

平成 21 年 10 月 26 日現在

研究種目：若手研究 (B)

研究期間： 2007 年度～2008 年度

課題番号： 19740119

研究課題名 (和文) 4 α 粒子クラスター原子核における α 凝縮状態の探索

研究課題名 (英文) The study of the alpha condensed state in the 4 alpha cluster nucleus

研究代表者 伊藤 正俊 (ITO MASATOSHI)

東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・助教

研究者番号：30400435

研究成果の概要：

フェルミ多体系である原子核においても、 α 粒子クラスターを形成することによって、ボーズ・アインシュタイン凝縮状態に類似した状態が存在するかどうかを実験的に証明するために、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おいて高分解能ビームラインの整備から同時計測による崩壊粒子測定装置の開発、さらに VME を用いたデータ収集系の構築を行った。本実験においては 4 α 粒子クラスター原子核である ^{16}O 原子核の励起エネルギー 15.097MeV の 0^+ 状態からの崩壊 α 粒子測定を行ったが、 ^{12}C の α 凝縮状態への崩壊分岐比は小さいことがわかった。今後、理論計算との比較が必要となる。しかしながら、本研究で開発した高分解能ビームラインおよび崩壊粒子測定装置を用いることで広範囲の励起エネルギー領域に渡って α 凝縮状態の探索が可能になった。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2007 年度	2,300,000	0	2,300,000
2008 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,300,000	300,000	3,600,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：核物理、 α 凝縮状態、酸素原子核、 α クラスター

1. 研究開始当初の背景

^8Be の基底状態や ^{12}C の第二 0^+ 状態は、核内において核子よりも α 粒子クラスターを構成要素とする状態であると考えられており、その α クラスターが弱結合しつつ、軌道角運動量が 0 つまり最低エネルギー軌道である S 波にあるような状態である。Tohsaki らは、このような状態を原子・分子における

ボーズ・アインシュタイン凝縮状態との類似性に着目し、 α クラスターがもつボーズ粒子の性質を発揮し、原子核内においても凝縮していると考えられるような状態であることを凝縮モデル波動関数によって示した。彼らの主張によると、もしこのようなモデルが正しければ、 α クラスターが 2 個や 3 個の原子核だけでなく、 α クラスターが 4 個である酸素原子核においてもこのような凝縮状態が

存在するはずである。

一方、 α 凝縮状態に関する実験的研究はあまり行われていなかったが、大阪大学核物理研究センターにおける α 非弾性散乱による実験が数少ない実験データとなっている。そのなかでも酸素原子核における実験は、九州大学理学研究科の若狭氏が中心として行った実験のみである。核物理研究センターでの実験で、酸素における α 凝縮状態と考えられる 0^+ 状態は 4α 崩壊しきい値よりもやや低い 13.6MeV に存在するという可能性が出てきた。しかしながら、 α 非弾性散乱のみによる実験では、周囲の励起状態に埋没し、はっきりとしたピークを確認するに至っておらず、散乱断面積の角度分布およびそのエネルギースペクトルをウェーブレット解析によって、ようやくその存在を示唆できていた。

2. 研究の目的

本研究の目的は、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おいて、 α 非弾性散乱測定以外の方法によって酸素の α 凝縮状態を実験的に探索する方法を確立し、測定装置を開発することによって、最終的には、その励起エネルギー、崩壊幅などの性質を求めることである。本研究では、特に酸素原子核における $15.097\text{MeV } 0^+$ の励起状態について崩壊分岐比を求め、 α 凝縮状態の存在を示す実験データの提供を行う。

3. 研究の方法

(1) 原子核における α 凝縮状態は、原子核内において α 粒子としての性質を保ちつつ、その α クラスターの軌道がS軌道であるような状態である。これは、個々の α 粒子に崩壊するエネルギーしきい値付近に存在していることが予想される。さらに、 α 凝縮状態では基底状態に比べて空間的に大きく広がっており、 N 個の α クラスターからなる α 凝縮状態は、 $N-1$ 個の α クラスターからなる α 凝縮状態と、波動関数の重なりが大きい。そのため、 N 個の α 凝縮状態から $N-1$ 個の α 凝縮状態へ崩壊する確率を求めることで、その状態が α 凝縮状態か否かを判定することが可能となる。

(2) 具体的な方法としては、サイクロトロンによって研究対象となる酸素原子核を 160MeV まで加速し、炭素原子核と反応させることによって酸素を α 凝縮状態の候補である励起状態に励起させる、逆運動学の方法を利用する。励起した酸素原子核は崩壊し、 ^{12}C の α 凝縮状態(つまり第二 0^+ 状態)と α 粒子へと崩壊する。または他の崩壊チャンネルへと崩壊する。このとき、 ^{12}C の第二 0^+ 状態へ崩壊するチャンネルにおいて放出さ

れる α 粒子と他の崩壊チャンネルで放出される α 粒子は角度および運動エネルギーが異なる。その違いを利用して、各崩壊チャンネルの崩壊分岐比を求め、 ^{12}C の第二 0^+ 状態への崩壊分岐比が大きいかどうかによって、元の酸素原子核の励起状態が α 凝縮状態であるか否かを判定する。

4. 研究成果

(1) 高分解能ビームラインの開発

東北大学サイクロトロン・ラジオアイソトープセンターは、1998年にサイクロトロン更新を行った後、高分解能ビームライン(以下41コース)は様々なエネルギーや核種が加速できるようになったにも関わらず、更新前の状況と変わっていなかった。そこで、まず着手したのがビーム輸送系のパラメータを見直しであった。特に逆運動学による散乱実験では反跳粒子の角度分解能が直接反応原子核のエネルギー分解能に影響する。また、本実験で使用するアクロマティックモード(図1)だけでなく、6000分の1の分解能をもつ分析電磁石2つを有効に組み合わせ、超高分解能ビームを利用することが可能になり、放医研や理研等の実験で使用される高分解能NaI検出器のエネルギー較正にも用いられている。

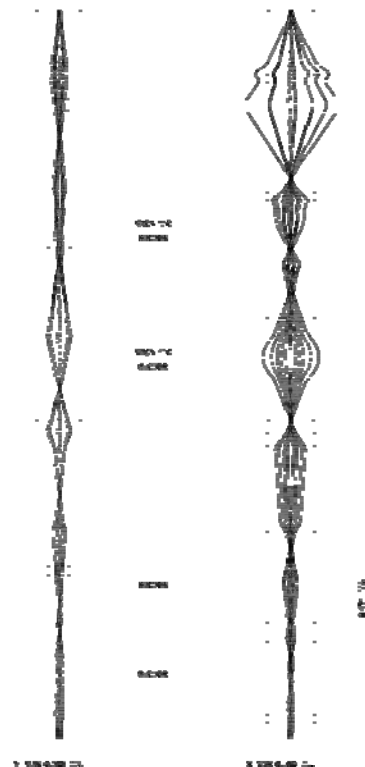


図1. アクロマティックビームトランスポート

次に、物点となる位置とビームの運動量分散が最大になる位置に、ビーム整形のための

遠隔操作可能なビームスリット、およびビーム診断のためのビームモニターを設置した。このモニターにより、迅速なビーム輸送が可能になり、ビームスリットによって、散乱槽内の標的上においてビーム径を 1mmφ程度まで小さくすることを可能にし、散乱断面積測定などの精密な原子核反応実験に耐えうるビームを得ることを可能にした。

(2) 反跳粒子と同時計測による崩壊α粒子測定装置の開発

反跳粒子の角度分解能を上げるためには、ビームスポットの大きさだけでなく、反跳粒子測定装置の角度分解能も必須となる。さらに、飛行時間分析法(TOF)によって粒子を識別するため、ある程度の応答速度を持つ必要がある。安価にこれらの要求を満たすために、反跳検出器には、立体角を制限する幅 1mm×高さ 10mm のコリメータを用いた、13mmφ程度のシリコン半導体検出器 (SSD) を採用した。さらにビームの角度、位置を確認するため、SSD を後方角度(72.5°)に設置し、常時 ^{12}C (^{16}O , ^{16}O) ^{12}C の弾性散乱のピークエネルギー、およびエネルギー幅をモニターしながら実験を行った。TOF スペクトルによる SSD の粒子識別の様子を図 2 に示す。

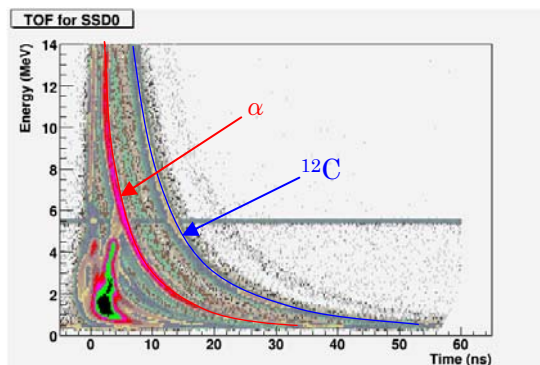


図 2 SSD における TOF スペクトル

次に、本実験のキーポイントとなる崩壊α粒子測定装置であるが、崩壊α粒子の測定にも、崩壊チャンネルを決定するために、ある程度の角度(≒位置)分解能が必要となる。さらに、崩壊して放出される粒子は広範囲に放出されるため、大立体角の検出器が好ましい。この崩壊α粒子測定装置の検出器には 3mm幅のストリップが表裏に縦横 16chずつあるシリコン検出器(以下 PSD)を用いた。これにより、崩壊粒子測定装置の角度分解能は 0.4°程度を達成できた。また、前方角度に設置するため弾性散乱による ^{16}O が大量に PSD の方向に飛んでくることが予想される。これを、PSD の直前に厚さ 200μm のアルミニウム板を設置することで停止させ、崩壊粒子

のみを通過させることを可能にした。しかしながら、崩壊して放出される粒子には ^{12}C も含まれており、中には崩壊の Q 値により、核子当りのエネルギーがビーム粒子である ^{16}O よりも大きくなる。そのため一部の ^{12}C はアルミニウム板を通過する。これらの粒子識別には TOF および運動学の計算から評価することができた。図 3 に PSD における粒子識別の様子を示す。

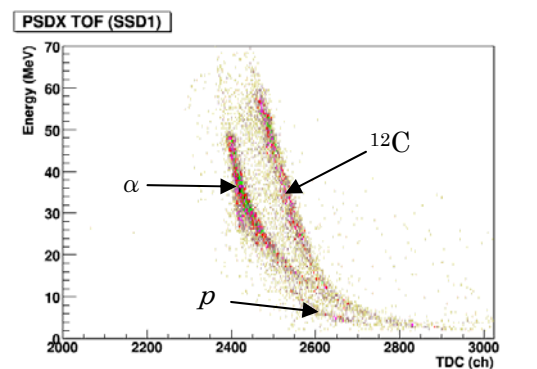


図 3 PSD における TOF スペクトル

また、反跳 ^{12}C が 4.44MeV ^{12}C に励起した場合、測定する異なる酸素の励起エネルギーからの崩壊粒子を測定することになる。この成分を最終結果から取り除くために、BGO 検出器を用意し、設置した。しかしながら、 ^{12}C に励起した成分は僅かであったため、今回の解析では使用していない。最終的なセットアップの写真を図 4 に示す。

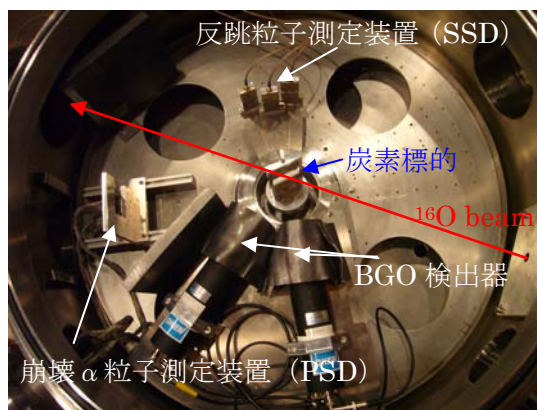


図 4 反跳粒子および崩壊α粒子測定装置

(3) VME を用いたデータ収集システムの構築

データ収集システムは、VMEbus 規格の回路に Bit3 の PCI/VME アダプタを用いて Linux PC に取り込むシステムを採用した。またデータ収集系のプログラムには京都大学の庄司氏が開発した Linux kernel 2.6.x 上で動作する「nagidaq-1.6」を改良し、使用した。トリガー信号には、反跳粒子検出器である

SSDによって粒子を検出した信号を用い、PSDで同時計測された崩壊 α 粒子の処理はPC上の処理によって行った。

(4) 酸素原子核における励起エネルギー15.097 MeVの 0^+ 状態の $^{12}\text{C}+\alpha$ チャンネルの崩壊分岐比

図4で示した実験セットアップを用いて本実験を行った。崩壊粒子の測定角度を $0^\circ \sim 25^\circ$ 程度まで広げるため、PSDを 9° 、 17.5° 、 26° の3つの角度に設定した。また、反跳 ^{12}C 測定用のSSDを 61° に設定し、4.6~5.6 MeVの運動エネルギーの反跳 ^{12}C にゲートをかけ、散乱 $^{16}\text{O}^*$ の平均励起エネルギーが15.1 MeVになるように解析を行った。この時の運動量移行(q)は 1.7 fm^{-1} となり、散乱 $^{16}\text{O}^*$ の角度は約 8.4° となる。

^{16}O の励起エネルギー15.097 MeV 0^+ 状態からの α 崩壊チャンネルは

1. $^{16}\text{O}^* \rightarrow ^{12}\text{C}(\text{ground state 以下 gs}) + \alpha$
2. $^{16}\text{O}^* \rightarrow ^{12}\text{C}(4.44\text{MeV}, 2^+) + \alpha$
3. $^{16}\text{O}^* \rightarrow ^{12}\text{C}(7.65\text{MeV}, 0_2^+) + \alpha \rightarrow 4\alpha$
4. $^{16}\text{O}^* \rightarrow ^8\text{Be} + ^8\text{Be} \rightarrow 4\alpha$

の4つが考えられる。これを均等に崩壊するとして、モンテカルロシミュレーションを行った結果を図5に示す。また、実験データを図5と同様な2次元ヒストグラムで表すと図6のようになる。シミュレーション(図5)と実験結果(図6)の比較により、崩壊チャンネル1, 2の α 粒子(図5の黒、紫)、 ^{12}C 粒子(図5の緑)が測定できていることがわかる。一方、崩壊チャンネル3, 4に関してはほとんど検出されていないように見えている。

次に、定量的に示すために崩壊チャンネル1, 2, 3に関する検出数を求める。測定データを図3のPSDのTOFスペクトルを用いて ^{12}C と α を分離し、質量欠損エネルギースペクトルに変換したものが図7(^{12}C)、図8(α)である。

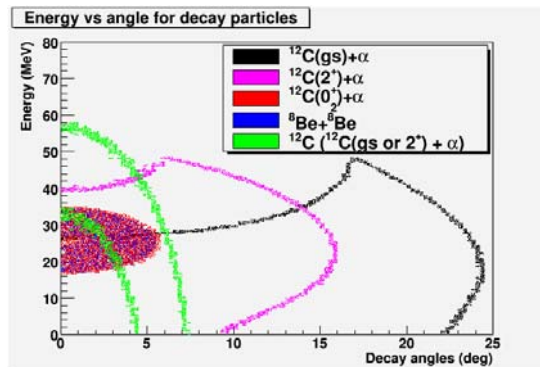


図5 崩壊粒子についてのシミュレーション結果。Decay anglesは散乱した $^{16}\text{O}^*$ の角度に対する崩壊粒子の放出角度。EnergyはPSDで測定されるエネルギー。

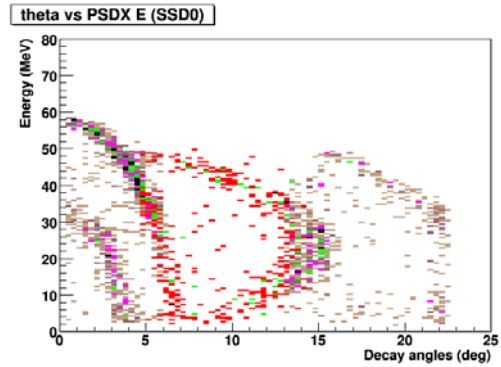


図6 崩壊粒子の崩壊角度-PSDで測定されたエネルギーのパターン(実験結果)。3つのPSD角度設定を重ねてプロットしたもの。

図7において、崩壊チャンネル3の $^{12}\text{C}(0_2^+)$ は、すぐに $^8\text{Be}+\alpha$ チャンネルを経て、3つの α 粒子となるため、 ^{12}C としては検出されない。従って、基底状態(gs)と4.4 MeV(2^+)状態の2つのピークが現れる。図8においては、gs、 2^+ 、 0_2^+ のすべてのピークが見られる。PSDによるそれぞれの励起状態に対する立体角が異なるため、ピークの大きさが、そのまま崩壊分岐比に相当するわけではないが、最も立体角の大きい 0_2^+ のピークが最も小さいことがわかる。

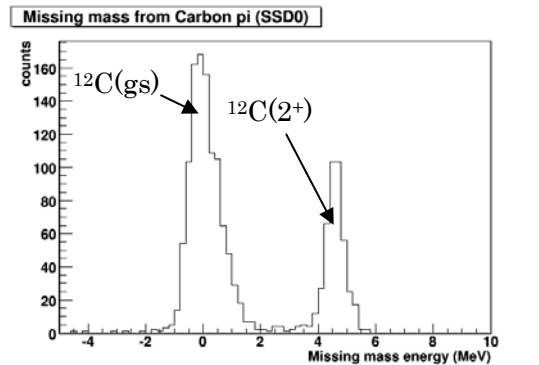


図7 崩壊 ^{12}C を検出した場合の質量欠損エネルギースペクトル

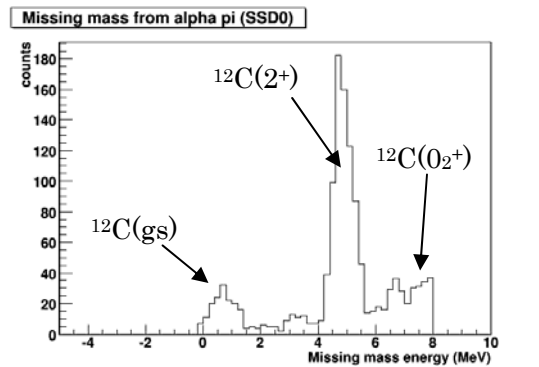


図8 崩壊 α 粒子を検出した場合の質量欠損エネルギースペクトル

実際、モンテカルロシミュレーションによる

立体角の補正では、gs に対しては約 6.8 倍、 2^+ に対しては約 4.4 倍、一方、 0_2^+ に対しては、ほぼ 1 倍の因子がかかる。つまり、図 8 で得られたピーク比よりも、 0_2^+ への崩壊分岐比はさらに小さいことになる。ざっくりと崩壊分岐比を求めると、(gs):(2^+):(0_2^+)=7:22:1 となる。ただ、これらの実験結果をもとに、15.097MeV の 0^+ 状態が α 凝縮状態か否かを判断することはできない。軽い原子核とはいえ、中間状態（この場合、15.097MeV の状態から終状態へ崩壊する過程において残留相互作用の影響のため、やはり理論計算との比較が必要となる。

本研究により、4 α 粒子クラスター原子核である ^{16}O において、 α 凝縮状態を研究するための測定装置が整い、解析方法を確立したことで、今後さらに他の ^{16}O の励起状態に対して調査を行っていく予定である。

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 6 件)

1. B.K. Nayak et al (23 名中 13 番目), "Direct proton decay of the isoscalar giant dipole resonance in ^{208}Pb ", Physics Letters B 674(2009)281-285、査読有り
2. T.Noro et al (22 名中 7 番目), "Wolfenstein parameters for s1/2 proton knockout (p, 2p) reaction", Physical Review C 77(2008)044604、査読有り
3. S.Terashima et al (15 名中 5 番目), "Proton elastic scattering from tin isotopes at 295 MeV and systematic change of neutron density distributions", Physical Review C 77(2008)024317、査読有り
4. M.Itoh et al (20 名中 1 番目), "The second 2^+ state at Ex \sim 10 MeV in ^{12}C ", Nuclear Physics A 805 (2008)371-373、査読有り
5. T.Kawabata et al (19 名中 8 番目), " 2^+ α +t cluster structure in ^{11}B ", Physics Letters B 646(2007)6-11、査読有り
6. T.Wakasa et al (20 名中 7 番目), "New candidate for an alpha cluster condensed state in $^{16}\text{O}(\alpha, \alpha')$ at 400 MeV", Physics Letters B 653(2007)173-177、査読有り

[学会発表] (計 5 件)

1. 伊藤正俊、高橋利弥、長野哲也、杉本直

也、吉田英智、酒見泰寛、「逆運動学による ^{16}O の α 凝縮状態の研究」、日本物理学会、2009 年 3 月 28 日、立教大学

2. M.Itoh, 「Experimental studies of α -condensed states」、KGU Yokohama Autumn School of Nuclear Physics、2008 年 10 月 9 日、関西学院大学関内メディアセンター
3. 伊藤正俊、大関和貴、酒見泰寛、松尾亮 「逆運動学による α 凝縮状態の研究」、日本物理学会、2007 年 9 月 21 日、北海道大学
4. M.Itoh, H.Akimune, M.Fujiwara, H.Hashimoto, T.Kawabata, T.Murakami, K.Nakanishi, Y.Nakatsugawa, H.Sakaguchi, S.Terashima, M.Uchida, Y.Yasuda, M.Yosoi, J.Zenihiro, 「Study of cluster states in the Ex=10 MeV region in ^{12}C .」、クラスター国際会議、2007 年 9 月 3 日、イギリス・ストラットフォードアポンエボン
5. M.Itoh, H.Akimune, M.Fujiwara, U.Garg, H.Hashimoto, T.Kawabata, K.Kawase, S.Kishi, T.Murakami, K.Nakanishi, Y.Nakatsugawa, B.K.Nayak, S.Okumura, H.Sakaguchi, H.Takeda, S.Terashima, M.Uchida, Y.Yasuda, M.Yosoi, J.Zenihiro, 「The second 2^+ state at Ex \sim 10MeV in ^{12}C .」、原子核国際会議 (INPC2007)、2007 年 6 月 6 日、東京国際フォーラム

[図書] (計 0 件)

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]

ホームページ

<http://cycgw1.cyric.tohoku.ac.jp/~itoh/a-cond/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

伊藤 正俊 (ITO MASATOSHI)

東北大学・サイクロトロン・ラジオアイソトープセンター・助教

研究者番号：30400435

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし