

〈座談会〉

ブレイクスルーに向けて何が進んでいるか

青木 秀夫 あおき ひでお (東京大学大学院理学系研究科, 物性物理学)

上田 正仁 うへだ まさひと (東京工業大学大学院理工学研究科, 物性理論・量子情報)

福山 寛 ふくやま ひろし (東京大学大学院理学系研究科, 低温物理学)

なぜ100年か

青木 超伝導は1911年、カマリング・オネスが水銀において発見した(現在に至るまでの歴史については表1参照)ので、超伝導100周年は厳密には2011年になるが、ちょうど100年前の1908年に同じくカマリング・オネスは、ヘリウムの液化に初めて成功した。ここに源流がある。

福山 カマリング・オネスは、広い意味で物質科学の父といっていい。よく低温物理学の創始者と呼ばれるが、固体中で量子力学がどのように働いているか、ということを考える端緒を開いた。

青木 本特集では、超伝導、超流動、ボース-アインシュタイン凝縮(BEC)という大きな広がりカバーすることにより、“超”という点で共通

する物理を俯瞰したい。

超伝導の本質はゲージ対称性の破れた状態で、ゲージ対称性の破れは相転移の一種。相転移とは、たとえば磁性体でいえば、ランダムな向きに向いていたスピンがある特定の方向にそろうことで、そうした対称性の破れた状態は物性物理学の興味の中心といえる。とくに、超伝導、超流動、ボース-アインシュタイン凝縮は、量子力学に特有な、ゲージ対称性が破れた(波動関数の位相が揃った)面白い状態といえる。半導体でおきる分数量子ホール効果という現象も、この一種。

上田 ノーベルには遺言があり、前年度の最も重要な発見に対してノーベル賞を与えるというものだ。しかしそれは科学の分野ではめったに満足されない。大発見を確認するには何年もかかるので

表1——超伝導・低温物理・冷却原子の年表。下線はノーベル物理学賞受賞年。

1908	ヘリウム(He)の液化成功	H. Kamerlingh Onnes(1913)
1911	超伝導の発見	H. Kamerlingh Onnes
1924	ボース-アインシュタイン凝縮(BEC)の理論	S. Bose & A. Einstein
1937	液体 ⁴ Heの超流動現象の発見	P. L. Kapitza(1978)
1938	超流動現象をボース-アインシュタイン凝縮で説明	F. London
1941~47	液体 ⁴ Heの超流動に関する理論	L. D. Landau(1962)
1950	超伝導のギンツブルク-ランダウ理論	V. L. Ginzburg(2003)
1956~58	フェルミ流体論(液体 ³ Heや金属中伝導電子の理論)	L. D. Landau(1962)
1957	超伝導の微視的理論(BCS理論)	J. Bardeen, L. N. Cooper & J. R. Schrieffer(1972)
1957	第2種超伝導体の渦糸格子の予測	A. A. Abrikosov(2003)
1960	超伝導トンネル効果の発見(超伝導エネルギーギャップ)	I. Giaever(1973)
1961	量子渦の発見	W. F. Vinen ←理論予測 L. Onsager(1946), R. P. Feynman(1955)
1962	ジョセフソン効果の予言(超伝導位相干渉効果→巨視的量子現象)	B. D. Josephson(1973)
1962	非対角長距離秩序	C. N. Yang
1972	超流動 ³ Heの発見	D. M. Lee, D. D. Osheroff & R. C. Richardson(1996)
1972	超流動 ³ Heの理論(異方的BCS状態)	A. J. Leggett(2003)
1978	⁴ He薄膜の2次元超流動の発見	J. D. Reppy ←理論予測(2次元のトポロジカル相転移) J. M. Kosterlitz & D. J. Thouless(1973)
1982	分数量子ホール効果	R. B. Laughlin, H. L. Störmer & D. C. Tsui(1998)
1986	銅酸化物における高温超伝導の発見	J. G. Bednorz & K. A. Müller(1987)
1995	レーザー冷却ボース粒子原子気体のBEC実現	E. A. Cornell, W. Ketterle & C. E. Wieman(2001)
2003~04	レーザー冷却フェルミ粒子原子気体の超流動実現	JILA, MIT

(笑)。高温超伝導はその数少ない例外だ。レーザ一冷却された BEC も比較的早く受賞した。それだけ大きなインパクトがあったと言える。

展開する超伝導研究

青木 1911年の超伝導発見時の超伝導転移温度(T_c)は、4 K。 T_c はその後じわじわと上がっていくが、1980年代中頃まで20 K程度を超えられず、原理的に無理なのではという声さえ聞かれるようになった。しかし、1986年に銅酸化物で高温超伝導が発見され、またたく間に100 Kを超え、壁というのは間違いだとわかった。いまでは、超伝導の研究に携わる人の中には、私も含めて、室温超伝導は原理的に可能と考えている人もいる。もちろん、その実現には実験的・理論的に大変な努力とブレイクスルーを要することは確かだが、実現すれば社会的な革命をもたらすだろう。わかりやすい例では送電線などで抵抗による損失がなくなる。

100 Kを超える高温超伝導のメカニズムも、おおよそ理解のコンセンサスが得られつつある。それは、原理的に新しいものだろうと考えられている。従来型の超伝導では、電子の間に、結晶の格子振動の量子(フォノン)を媒介にして引力が働いて、クーパー対といわれる対(ペア)が形成され、これが凝縮して超伝導になる(この理論の提唱者の頭文字にちなみBCS理論という)。これに対して高温超伝導では、電子間に働く非常に強いクーロン斥力相互作用のために超伝導状態になるのではないかと考えられている。

このような理解の発展の一方、高温超伝導発見から20年以上経ち、転移温度 T_c 自体は膨大な研究にもかかわらずなかなか上がっていないのが実情だが、さまざまな展開はみられている。

たとえば単体(一種類の元素からなる物質)の超伝導では、驚くべきことに、シリコンや酸素など典型的な半導体や絶縁体が、高圧で圧縮すると超伝導を示す(コラム1図参照)。これは主に大阪大学を中心とする成果。また、リチウムは金属だが、これが高圧下で超伝導というのも注目すべき結果の1つ。というのは、周期律表で1つ上の水素は、まだ実現していないが、高圧下で金属水素と

なって高温超伝導体になるという理論的予測があって、これは物性物理の「聖杯」ともいえるテーマの1つ。その足がかりとして注目される。ちなみに、リチウムなどのアルカリ金属は、教科書では単純金属となっていて、「単純」とはすなわち、電子間相互作用を無視してもよいとされている。しかし、単純金属といえども、実は電子間相互作用の効果は物性に影響している。

さて、化合物では自由度が大きいので、さまざまな超伝導体が探索され、実際多くのものが発見されている。じつは、秋光純氏発見の MgB_2 をはじめとして、これら最近発見の超伝導体の多くが、日本発だ(コラム1参照)。概念的にも、時間反転対称性を自発的に破った超伝導状態という、きわめて面白い状態がルテニウムの化合物で発見されていて、これも日本(前野悦輝氏)の功績だ。

さらに、超伝導は固体物理の専売特許ではなくて、学際的な発展もある。さかのぼれば、素粒子論において、超伝導の概念を場の理論に取り入れたものが、素粒子論における南部陽一郎氏の理論の重要な要素となった。他方、地球物理学では、近年日本から、地球深部の物質構造としてポスト・ペロフスカイトという構造の発見が報告され、地震波などとの関連に興味ももたれているが、最近では、この構造をもつ化合物で高温超伝導をねらうという研究もあって興味深い。また宇宙物理学でも、中性子星の内部が超伝導状態という可能性も検討されている(本特集の初田氏の解説参照)。普通の超伝導状態では、重心の動かない2電子の対が凝縮するが、重心が動いている対の超伝導状態も考えられており、最近「重い超伝導電子系」とよばれる化合物の中で見つかった。もしかすると、このような状態が中性子星(パルサー)でおきているのでは、という提案もある。

このように、電子間相互作用の強い物質での超伝導、時間反転を破った超伝導、特徴ある結晶構造での超伝導のように、注目すべきさまざまな新手法の超伝導のことを「エキゾチック超伝導」と呼ぶことがある。

超流動と超伝導: 類似点と相違点

福山 超流動とは、低温にすると液体の粘性がな

くなくなって見えるという、常識外れの状態だ。超伝導と超流動は、現象としてはよく似ており、理論的にもほとんど同じとっていいところがある。しかし同時に違いもある。

すべての粒子は、フェルミ統計かボース統計の

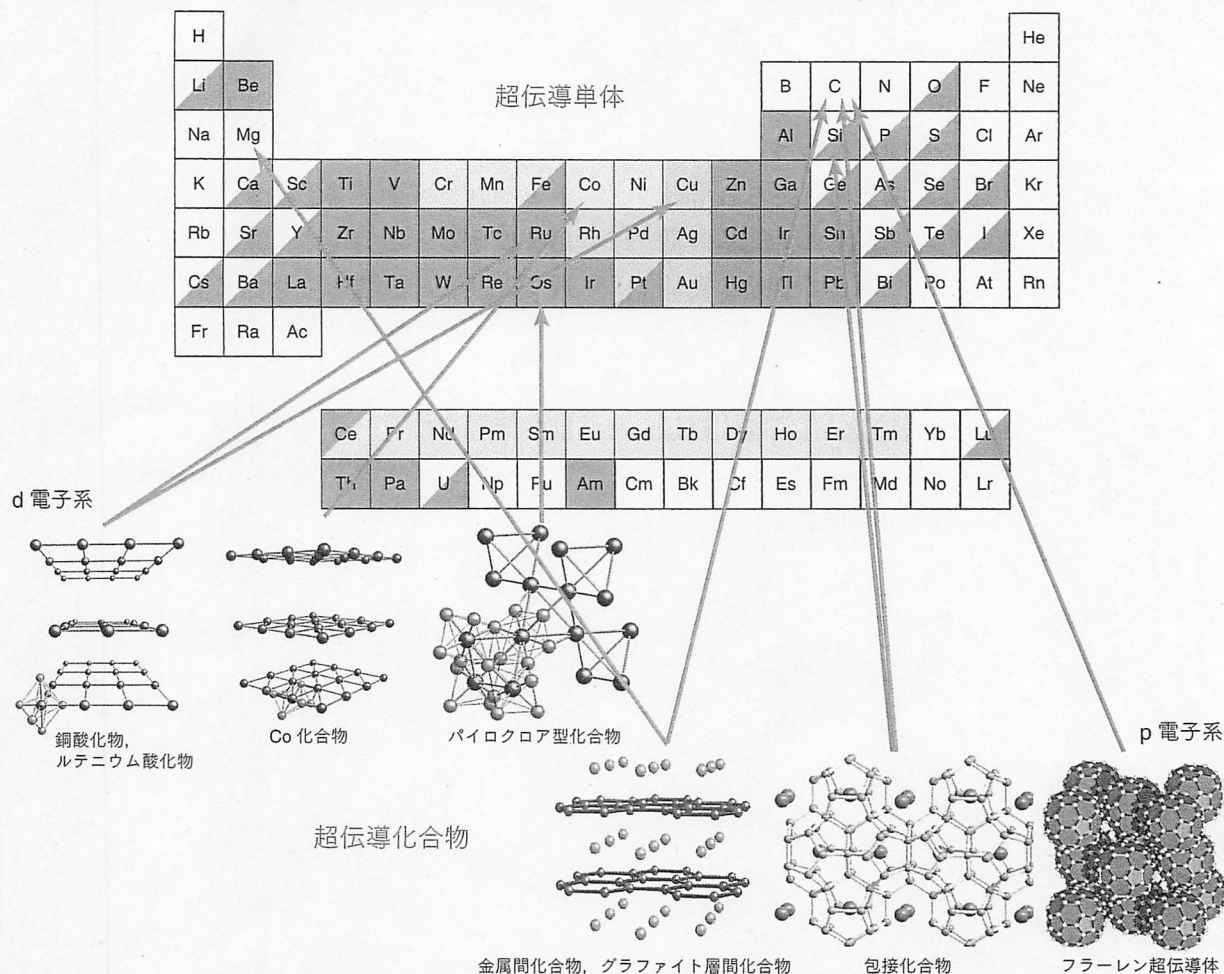
どちらか一方の「統計」に従う。1つの量子状態を占める粒子数が0か1に制限されているものをフェルミ粒子、制限がないものをボース粒子という。フェルミ粒子はたとえば電子がそうであり、質量数が3のヘリウム(³He)もフェルミ粒子であ

コラム1 高温超伝導体の物理開発と設計

近年話題の超伝導体のほとんどは、実は日本で発見されている。MgB₂は秋光純氏(青山学院大学)により発見された。高温超伝導が見出された銅酸化物も、そもそも日本にゆかりが深い(本特集の内田慎一氏の解説参照)。コバルトの化合物も、寺崎一郎氏(早稲田大学)による高い熱電能の発見の後、超伝導が物質材料研究機構のグループにより発見された。3次元でフラストレートした構造をもつパイロクロアという結晶群における超伝導は廣井善二氏(東京大学)により発見された。シリコン(もちろん常圧では超伝導にならな

い)も、包接化合物という籠状構造にさせて、中にバリウムなどを入れると、超伝導状態になることが山中昭司氏(広島大学)によって発見された。炭素原子が60個集まってサッカーボール型になった分子フラレンでは、これを結晶化してアルカリ金属を加えると超伝導になる。この発見は外国だが、フラレンでの最高の超伝導転移温度をもつ物質を見つけたのは谷垣勝己氏(当時 NEC)だ。

これら物質開発と呼ばれる努力の一方、理論面から、電子間相互作用(電子相関)による超伝導が有利化するような指針を与えて超伝導体を「設計」する努力も続いている。(青木)



図——さまざまな超伝導体。上パネルは、周期律表において、単体で超伝導になる元素を赤で示した(赤三角は高圧下で超伝導)。下パネル左は、d電子系(遷移金属化合物)の超伝導体の結晶構造を示す(青丸: 遷移金属, 赤丸: 酸素など他の元素)。下パネル右は、p電子系(炭素, シリコンなどの化合物)の超伝導体の結晶構造。緑の矢は、構成元素の周期律表上での位置を示す。

る。金属中の伝導電子系は液体 ^3He と同様に相互作用する液体と考えることができるので(ランダウのフェルミ流体論)、基本的な振る舞いが似ており、それぞれ超伝導、超流動をおこす。ただし、重要な違いは、超伝導の舞台となる固体中では、電子は結晶格子というジャングルジムのような入れ物の中を動き回っているということだ。ところが液体 ^3He にはジャングルジムは一切なく、完全に等方的である。

違いの点で誤解の多いところを補足すると、超流動状態は、じつは絶対零度でない限り、常流動(粘性あり)の成分と、超流動の成分の2成分からなっており(二流体モデル)、それぞれの成分は摩擦なく対向して流れることができる(熱対向流)。これは超伝導では観測されない。常流動成分がジャングルジムに捕まって自由に流れ得ないからだ。

ヘリウムには、 ^3He の他に、風船に入れたりする身近な ^4He (原子核中の中性子数が ^3He より1つ多い)があり、こちらはボース粒子だ。ボース粒子系は低温でボース-アインシュタイン凝縮(BEC)をおこし、やはり超流動となる。1908年にオネスは ^4He の超流動を目にしたはずだが、そうだとはいきりわかるには、1937年の実験と1938年の理論を待たねばならなかった。

一方、 ^3He の超流動が実験的に確かめられたの

は1972年で、ずいぶんと遅れた。なぜかというところ、フェルミ粒子系には転移温度が下がってしまうという宿命があるからだ。ボース粒子系が超流動になる温度(BEC転移温度)では、フェルミ液体は運動量空間での秩序化は進むけれども(フェルミ縮退)、当然、BEC機構による超流動転移はおこさない。その10分の1や100分の1の温度でやっと超流動になれる。実際に1972年の液体 ^3He の超流動の発見は、わずか3ミリKという温度でなされた。

72年の超流動発見につづいてその理論として、「異方的BCS状態」が考えられた。2個のフェルミ粒子がクーパー対を組み、対がBECをおこして超伝導・超流動状態になるというのがBCS理論の筋書きである。 ^3He の超流動相は、対を組む2粒子が相対的な軌道角運動量をもつようにお互いに回るといふ、新しいタイプのBCS状態であった。もともと系がもっていた空間対称性が自発的に破れ、「異方的」な状態に相転移するのである。このとき、フェルミ粒子系に特有のパウリの原理が働いて、対のスピン状態に自由度が生じてくる。2個のフェルミ粒子のスピンは、アップ・アップ、ダウン・ダウン、アップ・ダウンの混ざったものの3種類に分かれる。これをスピン三重項超流動と呼んで、青木先生が触れた、時間反

コラム2 量子渦と乱流、宇宙論

量子渦は1961年に実験的に発見された。これは、超流体の中の位相欠陥、つまり超流動性が壊れているところだ。渦の中心で超流動性が壊れている領域を量子渦糸という。その周りを超流体が回っている。面白いことは、渦糸を囲む閉経路に沿って超流動速度を線積分すると量子化されている。このことから量子渦とよぶ。

たとえば、バケツに入れて超流体を回転させると、その量子渦糸はきれいに三角格子状に並ぶ。これを渦糸格子とよぶ。もともとは磁場中の超伝導体で発見されたものだが、超流動でもまったく同じことがおこる。さらにそれを激しい流れの中でおこすと、量子渦糸の絡み合った状態になることが、実験的にも理論的にもわかってきた。これを量子乱流という。

乱流は、古くはダ・ヴィンチの時代からある問題だが、まだわれわれは完全には理解していない新しい問題でもある。しかし、超流体の乱流は非常にシンプルな系で理解しやすい。水や空気の乱流を制御できれば、エネルギーの節約の点で莫大な効果があって、世の中に対するインパクトも大きい。

一方、宇宙論の研究にも役立つ。たとえば急速な2次の相転移が超流体でおこると、量子渦糸(位相欠陥)が自発的に生じるという理論があり、実験がなされている。宇宙でビッグバンがおこったときに、真空が相転移をおこし、冷却していった。急速な相転移で位相欠陥ができたことが、宇宙の中の不均一性の1つの原因ではないかという説がある。つまり、実験室ではビッグバンを何回もおこすことができ、精密に測ることができるということになる。(福山)

転対称性を破るといふ超伝導体は、おそらくこの状態になっている。つまり、1972年に発見された超流動 ^3He に源流がある。こうして、超流動 ^3He の発見が後のエキゾチックな超伝導体研究のフィーバーにつながっていく。(最近の話題についてはコラム2,3参照。)

レーザー冷却による制御: 超低温に至る新しい道

上田 レーザー冷却されたBECが実現したのは1995年。 ^3He の超流動よりもさらに二十数年かかった。これは原子の気体をマイクロK以下に冷却して初めてできたものだ。これには、レーザー冷却と呼ばれるまったく新しい冷却方法が用いられた。上下・左右・前後の6方向から原子集団にレーザーを照射すると、その交差点で原子が冷却されていく。レーザーはレーザーメスなど物を熱するものと一般には思われているが、量子力学の原理を使うと冷やすこともできるという、逆転の発想による(本誌2006年10月号特集参照)。

さらに技術を発展させて、1個1個の原子だけでなく、原子集団を急激に冷やすことによって、希薄な原子を超流動状態にすることが可能になったというのが、レーザー冷却によるBECだ。

もう1つの特徴は、この系ではレーザーを使って、いろいろと制御が可能なことだ。温度や原子数だけでなく、原子間相互作用までも自在に制御することができるという、顕著な特長がある。

たとえば、アルミニウムは1.2Kで超伝導になるが、その電子間の引力をもしも10倍強くできればどうか。超伝導転移温度ははるかに高くなる。と理論的には考えられるが、電子間の引力の強さを、普通は人間が勝手に変えることはできない。しかし、レーザー冷却された系では、原子間相互作用の強さも自在に変えることができ、しかも1万倍にも強くすることも可能なのだ。実際、密度が非常に低く、自然のままでは非常に弱く相互作用している系で人為的に相互作用を強めて、液体ヘリウムに匹敵するような強く相互作用する量子気体を実現されている。

マクロな量子系(原子数でいえば典型的には100万個ぐらいの原子の集団)を、それを特徴づけるパラメータ(温度、原子数、原子間相互作用)

を連続的に変化させることで、新しい物質を系統的に探索するまったく新しい道が開かれた。(展望についてはコラム4参照。)

物性物理学の魅力

青木 物性物理学は何が面白いのか。非常に原子の数が多く、これを無限個に近いととらえると、無限自由度の系は、有限自由度の系とは質的に違うところがある。とくに最初に触れたように相転移は面白い。相転移にもいろいろあるが、ゲージ対称性が破れる相転移は、量子力学に特有で、巨視的量子現象が現れて、物性物理学のハイライトの1つであることは間違いない。

上田 素粒子論は自然現象を要素に還元して、普遍的な法則を見つけるものだが、物性の面白いところは、粒子数が減ると法則が消滅するところだ。たとえば、電子は1個では超伝導にならない。たくさん粒子があつて初めて現れる現象に満ちているところが、物性の面白い点ではないか。

超流動や超伝導で私が面白いと思うのは、高温では物の個性を反映してまったく違った振る舞いをするものが、低温で超流動や超伝導になった瞬間に普遍的で共通な性質が現れるところだ。

青木 相転移は教科書では無限系(熱力学極限)で初めて発生すると説くが、原子数をどんどん減らしていったときに、超流動のおこらなくなる境がどこにあるか、という原理的な問題を設定できる。

福山 それは現代的な問いだ。ヘリウムでは、いま60個というところ(超流動ナノ液滴)。

青木 レーザー冷却の場合はどうか。

上田 原子が1000個ぐらいでもBECになる。

ゲージ対称性は粒子数保存と同じなので破れることはないが、超流動や超伝導になると相対ゲージが破れる。つまり、ある場所の位相と別な場所の位相の差が確定するというのが、超流動・超伝導の本質だ。これはいろいろな場所の粒子が絶えず入れ替わって識別できなくなることで生じる。粒子数が減ると、位相差がだんだん揺らいでくる。大きなBECをつくると、位相差が確定して相対ゲージがはっきりと破れている状態ができるが、BECが小さくなってくると、それがだんだん揺らいでくる。最後の1個になると、位相差はまっ

コラム3 超流動研究の最近の話題

超流動固体 ヘリウムは絶対零度でも固体にならない量子物質だが、圧力を加えて密度を増せば固体になる。最近、米国の研究者によって、200ミリK以下の温度で固体⁴Heが超流動性を示すという実験報告がなされた。超流動固体は、結晶の周期性を保ちつつ、粒子がその周期性をホップしながら超流動的に流れることができる、という物質のまったく新しい状態だ。まだ実験的な確認がさまざまに必要な段階だが、最近の考えでは、その報告は真正の固体の超流動ではなく、量子固体中の転位に関する未知の現象ではないかと考えられている。

しかし、固体の超流動は概念としてはありえて、今後も探究の対象だ。もしも常圧下で存在する超流動固体があれば、角砂糖が勝手に溶けるように、重力でスーッと流れるはずだ。

量子スピン液体と零点空格子点相 ヘリウム原子を基板表面に吸着させて、2次元な固体膜を作ることができる。これが³Heの場合、フェルミ粒子で核スピンをもつので磁性を示す。その磁性が、スピンの自由度に関する量子液体といえるような非常に面白い状態をとることがわかってきた(量子スピン液体)。

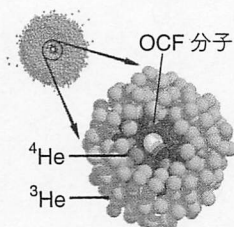
あるいは、粒子が少し欠けたような密度で固化

させると、穴(空格子点)が自由に動く(零点空格子点)。⁴Heの場合、この穴がBEC転移して真正の固体の超流動状態になるかもしれない。広い意味で新規な物性、強相関効果が期待される。

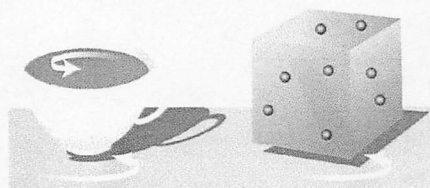
粒子線検出器・超流動ジャイロスコープ・量子ビット という応用 ヘリウムはきわめて純粋な物質だ。絶対零度付近の超流動ヘリウムでは、とても熱容量が小さくなっている。しかも、超流動状態なので、熱伝導もよい。ここに、外から粒子が入ってくれば(ベータ線、ガンマー線、中性子のいずれでも)、反応がおきて、熱容量が小さいので大きく温度が上がり、中の温度計で鋭敏に知ることができる。これは、もっとも鋭敏な粒子線検出器になっている。

超流動ジャイロスコープは、超伝導でよく知られるジョセフソン効果を利用したもの。ジョセフソン効果は、じつは超流体である液体ヘリウムでもおこって、きわめて鋭敏なジャイロスコープになる。地球の自転のわずかな不均一性を精密に測れることが実証されている。

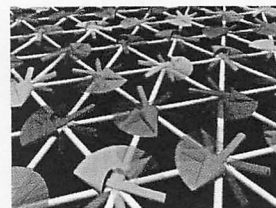
また、ヘリウムの液面上に電子を乗せたもので量子ビットをつくり、量子コンピュータの素材にすることができるのではないかとという研究もある。液体ヘリウムの系は不純物がないので、量子状態が長持ちする(位相緩和時間が長い)。今後が期待されている。(福山)



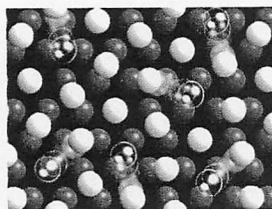
超流動ナノ液滴



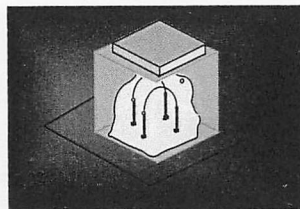
超流動固体の可能性



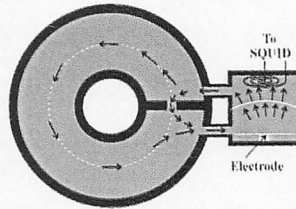
量子スピン液体(2次元³He)



零点空格子点相(2次元³He)



粒子線検出器(超流動³He-B)



超流動ジャイロスコープ(超流動³He-B)

図——21世紀の量子液体・固体研究の例。

格
象
新
し
い
物
質
科
学
の
創
成

コラム4 レーザー冷却された原子気体の将来性

光で固体をつくる 左右からレーザーを当てると1次元の定在波が立つ。これに前後方向からも当てると、2次元の定在波ができる。さらに上下方向から照射すると3次元の周期的なポテンシャルが実現できる。光で作る定在波の深さは非常に浅いので、原子をそこに捕らえる(トラップする)ことはできないが、マイクロKという極低温に冷やすと、非常に浅いポテンシャルであっても、原子をそれぞれの谷にトラップすることができる。こうして1, 2, 3次元の格子(光格子という)の中に原子を入れることが可能になる。

これは画期的な新技術で、いわば固体中の結晶構造を光で作ったといえる。光の配置を換えれば、次元だけでなく、四角格子以外の三角格子やカゴメ格子などもできる。この中にレーザー冷却された原子を閉じ込める。しかも、それが超流動になっているので、固体物理をシミュレーションでき

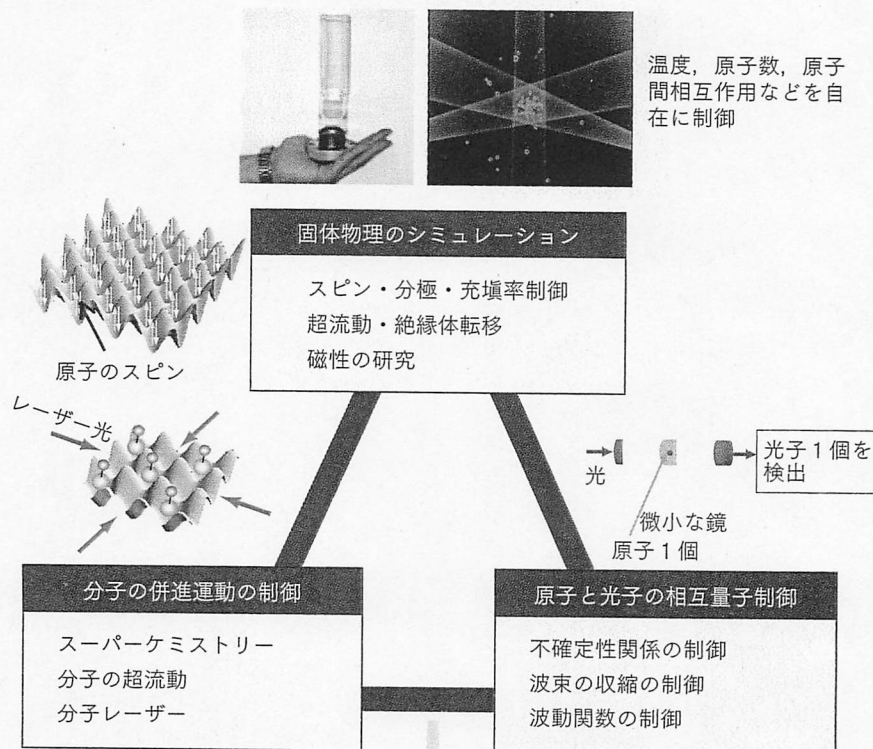
る新たな系ができたといえる。

たとえば、格子の間隔はレーザーの波長を変えることで任意に決められる。原子の数を変化させることもできるので、1個の谷あたりにいくらの原子があるか(充填率という)も変えられる。超流動とモット絶縁体間の相転移がこの系で実現した。

さらに原子はスピンをもつ。磁性の研究、超流動と磁性の研究、固体物理で最も重要なこれらのテーマを、光格子の中で研究しようという大きな流れがある。これはいま最もホットなテーマの1つだ。

次の大きなターゲットに、高温超伝導のメカニズムの解明がある。たとえば、リチウム6はスピンの1/2のフェルミ粒子で、電荷をもたないこと以外は電子と同じ。この系を2次元の光格子に閉じ込めることができる。超伝導では2次元系が注目され、力を引力にも斥力にもできる。斥力にして超流動体ができるかどうか。できるとすると、それは高温超伝導に非常に近い状態とな

レーザー冷却：超低温に至る新しい道



- ・物質パラメーターの系統的制御: 高温超伝導のメカニズムの解明, 新しい化学分野の創出
- ・量子状態と不確定性関係の極限操作: 量子コンピュータの基礎研究, 超精密測定などへの応用

図——レーザー冷却された原子気体の可能性。

る。この系では、固体物理のさまざまな要素、つまり、相互作用の強さ、格子間隔、あるいは密度、スピンなどを独立に制御することができる。もし、高温超伝導と類似な系が実現できれば、そのメカニズムの解明に寄与できるのではないかと期待されている。

分子の制御 もう一つの大きな可能性として、分子を冷却して制御しようという試みもなされている。分子には形がある。回転、振動、並進(重心運動)という自由度をもつ。このうち、回転と振動はすでに制御できるようになっているが、並進の自由度については、まだ誰も成功していない。その制御にはミリK以下に分子を冷やす必要がある。今、世界中で研究されている。

分子を冷却することがなぜ面白いのか。たとえば、分子の超流動は誰も見た人がいない。あるいは、分子でレーザーをつくることができれば、いろいろな化学反応を量子縮退したレベルでおこしてみることができ、量子統計的な効果が前面に出てく

る。そのときにどのような化学反応がおこるかは、まったく未開拓の分野なのだ。スーパーケミストリーと呼ばれることもあり、新分野が開ける可能性がある。

原子と光子の相互作用 さらに、光と原子の相互作用に着目しているグループもある。極限にまで冷えた原子や光を非常に高度に制御する技術が発達してきた。これを量子力学的なレベルで制御しようという試みが、世界中でなされている。量子コンピュータをつくるために最も重要な基盤技術となるし、時間標準のような超精密測定にも応用できる。

* *

マクロな量子系(多自由度の量子系)の未踏のパラメータ領域において、系を特徴づけるパラメータを連続的に変化させることによって、系統的に未知の現象を発見する、レーザー冷却された原子がそういう研究ツールになればと期待している。

(上田)

たく決まらなくなって、普通の原子に連続的につながっていきだろう。

福山 “超”の世界はそれ自体が面白い。やるのがたくさんあるという話に、つついなくなってしまふ(笑)。なぜ“超”が面白いかというと、私も、そこで物の個性を超えて一般的な性質が出てくるところが面白いと思う。素粒子の世界も、じつはそんなにかげ離れてはいないのではないのか。

青木 理論的には結局、「場の理論」。

上田 実際、素粒子論は無限自由度を扱うので、そういう意味では固体物性と似ている。無限の自由度をもつ系の基底状態を真空とみなして、そこから発現する性質を探ろうとしている。真空からの励起状態である準粒子として素粒子が構成されると考えると、本来、同じような見方をしているのではないかと思う。

福山 根っこは近いのではないかという感触もっている。われわれはそれを、多体系として全体を捉えることもあるし、素励起という形で素粒子的な考えをとったりすることもある。自在に使い分けているところがある。

青木 クォークと、それらの間の力を媒介するグ

ルーオンという素粒子を扱う理論は量子色力学といわれるが、それは超伝導と似た理論体系だ。内部自由度としてクォークは「色」というのをもっているのだが、その色自由度に関して超伝導状態(カラー超伝導)が考えられている。上でも触れたように、中性子星では、カラー超伝導状態がひょっとしたら実現し、パルサーの周期の変化が超伝導転移に関係するのでは、といった説もある(本特集の初田氏の解説参照)。

上田 非常に学際的に融合しつつある。2007年春にあったある国際会議には、クォーク・グルーオン・プラズマというまさに原子核の分野と、冷却原子の分野という、一見まったく違った、エネルギーでいうと何十桁も違う分野の人たちが集まって議論した。モノはまったく違うが、物理の本質は非常に似通っている。冷却原子のBECと固体物性の超流動・超伝導には大変密接な関係があるが、それを超えて、原子核や高エネルギーの分野の人たちがどんどん加わってきて融合しつつある。超流動になった瞬間に現れる普遍的な概念は、いろいろな分野が共通している証拠なのだろう。

福山 超伝導・超流動の現象は、物性の世界とそ

れ以外の物理の世界とをつなぐ「窓」なのだろう。実はつながっていて、その言葉を使うと、お互いにわかりやすく、話し合える。

上田 物の個性を超えて物理を語ることができる。
福山 やはり“超”は大切に面白い(笑)。

次のブレイクスルーへ

青木 さて、超伝導・超流動発見100年、高温超伝導発見20年の今、ぜひ次のブレイクスルーがほしい。エキゾチック超伝導や内部自由度をもった多自由度系が注目される。それらは個性を持っているが、ひとたび凝縮すれば普遍的な性質を示す。そのあたりから、新しい世界にアタックできないか。

見出された超伝導体は、それぞれに特徴的な結晶構造をもっている。高温超伝導メカニズムがわかりかけてきて、既存の超伝導の理解だけでなく、新たな物質を「設計」することが現実味を帯びてきていると思う。実は、現在最高の超伝導転移温度 T_c でも、電子のもつエネルギー(1 eV の程度で、温度に換算すると1万 K の程度)に比べて2桁も小さい100 K程度。なぜこんなに低くなってしまったかという理由は理論的には理解されつつあるが、それなら、この2桁落ちを回避する方策はないだろうか、ということになる。このあたりを探るのが設計の要点となる。まだ実現はしていないが、近い将来現れてもおかしくない。物質開発の実験家と理論家とが一緒に取り組む時代で、面白い将来展望が描ける。

福山 強相関の物理も大切だ。「モット転移」といわれるような、粒子間の相関が非常に強くなり、そのために固体になってしまうほど相関が強くなる直前のところでおこる高温超伝導は、物性物理のブレイクスルーだった。

超伝導の転移温度については、私は試料作りの専門家ではないのでわからないが、まったく新しいメカニズムを考えて物質設計をしていく、という方式も考えられてよいように思う。

青木 確かに考えられていい。電子が何かをキャッチボールしながら相互作用してクーパー対になって超伝導をおこすわけだが、普通の低温超伝導の場合は、キャッチボールするのはフォノンとい

う結晶の格子振動の量子だ。高温超伝導の場合には、スピン揺らぎを交換して相互作用する。しかし、交換するのは原理的には何でもいい。たとえば、1960年代から、励起子(エキシトン)という電子の励起の量子の交換が考えられたりしてきたが、理論的になかなか難しいことがわかってきた。これに限らず、また量子のキャッチボールに限らず、広範なフェルミオン凝縮状態が考えられるのではないか。

上田 非対角長距離秩序という概念を提唱したヤンは論文の中では、フェルミ粒子系の場合は超流動や超伝導を構成する最小単位が2個の粒子の対(ペア)であると言っただけで、理論的にはもっと大きな偶数個のフェルミ粒子からなる単位から超流動を構成することも可能だ。

福山 有機の物質系にも可能性がある？

青木 有機物は確かに構造がフレキシブルで、可能性は大きいですが、無機物にも、電子のもつ運動エネルギーや相互作用エネルギーが大きいなどの利点がある。構造の大雑把なところでは、(他の条件が同じなら)層状物質がよさそうなことは理論的に示唆されているし、銅酸化物の高温超伝導体を含めて最近発見された超伝導体の多くが層状構造をしていることとも経験的に合う。

福山 ヘリウム分野でも、従来の手法を延長するアプローチと、新しい理論から入るアプローチとがあるのではないかと思う。たとえば、下地の上にヘリウムを1原子層、2原子層と重ねたときに、そこでの超流動はまだ発見されていない。先ほどのエキシトンと似た話で、表面吸着した超流動⁴He薄膜には第三音波という素励起があって、それをキャッチボールして、上層の単原子層³Heが超流動になるかもしれないとか、表面を利用すると、ちょうど層状物質がそうであるように、相互作用のバリエーションと操作性が増す。何か新しいメカニズムが出てくるのではと期待している。

それがそのまま高温超伝導や室温超伝導に結びつくとは思わないが、超伝導の裾野を広げる1つの方法かもしれない。

上田 理論家にとってもチャレンジングな時代だと思う。高温超伝導についても、定性的なことはわかりつつあると思うが、いざそれを出発点にして、実際にどう具体的に計算するかとなると、

BCS理論のような予測力をもった理論はまだ出現していない。そろそろBCS理論の前夜に似てきて、予言力をもった新しい理論が出現するのはと期待している。実験レベルではかなり整理されてきたのではないかと思う。群雄割拠の時代から統一の時代への変化が近いのではないか。

青木 実際、既存の超伝導の理解から新しいメカニズムにわたるまで、さまざまに模索されている。1つ確かなのは、超伝導発現の様子が、結晶中を走る電子の運動の様子(バンド構造と呼ばれる)に敏感に影響される。既存の超伝導体をバンド構造から理解する、さらにはバンド構造の観点から新たなものを探索する。変わったバンド構造を考へることによって、先ほど述べた「 T_c が電子エネルギーから2桁落ち」という問題を乗り越える、という試みがある。別の観点の1つには、三角格子という結晶格子は、フラストレーションとよぶ要素をもち、超伝導に関しても面白いという理論的予測があった。これもそのままの形では高温超伝導になりにくいことがわかっているが、詰めると面白いかもしれない。似たようなことがヘリウムの物理にもあって、ヘリウムはたとえば、2次元面の上に乗せると三角格子を組みたがる。つまり、固いボールを面上にいちばんきっちり詰めたらどうなるかという、三角格子になる。

福山 そこで磁性が面白く絡んでくる。磁性と超伝導は、高温超伝導が提起した非常に大きな問題

(従来の超伝導体は磁性を示さない)。新しい側面で、ここに面白さがあることは間違いない。

上田 やはり、非常に強く相関している系をどう理解するか、新しい見方が実験によって要求されている。かつて、BCS理論が現れて、クーパー対という新しい階層構造が出てきて、そこから超伝導の地平が広がった。同じように、超伝導100年を迎えるにあたって、BCS、BEC、固体ヘリウム、超流動を通じて統一的な見方が生まれれば、物理の地平がさらに広がるだろう。

青木 地平が広がるという意味で1つ面白いと思うのは、これまでの研究はほとんどが平衡状態の話だったが、非平衡状態というカテゴリーが別にある。強相関系の非平衡に特有な、面白いことがいろいろあるのではないかと思う。たとえばBECでも、緩和時間が比較的長いので、そういう実験がやりやすいことが指摘されている。

上田 平衡に達するまでに時間がかかる。それを利用して非平衡が見える。たとえば、渦がBECに入るダイナミクスなどを可視化して理解できる。また、BECが生まれる瞬間を実験的に捉えることができるかもしれない。

青木 実際に凝縮する時間過程や凝縮が壊れる過程がわかれば。

上田 非平衡統計力学の新たな方向性を与えるような具体的な知見が生まれる可能性がある。

コラム5 “やり手”のカマリング・オネス

なぜ物質を、より低温にしようと思ったのだろうか。どんな物質でも、気体が液体になり、最後に固体になるという普遍性が成り立つかどうか、まず興味の対象であろう。美しい秩序を求めて競争が激しく行われていた。当時、窒素、ネオン、水素と順番に液化が成し遂げられ、最後に液化できなかったのがヘリウムだった。巨大なポンプや大がかりな装置が必要で、海軍から借り受けるなど、カマリング・オネスは相当なやり手だったらしい。当時のオランダには、ファン・デル・ワールスとローレンツという2大理論家がいる。カマリング・オネスをサポートした。ヘリウムが液

化できたときには、カマリング・オネスはファン・デル・ワールスのところへ行き、「あなたの理論を用いて液化ができた。喜んでくれ」と言ったという。一方、当時は、金属を低温にしてゆくと電子は動かなくなる(絶縁体になる)という説と、電気抵抗がどんどん減少するという説があり、これを判定することもカマリング・オネスの動機となった。面白いことに、1972年に超流動 ^3He を発見したオシエロフらも、 ^3He の融解圧力の磁場依存性について他グループのデータでつじつまの合わない点があったことが動機になっており、カマリング・オネスが動機をもって金属を冷やしたことを思い出させるとオシエロフ自身が述べている。(青木・福山)