

原子核におけるアルファ凝縮状態の探索

足立 智 〈東北大学先端量子ビーム科学研究センター adachi@raris.tohoku.ac.jp〉

藤川 祐輝 〈京都大学大学院理学研究科 fujikawa@rcnp.osaka-u.ac.jp〉

川畑 貴裕 〈大阪大学大学院理学研究科 kawabata@phys.sci.osaka-u.ac.jp〉

ボース-アインシュタイン凝縮 (BEC) はボース統計から導かれる量子現象であり、物理学徒であれば、その奇妙な振舞いに心躍らされたことがあるに違いない。

BECは原子核においても発現する可能性がある。原子核はフェルミ粒子である陽子と中性子 (核子) で構成されているおよそ 10^{-14} m という小さな系であるが、 ${}^4\text{He}$ の原子核である α (アルファ) 粒子はボース粒子なので、核内において複数の α 粒子が最低エネルギー状態に凝縮すれば、 α 粒子の BEC 状態、すなわち α 凝縮状態となる。

α 凝縮状態は、巨視的な原子核である「核物質」の理論研究において初めて提案された。陽子と中性子が同程度存在する対称核物質が低密度になると、 α クラスターが析出し BEC へと至る可能性が指摘され、その後、現実の原子核においても α 凝縮状態が発現し得ることが示された。近年では、 ${}^{12}\text{C}$ の 0_2^+ 状態 (スピンの 0 で正パリティをもつ状態のうち、エネルギーが 2 番目に低い状態) は 3 つの α クラスターが最低エネルギー軌道を占有する α 凝縮状態であると考えられている。凝縮状態にある α クラスターは運動量空間においてゼロ付近に局在するため、座標空間においては広い領域に拡散し通常の原子核に比べて約 1/5 の低密度となることが予測されている。

低密度の対称核物質において α 凝縮相が現れると、 α 粒子の析出によりエネルギーが低下する一方で、陽子数と中性子数の比が変化すると α 粒子の析出率が低下し、エネルギーが増加する。この機構は、低密度核物質の対称エネルギーを増大させ、中性子星の構造にも影響を与える。しかし、通常の原子核の密度は核種によらずほぼ一定であるため、原子核から低密度核物質の情

報を引き出すことは容易でない。だが、もし陽子と中性子の多体系が低密度において α 凝縮相へと変化する性質を有するのであれば、通常の原子核においても低密度な α 凝縮状態が普遍的に存在しているはずである。 α 凝縮状態の普遍性を確立し、そのエネルギーや崩壊幅などを調べることは、低密度な核物質の物性を明らかにするうえで重要である。しかし、これまでのところ、実験的に α 凝縮状態に関する情報が得られているのは ${}^{16}\text{O}$ よりも軽い原子核に限られている。そこで、筆者らは ${}^{20}\text{Ne}$ と ${}^{24}\text{Mg}$ における α 凝縮状態の探索に取り組んでいる。

${}^{20}\text{Ne}$ については、 α 非弾性散乱と励起状態からの α 崩壊を同時測定した。 α 凝縮状態は、軽い核の α 凝縮状態を経由して崩壊する確率が高いと期待されるため、 ${}^{16}\text{O}$ の α 凝縮状態の候補とされる 0_2^+ 状態への崩壊確率を測定した。統計量が十分ではなく、スピンやパリティを決定できていないが、 α 凝縮状態の候補となる複数の状態を発見した。

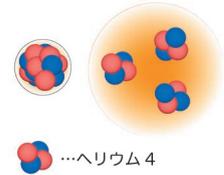
${}^{24}\text{Mg}$ については、 ${}^{12}\text{C}+{}^{12}\text{C}$ 散乱からの崩壊 α 粒子を測定した。この実験では、 ${}^{24}\text{Mg}$ の複合核状態から ${}^{12}\text{C}$ の α 凝縮状態である 0_2^+ 状態を経由して 3 つの α 粒子を放出する過程に注目した。その結果、 α 凝縮状態とその励起状態の候補となる状態を発見し、その一部についてはスピンとパリティを決定することに成功した。

現時点での成果は、原子核における α 凝縮状態の候補を発見したに過ぎないが、最近では、これまで難しかった 5α 凝縮状態の微視的計算がなされるなど理論計算の進展も著しい。今後も理論研究者と連携しつつ、測定装置の高度化や統計量の増大を図り、 α 凝縮状態の確立に取り組みたい。

用語解説

 α 凝縮状態:

原子核において、ボース粒子である α クラスターが同一の最低エネルギー状態に凝縮している状態。原子核におけるボース-アインシュタイン凝縮状態である。はじめ、巨視的な数の陽子と中性子からなる核物質において発現する可能性が指摘されたが、のちに、通常の原子核においても存在し得ることが示されている。例えば、 ${}^8\text{Be}$ の基底状態や ${}^{12}\text{C}$ の 0_2^+ 状態は α 凝縮状態であると考えられている。

炭素 12 (基底状態) 炭素 12 (0_2^+ 状態)

核物質:

巨視的な数の陽子と中性子で構成された物質。強い力が支配する量子多体系としての原子核を研究するための仮想的な物質であるが、中性子星は重力の効果により実在する核物質である。陽子と中性子の比や、巨視的な物理量である温度・密度をパラメータに核物質の物性を記述する状態方程式が精力的に研究されている。

 α クラスター:

原子核において、複数の陽子と中性子から構成される粒子が構成単位として振る舞うとき、その粒子をクラスターと呼ぶ。 ${}^4\text{He}$ の原子核である α 粒子がクラスターとなった場合は α クラスターと呼ばれる。原子核の内部に α クラスターが存在するというモデルは、1928年の原子核の α 崩壊の理論にまで遡る。