

氏名	きむらまさあき 木村真明
学位(専攻分野)	博士(理学)
学位記番号	理博第2435号
学位授与の日付	平成14年3月25日
学位授与の要件	学位規則第4条第1項該当
研究科・専攻	理学研究科物理学・宇宙物理学専攻
学位論文題目	反対称化分子動力学による $N=20$ 魔法数破れの研究

論文調査委員 (主査) 教授 堀内 昶 教授 川合 光 講師 藤原 義和

論文内容の要旨

ベーター崩壊に対して不安定な不安定原子核の研究はこれまで安定原子核の研究の上に築かれてきた原子核に対する基本的な認識の変更を多くの点で要求している。その内の一つが魔法数の破れの現象である。中性子過剰の原子核では中性子数 N が 8 も 20 もはや魔法数になっていないことが実験的に分っている。この魔法数の破れの原因とその意味する所の解明は現在の核構造理論の重要な課題である。中性子魔法数 $N=8$ の破れについては実験研究も豊富であり、それに応じて理論研究も蓄積が大きい。これらの研究は中性子魔法数 $N=8$ の破れの原因として多くの要因が存在することを示唆しているが、その要因の一つとしてクラスター相関が挙げられてきた。その根拠はベリリウムの中性子過剰核の基底状態のみならず励起状態群の多くの実験結果がクラスター相関を考える事によって統一的に見事に説明されるからである。さてそれでは中性子魔法数 $N=20$ の破れについての現在の理解はどうかというと、実験情報がまだ多くないために魔法数 $N=8$ の破れに比べてその理解は初歩的段階である。申請論文は中性子魔法数 $N=20$ の破れの研究を原子核構造研究の新しい理論である反対称化分子動力学を用いて行ったものである。反対称化分子動力学を用いることによってクラスター相関を十分に考慮した形の研究が可能となった。研究の結果は魔法数の破れの現象に対して多くの新しく重要な知見を得ることに成功し、今後の理論的ならびに実験的な研究の展開に対して貴重な指針を与えるものとなっている。

申請論文が研究対象としたのは Island of Inversion (反転の島) と呼ばれる核種領域の原子核で、中性子魔法数 $N=20$ の ^{32}Mg と ^{30}Ne の研究を中心としている。この核種領域の名称の由来は負パリティの pf 殻の軌道が正パリティの sd 殻の軌道とエネルギーの順序を反転しているからで、この様な反転が魔法数の破れの実態である。申請論文はこの反転が理論計算の結果として実際に得られることを示し、その上で ^{32}Mg に於いて反転の結果として得られる大きな変形を反映する電気四重極遷移確率などの実験データが再現されることをも示している。申請論文が示した新たな知見としては魔法数 $N=20$ の破れに対するクラスター相関の関与についての解析結果が重要である。基底状態を含む正パリティ準位に対しては、 ^{32}Mg の場合はクラスター相関の関与はそれほど顕著ではないが、 ^{30}Ne の場合は相当に大きいクラスター構造の混入が示されたのである。クラスター構造の混入の度合いはよく知られている安定核の ^{20}Ne の基底状態のそれとよく似ていることが示された。申請論文が示したもう一つの新たな知見としては負パリティ状態が相当に低い励起エネルギーの領域に現れるというもので、これは実験的に確証が大いに期待される予言となっている。負パリティ状態が低い励起エネルギーの領域に現れることは負パリティの pf 殻の軌道と正パリティの sd 殻の軌道との反転を示す直接的な現象としての位置づけがないうる。計算結果によれば負パリティ状態は ^{32}Mg でも ^{30}Ne の場合でもクラスター相関の寄与は顕著ではない。

上記のクラスター相関の研究や負パリティ状態の研究は、反対称化分子動力学の次の様な重要な特徴を十分に使ったものである。それは、反対称化分子動力学では、平均場とクラスター相関が同時に記述できるということと、パリティ射影を行った後にエネルギー変分の計算が出来るということで、Hartree-Fock などの平均場理論には欠けている長所である。申請論文の業績としては、この反対称化分子動力学の理論に対し新しく重要な改良を加えたことも指摘される。それは従来の反

対称化分子動力学では核子の波束は球形のガウス波束であったものが申請論文では3軸非対称な変形したガウス波束を用いていることである。この改良により Mg の同位体の四重極変形は2倍に近い値の変化があり、実験データとのほぼ満足のいく一致が得られた。この改良は従来の反対称化分子動力学の平均場構造を記述する部分を改良したことを意味する。反対称化分子動力学が元来はクラスター構造の記述には自然な理論形式であることを考えるとこの改良は平均場構造とクラスター構造を同時に記述するという反対称化分子動力学の特徴をより信頼の高いものに改善したことを意味する。

現在は ^{30}Ne の実験データが得られていないが ^{28}Ne と ^{26}Ne の正パリティ状態には実験データが少ないながら存在する。申請論文はこれらの核種の研究も行い、データの良好な再現を得るとともに、より安定核に近い ^{26}Ne では pf 殻の軌道と sd 殻の軌道との反転がどの様に消えていくかを示して魔法数 $N=20$ の破れの研究に貴重な資料を提供している。ここでもまた正パリティ状態とともに負パリティ状態に付いても研究を行い、これもまた実験的に確証が大いに期待される予言となっている。

論文審査の結果の要旨

不安定原子核の研究は安定原子核の研究の上に築かれてきた原子核に対する基本的な認識の大きな変更を余儀なくしてきているので、原子核物理の再構築が始まっているとも言える。この事からも分かるように不安定原子核というのは従来の常識の通用しない未知領域である。申請論文の用いている反対称化分子動力学は模型仮定を必要としない *ab initio* 理論(第一原理理論)であるので、このような未知領域としての不安定原子核の研究に用いることは極めてふさわしいと言うことが出来る。申請論文はこの反対称化分子動力学を用いて不安定原子核に於ける重大な問題である魔法数の破れの現象の解明に取り組んだものである。魔法数の破れの現象としては中性子魔法数 $N=8$ の破れの研究が最も進んでいるが、申請論文はそれに比べて実験的にも理論的にも研究の蓄積の少ない中性子魔法数 $N=20$ の破れの研究を扱っている。この問題に対する従来の研究としては殻模型に依るものと Hartree-Fock 理論に依るものとが存在するが申請論文の研究の先行研究に対する独自性は二つある。一つは魔法数の破れの現象にクラスター相関が関与しているのか否かの問題を追究していることであり、もう一つは従来の理論研究が基底状態を含む正パリティ準位にのみ限定されていたのを新たに負パリティ準位に対しても拡張したことである。第一の点について言うと、中性子魔法数 $N=8$ の破れの現象の場合にはクラスター相関が関与していることがベリリウムの同位体には明らかにされているので中性子魔法数 $N=20$ の破れの現象に於いても同様であるか否かを明らかにすることは極めて重要である。

申請論文の研究対象の原子核は Island of Inversion (反転の島) と呼ばれる領域の核種で、中性子魔法数 $N=20$ の ^{32}Mg と ^{30}Ne の研究を中心としている。この核種領域では負パリティの pf 殻の軌道が正パリティの sd 殻の軌道とエネルギーの順序を反転しているのが名称の由来である。魔法数の破れの実態はこの様な反転にあるというのが現在の認識で、何故に反転が起こるのが追及されるべき課題である。申請論文はまず、この反転が反対称化分子動力学による計算の結果としても実際に得られることを示した。その上で ^{32}Mg に於いて、反転の結果として得られる大きな変形を反映する電気四重極遷移確率などの実験データの再現に成功している。これらのデータの再現は先行研究によっても得られていたものであるが、申請論文が示した新たな知見は、魔法数 $N=20$ の破れに対してクラスター相関が関与している可能性を強く示唆する結果を得たことである。基底状態を含む正パリティ準位に対しての検討の結果は、 ^{32}Mg の場合にはクラスター相関の関与は基底状態ではそれほど顕著ではないが低い励起エネルギー領域に於いてはクラスター相関の大きく関与した状態が現れる可能性を示しており、 ^{30}Ne の場合では相当に大きいクラスター構造の混入が基底状態に対しても示されたのである。クラスター構造の混入の度合いはよく知られている安定核の ^{20}Ne の基底状態のそれとよく似ていることが示された。この研究結果は平均場とクラスター相関を同時に記述できる反対称化分子動力学を用いて始めて明らかに出来たことである。申請論文が示したもう一つの新たな知見としては負パリティ状態が相当に低い励起エネルギーの領域に現れるというもので、これは実験的に確証が大いに期待される予言となっている。負パリティ状態が低い励起エネルギーの領域に現れることは負パリティの pf 殻の軌道と正パリティの sd 殻の軌道との皮転を示す直接的な現象としての位置づけがなされる。計算結果によれば負パリティ状態では ^{32}Mg でも ^{30}Ne の場合でもクラスター相関の寄与は顕著ではない。

上記のクラスター相関の研究や負パリティ状態の研究は、反対称化分子動力学の特徴を十分に使ったものである。申請論

文の業績としては、この反対称化分子動力学の理論に対し新しく重要な改良を加えたことも高く評価される。それは従来の反対称化分子動力学では核子の波束は球形のガウス波束であったものを申請論文では3軸非対称な変形したガウス波束を用いたことである。この改良により Mg の同位体の四重極変形については2倍に近い値の増加が得られ、実験データとのほぼ満足のいく一致が得られた。この改良は従来の反対称化分子動力学の平均場構造を記述する部分を改良してより信頼性の高い理論へと改善したことを意味する。

^{30}Ne の実験データは現在は得られていないが ^{28}Ne と ^{26}Ne の正パリティ状態には実験データが少ないながら存在する。申請論文はこれらの核種の研究も行い、データの良好な再現を得るとともに、より安定核に近い ^{26}Ne では pf 殻軌道と sd 殻軌道の反転がどの様に消えていくかを示して魔法数 $N=20$ の破れの研究に貴重な資料を提供している。また負パリティ状態に付いても研究を行い、実験的に確証が大いに期待される予言となっている。

以上に述べた申請論文の研究の重要な成果により、申請論文は博士（理学）の学位論文として価値あるものと認めた。なお、申請論文とそれに関連した口頭試問を行った結果合格と認めた。