

多孔媒質中における ^3He 準粒子の拡散と量子局在

学位論文内容の要旨

近年、アモルファス半導体、アモルファス金属や合金、液晶、高分子材料、ガラスなどの乱た系は、結晶系にはない固有の性質を有するためいろいろな分野で応用されている。これらの乱れた系はいろいろなタイプのランダムネスによって分類されるが、なかでもトポロジカルに乱れた系、すなわちランダムなネットワーク構造をもつ系は物性物理学の観点からも多くの興味をもたれている。このような系として、多孔媒質が知られている。多孔媒質は無数の小さな孔が連結したランダム・ネットワークを持ち、このランダムネスを利用してフィルター、クロマトグラフィー、ウランの分離など多方面に応用されている。多孔媒質はまた、ランダム系の基本的モデルであるパーコレーション系で記述できる。パーコレーション系はフラクタル構造と臨界的性質を有することから、最近活発な研究対象となっている。本論文は多孔媒質中における ^3He - ^4He 希釈溶液中の ^3He 準粒子の拡散について理論的に研究したものである。

本論文は8章から構成されている。

第1章は、ランダム系の物性物理学で特に重要な問題であるパーコレーション系の性質に関するこれまでの研究の概略と本論文の目的が述べられている。

第2章では、最初に液体 ^4He 、液体 ^3He 、 ^3He - ^4He 混合液の一般的性質が述べられている。次に、本論文で主に扱われる ^3He - ^4He 希釈溶液中の ^3He 準粒子を取り扱う理論的手法及びその基本的性質が与えられている。また、バルクの ^3He - ^4He 希釈溶液の熱力学的性質と輸送的性質が説明されている。

第3章では、本論文で扱う多孔媒質がパーコレーション系として記述できることが示されている。また、連続パーコレーション系のモデルの臨界的性質、特に伝導度の臨界的挙動は通常の格子パーコレーション系と異なるユニバーサリティ・クラスに属するので、その点に関して詳細に述べられている。

第4章では、本論文で議論する多孔媒質(バイコール・グラス)に対する幾何学的構造モデルとして、孔(直径 a)とチャンネル(長さ l , 半径 d の円柱)から構成されるパーコレーション・ネットワークが提案されている。但し、チャンネル半径 d は分布しているものとし、この分布関数は第3章で述べた連続パーコレーション系の典型的なモデルであるランダム・ボイド・パーコレーション・モデルと逆ランダム・ボイド・パーコレーション・モデルから決定される。チャンネルや孔における ^3He - ^4He 希釈溶液中の ^3He 準粒子のゼロ点エネルギーをそれらのサイズ(a や d)の関数として求め、多孔媒質中の ^3He 準粒子の有効ポテンシャルを決定している。この有効ポテンシャルは、チャンネルのサイズの分布に起因したゼロ点エネルギーの分布によって形成されるランダム・ポテンシャルである。また、 ^3He 準粒子が隣の孔へ拡散するときのホッピング時間が計算されており、 ^3He 準粒子はその運動エネルギーがチャンネルのポテンシャル障壁より大きい時のみ隣の孔へ拡散できることが示されている。そして、 ^3He 準粒子の化学ポテンシャルとパーコレーション濃度とが関係づけられることを理論的に明らかにする。この関係から ^3He 濃度を人為的に変化させることによって系のパーコレーション濃度をコントロールできることが主張されている。

第5章では、最初に Gefen, Aharony, および Alexander によるパーコレーション系における拡散のスケーリング理論が述べられている。次に ^3He 準粒子がある孔から隣の孔へのホッピングするとき、ホッピング時間の分布を考慮に入れて、 ^3He 準粒子の拡散について議論されている。次に、 ^3He 準粒子の拡散係数に対する表式が一定チャンネル半径の規則格子系と第4章で考えた多孔媒質系に対して求められている。規則格子系の拡散係数の化学ポテンシャルの依存性は、チャンネルのポテンシャル障壁の閾値エネルギー以上で有限の大きさの拡散係数となることが示されている。また、温度依存性につ

いての理論的表式が求められ、これらの結果は Rice の長い細孔中の³He 準粒子の拡散係数の表式と比較し議論されている。一方、多孔媒質における³He 準粒子の拡散に対しては拡散係数の化学ポテンシャル依存性が、臨界化学ポテンシャル近傍で $(\mu - \mu_c)^{\epsilon - \beta}$ というユニバーサルな臨界的挙動を示すことを見いだしている。温度依存性についても $T^{\epsilon - \beta}$ というべき依存性を示すことが明らかにされている。また、強磁場下における³He 準粒子の拡散に対して議論が展開され、その結果↑スピンと↓スピンの移動端が異なり、拡散係数の大きさもで↑スピンと↓スピンの異なることが見い出されている。

第6章では、強磁場下における³He-⁴He 希釈溶液系 (スピン偏極³He ↑ -⁴He 系) の拡散についての第5章の結果を適用している。スピン偏極³He ↑ -⁴He 希釈溶液系の基本的性質が述べられている。次に、従来のスピン偏極³He ↑ の生成方法について簡単に紹介し、現在まで報告されている結果について説明されている。この章の最後では、多孔媒質中のスピン偏極³He ↑ 準粒子の拡散を利用して、従来実現することが不可能であった高³He 濃度かつスピン高偏極度の縮退³He ↑ -⁴He 希釈溶液系が生成できることを詳細に議論されている。

第7章では、本論文では多孔媒質における³He 準粒子の量子干渉効果による量子局在について議論されている。ここでは、古典的粒子のランダム・ウォークと量子力学的粒子の局在を関係づけた Allen の理論が用いられている。その結果、マイクロケルビン領域では³He 準粒子は量子局在することが示されている。一方有限温度ではミリケルビン領域においては³He 準粒子の位相のコヒーレンス長が孔径以下になるので古典的粒子として取り扱えることを意味している。さらにサブミリケルビン領域では量子干渉効果が重要となるので、非弾性散乱による非局在化の可能性について議論している。非弾性散乱の機構としては壁の磁性不純物との磁気双極子相互作用と考え、フェルミの黄金律を用いて非弾性散乱時間が計算されている。その結果、この機構による非局在化は起こらないことが明らかにされている。

第8章は、本論文で得られた結果を総括し、今後の課題について言及している。

学位論文審査の要旨

主 査 教 授 中 山 恒 義
副 査 教 授 堤 耀 広
副 査 教 授 田 中 啓 司
副 査 教 授 徳 田 直 樹

学 位 論 文 題 名

多孔媒質中における ^3He 準粒子の拡散と量子局在

近年、アモルファス半導体、アモルファス金属や合金、液晶、高分子材料、ガラスなどの乱た系は、結晶系にはない固有の性質を有するためいろいろな分野で応用されている。これらの乱れた系はいろいろなタイプのランダムネスによって分類されるが、なかでもトポロジカルに乱れた系、すなわちランダムなネットワーク構造をもつ系は物性物理学の観点からも多くの興味もたれている。このような系として、多孔媒質が知られている。多孔媒質は無数の小さな孔が連結したランダム・ネットワークを持ち、このランダムネスを利用してフィルター、クロマトグラフィー、ウランの分離など多方面に応用されている。多孔媒質はまた、ランダム系の基本的モデルであるパーコレーション系で記述できる。パーコレーション系はフラクタル構造と臨界的性質を有することから、最近活発な研究対象となっている。本論文は多孔媒質中における ^3He - ^4He 希釈溶液中の ^3He 準粒子の量子拡散について理論的に研究したものである。

本論文は8章から構成されている。

第1章は、ランダム系の物性物理学で特に重要な問題であるパーコレーション系の性質に関するこれまでの研究の概略と本論文の目的が述べられている。

第2章では、最初に液体 ^4He 、液体 ^3He 、 ^3He - ^4He 混合液の一般的性質が述べられている。次に、本論文で主に扱われる ^3He - ^4He 希釈溶液中の ^3He 準粒子を取り扱う理論的手法及びその基本的性質が与えられている。また、バルクの ^3He - ^4He 希釈溶液の熱力学的性質と輸送的性質が説明されている。

第3章では、本論文で扱う多孔媒質がパーコレーション系として記述できることが示されている。また、連続パーコレーション系のモデルの臨界的性質、特に伝導度の臨界的挙動は通常の格子パーコレーション系と異なるユニバーサリティ・クラスに属するので、その点に関して詳細に述べられている。

第4章では、本論文で議論する多孔媒質(バイコール・ガラス)に対する幾何学的構造モデルとして、孔(直径 a)とチャンネル(長さ l , 半径 d の円柱)から構成されるパーコレーション・ネットワークが提案されている。但し、チャンネル半径 d は分布しているものとし、この分布関数は第3章で述べた連続パーコレーション系の典型的なモデルであるランダム・ボイド・パーコレーション・モデルと逆ランダム・ボイド・パーコレーション・モデルから決定される。チャンネルや孔における ^3He - ^4He 希釈

溶液中の ^3He 準粒子のゼロ点エネルギーをそれらのサイズ(a や d)の関数として求め、多孔媒質中の ^3He 準粒子の有効ポテンシャルを決定している。この有効ポテンシャルは、チャンネルのサイズの分布に起因したゼロ点エネルギーの分布によって形成されるランダム・ポテンシャルである。また、 ^3He 準粒子が隣の孔へ拡散するときのホッピング時間が計算されており、 ^3He 準粒子はその運動エネルギーがチャンネルのポテンシャル障壁より大きい時のみ隣の孔へ拡散できることが示されている。そして、 ^3He 準粒子の化学ポテンシャルとパーコレーション濃度とが関係づけられることを理論的に明らかにする。この関係から ^3He 濃度を人為的に変化させることによって系のパーコレーション濃度をコントロールできることが主張されている。

第5章では、最初にGefen, Aharony, およびAlexanderによるパーコレーション系における拡散のスケージング理論が述べられている。次に ^3He 準粒子がある孔から隣の孔へのホッピングするとき、ホッピング時間の分布を考慮にいれて、 ^3He 準粒子の拡散について議論されている。次に、 ^3He 準粒子の拡散係数に対する表式が一定チャンネル半径の規則格子系と第4章で考えた多孔媒質系に対して求められている。規則格子系の拡散係数の化学ポテンシャルの依存性は、チャンネルのポテンシャル障壁の閾値エネルギー以上で有限の大きさの拡散係数となることが示されている。また、温度依存性についての理論的表式が求められ、これらの結果はRiceの長い細孔中の ^3He 準粒子の拡散係数の表式と比較し議論されている。

一方、多孔媒質における ^3He 準粒子の拡散に対しては拡散係数の化学ポテンシャル依存性が、臨界化学ポテンシャル近傍で $(\mu - \mu_c)^{t-\beta}$ というユニバーサルな臨界的挙動を示すことを見いだしている。温度依存性についても $T^{t-\beta}$ というべき依存性を示すことが明らかにされている。また、強磁場下における ^3He 準粒子の拡散に対して議論が展開され、その結果 \uparrow スピンと \downarrow スピンの移動端が異なり、拡散係数の大きさも \uparrow スピンと \downarrow スピンの異なることが見い出されている。

第7章では、多孔媒質における ^3He 準粒子の量子干渉効果による量子局在について議論されている。ここでは、古典的粒子のランダム・ウォークと量子力学的粒子の局在を関係づけたAllenの理論を適用し、サブミリケルビン領域では ^3He 準粒子は量子局在することが示されている。一方ミリケルビン領域においては ^3He 準粒子の位相のコヒーレンス長が孔径以下になるので、古典的粒子として取り扱えることを明らかにしている。さらにサブミリケルビン領域では量子干渉効果が重要となるので、非弾性散乱による非局在化の可能性について議論している。非弾性散乱の機構としては壁の磁性不純物との磁気双極子相互作用と考え、フェルミの黄金律を用いて非弾性散乱時間が計算されている。その結果、この機構による非局在化は起こらないことが見いだされている。

第8章は、本論文で得られた結果を総括し、今後の課題について言及している。

以上、著者は多孔媒質中における ^3He 準粒子の拡散について多くの新知見を得ており、物性工学、応用物理学の発展に貢献するところ大なるものである。よって、著者は、博士(工学)の学位を授与される資格あるものと認める。