

平成 22 年 6 月 1 日現在

研究種目：特定領域研究

研究期間：2005～2009

課題番号：17071005

研究課題名（和文）内部自由度をもつ原子気体の超流動性 に関する研究

研究課題名（英文）Study on superfluidity of atomic gases with internal degrees of freedom.

研究代表

上田正仁(UEDA MASAHIRO)

東京大学・大学院理学系研究科・教授

研究者番号：70271070

研究成果の概要（和文）：

本研究では、内部自由度(スピン)を持った冷却原子気体のボース・アインシュタイン凝縮(BEC)の超流動性の研究を行った。スピン自由度を持った BEC は外部磁場によって異なった量子凝縮相をとりうる。このような系において外部磁場を短時間で変化させることにより、スピンの渦が自発的に生じる Kibble-Zurek 機構を数値シミュレーションで実証した。また、結び目励起や非アーベル渦が内部自由度をもった BEC で生じることを見出した。

研究成果の概要（英文）：

We studies superfluid properties of Bose-Einstein condensates (BECs) with internal degrees of freedom. We have numerically demonstrated that by changing an external magnetic field spin vortices are spontaneously generated. This provides an atomic-gas demonstration of the Kibble-Zurek mechanism. We have also demonstrated that exotic topological excitations such as knots and non-Abelian vortices can be created in spinor BECs.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005 年度	8,300,000	0	8,300,000
2006 年度	9,400,000	0	9,400,000
2007 年度	9,400,000	0	9,400,000
2008 年度	8,700,000	0	8,700,000
2009 年度	7,900,000	0	7,900,000
総計	43,700,000	0	43,700,000

研究分野:冷却原子気体の理論、超流動、量子情報、測定理論

科研費の分科・細目:物理学(数理物理・数理物理)

キーワード:原子、低温物性、物性理論、物性実験

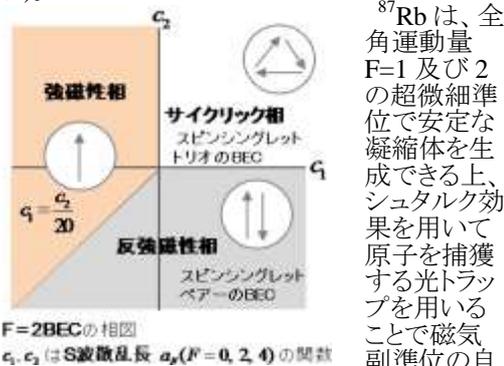
1. 研究開始当初の背景

アルカリ原子気体のボース・アインシュタイン凝縮(BEC)の顕著な性質は、真空中にトラップされ外部環境から隔離された、不純物を一切含まないスーパークリーンな系であると同時に内部自由度を持つことである。同じく内部自由度を持つ超流動ヘリウム3との違いは、(1)磁気モーメントの起源が主として電子であることから外部磁場に対する応答が千倍以上強く、このためスピントクスチャーの局所制御ができること、(2)BEC が希薄な気体であることから、系の非平衡ダイナ

ミックスがリアルタイムで追跡できることである。

本研究の目的は、理論グループと実験グループが密接に協力してこれらの点に着眼した内部自由度を持つ BEC の新たな研究を創造することにある。本研究の主な対象であるルビジウム $87(^{87}\text{Rb})$ は、電子スピン $1/2$ と核スピン $3/2$ を持ち、基底状態は、合成スピンが $F=1$ と $F=2$ の超微細準位へと分裂する。我々(学習院)は ^{87}Rb BEC を光学トラップに閉じ込めることに世界で初めて成功し、これにより、 $F=2$ BEC の超流動性を実験的に研究する可能性が開かれた(^{23}Na BEC を使

った MIT の実験は、 $F=1$ である)。 $F=1$ の場合、基底状態は強磁性的か反強磁性的の 2 種類しかないが、 $F=2$ BEC の場合は、さらに、3 原子がスピニングレットを組み、それがポーズ凝縮する新しい相(cyclic phase) が現れることが我々の理論的研究 (東工大) で予言されている (下図参照)。



$F=2$ BEC の相図
 c_1, c_2 は S 波散乱長 $a_s (F=0, 2, 4)$ の関数

^{87}Rb は、全角運動量 $F=1$ 及び 2 の超微細準位で安定な凝縮体を生成できる上、シュタルク効果を用いて原子を捕獲する光トラップを用いることで磁気副準位の自由度を解放することができ、全部で 8 つの自由度を持つ凝縮体 (スピノール BEC) を実現できる (^{23}Na BEC の $F=2$ の状態は $m_F=\pm 2$ 以外は不安定である)。これら原子の内部自由度を生かした実験研究は国内では他に無く、海外においてもまだ少数である (Hanover, Georgia Tech, Oxford)。しかし、内部自由度を持った BEC の超流動性に対する関心は急速に高まりつつあり、今研究投資を行うことがこの分野における我々のリードを維持し、研究を進展させる上で極めて有効である。この系は気体相にあり、液体相にあるヘリウム 3 超流動体と様々な点で相補的なパラメーター領域にあるために、領域内の他の研究グループ (A 03 等、A 04 キオおよびクなど) と有機的に連携することにより、内部自由度を持った超流動体一般に対する新たな知見が得られるものと期待される。

2. 研究の目的

本科学研究費の交付を希望する研究期間内に以下の諸点を明らかにすることを目指した。

(1) ^{87}Rb BEC の基底状態の磁場依存性

我々 (学習院) およびハノーバーのグループの実験から、バイアス磁場をかけた状態では基底状態は反強磁性相 (AF) 側にあることが推定されるが、cyclic (C) 相にも極めて近く、ゼロ磁場でどちらの相になるかはわかっていない。実験的には外部磁場を精密にコントロールすることによりゼロ磁場付近での基底状態および低励起状態を決定する。理論的には実験結果を解釈する上で必要な 2 次ゼーマン効果を取り入れて基底状態を決定する。

(2) スピン交換相互作用による磁気副準位 m の占有原子数の量子揺らぎ

原子が衝突する際、スピン交換相互作用により全磁気量子数を保存しつつ、原子は $(m=0)+(m=0)$ 記号 $\leftrightarrow (m=1)+(m=-1) \leftrightarrow (m=2)+(m=-2)$ のように異なった磁気副準位を持った状態に遷移するが、系が AF 相と C 相の境界に近いことから各状態の原子の占有数が平均値の周りに量子的に大きく揺らぐ可能性がある (臨界揺らぎ)。これらを理論的および実験的に解明する。

(3) バイナリー・スピノール BEC の超流動性

全角運動量 F が異なる、2 成分 BEC ($F=1$ 及び 2) の混合超流動体の研究を行う。この 2 種類の BEC は磁性が異なり ($F=1$ は強磁性、 $F=2$ は反

強磁性または cyclic)、これらの混合気体 (バイナリー-BEC) のスピンドYNAMICS (異成分間のトンネリングと集団モードなど) を解明し、スピン交換相互作用に起因する新たな現象の発見を目指す。

(1) 量子渦近傍におけるスピン網目構造

量子渦が生じると密度が空間的に急激に変化する。スピン交換相互作用は磁場の強さだけでなく原子密度にも依存するので、様々なスピンの網目構造が生じることが期待できる。特に、系は非一線なポテンシャルに閉じ込められており、原子間相互作用を介した密度波とスピン波の結合を介した新しい網目構造や渦の安定性を明らかにする。

3. 研究の方法

本研究の目的は理論と実験とが密接な連携をとりながら内部自由度を持った BEC の超流動性の包括的な研究を行なうことにある。具体的には、下記の計画に沿って研究を進めた。

平成 17 年度

(1) 2 次ゼーマン効果を考慮した $F=2$ BEC の基底状態の理論的解明。

(2) $F=2$ の ^{87}Rb スピノール BEC のスピン交換相互作用の精密測定と cyclic 状態の探索。

まず、実験的には

① 時間分解能が高いコンピュータコントロールシステムの開発: スピノール BEC のスピン交換相互作用の精密測定のために、 10μ 秒の時間分解能で測定できるコンピュータコントロールシステムを開発 (そのためのソフト、ハードは既存)、最適化を行い、継続して 100 回以上再現性よく BEC を生成できることを確認する。

② BEC 撮像システムの整備: 低雑音・高精度で凝縮体を撮像 (測定) するために、既存のものより高性能なレンズ・ミラー等の光学素子を導入し、測定系全体を再構築する。複数方向からの測定ができるよう、光学系の配置の工夫と最適化を行う。

また、スピン交換相互作用による集団励起状態の出現を観測するための予備実験及び、2 成分 BEC の研究に必要な、マイクロ波を使った超微細準位間遷移制御の装置の開発・テスト実験も行う。理論的には、基本的なハミルトニアン構成と基底状態が満たすべき条件についてはほぼ解明が終わっているが、それを実際に満足する解を見つけることが課題となる。この努力と平行して数値的に解を見つける計算コードの開発も行なう。

平成 18 年度

(1) スピン交換相互作用による磁気副準位のパラメトリック生成過程のダイナミクスの研究

(2) スピノール BEC の量子渦の生成とダイナミクスの解明

理論的には前年度に明らかにした基底状態の知見を踏まえて、平衡状態からずらした初期状態から出発した場合に期待できるスピン交換相互作用による磁気副準位の占有数の量子揺らぎを調べる。実験的には前年度からの予備研究の状況を踏まえ、外部磁場強度を変化させながら、特定の磁場強度でスピン交換相互作用が増大しないかを測定していく。磁場の精密測定: 原子スピンの精密測定では、磁場を高精度に制御モニタリングする必要がある。レーザー光の偏光面回転効果 (ファラデー効果) を利用して、BEC 内原子のスピン歳差運動を測定することで、精密な磁場測定を行えるシステムを構築する。また、様々な外部磁場環境下における詳細なデータを蓄積し、原子の各スピン成分の揺らぎの増

減や磁場依存性をみる。

量子渦に関しては外部から印加した磁場を反転することによって、原子の内部自由度を利用した量子渦の生成を行う。この方法の特徴は、2以上の過渡をもつ量子渦が生成できる点である。量子渦を生成した後、BECを光トラップ中に捕獲し、スピン自由度が開放された状態での量子渦のダイナミクスに関する研究を行う。この研究に必要な高精度な磁場制御の装置系の開発を行う。量子渦生成に成功した後は、原子間相互作用スピン交換による、スピン網目構造の形成や渦の安定性に関し調べていく。実験と平行して理論的には渦生成の最適化の分析および網目構造のダイナミクスの研究をおこなう。

平成19年度

原子間のスピン交換相 E 作用と BEC の集団励起モードの解明

本研究の目的はスピン交換相互作用が原子数密度に依存することに着目して、非一様な系にトラップされた BEC がどのような集団励起モードを発現するかを解明する。実験的には、まず、特定の磁場強度で共振共鳴を探索し、現象が確認された後は、磁場強度の変化範囲を広げ、スピン交換相互作用による誘起を系統的に調べる。理論的には、まず一様な系の場合について調べ、次に非一様な系の研究をおこなう。また、まず、平均場のレベルで調べ、次に第二量子化したレベルで調べる。

平成20年度

(1) 非弾性ロスの精密測定および定式化による ^{87}Rb スピノール BEC の基底状態磁性相の決定

現在までの研究から、 ^{87}Rb の $F=2$ スピノール BEC のスピンドイナミクスにはスピン依存した非弾性ロスの影響が大きいことがわかったので、スピン依存する非弾性衝突の精密測定を行う。平行して、 $F=2$ ^{87}Rb BEC のスピン状態に依存する、原子の非弾性衝突ロスを的確に取り入れた平均場理論を定式化し、原子ロスの入ったグロス・ピタエフスキー (GP) 方程式を導出する。実験的に得られた非弾性衝突係数を、導出した GP 方程式に適用し、実験で観測された様々なスピンドイナミクスを再現するかどうかを調べることににより、非弾性衝突の定式化の妥当性を確認する。これをもとにして、非弾性衝突による原子ロスを考慮した、より精密な、 $F=2$ ^{87}Rb BEC 基底状態磁性相の決定法を理論的に確立し、実験で決定する。これらの実験において、実際の原子の弾性・非弾性衝突レートの大きさによっては、理論的に予言される興味深い量子現象を実験で確かめることが困難である可能性もある。その場合には、磁気あるいは光学フェンシュバハ効果により、積極的に弾性及び非弾性衝突の積極的な制御を試みる。また、1次元光格子を導入することにより、擬2次元系を実現し、さらなる制御を行う。

実験ではさらに、マイクロ波を使った超微細準位間遷移の制御実験により、2成分 BEC を光トラップ内に捕獲し、8成分の自由度を有する場合の弾性・非弾性衝突の精密測定を行う。実験データは次年度以降のバイナリー・スピノール BEC の研究に利用する。

(2) ダイポール相互作用による BEC の異方的な崩壊過程

ダイポール相互作用を含めた平均場の GP 方程式をシミュレートするコードはすでに開発済みであり、これを用いて崩壊過程を調べる。崩壊過程では凝縮体が非常に高密度になるため平均場理論の方程式を使うには注意が必要だが、過去に斎藤らが s 波散乱の等方的な引力相互作用

による崩壊過程を調べており、その経験が活用できると考えている。ダイポール BEC の崩壊実験に最近着手した Stuttgart 大学の実験グループとも連絡を取り合い、実験データとの詳細な比較検討をしつつ研究を進める。

平成21年度以降

(1) バイナリー・スピノール BEC における量子渦、準安定性、量子トンネル効果の研究

光トラップ中で多成分 BEC を保持しておき、磁場反転の手法を適用すれば、成分ごとに異なる過渡をもつ量子渦の共存系を実現することができると考えられる。このような系における、原子間相互作用スピン交換による、スピン網目構造の形成や渦の安定性を実験的に探求する。この実験を行うには、光トラップポテンシャルの極小軸と磁場反転の際の四重極磁場をマイクロメートルの精度で一致させる必要がある。この磁場装置の開発は平成20年度も他の実験と平行して進めておく。また、混ざり合わない2成分間で起こるドメイン構造や量子トンネル効果についても探求する。

理論では非弾性衝突による原子のロスを、 $F=1, 2$ 混合系に取り入れ定式化する。これによって、より具体的にバイナリー BEC のダイナミクスを理論的に予言することが可能となる。特に、ドメイン構造や量子トンネル効果を解析し、実験と比較する。

(2) ダイポール相互作用による磁区構造形成の機構解明

ダイポール相互作用による磁区構造形成のダイナミクスを GP 方程式を用いてシミュレーションし、強磁性体における磁区構造形成との類似点相違点を明確にする。特に、量子渦やスピン渦などのトポロジカルな励起が生じている可能性があるため、これらの発現機構に着目して注目をダイナミクスの詳細を調べる。

(3) これらの研究と平行して、全研究期間に得られた結果のまとめと総括をおこない、研究の過程で明らかになった新たな可能性についての研究を推進する。

4. 研究成果

理論グループ(東大、電通大):

(1) 強磁性相互作用するスピン1ルビジウム原子 BEC が磁気相転移によって自発磁化するダイナミクスを調べ、キップル・ズレック機構によってスピン渦が生成されることを明らかにした。

(2) Stuttgart 大の実験グループと共同で、クロム原子の BEC が磁気双極子相互作用によって異方的に崩壊する現象を観測しバーストが発生する機構を理論的に解明した。この研究成果は Physical Review Letters 誌の表紙、Editor's suggestion および Viewpoint に採用された。

(3) 磁気双極子相互作用する BEC において、古典磁性流体に類似した棘状パターンおよび迷宮状パターンの生成、ヒステリシス、ソリトンなど多彩な現象が現れることを明らかにした。また、超固体性や永久流の安定化など、古典磁性流体には無い磁性超流体特有の現象を見出した。

実験グループ(学習院大):

スピン内部自由度を持った ^{87}Rb ボース・アインシュタイン凝縮体を研究するための実験手法の開拓を進め、理論グループとの密接な共同研究により、基礎的な物性パラメータについての知見や新奇な現象の発見などを行うことができた。

(1) ^{87}Rb のもつ8つの内部状態の分布数を再現性良く制御する実験技術や、量子渦の生成

技術などを開発することができた。

(2) 非弾性衝突レートの測定を様々な磁気副準位の組み合わせに対して行い、これら全ての実験結果が、2つのパラメータ(全スピンの0または2の非弾性衝突レート)により、ほぼ定量的に説明可能であることを示した。

(3) マイクロ波を使った超微細準位間遷移により2成分BECを用意し、磁場によるフェッシュバッハ共鳴を確認し、共鳴磁場付近で相分離の様子が変化することを発見した。非弾性衝突レートの小さい2準位でもフェッシュバッハ共鳴を発見した。

本研究で得られた非弾性衝突に関する統一のかつ定量的な知見や、種々の実験手法は、今後スピノール BEC を研究するための基礎となるものであり、磁気基底状態の最終的な決定(反強磁性相かサイクリック相か)や量子揺らぎの効果などを明らかにする道筋を開くことができた。

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](査読有り、計 21 件)

1. T. Kuwamoto, H. Usuda, S. Tojo, and T. Hirano, “Dynamics of Quadruply Quantized Vortices in 87Rb Bose-Einstein Condensates Confined in Magnetic and Optical Traps”, *Journal of the Physical Society of Japan*, 79, 034004(1)-034004(5) (2010)
2. T. Sagawa and M. Ueda, “Generalized Jarzynski Equality under Nonequilibrium Feedback Control”, *Phys. Rev. Lett.* 104, 090602(1)-090602(4) (2010)
3. M. Horikoshi, S. Nakajima, M. Ueda, T. Mukaiyama, “Measurement of Universal Thermodynamic Functions for a Unitary Fermi Gas”, *Science* 327, pp.442-445 (2010)
4. Y. Watanabe, T. Sagawa, and M. Ueda, “Optimal Measurement on Noisy Quantum Systems”, *Phys. Rev. Lett.* 104, 020401(1) - 020401(4) (2010)
5. M. Kobayashi, Y. Kawaguchi, M. Nitta, and M. Ueda, “Collision Dynamics and Rung Formation of non-Abelian Vortices”, *Phys. Rev. Lett.* 103,115301(1)-115301(4) (2009)
6. H. Saito, Comment on “Fragmented metastable states exist in an attractive Bose-Einstein condensate for atom numbers well above the critical number of the Gross-Pitaevskii theory”, *Phys. Rev. Lett.* 103, 018901(1)-018901(1) (2009)
**Comment on L. S. Cederbaum et al., Phys. Rev. Lett.* 100, 040402(1)-040402(1) (2008)
7. T. Sagawa and M. Ueda, “Minimal Energy Cost for Thermodynamic Information Processing: Measurement and Information Erasure”, *Phys. Rev. Lett.* 102, 250602(1)-250602(4) (2009).
(*Editor's suggestion*)
8. H. Saito, Y. Kawaguchi, and M. Ueda, “Ferrofluidity in a two-component dipolar Bose-Einstein Condensate”, *Phys. Rev. Lett.* 102, 230403(1)-230403(4) (2009)
9. Y. Inada, M. Horikoshi, S. Nakajima,

M. Kuwata-Gonokami, M. Ueda, and T. Mukaiyama, “Critical Temperature and Condensate Fraction of a Fermion Pair Condensate”, *Phys. Rev. Lett.* 101, 180406(1)-180406(4) (2008)

10. S. Tojo, A. Tomiyama, M. Iwata, T. Kuwamoto, and T. Hirano, “Collision dynamics between stretched states of spin-2 87Rb Bose-Einstein condensate”, *Applied Physics B* 92, 403-407 (2008)

11. Y. Inada, M. Horikoshi, S. Nakajima, M. Kuwata-Gonokami, M. Ueda, and T. Mukaiyama, “Collisional Properties of p-Wave Feshbach Molecules”, *Phys. Rev. Lett.* 101, 100401(1)- 100401(4) (2008) **Publisher's Note: Phys. Rev. Lett.* 101, 139901 (2008)

12. T. Lahaye, J. Metz, B. Fröhlich, T. Koch, M. Meister, A. Griesmaier, T. Pfau, H. Saito, Y. Kawaguchi, and M. Ueda, “d-wave collapse and explosion of a dipolar Bose-Einstein condensate”, *Phys. Rev. Lett.* 101, 080401(1)- 080401(4) (2008) (*Editor's suggestion*)
**See accompanying Viewpoint commentary Physics 1, 13 (2008)*

13. Y. Kawaguchi, M. Nitta, and M. Ueda, “Knots in a Spinor Bose-Einstein Condensate”, *Phys. Rev. Lett.* 100, 180403(1)-180403(4) (2008) (*PRL cover*)

14. M. Tezuka and M. Ueda, “Density-Matrix Renormalization Group Study of Trapped Imbalanced Fermi Condensates”, *Phys. Rev. Lett.* 100, 110403(1)-110403(4) (2008)

15. T. Sagawa and M. Ueda, “Second Law of Thermodynamics with Discrete Quantum Feedback Control”, *Phys. Rev. Lett.* 100, 080403(1)-080403(4) (2008)

16. R. Kanamoto, L. D. Carr, M. Ueda, “Topological Winding and Unwinding in Metastable Bose-Einstein Condensates”, *Phys. Rev. Lett.* 100, 060401(1)-060401(4) (2008)

17. Y. Kawaguchi, H. Saito, and M. Ueda, “Can Spinor Dipolar Effects Be Observed in Bose-Einstein Condensates?”, *Phys. Rev. Lett.* 98, 110406 (1)-(4) (2007)

18. Y. Kawaguchi, H. Saito, and M. Ueda, Spontaneous Circulation in Ground-State Spinor Dipolar Bose-Einstein Condensates, *Phys. Rev. Lett.* 97, 130404 (1)-130404(4) (2006)

19. Y. Kawaguchi, H. Saito, and M. Ueda, Einstein-de Haas Effect in Dipolar Bose-Einstein Condensates, *Phys. Rev. Lett.* 96, 080405 (1)-080405(4) (2006)

20. H. Saito, Y. Kawaguchi, and M. Ueda, “Breaking of Chiral Symmetry and Spontaneous Rotation in a Spinor Bose-Einstein Condensate”, *Phys. Rev. Lett.* 96, 065302 (1)-065302(4) (2006)

21. R. Namiki and T. Hirano, “Security of continuous-variable quantum cryptography using coherent states: Decline of postselection advantage”, *Phys. Rev. A* 72, 024301 (1)-024301(4) (2005)

[学会発表] (計 39 件)

1. 上田 正仁, 冷却原子気体におけるトポロジカル励起(シンポジウム講演)、日本物理学会第65回年次大会、岡山大学、岡山、2010年3月21日
2. Y. Kawaguchi, “Topological Excitations in Spinor BECs”, New Frontiers in QCD 2010-QCD Phase diagram, Kyoto University, Kyoto, 10 March 2010 (invited)
3. H. Saito, Y. Kawaguchi, M. Ueda, “Ferrofluidity in dipolar Bose-Einstein condensates”, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials Kanagawa, Japan, 9 March 2010
4. 上田 正仁, ボーズアインシュタイン凝縮、レーザー誕生50周年記念シンポジウム(千里ライフサイエンスセンター、大阪)、2010年2月2日
5. M. Ueda, “Topological excitations in spinor-dipolar Bose-Einstein condensates”, 5th CAS Cross-Strait and International conference on quantum manipulation, Beijing, China, 19 December 2009 (Invited)
6. M. Ueda, “Topological excitations in Bose-Einstein condensation”, International workshop 2009, Reimsburg, Germany, 16 November 2009 (Invited)
7. 斎藤 弘樹, “原子気体BECにおける磁性流体力学”, 日本物理学会2009年秋期大会、熊本大学、熊本、2009年9月27日
8. 東條 賢, 田邊 達良, 田口 義久, 平野 琢也, “フェッシュバハ共鳴による2成分⁸⁷Rb BECの相分離制御”, 日本物理学会2009年秋季大会、熊本大学、熊本、2009年9月27日
9. 東條 賢, 田邊 達良, 田口 義久, 平野 琢也, “Search for “trimmer” Bose-Einstein condensate”, Novel Spin Pairing 2009 (NSP2009), 京都大学、京都、2009年9月16日
10. 川口由紀, “双極子相互作用するボーズ・アインシュタイン凝縮体”, “科研費「動的相関光科学」第2回シンポジウム、京都大学、京都、2009年8月20日
11. M. Ueda, “Lee-Yang cluster-expansion approach to BEC-BCS crossover”, The 18th International Laser Physics Workshop, Barcelona, Spain, 16 July 2009 (Invited)
12. M. Ueda, “Issues on Spinor-Dipolar Bose-Einstein Condensates”, Nonlinear Waves-Theory and Applications, Beijing, China, 10 June 2009 (Invited)
13. 東條 賢, 林 太郎, 井上 恵美子, 田邊 達良, 田口 義久, 平野 琢也, “Controlling phase-separation of binary Bose-Einstein condensates by mixed-spin-channel Feshbach resonance”, 18th Laser Physics Workshop (LPHYS09), World Trade Center, Barcelona, Spain, 7 July 2009
14. Y. Kawaguchi, “New Physics in Dipolar Bose-Einstein condensates”, 19th International Conference on Laser Spectroscopy (ICOLS), Hokkaido, Japan, 8 June 2009 (Invited)
15. M. Ueda, “Topological Excitations in Bose-Einstein Condensates, The 2009 Summer Program of the Aspen Center for Physics: Quantum Simulation, Computation with Cold Atoms and Molecules, Colorado, USA, 28 May, 2009 (Invited)
16. M. Ueda, “Symmetry Breaking in Bose-Einstein Condensation”, OIST Workshop --Fundamentals of Quantum Mechanics and Its Applications--, OIST, Okinawa, 13 May 2009 (Plenary Talk)
17. 川口 由紀, “二次元スピノールボース気体におけるKosterlitz-Thouless転移”, 特定領域研究A03-A04合同研究会、箱根、神奈川、2009年4月19日
18. Y. Kawaguchi, M. Nitta, and M. Ueda, “Knots in Spinor Bose-Einstein Condensates”, 3rd Annual Dodd-Walls Symposium, Queenstown, New Zealand, 12 Dec. 2008 (Invited)
19. Y. Kawaguchi, “Knots in Spinor Bose-Einstein Condensates”, 3rd Annual Dodd-Walls Symposium, Queenstown, New Zealand, 9-11 Dec, 2008 (invited)
20. H. Saito, “Topological defect formation in spinor and dipolar Bose-Einstein condensates”, 8th Asian International Seminar on Atomic and Molecular Physics, Perth, Australia, 28 Nov. 2008 (Invited)
21. 川口 由紀, スピノールBECにおけるトポロジカル励起、日本物理学会2008年秋期大会、岩手大学、岩手、2008年9月21日 (招待講演)
22. 川口 由紀, “スピノールBECにおけるトポロジカル励起”, 日本物理学会秋季大会、岩手大学、岩手、2008年9月21日 (招待講演)
23. M. Ueda, “Symmetry Breaking in Bose-Einstein Condensates”, The 9th International Symposium on Foundations of Quantum Mechanics in the Light of New Technology (ISQM-TOKYO'08), Saitama, Japan, 27 August 2008 (Invited)
24. M. Ueda, “Chiral symmetry breaking in spinor Bose-Einstein condensates”, International Workshop: Spin Helicity and Chirality in Superconductor and Semiconductor Nanostructures: Novel Phenomena and Emergent Functionality, Karlsruhe, Germany, 14 July 2008 (Invited)
25. M. Ueda, “What we know and have yet to learn about Spinor Bose-Einstein condensates”, 39th Annual Meeting of the Division of Atomic, Molecular, and Optical Physics (DAMOP), Pennsylvania, USA, 29 May 2008 (Invited)
26. M. Ueda, “Symmetry breaking in Bose-Einstein condensates with internal degrees of freedom”, Quantum Coherence and Controllability at the Mesoscale, San Sebastian, Spain, 20 May 2008 (Invited)
27. M. Ueda, “Nonlinear dynamics of Bose-Einstein condensates with internal degrees of freedom”, Nonlinear phenomena in degenerate quantum gases(UCLM), Toledo, Spain, 3 April 2008 (Invited)
28. 東條 賢, 林 太郎, 田邊 達良, 平野 琢也, “⁸⁷Rb spin-2 BECの衝突ダイナミクス”, 日本物理学会第63回年次大会、近畿大学、大阪、

2008年3月25日

29. 川口 由紀, “スピノール・ダイポールBECの理論的研究”, 日本物理学会第63回年次大会、近畿大学、大阪、2008年3月23日 (若手奨励賞受賞記念講演)

30. 川口 由紀, “原子気体BECにおける位相とコヒーレンス”, 物性研短期研究会「短波長コヒーレント光と物質中のコヒーレンスの生成・消滅」東京大学物性研究所、2007年11月27日 (招待講演)

31. M. Ueda, “Symmetry Breaking in Spinor-Dipolar Bose-Einstein Condensates”, Yukawa International Seminar 2007(YKIS2007) “Interaction and Nanostructural effects in Low-Dimensional Systems”, Kyoto, 22 November 2007 (Invited)

32. 沙川 貴大, 上田 正仁, “キュービット計に対する一般化された同時測定 of 精度行列”, 第17回量子情報研究会、岡山光量子科学研究所、岡山、2007年11月22日 (招待講演)

33. M. Ueda, “Symmetry Breaking in Spinor-Dipolar Bose-Einstein Condensates”, Bose-Einstein Condensation and Quantized Vortices in Superfluidity and Superconductivity, NUS, Singapore, 15 November 2007 (invited)

34. M. Ueda, “Symmetry Breaking in Spinor-Dipolar Bose-Einstein Condensates”, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2007), Gifu, Japan, 30 October 2007 (invited)

35. Y. Kawaguchi, H. Saito, and M. Ueda, “Novel Phenomena in Spinor Dipolar Bose-Einstein Condensates”, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials (PSM2007), Gifu, Japan, 29 October 2007 (invited)

36. M. Ueda, New Directions in Spinor-Dipolar BEC, Bose-Einstein Condensation, 2007 Frontiers in Quantum Gases, Barcellona, Spain, 15-20 September 2007 (invited)

37. Y. Kawaguchi, H. Saito, and M. Ueda, “Dipolar BEC with spin degrees of freedom”, Summer School on Novel Quantum Phases and Non-equilibrium Phenomena in Cold Atomic Gases, Trieste, Italy, September 2007 (invited)

38. H. Saito, “Symmetry breaking in scalar, spinor, and rotating Bose-Einstein condensates”, 18th International IUPAP Conference on Few-Body Problems in Physics, Sao Paulo, Brasil, August 2006 (invited)

39. M. Ueda, Y. Kawaguchi, H. Saito, R. Kanamoto and T. Nakajima, “Symmetry Breaking in Bose-Einstein Condensates”, ICAP2006-20th International Conference on Atomic Physics, Innsbruck, Austria, 18 July 2006 (invited)

[図書] (計 4 件)

1. C. A. R. サ・デ・メロ (川口 由紀 訳), “フェルミオンがボソンに変わるとき”, 丸善株式会社「パリティ」, pp. 4-13 (2009)

2. H. Saito, Y. Kawaguchi, and M. Ueda, “Topological defect formation in spinor and dipolar Bose-Einstein, Electromagnetic, Magnetostatic, and Exchange-Interaction Vortices in Confined Magnetic Structures”, Edited by E. O. Kamenetskii, Research Signpost Publisher, pp. 107-131 (2009)

3. 平野 琢也, 光科学研究の最前線 (国際文献印刷社), pp. 12-13 (2005)

4. 平野 琢也, 物理学大辞典 (朝倉書店), pp. 547-561 (2005)

[その他] ホームページ等

・研究内容・研究成果に関連するアニメーション
東京大学 上田研究室 URL:

<http://cat.phys.s.u-tokyo.ac.jp/research.html>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

上田 正仁 (UEDA MASAHIRO)
東京大学・大学院理学系研究科・教授
研究者番号: 70271070

(2) 研究分担者

平野 琢也 (HIRANO TAKUYA)
学習院大学・理学部・教授
研究者番号: 00251330

斎藤 弘樹 (SAITO HIROKI)
電気通信大学・大学院情報理工学研究科・准教授
研究者番号: 60334497

桑本 剛 (KUWAMOTO TAKESHI)
学習院大学・理学部・助手
研究者番号: 10337909
(H17.04-H18.03 研究分担者)

東條 賢 (TOJO SATOSHI)
学習院大学・理学部・助教
研究者番号: 30433709
(H18.04-H20.03 研究分担者)

川口 由紀 (KAWAGUCHI YUKI)
東京大学・大学院学系研究科・助教
研究者番号: 00456261
(H19.04-H20.03 研究分担者)

(3) 連携研究者

東條 賢 (TOJO SATOSHI)
学習院大学・理学部・助教
研究者番号: 30433709
(H20.04-H22.03 連携研究者)

川口 由紀 (KAWAGUCHI YUKI)
東京大学・大学院学系研究科・助教
研究者番号: 00456261
(H20.04-H22.03 連携研究者)