

令和元年5月29日現在

機関番号：22604

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2014～2018

課題番号：26287048

研究課題名(和文) 高分解能飛跡検出器を用いた二重ベータ崩壊実験

研究課題名(英文) A Double Beta Decay Experiment using a High Resolution Drift Chamber

研究代表者

角野 秀一 (Kakuno, Hidekazu)

首都大学東京・理学研究科・教授

研究者番号：70376698

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,300,000円

研究成果の概要(和文)：ニュートリノのマヨラナ性の検証を目的とするニュートリノレス二重ベータ崩壊探索実験のための新しい実験装置の開発を行っている。ガス飛跡検出器を用いて、2本のベータ線の運動学的情報を全て捕えることで背景事象との区別を行う。本研究課題においては、改良を重ねた第三世代の実験装置の開発を行った。当初目標の、実験装置を用いた二重ベータ崩壊実験の開始までは至らなかったが、高エネルギー加速器研究機構と首都大でそれぞれ飛跡検出器の開発・試験を行ない、宇宙線信号を用いて、その飛跡を3次元に捕えることができることを確認した。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究課題で探求した実験手法が確立され、もしニュートリノレス二重ベータ崩壊が発見され、ニュートリノがマヨラナ粒子であることが証明された場合には、本手法で得ることができるベータ線の間の角相関の情報を用いて、さらにニュートリノレス二重ベータ崩壊に寄与する新物理の候補を絞り込むことができる。また、ニュートリノレス二重ベータ崩壊が世界各地の実験で発見されない状況においては、ニュートリノレス4重ベータ崩壊の探索を通して、逆にニュートリノがディラック粒子であることを積極的に証明できる可能性がある。本研究課題の成果はそれらに向けた一歩である。

研究成果の概要(英文)：The neutrinoless mode of the double beta decay occurs only if the neutrino is a Majorana particle. We develop a new experimental device toward a search for neutrinoless double beta decay. We utilize a drift chamber to obtain full kinematical information of two beta rays. Using these kinematical information, we can separate signals from backgrounds. In this study, we develop third generation device. We developed and tested the drift chamber at KEK and TMU. Although we could not start the double beta decay experiment in time, we confirmed that the developed drift chamber works as expected using cosmic rays; we could reconstruct three-dimensional tracks from cosmic rays.

研究分野：素粒子物理学実験

キーワード：二重ベータ崩壊 ニュートリノ マヨラナ性 飛跡検出器

様式 C - 19、F - 19 - 1、Z - 19、CK - 19 (共通)

1. 研究開始当初の背景

研究開始当初において、多くのニュートリノ振動実験によってニュートリノに質量があることが証明され、ニュートリノ混合に対する理解が進みつつあった。しかしながら、これらの研究では、ニュートリノの重要な性質であるニュートリノ質量の絶対値や、ニュートリノのマヨラナ性(ニュートリノに粒子と反粒子の区別があるか無いか)については答えを得ることが出来ない。物質優勢な宇宙を説明する現在の有力な考え方では、宇宙初期にレプトンの物質・反物質の非対称性が生じそれによってバリオンの優勢が生じたとされる。その理論的な枠組みに用いられるシーソー機構では、ニュートリノは粒子と反粒子の区別がないマヨラナ粒子であることが前提とされており、実験的にニュートリノのマヨラナ性を検証することが、物質優勢な世界を説明するための重要な鍵の一つとなっている。ニュートリノのマヨラナ性を証明する実験的な手段は、ニュートリノレス二重ベータ崩壊(0 $\nu\beta\beta$)の観測である。また、ニュートリノ質量の絶対値に関しても、ニュートリノの質量が1eVより十分小さい場合、その直接測定は困難であるが、0 $\nu\beta\beta$ の半減期はニュートリノ質量の2乗に反比例するため、ニュートリノがマヨラナ粒子である場合、ニュートリノ質量の絶対値を0 $\nu\beta\beta$ の測定から決定できる。

実験的には2001年にKlapdorらによって ^{76}Ge を用いて0 $\nu\beta\beta$ が観測されたとの主張がなされた。しかしながら、研究開始当初から現在に至るまで、まだ他の実験による0 $\nu\beta\beta$ の観測の報告はない。研究開始当初において、多くの二重ベータ崩壊実験が世界各地で進行中または提案されており、ベータ線のエネルギーの総和を測定する熱量計型と、飛跡検出型に大別される。熱量計型の実験は、Ge半導体検出器を用いて ^{76}Ge を観測するGERDA実験やMAJORANA実験、ボロメータを用いて ^{130}Te を観測するCUORE実験、液体キセノン検出器を用いて ^{136}Xe を観測するEXO実験、それぞれ ^{136}Xe および ^{48}Ca を用いてシンチレーションを測定するKamLAND-Zen実験およびCANDLES実験などがある。飛跡検出型の実験は、ガスキセノン検出器で ^{136}Xe によるシンチレーションと飛跡検出をおこなうNEXT実験や、複合型検出器で ^{82}Se 等を線源として飛跡検出と熱量測定を行うSuperNEMO実験等が挙げられる。これらの実験では飛跡の情報をイベントトポロジーの同定に用い、ベータ線のエネルギーは熱量測定により行う。

2. 研究の目的

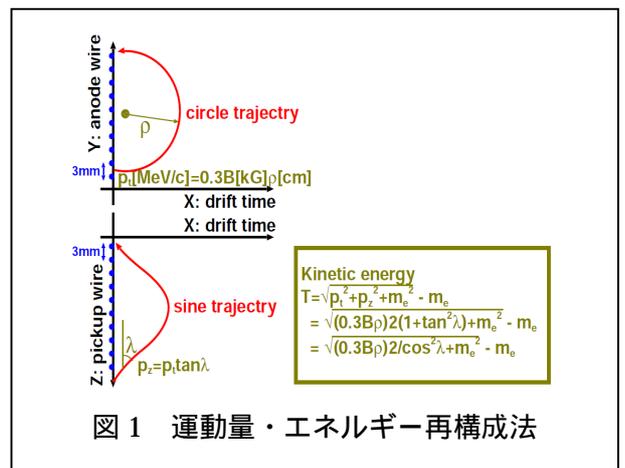
他の二重ベータ崩壊実験では、熱量測定によってベータ線のエネルギーを測定する。そのため、0 $\nu\beta\beta$ のエネルギー値(2本のベータ線の運動エネルギー和)に近いエネルギーを持つガンマ線背景事象と見分けることが難しい。そこで異なる手法として、飛跡検出器を用いて2本のベータ線それぞれの飛跡を観測し、さらに磁場を用いてベータ線の飛跡を観測することで、その曲率半径を基に運動量を測定しその情報から2本のベータ線のエネルギー和を求める。2本のベータ線の運動量に加え、崩壊点の位置情報も得ることができ、二重ベータ崩壊の運動学的情報を全て得ることができる。これらの情報を用いて、ガンマ線などの背景事象との分離を行い、二重ベータ崩壊事象であることを保証する。さらに本手法によって得られる2つのベータ線の角相関は、ニュートリノレス二重ベータ崩壊が発見された際に、その崩壊に寄与する新しい物理モデルに制限を与えることが出来る重要な物理量であり、熱量測定などの方法によっては得られない情報である。この実験手法の確立を目指して、 ^{100}Mo または ^{150}Nd から放出される二重ベータ崩壊(ニュートリノを2つ放出する通常の二重ベータ崩壊)を観測する実験(DCBA実験)を行う。DCBA実験は高エネルギー加速器研究機構富士実験室で2005年より開始され、第二世代の実験として0.03molの ^{100}Mo から放出される二重ベータ崩壊を、6mmの間隔で40本のワイヤーをもつ2枚のドリフトチェンバーで観測する実験(DCBA-T2, DCBA-T2.5実験)さらに、第三世代の実験として、3mmの間隔で160本のワイヤーをもつドリフトチェンバーを開

発して ^{150}Nd から放出される二重ベータ崩壊を観測し、運動量測定を用いる二重ベータ崩壊実験の手法の確立を目指す。特に、本研究課題においては、DCBA-T3 実験装置の開発を行う。

3. 研究の方法

本研究に用いる DCBA-T3 実験装置は、大別すると超伝導電磁石、飛跡検出器およびその読み出しで構成される。超伝導電磁石は実機を製作済みであり、現在の実験(DCBA-T2.5 実験)で運転実績をもつ。0 の信号事象は、あるエネルギーにピークを作るため、その発見には高いエネルギー分解能が要求される。本研究では、ワイヤーピッチを微細化した高分解能の飛跡検出器(ドリフトチェンバー)およびその読み出しを開発する。開発した飛跡検出器を既存の超伝導電磁石に組み込んで二重ベータ崩壊実験(DCBA-T3 実験)を行う。DCBA-T3 実験データの取得とその解析を行い、 ^{150}Nd の二重ベータ崩壊の半減期($T^{2-1/2}$)の測定および、ニュートリノレス二重ベータ崩壊の探索を行う。さらに DCBA-T3 実験を通して、次世代実験である MTD 実験に必要な実験技術および解析手法を確立する。

DCBA 実験では、2 枚のドリフトチェンバーの間に 2 重ベータ崩壊線源を塗布したソースプレートを挟んだサンドイッチ構造になっている。ドリフトチェンバー全体を囲むように配置した超伝導ソレノイドによってソースプレートに対して並行な方向に約 2kG の一様磁場を発生する。ソースプレートで 2 重ベータ崩壊を起こして放出されたベータ線は一様磁場中でそれぞれ螺旋軌道を描き、チェンバーガスを電離する。ソースプレートに対して並行にアノードワイヤー、ピックアップワイヤー及びカソードワイヤーが張られている。アノードワイヤーとカソードワイヤーの間に高電圧を印加し、電離によって生成した電子はアノードワイヤーに向けてドリフトし、アノードワイヤー付近の高電界で電子雪崩を起こして増幅される。またその際に生じたイオンの信号をピックアップワイヤーで収集する。アノードワイヤーは磁場に並行に、ピックアップワイヤーは磁場に垂直に、それぞれ互いに直交するように張られており、飛跡の 3 次元的位置 X , Y 及び Z をそれぞれドリフト時間、信号を生成したアノードワイヤー位置およびピックアップワイヤー位置より再構成する。図 1 で示すように飛跡は X - Y 平面では円軌道を描き X - Z 平面ではサインカーブを描く。円軌道の半径()および、正弦軌道のピッチアングル()をフィットして求めることにより、3 次元運動量を再構成しベータ線の運動エネルギーを得る。本研究では、現在の DCBA-T2.5 実験で用いているドリフトチェンバーと比較してワイヤー間隔を半分(3mm)に微細化したドリフトチェンバーを新しく開発する。これにより、エネルギー分解能を現在の約 150keV から約 80~100keV に改善できることが、期待される。本研究では、エネルギー分解能の改善等を目指し、さらにチャンネル間隔を微細化したドリフトチェンバーの開発を行う。



4. 研究成果

DCBA-T3 実験では、チェンバーガスとして 85%のヘリウムと 15%の二酸化炭素の混合ガスを用いる。業者から購入する混合ガスにおいては混合比の若干の変動があり、チェンバーに印可する高電圧の微調整が必要になる。そのため、純ヘリウムガスと純二酸化炭素を混合し、ヘリウムと二酸化炭素の混合ガスを安定的に供給するシステムを、マスフローコントローラ 2 台を用いて構築した。

DCBA-T3 で用いるドリフトチェンバーを開発・試験するシステムを、KEK および首都大にそれぞれ構築し、それぞれ一台のドリフトチェンバーを用いてドリフトチェンバー本体およびその読み出しエレクトロニクスの開発を行った。KEK で開発を行ったシステムでは、LHC-ATLAS 実験の Thin Gap Chamber の信号読み出し用に開発されたアンプ・シェーパ・ディスクリミネータ(ASD)集積回路を搭載したフラッシュ・アナログ・デジタル変換ボードを独自開発して試験を行った。首都大で開発を行ったシステムでは、Belle II 実験の中央飛跡検出器の信号読み出し用に開発された ASD 集積回路を用いたフラッシュ・アナログ・デジタル変換ボード(市販品)を採用して試験を行った。

KEK において開発を行ったシステムでは、当初チェンバーの気密性の問題により、なかなか信号を見ることが出来なかったが、ガスコンテナを新規製作し、ガスの気密性を高めることで、最終的に宇宙線らしき信号を観測することが出来た。図 2 にその波形の一例を示す。22本のアノードワイヤーからの信号を縦に並べたものであり、山型の波形が荷電粒子の通過の際の信号に対応する。波形の位置がワイヤーの場所によってずれているのは、荷電粒子がガスを電離させ、電子を発生させた位置から、電子がアノードワイヤーまでドリフトする時間の違いを反映している。この時間的遅延の情報(横軸)とアノードワイヤーの位置情報(縦軸)を組み合わせることで、DCBA-T3 用に開発したドリフトチェンバーで宇宙線らしき荷電粒子の飛跡を二次元的に確認することができた。

首都大において開発を行ったシステムでは、KEK で試験を行っている電圧よりも約 300V 程度低い 1800V 程度のアノードワイヤーへの印可電圧で放電が発生し、さらに放電に伴い読み出しエレクトロニクスやその電源が故障

する問題に苦しめられた。そのため、チェンバーガスとして良く使用される PR ガス(アルゴン 90%+エタン 10%)を用いて動作試験を行った。ドリフトチェンバーの前後に宇宙線トリガー用のプラスチックシンチレータを設置し、プラスチックシンチレータを 2 枚通過した事象を用いてドリフトチェンバーの信号の確認を行った。その結果、宇宙線の飛跡を確認することが出来た。さらにドリフト電場の値を変化させながら信号の遅延(ドリフト時間)の依存性を測定したところ、過去の文献(Peisart and Sauli(1984))で得られている値と良く一致した。このことから、DCBA-T3 チェンバーがドリフトチェンバーとして正しく動作していることを確認した。さらに、ガスを本来のヘリウム 85%+二酸化炭素 15%のガスに変更し、放電を避けるためにアノードワイヤー印可電圧を 1700V に抑えて試験を行ったところ、十分にガスゲインが得られない電圧でありながら、宇宙線の飛跡を確認することが出来た。アノードワイヤーに対して垂直に張られたピックアップワイヤーにも -510V の電圧を印可して試験を行ったところ、ピックアップワイヤーにおいても 2 次的に飛跡を観測することが出来た。

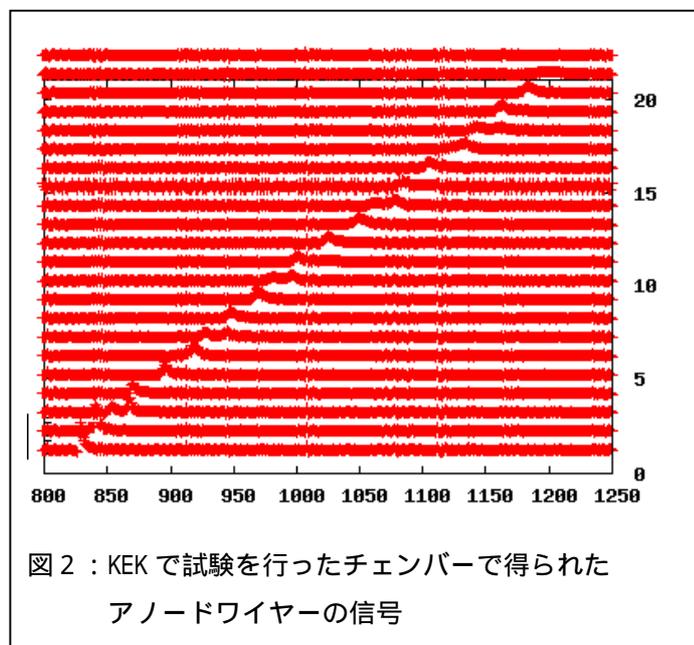


図 2 : KEK で試験を行ったチェンバーで得られたアノードワイヤーの信号

図3にアノードワイヤーおよびピックアップワイヤーで観測された飛跡を示す。上の図は横軸がドリフト時間、縦軸はアノードワイヤーのヒットした位置、色は収集された電荷量に比例したものになっている。下の図は縦軸がピックアップワイヤーのヒット位置であり、その他は上の図と同様である。それぞれ宇宙線の飛跡が二次元的に観測できていることが分かる。この2つの二次元の飛跡を組み合わせると、3次元の飛跡が得られる。正常な動作電圧より約400V程度低いアノードワイヤーへの印可電圧であるが、DCBA-T3用チャンパーにおいて、3次元的に飛跡を確認することが出来た。また、図の色に対応している収集電荷量は、より簡素な実験装置(チューブチャンパー)を用いて見積もった値と矛盾がないことも確認した。正常な動作電圧よりも低

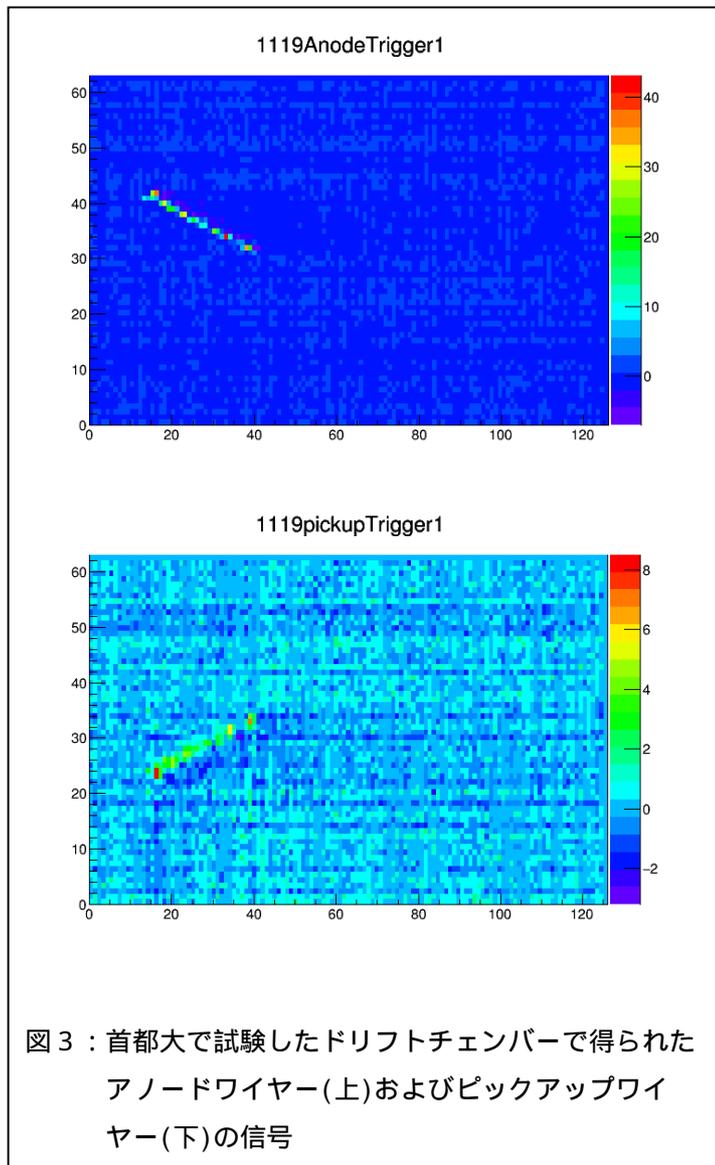


図3：首都大で試験したドリフトチェンバーで得られたアノードワイヤー(上)およびピックアップワイヤー(下)の信号

い印可電圧で放電してしまう問題はまだ解決しておらず、現在も調査に取り組んでいるが、その問題が解決した後は、 ^{150}Nd を含むソースプレートの両脇に首都大とKEKで動作試験を行ったチャンパーを設置し、早い段階でDCBA-T3実験を開始したいと考えている。

研究計画で予定していた、さらに微細化したドリフトチェンバーの開発については、電場および磁場の配置の見直しを検討した。近年、ニュートリノを含まない4重ベータ崩壊が発見されると、ニュートリノがディラック粒子であると証明できるとの新たな理論的予測がある(J. Heeck and W. Rodejohann(2013))。その信号事象ではエネルギーの低い4本のベータ線が放出される。そのような複雑なヒットパターンを持つ事象は、DCBA実験で用いているように2次元情報を2つ組み合わせて3次元情報を再構成することは困難であることが予測される。そのため、完全な3次元情報を得られるよう、チェンバーをTime Projection Chamberとする方向で検討を行った。電場に対して平行にソースプレートを配置する必要があり、有限要素法を用いた電場シミュレーションを行った。その結果、端での電場の乱れはみられるものの、電場の一様性は概ね保たれることが分かった。DCBA-T3実験の準備と並行して、首都大において小型のプロトタイプの製作も開始した。

<引用文献>

J. Heeck and W. Rodejohann, Neutrinoless quadrupole beta decay, EPL 103(2013) 32001

〔雑誌論文〕(計 1 件)

N. Ishihara et al., Performance of the drift chamber beta-ray momentum analyzer for double beta decay experiments, Progress of Theoretical and Experimental Physics, 2017 no.7, 073H01, 2017, 17pp.
DOI: 10.1093/ptep/ptx091

〔学会発表〕(計 9 件)

石原信弘 他, DCBA/MTD によるレプトン数非保存事象の探索, 日本物理学会 第 73 回年次大会, 2018 年 3 月
吉岡輝昭 他, 二重ベータ崩壊実験 DCBA-T3 の現状, 日本物理学会 2017 年 秋季大会, 2017 年 9 月
H.Kakuno, et al., Status of the DCBA experiment, International Workshop on Double Beta Decay and Underground Science (DBD16), 2016 年 11 月
伊藤隆晃 他, 二重ベータ崩壊実験 DCBA の現状, 日本物理学会 2016 年 秋季大会, 2016 年 9 月
柿崎正貴 他, DCBA 実験における飛跡再構成の性能評価, 日本物理学会 第 71 回年次大会, 2016 年 3 月
柿崎正貴 他, 二重 崩壊実験 DCBA の現状とシミュレーションによる検出器性能評価, 日本物理学会 2015 年 秋季大会, 2015 年 9 月
角野秀一 他, DCBA による二重ベータ崩壊実験の現状報告 XVIII, 日本物理学会 第 70 回年次大会, 2015 年 3 月
角野秀一 他, DCBA による二重ベータ崩壊実験の現状報告 XVII, 日本物理学会 2014 年 秋季大会, 2014 年 9 月
伊東孝行 他, 二重ベータ崩壊実験 DCBA-T3 における飛跡検出器と読み出し機器の開発, 日本物理学会 2014 年 秋季大会, 2014 年 9 月

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

DCBA ホームページ

<https://wiki.kek.jp/pages/viewpage.action?pageId=11931117>

6. 研究組織

(1) 研究分担者

研究分担者氏名: 石原 信弘

ローマ字氏名: ISHIHARA Nobuhiro

所属研究機関名: 高エネルギー加速器研究機構

部局名: 素粒子原子核研究所

職名: 名誉教授

研究者番号(8桁): 50044780

研究分担者氏名: 住吉 孝行

ローマ字氏名: SUMIYOSHI Takayuki

所属研究機関名: 首都大学東京

部局名: 大学院理学研究科

職名: 特任教授

研究者番号(8桁): 30154628

(2) 研究協力者

研究協力者氏名: 加藤義昭

ローマ字氏名: KATO Yoshiaki

科研費による研究は、研究者の自覚と責任において実施するものです。そのため、研究の実施や研究成果の公表等については、国の要請等に基づくものではなく、その研究成果に関する見解や責任は、研究者個人に帰属されます。