

研究の概要

東北大学大学院理学研究科物理学専攻 (平成 24 年 11 月修了)

丸藤(寺島) 亜寿紗

ニュートリノと二重ベータ崩壊

標準理論における素粒子の一つ、ニュートリノは、全てのクォーク、レプトンの中で唯一電荷を持たず、質量はゼロとされてきた。しかし、近年のニュートリノ振動実験から、ニュートリノには小さくも有限な質量があることが明らかになり、それぞれの世代間での“質量の二乗の差”が精密に測定されるようになってきている。この有限な質量がニュートリノに関する二つの新たな疑問を呈する。一つは、ニュートリノのマヨラナ ($\nu = \bar{\nu}$) 性、そして、もう一つが、ニュートリノの絶対質量と質量の順序である。全ての素粒子の中で唯一中性のニュートリノにのみ、マヨラナ粒子の可能性が残されているが、未だ検証されていない。もしニュートリノがマヨラナ粒子であれば、右巻き粒子と左巻き粒子で別々の質量を与える事が出来、また、レプトン数は保存しない。これらの事実から、ニュートリノの質量が他の素粒子に比べて非常に軽い事や、宇宙が物質で出来ている謎を説明出来る(シーソー機構、レプトジェネシス)可能性がある。

ニュートリノのマヨラナ性、及び有効質量を実験的に調べられるのが、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊事象の探索である。一般に、二重ベータ崩壊は一つの原子核内の2個の核子が同時にベータ崩壊を起こして電子とニュートリノを放出し、原子番号が2大きくエネルギー的に安定な原子核に変わる現象であり、連続スペクトルを成す ($2\nu\beta\beta$ 崩壊)。しかし、ニュートリノがマヨラナ粒子であれば、レプトン数を保存しない、ニュートリノを伴わない反応 ($2n \rightarrow 2p + 2e^-$) も起こりえて、崩壊核の Q 値に線スペクトルを作る ($0\nu\beta\beta$ 崩壊)。これらの崩壊の半減期は非常に長く、 $2\nu\beta\beta$ 崩壊では十数種類の崩壊核で 10^{19} - 10^{24} 年といった値が測定されている。一方、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊は理論的に予測されているものの、一つの(議論の余地のある)観測を除いて、未だ確認されていない。半減期の下限値は、崩壊核によるが、 10^{24} - 10^{25} 年程度となっている。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊では実験の観測値である崩壊率(半減期 $T_{1/2}^{0\nu}$ の逆数)は、ニュートリノの有効質量 $\langle m_{\beta\beta} \rangle \equiv |\sum_i U_{ei}^2 m_{\nu_i}|$ と以下の様に結びついている。

$$(T_{1/2}^{0\nu})^{-1} = G_{0\nu} |M^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2$$

ここで、 $G_{0\nu}$ は位相空間因子、 $M^{0\nu}$ は核行列要素である。有効質量は、ニュートリノ振動実験から、一番軽いニュートリノの関数として描け、存在出来る範囲が限定される。これによって、質量の階層構造(固有質量の順序が $m_3 > m_2 > m_1$ の正常階層(有効質量 20meV 以下)か、 $m_2 > m_1 > m_3$ の逆階層(20-60meV)か、または、3種類が同程度に重い縮退構造(60meV 以上)か)、及び絶対質量へのヒントが得られる。実際の実験では半減期の長さが大量の崩壊核と低バックグラウンド(BG)環境を要求し、100kg 以上の崩壊核を用いることで $0\nu\beta\beta$ 崩壊を観測したという主張(数百 meV)のテスト及び縮退構造の探査が行える。100kg 以上の崩壊核を使用する実験は次世代実験と呼ばれており、2011年に二つの実験がようやく測定を開始した。一つが KamLAND-Zen(カムランド禅)である。

KamLAND-Zen

KamLAND-Zen は既存のニュートリノ検出器 KamLAND の大容量、低バックグラウンド環境を利用して二重ベータ崩壊実験を行っている。KamLAND は約 1,000 トンの超高純度液体シンチレータ(LS)を用いて低エネルギーのニュー

トリノを観測する大型光検出器で、岐阜県飛騨市の神岡鉱山内、地下 1,000m に設置されている。反応で放出されたエネルギーはシンチレーション光に変換され、光電子増倍管(PMT)で観測される。KamLAND-Zen は、二重ベータ崩壊実験の中では最大量の崩壊核、約 300kg の ^{136}Xe (Q 値 2.458 MeV) を液体シンチレータに溶かし(Xe-LS)、半径 1.54m のインナーバルーン(IB)に入れ、KamLAND の中心に設置している(図 1)。IB は 25 μm の厚さの、放射性不純物含有量を

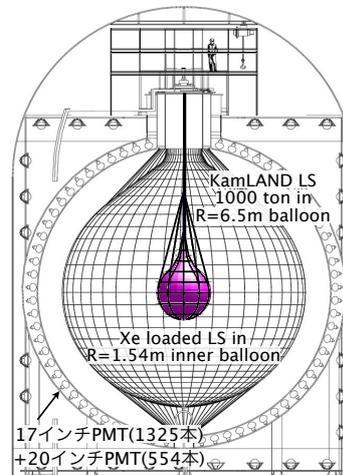


図 1: KamLAND-Zen 検出器の概略図

低く抑えた特注フィルム (^{238}U , ^{232}Th , $\text{K} \sim 10^{-12}\text{g/g}$) で、BG を増やさないため、接着剤を使わず、熱溶着で形成されている。キセノンは液体シンチレータに容易に溶解、抽出する事も可能、濃縮や純化の手法も確立している点に加え、 $2\nu\beta\beta$ 崩壊の半減期が長く、検出器の分解能への要求が他の崩壊核に比べて厳しくないと言った利点がある。KamLAND の改造は 2011 年 8 月に行われ、9 月からデータ取得を開始した。本研究では、2011 年 10 月 12 日から 2012 年 1 月 2 日までの 77.6 日分のデータ及び、2012 年 2 月 9 日までに測定された 112.3 日分のデータを用いて、ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊の探索を行い、2 本の論文を発表した。

エネルギー較正

Xe-LS におけるエネルギー較正は 3 種類の線源を用いて行った。一つは人工線源 $\text{ThO}_2\text{-W}$ からの ^{208}Tl (2.614MeV γ 's) で、エネルギースペクトルとモンテカルロシミュレーションから、エネルギー分解能 $\sigma = (6.6 \pm 0.3)\% / \sqrt{E(\text{MeV})}$ が得られている。また、宇宙線ミューオンによる原子核破砕反応で生成された中性子が陽子に捕獲された際に放たれる 2.225MeV ガンマ線(検出器内に一様分布)を用いて、事象の位置依存性、時間変化を調べ、どちらも $\pm 1\%$ 以内で安定していることがわかっている。また、Xe-LS を IB に注入する際に混入した ^{222}Rn ($\tau=5.5$ 日) から生じる ^{214}Bi ($\beta + \gamma$) と ^{208}Tl から、エネルギーの非線形効果も見積もり、エネルギースペクトルをフィットする際に制限を与えている。位置分解能は、事象の動径方向の分布から $\sigma = 15\text{cm} / \sqrt{E(\text{MeV})}$ と見積もった。

事象の選定とバックグラウンド

事象の選定は、非物理事象の除去と BG の除去の二つから

なる。BGは物理事象であり、基本的に落とす事が出来ないが、Bi-Poのように連続した二つの事象が時間空間相関を持っている場合、二つのエネルギースペクトルも調べる事によって、除去する事が出来る。特に ^{214}Bi は $0\nu\beta\beta$ 崩壊の領域でのBGとなるが、 ^{214}Po との時間空間相関を調べる事で99.7%除去している。

有効体積は、IB表面にBGが多く見られたため、半径1.2メートル以内とした。Xe-LSで 7.24m^3 、 ^{136}Xe で125kgに相当する。最大の系統誤差は有効体積の見積もりからくるもの(5.2%)で、合計の系統誤差も5.2%となっている。

$2\nu\beta\beta$ 崩壊の領域($1.2 < E < 2.0$ MeV)ではIB上に ^{134}Cs 及び ^{137}Cs が分布している事がわかっている。IBの製作が仙台で行われた点、 ^{134}Cs と ^{137}Cs の比(~ 0.8)が仙台や福島の土壌サンプルの測定結果と一致している点などから、これらの原子核は福島原発事故での放射性降下物と見られている。

$0\nu\beta\beta$ 崩壊の領域($2.2 < E < 3.0$ MeV)では予期しないバックグラウンドが見られた(この領域にバックグラウンドがなく、ピークが $0\nu\beta\beta$ 崩壊で説明出来るという仮定は 5σ 以上の信頼度で否定されている)。このピークは、有効体積中、一日に数イベント見られ、Xe-LS中に一様に分布している。データからベータ線かガンマ線かを区別する事は困難であった。また、量が少なすぎて一般的な分析での崩壊核の同定は不可能である。このBGの起源は、長寿命、もしくは宇宙線ミューオンによる原子核破碎反応で生成され常に供給される、何らかの放射性不純物と考えられる。長寿命の放射性不純物(半減期30日以上)の候補は、全ての崩壊核及び崩壊過程を含んだデータベース(ENSDF)を用いて探索したところ、以下の4種類となった(表1)。これら

表 1: 4核種の基本的性質

崩壊核	崩壊モード	Q値 (MeV)	半減期
$^{110}\text{Ag}^m$	$\beta^- + \gamma$	3.01	250 日
^{88}Y	電子捕獲	3.62	106 日
^{208}Bi	電子捕獲	2.88	3.68×10^5 年
^{60}Co	$\beta^- + \gamma$	2.82	5.27 年

の崩壊核で、Xe-LSを作る装置が汚染されていた可能性を調べたが、そのような痕跡は見られなかった。これら4つの崩壊核は全てフリーパラメータとしてフィットに用いている(^{60}Co のみエネルギースペクトルの形から大きく制限される)。それぞれの半減期の違いから崩壊核の同定を行うには統計が不十分で、はっきりと区別する事はできなかった。一方、原子核破碎反応で生成される原子核(半減期30日以下)は、ミューオンとの時間相関を用いた解析や、反応断面積を考慮すると、地下での宇宙線による原子核破碎反応からピークが出来る可能性は非常に小さい事が明らかになった。キセノンはロシアで濃縮されて飛行機で日本に運ばれたため、上空での原子核破碎反応で、ピークを生成するような原子核が出来ていた可能性もある。定量的な見積もりは出来ないものの、どのような原子核が出来たか調べたところ、ピークを生成する原子核として $^{110}\text{Ag}^m$ と ^{88}Y が残る事が判明した。また、土壌サンプルからは、放射性降下物による $^{110}\text{Ag}^m$ が検出されている。スペクトルの形も考慮すると、断定は出来ないものの、ピークは $^{110}\text{Ag}^m$ である可能性が高いと言える。

^{136}Xe 二重ベータ崩壊半減期の測定

図2に ^{136}Xe 38.5kg.yrのexposureでのエネルギースペクトルを示す。赤紫色で示された $2\nu\beta\beta$ 崩壊はBGに比べて

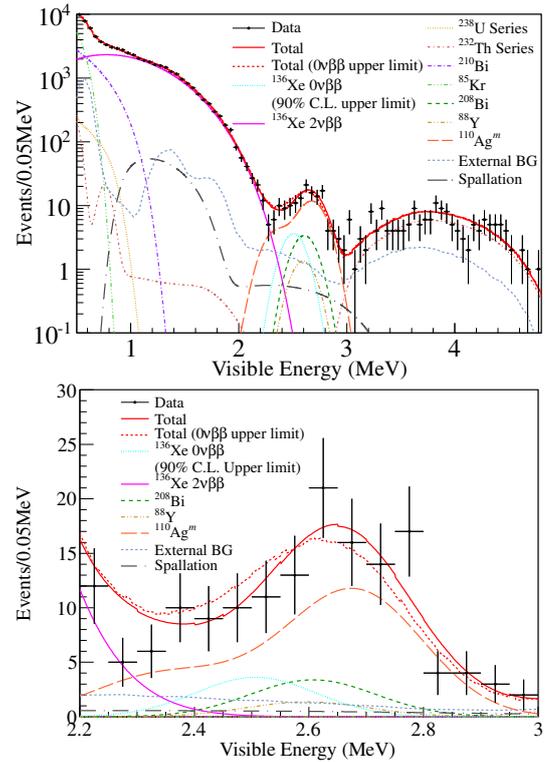


図 2: エネルギースペクトル(上 $0.5 < E < 4.8$ MeV、下 $2.2 < E < 3.0$ MeVの拡大図)

非常にクリアで、 ^{136}Xe で最も精密に測定された半減期、

$$T_{1/2}^{2\nu} = 2.30 \pm 0.02(\text{stat}) \pm 0.12(\text{syst}) \times 10^{21} \text{ yr}$$

が得られた。これは、先行研究であるEXO-200の結果とよく一致しており、EXO-200以前の下限值でしか得られていなかった半減期($\sim 10^{22}\text{yr}$)より有意に短いことが明らかになった。また、この結果から $2\nu\beta\beta$ 崩壊の核行列要素($M^{2\nu}$)を計算する事が出来、 $M^{2\nu} = 0.018 \text{ MeV}^{-1}$ となった。 $M^{2\nu}$ は、計算がより複雑で不定性の大きい $M^{0\nu}$ を評価する際に役立つ情報となる。

$0\nu\beta\beta$ 崩壊の半減期の下限值(水色)及びニュートリノの有効質量の上限値は90%の信頼度で以下の様になった。

$$T_{1/2}^{0\nu} > 6.2 \times 10^{24} \text{ yr}$$

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle < (0.26 - 0.54) \text{ eV}$$

核行列要素の計算にはQRPAモデルを使用している。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊を観測したという主張を排除するまでには至らなかったものの、最初の結果で世界でトップレベルの制限を付ける事に成功した。今後は、BGの除去と観測時間の増加によって更なる感度向上を目指す。

論文リスト

- A. Gando *et al.*, Phys. Rev. C 85, 045504 (2012)
- A. Gando *et al.*, Phys. Rev. C 86, 021601(R) (2012)
- 他 6 編