

## 文部科学省と国立大学附置研究所・センター 個別定例ランチミーティング

### 第116回 岡山大学 異分野基礎科学研究所 (2025.5.23)

- 12:05 – 12:10 ( 5分) : 研究所・センターの概要 (西原康師)  
12:10 – 12:25 (15分) : 新しい超伝導状態の探索と解明  
— 岡山大学における量子マテリアル研究 (笠原 成)  
12:25 – 12:45 (20分) : 質疑応答

# 岡山大学 異分野基礎科学研究所 (2016. 4一)

## Research Institute for Interdisciplinary Science (RIIS)



# 岡山大学 異分野基礎科学研究所

岡山大学の強みある分野、物理学と生物学を中心に 2016 年 4 月に設立  
物理学、化学、生物学、数理科学の分野で世界トップレベルの成果を輩出する

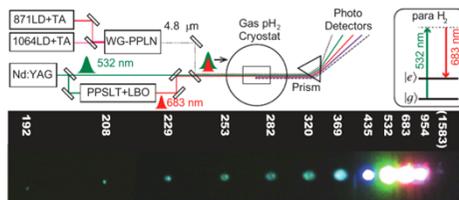
3 つの研究コア、19 の研究グループ、約 50 名の研究者、100 名の大学院生(博士前期課程、博士後期課程)



## 研究コア

### 量子宇宙研究コア

ニュートリノ分光、先端光量子、数理科学

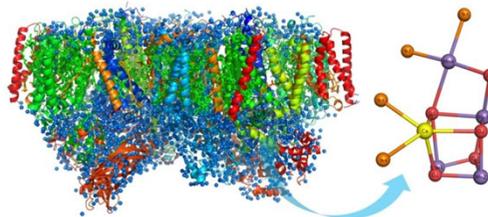


- 先端光量子科学
- ニュートリノ質量分光
- 数理科学

3研究グループ

### 光合成・構造生物学研究コア

天然光合成の機構解明と人工光合成系の開発

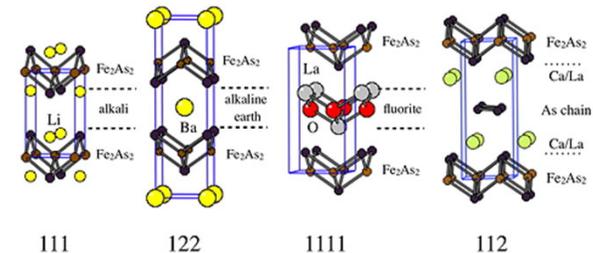


- 機能解析
- 構造解析
- 人工光合成
- 進化・構造生物学
- 表面物理学

6研究グループ

### 超伝導・機能材料研究コア

新規超伝導材料・機能材料の開発



- 高温超伝導材料
- 超伝導物性評価
- 軽元素超伝導・エレクトロニクス
- 新機能材料合成
- 分子科学

10研究グループ

## 目標：原子とレーザーを用いて宇宙の謎に挑む

### (1) 宇宙からなぜ反物質は消えたか

- ▶ 量子干渉性を利用したニュートリノ質量分光
- ▶ 標準理論を超える素粒子物理への展望を切り拓く！

### (2) 暗黒エネルギー解明の手がかりを得る

- ▶ 物理定数の時間変化を超高精密測定！
- ▶ トリウム ( $^{229}\text{Th}$ ) の特異状態を利用 (SPring-8)

### (3) 暗黒物質の正体は何か？

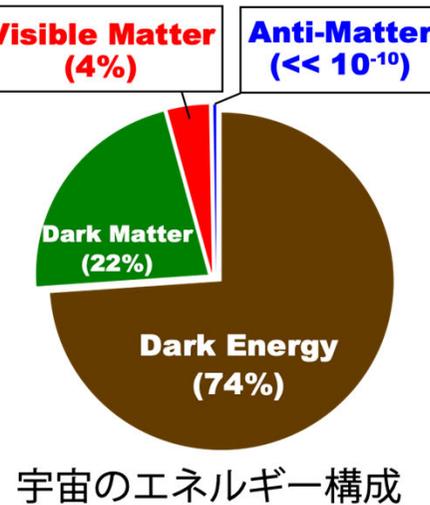
- ▶ 有力候補 Axion 粒子を超高感度で探索
- ▶ 素粒子物理の懸案問題 (Strong-CP 問題) の解決も！

### (4) 標準理論の超高精密検証から切り拓く新物理探索

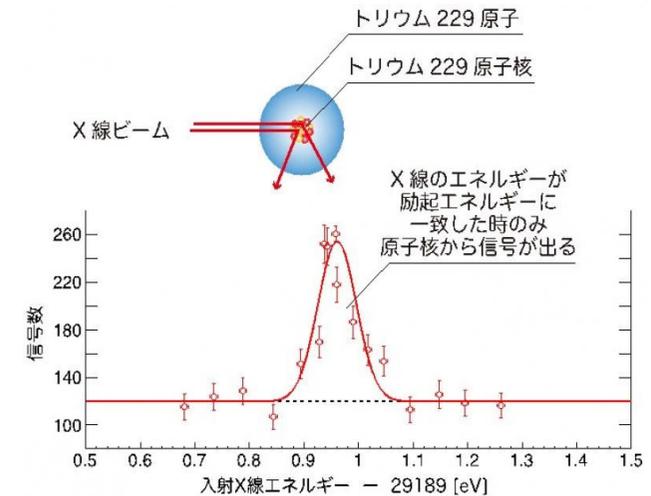
- ▶ レプトンだけから構成される特殊な原子の超高精密レーザー分光
- ▶ J-PARC のミュオン生成施設を利用した研究

### (5) CP 対称性の破れを引き起こす未知の素粒子探索

- ▶ 電子 (素粒子) は点電荷か？
- ▶ 永久電気双極子モーメントの探索実験 (米 Harvard, Yale, NorthWestern 大との共同研究)



吉村浩司教授 笹尾 登教授



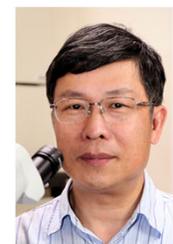
自然界で最小の励起エネルギーをもつ原子核がトリウム229のアイソマー状態をSPring-8のX線を用いて生成することに成功し、超高精密原子核時計の実現に向け大きく前進した (Nature, 573, 238-242, 2019)

岡山発信の独創的なアイデアに基づき、実験室から巨大加速器に匹敵する成果を目指す

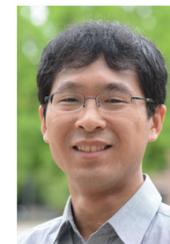
## 光合成・構造生物学研究コア

## 機能解析研究分野

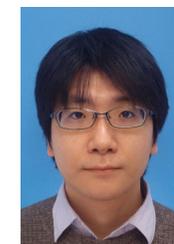
天然光合成における光エネルギーの捕集・伝達機構、水分解・酸素発生反応機構、人工光合成系の開発、生物の進化について研究



沈 建仁教授



秋田 総理准教授

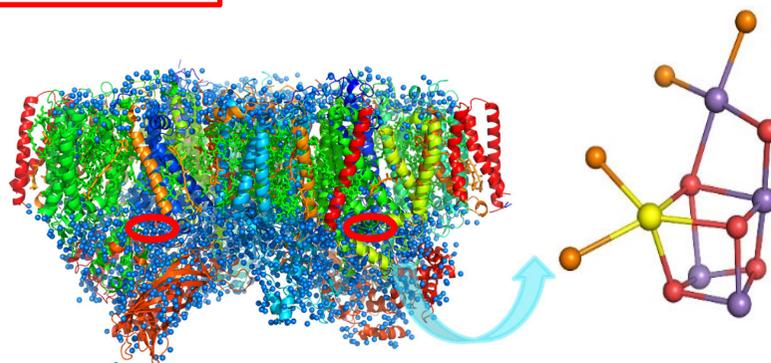


中島 芳樹助教

### 光化学系IIの構造と機能

光化学系II複合体の原子構造をSPring-8のX線やSACLAのX線自由電子レーザーを用いて解析し、水分解・酸素発生反応の機構を解明する。

1. Umena et al. **Nature**, 473, 55-60 (2011). (2011年 Science誌による世界十大成果の一つ)
2. Suga et al. **Nature**, 517, 99-103 (2015).
3. Suga et al. **Nature**, 543, 131-135 (2017).
4. Suga et al. **Science**, 366, 334-338 (2019)
5. Li et al. **Nature**, 626, 670-677 (2024).



光化学系II複合体(右)と水分解触媒(Mn<sub>4</sub>CaO<sub>5</sub>-cluster、左)の構造

### 光化学系Iの構造と機能

光化学系I複合体の原子構造をSPring-8のX線等を利用して解析し、エネルギー捕集・伝達・電子伝達の機構を解明する。

1. Qin et al. **Science**, 348, 989-995 (2015).
2. Yu et al. **Nature**, 556, 209-213 (2018)
3. Wang et al. **Science**, 556, 209-213 (2019)
4. Chen et al. **Science**, 365, eaax4406 (2020).
5. Shen et al. **Nature**, 601, 649-654 (2022)



高等植物由来PSI-LHCI超分子複合体の構造(右:膜の側面から見た図、左:膜の上から見た断面図)

# 超伝導・機能材料研究コアー1

# 高温超伝導材料研究分野

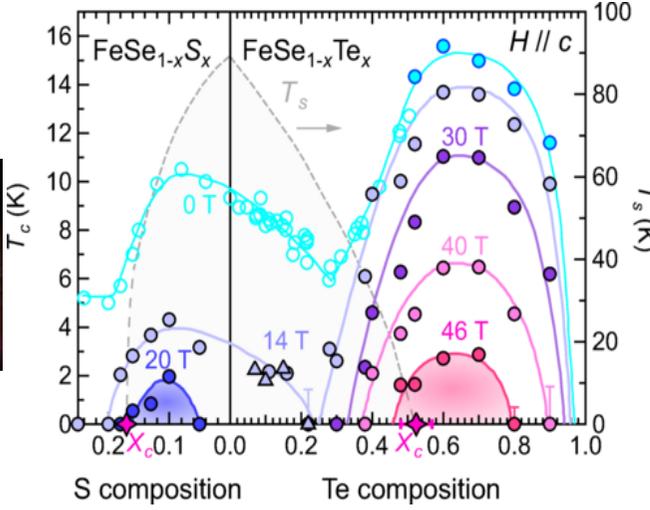
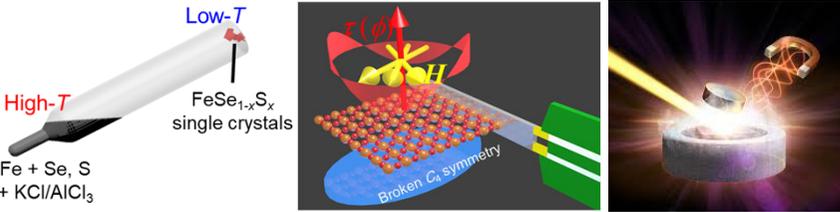


笠原 成 教授 木原 工 准教授

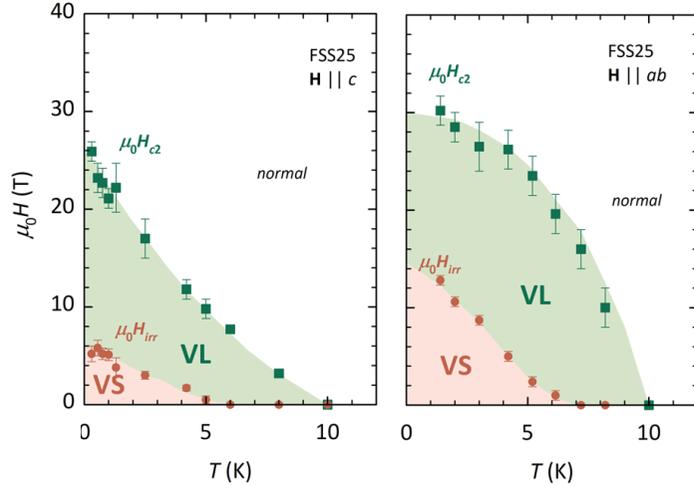
高品質単結晶の開発と  
強磁場実験・精密バルク物性測定を  
駆使した高温超伝導物質の研究

電子液晶状態の揺らぎが媒介する  
超伝導機構の研究

ウルトラノーダル超伝導と  
量子渦糸液体状態の研究



Phys. Rev. X 13, 011032 (2023).



Nat. Commun. 13, 394 (2022).

High-impact journals (論文数)  
Nature(2), Science(3), Nat.Physics(3),  
Nat.Commun.(9), PNAS(5), Sci.Adv.(2),  
Phys.Rev.Lett.(14), Phys.Rev.X(4),

## 超伝導・機能材料研究コア-2

## 新機能材料合成研究分野

私たちのグループでは、有機金属化学、有機合成化学、錯体化学を基盤とし 100% の原子効率を達成しうる新規な有機合成反応の開発を目的とし、研究をおこなっています。さらに、私たちが合成した有機化合物から新たな機能を有した材料の開発も同時におこなっています。



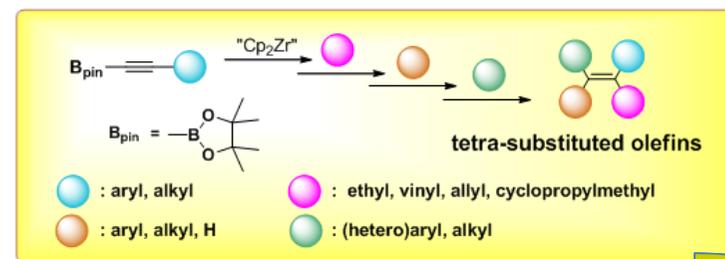
西原 康師教授



森 裕樹  
研究准教授

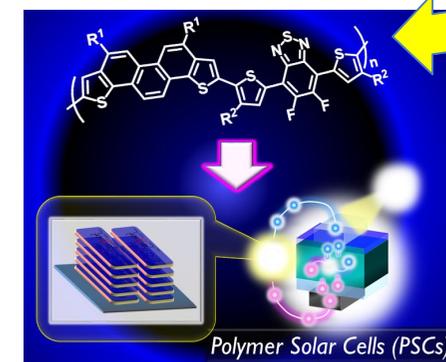
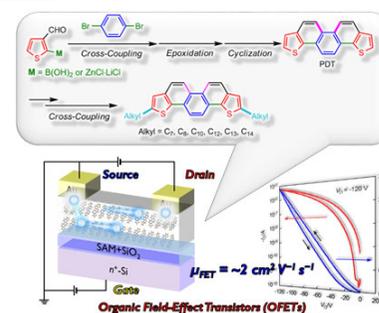
### 有機金属錯体触媒を利用した新規有機合成反応の開発

- ニッケルまたはパラジウム触媒を用いたカルボン酸誘導体の**脱カルボニル型変換反応**の開発
- 多置換オレフィン**の高位置および立体選択的合成と AIE 特性への展開
- フェナセン型有機分子**の精密合成



### 有機エレクトロニクスに向けた機能性有機材料への応用

- 含硫黄縮合多環芳香族化合物の開発と**有機電界効果トランジスタ (OFET)** への応用
- フェナセン骨格を基盤とする半導体ポリマーの開発と高性能**有機薄膜太陽電池 (OPV)** への展開



# 超伝導・機能材料研究コアー3

## 機能分子工学研究分野



仁科勇太教授

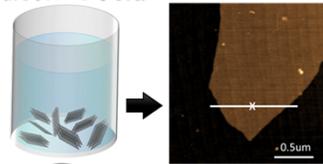
私たちの研究室は、持続可能な応用に向けた機能性カーボン材料の開発に取り組んでいる。これまで、黒鉛から得られる二次元ナノ材料である酸化グラフェン(GO)に10年以上にわたり注目してきた。その形成機構を解明し、制御可能な合成法の確立を目指すとともに、GO複合材料を触媒、電池、導電性フィルム、発光デバイスなどへ応用する研究を行っている。これと並行して、高分子やバイオマスから炭素材料を開発することで資源循環の促進にも取り組んでいる。これには、木材や竹といったバイオマスを従来のパルプ工程を経ずに直接セルロースナノファイバーへと変換する技術も含まれる。さらに、構造や表面化学を精密に設計したナノ材料の機能を明らかにし、環境・エネルギー関連分野への応用を探求している。

### 材料生産

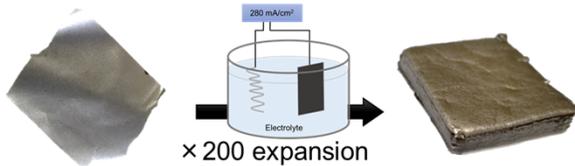
#### 1. 化学酸化



#### 3. 機械的剥離



#### 2. 電気化学酸化



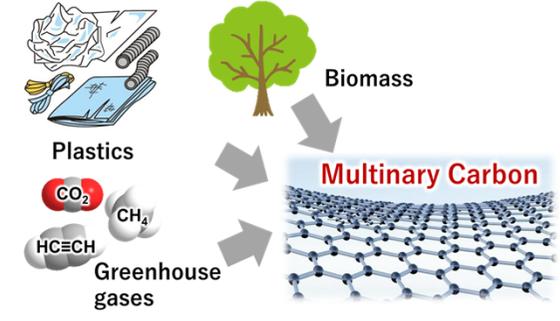
#### 4. 解繊



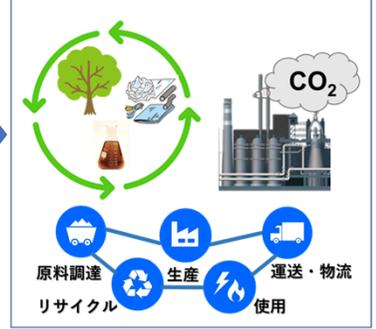
メカニズム解析研究に基づいて、ナノ材料の大規模製造法を開発している。  
産業界との連携により、様々な材料を実用化に向けて提供することができる。

### 資源循環

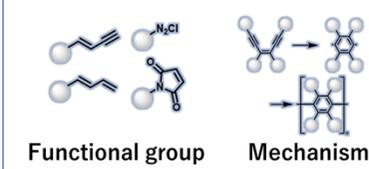
#### ① 物質生産



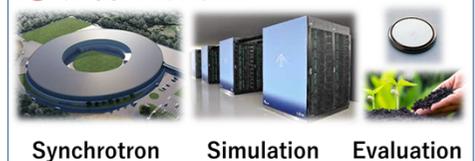
#### ② アセスメント



#### ③ 分子工学



#### ④ 分析・応用



# 新しい超伝導状態の探索と解明 —岡山大学における量子マテリアル研究—

異分野基礎科学研究所 超伝導・機能材料研究コア 教授

笠原 成



科学技術振興機構

戦略プロポーザル  
量子2.0 ~量子科学技術が切り拓く新たな地平~

日刊工業新聞より

## 日本が取り組む量子技術の全体像

Society5.0  
社会ニーズ

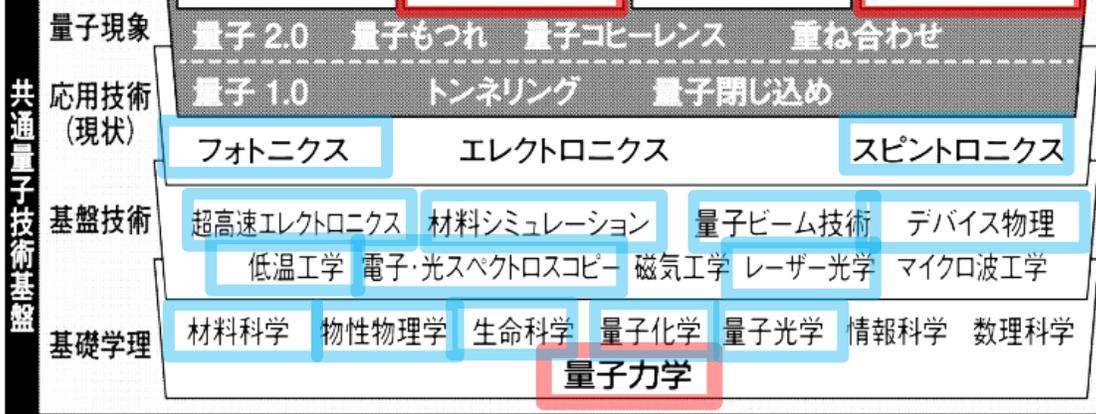
生産性向上   安全・安心   健康・医療・介護   環境・エネルギー

戦略的  
推進課題

量子 コンピューター	量子計測・標準 量子医療・診断	量子 セキュリティ	トポロジカル 材料
---------------	--------------------	--------------	--------------

主要な  
技術領域

<b>量子コンピューティング・シミュレーション</b> ・NISQ ・量子アニーリングマシン ・超伝導量子ビット ・イオントラップ ・光量子ビット ・冷却原子	<b>量子計測センシング</b> ・ダイヤモンド NV 中心 ・室温超核偏極 ・量子もつれセンサー ・光格子時計 ・原子干渉計 ・ジャイロスコープ	<b>量子暗号・通信</b> ・暗号鍵配送 (QKD) ・量子中継 ・量子メモリ ・量子テレポーテーション	<b>量子材料</b> ・トポロジカル量子 (マヨラナ、ワイル…) ・スピントロニクス材料 ・エネルギー変換材料 ・フォトンクス材料など
---	---	---	--



<量子マテリアル・量子計測/センシング>  
量子科学技術のシーズ, 進展著しい  
世界的にも競争の激しい学術分野

特に量子マテリアルは  
日本が優位性をもつ研究分野

岡山大学は  
量子マテリアル/量子センシング  
において特に強み  
世界と伍する研究を展開

# 異分野基礎研を中心とした量子マテリアル研究 + 量子センシング研究

## 異分野基礎研を中心とした融合研究

- 量子マテリアルと量子センシングが一体となった研究を推進

## 強磁場研究設備 国内の強磁場施設と互角

- 20テスラ超伝導マグネット (世界トップクラス, J-PEAKSで導入・整備中)
- 30テスラパルス強磁場 (ロングパルス, 中四国・九州で唯一)
- 各種超伝導マグネットを各研究室が配備 [16(18)T x2台, 14T, 12T x3 など]

## SPring-8との強い連携 最も近い国立大学

- 第4世代大型放射光施設 SPring-8 IIが整備  
現行の約100倍の輝度を持つ世界最高峰の放射光  
放射光を用いた量子マテリアル研究  
持ち運び可能なADR装置によって原子核時計の開発などを推進

## クライオジェニック研究環境 量子科学の開拓に必須

- ヘリウム液化機  
物理学、化学、生物学など、様々な先端科学研究を支えるコアファシリティ  
中四国では本学と広大のみにしかない誇るべき設備

量子科学技術のシーズ開拓  
量子マテリアル, 量子センシング  
~ 融合研究の推進 ~

世界トップレベル  
強磁場超伝導磁石  
クライオジェニック研究環境  
量子マテリアル、量子センシングの最先端研究  
を進めエキゾチック量子技術を創出

原子核時計  
最先端レーザー開発  
アシンメトリ量子物質  
超伝導物質  
量子液晶物質  
トポロジカル量子物質  
スピントロニクス  
フォトニック結晶  
トポロジカル物質の強磁場伝導制御  
Majorana fermion  
モアレ積層層状物質の高磁場下新規電子状態  
イリジウム原子  
酸素原子  
アナホールモーメント  
ループ電流

レーザー  
ダイヤモンド  
NV粒子  
微小虫  
マイクロ波  
アンテナ

生体量子  
センシング  
超高速  
レーザー分光  
反応化学

Yttrium iron garnet  
Gold  
Input  
Output  
Cold  
Hot  
Z<sub>2</sub> flux  
Majorana fermion  
Tetragonal  
Distance  
Orbital  
Lattice  
LD  
xZ  
yz

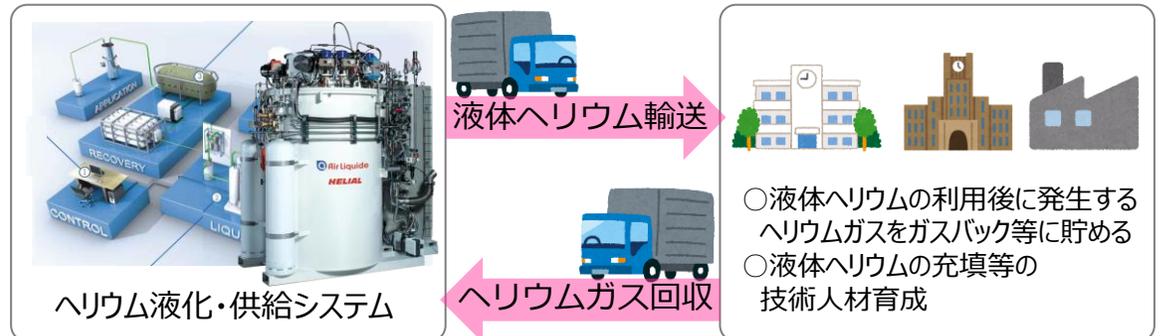
sapphire  
void  
5 μm  
100 μm

人工知能  
MACHINE  
LEARNING  
機械学習

極限強磁場

フロンティア研究者間の新しい連携  
~新しい視点を得るシナジー効果~

## 中四国・播磨ヘリウムリサイクルネットワーク (HeReNet) 岡山大学と供給側連携機関



# 強磁場を活用した量子マテリアル研究

Nijmegen強磁場研究所 (オランダ)  
定常磁場 38テスラ

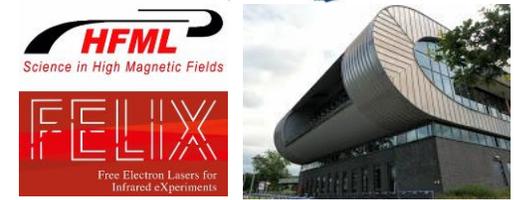
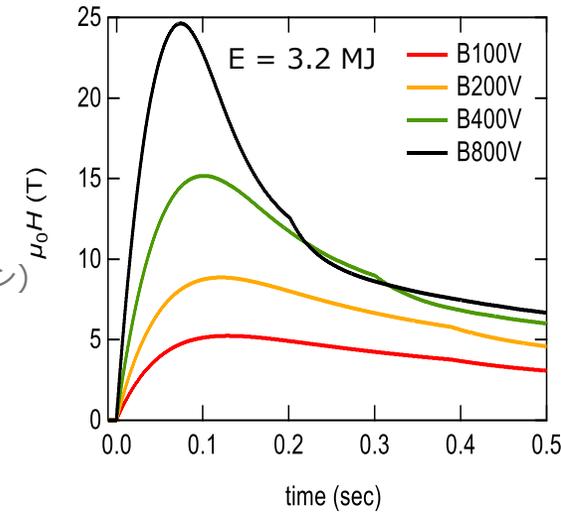
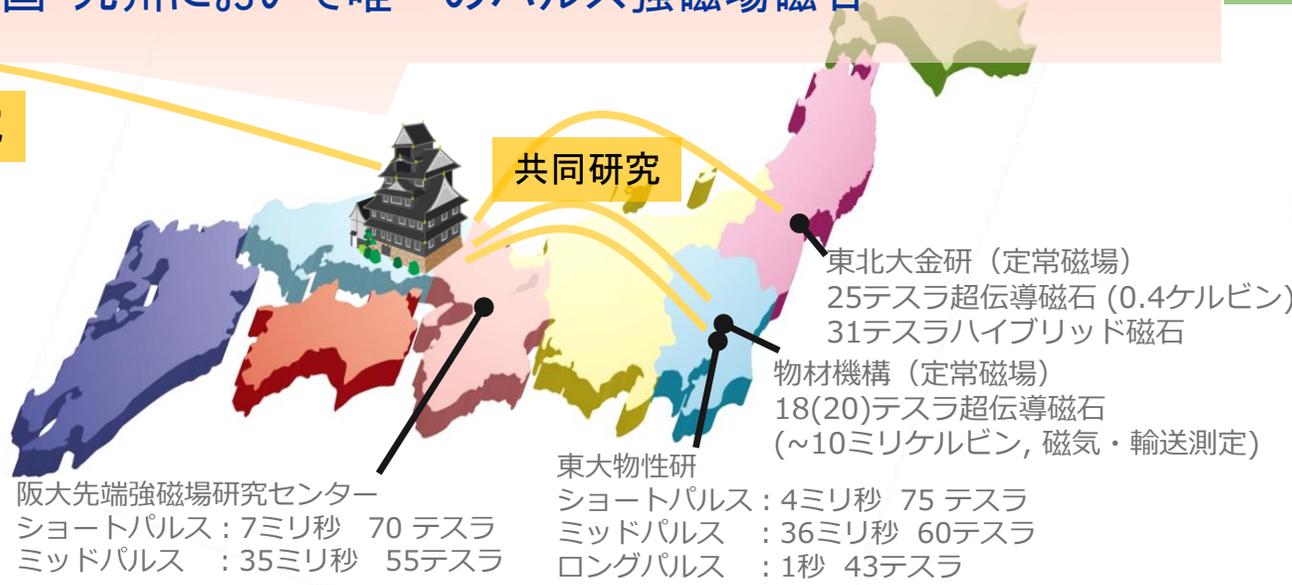


## 岡山大学: 独自の強磁場研究環境

- ① J-PEAK事業を通じ、世界トップクラスの20テスラ超伝導磁石
- ② 中四国・九州において唯一のパルス強磁場磁石

岡山大学・パルス磁石初号機  
25テスラ・ロングパルスを実現  
→ コイルの最適化により30テスラへ  
式号機(40テスラ・ミッドパルス)計画中

### 国際共同研究



'22-'27年度「極限定常磁場下での精密熱輸送測定の実装とエキゾチック凝縮相の物性開拓」



強磁場研究環境(強磁場超伝導磁石+パルス磁石)  
→ 岡山大学全体の研究を加速するとともに  
国内を代表する重要研究拠点を形成

世界トップクラスの研究環境(20テスラ, 10ミリケルビン)と、  
他機関にない熱測定技術をコアとして、オリジナリティの高い研究を推進



“量子マテリアルの先端計測”  
まで融合した研究を牽引



# 新しい超伝導状態の探索と解明

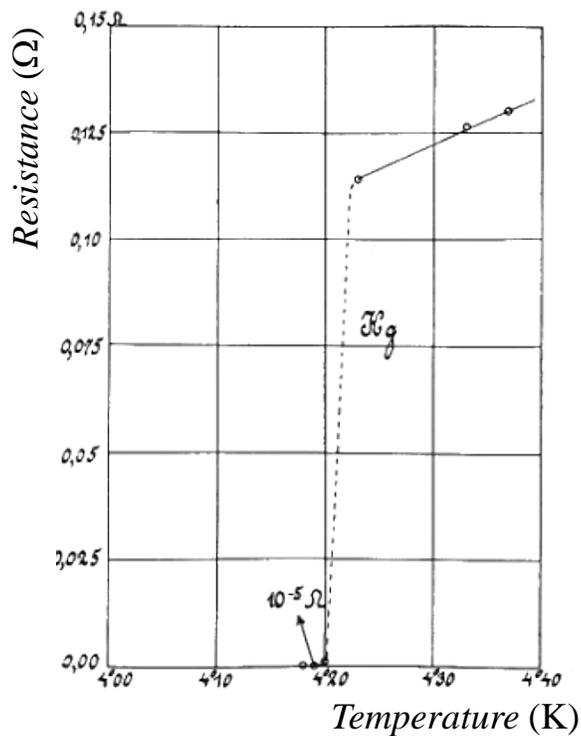
量子力学的多体効果によって物質中で実現される  
新しい凝縮状態の研究



**物質中の電子の世界は  
すばらしい驚きに満ちあふれている！！**

# 新しい超伝導状態の探索と解明

量子力学的多体効果によって物質中で実現される  
新しい凝縮状態の研究

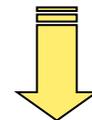


Heike Kamerlingh Onnes



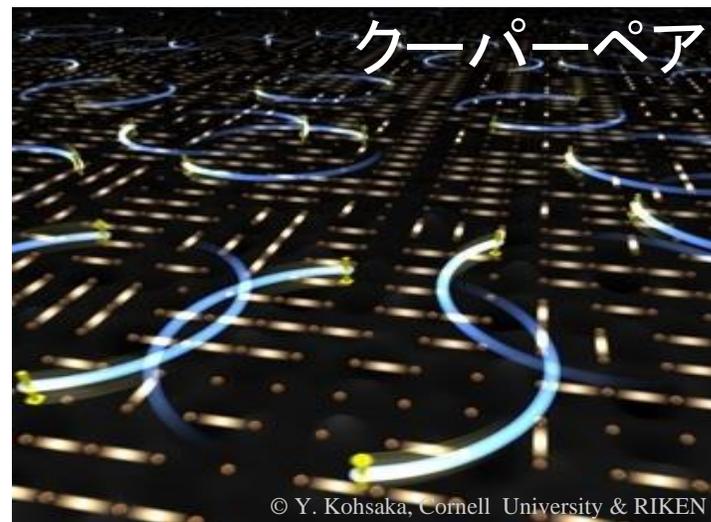
1911年 Hgにて **ゼロ抵抗 (超伝導)** を発見  
1913年 ノーベル物理学賞

物質中の電子：量子力学的に振舞う



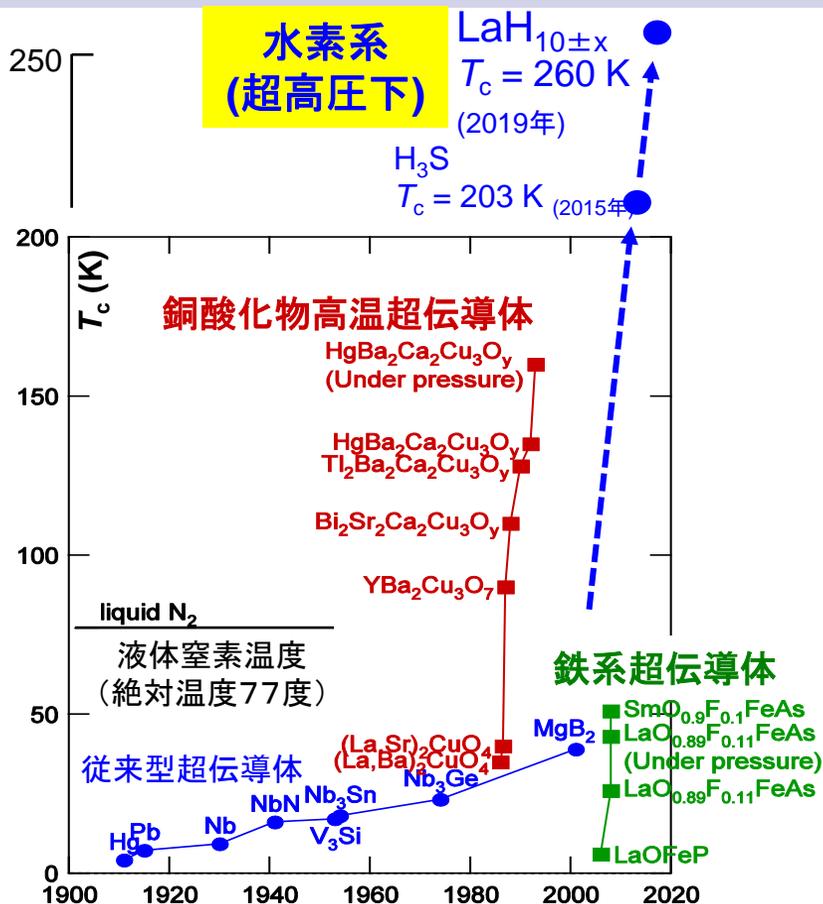
超伝導：量子現象がマクロに現れる

“自然界で最も美しく劇的な相転移”

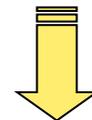


# 新しい超伝導状態の探索と解明

量子力学的多体効果によって物質中で実現される  
新しい凝縮状態の研究



物質中の電子：量子力学的に振舞う



超伝導：量子現象がマクロに現れる

“自然界で最も美しく劇的な相転移”

**非従来型超伝導**

銅酸化物高温超伝導体  
 鉄系高温超伝導体  
 重い電子系超伝導体

BCS理論 (標準理論) の  
 枠組みを越えた超伝導

強く相互作用しあう電子系 (強相関電子系)  
 が示す多彩な量子現象

100年前には想像もできなかったような奥深い世界

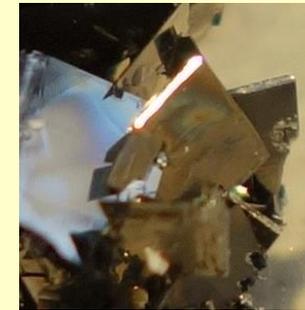
## 量子力学的多体効果によって物質中で実現される 新しい凝縮状態の探索と解明

- (1) 非従来型超伝導: 高温超伝導の解明や新奇超伝導状態の探索など
- (2) 新奇電子状態: 量子液晶状態、量子臨界現象など

## 純良単結晶の作製と低温物理の楽しみ

### 豊富な実験手段

- (1) 物質合成 : 世界最高品質の純良結晶の作製
- (2) 精密物性測定 : 比熱測定、磁気異方性、電子/熱輸送
- (3) 実験装置開発: パルス強磁場発生装置



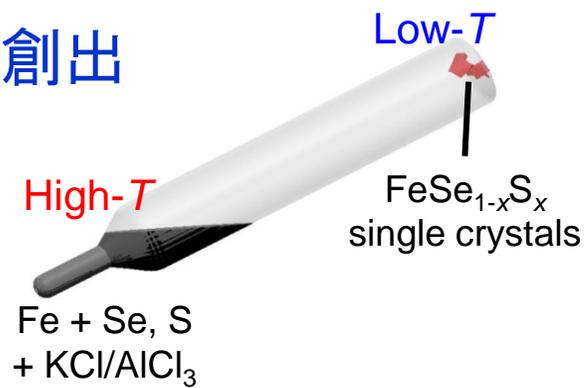
**創り、測り、探求する** 世界最高レベルの組み合わせ！！

ボックス炉 (1200°C)



## 純良単結晶の創出

フラックス法,  
化学蒸気輸送法,  
TSFZ法, *etc.*



管状炉 (1000°C, 1500°C)

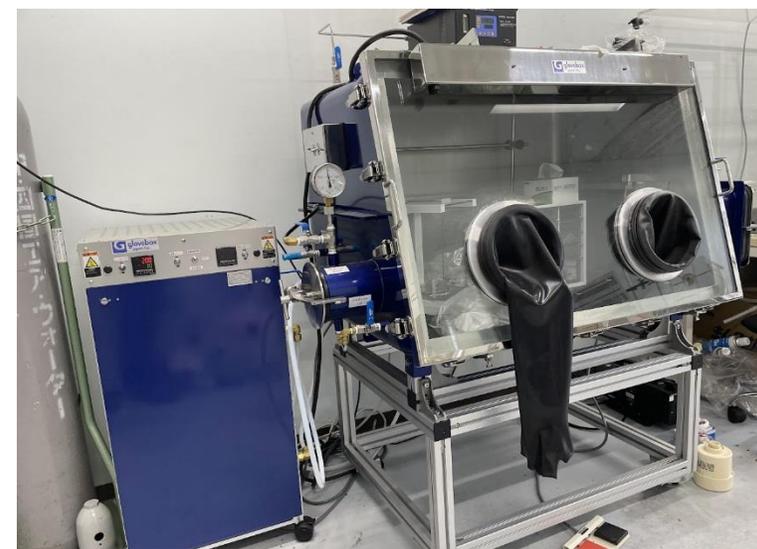


FZ炉 (2100°C)



世界最高レベルの  
純良単結晶を系統的に作製  
東大、京大、オックスフォード大、  
ブリストル大などと共同研究

アルゴン・グローブボックス



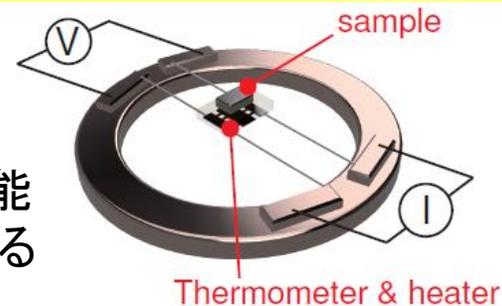
# 極限分解能をもつ精密物性測定

世界最高レベルの精密測定によって物質科学の謎に迫る



## 超高感度比熱測定 (長時間緩和法)

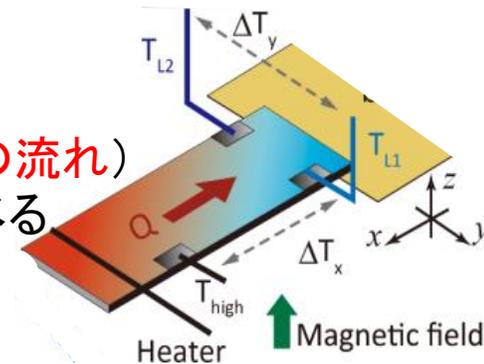
数10  $\mu\text{g}$ の微小試料で比熱を測定可能  
→ 素励起や状態密度を調べる



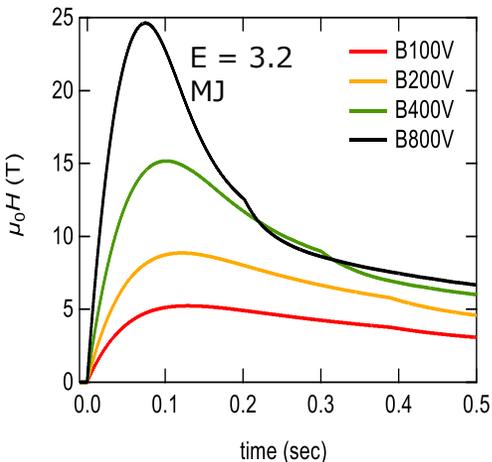
12 T超伝導マグネット x2台,  
4 T 2Dベクトルマグネット  
 $^3\text{He}$ 冷凍機 x2台 (~0.3ケルビン)

## 熱輸送・熱電係数測定 電子輸送現象測定

電子は電荷と熱を運ぶ(エントロピーの流れ)  
→ 電子状態を調べる



## 極限強磁場技術

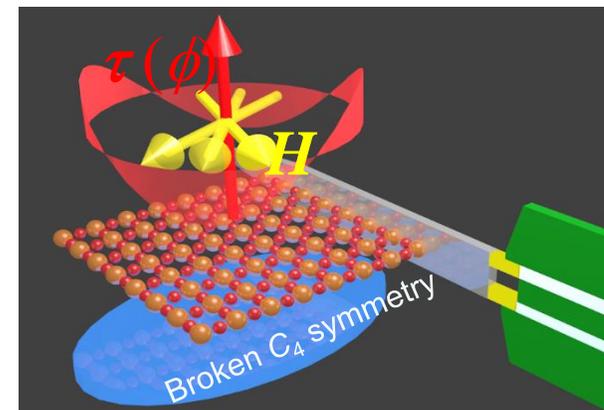


## 30 T パルス強磁場実験

定常的には発生不可能な強磁場を瞬間的に発生  
(世界でも限られた実験技術)

## 磁気トルク測定

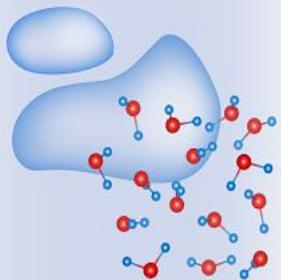
SQUID磁束計の数千倍の精密磁気異方性測定



# 電子の液晶状態が誘発する特異な超伝導状態

Parameters  
(Temperature, etc.)

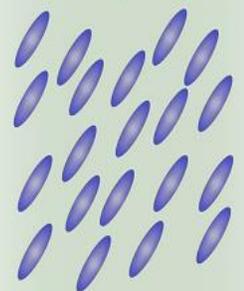
**Water**  
Liquid



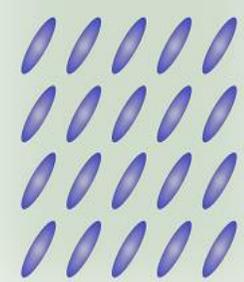
**Liquid crystal**  
Liquid



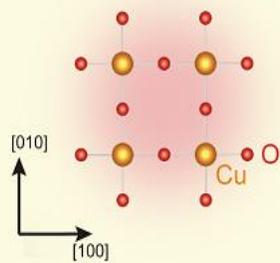
Nematic liquid crystal



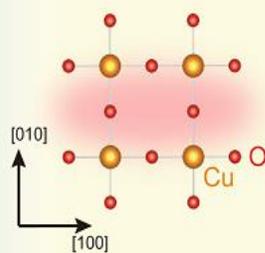
Solid



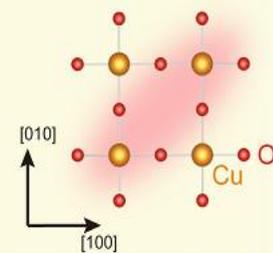
**Electron**  
Fermi liquid



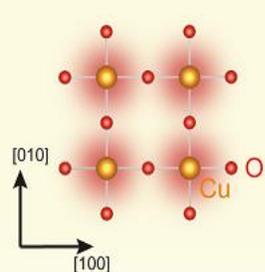
Bond nematicity



Diagonal nematicity



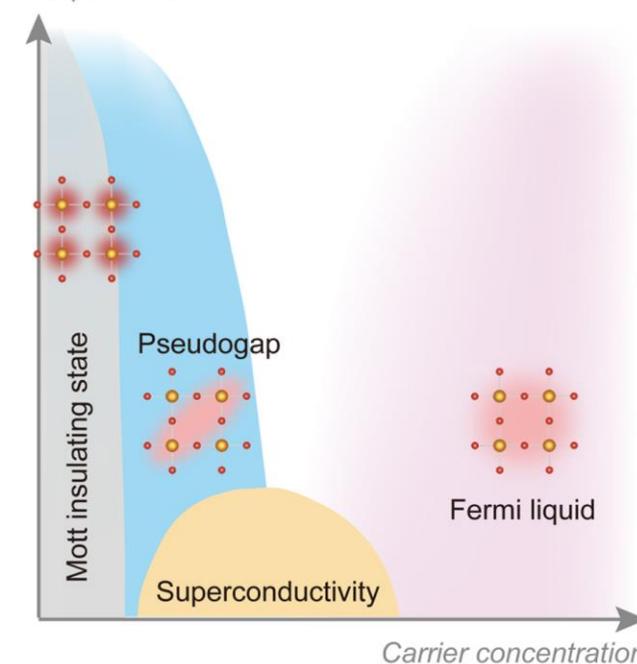
Mott insulator (solid)



ATLAS of  
**Science**  
another view on science

<https://atlasofscience.org/electronic-liquid-crystal-a-key-ingredient-for-solving-a-long-standing-mystery-of-the-high-temperature-superconductivity/>

Temperature



電子の集団は量子効果によって液体から固体に凍結し  
その中間には液晶のような状態も出現する

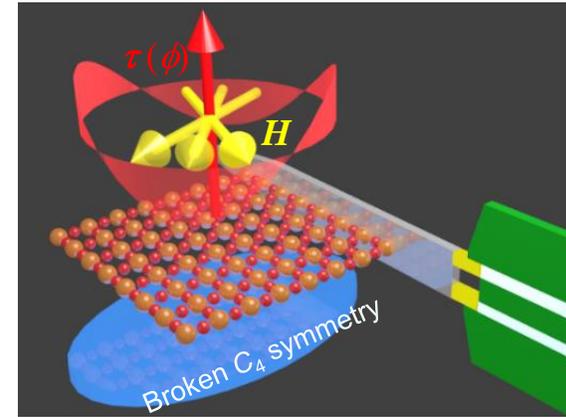
自発的に特定の方向へと揃った  
新しいタイプの電子状態  
→ 超伝導とも密接に関係

## 高温超伝導の発現機構解明

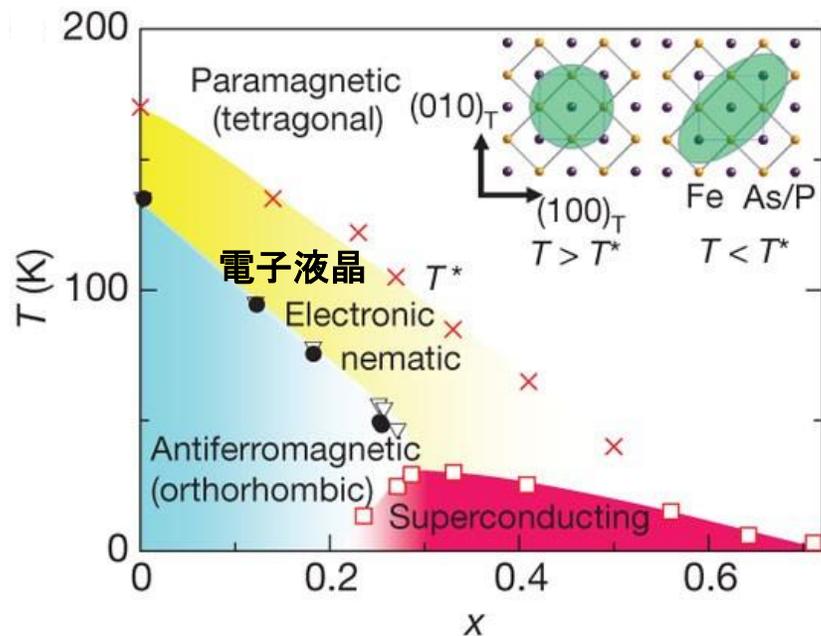
### 銅酸化物超伝導体, 鉄系超伝導体

量子液晶状態(電子ネマティック相)  
が高温超伝導の舞台

超高分解能磁気異方性測定

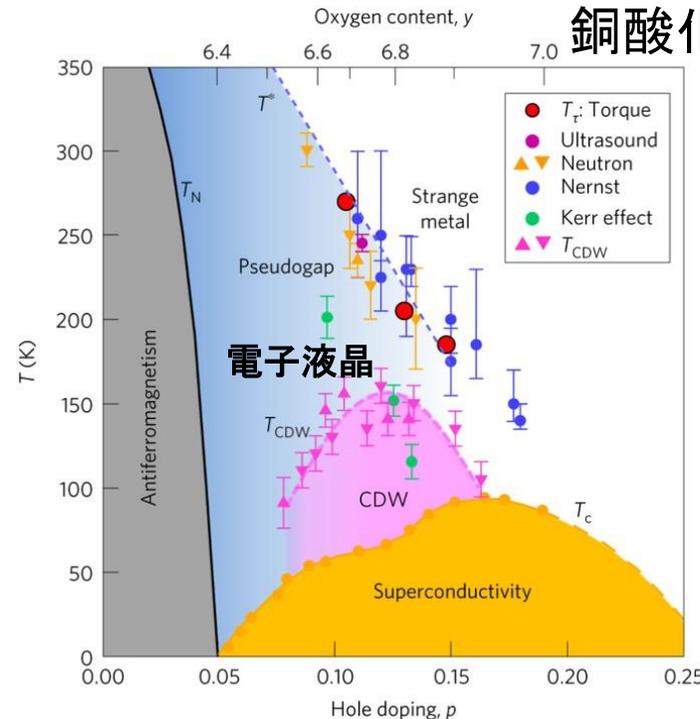


### 鉄系超伝導体

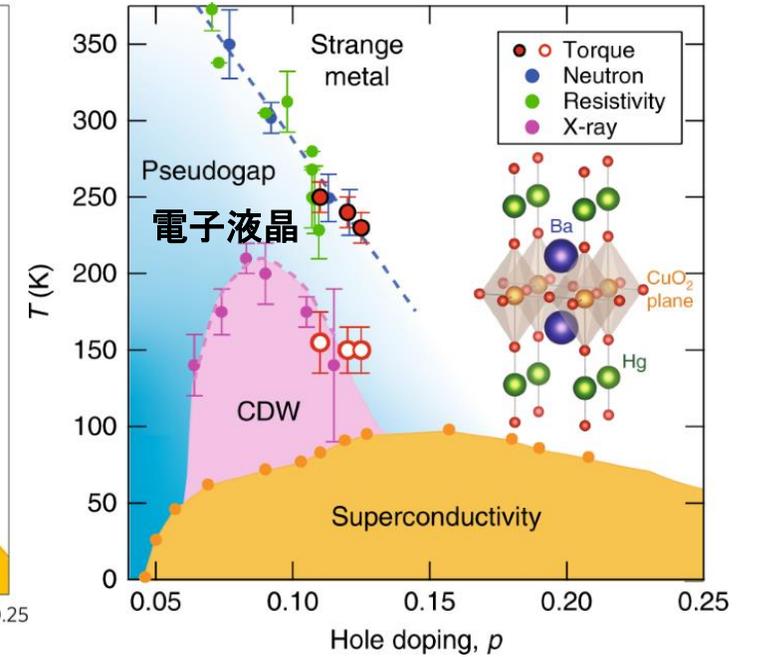


Nature **486**, 382 (2012).

### 銅酸化物超伝導体

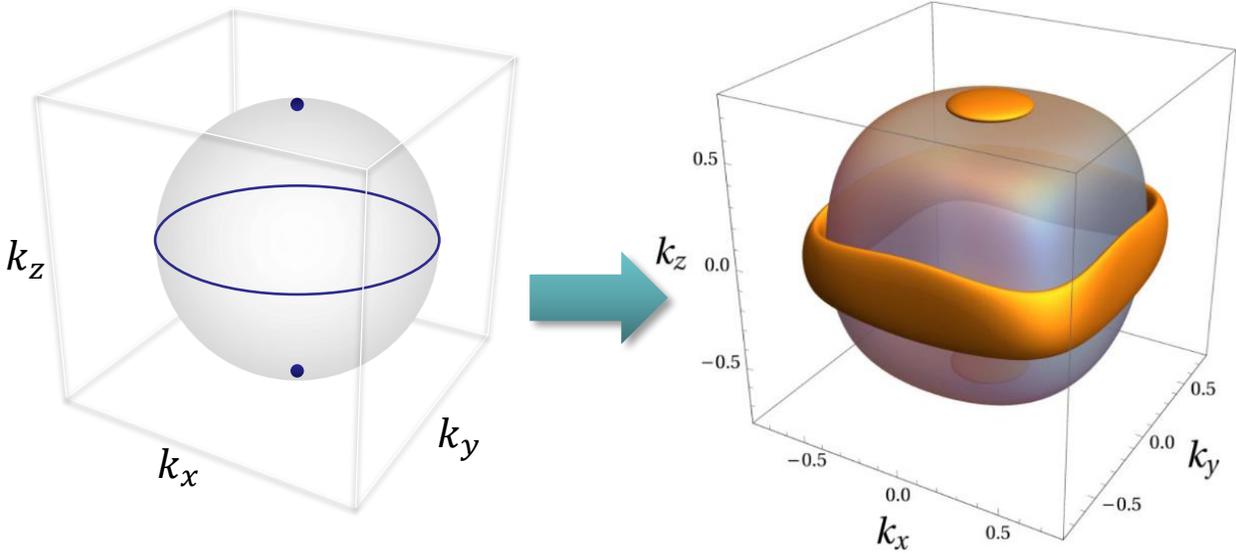


Nat. Phys. **13**, 1074 (2017).



Nat. Commun. **10**, 3282 (2019).

# 電子の液晶状態が誘発する特異な超伝導状態



Topologically protected  
"inflated nodes"

D. F. Agterberg,  
P. M. R. Brydon, and C. Timm  
PRL **118**, 127001 (2017).

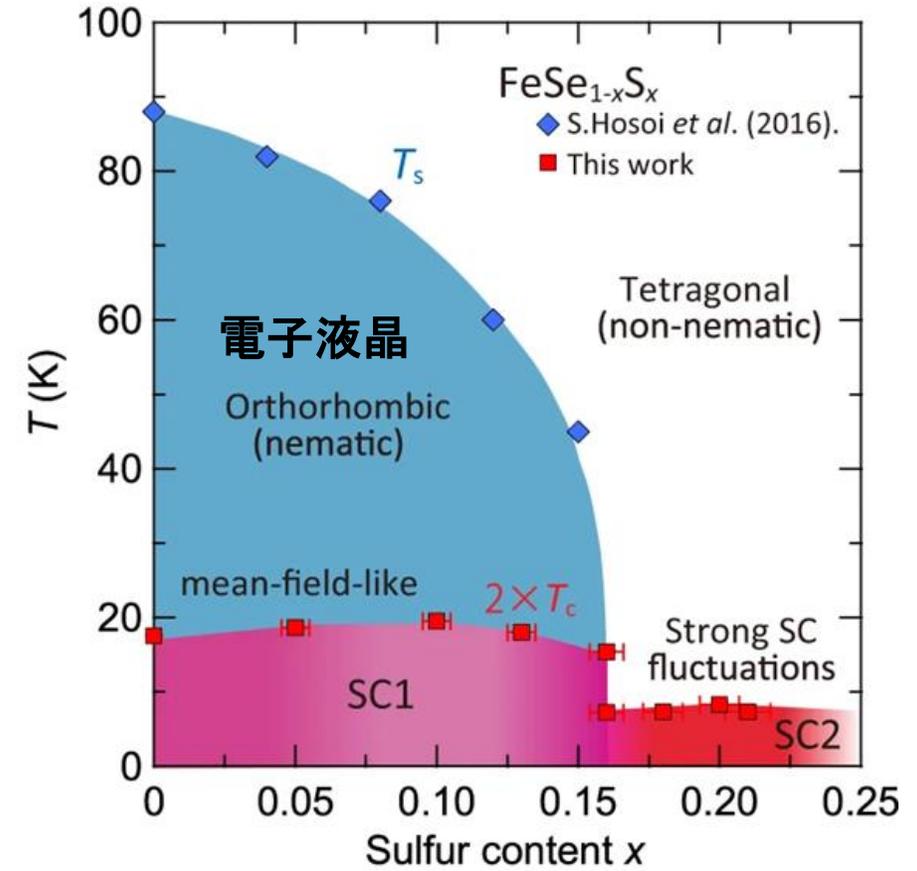
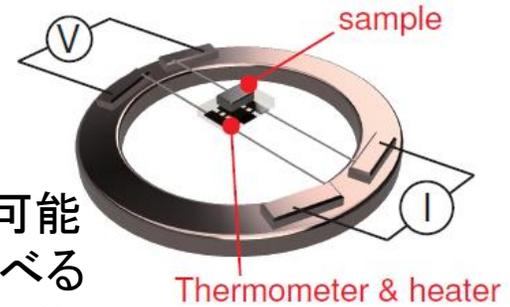
## Bogoliubov Fermi surface

トポロジカルに出現する  
全く新しいタイプのエキゾチック超伝導状態!?

新奇な素励起や  
新しいトポロジカル準粒子の可能性を探索！！

## 超高感度比熱測定 (長時間緩和法)

数10  $\mu\text{g}$ の微小試料で比熱を測定可能  
→ 素励起や状態密度を調べる



*Commun. Phys.* **6**, 183 (2023).

# 電子の液晶状態が誘発する特異な超伝導状態



## 国際共同研究

Nijmegen強磁場研究所 (オランダ)  
強磁場熱輸送測定を開発  
(世界でオンリーワンの実験技術)

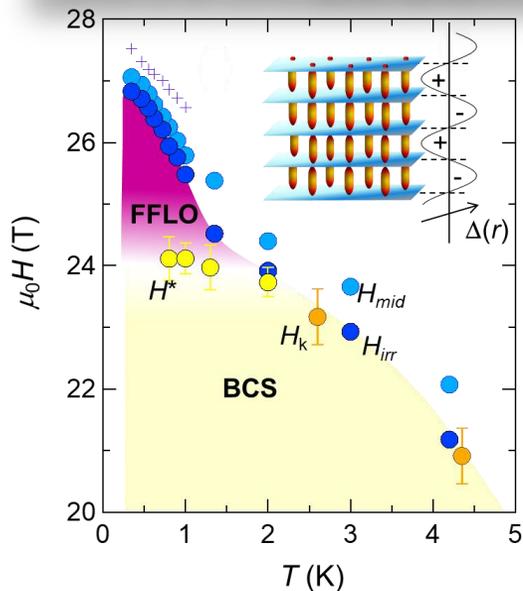
## 国内共同研究

東北大金研  
25テスラ超伝導磁石  
(0.4ケルビン)



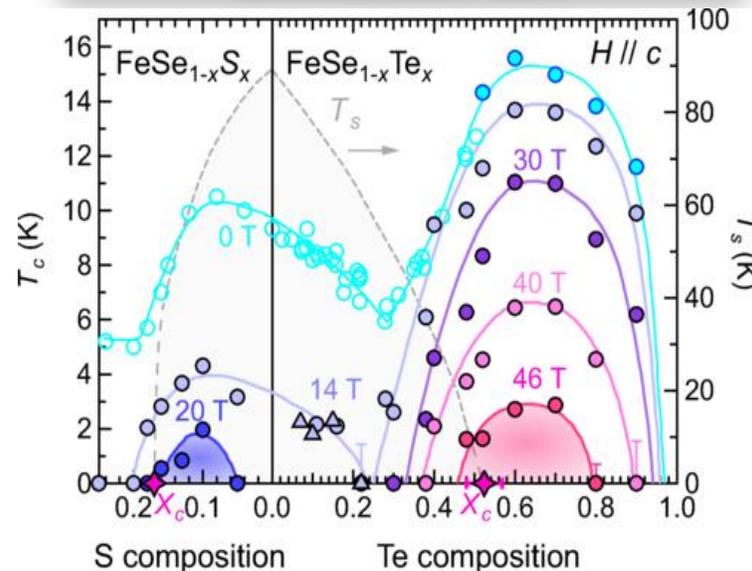
## 強磁場実験で解き明かす超伝導

### 強磁場で現れる エキゾチック超伝導相の研究



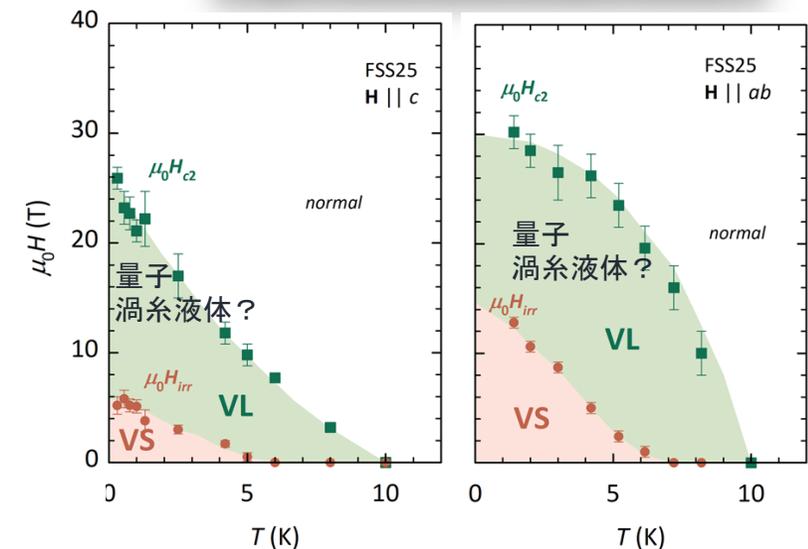
Phys. Rev. Lett. **124**, 107001 (2020).

### 電子液晶状態の揺らぎが媒介する 超伝導機構の研究



Phys. Rev. X **13**, 011032 (2023).

### ウルトラノーダル超伝導と 量子渦糸液体状態の研究



Nat. Commun. **13**, 394 (2022).

岡山大学は

**量子マテリアル/量子センシング**

において特に強み

**基礎物理学・物質科学としての命題**

**量子力学的多体効果によって物質中で実現される**

**新しい凝縮状態の探索と解明**

- (1) 非従来型超伝導: 高温超伝導の解明や新奇超伝導状態の探索など
- (2) 新奇電子状態: 量子液晶状態、量子臨界現象など

**熱**と強磁場で解き明かす  
エキゾチック超伝導

Science in Extreme  
High-Magnetic Field

新原理による革新的量子デバイス・量子センシング技術  
新たな量子力学的粒子の制御

**量子マテリアルの機能性探索・解明**  
**新しい準粒子/未発見素粒子の探索・解明**  
トポロジカル粒子 (マヨラナ, ワイル, ディラック), スピントロニクス (マグノン),  
超伝導 (ボゴロン), アシンメトロニクス, 量子液晶,  
重力子 (グラビトン), アクシオン, ダークマター

**次世代の量子マテリアル**  
**量子センシングの開拓**

