

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 29 年 5 月 30 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2014～2016

課題番号：26610068

研究課題名(和文)チェレンコフ検出器によるニュートリノレス二重ベータ崩壊探索の新技术法の開拓

研究課題名(英文) Investigation of a new technique by a Cherenkov detector to search for neutrinoless double beta decays

研究代表者

松岡 広大 (Matsuoka, Kodai)

名古屋大学・現象解析研究センター・特任准教授

研究者番号：70623403

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,100,000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の探索のため、チェレンコフ検出器を用いて線の速度を測定し運動エネルギーを再構成する新たな手法を提案した。当初は、チェレンコフリングイメージから速度を求める手法であった。モンテカルロ・シミュレーションにより、1.5MeVの線に対して10%(FWHM)程度のエネルギー分解能、20%程度の検出効率が得られることがわかった。これを改善するため、線の飛行時間から速度を求める手法を考案した。1.26MeVの線に対して約13%(FWHM)のエネルギー分解能、約44%の検出効率が期待できることがわかった。

研究成果の概要(英文)：To search for neutrino-less double beta decays, I proposed a new technique to reconstruct the beta-ray kinetic energy by means of velocity measurement with a Cherenkov detector. The first idea was that the velocity was deduced from the Cherenkov ring image. In a Monte Carlo simulation, the energy resolution and efficiency for a 1.5 MeV beta-ray were estimated to be about 10% (FWHM) and 20%, respectively. To improve the performance, I invented another new technique that measured the time-of-flight of the beta-ray to deduce the velocity. The expected energy resolution and efficiency for a 1.26 MeV beta-ray were improved to be about 13% (FWHM) and 44%, respectively.

研究分野：素粒子実験

キーワード：ニュートリノレス二重ベータ崩壊 チェレンコフ検出器 ベータ線

## 1. 研究開始当初の背景

(1) ニュートリノ振動により、ニュートリノの質量が0でないことが示されたが、その質量の大きさも起源もまだわかっていない。ニュートリノの質量を説明する有力な理論としてシーソー機構がある。その理論では、ニュートリノは粒子と反粒子が同じマヨラナ粒子であるとされる。その場合、原子核の二重ベータ崩壊において、ニュートリノを放出しない過程(ニュートリノレス二重ベータ崩壊; $0\ 2$  崩壊)が起こり得る。その崩壊を観測できれば、それはニュートリノがマヨラナ粒子であることの証拠となる。さらに、 $0\ 2$  崩壊が起こる確率を測定すれば、ニュートリノの質量を決定することができる。

(2)  $0\ 2$  崩壊では、電子が2つだけ放出され、その運動エネルギーの和Eはある一定の値(Q値)となる。一方、通常二重ベータ崩壊( $2\ 2$  崩壊)では、検出できないニュートリノ2つが運動エネルギーの一部を持ち去るので、 $E < Q$ となる。したがって、 $E = Q$ である事象が $0\ 2$  崩壊だと言える。 $0\ 2$

崩壊探索実験の感度は、主に、電子の運動エネルギー測定分解能、背景事象数、崩壊核ソースの量の3点で決まる。その3点において優れるように実験がデザインされるが、手法としては2つに大別される。ひとつは測定器自体が崩壊核ソースとなるカロリメータ型で、エネルギー分解能に優れ、大質量の崩壊核ソースを用いることが可能である。もうひとつは、崩壊核ソースと測定器が分かれているトラッキング型で、エネルギー分解能が低く、崩壊核ソースの大質量化も難しいが、背景事象の除去能力に優れている。私は、トラッキング型でエネルギー分解能を改善できる新しい手法を考案した。

## 2. 研究の目的

$0\ 2$  崩壊探索では、1 MeV 程度の低エネルギーのベータ線を精度良く測定する必要がある。本研究では、電子の速度を測定することで運動エネルギーを再構成するというこれまでにないベータ線計測の新手法を提案し検証する。本手法では主に、崩壊核ソースを薄いシート状にしたソースフォイルと、それを挟む薄いシート状のチェレンコフ放射体2枚、そしてソースフォイルの両面からそれぞれ一定距離の平面上に並べた光検出器を用いる。それらを真空容器の中に入れ、さらに真空容器を VETO 検出器で取り囲む。ある荷電粒子が放射体内で光速を超えて通過したとき、放出されるチェレンコフ光のリングを光検出器で検出すれば、そのリング径の大きさからチェレンコフ角すなわち速度を測定できる。VETO 検出器で真空容器外部から入射してくる粒子を除去すれば、検出した荷電粒子は電子だとみなせるので、速度と質量から運動エネルギーを計算できる。本手法により、他のトラッキング型の実験よりも優れたエネルギー分解能、そしてチェレンコ

フ光測定による力学的制限から背景事象低減を目指す。測定器のほとんどが真空なので、他のトラッキング型の実験よりも背景事象が少なくなることが期待できる。

## 3. 研究の方法

(1) 本研究では、まずモンテカルロ・シミュレーションで検出器内での電子の反応とそれに対する検出器の応答を調べ、チェレンコフ検出器への性能要求を洗い出す。チェレンコフリングイメージを精度良く再構成するためには、電子の多重散乱を小さく抑えなければならないので、放射体はできるだけ低密度にする必要がある。一方で、チェレンコフ光の発光量を多くするには、できるだけ屈折率の大きい放射体を用いる必要がある。Lorentz-Lorenz の式から、屈折率はおよそ密度と分極率に比例し分子量に反比例するので、分極率が大きくかつ分子量が小さな物質を選択した上で、屈折率と密度を最適化する必要がある。光検出器に対しては、チェレンコフリングイメージを精度良く再構成するために要求される光子検出効率、位置分解能、時間分解能を見積もり、どのような光検出器が必要か検討する。ソースフォイルに用いる核種によってQ値が異なり、したがって検出する電子の運動エネルギーも異なるので、本新手法に最適な核種を選択する。

(2) 上記シミュレーションの結果を元に小型試作機を設計、製作する。そして、宇宙線ミュオンを用いて、本新手法の原理を検証する。具体的には、 $10 \times 10 \times 10$  cm<sup>3</sup>程度の大きさのシリカエアロゲルをチェレンコフ放射体にして、そこに入射するミュオンをプラスチックシンチレーションカウンターでトリガーする。そして、シリカエアロゲルで発生したチェレンコフ光を光検出器で検出する。検出されるチェレンコフ光の位置と時間と数が、ドリフトチェンバーを使って再構成したミュオンの飛跡(放射体への入射位置と角度)から予想されるチェレンコフリングイメージと一致するかを調べる。

(3) 測定により得られた試作機の性能をもとに、将来の $0\ 2$  崩壊探索実験において期待される感度を、モンテカルロ・シミュレーションで見積もる。

## 4. 研究成果

(1) 宇宙線ミュオンを用いた小型試作機の性能評価で使うドリフトチェンバーを設計、製作した(図1)。六角形のセルで、各頂点に直径126ミクロンのフィールドワイヤ(アルミニウム線)中央に直径20ミクロンのセンスワイヤ(金メッキタングステン線)を張った。セルは20mm間隔で、7または8セルで1層を構成し、x方向に2層、y方向に2層ある。有感領域は $16 \times 16$  cm<sup>2</sup>である。ガスにはアルゴンとメタンを1対1の割合で混合したものを使用した。このドリフトチェンバーの各ワイヤの位置分解能を宇宙線ミ

ユーオンで評価した。ドリフト時間と距離の較正を行った後、必要とされるものより十分に良い位置分解能 0.11 mm が得られた。

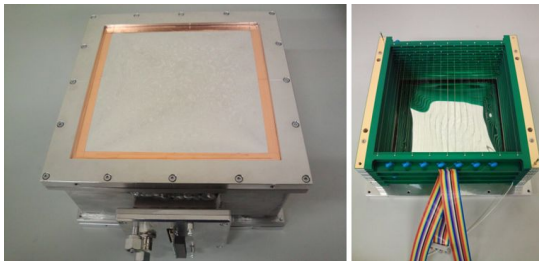


図 1 製作したドリフトチェンバーの写真。左は外観、右はガス容器の中身。

(2) 本新手法をシミュレーションできるコードを、粒子反応シミュレータプログラム GEANT4 を利用して開発した。シミュレーションでは、ソースフォイルに 0.1 mm 厚のセレン(二重ベータ崩壊するセレン-82 の Q 値は 2.995 MeV) 輻射体に屈折率 1.04 で厚さ 1 mm のシリカエアロゲル、光検出器にガイガーモード・アバランシェフォトダイオードを用いた。ソースフォイルで 1.5 MeV の電子を発生させた場合のエネルギー分解能と検出効率は、それぞれ約 10% (FWHM) と約 20% であった。チェレンコフ検出器を用いてベータ線のエネルギーを測定するのは、これまでにない新しい手法で画期的であると言えるが、 $0 \leq 2$  崩壊探索のためには性能が乏しく、見直す必要がある。本手法の問題点は、輻射体における電子の多重散乱である。電子のエネルギーが低いと多重散乱が激しく、光検出器に届くチェレンコフリングイメージがぼやけてしまう。

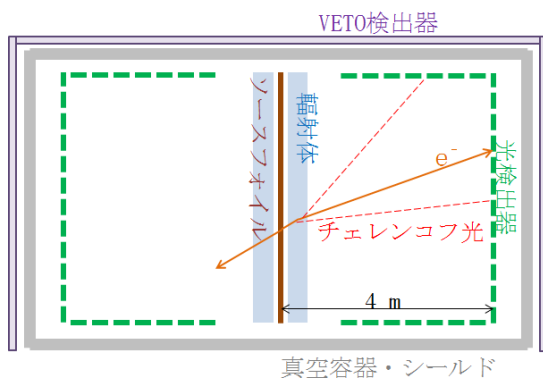


図 2 飛行時間測定による  $0 \leq 2$  崩壊探索実験のセットアップ概略図。

(3) 多重散乱の問題を回避するため、本新手法を発展させた改良案を考えた。それは、運動エネルギーを再構成するために、チェレンコフリングイメージから電子の速度を測定するのではなく、電子の飛行時間から速度を測定するものである。実験のセットアップは前述のものと同じであるが、電子の飛行時間を精度良く測定するため、光検出器をソースフォイルから遠くに配置し、時間分解能の良い光検出器を用いる(図 2)。電子の飛行時

間を求めるためには、ある 2 点(始点と終点)での電子の位置と時間を測定する必要がある。終点の位置と時間は光検出器で直接測定できる。始点の位置と時間は、輻射体で発生したチェレンコフ光を光検出器の少なくとも 3 点で測定することで再構成できる。それは、光の速度が一定で、チェレンコフ光の検出時間の差が光路差に対応するためである。この改良案においては、電子が輻射体でどんなに散乱されても、飛行時間測定には影響しない。

(4) モンテカルロ・シミュレーションで、本新手法の改良案におけるエネルギー分解能と検出効率を見積もった。ここでは、ソースフォイルに 0.1 mm 厚のテルル(二重ベータ崩壊するテルル-130 の Q 値は 2.527 MeV) 輻射体に屈折率 1.53、密度 1.02 g/cm<sup>3</sup> で厚さ 0.6 mm の光学フィルムを用いた。光検出器には、時間分解能に優れたマイクロチャンネルプレート内蔵マルチアノード光電子増倍管(MCP-PMT)を用いた。その光子検出効率(有感領域 79.6%、280 nm の量子効率 33%、収集効率 60%)、時間分解能(30 ピコ秒)、ダークノイズレート(30 Hz/cm<sup>2</sup>)は PHOTONIS 社製の 2 インチ MCP-PMT (PLANACON) の仕様とした。1.26 MeV の電子に対するエネルギー分解能は 13.4% (FWHM)、検出効率は 43.6% で、チェレンコフリングイメージを再構成する場合と比べ大きく改善することができた。ただし、非常に高価な MCP-PMT で図 2 のように大面積を覆うのは難しい。一方で、MCP-PMT ほどの時間分解能を持つ光検出器はないため、この改良案で  $0 \leq 2$  崩壊探索実験を行うには、安価で時間分解能に優れた新たな光検出器の開発が必須である。

(5) そこで、安価かつ大面積かつ時間分解能の良い荷電粒子検出器である高抵抗板ガス検出器(Resistive Plate Chamber; RPC)を光検出器に応用することを考えた。高時間分解能 RPC では、一般に代替フロン(R134a)と六フッ化硫黄(SF6)の混合ガスを用いる。その混合ガスにおける電子の増幅過程等は先行研究でよく理解されており、Garfield++ というソフトウェアを用いて精度良くシミュレーションすることができる。光電子に対するガス増幅をシミュレーションしたところ、1 光子に対して 18.8 ピコ秒の時間分解能、81% の収集効率と、MCP-PMT よりも優れた性能を期待できることがわかった。

(6) 4 と同様のモンテカルロ・シミュレーションで、この新たな光検出器を用いたときに期待される性能を見積もった。1.26 MeV の電子に対して、エネルギー分解能は 11.2%、検出効率は 64.8% となり、MCP-PMT よりもよい結果であった。次に、 $2 \leq 2$  崩壊と  $0 \leq 2$  崩壊をシミュレーションし、 $0 \leq 2$  崩壊探索の感度を見積もった。テルルのソースフォイルは  $10 \times 10 \text{ m}^2 \times 0.1 \text{ mm}$  (62.4 kg、同位体濃縮なし) 探索期間は 5 年とした。図 3 は再構成した 2 本のベータ線の運動エネルギー

の和の分布である。この図では、 $0\nu 2\beta$  崩壊の寿命は  $1.0 \times 10^{26}$  年と仮定している。信号領域を 2.08 MeV 以上としたとき、期待される  $0\nu 2\beta$  崩壊の感度は  $0.8 \times 10^{26}$  年であった。これは他のトラッキング型の実験で計画中の SuperNEMO 実験で見積もられている予想感度 ( $1.0 \times 10^{26}$  年) と同程度である。

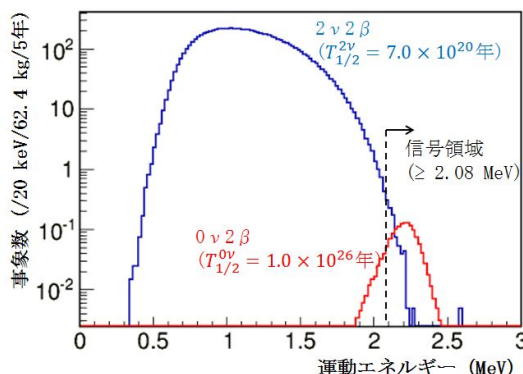


図3 テルル-130の  $2\nu 2\beta$  崩壊 (青) と  $0\nu 2\beta$  崩壊 (赤) について、シミュレーションで再構成した2本のベータ線の運動エネルギーの和の分布。

(7) RPC を応用した光検出器を開発するため、まず小型 (有感面積  $37.5 \times 37.5 \text{ mm}^2$ ) のRPC を設計、製作した (図4)。これに光電面を取り付ければ光検出器になる。その前に、まず荷電粒子検出器RPCとして、宇宙線ミュオンを用いて先行研究通りの高い時間分解能が得られるか評価している。



図4 RPC 試作機の写真。

## 5. 主な発表論文等

(研究代表者、研究分担者及び連携研究者には下線)

[学会発表](計 1 件)

K. Matsuoka, "Research of a new TOF method for neutrino-less double beta decay search", Neutrino Frontier Workshop 2016, 30 November 2016, 石川県加賀市

## 6. 研究組織

(1)研究代表者

松岡 広大 (MATSUOKA, Kodai)

名古屋大学・現象解析研究センター・特任准教授

研究者番号：70623403