

研究課題別評価

1. 研究課題名： 基底状態の質的变化としての量子相転移
2. 研究者氏名： 初貝 安弘
3. 研究のねらい

物質の特定の状態である「相」Phase と、それが劇的に変化する現象である相転移は物理学において常に基本的概念であった。熱揺らぎにより引き起こされる転移はニュートン以来の古典力学に従うもので基本的には古典的な相転移といえる。一方で現実の物理現象、たとえば物質の形態、変化などは現代的には量子力学に従うと考えられ、現代の物質科学ならびにその上に構成される情報化社会は（意識されることが少ないとはいえ）、その基礎を量子力学におくといえる。この量子力学によると熱揺らぎの存在しない絶対零度においてすら量子力学に起因する量子揺らぎが存在し物質、および物理系の基底状態はその量子揺らぎを十分に取り込んだもとで構成されることとなる。この量子力学による物質の基底状態に注目したとき、系の何らかのパラメータ、例えば粒子密度、磁場の強さなどを連続に変化させたとき引き起こされる変化は、必ずしも連続変化ではなく急激かつドラスティックなものである場合も多い。これが「量子相転移」といわれる現象で、今回の私の研究テーマ「基底状態の質的变化としての量子相転移」において研究対象としたものである。特に現実の物質には必ず存在する「ランダムネス（乱れ）」の効果と、同種の電荷間に働くクーロン斥力に起因する「電子相関、相互作用」の 2 つをキーワードとして取り上げそれらの対比、もしくはそれらの共存効果に着目したものに注目し研究を行った。

4. 研究結果及び自己評価

研究のねらいに沿った以下の幾つかの研究テーマに関して研究を行い、それぞれの分野で有益な成果を得た。その結果はそれぞれ数編の研究論文として、読者付きの権威ある欧文誌に出版した（論文リスト参照）。

- [A] 量子相転移の典型例である量子ホールプラトー間転移
- [B] 強相関電子系におけるモット転移近傍における乱れの効果
- [C] アンダーソン局在における電子相関の効果
- [D] 量子ホールプラトー間転移の応用としての超伝導体における量子相転移

また、これらの研究においては数値的手法が必須の技術であり、この数値的手法にも特に独立して興味を持ち、方法論的ブレークスルーを目指した研究を進めた。その成果として、幾つかの数値計算のためのプログラムを完成させた。相互作用の無いランダム系と相互作用の強い乱れの無い系とは歴史的には独立した分野として研究が進められてきたわけだが、これらの 2 つの異なる分野で開発されてきたいくつもの手法を、他の分野へ応用ならびに転用する可能性を探りつつ新しい手法の開発も行ってきた。

特筆する点としては研究テーマ [D] に関しては当初計画していなかった発展が研究の遂行中にあり、現在も関連論文を執筆中である。

基本的には当初の計画通りに研究を遂行することが出来、その成果も順調に出版することが

出来た。量子相転移という観点は、本研究期間に物性物理、材料科学においてますます重要かつ基本的な概念であることが広く認識されるに至り、研究分野が急速に拡がりつつある。これは本研究テーマならびにその成果が、ある種「先駆け」としての視点を持っていたことを意味すると考えている。特に研究テーマ[D]に関しては、『トポロジカルな』量子相転移としてもう一步新しい局面を開きうる側面を持ち、今後研究を精力的に進めていきたい。

最終的に、本研究プロジェクトを自己総括すれば大成功であったと考えている。

今後の展開

個々の研究テーマに関しても、その研究がすべて完了したわけではなく、今後とも継続的に研究を進めていく予定である。特に、『トポロジカルな』量子相転移の観点は概念的にも重要かつ新規なものを含み、今後の発展を期待している。更に、本研究期間において、幾つか見出された数値的研究手法における新たなブレークスルーに至りうる「種」を、真のブレークスルーを目指して発展させていきたい。

5. 領域総括の見解

本領域の中心課題である「状態と変革」には、物質の電子状態とそのダイナミクスを量子力学的に綿密に解明するための最先端の理論的方法を開拓する必要がある。本研究は同期 20 名の本研究領域研究者の中で、ただ一人の理論研究者であり、提案された独自の理論構築によって、他の実験研究者の研究推進に役立つ理論モデルを与えるとともに、新規な実験データの中から新しいアイデアを汲み取ることが期待され、第 2 期研究者として採用された。3 年間の研究期間の成果が高度な水準のものであることは、国際学術誌の公表された多くの英文研究論文によって明らかである。特に、「量子相転移」に関する本研究者の理論は、第 3 期研究者を含む本研究領域研究者の行なっている実験と直接に関係するものと思われ、両者の間での積極的交流が今後も進められることを期待したい。

6. 主な論文等

- 1) Y. Hatsugai, Y. Morita, X.-G. Wen, and M. Kohmoto, "Disordered Critical Wave Functions of Two-Dimensional Dirac Fermions on a Lattice", Physica B249-251 796-800 (1998).
- 2] Y. Morita and Y. Hatsugai, "Scaling near random criticality in two-dimensional Dirac fermions", Phys. Rev. B58, 6680-6683 (1998).
- 3) Y. Otsuka, Y. Morita, Y. Hatsugai, "Collapse of Charge Gap in Random Mott Insulators", Phys. Rev. B58 15314-15316 (1998).
- 4) Y.Hatsugai, K. Ishibashi, and Y. Morita, "Sum Rule of the Hall Conductance in Random Quantum Phase Transition", Phys. Rev. Lett. 83,2246-2249(1999).
- 5) Y. Hatsugai and Y. Morita, "Delocalized States of the Quantum Hall Effect in the Weak Magnetic Field", Physica B: Condensed Matter, Vol. 284, Part 2, July 2000, Pages 1724-1725 (2000)

- 6) Y. Morita, K. Ishibashi and Y. Hatsugai, "Transition from Quantum Hall State to Anderson Insulator: Fate of Delocalized States", Phys. Rev. B61,15952 (2000).
- 7) Y. Morita and Y. Hatsugai, "Plateaux Transitions in the Pairing Model: Topology and Selection Rule", Phys. Rev. B62,99(2000)
- 8) K. Hoshi and Y. Hatsugai, "Exact Landau Levels from Quantum", Phys. Rev. B61, 4409-4412 (2000).
- 9) Y. Otsuka and Y. Hatsugai, "Numerical Study of the effects of disorder on the three-dimensional Hubbard model", J. Phys. C, Condensed Matter 12, 9317-9322 (2000).
- 10) Y. Hatsugai and A. Sugi, "Effects of interaction for the quantum diffusion in coupled chains", Int. J. Mod. Phys. B 15, 2045-2052 (2001).
- 11) Y. Morita and Y. Hatsugai, "Duality in the Azbel-Hofstadter problem and the two-dimensional d-wave superconductivity with a magnetic field", Phys. Rev. Lett 86,51-154(2001).
- 12) Y. Morita and Y. Hatsugai, "Breakdown of the IQHE and the Selection Rule", Physica B 298, 24-27 (2001).
- 13) S. Ryu and Y. Hatsugai, "Numerical Replica Limit for the Density Correlation of the Random Dirac Fermion", Phys. Rev. B63, 233307, (2001).
- 14) "T. Matsumoto and Y. Hatsugai", Numerical Study of Delocalized States in an Extended Network Model", preprint.
- 15) Y. Otsuka and Y. Hatsugai, "Mott Transition in the Two-Dimensional Flux Phase", to appear in Phys. Rev B 2002.
- 16) Y. Otsuka, Y. Morita, and Y. Hatsugai, "Anisotropy on the Fermi surface of the two-dimensional Hubbard model", submitted to Phys. Rev. Lett.
- 17) S. Ryu and Y. Hatsugai, "Singular Density of States of Disordered Dirac Fermions in the Chiral Models", to appear in Phys. Rev B 2002.
- 18) 初貝安弘, "量子ホール効果---その幾何学的構造と代数的構造", 物性若手夏の学校 2001 講義録および物性研究 2002 出版予定.
- 19) "Correlation Effects on the Fermi Surface of the two dimensional Hubbard model", (Y. Otsuka, Y. Morita, and Y. Hatsugai), to appear in Physics and Chemistry of Solids, 2002.
- 20) "Topological Quantum Phase Transitions in Superconductivity on Lattices", (Y. Hatsugai and S. Ryu), cond-mat/0111077, submitted to PRL.
- 21) "Topological Origin of Zero energy Edge State in Particle-Hall Symmetric Systems", (S. Ryu and Y. Hatsugai), preprint.