

機関番号：32660

研究種目：若手研究 (B)

研究期間：2009～2010

課題番号：21740189

研究課題名 (和文) ニュートリノ振動研究のためのホウ素 8 太陽ニュートリノスペクトル精密決定

研究課題名 (英文) Precise  $^8\text{B}$  solar neutrino spectrum for neutrino oscillation analysis

研究代表者

炭竈 聡之 (SUMIKAMA TOSHIYUKI)

東京理科大学・理工学部・助教

研究者番号：20392003

研究成果の概要 (和文)：ニュートリノ振動等の標準理論を越えるニュートリノの性質を研究する上でホウ素 8 起源の太陽ニュートリノスペクトルは最も精密な観測量の一つである。Super-Kamiokandeにおけるニュートリノスペクトル測定で最も大きな不確かさの要因の一つは、ホウ素8からニュートリノが出た瞬間のスペクトルの形状因子である。今研究では、形状因子に作用する弱磁気項と軸性電荷を新たな手法でベータ崩壊の結果から直接決定した。形状因子の不確かさを、初めて実験結果に基づいて決める事ができた。

研究成果の概要 (英文)：Solar neutrino spectrum from  $^8\text{B}$  is one of the most precise observables to investigate the neutrino oscillation beyond the standard model. One of the largest uncertainties of neutrino spectrum observed at Super-Kamiokande is the spectral shape factor just after the neutrino emission from  $^8\text{B}$ . In this study, the weak magnetism and axial charge matrix elements, which are the terms in shape factor, were determined directly from experimental results of beta decay. Uncertainties in the shape factor were determined based on experimental uncertainties for the first time.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2009 年度	1,500,000	450,000	1,950,000
2010 年度	1,200,000	360,000	1,560,000
年度			
年度			
年度			
総計	2,700,000	810,000	3,510,000

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：太陽ニュートリノ、 $\beta$ 線角度分布

## 1. 研究開始当初の背景

(1) ニュートリノは標準理論を越える物理現象 (ニュートリノの有限質量・ニュートリノ振動) を研究するのに非常に重要である。太陽ニュートリノを地球上で観測すると予測値より大幅に小さかったという太陽ニュートリノ問題は、ニュートリノが質量を持つ事

によるニュートリノ振動が原因であった[1]。現在、利用可能な太陽・原子炉ニュートリノ実験結果を同時に解析するグローバル解析によって、ニュートリノ振動に関わる世代間質量差・混合角が決められている[1]。太陽からくる  $^8\text{B}$  ニュートリノのエネルギースペクトルは、Super-Kamiokande により高

統計で測定されている [1,2]。ニュートリノ振動により低エネルギーでスペクトルの歪みが引き起こされると予測されているが、いまだ検出には至っていない。さらに統計・系統誤差を減らしスペクトルの歪みを検出すべく Super-Kamiokande での実験が続けられている。

Super-Kamiokande のデータで、エネルギーに依存した系統不確かさは、エネルギー較正・エネルギー分解能・ $^8\text{B}$  スペクトルに関するもので、それぞれ同程度である。ここでいう  $^8\text{B}$  スペクトルとは、 $^8\text{B}$  からニュートリノが放出された瞬間のスペクトルの予測精度であり、核構造が寄与するため原子核実験のデータを反映させる事で精度を上げる以外に方法は無い。β崩壊の終状態エネルギー分布は様々な実験で測定されているが[3]、現在の系統不確かさの主要因である高次の行列要素(弱磁気項・軸性電荷)をβ崩壊の測定で決定した事はなかったが、最近のβ線角度分布実験[4]により、始めて弱磁気項・軸性電荷を直接決定できるようになった。

[1] J.N. Bahcall et al., New Journal of Physics 6 (2004) 63.

[2] The Super-Kamiokande Collaboration, Phys. Rev. D 73, 112001 (2006); Phys. Rev. D 78, 032002 (2008).

[3] C.E. Ortiz et al., Phys. Rev. Lett. 85, 2909 (2000); W.T. Winter et al., Phys. Rev. Lett. 85, 2909 (2003).

[4] T. Sumikama et al., Phys. Lett. B 664, 235 (2008).

(2) 2体β崩壊(電子捕獲・束縛状態β崩壊)による単一エネルギーのニュートリノを、逆反応で共鳴吸収させる実験は、短基線ニュートリノ振動実験として、注目されている[5]。メスバウアー効果をニュートリノで起こす実験であるため、通常メスバウアー効果で観測されている様々な現象が検討され、共鳴吸収断面積の評価が行われていた。2体β崩壊のニュートリノに特有の現象については殆ど議論されておらず、指摘すらされていなかった。

[5] R.S. Raghavan, Phys. Rev. Lett. 102 (2009) 091804.

## 2. 研究の目的

(1) ニュートリノ振動等の標準理論を越えるニュートリノの性質を研究する上で、太陽ニュートリノスペクトルは最も重要な測定量の一つである。現在、ニュートリノ振動に関わる世代間質量差、混合角の精度を上げるために、Super-Kamiokande 検出器を用い太陽ニュートリノの一つである  $^8\text{B}$  ニュートリノのエネルギースペクトルを高精度で決定する実験が進行している。測定精度が上がるにつれ、 $^8\text{B}$  からニュートリノが出た瞬間のスペ

クトルの精度が最も大きな系統不確かさの1つとなっている。 $^8\text{B}$  ニュートリノスペクトルは原子核実験を反映し導出される。高精度でニュートリノスペクトルを決めるには、次の2つの実験が必要である。

- ①  $^8\text{B}$  β崩壊後に放出されるα線スペクトル
- ② 高次の禁止遷移の寄与を決めるβ線角度分布測定

この研究の目的は、②に関連し、最近我々グループで始めて測定した全く新しいβ線角度分布[4]をニュートリノスペクトルに反映させ、スペクトルの精度を上げる事である。(2) ニュートリノの共鳴吸収に関しては、逆反応の条件を満たすために、最外殻の電子がベータ崩壊に寄与する必要がある。しかしながら、最外殻の電子の結晶中での振る舞いは全く考慮されていなかった。電子構造の第1原理計算の結果を元に、共鳴吸収断面積にどのような影響を及ぼすかを調べる事が目的である。

## 3. 研究の方法

(1) β線角度分布実験[4]では、整列相関項を導出している。この整列相関項には、様々な禁止遷移の寄与が混在しているため、β線遅延α線間の角度分布実験[6]と組み合わせ禁止遷移の寄与を分離する。

整列相関項・β-α角度相関項は、以下の  $K(E,s)$  の式にそれぞれ  $s=0, 1$  を代入する事で得られる。

$$K(E,s) = -\frac{E}{3M_n} \left[ \frac{1}{A} \pm \frac{b}{Ac} - \frac{d_1}{Ac} \mp \frac{g_{11}}{g_A} + \frac{(-)^s}{\sqrt{14}} \left\{ \pm \frac{f}{Ac} \frac{E_0 + 2E}{E_0} + \frac{3}{2A^2c} \frac{j_2}{M_n} \frac{E_0 - 2E}{E} \right\} - \frac{3}{\sqrt{35}} \frac{j_3}{A^2c} \frac{E}{M_n} \right], \quad (1)$$

ここで、各項は、

$c$ : ガモフ・テラー項、

$b$ : 弱磁気項、

$d_1$ : 軸性電荷、

$f, j_2, j_3$ : 2次の禁止遷移

$g_{11}$ : 誘導テンソル項(Gパリティ保存の下ではゼロ)

である。符号は、上が  $^8\text{Li}$ ( $^8\text{B}$  の鏡映核)、下が  $^8\text{B}$  である。それぞれ、符号が異なるので、鏡映核 ( $^8\text{Li}, ^8\text{B}$ ) の2種類の角度相関項を使うと、分離が可能である。

それぞれの項の和、差を作り、ニュートリノスペクトルの歪みの原因となる弱磁気項と軸性電荷の項を、世界で始めてβ崩壊の測定結果から直接導出する。

[6] R.D. McKeown, G.T. Garvey, and C.A. Gagliardi, Phys. Rev. C 22, 738 (1980).

(2) ニュートリノ共鳴吸収の評価

共鳴吸収を起こす良い条件を与える、 $^{181}\text{W}$  か

ら  $^{181}\text{Ta}$  の電子捕獲崩壊（半減期 121 日、 $Q$  値 188keV）と、盛んに議論されている[5] 3 重水素から  $^3\text{He}$  への束縛状態ベータ崩壊を例として選び、Korringa-Kohn-Rostoker (KKR) グリーン関数法により電子状態を計算し、孤立原子系と結晶中原子での最外殻電子状態の違いとその影響を議論した。

#### 4. 研究成果

(1) ニュートリノスペクトルに寄与する禁止遷移行列要素

整列相関項および  $\beta$ - $\alpha$  角度相関項は、図 1 の様になり、式(1)にあるように、4 種類の相関項で違いが現れている。

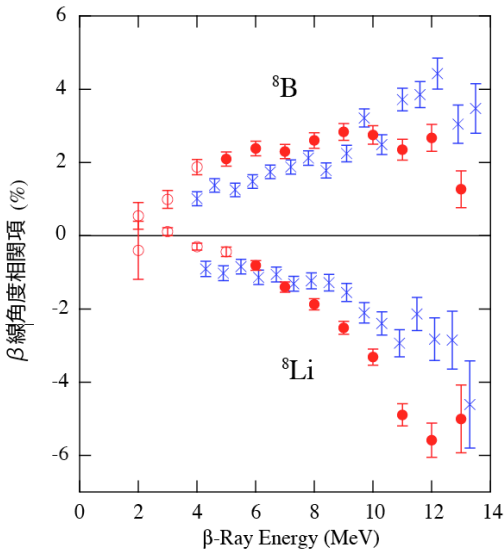


図 1  $\beta$  線角度相関項。赤は整列相関項で、青は  $\beta$ - $\alpha$  角度相関項[6]。それぞれ上が  $^8\text{B}$  で下が  $^8\text{Li}$  の結果。

鏡映核間の差をとると、 $b/Ac$ ,  $f/Ac$  の寄与を導出することが出来る。それが、図 2 である。

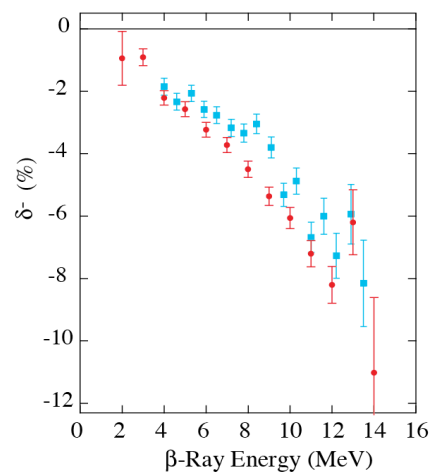


図 2  $\beta$  線角度分布の鏡映核間の差。赤は整列相関項で、青は  $\beta$ - $\alpha$  角度相関項[6]。

赤と青のデータには差が見えており、これは、 $f/Ac$  の寄与を示している。

以前の  $^8\text{B}$  ニュートリノスペクトル導出[7] では、 $b$  をアナログガンマ遷移の実験から求め、図 2 の青の結果を用いて、 $b/Ac$  を評価していた。この時、 $f/Ac$  がゼロであるという仮定を用いて  $b/Ac$  を評価していたため、 $f/Ac$  の寄与の分違っていることになる。鏡映核間の差（図 2）の平均をとると、 $b/Ac$  が抜き出せる（図 3）。

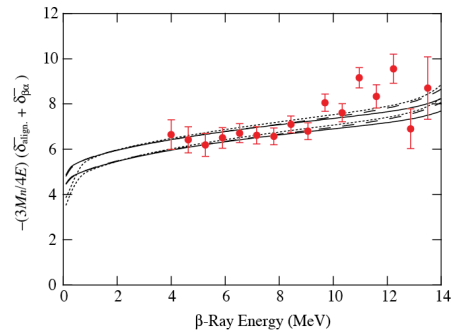


図 3 導出した弱磁気項  $b/Ac$ 。アナログガンマ遷移から導出した曲線[7, 8]も書かれている。2 本の線は不確かさ ( $1\sigma$ ) による範囲を示す。

軸性電流保存則(CVC)仮説を使うとアナログガンマ遷移からも導出でき（図 3 の曲線）、今回の結果と比較すると 10 MeV から上で少しずれが大きくなっているのがわかる。この結果を、CVC 仮説の検証という観点でまとめ、Physical Review C へ投稿し掲載が決定した(雑誌論文②)。

さらに、図 3 の結果から直接  $b/Ac$  をエネルギーの関数として導出する事を行った。（図 4）

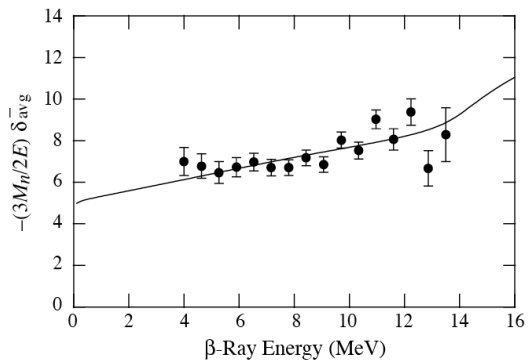


図 4  $b/Ac$  と  $R$  行列を用いて行ったフィット。

14 MeV より大きいところでは、 $\beta$  線のエンドポイントに近いため、データが無い。したがって、14 MeV 周辺で直線が曲がっているが、不確かさが非常に大きくエネルギー依存性ははっきり決められていない。

ニュートリノスペクトルの計算には、 $\beta$  遅延  $\alpha$  線スペクトルの結果を用いる必要があ

る。今回は、Winter らの結果[7]を用いた。Bhattacharya らの結果[10]と、非常に良い一致を示しているからである。Winter らが計算したニュートリノスペクトルを、再現する事に成功した。今回の系統不確かさの解析も行った結果をまとめた論文を、現在執筆中である。

[7] W. T. Winter, S. J. Freedman, K. E. Rehm, and J. P. Schiffer, Phys. Rev. C 73, 025503 (2006).

[8] L. De Braekeleer, E. G. Adelberger, J. H. Gundlach, *et al.*, Phys. Rev. C 51, 2778 (1995).

[9] T. Sumikama *et al.*, Phys. Rev. C (掲載決定)

[10] M. Bhattacharya, E. G. Adelberger, and H. E. Swanson, Phys. Rev. C 73, 055802 (2006).

(2) ニュートリノ共鳴散乱実験の検討  
逆反応を起こすためには、最外殻電子が寄与する必要がある。また、電子捕獲に主要な寄与をするのは、s 電子である必要もある。<sup>181</sup>Ta-<sup>181</sup>W の場合、それは、6s 電子である。電子の Ta 金属中でのバンド構造を計算した結果が図 5 である。本来の共鳴の幅  $10^{-23}$ eV より非常に広い幅(数 eV)を持っており、6s 電子捕獲では、数 eV の幅のニュートリノが放出される事になる。これによる共鳴吸収断面積の減少係数は、 $10^{-24}$  となり、この反応が非常に起こりにくくなる事がわかった。

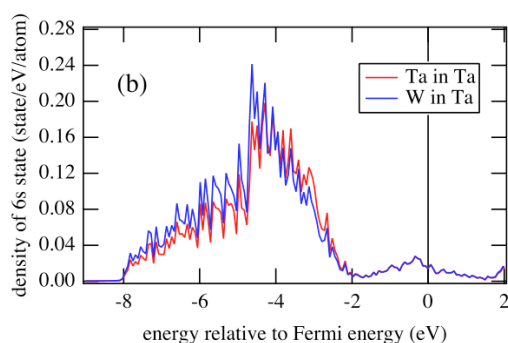


図 5 Ta, W の最外殻 6s 電子の Ta 金属中の状態密度

3 重水素-<sup>3</sup>He の場合[5]は、図 6 のようになった。1s 電子のエネルギーの位置には、Nb 金属の電子バンドは存在せず、1 原子のみ存在している場合、鋭いピークとなる事がわかった。しかしながら、多数の原子を金属に入れると、お互いに相互作用し始め共鳴の幅が数 eV になって行く事がわかった。この場合でも、吸収を観測できないほど断面積が減少

する事がわかった。この成果は Physics Letters B に出版されている(雑誌論文①)。

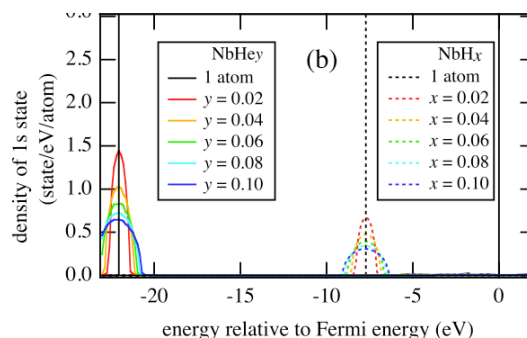


図 6 Nb 金属中の H, He の 1s 電子の状態密度。x および y は H, He の濃度を表す。

## 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 2 件)

① D. Suzuki, T. Sumikama, et al. (1 1 人中 2 番目), Resonant neutrino scattering: An impossible experiment?, Physics Letters B, 査読有、687 巻、2010、144-148

② T. Sumikama, et al. (1 2 人中 1 番目), Test of the Conserved Vector Current Hypothesis by  $\beta$ -ray Angular Distribution Measurement in the Mass-8 System, Physical Review C, 査読有、掲載決定

[学会発表] (計 2 件)

① 炭竈 聡之、Recoil order correction of <sup>8</sup>B beta decay for solar neutrino spectrum 3rd Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan 2009 年 10 月 16 日、Hawaii's Big Island, Hawaii, USA

② 炭竈 聡之、共鳴ニュートリノ散乱実験の実現可能性、日本物理学会 2010 年秋季大会、2010 年 9 月 14 日、北九州工業大学戸畑キャンパス

## 6. 研究組織

(1) 研究代表者

炭竈 聡之 (SUMIKAMA TOSHIYUKI)  
東京理科大学・理工学部・物理学科  
研究者番号：20392003

(2) 研究分担者

なし

(3) 連携研究者

なし