

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 13 日現在

機関番号：82118

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2012～2015

課題番号：24654073

研究課題名(和文)電波観測技術を応用したニュートリノ質量絶対スケールの新しい測定法の開拓

研究課題名(英文)Study of radiofrequency technique for a direct neutrino mass measurement

研究代表者

長谷川 雅也 (HASEGAWA, MASAYA)

大学共同利用機関法人高エネルギー加速器研究機構・素粒子原子核研究所・助教

研究者番号：60435617

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,800,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は将来のニュートリノ質量絶対スケールの測定に向けて、トリチウムベータ崩壊からの電子のエネルギースペクトルを精密に測定するための、電波観測技術を用いた新しい手法を開拓する事を目標としている。シミュレーションにて、電子が磁場中で発生するサイクロトロン放射を用いて、原理的に電子のエネルギーを(ニュートリノ質量測定が期待出来る)0.1eVの精度で測定可能な事を確認した。また信号を模擬した電波を発生し、その電波を読み出し系に実際に通して十分なS/Nで観測できる事を確認した。本実験でのセットアップ案もほぼ固まった。

研究成果の概要(英文)：The main goal of this study is to establish a new method for measuring the electron energy based on a radio-frequency technique toward a direct neutrino absolute mass measurement. Electrons emit the cyclotron radiation in the magnetic field, which is related to the energy of the electron, thus provides a new form of non-destructive spectroscopy.

We designed a prototype detector system which will be used for the proof-of-concept of the frequency-based technique. By using the simulation, we showed the energy resolution of 0.1eV level is possible with this method in principle. In parallel, we evaluated basic performance of detector system which consists of horn antenna for detecting radio-waves, low-pass filter and cryogenic amplifier, and confirm it's promising to detect the electrons with good signal-to-noise ratio. We also started the designing work of the detector for a future neutrino mass measurement.

研究分野：宇宙物理

キーワード：電波観測 ニュートリノ

1. 研究開始当初の背景

ニュートリノ振動の発見により素粒子ニュートリノが有限の質量を持つことは証明されたが、質量の絶対スケール及び階層構造はまだ解明されていない。ニュートリノが質量を獲得する過程には、背後に力の統一に関連する理論が密接に関わっており、研究の為に重要な情報として解明が期待されている。また、ニュートリノの質量は大規模構造の形成に大きく関わっており宇宙の進化を理解する上で非常に重要なパラメータとなっている。ニュートリノ質量の探索方法として従来から行われている方法に、ベータ崩壊からの崩壊電子のエネルギーのエンドポイントの測定がある。現在の上限値は Mainz 実験による 2.3eV (95%CL) で今後数年の内に後継の KATRIN 実験が開始する予定であるが、すでに実験装置が 100m を越えて巨大化している点とエネルギー分解能を 1eV より下げることが困難なことから、劇的な感度の改善は期待できず、発見に向けて新しい手法の開拓が望まれている。近年、崩壊電子が磁場中で発生するサイクロトロン放射を用いたエネルギー測定法が考案されている (PRD80,951391)。放射される電波の周波数は電子の (ソースから) 飛び出す角度に依存しない為、周波数から電子のエネルギーを一意に再構成する事ができる。この方法の利点は、磁場中で電子をトラップしながら長時間放射を観測できるので、装置をコンパクトに抑えつつエネルギー分解能を上げられる点である。ただし、まだ手法自体の原理検証はなされておらず、本研究を通して原理検証に挑む。

2. 研究の目的

本研究では、ニュートリノ質量の精密測定に向けて、トリチウムベータ崩壊からの電子のエネルギースペクトルを 0.1eV のエネルギー分解能で測定するための、電波観測技術に応用した新しい手法を開発する事を目的としている。本研究を通して、サイクロトロン放射を用いた電子のエネルギー測定の原理検証が進み、系統誤差が十分抑えられる目処がたてば、ニュートリノ質量測定に適応可能な手法として応用が出来、次世代の直接測定の標準的な手法として広く利用される事が期待できる。その先の展開として、本手法を用いて実際にニュートリノ質量を 10^{-2}eV レベルまで探索できれば、高い確率でニュートリノの有限な質量の効果を直接検出 (絶対質量の測定) できると期待できる。そのレベルまで探索できれば、たとえ検出できなくとも、ニュートリノ振動実験のデータと合わせて質量階層構造を決定する事ができる。本研究代表者は、現在宇宙背景放射の偏光観測を行っているが、最近、重力レンズ効果に特有の偏光パターン (大きさが 0.2 程度程度の渦巻き状のパターン) の強度を精密に測定する事で、宇宙の暗黒成分 (特に暗黒エネルギー) の研究ができる事が提案されている。し

かし、ここでその偏光強度にはニュートリノの質量も大きく寄与する事が予想されており、暗黒エネルギーの量とニュートリノ質量の間に大きな縮退関係が残ってしまう。地上実験でニュートリノ質量を抑える事は、宇宙の運命を決定づける暗黒エネルギーの研究にも重要であり、本研究が成功した際の素粒子・宇宙論に与えるインパクトは非常に大きいと考えられる。

3. 研究の方法

サイクロトロン放射の周波数から電子のエネルギーを精密測定する、という手法を確立するため、図1の様な試験装置を製作して手法の原理検証を行う。ここで電子ソースとして、エネルギー (17.8keV) がトリチウムのエンドポイントと近く半減期の短い (1.8h) $^{83\text{m}}\text{Kr}$ をソースとして用いる。このセットアップを用いた場合に 1 テスラの磁場領域で電子から放出されるサイクロトロン放射の周波数はおよそ 30GHz であり、ケーブルでのロスを出るだけおさえるため、アンテナで受けた信号を低温ステージの上で一端 MHz 領域に信号をダウンコンバートし、さらに増幅してから常温に引き出す。観測した信号が確実に電子のサイクロトロン放射によるものである事を保証するために、磁場領域の先にシリコン検出器を置いて電子が入射するタイミングとアンテナでパワーを受けたタイミングの相関を取る。これにより、クライオスタットの壁面等から熱的に放射される電波等の背景事象をほぼフリーなレベルまで抑える事が出来ると期待される。

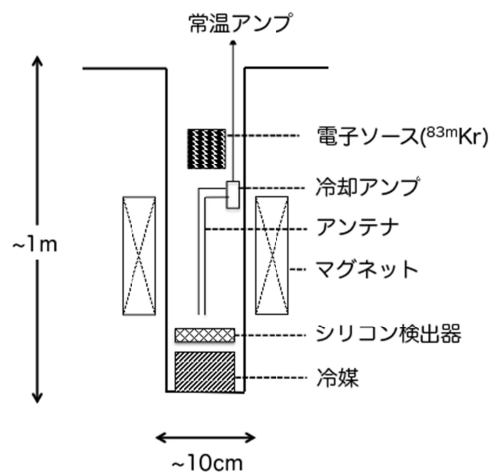


図1 原理検証のための試験装置の概要

次にニュートリノ質量測定実験に向けたセットアップの検討と期待される性能の考察を行う。この際に特に重要なのがサイクロトロン放射を受けるアンテナの形状及び配置である。電子から放出される電波の周波数はエネルギーに応じて一定であるが、検出する

アンテナに対する速度に応じてドップラー効果により周波数が容易にズれるため、この効果を十分小さく抑えるような配置の検討が必要である。

4. 研究成果

測定手法の原理検証に関しては、まずシミュレーションにて、およそ1テスラの磁場中での電子のサイクロトロン放射を用いて、その周波数を数10MHzの精度で測定する事でおおよそ0.1eVの分解能で電子のエネルギーを再構成する事が原理的に可能である事を確認した。

この時、トリチウムを電子ソースとして用いた際に放出される電子の周波数はおよそ27GHz以上になる。

次に、信号発生器を用いてサイクロトロン放射を模擬した25~40GHzの電波を発生し、それをホーンアンテナで受け、low pass filter及び(低温)アンプを通してスペクトルアナライザーに入射して、~30GHz付近の電波に対して信号が期待通り増幅されて検出されている事、及びニュートリノ質量測定において無関係な(エンドポイントと遠く離れたエネルギー領域の)高週波の電波(35GHz以上)に対して感度が無い事を確認した。また、ホーンアンテナの受信効率の角度依存性や後段のアンプやケーブルでのパワーのロスの周波数依存性を測定し、かつ機械式冷凍機を用いて簡単な冷却試験を行い、低温アンプの77K付近での特性について(ノイズレベル、増幅率等)評価をした。これらの評価試験を通して、読み出し系の原理検証がほぼ完了したと共に、これらの試験を通して得た特性はシミュレーションに入力する基礎情報となる。

また、原理検証を行うためのプロトタイプ検出器の設計を行った。ソレノイド電磁石を用いた場合とネオジム磁石を用いた場合の両方について様な磁場が期待出来る領域を定義し、そこにガス状の電子ソース(本研究ではクリプトンを想定)を送るための配管やアンテナの配置などを決定し仕様を固めた。ただし、使用予定の電磁石へのアクセスが期間内にできなかったため、検出器の取り付け及びアライメントのためのジグ等の製作及び原理検証試験は今後の課題である。

並行して、ニュートリノ質量測定のためのセットアップの検討を行い案を固めた。図2の様にアンテナを磁場の方向に対して軸対称に配置する事で、統計的にドップラー効果によるバイアスを受けない様にしている。また、アンテナを図の様に細かく分割する事で、アンテナは通常正面からの電波に対して最も感度が出る様に設計されているため、電子が移動するに応じて(アンテナ間で感度が最も

悪くなるため)出力が周期変動する(=AMラジオの様に信号に変調がかかる)。従って、磁場の強さでほぼ決定される変調の周波数に応じた信号の成分をとることで、S/Nのより高い(10程度以上で)測定が期待出来る。

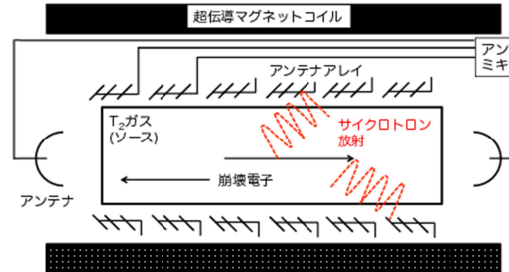


図2 ニュートリノ質量測定のためのセットアップ案

また、当初の想定を越える進展(成果)としては、宇宙が誕生して1秒後に生成されたと考えられている宇宙背景ニュートリノの現実的な検出法の提案ができたことである。サイクロトロン放射による電子の検出効率が非常に高い事が期待出来るため、この原理による検出装置を電子がソースから放出された事を保証する“トリガー”として使用し、電子自身のエネルギーを超高感度の検出器(例えば超伝導転移端(TES)ボロメータ検出器など)で測定する事で、S/Nが~1以上で検出できる可能性がある。今後別の研究課題として発展させて行く。

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 0 件)

〔学会発表〕(計 1 件)

(1)発表者: 長谷川雅也

発表標題: ミリ波検出技術を応用した新しいニュートリノ質量探索実験の検討
学会等名: ミリ波受信機ワークショップ
発表年月日: 2014年3月3日~3月4日
発表場所: 茨城大学(茨城県水戸市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

名称:
発明者:
権利者:
種類:
番号:
出願年月日:
国内外の別:

取得状況(計 0 件)

名称：
発明者：
権利者：
種類：
番号：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕
ホームページ等
<http://cmb.kek.jp>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

長谷川 雅也 (HASEGAWA MASAYA)

大学共同利用機関法人 高エネルギー加速
器研究機構・素粒子原子核研究所・助教
研究者番号：60435617

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：