

「サイエンスカフェ in 静岡」第 161 話 (2023 年 1 月 19 日) Q&A

テーマ: 「磁石の不思議」から「微小な磁石の先端研究」まで

講師: 廣部 大地 (静岡大学理学部物理学科・助教)

Q1. (12 頁の図) 磁石を細かく分けていったときに、なぜ N 極と S 極に分かれないのか? さらに、(13 頁の図に関して電子の場合、矢印が一方しか向いていないということから) なぜ電子の場合は N 極と S 極が分かれてしまうのか?

A1. 電子でも N 極と S 極は常にペアで現れます。13 頁の図の矢印は、物理の慣習で電子の場合、N 極から S 極に向かう方向を矢印 1 本で書くということになっています。したがって、矢印 1 本を見たら、N 極と S 極がペアであるのだな、棒磁石があるのだなと思っていただければ結構です。

Q2. スピンというのは右回りでも左回りであろうと、N 極、S 極は現れるのですか?

A2. この矢印が、スピンの上なのか、それともスピンの下なのかに対応して変わり、いわば棒磁石の向きがひっくり返ったようになります。

Q3. スピンの向きによって、この矢印の向きが変わるということですか?

A3. はい変わります。

Q4. モノポールはありますか? 数学上ではあるようですが。またあるとすれば発見はいつ頃で、場所はどこですか? 宇宙ですか? 加速器ですか?

A4. 本当の最先端の素粒子とか原子核の話は、私はフォローしていないので、あくまで大学で習う物理の範囲ですけれども、少なくとも電磁気学という理論に基づく限りだとモノポールは今のところはないだろうと言われていています。方程式を使って解いてあげると、実はモノポールがこの世に存在するのか、存在しなかったのかというのは、物理の言葉では初期条件でしか決まっていません。つまり遠い昔、たまたまモノポールがあったのか、なかったのか、誕生したのか、しなかったのかという条件でしか決まっていない訳で、モノポールが存在してはならないという物理原理がある訳では電磁気学の範囲ではないです。ですので、ありますかと言われると、悪魔の証明ですけど、ないとは絶対に言えない。そして数学上ではあります。おっしゃる通りです。ここは先ほど言ったように初期条件をどう定めるかというところで、数学は初期条件までを指定していませんので、数学上はあってもいいわけです。ただ、ここで話した内容は真空、宇宙でモノポールがあり得るかどうかということなのです。実は、物質の中だとあたかもモノポールがあるかのような実験結果を作り出すことはできます。ただ、それは物質の中だと数学で仮定されたモノポールが生まれるというだけであって、

真空のモノポールを証明したことにはなりません。もしご興味があれば、「スピン アイ モノポール」などと論文を調べてみてください。きっと Nature とか Science の論文が出てくるはずですよ。

Q5. 磁石は、原子核の周囲を回転する電子のスピン（自転）運動で発生する小さな磁石と説明を受けました。太陽（原子核）の周囲を公転し、自転（スピン）する地球（電子）や他の惑星はほぼ平面上を運動して常に自転軸が特定しているので磁石になることを理解できます。しかし、電子は地球を周回する多数の人工衛星のように回転面はランダムであるために電子の自転軸はランダムであり磁石にならないと思います。磁石の発現をどのように理解すればよいですか？

A5. これは 100 年前の方も同じことを考えました。いわば、宇宙と同じように電子が回転しているとそれが原子核の中でもあるだろうと考えられて、予想していました。ここでの仮定は公転を定めないと自転も決まらないでしょうということです。電子の場合だと公転軸に対して、自転軸がどの方向を向くべきか、というのは決まらないとまでは言いませんけれども、少しは関係していますが、このときに、いろんな方向に公転したときに公転軸に対して、例えば自転軸が平行だったとします。公転がいろんな方向に向いてしまったら、公転軸と自転軸を合わせたものが、ぐるぐる回ってしまうため、そろわない気がします。1 個で考えれば、おっしゃる通り、原子 1 個で考えるとそうなのですが、今日話が難しくなるため、飛ばしてしまったのですが、本当は物理という自発的対称性のやぶれというものを考えないといけません。すごく平たく言うと、電子がたくさん並んでいる、このときに磁石同士はお互いを監視し合っている（相手の磁石が向く方向で、自分の向く方向を決める）様な状況になっている。ですので、ある所だけ 1 個だけひっくり返そうとすると、示し合わせたかのように他の隣の場所も全部、配置を変えないといけません。でも物質の中で一気にひっくり返そうとすると何が起こるかという、アボガドロ数個 10^{23} 個の電子が示し合わせたかのように一気に運動しないとイケないわけですよ。あまりにもそれは確率が低すぎます。ゆえに、隣に原子がいることを忘れて、1 個だけ見ればどこに軸が定まるのかというのは確かに決まらないです。決まらないのですが、物質の中では相互作用している磁石が 10^{23} 個というオーダーにいるということを見ると、1 つの向きに決まってしまう。

Q6. 上下のスピンがペアになる理屈を説明して下さったと思うのですが、(36 頁の図のように棒磁石が逆向きに 2 つ存在し) ペアになると磁石は打ち消しあってしまうのではないのでしょうか？

A6. (図に関して) 確かに全体で見ると磁石上と下が重なっているため、打ち消し合っているように見えます。けれども、例えば、(図の) コイルの長さが 1 nm だとします。

原子の大きさは大体 0.1 nm ぐらいです。ここでまず、なぜ吸着するかという話をします。話を簡単にするためあたかも磁石と磁石が反発するか引き付けあうかのようには書きましたが、本当は違います。本当は何が起きているかというお互いの磁石の向きが平行なのか反平行なのかあたかも実効的な力が働くということを利用して。ただ、電子の広がりも高、原子の大きさ程度、0.1 nm 程度しかない。ですので、実際に吸着するとき、あるいは実験の測定の際に重要になってくるのは、全体ではありません。磁石に近い、0.1 nm のところで磁石は N 極を向いているのか、S 極を向いているのかというのが本当の話になります。今日何回か出ている米粒の例でいえば、この分子というのはいわばごはん一膳です。このときにごはん一膳の一番上の米一粒と一番下の米一粒が上向きの磁石なのか、それとも下向きの磁石なのかということだけが磁石の吸着であるとか、この実験に影響を与えています。ですので、答えは2つの磁石を同時に見るのではなくて、その片面しか実験では見ていないので、ちゃんと右手と左手に応じた実験結果が出てくるということです。

Q7. もう一点、ご研究のお話で、キラル分子がスピンのフィルターになる話と、今回の反対向きの磁石が両端にできるという話は整合しているのでしょうか？

A7. 整合しています。言葉の問題ではありますが、例えば、コイルに電流を流すと電磁石になると言ったときには、例えば、最初、電子が上と下となっていたものが全部上になると考えるわけですね。同じ空間にいるが電子の持っている磁石が全部同じ方向を向く。これがコイルの考え方になりますが、このキラル化学のスピントロニクスを研究している人たちがフィルターと言ったらどういうことかという上と下これの個数は実は正味で変わってなくて、空間的に分離するという風に理解しています。ですので、フィルターという考え方は上向きの磁石と下向きの磁石が入ってきたときに、片方だけが抜けていき、もう片方の反対向きの磁石は元の場所に残るという風に考えます。ですので、フィルターという言い回しと磁石の反平行のペアが現れるというのはちゃんと整合しています。ただし、これが明らかになってきたのはここ2、3年で確かにそのように考えないといけないという風になってきたので、極めて鋭い質問だと思います。

Q8. 先生の研究で磁性の角度がわかっていましたが、どのような実験が簡単に教えていただけますでしょうか。

A8. ニッケルは有名な磁石です。そして、ニッケルと超伝導体が接合している場所で生じる電圧が+なのか-なのかというのを調べます。かなり難しく、大学4年生や大学院に入らないと本当の説明はできないので、大雑把に言うと例えば、ニッケルのN極が上だったとします。このときに超伝導体の端に出ている磁石も同じくN極が上だったとします。このときには電圧が-になると仮定します。今度、ニッケルの磁石の

向きをひっくり返してあげる。すると、端の出ている磁石も完全に逆になるため、電圧信号も+になります。ここで私が何をしたかという磁場を 180 度くらい回しました。そうすると、あるところで信号が+になって、あるところでは電圧信号が-に変わる。この符号の変化が角度いくつで生じるのか、そして、その角度の周りで+から-に変わったのか、それとも-から+に変わったのかに注意して、解析すると、この磁石の向きを求めることができます。

Q9. なぜこのような現象が起こるのが今後の研究課題ということでしたが、そのアプローチはいろいろあると思うのですが化学の人間だと最初に考えるのは他の分子の系で同じようなことが起きるのか、そしてそれを比較検討することが化学的な考え方になると思いますが、ただ超電導かつ結晶の物質がないから難しいのですよね？

A9. 難しいです。ですので、系統的に何か変えて測定するという意味では有機の系、本当であれば無機物の系を見つけて、ドーピングの効果であるとか、圧力効果であるとかを調べるのがいいのだと思います。ただ、結晶に限らず、行くのであれば例えば、化学のアプローチであったのは、らせん構造の分子が一巻なのか、二巻なのか、三巻なのか、長さを変えていったときにどういう風に信号が変わるのかであるとか、あるいは円二色性信号強度を色々変えた分子を用意してあげて、円二色性信号強度とスピンの選択制に相関がないのかということ調べるという方向性は実際にとられています。

Q10. ただ、先生が考えているアプローチはそうではなくて、別のアプローチなのですか？

A10. そうです。量子力学で結局何が一番大切であったかという絶対に信じられる実験結果をいくつか見つける。それを説明しようとしたときの最低限の前提とは何なのかを考える。これが物理の人間と化学の人間との違いで、物理の人間は可能であればこのようなアプローチをとりたいのです。