

Shimoura Susumu (東京大学大学院理学系研究科附属原子核科学研究センター)

# **1** はじめに

自然界の物質質量の大部分を担っている原子核 は、核力により複数の陽子と中性子が結びついた量 子複合系である。天然に存在する安定な原子核は、 陽子と中性子の個数がバランスしている。このバラ ンスが崩れて不安定になった場合でも、多くの原子 核はバラバラにならずに、中性子(陽子)が過剰な 場合、中性子(陽子)が陽子(中性子)に変換する β崩壊によってより安定な原子核に変換する\*。こ れらは放射性同位体として知られている。こうした 不安定な原子核は現在までにおよそ 3,000 種類が実 験的に確認され、また、理論的には 7,000~10,000 種の原子核が予言されている。それらには安定な原 子核とは異なる性質や構造があらわれ、その系統性 を調べ、起源や法則を探ることは、現代の原子核物 理学の重要な研究課題となっている。

バランスが崩れた極限として、「中性子だけで構成される原子核が存在するか」は50年以上前から 興味がもたれてきた。中性子2個にはたらく引力 は、束縛状態をつくるにはわずかに足りず、また、 準安定な共鳴状態ももたないことが知られている。 中性子の個数を増やしていくと、系に含まれる中性 子対の数は増えていくので、それらに引力が働け ば、束縛状態や共鳴状態ができるかもしれない。中 性子3個の場合は、相互作用が3組になる反面、3

\* 重い原子核の場合, α崩壊や自発的核分裂によっても核種 の変換が起こるがその寿命が十分長い(マイクロ秒程度以 上)ものは原子核とみなされる。また,陽子過剰核でも, 陽子崩壊の寿命が同様に長いものは原子核とみなされる。 個の中性子が同じ状態をとることができないという パウリ効果のためにやはり束縛状態をもたず,また 寿命の長い共鳴状態ももたない。4 個あるいはそれ 以上ではどうか。これまで,実験的に孤立した4 個 以上の中性子で構成される系をつくることが難しい ため,未だに束縛や共鳴状態があるか否かに関して 明らかになっておらず,存在の可能性を示す実験は 1 件のみである<sup>1)</sup>。

下浦

理論的には、最近、現実的な2体核力を用いた第 一原理計算が進歩し、軽い原子核構造の理解が進 み、3重水素(<sup>3</sup>H)やヘリウム3(<sup>3</sup>He)の束縛エネ ルギーを再現するためには、2体核力だけでなく、 3個の核子に働く3体核力が必要で、こうした3体 核力を用いることで、軽い核の束縛エネルギーや励 起状態が再現されている。こうした計算を4中性子 系に適用した計算によると、これまで知られている 2体核力と3体核力だけでは、束縛状態はできず、 共鳴状態がある可能性のみが残されている<sup>20</sup>。ただ し、3体力に関しては現象論的あるいはπ中間子交 換を考慮した半現象論的なもので、例えば、中性子 3個に働くアイソスピン3/2の3体力の大きさはよ くわかっておらず、4中性子(テトラ中性子)状態 の実験的研究に興味がもたれている。

一方,中性子をその要素とする巨視的な系として,中性子星が知られている。中性子星の表面には,中性子過剰原子核が存在し,その内側に中性子を構成要素とするパスタ構造が表れ,芯に近づくと高密度の中性子物質,さらに核子がA粒子になるなどのストレンジハドロン物質になっていると考えられている。中性子星の重さや大きさは,中性子物質の状態方程式によって決まり,定量的には,2体

核力だけでなく3体核力の知見が必要である。テト ラ中性子状態を実験的に明らかにすることは、3体 核力の知見を得るためにも重要であると考えられている。

こうした背景のもと、ここでは、理化学研究所 RIビームファクトリー施設(RIBF)で行われた、 テトラ中性子共鳴の生成・同定実験<sup>3)</sup>を紹介する。 この実験は、中性子過剰な不安定核、ヘリウム 8 (<sup>8</sup>He)のビームを世界最高の強度で供給できる RIBFにより始めて実現されたものである。

#### 2 実験手法

原子核反応によりテトラ中性子状態(4n)を生成 する手法はいくつかあるが、この実験では、ヘリウ ム4(<sup>4</sup>He)を標的とし、中性子過剰な不安定核、 <sup>8</sup>Heを入射粒子とした2重荷電交換反応<sup>4</sup>He(<sup>8</sup>He, <sup>8</sup>Be)4nが用いられた。

テトラ中性子共鳴が存在するとしても、その状態 は非常に壊れやすいものと考えられる。壊れやすい ものはできる限り衝撃を与えず "そっと" つくる必 要がある。原子核反応の言葉では、生成されたテト ラ中性子に与える運動量移行をできる限り小さくす る、すなわち反跳を小さくするということになる。 本実験で用いられた反応では、テトラ中性子状態を <sup>4</sup>Heから生成するが、このためには、約31 MeVの エネルギーが必要である。自然界に存在する同位体 をビームとした原子核反応では、このエネルギーを 運動エネルギーから転換することになるが、そのた め、ビームの運動量が減少し、標的から生成される 原子核に反跳を与えてしまう。しかし、不安定核 <sup>8</sup>Heは<sup>8</sup>Be核より、約28 MeV 重く、この質量差 (エネルギー差)を.<sup>4</sup>Heから4nを生成するための エネルギーに使うことで、ほぼ無反跳で4nが生成 可能となる。このように正の質量差を利用する反応 を発熱型荷電交換反応とよび、安定核ビームでは実 現不可能な条件をみたすことができる。

ビームのエネルギーは核子あたり約 200 MeV が 用いられた。このエネルギーは RIBF が最も有効に 利用できる領域であるとともに,荷電交換反応を引 き起こす相互作用が最も有効に働く領域であること が知られている。4n 状態は反応後の<sup>8</sup>Be の運動エ ネルギーの測定により求められるが,<sup>8</sup>Be 核は生成



図1 SHARAQ磁気分析装置の模式図 超電導2連四重極磁石,双極磁石,四重極磁石, 双極磁石の順(QQDQD型)に並べられ,運動 量分解能1/15,000の性能をもつ

後約 10<sup>-16</sup> 秒で約 100 keV の崩壊エネルギーで 2 つ の α 粒子になる。これは、測定を複雑にする反面、 2 つの α 粒子が非常に強く相関しているために同時 測定の感度が十分に高く、相対エネルギーの測定に より基底状態が同定できるとともに、様々なバック グラウンドからの識別を容易にする。

テトラ中性子状態のエネルギー精度を1 MeV 程 度にするため、<sup>8</sup>Be 核の運動量は磁気分析装置 SHARAQ (図1)<sup>4)</sup>により測定された。一方、不安定 核ビームはそのエネルギーの拡がりが大きく、本実 験では±2%、すなわち約15 MeV もある。4n 状態 のエネルギー精度を1 MeV 程度にするためにビー ムも1 粒子ごとにその運動量が測定された(図2)。

### 3 結果

反応後の<sup>8</sup>Beの運動量と<sup>8</sup>He ビームの運動量の相 関を図2に示す。ほとんどの事象は4nの閾値が0 である線の左上にあり、4nが散乱状態にあること を示している。右下の束縛状態の領域にある1事象 は実験的なバックグラウンドだと考えられる。

測定された2つのα粒子の相対エネルギーと4n のエネルギーとの相関を図3上に示す。相対エネル ギースペクトルの形から、ほとんどの事象が<sup>8</sup>Beの 基底状態からの崩壊したものであると同定された。 図3中に得られた4nスペクトルを示すが、それら は、非常にわずか(スペクトル全体で2事象程度) の実験的なバックグラウンド(点線)、反応後に4n の連続状態になったもの(実線)に加 えて, 閾値のすぐ上にそれらでは説明 がつかない4事象が観測された。

ここで、4nの連続スペクトルは、 反応直後に<sup>4</sup>He核から生成された4n 系の波束が、強く相関した2中性子2 組の散乱状態になるという模型で計算 された。

スペクトル全体にわたって最尤法を 用いて検定した結果, 閾値のすぐ上の 点を除けば, うまくフィットされてい る。除外した点の有意度をエネルギー の不確定性も考慮して求めたところ, 4.9 σであることがわかった。

4 事象のエネルギーの平均は,0.83 ±0.65(統計精度)±1.25(系統精度) MeV であり,測定精度からは束縛状 態を否定することはできないが,中心 値から共鳴状態の候補であると結論づ けられた。

## **4** 展望

この実験で得られた結果について, いくつかの理論的な解析が進められて いる<sup>5,6)</sup>が,これまで用いられている 核力だけでは,共鳴状態を予言するこ とが難しいと考えられており,実験的 には,より多くの事象でより高いエネ ルギー精度の測定が求められている。 本年6月には,測定システム及び較正 手法を改良した再実験が行われ,現在 解析が進行中である。また,テトラ中 性子系を別の反応を用いて生成する実 験が複数準備されており,共鳴状態の 有無だけでなく,その性質が解明さ

れ,核力に関するより深い理解が可能となり,中性 子星の構造の解明に寄与すると期待されている。

#### 参考文献

- 1) F.M. Marqués, et al., Phys. Rev. C 65, 044006 (2002)
- 2) S. Pieper, Phys. Rev. Lett. 90, 252501 (2003)



#### 図3 実験結果

上右:4n エネルギーと2つの α粒子の相対エネルギーの相関。上左:2つ のα粒子の相対エネルギースペクトル。下:4n エネルギースペクトル。 (文献 3) から引用)

- K. Kisamori, S. Shimoura, et al., *Phys. Rev. Lett.* 116, 052501 (2016)
- T. Uesaka, et al., Prog. Theor. Exp. Phys. 2012, 03C007 (2012)
- 5) E. Hiyama, et al., *Phys. Rev.* C 93 044004 (2016)
- A. M. Shirokov, et al., *Phys. Rev. Lett.* 117, 182502 (2016)