

二重ベータ崩壊と CANDLES 実験

大阪大学大学院 理学研究科

岸本 忠史

on behalf of CANDLES 実験グループ

2005 年 11 月 14 日

1. はじめに

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た。ニュートリノが質量を持つ場合二つの可能性が考えられる。素粒子で物質を構成する粒子はクォークとレプトンであるが、ニュートリノを除く粒子はすべて電荷を持ち、ディラック方程式で記述されるディラック粒子である。ニュートリノだけはディラック粒子だけでなく、マヨラナ粒子でもあり得る。マヨラナ粒子はレプトン数を保存せず、ニュートリノの質量（マヨラナ質量）はレプトン数の破れを示す量になる。粒子数保存則の破れは現在の宇宙が物質優勢であることを物理法則で説明するとき直接の鍵となる。ニュートリノのマヨラナ粒子性の検証は、現状では二重ベータ崩壊の研究でのみ可能と言えるだろう。このため二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いるだけでなく、大型次世代研究計画が目白押しである。

本稿では世界の二重ベータ崩壊研究の現状と阪大理学研究科のわれわれのグループで進めている CANDLES 実験を紹介する。

2. ニュートリノはマヨラナ粒子か

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である。質量を持たないニュートリノはワイル方程式で記述されるが、パリティ (P) と荷電共役 (C) 変換の対称性を破る。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るが、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示された。

さて振動実験でニュートリノが質量を持つことが今や確実になったと言える。ニュートリノはディラック粒子でもよいが、マヨラナ粒子と考えている研究者は多いと思われる。それにはいくつか説得力のある理由がある。まず質量項を見てみよう。ディラック粒子の場合、左巻きニュート

リノ場を ψ_L として質量項は $m_D \bar{\psi}_R \psi_L$ と右巻きと左巻きの積で与えられる。スピン 1/2 の粒子がある方向に進行している場合を考える。進行方向に対するスピンの向きでカイラリティが決まる。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する。しかしスピンは変わらないためにカイラリティは反転する。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。

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の要請は変わりようがない。しかしニュートリノがマヨラナ粒子の場合、右巻き成分は左巻きニュートリノの反粒子であることが決定的に異なる。つまり $m_L \bar{\psi}_L^C \psi_L$ と左巻きの粒子だけで質量項が構成できる。これをマヨラナ質量と呼ぶ。この場合、同様に右巻きの粒子だけでも $m_R \bar{\psi}_R^C \psi_R$ と質量項が作れるので、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る。

われわれは現実には左巻きのニュートリノしか知らない。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よいのだろう。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受け入れることが出来る。右巻きと左巻きが異なる質量をもつということは理解し難い面があるが、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、相互作用からまったく見えなくなっている右巻きニュートリノが左巻きとまったく同じ質量を持つことになり、かえって考えにくい。

さてニュートリノがマヨラナ粒子で、右巻きが非常に重いとして質量を M_R とおく。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と考えることが自然とすると、左巻きのニュートリノの質量を、

$$m_L \sim \frac{m_D^2}{M_R}$$

と表すことができ、他の荷電レプトンやクォークに比較して極端に小さいことを自然に説明出来る。これがシーソー機構と呼ばれている理論で、柳田や Gell-Mann らによって提案された。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ことで、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ことになる。

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る。他の素粒子である荷電レプトンとクォークの場合は電荷を持っているので、粒子と反粒子を結ぶ項が電荷の保存則で禁止される。よってマヨラナ質量を持つ可能性はニュートリノだけに許される。ここにニュートリノのマヨラナ粒子性を検証できる二重ベータ崩壊研究の重要性が高まる必然性がある。

3. 二重ベータ崩壊の研究と日米セミナー

本年 9 月 16 日-20 日の日程で学振の支援を受けてハワイで日米セミナーを開催した。会議のタイトルは「二重ベータ崩壊とニュートリノ質量」で、最近の進展を日米の関連分野の研究者で議論した。シーソー機構の創造者の一人である柳田氏の基調講演の他、ニュートリノの質量に関する理論と実験の研究の現状、それに二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た。会議の詳細やプログラムなどは、

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

をご参照いただきたい。

会議が終わった後、多くの参加者から非常に面白い会議であったとの感想が述べられた。実験屋は比較的原子核関係者が多かったが、理論は素粒子論屋中心という組み合わせが新しい雰囲気での議論を醸成したのかも知れない。

多くの重要な講演が行われたが、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く。まず現在の宇宙が物質だけの世界であって、かつ物質と反物質の量の差が十桁も小さい量に最初から決まっていたとは考え難く、宇宙の物質量を定める物理法則があると考えられる。物質優勢の宇宙があって、われわれ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る(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こと ($qqq \leftrightarrow \bar{l}$) が可能で、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。この遷移確率は現在の宇宙では無視できるほど小さいが、温度が数 100 GeV の宇宙初期では高く、B と L は独立に保存せず、B-L が保存する形で入れ替わる。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。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ある。インスタントン効果は更に高いエネルギー領域(たとえば 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、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った。

他にニュートリノの質量に関して実験の現状から理論的にどういったパターンが考えられるかという話が南方氏からあり、また宇宙論の立場から川崎氏の講演があった。他にも多くの講演があったが、本稿ではこれ以上の紹介はしないので、興味を持たれた方はぜひ前述のホームページをご覧ください。

4. 0ν 二重ベータ崩壊とニュートリノ質量

さてニュートリノはマヨラナ粒子と考えるしかないという状況があるが、それを検証しなければならない。その方法としては現在の所 0ν 二重ベータ崩壊の研究だけでもよい。 0ν 二重ベータ崩壊は原子核の中で二つの中性子が二つの陽子と電子に転換する過程で(二つの陽子が二つの中性子に変わる過程もあるが、ここでは議論しない)

$$nn \rightarrow ppe^-e^- \quad (1)$$

と表され、ダイアグラムで表すと図 1 の様になる。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ためにニュートリノに転換し、吸収されて電子を放出するが、ニュートリノは出ない。この結果レプトン(電子)数が 2 増えている。ニュートリノを二個放出する過程は 2ν 二重ベータ崩壊と呼ばれていて標準理論の枠内で起こるが、二次の摂動であるためその崩壊率は小さい。 2ν 二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る。 0ν 二重ベータ崩壊は Q 値にピークを作るが、 2ν 二重ベータ崩壊より更に五、六桁少ないので、検出器を工夫しないと観測が困難である。

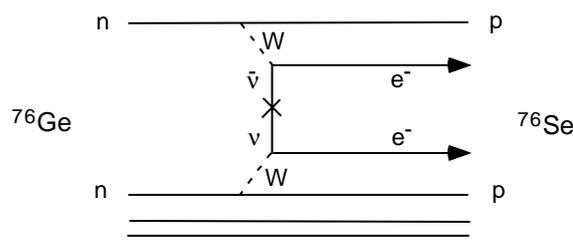


図 1 0ν 二重ベータ崩壊のダイアグラム
典型的な原子核として ^{76}Ge を取り上げた。

この 0ν 二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る。

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

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、二重ベータ崩壊で観測できる質量である。有効質量は主に電子ニュートリノの質量になるが、種の間には混合があるので、

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

と表される。ここで U は種の間での混合行列である。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くる。二重ベータ崩壊で観測できる有効質量はニュートリノの質量のパターンに依っている。

ニュートリノ振動実験より質量差に制限が加わっているが、ニュートリノ質量自体は分からないので一番軽いニュートリノの質量をパラメータとして二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を図 2 に示す[文献 1]。

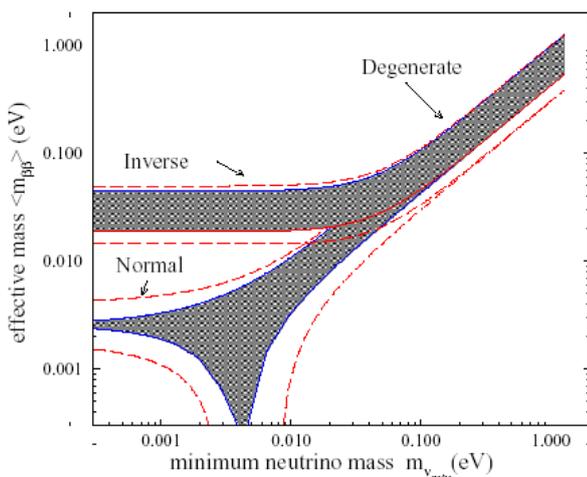


図 2 ニュートリノ振動実験から予想されるニュートリノの質量パターン

横軸にもっとも軽い質量のニュートリノを取り、縦軸は二重ベータ崩壊で観測できるニュートリノ有効質量である。0.4eV より高い領域は排除されていると考えることができる。

ここでニュートリノ質量のパターンで三種類に分類される。まず三種類のニュートリノ質量がその差より大きく、ほとんど同じ質量を持つ縮退 (degenerate) 領域で、大体 0.1eV 程度以上の質量を指す。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 0.03eV ~ 0.1eV の領域である。正常階層 (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 0.01eV より小さい領域になる。なお、ニュートリノもクォ

ークや荷電レプトンと同様な正常階層になっていて、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と思われるかも知れないが、ニュートリノにはクォークや荷電レプトンにはな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い。縮退領域で発見がある可能性も十分あり得る。どちらにしても実験だけが答えを与えること出来る。

5. 研究の発展と現状

二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 に対して行なわれた。ここでは濃縮された約 10g の ^{48}Ca が用いられた。 0ν 二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た。

一方、地質学的方法も使われた。二重ベータ崩壊核の ^{130}Te は ^{130}Xe に崩壊する。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る。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と考えられる。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た。この方法で寿命が求められたが、 2ν と 0ν を分けることは出来ないので、 0ν 二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ある。

測定には二重ベータ崩壊核の線源と電子を検出する検出器を必要とする。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る。前者のタイプの実験として ^{76}Ge の研究がある。自然存在比約 8% の ^{76}Ge を 86% 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するものである。2005 年の段階で約 11kg の ^{76}Ge を用いたハイデルベルグ・モスクワ (HDM) 実験が世界最高の感度を達成しており、ニュートリノ質量にして 0.3eV より小さいとの上限値が得られている。一方で同じデータを解析することで 0ν 二重ベータ崩壊を観測し、ニュートリノが 0.4eV 程度の質量を持つことを示したとの報告もあり、混沌としている。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る。

6. 世界の次世代研究計画

二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する。よって質量の感度を一桁上げようとする寿命の感度を二桁上げなければならない。つまり最低物質質量を二桁増やす必要がある。

次世代研究が大型化して行く理由がここにある。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、計画中である。実験の鍵は次の三点にまとめられる。(1)大量の二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を減少させ、(3)エネルギー分解能を向上させて 2ν 二重ベータ崩壊からの寄与をなくす。

ニュートリノの質量として0.1eV程度まで探れば三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る。また0.03eV程度まで研究できれば、逆階層領域まで検証できる。世界の大型将来計画はこの辺りを目標にしている。0.001eV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るが、そこまでの実験計画はまだ提案されていない。現在世界で進行中ないし計画中の実験を図3にまとめておく。

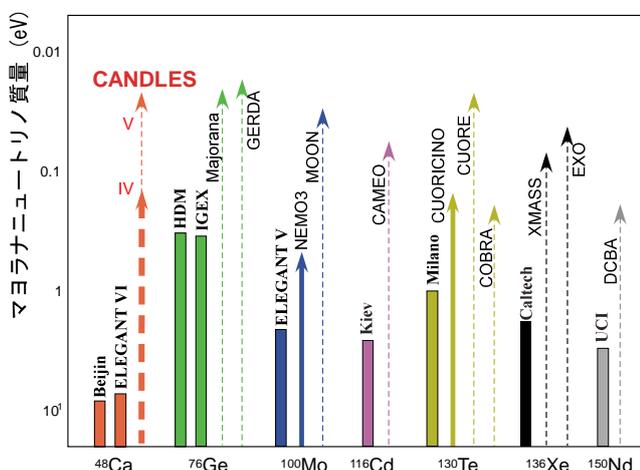


図3 世界の研究とニュートリノ質量

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。

現在進行中の実験でHDM実験に迫り、を超える可能性のあるのは、 ^{100}Mo を研究するフランスを中心とするNEMO III実験と、 ^{128}Te を研究するイタリアを中心とするCUORECINO実験である。NEMO III実験は線源と検出が異なるタイプでドリフトチェンバーで磁場中の電子の飛跡を追う装置である。CUORECINO実験はポロメーターで、微小な温度変化でエネルギーを測定する。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計画がある。どちらも濃縮した ^{76}Ge をトンのオーダー用意し、放射線検出器として最高のエネルギー分解能を持つGe検出器を製作するものである。MAJORANAもGERDAもどちらかという既存の技術でスケールアップを図る計画である。一方で、EXO計画の様に ^{136}Xe の崩壊で作られる ^{136}Ba 原子を一個一個同定する野心的だが困難な技術開発に挑戦している実験計画もある。

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、また国際協力での ^{100}Mo のMOON計画などが進行中である。世界中で将来の大型実験に向けて技術開発にしのぎを削っている。

7. 大阪大学でのCANDLES実験

大阪大学では次世代の二重ベータ崩壊の研究に向けてCANDLES計画を推進している。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 0ν 二重ベータ崩壊を観測することを目標にしている。 ^{48}Ca は二重ベータ崩壊のQ値が4.28 MeVで、すべての原子核中で最大である。自然放射性のガンマ線の最大エネルギーは2.6 MeVでベータ線は最大3.27 MeVなので、原理的にバックグラウンド(以下BG)のない測定が可能である。 ^{76}Ge のQ値(2.04 MeV)では分解能を上げて限界がある。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る。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こなかった。

われわれはCANDLES計画に先立ち、 $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 結晶(6.7 kg)を用いたELEGANT VIで ^{48}Ca の二重ベータ崩壊の研究を進め、世界最高感度の測定を行った[文献2]。図4に実験で得られたスペクトルを示す。

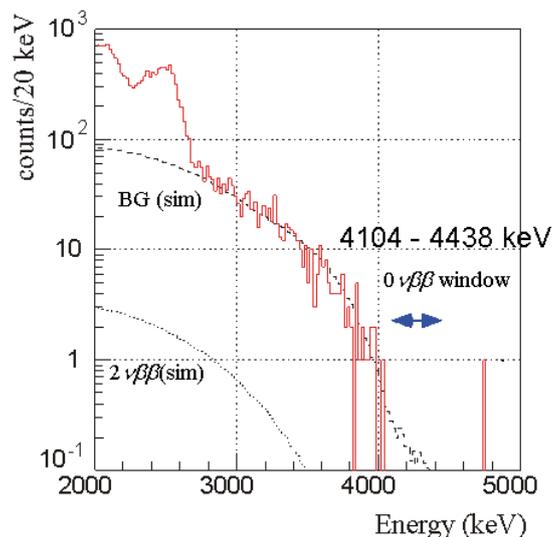


図4 ELEGANTS VIで測定された6.66 kgの $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 結晶を0.64年観測した時のスペクトル

^{48}Ca の二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より小さい値になる。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。

$\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 結晶は発光量の大きなシンチレータで、高分解能が得られる。またライトガイドを発光量の少ない CaF_2 (pure) にすることで PMT 側も active shield を達成する特徴的なデザインで ^{48}Ca に関しては一番よい結果が得られたが、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ある。しかし BG のない測定が達成できているという大きな特徴がある。

将来の大型検出器としては BG がいないことは特に重要である。6 章で質量の感度を一桁上げようとする物質質量を二桁増やす必要があると書いたが、これは BG がいないときに正しく、BG にリミットされる様になると四桁増やす必要があり、実質的に限界が見えてくる。BG に強い原子核が有利な理由がここにあり、 ^{48}Ca は最善の原子核と言える。

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った。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減衰長が自己吸収のため、10cm 程度と短いという問題があった。このため、 $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ 結晶を用いる限り二次元的にしか拡張できず、デザインに大きな制約となった。

われわれはこの問題を大量の CaF_2 結晶（ここでは Eu をドーブしない pure の結晶）をシンチレータとして用い、液体シンチレータ中に沈める CANDLES 検出器のデザインで一挙に解決した[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、光の透過率が優れており、大きな結晶を作っても集光にまったく問題がない。 CaF_2 結晶のシンチレーション光の発光中心は UV 領域になっていることもあって、シンチレータとして使えることはあまり認識されていなかった。発光量も $\text{CaF}_2(\text{Eu})$ に比較して小さいが、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ことが可能になった。図 5 に CANDLES 検出器の概念図を示す。

大型化は可能になったが検出器として動作させるには、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らない。CANDLES 計画では、

- (1) 結晶のサイズを最適化して、二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 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 $\sigma \sim 1.5\%$) を実現した。

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

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、その数を評価できる。このことは信号が見つかったとき、発見したという論拠を数で示すことができる有利さに繋がる。HDM 実験の結果が BG の評価で議論が分かれているが、その素性を理解していない限り答えがない。しかし CANDLES 計画ではその様な不定性がない。以下 BG の低減とエネルギー分解能について個別に議論する。

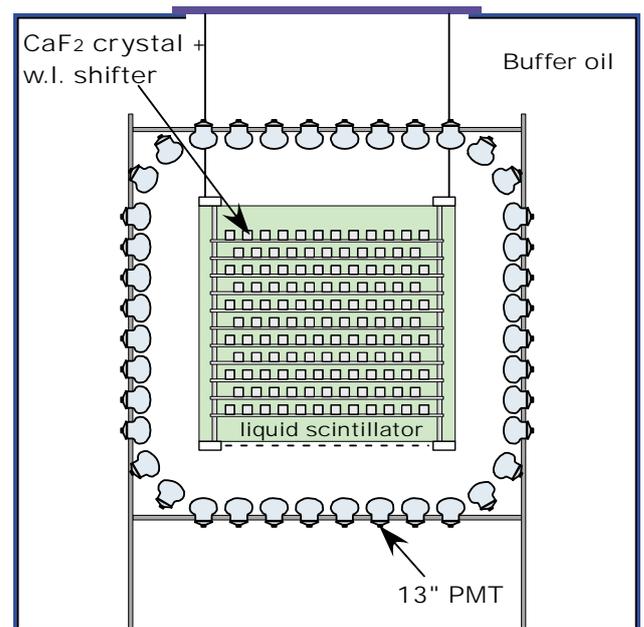


図 5 CANDLES IV 検出器の概念図

多数の光電子増倍管が 15 cm 立方の 600 個の CaF_2 結晶からのシンチレーション光を検出する。

7.1 BG の低減

^{48}Ca は原理的に BG のもっとも少ない原子核である。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で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) を除去する。液体シンチレータの時定数は $\sim 10\text{nsec}$ であり、一方で 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る。図 6 に明確に弁別できることが示されている。

^{48}Ca の二重ベータ崩壊の 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 ($\sim 1\mu$ 秒) に連続崩壊する β 線と 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る (図 7 に典型的な例を示す)。それ以外に 4.27 MeV に届く自然放射線はない (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 程度になる)。しかしこれらの BG はパルス波形の測定で三桁半程度下げられることを確認した。

パルス波形の測定で BG を下げたが、われわれが目指す BG レベルは更に低いもので、最後には結晶に含まれる BG の低減がどこまで達成できるかが問題になる。製造業者と協力しながら結晶の製作過程を見直して、U, Th などの放射性不純物濃度を、 $20 \sim 30 \mu\text{Bq/kg}$ に低減した結晶の安定製造を可能にした。この BG レベルは ELEGANT VI で使用したものよりほぼ一桁の向上が計られている。現在製作中の CANDLES III では既に十分なレベルに達している。

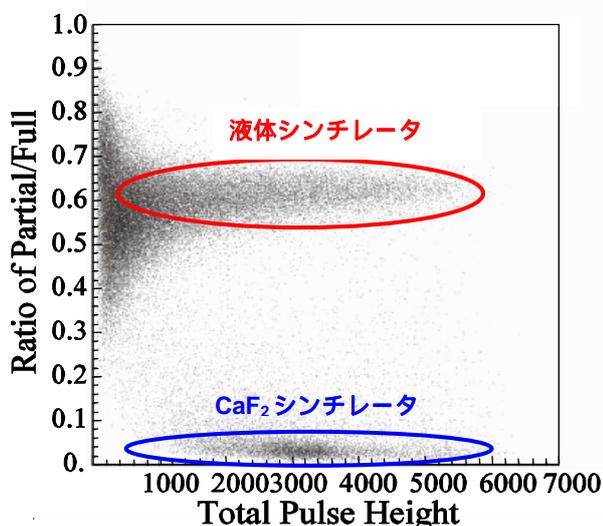


図 6 CaF₂ と液体シンチレータからの信号の弁別

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。

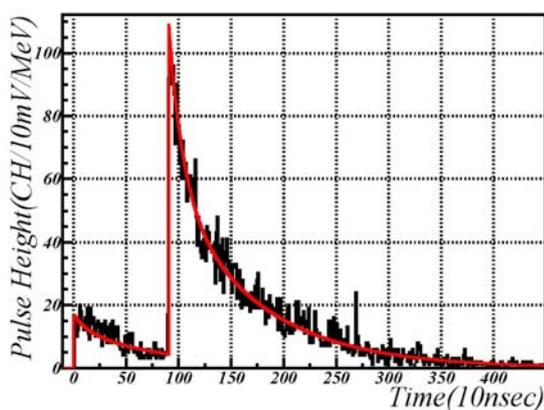


図 7 β 線と α 線が重なりエネルギー的に Q 値の領域に届く BG の例

パルス波形の測定でこの BG を落とすことが出来る。

7.2 エネルギー分解能

光の透過率の高い純粋な CaF₂ 結晶と液体シンチレータを組み合わせるにより、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た。しかし CaF₂ 結晶はシンチレーション光の発光波長中心が UV 領域で CaF₂(Eu) 結晶に比較して発光量が 1/3 程度なのでエネルギー分解能に限界があった。これを結晶の周りの液体シンチレータの波長変換剤を最適化して CaF₂ 結晶の発光量を増大させて解決した。なお液体シンチレータの発光量を高く保つためにはブソイドクメンを 20% 程度入れる必要があるが、これは CaF₂ 結晶から UV 光を吸収してしまうので、結晶の周り 5mm だけにブソイドクメンのない波長変換層を作り、ベト効率を維持しながら集光効率を上げることを可能にした。以上の工夫と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た。図 8 に ¹³⁷Cs の 662 keV の γ 線に対する分解能を示した。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う。

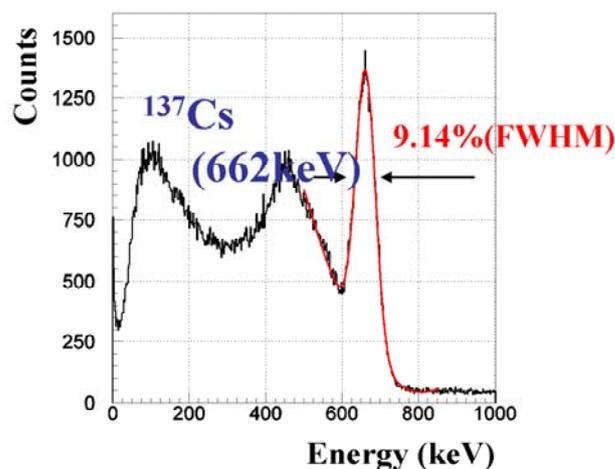


図 8 波長変換剤で発光量を増大させた CaF₂ 結晶で γ 線を測定したときの分解能

半値全幅で 9.14% は、Q 値の領域で原理的に FWHM で 3% の分解能を達成できる分解能で、 2ν 二重ベータ崩壊の影響を受けることなく 100 トンの検出器まで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 まで建設している。I は 10cm 立方の液体シンチレータに 5cm 立方の CaF₂ 結晶を沈め、4 本の 5" PMT で観測するもので、図 6 に示した BG 弁別の原理を実証した。II では 50cm 立方の液体シンチレータを 4 本の 15" PMT で観測するもので、中に複数の CaF₂ 結晶を入れて集光効率や位置分解能を検証した。以上の結果を基に、CANDLES III (CaF₂ 結晶: 200kg、13" PMT:

40本、地上)を大阪大学理学部に建設し、実証実験を行っている。図9にCANDLES IIIを示す。

現在 CANDLES III を CaF_2 結晶を 300kg、PMT を 80本に増強して地下に建設するための作業を進めている。来年度には建設が完了し、実際の測定に入る予定である。1年程度の測定で 1eV 以下で、4年で HDM の 0.5eV に到達する予定である。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する。

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ない。そこで CaF_2 結晶で 6トンの CANDLES IV 検出器の予算を要求中である。これで 0.1eV 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する。世界中で多くの大型実験計画が進行している中で後発との印象をもたれるかも知れないが、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われわれだけと言ってよく、現状では世界で最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る。

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を CANDLES III のレベルより一桁下げの必要がある。われわれの研究で一番問題になる BG は Th 系列だが、現在 CANDLES III には十分な約 $30\mu\text{Bq/kg}$ のレベルまで下げた結晶は製作されている。しかしこれを更に一桁下げて $3\mu\text{Bq/kg}$ 以下にする必要がある。そんなことが出来るのかと思われるかも知れないが、R&Dの段階で $6\mu\text{Bq/kg}$ の結晶の製作に成功しており、実現可能と考えている。ただし、大型検出器を作るときには、コストに注意を払う必要がある。一応よい感触は得ているが、製作方法が確立した段階でプロセスを見直す予定である。なお $3\mu\text{Bq/kg}$ (0.3ppt) とは検出効率 100% のわれわれの測定方法をもってしても 10cm 立方 (3.2kg) の結晶で、20個の崩壊を観測するのに1ヶ月かかるレベルであり、結晶の BG 調査だけでも大仕事である。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ある。われわれの計画では III (地下) で IV 用に開発・製作した結晶で二重ベータ崩壊の観測を行いながら IV に使える結晶であるかを調べていく。さもなければ IV に使える結晶を選定するのに無限の時間がかかってしまう。こういった研究を段階的に進める必要がある。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、いくつかの幻想が含まれている。

更に将来、CANDLES V では 100 トンサイズの検出器の建設を考えている。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る。世界の大型次世代計画と同程度の 30meV の質量領域の探索を目標にしている。V を建設する頃は、

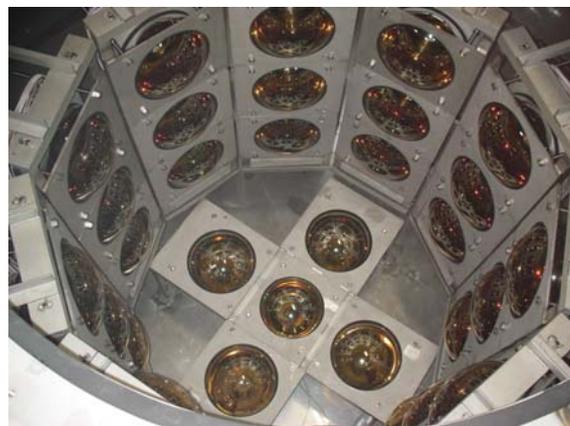
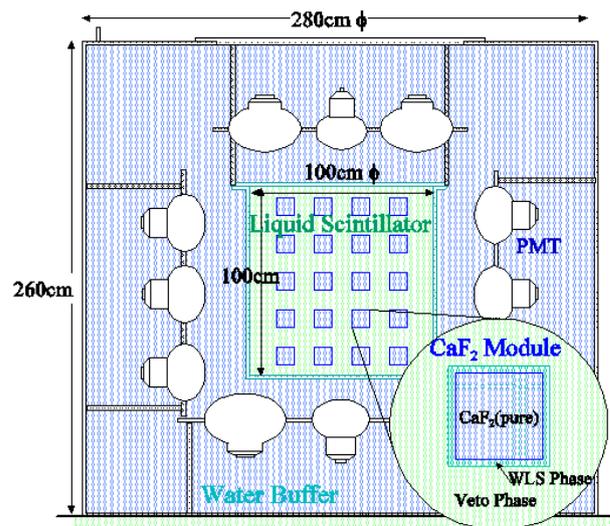


図9 現在阪大理学部に設置されている CANDLES III (地上) 検出器の構造図 (上) と PMT を設置したところの写真 (下)

水中にアクリルの 1kl の液体シンチレータ容器を設置し、その中に二層構造の CaF_2 結晶が設置される。40本の $13''$ 光電子増倍管が 60個の 10cm 立方の CaF_2 結晶からのシンチレーション光を検出する。CANDLES III (地下) では水の部分も液体シンチレータになる。

たとえば SNO や Kamland といった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になれば測定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る。そうなれば予算の点からも世界の大型計画に比較して圧倒的に有利な立場に立てる。

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る。しかも、もし同位体濃縮が可能になれば他の追従をまったく許さない検出器が完成する。現在 ^{48}Ca の濃縮は可能ではあるが、微量かつ高価で、大型化している二重ベータ崩壊研究に対応できない。有効な製造方法がなかったのは原理的な問題

ではなく、ニーズがなかったためかも知れない。安価な濃縮法がないのは Ca にガスの化合物がないためだが、他にもいくつか方法が考えられる。われわれも研究を進めている。研究会を開いたところ、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ことが分かり、思った以上に将来性があるのではと考えている。

文献

1. 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/>
2. Ogawa, *et al.*, Nucl. Phys. **A730** (2004) 215 – 223
3. 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