

令和 4 年 6 月 22 日現在

機関番号：32660

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2019～2021

課題番号：19K03892

研究課題名(和文) シリコン半導体検出器を用いたマヨラナニュートリノ検証実験の基礎研究

研究課題名(英文) Research and development of Silicon semiconductor detector for test of Majorana neutrino

研究代表者

石塚 正基 (Ishitsuka, Masaki)

東京理科大学・理工学部物理学科・教授

研究者番号：40533196

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,300,000円

研究成果の概要(和文)：ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊探索によるニュートリノのマヨラナ性の検証を目的とし、シリコン半導体検出器と二重ベータ崩壊核を並べた新しい検出器構造を検証した。研究期間には、測定において重要であるシリコン検出器のエネルギー分解能を測定により評価した。また、シミュレーションのソフトウェアを開発し、測定に基づくエネルギー分解能を仮定して新しい検出器構造での測定感度を評価した。この結果、1立方メートル程度の検出器で、原理的には、これまでの実験により得られているセレンの寿命の下限値を更新可能であることを示した。これらの成果を日本物理学会で報告し、修士論文にまとめた。

研究成果の学術的意義や社会的意義

ニュートリノがマヨラナ粒子か否かは素粒子物理学における最も重要な研究課題の一つであり、その検証を目指して世界各地で測定器の開発が行われている。最終的には、発見を目指して大規模実験装置を建設する必要があるが、本研究ではその候補となる新しい検出器構造を提案した。測定器の大型化やバックグラウンドの精査などの課題は残されているが、シミュレーションによる研究と実験装置を用いた測定の両面から、新しい検出器構造により、原理的にはこれまでの実験を上回る測定感度での探索が可能であることを明らかにしたことが、本研究成果の学術的意義である。

研究成果の概要(英文)：New detector structures using silicon semiconductor detector and double beta decay nucleus are investigated aiming to verify the Majorana nature of neutrinos through neutrino-less double beta decay searches. During the period, the energy resolution of the silicon detector was evaluated by the measurement. Simulation software was also developed to evaluate the sensitivity of the new detector structure proposed in this study based on the energy resolution from the measurements. As a result, it was shown that we can improve the current lower limit of the lifetime for selenium by about 1 cubic meter detector in principle. These results were reported at a JPS meeting and summarized in a master thesis.

研究分野：素粒子物理学

キーワード：ニュートリノ 二重ベータ崩壊

## 1. 研究開始当初の背景

素粒子標準理論ではニュートリノはすべて左巻きで質量が0であるとされるが、ニュートリノ振動の発見は、ニュートリノが質量を持つことを示しており、標準理論の修正をせまるものである。しかし、ニュートリノの質量の大きさについては未だ測定されておらず、上限値のみが与えられている現状である。ニュートリノの質量が0でないということは、右巻きニュートリノの存在を意味するが、その存在を説明する枠組みとして、ニュートリノには粒子と反粒子の区別がないマヨラナ粒子であるとするモデルが検討されている。マヨラナ性は、フェルミ粒子の中でも電荷を持たないニュートリノのみが持ちうる性質である。

ニュートリノがマヨラナ粒子である場合、右巻きの重いニュートリノの存在により、いくつかの素粒子物理学の根本的な疑問を説明しうる。ニュートリノの質量は他のフェルミ粒子に比べて極端に小さく、ニュートリノがフェルミ粒子であるとする、ヒッグス粒子との結合が他のフェルミ粒子に比べて12桁以上も小さいことになる。一方、ニュートリノがマヨラナ粒子である場合、右巻きの重いニュートリノの存在によりニュートリノの軽さが説明できる(シーソー機構[1])。また、右巻きの重いニュートリノは、現在の宇宙が物質から形成され、反物質がほとんど存在しないという非対称性、すなわち宇宙の物質の起源を理解するための鍵を握る可能性が指摘されている(レプトジェネシス[2])。

このような理由からニュートリノがディラック粒子であるかマヨラナ粒子であるかの決定は素粒子物理学実験の重要な研究テーマとなっており、現在のところ、その謎を解明する可能性のある唯一の実験的手法がニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊(以下、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊)探索であると考えられている。この発生頻度はニュートリノの有効質量の2乗に比例するため、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の発見(寿命の測定)はニュートリノの質量の測定を意味する。

$0\nu\beta\beta$ 崩壊の発見を目的として多くの実験が実施されているが、いまだ発見には至らず、崩壊寿命の下限值(質量の上限値)のみが設定されている状況である。現在の質量の上限値は二重ベータ崩壊核を含むカロリメータ検出器により得られている。今後はKamLAND2-Zenを始め、ヨーロッパ・カナダでも新しい計画が測定を開始し、逆階層領域の探索が進むと考えられる。

これらの実験で $0\nu\beta\beta$ 崩壊が発見される可能性もあるが、ニュートリノ振動実験から順階層を区別する結果が報告されており、5年から10年以内に $0\nu\beta\beta$ 崩壊が発見される可能性が十分に高いとは言えない。一方、さらに探索を進めて発見を目指す場合、順階層を探索する必要があり、順階層までの探索を視野に入れた検出器開発も世界各地で進められている。順階層での発見を目指すには、大規模な国際共同研究が必須であるが、この規模では複数の実験を並行して進めることは困難であり、順階層での発見の可能性が実証された計画に集約する必要があると考えられている。

## 2. 研究の目的

本研究は機を逃さず、順階層での発見の可能性のある検出器の検討を進めるものである。特に、シリコン検出器は技術的に確立されているため、その応用により、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索に最適化した検出器の検討を進める。

初期の $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索では2つの電子の飛跡を測定する手法が用いられていたが、現在の有効質量の上限値はKamLAND-Zenに代表されるように、二重ベータ崩壊核を含むカロリメータ検出器により得られている。これは、稀な崩壊事象を探索するためには膨大な量の二重ベータ崩壊核を検出器に含む必要があるためであるが、一方で飛跡による情報を用いる事ができず、またエネルギー分解能により通常の二重ベータ崩壊(以下、 $2\nu\beta\beta$ 崩壊)との識別に限界があるため、測定感度はバックグラウンドの残存量で制限されている。

次世代 $0\nu\beta\beta$ 崩壊実験では、逆階層で予測される範囲をすべて検証し、さらに順階層を探索することを目標とするが、その実現のためには以下の条件を満たす検出器の作成が必要である。

- $10^{27}$ 年以上の崩壊寿命を探索するため、1 ton以上の二重ベータ崩壊核を含む
- 統計量に比例して測定感度を向上するため、バックグラウンドをほぼ0に抑えられる
- $0\nu\beta\beta$ 崩壊と $2\nu\beta\beta$ 崩壊を識別するために十分なエネルギー分解能を持つ

本研究では、これらの条件を満たし、将来的に $0\nu\beta\beta$ 崩壊を発見できる可能性を持つ検出器としてシリコン半導体検出器に着目した。

シリコン自体は二重ベータ崩壊核種ではないため、図1のように二重ベータ崩壊核による層をシリコン半導体検出器で挟んだ構造で $0\nu\beta\beta$ 崩壊による2本の電子による信号を測定する。

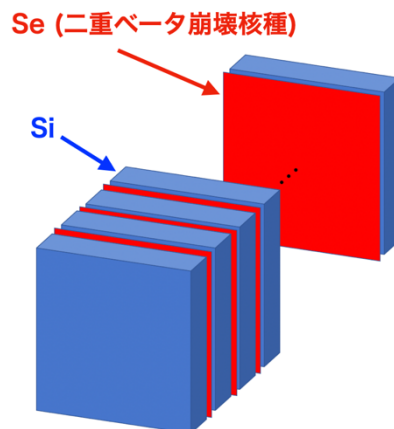


図1 本研究で想定した検出器構造の模式図

### 3. 研究の方法

本研究では、シミュレーションによる研究と測定による検出器の測定精度の評価を平行して進めた。

シリコンは加工のしやすさ、早い時間応答、高いエネルギー分解能から高エネルギー物理学実験の検出器としても広く用いられ、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索実験にも適していると判断した。最終的には $2\nu\beta\beta$ 崩壊がバックグラウンドとなり、その識別精度はエネルギー分解能により決まるため、エネルギー分解能が特に重要な要素である。本研究では、線源を用いてシリコン検出器のエネルギー分解能を測定し、その結果をシミュレーションに反映させることで、測定感度の信頼性を高めている。

シミュレーションによる研究では、図1の検出器構造を仮想的に作成し、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊探索の感度を評価した。二重ベータ崩壊核種については $^{82}\text{Se}$ を候補とした。 $\text{Se}$ は共に常温で固体であるため、薄膜状に加工してエマルジョンと交互に並べることができる。NEMO-3実験および他の飛跡検出器を用いる実験ではこれまで $^{100}\text{Mo}$ が広く用いられていたが、 $^{82}\text{Se}$ は $2\nu\beta\beta$ 崩壊の寿命が $^{100}\text{Mo}$ に比べて10倍程度長いという利点がある。 $0\nu\beta\beta$ 崩壊の寿命も約2倍程度になると考えられるが、バックグラウンドに対する信号の比率で有利である。最終的には $2\nu\beta\beta$ 崩壊が最も重要なバックグラウンドとなるため、この利点は大きい。 $^{82}\text{Se}$ の天然存在比は10%程度であるが、97%の純化に成功した例が報告されている[3]。シミュレーションでは $0\nu\beta\beta$ 崩壊信号に加え、バックグラウンドとして、 $^{82}\text{Se}$ の $2\nu\beta\beta$ 崩壊とウラン系列・トリウム系列の環境放射線を考慮した(アクチニウム系列・ネプツニウム系列はエネルギーが低いため問題にならない)。図2にシミュレーションで発生させた $0\nu\beta\beta$ 崩壊信号を示す。検出器は、図1に示すように、二重ベータ崩壊核の層をセグメント化したシリコン検出器の層で挟む構造であり、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊で生じた2本の電子を別々に測定する。2つの電子による信号の時間と位置の相関を取ることでより、環境放射線によるバックグラウンドを大幅に抑えることができる。

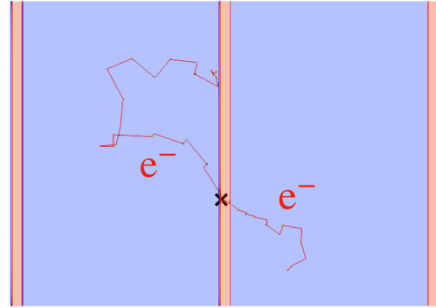


図2 シミュレーションで発生させた二重ベータ崩壊事象。青い領域がシリコン、赤い領域がSeを表し、赤い線が電子の軌道を示している。

### 4. 研究成果

図3にシリコン検出器で測定した $^{57}\text{Co}$ のエネルギースペクトルを示す。最も大きなピークは122keVのガンマ線に対応する。ガウス分布を仮定してフィットした結果、122keVでのエネルギー分解能は0.29%と得られた。実験環境に対する条件を定めるため、温度を変えて測定を行い、280Kを超えるとエネルギー分解能が悪化することを確認した。他の線源による測定も合わせて、シリコン検出器のエネルギー分解能を評価したところ、 $0\nu\beta\beta$ 崩壊信号のエネルギーである3MeVでの0.04%と見積もられた。ただし、この値は低エネルギーからの外挿で求めたものであり、実際の測定では統計的なばらつきとは別の要因により、エネルギー分解能が見積もりよりも悪い可能性がある。この点を考慮し、シミュレーションでは、信号領域でのエネルギー分解能が0.1%の場合と1%の場合で測定感度を評価している。

シミュレーションではシリコン検出器と二重ベータ崩壊核種であるSeを交互に830層並べた大きさが $1\text{m} \times 1\text{m} \times 2.6\text{m}$ の検出器を想定して計算を行なった。検出器には約200kgの $^{82}\text{Se}$ が含まれる。図4にこの検出器を1年間稼働させたときに観測が期待されるエネルギースペクトルを示す。ウラン系列、トリウム系列の含有量はNEMO-3実験での測定値を仮定している。また、エネルギー分解能として3MeVで0.1%を仮定している。シミュレーションの結果から、予測される測定感度を見積もったところ、 $^{82}\text{Se}$ の $0\nu\beta\beta$ 崩壊の寿命が $4 \times 10^{24}$ 年以下であれば10年間の測定で $3\sigma$ 以上の有意さで信号が確認できるとい

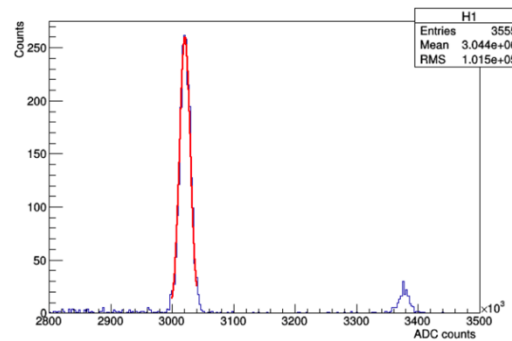


図3 シリコン検出器で測定した $^{57}\text{Co}$ 線源のエネルギースペクトル。最も大きなピークは122keVのガンマ線によるものである。

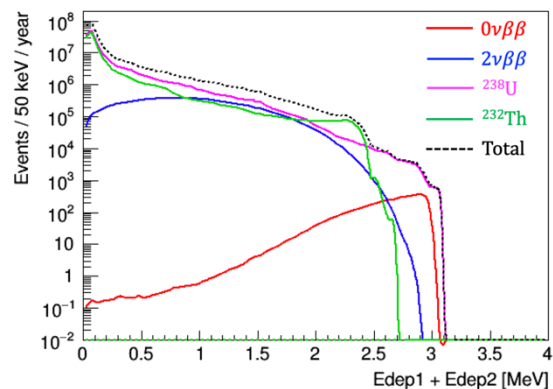


図4 シミュレーションで計算された1年間の観測で期待されるエネルギースペクトル。赤が $0\nu\beta\beta$ 崩壊信号を示している。

う結果になった。これは NEMO-3 実験で得られている  $^{82}\text{Se}$  の  $0\nu\beta\beta$  崩壊の寿命の下限值 ( $2.5 \times 10^{23}$  年[3]) よりも大きい値である。また、10 年間の測定で得られる寿命の下限値は  $2.7 \times 10^{25}$  年と見積もられた。これはニュートリノの有効質量に換算すると、 $\langle m_{\beta\beta} \rangle < (192\sim 390)\text{meV}$  に相当する。現状の見積もりではウラン系列のバックグラウンドにより測定精度が限定されているため、信号領域でのエネルギー分解能を 1% と仮定した場合でも、ほぼ同様の結果となる。この結果は、 $^{82}\text{Se}$  に限定すれば、現在の下限値を上回る測定感度と言えるが、他の二重ベータ崩壊核種の測定も含めて比較すると、未知の領域を探索するためにはウラン系列のバックグラウンドを低減する必要がある。バックグラウンドを低減する方法として、時間情報や位置情報を使ったバックグラウンドの識別 (同じ位置で異なる時間に発生した信号からウラン系列の崩壊を特定する)、および、Se の純化による放射性同位体の含有量の低減が挙げられる。本研究の成果として、シリコンと二重ベータ崩壊核種を用いた新しい検出器構造での検出器により、 $^{82}\text{Se}$  については現在の下限値を上回る精度で探索が可能であることを示した。また、測定精度がウラン系列のバックグラウンドで制限されることを示し、今後の研究における課題を明確にすることができた。

- [1] P. Gell-Mann *et al.*, "Supergravity", p.315 (1979); T. Yanagida, KEK report 79-18, p.95 (1979); R. N. Mohapatra and G. Senjanovic, Phys. Rev. Lett **44**, 912 (1980).
- [2] M. Fukugita and T. Yanagida, Phys. Lett **B174**, 45 (1986).
- [3] R. Arnold, C. Augier, A. S. Barabash *et al.*, Eur. Phys. J. **C78**, 821 (2018).

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計3件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 小林竜嗣
2. 発表標題 シリコン半導体検出器を用いた二重ベータ崩壊探索実験の基礎研究
3. 学会等名 日本物理学会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 小林竜嗣
2. 発表標題 シリコン半導体検出器を用いた二重ベータ崩壊探索実験の基礎研究
3. 学会等名 新学術領域「ニュートリノで拓く素粒子と宇宙」研究会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 小林竜嗣
2. 発表標題 シリコン半導体検出器を用いた二重ベータ崩壊探索実験の基礎研究
3. 学会等名 第9回高エネルギー物理春の学校
4. 発表年 2019年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

石塚研究室ホームページ

<https://www.rs.tus.ac.jp/ishitsuka/>

本研究で行ったシミュレーションによる探索感度の研究とエネルギー分解能の測定結果は小林竜嗣氏により修士論文にまとめられ、東京理科大学理工学部物理学科に提出されている。また、時間相関を用いたバックグラウンドの低減については上田氏の卒業論文にまとめられている。

6. 研究組織

	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
--	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8. 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------