

# 超伝導転移温度の高さと 電子対の強さをつなぐ法則を発見

～ 回転する電子対による超伝導の核心部分に光明 ～

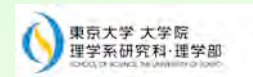
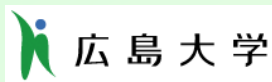
広島大学 大学院理学研究科 井野明洋

大阪府立大学 大学院工学研究科 安齋太陽



広島大学放射光科学センター 有田将司、生天目博文、谷口雅樹

東京大学 大学院理学研究科 石角元志、藤田和博、石田茂之、内田慎一



## 本研究成果の要点

2

超伝導転移温度 $T_c$ と、超伝導を担う電子対の強さ $\Delta$ を  
つなぐ法則を発見

$$8.5k_B T_c = 2\Delta_N \propto \Delta^* \sqrt{\rho_s}$$

- 回転する強い電子対による超伝導の**核心部分**を捉えました。
- 高温超伝導による**無損失の電線材料**や、  
さらなる**高温超伝導物質**の開発を導く**強力な指針**に。

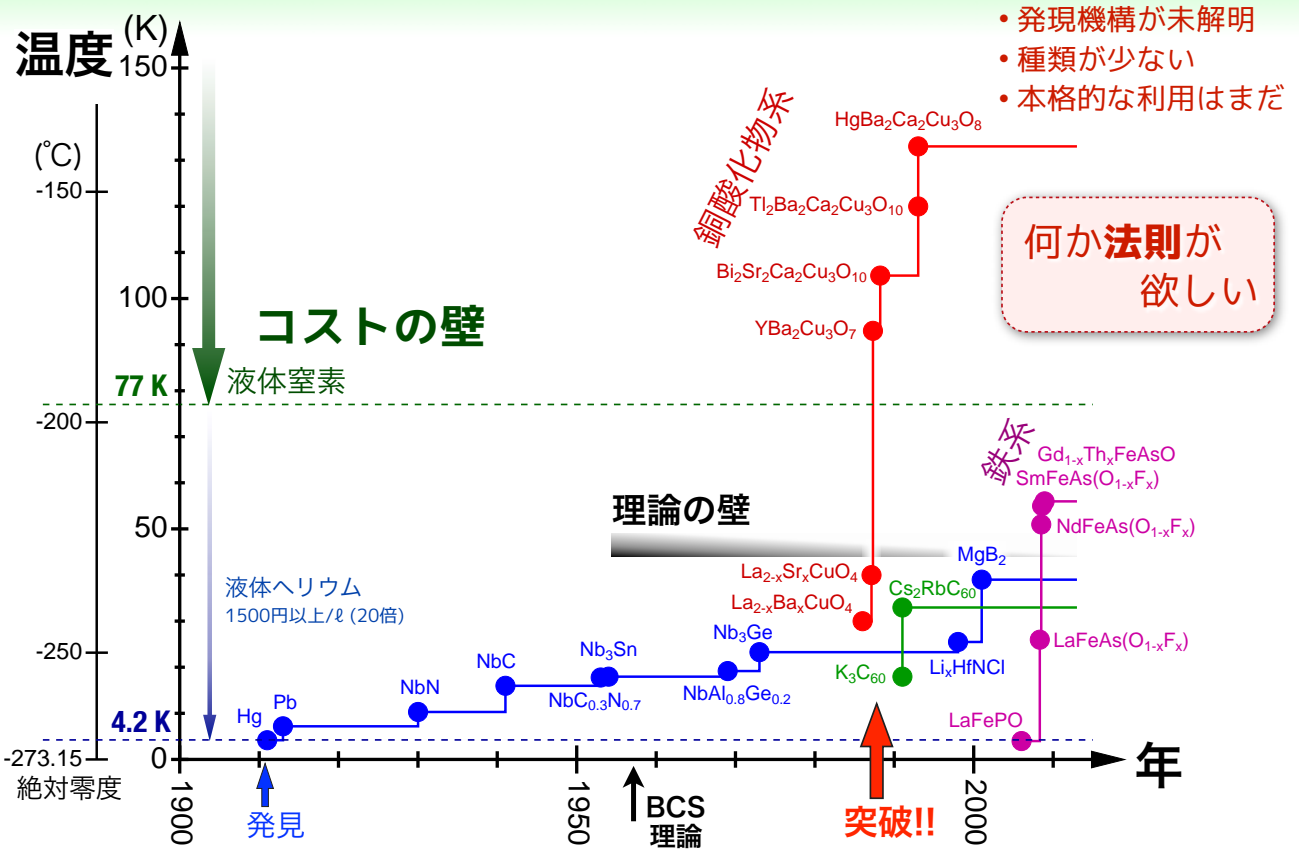
# 電力問題と超伝導技術

- 送電による電力損失は、総発電量の **5%以上**
- 電力の需要は、昼夜比 **2倍以上**
- 太陽光や風力による発電は、時間や地域で **大きく変動**

無損失電力輸送

無損失電力貯蔵

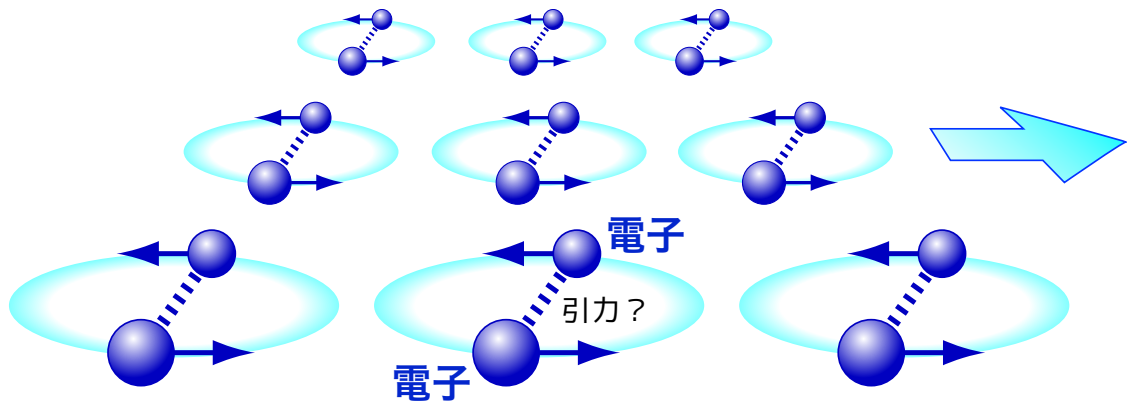
# 壁を越える高温超伝導



- 発現機構が未解明
- 種類が少ない
- 本格的な利用はまだ

# なぜ電気抵抗が消えるのか？

5

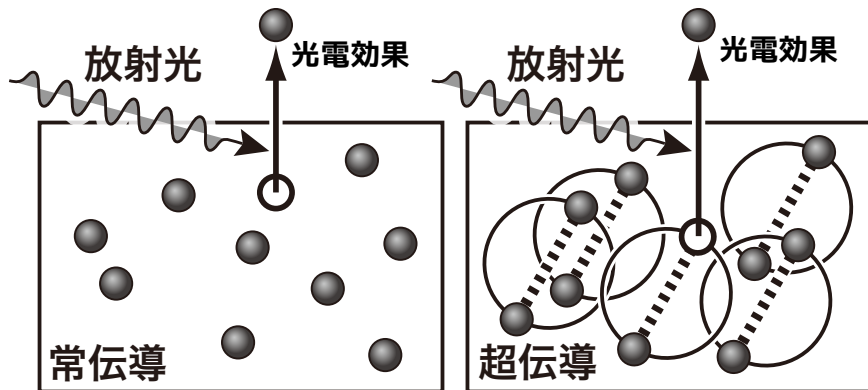
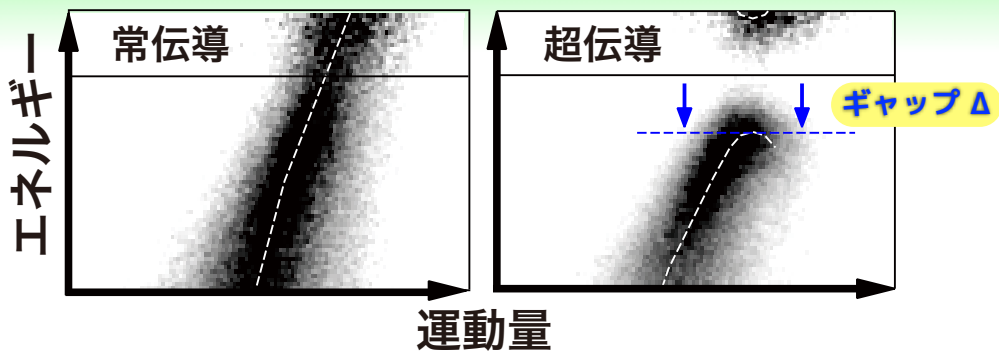


電子は排他的、電子対は協調的。 電子対は、他と同じ動きを好む。  
集団でそろって動いているときは、ひとりで勝手に停まらない（抵抗ゼロ）

**超伝導は、一糸乱れぬ電子対の踊り**

# 電子対の強さ

6



電子を引きはがすのに必要なエネルギー = **超伝導ギャップ  $\Delta$**

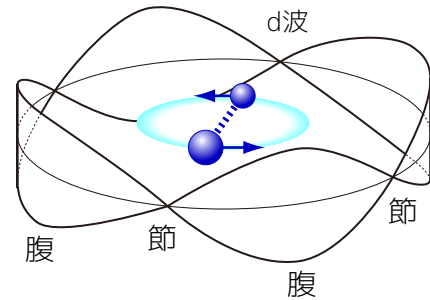
## ギャップ、高温超伝導の最大の謎

- 本来、ギャップ  $\Delta$  は  
転移温度  $T_c$  に**比例する**はずだが、  
高温超伝導体では、両者が**全く異なる傾向**を示す  
ことがある。**関係式が不明**。

$$2\Delta = 4.3k_B T_c$$

弱結合平均場近似 (d波)

- 電子対の回転と波動性から、  
ギャップに**節**と**腹**が生じる。  
**異方的な発達**が混乱に拍車。



四半世紀の研究活動は、**ギャップの正体**の解明に集約される。

## 問題点と戦略

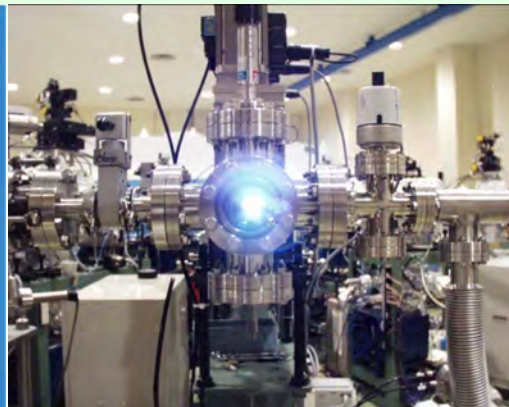
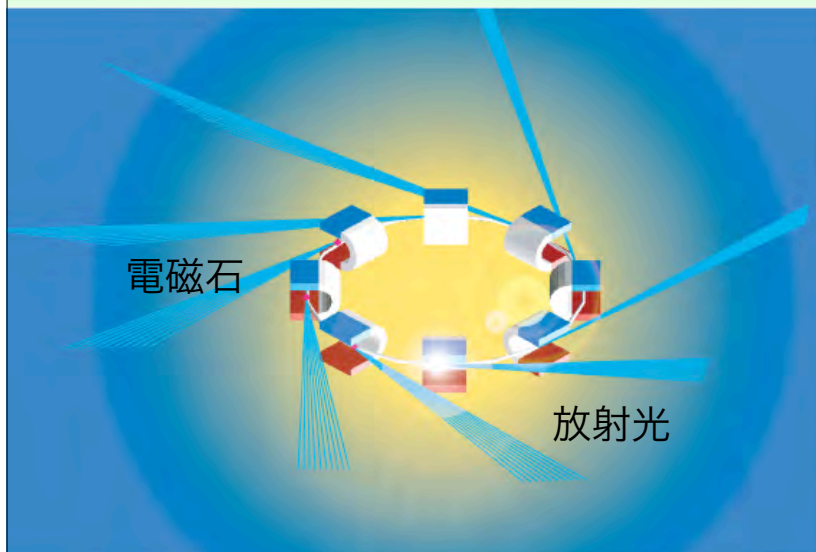
- ギャップ  $\Delta$  と転移温度  $T_c$  の間の関係が、  
はっきりしない。
- ギャップ  $\Delta(\theta)$  の中でも、それぞれの方向の  
間の関係が、よくわからない。



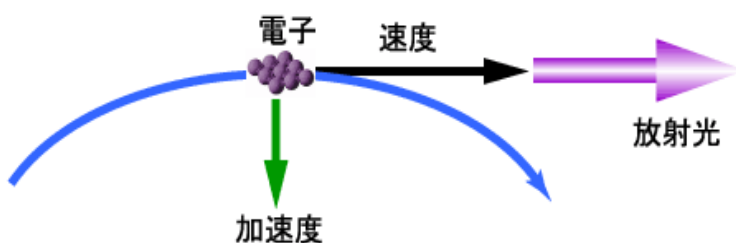
放射光を利用して、超伝導ギャップの  
**高分解能、全方位画像**

## 「夢の光」 放射光

9



光速に近い高エネルギーの電子が磁場によって軌道を曲げられるとき、軌道の接線方向に強力な光を発生します。



## 放射光の特長

10

- **連続性** : 可視～X線のすべてを含む連続光
- **大強度** : 人類が手に入れた最も強力な連続光
- **偏光性** : 優れた偏光特性
- **高指向性** : 平行な放射光ビーム
- **標準光源** : 理論に従う放射特性 (放射標準)
- **清浄性** : 超高真空中で発生



# 広島大学放射光科学研究センター Hiroshima Synchrotron Orbital Ring



11

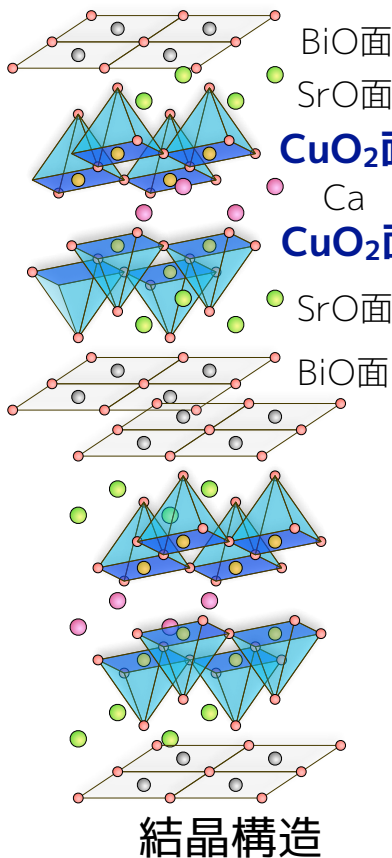
国立大学法人として唯一の放射光施設



- 物質科学研究の推進
- 放射光科学分野の人材育成

## ビスマス系銅酸化物

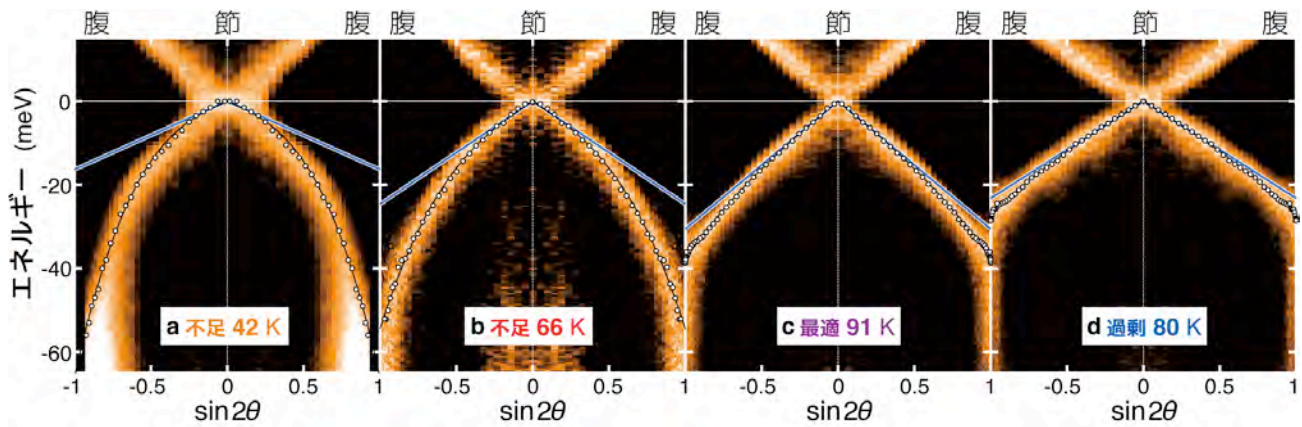
12



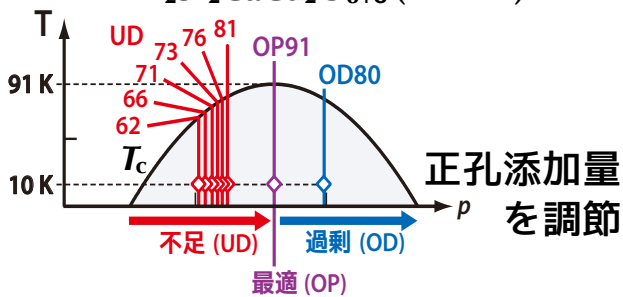
$$T_c^{\max} = 91 \text{ K}$$

- 液体窒素温度 (77 K, -196°C) を上回る **高温超伝導体**。
- **電線材料**として開発が進展。
- **臨界電流密度の高い丸線材**に加工できる **唯一の酸化物超伝導線材**。
- **超伝導電力貯蔵**に用いる線材として最有力候補。

# 超伝導ギャップの高分解能、全方位画像



Bi<sub>2</sub>Sr<sub>2</sub>CaCu<sub>2</sub>O<sub>8+δ</sub> (Bi2212)



節の極近傍の  
ギャップの傾き  $\Delta_N$  を  
精密に決定

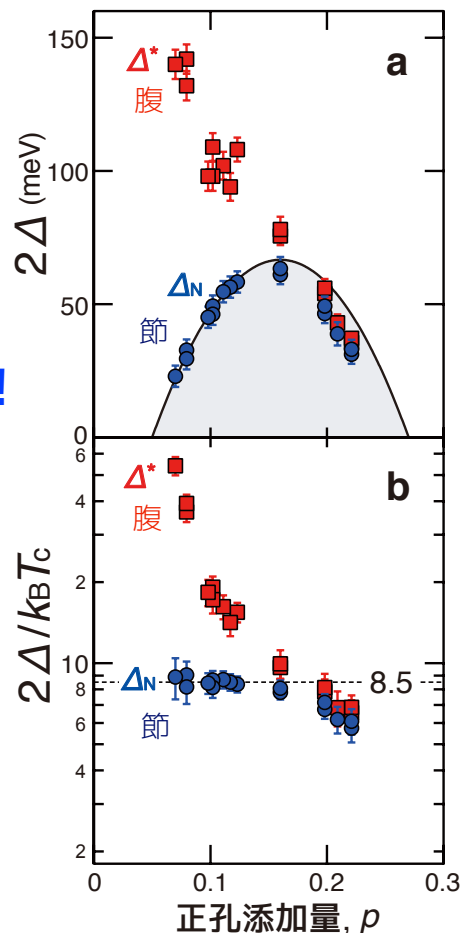
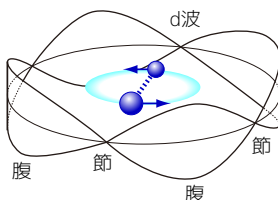
## 超伝導転移温度 $T_c$ との関係

ギャップの節の傾き      超伝導転移温度

$$2\Delta_N = 8.5k_B T_c$$

新しい形で**比例関係が復活!**

- $2\Delta/k_B T_c$  比が標準値 4.3 より大きい。  
電子対は、**非常に強く**壊れにくい。
- 熱に対して最も弱い  
超伝導ギャップの  
節の周辺だけが、  
 $T_c$  と関係する。



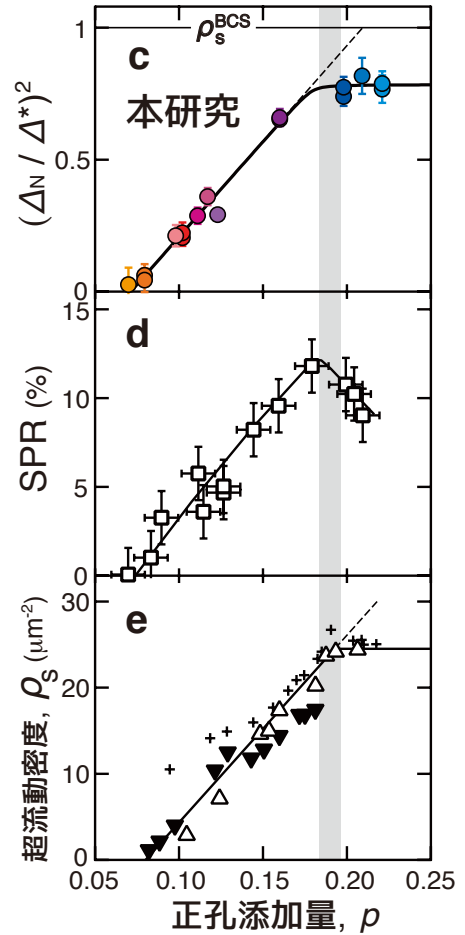
# 超流動密度 $\rho_s$ との関係

運動状態のそろった電子対の密度を、**超流動密度**と呼ぶ。

節のギャップの減少比      超流動密度

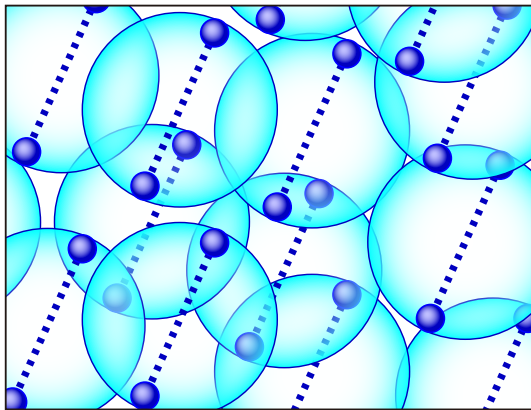
$$\frac{\Delta_N}{\Delta^*} \propto \sqrt{\rho_s}$$

謎の動きをしていた  
ギャップの腹の振幅  $\Delta^*$  も、  
間接的に、超伝導転移温度  $T_c$   
と関係している

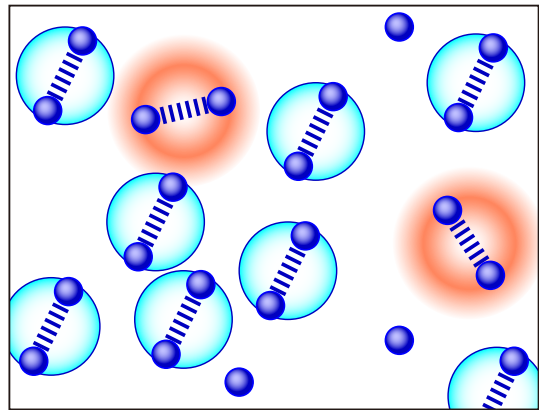


# 強い電子対による超伝導

弱結合



強結合



秩序を乱す電子対

ギャップの正体 { 腹の振幅  $\Delta^*$  が、電子対**形成**のエネルギー  
節の傾き  $\Delta_N$  が、電子対**凝縮**のエネルギー

回転する強い電子対による超伝導機構の**核心部分**に光明



## 解釈を越えて（波及効果）

17

$$8.5k_B T_c = 2\Delta_N \propto \Delta^* \sqrt{\rho_s}$$

超伝導現象を左右する基本量  $T_c$ 、 $\Delta(\theta)$ 、 $\rho_s$  を結びつける簡潔な式

▶ 高い普遍性と実用性

- 超伝導現象やボーズ凝縮についての研究活動を刺激
- さらなる高温超伝導物質の探索
- 超伝導材料の応用開発：
  - 超伝導送電線
  - 超伝導電力貯蔵

見通しや狙いをつけるときの

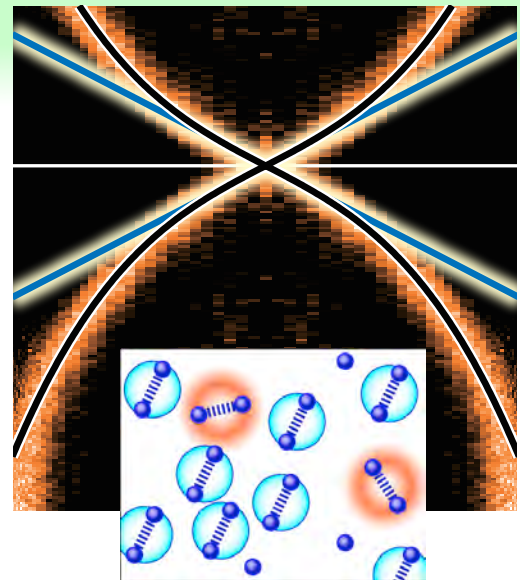
強力な指針として期待されます

## 本研究成果のまとめ

18

超伝導転移温度と、  
超伝導を担う電子対の強さを  
つなぐ法則を発見

$$8.5k_B T_c = 2\Delta_N \propto \Delta^* \sqrt{\rho_s}$$



- 回転する強い電子対による超伝導の核心部分を捉えました。
- 高温超伝導による無損失の電線材料や、さらなる高温超伝導物質の開発を導く強力な指針に。