

ブラックホールからストレンジメタルへ

ホン・リウ

翻訳：夏梅 誠*（高エネルギー加速器研究機構）

超伝導転移より高い温度で観測されている新しい物質相は、超弦理論によって重力系と関連づけられる。

石器時代の終わりからというもの、金属は人類を魅了して、文明の発展に決定的な役割を果たしてきた。より近年、物理学者は新しい種類の金属、ストレンジメタルに魅了されている。その特殊な性質は、物性物理の基本概念に挑戦している。超弦理論から出てきた考えであるホログラフィック双対性が、この新しい金属状態に応用され、謎のいくつかに光を投げかけている¹。

ストレンジメタル

一見すると、金属は単純そうである。電子が動き回りながら、クローン・ポテンシャルによって相互作用している。実際には、金属は複雑に相互作用する多体系であり、厳密な理論的手法はない。ランダウは、フェルミ流体論で、パウリ排他律に従うという電子のフェルミオンとしての性質が、低エネルギーのダイナミクスを大きく制限すると議論した。彼によると、金属はほとんど相互作用しないフェルミオンの「準粒子」のガスとして振るまう。この準粒子は、相互作用によって変化した電子として考えることができる。準粒子は、電荷やスピンは電子と同じだが、質量や磁気モーメントといった他の性質は変化している。金属は、電気および熱の良導体だが、これは準粒子が自由に動き回り、めったに散乱を起こさないからである。

フェルミ流体論は驚くほど成功を収めた。ストレンジメタルが発見されるまで、この理論は自然界のあらゆる金属状態を記述できた。準粒子の存在とフェルミオンとしての特性、そして低い散乱率は光電子放出実験で確認されている。この実験では、系から電子を取り去り、残ったホールが系とどう相互作用するかを調べる。

金属の電気抵抗は、転移温度以下で完全に消え、超伝導体になる。カマリン・オンネスが、百年前に発見した現象である（ファン・デルフトとケスの Physics Today, Sep. 2010, page 38 の記事）。ふつうの金属では転移温度は30K以下で、この転移の物理的なメカニズムは1950年代後半以降よく理解されている。しかし、1986年、ベドノルツとミュラーはいわゆる高温超伝導体を発見した。これら銅酸化物は正常金属よりずっと高い転移温度をもち、165Kという転移温度も知られている。理論家は巧妙な方法をいろいろ提案して、銅酸化物の超伝導とその高い転移温度の物理的原因を理解しようとしてきたが、意見は一致しておらず、多くの謎が残っている。

もっとも大きな謎の一つは、転移温度のすぐ上の相での性質である。この相は、熱力学的および輸送的性質が正常金属とは大きく異なっており、「ストレンジメタル」(strange metal)と

*原論文：Hong Liu, “From black holes to strange metals,” Physics Today, June 2012. 他のタイトル候補：ブラックホールを使ってストレンジメタルを理解する、ブラックホールはストレンジメタルの謎を解けるか？

¹訳注：ストレンジメタルは、異常金属 (anomalous metal) とも呼ばれる。

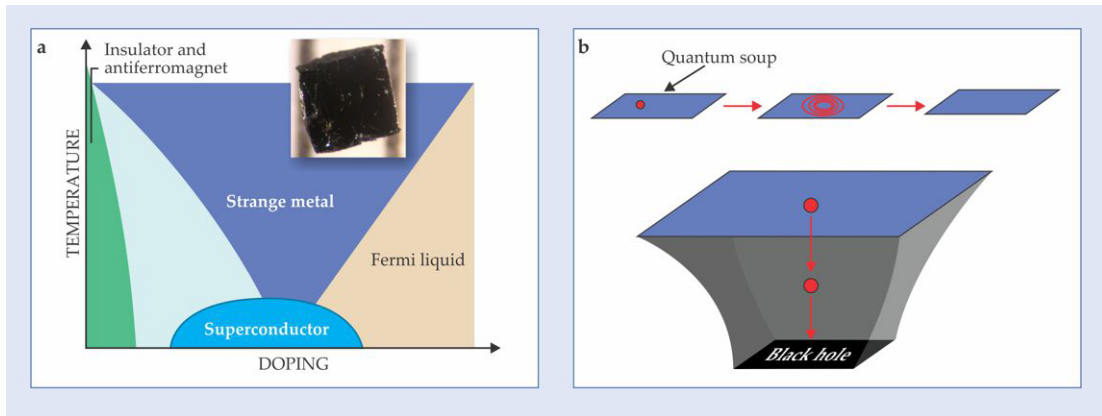


図 1: 読者のための量子スープ! (a) Bi-Sr-Ca-Cu-O のような銅酸化物は、温度と不純物の濃度 (ドーピング) 次第で様々な相にわけられる。中間的なドーピングで超伝導転移温度より上の領域では、銅酸化物は強く相互作用するストレンジメタルになり、量子電子スープとしてイメージできる。(b) ホログラフィック双対性の原理は、量子スープの物理を 1 次元空間次元が高いブラックホールの重力場に対応づける。上の続き絵では、量子スープに加えられた粒子 (赤) が、系に急速にのみ込まれている。対応する重力の記述では、粒子はブラックホールに急速に落ち込むため、境界 (青) に平行な方向にはほとんど動かない。

いう名前を促した (図 a)。ストレンジメタルは、正常金属同様、電気伝導や熱伝導を起こすが、光電子放出実験ではいかなる粒子的な励起も見い出されない。ストレンジメタルでの電子相互作用はとても強いため、系に電子を加えると、粒子的な性質を示すほど十分遠くに行く前に飲み込まれてしまう。言い換えれば、ストレンジメタル中の電子は、相互作用によって個別性を失うようである。このような強く相互作用する系は、イメージ豊かに「量子電子スープ」と呼べるかもしれない (強結合量子系についてより詳しくは、Physics Today, May 2010 の特集号)

したがって、ストレンジメタルは、荷電準粒子のガスとみなすことはできない。では、どうやって電気伝導や熱伝導が起こるのだろうか? これと密接に関わった謎として、ストレンジメタルの抵抗は温度に比例するという性質がある。これは温度の 2 乗に比例する正常金属の抵抗の振るまいとは異なる。銅酸化物でのエキゾチックな相の発見後、ストレンジメタルの振るまいは、正常金属でもみつがっている。圧力や磁場といった外場を変化していくと、ゼロ温度でも相転移が起こるが、たとえばそういった不安定性が起こる場合である。

フェルミ流体論には多くの成果があったにもかかわらず、ストレンジメタルには明らかに当てはまらない。しかし、強結合量子系をあつかう新しいアイデアと手法が、過去 15 年のあいだに予期せぬ方向から来ていたのである。

重力を使って調べる量子物質

その手法とは、1997 年マルダセナによる独創的な論文に端を発したものである。超弦理論の研究者たちによって発見されたのは、重力を含まないある種の量子物質系と、空間次元が 1 次元増えた曲がった時空での量子重力系との等価性である。この等価性は、ホログラフィック双対性、AdS/CFT (反ド・ジッター/コンフォーマル場の理論) 対応、ゲージ重力双対性といった名前で知られている (クレバノフとマルダセナの Physics Today, Jan. 2009, page 28 の記事 [パリティ 2009 年 8 月号])。「ホログラフィック」という言葉は、この等価性にあらわれる両者が違う時空次元をもっていることを強調している。これは 3 次元の物体を 2 次元で表現する、

光学的なホログラムとの類似から来ている．重力のない低次元の方の系を「ホログラフィック量子物質」と呼ぶことにしよう．

意外なことに，強く相互作用するホログラフィック量子物質は，古典重力系，それも通常ブラックホールをもつ重力系に対応する（図 b）．伝統的手法で取り扱うのが難しい多体系の問題は，古典重力の問題に帰着し，しばしばアインシュタインの一般相対論の枠組みで解くことができる（ときには学部レベルの方法で）．他の手法では計算できない強結合系のエントロピーや自由エネルギーといった熱力学量は，ブラックホール計量からしばしば直接読みとることができる．計量は，この高次元時空の幾何を記述する量である．そのうえ，ブラックホール時空は単純であり，普遍的である．一般に，ブラックホールは質量，電荷，角運動量によって，完全に指定される．ブラックホール時空のこの普遍性は，量子物質の新しいユニバーサルリティクラスにつながる．つまり，微視的には違った系でも同じブラックホール時空に対応するため，巨視的な振るまいは同じになる．さらに，ブラックホールの簡単な幾何的性質が，ホログラフィック量子物質の非直観的な強結合現象に翻訳される．このように，ホログラフィック双対性は，新しい物理をみつける上で強力な手法を提供する．

半局所量子液体

もっとも，自然は無料パスを与えてはくれない．正常金属，あるいはストレンジメタルの根底にある相互作用する多体電子系に対して，現時点では重力の記述はない．したがって，双対性によってもたらされる強力なツールは，これらの系に直接は適用できない．事実，重力の記述を持つ既知のホログラフィック量子物質系は，微視的には現実の多体電子系とは似ても似つかない²．しかしながら，これらの系が巨視的にはどう振るまうのか，つまり正常金属，ストレンジメタル，あるいは別の系として振るまうかどうかを考えてみることはできる．

この問いに答えるために，電荷密度をもつホログラフィック量子物質系を考え，この系に荷電フェルミオンを加えてみよう．重力的な記述では，系と「プローブ」の相互作用は，荷電ブラックホール時空を伝搬する（ディラック方程式に従う）荷電フェルミ粒子を考えることに相当する．フェルミオンがブラックホールで散乱される様子が，プローブとホログラフィック量子系との相互作用を決めるのである．より具体的には，プローブと系の相互作用をあらゆる散乱率，そして抵抗は，温度についてベキ則 $T^{2\nu}$ に従う（ ν は定数）．正常金属の場合，2乗則に従う（ $\nu = 1$ ）．ストレンジメタルの場合，温度依存性は線形である（ $\nu = 1/2$ ）．ホログラフィック量子物質系の場合， $1 \geq \nu > 0$ となり，正常金属，ストレンジメタルどちらにもなりうる． ν の値は，ブラックホール時空を運動する粒子の電荷と質量次第である．また， $\nu > 1/2$ の系では，正常金属のように弱く相互作用する準粒子があるようである．一方， $\nu \leq 1/2$ の系は量子電子スープとして振るまい，準粒子的な励起をもたない．興味深いことに，銅酸化物で見られるストレンジメタルの振るまい $\nu = 1/2$ は，この2つの領域のちょうど境界である．もっとも，ホログラフィックな手法は，先天的に $\nu = 1/2$ が現実世界の物質に対応することを示しているわけではない．

物理学者たちは，ホログラフィック・ストレンジメタルのさまざまな性質やさまざまな形を探求中である．1つの可能性として，これらは普遍的な中間エネルギー相の例なのかもしれない．イクバル，メゼイ，と私が「半局所量子液体」（semilocal quantum liquid）と呼んでいるこの相には，興味深く変わった性質がある．大雑把に言って，この液体の場合，空間的には相関は有限距離しかないが，時間的には無限に相関が持続する．液相状態の水のように，半局所量子液体は限られた温度領域でのみ存在する．この相は冷却されると，超伝導相，フェルミ流体，反強磁性体を含むさまざまな相へと転移する．逆に言えば，温度ゼロでは振るまいが違う

² 訳注：重力の記述をもつのは「ラージ N ゲージ理論」として知られる微視的な系である．

ホログラフィック量子系でも、暖められると単一の半局所量子液体へと転移する。この意味で、半局所量子液体は普遍的な相である。

物理学者はしばしば、複雑な系を、本質的な物理を捉えた単純系で解いて進歩を収めてきた。ストレンジメタルに対しては、適切な単純系を得るのは難しかった。ブラックホールこそ、我々が求めていたものなのかもしれない。

ホン・リウはマサチューセッツ工科大学の物理学准教授である。

参考文献

N. Iqbal, H. Liu, M. Mezei, “ Lectures on holographic non-Fermi liquids and quantum phase transitions, ” <http://arxiv.org/abs/1110.3814>.

図中文字

図 a : 温度 ドーピング 絶縁相, 反強磁性相 ストレンジメタル 超伝導相 フェルミ流体
図 b : 量子スープ ブラックホール