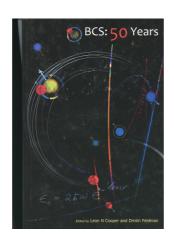
青木秀夫: BCS: 50 Years (書評)、日本物理学会誌 **67**, 414 (2012) の unabridged version (not for distribution)。

Leon N. Cooper and Dmitri Feldman (eds.)

BCS: 50 Years

World Scientific, Singapore, 2011 [専門、大学院、学部向]

青木秀夫〈東大 理〉



超伝導は、物性物理学だけでなく、物理の多くの分野に関わる特段の面白さをもっているといえるが、現在大きな節目を通過中である。2011年は、1911年に Kamerlingh Onnes によって水銀で超伝導が発見された百周年に当たるので、これを記念した様々な国際会議が行われた。一方、1957年に Bardeen, Cooper, Schrieffer により提出された超伝導の BCS 理論は基本中の基本だが、これも数年前に 50 周年記念を迎えた。本書は、これを記念したもので、様々な著者による 23 の章から成り、編集には、BCS の一人である Leon Cooper と、Brown 大学での同僚である Dmitri Feldman が当たっている。

BCS は、二つの点で興味深い。一つは、20世紀前半には超伝導を理論化しようと多くの物理の巨人(ハイゼンベルク、ランダウなど、実はアインシュタインも手掛けている)が挑戦したが、半導体を専門とする Bardeen (Shockley, Brattain とともにトランジスターを発明)のグループが成功した。実際、Cooper は、自らの章で、「自分は1955年に Bardeenのポスドクになった時点では、超伝導の素人どころか、超伝導という概念すら知らなかった」といっている。もう一つは、半世紀の間に、BCS をはじめとする様々な概念が、ハドロン物理などへのスピンオフを見せた一方、MRI やデバイスへの影響も与えた。そのため、本書も内容は非常に多岐に亘っている。Bardeen, Cooper, Schrieffer 自身の語りが先ず面白いが、他の著者も面白い。

本書の構成は、先ず「歴史的概観」の部から始まる。クーパー(Cooper)の「超伝導の 懐古」では、BCSの事始めが語られ、上でも触れたように、超伝導の素人だったのが却っ てよかった、といっている。理論の出発点は、超伝導は普遍的な現象であろうから、先ず はエネルギー・ギャップを説明しよう(マイスナー効果は、ゲージ不変性をどう扱うか問 題だが、多分帰結としてでてくるだろう)という方針をたてた。ポスドクとして、当時最 新のファインマン・ダイアグラムや繰りこみの手法を駆使しようとしたが、出発点のエネ ルギー・スケールに比べ、超伝導状態になったためのエネルギー利得が桁違いに小さい、 という壁に先ず突き当った(このあたりは、電子相関の関与する高温超伝導酸化物で、同 じ問題が別の物理で生じたことを思い出させる)。フォノン交換が電子間引力を生むこと はFrölich などにより示唆されていたが、これが、フェルミ面上の(従って、膨大に縮退し た)電子に働いたときの問題(フェルミ面の不安定性)となることに Cooper は気付いた (1956年)。しかし、Cooperペアは重なりあっているので、単純なボース・アインシュタイ ン凝縮 (BEC) はしないのでは、というのが Cooper の勘だった。しかし(と Cooper は述 懐する)、現在の目で見れば、BCS-BEC 間は連続的にクロスオーバーすることが知られて いるので、これは重要ではなかったかもしれない。電子系でこのクロスオーバーを実験的 に実現できれば面白いが、現在では冷却原子系で実現している(後の、Ketterle, Baym の 章)。いずれにせよ、当時のアメリカ物理学会で、Feynman が語るところでは、Feynman (当時超伝導理論をやろうとしていた) と Onsager が居るところに、目に只ならぬ光をた たえた (wild-eyed) 若者がやってきて、「僕は超伝導を解いた」と説明したが、Feyman は 理解できずこの若者はおかしいのでは、と思ったのに対し、Onsager はしばし黙考した のち、彼は正しいと思う、といった。Feynman によればこの若者というのは Cooper だと いう。しかし、Cooper 不安定性から、多体系全体の状態への道程は一筋縄ではなく、丁 度 1956 年に半導体関連でノーベル賞を受けた Bardeen がストックホルムに行くときに、 Schrieffer が絶望して、テーマを変えたい、というと Bardeen は「やり続けてごらん、何 か (something) は出てくるかも」といった。その something が BCS 波動関数形であった。 マイスナー効果の計算では、ゲージ不変性が気になったが、Bardeenは、ゲージ不変性は 有るはずだから、特定のゲージでやれといった。後に、Weinberg が、(本書の彼の章を含 め)「超伝導とはゲージ対称性の自発的破れに他ならず、マイスナー効果等の物性はこれ の帰結だから、超伝導機構を探索する必要はない」と主張するが、Cooper はその見解に は反対している。これはほんの粗筋の一部であるが、小説を読むように興奮させられると ともに、現代でも色々な意味で示唆的なことを考えさせられる。

シュリーファー (Schrieffer) の「BCS への道程」は、インタビュー形式 (AIP website にも貼ってある)を活字にしたものである。日本の読者に特に興味深いのは、シュリーファー

(BCS 理論当時 25 歳の院生) が BCS 波動関数の形を思いついたのは、元々朝永振一郎が、原子核の中の $\pi$ 中間子の問題において、 $\Psi=\prod_k(u_k+v_kb_k^\dagger|0\rangle$  という変分法の試行関数 ( $b_k^\dagger$ はペアの生成演算子) を作っていた (1947年) のに触発されたことである (これは、APS 百周年記念の Rev. Mod. Phys. **71** (1999) の中でも Schrieffer が述べている)。 摂動論が効かないために答を推測 (guess) しなければならなかったので、朝永の変分法を使った、といっている。一たび気付けば後は簡単だった、という述懐がつづく。

バーディーン (Bardeen) の「超伝導概念の開発」では、彼は 1991 年に没した故、ここ では1962年にロンドンでの低温物理学国際会議でFritz London 賞受賞記念に行った講演 が収録されている。彼は1930年代に一度超伝導に興味をもったが、その後半導体物理に 変わった。1950年に同位体効果の話を聞いて、また超伝導に興味をもった。同位体効果 はフォノンが効くことを意味し、実際、フォノン交換から電子間引力が出ることは示せる が、超伝導においてはフォノンの効果を摂動で扱ってもマイスナー効果は出ないことを Schafroth が示したので、摂動を超えることが急務となった。そこに、Cooper がフェルミ 面不安定を見つけた。そして、BCS 理論が来る。BCS 状態を特徴付ける重要な性質は、波 動関数のコヒーレンスだが、一つ注目すべきは、Bardeen のイリノイでの同僚に Hebel と Slichter が居て、現在では NMR の Hebel-Slichter ピークと言われる現象を 1957 年に実験 で見つけ、それがコヒーレンスと関係していることに Bardeen はすぐ気付いた、というこ とである。後の「NMR と BCS 理論」の章で Slichter 自身も詳しく語っているが、Slichter が超伝導に興味をもったのは決して偶然ではなく、Bardeen が超伝導の講演で多体効果に よりギャップが開く、といったので、NMRに影響しないはずはなかろう、と実験をした 由である(但し、マイスナー効果が磁場を排除してしまうので、緩和時間を測定する必要 がある、などの面白い話となる)。また、BCS理論は発表当時は意外と強い批判ひきおこ した。一つの批判はこの理論はゲージ不変性を破っている (London 方程式の意味で)、と いう点であり、実は、理論を全てゲージ不変に定式化できる、ということは、この数年後 (1960年)の南部陽一郎やGor'kovの理論を待つ必要があった訳である。これは南部自身 が「エネルギー・ギャップ、質量ギャップと対称性の自発的破れ」の章で述べている。

さて、この調子で紹介していては、紙幅を大幅に超えてしまうので、あとは項目のみを示すことにすると、シュマリアン (Schmalian)「超伝導理論の失敗の歴史」、パインズ (Pines、1952年から Bardeen の research assistant prof を務めた)「超伝導 一 電子相互作用から超流動まで」、ゴリコフ「旧ソ連における BCS アイディアの発展」(ランダウも超伝導理論に挑戦した一人だが、その学派による、当時のソ連での BCS 受容史。BCS 理論をBogoliubov が場の理論で分かり易くしたので、"西側と違って"ソ連では BCS はすんなりと受け入れられた、と強調している)、アンダーソン (Anderson)「BCS — 科学における

『我が生涯の愛』」(タイトルの意味は、1957年に超伝導に一目惚れしてから、生涯の恋人に なった、ということであるが、ゲージ不変性についても、南部理論を経て、Anderson-Higgs 機構に至ることに触れている。また、超伝導の電子機構の提唱者の一人として、それにも 当然触れている。異方的ペアリングが必要であること、これは<sup>3</sup>Heの超流動でも起きてい ること、また物質としては有機超伝導体や、最も最近の鉄系にも触れられている)。第二 部は「揺らぎ、トンネリング、不規則性」で、クラーク(Clarke)「SQUID — 過去、現在」、 ハルペリン (Halperin) 等「超伝導体における抵抗」、フルデ (Fulde)「クーパー対破壊」、 ゴールドマン (Goldman) 「超伝導・絶縁体転移」、ル・ドゥサル (Le Doussal) 「超伝導体に おける新奇渦相」、ツヴィックナーグル (Zwicknagl)、ウォスニッツァ(Wosnitza) 「FFLO 状態」。第三部は「新超伝導体」で、コーエン (Cohen)「BCS 超伝導体の Tc および物性 の予言と説明」、チュー (Chu)「高温超伝導の発展 — Tc 実験の展望」、エイブラハムス (Abrahams)「高温超伝導の発展 — 理論の展望」。最後は「超伝導以外での BCS」の部 で、レゲット (Leggett) 「液体 <sup>3</sup>He の超流動 — BCS 理論」、ケッターレ (Ketterle) 等「強 く相互作用するフェルミ気体における超流動」、ベイム (Baym)「原子核、中性子星から クォーク物質、冷却原子系に至る BCS」、ウィルチェック (Wilczek) 「基盤とインスピレー ションとしての BCS — 対称性のトランスミューテーション」、ワインバーグ (Weinberg) 「BCS から LHC」(物性は超伝導、量子ホール効果などの"現象"に興味をもつが、素粒子 ではそうではない、といった議論から始まる)。

このように、目次を紹介しただけで溜息が出るほど多彩で錚々たる著者であり、超伝導関連のキーワードも網羅的に現れる。銅酸化物高温超伝導も完全な理解からはいまだに遠い (Abrahams も彼の章で理論を苦心して要約している、現時点での実験・理論の集成としては、例えば J. R. Schrieffer, J. S. Brooks (eds.): Handbook of High-Temperature Superconductivity: Theory and Experiment)。異なる物理系との密接な関連では超流動へリウム (Leggett の章) や、冷却原子系 (Ketterle らの章)、ハドロン物理・QCD(Baym やWilczek の章)が迫力がある。さらに、BCS の各人に興味ある方は、Bardeen の伝記 (Vicki Daitch: True Genius: The Life and Science of John Bardeen (Joseph Henry Press, 2002))や、いまだに価値を失わない J. R. Schrieffer: Theory of Superconductivity (Benjamin, 1964; Perseus Books から 1999に再刊)などを読むのも一興だろう。本書のような集成は、読者は歴史に浸るのも良し、実験的・理論的にブレークスルーを狙うスタートラインに使うのも良し、というわけで、超伝導専門外の方も含め、研究者、学生ともに強く薦められる本である。今はarXivの目まぐるしい時代ではあるが、それだからこそ、ものごとを50年、100年単位で見直すことはますます大事と思われる。超伝導も新超伝導体の発見をはじめとして日進月歩であり、室温超伝導は研究者の目標(聖杯?)だが、このような

long-range の考察を契機とした今後の発展を期待したい。