

人工原子・分子が拓く量子の世界

(東京大学・理・物理) 樽茶 清悟

電子をド・ブロイ波長程度の小さい空間に閉じ込めると、電子の運動は完全に量子化され、エネルギーはとびとびの値しかとれなくなる(零次元準位)。このような微小構造は量子ドットと呼ばれ、量子物理の新しい研究対象として注目されている。最近では、形状や電子数を厳密に制御できる半導体量子ドットが開発され、本物の原子に類似の“殻構造やフント則”の存在も確認されている(「人工原子」)。また、人工原子を連結することによって分子に類似の構造(「人工分子」)を作ることにもできる。本講演では、このような人工原子・分子の電子状態の特徴を説明した後、少数電子系の相互作用とスピン効果、量子計算への応用などについて紹介する。また、スピン効果に関して、ナノチューブや分子接合系への適応性にも言及する。

人工原子

ここで紹介する人工原子は薄い円盤状の半導体でできていて、高さ方向には強い閉じ込めによる単一の量子準位、面内方向には放物形の緩い閉じ込めによる複数の量子準位が作られている。電子の軌道は面内に広がっていて、その寸法は数 10nm と原子の千倍程度大きい。さらに、人工原子は電界効果トランジスタ形の素子に埋め込まれていて、ゲート電極を使って電子数を零個から一個ずつ正確に変えられる。このような素子を用いて、ソース、ドレイン間のコンダクタンスを測定することにより電子系の電気化学ポテンシャルが求められる。これにより、特定の電子数のとき閉殻形成による電子系の安定化とフント則に従った半閉殻形成による安定化が確認される。ここで、殻構造は2次元調和形ポテンシャルで閉じ込められた固有状態の縮退(1s、2p、3s3d、...の軌道縮退)に関係し、これらの固有状態で作られる少数多体系の量子数は、スピンを含めて、磁場依存性の測定から正確に決めることができる。加えて、人工原子では、磁場が電子状態を制御するための有効なツールで、例えば数テスラ以下の磁場印可により、軌道縮退の成否を自在に操作することができる。このとき、軌道縮退時の電子占有には、フント則に従った高スピン状態が出現することから、フント則の一般性を確認することができる。

人工分子

人工分子は、通常、2個の量子ドットを同一面内で横に並べたり、縦に重ねたりして作られ、その電子状態はドット間のトンネル結合や静電的結合などの大小に依存する。トンネル結合が大きく、また2個のドットが対称なときには、結合、反結合状態が良く形成されていて結合状態

に優先的な電子占有が、そうでない時にはそれぞれのドットに局在した電子占有が起こる。これらの様子は、トンネル結合を様々に変えて前述と同様な電氣的測定を行うことによって確認される。

スピン効果

人工原子、分子を用いることにより、スピンの関与する様々な実験を行うことができる。ここでは、典型的なスピン効果である近藤効果とパウリ則について紹介する。

(1)近藤効果： 近藤効果は、一般には、局在スピンと伝導スピンのスピン 1 重項結合を介した高次のコヒーレント散乱問題として考えられる。人工原子では、ドットに捕らえられた電子スピンの局在スピン、ドットとトンネル結合した電極（ソース、ドレイン）のフェルミ電子が伝導スピンの置き換えられる。人工原子の大きな特徴は、電極とドットの間のトンネル結合や、ドットの電子状態、特にスピン状態を様々に変えられることにある。とくに、トンネル結合が強い人工原子を使うことにより、ドット中の電子数が奇数の場合、即ち、不對の局在スピンの存在する場合に、明瞭な近藤効果が観測される。これは、通常近藤効果であるが、それ以外にも、磁場を印可して、軌道縮退を起こさせると極めて強い近藤効果が出現するなど、人工原子特有の新しい近藤問題も提起されている。

(2)パウリ則： パウリ則によれば、2 個以上の電子は同一の量子状態を占めることができない。電気伝導は、いわば電子による各量子状態間の移動現象であり、常にパウリ則を満たす必要がある。しかし、通常は、物質には無数の量子状態が縮退し、各量子状態の占有確率は 1 より十分小さいので、パウリ則が重要になることはない。ここで、人工 2 原子分子を考え、各ドットには唯一の量子状態が存在するとすれば、電子の伝導はパウリ則の影響を受ける。とくに、電極間に直列に挟まれた人工分子で、一方のドットにのみ常に 1 個の電子が捕らえられているような場合には、1 個の電子スピンの反応する整流作用が出現する。

(3)量子計算： 人工原子、分子の電子スピンの量子ビットへの応用は、有力な候補の一つとして注目されている。ここでは、量子演算のために必要な条件として、スピン操作、初期化、読み出しなどの問題について議論する。

なお、人工原子、分子のスピン効果は、分子接合系やカーボンナノチューブでも同様に考えられる。近藤効果は、既に観測されているが、これを含めて、講演では、分子接合系で期待されるスピン効果について言及する。