

## ニュートリノレス二重ベータ崩壊の原子核行列要素の信頼性の検証

### Examination of reliability of nuclear matrix element of neutrinoless double- $\beta$ decay

寺崎 順

チェコ工科大学プラハ 実験応用物理学研究所

#### 1. 研究目的

本研究では  $^{110}\text{Pd} \rightarrow ^{110}\text{Cd}$  の  $0\nu\beta\beta$ 崩壊の原子核行列要素計算を QRPA を用いて行う。研究者独自の方法で決めたある相互作用の強さの系統性から、その強さを決定する物理的要因を明らかにする。また、求めた原子核行列要素の信頼性を計算の自己検証の方法によって評価する。さらに、この評価とこれまでに計算した  $^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$ ,  $^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Te}$ ,  $^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$ ,  $^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$  の計算の信頼性評価を合わせて比較し、どの崩壊例で QRPA が最も信頼できる原子核行列要素を提示できるか研究する。

#### 2. 研究成果の内容

研究目的で述べたように、 $^{110}\text{Pd} \rightarrow ^{110}\text{Cd}$  の  $0\nu\beta\beta$ 崩壊原子核行列要素の計算が当該年度の主要な新しい計算であった。研究成果は二つある。ひとつはこの崩壊を含む、今までに計算した五つの崩壊例について、報告者独自のアイソスケーラ陽子・中性子対相互作用の強さの系統的变化を詳細に分析することによって、その強さを左右する重要な物理的要因を明らかにしたことである。もうひとつは、QRPA の  $^{110}\text{Pd}$  の二重ベータ崩壊への適用における近似性能を明らかにしたことである。QRPA を二ニュートリノ二重ベータ崩壊の原子核行列要素計算に適用する際、始状態から求めた中間状態エネルギーをエネルギー分母に用いて得た原子核行列要素と、終状態から求めた中間状態エネルギーを用いたそれを比較し差を求めた。この差は、小さければ QRPA はよい近似であるということを示し、QRPA の信頼性自己検証の指標である。

二重ベータ崩壊を引き起こす最も基礎的な、二中性子消滅と二陽子生成演算子の積の順序交換から、完全性近似の下での  $0\nu\beta\beta$ 崩壊原子核行列要素は、本来である、二重ベータ崩壊のほかに、二中性子消滅の後二陽子生成という仮想的崩壊経路によっても求めることができる。ところが、この二つの崩壊経路で同じ  $0\nu\beta\beta$ 崩壊原子核行列要素が得られるのは、原子核の厳密な波動関数が用いられる場合である。二経路で役割を果たす物理的効果が異なるために、近似を用いるとその等価性は満足されない。そこで、報告者は、その等価性は、その近似で用いられる有効相互作用に対する拘束条件と見なせるという考えを提唱し、同じ  $0\nu\beta\beta$ 崩壊原子核行列要素が得られるようにアイソスケーラ陽子・中性子対相互作用の強さを決めた。この相互作用に適用したのは、

これが、原子核の現象論的有効相互作用の中で、最も不確定性が大きいからである。このようにして求めた相互作用の強さは、質量数  $A$  に反比例し、魔法数核に比べて非魔法数核に対して大きくなるということがわかった。この性質が図に示される。後者の性質は、フェルミ面付近の一粒子レベル密度が高いと対相関を促進するという性質から生じる。図の相関の発見以前には、その相互作用の強さは原子核によってたいへんまちまちに見え、いささか困惑であったが、この問題は解決した。

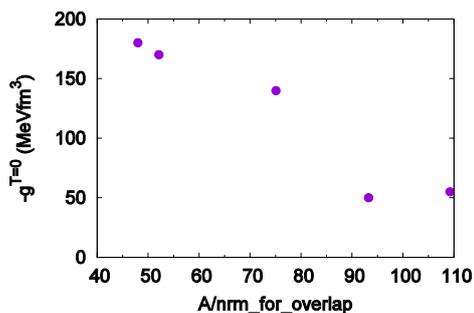


図 アイソスケラ陽子・中性子対相互作用の強さと、質量数  $A$  を始状態と終状態から求めた二つの中間状態の重複を求めに用いるノルムで割ったものとの関係。そのノルムは、魔法核で小さく、非魔法核で大きいという性質を持つ。

|  | $^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$ | $^{110}\text{Pd} \rightarrow ^{110}\text{Cd}$ | $^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$ | $^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$ | $^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$ |
|--|---|---|---|---|---|
| 二つの $2\nu\beta\beta$ 崩壊原子核行列要素の差/元の値の平均値 (%) | 10.2  | 81.7  | 42.4  | 0.9   | 78.1  |

表 二つの  $2\nu\beta\beta$  崩壊原子核行列要素 (本文参照) の差の元の二つの値の平均値に対する比 (%)。今までに計算した  $^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$ ,  $^{110}\text{Pd} \rightarrow ^{110}\text{Cd}$ ,  $^{130}\text{Te} \rightarrow ^{130}\text{Xe}$ ,  $^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$  および  $^{150}\text{Nd} \rightarrow ^{150}\text{Sm}$  の結果を示す。

二番目の、QRPA の近似の適否を示す指標は、表にまとめられる。この指標のばらつきは大きい。最も良いのは  $^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$  で、QRPA はこの崩壊例に対して相当によりよい近似であることがわかる。言い換えれば、この崩壊に関与する核の多粒子・多空孔相関は弱いという核の性質が示されている。今回新たに計算した  $^{110}\text{Pd} \rightarrow ^{110}\text{Cd}$  は、五つの崩壊例の中で、最も QRPA がよくない例であることがわかった。陽子数または中性子数が魔法数に近く、他方がそれから離れているとき、一般に多粒子・多空孔相関の効果は大きく QRPA はよい近似でない。

### 3. 学際共同利用が果たした役割と意義

本研究の計算は、学際共同利用なしには遂行できなかった。したがって、学際共同利用の意義は本研究にとってきわめて高い。

### 4. 今後の展望

信頼できる  $0\nu\beta\beta$  崩壊の原子核行列要素を求めるための必須項目のひとつは、その計算にとって十分な精度をもった原子核波動関数である。QRPA では一粒子波動関数空間

の拡張に関する結果の収束を得ることが可能である。そこで、QRPA がよい近似である崩壊例を明らかにすれば、その崩壊例については波動関数は十分ということであり、ひとつの道標といえる成果である。現在のところ、最善の崩壊例は  $^{136}\text{Xe} \rightarrow ^{136}\text{Ba}$  あり、これに匹敵するあるいはよりよい例の探索を続行する。

## 5. 成果発表

### (1) 学術論文

1. J. Terasaki, *Physical Review C* **102**, 044303 (2020)
2. J. Terasaki and Y. Iwata, submitted to *European Physical Journal Plus*

### (2) 学会発表 なし。

### (3) その他

1. J. Terasaki, "Examination of reliability of nuclear matrix element of neutrinoless double-beta decay by QRPA", online international conference Neutrino 2020, June 22 – July 2, 2020, (Chicago, USA), poster.
2. J. Terasaki, "Reliability of nuclear matrix elements of neutrinoless double- $\beta$  decay by QRPA", online workshop ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊とその周辺, February 12, 15, 2021, (Kashiwa, Japan), oral.

| 使用計算機                       | 使用計算機<br>に○ | 配分リソース※ |        |
|-----------------------------|-------------|---------|--------|
|                             |             | 当初配分    | 追加配分   |
| Cygnus                      |             |         |        |
| Oakforest-PACS              | ○           | 152,000 | 38,000 |
| ※配分リソースについてはノード時間積をご記入ください。 |             |         |        |