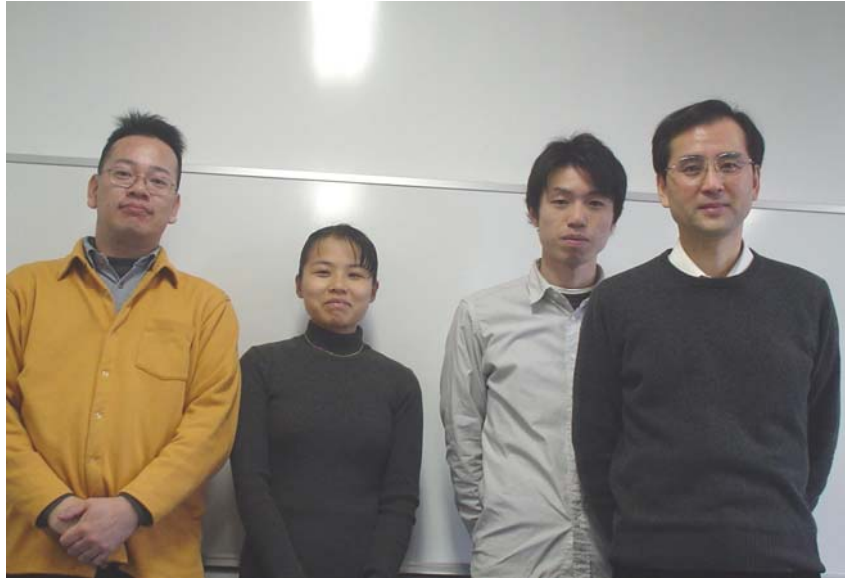


2重ベータ崩壊と CANDLES 実験



岸本忠史、小川泉、梅原さおり、平野祥之
大阪大学大学院理学研究科

要旨：ニュートリノ振動現象の確認によって、ニュートリノは質量を持つことがはっきりしました。ニュートリノが質量を持つ場合 2 つ可能性が考えられます。素粒子で物質を構成する粒子はクォークとレプトンですが、ニュートリノを除く粒子は全て電荷を持ちますので、ディラック方程式で記述されるディラック粒子です。ニュートリノだけはディラック粒子だけではなく、マヨラナ粒子でもあり得ます。マヨラナ粒子の質量は粒子と反粒子の結合でできているので、レプトン数（粒子数）を保存しません。粒子数保存則の破れは現在の宇宙が物質優勢である（反物質が無い）ことを物理法則で説明する時、直接の鍵となります。現状では、ニュートリノのマヨラナ粒子性の検証は 2 重ベータ崩壊の研究でのみ可能と言えます。このため 2 重ベータ崩壊の研究は最近とみにその重要性を増しており、世界中で研究が進められており、また大型次世代研究計画が目白押しです。本稿では世界の 2 重ベータ崩壊研究の現状と阪大理学研究科の我々のグループが進めている CANDLES 実験を紹介します。

1. ニュートリノとマヨラナ粒子性

ニュートリノは標準理論では質量がなく、粒子が左巻きで反粒子が右巻きの粒子になっています。この場合ニュートリノはワイル方程式で記述されますが、パリティ (P) と荷電共役 (C) 変換の対称性を破ることになります。このため、ニュートリノの提唱者のパウリは信じなかった

といわれていますが、現実にはパリティの破れが発見され、弱い相互作用の世界が左巻きであることが確認されています。

さて振動実験でニュートリノが質量を持つ事が今や確実になりました。質量を持つ場合、ディラック粒子でもよいのですが、マヨラナ粒子の可能性が発生します。実際ニュートリノはマヨラナ粒子に違いないと考えている研究者は素粒子論分野を中心として多いと思われます。それは以下の様な理由によります。まずスピン 1/2 の粒子の質量がどう表されるから見て行きます。ディラック粒子の場合、左巻きニュートリノ場を Ψ_L 、右巻きニュートリノ場を Ψ_R としてラグランジアンに現れる質量項は

$$L_D = -m_D \overline{\Psi_R} \Psi_L + h.c.$$

と右巻きと左巻きの積で与えられます。スピン 1/2 の粒子の場合、進行方向に対するスピンの向きでカイラリティが決まります。粒子が質量を持つ場合より速く走る座標系があり、そこから見ると進行方向は逆転しますが、スピンは変わらないためにカイラリティは反転します。つまりディラック粒子の質量項はスピン 1/2 の粒子が特殊相対論の座標変換でどう見えるかを表現していることとなります。

さてスピン 1/2 の粒子である限り、座標変換で左巻きの粒子が右巻きに反転する特殊相対論から要請は変わりようがありません。しかしニュートリノがマヨラナ粒子の場合、右巻き成分を左巻きニュートリノの反粒子と出来るということが決定的に異なります。これは質量の無いワイル粒子と同様にカイラリティ（右巻き、左巻き）で粒子・反粒子を分類する一方で、それを結合する質量を導入したこととなります。この結果

$$L_{mL} = -\frac{m_L}{2} \overline{\Psi_L^C} \Psi_L + h.c.$$

と粒子数を破るだけでなく、左巻きの粒子だけで質量項が構成できることとなります。これをマヨラナ質量と呼びます。この場合同様に右巻きの粒子だけでも

$$L_{mR} = -\frac{m_R}{2} \overline{\Psi_R^C} \Psi_R + h.c.$$

と質量項が作れます。つまりマヨラナ粒子の場合は左巻き粒子と右巻き粒子に別々の質量を与えることが可能になります。粒子と反粒子は電荷が逆なので、マヨラナ粒子性は電荷の無いニュートリノにのみ許される可能性になります。マヨラナはディラック方程式が出された後に、そこに現れる γ 行列を全部実数だけで書く表現を見出して、この事実を発見しました。そして現代物理学の世界に粒子数の破れと、右巻きと左巻きに別の物理法則を与える機構を提供したこととなります[1]。

我々は現実には左巻きのニュートリノしか知りません。質量があるにも関わらず、右巻きがないことをどう考えれば良いのでしょうか。この事実はニュートリノがマヨラナ粒子であると考え、右巻きのニュートリノは極端に重いと考えると自然に説明することができます。右巻きと左巻きが異なる質量をもつということは直感的には理解し難い面がありますが、相互作用も質量に寄与することを考えると、左巻きの相互作用しかない弱い相互作用だけをするニュートリノがディラ

ック粒子と考えるならば、相互作用から全く見えなくなっている右巻きニュートリノが左巻きと全く同じ質量を持つ事になって、かえってあり得ないといえます。

2. シーソー機構

さてこの考えをさらに推し進めてニュートリノが現実の世界で非常に小さな質量を持つことまでを明快に説明したのがシーソー機構と呼ばれているものです。Gell-Mann らと柳田によって独立に提案されました。現在標準模型を越える統一理論を考えるとき、出発点的な位置を占めています。マヨラナ粒子は右巻きと左巻きで別の質量を与えることができますので、右巻きが何らかの統一理論のエネルギースケールである非常に重い質量 (M_R) を持つと考えます。質量項は左巻きと右巻きの 2 行 2 列の行列で与えられます。このとき左巻きと右巻きを結ぶディラック質量 m_D はニュートリノも他のクォークやレプトンと同程度の大きさであると考えた事だとすると、

$$L_m = -\frac{m_R}{2} \sim \left[\overline{\Psi}_R^c, \Psi_R \right] \begin{bmatrix} 0 & m_D \\ m_D & M_R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Psi_R^c \\ \Psi_R \end{bmatrix} + h.c.$$

と書くことができます。ここで左巻きは非常に小さいので 0 にしてあります。この模型の中で我々が観測できる質量はこの行列を対角化して得られます。この結果、2 行 2 列の行列は左巻きのニュートリノの質量を

$$m \sim \begin{bmatrix} m_D^2 / M_R & 0 \\ 0 & M_R \end{bmatrix}$$

と現すことができます。つまり、 $m_L = m_D^2 / M_R$ となって、左巻きニュートリノの質量は他の荷電レプトンやクォークに比較して極端に小さい事を自然に説明出来ます。右巻きのニュートリノの質量が重ければ重いほど左巻きのニュートリノが軽くなるのでシーソー機構と呼ばれています。右巻きニュートリノ質量は統一理論のエネルギー領域にあると考える事で、振動実験が示唆するニュートリノの小さな質量が統一理論で説明される事になります。

粒子と反粒子を結ぶマヨラナ質量項は当然ながら粒子数の保存則を破ります。粒子が反粒子に転換すると電荷が反転するので、マヨラナ質量を持つ可能性は中性のニュートリノだけに許されます。ここにニュートリノのマヨラナ粒子性を検証できる 2 重ベータ崩壊研究の重要性が高まる必然性があるのです。

3. レプトジェネシスによる宇宙の物質生成

2005 年 9 月 16-20 日の日程で学振の支援を受けてハワイで「2 重ベータ崩壊とニュートリノ質量」の課題で日米セミナーを開催しました。幸いシーソー機構の創造者の一人である柳田氏に基調講演をして頂け、他にニュートリノの質量に関する理論と実験の研究の現状、それに 2 重ベータ崩壊に関連する日米の有力な実験計画がレビューされました。会議の詳細やプログラム等は

<http://usj.phys.sci.osaka-u.ac.jp/index.html>

をご参照頂きたいと思います。

レプトン数非保存の重要な帰結である宇宙の物質生成のシナリオを柳田氏の講演に沿う形で紹介しておきます。まず現在の宇宙は物質だけの世界であって、かつ物質は光より 10 桁ほど少ない量存在しています。初期宇宙では物質と反物質が同量存在し、温度が下がるにつれて対消滅して、その差が現在残っていると考えられます。それが 10 桁も小さい量に最初から決まっていたとは考え難く、差を決めていく物理法則があると考えべきといえます。物質優勢の宇宙があって、我々が存在している事実が、ニュートリノがマヨラナ粒子で、レプトン数が破れていることの証明になっているといえます (レプトジェネシス)。この議論で重要な点は、弱い相互作用がインスタントン効果でバリオンを反レプトンに変化させる事 ($qqq \leftrightarrow \bar{l}$) が可能な事が t'Hooft によって証明されていることです。これは全く標準理論の範囲で許される事なので、その結果バリオン数 (B) とレプトン数 (L) は独立に保存せずに $B-L$ が保存することになります。この遷移確率は現在の宇宙では無視できるほど小さいので、忘れていても何も問題ありませんが、温度が数百 GeV の宇宙初期では高くなり、 B と L は独立に保存せずに $B-L$ が保存する形で入れ替わることになります。つまりどこかで $B-L$ に変化を生じさせておかないとバリオン数を生成できないという結論が導かれるのです。これを重い右巻きのマヨラナニュートリノが崩壊するとき、 CP の破れで反レプトンを多く生成することで実現するのがレプトジェネシスのシナリオです。インスタントン効果は更に高いエネルギー領域 (例えば GUT スケール) で生成されるバリオン数を $B-L$ を保存しながら消してしまうので、柳田氏の講演の中で “The proton decay is irrelevant to baryogenesis” というちょっと刺激的な発言がありました。

4. 0 2 重ベータ崩壊とニュートリノ質量

さてここまでの議論でニュートリノのマヨラナ粒子性をどうしても検証しなければならないとの議論はご理解頂けたのではないかと思います。実際の方法は現在の所 $0\nu 2$ 重ベータ崩壊の研究だけと言っても過言ではありません。 $0\nu 2$ 重ベータ崩壊は原子核の中で 2 つの中性子が 2 つの陽子と電子に転換する過程で、(陽子が 2 個中性子に変わる過程もあるがここでは議論しない。)



と表され、ダイアグラムで表すと図 1 の様になります。ここで電子の生成に伴って放出された反ニュートリノがマヨラナ質量の為にニュートリノ転換し吸収されるので、電子を放出するが、ニュートリノが出てきません。この結果レプトン (電子) 数が 2 増えています。ニュートリノを 2 個放出する過程は $2\nu 2$ 重ベータ崩壊と呼ばれていて、2 次の摂動であるためその崩壊率は小さいながらも標準理論の枠内で起こり得ますので、すでに観測されています。電子の全エネルギーを測定すると、 $2\nu 2$ 重ベータ崩壊ではニュートリノにもエネルギーが配分されるので最大が Q 値の連続スペクトルになります。一方で、 $0\nu 2$ 重ベータ崩壊は Q 値にピークを作るので信号は明確に思えますが、 $2\nu 2$ 重ベータ崩壊より更に 5-6 桁少ないので、検出器を工夫しないと観測が困難です。

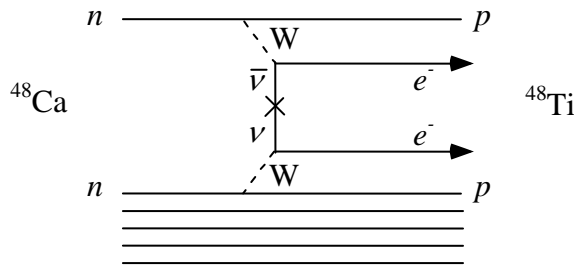


図1 $0\nu 2$ 重ベータ崩壊のダイアグラム。典型的な原子核として ^{48}Ca を取り上げた。

この $0\nu 2$ 重ベータ崩壊の崩壊率はニュートリノの質量の自乗に比例し、以下のように表されます。

$$|T_{1/2}^{0\nu}(0^+ \rightarrow 0^+)|^{-1} = G^{0\nu} |M_{NM}^{0\nu}|^2 \langle m_{\beta\beta} \rangle^2 \quad (2)$$

G は位相空間の体積で、 M は核行列要素、 $m_{\beta\beta}$ はニュートリノの有効質量で、 2 重ベータ崩壊で観測できる質量です。有効質量は主には電子ニュートリノの質量ですが、種の間には混合があるので

$$\langle m_{\beta\beta} \rangle = \left| \sum_i |U_{ei}|^2 m_{\nu_i} e^{i\alpha_i} \right| \quad (3)$$

と表されます。ここで U は種の間での混合行列です。マヨラナニュートリノの場合、 α で表されるマヨラナ位相も入ってきます。

さて 2 重ベータ崩壊で観測できる有効質量は 3 種類のニュートリノの質量のパターンに依っています。ニュートリノ振動実験から質量差に制限が加わってはいますが、ニュートリノ質量自体は分かりません。そこで一番軽いニュートリノの質量をパラメータとして 2 重ベータ崩壊で観測できる有効質量をプロットしたものが図 2 に表されています[文献 2]。ここでニュートリノ質量のパターンで 3 種類に分類されます。1) 3 種類のニュートリノ質量がその差よりも大きく、ほとんど同じ質量を持つ縮退 (degenerate) 領域で、大体 0.1 eV 程度以上の質量を指します。2) 逆階層 (inverted hierarchy) 領域は電子ニュートリノが一番重くなるケースで、有効質量にして $0.03\text{--}0.1 \text{ eV}$ の領域です。3) 順階層 (normal hierarchy) 領域は他のクォークや荷電レプトンと同じく電子ニュートリノが一番軽くなるケースで、有効質量が 0.01 eV より小さい領域になります。尚ニュートリノもクォークや荷電レプトンと同様な順階層になっていて、電子ニュートリノの質量が観測にかからない程小さくなっているのではないかとと思われるかも知れません。しかし、ニュートリノにはクォークや荷電レプトンには無い、ほとんど最大に近い大きな混合があり、同様な階層性になっているとは考えにくく、逆に縮退領域で発見がある可能性も十分あります。どちらにしても実験だけが答えを与えることが出来るのです。

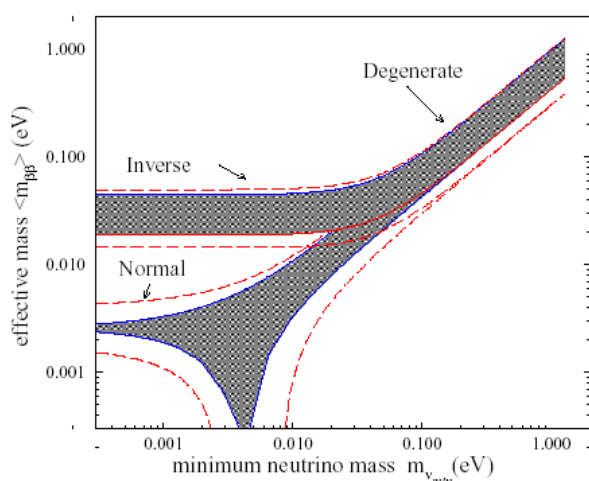


図2 ニュートリノ振動実験から予想されるニュートリノの質量パターン横軸に最も軽い質量のニュートリノを取り、縦軸は2重ベータ崩壊で観測できるニュートリノ実効質量である。0.4 eVより高い領域は排除されていると考えることができる。

5. 研究の発展と現状

2重ベータ崩壊の観測は最初ベータ崩壊でパリティの破れを発見したウーラによって ^{48}Ca に対して行なわれました。そこでは濃縮された約10 gの ^{48}Ca が用いられました。その結果、 $0\nu 2$ 重ベータ崩壊は観測されなかったのでマヨラナ粒子の可能性は否定されたと考えられました。

一方、地質学的方法も使われました。2重ベータ崩壊核の ^{130}Te は ^{130}Xe に崩壊します。鉱石中の ^{130}Xe を調べると大気中のXeの同位体比から大きくずれていることがあります。これは ^{130}Te が長時間をかけて ^{130}Xe になり、鉱石中に閉じ込められたためだと考えられます。生成年代の分かっている鉱石中の ^{130}Xe を質量分析器で調べ、寿命を求める研究が緒方(阪大)らによって行なわれました。この方法で寿命が求められましたが、 2ν と 0ν を分けることは出来ないので、 $0\nu 2$ 重ベータ崩壊に興味の中心がある最近の研究では電子のエネルギースペクトルを観測する方法が主流です。

測定には2重ベータ崩壊核の線源と、崩壊に伴い放出される電子を検出する検出器を必要とします。測定装置としては大きく分けて、検出器が線源を兼ねるタイプと検出器と線源が独立なタイプがあります。前者のタイプの実験として ^{76}Ge の研究があります。自然存在比8%の ^{76}Ge を80%程度にまで濃縮したGeで半導体検出器を作ってその中で崩壊の結果生成された電子の全エネルギーを観測します。2005年の段階で約10 kgの ^{76}Ge を用いたハイデルベルグ・モスクワ(HDM)実験が世界で最も良い感度を達成しており、ニュートリノ質量にして0.3 eVより小さいとの上限値が得られています。一方で同じデータを解析することで $0\nu 2$ 重ベータ崩壊を観測し、ニュートリノが0.4 eV程度の質量を持つことを示したとの報告もあり、混沌としています。また ^{76}Ge で同程度の感度を達成しているIGEX実験は上限値のみを与えています。

6. 世界の研究計画

2重ベータ崩壊の崩壊率は式2で表される様に、ニュートリノのマヨラナ質量の自乗に比例します。よって質量の感度を1桁上げようとする寿命の感度を2桁上げなければなりません。つまり物質質量を少なくとも2桁増やす必要があります。次世代研究が大型化して行く理由がここにあ

ります。研究の重要性から世界中で HDM 実験を超える実験が進行中ないし計画中です。実験の鍵は次の 3 点にまとめられます。(1) 大量の 2 重ベータ崩壊核を用意し、(2) Q 値領域の放射線のバックグラウンド (以下 BG) を減少させ、(3) エネルギー分解能を向上させて $2\nu 2$ 重ベータ崩壊からの寄与をなくすのです。

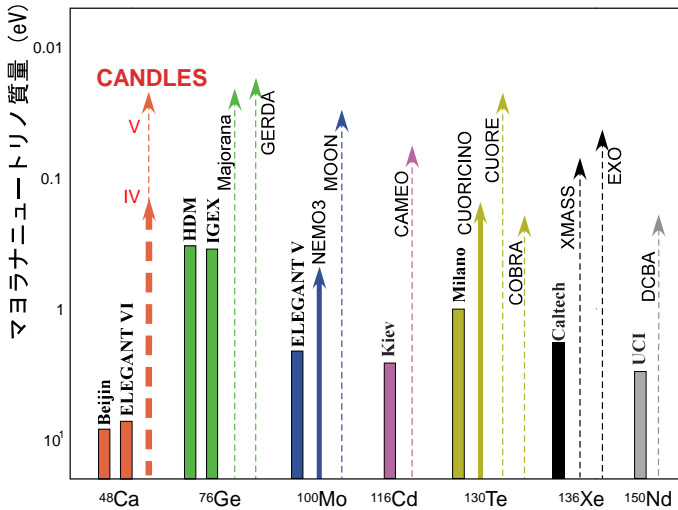


図 3 世界の研究とニュートリノ質量。
棒グラフは出版された実験結果、実線矢印は現在稼働中の実験、点線矢印は計画されている実験。

ニュートリノの質量として 0.1 eV 程度まで探れば 3 種のニュートリノがほぼ同じ質量を持つ縮退した可能性を検証できます。また 0.03 eV 程度まで研究できれば、逆階層領域まで検証できます。世界の大型将来計画はこの辺りを目標にしています。0.001 eV 程度まで探れば順階層領域を含めて探索が可能と考えられますが、そこまでの実験計画はまだ提案されていません。現在世界で進行中ないし計画中の実験を図 3 にまとめます。

現在進行中の実験で HDM 実験に迫り、超える可能性のあるのは、 ^{100}Mo を標的核とするフランスを中心とした NEMO III 実験と、 ^{128}Te を研究するイタリアを中心とした CUORECINO 実験です。NEMO III 実験は線源と検出器が異なるタイプで、磁場中に置かれたドリフトチェンバーにより標的原子核からの電子の飛跡を追う装置です。CUORECINO 実験はボロメーターで、標的原子核を含む結晶 (TeO_2) を希釈冷凍機で冷凍し、崩壊に伴う微小な温度変化でエネルギーを測定します。どちらも将来の大型計画 (Super-NEMO、CUORE) を持っています。また、HDM を大きく超える実験として計画中のものには、欧州を中心とする GERDA 計画と米国を中心とする Majorana 計画があります。どちらも濃縮した ^{76}Ge をトンのオーダーで用意し、放射線検出器として最も良いエネルギー分解能を持つ Ge 検出器を製作するものです。Majorana も GERDA も比較的既存の技術でスケールアップを図る計画です。一方で、EXO 計画の様に ^{136}Xe の崩壊で出来る ^{136}Ba 原子を 1 個 1 個同定する野心的ですが困難な技術開発に挑戦している実験計画もあります。日本では ^{48}Ca を研究する CANDLEs 計画や ^{150}Nd の DCBA 計画、 ^{136}Xe の XMASS 計画、また国際協力で ^{100}Mo の MOON 計画などが進行中です。世界中で将来の大型研究に向けて技術開発にしのぎを削っています。

7. 大阪大学における CANDLES 実験

大阪大学では次世代の 2 重ベータ崩壊の研究に向けて CANDLES 計画を推進しています。CANDLES 計画では CaF_2 結晶を検出器として、その中に含まれる ^{48}Ca の $0\nu 2$ 重ベータ崩壊を観測することを目標にしています。 ^{48}Ca は 2 重ベータ崩壊の Q 値が 4.28 MeV で、全ての原子核中で最大です。自然放射性のガンマ線の最大のエネルギーは 2.6 MeV・ベータ線は最大 3.3 MeV なので、原理的に BG のない測定が可能です。 ^{76}Ge の Q 値 (2.04 MeV) では分解能を上げて限界があります。次いで Q 値の高い ^{150}Nd (3.37 MeV) に比較しても ^{48}Ca の Q 値の高さは際立っています。しかし自然存在比が 0.187 % と小さい上、効率的な同位体濃縮法が開発されていないために大量の標的核を集めることが出来ず、初期の研究を除き今まで余り使用されてきませんでした。

我々は CANDLES 計画に先立つ $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 結晶 (6.7 kg) を用いた ELEGANT VI で ^{48}Ca の 2 重ベータ崩壊の研究を進め、世界最高感度の測定を行いました[文献 2]。図 4 に実験で得られたスペクトルを示します。 $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 結晶は発光量の大きなシンチレータで、高分解能が得られます。またライトガイドを発光量の少ない $\text{CaF}_2(\text{pure})$ にすることで光電子増倍管側も active shield を達成する特徴的なデザインで、 ^{48}Ca に関しては一番良い結果が得られました。ニュートリノ質量の点からは HDM などと比較してまだまだですが、BG のない測定が達成できているという大きな特徴があります。

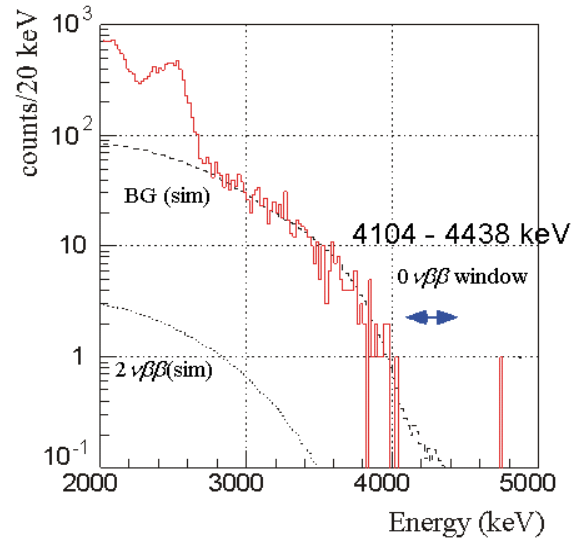


図 4 ELEGANT VI で測定された 6.66 kg の $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 結晶を 0.64 年観測した時のスペクトル。 ^{48}Ca の 2 重ベータ崩壊の寿命の下限値として 1.4×10^{22} 年が得られた。これをニュートリノの質量に変換すると核行列要素の不定性を入れて 7.2–44.7 eV より小さいとなる。 Q 値領域の BG の素性は分かっており、また CANDLES では更に減少させることが出来る。

将来の大型検出器として BG が無いことは特に重要です。6 章で質量の感度を一桁上げようとすると物質量を 2 桁増やす必要があると書きましたが、これは BG が無い時に正しく、BG にリミットされる様になると 4 桁増やす必要があり実質的に限界が見えてきます。BG に強い原子核が有利な理由がここにあり、 ^{48}Ca は最善の原子核といえます。

ニュートリノ質量に対する感度で他の研究と並ぶにはまず量を増大させる必要があります。しかし ELEGANT VI のデザインでスケールアップするには、 $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 結晶のシンチレーション光に対する自己吸収のため減衰長が短い (10 cm 程度) という問題がありました。この為、 $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 結晶を用いる限り 2 次元的にしか拡張できないのでデザインに大きな制約となりました。我々は CANDLES 検出器のデザインとして、大量の CaF_2 結晶 (ここでは Eu をドープしない純粋な結晶) をシンチレータとして使い、液体シンチレータ中に沈めることにより一挙に解決

しました[文献 3]。ここで用いる CaF_2 結晶は最高級の光学レンズとして使われていることから分かるように、光透過率が優れており、大きな結晶を作っても集光に問題がありません。 CaF_2 結晶のシンチレーション光の発光中心は UV 領域であることもあって、シンチレータとして使える事は余り認識されていませんでした。発光量も $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ に比較して小さいのですが、以下で示すようにそれらの問題点を解決し、大型の検出器を作る事が可能になりました。図 5 に CANDLES 検出器の概念図を示します。

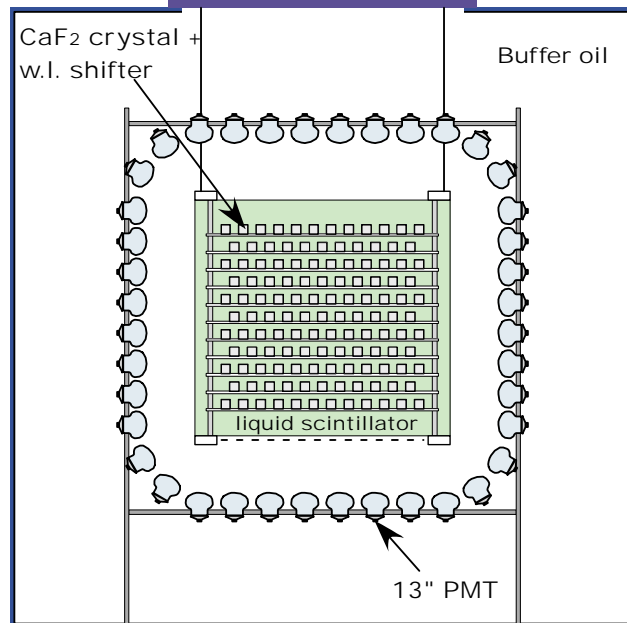


図 5 CANDLES IV 検出器の概念図。
多数の光電子増倍管が 10 cm 立方の
1000 個の CaF_2 結晶からのシンチレー
ション光を検出する。

大型化は可能になりましたが検出器として動作させるには、検出器サイズに応じたエネルギー分解能の向上と BG の低減を達成しなければなりません。CANDLES 計画では

- (1) 結晶のサイズを最適化して、2 重ベータ崩壊からの電子は結晶中に留まる一方、BG は周りの液体シンチレータを光らせるようにして、検出効率を維持しながら S/N 比を向上させ、
- (2) 液体シンチレータが光った場合は信号の時定数の違いを利用して信号と BG を弁別することで BG を低減し、
- (3) 光の透過率の高い CaF_2 結晶に波長変換剤を組み合わせることにより、高集光効率と高エネルギー分解能 (Q 値の辺りで測定に必要な $\sigma \sim 1.5\%$) を実現しました。

以上の基本的な特性を今までの研究で確認し、0.1 eV まで探索できる検出器が実現できることを明らかにしました。

CANDLES 検出器では以下に述べる様に Q 値領域での BG の素性が明らかなので、その数を評価できます。この事は信号が見つかった時、発見したという論拠を数で示せる有利さにつながります。HDM 実験の結果が BG の評価で議論が分かれています、その素性を理解していない限り答えがありません。しかし CANDLES 計画ではその様な不定性はありません。以下 BG の低減とエネルギー分解能について個別に議論していきます。

7.1 BG の低減

^{48}Ca は原理的に BG の最も少ない原子核です。その上で液体シンチレータ中に複数個の分割された CaF_2 結晶を配置するデザインによって液体シンチレータを光らせる BG（主に外部からの放射線と内部からの γ 線）を除去します。液体シンチレータの時定数は $\sim 10 \text{ nsec}$ であり、一方 CaF_2 の結晶からのシンチレーション光の時定数は $\sim 1 \mu\text{sec}$ なので、その違いを利用して弁別できます（図 6）。

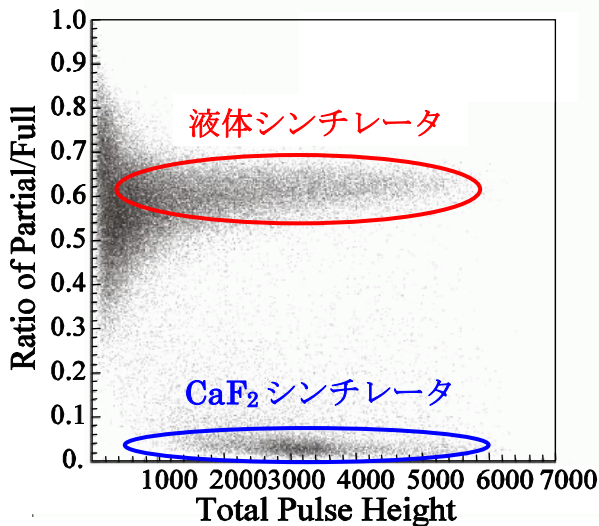


図 6 CaF_2 と液体シンチレータからの信号の弁別。横軸は全電荷で、縦軸は信号の速い成分と全体の電荷の比。信号は明確に分離している。

^{48}Ca の 2 重ベータ崩壊の Q 値付近に残る BG は、結晶中の放射性不純物 (U, Th 系列) から短時間 ($\sim \mu$ 秒) に連続崩壊する β 線・ α 線が同時計測されて、和のエネルギーが観測される場合にほぼ限られます（図 7 に典型的な例を示します）。それ以外には 4.27 MeV に届く自然放射線はありません (α 線には減光係数が掛かって電子等価エネルギーが $1/4$ 程度になります)。しかしこれらの BG はパルス波形の測定で 3.5 桁程度下げられることを確認しました。

パルス波形の測定により BG を下げることが

出来ました。我々が目指す BG レベルは更に低いもので、最後には結晶に含まれる自然放射性不純物の低減がどこまで達成できるかが問題になります。製造業者と協力しながら結晶の製造過程を見直すことによって、U, Th などの放射性不純物濃度を、 $20\text{--}30 \mu\text{Bq/kg}$ に低減した結晶の安定製造を可能にしました。この BG レベルは ELEGANT VI で使用したものよりほぼ 1 桁の向

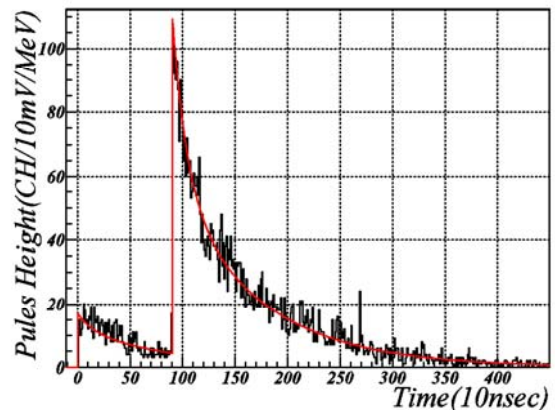


図 7 β 線と α 線が足されてエネルギー的に Q 値の領域に届く BG の例。パルス波形の測定でこの BG を落とすことが出来る。

上が計られています。現在製作中の CANDLES III では十分なレベルに既に達しています。

7.2 エネルギー分解能

透過率の高い純粋な CaF_2 結晶と液体シンチレータを組み合わせることにより、シンチレーション光の減衰を伴わずに大型化を可能にしました。しかし CaF_2 結晶は $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 結晶に比較して発光量が 1/3 程度であり、かつシンチレーション光の発光波長中心が UV 領域なのでエネルギー分解能に限界があります。これは波長変換剤により CaF_2 結晶からのシンチレーション光を大型光電子増倍管の感度に適した波長域に変換して光電子数を増やすことにより解決しました。また、液体シンチレータの発光量を高く保つためにはプソイドクメンを 20%程度入れる必要がありますが、これは CaF_2 結晶から UV 光を吸収してしまうので、結晶の周り 5 mm だけにプソイドクメンの無い波長変換層を作り、ベトー効率を維持しながら集光効率を上げることが可能なデザインを達成しました。以上の工夫により結晶と大型光電子増倍管の最適な配置で、測定に必要なエネルギー分解能が得られることを確認しました。図 8 に ^{137}Cs の 662 keV の γ 線に対する分解能を示しました。こういった研究に携わっている方には印象的な分解能であると思います。

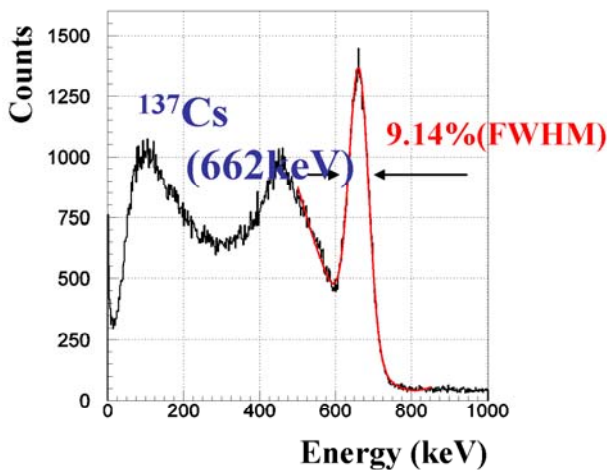


図 8 波長変換剤で発光量を増大させた CaF_2 結晶で γ 線を測定したときの分解能を示す。半値全幅で 9.14% は、 Q 値の領域において原理的に FWHM で 3% の分解能を達成できる分解能で、100 トンの検出器まで $2\nu 2$ 重ベータ崩壊の影響なく建設できる値である。

8. 一連の CANDLES 検出器

CANDLES 検出器は I から III まで建設しています。I は 20 cm 立方の液体シンチレータ中に 10 cm 立方の CaF_2 結晶を沈め、4 本の 5" 光電子増倍管で観測するもので、図 6 に示した BG 弁別の原理を実証しました。II では 45 cm 立方の液体シンチレータを 4 本の 15" 光電子増倍管で観測するもので、中に複数の CaF_2 結晶を入れて集光効率や位置分解能を検証しました。以上の結果を基に、CANDLES III (CaF_2 結晶 : 190 kg、13" 及び 15" 光電子増倍管 : 40 本) を地上の大阪大学理学部に建設し、実証実験を行っています。図 9 に CANDLES III を示します。

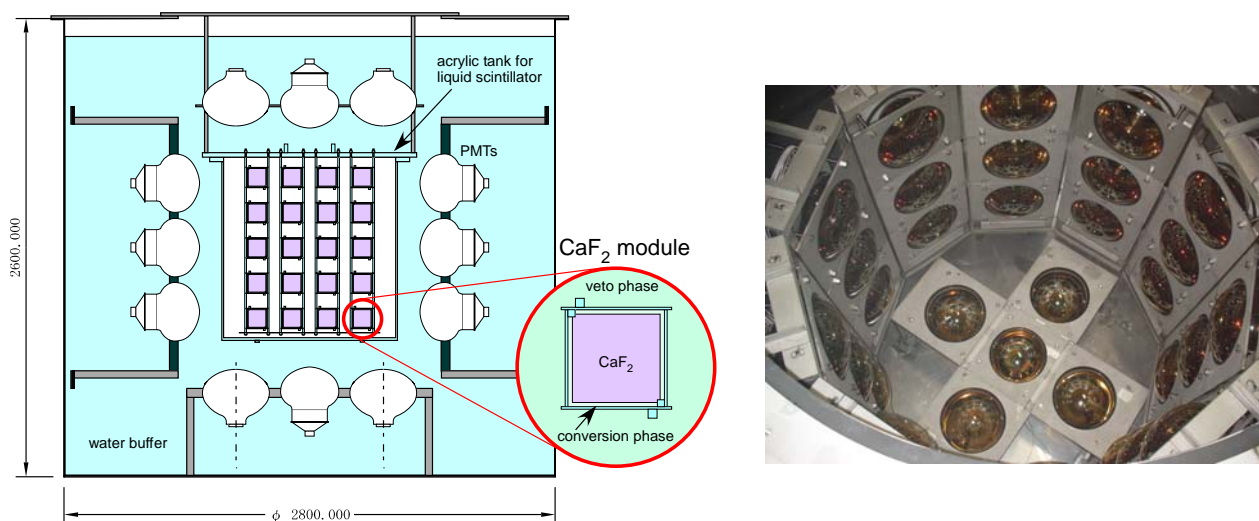


図9 現在阪大理学部に設置されている CANDLES III 検出器の図(上)。純水中にアクリルの 0.8 kℓ の液体シンチレータ容器を設置し、その中に 2 層構造の CaF_2 結晶が設置される。40 本の 13”及び 15”光電子増倍管が 60 個の 10 cm 立方の CaF_2 結晶からのシンチレーション光を検出する。写真(下)は液体シンチレータを除いた時の光電子増倍管の設置を示す。

本測定においては、宇宙線由来の BG を避けるために、地下実験室へ移設する必要があります。現在 CANDLES III を増強して (CaF_2 結晶 : 300 kg、光電子増倍管 : 70 本) 地下実験室に建設 (III 地下) するための作業を進めています。来年度には建設が完了し、実際の測定に入る予定です。1 年程度の測定で 1 eV 以下、4 年で HDM の 0.5 eV に到達する予定です。この CANDLES III (地下) で HDM 実験に十分追いつくことが出来ることを実証します。

しかし HDM を追い越す感度を持つ検出器を建設しなければ世界で勝負することは出来ません。そこで CaF_2 結晶で約 3 トンの CANDLES IV 検出器の予算を要求中です。これで 0.1 eV 程度の感度を達成し、HDM を十分超えて縮退領域での質量の存否を確認します。世界中で多くの大型実験計画が進行中の中で後発との印象をもたれるかもしれませんが、予想される BG レベルを単なる見込みでなく実験値をベースにしているのは我々だけと言って良く、現状では世界でも高い感度の測定を経済的に実現できる計画と考えています。

ここで必要な BG レベルに達するには結晶に含まれる U と Th 系列の放射性同位元素の濃度を CANDLES III のレベルより更に一桁下げる必要があります。我々の研究において一番問題になる BG は Th 系列 (^{212}Bi) ですが、現在、平均すると約 $30 \mu\text{Bg/kg}$ のレベルまで下げた結晶を製作出来ており、これは CANDLES III には十分な値です。今後はこれを更に下げて $10 \mu\text{Bq/kg}$ 以下にする必要があります。そんな事が出来るだろうかと思われる方もいるかも知れませんが、R&D の過程で既に $6 \mu\text{Bq/kg}$ の結晶の製作に成功しており、実現可能だと考えています。ただし大型検出器を作る時にはコストに注意を払う必要があります。一応良い感触は得ていますが、制作方法が確立した段階でプロセスを見直す予定です。なお $10 \mu\text{Bq/kg}$ (1 ppt) とは検出効率 100 % の我々の測定方法をもってしても 10 cm 立方 (3.2kg) の結晶で、20 個の崩壊を観測する

のに 10 日かかるレベルであり、結晶の BG 調査だけでも大仕事です。これが一方では IV を建設するためにも III（地下）が必要である理由です。我々の計画では、III（地下）で製作済みの結晶を用いて 2 重ベータ崩壊測定をスタートさせた後、その一部を IV 用に開発・製作した結晶で順次置き換えて IV に使える結晶であるかを調べていきます（2 重ベータ崩壊測定に関してもより低 BG 環境が期待できます）。さもないと IV に使える結晶を選定するのにかなりの時間がかかってしまいます。こういった研究を段階的に進める必要がここにあります。世界の大型次世代計画が一挙に現在のレベルを超えて行くとの考えには幾つかの幻想が含まれているのです。

更に将来として CANDLES V では 100 トンサイズの検出器の建設を考えています。この辺りがエネルギー分解能やその他の BG の関係で CANDLES 検出器を延長したときの限界の大きさと言えます。世界の大型次世代計画と同程度の 30 meV の質量領域の探索を目標にしています。V を建設する頃には、たとえば SNO(+) や KamLAND といった大型検出器が当初の役割を終えている可能性もあり、CANDLES の結晶を入れることが出来れば測定器部分に対する投資を少なく抑えて検出器を建設する可能性も生まれます。そうなれば予算の点からも世界の大型計画に比較して有利な立場に立っています。

自然存在比 0.187 % に打ち勝って ^{48}Ca で高感度の測定が出来る様に CANDLES 計画は設計されています。しかし、もし同位体濃縮が可能になれば他の追従を全く許さない検出器が完成します。現在 ^{48}Ca の濃縮は可能ですが、微量かつ高価で、大型化している 2 重ベータ崩壊研究に対応できるようになっていません。有効な製造方法が無かったのは原理的な問題ではなく、ニーズが無かったためかもしれません。安価な濃縮法がないのは Ca にガスの化合物が無いためですが、他にも幾つか方法が考えられ、我々も研究を進めています。研究会を開いた所、実際多くの方々が興味深くかつ新しい方法を研究している事が分かり、思った以上に将来性があるのではと考えています。

[文献]

1. CERN courier, July/August 2006
2. Neutrinoless Double Beta Decay and Direct Searches for Neutrino Mass, C. Aalseth et al., APS Neutrino Study (2004) 47 – 48, <http://www.aps.org/neutrino/>.
3. I. Ogawa, et al., Nucl. Phys. **A730** (2004) 215-223
4. T. Kishimoto, et al, Proceedings of 4th International Workshop on Neutrino Oscillation and their Origin (NOON2003), Kanazawa, Japan, 10-14 February 2003, (2004), 338-349.