

我々が何気なく手に取る一欠片の物質の中には、アボガドロ数個の莫大な数の電子が閉じ込められています。（アボガドロ数は全人類にビルゲイツと同じだけの資産を配ってもお釣りがくるほどの大きな数です。）電子はマイクロには地球のように自転をしています。地球が自転をして北極から南極へ地磁気を発する大きな磁石になるように、電子は最小の磁石としての性質を持っています（最小の磁石をスピンと呼ぶ。）。我々が日常用いるいわゆる磁石と呼ばれている物は、物質中でアボガドロ数個のスピンの全てが同一方向を向いて N 極と S 極が揃っている物質のことで、専門的には強磁性体と呼ばれます。一方で、世の中には様々な種類の磁石があります。隣同士のスピンが反対向きを向くように力が働く物質もあり、それは反強磁性体と呼ばれます。反強磁性体は N 極と S 極が反対向きに並ぶため、くっつく力はありません。

本論文で吉田准教授らが注目したのは正三角形を基本構造に持つ反強磁性体です。つまり、正三角形の頂点にスピンを上向き・下向きと交互に置こうというわけです。この時、我々はすぐに一つ目のスピンと三つ目のスピンの同じ方向を向いてしまう問題に遭遇します。このようにスピンには反対向きを向きたいという欲求があるにも関わらず、三角形という幾何学が障害となって、その欲求が満たされないことを幾何学的フラストレーションと呼んでいます。フラストレーションがある場合は、スピンは一意に向きを定めることができず、時には上を向いたり時には下を向いたりユラユラと揺らいだ状態を取ってしまいます。ここで大きな問題となるのは熱力学の法則との整合性です。この法則は絶対零度において全ての物体の状態が一意に定まることを要請しています。熱力学の法則はお釈迦様の手の平のようなもので、ブラックホールから素粒子までいかなる物理現象もこの法則に従わなくてはなりません。したがって、絶対零度では全てのスピンの定まった方向を向かなくてはならないのですが、フラストレーションの効果はそれを許してくれません。

このようなシンプル且つ深い問題について、自然がどのような答えを用意しているのか？それを調べるために吉田准教授らは人工的に発生させた高温・高圧の熱水中でフラストレーションを有する新物質を合成し、その磁気的な性質を絶対零度近傍まで調べました。今回発見した新物質はカゴメ格子反強磁性体 $\text{CaCu}_3(\text{OH})_6\text{Cl}_2 \cdot 0.6\text{H}_2\text{O}$ （Ca カペラサイト）です。この物質は竹細工の籠目編みと同じく三角形が頂点共有した構造を有する反強磁性体です。本論文では Ca カペラサイトにおいて 7.2 ケルビンの温度で風変わりなスピン配列が実現していることを見出しました。このスピン配列状態はスピン配列を乱す揺らぎに対して興味深い 2 種類の応答を示します。通常の強磁性や反強磁性体では、ある定まったスピン配列において一つのスピンを反転させる揺らぎを与えると、その影響は物質中を波となって伝わります。これをスピン波と呼びます。一方、Ca カペ

ラサイトでは、通常のスピン波に加え、スピン反転の影響が金属中を動き回る電子のように伝わる成分が共存していることが明らかにされました。Ca カペラサイトは電気を流さない絶縁体であるにもかかわらず、スピン配列の秩序状態においてあたかも金属電子のような揺らぎが生じている点が新しく、スピンが絶対零度でも揺らぎ続けるスピン液体状態との関連からも大きな注目が集まっています。

本論文をきっかけに、ミクロなスピン状態を調べる NMR での金属的磁気励起の観測、大きな熱ホール効果の観測などへと発展し、フラストレーションの物理学の解明に貢献しています。絶縁体における金属的な磁気励起の存在は量子スピン液体の実現とも関連するものであり、今後の研究により未だ謎の多い量子スピン液体状態の解明にも発展することが期待されます。