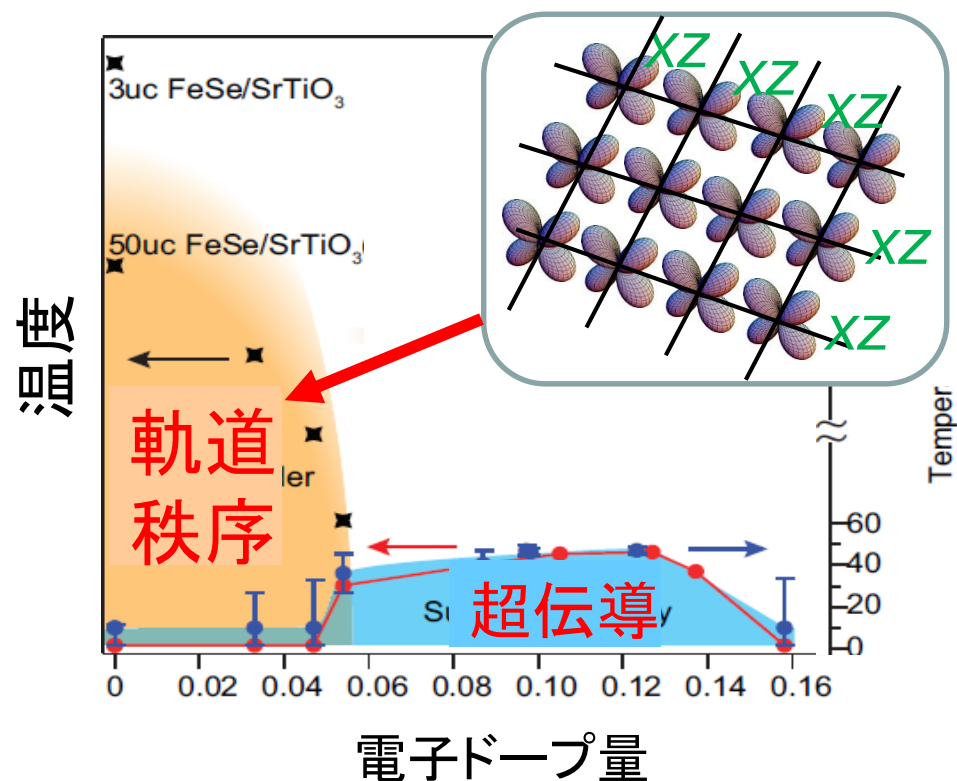




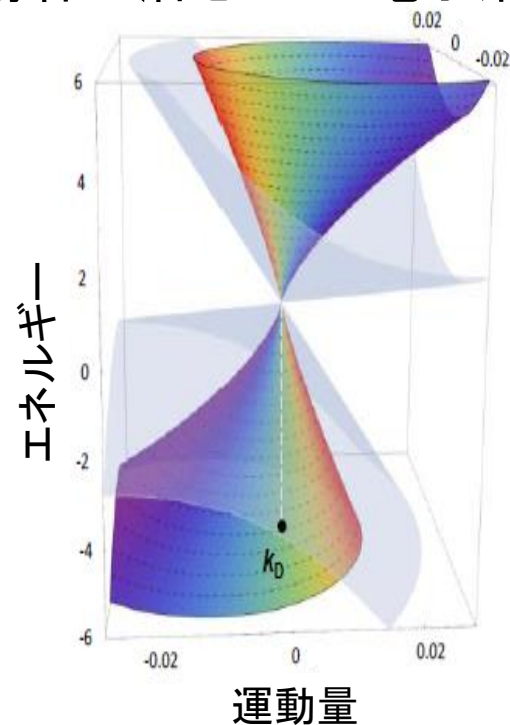
Sc研（凝縮系理論） 研究室紹介

2020年5月30日

軌道の揺らぎによる高温超伝導



有機導体に潜むDirac電子系



質量ゼロのDirac粒子

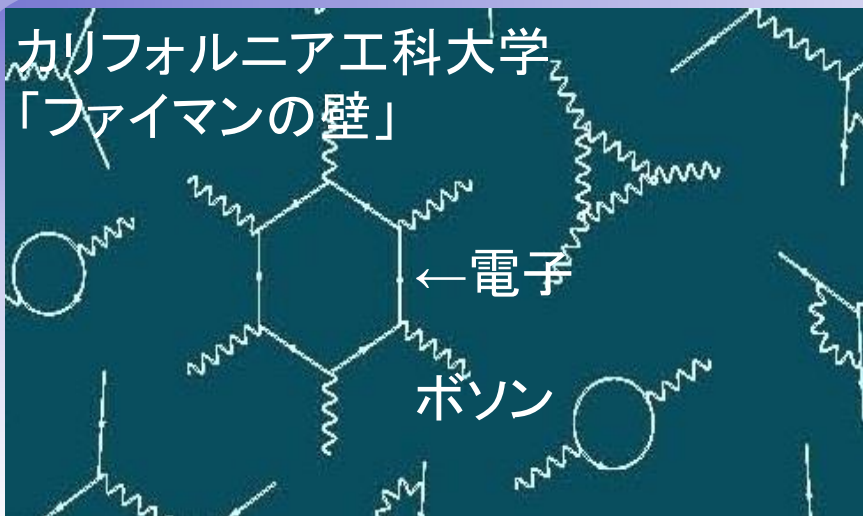
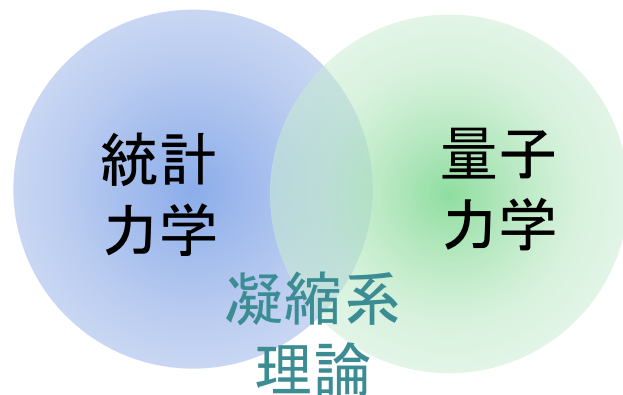
凝縮系理論とは？

「無数の量子力学粒子」が織りなす
新現象・新概念を追求する学問。

本研究室では・・

物性物理学の重要課題！

特に、高温超伝導体や有機導体など、
相関の強い電子系の新規現象に興味を持っています。



理論研究のツール

場の量子論

→ Feynman diagram
によって、量子力学電子
の振る舞いを解明する！

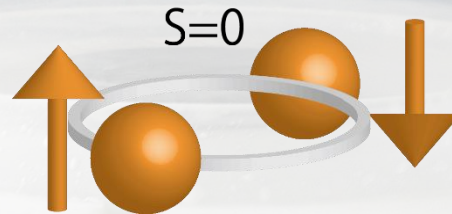
凝縮系物理学の魅力

量子力学粒子が集まると、
想像を超えた面白い現象が起きる

例：超伝導・・・バラバラな電子の位相が、突如そろう！

巨視的量子効果

$$\Psi = |\Psi| e^{i\theta}$$



Cooper対
(ボーズ粒子)

不思議な量子の世界を身近に研究できる。
世界的に日々新しい発見が報告される分野。

- ✓ 新規超伝導のメカニズム
- ✓ 不思議な量子相転移
- ✓ Dirac電子(相対論的電子)

研究室の構成

教員： 紺谷浩(教授)、小林晃人、大成誠一郎(准教授)、
山川洋一(助教)、田財里奈(特任助教)

博士学生： 川口功起*(D3)、大木大悟*、松原舜*(D2) *は学振研究員

修士学生： 安藤智大、今川拓郎、川島惇、川村泰喜、平田徹(M2)、
スパシュ、安藤叡史、伊藤美咲子、斎藤正樹(M1)

1. 多数の教員による充実した研究教育

物性理論の重要な分野をカバーしているので、進学後に自分に合ったテーマを選択できます。

学生の論文出版数や学振の採択率など、研究教育の実績があります。

2. トップレベルの研究成果を輩出中

世界的にも名の通った強相関電子系の研究室です。

頑張れば研究の世界で成功できます。(学生の成長の機会！)

3. 主体性のある学生を歓迎

誰とも気さくに相談できる、自由闊達な雰囲気があります。

その中で、創造的研究に主体性をもって取り込む院生を応援します。

研究室の日々の活動

1. 研究室セミナー(毎週、通年)

各メンバーが年数回発表し、研究進捗の議論を行います。

2. M1輪講(毎週、通年)

教員を交えて、研究に必要な場の量子論を基礎から習得します。

3. 院生輪講(毎週、前期)

院生全員＋教員で教科書を輪講して、[Sc研夏の学校](#)で発表します。
[物性若手夏の学校](#)にも出席できます。

4. コロキウム、集中講義(不定期)

外部から講師を招き、学生や教員の見聞を広げます。

5. 修士論文研究(日常的)

複数の教員たちと日々議論を重ねて、最先端の研究を行います。
研究成果を研究会や物理学会で発表し、論文にまとめます。
外部の研究者との共同研究も活発です。

6. 院生同士の議論(日常的)

大変活発です。最も有益かもしれません。

修士二年間のスケジュール(例)

	修士1年	修士2年
4月	授業開始	
5月	指導教員とテーマ を決めて研究開始！	学振の申請書(進学希望者のみ)
6月		セミナー発表
7月	物性若手夏の学校	
8月	Sc研夏の学校で輪講発表	Sc研夏の学校で修論中間発表
9月	本格的に研究開始！	日本物理学会
10月		研究会発表
11月	研究室遠足(2018年は犬山城)	研究室遠足(2019年は日間賀島)
12月	集中講義	セミナー発表
1月	最初のセミナー発表	研究室修論発表会
2月	研究会発表	物理教室 修論発表会
3月	日本物理学会(順調なら)	日本物理学会

Sc研の研究紹介

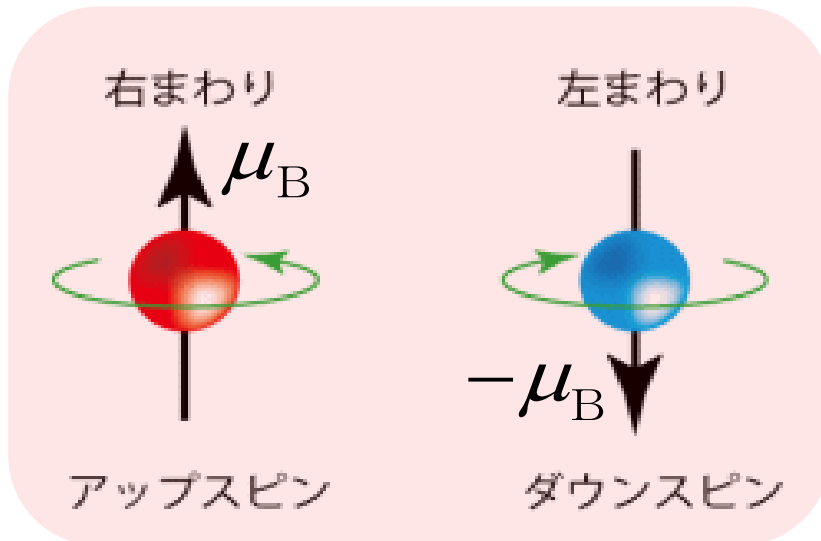
① 基礎編

- ・金属中の電子の姿
- ・従来型超伝導

金属中の電子の姿：第3の自由度

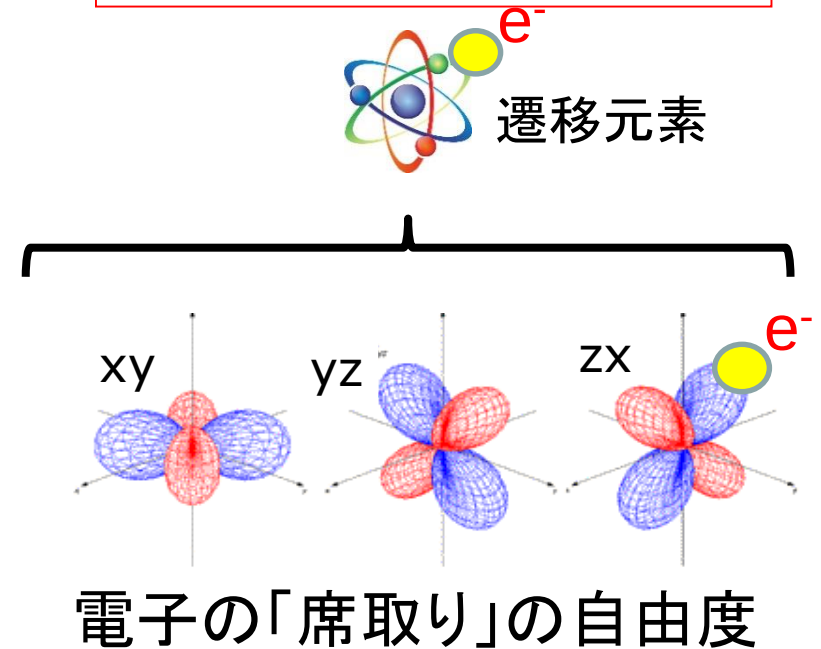
真空中の電子

- ①電荷 = $-e$ ②スピン = $\pm \hbar/2$



物質中の電子

- ③軌道の自由度を獲得



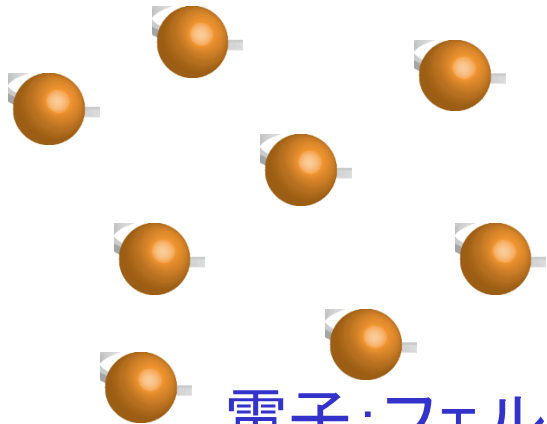
物質は、新粒子を生み出す小宇宙

軌道の自由度が高温超伝導をもたらす

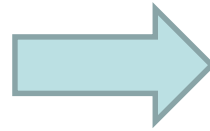
H. Kontani and S. Onari, Phys. Rev. Lett. (2010)

金属中の電子の姿：超伝導

正常金属状態

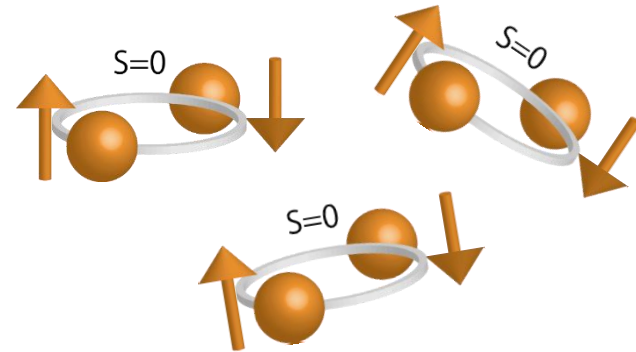


電子：フェルミ粒子



相転移

超伝導状態



クーパー対(複合粒子)：ボーズ粒子

Bardeen-Cooper-Schrieffer (BCS) 理論

超伝導 = 2電子が結合した複合粒子が
ボース・アインシュタイン凝縮する

複合粒子の「糊 (glue)」の起源は？

(起源A) 格子振動

(起源B) 電子相関(クーロン斥力)



1972年ノーベル賞
(Bardeenは1956年にも受賞)

中嶋先生(名大OB)の理論

(起源A) 格子振動による引力機構

理フィロソフィア(2019) ノーベル賞級の偉業

時を語るもの

中嶋先生とBardeen先生
(1986年)



中嶋貞雄博士——格子振動がもたらす電子間引力の発見

中嶋貞雄博士は1950年に27歳で名古屋大学物理学教室に助教授として着任した。その後教授昇格を経て、1960年に東大物性研に異動するまでの10年間、超伝導・超流動などさまざまな重要な凝縮系理論をS研究室から発信した。

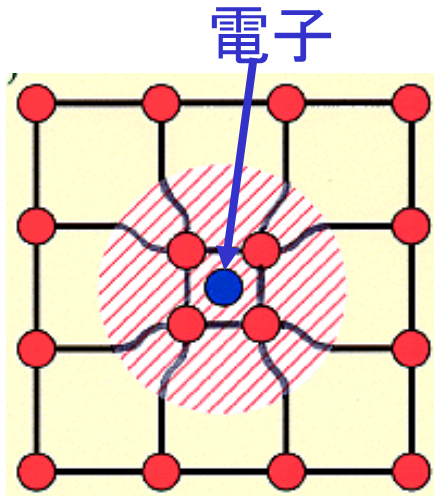
超伝導理論の金字塔である、バーディーン、クーパー、シュリーファーによるBCS理論の完成前夜の1953年、中嶋博士は超伝導の研究に取り組んでいた。粗削りなFröhlichの超伝導理論の問題点を整理し、格子振動とクーロン斥力を同時に考慮した理論を展開し、超伝導の起源である電子間引力が生じることを見出した。折しも京都の国際会議に出席していたバーディーン*は本研究

の重要性をいち早く理解し、彼の依頼を受けた中嶋博士は名古屋駅に出向き、東京へと向かう車中バーディーンに論文の別刷りを手渡した。バーディーンたちにより1957年に完成したBCS理論の礎の一つとして、中嶋博士の仕事はBCSの論文に引用されている。

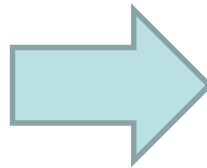
中嶋博士は東京大学物性研究所では所長を歴任するなど、日本の凝縮系物理の指導者として活躍された。超伝導の研究は、1986年の銅酸化物超伝導体の発見や、2008年の鉄系超伝導体の発見を経て、今日まで目覚ましい発展を遂げた。しかし中嶋博士の理論は今日なお輝きを失わない不朽の業績である。

(紺谷 浩 物質理学専攻教授)

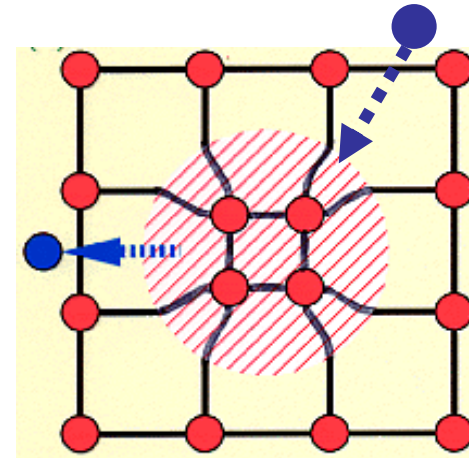
(起源A) 格子振動による電子間引力



1. 格子(正イオン)が電子に引き寄せられる



電子の速度は、
格子振動の
速度の約千倍



2. 格子変形した箇所(正に帯電)に、別の電子が引き寄せられる。

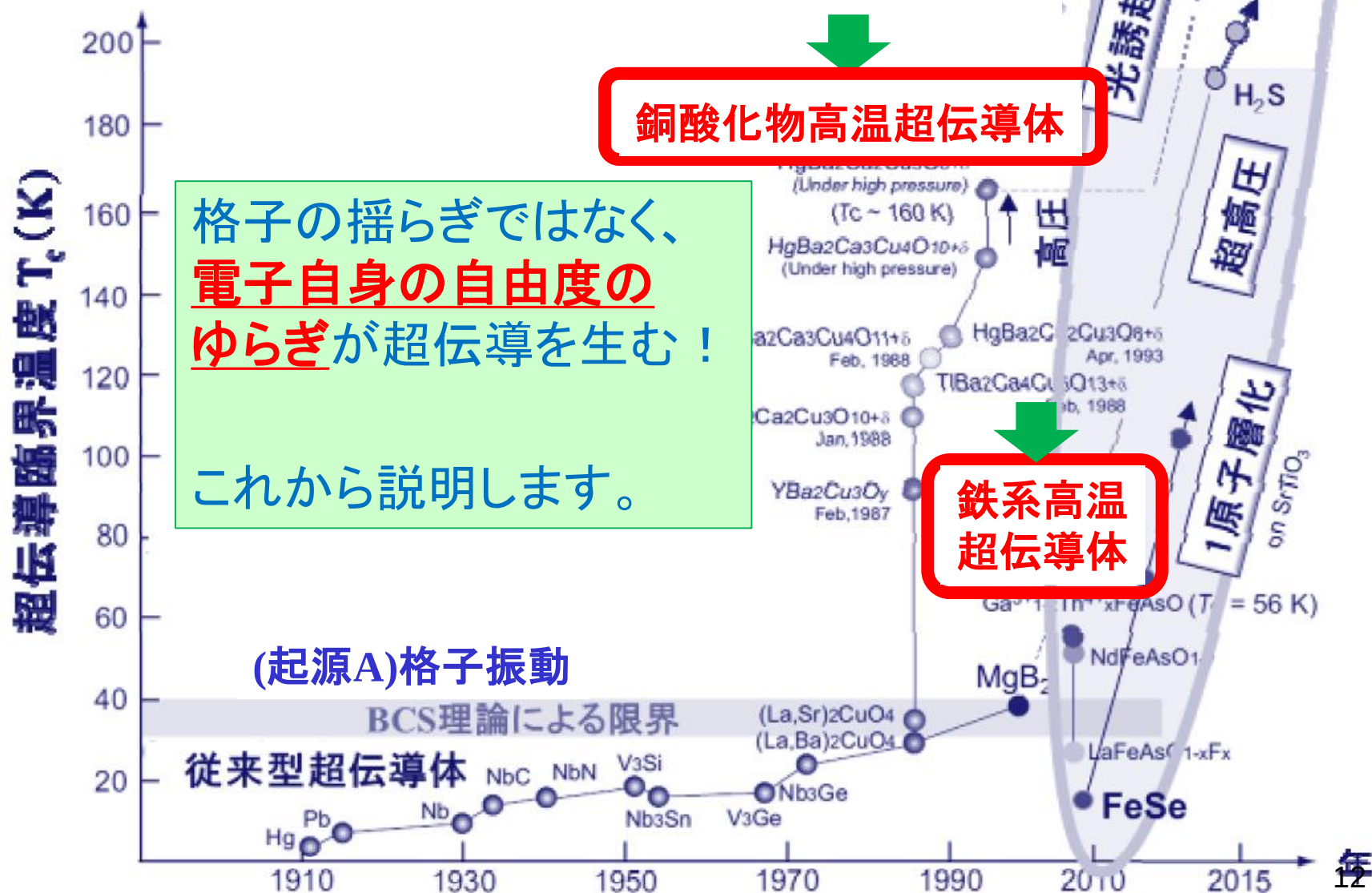
⇒ **時間差の引力！**

(起源A)の引力は弱い→BCSの壁： $T_c < 30\text{K}$

(起源B) 電子相関(クーロン斥力)には壁が無い！

BCS超伝導から強相関超伝導へ

(起源B)電子相関による超伝導



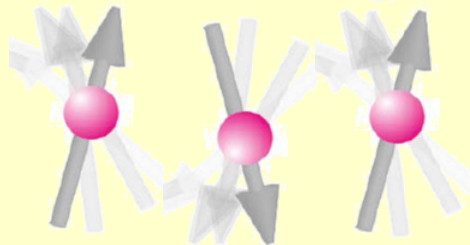
Sc研の研究紹介

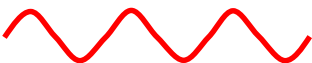
②最先端の研究活動

前提知識: クーロン斥力が強い金属では、格子揺らぎ(フォノン)とは別に、電子自身の自由度である**スピン**や**軌道の時間・空間的揺らぎ**(マグノン、オービトン)が発達。

⇒ 超伝導など面白い量子現象をもたらす。

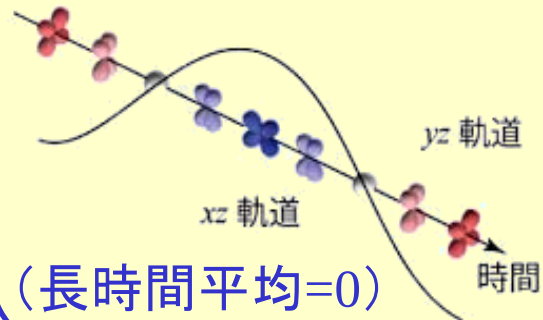
時間とともに変動



スピンの揺らぎ 

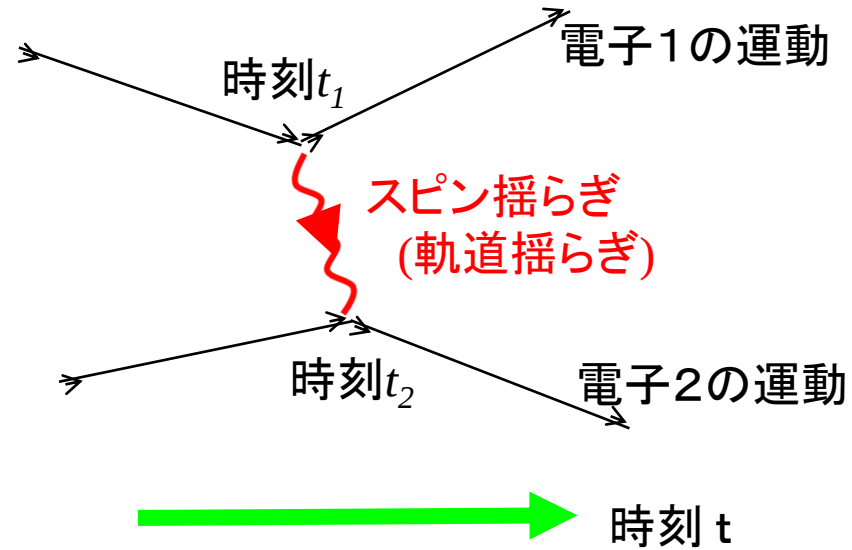
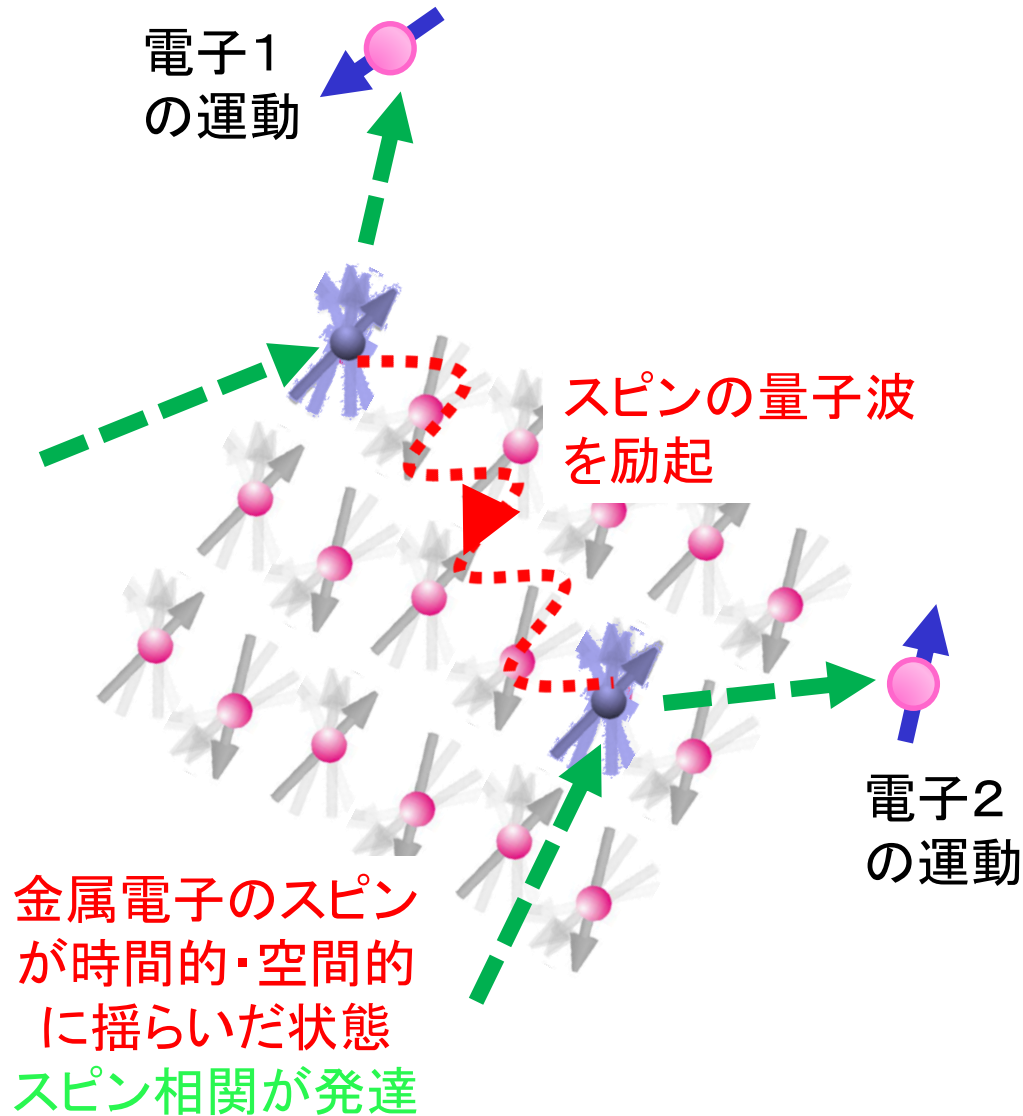
(長時間平均=0 ゆえ、秩序は無い)

時間とともに変動



軌道の揺らぎ 

場の量子論による電子相関の研究



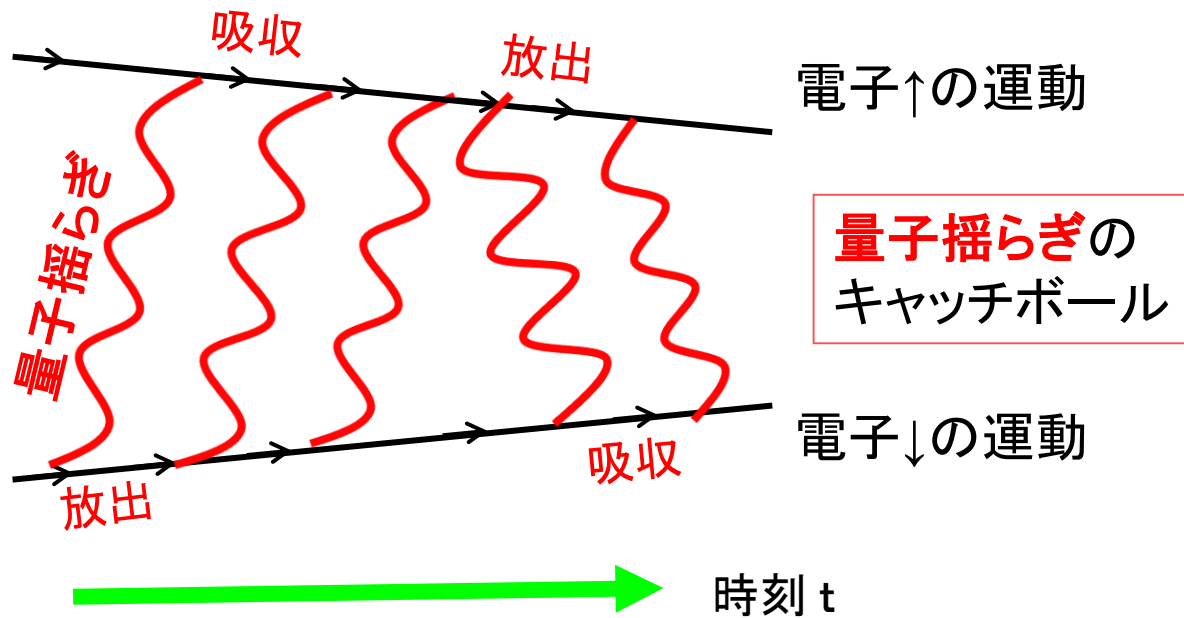
ファイマン図による
最先端の研究



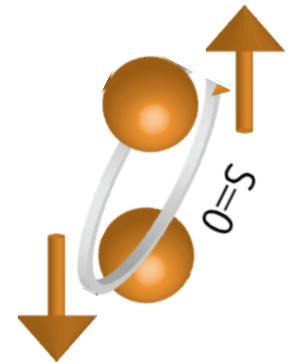
ファイマン博士

いろんな”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の研究

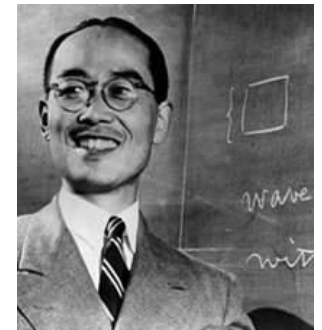


↑電子と↓電子が
クーパー対を形成



”量子揺らぎ”を変えると、
多彩な超伝導が出現！
格子振動、スピン揺らぎ、軌道揺らぎ、...

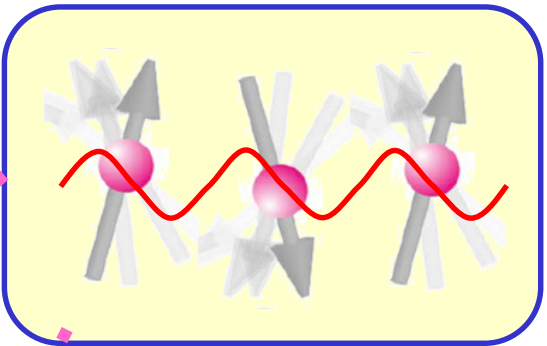
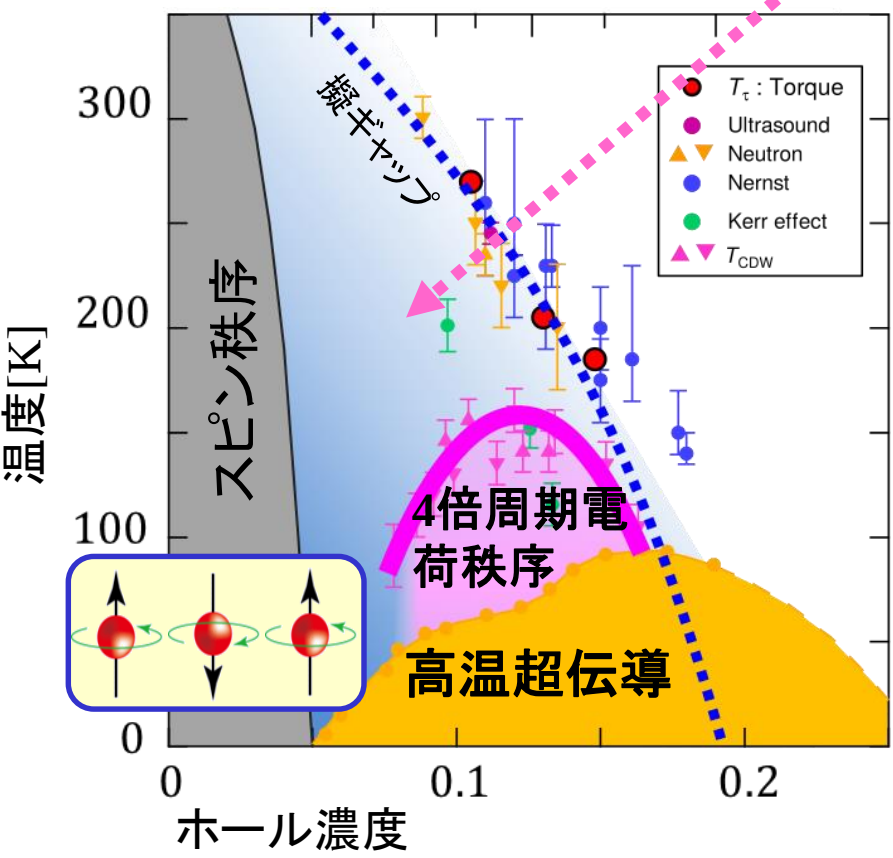
湯川秀樹：
中間子理論
(1949年
ノーベル賞)



(i) 銅酸化物超伝導体: スピン揺らぎ超伝導機構

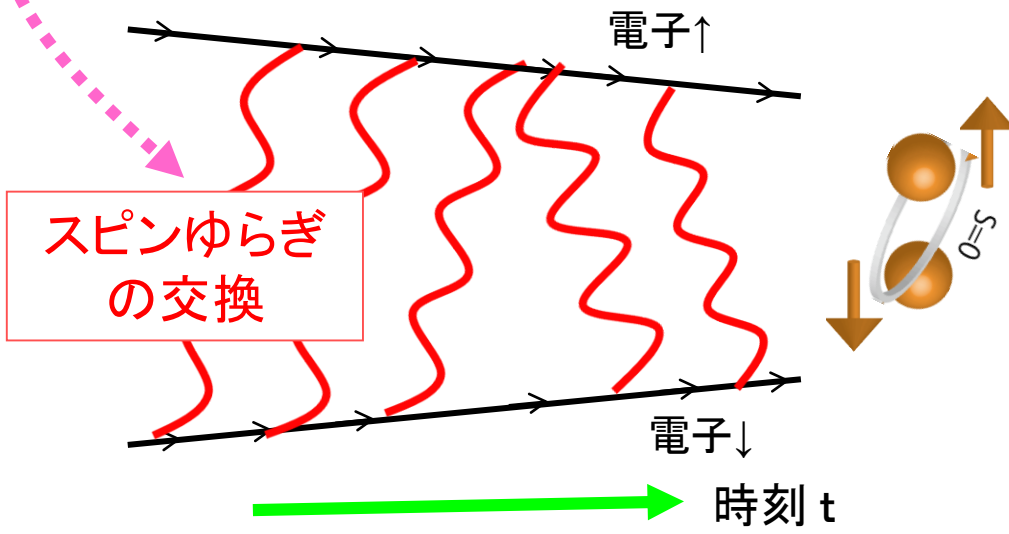
スピン揺らぎの発達

$T_c \sim 160K$



D. Pines
守谷亨, etc

スピン揺らぎが
高温超伝導を与えるファイマン図

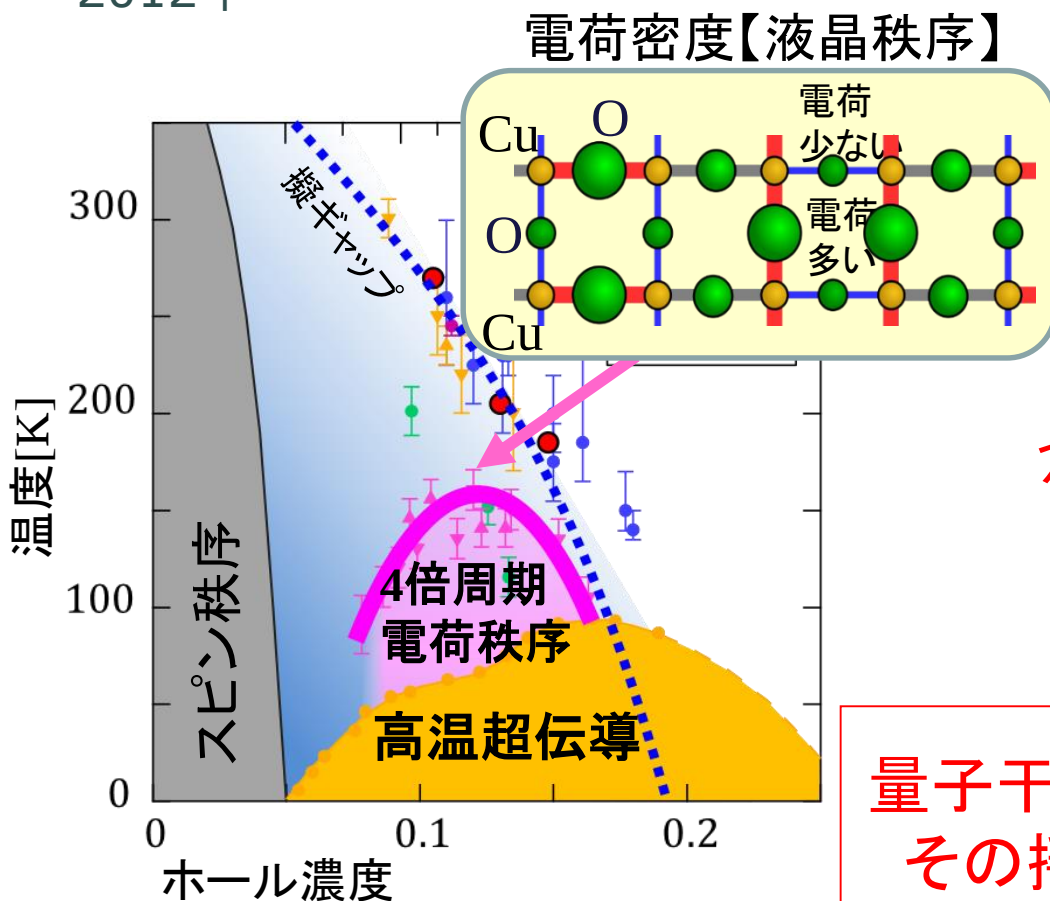


d波クーパー対 ($l=2$) !

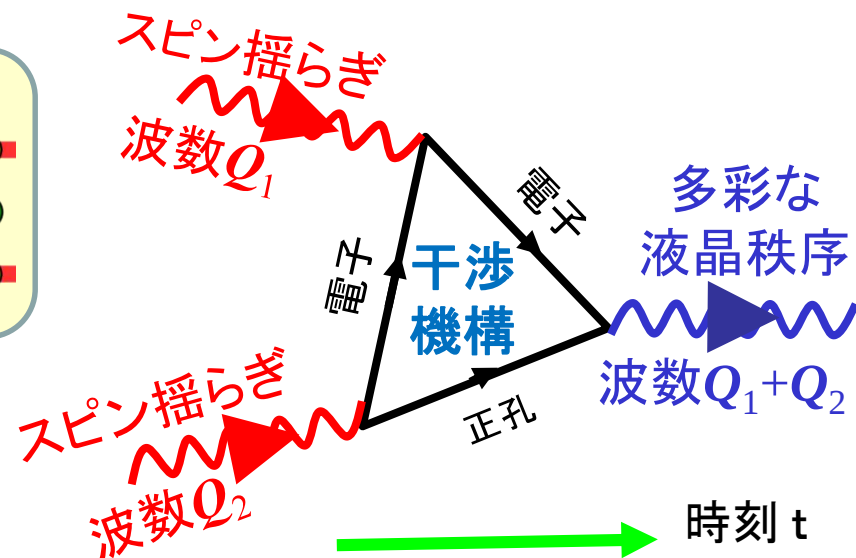
(i) 銅酸化物超伝導の新展開：液晶秩序とは？

回転対称性を破る新種の相転移
「**液晶秩序**」が相次いで発見され、
電子相関の理論が一新した。

2012年～



2つの**スピンの波**が**干渉**して、
液晶秩序が生まれる新機構
を発見 **Sc研究の物理！**



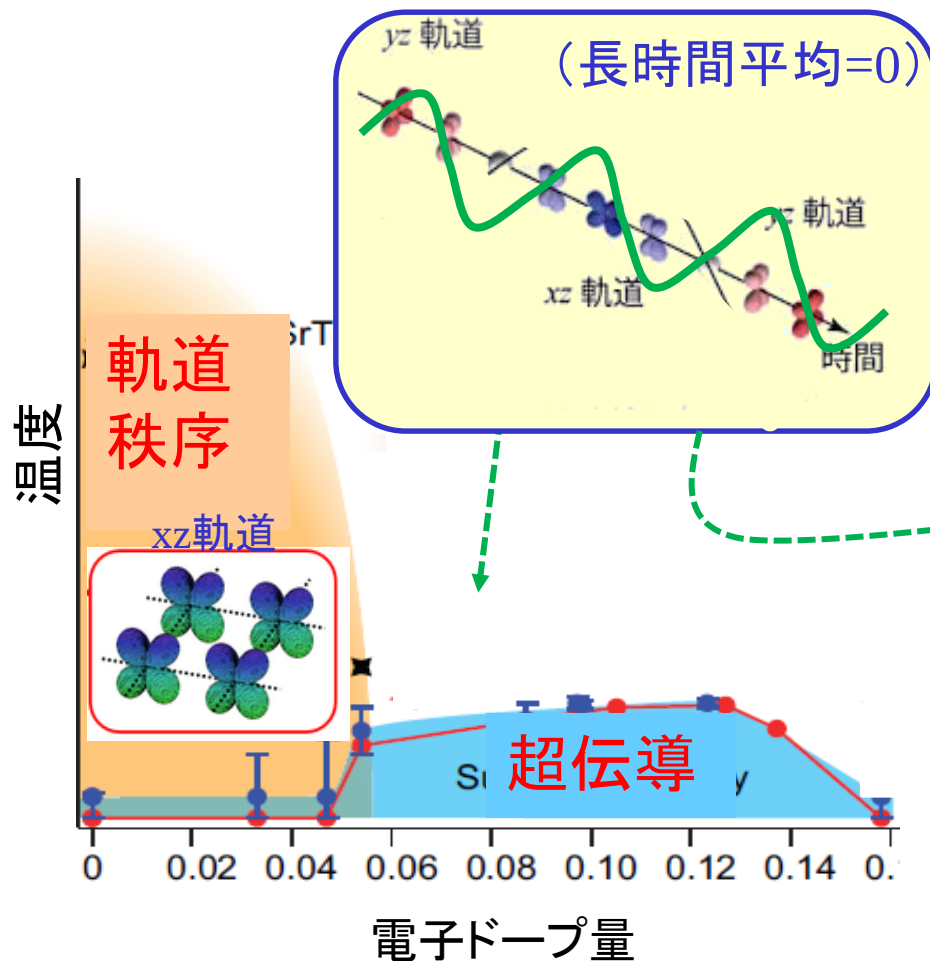
成果

量子干渉が多彩な液晶秩序を生み、
その揺らぎが T_c を上げる可能性！

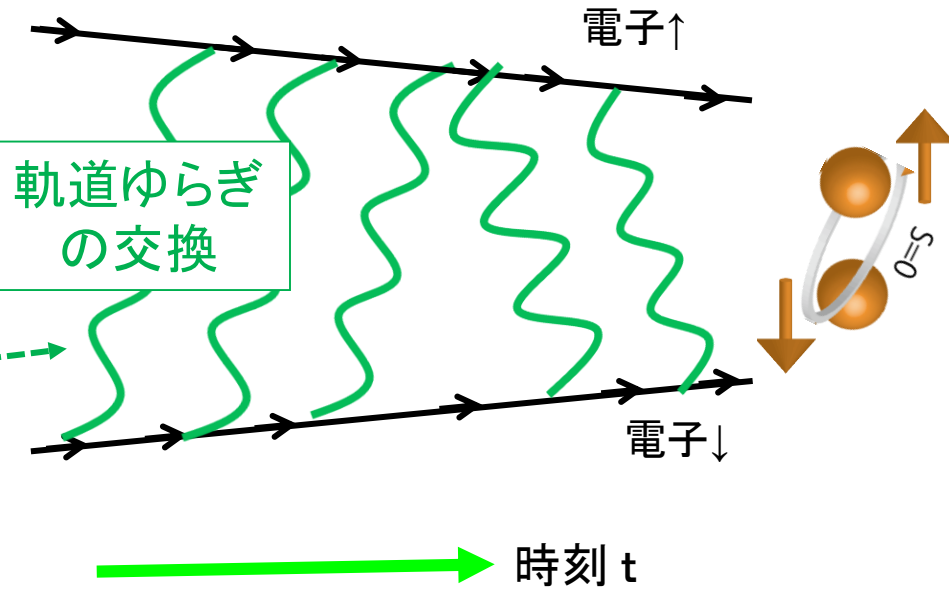
(ii) 鉄系超伝導体: 軌道揺らぎ超伝導機構とは？

鉄系超伝導体(2008年)以降、超伝導の理論が一新した。
鉄の軌道秩序が溶けると、超伝導になる！

Sc研の代名詞: 軌道の揺らぎ



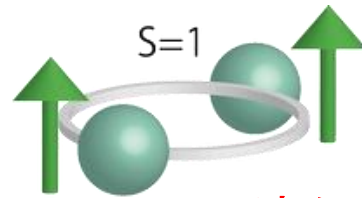
「軌道の揺らぎ」が高温超伝導を与えるファイマン図を提唱



s波クーパー対 ($l=0$) !

(iii) 面白い非従来型超伝導たち

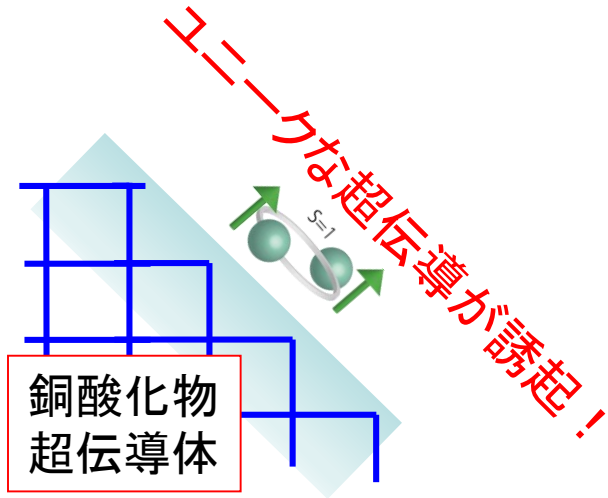
○スピントリプレット超伝導
大変レア！ 注目を集める



新物質が続々と発見！
 KCr_3As_3 , UTe_2 , UPt_3 , etc

p波クーパー対 ($l=1$) など

○表面誘起
超伝導



銅酸化物
超伝導体

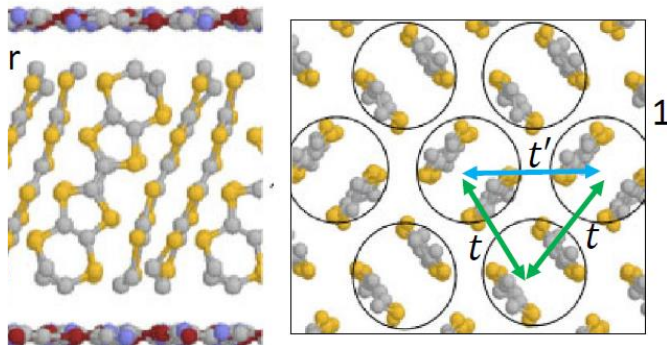
電子相関＋実空間構造
⇒新しい超伝導

✓スピントリプレット超伝導

✓マヨラナ準粒子→量子コンピュータ

○有機導体、
重い電子系

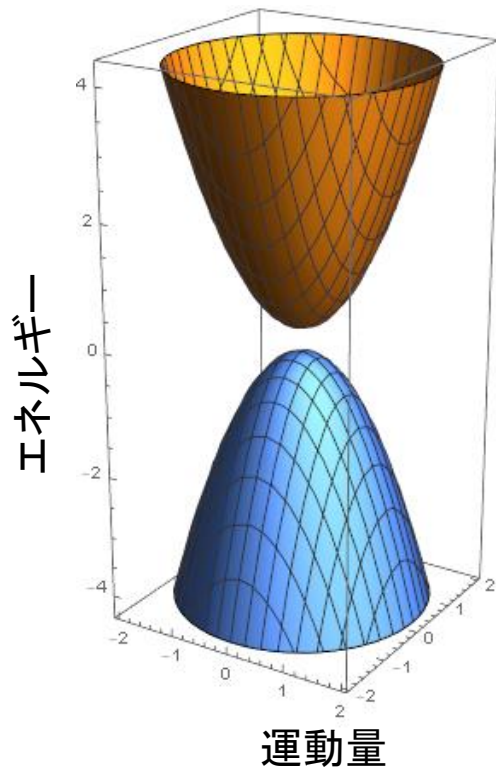
$\kappa\text{-(ET)}_2\text{X}$
超伝導体



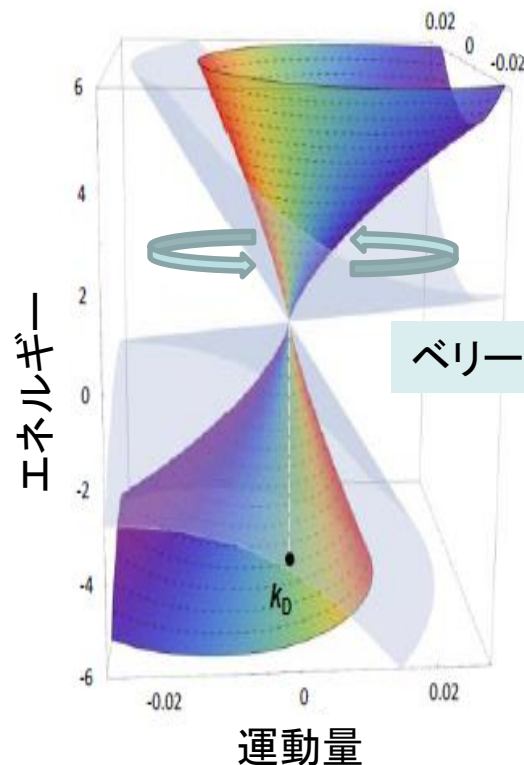
幾何学フラストレーション
液晶秩序
多彩な超伝導

ホットなテーマが
たくさんあります！

(vi) 固体中の新規準粒子 = Dirac電子系



普通の導体



質量ゼロの新粒子



P. A. M. Dirac
1933 Nobel prize

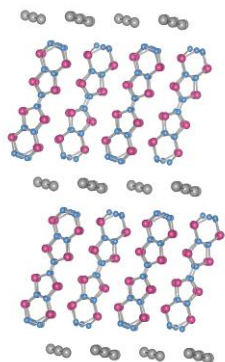
グラフェン(2010年ノーベル賞)・
有機導体など

特有の新奇な物性

- ・不純物をすり抜ける量子輸送
- ・巨大な反磁性
- ・半整数量子ホール効果

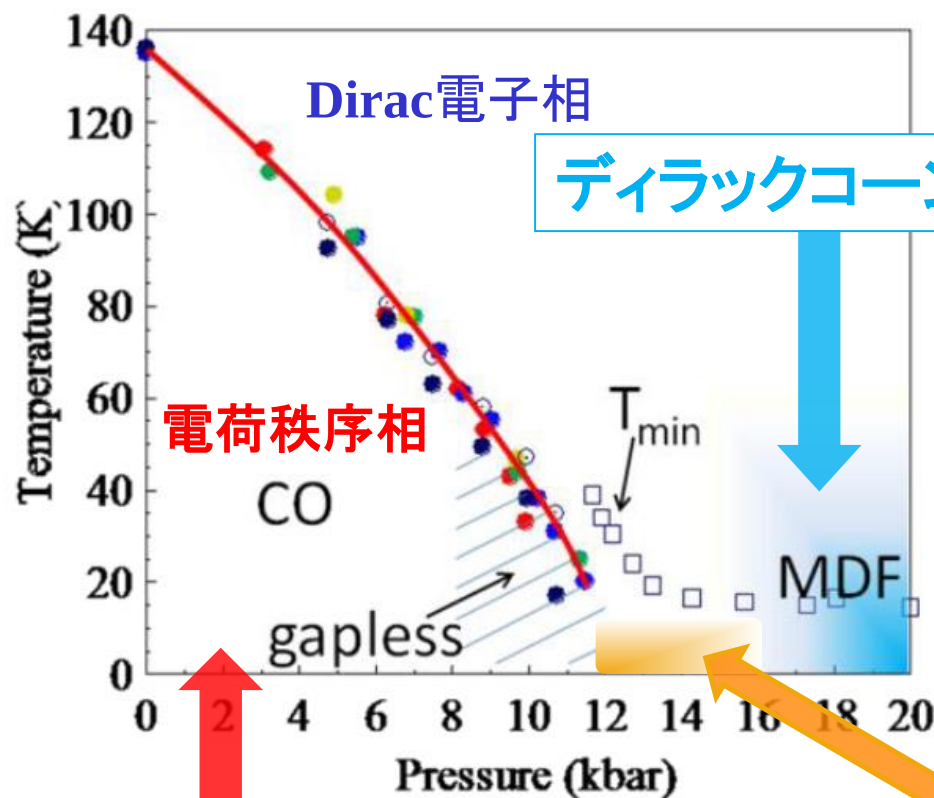
最近の新展開

- ・新奇な電子相関効果

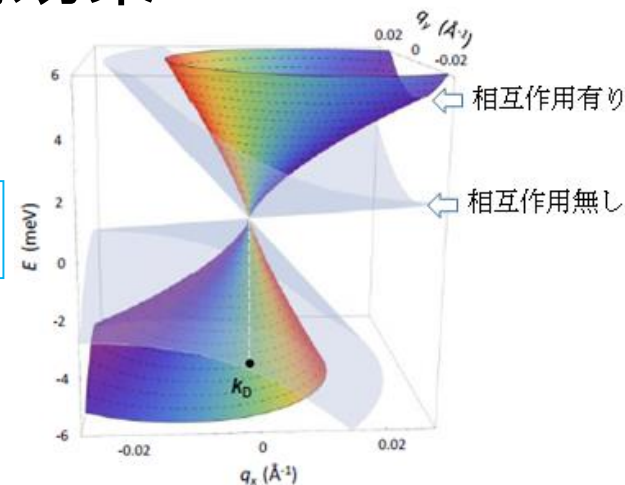
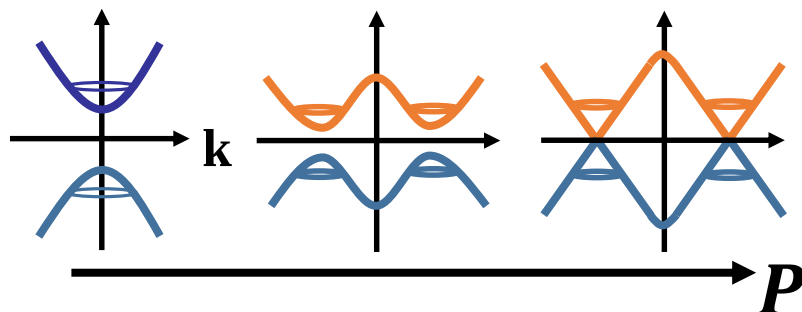


有機導体のDirac電子系は
Sc研で発見された
(2006年)

有機Dirac電子系の電子相関効果



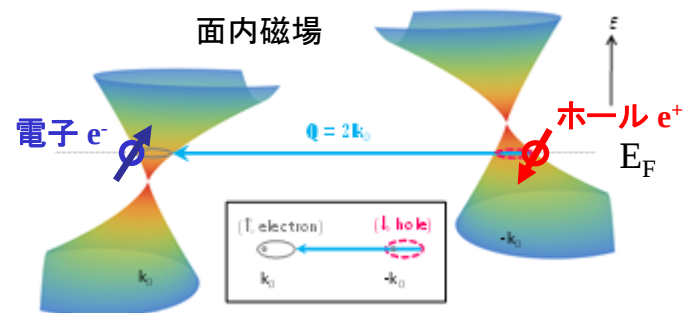
Dirac電子が質量を獲得



クーロン相互作用

ディラック電子

エキシトニック揺らぎ



研究室紹介のまとめ

高温超伝導体や有機導体など、
相関の強い電子系の新規現象を協力して研究しています。

物性物理学の重要課題！

- ✓ 新規超伝導のメカニズム
- ✓ 不思議な量子相転移
- ✓ Dirac電子(相対論的電子)

皆さんの参加をお待ちしています！

詳細はSc研HP
をご覧ください

