

# ボース・アインシュタイン凝縮による超伝導を初めて確認

極限コヒーレント光科学研究センター 岡崎 浩三

## 研究背景

多くの超伝導体は、Bardeen-Cooper-Schrieffer によって提唱されたいわゆる BCS 理論によって理解される。BCS 理論は電子対の起源である電子-格子相互作用が摂動で扱える弱結合の場合を扱う理論であるが、強結合の場合、超伝導はボース-アインシュタイン凝縮によって実現されると考えられている。さらに、図 1 に示すように、弱結合の BCS 超伝導と強結合の BEC 超伝導は、BCS-BEC クロスオーバーを経て連続的につながっている[1]。BCS-BEC クロスオーバーは、フェルミ粒子のペアリングと凝集の理解に非常に重要と考えられるが、ペアリングの強さを制御するには2つのフェルミ粒子間の相互作用をコントロールする必要がある。極低温原子系の場合、この制御は磁場をかけることによる Feshbach 共鳴によって可能になる。固体中の電子における BCS-BEC クロスオーバーの実現は、様々な観点から非常に興味深い。例えば、図 2 に示すように、超伝導状態における Bogoliubov 準粒子(Bogoliubov quasiparticle, BQP)のバンド分散は、BCS 超伝導では特徴的なバックベンディング型の分散になるが、クロスオーバー領域ではフラットバンドになり、BEC 超伝導では、 $k = 0$  でギャップが最小になる上凸型の分散になる、というような違いが見られることが期待される。さらに、BEC 超伝導では、その転移温度  $T_c$  のフェルミ温度  $T_F$  に

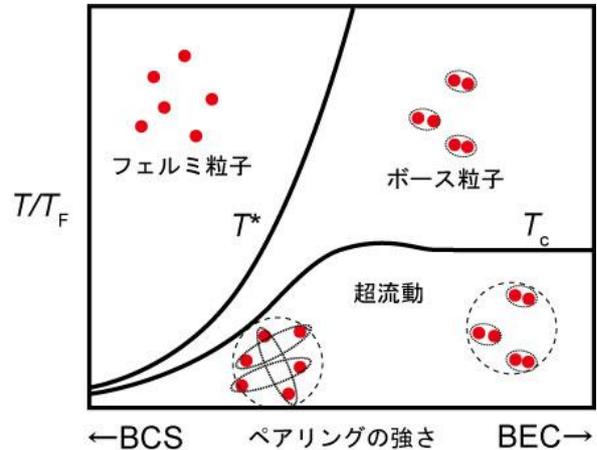


図 1: BCS-BEC クロスオーバーの相図。  $T_c$  および  $T^*$  はそれぞれ凝集温度とペア形成温度。ペアリングの強さが強くなると  $T^*$  と  $T_c$  が乖離し、 $T^* > T > T_c$  の温度領域において擬ギャップが現れることが期待される。

対する比  $T/T_F$  (もしくは  $T_c$  に比例すると考えられる超伝導ギャップの大きさ  $\Delta$  と  $T_F$  に比例するフェルミエネルギー  $\epsilon_F$  の比  $\Delta/\epsilon_F$ ) が大きくなることから、BEC 超伝導はフェルミ温度を基準として“高温”超伝導であると言える。この超伝導メカニズムがより高いフェルミ温度を持つ物質で実現できるようになれば、より高い温度での超伝導が実現できる可能性もあり、BEC 超伝導の実現はより高い温度での超伝導実現に非常に重要であると考えられる。しかし

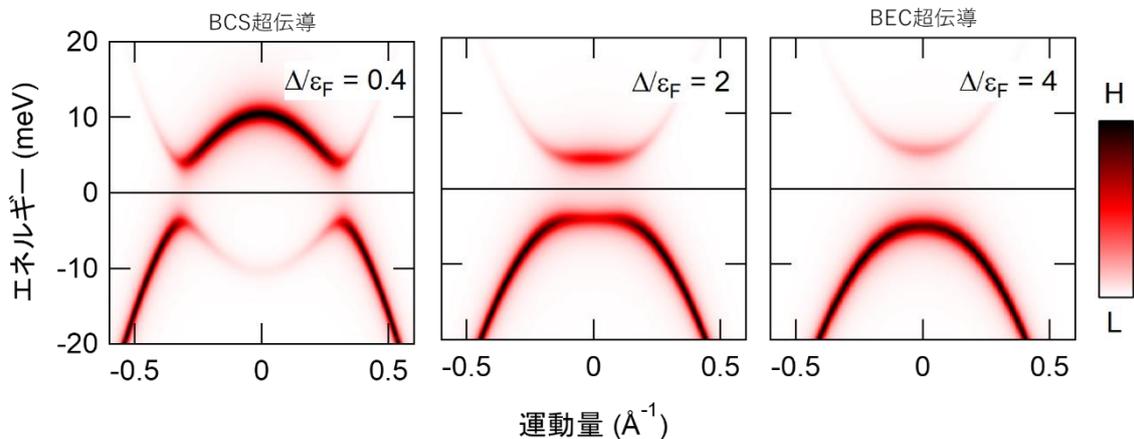


図 2: BCS 超伝導、クロスオーバー領域、BEC 超伝導における準粒子のバンド分散。BCS 超伝導では、バックベンディング型のバンド分散となり、 $k = 0$  近傍において下凸の分散になるが、クロスオーバー領域ではフラットバンドになり、BEC 超伝導では上凸の分散になることが期待される。



超伝導実現のメカニズムに大きく関わっていると考えられる。

## 考察

以上の結果から、 $x = 0.21$  は BEC 超伝導に特徴的な上凸の BQP バンド分散を示し、EDC の温度変化からは  $x = 0.21$  のみ擬ギャップを示すことがわかり、 $x = 0.21$  において BEC 超伝導が実現していることが確認された。一方で、ペアリングの強さの指標となる  $\Delta/E_F$  の S 置換量依存性を見ると、単一バンドの場合での理論からの予想に反して、S 置換とともに  $\Delta/E_F$  が小さくなることがわかった。我々は、 $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$  における BCS-BEC クロスオーバーのメカニズムを次のように考察した。図 2 を見るとわかるように、 $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$  では Brillouin ゾーン中心付近にフェルミ準位 ( $E_F$ ) を横切る  $\alpha$  バンドの直下にもう一本ホールバンド ( $\beta$  バンド) が存在する。 $\alpha$  バンドと  $\beta$  バンドはスピン-軌道相互作用が存在しなければ  $\Gamma$  点において縮退すると考えられるが、実際にはスピン-軌道相互作用によって縮退が解けている。さらに、 $\text{FeSe}$  においては、 $T_s = 90 \text{ K}$  の構造相転移温度以下において、電子ネマティック相と呼ばれる、電子系が自発的に 4 回対称性を破り 2 回対称になることで、 $\alpha$  バンドと  $\beta$  バンドの分裂幅が大きくなることが知られている [10]。 $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$  の電子ネマティック相への転移温度は、S 置換と共に低くなり、 $x = 0.17$  で転移温度が  $0 \text{ K}$  となる電子ネマティック臨界点が存在し、 $x > 0.17$  においては最低温においても 4 回対称を保った正方晶となる。 $x = 0.21$  では電子ネマティック転移が抑制されていることから、 $\alpha$  バンドと  $\beta$  バンドの分裂はスピン-軌道相互作用からの寄与のみとなり、 $\alpha$  バンドの頂上の位置から見積もられる  $\varepsilon_F$  が、 $E_F$  と  $\beta$  バンドの頂上の位置の差よりも大きくなる。このことは、 $x = 0.21$  における超伝導状態において、 $\alpha$  バンドがバックベンディング型の BQP バンド分散を示すと、 $\beta$  バンドと混成し得ることを意味する。つまり、 $x = 0.21$  においては、超伝導状態で  $\beta$  バンドもペアリングに寄与できると考えられ、このことによって  $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$  では S 置換とともにペアリングが強くなっていると考えられる。 $\alpha$  バンドと  $\beta$  バンドの分裂幅は  $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$  における電子ネマティシティによって決まると考えられることから、 $\text{FeSe}_{1-x}\text{S}_x$  における BCS-BEC クロスオーバーは電子ネマティシティによって制御されている、と結論づけることができる。

## 謝辞

本研究は以下の方々(橋本 嵩広、大田 由一、都築 章宏、長島 椿、福島 昭子、笠原 成、松田 祐司、松浦 康平、水上 雄太、芝内 孝禎、辛 埴 各氏)との共同研究です。また、文部科学省科学研究費補助金 新学術領域(研究領域提案型)「量子液晶の物性科学」(JP19H05824, JP19H05826)、「トポロジーが紡ぐ物質科学のフロンティア」(JP15H05852)、JSPS 科研費 (JP19H00651, JP19H01818, JP18H05227, JP19H00649, JP18H01177, JP18K13492, JP20H02600) の助成のもとに行われました。

## 参考文献

- [1] M. Randeria and E. Taylor, *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **5**, 209 (2014).
- [2] T. Shimojima *et al.*, *Sci. Adv.* **3**, e1700466 (2017).
- [3] H. Miao *et al.*, *Nat. Commun.* **6**, 6056 (2015).
- [4] S. Rinott *et al.*, *Sci. Adv.* **3**, e1602372 (2017).
- [5] Y. Lubashevsky *et al.*, *Nat. Phys.* **8**, 309 (2012).
- [6] F.-C. Hsu *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **105**, 14262 (2008).
- [7] A. E. Böhrer *et al.*, *Phys. Rev. B* **87**, 180505 (2013).
- [8] S. Kasahara *et al.*, *Proc. Natl. Acad. Sci. U.S.A.* **111**, 16309 (2014).
- [9] T. Hashimoto *et al.*, *Sci. Adv.* **6**, eabb9052 (2020).
- [10] M. D. Watson *et al.*, *J. Phys. Soc. Jpn.* **86**, 053703 (2017).