

# 固体におけるネマティックの物理

Keyword: ネマティック

## 1. はじめに

最近、固体物性研究において、「ネマティック」(nematic)という言葉がよく用いられるようになってきた。この言葉は元来、液体と結晶(固体)の間に出現する中間相である液晶の一種を表すものである。液晶やソフトマターの研究分野では「ネマチック」とよぶことも多いこの名称は、古代ギリシア語の「糸」に由来している。具体的には、棒状や円盤状の分子が流動性をもちながら、分子の向きが平均して一方向に揃った液晶状態のことであり、物理的には、並進対称性は保たれているが、回転対称性を破っている点で液体と区別される(図1(a), (b))。

1990年代から、回転対称性の破れを表す「ネマティック」の概念が、固体中の電子に関する異方的な現象や状態に対して適用されはじめ<sup>1,2)</sup> 2008年以降の鉄系高温超伝導体における研究を一つの契機として、近年では様々な物質を対象に、電子系のネマティック研究が進められている。ここでは、固体におけるネマティックの物理について概説する。

## 2. 量子液体における回転対称性の破れ

まず固体金属を考えてみよう。原子は規則正しく並んでおり、回転および並進対称性を共に破っているが、結晶中に多数存在する電子は、互いに相互作用しながら動き回ることができる。ここで、電子間の相互作用(電子相関)を無視する近似が自由電子ガスモデルであり、電子が気体のように振る舞うと考える。電子ガスの密度を非常に低くすると、電子は格子を形成し固体化し、ウィグナー結晶となることが知られている。一方で、電子相関の効果が無視できない強相関金属では、電子の状態はフェルミ統計に従う量子液体、つまりフェルミ液体として捉えることができ、有効質量が増大した準粒子が流動性をもった状態となる。このように、多電子系がとりうる状態と物質の三態(気体・液体・固体)にはアナロジーを考えることができる。

さて、では多電子系において、分子系でみられるネマティック液晶状態と同じように、液体と固体の中間に回転対称性が破れた状態ができていけるのであろうか。通常の液晶では、回転対称性が破れる一因は、分子の構造が棒状や円盤状といった方向性をもっていることにある。その点で、異方性は構成分子自体に自明に内在しているといえることができる。これに対して、固体中の電子に着目すると、古典的には電子自体は方向性をもたないが、量子力学的なスピン自由度や軌道自由度により方向性が出現し、電子集団全体として非自明な異方性を獲得する場合がある(図1(c),

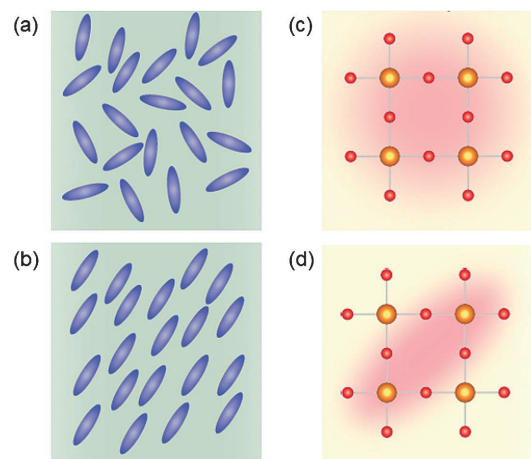


図1 棒状分子と固体中の電子状態における液体および液晶状態の例の概念図。(a) 分子の液体状態では、方向および重心位置はばらばらであり、どこから見ても同じように見える対称性の高い状態である。(b) ネマティック液晶では、重心位置はばらばらだが、方向が平均して一方向に揃っており、回転対称性が破れている。(c) 例えば正方晶の固体金属では、格子は4回回転対称性をもち、電子の液体状態での応答も、90度回転させたとき同じように振る舞う。(d) 電子ネマティック状態では、電子応答が異方的になり、例えば、陰で示すように対称性が2回回転対称に低下する。

(d)). 特に、強相関電子系では、電子相関の強さやキャリア数などを変化させることで、電子の固体状態の一種であるモット絶縁体と液体状態であるフェルミ液体の境界領域で、中間的な性質を示す電子の新奇な秩序が観測されている。このような状態は、流動性をもちながら異方性をもつという点で液晶との強いアナロジーがある。

液晶の概念を固体中の電子状態に拡張し、結晶格子がもつ回転対称性を破る電子状態やその現象に対して、液晶との類似性から、ネマティックやネマティシティ(nematicity)という表現が用いられている。このような電子系におけるネマティック現象は、強相関金属状態だけでなく、磁性絶縁体における量子スピン系の新奇秩序や、通常とは異なる超伝導状態など、多岐にわたる固体物質群において議論されている。以下、それぞれの具体例について述べる。

## 3. 強相関金属における電子ネマティック状態

電子相関の強い金属状態は、銅酸化物高温超伝導体、鉄系超伝導体、重い電子系化合物などでみられ、このような強相関金属状態では、フェルミ液体論から逸脱した振る舞いなどの異常物性がしばしば観測される。このような異常金属状態近傍で、電子ネマティック状態とよばれる結晶のもつ回転対称性を破った電子状態が観測されている。

例えば、鉄系超伝導体では正方晶から直方晶への構造相

転移が存在するが、この起源は、電子系の応答が4回対称から2回対称へ低下する電子ネマティック状態に相転移するためと考えられている(目次口絵)。このことは、電子系の異方的状態へのなりやすさを定量化するネマティック感受率 $\chi_{\text{nem}}$ という物理量の測定から結論されている。<sup>3)</sup> このネマティック感受率は、例えば、ピエゾ素子を用いて試料に一軸性の歪みを加えたときの電気抵抗率の変化量から見積もることができる。ここで、一軸性歪み $\epsilon$ は、ネマティック状態に対する共役な場と考えることができ、歪みにより誘起された電気抵抗の異方性を電子ネマティック秩序変数 $\psi_{\text{nem}}$ として測定することにより、ネマティック感受率 $\chi_{\text{nem}} = d\psi_{\text{nem}}/d\epsilon$ の温度依存性を評価できる。これは、磁性体の相転移を議論するとき、磁場 $H$ に対して秩序変数である磁化 $M$ を測定し、帯磁率 $\chi = dM/dH$ を調べると同様である。鉄系超伝導体では、 $\chi_{\text{nem}}$ が構造相転移温度に向かって発散的に増大することから、電子系自体が2回対称に変化することが本質的であり、電子系と格子系の結合により、格子系が歪み構造相転移として観測されると考えられている。

このような電子ネマティック状態の起源として、スピン自由度を起源とするもの、軌道自由度を起源とするもの、電子のサイト間のホッピングを考慮したもの、など様々な理論的考察がなされている。<sup>4)</sup> 物質によって多様な電子ネマティック状態が実現している可能性があり、その普遍性の解明が重要な課題となっている。

#### 4. 磁性絶縁体におけるスピンネマティック状態

磁性絶縁体では、電子は各サイトに局在し、そのスピン自由度に着目した多くの研究がなされている。通常、スピン間の相互作用により、基底状態では強磁性や反強磁性などの磁気秩序が形成され、対称性が低下したスピンの固体状態となる。しかし、例えば三角格子における反強磁性相互作用やハニカム格子におけるキタエフ相互作用など、何らかのフラストレーションが存在する場合には、極低温まで対称性の破れが観測されない量子スピン液体が期待される。

このようなスピンの液体状態に対して、フラストレート磁性体では回転対称性を破り、液晶との類似性を有するスピン液晶状態が議論されている。強磁性ゆらぎの強いフラストレート系では、スピン励起であるマグノンが対状態となり、ボーズ・アインシュタイン凝縮を起こすことが考えられている。通常のスピン状態は、 $e^{i\theta}$ の回転を考えたときの周期が $2\pi$ であり、矢印のイメージで捉えられる。これに対して、マグノン対の状態は、位相項が $e^{i2\theta}$ と表されるため、周期が $\pi$ の棒状のイメージとなり、液晶分子になぞらえることができ、スピンネマティック状態とよばれる。<sup>5)</sup>

また最近では、キタエフ模型で厳密解として得られる量子スピン液体に対して、強磁場を印加することで多体相互作用によりトポロジカルネマティック転移の可能性が議論されており、<sup>6)</sup> 今後の展開が期待される。

#### 5. ネマティック超伝導状態

超伝導状態においても、系のもつ回転対称性を破る状態が見つかっており、ネマティック超伝導とよばれている。もちろん、常伝導状態において電子ネマティック秩序をもっている鉄系超伝導体などでは、超伝導状態でも異方的な超伝導ギャップをもつことが観測されている。一方で、最近、超伝導状態となることで回転対称性が破れる、真の意味でのネマティック超伝導体もいくつか見つかっている。

精力的に研究が行われているのは、トポロジカル絶縁体 $\text{Bi}_2\text{Se}_3$ にキャリアをドープした系での超伝導状態である。この系の結晶構造は層状であり、層面内では3回回転対称性をもつが、超伝導転移温度以下で面内磁場角度を回転させると、スピン磁化率、準粒子状態密度、上部臨界磁場などの物理量が $180^\circ$ ごとに振動することが観測されている。<sup>7)</sup> これは、この系で理論的に提唱されている、超伝導の秩序変数である超伝導ギャップの大きさが異方的で2回対称性をもつ奇パリティ超伝導状態と矛盾しない。

#### 6. おわりに

物理学において、「対称性の破れ」の概念は普遍性が高く、特に相転移を記述するうえで重要である。液晶では、ネマティックのほかにも、並進対称性も破り層状構造をもつスメクティックや螺旋構造をもつコレステリックなど種々の状態があり、これらと類似の状態も含めると、固体中の多電子が示す液晶的な状態は想像以上にたくさんありそうである。このような電子状態では、液晶研究でも重要なドメインや欠陥の構造、柔軟な制御性、階層構造など物理的に重要な問題も多い。今後、量子液体の分野を超えた量子液晶、あるいは量子ソフトマターの研究展開が期待される。

#### 参考文献

- 1) S. A. Kivelson, E. Fradkin, and V. J. Emery, *Nature* **393**, 550 (1998).
- 2) レビューとして、E. Fradkin et al., *Annu. Rev. Condens. Matter Phys.* **1**, 153 (2010).
- 3) J.-H. Chu et al., *Science* **337**, 710 (2012).
- 4) レビューとして、R. M. Fernandes, A. V. Chubukov, and J. Schmalian, *Nat. Phys.* **10**, 97 (2014).
- 5) 例えば、桃井 勉, *日本物理学会誌* **65**, 345 (2010).
- 6) M. O. Takahashi et al., *Phys. Rev. Res.* **3**, 023189 (2021).
- 7) レビューとして、S. Yonezawa, *Condens. Matter* **4**, 2 (2019).

芝内孝禎 (東京大学大学院新領域創成科学研究科  
shibauchi@k.u-tokyo.ac.jp)

(2021年7月5日原稿受付)