

開放系の量子多体不純物問題で探る 冷却原子系と固体電子系の橋渡し

山本和樹*

Bridging Ultracold Atoms and Solid State Systems in Search for Open Quantum Many-body Physics of Impurity

Kazuki YAMAMOTO*

Strong correlations originate from the electron-electron interactions and give rise to exotic phenomena in quantum materials. Motivated by remarkable developments in open quantum systems in recent years, we analyze the competition between strong correlations and dissipation in quantum impurity systems from the Kondo regime to the valence fluctuation regime by developing a slave-boson theory for a non-Hermitian Anderson impurity model with one-body loss. Notably, in the non-Hermitian Kondo regime, strong correlations qualitatively change the nature of dissipation through renormalization effects, where the effective one-body loss is suppressed and emergent many-body dissipation characterized by the complex-valued hybridization is generated. We unveil the mechanism of a dissipative quantum phase transition of the Kondo state on the basis of this renormalization effect, which counterintuitively enhances the lifetime of the impurity against loss. Our results can be tested in a wide variety of setups such as quantum dots coupled to electronic leads and quantum point contacts in ultracold Fermi gases.

1. はじめに

極低温に冷却された原子集団(冷却原子系)による実験技術の発展は、系のパラメータの自在な制御に加え、散逸の制御や1原子レベルでの観測をも可能にした。観測によって量子系の情報を取り出す際、観測者は環境としての役割を果たし、観測の反作用は量子状態に無視できない変化を引き起こす。特に、冷却原子系のような極限の解像度の下での物理では観測による反作用の影響が顕著となる。近年、こうした『観測の反作用や粒子ロス等の散逸』を利用して、開放系特有の非平衡量子状態を実現できることが実験・理論の両側面からわかってきている。一方で、系の原子は周りの原子の影響を受け複雑に相互作用しながら運動(強相関)しているが、このような『強相関効果』が散逸の下でどのような非平衡現象を誘起するのかといった問題は系統的理解から程遠い。本研究はこうした背景を踏まえ、散逸と強相関効果の協奏で発現する非平衡現象を探究することを目的とする。特に本課題では、冷却原子系のみならず、固体電子系においても実現可能な散逸を伴う、冷却原子系と固体電子系の境界領域における非平衡多体現象を取り扱う。

2. セットアップ：量子開放系

冷却原子系は光や磁場を用いることにより相互作用等のパラメータを自在に制御することができ、量子多体系を実現する理想的な舞台を与えている。近年では特に、散逸の制御による量子開放系の物理の探索が盛んに行われており、 ^{173}Yb での光会合による粒子ロスに誘起された、磁化の反転を伴う非平衡ダイナミクス等の新奇量子現象が報告されている。さらに、固体電子系の分野においても量子ドットと外界の結合によるノイズを用いた、スピン間の量子もつれの制御などの応用が報告されており、散逸の存在する物理の解明は非平衡量子開放系の発展のために必要不可欠である。また量子多体系のみならず、例えば量子コンピュータ(量子力学の基礎原理に基づく革新的並列計算機)を対象にした量子情報分野においても、計算で蓄積された情報である量子もつれを読み取る際、観測の反作用により量子もつれが破壊され、情報の相転移が起こる(観測誘起相転移)ことが報告されている。近年の観測技術の発展は目覚しく、例えば冷却原子系では量子気体顕微鏡を用いた1サイトレベルでの量子状態の観測が可能となり、 ^6Li 原子系での超流動原子ペアの一原子レベルでの直接観測等が報告されている。

そこで本研究では特に、冷却原子系と固体電子系のどちらでも重要な役割を持つ、量子ドットに着目する。特に、レーザーと結合した量子ドットに、さらに空のレーザーが結合して、不純物原子（フェルミオン）の一体ロスが存在するような状況を考える（図1参照）。このような系は、典型的な強相関現象である近藤効果、つまり、不純物原子がレーザーの伝導電子と強く結合し、シングレット状態を形成することで、局在不純物原子が伝導電子によって遮蔽される現象を示す。この現象は凝縮系物理の分野で古くから盛んに研究されてきたものであり、例えば金属中の不純物原子の存在によって、金属抵抗が低温で極小値を取ることなどが知られている。

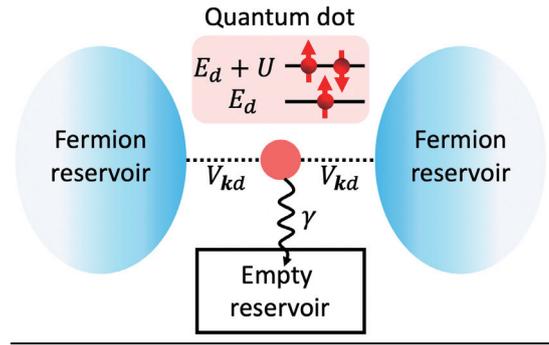


図1 一体ロスを伴う量子ドット系の概念図。

3. 散逸誘起近藤効果

図1に示された量子ドットはアンダーソンモデルと呼ばれるハミルトニアンに一体ロス（散逸）を導入することで記述することができる。このような強相関モデルは一般に煩雑であり、厳密に解を求めることは難しい。そこで本研究では場の理論によるアプローチを試みた。特に、スレイブボゾン法と呼ばれる、高温超伝導、スピン液体、近藤効果など幅広い強相関現象を記述する際に用いられてきた強力な理論手法を量子開放系に拡張することでアプローチを試みた。これにより、散逸誘起近藤効果を、強相関効果をくり込んだ物理量の振る舞いとして記述することに成功した。具体的には、共鳴準位と呼ばれる不純物原子の寿命を決める物理量と、強相関効果の影響をくり込んだ一体ロス、そして同じくくり込まれた有効的なエネルギー準位の振る舞いを自己無撞着方程式の数値計算によって解明した。図2にその結果を抜粋して示す。図2は縦軸にくり込まれた一体ロス、横軸に散逸の値を取っており、様々な不純物のエネルギーレベル (E_d) についてどのように多体効果が現れるかを示している。まず、不純物準位 E_d が低い時（図の下の方のプロット）に着目する。明らかにくり込まれた一体ロスはほとんど0付近にすることがわかる。これは、散逸を系に加えているにもかかわらず、実際に不純物原子が感じる散逸はほとんど0になるという驚くべきことを示している。一方で、不純物準位 E_d が高い時（図の上の方のプロット）に着目すると、加えられた散逸に応じてくり込まれた一体ロス（不純物が感じる散逸）も増えていくことがわかる。これは直感に沿った結果のように思える。では前者の結果はなぜ引き起こされたのだろうか？ それは量子開放系における近藤効果が強く影響したからに他ならない。つまりこれは、強相関効果が散逸の性質を変えてしまうという劇的な現象が起こることを示している。誌面の都合上ここでは述べないが、実際に他の物理量を見ても近藤効果が強く寄与しており、上記の結果（強相関効果が散逸の性質を変えてしまうこと）は非平衡相転移を引き起こすことにつながる。興味のある方は是非論文 (1) を参照されたい。

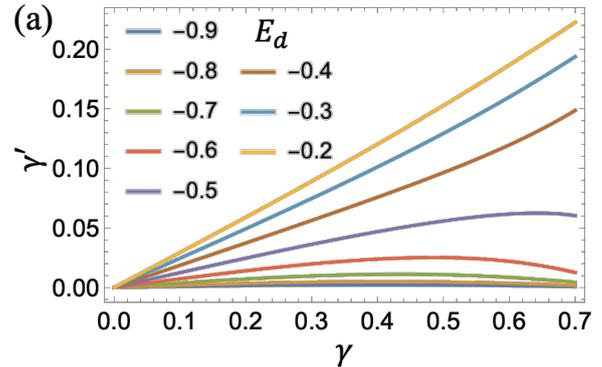


図2 くり込まれた一体ロス ($\tilde{\gamma}$) の散逸 (γ) に対する依存性。

4. まとめと今後の展望

本研究では不純物に着目することで、量子開放系における典型的な強相関効果の影響を調べた。関連研究としては (2), (3) も昨年発表したが、全て開放系における強相関効果の重要性を示唆する結果を得た。特に、研究 (1) では固体電子系と冷却原子系の両方で本モデルを実現するためのセットアップを議論している。既存の量子開放系の研究は、その制御性の高さから冷却原子系におけるものが圧倒的に多いが、固体電子系にも散逸は広く存在している。今後も引き続き幅広い分野にわたって、非平衡開放系の強相関物理の研究を推進していきたいと考えている。

REFERENCES

- 1) K. Yamamoto, M. Nakagawa and N. Kawakami, arXiv: 2408.03494, to be published.
- 2) S. Takemori, K. Yamamoto and A. Koga, *Phys. Rev. B*, **109** (2024) L060501.
- 3) S. Takemori, K. Yamamoto and A. Koga, *Phys. Rev. B*, **110** (2024) 184518.