

# ナノスケールの半導体基盤上で起こる電子の協力現象

物性理論研究部門 加藤研究室 阪野 壘

先日出版した論文[1]でプレスリリースを発出したおかげで、再び物性研だよりに文章を書く機会をいただきました。これまでも物性研だよりに寄稿する機会があったのですが、プレスリリースをやや詳しく書いた、物理の大学院生や専門家向けの記事になってしまったように思います。以前、理論系のある秘書さんが、理論系部門の人が書いた文は読むようにしているとおっしゃっていました。多分、研究者(学生、研究員、助教、技術スタッフ、所員)以外の職員さんも少なからず目を通してくださっていると信じて、今回はできるだけプロ以外へ向けて書いてみたいと思います。物性研で一緒に働いている方々へ、私が物理学の何が面白いと思って研究しているのか、少しでも伝われば嬉しいです。

今回プレスリリースされた研究のキーワードのひとつは『フェルミ液体』という物理現象です。中学の理科や高校の物理の教科書にも載っていないので、全く聞き慣れない専門用語だと思いますが、物理学科の授業でも耳にする、物理学を専攻する学部学生にはよく知られた、基本的な物理現象のひとつです。

電子が無数に集まった凝集体がどのような性質を持つかを説明するのがフェルミ液体の理論です。無数と言われてもどの程度か想像できないと思いますが、大体 $10^{24}$ 個(= 1 000 000 000 000 000 000 000 000 個でゼロが 24 個並んでいます)程度を想定しています。電子は負の電荷を持つので凝集すると、互いにクーロン斥力で反発力を感じます。電子が無数にいる場合、互いにクーロン斥力で複雑に絡み合うため、その性質を解き明かすことは非常に難しい問題になります。

物性物理学や統計物理学の面白さは少しわかりにくいかもしれませんが、なぜ、わざわざこんな複雑な問題に取り組むのか、疑問に感じることと思います。実はこのフェルミ液体の重要性のひとつに、金属の性質を説明することが挙げられます。例えば、電気の流しやすさや、「熱し易く冷め易い」、表面の光沢などの性質は、金属の種類によらず共通の性質になっています。この金属に共通の性質の起原を説明するのがフェルミ液体です。

金属の塊の中で何が起きているか考えてみます。金属の塊では、金属原子がびっしりと並んでいます。そして各金属原子の周回する電子の一部は、金属の塊の中では自由に動き回ることができます。その自由に動き回ることができる無数の電子が金属の塊の中で凝集し、お互いに相互作用をすることで、金属の性質を作り上げていきます。つまり、塊としての金属の性質は、個々の金属原子の性質ではなく、そこを動き回る無数の電子とその相互作用によって金属全般に共通の性質が形成されています。このためフェルミ液体は、金属の性質を説明する重要な問題として研究されてきました。もちろん、電気の流れやすさの程度や金属光沢の色などは金属の種類によって異なります。そういった性質が何に由来するかを調べる研究は、物性研究所でもたくさん行われていて、物の性質の起原を探る重要な研究です。

物理学は難しい数学を使った難しい学問だと思われるかもしれませんが、あまりに複雑な問題は誰も解くことが出来ません。大事なことは調べている現象を引き起こしている本質は何かを見抜くことです。そして、事象を単純化した上で説明し、数学的な手法やコンピューターを使って問いたり、実験によって検証します。金属の塊としての性質を考える場合には、無数に並んだ個々の金属原子のすべて性質を取り入れて説明するのは複雑すぎて不可能です。そこで、フェルミ液体の理論では金属中の自由に動き回る電子に着目し、そこから金属の性質を説明しようとするのです。

さて、無数の数の電子の振る舞いの話に戻しましょう。無数の金属原子を取り扱うよりはだいぶ単純化されましたが、まだ難しい問題に思えます。しかし、この問題は解くことが出来て、無数の電子の状態の主要な性質はクーロン斥力が消え重くなった電子によって説明できることが知られています。つまり、複雑な相互作用の効果は電子の質量に押し込むことで互いに自由に動き回る電子によって、簡単に説明できるのです。そして、他の性質には相互作用が必要なものがありますが、この重くなった2つの電子の間に弱くなった相互作用が働くことで説明がつかます。一見複雑だった問題は非常に簡単な形で説明がつくようになります。



こういった話をしますと、皆さん最後に一体何に役に立つのか質問してください。もちろん直接的に役に立つ研究ができるはとても嬉しいことですが、誰も知らなかった物理学の知見を見つける喜びも、たとえそれが些細な問題であっても大きく、刺激的だと伝わると嬉しいです。研究者には、その研究の何が楽しいのか、とも尋ねていただけると、喜々として話をしてくれると思います。

この文章を通して、私が行った研究の楽しさが少しでも伝われば嬉しいです。

最後に、本稿の内容は秦徳郎さん(東工大)、荒川智紀さん(産総研)、Meydi Ferrier さん(パリ南大)、Richard Deblock(パリ南大)さん、Sanghyun Lee(当時阪大)さん、小林研介さん(東大)らの実験チームと、寺谷義道さん(大阪市大)、小栗章さん(大阪市大)らの理論チームとの共同研究の成果の一部です。コロナ禍で移動できなくなってからも、オンラインでたくさんの議論を行ってきました。刺激的で楽しい議論をしてきた仲間感謝しています。

また、この研究の一部は、インペリアル大学滞在時に私と Alex C Hewson 氏との議論で得られた知見が多く反映されています。残念ながら、Hewson 氏は最近、亡くなってしまいました。彼が書いた教科書“Kondo problem to heavy fermion”は、量子多体問題の専門家であれば手にしたことのないものはないと思います。インペリアル大学滞在時には、いつも昼食後にはカフェで、物理ばかりではなく、日本やイギリスの政治、経済、文化について話をしていました。私の上手くない英語にも“I see.”と相槌を打ちながら、1 時間、2 時間と話をしていました。エレベーターの日本では見かけない「M」(中 6 階を意味する)のボタンを押して彼の居室に向かい、少しはにかんだ笑顔で静かに迎えてくれることはないのだと思うと、寂しくてなりません。ご冥福をお祈りしています。

内容は専門的ですがオープンアクセスの論文なので、学外からでも無料でアクセスして読むことが出来ます。

1. “Three-body correlations in nonlinear response of correlated quantum liquid”

Tokuro Hata, Yoshimichi Teratani, Tomonori Arakawa, Sanghyun Lee, Meydi Ferrier, Richard Deblock, Rui Sakano, Akira Oguri, and Kensuke Kobayashi Nature Communications **12**, 3233 (2021).

