

平成22年6月25日現在

研究種目：若手研究（B）

研究期間：2008 ～ 2009

課題番号：20740206

研究課題名（和文） 異方的2次元量子系における分数粒子

研究課題名（英文） Fractional particles in anisotropic-two-dimensional quantum systems

研究代表者

河野 昌仙 (KOHNO MASANORI)

独立行政法人物質・材料研究機構・国際ナノアーキテクトニクス研究拠点・MANA 研究者

研究者番号：40370308

研究成果の概要（和文）：

1次元の分数量子数をもつ準粒子が鎖間プロセスによって高次元の整数量子数をもつ準粒子へとどのように移り変わっていくのかを、厳密解と鎖間弱結合理論を用いて調べた。その結果、分数量子数をもつ準粒子は鎖間プロセスによって結合状態を形成することがわかった。こうして得られた準粒子によって、フラストレートした異方的2次元反強磁性体の磁場中で観測されていた異常な動的性質を統一かつ定量的に説明することができた。

研究成果の概要（英文）：

We investigated how quasiparticles having fractional quantum numbers in one-dimensional chains change into those with integer quantum numbers in higher dimensions, by using a weak-interchain-coupling approach combined with exact solutions. We found that quasiparticles carrying fractional quantum numbers form bound states due to interchain processes. In terms of the resultant quasiparticles, anomalous dynamical features observed in a frustrated anisotropic-two-dimensional antiferromagnet in a magnetic field are quantitatively explained in a unified manner.

交付決定額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	1,800,000	540,000	2,340,000
2009年度	1,600,000	480,000	2,080,000
年度			
年度			
年度			
総計	3,400,000	1,020,000	4,420,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学・物性Ⅱ

キーワード：強相関系、スペクトル関数、厳密解、準粒子

## 1. 研究開始当初の背景

銅酸化物高温超伝導体の異常な金属状態の振る舞いや、フラストレートした磁性体におけるスピン液体的振る舞いなど、通常の古典的な理論では理解し難い現象が2次元強相関系で観測されている。それらの性質を説明するために、これまで多くの理論的提案がなされてきたが、様々な異常な振る舞いを統一的に説明するには至っていない。

一方、1次元系では、分数量子数をもつ準粒子によって基本的な物性が説明できることが、厳密解や低エネルギー有効理論の解析により確認されている。我々は、1次元反強磁性体の性質をもとにして、それらが弱く結合した系の動的性質を調べ、ゼロ磁場でのスピン液体的振る舞いを統一的に説明することに成功した。このアプローチは、粒子の統計性によらず、様々な系に適用することが可能なので、より一般的なボーズ粒子系やフェルミ粒子系に適用するにより、異方的2次元系における動的性質を、より統一的な観点から明らかにすることができると考えられる。

## 2. 研究の目的

本研究では、我々が開発した1次元からのアプローチを、フェルミ粒子系やボーズ粒子系（磁場中の磁性体）などの異方的2次元強相関系に適用し、1次元の分数量子数をもつ準粒子が鎖間プロセスによってどのように変化するかを明らかにすることを目的として研究を行った。

## 3. 研究の方法

厳密解を用いて1次元系のスペクトル関数を計算し、その結果をもとにして、鎖間弱結合理論によって異方的2次元系のスペクトル関数を計算した。

具体的には、ボーズ粒子系については、スピン1/2反強磁性ハイゼンベルグ鎖の動的構造因子  $S(k, \omega)$  を、また、フェルミ粒子系については、近接斥力のある1次元スピンレスフェルミオンモデルのスペクトル関数  $A(k, \omega)$  を、それぞれの厳密解を用いて計算した。

次に、鎖間ホッピングに関する弱結合理論である乱雑位相近似（RPA 近似）によって、1次元鎖が弱く結合した2次元系の動的構造因子およびスペクトル関数を計算した。これにより、自由電子描像や古典的磁気秩序のような従来の古典的理論の前提を仮定することなく、異方的2次元系の動的性質を精度良く調べることができる。

## 4. 研究成果

主な研究成果として、以下のことを挙げることができる。

- (1) 1次元反強磁性体の磁場中での動的性質  
これまで行われてきた1次元系に関する

多くの研究は、低エネルギー極限で有効な場の理論によるものであった。この理論によって、1次元系の低エネルギーの性質は、分数量子数をもつ準粒子によって良く説明できることが知られている。一方、1次元反強磁性体の中性子非弾性散乱実験によって、通常の高エネルギー理論では説明できない高エネルギーの励起が強いスペクトル強度をもつことが示唆されていた。そこで、1次元反強磁性体の全エネルギー領域にわたる動的性質を、厳密解を用いて系統的に調べた。その結果、通常の有効理論では無視されてきた、複素数パラメータで指定される2-ストリング解と呼ばれる解が、高エネルギー領域で大きなスペクトル強度をもつことがわかり（図1）、実験結果を定量的に説明することができた。また、それに伴って、分数量子数をもつ通常の1次元系の準粒子の他に、その結合状態と見なせる2-ストリングを表す準粒子も1次元反強磁性体の動的性質を議論する上で重要な役割を果たすことが明らかになった。

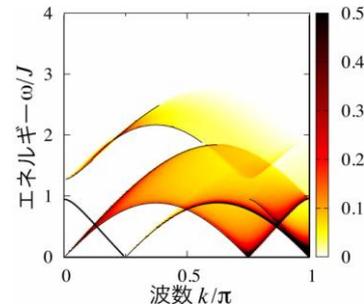


図1 スピン1/2反強磁性鎖の動的構造因子  $S(k, \omega)$  の計算結果. 高エネルギーの連続スペクトルは2-ストリング解によるものである.

- (2) 1次元スピンレスフェルミオンモデルの高エネルギーの性質

1次元反強磁性体のモデルは相互作用するボーズ粒子系と見なすことができるが、そのフェルミ粒子版である近接斥力をもつスピンレスフェルミオンモデルについても厳密解を用いた同様な解析を行った。その結果、反強磁性体の場合と同様に2-ストリング解が高エネルギー領域で大きなスペクトル強度をもつことが明らかになった。また、反強磁性体の結果と比較することにより、ギャップレス点やスペクトル関数の形状が粒子の統計性によって異なることがわかった。それらの違いは、厳密解を得る方法であるベータ仮設法の枠組みで直感的に説明することができる。つまり、解を特徴づける量子数（ベータ量子数）の分布が、粒子の統計性に依りて異なることから、ギャップレス点やスペクトル関数の形状などの違いを自然に理解できることがわかった。

(3) フラストレートした異方的2次元反強磁性体の磁場中での準粒子

1次元反強磁性体の磁場中の結果をもとにして、鎖間弱結合理論によってフラストレートした異方的2次元反強磁性体の磁場中での動的性質を調べた。その結果、1次元の準粒子が鎖間結合によって結合状態を形成し、それが異方的2次元系の準粒子として振る舞うことがわかった。こうして得られた準粒子は、古典的秩序に基づくスピン波理論で得られるマグノンとは異なる性質を示す。

- ① 通常のマグノンは磁場中で連続的に変形するのに対して、1次元準粒子の結合状態は、磁場中で多粒子遷移する。つまり、低磁場で大きなスペクトル強度を持っていた準粒子は磁場とともに消滅し、磁場中で誘起される別の準粒子が高磁場領域で大きなスペクトル強度をもつ (図2)。
- ② 通常のマグノンは、波数  $k=\pi$  付近にギャップレス点をもち、磁場に対して垂直な面内の揺らぎに関する秩序を示す。それに対して、1次元準粒子の結合状態は、磁気的フラストレーションのために波数  $k=\pi$  付近の揺らぎはほぼ1次元系のまま残り、非整合波数  $k_x=\pi \pm 2\pi m$  ( $m$ : 1サイトあたりの磁化) にギャップレス点をもつ。これにより、スピン密度波的な非整合秩序が生じることが示唆される。
- ③ 通常のマグノン描像では理解することができない高エネルギーのモードが現れることを、2-ストリング解を用いた解析によって示すことができた。

このような違いから、1次元準粒子の結合状態を、通常のマグノンと区別して、異方的2次元スピン液体の準粒子とみなすことができると考えられる。

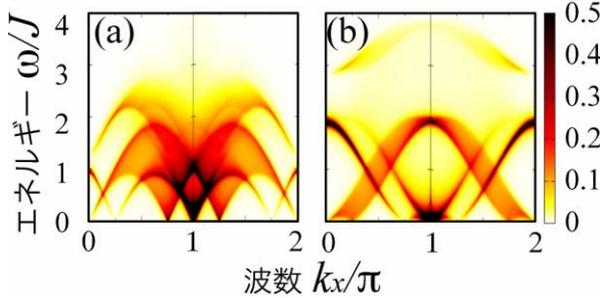


図2 異方的三角格子上的スピン1/2反強磁性体の動的構造因子  $S(\mathbf{k}, \omega)$  の計算結果. (a) 低磁場領域. (b) 高磁場領域.  $k_x=0$  や  $2\pi$  付近のモードが高磁場で大きなスペクトル強度をもつ.

(4) 異方的2次元フラストレート系の斥力の強い極限での動的性質

斥力の強い極限を取ることによって、上述の準粒子描像に対して、より直感的な解釈を与えることができた。スピンレスフェルミオ

ン系では近接斥力がホッピングに比べて強い極限、また、反強磁性体では一軸異方性が強い極限において、1次元鎖のスペクトル関数や動的構造因子の解析的な表式が得られる。さらに斥力の空間的異方性が強い極限において、我々の1次元からのアプローチは厳密になるので、1次元の厳密解を用いて異方的2次元系のスペクトル関数や動的構造因子、さらには分数電荷 (または分数スピン) 間の相関関数を厳密に計算することができた (図3)。その結果、鎖間ホッピングによって誘起される結合状態は、実空間で結合した状態とみなすことができ、分数電荷間の相関は指数関数的に減衰することがわかった。また、その相関長は、連続スペクトルの端に到達すると発散し、連続スペクトル内では分数電荷をもつ準粒子として振る舞うことも明らかになった。

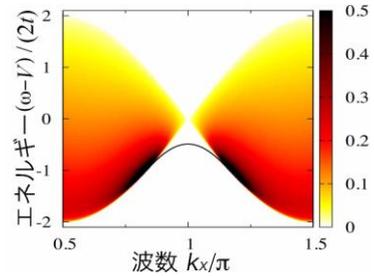


図3 異方的三角格子上的スピンレスフェルミオンモデルのスペクトル関数  $A(\mathbf{k}, \omega)$  の計算結果 (斥力が強い極限). 実線は分数電荷をもつ準粒子の結合状態を示す.  $V$  は斥力相互作用の強さ、 $t$  は鎖内ホッピングの強さである.

以上のような異方的2次元系に関する結果から、1次元の分数量子数をもつ準粒子は、鎖間プロセスによって整数量子数をもつ結合状態を形成することがわかった。このようにして得られた準粒子は必ずしも、古典的な理論で得られる準粒子と同じ性質を示すとは限らない。その違いは、準粒子の形成メカニズムに起因しており、今回得られた準粒子は、従来の古典的理論で仮定されている秩序状態や自由粒子からの摂動によって得られるのではなく、鎖間を1次元準粒子が移動することによる運動エネルギー利得によって生じている。

また、1次元系の高エネルギーの動的性質に関する結果から、斥力相互作用する1次元系の高エネルギー領域には、2-ストリング解に起因する連続帯が一般的に現れると考えられる。このような励起は、低エネルギーの有効理論では現れないものであり、ハバードモデルの上部ハバードバンドと関連する励起であると考えられる。

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 8 件)

- ① Masanori Kohno, Mitsuhiro Arikawa, Jun Sato, Kazumitsu Sakai, Spectral Properties of Interacting One-Dimensional Spinless Fermions, Journal of Physical Society of Japan, 査読有、Vol. 79, No.4, 2010, 043707 (1-4).
- ② Masanori Kohno, Quasiparticles of string solutions in the spin-1/2 antiferromagnetic Heisenberg chain in a magnetic field, Journal of Physics: Conference Series, 査読有、Vol.200, No.2, 2010, pp. 022027 (1-4).
- ③ Masashi Hase, Andreas Dönni, Vladimir Yu. Pomjakushin, Lukas Keller, Fabia Gozzo, Antonio Cervellino, Masanori Kohno, Magnetic structure of  $\text{Cu}_2\text{CdB}_2\text{O}_6$  having magnetization plateau and antiferromagnetic long-range order, Journal of Physics: Conference Series, 査読有、Vol.200, No.2, 2010, pp. 022015 (1-4).
- ④ Masanori Kohno, Quasiparticles of Spatially Anisotropic Triangular Antiferromagnets in a Magnetic Field, Physical Review Letters, 査読有、Vol.103, No.3, 2009, pp. 197203 (1-4).
- ⑤ Masanori Kohno, Dynamically Dominant Excitations of String Solutions in the Spin-1/2 Antiferromagnetic Heisenberg Chain in a Magnetic Field, Physical Review Letters, 査読有、Vol.102, No.3, 2009, pp. 037203 (1-4).
- ⑥ Masanori Kohno, Leon Balents, Oleg A. Starykh, Dynamical properties of spatially anisotropic frustrated Heisenberg models in a magnetic field, Journal of Physics: Conference Series, 査読有、Vol.145, No.1, 2009, pp. 012062 (1-4).
- ⑦ Masanori Kohno, Bound states of spinons in spatially anisotropic frustrated XXZ models in the Ising limit, Journal of Physics: Conference Series, 査読有、Vol.150, No.4, 2009, pp. 042097 (1-4).
- ⑧ Masashi Hase, Andreas Dönni, Vladimir Yu. Pomjakushin, Lukas Keller, Fabia Gozzo, Antonio Cervellino, Masanori Kohno, Magnetic structure of  $\text{Cu}_2\text{CdB}_2\text{O}_6$  exhibiting a quantum-mechanical magnetization plateau and classical antiferromagnetic long-range order, Physical Review B, 査読有、Vol.80, No.10, 2009, pp. 104405 (1-4).

[学会発表] (計 18 件)

- ① 河野昌仙, 低次元量子スピン系の準粒子に関する理論的研究、日本物理学会第 65 回年次大会、2010 年 3 月 21 日、岡山大学.
- ② 河野昌仙, Quasiparticles of the spin-1/2 Heisenberg antiferromagnet on an anisotropic triangular lattice in a magnetic field, Annual APS March Meeting 2010, 2010 年 3 月 17 日、Portland (アメリカ).
- ③ 河野昌仙, Quasiparticles of the spin-1/2 Heisenberg antiferromagnet on an anisotropic triangular lattice in a magnetic field, International Symposium on Physics of New Quantum Phases in Superclean Materials PSM2010, 2010 年 3 月 10 日、はまぎんホール、横浜.
- ④ 河野昌仙, 異方的三角格子反強磁性体における磁場中での粒子、特定領域研究「フラストレーションが創る新しい物性」平成 21 年度成果報告会、2010 年 1 月 9 日、京都大学基礎物理学研究所.
- ⑤ 河野昌仙, 擬 1 次元反強磁性体における準粒子、物性セミナー、2009 年 12 月 18 日、東京大学駒場キャンパス.
- ⑥ 河野昌仙, Quasiparticles in quasi-one-dimensional antiferromagnets, 第 1 回 MANA/NIMS-CEMES/CNRS 合同ワークショップ、2009 年 10 月 14 日、Chateau de Larroque, トゥールーズ (フランス).
- ⑦ 河野昌仙, 異方的三角格子スピンレスフェルミオン系における準粒子電荷の分数化、日本物理学会 2009 年秋季大会、2009 年 9 月 28 日、熊本大学.
- ⑧ 河野昌仙, Quasiparticles of string solutions in the spin-1/2 antiferromagnetic Heisenberg chain in a magnetic field, International Conference on Magnetism (ICM)、2009 年 7 月 30 日、Karlsruhe, ドイツ.
- ⑨ 河野昌仙, Quasiparticles in spatially anisotropic frustrated antiferromagnets in a magnetic field, Euro-Japan Joint conference on Frustration in Condensed Matter、2009 年 5 月 13 日、Lyon (フランス).
- ⑩ 河野昌仙, 異方的三角格子反強磁性体における磁場中での粒子描像の変化、日本

- 物理学会第 64 回年次大会、2009 年 3 月 27 日、立教大学.
- ⑪ 河野昌仙、Dynamically dominant excitations of string solutions in the antiferromagnetic Heisenberg chain in magnetic fields、APS March Meeting 2009、2009 年 3 月 19 日、Pittsburgh (アメリカ).
  - ⑫ 河野昌仙、異方の三角格子反強磁性体における磁場中での粒子、MANA International Symposium 2009、2009 年 2 月 26 日、つくば国際会議場.
  - ⑬ 河野昌仙、異方の三角格子反強磁性体における磁場中での粒子、特定領域研究「フラストレーションが創る新しい物性」平成 20 年度領域成果報告会、2009 年 1 月 9 日、東京大学物性研究所.
  - ⑭ 河野昌仙、異方の三角格子反強磁性体における磁場中での粒子描像の変化、第 3 回トピカルミーティング「フラストレーションとスピン液体」、2008 年 12 月 23 日、神戸大学.
  - ⑮ 河野昌仙、磁場中で現れるハイゼンベルグ鎖の隠れた励起、日本物理学会 2008 年秋季大会、2008 年 9 月 21 日、岩手大学.
  - ⑯ 河野昌仙、Dynamical properties of spatially anisotropic frustrated Heisenberg models in a magnetic field、Highly Frustrated Magnetism 2008 (HFM 2008)、2008 年 9 月 10 日、Braunschweig (ドイツ).
  - ⑰ 河野昌仙、Bound states of spinons in spatially anisotropic frustrated XXZ models in the Ising limit、25th International Conference on Low Temperature Physics (LT25)、2008 年 8 月 9 日、Amsterdam (オランダ).
  - ⑱ 河野昌仙、Effective Hamiltonian approach for dynamical properties of spatially anisotropic frustrated antiferromagnets、WMRIF Workshop for Young Scientists、2008 年 7 月 23 日、物質・材料研究機構.

[その他]

ホームページ等

[http://www.nims.go.jp/mana/members/personal/m\\_kohno/Japanese/menu/mhome.htm](http://www.nims.go.jp/mana/members/personal/m_kohno/Japanese/menu/mhome.htm)

## 6. 研究組織

### (1) 研究代表者

河野 昌仙 (KOHNO MASANORI)

独立行政法人物質・材料研究機構、  
国際ナノアーキテクトニクス研究拠点、

MANA 研究者

研究者番号：40370308

(2) 研究分担者  
なし

(3) 連携研究者  
なし