

^8He における新奇的な 4 中性子相関

堀内 渉 板垣 直之
Horiuchi Wataru Itagaki Naoyuki

1. はじめに

原子の中心に点のように存在する原子核は、陽子や中性子といった核子が固く結合することによって成り立っています。この原子核の結合を支配しているのは、核子の間に作用する「核力」です。核力は強い相互作用とも呼ばれますが、重力や電磁気力と並び、自然界に 4 つしか存在しない基本的な相互作用の 1 つです。この力によって陽子と中性子は重陽子と呼ばれる結合した状態（束縛状態）を作ります。一方で、2 個の中性子（あるいは 2 個の陽子）は、それだけでは結合状態を作れません。これは、中性子同士（あるいは陽子同士）に働く核力が、陽子-中性子間に働くものよりも弱く、結合状態を作るには引力がごくわずかに足りないためですⁱ⁾。それならば、中性子の数を更に増やし、4 つにした場合、果たして結合状態が現れるのであろうか、という議論が、最近実験・理論双方で活発に行われています。結論としては、4 中性子の場合も 2 中性子と同様、陽子なしで結合状態を作ることは難しいのですが、それでも「4 中性子状態」がある一定の寿命を持った共鳴状態として存在するのではないか、という実験的示唆が得られています¹⁾。

それでは、一般の原子核中では、このような 4 中性子の塊のようなものを見ることができるのでしょうか？というのも、通常の原子核中では、むしろ逆に、陽子や中性子といった核子はお互いに強い相関

を示すのではなく、個々が独立な運動を行っていると考えられているからです。このことには、原子核の構造に関するある有力な描像、及びそれに基づいたモデルが強く関わっています。すなわち、1 つの核子に作用する他の核子からの核力を足し合わせると、それはあたかも原子核中心からの力であるかのように見なすことができる、という描像です。この考え方を推し進めた「シェルモデル」では、原子核内の核子集団は自分自身による平均ポテンシャル場を作り出し、個々が原子核中心から引力を受け、中心周りを独立に運動すると考えます。このシェルモデルこそが原子核構造に対する標準的な理論であり、原子核に現れる魔法数ⁱⁱ⁾の起源を説明しました。ゲッパート=メイヤーとイェンゼンはこの発見により、1963 年にノーベル物理学賞を受賞しています。

一方、このシェルモデルに代表される、それぞれの核子の独立粒子運動という描像が良く成り立つのは、天然に存在する原子核のように、陽子と中性子の数のバランスが保たれた、比較的結合の強い安定な原子核の場合である、とも言うこともできます。天然に存在する安定な原子核では、それぞれの核子は 7~8 MeV というほぼ一定の結合エネルギーⁱⁱⁱ⁾を持ち、このことは原子核における核力の飽和性と呼

i) 極小の世界を支配する量子力学によれば、単に粒子間に引力が作用するだけでは、結合状態の存在を保証しません。2 つの粒子が近づくにつれ、不確定性関係により運動エネルギーが増大するために、結合状態の生成には、それを上回るだけの一定以上の引力が必要となるためです。

ii) 陽子数や中性子数がそれぞれ 2, 8, 20, 28, 50, 82, 126 の時、特に原子核の結合が強まり、安定となる現象が知られており、これらの数を「魔法数」と呼びます。

iii) 同種のフェルミ粒子からなる系を記述する波動関数は、どの粒子の入れ替えに対しても負符号を返すように構築されます。例えば、A 個の同一フェルミ粒子系の波動関数の i 番目と j 番目の粒子の入れ替えについて、全系を表す波動関数は、 $\Psi(r_1, \dots, r_i, \dots, r_j, \dots, r_A) = -\Psi(r_1, \dots, r_j, \dots, r_i, \dots, r_A)$ のような符号の変化を引き起こします。このことは 2 つの同種粒子が同一状態をとることができないことを意味しています（パウリの排他原理）。

ばれています。同時に、原子核中心における密度も、原子核の種類によらず、ほぼ一定に保たれていると考えられています（原子核密度の飽和性）。

しかし、天然には存在しない、結合の弱い原子核の場合はこの限りではなく、そこにおいては飽和性に関する状況が一変します。過去数十年に渡り、このような、天然には存在せず、加速器によって人工的に作られる中性子過剰核の物理が大きく進展してきました。中性子過剰核は、その存在自体が物理学の興味の対象であるだけでなく、我々の身の周りの元素の成立の起源を考える上で、鍵となる存在と考えられています。これらは陽子と中性子の数の比が最適ではないため、中性子を陽子に入れ替える反応である β 崩壊に対して不安定であり、一般に不安定核と呼ばれています。また、中性子過剰核は、結合の強さの面からも、弱結合という著しい特徴があります。中性子数に比して陽子数が少ないために、いくつかの中性子が非常に弱く結合するのです。例えば、代表的な中性子過剰核の1つとして、 ${}^6\text{He}$ （陽子数2、中性子数4）があります。これは、通常のHe元素の原子核である ${}^4\text{He}$ （陽子数2、中性子数2）に2つの中性子が付与されたものです。 ${}^4\text{He}$ は、陽子と中性子のそれぞれが前述の魔法数の2に対応し、それぞれの核子が7 MeVあまりの標準的な結合エネルギーを持ちますが、一方の ${}^6\text{He}$ では、 ${}^4\text{He}$ の周りの2中性子は、2つ合わせても1 MeVに満たない結合エネルギーしか持ちません。このため、2中性子は、固く結合した ${}^4\text{He}$ の周りに緩く結合し、遠方まで平がった空間的な分布を示します。このような、弱結合した中性子の持つ、遠方まで平がった空間分布を、中性子ハロー（halo）構造^{2),iv)}と呼び、これは中性子過剰核を特徴づける物理現象であると考えられています。また、弱結合性ゆえに起こる、魔法数の変化も、中性子過剰核の重要な研究テーマの1つです。

中性子過剰核のような弱結合した原子核においては、それぞれの核子が中心から受ける引力が弱く、それに付随して核子の独立な運動が弱まる一方で、核子と核子の間の相関が相対的に重要となります。それぞれの中性子同士に働く引力がより大きな意味

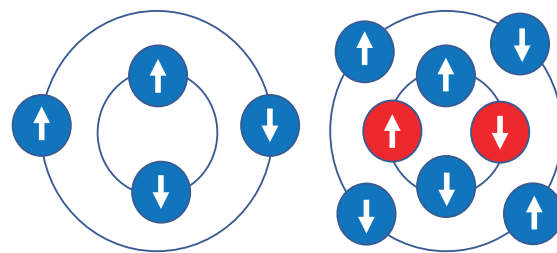


図1 真空中の4中性子（左図）と ${}^6\text{He}$ 内における4中性子の最低エネルギー配位の比較に関する模式図

青丸は中性子、赤丸は陽子、矢印は異なるスピン状態を示します。真空中ではパウリの排他原理により2中性子は異なる軌道に入らざるを得ませんが、 ${}^6\text{He}$ 内では4中性子が同一軌道（p軌道）に入ることができます

を持ち、中性子同士が相関を持つのです。前述した2中性子の織り成すハロー構造においては、2つの中性子が1つの塊を形成して遠方まで広がった成分が、現実の原子核の中に存在することが知られています。この現象は双中性子相関、あるいはダイニュートロン相関と呼ばれ、その発現メカニズムに関する研究は、現代の原子核物理学における中心課題の1つとなっています。

本研究では中性子過剰核である ${}^8\text{He}$ （陽子数2、中性子数6）を取り上げました。ある元素の同位体が、原子核としての束縛状態を形成できる最大の中性子数を中性子ドリップラインと呼び、 ${}^8\text{He}$ は、He同位体の中性子ドリップラインに対応しています。この原子核においては、 ${}^4\text{He}$ の周りに、4つの中性子が計3 MeVあまりのわずかなエネルギーで結合しており、その弱結合性により、中性子ハロー的な構造が現れます。この時、4中性子は、最初に述べた陽子なしの4中性子の場合と異なり、 ${}^4\text{He}$ の周りの同じ軌道を占有できるという性質があります（図1）。筆者らはこのような特殊な条件下において、4中性子間の相関が、真空中の4中性子状態と比べて、更に強まる可能性を指摘しました³⁾。

2. ${}^8\text{He}$ に対する微視的クラスター模型

本研究では、 ${}^8\text{He}$ の構造を理論的に明らかにしました。原子核のようなマイクロな系では、通常の世界におけるニュートン力学に代わり、量子力学がその運動を支配しています。この量子力学に基づくと、原子核の構造は、波動関数によって表現されます。多数の自由度を持つ原子核の波動関数を正確に求め

iv) 1985年に谷畑らによってLi同位体の束縛限界である ${}^{11}\text{Li}$ （陽子数3、中性子数8）の異常に大きい核半径が初めて測定されました。

ることは、一般には挑戦的な課題です。というのも、フェルミ粒子である核子から構成される原子核の波動関数は正しく反対称化ⁱⁱⁱ⁾されていなければならず、今回扱う8体系でも、すべての核子の空間的、スピン自由度を考慮して、多体系の波動関数を正確に求めるのは大変なことです。

そこで、 ${}^8\text{He}$ 原子核の効率的な記述のため、今回は微視的クラスターモデルを採用しました。まず、それぞれの核子を有限の拡がりを持った波束として表現します。次に、強く結合している ${}^4\text{He}$ を陽子2つ中性子2つからなる塊として扱う、いわゆるアルファクラスター構造を仮定します。 ${}^4\text{He}$ 原子核は非常に安定な原子核であり、この仮定が妥当であることは数々の実験事実から明らかになっています。強く結合した ${}^4\text{He}$ 部分をこのようにクラスターとして単純化して表現する一方で、その周りを運動する4中性子に関しては、様々な配位を重ね合わせることで、その波動関数を正確に解くことが可能です。このように、8核子からなる ${}^8\text{He}$ を、強く結合した4核子(${}^4\text{He}$)と、その周りの弱結合した4核子とに分離し、自由度をある程度制限することで、定量的な精度を持った構造分析と結果の議論が可能となりました。

3. ${}^8\text{He}$ 内における 4 中性子相関

量子力学の重ね合わせの原理に基づき、 ${}^8\text{He}$ 原子核の波動関数は、固く結合した ${}^4\text{He}$ 原子核の周りを運動する4つの中性子の、様々な配位を重ね合わせることで表現されます。これらの異なる中性子配位が ${}^8\text{He}$ の基底状態においてどのように混じり合うか、その最適な混合具合は、多体系に対するシュレーディンガーの波動方程式を解くことによって求められます^{v)}。実際の大規模な数値計算は、京都大学基礎物理学研究所の所有するスーパーコンピュータ、Yukawa-21を使用して実行されました。

こうして得られた ${}^8\text{He}$ の基底状態を表す波動関数は、結合エネルギーや荷電半径といった実験的に観測された物理量を良く再現します。また、このよう

v) シュレーディンガーの波動方程式は、この場合、変分原理に基づいて解かれます。具体的には、系のハミルトニアンを行列表示し、それを対角化することによって、各配位の混合度合いが決定されます。

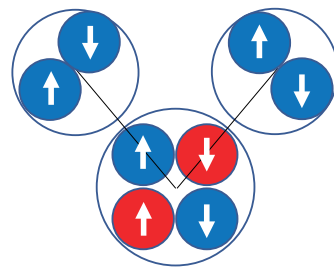


図2 ${}^8\text{He}$ 内における2つの中性子対の最尤配位の模式図⁴⁾
青丸は中性子、赤丸は陽子、矢印は異なるスピン状態を示します

な原子核構造計算で得られた波動関数を用い、原子核反応計算を実行することも可能です。本研究では、全反応断面積、及び微分弾性散乱断面積を計算し、これらが実験結果を良く再現することを確かめました。これらは原子核密度の空間的な分布の形状に敏感な物理量であり、実験結果が再現されたということは、例えば、弱結合した中性子の持つ空間的に広がった分布等、今回の構造計算で得られた ${}^8\text{He}$ の波動関数の特徴が現実にも即したものである、ということが検証されたことを意味します。

このようにしてその妥当性を担保した ${}^8\text{He}$ の波動関数を詳細に分析してみると、 ${}^4\text{He}$ の周りを運動する4つの中性子は、それぞれが独立に運動するだけではなく、2中性子の塊が2つ、といった成分を多く持つことが分かりました。これら2つの2中性子の塊は、原子核の表面付近に対応する、中心から半径3 fm程度の領域に分布し、中心に存在する ${}^4\text{He}$ と、ある程度狭い角度(〜80度)を形成します(図2)。実際の ${}^8\text{He}$ 原子核の基底状態には、このような幾何学的な成分が大きな確率(45%)を持って混合することが示されました。これは、 ${}^4\text{He}$ の周りに4中性子が1か所にまとまっているというわけではありませんが、2つの2中性子の塊が形成され、それらの塊同士が相関していることを示しています。

これまで、弱結合した中性子過剰核においては、中性子同士の相関が重要となり、2中性子が塊となった成分が混じることが知られてきましたが、今回の ${}^8\text{He}$ の分析結果は、4つの中性子が弱く結合した原子核の場合、2中性子の強く相関した塊が2つ現れ、かつその2つの塊同士が引き合い、相関を持つことを示しています。その意味するところは、 ${}^8\text{He}$ が、4つの中性子が ${}^4\text{He}$ の周りを独立に運動する、単純な球対称の形状を持つのではなく、より複雑な構造を持つということです。最新の実験結果による

と、 ${}^8\text{He}$ は球形ではなく、変形している可能性が指摘されています⁵⁾。今回の計算結果はこの実験結果とも無矛盾で、中性子ドリップライン核 ${}^8\text{He}$ における、弱結合した4つの中性子の相関のもたらす新奇的な構造を明らかにしたことになります。

4. まとめと今後の展望

原子核中では、陽子や中性子といった核子が中心の周りをそれぞれ独立に運動する、というシェル模型の描像が良く成り立ちますが、中性子過剰核等の結合の弱い原子核には特殊な構造が現れます。本研究では、原子核内における4中性子の持つ相関の探索のため、 ${}^8\text{He}$ を例として取り上げ、微視的クラスター模型に立脚した大規模な数値計算を実行しました。 ${}^8\text{He}$ においては、「2中性子の塊が2個、 ${}^4\text{He}$ の周りに存在する」成分が多く含まれることを示し、更に2個の塊同士が引き合い、相関した幾何学的配置を持つことを明らかにしました。中性子過剰核において、弱結合した2中性子が空間的な相関を持つことは研究されてきましたが、今回はドリップライン原子核である ${}^8\text{He}$ を例に、4つの弱結合した中性子が織りなす新奇的な相関構造を明らかにしたことに

なります。今回の研究の結果は、このような構造が、ドリップライン原子核の結合メカニズムに対してどのような影響を与えるのか、新たな示唆を与えるものです。今後は、より重い中性子過剰核においても一般にこのような4中性子相関が現れるのか、また現れる場合の条件は何か、それがドリップライン原子核の結合にどう関わるのか等、この現象の普遍性についてより深く探っていきたいと思っています。

本研究は、著者2名に加え、山口雄紀氏（大阪公立大学・大学院生）、市川隆敏氏（(株)シグマクス・フェロー）との共同研究として行われました。

参考文献

- 1) K. Kisamori, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **116**, 052501 (2016)
- 2) I. Tanihata, *et al.*, *Phys. Rev. Lett.*, **55**, 2676 (1985)
- 3) Y. Yamaguchi, *et al.*, *Phys. Rev. C*, **108**, L011304 (2023)
- 4) 大阪公立大学プレスリリース「ヘリウム8原子核内で中性子同士に強い相関があることを発見！」
https://www.omu.ac.jp/info/research_news/entry-07084.html
- 5) M. Holl, *et al.*, *Phys. Lett. B*, **822**, 136710 (2021)

(大阪公立大学理学研究科)