

令和 4 年 6 月 8 日現在

機関番号：32686

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2016～2020

課題番号：16H03985

研究課題名(和文) 時間反転対称性の新展開・第三世代MTV実験

研究課題名(英文) New Phase on Time Reversal Symmetry: The third generation MTV experiment

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) 13,400,000円

研究成果の概要(和文)：時間反転対称性の破れを探索する実験を行い、データ収集に成功した。スピン偏極したLi-8原子核から放出される電子線の、横偏極度を測定する実験である。スピン偏極した不安定原子核はカナダのTRIUMF研究所のISACを用いて生成し、電子飛跡検出器として円筒型ドリフトチェンバーを用いたMott散乱の散乱非対称性を測る原理に基づく横偏極度計を建設して用いた。実験は2016年、2017年に行ってデータ収集に成功し、時間反転対称性を破るR相関、時間反転対称性は破らないがこれまで観測されていないN相関、そしてローレンツ対称性の破れの検証が可能な偏極核半減期の時間変動のデータを得る事が出来た。

研究成果の学術的意義や社会的意義

時間反転対称性は物理法則が持つと信じられている最も基本的な対称性の一つである。これは物質と反物質の対称性の破れとも直接的に関係しており、我々の宇宙に極端に反物質が少ない謎に対する答えを提供する可能性があるものである。この研究はわが国で開発した検出器をカナダに移設し、カナダの加速器を用いて世界最高精度に達するデータを得る事に成功した国際プロジェクトである。

研究成果の概要(英文)：An experiment to search for time-reversal symmetry violation was performed and data was successfully collected. The experiment measured the transverse polarization of electron emitted from spin-polarized Li-8 nuclei. The spin-polarized unstable nuclei were produced using ISAC at the TRIUMF in Canada, and a transverse polarimeter based on the principle of measuring the scattering asymmetry of Mott scattering using a cylindrical drift chamber as an electron tracking detector was constructed and used. Experiments were performed in 2016 and 2017 and data were successfully collected, yielding data on R correlations that break time-reversal symmetry, N correlations that do not break time-reversal symmetry but have not been observed before, and time variations of polarized nuclear half-lives that can verify Lorentz symmetry breaking.

研究分野：素粒子・原子核物理学、重力物理学

キーワード：時間反転対称性 物質と反物質 ベータ崩壊

1. 研究開始当初の背景

物理法則は空間並進対称性、空間反転対称、空間回転対称性、時間並進対称性、そして時間反転対称性などの基本的な対称性を満たすと考えられる。空間反転対称性はパリティ対称性と呼ばれ、全ての物理法則がこれを満たすものと信じられていたが、弱い相互作用においてこれが破られることが半世紀前に発見された。その後、物質・反物質の間の対称性である CP 対称性もわずかに破れる事が発見され、これが小林・益川理論につながった。B 中間子の系においても CP 対称性が破れる事が確認されたが、これらは全て小林・益川理論で説明する事が出来、逆に小林・益川のノーベル物理学賞へとつながった。

しかし、物質と反物質の間の基本的な対称性である CP 対称性は、小林・益川理論の範囲内では破れが非常に小さい。宇宙がビッグバンで始まった当初は物質と反物質は等量作られるはずであり、CP 対称性が破れる過程を通じて反物質が相対的に少なくなったものと定性的には説明できそうである。しかし、実際に定量的にこれを検証すると、観測されている反物質の少なさを説明するには小林・益川理論の予言する対称性の破れは桁違いに小さい。これが現代物理学が抱える、宇宙の物質・反物質の謎である。

2. 研究の目的

宇宙の観測が正しければ、現在の物理学が知っている物質と反物質の非対称性の理論、つまり小林・益川理論が不十分であるか、もしくは小林・益川理論の枠組みに入らない、全く未知の形で現実に生じているかいずれかである。B 中間子の実験はまだ続行中であるが、小林・益川理論からのわずかなずれがそこに見いだされるかどうかの精密実験という位置づけとなる。これに対し、本研究は小林・益川理論では破れが殆ど見えないと予想される一方で、実験的には高精度で対称性の破れを探索できる系を検証する事を目的として開始された。即ち、小林・益川理論の検証が目的ではなく、想定外の大きな対称性の破れが発見される可能性に期待して実験を行うものである。

3. 研究の方法

CP 対称性に対し、CPT 対称性という、CP 変換にさらに時間反転を施した際の物理法則の対称性がある。これは相互作用のモデルでは破れる事はなく、量子論の枠組みとして対称性があるはずという、CPT 定理が知られている。CPT 対称性の下でもし、CP 対称性が破れるならば、それを補うように時間反転対称性が破れなければならない。CP 対称性と T 対称性は全く別の対称性であるが、その破れの程度は同程度になるはずである。従って、時間反転対称性の破れの探索は CP 対称性の破れの探索と同義となる。

CP 対称性は本質的に物質と反物質の対称性であり、反物質の関与する系での実験検証がその手段となる。反物質とは何か、という理論的解釈に依存する構造であり、量子論を離れて古典的な解釈が可能であるかも難しい問題を包有している。これに対し、時間反転対称性は古典的対応が直接的に可能であり、CPT 定理に基づいて単に CP 対称性の破れと同義という意味付けを離れても、独立した検証を行う価値が高いと言えるだろう。

以上の物理的動機に基づいて、時間反転対称性の破れを探索する実験を行った。観測する系は弱い相互作用を含むものであり、具体的には原子核のベータ崩壊の観測のうち、時間反転対称性の破れを意味する相関を検証した。前述のパリティ対称性の破れは実際、原子核のベータ崩壊で発見されたものである。原子核をスピン偏極させ、それがベータ崩壊して電子が放出される際に、電子の放出方向の分布にスピン偏極の向きとの相関が観測され、それがパリティ対称性を破るものだったのである。原子核の系は核子である陽子と中性子から成る為、核子のレベルで考えると反物質を含めることが実験的に出来ない。従って CP 対称性の破れの実験は実行不可能である一方で、K 中間子や B 中間子の実験と比較して大強度の不安定原子核の生成が可能であり、精密実験が出来る長所がある。原子核を用いた時間反転対称性の破れの実験は、その長所を活かす事を意識して計画されたものである。

時間反転対称性の破れを伴う、ベータ崩壊における相関は複数ある。非偏極ベータ崩壊に対する、偏極核のベータ崩壊の崩壊率は各種の相関項を含めて以下の様に書かれる [1]。

$$\omega \propto 1 + A \frac{\mathbf{p}_e \cdot \langle \mathbf{J} \rangle}{E_e J} + D \frac{\langle \mathbf{J} \rangle}{J} \cdot \left(\frac{\mathbf{p}_e}{E_e} \times \frac{\mathbf{p}_\nu}{E_\nu} \right) + R \sigma_e \cdot \left(\frac{\langle \mathbf{J} \rangle}{J} \times \frac{\mathbf{p}_e}{E_e} \right) + N \sigma_e \cdot \frac{\langle \mathbf{J} \rangle}{J} + \dots$$

Aがパリティ対称性を破る、電子の放出方向の異方性を表すパラメーターで、素粒子の標準模型に

入っているものである。それ以外の D, R, N は原子核の系では存在が有意に確認されていない相関であり、本研究では時間反転対称性の破れを意味する R に特に注目して研究を行った。

R 相関はスピン偏極した不安定原子核がベータ崩壊する際、電子が進行方向にも親核のスピン偏極方向にも垂直なスピン偏極を持つことを意味している。この量は、時間反転操作をすると符号が変わることから、時間反転対称性を要求するとゼロになるはずの量である。従って、本研究を進めるには親核とそのスピン偏極(J)の生成、そして電子のスピン偏極(σ_e)の計測が必要となる。尚、上式では σ_e への依存性が書かれているが、この崩壊率に従って多数回の事象が起きると、結果的に $\langle\sigma_e\rangle$ が生じていると解釈できる。

R 相関の検証には先行研究があり [2]、これをを超える精度を達成するには大強度で高偏極の不安定核ビームが不可欠である。本研究はまず、原理実証を我が国の KEK-TRIAc で行った後に、この大強度・高偏極ビームが利用可能なカナダの TRIUMF 研究所に検出器を建設して進めてきた。KEK-TRIAc での実験 [3]で建設した平面型ドリフトチェンバーを用いた電子線横偏極度計を TRIUMF に移設し、MTV 実験として本格的にスタートさせた [1, 4]。

4. 研究成果

MTV 実験では電子線の横偏極度測定に特化した円筒型ドリフトチェンバー (CDC) を新たに建設し、物理測定の準備を進めた。本研究は CDC の建設が完了し、物理測定を行うことを主目標にして開始された。

研究を開始した平成 28 年 (2016 年) には CDC の出力する信号を高速デジタル処理し、10kHz を超える事象の記録頻度を達成した上で、 R 相関に加えて N 相関も計測可能な様に測定器を改造し、さらに研究計画当初には想定していなかった、ローレンツ対称性を破る項の検証も可能なデータ収集システムの実装も済ませた。

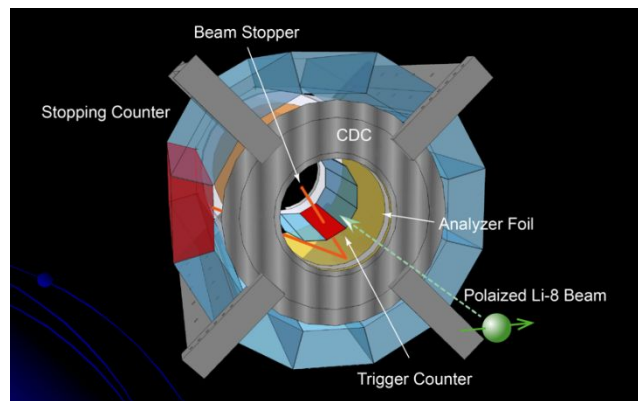


図 1 MTV 実験検出器

2016 年に MTV 実験として承認されていたビームタイムの一部を用いて最初のフルスペックでの物理データ収集を行った。2015 年までのテスト測定で、当初、正体のわからない系統誤差が観測されていた。これはパリティ対称性を破る電子線の異方性と同期する事から、殆どの系統誤差を相殺可能とする、ビームのスピン方向の切り替えによっては消すことの出来ない厄介な現象であった。そこで、異方性に起因する検出器内部の空間電荷効果による検出効率の系統的非対称性が系統誤差の原因と考え、これを幾何学的に相殺させるロボットシステムを導入して系統誤差を迎え撃つ準備を整えてテスト実験を行った。結果としてこの方法ではすべての場合について系統誤差を相殺する事は出来ず、系統誤差の原因として空間電荷効果は主ではない事が判明した。徹底的な系統誤差の解析と試験の末に、検出器の偶然同時計数が主原因である事を突き止めた。

偶然同時計数が原因であれば、これの起きる確率を人為的に増減させて、それに対して系統誤差がどのような依存性を持つかを調べることで評価、除去が可能となる。これを Run-2016 のビームタイム中に考案し、時間窓を人為的に数パターン用意してデータ収集を行う事が有効であると判断した。実際、得られた系統誤差は時間窓とビーム強度でスケールし、偶然同時計数の理論から予測される依存性を示す事を確認出来た。これによって難航していた R 相関の系統誤差抑制に道筋が付けられ、先行研究と少なくとも同程度の検証精度が達成可能である事をついに確認出来た。

Run-2016 の結果を受けて、いよいよ最終的な物理データ収集にあたる、Run-2017 を実行した。Run-2016 から Run-2017 にかけて、研究代表者と研究協力者は長期間現地に常駐して準備にあたった。その上で Run-2017 の物理データ収集を完了し、膨大なデータを日本に持ち帰ることが出来た。

本研究の主眼は時間反転対称性の検証であり、検証対象の相関は R 相関である。一方で、 N 相関は時間反転対称性を破らないものの、実験的には R 相関と同等の測定能力が必要な難しい実験

が要求されるものである。MTV 実験は装置全体を回転させる事で、この N 相関の測定が可能となる事から、Run-2016、Run-2017 ではこの測定も行った。

N 相関は中性子のベータ崩壊では有意に観測されており、また、標準模型の範囲内でゼロではない観測可能な大きさの効果が期待される為、測定の健全さを検証する良いチェックとなる。かつ、原子核のベータ崩壊では未検証の量である為、本研究での観測が初めてのものとなる。

本研究開始と前後して、ローレンツ対称性の破れが世界的な研究動向として注目され始めていた。ローレンツ対称性は現代物理学の基礎中の基礎であり、CP 対称性とは比べ物にならない信頼度を誇るものである。これは相互作用の性質ではなく時空そのものの性質に関わる事から、素粒子物理学だけではなく時空の物理学、つまり重力と宇宙論に直接影響する重大な関心である。重力は四つの相互作用の中で唯一、量子論が未完成であり、重力はそもそも量子化が不可能なのか、もしくは困難だが何らかの契機があれば量子重力理論の建設に道が開けるか、いずれかというのが現状である。そして、もし、ローレンツ対称性が実は近似的な対称性であり、厳密には守られないとすると、量子重力理論の建設は一気に容易になると言われている。かような理論的背景の下に、これまで CP 対称性、時間反転対称性を精密観測してきた弱い相互作用においても、高精度でローレンツ対称性を検証すべきだという機運が高まってきた。

しかし、弱い相互作用の系の実験は実行が非常に難しく、過去の実験データの再解析では精度がごく低いものしか得られなかった。そこで MTV 実験が国際的に注目され、我々の装置で高精度のローレンツ対称性の検証が可能であるという期待が集まった。この為、Run-2016 では急遽、この期待に応えるべく応急のデータ収集システムを組んでデータ収集を行った。そして Run-2017 ではよく準備した上で専用のシステムを設け、ローレンツ対称性の検証実験を並行して行う事に成功した。

以上、本研究では時間反転対称性を破る、偏極原子核のベータ崩壊における電子の横偏極を意味する R 相関、同じく電子の横偏極ではあるが親核のスピン方向を向くため時間反転対称性は破らない N 相関、そしてローレンツ対称性の破れを意味する偏極核半減期の時間変動のデータを取得する事が出来たのが研究成果である。これらのデータ解析に際しては系統誤差の徹底的な評価の他、従来行われてきた統計誤差の処理に関しても知見を深め、より一般的に信頼性の高い有意性検証の手法を理解し、生み出す事が出来たのも将来につながる大きな成果である。

特に、ローレンツ対称性の破れの探索は本プロジェクトである MTV 実験の将来計画の方向性を決定する重要な契機となった。MTV 実験は本研究期間の後半が新型コロナウイルス感染症拡大に伴って現地での実験などが不可能となった影響を真正面から受けて計画変更を余儀なくされた面はあるが、そこを逆手に取ってカナダでの実験が必要な不安定原子核ではなく、国内で実験可能なミューオンを用いた検証実験の発案、研究開始に繋げる事が出来た。研究計画変更に伴って延長した研究期間の最後に、J-PARC におけるミューオンの弱い相互作用による崩壊を用いたローレンツ対称性の破れ探索実験 (J-PARC- μ LV 実験) を本格稼働させるに至った。そこでは MTV 実験で培った計測技術とデータ解析、物理解析の技術が存分に活かされており、非常に早い段階での成功に導いたと言える。本研究は研究期間終了後は、この J-PARC- μ LV 実験に引き継ぐ形で発展させていく予定である。

引用文献：

[1] J. Murata et. al., “The MTV experiment: searching for T-violation in polarized Li-8 at TRIUMF”, *Hyperfine Interact* (2016) 237:125

[2] R. Huber et al., “Search for Time-Reversal Violation in the β -Decay of Polarized ^8Li Nuclei”, *Phys. Rev. Lett.* 90, 202301 (2003)

[3] H. Kawamura et. al., “A new measurement of electron transverse polarization in polarized nuclear β -decay”, *Modern Physics Letters A*, Vol. 32, No. 10 (2017) 1750058

[4] J. Murata et. al., “The MTV experiment: a test of time reversal symmetry using polarized ^8Li ”, *Hyperfine Interact* (2014) 225:193–196

5. 主な発表論文等

〔雑誌論文〕 計0件

〔学会発表〕 計11件（うち招待講演 2件 / うち国際学会 0件）

1. 発表者名 菊地武, 若田真来, 竹中黎, 尾崎早智, 梶原拓真, 後藤文也, 田村晃太郎, 山脇友志, 村田次郎
2. 発表標題 TRIUMF-MTV実験におけるローレンツ対称性検証物理解析の報告
3. 学会等名 日本物理学会第77回年次大会
4. 発表年 2022年

1. 発表者名 田村晃太郎, 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, 戸塚祐美, 中谷祐輔, 馬場秀忠, 益田英知, 村田次郎, 山脇友志, 横橋麻美, 渡辺悦子, John A Behr, Matthew Pearson, Phil Levy
2. 発表標題 MTV実験の報告1
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 後藤文也, 尾崎早智, 梶原拓真, 川村広和, 北口雅暁, 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, 戸塚祐美, 中谷祐輔, 馬場秀忠, 益田英知, 村田次郎, 山脇友志, 横橋麻美, 渡辺悦子, John A Behr, Matthew Pearson, Phil Levy
2. 発表標題 MTV実験の報告2
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 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, 戸塚祐美, 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
2. 発表標題 MTV実験の報告3
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 竹中黎, 尾崎早智, 梶原拓真, 北口雅暁, 後藤文也, 清水裕彦, 清水裕太, 田村晃太郎, 益田英知, 山脇友志, 渡辺悦子, 村田次郎
2. 発表標題 弱い相互作用におけるローレンツ不変性の破れ探索実験
3. 学会等名 日本物理学会第75回年次大会
4. 発表年 2020年

1. 発表者名 後藤文也, 尾崎早智, 梶原拓真, 川村広和, 北口雅暁, 坂元祐子, 清水裕彦, 清水裕太, 竹中黎, 田中佐季, 田村晃太郎, 戸塚祐実, 中谷祐輔, 馬場秀忠, 益田英知, 村田次郎, 山脇友志, 横橋麻美, 渡辺悦子, John A Behr, Matthew Pearson, Phil Levy
2. 発表標題 MTV実験に関する報告1
3. 学会等名 日本物理学会第74回年次大会
4. 発表年 2019年

1. 発表者名 Jiro Murata
2. 発表標題 THE MTV EXPERIMENT
3. 学会等名 基礎物理勉強会 (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 後藤文也, 尾崎早智, 梶原拓真, 川村広和, 北口雅暁, 坂元祐子, 清水裕彦, 清水裕太, 竹中黎, 田中佐季, 田村晃太郎, 戸塚祐実, 中谷祐輔, 馬場秀忠, 益田英知, 村田次郎, 山脇友志, 横橋麻美, 渡辺悦子, John A Behr, Matthew Pearson, Phil Levy
2. 発表標題 MTV Run-2017の報告
3. 学会等名 日本物理学会 第73回年次大会
4. 発表年 2018年

1. 発表者名 Jiro Murata
2. 発表標題 the MTV experiment
3. 学会等名 TRIUMF ISAC Seminar (招待講演)
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 清水裕太、村田次郎 他
2. 発表標題 MTV Run2016の報告I
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

1. 発表者名 後藤文也、村田次郎 他
2. 発表標題 MTV Run2016の報告II
3. 学会等名 日本物理学会第72回年次大会
4. 発表年 2017年

〔図書〕 計0件

〔産業財産権〕

〔その他〕

-

6. 研究組織	氏名 (ローマ字氏名) (研究者番号)	所属研究機関・部局・職 (機関番号)	備考
---------	---------------------------	-----------------------	----

7. 科研費を使用して開催した国際研究集会

〔国際研究集会〕 計0件

8 . 本研究に関連して実施した国際共同研究の実施状況

共同研究相手国	相手方研究機関
---------	---------