

ウラン系超伝導体はなぜ磁場に強い？

超伝導体を強くする「磁気揺らぎ」の観測に成功


課題 通常の超伝導は磁場に弱く、磁場中では超伝導状態は破壊される
 ⇒ 強磁場中でも安定な超伝導体の開発は、超伝導の実用化の重要な課題

観測用の試料には、磁場に強い「ウラン系超伝導体ウランテルル化物 (UTe₂)」を使用、
 観測手法には、電子の状態をミクロな視点で探索する「核磁気共鳴 (NMR)」を適用、
 NMR 観測を強磁場環境下で行うことで、今まで誰も調べることができなかった
 強い磁場中で生じる「高磁場超伝導」で起きている現象を原子レベルで観測

成果 ⇒ 磁氣的揺らぎが増大していることを発見
 磁氣的揺らぎの増大が電子対の間に働く引力を強化することで、
 超伝導状態を破壊する磁場の値が大きくなっている「高い臨界磁場」
 を実現していることを解明

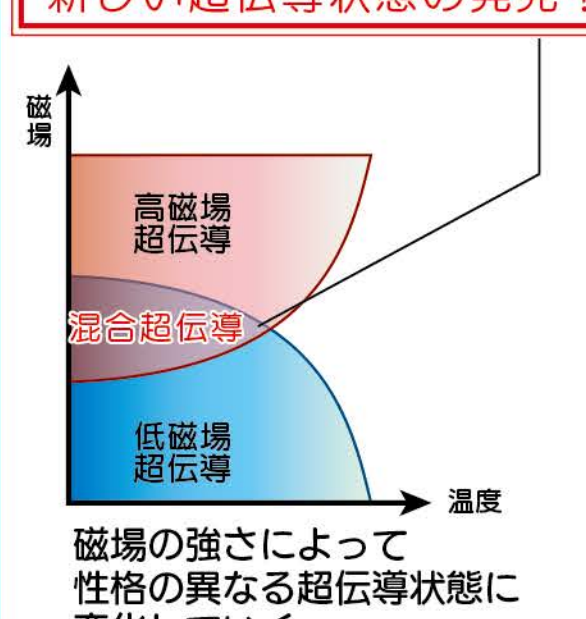
今回の結果の要約

磁場に強い！
ウラン系超伝導体
UTe₂



ウラン系超伝導体は磁場が強くなると超伝導転移温度が上昇
 スピンが互いに同じ向きな三重項の超伝導電子対を持つ

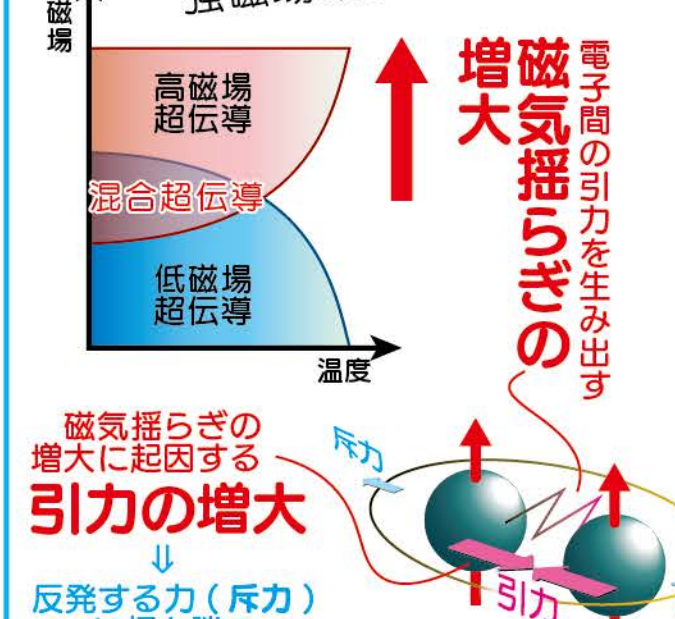
前回の研究で分かったこと



新しい超伝導状態の発見！

磁場の強さによって性格の異なる超伝導状態に変化していく

今回分かったこと



強磁場環境下で **増大** 電子間の引力を生み出す **磁気揺らぎ** の

磁気揺らぎの増大に起因する **引力の増大** ↓ 反発する力 (斥力) に打ち勝つ

今後の展開 ウラン系以外の化合物で、より高い臨界磁場を持つ超伝導体の開発につなげたい
 高性能な超伝導物質の実現で、超伝導技術の応用分野の拡大へ！

補 足 説 明

超伝導って、なに？

超伝導とは？



- 物質の温度を下げていくと、ある温度を境に電気抵抗がなくなる現象
- 超伝導は一般的に磁場に弱い
- 超伝導になる温度 ⇒ 「転移温度」 (「超伝導転移温度」とも) (T_c と書くことが多い)

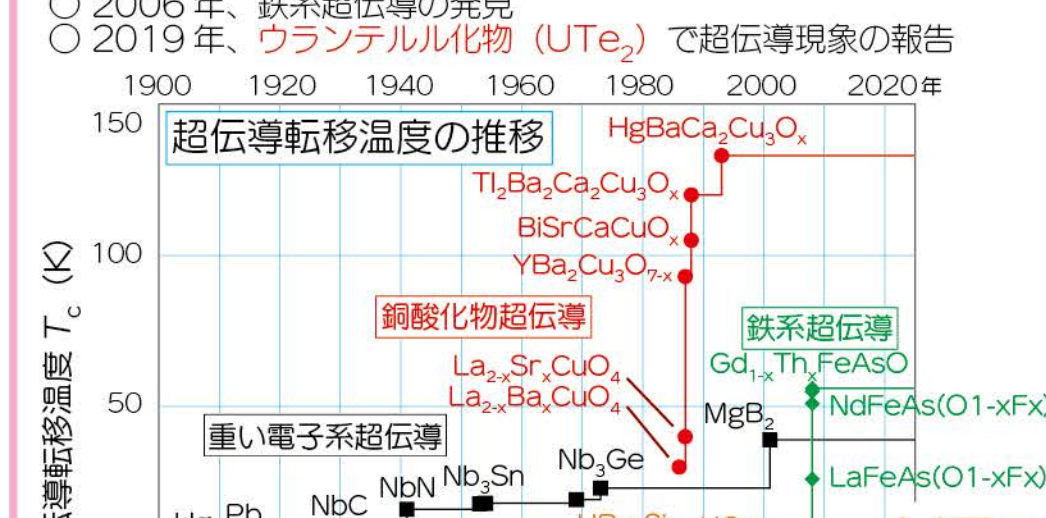
社会に期待されている超伝導

- リニアモーターカー 送電ケーブル MRI
- 量子コンピュータ 加速器
- 社会実装の例

ウラン系超伝導体：ウランテルル化物

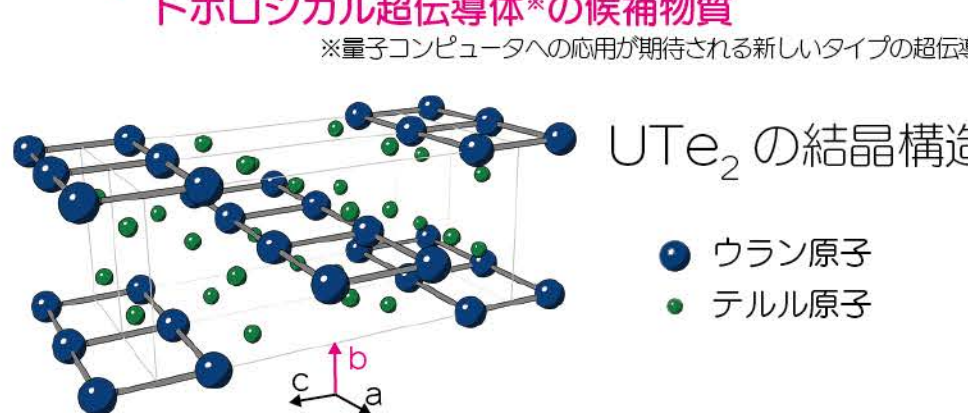
超伝導の歴史

- 1911年、水銀で超伝導現象を初めて発見
- 1983年、ウラン系超伝導の発見
- 1986年、銅酸化物超伝導現象の発見 転移温度が急上昇
- 2006年、鉄系超伝導の発見
- 2019年、ウランテルル化物 (UTe₂) で超伝導現象の報告



ウランテルル化物：UTe₂

ウラン系超伝導体：多くは強磁性超伝導体
UTe₂：強磁性に近い常磁性超伝導体
 トポロジカル超伝導体*の候補物質
*量子コンピュータへの応用が期待される新しいタイプの超伝導体



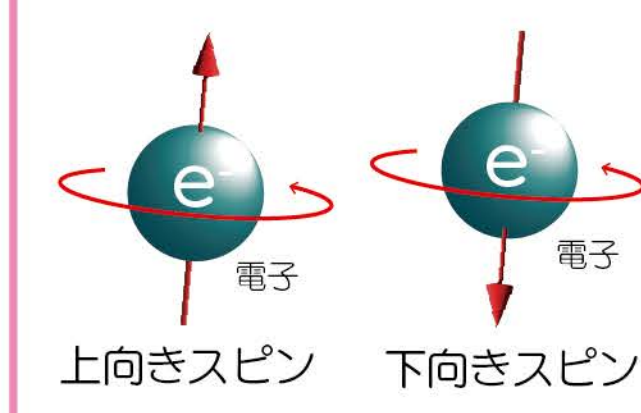
UTe₂ の結晶構造

- ウラン原子
- テルル原子

磁場をかける方向によって超伝導の発現の仕方が変わる
 UTe₂ では、図中の b 軸方向に磁場をかけたときに超伝導が最も強くなる

超伝導とスピン

スピンとは？



- 電子の自転により生じる磁氣的な性質
- 上向きと下向きのスピンがある

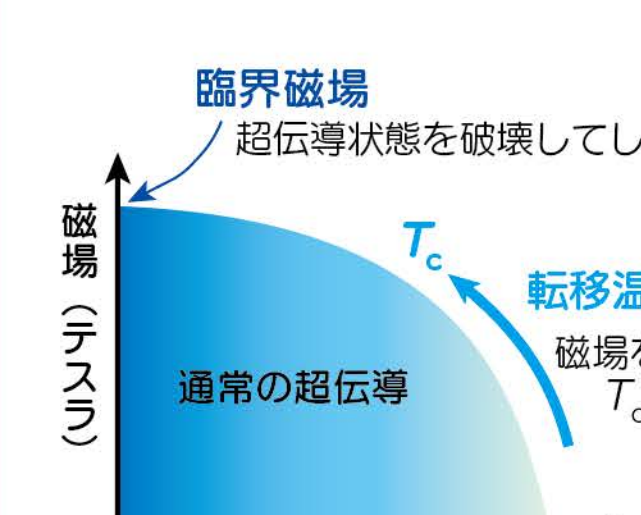
スピンの向きと超伝導

- スピン三重項** = スピンは互いに逆向き = スピンを打ち消しあう 99%以上
- スピン一重項** = スピンは互いに同じ向き = スピンを打ち消しあわない 1%以下

UTe₂ の超伝導はスピン三重項超伝導と考えられている

超伝導は磁場に弱い

通常の超伝導は磁場に弱い



臨界磁場 超伝導状態を破壊してしまう磁場の値

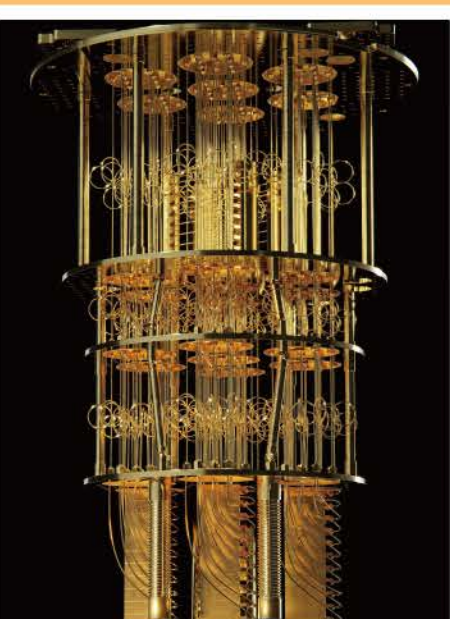
転移温度 T_c 磁場をかけると T_c が下がっていく

超伝導体の温度 - 磁場相関図

強い磁場中で高い臨界磁場を持つ超伝導物質の開発

- 電力ロスの少ない高性能な超伝導線材
- 量子コンピュータに必要な超伝導量子デバイス

などの開発において、重要な課題




量子コンピュータ

磁場に弱い超伝導で起きていること

超伝導：2つの電子がペア (対) になっていることが大事
 ⇒ 電子対が壊れると超伝導も壊れる

一重項超伝導 電子対




電子対を結びつける引力は常に一定

引力を生み出す格子の揺らぎ

電子対を破壊する斥力は磁場で増大する

超伝導の崩壊



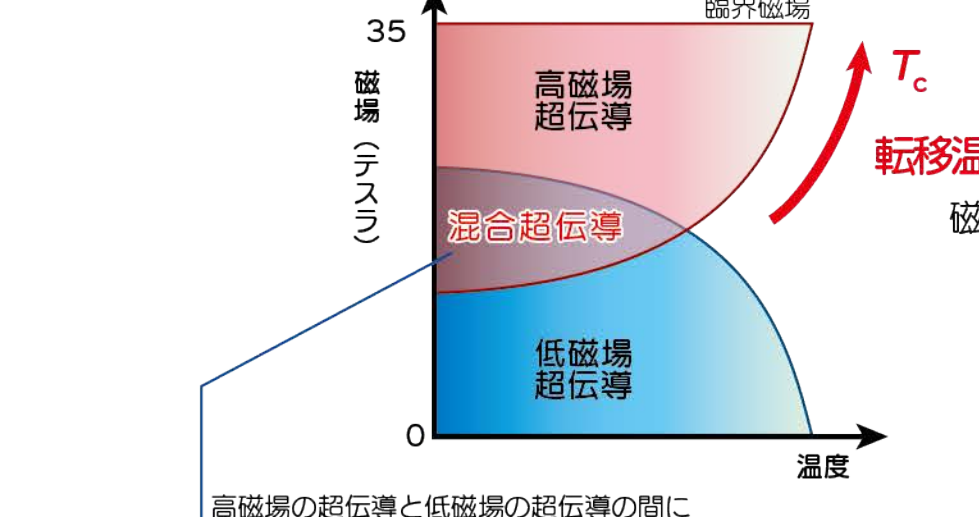
電子対が壊れることで超伝導状態が壊れ常伝導状態に戻る

強磁場をかけると…

【臨界磁場】 斥力が引力を上回り電子対はバラバラに！

UTe₂ の超伝導は磁場に強い！

UTe₂ の超伝導は磁場をかけると強くなる！



高磁場の超伝導と低磁場の超伝導の間に新たな超伝導状態があることを発見！
 2023年5月12日プレス発表

新・超伝導状態：ウラン系超伝導体の超純良単結晶で発見
 —磁場によって性格を変える超伝導—

UTe₂ の臨界磁場 約10倍
 理論値：3.5 テスラ
 実測値：35 テスラ

高磁場で超伝導が強化される
 ↓
 高磁場でなぜ超伝導が壊れないのか？ 原因は不明
 ↓
 原因究明には 物質内部の電子状態を調べるのが重要

UTe₂ の超伝導を測定する

「超純良単結晶」 × 「強磁場」 × 「核磁気共鳴」

超純良単結晶



元素欠損のない超純良な UTe₂ 結晶

※元素欠損があると、超伝導の性質に大きな悪影響が出る
 自分たちで開発した「溶融塩フラックス法」で作成
 2022年7月29日プレス発表
 身近な場で超純良ウラン超伝導物質の育成に成功！
 一次世代量子コンピュータへの応用に期待！

強磁場



世界最強クラス！ 最高 36 テスラ！

フランス国立科学研究センター
 水冷式電磁石

核磁気共鳴 (NMR)



電磁波 (MHz) 原子核 電子

原子核のスピンと電磁波の共鳴を利用
 周囲の電子の状態をミクロな視点で調査

「磁氣的な揺らぎ」と超伝導

UTe₂ では、磁場が 15 テスラを超えると「磁氣的な揺らぎ」が急激に増大する
 ⇒ 物質内部の磁氣的揺らぎを利用した超伝導が出現

低磁場 (15 テスラ未満)



小さな揺らぎ

高磁場 (15 テスラ以上)



揺らぎの増大

ウランを持つ電子スピン

ウラン系超伝導体はなぜ磁場に強い？

高磁場で増大した「磁氣的な揺らぎ」⇒ 電子対を作る引力の増大
 ⇒ 高磁場環境下でも電子対が壊れない ⇒ 超伝導の増大へ！

低磁場超伝導 (15 テスラ未満)

三重項超伝導 電子対



電子対を結びつける引力

引力を生み出す磁氣的な揺らぎ

電子対を破壊する斥力の方が優勢

高磁場超伝導 (15 テスラ以上)



増大した引力が斥力に打ち勝つ

磁氣的な揺らぎが磁場で増大
 ↓
 引力の増大へ