

科学研究費助成事業（科学研究費補助金）研究成果報告書

平成 25 年 6 月 3 日現在

機関番号：32612

研究種目：基盤研究（C）

研究期間：2008～2012

課題番号：20540279

研究課題名（和文）有限温度の非平衡場の理論における物理量の第一原理からの解析

研究課題名（英文）Study of the physical behavior in non-equilibrium field theories from first principles

研究代表者

青木 健一郎（AOKI KENICHIRO）

慶應義塾大学・経済学部・教授

研究者番号：00251603

研究成果の概要（和文）：本研究においては，有限温度の非平衡状況における系の物理的な振る舞いを第一原理より理論的に解析しました．特に，物理量に系の大きさへの依存性がある物理系から依存性が無い系へと連続的な変化を分析しました．また，三井隆久氏とともに様々な物体の表面やガスの有限温度の揺らぎを原子レベルで実験的に測定し，その理解を理論的にも検証しました．これらの測定は我々の新たな測定法の開発を経て初めて可能になったものです．

研究成果の概要（英文）：We investigated the physics behavior of some non-equilibrium systems at finite temperature theoretically, from first principles. In particular, we investigated a system whose transport coefficients continuously change from not having a bulk behavior to having bulk behavior. Also, we experimentally measured thermal fluctuations of various surfaces and atomic vapor at sub-atomic scales, in collaboration with Takahisa Mitsui (Keio University). Furthermore, we investigated the theoretical understanding behind these phenomena. The experimental measurements were made possible due to the novel noise reduction methods we developed.

交付決定額

（金額単位：円）

	直接経費	間接経費	合計
2008年度	600,000	180,000	780,000
2009年度	500,000	150,000	650,000
2010年度	500,000	150,000	650,000
2011年度	500,000	150,000	650,000
2012年度	500,000	150,000	650,000
総計	2,600,000	780,000	3,380,000

研究分野：数物系科学

科研費の分科・細目：物理学、素粒子・原子核・宇宙線・宇宙物理

キーワード：有限温度・非平衡・場の理論

1. 研究開始当初の背景

有限温度の非平衡の物理は宇宙初期の物理，重イオン衝突，さらに物性など物理のあらゆる分野で非常に重要な役割を果たしています．その一方，古典論の基本的な側面ですえ未解決の重要な問題が今でも残されている分野でもあります．量子力学的な揺らぎ

も一般には物理現象に寄与し，さらに問題を複雑にしています．場の理論の観点からの非平衡物理の研究も数多くありますが，それらの研究の多くは，第一原理よりの計算ではなく根本的な仮定を用いたものか，あるいは形式的で具体的な物理量のふるまいを求められていないものがほとんどです．それだけ

問題が難しいということが言えます。近年、数値シミュレーション能力の向上にもより、大きな発展をしていますが、研究開始当初はもちろん、いまだに数多くの根本的な問題が残されています。

2. 研究の目的

(1) 有限温度、非平衡状態における物理系の具体的な振る舞いを第一原理より計算して求める事を目的としています。それにより、局所平衡の持つ意味、そしてそれからのずれ、示量性の有無とその理由、線形応答理論の妥当性などを明らかにしていきます。特に、実際に実験や観測できる状況に近い物理系の理論解析をしていきます。

(2) 有限温度の物理の源はブラウン運動を典型とする熱揺らぎです。この性質をより深く理解するために、実験の結果を理論的に解析し、その背後の物理を明らかにしていきます。これに関しては実験結果と第一原理よりの理論を結びつけるのは難しいですが、できる限り第一原理に近い理論から熱揺らぎにアプローチします。特に、有限温度ゆらぎはあらゆるものに存在し、近年これを様々な物体で原子スケールで直接実験的に測定できるようになったので、これを解析します。一般に、古典的な有限温度の揺らぎとともに量子力学的な揺らぎが存在し、この研究ではその両面を理論的に解析します。

3. 研究の方法

(1) 非平衡系の場の理論の研究においては、4乗理論、FPUモデルなどの格子化された場の理論において物理量を第一原理より計算して求めます。このためには、解析的な手法とともに、数値シミュレーションも併用します。そして、その物理量が系の温度、理論の結合定数、その他の物理パラメータにいかに関係するかを解析して理解していきます。

(2) 有限温度の揺らぎの理論解析においては原子スケールでの新たな技術を用いた揺らぎの測定結果を分析します。この研究においては新たな方法で散乱雑音を含めた雑音を除去しており、そのために原子スケールでの今までに比べて高い精度の測定を行っています。この測定方法は汎用性があり、様々な物理系に適用できます。液体、複雑流体、生物体など物理学的に興味深い様々な物質の表面の有限温度の揺らぎを測定し、理論的に解析し、既存の理論を検証します。また、原子ガスの揺らぎも測定して解析します。この物理系では、本質的に量子力学的な揺らぎと有限温度の揺らぎの両方を同時に解析し

ます。

4. 研究成果

(1) 有限温度非平衡状態における FPU 模型、4乗模型などの物理的な振舞いを研究しました。特に、FPU 模型に場の理論で質量項に相当する項を採り入れると、熱伝導度の振舞が FPU 模型、4乗とも定性的に異なり、系のサイズ依存性が温度とともに変わるという結果を得ました。サイズ依存性が無い示量性を持つ場合から依存性のある場合へと連続的に移り変わるという意味で興味深い側面があります。これを含めた結果については論文として発表しました。4乗理論、FPU 模型を含めた一般的な模型について温度の空間依存性の非線型性と線型応答理論との関係について結果を得ているので現在これに関する論文を推敲中です。有限温度の非平衡状態における物理的な振舞から、一見非線型に見える現象のどこまでが本質的に線型応答理論で説明できるかが明らかにできると考えています。

(2) 様々な物体表面の有限温度のゆらぎを原子スケールで直接測定し、それを理論的に解析する研究を行いました。有限温度では、あらゆる物質が原子レベルで運動しており、これが統計物理、熱力学等で扱う有限温度の物質の振る舞いの根源です。原子レベルでの揺らぎは小さく、通常の測定法では散乱雑音などの雑音に埋もれてしまい、直接測定することは困難です。我々は、本質的に新たな測定技術を開発し、これを用いて散乱雑音を除去し、今まで見ることのできなかった揺らぎのスペクトルを測定しています。これについて、液体、複雑流体、生物体などの様々な物体の表面の熱振動を測定し、その結果を理論的に解析しました。この結果と分析についてはすでに論文を3編発表しており、さらに論文を投稿準備中です。そこでは、通常使われる流体力学的な理論を高い精度で検証したとともに、その限界を具体的なデータを基にして指摘することができたと考えています。

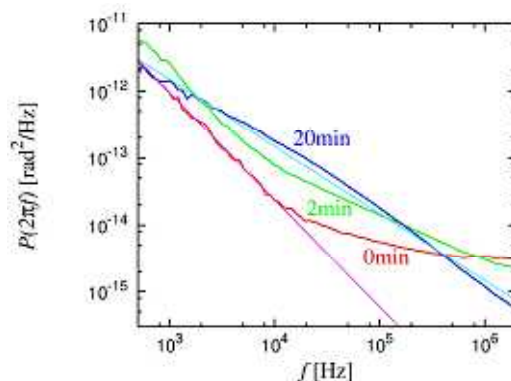


図 1：鮎の目の表面の揺らぎのスペクトルの時間変化 .0分(赤),2分(緑),20分後(青)のスペクトルを表示 .

(3) 原子のガスの光吸収の揺らぎのスペクトルを測定し,その理論的な仕組みを明らかにしました .スペクトルの背後には本質的に量子力学的な揺らぎがあり,量子光学的な側面が必然的に現れています .量子的揺らぎの理解を深めるとともに,さらなる応用の基盤を築けたと考えています .この測定には,今までに無かった我々の開発した不要な雑音の除去技術を用いており,それにより今までに見ることのできなかつたスペクトルを観測しています .なお,この独自の技術は汎用性があり,今後様々な分野で応用される期待ができます .この研究については,現在論文を1篇投稿中であり,さらにもう1篇推敲中です .

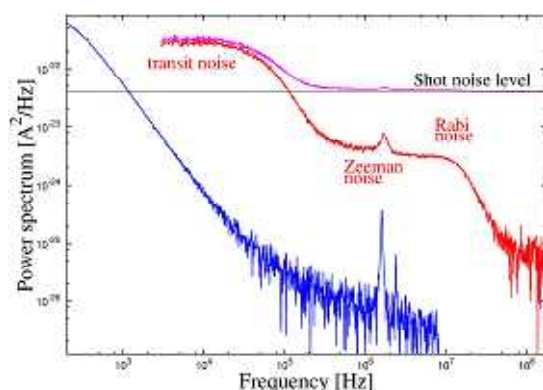


図 2：ルビディウム原子の光吸収の揺らぎスペクトル .従来の測定法では散乱雑音 (shot noise) のため,グラフ中の黒い線より上しか測定できなかつた .スペクトルには,原子がレーザービームを横切るための雑音 (transit noise),磁場中の原子が歳差運動をすることによる雑音 (Zeeman noise) と量子的準位間を共鳴遷移するための雑音 (Rabi noise) の寄与がはっきりと観測されている (赤) .バッファガスにより雑音を抑えた場合 (青) も対比させるために表示している .

5 . 主な発表論文等

(研究代表者,研究分担者及び連携研究者には下線)

[雑誌論文](計5件)

Takahisa Mitsui, Kenichiro Aoki ,
Michelson interferometry with quantum
noise reduction, Physical Review, E87,
042403-1-4 (2013), 査読有,
DOI:10.1103/PhysRevE.87.042403

Kenichiro Aoki, Takahisa Mitsui ,
Spectral properties of thermal
fluctuations on simple liquid surfaces
below shot-noise levels, Physical
Review, E86, 011602-1-8 (2012), 査
読有, DOI:10.1103/PhysRevE.86.011602
Kenichiro Aoki, Takahisa Mitsui,
Direct observations of thermal
fluctuations below shot noise levels,
素粒子論研究, 13 (4) , 1-4(2012), 査読
無,
URL:http://www2.yukawa.kyoto-u.ac.jp
/ sokened/sokendenshi/vol13/netsuba2
012/p23-02-Aoki.pdf
Takahisa Mitsui, Kenichiro Aoki ,
Direct optical observations of surface
thermal motions and sub-shot noise
levels, Physical Review, E80,
020602(R)-1-4 (2009), 査読有,
DOI:10.1103/PhysRevE.80.020602
Kenichiro Aoki, Some thermal transport
properties of the FPU model with
quadratic pinning, Progress in
Theoretical Physics, 119,717-724
(2008), 査読有,
DOI:10.1143/PTP.119.717

[学会発表](計1件)

青木 健一郎, Shot noise レベルより小
さい有限温度の表面揺らぎスペクトルの
直接測定, 熱場の量子論とその応用,
2012年08月23日, 京都大学基礎物理
学研究所

[その他]

ホームページ等

Takahisa Mitsui, Kenichiro Aoki ,
Observation of spontaneous quantum
fluctuations in photon absorption by
atoms,
http://arxiv.org/abs/1301.5405
三井 隆久, 青木 健一郎, 量子雑音に埋
もれた微小信号の検出と応用,
http://lib-arts.hc.keio.ac.jp/hrp/pd
f/2012_aoki_1.pdf

6 . 研究組織

(1) 研究代表者

青木 健一郎 (AOKI KENICHIRO)
慶應義塾大学・経済学部・教授
研究者番号: 00251603

(2)研究分担者
なし

(3)連携研究者
なし