

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 9 日現在

機関番号：11301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2013～2014

課題番号：25610046

研究課題名(和文)重力波実験技術を応用した新しいニュートリノ質量測定方法の開拓

研究課題名(英文)Development of new scheme determine the neutrino mass using the technique of gravitational wave experiments

研究代表者

石徹白 晃治(Ishidoshiro, Koji)

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・助教

研究者番号：20634504

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,000,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は、ねじれ振り子を用いた新しいニュートリノ質量測定方法を定量的に評価することを目標としている。J-PARCの大強度ニュートリノビームを用いたニュートリノの原子核の中性散乱による運動量輸送に着目して、ニュートリノビームがねじれ振り子に与える"力"を精密測定することを利用する。結果として、現実的なパラメータをもとに考えると、この方法では質量測定が難しいことがわかった。そのために、ねじれ振り子の改良版として極低温支持系を持つシステムをデザインした。また、既存のねじれ振り子を2つ用いて、背景重力波探索を行い、35-830mHz帯域で世界最高の上限値を与えた。

研究成果の概要(英文)：We developed the new scheme to determine the neutrino mass using the torsion-bar antenna and high power neutrino beam generated at J-PARC. Neutrino beam can transfer its momentum to the torsion-bar antenna as force vis neutral current interaction. Using the realistic parameter, we found that measurements of the neutrinos mass is much difficult using this scheme. Thus, we designed the new torsion-bar antenna based on cryogenically-cooled metal suspension. In addition, we set the new upper limits on gravitational wave background for 35-830mHz.

研究分野：宇宙線実験

キーワード：ニュートリノ ねじれ振り子

1. 研究開始当初の背景

近年明らかになったニュートリノの振動現象はニュートリノが質量を持つという決定的な証拠であり、ニュートリノ質量を0と仮定している素粒子の標準理論を超えた枠組みを要求する。同時に宇宙論や崩壊の研究から来るニュートリノ質量の上限値は、他のクォークやレプトンと比べてニュートリノが桁違いに軽いことを示している。このことは、ニュートリノが質量を持ち、しかも特別に軽いという2重の問題を意味している。

この「軽いニュートリノ質量」問題を解決する第一歩は、ニュートリノの質量を決定することにある。そのために崩壊の精密測定実験、ニュートリノ放出を伴わない2重崩壊の探索実験や宇宙論的な解析などでニュートリノ質量を決定することが試みられている。しかし、それぞれが大きな問題を抱えている。

崩壊実験はこれ以上の大型化が困難で感度が頭打ち、2重崩壊の実験はニュートリノのマヨラナ性を持つ場合にのみ有効質量を決定できる。宇宙論解析は宇宙進化のモデルに強く依存することである。

2. 研究の目的

本研究の目的は、重力波実験で得られた”力”の超精密測定を素粒子実験、特にニュートリノ質量測定へ応用する方法を開発することにある。我々はニュートリノが巨視的物体に与える運動量輸送に着目する。この運動量輸送はニュートリノと原子核の中性カレントコヒーレント弾性散乱で表れる。その反応断面積はニュートリノ質量に依存している。そこで、ニュートリノによる運動量輸送を高強度ニュートリノビームと高感度ねじれ振り子で精密測定することで、ニュートリノ質量を測定するのが基本アイデアである。特に、高エネルギー加速器気研究機構と日本原子力研究機構が共同で開発した大強度陽子加速器施設(J-PARC)で生成されるニュートリノビームを用いたニュートリノ質量測定の可能性を定量的に評価する。

3. 研究の方法

ニュートリノは巨視的物体へ弱い相互作用の2次の効果を介して運動量輸送を及ぼすことが知られている。この反応はニュートリノと原子核の中性カレントコヒーレント弾性散乱によるもので、そのクロスセクションがニュートリノ質量に依存している。運動量輸送を高感度のねじれ振り子で”力”として精密測定することで、ニュートリノの質量を決定、または制限を与える感度を評価する。

ねじれ振り子とは、力を受けると回転する試験質量とそれを中心から支える支持系からなっている。そもそも地球重力下で重力定数(G)の精密測定のために提案された装置であり、現在でも微小な力の精密測定の様々な分野で使われ続けている。ねじれ振

り子の制限限界は、支持系の散逸による熱雑音で決まる(これは揺動散逸定理により導かれる、系が有限な熱浴に接していることから発生する原理的な雑音である)。一般に、散逸の小さいタングステンワイヤーが支持系に使われることが多い。本研究では、申請者らが過去に開発した超伝導磁気浮上を使う場合を想定する。超伝導磁気浮上は、機械支持を超伝導のピン留め効果を利用した非接触支持に置き換えることで、低散逸な支持を実現するものである。

この超伝導磁気浮上型のねじれ振り子にJ-PARCが作り出す大強度ミュオンニュートリノビームを当てた時の、ミュオンニュートリノ質量決定精度を評価する。

4. 研究成果

T2K(Tokai to Kamioka)実験における前知検出器の場所にねじれ振り子を設置すると考えて、ねじれ振り子に与える力を精密に計算した。結果、この方法には2つの問題が出現することがわかった。問題は、絶対的な統計量の不足である。現在のJ-PARCの出すニュートリノ量では、100年以上の連続運転をする事で信号が見えて来る。もう1つは、J-PARCが出すような高エネルギーなニュートリノは厳密にはクロスセクションは質量でなく、質量と運動エネルギーを合わせた全エネルギーで決まる。ニュートリノビームのエネルギーの不定性により、質量決定能力はほぼ失われる。

しかしながら、ねじれ振り子などの”力”の検出器が素粒子実験において新しい可能性を持つことは変わらない。以前から、宇宙背景ニュートリノを探索できる可能性は指摘されており、さらに我々は暗黒物質の探索可能性に着目している。以上から、ねじれ振り子の高感度化は今度ともに重要である。そのために、我々は超伝導磁気浮上型を超えるものとして、極低温ねじれ振り子の開発を進めており、基礎デザインを確立した。

また、東京大学と京都大学において開発された超伝導磁気浮上型ねじれ振り子2台による背景重力波探索を行った。7時間の同時観測データを用いて、宇宙の臨界密度で規格化した背景重力波のエネルギー密度 gw にして、 $h^2 gw = 1.9 \times 10^{17}$ (35-830mHz) の上限を得た。ただし、 h は 100 km/s/Mpc で規格化されたハッブル定数である。この結果は、Phys.Rev.Dで出版された。

重力波実験技術を応用した別のアプローチとして、3kmの基線長を持つレーザー干渉計型重力波検出器(KAGRA)を用いた暗黒物質探索の可能性を検討した。KAGRAでは3km Fabry-Perot共振器中に400kWの光が蓄積される。我々は、この400kWの光を利用した暗黒物質の一種であるパラ光子の探索可能性を評価した。パラ光子は、標準理論を超える物理で表れる $U(1)$ 対称性に起因するもの

である。光子とパラ光子は、ニュートリノ振動のような振動を行う。そこで、400kWの光がパラ光子に振動し、外部の光検出器に漏れて行く効果で、その検出可能性を評価した。結果、0.1 - 1meV程度のパラ光子に対して、世界最高感度で探索できる可能性を示すことができた。

さらに、逆のプロセスとしてニュートリノ実験装置を用いた重力・重力波実験の可能性を検討した。特に、神岡地下鉱山内に建設された1kt液体シンチレータ型ニュートリノ検出装置(KamLAND)の法定点検時の液体シンチレータ交換を利用して、液体シンチレータ(または水)有りの場合と無しの場合の重力を測定して、on-offの比較で10-100mスケールでの標準理論を超える非ニュートン重力の探索可能性も評価した。この距離スケールは測地学的測定による探索実験があるが、最も探索精度が低い。

我々は、KamLANDの3次元CADデータをもとにANSYS Workbenckで液体シンチレータのタンク(半径9m)の変形を計算した。さらに、レーザートラッカー(~100um/100mの精度)での実際のタンク計上測定を見込む。検出器としては、超伝導重力計 10^{-11} gの感度を仮定した。より巨大なタンクを持つSuper-Kamiokandeでなく、KamLANDを考えたのは、後者はタンク形状が球形で系統誤差の影響を受け難いからである。さらに、地面振動の少ない神岡坑内により外乱の影響を最小化できるのである。

計算の結果、タンク中心から30m離れた位置に超伝導重力計を設置することで、わずかであるか既存の実験を上回る精度で非ニュートン重力の探索が可能であることがわかった。今後はより詳細な計算を進め予定である。

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)

1. A. Shoda, M. Ando, K. Ishidoshiro, K. Okada, W. Kokuyama, Y. Aso, and K. Tsubono, Search for a stochastic gravitational-wave background using a pair of torsion-bar antennas, Phys. Rev. D 89, 027101 (2014). 査読有

[学会発表](計11件)

1. 石徹白晃治, KamLAND 実験における計測システム, 計測システム研究会(核融合研究所, 土岐, 2013年7月11日)
2. 正田亜八香, 安東正樹, 石徹白晃治, 岡田健志, 麻生洋一, 坪野公夫, 次世代ねじれ振り子型重力波検出器(Phase-II TOBA)の基本概念設計, 日本物理学会

2013年秋季大会(高知大学, 高知, 2013年9月23日)

3. Koji Ishidoshiro, (招待講演)KamLAND, NNN13(東京大学IPMU, 柏 2013年11月11日)
4. 石徹白晃治, Nearby supernovae with KamLAND, 新学術「重力波天体」第2回領域研究会(東京工業大学, 東京, 2014年1月13日)
5. 石徹白晃治, Nearby supernovae with KamLAND, 早稲田大学宇宙物理学研究室セミナー(早稲田大学, 東京, 2014年3月7日)
6. 石徹白晃治, 超新星(前兆)ニュートリノ, 新学術「地下素核研究」第一回研究会(大阪大学, 大阪, 2014年8月24日)
7. 石徹白晃治, カムランドにおける超新星前兆ニュートリノの検出可能性, 日本天文学会2014年秋季大会(山形大学, 山形, 2014年9月13日)
8. Koji Ishidoshiro, (招待講演)KamLAND-Zen, International Workshop on Double Beta Decay and Underground Science (DBD2014) (Hawaii Island, US, 2014年10月7日)
9. 石徹白晃治, カムランドによる超新星前兆ニュートリノ観測と爆発前超新星アラームの可能性, 東北大学天文学教室談話会(東北大学, 仙台, 2014年10月27日)
10. 石徹白晃治, KamLAND-Zen, 東京大学安東研究室セミナー(東京大学, 東京, 2014年12月2日)
11. 石徹白晃治, 液シン型検出器による超新星ニュートリノ研究の現状と展望, 第一回超新星ニュートリノ研究会(東京理科大学, 野田, 2015年3月16日)

[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：
出願年月日：
取得年月日：
国内外の別：

〔その他〕

ホームページ等

6. 研究組織

(1) 研究代表者

石徹白晃治 (ISHIDOSHIRI KOJI)

東北大学・ニュートリノ科学研究センター・助教

研究者番号：20634504

(2) 研究分担者

()

研究者番号：

(3) 連携研究者

()

研究者番号：