

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24年5月15日現在

機関番号：13101
 研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2009～2011
 課題番号：21540261
 研究課題名（和文）ニュートリノによる 4He, 3H 及び 3He 核励起の理論的研究
 研究課題名（英文）Theoretical study on excitations of 4He, 3H, and 3He by neutrino
 研究代表者
 鈴木 宜之（SUZUKI YASUYUKI）
 新潟大学・自然科学系・フェロー
 研究者番号：70018670

研究成果の概要（和文）：連続状態への遷移確率を求めるためにまず複素回転法による計算法を確立する必要があり、現実的核力に基づいた 4He の光吸収断面積の研究で検討した。実験データとの良い一致を得たので、同じ手法をニュートリノ-4He 反応に応用することが可能になった。反応に寄与するガモフ-テラーやスピン双極子のそれぞれの演算子に応じた応答関数を求めた。

研究成果の概要（英文）：First we have established a method of calculating response functions involving continuum states, by testing it in ab initio study of photoabsorption cross section of 4He. Good agreement with experiment, obtained with a realistic nuclear interaction, has made it possible to extend the method to the Gamow-Teller and spin-dipole response functions of 4He that are relevant to neutrinio-4He reaction.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2009年度	800,000	240,000	1,040,000
2010年度	800,000	240,000	1,040,000
2011年度	900,000	270,000	1,170,000
年度			
年度			
総計	2,500,000	750,000	3,250,000

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：ニュートリノ、ヘリウム原子核、応答関数、複素回転法、ガモフ-テラー遷移、スピン双極子遷移、電気双極子遷移

1. 研究開始当初の背景

(1) 超新星爆発時に大量に発生するニュートリノと 4He 等の軽い原子核との相互作用によるエネルギー散逸は、爆発機構の理解にとって有意義な情報を与えると期待される。弱い相互作用及による励起（応答）関数を第一原理的手法で求める。

(2) 連続状態への遷移を計算することになり、これまでのところ応答関数のローレンツ積分を求めそれを逆変換する方法によるも

のしかなく、別の独立した理論計算が求められていた。

2. 研究の目的

(1) 現実的核力を用いて 4He, 3He, 3H などの基底状態を記述する。

(2) 終状態が連続状態にある応答関数を計算する手法を確立するために、実験データがある電気双極子遷移について複素回転法ならびにR行列理論によりまず分析する。特に

終状態を記述する配位に注意する。

(3) 弱い相互作用を引き起こすガモフ-テラーやスピン-双極子演算子により、 4He の応答関数を計算する。それをもとに、ニュートリノ- 4He 反応断面積を求める。

3. 研究の方法

(1) 連続状態を含む応答関数を2乗可積分基底で計算する方法を採用する。これを可能にするために、エネルギー保存を含む終状態へのすべての和がリゾルベントを用いて実行できることが出発点になる。そのうえで複素回転法により応答関数を求める。

(2) 上記の方法は汎用性が広いが、より確立した方法であるR行列理論で逆過程の断面積を計算し、それぞれ独立した二つの計算が矛盾のない結果を与えるか検討する。R行列理論は終状態が3粒子以上含む場合に適用するのは現状では不可能である。実験データが豊富でありかつそれ自身興味深い 4He の光吸収（電気双極子遷移）について行う。

(3) 2乗可積分基底として、グローバルベクトルを含む相関ガウス関数を採用する。これにより、短距離斥力が強くかつテンソル力などの非中心力を含む現実的核力に対して 4He 、 3He 、 3H などの基底状態を高精度で記述する。

(4) ガモフ-テラーやスピン-双極子演算子による 4He の応答関数を複素回転法により計算する。

4. 研究成果

研究方法の(1)及び(2)で述べたように、連続

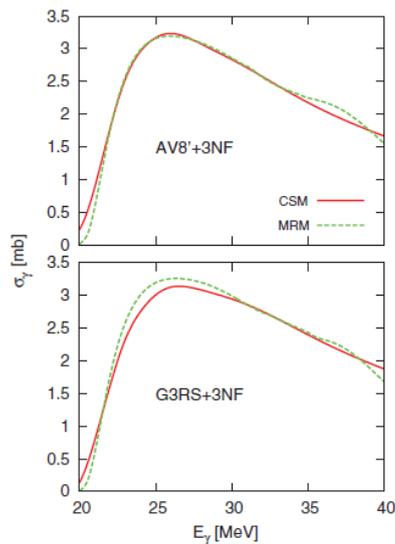


図1 複素回転法(CSM)とR行列理論(MRM)によって計算した 4He の光分解断面積の比較(文献1)

状態への応答関数の計算は2体崩壊などの簡単な場合を除けば決して自明ではなく、それ自体難しい課題である。信頼できる手法を確立するために、ニュートリノ反応を引き起こす弱い相互作用と似た演算子をもち、かつ実験データが豊富な 4He の光分解の課題について分析した。この課題自体も実験データが必ずしも一致していないため興味深い。図1に示したように、複素回転法(CSM)と微視的R行列理論(MRM)のそれぞれ独立した方法により光分解の断面積を計算し、事実上同じ結果を与えることを確かめた。AV8'やG3RSは現実的核力で、3NFは3体力である。

複素回転法の利点は、終状態が2体以上になっても2乗可積分基底を十分広くとれば適用可能ということにある。実際、 4He の崩壊チャンネルの閾値は2体と3体とでそれほどの差がないので、複素回転法が便利と期待される。図2は 4He の光分解断面積を実験データと比較したものである。実験データ自体、とりわけ低いエネルギーでばらつきがあるが、理論計算は実験データをよく再現しているといえる。

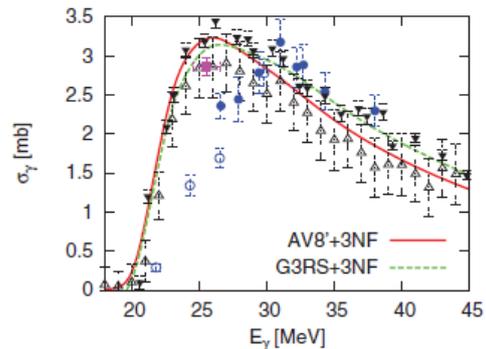


図2 4He の光分解断面積の実験データと複素回転法による理論計算との比較(文献1)

この結果を得るために、現実的核力の特徴である短距離斥力と強いテンソル力に柔軟に対応できる基底を注意深く選んだ。それは相関ガウス基底とよばれるものを回転運動が記述できるように一般化したものであり我々が開発してきた。少数系の精密計算に適用し、非常に強力であることが実証されている。

ニュートリノと原子核の反応では、原子核は核子の座票 \mathbf{r} 、運動量 \mathbf{p} 、スピン σ 、アイソスピン τ などを用いて表される。特に 4He それ自身の励起の反応では中性カレントと呼ばれるものでアイソスピンについてはその第3成分のみを考えればよい。そのほかの座

標については、フェルミ型の σ 演算子、ガモフ-テラー型の $\tau \sigma$ 演算子などの他にスピン双極子 (σ と \mathbf{r} ないし σ と \mathbf{p}) のテンソル演算子を考慮して、応答関数を求めていくことになる。

これらの演算子で励起される 4He の連続状態の角運動量とパリティ J^π は 0^\pm 、 1^\pm 、 2^- となる。我々はすでにこれらの J^π をもつ 4He の励起状態を 2 乗可積分基底で計算し、詳しい分析を行った。図 3 は 4He のエネルギー準位で、左側が実験のスペクトル、右側が AV8' + 3NF の理論計算の結果である。

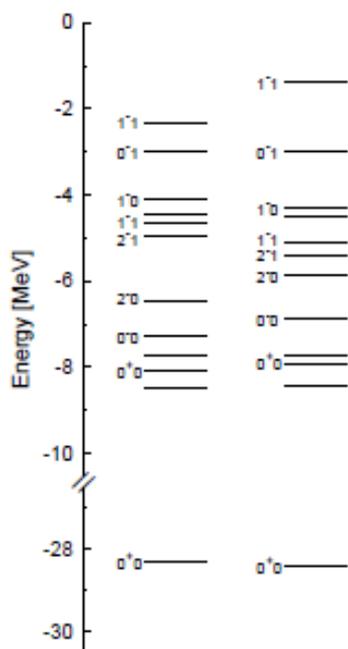


図 3 4He のエネルギー準位 (文献 2)

上記のそれぞれの演算子による励起関数を計算した。演算子に対応して相関ガウス基底を十分広く用意し、エネルギーについての連続分布は複素回転法によって得た。図 4 はガ

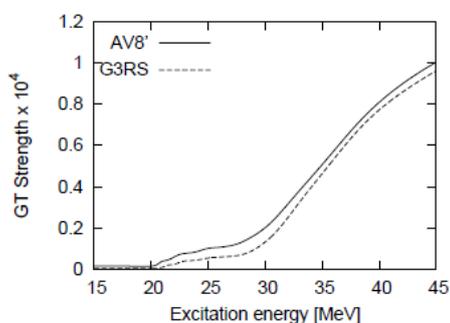


図 4 4He の 1^+ 状態へのガモフ-テラー応答関数 (文献 3)

モフ-テラー遷移の強度関数である。図 5 はスピン双極子テンソル、 $[\sigma \times \mathbf{r}]_\lambda$ 、に対応した応答関数である。

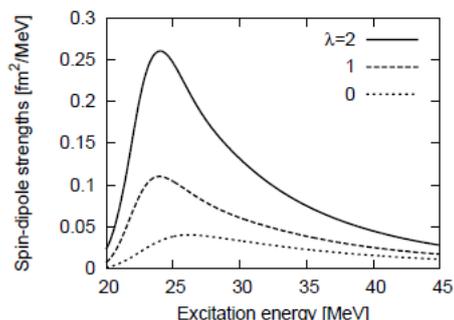


図 5 4He のスピン双極子応答関数。 λ はそのテンソルで 4He の λ^- 状態が励起される。(文献 3)

現在これらの強度の和則などを検討している。それが終わり次第、研究成果のまとめの論文を発表する予定である。さらに、これらの応答関数を用いて、ニュートリノ- 4He 反応の断面積を計算し、超新星爆発のシナリオへの影響を調べる。

本研究の独自性は、複雑な相互作用系の崩壊過程を核子間の相関と演算子の特性を考慮した第一原理的計算によって記述し、あいまいさのない結果を導いたことにある。更に、核力のうちのテンソル力、とりわけ π 中間子交換力によるものについて明らかにしたことは物理的に重要である。

文献

- (1) W. Horiuchi, Y. Suzuki, K. Arai, Phys. Rev. C85, 054002-1:14 (2012)
- (2) W. Horiuchi, Y. Suzuki, Phys. Rev. C78, 034305 (2008)
- (3) W. Horiuchi, Y. Suzuki, T. Sato: Electroweak responses of 4He using realistic nuclear interactions, 11th Symposium on Nuclei in the Cosmos (NIC XI), July 19-23, (2010)

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 16 件)

- ① W. Horiuchi, Y. Suzuki, K. Arai: Ab initio study of the photoabsorption of 4He , Phys. Rev. C85, 054002-1:14 (2012) 査読有
- ② K. Arai, S. Aoyama, Y. Suzuki, P. Descoquemont, D. Baye : Tensor force manifestations in ab initio study of the $2\text{H}(d,\gamma)$

- 4He, 2H(d, p)3H, and 2H(d, n)3He reactions, Phys. Rev. Lett.107, 132502-1:5 (2011) 査読有
- ③ E. C. Pinilla, D. Baye, P. Descouvemont, W. Horiuchi, Y. Suzuki: Tests of the discretized continuum method in three-body dipole strengths, Nucl. Phys. A865, 43-56 (2011) 査読有
- ④ Y. Suzuki, W. Horiuchi, D. Baye: Green's function method for strength function in three-body continuum, Prog. Theor. Phys. 123, 547-568 (2010) 査読有

[学会発表] (計31件)

- ① 堀内渉, 鈴木宜之, 新井好司, 佐藤透: 現実的核力を用いたヘリウム4の励起スペクトルと電弱応答, 基研研究会「E0;E1励起を通じて探る原子核の低い励起エネルギーのエキゾチックな構造」2011年12月7-9日, 京都大学基礎物理学研究所
- ② Y. Suzuki: Ab initio study of 2H(d, γ)4He, 2H(d,p)3H, and 2H(d,n)4He reactions and the tensor force, 11th International Symp. on Origin of Matter and Evolution of Galaxies (OMEG11), November 14-17, 2011, RIKEN, Wako, Japan
- ③ Y. Suzuki: Solving continuum problems with bound state methods, Long-term workshop on Dynamics and correlations in exotic nuclei (DCEN2011), September 20-October 28, 2011, YITP, Kyoto, Japan
- ④ 堀内渉, 鈴木宜之, 新井好司: 現実的核力を用いたヘリウム4の光吸収断面積の解析, 日本物理学会2011年秋季大会, 2011年9月16-19日, 弘前大学文京町キャンパス
- ⑤ W. Horiuchi, Y. Suzuki, T. Sato: Strength functions of 4He using realistic nuclear interactions, Japan-Italy EFES Workshop on Correlations in Reactions and Continuum, September 4-6, 2010, Istituti di Fisica (トリノ、イタリア)
- ⑥ W. Horiuchi, Y. Suzuki, T. Sato: Electroweak responses of 4He using realistic nuclear interactions, 11th Symp. on Nuclei in the Cosmos (NIC XI), July 19-23, 2010, Stadthalle of Heidelberg (ハイデルベルグ、ドイツ)
- ⑦ 鈴木宜之, 堀内渉, D. Baye: 2乗可積分基底を用いた三体連続状態の記述とその強度関数への応用, 日本物理学会第65回年次大会, 2010年3月20-23日, 岡山大学津島キャンパス

6. 研究組織

(1) 研究代表者

鈴木 宜之 (SUZUKI YASUYUKI)
新潟大学・自然科学系・フェロー
研究者番号: 70018670

(2) 研究分担者

()

研究者番号:

(3) 連携研究者

青山 茂義 (AOYAMA SHIGEYOSI)
新潟大学・学術情報基盤機構情報基盤センター・准教授
研究者番号: 60311528

(4) 研究協力者

堀内 渉 (HORIUCHI WATARU)
独立行政法人理化学研究所・仁科加速器研究センター・研究員
研究者番号: 00612186
DANIEL BAYE
Universite Libre de Bruxelles・Physique Nucleaire Theorique et Physique Mathematique・名誉教授