

最終講義 2022年3月22日

謎に惹かれて基礎の森

清水 明

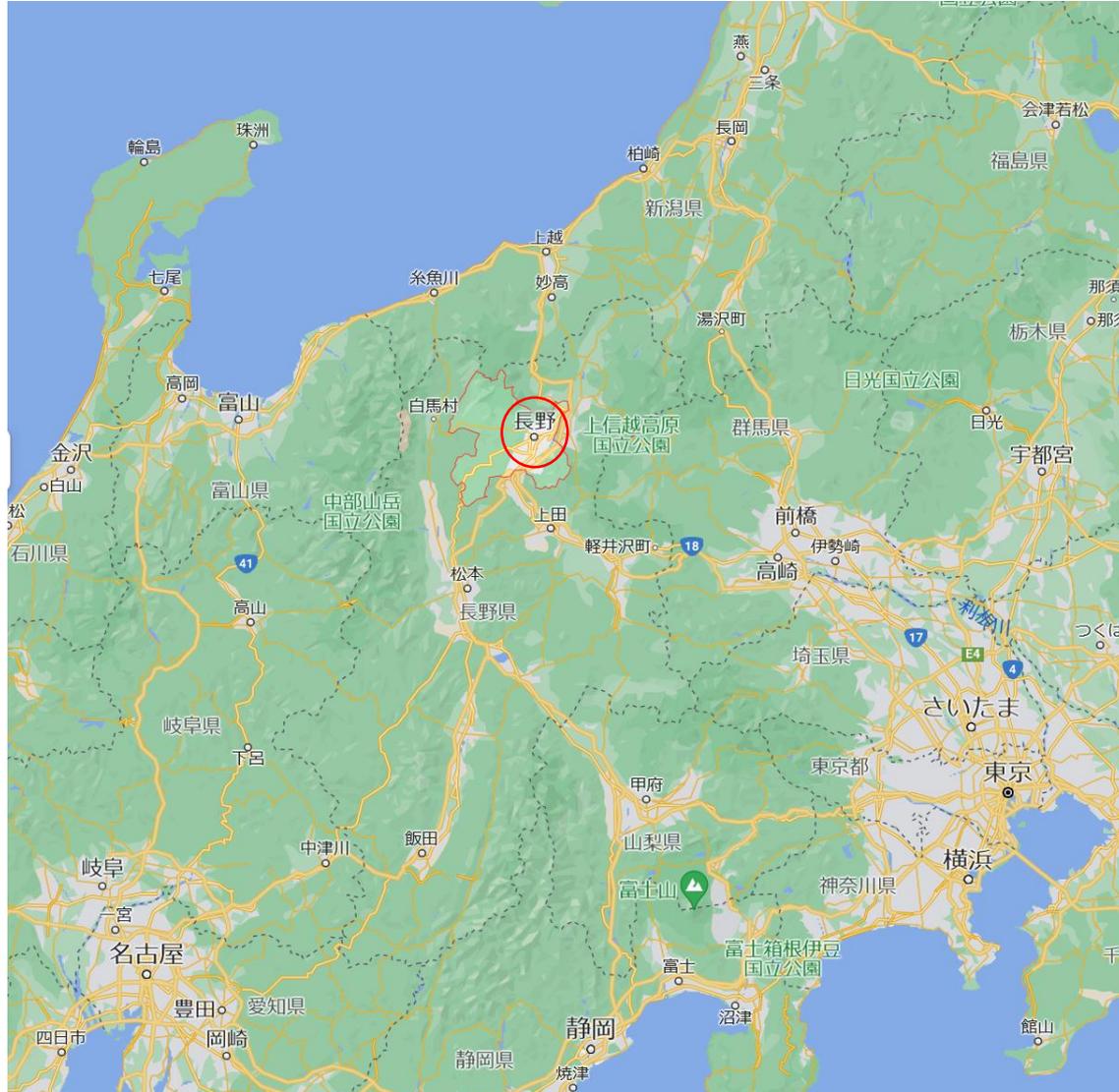
東京大学 総合文化研究科 先進科学研究機構

東京大学 総合文化研究科 広域科学専攻 相関基礎科学系

プロローグ

東京大学に着任する前は、何をしていたの？

長野県長野市 (1956.7-1975.3)



長野県長野市 (1956.7-1975.3)

長野市と言えば、善光寺

欽明天皇十三年(552)、仏教
伝来の折りに百済から日本へ
伝えられた日本最古の仏像

→ 広く信仰を集める



牛に引かれて善光寺



謎に惹かれて基礎の森

東京大学理科一類 (1975.4-1977.3)

アパートを探すのが遅すぎた

小田急線よみうりランド駅から徒歩10分のアパート

下北沢で乗り換え

パチプロになろうかな？

- ・ボーナスがないことに気づく
- ・電動パチンコの普及



学業に戻る

物理学科・理学系研究科物理学専攻 (1977-1984)

基礎的・原理的なことは御法度だった

1. 量子論の測定周りのことを考えてはいけない

➡ 量子光学では**必須**だった...

2. 古典論with隠れた変数でも同じ結果が出るが量子論の方が楽だ

➡ **大嘘**だった... (教科書(2003)で解説)

その後、1, 2は、量子情報をやる上でも**必須**になった

3. 統計力学の基礎をやってはいけない

➡ 今では、**大きな研究分野**になった

4. 量子重力をやってはいけない

➡ 今では、**大きな研究分野**になった

物理学科・理学系研究科物理学専攻 (1977-1984)

というわけで、惹かれる研究テーマが見つからなかった

本も少なかつたし、インターネットもなかつた

田舎者は、情報収集が下手だった...

ともかく、グラファイト層間化合物の超伝導とか、強相関ランダム系をやって、博士号は頂けた。

Canon中央研究所 (1984.4-1990.9)

上村先生に某大企業(売上高5兆円)を紹介されたが、Canonを選ぶ
当時は売上高が5000億円(いまは3.5兆円)「目指せ一兆円企業」
こじんまりとした、楽しい研究所でした(現在はありません...)

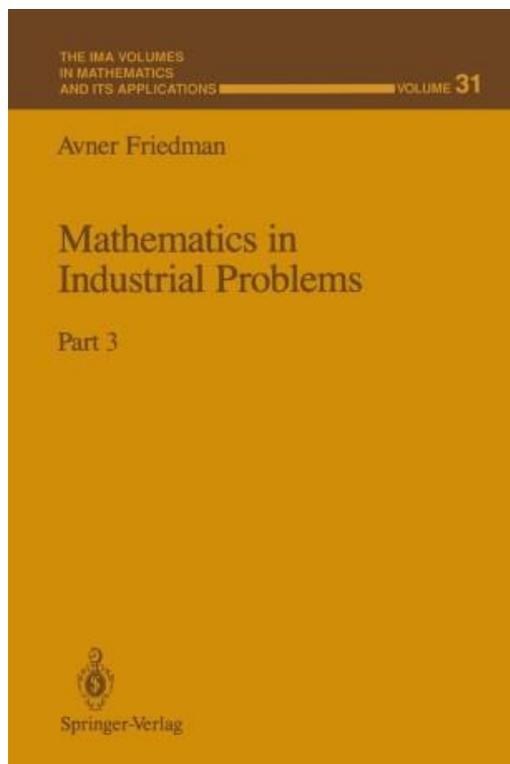


Canon中央研究所 (1984.4-1990.9)

1.半導体レーザーの理論解析と設計(シミュレーター)

黒部さん「各社のシミュレーターを東芝で評価したら、Canonがトップだったよ」

➡ 上司に伝えるも、信じてもらえず...
その後、教科書にも載った...



Mathematical modeling of semiconductor lasers

This chapter describes a coupled electrical and optical model for the conversion of electrical energy into coherent optical energy by solid state device. Such devices are used as exposure sources in photography and medicine, and in optical transmission lines for telephones. John Spence from Eastman Kodak has presented, on April 6, 1990, a solid state laser model, and discussed numerical results which he and Keith Kahen (from Eastman Kodak) have been developing. He concluded by presenting some mathematical problems.

The electrical model can be described by an elliptic equation with an internal interface condition formed by a coupled pair of nonlinear ordinary differential equations (which involve nonlocal terms). These differential equations are also coupled to the optical model, which involves solving the Maxwell equations as a superposition of eigenfunctions representing laser emission modes.

In Section 13.1 we describe the electrical part of the model and in Section 13.2 we include the optical part of the model. The material is based on an article by Wilt and Yariv [1]; see also Shimizu and Hara [2] and the references in both papers.

Canon中央研究所 (1984.4-1990.9)

1. 半導体レーザーの理論解析と設計 (シミュレーター)

黒部さん「各社のシミュレーターを東芝で評価したら、Canonがトップだったよ」

 上司に伝えるも、信じてもらえず...

2. Dielectric Superlattice (with Niibe, Tsukamoto)

ペロブスカイト型のセラミック

上司に提言「こういう物質は、誘電体じゃなくて超伝導の方が面白いですよ」

 不採用

 2年後、Bednorz-Mullerにより、高温超伝導が発見される...

3. 冷電子線源 (with Tsukamoto)

この部分は、公開版では削除しました。

 特許多数  SEDへ

Canon中央研究所 (1984.4-1990.9)

「こりゃ、自分で研究テーマを考えたほうがいいな」

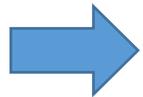
- Asymmetric Dual Quantum Well Laser (with Ikeda)
- Optical Nonlinearity of Nanostructures (with Fujii, Nakamura, Sawada, Bergquist)
- Novel Electron Interferometers (with Okuda, Yamanishi)
- Quantum Nondemolition Detector

榊量子波プロジェクト(1990.10-1992.4)

榊先生「グループリーダーになりませんか？」

研究をするための最高の環境

- Fundamental Limits of Quantum Interference Devices (with Sakaki, Noge)
- Photon-energy dissipation caused by an external electric (with Yamanishi)
- Optical Nonlinearity of Nanostructures (with Ogawa, Cingolani)
- Kondo effect in a quantum dot (with Inoshita, Kuramoto)
- 量子細線を作成するための、ちょっとした工夫を提案して、実験の論文にも名前を載せてもらえた！ (with Koshihara, Akiyama, Sakaki)



「実験がわかる理論屋」と自称し始める...

約1年経ったところで、榊先生に相談し、東京大学教養学部の公募に応募

東京大学 (1992.4- present)

教養学部物理教室としては初めて、民間企業から採用

東京大学としては(おそらく)初めて、主要業績に量子測定理論を含めた者を採用

最初の授業：力学(夏学期)、電磁気学(冬学期)

最初の大学院生：Morimoto, Okushima



現在に至る

研究・教育・運営...

先進科学研究機構
と
アドバンスト理科
(see HP)

謎に惹かれて基礎の森

研究をしていると、次々に謎に出くわします。

どの謎を追いかけても、広大な「基礎の森」へと導かれました。

大勢の人が行き交う所ではなく、たまに誰かに会うぐらいなので、未踏の地がたくさんある森です。

そのお話をさせていただきます。

謎1

自発的対称性の破れ:

対称な法則に従う系の平衡状態が非対称な状態になり、マクロな秩序が現れる現象(例:磁石にN極とS極が出来る)

学生時代に読んだ教科書や解説(1980?)

「多自由度系の基底状態が縮退している(いちばんエネルギーが低い状態が複数個ある)ときに起こる」

博士論文「Hubbard model with random site energies」の計算中(1983)

「あれ?反強磁性秩序が現れるはずの状況では、Hubbard modelの基底状態は縮退してない(1つしかない)じゃん！」

専門家への注: Horsh and von der Linden (1988), Koma and Tasaki (1994)

「そういう系では、どうして自発的対称性の破れが起こるのか？」

「そういう系でマクロ世界が実現されるのは何故か？」

森の入口1 (with Inoue, Miyadera 1998-2001)

体積を無限大にする極限では縮退する(エネルギーギャップが消える)のかな？

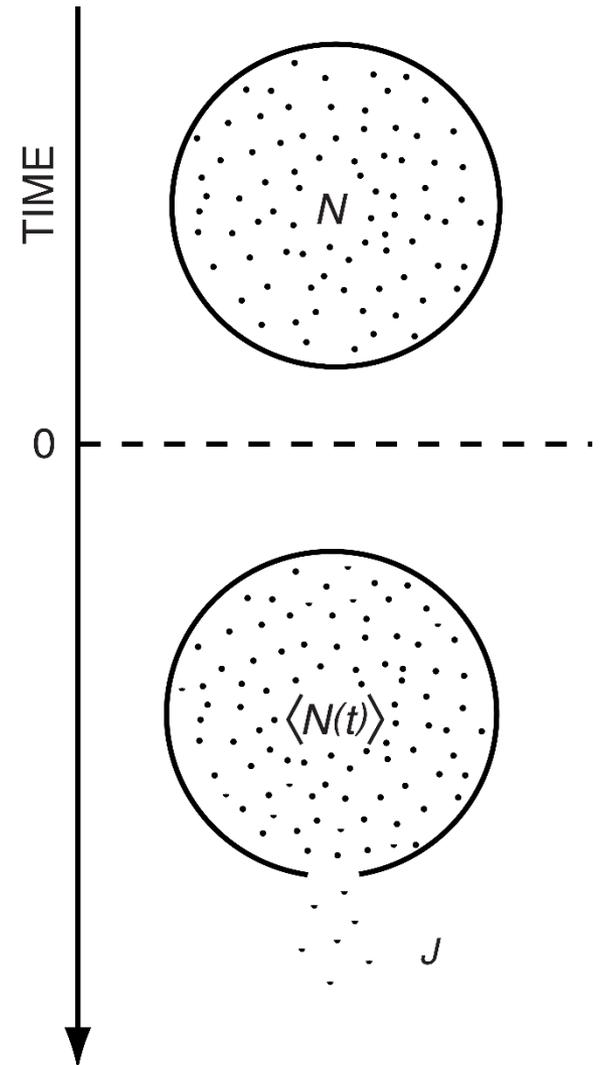
相互作用するボゾン系では、そうならない

その系から粒子が漏れ出すと？

- 基底状態は壊れていってしまう
- 対称性が破れた状態ならば、安定した量子状態(波動関数)を保つ

対称性が破れた状態の方が、擾乱に対して安定！

でも、ひとつの例だけでは不足・・・



森の中へ (with Miyadera 2002)

一般化：特定の系や基底状態に限らない普遍的結果

これらの例における基底状態は、マクロに異なる状態の重ね合わせだった

シュレディンガーの猫状態 (cat state) の一般化：一般化猫状態

マクロに異なる状態の重ね合わせを有意に含む多体量子状態

自然で一般的な設定の元で、一般化猫状態は、

- そうでない状態と比べて、擾乱に対して桁違いに脆弱
- 脆弱性の違いは、系のサイズを大きくするとぐんぐん拡大してゆく

➡ 一般化猫状態は、わずかな擾乱でも、すぐに壊れてしまう。

➡ 安定な量子状態が選び出される

➡ マクロな世界が実現！

周りを探検

一般化猫状態のさらなる一般化 (with Morimae)

- 混合状態(量子状態を古典的に混ぜ合わせた状態)にまで一般化
- その状態をどうやって検出すればいいかも示した

量子計算 (with Ukena, Matsuzaki)

- 代表的アルゴリズムの計算途中に、一般化猫状態が現れる。

量子エラー訂正 (with Kokubun)

encodeした論理qubitを、設計通りに時間発展させるには？

- 普通にやると、たくさんの量子ゲートを精密に動かす必要
- 物理的に自然な相互作用で自動的に実現できる方法を提案

謎2

量子測定理論に出てくる、**first-kind measurement**

(ざっくり言うと)測定前後で、物理量の確率分布が変わらないような測定

専門家への注: 誤差の範囲への射影を行う測定だと考えてください

その条件 (Landau and Peierls, 1931):

測定される物理量 Q と、被測定系と測定器の相互作用 H_I が、
 $[Q, H_I] = 0$

量子非破壊(QND)測定 (Braginsky et al, Caves et al. 1980)

保存される(測定されないときは値が変わらない)物理量の first-kind measurement

$$[Q, H_I] = 0$$

$[Q, H_I] = 0$ は、本当に必要なのか？

森の入口2 (1989-1990)

$[Q, H_I] = 0$ は

測定器をどんなにずさんに作っても(誤差が増えるだけで)QND測定になる
という条件に過ぎない！

➡ 必要条件ではない

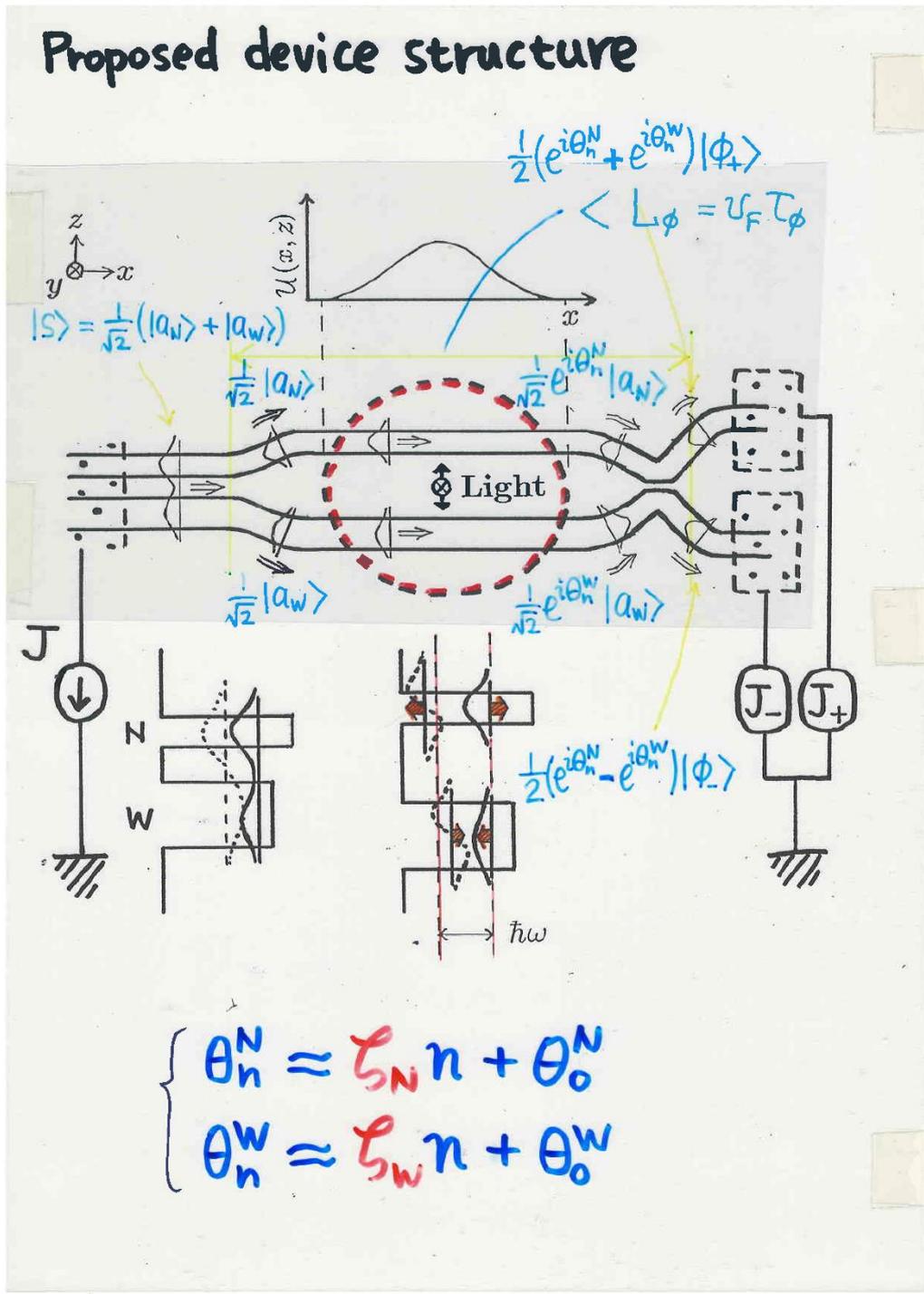
➡ $[Q, H_I] \neq 0$ でもQND測定になるように測定器を設計できる

具体例

電子の干渉計に光をあてる
電子の量子干渉電流が変化する



$[Q, H_I] \neq 0$ なのに、
光子数のQND測定ができる！



この測定器により、
光子の量子状態が色々変わる！
(量子状態の制御が出来る)

日本物理学会 (1990年3月)

17th Int. Quantum Electronics Conference
(May 1990; submitted December 1989)

おごり:

- こんなことを思いつく人はいないだろう
- 思いついても、計算できないだろう

数ヶ月遅れて、同様のアイデアが、他の
グループからも提案

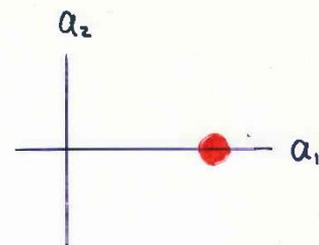
慌てて論文誌に投稿したときには手遅れ

- 速報誌から通常誌に回された
- 印刷が1991年になってしまった

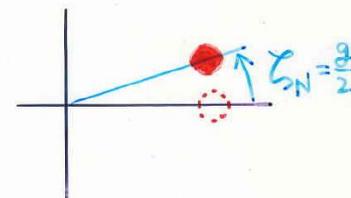
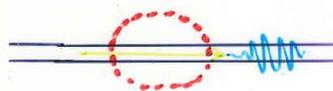
Origin of the phase randomization

$$(\xi_N = -\xi_W \equiv \frac{g}{2})$$

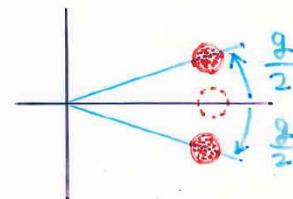
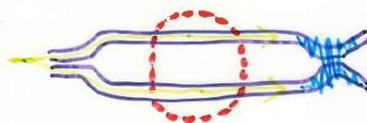
- Initial state
(Coherent state)



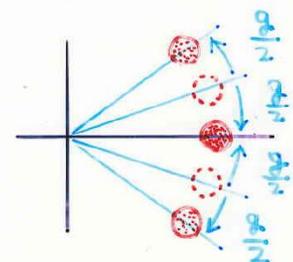
- Single QWR, $N = 1$



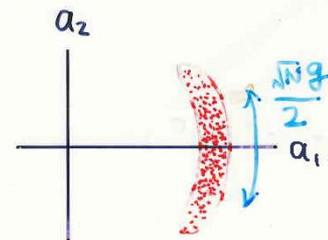
- Double QWR, $N = 1$



- Double QWR, $N = 2$



- Double QWR, $N \gg 1$



2012 Nobel Prize in Physics 2012 : S. Haroche and D. J. Wineland

Haroche and Wineland have opened the door to a new era of experimentation with quantum physics by demonstrating the direct observation of individual quantum systems without destroying them.

"Serge Haroche and David J. Wineland have independently **invented and developed methods for measuring and manipulating individual particles while preserving their quantum-mechanical nature, in ways that were previously thought unattainable.**"

There are several interesting similarities between the two. **In both cases, the quantum states are observed through quantum non-demolition measurements where two-level systems are coupled to a quantized harmonic oscillator** --- a problem described by the so-called Jaynes-Cummings Hamiltonian.

In 1990, Haroche and coworkers **suggested a method to measure the number of photons in the cavity in a quantum non-demolition measurement** (Brune et al., 1990).

理論的には、清水のと等価なんだけどなあ…。でも、実験をやり遂げたのが偉い。

森の中へ

量子測定については、解らないことだらけなのではないか？

量子Zeno効果は、現代的な測定理論で解析したらどうなるのか？ (with Koshino)

それまでの理論：瞬時に、誤差なく、理想的な測定ができる
(ほとんど古典論のノリ...)

そんなの、物理的にあり得ない！

測定器の、応答速度、誤差、配置 etc をきちんと取り入れると？

結果があれもこれも大きく変わる！

例：指数関数で崩壊する時間領域でも量子Zeno効果が起こる

招待review論文は、代表的なreviewに

森の奥へ

量子多体系で、マクロな物理量を測定した後の、量子状態は？ (with Tatsuta)

$M_x \neq 0$ の平衡状態で、 M_z を $O(1)$ の精度で測定すると？

平衡状態が一般化猫状態に変わる！

入口1から入った旅人と合流！



Mamiko Tatsuta

M_z を $O(1)$ の精度で測定



Called "**Mamineko**" in Shimizu Lab.

In her thesis, "Maximally Mixed Neko (cat) state"

古典限界を突破するセンサーになる (with Tatsuta, Matsuzaki)

さらに森の奥へ

量子多体系で、マクロな物理量のゆらぎを測定したら、どうなる？ (with Fujikura)

少数自由度系(例: 単一モード光子)では、測定器の詳細に強く依存し、普遍的な結果にはならない

➡ 多自由度系では？

c.f. 統計力学の教訓:

自由度を大きくすると、個々の物質の性質に依らない、普遍的な性質が表れる。

乱暴に測ったら、状態が大きく乱れて、何の普遍性もないのは自明

- 古典系では、反作用がない測定を(暗に)仮定して議論する。
- 量子系では、そうはいかない(不確定性原理)

マクロ変数を、量子論が許す範囲内で最も古典測定に近いように、量子測定する

平衡状態のゆらぎをそのように測ると、必ず、対称化積時間相関が測定される！

普遍的: 物質の種類に依らない。測定器の詳細にも依らない。

余談:

- 量子測定理論(物理)と量子中心極限定理(数学)の近年の成果をフル活用
- 理論物理としてだけでなく、数学としても正しい(はず)の証明

➡ American Mathematical Society 「Mathematical Reviews のreviewerになってほしい」

➡ 手に余るので、お断りしました(数学科の方々、ご安心ください)

周りを探検

非平衡統計力学の基本的「定理」: 揺動散逸定理

平衡状態におけるゆらぎ = 温度 × 線形応答係数

例: 平衡状態における電流ゆらぎ = 温度 × 電気伝導度

普遍性: 係数が物質の種類とは全く無関係に、温度になる

古典系では証明されている。

量子系でも証明されたことになっている。

60年間解けずに放置されていた問題: そのゆらぎは測定されるゆらぎなのか?

平衡状態のゆらぎを、量子論が許す範囲内で最も古典測定に近いように測定

➡ 必ず、対称化積時間相関が測定される ≠ 「証明」に出てくる量

- 時間反転対称性が偶の成分: 測定値の関係として、揺動散逸定理が成立
- 時間反転対称性が奇の成分: 測定値の関係としては、揺動散逸定理が破綻

余談: 論文のタイトル

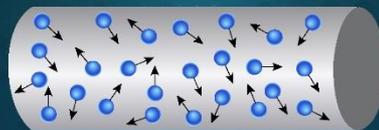
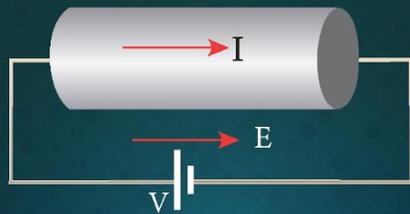
Universal Property of Quantum Measurements of Equilibrium Fluctuations
and Violation of Fluctuation-Dissipation Theorem

具体的な物理系における揺動散逸定理の破綻と、その帰結 (with Kubo, Asano)

To appear in JPS Hot Topics <https://jpsht.jps.jp/>

Violation of Fluctuation-Dissipation Theorem Results in Robustness of Fluctuation Against Localization

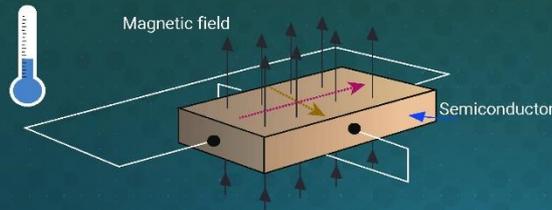
The fluctuation-dissipation theorem (FDT), which relates equilibrium fluctuations with the conductivity, is well established for classical systems



However, FDT is violated in macroscopic quantum systems due to unavoidable disturbances from the measurement

Conductivity and current fluctuation become independent, and show different physics

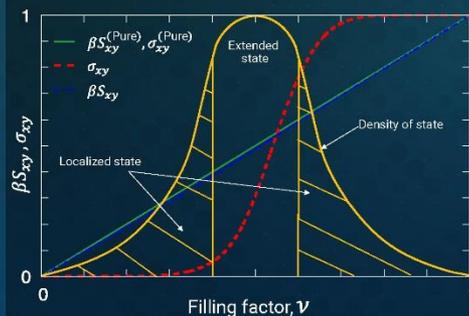
Measurement of Hall conductivity and current fluctuation



2D electron system in a high magnetic field at low temperature

Independent measurements of

- Off-diagonal current fluctuation, S_{xy}
- Hall conductivity, σ_{xy}



- Both extended and localized states contribute to S_{xy} → fluctuations are insensitive to system impurities
- Only extended states influence σ_{xy} → highly sensitive to system impurities
- S_{xy} grows linearly with the Landau level filling factor → can be used to estimate carrier density

The off-diagonal current fluctuation is insensitive to imperfections of the system in contrast to the Hall conductivity

謎3

東大着任以前

- Asymmetric Dual Quantum Well Laser (with Ikeda)
- Optical Nonlinearity of Nanostructures (with Fujii, Ogawa, Cingolani)
- Novel Electron Interferometers (with Okuda)
- Fundamental Limits of Quantum Interference Devices (with Sakaki, Noge)

東大着任直後

- Dynamical Casimir effect (with Okushima)
- Quantum noise of LEDs (with Fujisaki)
- Superconductivity of photo-excited semiconductors (with Shigemori)

どれも非平衡状態



非平衡状態の物理は？

森の入口3

非平衡ノイズ(非平衡状態におけるゆらぎ)のスケーリング(サイズを大きくしていったときにどう振る舞うか)

メゾスコピック伝導体のスケーリングは、マクロ伝導体へと向かわない! ?

伝導体が、マクロに振る舞うようになるメカニズムは何か? (with Ueda)

- 量子力学的な干渉が消えればいい?  それだけではダメ。
- 散逸(他の系にエネルギーを渡して過去を忘れること)が必要!

「これに限らず、開いた系のことをもっと研究しよう」

森の中へ

化学ポテンシャルは、粒子間相互作用があると、どう変わる？

➡ 電流と共に変わり、変化が相殺して、1次元系では、伝導度には相互作用が効かなくなる！

粒子溜は、どうして相互作用がないとみなせるのか？ (with Kato, Miyadera)

➡ 量子力学的な波束が粒子溜で広がると、実効的に相互作用がなくなる

超放射(異常に強い光放射)する系に粒子溜を付けるとどうなる？ (with Brandes)

➡ カオス的な振動を起こす

相互作用する粒子系に強い外場をかけると？ (with Inoue)

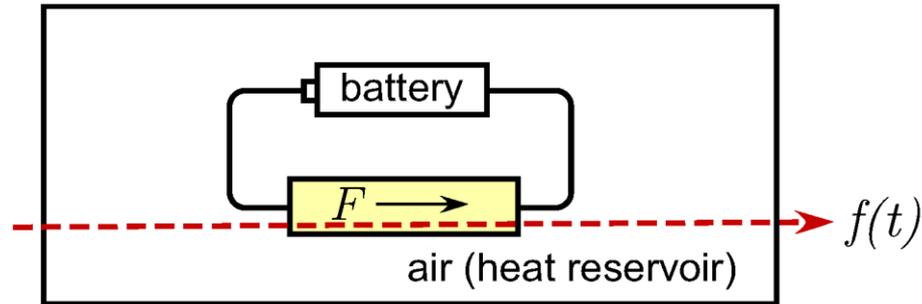
➡ 実効的に、外場がない別の系になる

森の奥へ

非平衡状態に普遍的性質はあるか？ (with Yuge, Hasegawa, Lee, Itoh)

- 自然な電気伝導度モデルの計算機シミュレーションを確立
- 非平衡状態の応答係数の総和則を発見

Example: electrical conductor



When $A = I$ (electric current averaged over the x direction),

$$\begin{aligned}\Delta I(t) &\equiv \langle I \rangle_{F+f}^t - \langle I \rangle_F \\ &= \int_{t_0}^t \Phi_F(t-t') f(t') dt' \quad : \text{longitudinal conductivity of the NESS}\end{aligned}$$

The sum rule says

$$\int_{-\infty}^{\infty} \text{Re} \Xi_F(\omega) \frac{d\omega}{\pi} = \frac{e^2 N_e}{mL} \quad : \text{independent of } F !$$

(N_e : number of electrons, m : electron mass)

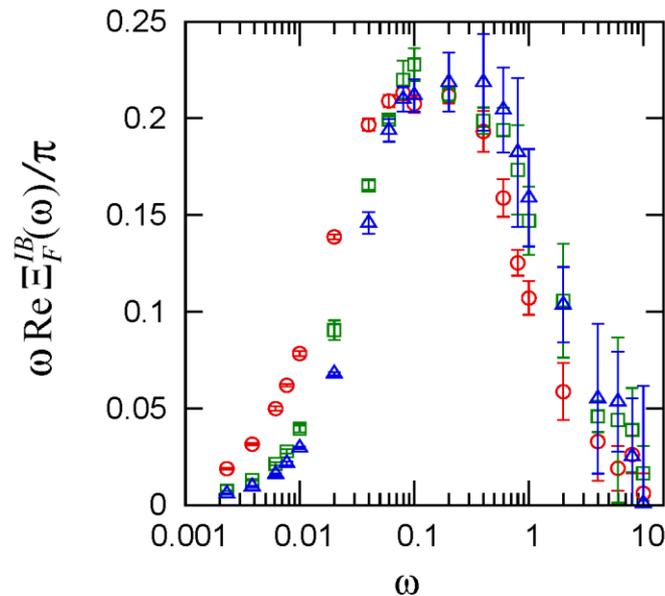
森の奥へ

非平衡状態に普遍的性質はあるか？ (with Yuge, Hasegawa, Lee, Itoh)

- 自然な電気伝導度モデルの計算機シミュレーションを確立
- 非平衡状態の応答係数の総和則を発見

Verification by MD simulation of an electrical conductor

$$\int_{-\infty}^{\infty} \text{Re} \Xi_F(\omega) \frac{d\omega}{\pi} = 2 \int_{-\infty}^{\infty} \omega \text{Re} \Xi_F(\omega) \frac{d \ln \omega}{\pi} = \frac{e^2 N_e}{mL} : \text{indep't of } F$$

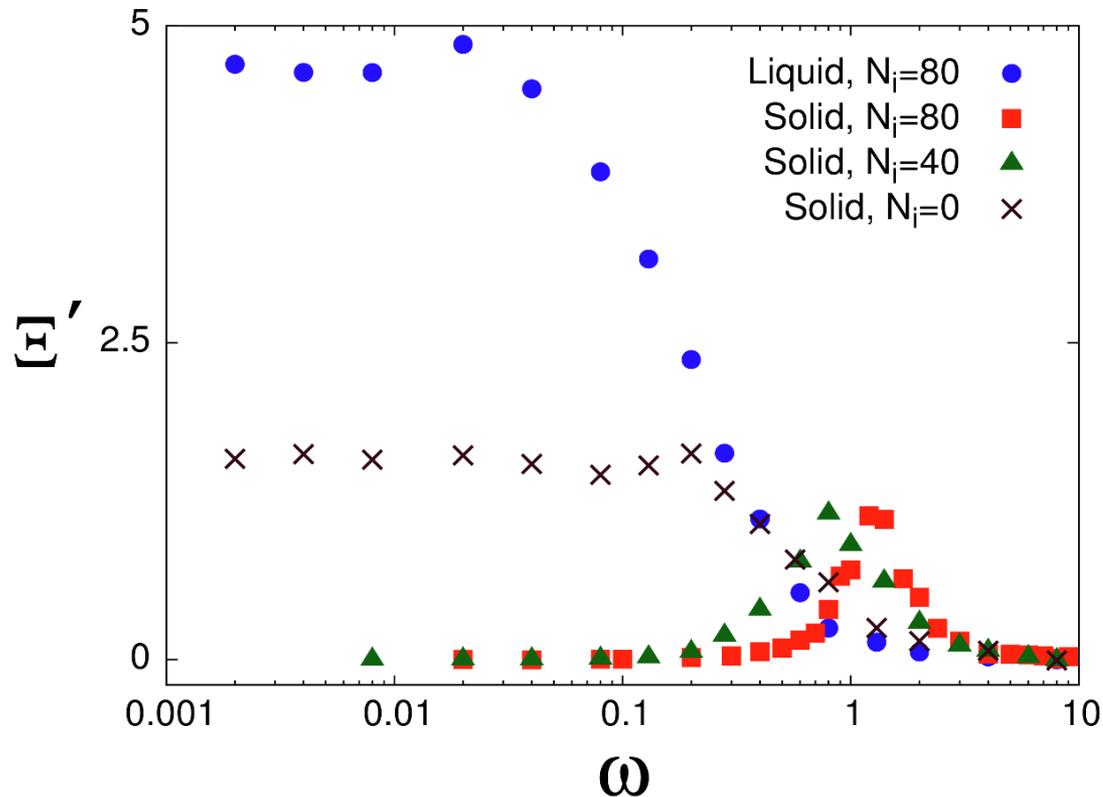


$F = 0$ (circles), 0.06 (squares) and 0.1 (triangles).

森の奥へ

非平衡状態に普遍的性質はあるか？ (with Yuge, Hasegawa, Lee, Itoh)

- 自然な電気伝導度モデルの計算機シミュレーションを確立
- 非平衡状態の応答係数の総和則を発見
- どんな物質も、高い周波数で見ると、固定よりも液体の方が固い



謎4

多自由度量子カオスの状態は擾乱に対して不安定か？ (with Sugita)

従来の予想： 複雑な波動関数を持つから脆弱に違いない

結果： 一般化猫状態を含まず、安定性は普通の状態と同じ

(入口1から入って見つけた一般論を適用した)

森の入口4

AS「こういう系の状態は、その1個1個が、平衡状態を表すはず」

Sugita「えーと...」(このおっさん、何を言ってるんだ?)

c.f. 通常の教科書:「平衡状態は、多数の状態を混ぜ合わせた状態」

Tasaki との立ち話:「統計力学の教科書はどれもよくないよね」

ある日のランチ会 (2010?): 統計力学をどう教えるべきか?

AS「平衡状態は1個の状態で表せると教えるべき」

Hukushima「では、1個の状態だけで、統計力学の**全ての**予言ができますか?」

c.f. 通常の教科書:「**熱力学関数は**、混ぜ合わせた状態の数の対数」

AS「できるはず」(けど、どうやって?)

森の中へ

1個の状態から統計力学の全ての予言ができる「**熱的量子純粋状態**」を構築
(with Sugiura, Hyuga)

- 力学量(量子力学の可観測量でもある熱力学量)だけでなく、純熱力学量(量子力学の可観測量ではない熱力学量)も、1個の状態だけから求まる
- その正しさを理論的に証明
- 数値計算にも便利 ➡ 物性研究所の数値計算ライブラリーに入った

専門家への注:

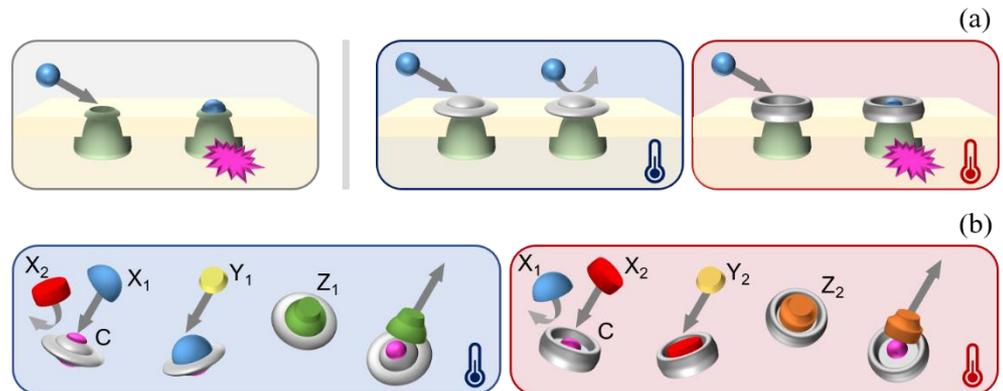
microcanonical版と、対応するアンサンブル: 新規な状態

canonical 版: Imadaらが数値計算手法として導入したものの厳密化。

microcanonical版で級数展開する強力な公式。

非線形応答 (with Endo, Hotta)

Entropic Quantum Machine
(with Hatakeyama)



森の奥へ

squeezed ensemble による統計力学 (with Yoneta)

- 相共存状態を正しく与えることができる
- Hukushimaのexchange Monte Carloが使える

拡張：非可換可観測量で指定される平衡状態のsqueezed ensemble

von Neumann以来の基本的問題

非可換可観測量で指定される平衡状態の統計力学(相共存があると困る)

von Neumann, Ogata:

近似する別の可観測量でmicrocanonical ensembleを作れ

しかし、それでは物理的予言ができない...

元の非可換可観測量でmicrocanonicalのようなsqueezed ensembleを作れる

- 相共存状態を正しく与えることができる
- 相共存まで扱える統計力学は、これが基本原理か？

量子論と熱力学は整合しているのか？ (with Chiba, Asano)

平衡状態(初期状態)

→ 外場をかける

→ いったん、非平衡状態になる

→ やがて落ち着く(終状態)

物理量の変化:

物理量の値@終状態 — 物理量の値@初期状態

- 量子力学で計算
- 熱力学で計算

両者は一致しているのか？

一致するための必要十分条件を見いだした

量子力学による結果と、熱力学による等温感受率や断熱感受率が、どのように関係するかも見いだした

4つの入口から「基礎の森」に入ってみました...



まだ、1%も探索してないでしょう...

近日中に御覧に入れられそうな報告

- 一般化した相律 (with Chiba, Yoneta)
- 高エネルギーでの法則を低エネルギー現象で測定する理論 (with Kawaguchi)

アイデアは報告したけど、結果は永久にご覧に入れられないかもしれない報告

- どの物理量が、どのくらいの応答速度で、どのくらいの反作用で、どのくらいの精度で測れるかは物理法則が決めるはず

➡ それぞれの原理的限界は？

ぼんやりと考えているだけで、手つかずの謎もたくさんある

みなさんも、「基礎の森」を探索してみませんか？



Thank you for
attention