報告 A-3班　地上実験と理論による、空間構造の解明

1. 現在までの進捗状況および達成度

時空構造を探るテーマの下に、主として三次元を超える余剰空間次元の探索実験と、時間反転対称性の破れの探索実験を進めた。合わせて、超弦理論に基づく高スピンの理論研究を進めた。

1. 余剰次元探索実験

本研究は、重力の法則の距離依存性が空間次元に敏感である事を利用し、三次元空間という認識の根拠となっている、万有引力の法則の実験検証を、実験的に未開拓でかつ、理論的に余剰次元の存在可能性が強く示唆されているミクロンスケールにて推進する事を目標としている。本研究の準備研究として、センチメートルから検証実験を開始し、これまでに Newton-I, II, III, IV号という一連の重力検証装置を用いて万有引力の法則の検証を進めてきた[論2015-9]。この段階で、ミリメートルスケールにおける検証には成功し、本研究では、これまでの準備の上に立って、満を持してミクロンスケールでの検証を進めることとした。センチメートルからミリメートルスケールでは伝統的なねじれ秤を用いてきたが、ミクロンスケールではその実現は難しく、新たにワイヤーカンチレバーとデジタル顕微鏡を組み合わせた計測原理を一から開発する事となった。ワイヤーカンチレバーの熱雑音や弾性変形に関する基礎研究の後に、具体的に万有引力の法則の検証を行うNewton-V号の開発と建設を行い、物理実験へと段階を進めることができた。今までの開発研究の上に立ち、いよいよ初期段階の物理実験を開始した。今後、測定距離の改善等の開発を継続しつつ、データを蓄積していく予定である。

これらの成果は通常の論文・学会報告の他、高エネルギーニュース誌[論2014-1]や一般雑誌、テレビ番組に数多く紹介されて広く注目を集めている。[他2017-1, 2016-1,2,3, 2015-1,3, 2014-1,2,4]

1. 時間反転対称性の破れ探索実験

2009年より進めてきたカナダのTRIUMF研究所における、偏極原子核のベータ崩壊の精密観測による時間反転対称性の破れの探索実験（TRIUMF-MTV実験）は、本研究の準備研究の段階で、円筒型ドリフトチェンバーを用いた高感度の検出器セットアップを完成させていた[論2014-2,16]。とりわけ、TRIUMF研究所における大強度ビームに対応できる、高速データ収集系の開発を成功させることが出来ていた。そこで、本研究では、統計精度と少なくとも同程度まで系統制度を抑制する基礎的研究を進め、物理実験へつなげる事を目標とした。

時間反転対称性の破れの探索実験において最も深刻な系統効果は、パリティの破れに起因する効果である。これは、検出器の効率の非一様性など、ビームのスピン反転で相殺可能な殆どの系統効果とは異なり、スピン反転による相殺が効かない場合場ある。その混入経路は複雑であり、理解は困難を極めた。しかし、短時間しか得られない実際のビームだけに頼らず、系統効果を集中的に調査できる線源システムを構築する事で、様々な角度からの系統効果の検証を入念に行った[論2016-1]。これらの3年間におよぶ事前研究の上で、万全の態勢で初めての本格的な物理データ収集を行った。本実験はTRIUMFの実験評価委員会にてこれらの準備研究が高く評価され高優先度課題として継続採択され、優先的にビームタイムが与えられ実験を実行できた。高統計かつ系統誤差がほぼ想定通りのデータ収集に成功し、物理解析を行っている。それと共に、今後のデータ収集に向けた改良開発を進めている。

1. 超弦理論の理論的研究

理論的側面の研究としては、時空のミクロな構造を調べるために超弦理論の研究を行った。超弦理論の高エネルギー極限では、高いスピンのゲージ対称性が現れることが期待されていた。ゲージ/重力対応に関するこれまでの研究を拡張することで、具体的に超弦理論がどのような高いスピンのゲージ理論で記述できるのか明らかにした。高いスピンのゲージ対称性を破ることでゲージ場が質量を持つようになるが、3次元の場合に質量を一般のスピンの場に対して求めた[論疋田3]。この結果について超弦理論の立場からどこまで何が言えるのか検証した。さらに、これまで開発した解析手法を、より現実に近い4次元の高いスピンのゲージ理論に応用した[論疋田1]。最も基本的と思われる例において、対称性の破れにしたがって生じる質量をこれまでとは異なる手法で再現した。この解析によって、対称性の破れに関する理解を深める研究成果をあげることができた。

1. 問題点とその克服方法

余剰次元探索実験においては、ワイヤーカンチレバーの開発には早い段階で成功していたが、実際の物理実験を高精度で行う上で鍵となる、測定距離の短縮と系統効果の混入による系統誤差の問題があった。系統効果については遮蔽、振動経路の分断等の工夫により現在、観測限界以下まで抑制する事に成功している。測定距離の短縮の為、高精度の位置調整システムを導入し、接触を回避しつつ測定距離を100ミクロン程度まで短縮する事に成功した。

時間反転対称性の破れの探索においては、観測対象の相関と区別できない系統効果がパリティの破れによって生じることが明らかとなっており、これが最大の障壁となっていた。そこで、この効果の原因が0.1%程度の確率で混入する誤認識事象である事を徹底的な調査で明らかとし、それを高い統計精度で評価し相殺する方法の開発に成功した。この成功を受けて物理実験へと段階を移し、得られたデータの範囲内でこの効果は相殺されていることが確認されている。

理論的側面は、実験において実際に観測可能性のある予言や、実験へのフィードバックなどの面がやや立ち遅れる問題があった。これは広く素粒子だけでなく宇宙物理学、天文学の理論分野とも積極的に実験側が関わることで新しい知見が得られるつつある。

1. 今後の研究方針

余剰次元探索実験に関しては装置開発から物理データ収集の段階へと進んでおり、改良を加えながらデータを蓄積し、余剰次元に関する物理解析を行い成果をまとめる予定である。また、逆二乗則の検証以外の、近距離重力の実験に関しても多くの試行を続けたい。時間反転対称性の破れの探索はプロジェクトとして最終段階に進んでいる。数年以内にはデータ収集、解析ともに完了が見込まれる。原子核の系での系統的な展開、素粒子の系への拡大応用など、新規開発を含めて準備研究を進める予定である。理論研究に関しては理論研究者との議論をより活発化し、新たな研究の芽を生み出すよう努力する。

1. 特に優れた研究成果

・科学雑誌 Newton にて、「高次元」が特集され、巻頭特集で立教大学の余剰次元探索実験が特集インタビューとして紹介された。[他2016-2]

・Classical and Quantum Gravity誌において、余剰次元探索の近距離重力実験の論文がHighlight論文 に選出された。[論2015-9]

・日本経済新聞の科学欄にて、余剰次元探索実験が企画初回記事として紹介された。[他2016-1]

・歴史あるソルベイ研究会にて、ベータ崩壊の先端研究の紹介として招待講演した。[講2014-1]

・NHKのテレビ番組 「コズミックフロント」にて、重力実験の様子が紹介された。[他2014-4]

・時間反転対称性の破れの探索の技術応用として開発した、福島の原発災害復興支援の開発研究の成果をプレスリリースした。[他2014-3]

1. 研究成果の副次的効果

余剰次元探索実験は一般の関心を広く集め、新聞・雑誌・テレビ番組での紹介が数多く続いている。高校生対象のメディアでの紹介も増え、我が国の一般の科学的関心、将来へつながる効果が確実に得られていると思われる。

時間反転対称性の破れの探索実験は、科研費の国際化加速共同基金への採択に象徴される様に、国際共同研究として我が国、そしてカナダ側からも研究教育の国際協力モデルケースとして支援されている。これらは我が国の国際化、国際社会における科学、教育分野に貢献する効果があると思われる。

1. 成果の公表 2014-16　別紙参照
2. その他研究成果等　別紙参照