

平成21年 6月 2日現在

研究種目：基盤研究（C）
 研究期間：2005～2008
 課題番号：17540265
 研究課題名（和文） スピンに依存する電子間有効相互作用を用いた量子ドットの研究
 研究課題名（英文） Spin-dependent effective interaction and its application to quantum dots
 研究代表者
 高柳 和雄（TAKAYANAGI KAZUO）
 上智大学・理工学部・教授
 研究者番号：30183859

研究成果の概要：

応答関数に関しては、強磁場でスピンを制御した2次元電子系（量子ホール系）のスピンの応答関数と、それが低密度側で示す不安定性の間の関係を明らかにした。その立場から、filling factor が2の系に対して密度とゼーマンエネルギーで指定される平面上での磁気相図を完成した。有効相互作用に関しては、多重散乱の効果スピンを依存する電子間有効相互作用として、使いやすいSkyrme型のポテンシャルで表し、いくつかの応用により、その有用性を示した。

交付額

(金額単位：円)

	直接経費	間接経費	合計
2005年度	600,000	0	600,000
2006年度	500,000	0	500,000
2007年度	500,000	150,000	650,000
2008年度	500,000	150,000	650,000
年度			
総計	2,100,000	300,000	2,400,000

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：有効相互作用、スピン相関、近距離相関、相転移

1. 研究開始当初の背景

近年の実験技術の進歩に伴い、2次元電子系（量子井戸）および、さらに電子の運動を制限した1次元電子系（量子細線）、0次元電子系（量子ドット）が精度よく作られて、それらの性質が様々な立場から調べられている。その結果、特にスピン自由度に関する様々な性質がわかってきた。特に2次元電子系においては、1999年にEriksson達によりおこなわれたスピン励起の応答関数の測定により、 $r_s \sim 10$ 以上において系がスピン揺らぎに対して不安定になる不だろろうというこ

とが予測された。また、同じころから量子ドットの基底状態としてスピン密度波状態が基底状態として実現する可能性が、実験的にも理論的にも指摘され始めた。これらの結果は、クーロン力をそのまま使ったそれまでの平均場理論では説明できないものであった。

2. 研究の目的

上にあげたような電子系のスピンに関する性質を、スピン自由度を取り入れた電子間有効相互作用の性質により理解することが大

きな目的である。特に、スピンの依存する有効相互作用の導出、スピン密度波状態が系の基底状態として実現される可能性とそのメカニズムの理解を具体的な目標とした。

3. 研究の方法

研究の方向は、大きく次の3つに分かれる。(1)電子系に対する応答関数の作成と、それが示唆する系の不安定性と相転移との関係の研究。(2)電子系におけるスピン自由度を取り込んだ有効相互作用の作成及びその性質の研究。(3)有効相互作用の電子系への応用。以下、これらを簡潔に説明する。

(1)まず、バルクな2次元電子系に対する応答関数を RPA およびその拡張版である Extended RPA により調べ、どのようなプロセスがスピン密度励起(SDE)の性質を決めているのかを調べる。それと同時に SDE の不安定性がみられる場合、どのような基底状態が実現するのかを見る必要がある。これは不安定化した SDE ボソンが凝縮する形でスピン密度波状態へ相転移をおこすプロセスを記述することになる。これらは、スピンを制御した2次元電子系である量子ホール系に対してまず行った。

(2)電子間の有効相互作用の作成は、まず G 行列の理論に基づいておこなう。2次元電子系において、スピンの依存する電子間有効相互作用の作成は、(陽子数と中性子数の違い)非対称核での G 行列の作成に倣って行われる。

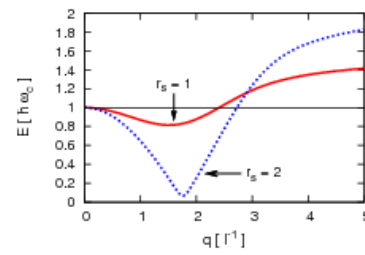
(3)出来上がった有効相互作用を電子系の基底状態及び励起状態の記述に応用する。基底状態に対しては、BHF や HFB の理論を適用し、励起状態に対しては RPA およびその拡張版である Extended RPA を使うことができる。

4. 研究成果

上にあげた3つの研究方向における研究成果を説明する。

(1) RPA の応答関数と、その解が示す不安定性に関しては、原子核ではよく知られている。また、不安定性を示すボソン解の凝縮という形で新しい平均場状態が近似できることもわかっている。われわれは、強磁場下でスピンを制御したバルクな2次元電子系である量子ホール系に対してこれらの考えによる解析を行った。それにより、(i)電荷密度励起(CDE)の応答関数は RPA および Extended RPA で調べても不安定性を起ささないことが確かめられた。(ii)それに対してスピン密度励起(SDE)の RPA の応答関数は $rs \sim 2$ 程度で次の図のように不安定性を示すことが確認できた。この図は SDE の分散関係を $rs=1$

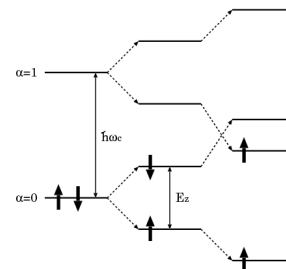
と $rs=2$ に対して示しているが、 $rs=2$ では $q \sim 1.8$ 程度のところで分散関係が急に下がり、



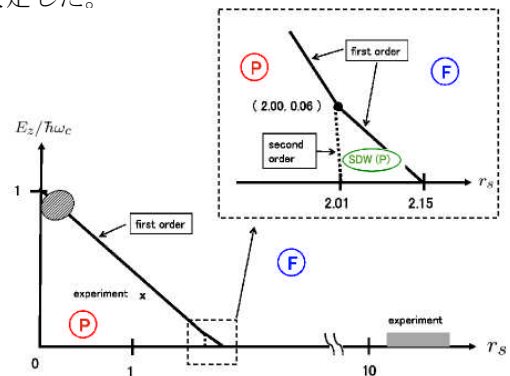
SDE の励起に対し系が不安定化することを示している。さらにその不安定性は、スピン密度波(SDW)状態への相転移点を決めていることを確認した。また、 $rs \sim 2$ 程度以上の SDW 状態を HF の理論で記述し、その性質を調べることができた。

また、RPA の応答関数は $rs \sim 2$ 程度で不安定性を示したのに対し、2粒子2空孔の自由度まで取り込んだ Extended RPA では $rs \sim 5$ 程度まで密度を下げて、励起スペクトルはソフト化するものの、不安定にはならないことも分かった。これらの成果により、スピンの依存する SDE のチャンネルに関しては実験事実を矛盾なく説明することができた。

次に、さらにスピンの自由度を見るために、電子系に斜めに磁場をかけることで導入されるゼーマンエネルギー E_z の効果を調べた。次の図に示すように、 $\nu=2$ の系は、電子間の相関がなければ、 E_z を大きくしていくと、常磁性相から強磁性相に変化していく。



この系に対して、応答関数を計算し、その解が不安定になる領域で HF 計算を実行することにより、 (rs, E_z) 平面上での系の基底状態を決定した。

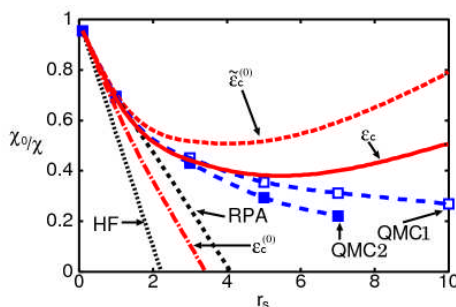


この結果は上の(rs, Ez)平面上での相図にまとめられている。この図は、rs と Ez が小さなおとこでは系は常磁性相にあり、その反対側では強磁性相になっていて、それらの境界は1次相転移になっていることを示している。また、rs ~ 2 で Ez が小さなおとこに SDW 状態が基底状態として実現される領域があることを示している。また、SDW 状態と常磁性状態との境界は2次転位である。

(2) 電子系においては、クーロン力が長距離力であるために、2次以上の多重2次以上の多重乱による部分を、近距離相関を表す G-行列と定義し、これと(1次の)クーロンポテンシャルを同時に扱っていく必要がある。G-行列は、相互作用する2電子のスピンの方向、及び媒質中のスピン分極、に依存する形の Skyrme 型有効相互作用として次の使いやすい形で表すことに成功した。

$$g = \alpha \delta(r) + \beta (\nabla^2 \delta(r) + \delta(r) \nabla^2) + 2\gamma \nabla \delta(r) \nabla$$

ここで係数 α 、 β 、 γ は密度とスピン偏極の関数であり、スピン変数に依存している。この有効相互作用がどれほどスピン相関を正しく表しているかを見るために、もっとも直接的にスピン感受率を計算した結果を示す。



この図を見れば、我々の Skyrme 型有効相互作用による相関エネルギー ϵ_c を使った線は、RPA や HF に比べて量子モンテカルロ (QMC) の結果に非常に近いことが見て取れる。これは、上の Skyrme 型有効相互作用の有用性を如実に示す結果地になっている。

次にバルクな2次元電子系の応答関数に対する効果を調べ、我々の有効相互作用が有用であることを確認した。

有効相互作用を多重散乱を足し上げることで表す Lippmann-Schwinger 方程式は、主値積分で定義された Green 関数を使ってあらわされる。これは一般に R 行列理論といわれ、普通に使われる T 行列理論と対比される。R 行列理論では散乱状態は直交系を成さないため、双直交基底を導入する必要があり、その取り扱いが大変であったが、この研究で双直交基底の満たす方程式を導出し、R 行列理論を完成させることができた。

(3) 強磁場下の電子の多体系の記述に HFB 理

論を使うためには系の位相をコントロールできる形で Bogoliubov 変換を行うことが重要である。この方向では、どのようなユニタリ変換の演算子が群論的性質を持つかを明らかにした。その変換を使うことにより系の位相をユニークに定めながら Bogoliubov 変換を導入することが可能になった。

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] (計 10 件)

① Kanako Yoshizawa and Kazuo Takayanagi,

Magnetic Phase diagram of nu=2 quantum Hall systems,

Physical Review B79, 125321(15pages), 2009, 査読有

② Kanako Yoshizawa and Kazuo Takayanagi,

Spin instability and phase diagram of nu=2 quantum Hall systems,

Journal of Physics: Conference Series, 150, 042242(4pages), 2009, 査読有

③ Kanako Yoshizawa and Ysutami Takada,

New general scheme for improving accuracy in implementing self-consistent iterative calculations: illustration in the STLS theory,

Journal of Physics: Condensed Matter, 21, 064204(8pages), 2009, 査読有

④ Sachiko Takeuchi and Kiyotaka Shimizu

Physical Review C79, 045204(1-12), 2009

Lambda(1405) resonance in baryon-meson scattering with a bound state embedded in the continuum. 査読有

⑤ Kazuo Takayanagi,

Utilizing group property of Bogoliubov transformation,

Nuclear Physics, A808, 17-26, 2008, 査読有

⑥ Kazuo Takayanagi,

Completeness relation in the R-matrix theory of scattering,

Physical Review, A77, 062714(6pages), 2008, 査読有

⑦ Kanako Yoshizawa and Kazuo Takayanagi,

Spin instability of integer quantum Hall systems,
Physical Review B76, 155329(9pages),
2007, 査読有

⑧ Sachiko Takeuchi and Kiyotaka Shimizu
 Λ (1405) as a resonance in the baryon-meson scattering coupled to the q_3 state in a quark model,
Physical Review C76, 035204(11pages),
2007, 査読有

⑨ Sachiko Takeuchi and Kiyotaka Shimizu
Physical Review C71, 062202(1-5), 2005
Pentaquark as a NK^* Bound State with $TJ = 0 \ 3/2$. 査読有

⑩ Kanako Yoshizawa and Kazuo Takayanagi,
Charge-density response function of two-dimensional electron systems in a magnetic field,
Physical Review B71, 125118(17pages),
2005, 査読有

[学会発表] (計 8 件)

① Kazuo Takayanagi,
Effective interaction in electron systems
YITP workshop on development of nuclear structure models from the viewpoint of nuclear force,
Yukawa Institute for Theoretical Physics,
Kyoto, 20-22 May 2009

② Kanako Yoshizawa and Kazuo Takayanagi,
Spin instability and phase diagram of $\nu=2$ quantum Hall systems,
25th International Conference on Low Temperature Physics, August 2008, Amsterdam

③ 吉澤香奈子、高柳和雄
整数量子ホール系における常磁性相及び強磁性相の不安定性、
日本物理学会第63回年次大会 (2008年3月)、
立教大学

④ Sachiko Takeuchi and Kiyotaka Shimizu
Proceedings of the Sendai International Symposium on Strangeness in Nuclear and Hadronic Systems. Sendai, Dec. 15-18, 2008.

Λ (1405) in a baryon-meson scattering described from a quark-model viewpoint

⑤ 吉澤香奈子、高柳和雄
量子ホール系におけるスピン偏極不安定性、
日本物理学会第62回年次大会 (2007年9月)、
北大

⑥ Sachiko Takeuchi and Kiyotaka Shimizu
Proceedings of the 11th International Conference on Meson-Nucleon Physics and the Structure of the Nucleon.
IKP, Juelich, Germany, Sep.10-14, 2007.
 Λ (1405) as a resonance in the baryon-meson scattering coupled to the q_3 state in a quark model.

⑦ 吉澤香奈子、高柳和雄
2層 $\nu=2$ 量子ホール系の相転移、
日本物理学会秋季大会 (2007年3月)、
鹿児島大

⑧ 吉澤香奈子、高柳和雄
量子ホール系におけるスピン密度励起のソフト化と相転移、
日本物理学会秋季大会 (2006年9月)、
奈良女子大

6. 研究組織

(1) 研究代表者

高柳 和雄 (TAKAYANAGI KAZUO)
上智大学・理工学部・教授
研究者番号：30183859

(2) 研究分担者

清水 清孝 (SHIMIZU KIYOTAKA)
上智大学・理工学部・教授
研究者番号：00143363
吉澤 香奈子 (YOSHIZAWA KANAKO)
上智大学・理工学部・研究員
研究者番号：70439339

(3) 連携研究者

なし