

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 5 月 11 日現在

機関番号：12102

研究種目：研究活動スタート支援

研究期間：2012～2013

課題番号：23840005

研究課題名（和文）

Skyrme-QRPA を用いた二重ベータ崩壊の遷移行列要素の計算

研究課題名（英文）

Calculation of transition matrix elements of double-beta decay using Skyrme-QRPA

研究代表者

寺崎 順 (TERASAKI JUN)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号：50616430

研究成果の概要（和文）：ニュートリノ質量を決めるためのニュートリノレス二重ベータ崩壊の遷移行列要素の計算を行うプログラムを開発し、必要な基底状態ならびに励起状態の計算を質量数 150 近傍で行った。最も大きな成果は、中間状態の重複計算をほとんど厳密に近いものにしたことである。これは最先端の計算機によって可能になったことで、乱雑位相近似のニュートリノレス二重ベータ崩壊への応用をいままでより正確にする進歩である。

研究成果の概要（英文）：We developed a system of programs to calculate transition matrix elements of the neutrinoless double-beta decay for determining the neutrino mass. Calculations have been performed of the ground and excited states necessary around a mass-150 region. The most significant achievement is that the overlap of the intermediate states obtained can now be calculated almost exactly. This achievement was enabled by the most advanced computers and has an effect to make the application of the random-phase approximation to the neutrinoless double beta decay more accurate than before.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2012 年度	1,100,000	330,000	1,430,000
2013 年度	1,000,000	300,000	1,300,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,100,000	630,000	2,730,000

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：原子核、理論、ニュートリノ、ニュートリノレス二重ベータ崩壊、QRPA

1. 研究開始当初の背景

(1) ニュートリノの質量は標準理論で 0 と仮定されてきたが、最近ニュートリノ振動の観測によって、有限の質量をもつことが判明した。その有効質量を知ることは物理学の進歩である。

(2) ニュートリノの有効質量を得るための数少ない有力な方法のひとつは原子核のニュートリノレス二重ベータ崩壊を利用する

ことであり（ニュートリノがマヨラナ粒子と仮定）、この方法では、ニュートリノレス二重ベータ崩壊に対する原子核の寿命（実験測定）と遷移行列要素（理論計算）が必要である。現在 20 以上の寿命測定の実験計画が進行中である。理論計算に最もよく用いられるのは準粒子乱雑位相近似（QRPA）であり、30 年くらい前から改良が続けられてきたが、殻模型計算の遷移行列要素より系統的に小さ

い（因子 2）ことがわかっている。原因は不明である。

(3)QRPA の方法では、崩壊の始状態から求めた励起状態と終状態から求めた励起状態の重複を計算する必要があるが、これは単純化された方法で計算されてきた。

2. 研究の目的

Skyrme-QRPA を用いて、質量数 70 から 150 の領域でニュートリノレス二重ベータ崩壊の遷移行列要素を計算する。

3. 研究の方法

- (1)崩壊の始状態と終状態を求めるための Hartree-Fock-Bogoliubov (HFB) 基底状態計算を Skyrme エネルギー密度汎関数と体積対エネルギー密度汎関数を用いて行う。
- (2)求めた HFB 基底状態に基づき、励起状態を QRPA を用いて行う。HFB 計算と同じエネルギー密度汎関数を用いる。
- (3)始状態と終状態に基づいて求めた二種類の QRPA 状態の重複行列を計算する。
- (4)HFB 計算から求まるカノニカル単一粒子基底を用いてニュートリノポテンシャルの二体行列を計算する。
- (5)始状態から励起状態への二核子移行遷移行列を計算する。終状態についても同じ計算を行う。
- (6)上記(3)から(5)で求めた行列の積のトレースを計算することにより、原子核行列要素を求める。
- (7)位相空間因子(崩壊の遷移行列要素の電子部分)を計算する。原子核行列要素の二乗と位相空間因子の積が崩壊の遷移行列要素を与える。

4. 研究成果

(1)ニュートリノレス二重ベータ崩壊ではよいと考えられている完全性近似のもとでは、二核子移行経路を用いて原子核行列要素を計算することが可能であるということを示した。(図 1) これは新しいアプローチである。この方法により、荷電変化反応に適用した際 QRPA はあまり良い近似でないという問題を避けることができ、また、原子核行列要素の重要な部分を実験的に直接検証する可能性をもたらす。

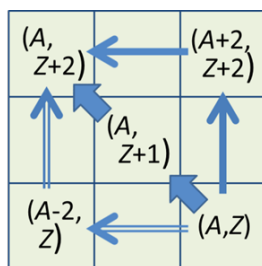


図 1. 核図表上（縦軸：Z、横軸：N）でのニュートリノレス二重ベータ崩壊の経路（対角線）と完全性近似のもとで計算上可能な二核子移行経路（水平方向と鉛直方向の遷移）。A は質量数。

(2)異なる原子核の基底状態に基づく QRPA 励起状態の重複を厳密とって差し支えないくらい精密に計算する方法を示し、数値計算が可能であることを実証した。この際用いられた近似の精度が図 2 および 3 に示されている。QRPA 状態の式は複雑でそれをあらわに用いることは極力避けるのが QRPA 計算の常套的考えであったが、重複行列の特性をうまく使い、強力な並列計算機を用いれば、その常套的考えにこだわって計算精度を落とす必要はないということを示した点が特筆される。

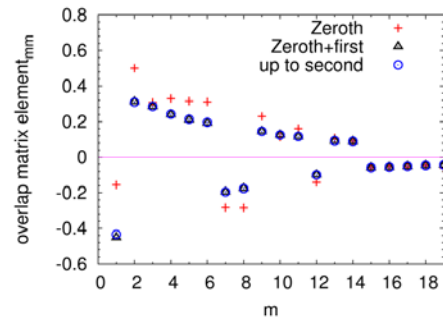


図 2: ^{26}Si と ^{26}Mg の QRPA 励起状態の重複の対角行列要素を絶対値の大きい順に並べたもの。用いられている近似は QRPA 生成子に関する指数関数の展開で、図内に示されているように 2 次まで計算された。これにより 1 次までで十分であることがわかる。

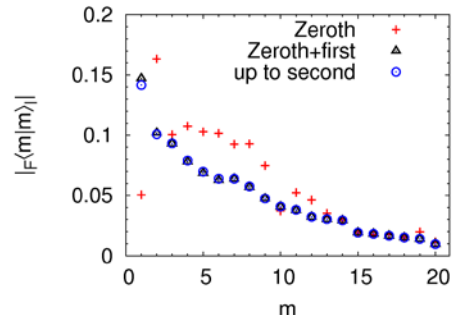


図 3: 図 2 と同様の計算、ただしふたつの原子核の基底状態の変形度と対場の違いが図 2 に用いたものより大きい。(人為的に相互作用の強さを変えた。)

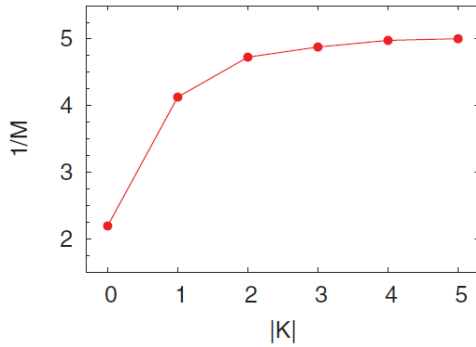


図 4: QRPA 基底状態の規格化因子の収束性。横軸は用いられた QRPA 解の K 量子数。

この新しい計算方法のチェックは精密に行われた。たとえば QRPA の基底状態を定義するのに原理的にはすべての QRPA 解が必要なのであるが、図 4 は計算に使われる QRPA 解の K 量子数 (角運動量の第三軸成分) を増やすにつれて QRPA 基底状態の規格化因子が収束することを示している。

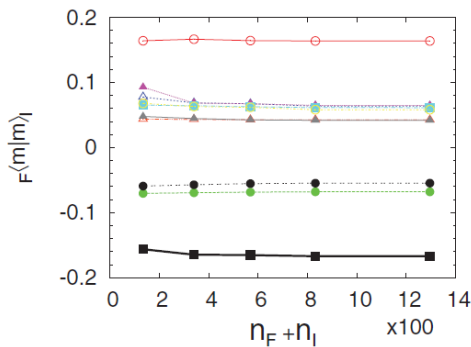


図 5: QRPA 状態の未規格化重複計算の一部に用いられた二準粒子励起の数 (n_F と n_I) に対する重複の収束性。

これに対し、未規格化重複の計算に用いる二準粒子励起数の増加に対する収束性は、図 5 に示されているように大変良い。これは、二つの異なる原子核のフェルミ面上の配位が異なるために、ここをそのままにして高いエネルギーを伴う励起状態は重複をほとんどもたないため、QRPA を二重ベータ崩壊に適用した際の著しい数学的特徴である。

また、図 6 には再び二つの原子核上の $K^\pi=0^+$ 励起状態の重複が示されているが、実はこのとき QRPA 未規格化基底状態を計算するのに 0^+ 以外の K^π はなくても近似的によいということが示されている。これは、ボソン近似がよい描像であることを意味していて興味深い。

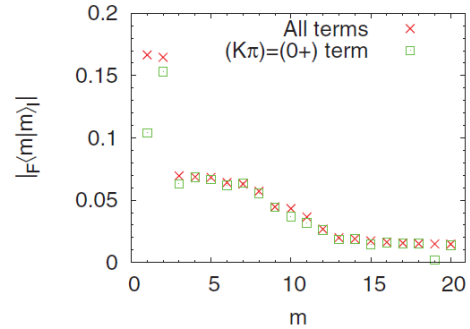


図 6: 二つの原子核上の QRPA 状態の重複。赤十字はすべての K^π を QRPA 基底状態の計算に用いた。緑四角は QRPA 未規格化基底状態に $K^\pi=0^+$ のみを用いて得られた結果。

(3) ニュートリノポテンシャルの二体行列と QRPA の重複行列を京コンピュータ上で大規模かつ高速に計算するためのプログラムを開発した。これらのプログラムは数値計算技術的に進んでおり、本研究の成果のひとつである。たとえば、大規模データのファイルへの効率の良い書き出し方などの技術が他の計算プログラムへも応用できる。上記二つの行列の大規模計算の最終準備が進行中である。

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 3 件)

① J. Terasaki,

Overlap of quasiparticle random-phase approximation states based on ground states of different nuclei: Mathematical properties and test calculations
Phys. Rev. C 87, 024316-1 - 18(2013), 査読有、
DOI:10.1103/PhysRevC.87.024316

② J. Terasaki,

Overlap of QRPA states based on ground states of different nuclei
Acta Physica Polonica B 44, 259-262 (2013), 査読有、
DOI:10.5506/AphysPolB.44.259

③ J. Terasaki,

Overlap of quasiparticle random-phase approximation states for nuclear matrix elements of the neutrino-less double- β decay
Phys. Rev. C 86, 021301(R)-1 - 4 (2012), 査読有、
DOI:10.1103/PhysRevC.86.021301

〔学会発表〕(計2件)

①寺崎順、
ニュートリノレス二重ベータ崩壊の原子核
行列要素のためのQRPA状態の重複計算
日本物理学会 第68回年次大会、2013年3
月26-29日、東広島

② J. Terasaki,
Overlap of QRPA states based on ground
states of different nuclei
XLVII Zakopane Conference on Nuclear
Physics, Extremes of the Nuclear Landscape,
Aug. 27 - Sep. 2, 2012, Zakopane, Poland.

6. 研究組織

(1) 研究代表者

寺崎 順 (TERASAKI JUN)

筑波大学・数理物質系・准教授

研究者番号：50616430