

## 物質の相対論効果を精密に測る ——半世紀にわたるスピン軌道結合の謎を解明——

### 研究成果のポイント

- ❖ 物質における相対論効果(スピン軌道結合効果)についての精緻な理論を構築した
- ❖ 物質における相対論効果に関する50年来の謎の完全解明に初めて成功した
- ❖ 結晶スピン軌道結合効果を定量的に評価する新たな測定方法の道が拓けた

### 概要

電気通信大学大学院情報理工学研究科の伏屋雄紀准教授およびパリ高等物理化学学校の Kamran Behnia 教授らの国際共同研究グループ\*は、物質の相対論効果に関する50年来の謎を解き明かすことに成功しました。

スピン軌道結合\*<sup>1</sup>は相対論的量子力学から導き出される効果で、物質中では電子の持つ磁気モーメントの大きさを大幅に変調します。この物質における相対論効果は実験的にはゼーマン分裂\*<sup>2</sup>とサイクロトロンエネルギー\*<sup>3</sup>の比(ZC 比)により特徴付けられると考えられてはいましたが、その複雑さのため精巧な理論研究は行われなまま現代に至りました。実際、ビスマスの大きく異方的な磁気モーメントについての実験結果は半世紀以上にわたり十分な説明が与えられていませんでした。

このたび伏屋雄紀准教授らの国際共同研究グループは、この長年の問題を理論的に解明することに初めて成功しました。さらに同グループはビスマスの相対論効果に関する新しい実験を行い、その結果も同一理論で説明できることを示しました。本研究結果は、ビスマスでの象徴的な事例に留まらず、トポロジカル絶縁体やスピントロニクス材料を含む相対論効果が主要な役割を果たす物質系の研究に新たな方向性をもたらすものです。

また、物質の相対論効果を一貫した手続きのもとで評価できる手段として前述の ZC 比の原理を明らかにしたことにより、これまで困難とされてきた物質の相対論効果を定量的に評価する新しい測定方法の道が拓かれました。

本研究結果は、アメリカ物理学会が発行する学術雑誌で、物理学全領域を扱う速報誌「Physical Review Letters」に2015年11月16日(現地時間、オンライン版)に掲載されます。

※国際共同研究グループ

電気通信大学大学院情報理工学研究科  
パリ高等物理化学学校 (ESPCI ParisTech)

梨花女子大学(韓国)

ナンシー国立高等鉱業学校(フランス)

准教授 伏屋雄紀

教授 Kamran Behnia,

研究員 Benoît Faugué, Zengwei Zhu

教授 Woun Kang

教授 Bertrand Lenoir



国立大学法人  
電気通信大学  
Unique & Exciting Campus

## 研究の背景

現代固体物理学の中心的テーマの一つは、結晶中電子のスピンの軌道自由度の結合をいかに理解するかということです。関連する分野は磁性、量子輸送現象からトポロジカル絶縁体、スピントロニクス、マルチフェロイクスなど多岐に渡ります。スピン軌道結合自体は相対論的量子力学の自然な帰結であり、孤立した原子における電子の場合は十分よく理解されています。しかし、原子が周期的に並ぶ結晶中の電子についてその効果を正確に理解するのは容易ではありません。スピン軌道結合は結晶構造や電子軌道に大きく依存するため、その効果は物質ごとに様々に異なります。そのため結晶スピン軌道結合の効果を統一的に理解することは極めて難しい問題となっています。しかし同時に、多岐に渡る分野の根幹をなすだけに是非解き明かさなくてはならない問題でもあります。特に、結晶スピン軌道結合の効果を直接測定する方法がなく、本質的に新しい測定法の開拓が待たれています。

結晶スピン軌道結合がもたらす顕著な効果の一つとして、ゼーマン分裂の大幅な変調が挙げられます(図1)。このこと自体は古くから知られていましたが、ごく基本的な理解に留まっており、具体的な物質における定量的な理解についてはほとんど進展がありませんでした。特に従来理論(2バンド k.p 理論, ディラック電子系の理論)ではスピン軌道結合が強い物質(代表的な物質はビスマス)のゼーマン分裂の実験を定量的どころか定性的にすら説明することができず、半世紀以上もの間未解決のままでした。

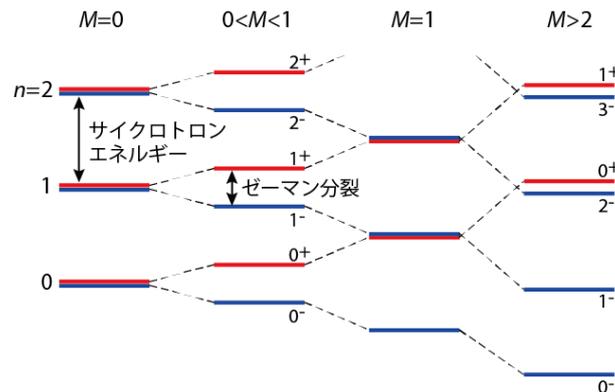


図1 サイクロトロンエネルギーとゼーマン分裂の関係図。スピン軌道結合の効果が強くなるとゼーマン分裂が大きくなる。その度合いはゼーマン分裂とサイクロトロンエネルギーの比(ZC比)“ $M$ ”で特徴付けられる。

## 研究の内容

こうした問題に対して、今回の研究では、従来の k.p 理論をマルチバンド系に拡張し、サイクロトロンエネルギーやゼーマン分裂および ZC 比を求める一般公式を導出し、この公式とバンド計算を組み合わせることによって、ビスマスにおけるゼーマン分裂の変調を定性的にも定量的にも説明することに初めて成功しました。

さらに同研究グループは(i)ビスマスとアンチモンを置換する; (ii)ビスマスに圧力を加える、といった新たな実験を行うことで、今回の理論の正当性を検証しました。(i)と(ii)の実験では、ゼーマン分裂の変調のふるまいが異なって現れましたが、こうした違いも同一理論により定量的に説明できたことから、理論の精度の高さが確かめられました(図2)。

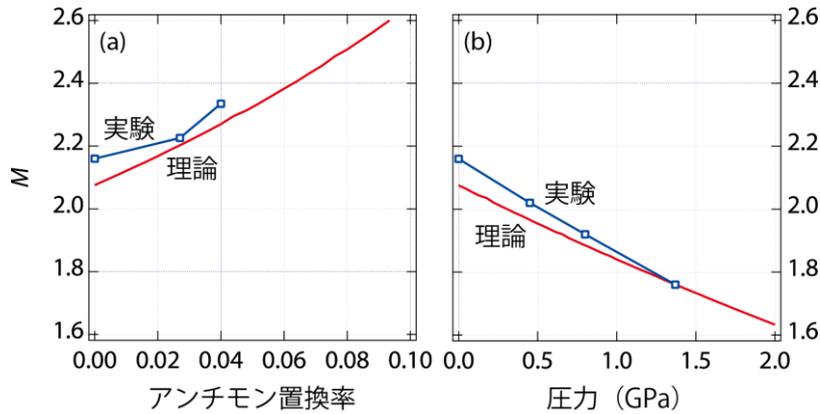


図2 アンチモン置換および圧力に対する結晶スピ軌道結合効果(ZC比  $M$ )の変化。実験と理論が定性的のみならず定量的にもよく一致していることから、今回の理論の精度の高さが確かめられた。

### 研究の意義

本研究成果は、物質の相対論効果(結晶スピ軌道結合効果)についての長年の謎を解明したという点で、物質科学の基盤的理解を深めることに寄与しました。この長年の謎は物質における相対論効果を測定する原理に直接繋がっています。今回その原理が明らかになったことで、今後はこの測定法(ゼーマン分裂とサイクロトロンエネルギーの比を測定すること)を用いて物質の相対論効果を様々な物質で統一的に測定できる道が拓かれました。相対論効果の精密測定ができるようになれば、磁性、量子輸送現象からトポロジカル絶縁体、スピントロニクス、マルチフェロイクスなど多岐に渡る分野において物質の性質の理解および新物質設計における発展が大いに期待されます。

### 用語解説

#### ※1 スピ軌道結合

電子や核子の持つスピとその軌道運動は独立ではなく、両者の間に相互作用がはたらく。これをスピ軌道相互作用といい、これらの結合をスピ軌道結合とよぶ。

直感的には、次のように理解することができる(図3)。原子核の周囲を電子が周回運動しているとする。この状況は電子の立場からみると、相対的に原子核が電子の周りを周回していることになる。(地動説と天動説の関係)原子核は電荷を持っており、電子の周りに環状電流が流れていることになるので、ビオーサバールの法則から電子の場所に磁場が作られる。この磁場と電子のスピ磁気モーメント(磁石の最小単位のようなもの)が相互作用することになる。これがスピ軌道相互作用に相当する。正確には、量子力学と特殊相対性理論を融合させた、相対論的量子力学における電子の基本方程式であるディラック方程式から導かれる。

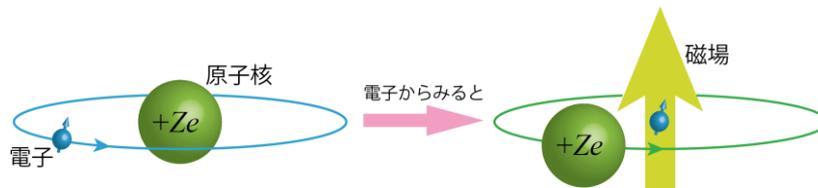


図3 スピ軌道相互作用のイメージ。核の環状電流が作る磁場と電子スピが相互作用する。

## ※2 ゼーマン分裂

磁気モーメント  $\mu$  をもつ電子などが磁場  $B$  の中にある場合、磁気モーメントと磁場との相互作用エネルギー  $\mu \cdot B$  をゼーマンエネルギーという。この効果により磁場中のエネルギーはいくつかの準位に分裂する。これをゼーマン分裂と呼ぶ。電子の場合、2つの準位に分裂し、そのゼーマン分裂の大きさを表す係数が  $g$  因子で、自由電子の場合は  $g=2.0023$  であるが、結晶中ではスピン軌道結合により大きく変調を受ける。たとえばビスマスでは、 $g=1000$  にもなり得る。

## ※3 サイクロトロンエネルギー

磁場中で荷電粒子は周回運動(サイクロトロン運動)を行う。その周回の角周波数はサイクロトロン周波数( $\omega_c$ )と呼ばれる。 $\omega_c$ は電子質量  $m$  に反比例する。ここまでは古典物理学の範囲内で理解できる。一方量子力学の世界では、磁場中で荷電粒子のエネルギーは量子化され、その分裂したエネルギー準位の間隔がサイクロトロンエネルギー  $\hbar\omega_c$  で与えられる。(  $\hbar$ : 換算プランク定数。プランク定数を  $2\pi$  で割ったもの)

半導体など、キャリアの有効質量が自由電子の値と異なる場合、 $\omega_c$ に含まれる質量  $m$  を有効質量  $m^*$ (正確にはサイクロトロン質量  $m_c$ ) で置き換えれば良い。したがって、有効質量が小さいほどサイクロトロンエネルギーは大きくなる。たとえばビスマスでは  $m_c \sim 0.001$  にもなり、自由電子の 1000 倍近く大きなサイクロトロンエネルギーを持つ。

<問合せ先>

(研究関係)

国立大学法人 電気通信大学 大学院情報理工学研究科

准教授 伏屋 雄紀

電話 : 042-443-5571

Email : fuseya@pc.uec.ac.jp

(報道関係)

国立大学法人 電気通信大学

総務課広報係 (担当:平野、岡村)

電話 : 042-443-5019

Email : kouhou-k@office.uec.ac.jp



国立大学法人  
電気通信大学  
Unique & Exciting Campus