

| | |
|------|------|
| 受付ID | 16a5 |
| 分野 | 原子核 |

ニュートリノレス二重ベータ崩壊の原子核行列要素

Nuclear matrix elements of neutrinoless double-beta decay

寺崎 順

チェコ工科大学プラハ

1. 研究目的

本研究の目的は、ニュートリノの質量を決定するのに必要な、ニュートリノレス二重ベータ($0\nu\beta\beta$)崩壊過程の原子核の遷移行列要素(原子核行列要素)を、準粒子乱雑位相近似(QRPA)を用いて信頼のできる精度で求めることである。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の観測は、ニュートリノがマヨラナ粒子か否かを検証する重要な研究であるが、もしマヨラナ粒子であれば、ニュートリノ有効質量を、始状態の寿命のデータと理論計算による原子核行列要素から求めることができる。そこで現在 $0\nu\beta\beta$ 崩壊に対する寿命を測定するいくつかの大規模な実験プロジェクトが進展中である。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の原子核行列要素を巡っては、用いる計算方法によって因子 2 から 3 の違いがあることが知られており、ニュートリノ有効質量の決定にとって障害になっている。

2. 研究成果の内容

2016年度の研究では、 $^{48}\text{Ca}\rightarrow^{48}\text{Ti}$ の二重ベータ崩壊の原子核行列要素の計算を精力的に行い、 $^{136}\text{Xe}\rightarrow^{136}\text{Ba}$ のQRPA計算も実施した。また、RPAを拡張する研究も開始した。

二重ベータ崩壊の原子核行列要素をQRPAを用いて計算するためには、始状態に基づいて求めたQRPA状態と終状態に基づいて求めたQRPA状態の重複を計算する必要があり、実施者は本年度の研究を始めるまでに、多体相関を正しく取り入れたQRPA状態の重複計算方法を初めて開発した。この方法を $^{150}\text{Nd}\rightarrow^{150}\text{Sm}$ に適用することにより、QRPA基底状態を具体的に計算する際に求まる規格化因子が1.8であり、これがQRPA状態の重複を通じて原子核行列要素を小さくする顕著な効果をもつことを初めて示した。

そこで、この方法を ^{48}Ca に適用したらどういう原子核行列要素が得られるかという疑問に答えることが次の課題になる。なぜならば、 ^{48}Ca は二重魔法核であり、実施者の用いている現象論的エネルギー汎関数をHartree-Fock-Bogoliubov近似で決めるのに用いられる核のひとつである。従って、その近似で基底状態束縛エネルギーは再現され、QRPA状態の重複に含まれる規格化因子は1でよい。そうすると上記の新しい効果はなく、 ^{48}Ca ではそれでよいのかという問題が出てくる。

計算は同種粒子 QRPA を用いて計算される仮想的二粒子移行経路と本来の二重ベータ崩壊経路を用いた二通りで行われた。この際両者が一致すべきという条件から、後者でのみ用いられるアイソスカラー陽子・中性子対相互作用の強さが決まる。エネルギー汎関数にはスキルム型が用いられた。これは核図表中の多くの核の基本的な性質をできるだけ再現するように決められているので、これは固定して用いられた。同種粒子対相互作用（エネルギー汎関数）の強さは、 ^{48}Ca 近傍の開核の実験的束縛エネルギーから得られる対ギャップを再現するように決め、それに対する小さい変動が結果に大きな影響を与えないことを確認した。この方法で $^{48}\text{Ca} \rightarrow ^{48}\text{Ti}$ の $0\nu\beta\beta$ 崩壊の原子核行列要素の数值は 2.2 となった。これを再現するような接触型アイソスカラー陽子・中性子対相互作用の強さは、 -180.0MeVfm^{-3} であった。この計算では、アイソベクター陽子・中性子対相互作用の強さは簡単のため 0 とした。この計算で、アイソベクター陽子・中性子対相互作用の強さを陽子と中性子の同種粒子対相互作用の強さの平均値とすると、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の原子核行列要素の数值は 1.9 となった。アイソベクター陽子・中性子対相互作用の効果は 14% であり、無視できないが顕著でもない。

この計算を通じて得られたひとつの情報は、対相互作用のはたらく範囲をフェルミ面の上下 30MeV に限定する必要があるということである。 ^{150}Nd の計算では、この範囲が 60MeV で二つの崩壊経路による計算を一致させることができた。 ^{48}Ca では範囲にこの数値を用いると、 $0\nu\beta\beta$ 原子核行列要素の数值はアイソスカラー陽子・中性子対相互作用の強さが 0 のとき最大で 1.1 であった。つまり、この有効範囲が大きいと二つの崩壊経路によって求める原子核行列要素の値を一致させることはできない。一般的にいて、対相互作用の適用範囲を狭めればその強さを大きくすればよく、この二つのパラメータの組み合わせには任意性があると考えられるが、 ^{48}Ca のこの計算は、そうではないという、少なくとも実施者にとっては初めての例である。

他の方法による $0\nu\beta\beta$ 崩壊の原子核行列要素値は最近の殻模型で 0.963 から 1.183 である [Y. Iwata et al., Phys. Rev. Lett. **116**, 112502 (2016)]。この計算では sdpf 殻が用いられ、値の違いは相互作用と短距離相関補正の仕方から生じている。生成座標の方法では、2.23 [N. Vaquero et al., Phys. Rev. Lett. **111**, 142501 (2013)] と 3.66 [J. Yao et al., Phys. Rev. C **91**, 024316 (2015)] という数値が得られている。後者には粒子数射影から生じる規格化因子が含まれる。本研究の結果は殻模型値の約二倍という点では、他の崩壊例と同じであるが、生成座標の方法の数値に近いという点では異色である。

二ニュートリノ崩壊確率についてはすでに実験データがあり、それから原子核行列要素を求めると、 $0.0382303(+0.00264 \text{ or } -0.00217)$ である。ここで、ベクター流結合は $g_A=1.000$ とし、ユベスキュラのグループが計算した相空間因子を用いた。これに対し実施者の数値は -0.13 であり、半実験値の 3.4 倍となった。 ^{150}Nd の計算では、対応する比は 1.5 である。 ^{48}Ca での不一致の顕著な拡大の原因は、QRPA 状態の重複計算において、規格化因子を 1 としたことにあると思われる。すなわち、多体相関を十分

含むと仮定した **Hartree-Fock** 状態ではなく、多体相関をあらわに含む原子核波動関数の使用が望ましい。しかしながら、エネルギー汎関数の方法ではこれは原理的に困難である。 ^{48}Ca は実施者の方法にとって、結果の信頼性の点で他の崩壊例より難しい例であると結論される。

本年度の研究のもうひとつの成果は、含まれる多体相関の点で **RPA** を超える方法の構築に着手したことである。方法の間での $0\nu\beta\beta$ 原子核行列要素の不一致問題を解決するために必要な課題のひとつは、**(Q)RPA** を拡張することである。そのような試みは、ベータ崩壊研究とは独立にすでに多数あるのだが、実施者は、チェコ工科大学プラハを中心とする共同研究によって、運動方程式と呼ばれる **RPA** の導出方法に基づく発展を行った。その方程式の特徴は、非線形であることと、基底状態に作用して励起状態をつくる演算子に多粒子・多空孔成分が含まれることである。他のグループにない新しい点は、その励起状態生成演算子に定数項を含めたことである。これにより、近似法の試験にしばしば用いられるリップキン模型に適用した際、厳密解が得られることが示された。これは、**RPA** の拡張が厳密なシュレーディンガー方程式と等価になることを示した初めての例であり、上記必要課題のため、この方法を原子核行列要素計算に適用する価値がある。

3. 今後の展望

これまで ^{150}Nd と ^{48}Ca を計算し、計算方法についての違いが明らかになった。方法の間の不一致問題は複数の核に見られる系統的な問題であるが、どの核の計算も同様ではない。従って、他の崩壊例にどのような特徴があるかを調べる必要がある。

方法の間の不一致問題解決のため、**QRPA** の拡張は必須である。そのためのコード制作を今後行う。

4. 成果発表

(1) 学術論文

J. Terasaki, A. Smetana, F. Šimkovic, and M. I. Krivoruchenko, Phys. Rev. C, submitted.

| 使用計算機 | 使用計算機に○ | 配分リソース* |
|-----------------------------------|---------|---------|
| HA-PACS | | |
| HA-PACS/TCA | | |
| COMA | ○ | 1080 |
| ※配分リソースについては 32node 換算時間をご記入ください。 | | |