

## 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 (6月1日転入)
大学院生	11名
学群生 (卒業研究)	4名

### 【1】 非平衡散逸系の統計物理

- (1) 大スケールのデータ同化による乱流小スケールの再生 (吉田) 論文 [1],  
講演 [1, 3]

乱流において、流れ場は初期条件や境界条件に敏感に依存することが広く知られている。しかし、一方で、もし空間的に粗い大スケールのデータが (大気乱流を例にすれば、人工衛星等を使って) 時々刻々得られていれば、それより小スケールの流れ場については初期条件に鈍感になる可能性が、気象分野等で示唆されている。これは、流れ場の小スケールのデータは、ある時刻で失われたとしても、大スケールの時々刻々の正しいデータがあれば、時間が経つにつれ「再生」されることを意味する。

本研究では、Navier-Stokes 方程式の DNS (直接数値シミュレーション) を用いて、大スケールのデータを正しいデータに時々刻々同化させる実験を行い、小スケールのデータが「再生」されるために最小限必要なデータ量の定量的評価を行った。その結果、臨界波数

$$k^* \approx 0.2\eta^{-1} \quad (1)$$

以下の低波数モード (大スケール) の正しいデータがあれば、それよりも高波数モード (小スケール) のデータが「再生」されることが示された。ただし、ここで  $\eta \equiv (\nu^3/\epsilon)^{1/4}$ 、 $\epsilon$  は平均エネルギー散逸率、 $\nu$  は動粘性係数である。この結果は、実験を行った Reynolds 数の範囲 (Taylor 長に基づく Reynolds 数で、 $31 < R_\lambda < 179$ ) で Reynolds 数に殆ど依存せず、式 (1) は高 Reynolds 数乱流に普遍的なものであると期待される。

- (2) Lagrange 繰り込み近似による乱流統計解析 (吉田) 解説 [1], 講演 [2, 4]

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 系の平衡系統計力学を適用することはできない。平衡系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 方程式の一様等方性乱流の解析に適用されてきた LRA を、非等方性乱流の場合、NS 方程式以外の流動系の場合に適用することを行っている。回転球面上の流体運動のモデルとなる  $\beta$  平面上の乱流において 1 粒子拡散の解析

年代	研究のおもな展開
1513	乱流のスケッチ (Leonardo da Vinci)
1883	系統的实验の開始 (Reynolds)
1922	カスケード・モデル (Richardson)
41	次元解析による乱流理論の開始 (Kolmogorov)
44	K41 への批判, Landau 方程式 (Landau)
48	乱流粘性 (Heisenberg; 55 Chandrasekhar)
55	量子乱流の渦糸タンブル (Feynman)
57	閉鎖問題 (e.g., Tatsumi)
59	直接相互作用近似 (Kraichnan; 64 Edwards, 65 Novikov)
62	対数正規モデル (Oboukhov, Kolmogorov; 66 Yaglom)
65	Lagrange 描像 (Kraichnan)
77	繰込み群 (Forster-Nelson; 86 Yakhot)
78	$\beta$ モデル (Frisch-Nelkin)
81	Lagrange 的繰込み近似 (Kaneda)
85	特異性分布 (Frisch-Parisi)
87	p モデル (Meneveau-Sreenivasan)
94	対数 Poisson モデル (She-Leveque)
94	再総和法 (Procaccia)
2000	マルチフラクタル解析 (Arimitsu-Arimitsu)
01	特異性の直接測定 (Bodenschatz)

表 1: 乱流研究の展開

を行い、回転が十分速い場合南北方向の拡散が抑えられることを示した。また、圧力の無い流体を記述する Burgers 方程式、液体ヘリウムの超流動状態や Bose-Einstein 凝縮体の流動についての Gross-Pitaevskii 方程式、電磁流体 (MHD) への LRA の拡張とその解析が現在進行中である。

### (3) マルティフラクタル PDF 解析 (有光) 論文 [2, 4, 6, 8, 9], 著書 [1], 紀要 [2, 4, 5], 講演 [5, 6, 7, 8, 9, 11, 12]

充分発達した乱流の理論的研究は、慣性領域における乱雑速度場の自己相似性の仮説に基づいた Kolmogorov の次元解析 (K41) から始まった。Landau の K41 に対する批判や Heisenberg による予備的研究の後、自己相似性の破れや速度場における間欠性を扱う方法は主に 2 つの方向に発展した。一つはダイナミカルな方法 (表 1 の字下がりの項目) であり、もう一つはアンサンブル的方法 (表 1 の左寄せの項目) である。ダイナミカルな方法では、確率的 Navier-Stokes (N-S) 方程式を摂動論で直接扱う。他方、アンサンブル的方法では、渦がエネルギー・カスケードを構成するものとして乱流を統計力学的に解析する。アンサンブル的方法の中でも、「マルチフラクタル PDF 解析」と呼ばれる新しい理論体系とその枠組みで提唱されたモデル (A&A モデル) によって、最近の高精度な実験やシミュレーションで得られた結果を高精度に再現できることが明らかになって来た。

PDF が大偏差統計を呈する他の多くの系 (量子乱流の各種 PDF, 粉粒体の速度 PDF, 銀河の相対速度 PDF, 高エネルギー対消滅衝突の運動量分布, 株価変動の PDF, 交通流に関わる PDF など) の解析手法としてのマルチフラクタル PDF 解析の展開も大いに期待できる。Leonardo da Vinci によって乱流の注意深い観察が成された 1513 年から数えると 500 年近くに亘る、あるいは、Reynolds によって系統的な実験が成された 1

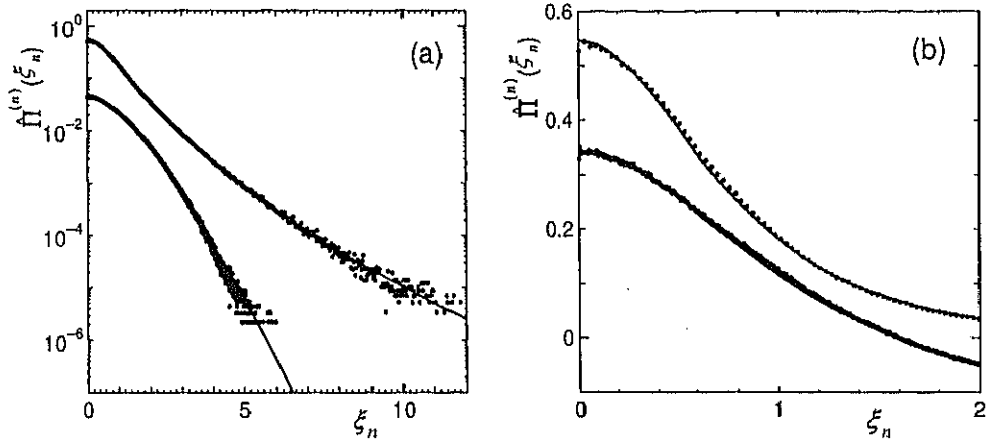


図 1: 量子乱流速度揺らぎ PDF ( $\mu = 0.326$ )。 (a) 対数尺度, (b) 線形尺度。

880年頃から数えてもすでに120年に亘る、「乱流の素過程である間欠性の本質を探る」という物理学における難問への新しい観点での挑戦である。

### 1. 古典乱流 (有光) 論文 [2, 4, 8], 著書 [1], 紀要 [2, 4, 5], 講演 [5, 7, 8, 11, 12]

乱流が実現する状況 (高 Reynolds 数) において, 乱流の基礎方程式である N-S 方程式はある尺度変換不変性を持つが, それに起因する特異性が速度勾配や流体粒子加速度に現れる。マルチフラクタル解析は, 「その特異性強度が実空間にマルチフラクタル分布している」という仮定を踏襲し, それが間欠性の原因であるとして構築されたアンサンブル的統計理論である。確率密度関数 (PDF) の裾野部分は, この特異性分布が決定している。理論に現れるパラメータは, 間欠性の強さを示す間欠性指数が与えられると一意的に決まる。一方, N-S 方程式には尺度変換不変性を破る項 (散逸項) があり, 観測される PDF には当然この影響も含まれているはずである。しかし, これまでの乱流のアンサンブル理論にはこの効果を取り込んだものはなく, そのほとんどが  $m$  次速度構造関数 (速度揺らぎの  $m$  次モーメント) のスケーリング指数を観測結果と比較する段階までに止まるという状況であった。マルチフラクタル解析では, この影響は, 標準偏差より狭い中心部分の PDF を決定するものとして取り込まれている。すなわち, 間欠性を示す系の PDF が呈する広がった裾野部分は系の持つ大域的な性質が決定し, 一方, PDF の中心部分は系を構成している渦の局所的な性質が反映しているものと仮定しているのである。

マルチフラクタル解析は, 観測された PDF を高精度に再現できるので, 中心部分の解析により系の局所的な構造やダイナミクスの情報抽出が可能であり, ダイナミカルな方法に対しても実り多い洞察を与えることが期待される。

### 2. 量子乱流 (院生: 平野寛, 有光) 論文 [8], 著書 [1], 講演 [5, 7, 8, 11]

Maurer と Tabeling (Europhys. Lett. 43 (1998) 29) は, 超流動  $^4\text{He}$  量子乱流の速度揺らぎ PDF を測定した。その結果を対称化し, 図 1 に黒点として掲げた。上の PDF は測定時間差が 1 msec, 下は 100 msec である。図を見やすくするために, (a) では各 PDF を  $-1$ , (b) では  $-0.1$  垂直方向にずらしてある。A&A モデルで得られた PDF を実線で示し

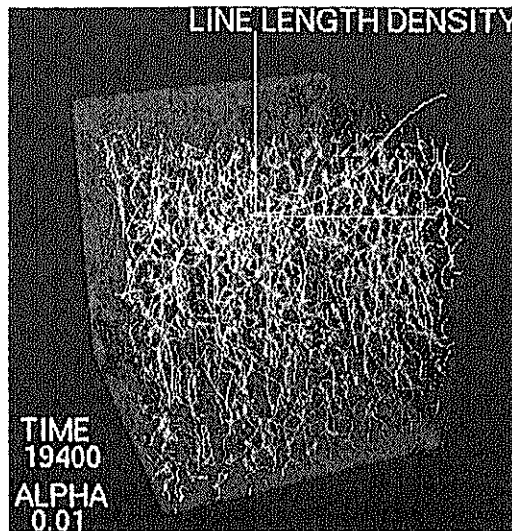


図 2: タングルのシミュレーション。挿入図は渦長密度の時間発展。

た。一致は満足の行くものである。この解析で、間欠性指数は  $\mu = 0.326$  であることが判明したが、この値は古典乱流でほぼ普遍的に得られている値  $\mu \approx 0.24$  よりもかなり大きい値になっている。量子乱流と古典乱流との違いを捉えていると思われるが、さらに詳細な実験とその解析が必要である。

マルチフラクタル解析の成功により乱流のアンサンブル的側面が高精度で調べられるようになったので、間欠性の素過程 (特異性の原因やそれがマルチフラクタル分布する理由など) を探る糸口ができたと言えよう。そのための最も有力な系は、超流動  $^4\text{He}$  や超流動  $^3\text{He}$  中に発生する渦糸タングル (tangle) であろう。渦糸タングルの渦度は量子化されており、超低温下では (2 流体モデルの意味での) 超流動成分と常流動成分の相互摩擦の影響が小さいので、乱流の素過程を探るのに適しているからである。1) もし、乱流の特異性の原因が渦核の形状にあるとすると、乱流のマルチフラクタル性は古典乱流中での豊富な渦度の強度分布と関連していると考えられる。この場合、量子乱流における特異性の分布は、その渦度が単一の値しか持たないためフラクタル (uni-fractal) となり、量子乱流が呈する間欠性は古典乱流とは異なるものとなるであろう。2) 一方、もし、特異性の素過程が渦の再結合であるとする、特異点のマルチフラクタル分布は渦の再結合点の実空間中の分布に対応していると考えられる。この場合は、量子乱流における特異性の分布もマルチフラクタルとなり、古典乱流と同様な間欠性を呈するであろう。この問題に対する解答を得る方法は、古典流体 DNS のある時刻でのスナップショットを利用して、速度導関数や圧力導関数の値の空間分布 (マルチフラクタル・スペクトル) を調べてみることである。また、量子乱流に対しては、渦糸タングル・モデルでのシミュレーションを行い、ある時刻でのスナップショットを調べてみると良いであろう。

そのため、渦糸モデルに従って渦糸タングルの時間発展をシミュレートするプログラムを開発し、得られた渦糸タングルの時間発展を可視化するシステムを構築した。種々の物理量を先行研究の結果と比較し、システムのバグ出しを行った。図 2 に一例として、充分発達した乱流状態のタングルを可視化したアニメーションを掲げてある。渦糸は白い糸として見える。図 2 右上の挿入図には、重要な物理量である渦長密度の時間発展を示した。これにて、超流動 He 相や希薄気体 BEC 相における量子タングルの素過程を検証するた

めの基礎システムが完成したことになる。今後は、渦糸タングルの空間分布から速度場を算出し、速度差確率密度関数 (PDF) を抽出するためのプログラム開発を進めると共に、統計精度向上を図るための大掛かりなシミュレーションを実施する予定である。

### 3. 粉粒体乱流 (Granulence) (有光) 論文 [6, 9], 講演 [6, 9]

Radjai と Roux (Phys. Rev. Lett. 89 (2002) 064302) は、準静的一様ずり下で発生する 2 次元粉粒体の緩い流れのシミュレーションを行い、時間間隔の異なる 2 種類の PDF を観測した。その PDF を、マルチフラクタル PDF 解析により、高精度で再現した。この系は、粉粒体粒子の各散乱が非弾性で摩擦を伴うものであり、乱流系とはかなり基礎過程が異なる。それにも関わらずそのスケーリング性に、乱流系との共通点が見られる。その根底にある共通性の本質を探るのは、今後のたいへん興味深い課題である。

### (4) Generalized Statistics of Rényi (Jizba, 有光) 論文 [3, 5]

We have tried to explore various quantitative aspects of the currently much debated Rényi's statistics. These advances rely upon information theory, especially on the fundamental observations that the most general functional form for the mean transmitted information (i.e., information entropy) is that of Rényi. Although Rényi's information measure offers very natural-setting and maybe conceptually the cleanest-setting for the entropy, it has not found so far as much applicability as its Shannon's (or Gibbs's) counterpart. The explanation lies in two facts; ambiguous renormalization of Rényi's entropy (RE) for non-discrete distributions and little insight into the meaning of Rényi's  $\alpha$  parameter. Surprisingly little work has been done towards understanding both of the former points.

We addressed the renormalization issue in [論文 [3]], where we employed, in a sense, a minimal renormalization prescription conforming to the condition of additivity of independent information and quasilinearity of averaging. RE thus obtained could then directly identified with the Kulback-Liebler measure of divergence (known also as "negentropy"). To find the physical interpretation for  $\alpha$  parameter, we resorted to systems with a multifractal structure. Such systems are very important and highly diverse, including the turbulent flow of fluids, percolations, diffusion-limited aggregation systems, DNA sequences, finance, and string theory. Using the Vilder-Stiltjes reconstruction theorem we showed that in order to obtain a "full" information about a (multi)fractal system one needs to know RE's to all orders. Yet, for discrete sample spaces and simple metric spaces (like  $\mathbf{R}^d$ ) we proved that the contribution from Shannon's entropy dominates over all other RE's. We were able to show that from the maximal entropy (MaxEnt) point of view, extremizing the Shannon entropy on a multifractal is equivalent to extremizing directly RE without invoking the multifractal structure explicitly.

Some doubts were lately cast on whether or nor RE's are observable quantities. This is relevant issue particularly in view of the recent proposal of Bialas and Czyz where the actual measurements of RE (so-called coincidence method) should directly determine the local properties of a multiparticle (e.g., hadronic) spectra. Besides, RE is routinely measured in numerous situation ranging from coding theory and cryptography, through chaotic dynamical systems and earthquake analysis to non-parametric mathemat-

ical statistics. RE's also provide measurable bounds in quantum-information uncertainty relations. In [論文 [3]] we studied the observability issue as well as the closely related issue of stability of RE. We showed that the criterion used in literature to disregard RE's as observable (Leshe's observability condition) is too tight and, in fact, many standard physical quantities (e.g., susceptibility, correlation length or free energy) do not conform to Leshe's requirement. For this purpose we proposed a more intuitive concept of observability by allowing the quantity in question to have a certain amount of "critical" points provided that the cardinality of the critical points in the state space is of zero measure. In the case of RE the state space is the space of all possible statistics and the corresponding measure is Bhattacharyya measure. We were able to prove that the critical points (i.e., distributions themselves) correspond to (ultra)rare events and that their measure is indeed zero.

Recently we proposed a unifying axiomatics for RE and non-extensive entropy of Tsallis. By solving the corresponding Pixeder's functional equation we proved that the resulting entropy coincides with Csiszár's measure of directed divergence known from communication theory and DNA sampling theory [論文 [5]].

## (5) レオロジー (有光) 論文 [7]

高分子両末端の結合により形成されるネットワークの内、水素結合やイオン結合 (熱的に切れる) で繋がっている「物理ゲル」と呼ばれるものでは、熱平衡状態において、高分子両末端の架橋点で熱的な解離と結合を繰り返している。物理ゲルに「ずらし (shear)」の力を加え「ずり速度」を与えると、特徴的なずり速度で粘性の急速な増加と減少 (shear-thickening ; 異常粘性ピーク) が観測されるものがある。この異常ピークのメカニズムの物理的な解釈は、いくつかの試みにもかかわらず、高分子ネットワークの難問のひとつとして解明されずに残されたままになっていた。

本研究では、活動鎖 (両端が架橋点に繋がっており、ネットワークを構成している高分子)、末端鎖 (一端のみが架橋点に繋がっている高分子)、環状鎖 (ループ ; 両端が同一の架橋点に繋がっている高分子) の三種類を考える。ずり速度をかけていない状態では、これら三種類の高分子間の遷移確率に対応した熱平衡状態が実現している。ずり速度を増していくとネットワークが変形し三種類の高分子数間のバランスが変化するために、粘性に変化が現れるのである。

この問題の解決に当たって、異常粘性ピークが2つに要素から構成されていることを見抜いたのが、成功の鍵であった。高く鋭いピーク要素の説明は、高分子末端間に働くエントロピー力として、高分子の全長が有限である効果を適切に取り入れた乱雑飛行模型を採用することにより行った。この論文では、さらに、ある長さ  $r^*$  を導入し、この長さに達した活動鎖は必ず解離して末端鎖になるものと仮定する。これは物理ゲルが解離し易い相互作用で結合していることを取り入れたもので、 $r^*$  は物理ゲルに固有の長さである。解析の結果、このピーク要素は、「 $r^*$  近傍まで引き伸ばされた活動鎖が、強いエントロピー力で架橋点を引き合うため」現れることが解明された。高分子全長が短いほどピークが高くなるという実験結果も、全長が短いほど  $r^*$  近傍の活動鎖数が多いことにより理解できる。一方、低く幅広いピーク要素に対しては、以下のメカニズムが解明された。ずり速度が増すと共に、糸毬状の環状鎖に衝突する末端鎖や他の環状鎖の数が増加し、環状鎖が解離して末端鎖になる確率が増える。末端鎖の増加は活動鎖の増加を促し、結果として低く幅広いピークを形成するのである。このピークが高分子の全長にほとんど依らないのは、

糸毬状の環状鎖の広がりが高分子の全長にほとんど依存しないからである。

以上の解析により、物理ゲルの異常ピークの実験結果を再現することができた。

## 【2】 散逸場の量子論

量子情報物理（院生：林剛史，有光）講演 [10, 13, 14]

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)。

この独自の体系を駆使して、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。

## 【3】 非加法的統計力学 (阿部) 論文 [10, 11, 12]

非加法的統計力学を特徴づける分布関数を定常解として持つような Fokker-Planck 方程式を正準形式で定式化し、その伸縮変換対称性を調べた [10]。論文 [11] では、非加法的統計力学において基本的な役割を果たす Tsallis エントロピーが熱力学および測度論的考察から如何に一意的に規定されるかを示した。また、[12] では、任意の与えられた分布関数によって最適化される一般化されたエントロピー汎関数の測度論的安定性を研究し、一般的な安定条件を導いた。

## 【4】 カタストロフを呈する複雑系 (阿部) 論文 [13, 14, 15, 16]

余震の Omori 領域における加齢現象とスケーリング則を見出した [13]。次に、地震の時系列を成長するランダムグラフに写像し、それがスケール不変ネットワークでありかつスモールワールドネットワークであることを示した [14, 15]。更に、[13] で得られた結果に対する数値モデル計算としてコヒーレントノイズ模型を取り上げ、自然時間に関するその加齢現象とスケーリング則を確認した [16]。

## 【5】 量子ドット系・量子カオス系の量子効果の研究

### (1) 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 [17], 紀要等 [6], 講演 [15, 16]

量子カオス系の有効場理論として、超行列非線型シグマ模型がよく知られているが、その導出や妥当性の本質的な部分は拡散的量子ドット= 乱れた電子系での議論に立脚している。系のダイナミクスが弾道的になる量子ビリヤード系ではその妥当性は明確になっていないのみならず、(1) 周期軌道をもたらす量子干渉効果に軌道の回折効果が現れ、それが場の理論による予想から微妙な差異があること、(2) 弾道的系に対し有効場理論の導出を試みると、Wigner-Dyson 相関を与える物理的な零モードに加え、「非物理的な」零モードが存在するのように見えること (mode-locking の問題)、といった困難が存在する。これらは 弾道運動系に対する有効場理論の妥当性と深く関わる根本的問題である。

我々はこの問題について有効場理論 (超行列非線形シグマ模型) の立場から、アンサンブル平均と有効場理論の関係に着目し研究を続けてきた結果、本年度には大きな進展が得られた。本年度の研究成果は以下の通りである。

- 有効場理論の導出する際に現れる mode-locking の問題を解決するため、量子カオス系における量子化条件・量子位相 (ベリー位相) を詳細に検討した。その結果、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た。
- 古典系と量子系ではエネルギー準位の状態が連続的から離散的へとかわる。これを「量子異常」という概念で捉えることが可能である。カオス系のようなエルゴード系の量子化はその手続きが完全に理解されているわけではない。しかし離散準位は量子化の帰結であり、離散的準位の存在とその帰結を量子化条件の代替物として使うというのが基本的な考え方である。
- 上述した離散準位による「量子異常」を丁寧に調べると、等エネルギー面上の場の理論のカレント代数に Schwinger 項をもたらすことを示すことができた。つまり、カレント代数として Kac-Moody 代数が現れる。従ってその経路積分表示をとると、有効場理論は位相項 (Wess-Zumino 項) を含む非線型シグマ模型となる。従来必要とされていたアンサンブル平均の処方箋は有効場理論の導出に必要なではない。0次元近似のもとで準位相関がランダム行列理論で近似できることも、このカレント代数より説明できる。
- 等エネルギー面の場の理論の記述に使う位相空間表示としては、標準的には Wigner 表示もしくは Husimi 表示 (波束表示) を選択することができるが、上述のカレント代数の同定の際に両者は同等ではない。カレント代数が  $\hbar$  の高次の効果を含めて Kac-Moody 代数となることは Husimi 表示のみで厳密に示すことができる。
- 古典力学 (カオス的振る舞い) との対応を考える上で、Winger 表示と Husimi 表示の違いは重要である。 $\hbar \rightarrow 0$  の極限で、前者は Liouville 方程式を与えるが、後者は粗視化された Liouville 方程式、つまり Peron-Frobenius 方程式に対応する。
- 「等エネルギー面上の場の理論」と言う観点からみると、従来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」と強相関電子系で頻繁に用いられている「ゲージ場理論」や「ボゾン化法」とは、ほぼ等価であることが



わかった。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。

今後、本研究の結果を等エネルギー面上の場の理論として拡張・整備し、等エネルギー面上の力学の局所および大域的 (=幾何学的) 性質と量子位相効果・量子多体効果との関係を調べることにより、新しい観点より量子位相現象や量子相転移に対する知見を得ることを目指す。

## (2) カオス的量子ドットによるエンタングルメント状態の生成 (坂井・谷口) 卒業論文 [4]

エンタングルメント状態の生成は、相互作用に基づく生成過程が一般的であるが、その方法は複雑でありコントロールも難しい。本研究では、もっとも簡単にエンタングルメント状態を作る方法として、量子ドットに2チャンネル状態を入力することによりエンタングルメント状態を生成する過程について研究を行った。不規則境界を持つ量子ドット系は、量子カオス系を考えることができる。量子カオス系ではいわゆる普遍相関を使うことにより、種々の物理量の統計的な性質を予測することが可能である。このことを踏まえ、不規則境界を持つ量子ドット系に2チャンネル状態を入力する場合にどのような性質を持つエンタングルメント状態が生成されるのかを調べた。エンタングルメント状態は、コンカレンス  $C$  や Bell パラメータ  $\mathcal{E}$  で特徴づけることができる。これまでは、時間対称性の有無は生成されるエンタングルメント状態にそれほど影響を与えないと考えられてきたが、それは時間反転対称性の有無によりエンタングルパラメータの平均と平均には変化がほとんど見られなかったからであった。

本研究では、量子カオスの普遍相関を使うことにより、平均・分散に留まらず、これらのエンタングルパラメータの分布関数自体を調べた。特に、コンカレンス  $C$  の分布関数  $P(x) = \langle \delta(x - C) \rangle$  については次の比較的簡単な解析的表式で表されることわかった (平均は不規則量子ドットについてのアンサンブル平均)。

(時間反転対称性のあるとき)

$$P(x) = \frac{2}{(1+x)^2},$$

(時間反転対称性のないとき)

$$P(x) = \frac{x}{(1-x^2)^3} \left[ (2+3x^2)\operatorname{sech}^{-1}x - 2(4x^2+11)\sqrt{1-x^2} \right]$$

このように、コンカレンスおよび Bell パラメータの分布関数を解析的・数値的に調べることにより、時間反転対称性の有無が、生成されるエンタングルメント状態に顕著な影響を与えていることが明らかになった。

## (3) 2次元量子ドット系の電子間相互作用と異方性 (浜谷・谷口) 論文 [18], 紀要 [7], 講演 [17, 18]

微粒子系では、電子間相互作用は準位の離散性と絡み合い、バルク系とは異なる現象をもたらす。クーロン閉塞現象・永久電流などが有限系特有の現象の典型である。また最近

では GaAsMn などの磁性半導体だけでなく、本来非磁性的であるはずの金の微粒子系にも強磁性が観測され、微粒子系特有の電子間相互作用現象の理解が求められている。

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模型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いる。特に本年度は、異方性のある相互作用が存在したとき磁性的秩序が安定化する傾向があること、および、繰り込み群のフロー解析から実現を示唆される新たな相の性質に関し、研究を継続的に進めている。

## 【6】 ボーズ・アインシュタイン凝縮 (BEC) の理論的研究

### (1) BEC の励起スペクトル (松本、市野 (院生)) 紀要等 [8]

調和振動子型トラップポテンシャル、斥力相互作用  $V$  のある系で、励起エネルギーの温度依存性を調べたところ、常流動状態では低温で各運動量  $1$  のモードが減少する結果を得、コーンの定理に矛盾する結果となった。低温での通常の場合の理論の取り扱いにボゾン系では再考慮の必要があることが明らかになった。有限個数の系の取り扱いとして、カノニカル分布からの場の理論的アプローチを検討中である。

### (2) BEC における非平衡理論 (松本) 紀要等 [9]

秩序パラメーターとその影響を受けた準粒子を同時に扱う非平衡理論を展開しているが、トラップポテンシャルの存在のための空間依存性が強いことを考慮し、準粒子の変化を準粒子場の微分方程式を導くことで表現した。得られた準粒子場の方程式は、時空で変化する粒子エネルギー、減衰幅、粒子分布の情報を含んでいることを示すことができた。BEC の動的性質で、凝縮体と粒子励起成分の相互のやり取りを考慮することが必要となってきたが、実際の非平衡現象に適用するのが今後の課題である。

### (3) BEC での渦糸状態 (松本) 論文 [21, 22]、講演 [19, 20, 21, 22]

凝縮状態の秩序パラメーターに対する方程式 (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。トラップポテンシャル中の凝縮体においては、秩序パラメータが急激に小さくなるトーマス・フェルミ端がほぼその端と同定されるが、位相はさらにそれを囲む大きな範囲で定義される。しかし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・フェルミ端は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。また、渦糸は揺らぎ領域から生成され位相領域に入り込んでくることがわかった。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。急激なエネルギー散逸が起こる段階では、渦の衝突によって渦糸の組換えが起こっていることがわかり、系の安定化に散逸過程が重要な役割をしていると考えられる。

(4) 光学格子中のボーズ原子ガス超流動-絶縁体転移 (松本、大橋、高橋 (院  
生)) 論文 [23, 32]、講演 [24, 26, 28]

希薄アルカリ原子気体の量子状態については、フェッシュバッハ共鳴による相互作用の自由な調節ができることや、光学的な方法により周期ポテンシャルを印加できることなど、外的に理想的な状態を用意できることに特徴がある。その中で、光学格子中の原子ガスは、結晶中の粒子と同じ状況を作り出すことにより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。実際、中性ボーズ原子気体をレーザーを利用して作られた光学格子内にトラップし、レーザー強度を変化することによって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観測された。これを理論的に調べるには、ポテンシャルにトラップされた粒子を、タイトバインディング近似で記述しボーズハバード模型にモデル化できる。この模型を用いて、強結合極限から場の理論の手法を用いて、超流動-絶縁体近似を調べた。また、NCA 近似で量子補正の効果を取り入れ、その効果を調べた。フェルミオンハバード模型のように絶縁体-超流動転移近傍で相関の強い粒子状態が形成される予備的結果を得ている。

また、光学格子中のボーズ原子ガスについて、超流動-絶縁体転移近傍の励起スペクトルを計算した。絶縁体転移近傍の超流動状態では、ギャッ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が現れ、バンド構造に「局在、遍歴」という二重構造が見られることを見出した。

(5) フェルミ原子ガス超流動の研究 (大橋) 論文 [26, 27, 28, 29, 30, 31]、解説  
[10, 11]、講演 [31, 32, 33, 34, 35, 36, 37, 38, 39, 40, 41, 42, 43, 44, 45, 46, 47, 48,  
49, 50]

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 3 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、その際の転移温度を予言した。また、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持つことを明らかにした。同時に、絶対零度におけるこの結果は、これまでいくつかの理論間で不一致がみられた散乱長の大きさの原因が繰り込み効果に起因するものであることを明らかにし、ここ一年ほど大きな問題になっていた、BEC 領域での分子間相互作用の強度の問題に、最終的な回答を与えた。更に、一粒子励起スペクトル、及び、 $r f$  トンネルスペクトルを微視的理論により計算、実験を定量的に説明できることを示した。Feshbach 共鳴が narrow の場合と broad の場合についての比較を  $T=0$  に対し行い、散乱長によって相互作用を記述した場合には、いくつかの物理量の振る舞いについて両者はほぼ同じ結果を与えることを明らかにした。

(6) 光学格子中のフェルミ原子ガス超流動の研究 (大橋、松本) 論文 [20]、講演  
[30, 51]

フェルミオン系の光学格子中の原子気体は、ハバード模型に帰着できるため、強相関電子系との対応が議論されているが、トラップポテンシャルの存在により異なる状況が生

じるかを数値シミュレーションにより調べた。原子間斥力が強い場合、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状態が形成され、その周辺にホールのドーピングされた状態が形成される。これは、スピン揺らぎの強いモット層のまわりに稼動できる流動層を作ったこととなり、モット相のスピン揺らぎを媒介として流動層粒子間に対形成ポテンシャルが働く可能性が考えられる。実際、一次元の数値計算であるが対形成の傾向を示しており、あらたな超流動/超伝導形成のメカニズムが考えられ、トラップ中心付近に形成されたモット絶縁体を挟んでその周囲に超流動状態が発生しうることを理論的に予言した。

## 【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) 論文 [19]、講演 [23, 25, 27, 29]

高温超伝導体の電気磁気的性質が多重ジョセフソン接合模型で記述され、そこに励起されるジョセフソンプラズマ振動がテラヘルツ領域であることから、テラヘルツ発振の素子として利用できないかとの研究がさかんにされている。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、帯電効果と電磁誘導効果を取り入れ導出して、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) などがどのような新しい現象を引き出すかを調べた。

まず、静的に安定化したジョセフソン渦糸配列を数値シミュレーションで求め、その周りの微小振動を調べることにより、以下の結果を得た。外部磁場が  $\Phi_0/(2\pi\lambda D)$  (ここで  $\Phi_0$  は磁束量子、 $\lambda$  は ab 軸方向のロンドン侵入長、 $D$  は絶縁体層の厚さ) より大きいときには、ジョセフソン渦糸が三角格子を形成し、通常の磁場とともに振動数が増加するジョセフソンプラズマモードに加え、低周波数側に磁場とともに減少するモードができることがわかった。これは門脇・掛谷により得られた実験結果と一致する。外部磁場が  $\Phi_0/(2\pi\lambda D)$  以下では、ジョセフソン渦糸三角格子は崩れ、不規則な配列となる。

また、外部電磁場と内部電磁場をカップルさせた数値シミュレーションの方法を開発し、電磁波発振の状況を調べた。層間に形成されるジョセフソン磁束の集団運動のコヒーレンスが強い発振を実現させるには重要な役割をしていることがわかった。内部の集団運動を如何にコントロールするかが今後の問題である。外部電磁場との共鳴を利用することが一つの方法として考えられるが、数値シミュレーションによる検討が必要である。

### (2) 超伝導の研究 (大橋) 論文 [24, 25]

MgB<sub>2</sub> と有機超伝導体  $\lambda$ -(BETS)<sub>2</sub>Fe<sub>1-x</sub>Ga<sub>x</sub>Cl<sub>4</sub> について研究し、前者については2バンド超伝導における非磁性不純物効果、後者については元素置換による超伝導-絶縁体転移の様相を明らかにした。

## <論文>

- [1] Kyo Yoshida, Junzo Yamaguchi, and Yukio Kaneda, "Regeneration of Small Eddies by Data Assimilation in Turbulence", Phys. Rev. Lett. 94 (2005) 014501.

- [2] T. Arimitsu and N. Arimitsu: 「Multifractal Analysis of Fluid Particle Accelerations in Turbulence」, *Physica D* **193** (2004) 218–230 [cond-mat/0210274].
- [3] P. Jizba and T. Arimitsu: 「The World according to Rényi: Thermodynamics of Fractal Systems」, *Annals of Physics* **312** (2004) 17–59 [cond-mat/0207707].
- [4] T. Arimitsu and N. Arimitsu: 「Harmonious Representation of PDF's by Two Distinct Tsallis Distributions」, *Physica A* **340** (2004) 347–355 [cond-mat/0312143].
- [5] P. Jizba and T. Arimitsu: 「Generalized Statistics: Yet Another Generalization」 *Physica A* **340** (2004) 110–116 [cond-mat/0312034].
- [6] N. Arimitsu and T. Arimitsu: 「An Aspect of Granulence in view of Multifractal Analysis」 (2004) in press [cond-mat/0312164].
- [7] T. Indei and T. Arimitsu: 「Analysis of Shear-Thickening in Physical Gel by Transient Network Theory」 in *Proceedings of the 3rd International Symposium on Slow Dynamics in Complex Systems*, eds. M. Tokuyama and I. Oppenheim (AIP Conference Proceedings **708**, 2004) pp.225–228.
- [8] T. Arimitsu and N. Arimitsu: 「Multifractal analysis of the fat-tail PDFs observed in fully developed turbulence」 *Journal of Physics: Conference Series* **7** (2005) 101–120.
- [9] T. Arimitsu and N. Arimitsu: 「Multifractal analysis of turbulence and granular flow」 *E. Majorana conferences*, eds. C. Beck, A. Rapisarda and C. Tsallis (World Scientific, 2005) in press.
- [10] S. Abe, “Dilatation symmetry of the Fokker-Planck equation and anomalous diffusion”, *Phys. Rev. E* **69** (2004) 016102.
- [11] S. Abe, “Tsallis entropy: How unique?”, *Continuum Mech. Thermodyn.* **16** (2004) 237–244 .
- [12] S. Abe, G. Kaniadakis and A. M. Scarfone, “Stabilities of generalized entropies”, *J. Phys. A* **37** (2004) 10513–10519.
- [13] S. Abe and N. Suzuki, “Aging and scaling of earthquake aftershocks”, *Physica A* **332** (2004) 533–538.
- [14] S. Abe and N. Suzuki, “Scale-free network of earthquakes”, *Europhys. Lett.* **65** (2004) 581–586.
- [15] S. Abe and N. Suzuki, “Small-world structure of earthquake network”, *Physica A* **337** (2004) 357–362.
- [16] U. Tirnakli and S. Abe, “Aging in coherent noise models and natural time”, *Phys. Rev. E* **70** (2004) 056120.
- [17] N. Taniguchi, “Quantum Anomaly and Effective Field Description of a Quantum Chaotic Billiard”, to appear in *Phys. Rev. B* (2005); cond-mat/0407802.

- [18] M. Hamatani, and N. Taniguchi, "Low energy effective interaction of XXZ spin interaction in the two-dimensional quantum dot", to appear in *Physica E* (2005).
- [19] H. Matsumoto and T. Koyama, "Josephson Plasma and Josephson vortex lattice in high  $T_c$  superconductors with an applied magnetic field parallel to the layers", *Physica C* **412-414**, 444-448 (2004.5).
- [20] M. Machida, S. Yamada, Y. Ohashi and H. Matsumoto, "Novel Superfluidity in a Trapped Gas of Fermi Atoms with Repulsive Interaction Loaded on an Optical Lattice", *Phys. Rev. Lett.* **93**, 200402-(1-4) (2004.11).
- [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 (2005.2)
- [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 (2005.2)
- [23] H. Matsumoto, "Highly Correlated Particle Systems and Composite Operator Method", in the Proceedings of the IX training course of physics in "Highly Correlated Electron Systems and High  $T_c$  Superconductors" (to be published from AIP, 2005).
- [24] Y. Ohashi: "Effects of Interband Impurity Scattering on Superconducting Density of States in a Two-band Superconductor." *Physica C* **412-414** (2004) 41.
- [25] M. Terao and Y. Ohashi "Theory of Superconductor-Insulator Transition in Organic conductor  $\lambda$ -(BETS) $_2$ Fe $_{1-x}$ Ga $_x$ Cl $_4$ ." *Physica C* **412-414** (2004) 324.
- [26] Y. Ohashi: "Kohn's theorem in a superfluid Fermi gas with a Feshbach resonance." *Phys. Rev. A* **70** (2004) 063613.
- [27] Y. Ohashi: "BCS-BEC crossover in a gas of Fermi atoms with a p-wave Feshbach resonance." *Phys. Rev. Lett.* **94** (2005) 050403.
- [28] Y. Ohashi and A. Griffin: "Single-particle excitations in a trapped gas of Fermi atoms in the BCS-BEC crossover region." *Phys. Rev. A* (2005), in press, cond-mat/0410220.
- [29] Y. Ohashi: "Effective interaction between molecules in the BEC regime of a superfluid Fermi gas." submitted to *Phys. Rev.* (2005), cond-mat/0504123.
- [30] Y. Ohashi and A. Griffin: "Collective modes and the effect of single-particle excitations in the BCS-BEC crossover region of a trapped Fermi superfluid" submitted to *Phys. Rev.* (2005), cond-mat/0503641.
- [31] Y. Ohashi and A. Griffin: "Single-particle excitations in a trapped Fermi superfluid with a broad Feshbach resonance." in preparation.
- [32] Y. Ohashi and H. Matsumoto: "Itinerant-localized dual character of a strongly-correlated superfluid Bose gas in an optical lattice." in preparation.

## <著書>

- [1] 有光敏彦, 有光直子: 第2話「乱流のマルチフラクタル解析」 pp.41-68 (分担執筆); 河東泰之編「数理解論への誘い5 —最近の動向をめぐって」(遊星社, 2005).

## <解説・紀要等>

- [1] 吉田恭, 「乱流拡散とLagrange速度相関」, 日本流体力学会誌「ながれ」**23**(3) (2004) 159-170.
- [2] 有光直子, 有光敏彦: 「乱流における流体粒子加速度密度関数のマルチフラクタル解析」, 第11回「凝縮系物理(非平衡系の統計物理)」シンポジウム報告書(2004) 36-39.
- [3] 有光敏彦: 「10年を振り返って —「非平衡系の統計物理」シンポジウム」, 物性研究 **82** (2004) 845-874.
- [4] 有光敏彦, 有光直子: 「乱流速度揺らぎ確率密度関数のマルチフラクタル解析」, 物性研究 **82** (2004) 948-955.
- [5] T. Arimitsu and N. Arimitsu: 「Harmonious Representation of PDF's by Two Distinct Tsallis Distribution Functions」, 京都大学数理解析研究所講究録(RIMS Report, Kyoto) **1406** (2004) 119-135.
- [6] N. Taniguchi, "Quantum Anomaly and Effective Field Description of a Quantum Chaotic Billiard" (物性研究に掲載予定).
- [7] M. Hamatani and N. Taniguchi, "Low energy effective interaction of XXZ spin interaction on 2 dimensional quantum dot" (物性研究に掲載予定).
- [8] 市野茂人, 松本秀樹, 坂本昇一, "Bose-Einstein凝縮の励起スペクトル", 基研研究会「熱場の量子論とその応用」研究報告書(素粒子論研究, vol. 108 No. 5, E38-E39, 2004.2)
- [9] 松本秀樹, "ボーズ・アインシュタイン凝縮における準粒子場", 基研研究会「熱場の量子論とその応用」研究報告書(素粒子論研究, vol. 108 No. 5, E46-E49, 2004.2)
- [10] Y. Ohashi: "フェッシュバハ共鳴を用いたフェルミ原子ガスにおける新しい超流動." 日本物理学会誌 **59** (2004) 591.
- [11] Y. Ohashi: "フェルミ原子ガスにおける新しい超流動: BCS - BEC クロスオーバーの実現." 日本物理学会誌 **59** (2004) 207.

## <卒業論文(学士)>

- [1] 筑波大学卒業論文: 阿部倫太郎「蒸発の熱流体力学理論」(2005) 2月.

- [2] 筑波大学卒業論文：伊藤悠一「複雑ネットワークの形態と形成」(2005) 2月.
- [3] 筑波大学卒業論文：小松崎慎人「超粘性薄膜の破裂の理論的解析」(2005) 2月.
- [4] 筑波大学卒業論文：坂井範昭「カオスの量子ドットによるエンタングルメント状態の生成とその統計的性質」(2005) 2月.

## <学位論文 (修士)>

- [1] 筑波大学修士論文：宮崎真理子「風洞内乱流のマルチフラクタル解析」(2004) 2月.
- [2] 筑波大学修士論文：高橋清志「光格子中のポーズ・アインシュタイン凝縮」(2004) 2月.
- [3] 筑波大学修士論文：鈴木康弘「ジョセフソン接合におけるジョセフソン渦糸とジョセフソンプラズマ振動」(2004) 2月.

## <講演>

- [1] Kyo Yoshida, Junzo Yamaguchi, and Yukio Kaneda, "Regeneration of Small Eddies by Data Assimilation in Turbulence", COSLAB Workshop on Turbulence and Vacuum Instability in Condensed Matter and Cosmology, (Helsinki(Lammi), Finland, 21 Aug. 2004)
- [2] 吉田恭, 「乱流の統計理論の基礎」, 物理学セミナー (筑波大学, つくば, 2004年10月20日).
- [3] 吉田恭, 金田行雄, 「乱流における大スケールデータ同化による小スケールの再生」, 京都大学数理解析研究所共同研究集会「乱流現象と力学系的縮約」(京都大学, 京都, 2005年1月14日).
- [4] 吉田恭, 「乱流における小スケール統計の普遍性」, 第103回流体懇話会 (電機通信大学, 東京, 2005年2月23日).
- [5] (招待講演) T. Arimitsu and N. Arimitsu: 「Multifractal analysis of the fat-tail PDFs observed in fully developed turbulence」, International Workshop on "Chaotic Transport and Complexity in Fluids and Plasmas", 2004年6月, Carry le Rouet, France.
- [6] T. Arimitsu and N. Arimitsu: 「Multifractal Analysis of Turbulence and Granular flow」, Summer School on "Complexity, Metastability and Nonextensivity", 2004年7月, Erice (Sicily) Centre Ettore MAJORANA, Italy
- [7] T. Arimitsu and N. Arimitsu: 「Multifractal analysis for the systems with fat-tail PDFs」, Lecture in the Mathematical Institute of the Czech Academy of Sciences, 2004年7月, Prague, Czech.



- [8] (招待講演) T. Arimitsu and N. Arimitsu: 「Rényi and Tsallis statistics and their application to turbulence and vortex tangle」, COSLAB Workshop on "Turbulence and Vacuum Instability in Condensed Matter and Cosmology", 2004年8月, Lammi, Finland
- [9] 有光敏彦, 有光直子: 「粉粒体乱流 (granulence) のマルチフラクタル解析」, 日本物理学会 第60回秋季大会, 2004年9月, 青森大学
- [10] 林剛史, 有光敏彦: 「Decoherence-free subspace のランダムノイズに対する安定性」, 日本物理学会 第60回秋季大会, 2004年9月, 青森大学
- [11] T. Arimitsu and N. Arimitsu: 「Comparison between classical and quantum turbulence based on the multifractal analysis」, International Workshop on "Vortex and Turbulence in Classical and Quantum Fluids", 2004年10月, 京都大学
- [12] (招待特別講演) 有光敏彦, 有光直子: 「間欠性のマルチフラクタル解析」, 第10回交通流のシミュレーションシンポジウム, 2004年12月, 大阪大学サイバーメディアセンター
- [13] 林剛史, 北島佐知子, 有光敏彦, 柴田文明: 「有限温度環境による量子ノイズの離散表現」, 第13回非平衡系の統計物理シンポジウム (つくば冬の学校), 2005年1月, 筑波大学
- [14] 林剛史, 北島佐知子, 有光敏彦, 柴田文明: 「有限温度環境による量子ノイズの離散表現」, 日本物理学会 第60回年次大会, 2005年3月, 東京理科大学 (野田)
- [15] N. Taniguchi, 「量子ピリヤード系の有効場理論 -等エネルギー面上の場の理論の量子異常・ボソン化法」 (2005.03 日本物理学会)
- [16] N. Taniguchi, "Quantum Anomaly and Effective Field Description of a Quantum Chaotic Billiard" (invited) 京大基研短期研究会 「量子系及びマクロ系におけるカオスと非線型動力学」 (2004.12.08-2004.12.10)
- [17] M. Hamatani and N. Taniguchi, "Low energy effective interaction of XXZ spin interaction in the two-dimensional quantum dot", (nanoPHYS2005, 2005.01.26-2005.01.28)
- [18] M. Hamatani and N. Taniguchi, "Low energy effective interaction of XXZ spin interaction on 2 dimensional quantum dot" 京大基研短期研究会 「量子系及びマクロ系におけるカオスと非線型動力学」 (Chaos and Nonlinear Dynamics in Quantum-Mechanical and Macroscopic Systems, 2004.12.08-2004.12.10).
- [19] 町田昌彦, 佐々成正, 松本秀樹, 「回転ボーズアインシュタイン凝縮系における渦糸侵入および格子形成過程」 短期研究会 「量子凝縮系研究の新展開」 東京大学物性研究所 (2004年1月)
- [20] 佐々成正, 町田昌彦, 松本秀樹, 「回転ボーズ・アインシュタイン凝縮系に対する3次元動的シミュレーション」 短期研究会 「量子凝縮系研究の新展開」 東京大学物性研究所 (2004年1月)

- [21] 佐々成正, 町田昌彦, 松本秀樹, 「希薄原子ガス・ボーズアインシュタイン凝縮系における渦糸ダイナミクス: 生成消滅とエネルギー散逸過程」短期共同研究会: 流体渦場のゲージ構造と変分原理京大数理解析研究所 (2004年3月)
- [22] 佐々成正, 町田昌彦, 松本秀樹, 「ボーズアインシュタイン凝縮系に対する3次元動的シミュレーション」日本物理学会年会 九州大学 (2004年3月)
- [23] 松本秀樹, 小山富男, 「ジョセフソンボータックス格子とジョセフソンプラズマモード」先端研究拠点事業第一回「超伝導ナノサイエンスと応用」研究会 (2004年3月31日)
- [24] (講義講師) H. Matsumoto, "Highly Correlated Particle Systems and Composite Operator Method", invited lecture in the IX training course of physics in "Highly Correlated Electron Systems and High Tc Superconductors" held at Vietri sul Mare (Salerno, Italy), 4-15 October, 2004
- [25] (招待講演) H. Matsumoto, "Josephson Plasma Oscillation and Josephson Vortex Lattice", invited talk in the 4th International Symposium on Intrinsic Josephson Effect and Plasma Oscillations in High-Tc Superconductors (PLASMA 2004) (Tsukuba, Nov. 26-28, 2004).
- [26] 松本秀樹, 「Highly Correlated Particle System and Superconductivity/ Superfluidity」東北大学大学院理学研究科物理学専攻集中講義 (2005年1月11日-13日)
- [27] 松本秀樹, 「銅酸化物高温超伝導体の多重ジョセフソン接合模型による電磁氣的性質」東北大学物理物性コロキウム (2005年1月13日)
- [28] 高橋清志, 松本秀樹, 「Phase Transition of BEC in Optical Lattces」日本物理学会年会 東京理科大野田キャンパス (2005年3月)
- [29] 松本秀樹「多重ジョセフソン接合模型におけるジョセフソン渦糸格子と電磁的性質」日本物理学会年会 東京理科大野田キャンパス (2005年3月)
- [30] 町田昌彦, 山田進, 大橋洋士, 松本秀樹, 「光学格子中のトラップされたフェルミ原子ガスの新奇超流動」日本物理学会年会 東京理科大野田キャンパス (2005年3月)
- [31] (招待講演) Y. Ohashi: "Single particle excitations in the BCS-BEC crossover region." APS March Meeting (Focus session), March 23, 2005 LA, U.S.A.
- [32] (招待講演) Y. Ohashi: 「フェッシュバツハ共鳴を用いた、フェルミ原子ガス超流動におけるBCS-BECクロスオーバー」 2004年度宇宙空間原子分子過程研究会「共鳴制御による反応機構クロスオーバー」 2005年1月 JAXA宇宙科学研究本部、相模原.
- [33] (招待講演) Y. Ohashi: "New Fermion Superfluidity and the BCS-BEC crossover in a trapped Gas of Fermi atoms with a Feshbach Resonance." 21st COE seminar "Recent Topics in Atomic Condensates" 2005年1月 東京大学.
- [34] (招待講演) Y. Ohashi: 「フェルミ原子ガスにおける新しい超流動」平成16年度基礎研究会「場の量子論の基礎的諸問題と応用」2004年12月 京都大学基礎物理学研究所、京都.

- [35] Y.Ohashi: "BCS-BEC crossover in a trapped gas of Fermi atoms with a Feshbach resonance." 京大基研セミナー 2004年7月、京都.
- [36] Y.Ohashi: "New Fermion Superfluidity in a Gas of Fermi Atoms with a Feshbach Resonance." 日大物理学セミナー 2004年6月、習志野.
- [37] Y.Ohashi: "New Fermion Superfluidity in a Gas of Fermi Atoms with a Feshbach Resonance." 原子核理論物理学セミナー 2004年6月、筑波大学.
- [38] (招待講演) A. Griffin and Y.Ohashi: "Molecules and Cooper pairs in a superfluid atomic Fermi gas." DAMOP APS meeting , May 26-29, 2004, in Tucson, Arizona, USA.
- [39] A. Griffin and Y.Ohashi: "Molecules and Cooper pairs in a superfluid atomic Fermi gas." Seminar, May 25, 2004 ,Kavil Institute for Theoretical Physics, Santa Barbara, California, USA.
- [40] (招待講演) A. Griffin and Y.Ohashi: "Molecules and Cooper pairs in a superfluid atomic Fermi gas." Canadian Association of Physicists(CAP) Annual Meeting, June 14, 2004 Winnipeg, Manitoba, Canada.
- [41] (招待講演) A. Griffin and Y.Ohashi: "BCS excitations in a superfluid gas of trapped Fermi atoms." Special Quantum Materials meeting of the Canadian Institute for Advance Research(CIAR), October 23, 2004, Vancouver, BC, Canada
- [42] A. Griffin and Y.Ohashi: "Recent work on the quasiparticle energy spectrum in a superfluid Fermi gas." LASSP seminar, October 26, 2004 , Cornell University, Ithaca, NY, USA
- [43] (招待講演) A. Griffin and Y.Ohashi: "BCS-BEC crossover in atomic superfluid Fermi gases" Physics seminar, Nov.23, 2004, University of Queensland, Brisbane, Australia.
- [44] (招待講演) A. Griffin and Y.Ohashi: "Recent work on the BCS-BEC crossover in atomic superfluid Fermi gases." Four invited lectures given at the Quantum and Atomic Optics Summer School, Nov. 28-Dec.3, 2004 , Australian National University, Canberra, Australia.
- [45] A. Griffin and Y.Ohashi: "BCS excitations in a superfluid gas of trapped Fermi atoms." Theory seminar, January 10, 2005, University of British Columbia, Vancouver, Canada.
- [46] Y. Ohashi: "New Fermion superfluidity and the BCS-BEC crossover in a trapped gas of Fermi atoms with a Feshbach resonance." 「平成16年度ナノサイエンス特別プロジェクト発表会」2005年3月11日、筑波大学.
- [47] Y. Ohashi: "Effective interaction between bound molecules in the BEC regime of a superfluid Fermi gas." Banff Cold Atom Meeting (BCAM2005), February, 24-17, (2005), Banff Center, Banff, Canada.

- [48] Y. Ohashi: "p-wave BCS-BEC crossover in a gas of Fermi atoms with a Feshbach resonance." Seminar in Toronto BEC group, September 10, 2004, University of Toronto, Canada.
- [49] Y. Ohashi: "Single-particle excitations and collective modes in a trapped gas of Fermi atoms with a Feshbach resonance." Queen's university-Toronto university mini symposium on cold atom physics, October 30, 2004, University of Toronto, Canada.
- [50] Y. Ohashi: "Effective interaction between bound molecules in the strong-coupling BEC regime of a superfluid Fermi gas." Seminar in Toronto BEC group, November 10, 2004, University of Toronto, Canada.
- [51] M. Machida, S. Yamada, Y. Ohashi, and H. Matsumoto "Novel Superfluidity of Trapped Fermi Atoms Loaded on Optical Lattices." APS March meeting, 2005, LA, USA.