

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 30 年 6 月 17 日現在

機関番号：82118

研究種目：基盤研究(C) (一般)

研究期間：2015～2017

課題番号：15K05112

研究課題名(和文) マヨラナ・ニュートリノ探索実験用大型飛跡検出器の開発

研究課題名(英文) R&D of large size tracking detectors for the experiment searching for Majorana neutrino

研究代表者

石原 信弘 (ISHIHARA, Nobuhiro)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・その他部局等・名誉教授

研究者番号：50044780

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,600,000円

研究成果の概要(和文)：ニュートリノがマヨラナ性(物質と反物質の区別が無い性質)を持つことを実験的に証明するには、原子核の二重ベータ崩壊にニュートリノ放出を伴わない崩壊モードが有ることを示すのが唯一の現実的な方法である。本件は二重ベータ崩壊で放出される2つのベータ線が一樣磁場の中で描く螺旋飛跡を捉えて個々のベータ線の運動量を測定することによってニュートリノ放出を伴わない崩壊モードを探索する世界唯一の大型測定器を製作するための開発研究である。従来行われて来たエネルギー測定と比較して背景事象を極端に減らすことが出来るのが特長である。

研究成果の概要(英文)：Majorana nature, which means no difference between material and anti-material, is realistically confirmed by only the experimental discovery of neutrinoless double beta decay in nuclei. This research is an R&D project to construct a large scale momentum analyzer that can measure the momentum of each beta-ray emitted from the nuclear double beta decay. The project is the only one searching for neutrinoless double beta decay by measuring a beta-ray momentum all over the world. This method can extremely reduce the backgrounds in searching for neutrinoless double beta decay events better than the energy measurement method using calorimetry.

研究分野：素粒子物理

キーワード：マヨラナニュートリノ 二重ベータ崩壊 運動量測定器 ドリフトチェンバー 超伝導ソレノイド磁石

1. 研究開始当初の背景

クォークとレプトンは物質の基本粒子である。電荷を持つ基本粒子は粒子と反粒子の区別が付くディラック粒子である。近年の衝突型加速器は高エネルギー密度状態を作る事が出来、宇宙の初期(ビッグバン)に近い状態に迫ることが可能となった。特に電子・陽電子衝突型加速器実験では電子・陽電子消滅反応後に物質と反物質が生成されることが明確に示された。問題は宇宙初期に物質と等量生じたはず反物質が現在宇宙に存在しないのは何故かということである。この物質・反物質非対称生成の答えの一部は小林・益川理論の6クォーク説で説明出来ることがBaBarとBELLE実験から分かったが、それだけでは現在の宇宙が物質のみから構成されていることは説明出来ない。

一方、レプトン中のニュートリノは電荷を持たないために粒子と反粒子の区別が付かないマヨラナ粒子である可能性がある。粒子と反粒子の区別が付かない性質はマヨラナ性と呼ばれている。柳田、Gell-Mann et al.によって提唱されたシーソー機構理論は、ニュートリノがマヨラナ性を持つことを仮定すると、実験で知られているニュートリノが軽い質量を持つことが自然に導かれることを示した。それまでに広く認められていた素粒子標準理論ではニュートリノ質量はゼロとされていたが、ニュートリノ振動の発見によって有限質量であることが実験的に示されて以来、ニュートリノがマヨラナ性を持つ期待が高まっている。但し、ニュートリノ振動はニュートリノの世代間に質量差が有りさえすれば起きるので、ディラック粒子でも可能である。

シーソー機構は宇宙初期に軽いニュートリノと重いニュートリノが対になって生成されることを示している。そのため重いニュートリノが崩壊する時に物質粒子が反物質粒子より優勢になる状況を説明する有力な理論であるレプトジェネシスの根拠をなすものである。

ニュートリノがマヨラナ性を持つなら、 ^{76}Ge 、 ^{100}Mo 、 ^{136}Xe 、 ^{150}Nd 等の原子核がニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊(ここでは $0\nu 2\beta$ と表記する)を起こすことが理論的に導かれる。 $0\nu 2\beta$ の存在を実験的に確認できれば、ニュートリノがマヨラナ性を持つことが証明されシーソー機構を強く支持することになり、レプトジェネシスが宇宙創成の謎を解く理論として有力になる。さらに $0\nu 2\beta$ 事象の統計量が増えれば、その半減期からニュートリノの有効質量を求めることが出来る。

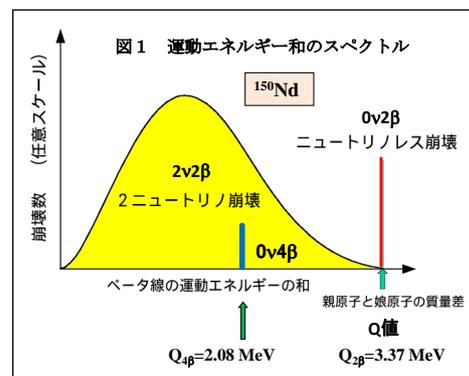
最近(2013年)、ニュートリノがディラック粒子であってマヨラナ性を持たない場合には、反電子ニュートリノ放出を伴わないで4つのベータ線が放出される($0\nu 4\beta$ と表記)反応が起きるという理論が提案された。この理論の妥当性には検討時間が必要であるので、現段階では参考にするだけであるが、今後の

展開によっては将来マヨラナ性に問題が出て来るようなことが無いとも限らないので無視は出来ない。

2. 研究の目的

原子核が二重ベータ崩壊を起こす時、標準モデルに従えば2つのベータ線と2つの反電子ニュートリノが放出され($2\nu 2\beta$ と表記)、それらの運動エネルギーの和が崩壊によって解放される全エネルギー(Q値)となる。もし、ニュートリノがマヨラナ性を持つなら、上述したように $0\nu 2\beta$ が起きる。この場合は反電子ニュートリノ放出を伴わないので、2つのベータ線の運動エネルギー和がQ値となる。また、 $0\nu 4\beta$ の場合には4つのベータ線の運動エネルギー和がQ値となり $0\nu 2\beta$ のそれよりも低い値となる。

実験ではベータ線の運動エネルギースペクトルを調べることになる。図1は ^{150}Nd の場合について、ベータ線の運動エネルギー和のスペクトルを示すものである。上述した $2\nu 2\beta$ 、 $0\nu 2\beta$ 及び $0\nu 4\beta$ のスペクトルがそれぞれ示されている。



ニュートリノは殆ど反応しないので捉えようが無く、 $2\nu 2\beta$ は連続スペクトルとなる。他方 $0\nu 2\beta$ 及び $0\nu 4\beta$ は、それぞれのQ値の位置に集まりスパイク状となる。

この研究の主たる目的はこれらのスペクトルの内、特に $0\nu 2\beta$ のスパイクを実験的に発見することである。注意すべきは、図はエネルギースペクトルの概念を示すために、崩壊数のスケールが任意になっている点である。実際には $2\nu 2\beta$ の半減期は 10^{19} 年程度であり、 $0\nu 2\beta$ や $0\nu 4\beta$ のそれは 10^{25} 年程度かそれ以上に長いと試算されているので、スパイク状とは言え確証を得るのは容易では無い。

3. 研究の方法

(3. 1) 運動量分析器 DCBA の概要

二重ベータ崩壊における2つのベータ線のエネルギー和を求めるためにDrift Chamber Beta-ray Analyzer (DCBA)と呼ばれる運動量分析器を開発した。荷電粒子の飛跡検出器であるドリフトチェンバーの中に ^{150}Nd 等の崩壊核を薄板状にした物(ソースプレートと呼ぶ)を設置し、それらを磁束密度0.6-2.0 kGの1様磁場の中で運転する。二重ベータ崩壊

が起きるとソースから2つのベータ線が放出され、個々のベータ線は一樣磁場の中で螺旋状に運動する。その飛跡を3次的に記録し、螺旋半径(r)とピッチ角と呼ばれる進行方向の角度(λ)を測定すれば、次式(1)により個々のベータ線の運動量 p が求まる。

$$p(\text{MeV}/c) = 0.3r(\text{cm})B(\text{kG}) / \cos\lambda \quad (1)$$

ベータ線は電子質量 m なので次式(2)により運動エネルギー T を得る。

$$T = (p^2 + m^2)^{1/2} - m \quad (2)$$

崩壊1事象に得られる2つのベータ線の運動エネルギーをそれぞれ T_1 及び T_2 とすると、 $T_1 + T_2$ が図1に表すべきエネルギー和となる。

過去に運動量を測定した実験は2例有るが、いずれも現在は行われていない。飛跡を記録するエレクトロニクス技術と一樣磁場を発生させるマグネット技術が未発達であったのが途切れた理由だと思われる。DCBAは近年急速に発達したコンピューターとその周辺エレクトロニクス技術を利用したドリフトチェンバー3次元飛跡検出器と、超伝導ソレノイドが発生する磁束をリターンヨークに閉じ込めて一樣磁場を実現したマグネットから成り立っている。

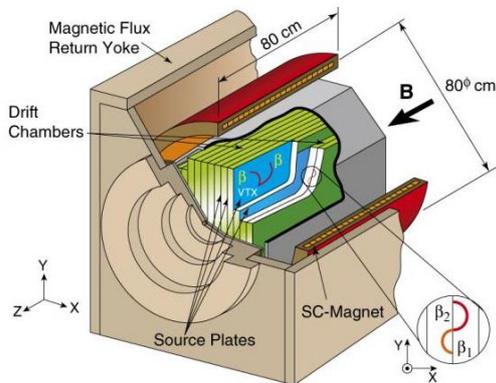


図2. DCBA-T3の概念図

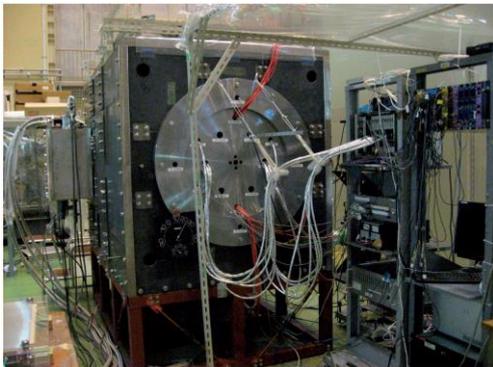


図3. DCBA-T3の外観図

図2に試作機T3(DCBA-T3)の概念図、及び図3にその外観を示す。

(3. 2) DCBAの性能

宇宙線や自然崩壊元素に由来する背景事象の中から、前述したような長い半減期を持つ事象を抽出するためには次の2点が必要不可欠である。

(I) 検出すべきベータ線の運動エネルギーの範囲は0.1-3 MeVである。この範囲外の電子や陽電子、アルファ線、ミュー粒子、陽子及びその他の荷電粒子は背景事象として除去されるべきである。

(II) $0\nu 2\beta$ の半減期はニュートリノ有効質量の値に依存するが 10^{25} 年と試算されており、 $0\nu 2\beta$ についてはさらに長いと予想される。従ってソースの量は少なくとも1000 mol以上必要である。

DCBAは次のような特徴を持つ。

(i) ドリフトチェンバーはヘリウム主体ガスのイオン化を利用するので、ガンマ線や中性子は検出されない。一樣磁場の磁束密度は3 kG以下で使用されるので、測定可能な運動量範囲は限定される。例えば $r=4$ cm とすれば(1)式より $p=3.6$ MeV/c となる。これは電子と陽電子の場合には(2)式より $T=3.1$ MeV となる。しかし、それ以外の荷電粒子では質量が桁違いに大きいので、運動量も大き過ぎて螺旋ではなく直線となる。電子と陽電子は回転方向の違いから区別することができる。

(ii) ソースからベータ線が飛び出すためには厚みが 50 mg/cm² 程度以下でなければならない。ソースを ^{150}Nd とし必要な量を1000 molと仮定するとソース面積は 300 m² となる。これは予算的に試験研究の範囲を超えるので、DCBAの将来計画としてMagnetic Tracking Detector (MTD)を考えることとする。言い換えればDCBAはMTDのR&Dという位置付けである。

(3. 3) DCBAとMTDの現状

図2において、超伝導ソレノイドマグネット(SC-Magnet)と磁束リターンヨーク(Magnetic Flux Return Yoke)は完成している。

一樣磁場中に天然Moをソースとして収納した既設T2チェンバーを設置してDCBA-T2.5と称する実験がこれまでに行われ、現在データを解析中である。この実験の主目的は ^{100}Mo (天然Moに9.6%含まれる)による $2\nu 2\beta$ の半減期を求めることである。

T3用ドリフトチェンバーについては、運動量測定精度とソース収容量の向上を目指して、ワイヤーピッチとドリフト距離を共にT2チェンバーの半分にした物を製作し、宇宙線を使って荷電粒子の3次元位置情報収集システムの開発を行っている。

将来のことではあるがMTD用ドリフトチェンバーとしては可能な限り大きなサイズが経済的である。大型化に伴う問題はDCBA

では見えてこないなので別途取り組む必要が有る。図4にMTDの概念図を示す。この図に示すものを1モジュールと呼ぶことにする。

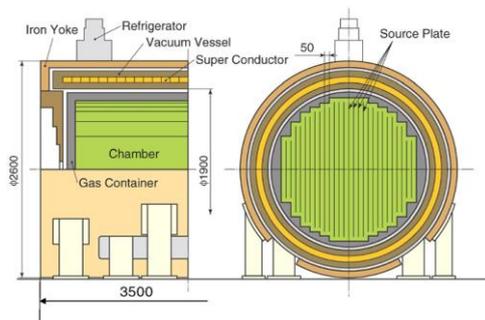


図4. MTDの概念図

収容可能なソース面積は約 80 m^2 なので厚さを 50 mg/cm^2 とすると約 40 kg のソースを搭載出来る。前述の ^{150}Nd を考慮したとき、天然ネオジウム (^{150}Nd の含有量 5.6%) の場合は 15 mol 、 50% に濃縮出来れば約 130 mol を1モジュールに収容出来る。技術的には 50% 濃縮も可能であるという情報があるので、8モジュール以上製作すれば半減期 10^{26} 年の事象を捉えることが可能である。

MTDは組み立てと試運転をKEK富士実験室B4ホールで行い、完成を見極めた上で地下実験室へ搬入する予定である。そのため全体の大きさは低床大型トラックで運搬できるように設計されている。運転経費の大部分は超伝導ソレノイドマグネットの冷却に費やされるので、冷凍機の負荷を小さくするために転移温度 T_c が高い線材 MgB_2 ($T_c=39 \text{ K}$) をソレノイドコイルに使用することを予定しており準備研究が進んでいる。

4. 研究成果

将来を見据えた時、DCBA-T3が完成した時点では殆どの技術的問題点が解決しており、MTDを進めるには予算的措置だけという状態に近くなることに目標を置いている。本研究期間中に次の様な成果が得られた。

(4.1) DCBA-T2用チェンバーとT3用超伝導ソレノイドマグネットを組み合わせてKEK富士実験室B4ホールでDCBA-T2.5と称する実験を行った。厚さ $50 \mu\text{m}$ の天然モリブデン薄板 (^{100}Mo を 9.6% 含有) を設置し 0.03 mol の ^{100}Mo からの $2\nu 2\beta$ 事象を収集し、現在解析中である。宇宙線由来の背景事象が約 0.1 Hz の頻度で観測されるが、それらの中から1日平均1乃至2個程度の $2\nu 2\beta$ 事象候補を選択出来ることが確認された。図5はそのような事象の中の一例外を3次元表示したものである。Z方向に磁場が掛けられている。(a)を回転してZ方向から見たのが(b)である。2つのベータ線 $\beta 1$ と $\beta 2$ が真ん中のソース板から出発して反時計方向に円運動している様子が良く分かる。

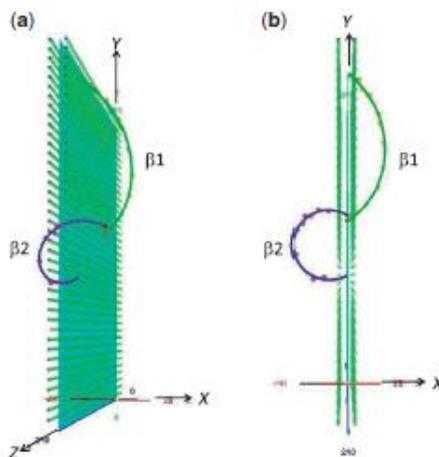


図5. ^{100}Mo からの $2\nu 2\beta$ 事象の一例

(4.2) 2つの電子の運動エネルギー和が 3.03 MeV になる図6のようなものが1事象得られた。

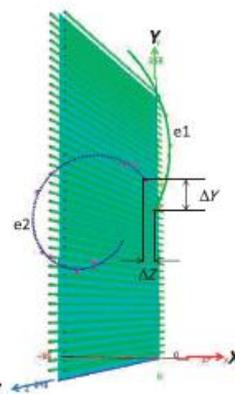


図6. 運動エネルギー和が 3.03 MeV の事象

^{100}Mo の Q 値は 3.03 MeV であるので、詳細検討した結果、図に示したように飛跡 $e1$ と $e2$ のソースでの出発点位置が Y 及び Z 座標共に互いにずれていることが判明した。従ってこの事象は $0\nu 2\beta$ 事象では無く背景事象であることが確認された。二重コンプトン散乱による反跳電子であろうと予想される。このように出発点の Y 及び Z 座標を求めることが背景事象を除く上で大変有力な方法であることが確認された。

(4.3) DCBA-T3とMTDのチェンバーセルは全く同じである。つまり、どちらもワイヤーピッチが 3 mm 、ドリフト電子の最大ドリフト距離が 42 mm である。従ってチェンバー信号の読み出し電子回路システムのかなりの部分は共通である。試作プリアンプをDCBA-T3チェンバーに設置して宇宙線の直線飛跡を捉えたときのアノードワイヤー信号を図7に示す。

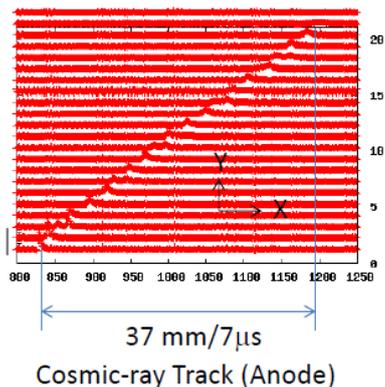


図 7. アノードワイヤー信号

(4. 4) MTD のドリフトチェンバーは DCBA-T3 のそれと比較して格段に大きいので、大型化するに当たっては固有の問題がある。重力によるチェンバー枠やワイヤーの撓み等の機械的問題や、その撓みがもたらす電気信号や放電への影響等の電気的問題点を探るために、回転機能を持った大型チェンバー組立装置を製作しテストチェンバーを組み上げた。このチェンバーのワイヤーピッチは DCBA-T3 と同じく 3 mm である。現在はそのテストチェンバーを使用して各種問題点を洗い出しているところである。図 8 に回転機能付き大型チェンバー組立装置とテストチェンバーを示す。



図 8. 回転機能付き大型チェンバー組立装置とテストチェンバー(1600mm×2490mm)

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)

[雑誌論文] (計 1 件)

N. Ishihara, T. Ohama, Y. Yamada, Y. Kato, T. Inagaki, G. Iwai, H. Iwase, M. Kawai, Y. Kondou, Y. Makida, K. Takahashi, N. Ujiie, K. Tanaka, M. Tonooka, R. Hamatsu, T. Ishikawa, H. Igarashi, T. Ito, M. Kakizaki, H. Kakuno, S. Kitamura, T. Sumiyoshi, T. Yoshioka, T. Ishizuka, N. Tamura, Y. Sakamoto, Y. Nagasaka, and R. Ito
Performance of the drift chamber beta-ray

momentum analyzer for double beta decay experiments

Progress of Theoretical and Experimental Physics 査読有

2017, 073H01 (17 pages)

DOI: 10.1093/ptep/ptx091

[学会発表] (計 5 件)

① 石原信弘、川井正徳、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

東京理科大学 野田キャンパス

2018 年 (平成 30 年) 3 月 25 日発表

② 吉岡輝昭、石原信弘、川井正徳、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

宇都宮大学 峰キャンパス

2017 年 (平成 29 年) 9 月 13 日発表

③ 伊藤隆晃、石原信弘、川井正徳、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

宮崎大学 木花キャンパス

2016 年 (平成 28 年) 9 月 23 日発表

④ 柿崎正貴、石原信弘、川井正徳、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

東北学院大学 泉キャンパス

2016 年 (平成 28 年) 3 月 22 日発表

⑤ 柿崎正貴、石原信弘、川井正徳、他

二重β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

大阪市立大学 杉本キャンパス

2015 年 (平成 27 年) 9 月 27 日発表

[その他]

ホームページ等

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

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石原信弘 (ISHIHARA, Nobuhiro)

高エネルギー加速器研究機構・名誉教授

研究者番号：50044780

(2) 研究分担者

川井正徳 (KAWAI, Masanori)

高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・技師

研究者番号：50391735