OUKA
The University of Osaka
Institutional Knowledge Archive

Title	Microscopic Theory of Quench Dynamics in Disordered Potentials under Non-Abelian Gauge Fields
Author(s)	栫, 昌孝
Citation	大阪大学, 2026, 博士論文
Version Type	VoR
URL	https://doi.org/10.18910/107155
rights	
Note	

The University of Osaka Institutional Knowledge Archive : OUKA

https://ir.library.osaka-u.ac.jp/

The University of Osaka

様式３

論　文　内　容　の　要　旨

氏　名　（　栫　昌孝　）	
論文題名	Microscopic Theory of Quench Dynamics in Disordered Potentials under Non-Abelian Gauge Fields （非可換ゲージ場下における乱れたポテンシャル中のクエンチダイナミクスの微視的理論）

論文内容の要旨

本博士論文では、スピン軌道相互作用（SOC）を有する二次元無秩序系において、初期平面波状態を無秩序ポテンシャル中へクエンチした後のスピン・運動量分布の時間発展を数値的・解析的に調べた。

無秩序系における波動輸送では、異なる多重散乱経路を伝播する波の量子干渉が重要な役割を果たす。特に、相反する経路間の干渉は、弱局在やコヒーレント後方散乱を引き起こす。近年、冷却原子系では、平面波状態に調製した原子を無秩序ポテンシャル中へクエンチし、その後の運動量分布の時間発展を直接観測できるようになった。これにより、固体系では捉えにくい多重散乱による量子干渉効果の発達を、散乱時間程度の時間分解能で研究できる。さらに、冷却原子では強度や異方性を制御可能な合成SOCを実現できるため、乱れと非可換ゲージ場が協調して生み出す非平衡ダイナミクスを調べる有力な舞台となる。

SOCが存在すると、乱れによる運動量散乱に伴ってスピン緩和が生じるとともに、散乱経路間の干渉も変化する。このような系における従来の理論の多くは、スピン軌道長が平均自由行程より十分長い弱結合領域を対象とし、長時間・長波長の拡散近似に基づいていた。そのため、冷却原子実験で観測可能な散乱時間程度の短時間ダイナミクスや、強いSOCの領域を統一的に記述する枠組みは十分に確立されていなかった。この問題は、冷却原子の非平衡現象のみならず、強いSOCを有する乱れた電子系の輸送を理解する上でも重要である。

そこで本研究ではまず、Rashba型SOCをもつ二次元無秩序系を解析した。数値シミュレーションにより、短時間に形成されるコヒーレント後方散乱ピークが、時間の経過とともに破壊的干渉に由来する後方散乱ディップへ移行することを示した。また、SOCを非摂動的に扱うダイアグラム理論により、弱結合極限のDyakonov-Perel型スピン緩和から、強結合極限における散乱時間に比例した緩和へのクロスオーバーを明らかにした。

次に、解析を一般の一様なSU(2)ゲージ場へ拡張した。数値シミュレーションにより、コヒーレント後方散乱ディップと共存し、正確な後方散乱方向からずれた波数に現れる有限寿命の干渉ピークを見いだした。この系は冷却原子の内部状態をレーザーで結合する現実的な構成によって実現でき、見いだした干渉現象の実験的観測も期待される。その運動量オフセットと有限寿命は、非可換ゲージ変換に基づく描像で直感的に理解できる。さらに、梯子型および最大交差型ダイアグラム級数の周波数依存性を拡散近似を超えて扱い、任意のSOC強度において無秩序平均密度行列を時間の関数として記述する多重散乱の摂動理論を構築した。この理論は、スピン軌道長が平均自由行程より十分長い極限（弱いSOC）から十分短い極限（強いSOC）へのクロスオーバーを連続的に記述し、SU(2)対称な永続スピンヘリックス極限も正しく再現する。さらに、数値計算との比較により、スピン等方化時間、運動量分布の緩和、および過渡的干渉ピークの形成と減衰を広いパラメータ領域で定量的に再現した。

本研究は、冷却原子系で観測可能となった無秩序物質波の非平衡ダイナミクスに微視的な理解をもたらすとともに、非可換ゲージ場下におけるスピン・運動量緩和と量子干渉を、SOCが弱い領域から強い領域まで統一的に記述する理論的枠組みを与えるものである。

様式 7

論文審査の結果の要旨及び担当者

氏　名　（　栫　昌孝　）		
論文審査担当者	（職）	氏　名
	主 査　教授	黒木和彦
	副 査　准教授	Slevin, Keith
	副 査　教授	浅野建一
	副 査　教授	新見康洋
	副 査　教授	吉野元

論文審査の結果の要旨

無秩序系における波動輸送では、多重散乱経路間の量子干渉が重要な役割を果たし、スピン軌道相互作用はその性質を大きく変化させる。近年、冷却原子系では、平面波状態に調製した原子を無秩序ポテンシャル中へクエンチし、その後の運動量分布の時間発展を直接観測できる。さらに、強度や異方性を制御可能な合成スピン軌道相互作用を実現できるため、固体系では捉えにくい散乱時間程度の実時間ダイナミクスを研究する有力な舞台となる。

このような研究背景のもと、栫昌孝氏は、一様な SU(2)ゲージ場下の二次元無秩序系における初期平面波状態の運動量分布の時間発展を解析した。フーリエ変換を活用した効率的な時間発展シミュレーションを自ら構築し、スピン軌道相互作用による位相蓄積を反映して、後方散乱方向からずれた運動量に現れる有限寿命の干渉ピークを見いだした。そして、その運動量オフセットと有限寿命は、非可換ゲージ変換に基づく描像で理解できることを示した。さらに、スピンチャンネルをあらわに取り扱う多重散乱の摂動論を用いて、スピンと運動量分布の時間発展を解析的に記述することに成功した。とりわけ重要なのは、従来の研究で採用されてきた拡散近似に限定されることなく、高次の周波数依存性を取り入れた理論手法を独自に考案した点にある。この手法により、Rashba 型スピン軌道相互作用を持つ系から SU(2)対称性が現れる特殊な極限に至るまで、幅広い乱れ強度およびスピン軌道相互作用強度のもとで生じるダイナミクスを統一的に記述することに成功した。この理論は、スピン軌道長が平均自由行程より十分長い極限から十分短い極限へのクロスオーバーを連続的に記述するとともに、SU(2)対称な永続スピンヘリックス極限も正しく再現する。さらに、数値計算との比較により、運動量分布の緩和と過渡的干渉ピークを定量的に再現した。50 年間にもわたる過去の複数の研究を統一的に理解するとともに、これまで研究されてこなかったパラメーター領域をも包括する理論となっており、極めて独創性の高い研究である。

よって、本論文は博士（理学）の学位論文として十分価値あるものと認める。