

科学研究費助成事業 研究成果報告書

令和 5 年 6 月 30 日現在

機関番号：13901

研究種目：挑戦的研究（萌芽）

研究期間：2021～2022

課題番号：21K18627

研究課題名（和文）原子核乾板を用いた 0ν ダブルベータ崩壊探索に向けたMeV電子精密測定技術の開発

研究課題名（英文）Development of precise measuring technology of MeV electrons with nuclear emulsion for search for neutrinoless double-beta decay

研究代表者

福田 努（Fukuda, Tsutomu）

名古屋大学・高等研究院・特任講師

研究者番号：10444390

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 3,500,000円

研究成果の概要（和文）：素粒子ニュートリノの極端な軽さの起源、そして宇宙が物質で満ち溢れている理由（物質優勢宇宙の起源）の解明に向けて、「ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊（ 0ν ）」事象の探索を目指し、新たに原子核乾板を用いた実験手法を提案し、従来と全く異なる新しい原子核乳剤を開発した。新しく開発した平板状の臭化銀結晶を持つ原子核乳剤は、従来の八面体臭化銀結晶の原子核乳剤と比べて荷電粒子の結晶内通過距離の不定性が抑制でき、 0ν から放出されるMeV電子のエネルギー分解能が飛躍的に向上すると考えられる。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究では半世紀以上手が付けられていなかった原子核乳剤の結晶形状を抜本的に改良するという野心的な研究に挑戦し、新たに平板状の臭化銀結晶を持つ原子核乳剤の作製に成功した。この成果は、将来の原子核乾板を用いた 0ν 探索実験の実現に向けた極めて重要な一里塚である。また、今後取り組む実用化研究が達成された暁には、素粒子検出器としても全く新しいデバイスが開発される可能性があり、その波及効果は計り知れない。

研究成果の概要（英文）：In order to elucidate the origin of the extreme lightness of elementary particle neutrinos and the reason why the universe is filled with matter (the origin of the matter-dominated universe), I have proposed a new experimental method using nuclear emulsions and developed a new nuclear emulsion gel that is completely different from conventional emulsion gel. The newly developed nuclear emulsion gel with flat-type silver bromide crystals is expected to suppress the uncertainty of the passage distance of charged particles within the crystal compared to the conventional nuclear emulsion gel with octahedral-type silver bromide crystals, and to dramatically improve the energy resolution of MeV electrons emitted from 0ν .

研究分野：素粒子実験

キーワード：原子核乾板 素粒子実験 二重ベータ崩壊 MeV電子 平板状ハロゲン化銀結晶 マヨラナ粒子

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノ振動現象が実証され、ニュートリノが質量を持つことは確定的となった。すなわち、未検出の右巻きニュートリノの存在が強く示唆される。また、ニュートリノ質量は極端に軽く、その質量獲得機構は未だ謎に包まれている。ニュートリノは電荷を持たない素粒子であり、粒子・反粒子の区別のないマヨラナ粒子になりうる。この場合、新たな自由度として右巻きニュートリノを導入することができるが、シーソー機構では重い右巻きニュートリノの存在によって、この極端に軽いニュートリノ質量を自然に実現することができる。さらに、宇宙初期に粒子と反粒子は同数存在していたはずが、現在の宇宙では粒子が形作る物質のみが存在している謎(物質優勢な宇宙の起源)を理論的に説明するレプトジェネシスでは、ニュートリノがマヨラナ粒子であることを仮定し、重い右巻きニュートリノの崩壊を通して、粒子・反粒子の数の偏りが生じたとする。このようにニュートリノがマヨラナ粒子であるか否かの検証は、素粒子・宇宙の根幹に関わる重要な研究テーマである。

ニュートリノがマヨラナ粒子であるかを実験的に検証する有力な方法として「ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊($0\nu\beta\beta$)」事象の探索がある。原子核の中には、一つの原子核内で同時に2回のベータ崩壊が起きる原子核があり、通常の二重ベータ崩壊はニュートリノがエネルギーを持ち出してしまう(ニュートリノを伴う二重ベータ崩壊: $2\nu\beta\beta$)が、ニュートリノがマヨラナ粒子であった場合には生成される2つのニュートリノが対消滅することで $0\nu\beta\beta$ 事象が起き、この時放出される2つの電子のエネルギー総和はQ値と一致する。このように $0\nu\beta\beta$ 探索は学術的に極めて重要であり、これまで数多くの $0\nu\beta\beta$ 探索実験が行われてきているが、未だ発見には至っていない。

2. 研究の目的

本研究では新たな $0\nu\beta\beta$ 探索の手段として、究極の空間分解能を持つ「原子核乾板」を導入する。本研究の目的は、 $0\nu\beta\beta$ 事象から放出される MeV 電子の原子核乾板における精密測定手法を開発することである。

$0\nu\beta\beta$ 事象のような稀少な現象を探索する上で重要な要素は、(a):検出器の大型化(統計誤差の削減)、(b):高いエネルギー分解能($2\nu\beta\beta$ 事象との識別)、(c):背景事象の極少化($2\nu\beta\beta$ 事象以外の背景事象との識別)であり、これらが同時に高いレベルで達成されることが不可欠である。原子核乾板は固体検出器であり、小型の検出器で必要な性能を満たせば、検出器を大量に並べることでその性能を完全に保持したまま容易に大型化が可能である。また、ミクロン級の空間分解能による飛跡検出を活かした事象再構成能力によって $2\nu\beta\beta$ 以外の背景事象(放射線同位体のベータ崩壊・環境ガンマ線のコンプトン散乱電子によるアクシデンタルな背景事象・崩壊を伴う放射性同位体背景事象など)を極少に抑えることができる。従って、(b)の条件を満たせば、将来の $0\nu\beta\beta$ 探索の検出器として極めて有望な手段となる。将来の $0\nu\beta\beta$ 探索実験では、最終的な背景事象となる $2\nu\beta\beta$ 事象との識別のために、MeV 電子のエネルギー測定精度として1%以下の分解能が必要である。MeV 電子のエネルギー測定は、原子核乳剤中で電子がエネルギーを失って停止するまでの飛程を測定し、通過してきた物質質量と電離損失量から推定する。従来の原子核乳剤を用いた場合のエネルギー測定精度は5-10%と見積もられているため、原子核乳剤の抜本的な改良を行うことで MeV 電子のエネルギー分解能において約1桁の改善を目指す。

3. 研究の方法

エネルギー測定精度のバラツキの原因となっているのは、通過してきた物質質量の不定性である。一般に原子核乳剤では荷電粒子のセンサーである臭化銀結晶は八面体であり、荷電粒子がどの位置を通過したかによって、結晶内の通過距離が異なってしまう(図1)。また、結晶内通過距離が短いと現像されない結晶が出てきてしまう。そこで、本研究では、結晶内の通過距離を揃える目的で、任意の厚さの平板状の臭化銀結晶で構成される原子核乳剤を開発する。結晶内通過距離を正確に決定するとともに、厚みを調整して臭化銀結晶の現像確

率を 100% に近づけることができれば、MeV 電子のエネルギー測定精度を飛躍的に向上することができると考えられる。

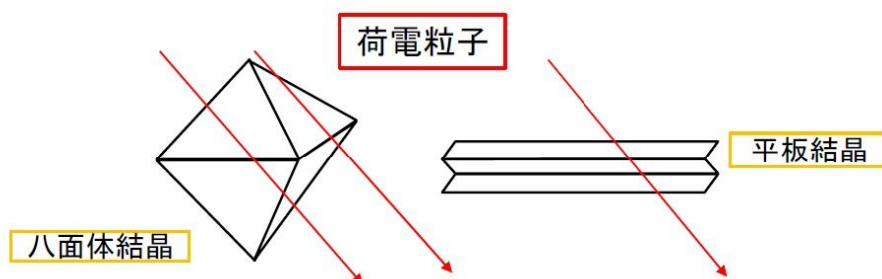


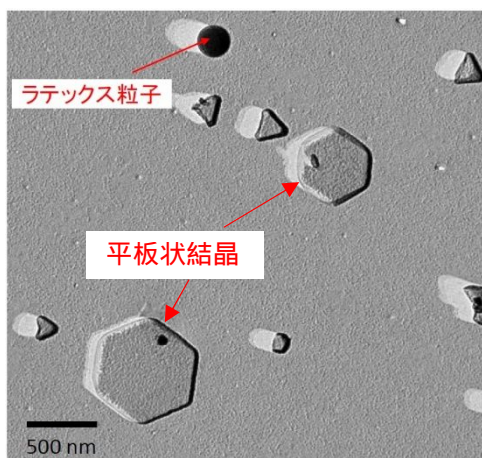
図 1：八面体結晶と平板状結晶

4. 研究成果

：平板状の臭化銀結晶の作製

名古屋大学 F 研の原子核乳剤製造装置を用いて、平板状の臭化銀結晶を持つ原子核乳剤の作製に成功した。平板状結晶の作製には臭化銀結晶中に双晶面を平行に 2 ヶ所導入する必要がある。双晶面は (111) 面の積層欠陥であるため、核形成時に (111) 面が表面となるようにハロゲンが十分に過剰な条件下で結晶を作製した。さらに核形成と核成長時で、それぞれ保護コロイドであるゼラチン量を減らして保護コロイド能を抑制しつつ、銀電位を低く保って結晶を作成した。

結晶の形状評価には、名古屋大学医学部医学教育研究支援センターの透過型電子顕微鏡を使用した。適切な厚みのコロジオン膜を貼ったメッシュを用意し、原子核乳剤からゼラチンを除いて結晶を濃縮した評価サンプルを作成した。また、評価サンプル作成の際に、リファレンスとして球状のラテックス粒子を導入し、斜め方向から金パラジウムで蒸着して影を付けることで平板状結晶の厚みを測定できるようにした (図 2)。



作製に成功した平板状結晶の厚みを測定すると、 77.9 ± 13.4 nm であった。このように結晶の形状評価法を確立した。

図 2：平板状結晶の電子顕微鏡画像

：結晶内通過距離と現像確率の関係の導出

結晶内の荷電粒子通過距離と現像確率の関係を導出する目的で、従来の原子核乳剤のシミュレーションを構築した。シミュレーションに与えた条件は、[i]臭化銀結晶は球体と近似する、[ii]臭化銀結晶の直径は測定データを使用し、 201 ± 18 nm とする、[iii]臭化銀結晶の乳剤内体積充填率も測定データを用いて 31% とする、[iv]臭化銀結晶は一様分散とする、である。このシミュレーションにより、荷電粒子が原子核乳剤中を $45 \mu\text{m}$ 通過した時に貫通する結晶数が 102.4 ± 6.7 と分かった。また、実際に従来の八面体結晶の原子核乳剤で作成された原子核乾板に最小電離粒子を照射し、 $45 \mu\text{m}$ あたりの現像銀粒子数 (Grain Density: GD) を測定した結果、 $\text{GD} = 16.3 \pm 3.7 / 45 \mu\text{m}$ となった。従って、従来の八面体の臭化銀結晶における現像確率は 15.9% だということが分かる。ここで、ある一定以上の結晶内通過距離から臭化銀が現像されると仮定すると、現像されるのに必要な結晶内通過距離は 187 nm となった。

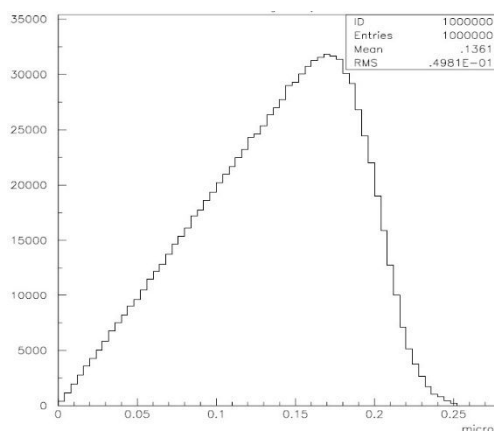


図 3：結晶内通過距離分布

：厚い平板状結晶の作製（厚みの制御）

臭化銀の結晶感度は必ずしも結晶内通過距離だけによるものではないが、現状の厚さ約 80nm の平板状結晶では最小電離粒子に対して感度が低い可能性があるため、より厚い平板状結晶の作製を試みた。

平板状結晶の核成長時の銀電位を高くすることで厚みの制御を行った。図 4 が作製した結晶の電子顕微鏡画像である。ラテックス粒子の直径は 210nm であるため、厚さ 200nm を越える粒子を作製することができたが、形状がいびつで、今回は核形成がうまくいっていない可能性があり、さらなる検討や試行が必要である。

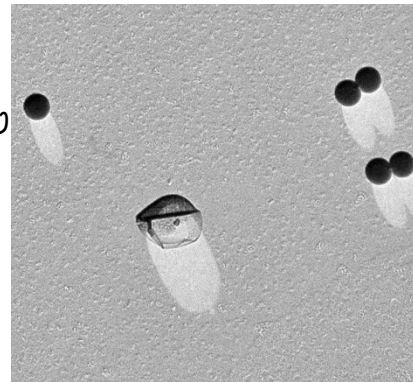


図 4：電子顕微鏡画像

本研究では将来の 0 探索実験で原子核乾板を主検出器とした実験の実現を目指し、従来と全く異なる結晶形状の原子核乳剤作製に挑戦した。原子核乾板を用いた 0 探索実験はこれまでも検討されたことはあるが、検出器開発の具体的な方向性を示して取り組んだ本格的な研究は本研究が初めてである。また、実際に平板状結晶・原子核乳剤の作製に成功したことは極めて大きな一歩である。今後、実用化に向けて結晶の厚み・サイズの制御、ノイズ結晶の除去、増感手法・現像手法の開発、塗布・乾燥方法の確立などの課題があるが、本研究は原子核乳剤において世界で初めて平板状結晶を導入した試みであり、これらの課題を達成した暁には、0 探索実験が実現するだけでなく、素粒子検出器としても全く新しいデバイスが開発される可能性があり、その波及効果は計り知れない。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計2件（うち招待講演 0件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 宮田 芙悠、福田 努、久下 謙一、大関 勝久
2. 発表標題 素粒子検出用新規原子核乾板のための平板状ハロゲン化銀結晶の開発
3. 学会等名 2021年度 日本写真学会年次大会
4. 発表年 2021年

1. 発表者名 福田 努
2. 発表標題 原子核乾板を用いたニュートリノレス二重ベータ崩壊探索実験
3. 学会等名 ニュートリノ研究検討会
4. 発表年 2022年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

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
研究協力者	大関 勝久 (Ozeki Katsuhisa)	名古屋大学・未来材料・システム研究所・特任教授 (13901)	
研究協力者	久下 謙一 (Kuge Ken'ichi)	千葉大学・大学院理学研究院・特任研究員 (12501)	

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
---------	---------