

産学官との連携



取材日：2021年12月20日
(一社) 日本科学機器協会 会議室

京都大学 白眉センター特定准教授 理学研究科 連携准教授
日本科学振興協会 代表理事

ばんば もとあき

馬場 基彰 先生 に聞く

物理の未解明現象「超放射相転移」を研究。これからの日本の科学を振興する新団体発足にも奔走 上

聞き手：梅垣喜通 日本科学機器協会 広報委員長
高橋秀雄 日本科学機器協会 広報副委員長
夏目知佳子 日本科学機器協会 広報委員
岡田康弘 日本科学機器協会 事務局長
(取材・撮影・編集協力：クリエイティブ・レイ(株) 安井久雄)



馬場 基彰 先生のプロフィール

【学 歴】

2000年 4月 - 2004年 3月 大阪大学 基礎工学部 電子物理科学科
2004年 4月 - 2009年 3月 大阪大学 基礎工学研究科 物質創成専攻

【経 歴】

2007年 4月 - 2009年 3月 日本学術振興会 特別研究員 (DC2)
2009年 4月 - 2009年 4月 大阪府立大学 電子理工学分野 博士研究員 (特定領域研究)
2009年 5月 - 2012年 3月 パリ第7大学 & CNRS 博士研究員
2012年 4月 - 2015年 3月 日本学術振興会 特別研究員 (PD)
2015年 4月 - 2019年 3月 大阪大学 博士課程教育リーディングプログラム 特任講師 (常勤)
2019年 4月 - 2020年12月 京都大学 大学院理学研究科 特定講師 (さきがけ)
2017年10月 - 2021年 3月 科学技術振興機構 戦略的創造研究推進事業 さきがけ研究者
2019年12月 - 現在 京都大学 未来を切り拓く量子情報ユニット 参画教員
2021年 1月 - 現在 京都大学 白眉センター 特定准教授
2021年 1月 - 現在 京都大学 大学院理学研究科 連携准教授

【委員歴】

2017年 4月 - 2018年 3月 日本物理学会 領域5運営委員
2015年 4月 - 現在 光科学若手研究会 組織委員
2020年11月 - 現在 日本版AAAS設立準備委員会 委員長
2021年11月 - 現在 日本科学振興協会 代表理事

【受 賞】

2004年 3月 楠本賞 (基礎工学部 電子物理科学科) 楠本奨学会・大阪大学
2007年12月 光物性研究会奨励賞 光物性研究会
2011年 2月 第27回 井上研究奨励賞 財団法人 井上科学振興財団
2017年 3月 第11回 日本物理学会若手奨励賞 (領域1:原子分子・量子エレクトロニクス・放射線) 日本物理学会
2017年 3月 第11回 日本物理学会若手奨励賞 (領域5:光物性) 日本物理学会
2018年 2月 平成29年度 研究表彰【課題】光科学・光科学技術の向上に役立つ独創的な研究 光科学技術研究振興財団
2018年 9月 Publons Peer Review Awards 2018, Top 1% of reviewers in Physics Web of Science
2019年 9月 Top Peer Reviewer 2019, Top 1% of reviewers in Physics Web of Science



理論提唱されながら世界で未観測の「超放射相転移」

馬場先生は、世界でも未解明である「超放射相転移」について研究をされていると伺っています。門外漢向けに、研究の内容をご教示いただけますか。

馬場 私が研究している超放射相転移は、1973年に理論的に提唱されたものの未だに観測されていない光に関する現象です。今日、光の特性や活用の手法は様々な面において解明が進み、社会で広く利用されています。しかし超放射相転移は、光に関してこれまで分かっている事とは性質が異なる、未解明の物理現象になります。その現象の観測を誰も出来ていないのですが、この超放射相転移に類似の現象を発見することが出来たというのが、私の最近の研究になります。

相転移は氷→水→水蒸気とこのように変化すること

解明されれば「世界に衝撃が走る大発見」と言われるものだと伺っています。超放射相転移とは、こういったものののでしょうか。

馬場 そもそも「相転移」とは何かというと、例えば水が水蒸気や氷に変化するような現象です。「液相」の水が、「気相」の水蒸気、「固相」の氷にというように、温度

産学官との連携

に応じて物質の相（状態）が劇的に変化する現象が、典型的な相転移と言われる現象です。

この相転移は磁石でも起こります。ごく普通に目にするフェライト磁石は、約460℃よりも高温だと磁石の特性はなくなりますが、そこから温度を下げると再び磁石としての振る舞いを見せます。これも一種の相転移です。

では私が研究している事は何なのかというと、光と物質の相転移になります。相転移は普通、物質が起こす現象なのですが、「光は相転移するのか?」という研究をしているわけです。

超放射相転移は電磁波と物質（例えば、光と電子）の相互作用による現象

相転移の例で挙げてもらった水や磁石の変化は分かりましたが、光が状態を変えるというのは、想像がつきにくいですね。

馬場 おっしゃる通り少し難しいので、順番にかみ砕きながら、まず「光とは電磁波である」、次いで「電磁波とは電場と磁場の波である」ということに少し触れます。

「光とは何か」というと「光とは目に見える波長域の電磁波」のことです。電磁波は、波長や振動数で特徴づけられて呼び名が変わります。波長が短い電磁波にはX線がありますが、X線は目に見えないので、あまり光とは呼びませんよね。しかしもう少し波長が長くなって可視光線になると、私達は

光と呼ぶようになります。そして、さらに波長が長くなって目に見えないマイクロ波になると、光とは言わないようになります。

なるほど。電磁波の中で、およそ目に見えるものを光と言っているわけですね。

馬場 基本的にはそうです。ただ、肉眼で見えない紫外線や赤外線も光と呼ぶことがあるので、大まかにそうだというくらいに思っていてください。

さて「光が目に見える電磁波」だと分かったところで、電磁波とは何かというと「電場と磁場の波のこと」です。

となると、先生が取り組む「光は相転移するのか」という言葉は「電磁波、つまり“電場と磁場の波”は相転移するのか」と言い換えられるということでしょうか。

馬場 ざっくりとした理解としては、そう捉えていただいて良いでしょう。

そのうえで、理論はあるものの観測はされていないという「超放射相転移」について教えていただけますでしょうか。

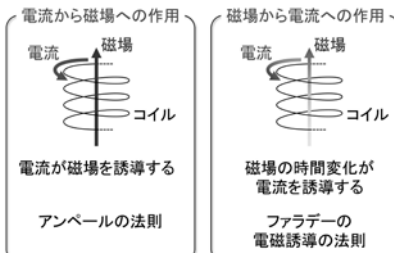
馬場 水や磁石の例で話した相転移は、その物質の内部が変化するものでした。超放射相転移は「光と物質の相互作用」による現象です。結論から言うと、特定の環境下で例えば「ある物質中の電子の向きと電磁場が、ぴたりと

産学官との連携

揃う」と超放射相転移と言えます。少し難しくなったので、小中学校の理科で習う「コイル、電流、磁場の関係」で説明していきましょう。

これからの説明では「電流=物質」と考えてもらおうと分かりやすくなります。なぜその置き換えが成り立つかというと、電流とは電子という“モノ”が例えば電池の+極から-極に移動するという振る舞いで、これはつまり物質になんらかの力が作用して起きている現象と言えるからです。

電磁波(光)と物質の相互作用



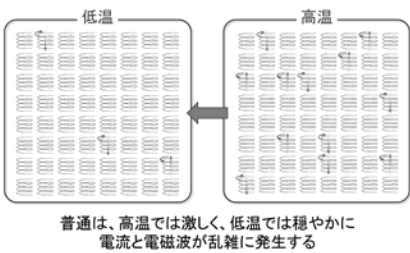
電流は“物質”という語句に置き換えられること、理解出来ました。

馬場 そのうえで、皆さんも理科で習った現象ですが「コイルに電流を流すと磁場が発生する」、そしてその反対に「コイルに磁場を発生させると電流が流れる」という現象を思い描いてください。前者はアンペールの法則、後者はファラデーの電磁誘導の法則と言います。これを、先に言及したように「電流」を「物質」という言葉に置き換えて、「物質が磁場に作用する。そしてその反対の作用もある」と理解いただきたいと思います。

さらに「光は電磁波のうちの目に見えるもの」と触れたところで言った「電磁波は電場と磁場の波である」ということを思い出してください。磁場は光の一部を形成しているものなので、磁場と電流の関係を見る事を通して「電磁波

(光)と物質の相互作用」を見ることが出来るわけです。

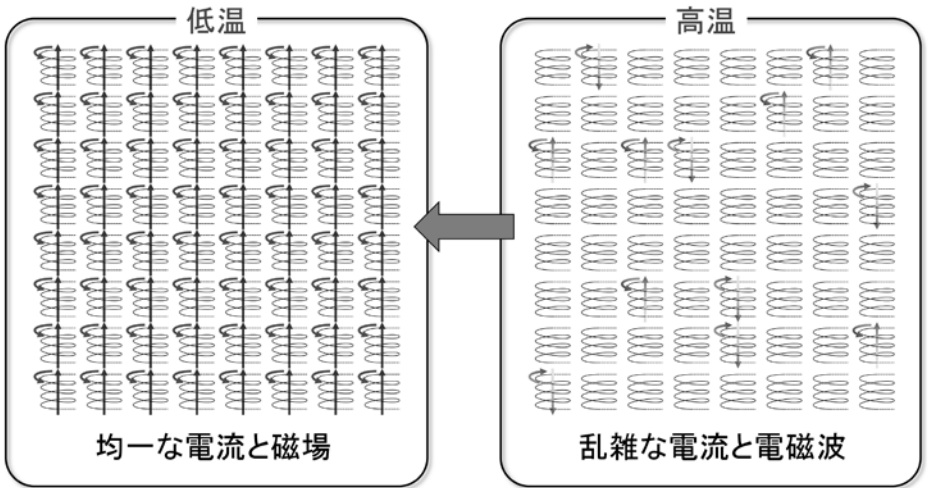
コイルを敷き詰めて温度を変えると



そういうわけで、電磁波と電流を見ていくと、超放射相転移を観測出来るということにつながっていくわけですよ。続けて説明をお願いいたします。

馬場 超放射相転移はそれに温度が関わってきます。また、ひとつの例として、先ほどのコイルをずらりと敷き詰めた状態を思い描いてください。そこでは電子が乱雑に動き、また電磁波も飛び交っていて、

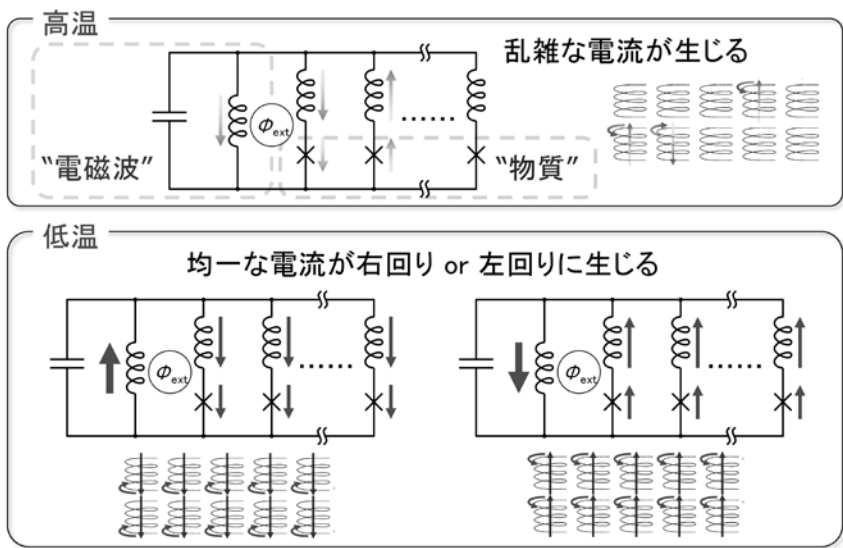
超放射相転移が起きる場合



特別なコイル(物質)を用意すると超放射相転移が起きる可能性がある

産学官との連携

“超放射相転移”が起こる超伝導回路



言わば“わしゃわしゃ”と乱雑な状態にあります。この動き方や動く量は、温度で変わります。温度が低いと穏やか、温度が高いとより激しく乱雑に動きます。

今話した仕組みで、電球や太陽は光を放っています。高温になるほど電子の“わしゃわしゃ”とした乱雑な動きが激しくなるので、高温になるほど物はよく光るのです。例を挙げると、物は9000℃程だと青っぽく強く光ります。2000℃ではもっと光は弱く、赤っぽく光ります。いったんまとめると、熱ければ物はよく光る、冷たければ物は光らない、それは電子の乱雑な動きで起こっているということになります。これが普通の場合の典型的な振る舞いです。

それが超放射相転移ではどうなるのか?というと、ずらりと並んだコイルに電流と電磁波が乱雑にある状態を、冷やしていくと、均一な電流と磁場が出来る、そんな風に

変化する相転移のことになります。“わしゃわしゃ”だった電子や磁場が、均一な電流と磁場に揃うということです。今説明しましたが、世界でまだ観察されたことがない現象ですので、こうした相転移を起こしたい、そして観測したいと研究を進めています。

つまり、電磁波の1つの成分である磁場と電流が元々乱雑な状態であったのが、温度を下げることで、勝手に均一に整列した電流と磁場に転移する、それが超放射相転移と呼ばれる現象、ということになります。

極めて素人的なイメージですが、水が冷やされて氷に相転移すると、氷の方が分子は“整列している”感じですよ。それに似たイメージが、磁場である光や電流でも起きるという感じでしょうか。

馬場 正確に言うともちろん違うと

ころはありますが、あくまでざっくりとしたイメージや雰囲気としては、そう思い描いていただくと、理解の助けになると思います。

超放射相転移の兆候や類似の現象を観測

これが、理論は以前から提唱されているけど、誰も観察したことはない、そして馬場先生が世界で初めて観察して証明しようと取り組んでいることになるわけですね。

馬場 そうということです。まとめると、超放射相転移は電磁場（光）と物質の相互作用によって起こる現象である、ただし、その電磁場と物質が一緒になって相転移するという現象は、まだ観測されていない、ということです。

1つ付け加えておくと、超放射相転移という名称ですが、今の

産学官との連携

説明で分かるように、別に何も放射はしません。歴史的に超放射という光の現象が起こる数学的なモデルにおいて見つかった経緯があるので、こうした名称になっています。

馬場先生は、超放射相転移に“類似の現象”を発見されたということでした。それについてご説明いただけますか。

馬場 超伝導回路で、超放射相転移に似た現象が起きるということを研究しました。超伝導というのは電気抵抗がゼロになる現象で、医療のMRI検査機器やリニアモーターカーに応用されているものです。超伝導を示す物質で作られた電気回路が超伝導回路です。最近注目されている量子コンピューターの多くが、超伝導回路で作られています。

超伝導回路は典型的には、数十ナノメートル程度の厚さのアルミニウム薄膜に回路を描いたものです。詳細は省きますが、超放射相転移の現象の一端を捉えることが出来るように超伝導体、コイル、コンデンサなどを配置した回路を理論的に考えました。この回路を希釈冷凍機で冷やしていき、観察するという実験を想定した理論研究です。あくまでも例えばですが、0.02ケルビン(−273.13℃)から0.01ケルビン(−273.14℃)を境にして、電流が勝手に、右回りや左回りに流れ始めたりすること等を明らかにしました。そうして、これが超放射相転移に相当する現象であるとい

うことを理論的に検証したというのが、まず研究の1つです。

もう1つ、磁性体を使った別の研究があります。エルビウムオルソフェライトというフェライト磁石よりも特殊な物質を使いました。この研究は、4ケルビン(−269℃)で起きる相転移が、超放射相転移に類似のものであると、実験的に、また理論的に検証したものになります。手法は、サンプルに磁場をかけ、冷却して、テラヘルツ領域の電磁波で吸収スペクトルを見るということでした。

実験装置の詳細な仕組み等は割愛しますが、磁場の強さと電磁波の波長を変化させて見ていったところ、超放射相転移の兆候と言えるものを発見出来ました。吸収スペクトルの線に、そうではないかと思われる分裂が見られたのです。

それは世界の研究者にも反響があったのではと想像しますが、どうだったのでしょうか。

馬場 大きな反響があり、結果はサイエンス誌などにも取り上げられるものとなりました。

そうした兆候を捉えたことを踏まえ、別の論文で詳細な解析をして超放射相転移であると結論づけはしたのですが、もっと確かな実験証拠が欲しいと考えました。これから実行していく進行中の事になりますが、電磁場のゆらぎを観測することで、より確かな証拠に迫ることが出来ます。ゆらぎというのは、言い方を変えると量子力学的なゆらぎになります。

量子力学的なゆらぎの観測で超放射相転移の発見を裏付けられる

量子力学的なゆらぎとは、どういったものでしょうか。

馬場 また水を例に出して説明しますと、水が冷やされて氷になると水の分子の動きは止まったように観察されます。しかし完全に止まっているわけではなく、氷の結晶を作りながらも分子は動いているのです。さらに温度をどんどん下げて絶対零度に到達したとしても、分子は動いていると量子力学的には言えまして、それが量子力学的なゆらぎという事になります。

同じように電磁場もゆらいでいます。そして、超放射相転移が起きれば、その起きた温度でゆらぎが抑えられる事が理論的に分かっています。ですので、電磁場のゆらぎが抑えられたところを観測出来れば、超放射相転移が起きた事を発見出来たということになると言えるのです。

実はそうした量子ゆらぎを測定するのは、なかなか難しく、世界的にも電磁場の量子ゆらぎの検出は2例しかありません。そうした量子ゆらぎの発生と検出を高精度で行える装置を、今、京都大学に設置しようとしています。京都大学には既にいくつかの設備が整っているので、プラス数百万円、おおよそ400万円前後くらいで観測のシステムを立ち上げられるのではないかと思います。

超放射相転移は、理論的には1973年に唱えられているという事でした。この理論自体は信頼性が高いとされているのでしょうか。

馬場 その点は、色んな言い方がされています。

物質を表現する数学的なモデルがあり、そのモデルに基づいて相転移が起こるかどうかを検証するということで、理論が唱えられました。用いられたのはディッケモデルという光と物質の相互作用を表現するための量子光学の基本モデルで、このディッケモデルから出発すると、超放射相転移をするというのは、確かとされています。

ただし、実は実際の物質の中にはディッケモデルで表現される物がなかなか無いのです。

後にディッケモデルに付け加えるべき事柄があるのではないか等、モデルそのものの問題を指摘する声が上がったりするなどもあり、実は超放射相転移は「ある、ない」という論争が繰り返されてきました。

少し時系列で挙げると、1973年に超放射相転移が提唱される、しかし1975年には、物理法則から導かれた正確なモデルの下では起きないと指摘される、1979年から81年には、さらに広い範囲の物質で起こりえないと、当時の理論で証明される、しかし1988年から89年、また別の文脈で超放射相転移は起こりうるといった指摘が起こる、といった論争が続いてきたのです。

そうして幾度となく議論が繰り返られていたのですが、2010年に、

産学官との連携

本来の意味での超放射相転移ではなかったのですが、似たような現象が実験的に観測されて再び論争が盛り上がり始めたのです。この当時、私は日本で博士号を取得した後、パリ第7大学で博士研究員として働いていた頃で、この議論に参加していました。

発見のきっかけは、教授の間違いを指摘したことから

馬場 そのパリ第7大学で所属していた研究室の教授に、「超放射相転移がこれならば起こるはずだ」というアイデアを示されたのですが、私は違うのではないかなと感じ、計算を行ってみると、やはり先生の示したアイデアは間違いでした。実はこの頃、本来の意味での超放射相転移は起きないものだと思っていて、さほど価値も感じていなかったのです。

そして帰国後、フランス時代の教授が、また違う形で『これなら超放射相転移が起こる』ということ論文発表していたのですが、他の研究者は否定的な見解を出していました。私も否定派だったのですが、これは私がきちんと否定をするということが、この分野の研究の信頼性を高め、科学の発展のために大切な役割を担うのではないかと考えたわけです。

そうして否定を試みようとする組んでいると「あれ?こうすれば上手くいくのでは?」と、否定するだけでなく超放射相転移を起こしうる事例が見えてきたのです。フランス時代の教授は、超伝導物質か

ら構成される典型的な回路を想定して理論を唱えていたのですが、否定するつもりで実験系の共同研究者の手も借りながら、理論的な検証を進めていたところ、『別種の回路においては、理論上は超放射相転移に相当する現象が起こりえる』ことが分かったのです。

実にユニークですね。ひょうたんから駒というか…

馬場 その結果は2016年に論文で発表しました。当時は本来の意味での超放射相転移に類似の現象すら確認出来ていなかったのですが、反響は大きかったです。その論文は今のところ理論的にも否定もされていません。

超放射相転移の解明がもたらす未来への可能性

超放射相転移が明らかになると、その先には、社会でどのように役立つことが期待されるのでしょうか。

馬場 まず、超放射相転移を起こすために必要となる光と物質の非常に強い相互作用について言えば、理論的には、量子コンピューティング、センサー、エネルギーを取り出すなど熱機関への応用、エネルギーを蓄える電池のようなエネルギーストレージのようなもの等に応用出来るのではないかとされています。さらに、暗黒物質の検出にも活用出来るのではないかな等とも言われることがあります。また、

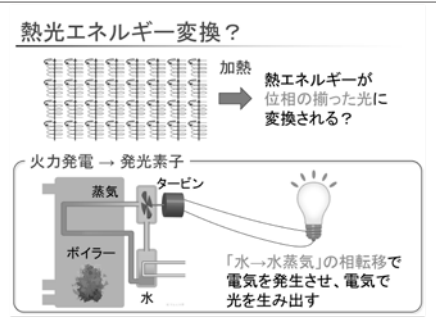
産学官との連携

化学反応を促進させるという応用の仕方について、デモンストレーションされた例もあり、期待が持たれています。

私自身は、量子計算や量子暗号通信といった量子技術の方面、さらにはエネルギーの方面に活用可能ではないかと思っています。熱のエネルギーを直接光のエネルギーである電磁波に変えて伝送する、また余剰な熱を光に変換するといったようなことで、エネルギー問題へ貢献していけるような発展性を持つ現象だと思います。

例えば、火力発電から電気を得て光を作るという仕組みでは、熱エネルギーが光のエネルギーになるために、水を熱して水蒸気にしてタービンを回して電気を発生させ電球やLEDを光らせるという段階を経る中で大きなエネルギーのロスがあります。それを、超放射相転移を利用すると、熱のエネルギーから直接、レーザー光のような光のエネルギーに出来るのではないか、などを考えています。

そのように可能性としては色んなことを想像するわけですが、前提として、現時点はそもそも観測されていない未知の現象を明らかにしようとする、基礎の段階であると考えてください。



今は基本の現象を明らかにしようという段階であり、応用はその後の、また違うアプローチなどが重ねられた上に起こってくるものですよね。

馬場 例えば、話してきた私の実験では、0.数ケルビンというような低温下などであり、そもそものエネルギースケールは小さいわけです。そのような低温で動く量子コンピュータなどもあるわけですが、例えば一般の室温のようなレベルで活用出来るようにとエネルギーを高めるのは、また別のブレイクスルーが必要になるでしょう。

例えば超伝導の研究は、もともと低温下でしか起こりえない現象と見られていたものが、高温超伝導という発見があり、活用される可能性の範囲は大きく広がりましたよね。

ちなみに、超伝導も、電子の状態が変わって電気抵抗がゼロになるという一種の相転移によって起こっている現象です。

暗黒物質の検出に活用出来るのではないか、という事については、どうお考えですか。

馬場 この暗黒物質の分野は、暗黒物質が観測されたことがないだけに、色んな研究者が手を出しやすいとも言えるのです。暗黒物質は検出の方法すら模索されている段階ですので、電子と相互作用するかもしれない、光と作用するかもしれない、可能性はないとは言えない、程度なのかなとも思

います。私としては、そういう取り組みをしようという動きの研究者もいる、という感じの程度に捉えています。

動機は、光の分野で「未発見の新しい現象を解明しなければ」という思い

超放射相転移のように“未知の現象”が現代もまだあり、そこに迫ろうというのは、言わば科学研究の原点のようなロマンも感じます。

馬場 ありがとうございます。しかしながら、現実のジレンマのような事を感じるというのも正直なところ です。光の分野の研究は、今日、産業に直接的に役立っていく应用の方が盛んだと言えます。光の技術は産業化されているものが多く、産業界との繋がりが強いわけです。

そうした中で、私は光と物質の相互作用を研究する光物性物理学という分野の理論研究者になるのですが、この分野は、半導体やLEDなど近年の技術と近い分野です。昔は、なぜ半導体が発光するのかという事を突き詰めたりする理論研究者がたくさんいましたが、原理が分かってくると、この分野の理論研究者は減っていった、例えば量子情報の分野に移っていくというようなことを経てきたわけです。

私は、今後の科学技術の発展のために、光と物質の相互作用によって起こる、未だ発見されていない何か新しい現象を研究しなけ

産学官との連携

ただ、この超放射相転移が、非常に大きな可能性を秘めている現象であるという思いは、大変強く持っています。

超放射相転移の観測や解明が達成されるなど、研究が深まることは、物理学そのものにどのようなインパクトを与えとお考えでしょうか。

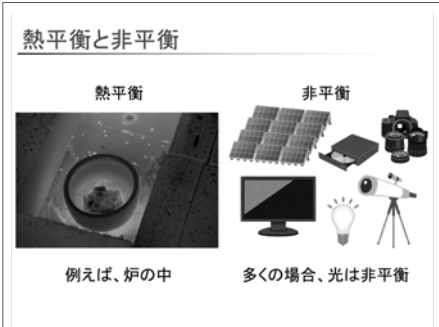
馬場 相転移は100年以上の長きに亘って研究されている分野ですが、物質だけに絞っての議論や研究がほとんどでした。そこに、電磁波が入ってくるわけですので、これによって研究の自由度が一気に広がり、新しい現象の発見に繋がっていくようなことが期待出来ます。

そしてもう1つ、超放射相転移の研究と言うのは、熱平衡の物理と非平衡な光を繋ぐ現象の研究であると言えます。

光の研究は非平衡な状態を扱う分野で、一方、熱力学は熱平衡状態を基本としています。これを少しかみ砕いて言うと、光の温度が何度であるのかは、基本的にはあまり議論されてきませんでし

た。レーザー加工に使われている光が何度なのかと聞くと「温度はありません、定義出来ません」といった答えが返ってくるという感じです。例外的に、炉の中で光を扱う研究については温度を話題にしていたましたが、基本的には光の温度は重要な物とはされていませんでした。

そのように、多くの場合に温度が定義できない光を、今度は定義できる状態に落とし込んで相転移させるという現象が、超放射相転移なのです。その、非平衡と熱平衡を繋ぐ現象が見つかることで、新しい科学的な発見や発想が起こって研究の領域が発展していくということはあるでしょう。



次号「科学の峰々」では、引き続き京都大学 白眉センター 特定准教授 馬場基彰先生にお話を伺います。

未解明の謎「超放射相転移」
社会と科学を革新する
可能性を秘めています

