

「がらがら」と鳴る超伝導

誰もがかつて遠い昔に持っていた（誰も覚えていないが）玩具「がらがら」が最近、物性物理学の分野で大きな注目を集めている。赤ちゃんが振ると大きな音を立てる「がらがら」を英語ではラトラー（rattler）という。ちなみに、**rattling good materials** というと、とても面白い物質という意味となる。「がらがら」は容器の中に小さな球が入っていて音を鳴らす。物質の中では小さな原子が別の原子で形作られる比較的大きなカゴの中に入っている時、同じようにならりと動き回るようになる（図 1a、もちろん音は聞こえない）。これを「ラットリング」と呼び、この運動によって引き起こされる現象を明らかにしようとする研究に多くの物性研究者が取り組んでいる。

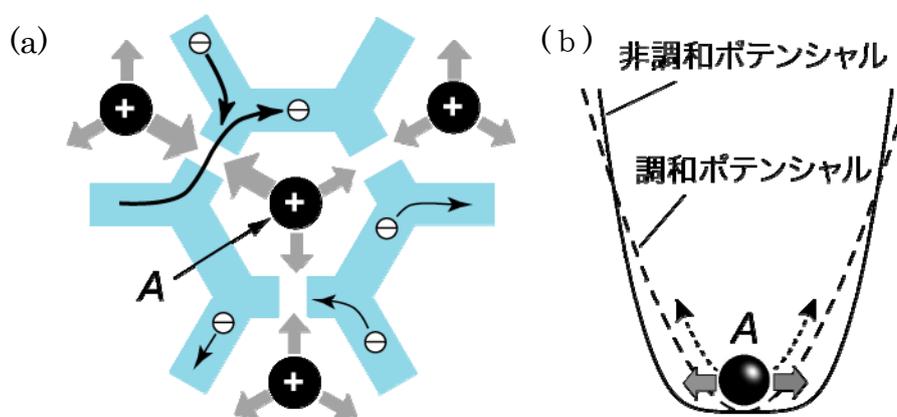


図 1. カゴの上を動き回る電子とカゴの中で振動するアルカリ金属イオン(A) (a) と A イオンに対する調和・非調和ポテンシャル (b) の模式図。

通常の結晶固体中の原子は、周りの原子とバネで強く繋がれているとみなされ、調和振動子として近似される。1 個の原子は図 1b のように 2 次関数で表される調和ポテンシャルの中で振動しており、温度を下げるとポテンシャルの底でほとんど止まる（最低エネルギー準位の零点振動状態に落ち込む）。一方、ラットリングしている原子は、周りのカゴが大きすぎてふらふらしているため、むしろ 4 次関数に近い非調和ポテンシャルの中で振動する。そこではポテンシャルの底が平らなので、原子は低温でもなかなか止まることができず、依然として異常に大きな振幅を保ったまま振動していることになる。

このラットリング原子は、負の電荷をもつ電子を失って正の電荷をもつイオンとして存在する。失った電子はカゴの上を自由に動き回り、物質は電気を流す金属となる。反対の電荷を持つ電子とイオンには互いに引き寄せ合う力が働く。通常の固体では小さな引力にしかないが、このようにラットリングしているイオンは非常に大きな振幅を持って低いエネルギーで動いているため、電子を引きつける力が異常に強くなりうるということが分かってきた。しかも、この引力が 2 つの電子を結び付けると、これまでになく超伝導が生じる。

東大物性研の広井善二氏、山浦淳一氏らの研究グループは β パイロクロア酸化物という

物質に着目し、その性質を調べてきた。これは AOs_2O_6 という化学組成をもつオスミウムの酸化物であり、A はアルカリ金属元素 Cs, Rb, K である。その結晶構造を眺めると、オスミウムと酸素イオンが作るカゴの中にアルカリ金属イオンが入っていて、その大きさがカゴに比べて十分小さいため、まさに上で述べたラットリング現象が起こる。特に最も小さいカリウムイオンにおいてラットリングが例外的に激しくなることが分かった。βパイロクロア酸化物は低温で超伝導を示す。超伝導転移温度は、Cs, Rb, K の順に、3.3K, 6.3K, 9.6K である。残念ながら、その超伝導転移温度は銅酸化物や最近発見された鉄ヒ素化合物に比べるとかなり低い、従来型の超伝導機構では説明できない実験結果がいくつか見つか、それなりに面白い超伝導であると分かってきた。今回、同研究グループは 3 つの βパイロクロア酸化物における超伝導を詳細かつ系統的に調べた結果、この超伝導がまさにラットリングによって誘起されたものであるとの結論に至った。超伝導を担うフォノンのエネルギーを比熱データおよび強結合補整の解析から求めた結果、様々な測定から得られているラットリング振動のエネルギーと見事に一致したのである。この研究は、日本物理学会が発行する英文誌 *Journal of the Physical Society of Japan (JPSJ)* の 2009 年 6 月号に掲載される。

本研究から導かれたラットリングによる超伝導機構は次のとおりである。図 1a に模式的に示したように、1 つの電子がカゴの上を通ると近くの A イオンが強く引き寄せられる。電子に比べてイオンの動きはゆっくりしているので、電子が通り過ぎた後もイオンはしばらく集まったままであり、正の電荷が過剰な領域が生じる。これを目掛けて 2 番目の電子が引き寄せられことになり、その結果、2 つの電子の間には有効的な引力が働くとみなすことができる。この強い引力がクーパー対を生み出し、これが低温で量子力学的な状態に落ち込んで超伝導が起こる。通常の BCS 超伝導では、フォノンによって媒介される弱い引力により運動量空間においてペアリングが起こるが、ラットリングを媒介とする超伝導では、むしろこのように実空間で「見てきたような」強結合ペアリングが起こっていると考えられる。

本研究は、ラットリングによって引き起こされる様々な物性の測定・解析から、βパイロクロア酸化物においてラットリングによる超伝導の発現を初めて決定付けた成果として多くの研究者の注目を集めている。しかしながら、例えば、最も激しいラットリングを示す KOs_2O_6 における強結合超伝導にはラットリングの非調和性が重要な役割を果たしていると予想されているが、その詳細はまだ明らかではない。また、ラットリングの本質を理解するためにさらなる理論的研究が望まれる。超伝導のみならず、ラットリングが引き起こす現象にはまだまだ面白いものがあり、今後の研究によってラットリングに基づく新しい物理的概念が確立されるものと大いに期待される。

論文掲載誌: *J. Phys. Soc. Jpn.* **78** (2009) No. 6, p. 064702

電子版: <http://jpsj.ipap.jp/link?JPSJ/78/064702/> (5月25日公開済)

<情報提供: 広井善二、山浦淳一(東大物性研)>