

氏 名 MALUCKOV ALEKSANDRA A.

学位（専攻分野） 博士(学術)

学位記番号 総研大甲第554号

学位授与の日付 平成13年9月28日

学位授与の要件 数物科学研究科 核融合科学専攻

学位規則第4条第1項該当

学位論文題目 The Statistical Properties of the Particle
Radial Diffusion in the Presence of the Magnetic
Field Irregularities

論文審査委員	主査	助教授	中島 徳嘉
		教授	小森 彰夫
		教授	岡本 正雄
		教授	佐藤 哲也
		教授	若谷 誠宏 (京都大学)
		教授	近藤 義臣 (群馬大学)

軸対称トーラスMHD平衡の動径方向に有限な領域に加えられた摂動磁場中でのクーロン衝突による電子の動径方向拡散の統計的性質を明らかにした。このような状況下では、速度空間に由来するクーロン衝突による総計性と、配位空間に由来する乱れた磁場による総計性とが共存している。

摂動磁場強度とクーロン衝突周波数からなる2次元パラメータ空間において、電子の動径方向変位に関する4次までのキュムラント、2次のキュムラントの時間微分で定義した拡散係数、及び、異なる二つの時刻の間の自己相関関数等を評価することにより、電子の動径方向拡散の統計的性質を明らかにし、その性質の両パラメータ依存性を粒子軌道の非局所性の観点から物理的に解釈した。

摂動磁場が存在しない場合には、新古典理論で知られているように、粒子の動径方向拡散は、時間に依存しない拡散係数を持つウィナー過程（古典的ブラウン過程）として現れる。ウィナー過程は、時間に依存しない拡散係数を持つ正常拡散で、粒子分布は動径方向にガウス分布を示し、自己相関関数が二つの時刻に依存し、その時間差のべき状で減衰する統計的に非定常なマルコフ過程である。

これに対し、クーロン衝突が存在しない状況下での粒子拡散は、磁場の乱れの増大と共に、相関時間の後に拡散係数が消失する一様混合過程に近づく。一様混合過程は、拡散係数が消失する非拡散的過程で、粒子分布は動径方向に一様分布を示し、自己相関関数が二つの時刻の時間差のみに依存し、指数関数的に減衰する統計的に定常なマルコフ過程である。この結果は、動径方向に有限な広がりを持つ磁場摂動を考慮することにより初めて得られるものである。

両統計性が共存する場合には、磁場の乱れが強くて衝突周波数が小さい領域では、拡散過程は一様混合過程から拡散係数が時間と共に減少するサブ拡散過程へと移行し、磁場の乱れが弱くなり且つ衝突周波数が増大すると共に、サブ拡散過程はウィナー過程へと移行する。サブ拡散過程においては、時間と共に減少する拡散係数を持ち、粒子の動径方向分布はガウス分布でも一様分布でもなく、自己相関関数が二つの時刻に依存し、その時間差のべき状で減衰する統計的に非定常な過程である。このサブ拡散過程のマルコフ性は明

らかでない。

以上の摂動磁場強度とクーロン衝突周波数からなる2次元パラメータ空間内での統計的性質の変化は、物理的には以下のように理解できる。粒子のドリフト速度は、磁力線に沿った平行方向速度が、磁力線を横切る垂直方向速度と比べて十分に大きいため、衝突周波数が小さい場合には、磁場の統計性を反映した素早い磁力線に沿った非局所運動により拡散過程は一様混合過程を示すが、衝突周波数の増大と共に、磁力線方向の粒子の自由な運動は妨げられ、拡散係数が時間と共に減衰するサブ拡散過程へと移行する。更に衝突周波数が増大すると、磁場の乱れが弱いほど磁力線に沿った動径方向への移動より磁力線に垂直方向ドリフトのクーロン衝突散乱による移動の方が大きくなり、軌道の局所性から時間に依存しない拡散係数を持つウイナー過程へと移行する。即ち、粒子軌道が動径方向に局在化している場合にのみウイナー過程が得られ、軌道が大域的な場合には、サブ拡散過程や一様混合過程が得られる。このように、軌道の非局所性を反映する摂動磁場強度と軌道の散乱を反映するクーロン衝突からなる2次元パラメータ空間において、軌道の非局所性が通常とは異なる拡散過程を生み出すことを明確に示した。

更に、乱れた磁場のリアプノフ数を評価することにより、本研究と従来の研究との関連も明らかにした。本研究で用いた現実的な状況を反映した動径方向に有限な領域に加えられた摂動磁場の場合、平衡磁場に垂直方向の特性長は平行方向の特性長より遙かに短く、従来用いられた準線形的な取り扱いが妥当でないことが明らかとなった。

論文の審査結果の要旨

本提出論文の主題は、軸対称トーラスMHD平衡の動径方向に有限な領域に加えられた摂動磁場中でのクーロン衝突による電子の動径方向拡散の統計的性質を明らかにすることである。乱れた磁場中での粒子のクーロン拡散は、その研究の初期においては、準線形理論が成立する動径方向に無限で乱れが一様な摂動磁場中においてなされた。言い換えると、磁場の相関関数に現れる平衡磁場に垂直方向の特性長が無限の極限での解析である。この場合には、磁場の拡散係数は平衡磁場方向への距離に依存しない一定値を持ち、これに基づいたクーロン衝突周波数の小さい及び大きい極限における粒子の拡散は、時間に依存しない拡散係数を持つ正常拡散となる。しかしながら、動径方向に一様な磁場の乱れは、トーラス配位の実際的な状況を正しく取り入れたものとは言い難い。その後、準線形近似をその一部に含むような形式で摂動磁場の統計的性質（相関関数）を仮定し、拡散係数が時間と共に減衰するサブ拡散過程が理論的に示されたが、具体的、現実的な摂動磁場との対応は不明瞭なままである。

本論文は、従来の研究の欠点を克服しており、1) 単に拡散係数を評価するという、ブラウン運動の延長上の古典的な考え方から脱し、その統計的性質を緻密に評価している点、及び、2) 実際的な状況を反映する動径方向に有限の広がりを持つ摂動磁場を与え、摂動磁場の統計的性質を仮定することなくその統計的性質を評価し、クーロン衝突による統計的性質との重ね合わせから粒子の動径方向拡散の統計的性質を評価している点、更に、3) 統計的性質の決定に本質的な、軌道の非局所性を反映する摂動磁場強度と軌道の散乱を反映するクーロン衝突周波数からなる2次元空間において、統計的性質の全体像を明確化しているという点において、独創性のある研究であるといえる。

本研究の結果は、摂動磁場強度とクーロン衝突周波数からなる2次元空間における統計的性質の大域的な両パラメータ依存性という形でまとめられる。摂動磁場が存在しない場合には、新古典理論で知られているように、粒子の動径方向拡散は、時間に依存しない拡散係数を持つウィナー過程（古典的ブラウン過程）として現れる。これに対し、クーロン衝突が存在しない状況下での粒子拡散は、磁場の乱れの増大と共に、相関時間の後に拡散係数が消失

する一様混合過程に近づく。この結果は、動径方向に有限な広がりを持つ磁場摂動を考慮することにより初めて得られるものである。両統計性が共存する場合には、磁場の乱れが強くて衝突周波数が小さい領域では、拡散過程は一様混合過程から拡散係数が時間と共に減少するサブ拡散過程へと移行し、磁場の乱れが弱くなり且つ衝突周波数が増大すると共に、サブ拡散過程はウイナー過程へと移行する。この変化は、物理的には以下のように理解できる。粒子のドリフト速度は、磁力線に沿った平行方向速度が、磁力線を横切る垂直方向速度と比べて十分に大きいため、衝突周波数が小さい場合には、磁場の統計性を反映した素早い磁力線に沿った非局所運動により拡散過程は一様混合過程を示すが、衝突周波数の増大と共に、磁力線方向の粒子の自由な運動は妨げられ、拡散係数が時間と共に減衰するサブ拡散過程へと移行する。更に衝突周波数が増大すると、磁場の乱れが弱いほど磁力線に沿った動径方向への移動より磁力線に垂直方向ドリフトのクーロン衝突散乱による移動の方が大きくなり、軌道の局所性から時間に依存しない拡散係数を持つウイナー過程へと移行する。

以上の結果から理解できるように、粒子軌道が動径方向に局在化している場合にのみウイナー過程が得られ、軌道が大域的な場合には、サブ拡散過程や一様混合過程が得られる。このように、軌道の非局所性を反映する摂動磁場強度と軌道の散乱を反映するクーロン衝突からなる2次元パラメータ空間において、軌道の非局所性が通常とは異なる拡散過程を生み出すことを明確に示した点は、非局所輸送理論に関連して将来の発展が期待できるものであり、博士論文として十分な意義を持っている。