

科学研究費助成事業（学術研究助成基金助成金）研究成果報告書

平成 25 年 5 月 28 日現在

機関番号：14301

研究種目：挑戦的萌芽研究

研究期間：2011 ～ 2012

課題番号：23654086

研究課題名（和文）ボース凝縮体の超高分解能分光によるナノスケールでの重力法則の検証

研究課題名（英文）Test of law of gravity at nano-meter scale by using ultra-high resolution spectroscopy of a Bose condensate

研究代表者

高橋 義朗 (TAKAHASHI YOSHIRO)

京都大学・大学院理学研究科・教授

研究者番号：40226907

研究成果の概要（和文）：

ナノスケールでの重力法則の検証を目的として、イッテルビウム原子のボース凝縮体に対する高分解能な光会合分光を、複数の同位体の振動回転準位に適用し、合計で15の準位について、約500Hzの精度で束縛エネルギーを決定することに成功した。以上の、非常に高精度な実験結果について、いくつかの知られているモデルポテンシャルを用いて詳しい理論的な考察を行った結果、実験結果を全く説明できないことがわかった。

研究成果の概要（英文）：

Towards the test of the gravity at nano-meter scale, we performed high-resolution photo-association spectroscopy using Bose condensates of ytterbium atoms, and determined the binding energies of 15 ro-vibrational states of various isotopes, with the precision of 500Hz. These precision data were finely analyzed by using several known molecular model potentials, which results in the great disagreement between the measurements and calculations.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
交付決定額	3,000,000	900,000	3,900,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：ボース凝縮、重力法則、高分解能分光、ナノスケール、モット絶縁体

1. 研究開始当初の背景

質量をもった二つの物体の間に働く重力の研究は、極めて基本的な課題であり、その逆自乗則を検証する実験は、過去から現在にいたるまで、高精度に行われてきた。天体の振る舞いからは 10^{15}m レベルの天文学的な距

離について、地上での縦穴、湖、塔などでの実験からは 10^5m レベルの距離について、またねじれ秤の実験室内での実験から 1m から数 cm 程度の距離について、さらに最近はカシミール力の測定などから 10 ミクロン程度の距離について、それぞれ非常に高精度な測定が

行われてきており、逆自乗則がよい精度で成立していることが確認されている。

一方、近年、4つの力の中で重力だけが極端に弱いという階層性問題が余剰次元の存在などで説明できる可能性が指摘され大変注目を浴び、またいわゆる宇宙項問題とも関連して、これが微小距離での重力の逆自乗則の破れとして現れることが指摘され、世界的に大変注目されている。現在、国内外で重力の逆自乗則の補正項の検証を目指した実験が計画されている。

上述のように、重力は4つの力の中で、最も弱い力であるため、近距離においては必然的に物体間の電磁気力に由来するファンデアワールス力の影響が相対的に強くなり、そのため小さい重力の効果を正確に測定することは非常に困難を伴う。重力の大きさは質量に比例するため、より「マクロ」な物体を用いて測定することが有利であり、これまで計画されている研究もこうした方向性のものがほとんどである。

一方、近年の中性原子のレーザー冷却・原子制御の技術の発展は目覚ましいものがあり、レーザー光の3次元的な定在波の腹（格子点）に、ほとんど温度ゼロまで冷却された原子を二つずつ用意することが可能となっている。さらに、高度に安定化されたレーザー光を用いることにより、その原子間の“分子”結合エネルギーを非常に高分解能で測定することが可能であり、これは、原子間相互作用を高精度に決定することが可能であることを意味する。

2. 研究の目的

こうした状況のもと、本研究において、超低温に冷却されたボース・アインシュタイン凝縮体の高度な制御性に立脚した全く新しいアイデアに基づく独自のアプローチを着想し、これにより、これまで研究することが

非常に困難であった、ナノメートルスケールでの重力の逆自乗則に対する補正項を高精度に測定することを研究目的とした。

本研究により、近距離での重力補正項の上限が更新されれば、これまでに提案されている幾つかの理論モデルについての制限を与えることができ、その意義は大変重要である。もし、有限値が観測されれば、基礎物理学へのインパクトは計り知れない。また、本研究は、重力の実験研究と、精密原子物理学の新たな融合分野の先駆けと位置付けることができる。

3. 研究の方法

本研究では、これまでの研究背景で述べた「常識」にあえて逆らう手法を提案した。「マクロ」な物体を用いた場合の近距離での力の測定を困難している要因として、形状や密度・表面処理などの誤差に起因する系統誤差が大きい点、「大きさ」で力が積分されるため近距離での力だけを評価するのが困難という点、が挙げられる。このため、「マクロ」な物体間に近距離で働くファンデアワールス力は実質的に予測不能な非常に複雑なものになってしまっている。そこで、重力の大きさという点では有利な「マクロ」な物体を対象とすることを諦め、代わりに、マイクロな対象である「二つの中性原子」の間に働く「原子間力」を最新の原子・レーザー技術を駆使して超精密測定することにより、サブマイクロンという従来の手法では対象とすることができなかった近距離での重力の補正項の精密測定を実現しようというものである。この手法は、原子-分子という個体差がなく2つの質点と扱えるシンプルな系を用いている点、力による物体の変動ではなく、エネルギーポテンシャルを直接測定する点、が特に優れている。質量の異なる複数の同位体に対して系統的に精密測定を繰り返し、結果を比較する

ことにより、質量に依存した力に対する情報を得ることができる。重力測定としては、質量の大きな「マクロ」な物体を用いることが基本であるが、これをあえて採用せず、「ミクロ」な物体である原子について、その超精密測定を通して、微小距離での重力の逆自乗則の破れの問題にアプローチしようというものである。

この逆転の発想は、研究代表者の以前の研究成果がもとになっている。2008年の研究において、研究代表者は、光会合分光法と呼ばれる最新のレーザー分光技術を駆使することにより、超低温に冷却された中性原子の間の相互作用を、驚くべき高い精度で決定することに成功していた。わずか3つのパラメーターにより表した原子間の相互作用が、複数の同位体に対して行なった分子結合エネルギーのすべての測定結果を、 10^{-4} の精度で説明することができた。本挑戦的萌芽研究では、この測定精度を、ボース・アインシュタイン凝縮体を用いて、重力補正項測定のためのより理想的な状況を作り出し、 10^{-7} という、これまでの結果の3桁以上の測定精度の向上を図ろうというものである。

また、本研究では、中性原子として特にイッテルビウム (Yb) 原子を用いる。これは希土類原子で非常に単純なエネルギー構造をしており、他の多くの原子種と違い、単一の原子間ポテンシャルを有し、精密測定に非常に有利である。さらに、質量数 168 から 176 までに7種類の安定同位体が存在し、様々な同位体での測定結果を比較することにより、重力の効果のみを抜き出すことが可能となる、という利点がある。さらに、そもそも“重い”原子である。このように本研究において極めて魅力的な原子種であるが、現在、研究代表者のグループのみがボース・アインシュタイン凝縮までの冷却が可能な原子種であ

る。研究代表者のグループでは、7種の安定同位体のうち6種類について“量子”気体の領域までの超冷却に成功しており、この技術を最大限に活用することを計画した。

4. 研究成果

まず、イッテルビウム原子のボース・アインシュタイン凝縮体に対する高分解能な光会合分光を、複数の同位体の振動回転準位に適用し、約2GHzの範囲に、合計で15の準位について、約500Hzの精度で、その束縛エネルギーを決定することに成功した。特に注意すべき系統的誤差として、光会合光によるエネルギーシフト、原子間相互作用によるシフト、原子と分子の分極率の違いによるシフト、を考慮し、全て、光会合光強度依存性、原子数依存性、光トラップ光強度依存性、を測定することにより、取り除くことに成功した。

さらに、ボース同位体だけでなく、フェルミ同位体にも分光測定の対象を広げ、同様に、高い精度で、束縛エネルギーを決定することに成功した。

以上の、これまでにない非常に高精度な実験結果について、これらを理論的に説明できるかどうかについて、詳しい理論的な考察を行った。原子間距離 R の6乗、8乗、12乗の項によって表される、いわゆるレナード・ジョーンズ型のモデルポテンシャルによるフィッティングを試みた結果、実験結果を全く説明できないことがわかった。また、このレナード・ジョーンズ型のモデルポテンシャルの係数を、同位体ごとに変化しうるようにした結果、フィッティングの残差は一桁程度改善されたが、それでも、実験結果とは、一桁以上のずれが残ることが分かった。さらに、モデルポテンシャルとして、近距離でのポテンシャルとして ab-initio 計算のものを用い

て、遠距離での分散型ポテンシャルに漸近するようにしたものを用いても、フィッティングが改善されないこと、および、タン-テニアスポテンシャルと呼ばれる、2電子系原子の振る舞いをよく記述するモデルポテンシャルを導入しても、依然としてフィッティングが改善されないこと、さらに、遠距離ポテンシャルの補正として、カシミア-ポルダ-ポテンシャルを導入した場合には、むしろフィッティングが悪くなる、ということ新たな知見として得ることに成功した。これらは、今後の重力補正項探索への重要な第一歩である。

また、以上の測定から、原子と分子の散乱長を決定することに成功した。また、光格子中で2重占有のサイトと3重占有のサイトからの光会合共鳴のシフトを観測し、原子と分子の散乱長との無矛盾性を議論した。これらも、以上の精密な測定からのみ得られる最新の成果である。

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 12 件) 全て査読有

- ①R. Inoue, S. Tanaka, R. Namiki, T. Sagawa, and Y. Takahashi, Unconditional quantum-noise suppression via measurement-based quantum feedback, Phys. Rev. Lett., 110, 163602-1-5, 2013
(DOI:10.1103/PhysRevLett.110.163602)
- ②R. Yamazaki, S. Taie, S. Sugawa, K. Enomoto, and Y. Takahashi, Observation of a p-wave optical Feshbach resonance, Phys. Rev. A, Vol. 87, Issue. 1, pp. 010704-1(R)-5 2013
(DOI:10.1103/PhysRevA.87.010704)
- ③Shinya Kato, Rekishu Yamazaki, Kosuke Shibata, Ryuta Yamamoto, Hirotaka Yamada,

and Yoshiro Takahashi, Observation of long-lived van der Waals molecules in an optical lattice, Phys. Rev. A, Vol. 86, Issue4, pp. 043411-1-5, 2012

(DOI:10.1103/PhysRevA.86.043411)

④Satoshi Uetake, Ryo Murakami, John M. Doyle, and Yoshiro Takahashi, Spin-dependent collision of ultracold metastable atoms, Phys. Rev. A, Vol. 86, Issue3, pp. 032712-1-5, 2012

(DOI:10.1103/PhysRevA.86.032712)

⑤Shintaro Taie, Rekishu Yamazaki, Seiji Sugawa & Yoshiro Takahashi, An SU(6) Mott insulator of an atomic Fermi gas realized by large-spin Pomeranchuk cooling, Nature Physics, Vol. 8, pp. 825-830, 2012

(DOI:10.1038/nphys2430)

⑥Yosuke Takasu, Yutaka Saito, Yoshiro Takahashi, Mateusz Borkowski, Roman Ciurylo, and Paul S. Julienne, Controlled Production of Sub-Radiant States of a Diatomic Molecule in an Optical Lattice, Physical Review Letters, 108(17), 2012, 173002-1-5,

(DOI:10.1103/PhysRevLett.108.173002)

⑦S. Kato, K. Shibata, R. Yamamoto, Y. Yoshikawa, and Y. Takahashi, Optical magnetic resonance imaging with an ultra-narrow optical transition, Appl. Phys. B 108, 2012, 31-38

(DOI:10.1007/s00340-012-4893-0)

⑧Mateusz Borkowski, Roman Ciurylo, Paul S. Julienne, Rekishu Yamazaki, Hideaki Hara, Katsunari Enomoto, Shintaro Taie, Seiji Sugawa, Yosuke Takasu, and Yoshiro Takahashi, Phys. Rev. A 84, 2011, 030702(R)-01-05

(DOI:10.1103/PhysRevA.84.030702)

⑨Seiji Sugawa, Rekishu Yamazaki, Shintaro Taie, and Yoshiro Takahashi, Bose-Einstein condensate in gases of rare atomic species, Phys. Rev. A 84, 2011, 011610-1-4, (DOI:10.1103/PhysRevA.84.011610)

⑩Seiji Sugawa, Kensuke Inaba, Shintaro Taie, Rekishu Yamazaki, Makoto Yamashita, and Yoshiro Takahashi, Interaction and filling-induced quantum phases of dual Mott insulators of bosons and fermions, Nature Physics, 7, 2011, 642-648, (DOI:10.1038/nphys2028)

⑪R. Namiki, S.-I. Tanaka, T. Takano, and Y. Takahashi, Measurement schemes for the spin quadratures on an ensemble of atoms, Applied Physics B, 105, 2011, 197-201 (DOI:10.1007/s00340-011-4717-7)

⑫Hideaki Hara, Yosuke Takasu, Yoshifumi Yamaoka, John M. Doyle, and Yoshiro Takahashi, Quantum Degenerate Mixtures of Alkali and Alkaline-Earth-Like Atoms, Physical Review Letters, 106, 2011, 205304-1-4, (DOI:10.1103/PhysRevLett.106.205304)

[学会発表] (計 43 件)

①高橋義朗, 光格子を用いた凝縮系の量子シミュレーション, 第5回超高速時間分解光計測研究会, ホテルクラウンパレス浜松 3 階松の間, 浜松, 2013 年 2 月 21 日

②Yoshiro Takahashi, Quantum simulation using ultracold ytterbium atoms in an optical lattice, The 72nd Okazaki Conference on "Ultimate Control of Coherence", Okazaki Conference Center, Okazaki, Japan, 2013 年 1 月 8 日

③Yoshiro Takahashi, Ultracold Ytterbium atoms in an optical lattice, Workshop on

Orbital Physics in Cold Atom Systems, Institute of Physics, Chinese Academy of Science, Beijing, China, 2013 年 1 月 5 日

④高橋義朗, ボース凝縮体の超高分解能光会合分光によるナノスケールでの重力補正項の検証, 中性子物理研究会, 名古屋大学東山キャンパス理学南館セミナー室(愛知), 2012 年 11 月 21 日

⑤高橋義朗, 超低温原子気体の精密量子制御: 強相関量子多体系の量子シミュレーションと基礎物理学への応用, 益川塾セミナー, 京都産業大学(京都市) 2012 年 7 月 14 日

⑥Yoshiro Takahashi, 冷却極性分子を用いた原子核起源 EDM 探索の可能性, 立命館大学 EDMworkshop, Kinugasa Campus, Ritsumeikan University(Kyoto), 2012 年 6 月 1 日

⑦Yoshiro Takahashi, Prospects for nuclear EDM search with ultracold molecules Workshop on eEDM with Molecules 「分子を用いた電子の双極子モーメント測定に関する研究会」, 東京大学駒場キャンパス(東京), 2012 年 5 月 20 日

⑧Yoshiro Takahashi, Ultracold Ytterbium Atoms in an Optical Lattice, CUA seminar talk, MIT, Cambridge, MA, USA, 2012 年 5 月 1 日

⑨Yoshiro Takahashi, Quantum Simulation using Ultracold Ytterbium in an Optical Lattice, Yale University Seminar, Yale University, New Heaven, USA, 2012 年 4 月 30 日

⑩Yoshiro Takahashi, Quantum Degenerate Mixtures of Alkali and Alakline-Earth-Like Atoms, Research Frontiers in Ultra-Cold Atoms and Molecules: Unequal Mass Mixtures and Dipolar Molecules, Session II - Ultra-cold Mixtures; Chair: Hanns-Christoph Naegerl, HARVARD-

SMITHSONIAN CENTER, CAMBRIDGE, MA, USA,
2012年4月23日

⑪高橋義朗、超低温イッテルビウム原子：量子シミュレーションと精密測定への応用、理研セミナー、理研(和光市)、2011年12月20日

⑫Y. Takahashi, High-Resolution Spectroscopy of Ultracold Quantum Gas、Workshop of Cold Antimatter and High Precision Physics、くにびきメッセ(島根)、2011年11月29日

⑬高橋義朗、Few-body and Many-Body Problems in an Optical Lattice, Today/Riken Meeting on Cold Atoms and Nucleons、理研(和光市)、2011年10月28日

⑭Y. Takahashi, Quantum Simulation Using Two-Electron Atoms, Bose-Einstein Condensation 2011 Frontiers in Quantum Gases, Costa Brava (Spain), 2011年9月13日

⑮Y. Takahashi, Quantum Gas with SU(N) Symmetry, ULT2011, Daejeon (Korea), 2011年8月21日

⑯Y. Takahashi, Quantum Simulation Using Two-Electron Atoms, 26th International Conference on Low Temperature Physics (LT26), Beijing (China), 2011年8月12日

⑰Y. Takahashi, Novel Quantum Phases of Ytterbium Atoms in an Optical Lattice, Gordon Research Conferences (Atomic Physics), West Dover, VT (USA), 2011年6月29日

⑱Y. Takahashi, Realization of an enlarged spin Symmetry of fermions in an atomic gas, 20th International Conference on Laser Spectroscopy ICOLS 2011, Aerzen (Germany), 2011年5月30日

⑲Y. Takahashi, SU(6) Fermi system in an optical lattice, Quantum Magnetism in

Ultracold Atoms, Haifa (Israel), 2011年5月17日

[図書] (計 2件)

①Sugawa, Y. Takasu, K. Enomoto and Y. Takahashi, World Scientific, Chapter1 “Ultracold Ytterbium: Generation, Many-Body Physics, and Molecules”, in Annual Review of Cold Atoms and Molecules: Volume 1. (edited by K. W. Madison, Y. Wang, Ana Maria Rey, and K. Bongs), 2013, pp540 (1-49)

②田家慎太郎, 素川靖司, 山崎歴舟, 高橋義朗, アグネ技術センター, 光格子を用いた量子シミュレーション, 固体物理(動的光物性の新展開)特集号, Vol. 46, No. 11, 2011年11月号, pp216(121-128)

[その他]

ホームページ等

<http://yagura.scphys.kyoto-u.ac.jp/research/index.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高橋 義朗 (TAKAHASHI YOSHIRO)
京都大学・大学院理学研究科・教授
研究者番号：40226907