

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 27 年 6 月 3 日現在

機関番号：17102

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2014

課題番号：25800152

研究課題名(和文)低エネルギー中性子散乱を用いたナノメートルスケールでの重力逆2乗則検証実験

研究課題名(英文)An experimental test of the inverse-square law of the gravitation using low energy neutron scattering

研究代表者

吉岡 瑞樹 (Yoshioka, Tamaki)

九州大学・先端素粒子物理研究センター・准教授

研究者番号：20401317

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 2,000,000円

研究成果の概要(和文)：当初の目標通り、標的ガス封入ガス容器窓材の選定を行い、シミュレーションに測定系の最適化を行った。この結果に基づき、標的ガス封入容器および真空散乱槽を作製し、位置敏感型中性子検出器とともにビームラインに設置した。研究期間内に本実験遂行の準備は全て整ったが、諸手続き上研究期間内での実験開始は叶わなかった。本実験は次年度に行われる予定である。

研究成果の概要(英文)：We have successfully selected the candidate material for the target gas chamber and optimized the experimental setup using newly developed simulation code. Based on the result, all experimental apparatus have been constructed and installed to the beam line. We unfortunately could not perform data taking due to J-PARC regulation. The experiment will be carried out within the next fiscal year.

研究分野：実験素粒子物理学

キーワード：低エネルギー中性子 散乱

## 1. 研究開始当初の背景

ニュートンの万有引力の法則は、一般相対性理論によって弱い重力場における関係式として理論的に導出できるため、古典力学の枠組みにおける物理法則の一つに止まらず、さらに大きな物理学の枠組みの中においても満たされる基本的な法則であることが示されている。実際、衛星や惑星などの天体の運動のスケールから、エトペシュの実験に代表されるような数センチメートルの実験室レベルまで、重力の逆2乗則は正確に成り立つことが知られている。そのため、ミリメートル以下のスケールの重力の逆2乗則の検証実験は、確かめられていないとはいえ、もはや法則の確かさを疑う余地が無く積極的な動機付けのある実験とは言えなかったというのがこれまでの現状であった。ところが、1990年代後半の超紐理論における非摂動的なアプローチなどの興味深い幾つかの研究の進展により、多様性に富んだ真空状態が実現されている可能性が示された。とりわけ注目を引いたのは、超紐理論の現象論的な帰結の一つとして、我々が住む4次元時空の世界の他に余剰次元がコンパクト化されている可能性があり、しかも、それがミリメートル以下の観測可能なスケールであるというものであり、この余剰次元の効果が重力の逆2乗則のズレとして観測可能なスケールであるというものであった。これをきっかけに、以後、ミリメートル以下の重力の逆2乗則の検証実験が盛んに行われるようになった。今日までのところ、重力の距離依存性は、主に数10マイクロン以上のスケールでの古典的な物体を用いた実験によって検証されており、それ以下のスケールについては原子間力が障害となって検証されていない。実験室における直接的なミリスケール以下の重力の逆2乗則の検証実験としては、ねじり秤などの古典的物体を用いて、 $\sim 0.2\text{mm}$ 程度まで測定した実験がある。最近では、更に小さな数マイクロンスケールにおける重力の逆2乗則の検証に向けた試みとして、原子や中性子といった中性粒子を巧みに利用した検証実験が提案され、微小スケールの有力なプローブとして注目されている。超紐理論によれば、重力の逆2乗則のズレの要因としては大きな余剰次元以外にも様々なモデルが考えられるが、以下ではモデルを特定せずに「未知の相互作用」が存在すると仮定して議論を進める。未知の相互作用が存在する場合、重力相互作用のポテンシャルの式において $1/r$ 型の項の他に湯川型の相互作用が付加されることが予想される。従って、物体 $m_1, m_2$ の間に働く重力相互作用と未知の相互作用を合わせた重力ポテンシャルの一般型は、未知の粒子のコンプトン波長 $\lambda_c$ と結合定数 $\alpha$ を用いて

$$V(r) = -G \frac{m_1 m_2}{r} (1 + \alpha e^{-r/\lambda_c}) \dots (1)$$

と記述される。これまでに行われて来た検証

実験では上式における重力の逆2乗則からのズレを表すパラメータ $(\alpha, \lambda_c)$ の存在領域の制限として与えられている。申請者は、これまでの限界を打ち破り、これまでに検証されたスケールより更に微小なスケール( $\sim 1\text{nm}$ )における重力の逆2乗則の検証実験を立案した。

## 2. 研究の目的

本実験は、低エネルギー中性子ビームを希薄なAr, Xe, Krなどの希ガス標的に入射させて、散乱した中性子の分布を測定する極小角散乱装置を応用したものである。数マイクロン以下のスケールは原子を用いた実験では原子間力の影響のために原理的に測定が不可能であるが、低エネルギー中性子散乱はこの問題を回避する唯一の手段と考えられる。申請者の所属する日本中性子光学グループは中性子光学の最先端技術において世界に誇る実績を有し、この実験を着想するに至った。

中性子は(i)電氣的に中性であり、最低次での電磁相互作用に対して不感である、(ii)電気分周率が中性原子の $10^{-18}$ 以下と極めて小さく、分子間力などの高次の電磁相互作用の影響も十分小さい、(iii)そのため、微弱な重力相互作用に対して感度がある、という特徴を備えており、サブマイクロン領域での微弱な相互作用を検出する上で唯一の試験粒子である。また、標的粒子としては(a)質量が大きいこと、(b)中性子に対する吸収及び散乱断面積が小さいこと、(c)磁気モーメント間の相互作用を抑えるため、希ガス原子であること、(d)長距離相関の影響を抑えるため、標的物質全体が均質であること、等の条件を満たす必要がある。本実験では、希薄なAr, Xe等の希ガス原子を標的として用い、入射中性子の小角散乱の角度分布を精密に測定することにより到達距離 $1\text{nm}$ 付近の領域での重力逆2乗則を検証する。本実験による測定感度は $\sim 1\text{nm}$ において $\sim 10^{21}$ に相当し、これは直接測定としては従来の測定下限を5桁以上上回る高精度測定である。間接的に得られている上限値と比しても、本実験の測定感度は5~15倍向上する見込みである。

## 3. 研究の方法

我々が求めたいものは未知の相互作用による中性子の断面積である。まず同様の湯川型の相互作用を有する強い相互作用(核力)による散乱断面積を評価する。核力による微分断面積をボルン近似を用いて計算すると、熱中性子以下のエネルギー領域では角度やエネルギーによらず数 $\text{mb/sr}$ 程度の一定の値となることが示される。次に、未知の相互作用による散乱断面積を同様の方法を用いて評価する。「研究開始当初の背景」で述べたように、重力相互作用と未知の相互作用を合わせた重力ポテンシャルの一般型は(1)式のよ

うに表される。(1)式より、スケール長より小さなスケールの場合、第2項の付加項の効果が顕著に強くなることわかる、従って、重力相互作用を示す第1項は無視でき、未知の相互作用による散乱断面積を核力の場合と同様にボルン近似を用いて評価することができるようになる。結果として、散乱角が0に近い超前方に強いピークを持つ角度分布となることが示される。従って、超前方での散乱中性子の角度分布を精密に測定することにより、サブミクロン領域での重力の逆2乗則を検証することが可能となる。

これまでの議論を元に設計した中性子小角散乱装置は次のようになる。冷中性子ビームを数センチ角にコリメートして、0.1気圧、長さ数10cmの標的ガスに入射させる。標的ガスを透過した中性子、及びガスによって散乱された中性子を数メートル下流に配置した位置敏感型の中性子検出器によって検出し、イベント毎に中性子飛行時間と散乱方向のデータを記録する。これらのデータを元に中性子エネルギースペクトル毎の角度分布スペクトルを求め、解析を行う。

茨城県東海村に大強度陽子加速器施設(J-PARC)が建設され、2008年度より運転を開始している。我々はJ-PARCの物質生命科学研究施設(MLF)に低エネルギー中性子を用いた基礎物理実験を行うことを目的としたビームラインBL05を建設した。本ビームラインは一本の中性子ビームを3分岐するという特殊性に加えて、なおかつスピン偏極やビーム発散制限を内蔵する高度な光学系になっており、本実験の中性子小角散乱実験装置はこのうち最もビーム発散角が小さいビームラインを占有して設置する予定である。

本研究では、まず希ガス標的を封入するための散乱ガス試料容器を開発する。中性子ビームが通過する入射窓からの小角散乱は免れないため、窓材の選定及び窓材による中性子小角散乱を高精度で測定し、角度分布を持たないことを示すことが重要である。窓材としてはシリコンの結晶材料の試験を行う。最適な窓材を選定したのち、散乱ガス試料容器の設計及び制作を行う。また、散乱試料容器後の真空槽及び検出器を含めた実験装置の最適化・設計を行う。制作した全実験装置をビームラインBL05に設置し、本実験を行う。

#### 4. 研究成果

平成25年度では、散乱ガス試料容器の窓材選定実験を行い、散乱ガス試料容器を完成させる予定であったが、実験実施予定であったJ-PARC加速器施設が当該年度中運転を停止していたため実施が不可能であった。そのため、すでに取得してあった予備データの詳細な解析および新規開発したモンテカルロシミュレーションを組み合わせて、懸念されていた窓材による背景事象が本実験の障害とならないことを示した。また、標的粒子の熱

運動を考慮した実験系のシミュレーションを新たに開発し、測定系の最適化を行った。その結果、中性子ビームダクトから1m下流に標的容器、さらに3m下流に中性子検出器を設置することで測定時間を最小になることが分かった。

H26年度では希ガス標的を封入する標的ガス容器を作製した。標的容器入射窓には、前年度の研究結果により厚さ2mmのシリコン材を用いた。また、散乱した中性子が飛行するための真空散乱槽を作製した。散乱した中性子が真空散乱槽内壁に衝突するのを防ぐために、中性子吸収材を内壁に設置した。以上の装置を真空試験を行ったのちに、ビームラインBL05に設置した。また、3He位置敏感型検出器の動作試験を行ったのちに、同ビームラインに設置した。以上により、本実験開始のための準備は全て整った。J-PARC施設への諸手続き上、当該年度中に希ガスを標的とする本実験許可が間に合わなかったが、本実験装置軍により予備データを取得した。取得予備データの詳細な解析により、封入したガス標的の中性子全断面積を決定することができ、本実験装置が正しく機能していることが確認できた。本実験はJ-PARC施設側の許可が下りたのち、次年度中に開始する予定である。

#### 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 0 件)

[学会発表](計 4 件)

1. 松本悟、吉岡瑞樹、低エネルギー中性子散乱を用いたナノメートルスケールでの重力逆2乗則の検証、中性子物理研究会、2013年12月25日、名古屋大学(愛知県・名古屋市)
2. Masaaki Kitaguchi, Hirohiko Shimizu, Tamaki Yoshioka, Tatsushi Shima, Kenji Mishima, Takashi, Ino, Experimental studies of gravity with slow neutrons, 4<sup>th</sup> Joint Meeting of the APS Division of Nuclear Physics and the Physical Society of Japan, October 7-14, 2014, Waikolola, Hawaii
3. M. Kitaguchi, T. Yoshioka et al., Fundamental Physics with Cold Neutrons at J-PARC, 2<sup>nd</sup> International Symposium on Science at J-PARC, July 2014, Tsukuba, Japan
4. 吉岡瑞樹、低エネルギー中性子散乱を用いたナノメートルスケールでの重力逆2乗則検証実験、第3回KMI分野横断セ

ミナー「精密測定で迫る重力」2015年3月2日、名古屋大学(愛知県・名古屋市)

〔図書〕(計 0 件)

〔産業財産権〕

出願状況(計 0 件)

取得状況(計 0 件)

〔その他〕

ホームページ等

<http://nop.kek.jp/Zope2/Home>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

吉岡 瑞樹 (YOSHIOKA TAMAKI)

九州大学先端・素粒子物理研究センター・  
准教授

研究者番号：20401317

(2) 研究分担者 なし

(3) 連携協力者 なし

(4) 研究協力者

北口 正暁 (KITAGUCHI MASA AKI)

名古屋大学・素粒子宇宙起源研究機構・准  
教授

研究者番号：90397571

三島 賢二 (MISHIMA KENJI)

高エネルギー加速器研究機構・物質構造科  
学研究所・特別准教授

研究者番号：20392136

清水 裕彦 (SHIMIZU HIROHIKO)

名古屋大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：50249900

嶋 達志 (SHIMA TATSUSHI)

大阪大学・核物理研究センター・准教授

研究者番号：10222035

猪野 隆 (INO TAKASHI)

高エネルギー加速器研究機構・物質構造科  
学研究所・講師

研究者番号：10301722