



東北大学



平成22年9月 6日

報道機関各位

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構  
科学技術振興機構（JST）

## 世界最高分解能のスピンド分解光電子分光装置の開発に成功 -磁石の素になる電子のスピンを直接観測-

### <概要>

東北大学原子分子材料科学高等研究機構の高橋 隆教授と相馬 清吾助教らの研究グループは、世界最高の分解能で、物質の電子状態をスピンド<sup>注1)</sup>にまで分解して測定できる「超高分解能スピンド分解光電子分光装置」（図1, 2）の開発に成功しました。開発されたスピンド分解光電子分光装置を用いることで、巨大磁気抵抗効果<sup>注2)</sup>や量子スピンドホール効果<sup>注3)</sup>などの、電子のスピンドが引き起こす様々な物質現象の解明が進み、次世代超高速・超低消費電力素子として注目されるスピンドロニクスデバイス等の開発が大きく進展するものと期待されます。

本研究成果は、平成22年9月10日（米国東部時間）に、米国学術誌 Review of Scientific Instruments の電子版で公開されます。

### <背景>

高機能性材料や電子素子の動作機構は、用いられる物質の電子状態を基にして理解されます。物質の電子状態を測定する最も直接的な実験方法が、アインシュタインの光量子仮説に基礎を置く光電子分光法です（図3）。この手法は、物質に強力な光を照射して、外部光電効果<sup>注4)</sup>によって物質から飛び出てきた電子（光電子）を1つずつ計数し、そのエネルギーや速度を測定する方法です。電子そのものを観測するため、物質の電子状態を高精度で測定でき、これまで半導体や高温超伝導体の研究で大きな成功を収めてきました。一方、電子は「最小の磁石」として、「スピンド」という磁石の素になる性質を持っています。このスピンドは、物質の磁氣的性質を支配して物質に磁石の性質を与え、また非常に高い温度で電気抵抗がゼロになる高温超伝導の起源とも考えられています。最近研究が急速に進展しているスピンドロニクス<sup>注5)</sup>は、この電子のスピンドを利用するものです。しかしながら、従来の光電子分光装置では、電子のスピンドを測定しようとすると検出効率が急激に低下し、エネルギー分解能が0.1 エレクトロンボルト (eV) 程度までしか得られず、スピンドが関わる物質現象を解明する上で大きな障害となっていました。電子スピンドの動作を高精度で測定することは、スピンドが関与する様々な物質現象を理解し、それらを有効に利用した機能性材料や電子素子の開発において

重要な課題であることから、これらの問題を克服した高分解能装置の開発が強く望まれていました。

#### <研究の内容>

本研究グループは今回、電子のエネルギーを高精度で測定できる大型半球型電子エネルギー分析器と、電子のスピンを検出するモット散乱<sup>注6)</sup>型電子スピン検出器を新たに開発し、電子レンズシステムや電子偏向器などを用いて両者を効率的に結合することで、「超高分解能スピン分解光電子分光装置」の開発に成功しました(図1,2)。スピンを検出するモット散乱法<sup>注6)</sup>(図4)は、その基本原理から検出効率が非常に低いという問題がありましたが、本研究グループは、モット散乱された電子を広い立体角で集める機構を考案し、また光電子を検出する2次元エネルギー分析器を高効率化するなどして、装置全体の電子検出効率を格段に上げることで、世界最高のエネルギー分解能8 meVでのスピン分解光電子分光測定を可能としました。これは従来の分解能に比べ10倍以上の向上で、これまでの装置では観測することのできなかった、物質の機能発現に直接関わる微細なスピン分解電子状態の測定が可能となります(図5)。

#### <今後の展望>

開発された装置を用いることで、物質中の電子1個ずつについて、そのスピンの向きや大きさを、非常に高いエネルギー分解能を用いて測定できます。その結果、これまででは観測ができなかった様々な機能性物質のスピン分解電子状態の精密な決定が可能となり、電子のスピンの引き起こす様々な物質現象の解明が急速に進展するものと期待されます。次世代の超低消費電力素子であるスピントロニクスは、まさに電子のスピンそのものを利用します。物質中をこれまでの電子素子のように電子を流すのではなく、電子のスピンを伝搬させて情報を伝達させます。従って、電子のスピンの情報はスピントロニクスにおいては不可欠です。この点についても、今回開発された装置は大きな貢献が期待されます。スピントロニクス素子開発においては、その素子を構成する材料の開発が最も重要となります。スピン分解光電子分光装置を用いて物質のスピン分解電子状態を測定することで、スピン偏極度<sup>注7)</sup>の大きなスピントロニクス材料として適切な物質を選別し、またその結果に基づいたより高性能な物質の開発が可能となります。また将来的には、光電子分光の光のサイズを顕微化する事で、スピントロニクス素子中のスピンの伝搬の様子を直接観測できるようになり、スピントロニクス素子の動作性能向上に大きく貢献するものと期待されます。以上のように、今回開発された超高分解能スピン分解光電子分光装置は、現在研究開発が進められている新機能性材料の物質現象の解明とその高性能化に大きく貢献するものと期待されます。

---

本成果は、JST 戦略的創造研究推進事業 チーム型研究 (CREST) の「物質現象の解明と応用に資する新しい計測・分析基盤技術」研究領域(研究総括: 田中 通義 東北大学 名誉教授)の研究課題「バルク敏感スピン分解超高分解能光電子分光装置の開発」(研究代表者: 高橋 隆)によって得られました。

#### <用語解説>

注1) スピン

電子が持つ、自転に由来した磁石の性質のことです。自転軸の方向に対して、上向き(アップ)と下向き(ダウン)の2種類の状態があります。通常金属や半導体では、同じ数の上向きスピンと下向き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の電子の数が多くなるため、強い磁化が発生します。

#### 注 2) 巨大磁気抵抗効果

物質に磁石を近づけたとき、その電気抵抗が大きく変わる現象を巨大磁気抵抗効果と呼びます。電子の流れがスピン状態（アップ／ダウン）によって強く影響を受けることがその原因です。微弱な磁場を電気信号に変換して検出することができるので、主にコンピューターのハードディスクの読み取り装置に実用化され、記録密度の飛躍的な向上に寄与しています。

#### 注 3) 量子スピンホール効果

通常、物質に流れる電流は、電圧を変えると連続的に変化します。しかし、半導体の接合面内に電子の動きを制限して、絶対零度に近い低温で強い磁場を印加すると、電流値が飛び飛びの値を示すようになります。この現象は量子ホール効果と呼ばれ、1980年に発見されました。これと類似の現象を、磁場をかけなくても電子スピンをうまく利用することで実現できるのではないかと、2005年に理論的に提案されたのが量子スピンホール効果です。この現象はトポロジカル絶縁体と呼ばれる特殊な電子スピン状態を持つ物質で発現すると考えられており、現在、精力的な物質開発・探索が行われています。

#### 注 4) 外部光電効果

物質に紫外線やX線を入射すると電子が物質の表面から放出される現象です。物質外に放出された電子は光電子とも呼ばれます。この現象は、1905年に、アインシュタインの光量子仮説によって理論的に説明されました。アインシュタインは、この業績でノーベル賞を受賞しています。この外部光電効果により結晶外に放出される電子について分析を行うのが光電子分光法です。1個1個の光電子について、エネルギーと運動量さらにはスピンまで決定することができます。

#### 注 5) スピントロニクス

電子の磁氣的性質であるスピンを利用して動作する全く新しい電子素子（トランジスタやダイオードなど）を研究開発する分野のことです。電子スピンのアップ／ダウン状態を、電気信号の「0」と「1」に置き換えて信号処理を行います。電子スピンは応答が早く、熱エネルギーの発生も非常に少ないので、これを利用したスピントロニクス素子は、超高速、超低消費電力の次世代電子素子の最有力候補とされています。

#### 注 6) モット散乱、モット散乱法

1929年に英国の物理学者モットによって考案された電子スピンの測定法です（図4）。非常に高いエネルギー（数十から数百キロボルト）まで電子を加速して、金などの原子番号の大きい原子に衝突させたときの電子が散乱される確率は、その電子が持つスピンのアップ／ダウンにより変わります。これを利用して、左右対称に配置した計測器による電子の計数の差から、電子のスピン状態を決定します。スピン検出法としては歴史が最も古く、高い信頼性が確立されている一方で、高速電子の散乱確率が低いことから検出効率を向上させることが非常に難しい手法として知られています。

#### 注 7) スピン偏極度

電子のスピン状態がアップ／ダウンのどちらに偏っているかを示す数です。+1（完全にアップ）から-1（完全にダウン）までの値をとります。スピントロニクスではスピン状態を電気信号として扱うので、スピン偏極度の絶対値が大きい物質を開発することが重要です。

<参考図>

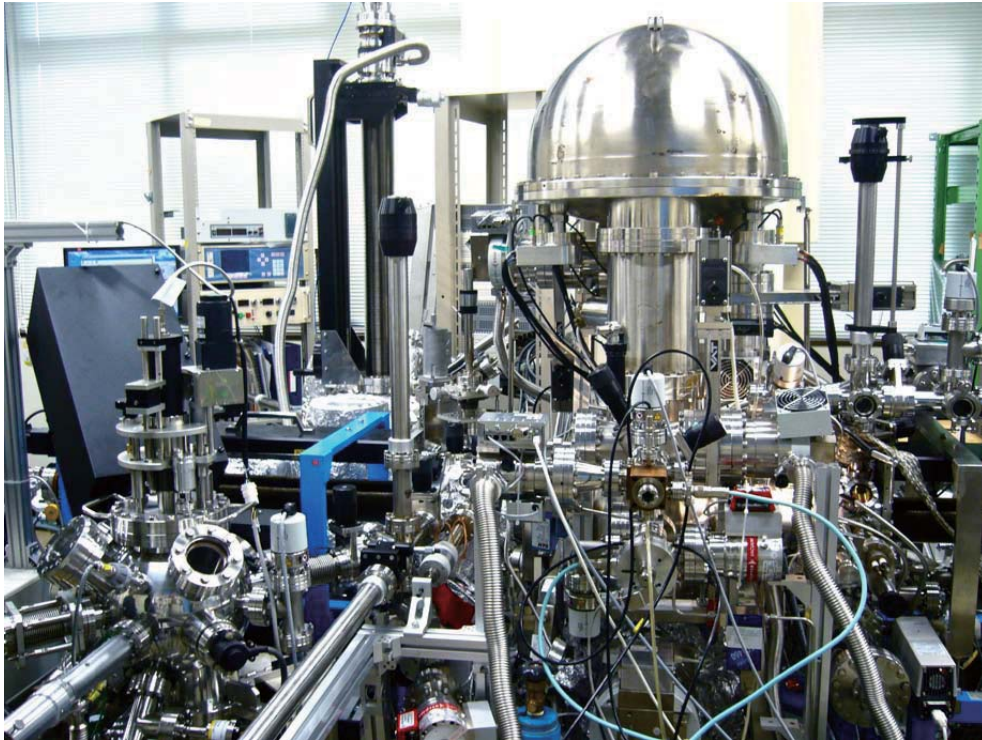


図1 超高分解能スピ分解光電子分光装置の写真

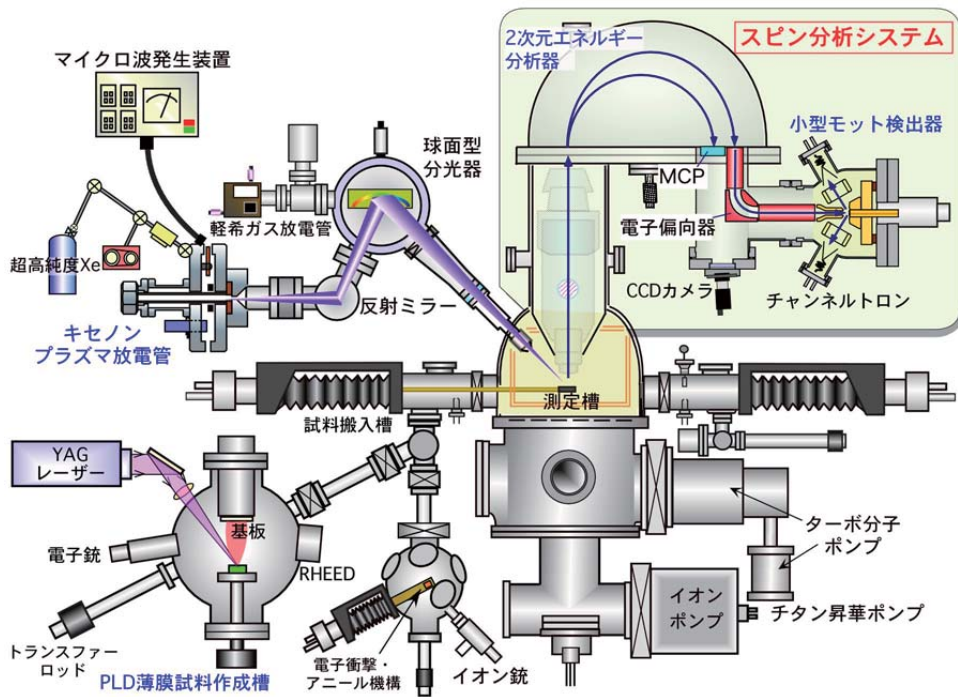


図2 超高分解能スピ分解光電子分光装置の概略図

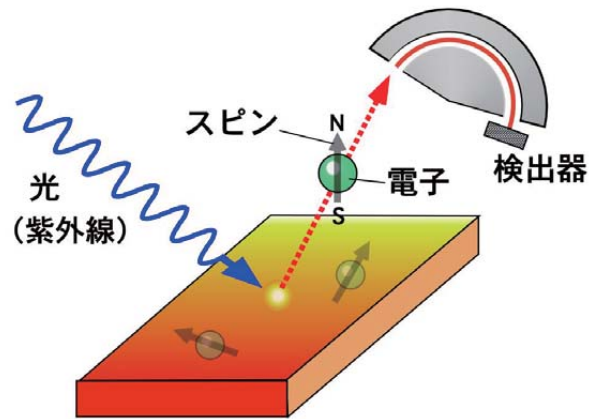


図3 光電子分光法の原理

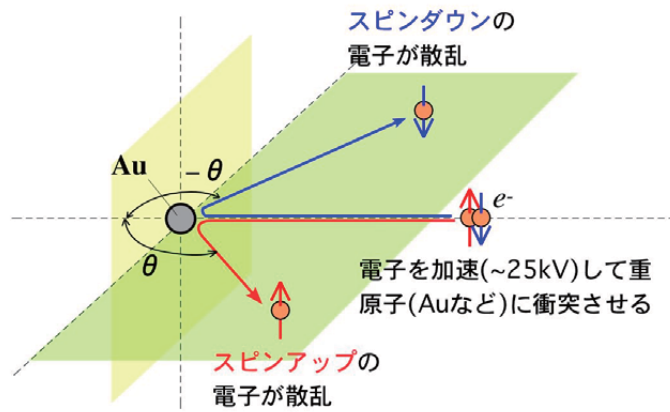


図4 電子のスピンの検出の原理:モット散乱

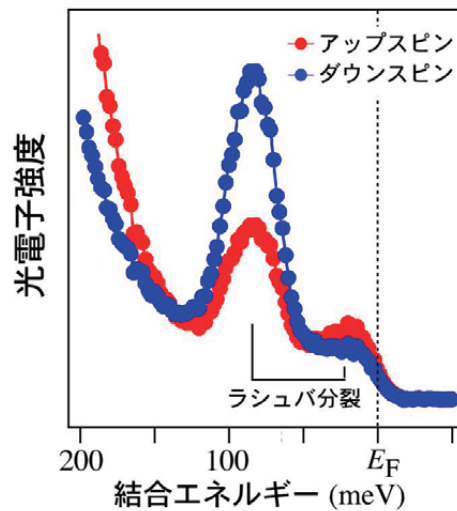


図5 ビスマス表面のスピンの分解光電子スペクトル  
電子状態がラッシュバ効果により異なるスピン状態(アップとダウン)に分離した様子が明確に観測されています。

<お問い合わせ先>

<研究に関すること>

高橋 隆 教授

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構 (大学院理学研究科兼任)

Tel : 022-795-6417

E-mail : t.takahashi@arpes.phys.tohoku.ac.jp

相馬 清吾 助教

東北大学 原子分子材料科学高等研究機構

Tel : 022-795-6477

E-mail : s.souma@arpes.phys.tohoku.ac.jp

<JSTの事業に関すること>

長田 直樹 (ナガタ ナオキ)

科学技術振興機構 イノベーション推進本部 研究領域総合運営部

〒102-0075 東京都千代田区三番町5 三番町ビル

Tel : 03-3512-3524 Fax : 03-3222-2064

E-mail : crest@jst.go.jp