

カムランド禅

ディラックかマヨラナか?

ニュートリノは宇宙全体で平均すると1 cm³あたり300個強存在し、我々が知っている物質を構成する素粒子の中で最も、しかも桁違いに、多く存在します。ニュートリノをあまり身近に感じないのはこの素粒子がなかなか反応しないからですが、そのためその性質の解明にも時間がかかっていました。ニュートリノのルーツは、 β 崩壊のエネルギー保存などに関する問題を解決するためにパウリが1930年に理論的に導入したもので、実験より理論が先行した最初の素粒子とされています。1937年には既に今回の主題であるニュートリノのマヨラナ仮説が提唱されていますが、この仮説は未だに検証されていません。その後ニュートリノが実験的に観測できるようになった後も、太陽ニュートリノ問題や大気ニュートリノ異常といったものが長らく研究者を悩ませていました。これらの問題は1998年以降ほんの数年で解決しましたが、これはニュートリノ振動の実験的観測によるものです。飛行中にニュートリノの種類が繰り返し変化するニュートリノ振動の研究は、ニュートリノの混合や質量の2乗差といった性質の理解を大きく進めました。カムランド実験も原子炉反ニュートリノ振動の測定により Δm_{21}^2 という質量の2乗差を2.6%という高精度で測定し、ニュートリノ振動研究に大きく貢献しています。ニュートリノ振動現象はニュートリノが質量を持つということの決定的な証拠であり、ニュートリノ質量を0と仮定している素粒子の標準理論を越えた枠

組みを必要とします。同時に宇宙論や β 崩壊の研究から来る質量の上限は、他のクォークやレプトンと比べてニュートリノが桁違いに軽いことを示していて、ニュートリノが質量を持ち、しかも特別軽いという二重の問題を突きつけています。一方で、これまでニュートリノについては進行方向に対して左向きに回転（左巻き）するものしか発見されておらず、反ニュートリノでは進行方向に対して右回転（右巻き）するものしか発見されていません。しかし、ニュートリノに質量があることが判明したため、相対論に従えばニュートリノは必ず光速より遅く飛行します。ですから、ニュートリノより速く進む座標系ではニュートリノの回転方向が逆転してしまいます。したがってニュートリノの有限質量の存在から、これまで見つかっていない右巻きのニュートリノや左巻きの反ニュートリノという状態を考えざるを得ません。電荷をもつ素粒子は粒子と反粒子では電荷が反転するために明らかに区別がつきますが、電氣的に中性のニュートリノはニュートリノ・反ニュートリノの関係に対して2つの選択肢が考えられます。ディラック粒子なのかあるいはマヨラナ粒子なのかです。ニュートリノが電荷を持った素粒子同様にディラック粒子であるのなら、右巻きのニュートリノは左巻きのニュートリノと同質量であり、相互作用が一段と弱いために未だ発見されていないということになります。粒子・反粒子も同質量ですから、回転方向でも区別するなら粒子・反粒子それぞれの右巻き左巻きの合計4種が全て同質量になります。一方、マヨラナ粒子であるならば、ニュートリノと反ニュート

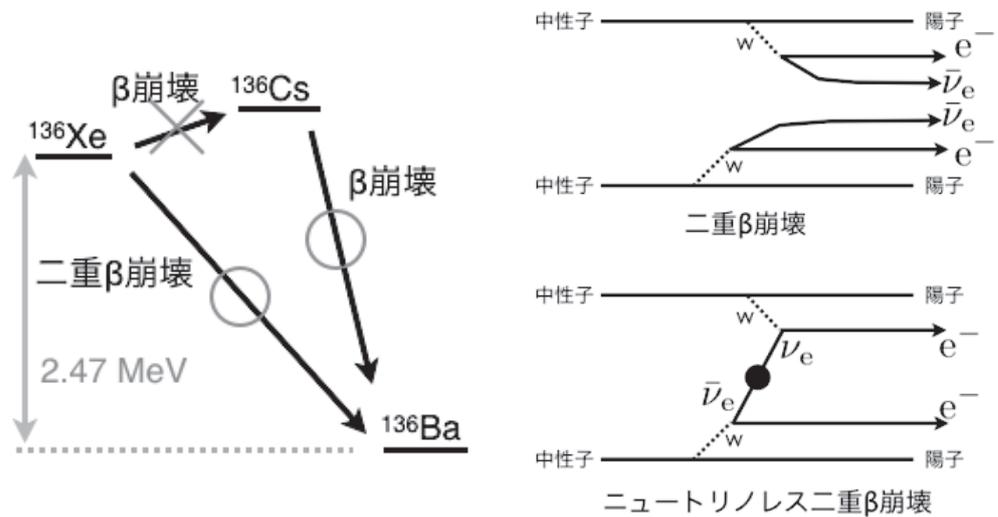


図1 二重β崩壊核のエネルギー準位(左)と二重β崩壊のファインマンダイアグラム(右)。

リノに区別はなく、すなわち右巻きのニュートリノは実は右巻きの反ニュートリノということになります。マヨラナニュートリノを選んだ場合は自由度として右巻きのニュートリノを別個に定義することができ、例えば大統一スケールに近い非常に重い質量を与えることも可能です。このような大質量のニュートリノの導入は、シーソー模型を通して軽いニュートリノ質量を説明することができます。同時に、ニュートリノのマヨラナ性はビッグバン以降の宇宙に物質を生き残らせるために必要なバリオン数Bとレプトン数Lの差(B-L)の破れを明らかに含んでおり、シーソー模型で導入した重いニュートリノの崩壊を通して宇宙にバリオン数を生成するレプトジェネシス理論が有力な理論のひとつとして議論されています。

ニュートリノを伴わない二重β崩壊

ニュートリノのマヨラナ性というものが、宇宙、素粒子の大問題である「軽いニュートリノ質量」および「宇宙物質優勢」という2つの謎に対して知見を与える非常に重要な性質であるにもかかわらず、これまでマヨラナ性に対する確実な証拠は得られていません。

マヨラナ性を調べるためには、例えば電子ニュートリノを打ち込んで、反電子ニュートリノが起こす反応が発生するかを調べれば良いのですが、これは現実的には不可能な話です。なぜなら、もともとニュートリノ反応は断面積(物質中を単位距離進むときの反応確率)が小さいのですが、効率的に反応を引き起こすにはエネルギーEをある程度大きくしなければならないのにニュートリノ質量mは小さく、一方調べなければならない逆回転の成分の割合は断面積のたった $1/2(m/E)^2$ にすぎないからです。しかし、うまい手法があって、β崩壊は起こさないが2つ同時のβ崩壊なら許される特別なエネルギー準位の関係にある原子核(二重β崩壊核)を用意すれば、原子核内という非常に小さい空間に2つの反ニュートリノを同時に生み出すことができます(図1参照)。マヨラナ性があるなら、この2つの反ニュートリノが対消滅することも可能です。対消滅をする確率は、ニュートリノの有効質量の2乗に比例することから、「ニュートリノが出ない二重β崩壊」(ニュートリノレス二重β崩壊とも言い、記号的に $0\nu 2\beta$ と書きます)を発見すればニュートリノのマヨラナ性を証明でき、その頻度からニュートリノの絶対質量を知ることができます。今のところはこ

Feature

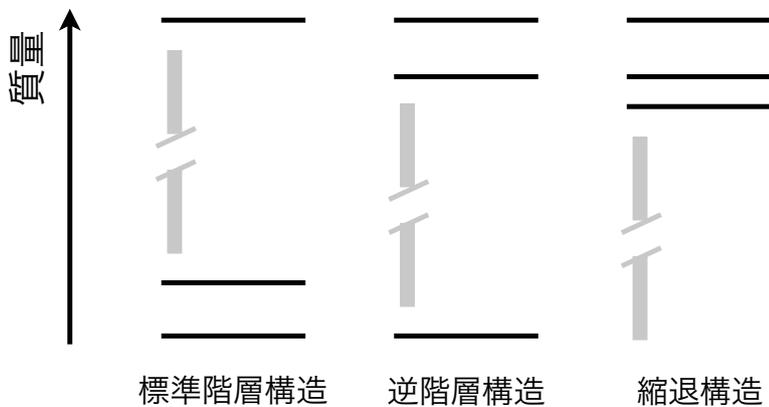


図2 ニュートリノ質量の階層構造。ニュートリノには電子ニュートリノ (ν_e)、ミューニュートリノ (ν_μ)、タウニュートリノ (ν_τ) の3種類がありますが、これらはニュートリノ振動の実験から、質量 m_1 、 m_2 、 m_3 をもつ質量の固有状態、 ν_1 、 ν_2 、 ν_3 の組み合わせ (一次結合) となっていることがわかっています。 m_1 、 m_2 、 m_3 の絶対値はまだわかりませんが、ニュートリノ振動の実験から $\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2$ と $\Delta m_{32}^2 = |m_3^2 - m_2^2|$ が測定されており、 m_1 、 m_2 、 m_3 の相対的な関係が標準階層構造 ($m_1 < m_2 < m_3$)、逆階層構造 ($m_3 < m_1 < m_2$)、縮退構造 ($m_1 \approx m_2 \approx m_3$) のいずれかであることがわかっています。ニュートリノ質量の階層構造の決定は今後のニュートリノ物理学の重要な課題の一つです。

れがマヨラナ性を探る唯一現実的な手法です。ちなみに、マヨラナ質量でなくても標準理論を越える物理で $0\nu 2\beta$ を引き起こすことは可能ですが、幸いにもそのようなファインマンダイアグラムに外線を幾つか加えてやるとマヨラナ質量を作るダイアグラムに書き換えることができ、すなわち $0\nu 2\beta$ の発見はマヨラナ性の証明となることがわかっています。

その物理的重要性に動機づけられた精力的な探索にもかかわらず $0\nu 2\beta$ の確実な証拠はこれまで得られておらず、唯一⁷⁶Geを使った測定で320 meV (ミリ電子ボルト) 程度の質量で 6σ 以上の信号*を得たと指摘するもの (ここではKKDCクレイムとよぶことにします) があります。しかしKKDCクレイムは、疑わしいバックグラウンドの候補があることやその信号の振る舞いに疑念が残されており、検証が待たれています。一方、これまではどの程度の有効質量を目標に実験装置を設計すればよいかという明確な指針がありませんでしたが、ニュートリノ振動の研究から、ニュートリノの質量階層構造として、図2に示すように3種類

* ある量を測定する場合、測定に伴う標準偏差が分散 σ の正規分布に従って統計的に分布するものと仮定する。 6σ 以上の信号とは、 $a \pm \sigma$ のように測定値 a とその誤差として標準偏差 σ が報告され、 a が0から 6σ 以上離れていること (a が正なら $a > 6\sigma$) を意味する。

が同程度に重い縮退構造 (マヨラナ有効質量60 meV以上)、2つが相対的に重い逆階層構造 (20 meV~60 meV)、1つが重い標準階層構造 (20 meV以下) の3種類が考えられるようになり、明確な目標設定が可能となりました。有効質量が軽いほど発見が困難になります。現在の主要なプロジェクトはKKDCクレイムにとどまらず、まずは縮退構造であれば確実に発見し、なおかつ逆階層構造に感度を持つ拡張性を設計の基本としています。軽い有効質量にまで感度を持つためには二重 β 崩壊核も大量に必要となります。原子核の種類によりますが、これまでの実験では10 kg程度の二重 β 崩壊核が使われていたところ、今後は 10^{26-28} 年の寿命を探索することが必要で、質量を100 kg~1000 kg以上に増やさなければなりません。

カムランド禅

大量の物質を使って希な現象を探るとするのは陽子崩壊探索やニュートリノ検出と似通った手法ですが、二重 β 崩壊のQ値 (この場合は崩壊により放出される全エネルギーを意味する) が4.3 MeV 以下であることも考えると、さらに極低放射能環境という特性

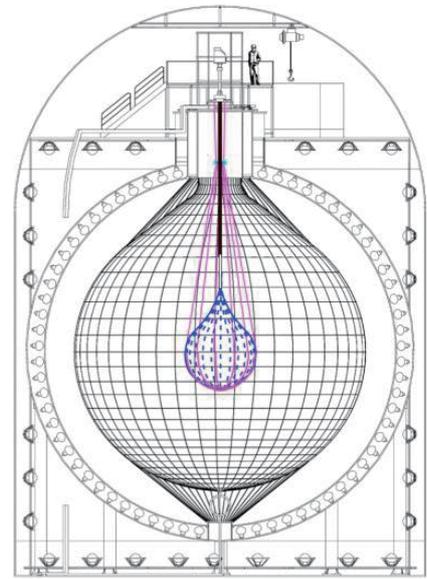


図3 KamLAND-Zen検出器の概略図。

が必要となります。反ニュートリノ観測で成果をあげてきたカムランドは、1000トンの液体シンチレータを有した極低放射能環境を実現しており、 $0\nu 2\beta$ 探索にうってつけの環境と考えられます。その特性を活かすためには、不要な構造物を導入しないで済むようにする必要がありますが、二重 β 崩壊核の中でもキセノン136 (^{136}Xe) は液体シンチレータに可溶 (3wt%、つまり液体シンチレータ100 g 当たり3 g の ^{136}Xe が溶解する) であり、遠心分離による濃縮や純化の手法が確立しているという特徴があります。キセノン136のQ値は2.476 MeVですが、Q値の高い放射性物質を使った研究でしばしば問題になる ^{214}Bi や ^{212}Bi は ^{214}Po との遅延同時計測で除去できること、カムランドを巨大なアクティブシールド (信号検出の邪魔になるバックグラウンドを積極的に検出して除去するシステム) と考えるならば、 ^{208}Tl は2.615 MeVと0.583 MeVの γ 線に加え β 線も放出されエネルギーが問題にならないくらい高くなることから、非常に素性が良いことが予想されます。次に考察すべきバックグラウンドは宇宙線の原子核破砕反応による ^{10}C や太陽ニュートリノ事象、通常の二重 β 崩壊 ($2\nu 2\beta$) ということになります。前の2つは体積に比例するものなので、S/N比

(信号/雑音比) を高めるためには、同位体濃縮したキセノン136をできるだけ高濃度で溶かすことが有効です。一方、 $2\nu 2\beta$ はエネルギー分解能を高めるほかありませんが、カムランドをアクティブシールドとして活用するためにはキセノンの導入部分だけ発光量を増加させてしまうと、外部にも漏れだすバックグラウンド事象のエネルギーがわかり難くなってしまいます。

このような考察のもと、ミニバルーン内に、自然存在比 8.9%のキセノン136を90%以上に同位体濃縮し、液体シンチレータに可能なだけ溶かして導入するという手法を選びました (図3参照)。発光量はキセノンを溶かした状態でカムランドの液体シンチレータと揃えます。ミニバルーンに負荷をかけないように密度も揃える必要が有ります。ミニバルーンが放射性物質を含んでいては元も子もないので、純度の高いものを薄くして物質量を減らすとともに、Bi-Poの同時計測がある程度成立するように、 α 線が出てこられるほど薄いものが望ましいのです。当然、薄いバルーンは製造も導入も全て難しくなります。また、 ^{10}C 対策は新たな電子回路を開発・導入することでも行っています。宇宙線ミュオンにより ^{12}C から ^{10}C が生成するときに90%以上の高い確率で中性子が生成されるので、

Feature



図4 カムランド禅のロゴ。

これをミューオン・中性子・ ^{10}C の3重同時計測で識別するため、1GHzのフラッシュADCを用いた不感時間をもたないデッドタイムフリー電子回路が稼働しています。

プロジェクトは、いち早く縮退構造を探索し、最終的に逆階層構造を探索できるように2段階で進められます。縮退構造を探索する感度を2年程度で達成するには400 kgくらいのキセノンが必要となりますが、光量はカムランド程度で良いことがシミュレーションで判明していました。設計時点では $2\nu2\beta$ の半減期は 10^{22} 年以上と非常に長く、その分エネルギー分解能に対する要求も緩いものでした。つい最近、アメリカで行われているEXO実験がキセノン ^{136}Xe の $2\nu2\beta$ を検出し、半減期としてこれまでの実験的制限より5倍も早い 2.11×10^{21} 年と報告した時はびっくりしましたが、比較的影響は小さく、縮退構造を探索するのに3～4年かかるという程度で済みました。2年なら80 meV程度の感度になると見積もっていますが、エネルギー分解能向上に対する要求が高まったことは間違いありません。

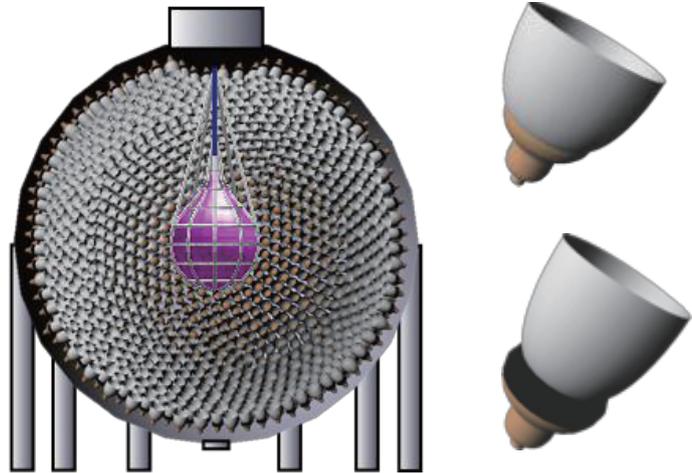
このプロジェクトはKamLAND-Zenと命名しました。Zero neutrino double beta decay searchを意味

していますが、カムランドのその後という意味の“then”とも響きがちかく、キセノンの英語読みXenon（ゼノン）とも響きが近いのでこの名前を選びました。バックグラウンドのない無の境地で宇宙の真理を探るといえるのはいかにも「禅」らしいということで、日本語では「カムランド禅」と名乗ることにしました。ロゴには漢字の禅の文字を入れてあります(図4)。観測はキセノン量約330kgで2011年9月に始まりましたので、近いうちに論文を発表できると期待しています。

将来計画

さらなる感度向上に向けて光量を増加させるには、先に述べた理由でカムランドの液体シンチレータの光量も増やす必要が有ります。これは大規模な作業になるので、ついでに光電子増倍管に集光のためのウィンストンコーンも取り付けることを計画しています(図5参照)。液体シンチレータを標準的な光量のものにするのとあわせて2.5倍の光量増加が見込まれ、 $2\nu2\beta$ の影響を10分の1以下にできます。同時に上部導入口を拡大することで、各種の機器を導入できるようにするつもりです。 $0\nu2\beta$ が発見されたなら、高統計の

図5 KamLAND2-Zen (左)とウィンストンコーン型反射板を取り付けた光電子増倍管(右)の概略図。



測定だけでなく各種の原子核でも測定することが重要です。崩壊の寿命を決める原子核行列要素の不定性の低減にとどまらず、背景となる物理を探る上でも有効と考えられています。また、NaI（ヨウ化ナトリウム結晶シンチレーター）を沈めて暗黒物質探索のようなことも可能になると期待しています。この計画はKamLAND2-Zenと呼んでいます。KamLAND2-Zenでは、1000 kgの同位体濃縮キセノンを用いて約1.8気圧の圧力（深さが10mある）で溶かすことで、濃度を高めて体積に比例するバックグラウンドを低減することを考えていて、逆階層構造を探索する20 meV程度の感度が見込まれます。

並行してさらに挑戦的な開発も行っていて、ミニバルーンのフィルムがシンチレーション光を発するようにし、Bi-Poの識別効率を大幅に上げる開発や、イメージング技術を用いたマルチバーテックス（多反応点）の識別による ^{10}C や γ 線由来のバックグラウンドの大幅な低減を図る開発も行っています。これらを組み合わせれば標準階層構造に切り込むことも夢ではありません。これらの改良案のうち、高压で溶かすことでキセノンの濃度を高める工夫はコスト対効果が高いため、KamLAND2-Zenに移行する前の中間段階

として800 kgのキセノン溶かしたフェーズを考えていて、現在手持ちの450 kgからさらに調達を進めています。このフェーズでは、逆階層構造の半ば程度30~40 meVの感度を達成できると見積もっています。

おわりに

大きく発展したニュートリノ研究は非常に特殊な観測空間を生み出しました。地下深くの巨大な空間できわめて純度の高い物質を用いることで構築された極低放射能環境は、希な現象の探索で新たな領域を開拓しています。これまで10 kg程度にとどまっていた二重 β 崩壊研究の物質量が既に300 kgを越えるまでになりました。既存の装置を有効活用することで高いコストパフォーマンスと拡張性を有しており、短い準備期間での立ち上げが可能です。より詳細な物理現象の研究には多種の原子核での測定や角分布の測定などが必要ですが、高度な装置ほど高額になることは避けられずしかも往々にして単機能になってしまいます。汎用性・拡張性の高い装置で先鞭をつけ、目標を定めた後により高度な装置で詳細な研究を行うといったスタイルが継続的な研究発展には必要ではないでしょうか。