

令和 4 年 5 月 26 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究

研究期間：2020～2021

課題番号：20K14490

研究課題名（和文）ガス標的とニューラルネットワークを用いた ^{20}Ne 原子核のアルファ凝縮状態の探索研究課題名（英文）Search for the alpha condensed state in ^{20}Ne with a gas target system and neural network

研究代表者

足立 智（Adachi, Satoshi）

大阪大学・理学研究科・招へい研究員

研究者番号：60838126

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,200,000円

研究成果の概要（和文）： ^{20}Ne 原子核におけるアルファ凝縮状態の候補を探索するために、ガス標的とシリコン検出器の波形解析を用いた新たな探索実験の波形解析の手法などの条件の検討を行って最適な実験条件を決定した。この実験条件に基づいて実験施設へ ^{20}Ne のための実験提案を行い高い評価で採択された。また、これまでに得られていた実験データの解析から世界で初めて ^{20}Ne 原子核におけるアルファ凝縮状態の候補を提案した。これらの成果は低密度核物質の性質を調べるために理論的にも実験的にも重要な情報となる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

これまでは ^8Be 原子核と ^{12}C 原子核にしか原子核におけるアルファ凝縮状態の候補が実験的に示されておらず、原子核の質量数に沿った系統的な研究は困難な状況であった。しかし、本研究で ^{20}Ne 原子核におけるアルファ凝縮状態の候補となる状態を発見することができたため、アルファ凝縮状態の存在限界と励起エネルギーや崩壊幅等の具体的な実験データを用いることが可能になった。また、新たに採択された ^{20}Ne 原子核におけるアルファ凝縮状態の同定実験では実験データの統計的有意性を確かにし、さらに励起状態のスピンとパリティを明らかにできる予定である。これらの結果は特に理論的な原子核構造研究にとって重要な情報となる。

研究成果の概要（英文）：I have designed a new experiment with a new gas target and waveform analysis method for the silicon detector in order to search for the alpha condensed state in ^{20}Ne nucleus. The experimental condition such as the method of the waveform analysis was examined, and most proper condition was determined. Based on this experimental condition, the proposal of a new experiment for ^{20}Ne was submitted to the experimental facility and approved with a high-grade evaluation. In addition, I analyzed the experimental data obtained by the previous experiment, and proposed candidates for the alpha condensed state in ^{20}Ne for the first time in the world. These results are very important both from the experimental and theoretical sides to study the nature of low-density nuclear matter.

研究分野：原子核物理学（実験）

キーワード：アルファ凝縮状態 ニューラルネットワーク ガス標的

1. 研究開始当初の背景

原子核および核物質の性質を理解するためには核物質の状態方程式を導くことが非常に重要であり、これは原子核物理学における非常に大きな目標である。しかしながら、これまでの主たる実験的手法である通常の原子核を用いた散乱実験では原子核の飽和密度近辺についての情報が得ることができず、状態方程式のパラメータである密度に関して広い範囲での知見を得ることは一般に難しい。しかしながら低密度領域においては、核物質内で束縛エネルギーの大きいアルファ粒子を形成し主要な構成要素(クラスター)となることが指摘されている。

通常の原子核においても、低密度領域においてはアルファ粒子がクラスターとして析出し同一の最低エネルギー状態である軌道に凝縮することが予測されており、この状態はアルファ凝縮状態と呼ばれている。この状態は、原子核内の核子がアルファ粒子クラスターを形成して密度の低い状態となる、有限の核物質における低密度状態であることが分かっている。

アルファ凝縮状態の励起エネルギーや崩壊幅などの特徴量を実験的に測定しその情報を原子核の質量数に沿って系統的に研究することは非常に重要である。これは、この研究から得られる情報が、核物質の低密度領域での振る舞いを記述する理論にとって不可欠であるためである。しかしながら、これまで実験と理論の両方からアルファ凝縮状態であると考えられている状態は発見されているのは、 ^8Be 原子核と ^{12}C 原子核においてのみである。原子核の質量数に沿って系統的に研究する重要性から、申請者はこれまで実験データがほとんど得られていなかった ^{20}Ne 原子核に着目した。

2. 研究の目的

本研究では、 ^{20}Ne 原子核におけるアルファ凝縮状態を実験的に探索同定しその励起エネルギーやアルファ崩壊幅を測定することで、低密度核物質の性質の解明を目指す。申請者の先行研究において ^{20}Ne 原子核におけるアルファ凝縮状態の候補をあげることができていたが、統計的有意性は不足しており、またその励起状態のスピンやパリティについての情報も得ることはできなかった。そこで本研究ではアルファ凝縮状態を確実に同定するためにその励起エネルギーとアルファ崩壊幅に加えて状態のスピンとパリティを同時に決定することを目的とする。

3. 研究の方法

アルファ凝縮状態のような原子核のクラスター状態を励起するためには、対象となる原子核を標的とした 0 度を含む超前方角度におけるアルファ非弾性散乱を測定することが有効な手法であることが先行研究で明らかになっている。これはアルファ凝縮状態のように強いクラスター相関を有し空間的に広がった状態は E_0 遷移にて励起されやすいとの理論研究に基づいたものである。実際に ^{12}C 原子核においてアルファ凝縮状態であると広く考えられているホイル状態は独立粒子モデルから考えられるよりも約 3 倍の遷移強度で励起される。また、対象となる原子核からの非弾性散乱断面積の角度分布を測定することで、ある励起エネルギーにおける移行角運動量の成分を抽出することも先行研究で知られている。アルファ凝縮状態ではスピンパリティが 0^+ のアルファ粒子が最低起動状態である $0s$ 軌道に凝縮しているので、スピンパリティは 0^+ である。基底状態のスピンパリティが既知でありかつ散乱による移行角運動量が定まれば励起状態のスピンパリティを決定することができる。

さらに申請者は、アルファ凝縮状態はアルファ粒子が同一軌道状態に凝縮した状態であることから、あるアルファ凝縮状態とより軽いアルファ凝縮状態と自由なアルファ粒子の波動関数の重なりは大きいと推測し、それ故にあるアルファ凝縮状態はより軽い原子核のアルファ凝縮状態へアルファ崩壊する確率が高くなると考えた。

そこで申請者は、 ^{20}Ne 原子核を標的としたアルファ非弾性散乱を 0 度で行い散乱アルファ粒子と励起状態からのアルファ粒子の同時計測を行うことで ^{20}Ne 原子核のアルファ凝縮状態を励起しそのアルファ崩壊確率を測定することと、アルファ非弾性散乱の角度分布を測定することで移行角運動量を抽出する実験を行うことを計画した。本測定が遂行できれば、 ^{20}Ne 原子核のアルファ凝縮状態の候補となる状態とそのアルファ崩壊幅を測定することができ、さらに状態のスピンパリティについての情報を得ることができるため、 ^{20}Ne 原子核におけるアルファ凝縮状態を同定することができる。

上記実験を遂行するに当たって、必要となる要素技術開発が 2 件必要となる。1 件は標的として用いるガス標的の開発と、もう 1 件は崩壊粒子の測定に用いる検出器系の装置及び解析手法の開発である。

^{20}Ne は常温常圧では気体相にあり、標的としてはガス標的として用いることが多い。更に本研究においては、 ^{20}Ne 原子核のアルファ凝縮状態からの崩壊アルファ粒子を測定する必要がある。この崩壊アルファ粒子の運動エネルギーはたかだか数 MeV であるために、標的を固体などの目的のエネルギーのアルファ粒子が通過することのできない物質厚は不適切である。そこで申請者は、窒化シリコン薄膜で封止を行ったガス標的の開発を進めることとした。また同時に標的ガスを液体窒素で冷却し物質厚を必要量まで増加させるために、標的周辺の真空度工場のための

ガス標的隔壁の開発などシステム全体の更新を行う。

崩壊粒子検出器としては、複数のシリコン半導体検出器を組み合わせた大立体角の検出器を開発する。本検出器は実験室系後方角度に設置し、弾性散乱などの背景粒子の影響の低減を図る。検出した崩壊粒子について粒子の種別を判断する方法として、シリコン半導体検出器の出力信号波形の粒子種別による差異を用いる。この解析にはニューラルネットワークを用いた波形解析を用いることとした。

図1に検討しているガス標的隔壁とシリコン半導体検出器の組み合わせを示す。赤線は上流から入社するアルファ粒子ビームである。

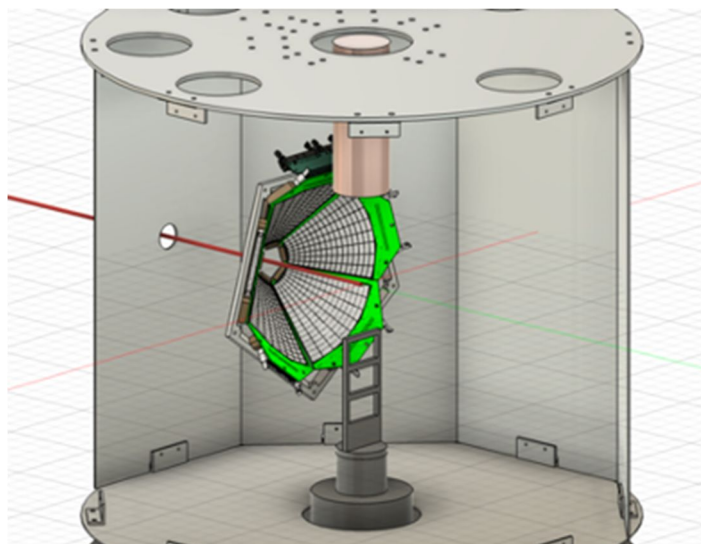


図 1: ガス標的隔壁とシリコン半導体検出器系

4. 研究成果

本研究課題の研究により、計画している2件の要素技術の開発がほぼ完了した。

ガス標的に関しては、背景事象の原因となる水分子の吸着を可能な限り低減するためのガス標的周辺のガス標的隔壁を設計、製作を行った。図1で示した隔壁は既に実験施設に設置して隔壁導入による真空度向上試験を残すのみである。また本研究課題の予算でガス標的周辺の真空度を記録するシステムも設置することができた。さらに、液体窒素温度で動作可能な窒化シリコン薄膜の製作については、製造会社と必要となる窒化シリコン薄膜の性能諸元の綿密な検討を続けており、まもなく製造を依頼することができる段階に進めることができた。

シリコン半導体の波形解析による粒子識別方法の開発に関しては、2020年に神戸大学海事科学部タンデム加速器施設、及び東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンターにてそれぞれ同じ3 MeVのエネルギーのアルファ粒子と陽子の照射試験、連続エネルギーの複数種類の粒子の照射試験を行った。取得した信号波形を手動で解析した結果、シリコン半導体検出器の波形信号の立ち上がり時間または微分波形の振幅を用いれば運動エネルギーがおおよそ3 MeV以上の領域においてアルファ粒子と陽子を識別することができることを示すことができた。更に得られた波形信号を機械学習により解析すると粒子識別の正解率が向上することも確認できた。更に3 MeV以下の低エネルギーの粒子についての粒子識別を行うために、標的からの粒子の飛行時間法を用いてシリコン半導体検出器の時間分解能による粒子弁別試験を2021年に神戸大学海事科学部タンデム加速器施設で行った。その結果、シリコン半導体の検出器の検出ストリップの時間分解能はストリップ面積や粒子の入射面に依存することを明らかにした。得られた粒子識別の状況と時間分解能評価の一例を図2, 3に示す。

以上のように要素技術の開発がほぼ完了したので、実験の遂行条件を検討した結果を持って大阪大学核物理研究センターの課題採択委員会に申請者が計画している実験を共同利用実験等して提案した。2021年1月に課題採択委員会が行われ、申請者の課題は最も高い評価であるA+と評価され共同利用実験E554として採択された。そのため大阪大学核物理研究センターの施設の共同利用再開を待って実験を遂行することが可能となった。

更に、本研究課題期間中には先行研究で得られていた ^{20}Ne 原子核のアルファ非弾性散乱と崩壊粒子の同時測定データを詳細に解析し理論計算と比較することで、 ^{20}Ne 原子核におけるアルファ凝縮状態の強い候補を世界で初めて提案する学術論文をPhysics Letters B誌に投稿し査読の結果掲載された。この結果は申請者の所属する大阪大学と指導している学生の所属している京都大学の協同プレスリリースとして世界に発信を行った。図4にプレスリリースのWebページの一部を示す。

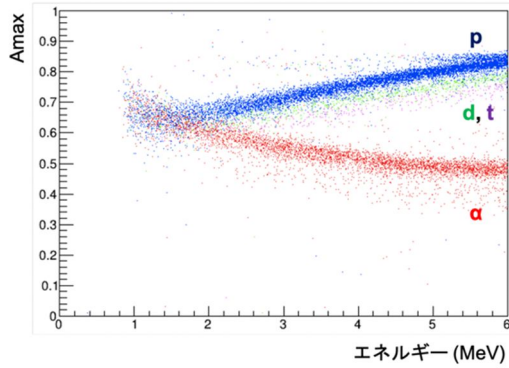


図 2: 微分波形の振幅とエネルギー依存性

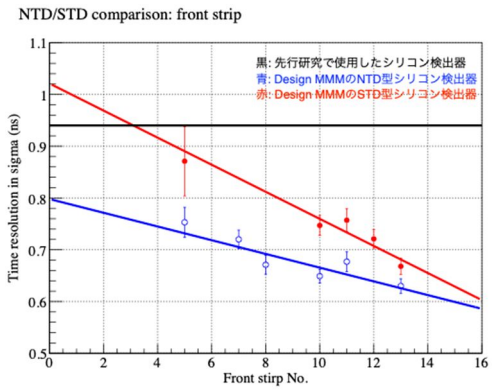


図 3: 時間分解能のストリップ面積依存性



図 4: プレスリリースページ(https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2021/20210614_2 より)

2021 年度末までに ^{20}Ne 原子核におけるアルファ凝縮状態の確実な同定を行う実験を行う準備はほぼ整ったが、実験遂行は大阪大学核物理研究センターの共同利用再開を待つ必要がある。並行して推進していた既存のデータの詳細な解析から、 ^{20}Ne 原子核の凝縮状態の候補となる状態を発見し、かつ論文誌に掲載することができた。

上記の研究結果は今後の ^{20}Ne 原子核の確実な同定実験を行うために必要不可欠なものであり、確かな進展を得られたと考えられる。またアルファ凝縮状態の候補を提案したことにより理論計算による ^{20}Ne の構造計算も活発になされるようになり、今後のさらなる実験的および理論的研究の進展が見込まれる。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計1件（うち査読付論文 1件/うち国際共著 0件/うちオープンアクセス 1件）

1. 著者名 Adachi S., Fujikawa Y., Kawabata T., Akimune H., Doi T., Furuno T., Harada T., Inaba K., Ishida S., Itoh M., Iwamoto C., Kobayashi N., Maeda Y., Matsuda Y., Murata M., Okamoto S., Sakaue A., Sekiya R., Tamii A., Tsumura M.	4. 巻 819
2. 論文標題 Candidates for the 5 condensed state in ^{20}Ne	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 136411 ~ 136411
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2021.136411	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスとしている（また、その予定である）	国際共著 -

〔学会発表〕 計4件（うち招待講演 2件/うち国際学会 0件）

1. 発表者名 足立智
2. 発表標題 Candidates for the 5 condensed state in ^{20}Ne
3. 学会等名 第5回クラスター階層領域研究会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 足立智
2. 発表標題 アルファ非弾性散乱と崩壊粒子同時測定による ^{20}Ne のアルファ凝縮状態の探索
3. 学会等名 RCNP 研究会「原子核における多様な共鳴現象とそれを探る反応機構」（招待講演）
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 足立智
2. 発表標題 ^{20}Ne 原子核におけるアルファ凝縮状態の同定
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 足立智
2. 発表標題 新型ガス標的システムによる ^{20}Ne 原子核のアルファ凝縮状態の探索
3. 学会等名 新学術領域「量子クラスターで読み解く物質の階層構造」ワークショップ（招待講演）
4. 発表年 2021年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

大阪大学と京都大学の共同プレスリリースの形で、2021年に投稿した論文の研究結果を公表した。
 ・大阪大学：https://resou.osaka-u.ac.jp/ja/research/2021/20210614_2
 ・京都大学：<https://www.kyoto-u.ac.jp/ja/research-news/2021-06-15>

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	川畑 貴裕 (Kawabata Takahiro) (80359645)		
研究協力者	藤川 祐輝 (Fujikawa Yuki)	京都大学・大学院物理学・宇宙物理学専攻・大学院生 (14301)	
研究協力者	古野 達也 (Furuno Tastsuya) (30876363)		

6. 研究組織（つづき）

	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	坂梨 公亮 (Sakanashi Kohsuke)	大阪大学・大学院物理学専攻・大学院生 (14401)	
研究協力者	伊藤 正俊 (Itoh Masatoshi)		
研究協力者	松田 洋平 (Matsuda Yohei)		
研究協力者	辻 聖也 (Tsuji Seiya)	大阪大学・大学院物理学専攻・大学院生 (14401)	
研究協力者	氷見 香奈子 (Himi Kanako)	大阪大学・大学院物理学専攻・大学院生 (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関