

## 磁化の歳差運動により現れる磁気モノポールの理論的発見

磁石をどれほど小さくしていてもN極とS極を引き離す事はできない。このN極もしくはS極単体を構成する素粒子である磁気モノポールは、1931年にディラックによって存在の可能性が示された。大統一理論では、電磁気学の裏に潜む代数的対称性であるゲージ対称性の破れによって磁気モノポールが出現する事が予言されているが、その生成には宇宙誕生初期に相当する巨大なエネルギーが必要となる。これまで様々な実験が行われてきたが、残念な事に今日に至るまで自然界にその存在は確認されていない。

真空中とは異なり、物質中では低エネルギーでも磁気モノポールが見られる可能性が秘められている。実際、磁気構造がヘッジホッグ（はりねずみ）のような特異性を持つ磁性物質中において、電子スピンの従うSU(2)のゲージ対称性が壊れる事で磁気モノポールが現れる事が理論的に明らかにされている。しかしながら実際にこのような特殊な磁化配置の物質を作成する事は非常に困難である。

最近、首都大学東京大学院理工学研究科物理学専攻の研究グループは、磁性体中にスピン軌道相互作用が働く事で、磁気モノポールが現れる新しい機構を発見した。磁性体中の磁化の歳差運動によって誘起される電子の輸送現象を、量子多体理論に基づいて解析する事で、電磁気学の基本方程式であるマクスウェル方程式を導き、それにより新奇な磁気モノポールの存在可能性を理論的に示した。この成果は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の2012年3月号に掲載された。

この磁気モノポールの生成では、スピン軌道相互作用が鍵を握っている。物質中に見られる相対論的効果であるスピン軌道相互作用は、電子スピンの住む磁気的な世界と電子の電荷が住む電気的な世界とを互いに結び付ける働きをする。それにより、歳差運動する磁化によって駆動された電子スピンの運動は、電子自身の軌道運動へと変換される。その過程で磁気モノポールが生成されるのである（図1）。この磁気モノポールは磁化の歳差運動の緩和（スピンドamping）により失われた角運動量が元になって現れるため、スピンドampingモノポールと名付けられた。

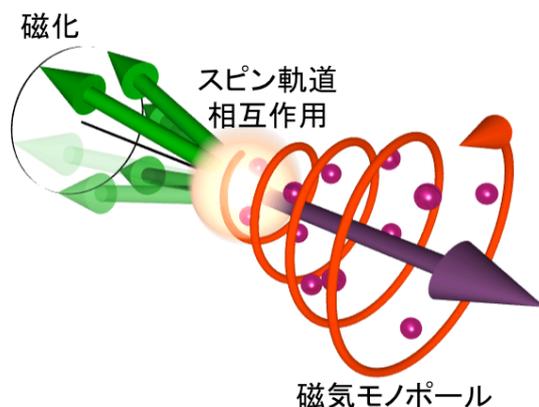


図1. 磁化の歳差運動とスピン軌道相互作用により生成される磁気モノポールの概念図

ここで、スピン軌道相互作用は磁化と電子スピンの交換相互作用を組み合わせる事により、

スピンの空間の対称性を破る役割を担っている。つまり、ヘッジホッグのような特別な構造がなくとも、非常に一般的な磁性試料で磁気モノポールは生まれるのである。実際、この磁気モノポールは磁石（強磁性体）と白金のような強いスピン軌道相互作用を有する非磁性体とを接合した簡単な試料で実現され得る（図2）。

強磁性体/非磁性体接合という試料を用いて、磁気モノポールの観測は電气的に行う事が可能である。アンペールの法則により電流がその周りに磁場を作り出すように、磁気モノポールの流れの周りには電場が誘起される。その結果、接合界面に駆動される電流として磁気モノポールの存在を確認する事ができるのである（図2）。実は2006年に、パーマロイ（鉄とニッケルの合金）と白金との接合系において磁化の歳差運動を誘起する事で現れる電圧の測定が行われている。この実験は、電子スピンの流れであるスピン流の電流への変換を実現するために行われたものであったが、この結果に磁気モノポールの効果が含まれていた可能性は高い。

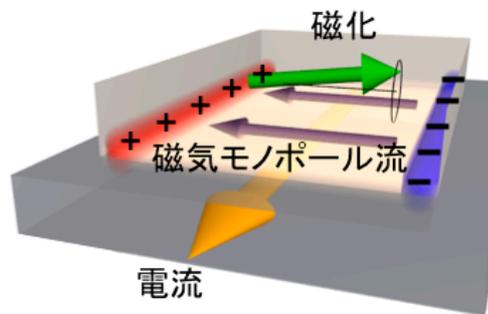


図2. 強磁性体/非磁性体接合系で生成される磁気モノポール流と電流

従来、磁気モノポールはゲージ理論を用いて導出されてきたが、この研究では電子の輸送現象を解析する事で磁気モノポールを導出するという今までにない方法がとられた。まだここで示された磁気モノポールとゲージ理論との関係は明らかにされていないが、この手法は今後の基礎物理学に対して新たな切り口を与えるのではないだろうか。また、この研究は電子スピンを利用する事を目的としたスピントロニクス研究において、電子スピンや磁化の効果を既存の電磁気学と結び付けた初めての研究である。この磁気モノポールがもたらす新たな電気と磁気の変換機構は、記録メディアの高密度集積化や省エネルギー化にも応用可能な技術である。基礎的な意義に留まらず応用的な側面をも兼ね備えた磁気モノポール研究の今後の発展が期待される。

論文掲載誌 J. Phys. Soc. Jpn. **81** (2012) 033705

電子版 <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/81/033705> (2月27日公開済)

<情報提供：竹内祥人（首都大学東京大学院理工学研究科）

多々良源（首都大学東京大学院理工学研究科）>