

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成24年 5月 10日現在

機関番号：17102

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2009～2011

課題番号：21540301

研究課題名（和文） 低エネルギー不安定核反応による2核子相関の研究

研究課題名（英文） Study of two-nucleon correlation by low-energy reactions of unstable nuclei

研究代表者

寺西 高 (TERANISHI TAKASHI)

九州大学・大学院理学研究院・准教授

研究者番号：10323495

研究成果の概要（和文）：

RI ビームの共鳴散乱実験により2核子相関の研究を目指した。 ${}^9\text{Li}+\text{d}$  実験では、2中性子ハロー核  ${}^{11}\text{Li}(={}^9\text{Li}+2\text{n})$  に対応するアナログ共鳴の探索を行ったが共鳴ピークは観測されなかった。しかし、実験下限エネルギー0.3 MeV 以下に幅の広い共鳴が存在する可能性は残された。 ${}^{17}\text{Ne}+\text{p}$  実験では新しい  ${}^{18}\text{Na}$  共鳴(励起状態)を発見した。この状態は  ${}^{19}\text{Mg}$  の2陽子崩壊には寄与しないことが示唆された。

研究成果の概要（英文）：

Resonant scattering experiments with RI beams were performed for studying two-nucleon correlation. In the  ${}^9\text{Li}+\text{d}$  experiment, we searched for an analog resonance corresponding to the two-neutron halo nucleus  ${}^{11}\text{Li}(={}^9\text{Li}+2\text{n})$ , and no resonance peak was observed. However, there remains a possibility of a wide resonance below the experimental lower energy limit of 0.3 MeV. In the  ${}^{17}\text{Ne}+\text{p}$  experiment, a new  ${}^{18}\text{Na}$  resonance (excited state) was found. It is suggested that the state does not contribute to the two-proton decay of  ${}^{19}\text{Mg}$ .

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

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：実験核物理、不安定核、共鳴状態、RI ビーム

## 1. 研究開始当初の背景

本研究では核子あたり数 MeV の低エネルギー不安定核2次ビーム(RI ビーム)を用いて、不安定核と陽子または重陽子の共鳴を測定し、中性子および陽子ドリップライン近傍の弱束縛または非束縛核の構造や崩壊を支配する2核子相関について研究することを目指した。

RI ビーム施設の発展により、通常の安定核

より中性子または陽子が過剰な不安定核の研究が可能になり、安定核およびその近傍の核の実験データに基づいた従来の原子核の知識が塗り替えられつつある。例えば、中性子ドリップライン近傍の軽い核のいくつかは核の周辺に弱く束縛した中性子が薄く広がって存在する層(中性子ハロー)をもつこと、また、安定核で知られている魔法数が中性子過剰核の領域では変化していることな

どがわかってきた。

核内で2中性子または2陽子が対をなして同一の軌道に入ることにより、原子核がより安定になるという対相関の効果は、ドリップライン近傍の弱束縛・非束縛核の構造や崩壊様式に大きな影響を与えている。例えば、2中性子ハロー核  $^{11}\text{Li}$  は  $^9\text{Li}+n+n$  のような弱束縛3体系と考えることができるが、この部分2体系( $^9\text{Li}+n$  または  $n+n$ ) には束縛状態は存在しない。このような核(ボロミアン核)におけるハロー構造の形成には対相関が重要な役割をもっている。

一方、陽子過剰核領域においては2陽子相関の結果として、基底状態の原子核が1陽子に対しては束縛状態だが2陽子放出に対しては非束縛状態となり直接2陽子を放出して崩壊するという2陽子放出核がいくつか存在する。これらの大部分は非常に短い寿命をもった共鳴状態として存在するが、例えば  $^{45}\text{Fe}$  は2陽子崩壊の寿命が長く $\beta$ 崩壊と競合していることが明らかになっており、「2陽子放射能」をもった核として興味もたれている。

ドリップライン近傍の原子核の安定性、構造、崩壊等に対相関がどのように影響を与えているかを理解するためには、不安定核の実験データを増やし、微視的な原子核構造理論と比較していく必要がある。

## 2. 研究の目的

### (1) 低エネルギーRI ビームの共鳴散乱による共鳴状態の直接測定

近年、核子あたり数 MeV の低エネルギーRI ビーム施設が発達し、低エネルギー共鳴散乱 ( $A+b \rightarrow C \rightarrow A+b$ ) により不安定核の共鳴状態を直接的に観測できるようになった(図1)。この手法では比較的簡単な散乱理論によりデータの解析ができ、逆運動学の条件で反跳粒子を測定することにより100 keV 以下の良いエネルギー分解能が達成できる。そこで本研究では、低エネルギーRI ビームの共鳴散乱の利点を生かして、対相関と密接に関係する共鳴状態の測定を目指した。

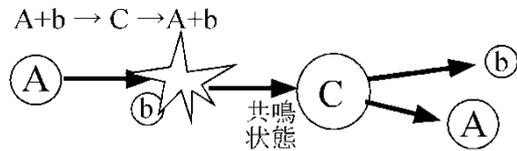


図1 低エネルギーRI ビームの共鳴散乱

### (2) 2中性子ハロー核のハロー・アナログ重陽子共鳴の研究

$^{11}\text{Li}$  のようなハロー核を調べる方法のひとつに荷電交換反応や $\beta$ 崩壊により1中性子を1陽子に変換して空間的な波動関数がほとんど同じアナログ状態を生成し、そのエネル

ギーや崩壊の性質を調べるという方法が考えられる。ここで興味をもつのはハロー2中性子のうち一つが空間波動関数を保ったまま陽子に変わった状態(ハロー・アナログ状態)である。ハロー・アナログ状態はハロー部分のスピン( $J$ )・アイソスピン( $T$ )の状態により2種類存在し、一つはもとのハロー2中性子と同じ( $J=0, T=1$ )状態と、もう一つは重陽子的な( $J=1, T=0$ )状態である(図2)。前者は申請者らがすでに観測した  $^{11}\text{Li}$  のアイソバリック・アナログ状態の波動関数の1成分として存在すると考えられている。重陽子的成分に対応する状態はまだ同定されていないが、重陽子崩壊をする共鳴状態として存在する可能性がある。本研究ではこの  $^9\text{Li}+d$  共鳴状態を  $^9\text{Li}+d$  共鳴散乱により直接的に観測することを目指した。もしハロー・アナログ状態が観測されれば、その崩壊幅からハロー2核子の空間的な相関の強さについて調べることができる。またこの状態は  $^{11}\text{Li}$  の $\beta$ 崩壊においてよく分かっていない $\beta$ 遅発重陽子放出を支配していると考えられ、中性子過剰核のガモフ・テラー遷移強度分布と $\beta$ 崩壊様式を理解する上でも重要である。

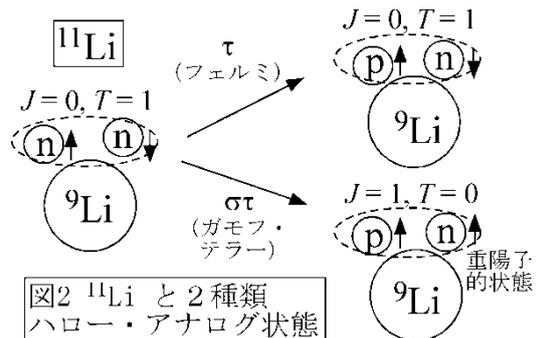
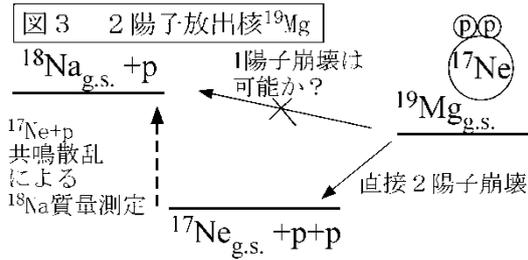


図2  $^{11}\text{Li}$  と2種類ハロー・アナログ状態

### (3) 2陽子崩壊に関与する陽子共鳴の研究

本研究では2陽子放出核の候補といわれている  $^{19}\text{Mg}(=^{17}\text{Ne}+2p)$  核を研究するため、その2体部分系である  $^{18}\text{Na}(=^{17}\text{Ne}+p)$  核を共鳴散乱で測定することを目指した(一番軽い Mg, Na 束縛核はそれぞれ  $^{20}\text{Mg}, ^{20}\text{Na}$  である)。 $^{19}\text{Mg}$  および  $^{18}\text{Na}$  は生成が困難なため、実験データがほとんどなく、質量もよくわかっていない。もし、陽子対相関のため  $^{19}\text{Mg}(=^{17}\text{Ne}+2p)$  が  $^{18}\text{Na}+p$  よりも安定していれば2段階崩壊  $^{19}\text{Mg} \rightarrow ^{18}\text{Na}+p \rightarrow ^{17}\text{Ne}+2p$  は不可能で、直接2陽子崩壊  $^{19}\text{Mg} \rightarrow ^{17}\text{Ne}+2p$  のみ可能になるため、2段階崩壊の場合より寿命が長くなるはずである(図3)。この研究の第1段階としてまず  $^{18}\text{Na}$  共鳴のエネルギー、スピン・パリティ、陽子幅を  $^{17}\text{Ne}+p$  共鳴散乱により初めて決定することを目指した。これに加えて、本実験による  $^{18}\text{Na}$  共鳴のスピン・パリティと幅からは、 $^{17}\text{Ne}$  および  $^{18}\text{Na}$  における陽子軌道配位の情報が得られる。 $^{17}\text{Ne}$  自体も2陽子相関をもった2陽子ハロー核( $^{17}\text{Ne}=^{15}\text{O}+2p$ )の候補であり、この陽子軌道の情報は、それを検証

するための有用な情報となる。

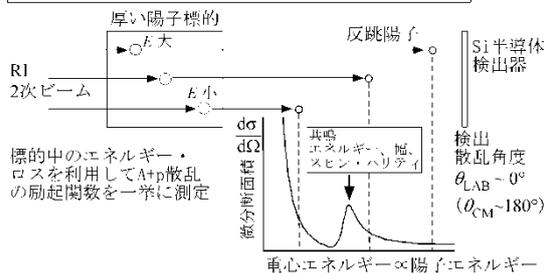


### 3. 研究の方法

本研究では中性子および陽子ドリプライン近傍の弱束縛または非束縛核の構造や崩壊を支配する2核子相関について研究するため、中性子過剰核領域では $^9\text{Li}+d$ 共鳴、陽子過剰核領域では $^{17}\text{Ne}+p$ 共鳴の測定を行った。

測定手法として逆運動学の厚い標的法を用い、弾性散乱の励起関数 $d\sigma/d\Omega(E)$ を測定した。ここでは $^{17}\text{Ne}(\text{ビーム})+p(\text{標的}) \rightarrow ^{18}\text{Na} \rightarrow ^{17}\text{Ne}+p$ という共鳴散乱を例にとり説明する(図4)。他のビーム核種、重陽子標的の場合も基本的な手法は同じである。核子あたり約5 MeVの $^{17}\text{Ne}$ ビームを厚い陽子標的(ポリエチレン)に照射する。ビーム粒子は厚い標的中でエネルギー・ロスをしながらか弾性散乱し、陽子を標的外にはじき飛ばす。したがって、ビーム・エネルギーを変化させることなく、広い範囲の励起関数を一挙に測定することができる。反跳陽子は前方角度においたSi半導体検出器(SSD)により測定される。角度を決めると、陽子エネルギーと散乱エネルギーの間には一対一の対応関係があるので、陽子エネルギー・スペクトルから弾性散乱の励起関数が得られる。励起関数に現れる共鳴散乱とポテンシャル散乱の干渉によるパターンをR行列理論により解析し、共鳴エネルギー、幅、スピン・パリティを決定する。

図4 逆運動学厚い標的法によるA-p共鳴散乱の測定



### 4. 研究成果

#### (1) $^9\text{Li}+d$ の測定

##### ①測定目的

$^{11}\text{Li}$  ( $=^9\text{Li}+2n$ )のハロー2中性子のガモフ・テラー遷移によってできるハロー・アナログ状態 $^{11}\text{Be}^*(=^9\text{Li}+d)$ の探索を $^9\text{Li}+d$ 共鳴散乱により行った。 $^9\text{Li}+d$ 共鳴状態の存在はまだよく分かっていないが、理論や $^{11}\text{Li}$ β

崩壊のデータから $^{11}\text{Be}$ の励起エネルギー18.2 MeV付近(共鳴エネルギー0.3 MeV付近)に存在し、β崩壊における遅発n, d, t, α粒子放出に影響を与えていると考えられている。特にβ遅発重陽子放出確率は18.2 MeV状態がハロー・アナログ状態であるかどうか強く依存する。

##### ②実験結果

最初に $^9\text{Li}$ ビームの生成テストを高エネルギー加速器研究機構・日本原子力研究開発機構のRIビーム施設TRIACで行った。タンデム加速器による70 MeVの $^7\text{Li}$ 1次ビームをBN標的に照射して $^9\text{Li}$ 2次イオンを生成した。 $^9\text{Li}$ 2次イオンはTRIACにより核子あたり0.85 MeVまで再加速された。最大ビーム強度は $6 \times 10^4$ 個/秒であった。

次に $^9\text{Li}+d$ 散乱・反応の本測定を4日間行った。標的には2.3 mg/cm<sup>2</sup>の重水素化ポリエチレンを使用し、散乱・反応により発生するd, t, α粒子のスペクトルを半導体検出器で測定した。

$^9\text{Li}(d, d)$ 散乱に対するエネルギー・スペクトル(図5)には、はっきりとした共鳴ピークは観測されなかった。スペクトルのエネルギー下限値は、ノイズおよび標的厚による限界から $E_{\text{cm}} \sim 0.3$  MeV程度であった。一方、理論により予想されていた共鳴エネルギーも0.3 MeV程度である。実際低エネルギーに向かって断面積が増大しており、0.3 MeV以下に幅の広い共鳴が存在している可能性が残された。

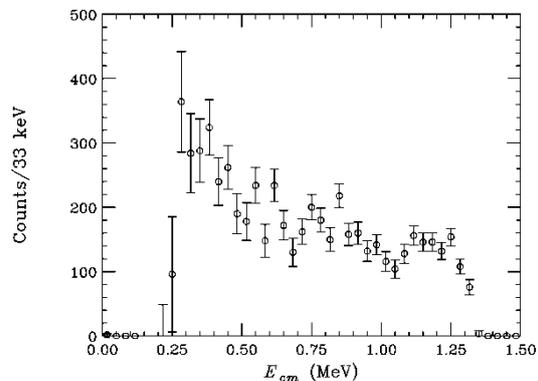


図5  $^9\text{Li}+d$ 散乱のスペクトル

##### ③結果の意義・展望

今回の $^9\text{Li}(d, d)^9\text{Li}$ スペクトルは初めて得られたものである。最近カナダTRIUMF研究所で行われた $^{11}\text{Li}$ のβ遅発重陽子のスペクトル中にもやはり、はっきりとした共鳴ピークの存在は確認されておらず、その点では本測定の結果と一致している。それでも幅の広い $^9\text{Li}+d$ 共鳴が存在しており、その状態が生成されると、dだけでなくtやαを放出して崩壊している可能性が残されている。将来ア

クティブ・ガス標的をつかった測定を行うなどして、今回より低いエネルギーまで測定を行うことができれば状況がより明らかになる可能性がある。

(2)  $^{17}\text{Ne}+p$  の測定

①測定目的

$^{19}\text{Mg}$  の 2 陽子崩壊 ( $^{19}\text{Mg} \rightarrow ^{17}\text{Ne}+2p$ ) の寿命に影響を与える可能性のある、非束縛核  $^{18}\text{Na}$  の準位を  $^{17}\text{Ne}+p$  共鳴散乱により探索した。

②実験結果

まず測定に必要なビームの開発を東京大学原子核科学研究センターの CRIB 分離器により行った。ビーム生成条件と結果は表 1 のとおりであった。

$^{14}\text{O}$  ビームは副産物として  $^{17}\text{Ne}$  ビームと同時に得られた。 $^{17}\text{Ne}+p$  の測定にとって  $^{14}\text{O}$  はバックグラウンド成分ということになるが、実際には 1 粒子ごとにビーム粒子を識別できるので測定には支障がない。むしろ、 $^{14}\text{O}+p$  の測定も同時に行うことができ有用であった。

得られた  $^{17}\text{Ne}$  および  $^{14}\text{O}$  ビームを用いて、 $^{17}\text{Ne}+p$  励起関数(図 6)および  $^{14}\text{O}+p$  励起関数(図 7)の測定を約 18 時間にわたり行った。 $^{17}\text{Ne}+p$  スペクトルには統計量が少ないものの幅の狭い共鳴ピークが  $E_{cm} = 2.04$  MeV に観測された。 $^{14}\text{O}+p$  スペクトルには既知の  $^{15}\text{F}$  基底状態(1.4MeV 付近のこぶ)および第一励起状態(2.7 MeV 付近のピーク)が観測された。本研究で整備した R 行列計算コードによるフィッティング(図 6 および 7 中の実線)の結果として得られた共鳴パラメーターを表 2 に示す。

表 1 ビーム生成条件と結果

1 次ビーム	$^{16}\text{O}$ 核子あたり 11 MeV 強度 150 pA
	冷却 $^3\text{He}$ ガス標的 厚さ 3.3mg/cm <sup>2</sup>
2 次ビーム	$^{17}\text{Ne}$ 生成反応 $^3\text{He}(^{14}\text{O}, ^{17}\text{Ne})2n$ 核子あたり 4.9 MeV 強度 440 個/秒
	$^{14}\text{O}$ 生成反応 $^3\text{He}(^{16}\text{O}, ^{14}\text{O})^4\text{He}+n$ 核子あたり 4.8 MeV 強度 5200 個/秒

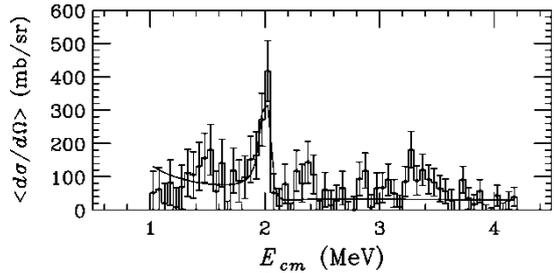


図 6  $^{17}\text{Ne}+p$  散乱のスペクトル

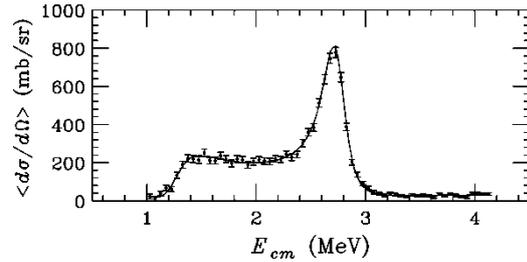


図 7  $^{14}\text{O}+p$  散乱のスペクトル

表 2 共鳴パラメーターの結果

	スピン・パリティ	共鳴エネルギー MeV	幅 $\Gamma_{\text{obs}}$ MeV
$^{18}\text{Na}^*$	3-	2.040 (16)	0.05(2)
$^{15}\text{F}$ 基底	1/2+	1.36-1.42	0.4-0.8
$^{15}\text{F}$ 第 1 励起	5/2+	2.779 (16)	0.226(15)

③結果の意義

$^{17}\text{Ne}+p$  散乱による  $^{18}\text{Na}$  共鳴の測定はこれが初めてである(仏 GANIL 研究所でもほぼ同時期に  $^{17}\text{Ne}+p$  の実験が行われ、同じ共鳴が報告された)。エネルギーは基底状態の理論予想より 0.2-0.6 MeV ほど高いということ、またスピン・パリティが基底状態の予想 1-ではないことから、観測された 3-状態は励起状態であることが示された。また幅が小さいことからこの状態は  $^{19}\text{Mg}$  の 2 陽子崩壊にはほとんど寄与しないことがわかった。

本研究の副産物である  $^{14}\text{O}+p$  散乱による  $^{15}\text{F}$  共鳴の測定はこれまで米国で 3 例あるが、いずれも本測定よりも統計量が少なく、エネルギーと幅の精度が低かった。今回は特に  $^{15}\text{F}$  第一励起状態のエネルギーと幅をこれまでより高精度に決定することができ、幅が従来の測定値(約 0.3 MeV)よりも小さいことが示された。これらの実験値は  $^{15}\text{F}$  の構造、クーロン力による原子核準位のずれ、魔法数  $Z=8$  の破れなどの研究に有用である。

(4) R行列計算コードの整備

本研究のデータ解析に必要な多準位・多チャンネルR行列計算コードを整備した。また、将来、不安定核ビームと偏極標的の実験を計画するうえで有用な、偏極分解能の計算ができるようにコードの改良をした。

(5) 今後の展望

今後、より陽子過剰または中性子過剰なRIビームによる共鳴散乱・反応の実験を行い、未測定のコモング準位を測定することは、核物理のさまざまな観点から重要である。実験手法的には高エネルギー飛行分離法で発生したRIビームを低速化して利用する必要がある。また、近年発達しつつある陽子偏極標的を導入し、偏極分解能を測定し、共鳴状態の識別の確度を向上させるという可能性が考えられる。偏極分解能測定の可能性については本研究で改良したR行列計算コードを用いて検討していきたい。

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2件)

① T. Teranishi et al.,  
“Test measurement of  $^{17}\text{Ne}+p$  resonance elastic scattering”,  
CNS-REP-86, Ann. Report 2009 (査読無), (2011) p17-18.

② T. Teranishi et al.,  
“Search for highly excited  $^{11}\text{Be}$  states in  $^9\text{Li}+d$  reactions”,  
JAEA-Review 2010-056 (査読無), (2010) p35-36.

[学会発表] (計4件)

① T. Teranishi,  
“Proton elastic resonance scattering of light unstable nuclei”,  
Review meeting on CRIB activities,  
2011年6月21日,  
東京大学原子核科学研究センター・和光キャンパス(埼玉県和光市)

② T. Teranishi,  
“Proton resonance elastic scattering on light unstable nuclei”,  
French-Japanese Symposium on Nuclear Structure Problems (LIA Symposium 2011),  
2011年1月8日, 理化学研究所(埼玉県和光市)

③ T. Teranishi,  
“Isobaric analog states of neutron-rich

nuclei”,  
The Symposium of 25th Anniversary of the Discovery of Halo Nuclei (Halo2010),  
2010年12月7日, 神奈川県葉山町

④ T. Teranishi,  
“Isobaric analog states of unstable nuclei studied by charge-exchange reactions and resonant proton scattering”,  
ICHOR-EFES International Symposium on New Facet of Spin-Isospin Responses,  
2010年3月30日, 東京大学

[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]

6. 研究組織

(1) 研究代表者

寺西 高 (TERANISHI TAKASHI)  
九州大学・大学院理学研究院・准教授  
研究者番号: 10323495