

令和元年6月3日現在

機関番号：32686

研究種目：国際共同研究加速基金（国際共同研究強化）

研究期間：2016～2018

課題番号：15KK0172

研究課題名（和文）次世代時間反転対称性の破れ探索実験(TRIUMF-MTV実験)（国際共同研究強化）

研究課題名（英文）The Next Generation T-Violation Experiment (TRIUMF-MTV experiment)(Fostering Joint International Research)

研究代表者

村田 次郎 (MURATA, Jiro)

立教大学・理学部・教授

研究者番号：50360649

交付決定額（研究期間全体）：（直接経費） 11,000,000円

渡航期間：14ヶ月

研究成果の概要（和文）：本研究は、時間に特別な向きがあるかどうかを検証する、世界で最も高精度の実験を実行する事を目的とした、MTV実験を国際的に高度化し、新たな学術的展開を図ることを目的として行われた。MTV実験では偏極したリチウム8核のベータ崩壊を観測し、時間反転対称性の破れを伴うR相関を検証する事を主目的としたが、本研究ではそれを発展させ、ローレンツ対称性及び太陽ニュートリノ起源の弱い相互作用の性質の変動の有無を検証する高度化を行った。特に、偏極リチウム核のベータ崩壊における半減期の日変化の検証は統計誤差の評価を徹底的に行い、今までで最も精度の高い検証と比肩しうる成果をあげる事が出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

時間は過去から未来へと流れており、過去と未来は明確に区別できる様に思える。しかし、物理学の基礎的な法則は時間には特別な向きがないと主張し、実験的にもそうである事が確かめられている。本研究は、このような基本的な宇宙の性質が本当にそうであるかどうかを問い直し、最も厳しいテストを行う事で検証する事を目指したものである。本研究で得られた学術的知見と共に、そもそも時間の流れとは何か、という万人に共通する疑問に立ち向かう意義もあり、今後はその考察の成果を還元する予定である。

研究成果の概要（英文）：We execute this research project aiming to perform the most precise experiment to examine whether there is the special direction of time, by means of upgrading the MTV experiment internationally. The MTV experiment observe the beta decay of polarized lithium-8, in order to test the R-correlation which violates time reversal symmetry. In this research project, we upgraded the setup to perform test measurements of the Lorenz symmetry as well as the time variation due to the solar activity changing. Especially, we succeeded to obtain an result of day variation of the half-life of lithium-8 in good precision comparable to the best result obtained in the past research.

研究分野：原子核・素粒子物理学

キーワード：対称性 ベータ崩壊

1. 研究開始当初の背景

本研究助成は国際共同研究の加速を目的としたものであり、科研費の基課題として既に進めていた時間に特別な向きがあるかどうかの有無を検証する、ベータ崩壊における時間反転対称性の破れの探索を行う MTV 実験を国際化して新たな展開を進めることを本研究の目的と設定した。

「時間が過去から未来へと流れる」という考えは直感的には明らかである様に思えるにも関わらず、物理学の基本法則では時間には特別な向きがない、と考えられている。実際、時間に特別な向きがあると誰もが認めざるを得ない実験データは未だに得られていない。一方で、本当はわずかに時間の特別な向きが存在するのだが、これまでの実験精度では観測できていないだけである、という可能性も考えられている。そうでなければビッグバンで生成された我々の宇宙に、本来「物質」と等量存在するはずの「反物質」が殆ど観測されない、という謎を説明出来ないからである。これが研究開始当初の学術的な背景であり、この、理論的には必要と考えられているが、実験的に未発見の「時間反転対称性の破れ」を発見することが、本研究の目的である。

2. 研究の目的

時間反転対称性を検証するには、時間の向きによって物理現象が違いを見せるかどうかを調べればよい。本研究では、原子核の崩壊現象を精密に観測することで、基本法則の段階で時間反転対称性の破れがわずかにでも破れている可能性を検証する。本研究では 1957 年のパリティの破れの発見と同様の、自転する原子核（スピン偏極した原子核と呼ばれる）を用いた方法を用いて検証を行う。

この偏極原子核を世界で最も大量に、偏極度も高く生成できる施設が本研究の国際共同研究先であるカナダの TRIUMF 国立研究所（カナダ国立素粒子原子核物理学研究所）である。我々は、TRIUMF 研究所の偏極原子核ビームを用いて、我々が開発した「電子線横偏極度測定装置」を用いることで、時間反転対称性の破れの探索実験（MTV 実験）を進めてきた。これは時間に特別な向きがなければ、ゼロであるはずの「電子の横偏極」を観測する装置で、電子の飛跡検出器（ドリフトチェンバー）を用いたこの装置は本研究の基幹装置である。

本研究が国際化を伴って発展させる基課題で進める MTV 実験は、TRIUMF の加速器の供給する偏極 ^8Li 核ビームを停止させ、そのベータ崩壊で放出される電子の横偏極の有無を、基幹技術であるドリフトチェンバーを用いた電子線横偏極度測定装置で計測する実験である。基課題では 2009 年に完成した平面型の第一世代機を、MTV 実験に特化した理想的な形状をもつ、新たな「第二世代円筒型ドリフトチェンバー」を一から設計、開発したもので置き換えることで進めた。2016 年と 2017 年に TRIUMF 研究所にてこれを用いた本番のデータ収集を行い、時間反転対称性の破れの探索実験を実行し、0.01%の統計水準で検証を行う計画を実行することを目的とした。

一方、MTV 実験を応用した原子核スケールでの重力の逆二乗則の検証実験も原子核の質量が作り出す重力場による「原子核近傍の時空の歪み」を電子の偏極歳差運動という形で検証するという、新たなアイデアに基づく成果を出すことも出来ていた。我々の三次元空間を超える、四次元以上の「余剰次元」の探索実験である。MTV 実験では時間反転と共に、この余剰次元の探索を目的とした重力の逆二乗則の検証にも独自のアプローチで成果を生み出しつつあった。本研究は、研究代表者が現場である TRIUMF 研究所にて直接、指揮することで、集中的に基課題である MTV 実験を成功させ、かつ注目されている重力実験にも発展的に取り組むことで成果を達成することを目的とするものであった。

3. 研究の方法

本研究では、特に長期間現場に滞在することで初めて可能となる長期測定と、TRIUMF 研究所とそこを訪問する世界中の研究者と議論を行うことで、MTV 実験の元々の目標である時間反転対称性を破るベータ相関における相関項である R 相関を超えた物理の展開を目指すこととした。

研究開始当初、時間反転対称性の破れの実験と、その一方で進めていた余剰次元探索の為の近距離における重力の逆二乗則の検証実験は、その目的とする物理において関連が全くないものと考えていた。

しかし、ベータ崩壊の精密測定による標準模型の検証を行う国際的な学術的兆候の中で、ローレンツ対称性が注目される展開が訪れた。ローレンツ対称性は特殊相対性理論の基礎となる対称性であり、現代物理学の最も基礎となる概念でもある。最も著名な例はマイケルソン・モーレーの実験による光速の方向依存性の検証であり、多くの系に於いてこの破れがないか、膨大な検証が進められていた。その中で、ベータ崩壊が関係する、弱い相互作用におけるローレンツ対称性の検証は桁違いにその精度が低く、ここにその破れが見出される可能性が注目された。

本研究ではこの国際的な時流にのり、MTV 実験を国際的に高度化し、R 相関の物理のみならず、ローレンツ対称性の物理の感度を持つ実験へと進化発展させることとした。ローレンツ対称性は量子重力理論の構築の鍵となる重要な対称性であり、ここに思わぬ形で MTV 実験と重力理論の関係が見いだされ、学術的に興味深い議論を生むこととなった。

具体的には、下記の式 1 に示すガモフ・テラー型のベータ崩壊における崩壊率において、ローレンツ対称性を破る相関項を導入してその相関係数を検証する。これらのうちの幾つかの項は、偏極した原子核の生成とその崩壊の観測や、ベータ線の偏極を計測がその検証には必要であり、それが実行できる殆ど唯一の装置として MTV 実験が注目された。

$$\begin{aligned}
 dW_{GT} = dW^0 & \left[1 - \frac{2}{3}\chi_r^{00} + \frac{2}{3}(\chi_r^{l0} + \tilde{\chi}_i^l) \frac{p^l}{E_e} \right] \\
 \mp \Lambda^{(1)} & \left[(1 - \chi_r^{00}) \frac{\mathbf{P} \cdot \hat{\mathbf{I}}}{E_e} + \tilde{\chi}_i^l \hat{\mathbf{I}}^l + \frac{\chi_r^{lk} p^l \hat{\mathbf{I}}^k}{E_e} - \frac{\chi_r^{l0} (\mathbf{P} \times \hat{\mathbf{I}})^l}{E_e} \right] \\
 + \Lambda^{(2)} & \left[-\chi_r^{00} + (\chi_r^{l0} + \tilde{\chi}_i^l) \frac{p^l}{E_e} + 3\chi_r^{kl} \hat{\mathbf{I}}^k \hat{\mathbf{I}}^l - 3\chi_r^{l0} \hat{\mathbf{I}}^l \frac{\mathbf{P} \cdot \hat{\mathbf{I}}}{E_e} - 3\tilde{\chi}_i^{ml} \hat{\mathbf{I}}^m \frac{(\mathbf{P} \times \hat{\mathbf{I}})^l}{E_e} \right]
 \end{aligned}
 \tag{式 1}$$

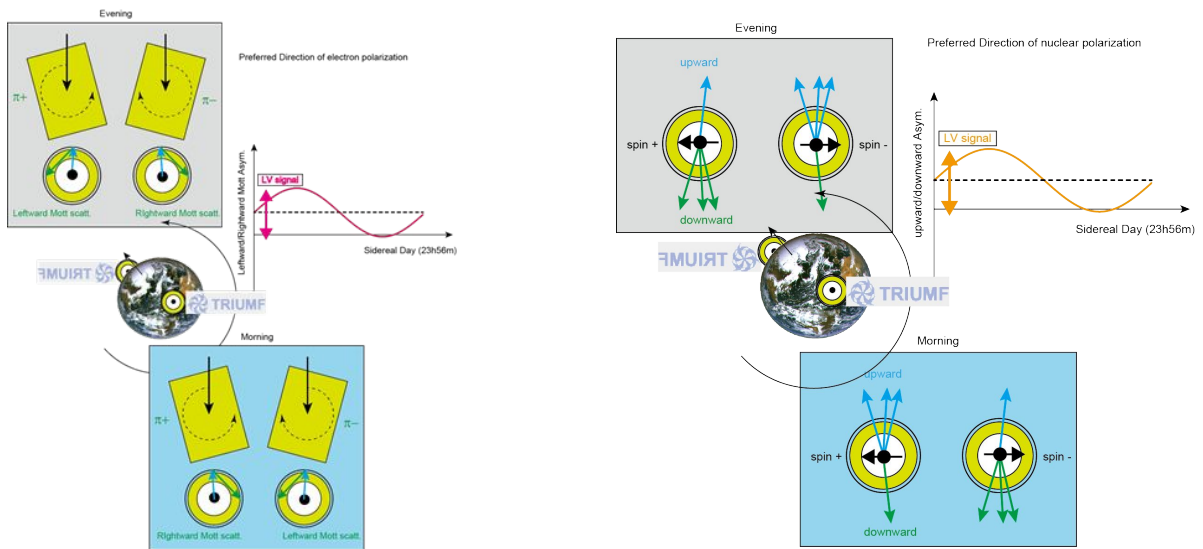


図 1 MTV 実験で想定された、ローレンツ対称性の検証方法の例

これらのローレンツ対称性を破る効果はいずれも、宇宙に特別な方向があり、弱い相互作用がその方向に依存して性質を変えることがあるかどうかを検証する。その為、実験装置全体が方向を変える必要があり、加速器全体を回転させることが不可能なことから、地球の自転を利用した計測が基本となる。即ち、様々な観測の、地球の自転の位相依存性を検証するのである。従って、観測の日変化に代表される効果が検証の対象となる。

日変化を精度よく検証するには長期間の計測が不可欠であり、これが現地に長期滞在して長期測定を行い、ローレンツ対称性の検証という新たな展開を進める必要があった主な理由の一つである。

4 . 研究成果

2016年から2017年にかけて行われたMTV実験において、加速器を用いて生成する偏極 ^8Li 核のベータ崩壊を観測する期間と、それ以外の期間に大強度放射線源を用いた長期測定の間を進めた。また、この研究期間内に、地上の放射性同位元素の半減期の年次変化と太陽活動の間に相関がある可能性が話題となり、急遽、これも検証が可能な様に実験データの取得方法を工夫する事とした。

2018年度にはデータの解析を進め、その中で様々な試みを行った中で最も成功を収めたものは偏極した原子核のベータ崩壊の半減期の日変化の検証である。これはTRIUMF研究所で供給される大強度偏極核ビームがあって初めて実行可能なもので、達成した精度においてはこの効果の検証が最も有利であった。結果として、日変化は確かに観測されたが、系統効果の検証を徹底的に進め、ローレンツ対称性もしくは太陽ニュートリノの効果はないものと矛盾しない結果となった。得られた結果は原子核の国際会議で計測の途中経過を報告すると共に、日本物理学会で解析結果の報告を行った。

研究期間終了後は、本研究で得られた知見に立脚し、新たにローレンツ対称性に特化した国際共同プロジェクトを立案し、発展させていく予定である。

5 . 主な発表論文等 (研究代表者は下線)

[学会発表](計 5 件)

尾崎早智, 梶原拓真, 川村広和, 北口雅暁, 後藤文也, 坂元祐子, 清水裕彦, 清水裕太, 竹中黎, 田中佐季, 田沼良介, 田村晃太郎, 戸塚 祐実, 中谷祐輔, 馬場秀忠, 益田英知, 山脇友志, 横橋麻美, 吉田立, 渡辺悦子, John A Behr, Matthew Pearson, Phil Levy, 村田次郎
「MTV実験の報告2」日本物理学会第74回年次大会 2019年3月14日-17日

山脇友志, 尾崎早智, 梶原拓真, 北口雅暁, 後藤文也, 清水裕彦, 清水裕太, 竹中黎, 田村晃太郎, 益田英知, 渡辺悦子, 村田次郎
「偏極 ^8Li の β 崩壊におけるローレンツ不変性の検証」日本物理学会第74回年次大会 2019年3月14日-17日

山脇友志, 尾崎早智, 梶原拓真, 清水裕太, 竹中黎, 田村晃太郎, 益田英知, 村田次郎, 渡辺悦子, 後藤文也
「弱い相互作用におけるローレンツ不変性の破れと太陽ニュートリノ」日本物理学会第73回年次大会 2018年3月22日-25日

Jiro Murata

“Probing strong gravity using geodetic precession in nuclear scale”
Workshop on Gravitational physics with particle accelerators 2017(招待講演), KEK Tokai, 2017/11/30

Jiro Murata

“The MTV Experiment: from T Violation to Lorenz Violation”
International Nuclear Physics Conference (INPC2016), Adelaide, Australia, 2016/9/11-16

6 . 研究組織

研究協力者

[主たる渡航先の主たる海外共同研究者]

研究協力者氏名: John Behr

ローマ字氏名: John Behr

所属研究機関名: TRIUMF 研究所

部局名: Physical Sciences Division

職名: Research Scientist

〔その他の研究協力者〕

研究協力者氏名：Phil Levy

ローマ字氏名：Phil Levy

研究協力者氏名：Mathew Pearson

ローマ字氏名：Mathew Pearson

研究協力者氏名：Martin Alcorta

ローマ字氏名：Martin Alcorta

研究協力者氏名：渡辺 悦子

ローマ字氏名：WATANABE, etsuko

研究協力者氏名：尾崎 早智

ローマ字氏名：OZAKI, sachi

研究協力者氏名：山脇 友志

ローマ字氏名：YAMAWAKI, yuji

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。