

# 論文内容の要旨

論文題目 Theoretical Study of Nonequilibrium Correlated Fermions  
Driven by ac Fields  
(AC 外場により駆動された非平衡相関フェルミオン系の理論)

氏名 辻 直 人

相互作用するフェルミオン多体系は、そこに内在する様々な揺らぎを反映して外部からの制御に対して多彩な応答を示す。温度やバンドフィリング、磁場などの静的な制御に対しては理論的理解が格段に進んできている一方、系を非平衡状態に駆動するような動的な外場に対する応答は未解明の部分が多い。そのような外場により非平衡特有の物性を発現させることができれば相関多体系の新たな可能性を拓くことになり、基礎物理としても応用的見地からも非常に興味深い。実際近年の実験技術の進歩により、電子系や冷却原子系などで外場によって非平衡状態に駆動された量子多体系の時間発展を観測することが可能になってきている。特に電子系に対する超高速ポンプ・プローブ分光測定により、外場によって相関電子系の物性を制御し、あるいは「相転移」を引き起こすことができる(光誘起相転移)ことが徐々に明らかになってきた。物性を制御することは凝縮系物理学の主要課題であり、相関多体系の非平衡状態における振る舞いの理解が求められている。

ところが平衡状態と異なり、相互作用する多体系の非平衡状態は理解が十分になされているとはいえない。その理由として次の2点が挙げられる：

(1) 多粒子系の**統計分布**は系の物性を支配するが、非平衡状態では一般にどのような分布が実現されるか分かっていない。平衡状態では統計力学が確立しており、フェルミ粒子系の場合、相互作用の有無に依らずフェルミ・ディラック分布(図1左)

$$f(\omega) = \frac{1}{e^{\omega/T} + 1}$$

で特徴づけられる( $T$ は温度)。しかし、光などの ac 外場が印加されると周波数  $\Omega$  という新たなエネルギースケールが導入され、 $\Omega$  が系の励起エネルギーと同程度であれば分布は容易に平衡分布から大きくはずれ得る(図1右)。今まで非平衡統計力学の一般論の確立を目指

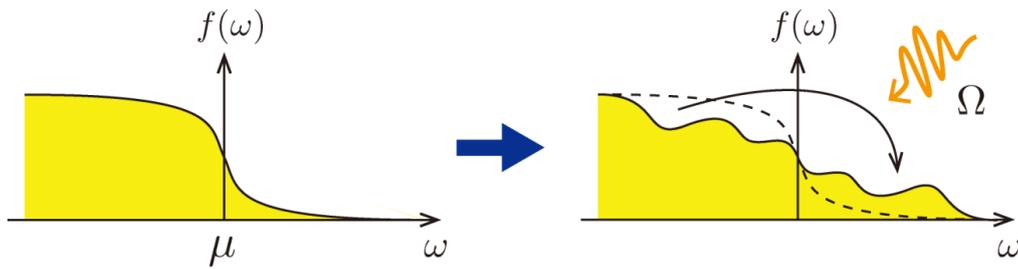


図 1. (左)フェルミ・ディラック分布。(右)ac 外場で駆動された系の非平衡分布。

して多大な努力がなされてきたが、特に興味がある**相互作用する**多粒子系で非平衡分布を決定することは、非平衡定常状態に限っても理論的に非常に困難であった。

(2) 系のダイナミクスは**散逸**の有無によって大きく異なる。特に定常的に ac 外場で駆動する状態を考えるとときには散逸の効果は重要になる。開放系では外場により注入されるエネルギーが環境に逃げ出すエネルギーと釣り合っているのに対し、孤立系では注入されたエネルギーは内部に溜めこまれるため、エネルギーの流れに大きな違いが生じる。相関多体系の中でも電子系は一般に開放系と考えられるが、その時間発展を考えるとときには専ら孤立系として扱われ、散逸の効果は真剣に考慮されてこなかった。

このような点に動機づけられ、本論文で本著者は ac 外場で駆動された相関フェルミオン系の非平衡状態を研究した。そして以下のオリジナルな結果を得た。

## 相関フェルミオン系の非平衡定常状態

本著者は厳密に解ける最もシンプルな熱浴のモデルとして Büttiker 熱浴を相関フェルミオン系に導入し、Keldysh 形式に基づいて非平衡定常状態を決める方程式系を導いた。これは減衰率  $\Gamma$  という一つの現象論的なパラメーターで散逸を記述する枠組みになっている。また系が外場からされる仕事と熱浴に散逸するエネルギーとが非平衡定常状態で釣り合っていることを示し、それまでランジュバン方程式系で知られていた原田・佐々関係式を相互作用する電子系のモデルに拡張した。

## 新たな理論的方法論の提案： フロッケ動的平均場理論

時間的に周期的な外場に駆動された状態を扱うフロッケ(Floquet)の方法が知られている。一方、相互作用する多体系を解くには小さな系での厳密対角化しか主に知られていなかった。本論文ではフロッケの方法と動的平均場理論を組み合わせ、さらに前述した方法で散逸を考慮することで、動的な相関効果(自己エネルギーの周波数依存性)を取り入れながら強い ac 外場に駆動された多体系の非平衡定常状態を解く理論アプローチを提案する(フロッケ動的平均場理論)。また、一粒子グリーン関数だけでなくバーテックス補正も含めた相関関数の計算方法を確立した。

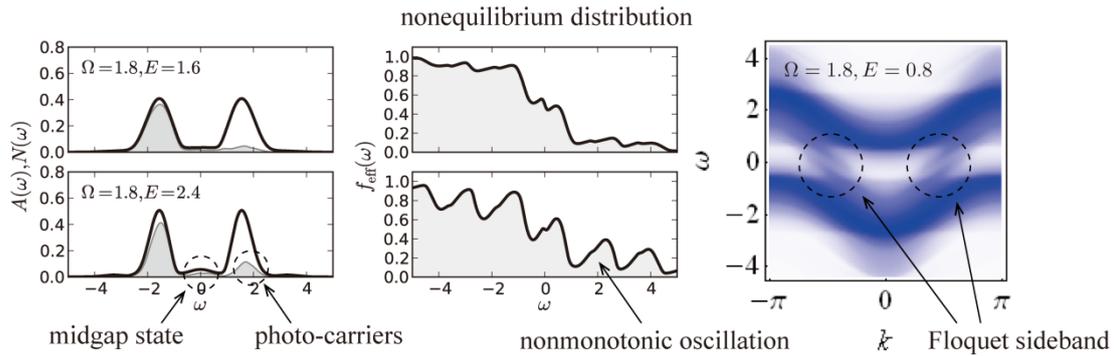


図 2. ac 外場中のファリコフ・キンボール模型の(左)状態密度(実線)、占有密度(灰色領域)、(中央)分布関数、(右)スペクトル関数  $A(k, \omega)$ 。

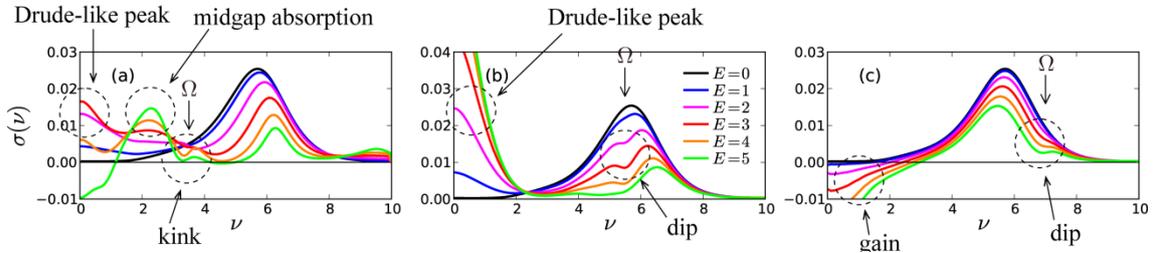


図 3. ac 外場中のハバード模型の光学伝導度。(左)  $E_g < \Omega < U$ 、(中央)  $\Omega \sim U$ 、(右)  $\Omega > U$ 。

### 光誘起絶縁体-金属転移のフロッケ動的平均場理論による解析

このフロッケ動的平均場理論を用いて、光のもたらす興味深い現象の典型として光誘起絶縁体金属転移の解析を行った。具体的には、可解模型であるファリコフ・キンボール模型とハバード模型(相互作用  $U$ 、エネルギーギャップ  $E_g$ )に対してスペクトル関数や分布関数(図 2)、光学伝導度  $\sigma(\nu)$ (図 3)を計算し、次のような豊富な振る舞いが生じることを見出した。

- (1)  $E_g < \Omega \lesssim U$  のとき、Drude 的なピークが  $\sigma(\nu)$  の低エネルギー部分に現れ、光誘起絶縁体金属転移をしていることがわかる。
- (2)  $E_g < \Omega < U$  のとき、 $\sigma(\nu)$  の  $\nu = U - \Omega$  付近にミッドギャップ吸収が現れる。これは光誘起されたフロッケバンド(図 2 右)がギャップ内にできたことに起因する。
- (3)  $\sigma(\nu)$  の  $\nu = \Omega$  付近に共鳴構造(ディップやキンクで、左右非対称)が現れる。これは非平衡特有の量子補正効果から来ている。
- (4)  $\Omega > U$  のとき、 $\sigma(\nu)$  に負の部分が現れ、エネルギー利得が生じている。これはバンド内で反転分布が実現していることによる。

これらに伴い  $\sigma(\nu)$  の変化に対応する 3 次の非線形光学感受率  $\chi^{(3)}$  を評価し、同様の特徴が見られることを示した。また、平衡状態で知られていた  $f$ -和則が、時間的に周期的な外場中の

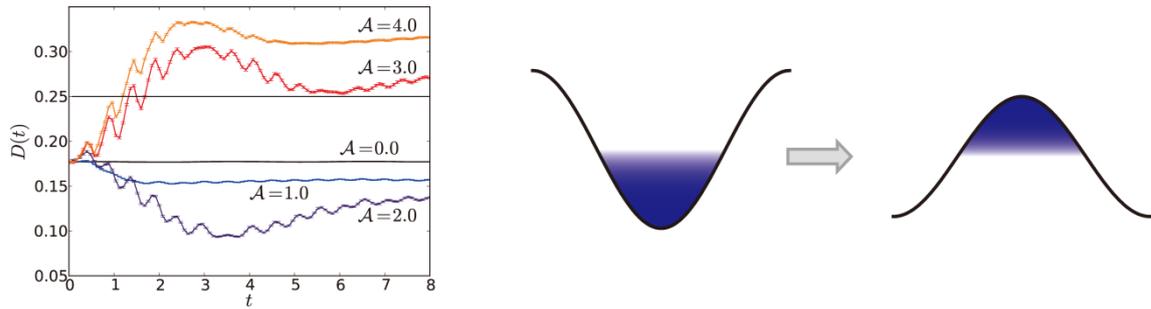


図 4. (左)様々な ac 外場の振幅  $\mathcal{A}$  に対する二重占有率の時間発展。(右)ac 外場によるバンド反転とそれに伴う反転分布。

相関電子系における非平衡定常状態でも成立していることを示した。

### ac 外場によるバンド反転と斥力引力転換

多体系が環境から孤立して散逸がないときの ac 外場中の時間発展を、時間依存動的平均場理論と量子モンテカルロ法により斥力ハバード模型に対して求めた。適当な振幅を持つ ac 外場を非断熱的に突然印加すると、二重占有率( $n_{\uparrow}(t)n_{\downarrow}(t)$ )が自由粒子の値 0.25 を超えて大きく増加することがわかった(図 4 左)。これはフェルミ粒子間に働く相互作用が有効的に斥力から引力に転換されていることを意味する。分布関数を評価することで、バンド構造が ac 外場により反転し負の温度状態(反転分布)が実現されていることによるものとわかった(図 4 右)。本論文では、ac 外場誘起の引力相互作用がもたらすものを、特に超伝導との関連で議論した。

### まとめと今後の展望

以上のように、ac 外場中の相関フェルミオン系の非平衡状態について、散逸があるときのないときに分けて方法論を構築し、ならびに非平衡特有の現象を見出した。本著者が開発したフロッケ動的平均場理論は、今後この分野で標準的な解析手法となることが期待される。また、本論文で得られた様々な結果は将来実験で確認されるべきものである。ポンプ・プローブ分光については電子のコヒーレントな応答が見られるようさらなる時間分解能の向上に期待したい。冷却原子気体での実験は技術的な困難がなく、すぐに実行可能と考えられる。

今後の課題としては、フロッケ動的平均場で解く際に必要となる不純物問題の解法の改良、連続的な ac 外場だけでなくパルス状の外場にも拡張すること、電子系で重要な電子・格子相互作用を取り入れること、また孤立系で如何にして対称性が破れ得るかさらに考察する、などが挙げられる。