



季刊誌

NO.05

J-PARC

JAPAN PROTON ACCELERATOR RESEARCH COMPLEX

2016

特集

超伝導の謎に挑む

インタビュー

超伝導の歴史 山田和芳

現在の研究テーマ 横尾哲也

未来に向けた研究最前線 横尾哲也

超伝導の歴史

KEK物質構造科学研究所
山田和芳所長

電気抵抗が完全にゼロになるという奇妙な現象「超伝導」が見つかったから1世紀。これまでに、様々な超伝導物質が見つかり、超伝導状態になる臨界温度も少しずつ上がってきた。夢の“室温超伝導”は実現可能なのか。超伝導物質の探求の歴史や、これからの見通しなどについて、KEK 物質構造科学研究所の山田和芳所長に語ってもらった。

—まずは、高温超伝導の始まりについて教えてください。

世界で初めて超伝導が見つかったのは1911年のことです。物質を超伝導状態にするには、臨界温度(Tc)以下に冷やす必要があって、最初に見つかった水銀の場合、これは4.2K(※)という極低温でした。その後、次々に新たな超伝導物質が見つかり、臨界温度は3年に1K程度のゆっくりとしたペースで上がっていきます。

※K(ケルビン)は温度の単位。0K(絶対零度)は-273.15℃で、これは物質がとれる最低の温度になる。

ところが1986年に状況が一変しました。初めて銅酸化物で超伝導が見つかったのですが、衝撃的だったのは、臨界温度がいきなり30Kという高さだったことです。その後すぐに、別の銅酸化物で90Kを超えるような物質も見つかりました。

—“高温”とは言っても、まだまだ極

低温の世界での現象ですね。

一般の感覚ではそうかもしれません。ただ、90Kにもなると、安価な液体窒素で超伝導が起せるようになります。さらに臨界温度が上がって行って、室温レベルで超伝導が実現できれば、ノーベル賞クラスの大発見です。普段は別分野で研究をしている人まで超伝導をやり始めて、まるでゴールドラッシュのようでした。

—日本でも盛り上がっていたんですか？

はい。初めて90Kを超える銅酸化物が見つかったとき、最初はどんな結晶構造をしているのか分かっていませんでした。これを世界で初めて、明らかにしたのが日本です。このとき、我々KEKの加速器は休止期間だったのですが、一刻を争うということで急遽動かしてもらい、この発見に繋げることができました。普通ならあり得ない特例ですね。

—そもそも、超伝導という現象はなぜ

起きるのでしょうか？

それが、実はまだ良く分かっていないんです。従来の超伝導物質には「BCS理論」というものがあって、超伝導が起きるメカニズムはほぼ明らかになっています。しかし、その後に見つかった銅酸化物の超伝導は、この理論だけでは説明できません。なにか別の仕組みが働いているようなのです。

物質が超伝導状態になるためには、2つの電子がペアを組む必要があって、BCS型の超伝導では、原子の振動によりこれが作られることが分かっています。しかし、銅酸化物では議論が続いて、結論がまだ出ていません。銅の磁石としての性質が関係していると思われるが、詳しく調べるにはさらなる研究が必要なんです。

—メカニズムを解明するために、どんな実験をしているんですか？

我々が力を入れているのは中性子を使った実験です。超伝導のメカニズムを

理解するためには、電子や原子核の静的な状態だけでなく、動いている様子まで詳しく見る必要があります。先ほど格子振動について説明しましたが、こういう動いているものを調べるのは、中性子が最も得意としていることです。

—室温超伝導は実現できそうですか？

当時は「すぐにでも実現できるのでは」という期待もありましたが、銅酸化物はその後、常圧で135Kあたりで頭打ちになっています。これまでに、室温超伝導を実現したという報告は世界中でいくつもありましたが、検証の結果、全て否定されています。我々は冗談で、UFO(未確認飛行物体)ならぬUSO(未確認超伝導物質)と呼んだりしていました(笑)。

最近では、2008年に東京工業大学の細野先生が発見した、鉄を含んだ超伝導物質に注目が集まりました。良く知られているように、鉄は永久磁石になります。超伝導と永久磁石は犬猿の仲。まさか鉄で超伝導が起きるとは、誰も思っていませんでした。今のところ臨界温度はまだ50Kを超えたあたりですが、これから先どうなるかが関心事の1つです。

—ほかにも期待できそうな物質はありますか？

水素による超伝導を目指している人もいます。BCS型の超伝導では、格子振動の周波数が高いほど、電子ペアの結合が強くなり、臨界温度が上がります。最も速く振動できるのは、最も軽い原子である水素です。水素が金属になるほどの高圧にする必要はありますが、臨界温度が室温を超えるのではと期待されています。

—室温超伝導が実現できたら社会的なインパクトは大きそうですね。

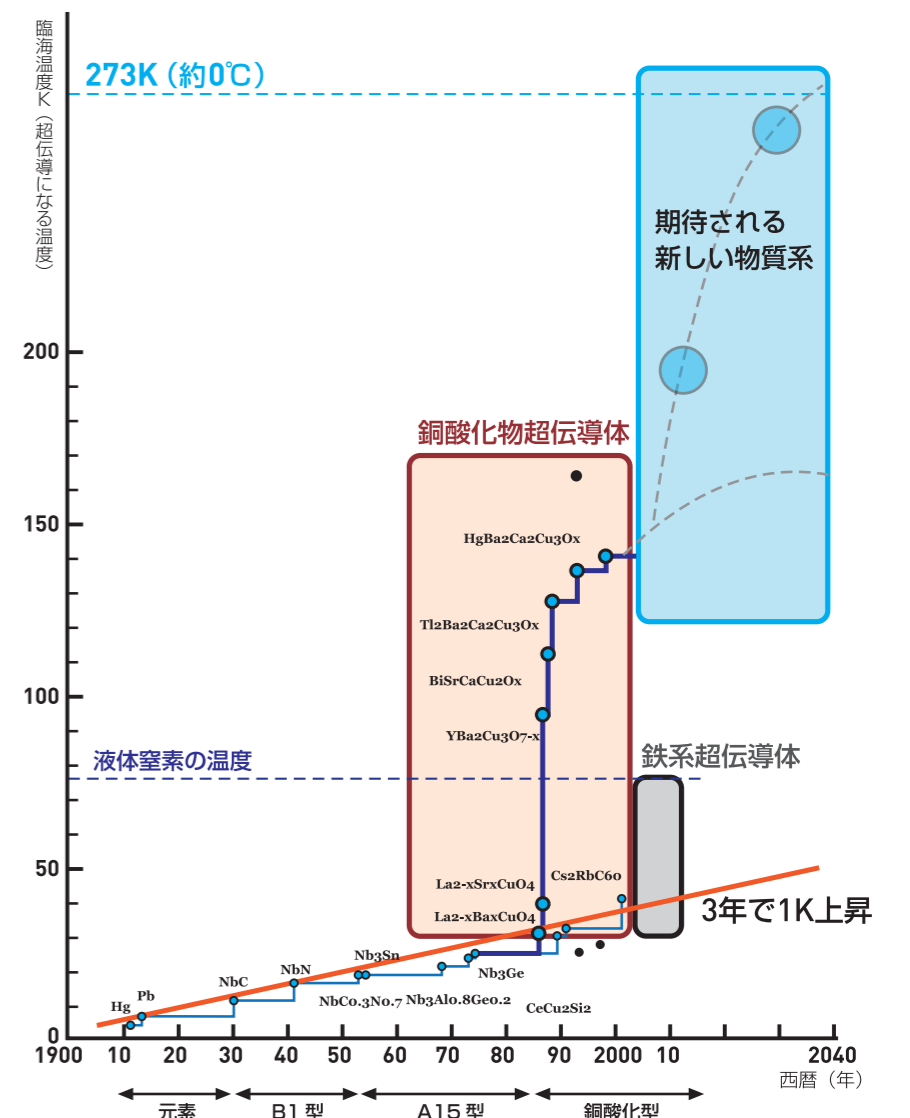
超伝導を利用すれば、強力な磁場を作ることができます。この応用例として、すでにMRIやリニアモーターカーが実用化されています。今後、もしも臨界温度が室温まで上がれば、もう冷却は不要になります。産業化を考えるとこれが非常に大きい。仕組みが簡単になり、超伝導の使い道は一気に広がるでしょう。

様々な分野で活用が進むでしょうが、その1つはエネルギー分野です。超伝導状態では電気抵抗がゼロになるため、送電線を作れば、エネルギー損失無しに

電力を送ることができます。たとえば、夜間で電力が余っている国から、昼間で電力が足りない国に送電するなど、地球規模の送電網などが考えられています。

—ワクワクするような話ですね。

銅や鉄以外にも、超伝導になる物質はあると思います。超伝導はまだ分かっていないことも多いですが、だからこそ面白い。我々研究者の間にも、「何かこれから面白いことが起きる」という予感があります。これからも新しい発見がたくさんあると思いますので、注目していただけたら幸いです。



現在の研究テーマ

KEK物質構造科学研究所
J-PARCセンター 物質・生命科学ディビジョン
横尾哲也 准教授



超伝導のメカニズムを解明するために、期待されているのが J-PARC の加速器である。現在、J-PARC ではどんな実験装置が使われ、どんな実験が行われているのか。また、最新の超伝導研究では、どこまで分かってきたのか。KEK物質構造科学研究所/J-PARCセンターの横尾哲也准教授に話を聞いた。

—中性子を使ってどんな実験を行っているのですか？

我々が超伝導の研究に利用しているのは、中性子の「非弾性散乱」を測定する装置です。中性子は非常に透過力が高い粒子ですが、物質内部の原子核に当たって跳ね返ります。これを観測すれば、原子の状態を知ることができる。言わば、“物質の中まで見通せる光”のようなものですね。

—非弾性というのは、どのような散乱なのでしょう。

ボールを壁に投げた場合、壁が固ければ、ボールはほぼ同じ速さで跳ね返ってきます。これが弾性散乱です。でも壁が軟らかければ、ボールは勢いを失ってしまいます。中性子の場合、遅くなるだけではなく、逆に速くなることもあるのですが、これはピッチングマシンのようなものに当たったイメージすると良いかもしれません。

このように、物体からエネルギーをも

らったり、逆に奪われたりして、速度が変化するのが非弾性散乱です。弾性散乱でも、物質の結晶構造などは調べることができるのですが、静的な構造を見ただけでは超伝導は理解できません。超伝導状態では、原子核や電子がどのように運動しているのか。それを調べるために、我々は非弾性散乱を測定できる装置を作りました。

—非弾性散乱なら、運動状態まで分かるのですか？

はい。ただ、弾性散乱に比べると、非弾性散乱のシグナルは4~5桁も弱い。弾性散乱なら短時間で実験データが取れても、我々の実験は数時間、長ければ1日かかることもあります。それだけ長時間の実験をやって、統計的な処理をしないと、欲しい情報が出てこないのです。

非弾性散乱は確率が低い現象なので、観測するためには、とにかくたくさん中性子を当てるしかありません。ビーム中の中性子の量を我々は「強度」と表現しますが、J-PARCの加速器は強度の

強さ、つまり中性子の多さが特徴です。以前の加速器では強度が足りなかった実験が、J-PARCでついに実現できるようになったと言えます。

—現在 J-PARC で使われている実験装置について教えてください。

非弾性散乱に使われている中性子の実験装置には、大きく分けて「直接配置型」と「逆転配置型」の2種類があります。直接配置型の装置としては、現在以下の3台が稼働しています。

- ・4次元空間中性子探査装置 (4SEASONS)
- ・高分解能チョッパー分光器 (HRC)
- ・冷中性子ディスクチョッパー型分光器 (AMATERAS)

入った中性子と出てきた中性子のエネルギー (=速度) を比較すれば、物質との間のエネルギーの授受が分かります。この3台はいずれも、入り口のところ「チョッパー」と呼ばれる装置が付いており、決まったエネルギーの中性子だけを通すようになっています。な

ので、出てくる中性子の速度を観測すれば、エネルギーの変化が分かるわけです。

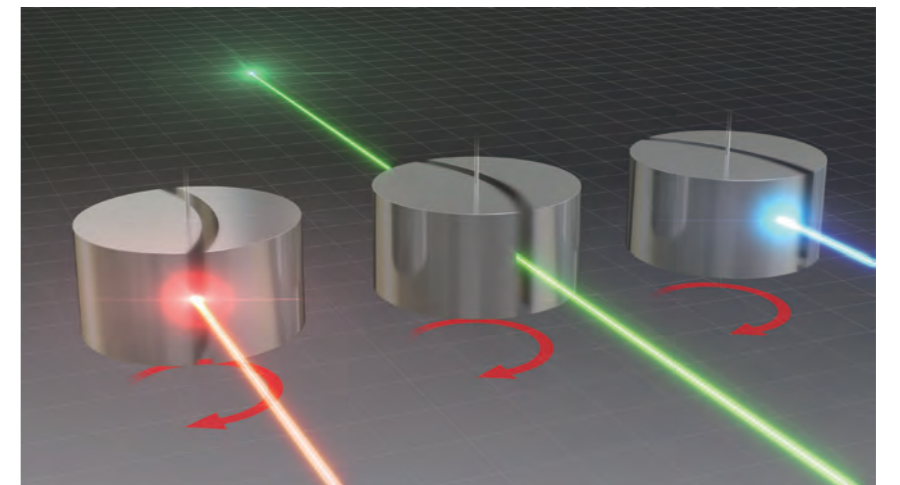
—この3つの装置の違いは何でしょうか。

チョッパーを使う手法は共通なので、この3台は兄弟のような装置と言えます。違っているのは、得意とする部分です。装置の性能として考えられるパラメータは、ビーム強度、測定領域、分解能の3つ。この全部が良い装置が理想ではありますが、残念ながらそれは不可能です。

ビーム強度が強いと、弱いシグナルがよりハッキリと見えてきます。測定領域が広いと、様々なエネルギーの動きを見ることができます。分解能が高ければ、より細かく原子の動きを調べられます。これらの特性を踏まえ、研究テーマによって、適した装置を選ぶことになります。

—これまでの実験でどんなことが分かってきましたか？

高温超伝導の研究は、まだ混沌とし



フェルミチョッパーは、中性子を特定の速度に揃える装置の一種。スリットを中性子の発生に同期させて回転させ、スリットが中性子ビームラインに平行になった時刻にのみ中性子を通させ、試料に照射させる。

ていて、先が見えない状況です。これまでに、様々な超伝導物質が見つかり、そのたびにブームのように盛り上がってきましたが、いまだに、全ての現象を説明できる理論は見つかりません。格子振動のほか、電子のスピンや軌道も関係していると見られ、超伝導は想像以上に複雑な現象のようです。

ただ、大まかなところはかなり分かってきました。スピン(※)のような磁気的な運動が非常に重要な要素であるこ

とは、ほぼ間違いない。今までの研究で、高温超伝導の“癖”のようなものは見えてきたので、今後は、その癖がなぜ起きているのか、1つ1つ原因を明らかにしていく必要があるでしょう。

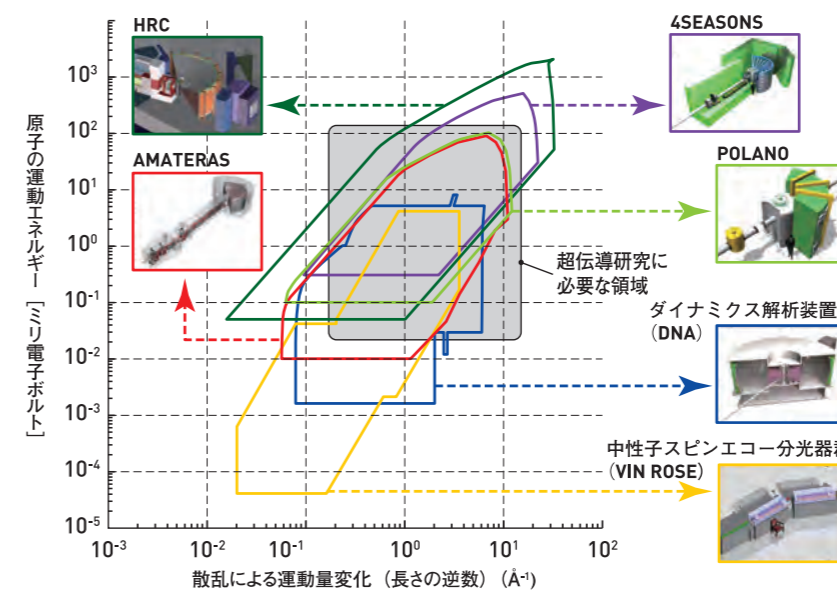
※この場合スピンは電子の持つスピンを考えている。スピンとは古典的には電子の自転運動に相当する、粒子が持つ固有の角運動量。

—解明にはまだ時間がかかりそうですね。

まだまだ、いろんな実験や理論が必要です。現在は、複合的に研究を進めて、1つのことを明らかにしていく時代。高温超伝導でも、何か1つの大発見があって、それで全て分かってしまうということは、おそらくもう無いでしょう。

世界中の研究機関は我々の競争相手ではありませんが、いろんなところの実験成果を集めて研究を進める必要があります。そういう意味では協力しあう仲間とも言えます。この競争と協力をいっそう進めて、早く全てを説明できるような理論体系を構築したいですね。

超伝導研究に必要な領域と対応する中性子実験装置





KEK物質構造科学研究所
J-PARCセンター 物質・生命科学ディビジョン
横尾哲也 准教授

未来に向けた 研究最前線

超伝導研究をさらに進展させるため、J-PARCに現在建設中の最新鋭装置が「POLANO」である。POLANOが完成すれば、何が分かるのか。そして、高温超伝導の先に室温超伝導はあるのか。引き続き、KEK物質構造科学研究所/J-PARCセンターの横尾哲也准教授に話を聞き、超伝導研究の最前線を追ってみよう。

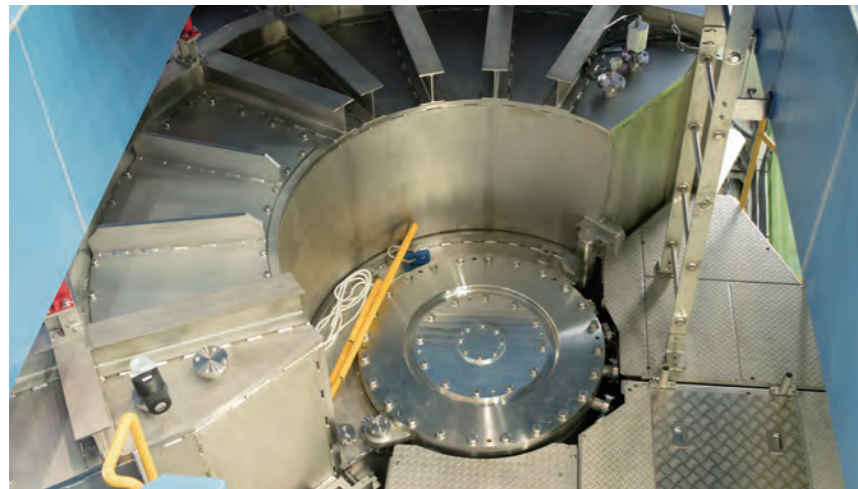
— POLANOとはどのような装置なのでしょう。

現在建設中の「POLANO」(偏極中性子散乱装置)は、実験装置としての3つの性能(ビーム強度、測定領域、分解能)は、それほど良くはありません。全てが「そこそこ」の装置です。では、「一体何が得意なのか」と疑問に思うでしょうが、それは装置の名前にもなっているように、「偏極中性子」が使えるということです。

中性子の非弾性散乱は、原子核のほ

か、電子スピンによっても起きます。中性子は電荷を持たないので、電気的な力は働きません。でも、スピンにより磁石としての性質を持っているため、磁気的な力の影響は受けるのです。これまでの実験装置では、非弾性散乱が原子核と電子スピンのどちらで起きたのか、区別できませんでした。

POLANOは偏極実験に特化した装置です。偏極中性子を使えば、この両者の区別が可能になり、高温超伝導のメカニズムがよりハッキリと見えてくるでしょう。



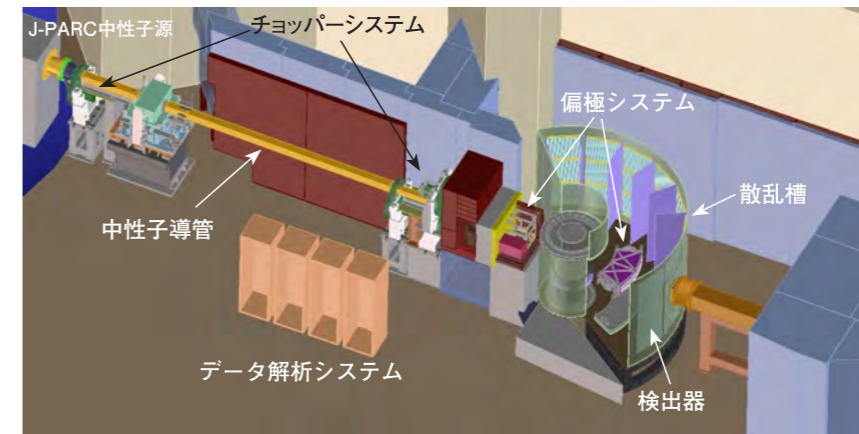
— 偏極中性子というのは何ですか？

中性子や電子などのスピンには、上向きと下向きの2種類があります。スピンは量子力学的な性質であって、古典的な自転とは異なるのですが、イメージとしては自転のようなものと考えてもらって構いません。

通常の中性子ビームには、上向きスピンと下向きスピンの中性子がランダムに混じっています。ここから、「偏極子」という装置を使って、上向きまたは下向きどちらかだけを選んだものが、偏極中性子になります。光にも、振動方向が揃った偏光というものがありますね。偏極も考えとしてはこれに近いです。

— 偏極中性子でどうやって区別するのでしょうか。

偏極中性子を入射して、原子核に当たった場合は、スピンの向きはそのまま出てきます。しかしスピンによる散乱であれば、スピンが反転します。出てきた



■ POLANO 概念図

中性子のスピンを見れば、原子核と電子スピンのどちらで散乱されたのか、明確に分かるわけです。

ただし、偏極子で中性子の半分は捨ててしまうことになるので、強度が半減するという問題があります。これが装置としての難しさですね。

— いつから実験を開始する予定ですか？

すでに装置の建設は大体終わっていて、これから装置の調整を始めるところです。シャッターがちゃんと開くか。検出器がカウントできているか。ビーム強度が設計通り出ているか。様々な調整作業があって、これに半年~1年くらいかかる見込みです。順調に行けば、2017年中には本格的な観測が開始できると思います。

— 新しい装置の開発には苦労もあるのでしょうか。

はい、相当大変です。建設前はひたすら図面ばかり見ていましたし、建設が始まってからは、ヘルメットを被って汗だくになりながら、現場で作業していました。研究者なのに、全然研究する時間が無いというのは、我々にとってかなりス

トレスがあることでした。それだけに、完成してから自分の実験をするのがすごく楽しみです。

— ご自身ではどんな実験をする予定ですか？

もちろん超伝導もテーマの一つですが、軌道の素励起として知られる「オービトン」について観測したいと思っています。オービトンというのは、電子軌道の運動状態を仮想的な粒子として扱う新しい考え方です。POLANOには、スピンの影響を取り除いて、軌道の寄与だけを観測する能力があります。これは世界的に見ても、POLANOの大きな強みです。

— 世界でもPOLANOでしか観測できない？

中性子のスピン偏極の技術は以前からあって、原子炉を使った中性子散乱の実験装置はすでに存在しています。POLANOがユニークなのは、加速器の中性子散乱で、偏極実験を可能としたことです。原子炉だと、低いエネルギーの中性子しか作ることができません。でも加速器なら、桁違いに広い領域での実験が可能になります。

高温超伝導の研究で必要となるのは、まさにPOLANOで観測できるようになる高いエネルギー領域でのデータです。この領域でのデータ取得は世界初になるはずですが、他国も指をくわえて見ているだけではありません。あちこちで同様の装置を作ろうとしていて、競争が激しくなっています。のんびりしてられませんね。

— 新しい超伝導物質の開発も加速しそうですか？

簡単ではないですが、「こういう構造の物質を作れば良さそう」と、予見できるようになるかもしれません。今までにはある意味、総当たりのような感じで、とにかくいろんな物質を作ってみて、試すしかありませんでした。

世界中の研究者が室温超伝導を目指していますが、これが実現できるかどうか、まだ断言できるような状況ではありません。ですが、高温超伝導のメカニズムが明らかになって、指針を出せるになれば、臨界温度をもっと上げられる可能性はあると思います。そのためにも、まだまだ研究が必要です。

— 最後に、若い人達へのメッセージをお願いします。

超伝導は最先端の研究です。だからこそ難しいし、答えがなかなか出てきません。でも、そうした難問に対して、加速器のような大型施設を駆使して、謎を解き明かしていく。この喜びを、一緒に味わってもらえたら嬉しいです。超伝導はいまだに分かっていないことも多く、今の高校生が研究者になる頃にも、まだ十分謎は残っていると思いますよ。

