



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Cluster formation in neutron-rich Be and B isotopes [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	本木, 英陽
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第15278号
Issue Date	2023-03-23
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/89535
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Hideaki_Motoki_abstract.pdf, 論文内容の要旨



学 位 論 文 内 容 の 要 旨

博士の専攻分野の名称 博士(理 学) 氏 名 本 木 英 陽

学 位 論 文 題 名

Cluster formation in neutron-rich Be and B isotopes
(中性子過剰な Be と B 同位体におけるクラスター形成)

【背景】原子核は陽子・中性子が強く相互作用し自己束縛している有限の量子多体系である。原子核が成す構造には、幾つかの核子から成る「クラスター」が出現するクラスター構造がある。このクラスター構造は軽い核において頻繁に現れることが知られており、 α 粒子（ヘリウム4原子核 ${}^4\text{He}$ ）が出現する α クラスター構造が典型例である。一方、一部の重い原子核においても、原子核が α 粒子を放出する「 α 崩壊」現象が古くから知られているが、その際、原子核内で α 粒子がどのように形成されるか未だに解明されていない。理論的には、 α 粒子の形成には陽子・中性子の比率やそれらの密度が関係しており、 α 粒子は原子核表面において発達することが指摘されていた。その結果として、中性子過剰な Sn（錫）同位体（陽子数 $Z=50$ ）において中性子スキン（厚さ）の増加、即ち中性子数の増加と共に、 α 粒子の形成が抑制されることが予言された。

近年、陽子による α 粒子ノックアウト反応 ($p, p\alpha$) 実験により、標的の原子核表面における α クラスターの形成を実験的に確かめることが可能になった。即ち、($p, p\alpha$) 実験の断面積がある程度大きければ、原子核内に α 粒子が存在することを意味する。2021 年に、この ($p, p\alpha$) 実験により、初めて Sn 同位体（中性子数 $N=62, 66, 70, 74$ ）基底状態の核表面における α クラスター形成が確かめられ注目を集めている。更に、この実験は、理論的に予測されていた α クラクター形成と中性子数との間の負の相関を支持する結果となった。即ち、中性子数の増加に伴い α クラクター形成は「減少」する。また、「反対称化分子動力学」により C（炭素）同位体基底状態においても、 α クラスターに対する分光学的因子 $S(\alpha)$ により評価した α クラクター形成と中性子数のとの間に負の相関があることが理論的に示された。

一方、Be（ベリリウム）と B（ホウ素）同位体においては、中性子数の増加に伴う α クラスター形成の「増加」が理論的に議論されてきた。これらの議論は陽子分布における二つのコア間距離に基づいている。具体的には、陽子分布におけるコアの位置は α 粒子の位置と見なし、コア間の距離が α クラスターの発達確率を示していると期待できるためである。加えて、中性子数の増加に伴い実験で測定された荷電半径も増加傾向を示しており、これは理論計算による α クラスター形成の増加と矛盾しない。しかし、これらの議論は α クラスター構造を「直接的に」示すものではない。実際、先行の理論研究による中性子分布は陽子分布よりも変化に富んでおり、単純な陽子分布による α クラスター形成の見積もりは不十分である。従って、 α クラスター構造を「直接的に」且つ定量的に評価し、($p, p\alpha$) 実験と比較できるような物理量に基づく議論が必要である。

特に、Be 同位体における α クラスター構造の発達、その余剰中性子の「分子軌道模型」により説明されてきた。中性子過剰な Be 同位体中の余剰中性子は、二つの α 粒子の周辺作られた分子軌道を占有し共有結合のような働きをすることで二つの α 粒子間距離の発達に寄与する。本研究では、このように二つの α 粒子周辺に分布している余剰中性子に着目した。例えば、 ${}^{12}\text{Be}$ において、 α クラスターが出現する構造 ($\alpha+{}^8\text{He}$) だけでなく、 ${}^6\text{He}$ クラスターが出現する構造 (${}^6\text{He}+{}^6\text{He}$) も存在すると期待できる。B 同位体においても、一部は二つの α 粒子と期待されるコアを持ちその周辺に余剰中性子が存在していることが先行研究により指摘されているため、 α クラスター構造に留まらないクラスター構造の解析が必要である期待できる。

【目的】中性子過剰な Be と B 同位体において、中性子数の増加に伴う α クラスター及び ${}^6\text{He}$ と ${}^8\text{He}$ クラスター形成を直接的に調べ、それぞれのクラスター形成に対する余剰中性子の影響を明らかにする。陽子による α 粒子ノックアウト反応 (p, pa) 実験を意識し、親核と娘核（残留核）の基底状態間チャンネルのみを考慮する。

【手法】示される原子核は反対称分子動力学 (AMD) と生成座標法 (GCM) の枠組みで記述されている。本枠組みは陽子・中性子を自由度とした微視的理論模型であり、クラスター構造や原子核の形状に関する対称性を仮定しないにも係わらず、クラスター構造や多様な構造の混合を記述でき、本研究のように複数の同位体を統一的に解析することが可能である。原子核内のクラスター形成確率を直接的に評価する手法として、クラスターの分光学的因子を用いた。

【結果】中性子過剰な Be 同位体 (${}^{10,12,14}\text{Be}$) と B 同位体 (${}^{11,13,15,17,19}\text{B}$) の基底状態を記述した。Be 同位体において、先行研究同様に、中性子数の増加に伴い陽子分布における二つのコア間距離や陽子分布半径が増加する結果が得られた。このことから、中性子数の増加に伴い α クラスター形成も増加すると期待されたが、 α クラスターに対する分光学的因子 $S(\alpha)$ は減少する結果となった。従って、Be 同位体に対し (p, pa) 実験を行えば、その断面積は減少すると期待され、Sn 同位体での傾向と同様である。また、Be 同位体において、 ${}^6\text{He}$ クラスターに対する分光学的因子 $S({}^6\text{He})$ が無視できない程度に存在することが明らかになった。これは Be 同位体において分子軌道を占有している余剰中性子の存在のためであると考えられる。結果として、中性子数の増加に伴い各同位体における $S(\alpha)$ と $S({}^6\text{He})$ の和は増加する結果となった。ここで、 ${}^6\text{He}$ 内部に α クラスターのコアがあることを考えれば、 $S(\alpha)$ と $S({}^6\text{He})$ の和の増加は、陽子分布などから議論されていた α クラスター形成の増加傾向と矛盾していないことを示している。即ち、陽子分布で見られるクラスター構造の発達は α クラスターや ${}^6\text{He}$ クラスター構造を含んでいるものと捉えられる。更に、 ${}^{12}\text{Be}$ における α クラスターと残留核の励起状態 ${}^6\text{He}(2^+)$ の分光学的因子もある程度存在することを示した。この結果は、Be 同位体における分光学的因子 $S(\alpha)$ の減少は、残留核の基底状態のみを考慮していることが原因であり、 α クラスターが発達していないことを示しているのではないことを意味する。即ち、陽子による α 粒子ノックアウト反応 (p, pa) 実験からだけでは α クラスター構造の発達を把握しきれない可能性があることを意味している。この様に、残留核の基底状態に留まらない理解が重要であることが本研究の帰結である。

B 同位体においても、先行研究同様に、中性子数の増加に伴い陽子分布半径が増加する結果が得られた。しかし、 ${}^{19}\text{B}$ の陽子分布は発達したクラスター構造を示さなかった。このことから、中性子数の増加に伴い ${}^{17}\text{B}$ まで α クラスター形成も増加すると期待されたが、 $S(\alpha)$ は減少することが示された。そこで、Be 同位体のように陽子分布に二つのコアが存在し、その周辺に余剰中性子が分布していると期待される ${}^{13,15,17}\text{B}$ における ${}^6\text{He}$ と ${}^8\text{He}$ クラスターに対する分光学的因子 $S({}^6\text{He})$ と $S({}^8\text{He})$ をそれぞれ求めた。その結果、中性子数の増加に伴い各同位体における $S(\alpha)$ と $S({}^6\text{He})$ 、 $S({}^8\text{He})$ の和は ${}^{17}\text{B}$ まで増加し、陽子分布などから期待されていた α クラスター形成の増加傾向と矛盾しない結果を得た。 ${}^{11}\text{B}$ に関して、 t (水素 3 原子核 ${}^3\text{H}$) クラスターに対する分光学的因子 $S(t)$ を調べることで、ある程度の $\alpha + \alpha + t$ 構造を保持していることが微視的に裏付けられた。この結果は、先行研究と矛盾しない。

【要約】本研究により、従来議論されていた Be と B 同位体における、中性子数の増加に伴う α クラスター形成の Sn 同位体とは反対の増加傾向を、 α クラスター及び ${}^6\text{He}$ と ${}^8\text{He}$ クラスターに対する分光学的因子から「直接的に」それぞれのクラスター形成確率を定量的に評価することで説明した。二つの α 粒子のコアの周辺を余剰中性子が分布している系におけるクラスター生成の評価には、 ${}^6\text{He}$ と ${}^8\text{He}$ クラスターなど α クラスターに留まらないクラスターを評価する必要がある。 α クラスター形成確率の減少は、残留核の基底状態のみを考慮していることが原因である。

本研究は、同位体における α 及び ${}^6\text{He}$ と ${}^8\text{He}$ クラスター構造を直接的に解析した初めての系統的研究であり、軽い核の同位体におけるクラスター形成の理解に加えて、Sn などの重い核の同位体における α クラスター形成の理解にも繋がる。実際に、 α クラスターに留まらず、様々なクラスター X の形成を (p, pX) 実験で観測するプロジェクトが進行している。