



Contents lists available at ScienceDirect

## Reviews in Physics

journal homepage: [www.elsevier.com/locate/revip](http://www.elsevier.com/locate/revip)

## Current status of neutrinoless double-beta decay searches

Reyco Henning<sup>a,b</sup><sup>a</sup> Department of Physics and Astronomy, University of North Carolina at Chapel Hill, CB 3255, NC 27599, USA<sup>b</sup> Triangle Universities Nuclear Laboratory, Duke University, P. O. Box 90308, Durham, NC 27708-0308, USA

## Current status of neutrinoless double-beta decay searches

ニュートリノレス二重ベータ崩壊探索の現在の状況

Ass. Prof. Reyco Henning (レイコ・ヘンニング) … USA, ノースカロライナー大学

Abstract: 概要

この記事はニュートリノレス二重ベータ崩壊の実験的探索の現在の状況と近い期間の将来を簡単に批評する。ニュートリノレス二重ベータ崩壊の動機と歴史を議論した後で、現在の実験とこれら感度を制限する因子に注目しよう。その後、転換させたニュートリノ質量の階層性(hierarchy)を探索する実験の提案の要求と展望を議論しよう。

Introduction

ニュートリノは粒子物理の標準模型の範囲内で基本的な粒子である。これらは(電氣的な)電荷を運ばない唯一のフェルミオンで、そしてカラー(量子色力学)を持たない。ニュートリノ( $\nu$ )と反ニュートリノ( $\bar{\nu}$ )の間をはっきりと区別するために使用できる唯一の量子数はレプトン数である。しかし、レプトン数で組織されたゲージ対称性はなく、この量が保存しなくてはならないという基本的な(fundamental)理由はない。レプトン数保存(lepton number conservation)を要求しない標準模型へのたくさんの拡張がある。レプトン数が破れた場合、 $\nu$ と $\bar{\nu}$ の間の区別は不明確で、これはニュートリノ自身が反粒子である、マヨラナ・フェルミオン<sup>[1]</sup>と呼ばれることが可能になる。

興味深いことに、今日の実験結果はマヨラナとディラックのニュートリノの両方が一致する。ニュートリノの性質を決定することは難しい、なぜならニュートリノ質量が小さく、そして弱い相互作用の利き手があるから、しかし、将来有望な(promising)アプローチは以下に与える原子核のニュートリノレス二重ベータ崩壊( $\beta\beta(0\nu)$ -decay)を探索することである<sup>[2,3]</sup>。

$$(A, Z) \rightarrow (A, Z + 2) + 2e^-$$

これもレプトン数が破れる過程( $\Delta L=2$ )で、すぐわかる(obvious)。多くの様々な過程が潜在的にこの過程を成立させる(mediate)ことができたにもかかわらず(though)、例えば、質量を持ったマヨラナニュートリノまたは超対称性粒子の交換(文献<sup>[4,5]</sup>をみよ)、この崩壊の観測はちょうどニュートリノがマヨラナフェルミオンであることを示すためには十分である<sup>[6]</sup>。<=注意としてはこの崩壊を観測できれば  $\nu$  がマヨラナであることは明白だが、まだ観測できてないよってこと！

LHC などの加速器実験は $\beta\beta(0\nu)$ -decay<sup>[5,7-16]</sup>に寄与できるレプトン数破れ過程を探索することができる。しかし、この崩壊の直接探索はモデルに依存しない方法でニュートリノのマヨラナ性 vs. ディラック性を探索できる唯一の方法である。いずれの $\beta\beta(0\nu)$ -decayの半減期直接測定または制限もニュートリノ質量絶対値を制限する(constrain)ために使用でき、質量を持ったマヨラナ・ニュートリノの交換によって $\beta\beta(0\nu)$ -

decay 過程が支配されると仮定している。実験の次世代は実効的なマヨラナニュートリノ質量を 10-20 meV に下げた感度を持つために試みる (attempt) だろう、これはいわゆる反ニュートリノ階層制度 (hierarchy regime) をカバーするだろう。しかし、他の新物理からの寄与を解決する (unravel) ことは定量化することが難しいニュートリノ質量<sup>[4, 5, 17]</sup>のための決定的な (definitive) 半減期測定の結果をもたらすことができるだろう。加えて、崩壊に親密な原子核物理は観測したニュートリノ質量への崩壊頻度に関連づけるため原子核行列成分 (NMEs) の難し計算を要求する (現在の批評を代表して文献<sup>[18-20]</sup>を見よ)。これにも関わらず、 $\beta\beta(0\nu)$ -decay の質量制限 (constrain) はニュートリノ質量直接探索からのそれら (寄与) とまだ互いに補いつ合っている (complementary)、KATRIN<sup>[21]</sup> と Project 8<sup>[22]</sup> のような実験のトリウム・エンドポイント、ECHO<sup>[23]</sup> のような実験の電子捕獲、そして宇宙論<sup>[24]</sup> のように。

この論文は  $\beta\beta(0\nu)$ -decay の探査卵実験の現在の状況と次世代に移行する (scale) 挑戦についてとても簡単な批評を提供する。 $\beta\beta(0\nu)$ -decay の文献 (literature) は広範囲で詳細な現在の現象学と  $\beta\beta(0\nu)$ -decay の実験将来性の批評であり、読者は文献<sup>[16, 18, 27-29]</sup>を参照する。

## 2. The experimental approach and challenges

$\beta\beta(0\nu)$ -decay は活発な (energetically) 多くの同位体を許すが、これらの唯一 35 個が安定に反して (不安定で) または単一ベータ崩壊の高い抑制を持ち、そして実験的に使用された<sup>[30]</sup>。さらに考察 (以下で記述する) は同位体が実効可能のために追加の制限を適用している。表 1 に示すのは実際の実験の関心の方痛いのリストで、この論文で議論するつもりだ。半減期の制限は極端に長い ( $\sim 10^{24}$  年)、そして次世代実験の以降のセットを述べる。

**Table 1**

Some  $\beta\beta(0\nu)$ -decay isotopes of experimental interest that are discussed in this paper, shown with most recent half-life limits. Natural abundances and Q-values taken from <sup>[28]</sup>.

Isotope	$\beta\beta(0\nu)$ Half-life limit (years)	Natural Abundance [%]	Q-value (MeV)
<sup>48</sup> Ca	$> 1.4 \times 10^{22}$ <sup>[31]</sup>	0.187	4.2737
<sup>76</sup> Ge	$> 3.0 \times 10^{25}$ <sup>[32]</sup>	7.8	2.0391
<sup>82</sup> Se	$> 1.0 \times 10^{23}$ <sup>[33]</sup>	9.2	2.9551
<sup>100</sup> Mo	$> 1.1 \times 10^{24}$ <sup>[34]</sup>	9.6	3.0350
<sup>130</sup> Te	$> 4.0 \times 10^{24}$ <sup>[35]</sup>	34.5	2.5303
<sup>136</sup> Xe	$> 1.1 \times 10^{25}$ <sup>[36]</sup>	8.9	2.4578
<sup>150</sup> Nd	$> 1.8 \times 10^{22}$ <sup>[37]</sup>	5.6	3.3673

CUORE

### 2.1. Signal detection

$\beta\beta(0\nu)$ -decay は 2 つの電子と反ニュートリノが 0 個の原子核放射によって特徴つけられる。原子核の反跳エネルギーは無視でき、そしてエネルギーのほとんどが電子によって持っていかれる (carry away)。ほとんどの直接実験アプローチはこのエネルギー和を測定することだ、なぜなら  $\beta\beta(0\nu)$ -decay は崩壊の Q 値で合計エネルギー Spektrum において特徴的なピークとして現れるだろうから (manifest)。他の情報も収集できる。飛跡検出器は事象の位相数学 (topology) を再構成でき、そして  $\beta\beta(0\nu)$ -decay のような 2 つの電子放射した事象を単一電子生成した事象から区別できる (distinguish)。後者は普通の電子または散乱した  $\gamma$  線のコンプトン反跳を含む。原子技術は以下で議論するとして、 $\beta\beta(0\nu)$ -decay の追加の確認として娘核同位体を識別するために適用できる。

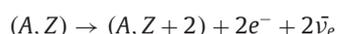
### 2.2. Radioactive backgrounds

$\beta\beta(0\nu)$ -decay 実験の最も優位な実験的な挑戦は電離放射バックグラウンドの削減である。確かな自然に生じる放射性同位体は擬態した (mimic)  $\beta\beta(0\nu)$ -decay 信号として、 $\beta\beta(0\nu)$ -decay 探索においてバックグラウンド事象を生成するかもしれない。<sup>232</sup>Th と <sup>238</sup>U のような長寿命の原始な同位体は地殻 (earth crust) と建

設物、標的物質内の至る所に存在する(ubiquitous)。崩壊する間にこれらの娘核の放射のいくつかの高エネルギー  $\gamma$  線は検出器物質内の  $\beta\beta(0\nu)$ -decay 信号の擬態または解析カットで邪魔することの電離相互作用に耐える(undergo)ことができる。例えば、 $^{232}\text{Th}$  崩壊連鎖の  $^{208}\text{Tl}$  は極端な(intense)ライン 2.614 MeV を放射する、これはいくつか興味持っている  $\beta\beta(0\nu)$ -decay 同位体の Q 値以上、そして  $^{238}\text{U}$  系列の  $^{214}\text{Bi}$  は 3.184 MeV にわたって多くのことなったエネルギーで  $\gamma$  線を放射する。これらの放射能同位体を削減するために、 $\beta\beta(0\nu)$ -decay 実験は建造物と標的物質の放射性純度を改善のために極端な(extreme)手段(measure)に頼っている(resort)、しかしどのバックグラウンドが支配的で、何の物質が要求されているかは実験特有である。 $\beta\beta(0\nu)$ -decay 実験も高密度物質(鉛など)、極低温液体、水またはこれらの組み合わせによって環境  $\gamma$  線に対して(against)遮蔽を要求する。いくつかの遮蔽設計は追加のバックグラウンド除去力を追加するために軽装された(instrument)。遮蔽として鉛を使用する実験は  $^{210}\text{Pb}$  が少ない古い(大昔の)(archaeological)鉛を使用することさえあるかもしれない、 $^{210}\text{Pb}$  は半減期 22.2 年である [38]。

$^{222}\text{Rn}$  は  $^{238}\text{U}$  系列の一部で、3.82 日の半減期を持ち、特に有害な(pernicious)バックグラウンドである。これは岩、コンクリート、検出器構造の素材から染み出し(seep)、そして化学的に不活性な(inert)希ガスである。これが崩壊したとき、娘核イオンは近くの表面に静電的に付着して、特に表面に感度を持つポロメータ(温度測定)や他の検出器において沈着(plate-out)は優位な懸念(心配事: concern)をもたらす。加えて、 $^{214}\text{Bi}$  は  $^{222}\text{Rn}$  の娘核同位体で、 $\gamma$  線のバックグラウンドを与える。全ての  $\beta\beta(0\nu)$ -decay 実験は Rn 緩和(mitigation)からのいくつか要請する。

$\beta\beta(0\nu)$ -decay に耐える(undergo)ことができる全ての同位体は以下に与えるニュートリノ・ダブルベータ崩壊と呼ばれる  $\beta\beta(2\nu)$ -decay に関しても絶えることができる。



これは  $10^{20}$  年のオーダーの半減期を持つ実験的に興味ふかい同位体で観測することができる許された 2 けた弱い過程である [27]。運動学的な主張から、この崩壊で放射された電子はこの崩壊の Q 値への幅広い連続性をもつことが許される(つまり、電子のエネルギーは連続分布である)。 $\beta\beta(0\nu)$ -decay からこれら  $\beta\beta(2\nu)$ -decay を区別する唯一の方法はエネルギーによる。実験のエネルギー分解能は特に重要になる。

最後に全ての近代的な(modern)  $\beta\beta(0\nu)$  実験はバックグラウンドを誘発する(indeed)宇宙線を減らすため地下の場所が求められている。宇宙線が上流大気と相互作用したによって生成されるミュオンは極度に(extremely)貫通性がよく(penetrates)、そして標的体積と直接相互作用することができ、または周りの物質でハドロニックまたは電磁氣的に相互作用によって二次粒子を生成することができる。これらは放射化した検出器素材と  $\beta\beta(0\nu)$  実験の共通構造物の銅中の  $^{60}\text{Co}$  のような宇宙放射性同位体と呼ばれるようなものが生成されることによって遅れた事象を引き起こすこともできる。現在の実験は即座の宇宙線バックグラウンドを軽減するために(mitigate) 1 km オーダー以上大きい深さを要求する。

### 3. Major experimental efforts

この章で、現在進行中(underway)の主な実験的な仕事(effort)を議論し、 $\beta\beta(0\nu)$ -decay する同位体約 1 トン以上を展開する道を実証する実験に注目している。他の仕事も簡単に議論する。

#### 3.1. $^{130}\text{Te}$ program

$^{130}\text{Te}$  はいくつかの  $\beta\beta(0\nu)$  同位体でもっとも高い自然な量(34.5%)を持ち、これは有効な候補にする。これは  $2527.518 \pm 0.013$  keV の良い Q 値を持つが、銅からの宇宙  $^{60}\text{Co}$  の崩壊において合計エネルギー(2505.7 keV)で放射される  $\gamma$  線に近い。この同位体で現在 2 つのメインで進行中の(underway)  $\beta\beta(0\nu)$  を探索している実験(仕事: effort)がある。

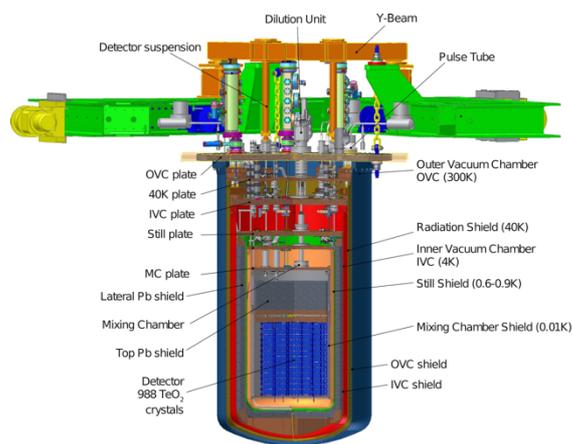
##### 3.1.1. CUORE

クオレ クライオジェニック  
CUORE(Cryogenic Underground Observatory for Rare Events: 希事象のための超低温地下観測)[38]はイタリア、アブルッツォ州ラクイラの近くグランサツツ国際研究所(LNGS)の水換算で 3400 m の深さで建造は最終段階である。これは自然の酸化テルル(Tellurium oxide)から作られた(未濃縮した(unenriched))超低温ポロメータ(温度計)[39, 40]を用いている。それぞれのポロメータは  $5 \times 5 \times 5 \text{ cm}^3$  の結晶、10 ミリケルビンで制御されている。この温度で結晶の熱容量は極端に小さい(どのくらい?)ので、 $\beta\beta(0\nu)$  からの微視的な(microscopic)エネルギーデポジションのようなそれらは測定可能な温度変化(の収量)が得られる(can yield)

measurable...).それぞれの結晶の温度は中性子核変換ドープされた Ge サーミスター(thermistor)\*で測定される。CUORE で、結晶は 200 kg の質量の  $^{130}\text{Te}$  を分配したそれぞれ 52 結晶の 19 タワーに整列されるだろう。このタワーの支持材は低バックグラウンドの銅とポリテトラフルオロエチレン (Polytetrafluoroethylene) (PTFE)から構成されている。CUORE は低い放射能を持つ鉛遮蔽材によって遮蔽される、これは中性子減速材(moderator)とラドン除去(exclusion)システムと同等の昔のローマの鉛を含んでいる。

CUORE は現在、ボロメータ技術を使つが感度増加と質量を増やしての実験の連結の段階である。もっとも最近では、CUORE コレポレーションは一つのひも(タワーのことか?)を展開して $\beta\beta(0\nu)$ の探索を実施した。この実験はCUORE-0と呼ばれ、露出 9.8 kg/y の  $^{130}\text{Te}$  において $\beta\beta(0\nu)$ 崩壊の制限 $T_{1/2} = 4.0 \times 10^{24}$  y を達成することができた<sup>[35]</sup>。CUORE はバックグラウンドレベル 1 count/t/keV/y で 10 年感度の $3.5 \times 10^{26}$  年の達成することを望んでいる(hope)<sup>[38]</sup>。CUORE のアプローチはとても良いエネルギー分解能と拡張性(scalability)を持つ。この主な欠点(drawback)はバックグラウンド汚染、特に結晶表面近くでの複雑な超低温物理、そして信号読み出しである。

\*サーミスター: 温度変化に対して電気抵抗の変化の大きい抵抗体のことである。この現象を利用し、温度を測定するセンサとしても利用される。センサとしてはふつう -50°C から 150°C 程度までの測定に用いられる。



グランサッソの位置は▲に示す(左)。CUORE 検出器概要(右)。

### 3.2. SNO+

SNO+検出器はSNO(Sudbury Neutrino Observatory: カナダ南東部の工業都市の名サドバリ、サドバリニュートリノ天文観測所)検出器<sup>[41]</sup>のアップグレードである。SNO は 1 キロトンの超純粋な重水(heavy water)( $\text{D}_2\text{O}$ )で満たされた直径 12m の透明な(transparent)アクリルベッセルで構成されている<sup>[42]</sup>。アクリルベッセルは水中に沈められ(submerge)、そして約 9500 個の PMT によって観測された。SNO はカナダのサドバリ近郊のクレイトン鉱山の水換算 6000m 深くの SNOLAB 実験室に位置する。SNO+は  $^{130}\text{Te}$  の  $\beta\beta(0\nu)$ 崩壊の探索を最初の物理目標を持つ新しいニュートリノ実験に編成する(field)ために SNO の建設施設(infrastructure: インフラ)の丈夫な(substantial)遺産(portion)を使っている。これは地球と天文のソースからのニュートリノ観測を基にした物理プログラムも持っている。SNO+は有機液体シンチレータ、PPO flour を持つリニア・アルカリ・ベンゼン(LAB)、検出媒介(medium)として  $^{130}\text{Te}$  を含んでいる(loaded)、を使用する予定で、SNO の重水媒介を置き換える。加えて SNO+は新たな浄化(purification)システム、改善された PMT、改良された DAQ システム、そして LAB と水の間の変換を調節適応順応する(accommodate)ために新たな機械的な支持システムも活用する(utilize)<sup>[43]</sup>。

SNO+は同位体のとても大きな質量を編成することができるだろうが、他の $\beta\beta(0\nu)$ 実験と比べてエネルギー分解能が負相なのから悩んでいる(suffer)。これはバックグラウンドを決定させて、エネルギー較正をするのに極度に重要である、この実験が残留バックグラウンドの統計量(statistical subtraction)を信頼する予定なので。SNO+バックグラウンドは $\beta\beta(2\nu)$ 事象と  $^8\text{B}$ (ボロン・エイト)太陽ニュートリノの電子との弾

性散乱によって支配されるだろう<sup>[43]</sup>。他の U/Th 汚染と岩壁からの BG は材質選択、純化、そして基準空間の選定(fiducialization)で緩和される。この技術が作用したら、通常のニュートリノ階層性の調査のためにスケールを変えることさえ可能になるかもしれない<sup>[44]</sup>。

SNO+は2段階提案している。初段階では、自然のテルルを0.3%(2340 kg)装填する(load)予定だ、<sup>130</sup>Teは800 kgに換算される。このフェイズの間、2017年に開始することを予期している、目標の感度は $T_{1/2} > 9.4 \times 10^{25} \text{y}$  (90% CL)または3シグマ検出限界 $T_{1/2} > 6.9 \times 10^{25} \text{y}$ だ。一度検出器コンセプトと純化が実証されて、次のフェイズは3%(<sup>130</sup>Teが8トン)の同位体順天に増加し、光量子効率を持つPMT R5912-HQEsに置き換える予定だ。このフェイズのため、目標感度は $T_{1/2} > 7 \times 10^{26} \text{y}$  (90% CL)または3シグマ検出限界 $T_{1/2} > 4 \times 10^{26} \text{y}$ だ<sup>[45]</sup>。

### 3.3. <sup>136</sup>Xe program

<sup>136</sup>Xeは特異な同位体だ、なぜならキセノンはシンチレーションして、希ガスで、他の同位体からの異なる実験アプローチを許す。<sup>136</sup>Xeの $\beta\beta(0\nu)$ 崩壊探索するために開発の異なる水準で3つの主な仕事がある。

#### 3.3.1. KamLAND-Zen

KamLAND-Zenも前のニュートリノ実験(この場合はKamLAND)のアップグレードであり、前の実験は原子炉ニュートリノの流量を測定した。KamLAND-Zenは日本富山市近郊の神岡鉱山内部に所在する。KamLAND-Zenでは、元のKamLAND検出器内の1.5mのバルーンに内包されている液体シンチレータに溶けている(dissolve)。バルーンの外の容積にもシンチレータで満たし、外部バックグラウンドに対して(against)強力な有効な遮蔽を与える。

最初のフェイズのため、<sup>136</sup>Xeの91.7%に濃縮した(enrich)179kgのキセノン配置した(deploy)。2011年に開始し、85 kg.yrの露出を収集した。残念ながら(unfortunately)、実験感度は予期しないバルーンへの<sup>110m</sup>Ag汚染によって邪魔された。これは $\beta\beta(0\nu)$ エンドポイントにとっても近いピークを作る。<sup>110m</sup>Agはどうか福島第一原子炉事故から起因している可能性が高い(likely)。(本当に?、なぜ金が入るの?)この混入にもかかわらず、KamLAND-Zen コラボレーションは制限を設けることができた。 $T_{1/2} > 1.9 \times 10^{25} \text{y}$  (90% CL)<sup>[46]</sup>。第2フェイズに移行して、コラボレーションはバルーンを置き直して、追加の同位体も充填した。合計質量は383 kg。追加で27.6 kg.yrの露出が唯一得られたが、<sup>110m</sup>Agバックグラウンドを10倍まで減らせた。2つのフェイズを結合して、KamLAND-Zenは $T_{1/2} > 2.6 \times 10^{25} \text{y}$  (90% CL)を達成することができた<sup>[47]</sup>。

近い将来のKamLAND-Zenの計画で、綺麗にした材質のミニバルーンを再建造して、Xeの量を600 kgにする。これで彼らは半減期 $2 \times 10^{26} \text{y}$ の達成を望んでいる。コラボレーションの提案を超えて、主な検出器アップグレードはKamLAND2-Zenと呼ばれ、集光ミラー、新たによく光るシンチレータ、そして量子効率が高いPMTを使用することによってエネルギー分解能の向上に注目している。彼らはエネルギー分解能が4%から2%未満に改善されると予測している(predict)、<sup>136</sup>Xe崩壊のQ値において。また、Xe質量を1,000 kg以上に増加するつもりでもある(intend: つもりである)。これらの改善で、ニュートリノ質量の逆階層性(inverted neutrino mass hierarchy)を20 meVに下げてカバーすることを期待している<sup>[48]</sup>。KamLAND-ZenはSNO+よりも同位体質量が小さいが、比較して良いエネルギー分解能によって帳消し(offset)にしている。

#### 3.3.2. EXO/nEXO

EXO(濃縮キセノン観測所: Enriched Xeon Observatory)はソースと検出媒介として<sup>136</sup>Xeを濃縮している超純粋液体キセノン(LXe)を使用している<sup>[49]</sup>。3次元事象再構成を達成するために時間射影電離箱(TPC)を使用してイオン化した電子を収集する。これはLXeの多重位置の典型的なエネルギーを落とすコンプトン散乱した $\gamma$ 線バックグラウンドに対して強い区別を与える。加えて、EXOはシンチレーション光を測定し、エネルギーデポジションの追加測定を与える。EXOのような一体の(monolithic)同質の(homogeneous)検出器は自身の次元に比例してスケールする自己遮蔽のご利益(benefit)を持っているが、素材をより濃縮することの費用で検出器次元の3乗でスケールする。

最初のフェイズ、EXO-200はアメリカ・ニューメキシコ州カールズバッド都市近郊の核廃棄物隔離試験施設(Waste Isolation Pilot Plant)の地下で2011年に濃縮Xeを150 kg配置した。それは $\beta\beta(0\nu)$ 探索を実施し<sup>[36, 50]</sup>、2014年に90%CL上限を $T_{1/2} > 1.1 \times 10^{25} \text{y}$ と報告した。EXO-200は大規模にそして慎重に素材選

定を実施し、スクリーニングして、低いバックグラウンド許容を達成するために特徴付けした<sup>[51, 52]</sup>。関心領域(ROI: region-of-interest)の項の性能で、EXO-200 はエネルギー分解能 FWHM 4% @  $Q_{\beta\beta}$  FWHM と、バックグラウンド頻度  $1.1 \times 10^{-3}$  counts/keV/kg/yr を達成した。理解すると、彼らの ROI は 0.23 counts/kg/yr の頻度である。

次の EXO の提案されたフェイズは nEXO とよばれている<sup>[53, 54]</sup>。コラボレーションは5年のランのあと、目標感度  $T_{1/2} > 6.6 \times 10^{27}$  y (90%CL)、マヨラナニュートリノ質量 7-17 meV の感度で、クライオスタット(cryostat: 低温恒温槽)内の濃縮 Xe を 5 トン充填する提案をしている。EXO で、nEXO は LXe を基にした TPC 画像化を予定している。主な実験的なツカイゼンは巨大質量の遮蔽改善、事象再構成のセグメント増加、エネルギー分解能向上するために APD の代わりに低いノイズのシリコン光電管を使用して、そして SNOLAB のようなもっと深い位置で行うなどを含む。他の可能性のある将来のアップグレードは直接タグまたは娘の Ba イオンを回収することであろう<sup>[55]</sup>。

### 3.3.3. NEXT

さらに現在の <sup>136</sup>Xe での  $\beta\beta(0\nu)$  探索の提案、NEXT (Neutrino Experiment with a Xenon TPC) と呼ばれている、は 15 bar の高圧の TPC 内で濃縮 Xe を使用する<sup>[56, 57]</sup>。TPC で再構成できる  $\beta\beta(0\nu)$  崩壊からの電子の長い軌道をガスの低密度は生成する。電子軌道の終わりでエネルギー損失のイオン化の増加は”スパゲッティ(spaghetti)”と”ミートボール(meatball)”の特徴的な構造を生成し、電子が航行している方向を決定するために使用することができる(つまり head/tail を決定できるというわけ)。これは明らかに同じバーテックスから起因した1つまたは2つの電子を持つ事象を区別もでき、外部  $\gamma$  線からのバックグラウンドを除去するための強力なツールを与える。加えて、この設計は興味を持っているエネルギー分解能はプロトタイプで 0.5-0.7% を実証し、他の Xe アプローチよりも良い。単一体で同質な検出器なので、規模拡大にスケールの同じご利益を持っているが、低バックグラウンドな大きな圧力ベッセルと技術的な挑戦をもたらすだろう外部バックグラウンドに対する巨大な量の遮蔽が要求される。許容なアップグレードは磁場を使用することで、コラボレーションによってバリウム・タギングも検討されている<sup>[58]</sup>。

### 3.4. <sup>76</sup>Ge program

ゲルマニウムは半導体で、直接イオン化電荷を測定する半導体放射線検出器に転換される(convert)ことができる。 $\gamma$  線スペクトロスコーピーのために要求された高純度ゲルマニウム(HPGe)検出器約 1kg の半導体性(semiconducting)の性質要求を達成するために、 $10^{-12}$  未満の汚染レベルにゲルマニウムを純化するプロセスが開発された<sup>[59]</sup>。これらのプロセスも在庫(stock)材質からの残留(residual)放射能汚染を減らせるが、実験的には同位体の起因である(induced)宇宙線の対処(contend)がまだ残っている。HPGe 検出器はどの  $\beta\beta(0\nu)$  技術で最も良いエネルギー分解能(0.15% @  $Q_{\beta\beta}$ )を持っていて、これは小さい ROI のために強力なバックグラウンドの減少(reduction)を与える。高分解能は精密な  $\gamma$  線スペクトロスコーピーによって残留放射能汚染の上質な(superior)識別も許容する。ゲルマニウムの欠点は検出器建設のコストと、極低温と低放射能環境の中で多くの検出器を配置する複雑な連結をしている。<sup>76</sup>Ge は実験的な興味他の同位体よりも  $Q_{\beta\beta}$  が 2039 keV でわずかに低い。バックグラウンドの潜在的なソースの要求が検討されている。

#### 3.4.1. GERDA and the Majorana demonstrator

ゲルマニウム検出器アレイ実験(GERDA: Germanium Detector Array)は液体アルゴン LAr で低温にした中で直接 86%に濃縮した HPGe 検出器のアレイを沈めた新しいアプローチを活用している<sup>[60]</sup>。Lar は極低温の冷却を提供して、外部  $\gamma$  線に対して遮蔽する。Lar を含んだ冷却層と HPGe 検出器は追加した有効な遮蔽として与えた巨大な水タンクに沈めている。GERDAは計画されたアプローチでこれらのゲルマニウム検出器を展開し、そして LNGS(グランサツソ国際研究所)で最初の段階を現在完了した<sup>[32, 61]</sup>。この間のフェイズで彼らは以前の IGEX: International Germanium Experiment (国際ゲルマ実験)<sup>[62, 63]</sup>と HDM: Hidelberg-Moscow 実験<sup>[64]</sup>から濃縮した検出器を再生して(reprocess)展開した、セカンドフェイズからの新しい検出器と同様に。GERDA は 2011 にデータ収集を開始し、露出は 21.6 kg.yr を収集し、LAr 中に HPGe アレイを沈めて制御する実証を成功させた。また  $\beta\beta(0\nu)$  崩壊の現在の <sup>76</sup>Ge におけるベスト制限を  $T_{1/2} > 2.1 \times 10^{25}$  y とセットした。これは以前の実験の生成  $T_{1/2} > 3.0 \times 10^{25}$  y と組み合わせている。加えて慎重な材料選択で、GERDA は  $\beta\beta(0\nu)$  崩壊を示唆するかもしれない単一サイト事象とコンプトン散乱のような多重サイトの間の区別(distinguish)のために HPGe 信号のデジタルパルス整形解析が必要である(rely)。

GERDA は現在、セカンドフェイズを展開している、これは追加の 20 kg を加える予定の検出器で、 $10^{26}$  年を超える半減期の感度の向上を望む<sup>[65]</sup>。

“マヨラナ・デモンストレーター”も濃縮 HPGe 検出器を使用しており、有効なミューオン除去で遮蔽している銅と鉛の常時従来よりも低バックグラウンドである内側に展開している<sup>[66]</sup>。現在アメリカ、南ダコタ州リードのスタンフォード地下研究施設(SURF)での依頼に耐えてそして展開されている。検出器の近くに位置する銅部分は電鍍法(でんじゅうほう)\*\*で作られた銅から作られている、そして、宇宙線が生産する $^{60}\text{Co}$ を防ぐため SURF 地下で加工した。このコラボレーションは 29kg の濃縮検出器と 15kg の無濃縮を展開するつもりで、解析カットの後、3 counts/ROI/t/y のバックグラウンドの実証を目標で。マヨラナデモンストレーターは GERDA のように LAr からの低エネルギーの $^{39}\text{Ar}$ バックグラウンドを持たないので、低エネルギーの希事象の探索も可能である<sup>[67]</sup>、軽い WIMP 暗黒物質<sup>[68-72]</sup>と太陽・宇宙アクシオンのような<sup>[70, 73-87]</sup>。

マヨラナデモンストレーターと GERDA コラボレーションは両方のコラボレーションからのベスト技術を組み合わせたトン・スケールの $\beta\beta(0\nu)$ 崩壊実験の参加を続けて合併するつもりだ。

\*\*電子メッキ法のようなもの

### 3.5. Other isotopes and approaches

$^{48}\text{Ca}$  は $\beta\beta(0\nu)$ 崩壊同位体の高い Q 値を持っていて、同位体候補として実験的にとても魅力的(attractive)にする<sup>[31]</sup>。しかし、これの自然存在率(natural abundance)はとても低く(0.187%)で、つまり、いくつかの正体の実験の成功は新しい濃縮技術に依存するだろう。CANDLSE 実験は液体シンチレータの中に沈めた(submerge)CaF<sub>2</sub>シンチレータを使用して、そしてこの感度を制限する $^{48}\text{Ca}$ の唯一 0.3 kg だけ展開されている。

異なる同位体での追加の仕事は、ガス軌跡検出器の薄いホイル(NEMO-3<sup>[88]</sup>, Super NEMO<sup>[89]</sup>)、シンチレータ・ポロメータ(CUPID<sup>[90]</sup>, LUCIFER<sup>[91]</sup>, AMoRE<sup>[92]</sup>)、そして個体 TPC(COBRA<sup>[93, 94]</sup>)が進行中である(underway)。読者はさらなる詳細にこれらの技術をカバーする他の批評記事を参照されよ<sup>[16, 28, 29, 95]</sup>。

## 4. Main considerations for the next generation experiments

主な $\beta\beta(0\nu)$ 崩壊実験は感度向上のためにトン・スケールの建造に向かって移動している。これらの実験は高価で、そして全てのアプローチが前進する(forward)ことはできないだろう。最適な技術と同位体の選択は NME 計算、同位体の Q 値、ROI 中のバックグラウンド、エネルギー分解能、濃縮、そしてコストの検討が必要な恐ろしく大きな(formidable)挑戦だろう。いくつかの著者はこの問題を研究している、つまり<sup>[20, 27, 95]</sup>、そしてこの複雑なトピックはこの簡単な批評の範囲を超える。しかし、重要で時々見落とす(overlooked)事実はバックグラウンドの要請はちょうど質量の増加と同様に重要で、感度推定の相互(reciprocal)関係で生じる。これは図 1 に示す。いくつかの同位体増加はバックグラウンドの見合った減少によって伴わなければいけない。

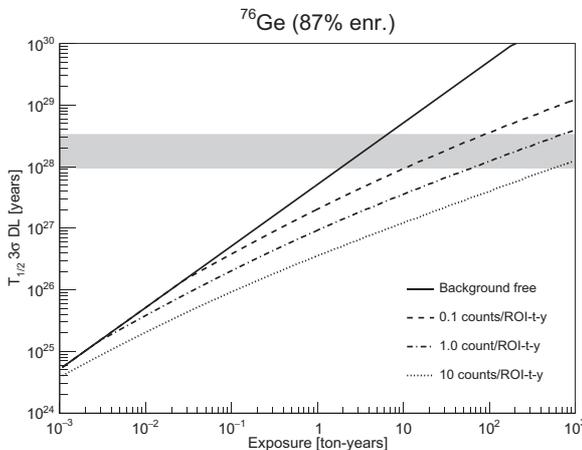


図 1. ゲルマニウム実験の露出の関数としての  $3\sigma$  発見制限と達成されるバックグラウンド制限を示す。水平のバンド(灰色帯)は NME とニュートリノ金剛パラメータで組織された不確定性を含むニュートリノ逆階層性の領域を示す。これはニュートリノ質量の逆階層性の完全な探索を明らかにし、この実験は 0.1 cts/t/y の極度な(extremely)低バックグラウンド、露出 10t.y の事象を持つべきである。他の同位体も同軸バックグラウンドが要求される。

## 5. Conclusions

この論文は $\beta\beta(0\nu)$ 崩壊探索実験の現在状況と将来計画について簡単に批評した。これが次世代のトンスケール実験に移行するつもりである実験技術の豊富な配置された広い分野を示した。我々は検出器主のバックグラウンドが将来の実験の到達にちょうど質量と同じくらい重要であり、どちらも改善するために見合った仕事が置かれるべきだと主張する( argue)。

## Reference

- [1] E. Majorana, Nuovo Cimento 14 (1937) 171.
- [2] M. Goeppert-Mayer, Phys. Rev. 48 (1935) 512.
- [3] G. Racah, Nuovo Cimento 14 (1937) 322.
- [4] F.F. Deppisch, M. Hirsch, H. Päs, J. Phys. G Nucl. Part. Phys. 39 (2012) 124007.
- [5] F. Bonnet, M. Hirsch, T. Ota, W. Winter, J. High Energy Phys. 2013 (2013) 55.
- [6] J. Schechter, J. Valle, Phys. Rev. D 25 (1982) 2951.
- [7] W.-Y. Keung, G. Senjanovic ´, Phys. Rev. Lett. 50 (1983) 1427.
- [8] V. Cirigliano, A. Kurylov, M.J. Ramsey-Musolf, P. Vogel, Phys. Rev. Lett. 93 (2004) 231802.
- [9] P. Fileviez Pérez, T. Han, G. Huang, T. Li, K. Wang, Phys. Rev. D 78 (2008) 015018.
- [10] B.C. Allanach, C.H. Kom, H. Päs, Phys. Rev. Lett. 103 (2009) 091801.
- [11] G. Aad, et al., J. High Energy Phys. 2011 (2011) 107.
- [12] A. Melfo, M. Nemešsek, F. Nesti, G. Senjanovic ´, Y. Zhang, Phys. Rev. D 85 (2012) 055018.
- [13] J.C. Helo, S.G. Kovalenko, M. Hirsch, H. Päs, Phys. Rev. D 88 (2013) 011901.
- [14] J.C. Helo, S.G. Kovalenko, M. Hirsch, H. Päs, Phys. Rev. D 88 (2013) 073011.
- [15] T. Peng, M. Ramsey-Musolf, P. Winslow (2015).
- [16] H. Päs, W. Rodejohann, New J. Phys. 17 (2015) 115010.
- [17] M. Duerr, M. Lindner, A. Merle, J. High Energy Phys. 2011 (2011) 91.
- [18] J.D. Vergados, H. Ejiri, F. Šimkovic, Rep. Prog. Phys. 75 (2012) 106301.
- [19] J. Suhonen, O. Civitarese, J. Phys. G Nucl. Part. Phys. 39 (2012) 124005.
- [20] R.G.H. Robertson, Mod. Phys. Lett. A 28 (2013) 1350021.
- [21] Katrin design report2004, <http://bibliothek.fzk.de/zb/berichte/FZKA7090.pdf>. (accessed 14.03.16).
- [22] D.M. Asner, et al., Phys. Rev. Lett. 114 (2015) 162501.
- [23] L. Gastaldo, et al., J. Low Temp. Phys. 176 (2014) 876.
- [24] P.A.R. Ade, et al., Planck 2015 results. XIII. Cosmological parameters (2015). ArXiv:1502.01589
- [25] G. Drexlin, et al., Adv. High Energy Phys. 2013 (2013) 293986.
- [26] C. Weinheimer, K. Zuber, Annalen der Physik 525 (2013) 565.
- [27] F.T. Avignone III, S. Elliott, J. Engel, Rev. Mod. Phys. 80 (2008) 481.
- [28] B. Schwingenheuer, Annalen der Physik 525 (2013) 269.
- [29] S.M. Bilenky, C. Giunti, Int. J. Mod. Phys. A 30 (2015) 1530001.
- [30] C. Giunti, C. Kim, Fundamentals of Neutrino Physics and Astrophysics, Oxford University Press, 2007.
- [31] I. Ogawa, et al., Nucl.Phys. A730 (2004) 215.
- [32] M. Agostini, et al., Phys. Rev. Lett. 111 (2013) 122503.
- [33] R. Arnold, et al., Phys. Rev. Lett. 95 (2005) 182302.
- [34] R. Arnold, et al., Phys. Rev. D 89 (2014) 111101.
- [35] K. Alfonso, et al., Phys. Rev. Lett. 115 (2015) 102502.
- [36] J. Albert, et al., Nature 510 (2014) 229.
- [37] J. Argyriades, et al., Phys. Rev. C 80 (2009) 032501.
- [38] C. Arnaboldi, et al., Nucl. Instr. Meth. A 518 (2004) 775.
- [39] E. Fiorini, T. Niinikoski, Nucl. Instr. Meth. 224 (1984) 83.
- [40] C. Enss, D. McCammon, J. Low Temp. Phys. 151 (2008) 5.
- [41] M. Chen, Nucl. Phys. Proc. Suppl. 145 (2005) 65.
- [42] B. Aharmim, et al., Phys. Rev. C88 (2013) 025501.
- [43] A. Maio, J. Phys. Conf. Ser. 587 (2015) 012030.

- [44] S.D. Biller, Phys. Rev. D 87 (2013) 071301.
- [45] A. Wright, “Liquid scintillator based double beta decay experiments”, Conference Presentation at International Workshop on Baryon and Lepton Number Violation, 2015.
- [46] A. Gando, et al., Phys. Rev. C 85 (2012) 045504.
- [47] A. Gando, et al., Phys. Rev. Lett. 110 (2013) 062502.
- [48] K. Asakura, et al., AIP Conf. Proc. 1666 (2015) 170003.
- [49] M. Auger, et al., J. Instrum. 7 (2012) P05010.
- [50] M. Auger, et al., Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 032505.
- [51] D. Leonard, et al., Nucl. Instr. Meth. A 591 (2008) 490.
- [52] J.B. Albert, et al., Phys. Rev. C 92 (2015) 015503.
- [53] F. Retire, “From EXO-200 to nEXO towards the inverted mass hierarchy”, Conference Presentation at International Workshop on Baryon and Lepton Number Violation, 2015.
- [54] A. Pocar, Nucl. Part. Phys. Proc. 265 (2015) 42.
- [55] M.K. Moe, Phys. Rev. C 44 (1991) R931.
- [56] V. Alvarez, et al., J. Instrum. 7 (2012) T06001.
- [57] J. Gomez-Cadenas, et al., Adv. High Energy Phys. 2014 (2014) 907067.
- [58] J. Gomez-Cadenas (2014). ArXiv:1411.2433
- [59] G.F. Knoll, Radiation Detection and Measurement, third ed., John Wiley & Sons, Inc., 2010.
- [60] K.H. Ackermann, et al., Eur. Phys. J. C 73 (2013) 2330.
- [61] M. Agostini, et al., Eur. Phys. J. C 74 (2014) 2764.
- [62] C.E. Aalseth, et al., Phys. Rev. D 65 (2002) 092007.
- [63] C.E. Aalseth, et al., Phys. Rev. D 70 (2004) 078302.
- [64] H.V. Klapdor-Kleingrothaus, et al., Eur. Phys. J. A 12 (2001) 147.
- [65] K.T. Knopfle, PoS TIPP2014 (2014) 109.
- [66] N. Abrgall, et al., Adv. High Energy Phys. 2014 (2014). Article ID 365432.
- [67] P.S. Barbeau, J.I. Collar, O. Tench, JCAP 2007 (2007) 009.
- [68] C.E. Aalseth, et al., Phys. Rev. Lett. 101 (2008) 251301.
- [69] C.E. Aalseth, et al., Phys. Rev. Lett. 106 (2011) 131301.
- [70] C.E. Aalseth, et al., Phys. Rev. Lett. 107 (2011) 141301.
- [71] C.E. Aalseth, et al., Phys. Rev. D 88 (2013) 012002.
- [72] G. Giovanetti, et al., Physics Procedia 61 (2015) 77.
- [73] F. Avignone, et al., Phys. Rev. D 35 (1987) 2752.
- [74] E. Paschos, K. Zioutas, Phys. Lett. B 323 (1994) 367.
- [75] R. Creswick, et al., Phys. Lett. B 427 (1998) 235.
- [76] M. Krcmar, Z. Krecak, M. Stipcevic, A. Ljubcic, D. Bradley, Phys. Lett. B 442 (1998) 38.
- [77] A. Morales, et al., Astropart. Phys. 16 (2002) 325.
- [78] A. Ljubcic, D. Kekez, Z. Krecak, T. Ljubcic, Phys. Lett. B 599 (2004) 143.
- [79] A. Derbin, et al., JETP Lett. 85 (2007) 12.
- [80] A. Derbin, et al., Bull. Russ. Acad. Sci. Phys. 71 (2007) 832.
- [81] P. Belli, et al., Nucl. Phys. A 806 (2008) 388.
- [82] D. Kekez, A. Ljubcic, Z. Krecak, M. Krcmar, Phys. Lett. B 671 (2009) 345.
- [83] Z. Ahmed, et al., Phys. Rev. Lett. 103 (2009) 141802.
- [84] A. Derbin, et al., Eur. Phys. J. C 62 (2009) 755.
- [85] A. Derbin, V. Muratova, D. Semenov, E. Unzhakov, Phys. At. Nucl. 74 (2011) 596.
- [86] P. Belli, et al., Phys. Lett. B 711 (2012) 41.
- [87] E. Armengaud, et al., J. Cosmol. Astropart. Phys. 2013 (2013) 067.
- [88] R. Arnold, et al., Phys. Rev. D 92 (2015) 072011.
- [89] R. Arnold, et al., Eur. Phys. J. C 70 (2010) 927.
- [90] D.R. Artusa, et al., Eur. Phys. J. C 74 (2014) 3096.
- [91] F. Bellini, AIP Conf.Proc. 1498 (2012) 237.

- [92] N. Khanbekov, Phys.Atom.Nucl. 76 (2013) 1086.
- [93] K. Zuber, Phys. Lett. B519 (2001) 1.
- [94] T. Bloxham, et al., Phys.Rev. C76 (2007) 025501.
- [95] O. Cremonesi, M. Pavan, Adv. High Energy Phys. 2014 (2014) 951432.