

令和元年6月12日現在

機関番号：82118

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2015～2018

課題番号：15K13493

研究課題名(和文)超伝導ミリ波検出器と電波観測技術を応用した新しい宇宙背景ニュートリノ探索法の開拓

研究課題名(英文) Study of a new approach towards future cosmic neutrino background measurement based on superconducting detector and radio-frequency detection technique

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・研究機関講師

研究者番号：60435617

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,900,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、ニュートリノ捕獲反応を用いた宇宙背景ニュートリノの直接検出に向けて、超伝導ミリ波検出器と電波観測技術を応用し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、「電波を用いた電子トラッキング」のセットアップの最適化を行いS/N比が10以上で電子の通過を同定できる事を確認した。また電子のエネルギーを測定する超伝導検出器アレイの実現に向けて信号多重化に関する原理検証を行い、0(10000)の検出器アレイの読み出しに成功した。本研究を通して実現可能な本実験でのセットアップ案がほぼ固まった。

研究成果の学術的意義や社会的意義

本研究は、宇宙誕生直後に発生したニュートリノ(宇宙背景ニュートリノ=C B)の直接検証を目指した新技術開発に関する研究である。C Bをトリチウムに吸収させ、その結果放出される電子のエネルギーを精密に測定する事で検出する。この検出によりビッグバン宇宙の最終検証が完了する。測定のポイントは(1)トリチウムからの電子を確実に同定する事、(2)C Bとトリチウムの崩壊からの電子をエネルギー測定により確実に識別する事、の2点である。本研究を通して、電子を高S/N比で同定できる事、電子エネルギー測定のための大規模超伝導検出器アレイ信号読み出しの原理検証が出来た。本実験でのC B検出がおおいに期待できる。

研究成果の概要(英文)：The main goal of this study is to establish a new method for detecting the cosmic neutrino background based on a radio-frequency technique and superconducting detectors. We optimize the setup of "electron tracking with radio frequency signal", where electron emits the cyclotron radiation in the magnetic field, and we are able to trigger the electrons from Tritium by neutrino capture without destructing the electrons. The electron energy is measured with superconducting detectors in the experiment. In order to avoid the "pileup" due to high-rate electrons from tritium beta-decay, and thus the large-format detector array is indispensable to the experiment. We tested frequency domain signal multiplex method, and confirmed more than ~8000 detectors is readable. We confirm this method is promising to detect the neutrinos. We also started the designing work of the detector with the knowledge from this research.

研究分野：宇宙物理

キーワード：宇宙背景ニュートリノ 超伝導検出器 電波観測 ニュートリノ

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

1. 研究開始当初の背景

宇宙背景ニュートリノは、ビッグバン直後に熱平衡を離れ自由粒子として宇宙を漂うビッグバンの残骸である。エネルギーが極めて低く(\sim meV)、物質とほとんど相互作用をしないために、直接検出は非常に困難であるが、宇宙マイクロ波背景放射(CMB)と同様に、初期宇宙、特にビッグバン直後1秒後までを直接探れるプローブとして検出が期待されている。本研究では宇宙背景ニュートリノの探索方法として、ニュートリノ捕獲反応を用いる方法を推し進める。

ニュートリノ捕獲反応と続くベータ崩壊では2体反応となるため、放出される電子は通常のベータ崩壊のエンドポイントよりも2m高い所で単一のエネルギーを持つ。ニュートリノ振動実験からこのエネルギーギャップは典型的におよそ0.1eVである事がわかっているため、放出電子のエネルギーを0.1eV以下の分解能で測定できれば、宇宙背景ニュートリノをとらえられる可能性が出てくる。これは本研究代表者が行なっているCMB観測で用いる超伝導検出器を用いれば十分達成可能である。さらにCMB観測技術を応用した新しい電子のトラッキング検出器を導入し、バックグラウンドを期待される事象数よりも十分小さく抑える事でS/N比 $\gg 1$ の非常にクリアな検出が実現できる。このための基盤技術の開発が本研究の目的である。

2. 研究の目的

本研究では、ニュートリノ捕獲反応を用いた宇宙背景ニュートリノの直接検出に向けて、超伝導ミリ波検出器と電波観測技術を応用した新しい手法を開拓する事を目標としている。本研究で開発される手法を用いて、トリチウムのニュートリノ捕獲反応及びベータ崩壊からの電子のエネルギースペクトルを0.1eV以下のエネルギー分解能で測定し、かつトリチウム以外からの電子の背景事象頻度をマイクロヘルツに抑えることが出来れば、S/N比が1を越えるクリアな検出が可能になる。系統誤差も詳細に検討した結果、宇宙背景ニュートリノ探索に有用な手法である事が確認できれば、今後の宇宙背景ニュートリノ探索の標準的な手法として広く利用されることが期待できる。その先の展開として、トリチウム100グラムを用いた本実験を行い、年間10事象程の観測が期待できる。これによりビッグバン宇宙の実験的検証が完結する。また捕獲反応による観測の独自性として、検出するニュートリノが非相対論的である事があげられる。そのためスペクトルの精密測定が実現すれば、マヨラナ/ディラックの区別や、eVレベルのステライルニュートリノの探索などテーブルトップのニュートリノ実験という新たな可能性の開拓が期待できる。

3. 研究の方法

「電波を用いた電子トラッキング」と「超伝導検出器」という新しい宇宙背景ニュートリノ検出の手法を確立するため、(1)テスト装置を製作して手法の原理検証を行い、(2)結果を基に実機のデザインを設計し、シミュレーションを用いて期待される感度を見積もる。

原理検証はまず「電波を用いた電子トラッキング」から開始する。電子は1テスラの磁場領域を通過する際にサイクロトロン放射により約28GHzの電波を発生するため、それを検出する事で、電子を同定する。ケーブルによる信号ロスを出来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度MHz領域にダウンコンバートしてから常温に引き出す。磁場の大きさはセットアップの大きさに直結するため、トラッキング効率の磁場強度依存性等を確認し、シミュレーションとの比較を行う。

超伝導検出器を用いた電子エネルギーの測定については、エネルギー分解能の他に、焦点領域をどれくらいの大きさにセグメント出来るのか=何chの読み出しが可能か、が実機のデザインを決定する上で重要な検討事項である。このために、信号の多重化に関する評価を精力的に行う。最終的に実現した多重度を基に、焦点領域の超伝導検出器アレイの仕様が決定できる。これは代表者が別予算で行っているCMB偏光観測実験POLARBEARで用いている超伝導転移端センサーを出発として原理検証を始める。POLARBEARでは研究開始時に8多重度が達成できているが、これをはるかにしのぐ40多重度の実現を目指す。

4. 研究成果

「電波を用いた電子トラッキング」の原理検証を行うためのプロトタイプ検出器の設計及び各コンポーネントの性能評価を行った。シミュレーションにより1テスラの磁場中に電子を通した際に発生するサイクロトロン放射を用いてS/N比が10以上で電子の通過を同定できる事を確認した。並行してトラッキング装置の読み出しに関する基礎特性の評価を行った。具体的には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て、ローパスフィルタおよびアンプを通してパワー検出器に入射して、-30GHz付近の電波に対して検出器の感度があり、無関係な高周波(>35GHz)に対して感度が無い事を確認した。最終年度には従来よりも数倍検出効率の高いアンテナシステムの目処が付き、よりコンパクトな設計の目処がたった。

超伝導検出器に関しては、電子のシリコン基板中の飛跡が短いため、既存のボロメータでは期待される分解能が得られないことがわかり、検出器表面の物質量を大きく削減する手法を専門分野の研究者と議論した。また、KIDと呼ばれる多重化読み出しにより適した最先端の超伝導検出器の利用可能性についても専門家と議論を重ね、試作の目処が立っている。

さらに、本実験ではトリチウムの通常の崩壊からくる電子による検出器・読み出し系のパイプアップを避けるために、焦点面を多数のボロメータでセグメント化する。そのため、信号の多重化読み出しが必須であり、その原理検証を行った。最終年度には CMB 偏光観測装置を用いて、40 多重度・0(10000)個のボロメータの読み出しに成功した。

実機製作に向けた基礎開発が着実に進展している。

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕(計 0 件)

〔学会発表〕(計 1 件)

長谷川雅也、超伝導検出器を用いた宇宙背景ニュートリノ探索実験の検討、ミリ波受信機ワークショップ、2018

〔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：

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：

国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

KEK-CMB グループ <http://cmb.kek.jp>

研究代表者個人ページ <http://research.kek.jp/people/masayan/>

6. 研究組織

(1)研究分担者

研究分担者氏名：

ローマ字氏名：

所属研究機関名：

部局名：

職名：

研究者番号(8桁)：

(2)研究協力者

研究協力者氏名：

ローマ字氏名：

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。