

科学研究費助成事業 研究成果報告書

平成 26 年 6 月 6 日現在

機関番号：12601

研究種目：基盤研究(B)

研究期間：2010～2013

課題番号：22340114

研究課題名(和文)冷却原子気体における自発的対称性の破れの研究

研究課題名(英文)Study on spontaneous symmetry breaking in ultracold atomic gases

研究代表者

上田 正仁(UEDA, MASAHIITO)

東京大学・理学(系)研究科(研究院)・教授

研究者番号：70271070

交付決定額(研究期間全体)：(直接経費) 12,900,000円、(間接経費) 3,870,000円

研究成果の概要(和文)：本研究は冷却原子気体における自発的対称性の破れに注目して研究を行った。具体的には、スピン自由度を持ったスピノールボース・アインシュタイン凝縮体(BEC)、スピン軌道相互作用をする系、および、人工ゲージ場下で高速に回転するボース気体の系に関する研究を行った。特筆すべき成果としては、最初の系に対しては、ボゴリウボフ理論を超えるベリアエフ理論の構築に成功し、スピン2 BECの相転移の基本的性質を説明した。二番目の系に対しては、スピン軌道相互作用に起因するさまざまな種類の量子渦および渦格子を見出した。最後の系に関しては、ボソンの量子ホール効果の予言を行った。

研究成果の概要(英文)：In this study, we have studied various types of symmetry breaking in ultracold atomic gases. Special focus is made on Bose-Einstein condensates (BECs) with spin degrees of freedom, systems subject to spin-orbit interactions, and fast-rotating Bose systems subject to synthetic gauge fields. As for the first topic, we have succeeded in developing spinor Beliaev theory which is the next-order theory beyond Bogoliubov theory, and used it to successfully explain the phase transition in spin-2 BECs. As for the second topic, we have found various types of quantized vortices and vortex lattices which arise from spin-orbit interactions. As for the last topic, we have found the quantum Hall effect of bosons.

研究分野：数物系化学

科研費の分科・細目：分科：物理学・細目：原子・分子・量子エレクトロニクス

キーワード：自発的対称性の破れ 冷却原子気体 ボース・アインシュタイン凝縮

1. 研究開始当初の背景

冷却原子気体の研究は、1995年にボース・アインシュタイン凝縮(BEC)が実現されて以来、爆発的に拡大・深化・多様化しており、その勢いは今なお衰えていない。最近の大きな進展としては、スピン自由度を持ったBEC(スピノールBEC)の研究、フェルミ縮退、分子の生成、およびBEC-BCSクロスオーバーの実現、超流動モット絶縁体転移の観測、ダイポール気体の実現、基底状態での異核子分子の生成などが挙げられる。これらはいずれも、数多くの応用・発展が期待される画期的成果とみなされている。本研究の背景として、冷却原子気体が自発的対称性の破れの宝庫であることが挙げられる。この系は、エネルギースケールが大きく異なるさまざまな物理を含んでおり、それぞれが固有の対称性の破れを引き起こす。具体的には、ハートリー相互作用は密度不安定性と相分離やボースノヴァ現象を、スピン交換相互作用はさまざまな磁性を生み出す。磁気的双極子相互作用は長距離秩序を有するスピネクスターを生み出し、それが実際に観測されている。これらの自由度を用いることにより、さまざまな量子相転移を人工的に引き起こし、相転移のダイナミクスをリアルタイムで観測できる。実際、光学的手段を始めとするさまざまな方法で秩序形成の様子がリアルタイムで観測できる。

2. 研究の目的

冷却原子気体は、相互作用の強さを始めとする系を特徴づけるほとんどすべてのパラメータを高い精度で制御できる、理想的な人工量子物質である。本研究は、この系の持つ高い自由度を最大限に活用して、自発的対称性の破れとそれに伴う多彩な物理現象を探検し、量子縮退した凝縮系の知見を深化拡大することを目的としている。とりわけ、申請者らが発見したサイクリック相のような固体物性では知られていなかった新しい量子相で現れるトポロジカル励起の特性を明らかにすることなどを通じて、冷却原子気体のフロンティアを切り開き、かつ、物性物理や低温物理学など他の分野への波及効果のあるインパクトのある基礎研究を行う。また、このような研究を通じて、冷却原子気体に独自の実験研究をこれまでもましてリードする研究を遂行する。本研究のターゲットおよび到達目標は次の通りである。

自発的対称性の破れに伴うさまざまなトポロジカル励起の研究

スピン2BECのサイクリック相およびネマティック相における非可換量子渦の研究を行う。スピノールBECは内部自由度を持つため、秩序パラメータが多成分となり、離散対称性を持っている。渦の芯は秩序パラメータ空間の特異点となるが、スカラーBECとは異なり、空にはならず別な離散対称性を持つ状態が占める。従って、渦の外側と内側を

エネルギーコストを最小限にしつつ接続しなければならないという興味深い問題が生じる。これは、多角形のタイルの周りを別な多角形のタイルで埋め尽くすというタイリングの問題の量子力学版とみなすことができる。多彩な渦が存在するスピノールBECにおいてはこのような量子渦のタイリングの組み合わせが多数存在し、一連の興味深い問題を提起する。他方、スピン1のポーラー相においては、我々はノットと呼ばれる新奇なトポロジカル励起が存在することを指摘した。これは絡み数という量子渦における巻き数とは異なるトポロジカル量子数で特徴づけられる励起であり、冷却原子を使って比較的容易に生成できることが明らかになった。しかしながらこれまでのところは、リンク数が1のunknotと呼ばれる特別な励起の発生法しか分かっていない。本研究では、三葉構造のような高次の絡み数を持つノットをダイナミカル不安定性などを利用して発生させる方法を研究する。

外部パラメータを変化させることにより誘起される対称性の破れのダイナミクスの研究

これは、初期宇宙の相転移を記述するシナリオとして提案されたキブル機構の冷却原子系におけるシミュレーションに相当するものである。冷却原子系では外部磁場を変化させることにより、一つの相(例えばポーラー相)から別な相(強磁性相)への転移が容易に実現でき、それに伴って系の対称性がダイナミカル変化しさまざまな励起が生じる。我々は、この問題に関する先駆的な研究を行ってきたが、本研究においては、スピノールBECにおいて異なる対称性を有する複数の渦が同時に出現する非自明なクエンチダイナミクスの研究を行う。

3. 研究の方法

本研究の目的を達成するために必要なマイルストーンは、(1)2次ゼーマン効果および零点エネルギーの効果が必要な場合のスピノールBECの基底状態の同定、(2)各量子相の秩序パラメータの対称性の決定、(3)ポゴリウボフおよびトポロジカル励起と量子渦の問題の解明、(4)磁場などの外部パラメータを変化させてある相から別な相へ突然変化させたときのダイナミクスの研究である。研究方法は、解析的手法と数値的手法を併用する。対称性の決定においては、群論に基づく方法と平均場方程式を解析的に解くことを並行して行い、解析的に解ききれない部分とダイナミクスの研究は数値計算に基づいて行う。BKT転移の研究においては、繰りこみ群を内部自由度を持った系へと拡張する。

冷却原子系では、外部磁場方向に沿ったスピン成分が保存されるために、1次ゼーマン効果と2次ゼーマン効果を独立に制御できる。前者の効果は、スピンが1のBECについては

大見と町田により明らかにされ、スピンの2のBECについては我々のグループが解明した。しかしながら、実験では、2次ゼーマン効果の方が重要であり、この効果を考慮しない限り実際に何が起こるのかの予言はできない。この効果を取り入れたボゴリウボフ励起は、スピンの1の強磁性相の場合に我々の先行研究があるが、この場合も基底状態の繰りこまれたエネルギーは求められていない。また、それ以外の場合は未解明のままである。そこで、まず、スピン1と2の各相(強磁性、単軸ネマティック、2軸ネマティック、サイクリック)のそれぞれについての2次ゼーマン効果を取り入れたボゴリウボフスペクトルと基底状態のエネルギーを求める。そのためには、内部自由度を持った系に対する結合定数の繰りこみが必要であるが、それが可能であることは本申請のための予備的な研究によってすでに確認している。ボゴリウボフ基底状態が求められれば、そこからLee-Huang-Yang (LHY) の補正を含めた音速が得られるので、スピノールBEC系における集団モードの実験研究への本質的な指針が与えられるものと期待できる。LHY補正は、ボゴリウボフ励起に対する微小な補正と考えられているが、2次ゼーマン効果が重要な実際の状況においては、LHY補正が無視できないくらい重要な寄与を行うことを具体的に示すことも主目的の一つである。繰りこまれたエネルギーには、量子力学的零点エネルギーの効果が含まれており、それによりスピン2BECのネマティック相の安定性が大きな影響を受ける可能性が最近示唆されている。我々は、本研究を通じてこの問題に決着をつけたい。次に、(1)で得られた基底状態の対称性とその基本的性質を、群論およびホモトピー理論に基づいて決定する。励起の種類と性質は、秩序パラメータの空間の対称性により強い制約を受ける。スピノールBECのさまざまな基底状態のホモトピー理論による分類は我々のグループも含めて世界の複数のグループが取り組んでいる問題である。しかし、これらはほとんどの場合、磁場が無い場合あるいは2次ゼーマン効果を見捨てた場合の研究であるために、実際の系へ適用できない場合がほとんどである。我々は、超流動ヘリウム3で成功した対称性の群論的分類法をスピノールBECへ応用することによりこの問題を解決する。必要とされる群論およびホモトピー理論の準備研究は十分に行っており、この問題の全面的解決が可能であると考えている。さまざまな量子相の秩序変数多様体の性質が解明できれば、そこからどんな励起が可能になるかが明らかとなる。(4)に関しては、スピン1のBECは強磁性とポラー相の2種類が知られているが、これまで明らかにされていない後者についての研究を行う。

ポラー相は循環が通常の半分の1/2渦やノット励起が存在するユニークな量子相で

ある。この相は、 ^{23}Na BEC で実現されているが、MITの研究以降、スピノールBECとしての研究は行われていない。他方、最近になって、2次ゼーマン効果をその符号も含めて実験的に制御することが可能になっている。この自由度を利用して、2次ゼーマン係数を正から負へと変えると、BECの基底状態が磁気量子数 $m=0$ の状態のみが占有されるポラー状態から $m=\pm 1$ の状態が占有される反強磁性状態へと転移する。ところが、後者は、1/2渦が存在するために、半整数の渦と反渦が自発的に発生し、離散的なスピナーゲージ対称性に固有の新しいタイプのキブル機構の例が実現できるものと期待される。

スピン2のBECはほとんど未開拓といえる。そもそも平均場の基底状態ですら零点エネルギーにより単軸ネマティック相と2軸ネマティック相の縮退が解けることが最近明らかにされたばかりである。我々は、実験的理解に不可欠な2次ゼーマン効果が存在する場合のこの系の持つボゴリウボフ励起とトポロジカル励起を解明する。

4. 研究成果

本基盤研究の主な成果について下記に列挙する。

(1) スピノールBEC中の渦コア構造のトポロジカルな分類

一般に自発的に対称性が破れた系においては、秩序変数空間(秩序変数が縮退した空間)の第1ホモトピー群を計算すれば量子渦を系統的に分類することが可能である。しかし厳密に言えば、この分類は渦コアから十分遠方でのみ成り立つため、渦コア近傍においては理論のさらなる拡張が必要である。我々は「拡張された秩序変数空間」を定義することによりスピノールBECにおける系統的な渦コア構造の分類法を構築した。渦コア構造をトポロジーで分類することの利点は、数値計算をすることなく渦コア構造を予想し、さらに数値計算で見落としとしてしまっている状態も含め全ての渦コア状態を網羅することが可能となる点である。我々はこの手法をスピン $S=1$ BECに適用し、スピン $S=1$ BECの渦コア構造には異なる磁化の状態が同心円上に現れ、それぞれの同心円に沿った磁化状態には、局在したトポロジカル不変量が存在することを発見した。この研究はPhysical Review A誌に掲載された。[Phys. Rev. A vol. 86, 023612(1)-023612(14) (2012).]

(2) 回転二成分ボース気体における量子ホール状態

高速回転する冷却原子気体においては、量子ホール系に似た非圧縮性状態が出現することが理論的に議論されている。スカラー・ボース気体の場合、基底状態がRead-Rezayi波動関数と高いオーバーラップを持つことが示され、非可換統計に従う準粒子の観測が期待される系として興味を持たれている。我々は、原子が二つの内部状態を持つ二成分ボース

ス気体における量子ホール状態を厳密対角化法により解析した。この系では、成分間相互作用を増加させるに従って、二成分が混成した非自明な量子ホール状態が現れることが期待される。解析の結果、(i) Read-Rezayi 状態の二成分系への拡張である非可換スピン・シングレット状態が形成されること、(ii) 成分内・成分間の相互作用の比を変えることで異なった量子ホール状態間の相転移が起きることを示した。この研究は Physical Review A 誌に掲載された。[Phys. Rev. A vol. 86, 031604(1)-031604(4)(R) (2012).]

(3) 人工スピン・軌道相互作用のもとでの BEC の分類

強いスピン・軌道相互作用をする(擬)スピン $1/2$, 1 , 2 のスピノル BEC の基底状態を対称性に基づいて分類する方法を開発した。SO(2)スピン・空間回転対称性から離散対称性へと対称性の破れが起こると、光格子ポテンシャルが存在しなくても系は自発的に格子構造を発現することが見出された。例えば、擬スピン $1/2$ の系では2種類のカゴメ格子が現れる。また、スピンの 2 の BEC では1軸と2軸のネマティック相が交互に並んで格子を組むことが見出された。擬スピン $1/2$ の系では、平均場状態は時間反転対称性を常に破るが、多体的な基底状態では時間反転対称な基底状態が存在することが示される。

この状態は分裂した凝縮体と呼ばれ、原子数が小さな凝縮体で実現されるものと期待される。この研究は Physical Review A 誌に掲載された。[Phys. Rev. A vol. 86, 033628(1)-033628(8) (2012).]

(4) 連続・離散スケーリング領域をつなぐ新しい三体束縛状態

2種類の Fermion からなる3粒子系では、2つの3粒子束縛状態の存在が知られていた。2種類の Fermion の質量比が大きい場合、Efimov 状態が現れ、離散スケーリング則を示す。一方質量比が小さい場合、連続スケーリング則を満たす Kartavtsev-Malykh 状態という3粒子束縛状態が存在することが知られていた。質量比を変化させた際に連続スケーリング則・離散スケーリング則の間をどのように移行するかを理解するため、我々は、質量比や粒子間相互作用の強さを変化させながら3粒子問題を解いた。その結果、連続・離散いずれのスケーリング則も満たさない新しい3粒子束縛状態を発見し、Crossover 状態と命名した。この Crossover 状態を介することで、連続スケーリング・離散スケーリングの間の移行が可能になることが分かった。また相互作用の強さ・質量比を変化させた際に、どの領域にそれぞれの3粒子束縛状態が存在するか系統的に調べた。その結果、広いパラメータ領域に Crossover 状態が存在することがわかった。この研究は Physical Review A 誌に掲載された。[Phys. Rev. A vol. 86, 062703(1)-062703(14) (2012).]

(5) スピノル BEC の Beliaev 理論

内部自由度を持たない BEC については、基底状態のエネルギーや圧力、音速など様々な物理量を、平均場理論およびその最低次量子補正の範囲内で解析的に計算することができる。最近の実験および量子 Monte-Carlo シミュレーションにより、この最低次量子補正は、冷却原子気体での相互作用スケールにおける平均場理論からのずれを適切に記述することが示された。我々はこの理論を拡張し、スピノル BEC の物理量に対する最低次量子補正を与えるスピノル Beliaev 理論を構築した。スピノル BEC の励起モードの中には、線形分散関係をもつ密度波(フォノン)に加えて二次的分散関係をもつスピン波(マグノン)が現れる。量子補正のもと、密度揺らぎによってマグノンの有効質量が増加することが示された。つまり、マグノンの運動は他の粒子との相互作用によって阻害される。さらにマグノンの有効質量の増加率は異なる二つの相に対して等しいこともわかった。スピノル波束を利用することで、このようなマグノンの有効質量の増加や量子揺らぎの効果を実験的に検出することができると期待される。この研究は Annals of Physics 誌に掲載された。[Ann. Phys. vol. 328, 158-219 (2013).]

(6) ボソンの整数量子ホール状態

中性電荷を持つ原子系において光学的に人工ゲージ場を発生させる技術が近年、急速に進展している。我々は人工磁場中の二成分ボース気体を厳密対角化法により解析し、U(1)対称性で守られたボソン版の整数量子ホール状態が現れることの数値的証拠を提示した。フェルミオンの整数量子ホール状態は相互作用のないもとで現れるのに対し、この状態は二成分が強く相互作用することで初めて現れる。この状態のエンタングルメント・スペクトルを計算することで、電荷モード、スピンモードが逆向きに伝搬する特異な端状態の存在を示した。この結果は、二次元以上のボソン系において、対称性で守られたトポロジカル相の存在を数値的に示した数少ない例の一つである。この結果は Physical Review Letters 誌に公表された。[Phys. Rev. Lett. vol. 111, 090401 (2013).]

(7) スピノル BEC の量子相転移における揺らぎの効果

弱く相互作用する希薄原子気体の BEC の今までの研究では、様々な現象が平均場理論によって精度良く記述されていた。我々は、スピノル BEC において平均場理論では記述できない現象が現れることを発見した。スピン2 BEC の基底状態には、スピンに依存する相互作用の大小関係によっていくつかの相が存在する。これらの相の秩序パラメータはスピン空間内で異なる対称性を持つため、相転移はすべて一次になり、相境界の回りに準安定状態が存在するのが自然である。しかし、Bogoliubov 理論によって得られる励起スペクトルには準安定状態が見られない。この矛

盾を解決するために、我々はこの準安定状態は量子揺らぎの効果によって現れることを指摘し、Bogoliubov 理論を超える Beliaev 理論をスピノル BEC に拡張することで初めて準安定状態が実際に存在することを証明した。準安定状態から基底状態への巨視的なトンネリングに要する時間スケールも見積もった。更に、どの近似オーダーでも準安定状態が存在しない一次相転移のクラスを見出した。ここでは相境界において系が高い対称性を持つことによって準安定状態は禁止されることがわかった。この結果は、Physical Review A 誌に公表された。[Physical Review A 88, 043629 (2013).]

(8) トポロジカル励起共存系にけるトポロジカルチャージ保存則

トポロジカル励起とは量子渦や点欠陥などのトポロジカルチャージによって特徴づけられる励起状態のことであり、自発的対称性が破れた系において普遍的に存在する。ここで定義されるトポロジカルチャージは一般に非可換群で記述される。そのため複数のトポロジカル励起が共存する状況下ではトポロジカルチャージ間に影響が存在する。例えば、スピン 1 ポーラー相中の半整数量子渦と点欠陥が非可換であり、チャージ +1 の点欠陥が半整数量子渦の周りを一周回るとチャージ -1 の点欠陥へ連続変形する。しかし、ここで点欠陥が半整数量子渦の周りを回る前と後で点欠陥のチャージが保存していないという問題が存在する。我々はこの問題に焦点を当て、量子渦の捻じれによるトポロジカルチャージを考慮することで問題が解決されることを発見した。スピン 1 ポーラー相の場合、点欠陥が一周回ると同時に回転中心にある半整数量子渦にも捻じれが生じ、チャージ +2 の半整数量子渦輪が形成される。結果として、全トポロジカルチャージは $2+(-1)=1$ で初期状態と一致している。我々はこの現象が非可換チャージを持つ他の秩序相においても一般的に現れることを代数的に示した。この結果は Physical Review A 誌に公表された。[Phys. Rev. A vol. 89, 033603 (2014).]

(9) Efimov 状態における 3 体パラメータの普遍性

散乱長が大きな 3 粒子系では、離散スケールリング則を示す 3 粒子束縛状態が普遍的に現れ、Efimov 状態とよばれる。Efimov 状態のエネルギースケールを決定する重要なパラメータとして 3 体パラメータがあり、近年 3 体パラメータが普遍的に振る舞うことが冷却原子気体の実験で発見された。我々は冷却原子系特有の van der Waals 型相互作用以外の様々な相互作用をする 3 粒子問題を解き、この 3 体パラメータの普遍性が原子系以外の様々な系について普遍的に成立することを見出した。また、相互作用の遠方での減衰の速さに依存して、3 体パラメータの普遍クラスの分類が可能であることを発見した。Efimov 状

態は冷却原子気体以外にも、 ^4He クラスタ一、中性子過剰原子核、マグネオン等で現れる可能性が示唆されており、これら様々な系での少数系の理解に本研究が大きく貢献するものと期待される。この結果は Physical Review Letters 誌に公表された。[Phys. Rev. Lett. vol. 112, 105301 (2014).]

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](総件数計 38 件)

1. P. Naidon, S. Endo, M. Ueda. Microscopic Origin and Universality Classes of the Efimov Three-body Parameter

Phys. Rev. Lett. 査読有, 112, 2014.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.112.105301

2. S. Kobayashi, N. Tarantino and M. Ueda. Topological influence and backaction

between topological excitations. Phys. Rev. 査読有, A 89, 2014.

DOI: 10.1103/PhysRevA.89.033603

3. Z. Xu, S. Kobayashi, and M. Ueda. Gauge-spin-space rotation invariant vortices in spin-orbit coupled

Bose-Einstein condensates. Phys. Rev. 査読有, A 88, 2013.

DOI: 10.1103/PhysRevA.88.013621

4. N. T. Phuc, Y. Kawaguchi, and M. Ueda. Fluctuation-induced and

symmetry-prohibited metastabilities in spinor Bose-Einstein condensates.

Physical Review, 査読有, A 88, 2013.

DOI: 10.1103/PhysRevA.88.043629

5. S. Furukawa and M. Ueda. Integer Quantum Hall State in Two-Component Bose Gases in a Synthetic Magnetic Field. Physical Review Letters, 査読有, 111, 2013.

DOI: 10.1103/PhysRevLett.111.090401

6. D. M. Stamper-Kurn and M. Ueda. Spinor Bose gases: Symmetries, magnetism, and quantum dynamics. Reviews of Modern Physics 査読有, 85, 2013.

DOI: 10.1103/RevModPhys.85.1191

7. N. T. Phuc, Y. Kawaguchi and M. Ueda. Beliaev theory of spinor Bose-Einstein

condensates. Annals of Physics, 査読有,

328, 2013. DOI: 10.1016/j.aop.2012.10.004

8. S. Endo, P. Naidon, and M. Ueda. Crossover trimers connecting continuous and discrete scaling regimes. Physical Review A, 査読有, 86, 2012.

DOI: 10.1103/PhysRevA.86.062703

9. Z. F. Xu, Y. Kawaguchi, L. You, and M. Ueda. Symmetry classification of

spin-orbit-coupled spinor Bose-Einstein

condensates. Physical Review A, 査読有, 86, 2012. DOI: 10.1103/PhysRevA.86.033628

10. S. Furukawa and M. Ueda. Quantum Hall states in rapidly rotating two-component Bose gases. Phys. Rev. A, 査読有, 86, 2012. DOI: 10.1103/PhysRevA.86.031604

11. Y. Kawaguchi and M. Ueda. Spinor Bose-Einstein Condensates. Physics Reports, 査読有, 520, 253-381, 2012. DOI: 10.1016/j.physrep.2012.07.005

12. M. Ueda. Bose Gases with Nonzero Spin. Annu. Rev. Condens. Matter Phys. 査読有, 3, 263-283, 2012. DOI: 10.1146/annurev-conmatphys-020911-125033

13. S. Kobayashi, M. Kobayashi, Y. Kawaguchi, M. Nitta, and M. Ueda. Abelian homotopy classification of topological excitations under the topological influence of vortices. Nuclear Physics B, 査読有, 856, 577, 2012. DOI: 10.1016/j.nuclphysb.2011.11.003

14. Y. Kawaguchi and M. Ueda. Symmetry classification of spinor Bose-Einstein condensates. Physical Review A, 査読有, 84, 2011. DOI: 10.1103/PhysRevA.84.053616

15. P. Naidon and M. Ueda. The Efimov effect in lithium 6. Comptes Rendus Physique, 査読有, vol. 12, 13-26 2011. DOI: 10.1016/j.crhy.2010.12.002

16. S. Endo, P. Naidon, and M. Ueda. Universal physics of 2+1 particles with non-zero angular momentum. Few Body Systems, 査読有, 51, 207, 2011. DOI: 10.1007/s00601-011-0229-6

17. Y. Kawaguchi, H. Saito, K. Kudo, and M. Ueda. Spontaneous magnetic ordering in a ferromagnetic spinor dipolar Bose-Einstein condensate. Phys. Rev. A. 査読有, 82, 2010. DOI: 10.1103/PhysRevA.82.043627

18. S. Uchino, M. Kobayashi, and M. Ueda. Bogoliubov theory and Lee-Huang-Yang corrections in spin-1 and spin-2 Bose-Einstein condensates in the presence of the quadratic Zeeman effect. Phys. Rev. A. 査読有, 81, 2010. DOI: 10.1103/PhysRevA.81.063632

[学会発表] (総件数計 43 件)

1. M. Ueda, "Universality of the three-body parameter in Efimov physics", CIFAR Meeting on Cold Atoms, February 18-21, 2014 (talk 2/19), The Banff Centre, Canada.

2. M. Ueda, "Spinor Beliaev theory", The 2013 Summer Program of the Aspen Center for

Physics, (Aug. 4-24) (talk 8/8), Aspen, USA.

3. M. Ueda, "First-order quantum phase transition in spinor Bose-Einstein condensates", The 7th Cross-Strait and International Conference on Quantum Manipulation, June 28-30, The Institute of Physics, 北京 (6/29).

4. M. Ueda, "Symmetry Breaking and Topological Excitations in Bose-Einstein Condensates", Zurich Physics Colloquium, March 6, 2013, Zurich, Switzerland.

5. M. Ueda, "Topological Excitations in Ultracold Atoms", Quantum Technologies Conference III, Sep. 9-15, 2012, Warsaw, Poland. (keynote speech)

6. M. Ueda, "Topological Aspects in Ultracold Atomic Gases", International Conference on Topological Quantum Phenomena, May 16-20, 2012, Nagoya, Japan.

7. M. Ueda, "Topological Aspects in Ultracold Atoms", 34th International Workshop on Condensed Matter Theories (CMT34), Nov. 7-11, 2011, Pohang, Korea.

8. M. Ueda, "Efimov states in Fermionic Lithium 6", Workshop on Frontiers in Ultracold Fermi Gases, Jun. 6-10, 2011, Trieste, Italy.

9. M. Ueda, "Topological aspects of spinor Bose gases", Quantum Magnetism in Ultracold Atoms, May 15-19, 2011, Haifa, Israel.

10. M. Ueda, "Topological excitations in Bose-Einstein condensates", Nordita program on quantum solids liquids and gases, Jul. 19-Aug. 27, 2010, Stockholm, Sweden.

[その他]

ホームページ等

<http://cat.phys.s.u-tokyo.ac.jp/~ueda/>

6. 研究組織

(1) 研究代表者

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

(2) 研究分担者

川口 由紀 (KAWAGUCHI YUKI)
東京大学・大学院・工学系研究科・准教授
研究者番号: 00456261