

# 教養教育指向の物理教育の実践

安塚 周磨\*・大村 訓史\*\*・鈴木 貴\*\*\*

(令和元年10月29日受付)

## Practice of a liberal arts oriented physics education

Syuma YASUZUKA, Satoshi OHMURA and Takashi SUZUKI

(Received Oct. 29, 2019)

### Abstract

We have given our college students a fascinating lecture which covers broad area of modern physics: quantum mechanics, semiconductor, magnetism, laser, superconductivity, big bang, and particle physics. The emphasis is on understanding of the basic principles without an overload of technical details, replacing some fundamental equations with physical insight. History of research on superfluidity and superconductivity is briefly shown.

**Key Words:** modern physics, physics education, liberal arts, superconductivity, superfluidity, science, engineering.

### 1. はじめに

近年の人工知能の進歩や量子コンピュータの商用化の例を挙げるまでもなく、科学技術や研究のフロンティアは非常に早いスピードで進んでいる。研究内容はその領域の専門家以外には理解が困難な状況にあるから、一人の大学教員が、その全体像を的確に把握して、これを1つの体系にまとめて大学の学部学生に教えるというようなことは不可能に近い。しかし、異なる専門分野を持つ複数の教員が、自分の研究に関連する興味深い現象や話題をピックアップして、その内容には深入りせず概観するだけなら難しいことではない。内容に踏み込んだ教育が目的ではなく、雑学的となってしまう系統だったことにはならないにせよ、より多くの学生に物理学の面白さを理解してもらうために、またそのような話題を持ち合わせた技術者を育てるためにも「現代物理学を彩る20世紀以降の物性物理学と素粒子物理学」についてある程度専門的な教養指向の物理教養科目

が必要であろう。

本学では「物質と宇宙の物理」を開講し、物理グループの大村、安塚、鈴木が分担してそれぞれの専門性を活かし、15週の講義を担当している。本科目では、現代物理学の二大分野である物性物理学と素粒子物理学が解き明かした物質観と宇宙観を解説している。最先端のホットな話題であるが、物理をとくに学んでいない文科系の学生にも理解できるように数式の利用を極力避け、教養的なテーマにしぼって概説している。本科目では、物質をミクロな視点から理解するという現代物理学の手法と、それによって理解された自然の真の姿について概説する。現代物理学の出発点は、「物質をよりミクロに分解すると何が現れ、それらはどのような法則に従っているのだろうか?」という素朴な疑問である。この間に対する答として、まず、計算物性・理論物性を専門とする大村が、原子の内部構造、光、X線等に関する話題について5週にわたって講義している。次に、電子物性を専門とする安塚が、科学技術の革命

\* 広島工業大学工学部知能機械工学科

\*\* 広島工業大学工学部環境土木工学科

\*\*\* 広島工業大学工学部電子情報工学科

的な進歩を生んだ量子力学と現代の物質科学の基礎を5週にわたって講義している。さらに、素粒子論・数物理学を専門とする鈴木が初期の宇宙にまで迫る素粒子物理学に焦点をあて、現代物理学が解き明かしたビッグバンの「ビフォー・アフター」を、最後の5週をかけて解説している。

本科目は2010年(H22カリ)から7学科の発展学習トラック科目(2単位)として開講された。この科目の開講の経緯については文献[1]に詳しい報告がある。この科目は自由科目であり、その取得単位は本学の卒業要件にはカウントされない。しかも、後期木曜日の9・10時限(16:45~18:15)という遅い時間帯にも関わらず、毎年、30名弱の学生が熱心に受講してくれた。このことから、本学の学生が現代物理学に対して純粋な興味と関心を持っていることが伺える。また、この科目を一般社団法人教育ネットワーク中国への単位互換科目として提供しており、他大学から6名の学生も受け入れた実績がある。

本科目において、20世紀以降の物理学を概観するテキストとして、大槻義彦著「 Semester 物理学 現代物理学」(学術図書出版社)を使用している[2]。内容として、原子とその内部構造、量子力学、半導体、磁性、レーザー、超伝導、素粒子、宇宙の構造、ビッグバンなどが扱われているが、このような構成は従来の物理教育の体系からすると大変珍しく、かつ魅力的な内容になっている。本科目は断片的な内容ではあるが、本学の学生には「知的な潤い」を与えることも狙いとしている。また、講義を担当する我々自身が幅広く物理学の面白さを再認識する機会でもある。残念ながらR2カリではこの科目は廃止されてしまう。この紀要では、この講義内容の中から、最も華々しい分野である超流動と超伝導の研究の歴史と魅力を整理しておきたい[3-6]。

## 2. 超流動現象

1908年、オランダの物理学者オンネスは世界ではじめてヘリウムガスの液化に成功した。大気圧と圧力平衡にあるときの液体ヘリウムの温度(沸点)は4.2 Kである。液体ヘリウムの誕生は20世紀以降を通して多くの驚きと夢を人類にもたらしたと言っても過言ではない。そこには驚異の物理現象、超流動と超伝導が待っていたからである。

私(安塚)が学生時代、卒業研究の実験で液体ヘリウムを使用する際には、ガラス製のデュワー瓶(魔法瓶)を用いていた。通常使用するデュワー瓶には、赤外線輻射を防ぐために銀メッキが施されているが、液体ヘリウムの液面の確認と超流動現象の観察のために、幅が数cmで垂直方向にスリットが設けられている。私と同じ研究室の博士後期課程の先輩が私の目の前で超流動状態を見せてくれた。液体ヘリウムを真空ポンプで引くと、ヘリウムガスが

どんどん排気されていく。減圧によって、液体ヘリウムは激しく沸騰する。圧力は一気圧から徐々に下がり、液体ヘリウムは蒸発熱を奪われるため、温度はどんどん下がっていく。ある瞬間、激しく沸騰していたヘリウムが、急に静かになった。温度は2.17K。激しい沸騰で荒れ狂っていた液面は、まるで死んだかのように横たわっており、透明な液体ヘリウムは水平な液面を静かにたたえている。それにも関わらず、温度はさらに低下していくのである。この死に絶えたような静寂の世界こそ超流動状態なのである。

液体ヘリウムは2.17 Kで比熱に異常を伴う相転移を示す。比熱の温度依存性はギリシャ文字の $\lambda$ (ラムダ)に似た鋭い極大を示すことから、エーレンフェストはこの相転移を「 $\lambda$ 転移」と名付けた。キースムらは $T_\lambda = 2.17$  Kを境とする高温側の液体ヘリウムをHe-I(常流動状態)、低温側をHe-II(超流動状態)と呼んだ。この名称は現在でも使われている。1930年ごろからHe-IIに特徴的な現象が実験的に明らかにされ始めた。そのひとつはHe-IIの熱伝導度が純粋な銅の1000倍以上にもなるということである。また、見た目にも明らかな不思議な流体现象を示す。例えば、温度勾配が圧力勾配を誘起し、それによって流れが駆動される熱機械効果がみられる。この代表例が噴水効果である。温度勾配に圧力勾配が付随する現象は一般の流体でも見られるが、He-IIの場合は、その大きさが桁外れに大きい。また、He-IIはふつうの液体が粘性によって流れることのできない薄い膜や狭いすき間をたやすく流れることができる。粘性の消失が超流動現象のもっとも際立った特徴である。

ランダウは、粘性の消失の起源として、液体ヘリウム全体が量子力学的な基底状態に落ち込むこと(ボーズ凝縮)を示し、2流体モデルを構築した。2流体モデルでは基底状態とともにフォノンやロトンと呼ばれる素励起の概念が重要である。素励起に対するファインマンの理論は現象論として導入されたが、ファインマン特有の直感的な展開であり、示唆に富んでいる[3-6]。

## 3. 超伝導現象

オンネスが水銀の超伝導を発見したのは、彼がヘリウムの液化に成功してから3年後の1911年のことである。オンネスは当時「金属をどこまでも冷やしていったら電気抵抗はどうなるか?」という非常に基本的な問題に取り組んでいた。当時、ケルビン卿は金属を極低温に冷やすと物質中の伝導電子の動きが止まり、電気が流れなくなると予測していた。しかし、実際に調べてみると白金、金に対する電気抵抗は温度が下がるとどんどん小さくなることが分かったのである。絶対零度でも、ほんの少し抵抗が残るのは不純物が原因だとオンネスは考えた。このことを検証するた

めに選んだ金属が水銀である。なぜなら、水銀は室温で液体であり、蒸留を繰り返すことで高純度の試料を得ることができるからである。オンネスが高純度化した水銀試料の電気抵抗を測定したところ、4.2 K 付近で電気抵抗が突然ゼロになることを見つけた。しかし、ゼロ抵抗が本質的なものなのか、測定リードのショートのような測定ミスによるものなのか不明であった。あるとき、たまたま試料の温度が上昇してしまい、4.15 K を超えたところで突然抵抗が現れた。すなわち測定リードのショートではなかった。超伝導の発見は「常伝導の発見」という思いがけない形で確認されたのである。

「超伝導状態にある電気抵抗はどのくらいゼロなのか？」という問いに対して、リング形状の超伝導体に「電源なし」で電流を流し、この電流が時間とともにどの程度減衰するか？という実験がマサチューセッツ工科大学の Collins らにより行われた。測定はなんと 2 年間にも渡って行われ、しかも測定精度内で電流の減衰はないことが確認された。超伝導リングを流れる電流の持続性については、磁束の量子化の観点から、C. Kittle の固体物理学入門のなかで議論されている [7]。熱的なゆらぎで超伝導リングの一部が常伝導状態になる確率を計算すると、ひとつの磁束量子がリングから漏れるのに要する時間の目安が  $10^{40000000}$  s となる。宇宙の年齢は 137 億年であるから、これを秒単位に換算しても  $4.3 \times 10^{17}$  s にしかない。従って、宇宙の寿命のうちには磁束量子はひとつも漏失せず、電流は保持される。

オンネスによる水銀の超伝導の発見後、鉛が 7.2 K で、スズが 3.7 K で超伝導になることが発見された。このように超伝導が多くの物質で見られる普遍的な現象であることが分かると、ほかの物理的性質を求めて、それらのメカニズムを理論的に解明したくなるのは当然であろう。また、物質ごとに超伝導になる温度（これを転移温度といい  $T_c$  で表す）が異なることがわかると、なるべく高い  $T_c$  をもつ物質を探したくなるのも研究者の当然の心理であろう。

「超伝導が現れる」ということが一種の相転移であり、電流が流れている状態が熱力学的に安定であることを示したのはオクセンフェルトとマイスナーである。彼らは超伝導状態にあるスズの周囲の磁場を精密に測定した。常伝導状態では、一定の磁場をかけると磁束は試料のなかに自由に入っていき、温度を下げて超伝導状態にすると磁束がすべて超伝導体の外に排除される様子が観測された。これはマイスナー効果と呼ばれている。ただし、強い磁場をかけると超伝導状態は壊れてしまう。

上記のマイスナー効果では、穴の開いていない（幾何学でいう単連結な）超伝導体を考えたが、リング状の超伝導体に外部から磁場をかけると、最初は単連結の場合と同様

に磁束は外部に排除されているが、磁場が大きくなると磁束の侵入が起こり、リングの磁化が変化する。ところがこの磁化は磁場の増加とともに階段状に変化するのである。リングを貫く磁束を調べてみると、

$$\phi_0 \equiv \frac{h}{2e} \approx 2.07 \times 10^{-15} \text{ Wb} \quad (1)$$

の整数倍に量子化されていることが分かった。ここで、 $\phi_0$  は磁束量子、 $e$  は素電荷、 $h$  はプランク定数である。プランク定数は量子論的な不確定性関係と関わる定数であり、 $h \rightarrow 0$  の極限で量子力学が古典力学に一致するなど、量子効果に由来する物理現象を特徴付ける定数である。古典電磁気学では、連続的に変えられるはずの磁束が、超伝導状態を貫通するときはトビトビの値しか取れない。この磁束の量子化は 1948 年にロンドンが予言した [8]。

1957 年、バーディーン・クーパー・シュリーファアの三人によって提唱された BCS 理論は超伝導の微視的理論の決定版である。BCS 理論は、水銀で超伝導が発見されてから 46 年間もの長い時間に蓄積された実験事実のほとんどを整合的に説明した。シュリーファアが変分基底状態に辿り着くにあたって、核力に関する朝永振一郎の中間結合理論のマネをしてみたら上手くいったという事実は、日本人にとっては嬉しいエピソードである [5]。時代の進展とともに、金属間化合物、有機物、重い電子系、銅酸化物高温超伝導体、鉄ヒ素系高温超伝導体、そして最近では硫化水素  $\text{H}_2\text{S}$  というありふれた物質が超高压力で 203 K で超伝導になることが発見され [9]、水素化合物の超伝導研究が活発に行われている。新規超伝導物質の開発は、一世紀以上にわたって途切れることなく発展してきた事実にも驚かされる [6]。今後の展開も興味深い。

超伝導の応用研究のひとつとして、リニアモーターカーがあげられる [10]。2015 年には山梨リニア実験線にて実施された高速度試験において有人走行最高速度 603 km/h を記録した。JR 東海は、リニア中央新幹線を 2027 年に、東京都 - 名古屋間で営業運転を開始する方針を発表した。東京 - 大阪間を約 1 時間で結ぶことができるかも知れない。また、リニア中央新幹線は、一人を 1 km 運ぶ時の二酸化炭素排出量を他の交通機関と比較すると、航空機の半分以下、乗用車の約 9 分の 1 の削減が見込まれる。クリーンな電気エネルギーを有効活用し、浮上走行するため、騒音や振動も少なく、沿線の環境への影響を最小限に抑えることができる。超伝導リニアは環境保全とスピードを両立する、新時代の交通機関といえるだろう。

もうひとつのトピックスとして超伝導素子を利用した量子コンピュータが挙げられる。世界各国が開発を急ぐ背景には、既存の半導体技術だけではコンピュータの高速化や省エネ性能の改善に限界が見えてきたためである。カナダ

の企業、Dウェーブ・システムズ社が量子コンピュータを2011年に世界で初めて実用化した [11]。この量子コンピュータは、超伝導素子を利用したものではなく、東工大の西森らによる「量子アニーリング」を基礎にしたものである [12]。D-Wave マシンは Google、NASA、ロスアラモス国立研究所などの巨大 IT 企業や米国政府研究機関に納入され、クラウドでのユーザーも含めてその顧客は増え続けている [13]。また、米グーグルにより、現在のスパコンで約1万年かかる乱数の問題を量子コンピュータではわずか3分20秒で解くことが出来たというニュースは記憶に新しい [14]。量子コンピュータの台頭はデジタル社会が新たな段階に入ることを意味している。

#### 4. 超流動・超伝導と素粒子物理学

よく知られたビックバンのシナリオでは火の玉宇宙に始まり、その温度が急速に下がるなかで真空が相転移を起こして現在の世界を形成したとされる。このシナリオの主要な要素が素粒子の標準模型であり、超伝導・超流動と密接に関連している。超伝導の研究分野は他の物性研究分野と比較して、極めて高度に発展した研究水準にある。これは、裏を返せば既に100年以上にもわたる超伝導研究の歴史の結果でもあるが、このような歴史的な意義を持つ科学の分野は稀である。しかも、この間、現代物理学の根幹をなす Ginzburg-Landau 理論や、対称性の破れ概念、質量発現機構 (Anderson-Higgs 機構) などあまりにも大きな物理学上の基本原理が生まれ、その影響は多くの他の分野に絶大である。超流動・超伝導現象に関わる理論が素粒子物理学や宇宙論へも広がる普遍性を持つことも、この研究分野の魅力のひとつと言えるだろう [5]。

#### 5. 社会における基礎研究の役割

私 (安塚) は「物質と宇宙の物理」を担当して7年になる。その講義のなかで受講者に尋ねる質問がある。工学部と理学部の違いである。いくつか回答例をあげると、「理学部は基礎的、工学部は実用的な研究をする」、「工学部は役に立つこと、理学部は役に立たないことを研究する」、「理学部より工学部のほうが就職が良い」などである。学生が両者に抱いているイメージは何となく分かる。

工学の研究は、目的意識や大義名分 (いわゆる「出口」) がはっきりしているのが特徴であり、工学における魅力的な目標は「発明」であろう。高性能で低コストのデバイスやセンサー、特殊な機能を持つ材料など、具体的な目的があり、工学の研究は、それを実現するためにアイデアを練ることから始まることが多い。工学の研究では、とりわけ発想が重要であるように思う。独創的な発想があって、はじめて発明と言えるからである。

一方、理学の研究は「新発見」が魅力的な目標であるように思う。未知の現象、原理を発見するために、理学の研究者は、超高圧・極低温・強磁場など自然界に存在しない極限条件を人工的に作りだし、極限環境下での実験に挑戦する。ヘリウムガスの液化に成功したオネネスのように、優れた理学の研究者は他の研究者がなしえない実験を行える、優れた技術者 (もっと言えば職人) としての側面があり、また、それ故に新しい現象にも遭遇することができるのであろう。そして、実験結果をよく見る観察力と、現象を支配する原理を見抜く力、そして洞察力が要求されるのであろう。

物理学の場合、基礎研究から生まれた新しい技術シーズが一般社会に還元されるタイムスケールは、典型的には十年~数十年というところである。例として、トランジスタが発明されてからパソコンや携帯電話が世の中に溢れるほどに普及するまでに約50年、初めてのレーザー発振が実現してから CD プレーヤーやレーザーポインターなど日常的な場面にレーザーが使われている今日でも約50年である。相対性理論が100年を経て、カーナビ等に使われる GPS の基礎となっていることにも注目し得る。冒頭でも述べたように、科学技術や研究のフロンティアは非常に早いスピードで進んでいる。従って、即効性のある研究や開発に力を入れたとしても、その賞味期限は非常に短い。仮に今すぐに役立つ研究に資金的投資を行ったとしても、10年後には全く役に立たない技術になっている可能性が高い。実際、10年前の携帯電話やパソコンを使用している人は、身の回りに何人いるだろうか? このように「役に立つものが有益」という発想は、テンポが速く予測の難しいこれからの時代では通用しない。学生への日々の教育でも感じていることであるが、基礎力こそ真の応用力なのである。演繹的思考の土台となる基礎研究ほど実用的なものはないということ強調して本稿を閉じたい。

#### 文 献

- [1] 尾崎徹、鈴木貴、大政義典、北野保行、細川伸也、接続型教育を目指して 第4報 基礎物理科目から専門科目への接続の調査と改善、広島工業大学紀要教育編、第9巻、27-36、2010。
- [2] 大槻義彦 セメスター物理 現代物理学 (学術図書出版社)。
- [3] 佐々木祥介 超流動・超伝導ってなんだろう (ダイヤモンド社)。
- [4] 勝本信吾、河野公俊 超伝導と超流動 (岩波書店)。
- [5] 日本物理学会誌 Vol. 66, No. 10 (2011) 734。
- [6] 日本物理学会誌 Vol. 63, No.1 (2008) 1。
- [7] C. Kittel 固体物理学入門 第6版 (宇良野良清、津

- 屋昇、森田章、山下次郎 共訳 丸善株式会社).
- [ 8 ] F. London, Phys. Rev. **74**, 562 (1948).
- [ 9 ] A. P. Drozdov, M. I. Eremets, I. A. Troyan, V. Ksenofontov, S. I. Shylin, Nature **525**, 73 (2015).
- [10] <http://www.linear-chuo-shinkansen-cpf.gr.jp/index.html>
- [11] <http://www.dwavesys.com/>
- [12] T. Kadowaki and H. Nishimori, Phys. Rev. B **58**, 5355 (1998).
- [13] 西森秀稔、大関真之、基本法則から読み解く物理学最前線【18】巻「量子アニーリングの基礎」.
- [14] 例えば、日本経済新聞 2019年10月25日（朝刊）.