



HOKKAIDO UNIVERSITY

Title	Linear-Chain Structure in Carbon Isotopes [an abstract of dissertation and a summary of dissertation review]
Author(s)	馬場, 智之
Degree Grantor	北海道大学
Degree Name	博士(理学)
Dissertation Number	甲第13565号
Issue Date	2019-03-25
Doc URL	https://hdl.handle.net/2115/74296
Rights(URL)	https://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/
Type	doctoral thesis
File Information	Tomoyuki_Baba_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 馬 場 智 之

学 位 論 文 題 名

Linear-Chain Structure in Carbon Isotopes (炭素同位体における直鎖クラスター構造)

原子核は、陽子と中性子という2種類の構成要素のみから成るにもかかわらず、非常に多種多様な構造を示す。アルファクラスター構造は、陽子2つと中性子2つから成るアルファ粒子が互いに弱く束縛するという分子的な構造で、主に軽い核の励起状態として現れる。アルファクラスター構造にも多くの種類が提案されており、なかでもアルファ粒子が直線上に並んだ構造は、直鎖クラスター構造と呼ばれ、従来観測された例がないほど極端に変形した極めて特異な構造であることから非常に興味を持たれ、多くの研究がされている。

直鎖クラスター構造の存在は、1960年代に ^{12}C の 0_2^+ 状態として初めて提唱された。一方、フレッド・ホイルは、炭素元素の存在比および、炭素より重い元素の星の内部での合成を説明するためには、 ^{12}C の励起状態として3つのアルファ粒子から成る共鳴状態が、その崩壊しきい値の近くに存在するはずだと予言した。その後すぐに、ホイルが予言した状態の存在は観測によって 0_2^+ 状態であると実証され、現在ではホイル状態と呼ばれている。したがって、直鎖クラスター構造は、このホイル状態の構造を表すものとして有力視されていた。しかし、多くの理論研究によって、ホイル状態は直鎖クラスター構造ではなく、3つのアルファ粒子が非常に緩く束縛した希薄な気体のような構造であることが指摘され、確立されつつある。次に、 ^{12}C の 0_3^+ 状態あるいは 0_4^+ 状態が直鎖クラスター状態であることが示唆されたが、 ^{12}C における直鎖クラスター構造は直線が曲がる方向へのモードに対して不安定であることが、その後の理論研究で示されてきた。したがって、 ^{12}C における直鎖クラスター構造の存在は不確かとなっている。

ところが、中性子過剰核では余剰中性子の存在によって、直鎖クラスター構造が安定化する可能性のあることが示唆されている。これは余剰中性子が糊の役割をすることでアルファ粒子を結びつけるためと解釈されており、実際に2つのアルファ粒子と余剰中性子から成るベリリウム同位体では余剰中性子の分子軌道による安定化機構として非常に良く理解されている。当然の帰結として、この理解は3つのアルファ粒子から成る炭素同位体に拡張され、 ^{14}C や ^{16}C において直鎖クラスター構造の存在が理論的に議論されている。

多くの理論研究が炭素同位体における直鎖クラスター構造を議論している一方、2000年代まで直鎖クラスター状態の存在を示す実験はほとんど行われていなかった。しかし近年、 ^{14}C における共鳴状態が複数の実験によって観測され、これらの共鳴状態は先行研究によって示された ^{14}C のパイ軌道の直鎖クラスター状態と近い励起エネルギーを示すため、直鎖クラスター状態の存在を示す有力な候補と考えられている。

観測的証拠が充実してきた一方で、定性的な理論予測は多いが観測と定量的に比較可能な理論計算は不足していた。例えば、 ^{14}C の実験ではアルファ崩壊幅が測定された。アルファクラスター構造をもつ原子核は、核子を1つ放出して崩壊するよりも、アルファ粒子を放出して崩壊する確率の方が高い。よって、大きなアルファ崩壊幅はアルファクラスター形成の直接的証拠であるため、非常に重要な物理量である。このことから理論においてもアルファ崩壊幅を計算する必要があるが、先行研究では依然計算できていなかった。したがって、定量性を伴う微視的理論の立場から ^{14}C における直鎖クラスター状態の励起エネルギーやアルファ崩壊幅の評価を行う必要がある。

また、実験ではパイ軌道の直鎖クラスター状態より高い励起状態が観測されており、パイ軌道

の候補と考えられる共鳴状態とは異なる崩壊モードが観測されている。この事実は、異なる分子軌道をもつ直鎖クラスター状態の存在可能性を示しているが、理論においてそのような存在を示す先行研究はなかった。

そこで本研究では、直鎖クラスター構造の存在を示し、その性質を解明するため、反対称化分子動力学と呼ばれる手法を用いて、 ^{14}C および ^{16}C の励起状態について調べた。特に、励起エネルギーに加えて、実験と比較可能な観測量である慣性モーメントやアルファ崩壊幅を初めて定量的に計算した。

結果として、本計算で得られた ^{14}C のパイ軌道の直鎖クラスター状態における励起エネルギーや慣性モーメント、アルファ崩壊幅は観測された値と非常に良く一致しており、これらから ^{14}C におけるパイ軌道の直鎖クラスター状態の存在は非常に確からしいことを示した。また、パイ軌道の直鎖クラスター状態に加えて、異なる分子軌道であるシグマ軌道の直鎖クラスター状態の存在を初めて示した。より明確に分子軌道の異なる直鎖クラスター状態を区別するため、また、その存在をより強く立証するため、直鎖クラスター構造の崩壊モードにも着目した。アルファ崩壊幅と ^4He 崩壊幅を比較したところ、2種の直鎖クラスター状態では崩壊モードがはっきりと異なることを示した。この崩壊モードは前述の観測された崩壊モードとも無矛盾である。したがって、余剰中性子が占有する分子軌道によって直鎖クラスター構造に定性的な違いが現れることを明らかにし、この違いは観測可能であることも示した。さらに、占有する分子軌道に関わらず、直鎖クラスター構造は娘核である Be 同位体の 2^+ 状態への崩壊が支配的であることを示した。これは、直鎖クラスター構造が極めて大きな変形度をもつことによる角度相関および強結合によるものであり、直鎖クラスター構造において固有な崩壊モードであると考えられる。したがって、直鎖クラスター構造をその他の非クラスター構造と区別し、また、その存在を立証する上で強い証拠となる結果を示した。

陽子数と中性子数を反転させた鏡映核すなわち ^{14}O では、荷電対称性から ^{14}C と同様の構造をもちうる。しかし、シグマ軌道はパイ軌道に比べて非常に広い空間的分布をもつため、クーロンエネルギーが減少し、エネルギースペクトル上にクーロンシフトとして現れうる。このことに着目し、本研究では ^{14}O に対して同様の計算を行い、シグマ軌道の直鎖クラスター状態のエネルギーを ^{14}C の値と比較した。結果として、 ^{14}O のシグマ軌道の直鎖クラスター状態は、他の励起状態に比べて明らかに減少したクーロンシフトをもつことを示した。この事実もまた、シグマ軌道の直鎖クラスター構造の存在を示す証拠となるため、今後の観測が期待される。

同様の解析は、 ^{16}C に対しても行われた。 ^{16}C では、 ^{14}C に対してさらに2つの余剰中性子が増えるため、 ^{16}C の直鎖クラスター構造はパイ軌道とシグマ軌道を同時に占有することが可能となる。そのような組み合わせによる ^{16}C の直鎖クラスター構造は、炭素同位体の中で最も直線が曲がる方向へのモードに対して安定であることが先行研究によって示唆されている。したがって、観測的証拠は少ないが、 ^{16}C もやはり直鎖クラスター構造に関して非常に興味深い原子核である。先行研究はクラスター構造および余剰中性子の分子軌道を仮定した計算であったが、本研究ではいかなる構造も仮定しない特長をもつ反対称化分子動力学によって、 ^{16}C の直鎖クラスター構造の存在を示した。励起エネルギーや慣性モーメント、アルファ崩壊幅についても定量的に予言し、今後の観測による検証を可能とした。特に、パイ軌道とシグマ軌道を同時に占有する性質から、 ^{14}O の直鎖クラスター構造とも異なる特徴的な崩壊モードをもちうることを示した。また、負パリティの直鎖クラスター状態では、反結合性のパイ軌道を占有した余剰中性子が存在することも新たに示した。

以上の結果から、本研究は直鎖クラスター構造の立証と解明に向けて大きく貢献した。