

● 馬場 基彰 特定准教授 *Motoaki BAMBA (Associate Professor)*

研究課題：超放射相転移の実現と観測に向けて
(Superradiant phase transition; For its realization and observation)

専門分野：物理学（Physics）

受入先部局：理学研究科（Graduate School of Science）

前職の機関名：科学技術振興機構（JST）
(Japan Science and Technology Agency (JST))



私は物理学の中でも、特に電磁波（光）の研究をしています。電磁波は、電場と磁場が空間的・時間的に振動して伝搬してく波です。目に見える電磁波が光と言われます。通信に使われる電波も、電子レンジで使われるマイクロ波も、各自が放出している赤外線も、日焼けを引き起こす紫外線も、レントゲン撮影で使われるX線も、放射性物質から出るガンマ線も、全て電磁波です。一方、磁石からも磁場が出ています。しかし、その磁場は振動していません。私が取り組む超放射相転移とは、基本的に振動している電磁波が、振動しない磁場や電場になる現象です。1973年に理論的に提唱されましたが、これまで観測された例はありません。ただ、この数年で、似たような現象を起こす方法を解明し、それが実際に起こっている物質も確認できてきました。今後、実際に電磁波が静止する超放射相転移を実現し、観測していきたいと思います。そうすると、熱いから光するというのを越えた光を、熱から直接発生させられ、それによって世界的なエネルギー消費を改善できるのではと考えています。

電磁場と物質は相互に作用し合う

秒速 30 万キロメートルで伝搬する電場と磁場の波である電磁波は、電波からガンマ線まで、振動数は異なるものの、全て同じ物理の法則に従っています。例えば、コイルに電流を流すと磁場が発生します。図1のように、中央のコイルにて電流の向きを交互に変えれば（振動させれば）、発生する磁場もまた振動し、それと共に電磁波（電波）が放出されます。一方、コイルに磁石などを近づけると電流が流れます。図1の右のコイルのように、磁石の代わりに、電磁波の磁場を感じても

I am studying the physics, especially the electromagnetic wave, which is the wave of electric and magnetic fields oscillating spatially and temporally. The light is the electromagnetic wave to be seen by our eyes. The radio wave, microwave, infrared light, ultraviolet light, X ray, and gamma ray are all electromagnetic waves. On the other hand, a static (temporally non-oscillating) magnetic field emerges from a magnet. The superradiant phase transition (SRPT) means a spontaneous appearance of a static electromagnetic field owing to an interaction between the electromagnetic wave and matters. Unfortunately, the SRPT has not yet been observed since its first proposal in 1973. In my recent theoretical and experimental studies with my collaborators, we have found analogues of the SRPT in superconducting circuits and magnetic materials. We are now trying to realize and observe the original SRPT. There should be a possibility that we can directly convert the heat energy to coherent electromagnetic waves, such as the laser light, by controlling the SRPT. Thus, the realization and observation of the SRPT have a potential to contribute to the problem of the increasing energy consumption in the world.

電流が生じます。このように、電磁場と物質（ここではコイル中の電流）は相互に作用し合います。

超放射相転移とは

さて、コイルに電流を流さず、電磁波も全く照射しない場合は、どうなるでしょうか？コイルの温度が十分高ければ、コイル内の電子が熱によって乱雑に動き回ります。この電子の運動は図2左のようにコイルに乱雑な電流を生み出し、それと同時に電磁波を放出します。これは熱輻射（黒体輻射、熱放射）と呼ばれ、

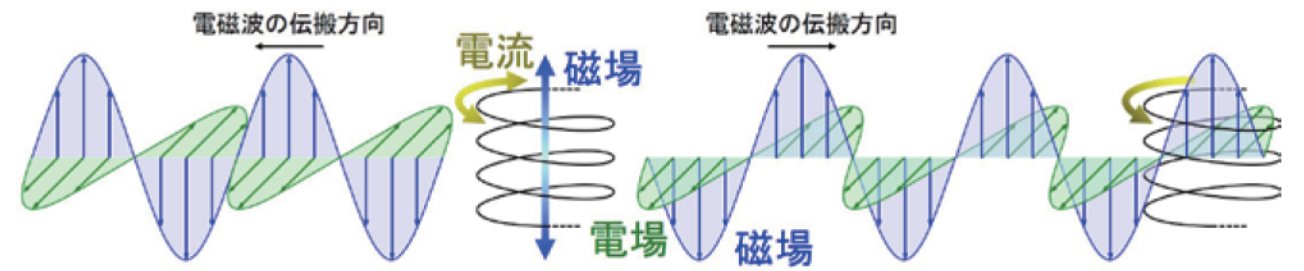


図1：コイルに流す電流の向きを交互に変えると電磁波が放出される。一方、電磁波が来るとコイルには電流が流れる。このように、電磁場とコイル中の電流は相互に作用し合う。

白熱電球や太陽が光ののと同じ原理ですが、発生する電磁波もまたある種、乱雑なものです。超放射相転移とは、コイルの温度がある値よりも低くなると、図2右のように、全てのコイルで同じ方向に電流が流れ、同時に均一で振動しない磁場が発生するような現象です。一般に相転移とは、大気圧下で水が0℃で氷になるように、温度によって物質の状態が変化する現象です。例えば、フェライト磁石はその外部に磁場を発生させますが、460℃より高温では磁石でなくなってしまうことが知られています。相転移は通常、水分子同士や磁石を構成する原子（がそれぞれ有しているスピンと呼ばれる磁気モーメント）同士の相互作用によって起こります。超放射相転移については、電磁場と物質との相互作用がその起源となります。つまり、電流や磁場が自発的に現れてお互いを支え合った方が、全体として安定になる（エネルギーが低い状態になる）ことが起源となります。

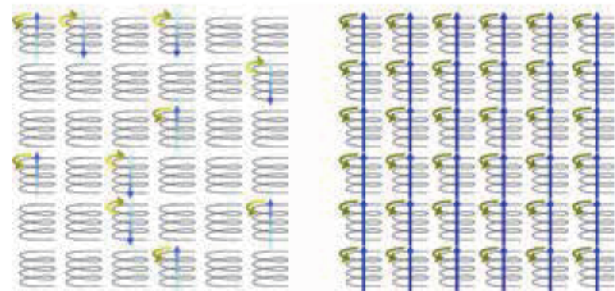


図2：(左) コイル中の電子の熱運動によって、乱雑な電流と磁場が生じ、乱雑な電磁波が放出される。(右) 全てのコイルで同じ向きに電流が流れ、均一な磁場が発生した状態。温度が下がることで、(左)の乱雑な状態から(右)のような状態に変化することが、超放射相転移と呼ばれる。

超放射相転移を起こすには

超放射相転移は1973年に提唱されたものの、いまだ観測された例がありません。残念ながら、これまでの研究で、図2で考えた単純なコイルのようなものでは、超放射相転移は起きないことが指摘されています。一

方で、どんな物質でも超放射相転移が絶対に起きないと証明されたわけではありません。私はこれまで、超伝導体で構成されたコイルを含む電気回路であれば、超放射相転移に類似の相転移が起きることを理論的に示してきました（参考文献1）。さらに、ErFeO₃という磁性体でも、類似の相転移が起きていることを実験的・理論的に確認してきました（参考文献2）。他の研究グループからの最近の報告では、電流とスピンとが相互に作用する物質では、超放射相転移が起きてもよいことが理論的に示唆されています。これらの研究結果を参考に、実際に磁場などが現れる超放射相転移の実現を目指します。また、実現したことを観測することも肝心です。これまでの研究で、超放射相転移が起き際には、電磁場の揺らぎが強く抑制されることを理論的に見いだしてきました（参考文献3）。現在机を借りている京都大学光物性研究室にて、電磁場揺らぎの抑制を実験的に観測することで、超放射相転移が確かに起きていることも観測していきます。

参考文献

- 1.M. Bamba, K. Inomata, and Y. Nakamura, *Superradiant Phase Transition in a Superconducting Circuit in Thermal Equilibrium*, Phys. Rev. Lett. **117**, 173601 (2016).
- 2.X. Li, M. Bamba, N. Yuan, Q. Zhang, Y. Zhao, M. Xiang, K. Xu, Z. Jin, W. Ren, G. Ma, S. Cao, D. Turchinovich, and J. Kono, *Observation of Dicke cooperativity in magnetic interactions*, Science **361**, 794 (2018).
- 3.K. Hayashida, T. Makihara, N. M. Peraca, D. F. Padilla, H. Pu, J. Kono, and M. Bamba, *Perfect Intrinsic Squeezing at the Superradiant Phase Transition Critical Point*, arXiv:2009.02630 [quant-ph].