

令和 2 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(A)

研究期間：2016～2019

課題番号：16H06003

研究課題名（和文）同重体の巨大共鳴を用いた核物質状態方程式の荷電依存性の研究

研究課題名（英文）Study of isospin dependence in nuclear-matter equation of state via giant resonances in isobaric nuclei

研究代表者

大田 晋輔 (OTA, Shinsuke)

東京大学・大学院理学系研究科（理学部）・助教

研究者番号：60548840

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 17,900,000円

研究成果の概要（和文）：本研究では質量数132同重体の不安定核での荷電スカラー巨弾単極共鳴のエネルギー測定を行うため、従来の10倍の測定効率を持つアクティブ標的CAT-Mおよび、毎秒100万個の大強度ビームを利用可能にするストリップ電極読み出し型PPAC (SR-PPAC)を開発した。これらを理化学研究所RIBFに設置し、毎秒50万個を超える大強度ビームを用いて、キセノン132原子核の重水素非弾性散乱の測定を実現した。これにより、同重体における系統的測定を可能にし、質量数依存性の不定性なく非圧縮率の荷電依存性を決定する新たな道筋を切り拓いた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

中性子星は、連星合体によって金などの鉄より重い元素を生み出す、いわば元素の生みの親とも言える星であるがその構造については未解明である。本研究はその解明に必須である核物質状態方程式の決定を目指して、試金石たる非圧縮率の荷電依存項を実験的に決定することを目的とし、同重体とよばれる質量数が同数のさまざまな原子核の密度圧縮振動状態のエネルギーを測定する。従来の10倍の効率を実現するため、アクティブ標的CAT-Mとビーム粒子検出器SR-PPACを新たに開発し、キセノンの質量数132同重体での測定を実現した。これにより新たな研究の道筋が切り拓かれた。

研究成果の概要（英文）：We developed a gaseous active target CAT-M aiming at high luminosity and a strip-readout parallel-plate avalanche counter SR-PPAC aiming at an effective use of high-intensity heavy-ion beams. Deuteron inelastic scattering on xenon-132 nuclei has been measured with the high-intensity beam more than five hundred thousand particles per second using these cutting-edge detector systems. This allows systematic measurements of isoscalar giant monopole resonances in isobaric nuclei for the determination of the isospin dependence of the incompressibility apart from an uncertainty due to the mass number dependence.

研究分野：原子核物理学

キーワード：核物質 中性子星 状態方程式 アクティブ標的 大強度RIビーム 巨大共鳴 不安定核 非弾性散乱

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

強い力で相互作用する核子多体系は原子核だけでなく、中性子星のようなコンパクト天体としても存在する。原子核の構造、ダイナミクスから中性子星、超新星爆発、コンパクト連星合体などの天体現象までを支配する核物質状態方程式の決定は原子核物理の大きな目標の一つである。核物質状態方程式は、系のエネルギーを密度および陽子数・中性子数の差(以下、非対称度)の関数として表わすことで得られる。近年では特に非対称度が大きな中性子核物質の状態方程式に重要な荷電依存性が、中性子星の構造や限界質量の解明に大きな役割を果たすことで注目されている。その導出のため、質量分布や中性子スキン厚、電気双極性の研究が国内外で精力的に進められ、その結果、非対称度が1での密度の一次の項までは比較的よい精度で求められてきた。一方で二次以上の項については決定的ではない。密度の二次の項に強く関連している非圧縮率の荷電依存項は、実験的に直接決定できるパラメータであり、いかなる理論モデルも再現すべき確固たる指標となりうる物理量として、その精度および確度の向上が求められている。

巨大単極共鳴のエネルギーを質量数、陽子数(クーロン項)、非対称度の関数で表した時、非圧縮率の荷電依存項は非対称度の項の係数である。したがって、非圧縮率の荷電依存項は原子核の巨大単極共鳴のエネルギーを非対称度を変えながら測定することで導出ができる。クーロン項についてはモデルによる差が非常に小さいため既知と仮定してよい。これまでスズ同位体およびカドミウム同位体における巨大単極共鳴のエネルギーが測定され荷電依存項が導出されたが、質量数依存性を既知として仮定する必要があり、新たに質量数依存性を評価することによる確度の向上が求められていた。

2. 研究の目的

本研究を含む研究全体の目的は核物質状態方程式の決定をめざし、特に、状態方程式の密度二次の項に密接に関連し、理論モデルが再現すべき確固たる指標非圧縮率の荷電依存項を、質量依存性の仮定なく実験的に決定することである。これは原子核のバルクな性質を解明するだけでなく、中性子星内部構造や超新星爆発、中性子星連星合体の解明に資するものである。本研究では、従来の同位体を用いた荷電依存項の決定において仮定されていた質量依存性を、同重体という新たな切り口を取り入れることにより評価可能にし、非圧縮率の確度向上を目的とする。そのために大型のアクティブ標的開発、大強度ビーム粒子検出器群の開発、それらを用いた同重体の巨大単極共鳴の系統的測定によって荷電依存項の決定を目指す。

3. 研究の方法

核物質非圧縮率の荷電依存項は、原子核の荷電スカラー巨大単極共鳴(以下、巨大共鳴)のエネルギーにおける陽子数と中性子数の差(非対称度)に依存する項として現れる。そのため、巨大共鳴のエネルギー変化を同位体のように中性子数の異なる原子核に対して測定すれば導出できることが知られている。巨大共鳴のエネルギーは有限多体系の特徴である表面効果も含む。表面効果は質量数に依存するため、同位体のような質量が変化する系においては表面効果をどのように評価するかという課題があるものの、安定核を標的とする実験においては同位体を用いるほかなかったため表面効果を仮定するほかない。一方で、我々の先行研究で開発を行ったアクティブ標的を用いれば、不安定核をビームとして用いる逆運動学によって巨大共鳴のエネルギー測定ができる。そこで我々は質量数を止めて非対称度のみを変化させられる系として、同重体に目をつけた。同重体においても不安定核にまで領域を広げれば同位体と同じく広い範囲の非対称度で巨大共鳴のエネルギーを決定でき、かつ表面効果を一定として定数化できるため、不定性を格段に減らすことが可能となる。

同重体の測定においては、対象とする不安定核を含む大強度ビームを利用可能にするとともに、反応確率を増大させるためのアクティブ標的の大型化が必須である。そこで、アクティブ標的CAT-M、およびビームライン検出器群、特にストリップ電極読み出しPPACを開発し従来のシステムの10倍の効率で測定を実現する。

質量数132同重体のキセノン、錫、セリウム、ネオジウムなどの原子核において巨大共鳴のエネルギーを逆運動学の重水素非弾性散乱によって測定する。

4. 研究成果

本研究では質量数 132 同重体の不安定核での荷電スカラー巨弾単極共鳴（以下、巨大共鳴）のエネルギー測定を行うため、測定効率増大をめざしたアクティブ標的 CAT-M および、大強度ビームを有効利用するためのビームライン検出器としてストリップ電極読み出し型 PPAC (SR-PPAC)の開発をおこない、毎秒 50 万個を超える大強度ビームを用いて、キセノン 132 原子核の重水素非弾性散乱の測定を実現した。これにより、同重体における系統的測定を可能にし、質量数に依存しない非圧縮率の荷電依存性の決定の道を切り開いた。以下に詳細を述べる。

アクティブ標的 CAT-M の開発では、大型化の鍵となる DG-M-THGEM のプロトタイプのパフォーマンス評価および実機製作を行った後、CAT-M の各構成要素の設計・製作、そして組み立てをおこない、2 年という短期間で従来の 10 倍の測定効率をもつアクティブ標的の製作を実現した。DG-M-THGEM は我々が開発した大強度ビーム照射を可能にする電極分割方式(DG 方式)を多積層の厚いガス電子増幅器(M-THGEM)に応用したものである。まず、10 x 10 cm² のプロトタイプを作成し、放射線医学総合研究所においてキセノン 132 ビームを用いて性能評価実験 (15H307)を行った。その結果、反跳粒子に対して有効増幅度 2000、ビーム粒子に対して有効増幅度 100 を同時に達成することができ、毎秒 100 万個の入射粒子に対しても長時間安定的に動作することがわかった。エネルギー分解能も 3% 以下を達成することができ、目標とする性能を得られた。(この結果は技術論文として近日中に投稿予定である。)アクティブ標的 CAT-M の製作後、放射線医学総合研究所においてコミショニングをおこなった(15H307 実験)。毎秒 100 万個以上の大強度ビーム照射下でも重水素散乱を逆運動学において測定することができることがわかった。コミショニング後には、キセノンの質量 132 同重体にたいする重水素非弾性散乱の測定を行った。本アクティブ標的は重水素非弾性散乱のみならず、陽子（非）弾性散乱や核子移行反応への応用が期待され、後述のように陽子弾性散乱の実験にも導入された。

理化学研究所における不安定核での重水素非弾性散乱の測定を効率化するために、ビーム粒子検出器の高度化として、ストリップ電極読み出し型の PPAC (SR-PPAC) の開発を行った。薄膜上の 2.5mm 幅の電極をそれぞれ直接読み出すことで、高速・高分解能・高効率の位置導出を可能にした。これにより毎秒 100 万個のビーム入射時においても 1 面あたり 99% の効率で位置導出を行うことが可能となり、大強度ビームの有効活用が実現している。この検出器は本研究のみならず、特に中重不安定核の不安定核ビームを必要とする実験の大幅な効率化を可能にし、実験研究の飛躍的進展を促すものである。

本来目標としていたセリウム、ネオジムなどの質量数 132 同重体不安定核に対する重水素非弾性散乱の測定については、施設運用計画の観点から課題申請を見合わせることにしたが、上述のアクティブ標的 CAT-M および 位置検出器 SR-PPAC を含むビームライン検出器群を用いたシステムは理研 RIBF における RIBF79 実験で逆運動学陽子弾性散乱の前方測定のために導入された。CAT-M における若干の課題は見つかったものの、システム全体のその実用性が確認されている。すでに錫およびキセノンの同重体については先行研究および本研究課題においてデータを取得済みであり、今後の同重体不安定核の測定により質量数に依存しない非圧縮率の荷電依存性決定の道筋は整えることができた。非圧縮率の荷電依存性を質量数依存性の不定性なく導出することを目指し、セリウム、ネオジムなどの質量数 132 同位体不安定核における実験計画を進めている。

本研究の成果については様々な国際会議での招待講演において成果発表を行うなど精力的に発信した。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計22件（うち招待講演 11件 / うち国際学会 15件）

1. 発表者名 Shinsuke OTA
2. 発表標題 Ktau from ISGMR Measurements on and around 132Sn
3. 学会等名 Gordon Research Conference, Nuclear Chemistry, "Exploring Simple Structure Patterns and the Dynamics of Nuclei" (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinsuke OTA
2. 発表標題 Research of isoscalar Giant Monopole Resonances using Gaseous Active Target
3. 学会等名 14th Asia-Pacific Physics Conference (APPC 2019) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinsuke OTA
2. 発表標題 Giant Resonances in Tin-region nuclei studied using gaseous active target
3. 学会等名 Vth Topical Workshop on Modern Aspects in Nuclear Structure (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 大田晋輔、遠藤史隆
2. 発表標題 大強度重イオンビーム照射用低圧ガスアクティブ標的CATの開発と現状
3. 学会等名 マイクロパターンガス検出器(MPGD)・アクティブ媒質TPC合同研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 遠藤史隆、大田晋輔ほか
2. 発表標題 大強度重イオンビーム照射下でのアクティブ標的CATにおけるイオンバックフローの抑制
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 花井周太郎、大田晋輔
2. 発表標題 大強度RIビーム実験における高速応答飛跡検出器SR-PPACの性能評価
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 原田知也ほか
2. 発表標題 不安定核 ^{132}Sn の逆運動学陽子弾性散乱測定
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 花井周太郎
2. 発表標題 Development of new type of PPAC for high intensity RI beam
3. 学会等名 Advanced Nuclear Reactions and Applications in Astrophysics (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shutaro Hanai
2. 発表標題 Development of Strip Readout Parallel Plate Avalanche Counter
3. 学会等名 The 18th CNS Summer School (CNSSS19) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Shinsuke OTA
2. 発表標題 Experimenta study of the isospin dependence of nuclear incompressibility
3. 学会等名 5th joint meeting of the APS and JPS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Hiroshi TOKIEDA
2. 発表標題 CNS Active Target (CAT) for high-intensity heavy-ion beam experiment
3. 学会等名 5th joint meeting of the APS and JPS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Chihiro IWAMOTO
2. 発表標題 Performance evaluation of Dual Gain Multi-layer Thick GEM for CAT with high-intensity heavy-ion beams
3. 学会等名 5th joint meeting of the APS and JPS (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shinsuke OTA
2. 発表標題 Giant resonances in Tin-region nuclei
3. 学会等名 6th International Conference on Collective Motion in Nuclei under Extreme Conditions (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Shinsuke OTA
2. 発表標題 Active target technique for medium-heavy high-intensity heavy-ion beams
3. 学会等名 10th China Japan Joint Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 大田 晋輔
2. 発表標題 Equation of State of Nuclear Matter from Direct Reactions
3. 学会等名 Workshop on RI and Heavy-ion Science (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大田 晋輔
2. 発表標題 Active Targets CATs' for missing mass spectroscopy with high-intensity beams
3. 学会等名 Workshop on Active Targets and Time Projection Chambers for High-intensity and Heavy-ion beams in Nuclear Physics (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 岩本 ちひろ
2. 発表標題 ガスアクティブ標的CATの大型化に向けた二重増幅率制御型多層THGEMの開発
3. 学会等名 日本物理学会 2017年秋季大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大田 晋輔
2. 発表標題 CNS Active Target (CAT) for high-intensity beam experiment and the first experiment at RIBF
3. 学会等名 Workshop on Software for Time Projection Chambers for Nuclear Physics Experiments (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 岩本 ちひろ
2. 発表標題 Simulation for high-intensity heavy-ion beam injection in CAT
3. 学会等名 Workshop on Software for Time Projection Chambers for Nuclear Physics Experiments (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 時枝 紘史
2. 発表標題 Event Search Algorithm for CAT
3. 学会等名 Workshop on Software for Time Projection Chambers for Nuclear Physics Experiments (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2016年

1. 発表者名 大田 晋輔
2. 発表標題 CNS Active Target
3. 学会等名 新学術領域「中性子星核物質」第二回検出器ワークショップ(招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 大田 晋輔
2. 発表標題 重水素アクティブ標的を用いた錫領域不安定核の巨大単極共鳴の測定
3. 学会等名 日本物理学会 第72回年次大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

<p>アクティブ標的プロジェクト http://www.cns.s.u-tokyo.ac.jp/~ota/ja/project/cat/ 核物質の状態方程式 http://www.cns.s.u-tokyo.ac.jp/~ota/ja/project/nuclear-matter/</p>

6. 研究組織			
	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	時枝 紘史 (Tokieda Hiroshi)		

6. 研究組織（つづき）

	氏名 (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
研究協力者	岩本 ちひろ (Iwamoto Chihiro)		
研究協力者	堂園 昌伯 (Dozono Masanori)		
研究協力者	銭廣 十三 (Zenihiro Juzo)		
研究協力者	道正 新一郎 (Michimasa Shin'ichiro)		
研究協力者	上坂 友洋 (Uesaka Tomohiro)		