

論文内容の要旨

論文題目 Correlated Electronic States in Quantum Dots under High Magnetic Fields (強磁場中の量子ドットの相関電子状態)

氏名 西 義史

電子をド・ブロイ波長程度の微小領域（100nm 程度）に閉じ込めた、いわゆる量子ドットにおいては、量子効果に起因する状態の離散化が起こり、同時に電子と電子の間にはたらく相互作用の効果が重要になってくる。特に電荷の離散性が顕著に現れてくるため、ドットに取り付けたゲート電極に電圧を印加して静電ポテンシャルを制御することで、内部の電子数を1個ずつ制御することができる。

AlGaAs/InGaAs/AlGaAs ヘテロ二重障壁構造を円形に切り出した縦型量子ドットでは、電子数を0個から数十個まで1個ずつ制御することが可能であり、また、回転対称性の高い放物型閉じ込めポテンシャルが得られる。これらの性質を利用して、少数電子系の磁場中の状態遷移が詳しく調べられている。

量子ドットに磁場を印加してゆくと、単一電子軌道はランダウ準位に対応したそれぞれのグループを形成する。ある程度の磁場（2~3T）を印加すると、すべての電子がスピンペアを組んで最低ランダウ準位を占有するが、さらに磁場を強くすると、電子軌道が縮まって電子間のクーロン斥力エネルギーが大きくなるため、電子は空間的に大きな角運動量の高い軌道へと移ってゆく。それに伴い、交換エネルギーを稼ぐためにスピンの揃ってゆき、最終的には完全にスピンの揃った最大密度電子液滴状態（maximum density droplet, MDD）状態へと遷移する。これは2次元の $\nu=1$ に対応した状態であると考えられている。MDDは比較的安定な状態であるが、さらに強い磁場を印加すると、やはりクーロン斥力が強くなり、さらに角運動量の高い状態へと遷移してゆく。MDDより強磁場側、即ち $\nu < 1$

の状態は、これまでに電子数の比較的大きい領域で基底状態エネルギーの磁場変化が観測され、電荷再配置が起こることが知られている。しかし、具体的にどのような電子状態が現れるか、という点に関しては実験的な検証は行われていない。

理論的には、MDDを越える強磁場領域では、電子はお互いを避けるように古典的安定配置に対応した「格子」を組み、全体として回転・振動しているという、電子分子の描像が成り立つことが示されている。電子分子では、分子形状の回転対称性と振動モードによって角運動量 L がパウリ原理の要請を受け、系の全スピン S に応じた、魔法数と呼ばれる特定の値のみが許される。つまり、電子相関が強い状況では、 L と S はある特定の組み合わせでしか実現しない。従って、高磁場領域で基底状態遷移が起こる際、 L が変化するとそれに伴って S も変化することが期待される。但し、現実の系ではゼーマン効果があるため、低スピン状態は完全スピン分極の魔法数状態の間に中間状態として現れると考えられる。

本論文では、強磁場中で電子相関が重要になる領域における、縦型量子ドットの少数電子状態を電気伝導測定によって調べた結果について述べている。実験はすべて希釈冷凍機温度における直流測定で行った。

実際に相関の強い電子状態がどの程度の磁場で実現されるかは、電子に対する閉じ込めエネルギー $\hbar\omega_0$ と磁場によるサイクロトロン運動の閉じ込めエネルギー $\hbar\omega_c = \hbar eB/m^*$ の兼ね合いで決まる。すなわち、 $\hbar\omega_0$ が小さくなれば、相対的に $\hbar\omega_c$ の効果が大きくなるため、より低磁場で強相関状態が実現されると考えられる。

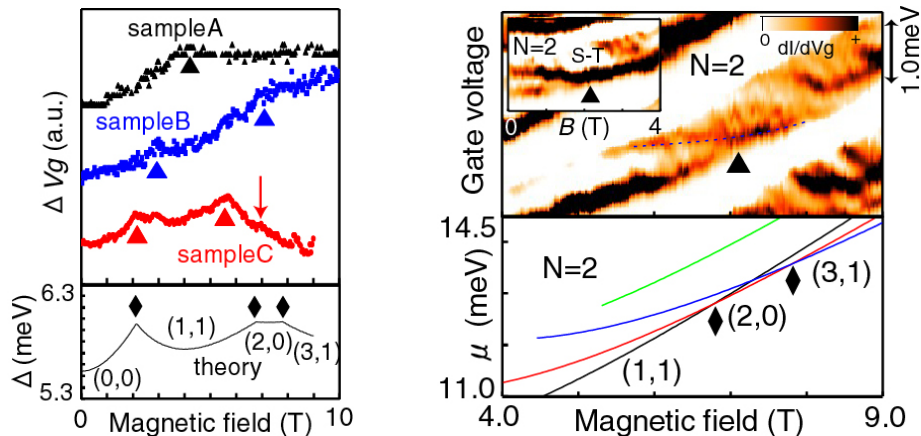


図1. 左: 2番目の電子の addition エネルギーの磁場変化。閉じ込めエネルギーは sample A, B, C の順でそれぞれ 4.2, 3.7, 2.8 meV と見積もられている。閉じ込めが小さくなるに従って基底状態遷移 (▲印) が低磁場側へシフトしている。下図は閉じ込めエネルギー 3.5 meV の場合の理論計算。右: Sample C の 2 電子励起スペクトル (上) と対応する理論計算結果。理論図中の (L, S) は基底状態の角運動量 L とスピン S の値を示している。

本研究では、従来の典型的な縦型量子ドットに比べて閉じ込めエネルギーが従来の 7 割弱であるような縦型量子ドットを作成し、磁場中での基底状態の様子を比較した。その結果、従来は 5 ~ 6 T 程度で観測されていた MDD 状態が、2 ~ 3 T で実現することが分かつ

た。また、特に2電子基底状態について、**addition** エネルギー（1電子基底状態に2個目の電子を付加するのに必要なエネルギー）の磁場変化を調べたところ、MDDを越える6Tおよび7T付近で新たな基底状態遷移を観測した(図1)。これは、2電子MDD $(L, S)=(1, 1)$ が崩壊し、さらに角運動量の高い状態 $(2, 0)$ および $(3, 1)$ へと遷移してゆくことによるものである。この状態遷移は理論的に予測はされていたが、従来の量子ドットでは強磁場(15T強)が必要なために観測されなかった。今回は閉じ込めを小さくしたことで、これらの状態遷移が低磁場側へシフトし、観測できるようになった。また、この実験結果は厳密対角化計算によってよく再現される。

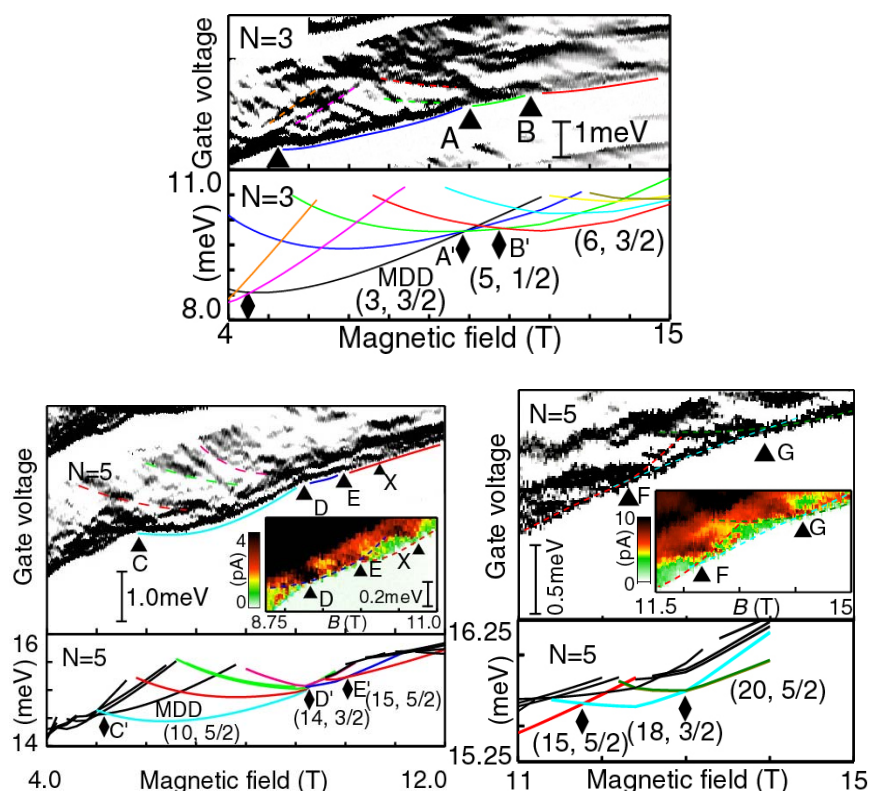


図2. 上段：3電子励起スペクトル(上)と対応する計算結果(下)。基底状態遷移に関与する励起状態(点線でなぞってある)が見えており、理論計算と対応付けられる。MDD崩壊後に中間的な状態が現れる(AB間)。電極内部の状態密度に由来する電流ゆらぎも多く見えている。下段左：5電子励起スペクトル(上)と理論計算(下)。挿入図はMDD崩壊付近の拡大図で、MDD崩壊後に中間状態が現れる様子が分かる(DE間)。下段右：5電子励起スペクトルの高磁場側。FG間に中間状態が現れている。

次に、典型的な縦型量子ドットに強磁場(最大で15T)を印加することにより、3電子および5電子の $\nu < 1$ 領域について、励起スペクトロスコトピーの手法を用いて基底状態付近を詳しく調べた。3電子では安定なMDD状態 $(3, 3/2)$ が崩壊した後、中間的な状態を介して次の安定状態へと遷移してゆく様子が観測された。厳密対角化計算と比較したと

ころ、この中間状態は、完全スピン分極した安定な魔法数状態の間に現れた、低スピン状態 (5, 1/2) であることが同定できた。5 電子状態についても、 $\nu < 1$ 領域に 2 つの中間状態を観測した。測定したスペクトルを計算結果と比較し、これらの中間状態を完全分極した安定な魔法数状態 (10, 5/2), (15, 5/2), (20, 5/2) の間に現れる低スピン状態 (14, 3/2) および (18, 3/2) 状態と同定した。これらの低スピン状態は先に述べたような電子分子の描像によって直感的に説明することが可能である。

磁場に応じて角運動量とスピンの組み合わせが変化してゆくという様子は、スピン選択則によって電流が抑制される、いわゆるスピンプロックードとして観測可能である、ということが理論的に予言されている。すなわち、ある磁場において $N-1$ 電子基底状態および N 電子基底状態の全スピン $S(N-1)$ と $S(N)$ について、 $|S(N-1) - S(N)| > 1/2$ が成り立つ場合に、スピン選択側がはたらくため、 N 番目のクーロン振動ピークが抑制される、という現象である。このスピンプロックードは、電子相関が重要な役割を果たしており、単に単一電子軌道に電子が順番に詰まってゆく、という描像では理解することはできない。

本研究では、5 電子目のクーロン振動ピークの高さを磁場の関数として測定し、5 電子 MDD が形成される直前約 0.5T の領域で、電流値が 10% 以下まで急激に減少することを見出した (図 3 左)。そこでこの領域の励起スペクトルを調べたところ、電流が急激に減少する領域では (7, 1/2) および (8, 1/2) の最低スピン状態が基底状態となっていることが分かった。4 電子 MDD は 5 電子 MDD よりも低磁場で形成されるため、 $S=2$ である 4 電子 MDD と 5 電子低スピン状態 $S=1/2$ が重なって、スピンプロックードが生じたものと考えられる。ブロックード領域におけるクーロンダイヤモンド測定結果も、電流の抑制は 4 電子基底状態が関与していることをはっきり示すものである (図 3 右)。厳密に量子力学的に定義された状態間に生じるスピンプロックードの観測はこれが初めてであり、磁場と電子相関によってスピン状態が変化することへの直接的な証拠のひとつと考えられる。

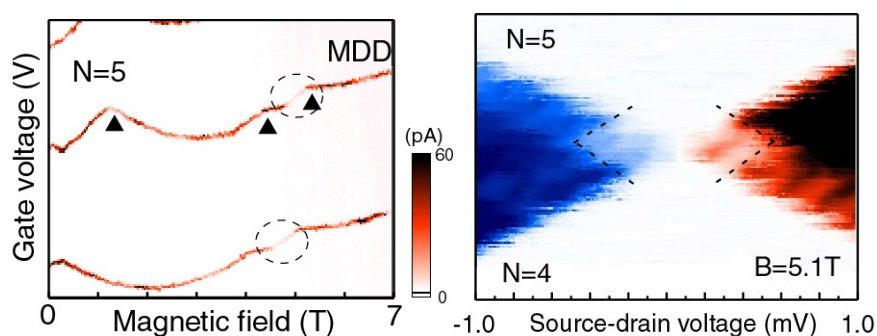


図 3. 左: 4 電子および 5 電子目のクーロン振動の磁場依存性。上に凸なカスプは基底状態遷移に対応している (▲)。スピンプロックードにより、MDD 形成直前でピークの高さが急激に減少している (点線で囲まれた領域)。右: $B=5.1\text{T}$ における 5 電子基底状態付近のクーロンダイヤモンド。中心部の電流が抑制された領域の形状は、電流の抑制が 4 電子励起状態および 5 電子基底状態によって引き起こされていることを示している。