

VII - 1. 凝縮系理論グループ

教授	有光 敏彦, 初貝 安弘
准教授	谷口 伸彦, 宮崎 州正
助教	吉田 恭
研究科特別研究員	有川 晃弘
学振ポスドク	池田 昌司
博士前期課程大学院生	3名
博士後期課程大学院生	5名
社会人早期修了プログラム	1名
学群生 (卒業研究)	3名
研究留学生	1名

[1] 間欠性を呈する流動系の非平衡統計物理

- (1) マルティフラクタル確率密度関数理論 (MPDFT) (有光) 著書 [1],
 解説・紀要 [1], 講演 [1, 4, 5, 8, 10, 11]

MPDFT (Multifractal Probability Density Function Theory) は、『間欠性の本質は、Navier-Stokes 方程式のスケール不変性に起因する速度場の特異性が実空間にマルティフラクタル分布していることの現れである』との仮説に基づいて、古典乱流および量子乱流などで得られる裾の広い各種確率密度関数 (PDF) の高精度解析を可能にした理論体系である。

乱流のアンサンブル理論の基礎となるカスケード・モデルにおいては、大きなスケールで注入されたエネルギーによってサイズ l_{in} の渦が生まれ、この渦は流れに沿って移動する過程でサイズ $l_{in} \delta^{-1}$ の渦に分裂し、次々に小さな渦 (サイズ $l_{in} \delta^{-n}$, $n = 1, 2, 3, \dots$) が生まれ出されると考える。ただし、 $\delta (> 1)$ はズーム率を表す。大小様々なスケールの渦の存在は、Navier-Stokes 方程式の持つスケール不変性により、速度場などの物理量に特異性をもたらす。MPDFT では、その特異性が、乱流における間欠現象を司るとするのである。

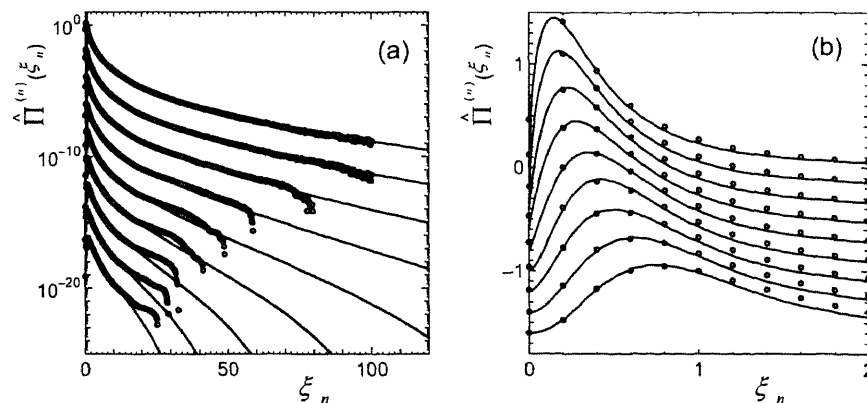


図 1: The PDFs of energy dissipation rates for $\delta = 2^{1/2}$ on (a) log and (b) linear scale. Open circles are the DNS data points. Solid lines represent the curves given by the present theory with $\mu = 0.345$. Note that $q = 0.068$. For better visibility, each PDF is shifted by -2 unit along the vertical axis in (a) and by -0.2 unit along the vertical axis in (b).

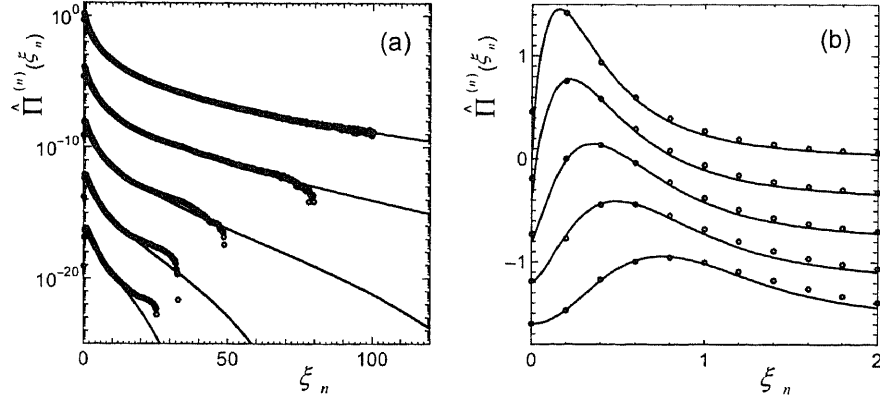


図 2: The PDFs of energy dissipation rates for $\delta = 2$ on (a) log and (b) linear scale. Open circles are the DNS data points. Solid lines represent the curves given by the present theory with $\mu = 0.345$. Note that $q = 0.568$. For better visibility, each PDF is shifted by -4 unit along the vertical axis in (a) and by -0.4 unit along the vertical axis in (b).

乱流の時系列データやある時刻における乱流のスナップショットより、特異性を示す物理量（速度差、圧力差、エネルギー散逸率、エネルギー輸送率など）の確率密度関数（PDF）を抽出する。その際、抽出 2 点間距離（時間的、空間的）や粗視化領域の直径をズーム率 δ で変化させて一連の PDF を得て解析を行う。ところで、ズーム率を決めるのは観測者である。従って、ひとつの乱流系データからズーム率を変えて PDF を抽出した場合、その乱流系の物理量は同じ値を示すべきである。

従来は $\delta = 2$ の PDF シリーズしか提供されなかったが、最近では高 Reynolds 数での風洞実験データや大規模サイズの乱流の直接数値実験（DNS）がなされ、ズーム率 δ の異なる PDF 列が得られるようになった。そこで、MPDFT の理論体系におけるズーム率 δ が物理量の値に顕に依らない形で理論体系が構成できるか否かを再検討したところ、エントロピー指数 q と間欠性を呈する物理量に付随した特異性指数 α を関連付けるスケーリング関係式を

$$\frac{1}{1-q} = \frac{\ln \delta}{\ln 2} \left(\frac{1}{\alpha_-} - \frac{1}{\alpha_+} \right) \quad (1)$$

の形に拡張すべきであることが判明した。MPDFT 理論体系自身がそれを指し示していたのである。ただし、 α_- と α_+ ($\alpha_- < \alpha_+$) は、注目している物理量のマルチフラクタル・スペクトル $f(\alpha)$ のゼロ点である。なお、ズーム率が $\delta = 2$ の場合には、(1) は従来採用していた Lyra-Tsallis 型スケーリング関係式に還元する。

現時点で世界一のサイズ 4096^3 大規模乱流 DNS データを有する名古屋大学の金田・石原グループからエネルギー散逸率 PDF とエネルギー輸送率 PDF の提供を受け、新しいスケーリング関係式が上記の物理的要請を満たしているかについて検証を行い、ポジティブな結果を得た。図 1 と図 2 に、それぞれ、 $\delta = 2^{1/2}$ と $\delta = 2$ の場合におけるエネルギー散逸率 PDF の解析結果を載せてある。この乱流 DNS 系の間欠性指数が $\mu = 0.345$ であることが、何れの解析からも得られ、新しいスケーリング関係式の検証に成功した。

新しいスケーリング関係式 (1) は、『十分発達した乱流は、可能な値 δ を有する δ スケール・カントール集合の集合体である』という新しい解釈を提供している。この解釈に関しては、次項で触る。

(2) n^∞ 周期軌道のべき的不安定性と特異性スペクトルの解析 (院生: 本池巧, 有光)
 学位論文 (博士) [1], 解説・紀要 [3], 講演 [2, 6, 9, 10, 12]

n^∞ 周期軌道は, これまでは, Feigenbaum 普遍則の解析という抽象的な視点以外では取り扱われる機会がほとんどなかった。 n^∞ 周期軌道の構造を解析するためには, 非常に長い周期 ($\sim 10^7$) の周期軌道を求める厳密計算方法の開発が必要であった。まず, その方法とそれに基づいた数値計算手法を考案し, 抽象的な n^K 周期軌道 ($K \gg 1$) を具体的に扱えるようにした。これにより, 「 n^∞ 不安定周期軌道の階層構造解析」, 「間欠性を特徴付ける新たなスケーリング関係式」の導出が可能となった。

次に, n^∞ 不安定周期軌道の持つ階層構造が n スケール・カントール集合となることを示した。さらに, この周期軌道の不安定性が有するべき的構造が, $n = 2$ と $n > 2$ では異なることを明らかにした。Lyra-Tsallis のスケーリング関係式

$$\frac{1}{1-q} = \frac{1}{\alpha_{\min}} - \frac{1}{\alpha_{\max}} \quad (2)$$

は, 「軌道拡大率の生の時間発展データ (階層構造の詳細を反映している) に, 最も荒い粗視化を施して得られた平均軌道拡大率のべき指数 $1/(1-q)$ を与える関係式」であることを明確にした。なお, (2) 中のスケーリング指数 α_{\min} と α_{\max} は, n^∞ 不安定周期軌道が有するマルチフラクタル・スペクトル $f(\alpha)$ 定義域の最小値と最大値である。間欠性の特徴を抽出するには, 粗視化のレベルを下げ, 軌道拡大率の時間発展の中から間欠性を特徴付けるユニットを取り出す必要がある。そのユニットを取り出すための適切な粗視化が, 「 n^∞ 不安定周期軌道からスケーリング指数 α_{\min} と α_{\max} に対応する軌道点のみを抽出し, 2 スケール・カントール集合を構築するプロセス」で与えられることを明らかにした。このユニット内で平均化して得られる間欠性を特徴付けるべき指数 $1/(1-q)$ は, スケーリング関係式

$$\frac{1}{1-q} = \frac{\ln n}{\ln 2} \left(\frac{1}{\alpha_{\min}} - \frac{1}{\alpha_{\max}} \right) \quad (3)$$

で与えられることを導き出した。新たに導出したこのスケーリング関係式を利用することにより, 間欠性を示す物理系の時系列データから, その背後にある階層構造を決定するための道を開いた。

(3) 量子流体乱流の渦糸モデルによるシミュレーション (院生: 本池巧, 武智公平, 有光)

液体ヘリウムの超流動状態や Bose-Einstein 凝縮体の流動などの量子流体の運動は, 循環が量子化された渦糸が存在し, Navier-Stokes 方程式に従う古典流体とは異なる性質を有する。渦糸が量子化されていることを利用して, 乱流の本質に迫ろうという構想が Feynman により提案されたが, 最近になって, ようやく実験や数値計算が可能な状況になって来ている。今年度は, これまで進めてきた数値計算コードを, 間欠性を評価できる精度が得られるようにさらに改良・工夫した。

(4) 電磁流体乱流の統計解析 (吉田, 有光) 解説・紀要 [2], 講演 [15, 16, 17],
 外部資金 [1]

太陽表面, 太陽風, 地球のコア, 核融合炉などのプラズマの流体近似モデルとなる電磁流体 (MHD) の乱流の統計的性質は, 水や空気などの通常の流体の乱流のそれと比較して, まだ明らかになっていない部分が多い。昨年度までの我々の研究において, 乱流統計の近似理論の一つである Lagrange 繰り込み近似 (LRA) を一様等方性 MHD 乱流に適用し, 全 (運動 + 磁場) エネルギーのスペクトル $E(k)$ (k は波数) が $k^{-3/2}$, 残差 (運動 - 磁場) エネルギーのスペクトル $E^R(k)$ が k^{-2} に従うことを示し, その比例定数まで見積もった。

太陽風などの実際の MHD 乱流においては, ある特定の方向に一様磁場がある場合が多く, 乱流の統計も非等方的となる。本研究では, 先に得られた等方的エネルギースペクトルに一様磁場を摂動

として加え、その場合のエネルギースペクトルテンソルの非等方成分について、現象論的解析を行った。その結果、その非等方成分が等方成分と同じスケール則 ($k^{-3/2}$) を持つことが示唆され、それは直接数値シミュレーションにおいても検証された。この結果は、エネルギースペクトルの等方成分と非等方成分の比が波数によらず、一様磁場の非等方性が高波数（小スケール）まで深く浸透していることを意味する。これは、小スケールで等方化し統計的普遍性を持つと考えられている通常の流体の乱流と異なる性質である。

(5) 極性流体としての粉粒体の構成方程式と散逸関数 (院生：武智公平, 有光, 吉田) 論文 [5]

砂や小麦粉といった多数の粒子からなる系を総称して粉粒体と呼ぶ。粉粒体を速度場の他に回転速度場の自由度を持つ極性流体と捉えたとき、その運動方程式を閉じるには、応力・偶応力と場の量との間の関係、すなわち構成方程式、を決める必要がある。

本研究では、粉粒体に特化したシミュレーション手法である離散要素法を用いて、一様せん断率の速度場下における 2 次元粉粒体の振る舞いを調べた。散逸関数や構成方程式を測定し、その関数形を決定した。その結果は粉粒体の構成方程式を決定する手法の 1 つである金谷の理論の結果とは整合しなかった。その理由として、シミュレーションにおける粉粒体の摩擦係数が金谷の理論の想定するものより大きいことが考えられ、摩擦係数が大きく粉粒体が互いに接触したときにその接触面上での相対速度が直ちに 0 になる、という理論モデルを新たに構成し、散逸関数を見積もったところ、シミュレーション結果とよく一致した。この散逸関数から構成方程式を導くことは、今後の課題である。

【2】量子散逸系, 量子情報物理

Non-Equilibrium Thermo Field Dynamics (NETFD) の体系 (1984) では非平衡量子散逸系が正準演算子形式 (量子力学や場の量子論と同じ) で扱え、散逸過程にある物理量を真空期待値として求められる。この体系は、量子系確率微分方程式 (量子確率 Liouville 方程式, 量子 Langevin 方程式) も取り入れる形で、一貫した正準演算子形式の体系として拡張定式化された (1990)。

NETFD の体系を駆使して、量子情報物理に関わる問題 (主に、量子コヒーレンスと散逸の関わるダイナミカルな問題) への応用を進めている。量子通信や量子計算を実現するためには量子もつれ状態 (量子エンタングル状態) を駆使するが、それが散逸の影響で時間と共に如何に壊されるかを考慮に入れて、これまで量子力学のレベルで開発された手法や概念を検討し直す必要がある。

(1) 空間相関を考慮した環境下での量子誤り訂正 (有光) 論文 [1, 3], 著書 [2], 講演 [7]

空間的相関を有するノイズの影響下にある量子ビット列の時間発展を NETFD の理論体系で解析、既存の (独立ノイズ仮説に基づいた) 量子誤り訂正符号が、空間的相関を有するノイズにより量子ビット列に生じる誤りをも訂正できることを示した。量子ブラウン運動の理論及びそれに基づく量子 Liouville 方程式を利用して、空間的相関を有するノイズ影響下にある量子ビット列の時間発展を記述する完全正值写像を求めた。NETFD の体系での写像演算子の具体的表式を利用して、空間的相関を有するノイズにより量子ビット列に生じる誤りが、スタビライザー符号による通常の (すなわち、無相関ノイズに対するのと全く同じ) 誤り訂正手続によって訂正されることを証明したものである。

(2) 量子散逸系の真空と消滅演算子 (院生：大日向正志, 吉田, 有光) 学位論文 (修士) [1], 論文 [2], 講演 [3, 13]

NETFD の理論体系では、2 種類の演算子 (ティルダ演算子, 非ティルダ演算子) を導入し、密度演算子の時間発展をケット真空状態の時間発展として捉える。2 種類の演算子を導入することにより、非平衡量子散逸系の解析に通常用いられる量子マスター方程式の有する『時間推進演算子と密度演

算子間の演算子の複雑な絡み』を解消することができる。散逸系では、真空は不安定なため時間発展し、それに伴いその真空を消す消滅演算子も時間発展する。このような状況を記述するためには、各時刻の真空を消去する生成・消滅演算子が必要となる。これは、『時間に依存する Bogoliubov 変換』という新概念を生む。

時間依存 Bogoliubov 変換を導出する際、従来は Heisenberg 描像を経由し、Heisenberg 方程式が利用されていた。本研究は、「Schrödinger 描像のみで、その導出が可能である」ことを初めて示したものである。まず、ボゾン散逸過程における時間依存 Bogoliubov 変換を Schrödinger 描像のみにて導出できる新たな道筋が発見され、さらに、スクイーズド真空生成散逸過程を呈する（真空の対称性の破れを有する）系、すなわち、外部環境の影響下でスクイーズド真空が生成される過程に適用された。Bogoliubov 変換の時間依存性は、オーダー・パラメータの時間依存性を通して導入される。NETFD では、散逸過程の時間発展は、ティルダ・非ティルダ粒子対の真空への凝縮として捉えられるものである。フェルミ散逸系へも適用された。

(3) スクイーズド真空の生成過程における散逸の効果 (吉田, 有光) 論文 [4]

量子光学におけるスクイーズド真空は、連続量量子テレポーテーションなどで用いられ、量子情報における応用的価値が高い。スクイーズド真空は実験室では縮退パラメトリック過程などを用いて生成されるが、その過程における散逸の影響を評価することは応用上も重要である。

本研究では、縮退パラメトリック過程によるスクイーズド真空の生成における散逸の影響を、NETFD の枠組で調べた。散逸時間発展のみを考慮した真空 $|W(t)\rangle$ を参照真空として、散逸を伴ったスクイーズド真空の演算子形式による表現とその消滅演算子を求めた。その結果、スクイージングにより真空の位相対称性を破られる過程が、 $|W(t)\rangle$ への粒子ペアの凝縮で表現されることが分かった。また、得られた真空の表現を用いて正準演算子 p, q のそれぞれの分散 $\Delta p(t), \Delta q(t)$ およびそれらの積である不確定性関係の時間発展を調べた。散逸が無い場合不確定性関係は一定に保たれるのに対して、散逸がわずかでもある場合は不確定性関係が時間と共に発散することが示された。

(4) 量子散逸系の真空へのペア凝縮と Wigner 分布関数 (吉田, 有光) 講演 [14]

量子散逸系を扱う従来の方法として、密度演算子についての量子マスター方程式を c 数関数（例えば Wigner 分布関数）の偏微分方程式に写像するものがある。正準演算子形式である NETFD も c 数関数空間での表現が可能なのは知られている。本研究において、真空への粒子ペアの凝縮に対応する Wigner 分布関数の表現の再検討を行った。

[3] ソフトマターの非平衡統計力学とガラス転移

(1) 空間的に不均一な系のガラス転移 (宮崎) 講演 [18, 20, 21, 23, 24, 25], 外部資金 [2]

ガラス転移は、見かけ上、熱揺らぎの相関は何ら異常を示さないにもかかわらず、緩和時間や粘性係数は発散し、アモルファス状に分子運動が凍結する現象である。一方、ゲルや多孔質なども、ダイナミクスが凍結したアモルファス状の物質であるが、空間的な不均一性が最初から内在している点で、ガラスとは大きく異なる。この空間不均一性の有無がガラス転移の性質をどのように変化させるのか、つまり、ゲルとガラスのクロスオーバーはいかにして起こるのかを理解するために、我々は数値実験と解析計算による研究を行った。特に、ガラスとゲルのミニマルモデルとして、易動度の異なるコロイドの混合系（たとえば不純物と自由粒子）のスローダイナミクスの解明を行った。モデルとして、不純物は自由粒子と同じ大きさとし、運動のみが凍結されているものとした。最近、モード結合理論 (MCT) により、不純物密度が大きい領域において、スローダイナミクスが質的に変化することが予言された。これはコロイドゲルおよびガラスで観測されるダイナミクスに酷似しているが、その理由は明らかでない。我々はこれを数値実験により、検証することに成功した。動的相関関数、

非線形応答関数、Debye-Waller 因子などを系統的に調べ、特に動的な相関長が、不純物密度の増加とともに大きく減少することなどを発見した。さらに、この系は不純物密度が多くなると、自由粒子の易動度が上昇するという、所謂リエントラント転移を示すことがわかった。最近、他のグループにより、アモルファス中のイオン伝導度に奇妙なリエントラント転移が存在することが確認されたが、その物理的起源の説明はまだなかった。我々の研究は彼らの結果を、明確に説明するものである。

(2) コロイドゲルの生成ダイナミクス (宮崎) 論文 [6], 外部資金 [3]

コロイド分散系は、密度や相互作用を調節することにより、ガラスやゲルなど様々なアモルファス構造を作る。ゲルの生成で重要な役割を果たすと考えられる相互作用は、コロイド粒子間の相互作用の他に、コロイド-分散媒間の相互作用が考えられる。後者は、所謂、流体力学的相互作用と呼ばれるもので、動力的かつ非線形な相互作用である。これは、今までのほとんどの研究では無視されてきた。しかし、コロイドが凝集し密なネットワークを形成する後期過程においては、分散媒の流動場の影響は無視できないと考えられる。そこで、我々は、山本らが開発した手法を用いた大規模な数値計算により、この流体力学的な効果を2次元と3次元について考察した。一般に、流体力学的相互作用は極めて複雑でその効果を数値計算に取り入れることは至難とされているが、上記の手法は、流動場とコロイドを、連続的な密度場として扱うことにより、この困難を回避している。計算の結果、流動場の影響により、ゲルの生成過程が非常に遅くなること、そしてネットワークのモルフォロジーがよりコンパクトになることなどが分かった。

(3) 高次元空間におけるガラス転移の解析 (池田、宮崎)

ガラス転移とは、液体を融点以下に急冷し、その構造がアモルファス状に凍結する現象であり、様々な系で見られる普遍的な現象である。現段階では、ガラス転移の正体について二通りの考え方が存在する。一方は、ガラス転移は熱力学的な平衡相転移の一種として理解されるというものであり、もう一方は、モード結合理論に代表されるようなガラス転移は純粋に動力的な転移であるという考え方である。現段階では、「このどちらがガラス転移の正しい見方であるか」というガラス転移の基本的描像すらわかっていない。

このような状況では、各理論の整合性やその予測を緻密に検証していくことが肝要である。そこで、系の空間次元を三次元に限らずに、高次元での両理論のふるまいを比較することで考察を深めようと考えた。まず、一般の d 次元のモード結合理論を導出し、その方程式の解析を行うプログラムを開発した。得られた基礎方程式は、3次元のモード結合方程式に次元に依存する付加項がかかったものとなった。現在、この方程式の高次元での振る舞いを検討中である。

また、導出した高次元のモード結合理論とシミュレーションの結果を比較する研究も並行して行った。モード結合理論は平均場理論と考えられているため、高次元では、その記述が良くなる可能性があるためだ。具体的には、アメリカ Duke 大学の Charbonneau 博士と共同で、4次元でのガラス転移をシミュレーションとモード結合理論を組み合わせて解析している。実際に両者の比較をおこなうと、4次元剛体球系のガラス転移をモード結合理論が良好に記述することが明らかになった。

【4】 量子液体相における幾何学的位相の意義

現代物理学においては「対称性の破れ」とそれを記述する「秩序変数」の概念が基本的であると考えられてきた。主たる現代物理学の目的の一つはこれらを用いた物理的な「相」の分類、理解であったと言えよう。特にその相の質的变化としての「相転移」においては臨界点における局所的ゆらぎの時空間的な発散的振る舞いの正確な記述のために局所的場の理論を用いた繰り込み群ならびにその再帰的階層的概念が極めて有効であり、Landau-Ginzberg-Wilson (LGW) による一つの認識論的パラダイムが構築されるに至った。

一方近年の研究の進展により、量子効果が古典論に対する摂動であるにとどまらず、新たな物質相を選択することにより生じる「量子相」が広く存在することが認知されるに至った。物性論に例をとれば種々の量子ホール相、強相関電子群におけるスピン液体相、近藤格子系等における量子液体相、整数スピン鎖における Haldane 相等がその典型例となる。これらは、如何なる対称性の破れを伴わず、古典的秩序変数によっては特徴づけることのできない古典的対応物の存在しない真に量子的な新物質相である。これらの相は「量子液体相」と近年総称され多くの興味をあつめている。これらの新奇な「量子相」「量子液体相」の存在とその重大な意義の認識は上述の LGW-パラダイムからのパラダイムシフトの必要性を強く示唆し、あらたな自然法則の理解、発見を要求する。

その要求に応えるべく提案されたのが、「トポロジカル秩序」「量子秩序」の概念であり、共同研究者とともに、私もその概念形成を行ってきたものである。これは従来の LGW 理論が局所場の理論にその概念的基礎をおいているのに対して、トポロジカルな場の理論にその概念形成の発端をもつものである。「量子液体相」においては励起に有限のエネルギーギャップが存在し、低エネルギーの局所的な準粒子が存在しない。一般に連続対称性の破れに対応して存在するギャップレス（質量ゼロ）の Nambu-Goldston ボソンが存在しないわけである。対応して、この量子液体相の基底状態は本質的に非局所的となる。一つの系のトポロジカルな形状に支配される形で、系に境界が存在してはじめて生じたギャップレスのフェルミ統計に従う境界に局在する準粒子励起が状態を特徴づける。例えば量子ホール相等におけるギャップレスのエッジ状態がこれに対応する。これが非自明なトポロジカル秩序相としての量子液体相における「バルクエッジ対応」である。

以上を歴史的背景として量子系の特徴である「幾何学的位相」を用いたベリー接続を直接の手段とし多体の電子論、物性論におけるトポロジカルな秩序変数を構成する理論的提案を行い、それに基づく大規模数値計算機による具体的な数値計算により幾つかの量子液体相の特徴付けを行った。また「バルクエッジ対応」の観点からエンタングルメントエントロピーという新しい量子的な物理量を大局的な秩序変数として用いる試みも展開し、その有効性を確認した。

(1) Z_2 ベリー位相による量子液体相における局所秩序変数 (初貝)

論文 [7, 8, 11, 13, 14, 15, 16, 18],

講演 [26, 27, 28, 29, 30, 31, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 51, 55, 56, 57, 59, 62, 64, 66]

ベリー位相は歴史的には量子力学における断熱過程の解析から発見されたが、その真の意義はパラメータ依存のエルミート演算子の固有空間の正確な理解をもたらした点にある。固有ベクトルのパラメータ空間上での形式的微分 (1-form) により定義されるベクトル場は固有ベクトルの位相の不定性に起因する自由度を持つが、これは対応するベクトル場に $U(1)$ のゲージ変換を引き起こす。より一般に固有ベクトルの M 本の組により張られる固有空間を考えたとき、対応するベクトル場は M 次元の行列となり基底のユニタリ変換は (非可換) ゲージ変換を引き起こす。このようにして、非可換ゲージ場はパラメータ空間上で固有空間を考えたとき極めて自然に導入されることとなる。ここで構成されたゲージ場をパラメータ空間上の異なる 2 点間の関係を与えるものとしてベリー接続と呼んだとき、これを用いてベリー位相、チャーン数等のトポロジカルな量が一般に定義されることとなる。これが近年注目を集めている幾何学的位相の本質的部分である。これらのトポロジカルな量を具体的な物理系に対して計算する際、ベリー接続に関する明示的なゲージ固定が必要となることにまず注意したい。一方で、パラメータ空間を離散化することで得られるパラメータ空間上の格子上で非可換ゲージ場を構成し、ベリー接続としての格子上のゲージ不変量を直接扱うこともできる。その際格子ゲージ理論により開発された手法が直接適用されることとなる。一方でランダウ以来の相転移の理論によれば、古典的な物質相は局所的な秩序変数を用い対称性の破れに基づき、その多くが長距離秩序の存在により特徴づけられることを思い起こそう。局所磁化による長距離秩序で強磁性相が、局所的な電荷密度の長距離相関で、電荷密度相がそれぞれ特徴づけられるわけである。一方、低次元量子系では、その強い量子ゆらぎならびにその低次元性により、通常の秩序形成が

強く妨げられ、対称性の破れを伴わず、それでいて極めて特徴的な物理相が存在し得ることとなる。フラストレートしたスピン系におけるスピン液体相、整数スピン鎖における Haldane 相、量子ホール相等がその典型例である。これらの量子液体相の物理的理解を目指すとき、古典的な概念では不十分であることはほぼ自明であろう。

これら対称性の破れを伴わない古典的には特徴付けが困難である量子液体相、特に励起にエネルギーギャップを持つ相を量子的に特徴付けることを目指しベリー接続を用いて幾何学的位相の代表例であるベリー位相を構成し量子的な「局所」秩序変数を構成するものである。古典的観測量はエルミート演算子の期待値で与えられ、それ故ユニタリ不変であるが、ベリー位相は基底のユニタリ変換により 2π の整数倍だけ不定であり決して古典的な物理量とはならない。また、ゲージ不変なチャーン数も量子液体相の特徴付けに有効である。例えば異方的超伝導相、単層炭素 2 次元系であるグラフェン等におけるスピンホール伝導度がその例である。

(2) バルクエッジ対応に基づく量子液体相でのエンタングルメントエントロピーに関する研究 (初貝、有川) 論文 [7, 8, 14, 18], 講演 [26, 27, 28, 39, 40, 41, 42, 43]

上述の対称性の破れを伴わない量子液体相に対して私が提案してきた「バルクエッジ対応」の概念に立脚し、近年量子情報分野という物性論とは全く異なる分野において展開されてきたエンタングルメントエントロピーなる新しい物理量を用いることにより波動関数の量子的絡み合いに関連する大局的な情報が得ることを目的とし具体的な種々の物理系に対して理論的研究を行い、相の特徴を同定した。

(3) 量子ホール系における交流ホール伝導度におけるステップ構造の普遍性 (初貝) 論文 [10], 講演 [37, 38, 60, 61]

量子ホール系における交流ホール伝導度を理論的に計算しそこにステップ構造を見だしその普遍性を議論した。

(4) グラフェンの量子ホール系の光学伝導度の研究 (初貝) 論文 [9, 10], 講演 [37, 38, 60, 61]

グラフェンの光学伝導度を理論的に計算し、実験との比較をふくめてその特異性を詳細に議論した。

(5) グラフェンをはじめとするトポロジカル秩序相での量子-古典対応の破れ (初貝) 論文 [13], 講演 [34]

グラフェン等トポロジカルに非自明な系でのホール伝導度をトポロジカル不変量を用いて計算し、量子-古典対応を詳しく議論し、その破れを見いだした。

(6) グラフェンにおけるトポロジカル秩序とバルクエッジ対応

1. 2次元 Dirac Fermion としてのグラフェンにおけるトポロジカル秩序 (初貝) 論文 [9, 10, 11, 13, 16], 講演 [26, 27, 28, 30, 31, 32, 47, 48, 49, 50], 卒論 [3]

グラフェン無限結晶は Dirac cone 型のエネルギー分散を持ち、単位胞内の 2 原子の電子論的等価性であるカイラル対称性に起因するトポロジカル安定性をもつ。特に磁場中ではこの特異な電子構造に起因する種々のトポロジカルな効果が顕在化し、理論実験の両面から多くの興味をもたれている。これに関して「トポロジカル秩序」、「バルクエッジ対応」という独自の観点から研究を遂行し電子相関に起因するボンド秩序相の存在の可能性を提起する等、重要な成果を得た。またグラフェンの光応答に関してもそのトポロジカルな側面に基づき重要な成果を得た。

2. 有限磁場下のグラフェンの端状態 (有川, 初貝) 論文 [11, 16], 講演 [30, 31, 65]

zigzag 端を持つグラフェンでは端に局在する 1 粒子状態が存在することが知られ、ゼロモードとしてのトポロジカルな起源を持つ。一方、強磁場下では、通常の 2 次元量子ホール系では、磁場下での端状態が存在し、このエネルギー分散がランダウギャップ内にあるために E_F がランダウ準位間にあってもギャップレスの励起をもつ。 E_F がバルクのランダウ準位内のときには、電荷密度は端で磁場長程度の領域で減少する。これに対して、磁場下のグラフェンでは、Dirac 型の分散に起因して $E = 0$ (Dirac cone 点) に特異なランダウ準位が生じるので、端状態のエネルギー分散がどうなるかは興味深い。特に、zigzag 端では磁場下でもトポロジカルに保護されたゼロモード・エッジ状態が存在し、 $E = 0$ でバルク・ランダウ準位とエッジ状態が共存する新しい状況が生まれる。

本研究では、端のある磁場中グラフェン (1 層および 2 層) に対して、エネルギー・スペクトルおよび実空間における波動関数を zigzag, armchair 端に対して計算し、電荷密度における端の依存性について調べた。この結果は STM-STIS により測定可能である。

3. グラフェンにおけるカイラル対称性と局在 (初貝) 講演 [32, 52]

グラフェンにおけるゼロギャップを理論的に保証するものが部分格子構造に起因するカイラル対称性であるが、それはこの系のアンダーソン局在にも特異な性質をもたらす。これに関して理論的かつ数値的な研究を行い興味深い結果を得た。

(7) 量子スピンホール相における Z_2 不変量とベリー接続 (初貝) 論文 [15], 講演 [29, 36, 53, 54]

スピンホール効果における Z_2 不変量に関して、高次のチャーン数による理論展開を展覧した。その結果はより一層の理論的展開の基礎となる。

(8) BEC-BCS クロスオーバーのトポロジカルな秩序変数による研究 (初貝, 有川) 講演 [35]

Bose 凝縮-BCS クロスオーバーを示す引力相互作用をもち、時間反転対称性をもつ電子系格子模型を平均場を用いた有効模型について量子ベリー位相を用いて Bose 凝縮相と BCS 相の間に量子相転移をもつことを示した。

【5】 強相関電子系の理論的研究

種々の理論的、数値的手法により広く強相関電子系における理論的研究をおこない新しいブレークスルーにつながり得る重要な成果を得た。

(1) 量子ドットとナノ構造における非断熱電荷移動の研究 (初貝) 講演 [58]

量子ホール効果を用いたナノデバイスで重要になると考えられる非断熱効果について新しい理論的手法を開発し数値計算をふくめて重要な成果を得、論文を公表した。

(2) リング相互作用をもつスピン梯子系 (有川, 初貝) 論文 [7, 8, 14, 20], 講演 [33, 39, 40, 41, 42, 55, 58, 63]

4 体相互作用をもつスピン梯子系は 2 体と 4 体のスピン相互作用の競合により様々な相が現れる。様々な系について絶対零度における動的スピン構造因子について (動的) 密度行列繰り込み群を用いて調べた。エネルギーギャップをもつ量子状態を特徴づけるために系に端を導入することで系を特徴づける低エネルギー状態が現れる (バルクエッジ対応)。基底状態の構造が非自明なベクトルカイラリティ相などに対して系を特徴づける開放境界条件下での低エネルギー励起 (ケネディー三重項) やエンタングルメントエントロピーを調べることで基底状態の試行関数を与えた。

(3) スピンチューブ (有川) 論文 [19, 21], 講演 [73]

スピンチューブとよばれる 3 本の $S=1/2$ Heisenberg スピン鎖がリング状につながった系の基底状態と絶対零度における動的スピン構造因子について (動的) 密度行列繰り込み群を用いて調べた。リング状の交換相互作用が全て等しい場合はスピン励起にギャップをもち、系が大きい極限でもダイマーのオーダーパラメータが有限に残ることを示した。一方、リング状の交換相互作用にわずかに異方向性を導入した場合、フラストレーションは失われスピンギャップは閉じ、ダイマーのオーダーパラメータは系が大きい極限でゼロになることを示した。

(4) 1次元電子系の相関関数 (有川) 講演 [67, 68, 70]

一般に可解模型であっても多体系の相関関数を導出するのは困難である。電子相関を考慮した、サイトあたりの電子数の二重占有数を変分パラメータにもつ Gutzwiller 波動関数と呼ばれる試行関数がよく用いられる。1次元系でかつ、サイトあたりの電子数の二重占有を禁止した場合は $1/r^2$ 型相互作用をもつ t - J 模型の厳密な基底状態であることが知られている。この場合の Gutzwiller 波動関数に対する 1 粒子密度行列の厳密な解析形の導出を行った。さらに動的密度行列繰り込み群により最近接相互作用をもつ t - J 模型の相関関数を求め、 $1/r^2$ 型相互作用をもつ t - J 模型の動力学との比較を行った。

(5) 1次元可解模型の相関関数 (有川) 講演 [69], 解説・紀要 [4]

三角型 Ruijsenaars-Schneider 模型とよばれる $1/r^2$ 型相互作用をもつ Calogero-Sutherland 模型の”相対論的拡張”版の模型の先進 Green 関数の解析形を Macdonald 多項式の公式を用いて導出した。

【6】 複合ナノ構造系の電子相関と量子輸送

現在では単一の微小半導体部 (量子ドット系) を介したコンダクタンス挙動に対する電子相関効果は、かなり良く理解されるようになった。数 K 程度の低温領域でのクーロン閉塞現象、さらに低い温度領域でのコンダクタンス増大現象 (量子ドットの近藤効果) といったナノ系特有の現象に対する理解が深まり、その挙動が、量子ドット系の微視的詳細に依らない「単一量子ドットの普遍的挙動」により記述できることが明らかになってきた。一方、工学技術の進歩は縦型/並列多重量子ドット、アハロノフ-ボーム (AB) リング系、T 字ネットワークといった、様々な複合ナノ構造を実現可能にしたが、これらの複合ナノ構造系の量子輸送実験の結果をみると、従来の「単一量子ドットの普遍性」による理論的理解では説明し難い現象が数多く観測されている。我々は、普遍性の観点から複合ナノ構造系の量子性と電子相関効果に着目し、その量子輸送現象を明らかにするため継続的に研究を進めている。本年度の成果は以下の通りである。

(1) 軌道縮退系の電子相関と量子輸送 (院生: 小口悠, 谷口) 学位論文 (博士) [2], 解説・紀要 [5], 講演 [74, 75]

軌道縮退量子ドット系では、スピン自由度と軌道自由度の絡み合いにより近藤効果が強まることが知られる ($N_d = 1$ の軌道近藤効果)。縦型/並列二重量子ドット系では、各ドットのゲート電圧を調整することでこの現象を観測することが可能である。またカーボンナノチューブドットの外殻軌道はほぼ二重に軌道縮退しており、「内部縮退自由度を持つ」量子ドットとみなすことが可能である。一方、これらの軌道縮退系では、「単一量子ドットの普遍性」では説明し難い現象も数多く観測されている (カーボンナノチューブドット系では、偶数のドット電子数 N_d においても低温でのコンダクタンス増大が観測されたりされなかったりする。) 本研究ではこれらの現象が軌道二重縮退準位構造をもつドット系特有の現象と考える。同軌道内に Coulomb 相互作用 U 、異軌道間に Coulomb 相互

作用 U' が働く二重軌道縮退アンダーソン模型に基づき、相互作用の非対称性 (軌道依存性) を考慮して普遍性を拡張することで、実験結果を系統的に解明を目指した。

解析手法としては、有限相互作用スレーブボソン平均場法 (Kotliar-Ruckenstein スレーブボソン法) を二重軌道縮退アンダーソン模型に拡張し、非平衡グリーン関数法と組み合わせ、線形・非線形コンダクタンスを全ゲート電圧領域 ($N_d = 0 \sim 4$) で評価した。

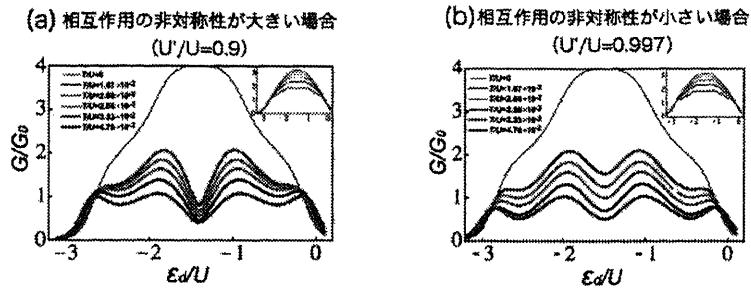


図 3: 線形コンダクタンスの温度依存性に見られる相互作用の非対称性の影響。

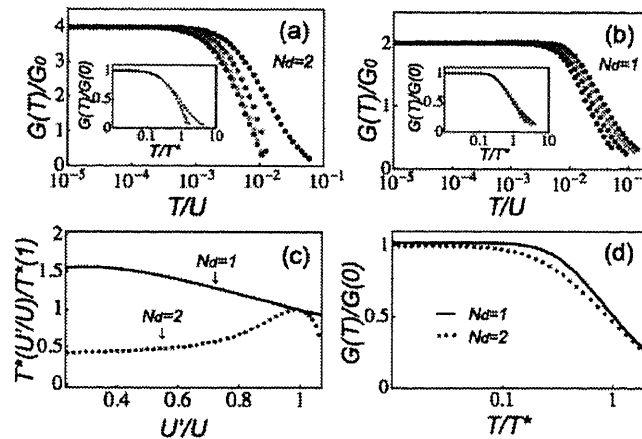


図 4: (a), (b) 線形コンダクタンスの温度依存性。(c) 特性温度の軌道間クーロン相互作用依存性。(d) 普遍曲線のドットの電子数依存性。

線形コンダクタンス (1) クーロン相互作用の軌道依存性は線形コンダクタンスのゲート電圧プロファイルに大きな影響を与え、特にその影響は、 $N_d = 2$ 領域のゲート電圧で顕著であることが明らかになった。相互作用の軌道非対称性が 10%程度存在するだけで、有限温度で線形コンダクタンスに特徴的なディップ構造が現れる (図 3)。(2) 各ゲート電圧において適切なエネルギースケール (特性温度) 定義すると、コンダクタンスの温度依存性は普遍的挙動により説明できることがわかった (図 4)。(3) 以上の結果は、カーボンナノチューブ量子ドット系において行われた P. J. Herrero らの実験 (2005) と Makarovski らの実験 (2007) とに観測されているコンダクタンス挙動の差異を説明すると同時に、二重縮退量子ドット系が示す普遍的挙動に対しても系統だった理解を与える。

非線形コンダクタンス (1) 有限バイアス効果により、非線形コンダクタンスは $N_d = 2$ 領域における近藤効果が大きく抑制されるが、 $N_d = 1$ 領域における抑制はさほど大きくない。(2) スケーリング解析の議論の範疇で、有限バイアス電圧は、有限温度と同様の役割を果たすと期待されるが、我々

の計算結果はこれを支持する。温度 T とバイアス電圧 V が両方存在する場合、非線形コンダクタンスは大きいエネルギー $\max[T, eV]$ によって支配される。さらにバイアス電圧に対する依存性も普遍的依存性を示すことが明らかになった。(3) Wilhelm らのグループは、並列二重量子ドットを使ったコンダクタンス計測で、準位縮退領域では $N_d = 1$ のみを観測していることは相互作用の非対称性と有限バイアス電圧効果に依るものと解釈できる。また我々の理論結果は、現在実験で使われているバイアス電圧 ($80\mu\text{eV}$) を一桁下げれば $N_d = 2$ 領域にも近藤効果によるコンダクタンス増大が観測されることを示唆する。

【7】 AB リング系における普遍スケーリング解析: 近藤温度の磁束依存性 (院生: 磯崎健太, 院生: 小口悠, 谷口) 講演 [76]

Aharonov-Bohm リングに量子ドットを埋め込んだ系 (AB リング系) は、リングを貫く磁束により制御性が高く、量子素子として大きな可能性を持っている。AB リング系には量子ドット系の離散準位とリング部分の連続準位が混在し、そのため Fano 効果が観測されるが、更に低温領域では、Fano 効果と量子ドットの近藤効果が共存する Fano-Kondo 効果が現れる。現在、単一量子ドット系のコンダクタンスでなされたような普遍挙動の議論は、AB リング系 (Fano-Kondo 効果) に対して全くなされていない。最近、AB リング系の近藤温度は、リングを貫く磁束により変化すると理論報告もいくつかあり、普遍性の観点からも大変、興味深い系である。

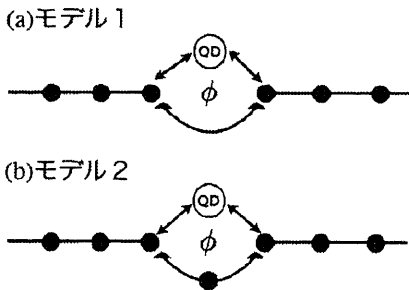


図 5: モデル

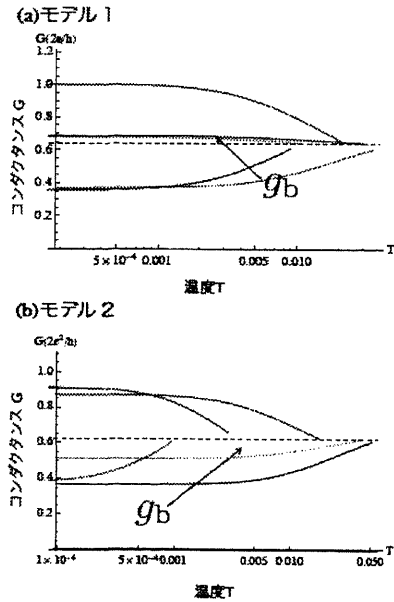


図 6: コンダクタンスの温度依存性

本研究では、Fano-Kondo 効果における普遍挙動を探索し、普遍スケーリング解析を行うことで物理的に明確な形で近藤温度を同定することを試みた。その結果、定義される (Fano-Kondo 効果の) 近藤温度の磁束依存性を明らかにした。

模型として、図 5 で示す (a) モデル 1 (直接ホッピング) (b) モデル 2 (1 サイトホッピング) を考え、有限相互作用スレーブボソン法を用いて解析した。各磁束の値でコンダクタンスの温度依存性 (図 6) はコンダクタンス $G(T)$ の温度依存部分

$$F(T) = \frac{G(T) - g_b}{G(0) - g_b}; \quad (G_b : \text{ドットを切り離れた時})$$

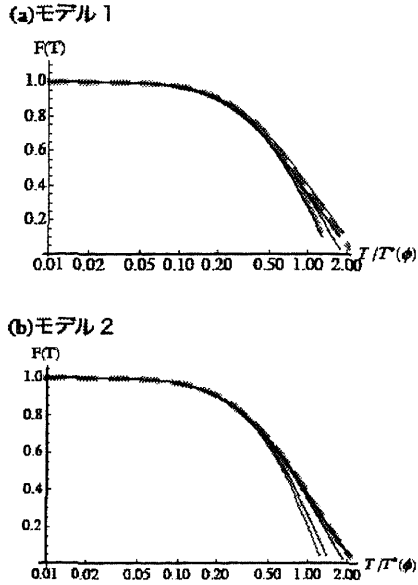


図 7: スケール普遍性

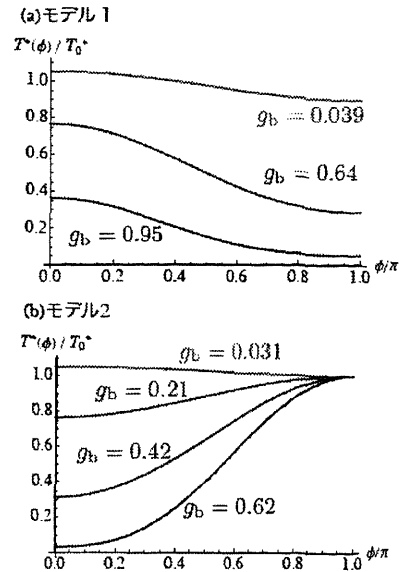


図 8: 近藤温度の磁束依存性

に着目して、スケール普遍性を調べたところ、各磁束で異なった挙動を示していたものが一つの曲線で表せ (図 7)、Fano-Kondo 効果に普遍性が存在していることが明らかになった。この普遍曲線は単一量子ドットの普遍曲線とも一致する。このような普遍スケール解析を用い、近藤温度の磁束依存性を調べた結果が図 8 である。モデル 1 では g_b の値に依らず磁束が 0 から π で必ず減少し、モデル 2 では g_b が小さい時はわずかに減少し、 g_b が大きい場合には増加する。一見、ほとんど類似した 2 モデルが近藤温度に関して全く正反対の磁束依存性を示すことがわかる。

【8】 電子系の量子相転移: 電子相関と乱れ

電子系の絶縁相としては、(乱れの無い系の) 電子相関に起因するモット絶縁相、(電子相関の無い系の) 乱れに起因するアンダーソン絶縁相が存在することが知られている。電子相関と乱れが共存する場合には量子相転移の存在が示唆されているが、両者が存在するときの理論解析は困難であり、理論的解明はまだ十分になされていない。本研究では、特にフェルミ原子トラップ系実験を念頭におき、観測可能な電荷密度分布、スピン分極分布の挙動として量子相転移を特徴づけることを目指して理論研究を進めている。原子力機構の町田グループ (奥村雅彦・山田進・町田昌彦) との共同研究である。理論モデルとして電子相関と乱れが同時に存在する一次元電子系 (Anderson-Hubbard 模型)

$$H_{AH} = \sum_{(i,j)\sigma} c_{i\sigma}^\dagger c_{j\sigma} + \sum_{i\sigma} \epsilon_i n_{i\sigma} + U n_{i\uparrow} n_{i\downarrow}; \quad P(\epsilon_i) = \theta(W/2 - |\epsilon_i|)/W$$

を使い、密度汎関数繰り込み群 (DMRG) 法により電荷分布、スピン分極分布の挙動を数値的に調べた。本年度の成果は以下の通りである。

(1) ホールドープ領域における乱れと電子相関の競合と協同 (谷口) 論文 [22]

一次元 Anderson-Hubbard 模型は、乱れない時 ($W = 0$) には、半充填 ($\bar{n} = 1$) でモット絶縁体、それ以外の充填 ($0 < \bar{n} < 2, \bar{n} \neq 1$) では金属相であることが理論的に知られている。従来の研究では電子相関と乱れは競合関係にあると考えられており、 $W = 0$ で金属相であるホールドープ系 ($\bar{n} < 1$)

に乱れを導入してもモット絶縁相が現れることは無く、金属相からアンダーソン局在相に移行すると考えられて来た。しかし、 $W \neq 0$ の系に対して半充填からホールドープを行った場合を注意深く調べると、ドープしたホール自体がまず局在化することでモット絶縁ドメインが現れることが明らかになった。つまり、乱れと電子相関が常に競合関係にあるわけではなく、乱れが電子相関を助けることより(電子相関起源の)モット絶縁相が実現され得ることが明らかになった。

(2) スピン不均衡系のスピン分極密度の乱れ依存性 (谷口) 論文 [23, 24], 講演 [77]

フェルミ原子気体に磁場を印加することで、上下スピンの不均衡となる状況を作ることができる。このようなフェルミ原子のトラップ状態を念頭におき、乱れがない場合に実現される反強磁的スピン分極密度が、乱れの導入にどのように消失(=局在化)するかを明らかにするため、スピン不均衡をもつ Anderson-Mott 模型の基底状態を DMRG により数値的に調べた。乱れがない状態では、スピン不均衡によりスピン密度波が存在する。しかし、乱れの導入に従い局所的な反強磁性領域が縮小していき、十分大きな乱れを導入すると、反強磁性領域が消失して行く様子が明らかになった(図 9)。

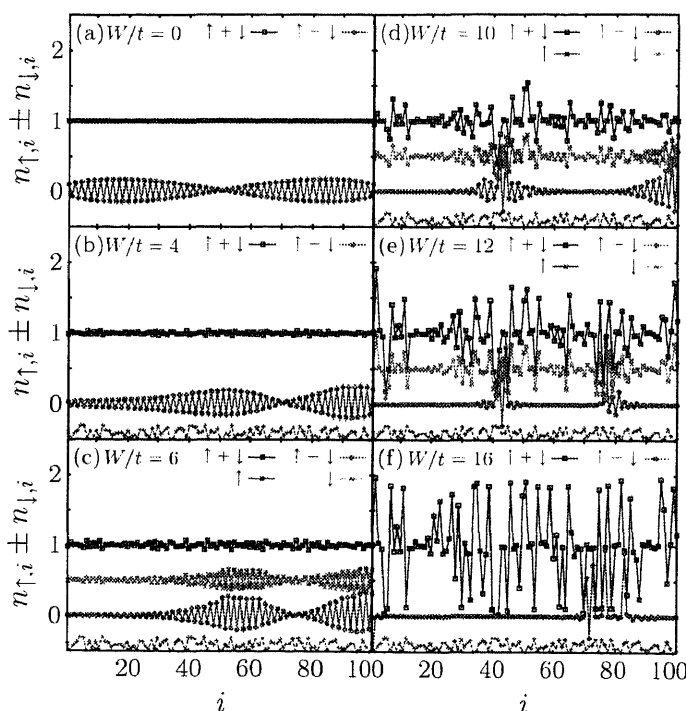


図 9: スピン分極密度の乱れ W 依存性: $(N_{\uparrow}, N_{\downarrow}) = (51, 49)$.

【9】 研究・教育成果の社会への還元・奉仕活動

(1) 雑誌編集委員 (有光, 初貝)

1. 日本応用物理学会欧文誌 (JJAP) の編集委員 (Ei) を務めた。(有光) 社会還元等 [1]
2. ウクライナ国科学アカデミー凝縮系物理学研究所出版の学術雑誌「Condensed Matter Physics」の編集委員を務めた。(有光) 社会還元等 [2]
3. Progress of Theoretical Physics の編集委員として、閲読者決定、論文掲載の可否の決定を行った。(初貝) 社会還元等 [7]

(2) 物理チャレンジ・オリンピック委員会 (有光) 社会還元等 [3, 4, 5, 6]

物理チャレンジ・オリンピック委員会運営会議・委員, 国際物理オリンピック派遣員会・参加派遣部会・部会長, 同・教育研修部会・委員として, 筑波大学開催の「物理チャレンジ2007」で選抜された物理オリンピック参加候補者への課題問題出題, 採点, 冬合宿での講義, 春合宿での最終選抜を行った。

また, 物理チャレンジ実行委員会・現地実行部会・委員として岡山大学での「物理チャレンジ2008」開催に関わった。

(3) 共同利用課題審査委員 (初貝) 社会還元等 [8]

東京大学物性研究所附属物質設計評価施設スーパーコンピュータ共同利用課題審査をおこなった。

(4) 国際会議プログラム委員 (初貝) 社会還元等 [9]

2次元電子系の国際会議 EP2DS のプログラム委員としてプログラムの決定を行った。

(5) 体験授業 (宮崎) 社会還元等 [10]

(6) 日本物理学会委員等 (宮崎, 吉田) 社会還元等 [11, 12, 13]

<論文>

- [1] T. Arimitsu, T. Hayashi, S. Kitajima and F. Shibata: “Quantum Error Correction for Spatially Correlated Errors”, *Int. J. Quantum Information* **6** Supplement (2008) 575–580.
- [2] K. Yoshida and T. Arimitsu: “Annihilation operators associated with unstable vacua in non-equilibrium thermo-field dynamics”, *Cond. Mat. Phys.* **11** (2008) 687–697.
- [3] T. Arimitsu: “Non-Equilibrium Thermo Field Dynamics and Its Application to Error-Correction for Spatially Correlated Quantum Errors”, *Interdisciplinary Information Sciences (IIS)* (2008) in press.
- [4] Kyo Yoshida, Tsuyoshi Hayashi, Sachiko Kitajima and Toshihico Arimitsu: “Dissipative squeezed vacuum in non-equilibrium thermo field dynamics”, *Physica A*, submitted.
- [5] Kohei Takechi, Kyo Yoshida and Toshihico Arimitsu: “Constitutive equations and dissipation function for a dense granular flow”, *Phys. Rev. E*, submitted.
- [6] R. Yamamoto, K. Kim, Y. Nakayama, K. Miyazaki, and D.R. Reichman: “On the role of hydrodynamic interactions in colloidal gelation”, *J. Pyys. Soc. Japan* **77** (2008) 084804.
- [7] I. Maruyama, T. Hirano, Y. Hatsugai, “Topological Identification of Spin-1/2 Two-Leg Ladder with Four-Spin Ring Exchange”, *Phys. Rev. B* **79** 115107 (2009)
- [8] I. Maruyama and Y. Hatsugai, “Quantized Berry phase of Kondo insulators”, *Journal of Physics: Conference Series* **150**, 042116 (2009)
- [9] T. Motimoto, Y. Hatsugai, H. Aoki, “Cyclotron radiation and emission in graphene – a possibility of Landau-level laser”, *Journal of Physics: Conference Series* **150**, 022059 (2009)
- [10] T. Morimoto, Y. Hatsugai, H. Aoki, “Optical Hall conductivity in QHE systems”, *Journal of Physics: Conference Series* **150**, 022060 (2009)

- [11] M. Arikawa, Y. Hatsugai, H. Aoki, "Edge states for the $n=0$ Landau level in graphene" *Journal of Physics: Conference Series* **150**, 022003 (2009)
- [12] I. Maruyama and Y. Hatsugai, "Non-adiabatic effect on Laughlin's argument of the quantum Hall effect" *Journal of Physics: Conference Series* **150**, 022055 (2009) arXiv:0806.4430
- [13] M. Arai and Y. Hatsugai, "Quantum Hall effects of graphene with multi orbitals: Topological numbers, Boltzmann conductance and Semi-classical quantization", *Phys. Rev.* **B79**, 075429 (2009) arXiv:0810.2377
- [14] I. Maruyama and Y. Hatsugai, "Quantized Berry Phases of a Spin-1/2 Frustrated Two-Leg Ladder with Four-Spin Exchange", *J. Phys. Conf. Ser.* **145**, 012052 (2009)
- [15] Takahiro Fukui, Takanori Fujiwara, Yasuhiro Hatsugai, "Topological meaning of Z_2 numbers in time reversal invariant systems" *Journal of the Physical Society of Japan (Letter)* **77**, 123705 (2008)
- [16] Mitsuhiro Arikawa, Yasuhiro Hatsugai, and Hideo Aoki, "Edge states in graphene in magnetic fields: A speciality of the edge mode embedded in the $n = 0$ Landau band", *Phys. Rev.* **B78**, 205401 (2008)
- [17] T. Morimoto, H. Aoki and Y. Hatsugai, "Cyclotron radiation and emission in graphene", *Phys. Rev.* **B78**, 073406 (2008)
- [18] T. Hirano, H. Katsura, and Y. Hatsugai, "Degeneracy and consistency condition for Berry phases: Gap closing under a local gauge twist", *Phys. Rev.* **B78**, 054431 (2008)
- [19] S. Nishimoto, M. Arikawa: "Low-lying excitations of the three-leg spin tube: A density-matrix renormalization group study" *Phys. Rev. B* **78**, 054421 (2008) (9 pages).
- [20] S. Nishimoto and M. Arikawa: "Dynamics in two-leg spin ladder with a four-spin cyclic interaction" *Phys. Rev. B* **79**, 113106 (2009) (4 pages).
- [21] S. Nishimoto and M. Arikawa: "Basic properties of three-leg Heisenberg tube" *J. Phys.: Conference Series* **145** 012041 (2009).
- [22] M. Okumura, S. Yamada, N. Taniguchi, M. Machida, "Hole Localization in Doped One-Dimensional Anderson-Hubbard Model", *Phys. Rev. Lett.* **101** 016407-1-4 (2008).
- [23] M. Okumura, S. Yamada, N. Taniguchi, and M. Machida, "Hole localization in strongly-correlated and disordered systems: DMRG studies for 1-D and n-leg ladder random Hubbard models", *Physica C* **468** 1241-1244 (2008).
- [24] M. Okumura, S. Yamada, N. Taniguchi, M. Machida, "Magnetism localization in spin-polarized one-dimensional Anderson-Hubbard model", to appear in *Phys. Rev. B* (2009).

<著書>

- [1] T. Arimitsu, N. Arimitsu, K. Yoshida, H. Mouri: "Multifractal PDF analysis for intermittent systems" (分担執筆); *Anomalous Fluctuation Phenomena in Complex Systems: Plasma, Fluids, and Financial Markets*, Eds. C. Riccardi and H.E. Roman (Research Signpost, India, 2008) pp.25-55.

- [2] 柴田文明, 北島佐知子, 番 雅司, 有光敏彦:「量子と非平衡系の物理」(東京大学出版会, 2009) in press.
- [3] トポロジーデザイン-新しい幾何学からはじめる物質・材料設計-「量子液体のトポジカルな特徴付け」NTS Inc. (2009)

<解説・紀要>

- [1] 有光敏彦, 有光直子, “Analyses of 4096³ DNS Turbulence conducted by Kaneda’s Group by means of Multifractal PDF Theory”: 研究集会報告 (20ME-S6)「乱流現象及び多自由度系の動力学, 構造と統計法則」(九州大学応用力学研究所, 2009年3月) 82-91.
- [2] 吉田恭, 有光敏彦「弱い一様磁場下での電磁流体乱流」: 研究集会報告 (20ME-S6)「乱流現象及び多自由度系の動力学, 構造と統計法則」(九州大学応用力学研究所, 2009年3月) 122-127.
- [3] 本池巧, 有光敏彦「力学系における n^∞ 周期軌道と乱流のマルチフラクタル構造」: 研究集会報告 (20ME-S6)「乱流現象及び多自由度系の動力学, 構造と統計法則」(九州大学応用力学研究所, 2009年3月) 128-135.
- [4] 有川晃弘: “三角型 Ruijsenaars-Schneider 模型の先進 Green 関数” 九州大学応用力学研究所 研究集会報告 20ME-S7 (2009) 103-108.
- [5] H. Oguchi and N. Taniguchi, “Thermal Symmetry Crossover and Universal Behaviors in Carbon Nanotube Dots”, arXiv:0811.1439 (2008).

<講演>

- [1] 有光直子, 有光敏彦:「4096³DNS 乱流のマルチフラクタル PDF 解析」, 日本物理学会 秋季大会, 2008年9月, 岩手大学, 盛岡
- [2] 本池 巧, 有光敏彦:「力学系における r^∞ 周期軌道と乱流のマルチフラクタル構造」, 日本物理学会 秋季大会, 2008年9月, 岩手大学, 盛岡
- [3] 吉田 恭, 有光敏彦:「量子散逸系における真空への粒子ペアの凝縮と Wigner 分布関数」, 日本物理学会 秋季大会, 2008年9月, 岩手大学, 盛岡
- [4] (招待講演) T. Arimitsu and N. Arimitsu: “On extension of the formalism MPDFA and its application to the analyses of DNS 4096³ conducted by Kaneda and Ishihara”, Isaac Newton Institute (INI) Programme High Reynolds Number (HRN) Workshop *Inertial-Range Dynamics and Mixing*, 2008年9月29日-10月3日, Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences, Cambridge, UK
- [5] N. Arimitsu and T. Arimitsu: “Detailed analyses of PDFs for energy transfer rates and for energy dissipation rates extracted from DNS 4096³ conducted by Kaneda and Ishihara”, INI Programme HRN Workshop *Inertial-Range Dynamics and Mixing*, 2008年9月29日-10月3日, Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences, Cambridge, UK
- [6] T. Motoike and T. Arimitsu: “On a generalization of the Lyra-Tsallis scaling relation within the formalism of multifractal PDF analysis”, INI Programme HRN Workshop *Inertial-Range Dynamics and Mixing*, 2008年9月29日-10月3日, Isaac Newton Institute for Mathematical Sciences, Cambridge, UK

- [7] (招待講演) T. Arimitsu, T. Hayashi, S. Kitajima, F. Shibata: “Non-Equilibrium Thermo Field Dynamics and its Application to Error-Correction for Spatially Correlated Quantum Errors”, 8th Sendai Workshop *Infinite Dimensional Analysis and Quantum Probability*, 2008 年 11 月, 東北大学大学院 情報科学研究所
- [8] 有光敏彦, 有光直子:「金田グループによる 4096³ 乱流 DNS のマルチフラクタル PDF 解析」, 研究集会「乱流現象及び多自由度系の動力学、構造と統計法則」2008 年 11 月, 九州大学応用力学研究所
- [9] 本池 巧, 有光敏彦:「力学系における n^∞ 周期軌道の階層構造と乱流のマルチフラクタル構造」, 研究集会「乱流現象及び多自由度系の動力学、構造と統計法則」2008 年 11 月, 九州大学応用力学研究所
- [10] (特別講演) 有光敏彦, 有光直子, 本池 巧:「乱流のマルチフラクタル構造と n^∞ 周期軌道の階層構造」, 平成 21 年度統計数理研究所共同利用重点型研究「統計科学における乱数」研究会, 2008 年 12 月, 統計数理研究所
- [11] 有光直子, 有光敏彦:「4096³DNS 乱流のマルチフラクタル PDF 解析 II」, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 2009 年 3 月, 立教大学, 東京
- [12] 本池 巧, 有光敏彦:「力学系における r^∞ 周期軌道と乱流のマルチフラクタル構造 II」, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 2009 年 3 月, 立教大学, 東京
- [13] 大日向正志, 有光敏彦:「散逸環境下におけるスクイーズド真空の生成— Schrödinger 描像での定式化 —」, 日本物理学会 第 64 回年次大会, 2009 年 3 月, 立教大学, 東京
- [14] 吉田 恭, 有光 敏彦:「量子散逸系における真空への粒子ペアの凝縮と Wigner 分布関数」, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月, 岩手大学.
- [15] Kyo Yoshida and Toshihico Arimitsu: “Spectral anisotropy of MHD turbulence under weak uniform mean magnetic field”, The workshop *Inertial-Range Dynamics and Mixing*, 2008 年 9,10 月, Isaac Newton Institute, Cambridge, UK.
- [16] 吉田 恭, 有光敏彦:「弱い一様磁場下での電磁流体乱流」, 研究集会「乱流現象及び多自由度系の動力学、構造と統計法則」2008 年 11 月, 九州大学大学院 応用力学研究所
- [17] 吉田 恭:「乱流の統計理論」, 理論セミナー, 2008 年 11 月, 高エネルギー加速器研究機構.
- [18] 宮崎州正:「ガラス転移とモード結合理論」, 産業技術総合研究所セミナー, 2008 年 6 月, 産業技術総合研究所
- [19] K. Miyazaki: ”Comments on “ Bifurcation Scenario of Jamming Transition ”” (Discussant for Prof. S. Sasa’s talk), Internatinal Conference on ”Dynamical heterogeneities in glasses, colloids and granular media”. 2008 年 8 月, Leiden
- [20] 金鋼, 宮崎州正, 斉藤真司:「ランダム媒質中のスローダイナミクス-ガラス転移から局在転移へ-」, 日本物理学会 2008 年秋季大会, 2008 年 9 月, 岩手大学
- [21] 宮崎州正:「ガラス転移と動的相関長」, 物性研究所理論セミナー, 2008 年 9 月, 東京大学物性研究所
- [22] (招待講演) 宮崎州正:「非平衡統計力学の新たな展開」, 第 44 回熱測定討論会 2008 年 10 月, つくば市

- [23] (招待講演) K. Miyazaki: "From glasses to Lorenz gases: A crossover of slow dynamics in random media", JSPS Japan-France Bilateral Joint Seminar 2008 "Frontiers of Glassy Physics", 2008年11月, 京都大学
- [24] (招待講演) K. Miyazaki: "Recent Progresses and Open Problems in Mode-Coupling Theory of Glass Transition", "Unifying Concepts in Glass Physics IV (UCGP2008)", 2008年11月, 京都大学
- [25] K. Miyazaki: "Glass transition in random media", つくばソフトマター研究会, 2009年2月, 筑波大学
- [26] (招待講演) "Bulk-Edge correspondence and fractionalization", Yasuhiro Hatsugai, Workshop on Quantum Spin Hall Effect and Topological Insulators (KITP) 2008年12月10日 Kavli Institute for Theoretical Physics, University of California Santa Barbara Santa Barbara, California, U.S.A.
- [27] (招待講演) "Characteristic edge states of quantum Hall effects in graphene: Dirac fermions and quantum liquids", Y. Hatsugai, Quantum Phases and Excitations in Quantum Hall Systems 2008年6月19日, Max Planck institute for the Physics of Complex Systems (MPIPKS), Dresden, Germany
- [28] (招待講演) "Bulk Edge Correspondence in Quantum Liquids", Yasuhiro Hatsugai, International workshop on quantum critical phenomena and novel phases in superclean materials 2009年1月12日, Honolulu, Hawaii, U.S.A.
- [29] (招待講演) "Berry Phases with/without Time Reversal Invariance", Y. Hatsugai, Topological Aspects of Solid State Physics, 2008年6月26日 Yukawa Institute for Theoretical Physics, Kyoto University
- [30] "Topological aspects of the $n=0$ Landau level in graphene: chiral symmetry and Hall plateau transition", (selected oral presentation) Y. Hatsugai, Graphene week 2009, ESF(European Science Foundation)-FWF Conference in Partnership with LFUI, 2009年3月5日 Universitätszentrum Obergurgl, Austria
- [31] "Bulk-edge correspondence in graphene with and without magnetic field: Topological aspects of Dirac fermions in real materials" (selected oral presentation) Y. Hatsugai, ICTP Conference Graphene Week 2008, 2008年8月28日 ICTP(International Center for Theoretical Physics) Trieste Italy
- [32] 河原林透, 初貝安弘, 青木秀夫, 「強磁場中のグラフェン量子ホール効果におけるランダムネスのレンジの効果」日本物理学会 第64回年次大会 27pYH-10, 2009年3月27日 立教大学, 東京
- [33] 丸山勲, 棚谷翔, 有川晃弘, 初貝安弘, 「リング交換相互作用を持つスピン1/2梯子系におけるエッジ状態と量子化ベリー位相」日本物理学会 第64回年次大会 27pTJ-9 2009年3月27日, 立教大学, 東京
- [34] 新井正男, 初貝安弘, 「ホール効果における量子・半古典対応の破れ」日本物理学会 第64回年次大会 27pRC-6 2009年3月27日立教大学, 東京
- [35] 「バイポーラロン-BCS クロスオーバー系のトポロジカルな量子相転移」有川晃弘, 丸山勲, 初貝安弘, 日本物理学会 第64回年次大会 27pRC-5 2009年3月27日立教大学, 東京

- [36] 「非可換ベリー接続と時間反転対称性」初貝安弘, 福井隆裕, 日本物理学会 第 64 回年次大会 27pRC-3 2009 年 3 月 27 日立教大学、東京
- [37] 「グラフェン量子ホール不規則系における光学ホール伝導度とプラトー構造」森本高裕, 初貝安弘, 青木秀夫, 日本物理学会 第 64 回年次大会 27pPSB-51 2009 年 3 月 27 日立教大学、東京
- [38] "Optical Hall conductivity in QHE systems", Takahiro Morimoto, Yasuhiro Hatsugai, Hideo Aoki, 2009 APS March Meeting 2009 年 3 月 19 日 Pittsburgh, Pennsylvania, USA
- [39] "Quantized Berry phase and entanglement entropy for a spin ladder system", Isao Maruyama, Shou Tanaya, Mitsuhiro Arikawa, Yasuhiro Hatsugai, 2009 APS March Meeting 2009 年 3 月 18 日 Pittsburgh, Pennsylvania, USA
- [40] "Edge States of $S=1/2$ Spin Ladder with Four-Spin Ring exchange International", S. Tanaya, M. Arikawa, I. Maruyama, Y. Hatsugai, Symposium on Interdisciplinary Materials Science, ISIMS-2009 P-016 2009 年 3 月 9 日 EPOCHAL TSUKUBA
- [41] 「フラストレートした磁性体におけるバルクエッジ対応」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, 柏
- [42] 「フラストレートしたスピンラダーのバルクエッジ対応: 量子化ベリー位相とエンタングルメントエントロピーによる研究」, 丸山勲、棚谷翔、有川晃弘、初貝安弘, 「フラストレーションが創る新しい物性」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 22 日神戸大学百年記念館六甲ホール
- [43] "Gapped Quantum Liquids as Topological insulators", 初貝安弘, スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理 2008 年成果報告会, 2008 年 12 月 20 日奈良県新公会堂
- [44] "Topological Compensation of local charge of $n=0$ Landau level in graphene", スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理 2008 年成果報告会 (P5) M. Arikawa, Y. Hatsugai, H. Aoki 2008 年 12 月 19 日奈良県新公会堂
- [45] "Quantum Phase Identification of Gapped Systems by Quantized Berry Phases", I. Maruyama, S. Tanaya, M. Arikawa, Y. Hatsugai, スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理 2008 年成果報告会 (P105) 2008 年 12 月 19 日奈良県新公会堂
- [46] 「ナノ分子グラフェンの理論」有川晃弘、初貝安弘、青木秀夫, 筑波大学学際物質科学研究拠点研究会 「ナノ分子磁性体の化学・物理・応用」2009 年 11 月 29 日筑波大学総合研究棟 B 棟 0110 公開講義室
- [47] "Universality of the zero gap semiconductors : From Graphene and d-wave superconductors to topological insulators", Y. Hatsugai, NTT 基礎研セミナー 2009 年 11 月 25 日, NTT Basic Research Laboratories
- [48] 「ゼロギャップ半導体の普遍性: グラフェンと d 波超伝導体からトポロジカル絶縁体へ: ディラック電子とエッジ状態に関するカイラル対称性の意義」初貝安弘, NIMS 高柳研セミナー 2008 年 11 月 19 日つくば NIMS 桜地区
- [49] "Topological Aspects of Graphene: Quantum Hall Effects of filled Dirac Sea and zero mode edge states", Yasuhiro Hatsugai, Dept. of Physics, Univ. of Tokyo, Hatsuda Group, HD-Seminar, 2008 年 10 月 7 日, Univ. of Tokyo, Tokyo, JAPAN

- [50] 「マルチバンドモデルによるグラフェンの量子ホール効果」新井正男, 初貝安弘, 日本物理学会 2008 年秋季大会 22aTA-1 2008 年 9 月 22 日岩手大学
- [51] 「磁場中グラフェンのボンド秩序相におけるエンタングルメント・エントロピー」有川晃弘, 青木秀夫, 福井隆裕, 初貝安弘, 日本物理学会 2008 年秋季大会 22aTA-2 2008 年 9 月 22 日岩手大学
- [52] 「グラフェンランダウ準位におけるランダムネスの効果」河原林透, 初貝安弘, 青木秀夫, 日本物理学会 2008 年秋季大会 22aTA-9 2008 年 9 月 22 日岩手大学
- [53] 「時間反転対称性とベリー位相」初貝安弘, 福井隆裕, 日本物理学会 2008 年秋季大会 22pRB-13 2008 年 9 月 22 日岩手大学
- [54] 「Z₂ 不変量のトポロジカルな意味」福井隆裕, 初貝安弘, 日本物理学会 2008 年秋季大会 22pRB-14 2008 年 9 月 22 日岩手大学
- [55] 「リング交換相互作用を持つスピン梯子系のエンタングルメントエントロピー」棚谷翔, 丸山勲, 有川晃弘, 初貝安弘, 日本物理学会 2008 年秋季大会 22pVD-9 2008 年 9 月 22 日岩手大学
- [56] 「スピン 1/2 系におけるハルデー相の量子化ベリー位相と断熱変形」丸山勲, 初貝安弘, 日本物理学会 2008 年秋季大会 23aPS-15 2008 年 9 月 23 日岩手大学
- [57] "Quantized Berry phase of Kondo insulators", I. Maruyama and Y. Hatsugai, 25-th International Conference of Low Temperature Physics 2008 年 8 月 7 日 Amsterdam, Netherlands
- [58] "Non-adiabatic effect on Laughlin's argument of the quantum Hall effect", I. Maruyama and Y. Hatsugai, 25-th International Conference of Low Temperature Physics 2008 年 8 月 7 日 Amsterdam, Netherlands
- [59] "Edge states for the $n = 0$ Landau level in graphene", M. Arikawa, Y. Hatsugai and H. Aoki, 25-th International Conference of Low Temperature Physics, 2008 年 8 月 7 日, Amsterdam, Netherlands
- [60] "Optical Hall conductivity in the THz region in the quantum Hall regime", T. Morimoto, Y. Hatsugai and H. Aoki, 25-th International Conference of Low Temperature Physics, 2008 年 8 月 7 日, Amsterdam, Netherlands
- [61] "Cyclotron radiation and emission in graphene — a possibility of Landau-level laser", T. Morimoto, Y. Hatsugai and H. Aoki, 25-th International Conference of Low Temperature Physics, 2008 年 8 月 7 日, Amsterdam, Netherlands
- [62] 「フラストレーションとトポロジカル秩序」初貝安弘, 「フラストレーションが創る新しい物性」平成 20 年度立ち上げ全体会議 2008 年 6 月 23 日, 独立行政法人理化学研究所 和光研究所 鈴木梅太郎記念ホール
- [63] 「四体交換相互作用を持つスピンラダーの量子化ベリー位相」丸山勲, 初貝安弘, 「フラストレーションが創る新しい物性」第 2 回トピカルミーティング「フラストレーションとマルチフェロイクス」2008 年 6 月 6 日京都大学宇治地区木質ホール
- [64] 「近藤絶縁体の量子化ベリー位相による相分類」丸山勲・初貝安弘, 「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」A01-05 班合同研究会 2008 年 5 月 9 日東京大学理学部 1 号館・小柴ホール

- [65] 「磁場中でのグラフェンの端状態」有川晃弘, 初貝安弘, 「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」 A01-05 班合同研究会 2008 年 5 月 9 日, 東京大学理学部 1 号館・小柴ホール
- [66] 「量子液体・スピン液体におけるトポロジカル秩序」初貝安弘, 「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」 A01-05 班合同研究会 2008 年 5 月 9 日東京大学理学部 1 号館・小柴ホール
- [67] M. Arikawa: “Analytic results on the Gutzwiller wave function”, “Topological Aspects of Solid State Physics.” 2008 年 6 月, 東京大学 物性研究所.
- [68] M.Arikawa: “Correlation functions of Gutzwiller wave function”, “ASPECTS OF QUANTUM INTEGRABILITY”, 2008 年 7 月, 京都大学基礎物理学研究所.
- [69] 有川晃弘: “Particle propagator of trigonometric Ruijsenaars-Schneider model”, 日本物理学会 2008 年 秋季大会, 2008 年 9 月, 岩手大学.
- [70] 有川晃弘, 西本理: “1 次元超対称性 t-J 模型のスピン 電荷動力学”, 日本物理学会 2008 年 秋季大会, 2008 年 9 月, 岩手大学.
- [71] 有川晃弘: “三角型 Ruijsenaars-Schneider 模型の先進 Green 関数”, 「非線形波動の数理と物理」 2008 年 11 月, 九州大学
- [72] 有川晃弘, 西本理: “リング交換相互作用をもつスピン梯子系の動力学”, 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 神戸大学 (ポスター発表).
- [73] 有川晃弘: “三本鎖スピントューブのダイナミクスの理論”(シンポジウム講演) 日本物理学会 2009 年 春季大会, 2009 年 3 月, 立教大学.
- [74] 小口悠, 谷口伸彦: 「軌道縮退量子ドット系の拡張スレーブボゾン平均場近似による解析: 軌道間クーロン相互作用の効果」 日本物理学会 2008 年秋季大会 (2008 年 9 月, 岩手大学).
- [75] 小口悠, 谷口伸彦 「軌道縮退量子ドット系におけるクーロン相互作用の軌道非対称性と有限バイアス効果」 日本物理学会第 64 回年次大会 (2009 年 3 月, 立教大学).
- [76] 磯崎健太, 小口悠, 谷口伸彦 「AB リング系における近藤温度のリングサイズ依存性」 日本物理学会第 64 回年次大会 (2009 年 3 月, 立教大学).
- [77] M. Okumura, S. Yamada, N. Taniguchi, and M. Machida, “Magnetism Localization and Hole Localization in Fermionic Atoms Loaded on Optical Lattice”, American Physical Society March Meeting (March 2009, Pittsburg).

<社会還元等>

- [1] 有光敏彦: Japanese Journal of Applied Physics, 編集委員
- [2] 有光敏彦: Condensed Matter Physics (The Institute for Condensed Matter Physics on the National Academy of Science of Ukraine), 編集委員
- [3] 有光敏彦: 物理チャレンジ・オリンピック委員会運営会議 委員
- [4] 有光敏彦: 国際物理オリンピック派遣員会 参加派遣部会 部長
- [5] 有光敏彦: 国際物理オリンピック派遣員会 教育研修部会 委員

- [6] 有光敏彦：物理チャレンジ 2008 実行委員会 現地実行部会 委員
- [7] 初貝安弘：Progress of Theoretical Physics 編集委員
- [8] 初貝安弘：東京大学物性研究所附属物質設計評価施設 (スーパーコンピュータ共同利用課題審査)
- [9] 初貝安弘：Program Committee of the 18th International Conference on Electronic Properties of Two-Dimensional Systems (EP2DS-18)
- [10] 宮崎州正：体験授業「身近なものほど『?』がいっぱい —理論物理が挑戦するガラスの世界—」, 筑波大付属駒場高校 2 年生対象, 2008 年 7 月, 筑波大学
- [11] 宮崎州正：日本物理学会領域 12 世話人, 2008 年 5 月-2009 年 4 月
- [12] 宮崎州正：日本物理学会・学会誌編集委員
- [13] 吉田恭：日本物理学会領域 11 領域役員, 2007 年 5 月-2008 年 4 月.

<外部資金>

- [1] 科学研究費補助金若手研究 (B) (平成 19 年度～平成 20 年度、研究代表者：吉田恭)、課題番号 19740229 「乱流統計理論の宇宙規模流体への展開」(平成 20 年度 1,100 千円)
- [2] 科学研究費補助金基盤研究 (C) (平成 19 年度～平成 20 年度、研究代表者：宮崎州正) 課題番号 19540432 「ガラス転移と動的相関長」(平成 20 年度 1,300 千円)
- [3] 科学研究費補助金特定領域研究「非平衡ソフトマター物理学の創成:メソスコピック系の構造とダイナミクス」(公募研究)(平成 19 年度～平成 20 年度、研究代表者：宮崎州正) 課題番号 19031027 「コロイドゲルの生成ダイナミクスとレオロジー」(平成 20 年度 1,450 千円)
- [4] 初貝安弘 20340098 「対称性の破れを伴わない量子液体相：幾何学的位相による理論とその応用」基盤研究 (B) 代表 交付金額 5,400,000 円 直接経費 5,400,000 円 間接経費 1,620,000 円
- [5] 初貝安弘 20029004 「量子液体・スピン液体におけるトポロジカル秩序」特定領域研究 (A) (公募) 代表 交付金額 1,100,000 円 直接経費 1,100,000 円
- [6] 初貝安弘 20046002 「フラストレートした磁性体におけるベリー位相」特定領域研究 (A) (公募) 代表 交付金額 1,000,000 円 直接経費 1,000,000 円
- [7] 初貝安弘 20654034 「量子液体におけるバルケーエッジ対応とエンタングルメントエントロピー」萌芽研究 代表 交付金額 2,000,000 円 直接経費 2,000,000 円

<卒業論文 (学士) >

- [1] 筑波大学卒業論文：阿部朝彦 (有光) 「BBGKY 階層と Boltzmann 方程式」(2009) 3 月.
- [2] 筑波大学卒業論文：川本達郎 (有光) 「開放系と共鳴状態」(2009) 3 月.
- [3] 筑波大学卒業論文：阿部弘幸 (初貝、有川) 「磁場中グラフェンの量子ホール効果とその拡張」(2009) 3 月.

<学位論文 (修士) >

- [1] 筑波大学修士論文：大日向正志 (有光) 「量子散逸系を扱う正準演算子形式に基づくスクイーズド真空の研究—シュレディンガー描像での定式化—」(2009) 3 月.

<学位論文（博士）>

- [1] 筑波大学博士論文：本池 巧（有光）<社会人早期終了プログラム> 「 2^n 周期軌道のトポロジー及び階層構造とその物理系への応用」(2008) 12 月.
- [2] 筑波大学博士論文: Haruka Oguchi（谷口）, “Quantum transport properties through a quantum dot with two-fold orbital degeneracy and orbital asymmetry in electron-electron interactions”, (2009) 2 月.