

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 5 月 24 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B) (一般)

研究期間：2012～2015

課題番号：24340045

研究課題名(和文)超冷中性子の重力による量子効果を用いた等価原理の検証と未知短距離力の探索

研究課題名(英文)Test of Equivalence Principle and Search for New Short Range Force

研究代表者

駒宮 幸男 (Komamiya, Sachio)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：80126060

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 15,000,000円

研究成果の概要(和文)：超冷中性子の地球の重力場による量子束縛状態を $1\mu\text{m}$ 以下の精度で測り量子力学の予言と一致する世界初の結果をPhys.Rev. Let. に発表した。これを踏まえ、Xeガスと冷中性子の散乱の角度分布から未知短距離相互作用の探索を行い、 $0.04\text{nm} \sim 4\text{nm}$ の距離範囲で、理論に世界一の厳しい制限をつけ、Phys. Rev.Let. に発表した。さらに、量子力学のもとで等価原理を0.1%程度で検証するため、超冷中性子の重力束縛状態に対して中性子チョッパーで初期状態を与え、速度の違いによる時間発展を中性子検出器を用いて測り、量子束縛状態の時間発展を観測する新たな実験手法を考案した。

研究成果の概要(英文)：In 2013 vertical distribution of the bound states of ultracold neutrons was measured with an accuracy $< 1\mu\text{m}$, and it agrees with the prediction of quantum mechanics using the Wigner function. This is the first clear result of this type and it was published in Phys. Rev. Let. Based on these studies, new short-range force was searched for by measuring the angular distributions of cold neutron scattering with Xe nuclei. We imposed the best limit for the theory of new short range forces in the range of 0.04nm to 4nm . This result was also published in Phys. Rev. Let. Furthermore, we proposed a new experiment to test the Equivalent Principle in the quantum mechanical environment within an accuracy of 0.1%. In the experiment time development of the quantum states is measured after setting the initial distribution by the neutron chopper. Time evolution of quantum states with different velocities is measured by the neutron pixel detector with high precision.

研究分野：素粒子実験

キーワード：超冷中性子 CCD 量子束縛状態 未知短距離力

1. 研究開始当初の背景

平成 15 年に、Grenoble の Laue Langevin Institute (ILL) で行われた超冷中性子を用いて重力の量子状態を見る実験の結果が Nature に発表された。位置の精度が数ミクロンと小さくないので、確証を得るものではなかった。位置の測定精度を上げることが本質的だと我々は考えて CCD の表面に B10 を蒸着した中性子検出器を開発して、その位置精度を JAEA の原子炉で測定し 3 μm を得た。これでは精度が十分でないので、円柱で反射させて中性子鉛直分布を拡大するための拡大鏡を開発した。

初めの ILL での実験では、中性子が円柱表面に当たる角度が大きすぎて円柱の内部に潜ってまた出てくる中性子がバックグラウンドとなって中性子分布に明確な濃淡(量子効果)が見えなかった。ここで、測定器を一新して ILL で再度実験を行い、量子束縛状態を明確に観測することを踏まえたうえで、未知短距離力の探索や、重力の等価原理の量子力学のもとでの検証の実験にも研究の対象を拡張することとした。

2. 研究の目的

平成 24 年度に CCD ベースの新しい検出器を完成させ、まずは位置の測定精度を ILL の冷中性子を用いて測った。UCN 分布を拡大させるための円柱は、大阪大学工学研究科附属超精密科学研究センターにおいて表面を高精度で研磨し製作した。ILL において UCN の地球の重力場中での量子束縛状態を測定する実験を 1 か月間行った。この解析を東大で行ない、Wigner 関数を用いるという新しいアイデアで量子力学が予言する分布との一致を統計的に実証した。その結果の論文を出版した。

一方、Xe 原子核と冷中性子の散乱実験は、東大で Xe 容器を作って、韓国の KAERI の Hanaro で実験を行った。中性子の角分布のデータ解析は東大で行い、標準理論の角分布に未知短距離力の角分布を加えていき、その大きさに対して制限をつけた。

また、重力の等価原理の量子力学での検証に関しては、UCN を用いて、重力場中での量子束縛状態の時間発展を測定する方法を考案した。このための GIANT ベースのシミュレーションや測定器の設計を行い、これが可能であることを確認した。

3. 研究の方法

平成 24 年度の初めに CCD ベースの新しい検出器を完成させ、位置の測定精度の測定を行なった。UCN 分布を拡大させるための円柱は大阪大学工学研究科附属超精密科学研究センターにおいて作成した。測定器を組んで

ILL において UCN を用いた実証試験を行ない、取得したデータの解析を行なった。平成 25 年度には、測定器の改良を行ない 1 ヶ月以上の長期間に渡って高統計のデータを取得し、解析を行ない結果を論文として発表した。平成 25 年のデータ取得が成功し、平成 26 年においては更に高統計のデータを取得できる、スイスのポールシェラー研究所(PSI)での測定の検討と準備を行なった。

4. 研究成果

平成 24 年に、ILL における実験で超冷中性子の地球の重力場による量子束縛状態の鉛直分布を 1 μm より良い精度で測り、量子力学から導いた予言の分布を Wigner 関数を用いて計算し、これらがきれいに一致するという世界初の明確な結果を示した。これを平成 26 年に Physical Review Letters に発表した。

未知短距離相互作用の探索に関しては、Xe ガスと冷中性子の散乱の角度分布を用いてその角分布を用いて、0.04nm から 4nm の距離範囲で、理論に世界一厳しい制限をつけ、Physical Review Letters に平成 27 年に発表した。

また、量子力学のもとで等価原理を 0.1% 程度で検証するために、超冷中性子の重力束縛状態に対して中性子チョッパーで初期状態を与え、速度の違いによる時間発展を中性子検出器を用いて測り、量子束縛状態の時間発展を観測する新たな実験手法を考案した。この結果を平成 26 年度、27 年度には内外の学会で発表した。

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 5 件)

- (1) Y. Kamiya, K. Itagaki, M. Tani, G. N. Kim and S. Komamiya "Constraints on New Gravitylike Forces in the Nanometer Range", Physical Review Letters, 144, 161101, 2015, 査読有, 10.1103/PhysRevLett.144.161101
- (2) G. Ichikawa, S. Komamiya, Y. Kamiya, Y. Minami, M. Tani, P. Geltenbort, K. Yamamura, W. Nagano, T. Sanuki, S. Kawasaki, M. Hino and M. Kitaguchi, "Observation of the Spatial Distribution of Gravitationally Bound Quantum States of Ultracold Neutrons and ITS Derivation Using Wigner Function", Physical Review Letters, 112, 71101, 2014, 査読有, 10.1103/PhysRevLett.112.071101

- (3) Y. Kamiya, G. Ichikawa, and S. Komamiya,
 “Precision Measurement of the Position-Space Wave Functions of Gravitationally Bound Ultracold Neutrons”, *Advances in High Energy Physics*, 2014, 859241, 2014, 査読有, 10.1155/2014/859241
- (4) G. Ichikawa, S. Komamiya and Y. Kamiya, “Observation of the Gravitationally Bound Quantum States of Ultracold Neutrons with Submicron Spatial Resolution”, *Proceedings of the 12th Asia Pacific Physics Conference*, *JPS Conf. Proc.* 1, 013101, 2014, 査読有, 10.7566/JPSCP.1.013101
- (5) Y. Kamiya, M. Tani, S. Komamiya, G. Kim and K. Kim, “A Search for Non-Newtonian Force in a Precision Measurement of the Scattering of Slow Neutrons in Xenon Gas”, *Proceedings of the 12th Asia Pacific Physics Conference*, *JPS Conf. Proc.* 1, 013017, 2014, 査読有, 10.7566/JPSCP.1.013017

〔学会発表〕(計 16 件)

- (1) 内田健太, “超冷中性子を用いた新物理探索のための実験システムの開発”, 日本物理学会第71回年次大会, 2016年3月20日, 東北学院大学(宮城県仙台市)
- (2) 神谷好郎, “中性子で重力を探る” 弘前大学 物理学セミナー, 2016年2月15日, 弘前大学(青森県弘前市)
- (3) Y. Kamiya, Y. Sasayama, K. Itagaki, M. Tani, S. Komamiya and G. Kim, “Experimental constraints on New Gravity-like Forces in the Nanometer Range”, *International Conference on Gravitation and Cosmology*, 2015年12月14日~2015年12月18日, Sahibzada Ajit Singh Nagar (India)
- (4) Y. Kamiya, Y. Sasayama, S. Komamiya and G. Kim, “Experimental Constraints on Fifth Force Candidates in the Nanometer Range”, *The 25th Workshop on General Relativity and Gravitation in Japan*, 2015年12月7日~2015年12月11日, 京都大学(京都府京都市)

- (5) Y. Kamiya, Y. Sasayama, S. Komamiya and G. Kim, “Search for new gravity-like short-range forces in neutron-Xe scattering”, 8th International Workshop on Fundamental Physics Using Atoms, 2015年11月30日~2015年12月1日, 理化学研究所(埼玉県和光市)
- (6) 神谷好郎, 笹山悦宏, 駒宮幸男, G. Kim, “中性子散乱を用いた重力に準ずる未知相互作用の探索”, 日本物理学会2015年秋季大会, 2015年9月25日~2015年9月28日, 大阪市立大学(大阪府大阪市)
- (7) 内田健太, 神谷好郎, 駒宮幸男, 市川豪, “超冷中性子を用いた未知短距離力探索へ向けた実験システムの改善”, 日本物理学会2015年秋季大会, 2015年9月25日~2015年9月28日, 大阪市立大学(大阪府大阪市)
- (8) S. Komamiya, “Observation of the Spatial Distribution of Gravitationally Bound States of Ultracold Neutrons and Its Derivation Using the Wigner Function”, *PSI Physics Seminar*, 2015年9月16日, Zurich (Switzerland)
- (9) Y. Kamiya, K. Itgaki, Y. Sasayama, M. Tani, S. Komamiya and G. Kim, “Search for New Gravitylike Forces at the HANARO 40 m SANS Beam Line”, 2015 International HANARO Symposium, 2015年5月11日~2015年5月13日, Daejeon (Korea)
- (10) 笹山悦宏, 板垣景大, 神谷好郎, 駒宮幸男, G. Kim, K. Kim, “低速中性子散乱を用いた未知短距離力の探索実験”, 日本物理学会第70回年次大会, 2015年3月21日~2015年3月24日, 早稲田大学(東京都新宿区)
- (11) 荻野真由子, “超冷中性子を用いた重力場による量子状態観測実験と中性子用ピクセル検出器の最適化”, 日本物理学会2014年秋季大会, 2014年9月18日, 佐賀大学(佐賀県佐賀市)
- (12) G. Ichikawa, S. Komamiya and Y. Kamiya, “Observation of gravitational quantum states of ultracold neutrons

and its derivation using the Wigner function”

GRANIT-2014 Workshop “Quantum gravitational spectroscopy with ultracold systems”, 2014年3月2日～2014年3月7日, Les Houches (France)

(13) Y. Kamiya, S. Komamiya, G. Kim, M. Tani, K. Itagaki and K. Kim, “A Search for gravity-like short-range forces in precision measurement of neutron scattering in Xenon gas” GRANIT-2014 Workshop “Quantum gravitational spectroscopy with ultracold systems”, 2014年3月2日～2014年3月7日, Les Houches (France)

(14) Y. Kamiya, “A search for gravity-like short-range force using HANARO 40 m SANS beam line”, HANARO Seminar, 2014年2月10日, Daejeon (Korea)

(15) G. Ichikawa, “Observation of the Spatial Distribution of Gravitationally Bound Quantum States of Ultracold Neutrons with Submicron Spatial Resolution”, the 12th Asian Pacific Physics Conference, 2013年7月14日, 幕張メッセ(千葉県千葉市)

(16) Y. Kamiya, M. Tani, S. Komamiya, G. Kim, and K. Kim., “A Search for non-Newtonian force in a precision measurement of the scattering of slow neutrons in Xenon gas”, the 12th Asian Pacific Physics Conference, 2013年7月14日, 幕張メッセ(千葉県千葉市)

6. 研究組織

(1)研究代表者

駒宮 幸男 (KOMAMIYA, Sachio)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号：80126060

(3)連携研究者

神谷 好郎 (KAMIYA, Yoshio)
東京大学・素粒子物理国際研究センター・助教
研究者番号：90434323

山村 和也 (YAMAMURA, Kazuya)
大阪大学・大学院工学研究科・准教授
研究者番号：60240074

佐貫 智行 (SANUKI, Tomoyuki)
東北大学・大学院理学研究科・准教授
研究者番号：70323491