

VII-1. 凝縮系理論グループ

教授	有光 敏彦, 松本 秀樹
助教授	阿部 純義, 谷口 伸彦
講師	大橋 洋士
助手	吉田 恭
研究科特別研究員	北島佐知子 (8月1日転入)
大学院生	16名
学群生 (卒業研究)	8名

【1】 非平衡散逸系の統計物理

(1) マルティフラクタル PDF 解析 (有光, 吉田) 論文 [1, 2, 3, 4], 講演 [1, 3, 4]

充分発達した乱流の本質である「間欠性」の起源を, Navier-Stokes(N-S) 方程式そのものを扱って解明する試みや, それを基礎付ける統計理論を構築する試みは, 系統的な実験が始まってから 120 年余り, あるいは, 実質的な理論研究が始まってから 65 年に亘って多くの研究者によって成されてきたが, 未だその本質の解明には至っていない。早急に解決すべき, 物理学における重要課題のひとつである。2000 年辺りから実験 (Lewis & Swinney 1999, La Porta, Bodenschatz et al. 2001, Mouri et al. 2005) や DNS (Gotoh et al. 2002, Aoyama, Ishihara & Kaneda 2005) で高精度な確率密度関数 (PDF) が報告されるようになったが, 統計理論の中にさえ, それを精度良く解析できる理論は存在しなかった。そんな中, 『間欠性の本質は, N-S 方程式のスケール不変性に起因する速度場の特異

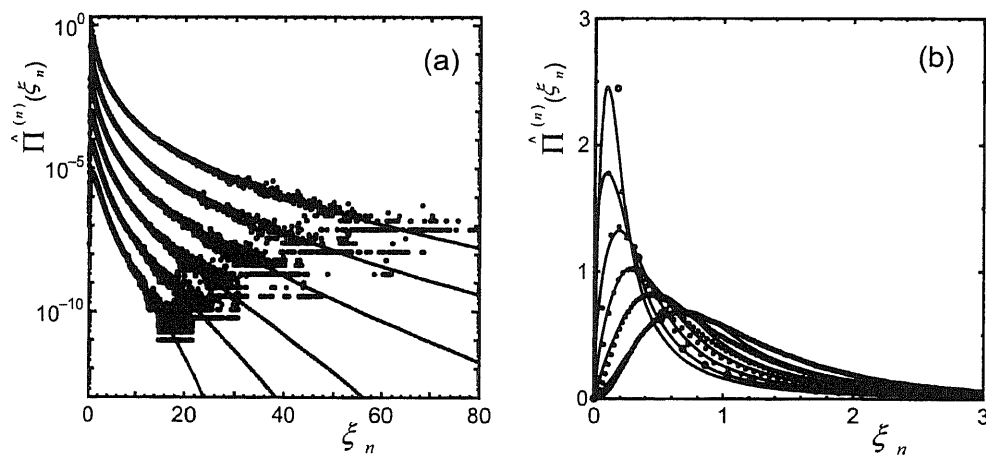


図 1: PDFs of Energy Dissipation Rates

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本研究室が進めてきたマルティフラクタル確率密度関数解析 (MPDFA) により, 古典乱流および量子乱流で得られた各種 PDF を高精度に解析できることが分かってきた。まず,

MPDFA で得られた速度構造関数のスケーリング指数を与える表式が、実験や DNS で得られた高次の指数まで正確に再現することが示された。さらに、速度揺らぎ PDF、速度導関数 PDF、流体粒子加速度 PDF、量子乱速度揺らぎ PDF の高精度での解析に成功した。その間、MPDFA の体系の整備や、粉粒体系への応用も進められた。

気象研究所大型風洞で得られた乱流時系列の生データから抽出したエネルギー散逸率 PDF(黒点) を、MPDFA で得られた PDF(実線) により高精度で解析することに始めて成功した(図1)。左図は片対数、右図は線形軸のみで記されている。図中にある6つのPDFは、上から順にエネルギー散逸率を求める領域が広がっている。さらに、MPDFA の体系が拠り所としている「特異性のマルチフラクタル分布」(間欠性の本性と考えている)に関わる一般化次元を高精度で抽出することにも成功した(図2)。図中の×印は生データのみを利用して求めた一般化次元、○印は生データでは得られなかったエネルギー散逸率 PDF の裾のみ(標準偏差の30倍程度以上の部分)をMPDFA の理論 PDF により補完して求めた一般化次元である。実線はMPDFA で理論的に得られた一般化次元である。

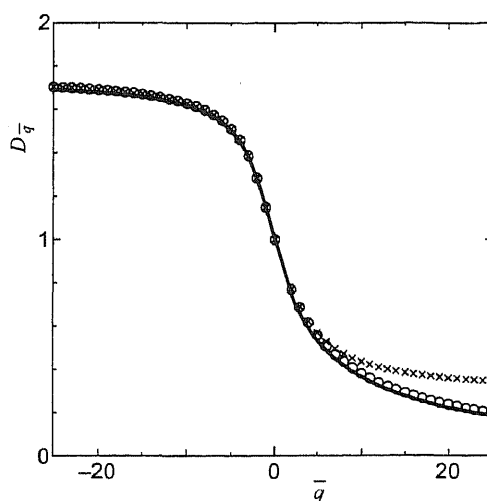


図 2: Generalized Dimension

(2) Lagrange 繰り込み近似による電磁流体乱流の統計解析 (吉田、有光)

講演 [6, 7]

乱流は、力学系の特徴として大自由度・非線形・非平衡であることが挙げられ、Hamilton 系の平衡統計力学を適用することはできない。平衡統計力学に対応するような乱流の統計理論は、未だ確立されていない。いくつかの近似理論が提案されているが、その中で Lagrange 繰り込み近似 (LRA) は Navier-Stokes (NS) 方程式から系統的に Lagrange 統計量について閉じた方程式を導く方法で、Kolmogorov のエネルギースペクトルを無次元比例定数まで含めて見積もり実験と良く一致しているなど、ある程度の成功を収めている。

本研究では、これまで主に非圧縮性 NS 方程式の乱流の解析に適用されてきた LRA を、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) の一様等方性乱流に適用した。発達した非圧縮性 MHD 乱流においてエネルギースペクトル $E(k)$ (k は波数) が NS に従う通常の流体と同様に $k^{-5/3}$ に従うのか、または Alfvén 波の効果で $k^{-3/2}$ に従うのかは、現在専門家の間で意見が分かっている未解決の問題である。LRA は $E(k) \propto k^{-3/2}$ を導き、本研究の理論計算の結果、その比例定数まで定量的に求まった。これまで巾則のみでは $k^{-5/3}$ と $k^{-3/2}$ のどちらが正しいのか直接数値シミュレーション (DNS) による検証も困難であったが、本研究で定量的な評価が得られたことにより、今後この問題の解決に大きく寄与することが期待される。実際に、DNS による検証も進行中である。

(3) 量子流体乱流の数値シミュレーション (吉田、有光) 講演 [8, 9]

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、適切な近似のもと Gross-Pitaevskii (GP) 方程式により支配される。量子流体は、循環が量子化された渦糸が存在するなど、Navier-Stokes (NS) 方程式に従う古典流体とは異なる性質を有する。しかし、このような違いにも拘らず、近年の実験や数値シミュレーションにおいて、量子流体の乱流のエネルギースペクトルが古典流体の乱流のものに類似することが示唆されている。

本研究では、支配方程式の構造がどのようにエネルギースペクトルなどの乱流統計に影響を与えるのかを探る目的で、GP 方程式の数値シミュレーションを行い、エネルギースペクトルの解析を行った。得られた非圧縮成分運動エネルギースペクトルは、先行する数値シミュレーション研究の結果とは異なるものであった。また、先行研究では調べられていなかった相互作用エネルギースペクトルについては $k^{-3/2}$ の巾則が観測された。本研究の結果が先行研究と異なる原因の解析、エネルギースペクトルの巾則を導く理論解析などが進行中である。

(4) Generalized Statistics of Rényi (Jizba, 有光) 論文 [5]

I have been focusing on a number of physical applications of generalized statistics. By generalized statistics I mean statistical systems that have broad, heavy-tail distributions. Examples include log-normal distributions, Weibull distributions, and various power-law tail distributions (e.g., Zipf-Pareto, Lévy, sprinkling or Tsallis-type distributions). In particular, the statistics associated with power-law tails correspond to a rich class of distributions that have been observed in physics, biology, earth science, and finance. It is emblematic of these systems that the usual Central Limit Theorem (CLT) no longer holds and that the mathematical underpinning for the limit distributions is provided by the generalized Central Limit Theorem (GCLT) of P. Lévy and B.V. Gnedenko. In effect, GCLT represents the proper mathematical framework incorporating, for instance, such important theoretical concepts as information-theoretic systems of Rényi, non-extensive Tsallis-Havrda-Charvát (THC) systems or Lévy flights.

In collaboration with Prof T. Arimitsu I have addressed a number of issues such as Vilder-Stiltjes reconstruction theorem, observability and stability of Rényi's entropy, thermodynamics of (multi)fractal systems, renormalization of Rényi's and THC entropies for absolutely continuous probability density functions (PDF's), and so on. An important observation in the context of the above information measures is that power-law tail dis-

tributions naturally emerge when the Maximum Entropy or the Minimum Cross-Entropy Principles are invoked. Phenomena obeying the resulting statistics are very diverse, including fractional diffusion processes, multiparticle hadronic systems (e.g., Hagedorn theory), multifractals, systems with long-range correlations (e.g., phase transitions) and/or long-time memories, non-ergodic (sub-recoiled) cooling or stockmarket returns. Bulk of my latest work has revolved around issues related to Rényi's information statistics. Among others, the latter provides the same Maximum Entropy distribution as the THC entropy, but does not require the q -deformed interpretation, nor non-extensivity, as advocated, e.g., by Tsallis and his co-authors.

【2】 非平衡量子散逸系

(1) 散逸場の量子論 (院生：林剛史, 有光) 学位論文 [1]

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)。

本研究では, NETFD を非可換ゲージ理論に応用して, NETFD の理論構成における基本的な問題を解決した。NETFD は, 非平衡散逸系を扱う正準演算子形式の場の理論である。とりわけ, 一貫した量子確率微分方程式の体系を備えている点が特徴的である。NETFD において, 量子ランジュバン方程式と量子確率リウヴィユ方程式は, それぞれ, ハイゼンベルグ描像とシュレーディンガー描像の確率的発展方程式として統一されている。ノイズを記述する (ボソンの・フェルミオンの) 量子ブラウン運動の理論も, NETFD の枠内で一貫した形で整備されている。NETFD の表現空間は熱的空間と呼ばれ, 2つのヒルベルト空間 (「チルド無し」自由度に対するヒルベルト空間と「チルド有り」自由度に対するヒルベルト空間) の直積空間である。熱的空間は, 非平衡状態を記述する熱真空上に生成されるフォック空間として実現される。非平衡系の時間発展は, 各時刻の熱真空が提供する表現空間により記述される。不安定な真空に対する場の量子論を構築している点が, NETFD の独創的なところである。

本研究をまとめた学位論文 [1] の前半では, NETFD を非可換ゲージ理論に適用し, フェルミオンに対する熱的状态条件 (TSC) とチルダ共役則 (TC) における位相の不定性に関する問題を解決した。TSC, TC 共に, チルダ無し自由度とチルダ有り自由度を関連付ける関係式である。演算子形式での非可換ゲージ理論のレビューをした後, NETFD の非可換ゲージ理論への拡張を行った。その上で, 非可換ゲージ理論における TSC と TC を与え, 熱的真空の Becchi-Rouet-Stora (BRS) 不変性と「TSC が表現に依らない」という要請から, TSC と TC が一意的に決定されることを示した。位相の不定性の起原が熱真空と密度演算子に対する「対応関係」において生ずることを明らかにし, 非可換ゲージ場の場合には非自明な形でその不定性が決定されることを見通しの良い形で示し, 位相の不定性に関する問題を解決した。

(2) 量子誤り訂正 (院生：林剛史, 有光, 北島) 学位論文 [1], 論文 [6], 講演 [5]

Non-Equilibrium Thermo Field Dynamics (NETFD) の体系 (1984) 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, これまで開発された手法や概念を検討し直す必要がある。その上で, 散逸の影響をもろに受ける量子純粋状態を利用するのをやめて, 混合状態を最初から扱うという前提での定式化を精力的に進めている。つまり, 散逸の影響を逆手にとって, 「量子もつれ混合状態」ともいうべき状態を駆使して, 量子通信や量子計算に必須の量子コヒーレンスを, 拡張された意味で如何に持続し制御できるかの可能性を当てるのである。殊に, 環境に即した量子誤り訂正と最適な制御法を中心に, 現在研究を進めている。

本研究をまとめた学位論文 [1] の後半では, NETFD を量子情報理論に応用して, 量子情報理論における NETFD の有用性を示した。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 の理論体系で解析した。その結果, 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リウヴィユ方程式を利用して, 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。NETFD では, 熱的なノイズや量子的なノイズを一括して扱え, しかも散逸的な時間発展を記述する完全正值写像演算子が書き下せることが, ここでの一般的な証明を可能にしたものである。この結果は, スタビライザー符号 (既知の重要な量子符号を全て含む, 符号のクラス) において一般的に成り立つものである。

これまでに提出された 2, 3 の無相関ノイズに対する量子誤り訂正符号の例で, 『既存の (独立ノイズ仮説に基づいた) 量子誤り訂正符号を用いて, 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訂正できる』ことを確かめられ始めた現段階で, それらの例を含むスタビライザー符号に対して一般的な証明に成功したことは, 量子誤り訂正に留まらず, 量子情報理論一般に大きなインパクトを与えることが期待される。

(3) 量子通信過程

纏れ合い状態を利用した量子通信過程において, 環境の影響により纏れ合い状態のコヒーレンスが消失するとともに情報伝送の効率は劣化する。環境系の異なる幾つかの量子通信チャンネルを導入して, 纏れ合い状態のコヒーレンス消失過程, およびエンタングルメントの時間変化, 量子通信における情報劣化をダイナミカルな過程として考察し, さらに, 失われたコヒーレンスを回復する機構を取り入れた解析が進行中である。

1. 厳密に解ける量子模型による量子通信過程 (北島, 有光) 論文 [8], 講演 [10, 12, 13, 14]

厳密に解けるボソン検出器 (BD) 模型と Coleman-Hepp (CH) 模型は, これまでにディコヒーレンスの問題を扱うことのできる理論模型として論じられてきた。これらの模型は, 全系の密度行列の時間発展を厳密に求めることができるため, 相互作用の強さなどといったコヒーレンス消失過程を特徴付けるパラメーターを自在に設定することが出来る。

これらの理論模型を量子通信の問題に適用可能なように拡張し、纏れ合い状態のディコヒーレンスおよび量子デンスコーディングのダイナミクスを論じた。それぞれの模型は、環境系が一次的に並べられた有限個の調和振動子 (BD), またはスピン (CH) によって構成され、纏れ合い状態を構成するキュービットの1つが、一定の速度でこの環境系の中を通過しながら相互作用を受ける。この過程を量子通信チャンネルとしてみなし、各環境における量子的な揺らぎの効果が纏れ合い状態に与える影響を厳密に扱った。BD 模型においては、調和振動子との相互作用によりコヒーレンスが失われていく過程を、通信路容量を用いて表現し、また、調和振動子列の初期状態を熱平衡状態とすると、その温度効果によって通信路容量のより著しい減少を引き起こすことが示された。さらに、調和振動子列の構成要素数が無限大のときを考察し、現象論的な Bloch 方程式との比較検討を行った。また、コヒーレンスの消失によって伝送したい情報の劣化が引き起こされるので、これを抑制するために、BD 模型に対し π パルスを用いた回復メカニズムを取り入れた定式化を行った。 π パルスを等間隔で偶数回印加すると、調和振動子から受ける相互作用効果を無効にすることができ、具体的には通信路容量を求めることによってその効果を表現した。環境系の構成要素数が有限な場合においては、この方法によって BD 模型のコヒーレンスは完全に回復されることが明らかになった。一方、スピン列を扱う CH 模型においては、量子デンスコーディング過程における通信路容量に加え、エンタングルメントの時間変化を fidelity, trace distance によって評価した。とくに、相互作用の強さのパラメータの依存性をしらべると、コヒーレンスが失われる過程のみならず、回復する過程をも示す特徴的なパラメータ値を得ることができる。このことは BD 模型にはみられない特徴的な振る舞いである。さらなる詳細を明らかにするために、これらの模型による量子通信のダイナミクスに関して研究を続行中であり、また、Non- Equilibrium Thermo Field Dynamics の方法による解析などが進められている。

2. Bloch チャンネル, 確率過程による量子チャンネルの扱い (北島) 論文 [7, 9, 10], 講演 [11, 15]

量子通信チャンネルによって惹き起こされるキュービットのディコヒーレンスが Bloch 方程式に従うとき (Bloch チャンネル), エンタングルメントの時間発展はその過程を特徴付ける縦緩和時間, 横緩和時間, そしてキュービットの平衡値 (パウリ行列 z 成分の平衡値) に依存する。コンカレンスなどの指標を求め、これらのパラメータによって纏れ合い状態が分離可能になるときの条件およびその時間変化を示した。また、量子通信チャンネルに及ぼす非マルコフ的效果の研究、さらには確率過程模型を用いてガウスマルコフ過程, 2 状態遷移マルコフ過程に基づく研究を行った。それぞれの扱いにおいてエンタングルメントの時間変化, 量子デンスコーディング過程を論じた。また、量子テレポーテーション過程のダイナミクスに関しては研究結果が出始めた段階である。現在、多状態遷移確率過程を考察し、その量子通信チャンネルへの適用と解析が進められている。

【3】非加法的統計力学 (阿部) 論文 [13, 16, 18]

非加法的統計力学を特徴づけるエントロピーとして、Renyi エントロピーが如何に無意味であるかを示した [13]。論文 [16] では、長距離相互作用をもつ系の平衡熱力学におけるスケーリング則を、Euler の定理を拡張して証明した。また [18] では、Shore-Johnson の定理を用いて、非加法的統計力学において何故 q -期待値という拡張された期待値の導入の

必要性を数学的に証明した。

【4】 複雑系 (阿部) 論文 [11, 12, 14, 15, 17]

複雑ネットワークとして中心的な役割を果たすスケール不変ネットワークを、Erdos-Renyi ランダムグラフにおける頂点間の接続率に揺らぎを導入することによって構成出来ることを示した [11]。[15] では、地震現象を時間発展する複雑ネットワークに写像し、そのネットワークにおける「周期」がベキ則になることを見出した。[17] では、二つの連続する地震の時間間隔の統計性を調べ、それがベキ則的分布に従うことが分った。論文 [12] は、複雑系においてしばしば見られる異常拡散現象が Einstein の 1905 年の Brown 運動理論の立場からいかに自然に理解できるかを論じたものである。非整数微分演算の必要性を導いた。[14] では、カタストロフをもつ複雑系の時系列を「自然時間表現」という新しい方法を用いて記述することによって主カタストロフが予言出来る可能性が生まれることを議論した。

【5】 量子カオス系および量子ドット系における電子相関と輸送現象

(1) 量子ドット系の電子間相互作用: リード線の影響 (浜谷・谷口) 論文 [19], 解説・紀要 [3]

我々は、量子ドット系の低エネルギー領域での挙動を正しく記述するモデルを微視的理論に立脚して調べることを目的とし、ランダム行列理論と電子間相互作用についての繰り込み群の手法を組み合わせ研究を行ってきた。

これまでの輸送現象の考察は線形応答の範囲内に限っていたため、基本的に量子ドット系を閉じた系として扱ってきた。しかし、有限電圧を印加した量子ドットの系の輸送現象は本来、非平衡現象であり、量子ドット系自体を開いた系 (非平衡系) と扱わねばならない。実際、量子ドット系において外界 (リード線) の存在は低温領域で特に重要であり、量子ドット系で観測されている近藤効果現象は、この典型例である。

我々は現在、量子ドット系の電子間相互作用の繰り込みを行うにあたり、リード線の存在が及ぼす影響を調べることを目的として研究を行っている。これまで我々が閉じた量子ドット系に対して使っていたランダム行列と繰り込み群によるアプローチを量子ドット + リード系に拡張するとともに、新たに、ハミルトニアンを直接繰り込んでゆくフロー方程式の方法の適用を考え、現在研究を進めている。

(2) 軌道縮退系の電子相関と輸送現象 (小口・谷口) 修士論文 [4]

近年、半導体の微細加工技術の発展に伴い、量子ドット系も多様化してきた。縦型量子ドット、並列 2 重量子ドットやカーボンナノチューブによる量子ドットなどはその例であり、これらの量子ドットは、軌道縮退や内部自由度をもっている点が従来型とは異なっている。我々は、このような軌道縮退をもつ量子ドット系において、軌道間の電子間相互作用がクーロン閉塞現象や近藤効果といった量子輸送現象に及ぼす影響を明らかにすること

を目的として研究を進めている。量子ドットの準位が軌道が縮退している場合、軌道間の電子間相互作用は異なる。そのため、本年度は、軌道縮退した量子ドット系を記述するモデルとして、同軌道内には Coulomb 相互作用 U 、異軌道間には Coulomb 相互作用 V が働くものと仮定した 2 サイト Hubbard 型の模型に対して研究を進めた。本年度の成果は以下の通りである。

(1) Coulomb 閉塞領域の条件を静電エネルギーから同定し、ゲート電圧の変化に対して線形コンダクタンスピークが幅 V 、 U と交互に現れるクーロン閉塞現象が見られることが分かった。このうち、幅 V のクーロン閉塞領域ではドットの総電子数は奇数であり、低温で近藤効果が現れ得る。

(2) 更に低温 (近藤温度) 領域の線形コンダクタンスを振舞いを調べるため、遷移振幅の 2 次摂動の範囲で解析を行った。 $V = U$ の時には、従来の $su(4)$ 軌道近藤効果の結果を再現する。軌道間の電子間相互作用が弱い場合 ($V < U$)、近藤温度に比べ十分に高い温度領域では、 $V = U$ の時と比べ線形コンダクタンスは減少する。しかし、この過程は散乱プロセスに強く依存し、2 次摂動の範囲内の散乱プロセスを詳細に調べると、 $U < V$ の領域でより強い近藤効果を示す散乱プロセスが存在することがわかった。従って、低温領域ではこの散乱プロセスの寄与が支配的になり、コンダクタンスが増大すると予測される。

以上の結果から予測されるゲート電圧に対する線形コンダクタンスの概念図を図 3 に示した。図 3(a) は $V = U$ 、図 3(b) は $V < U$ に対応し、実線は低温、点線は低温での振舞いを表す。今後、スケーリング理論や繰り込み群による議論により高次効果を取り込み、現在得られている 2 次までの結論の妥当性を調べる予定である。

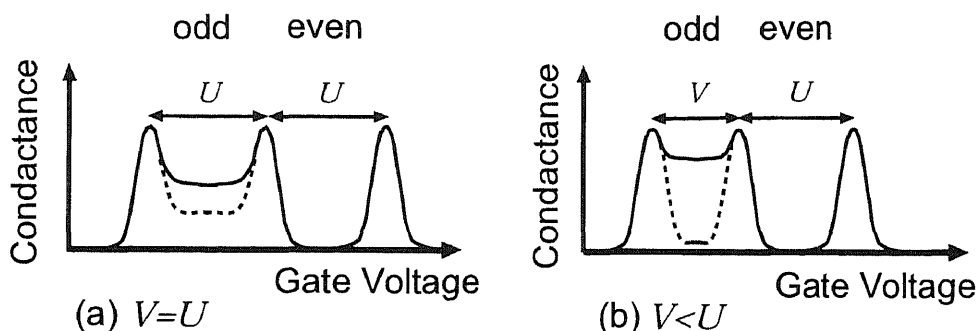


図 3: ゲート電圧に対する線形コンダクタンスの図。(a) は $V = U$ 、(b) は $V < U$ に対応し、実線は低温での振舞い、点線は高温での振舞いを表す。

(3) 量子カオス系の有効場理論と等エネルギー面上の場の理論 (谷口) 論文 [20], 解説・紀要 [4], 講演 [21]

弾動的な量子カオス系の有効場理論をアンサンブル平均の処方箋に頼ることなく構築しようとする、Wigner-Dyson 相関を与える「物理的な」零モードに加え、「非物理的な」零モードが現れるため、物理的なモードのみにロックする付加的な機構 (mode-locking) が必要と考えられてきた。我々は、この問題を解決するため、量子化条件・量子位相の検討を通じ、等エネルギー面上の位相空間に場の理論を構築する必要性を認識し、その定式化を行ってきた。

興味深いのは、「等エネルギー面上の場の理論」と言う観点からみると、これまでまったく異なると考えられていた「量子カオス系・乱れた電子系の有効場理論」と強相関電子系で最近、頻繁に用いられている「ゲージ場理論」や「ボゾン化法」とが、ほぼ同等であることがわかったことである。これは、カオスのハミルトン力学と量子多体系を結びつけるまったく新しい視点である。本年度の主な研究実績・状況は以下の通りである。

(1) 有効場理論の対称性は非コンパクトであるため、コンパクトの時と異なり代数構造(カレント代数)とその有効場理論が必ずしも一意性に対応せず、適切な表現空間を付加的な条件として決める必要があることがわかった。ただし物理的に常識的な Fock 空間を表現空間として選べば良く、これまでの議論・結論にはほとんど変更はない。

(2) 等エネルギー面上の古典軌道の幾何学的性質と応答との関係について調べたところ、半古典論を越えた量子効果を議論するためには、量子干渉・位相効果を軌道や波動関数に付随するものと考えたよりも、むしろ、等エネルギー面という射影された空間の状態空間の幾何や代数構造を調べるほうが得策であるとの認識が得られてきた。このことについては現在研究を継続中である。

(3) 等エネルギー面上の場の理論を多体系に適用する場合、等エネルギー面上への射影操作が問題になる。平均場近似でスペクトル Husimi 関数を求めると、動的平均場と等価な定式化が得られ、この時点で超対称化するとアンダーソン局在を支配する位相自由度を導入することが可能であり、Mott 型絶縁体転移と Anderson 型絶縁体転移を統一的に取り扱うことが可能である。ただし多体相互作用系をはじめから超対称化することはできないため、動的平均場を経て初めて導入されるこの位相自由度の意味は現在のところそれほど明らかではない。

(4) 運動粒子のダイナミクスと凝集パターンのフラクタル性 (矢代・谷口) 卒業論文 [5]

自然界では、多くの複雑なパターンやフラクタル構造が自然に形成されている。このような複雑なパターン形成を支配する微視的機構とは何であろうか。本研究では、運動粒子の付着により形成される凝集パターンについて、運動粒子の運動機構と形成されるパターンのフラクタル性との関係を数値実験により調べた。運動粒子が 2 次元拡散運動を行う場合には、フラクタル的パターンが形成されることが知られている(拡散律速凝集)。一方、ダイナミクスが弾動的であると、形成される凝集パターンにはフラクタル性は現れない(弾道凝集)。本研究では、運動粒子のダイナミクスを拡散的から弾道的へと連続的に変化させ、得られた凝集パターンのフラクタル次元を解析することにより、運動機構の影響を考察した。その結果、フラクタル的凝集パターンを形成するための条件として、運動のランダム性、特にパターン中心と反対方向へと移動する運動の実現確率の有無が極めて重要であることが分かった。

(5) 定磁場における 2 次元電子系の閉じ込め効果と電子相関 (関川・谷口) 卒業論文 [6]

定磁場におけるバルクの 2 次元電子系では、一体の電子状態として縮退した Landau 準位が形成される。しかし、量子ドット中のようにパラボラ型の閉じ込めポテンシャル中に電子を閉じ込めると、ランダウ準位の縮退が解かれ、一体の電子状態はいわゆる Fock-Darwin 状態となる。本研究では、磁場中の量子ドット系における電子相関を調べることを目的として、Fock-Darwin 状態における電子相関の役割を考察した。

【6】 ボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC) の理論的研究

(1) 総説 (松本、大橋) 解説 [5, 6, 7, 8, 9]、講演 [31, 39, 40, 41, 42, 43, 48, 49, 57, 58]

1995年のレーザー冷却・磁気トラップ・蒸発の過程による $\mu\text{K}, \text{nK}$ の極低温達成により、量子統計力学の基本とされている自由ボーズ粒子のボーズ・アインシュタイン凝縮が実現されたことは良く知られたことである。然しながら、その後の実験的・理論的解析により、弱く相互作用する粒子系でも、凝縮粒子との相互作用により凝縮粒子に比例した有効相互作用が系を支配し、自由粒子記述では留まらない新たな理論的解析が必要なことが明らかになってきた。さらに、フェルミ原子気体の超流動状態 (BCS状態) に関して、フェッシュバハ共鳴を利用した引力機構による実現可能性の理論的指摘が大橋等によりなされ、その帰結としての理論的予言であるBCS/BECクロスオーバーが実験的に実現された。このことにより量子原子気体のボーズ・アインシュタイン凝縮は、新たな局面を迎えたと言っても過言ではない。ボーズ系・フェルミオン系の任意の超流動状態が実現されることになり、量子原子ガスのシステムは物理パラメータのコントロール可能な量子多体系として、問題の山積する凝縮量子多体系の理解を深める有用な実験系としても重要な意味を持ってきている。実際、フェッシュバハ共鳴を利用した原子-原子散乱機構は、粒子間の相互作用を外部からコントロールするというこれまでに無かった側面を実現し、弱結合から強結合に到る相互作用の任意のパラメータ領域を得ることができる。それに加え、これらの系では、オプティカルトラップにより、人工的な格子に系を閉じ込めることが出来、理想化された固体状態に対応する状況を作り出すことが出来る。オプティカル格子の強度を変化させることによって超流動-絶縁体転移も実験的に実現している。この系のもう一つの特徴は、現象の緩和時間がmsのオーダーで時間的観測可能な緩和であることにある。渦糸状態の三角格子形成の時間過程なども観測されており、凝縮系の非平衡理論に対する良い実験系である。

これらの実験的進歩に対して、本年度は渦糸状態の解析とその動的変化の検討、BEC状態やBCS状態の実現される相図の理論的解析、オプティカル格子内でのボーズ粒子・フェルミ粒子の相関などについて調べた。

(2) BECでの渦糸状態 (松本、大橋) 論文 [21, 22, 23, 24]、講演 [22, 23, 24, 25]

凝縮状態の秩序パラメータに対する方程式 (GP方程式) に現象論的な散逸項を導入した式を用いて、三次元大規模数値シミュレーションを実行し、ボーズ凝縮気体中の渦糸生成について調べた。秩序パラメータが急激に小さくなるトーマス・フェルミ端が凝縮体の端と同定される。位相はさらにそれを囲む大きな範囲で定義されるが、位相が定義できる領域と揺らぎの領域とに明確な境界が形成されるという結果が得られた。渦糸格子はこの領域を含めて三角格子が形成され、トーマス・フェルミ端が六角形の構造を示す結果が得られた。これは実験で観測される傾向と一致している。渦糸生成の時間変化シミュレーションにより、その生成過程が三段階に分けられることを示した。初期のトーマス・フェルミ端での表面振動として不安定性が生じる段階、表面からの渦の出入とそのカオス的運動により急激にエネルギー散逸の起こる段階、緩やかに格子を形成していく段階である。

また、フェルミオン系の渦糸状態で、BCS - BECクロスオーバーでの渦糸状態の変化と、渦糸にトラップされたエネルギーレベルの変化を明らかにした。

(3) 光学格子中のボーズ原子ガスと超流動—絶縁体転移 (松本、大橋、高橋 (院生)、北浦 (院生)) 論文 [25, 26]、著書 [1]、講演 [26, 27, 28, 29]

光学格子中の原子ガスは、結晶中の粒子と同じ周期的な状況を作り出すことに加え、そのポテンシャルを自由にデザインできることや、フェッシュバッハ共鳴を利用して相互作用の強さを調節できることから、強相関電子系など凝縮系物理の難問にあらたな情報を与えるものとして期待されている。中性ボーズ原子気体に対しては、レーザー強度の変化でポテンシャル強度を変化させ、超流動—絶縁体転移が実験的に実現されている。この現象をボーズ・ハバード模型を用いて、強結合極限から理論的に調べた。超流動—絶縁体転移近傍の超流動状態での励起スペクトルは、ギャプレスの励起スペクトルに加え、絶縁体的なギャップを有する励起スペクトルも残り、バンド構造に「局在、遍歴」の二重構造が見られることがわかった。また、量子補正を局所近似の範囲で取り入れた結果は、転移近傍で相関の強い粒子状態が形成され、それが超流動状態になるという結果を得た。

(4) フェルミ原子ガスの超流動の研究 (大橋、福島 (院) 論文 [27, 28, 29, 30, 31]、解説・紀要 [6, 7, 8]、講演 [30, 31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43])

フェッシュバッハ共鳴で実現されるフェルミ原子ガス超流動について、BCS-BEC クロスオーバー現象を中心に研究した。異方的フェッシュバッハ共鳴によって、p波超流動から三種類の分子ボソンが凝縮するスピノール BEC へのクロスオーバーが起こることを示し、その転移温度を予言した。強結合領域での分子間相互作用を繰り込み群により解析、分子間相互作用が多体効果によって温度依存性をもつことを明らかにした。BCS-BEC クロスオーバー領域での一粒子励起スペクトルおよび rf トンネルスペクトルを微視的理論より計算、実験を定量的に説明できることを示した。フェッシュバッハ共鳴が narrow な場合と broad な場合につき比較を行い、散乱長によって相互作用を記述した場合には、いくつかの物理量についてほぼ同じ結果を与えることを明らかにした。

(5) 光学格子中のフェルミ原子ガス超流動の研究 (松本、大橋) 論文 [32, 33, 34]、解説・紀要 [9]、講演 [44, 45, 46, 47, 48, 49, 50, 51, 52, 53, 54, 55, 56]

フェルミオン系の光学格子中の原子気体は、ハバード模型で解析することができる。そのため強相関電子系との対応を議論することができる。それに加え、トラップポテンシャルや相互作用を自由に調節することができるため、強相関電子系の理解を深める情報が得られると期待されている。またこれらを利用して、新たな現象が設計できるのでと考えられている。斥力ハバード模型の半占有状態近傍では、トラップポテンシャル中心にモット絶縁体が形成され、その周辺にホールのドーピングされた領域が形成される。スピン揺らぎの強いモット相のまわりに稼動できる流動相を作ったことになり、モット相のスピン揺らぎを媒介として流動相粒子間に対生成ポテンシャルが働く可能性が考えられる。次元の数値計算で対形成の傾向が見られることを示し、新たな超流動生成機構を提唱した。また、up-down の擬スピン状態のアンバランスを生じさせることにより、フェルミ原子気体の擬スピン磁化状態が形成されることを示し、その磁化の分布、粒子の遍歴性についての性質などを、数値計算によって明らかにした。

【7】 超伝導の理論的研究

- (1) ジョセフソン渦糸格子とジョセフソンプラズマモード (松本、大橋) 論文 [35, 36]、解説・紀要 [10] 講演 [60, 61]

高温超電導体の電磁的性質は、多重ジョセフソン接合モデルで説明できることが知られている。多重ジョセフソン接合に対する位相差、電磁場間の方程式を用いて、帯電効果と電磁誘導効果により、ジョセフソン渦糸状態の運動やそれと結合した電磁振動（ジョセフソンプラズマ）などがどのような性質を示すかを調べることができる。特に、内部に生じる電磁励起がテラヘルツ領域の振動数を持つことから、これをテラヘルツ発振素子として利用できないかが注目を集めている。内部の電磁振動と外部の電磁振動の関係を調べるため、外部と内部の電磁場がカップルした方程式を導き、その関係を数値計算により調べた。手始めとして反射率を数値シミュレーションで求め、ジョセフソンプラズマ振動数半分あたりに新たな吸収端が現れ、磁場とともに変化するという実験の傾向と一致する結果を得た。ジョセフソン渦糸の運動とジョセフソンプラズマモードが強くカップルしているための現象であることがわかった。

【8】 研究・教育成果の社会への還元・奉仕活動

- (1) 集中講義 (有光、大橋) 集中講義等 [1, 3, 4, 5]
(2) 出前講義 (有光) 集中講義等 [2]

<論文>

- [1] N. Arimitsu and T. Arimitsu: "An Aspect of Granulence in view of Multifractal Analysis" *Traffic and Granular Flow '03*, eds. S.P. Hoogendoorn, S. Luding, P.H.L. Bovy, M. Schreckenberg and D.E. Wolf (Springer, 2005) pp.597-602 [cond-mat/0312164].
- [2] T. Arimitsu and N. Arimitsu: "Towards a Search for the Fundamental Process in Turbulence", *The Third International Conference on "Vortex Flows and Vortex Models"*, eds. K. Kamemoto (ICVFM, 2005) pp.161-166.
- [3] T. Arimitsu and N. Arimitsu: "Multifractal analysis of turbulence and granular flow", *Complexity, Metastability and Nonextensivity*, eds. C. Beck, G. Benedek, A. Rapisarda and C. Tsallis (World Scientific, 2006) pp.236-245.
- [4] T. Arimitsu and N. Arimitsu: "Multifractal PDF analysis for intermittent systems", *Physica A* **365** (2006) 190-196.
- [5] P. Jizba and T. Arimitsu: "Towards information theory for q-nonextensive statistics without q-deformed distributions", *Physica A* **365** (2006) 76-84.
- [6] T. Hayashi, T. Arimitsu, S. Kitajima and F. Shibata: "Stabilizer Code for Uncorrelated Errors Can Correct Spatially Correlated Ones", (2006) submitted.

- [7] M. Ban, S. Kitajima and F. Shibata: “Decoherence of entanglement in the Bloch channel”, *Journal of Physics A* **38** (2005) 4235–4245.
- [8] S. Kitajima, M. Ban and F. Shibata: “A Model of Quantum Mechanical Communication Channel with Quantum and Thermal Noises”, *Journal of the Physical Society of Japan* **74** (2005) 1436–1444.
- [9] M. Ban, S. Kitajima and F. Shibata: “Decoherence of Quantum Information in Non-Markovian Qubit Channel”, *Journal of Physics A* **38** (2005) 7161–7174.
- [10] M. Ban, S. Kitajima and F. Shibata: “Decoherence of Quantum Information of Qubits by Stochastic Dephasing”, *Physics Letters A* **349** (2006) 415–421.
- [11] S. Abe and S. Thurner, “Complex networks emerging from fluctuating random graphs: Analytic formula for the hidden variable distribution”, *Phys. Rev. E* **72** (2005) 036102.
- [12] S. Abe and S. Thurner, “Anomalous diffusion in view of Einstein’s 1905 theory of Brownian motion”, *Physica A* **356**, 403–407 (2005).
- [13] S. Abe, “Reply to Comment on ‘Stability of Tsallis entropy and instabilities of Renyi and normalized Tsallis entropies: A basis for q -exponential distributions’”, *Phys. Rev. E* **72** (2005) 028102.
- [14] S. Abe, N. V. Sarlis, E. S. Skordas, H. Tanaka, and P. A. Varotsos, “Origin of the Usefulness of the Natural-Time Representation of Complex Time Series”, *Phys. Rev. Lett.* **94** (2005) 170601.
- [15] S. Abe and N. Suzuki, “Scale-invariant statistics of period in directed earthquake network”, *Eur. Phys. J. B* **44** (2005) 115–117.
- [16] S. Abe and A. K. Rajagopal, “Scaling relations in equilibrium nonextensive thermostatics”, *Phys. Lett. A* **337** (2005) 292–295.
- [17] S. Abe and N. Suzuki, “Scale-free statistics of time interval between successive earthquakes”, *Physica A* **350** (2005) 588–596.
- [18] S. Abe and G. B. Bagci, “Necessity of q -expectation value in nonextensive statistical mechanics”, *Phys. Rev. E* **71** (2005) 016139.
- [19] M. Hamatani and N. Taniguchi, “Low energy effective interaction of XXZ spin interaction in the two-dimensional quantum dot”, *Physica E* **29**, 597–600 (2005).
- [20] N. Taniguchi, “Discrete levels as quantum anomalies: effective field theory of a chaotic billiard” to appear in AIP conference proceedings (Proceeding of LT24).
- [21] N.Sasa, M.Machida, and H.Matsumoto, “3-dimensional Dynamics of Vortices in a Rotating Bose-Einstein Condensate”, *J. Low Temp. Phys.* **138**, 617–622(2005).
- [22] M.Machida, N.Sasa, and H.Matsumoto, “Coexistence of Vortex Liquid and Solid in Rotating Bose-Einstein Condensate”, *J. Low Temp. Phys.* **138**, 623–628 (2005).

- [23] M.Machida, T.Koyama, and Y.Ohashi, "Vortex Structure in Weak to Strong Coupling Superconductors:Crossover from BCS to BEC", *Physica C*(in press, 2006).
- [24] M. Machida, T. Koyama, and Y. Ohashi, "Vortex Structure from BCS to BEC Superfluid", submitted to *Physica C* (2005).
- [25] Y. Ohashi, M. Kitaura, and H. Matsumoto, "Itinerant-localized dual character of a strongly-correlated superfluid Bose gas in an optical lattice", *Phys. Rev. A* **73** 033617 (2006).
- [26] Hideki Matsumoto, Kiyoshi Takahashi , Yoji Ohashi, "Effect of Quantum Correction in the Bose-Hubbard Model." AIP proceedings (LT24), in press (2006).
- [27] Y. Ohashi, "BCS-BEC Crossover in a gas of Fermi atoms with a p-wave Feshbach resonance", AIP proceedings (LT24), in press (2006).
- [28] Y. Ohashi, "Excitations in the BCS-BEC crossover regime of a superfluid Fermi gas with a Feshbach resonance", *Physica C*, in press (2006).
- [29] Y. Ohashi and A. Griffin, "Single-particle excitations in a trapped gas of Fermi atoms in the the BCS-BEC crossover region. II. Broad Feshbach resonance", *Phys. Rev. A* **72** 063606 (2005).
- [30] Y. Ohashi, "Effective interaction between molecules in the strong-coupling BEC regime of a superfluid Fermi gas", *J. Phys. Soc. Jpn.* **74** 2659 (2005). (**papers of Editors' choice**)
- [31] Y. Ohashi and A. Griffin, "Single-particle excitations in a trapped gas of Fermi atoms in the BCS-BEC crossover region", *Phys. Rev. A* **72** 013601 (2005).
- [32] M.Machida, S.Yamada, Y.Ohashi, and H.Matsumoto, "Reply to Comment on Novel Superfluidity in a Trapped Gas of Fermi Atoms with Repulsive Interaction Loaded on an Optical Lattice", *Phys. Rev. Lett.* **95**, 218902 (2005).
- [33] M.Machida, S.Yamada, Y.Ohashi, and H.Matsumoto, "Novel Pairing in the Hubbard model with Confinement Potential", *Physica C* (in press, 2006).
- [34] Masahiko Machida, Susumu Yamada, Yoji Ohashi, Hideki Matsumoto, "Spin Correlation and Superfluidity of Trapped Fermi Atoms on an Optical Lattice", AIP proceedings (LT24), in press (2006).
- [35] Hideki Matsumoto, Yasuhiro Suzuki , Yoji Ohashi, "Reflectivity in the Multi-Josephson Junction Model with Josephson Vortex Lattice", AIP proceedings (LT24), in press (2006) .
- [36] H. Matsumoto, "Electromagnetic Properties in the Multi-Josephson Model with a Josephson Vortex Lattice", to be published in *Physica C* (2006).

<著書>

- [1] H. Matsumoto, "Highly correlated particle systems and composite operator method", in 'Lectures on the physics of highly correlated electron systems IX', ed. A. Avella, F. Mancini, AIP Conference Proceedings Vol. 789 (Melville, New York, 2005), p. 45-91.

<解説・紀要>

- [1] 有光敏彦: 「エントロピー増大の法則と熱平衡状態への漸近」, 数理科学 No.512, February (2006) 43-48.
- [2] 吉田恭, 金田行雄, 「乱流場の大スケールデータ同化による小スケールの再生」乱流現象と力学系的縮約, 京都大学数理解析研究所講究録 1434 (2005年5月)
- [3] M. Hamatani and N. Taniguchi, "Low energy effective interaction of XXZ spin interaction on 2 dimensional quantum dot", 物性研究 **84** (3), 509-510 (2005).
- [4] N. Taniguchi, "Quantum Anomaly and Effective Field Description of a Quantum Chaotic Billiard" 物性研究 **84** (3), 552-555 (2005).
- [5] M. Matsumoto and Y. Ohashi: "Bose-Einstein condensation," in *Encyclopedia of Physics*, Lerner, Rita G. / Trigg, George L. (eds.), Wiley-VCH Verlag (2005), (辞典).
- [6] Y. Ohashi, "フェルミ原子ガスにおける新しい超流動", 素粒子論研究 **111** No. 3. (2005) C21.
- [7] Y. Ohashi, "フェルミ原子ガス超流動の物理: BCS-BECクロスオーバーと新しい物質科学", 物性研究 **85** No.11. (2005) 159.
- [8] (新聞報道) 大橋洋士, 「原子気体の超流動引き起こす力解明に進展」, 科学新聞 10月21日付 (2005)。
- [9] Y. Ohashi, "New Fermion Superfluidity and the BCS-BEC crossover in a trapped gas of Fermi atoms with a Feshbach resonance", 素粒子論研究 **112** No. 2 (2005) B54.
- [10] 小山富男、町田昌彦、松本秀樹, "銅酸化物接合における固有ジョセフソン効果", 固体物理特集号 Vol. 40 No. 10, 773-784 (2005.10).

<講演>

- [1] (招待講演) T. Arimitsu and N. Arimitsu: 「Multifractal PDF analysis for intermittent systems」, International Conference on "News, Expectations and Trends in Statistical Physics", 2005年8月, Kolymbari, Greece.

- [2] P. Jizba and T. Arimitsu: 「On q-non-extensive statistics with non-Tsallis entropy」, International Conference on "News, Expectations and Trends in Statistical Physics", 2005年8月, Kolymbari, Greece.
- [3] T. Arimitsu and N. Arimitsu: 「Towards a Search for the Fundamental Process in Turbulence」, The Third International Conference on "Vortex Flows and Vortex Models", 2005年11月, Yokohama, Japan.
- [4] 有光敏彦, 有光直子, 吉田 恭, 毛利英明: 「境界層乱流におけるエネルギー散逸率PDFのマルチフラクタル解析と一般化次元の抽出」, 日本物理学会 第61回秋季大会, 2006年3月, 愛媛大学・松山大学
- [5] 林剛史, 有光敏彦, 北島佐知子, 柴田文明: 「空間的相関を有するノイズに対するスタビライザー符号による量子誤り訂正」, 日本物理学会 第61回秋季大会, 2006年3月, 愛媛大学・松山大学
- [6] Kyo Yoshida, "Lagrangian renormalized approximation for magnetohydrodynamic turbulence", NIA/ERCOFTAC Workshop on Spectral Models of Turbulence and their Application, (Hampton VA, USA, 30 Jun. 2005).
- [7] 吉田恭, 「Lagrange 繰り込み近似による電磁流体乱流のスペクトル」, 日本物理学会 2005年秋季大会(同志社大学京田辺, 京都, 2005年9月20日) .
- [8] Kyo Yoshida, "Direct Numerical Simulation of Gross-Pitaevskii Turbulence", Warwick Turbulence Symposium, Workshop on: Universal features in turbulence: from quantum to cosmological scales, (University of Warwick, Coventry, UK, 5 Dec. 2005).
- [9] 吉田恭, 有光敏彦 「量子流体乱流の数値シミュレーション」, 京都大学数理解析研究所共同研究集会「混合、化学反応、燃焼の流体力学」(京都大学, 京都, 2006年1月12日) ,
- [10] 北島佐知子, 番雅司, 柴田文明: 「量子コヒーレンスの減衰と回復—厳密な理論模型による扱い—」, 日本物理学会 秋季大会, 2005年9月, 同志社大学
- [11] 黒川百香, 番雅司, 北島佐知子, 柴田文明: 「ブロッホ方程式による量子通信路の扱い」, 日本物理学会 秋季大会, 2005年9月, 同志社大学
- [12] 柴田文明, 番雅司, 有光敏彦, 北島佐知子: 「Non-Equilibrium Thermo Field Dynamics と射影演算子法」, 日本物理学会 秋季大会, 2005年9月, 同志社大学
- [13] 北島佐知子, 番雅司, 有光敏彦, 柴田文明: 「量子通信ダイナミクスの厳密な扱い」, 第14回非平衡系の統計物理シンポジウム—つくば冬の学校2005—, 2006年1月, 筑波大学
- [14] 北島佐知子, 番雅司, 有光敏彦, 柴田文明: 「厳密に解ける量子模型による量子通信ダイナミクス」, 日本物理学会 第61回年次大会, 2006年3月, 愛媛大学・松山大学
- [15] 柴田文明, 番雅司, 北島佐知子: 「多状態遷移確率過程と等価なマイクロ過程」, 日本物理学会 第61回年次大会, 2006年3月, 愛媛大学・松山大学

- [16] (招待講演) S. Abe, “Geometric effect and gauge-theoretic structure in nonequilibrium quantum thermostatics”, International Symposium on Nonlinearity, Nonequilibrium and Complexity: Questions and Perspectives in Statistical Physics (November 27-December 2, 2005, Tepoztlan, Mexico).
- [17] (招待講演) S. Abe, “Complex Network of Earthquakes”, STELAB-WISER International Workshop on Nonlinear Dynamics in Earth-Oceans-Space (EOS 2005) (September 15-16, 2005, Inuyama, Japan).
- [18] (Keynote 講演) S. Abe, “Generalized Boltzmann equation, Stosszahlansatz and nonextensive statistical mechanics”, The 14th International Conference on Discrete Simulation of Fluid Dynamics in Complex Systems (August 22-26, 2005, Kyoto University, Kyoto, Japan).
- [19] (Plenary 講演) S. Abe, “Seismicity in view of science of complexity”, Symposium on Statistical and Nonlinear Physics 2005 (July 31-August 6, 2005, Taiwan).
- [20] (招待講演) S. Abe, “Superstatistics and complex networks emerging from fluctuating random graphs”, International Workshop on Complex Networks (23-24 June, 2005, Seoul National University, Korea).
- [21] N. Taniguchi, “Discrete levels as quantum anomalies: effective field theory of a chaotic billiard” (24th International Conference on Low Temperature Physics, 2005年8月, Florida USA).
- [22] M. Machida, T. Koyama, and Y. Ohashi, “Vortex Structure and Dynamics in Fermi Superfluid Gas.” APS March Meeting, March 13-17, 2006; Baltimore, MD.
- [23] (Invited) M. Machida, T. Koyama, and Y. Ohashi, “Vortex Structure from BCS to BEC Superfluid”, Fourth international conference on vortex matter in superconductors. September 3-9, (2005) Crete, Greece.
- [24] M. Machida, T. Koyama, and Y. Ohashi, “Structure changes of a quantized vortex in Fermi atom gas”, 24th International Conference on Low Temperature Physics, August 10-17, (2005) Florida, USA.
- [25] 町田昌彦、小山富男、大橋洋士, “フェルミ原子ガスにおける渦糸構造とダイナミクス”, 日本物理学会, 2006年3月 愛媛大学、松山大学.
- [26] H. Matsumoto, K. Takahashi, and Y. Ohashi, “Effect of quantum correction in the Bose-Hubbard model”, 24th International Conference on Low Temperature Physics, August 10-17, (2005) Florida, USA.
- [27] 高橋清志、松本秀樹、大橋洋士, “ボーズ・ハバードモデルにおける超流動-モット絶縁体転移”, 日本物理学会, 2006年3月 愛媛大学、松山大学.
- [28] Y. Ohashi, M. Kitaura, and H. Matsumoto, “Itinerant-localized duality in a strongly correlated superfluid Bose gas in an optical lattice”, 文部科学省科学研究費補助金特定領域研究「スーパークリーン物質で実現する新しい量子相の物理」, 2005年12月15-16、東京大学

- [29] 高橋清志、松本秀樹、大橋洋士, "光学格子中のボーズ原子ガス絶縁体超流動転移." 日本物理学会, 2005年9月 同志社大学.
- [30] (invited) A.Griffin, E. Taylor and Y.Ohashi, "Two-fluid hydrodynamics in the BCS-BEC crossover region", Talk at the special CIAR workshop on ultracold matter, Oct.13, 2005 Toronto, Canada.
- [31] (invited) A. Griffin and Y.Ohashi, "Ultracold matter : past and future" Opening talk at the 2005 Cold Atom Workshop in Taipei, Nov. 4, 2005 National Taiwan Normal University, Taipei, Taiwan
- [32] (invited) A. Griffin, E.Taylor and Y.Ohashi, "Two-fluid hydrodynamics in the BCS-BEC crossover region", Second talk at the 2005 Cold Atom Workshop in Taipei, Nov. 6, 2005 National Taiwan Normal University, Taipei, Taiwan.
- [33] A.Griffin, E. Taylor and Y. Ohashi, "Two-fluid hydrodynamics in the BCS-BEC crossover region", Seminar at Department of Physics, Kyoto University, Nov.17, 2005.
- [34] (Invited) Y. Ohashi, "Excitations in the BCS-BEC crossover regime of a superfluid Fermi gas with a Feshbach resonance", Fourth international conference on vortex matter in superconductors. September 3-9, (2005) Crete, Greece.
- [35] Y. Ohashi, "BCS-BEC crossover in a gas of Fermi atoms with a p-wave Feshbach resonance", 24th International Conference on Low Temperature Physics, August 10-17, (2005) Florida, USA.
- [36] (Invited) Y. Ohashi, "Effective interaction between molecules in the BEC regime of a superfluid Fermi gas", ESF Exploratory Workshop, "New phenomena in superfluidity and superconductivity," and NQS2005, "International conference on recent challenges in novel quantum systems." July 3-8, (2005) Camerino, Italy.
- [37] A. Griffin and Y.Ohashi, "Quasiparticles, collective modes and two-fluid hydrodynamics in the BCS-BEC crossover in trapped Fermi gases." Seminar, May 3, (2005) Center for Ultracold Atoms (CUA), MIT Cambridge, USA.
- [38] 大橋洋士、福島直樹, "Condensate fraction and Superfluid density in the BCS-BEC crossover regime of a superfluid Fermi gas", ナノサイエンス特プロ H17 研究成果報告会、2006年3月、筑波大学
- [39] 大橋洋士, "フェルミ原子ガス超流動における BCS-BEC クロスオーバー", 物理学セミナー, 2005年11月15日、東京大学(駒場).
- [40] 大橋洋士, "フェルミ原子ガス超流動における BCS-BEC クロスオーバー." 物理学セミナー, 2005年5月 京都大学.
- [41] (集中講義) 大橋洋士, 「フェルミ原子ガス超流動の物理」 2005年5月、京都大学.
- [42] (集中講義) 大橋洋士, 「フェルミ原子ガス超流動の物理」 2005年10月31~11月2、首都大学東京.
- [43] (集中講義) 大橋洋士, 「フェルミ原子ガス超流動の物理」 2006年3月7~3月8、KEK.

- [44] M. Machida, S. Yamada, Y. Ohashi, and H. Matsumoto, "Novel pairing in the Hubbard model with confined potential", 18th International Symposium on Superconductivity, October 24-26, (2005) Tsukuba, Japan.
- [45] M. Machida, S. Yamada, Y. Ohashi, and H. Matsumoto, "Spin correlation and superfluidity of trapped Fermi atoms on an optical lattice", 24th International Conference on Low Temperature Physics, August 10-17, (2005) Florida, USA.
- [46] **(Invited)** M. Machida, S. Yamada, Y. Ohashi, and H. Matsumoto, "Superfluidity and pseudo-spin magnetism of trapped Fermi atoms on an optical lattice", 14th International Laser Physics Workshop, July 4-8, (2005) Kyoto, Japan.
- [47] 町田昌彦、山田進、大橋洋士、松本秀樹, "フェルミオン光学格子上での擬スピンの磁性及び超流動の発現について." 日本物理学会, 2005年9月 同志社大学.
- [48] A. Griffin and Y.Ohashi, "An overview of recent work on trapped Fermi superfluid gases", Seminar in Department of Physics, Tokyo University of Science, Nov.9, 2005.
- [49] A. Griffin and Y.Ohashi, "An overview of recent work on trapped Fermi superfluid gases", Seminar at Department of Physics, Kyoto University, Nov.15, 2005.
- [50] **(Invited)** Y. Ohashi, "BCS-BEC crossover in a trapped gas of Fermi gas with a Feshbach resonance", 13th international conference on recent progress in many-body theories. December 5-9, 2005, Buenos Aires, Argentina.
- [51] M. Machida, S. Yamada, Y. Ohashi, and H. Matsumoto, "Novel pairing in the Hubbard model with confined potential", 18th International Symposium on Superconductivity, October 24-26, (2005) Tsukuba, Japan.
- [52] A. Griffin and Y.Ohashi, "An overview of recent work on trapped Fermi superfluid gases", seminar at the Donostia International Physics Center (DIPC), September 21, (2005) San Sebastian, Spain.
- [53] M. Machida, S. Yamada, Y. Ohashi, and H. Matsumoto, "Spin correlation and superfluidity of trapped Fermi atoms on an optical lattice", 24th International Conference on Low Temperature Physics, August 10-17, (2005) Florida, USA.
- [54] **(Invited)** M. Machida, S. Yamada, Y. Ohashi, and H. Matsumoto, "Superfluidity and pseudo-spin magnetism of trapped Fermi atoms on an optical lattice", 14th International Laser Physics Workshop, July 4-8, (2005) Kyoto, Japan.
- [55] **(Invited)** Y. Ohashi, "New Fermion Superfluidity and the BCS-BEC crossover in a trapped Gas of Fermi atoms with a Feshbach Resonance", YITP Workshop on "New development in Nuclear Self-consistent mean field theories." May 31, (2005) Kyoto (Kiken), Japan.
- [56] **(Invited)** A. Griffin and Y.Ohashi, "Quasiparticles , collective modes and two-fluid hydrodynamics in trapped Fermi gases", Workshop on Strongly Interacting Quantum Gases, April 19, (2005) Ohio Center for Theoretical Science, Columbus, Ohio, USA.

- [57] 大橋洋士, "希薄原子ガスの高い操作性を活かした新しい物質科学 BCS-BEC クロスオーバーと光学格子中での超流動-絶縁体転移", 物理学セミナー, 2005年10月25日 物質・材料研究機構 計算材料科学研究センター.
- [58] 町田昌彦、山田進、大橋洋士、松本秀樹, "フェルミオン光学格子中での擬スピンによる磁性及び超流動の発現について", 日本物理学会, 2005年9月 同志社大学.
- [59] 大橋洋士, "New Fermion Superfluidity and the BCS-BEC crossover in a trapped Gas of Fermi atoms with a Feshbach Resonance", 物理学セミナー, 2005年6月 青山学院大学.
- [60] H. Matsumoto, Y. Suzuki, and Y. Ohashi, "Reflectivity in the multi-Josephson junction model with Josephson vortex lattice", 24th International Conference on Low Temperature Physics, August 10-17, (2005) Florida, USA.
- [61] (Invited) H. Matsumoto, "Electromagnetic Properties in the Multi-Josephson Model with a Josephson Vortex Lattice", Fourth international conference on vortex matter in superconductors. September 3-9, (2005) Crete, Greece.

<集中講義等>

- [1] 有光敏彦: 集中講義「複雑系科学特論(複雑系科学トピック)」, 2006年2月, はこだて未来大学
- [2] 有光敏彦: 土曜講座「スーパーサイエンスセミナー I」, 講義題目「シュレディンガーの猫と量子力学」, 2005年10月, 茨城県立竹園高等学校
- [3] 大橋洋士, 「フェルミ原子ガス超流動の物理」 2005年5月、京都大学.
- [4] 大橋洋士, 「フェルミ原子ガス超流動の物理」 2005年10月31~11月2、首都大学東京.
- [5] 大橋洋士, 「フェルミ原子ガス超流動の物理」 2006年3月7~3月8、KEK.

<学位論文(博士, 修士)>

- [1] 筑波大学 博士論文: 林 剛史「Applications of Non-Equilibrium Thermo Field Dynamics to Non-Abelian Gauge Theory and to Quantum Information Theory (非平衡場理論の非可換ゲージ理論と量子情報理論への応用)」(2006) 2月.
- [2] 筑波大学 修士論文: 北浦崇弘「光学格子中のボーズ原子ガスの超流動-絶縁体転移」(2006) 2月.
- [3] 筑波大学 修士論文: 福島直樹「フェルミオン原子気体におけるBCS-BECクロスオーバーの研究」(2006) 2月.

- [4] 筑波大学 修士論文：小口悠「軌道縮退をもつ量子ドット系の輸送現象：電子相関がクーロン閉塞、近藤効果に及ぼす影響」(2006) 2月.
- [5] 筑波大学 修士論文：金子聡「非平衡状態における仕事量のゲージ理論」(2006) 2月.

<卒業論文（学士）>

- [1] 筑波大学 卒業論文：武智公平「粉粒体の基礎方程式—金谷理論—」(2006) 3月.
- [2] 筑波大学 卒業論文：中村裕晃「2次元XYモデルの渦と相転移」(2006) 3月.
- [3] 筑波大学 卒業論文：玉置洋正「光学格子中のフェルミ原子ガス超流動におけるBCS-BECクロスオーバー」(2006) 3月.
- [4] 筑波大学 卒業論文：平間毅「BECにおける相転移と量子補正」(2006) 3月.
- [5] 筑波大学 卒業論文：矢代恵一「2次元凝集パターン形成のメカニズムの研究—弾道軌道凝集と拡散律速凝集」(2006) 3月.
- [6] 筑波大学 卒業論文：関川貴史「定磁場における2次元電子系の閉じ込め効果と2体相関」(2006) 3月.
- [7] 筑波大学 卒業研究：冷清水裕子「破壊現象における破片の個数分布と自己相似性」(2006) 3月.
- [8] 筑波大学 卒業研究：中田豊「時間平均による統計力学の再構築」(2006) 3月.