビーム上に捕獲しルミノシティ $10^{27}/\text{cm}^2/\text{s}$ 相当で測定を行った。プラスチックシンチレータ、オプティカルファイバ

ーそしてマルチアノード PMT を利用した 2 台の電子検出器を製作し、電子蓄積リングの穴を利用し、大電流の周回電子ビーム近傍（～3cm ほど）の真空箱外に設置した。原子核の低励起エネルギーに相当する 2 箇所に検出器を設置した。主バックグランドである制動輻射事象は、超前方に放出される制動輻射線を検出し電子検出器と同時計数により同定することを試みた。

4. 研究成果

電子検出器が設置された電子蓄積リングの主偏向電磁石は、高磁場（最大 2.7 T）並びに分厚い磁場リターンヨーク（鉄）のために、～200 mA もの大電流周回電子ビーム近傍にもかかわらず、検出器の正常動作を妨げるような膨大なバックグランドは存在せず、2 重のプラスチックシンチレータの同時計数の計数率は 数百 Hz 前後であり、検出器動作上は全く問題ない環境であることが初めて明らかになった。軌跡追跡型の高精度位置測定用検出器の設置が可能であることを示し、本研究の最終目標である電子ビームを利用した短寿命不安定核の光核反応測定に大きく道を開くことができた。また同時に、光核反応断面積に比べ約 1000 倍ほど断面積の大きい制動輻射過程の同定の可能性についても調査を行った。制動輻射過程は、終状態の電子、線ともに、超前方 $\sim m_e/E_e$ 、放出される。ここで、 m_e は電子質量、 E_e は電子ビームエネルギーである。標的原子核が捕獲されている直線部の下流 0 度方向には放射光（及び制動輻射線）取り出し用窓があるので、そこに高エネルギー線検出器を設置した。上述の電子検出器との同時計数により、制動輻射事象の同定を試みた。電子検出器系の低計数率もあり、制動輻射事象同定自体は全く問題ないことが明らかになり、これも将来の不安定核の光核反応測定に道を開くものである。

この研究で明らかになった問題点を挙げておく。まずは制動輻射線検出用検出器の計数率の高さである。現在我々が保有する線検出器は電子散乱実験時の使用を想定しており高エネルギー線、 $E \geq 50$ MeV、対応で有り、本研究のバックグランドとなるエネルギー領域、即ち $E = 10-30$ MeV、には、無理をして検出閾値を下げた状態で測定した。同検出器は超前方に放出される全ての線が入射するため、高計数率、～ 数 10 kHz、であり、数え落とし対策などが必要。またこ

れは事前に分かっていたことであるが、蓄積リングは制動輻射線に対し十分な開口部を有しておらず、電子ビームエネルギー 150 MeV では GEANT simulation によれば制動輻射線の透過率は 40% 弱である。

本研究で、電子ビームによる短寿命不安定核の光吸収断面積測定は可能であることを示すことが出来たが、実際の実施には電子蓄積リングのデザインを含めて再検討する必要がある。

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 4 件)(全て査読有り)

Prospects for Electron Scattering on Unstable, Exotic Nuclei
T. Suda and H. Simon
Progress of Particle and Nuclear Physics, in press

First elastic electron scattering from ^{132}Xe at the SCRIT facility
K. Tsukada, T. Suda (他 15 名)
Phys. Rev. Lett. in press

SCRIT Electron Scattering for Facility
T. Suda (他 16 名)
JPS Conf. Proc. Volume 6 (2015) 030100.

Electron Scattering for Exotic Nuclei
T. Suda
Pramana Journal of Physics,
83 (2014) 739.

〔学会発表〕(計 5 件)

SCRIT electron scattering facility : present status and future perspectives
T. Suda
Neutron Skin of Nucleiに関する国際研究会 (招待講演)

May 17 - 27, 2016、マインツ (ドイツ)

Future perspectives of the SCRIT facility
T. Suda
Electron-radioactive ion collisions に関する研究会 (招待講演)

April 25 - 27, 2016、パリ (フランス)

Electron Scattering for Exotic Nuclei
T. Suda

第 38 回南アメリカ原子核物理学シンポジウム (招待講演)

2015 年 1 月 6 -11 日、ココヨック (メキシコ)

Photonuclear Reaction of Exotic Nuclei
at the SCRIT Electron Scattering
Facility

T. Suda

International SAMURAI collaboration
meeting

2014 年 9 月 8-9 日、東北大 (仙台)

SCRIT Electron Scattering Facility

T. Suda

第 59 回南アフリカ物理学会 (基調講演)
2014 年 7 月 7-11 日、ヨハネスブルグ
(南アフリカ)

〔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〕

アウトリーチ活動

毎年一回 3 ~ 4 コマを埼玉県立熊谷高校で
当研究も関係する原子核研究に関する特別
授業を実施。

平成 27 年度は福島県磐城高校体験授業で
原子核研究に関する講義を実施。

平成 27 年 10 月 24 日の電子光物理学研究
センター一般公開では公開授業を担当し、原
子核研究について講演。

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

須田 利美 (SUDA, Toshimi)

東北大学・電子光物理学研究センター・教授

研究者番号 : 30202138