

物理学の研究手法

—— 実験 ——

小 山 慶 太

- 一 はじめに
- 二 物理学と実験
 - (一) ガリレオの落体の実験
 - (二) マイケルソン・モーレーの実験
 - (三) α 粒子の散乱実験
 - (四) 重水素の偏極実験
 - (五) 計算機実験
- 三 社会科学と実験
- 四 おわりに

一 はじめに

一般に科学を論ずる場合、往々にしてその研究対象が何であり、それについてどこまでわかったのかという点だけ

に的が絞られてしまうことが多い。しかし、科学が科学として成り立つには、その研究方法のあり方が大きな役割を果たしているはずである。

研究方法とは、研究対象を可能な限り正確に究明するよう考案されたものであり、その積み重ねによって各科学に固有の方法が確立されていく。その意味では、方法は対象に強く規制されていることになる。

ところが、科学の発展がある段階に達すると、確立された方法を適用しやすい問題が、研究対象に選ばれるという今とは逆の傾向も見られるようになる。つまり、研究方法によって特徴づけられる方向に沿って科学が進んで行き、方法が対象を規制するという側面も現われてくる。この傾向は、社会科学よりも自然科学により多く見られる。

したがって、社会科学が人間社会を、自然科学が自然界を対象とする違いはいうまでもないが、両者が用いる方法の違い、さらにその方法の位置づけにも顕著な差異が存在することを認識しなければならない。

特に、ひとつのテーマについて多方面から接近を試み、総合的に問題を考える学際研究の重要性が注目されている現在、対象によるのではなく、方法のあり方によって個々の科学を眺めることも必要になろう。

さて、本稿でとりあげる物理学は、自然科学の中でも、実験と理論という二つの確立した方法を有する学問である。そして、実験と理論に携わる研究者の間には、すでに十九世紀の中葉から完全な分業制がしかれている。このような特徴は、物理学に隣接した一部の分野（物理化学など）を別にすれば、物理学だけに固有のものであろう。

そこで、この二つの方法のうちから、まず実験に着目し、それが物理学の自然認識において果たす役割を考察することにする。そして、研究方法の確立という面から、物理学の基本的性質を浮き彫りにしたい。

二 物理学と実験

実験とは、装置を用いて自然に接近する人間の巧みな創意工夫といえる。このとき、なまの自然を丸ごと把握するのではなく、知りたい本質だけが抽出できるような状況を設定し、副次的な要因を除外しなければならない。つまり、自然に手を加えて、一種の理想化、単純化の操作を試みるわけである。このような条件を満たして初めて、科学の方法と成り得るのである。

そこで、抽象的な一般論に陥いるのを避けるため、本章では五つの具体例（ガリレオの落体の実験、マイケルソン・モーレーの実験、 α 粒子の散乱実験、重水素の偏極実験、計算機実験）を選び、いま述べた条件がどのように具現されるのかを検討していくことにする。

（一）ガリレオの落体の実験

人間の諸々の知的営為の中に、自然科学と呼べる形態が固まったのは、十七世紀のケプラー、ガリレオを境にしてである。⁽¹⁾したがって、彼らを最初の自然科学者と呼ぶことができるであろう（もっとも当時はまだ科学者ということばは存在しなかったが）。⁽²⁾

ケプラーは、惑星の運行に関する膨大な観測データを数学によって解析し、そこから三つの基本的な自然法則を発見した。

一方、ガリレオは、広く受け入れられていたアリストテレスの落下運動に関する説を覆し、巧妙な実験によって落体の法則を導出した。同じ自然現象の認識といっても、アリストテレスは単に思弁的な解釈を行ったに過ぎない。これに対し、ガリレオは、定量的な測定によって自然をとらえようとしたのである。ここで、物体の落下運動に関するガリレオの仮説とそれを実証するために行った実験方法について述べておこう。

彼はまず、「自由落下（初速度ゼロの落下運動）する物体の速度は、落下時間に比例して増加する」という仮説をもうけた。⁽³⁾しかし、この仮説を直接実験にかけることは不可能である。速度は時々刻々変化する量であるため、測定の対象としては取り扱いにくいからである。

そこでガリレオは、この仮説を「落下距離は落下時間の二乗に比例する」という形に書き直した。⁽⁴⁾つまり、距離と時間の測定によって落下運動を調べようとしたわけである。

測定は、ダンネマン『大自然科学史』⁽⁵⁾によると次のようにして行われた。

ガリレオは、十二エルレ⁽⁶⁾の長さの板に、半インチ幅の溝をつくった。その溝は真すぐに引かれ、その上に非常に滑らかな羊皮質が張られた。ついで板の一方の端をはじめは一エルレ、つぎは二エルレの高さにもち上げた。そこでガリレオは、滑らかに磨いた真ちゅうの球をとって、溝の上を走らせ、溝の全長にたいする落下時間を測定した。

時間の測定については、次のように書かれている。

落下時間のいっそう精密な測定には、つぎの装置が役立つ。まず大きな容器に水を満たす。この容器には底に小さな孔があつて、そこから一条の水が細く流出するようになっていた。この水柱は各観察時間ごとに小さな容器のなかへつぎこまれた。この方法で集められた液体量を非常に精密な秤ではかった。

つまりガリレオは、時間を容器の底にあげた小孔からその間に流出する水の量で置き換えたわけである（もちろん両者は比例する）。おそらく、板でつくった斜面の途中に出発点からの距離をはかって印をつけ、そこを球が通過した瞬間に容器の孔をふさいで水の流出を止め、落下運動の測定を行ったのであろう。このようにして、落下距離が落下時間の二乗に比例することが証明された。⁽⁷⁾

さて、ここで自然現象に臨むガリレオの姿勢を分析してみよう。

第一に彼は、仮説をそのまま実験にかけたのではなく、測定しやすい形に焼き直している。もちろんこの場合、焼き直しの仕方が、元の仮説を損わないことが必要であるが、それは数学によって確かめられている。速度から距離という測定可能な物理量への変換が行われたわけである。

しかし、これだけではまだ不十分である。ガリレオというとピサの斜塔の落下実験がすぐ思い浮ぶが、この逸話の真偽はともかく、垂直に物体を落下させたのでは速度が大きすぎ、当時の簡単な道具で落下時間を正確に求めることは、実際問題として不可能だったはずである。そこで、斜面の利用が意味を持つてくる。俗に「重力を薄めた」と形容されるが、これによって落下速度を十分遅くし、⁽⁸⁾水時計でも時間が測れるように運動を修正したわけである。

また、滑らかな斜面に金属球をころがしたのは、斜面の摩擦と空気抵抗の効果を小さくするためである。⁽⁹⁾ 真空技術のなかった当時、ガリレオは滑らかな斜面と金属球の組合せによって、重力の弱い、真空（に近い）状態を人工的につくりあげたことになる。

このように、多くの要因が複雑に絡み合う自然の中から特定の現象を取り出すには、それが鮮明に現われるよう、自然を人為的に変形しなければならない。そこに、実験という創意工夫が必要になるわけである。

したがって、ガリレオの功績は、落体の法則を発見したこともさることながら、それ以上に実験という研究方法を明示したことにあると考えてよい。

天体の運行や物体の落下運動から始まった物理学は、時代とともに研究対象が変わり、まさに自然界の諸現象を扱う守備範囲の広い学問に成長している。しかし、対象は変化しても、首尾一貫して変らないことは、実験という有力な方法に支えられていることである。別のいい方をすれば、一面として実験が適用できる方向に対象の拡大が行われたのである。

その意味でガリレオは、物理学の誕生を告げその発展のきっかけを与えたことになるであろう。

注

(1) 近代科学は十七世紀にガリレオらによって突発的に誕生したのではなく、中世の先駆的業績に負うところが大きいことが、中世科学史の研究が進むにつれ、明らかにされている。いわゆる歴史の連続論である（たとえば、伊東俊太郎『近代科学の源流』中央公論、終章参照）。落体の実験にしても、その萌芽的研究はすでに存在したのかもしれないが、自然法則の発見という水準まで実験を推し進めたのはガリレオが最初である。

(2) 英語で科学者を示す *scientist* ということが使われ始めたのは、一八四〇年ごろ。それまでは *natural philosopher*

という表現が用いられていた(吉田忠「科学と社会」・村上陽一郎編『科学史の哲学』朝倉書店所収参照)。また、中山茂『歴史としての学問』中央公論、第六章に、西洋での「科学」ということばの定着について説明がある。

(3) ガリレオは初め、落下速度は落下距離に比例すると考えたが、後年(一六〇九年ごろ)この考えを捨て、正しい関係に気がついた。ガリレオが落体の法則を確立するに至った思惟過程については、青木靖三「ガリレオの自然落下法則の発見についての一試論」科学史研究第二九号、一頁(一九五四年)参照。

(4) 現代風に書けば、時間 t の関数として物体の速度 $v(t)$ が与えられれば、動いた距離は $x = \int_0^t v(t) dt$ となる。しかし、自由落下のような等加速度運動では、 v と t の関係が直線で表わされるので、積分を使わなくても図形の簡単な面積計算から距離が求まる。ガリレオの時代には、まだ積分は知られていなかったので、彼もこの方法で x は t^2 に比例することを導いた。

(5) 安田徳太郎訳 ダンネマン『大自然科学史』三省堂、第四卷一〇五頁参照。

(6) 一エルレは約〇・六メートル。

(7) 板倉聖宣『ぼくらはガリレオ』岩波書店、第五部に、ガリレオの斜面の実験が再現されている。

(8) 斜面の傾きを4度とすると、重力加速度は約0.6倍に弱まる。

(9) 羽毛のようなものでは、空気抵抗の効果が大きく、その運動は複雑で、落下法則を調べるのには適さない。

(二) マイケルソン・モーレーの実験

次にとりあげるのは、光の干渉を利用して地球の絶対速度の測定を試みた実験である。

十九世紀も後半に入ると、古典物理学は、ほぼひとつの体系として完成の域に達した。その柱となるのが、ニュートンの運動法則に基礎を置く力学とマクスウェルの方程式に基礎を置く電磁気学である。

マクスウェルの方程式は、電気と磁気的作用が空間的、時間的にどのように変化するかを記述し、そこから二つの作用が波動方程式に従う電磁波として伝わる事が導かれた。さらに、光も電磁波として真空中を c の速度(約

$3 \times 10^{10} \text{ m/s}$)で伝搬することが示された。このとき、電磁波を伝える媒質として想定されたのが、静止エーテル⁽¹⁾である。つまり、マクスウェルの理論が厳密に成り立つのは、絶対静止系においてであり、光は静止エーテルに対し c の速度で伝わりと考えられた。

ところで、ニュートンの運動方程式と異なり、電磁気学の波動方程式はガリレイ変換⁽²⁾に対し不変にはならず、静止エーテルに対する速度 v （これを絶対速度という）を含んでしまう。つまり、エーテルの中を等速直線運動している座標系では、光速は c と v の合成速度になる。したがって、地球上で光の速度を測定すれば、逆に地球の絶対速度 v が決定できることになる。

この問題に挑戦したのが、一八八七年に行われたマイケルソン・モーレーの実験（以下M-Mの実験と略す）である。その原理は、以下のとおりである。

同じ人が川で同じ距離を泳ぐ場合、川の流れに沿って上下に往復するのと、流れを垂直に横切って往復するのは、戻ってくるのに要する時間が異なる。

同じように静止エーテルの中を運動している地球は、常にエーテルの流れにさらされているわけであるから、光が同じ距離を往復する場合でも、エーテルの流れに沿うのと流れを横切るのでは、所要時間に差がでるはずである。この時間差が測れば、それから地球の絶対速度 v が求まることになる。

そこで、マイケルソンとモーレーは、次のような装置を考案した。光源から出た光をスリットで集中し、それを半透明の鏡Mで直交する二本の光線に分け、それぞれをMから等距離 l に置いた鏡 M_1 、 M_2 で反射させる。この反射光をMで再び一本の光線にして、干渉計に入射させる。

ところで、光が道筋 M_1 を往復するのと M_2 を往復するのでは、いま述べたように所要時間に差があるので、この差に応じた光の干渉縞が現われる。次に 90° 装置全体を回転させると、エーテルの流れに対する道筋 M_1 と M_2 の立場が入れ替わるので、それに対応して干渉縞にも変化が見られる。この変化を干渉計で観測し、そこから v を決定するという手順である。⁽³⁾

さて地上で光速の測定を初めて行ったのは、一八四九年のフィゾーである。彼はさらにその二年後、光が流水中を通過するとき、水の流れが光速にどのような影響を及ぼすかを調べた。その方法は、光線を二本に分け、一方を水の流れる方向に他方を反対方向に通過させた後、両者による干渉縞をつくらせ、それが水を止めたときの干渉縞に比べてどの位変化するかを観測するものであった。

このようなフィゾーの先駆的実験があったのは事実であるが、 $M \perp M$ の実験では注(3)の(1)、(2)式からわかるように、 $(v/c)^2 \sim 10^{-8}$ というきわめてわずかな違いを検出しなければならない難しさがあった。

この難点を解決したのが、装置を 90° 回転するという着想である。これによって、干渉縞が縞の幅の約 0.4 倍も移動するからである。⁽⁴⁾ この移動を望遠鏡によって確認することは、それほど困難ではない。

10^{-8} という小さな効果を、装置の回転という簡単な操作だけで、測定にかかるときの大きさまで拡大してみせたわけである。ここでも、自然にひとひねり手を加え、注目している現象を引き出す工夫が行われているわけである。

さて、肝心の実験結果は、意外なことに干渉縞の移動が検出できずに終わった。⁽⁵⁾ つまり、地球の絶対速度はゼロ、エーテルの流れはないかのような結果が出たのである。

これに対し、当時はさまざまな（今から見ればこじつけのような）解釈が提唱されたが、 $M \perp M$ の実験は古典物理

学の限界を暗示する大きな警鐘となったのである。(7)

注

(1) 光が波動であるからには、振動してそれを伝える媒質が必要になる。そこで、電磁波を伝える媒質として宇宙空間をみたし、その中で絶対静止しているエーテルという存在を導入した。これが、静止エーテル説である。

(2) 慣性系の間の座標変換で、ニュートンの運動方程式はこの変換に対し不変に保たれる。したがって力学の法則はどの慣性系でみても同じになる。これをガリレイの相対性原理という。この原理によれば、力学によって地球の絶対速度を知ることができないことになる。

(3) いま、地球の絶対速度 v が M_1 方向に一致するとすれば、光が M_1 を往復する時間は

$$t_1 = \frac{l}{c+v} + \frac{l}{c-v} = \frac{2l}{c} \cdot \frac{1}{1-(v/c)^2} \quad (1)$$

になる。一方、 M_2 を往復する時間は

$$t_2 = \frac{2l}{\sqrt{c^2 - v^2}} = \frac{2l}{c} \cdot \frac{1}{\sqrt{1-(v/c)^2}} \quad (2)$$

となる。そこで、光の波長を λ とすれば 2 本の光線の位相差は

$$\phi = 2\pi c(t_1 - t_2)/\lambda$$

であり、 ϕ に対応した干渉縞が現われる。次に装置全体を 90° 回転すると、今度は M_2 が v の方向に、 M_1 が v に垂直になる。同じように二つの道筋による光の位相差 ϕ' を計算し、回転前後の位相差の変化を求めると

$$\Delta = \phi - \phi' = 4\pi(v/c)^2/\lambda \quad (3)$$

となる。なお、地球の公転速度 (約 3×10^4 m/s) に対し自転による地面の回転速度は約百分の一なので、 v としては公転だけを考えれば十分である。

(4) $M-M$ の実験では、光源にナトリウム D 線 (波長は約 6×10^{-7} m) を使い、光を何回も反射させて l を実質的に長く (約 10 m) した。その結果、注(1)の(3)式で

$$\lambda/2\pi = 2l(v/c)^2/\lambda \sim 0.4$$

となる。

- (5) M・Mの実験は、多くの研究者によって精度を上げた追試が繰り返行われている。最近の実験としては、レーザー光線を利用した A. Brillet and L. Hall, "Improved Laser Test of the Isotropy of Space", Phys. Rev. Lett. 42, 549 (1979) の報告がある。

- (6) 物理の教科書や相対性理論の啓蒙書では、M・Mの実験結果を説明するためにアインシュタインは相対性理論を提唱したかの如く書かれている場合が多い。しかし、一九〇五年 *Annalen der Physik* に発表された最初の特相対性理論の論文は、力学と電磁気学において運動の相対性が同じ意味をもたないことを解決する原理的観点から、相対論を導いたのであり、M・Mの実験は直接寄与しないことが指摘されている。むしろ、当時アインシュタインはM・Mの実験を知らなかった可能性すら考えられることが示唆されている（広重徹「相対性理論はどこから生まれたか」日本物理学会誌一九七一年六月号、三八〇頁参照）。なお、この問題は G. Holton, "Einstein, Michelson, and "Crucial" Experiment", *Thematic Origins of Scientific Thought*, Harvard Univ. Press, p. 261（西尾成子編『アインシュタイン研究』中央公論に邦訳がある）に詳しい。

(三) α 粒子の散乱実験

今世紀に入ると、物理学が対象とする世界は急速に人間離れを起してきた。大きさでいうと、原子・分子以下の微視的な世界になり、われわれの五感でとらえられる限界をはるかに超えてしまった。このように、直接目で見るのできない対象を扱うようになると、それをいかにして「見る」かという問題が実験に課せられてくる。その端緒をひらいたのが、ガイガーとマースデンによる α 粒子の散乱実験である。

一八九五年にレントゲンにより偶然X線が発見されたのを皮切りに、放射線、陰極線の研究が盛んになり、人びと

の関心は必然的に原子の内部へと向けられていった。そして原子の内部構造に関していくつかの模型が提唱された。代表的なものに J・J・トムソンの陽球模型⁽¹⁾と日本で有名な長岡半太郎の土星模型⁽²⁾があげられる。

このような状況にあった一九〇九年、ガイガーとマースデンは、ラザフォードの指導のもとラジウムから放射される α 粒子を種々の金属箔に照射し、金属の種類や厚さが α 粒子の反射にどのような影響を及ぼすかを測定した。⁽³⁾

その結果、わずかな割合ではあったが、 α 粒子が金属箔の表面ではね返されてくることが検出された。つまり、 α 粒子の一部は、金属の中でその進行方向が反転するほど大きな角度で曲げられたわけである。

これは予想に反する思いがけないことであった。彼らの論文には次のように書かれている。⁽⁴⁾

If the high velocity and mass of the α -particle be taken into account, it seems surprising that some of the α -particles, as the experiment shows, can be turned within a layer of 6×10^{-5} cm of gold through an angle of 90° , and even more. To produce a similar effect by a magnetic field, the enormous field of 10^9 absolute units would be required.

(α 粒子が高速であることとその質量の大きさを考慮すると、実験結果が示すように厚さ 6×10^{-5} cm の金属層内で α 粒子の一部が、 90° あるいはそれ以上も曲げられることは驚くべきことである。磁場によってこれと同じ効果を引き起そうとすれば、絶対単位で 10^9 もの強い磁場が必要になる。)

つまり、 α 粒子はすべて金属を素通りし、たとえわずかの割合にしても、後方にはね返されるなどとは考えられなかったのである。

論文の初めにも書かれているように、もともとガイガーとマースデンの実験は α 粒子の散乱現象そのものに興味向けられていたのであり、必ずしもこれによって原子構造の解明を試みようともくろんだわけではなかった。⁽⁵⁾

しかし、結果としては α 粒子の散乱が微視的な対象の構造（原子のひろがり）は約 10^{-8} cm、原子核は約 10^{-13} cm を調べる有力な手段であることを示すこととなった。

正に帯電している α 粒子が 90° 以上も屈曲するということは、箔を構成する金の原子から強い電氣的斥力を受けるからであろう。ところが、トムソンの考えた陽球模型では、原子の外部も内部も電氣的にはば中性で、 α 粒子は原子からほとんど力を受けず、素通りしてしまふ。そこで、正電氣が中心に集中し外側を電子がとり囲む構造をとることが推測される。この模型でも、原子の外部は電氣的に中性であるから、 α 粒子はそのまま通り抜けるが、たまたま原子の内部まで入り込んだ α 粒子は、中心に凝縮した正電氣のかたまりから強い斥力を受け、大きく方向を曲げることになる。

ラザフォードは、このような模型を想定して α 粒子の散乱を計算し、それがガイガーとマースデンの実験結果と一致することを示した。⁽⁶⁾

さてこの例は、すでに紹介したガリレオの落体の実験やマイケルソン・モーレーの実験のように、初めから目的を設定して行われたのとは異なり、いささかひょうたんから駒のような印象を与える。当初は原子構造の解明を意図したわけではなく、 α 粒子の散乱自体が研究目的であったことを考えると、目的が手段に変換されたともいえる。

しかし、その経緯はともかく、散乱実験は原子の内部構造を明らかにしただけにとどまらず、微視的を世界さぐる物理実験の有力な手段として定着した。⁽⁷⁾これは方法論の確立という立場からみても、現代物理学の大きな成果といえる。

散乱を起こさせる粒子の種類は研究対象や目的によって異なるが、特に素粒子物理学の発展にこの方法が果たした役割は多大なものがある。調べる相手が小さくなるにつれ、粒子のエネルギーは爆発的に増加し、現在では巨大な高エネルギー加速器が運転されている。装置の規模は、ガイガー、マースデンの時代に比べはかり知れないほど大きくなっているが、実験方法の基本原則はまったく同じである。また、最近では物性研究にも粒子の散乱が利用されている。⁽⁸⁾

かつてマックス・プランクは、現代物理学を「人間からの離脱」と形容した。古典物理学は、人間の身近に生起する現象を主な相手としていたのに対し、現代物理学は人間の常識を超えた世界に踏み入り、感覚や経験ではとても理解できなくなったことを言い表わしている。

それだけに、自然のベールを剥ぐなおいっそうの工夫が要求される。その意味で散乱実験は、内眼ではもちろん顕微鏡でも追えない世界を「見る」ことをわれわれに教えてくれたのである。

注

(1) 一様に正に帯電した球の中に電子が埋め込まれているとした模型。

(2) 正電気球のまわりを電子が環状にとり囲んでいるとした模型。なお、長岡の土星模型が、現在知られている原子構造を与えるきっかけになったように説明される場合が多いが、これは過大評価の感がある。原子物理の歴史の中で長岡の果たした役割は、日本で信じられているほど重要とはいえないことが、広重徹「Bohrの原子構造論の起源」科学史研究第七一号、九七頁（一九六四年）に指摘されている。

- (3) H. Geiger and E. Marsden, "On a Diffuse Reflection of the α -Particles". Proc. Roy. Soc., 82, 495 (1909).
- (4) 注(3)の四九八頁。
- (5) 広重徹『物理学史』培風館、第二卷一四一頁参照。
- (6) E. Rutherford, "The Scattering of α and β Particles by Matter and the Structure of the Atom", Phil. Mag., 21, 669 (1911).

この論文でラザフォードは、散乱角を θ とすると散乱される α 粒子の角度分布が $\cos^2(\theta/2)$ に比例することを示した。これが有名なラザフォードの散乱公式である。

- (7) たとえば、板の前に石を置いてその石めがけ機関銃を乱射すれば、石にさえぎられた跡が縁取りされて板に弾丸の穴が蜂の巣のようにあくであらう。さらに、弾丸のあらゆる方向へのはね返り具合を調べれば、それらの情報から石の形や大きさが見当つくはずである。石を原子に、弾丸を α 粒子に置き換えても同じことがいえる。

一般に、直接見ることでできない微視的対象は一種のブラックボックスであるから、これにテスト粒子をぶつけ、散乱された粒子がもってきた情報(粒子のエネルギー分布、散乱角度分布など)を解析して、ブラックボックスの中をさぐるわけである。

- (8) ラザフォード散乱そのものを応用した最近のトピックスとしては、イオンビームによる固体の表面構造解析があげられる。この方法により、長年手つかずだった表面原子の位置のずれが測定された。大槻義彦『放射線の話』NHKブックス、第九章に平易な解説がある。

(四) 重水素の偏極実験

前節で述べた散乱実験などを端緒として、原子・分子さらにはその内部構造といった微視的対象が、物理学のひとつの中心になったわけであるが、一方、無数の原子によって構成される物質の構造と性質の研究も、第二次大戦後盛んに行われるようになった。この分野は物性物理学と呼ばれ、現在ではきわめて多岐に分れた広範な学問領域を形成

している。対象としては、固体（結晶）が中心であるが、液体、気体も含まれ、それらの構造、電気的、磁氣的、力学的、熱的性質を、物質を構成する粒子間の相互作用を基礎にしてとらえようとする分野である。それだけに、工学との関連もきわめて深い。

さて、ここで例にあげるのは、結晶内で電子がどのような状態で存在するかを調べた実験である。

これを調べる一番手っ取り早いやり方は、なんらかの方法で電子を結晶の外へ取り出してやればよい。よく利用されるのは、結晶に電場をかけたり、光を照射して電子を引っ張り出す方法である。前者を電界放射、後者を光電子放射という。

他にもイオンを結晶内に入射させ、イオンに電子をつかまえさせる方法が考えられる。この現象をイオンの電子捕獲という。特に一価の正イオンが、電子を一個捕獲して中性原子になる現象をイオンの中性化という。

なるほどこれはうまい方法ではあるが、欠点は電子がそのまま裸で外へ出てくるのではなく、原子（電子を捕獲したイオン）の中に束縛されていることである。そこで、この原子を調べることによって、内部に束縛されている電子が、結晶内ではどのような状態にあったのかを知る第二の方法が必要になる（原子からさらに電子をはぎ取る方法も考えられるが、その過程で電子の結晶内での情報が消失してしまう可能性が大きい）。

この問題に対しカミンスキーは、いくつかの物理過程を組合せて、強磁性結晶内の電子状態（この場合は、磁性に関する情報つまり電子のスピン状態）を調べる実験を考案した。

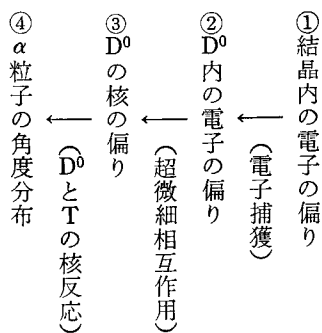
彼は、飽和するまで磁化したニッケル単結晶の薄膜に重陽子 D^+ を入射させた。このとき、結晶内の電子スピンは磁化方向に関して偏っており、電子は D^+ に捕獲されても重水素原子 D^0 が結晶内を走っている間、電子の偏りは原子内で

保たれている。

ところが、さきほど述べたように、このままでは電子のスピン状態がわからないので、カミンスキーは、結晶を通過して出てきた D^0 を弱い磁場内に導いた。このようにすると、電子の偏りが重陽子の核スピンの偏りに移行する⁽⁵⁾。つまり、結晶内の電子の情報を重陽子の核へ伝えたことになる。なお、 D^0 と同時に D^+ も結晶から出てくるが、これは電場をかけて運動方向を曲げ除去する。

次に、 D^0 を三重水素の標的に衝突させ、その結果生じる α 粒子の角度分布を測定した⁽⁸⁾。ここで重要なことは、この角度分布が D^0 の核スピンの偏りに依存していることである⁽⁷⁾。カミンスキーは、磁化方向に垂直な方向と D^0 ビームおよび磁化方向の両者に垂直な方向に放出される α 粒子の強度を測定し、その値から核の偏りを決定した。

この手順を整理すると次のようになる。



そして、この順番を逆にたどると最終的に④から①が決定されることになる。⁽⁸⁾

さて、①から④に至るカミンスキーが利用した個々の過程は、すべて既知のものである。目新しいことはひとつもない。

しかし、それぞれのつながりに注目し、それをうまく組合せて結晶内の電子状態をさぐる新しいひとつの実験を構成した思いつきはみごとである。

卑近なたとえになるが、「風が吹けば桶屋が儲かる」という諺がある。順に因果関係の連鎖をたどって行くと、一見脈絡のなかった二つの現象が結びつくという話である。

④の粒子の角度分布の測定が、①の電子状態の決定につながることを示したカミンスキーの実験は、まさにこのたとえにぴったりする好例ではないだろうか。⁽⁹⁾ 利用した素過程の間で、注目している情報がどのように伝わって行くか、つまりその間の定量的関係が十分押えられていれば、糸を少しづつ手繰るようにして奥に隠された自然の姿を引き出すことが実験によって可能になるわけである。

前に紹介した三つの例に比べると、かなり手のこんだ印象を受けるが、それだけにまた実験の有効さが見てとれるであろう。

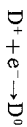
注

(1) M. Kaminsky, "Polarization of Channeled Particles", Phys. Rev. Lett. 23, 819 (1969)

(2) 磁化方向に対しスピンの平行、反平行の電子の数を N_{\uparrow} , N_{\downarrow} とすると、電子の偏りは、
$$P_{el} = (N_{\uparrow} - N_{\downarrow}) / (N_{\uparrow} + N_{\downarrow})$$

で表わされる。これを偏極度という。

- (3) 重陽子は電子を一個捕獲して重水素原子に変わる。その反応は



- (4) 磁化方向に対し核のスピン成分が 1, 0, -1 である重水素の数を N_+ , N_0 , N_- とすると、核スピンの偏りは

$$P_{zz} = 1 - 3N_0 = 3(N_+ + N_-) - 2$$

で定義されるテンソル偏極度で表わされる。

- (5) この移行は、重水素原子の超微細相互作用による。

- (6) 重水素が三重水素に衝突すると、核反応 $T(D,n)\alpha$ により、中性子と α 粒子が放出される。

- (7) 磁化方向と α 粒子の放出方向のなす角を ϕ とすると、 α 粒子の強度は

$$I(\phi) \sim \frac{1}{4} [1 - \frac{1}{4} (3\cos^2\phi - 1) P_{zz}]$$

で与えられる。

- (8) 電子の偏りと α 粒子の角度分布には

$$P_{el} = 12 \frac{I(0^\circ)/I(90^\circ) - 1}{I(0^\circ)/I(90^\circ) + 2}$$

の関係がある。

- (9) カミンスキーの実験では、イオンの電子捕獲は結晶内で起るものと想定された。また、この考に基づく理論も M. E. Ebel, Phys. Rev. Lett. 24, 1395 (1970) によって発表された。しかし、その後の詳しい研究から、イオンが電子を捕獲するのは結晶表面であることが示された。C. Rau and R. Sizmann, "Measurement of Predominant Electron Spin Orientation at Single Crystal Surfaces of Ferromagnetic Nickel", Phys. Lett. 43A, 317 (1973) 参照。ただし、カミンスキーの実験原理はそのまま利用できる。

なお、イオンの電子捕獲は、光電子放射、電界放射、スピン偏極電子線の散乱などと並んで、表面の磁性状態を調べる有力な方法として確立されている。最近の報告には、C. Rau and S. Eichner, "Electron-Spin Polarization at Single-Crystalline Cr and Ni Surfaces Determined with Electron-Capture Spectroscopy", Phys. Rev. Lett. 47, 939 (1981) がある。

(五) 計算機実験

物理学の研究方法は、実験と理論に分けられることは本稿の初めで述べた通りであるが、ここでとりあげる計算機実験（コンピューター・シミュレーション）は、近年の電子計算機の進歩にもなって確立されつつある新しい方法といえる。

名前は実験となっているが、装置を用いて行う実験ではない。寄与する効果が数多く複雑すぎて、解析的な計算を実行することが不可能な現象を、計算機によって追跡して行く方法である。これは、プログラミングによって実験条件を設定し（疑似的な自然を想定し）、計算機によって現象を観測する模擬実験である。

今のところ、主として新しい現象の可能性をさぐるのに利用され、実験と理論の補助的手段と考えられているが、すでにいくつかの重要な物理現象が、この方法によって発見されている。⁽¹⁾

さて、計算機実験が積極的に利用されている分野に、種々の粒子（イオン、電子など）を固体に照射し、その相互作用から固体の構造や性質を研究する放射線物性がある。その中から一例を選び、この方法の有効性を示すことにする。

いま、イオンが金属表面で散乱される場合を考えると、表面付近の自由電子に動的な極が生じる。⁽²⁾これは、動的な鏡像電荷⁽³⁾が固体内に発生したことに対応し、その結果イオンは、自分のつくった鏡像電荷から引力を受けることになる。引力を与える表面ポテンシャルの障壁は、イオンのエネルギー⁽⁴⁾によっては金属の仕事関数と同程度になる。

そこで、イオンが表面すれすれの角度で散乱するとき、適当な条件が揃えば、イオンは動的鏡像電荷の引力に打ち

勝てず、再び金属内に引き戻され、表面の原子層で再び反射されることになる。つまり、イオンが金属表面に滞在する時間が長くなるので、固体表面の研究に大きな影響を及ぼすことが考えられる。この効果は、ちょうど水面に向けて小石を水平すれすれに投げると、小石が水面をとびはねる現象に似ていることから、「水切り効果」と名づけられた。⁽⁵⁾

ここで一番興味があるのは、表面付近で実際にどのような水切り運動が行われるかということであるが、これを解析的に解くことは不可能である。また、実験で間接的に水切り効果を検出することはできても、イオンが描く軌道を直接見ることはできない。このような問題は、まさに計算機実験の対象となる。

その手順は次のようになる。まず、イオンの運動エネルギーと特定の表面層に対する入射角を決め、イオンを金属に入射させる。すると、イオンは表面にある特定の金属原子と二体衝突を起す。衝突の仕方は、標的原子とイオンの組合せによって、決まる相互作用ポテンシャル（これはイオンの電荷、エネルギーの関数）を与えて、イオンの散乱角を計算すればよい。その結果運動方向を変えたイオンは、その道筋に位置する次の原子に衝突する。このとき、また同様の計算を行うという具合に二体衝突を逐次計算していくと、イオンがどのような軌跡をたどるかが追跡できる。

しかし、金属内のイオンの運動を扱うには他にも考慮しなければならない効果がある。第一に、温度に依存した標的原子の熱振動がある。つまり、走っているイオンからみて、原子は静止しているわけではない。さらに注意しなければならないことは、今考えているような金属表面では原子の熱振動が、表面に垂直な方向と平行な方向で異なることである。これを熱振動の異方性という。

第二に、イオンの荷電状態の変化がある。これは、イオンが金属内に入ると、金属の電子を捕獲したり逆に電子を損失して、初めの電荷数に変化が生じる現象である。したがって、標的原子とイオンの相互作用ポテンシャルも、それに応じて調整しなければならない。

第三に、イオンのエネルギー損失があげられる。金属内を運動するイオンは、いつまでも初め与えられた運動エネルギーを保持しているわけではない。ちょうど、ボールを床の上でころがすと、摩擦によって徐々に遅くなるように、イオンも原子や電子との衝突によりそのエネルギーを失っていく。⁽⁷⁾ この効果を計算に取り入れなければならない理由は、いま述べた荷電状態の変化と同じである。

以上の効果を計算プログラムの中に組み込んだ上で、最初に説明した二体衝突の計算を順次行ない、イオンの運動を追っていくわけである。そして、最終的に金属表面から再び外へ出てきたイオンに対し、鏡像電荷による引力作用の計算を行なえば、これで完全にイオンの軌跡を描くことができる。⁽⁸⁾

このように、固体内のイオンの運動には、種々の効果が複雑に交錯しており、また標的原子の数を考えても、簡単な理論によって定量的な研究を行うことは難しいだけに、計算機実験の役割は大きくなる。

なお、この方法は社会科学でいうと、人口問題や交通問題で試みられるオペレーションズリサーチに対応すると思われる。ただ、そこで考慮に入れるべき個々の効果が、物理学では比較的正確に押えやすいので（一般にパラメータを含むが）、必然的にそれらを複合した最終結果の信頼度も高くなると思われる。

注

(1) 代表例にイオンのチャネリング（イオンを結晶の原子配列に沿って入射させると、イオンの透過がよくなる現象）があ

る。

- (2) ことばの上では矛盾するが、動的な静電誘導と考えてもよい。ただし、普通の静電誘導のように、イオンに引きつけられた電子が金属表面で静止するのではなく、電荷の密度分布は時間的に振動する。
- (3) 金属表面に電荷を近づけたとき、この電荷に働く力は、表面を鏡として反対側に想定した異符号の電荷からの引力に等しい。これを鏡像電荷という。
- (4) 固体内の電子を一個外へ取り出すに必要な最小エネルギー。
- (5) Y. H. Ohtsuki, K. Koyama and Y. Yamamura, "Skipping Motion of the Surface Scattering of Ion Beam", Phys. Rev B20, 5044 (1979).
- (6) たとえば、イオンの散乱角度分布の変化の測定。
- (7) いろいろな原因があるが、たとえば標的原子内に束縛されている電子を高いエネルギー状態に励起し、イオンはそれに対応するエネルギーを失う過程がある。
- (8) 注(5)の文献の図9、10にイオンの水切り運動の軌跡が描かれている。

三 社会科学と実験

以上具体例にあげて議論したように、実験とは必ず人為的な操作をほどこし、特定の現象を積極的に生じさせていることがわかる。あるがままの自然を観察するという消極的な態度で、自然と対峙しているわけではない。そして、人為的な操作の完成度が高いほど、法則の抽出は容易になり、併せて結果の再現可能性(客観性)が保証される。自然現象でも社会現象でも、それを丸ごととらえようとすれば、その複雑さはどちらも同じであろう。しかし、それぞれの対象に人為的な操作をほどこすことの可能性となると、明白な差異がでてくる。

たとえば、気体の組成、温度、圧力、体積が完全にコントロールできるとすれば、その段階で実験は可能になり、同じ現象を再現できる。また、そこから気体に関する法則が導かれる。これが物理学である。

しかし、気体を構成する分子を人間に置き換えたとき、そこに構成される社会を気体と同じように扱えるというアナロジーは成立しない。人間社会に人為的操作を行うといっても、そこには大きな制約が課せられるからである。さらに、没個性の分子と生身の人間をたとえ統計的に扱うにせよ同一視することはできない相談である。したがって、もし物理学と同じ厳密性で実験を定義するならば、社会科学で実験という方法の確立を期待することには無理があるう。

このような両者の違いに着目するならば、「社会諸科学はこれからまだ自分たちのニュートンを見つけたさなければならぬ」などという考えは、まったく意味を失う。実験の可能性は、両者の対象の質的な差違に基づく問題であり、学問の発展段階の位置づけとしてとらえるべき事柄ではないからである。⁽²⁾

注

(1) J・ザイマン著、松井巻之助訳『社会における科学』草思社、第十二章参照。

(2) 本章では、R・ハロッド著、清水幾太郎訳『社会科学とは何か』岩波新書および長尾龍一、浜井修「社会科学の方法」、山内恭彦編『現代科学の方法』NHK市民大学叢書所収を参考にした。

四 おわりに

アメリカのバイジャーが、木星や土星の写真を送ってきたことは記憶に新しい。現代科学は、精巧な観測装置を塔

載した宇宙船を、はるかかなたの惑星に正確に接近させるだけの力をもっているわけである。

ところが、たとえば目の高さから木の葉を一枚静かに落したとき、木の葉が足元のどの辺に着地するのかを正確に決定することは、現代科学をもってしても不可能である。

なぜだろうか。これは、再三強調している自然に対する人為的な操作に起因している。宇宙空間がどのように広大でも、宇宙船の運動は初期条件を与えれば決定できる。今の場合、宇宙船は質点とみなせるし、運動を乱す副次的な効果が介入しないからである。単純化、理想化された自然が舞台になれば、運動する距離の大小は問題にならない。一方、木の葉の方は、質点として取り扱うこともできないし、空気の抵抗さらには空気の流れの影響なども受けることになる。つまり、副次的効果の寄与が大きく、これを取り除けない条件下の問題になる。

こうなると、わずか一メートル程度の運動でも、実験によって同じ結果を再現することはもちろん、理論を組立てることも不可能になる。ここでは、落体の法則という自然の本質が、諸条件の錯綜する状況の中ではぼやけてしまうわけである（だからこそガリレオは実験を工夫した）。

これは、実験技術が進歩すれば将来解決できるという性質の問題でない。このように、丸ごとの自然をみようとすることは、根元的に物理学にはなじまないと考えるべきであろう。とすると、宇宙船と木の葉というアンバランスな組合せは、第一章でも触れたように物理学は自分の方法が適用可能な方向を嗅き分けながら、発展して行く一面があることを示唆している。つまり、方法のあり方がその学問を形づくることにもなるわけである。

なお、もうひとつの方法、理論については稿をあらためて論及する予定である。