

## 審査の結果の要旨

論文提出者氏名 杉本 直之

非平衡状態の理論的記述は、久保公式による線形応答理論がその代表的なものであるが、松原形式を使ったダイアグラム技法は、ゲージ不変性を表現するワード高橋恒等式を満たしながら注意深く行う必要があり、多バンド系に適用する場合には、相当複雑な解析を迫られることになる。また、熱平衡から遠く離れた非平衡状態を非摂動的に扱うことは不可能であった。これらの限界を乗り越えることは、非平衡量子統計力学の根幹に関わる大問題である。杉本氏はこの問題に対して、非可換幾何学による量子化という考えを持ち込むことで、新しいゲージ共変な形式を構築して上記の2つの限界を解決するとともに、それを i)異常ホール効果、スピホール効果、 ii)電場誘起絶縁体金属転移、の理論的解析に応用し、それぞれの問題で大きな成果を得た。

まず、Keldysh 形式において Wigner 表示で  $\pi = p + (e/c)A$  を変数にすることで、ゲージ不変性が顕になる定式化を行った。この新しい変数を導入すると、Green 関数に対する Dyson 方程式に現れる“積”が“\*積”という非可換性を表す非自明な積に置き換わることになる。この積を含む代数的構造を解析することで、電磁場  $A$  の存在下での Keldysh 形式を新たに構築することに成功した。この形式では、時間空間に依存した電磁場の場合は、string 理論における deformation quantization の手法を援用してコンパクトな公式を導き、さらに一様静電磁場の場合には積分を用いた表式を得た。

これらの基礎的な定式化を用いることで、まず多バンド系におけるホール効果の理論を、不純物散乱を取り入れて計算した。まず、異常ホール効果における不純物効果の問題は、スキュー散乱による外因的機構と Karplus-Luttinger の提唱したバンド効果による内因性機構の間で長年論争が行われてきた。最近の詳細なバンド計算によるとフェルミエネルギー付近に存在するバンド交差構造が、異常ホール効果に重要な働きをしていることが示唆された。この結果を踏まえ、バンド交差を記述する最も簡単なモデルとして Rashba モデルを取り上げ、不純物散乱効果を取り入れて異常ホール伝導度の計算を行った。その結果、乱れの強さに応じて3つの異なる領域が存在し、それぞれの領域で、外因性機構と内因性機構が異なる役割をすることを見出した。また、スピホール効果に関しても、まず Keldysh 形式から、スピホール伝導度に対する一般化した Streda 公式を導き、それをいろいろなモデルに適用して、不純物散乱によってスピホール効果が消える場合と、有限に残る場合を分類し、その一般論を構築することができた。

もう一つの応用として、強相関電子系における電場誘起絶縁体・金属転移の理論を構築した。不純物散乱を取り入れた Keldysh 形式で、電場の効果を非摂動的に取り

扱うことで Landau-Zener トンネル過程と、散逸を伴う定常流を統一的に扱うことに成功し、その非平衡 Green 関数を用いて、反強磁性磁気秩序に対する自己無撞着方程式を解いた。その結果、電場を強くしてゆくと必ず 1 次相転移で絶縁体・金属転移が起こることを見出した。そしてその閾値電場は通常の Zener 破壊に対するそれよりも 2 桁以上小さくなることを示した。これらの結果は、Cu,Ni 酸化物などの実験結果と良い符合を示している。

本論文は 5 つの Chapter, Appendix A からなる。

Chapter 1 は Overview of the thesis として論文全体の構成を述べている。

Chapter 2 は Gauge covariant Keldysh formula として、Keldysh 形式の導入のあと、ゲージ不変な定式化、変形量子化を使った Dyson 方程式の導出、定電磁場の場合の積分表示などが導かれている。

Chapter 3 は Hall effects として、その導入の後、異常ホール効果、スピンホール効果の不純物散乱を取り入れた計算を Chapter 2 の定式化を用いて行った。異常ホール効果では、乱れの強さに応じて 3 つの領域：(i) skew 散乱の支配的なスーパークリーン領域、(ii) 内因性機構が支配的な通常金属領域、(iii) 新しいスケーリング則  $\sigma_{xy} \propto \sigma_{xx}^{1.6}$  成

立するホッピング領域、の 3 者が存在することがわかった。スピンホール効果に対しては、不純物散乱を取り入れたときに、モデルに応じてスピンホール伝導度が有限に残る条件を一般的に導くことができた。

Chapter 4 は、Metal-insulator transition に gauge covariant Keldysh formalism を適用し、電場下での磁気秩序に対する自己無撞着方程式を解くことで、非平衡絶縁体・金属転移が 1 次転移となることを見出した。

Chapter 5 では、Chapter 2-4 で述べられた結果をまとめるとともに、今後の展望が述べられている。

以上をまとめると、本論文ではゲージ不変性を頭に Keldysh formalism に取り入れることで、多バンド系の量子輸送現象、および非平衡絶縁体・金属転移の理論を構築した。本論文の研究は、非平衡量子統計物理全般へと波及効果を持つばかりでなく、多バンド系の量子輸送現象、強相関電子系の非平衡過程の理論の発展に資するものと考えられ、今後の物理学へ寄与するところが大きい。

よって本論文は博士（工学）の学位請求論文として合格と認められる。