

令和 5 年 6 月 21 日現在

機関番号：14401

研究種目：基盤研究(A) (一般)

研究期間：2018～2020

課題番号：18H03703

研究課題名(和文)ハイパー変形原子核の探索

研究課題名(英文) Search for hyper-deformed nuclei

研究代表者

青井 考 (AOI, Nori)

大阪大学・核物理研究センター・教授

研究者番号：00311647

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 34,100,000円

研究成果の概要(和文)：カルシウム-40の超変形状態(第3-J_π=0⁺状態)から球形状態(第1-J_π=0⁺状態)へのe⁺e⁻生成崩壊を測定することで電気単極子強度を決定した。得られた値は極めて小さく、質量数50以下の原子核のなかで最も小さいものであった。球形状態、通常変形状態、超変形状態が純粋な状態ではなく、互いに混合しあっており超変形状態から球形状態への遷移を弱めあつような干渉が起きていることが分かった。さらに、カルシウム-40の核図表上右上の中性子過剰チタン同位体で変形度の推移を追跡するために⁵⁶Tiおよび⁵⁶Tiのクーロン励起断面積から変形度を最も直接的に反映する物理量である電気四重極遷移強度を決定した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

古典的な液滴では常に球形が安定であるのに対し、原子核では量子効果によって変形状態が安定化することが多い。さらに、複数の異なる形状の状態が基底状態付近に現れそれらの状態が混合する変形混合現象が起こることもある。カルシウム-40原子核では球形と通常変形と超変形の状態が基底状態付近に存在するが、今回の研究では3つの状態が混合し合い、互いの状態の遷移強度に干渉効果をもたらしていることが分かった。球形状態と超変形状態という非常に異なる内部構造を持った状態が混合するという現象は核分裂などの量子多体系のダイナミクスを理解する上で重要な役割を果たす。

研究成果の概要(英文)：The electric monopole strength was determined by measuring the e⁺e⁻ decay of calcium-40 from the superdeformed state (3rd-0⁺ state) to the spherical state (1st=0⁺ state). The obtained value is extremely small, the smallest among nuclei with mass numbers below 50. It was found that the spherical, normally deformed, and superdeformed states are not pure, but are mixed with each other and interfere with each other so as to weaken the transition from the superdeformed state to the spherical state.

To trace the deformation transition in the neutron-rich upper right region of the calcium-40 nucleus, the electric quadrupole transition strength, which is the physical quantity that reflects deformation most directly, was determined from the Coulomb excitation cross sections of ⁵⁶Ti and ⁵⁶Ti.

研究分野：実験核物理

キーワード：超変形 変形共存 変形混合

1. 研究開始当初の背景

原子核は孤立した量子多体系であり、密度分布がウッツサクソン型であるため表面がはつきりしており、従って形が定義できる。質量も相互作用の強さもおよそ等しい陽子と中性子が民主的な自己束縛系をなしており、自己無撞着に形状を決めている。回転対称な空間に浮かんだ原子核の多くは自発的に対称性を破り変形している。変形は回転楕円体がほとんどで、長軸と短軸の比が 1.3 程度以下の「通常変形」が主である。長軸と短軸の比が 2 程度のいわゆる「超変形」状態の存在も知られており、長軸と短軸の比が 2 という幾何学的な対称性によって安定化するという、通常変形とは異なる機構での変形の発現だと考えられている。

古典的な液滴が表面張力により球形で安定化することで分かるように、原子核の変形は量子効果であり、殻構造に支配されている。従って核図表上魔法数を基準にして基底状態の形状が時には滑らかに変化し、時には相転移的な振る舞いもする。一つの原子核の基底状態付近に異なる形状の状態が存在していることもあり、変形共存と呼ばれている。この場合、各状態は純粋に一つの形状をとることもあるが、異なる形状が混合し合っている変形混合現象を起こしていることも理論的には分かっている。形状が極端に異なる状態は、内部波動関数が非常に異なっており、それらが互いに混合しているということは量子力学的対象として非常に興味深い。

異なる形状の混合は異なる形状間の遷移を生み出すが、特に球形状態から超変形や極超変形状態への遷移は核分裂過程で経過すると考えられており、核分裂機構を理解する上で不可欠であるが、これまでにほとんど測定されておらず、核物理の解くべき最後の問の一つといわれている。超変形状態はこれまで多数見つかったが、超変形状態から球形状態の遷移強度がほとんど測られていない理由の一つはそもそも超変形状態のバンドヘッド状態（角運動量が一番小さい状態）特に、スピン・パリティが 0^+ の状態が見つからないからである。本研究ではカルシウム-40 (^{40}Ca) 原子核に連携研究者の井手口らが見つけた超変形状態の 0^+ 状態に着目し、球形状状態である基底状態への遷移強度を測定した。

2. 研究の目的

カルシウム-40 原子核は球形の二重魔法核（中性子数も陽子数も魔法数 20 である原子核）であり、基底状態は通常の魔法核と同じく球形であるが、低励起状態に通常変形状態と超変形状態が存在することが分かっている。基底状態およびその付近に存在するスピン・パリティが 0^+ の 3 つの状態（励起エネルギーの低い順に 0_1^+ 、 0_2^+ 、 0_3^+ ）がそれぞれ、球形状状態、通常変形、超変形状態に対応する。この 3 つの状態間の電気単極子遷移強度を決定し、それぞれの状態の混合比を決定する。また、 ^{40}Ca 近傍の中性子過剰核の回転バンド内の電気四重極遷移強度を決定し、変形度の推移を明らかにする。

基底状態の変形度は核図表上で滑らかに変化することもあれば相転移的に不連続に変化することもある。 ^{40}Ca から中性子数 20 に沿って陽子数を減らして行くと、それまで球形だったものが ^{32}Mg で突然大きく変形することはよく知られている。

カルシウム-40 の核図表上右上の中性子過剰チタン同位体で変形度の推移を追跡するために ^{56}Ti および ^{58}Ti のクーロン励起断面積から変形度を最も直接的に反映する物理量である電気四重極遷移強度を決定する。

3. 研究の方法

実験は 2 つに分けられる。

1. カルシウム-40 の電気単極子強度測定

実験はオーストラリア国立大学重イオン加速器施設のペレットロンタンデム加速器で加速した 8.6 MeV の陽子ビームをカルシウム標的に照射し、 0_2^+ 、 0_3^+ 状態などの励起状態を生成する。スピン・パリティが 0^+ の状態間の電磁遷移では通常のガンマ線放出が禁止されており、電子・陽電子対生成により遷移する。そこで、ゲルマニウム検出器によるガンマ線測定に加えて、電子・陽電子対を測定することのできる電子・陽電子分光装置 Super-e を用いて遷移を同定した。

2. カルシウム-40 近傍核の電気双極子強度測定

実験は理化学研究所 RI ビームファクトリーで行った。核子あたり 345 MeV に加速した ^{70}Zn ビームの入射核破砕反応で $^{56,58}\text{Ti}$ ビームを生成し、金標的に照射して 2^+ 状態を静止する。脱励起ガンマ

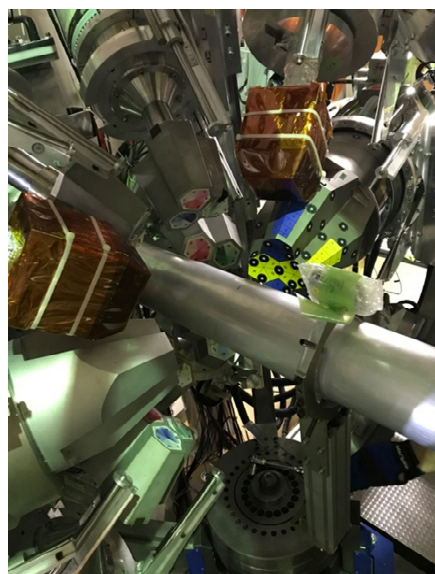


図 1: ガンマ線トラッキング検出器を組み込んだ HiCARI アレイ。正面に見える黄色いラベルの貼ってある検出器がガンマ線トラッキング検出器である。

線の強度およびエネルギーを測定することで、電気四重極遷移強度を求めた。ガンマ線測定には本課題で開発したガンマ線トラッキング検出器を含む HiCARI アレイ (図 1) を使用した。

4. 研究成果

超変形状態 (0_3^+) から球形状態 (0_1^+) への電気単極子遷移強度 $\rho^2(E0; 0_3^+ \rightarrow 0_1^+) = 2.3(5) \times 10^{-3}$ を決定した。この遷移強度は極めて小さく、質量数 50 以下の原子核のなかで最も小さいものであった (図 2)。通常変形状態 (0_2^+) から球形状態 (0_1^+) への遷移強度は非常に強いことが知られており、また、今回の実験結果からは超変形状態 (0_3^+) から通常変形状態 (0_2^+) への遷移強度も強いことが示唆されている (図 3)。こうした、遷移強度の強弱を説明するためには、球形状態、通常変形状態、超変形状態という 3 つの状態が完全には純粋ではなく、互いに少しずつ混合しており、超変形状態から球形状態への遷移は弱めあう干渉を、その他の 2 つの遷移では強めあうような干渉が起きていることで説明できる。球形状態と通常変形状態、超変形状態という非常に異なる内部構造を持った状態が混合するという現象は、核分裂などの量子多体系のダイナミクスを理解する上で重要な役割を果たす。

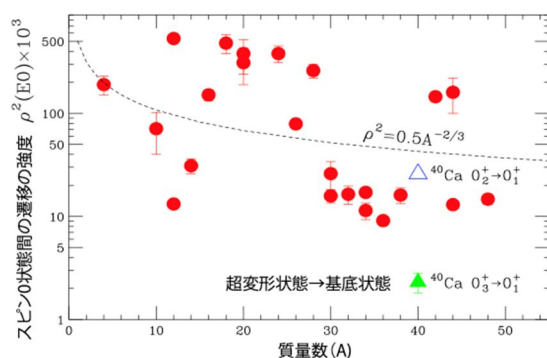


図 2: 図 1. 質量数 50 以下の原子核での $J = 0^+$ 状態間の遷移強度。緑色の点が本研究で得られた ^{40}Ca の超変形状態から基底状態への遷移強度で、このなかで最も小さい値を示している。

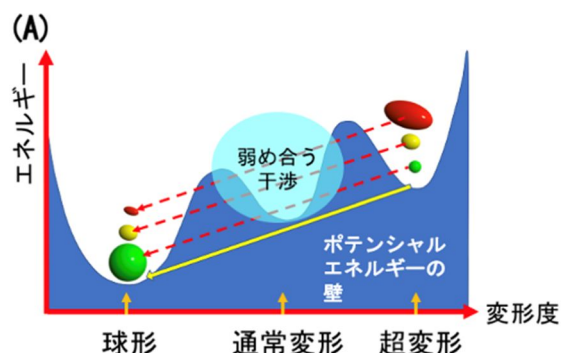


図 2: ^{40}Ca 原子核に共存する 3 つの変形状態と超変形状態から球形状態への電子・陽電子 (e^+e^-) 遷移の模式図。

[1] E. Ideguchi, N. Aoi et al., *Electric Monopole Transition from the Superdeformed Band in ^{40}Ca* . Physical Review Letters, 20 22. 128(25): p. 6.

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計6件（うち査読付論文 6件/うち国際共著 6件/うちオープンアクセス 0件）

1. 著者名 Ideguchi E., Kibedi T., Dowie J.T.H., Hoang T.H., Kumar Raju M., Aoi N., Mitchell A.J., Stuchbery A.E., Shimizu N., Utsuno Y., Akber A., Bignell L.J., Coombes B.J., Eriksen T.K., Gray T.J., Lane G.J., McCormick B.P.	4. 巻 128
2. 論文標題 Electric Monopole Transition from the Superdeformed Band in 40Ca	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 252501-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.128.252501	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Orlandi R., Makii H., Nishio K., Hirose K., Asai M., Tsukada K., Sato T. K., Ito Y., Suzuki F., Nagame Y., Andreyev A. N., Ideguchi E., Aoi N., Pham T. T., Yan S. Q., Shen Y. P., Gao B., Li G.	4. 巻 106
2. 論文標題 New K isomers in 248Cf	5. 発行年 2022年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 0664301-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.106.064301	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する
1. 著者名 Bazin D., Aoi N., Baba H., Chen J., Crawford H., Doornenbal P., Fallon P., Li K., Lee J., Matsushita M., Motobayashi T., Sakurai H., Scheit H., Steppenbeck D., Stroberg R., Takeuchi S., Wang H., Yoneda K., Yuan C. X.	4. 巻 103
2. 論文標題 Spectroscopy of 33Mg with knockout reactions	5. 発行年 2021年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 064318-1-11
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.103.064318	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Dowie J.T.H., Kibdi T., Jenkins D.G., Stuchbery A.E., Akber A., Alshammari H.A., Aoi N., Avaa A., Bignell L.J., Chisapi M.V., Coombes B.J., Eriksen T.K., Gerathy M.S.M., Gray T.J., Hoang T.H., Ideguchi E., Jones P., Kumar Raju M., Lane G.J., McCormick B.P., McKie L.J., Mitchell A.J., Spinks N.J., Tee B.P.E.	4. 巻 811
2. 論文標題 Evidence for shape coexistence and superdeformation in 24Mg	5. 発行年 2020年
3. 雑誌名 Physics Letters B	6. 最初と最後の頁 135855 ~ 135855
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1016/j.physletb.2020.135855	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Murray I., MacCormick M., Bazin D., Doornenbal P., Aoi N., Baba H., Crawford H., Fallon P., Li K., Lee J., Matsushita M., Motobayashi T., Otsuka T., Sakurai H., Scheit H., Steppenbeck D., Takeuchi S., Tostevin J. A., Tsunoda N., Utsuno Y., Wang H., Yoneda K.	4. 巻 99
2. 論文標題 Spectroscopy of strongly deformed Ne32 by proton knockout reactions	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review C	6. 最初と最後の頁 011302-1-7
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevC.99.011302	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

1. 著者名 Crawford H.L., Fallon P., Macchiavelli A.O., Doornenbal P., Aoi N., Ideguchi E. et al.	4. 巻 122
2. 論文標題 First Spectroscopy of the Near Drip-line Nucleus 40Mg	5. 発行年 2019年
3. 雑誌名 Physical Review Letters	6. 最初と最後の頁 0525001-1-6
掲載論文のDOI (デジタルオブジェクト識別子) 10.1103/PhysRevLett.122.052501	査読の有無 有
オープンアクセス オープンアクセスではない、又はオープンアクセスが困難	国際共著 該当する

〔学会発表〕 計21件 (うち招待講演 8件 / うち国際学会 15件)

1. 発表者名 A. Kohda, N. Aoi, E. Ideguchi, 他
2. 発表標題 Development of the gamma-ray tracking detector and its performance test
3. 学会等名 5th APS-JPS Joint Meeting (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 甲田旭, 青井考, 井手口栄治、他
2. 発表標題 ガンマ線トラッキング検出器の開発と性能評価
3. 学会等名 日本物理学会 第74 回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 甲田旭, 青井考, 井手口栄治、他
2. 発表標題 ガンマ線Tracking 検出器の開発と性能評価
3. 学会等名 日本物理学会 第73 回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 甲田旭, 青井考, 井手口栄治、他
2. 発表標題 中性子数40近傍のTi同位体における集団性の変遷
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 甲田旭, 青井考, 井手口栄治、他
2. 発表標題 ガンマ線トラッキング検出器の開発と位置分解能評価
3. 学会等名 日本物理学会2019年秋季大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小岩井拓真、青井考、他
2. 発表標題 —中性子ノックアウト反応による $^{55,57}\text{Ti}$ のインビームガンマ線核分光
3. 学会等名 日本物理学会2021年秋季大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 Asahi Kohda, Yasutaka Yamamoto, Nori Aoi, Eiji Ideguchi et al.
2. 発表標題 Development of the gamma-ray tracking detector at RCNP and its performance test at NewSUBARU
3. 学会等名 High Resolution Gamma-Ray Spectroscopy at the RIBF (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Asahi Kohda, Nori Aoi et al.
2. 発表標題 Development of a gamma-ray tracking detector and its performance test
3. 学会等名 5th Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Aoi
2. 発表標題 Current Status of Development of Gamma-ray Tracking Detector In Japan
3. 学会等名 8th SUNFLOWER Workshop / HiCARI Workshop (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 N. Aoi
2. 発表標題 Scientific program at RCNP
3. 学会等名 10th China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 N. Aoi
2. 発表標題 High resolution spectroscopy beyond ^{132}Sn
3. 学会等名 High Resolution Gamma-Ray Spectroscopy at the RIBF (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 E. Ideguchi
2. 発表標題 Gamma-ray spectroscopy with CAGRA and OEDO
3. 学会等名 International workshop of OEDO (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 E. Ideguchi
2. 発表標題 CAGRA Project at RCNP, Osaka University
3. 学会等名 5th Joint Meeting of the APS and the JPS (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 E. Ideguchi
2. 発表標題 Study of shape co-existence in mass A-40 region
3. 学会等名 SSNET ' 18 conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 E. Ideguchi
2. 発表標題 CAGRA project at RCNP, Osaka University
3. 学会等名 The 10th China-Japan Joint Nuclear Physics Symposium (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 E. Ideguchi
2. 発表標題 Electric monopole transition from the superdeformed band in 40Ca
3. 学会等名 International Nuclear Physics Conference 2019 (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 E. Ideguchi
2. 発表標題 Shape coexistence in mass 40 region studied via E0 and gamma transitions
3. 学会等名 Heavy Ion Accelerator Symposium 2019 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 E. Ideguchi
2. 発表標題 Electric monopole transition from the superdeformed band in 40Ca
3. 学会等名 V Topical Workshop on Modern Aspects in Nuclear Structure (国際学会)
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 E. Ideguchi
2. 発表標題 Electric monopole transition from the superdeformed band in 40Ca
3. 学会等名 SSNET ' 22 conference (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 井手口栄治, T. Kibedi, J.T.H. Dowie, T.H. Hoang, M. Kumar Raju, N. Aoi et al.
2. 発表標題 40Caの超変形バンドからのE0遷移
3. 学会等名 日本物理学会 2022年秋季大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 E. Ideguchi
2. 発表標題 Shape coexistence and E0 transition from the superdeformed band in 40Ca
3. 学会等名 NUSPEQ2023 (招待講演) (国際学会)
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
連携研究者	井手口 栄治 (Ideguchi Eiji) (80360494)	大阪大学・各区物理研究センター・准教授 (14401)	

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関			
中国	近代物理学研究所			
米国	ローレンスバークレイ国立研究所			
英国	ヨーク大学			
米国	Argonne National Laboratory	Lawrence Berkeley National Laboratory		
インド	Tata Institute of Fundamental Research			