

英語論文セミナー 第一回

極限環境下における相関電子系中の磁場構造の測定

2022/5/23

学籍番号：s0319007

氏名:上野智也

1 要旨

圧力は、超伝導や磁性などの強相関電子系における競合する基底状態の中で、(クリーン?)で連続的そして系統的な調整パラメータである。しかし、高圧装置に格納された試料へのアクセスが制限されているため、十分な感度を持つ磁場センサーは稀である。私たちは、ダイヤモンド窒素空孔中心を、極低温・高圧下での物質研究のための(空間分解ベクトル場センサー?)として利用した。 $\text{BaFe}_2(\text{As}_{0.59}\text{P}_{0.41})_2$ の単結晶をベンチマークとして、超伝導転移温度、マイルスナー状態での局所磁場プロファイル、及び臨界磁場を抽出した。本研究で開発した方法は、様々な量子多体系を調査し、理解するための明確なツールを提供するものである。

2 本文

強相関電子系は、外部摂動に敏感な様々な相をサポートする。例えば超伝導転移温度 T_c は、フェルミ準位における相互作用の強さと状態密度の両方に敏感であり(1)、これらは外部パラメータを変えることで調整することが可能である。さらに、超伝導体は、磁性的、構造的、電子的な秩序状態など、他の相と競合することがよく知られている(例えば(2-5))。したがって、材料系に適切なパラメータを与えることができるため、新しい相に到達するための主要な実験ツールとなる。

最も成功した調整パラメータのひとつが静水圧で、これは試料に追加の化学的不均一性を導入することなく電子構造と相互作用強度を変化させる。多くの系において、圧力は特定の量子状態に到達するための唯一の方法である。圧力は、競合する相を抑制することで、超伝導の安定化に影響力のある役割を担っている。例えば、重い電子系金属間化合物 CePd_2Si_2 では、圧力によって反強磁性状態が抑制され、超伝導転移温度 T_c が 28 kbar でピークをむかえる超伝導相が誘起される(2)。鉄系 BaFe_2As_2 でも同様に、スピン密度波の状態を抑制する圧力によって超伝導を引き起こすことができる(6)。最近では、 $\text{LaH}_{10-\delta}$ において 200 GPa で 250 ~ 260 K という非常に高い T_c を持つ超伝導状態が報告されている(7, 8)。これらの結果は、圧力が強力な調整パラメータであるという見方を補強するだけでなく、超高圧下での超伝導の微視的な詳細を研究する必要性を訴えている。

高圧を発生させるために、試料は試料よりも桁違いに大きな圧力容器に封入される。さらに、安定した圧力環境を確保するため、試料への電氣的アクセスは厳しく制限される。極限条件下ではさらなる制約が課される。このような厳しい実験状況下では、適用できる検出方法はごくわずかである。

負電荷を帯びた窒素空孔 (NV) センターは、スピン 1 基底状態を持つダイヤモンドの点欠陥である。電子スピン共鳴 (ESR) スペクトルは、蛍光率がスピンに依存しているため、光学検出磁気共鳴 (ODMR) 法により測定することができる。これらのスペクトルから、マイクロテスラ $\text{Hz}^{-1/2}$ の感度で磁場を導き出すことができる (9-13) ほか、電場、温度、機械的ひずみも導き出すことができる。[詳細な説明は (20) に記載] (14-19)。NV センターは、60 GPa までの圧力下で、電場の大きさと方向の両方を感知することができる (16, 21)。さらに、NV センターはサイズが小さいため、当然ながら高い空間分解能が得られ、量子多体系の特徴を微視的に研究することが可能になる。そこで、NV センターの磁場センシング能力とモアッサナイトアンビルセルの光学的アクセス性を組み合わせ、高圧下における試料周辺の局所磁場配置を探ることに成功した。本研究では、II 型超伝導体である $\text{BaFe}_2(\text{As}_{0.59}\text{P}_{0.41})_2$ の超伝導に伴う反磁性を高圧下で直接観測し、このアプローチの可能性を実証・検証した。使用した試料は $x = 0.41$ の単結晶 $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ で、これは (ultraclean family?) $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ の一部である (22)。 $x = 0.33$ で T_c は最大となり、量子臨界点の明確な証拠を示している (23, 24)。したがって、 $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ は、超伝導と量子臨界の間の相互作用を探るのに理想的なプラットフォームである。図 1A に圧力セル内部の分解図を、図 1B に試料と NV の中心基準枠の関係を拡大した図を示す。また、図 1B に試料近傍の写真と蛍光画像を示す。マイクロコイルを試料に近づけることで、NV センターがある試料空間に効率よくマイクロ波電力を伝達することができる。蛍光像の輝点は、試料表面に散布されたダイヤモンド粒子に含まれる NV センターによるもので、圧力伝達液と混合される。ダイヤモンド粒子の典型的な大きさ ($1 \mu\text{m}$) は、感度をよくするために光学的分解能より小さく、渦格子定数 a_V (20) より大きくなるように選ばれた。今回は、3 つのダイヤモンド粒子を戦略的に選んだ。NV_C は試料の中央付近、NV_E は試料の端付近、NV_F は試料から遠く離れた場所にある。

弱い外部磁場中では、 $T > T_c$ の場合、試料は通常状態にあり、NV センターが感じる磁場は外部磁場と同じである (図 1C)。しかし、 T_c 以下に冷却すると、試料から磁場が追い出され、材料表面付近の磁場プロファイルが変化し、これを試料表面の NV センターが感じるようになる。NV_C では有効磁場が大きく減少し、NV_E では有効磁場が大きく増加している (図 1D)。超伝導体が T_c を越えて温められると、超伝導に関連した反磁性応答が T_c で消失する。さらに、II 型超伝導体では、印加磁場が下部臨界磁場 (H_{c1}) よりも高い場合、磁場が試料を通過し始め、渦糸状態となる。渦糸状態は上部臨界磁場 (H_{c2}) 以上で完全に破壊され、その時点で超伝導体は通常の状態に戻る。これらのフィールド内挙動はすべて、試料表面に設置された NV センターによってプロファイルすることができる。

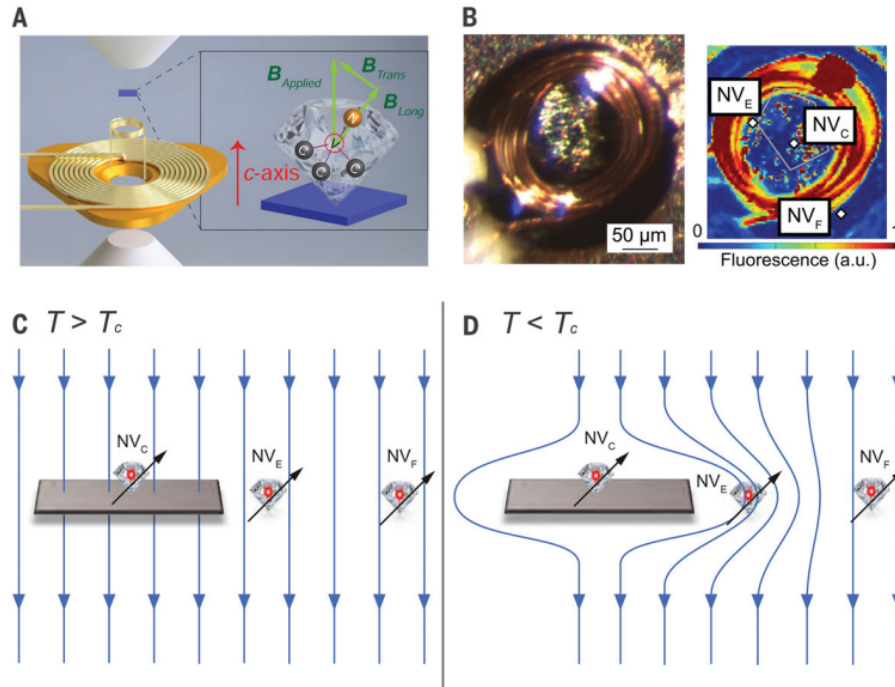


図1 実験構成と検出コンセプトの模式図

図1のステートメント

(A) 圧力容器の分解図。試料（青色）は、ダイヤモンド粒子の集合体とともに高圧チャンバー内に配置されている。ダイヤモンド粒子の1つ1つが、高感度の局所磁場センサーである。レーザーは上部のモアッサナイトのアンビルを通して高圧室に向けて照射されます。マイクロ波は、試料に近接した小型マイクロコイルから供給されるため、試料を加熱することなく効率的にマイクロ波電力を伝達することができます。大きい方のコイルは、補助的な交流磁化率測定用の変調コイルとして追加される（26, 34）。モジュレーションコイルの下にある金属部分がガasketである。拡大写真には、今回使用した2つの座標系が示されている。一つはc軸をFeAs面の積層方向とするサンプルフレーム、もう一つはNVセンサーフレームである。本研究における外部印加磁場は、常に試料c軸に沿ったものである。ダイヤモンド粒子は、それぞれが4つの量子化軸を持つ約100万個のNV中心を含み、サンプルフレームに対してランダムに配向している（20）。

(B)(左) アンビルの上に試料を載せたマイクロコイルの写真。(右) マイクロコイルとNV中心を示す共焦点スキャンの蛍光画像。試料の形状を五角形でトレースしている。3つのダイヤモンド粒子、 NV_C 、 NV_E 、 NV_F の位置が記されている。 NV_C は上面の中央付近、 NV_E は端部付近、 NV_F は試料から遠く離れており、コントロールセンサーとして機能する。蛍光は650nmから800nmの間で収集される。

(CとD)(C) $T > T_c$ 、(D) $T < T_c$ の場合、弱磁場印加時の試料周辺の磁場プロファイル。 $T < T_c$ のときに磁場が消えるのは、超伝導に伴う反磁性によるものである。超伝導体の存在下で磁場プロファイルが変化することは、圧力下で完全な磁場ベクトルを空間分解能で測定する我々のセンサーの性能を実証するための理想的なプラットフォームとなる。

3 用語

- ・ 相関電子系

物質中で電子間の相互作用（クーロン相互作用など）があるもの。相互作用が強いものを強相関電子系という。

- ・ ダイヤモンド窒素空孔中心 (別称 NVC: Nitrogen vacancy center)

ダイヤモンド結晶中の複合欠陥の一種であり、不純物原子である窒素 (Nitrogen) と空孔 (Vacancy) が隣り合うことで形成される原子レベルの構造体。分裂した電子スピン準位を持ち、その利用により高感度な計測が可能となる。

- ・ マイスナー状態

超伝導体が外部磁場を内部から排除している状態 (完全反磁性)。

- ・ 摂動

平衡状態に対しての僅かな乱れ。

- ・ 静水圧

一様な重力の下に置かれた静止流体中の圧力。

- ・ 重い電子系

強相関系において電子はゆっくりと動くため、電子の質量が重くなったと解釈でき、重い電子系と呼ばれている。

- ・ bar

圧力の単位。1 bar = 10^5 Pa

- ・ スピン密度波

金属の各原子位置での磁気モーメントの大きさがサイン関数的に変調を受ける磁性のこと。

- ・ 電子スピン共鳴 (ESR)

MRI: 磁気共鳴画像診断 (NMR: 核磁気共鳴) の電子版。

- ・ 光検出磁気共鳴法 (ODMR)

光学的に電子スピン共鳴 (EPR) を検出する手法。EPR は電子スピン準位間をマイクロ波で共鳴させることにより不対電子を検出する手法であり、試料からの光を検出するのが ODMR である。

- ・モアッサナイト

炭化ケイ素 SiC の鉱物。

- ・量子臨界点

絶対零度近傍において、磁場や圧力などの制御パラメータを変化させたとき、量子揺らぎによって秩序状態が壊されるパラメータの値を量子臨界点と呼ぶ。

- ・有効磁場

実際に感じる磁場。

- ・渦糸状態

第二種超伝導体において磁場が超伝導体を部分的に貫いている状態。渦糸とは、細い磁場とその磁場が作り出す円 (渦) 電流を組み合わせたもの。

英語論文セミナー 第二回

2022/5/30

学籍番号：s0319007

氏名:上野智也

1 課題

1.1 アンビルセルの大きさ

supplyment にアンビルセルの大きさが書かれていなかったため、調べた値を以下に示す。

- ・株式会社システムズエンジニアリングの高圧ダイヤモンドアンビルセル
アンビル面サイズ 0.8mm 高さ 14mm(ねじ除く)

- ・東京大学高木研究室 10GPa 級対向アンビル超高压セル
セルサイズ $\phi 29 \times 42\text{mm}$
セルサイズ $\phi 22 \times 34\text{mm}$

論文及び supplyment を読むと、今回使用した試料の大きさは、横の長さが約 $80 \sim 100\mu\text{m}$ 、厚さが約 $80\mu\text{m}$ の不規則な五角形である。したがって、試料に比べてアンビルセルはとて大きいことが分かる。

1.2 $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ の結晶構造

本論文で用いている物質 $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ の結晶構造は以下に示す通りである。

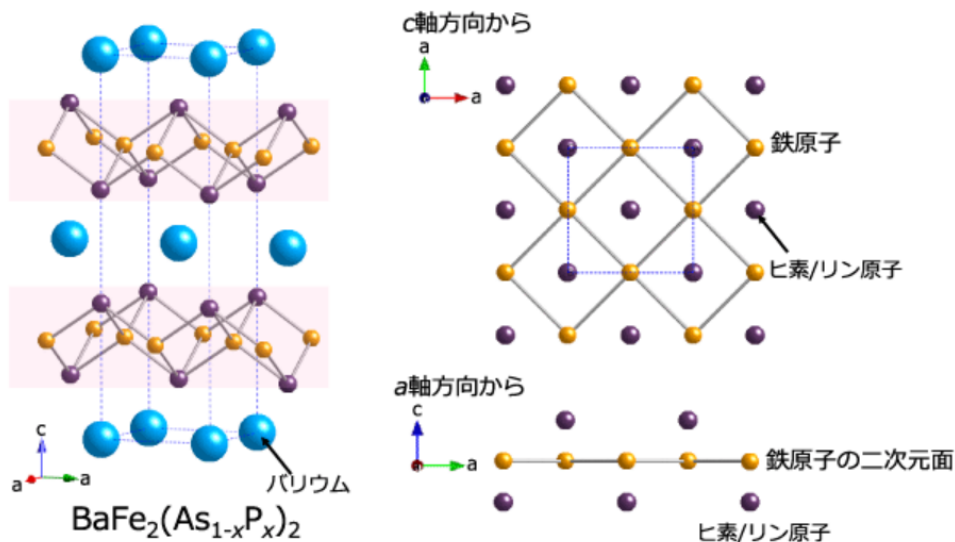


図 1 $\text{BaFe}_2(\text{As}_{1-x}\text{P}_x)_2$ の結晶構造

2 本文

図 2A に示すようなパルスシーケンスを用いて ODMR データを収集した。弱い磁場で温めてからデータを取ったので、超伝導に伴う反磁性も探ることができた。マイクロ波やレーザー照射による加熱を避けるため、測定に伴う超伝導状態への摂動を緩和する測定手順を考案した (20)。図 2 の B~D に、3 つのダイヤモンド粒子の 8.3 kbar における代表的な ODMR スペクトルを示す。このときの試料温度 (~ 7.7 K) は T_c (8.3 kbar において ~ 20.4 K、ゼロ磁場における交流磁化率を用いて決定) よりはるかに低い (20)。ODMR スペクトルは、異なる分裂を示す。これは周りの磁場によるゼーマン効果による分裂である。したがって、ODMR スペクトルは磁場を検出する手段を提供する。 NV_C のゼーマン分裂 (~ 64 MHz) は、 $T < T_c$ では NV_E のゼーマン分裂 (~ 658 MHz) の 10 倍小さいが、 $T > T_c$ ではその差ははるかに小さくなる (図 2G)。 NV_C の温度を変えたときの ODMR スペクトルを図 2E に示し、そこから分裂を抽出してプロットしたのが図 2F である。温められると、分裂の度合いは最初はほぼ一定であるが、約 17K 以降顕著に増加する。21K 以降は再び分裂が一定となる。超伝導との関連性を示すため、同じ実験で交流帯磁率データを追加収集した。これは、実験構成にモジュレーションコイルを追加したことで可能となった。マイクロコイルをピックアップコイルとして用いると、同じ温度で超伝導転移を意味する交流磁化率の急激な低下 (25, 26) が検出された (図 2F)。2 つの方法は、 T_c の測定においてよく一致した。

局所磁場分布の変化は、 NV_E と NV_F の分割の温度変化でも確認できる (図 2G)。 NV_C の挙動とは逆に、 NV_E は温めると分割の度合いが小さくなる。参考までに、 NV_F の分裂は温度に対してほぼ一定であり、これは NV_F が超伝導体から遠く離れているためであり、全磁場が変化していないと理解することができる。これ

らの観測結果は、先に説明した超伝導に伴う反磁性からの予想とよく一致する。線幅や ESR 線全体のコントラストに顕著な変化は見られなかった。これは、超伝導に伴う反磁性によって引き起こされる磁場勾配に比べ、ダイヤモンド粒子の大きさがはるかに小さかったためである。試料の大きさが有限であり、ダイヤモンド粒子と試料の間隔が狭いため、残留磁場があり、低温での NV_C のゼーマン分裂は ~ 64 MHz であった。また、3 つのダイヤモンド粒子は磁場に対してランダムな配向をしているため、試料が常伝導状態でもゼーマン分裂に違いが見られた。

本技術の大きなメリットの一つが、図 2H に示されている。前述のように、ある NV の中心に対する磁場の横方向と縦方向の成分は、その ODMR スペクトルから計算することができる。これにより、磁場のベクトルを再構築する手段を得ることができる。試料が常伝導状態であれば、NV 中心の向きは、試料の c 軸に沿った印加磁場方向に対して較正することができる。これにより、c 軸に沿った有効磁場ベクトルが得られ、温度の関数として追跡することができる (20)。これらの考察から、 NV_C 、 NV_E 、 NV_F が 8.3 kbar で感じる実効磁場ベクトルを決定した。 NV_C の場合、超伝導状態に入ると磁場ベクトルは短くなり、垂直方向から離れる方向に傾く。これは、 NV_C が試料の上部にあり、超伝導に伴う反磁性によって磁束線が試料の周囲で曲がっていることと矛盾しない。しかし、 NV_E の場合、超伝導状態では磁場ベクトルは長くなり、わずかに傾くだけである。ここでも、 NV_E が試料の脇に位置しているため、マイスナー状態では磁束線が垂直のまま密になることと矛盾しない。最後に、 NV_F によって感知される磁場ベクトルは、 NV_E と NV_C の挙動とは全く対照的に、超伝導相転移の間、実質的に一定である。極端な条件下で、完全なベクトル情報を空間分解能で収集できることは、この技術の重要な進歩の一つである。

参考文献

- [1] 株式会社 システムズエンジニアリング 「高圧ダイヤモンドアンビルセル」 閲覧日 2022/5/26
URL:https://www.systems-eng.co.jp/dcms_media/other/diaanvil_datasheet.pdf
- [2] 東京大学高木研究室 「10GPa 級対向アンビル超高压セル」 閲覧日 2022/5/26
- [3] spring-8 「鉄原子を含む高温超伝導体の仕組みを解くカギ「電子のネマティック液晶状態」を発見」
2012 年閲覧日 2022/5/26
URL:http://www.spring8.or.jp/ja/news_publications/press_release/2012/120621/

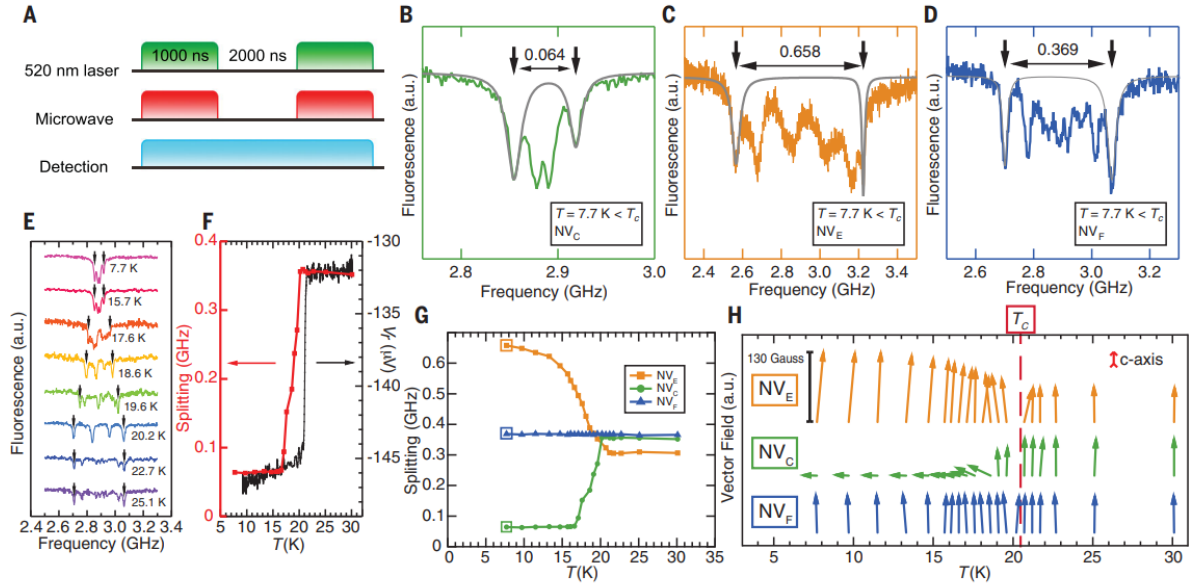


図2 図2 8.3 kbar における $\text{BaFe}_2(\text{As}_{0.59}\text{P}_{0.41})^2$ を NV センターを用いて感知した超伝導に伴う反磁性

図2のステートメント

(A) ODMR を用いたパルスシーケンス

(B~D) 7.7 K におけるそれぞれのダイヤモンド粒子の ODMR スペクトル。ゼーマン分裂を決定するためのローレンツフィットは、灰色の線で示されている。

(E) 違う温度での NV_C 中の NV の ODMR スペクトル

(F) 転移温度 T_c の決定における ODMR 法 (赤) と交流磁化率法 (黒) の比較。

(G) NV_C 、 NV_E 、 NV_F の NV センターに対するゼーマン分裂の温度による変化。

(H) NV_C 、 NV_E 、 NV_F の NV センターが感じる局所磁場ベクトルの、超伝導相転移に伴う変化。縦方向はサンプルの c 軸である。ODMR 測定は、レーザー出力 10mW、マイクロ波ピーク出力 30mW で行われた。試料の c 軸に沿って 68G の外部磁場が印加された。

3 用語

- ・ゼーマン効果

原子から放出される電磁波のスペクトルにおいて、磁場が無いときには単一波長であったスペクトル線が、原子を磁場中においた場合には複数のスペクトル線に分裂する現象である。

縮退していたエネルギー準位が磁場の印加によって分裂したともいえる。

- ・交流磁化率

交流磁場をかけた時の応答として現れる動的な磁化率を交流磁化率と呼ぶ。

- ・ローレンツ関数

分光分析においてスペクトルの波形分離の際、孤立スペクトルの形状、バックグラウンドの形状を仮定するときに用いる関数。この関数をもちいてバックグラウンドの前処理やスペクトル強度のフィッティングを行う。

以下の形で表される。

$$f(x) = A \frac{w^2}{4(x - x_0)^2 + w^2} \quad (1)$$

ただし、 A は強度、 x_0 は位置、 w は幅である。

- ・ピックアップコイル

磁場の時間変化を求めるためのコイル。

- ・G(ガウス)

磁場の強さの単位。1G=10⁻⁴T(テスラ)。地磁気は 0.5G

英語論文セミナー 第三回

2022/6/6

学籍番号：s0319007

氏名:上野智也

1 本文

次に、圧力を変化させた場合の性能について説明する。また、60 kbar までのルビー蛍光スペクトルのシフトに対して光学検出磁気共鳴シフトを校正し、圧力を感知する能力 (20) と高圧での光学検出磁気共鳴実験を行う能力を確認した。私たちは、この装置が圧力を変化させても超伝導転移に対する感度を失わないことを示すことを目的とした。図 3A は、7つの圧力点における NV_C のゼーマン分裂の温度依存性を示しており、ここから T_C の圧力依存性を検出することができる。また、交流磁化率データの裏付けは (20) に記載されている。その結果得られた $T-p$ 相図 (図 3B) (p は圧力) には、圧力とともに超伝導状態が抑制されることが示されている。これは、 $x = 0.41$ が超伝導ドームのオーバードープ側に位置していることと矛盾しない (25)。また、再現性を検証するために、放出圧力のデータも収集した。 p に対する T_C の全体的な滑らかな変化は、この系が弾性領域にあることを示している。この一連の実験により、本技術の性能が確認された。

図 2F の 2つの方法の遷移幅は、顕著な違いを示している。これは、磁場をかけることで、第二種超伝導体中で渦糸状態を安定化させることができるからである。光学検出磁気共鳴を用いた手法で幅が大きくなっているのは、試料に近接した窒素空孔が貫通磁場を渦糸という形で感知し始めたためである (試料全体の平均応答を調べる交流帯磁率は、渦糸の状態に対する感度が非常に低い)。相境界を探るため、 NV_C で感知した試料 C 軸に沿った磁場を計算した。8.3 kbar での合成磁場の温度依存性を図 4A に示す。 T_{C1} 以下、 T_{C2} 以上では、C 軸磁場は温度非依存である。しかし、 T_{C1} から T_{C2} にかけては、C 軸磁場の急激な上昇が検出される。これは、 $T > T_{C1}$ では磁力線が渦糸の形で入り込み、 $T > T_{C2}$ では印加した磁力線が完全に入り込んでいることの結果である。常伝導状態である 30K のデータを使って、印加磁場の値を校正することができる。したがって、この磁場は T_{C1} では H_{C1} に比例し、 T_{C2} では H_{C2} に等しいはずである。したがって、我々の光学磁気共鳴データは、圧力下でのマイスナー状態から渦糸状態への遷移を検出する可能性を提供する。

異なる印加磁場での測定を繰り返す、私たちは $\alpha H_{C1}(T)$ と $H_{C2}(T)$ を 8.3 kbar 下 $x = 0.41$ で探し出すことができ (図 4B)、 $H_{C1}(T)$ はマイスナー状態と渦糸状態の境界線である、 $\alpha \sim 0.5$ は、試料の形状に依存する数値定数である。 $H_{c1}(T)$ からロンドン侵入長さの温度依存性を導き出し、超伝導ギャップ関数を議論することができる (27, 28)。 $H_{c1}(T)$ は低温で線形的に現れ、0K で 384G に外挿される。線形性と外挿された $H_{c1}(0)$ の値は、この鉄系超伝導体に対してマイクロホール・プローブ・アレイを用いて行われた過去の H_{c1} 研究とよく一致している (27)。一方、初期の傾き $|dH_{C2}/dT|_{T_C}$ は、自由電子質量に対する準粒子有効質量の二乗に比例する。 $H_{C2}(T)$ がほぼ垂直であることは、物質系の強相関性と一致する。

我々は、ダイヤモンド中の窒素空孔中心を、極低温条件下の圧力セルにおいて、優れた空間分解能と磁場感度を有するベクトル磁場センサーとして使用することに成功した。ここで示した方法の空間分解能は、100 nm 未満に押し上げることができる (20)。この分解能は、圧力セル内の磁区、渦糸 (29-32)、スキルミオンなど、磁気関連の特徴のダイナミクスを感知する明確な機会を提供する。非侵襲的かつ非接触の方法であるため、二次元材料の薄片など、従来の巨視的な磁場センサーでは小さすぎたり繊細すぎたりするシステムの研究に用いることができる (33)。さらに、この方法は磁場センシングに限定されるものではない。窒素空孔中心は、局所電場や機械的歪みなど、他の物理パラメータに敏感である。したがって、今回示した方法は、磁場関連プロセス以外にも応用可能であり、圧力下の強相関係における量子物理学の研究において強力なツールとなる。

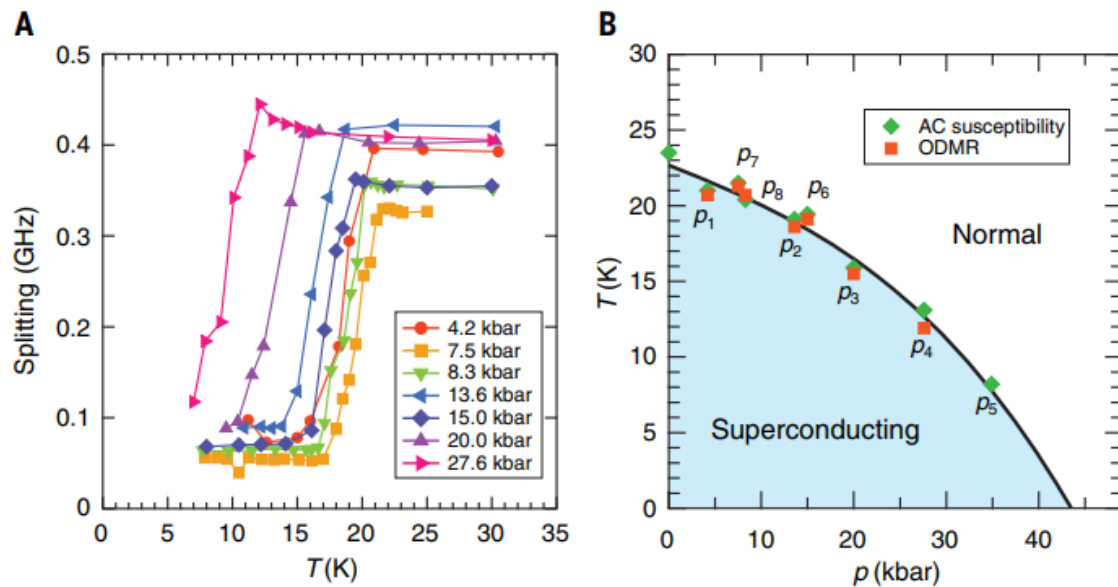


図 3. 窒素空孔センサーによる $\text{BaFe}_2(\text{As}_{0.59}\text{P}_{0.41})_2$ 温度-圧力相図

・図 3 のステートメント

(A) 異なる圧力下で窒素空孔中心のゼーマン分裂によって測定された超伝導に伴う反磁性。印加磁場は $(70 \pm 5) \text{ G}$ 。

(B) 光学磁気共鳴法 (緑のひし形) と交流磁化率 (赤の四角) で測定した T_c の、印加圧力に対する変化を示す。"p1...p8" は印加圧力の順序を示す。エラーバーはシンボルサイズより小さくなっている。

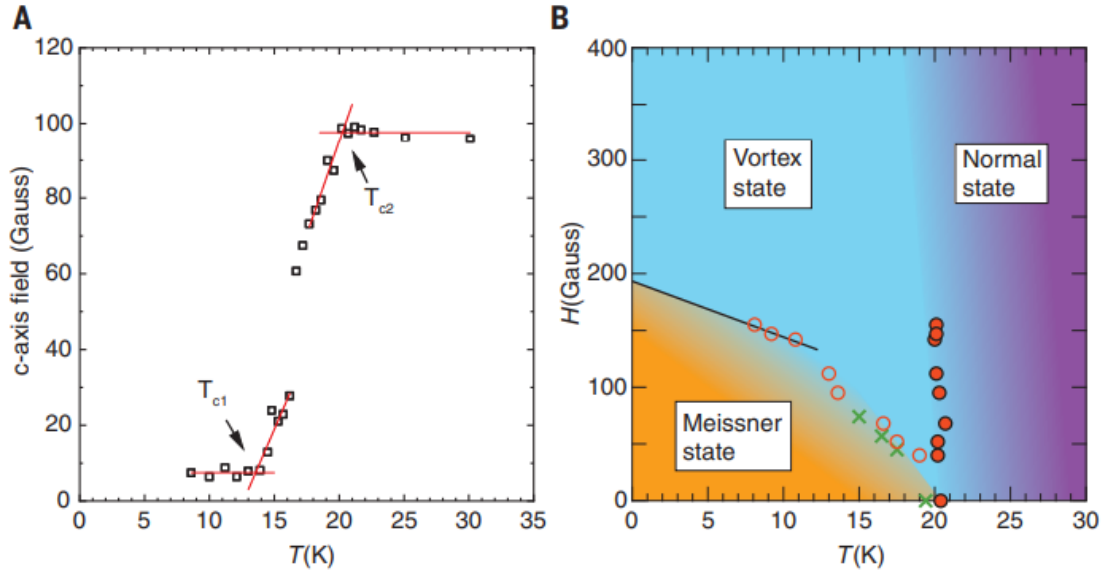


図 4. $\text{BaFe}_2(\text{As}_{0.59}\text{P}_{0.41})_2$ の下部臨界磁場 $H_{C1}(T)$ と上部臨界磁場 $H_{C2}(T)$ の測定。

・図 4 のステートメント

(A) NV_C で測定された c 軸方向の磁場。c 軸方向の印加電界は 95 G であり、これは 30 K でのデータから求めることができる。 T_{c1} と T_{c2} の定義を示す。

(B) 8.3 kbar での $\alpha H_{C1}(T)$ (赤色開丸) と $H_{C2}(T)$ (赤色実線丸) の相図。ここで、磁場に沿った長さ l_C と磁場に垂直な長さ l_a の薄いスラブのジオメトリ係数 α は、 $\alpha = \tanh(\sqrt{0.36(I_c/I_a)})$ (35) で計算でき、 $l_C/l_a \sim 0.8$ である。したがって、 α は ~ 0.5 となる。黒い線は目のガイドの役割を果たす。比較のため、15 kbar の $\alpha H_{C1}(T)$ を相図に追加した (緑の十字)。エラーバーはシンボルサイズより小さい。

2 用語

- ・超伝導ドーム

超伝導体の相図において超伝導を示す部分 ((25) 参照)。

- ・ロンドン侵入長さ

超伝導状態の超伝導体に入り込む磁場の長さ。

- ・超伝導ギャップ

超伝導体においてフェルミ面付近の電子密度が存在しない、つまりギャップが生じていることを言う。

- ・外挿

ある既知の数値データを基にして、そのデータの範囲の外側で予想される数値を求めること。

- ・マイクロホール・プローブ・アレイ

テーパー形状 (先細り) の穴を持つ多層配線基板との接続部品である ((27) 参照)。

- ・準粒子質量

相互作用をもつ多粒子の集団による運動の中で、振動や波動が量子化され、粒子のように振る舞うため、粒子のように扱うことができるもののことである (例：フォノン (格子振動の量子化)、マグノン (スピン波の量子化))。

- ・磁区

強磁性体中にいくつかの領域があり、その領域内では磁化の方向がそろっている。この領域を磁区という。

- ・スキルミオン

磁性体のスピンや液晶の配向秩序といったベクトルの的に表現される秩序を考えると、空間的に一様な秩序の中の局所的な領域において、その一様な秩序とは異なる状態へと連続的に変化しているような構造が、スキルミオンである (多くの場合は、渦状の構造をとる)。