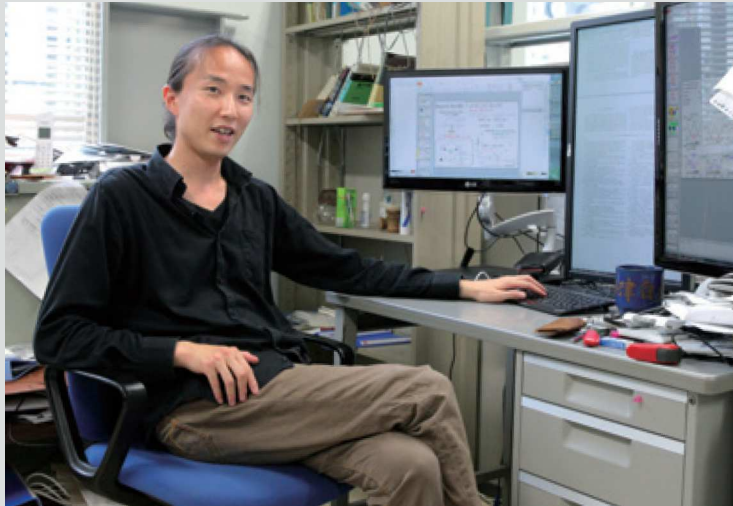


# 高温超伝導体で起きる電子の液晶状態

山川 洋一 物質理学専攻助教



Yoichi Yamakawa

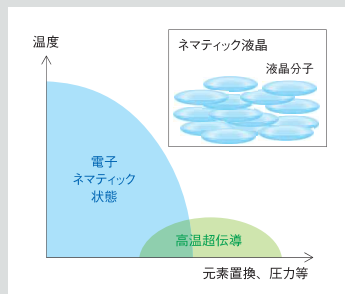
1981年生まれ。2010年新潟大学大学院自然科学研究科博士後期課程修了。同年日本学術振興会特別研究員。2011年名古屋大学大学院理学研究科研究員、特任助教を経て、2016年より現職。専門は物性理論。強相関電子系における多様な相転移や超伝導などを理論面から研究している。

## 電子の液晶状態とは

$10^{23}$ 個にも及ぶ多数の電子を有する固体中では、超伝導や強磁性をはじめとして少数電子系では起きえないさまざまな現象が実現する。1972年、アンダーソン\*1はこの多粒子系の多様性を More is different. (多は異なり)と表現した。

近年、固体電子論において注目を集めている現象が「電子ネマティック状態」である。ネマティックとは本来液晶に使われる言葉で、図1の挿入図に示すように液晶分子の方向が揃った状態を指す。一方、電子自身は点状の素粒子であり、液晶のような方向性をもたない。ところが最近、鉄系超伝導体等において、伝導電子が自発的に回転対称性を破って異方性を獲得するという不思議な現象が報告され、液晶との類推から電子ネマティック状態（電子の液晶

状態）とよばれている。図1は、鉄系超伝導体の模式的な相図である。電子ネマティック相は元素置換や圧力等により抑制され、その近傍で高温超伝導相が現れる。電子ネマティック状態は高温超伝導状態と密接な関係が期待され、その起源に対しさまざまな理論的可能性が提唱された。



## 電子の液晶状態の正体

ここで多くの理論家たちは重大な困難に直面した。回転対称性が破れた電子ネマティック状態は、簡単な平均場近似レベルの計算（第一原理計算を含む）では、まったく説明できないのである。高温超伝導体では電子が互いに避け合う相関効果が重

図1 鉄系超伝導体の模式的相図

鉄系超伝導体の母物質（左端）では、温度を下げると電子系の回転対称性が破れた電子ネマティック状態に相転移する。元素置換や圧力を加える事でこの相は抑制され、その近傍で高温超伝導状態が実現する。右上の挿入図は、ネマティック液晶の模式図。個々の液晶分子は異方性をもち、それらが1方向を向いている状態の液晶をネマティック液晶とよぶ。

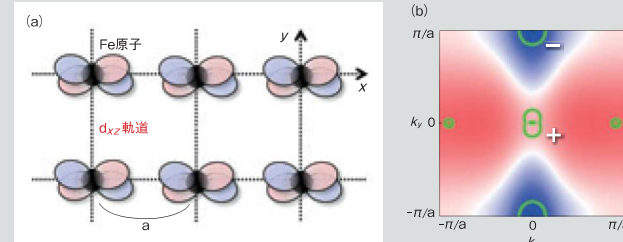


図2 鉄系超伝導体における軌道秩序

(a) 我々が提案する、鉄系超伝導体における軌道秩序起源の電子ネマティック状態の模式図。鉄の $d_{xy}$ 軌道の電子数が増加し、 $d_{xy}$ 軌道の電子数が減少することで、 $x$ 方向と $y$ 方向が非等価になる。(b) 軌道秩序状態下での $d_{xy}$ 軌道の分極の波数 $k$ 依存性。緑の実線は軌道分極により変形したフェルミ面。軌道分極が途中で符号を変える、非自明な軌道秩序が生じている（平均場近似では秩序パラメータに波数依存性はない）。この符号反転する軌道分極とフェルミ面の変形は、東大のARPESグループと我々の共同研究により、実験的にも観測されている。

要であり、相関効果を無視する平均場近似はしばしば破綻する。そこで我々は、平均場近似を超えて多数の電子間の相関を考慮した自己無撞着パーテックス補正 (SC-VC) 理論を開発し、この困難に挑戦した。

真空中の電子は電荷 $-e$ とスピン $1/2$ を有する点状素粒子に過ぎないが、物質中では新たに軌道という自由度を獲得した新種の素粒子へと生まれ変わる。我々は鉄系超伝導体において、伝導を担う鉄の $d_{xy}$ 軌道と $d_{xz}$ 軌道が非等価となる、軌道秩序が生じることを見出した（図2 (a)）。この回転対称性の自発的破れにより、金属電子の運動を決めるフェルミ面が $k_x$ 方向と $k_y$ 方向で非等価になり（図2 (b)）、電子ネマティック状態が実現する。

我々が見出した「軌道秩序による電子ネマティック状態」の起源は、多体相関に起因した軌道・スピン間のモード結合である。図3に、そのファインマン図形を示す。これは、1つの軌道波が2つのスピン波に分かれ、再び軌道波に戻るという仮想過程を通して、軌道波が大きく増強される。矢印つき実線は電子の運動を表す。このプロセスの重要性は、高次のファインマン図形の系統的計算が可能な汎関数くりこみ群理論により実証されている。このファインマン図形が表す軌道・スピン間のモード結合は、さまざまな多軌道系において重要な役割を果たしていると考えられる。

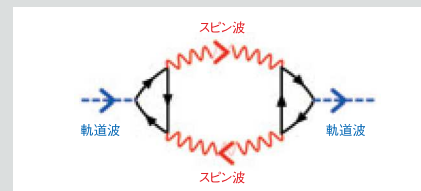


図3 Aslamazov-Larkin 型パーテックス補正のファインマン図形

1つの軌道波が2つのスピン波に分かれ、再び軌道波に戻るという仮想過程を通して、軌道波が大きく増強される。矢印つき実線は電子の運動を表す。このプロセスの重要性は、高次のファインマン図形の系統的計算が可能な汎関数くりこみ群理論により実証されている。このファインマン図形が表す軌道・スピン間のモード結合は、さまざまな多軌道系において重要な役割を果たしていると考えられる。

## 超伝導との関係

最後に、超伝導について簡単に議論したい。端的にいえば、超伝導とは電子対がボーズ凝縮を起こして低エネルギー状態に落ち込む現象であり、電子対をつくる引力が重要である。単純金属で現れる従来型超伝導では格子振動が引力を与えるが、転移温度は低い。そこで鉄系超伝導体においては、電子ネマティックゆらぎによる引力機構が、新しい高温超伝導発見機構として期待されている。我々は最近、超伝導の理論研究を推進した結果、多体相関により電子ネマティックゆらぎによる超伝導有効相互作用が一桁近く増強され、高温超伝導状態が実現しうることを見出した。固体電子論において、平均場近似を超えた多体理論の発展が、今後ますます重要になると考えられる。

\*1 P.W. アンダーソン (1923-) アメリカの物理学者。ノーベル物理学賞 (1977年) 受賞。  
\*2 擬ギャップ現象 超伝導転移温度より高温にも関わらず、超伝導のようなエネルギーギャップが開く現象。

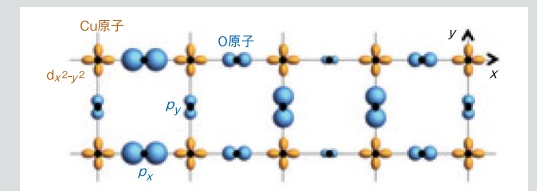


図4 銅酸化物高温超伝導体における電子ネマティック状態

$d_{x^2-y^2}$ 軌道秩序の模式図。 $x$ 方向と $y$ 方向が非等価になっている。この電子ネマティック状態の主な起源もまた、図3のファインマン図形に表す軌道・スピン間のモード結合である。