

サイエンストピックス

カーボンナノチューブのスピンの軌道相互作用

平成8年物理学専攻(博前)修了 物理学専攻 助教 泉田 渉



カーボンナノチューブとは、炭素からなる、直径がナノメートル程度の円筒状の物質です。円筒面はグラファイトからなります。特に円筒面が一枚のグラファイト層(グラフェン)のものは単層カーボンナノチューブ(以下、ナノチューブ)と呼ば

れています。ナノチューブはグラフェンをある方向に巻いた構造をしており、グラフェンの六角格子列が円筒面では螺旋状に巻き上がります。巻く方向を自由に選べるため、様々な螺旋構造のナノチューブが存在します。それらのうち3分の1が金属に、残り3分の2が半導体になることが知られています。

ナノチューブの電気伝導測定は1990年代中頃から盛んに行われてきました。特に、一本のナノチューブを電界効果トランジスタ構造にすることで、電子のスペクトル測定が可能となります。数ケルビン以下の低温で温度揺らぎを抑えることにより、金属や半導体といった性質に加え、マイクロメートル長程度のナノチューブに閉じ込められた電子の離散準位が観測されてきました。そのような中、2008年、アメリカの実験グループにより、ナノチューブのスピンの軌道相互作用が報告されました。

スピンの軌道相互作用は重い原子ほど大きいことが知られています。炭素原子は軽く、従来の観測でもその兆候が認められなかったということもあり、ナノチューブでスピンの軌道相互作用が注目されることはほとんどありませんでした。2008年の報告は多くの研究者にとって意外なものだったと思います。スピンの軌道相互作用はスピントロニクスにおける基本的な相互作用でもあるため、ナノチューブの応用に向けた新たな可能性を示すことにもなりました。

炭素原子のスピンの軌道相互作用は数ミリ電子ボルト程度であることが知られています。これは温度に換算すると数十ケルビンです。数ケルビン以下における電気伝導測定の技術はすでに確立されていますので、スピンの軌道相互作用は十分観測可能のようにも思われます。しかしグラフェンのように、 π 軌道だけが伝導に寄与する場合には、もともと小さいスピンの軌道相互作用はさらに抑えられてしまいます。

しかしナノチューブの注目すべき点として、円筒面が曲がっているために π 軌道は σ 軌道と混成することが挙げられます。異なる磁気量子数の軌道が混ざるため、スピンの軌道相互作用が誘起されることが考えられます。では具体的に、ナノチューブにおい

てスピンの軌道相互作用はどのように現れるのでしょうか？

私たちは、螺旋対称性を有する系に対してスピンの自由度を取り込んだブロッホ関数の定式化を行いました。これを用いて、様々な螺旋構造のナノチューブにおけるスピンの軌道相互作用を、数値計算により調べました。また同時に、摂動論に基づき有効モデルを導出しました。これにより、アームチェア型と呼ばれるナノチューブではバンドギャップが開くこと、カイラル型やジグザグ型ナノチューブでは上向きと下向きスピンのエネルギーがサブミリ電子ボルト程度に分裂すること、分裂の大きさはナノチューブの直径に反比例するだけでなく螺旋構造に強く依存することなどを、系統的に示しました。観測当初は謎であった、電子と正孔とでスピンの軌道分裂の大きさが異なることも、私たちの理論により自然に説明されることがわかりました。

ナノチューブのスピンの軌道相互作用を理解する上で、スピンに加え、谷と呼ばれる自由度が重要です。谷とは、フェルミエネルギー近傍のバンド構造を指します。ナノチューブには2つの谷が存在するため、電子が2つの谷のどちらに居るのか、という自由度があります。ナノチューブのスピンの軌道相互作用は、2つの谷で、大きさは同じく、スピンの向きが互いに逆向きになるように現れます。スピンの軌道相互作用が観測されるためには、谷が分離している必要があります。私たちは最近の研究で、螺旋構造によって、谷が分離する場合と、2つの谷が強く結合する場合とがあることを示しています。谷が強く結合する場合にはスピンの軌道相互作用は現れず、分裂と縮退を繰り返すスペクトル構造が現れることを指摘しています。全ての測定においてスピンの軌道相互作用が観測されているわけではありませんが、その一因は上記の様な谷結合にあると考えています。

スピンの軌道相互作用が観測された背景には、高純度ナノチューブの測定が可能になったという実験技術の進展があります。これにより、金属か半導体かといった振舞いの中に潜む微細構造の観測が可能となりました。最近では大量に合成されるナノチューブの中から特定の螺旋構造のナノチューブを分離することや、特定の螺旋構造のナノチューブだけを成長させることが可能となってきています。今後の研究において、様々な螺旋構造のナノチューブの持つ多彩な量子効果がさらに明らかにされるとともに、スピントロニクスなどへの応用が期待されます。