

量子の世界を見る究極の磁気共鳴 ULTMRSI

京都大学 大学院理学研究科

佐々木 豊

1. はじめに

我々の研究室では Ultra Low Temperature Magnetic Resonance Spectroscopic Imaging (ULTMRSI) と呼ぶ、絶対零度近傍の量子力学的世界の実空間分布を撮影する技術の開発を行ってきました。創立 40 周年記念誌にて予告しました通り、この 10 年でいよいよ実用段階に到達しましたので、本記念誌にて紹介させていただきます。

2. ULTMRSI とは

MRI (磁気共鳴映像) と呼ばれる測定技術はその医療応用としての存在が際立ち、皆様の中にも病院で MRI 装置の中に恐る恐る入って被験体となられた方が多数おられることと思います。この測定技術は物質の構造分析などで広く用いられている NMR (核磁気共鳴) という測定手法を発展させたものです。通常の NMR では均一磁場の中に試料を置いて、構成原子の核種や周辺物質の分布に依存しておきる電磁場の共鳴吸収と誘導放出の周波数を検出し、物質の組成構造分析に役立てます。一方、MRI では均一磁場に重畳した線形傾斜磁場の中で NMR 測定を行うことで、信号源となる原子が場所ごとに異なる周波数で応答するようにし、多数の異なる傾斜磁場下で取得された信号多数にフーリエ変換を利用した解析を行うことで、信号源である原子が実空間のどこに存在しているのかを測定します。この結果みなさんご存知のように生きた人間の体内の物質分布の様子が非破壊測定できるわけです。まとめますと、NMR では周波数空間での信号分布を精密に測定するのに対し、MRI では実空間での信号源分布を精密に測定することになります。通常の MRI では実空間での分布を得るために、周波数空間での分布は犠牲にしています。このギャップを埋めて、信号源の実空間分布のみならず、各場所ごとの周波数分布を測定できる、究極の NMR 測定が MRSI と呼ばれる MRI の発展技術です。

通常 MRI では時間軸のフーリエ変換が位置情報を与える基礎となっていますが、MRSI では線形磁場勾配の強度を軸としてフーリエ変換を行うことで、場所ごとの周波数分布の情報を破壊せずに取り出す仕組みとなっています。そのため、従来法の MRI と比べてデータの取得量は桁違いに増加し、それに伴って測定時間も大幅に増加します。しかしながら、その見返りとして試料中の各場所における共鳴周波数分布 (スペクトル) という、空間変化する物理系を研究するためには掛け替えのない情報を取得することができるのです。

さて、私たちが研究対象としている物質系は絶対零度に肉薄する 1mK の世界にしか存在していません。そのような低い温度に試料を冷却するための大型希釈冷凍機、核断熱消磁冷凍機も自主開発されたオンリーワン機器ですが、その実験空間に組み込めるように独自開発した手のひらに載るような小型超伝導 MRI 磁石を用い、超低温の敵ともなるパルス状磁場勾配の印加に代えて、ゆっくりと変化する磁場勾配を印加することなどの工夫をこらした独自仕様の MRI 手法を長年かけて開発しました。研究のためとはいえ手作りで MRI 装置を作り上げた方は滅多におられないことと思いますが、類のない研究を目指す基礎科学ならではの楽しい行いではないかと自負しています。これらの設備も含め ULTMRI あるいは ULTMRSI と呼んでいます。

3. ULTMRI で見た量子の世界

実用段階に到達した ULTMRI を活用して積年の夢であった超流動ヘリウム 3 の巨視的波動関数に現れる空間構造の撮影に成功しました。(図 1)

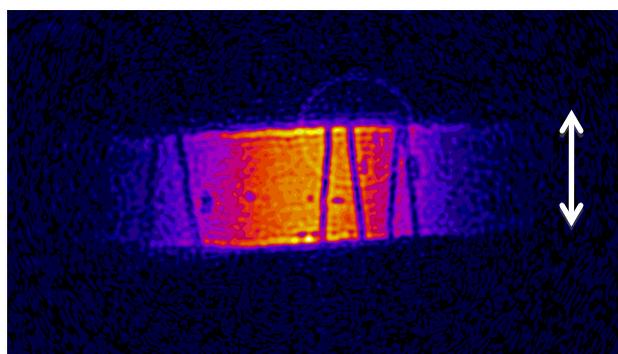


図 1 厚さ 100 μ m の平板状空間に閉じ込めた超流動 $^3\text{He-A}$ 中のドメインウォールの MRI 画像 (2mK)

図 1 の中央に横たわって見える帯状の画像は紙面奥行き方向に対応する厚さ 100 μ m の平板状空間に閉じ込められた超流動ヘリウム 3-A 相から取得した MRI 画像です。白矢印で示された上下方向の長さが 2mm に対応し、左右方向には NMR 信号検出コイルの感度領域外まで伸びた後、バルクの空間を通して試料を冷却するための熱交換器につながっています。NMR 検出のための均一磁場は紙面平行上向きに印加されており、この状態では平板間のほぼ全域が均一な巨視的波動関数で記述される状態となることと予測されていました。ところが、図の上下方向に走る数本の黒い線で示され

ている不均一な構造体が自発的に出現し、しかも安定に存在していることが、世界初の MRI 撮影により、疑いようのない事実として突如目の前に提示されたのです¹⁾。この黒い線の場所では空間均一であるはずの NMR 信号強度が低下しています。詳しい解析の結果、この線の両脇で巨視的波動関数の持つカイラルベクトル（クーパー対の角運動量の向きに対応する L-ベクトル）の向きが紙面に垂直な向きとその逆向きに別れていて、黒い線のある短い区間で反転している構造のドメインウォールが実写されたこととわかりました。こういった空間構造は両脇の均一な部分（黒い線と隣の黒い線の間部分）が安定なため、準安定状態として長時間存続することができます。実際この例でも超流動転移温度のすぐ近傍まで昇温しなければ何時間でも存続していました。こういった構造体の中には固有の NMR 周波数のずれ（シフト）を示すものもあり、古くから存在が知られている形のドメインウォールや量子渦といったトポジカルな構造体が様々な研究の対象とされてきましたが、その空間像を実測定により明らかにしたのは世界初です。

また、こうやって形を実測することで、新たな物理現象が見えていることがわかりました。図を見れば黒い線が交互に左右に傾いた配置を取っていることが見て取れます。これは偶然ではなく、平板状空間の左右方向に流れる超流動永久流と、ドメインウォールの構造に付随するカイラルベクトルの渦度の相互作用に基づく必然であると理解されました。ドメインウォール付近の巨視的波動関数の空間構造をブルーベとした超流動永久流の検出が可能になったことを意味しています。

4. 究極の磁気共鳴 ULTMRSI で見る空間構造

図 1 は各場所から検出された NMR 信号強度を強いほど明るい色で表した MRI 画像です。ドメインウォールのあるところでは信号強度が減少するため、黒い線が見えていますが、様々な状態の測定を重ねるうちにドメインウォールやそれらに囲まれたドメインには複数の種類があることがわかりました。図 2 にその一例を示しますが、濃い色のドメインウォール（黄）と平行して薄い色のドメインウォール（白）がうっすらと写っています。

これらに挟まれたドメインにも NMR 信号に違い

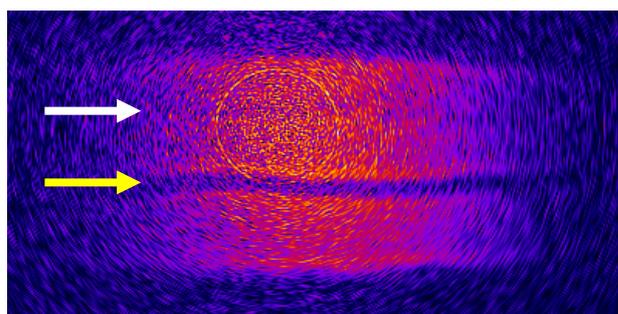


図 2 濃いドメインウォール（黄）と薄いドメインウォール（白）

が見られ、2本のドメインウォールに囲まれたドメインは巨視的波動関数が均一構造を持つときに期待される、NMR 線幅の狭いスペクトルを示しますが、一方その上下に広がるドメインでは巨視的波動関数が空間変化していることを示唆する、幅広い NMR スペクトルを示します。単純な NMR 測定ではこのように信号源の存在場所を区別した測定をすることはできず、MRI 測定ではスペクトルの違いを分離することはできず、空間変化するモデルをたてて想像するしかなかった状況が、場所ごとのスペクトルを取得する究極の NMR 測定、MRSI 法によって示し出されたのです。この例では含まれていませんが、局所的な共鳴周波数のシフトを起こすケースではより明瞭に異なる状態の空間分布を見ることができます。これぞ、旧来の NMR 測定では得ることのできなかつた情報で、“究極の”と名乗る所以であります。

5. おわりに

このように、新しい実験技術を開発することで、それまで知られていなかった世界の物理現象についての知見が得られて行くことにより、人類の知的好奇心はますます掻き立てられて行き、いつの日か「量子」の世界が人々の目の前に広がっていくことでしょう。高度に発展した日本という恵まれた社会に生きるものとして、このように目先の利益だけを目標にしない知的活動を行い、人類の文化の発展に参加する人生を歩ませてもらえたことを誇りに思います。

6. 参考文献

- 1) J. Kasai *et al.* : Physical Review Letters **120** (2018) 205301.