

## 科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 28 年 6 月 7 日現在

機関番号：12601

研究種目：若手研究(B)

研究期間：2013～2015

課題番号：25870160

研究課題名(和文) 低速中性子散乱実験施設を用いた未知の弱結合スカラー粒子の探索

研究課題名(英文) Search for new, weakly-coupled scalar boson using slow neutron scattering beam line

## 研究代表者

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

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 3,400,000円

研究成果の概要(和文)：冷中性子ビームとキセノン原子ガスの散乱角度分布を精密に測定することで、結合が弱く、まだ実験的に見付かっていない新しいスカラー粒子の探索を行った。実験は低速中性子散乱実験施設の冷中性子ビームを用い、約72時間の間散乱ターゲットに照射して、約1千万回に及ぶ散乱事象を取得した。実験結果を調べたところ、測定された散乱分布は既知の相互作用で十分に説明できるもので、未知粒子の兆候は確認されなかった。本実験の探索感度は、40ピコメートルから4ナノメートルのスケールにおいては、これまで行われてきたどの実験に比べても優れており、その結果として、未知粒子に対して世界で最も強い制限を付けることに成功した。

研究成果の概要(英文)：We searched new weakly-coupled scalar bosons by measuring the angular distribution of cold neutrons scattering off atomic xenon gas. Around 10 to the seventh scattering events in 72 hours were corrected at slow neutron scattering beam line. Measured scattering distribution was well described by the known scattering process, and no evidence for new particles was observed. Sensitivity of our experiment was world's best at 40 pm to 4 nm length scale, and the results improved the previous world's limits and gave new constraints for theoretically predicted particles.

研究分野：素粒子物理実験

キーワード：未知粒子探索 重力相互作用の検証 中性子ビーム 2次元散乱分布測定 キセノン原子ガス

1. 研究開始当初の背景

- (1) 国内外の研究所において、新しい力とその媒介粒子としての未知の弱結合スカラー粒子の探索実験が行われてきていた。
- (2) 未知粒子を示唆する理論的考察の多くは、重力と現在の素粒子標準理論との統一を念頭に議論を行うもので、そのために、多くの実験では、質量やバリオン数などを結合荷とするような、重力に準ずる新しい力を探索の対象としている。
- (3) 数ナノメートル程度の系の距離スケールでは、これまで、電荷が中性な中性子と物質との散乱過程を解析することで探索が行われてきていた。
- (4) フランスのグループが示した探索結果が、当時の世界最高感度を持つ結果であった。実験手法としては、特別な方向へ散乱した散乱データの比を取ることで結果を得ていた。
- (5) フランスのグループでは、探索感度をさらに上げることを目的に、極冷中性子ビームを用いた次期の実験を計画していた。
- (6) このような背景の下、本研究課題では、解析効率の高い新しい解析手法を提案し、より高い感度を得る実験を提案した。私たちの研究グループからの提案手法は、計算機による疑似実験を重ねて実現可能性を検討した。
- (7) 疑似実験の結果からは、特に、ターゲットガスの熱運動による影響の評価について、私たちの手法がより優れていると期待できた。その検討結果を受け、フランスグループの実験に先駆けて実験を行い、本研究手法の優位性を示す事を最優先事項とした。

2. 研究の目的

- (1) 冷中性子ビームと高純度 Xe 原子ガスの散乱角分布を精密に測定し、既知の散乱過程による分布との整合性を評価することで、世界に先駆け、新物理の可能性について現在の最高感度で検討することを一つ目の目的とした。
- (2) 世界最高感度での探索結果を示すことで、私たちが提案した研究手法の優位性を示すことを二つ目の目的とした。

3. 研究の方法

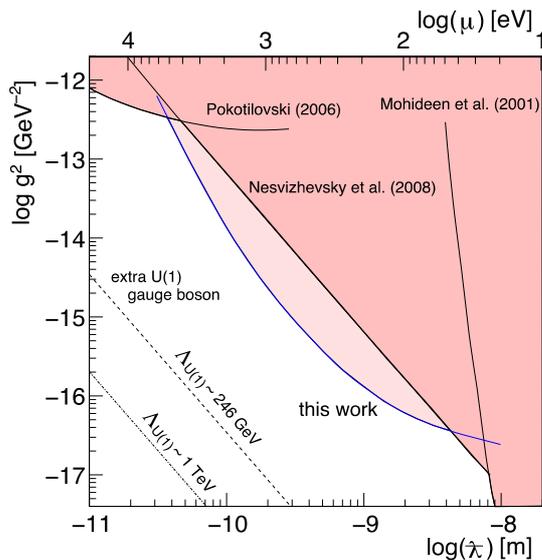
- (1) Xe 原子ガスを封じるガスチャンバーの設計と製作を行った。
- (2) チェンバー内壁からのアウトガスによる Xe 原子ガスの汚染度を計測し、散乱ターゲットガスの入替と純化スケジュールを決定した。

- (3) Xe ガスの入れ換えスピード、純化精度、チャンバーの洗浄効率を、それぞれ最適になるようガスライン・真空ラインを設計し、運用手順の整理を行った。
- (4) 中性子透過経路上に設置せざるを得ない窓材の、力学的剛性を評価した上で、窓材からの散乱を最小限に押える設計を行った。
- (5) 物性研究で使われる単波長で高性能な冷中性子小角散乱ビームラインに、Xe 原子ガスターゲットを設置し、対象ガスからの散乱データと、ガス封印チャンバーからの散乱データを取得した。
- (6) 取得したデータを整理し、核力による干渉性散乱やスピン-スピン相互作用を伴う非干渉性散乱、相対論的効果の Schwinger 散乱などによる既知の散乱過程からの影響と、新物理による影響とを、最大尤度法を用いてそれぞれ評価した。
- (7) 上記で得られた評価の結果を検討し、新物理の可能性について、統一法と呼ばれる手法をもって求めた。

4. 研究成果

- (1) 未知スカラー粒子が介在する新しい相互作用に対して、最も基本的な湯川型散乱ポテンシャルによる評価を行った。新しい力の到達距離が 40 ピコメートル～4 ナノメートルの範囲において、これまで世界最高感度を誇っていたフランスのグループの実験結果から、最大 10 倍の感度改善に成功した。探索実験の結果を、アメリカ物理学会が出版する学会誌の一つである Physical Review Letters に報告した。(下図参照)
- (2) 世界最高の探索感度を得るにあたって、主に、「アウトガスを抑制した真空チャンバーの製造/設計と運用方法」「Xe ガスの純化に用いるゲッターラインの構築と最適な運用方法」「真空ラインのコンダクタンス測定と実験スケジュールへの影響」「冷中性子ビームラインを包むようにして発生するバックグラウンド源となる中性子分布の影響」「冷中性子のダイレクトビームを止めるビームストップによる多重散乱の、物理探索感度への影響」を研究した。
- (3) 本研究実験手法に対する系統誤差の評価を、十分な精度で定量化することに成功した。今後に予定する、本研究の次世代の高統計実験における系統誤差の影響を、より現実的に検討するための準備を整えた。

- (4) 得られた成果は、40 ピコメートル～4 ナノメートルの到達距離の未知粒子に対して世界最高感度による探索結果である。2016年6月現在においても、いまだ、本研究結果を越える実験結果は報告されていない。



図：5. 主な発表論文-雑誌論文 No.1

Y. Kamiya et al., PRL 114, 161101 (2015) より、本研究課題で設けた未知粒子への新しい制限を示した図。横軸が新しい力の到達距離、あるいは未知粒子の質量で、縦軸がその結合の強さを示す。右上の濃い桃色の領域は、以前から制限されていた領域で、薄い桃色の領域は、本研究助成の下で更新した、新物理へのより厳しい制限結果。40 ナノメートルから4 ナノメートルの到達距離において、最大10倍の感度改善に成功している。

- (5) 国際会議での情報の収集状況から、また、本研究結果の論文等公表情報に対する問合せ状況などから、近年においては、イギリス・インペリアル・カレッジ・ロンドンのグループ、またアメリカコロンビア大学のグループが、共に、冷原子の技術を用いた新しい探索手法の開発を進めていることがわかった。冷原子による未知粒子探索実験が、主に国外において精力的に進められていると思われる。
- (6) 本研究の結果、未知の弱結合スカラー粒子の兆候はなかったと結論された。実験感度は、これまでのものに比べ、最大10倍高く、それにより、理論が予言し得るパラメーター領域に、より厳しい制限を与えた。論文発表後の、研究会での結果報告の際の参加者の反応や、研究者からの電子メールを介した問合せの多さを鑑みても、結果のインパクトは該当分野において、十分に大きなものと言える。
- (7) 本研究で確立した手法では、実験統計量が探索感度を制限していることが確認された。つまり、より高強度の中性子ビームを用いることや、データの積算時間

を増やすことで、感度改善が期待できると思われる。

- (8) 本研究課題で得られた系統誤差の影響に対する考察から、実験手法に大きな変更を加えること無く、もう一桁から二桁ほどの感度改善を見込めると言える。

#### 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, 114, 161101 (2015), 査読有, 10.1103/PhysRevLett.144.161101
2. 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, Volume 2014, Article ID 859241 (2014), 査読有, 10.1155/2014/859241
3. Yoshio Kamiya, Misato Tani, Sachio Komamiya, Guinyun Kim, and Kyungsook 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/JSPSC.1.013017
4. Go Ichikawa, Sachio Komamiya, Yoshio 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/JSPSC.1.013101
5. 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

[学会発表](計14件)

1. 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)

2. Yoshio Kamiya, Yoshihiro Sasayama, Keita Itagaki, Misato Tani, Sachio Komamiya, and Guinyun Kim, “Experimental constraints on New Gravity-like Forces in the Nanometer Range”, International Conference on Gravitation and Cosmology, 2015年12月14-18日, Mohali (India)
  3. Yoshio Kamiya, Yoshihiro Sasayama, Sachio Komamiya, and Guinyun 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7-11日, 京都大学 基礎物理学研究所(京都府京都市)
  4. Y. Kamiya, Y. Sasayama, S. Komamiya, and G. N. 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-12月1日, 理化学研究所(埼玉県和光市)
  5. 神谷好郎, 笹山悦宏, 駒宮幸男, Guinyun 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25-28日, 大阪市立大学(大阪府大阪市)
  6. 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25-28日, 大阪市立大(大阪府大阪市)
  7. Y. Kamiya, K. Itgaki, Y. Sasayama, M. Tani, S. Komamiya, and G. N. Kim, “Search for New Gravitylike Forces at the HANARO 40 m SANS Beam Line”, 2015 International HANARO Symposium, 2015年5月11-13日, Daejeon (Korea)
  8. 笹山悦宏, 板垣景大, 神谷好郎, 駒宮幸男, Guinyun Kim, and Kyungsook 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-24日, 早稲田大学(東京都新宿区)
  9. 荻野真由子, 駒宮幸男, 神谷好郎, 市川豪, 山村和也, “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18-21日, 佐賀大学(佐賀県佐賀市)
  10. 板垣景大, 駒宮幸男, 神谷好郎, 谷美慧, Guinyun Kim, and Kyungsook Kim, “低速中性子散乱による質量と結合した新しい相互作用の探索”, 日本物理学会第69回年次大会, 2014年3月27-30日, 東海大学(神奈川県平塚市)
  11. 荻野真由子, 駒宮幸男, 神谷好郎, 市川豪, 山村和也, “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”, 日本物理学会第69回年次大会, 2014年3月27-30日, 東海大学(神奈川県平塚市)
  12. Yoshio Kamiya, Sachio Komamiya, Guinean Kim, Misato Tani, Keita Itagaki, and Kyngsuk 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2-7日, Houches (France)
  13. Go Ichikawa, Sachio Komamiya, and Yoshio 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2-7日, Houches (France)
  14. Yoshio 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)
- 〔その他〕  
報道関連情報
- (1) “Gravity-Like Interactions At The Nanoscale”, Asian Scientist, 2015年5月27日, <http://www.asianscientist.com/2015/05/in-the-lab/gravity-like-interactions-nanoscale/>
  - (2) “重力に準ずる未知の相互作用の探索 -時空構造を知る手がかりを求めて-”, 東京大学 UTokyo Research, 2015年5月20日, <http://www.u-tokyo.ac.jp/ja/utokyo-research/research-news/hunt-for-new-gravity-like-interaction.html>
  - (3) “Hunt for new gravity-like interactions, -Search for clues about space-time structure-”, The University of Tokyo UTokyo Research, 2015年5月20日, <http://www.u-tokyo.ac.jp/en/utokyo-research/research-news/hunt-for-new-gravity-like-interaction.html>
  - (4) 神谷好郎, 駒宮幸男, Guinyun Kim, “重力に準ずる未知の相互作用の探索”, 東京大学 理学系研究科・理学部 プレスリリース, 2015年4月15日, <http://www.s.u-tokyo.ac.jp/ja/press/2015/20.html>

## ホームページ等

- (1) 研究成果に関する出版物のリスト：  
<http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/~kamiya/contents/Publicationsj.html>
- (2) Ultracold neutrons (Wikipedia)  
Reference[14],  
<https://en.wikipedia.org/?curid=17421330>

## 6. 研究組織

- (1) 研究代表者  
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
- (2) 研究協力者  
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