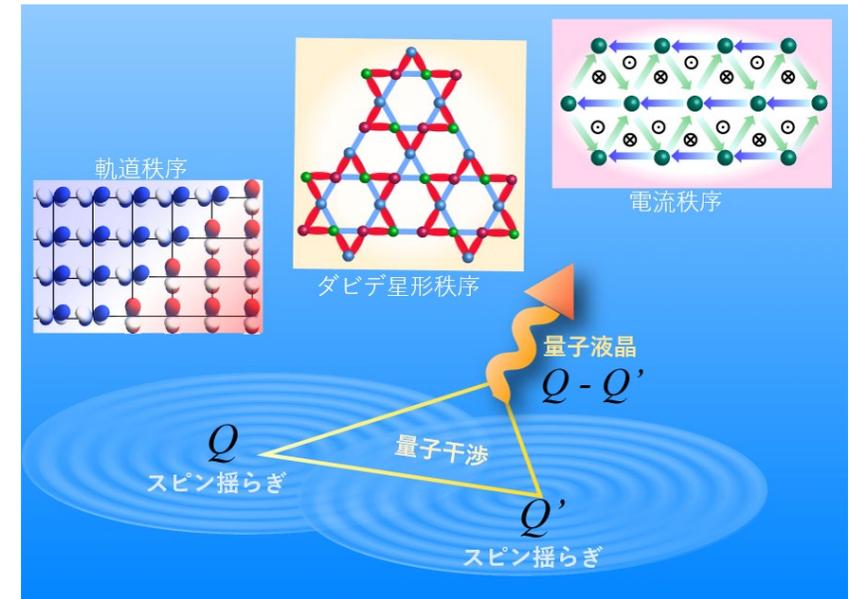


# 凝縮系物理学への招待：超伝導・量子液晶・幾何学効果

物理学概論I,II 2024年6月10日 紺谷浩(Sc研)

量子相転移(量子液晶)



本講義の感想を400字程度でまとめてください。その際に、授業で印象に残った物理用語（例えば、量子力学、統計力学、電子相関、クーパ対、量子相転移、幾何学的フラストレーション、トポロジーなど）を織り交ぜてください。

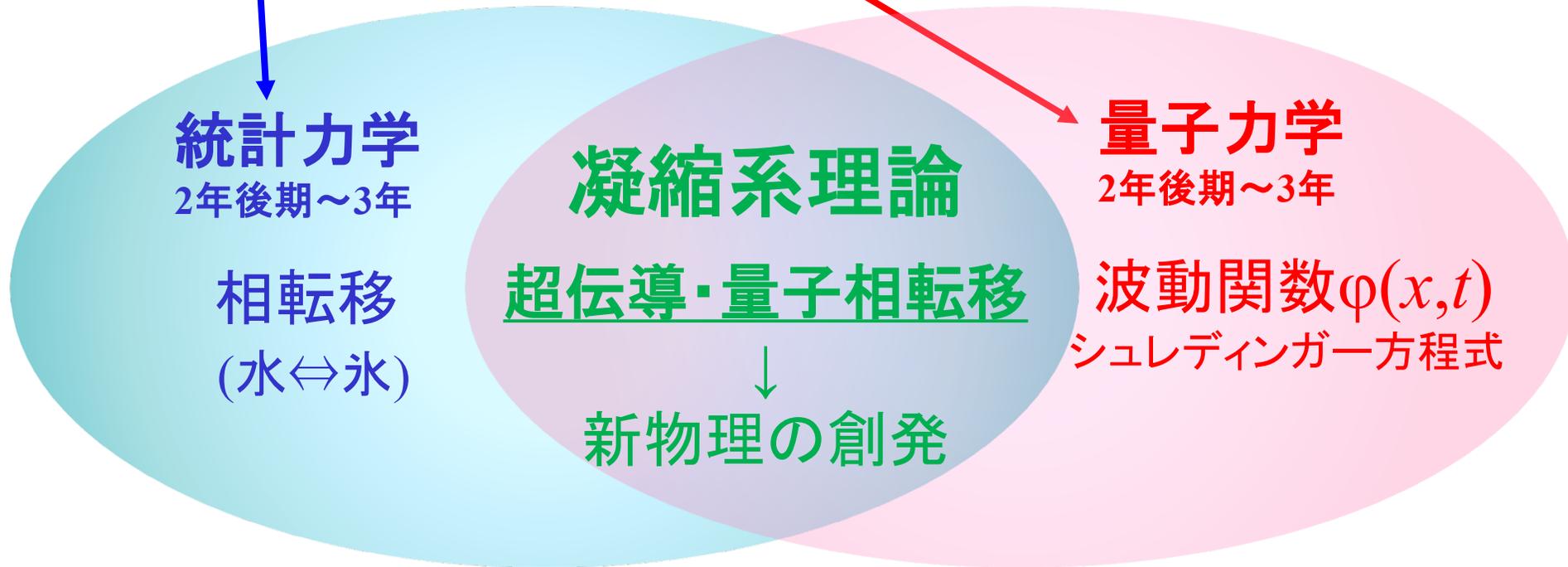
レポート問題

もし質問があれば記してください。

# 凝縮系理論とは？

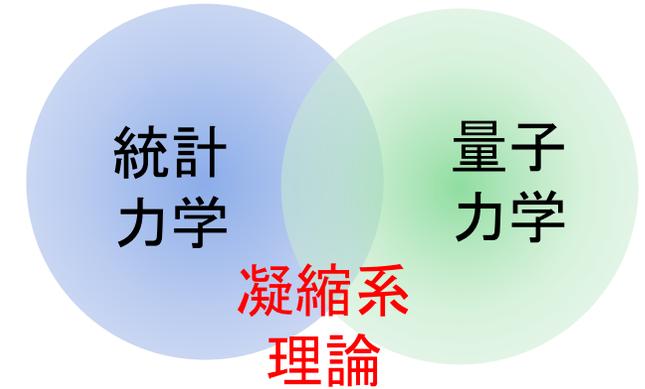
「多数の量子的粒子」が集まると、予想外の物理現象や  
物理法則が発現 本講義の主題

More is different (P.W. Anderson)



# 凝縮系理論研究室 (Sc研)

「**無数の量子的粒子**」が織りなす新現象・新概念を追求

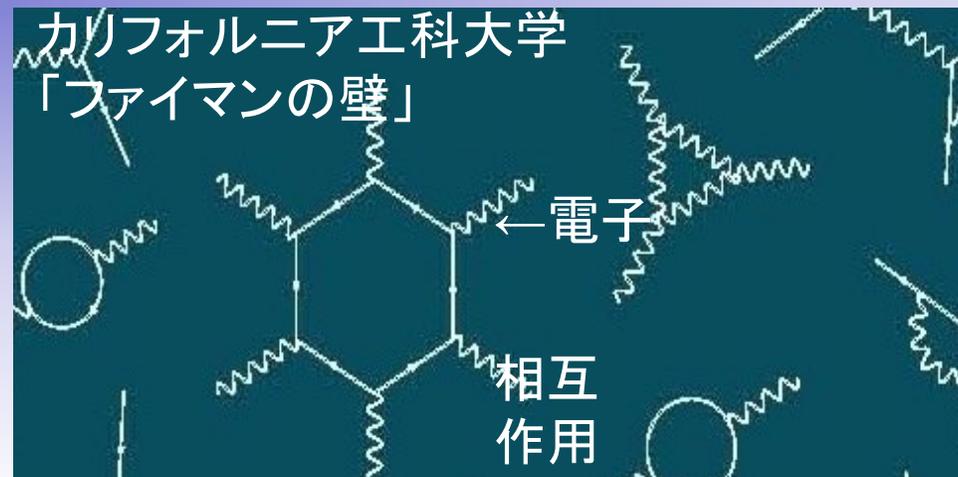


主な研究対象

(高温)超伝導体をはじめ各種  $p, d, f$  電子系の  
**強く相互作用する電子系の創発現象**を研究しています。



ファイマン博士



理論研究のツール

**場の量子論**

→ Feynman diagram  
を駆使して金属電子  
の謎を解明！

# 量子力学の世界：不確定性原理

4

$$\Delta x \cdot \Delta v \sim h/m$$

$h$ はプランク定数

$\Delta x$ :位置の不確定性

$\Delta v$ :速度の不確定性

粒子の位置を正確に決めることはできない。

$\Delta x=0$ の場合、 $\Delta v=\infty$ ゆえに運動エネルギーが発散。

# 量子力学の世界：不確定性原理

5

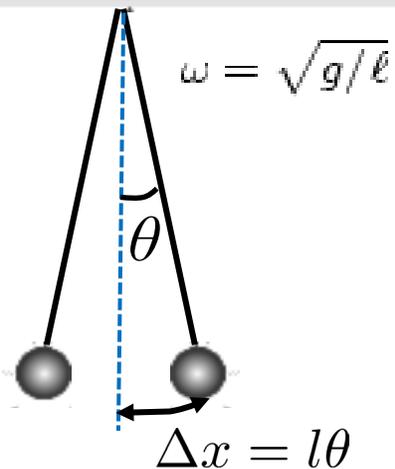
$$\Delta x \cdot \Delta v \sim h/m$$

$h$ はプランク定数

$\Delta x$ : 位置の不確定性

$\Delta v$ : 速度の不確定性

振り子(調和振動子)



$$l\sqrt{\langle \theta^2 \rangle} = \sqrt{\frac{\hbar}{m\omega}}$$

最低エネルギー状態

①古典力学:  $\theta=0$ で静止

②量子力学:  
静止不可能:  $\Delta x \sim \sqrt{\langle \theta^2 \rangle} \neq 0$   
= 零点振動 or 量子揺らぎ

金属中では様々な量子揺らぎが存在!

→超伝導の起源

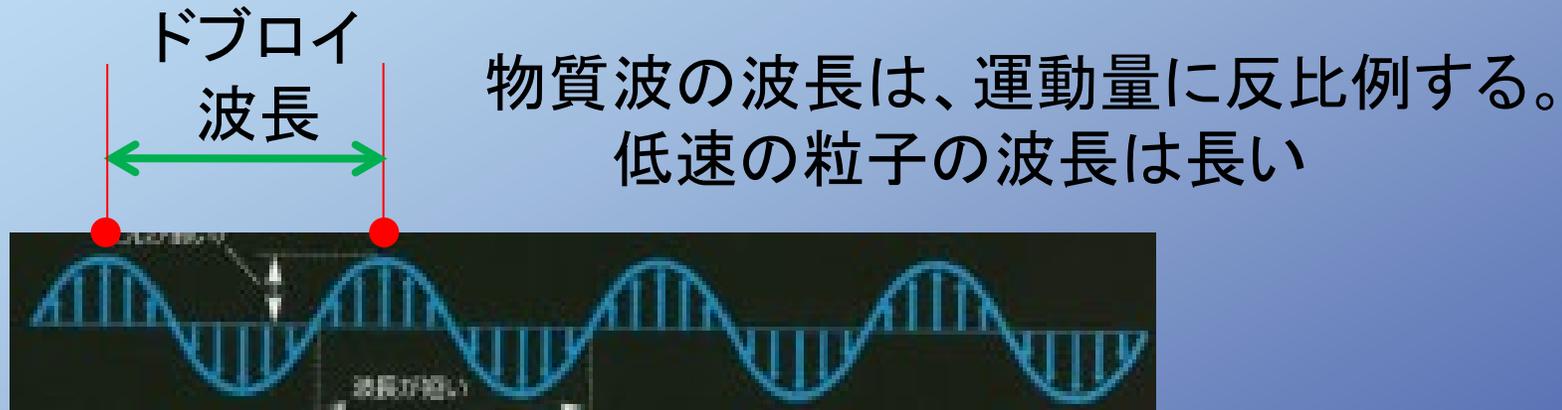
# 粒子性と波動性

アインシュタイン(1905)

光は波(電波)であると同時に、粒子(光子)でもある。

ド・ブロイ(1924)

電子は粒子であると同時に、波(物質波)でもある⇒量子力学

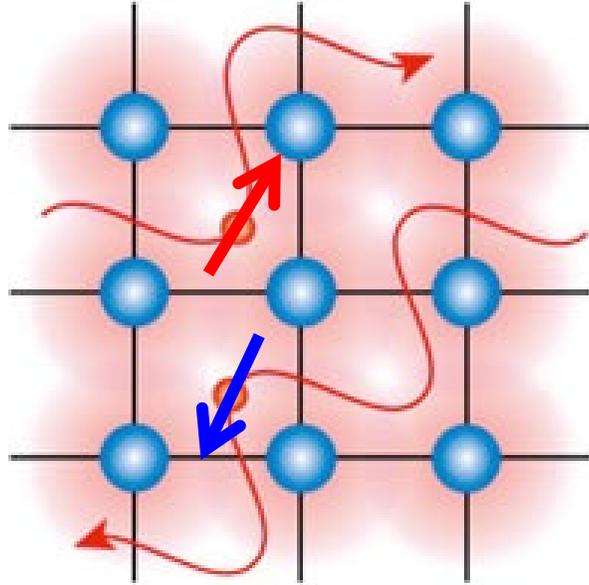


- ・金属中の電子(高速)のドブロイ波長 $\sim 1\text{\AA}=10^{-8}\text{cm}$
- ・クーパー対(運動量 $\sim 0$ )のドブロイ波長 $> 1\text{cm}$

巨視的量子現象

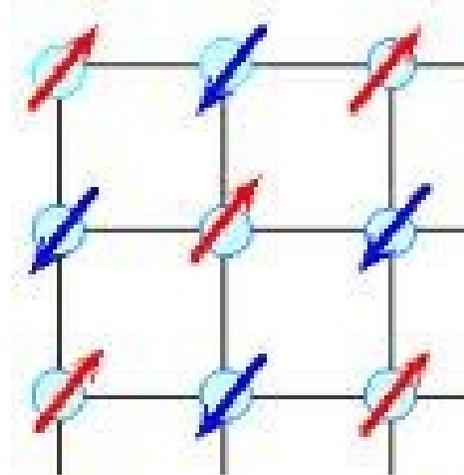
# 多彩な電子状態

金属  
電子の液体



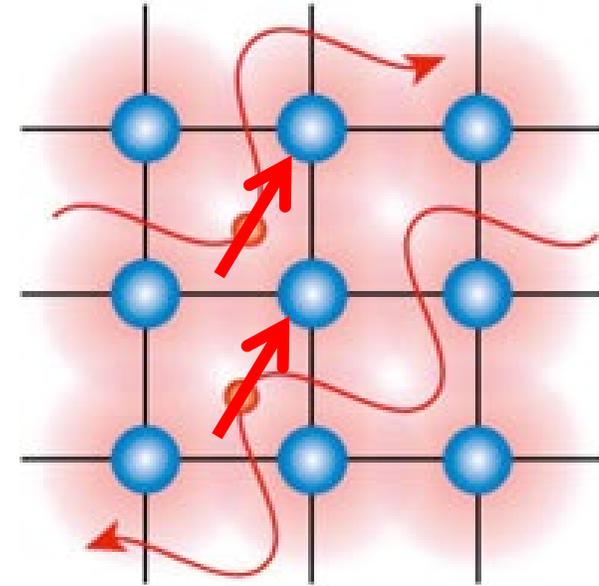
↑電子と↓電子が  
波として伝搬

絶縁体  
電子の固体



電子が局在  
粒子描像

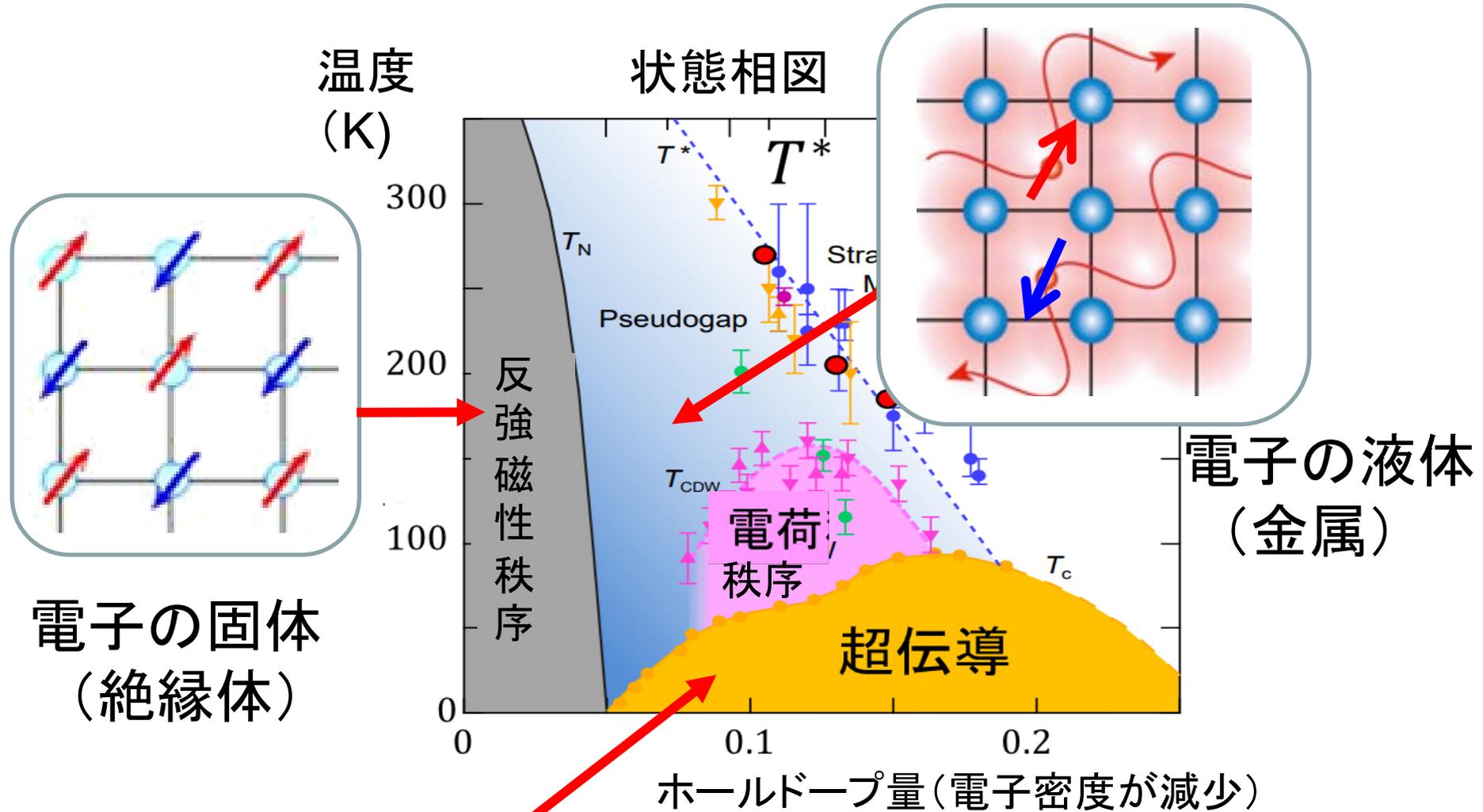
強磁性金属  
液体相その2



↑電子のみ伝搬

超伝導を絵で表すと??

# 多彩な電子状態：銅酸化物高温超伝導体



超伝導 = 摩擦がゼロの液体 (巨視的量子現象)

# 超伝導=クーパー対の形成 BCS理論

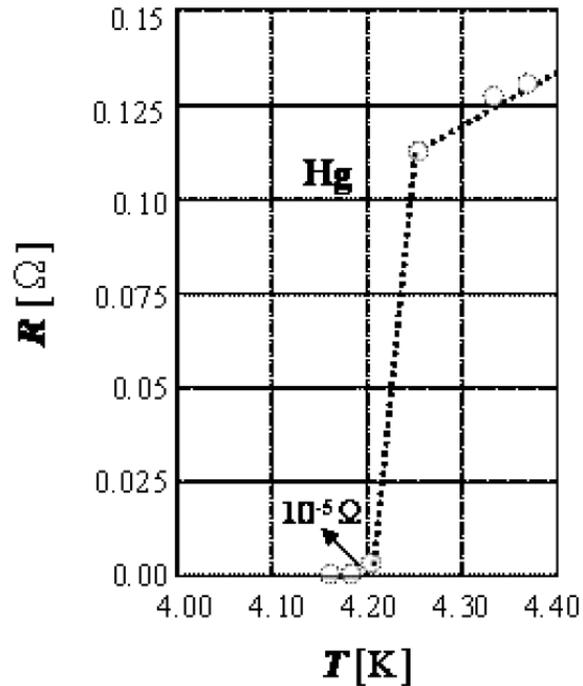
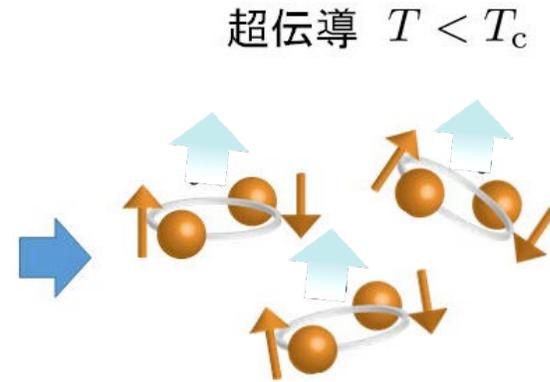


Fig.1 水銀 (Hg) の電気抵抗の温度変化



クーパー対はボース粒子。  
超伝導=ボース凝縮！



左から  
J. Bardeen (当時49),  
L.N. Cooper (PD),  
R. Schrieffer (大学院生)

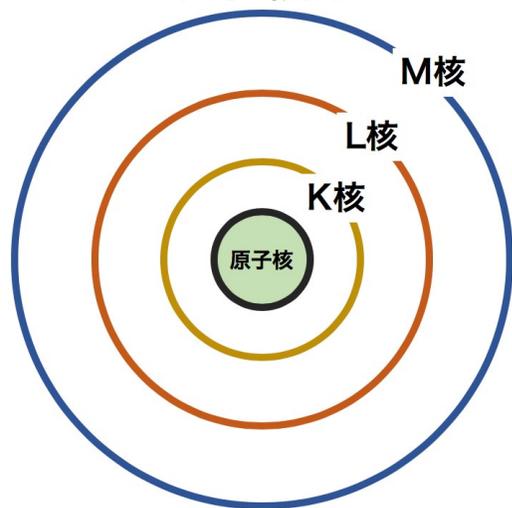
1972年に受賞  
(Bardeenは1956年にも受賞)

# 量子力学の基礎: フェルミ粒子とボース粒子

## 量子力学

- ・電子は波である
- ・状態が離散化する

### 原子軌道



- K核: 1状態 × 2
- L核: 4状態 × 2
- M核: 9状態 × 2

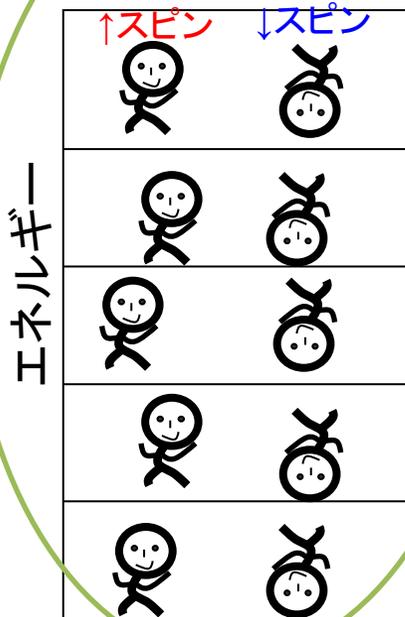
電子の収容数には上限がある

## 粒子には2種類ある!

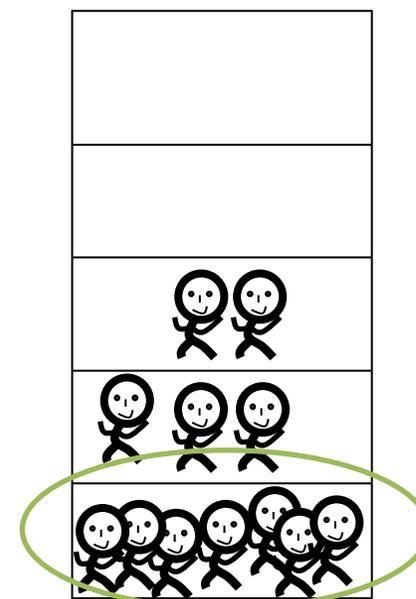
1つの状態に対して、

- ・ボース粒子: たくさん入ることができる
- ・フェルミ粒子: 1個(×2)しか入れない

### フェルミ粒子 (電子)

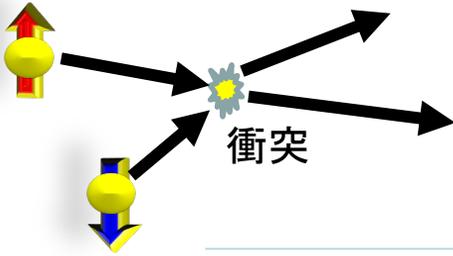


### ボース粒子

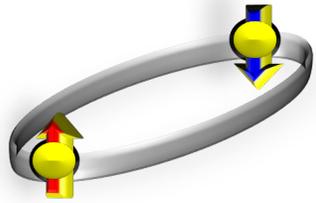


ボース・アインシュタイン凝縮!

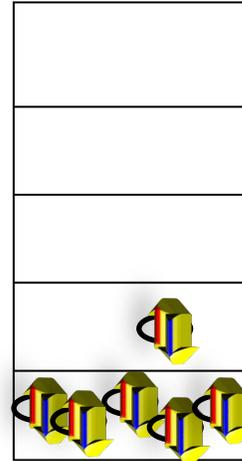
# ボース・アインシュタイン凝縮と超伝導現象



通常、バラバラに動く電子は  
お互いに衝突し、電気抵抗が生じる  
(電気を流すと電線が熱くなる)



クーパー対が出来て、  
電子はボース粒子に  
化ける



無数のクーパー対が  
**最低状態**に落ち込む  
ボース・アインシュタイン凝縮



**無数の電子の波が位相を  
そろえ、衝突しなくなる！**

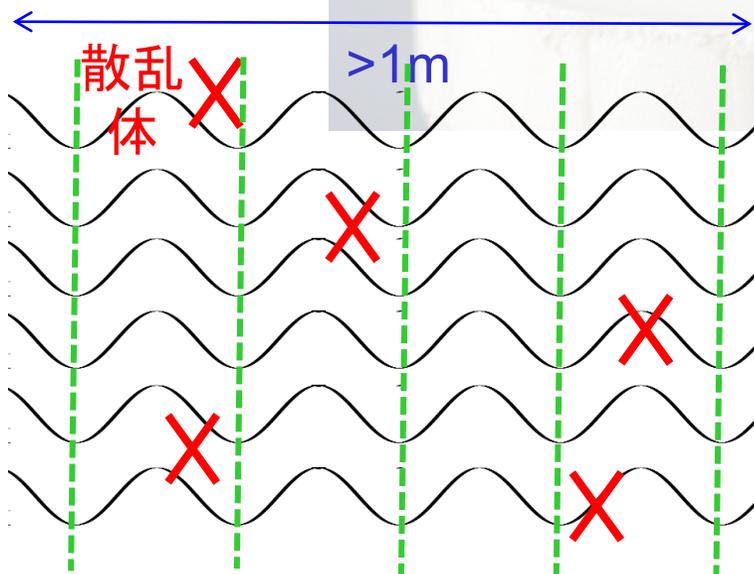
**超伝導 = クーパー対のボース凝縮**

# ゲージ対称性の破れ

人知を超えた物理現象！

超伝導・・・バラバラな電子の位相が、突如そろろう！

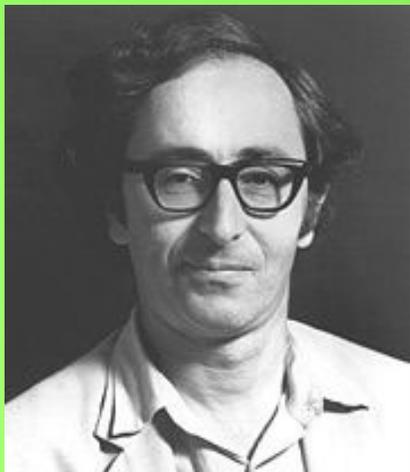
$$\phi(\mathbf{r}_i) = |\phi(\mathbf{r}_i)|e^{i\theta_i} \quad i=1, 2, \dots, 10^{23} \quad \longrightarrow \quad \Psi = |\Psi|e^{i\theta} \quad \text{U(1)ゲージ対称性の破れ}$$



(注)量子力学のゲージ変換  
 $A \rightarrow A - \text{div} \chi$   
 $\varphi \rightarrow \varphi \times e^{i\chi}$

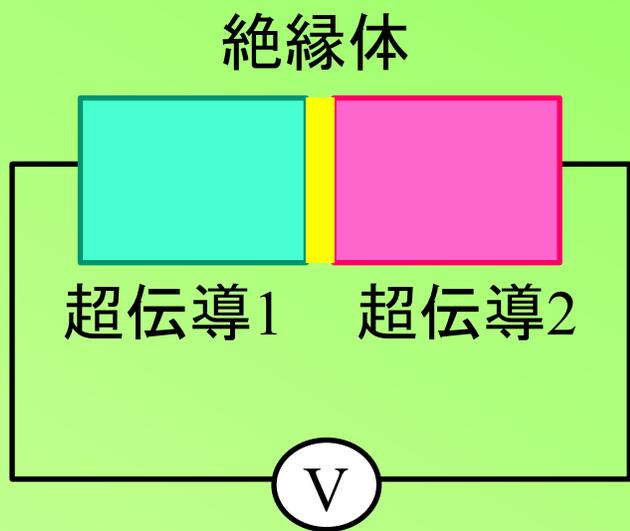
少々散乱では壊れない

# ジョセフソン効果(トンネル効果)



BCS直後の最大の発見

. Josephson (当時大学院生)  
1973年に受賞



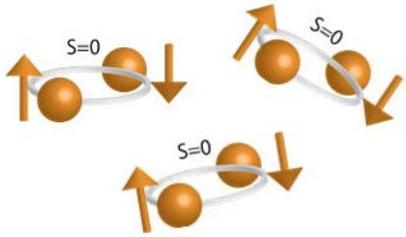
## トンネル素子

電位差をかけると、薄い絶縁体を通して電流が流れる。電子＝物質波の証拠

超伝導状態では、電位差がなくても電流が流れる。巨視的量子現象の証拠。

スイッチング素子、  
超伝導量子干渉装置(SQUID)

# 超伝導＝物理法則を一変させる特別な相転移

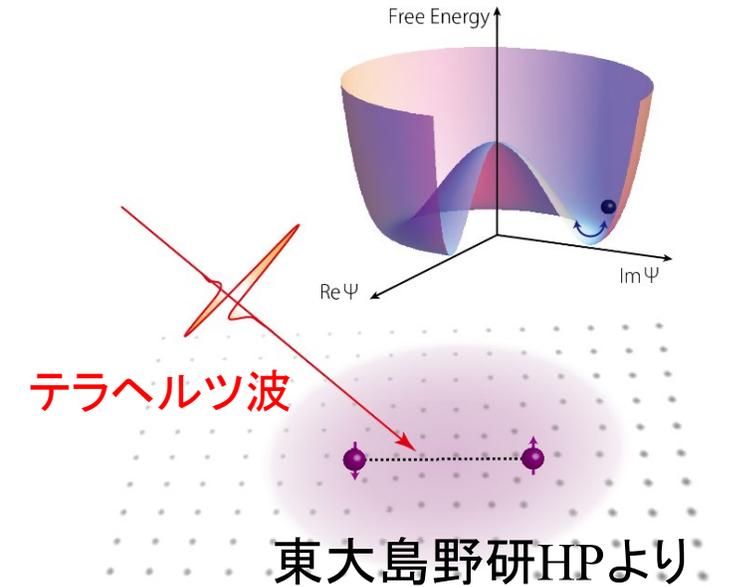


## 超伝導が導く新しい物理法則

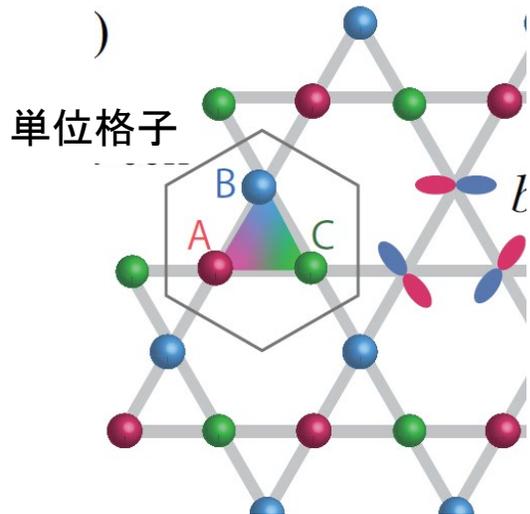
摩擦が完全にゼロになる

- ・マイスナー効果＝光子が質量を獲得  
アンダーソン・ヒッグス機構

超伝導中のヒッグス粒子の発見2018年 →



東大島野研HPより



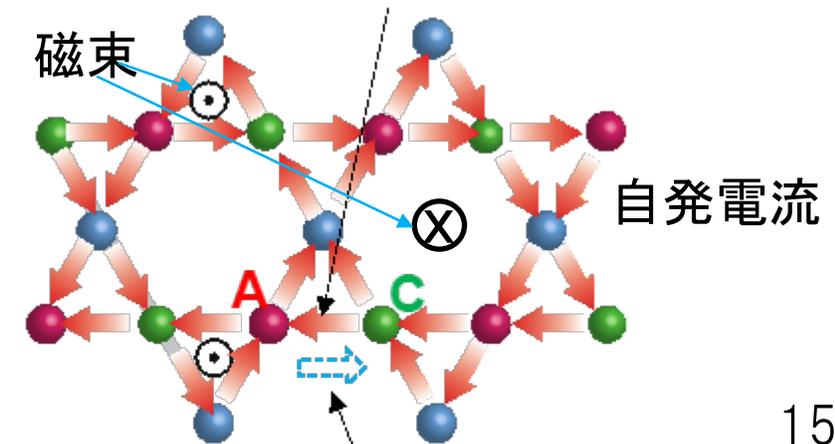
(同様に)

## 量子相転移が導く新しい物理法則

- ・最近の新展開: カゴメ格子超伝導

物質の数だけ宇宙がある!

## 渦電流状態＝トポロジカル現象

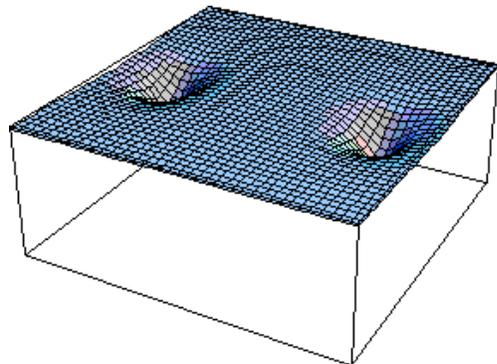


# Sc研の歴史

中嶋先生とBardeen先生  
(1986年、物性研究所)

## 中嶋貞雄先生

格子振動がもたらす電子間引力(1953年)  
BCS理論(1957年、ノーベル賞)の礎に!



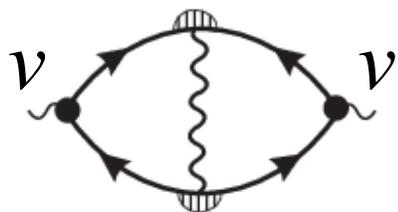
ゴム膜上の2つの球体  
格子歪による電子間引力

非従来型超伝導の研究へと発展



## 中野藤生先生

電気伝導度の厳密な中野・久保公式(1955年)



遅延グリーン関数

TKNN公式 2016年ノーベル賞

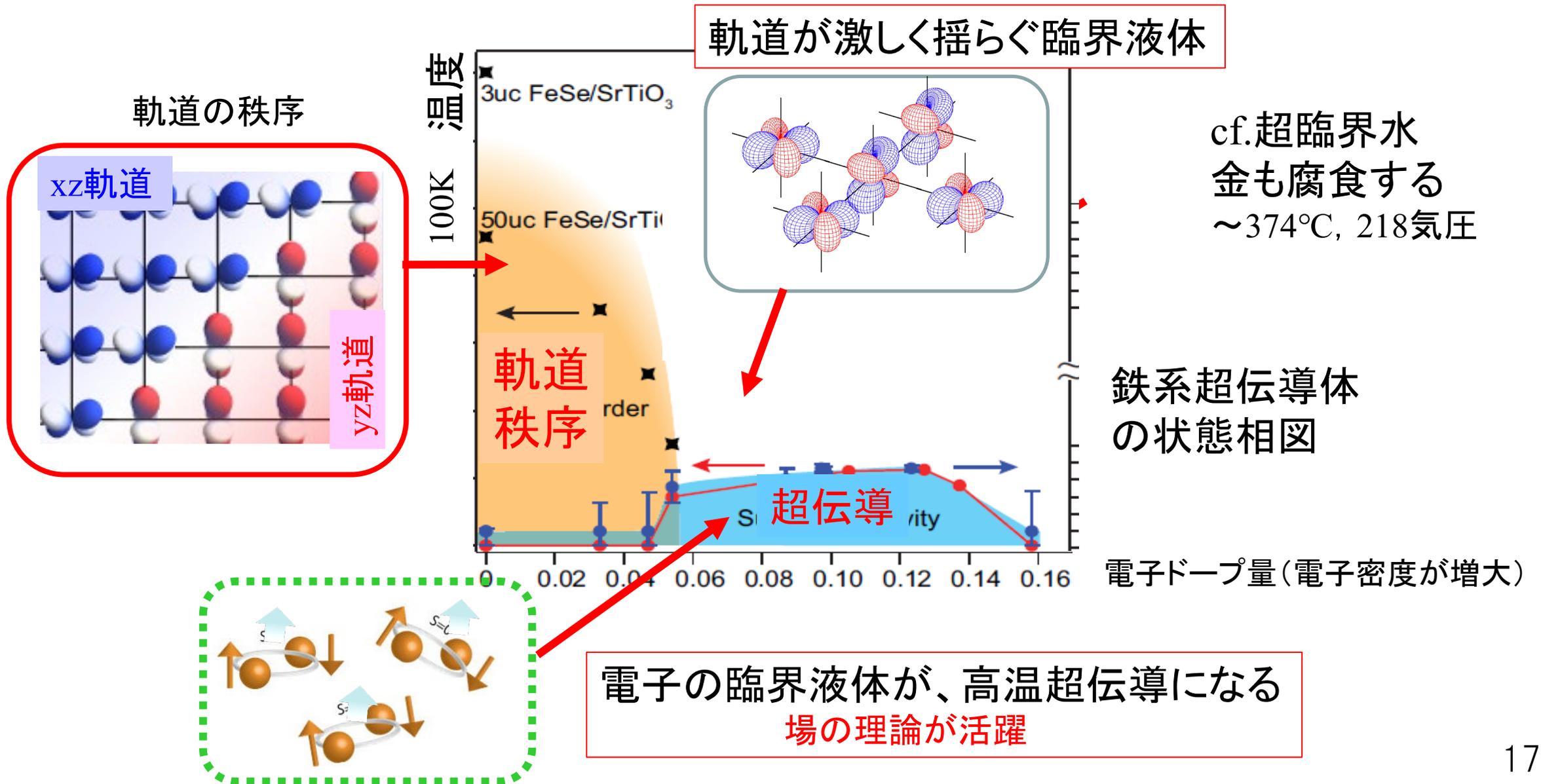
物性理論とトポロジーとの  
蜜月関係がはじまる

Dirac電子系、カゴメ電子系

中野先生を囲んで  
(2006年、名大理学館)



# 色々な電子状態：鉄系高温超伝導体



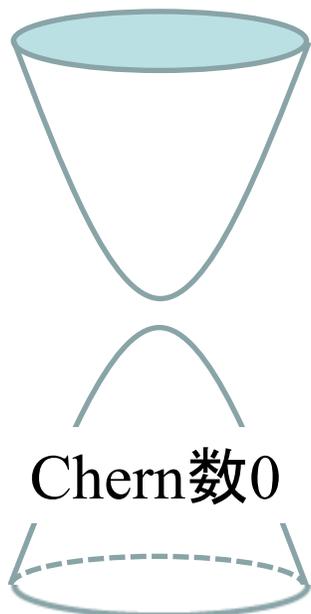
# 金属中の電子は姿を変える

2016年ノーベル物理学賞 物質のトポロジー

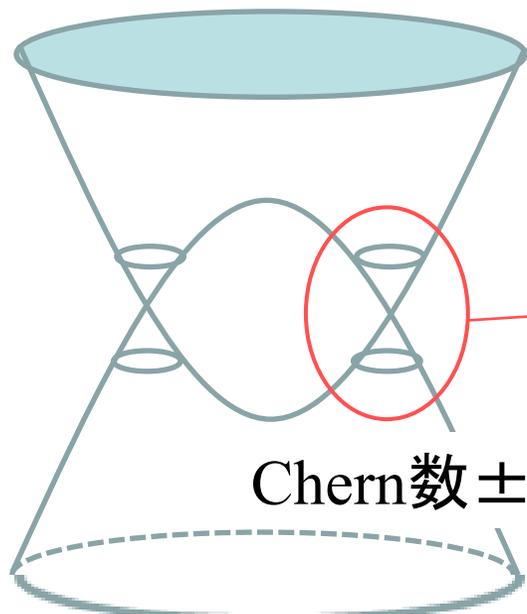
D. J. Thouless、F. D. M. Haldane、J. M. Kosterlitz

バンド(曲面)上の電子が感じる有効場(≈一般相対論)

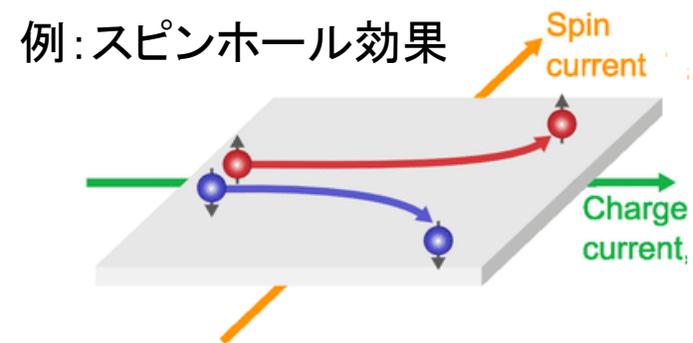
通常物質 ↔ トポジカル物質



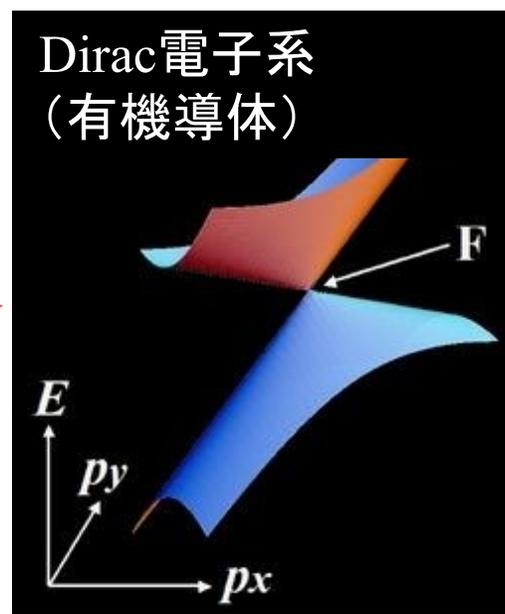
Chern数0



Chern数±1/2

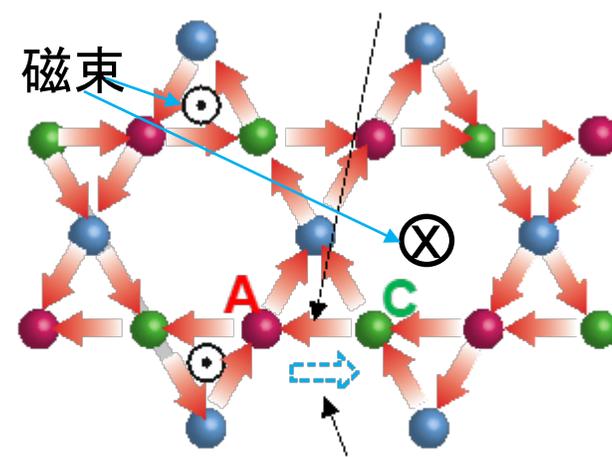


- ✓カゴメ格子金属: 永久電流秩序
- ✓Dirac電子: 質量ゼロの相対論的粒子

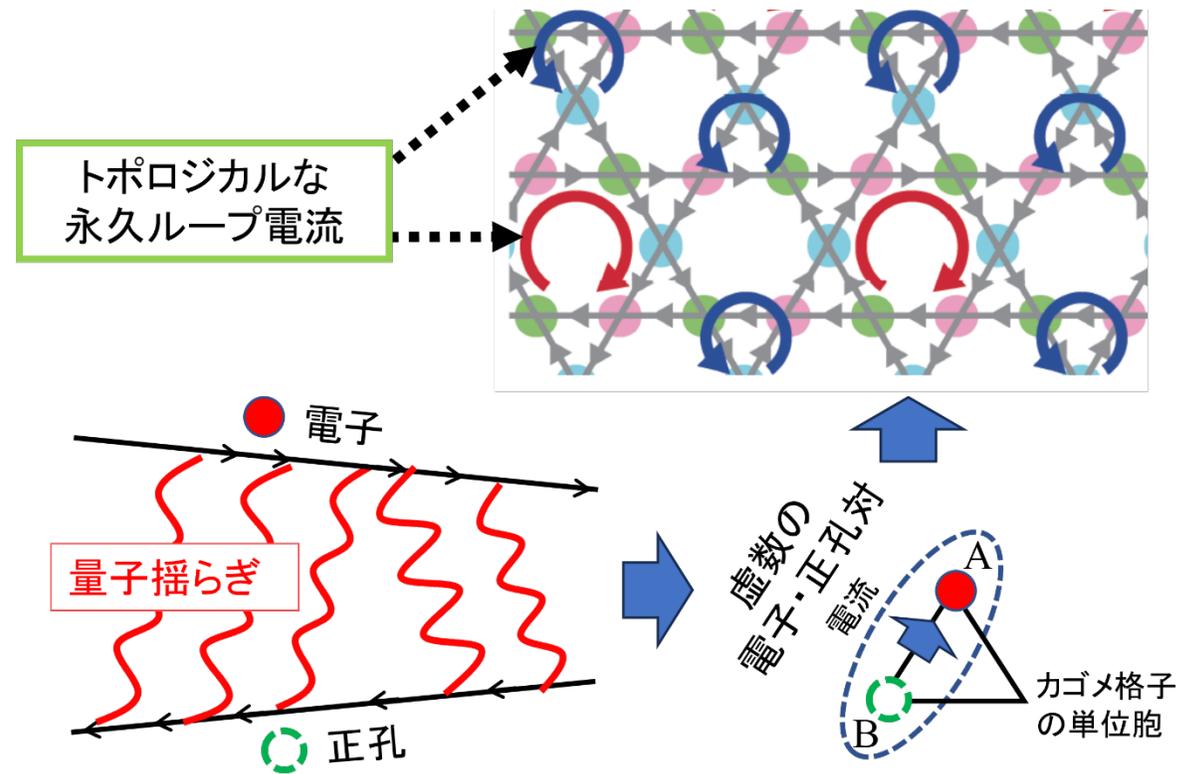
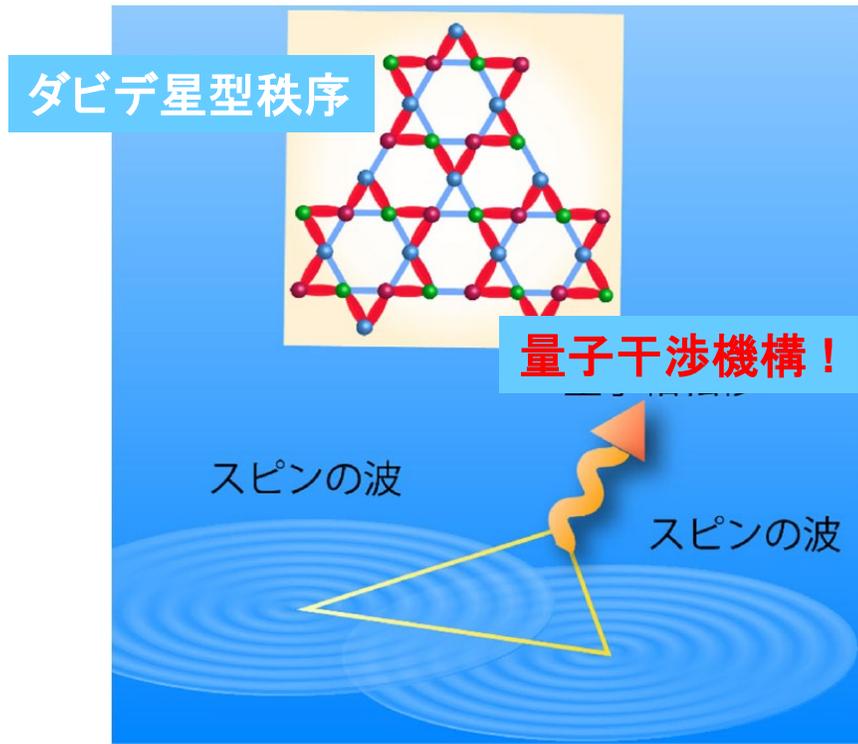


Dirac電子系  
(有機導体)

カゴメ金属の自発電流



磁束



## Mechanism of exotic density-wave and beyond-Migdal unconventional superconductivity in kagome metals

【論文情報】

2022.4

雑誌名： Science Advances

著者： 田財里奈、山川洋一、大成誠一郎、紺谷浩

カゴメ金属で起きる自発回転する不思議な電子状態  
～ナノスケールの永久ループ電流の機構を明らかに～

雑誌名： Nature Communications 2023.12

R. Tazai, Y. Yamakawa, and H. Kontani

# 場の理論に基づく金属電子論



ファイマン博士

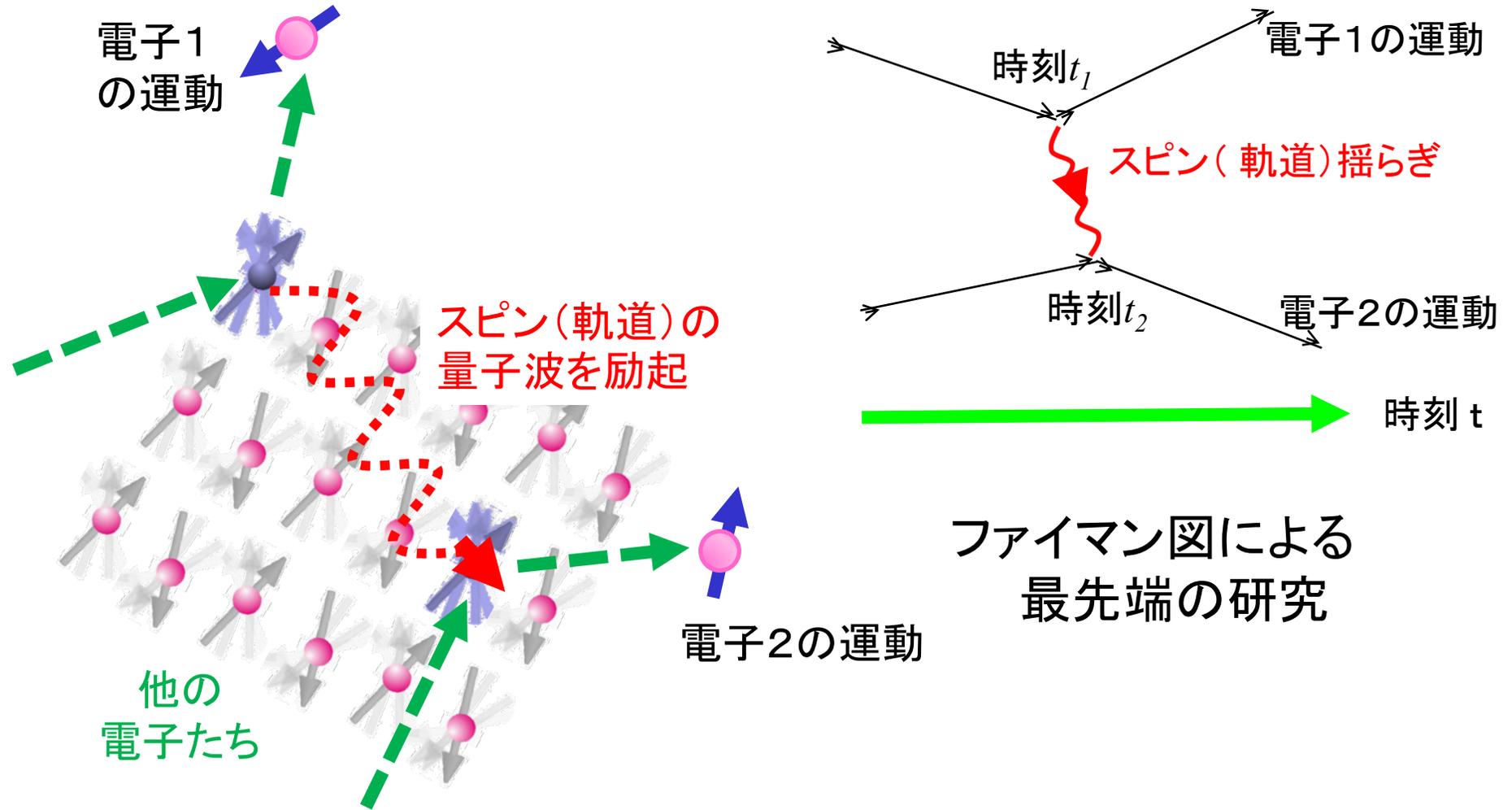


理論研究のツール

**場の量子論**

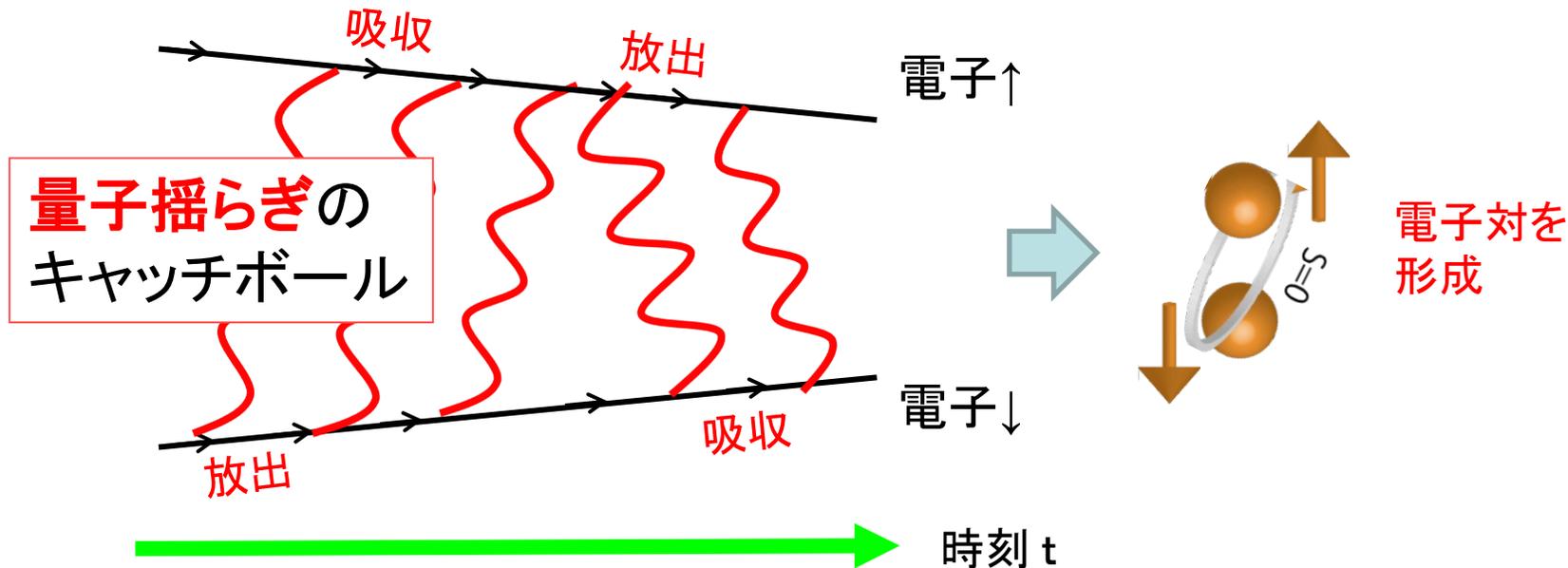
→ Feynman diagram  
によって、金属電子  
の謎を解明する！

# 場の量子論による研究



# ”量子揺らぎ”がクーパー対をもたらす！

ファイマン図を用いた超伝導理論



”量子揺らぎ(ゴム膜)”に応じて  
多彩な超伝導が出現！  
格子振動、スピン揺らぎ、軌道揺らぎ、...

湯川秀樹：  
中間子理論  
(1949年  
ノーベル賞)



# 超伝導の研究

## 超伝導ギャップ方程式

$$\Delta(\mathbf{k}) = \frac{1}{N} \sum_{\mathbf{p}} V(\mathbf{k}, \mathbf{p}) \langle c_{\mathbf{p}\uparrow} c_{-\mathbf{p}\downarrow} \rangle$$

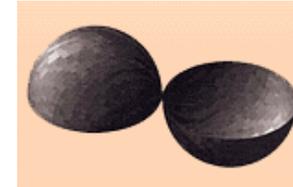
↑  
ギャップ関数  
超伝導の顔

↑  
引力相互作用:  
ダイアグラムで計算  
スピン揺らぎ、軌道揺らぎ、  
フォノン、など

$$T_c \propto \exp(-1/\langle V \rangle N(0))$$

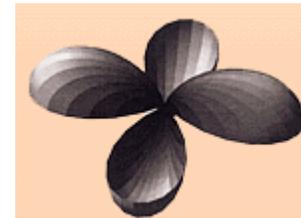
p波超伝導

$$\Delta(\mathbf{k}) \propto \sin k_x, \sin k_y$$



d波超伝導

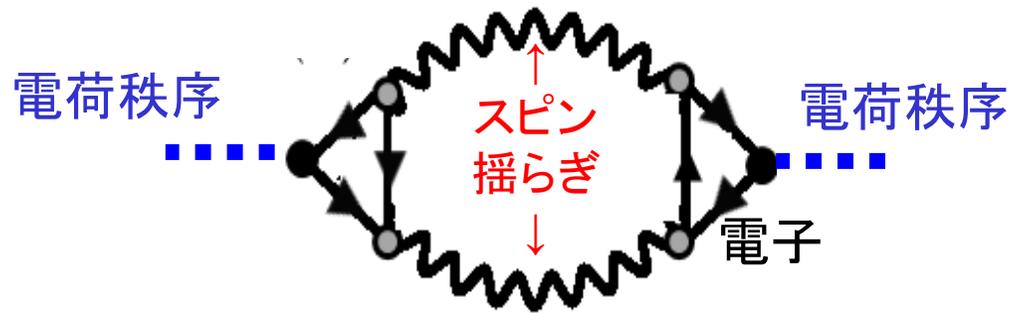
$$\Delta(\mathbf{k}) \propto \cos k_x - \cos k_y$$



- ・ $V(\mathbf{k}, \mathbf{p})$ がギャップ関数の対称性を決める。
- ・ $V$ が大きいほど $T_c$ が高くなる。

# 理論の最前線：摂動理論とくりこみ群理論

## 1. ファイマン図の方法



軌道秩序を与える  
ダイアグラム Sc研で発見

= new physics の発見

両者を組み合わせたユニークな研究を推進！

2. くりこみ群法 高エネルギーの寄与を漸次積分し、  
低エネルギーの有効相互作用を求める

(K. Wilson:ノーベル賞1982年~)

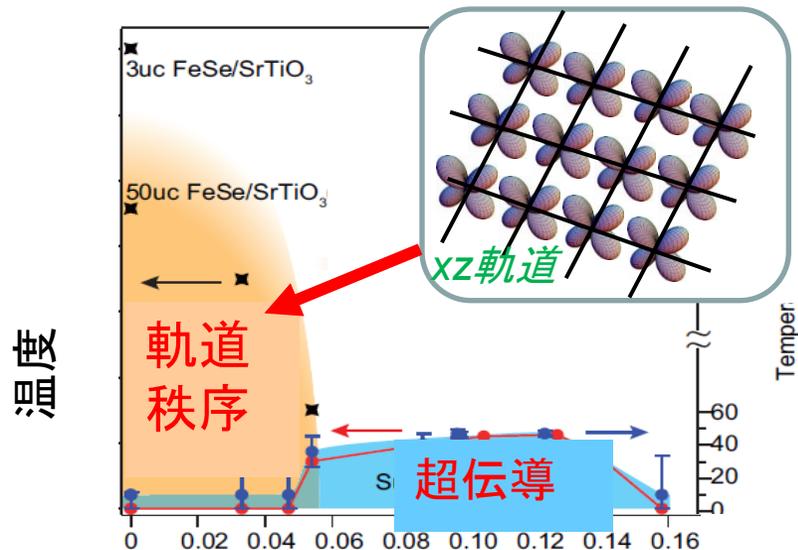
くりこみ群方程式:

$$\frac{d}{dl} \Gamma(k_1, k_2; k_3, k_4) = \text{diagram 1} + \text{diagram 2} + \text{diagram 3}$$

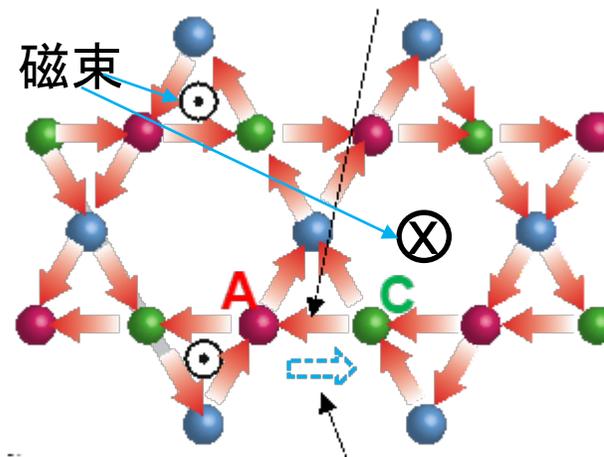
# Sc研の最前線の研究

物性理論の中心的課題！

## 超伝導現象



## カゴメ金属の自発電流



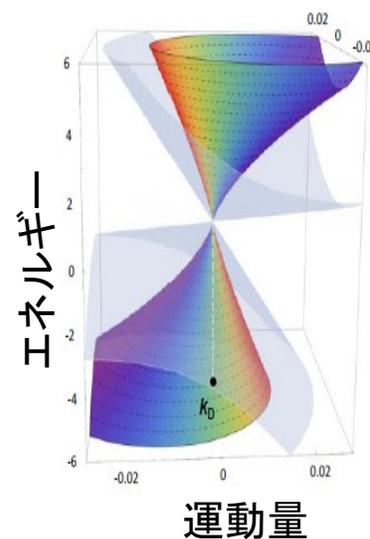
量子相転移  
(量子液晶)

## 場の理論

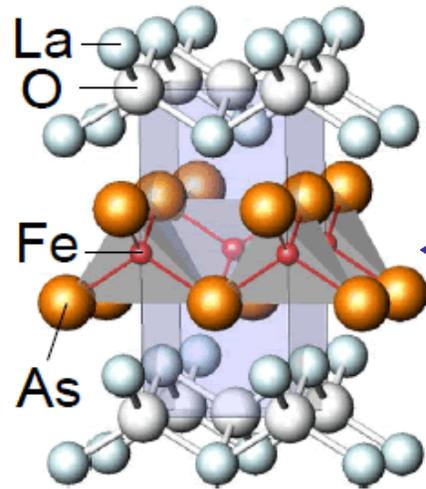
$$\frac{d}{d\Lambda} \text{diagram} = \text{diagram} + \text{diagram}$$

The diagram shows a four-point vertex with external momenta  $k_1, k_2, k_3, k_4$ . The left side is the derivative of the vertex with respect to the cutoff  $\Lambda$ . The right side is the sum of two diagrams: one with a red loop and one with a red loop and a shaded vertex.

## Dirac電子系

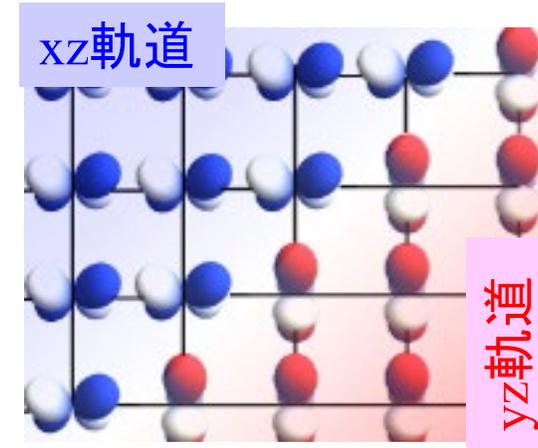


# 鉄系超伝導体(2008年～)



← FeAs面の電子は  
軌道自由度を獲得

## 鉄系超伝導体の軌道秩序



鉄の化合物が高温超伝導になった

$T_c = 60\text{K} \sim 100\text{K}$  ノーベル賞級！

21世紀に最も研究された超伝導体  
革命の火付け役！

Sc研は、その理論を先導してきた  
軌道揺らぎの理論！



細野秀雄

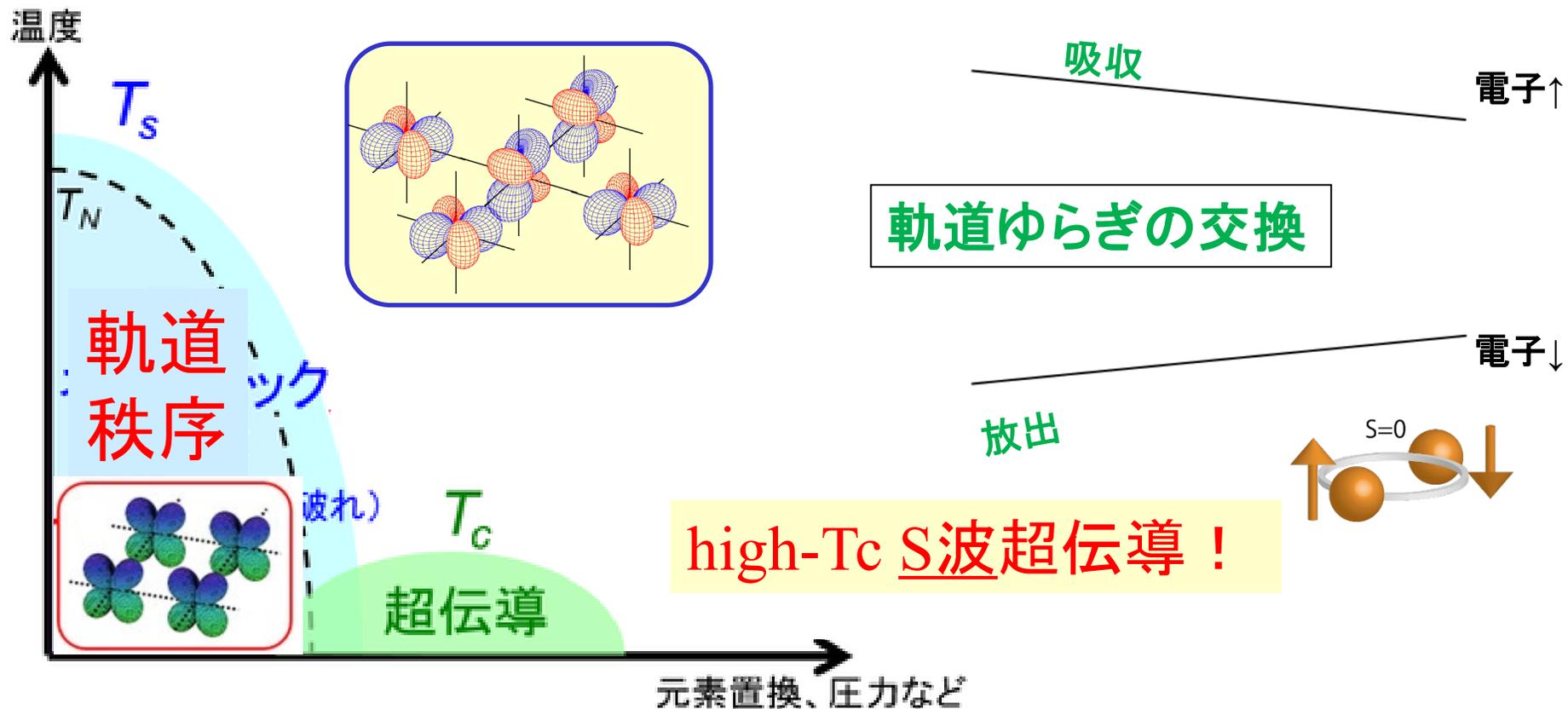
# 鉄系超伝導体：軌道揺らぎの物理

軌道秩序が溶けて、超伝導になる！  
( $T_c = 60\text{K} \sim 100\text{K}$ )

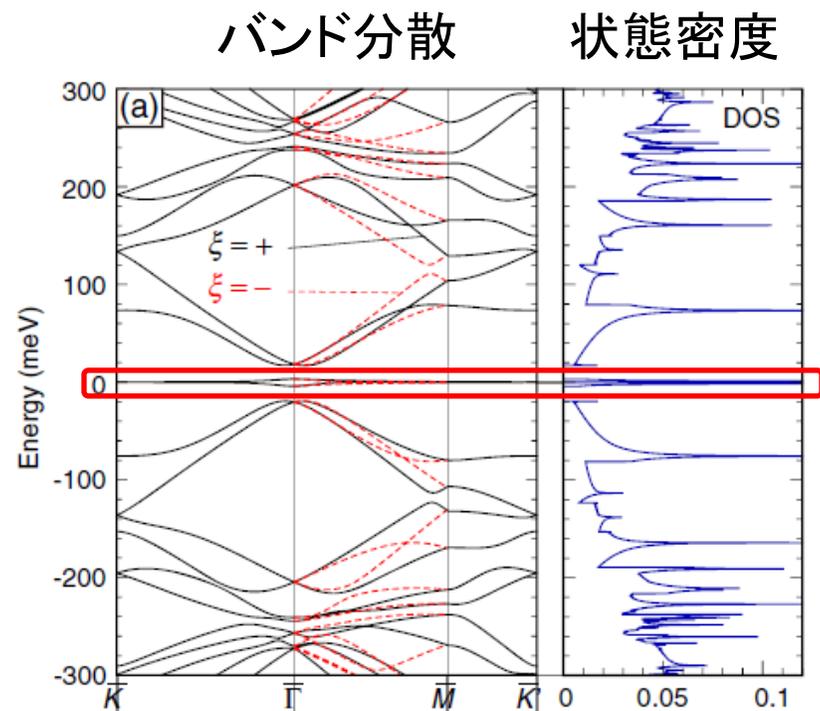
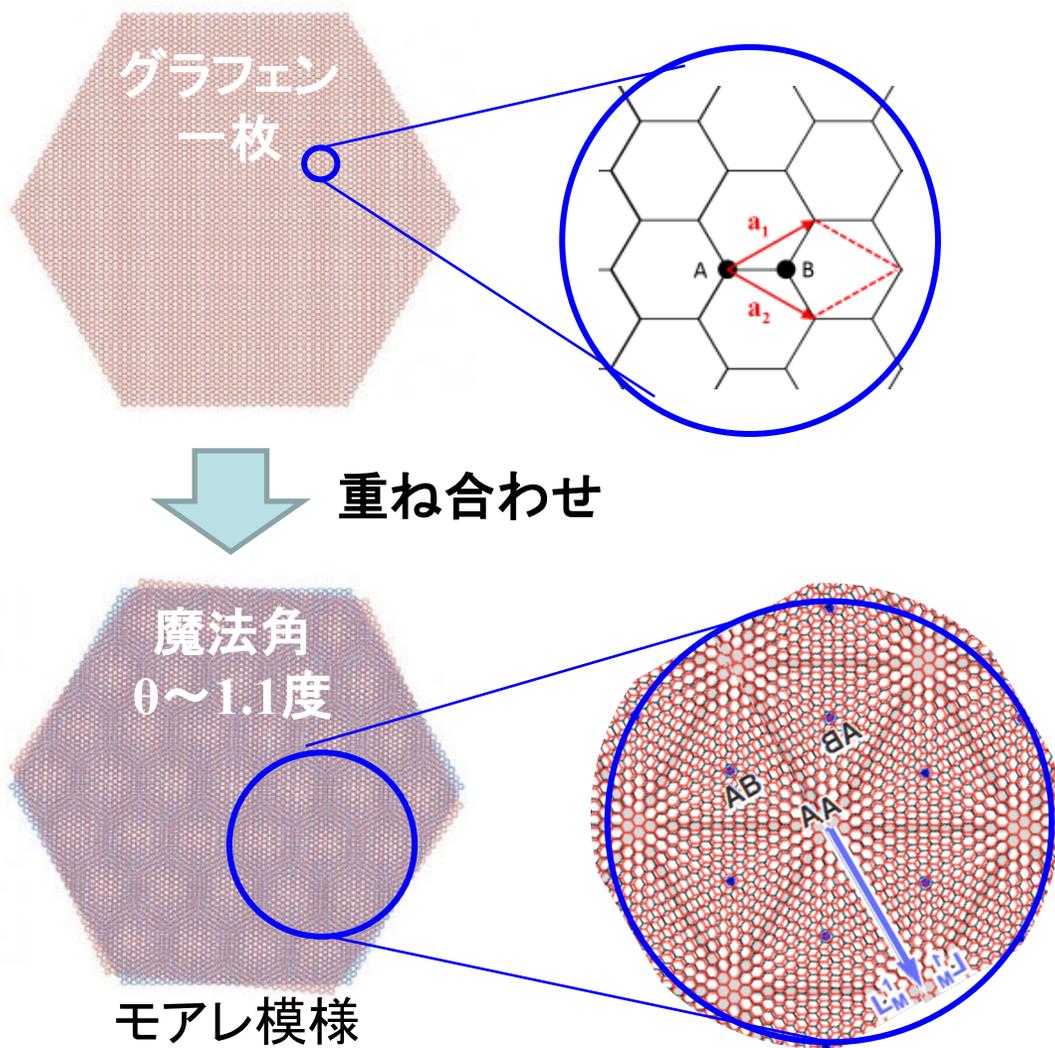
Sc研が世界をリード！

✓ 軌道秩序の発現機構  
2012～

✓ 「軌道揺らぎ媒介超伝導」の理論  
2010～



# 捻られた2層グラフェン:新規強相関電子系(2018~)



M. Koshino *et al.*, Phys. Rev. X **8**, 031087 (2018)

モアレ格子によるフラットバンド  
→ **新しい強相関電子系**

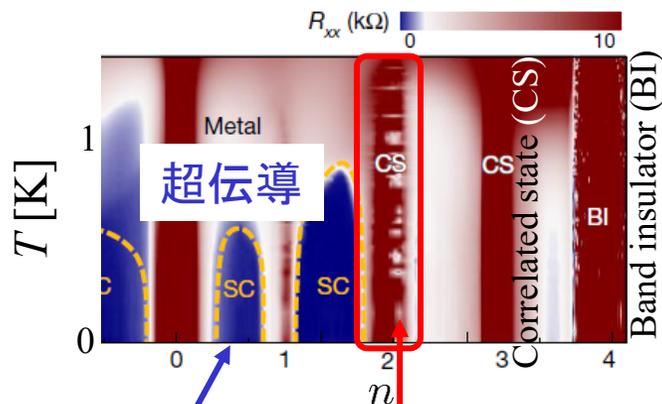
「モアレ格子」を電子が運動する新舞台

# 捻られた2層グラフェン:新規強相関電子系(2018~)

新規電子状態の宝庫  
無限の可能性！

1. 液晶秩序  
→ SU(4)揺らぎの量子干渉機構

強相関トポロジカル現象  
の舞台



X. Lu *et al.*, Nature 574, 653 (2019)

超伝導・液晶秩序



2. 超伝導  
→ 液晶揺らぎが媒介する超伝導

4 × 4複素回転行列 SU(4)

$$\vec{R}' = \hat{S} \cdot \vec{R}$$

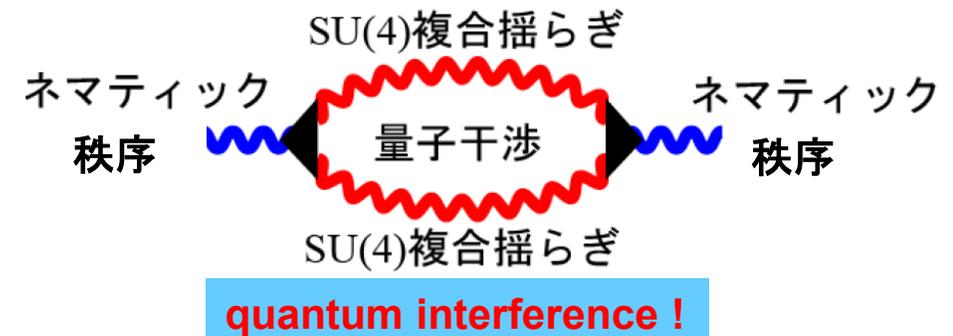
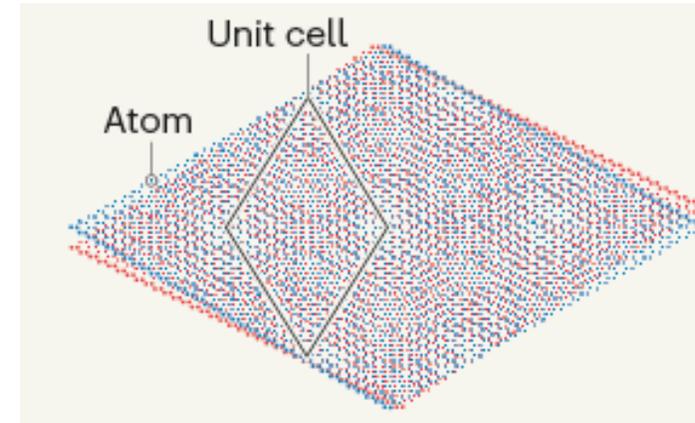
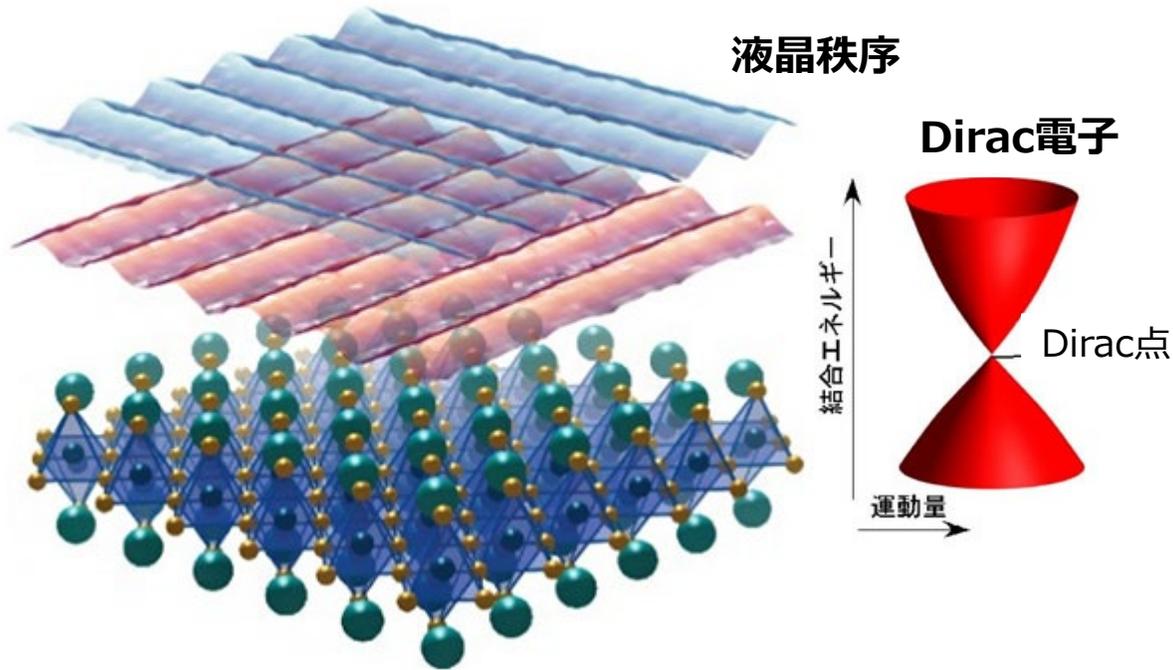
4次元複素ベクトル

$R = (\uparrow, \downarrow, \uparrow, \downarrow)$   
スピン バレー

3. 強相関トポロジカル状態  
→ 量子異常ホール効果

現在の物性研究の主役！

# Recent Press Release by Sc-Lab 2



## Correlation-driven **electronic nematicity** in the Dirac semimetal BaNiS<sub>2</sub> 2022.12

雑誌名: *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 2022.12

C. J. Butler, Y. Kohsaka, **Y. Yamakawa**, M. S. Bahramy, **S. Onari**, **H. Kontani**, T. Hanaguri, and S. Shamoto,

## SU(4) Valley+Spin Fluctuation Interference Mechanism for **Nematic Order** in Magic-Angle Twisted Bilayer Graphene 2022.2

雑誌名: *Physical Review Letter*

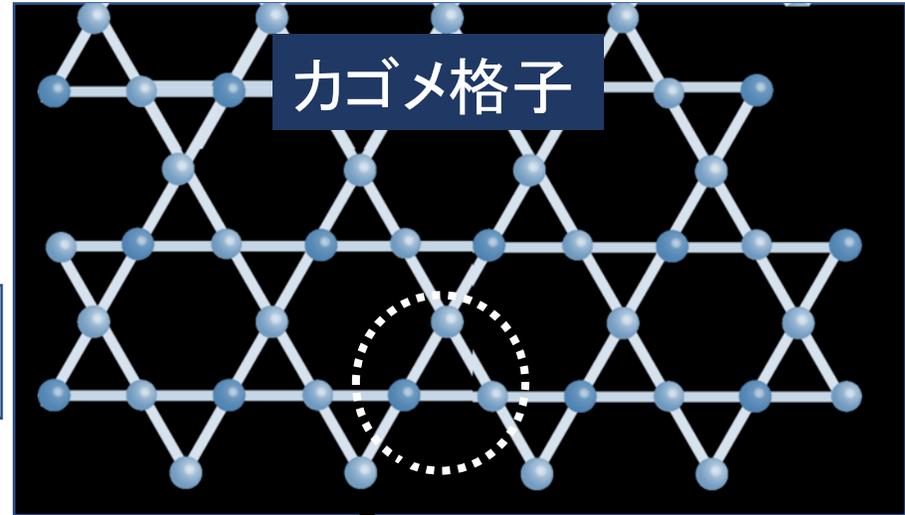
著者: Seiichiro Onari (名古屋大学准教授), Hiroshi Kontani (名古屋大学教授)

# 2019年に見つかった新しい超伝導 ～カゴメ超伝導～

籠目



原子●を籠目状に敷きつめる



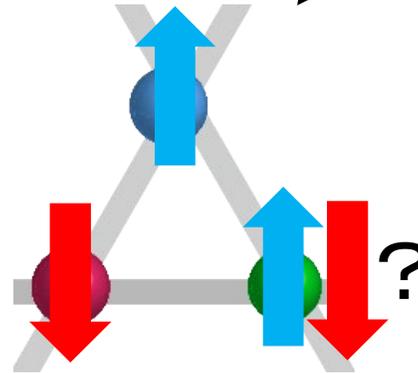
カゴメ格子の物理の何がおもしろいの??

普通の金属  $T \simeq 0$   
 $S(\propto \log W) \rightarrow 0$

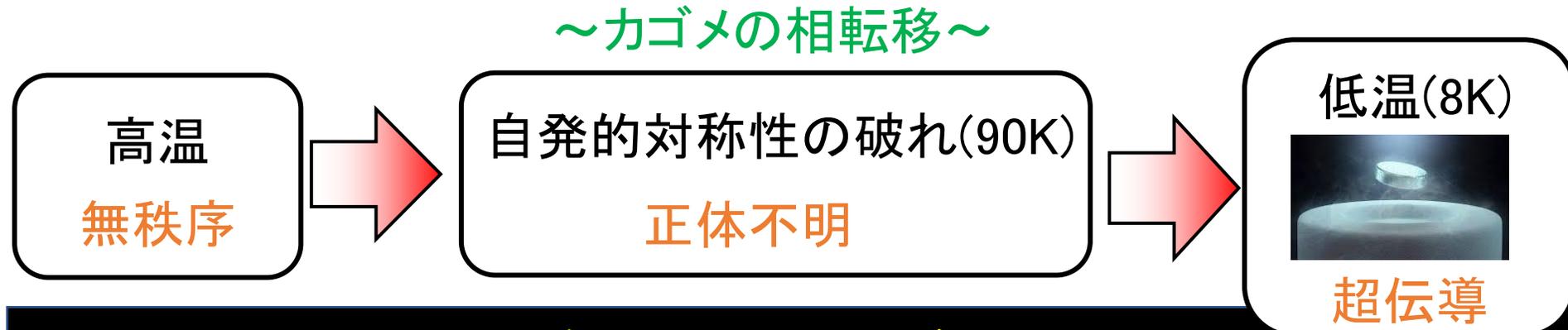
熱力学第三法則が破れてる! ?  
低温でも、  
エントロピーが0じゃない!

隣同士のスピンの“逆”向き  
→エネルギー的に得

→スピン配置が決まらず  
=フラストレーション  
カゴメ特有の物理



# 2019年に見つかった**新しい超伝導** ～カゴメ超伝導～



**カゴメの物理はほぼ未解明！**

カゴメが「超伝導」になる機構とは？

「超伝導」と「フラストレーション」の関係は？

「自発的対称性の破れ」の正体と起源は？

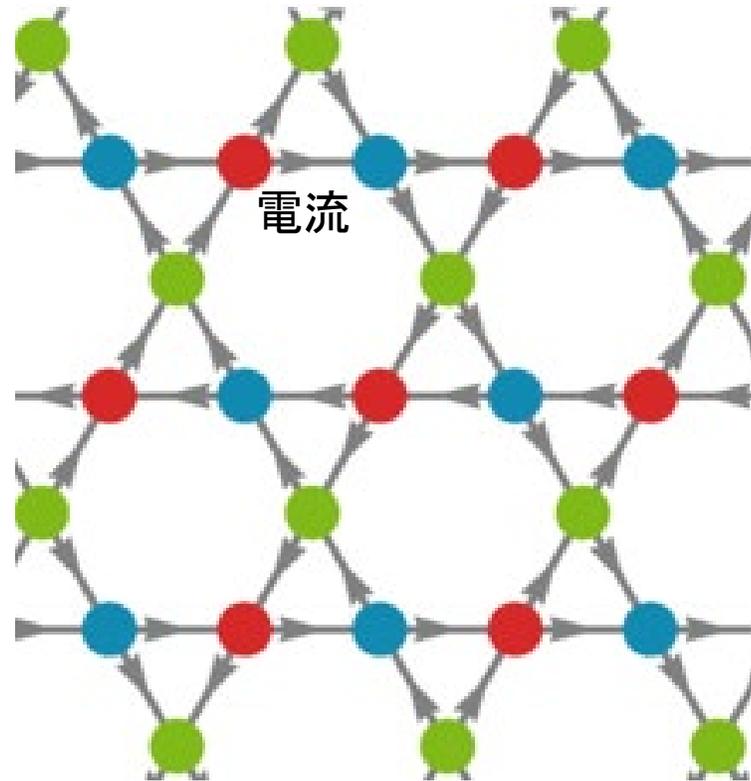
カゴメを記述する「普遍的な物理」とは？

new physicsを見つけるチャンス！若い研究者が活躍できるテーマ！

# 2019年に見つけた新しい超伝導 ～カゴメ超伝導～

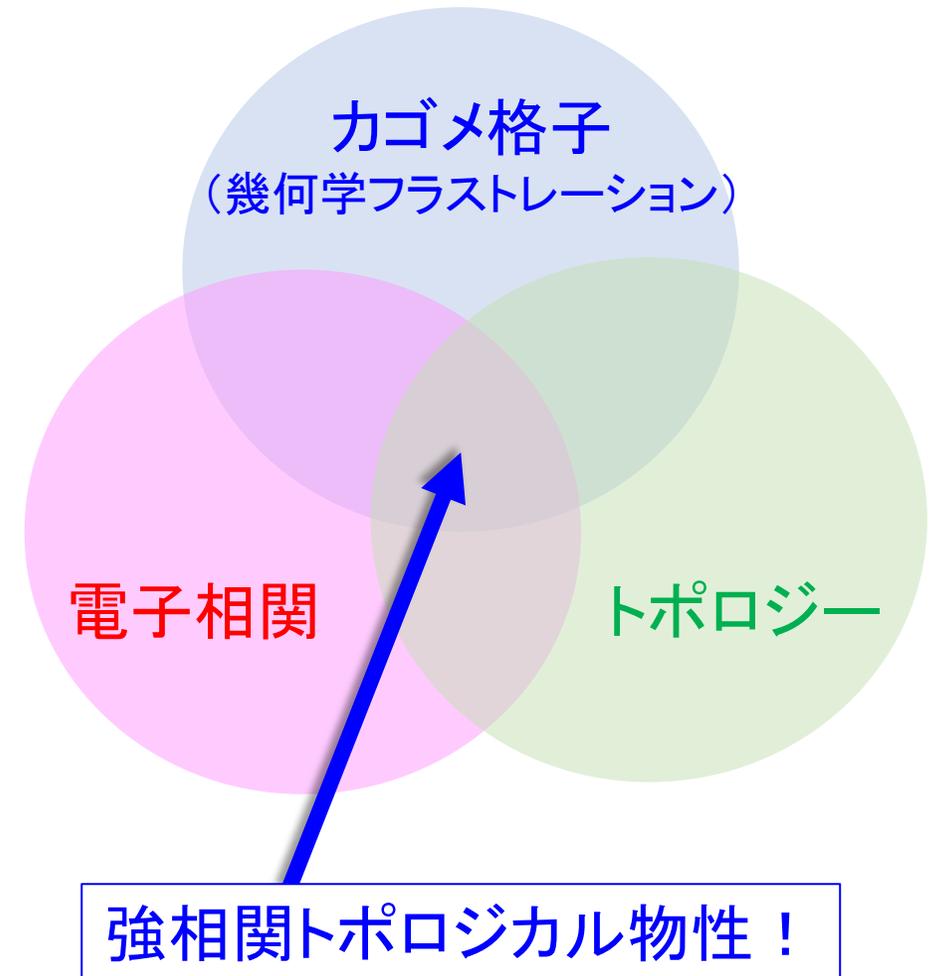
私たちのNewアイデア

(論文投稿中！→掲載決定！)

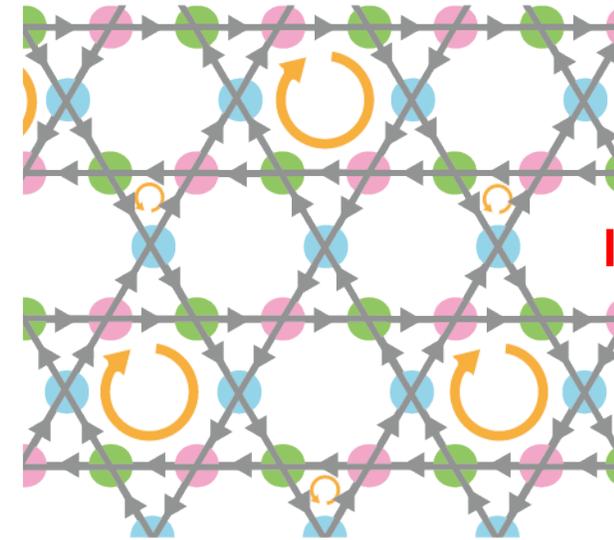
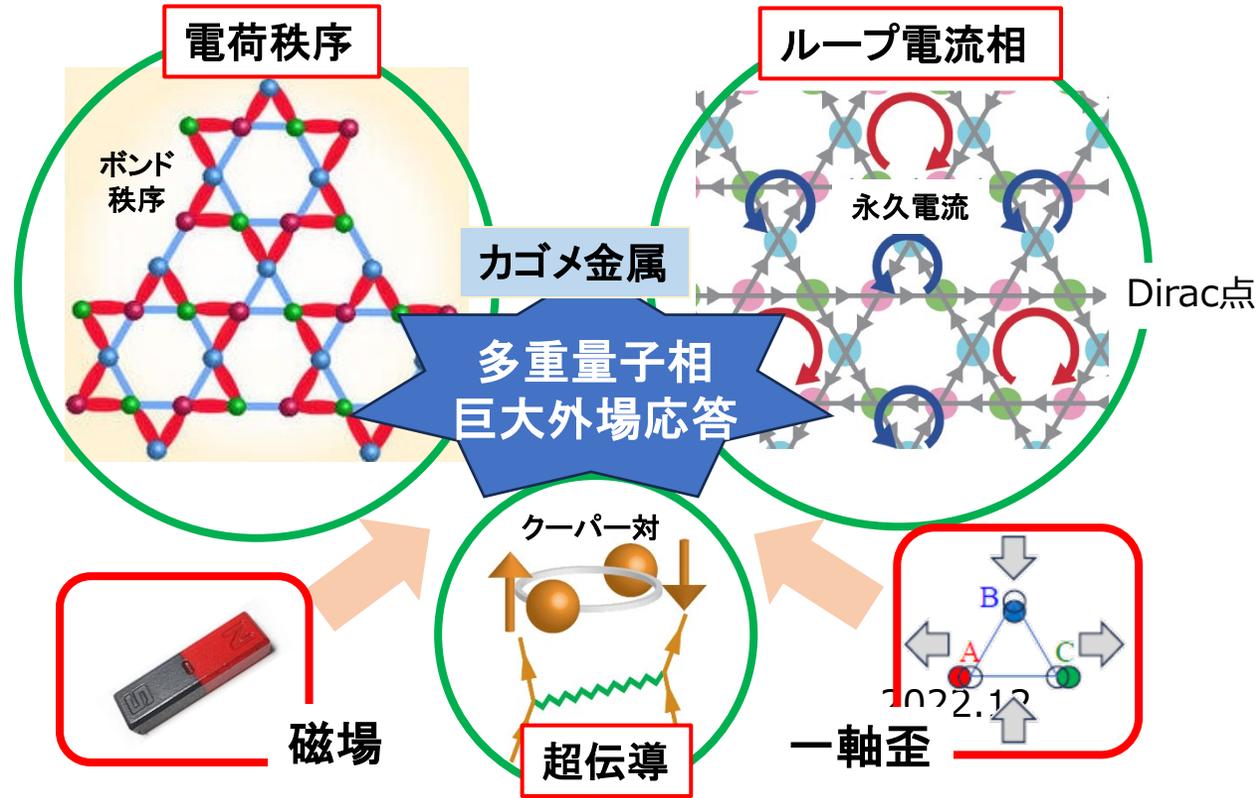


正体不明の =  
対称性の破れ

永久自発電流！



# Recent Press Release by Sc-Lab 3



loop current order

Evidence for an odd-parity nematic phase above charge density wave transition in kagome metal

雑誌名 : Nature Physics

2024.1

Tomoya Asaba, Asato Onishi, Yoichi Kageyama, Toshiki Kiyosue, Kenichi Ohtsuka, Shota Suetsugu, Yuhki Kohsaka, Tobi Gaggl, Yuichi Kasahara, Hinako Murayama, Kenichiro Hashimoto, Rina Tazai, Hiroshi Kontani, Brenden Ortiz, Stephen Wilson, Qing Li, Hai-Hu Wen, Takasada Shibauchi and Yuji Matsuda

雑誌名 : *Proceedings of the National Academy of Sciences of the United States of America (PNAS)* 2024.1

R. Tazai, Y. Yamakawa, and H. Kontani

カゴメ金属の新奇な多重量子相を予言・制御する理論を構築

— ループ電流・電荷秩序・超伝導が奏でる“アンサンブル” —

# 多彩なカゴメ金属系（他にもある）

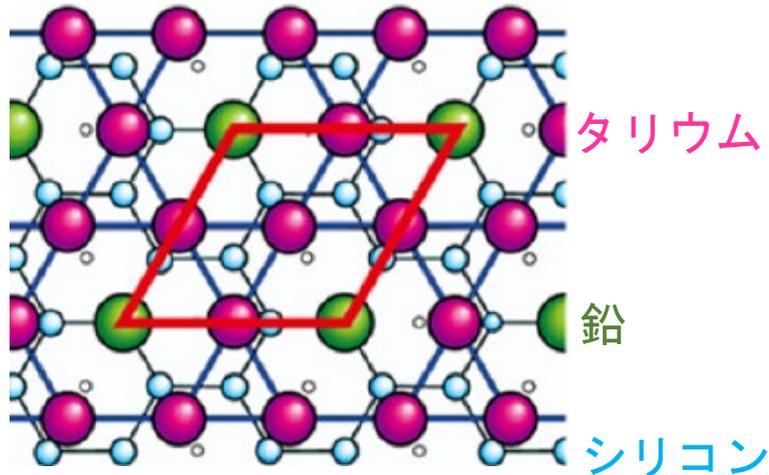
## Si (1, 1, 1) 表面のTI系カゴメ超伝導

T. Zhang, *et al.*, Nat. Phys. **6**, 104 (2010).

T. Uchihashi, *et al.*, Phys. Rev. Lett. **107**, 207001 (2011).

T. Nakamura *et al.*, Phys. Rev. B **98**, 134505 (2018).

Si (1, 1, 1)  
表面の  
格子構造



✓トリプレット超伝導？

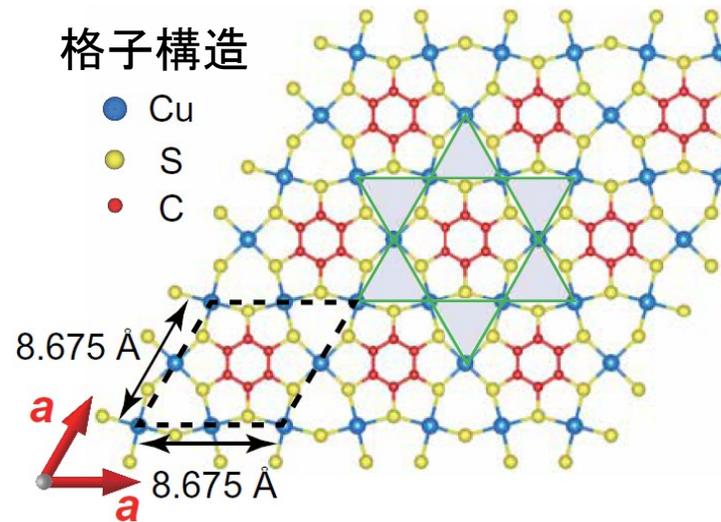
## 金属有機構造体 $[Cu_3(C_6S_6)]_n$ (Metal Organic Framework)

X. Huang, *et al.*, Angew. Chem. Int. Ed. **57**, 146 (2018).

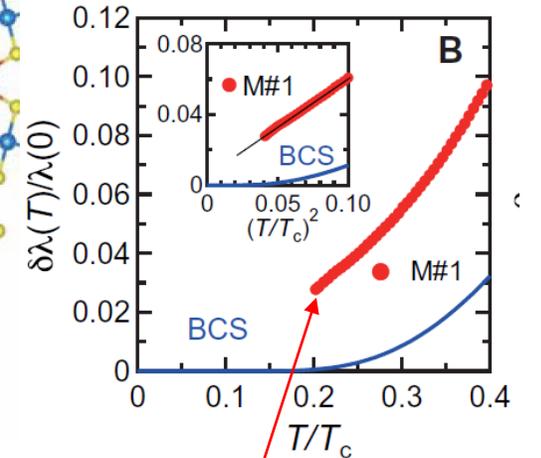
T. Takenaka *et al.*, Sci. Adv, **7**, 12 (2021).

格子構造

- Cu
- S
- C



磁場侵入長の温度変化



ノードの存在

非従来型超伝導が実現 → 液晶揺らぎ機構が適用可能？

研究課題

様々なカゴメ金属の超伝導相の普遍的発現機構を見出す。

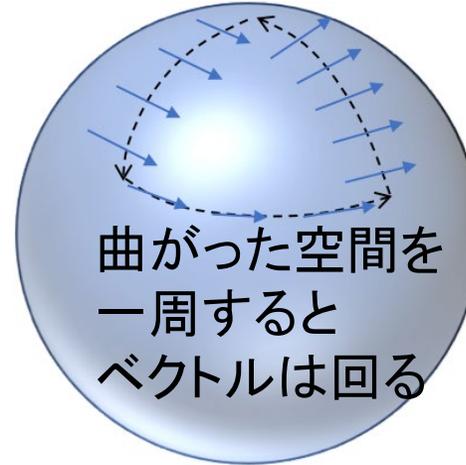
# 固体中のDirac電子

金属電子はバンド(曲面)に束縛されて運動する

↓  
トポロジカル物性の出現

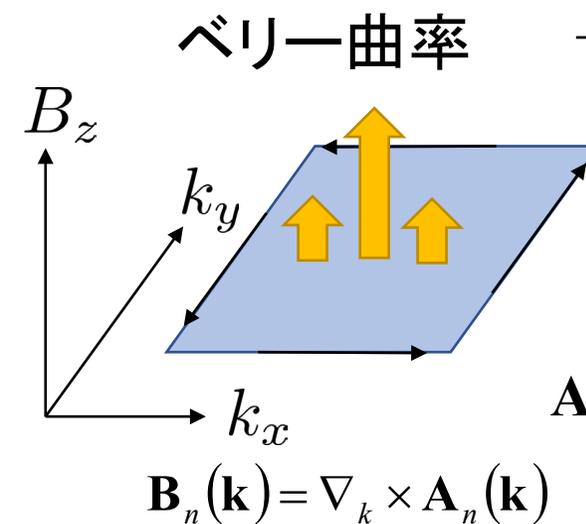
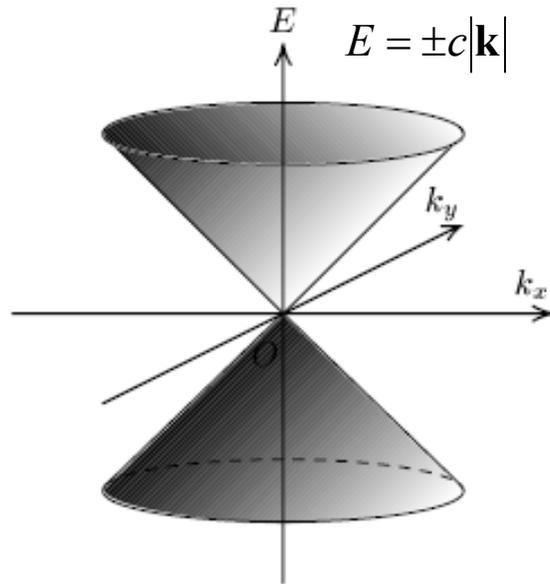
- ・量子スピンホール効果
- ・巨大な反磁性
- ・エッジ状態

様々な強相関電子系で出現



P. A. M. Dirac  
1933 Nobel prize

Dirac電子系:



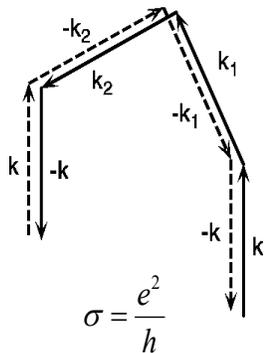
→波動関数が非自明なトポロジーを獲得

$$\mathbf{A}_n = -i \langle n | \partial_{\mathbf{k}} | n \rangle$$

$$\mathbf{B}_n(\mathbf{k}) = \nabla_{\mathbf{k}} \times \mathbf{A}_n(\mathbf{k})$$

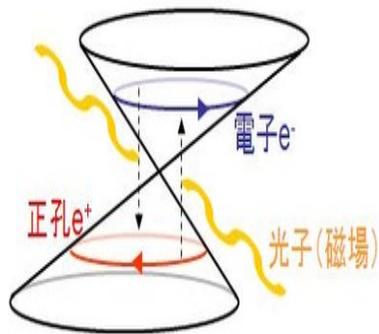
# ディラック電子系の多様な物性

## 量子輸送



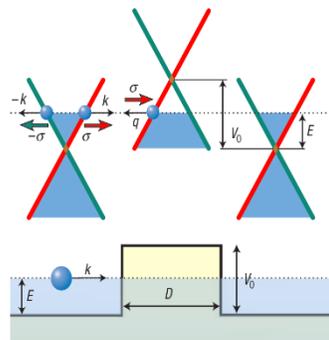
不純物をすり抜ける

## 巨大反磁性

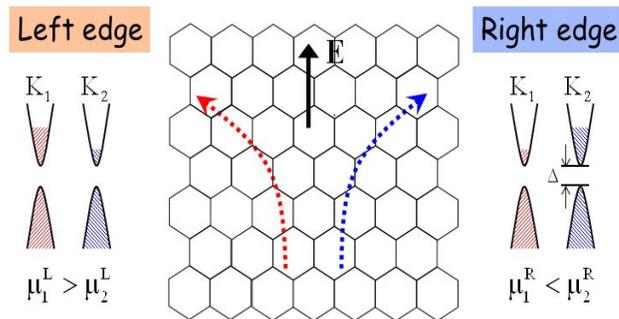


ベクトルポテンシャルの量子効果

## クライトンネリング



## スピン(バレー・軌道)ホール効果

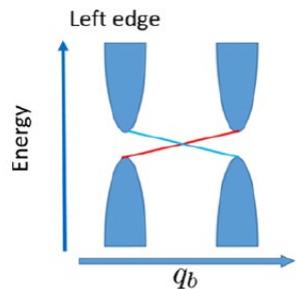


磁場が無いのに曲がる

ベリー曲率由来  
(トポロジカル量子現象)  
のホール効果は、  
最近の中心的課題！

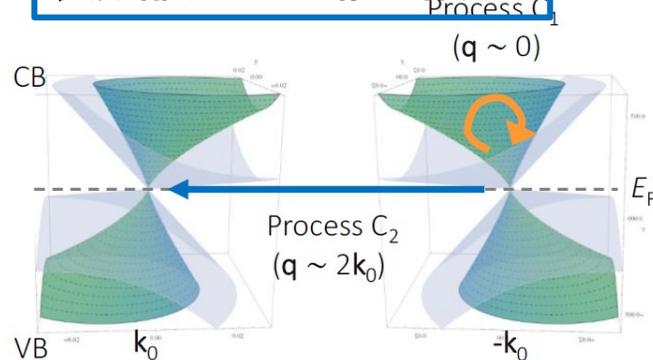
- ・Dirac電子系
- ・カゴメ電子系
- ・各種遷移金属

## バルクエッジ対応



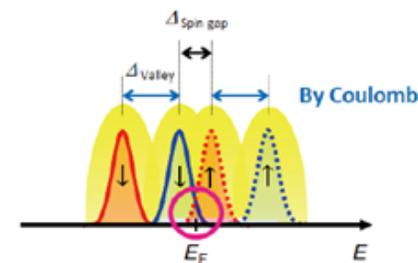
エッジ(表面)状態

## 長距離クーロン相互作用



ディラックコーンの変形と  
エキシトニック揺らぎ

## 特異なランダウ状態

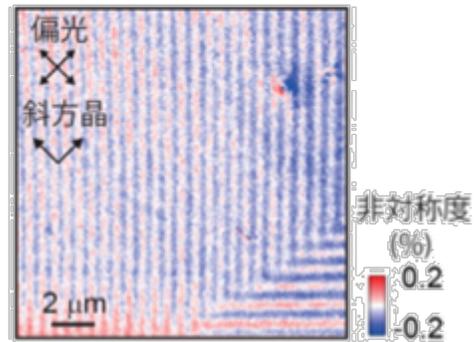


量子ホール絶縁体

# 鉄系超伝導体：ナノスケールで整列する電子を可視化 —物性理論の常識を覆す電子のうねりの発見—

プレスリリース

B レーザー光電子顕微鏡



ナノメートル ( $10^{-9}$  m)

平方マイクロメートル ( $\mu\text{m}^2$ )

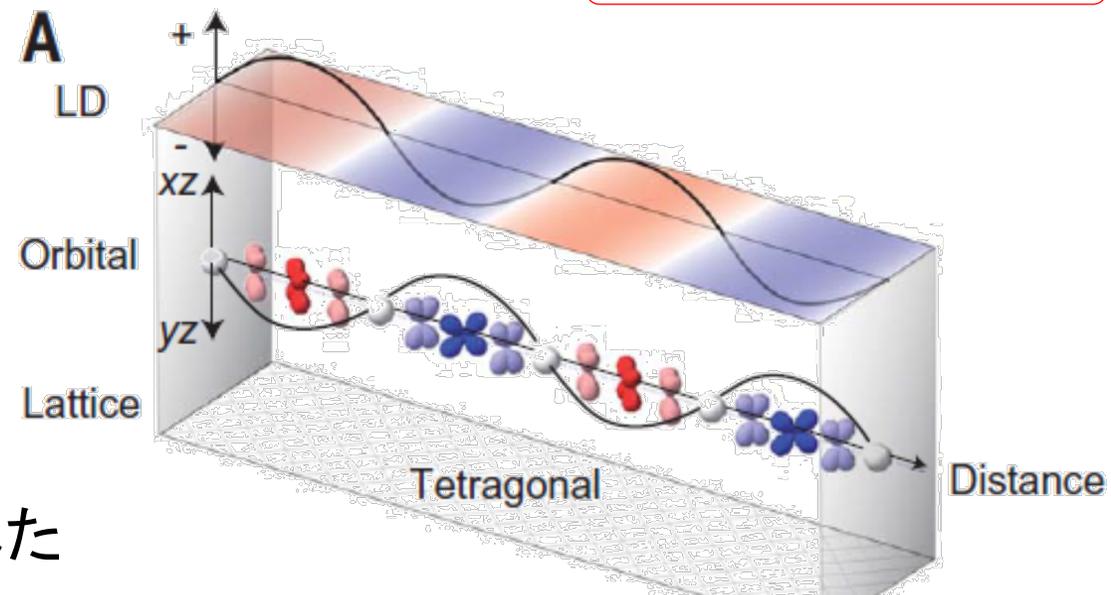
電子の空間パターン

## SUPERCONDUCTIVITY

### Discovery of mesoscopic nematicity wave in iron-based superconductors

T. Shimojima<sup>1\*†</sup>, Y. Motoyui<sup>2†</sup>, T. Taniuchi<sup>2,3</sup>, C. Bareille<sup>2,3</sup>, S. Onari<sup>4</sup>, H. Kontani<sup>4</sup>, M. Nakajima<sup>5</sup>, S. Kasahara<sup>6‡</sup>, T. Shibauchi<sup>7</sup>, Y. Matsuda<sup>6</sup>, S. Shin<sup>2,3,8\*</sup>

*Science* **373**, 1122–1125 (2021)



Sc研の理論で予言された  
軌道波の観測に成功！

# まとめ

## ①超伝導とは？

クーパー対のボース凝縮  
(U(1)ゲージ対称性の破れ)

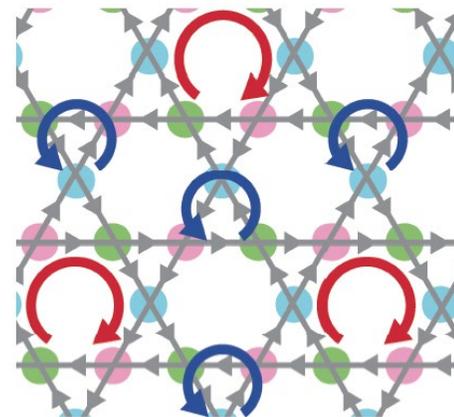
物質が電子に個性を与え、活躍の場を提供する。  
(more is different)

## ②量子相転移

液晶的な(軌道)秩序  
量子揺らぎ

超伝導  
発現機構

カゴメ金属の  
永久自発電流



カゴメ格子  
(幾何学フラスト  
レーション)

電子  
相関

トポロジー

強相関トポロジカル物性！

## ③新規強相関電子系

カゴメ金属  
ねじれ2層グラフェン

凝縮系物理では、新しい物理現象や物理法則が続々と発見されており、

新陳代謝が著しい、若者の活躍の舞台です！

詳細はSc研WEBページをご覧ください。