

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 23 日現在

機関番号：34506

研究種目：基盤研究(C)

研究期間：2011～2013

課題番号：23540349

研究課題名(和文) 軽核の クラスター励起

研究課題名(英文) Excitation of alpha cluster in light nuclei

研究代表者

山県 民穂 (Yamagata, Tamio)

甲南大学・理工学部・教授

研究者番号：50068144

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 4,300,000円、(間接経費) 1,290,000円

研究成果の概要(和文)： ${}^6\text{Li}(\gamma, n)$ 反応を励起エネルギー5から55 MeVの範囲で観測した。 ${}^6\text{Li}$ 核の双極子巨大共鳴(GDR)は励起エネルギーが約15 MeVと33 MeVの2成分からできていることが分かった。15 MeVの成分は ${}^6\text{Li}$ 固有のGDRであり、33 MeVの成分は クラスターのGDRであるとした。

クラスターのGDRを自由な粒子(${}^4\text{He}$ 核)のGDRと比較した。核内では クラスターの大きさが約15%自由な に比べ小さくなっていることが示唆された。

研究成果の概要(英文)：The giant dipole resonance (GDR) in ${}^6\text{Li}$ was investigated via the ${}^6\text{Li}(\gamma, n)$ reaction. The GDR in ${}^6\text{Li}$ was found to consist of two components at $E_x = 15$ MeV and 33 MeV. The component at $E_x = 15$ MeV is seemed to be the intrinsic GDR in ${}^6\text{Li}$. The another one at $E_x = 33$ MeV is due to the GDR of the alpha cluster in ${}^6\text{Li}$. Since the GDR in free ${}^4\text{He}$ is known to locate at $E_x = 27$ MeV, the excitation energy of the GDR of the alpha cluster in ${}^6\text{Li}$ is much higher than that of the ${}^4\text{He}$. This fact suggests that the size of the alpha cluster in ${}^6\text{Li}$ is smaller than that of ${}^4\text{He}$ due to the nuclear medium effect.

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード： クラスター 媒質効果 クラスターの大きさ

1. 研究開始当初の背景

(1) 軽い核において クラスタ構造は基本的な核構造であることはよく知られた事実である。他方、 クラスタは核内部で他の粒子と弱く相互作用し、比較的局在していると思われる。このような観点に立ち、我々は クラスタ自身が核内部で励起する運動様式を、軽イオンによる核反応 (p , p') ($^3\text{He}, t$) および (^7Li , ^7Be) 反応で調べてきた。その結果 クラスタが核内で双極子巨大共鳴 (GDR) およびスピン双極子巨大共鳴 (SDR) 励起を起す現象を発見した。しかしながら、このような GDR 励起は光核反応で非常に強く励起されるはずであるが、これまでに行われている光核反応では軽イオン反応で観測された励起に対応する励起が報告されていない。

(2) 粒子の GDR は励起エネルギーが約 2.7 MeV とすべての原子核の中で著しく大きい。このことは、もし、 クラスタの GDR 励起が存在するのなら、この励起のピークは原子核の他のあらゆる励起状態のピークより高い励起領域に観測され、他の励起状態と明確に区別できることを示唆している。別の言い方をすれば、 クラスタの GDR を観測することは クラスタにタグをつけることになる。タグの付いた クラスタを観測することは、原子核媒質中から原子核をみることになるが、今までにこのような観点で原子核が研究されたことがない。

2. 研究の目的

典型的な クラスタ構造を持つ ^6Li 核を用い、

クラスタの GDR が存在するかどうか。

もし存在するのなら、自由な ^4He の GDR と クラスタの GDR を比較し、その差がどのような物理現象として現れるか、の 2 点を明らかにすることを目指した。GDR を選択的に強く励起する光核反応で中性子を放出する反応、 $^6\text{Li}(\gamma, xn)$ を用い、入射線のエネルギーが 5 - 5.5 MeV の範囲で励起断面積を調べる。ここで $x = 1, 2, 3$ である。本研究では 線源として最近開発されたレーザー・逆コンプトン散乱によるほぼ単色の 線を用いることが特徴である。

3. 研究の方法

(1) 光核反応の 線源としては、兵庫県立大学高度科学技術研究所の電子シンクロトロン NewSUBARU で加速された 5.5 MeV から 130 MeV までのエネルギーの電子ビームに Nd レーザ光 (基本波 $\lambda = 1064 \text{ nm}$, または第 2 次高調波 $\lambda = 532 \text{ nm}$) を衝突させ、コンプトン散乱を起し、180 度方向に生成されたガンマ線 ($E = 5 \text{ MeV} \sim 5.5 \text{ MeV}$) を用いた。この 線を金属 ^6Li 標的に入射し、光核反応を起こした。入射線のエ

ネルギーの広がりにはモンテカルロ・シミュレーションで約 4.5% と推定され、ほぼ単色である。

(2) 光核反応で放出された中性子は、図 1 に示すように、 $(60 \text{ cm})^3$ のポリエチレン減速材に埋め込まれた 41 本の ^3He ガス比例計数管で検出した。中性子の検出効率にはモンテカルロ・シミュレーションで評価し、 ^{252}Cf 中性子源を用いて校正した。重水素を標的試料とする (γ, n) 反応を 線のエネルギー範囲、5 - 15 MeV で行い、計数率の比から ^6Li 標的試料での検出中性子のエネルギーを決定した。入射 線の数には直径 12.5 cm、厚さ 15 cm の NaI シンチレーターで計数した。

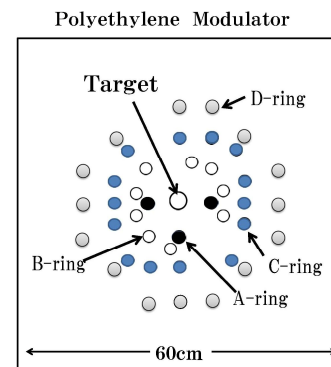


図 1 反応中性子検出器 (前面図)

4. 研究成果

(1) 光核反応断面積

$^6\text{Li}(\gamma, n)$ ($\gamma, 2n$) および ($\gamma, 3n$) 反応断面積を 線エネルギー範囲 5 - 5.5 MeV で測定した。図 2 に全中性子光核反応断面積 $^6\text{Li}(\gamma, n + 2n + 3n)$ および ($\gamma, 2n$) ($\gamma, 3n$) 反応断面積を示す。 ($\gamma, 2n$) および ($\gamma, 3n$) 反応断面積は (γ, n) 反応断面積に比べると無視できるくらい小さいことが分かった。したがって以下、全中性子反応断面積で光核反応断面積が代表できる。

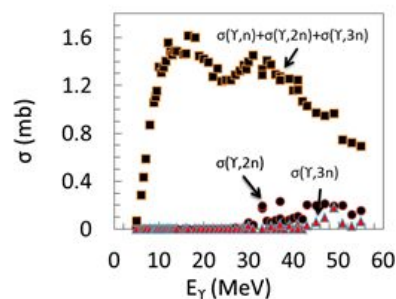


図 2 全中性子光核反応断面積; $^6\text{Li}(\gamma, n + 2n + 3n)$ および ($\gamma, 2n$) ($\gamma, 3n$) 反応断面積

(2) 測定された全中性子反応断面積 (図 2) から ^6Li の GDR について、以下の事実があき

らかにされた。

GDRは励起エネルギー 5 MeV から 55 MeV にまで至る、巾が約 40 MeV の共鳴である。

GDR は励起エネルギー、約 15 MeV と 33 MeV の 2 成分を持つ。

断面積のエネルギー積分から ${}^6\text{Li}$ の GDR は Thomas-Reiche-Kuhn (TRK) 和則の約 65% を尽くす。

(3) 先行研究との比較

光核反応との比較：光核反応の最も系統的な研究は米国・Rivermore 研究所での Berman 達の研究である。その結果によれば ${}^6\text{Li}$ の GDR は励起エネルギー 11 MeV にそのピークが観測され、33 MeV の成分は観測されていない。したがって、彼らが得た断面積は TRK 和則の 31% にすぎず、本研究結果の約半分である。本研究結果の励起エネルギー 15 MeV の成分と Berman 達の得た 11 MeV の成分についてはおおよそ断面積は等しい。

軽イオン核反応との比較

本研究の動機となった我々の行ってきた核反応； ${}^6\text{Li}(p, p')$, $({}^3\text{He}, t)$, および $({}^7\text{Li}, {}^7\text{Be})$ 反応では ${}^6\text{Li}$ の GDR は励起エネルギー 11 MeV と 27 ~ 30 MeV の 2 成分として観測されている。軽イオン反応では GDR と SDR が混在して励起されるため、特に GDR の励起エネルギーの高い成分のピーク位置に曖昧さがある。この曖昧さを除くために $({}^7\text{Li}, {}^7\text{Be})$ 反応によって SDR と GDR の区別をした。その結果 GDR の高い励起エネルギー成分のピークは約 30 MeV と (p, p') および $({}^3\text{He}, t)$ 反応で観測した励起エネルギー、約 27 MeV よりも高い励起エネルギーが観測されている。ただし、断面積の統計誤差が大きいため正確なピーク位置は大きな誤差を持つ。本研究結果はこれら軽イオン反応の結果を全面的に支持する。

(4) クラスタ励起

本研究で得られた ${}^6\text{Li}$ の GDR について、軽イオン核反応との比較から、励起エネルギー 15 MeV と 33 MeV のピークはそれぞれ、 ${}^6\text{Li}$ 核全体が振動する GDR と ${}^6\text{Li}$ 核内の クラスタの GDR と結論できる。これまでに行われてきた光核反応で クラスタ励起が観測されなかった理由は不明であるが、本研究により光核反応で強く励起されることが確かめられた。

クラスタ励起が存在することは、核の励起において局所的励起が存在することを意味している。これは今までに知られていない新しい励起様式である。

(5) 核内媒質効果

${}^4\text{He}$ 核の GDR は励起エネルギー約 27 MeV であることが知られている。本研究で観測し

た クラスタの GDR の励起エネルギーは約 33 MeV と ${}^4\text{He}$ の GDR より 6 MeV 大きい。図 3 に ${}^4\text{He}$ の GDR と本研究で観測した クラスタ-GDR のスペクトルを比較する。 ${}^6\text{Li}$ 核の粒子の分離エネルギー 1.5 MeV を差し引いても本研究結果で得た励起エネルギーは約 4 MeV 大きい。原子核全体が振動する励起 (GDR を含めた一般的な巨大共鳴) では励起エネルギーは原子核の大きさ (核半径) に反比例することが知られている。これらの事実は ${}^6\text{Li}$ 核内の クラスタの核半径が自由な粒子、すなわち ${}^4\text{He}$ 原子核の核半径より約 15% 小さいことを示す。

核内媒質効果のために 粒子の大きさが核内で変化するということはこれまで全く知られていない。本研究の結果は極めて独創的である。

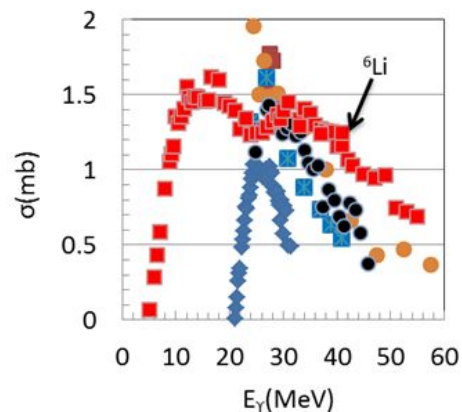


図 3 先行研究による ${}^4\text{He}$ の GDR と本研究で観測した ${}^6\text{Li}$ の GDR のスペクトル比較

(6) 今後の展望

本研究により クラスタの GDR 励起が実験的に確認されたことでこれまで知られていなかった新しい原子核励起様式が確立された。今後 クラスタの理論的な取り扱いで、クラスタの GDR も考慮されるべきである。

クラスタ励起の存在は核の励起において局所的非平衡状態が存在することを示している。励起の緩和について新たな取り扱いを考える必要がある。

核内の媒質効果により クラスタの大きさが自由な ${}^4\text{He}$ より小さくなるという事実は原子核構造模型に取り入れられるべき問題である。

これらはいずれも理論的な課題であるがこのような問題点を本研究は指摘した。近日中に論文発表するための原稿を纏める。

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5件)

H. Utsunomiya, S. Goriely, T. Kondo,

C. Iwamoto, H. Akimune, T. Yamagata,
H. Toyokawa, H. Harada, F. Kitatani, Y.-W.
Lui, A. C. Larsen, M. Guttormsen, P. K.
Koehler, S. Hilaire, S. Peru, M. Martini,
and A.J. Koning,

Photoneutron cross sections for Mo
isotope : A step toward a unified
understanding of (γ, n) and (n, γ)
reactions, Phys. Rev. C88, 2013, pp.
015805-1-6, 査読有

T. Kondo, H. Utsunomiya, S. Goriely,
I. Daoutidis, C. Iwamoto, H. Akimune,
A. Okamoto, T. Yamagata, M. Kamata, O. Itoh,
H. Toyokawa, Y.-W. Lui, H. Harada, F.
Kitatani, S. Hilaire, and A.J. Koning,
Total and partial photoneutron cross
sections for Pb isotopes, Phys. Rev. C86,
2012, pp. 014316-1-7, 査読有

C. Iwamoto, H. Utsunomiya, A. Tamii,
H. Akimune, H. Nakada, T. Shima, T.
Yamagata, et al., Separation of pigmy
dipole and M1 resonances in ^{90}Zr by a
high-resolution inelastic scattering near
0 degree, Phys. Rev. Lett. 108, 2012, pp.
262501-1-4, 査読有

T. Kondo H. Utsunomiya, H. Akimune, T.
Yamagata, A. Okamoto, H. Harada, F.
Kitatani, T. Shima, K. Horikawa, S.
Miyamoto, Determination of pulsed laser
Compton scattering photons, Nucl.
Instruments and Methods in Phys. Research
A 659, 2011, pp. 462-466, 査読有

O. Itoh, H. Utsunomiya, H. Akimune,
T. Kondo, M. Kamata, T. Yamagata, H.
Toyokawa, H. Harada, F. Kitatani, S. Goko,
C. Nair and Y.-W. Lui、

Photoneutron cross sections for Au
revisited: Measurements with laser Compton
scattering γ -rays and data reduction
by a least-squares method,
Journal of Nuclear Science and Technology,
査読有、Vol. 48, No. 5, 2011, pp. 834-840

〔学会発表〕(計 2件)

山県民穂、他、 $^6\text{Li}(\gamma, n)$ 反応による
クラスター励起、2013年9月26日、日本物
理学会(高知大学)

T. Yamagata et al., Medium effect in
the photoexcitation of α cluster in ^6Li ,
International Workshop on Nuclear Physics
and Gamma-ray Sources for Nuclear Security
and Nonproliferation, January 30, 2014,
Ricotti, Tokai-Mura, Japan

6. 研究組織

(1) 研究代表者

山県 民穂 (YAMAGATA, Tamio)

甲南大学・理工学部・教授

研究者番号 : 50068144