

日本の物理学—明日への展望

平成6年3月25日

日 本 学 術 会 議
物理学研究連絡委員会

日本の物理学—明日への展望

1 要旨

1.1 経緯

物理学は自然科学のすべての分野に基本原理、基本法則を提供する基盤科学である。同時にまた、次の時代の技術革新を育む土壌でもある。

学術としての物理学のこのような位置づけは、おそらく今後とも不変であろう。しかし、物理学も人間の営む文化的活動のひとつである以上、社会に及ぼす作用及び社会から受ける反作用は、物理学自体の発展と時代の趨勢によって左右される。

20世紀の物理学は、とりわけ大きなインパクトを人類社会に与えた。ここでは、代表的な3例を挙げておく。

1. いわゆる原子力の発見・解放は、相対論と原子核物理の所産であるが、恐竜絶滅に似た“核の冬”の脅威に人類を曝す一方、輝く星のエネルギー源とライフサイクルを明らかにし、そのミニチュア・モデルを地上で実現する核融合炉の可能性も教えてくれた。
2. 半導体物理は、結晶上に刻まれた1ミクロンというような微細回路、その高度集積化への道を拓き、今日の情報化社会の物質的基盤を用意した。
3. X線解析によるDNA二重らせん構造の発見は生物学に革命的な変化をもたらし、医学、農学から考古学、犯罪捜査や我々の生命観にまで影響を及ぼしている。

こうした情勢を背景に、物理コミュニティの社会的地位は上昇し、“物理帝国主義”という非難が一部でささやかれるほど発言力も強まった。しかし、冷戦が終結し、国内外の政治・経済機構が急速に流動化しつつある現在、また、エネルギー・人口・地球環境等の諸問題がますます深刻になるであろう21世紀を間近にして、物理学と社会の関係も変貌を余儀なくされるに違いない。

最近(1993年)起こったSSC(超伝導超大型粒子加速器)計画の中止は、こうした時代の“変化”を象徴する事件と見ることができる。この計画の目的は、物質構造の最も基本的な粒子として理論的に仮定されているヒッグス粒子の存在を実証することである。その意味で基礎研究であるが、他方では建設費約1兆円のメガサイエンスでもある。19

87年に米国の威信をかけてスタートしたが、赤字削減、産業競争力回復を重視する“変化”の波には抗い難く、建設半ばにして中止となった。

もっと身近な例としては、最近の高校生の“物理離れ”現象がある。物理を選択する生徒数が20%を割ろうとしているのである。授業時間数、指導要領等、教育技術上の問題としてとらえられがちであるが、研究者サイドでも今日の若者にとっての physics minimum がなんであるかを真剣に検討するとともに、もっと積極的に物理学の知的ロマンを彼らにアピールする必要がある。

さて、物理学をめぐる社会的環境にたいする概略以上のような状況判断に基づいて、第15期物理学研究連絡委員会（以下物研連と略称）は、なるべく広い層の国民に物理学の重要性、各分野の研究計画の意義を訴え、理解と支持を求めるよう努力すべきであるとの結論に達した。その場合の貴重な資料として、第14期物研連の周到な現状分析「物理学研究の動向と将来への課題」があるが、これとは相補的な資料として、現代物理学のわかり易い“鳥瞰”を第15期物研連の作業として試みることになった。

実際の作業は、物研連を構成している4専門委員会（原子核、物性物理、物理学一般、IUPAP）のそれぞれから複数の執筆委員を選出して作った作業部会（座長 江沢洋）に委ねられた。作業部会は、各研究分野の概観のみならず、国際協力、研究体制と行政、エネルギー・環境問題、物理教育等、多岐にわたるテーマを取り上げることとし、各テーマについて執筆委員が分担執筆した報告を編集して、一冊の報告集にまとめた。これが本報告書「日本の物理学—明日への展望」である。

当初の“わかり易い”という条件は必ずしも満たしていないが、このように現代物理学全体を広い視野で展望した報告集はあまり例がない。物研連の内部資料に留めておくのは惜しいのであるが、150ページを超え、しかも各項目毎に執筆者名を記して責任の所在を明示した報告書を、そのまま研連の対外報告とすることはできない。そこで、「日本の物理学—明日への展望」を別の角度で切った横断的な要旨をまとめ、作業部会編集の報告集と合わせて公表することとなった。

以上が本物研連報告作製の目的と経緯である。もとより“日本の物理学”を一篇の報告書で語り尽くすことは不可能である。とくに、比較的短期間にまとめられた本報告書には不備・不満足な点が多々あるに違いない。各方面からの批判・提言をとり入れ、今後の物

理学の進歩、研究計画の進展も加え、より良き報告を作製する必要があるだろう。もし本報告が物研連の定期刊行シリーズ「日本の物理学—明日への展望」第1巻ということにでもなれば、それこそ望外の幸せである。

1.2 文化としての物理学

物質は何からできているか？ 宇宙は何時、どのように始まったか？ 生命の本質は？ これらを支配する法則は？ 有史以来、人類が知的好奇心から問い続けてきたに違いないこれらの疑問に対し、現代物理学は、自然科学として採り得る最も基本的、統一的立場から、回答をあたえる。その意味で、芸術や宗教と同様に、物理学も人間の営む文化的活動のひとつである。

もっとも、現代物理学の提供する物質観、自然像が、我々の日常的な直観や伝統的思考様式に整合するとは限らない。20世紀に入って物理学に起こった2大革命—相対論と量子論—の場合がその顕著な例である。時間、空間、因果律のような基本概念が修正を迫られた。

1.2.1 時間・空間・宇宙

ニュートンの力学は、絶対時間が存在し、あらゆる時計をこれに合わせることができると仮定していたが、アインシュタインの相対論はこれを否定した。運動している時計は遅れ、運動している棒は運動方向に縮むのである（特殊相対論）。また、質量はエネルギーと等価であり、たとえばウランの原子核が2つに割れる際いくらか軽くなり、質量の減少分に相当するエネルギーが原子力エネルギーとして放出される。

さらに、3次元の空間に時間を加えた4次元時空の幾何学（リーマン幾何学）が、時空に存在する物質の分布で決まるとして、アインシュタインは重力現象を時空の幾何学に帰着させることに成功した（一般相対論）。宇宙の膨張、ブラックホールの存在等、壮大な宇宙ドラマがそこから展開されるのである。

1.2.2 因果律・不確定性

ニュートン力学では、ある時刻における力学系の状態（粒子の場合ならその位置と運動量）が決まると、あらゆる時刻における状態が運動方程式によって一意に決まってしまう。

遠い月や惑星をロケットで狙い撃ちできるのも、そのおかげである。ところが、この古典的因果律が量子論では成立しない。電子のようなミクロな粒子の場合、その状態が決まっても位置や運動量はさまざまな値をとり得るのであって、我々は確率論的な予測しかできない。とくに、位置や運動量が同時に確定した値を持つ確率は0である（不確定性原理）。粒子である電子が一面では電子波という波動性を示し、電磁波である光が一面では光子という粒子性を示す。自然の示すこの粒子・波動の2重性を量子論は論理的矛盾無く記述することに成功したが、その代償として古典的因果律を放棄したのである。

1.2.3 必然と偶然

ミクロな世界はともかく、賽のようなマクロな物体の運動はニュートン力学に従い、古典的因果律が成立するはずであるのに、賽を投げて賭けができるのは何故か？ 初期状態（賽の投げ方）を完全には制御できないからだが、これだけでは十分な答といえない。初期状態設定に制御不可能なほどのわずかな誤差があっても、時間の経過とともに大きな誤差に成長してしまうため、軌道について決定論的予測が不可能なのである（この条件を満足しない賽はイカサマということになる。）。現代物理学でカオスとよばれているのは、初期状態に異常に敏感なこの種の運動である。大気の熱対流を記述する簡単な非線型微分方程式の解として最初に発見され（1963年）、天気の長期予報が不可能な理由とされた。歴史的には、統計力学の創始者のひとりであるボルツマンが、気体分子の運動に確率論を適用して可逆的な力学法則から熱現象の非可逆性を導こうとした際、気体分子の運動がカオス的であることを既に予見している（1877年）。

1.3 物理学と技術

物理学は新しい原理、材料を提供することによって技術革新を誘発し、逆に技術革新の成果のおかげで物理学自体が新たな発展を遂げてきた。物理学（あるいは科学）の駆動力は知的好奇心であり、技術の駆動力は社会的ニーズだと一応の区別はできるが、この種の形式論理で研究開発現場の線引きはできない。

1.3.1 史的経緯

物理学と技術の強い相互作用は、産業革命期の英国、大革命直後のフランスから始まっ

た。例えば、後者の革命政権が設置した技術公務員養成学校エコール・ポリテクニークは、教授陣にラグランジュ、アンペール、フーリエなど第一級科学者を揃え、卒業生には熱力学第2法則を確立したカルノーも含まれている。19世紀後半には、技術開発における基礎研究を重視したドイツが、ヘルムホルツを所長とする国立物理工学研究所を設立している。白熱電灯改良や溶鉱炉測温の基礎データとして、理論・実験両面にわたるウィーンの下導下に同研究所が実施した熱放射スペクトルの精密測定は、のちにプランクの量子論を生んだ。

物理学と技術の結合は、20世紀に入ると重心を次第に米国に移し、第2次世界大戦中の原爆開発（マンハッタン計画）でひとつの頂点に達した。最初のウラン連鎖核反応を成功させたフェルミ、爆弾そのものを設計したベテをはじめ、名だたる物理学者たちが技術開発の最前線を担った。この功績が、戦後、加速器中心のビッグサイエンス誕生を助けることになる。

原爆と並ぶ戦時研究の焦点であった電波兵器関係からは、半導体開発の他、ESR（電子スピン共鳴）、NMR（核磁気共鳴）、レーザー、レーザーが発展し、その後に登場したSQUID（超伝導量子干渉計）、STM（走査トンネル顕微鏡）等とあわせて、物理学はもちろんのこと、化学、生物学、医学等の諸分野に新鮮で強力な測定方法を提供した。さまざまな技術革新をもたらす一方で、ラムシフト（量子電磁気学の予言する微細な効果）の最初の観測（1947年）から今日の重力波観測計画に至る超精密測定物理とも呼ぶべき潮流をうみだした。

戦後のもうひとつの特色として、IBMその他多くの企業の基礎部門重視、そこでの物理学者の活躍がある。なかでも、半導体表面のトランジスター作用は、ベル電話研究所の3人の物理学者によって発見され（1948年）、典型的スモールサイエンスの成果であったにもかかわらず、エレクトロニクス時代の開幕、人類社会の情報化という巨大な結果をもたらした。3人のうちの1人、理論物理学者のバーディーンは、後にイリノイ大学の物理学科と電気工学科の教授を兼ね、超伝導の量子論（BCS理論）を構築するかたわら、ゼロックス複写機の改良に貢献した。同じベル電話研究所の宇宙物理学者ペンジャスとウィルソンによる3K宇宙背景放射（宇宙に充満する絶対温度3度の光子気体の熱放射—宇宙膨張の実験的証拠）の発見（1965年）、とあわせて、良き時代の米国企業の懐の広さと研究者の柔軟性を示すエピソードである。

1.3.2 物理と応用物理

明治維新（1868年）以降の急速かつ能率的な近代化過程で、我が国の理学と工学はそれぞれの範を先進国の既製品に求め、共通の“文化的”基盤を欠いたまま発展した。例えば、日常的な用語であるfrequencyが振動数、周波数と二様に邦訳されて今日でも流通している。ほとんど唯一の例外というべきは、1917年、渋沢栄一を代表とし、『学問の力によって産業の発達を図る』ために純正科学たる物理学、化学及びその応用の研究をする目的で設立された財団法人理化学研究所であろう。我が国の現代物理学は、仁科芳雄博士の指導する理研の研究室からスタートしたといわれる。

第2次世界大戦中は、我が国でも科学技術動員が行われ、小谷正雄博士、朝永振一郎博士のマグネトロン、マイクロ波立体回路に関する力作も生まれたが、米・英の組織的動員とは比較にならない。

戦後、1946年に日本物理学会と応用物理学会が発足したが、前者は日本数学物理学会から分離独立したものである。湯川秀樹博士の中間子論（1934年）、朝永博士の超多時間理論（1943年）の先導によって素粒子論という新分野が戦後の物理学に生まれ、また1953年には戦後初の理論物理国際会議が東京と京都で開催されるなど、我が国の“純粹”物理は比較的順調に復興の途についた。

一方、戦後の“応用”物理の特色は、固体エレクトロニクスその他、やがて我が国の驚異的な経済成長の一端を担うようになる新興産業に対し、情報、技術、人材を提供し、これらの産業とともに成長した点にあらう。例えば、米国における接合型トランジスターの生産開始（主として軍用）が1952年だが、その2年後にはソニーが早くも携帯用ラジオに応用している。

現在は、貧困化した国立大学に代わって、企業の基礎研究所がセンター・オブ・エクセレンスを誇る時代である。我が国の研究開発費（GNPの約3%）の約80%を民間企業が負担していることの反映に過ぎない、といえはそれまでだが、ゲージ場の実在性の証明というようなアカデミックな実験が、電子線ホログラフィーを利用して企業の研究所で実施されていることを忘れてはなるまい。“純粹”と“応用”の区別、大学と企業研究所の役割分担を、改めて検討する時期が来ているのである。

1.3.3 今後の課題

“基礎研究タダ乗り”と我が国を非難してきた欧米の大企業は産業競争力回復、短期収

益重視に転じ、基礎部門の研究者たちは冬の季節を迎えている。（ただし、有望そうな研究開発に先行投資し、数年間はその成果を待つventure capitalが米国には相変わらず存在し、たとえば高温超伝導体の小規模実用化が活発である。）

一方、日本も深刻な経済不況に陥った。既知の原理、材料の組合せを改良してマーケット・シェアの増加を図る従来の路線は既に限界に達していると言われ、高附加価値の新製品の出現が望まれている。そのベースになるのは、借り物でも飾り物でもない基礎研究である。実は、これは日本に限らずすべての技術先進国の直面している課題なのだが、巨額の貿易黒字をかかえる日本の貢献がとくに期待されているのである。

もうひとつ、21世紀の技術革新を語る場合、「地球と人間に優しい」という条件を忘れるわけにはいかない。地球環境問題の調査・研究に最新の物理的方法が有用なことはいうまでもなく、例えば、長寿命放射性廃棄物を強力な陽子ビームで照射して短寿命のものに変換してしまう加速器物理の応用さえ検討されている。

しかし、人類の生産活動が活発化する程“ゴミ”（無価値物）処理問題が深刻化する現状を見ると、実はもっと基本的な課題が物理学にも残されている可能性が考えられる。

19世紀の熱力学は、マクロな物体中のミクロな運動のランダムネスを測る量としてエントロピーを発見し、燃料のエネルギーからエントロピーと絶対温度との積を引去った残りが、動力源として有効であることを示した。エントロピーに似た量が環境問題にもあるかもしれないが、これを物理学の論理でとらえ得るか否か、将来の課題である。

1.4 物質探究（1）

古代ギリシャの自然哲学は、空虚な真空を無数に飛びかう不生・不滅の粒子の離合集散として自然現象を理解しようと試みた。現代物理学の物質探究は、ある意味でこの自然観の復活である。ただし、現代の“素粒子”は相対論的な波動場に量子論を適用して得られる“量子”であって、生成・消滅が可能である。

1.4.1 2つの方向

19世紀初頭に化学反応の定量的研究を通じて発見された原子は、20世紀に入ると、プラス電荷をもつ重い原子核のまわりをマイナス電荷をもつ軽い電子が運動している複合粒子であり、大きさは約0.1ナノメートル(10^{-10}m)であることが明らかになった。現

代物理学の物質探究は、原子物理を出発点として、逆向きの2つの方向に発展してきた。

第1は、ミクロな原子からマクロな物質を再構築する方向である。原子が結合して分子を形成し（化学物理）、分子が集合してマクロな固体、液体あるいは気体を形成する。その形成機構、集合体の物理特性（物性）、集合状態の不連続的变化（水の固化、気化のような相転移）等の解明である。対象物質により、物性物理、プラズマ物理、生物物理等の諸分野に分化している。

第2の方向は、原子よりさらに小さなサブミクロの物質構造の追究である。原子核自体が実は複合粒子であり、構成粒子（核子）はプラス電荷をもつ陽子と質量はほぼ同じで電荷0の中性子とであることが発見されたときに（1932年）、本格的な原子核物理という形で始まった。現在では、物質を構成する基本的粒子と粒子間に働く相互作用（基本的な力）を統一的立場からとらえようとする素粒子物理にまで発展している。

1.4.2 4種の力

基本的な力として従来知られていたのは重力と電磁力であり、原子物理の主役も後者であった（重力は弱くて問題にならない）。量子電磁気学（QED）によると、2個の荷電粒子の一方が発射した光子を他方が吸収することによって電磁力が働く。光子の質量が0であるために、電磁力は遠距離型である。

原子核物理は、重力と電磁力のほかに、近距離型の“強い”相互作用及び“弱い”相互作用が存在し、基本的な力は合計4種類あることを明らかにした。実際、原子核の大きさは原子全体の約10万分の1しかない。核子がこの程度の近距離（1フェムトメートル）まで接近したとき、電磁力をはるかに上回る強い相互作用が働いて、原子核が形成されるからである。原子力エネルギーの源泉も、この強い相互作用にはかならない。電子と陽子の中間の質量をもつ未知の粒子（今日パイ中間子として知られているもの）を発射・吸収することによって核子間に短距離型の強い力が働くと考えたのが湯川理論（1934年）であって、素粒子物理のパイオニアの役割を果たした。

ところで、真空中に取り出された中性子は実は不安定であり、寿命約15分で陽子に変身してしまい、その際に電子とニュートリノ（正確に言えば、反ニュートリノ、電荷0で質量も0かごく0に近い粒子）が同時に発射される（中性子のベータ崩壊）。この種の素粒子崩壊の原因になるのが“弱い相互作用”である。電磁相互作用よりはるかに弱く、強い相互作用よりもっと近距離力である。原子核のベータ崩壊を場の量子論で扱ったフェル

ミ理論（1934年）は、湯川理論はじめその後の素粒子理論の原型となった。

1.4.3 高エネルギー物理

サブミクロの物質構造の探査用波動は探査対象の大きさより短波長である必要があり、対象が小さいほど短波長になる。量子論によって粒子像に翻訳すると、対象が小さいほど必要な探査用粒子の運動量は大きく、エネルギーは高くなる。実験の側から見ると、素粒子実験は高エネルギー物理にほかならない。

初期には放射性物質や宇宙空間から飛来する宇宙線が高エネルギー粒子の供給源で、湯川理論の予言したパイ中間子やその崩壊で生まれるミュー粒子も最初は宇宙線中に発見された。やがて、電子・陽子等の荷電粒子を電磁場で加速して標的核に衝突させる加速器が原子核実験の主役になり、さらには新種の粒子を人工的に生成する強力な道具にまで発展した。我が国でも、第2次世界大戦前から菊池正士博士が大阪大学に建設したサイクロトロン等があったが、敗戦時に米軍により破壊された。戦後、1961年に東京大学原子核研究所、1971年に文部省高エネルギー物理学研究所が、それぞれの分野の共同利用研究機関として設置されている。

1960～70年代に、主として米国の大型加速器で発見された新粒子は150種を超え、すべてが、“素”粒子とは考えにくい状態になった。レプトンと呼ばれる種族の電子、ミュー粒子、タウ粒子及びそれぞれと対をなす電子ニュートリノ、ミュー・ニュートリノ、タウ・ニュートリノは、電磁相互作用と弱い相互作用しか行わず、素粒子と考えられる。残りの粒子はすべて強い相互作用も行い、ハドロンと総称されている。一般に粒子はフェルミオンとボソンに大別され、前者では同一の運動状態に2個以上の同種粒子が存在できないのに対し、後者では何個でも存在できる。レプトンはすべてフェルミオンである。ハドロンにはフェルミオン（陽子、中性子等）とボソン（パイ中間子等）があり、それぞれバリオン及び中間子（メソン）と総称されている。

坂田昌一博士は、ハドロンのうち基本粒子は3種で、残りはずべて複合粒子という説を提唱したが（1956年）、現在ではクォークという基本的なフェルミオンが存在し、バリオンは3個のクォークの結合した複合粒子、中間子は2個のクォークの結合した複合粒子と考えられている。ただし、クォーク間には近距離で弱く、遠距離で強くなるという不思議な力が働くため（量子色力学-QCD）、クォークはハドロン内に“閉じ込め”られていて、単独で観測されることはない、というのである。

1.4.4 統一理論と宇宙物理

4種の基本的な力のうち、最も早く量子論が整備されたのは電磁相互作用である（朝永・シュウィンガー・ファインマンの量子電磁力学）。この理論形式（ゲージ理論）を弱い相互作用も含むように拡張できる（ワインバーグ・サラムの電弱統一理論）が、単純な拡張では弱い相互作用を伝えるボソンの質量が光子の質量と同様に0になってしまう。そこで物性物理の超伝導現象とのアナロジーが利用された。金属中の電子流体が低温で超伝導状態へ相転移を起こす結果、金属中の光子は0でない質量を持つようにふるまう（マイスナー効果）。同様に、膨張によって冷えた宇宙が、“ヒッグス粒子”流体の“超伝導状態”（ゲージ対称性の破れた状態）へ相転移を起こし、その結果弱い相互作用を伝えるボソンが0でない質量を持ち、力が短距離型になっていると考えられるのである。電弱統一理論の予想した重いボソンは、欧州原子核研究連合（CERN）の陽子・反陽子衝突加速器によって1983年に発見された。より積極的にヒッグス粒子そのものの存在を実証しようとするのが、CERNのLHC（大型ハドロン衝突加速器）、米国のSSC、我が国のJLC（日本線形衝突加速器）等の計画である。その結果如何によっては、クォークとレプトンを基本粒子と考え、そのダイナミックスを電弱統一理論とQCDの組合せ（標準理論）で扱う現在の素粒子物理に重大な変革あるいは新たな展開が起こるかもしれない。

なお、強い相互作用もゲージ理論の枠内に収めようとする大統一理論、さらに重力の量子論の試みもある。大統一理論によると、ビッグバン直後の超高温宇宙では同じ強さであった電・弱・強の相互作用が、その後の宇宙の冷却に伴う相転移の結果、現在のような3種の相互作用に分化したことになる。宇宙の相転移という発想によって素粒子物理と宇宙論が結びつけられたことは、物理学史上特筆すべき事件といえよう。

歴史的には、原子物理を原点にマイクロからマクロへの物質探究が始まったわけであるが、素粒子物理の進歩した現在、原点は原子核物理にシフトして考えるべきであろう。原子核をクォークとグルーオン（クォーク間の強い相互作用を伝えるボソン）の構成する多粒子系とみなし、量子色力学を適用する“核物性物理”が、新分野として今後発展するに違いない。

1.5 物質探究（II）

1.5.1 物性物理の魅力

ミクロの原子からマクロな物質の再構築を試みる物性物理の魅力は、100種ほどの素材原子の組合せで際限なく多様な新物質が得られるだけでなく、新物質がしばしば予想もしなかった物性や現象を示すところにある。好例は銅酸化物超伝導体の発見（1986年）で、それまで不可能と思われていた“高温”超伝導が突然に、しかも電導性セラミックスという意外な物質で実現することになった。

新物質は身近に発見されることもある。煤に含まれる炭素原子のクラスター（フラレン）には60個の原子がサッカーボールの形を組んでいるものがあり、このボールを周期配列させた結晶にアルカリ原子を添加すると電導性が現れ、どの金属より高温で超伝導を示す（1991年）。

一方、理論サイドからみると、電磁相互作用している多粒子系への量子力学及び統計力学の適用であって、物性物理に原理上の曖昧さはない。いわゆる計算機物理が威力を発揮する分野である。ただし、第一原理からすべての物性を予測できる現状ではない。現象の本質を突く適切なコンセプト、簡潔なモデルの発見が依然として重要であり、それによって計算機物理も生かされる。再び超伝導を例にとると、BCS理論（1957年）がクーパー・ペアという基本的コンセプトを発見し、また、簡単なモデルで金属超伝導の説明に成功しているのに、酸化物高温超伝導体におけるペアの形成機構については、目下のところ定説がない。

1.5.2 固体から液晶まで

第2次世界大戦後、産業技術との関連もあって、固体物理が活況を呈した（共同利用研究所である東京大学物性研究所の英語名は Institute for Solid State Physics）。原子が周期配列した結晶のほか、太陽電池のシリコンのように原子配列の不規則なアモルファス固体、結晶とアモルファスの中間の準結晶（1984年発見）も対象になる。最近では、液体、場合によっては気体も加えて、凝縮系物理という用語も普及している。さらに、凝縮系物理の手法（相転移のスケーリング則等）を高分子物質、液晶等のソフト・マテリアルへ適用する前線拡大も活発である。

もともと“物性論”あるいは物性物理という用語は我が国独特のものであり、半世紀の歴史がある。固体から液晶までをカバー出来る柔軟なコンセプトを導入した先覚者たちに敬意を表したい。

1.5.3 人工物質

先端技術から物理学へのフィードバックとしては、物理学全体にわたる測定機器のハイテク化（したがって高価格化）があるが、ここでは人工物質の供与と、これによる新しい物理の開拓に触れておく。“ハイテク王国日本”の研究者が、この新しい波に乗り遅れたり、あるいはトップの座を他に奪われたというのはやや意外である。研究者の意識もさることながら、理・工分離の研究開発体制、縦割り行政によるその管理等、構造的欠陥が要因と考えられる。

先端技術からのフィードバックの一例は、レーザーの応用による原子物理のリバイバルである。現在では、レーザー・ビームの干渉で生ずる光の定在波に原子をトラップさせて人工格子を作り、マイクロケルビン以下の超低温に冷却することも可能になっている。

別の例として、半導体のLSI技術の進歩によって電子濃度を制御できる2次元電子系が入手可能になったとき、整数量子ホール効果が発見された（1980年）。面に垂直な強磁場中で電気伝導率が半導体の種類に無関係な基本定数（電子電荷の2乗とプランク定数の比）の整数倍になる現象で、抵抗標準や量子電磁気学のチェックに利用された。整数量子ホール効果は、不純物原子による散乱がひどくて電子波が局在（アンダーソン局在）する場合に観測されるのに対し、より新しい半導体成膜法（MBE, MOCVD）で作られた高純度2次元電子系では、分数量子ホール効果が観測された（1982年）。電子間の電気的反発力と強磁場の相乗効果によって、元来フェルミオンである電子が、フェルミオンとボソンの中間的ふるまいを示すのである。

現在、半導体の微細加工技術は、0.5 ミクロン程度のトランジスターが製作可能なところまで進歩しており、マクロとミクロの中間の大きさをもつ新しいタイプの物質群、メゾスコピック系を物理学に提供している。さらに、STM（走査トンネル顕微鏡）により、固体表面の原子配列を原子サイズの精度で観察・制御できる。

なお、これは人工物質ではないが、化学者と物理学者の協力で電導性有機物の開発が進み、我が国の寄与も著しい。分子修飾や加圧による構造、物性の制御が比較的容易なために、1次元系の金属・絶縁体転移、電荷・スピン分離、2次元系の電荷密度波、スピン密度波、超伝導等多彩な秩序状態が実現されている。

1.5.4 プラズマ物理

気体を高温に熱したり強力なレーザー光で照射すると、気体分子が電子と陽イオンとに解離してプラズマ（電離気体）になる。マクロの物質には違いないが、その物理的な魅力も主役を演ずる場面も通常の物質とは異なる。宇宙の物質の99.9%以上がプラズマ状態にあるといわれ、核融合反応で燃えている太陽その他の星の内部もすべてプラズマである。したがって、プラズマの檜舞台は宇宙物理なのであるが、ここでは立ち入らない。

地上のプラズマは、放電管、雷、上空の電離層等で問題になる特殊な状態に過ぎなかったが、将来のエネルギー源を制御された核融合反応に求めるという野心的な開発計画の開始により、国際的規模で追求される重要研究課題に昇格した。核融合炉は、例えば二重水素・三重水素混合気体を一定の空間内に閉じ込め、1億度以上の高温プラズマ状態に1秒間程度保持する必要がある。閉じ込めには磁場による断熱圧縮か大出力レーザー（または粒子線）照射による爆縮（慣性閉じ込め）があるが、非線形電磁流体であるプラズマはさまざまな不安定性を示し、容易に乱流状態になる。最近、ようやくプラズマの制御、入出力バランスの可能な段階に達し、環状磁場閉じ込め（トカマク方式）を中心とする国際研究協力がスタートした（核融合分野における我が国の研究は、日本原子力研究所〔科学技術庁〕、核融合科学研究所〔文部省〕を中心として色々な大学・研究所で行われている）。核融合プラズマの研究は、今後工学課題の解決に力を入れると同時に、より良い核融合プラズマ実現を目指して、現象論的理解や経験則に頼った状態から、第一原理に基づいた物理的解明へと進むこととなる。

なお、核融合のように派手な話題にはならないが、プラズマを利用するプロセス技術が急速に普及し、先端材料開発に不可欠な基盤技術として定着しつつある。

もっと物理らしいプラズマの応用としては、自由電子レーザーのような高出力電磁波の発生や加速器への応用等がある。宇宙空間のプラズマや天体プラズマの諸問題（例えば宇宙線の加速機構）とあわせて、今後の研究開発が期待される。

1.5.5 生物物理

マクロな物質としての生物は、当然物理学の対象となりうる。このことを疑問の余地なく示したのは、あらゆる生物にとって不可欠な遺伝情報（したがって変異と進化の可能性）をDNA分子（ある種のウィルスではRNA分子）が担っているという事実の発見（1953年）であった。それにもかかわらず、現状では、生物物理とは何か、明快な定義が難しい。

核磁気共鳴 (NMR) が化学の必需品であり、MRI として医療機関に普及している現在、物理的機器、技術による生物の研究というような定義は無意味であろう。生体分子への量子力学の適用も同様である。分子レベルでの生物の研究というだけでは生化学と区別がつかないし、現状では生化学的方法の方がはるかに有用であろう。

このような状況は、生物という対象に対して現代物理学が未だ十分に成熟していないことを示している。DNAの構造のような問題は、その発見の歴史的経緯を見てもわかる通り、むしろ従来の結晶物理の延長線上にあったと考えられる。エネルギー・情報が絶えず流れている非線形・非平衡系、複雑でしかも自己組織力をもつソフト・マテリアルとしての生物は、21世紀の物理学にとって最も挑戦的な課題であるといえよう。

1.6 将来計画 (1)

SSCへの資金協力 (米国が日本に期待した額は、10年間に約2000億円) の是非をめぐって、ビッグサイエンス、スモールサイエンスのそれぞれの意義が論じられたが、以下の2点については、どちらの支持者も異議がなかったと思われる。①規模の大小を問わず、我が国の基礎研究を第一級の水準に引き上げ、“受信型”から“発信型”へ変身させて人類の知的公共財の蓄積に貢献する必要がある。②そのためには、国内外の動向を洞察して優先研究課題を選定し、限られた予算を有効に配分できる新機構を構築する必要がある。

目下のところ、これら2項目のどちらも未解決のままであり、解決には大幅な“規制緩和”も必要であろう。物研連としては、当面、共同利用研究所を中心とする従来の研究体制を拠点整備、研究ネットワーク化によって補強・拡充していくほかない。現在、物研連で論じられている将来計画をいくつか紹介しておく。

1.6.1 高エネルギー・フロンティア

我が国の高エネルギー・フロンティアは、高エネルギー物理学研究所 (KEK) の電子・陽電子衝突加速器トリスタン (1986年完成) である。その第2期計画として、Bファクトリーの建設が1994年度から始まる。B中間子を大量に発生させて小林・益川理論 (“CP対称性の破れ” と呼ばれる現象の標準理論による説明) の検証が目的とされる。これはヒッグス粒子探索に並ぶ素粒子物理の重要課題といわれ、米国のスタンフォード線形加速器センター (SLAC) も取り上げると伝えられ、日米の競争になりそうであ

る。

B-ファクトリィの次には、野心的な線形衝突加速器JLCの開発が予定されている。一方、欧州原子核研究連合(CERN)のLHCがヒッグス粒子探索に向けて始動するはずで、これとの協力も問題になると思われる。いずれにしても、国際的な高エネルギー・フロンティアにおいて、我が国が投入予算額と研究者数に相応しい指導的役割を果たすべき時が来ている。

1.6.2 原子核物理のフロンティア

最近、大阪大学核物理センターに中高エネルギー・サイクロトロンが、また、理化学研究所に重イオン・サイクロトロンが稼働し、成果をあげつつある。

さらに、原子核研究所の将来計画として大型ハドロン(JHP)計画が提案されている。強力な陽子ビームにより、中性子、パイ中間子、ミュー粒子、K中間子、不安定原子核等の2次ビームを生成し、原子核はもとより、素粒子物理から物性物理、場合によっては技術的応用も含めて、多目的研究を行う国際的センターである。1980年代半ばに物研連の議を経て提案されたが、総額500億円を超えるこの計画の早期実現の見通しは立っていない。物性物理も含む総合的計画であるだけに、物理学将来計画への影響は少なくない。

1.6.3 大型物性実験

マクロな物質中のミクロな構造や運動を知る有力な方法のひとつに、外部から物質に入射した粒子の散乱、吸収の観測がある。入射粒子源が加速器あるいは原子炉である場合には、通常は小型で済む物性実験も大型化が避けられない。中性子散乱やミュー粒子磁気共鳴の場合がそうであり、入射粒子が光子であっても、放射光(シンクロトロン放射)は円形電子加速器(貯蔵リング)から得られる。

最近の好例は、銅酸化物高温超伝導体の中性子散乱である。3種の重原子の間に介在する軽い酸素原子の位置同定は通常のX線解析では難しく、中性子散乱法で初めて可能になった。銅原子の持つミクロな磁気モーメント配向も中性子散乱で決定される。なお、超伝導状態でマイスナー効果を示しているときの磁場分析、その温度変化に関する情報は、ミュー粒子共鳴法によって得られている。

現在、我が国の物性研究者は、日本原子力研究所のJRR3原子炉(1991年改造)を定常中性子源として、また、KEKの陽子シンクロトロンをパルス中性子源として利用

しているが、マシンタイムの不足を訴える声が高い。また、ミュー粒子源はKEK内の東京大学中間子施設にあるのみである。中性子もミュー粒子も、生体や工業技術への応用も含めて需要は今後増加する一方と考えられ、JHPの段階的実現等、省庁の壁を超えた総合的対策が必要であろう。

放射光の場合は、微細加工その他産業界のニーズもあって、光源開発も積極的であるし、KEKのフォトンファクトリ等の共同利用も活発である。理化学研究所、原子力研究所の大型プロジェクト（建設費約1千億円）も間もなく始動する。ただし、物性研究にとって重要な真空紫外・軟X線波長領域の高輝度光源開発の見通しが立っていない。この領域は、物性研究所が原子核研究所内に我が国最初の放射光施設を作って以来担当してきたものである。台湾、韓国等でも開発が進められており、物性研究所の将来計画推進が期待される。

1.6.4 宇宙物理・天体物理への期待

大型加速器による素粒子物理の推進は、経済的・技術的理由からやがては限界に達するであろう。大統一理論の特性エネルギーが、地上で実現不可能な“天文学的”値であるという理由からも、今後、宇宙物理とも関連して、可視光や電波の代わりにガンマ線、粒子線、重力波を利用する“望遠鏡”が活躍するであろう。X線天文学等、この分野での我が国の実績は著しいが、ここでは、共同利用研究所である東京大学宇宙線研究所が推進しているスーパー神岡計画（1991～95年）を代表例として挙げておく。

岐阜県神岡鉱山の地下1000mに5万トンの水を蓄え、ここに入射して来るニュートリノによって引き起こされる発光現象を1万1千本の光電子増倍管でとらえる世界最大のニュートリノ観測装置である（建設費約100億円）。神岡グループは、マゼラン星雲の超新星爆発で発生したニュートリノの捕捉に成功してニュートリノ天文学を拓き、また太陽深部の核融合反応で発生するニュートリノの量が理論的予想値の半分しかないことを確認してニュートリノの質量について問題提起するなど、既に輝かしい実績を挙げている。スーパー神岡計画の最も野心的な目標は、大統一理論が予言している陽子崩壊の観測である。

1.7 将来計画（II）

予算規模が比較的小さく、個人プレーに近いスモールサイエンスの将来計画にも固有の問題がある。物性物理から例を採ろう。

1.7.1 ネットワーク構想

銅酸化物高温超伝導体の発見は、スモールサイエンスの傑作といえよう。化学者が手がけていた電導性セラミックスの電気抵抗測定を液体窒素温度以下まで延長することによって、超伝導分野では無名だったベトノルツとミュラーが発見したのだが、当初専門家は信用しなかった。それが本物の超伝導であることを最初に証明したには田中昭二グループであるが、その時使用されたSQUID（超伝導量子干渉計）は、当時どの超伝導研究室にも常備の測定器というわけではなかった。さらに、この新物質中の酸素原子の位置同定に中性子散乱が動員されたことは、既述の通りである。

この例が示しているように、スモールサイエンスといえども、適当に整備された拠点に結びつけ、また大型装置へのアクセスを容易にするネットワーク、及びこれを円滑に運営するための予算措置、技術要員の拡充、規制緩和がきわめて重要である。21世紀の技術を支える新物質や新現象の母胎は物性研究であり、最近では企業の研究開発体制の充実も目覚ましく、優秀な若手人材を引きつけつつある。しかし、10年あるいはそれ以上の長期的展望をもつ物質開発は、大学を中心とする基礎研究が担当するしかなく、その劣悪な研究環境を拠点整備、ネットワーク化によって早急に改善する必要がある。

1.7.2 物質合成・評価

物質合成は物性物理の基本であるが、比較的小型の合成炉、真空蒸気装置であっても、大学の経常校費での購入は困難な現状である。また、作製された試料の物質評価が早速必要になるわけであるが、そのための常識的な装置（電気抵抗測定、熱測定、電子スピン共鳴、核磁気共鳴等）についても事情は同様である。構造解析用の装置（X線解析、電子顕微鏡、STM等）、あるいはレーザーを含む分光装置、各種表面分析装置となると、一層困難である。このような問題の解決法として、物研連物性物理専門委員会は、各地で拠点となるべき研究機関、研究グループを優先的に整備し、当該地域の共同利用センターの性格を持たせることを提案している。

物質合成であっても、高温・高圧合成や人工物質合成のように大型あるいは特殊の装置を必要とするものについては、いくつかの拠点を選定して全国的な共同利用を図る。物質

評価についても同様で、特に全国共同利用体制が確立されている物性研究所には、総合的な評価システムの設置が計画されている。

なお、物性研究所は、第2次世界大戦後の物性分野における我が国の遅れを取り戻す目的で設立された全国共同利用研究所であるが、その後強磁場、超低温、極限レーザー等の極限物性研究開発を取り上げ、現在は、“物性基礎科学に関する最先端の総合研究を行う国際的研究所”への脱皮が計画されている。

1.7.3 物理環境

物性物理の魅力のひとつは、温度、圧力、磁場等の“物理環境”の制御が比較的容易であり、これによって物質の新たな集合状態、新たな物性の出現（相転移）を観測できることである。特に低温、高圧、超高真空、強磁場、レーザー光による高励起等の極限環境及びその複数の組合せが重要である。

低温を例にとると、希釈冷凍法で1 Kから10 mK、核断熱消磁法でそれ以下の温度が実現される。前者は質量数3及び4のヘリウム同位体の混合液が低温で2相分離することを利用したもので、軽い同位体が濃厚相から希薄相へ“蒸発”するとき外部から熱を吸収する（軽い同位体はフェルミオンであるため低温でも蒸気圧は有限であり、重い同位体は超流動状態にあるため“真空”と見なせる。）。この希釈冷凍機は、例えば、メゾスコピックな人工物質の量子物性を研究する場合に不可欠である。いずれにしても、我が国の超低温開発は20年の歴史と5ヶ所のセンターを持っている。

強磁場も比較的早くから整備されてきた。定常磁場は東北大学金属材料研究所で30 T級のものが実用化され、金属材料技術研究所（科学技術庁）で40 T級を建設中である。パルス強磁場は大阪大学極限物質研究センターで80 T級（非破壊）、物性研究所で500 T級（破壊）が実現されている。物性専門委員会は40 T級、持続時間1ミリ秒以上のパルス磁場を数カ所の拠点に設置することを提案している。

なお、磁性関係の新しい施設として、同専門委員会はX線磁気散乱実験装置をKEKのフォトンファクトリあるいはSpring-8に設置する可能性について検討している。中性子線吸収係数の大きな物質の磁気構造研究にとって重要である。

1.8 新たな途を求めて

1.8.1 理論科学国際研究所

理論物理は紙と鉛筆があればよい、と昔よく言われたものである。特定の実験施設に縛られない“自由”を讃えたものと理解した上で、国内外の研究者の活発な討論の場と高性能電子計算機を確保するという2条件を追加すれば、今日でも立派に通用する。ただし、計算機は別として、自由な発想と活発な討論の場を国際的に開かれた形で実現することは、我が国の現状から見て相当な難問ではある。ソフト開発の世界ランキングで我が国が第18位に甘んじているという事実とたぶん無関係ではあるまい。

実験を中心とする共同利用研究所も活発な理論部門を持ち、国際交流も行っているが、しかし上述の意味で自由とはいえないし、それがむしろ当然であろう。京都大学基礎物理研究所は、共同利用研究所第1号として理論専用設置された。湯川初代所長以来の歴史を誇り、米国サンタバーバラ理論物理学研究所と共同プロジェクトを組むなど、国際交流も盛んであるが、大学附置の小規模研究所という官制上の制約は免れえない。

一方、海外では、固有の研究所員をほとんど持たず、国際的に招請した客員による共同研究を企画・実施する研究所が増えている。理論的テーマに限定する代わりに、その選択を学際的、機動的に行うことができる。このような研究所は、国を異にする若手研究者の良き研修場でもある。

こうした情勢にかんがみ、物研連の物理学一般専門委員会は、この種の新方式の研究所として、「理論科学国際研究所」を提案した。もちろん我が国に設置する場合、国際協力課や学術情報室を含む事務機構システム、家族同伴も可能な宿舎等、現在の国際交流で研究者たちを悩ませている問題を十分解決する。

物研連とよく似た構想が数学研究連絡委員会からも「国際数理科学研究所」として提案され、さらに天文学研究連絡委員会も両案に賛意を示した。そこで本会議第4部が提案をとりまとめることになり、現在、本会議全体としての検討が進められている。

目下未定のまま残されているのは、一応“数理科学”を共通の軸とする諸科学ということとは了解されているものの、その学際性をどこまで広げるか、したがって名称ををどうするかの問題である。例えば、米国のサンタフェ研究所は、「複雑系」をテーマに、物理学、生物学、経済学、情報理論の諸分野に跨がる学際的研究を推進しているし、ドイツのビーレフェルト大学の学際研究センターでは“場の量子論の数学”から“欧州経済における国家の役割”まで広範なテーマを取り上げている。力学や流体力学のような古典物理学からさえ、カオスやフラクタルのような新しいコンセプトが生まれてくることを知った理論物