

質量ゼロの電子を新たに発見

～タングステンの表面電子の運動状態を説明～

ポイント

- ・タングステン表面に質量ゼロの電子(ディラック電子)を発見
- ・相関電子由来のディラック電子としては世界初の発見
- ・スピンを揃えて固体中を動き回ることを発見
- ・新世代デバイス用の新規多機能材料の新たな展開

研究の概要

国立大学法人 広島大学【学長 浅原利正】放射光科学研究センター【センター長 谷口雅樹】(以下「HiSOR」という)の宮本幸治助教、広島大学大学院理学研究科の木村昭夫准教授、ミュンスター大学物理研究所(ドイツ)のマルクス・ドナート教授を中心とする研究グループは、HiSOR の高輝度シンクロトロン放射光と、世界最高水準の高分解能・角度分解光電子分光装置およびスピン角度分解光電子分光装置とを組み合わせることで、タングステン表面上に新しいディラック電子を発見しました。この電子はスピン¹⁾が揃って運動するだけでなく、今までのディラック電子とは異なり、磁性や高温超伝導などの付加性質を持たせやすいという特徴を持っています。この発見により、次世代の大容量超低消費電力型のスピントロニクスデバイスや超高速コンピューターの開発がより一層加速するものと期待されます。

本研究成果は米国の科学雑誌「フィジカル・レビュー・レターズ (Physical Review Letters)」に掲載される予定です。

研究の背景

通常、金属や半導体の電子は質量を有しており、固体内部を比較的自由に動き回っています。固体内部の電子の動きを高速化すれば、演算速度が速い CPU やメモリー等を開発することが可能となります。

近年、固体中をより高速で移動できる質量ゼロの電子、いわゆるディラック電子が、グラフェン²⁾や特殊な絶縁体(トポロジカル絶縁体)³⁾で発見され、注目を集めています。既にグラフェンは、折り曲げることが可能なディスプレイに代表されるように、エレクトロニクスデバイス材料として活用されはじめています。また、トポロジカル絶縁体においては、その電子が、スピン¹⁾を揃えて動き回るという、とてもユニークな性質を持っているため、エレクトロニクスを超えた次世代の大容量超低消費電力デバイス技術であるスピントロニクス⁴⁾の材料として、現在脚光を集めています。しかし、グラフェンやトポロジカル絶縁体の質量ゼロの電子は、固体内部を比較的自由に動き回る電子(自由電子)中で発見されて

おり、磁性や高温超電導などといった付加性質を持たせにくいという課題を抱えていました。

一方で、固体内部を比較的自由に動き回る電子とは異なり、周りの原子や電子の影響を受けながら移動する電子(相関電子)は、物質の磁性の発現や高い転移温度をもつ高温超伝導の発現といった、様々な物質の性質を引き起こす電子として知られています。この電子の移動速度は一般的に極めて遅く、固体中を自由に動き回れる電子の10分の1以下しかありません。このような相関電子系であるタングステンは、最も融点が高く、大きな電気抵抗を持った金属のため、古くから電球のフィラメントなどで用いられてきました。タングステンについては、身近でありふれた材料であったためか、古くから、表面電子構造の研究が行われてきました。それにもかかわらず、その表面電子状態の詳細な電子の振る舞いについては謎に包まれたままでした。

研究の内容

研究グループは、HiSOR において、表面電子状態における運動量およびエネルギーを世界最高レベルの精度で分離し直接観測できる高分解能・角度分解光電子分光装置⁵⁾と、電子のスピンをも分離して観測できるスピン角度分解光電子分光装置⁶⁾とを用いて、タングステンの表面上を運動する電子の速度分布およびそのスピン状態を詳細に調べました。その結果、今まで未知であったタングステンの表面電子は、相関電子でありながら、移動速度が従来の相関電子の10倍以上と極めて高速であり、かつ、スピンを揃えて動き回る特殊な電子であることを発見しました。また、電子の速度分布に大きな異方性があることもはじめて明らかにしました。

今後の展望

タングステンの表面電子は、移動速度が従来の相関電子の10倍の速度をもち、スピンを揃えて固体中を動き回るだけでなく、磁性や超伝導などの発現も期待できます。そのため、スピンを利用した、次世代の大容量超低消費電力デバイスの開発に大きな広がりとなし新たな展開を与えるものと期待されます。

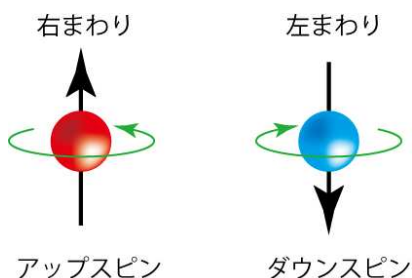
研究体制

本研究は、HiSOR の共同研究委員会により採択された研究課題のもと実験が行われました。

用語解説

1) スピン

電子の自転に由来した磁石の性質のことです。自転の方向に対応して、電子にはアップスピン(上向きスピン)とダウンスピン(下向きスピン)の2種類の状態があります。通常、金属や半導体では、同じ数のアップスピンとダウンスピンの電子が存在し互いにキャンセルしていますが、強磁性体(磁石)では片方の向きのスピン(電子の数)が多くなるため、強い磁化が発生します。

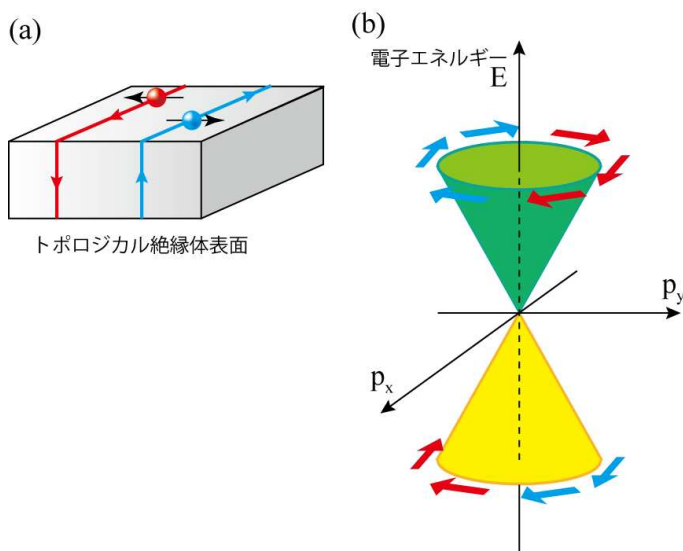


2) グラフェン

厚みが 1 原子層の、蜂の巣のような六角形の構造を持った炭素原子のシートのことを言います。このシートを積層したものが鉛筆の芯として使われているグラファイトです。このナノ材料を作成し、その物性を解明したとして、アンドレ・グイム氏とコンスタンチン・ノボセロフ氏は 2010 年ノーベル物理学賞を受賞しています。

3) トポロジカル絶縁体

物質の内部は絶縁体(電気を流さない)状態ですが、その表面では普通とは異なり、特殊な金属状態が実現している新奇絶縁体です。その表面金属状態は質量を持たず、スピンをそろえて動き回ります(図(a))。この様子を、横軸を電子の運動量、縦軸を電子のエネルギーとして表すと、下図の(b)の様に電子エネルギーと運動量が比例関係にあります。さらに、これを2次元表面の運動量として表すと、円錐となることから、一般にディラック・コーンと呼ばれます。トポロジカル絶縁体を利用した次世代の大容量超低消費電力スピン・デバイスの開発や、超高速の電子を利用した次世代型のスーパーコンピューターの開発において大きな期待が寄せられています。



4)スピントロニクス

電子の電氣的性質である電荷と磁氣的性質であるスピンの両方を利用して動作させる全く新しい電子素子(トランジスターやメモリーなど)技術のことです。この技術の究極の形として、電子1個1個のスピナップとダウンをそれぞれ電気信号の「1」、「0」に置き換えて信号処理を行う事が考えられています。これにより、微弱な電流でも明瞭に区別できるため、低消費電力の次世代電子素子の最有力候補として研究が進んでいます。

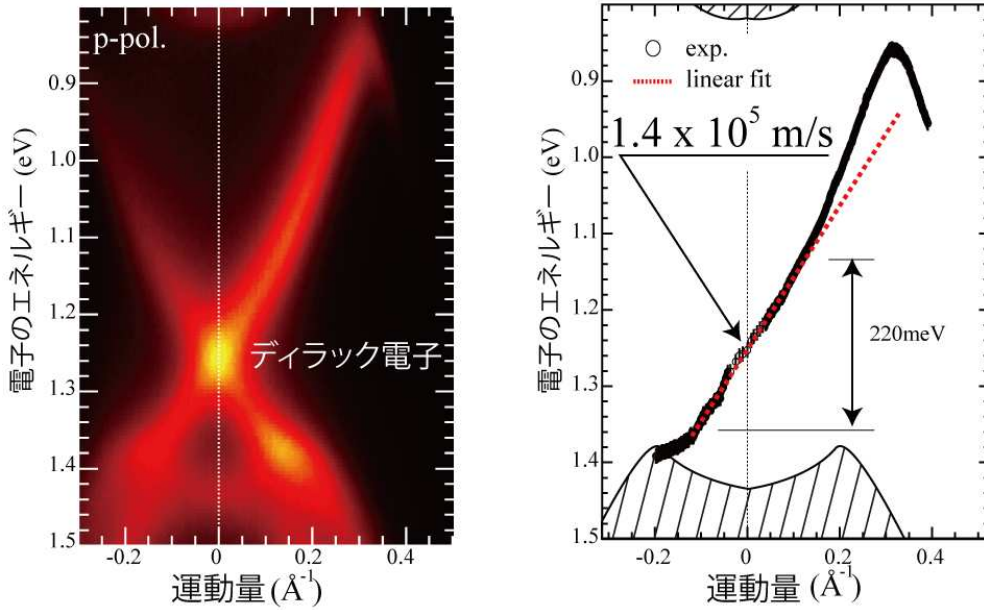
5)角度分解光電子分光

結晶の表面に紫外線を照射して、光電効果により結晶外に放出される電子のエネルギーと運動量を同時に測定する実験手法です。この方法により、固体中の電子のエネルギーと運動量の関係(これをバンド分散といいます)を決定でき、決定された微視的なバンド分散から物質の示す様々な巨視的な性質を説明することができます。

6)スピン角度分解光電子分光

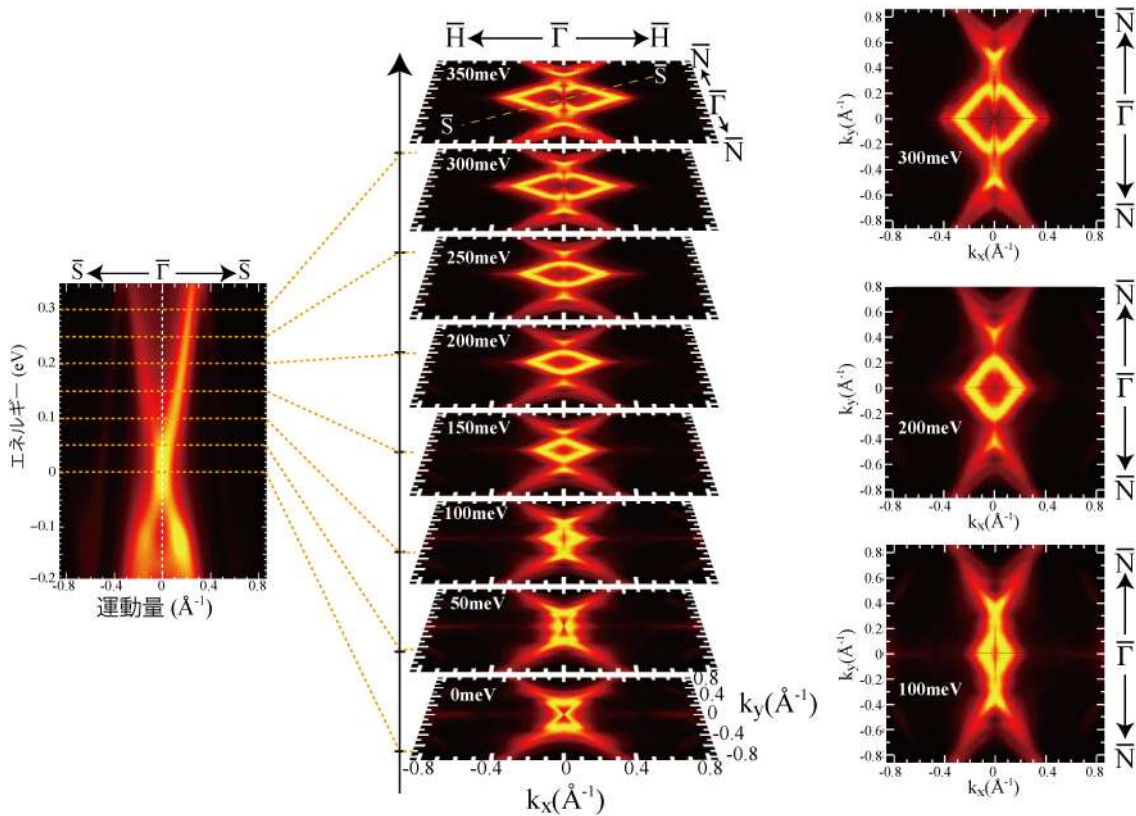
光電子の角度(運動量)・エネルギーを分析する角度分解光電子分光法にスピン分析技術を組み合わせた測定手法です。物質内にある電子の運動量・エネルギーだけでなくスピンの状態も観測することができます。そのため、スピンが関与する様々な物理現象を理解し、それらを有効に活用した高機能性材料や次世代電子・磁気デバイスの研究開発に有力な手法です。

・タングステン表面電子におけるディラック電子の直接観測(研究成果)



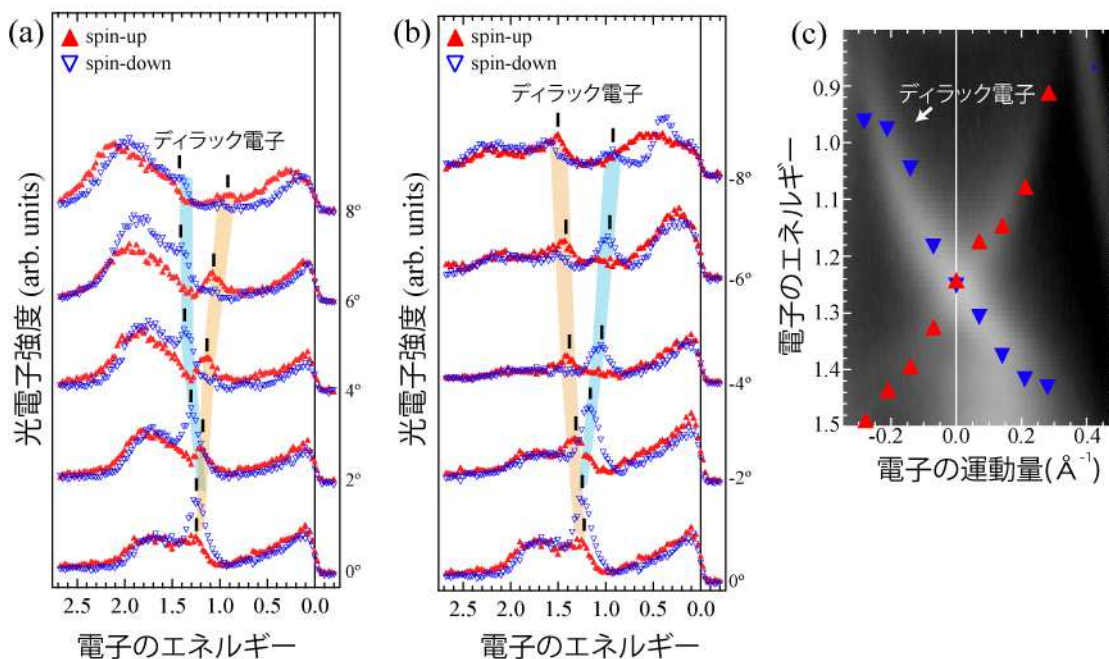
相関電子系であるタングステン表面の電子において、運動量とエネルギーとの関係が直線的な関係をもつ、質量ゼロの電子であることをはじめて観測した。また、この電子が相関電子系(通常 2×10^4 m/s)にも関わらず 1 秒間に 10^5 m も移動できる事を突き止めました。

・タングステンの表面電子の速度分布の詳細観測



ディラック点の付近でも、等方的(円形)ではなく異方的(ひし形)な形状を示し、そこからエネルギー的に離れたところでは、さらに異方的(歪んだ六角形)な形状に変化していくことをはじめて捉えた。

・タングステン表面電子におけるスピン構造の直接観測



スピン角度分解光電子分光測定により、それぞれ電子の運動量を変化させながらスピン電子構造を観測した結果を(a),(b)図に示す。(青色:ダウンスピン、赤色:アップスピン)

これらの結果は、縦軸をエネルギー、横軸を運動量に表記したものを図(c)にしめす。▼がダウンスピンを、▲がアップスピンを表し、ディラック電子がスピン偏極していることが明らかである。

今回発見した質量ゼロの電子は、今まで発見された自由電子系とことなり、さまざまな物性を引き起こす相関電子で形成されている。このような発見は、スピントロニクス材料のさらなる多機能化を促進すると考えられる。