

# 超流動・超伝導研究の発展

産業技術総合研究所 エレクトロニクス研究部門

柳澤 孝

## 1. 超流動・超伝導の発見

原子や電子のような小さな世界は、日常経験する法則とは異なる法則によって支配されている。その自然法則が量子力学である。量子力学は20世紀初頭に現われ、物理学の世界に革命を起した。量子力学において粒子は波の性質を持ち、この波動性が超低温において量子力学特有の様々な特異な現象を引き起こす。

超流動・超伝導状態においては抵抗を生ずることなくカレントが流れる。超流動・超伝導は典型的な量子現象であり、微視的な世界で起こることでありながら、肉眼で観測できるような巨視的なスケールでおこる現象である。超伝導現象は1911年にオランダのライデン大学のハマリン・オネス (Heike Kamerlingh Onnes) (図1) によって初めて発見された。彼はヘリウムを液化することにより、超低温領域での金属の電気抵抗を測定することに成功した。驚くことに、水銀の電気抵抗が絶対温度約4.2K (摂氏-268.9°C) でゼロとなることを発見した。電気伝導は金属中の電子が運動することにより生じる現象であるが、物質を絶対零度近くまで冷やした時に電気抵抗はどのような振る舞いを示すであろうか、というのは当時の物理学者達が抱いた疑問であった。この疑問に対する答えを得ようとしたオネスは予期していなかった超伝導現象を発見した。超伝導はその後、多くの金属、合金で発見され、何十年にも渡り物理学における解決困難な難問となった。

ヘリウム4が絶対温度2.17Kで粘性が消失し抵抗なく流れることが、1937年にロシアのカピツァ (P. L. Kapitsa) によって発見された。ヘリウム4は、量子力学的効果である零点振動により絶対零度まで液体のままであると考えられており、2.17Kで超流動状態になる。ビーカーの壁をよじ登ったり、非常に狭い隙間でも抵抗なく流れることができる。超流動転移温度では比熱のとびがあり、比熱のとびの形から $\lambda$ 転移と呼ばれる。実は、オネスは1908年にすでに、ヘリウム4を1Kまで冷やして液化に成功し、異常現象を発見していたのだが、この異常現象が超流動現象であるとは思いつかなかった。当時は超流動・超伝導という概念がそもそもなかったのである。

これらの超流動と超伝導が実は類似の現象であることが1930年代後半になって認識されるようになった。1938年にロンドン (F. London) が、ヘリウムの超流体はボーズ・アインシュタイン凝縮した状態ではないかと指摘した。量子力学にはフェルミ統計に従うフェルミ・ディラック粒子とボーズ・アインシュタイン統計に従うボーズ粒

子が存在する。偶数個のフェルミ粒子が束縛状態をつくとボーズ・アインシュタイン統計に従うと考えられる。ヘリウム 4 原子は 2 つの陽子と 2 つの中性子、すなわち偶数個のフェルミ粒子からなるためボーズ粒子である。ボーズ粒子からなる理想気体は、極低温において巨視的な数の粒子が最低エネルギー状態に落ち込み、マクロなスケールの量子現象を示す。最低エネルギー状態に落ち込んだボーズ粒子はエネルギーを失うことなく動くことができるようになる。すなわち、抵抗を生じることなく流れることができ、超流動状態となる。実際、ロンドン はヘリウム 4 の原子系を理想ボーズ気体と考えて、転移温度を 3.13K と見積もった。この値は 2.17K とそう外れてはいない。

## 2. 超伝導の解明

オネスによる超伝導の発見以後、多くの物理学者が超伝導・超流動現象の解明に凌ぎを削った。一つの物理現象を解明しようと多くの物理学者達が挑む時、多くの新しい概念や物理的方法が導入される。1933 年にマイスナー (W. Meissner) とオクセンフェルト (R. Ochsenfeld) は超伝導体中には磁場が入り込まないことを発見した。これは完全反磁性により超伝導体内部の磁場が打ち消されることを示しており、マイスナー効果と呼ばれている。超伝導体は外部磁場への反応により 2 種類に分けられる。第 1 種超伝導体はある強さ以上の磁場をかけることにより壊れてしまうが、第 2 種超伝導体はある臨界磁場 ( $H_{c1}$ ) 以上の磁場に対しては磁場は磁束として超伝導体中に入り込み、さらに強い磁場 ( $H_{c2}$ ) により超伝導が消失する。マイスナー効果が発見された当時は、第 2 種超伝導体は特異だと考えられていたが、現在ではほとんどの超伝導体は第 2 種であり、第 1 種超伝導体がむしろエキゾチックである。ランダウ (L. L. Landau) は超伝導状態をオーダーパラメータすなわち超伝導ギャップが存在する状態であるととらえ、ギンツブルグ (V. L. Ginzburg) と共に二次相転移の理論を発展させ、超伝導の現象論的解明に成功した。ギンツブルグ・ランダウの理論は「オーダーパラメータ」と「対称性の破れ」という二つの新しい概念を物理学に導入し、素粒子物理学を含む物理学の多くの分野に大きな影響を与えた。ランダウ学派のアブリコソフ (A. A. Abrikosov) は第 2 種超伝導体の理論を発展させ、超伝導体に入り込んだ磁束は格子を成すことを発見した。ランダウは当初、磁束格子のアイデアに反対であったが、ファインマンが同様のことを考えていると聞き及んで、アブリコソフの考えを認めたという話である。ついに超伝導現象がミクロな量子力学の画期的な理論により解明されたのは 1957 年である。バーディーン (J. Bardeen)、クーパー (L. Cooper)、シュリーファー (R. Schrieffer) の 3 人はフェルミ粒子である電子が二つでペアを作ってボー

ズ粒子となり、ペアーが凝縮した状態として超伝導を記述した。彼らはペアーを作る引力として電子—格子相互作用を仮定した。この BCS 理論により超伝導のほとんどすべてが説明され、やはり原子核物理学や素粒子物理学など物理学全般にわたり大きな波及効果をもたらした。超伝導機構が解明されて、量子力学における波動性が超伝導・超流動においても重要であることが明らかになった。量子力学的粒子は波の性質も持っているが、超伝導状態は波の位相がそろった状態である。この位相の自由度をゲージ対称性といい、超伝導はゲージ対称性が破れた状態であると理解できることがわかった。まさに量子力学的効果により超伝導は起きていたのである。1970 年頃までは、超伝導・超流動は BCS 理論により完全に解決されたと考えられた。

ランダウ、バーディーン、クーパー、シュリーファー、ギンツブルグ、アブリコソフ各氏は顕著な業績により後にノーベル物理学賞を受賞した。

### 3. ヘリウム 3 超流動（非 BCS 超流動）の発見

ヘリウム 4 は超流動現象を示したが、ヘリウム 3 は超流動にはならないだろうと長い間考えられてきた。ところが、驚くべきことに、1972 年にオシェロフ (D. D. Osheroff)、リチャードソン (R. C. Richardson)、リー (D. M. Lee) らにより、ヘリウム 3 の超流動が 0.0026K (2.6mK) (34 気圧下) で発見された。常圧での転移温度はおよそ 1mK であり、ヘリウム 4 と比べると非常に低い。ヘリウム 3 は核子が 3 個、すなわち奇数個のフェルミ粒子から成るためフェルミ粒子である。フェルミ粒子系はそのままでは凝縮状態とならないために、ヘリウム 4 に比べると超流動転移温度が非常に低かったのである。2 個のヘリウム 3 が対をつくればボーズ粒子となり、ボーズ・アインシュタイン凝縮を起すことが可能であり、ヘリウム 3 の超流動はヘリウム原子の対が凝縮した状態と考えられる。ヘリウム 3 の超流動には BCS 理論の枠内では説明できないことがあり非常に注目を集めた。BCS 理論においてはフェルミ粒子のペアーのスピンはゼロとされているが、ヘリウム 3 の超流動では原子対のスピンは  $S=1$ 、軌道角運動量  $L=1$  であり、内部自由度をもっている。粒子対の軌道角運動量がゼロでない最初の超流動体であった。粒子対の内部自由度を反映して、圧力下では A 相、B 相の 2 つの超流動相が存在し、さらに、磁場下ではもう一つの相が超流動転移線にそって現われる。この相は A1 相とよばれている。BCS 理論では電子—格子相互作用により引力が働き電子が対をつくったが、ヘリウム 3 に対してはスピンゆらぎを媒介にして引力が働くと考えられている。スピンゆらぎによる対相互作用はレゲット (A. J. Leggett) により詳しく議論され、複雑な相図が理論的に明らかにされた。これらの功績によりオシェロフらおよびレゲット氏はノーベル物理学賞を受賞した。

#### 4. 高温超伝導の発見

超伝導研究の想像を越えた大きな転機は 1986 年に起こった。BCS 理論では約 30K が超伝導臨界温度の限界とされ、BCS の壁とよばれていた。ところが、スイスのチューリッヒ郊外の IBM 研究所で、ベドノルツ (J. Bednorz) とミュラー (K. Müller) は超伝導転移温度  $T_c$  が 30K を遥かに超える物質を発見した。彼らが発見した  $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$  は図 2 に示すようなペロブスカイト構造をもつ酸化物であった。直後に、 $\text{La}_{2-x}\text{Ba}_x\text{CuO}_4$  のバリウム (Ba) をストロンチウム (Sr) に変えた  $\text{La}_{2-x}\text{Sr}_x\text{CuO}_4$  では、 $T_c$  が 40K 近くにまで上昇した。1987 年にはイットリウム系銅酸化物  $\text{YBa}_2\text{Cu}_3\text{O}_7$  の転移温度が窒素温度の 77K を超えて 93K に達し、世界中にセンセーションを巻き起こした。その後、ビスマス系銅酸化物  $\text{Bi}_2\text{Sr}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  では  $T_c=107\text{K}$  であることが発見され、また、タリウム系銅酸化物  $\text{Tl}_2\text{Ba}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  では  $T_c$  が 125K に達した。数年の間に相次いで高い転移温度をもつ超伝導体が発見されたことから、やがては常温超伝導体が発見され、エレクトロニクス技術など様々な分野への応用が期待され夢が大きく広がった。現在、最高の  $T_c$  はスイスのチューリッヒ工科大学で発見された水銀系銅酸化物  $\text{HgBa}_2\text{Ca}_2\text{Cu}_3\text{O}_y$  で記録されている 135K である。ただし、この値は常圧での測定であり、加圧下では 160K まで上昇する。図 3 に超伝導転移温度の変遷をグラフにして示した。1986 年の発見がいかに大きなインパクトを与えたかがわかる。高温超伝導を示す物質はセラミックスであり、とても伝導性が良いとは思われない物質であっただけに、高温超伝導体の発見は従来の常識を覆す大きな驚きであった。高温超伝導体の発見後、数年して両氏はノーベル物理学賞を受賞している。

それではどうしてこれらのような高い  $T_c$  を持つ超伝導が可能なのであろうか。高温超伝導の起源は現在、世界中で活発に研究されている。一番重要なことは電子対間に働く引力は何かを明らかにすることである。ヘリウム 3 の原子間にはスピンゆらぎによる引力が働くとされたが、高温超伝導もスピン間の相互作用に起因する引力であろうか。実は、ヘリウム 3 に働く引力の機構は完全にはまだわかっていない。高温超伝導は固体中の電子による現象であり、さらに複雑である。特に、電子間に働く強いクーロン相互作用が問題を難しくしている。そのため、高温超伝導の発現機構はいまだに完全には解決されていない。しかし、電子間相互作用がその鍵をにぎっているという点に関しては多くの物理学者の意見が一致している。

#### 4. 原子気体のボーズ・アインシュタイン凝縮

21 世紀最初のノーベル物理学賞は原子気体のボーズ・アインシュタイン凝縮を最

初に実現したコーネル (E. A. Cornell)、ケタレ (W. Ketterle)、ワイマン (C. E. Wieman) の3氏に与えられた。ボーズ・アインシュタイン凝縮はどの統計力学の本にも載っている非常に基本的なことであり、これまでボーズ・アインシュタイン凝縮が観測されていなかったというのが不思議なくらいである。1990年代に入って気体原子のボーズ・アインシュタイン凝縮を目指した研究が行われていた。ヘリウム4の超流動もボーズ・アインシュタイン凝縮と考えられるが、この場合は液体状態での相転移であった。1995年、ルビジウム87 ( $^{87}\text{Rb}$ ) のボーズ・アインシュタイン凝縮が100nKのオーダーの極超低温でついに実現された。原子をレーザー冷却法で冷やすことにより、ボーズ・アインシュタイン凝縮が実現したのである。レーザー冷却法を開発したチュー (S. Chu)、コーエンタヌージ (C. Cohen-Tannoudji)、フィリップス (W. Phillips) の3氏は1997年度のノーベル物理学賞を受賞した。

超伝導において粒子のもつ波の性質が重要であったが、原子気体のボーズ・アインシュタイン凝縮においても原子の波動性が本質的に重要である。量子力学的粒子は波の性質に対応した固有の波長を持っている。その波長が長いほど量子性が顕著になると考えてよい。野球のボールにも量子力学的な波長はあるのだがあまりに短いために問題にならないのである。温度  $T$  で熱運動している気体原子を特徴づける波長として、熱的ドブロイ波長がある。不確定性関係により原子は運動量ゆらぎをもち、波の広がり の程度を表わす熱的ドブロイ波長は

$$\lambda_{therm} = h / \sqrt{2\pi M k_B T}$$

となる。ここで、 $h$  はプランク定数、 $M$  は原子の質量、 $k_B$  はボルツマン定数である。波長が長くなり隣り合う原子どうしの波動関数が重なりあうようになると、量子性が効いてきてボーズ粒子ならばボーズ・アインシュタイン凝縮を起してもおかしくないであろう。上の表式からわかるように、温度  $T$  が低くなればそれだけ熱的ドブロイ波長が長くなる。よって、温度を下げればボーズアインシュタイン凝縮が期待できる。簡単な見積もりによるとその温度はおよそ 100nK、すなわち  $10^{-7}\text{K}$  になる。この極限的な超低温がレーザー冷却法により実現された。この方法では、磁場により原子を3次元空間にトラップし (磁気光学トラップ)、運動エネルギーの大きい原子をトラップの外へ逃げ出させる (すなわち蒸発させる) ことにより温度を下げるのである。磁気光学トラップと蒸発法によりマイクロケルビン以下の温度が実現した。

## 5. フェルミ原子気体の超流動

ボーズ粒子の原子気体のボーズ・アインシュタイン凝縮が実現したならば、フェルミ

粒子の原子気体の超流動も可能なのではないだろうか。ヘリウム4の超流動に比べて、ヘリウム3の超流動が非常に低い温度で起きたことを思い出すと、その難しさは簡単に想像できる。ところが、2004年にカリウム40 ( $^{40}\text{K}$ )、リチウム6 ( $^6\text{Li}$ )のフェルミ原子気体に対して超流動を報告した論文が相次いで現われた。レーザー冷却法はフェルミ原子の超流動をも可能にした。新しいフェルミ粒子系の超流動に対しては、ヘリウム3の超流動や高温超伝導とは異なるクーパー対形成の機構が提案されている。この機構においては、原子の散乱に現われる閉チャンネル共鳴（またはフェッシュバッハ共鳴）を原子対形成の起源と考えている。フェッシュバッハ共鳴は、2つの原子の衝突の際に中間状態の現われる共鳴状態であり、この中間状態において原子の束縛状態が形成される。この現象を研究した研究者にちなんでフェッシュバッハ共鳴とよばれている。フェルミ粒子である2つの原子の束縛状態はボーズ粒子と考えることができ、極低温では超流動が期待できるのである。図4にカリウム40に対する実験結果を示す。縦軸が超流動密度すなわち超流動状態になった原子の割合である。 $T \sim 0.1T_F$ の低温において超流動が実現したことを示している。ここで  $T_F$  はフェルミ縮退温度を表わし、この実験ではおよそ  $T_F \sim 0.35 \mu\text{K}$  でありマイクロケルビン以下である。磁気光学トラップによる超流動の実現は、更なる進展を予感させる。磁場による原子のトラップが可能であることは、レーザーの定在波を用いた人工的な結晶格子も可能であることを示している。現実の物質中では原子は結晶格子を形成しているが、同様のものを三次元空間中に人工的に作ることができる。これは光学格子 (optical lattice) とよばれている。この方法では現実の化学的な制約をのがれて粒子数だけでなく相互作用の強さをも自由に制御することができ、理想的な状況を人工的に形成できる可能性を示しており、超伝導・超流動を含めた基礎的な新機能物性研究・強相関物性研究とも密接に関係してくる。超流動が確認されたフェルミ原子気体のフェルミ温度は  $T_F \sim \mu\text{K}$  と非常に小さく、超流動転移温度はおよそ  $T_c \sim 0.1T_F$  のオーダーである。もし同じ機構で固体中でも超伝導が起きるならば、固体電子系ではフェルミ温度が1万度のオーダーであることを考えると、軽く1000Kを超える高温超伝導が可能であることを示唆している。物質材料開発を含めた今後の超伝導研究にも大きな影響を与えるであろう。我々の想像を越えた自由に制御された結晶格子の上で、予想もしなかった量子現象が目の前に広がる日が来るのも近いかもしれない。

## 6. まとめ

オネスの発見にはじまる超流動・超伝導研究は、ヘリウム4の超流動の発見、超流動・超伝導の解明、ヘリウム3の超流動の発見、高温超伝導の発見、と大きな発見を

くり返しながらか展してきた。最近はナノケルビンでボーズ原子気体のボーズ・アインシュタイン凝縮、フェルミ原子気体の超流動も実現された。超低温技術の開発のすばらしさは驚嘆に値する。微小世界のテクノロジーはナノメートルの世界を操る領域に入っているが、極低温物理学はナノケルビンの世界に入ってきた。表1は超流動・超伝導のエポックメイキングな発見の年表である。フェルミ粒子、ボーズ粒子と発見がほぼ交互にくり返しているのは興味深いことである。

このような超流動・超伝導研究の発展は、物質材料の基盤研究に支えられている。高品質で純良な超伝導材料の単結晶育成が決定的に重要であろう。物質材料の基盤研究なくしては超流動・超伝導研究の発展はありえない。基礎研究だけでなく、応用研究も盛んに行われている。一般に知られているのは、リニアモーターカー（超伝導磁気浮上列車）やMRI（磁気共鳴撮影法）用超伝導電磁石などであろうが、超伝導線材、エレクトロニクスデバイス用材料等の材料研究も盛んである。超伝導研究は量子コンピューター、ジョセフソンコンピューター、THz 領域の電磁波のレーザー発振など最先端の研究のみならず、超伝導発電、超伝導電力貯蔵、超高感度電磁波検出器、超高速大容量通信など様々な分野で応用が期待されている。

\*\*\* 参考文献 \*\*\*

1. 超伝導・超流動については

中嶋貞雄『超伝導入門』（培風館）。

恒藤敏彦『超伝導・超流動』（岩波書店）。

2. 高温超伝導全般について

立木昌・藤田敏三編『高温超伝導の科学』（裳華房）。

3. レーザー冷却によるボーズ原子気体のボーズ・アインシュタイン凝縮の原論文は  
M. H. Anderson et al.: Science 269, 198 (1995)。

K. B. Davis et al.: Physical Review Letters 75, 3969 (1995)。

4. フェルミ原子気体の超流動の原論文は

C. A. Regal et al.: Physical Review Letters 92, 040403 (2004)。

M. Bartenstein et al.: Physical Review Letters 92, 120401 (2004)。

M. W. Zwierlein et al.: Physical Review Letters 92, 120403 (2004)。

J. Kinast et al.: Physical Review Letters 92, 150402 (2004)。



図1. カマリン・オネスの肖像（ウィキペディアフリー百科事典より）。

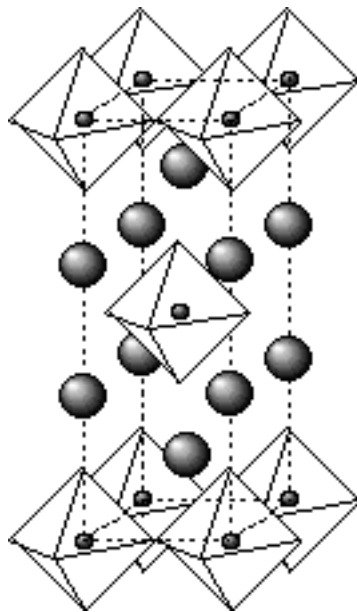


図2. 高温超伝導体の結晶構造。銅と酸素が八面体をなしており、銅-酸素の作る二次元面上を電流が流れる。



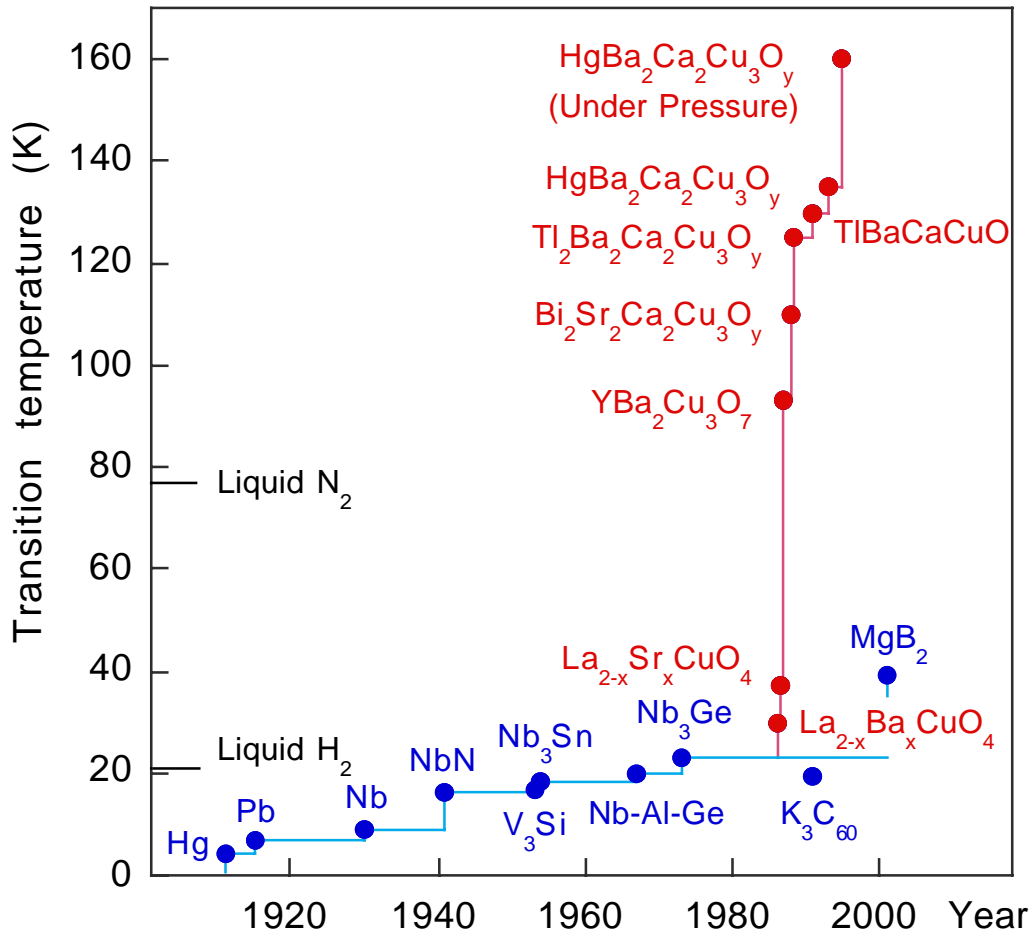


図3. 超伝導転移温度の変遷。

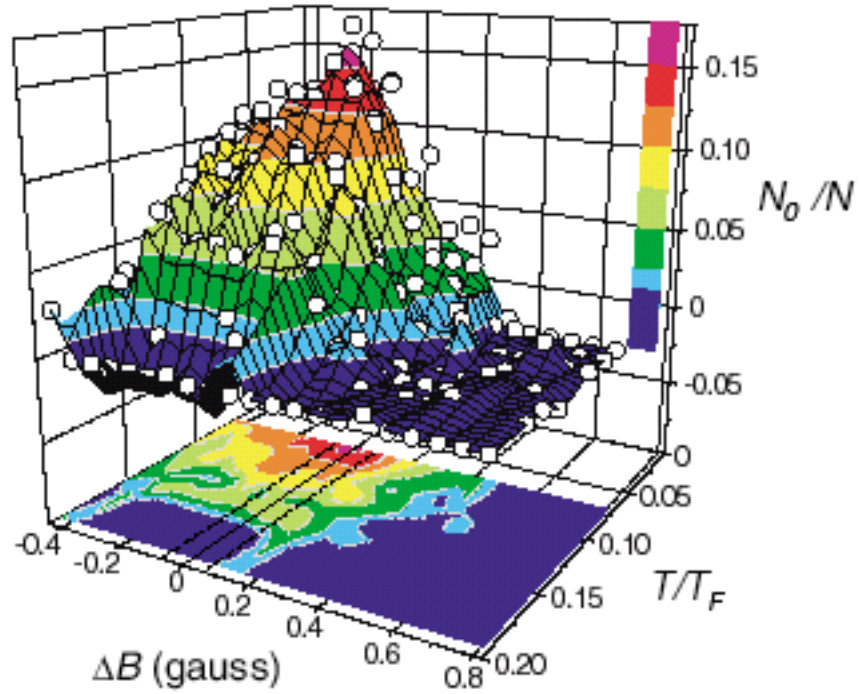


図4. フェルミ原子  $^{40}\text{K}$  気体の超流動密度。  $N_0/N$  が原子気体中の超流動成分の割合である。原子数は  $N=10^5$ 。  $T$  は温度であり、フェルミ縮退温度

$T_F$  は  $T_F=0.35\mu\text{K}$ 。  $\Delta B$  は共鳴磁場  $B_0$  からのずれを表わす。

(C. A. Regal et al.: Physical Review Letters 92, 04043 (2004) より転載。)

Year	1911	1937	1972	1986	1995	2004
Elements	Hg	$^4\text{He}$	$^3\text{He}$	LaBaCuO	$^{87}\text{Rb}$	$^{40}\text{K}$
Statistics	fermion	boson	fermion	fermion	boson	fermion
Temp.	4.2K	2.17K	2.6mK	30K	100nK	100nK

表 1. 超流動・超伝導の発見年表。