

*1 [訳注] 転位とは、規則正しく粒子が並んで形成されている格子がずれてしまうという欠陥であり、物質の塑性変形の原因となる。転位は、3次元結晶中では線状の欠陥だが、2次元結晶中では点欠陥になる。

*2 [訳注] それぞれの磁束線は、 $h/2e (= 2 \times 10^{-15} \text{ Wb})$ という決まった磁束の量(磁束量子、またはフラクソイド)をもつ。

*3 [訳注] アプリコソフの磁束格子、または渦糸格子、フラクソイド格子などとよばれる。

ナノスケール2次元磁束格子の融解を観る

チャールズ・デイ
長谷川修司 訳

Tunneling microscope maps the melting transition of a two-dimensional vortex lattice

Charles Day

Physics Today Vol. 62 No. 10 © 2009 American Institute of Physics

互いに相互作用する同一粒子が多数平面上に散らばっている状態で、絶対温度をゼロにすると、それらは規則的に並んで最密充填の六方格子状に“結晶化”する。しかし、この“2次元結晶”の温度が少しでも上がれば、長波長のゆらぎが生じて、粒子の並びの並進対称性(位置秩序)が崩れる。ところがその状態でも、配向秩序という秩序が残る。つまり、粒子の間隔はもはや等間隔ではなくなるが、それぞれの粒子を中心にしてそのまわりを見わたしたとき、まわりの粒子が放射状にきちんと並んで、6回対称性を維持しているのである。

さらに温度を上げると2次元結晶がどうなるのかという問題は、ここ数十年の間、物理学者の興味を惹きつけてきた。もちろん、十分温度が上がれば最後には融解して液体になってしまう。だがそれにいたる前に、系全体に一樣に存在していた配向秩序が崩れて、“ヘキサティック相”というトポロジカルに特徴的な状態が出現すること

がわかってきた。そこでは、“転位”という点欠陥^{*1}が2つ対で生成され、多数の転位対が結晶全体に広がって“回位”²とよばれる線状の欠陥になり、それによって結晶全体が分断されていく。分断されたそれぞれの領域内では、局所的に配向秩序が保たれているが、結晶全体ではもはや位置秩序も配向秩序も消えている。

2次元結晶の融解がこのヘキサティック相を介して進行することは、1978年にハルペリン(Bertrand Halperin)とネルソン(David Nelson)によって理論的に予言され¹⁾、その20年後にマレット(Georg Maret)、レンケ(Ralf Lenke)、ツァーン(Klaus Zahn)がコロイド粒子系で初めて観測に成功した²⁾。最近、スペインのマドリッド自治大学のギラモン(Isabel Guillamón)たちが、まったく異なる2次元系で、結晶状態からヘキサティック相、そして液体にいたる2次元格子の融解過程の全貌を観察することに成功した。その2次系とは、超伝導状態

のタンゲステン薄膜に垂直に磁場をかけたときに形成される、超伝導磁束格子であった³⁾。

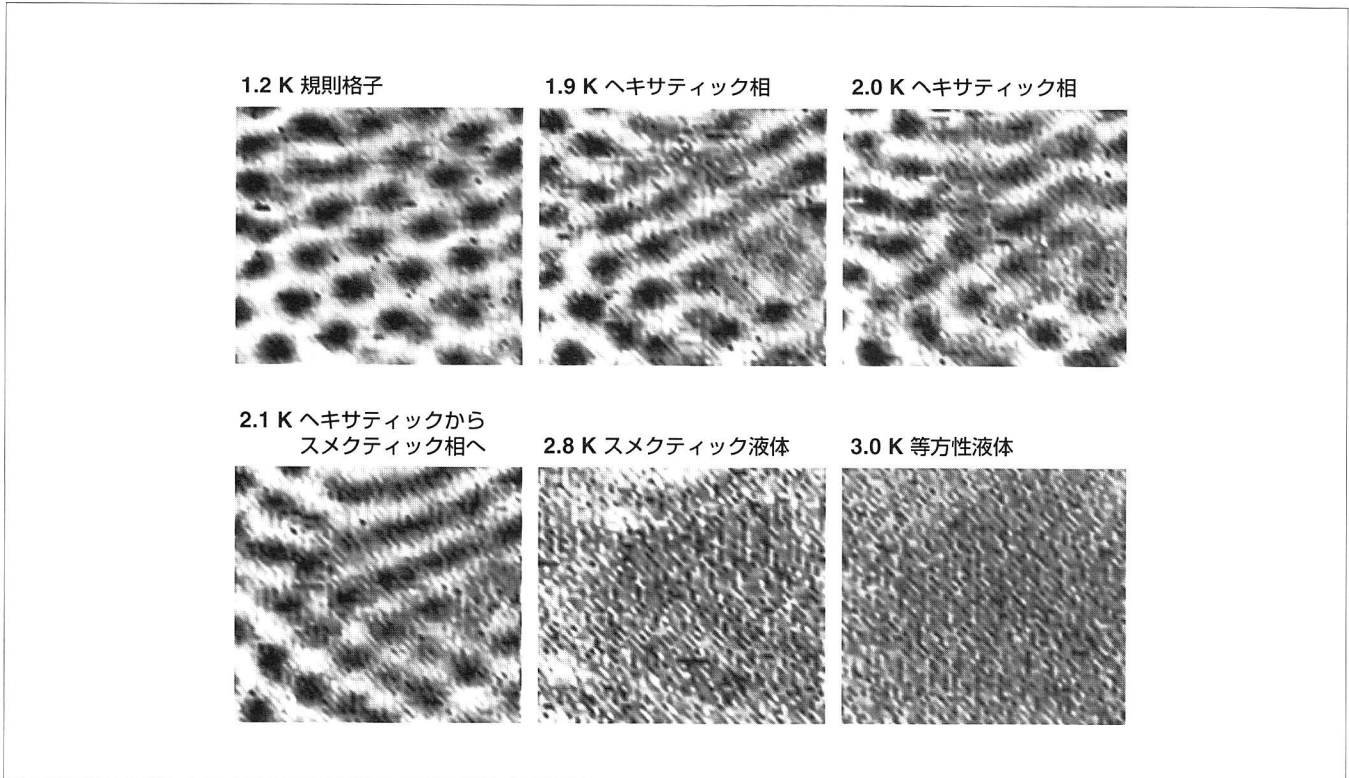
いわゆる第1種超伝導体に磁場をかけても、磁束は物質内部に入れず外に排斥される(マイスナー効果)。しかし、タンゲステンや高温超伝導体などの第2種超伝導体では、磁束が超伝導体の内部を局所的に貫通し、そのまわりをとり囲んで超伝導電流が渦状に流れる(ボルテックス)。その結果、磁束は多数の細い磁束線となって、超伝導体を貫通する^{*2}。この第2種超伝導体が薄膜の場合には、ほかの2次元系と同じように、十分に低い温度で磁束線が規則的に並んで格子状に“結晶化”する^{*3}。しかし温度を上げると、1本1本の磁束線が動き出し、ついには磁束格子が融解するのである。

走査トンネル顕微鏡による観察

走査トンネル顕微鏡(scanning tunneling microscope, STM)によって、この磁束格子の融解を観察することができる。磁束線が貫通しているボルテックスの芯では、超伝導状態が破れて通常の金属状態(常伝導状態)になっているので、STMの探針を走査して、探針がこの芯の場所にくると、低いバイアス電圧でも試料から電子をトンネルさせることができる。しかし、芯のまわりの超伝導電流が流れている場所では超伝導状態が維持されているので、超伝導エネルギーギャップのために、低いバイアス電圧では電子をトンネルさせることができない。このことを利用して、低バイアス電圧でのトンネル電流の流れやすさを各場所で測定すれば、ボルテックスの芯の位置を画像として描き出すことができる。

*4 [訳注] 図中の黒色の領域が磁束の貫通している常伝導状態であり、白色が超伝導状態の領域を表している。

*5 [訳注] この状態が、2つの転位が対で入った状態である。



〈図1〉STMによる磁束格子の融解を示す画像

1つのボルテックスは直径が10 nm程度なので、それをSTMで観察することは難しいことではない。しかし、融解は多数のボルテックスが相互作用して起こる多体现象なので、いくつかの点で細心の注意を払う必要がある。つまり、少なくとも数十本の磁束線が貫通できるくらいの広さにわたって試料表面が原子レベルで平坦で、しかも欠陥のまったくないものでなければならない。この要請を現実の試料で満たすことはとても難しいので、ザラコサ大学のナノサイエンスグループから高品質の試料を提供されるまで、ギラモンは今回の実験を実行しようとは考えなかったほどだった。

ザラコサ大学グループは、イオン

ビームをナノメートル程度にまで集束させて、 $100 \times 100 \text{ nm}^2$ ほどの広さにわたって完全に平坦な試料を作製した。この試料は結晶ではなく、アモルファス状態のタングステン薄膜であった。アモルファス金属薄膜は、結晶性の金属薄膜に比べて高い超伝導転移温度をもち、また等方的な超伝導ギャップをもっているので都合がよかった。さらに、単結晶のもつ結晶異方性が磁束格子の配向秩序に影響を与える心配もない、という利点もあった。

〈図1〉のSTM画像が、ギラモンたちの観察した磁束格子の融解転移を示している。最低温度の0.1 Kでは(その画像は掲載していない)、試料表面上の微細な欠陥によっていくつかのボル

テックスが捕捉されて、磁束格子が少しひずんでいた。しかし、(超伝導転移温度4 Kよりもずっと低い)1.2 Kにすると、熱エネルギーによってボルテックスが欠陥から解放され、ひずみのない完全な磁束格子が観察されている*⁴。ヘキサティック相は1.9 Kから現れ始めた。完全な磁束格子では、1つのボルテックスのまわりを6つのボルテックスがとり囲んでいる(6配位)が、1.9 Kの画像のうち2つのボルテックスが、5配位および7配位に変化して格子が乱れている*⁵。

温度がさらに上がると、格子はさらに乱され、ボルテックスが動き始めた。2.1 Kになると、ボルテックスのいくつかはSTMの探針の走査よりすばや

*6 [訳注] 磁束線が動くとジュール熱が発生し、超伝導状態の破壊につながる。

† 「今月のキーワード」(p.57)参照。

*1 [訳注] 銀河が皿のような形だとして、皿を横方向からみることを縁向き(edge-on)、皿を上からみることを正面向き(face-on)という。縁向きだと全体が重なって皿の構造がよくわからないが、正面向きだと皿全体の形がよくわかる。

く動くので、ボルテックスが線状のストライプとして観察されている。おもしろいことに、このストライプがやや曲がっているのがわかる。これは、液晶でスメクティック秩序とよばれる状態に対応しており、位置秩序が失われ始めたことを示している。さらに、このストライプが回位に沿って動くことが確認され、ヘキサティック相の特徴を示した。2.8 Kになると、このストライプはほとんど消失し、3.0 Kで秩序はまったくなくなっている。このときの画像は一様な灰色になっているが、これはボルテックスがすばやく動き回って液体状態になっているので、超伝導領域の白色と常伝導領域の黒色が平均化された結果なのである。

このマドリードでの実験では、2次元格子の融解理論が予言する特徴が確認されただけでなく、融解過程での電気抵抗の変化に対しても明確な解釈を与えよう^{*6}。そのため、ギラモンたちは次に、この融解過程での電気抵抗の変化を測定する実験を計画している。

参考文献

- 1) B. I. Halperin, D. R. Nelson: Phys. Rev. Lett. **41**, 121 (1978).
- 2) K. Zahn, R. Lenke, G. Maret: Phys. Rev. Lett. **82**, 2721 (1999).
- 3) I. Guillamón *et al.*: Nat. Phys. **5**, 651 (2009).

ガンマ線望遠鏡が明かす宇宙線の起源

バートラム・シュワルツシルト

水本好彦 訳

Gamma-ray telescopes show origins of cosmic rays

Bertram Schwarzschild

Physics Today Vol. 63 No. 1 © 2010 American Institute of Physics

長い間、大部分の宇宙線は超新星残骸中で加速されていると考えられてきたが、これまでは確かな証拠がなかった。

地球大気の頂上に入射する宇宙線陽子のエネルギースペクトルは、 10^9 eV(電子ボルト)から 10^{15} eVまで6桁にわたるエネルギー範囲で、エネルギー E のべき関数 $E^{-2.7}$ でなめらかに減少している。宇宙線フラックスの99%を占める陽子(と、数は少ないが重い原子核)は、私たちの銀河内の超新星(SN)残骸の衝撃波が広がっていくなかで、そのような高いエネルギーにまで加速されていると長い間考えられてきた(より高いエネルギーでは、遠方銀河の中心核で活発に周辺の物質を飲み込んでいるブラックホールのような、より壮大な加速器を考えなければならない)。

超新星による加速機構は、フェルミ(Enrico Fermi)によって提唱された統計加速の一種で[†]、超新星残骸の衝撃波面を荷電粒子がくり返し横切ることによって、逐次加速されていくものである。実際、X線およびガンマ線望遠鏡の観測データから、近傍の超新星残

骸で電子が加速されていることがわかっていて。しかし、電子は宇宙線フラックスの1%程度でしかない。しかも、超新星と宇宙線ハドロン(陽子と原子核)の加速を関連づける確証は、これまでのところ見つかっていない。

荷電粒子は最高エネルギーのもの以外はすべて、天の川銀河のなかの入り組んだ磁場によって軌道がぐにゃぐにゃに曲げられてしまうため、 10^{19} eV以下のエネルギーの宇宙線の起源をその到来方向から知ることはできない。磁場による擾乱の影響を受けずに宇宙線の起源を探ることのできる有力な候補は、宇宙線ハドロンがその加速源近くでガスと衝突して生成する、中性パイオンが崩壊してできるガンマ線であろう。実際に、天の川銀河(われわれの銀河)の円盤に広がったガンマ線は、そのようなパイオンの崩壊が起源である。しかし、銀河のなかにおいて円盤を横から見ている^{*1}観測者が、超新星残骸がたくさんある領域に、宇宙線の起源を特定することは困難であった。

そのため、天体物理学者たちは近年、近傍のスターバースト銀河からのガンマ線放射を見つけて、宇宙線と超新星