

有機超伝導体における磁束格子の量子融解

1. はじめに

全てのものが静止すると思われる絶対零度において、量子ゆらぎはしばしば予想のつかない現象をもたらす。よく知られているようにヘリウムガスは絶対零度においても液体のままであり固体にならない。これは量子ゆらぎによって原子が有限な運動エネルギーを持つためである。この量子ゆらぎの強さは低次元になるほど影響が強く、二次元的平面的な結晶構造を持つ物質で顕著になる。本企画の主題である磁束格子(flux lattice)は、超伝導体に強い磁場を印加した際に、超伝導体内部を貫通する磁力線のことである。磁束格子は温度が高いと液体のように融解し、低温で結晶化するなど、実在の粒子のように振舞うことが知られている。磁束格子の密度は磁場に比例するため、高磁場では粒子間隔が小さくなり、その間隔が、磁束線のゆらぎの振幅に達すると融解する。この振る舞いも実在の固体の融解を表すリンデマン則と一致する。このように、いわば仮想粒子として振舞う磁束線の状態を理解することは、超伝導の理解に不可欠であるとともに、一方、工学的な面においても重要な意味を持つ。なぜなら、超伝導体に電流を流した際に、ローレンツ力によって磁束線が動いてしまうと電圧が発生し、超伝導のホールマークである電気抵抗ゼロが実現せず、ジュール損失によって超伝導が不安定となるためである。このため、工学的見地からは磁束の固定化(=ピン留め)が最も重要な課題とされる。

多くの有機超伝導体や高温超伝導体は、超伝導平面を重ね合わせたような構造をしており、擬二次元構造と呼ばれる。前述のように量子効果は低次元系で顕著となるため、磁束格子の新しい相が現れるかも知れない。実際、 κ -(BEDT-TTF)₂Cu(NCS)₂と呼ばれる有機超伝導体では、量子ゆらぎによって、数十 mK における超低温においても磁束が固化せず、有限低抵抗状態が出現することが報告[1]されており、液体でもなく、固体でもない、シャーベットのような状態「磁束スラッシュ」と呼ばれているが、詳細についてはよくわかっていない。

2. これまでの量子スラッシュ相の研究の経緯

通常の超伝導体の磁束格子の相図を図 1(左)に示す。臨界温度近傍では磁束は液体状態(点線の内側の白色部分)で、低温で固化(斜線で塗りつぶされた部分)するようすがわかる。固体相は低磁場域からマイスナー相、ブラッグガラス相、ボルテックスガラス相の三つの相からなる。臨界磁場以下の全ての磁場域において、

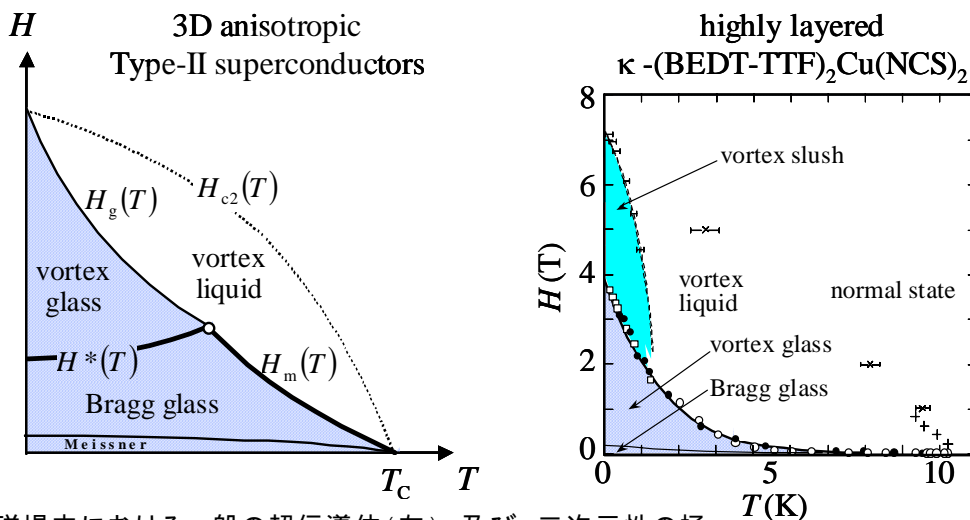


図1 磁場中における一般の超伝導体(左)、及び、二次元性の極めて強い場合(右)の磁束格子の相図。二次元性の強い場合には、量子揺らぎによって低温まで固化しない相(slush)が現れる。

低温極限では固相に転移する。しかし、二次元性の強い系(=量子揺らぎの顕著な系)、例えば前述の有機超伝導体 κ -(BEDT-TTF)₂Cu(NCS)₂では、高磁場域で絶対零度の極限まで、固化しない。その様子を図 1(右)に

示す。

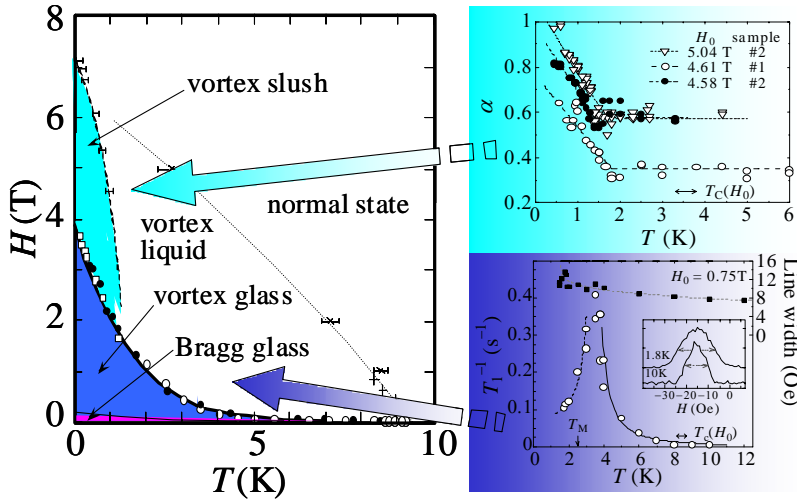


図2 NMR で見た磁束固体相と磁束 slush 相の緩和率の振る舞い。
液体から slush 相へ変化すると、緩和曲線のべき指数が 1 に漸近するようすがわかる。

高磁場側において低温でも固化しない新しい磁束格子相 (= slush) が、現れることが、電気抵抗の測定から予言されている[1]。彼らは、液体相から温度を下げていくと電気抵抗のステップ状の減少が起こるものの、低温で有限抵抗が残ることから、液体と固体の中間の相の可能性があると指摘している。申請者は、これまでこの物質の NMR 測定を行い、液体相から slush 相に変化する際の縦緩和曲線の曲率の変化を観測した。一般に、均一な系では ^1H 核のスピン格子緩和曲線の立ち上がりは直線的になるが、本系では高温の磁束液体相で有限な曲率を示している。すなわち、べき指数は 1 に比べて遥かに小さな値となった。これは渦糸液体状態における何らかの不均一を反映していると思われる。温度を下げていくと、液体相から slush 相に変化する約 1.3 K において急激に増加し ~ 1 に向かって漸近する。図 2 (右上) にべき指数 α の温度変化を示す。slush 相で見られるべき指数 1 は、slush の方が液体に比べてより均一な状態であることを意味している。最初に述べたように slush 状態は固体と液体の混合状態のようなものと考えられており、直感的には不均一な状態に見えるが、本結果は slush 状態の方がむしろ均一な状態に見えることになる。

一見、奇妙に見えるこの結果は次のように説明される。核スピン緩和曲線が冪的になる現象は、たとえば、希薄磁性不純物を含んだ系で良く知られている。そのような系では、緩和中心である磁性不純物の周囲で dipole-dipole 相互作用によって核スピン緩和が進行するが、その速さ (T_1^{-1}) は両者間の距離に強く依存 ($\sim r^{-6}$) するため、核スピンは各々の位置によって緩和の進行速度が異なる。これが冪乗的な緩和曲線の原因である。本系は slush 相において磁束格子の微小クラスターが多数出現することにより、全体的な空間不均一が小さくなったと考えられる[2]。この考えによれば、液体相において緩和曲線がべき関数に従っている時間領域 ($\sim 10^4 \text{s}$) の間は、核スピン拡散が緩和中心間距離まで進行しないはずである。もし進行してしまうと系は均一となり、べき指数は 1 となるからだ。この条件から、系の不純物密度の下限を見積もると、 $1 \times 10^4 \sim 3 \times 10^4 \text{\AA}$ となり、シュブニコフ・ドハース振動から求められている不純物密度の結果とコンシステントとなった[2]。

参考文献

- [1] T. Sasaki *et al.*, Phys. Rev. B66, 224513 (2002).
- [2] M. Urano *et al.* Phys. Rev. B76, 024505 (2007).