

平成 21 年 5 月 28 日現在

研究種目：基礎研究 (C)
 研究期間：2007年—2010年
 課題番号：18540368
 研究課題名 (和文) ボース・アインシュタイン凝縮体の厳密解析とその応用
 研究課題名 (英文) Exact Analysis of Bose-Einstein Condensates and its Applications
 研究代表者 和達 三樹
 東京理科大学・理学部第二部・教授
 研究者番号：60015831

研究分野：物性基礎論、統計力学、非線形物理、数理科学、可積分系
 科研費の分科・細目：物理学 数理物理・物性基礎
 キーワード：ボース・アインシュタイン凝縮、多成分非線形シュレディンガー方程式、電磁誘導透過現象、ベレーテ仮説、BCS-BEC クロスオーバー、量子可積分系、逆散乱法、パリティ・時間対称ポテンシャル

1. 研究計画の概要

統計物理学や非線形物理学において発展された種々の解析的手法により、原子間相互作用を取り入れて、ボース・アインシュタイン凝縮体の生成機構と乗縮退の静的・動的性質を研究する。

(1) ボース粒子系とフェルミ粒子系の基本的特徴を明らかにする。現在、BCS-BEC クロスオーバー現象として活発な研究が行なわれている課題である。

(2) 相互作用が斥力か引力かによる基本的性質を明らかにする。フェシュバハ共鳴による相互作用の制御や擬1次元への拘束による散乱長の変化などが実験的に観測されているので、より詳細な解析が興味深い。

(3) 外部ポテンシャルの効果を議論する。BEC生成の全光学的プロセスが実現され、また、レーザー波干渉による光格子のトラップが可能になり、モット絶縁相—BEC相の転移などが議論できるようになった。

(4) 原子の内部自由度が関与する現象を解析する。磁気トラップにおいては内部自由度(スピン)は凍結されていたが、光学トラップの成功により、多彩な非線形スピン動力学が議論できるようになった。このスピン自由度は、量子情報における量子ビットとしても注目されている。

以上の研究課題を着実に遂行し、多くの成果を挙げたいと考える。

2. 研究の進捗状況

(1) 非線形光学における自己透過(SIT)現象

は1960年代に活発に研究され、ソリトン物理の確立に大きな役割を果たした。その拡張として、近年、電磁誘導透過(EIT)現象が多くの興味を集めている。2つのレーザー光とラムダ配位の3準位原子系の相互作用を調べ、可積分条件を見出すことに成功した。ソリトン解を構成し、伝播の性質を詳細に解析した。現在、多ソリトン解を求め、衝突の振る舞いを調べている。多成分ソリトン系として、高次スピン $F=1, F=2$ を持つボース・アインシュタイン系と密接な関係があり、さらに多くの興味深い成果が期待できる。

(2) デルタ関数型相互作用を持つ1次元スピン1/2フェルミ粒子形の基底状態をYang-Yangの積分方程式を使って解析した。解法は、和達(2002年)が導入した方法を拡張して用いた。引力相互作用系において外部磁場を含めた点は、特に野心的である。相互作用が強い場合と弱い場合をともに解析することができた。また、相互作用定数と磁場の関数として、磁化を求めた。完全に対形成した非分極相、対形成のない完全分極相、それらの共存相、の3つの相が存在し、それらの相間には量子転移があることを証明した。

(3) 量子力学系において、エネルギーが実数値であるためには、エネルギー演算子はエルミート(自己共役)でなければならないとされている。2008年の論文 M.Wadati: Construction of Parity-Time Symmetric Potential through the Soliton Theory, J.Phys. Soc.Jpn,77,074005-1~4(2008)にお

いて、ソリトン理論を用いれば、その反例が統一的に導かれることを示した。この成果は、**Editor's Choice** として表彰され、科学新聞や物理学会誌などに紹介された。

3. 現在までの達成度

区分①当初の計画以上に進展している
ベータ仮説における積分方程式の解法、スピノル型 Gross-Pitaevskii 方程式の可積分条件の発見、など当初の目的を達成している。さらに、電磁誘導透過現象の解析、パリティ・時間対称ポテンシャルの構成、などの予期しない発展があった。

4. 今後の研究の推進方策

(1) ベータ仮説法に置ける **Lieb-Liniger** 積分方程式、**Yang-Yang** 積分方程式の解法を進め、有限温度を含む一般論として完成させる。
(2) 高次超微細スピン ($F=2$) をもつ多成分ボース・アインシュタイン凝縮体の解析を行い、非線形物質波の基本的性質を明らかにする。
(3) 量子情報処理・量子コンピューターなどへの応用を考察する。

5. 代表的な研究成果

(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 8 件)

1. T. Iida and M. Wadati: Exact Analysis of a Delta-Function Spin 1/2 Attractive Fermi Gas with Arbitrary Polarization, *Journal of Statistical Mechanics: Theory and Experiment*, P06011-1~49 (2007).
2. T. Kurosaki and M. Wadati: Matter-Wave Bright Solitons with a Finite Background in Spinor Bose-Einstein Condensates, *J. Phys. Soc. Jpn.* 76, 084002-1~9 (2007).
3. M. Wadati: Electromagnetically Induced Transparency and Soliton Propagations, *J. Phys. Soc. Jpn.* 77, 024003-1~4 (2008).
4. T. Iida and M. Wadati: Exact Analysis of a Delta-Function Spin 1/2 Attractive Fermi Gas with an External Magnetic Field, *J. Phys. Soc. Jpn.* 77, 024006-1~8 (2008).
5. M. Wadati: Construction of Parity-Time Symmetric Potential through the Soliton Theory, *J. Phys. Soc. Jpn.* 77, 074005-1~5 (2008).
6. V. Ramesh Kumar, R. Radha and M. Wadati: Collisions of Solitons in Electromagnetically Induced Transparency, *Phys. Rev. A* 78, 041803-1~4 (2008).
7. A. Joseph, K. Porsezian and M. Wadati, Small Amplitude Solitons on a Pedestal in the Modified Nonlinear Schroedinger

Equation for Negative Index Materials, *J. Phys. Soc. Jpn.* 78, 044402-1~8 (2009).

8. M. Wadati: Soliton Propagations in the Electromagnetically Induced Transparency, *Eur. Phys. J. Special Topics* 173, 207-216 (2009).

[学会発表] (計 5 件)

1. 2005年 7月 国際会議 Low Temperature Physics, Exact Soliton Solutions of Spinor Bose-Einstein Condensates.
2. 2006年 6月 国際会議 Low Temperature Physics, Soliton Dynamics of $F=1$ Spinor Bose-Einstein Condensates with Nonvanishing Boundaries
3. 2006年 6月 国際会議 Low Temperature Physics, Nonlinear Dynamics of Spin Structure in Confined Bose-Einstein Condensates.
4. 2006年 6月 国際会議 Low Temperature physics, Exact Analysis of a One-Dimensional Attractive Delta-Function Fermi Gas with Arbitrary Spin Polarization.
5. 2008年 2月 国際会議 Recent Developments in Nonlinear Dynamics, India

[図書] (計 1 件)

M. Wadati: Solitons in the Bose-Einstein Condensates in "Nonlinear Dynamics", ed. M. Daniel and S. Rajasekar (Narosa Publishing House, 2009) pp.63-67.

[産業財産権]

○出願状況 (計 0 件)

○取得状況 (計 0 件)

[その他]