

原子核の「分子的」構造

Keyword: 原子核のアルファクラスター状態

1. アルファクラスター構造の再認識

原子核には、陽子2つ、中性子2つからなるアルファ (α) 粒子を単位とした、いくつかの部分系 (クラスター) に分けて考えられる「分子的」な状態が存在し、それらをアルファクラスター状態と呼ぶ。重い原子核は自発的にアルファ崩壊を起こし、原子からアルファ線が放出される現象はラザフォードによる原子核の発見以前より知られていたのであるから、この「原子核の基本的構成要素がアルファ粒子である」とする描像は、一見至極自明であるかのように思われる。しかし、1950年代より、原子核を構成する陽子や中性子 (核子) は、それ自身の相互作用によってある一体ポテンシャルを作りだし、その中を独立粒子的に運動するというシェル模型の描像が確立し、以後「核子の独立粒子運動」が原子核構造の標準的な理解として定着した。このため、4つの核子が空間的に強い相関を持つ分子的なアルファクラスターは、20世紀中ばには原子核構造の標準的描像とは考えられなくなった。

20世紀後半から、「核子の独立粒子運動」という描像とは対極的なクラスターと呼ばれる分子的構造に対する関心が再び高まっていく。最も有名な例はいわゆるホイル状態の提案と発見である。質量数 (核子数) 5と8の原子核は安定に存在しない。そのため、元素合成の際には、これらの壁を乗り越えて軽い原子核から重いものへと反応が進展する必要がある。ホイルは、3つのアルファ粒子から ^{12}C 原子核というプロセスが、星の中での元素合成で決定的に重要であることを指摘し、炭素の存在比を説明するには、 ^{12}C が3つのアルファ粒子へと分裂する閾値エネルギーのすぐ上に、3アルファ構造を持った共鳴状態が存在するはずであると予言した。この状態は、 ^{12}C の第2励起状態としてすぐに発見され、今日ではホイル状態と呼ばれている。ホイル状態がまさにこのエネルギーに存在することが、我々の世界の物質構成に決定的な役割を果たしている。

1960年代に入ってクラスター構造が再び注目を集めた理由に、このような、「核子の独立粒子運動」に立脚したシェル模型では単純に理解できない状態が発見されたことが挙げられる。例えば、非常に一般的な元素である酸素でも、その原子核 (^{16}O) の最初の励起状態が単純なシェル模型では理解できず、1960年代には「ミステリアスな状態」と呼ばれていたが、やがてこの状態は $^{12}\text{C}+\alpha$ クラスター状態として理解されるに至った。このように原子核が異なる2つのクラスターから構成される場合、クラスター間の相対運動を記述する波動関数の軌道角運動量の偶奇性

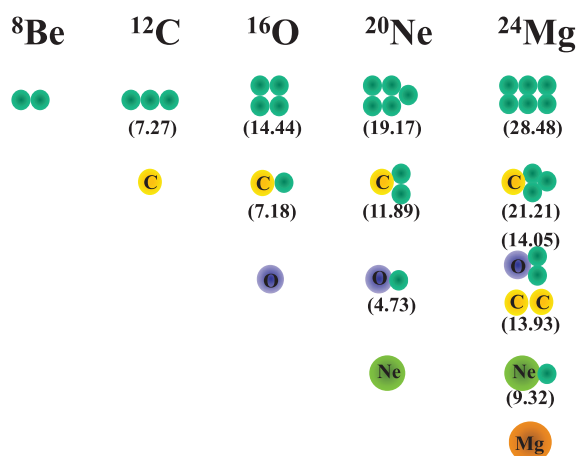
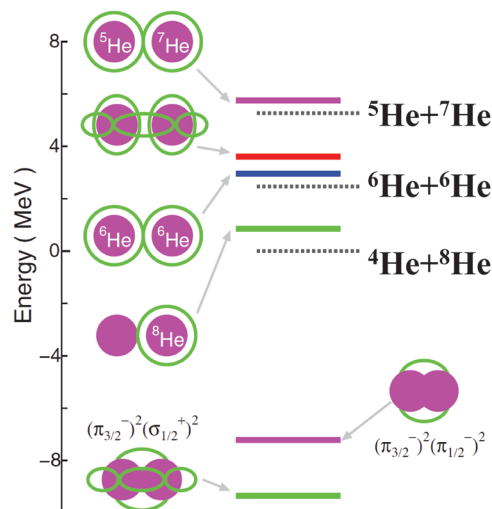
に対応して、系は正・負パリティの2つの回転帯を持つ。¹⁾ このような、正・負パリティの回転帯がエネルギー的に近接して「反転二重項」を形成することが、系が2種のクラスターからなる証拠であり、 ^{16}O の $^{12}\text{C}+\alpha$ 構造のみならず、 ^{20}Ne ($^{16}\text{O}+\alpha$) や ^{44}Ti ($^{40}\text{Ca}+\alpha$) など様々な例が観測された。

2. クラスター状態の出現機構

クラスター構造は、原子核が対応した部分系に分離可能となる閾値エネルギーの近傍に現れると考えられる。これを「閾値則」と呼ぶ。それ以下のエネルギーでは、クラスター間の引力により原子核は一体となり、そこでは核子は通常の「独立粒子運動」を行うからである。原子核を励起すると、 ^4He の束縛が非常に強いために、すぐにアルファクラスターを分離可能となる閾値エネルギーへと達し、アルファクラスター状態はその近傍に現れる。例えば、 ^{12}C から1つの核子を取りだすには20 MeV程度のエネルギーが必要であるが、逆に、3つのアルファクラスターへの分離はわずか7 MeV程度で可能であり、ここにホイル状態が現れる。このことを一般化し模式的に表したのが図1の池田ダイアグラムである。²⁾ これは、原子核がどの励起エネルギーでどのような部分系へと分離可能となるのか、その閾値エネルギーの実験値をMeV単位で示したものである。図で示された分子的構造が対応した閾値エネルギーの近傍に現れると期待され、1960年代からは重イオン加速器の進展により、アルファクラスターのみならず、 $^{12}\text{C}+^{12}\text{C}$ や $^{12}\text{C}+^{16}\text{O}$ など様々なクラスター構造が実験的に確認されている。

原子核でこのようなクラスター構造が出現するためには、アルファ粒子のような強く束縛した部分系が存在し、かつそれらのお互いの相対的な相互作用は逆に弱いという条件が必要であるが、これをもとと核子間に働く核力の性質から理解する試みもなされている。例えば、核力には π 中間子交換を主な起源とするテンソル力の成分があるが、 ^4He に対してはテンソル力は非常に強く、この強固な束縛がアルファクラスターを良い部分系の単位たらしめる。また、池田ダイアグラムに現れる ^4He 、 ^{12}C 、 ^{16}O などはすべてアイソスピン値として0を持つ。アイソスピンが0の系の間には、核力の中でも最も重要な、 π 中間子1つの交換が直接は作用しない。これが部分系同士の相互作用が弱くなり、分子的構造が保たれることの一因と考えられる。

池田ダイアグラムで表される閾値エネルギー近傍に現れるクラスター状態は、クラスターがお互いに緩く相互作用

図1 池田ダイアグラム (^{24}Mg までの最初の部分)。図2 ^{12}Be に現れる様々なクラスター状態。文献5より引用。

しており、クラスターの相対的な空間配置は必ずしも幾何学的な意味で固定されていない。ホイル状態は代表的な例であり、3つのアルファクラスターの様々な幾何学的配置を量子力学的に重ね合わせることで表される。このような状態は「アルファクラスターのガスの状態」と呼ばれ、³⁾ これを特徴づける模型波動関数として2000年にTHSR波動関数が提案され、⁴⁾ これを用いて ^{12}C 、 ^{16}O 、 ^{20}Ne 、 ^{24}Mg など様々な系が現在非常に精力的に研究されている。

一方で近年、 β 崩壊に対して不安定な、中性子過剰核の物理が劇的に進展している。中性子過剰核では、中性子がクラスター間の糊の役割を果たし、ガスのクラスター構造とは対極的な、より幾何学的なクラスター構造が出現することが理論・実験の双方から議論されている。例えば、 ^8Be は束縛せず、直ちに2つのアルファクラスターへと分離するが、そこに中性子が1つ加わった ^9Be は中性子の糊の効果でわずかに束縛する安定な原子核であり、2つのアルファクラスターはある相対距離を保って幾何学的な構造を持つ。図2は2つのアルファクラスターのまわりに4つの中性子が運動する ^{12}Be の例である。ここでは、中性子が両方のアルファクラスターの周りを運動する「分子軌道的状態」や、片側のアルファクラスターの周りのみに束縛された「原子軌道的状態」、さらに両方の対称性が混じり合った状態など、様々なクラスター状態が励起エネルギーの関数として現れる。⁵⁾ さらにアルファクラスターの数が増えたC同位体においても、3つのアルファクラスターが正三角形や直線など様々な幾何学的な配置を持った状態が、中性子の糊の効果で安定化することが示されている。⁶⁾ これらのクラスター状態を同定するための観測量として、最近、基底状態から励起状態へのアイソスカラー単極子遷移確率

が良い指標となるという議論がさかんになされている。⁷⁾

3. 原子核構造の統一的理解

原子核は、それぞれの核子が一体ポテンシャル中を独立に運動するシェル状態や、分子的なクラスター状態など、様々な異なった側面を持ち、励起エネルギーの関数としてその形状を変化させる。特に、原子核系で非常に強く作用する核力のスピン・軌道力項が、アルファクラスターを壊しそれぞれの核子の独立粒子運動を促進する役割を果たしており、シェル構造とクラスター構造の競合・混合を支配している。両者を含む原子核の統一的模型の構築へ向けて、精力的な研究が行われている。また近年、原子核の構造模型に適合させた有効相互作用ではなく、核子-核子散乱実験から決められる本来の核力を用いた「第一原理核構造計算」が世界各地で進展している。第一原理計算においてクラスター状態の記述が可能であるかどうかは、最近の大規模計算の進展にも関連した大きなテーマであり、原子核構造の統一的理解へ向けて様々な努力が続けられている。

参考文献

- 1) H. Horiuchi, *et al.*: Theor. Phys. **40** (1968) 277.
- 2) K. Ikeda, *et al.*: Prog. Theor. Phys. Suppl. **E68** (1968) 464.
- 3) E. Uegaki, *et al.*: Prog. Theor. Phys. **57** (1977) 1262.
- 4) A. Tohsaki, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **87** (2001) 192501.
- 5) M. Ito, *et al.*: Phys. Rev. Lett. **100** (2008) 182502; M. Ito: Phys. Rev. C **85** (2012) 044308.
- 6) 板垣直之, *et al.*: 日本物理学会誌 **64** (2009) 840.
- 7) T. Kawabata, *et al.*: Phys. Lett. B **646** (2007) 6.

板垣直之 (京都大学基礎物理学研究所 itagaki@yukawa.kyoto-u.ac.jp)

(2015年11月30日原稿受付)