

## 科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成25年 6月13日現在

機関番号：32503

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2010～2012

課題番号：22740171

研究課題名（和文） 電気双極子モーメントの原子核構造理論からのアプローチ

研究課題名（英文） Study of electric dipole moments in nuclear structure theory

研究代表者

東山 幸司 (HIGASHIYAMA KOJI)

千葉工業大学・工学部・准教授

研究者番号：60433679

研究成果の概要（和文）：本研究では質量数 130 領域の偶偶核・奇核・奇奇核の低励起状態について、平均場を越えた理論である核子対殻模型を用いて系統的な数値解析を実行した。核子対殻模型の計算結果は Xe、Ba、Ce、Nd 偶偶核の集団運動的なエネルギー準位と電磁遷移を再現することに成功した。奇核と奇奇核に関しては、不規則なエネルギー準位と電磁モーメントの計算結果が実験値と良く一致した。これらの計算で得られた原子核波動関数を用いて Xe アイソトープの  $1/2^+$  状態の Schiff モーメントを計算した。Schiff モーメントの計算結果を用いて、 $^{129}\text{Xe}$  中性原子の電気双極子モーメントの上限値を評価した。

研究成果の概要（英文）：Low-lying states for even-even, odd-mass, and doubly odd nuclei around the mass 130 are systematically investigated using a pair-truncated shell model. Energy levels of the low-lying collective states for even-even Xe, Ba, Ce, and Nd isotopes are reproduced very well along with electromagnetic transitions. For odd-mass and doubly odd nuclei, complicated level schemes and electromagnetic moments are in excellent agreement with the experimental data. Using wave functions obtained in these calculations, the Schiff moments for the lowest  $1/2^+$  states of Xe isotopes are calculated. The upper limit for the electric dipole moment of a  $^{129}\text{Xe}$  neutral atom is estimated using its nuclear Schiff moment.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2010年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2011年度	700,000	210,000	910,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
年度			
年度			
総計	2,300,000	690,000	2,990,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物理学・素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：原子核（理論）・原子核構造・中重核・殻模型・核子対殻模型・生成座標法・電気双極子モーメント・Schiffモーメント

## 1. 研究開始当初の背景

1950年にパーセルとラムゼーは中性子の電気双極子モーメント（EDM）の探索実験を

行い、当時としては驚異的な精度でその値はゼロと考えても矛盾しないという結果を得た。現在のところ、EDMはまだ見つかってい

ないが、その値に対する上限は素粒子物理の理論に対して重要な影響を与えてきた。

EDM は粒子の電荷分布の偏りを示す量であり、基本粒子が EDM を持つということは、時間反転対称性  $T$  の破れを意味する。現在の相対論的場の理論では  $T$  対称性の破れは、即  $CP$  対称性の破れ、すなわち荷電共役  $C$  とパリティ  $P$  の積が破れることを意味する。弱い相互作用では  $CP$  対称性は破れていることが知られているので、 $T$  対称性も破れていると考えられる。ただ、実験的にはこの破れは非常に小さく、実際、小林・益川行列をベースにする標準模型によると、現在の技術では到底測定できないほど小さな中性子 EDM ( $10^{-31}$  ecm 程度) を予言する。一方、標準模型を越える超対称性理論の幾つかでは、現在の実験で十分測定可能な EDM を予言するため、基本粒子がどのくらいの大きさの EDM を持つかということは、将来の素粒子理論に対し極めて重要な制限を与える。

原子核が点状であれば原子に一樣な電場をかけた場合には、原子核の外場を打ち消すように原子中の電子配位は変位し、原子の EDM の検出は妨げられる (シッフの定理)。しかし、原子核が大きさをもち変形しており、電荷と双極子モーメントの密度分布が異なっていれば、原子核はシッフモーメントと呼ばれるモーメントを通じ、原子に双極子モーメントを生み出させることになる。すなわち、原子核のシッフモーメントが大きければ、それだけ大きな原子の EDM が期待できることになる。原子核のシッフモーメントは、核子 (陽子または中性子) 固有の EDM から生じる部分と、原子核の変形により生じる部分があると考えられている。研究開始当初、シッフモーメントの理論研究は、海外の幾つかの研究グループにより  $^{129}\text{Xe}$ 、 $^{199}\text{Hg}$  他、数核種に対して行われていた。しかしながら、これらの研究すべてが平均場近似に基づいて行われており、信頼性は低かった。

原子の EDM の探索実験は、海外では  $^{129}\text{Xe}$  や  $^{199}\text{Hg}$  などの限られた原子でしか実験が行われておらず、上限値が得られているに過ぎなかった。国内でも、東京工業大学の旭教授率いるグループが  $^{129}\text{Xe}$  原子に対してのみ測定を始めていた。この状況で、どの原子で大きな EDM の観測値が得られるかの理論的予想は未だはつきりせず、平均場を越えた理論によるシッフモーメントの系統的な精密計算が必要とされていた。

## 2. 研究の目的

本研究の目的は、シッフモーメントを系統的に計算し、どの原子で EDM が大きくなるかを、数値計算を通じ明らかにすることであった。この計算には原子核波動関数の精度が要求されるため、核子自由度に基づく微視的な

理論により、原子核のエネルギー準位・電磁遷移等の実験値を再現しなければならない。そこで本研究では平均場を越えた核子対殻模型により、質量数 130 領域 ( $^{129}\text{Xe}$  周辺) の原子核構造の数値解析を実行し、多様な原子核構造が明らかにすることを計画していた。さらに得られた波動関数を用いて、固有の EDM から生じるシッフモーメントと、原子核の変形により生じるシッフモーメントの数値解析を実行し、どちらの効果が大きいかを評価する予定であった。

## 3. 研究の方法

原子核は陽子と中性子が共に魔法数と呼ばれる特定の数のときに安定になり、陽子数と中性子数が魔法数から離れた原子核の低エネルギー状態は、安定な原子核に幾つかの陽子と中性子を付加した構造により説明できる。殻模型は安定な原子核の周りにある陽子と中性子の占める状態を幾つかの一粒軌道に制限し、原子核を記述する理論である。質量数が軽い原子核において、殻模型は原子核構造を明らかにする非常に強力な手法であるが、質量数が 100 以上の中重核では配位の数が大きくなってしまい、現在の計算機では数値解析は不可能である。そこで本研究では、全殻模型空間を集団運動核子対によって作られる空間に制限して殻模型計算を行う核子対殻模型により、質量数 130 領域における原子核の数値解析を実行した。

前述のとおり、原子核のシッフモーメントは、核子固有の EDM から生じる部分と、原子核の変形により生じる部分がある。原子核の変形で生じる効果に関しては、パリティと時間反転対称性 (PT) を破る二体相互作用を計算する必要があり、先行研究と同じ形式で評価した。

## 4. 研究成果

本研究は、質量数 130 領域の偶偶核・奇核・奇奇核の系統的な数値解析を行ったが、以下では  $^{129}\text{Xe}$  原子核の結果のみを示す。核子対殻模型による  $^{129}\text{Xe}$  原子核のエネルギー準位の計算結果と実験値は図 1 のようになった。この図より、正パリティ状態に関して、核子対殻模型の計算結果は実験値を良く再現していることが分かった。特に基底状態から 3 つ目までの励起状態は、スピンの順番を良く再現している。負パリティ状態については  $9/2^-$  状態と  $11/2^-$  状態が逆転しているが、計算結果は実験値を良く再現していた。

核子対殻模型計算で得られた波動関数を用いて、原子核のシッフモーメントを計算した。シッフモーメントは

$$S = S_{\text{int}} + S_{\text{ch}}$$

と書ける。ここで、 $S_{\text{int}}$  は核子固有の EDM から生じるシッフモーメントであり、 $S_{\text{ch}}$  は原

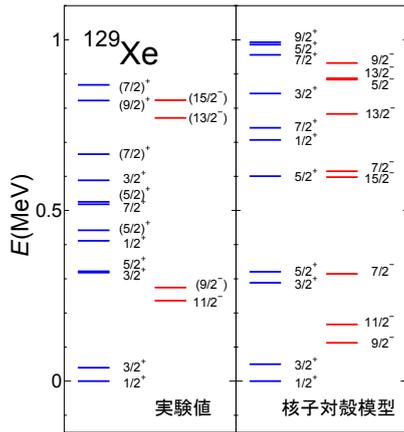


図1  $^{129}\text{Xe}$  原子核に対する実験のエネルギー準位と核子対殻模型による計算結果の比較。図中の数字と符号は状態がもつスピンとパリティを表している。

子核の変形により生じるシッフモーメントである。

核子固有の EDM から生じる原子核のシッフモーメント  $S$  は、陽子固有の EDM  $d_\pi$  と中性子固有の EDM  $d_\nu$  を用いて

$$S_{\text{int}} = s_\nu d_\nu + s_\pi d_\pi$$

と表わされる。 $1/2^+$  状態に対する原子核のシッフモーメントの要素  $s_\pi$  を中性子数  $N$  の関数として図2に示す。中性子の要素  $s_\nu$  は  $N=81$  の同中性子体で正の値をとるが、 $N=75$  の同中性子体では負の値をとる。一方、陽子の要素  $s_\pi$  は全ての原子核においてほとんど0となる。このことから、この領域の原子核のシッフモーメント  $S$  は中性子固有の EDM  $d_\nu$  による効果が重要であることが分かった。

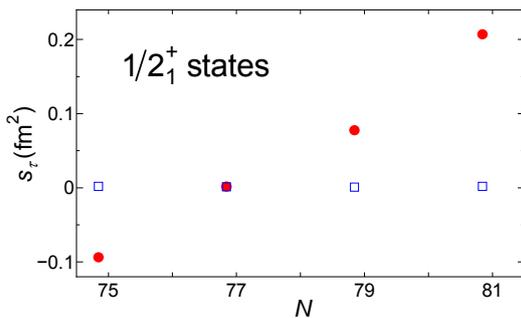


図2 Xe 同位体の要素  $s_\pi$  の計算結果。□印と●印はそれぞれ陽子の要素  $s_\pi$  と中性子の要素  $s_\nu$  を表す。

原子核の変形により生じるシッフモーメントは

$$S_{\text{ch}} = a_0 \bar{g}^{(0)} g + a_1 \bar{g}^{(1)} g + a_2 \bar{g}^{(2)} g$$

と書ける。ここで、 $g$  はパイ中間子と核子の結合定数、 $\bar{g}^{(I)}$  はアイソスピン  $I$  の PT を破るパイ中間子と核子の結合定数である。 $1/2^+$  状

態に対する、原子核の変形により生じるシッフモーメントの要素  $a_I$  を中性子数  $N$  の関数として図3に示す。

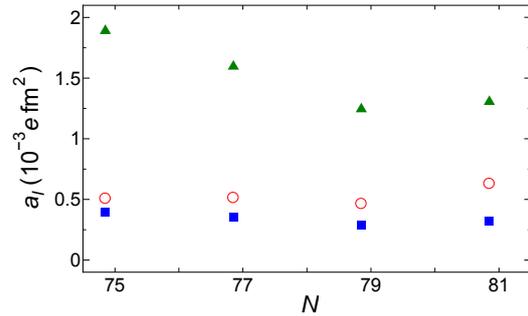


図3 Xe 同位体の要素  $a_I$  の計算結果。○印はアイソスカラー ( $I=0$ )、■印はアイソベクトル ( $I=1$ )、▲印はアイソテンソル ( $I=2$ ) を表す。

最後に、 $^{129}\text{Xe}$  原子の EDM の値を評価する。先行研究より、 $^{129}\text{Xe}$  原子の EDM  $d_{\text{Atom}}$  とシッフモーメント  $S$  は

$$d_{\text{Atom}} = 0.38 \times 10^{-17} \left( \frac{S}{\text{efm}^3} \right) \text{ecm}$$

で関係づけられる。実験で得られる中性子固有の EDM の上限値  $|d_\nu| < 2.9 \times 10^{-26} \text{ ecm}$  を用いると、核子固有の EDM から生じる  $^{129}\text{Xe}$  原子の EDM  $d_{\text{int}}$  の上限値は

$$|d_{\text{int}}| < 1.0 \times 10^{-31} \text{ ecm}$$

となる。また、一般的に使用されている結合係数の値  $g = 13.5$ 、量子色力学のラグランジアンにおける CP の破れの大きさを表すパラメーター  $\bar{\theta}$  と結合定数  $\bar{g}^{(0)}$  の関係式  $\bar{g}^{(0)} = 0.027 \bar{\theta}$ 、パラメーター  $\bar{\theta}$  の上限値  $\bar{\theta} < 3 \times 10^{-10}$  を用いると、原子核の変形により生じる  $^{129}\text{Xe}$  原子の EDM  $d_{\text{ch}}$  の上限値は

$$|d_{\text{ch}}| < 2.1 \times 10^{-31} \text{ ecm}$$

と計算できる。この結果は、 $^{199}\text{Hg}$  に対して行われている実験の上限値より3桁小さいものとなっており、現在の技術では観測が難しいことを示唆している。これまで殻模型を用いたシッフモーメントの理論研究は行われておらず、本研究により初めてそれが示された。

## 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8件)

- ① N. Yoshinaga, K. Higashiyama, Effective interactions between a

- neutron and a proton in high- $j$  orbitals around mass  $A=100$ , Journal of Physics G, 査読有, Vol. 37, 2010, pp. 115104/1-13 DOI:10.1088/0954-3899/37/11/115104
- ② Naotaka Yoshinaga, Koji Higashiyama, Ryouichi Arai, Shell model estimate of nuclear electric dipole moments, Progress of Theoretical Physics, 査読有, Vol. 124, 2010, pp. 1115-1123 DOI: 10.1143/PTP.124.1115
- ③ Koji Higashiyama, Naotaka Yoshinaga, Pair-truncated shell-model analysis of nuclei around mass 130, Physical Review C, 査読有, Vol. 83, 2010, pp. 034321/1-19 DOI: 10.1103/PhysRevC.83.034321
- ④ Koji Higashiyama, Naotaka Yoshinaga, Band structure of doubly-odd nuclei around mass 130, AIP Conference Proceedings, 査読無, Vol. 1355, 2011, pp. 84-87 DOI: 10.1063/1.3584049
- ⑤ Naotaka Yoshinaga, Koji Higashiyama, Shell model estimate of electric dipole moment in medium and heavy nuclei, AIP Conference Proceedings, 査読無, Vol. 1355, 2011, pp. 177-180 DOI: 10.1063/1.3584063
- ⑥ N. Yoshinaga, K. Higashiyama, R. Arai, E. Teruya Nuclear Schiff moments for the lowest  $1/2^+$  states in Xe isotopes, Physical Review C, 査読有, Vol. 87, 2013, pp. 044332/1-8 DOI: 10.1103/PhysRevC.87.044332
- ⑦ Y. Toh 他、計 21 名、K. Higashiyama (20 番目), Evidence for rigid triaxial deformation at low energy in  $^{76}\text{Ge}$ , Physical Review C, 査読有, Vol. 87, 2013, pp. 041304/1-19 DOI: 10.1103/PhysRevC.87.041304
- ⑧ Naotaka Yoshinaga, Koji Higashiyama, Band structure of neutron rich Se and Ge isotopes, Journal of Physics: Conference Serie, 査読無、掲載決定
- ① 東山幸司、吉永尚孝、質量数 210 領域における核子対殻模型計算、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 11 日、九州工業大学 (福岡県)
- ② 吉永尚孝、東山幸司、荒井亮一、中重核の電気双極子モーメントの殻模型による評価、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 11 日、九州工業大学 (福岡県)
- ③ Koji Higashiyama, Naotaka Yoshinaga, Band structure of doubly-odd nuclei around mass 130, International Symposium on New Faces of Atomic Nuclei, 2010 年 11 月 15 日、沖縄科学技術研究基盤整備機構 (沖縄県)
- ④ Naotaka Yoshinaga, Koji Higashiyama, Shell model estimate of electric dipole moment in medium and heavy nuclei, International Symposium on New Faces of Atomic Nuclei, 2010 年 11 月 15 日、沖縄科学技術研究基盤整備機構 (沖縄県)
- ⑤ 東山幸司、吉永尚孝、質量数 210 領域における殻模型計算、日本物理学会第 66 回年次大会、2011 年 3 月 25 日、新潟大学 (新潟県)
- ⑥ 吉永尚孝、東山幸司、PT を破る核力によるシッフモーメントの評価、日本物理学会第 66 回年次大会、2011 年 3 月 25 日、新潟大学 (新潟県)
- ⑦ 東山幸司、吉永尚孝、アクチナイド領域の殻模型的アプローチ、日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年 9 月 16 日、弘前大学 (青森県)
- ⑧ 吉永尚孝、東山幸司、荒井亮一、PT を破る相互作用により生じる中重核のシッフモーメント、日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年 9 月 16 日、弘前大学 (青森県)
- ⑨ 市川知沙、吉永尚孝、東山幸司、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊核行列要素の殻模型による評価、日本物理学会 2011 年秋季大会、2011 年 9 月 16 日、弘前大学 (青森県)
- ⑩ 東山幸司、吉永尚孝、生成座標法による中重核領域の偶偶核・奇核の解析、日本物理学会第 67 回年次大会、2012 年 3 月 26 日、関西学院大学 (兵庫県)

[学会発表] (計 19 件)

- ⑪ 吉永尚孝、市川知沙、東山幸司、  
質量数 130 領域でのニュートリノレス二重  $\beta$  崩壊殻模型行列要素、日本物理学会第 67 回年次大会、  
2012 年 3 月 26 日、関西学院大学 (兵庫県)
- ⑫ 齋藤香莉、吉永尚孝、東山幸司、荒井亮一、  
PT を破る核力によるシッフモーメントの殻模型での評価、日本物理学会第 67 回年次大会、  
2012 年 3 月 26 日、関西学院大学 (兵庫県)
- ⑬ 吉永尚孝、東山幸司、荒井亮一、  
中重核のシッフモーメントと電気双極子モーメント、日本物理学会 2012 年秋季大会、  
2012 年 9 月 12 日、京都産業大学 (京都府)
- ⑭ 東山幸司、吉永尚孝、  
核子対殻模型による中重核領域のニュートリノレス二重ベータ崩壊、日本物理学会 2012 年秋季大会、  
2012 年 9 月 12 日、京都産業大学 (京都府)
- ⑮ 東山幸司、吉永尚孝、  
生成座標法による Ge-Se 同位体の解析、日本物理学会 2012 年秋季大会、  
2012 年 9 月 14 日、京都産業大学 (京都府)
- ⑯ 山田弘平、吉永尚孝、東山幸司、  
殻模型による  $^{78}\text{Ge}$  のレベル統計、日本物理学会第 68 回年次大会、  
2013 年 3 月 26 日、広島大学 (広島県)
- ⑰ 吉永尚孝、東山幸司、  
生成座標法による質量数 130 領域の偶偶核・奇核の解析、日本物理学会第 68 回年次大会、  
2013 年 3 月 28 日、広島大学 (広島県)
- ⑱ 東山幸司、吉永尚孝、  
質量数 130 領域におけるニュートリノレス二重ベータ崩壊の核行列要素、日本物理学会第 68 回年次大会、  
2013 年 3 月 28 日、広島大学 (広島県)
- ⑲ 照屋絵理、吉永尚孝、東山幸司、  
質量数 130 領域における高スピン状態の殻模型計算、日本物理学会第 68 回年次大会、2013 年 3 月 28 日、広島大学 (広島県)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

東山 幸司 (HIGASHIYAMA KOJI)  
千葉工業大学・工学部・助教  
研究者番号：60433679