

様式 C-19

科学研究費補助金研究成果報告書

平成 23 年 5 月 16 日現在

機関番号：14401

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2008～2010

課題番号：20740163

研究課題名(和文) 中性子過剰な炭素同位体の集団性及び陽子魔法数の出現

研究課題名(英文) Collectivity of neutron-rich carbon isotopes and the emergence of proton magic number

研究代表者

王 恵仁 (ONG HOOI JIN)

大阪大学・核物理研究センター・助教

研究者番号：80462670

研究成果の概要(和文)：

研究代表者らの研究により、中性子過剰な炭素同位体 $^{16,18}\text{C}$ は外部から摂動を与えた時、陽子と中性子が異なる応答を示す場合があることが次第に明らかになってきた。これは安定な原子核に見られない現象であり、原子核物理従来常識に反する発見である。この陽子と中性子の不調和現象について、 $^{16,18}\text{C}$ では安定核にない新しい陽子魔法数(陽子数 6)が出現するためだと説明する理論がある。この現象が $^{16,18}\text{C}$ に限られるかどうか、また、新しい陽子魔法数を検証するために、 $^{16,18}\text{C}$ 及び周辺の原子核の陽子分布半径を測定する新しい実験手法の開発に着手した。研究課題の解明へ向けて着実に進んでいる。

研究成果の概要(英文)：

We have observed dissimilar response to perturbation of the protons and neutrons in the neutron-rich carbon isotopes $^{16,18}\text{C}$, hitherto unobserved in the atomic nuclei close to the stability line. This phenomenon is beyond the common knowledge of nuclear physics, which was formulated mainly from studies on nuclei in the neighborhood of stability line. While some theories have attributed this anomaly to emergence of a new proton magic number, i. e. proton number 6, in the neutron-rich isotopes $^{16,18}\text{C}$, it remains to be proven whether the new proton magic number does emerge. To examine this new-proton-magic-number hypothesis, and to explore possibility of other neighboring nuclei showing similar behavior, we have developed a new experimental method to determine the proton distribution radii.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008 年度	2,700,000	810,000	3,510,000
2009 年度	500,000	150,000	650,000
2010 年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	3,700,000	1,110,000	4,810,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・原子核(実験)

キーワード：不安定核、中性子過剰核、四重極集団運動、魔法数、陽子分布半径、荷電変化断面積

1. 研究開始当初の背景

(1) 原子核は構成する陽子及び中性子がある決まった数(魔法数と呼ぶ)になる時、安定もしくは準安定になり、外部摂動に対して魔法数を持っていない場合と異なる応答をする。安定な原子核(安定核)では、陽子中性子間の強い相互作用のため、陽子と中性子は揃った運動(集団運動)をする傾向を示す。ところが、研究代表者らのグループが行った先行研究から、中性子過剰な炭素同位体 ^{16}C (陽子数 6、中性子数 10)は、第一 2^+ 励起状態のエネルギーが低い(強い四重極集団性の表れ)にもかかわらず、陽子の四重極集団性を表す換算遷移確率 $B(E2)$ が異常に小さいことがわかった(参考文献[1])。この結果を受け、研究代表者らは別の手法で、 2^+ 励起状態の遷移確率を測定したところ、 ^{16}C では 2^+ 励起状態への遷移は中性子が支配的であることを明らかにした(参考文献[2])。 ^{16}C の $B(E2)$ 異常の理由について、新しい陽子魔法数(陽子数 6)が出現するためだと説明する理論があるが、実験による直接的な証拠がない。また、この陽子と中性子の不調和現象を理解するためにも、周辺の原子核について調べる必要があった。

(2) 原子核の陽子及び中性子分布半径は原子核の構造を特徴づける重要な物理量である。魔法数を持つ原子核は周辺の原子核より小さい陽子または中性子分布半径を持つことが知られている。 ^{16}C 及び周辺原子核の陽子分布半径を測定すれば、新しい陽子魔法数が検証できるはずである。ところが、 ^{16}C を含め、ホウ素から窒素までの不安定核について、陽子分布半径を測定する有効な実験手法がなかった。原子核の(陽子分布と中性子分布を含めた)質量半径の決定は、反応断面積測定が有効で、不安定核ビームを用いた研究の初期から盛んに行われてきた。一方、安定核及び一部の不安定核において、陽子分布半径(または荷電半径)の決定は電子散乱やアイソトープシフト法が用いられた。電子散乱やアイソトープシフト法が適用できない原子核について、荷電変化断面積測定により陽子分布半径を決定する方法が 90 年代から注目され始めたが、断面積からどう陽子分布半径を求めるか決定的なアイデアがなかった。

<参考文献>

[1] N. Imai, H. J. Ong (他 39 名、2 番目), "Anomalously hindered E2 strength $B(E2)$ in ^{16}C ", 査読付き, Physical Review Letters 第 92 巻, 2004 年, 062501-1 - 062501-4 頁.

[2] H. J. Ong, N. Imai (他 34 名、1 番目), "Neutron-dominant quadrupole collective motion in ^{16}C ", 査読付き, Physical Review C 第 73 巻, 2006 年,

2. 研究の目的

本研究の目的は

- (1) 中性子過剰な炭素同位体における陽子及び中性子の集団性を明らかにすることと、
- (2) 新しい陽子魔法数の存在を検証し、存在する場合、その存在領域を特定することである。

3. 研究の方法

(1) 中性子過剰な炭素同位体 ^{18}C の陽子の四重極集団性を調べるために、 ^{18}C の第一 2^+ 励起状態の寿命測定により $B(E2)$ を決定した。理化学研究所の不安定核生成装置を用いて人工的に ^{18}C ビームを生成し、標的に入射して励起させ、励起状態の一つである 2^+ 状態の寿命を測定した。寿命測定は先行研究で開発された Recoil Shadow 法を用いた。図 1 に Recoil Shadow 法の概念図を示す。

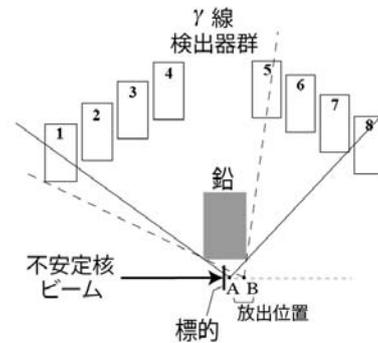


図 1: Recoil Shadow 法の概念図

標的の中で励起された ^{18}C はある距離を走ってからガンマ線を放出して基底状態に戻る。標的のすぐ横に適当な厚さの鉛ガンマ線遮蔽体を置くと、ガンマ線の放出位置(A か B)によって、ガンマ線の空間分布が異なる。その空間分布をガンマ線検出器群で測定し、励起状態の寿命を仮定し、かつ実験セットアップ情報を取り入れたシミュレーションと比較することで、寿命を決定する。

(2) 新しい陽子魔法数の存在を検証するために、 $^{16,18}\text{C}$ 及び周辺の原子核の陽子分布半径を測定する実験手法(荷電変化断面積測定)の開発に着手した。荷電変化断面積測定はトランスミッション法を用いて行った。トランスミッション法は、標的に入射する原子核及び反応せずに(今の場合は荷電変化しない、つまり陽子数が変わらない)、標的を通過した原子核を測定することで、反応した原子核の数、従って反応断面積を求める方法である。本研究では、 $^{16,18}\text{C}$ 及び周辺核の荷電変化断面積を測定し、反応断面積測定により物質半径

を決定するのと同じ手法を用いて、陽子分布半径を決定する。

4. 研究成果

(1) 研究代表者らは ^{18}C の第一 2^+ 励起状態の寿命測定を行い、換算遷移確率 $B(E2)$ を決定したところ、 ^{16}C と同様、 ^{18}C の $B(E2)$ が異常小さいことを明らかにした。 ^{16}C の $B(E2)$ について、先行研究より高度化された今回のセットアップで再測定を行った。図2に偶々核炭素同位体の第一 2^+ 励起状態のエネルギー(上図)及び $B(E2)$ (下図)の実験値を示す。

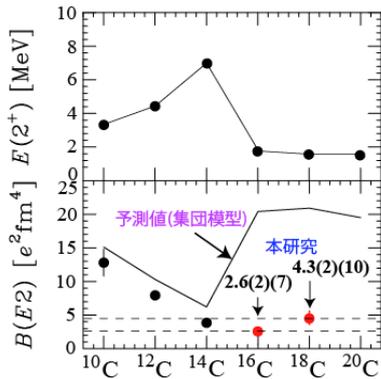


図2：偶々核炭素同位体の第一 2^+ 励起状態のエネルギー $E(2^+)$ 及び $B(E2)$

本研究で得られた結果は赤い点で示した。図からわかるように、 $^{16,18}\text{C}$ では、四重極集団性の良い指標である $E(2^+)$ の値が小さくなっているにもかかわらず、 $B(E2)$ の値は集団模型の予測から大きくずれている。

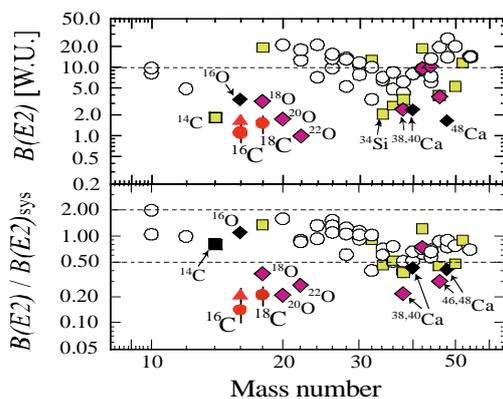


図3：偶々核の $B(E2)$ 実験値。(上図)一陽子あたりが寄与する $B(E2)$ 値。(下図) $B(E2)$ を集団模型予測値で割った値。

$^{16,18}\text{C}$ で観測された $B(E2)$ の値を他の偶々核と比べてところ、一陽子あたりの寄与に換算した $B(E2)$ 値が異常に小さく(図3、上図)、集団模型の予測値から大きくずれている(図

3、下図)ことがわかった。

研究代表者はこの結果をまとめて米国のPhysical Review C誌に投稿し、論文は2008年7月に掲載された。また、この結果を日本及び海外で行われた国際会議(埼玉和光市・Gamma08、中国・HNP08、ポーランド・ENAM08、横浜・関東学院大秋の学校、ニュージーランド・Kernz08)で発表し、各国の研究者と議論して意見交換をした。これらの結果をきっかけに、各国で炭素同位体について理論及び実験研究が活発になってきた。

$^{16,18}\text{C}$ の $B(E2)$ 異常の解釈として、新しい陽子“魔法数” $Z=6$ の出現が挙げられるが、これを確かめるために、まず、炭素同位体及び周辺の原子核の荷電変化断面積を測定し、陽子分布半径を決定する予定である。この研究は現在進行中であるが、下記項目(2)で簡単に実験の開発成果を述べる。

(2) 荷電変化断面積測定による炭素同位体及び周辺核の陽子分布半径を決定するために、大阪大学核物理研究センター(RCNP)にて二度開発実験を行った。断面積測定には「3. 研究の方法」で述べたトランスマッション法を用いた。これらの実験により、検出器及び測定回路の問題点を明らかにし、測定精度を上げることに成功した。これらの実験結果を平成22年の日本物理学会にて発表した。平成23年度に、RCNP及びドイツ研究所において、炭素同位体及び周辺核の荷電変化断面積測定が予定されており、この研究課題の解明へ向け、着実に進んでいる。

5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文] (計32件)

- ① H. J. Ong, N. Imai (他23名、1番目), “Lifetime measurements of 2_1^+ states in $^{16,18}\text{C}$ ”, 査読付き, Physical Review C 第78巻, 2008年, 014308-1 - 014308-11頁.
- ② D. Suzuki, H. J. Ong (他23名、3番目), “Lifetime measurements of excited states in ^{17}C : Possible interplay between collectivity and halo effects”, 査読付き, Physics Letters B 第666巻, 2008年, 222-227頁.
- ③ Y. Satou, H. J. Ong (他28名、19番目), “Unbound excited states in $^{19,17}\text{C}$ ”, 査読付き, Physics Letters B 第660巻, 2008年, 320-325頁.
- ④ Y. Kondo, H. J. Ong (他32名、22番目), “One-neutron removal reactions of ^{18}C and ^{19}C on a proton

- target”, 査読付き, Physical Review C 第 79 巻, 2008 年, 014602-1 - 014602-7 頁.
- ⑤ N. Imai, H. J. Ong (他 39 名、3 番目), “First lifetime measurement of 2_1^+ state in ^{12}Be ”, 査読付き, Physics Letters B 673, 179 (2009)
- ⑥ H. J. Ong, N. Imai (他 23 名、1 番目), “Observation/confirmation of hindered E2 strength in $^{18}\text{C}/^{16}\text{C}$ ”, 査読付き, European Physical Journal A 第 42 巻, 2009 年, 393-396 頁.
- ⑦ H. J. Ong, N. Imai (他 23 名、1 番目), “Confirmation/ Observation of hindered E2 strength in $^{16,18}\text{C}$ ”, 査読付き, Nuclear Physics Review Supplement 第 26 巻, 2009 年, 70-76 頁.
- ⑧ H. J. Ong, N. Imai (他 23 名、1 番目), “Anomalously hindered E2 strengths in $^{16,18}\text{C}$ ”, 査読付き, International Journal of Modern Physics A 第 24 巻, 2009 年, 2168-2174 頁.

[学会発表] (計 12 件)

- ① H. J. Ong, “Confirmation/Observation of hindered E2 strength in $^{16,18}\text{C}$ ”, CNS-RIKEN Joint International Symposium on Frontier of Gamma-ray Spectroscopy and Perspectives for Nuclear Structure Studies (Gamma08), 理化学研究所 (埼玉県和光市), 2008 年 4 月 5 日.
- ② H. J. Ong, “Confirmation/Observation of hindered E2 strength in $^{16,18}\text{C}$ ”, The Third China-Japan-Korea Hadron and Nuclear Physics 2008 Symposium (HNP08), Institute of Modern Physics (中国蘭州), 2008 年 6 月 24 日.
- ③ H. J. Ong, “ $^{16,18}\text{C}$ の第一 2^+ 励起状態の寿命測定”, 京大基研研究会, 京都大学 (京都), 2008 年 7 月 4 日.
- ④ H. J. Ong, “ $^{16,18}\text{C}$ の第一 2^+ 励起状態の寿命測定”, 阪大 RCNP 不安定核研究会, 大阪大学 (大阪), 2008 年 8 月 8 日.
- ⑤ H. J. Ong, “Observation/confirmation of hindered E2 strength in $^{18}\text{C}/^{16}\text{C}$ ”, The Fifth International Conference on Exotic Nuclei and Atomic Masses (ENAM08), Ryn Hotel (Ryn, Poland), 2008 年 9 月 9 日.
- ⑥ H. J. Ong, “Anomalously hindered E2 strengths in $^{16,18}\text{C}$ ”, Kanto Gakuin University Yokohama Autumn School of Nuclear Physics, 関東学院大学 (横浜), 2008 年 10 月 9 日.

- ⑦ H. J. Ong, “Anomalously hindered E2 strengths in $^{16,18}\text{C}$ ”, Interfacing Structure and Reactions at the Centre of the Atom (Kernz08), Millennium Hotel (Queenstown, New Zealand), 2008 年 12 月 3 日.
- ⑧ 王惠仁, “荷電変化断面積測定による ^{16}C 同位体の荷電半径の研究”, 日本物理学会第 65 回年次大会, 岡山大学(岡山市), 2010 年 3 月 23 日

[その他]

ホームページ等

発表リスト:

<http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~onghjin/publist.html>

国際会議で発表したポスター: “ $^{16,18}\text{C}$ の B(E2) 異常抑制”

http://www.rcnp.osaka-u.ac.jp/~onghjin/pub/kernz08poster_ong.pdf

6. 研究組織

(1) 研究代表者

王 惠仁 (ONG HOOI JIN)

大阪大学・核物理研究センター・助教

研究者番号: 80462670