

KamLAND-Zen による逆階層構造領域での $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索の開始

東北大学ニュートリノ科学研究センター

尾崎 秀義

ozaki@awa.tohoku.ac.jp

2023 年 (令和 5 年) 2 月 6 日

1 はじめに

つい先日の 2023 年 1 月末、Physical Review Letters に KamLAND-Zen の最新結果の論文が掲載された [1]。といっても論文のプレプリントは 2022 年 3 月には arXiv に載っていたわけだが…。この記事では、なぜ掲載までそんなにも時間がかかったのかは説明しない。PRL では伝えきれなかったエピソードや詳細を少しでも分かり易いように届けることを目標としたい。この記事を見て論文を見てみようかという人が増えると幸いである。

KamLAND 共同研究者グループは、2011 年に二重ベータ崩壊核 ($\beta\beta$ 崩壊核) である ^{136}Xe を溶かし込んだ液体シンチレータを入れて、ニュートリノレス二重ベータ崩壊 ($0\nu\beta\beta$ 崩壊) 探索をはじめた。2019 年からは、 ^{136}Xe の量をこれまでの約 2 倍の 745 kg に増やして観測を行なっている。2021 年の夏までのデータを解析した結果が今回公表された論文である。以前の高エネルギーニュース [2] で検出器のアップグレードについては十分紹介できたと信じて、今回は解析手法や物理結果に焦点をあてたい。

2 $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索の物理

2.1 マヨラナニュートリノとニュートリノ質量

1930 年にパウリによって予言されたニュートリノは、物質を構成する素粒子の中で、唯一電荷を持たないフェルミオンである。そのためニュートリノだけは、1937 年にイタリアの物理学者エッttore・マヨラナが提唱した粒子と反粒子の区別のない「マヨラナ粒子」である可能性が残される。2015 年に、スーパーカミオカンデ等がノーベル賞を受賞するきっかけとなった発見「ニュートリノ振動」によって、ニュートリノには非常に小さな質量があることがわかっている。しかし、まだニュートリノの絶対質量はわかっていない。観測宇宙論などから

ニュートリノの質量に、制限が与えられていて、3 つ合わせても 120 meV 以下しかないとわかっている。これは、ほかの物質の素粒子である電子やクォークなどと比べると 6 桁以上も軽い。このような質量を持つためには、ディラック粒子であればヒッグスとの結合定数「湯川定数」が非常に小さくなければならない。もちろん、われわれの宇宙では、このくらいの調整は不自然でないと感じる方もいるだろう。しかし、ニュートリノがマヨラナ粒子であれば、よく知るニュートリノ質量 (m) は、ディラック質量 (m_D) と重いマヨラナニュートリノ質量 (M_R) を用いて、

$$m \sim \frac{m_D^2}{M_R} \quad (1)$$

で表される。つまり、 M_R が大統一スケール $O(\sim 10^{15} \text{ GeV})$ であれば、わりと自然と非常に軽いニュートリノ質量が導き出される。左巻きのニュートリノと結合する右巻きのニュートリノは、その重さゆえに現在の宇宙では作り出されず、できたとしても非常に短命となるため、見つかっていない。こちらの方が自然だなとか面白いと感じる人は、ぜひ一緒にマヨラナニュートリノを探索しましょう。ちなみに、今回私が紹介したのは、Type-I のシーソー機構といわれるモデルにあたる。

2.2 レプトジェネシス

さらにマヨラナニュートリノは、われわれの宇宙が存在できている理由でもある物質優勢宇宙の謎を解く鍵になるかも知れない。今自分たちの住んでいる宇宙は物質 (粒子) で構成されていて、反物質 (反粒子) が存在しないとされる。この証拠は、宇宙の軽元素観測とビッグバン元素合成の比較や宇宙マイクロ波背景放射 (CMB) のゆらぎの観測などから得られている。物質優勢宇宙を達成するためには、サハロフの 3 つの条件が必要となる。(1) バリオン数が破れていること、(2) CP が破れていること、(3) 平衡状態からの離脱、である。標準模型の中でバリオン数を破る反応というのは、CKM 行列などがあ

るが、その破れの大きさは現在の宇宙のバリオン数を説明するには十分ではないと考えられる。レプトジェネシスでは、以下によってその条件が満たされる。まず、宇宙初期の高温状態で存在する重い右巻きマヨラナニュートリノの崩壊によりレプトン数が生成される。この逆反応は宇宙が冷えるに従い起こらなくなるのでレプトン数は保存しなくなる。宇宙が高温・高エネルギー時におこるレプトン数とバリオン数を保存しないスファレロン過程により、レプトン数がバリオン数へと移される。これが、熱的なレプトジェネシスで物質優勢を作り出す方法である。シーソー機構に加えて、重いマヨラナニュートリノが1人2役果たせるので、標準模型から比較的シンプルな拡張ですんでいる。もちろん、これ以外にもバリオジェネシスを含め様々な可能性があり、どれが正解かはこれから検証されるべき課題である。

2.3 $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索と実験の現状

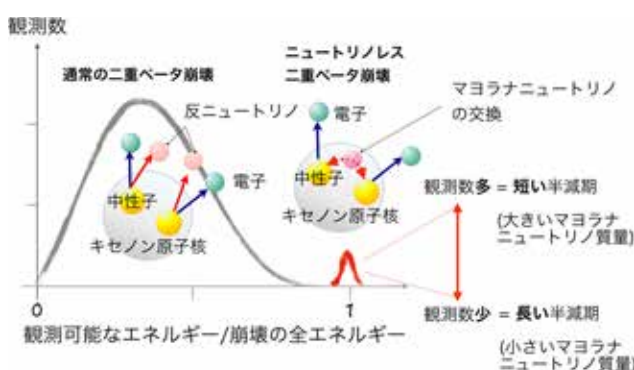


図 1: $\beta\beta$ 崩壊の概念図。 $2\nu\beta\beta$ 崩壊の連続スペクトル（左側）と、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊のピーク（右側）が描かれている。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊は未発見ではあるが、観測数が多い場合は半減期は短く $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ は大きくなる。

ニュートリノがマヨラナ粒子かどうか検証するには「ニュートリノレス二重ベータ崩壊の探索 ($0\nu\beta\beta$ 崩壊探索)」を行うのが現実的である。 $\beta\beta$ 崩壊は、1つの原子核の中で2つのベータ崩壊が同時に起こる現象である。通常、 $\beta\beta$ 崩壊が起こると、2つの電子と2つの反ニュートリノが放出される。ニュートリノがマヨラナ粒子である場合だと、ごく稀に2つの電子のみが放出される崩壊モード ($0\nu\beta\beta$) も起きる。図1を見ていただきたい。 $2\nu\beta\beta$ 崩壊では、ニュートリノがエネルギーを持ち出す分観測エネルギーは連続スペクトルになる。一方で、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊が起これば、ニュートリノが検出器からエネルギーを持ち出さないため、崩壊のQ値にピークが観測されるはずである。この信号を見つければ、ニュートリノがマヨラナ粒子だと証明される。 $\beta\beta$ 崩壊を起こす原子核の種類は限られている。それでも世

界中で様々な最先端の検出技術を使った実験が計画・実施されている。非常に稀な信号を探す実験なので、発見には大量の $\beta\beta$ 崩壊原子核が必要になる。つまり、ターゲットになる $\beta\beta$ 崩壊原子核は、大量に利用可能なものを選ばないと実験装置の建設自体が物理的に不可能となる。さらに、 $\beta\beta$ 崩壊の線源自体に含まれる放射性不純物も問題になるので、純化が可能なものが好ましい。最後に、崩壊のQ値が高いことも重要である。Q値が、自然放射線を避けられるほど高いエネルギーを持つと、探索範囲にバックグラウンドが少なく有利になるのだ。

では実験装置に求められる性能は何があるだろうか。まずノイズ信号があると探している信号が埋もれてしまうため、検出器にはバックグラウンドが低いことが求められる。宇宙線ミュオンは、それ自身がバックグラウンドとなるだけでなく原子核破碎反応を通して様々な不安定核種を作る。そのため、検出器は通常地下に建設される。次にウランやトリウムなどの天然放射性同位体の崩壊系列には様々なバックグラウンドが存在する。特にウラン系列の ^{214}Bi やトリウム系列の ^{208}Tl の崩壊は、高エネルギーガンマ線のノイズ信号を作るので極力排除したい。そしてエネルギー分解能も重要である。ピークの探索領域が狭くなれば、それだけバックグラウンドを抑えられる。さらに、必ず避けられないバックグラウンドに $2\nu\beta\beta$ 崩壊の分解能による染み出しがあるが、それはエネルギー分解能の約5.8乗¹で効いてくる。つまり、エネルギー分解能が2倍良くなれば $2\nu\beta\beta$ のバックグラウンドが2桁くらい下がることを意味する。

さらに近年は、粒子識別 (PID) ができるかどうか低バックグラウンド化に重要なため技術開発が盛んになっている。TPCなどの検出器では、トラッキング技術が開発されている。トラッキングができると、ガンマ線とベータ線の弁別が容易にできる。さらに、2本のベータ線を見つことができると、 $\beta\beta$ 崩壊と ^8B 太陽ニュートリノの電子散乱事象の1電子信号が見分けられる。シンチレーティングボロメータ検出器では、ボロメータ (熱) とシンチレーション (光) の両方を検出することで粒子識別ができる。シンチレーション光は、エネルギー損失が局所的に大きい場合にクエンチ (消光) するため、粒子によって光/熱の検出比が異なる。おもに、検出器表面などのアルファ線を除去する目的で開発が進んでいる。液体シンチレータ検出器でも、波形などによるベータ線とガンマ線の弁別が可能である。本記事でも KamLAND-Zen の開発した機械学習を用いたベータ線とガンマ線の識別を紹介したい。さらに KamLAND-Zen では難しいが、将来的にはチェレンコフ光を利用できると期待して

¹ 平坦なスペクトルのバックグラウンドに対しては、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の関心領域が狭まる分だけ減少する。一方で、 $2\nu\beta\beta$ 崩壊のように分解能が0であれば完全に分離できるバックグラウンドは、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の関心領域に染み出す量もエネルギー分解能に大きく依存しているため約5.8乗という数値になっている。

いる。それにより太陽ニュートリノによる電子散乱事象のベータ線バックグラウンドでも太陽方向を用いて除去できる可能性がある。

$0\nu\beta\beta$ 崩壊探索でピークを見つけることができると、その崩壊レートつまり半減期がわかる。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊のメカニズムもいくつか考えられているが、一般的なのは、軽いマヨラナニュートリノの交換である。この時、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の半減期の逆数は、有効マヨラナニュートリノ質量 ($\langle m_{\beta\beta} \rangle = |\Sigma_j m_j U_{ej}^2|$) の2乗に比例した式で表される。

$$\frac{1}{T_{1/2}^{0\nu}} \propto |M_{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2 \quad (2)$$

ここで、 $M_{0\nu}$ は崩壊の起こりやすさを表す核行列要素で理論計算から求められている。この式からわかるように、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊レートからニュートリノの質量の情報が得られる。ニュートリノの質量階層が標準階層 (NO: $m_1 < m_2 < m_3$) か逆階層 (IO: $m_3 < m_1 < m_2$) かで、 $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ の取れる値の範囲も異なっており、IOの際は、15 meV ~ 50 meV の範囲で、最も軽いニュートリノ質量が小さい時に依存しない形になる (IO バンドと呼ぶ)。先に結果のネタバレになってしまうが、最後のページの図 10 の横のバンドである。この IO バンドをカバーするところまでが、次世代検出器の探索目標となっている。バックグラウンドのない検出器を作って、だいたい 1 ton から数 ton くらいの $\beta\beta$ 崩壊原子核を用いた実験が必要となる。

$0\nu\beta\beta$ 崩壊探索の検出器開発の指針としては、大雑把に 2 つの戦略がある。1 つはまず大型の検出器を作って、その後バックグラウンドを減らすために、極低放射化や PID など低バックグラウンド技術を開発するという方針である。現在、最高感度で観測を行なっている KamLAND-Zen 実験や CUORE などのボロメータ実験がこれにあたる。KamLAND-Zen は、検出器の高分解能化に向けたアップグレード KamLAND2-Zen を計画している。CUORE は、先ほど紹介したシンチレーティングボロメータへのアップグレードを目指している。

もう一つは、まず小さな検出器でバックグラウンドフリーを達成して、それを複数個作ったりすることで大型化するというものである。Ge 半導体検出器 GERDA は、崩壊核量は約 40 kg と小型ではあるが、ほぼバックグラウンドフリーの検出器作成を達成した。そのおかげで KamLAND-Zen に次ぐ高感度の結果を残した。現在は、競合実験と合併して LEGEND 実験に移行中である。200 kg のフェーズ:LEGEND-200 を行い、その後の 1000 kg フェーズで IO バンドの完全探索を目指す。

3 KamLAND-Zen 実験

反ニュートリノ検出器 KamLAND は、放射性不純物が非常に少なく、稀な現象を探索する実験に適している。KamLAND は、約 1 kton もの液体シンチレータ (LS) を使った検出器で、岐阜県飛騨市神岡鉱山の地下 1000 m にある。原子炉から飛来する反電子ニュートリノの振動を検出することが建設当初の目的であった。現在は、多目的検出器として活躍しており、天体ニュートリノの観測や地球ニュートリノの観測も行っている。近年、地球ニュートリノに関する結果も出ており、ウランとトリウム成分のスペクトロスコピーを行ったので、こちらでも紹介しておく [3]。KamLAND では、原子炉ニュートリノや地球ニュートリノなどの反ニュートリノ検出のための遅延同時計測の観測チャンネルだけでなく、シングルイベントの観測チャンネルもある。こちらでは、 ^8B 太陽ニュートリノの観測や電荷をもった暗黒物質探索が行われている。このチャンネルで $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索も行われる。

KamLAND-Zen 検出器は、KamLAND の中心に、直径 3 m (後に 3.8 m) のミニバルーンを用意して、その中へ $\beta\beta$ 崩壊核の同位体 ^{136}Xe を液体シンチレータと一緒に入れた (キセノン液シン: XeLS) 構造になっている。図 2 が、KamLAND-Zen 800 検出器である。ミニバルーンは支持ベルトとコルゲート管で支えられており、ミニバルーンの内側は、非常に高価な ^{136}Xe を逃さないように密封されている。

KamLAND-Zen 実験は、2011 年に観測を開始した。

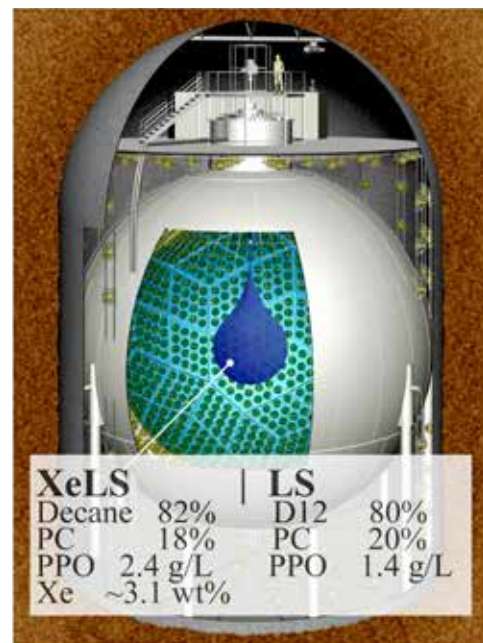


図 2: KamLAND-Zen 800 検出器の図。KamLAND 検出器の中心にあるのが XeLS 入りのミニバルーンである。

開始直後は福島原発事故由来のフォールアウト ^{110m}Ag に悩まされたが、液体シンチレータと Xe ガス両方の蒸留純化により解決できた。2015 年には、競合実験よりも 10 倍以上優れた結果を公表して、この分野で一気に世界をリードする実験となった。

2015 年までは、キセノンを約 380 kg 使用していたが、発見の確率をもっと上げるために Xe 量を約 750 kg にまで倍増して、KamLAND-Zen 800 フェーズを 2019 年 1 月に開始した。アップグレードに時間がかかってしまっているが、そのあたりの苦労話は [2] を見ていただきたい。大型化しただけでなくミニバルーンの放射性不純物を $1/10$ 以下にまで減らした。図 3 には、MC で再現したミニバルーンの ^{214}Bi バックグラウンドの観測分布とデータが載っている。ミニバルーンのナイロンフィルムに対して、ウラン系列とトリウム系列の不純物量はそれぞれ、 $\sim 3 \times 10^{-12} \text{g/g}$ と $\sim 4 \times 10^{-11} \text{g/g}$ であった。娘核の ^{214}Bi と ^{212}Bi の事象は、半径 1.9 m のミニバルーン全体で 1 日に約 5 イベントと約 22 イベントしか起こらない。

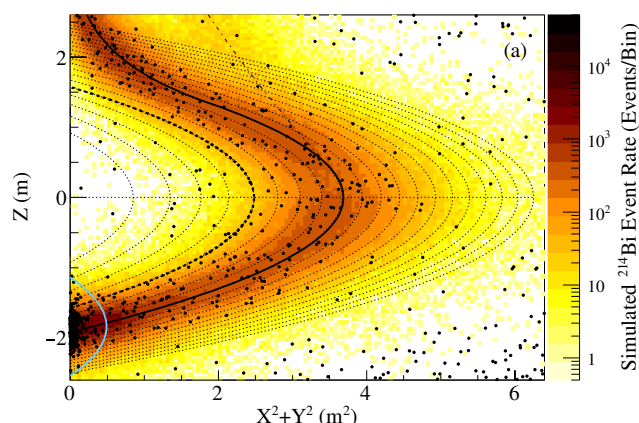


図 3: シミュレーションによるミニバルーンの ^{214}Bi バックグラウンド分布と実際のデータ分布の図 ([1] より)。色のついた 2 次元ヒストグラムがシミュレーションで、黒の点が $0\nu\beta\beta$ 崩壊エネルギーのデータである。実線と幅の違う点線はミニバルーンと支持ベルトの位置を、点線は解析で使った等体積ビンを表している。キレイなミニバルーンを作っているが、まだミニバルーン上にバックグラウンドは多い。特にミニバルーン底の部分だけは汚染されているので解析から除外している。

4 背景事象の特定

4.1 背景事象の起源

背景事象は、放射性不純物 (RI) と、宇宙線ミューオンを起源とする核破碎生成物、原子炉や太陽ニュートリノとそれらを起源とするものが考えられる。まず、RI で

あるが、考えられるソースは、(a) 検出器 (光電子増倍管:PMT やアクリル板、フレームなど)、(b) 液体シンチレータ、(c)Xe ガス、(d) ミニバルーンである。検出器からくる RI にはガンマ線、特にトリウム系列の ^{208}Tl の崩壊で発生する 2.6 MeV ガンマ線が検出器の内側まで飛来してバックグラウンドになる。しかし、KamLAND は、外側の液体シンチレータがアクティブシールドングとして働く (観測して Veto できる) ため、内側の部分にだけエネルギーを落とすガンマ線だけが問題となる。KamLAND 検出器は中心から PMT を仕切っているアクリル板までは半径約 8 m あるのに対して、XeLS はわずか内側の半径 1.9 m 以内である。したがって、内側まで飛ぶガンマ線イベントはほとんどない。ミニバルーンを使って内側だけに XeLS を集中しているのはこのためである。次に、(b) の液体シンチレータの RI である。XeLS は、KamLAND の液体シンチレータほどの純度には 1 桁ほど及ばないが、それでもウランとトリウムの含有量は、 $\sim 1.5 \times 10^{-17} \text{g/g}$ と $\sim 3 \times 10^{-16} \text{g/g}$ である。この水準であれば、 ^{214}Bi の崩壊や ^{212}Bi - ^{212}Po パイルアップのバックグラウンドは、 ^8B 太陽ニュートリノの電子散乱事象よりも少ない。(c) の Xe ガスであるが蒸留によって純化したものの、 ^{85}Kr に加えて配管や Xe ボンベからのエマネーション起源と思われるラドンやトロンを含んだ状態で導入してしまっていた。しかし、ラドンやトロンは寿命が短いため、最初の数ヶ月で崩壊しきってしまったため最初の期間だけ解析から除くだけでした。逆に、キレイすぎる Zen 800 の検出器にとっては貴重なキャリブレーション源になっている。比較的寿命の長い ^{85}Kr や娘核の ^{210}Po などは、崩壊エネルギーが低いので $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索では問題にならない。最後に、(d) の XeLS を保持するミニバルーンの RI である。図 3 にあるように、ウラン系列の ^{214}Bi がバックグラウンドとして残ってしまう。これは、ミニバルーン上では、遅延同時計測による Veto の効率がよくないせいでもある。 ^{214}Bi 崩壊の後すぐに起こる ^{214}Po の崩壊エネルギーがミニバルーンによって吸収され、消光されてしまうため、遅延信号として検出できないのが原因である。液体シンチレータでは、99.8%以上ある検出率が、ミニバルーン上では 50%程度しかない。現在はこれが高感度な体積を制限してしまっている。将来的には、シンチレーションフィルムでミニバルーン中の ^{214}Po の α 崩壊も光らせての除去を目指している。

4.2 Xe 原子核破碎事象

2019 年に観測データがある程度溜まり、国際会議で初めての結果を公表した際には、当時のわれわれのバックグラウンドモデルよりも少しだけデータがポジティブに

出ていた。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊であればよかったのだが、ピーク信号ではないようだった。結局、その頃にはまだ正確な見積ができていなかった Xe 原子核破碎事象であることがわかった。家城 斉氏を筆頭に、Xe 原子核破碎の正確な見積が行われた。図 4 は、FLUKA シミュレーションで生成された XeLS の原子核破碎生成物である。Xe 原子核付近の大きさまでの様々な種類の原子核が生成されていることがわかる。そして、図 5 は、連続的に生成されたあと娘核の崩壊まで含めたエネルギースペクトルである。娘核の崩壊は、Geant4 の RadioactiveDecay を用いてシミュレーションしている。このとき、市村 晃一氏が Geant4 の持っている崩壊データベースが正しいかを 1500 以上の核種すべてチェックしてくれている。Xe 原子核破碎は、ミニバルーン全体だと年間で $0\nu\beta\beta$ 崩壊のエネルギー領域 (ROI:Region of interest) に 20 イベントほどと見積もられた。LS の主成分の炭素 (C) の原子核破碎が ROI に年間 70 イベントほどであるのに対し、Xe 原子核破碎の量は少ないが、長寿命の原子核が多く解析での除去が難しい。

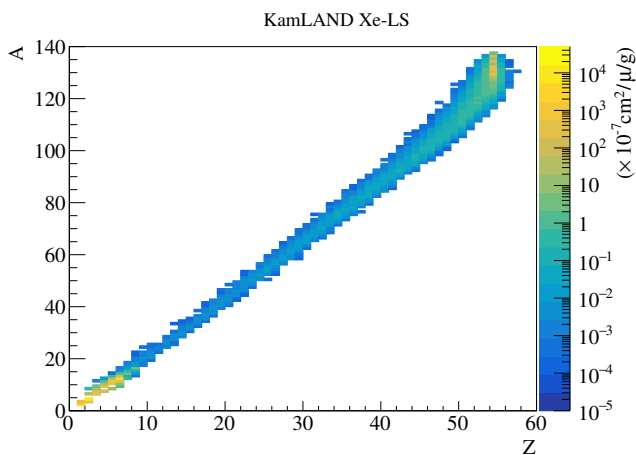


図 4: FLUKA シミュレーションによる宇宙線ミュオンを起源とする XeLS 原子核破碎生成物の生成量分布図 ([5] より)。質量数 A が 135 付近で生成物が多いのは Xe 原子核が破碎されるからで、A が 10 付近で生成量が増えるのが液体シンチレータ成分の C 原子核が破碎されるためである。

実際、図 6 のように長寿命の崩壊核も多い Xe 原子核破碎をタグするには、日単位のスケールを持つ遅延同時計測を開発する必要があった。幸い、FLUKA シミュレーションの結果から、中性子を多く含んだ ^{136}Xe 原子核の破碎では破碎生成物の周りに多くの中性子捕獲イベントがあることがわかった。中性子は、LS 中にもっとも多く存在する水素原子核によって捕獲される事がほとんどで、2.2 MeV のガンマ線が放出される。そこで、 ^{136}Xe 原子核の崩壊候補事象に対して、(I) 近くにある有効な中性子イベントの数、(II) 近くの中性子までの距

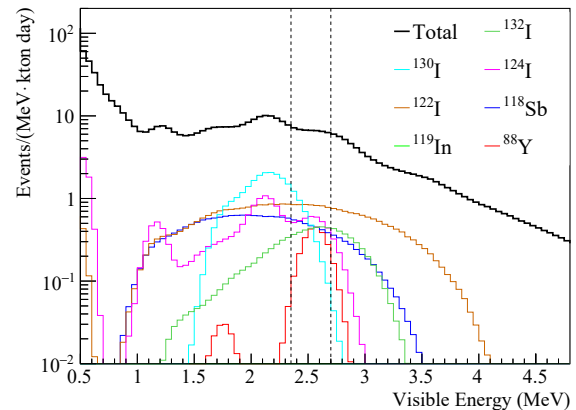


図 5: KamLAND-Zen 実験で見られる Xe 原子核破碎バックグラウンドのエネルギースペクトル ([5] より)。実線が合計のスペクトルで、薄い色の線はそれぞれの原子核からの寄与を表す。ROI に寄与の多い 7 種類がピックアップされている。web 版の記事では各原子核成分の分布がカラーでより分かりやすく表示されているのでそちらもご覧いただきたい。また実際は、数十種類以上の核種からの寄与がある。細かい寄与まで知りたい方はぜひ元の論文を一読いただきたい。

離、(III) 起源となったミュオンとの時間の 3 つを用いて最尤推定法をベースとしたタグを開発した。このタグで、 $(42.0 \pm 8.8)\%$ の Xe 原子核破碎事象をタグされた側のデータ (タグ前全体の 8.6% 分) に押し込むことができると見積もられた。後に出てくる実際のデータをフィットする解析結果でも、この見積と矛盾のない Xe 原子核破碎の生成量とタグ効率が得られた。タグの効率があまり高くない原因はいくつかある。まず、そもそも 1 日経過した時点でも 30% 以上はまだ崩壊していないためだ。つまり、非常に長時間同時計測のウィンドウを開くことが必要だが、それにより C 原子核破碎などのアクシデンタルも入ってしまう。加えて、ミュオンの後の PMT のアフターパルスやオーバーシュートによって中性子イベントの取得効率や再構成精度が低くなってしまっている。エレクトロニクスやトリガーロジックのアップデートにより中性子検出効率は、将来改善の見込みである。さらに、この Xe 原子核破碎事象は、ほぼすべてがガンマ線か陽電子を伴う事象である。将来的には、次の章の機械学習による PID でも除去が可能である。

5 機械学習を用いた粒子識別

5.1 粒子識別手法

KamLAND-Zen の機械学習を用いた粒子識別は、2019 年ごろ、当時学生だった林田 眞悟氏が KamLAND-Zen

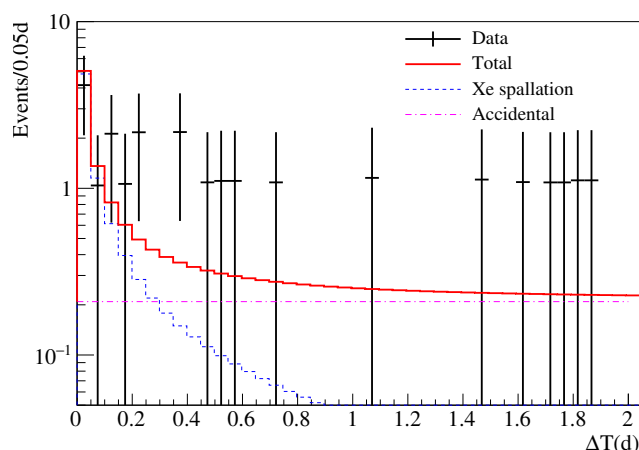


図 6: Xe 原子核破碎事象の候補イベントと、宇宙線ミュオン事象との時間相関図。黒の点がデータで、実線が、フィットされたアクシデンタルと Xe 原子核破碎事象の時間分布の合計スペクトル。[5] より。

400 で主要な背景事象であった ^{10}C の崩壊事象を除去するために開発したのがはじまりだった。LS は、シンチレータの中でも早い発光特性を持つ。PMT のヒット時間分布から、発光点から PMT までの距離による時間差を差し引くと LS の発光時間分布を見ることができるが、この中には事象の粒子の種類による発光の幾何学的な情報も含まれる。LS 中でベータ線は数 mm 程度しか動かない一方で、ガンマ線は平均数十 cm 飛来して複数回散乱される。この複数点からの発光は、時間分布をわずかに約 1 ナノから数ナノ秒程度広げる。また、PMT のヒット分布にも偏りができているはずである。さらに ^{10}C の崩壊などは陽電子も放出するが、この陽電子は半分くらいの確率で LS 中の電子とオルソポジトロニウム (o-Ps) の束縛状態を形成する。これが約 3 ナノ秒ほどの寿命をもつため、時間分布を広げ、時には 2 パルスにも見える [6]。これらの情報をニューラルネットワーク (NN) の機械学習に用いる。林田氏の開発した機械学習は、竹内 敦人氏に引き継がれた。最終的には、1 次元データの PMT ヒット時間スペクトルを、時系列データを扱う際に用いられるリカレントニューラルネットワーク (RNN) の一つである LSTM (Long Short Term Memory) のネットワーク 2 層に通して、最後に全結合層により識別のためのスコアにするとというネットワークに落ち着いた。これは、[1] の論文の KamLAND-Zen 400 の再解析部分に使用された。入力、図 7 の左上にあるヒストグラムのような 1 次元のヒット分布という単純なもので、パラメータ数も一つのエネルギービンに数万個ほどであった。それでも ^{10}C や Xe 原子核破碎のタグには十分な性能を発揮した。

5.2 KamNet

KamLAND-Zen 800 用の機械学習:KamNet は、当時 MIT の学生だった、Aobo Li 氏によって開発された。図 7 にある KamNet は、KamLAND のような球形検出器の特徴を活かすようデザインされた深層ニューラルネットワークである [4]。こちらでは、先ほどは 1 次元だった LSTM を、時間によってスライスされた 2 次元ヒットマップ画像のデータに拡張している。ここで、NN はニューロンを多数の層に繋げて作るネットワーク関数であった。既知のデータや MC を使って NN が持つパラメータを更新 (学習) することで、タスクを解決することができるようになる。KamNet の場合、タスクはガンマ線とベータ線の識別であった。基本的には NN 層は深ければ、パラメータは多ければタスク解決能力は向上する。しかし、大規模な NN は計算コストがかかる。そこで対称性に着目する。NN 層の中に、データが内包している適切な対称性を取り込むことで、必要なパラメータ数を減らすことができる。つまり、学習の高速化や低コスト化が可能となる。これにより、シンプルな NN で複雑なタスクをこなすことができるのだ。画像処理でよく使われる畳み込みニューラルネットワーク (CNN) では、パラメータを持ったフィルターを並進移動させることで、並進対称性を取り込んでいるのである。KamNet でも時系列データをあつかう LSTM には時間的対称性が取り込まれている。

しかし、CNN は KamLAND-Zen のデータに対して最適なネットワークではない。なぜなら、球面上の点を 2 次元画像に落とし込むと、どうしても球面では隣同士であっても連続的に繋がらなくなる部分ができる。また 1 つの PMT の占める単位面積 (1 つのセル) のゆがみや大きさの違いができてしまう。この問題を解決するために、S2CNN と呼ばれる Spherical CNN を取り込んだ。S2CNN では、 $\text{SO}(3)$ 回転群のフーリエ変換を用いることで、回転対称性を取り込むことができる。つまり、球面上のイメージを回転させる対称性を考慮できるのである。通常の CNN は、2 次元の画像に対して 2 次元のフィルターを並進移動させて畳み込みを行う。これが、S2CNN では以下ようになる。まず、2 次元の球面画像 ($\theta-\phi$ 画像) を入力とする。フィルターは 3 次元のオイラー角空間で定義され、一つのセルは一つの決まった角度に対応している。規格化された球面上 (S2 上) の信号に対しての畳み込みは、S2 と $\text{SO}(3)$ フーリエ変換を用いて行われる。この出力は 3 次元オイラー空間上の特徴量となる。このときの 3 次元特徴量テンソルの一つのセルは、ある特定の角度と方向から見た全体のイメージを意味している。そして、層を経るごとに増えていく 3 次元特徴量の数だけフィルターも用意されることになる。といった具合に球面畳み込みが行われていく。難し

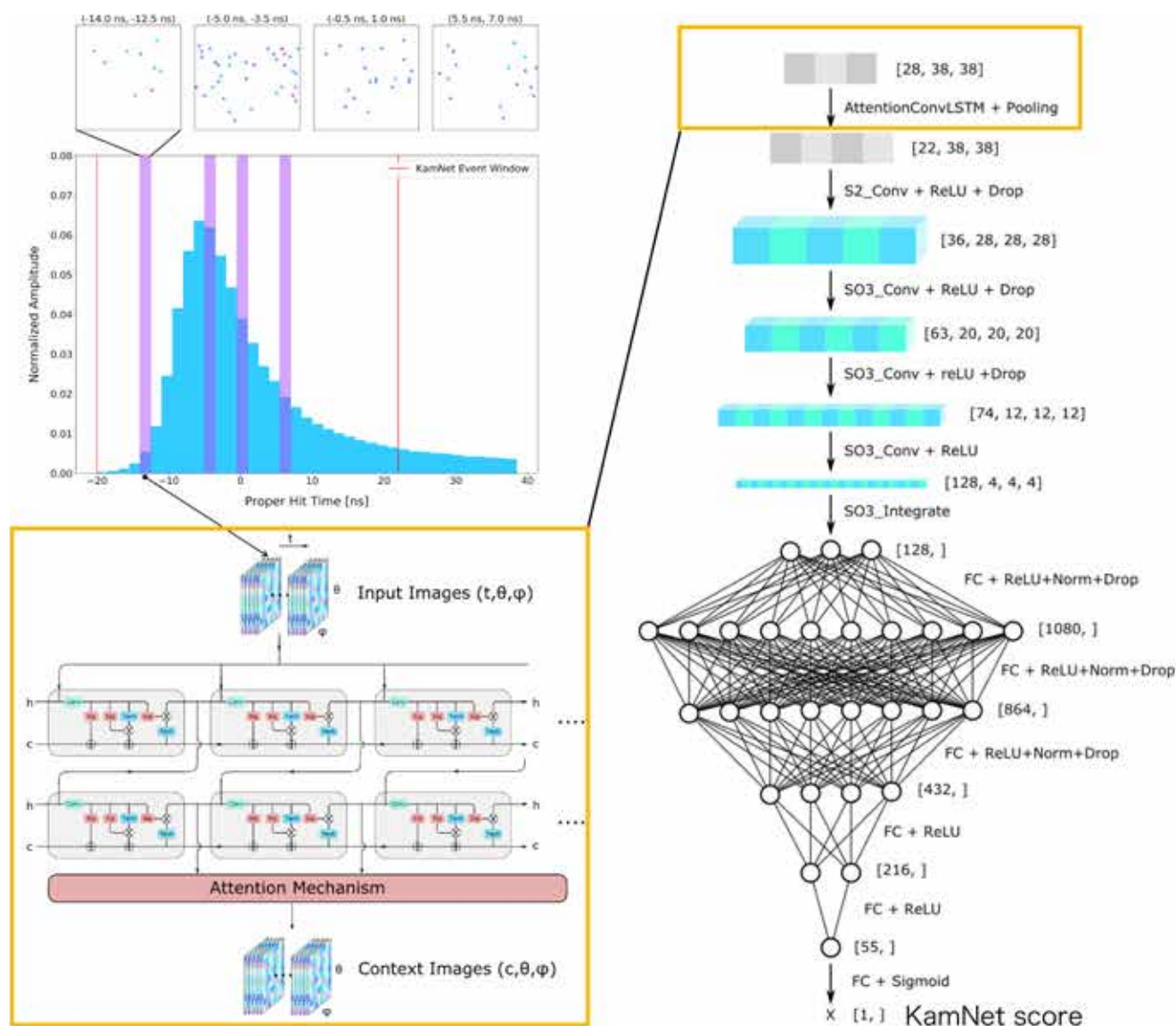


図 7: KamNet のデータ構造 (左上) と LSTM の構造 (左下) および KamNet 全体のネットワーク構造 (右側)。KamNet は、Attention 層を含む 2 次元の LSTM と Spherical CNN、全結合層 (FC 層) からなっている。[4] より一部改変。

くなくなってしまったが、要は KamNet では、回転対称性をもった畳み込み演算で NN が構成されている。

最後に、2 次元の LSTM 層の最終段に Attention 層が入っているのにも注目していただきたい。この Attention 層がネットワークの解釈可能性を与えている。Attention スコアをみることで、ネットワークがどの層に注目しているのかを可視化することができる。図 8 には、KamNet で信号を $0\nu\beta\beta$ として、バックグラウンドを ^{10}C と ^{214}Bi で変えた場合の Attention スコアの違いを表している。この図から、 ^{214}Bi では、シンチレーション光のピークあたりやガンマカスケードの起こる立ち上がり部分に着目する。一方で、 $o\text{-Ps}$ の形成などによってさらにスペクトルの広がる ^{10}C では、立ち上がりやオーバーフロービに着目していることがわかった。このように Attention 層は、NN が何を基準にイベントを識別しているのかを解釈する手がかりになっている。物理屋さんからする

と、このように NN をブラックボックス化してしまうのではなく、少しでも理解できるものにすることで安心できるのではないだろうか。

KamNet は、350 万ほどのパラメータをもつが、近年の GPU ボードであれば 1 枚で十分動かせる大きさのネットワークである。パフォーマンスは、Xe 原子核破碎バックグラウンドに対しては、10% の信号を落とすことで、27% 除去が可能である。ミニバルーンの ^{214}Bi に対してはもっとよくて、約 59% をカットできる。これにより高感度体積の向上が見込めるのである。また、光量が増えると性能も著しく増加するのも分かっており、将来計画の KamLAND2-Zen では高い除去効率になる。そのため、これからは機械学習によるイベント識別を行う前提で開発を進めていかなければならないだろう。KamNet は [1] のメイン解析では、高ノイズ期間の特定と Veto に使用した。KamNet は、ある期間にガンマ線

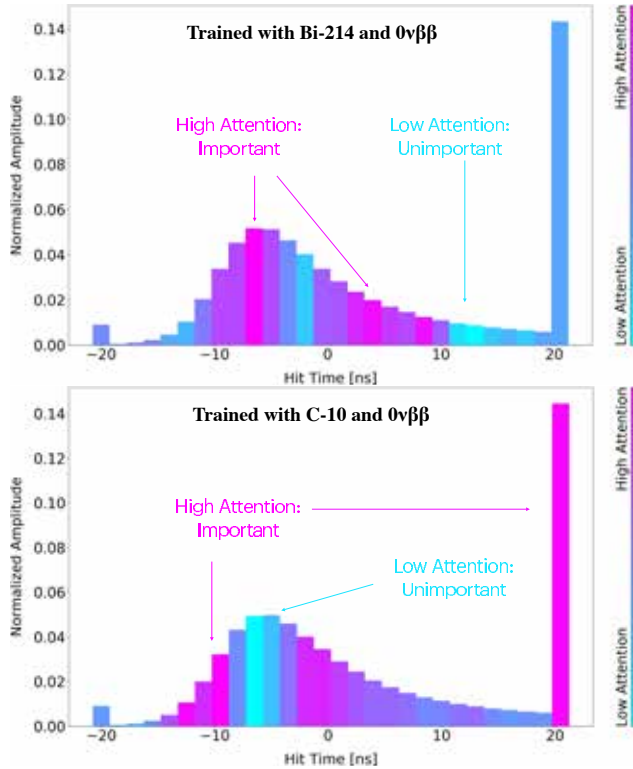


図 8: Attention スコア ([4] より一部改変。) 上の図は、 $0\nu\beta\beta$ を信号、 ^{214}Bi をバックグラウンドとしてトレーニングした KamNet の Attention スコアで、下が ^{10}C をバックグラウンドとしてトレーニングした Attention スコアの分布。高い Attention スコアは、KamNet がその時間ビンのデータにより着目していることを意味する。

らしい事象が有意に多かったことを示したのである。また、KamNet でベータ線らしいイベントとガンマ線らしいイベントにデータを分割した解析も行っていて、2.2% ほどの感度向上が見込まれる [4]。実際に、こちらの結果の方が厳しい制限を与えたが、高ノイズ期間も含めた解析になるため、この期間のまだ正体が特定できていないバックグラウンドを何かしら仮定しなければならないという問題がある。KamNet は、[4] の論文をみると GitHub にコードが上がっているので、興味のある方はインストールしてみるのもいいかもしれない。しかし、機械学習分野の発展は著しく、S2CNN がすでに古いモデルとなっており、あまりメンテナンスされていないようなので、実際に使用する場合は苦労するかもしれないことは言添えておく。

6 解析手法と結果

今回、2019 年から 2021 年の夏頃まで約 2 年 (合計約 1 トン・年) 分のデータを解析した。検出器だけでなく、解析ソフトウェアの刷新も行なった。[2] でも紹介したため割愛するが、宇宙線ミュオンによる原子核破碎の

解析のアップデートで、2015 年の結果では一番多かった短寿命の C 原子核破碎事象の ^{10}C は、無視できるまでになった。一方で、信号を作るはずの Xe 原子が壊されてできる Xe 原子核破碎が予想していたより多いことも分かった。今回の解析では、Xe 原子核のタグを適用するだけでなく、タグしたデータセットも同時にフィットして Xe 原子核破碎バックグラウンドと $0\nu\beta\beta$ 崩壊レートの相関を考慮した。

6.1 一般的な頻度解析 (Frequentist analysis)

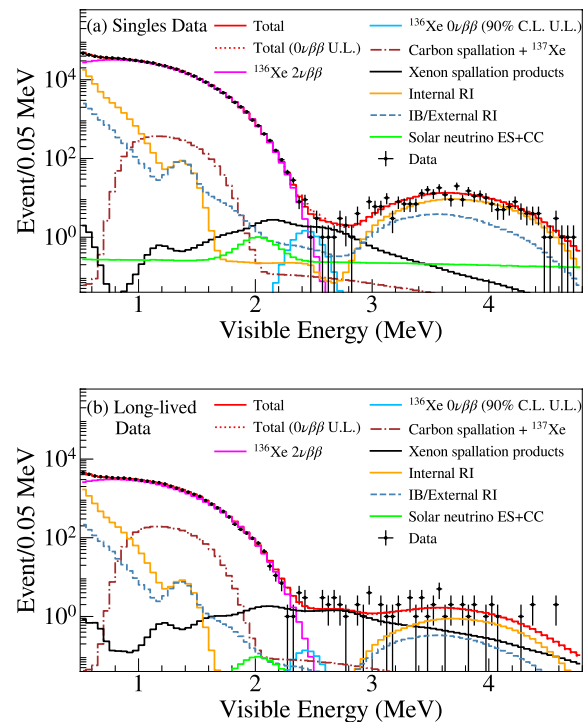


図 9: エネルギースペクトル図 ([1] より)。感度の高い 1.57 m 半径の内側をまとめて記載した。best-fit のバックグラウンド仮定のものに 90% 信頼度の $0\nu\beta\beta$ 崩壊レートの上限值を描いている。上がシングルのデータセットで下がタグされたデータセットである。8.6% 程度の exposure しかない。

KamLAND-Zen では、伝統的にデータをモデルでフィットする頻度解析が行われている。図 9 がフィットの結果である。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊のベストフィットは、0 事象で有意な信号は観測されていない。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の崩壊数は、図 9 の上の最高感度のデータ中に 90% の信頼度上限値で 8 事象未満と分かった。この制限値は観測時間を考えると崩壊レート、つまり半減期の制限値になる。

このように信号が有意に観測されなかった場合も頻度解析 (Frequentist analysis) は崩壊のレートに制限を与

える。これが、崩壊レートの上限值つまり $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ の上限値を決めている。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の信号があると仮定したフィットと信号を仮定しないベストフィットとの「カイ二乗差」は、1次元のカイ二乗分布となる。このカイ二乗差の分布から、信号のレートに対する信頼度を得る事ができる。実際のわれわれの解析では、バックグラウンドモデルも信号の仮定を変えるたびフィットし直すため、計算コストもそれなりにかかる。更に、Xe 原子核破碎のバックグラウンドレートと $0\nu\beta\beta$ 崩壊レートとの相関をしっかりと調べる必要があったため、2次元のカイ二乗差分布を計算している。また、以前のデータ (Zen 400 のデータ) にも新しい解析手法とバックグラウンドモデル、機械学習を適用して解析し直した。フィットには、2-3 GB のメモリがある CPU を 100 個用いて計算しても 1 週間以上かかっていた。そこで数千行あるフィットのコードを見直して計算時間を短縮する努力もおこなった。全期間の 2 次元 (一部 1 次元) カイ二乗差分布を統合すると $0\nu\beta\beta$ 崩壊の半減期は、 2.3×10^{26} 年以上という制限を得た。

この半減期の制限は、式 2 で表されるように有効マヨラナ質量 ($\langle m_{\beta\beta} \rangle$) は、半減期と核行列要素で表される。先ほどの半減期の制限は、 $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ への制限になっていて、36-156 meV よりも小さい値しか許されないことを示していた。ここで大きな幅がついてしまうのは、核行列要素の値が理論モデルによって大きくばらついてしまっているためである。図 10 には、それぞれのモデルに対応する線が引かれている。

6.2 ベイジアン解析と Feldman-Cousins の手法

先の頻度解析とは違った統計アプローチにベイズ統計に従った解析 (ベイジアン解析) がある。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊実験では、ベイジアン解析の結果もしばしば見られるようになっている。頻度解析では、ベストフィットは一つの固定値であり、つけた制限は、「同じような実験を何度か行くと、その 90% は崩壊レートの 90% 上限値より小さい値が得られる。」ことを意味する。一方で、ベイジアン解析では、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊は一定値ではなく、ある事前確率分布に従うと考える。そして、実験データをもとにこの分布を更新する。このようにして得た事後分布から 90% の信頼区間、つまり、確率分布の 90% が含まれる区間を求めて、報告している。KamLAND-Zen の頻度解析は、当時 RCNS の学生だった竹内氏をメインにわれわれ東北大学のメンバーによって行われたが、ベイジアン解析は、MIT を中心としたメンバーによって進められた。データやシミュレーションは、こちらが提供したものの、独立した解析手法で同じような結果になった

ため、今回の報告した結果がより堅実なものになったと考える。また、ベイジアン解析はバックグラウンドとの相関分布も得られる。やはり、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊と強い反相関があるのは、Xe 原子核破碎バックグラウンドであった。

先の頻度解析では、Wilks の定理にもとづいた 90% 信頼度を制限としていた。しかし、厳密にはわれわれの定義する「カイ二乗差の分布」は、いわゆる統計的な定義のカイ二乗分布になっていない。その理由としては、サンプルが十分大きくないのに加え、ほかで測定済みのパラメータにはペナルティをかけているなどが考えられる。そこで Feldman-Cousins の手法による解析も行っている。トイモンテカルロによって、ベストフィットのバックグラウンドモデルに信号を仮定した擬似実験結果を大量生成する。それを用いて、90% 信頼度を定義するのである。こちらも 2D での解析を行うので計算コストは大きい。グリッドスキャンをするのではなく、ベイジアンの最適化を使用するなど工夫がなされた。その結果、Feldman-Cousins による制限は、Zen 800 だけで 15% ほど長い半減期となった。われわれの Wilks の定理にもとづいた 90% 信頼度は $0\nu\beta\beta$ 崩壊レートが 0 のような境界部分でもそれほど大きな影響を受けないことと、少しだが保守的な制限になっていることが分かった。

6.3 逆階層領域での世界初探索

ニュートリノ質量は、3つの質量の順番が NO なのか IO なのかもわかっていない。ニュートリノを伴わない $\beta\beta$ 崩壊で測定できる $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ は、このニュートリノの質量と関係している。つまり、ニュートリノの質量の大きさや順番で、 $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ の大きさも変わる。また、2つのマヨラナフェーズによっても取れる値が変わる。図 10 には、実験でとり得る NO と IO の 2つのバンドと今回の結果が示されている。今回の結果は、EDF の核行列モデルに対しては、IO のバンド内に制限をつけることができた。つまり、世界で初めて IO バンドでの探索をはじめたということである。IO バンドの領域には、少なくとも 3つの理論予測値があるなど、理論モデルの検証も可能な段階へと入ってきている。残念ながら、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊はまだ見つかっていないが、今も世界最高感度でデータを蓄積しているので、今後の結果にも期待していただきたい。

7 まとめと今後の展開

KamLAND-Zen は、Zen 800 フェーズで最初の結果を公表した。 $\langle m_{\beta\beta} \rangle$ が 90% C.L. で 36-156 meV 以下という制限を得て、世界で初めて IO バンド内での探索を開始した。Zen 800 では、 $2\nu\beta\beta$ 崩壊とミニバルーンの

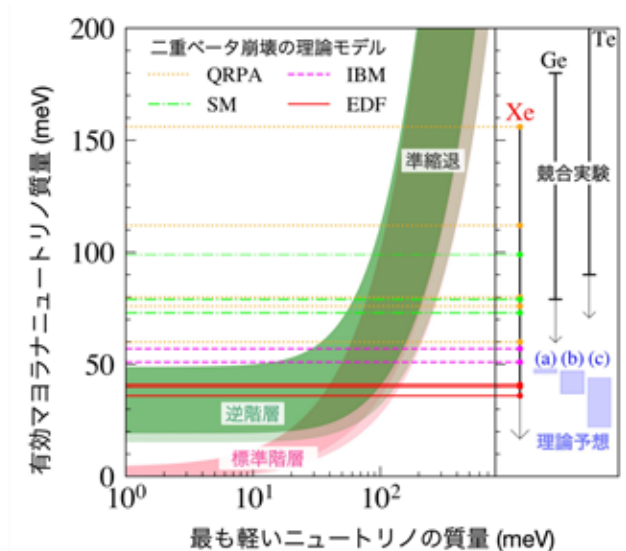


図 10: KamLAND-Zen の最新結果による有効マヨラナ質量 ($\langle m_{\beta\beta} \rangle$) への制限。色の付いた実線と点線がそれぞれの核行列要素のモデルに対応する 90% 信頼度の制限値を表す。2つのバンドは、逆階層構造のときと標準階層のときに許される値の領域を示している。([1] より一部改変。)

^{214}Bi に加えて、Xe 原子核破碎事象がメインのバックグラウンドになっている。機械学習による解析的除去やエレキのアップグレードによるハードでのタグ率向上などの研究開発を進めているところである。

それと並行して、 $2\nu\beta\beta$ 崩壊を減らすための高エネルギー分解能化やさらなる大型化 (KamLAND2-Zen) へ向けて、さまざまな実証実験や革新的な技術の開発を進めている。エネルギー分解能をよくするための、集光ミラーや高量子効率 PMT、透過性の高い LS などの導入で、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の Q 値において現在の 4%(σ) から 2%(σ) まで改善させる予定だ。2 倍のエネルギー分解能の向上で、 $2\nu\beta\beta$ 崩壊バックグラウンドは約 2 桁落ちることを思い出していただきたい。ほかにも、ミニバルーンのバックグラウンドをなくすためのシンチレーションフィルムや、方向情報を得たり高精度の PID ができるイメージカメラ、Xe 量を増やすための高圧 XeLS など将来に向けたハードウェアの開発も行っている。最近、KamLAND サイトに 50 m³ のタンクを設置して、集光ミラーと高量子効率 PMT の技術実証実験を開始したところである (KamLAND2-Zen プロトタイプ実験)。KamLAND2-Zen では、Xe を 1 ton 導入して 10 年間の観測で 2×10^{27} 年のリミットをつけられるところまでの探索、つまり平均的な核行列要素での IO 完全探索を第一目標としている。大型液体シンチレータ検出器の良さは、すでにキーとなる技術は確立されているため、いち早く大型化できた事だと考えている。速やかに KamLAND2-Zen を始めることで、このまま世界の競合実験に先行し

て IO の探索を続けていければ、KamLAND(2)-Zen がマヨラナニュートリノの発見をするという夢を見続ける事ができるのである。

参考文献

- [1] S. Abe *et al.*, Phys. Rev. Lett. **130**, 051801 (2023).
- [2] 飯田崇史, 尾崎秀義, 石徹白晃治, 高エネルギーニュース **39-3** (2020).
- [3] S. Abe, *et al.*, Geophys. Rev. Lett. **49**, e2022GL099566 (2022).
- [4] A. Li, *et al.*, Phys. Rev. C **107**, 014323 (2023).
- [5] S. Abe, *et al.*, arXiv:2301.09307.
- [6] T. Hachiya, for the KamLAND Collaboration, JPS Conf. Proc. **12**, 010046 (2016).