

# 物理学概論

石原 純

# 目次

緒 言 物理学理論の発展概観	1
第一章 物理学的経験	7
1. 感覚の分析	7
2. 感覚よりの離脱	9
3. 経験の様式	11
4. 必然的継起の原理（因果律）	12
第二章 物理学の方法	14
5. 経験の記述	14
6. 概念の数量化	16
7. 観察及び実験	20
8. 測定	21
9. 帰納及び一般化（法則）	23
10. 高次概念化	29
11. 理論化（仮説及び原理）	32
12. 推論（類推）	35
13. 検証	38
第三章 物理学に於ける基礎概念及び現象形式	40
14. 基礎概念	40
15. ディメンション	41
16. 絶対単位系	43

17. 概念の空間的様式 . . . . .	47
18. 空間及び時間概念 . . . . .	49
19. 現象の連続性（微分法則） . . . . .	51
20. 現象の可逆性及び非可逆性 . . . . .	54
21. 週期的現象 . . . . .	57
22. 現象の不連続性（量子法則） . . . . .	60

#### **第四章 物理学と認識論 66**

23. 直観と認識 . . . . .	66
24. 模写論 . . . . .	67
25. 実在の認識 . . . . .	68
26. 世界形像の唯一性 . . . . .	71
27. 物理学の実用性 . . . . .	74

## 緒言 物理学理論の発展概観

自然科学の諸分科は今日に於て甚だ多岐となり、自然のあらゆる状相変化について我々はその研究を進めているが、<sup>これら</sup>之等の中にあつて物理学が最も精確であり、<sup>したが</sup>従つて最も進歩したものであることは周知の事実である。<sup>これ</sup>之は物理学がその研究に際して採用するところの方法に依ることは勿論であつて、実際に物理学に於てはかような方法が適用せられ得るところの対象を選択することによって常にこの目的が遂げられるように導かれたのである。ここに物理学が他の自然科学の分科に対して最もすぐれた規範として<sup>みな</sup>見做され得る重要な意味が存する。

我々は<sup>もと</sup>固よりすべての自然が直ちにこの物理学的方法によって処理し得られようとは認めるわけにゆかない。けれども既に物理学の対象として取り扱われたところの物質の諸性質にあつても最初は甚だ複雑に見えて到底簡単な数学的处理を困難とするように思われたところのものも、これを適当に分析して或る一定の関係のみを抽象する場合に於ては遂に精確な数理的な法則をそこに見出だすことができるようになることは、我々の<sup>しばしば</sup>屢々経験する処である。やがては他の分科にあつても漸々かような研究段階に到達するであろうことは恐らく疑を容れないであろう。現に物質の変化を研究対象として起つた化学の如きは、今日に於て物理学に於ける物質理論の著しい発展のために、<sup>これら</sup>之等の理論に立ち入ることなしには遂に完全なる理解を得る道のないことが明白になった。我々はもはや化学に於ける独自の理論をもつことはできない。それは必然的に物理学の理論に帰趨せられ<sup>も</sup>若しくは翻訳せられる筈の<sup>はず</sup>ものでなければならない。そしてかようにして両者は全く相融合すべき運命に置かれている。

物理学がその進歩発展に対して有効な自らの方法を確立したのは第十六及び第十七世紀に於けるガリレイ (Galilei) 及びニュートン (Newton) の業績のお蔭であつたことは、誰しもが知っている。遠くギリシヤ時代に於ける自然哲学的研究はそれ自身に於て相当の深さに到達したには違いないが、<sup>しか</sup>併し実験的研究による<sup>せんめい</sup>事実の闡明が余りにも貧弱であつたがために、単なる我々人間の思惟によって勝

手に自然に命令すると云うような結果を招いた。先験的哲学によるこの不遜を責め、より謙虚に事実に従わねばならないことを我々に自覚せしめたのが、即ちガリレイ及びニュートンの精神であった。彼等は<sup>ま</sup>先ず物体の運動を観察実験してその法則を見出だし、依って力学の原理を確立した。この原理はその後多くの学者によって種々の形式に整序せられるに至ったが、二百年後に於てアインシュタイン (Einstein) の相対性理論があらわれるまでは内容上何等の変更をも受けずに、我々の物理学的理論の基礎に据えられたのであった。

第十八世紀に於ける多様な準備時代を経過して、第十九世紀に於ける物理学理論の急激な進展が我々を待ち迎えた。サディ・カルノー (Sadi Carnot) 及びクラウジウス (Clausius) の熱力学に於ける研究がこれに特有な一つの原理 (熱力学の第二主則) を明らかにすると同時に、ロバート・マイエル (Robert Mayer) 及びジュール (Joule) によって熱と機械的エネルギーとの間の一定の関係 (熱力学の第一主則) が見出だされ、後者は更にヘルムホルツ (Helmholtz) のエネルギー恒存原理にまで拡張せられるに至った。次いで熱の運動学的理論が発展するに及んで、我々は熱を完全に物体分子の運動として解釈することに成功した。更に光に関してはホイヘンス (Huygens) 以来の波動論が種々の事実を説明して、その媒質として仮定されたエーテル内の力学的状態を我々に示し、又電気及び磁気に於ける多くの現象はファラデー (Faraday) 及びマクスウェル (Maxwell) の電磁場の理論によって遺憾なく記述せられることができたばかりでなく、マクスウェルがこれから導き出した電気力学の根本方程式は特に電磁波動と光の波動との同一性を結果せしめて、謂わゆる光の電磁的理論を称えしめるに至った。しかもこの理論が有名なヘルツ (Hertz) の実験によって証明せられるに及んで、我々は<sup>これら</sup>実に之等の物理学的理論の全体系の光輝ある勝利を祝福しないわけにゆかなかった。一つの理論的体系——それは実にニュートン力学を第一の基礎として、すべての物理的現象を力学的に解釈しようと企図せられたところの<sup>い</sup>謂わゆる力学的世界観に外ならない。

<sup>しか</sup>併しながら我々の科学の進歩は必らずしも常に順境にのみ恵まれるものではな

い。我々は絶えず実験的技術の精度を増し、又観測事実の範囲を押し広めることによって、時に予測することのできない新奇な事実<sup>これら</sup>に遭遇し、之等を我々の考察圏内に持ち来さなくてはならないように余儀なくされる。そして或る場合には理論的に解くことのできそうもない矛盾に衝き当り、又或る場合には事実<sup>これら</sup>に相応すべきどんな理論が可能であるかを容易に透見することのできない困難な問題によって進路を阻まれてしまう。古来の学者はいずれも多少はかような障礙<sup>しょうがい</sup>にゆき悩んで、これに打ち勝つべく多くの努力を費した。しかも障礙<sup>しょうがい</sup>が大きければ大きい程、そこには偉大なる発見が彼等を待っていたのである。自然には実に我々の常識が到底思い及ばないような意味深い幽幻な機構が潜み匿れているのであって、我々の人間のうちの最も卓越した頭脳が正しい科学的研究方法によってのみこれ<sup>うかが</sup>を覗き知ることのできるようなものであるのを、我々はここに十分に悟ることができる。

上述の力学的世界観の発展に際して、我々は既に理論上の一つの難関<sup>し</sup>を超えねばならなかったことを想い起す。即ち熱の運動学的理論によって我々は熱を物体分子の運動として解することはできたけれども、併し分子の運動<sup>しか</sup>が全く力学原理に従い、それ故に可逆的過程であるに反し、すべての熱現象が熱力学の第二主則によって非可逆的であることは果していかなる理由に基づくかと云うことが重大な疑問として残されねばならなかった。運動学的理論は気体の場合にクラウジウス、マクスウェル等によって殆んど完全に数学的に取り扱われたが、これを精細<sup>ほと</sup>に論究することによってボルツマン (Boltzmann) は遂にそこに、常に増大するところの一つの函数を見出だし (H 定理と称せられる)、これを熱力学に於けるエントロピーなる量と同一であるとして、始めて上述の謎を解くことができた。彼によれば物体に於ける熱状態が一定の平衡状態に達することは分子に於ける速度分布が確度論<sup>したが</sup>に従って最も確からしい一定の終極に近づくことを意味するものに外ならないのであり、従って熱力学の法則は確度論<sup>したが</sup>の適用が正当に許容される条件のもとにのみ成立するものであることが明らかにせられた。我々はプランク (Planck) に従って<sup>したが</sup>1)、自然現象を可逆的及び非可逆的過程に大別することをもつ

1) M. Plank, *Physikalische Rundblicke* (1922) のうち特に *Die Einheil des physikalischen Weltbildes* の項をみよ。

て我々の物理学的世界形像に対する根本的の意味を保たしめるものであるとするならば、ボルツマンのこの発見は実に物理学に於ける最も重要なものの一つに数えねばならない。

物理学理論に於ける**第二の難関**は運動体系に於ける光の速度に関する事実によって惹き起された。之は同時に光を真空媒質としてのエーテル内に起る波動と解せねばならないことによって、古来疑問視せられていたエーテルの実質問題をも当然その中に含んでいた。更に純粹に運動学的に見ればすべての運動は全く相対的でなければならぬに拘らず、何故に我々はニュートン力学を一定の惰性系なる座標系群に関してのみ立てればならなかつたかと言う力学の根本問題にさえも触れていた。之等は実に前世紀に於ける数多くの理論家が頭脳を悩まして尚お何等の解決の道をも見出だすことのできなかつたところの最も困難な問題であつたが、それが今世紀に入るに及んで一人の偉大なる物理学者アインシュタインの手によって殆んど完全に始末づけられるに至つたことは、物理学史上の一大驚異であり、又理論の燦然たる光輝を永遠に照り亘らしめる所以でもあつた。物理学の本質がどこに存するか、その世界形像が終極的にどんな風に導かれるかと言うような点に関して、我々はどれ程多く彼の**相対性理論**によって啓発されたかわからない。それが単に一つの事実の証明として妥当であるばかりでなく、それ以上に遙かに深奥の意味を有し且つ絶大の価値を發揮するものであることはこれによって明らかであろう。

自然は併しながらまだまだ意外な隠れた機構を秘蔵している。我々は熱輻射の理論に於て一層重大な困難に出遇つた。物質の構成要素としての電子の発見は力学的世界観に代えるに電磁的世界観を以てせしめるに至つたが、それらは何れにしても作用の連続性を仮定した上で微分学の理論の応用によって論ぜられるものであつた。ところが熱輻射の平衡状態に関して導き出された理論的歸結はいかにしても実験的事実と一致するわけにゆかなかつた。そこでともかくもこの事実を正当に云いあらわすために、プランクは謂わゆる**量子仮説**を設けて、輻射作用の不連続性を考慮に取り入れたのであつたが、そしてアインシュタインの光量子

仮説も亦同様に光の種々の作用を説明するがために甚だ有効であることが認められはしたが、併し<sup>しか</sup>之等<sup>これら</sup>の仮説がいかにして他方に多くの実験的証明を手控えているところの、輻射波動の力学的連続性と相容れることができるかについては、誰もこれを明確に解釈することができなかつた。物理学理論のこの**第三の難関**は今世紀の初頭から今日に至る四半世紀の間、遂に打ち超えることのできない鉄柵によって相隔てられるかのように見えた。屢々<sup>しばしば</sup>我々の理論の危機が叫ばれた。だが<sup>たわ</sup>撓みない努力が最後に我々を救い、遠く射し入る光明をたしかに望見し得る境涯にまで我々を導いてくれた。三四年前にあらわれたハイゼンベルグ (Heisenberg) の量子力学や、シュレーディンゲルの波動力学はこの難関を開扉し得るところの最も有力な鍵として役立つであろうことは今日もはや疑うべくもない。自然の女神はまさにその半身を我々の前にあらわそうとしている。

最後に昨年から今年に<sup>わた</sup>亘って報道せられたアインシュタインの“単一的の場の理論”が何等かの事実によって証明される日が到達したとするならば、我々は更に広大な展望をもち得る理論的立場に立つことができるであろう。それは物体の万有引力及び電磁気力を単一の(計量的の)場によってあらわそうとするものであって、古来の意味に於ける力学的世界観<sup>1)</sup>や、その後これに代るべく<sup>みな</sup>見做された電磁的世界観を超えて、それ以上に<sup>これら</sup>之等を包容して高く位置するところのものであると云ってよい。若し我々が量子論的考察をこれと融合せしめ、又電子及び陽子の如き物質の構成要素の存在をこの理論のもとに何等かの形式に於て意味づけることが望まれるであろうならば、我々は恐らくここに**物質理論の一つの頂**点を仰視することができるであろう。<sup>ただ</sup>只今日に於てそれは固より将来への一つの<sup>もと</sup>期望に属するもので<sup>ママ</sup>しかないが、併し<sup>しか</sup>物理学の近代的発展の顯著なる有様を経験し得た人々は必らずしもそれを痴人の夢として斥けることはないであろう。

私は物理学理論の発展とその帰趨とに対する概観を極めて粗略ながらもここに述べ終った。ともかくも我々はかような発展過程の間に立って、物理学がどんなものであるかを一通りは<sup>うかが</sup>覗い知ることができる。私はこれを学修しようとする

<sup>1)</sup>通常、力学的世界観と称する場合には物体が他に及ぼす力、例えば万有引力の如きものを遠隔作用として距離の函数によって云いあらわしていた。従ってファラデー・マクスウェルの理論による電学気力などは“力学的”として見做さないように習慣づけられていたのである。



る読者諸氏のために特にその概論を与えて、その眼指す方向を提示したいと思う。一つの事物に対して外部からこれを探ろうとするものは先ずその眼を全体に広げて少なくとも輪郭をはっきりと補捉する必要があるであろうし、既に内部に立ち入っている研究者も亦時には自分自身の容姿を鏡に映してこれを整えることの必ずしも無益でないのは云うまでもあるまい。

# 第一章 物理学の経験

## 1. 感覚の分析

一般に自然を我々に対立する外部的存在即ち外界となし、自然科学をもってこれら外界に於ける事物の関係を我々に示すものであると解するのは唯物論的見解である。併しながら我々が外界に接してそこにどんな現象が起るかを知るがためには感覚の窓を透して見なければならない。若し感覚の窓を全く閉ざしてしまふならば、外界がどんなものであるかを我々は想像することさえ出来なかつたであろう。この事實はどんな唯物論者も承認しないわけにはゆかない。それ故に自然は全く感覚にのみ依存すると、唯心論者若しくは主観的観念論者は推論するのである。この唯心論的観念論的帰結に対抗して我々の自然科学はより普遍的な事實を見出だし、そこに絶対なる真理を求めようとした。私の信ずる処によれば、自然科学は必らずしも唯物論を“假定する”ものではない。只その結果が偶々唯物論的見解と一致するように導かれるに過ぎないのである。(物質に関する部分に於ては之は殆んど疑ないが、心理に関してはまだその自然科学的研究が十分に発達していないから、この断案をそこまで拈げることには確実性を欠いている。) それ故に、ともかくも自然科学の出発点に於ては常に一種のディレンマを含んでいることを免がれない。我々がいかにしてこれから脱却することができるであろうかと云うことは、我々に取って重要な問題でなければならない。

自然科学の立場から見れば唯物論も唯心論も共に先験的独断論である。我々はその中間の道を取って、出来得るだけの経験に基づき、依って漸近的に究極に進むことを心がけるより外はない。厳確に観念論的に追究するならば、すべての経験も亦信拠すべき普遍性をもち得ないかも知れない。併しながら事実の上に於て或る程度までの普遍的客観性が補足せられるならば、我々はそれで満足すべきである、何等かの手段によってこの程度の客観性を捉えた上で、我々は自然科学の特殊の方法によって漸次之を高めることができるからである。そして最後に於

て究極的普遍性への到達を十分に望見し得るところの位置にまで我々自身を導くことができるのである。

我々はこの意味に於て<sup>ま</sup>先ず最初に与えられた<sup>も</sup>感覺的若しくは知覚的經驗を分析しなければならない。そしてそれがどこまで普遍的客観性をもっているかを究明しなくてはならない。エルンスト・マッハ(Ernst Mach)は感覺を分析して、心理的要素と物理的要素とを区別し、彼の觀念論的立場から<sup>これら</sup>之等の要素の結合によって世界があらわれることを説いている<sup>1)</sup>。外部から我々の感官に作用するところのものが物理的であり、我々が感官を通じてその刺戟を感ずるのは<sup>ないし</sup>生理的乃至心理的現象に属すること云うまでもない。そして我々の感覺的經驗がすべてこの生理的及び心理的過程を経べきことも亦事實である。我々はこのに恐らく物理的及び生理的過程の普遍的であることを仮定することができるであろうけれども、併し<sup>これ</sup>之に反して心理的過程に至りてはそれが果して一定の生理的状态と一義的に結合せられ得るかどうかは既に述べた通り未だ十分に確實にせられてはいないと云はねばなるまい。勿論、<sup>もちろん</sup>心理現象を自然科学的に取り扱おうとする限りに於ては、かような一義的關係が<sup>なんら</sup>何等かの形に於て成立すると考えられねばなるまい。<sup>ただしか</sup>只併しその場合にもこの關係は極めて複雑である。例えば我々が皮膚によって暖冷の感覺を受取る如き際に、それが単に現在の環境によるばかりでなく、それ以前の有様にも關係をもつべきことは普通<sup>もっと</sup>に經驗する處である。尤もかような場合には既に生理的にも多少の相違が存在し、それが心理的に影響すると解せられるであろうし、又同様に個人的に感覺心理を著しく異にする事實に対しても、やはり<sup>これ</sup>之を或る程度までは生理的構造の相違に歸せられるであろう。併し<sup>しか</sup>ともかくも<sup>これら</sup>之等の心理を通じてあらわれる限りに於ては、外界の物理的状态が<sup>しか</sup>一々異なって知覚せられるのは確かである。我々がここに主観的觀念論者に従って外界に於ける普遍性を全く捨て去るか、又は上に説明した通りに<sup>これ</sup>之を仮定して感覺の相違を個々の生理的状态若しくは心理的作用に歸着せしめるかによって、二様の方向が決定されるのであり、自然科学が後者に於て出発点を求めねばならないことは明

<sup>1)</sup>E. Mach, *Die Analyse der Empfindungen und das Verhältnis der Physischen zum Psychischen*. (1. Aufl., 1885. 9. Aufl., 1922).

らかである。

それ故に我々は外界の普遍的関係を常に生理的及び心理的の或る普遍的基準状態に於て判断しなければならない。通常**感覚の錯誤**と称えられるものは、生理的又は心理的状态がこの普遍的基準から外れている場合にあらわれるものであって、感覚自身としてはそれが決して**錯誤**ではなく、却<sup>かえ</sup>って当然なる変化を示しているわけである。只<sup>ただ</sup>自然科学的経験として外界の普遍的関係を求めようとする目的のためにはこの感覚の**錯誤**をどこまでも避けねばならないことは云うまでもない。そしてこの意味に於ては自然科学的経験の普遍性は生理的及び心理的状态の普遍的基準に依存している。

## 2. 感覚よりの離脱

我々が外界に於ける現象を経験するに当って感覚によらねばならないと云うことは、最も能<sup>よ</sup>く古代の物理学の発達の有様に於てあらわれている。物理学が力、音響、熱、光などを論ずる分科に分たれているのは、それぞれ筋覚、聴覚、触覚、視覚に感ぜられる現象が先ず各独立に考究せられたためであることは明瞭である。ところがここに我々は寧ろ一つの驚くべき結果を見ることができる。なぜなら個々の経験が感覚によってなされているにも拘らず、我々が到達せるどんな物理学的法則に於てもそこにはもはや**感覚的要素**が全くその姿を潜めているからである。例えば我々がニュートンの万有引力の法則を述べて、“二つの質点の間にはたらく引力は各<sup>おのおの</sup>の質点の質量の相乗積に比例し、その間の距離の二乗に逆比例する”と云う場合に、どこに**感覚的要素**が残っているであろうか。ここで引力の大きさはもはや我々の筋力と比較して測らるべきものでなく、運動の法則に従って質点の加速度によって定義せらるべきところのものである。質量も亦同様に力学的に定義せられるのであるし、加速度とか距離とかは空間及び時間的計量によって客観的に決定せられるものと見ることができる。このようにして我々の物理学に於てはすべての**感覚的要素**を取り去ることによって、その普遍的客観性を完全に獲得しようとしているのである。物体の暖かさとか光の色とかは、少なくとも最初は触覚及び視覚によって決定するより外はないが、併し<sup>しか</sup>今日の物理学に於て

暖かさを云いあらわすべき温度なる概念は純粹に熱力学的に定義せられ、色は光の振動数によって置き換えられていることは一般に知られているであろう。感覺的經驗から出発して、併<sup>しか</sup>して全く感覺を離脱した普遍的關係に到達しようとするのが我々の目的に外ならない。それは一つの迷論とも見られようが、併<sup>しか</sup>し現に上述の通りに我々の物理学は之<sup>これ</sup>を成就しているのである。

何故にこれが可能であるかを私がここにより多く説明する必要は恐らくないであろう。我々は先<sup>ま</sup>ず外界の個々の状態に対して感覺をもつて之<sup>これ</sup>に接觸する。次に同種の感覺内容を互いに比較することによって、之<sup>これ</sup>に対立すべき關係を外界に於て類推することができる。かようにして求められた關係自身が普遍的に成立することを我々が種々の思惟的判断によって確め得たならば、それは即ち感覺から離脱せられた客觀的事実でなければならない。この事情を顧るならば、我々の感覺の役目は単に外界の個々の状態間を連携する媒助者の如きものであって、この連携が一度確立された上ではもはや必ずしもそこに關与することを要しないのである。

物理学の發達が漸次この感覺からの離脱を完全に成し遂げてゆくことについては、プランクがその“物理学的世界形像の單一性”なる論文<sup>1)</sup>に於て能く説明している。エネルギー原理の如きも、最初は“利用し得る仕事を無から獲得することは不可能である”と云うような事実で云いあらわされていた。この場合には感覺はその儘<sup>まま</sup>の形ではここにあらわれてはいないけれども、併<sup>しか</sup>し人間の筋力に應ずる仕事(労作)が考えられている点で、等しく人間的要素を帯びている。之<sup>これ</sup>に反して今日では我々はエネルギー原理を次の言葉で述べるのが最も適當とせられている：

“外部に対して絶縁された物体体系の全エネルギーは体系内部に起るどんな過程によつても大いさを増減することのできないような一つの量である。”

之<sup>これ</sup>は極めて抽象的の表現であるが、併<sup>しか</sup>しかような特殊の量<sup>おのおの</sup>が各の体系に歸せられると云う認識のなかにエネルギー原理の特質が存しているのであって、そこにはもはや永久機關の不可能と云うような人間能力への關係が跡を絶っている点

<sup>1)</sup>M. Planck 前引用。

で、全く普遍的であることができるのである。第二種永久機関なるものの不可能性から出発した熱力学の第二主則も亦同様であって、既に第1節に述べたところの、非可逆的過程に対するボルツマンの解釈が見出だされた後に、それはやはり人間的能力から独立に云いあらわされるようになったのであった。物理学がかようにして個々の感覚からばかりでなく、抑も一般に人間性なるものからも離脱してその客観的普遍性を確立するに至ることは我々に取って根本的に重要な意味をもっている。

### 3. 経験の様式

感覚的事実が一つの経験として述べられる場合には常に一定の思惟範疇によって一定の様式に組み立てられていることは、直観に対する哲学的考察によって明らかにせられた処である。即ち我々はどんな経験にしても、それが**空間及び時間形式**のなかに於ける対象の配置移動及び変化を規定するものとして見ることができる。只<sup>ただこれら</sup>之等の形式觀念や<sup>これ</sup>之に内属する対象觀念の如きものが直接に感覚から喚び起された直観そのものに内在する限りに於ては、尚<sup>な</sup>お著しく主観的色彩を帯びているのであって、我々が<sup>これら</sup>之等を同時に物理学的経験をあらわす様式に於て考える場合には、<sup>これら</sup>之等の觀念も亦思惟作用によって客観化されねばならないのであった。云い換えれば、空間及び時間形式や<sup>これ</sup>之に内属する対象なるものが全く客観的概念として規定せられた場合に、その間の関係をあらわす経験を始めて物理学的のものとして見<sup>みな</sup>做すことができるのである。なぜなら、<sup>これ</sup>之によって我々は経験を感覚から離脱せしめることが可能となるからである。

上述の通り哲学的には空間及び時間形式を思惟範疇として説明するけれども、併<sup>しか</sup>しかような範疇といえども感覚的経験なしには得られないことは確かである。空間は物体の形態を触覚又は視覚によって判断することに基づいて知覚せられるのであるし、時間は或る規則的变化の繰返しによって意識せられることは云うまでもない。我々はかような空間及び時間觀念を経験内容と結びつけ、依って<sup>これら</sup>之等を客観的に決定することができる。物理学的概念としての空間及び時間はかようなものでなければならない。経験の一般様式はそれ故に、この客観的空間及び

時間のなかに於て或る対象が固定持続するか又はその配置や性質を変化するかによって云いあらわされる。前者は対象の恒存性をあらわし、後者は更にこの対象の変化が他の何等かの変化と常に一義的に連結せられることを究明することによって通常**因果関係**としてあらわされている。

経験に対して最も重要な性質は、一定の環境が与えられる限りに於ては経験は常に同一に繰り返されねばならないと云うことである。之は実に自然科学に於ける一つの信條と云ってもよいのであって、之なしには自然科学は成立しないと云わねばならない。哲学的には之をやはり思惟範疇として解している。即ち思惟そのものが一つの普通的事実でなければならない（**普遍の原理**）と同時に、すべての事象は因果的に即ち一定の順序で必然的に継起すべきものである（**必然的継起の原理**）と仮定せられるのである。我々は之によって科学的に一定の法則を立てることができるのであり、且つこの法則の云いあらわす処に従って過去を推定し若しくは将来を予言することが可能になるのである。

普遍の原理及び必然的継起の原理は先験的思惟範疇として考えられているが、自然科学的に見ればそれらはやはり一種の仮定であって、我々が先ずこの仮定のもとに自然科学を発展せしめた上でそれがすべての経験を云いあらわすことができるとするならば、その時始めて経験的に証明されなければならない。即ちここにも思惟の循環過程があるのであるが、自然科学の究極への漸近性が是を許容すべきであろう。

#### 4. 必然的継起の原理（因果律）

事象が一定の順序で必然的に継起すると云うことは我々の普通に経験する処ではあるが、観念論的に云えばこの原理があつて始めて経験が普遍的に成立するのである。水を火の上で暖めれば漸次熱くなって遂には沸騰すると云うことは我々の日常見る処である。けれどもこの経験が単に主観に依存するものであるとするならば、たとえ水の暖まってゆくのを或る場合に目撃したとしても、それきりで眼を外らしてしまえばそれが果してその後沸騰するに至るかどうかは必らずしも保証されないわけである。併し必然的継起の原理を仮定すれば、嘗て一度その沸

騰を経験したことによって現在はそれを目撃しないでもやはりこの経験を信拠することが可能となるのである。かような意味に於てすべての自然科学的経験に客観性を帰するためこの原理が必要とせられるのである。

この必然的継起の原理は通常我々の有する因果観念と結びつけて**因果律**若しくは**因果の原理**と呼ばれている。併し因果観念は由来哲学上の理由律に基づいて寧ろ我々の意志現象などに於て起ったものであるから、之を純粹の物理現象の場合に当て嵌めると、そこに少々本質的でない要素を含むかの観があつて屢々之によって誤解を生じないとも限らない<sup>1)</sup>。そればかりでなく一つの物理的現象に対してその原因を求めようとする思想は、現実的にあらわれる事象に対して何等かの現実以上の隠れた理由を帰せしめ、之によって或る“証明”を行おうとする目的をもって起ったのである。我々人間の行為の如き場合にはその原因を具体的には見ることのできない意志に帰して之を探ることも当然の要求となるかも知れないが、自然科学の目的はかような“証明”に存するものでないことは次節に述べる通りである。我々は只事象がいかに関連して生起するかを知ればよいのである。無理に事象の原因を尋ねる必要はない。そしてこれだけの事情を能く心得た上で、この必然的継起の原理を習慣に従つて因果律と名づけるならば、それは一向に差支えはないのである。

<sup>1)</sup>石原純，自然科学概論（1929），79，377頁等参照。



## 第二章 物理学の方法

### 5. 経験の記述

物理学的経験のどんなものであるかを私は前章で説明したが、我々が物質現象に対して獲得した種々の経験を一般的に記述することによって物理学は成立するのである。すべての自然科学が対象の分類及び記述によって始まることは一般に認められている処であるが、物理学では物質的対象の個性に関する事柄を取り扱わないで、却ってその一般に通ずる共通性質を論ずることを最初からの目的としていたために、ここでは分類なる階段を欠いていたのであった。同じく物質を研究する場合に於ても、特にその個性的相異を知ろうとした化学に於ては物質の分類が先ず必要とせられたことは云うまでもないし、又物理学の範囲に於ても謂わゆる物質性<sup>1)</sup>を論ずる部分では固体、液体、気体の如き分類が存していた。そして之等<sup>これら</sup>の特性を記述することによってそれぞれの研究が始められたのである。併し単に経験的事実を記述するだけでは我々の思惟に於て満足されない傾向が最初から潜んでいたことが確かである。前節に述べたとおり我々は常に論理の理由律に基づいて、“何故”と問い、そして之<sup>これ</sup>に答えることによって思惟的に一段の高処に上り得ることを考えるのである。之<sup>これ</sup>が行為に対する意志的原因を追究する処の因果観念と結びついて、すべての事象に対してもその原因が存しなければならぬと思考するに至った。ギリシヤ時代に発達した自然哲学は物質現象に対するかような隠れた原因を探求して依って“自然の意志”を知ろうとすることに終始したものである。重い物体が地面に向って落下し、軽い物体が浮揚するのは何故であるかと云う疑問に対して、物体はそれぞれ固有の自然的位置を有するものであると解釈し、重い物体を下方に、軽い物体を上方に位置せしめることを自然の意志であるとしたのであった。又之<sup>これ</sup>とは多少の趣を異にしているとは云うものの、ニュートンの時代に於て力を運動（加速度）の原因であるとして云いあらわした

<sup>1)</sup>之は通常“物性”と云う言葉であらわされているが、恐らく物質の物理的性質のうちで単に原始的に我々に知られていたものを指すのであって、今日のように物理的研究が進んだ上では、共に合理的に使用せらるべき言葉ではないであろう。

ことも、因果観念への帰属に関しては同様の傾向のあらわれであるとしなければならぬ。そして之これに伴って久しい間、物理学の本質は**事実の記述**にあるのではなくて、現象の起因に関する“説明”に存しなければならぬとする主張が行われていた。

古代の自然哲学が種々の形而上学的思想を根拠として、自然これを之に当て嵌めようとしたのはまだよいとした処で、更に之これを超えて我々の形而上学的要請を楯に取って却かえって自然に命令しようとするような態度を持したことは固もとより誤っていなければならない。之これがために屢々しばしば自然の真実の姿を逸してしまつて、それを歪めた形に於てのみ頭腦のなかに描こうとした観が生じた。その最も甚だしい例は、コペルニクス (Kopernikus) の地動説が宗教的見地から反対せられ、その主張及び研究に対して暴虐なる圧迫さえも加えられた歴史的事実に見ることができる。我々はもっと謙虚に自然の事実を求めねばならぬと云う叫びが当時の自然研究者の間に漸ようやく起された。ガリレイは種々の運動を研究するに当って、“何故”之これが起されるかと問う代りに、“いかに”起るかを知らうとすることをもつて、彼の研究の本旨となした。彼が落下運動の法則や惰性の法則を正しく見出だすことができたのは、実験によって之これを検証することを知っていたからであると云つてもよいであろう。

この**実証論的傾向**はその後漸次物理学に於て勢力を得た。ニュートンの有名な標語 “Hypotheses non fingo” (我は仮説を作らない) も亦この意味をあらわしたものであった。十九世紀の後半に至つてキルヒホッフ (Kirchhoff) 及びマツハの如き学者は特に之これを強調し、物理学の本質は経験的事実の記述にのみあつて、決して我々の経験し得ないところの因果関係を含む説明や仮説にあるのではないことを論じた。キルヒホッフの力学講義<sup>1)</sup>の序文には、

“従来力学は力の学として定義せられ、そして力は運動を生ずる原因として考えられているが、併し力しかとか原因とか云うものは実際に経験せられるものではない。力学はかような概念を離れ、単に経験せられる処の運動を完全に、しかも簡単に記述することをその本分とする”

<sup>1)</sup>G. Kirchhoff, *Vorlesungen über mathematische Physik, I. Mechanik*(1887).

と書かれている。そしてこの意味で実際に力の概念を全く用いることなしに力学を構成しようとする企図はヘルツによりて実行された<sup>1)</sup>。

物理学が直接に経験し得ない概念を含むことの当否については尚<sup>な</sup>お後に別に述べようと思うが<sup>2)</sup>、併し<sup>しか</sup>それが事象の原因を説明するものでなくて、単に経験を記述すべきものであると云うことだけに関しては、実証論者の説く処は正しい。マッハは“因果性と説明”なる論文<sup>3)</sup>の中で次のように云っている：

“我々が或る原因を示すときに、我々は単に一つの結合関係、一つの事実を云いあらわすに過ぎない。即ち我々は記述するのである。‘質量の牽引’と云うならば、この表現は事実的なものよりも何等かそれ以上を含んでいるかのように見えるかも知れない。けれども我々がそれ以上に附加しようとするところのものは確かに無駄であり、無用である。我々が相互の加速度を  $\varphi = k \frac{(m + m_1)}{r^2}$  と置かならば、この式は上の言葉よりも遥かに精確に事実を記述し、且つ同時に各<sup>か</sup>の無<sup>おのおの</sup>用な虚偽の附加物を除去する。”<sup>4)</sup>

## 6. 概念の数量化

経験を精確に云いあらわすがためには、<sup>これ</sup>之に含まれる概念を数量的に規定してその間の関係を数理的に示すことの必要であるのは云うまでもない。暖かさの程度を性質的に差別するよりも、<sup>これ</sup>之を温度なる数量によってあらわすことの方がいかに比較を精確にし且つ簡便にするかを我々は能く知っている。この場合に用いられた“精確”と云う言葉の意味のうちには、主観的要素を取り去って純粹に客観的な関係として云いあらわされることをも含んでいるのに注意せねばならない。更にこの数量的表現によっては、上に引用したマッハの言葉に述べられている通りに、事実記述以外に<sup>や</sup>や<sup>や</sup>もすれば附加されるであろうところの無用な観念を取り除くこともできる。即ち概念の数量化と、その間の関係の数理的表現とは我々の目的に対して最も有効な方法でなければならない。自然科学のうちで精密

<sup>1)</sup>H.Hertz, *Die Prinzipien der Mechanik*(1894).

<sup>2)</sup>第 10 節参照

<sup>3)</sup>E. Mach, *Kausalität und Erklärung*[*Die Prinzipien der Wärmelehre* (4.Aufl., 1923),p.432]

<sup>4)</sup>説明と記述との相違については更に第 12 節“推論(類推)”の項を参照。

科学と称せられるものはこの方法による処のものであって、物理学は実にその最も代表的なものである。

我々が感覚常識によってつくるところの概念は一般に具象的ではあるけれども、<sup>これ</sup>之に反して純粹に客觀的に且つ<sup>か</sup>数量的に定義せられるところのものは著しく**抽象性**を帯びていることは明らかである。空間とか時間とかの概念は我々が日常生活に於て実際に物指で物体の大きさを測ったり、遠方の山を眺め天空の月や星を仰視し、汽車で旅行して途中の変化を経験したり、又昼と夜、夏と冬の循環を繰り返して年齢の加わることを体験し、過去の歴史を回顧し、未来の予想を描くなどの場合に、いかに直接にすべての人の脳裡に浮ぶことであろう。だが、物理学であらわされるところの空間及び時間はもはやそう云う具象的な概念ではない。或る任意の他の数量的概念の変化がこれ等に関係するものとして云いあらわされねばならなかったところの独立変数である。空間はその三次元性に相応して三つの互いに独立な座標変数によって、又時間はその一次元性に相応して単に一つの独立変数によって完全に代表せられる。そこにはもはや或る個人によって知覚意識せられる空間及び時間觀念の片影すらも形式的に全く消去せられてしまっていること<sup>もちろん</sup>勿論である。

更にアインシュタインの相対性理論に於て、空間及び時間概念が遥かにそれ以上我々の常識を超越したものにまで発展せしめられたことも周知の事実である。それ以前に於て空間座標及び時間は独立変数の形に於てすべての物理的法則のなかに入っていたが、それらは全く他の物理的数量とは形式的に関係しているだけであって、因果的には少しも関係しないのであった。常識的に云えば、<sup>ちょうど</sup>丁度それは水を或る容器に入れたのと同様な関係であって、水の形体は容器の形式によって決定せられるとは云っても、併し<sup>しか</sup>容器は物理的に水に対して何等の作用をも及ぼさないと見られるのである。空間座標及び時間がその値を変えることによってそのなか<sup>しか</sup>に起る物理現象の過程が決定せられはするが、併し空間及び時間はこの過程を物理的に左右する何等の権利をも附与されてはいなかった。ところが一般相対性理論では既に空間及び時間から構成せられる四次元連続体が物理的

性質を所有して居り、その種々の可能的な変化が万有引力の場をあらわしているものであって、<sup>したが</sup>従って物体の配置及び運動は空間及び時間の特殊の有様と関連し、<sup>これ</sup>之によってアインシュタインの有名な宇宙論的考察<sup>1)</sup>の如きものをも結果せしめるに至ったのである。尚お最近の研究が示す通りに電磁気力の場をも空間時間連続体の幾何学的性質によって云いあらわすことができたならば、<sup>そもそ</sup>抑も我々の空間及び時間なる概念がすべての物理的状态を規定し得るようになるであろう。之等<sup>これら</sup>の概念がいかに具象的に我々の知覚にあらわれるものと相違しているかは実に驚くべき程である。

又**物体概念**に関してもそれが我々の物理学的世界形像に取り入れられる限りに於て、全く抽象的であることは明らかである。常識的には物体は感覚の素因として認められている。視覚とか触覚とかに感ずる点に於て我々の周囲に存在する多くの物体、壁や床や机や地面や空気やその他のものは最も具象的である。<sup>しか</sup>併しながら我々は物理学に於て決して物体をかような感覚綜合の具象体として取り扱うのではない。物理学の方法は<sup>これら</sup>之等の感覚を分析抽象して、<sup>い</sup>謂わゆる外界に於ける一定の対応作用を決定し、<sup>これ</sup>之が帰せらるべき一定の対象物を見出だして、物体観念をそこに再び構成せしめるのである。例えば或る質量や運動量がそれに与えらるべきことを力学的作用によって知ることができたならば、我々は<sup>これら</sup>之等の量的概念によって力学的に物体なるものを定義することができる。更に物体の可能的な運動がミンコウスキー (Minkowski) の<sup>い</sup>謂わゆる“世界線”によって記述せられるとするならば、世界線を云いあらわす数式のなかに我々は物体に関する自然法則を見ることができる。エッディントン (Eddington) はその物質理論に於て、

$$G_{\mu}^{\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu}^{\nu}G$$

なる一種の世界テンソル<sup>2)</sup>が恒存の性質を有することを説明した。即ち或る閉じられた空間範囲のなかで、この量が変化するためには、必らず境界面を通してそ

1) “相対性理論” の項参照。

2) 第 17 節参照。符号の意味は次の通りである。

$$g_{\mu}^{\nu} = \sum_{\sigma} g_{\mu\sigma}g^{\nu\sigma},$$

れが流出又は流入しなければならない。彼は<sup>これ</sup>之によってこの量をもって物体を代表せしめた。少なくとも物体の力学的形像、即ち質量や運動量やその外の力学的概念が関与する限りに於ての物体なるものがこれによって定義せられるのである。我々はそれがいかに常識的概念と相隔たっているかを見ることができであろう。

上のエディントンの式は<sup>もと</sup>固より物体の力学的形像をあらわすだけの目的に対しても必ずしも満足的のものではない。現に彼自身もその後<sup>これ</sup>之を更に一般化する必要を説いて居るし、又これと異なった理論的見地も可能である。アインシュタインの最近の理論に於ては、物体の万有引力の場の外に電磁気力の場をも同一の世界テンソルによって云いあらわすことに成功したが、この場合に上式に相当すべき恒存量が見出だされるならば、それは物体を力学的並びに電磁気学的に代表せしめることができるであろう。

ともかくも物理学的に我々は今日までかような方法によって進んで来た。最初我々が物体の最も簡単な力学的形像として質点なる概念を導き入れてから、我々は具象的物体の種々の性質を考慮して、その概念を漸次に拡張して行った。この過程のなかに剛体や弾性体やその外の種々の形像を見出だし、又その構成的要素としての分子や原子や電子の如き概念が導き入れられ、そして最後にこの終極的要素をそれ自身の範囲に於ける“場”の或るテンソル表現によって決定せしめるに至ったのである。我々は尚お恐らく<sup>な</sup>之<sup>これ</sup>に今日の問題となっている処の量子的関係を融合せしめ、更に電子又は陽子の如き要素的単位の存在の事実をも同時に

ここに  $g^{\mu\nu}$  は  $g = |g_{\mu\nu}|$  なるデテルミナントに於ける  $g_{\mu\nu}$  の小デテルミナントである。同様に、

$$G_{\mu}^{\nu} = \sum_{\sigma} g^{\nu\sigma} G_{\mu\sigma},$$

$$G = \sum_{\mu,\nu} g^{\mu\nu} G_{\mu\nu}$$

であって、但し、

$$G_{\mu\nu} = \sum_{\sigma,\alpha} \{\mu\sigma, \alpha\} \{\alpha\nu, \sigma\} - \sum_{\sigma,\alpha} \{\mu\nu, \alpha\} \{\alpha\sigma, \sigma\} + \sum_{\sigma} \frac{\partial}{\partial x_{\nu}} \{\mu\sigma, \sigma\} - \sum_{\sigma} \frac{\partial}{\partial x_{\sigma}} \{\mu\nu, \sigma\},$$

$$\{\mu\nu, \sigma\} = \frac{1}{2} \sum_{\lambda} g^{\sigma\lambda} \left( \frac{\partial g_{\mu\lambda}}{\partial x_{\nu}} + \frac{\partial g_{\nu\lambda}}{\partial x_{\mu}} - \frac{\partial g_{\mu\nu}}{\partial x_{\lambda}} \right)$$

と置かれる。

結果せしめることができたならば、ここ始めて満足に値いする物体の形像をもつことができたでもあろう。だが、それがいかに抽象的なものとして現ずるかは重ねて云う必要もない。

熱や光などの概念に対しても全く同様である。我々は之等<sup>これら</sup>を分析して数量化することによって始めて物理学の異常な発展を見るに至ったことを顧るならば、数理的方法のいかに卓越したものであるかを十分に透察することができる。これなしには物理学は全く存在しなかったと同様であり、又之<sup>これ</sup>を理解しないではその一端に触れることさえも困難であるであらう。

## 7. 観察及び実験

一般に自然科学が経験に根拠を置かねばならない限りに於て先ず自然を観察することの大切な<sup>もちろん</sup>のは勿論である。併しながら自然に起る現象はその儘<sup>しか</sup>では通常極めて複雑である。単に物体が落下する運動を観察するとしても、そこには普通に考えられる通りに主として重力がはたらいているとせられるけれども、若し之<sup>も</sup>を精細に調べるならば実に多種の関係がこれと連関しているのを見出だすであらう。一口に重力と云ってもそれは場処によって値を異にするものであり、又その一部分は地球の万有引力に帰せられるが、他の部分としては地球自転のための遠心力が之<sup>これ</sup>に加わっていると見なければならぬ。更に重力以外に最も重要な力として空気の抵抗を考えなければならぬし、その大いさは第一に物体の形状に関係し、第二に空気の密度<sup>したが</sup>、従って気圧とか温度とか湿度などにも関し、又その流動状態にも関係するであらう。時としては電磁気力や光圧などもあらわれぬとは限らないから、我々は決して物体の落下を具象的には単なる力学の問題として制限するわけにはゆかない。けれども我々が之<sup>これ</sup>を物理学的に考究するに当っては複雑な関係を一々分析して簡単な部分に局限し、その各<sup>おのおの</sup>について事実を明らかにしてゆかなければならぬ。即ちこの意味に於て適当な人為的方法によって実際の現象のうちから我々の観察目的に應ずるものだけを取り出そうとするのが**実験**である。

それ故にすべての実験に先だって概念の分析抽象が行われなければならぬ。我々は適当な概念の抽象を試みさえすれば、普遍の原理及び必然的継起の原理に

したが従って、概念間の数量的関係が一定の法則として結果し得ることを予想することができる。例えば上述の落下運動の場合に重力と加速度とが一定の関係を保つが如きはそれである。併し実際にこの運動があらわれる模様は、第一に**始原条件**、即ち最初に於て物体にどんな方向にどんな速度が与えられるかと云うことに関係し、第二に**環境条件**、即ち一定の重力以外に他の力がはたらかないかどうかに関係するのである。従って之等の条件を出来るだけ厳確に我々の望む処に一致させることができるが、実験に取っての必要な手段であること云うまでもない。古来多くの実験学者が之に対していかに多大の苦心を重ねて来たか、更に現在並びに将来に於て一層多くの困難が我々を待っているであろうことは想像するに余りがある。それにも拘らず我々が既に今日の光輝に充ちた物理学体系を有し得たことは、理論学者の優れた解析方法に待たねばならなかったと共に、亦之等の実験家の精細な努力によることをも忘れてはならない。

天体の諸現象や地球上大規模に行われる物理現象にあっては、之を人為的に左右して或る変化だけを起さしめるようなことが到底不可能である。それ故之等は実験的対象となるわけにゆかないのであって、我々は単に自然的の状態を**観測**し、或る場合には別に実験室内で現じ得る処のものと比較すると云うような方法を講ずるより外はない。しかも通常環境条件の著しく相違することを許さねばならない点に於てそれらの研究は甚だ困難にせられている。

## 8. 測定

物理学的概念が数的に定義せられた上では同一種類の量を互いに比較することができる。この数量比較に関する実際的方法としては、そのうちの或る個的対象に相当するものを任意に大いさの基準即ち**単位量**として選び、その他のものをこれと単位量との比即ち数値によって云いあらわすのが便利である。或る実験的方法によってこの数値を決定するのが測定と名づけられる手続である。

我々が測定を行う場合に、出来るだけ精密な値を得るように望むのは勿論であるけれども、実際にはその測定手段の如何に応じて常に精密度に一定の限界が存



在する。測定すべき対象に帰せられると仮定せられる一定の値に対して実測値が示す差異は**測定の誤差**と称すべきものであって、この誤差が仮定的の正しい値に比べて小さな割合をもっている程、測定の**精密度**が大きいとするのである。

測定誤差の生ずる理由は次の二つに差別せられる。第一は測定の際に対象が受けるところの環境条件若しくは始原条件がそこに仮定せらるべきものと多少の相違を起すためである。例えば温度の一定なることが仮定せられたとしても、実際には必ずしも厳確にこの条件が満足せられないと云うような場合である。実験的装置に対して十分に周到な用意を施しても、種々の偶然の事情によって望まれた条件が完全に確保されないと云うことは、すべての実験測定に於て止むを得ない事柄である。第二には我々の感覺的判断に或る限界が存在し、且つ感覺そのものが個性的に幾分の相違をもつ結果として誤差を生ずることが免がれない。既に述べた通り我々は物理学に於て感覺的要素を全く除去することを理想としているけれども、併し経験しかをその考察の出発点としている限り、そこに感覺的判断あずの与かることを拒否するわけにゆかない。それ故我々はすべての感覺的判断のうちで最も普遍的客観的であると考えられるものを選んで、各おのおのの物理学的測定これを之に依らしめる方法を講じている。即ち今日では殆んどすべての物理的变化を適当な器械的装置によって常に或る度盛りの上に於ける指針の移動に帰着せしめ、その指針の位置を視覚によって決定することによって測定を行うのである。只この場合に於ても指針や度盛りの画線は既に或る有限の幅をもっているし、又二つの画線の間いの位置を判断するのは謂わゆる目分量による外はないのであり、副尺を用い又はその他の手段を取るにしても目分量の程度を少しく進めたと云うに過ぎないから、結局或る程度の精密さでしか判断せられないのは明らかである。又たとえ指針の位置を非常な精密さで決定したとしても、この指針の移動を起さしめるまでに経過すべき機械的装置ままそれ自身が摩擦やその他の事由によって測定対象たる物理的变化をその儘完全に指針に伝えることも不可能であるから、ここにも亦測定の誤差が伴わねばならない。

之等これらの理由によって測定の誤差は絶対に避けることのできないものであるが、

そのうちで測定器械の構造上の不備によっていつも一定の方向への偏倚<sup>へんい</sup>を生ずるとか、又は測定に従事する個人の感覚上の習性によって同様の誤りを結果すると云うような場合には、之<sup>これ</sup>を**系統的誤差**としてその他の偶然的素因によるところのものと差別することができる。若し前者を適当な注意の下に取り除くならば、我々は単に**偶然誤差**を含んだ測定値の一組を常に見出だすであろう。併し<sup>しか</sup>かような測定の結果からしてどんな値が果して真実に我々の求むべき値であるかを再び判断しなければならないのである。一つの仮定的な正しい値が存在するとは云っても、それが何であるかは我々に全く知られていないのであって、何等かの方法によって之<sup>これ</sup>を推量することが必要なのである。

この問題の解決は謂<sup>い</sup>わゆる**誤差論**<sup>1)</sup>に於て種々の方法で試みられた。測定値の算術平均を取って一つの解答とすることは最も普通に行われている処であるが、この場合の算術平均なるものがどんな意味をもつかは更に精細に論ぜられなければならない。ガウス (Gauss) はすべての誤差が等しい偶然さをもって起ることを仮定し、数学上の確度論を応用して、最も確からしい値の前後に誤差がいかに分布せらるべきかを論じ、一定の誤差法則なるものを見出だした。一組の測定値に対する誤差の程度を決定するために一般に行われている**最小二乗法**はこの誤差法則に基づいて形作られたものである。

この外に尚<sup>な</sup>お種々の誤差法則も可能である。測定者が相当の注意をもって出来るだけ誤差を小さくしようと努力する限り、誤差の小なることがその大なるよりもより確らしさを帰せられるとも考えられるであろう。又種々の測定が異なる事情のもとに、即ち測定者並びに測定器械を異にして存在する場合には、之<sup>これら</sup>等に対してそれぞれ**重さ** (信用値) を附して対象の最も確らしい値の計算に取り入れなければならない。之<sup>これら</sup>等は誤差論の論ずる処であるが、ともかくも適当な誤差法則によって決定せられた実験的数量値はその誤差の範囲内に於て最も近似的な値として許されねばならない。

## 9. 帰納及び一般化 (法則)

1) “計算法及び計算機械” の項参照。

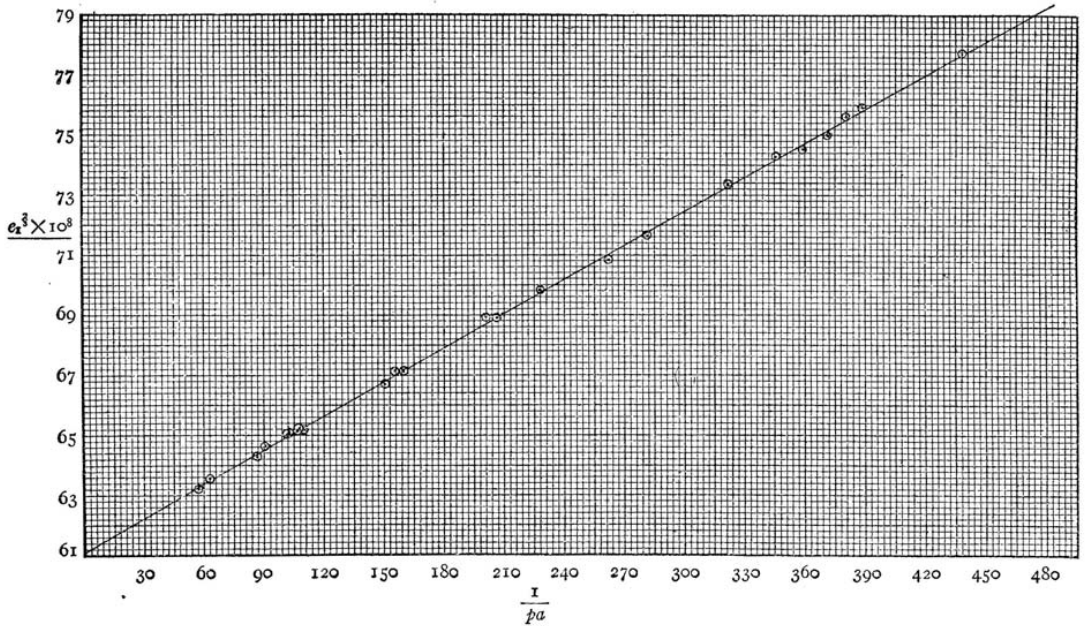
経験的事実の与える処のものはその最初に於ては個々の断片的な観察記録に過ぎない。即ち何時いかなる場処でかような事実が見られたと云うことでしかないのである。我々は之等<sup>これら</sup>の個々の経験を積み重ねて、適當の推論形式<sup>したが</sup>に従ってそこに共通な関係を見出すことによって始めて普遍的な命題に到達することができる。かような命題を法則と称し、之<sup>これ</sup>に達する方法を帰納と名づける。

帰納によって得られた法則は等しく経験的事実であり、個々の経験を換言したものに外ならないけれども、併し<sup>しか</sup>具象的経験とは著しく異なっていることに注意しなければならない。即ちそれは一般に特定の概念のみを抽象してその間の関係を云いあらわしたものであって、之<sup>これ</sup>が経験せられた環境<sup>いかな</sup>の如何には（特に環境との関係を云いあらわす場合の外は）関しないし、又多くの他の概念とも独立にせられている。経験として与えられた素材はその儘<sup>まま</sup>では自然科学的の意味をもっていないのに反し、法則として帰納せられたところのものが科学的内容を構成するのは、上述の概念抽象を経て普遍化せられるためである。単なる具象的観察でなくて、実験によって得られた事実は、実験が最初から概念関係を明らかにする目的で行われる点で、既に科学的の意味を具えていることが普通である。

物理学で取り扱うように、概念が数量化せられて、之<sup>これ</sup>に連続的な変化が考えられる場合には、第一に他の数量的概念との関係を或る間隔を置いた個々の値について実験的に求めることはできるけれども、之<sup>これ</sup>を実験によって連続的に蔽い尽くすことのできないのが常である。しかも第二には尚<sup>な</sup>お個々の値はそれぞれ偶然的の誤差を含んであらわれている。かような結果から一般的の関係を見出すためには、単なる帰納では不十分であること云うまでもない。即ち我々は実験の空隙を充たすと同時に、個々の測定値に含まれる誤差をも取り除くことによって始めて完全な法則に到達することができる。この手続を私はここに一般化と名づけよう。

一つの例を取るならば、第1図はミリカン (Millikan) の電気素量  $e$  の測定<sup>1)</sup>に於ける結果の一つであるが、それは能く知られている通りに、非常に小さな、帯電せる油滴（直径凡そ数千分の一センチメートル）を空気中で重力のもとに落下させ、又電気力で引き上げて一定距離を通過する時間を測ったものである。 $e_1$  は

<sup>1)</sup>R.A. Millikan, *The Electron*(2. Ed., 1924)



第 1 図

この油滴の運動がストークス (Stokes) の法則<sup>1)</sup>に従うと仮定して計算した油滴の電気量  $e_n$  を推測せられた電気素量数  $n$  で除したものであり,  $a$  は油滴の半径,  $p$  は大気の圧力 (水銀気圧計の高さ) である。第 1 図に於て  $e_1^{2/3}$  と  $\frac{1}{pa}$  との関係が個々の観測点として示されているが, 若し我々が単に之等<sup>も</sup>の点を正直に結び付ける線<sup>これら</sup>を引いたなら, それは甚だ複雑なジグザグの線となるであろう。併し<sup>しか</sup>この場合に空気の分子運動を考慮に取ってストークスの法則を改めるならば, 容易に,

$$e = \frac{e_1}{\left(1 + A\frac{\ell}{a}\right)^{\frac{3}{2}}}$$

なる関係の存在すべきことを見出すことができる<sup>2)</sup>。ここに,  $A$  は未知の常数であり,  $\ell$  は空気分子の平均自由径路の長さである。後者は圧力  $p$  に逆比例するから, 他の常数を用いて上の式を,

$$e^{\frac{2}{3}} \left(1 + \frac{b}{pa}\right) = e_1^{\frac{2}{3}}$$

1) “流体力学” の項参照。

2) R.A. Millikan, 前引用, p.101。

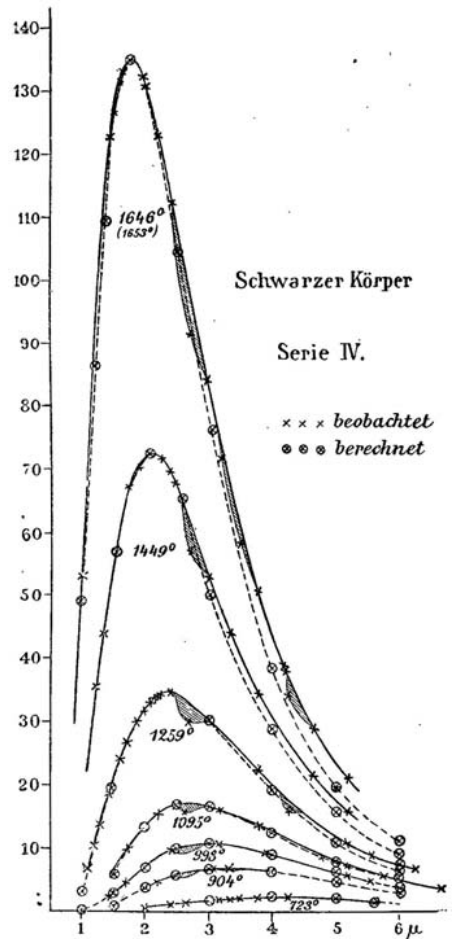
と書き換えることができる。そしてこの理論的結果によれば、 $e_1^{2/3}$  と  $\frac{1}{pa}$  とは互いに一次的に関係するから、第1図に於ける観測点は一つの直線上に横たわらなければならないことが要請せられるのであって、<sup>おのおの</sup>各の観測点に対する多少の誤差を許容するならば、それが實際上第1図に於て満足せられているのを見ることができる。ここに上に述べた個々の経験の一般化が遂げられていること、並びにそれが単なる帰納以外に何等かの理論によって指導せられなければならないことが理解されるのである。

私はここにもう一つの例として、黒体の熱輻射に対する実験的結果がいかにしてプランクの法則に導くことができたかを示そう。当時（1900年）熱輻射の法則としてはそれぞれ異なった理論的見地から導き出されたウィーン (Wien) 及びレイレー (Rayleigh) の式が知られていた。波長を  $\lambda$ 、絶対温度を  $T$  とすれば、輻射エネルギー  $E$  は、二つの常数  $C$  及び  $c$  を用いて、それぞれ次の如くあらわされるとするものである：

$$E = C\lambda^{-5}e^{-\frac{c}{\lambda T}}, \quad (\text{ウィーン})$$

$$E = C\lambda^{-4}Te^{-\frac{c}{\lambda T}}, \quad (\text{レイレー})$$

これ<sup>これ</sup>に対する検証は先ず<sup>ま</sup>ルンマー (Lummer) 及びプリングスハイム (Pringsheim) の共同実験によって行われた。第2図はこの実験の一つの結果をウィーンの式と比較したものである。これは種々の温度に於てエネルギー（縦座標）と波長（横座標）との関係を示した図であって、 $\times$  は

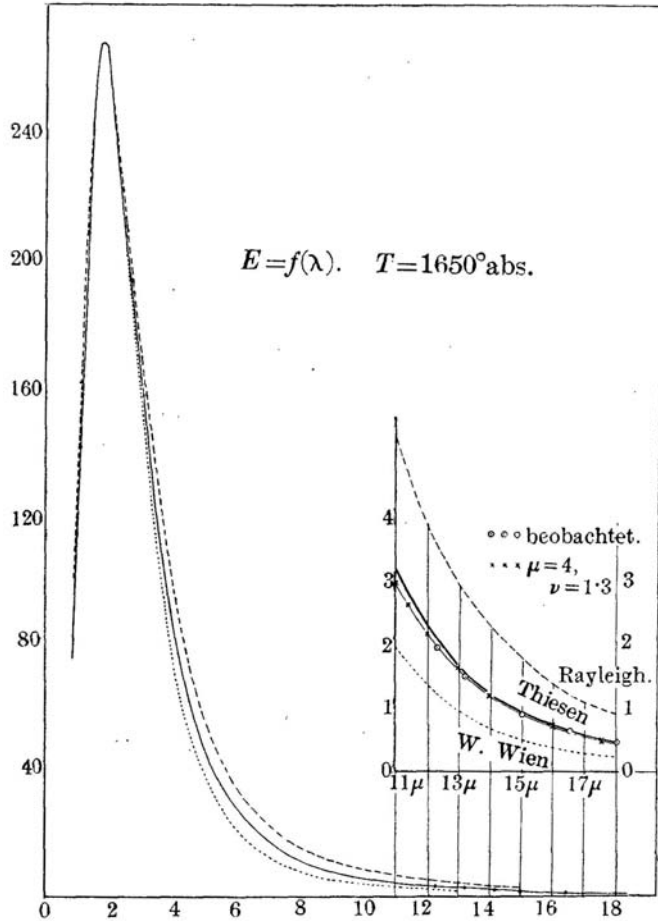


第2図

観測点,  $\otimes$  は上式に適当な常数の値を入れて計算した点である。<sup>1)</sup> この比較によ

<sup>1)</sup> 陰影を附した部分では、物質が特殊の波長を吸収するための影響によって観測点が特に外づれていると考えられるから、

ると、波長が増すに従い、規則的に理論と観測との差異が生ずるようになる。それ故特に長い波長に対して注意深く検証する目的で実験が行われた。第3図はこの結果を示したものである。



第3図

ここで更に上の両式の外に、どんな式が最も能く観測と一致するかの<sup>よ</sup>考察が行われた。即ち上式を一般化した形：

$$E = CT^{5-\mu} \lambda^{-\mu} e^{-\frac{c}{\lambda T} \nu}$$

を仮定すると、

$\mu = 5, \nu = 1$  は ウィーンの式 (————)

$\mu = 4, \nu = 1$  は レイレーの式 (.....)

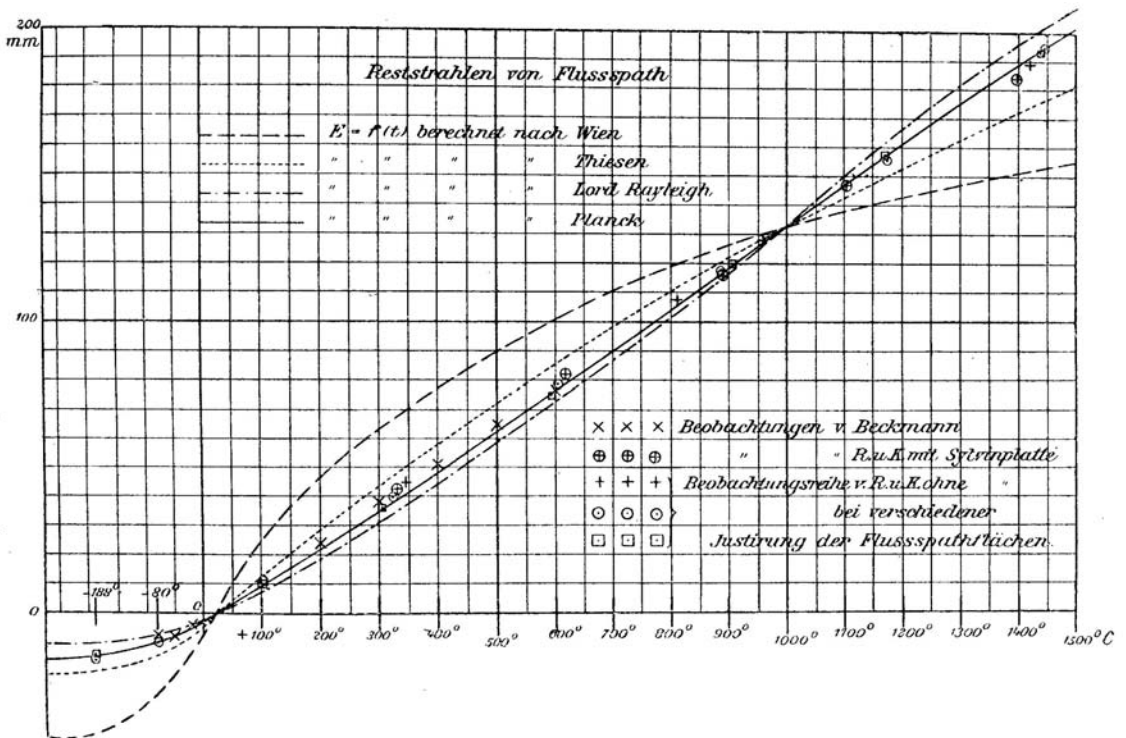
推測上これを取り除いた曲線が引かれているのである。

を与えるほかに、最も能く実験と一致するようにティーゼン (Thiesen) の仮定した式 (—) は  $\mu = 4.5, \nu = 1$  によって与えられる。依ってルンマー及びプリングスハイムは更に波長の大きな部分 (図の右方に示されたもの) に対して  $\mu$  及び  $\nu$  のどんな値がより良く観測 (⊙⊙⊙) をあらわすかを考究して、 $\mu = 4, \nu = 1.3$  (×××) を見出だした。

これら之等の事実を考慮して、プランクは始めて量子仮説を導き入れて、恐らく実験との一致を更に完全ならしめ得るであろうと推測せられる式：

$$E = C \frac{\lambda^{-5}}{e^{\frac{c}{\lambda T}} - 1}$$

を見出だしたのであった。ここに挙げられた種々の公式の間の相違は波長の大きいほど著しくなるから、ルンマー及びプリングスハイムの用いた範囲 ( $1\mu - 18\mu$ ) よりも更に大きな波長の場合に明瞭な判断が望まれる。この目的で、ルーベンス (Rubens) 及びクルバウム (Kurlbaum) は螢石、岩塩、水晶などの残留線



第 4 図

(Reststrahlen) を利用して検証を行った。第4図は螢石の残留線 ( $\lambda = 24.0\mu$ ) に対するエネルギー  $E$  と温度  $t$  (摂氏) との関係を示したものである。× ⊕ + ⊙ ⊠ 等は種々の観測の結果を記したものであり、<sup>これ</sup>之に対して上述の種々の公式から計算された値が曲線によって描かれている。我々はそこにプランクの式がいか<sup>よ</sup>に能く観測と一致するかを見ることができる。そして<sup>これら</sup>之等の結果から始めてこの式を経験の一般化として帰結することが許されるわけである。

## 10. 高次概念化

個々の経験的事実が帰納及び一般化によって普遍的の法則に到達し得ることを私は前節に述べたが、かような法則は一般に多くの概念間の相互関係を云いあらわすものであると共に、そこに含まれた概念自身は相互的に<sup>これ</sup>之によって始めて完全に定義せられるものであることに注意しなければならない。物体の質量の定義の如きは古くは単に“物質の量”として云いあらわされていたのであって、それが何等か自明的のもののようにいかにも曖昧に解されていた外には、精密科学的には<sup>これ</sup>之を一つの定義として見ることはできないのであった。ニュートンはその力学の最初に次の定義を述べた：“物質の量はその密度と体積とを乗じて測られる。物質の量を私は以下に於て体量又は質量と云う名であらわそう。且つそれは<sup>か</sup>どんな物体についてもその重さで知られる。質量が重さに比例することを私は、後に示す通りに、甚だ精密に行われた振子実験によって見出した。”

この定義も亦、密度について何も云われない限りは一定の意味をもたない<sup>も</sup>。若し通常<sup>も</sup>の物理書に記されるように、密度を単位体積の質量として解するならば、上のニュートンの定義はこれを再び云い換えたものでしかない。又実際にニュートン自身の考えていた通りに、<sup>これ</sup>之を物体の含む原子の数に比例するものであるとしたならば、そこには更に原子の何ものであるかが定義せられればならなかったであろう。マッハが論じたように<sup>1)</sup>、質量の定義は物体の力学的関係即ちニュートンの与えた運動法則によって始めて完全に云いあらわされるのであって、それ以前に質量を精確にあらわすわけにはゆかない。

<sup>1)</sup>E. Mach, *Die Mechanik* (6. Aufl., 1908), p.265.



時間や空間や、又物体の定義に関しても、それらが正当に物理学的に与えられるためには、我々が通常之等これらの観念を常識的感覚的に解しているものに比べていかに抽象的でなければならないかを私は既に第6節に於て詳述した。温度の定義は今日では決して暖かさの感覚によって与えられるのではなく、熱力学的に、若しくは分子運動の平均エネルギーに比例する一つの量として与えられるのであり、光の色は眼に感ずるところのそれではなくて光波の振動数によって決定せられるのである。物理学がかようにして漸次感覚的要素を棄て去って普通的なものに導かれることは既に説いた処であるが、之これはそこに含まれる諸概念が我々の直接感覚に訴えて常識的に得られたものから脱却して常に間接に他の概念との間の物理的關係によってのみ定義せられるに至ることを結果する。私は之これを物理学の**高次概念化**と名づけようと思う。

物理学の理論的發展は更にその高次概念化をより高い程度に進ましめる傾向をもっている。我々は屢々一つしばしばの概念から純粹に数学的關係によって新らしい他の概念を導き出し、後者をを用いることによって法則の数理的表現を遙かに簡単ならしめ得ることを経験する。そしてこの簡単な形式に於て我々は寧ろ法則の根本的の意味を解し、そこに物理学的世界形像を眺めようとするのであるが、この場合に概念は益々高次的（超越的）に持ち来されていることは当然である。ニュートンが力をもって加速度の作用因であるとしたのも、畢竟は知覚的に判断し得られる運動現象をより高次的な力の観念で思惟的に簡単に云いあらわそうとしたに過ぎない。更に力からポテンシャルの概念を導き出したり、エネルギーの時間的積分としての作用量を導き入れる場合に於ては一層高次的となるのであって、一方で之等これらが力学の根本原理をあらわすのに役立つと共に、他方では初学者に取って之等これらの概念を頭脳に入れることがいつも困難とされるようになるのである。

経験を記述することが物理学の本務であるとする上からは、直接経験から遠ざかった之等これらの高次的概念を全く用いないで法則を云いあらわすと云う方法も確かに存在の理由をもち得るであろう。既に述べた通り、ヘルツが力の概念を導き入れずに力学の体系を構成しようと企てたことは、この意味に於て興味ある且つ重

要な試みであった。彼は即ち惰性法則とガウスの最小束縛の原理とを相結合したものを彼の力学の唯一の基礎法則として選んだ：

“自由質量は直線的に一様に動く。之等が相互に何等かの連結をもつならば、ガウスの原理に相応して、出来るだけ僅かこの運動から外ずれる。その現実的な運動は他の思考し得るどんな運動よりも自由運動に近い。”

之がヘルツの基礎法則であって、彼は之に従う運動を最も直線的な軌道 (geradeste Bahn) にあると名づけた。一つの質量の運動が惰性法則に従うような直線的等速的でない場合に、これに力がはたらくと云う代りに、他の質量と剛体的連結にあると云いあらわした。即ち力の概念を質量連結の概念で置き換えたのである。

実際に質量連結の観念は力の概念よりも我々の頭脳に直接に描き出すことができるに相違ない。尤も力に対しても、我々が筋肉によって感ずるような接触力であるならば、知覚的にこれを想察することも容易になるが、謂わゆる、遠隔作用としてあらわれるものに至っては純粹に思惟的に考えるより外はないのであった。そしてヘルツの時代に在っては、力の場の理論が電磁気力に対しては殆んど完成されていたとは云え、その他の力をやはり一般に遠隔作用として許容していたのであるから、ヘルツが上述の企図を試みたことも決して無理ではなかった。只併しヘルツの力学は必ずしもその当初の目的に対しては成功するわけにゆかなかつた。なぜなら、ヘルツは一つの質量の運動に関してこれと連結せられる他の質量が得られない場合に、そこに或る“陰在的質量”(verborgene Masse) が“陰在的運動”にあることを仮定しなければならなかつたからである。

この場合に質量とか運動とかの概念は、たとえ他の観測し得られる物体のそれらと同等であるとしても、併し“陰在的”なる概念は既に我々の感覚を超えた処のものであり、それが思惟的の高次概念と幾ばくも異なるものでないばかりか、かような陰在的質量の實在の問題に関しては認識論的に困難を伴わないわけにゆかない。

それ故にマッハの評したように、ヘルツの力学は遂に“一つの美しいプログ

ラム”として終らねばならなかった。現に我々の物理学理論は多くの高次的概念を取り入れて益々深く進んでいる。誰もが今日に於て恐らく力や、ポテンシャルや、エネルギーや、更に重要な作用量の概念なしに力学を再び構成しようとするものがあるであろうか。

## 11. 理論化（仮説及び原理）

物理学が経験的事実の記述を目的とするとは云っても、それが単に何々の事実の列挙に過ぎないならば科学的体系をつくると云うことはできない。我々は帰納及び一般化によって普遍的な法則を見出だし、ここに始めて自然科学としての内容を具えることができるのである。ところが、既に第9節に於て論じた通り、一般化を正当に行うためには理論の指導を必要としなければならないのであって、後者を欠いては我々はそれ以前に歩みを止めるより外はなかったであろう。物理学がその理論に到達することは、多くの個々の法則を更に一つの体系のもとに纏めて、之等を演繹することのできる共通の、<sup>したが</sup>従って簡単な論理的根拠を見出すことに帰着せられる。即ち我々はこの理論によって思惟的に一つの階段を攀じ登ることができるのであって、<sup>したが</sup>従ってそこでは経験が高次概念化せられて記述せられるわけである。しかもこの高処に立って我々は始めて現象の全般を整序して見下すことができるのであり、ここに明確な物理学的世界形像を獲得することができるのである。それ故に物理学の理論化はその最も本質的な、最も重要な部分であって、古来多くの物理学者の偉大な業績がここに存するの亦当然の次第である。

一つの理論を形づくるためには、その出発点として何等かの前提的命題を要する。我々は之を根拠として、それから或る論理的過程を経てその帰結を演繹するのであるから、<sup>これ</sup>之に対しては数学の適用が是非とも必要となるわけであって、理論物理学がいかに密接に数学と関係するかは<sup>これ</sup>之によって明瞭にせられる。多くの場合に於ては既知の数学的演算を利用することによって事柄が足りることは<sup>もちろん</sup>勿論であるが、併し<sup>しか</sup>屢々物理学上の問題を解くために新しい数学が<sup>しばしば</sup>要求せられ、従来知られなかった新たな数学的展開が行われるに至った例も決して<sup>すくな</sup>尠くはない。

理論の前提的命題は一般に**仮説**と名づけられるものである。我々はこれから出発して理論的に或る経験的事実を帰結せしめることを目的とするのであるが、仮説は常に一般的であるだけにその外に多くの帰結をも包容して居り、<sup>これら</sup>之等がすべて事実によって説明せられない限りは俄かにそれが真であるかどうかを断ずるわけにゆかない。若し我々が十分に慎重な用意を怠って、単に或る一面的な論理と事実とにのみ依頼して理論的に遡ったであろうならば、我々は全く事実と隔離した独断に踏み入らないとは保証することができない。事実の“説明”を主目的としていた古代の自然哲学に於ては、ともかくも或る理窟付けを試みることに急いで甚だしくこの弊に陥ったのであった。それ故に近代の自覚した自然科学者たちがかような弊害から脱しようとして濫りな仮説を設けることを寧ろ戒めたのは至当の所為であるに相違なかった。だが、併し我々は<sup>しか</sup>之がために<sup>これ</sup>仮説を嫌ひ、<sup>も</sup>若しくは虞れてはならない。一切の仮説と理論となしには物理学は何の眼覚ましい進歩も飛躍も遂げられなかったであろう。

現に“私は仮説をつくらない”と云うことを一つの標語としたニュートンでさえも、光の微粒子仮説を称えてその諸現象を説明しようとしたのは有名な事柄である。原子や電子や更に最近の量子に関する仮説の如きものを悉く取り去ってしまったならば、今世紀の物理学は全く抹殺し尽されてしまうと云ってよいであろう。正当な意味での仮説の効能がいかにか絶大であるかを<sup>これ</sup>之によって悟ることができる。

仮説と理論とはそれが十分に経験的事実によって検証せられた上では、帰納によって得られた法則と同等の価値をもつようになるのであって、経験に対する本質的關係に於て異なるものではないが、<sup>ただ</sup>只最初に仮説として導き入れられる場合に於ては尚<sup>な</sup>お多くの検証を必要とする要素を含むと云う点で法則と差別せられるのである。概して法則の方は現象の或る限定せられた範囲に関して経験的事実を云いあらわすのに反し、仮説は更に<sup>これら</sup>之等を統一した、より広い範囲を含み、<sup>したが</sup>従って多くの未知の帰結をも包蔵している有様に置かれる。例えば万有引力の法則とか熱力学の法則とかはそれぞれそこであらわそうとせられた特定の現象だけに関

するものであるが、分子及び原子の仮説の如きは最初は単に物質の化学的変化を記述し説明するために設けられたに拘わらず、実際は独り化学的性質ばかりでなく、殆んどすべての物理的性質にも関しななければならないものであった。それ故間もなく熱を分子の運動として論ずることの思想が導き入れられ、それが気体の運動学的理論に於て多大の成功を得るに至って、始めて確実な基礎を据えることができたのである。併しそれでも尚おオストワルド (Ostwald) の如き理論化学者は分子及び原子仮説をもって単に之等の事実を証明するための便宜的な想定に過ぎないと論じたのは、彼自身の主張したエネルギー論 (Energetik) の立場から見て当然であったとは云え、仮説に対する周到厳密な検証の必要について一般の注意を惹き起さしめた点に於て考慮すべき事柄である。今日に於ては、その後のブラウン運動の研究や、結晶体原子に於ける X 線干渉の実験的事実や、その他種々の現象に於て分子及び原子の实在はもはや疑いのない事実としてすべての物理学者及び化学者によって承認せられるに至った。そして更に原子内部の電子的構造の理論が異常な発展を遂げるようにまで進んだことは周知の事実である。

ともかくも併し仮説は常に或る程度まで経験に先だつて、若しくは経験を超越して導き入れられるものであるから、その論拠を或る先験的要請に待つことも止むを得ない次第である。この点に関しては亦同様に理論の根拠として用いられる原理に於ても全く同様である。一般に原理と称せられているものも事実をあらわす上からは法則と同等の関係にあるわけであるが、我々は通常後者よりも前者に対して何等かの根本的の意味を歸して、その理由によって原理と云う名称を選んでいるようである。そうすればこの根本的の意味とは何であるかを先ず追究しなければならぬ。私の考える処によれば、それはやはり一種の先験的要請を含んでいると云うことに尽きるであろう。例えば物質恒存の原理とか、エネルギー恒存の原理とか云うものにあつては明らかに之を見ることができる。

物質恒存の思想は恐らく必然的継起の原理によって物質の持続的存在を思惟することに基ついて起つたものであつて、通常“無から有を生じない”と云う言葉であらわされている。併しこれだけでは単なる形而上学的の命題に過ぎないので

あって、経験的な物理学的原理とするわけにゆかない。我々がかような原理として物理学に引き入れるためには、この場合に恒存すべき対象概念としての物質なるものを明確にしなければならない。そして経験的にかような観念の实在すべきことを示すのが物理学者の仕事なのである。実際に物質の恒存性はその質量の恒存性によって久しく云いあらわされて来たけれども、近時に於て質量概念の変更が理論的に強要されるに至り、物質なる概念に対してどんな数量的概念を置き換えるのが最も適切であるかは新たに論ぜられなければならなくなった。既に第6節に於て述べたところのエッディントンの式の如きは<sup>これ</sup>之に対する力学的の一つの解釈なのである。そこで私が言い及ぼしたように、<sup>も</sup>若し我々が完全な“場の理論”から物質を構成する単元要素の存在を帰結し得たでもあろうならば、その上では我々はかような単元要素の数の恒存によって物質恒存の原理を云いあらわすことができるであろう。

エネルギー恒存に対しても亦何等の費償なしに機械的の仕事が得られないと云う先験的要請がその根拠となったのであつたが、仕事とかエネルギーとかの観念が漸次に明瞭にせられ、又一般的に拡張せられて今日に至ったのである。その外アインシュタインの相対性理論の重要な論拠とせられた運動の相対性の如きも一つ<sup>これ</sup>の先験的要請として知られていたものであるが、<sup>これ</sup>之によって実際に相対性理論が立てられるに至って始めて経験的に可能であることが証明せられ、<sup>か</sup>且つその明確な内容が与えられるようになったのである。

これ等の事情を顧みると、先験的に原理として導き入れられたものも物理学的には一種の仮説と見ても<sup>さしつか</sup>差支えないのであって、それらが経験との一致を明らかにせられた上で始めて確実の原理としての資格を得るに至るのである。それ故物理学の理論に於て法則とか仮説とか原理とかの差別は単にそれらの起原に属する意味の相違の上から我々が異なった称呼を用いると云うに過ぎない。

## 12. 推論（類推）

理論によって我々は直接経験からして一つの論理的階段を<sup>よ</sup>攀じ登って或る高処に達すべきことを私は前節に説いた。この過程を実際に行うに<sup>ま</sup>当っては先ず理論

の前提となるべき仮説をつくり、若しくはその他の種々の論拠を見出さなくてはならない。既に前提が与えられてそれから帰結を演繹するためには通常の論理的方法が応用されればよいのであるが、どんな前提が要望せられるような帰結をもつであろうかを<sup>あらかじ</sup>予め想定するためには、そこに論理的道程を欠くところの推論が必要とせられねばならない。物理学の理論そのものは全く演繹的論理によって、即ち数学に於けると同等の形式に於て成立するのであるが、それにも<sup>かか</sup>拘わらず物理学的研究が数学的のそれと趣を異にするのはこの推論なるものの必要である点に存する。

推論と云う言葉を私はここで、厳正な論理を用いることなしに単にその結果を予想しながら理性的に推断すると云う意味に解釈する。かような推論に対しては<sup>もと</sup>固より一定の形式はない。それは<sup>おのおの</sup>各の理論的研究者の想察に属するものであって、<sup>たまたま</sup>実験学者の事実発見と同様に、偶々それが成功することもあり、また失敗に帰する場合も多いのである。プランクが熱輻射の理論を立てようとしたときに、それ以前に知られていたウィーン (Wien) の極大エネルギーに対する波長移動の法則や、実験的結果などから推断して、謂わゆるエネルギー量子の仮説を導入したことは一つの極めて大胆なる推論であったが、そして当時は従来の力学原理から演繹せられたエネルギー等分配の法則を理論的に肯定しなければならぬと主張したジーンズ (Jeans) 等の激しい反駁をも<sup>かか</sup>受けたに拘わらず、それが更に精細なルーベンス (Rubens) 及びクルバウム (Kurlbaum) の実験や、パーシェン (Paschen) の実験によって完全に確証せられたことは、寧ろ偶然の成功と云わなければならない。法則の発見の場合に於ても同様の推論を必要とする例は沢山にある。ニュートンが万有引力の法則を確立するためには、<sup>ま</sup>先ず物体相互の間の引力が距離の二乗に逆比例することを推定し、<sup>これ</sup>之によって地球に対する月の加速度を計算し、月の運動の観測と比較してその結果の一致するのを確かめ、更に惑星運動の観測から帰納せられたケプレル (Kepler) の法則を上<sup>ま</sup>の仮定から演繹することによって諸天体の間に成立することを帰結し得たのであった。

かようにして推論の形式は必ずしも一定しないので、個々の場合にそれぞれ

異なった方法を用いなければならないけれども、<sup>しばしば</sup>屢々多くの理論に於てあらわれるものとして我々は**類推**を挙げることができる。<sup>これ</sup>之は論理的に根拠づけられた類同律に基づいているからである。即ち、

“二つの関係が同一の構造を有するならば、両者のすべての論理的性質は恒等的である”

と云うことは経験的に真であることが認められている。したがって或る物理的現象に対しても、他の既知の現象に於て同様の体係を見出だすならば、前者を<sup>これ</sup>之に類推して理論づけることができるわけである。例えば導体内部に於ける電気の流動を通常の流れの運動に類推して或る程度まで理論的帰結を導き出すと云うような場合である。実際には電気に陽及び陰の二種が存在するために、シムマア (Symmer) の二種流体説や、フランクリン (Franklin) の単一流体説がそれぞれ異なった仮定として導き入れられたが、<sup>いず</sup>何れにしても当時知られていた静電気現象や簡単な電流現象を説明するに役立った。又ウィルヘルム・ウェーベル (Willhelm Weber) は電流の力学的作用を説明しようとするに当って導体内を運動する電氣的粒子を仮定したが、<sup>これ</sup>之は後の電子論に於ても継承せられて、そこには気体の運動学的理論が適用せられるに至った。電気力及び磁気力に対して近接作用の理論がファラデー及びマクスウェルによって発展せられた際には、力の場の概念が連続的流体又は弾性体内部に於ける力学的状態に類推されて形づくられたのであって、<sup>これ</sup>之がために電磁気力の場としての空間に一種の物質的媒質の存在が仮定せられ、同様に光の波動を力学的に解釈しようとして仮定せられたエーテルも亦<sup>これ</sup>之に外ならないと論ぜられたのは周知の専実であろう。

<sup>これら</sup>之等の例で見られる通りに、類推は最も有力な推論形式の一つであることは疑もないけれども、物理学が単なる説明を目的とするものでなくて、どこまでも事実を記述することに本来の使命を有する以上、我々は更に類推せられた関係がどの点まで事実的に成立するかを考究することが認識論的により重要な問題となるのである。電気流体の仮説によって導体に於ける種々の電気現象を説明することも亦物理学理論の一部と<sup>みな</sup>見做されるけれども、<sup>しか</sup>併し我々の物理学の目的はかよ



うな説明にあるのでなくて、却<sup>かえ</sup>って之<sup>これら</sup>等の電気現象の経験によって導体内部に於ける機構を事実に見出だそうとする点になければならない。即ち電気抗体なるものが果してそこに存在するかどうか、若<sup>も</sup>し存在するならばその性質がどんなものであるか、之<sup>これら</sup>等の問題を解決する処に我々の主眼が向けられねばならないのであった。エーテルの問題にしても、之<sup>これ</sup>を仮定することによって電磁気力の場や光の現象を説明すると云うことよりも、却<sup>かえ</sup>って逆<sup>これら</sup>に之<sup>せんめい</sup>等の現象に於ける実験的知識に基づいてエーテルそのものの物理的性質を闡明することが我々の研究の目的になければならない。それ故に一般に類推は理論的研究の一つの手段ではあるけれども、我々は常にもう一步を進めて事実の真相に触れることに努力しなければならない。そしてそこに始めて物理学の認識論的意味を見出だすことができるのである。

### 13. 検証

物理学が理論的發展によって始めてその本領を発揮することのできるのは上來說く処によって既に明らかであろうと思うが、どんな理論が立てられるにしてもそれは結局は事実を記述するのを目的としなければならないのであるから、すべての推論に対して**検証**の必要であることは勿論である。検証なしにはどんな立派な理論もここには遂に何の価値をも有たないであろう。それ故に我々は種々の仮説や理論の検証を行うために常に実験を心がけねばならない。アインシュタインの相対性理論の如きはその理論的構成に於て実に驚くべきものであることは一般に知られているであろうが、それが物理学上の理論として価値のあるのはやはり経験的事実との一致に帰せられなければならない。多くの天文学者が非常な興味をもって、この理論から帰結せられる光線屈曲の事実を検証せんがために、日食観測の機会を待ち、競<sup>これ</sup>って之<sup>も</sup>に従事していることも亦当然であろう。

検証が実験若しくは観測によって行わるべきことは勿論であるが、或る特殊の場合に於ては**理論的検証**の必要とせられることもないわけではない。例えばプランクが量子仮説によって見出だした熱輻射の法則は能<sup>よ</sup>く実験と一致することが証

明されたけれども、併し我々が従来の力学原理を承認し従ってその帰結としてのエネルギー等分配の法則を肯定するならば、当然これと異なった輻射法則（レイレー・ジーンズの法則）に到達しなければならないのであったから、我々は尚お進んで後者の理論の何処に事実との背馳を求めればならないかを理論的に考究する必要があったのである。かような吟味は即ち一種の理論的検証である。又或る場合には概念の抽象や高次化が行われた結果としてそれが現実的対象から離れて理想化せられるために、之に対する関係は現実的には見られないで、従って実験的検証を施すことはできないけれども、併し理想的に許容されるであろうと思惟せられる先験的要請と矛盾しないかどうかを理論的に検証することが望まれることがある。かような手段を一般に**思考実験**と称えている。例えばカルノー (Carnot) が熱力学の第二主則として我々に知られている熱現象の非可逆性を論ずる際に、先ず理想的に完全な熱機関を想像し、之に可逆的輪環過程を行わしめると永久機関不可能の原理に矛盾することを証明して、依って所期の結果に到達しようとしたのは一つの思考実験に外ならない。又ガリレイが惰性法則を演繹するに当って、物体が或る高さを落下したときに得る速度を他の物体に与えて之を斜面に沿うて上らせ、同一の高さまで達すべきことを仮定したのも、現実的には摩擦のために実現せられない点で思考実験に属すると云わなければならない。ガリレイのこの仮定は、物体がそれ自身の重さで高処に持ち上げられないと云う原理に基づいているのであった。アインシュタインが特殊相対性理論に於て、どんな物理現象の空間伝達も光速速度を超えることは不可能であるとする事実を帰結したのも一つの思考実験によるのであった。即ち或る一つの基準座標系に於て超光速速度をもって伝わる現象があったとすれば、之を相対的に動いている他の適当な座標系から観測するとき現象の伝達が時間的に順序を逆にする事となるのであって、かような事柄は因果則に背反すると論ぜられた。

理論的検証は畢竟理論のなかに含まれる種々の関係を明確にするために役立つのであるから、そこに論拠として仮定せられた原理の内容以上のものをあらわすわけにはゆかない。これが實際上成立するかどうかの最後の判断はやはり何等か

の点に於ける経験的事実との一致を求めるより外はないこと云うまでもない。

## 第三章 物理学に於ける基礎概念及び現象形式

### 14. 基礎概念

物理学に於てあらわれる種々の概念は最初には単に性質的に規定せられ若しくは解釈せられて導き入れられることがあっても、その理論の発達と共に是非とも数量的なるものに分析されてゆかなくてはならないこと既に説いた通りである。この場合に諸観念間の関係は当然いずれも数理的關係としてあらわされ、それが法則を与えると共に亦概念の完全な定義としても見做され得るのである。我々はかようにして種々の数学方程式として云いあらわされた原理と法則とを物理学の到る処に見出すのであるが、さてそう云う方程式として連結せられた形式の上からは、ここに含まれた数量的概念のうちでどれがより根本的であり、どれが枝葉的であると言う差別は少しも存しない筈である。若し我々がマッハに従って<sup>これら</sup>1)之等の方程式であらわされるより以外の要素（例えば因果観念の如きもの）を悉く無用の附加物であるとするところの立場を最も厳確に守るならば、諸概念をすべて同等に取り扱うのが当然である<sup>2)</sup>。純粹に理論的抽象的にはそれでよいと思う。併しながら我々は一方で物理学を経験の記述として認容し、そのすべての原理と法則とを実験によって経験的事実と連結せしめなければならない点から見るならば、そこに感覺による直接経験からの形跡を全然無視するわけにゆかないことをも十分に考慮しなくてはならないであろう。理論的には経験乃至人間の要素を全く超越していると思惟せられる純粹数学に於てすらも、尚お相互に演繹し得られるものの一方を公理として他方を定理として名づけることは、やはり直観への或る連関によると見なければならぬ。それ故に我々が物理学に於て同様に**基礎概念**たるべきものとその外のものとのを分つことも亦理由がないわけではないであろう。

さて併し我々が何を基礎概念として取るかと云うことに対しては勿論判然とし

1) 第5節参照。

2) それにしても各の数量に対して事実に対応すべき概念内容を与えなければならぬことは云う迄もない。

た規準をもつわけでもなく、亦そう云う規準を決定する必要もないのであって、<sup>ただ</sup>只習慣又は便宜に従うに過ぎない。私は一方で通常**基本量**と云う名称のもとに取り扱われている時間及び空間の長さ、並びに質量を挙げ、他方に最も根本的基礎的の原理として解せられるもののなかにあらわれる諸概念を特に重要な意味をもつものとして等しく基礎概念のなかに数えたいと思う。後者は基礎原理の理論的発展によりて最も高次的な概念としてあらわれるのに反し、前者はこれと対蹠的に直接経験に対して最も親近な関係に立つものとして選ばれたのである。私はここに更に量のディメンションの理論からして温度及び電気量<sup>1)</sup>の両者を基本量に附加することを適切であると考え。

## 15. ディメンション

法則的關係をあらわす数学的方程式はそのなかに入り込む各<sup>おのおの</sup>の概念が相互にいかに関係するかと云う様式を決定する。それ故適当な数個の概念を選んで基本的なものと仮定するならば、<sup>これら</sup>之等に対してその他のすべての**概念の關係様式**をそれぞれ見出すことができるであろう。かような様式を各<sup>おのおの</sup>の量の**ディメンション**と称する。

物理学に於ける種々の概念をこのように特質づけるために我々がどれだけの独立な基本概念を必要とするかは、<sup>したが</sup>経験的法則に従って考究しなければならない。又どんな量を基本的として選ぶかは全く我々の任意に属するけれども、ここには前節に述べた通りに直接経験への連関を考慮することが便宜であるにちがいない。我々は<sup>ま</sup>先ず第一に経験の形式的輪廓を与えるものとして**時間及び空間**を選ぶ。数学的の言葉で云えば、これ等はいつも現象の記述に際して独立変数として採られるものである。次に対象概念としての物体を代表せしめるために**質量**を選ぶのが普通である。この点に関しては、最初我々が物質的対象を経験するに<sup>ま</sup>当って先ずその力学的關係を数理的に取り扱うことが一般的に行われたことや、そして物体の力学的性質をあらわすものとして質量の考えられたことから見れば当然と思われる次第であって、その後物質の種々の性質をも力学的に解釈しようとする力学

<sup>1)</sup>第 15 節参照。

的世界観の成立する範囲に於ては、時間及び空間の長さとのこの質量との三つの概念をもって基本的のものとなし、その他の量をすべて之等これらに帰属関係せしめてその様式を決定することに意味をもたせることができたのである。只今日に於ては物体を力学的に代表せしめるためにも既に質量が必ずしも適當のものでないと考えられるし<sup>1)</sup>、又実際に物質を力学的にのみ解釈することの不可能であるのも明らかであるから、上述の三者を基本量としてあらわすことは決して合理的とは云われぬ。けれども我々は他方に測定上の便宜をも考慮して、力学的の関係ではやはり質量を探るのが習慣上からも都合がいいかも知れないから、これをしばらくその儘ままにして尚おその他の性質を代表せしむべき量をここに附加すればよいであろう。これがためには次の考察が適當であると私は考える。

物質の構成要素として知られている電子は万有引力と共に電磁気力をも作用する根本性質を有しているのものであって、既にアインシュタインの最近の理論ごとの如きは之等これらの二つの力の場を空間の計量的性質によって云いあらわし、これによって物質の根本理論を形作ろうとしているのである。しばらくかような理論を措くとしても、ともかく之等これらの二つの力の作用によって物質が物理学的に代表せられることは疑われぬ。ところで一方に万有引力の場の源泉が質量によってあらわされると同時に、他方に電磁気力の場の源泉は電氣量として測られるのである。それ故に我々が現在に於て独立の基本量として質量と共に電氣量を仮定することは至当であると思われる。

更に我々が物質の運動学的理論に基づいてこれを多数の顯微鏡的要素（分子又は原子）の集合体系と考える場合に、個々の要素に属する概念の外に、集合体系の統計学的状態に関する概念として我々は温度を定義することができる。しかもこの温度なる概念は直接に感覺に於ける暖かさと対応することも能く知られているから、これをもって上述の集合体系いの謂わゆる巨視的 (macroscopic) 状態に関する一つの基本量として見做すことは適切であろう。

<sup>1)</sup>以前に我々は物体の“重さ”を基本量として取ったが、爾後その代りに、より不変的な量として寧ろ質量を選んだ（第16節参照）。しかし今日の、相対性理論に於ては質量は再び一つの不変量ではなくて、力学的状態（運動）によって変ることが説明せられた。従って更にこれに代るべき不変量としては静質量密度、又は第6節に記した  $G_{\mu}^{\nu} - \frac{1}{2}g_{\mu}^{\nu}G$  の如き世界テンソルを採用するのが至当とせられるであろう。

かようにして我々は上の五つの量を基本量となし、その他の量が基本量に対する関係様式をもってそれぞれの量のディメンションとするのが最も適当であると思われる。時間を  $t$ 、空間の長さを  $l$ 、質量を  $m$ 、電気量を  $e$ 、温度を  $T$  であらわすならば、例えば力  $F$ 、エネルギー  $E$ 、エントロピー  $S$ 、電媒常数  $\varepsilon$  の関係様式即ちディメンション方程式は次の通りになる<sup>1)2)</sup>。

$$F = lt^{-2}m,$$

$$E = l^2t^{-2}m,$$

$$S = l^2t^{-2}mT^{-1},$$

$$\varepsilon = l^{-3}t^2m^{-1}e^2.$$

## 16. 絶対単位系

力学的世界観の成立する範囲に於て通常時間及び空間の長さ、並びに質量の三つが基本量として取られることを私は前節に述べた。能く知られている通りに<sup>よ</sup>これら之等の量の単位としてそれぞれ秒 (sec.)、センチメートル (cm.) 及びグラム (g.) を採用したものを普通に絶対単位系又は C.G.S. 系と呼んでいる。

この絶対単位系なるものは最初ガウス (Gauss) によって導き入れられたのであった。ガウスは<sup>ま</sup>先ず長さ、質量及び加速度を基本単位として用いようとしたが、この場合に力は質量と加速度とによって決定されるので、加速度の単位によってそこに二様の方法が示された。第一に加速度を観測の場処に於ける二様の力によって測るならば、力の単位は単位質量の重さに等しくなる。第二に時間の単位を導き入れて、加速度の単位を通常知られているようにこれと距離の単位と<sup>しか</sup>によって定義するならば、力の単位は単位質量の重さとは異なるようになる。併し前者が観測の場処に関するのに反し、後者は地球上どんな場処に於ても不変的であるために絶対単位系と称られて今日物理学で一般に用いられるようになったのである<sup>3)</sup>。

1) 普通の数量的関係をあらわす方程式と区別するために [ ] なる括弧を附して記すことも多い。例えば  $[F] = [lt^{-2}m]$  のように。

2) この最後の式によって電気量  $e$  の代りに電媒常数  $\varepsilon$  を基本量として取っても差支ない。

3) 電気工学に於てもこれが用いられている。これに反して前者は機械工学などに於て却って実用上の便宜のために多く用

理論的に云えば、絶対単位系も亦必ずしも一義的には決定せられない。例えば、空間体積の単位を単位の長さの三つの稜でつくられた立方体によって定義する代りに、標準気圧のもとに最大密度の状態にある単位質量の水が占める体積として定義することもできる。この場合には空間体積の単位は質量の単位に伴って変わるわけであって、従<sup>したが</sup>って前者のディメンションは通常解せられる通りに長さの三乗に等しいとする代りに、質量のディメンションを有するようになる。之<sup>これ</sup>は我々が密度を単なる数量として取り扱ったためであって、若し単位質量の水の立方体の一辺を長さの単位として選ぶならば、同時に長さは質量の三乗根に等しいディメンションをもつことになるから、そこに少しも矛盾を起さないようにすることができる。

これと同様の例は實際上電気及び磁気に関する諸量の単位を定義する場合にあらわれている。電磁気の根本方程式を、

$$\begin{aligned} \operatorname{rot} \mathbf{H} &= \frac{4\pi}{c} \left( \mathbf{I} + \frac{\partial(\varepsilon \mathbf{E})}{\partial t} \right) \\ \operatorname{rot}(\mathbf{E} - \mathbf{E}^e) &= -\frac{1}{c} \frac{\partial(\mu \mathbf{H})}{\partial t} \end{aligned}$$

の形で云いあらわすと<sup>1)</sup>、左右両側をそれぞれ相乗じたもののディメンションが互いに等しくなければならないから、 $\mathbf{E}$  及び  $\mathbf{H}$  のディメンションの如何に拘らず、 $\frac{c^2}{\varepsilon \mu}$  は速度の二乗と等しいディメンションを有しなければならない。実際に  $\frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}}$  は電磁波動の速度をあらわすことをも我々は知っている。即ちディメンション方程式として、

$$\frac{c}{\sqrt{\varepsilon \mu}} = lt^{-1}$$

を得る。ところでこの左側に含まれた三つの常数  $c$ ,  $\varepsilon$ ,  $\mu$  を基本量  $l$ ,  $t$ ,  $m$  に附加して、総ての電気及び磁気に関する量のディメンションをあらわすことができるが、その間に上式の条件がある外は、 $c$ ,  $\varepsilon$ ,  $\mu$  のディメンションを任意に選ぶ

いられており、**重力単位系**として後者と区別されている（ガウス自身も後に之を用いたことがあった）。只重力単位系では力と質量との単位が共にグラムであらわされる点は混雑を免がれないのであって、質量に対して別の名称を附することにしたならばよかつたのであろう。

<sup>1)</sup>“電気力学”の項参照。ここに  $\mathbf{E}$ ,  $\mathbf{H}$  は電場及び磁場の強さ、 $\mathbf{E}^e$  は外部電気力、 $\mathbf{I}$  は電流密度である。



ことができる。通常用いられている種々の単位は次のディメンション式によって決定されるものである。

$$\begin{aligned} \text{静電単位系} & \quad \varepsilon = 1, \quad c = 1, \quad \mu = \ell^{-2}t^2; \\ \text{電磁単位系} & \quad \mu = 1, \quad c = 1, \quad \varepsilon = \ell^{-2}t^2; \\ \text{ガウス単位系} & \quad \varepsilon = 1, \quad \mu = 1, \quad c = \ell t^{-1} \text{ } ^{1)} \end{aligned}$$

**単位の大いさ**を實際上に決定することに対して種々の困難が存在することも我々は更に考案しなければならない。時間の単位は通常地球自転の時間によって決定されているけれども、その一自転の時間を一日として云いあらわすことは物理学的には決していかなる場合に於ても許容される規約的定義ではない。“現在に於ける”地球の一自転の時間を一日とするならば、それは規約的定義として許容されるであろう。併し我々はかような定義で規定せられた時間の単位を用いながら、再び地球の自転がいつまでも同一の時間に於て起るかどうかを判断しなければならない。之は単に地球自転の現象だけを観測していたのでは不可能であることは明瞭である。それにも拘らず我々がこれを可能にすることのできるのは、そこに物理学の卓越した方法が存在するためであることを注目しなければならない。我々は一度地球の自転から決定した時間の尺度を用いて他の現象を観測し、依って物体の力学的法則を見出だし、再びこれを地球の自転現象に応用して、その運動のエネルギーが潮汐の摩擦のために減ずることによって自転時間を増大すべきことを帰結することができる。又一方では地球が冷却して収縮を起すために自転速度が増すことも考えられるが、ともかくこの両者の効果は常に互いに償殺するわけにはゆかないので、長い年数の間に自転時間の変化すべきことは当然であると思われる。それ故に時間の単位を我々は地球の自転によって決定するとは云うものの、実はその不変的単位は別に理論的に与えられるべきものであって、我々がいつになってもこれを少しの間違もなく再現するためには、安心して地球の自転にのみ頼るわけにはゆかないのである。

<sup>1)</sup>私は前節に於ては電子論を顧慮して  $\varepsilon$  の代りに  $e$  を基本料としてあらわした。磁場は電子の運動によって生ずると解すれば、これから  $\mu$  のディメンションを導き出すことができる。

同様の事情は他の単位に於ても存する。現在長さの単位は国際メートル会議で決定せられた標準物指によって規定せられているけれども<sup>1)</sup>、これも永久に不変であることは保証せられない。それ故理論的に不変なものをもってこれに代えようとして、一定のスペクトル線の波長をもって長さの単位をあらわすことが1864年に始めてフィゾ (Fizeau) によって提議せられた。次いで1894年にマイケルソン (Michelson) はカドミウムの赤、緑、及び青のスペクトル線の波長を用いて国際メートル会議のメートルを測定した<sup>2)</sup>。若しか<sup>も</sup>ような測定の精密度が十分に要望にかなうならば、少なくとも長さの単位に関しては、これを理想的に不変に決定することができるであろう<sup>3)</sup>。そして今日に於ては漸次この方法が考究せられている。

長さの単位とその他の量の単位との間には種々の現象を介して関係づけられる。プランクは次の五つの普遍的常数、即ち万有引力常数 ( $\gamma$ )、光速度常数 ( $c$ )、エントロピー常数 ( $k$ )、プランク作用量子 ( $h$ ) 及び真空の電媒常数 ( $\varepsilon$ ) によって<sup>ちようど</sup>丁度我々が上に数えた五つの基本量が一義的にあらわされることを指摘した。実際に、<sup>これら</sup>之等の常数のディメンション方程式は、

$$\begin{aligned}\gamma &= \ell^3 t^{-2} m^{-1}, \\ c &= \ell t^{-1}, \\ k &= \ell^2 t^{-2} m T^{-1}, \\ h &= \ell^2 t^{-1} m, \\ \varepsilon &= \ell^{-3} t^2 m^{-1} c^2\end{aligned}$$

であるから、<sup>これら おのおの</sup>之等を各の基本量について解けば、

$$\ell = h^{\frac{1}{2}} \gamma^{\frac{1}{2}} c^{-\frac{3}{2}},$$

<sup>1)</sup>之に於ける1メートルは最初地球子午線の長さの四千万分の一に等しいものとして定められたものである。

<sup>2)</sup>科外特別題目、田中館愛橘、メートル法の歴史と現在の問題参照。

<sup>3)</sup>スペクトル線の波長は真空に於て測られなければならないのは勿論であるが、更に相対性理論によればそれは万有引力の場にも関するから、最も厳確にはかような条件をも考慮しなくてはならない。

$$t = h^{\frac{1}{2}} \gamma^{\frac{1}{2}} c^{-\frac{5}{2}},$$

$$m = h^{\frac{1}{2}} \gamma^{-\frac{1}{2}} c^{\frac{1}{2}},$$

$$T = k^{-1} h^{\frac{1}{2}} \gamma^{-\frac{1}{2}} c^{\frac{5}{2}}$$

$$e = \varepsilon^{\frac{1}{2}} h^{\frac{1}{2}} c^{\frac{1}{2}}$$

を得る。<sup>したが</sup>従ってここに挙げた普遍的常数の値をすべて1にするようなものを基本量の単位として選ぶならば、最も自然的な且つ絶対に不変的な一つの単位系を得るであろう。即ちこれを真の意味での絶対単位系として名づけることができるであろうが、<sup>ただ</sup>只實際上に於ては<sup>これら</sup>之等の常数に対する測定の精密度が十分に達せられない限りは実用に供するわけにゆかない。

## 17. 概念の空間的様式

物理学に於ける数量的概念のうちで、ディメンションと数値とだけでは完全に決定されないで、<sup>な</sup>尚おその外に空間的關係を云いあらわさなければならぬもののあることは<sup>よ</sup>能く知られている。例えば速度や力はその大いさの外に<sup>これら</sup>之等が空間的にどんな方向に向くかと云う有様が云われなければならない。一般に数値の外に空間的方向を示すことによって始めて完全に云いあらわされる量を**ベクトル**と名づけ、これに対して単に数値だけで決定せられる量を**スカラー**と名づけている。ところが更に張力の<sup>ごと</sup>如き量は同様に力の一種類ではあるけれども、或る広がり<sup>の</sup>面に働らくものであるから、我々は単位面積にはたらく力の大きさをもってその強さをあらわすと共に、この力がどんな向きの面にどんな方向にはたらくかを云いあらわさなければならない。かような空間的様式を有する量を一般に**テンソル**と名づける。

一つの量の空間的關係を云いあらわすには、或る基準座標系を仮定してこれに対する關係を解析幾何学的に取り扱えばよい。<sup>しか</sup>併し二つ以上のベクトルが与えられたときに<sup>これら</sup>之等相互間の關係を論ずるには必ずしも一定の座標系を借りることを要しないのであって、直接に<sup>これら</sup>之等のベクトル自身によって記述することができる。ベクトルに関するかような数学的運算は特に**ベクトル解析**と云う名

称の下に展開せられた。テンソルに関しても同様の特殊な数学的考察が可能であるけれども、ベクトル程にその必要がなかったので、従来は**テンソル解析**としての特別の展開が存しなかった。ところがアインシュタインの一般相対性理論が成立してからは俄にテンソルの取扱いの必要に強制せられて、これが大いに発展し、今日ではその理論的応用も益々増して来て、ベクトル解析のごときもまさに後者にその位置を奪われてしまおうとする有様にまでなった。

相対性理論では空間の三つの独立座標と時間変数とで形作られた四次元の綜合体、即ちミンコウスキーによって**世界**と称せられたところのものが根本的の意味をもっている。この世界空間には一般にリーマン幾何学に於ける計量的性質が与えられているのであって、そのなかに於ける一つの点の座標を  $x_1, x_2, x_3, x_4$  であるとすれば、これと相隣った点との距離  $ds$  は次の式で定められる：

$$ds^2 = \sum_{\mu, \nu} g_{\mu\nu} dx_{\mu} dx_{\nu}, \quad [\mu, \nu = 1, 2, 3, 4]$$

この式に従って既に空間的距離さえも、テンソルの性質を具えているのである。そしてこの理論の立場に於ては、すべての物理学的観念が同様に世界空間に於けるテンソル量、謂わゆる**世界テンソル**としてのみ定義せられなければならないのである。

この場合にテンソル量としては一般に何等かの空間的様式を有するものが意味せられているのであって、上式に於ける  $g_{\mu\nu}$  のように二つの座標によって決定せられるものを**第二階級のテンソル**と名づけ、 $A_{\mu\nu\sigma}$  [ $\mu, \nu, \sigma = 1, 2, 3, 4$ ] の如き三つの座標に関するものを**第三階級のテンソル**と名づける。この意味では  $dx_{\mu}$  自身の如き、又は  $\frac{\partial \varphi}{\partial x_{\mu}}$  の如き、唯一つの座標に関する量、即ちベクトルは**第一階級のテンソル**と見做すことができ、又全く座標に関しない不変量即ちスカラーは**第零階級のテンソル**として解せられる。ともかくかようにしてどんな物理学上の数理的関係も悉くテンソル解析によって云いあらわされ、しかもこの際に於けるすべての量の空間的様式のなかには実在的の空間と時間とを綜合的に含んでいることは多大の注目に値する処であって、我々がその間に潜んでいる深奥な意味を

探れば探る程、巧妙整齊な関係に対して絶大の驚異を感じないではいられないであろう。

## 18. 空間及び時間概念

物理学的に帰結せられる空間及び時間の性質が知覚的のそれらと著しく異なることについては既に第6節に述べた通りであるが、<sup>これ</sup>之は主として相対性理論の発展に帰着せられるものである。相対性理論以前に於てはカント哲学などが解したように、空間及び時間は経験を記述するための形式であって、<sup>したが</sup>従って経験的事実がこの形式それ自身を左右すると云うことは少しも考えられなかった。たとえ我々が空間や時間を全く客観的に計量することはできるとしても、それらの性質は先験的に確定されるのであって、決して経験がこれに影響することはできないのである。即ち我々は空間や時間をいかにして客観的に測定するかと云う方法だけを経験に求めるに過ぎないのであった。ところが空間の性質を規定する幾何学として古来我々が知っていたユークリッド幾何学の外に、種々の非ユークリッド幾何学が可能であることが数学的に見だされてからは、我々の知覚するところの、<sup>も</sup>若しくは物理学的経験を記述すべき形式としての実在の空間が果していずれの幾何学に従うべきものであるかと云う疑問に対して原理的の困難が横たえられた。我々の直観乃至日常の経験がユークリッド幾何学と一致すると云うことは決して全空間が亦そうでなければならぬと云う結論を一義的に持ち来さない。天文学者は遠方の星の観測からこの問題を解こうと試みたり、又哲学者は何等かの有力な先験的論拠を求めようとしたが、遂にその成功を見ることができなかつた。

他方で物理学に於て絶対空間なる概念が問題となされた<sup>1)</sup>。ニュートンは明瞭にこれを述べているばかりでなく、経験的にもその存在を示し得ると信じていたらしい。実際にガリレイ - ニュートンの力学はその法則が成立すべき座標系を自から限定するのであって、通常それは惰性系と名づけられていた。すべての運動はこれに関して云いあらわされねばならなかつたのであって、その他の任意に運動する座標系<sup>ごと</sup>に対しては、例えばコリオリス力の如き非実在的の力を仮定する必

<sup>1)</sup>石原純，自然科学概論，245頁参照。

要があった。ニュートンは更に有名な水桶の実験によって絶対廻転運動を経験的に証明することのできるのを明らかにし、絶対空間の認識の可能であることを示した。けれどもそれにも拘らず<sup>かかわ</sup>純粹に認識論的に云うならば、すべて空間や運動は相対的にのみ定義せられ得るものであって、絶対空間の概念は単なる思考以上に出ないものであり、マッハの論じた通り、水桶の実験といえども必ずしも空間に於ける絶対廻転を示すものではなく、宇宙間に存する絶大な恒星質量に対する相対的作用の現われに外ならないとも解釈される。そしてかようにしてこの問題も亦未解決の儘<sup>まま</sup>に相対性理論に残されたのであった。

丁度<sup>ちょうど</sup>これと同時にエーテルの問題が提起された。エーテルは一方で光の媒質として久しくその物理的性質について論争せられて来たと共に、他方で亦電磁気作用の媒質としても仮定されねばならなかった。幸にしてマクスウェルの理論は光と電磁的波動との同一であることを証明したので、事柄は<sup>やや</sup>簡単にせられたとは云うものの、併し<sup>しか</sup>エーテルの本質を完全に見究めることはやはり依然として困難に相違なかった。ローレンツ (Lorentz) の電子論に於ては、エーテルは、フレネル (Fresnel) が光学的理論に於て仮定したと同様に、全く不動的な媒質として空間に充満すると考えられた。この“不動的”と云う観念は即ち我々が絶対空間に帰するところのものと同一であって、<sup>したが</sup>従ってかようなエーテルは絶対空間を物理的に代表したものと解するのが至当であると思われる。一般に知られているようにアインシュタインの最初の理論、即ち特殊相対性理論は、このエーテルに対する地球の運動が光の現象に於て全くあらわれないことを証明した有名なマイケルソン (Michelson) - モーレー (Morley) の実験の結果に基づいて立てられたのであった。即ちそこでは物質的なエーテルの存在をも亦絶対空間をも否定して、そして既知の光及び電磁気現象を説明することのできる一つの路を求めたのである。

爾後<sup>じこ</sup>相対性理論が驚くべき発展を遂げたと共に、上述の空間に関する諸問題がいかに満足すべき解決を得たかを知ることは今日に於ける我々の幸福であるとも云ってよいであろう。我々はこの理論によって、全く絶対空間の仮定を取り除いて、どんな任意の座標系に対しても成立し得るところの力学的及び電磁学的法

則を見出だすことができたし、又これと同時に空間の幾何学的性質が一義的に物理的の力の場によって決定せられることを知ることができたのである。数学的にこれら之等の関係が四次元の時間空間綜合体たる“世界”に於けるテンソル解析によってあらわされることは、前節に概叙した通りである。したがってそのなかには単に空間に関する問題ばかりでなく、これと時間との緊密な関係をも含んでいる<sup>1)</sup>。ミンコウスキーが1908年に始めてかような関係を論じて、

“今後空間<sup>そ</sup>夫れ自ら及び時間<sup>そ</sup>夫れ自らは全く陰影のなかに隠れ失われて、独りその両者の或る結合のみが独自性を保つと謂わねばなるまい。”

と述べたことも、今日に至って更に一層深く味われる次第である。

## 19. 現象の連続性（微分法則）

我々が物質現象を論ずるに当って、多くはそれが空間的にも亦時間的にも連続的であり、従<sup>したが</sup>って常に微分関係として云いあらわされることを見ることができる。ガリレイの時代にはまだ完全な数学的微分法が形成せられていなかったけれども、彼は既にこの思想を現象の考察の際に導き入れようとした。微分法がニュートン及びライプニッツ (Leibnitz) によって見出だされてからは、理論物理学がどれ程これを有力な道具として役立てたかは言い尽されない程である。力学を始めとして、流体や弾性体の理論にしても、熱伝導の現象にしても、音や光の波動理論にしても、電磁気の理論にしても、それらの根本法則は殆んどすべて第二次の微分方程式によって云いあらわされることは、既に我々の能<sup>よ</sup>く知っている処である。我々はこの微分方程式を積分することによって有限の時間及び有限の空間範囲に於ける現象を求めることができるのである。このように微分的に現象が連続して起<sup>ひっきょう</sup>ることは、畢竟必然的継起の原理によるものであって、我々はここに因果則の本体を見るべきであろう。

近代に於て物質の原子的構成が考究せられてからは、極めて微小な範囲に対してはもはや物質の連続性が成立しないことが明瞭になったばかりでなく、個々の

<sup>1)</sup> アインシュタインは特殊相対性理論に於て始めて、二つの場処に於ける同時性が絶対的でなく、単に観測者に相対的に成り立つものであることを明らかに論じた。

原子に関するべき光学的現象などに於ては更に新たな量子的不連続性<sup>1)</sup>が見出だされるに至ったけれども、多数の原子の集合体系として見做される物質を謂わゆる巨視的に取り扱う限りに於ては、従来の連続性が少しも損われずに成り立つと見ることができる。この場合に我々が微分法則を適用するに当って、微分的範囲として数学的には無限小の大いさを考えるけれども、併し<sup>しか</sup>物理学的にはこの範囲のなかに既に無数の原子の集合が存在すると仮定しなければならぬ。物質の連続的理論が成立するためにはかような仮定が常に許容されることを必要とするのは<sup>もちろん</sup>勿論である。

尚お古典的物理学に於て現象の連続性を欠くように見えた唯一の場合は、力の遠隔作用である。ニュートンの万有引力の法則や、クーロム (Coulomb) の静電気力及び磁気力の法則や、ビオー (Biot) - サヴァー[ル] (Savart) の電流と磁気との間の力の法則などにあつては明らかにこの遠隔作用が仮定されていた。これ等の力は相互に作用する二つの対象の現在の位置だけに関係して云いあらわされているので、そこには力の伝達に対しては何事も述べられていないばかりでなく、寧ろ暗黙的にこの伝達速度の無限大であることが仮定されていると見てもよいのであろう。現に万有引力の作用のもとにある物体が相互に運動している際にも<sup>な</sup>尚おニュートンの法則が成立すると考えられる限り、明らかに上の仮定が行われているのである。電気の場合に於ては、その運動現象と解せられる電流に対して不幸にしてこの仮定の成立しないことが実験的に確められた。<sup>したが</sup>従つて電流の場合に於ても<sup>な</sup>尚お遠隔的にはたらき、しかも実験の結果と一致し得るためには、クーロムの法則をいかに拡張すべきかと云う問題が多く<sup>な</sup>の学者によって考究された。そしてウェーベル (Weber), クラウジウス (Clausius), カル・ノイマン (Karl Neumann) 等によって種々の電気力学的法則<sup>2)</sup>が立てられた。しながら<sup>これら</sup>之等はすべて遠隔作用を仮定した点に於て遂に完全な理論として成功することができなかつたのである。

遠隔作用なるものが必然的継起の原理に従うものでないことは詳論するまでも

<sup>1)</sup> 第 22 節参照。

<sup>2)</sup> 同様のガウス及びリーマン (Riemann) の法則に於ては力のポテンシャルが有限の速度で伝わると云う思想が既に含まれていた。



ないであろう。我々の思惟的要請によれば、どんな力も突然に遠方の対象に作用すると云うことは因果的連関を欠くと見るより外はない。物質内部に於ける圧力や張力が常に近接的に伝達すると同様に、一般の空間に於ても力が近接的に他に及ぼすと考える方が遙かに自然的である。この思考を始めて電気力及び磁気力に対して適用し、それ以前に於ては単に距離なる概念しか帰せられなかったところの空間に物理的作用の舞台としての“力の場”なる概念を導き入れたのは、実にファラデーの卓見に外ならなかった。このお蔭で電磁気理論は始めてその正しい軌道を踏み進むことができ、そしてマクスウェルの功績を加えてこれを完成の域に導くことができたのである。

電磁気力に反して、万有引力に於ては物体の運動の影響が甚だ小さく、<sup>したが</sup>従って天体運動の観測がニュートンの法則によっていつもかなり精密の程度まであらわされていたために、これを同様に近接的に解しなければならぬと云う理論的要請が漸次高められて来たにも拘らず、<sup>かかわ</sup>久しくこれに手を触れることができなかった。天体運動のうちで最も多くニュートンの法則から外ずれるものとして水星近日点の運動が見出だされたときに、これに対する種々の説明が試みられたけれども、我々の注目に値する処のものは、万有引力が光と同じ速度で伝わると云う仮定を導き入れたゲルベル (Gerber) の理論であった。しかもその結果は観測と能く一致することができた<sup>よ</sup>1)。併し万有引力の完全な“場の理論”が出来上るまでにはまだ多くの道程を要した。アインシュタインの特殊相対性理論が運動物体に於ける光及び電磁気現象の説明に成功した後に、更にこれを一般的に拡張しようとする際に地球上の重力による加速運動の考察からして、始めて万有引力の問題に到達したのであった。この結果は空間の幾何学的性質によって万有引力の場をあらわし得ることを明らかにし、依ってその近接作用理論が与えられるに至ったことは<sup>むし</sup>寧ろ驚くべき顕著な事柄である。私は尚おここに最近の“単一の場の理論”が万有引力と共に新たに電磁気力をも空間の計量的性質によって云いあ<sup>もちろん</sup>らわそうとしていることを附加して置こう。勿論この空間と云うのは理論的には時間をも含んだ世界空間の意味である。そして物理学的に知られた二つの根本的

1) 近日点運動に対してゲルベルの見出だした式は、後にアインシュタインが別に導き出したものと完全に一致している。

な力——万有引力と電磁気力と——が共にこれの計量的の場として解せられると同時に、空間それ自身も亦、昔のユークリッド幾何学によっては遠隔的に性質づけられていたのに反し、ここで用いられる幾何学<sup>1)</sup>に於ては近接的にのみ追従することが許されるのに注意しなければならない。

微分法則の積分を行うためには謂わゆる積分条件を必要とする。そしてこの条件の如何<sup>いかに</sup>によって現象は具体的に種々の形を取るのである。物理的には積分条件は即ち始原条件及び環境条件としてあらわれる。我々が人間的能力によって現象を左右することのできるのは之等<sup>これら</sup>の条件の適当な選択<sup>2)</sup>に存するだけであって、必然的に存する微分法則それ自身に対しては何等の手を下すこともできない。すべての自然の利用は、先ずこの微分法則を明らかにしてこれに附与すべき条件の如何<sup>いかに</sup>を適宜にすると云う意味に於て、自然への随順でしかないのであり、決してこれへの反抗又は征服ではないのである。

## 20. 現象の可逆性及び非可逆性

前節に述べた微分法則に於ては時間  $t$  が常に独立変数として含まれているけれども、 $t$  に対する第二次微分係数だけを含むような法則では  $t$  の代数的符号を変じても少しも影響がない。かような場合には現象は全く可逆的に起させることができる。摩擦や抵抗を除外した純粹の力学現象、吸収や廻折を伴わない光及び音の波動の伝播、非減衰電気振動などはすべてこれに属する。即ち物体の運動はその速度を逆に向ければ丁度逆に進むであろうし、又波動は完全な鏡で反射させると、やはり逆に進行させられる。ところが之等<sup>これら</sup>に反して  $t$  が一次的又は三次的に含まれるような法則では、現象を可逆的にあらわすことができないで、いつも一方向のみの変化が起る。摩擦や抵抗や熱及び電気の伝導や拡散や、光及び熱の輻射や、放射性物質の原子崩壊などはすべてこのような非可逆的現象である。

物理的現象のうちで上述の二種類を差別することは根本的の意味をもってい

<sup>1)</sup>一般相対性理論で用いられるリーマン幾何学に於ては二点間の距離が  $ds$  なる微分によってのみ定義せられるばかりでなく、有限の距離だけ離れた二点に於て二つの線分が互いに平行であるかどうかを決定することはできない。アインシュタインの新理論に於て仮定された幾何学に於ても距離が  $ds$  によってのみ定められることはやはり同一である。

<sup>2)</sup>条件選択のための手段としては、物体の配置の変更より外には我々に許されていない。物体に熱を加えると云っても熱源をこれに接触させることであり、化学的作用で熱を発生させるにしても適当な物質の接触を実現させることに帰せられる。

る。非可逆的現象については、サディ・カルノー (Sadi Carnot) が始めてこれを論究したが、熱に対する彼の解釈は尚お正鵠<sup>な せいこく</sup>を欠いていた。クラウジウスに至<sup>ようや</sup>って漸く非可逆性の本質がどこに存するかが詳細に考究せられた。彼は物体体系の<sup>おのおの</sup>各の状態に対して一定のエントロピーなる量の存在することを証明し、そしてこれが非可逆的現象に於て常に増大すべきことを見出だした。今日我々が熱力学の第二主則と称するところのものはこれを云いあらわしたものである。このエントロピー増大の原理に対立して、すべての可逆的現象に対しては、ヘルムホルツ (Helmholtz) がこれを明らかにした通りに、最小作用の原理が成立する。そしてこれによってその現象過程が完全に決定せられる。之等<sup>これら</sup>の二つの原理は、プランクが強調した通り、互いに全く異なった要素をもっているのものであって、各特殊の数学的処理を必要とする点で、力学と電気力学との対立や、物質内及びエーテル内の現象の対立などよりももっと原理的の相違を示すのである。

ところで我々に尚お不思議に感ぜられるのは、上に可逆的として挙げたところの現象が多く根本的のものと考えられるに<sup>かかわ</sup>拘らず、実際に起る処を見ると、純粋に可逆的であるものは殆んど実現しないことである。どんな運動も多少の摩擦や抵抗を伴わないものはないし、又波動伝播も吸収や散乱なしには見られない。我々の眼にするものはすべてが非可逆的であると云ってもよい程である。この事実の本質的な解釈は久しい間不明に残されていたが、それは、既に緒言に述べた通りに、気体の運動学的理論の発展の後にボルツマンによって遂げられた。彼は即ち現象の非可逆性をこれに<sup>あず</sup>与かるところの無数に多くの要素的現象の偶然性に帰着せしめたのである。

古昔から我々は自然法則をいつも必然的のものと考え、そしてこれによって自然科学なるものも成立することができると思惟していた。因果則<sup>も</sup>若しくは必然的継起の原理として云いあらわした処のものは即ちこの事柄を述べた先験的要請である。それ故に我々が物理学上の種々の法則を立てるに当っても、それが可逆的現象に<sup>かか</sup>関すると、非可逆的現象に<sup>かか</sup>関するとに拘わらず全く必然的であるとしてこれを解していたことは当然である。ところがボルツマンの研究はこれが謬った見

解であることを始めて我々に教えた点で特筆すべきものでなければならない。彼が明らかにした処によれば、すべての非可逆的現象は常に無数に多くの要素的現象の集合によって成り立っているのであって個々の要素的現象に対しては必然的な微分法則がこれを支配するのであるけれども、我々がその全体系を見る場合にはこの微分法則の積分条件を一々識別することは不可能であり、従って之等これらの条件に応ずる個々の要素的の有様は単に確度論したがに従って見出すより外はないのである。それ故個々の有様、即ち顕微鏡的状态がどうであるかに関してはこれを全く偶然の事柄として解釈しなければならない。ここに法則の必然性の外に、状態の偶然性を結果するわけである。

ボルツマンはこの考察から進んで、かような集合関係に於ては上述の偶然性のためにエントロピーに相当する一つの特種な函数が存在することを見出した。それは同時に全体系が現在の巨視的状态をあらわすことの数学的確度を与えるものであって、クラウジウスのエントロピー増大の原理は即ちこの状態確度の増大を意味するのである。我々は熱力学的に現象が一方向にのみ進んで遂には熱平衡の最終状態に到達することを知っているが、ボルツマンによればこれは状態が漸次たしか確らしい有様たしかになって最後には最も確らしいものに達することを意味する。けれどもこの状態確度の増大は抑も個々の顕微鏡的状态の偶然性に由来するものであるから、必ずしも絶対の必然ではあり得ない。数学的確度論はこれを適用する体系に於て個々の要素の数が多ければ多い程現実に近づくけれども、その数が減少すれば実際にはこれと著しく外ずれることが可能になる。熱を分子の運動として解する場合にも、分子の数は非常に多いとは云うものの、やはり有限の或る数に外ならない。それ故、たとえ我々が観測する限りに於てそれが熱力学的法則に従うとしても、併し物質の状態が確度論しかの示す処のものから外ずれる偶然性は決して絶無ではないのである。即ちこの意味に於て熱力学の第二主則は、その他の可逆的現象に関するすべての法則と異なって、絶対に必然的のものでないとしなければならない。

ボルツマンのこの理論はかようにして亦実に驚くべき一つの結果を持ち来した。

そして実際に少数の分子しか関係しないような現象、例えばブラウン運動の如きものに於て熱力学の法則の適用せられないことが実験的に説明せられるに至った。けれども一般の熱現象などに於てはこれに与<sup>あず</sup>かる要素の数が非常に巨大であるために、熱力学の法則に反する事実が現実にあられるであろうことを心配する必要は恐らく無いと云ってよいであろう。只今日に於ては更に原子内部に於ける量子的現象に於ても電子の状態転移に関して偶然性の存することが見出だされているので、これに対しても果して我々がその必然的な要素的現象を仮定することができるかどうか、そしてその法則までも見出だすことができるかどうかについて再び原理的に重大な疑問が横たわっている。なぜなら、抑も自然法則が窮極的に必然として見<sup>みな</sup>做されるかどうかは、この解決に待たねばならないからである。

## 21. 週期的現象

多くの物理的現象のうちで特別の考慮を要するのは週周期性を示すものである。之は一定の時間毎に同一の状況を繰返すものであって、その主要なものは力学に於ける廻転運動、並びに種々の波動現象である。既に誰でも知っているように我々の時間単位は地球の自転及び公転運動によって定められている。又太陰曆に於ては月の運動をも用いている。このように多くの天体運動が週周期性を有することは、我々に時間測定 of 最も簡便なしかも甚だ精確な方法を供与したと云う点で、我々人間に取って重要なものであった。ともかくも、その外の時間的に変化する現象は存在していたにせよ、かような週期的現象がなかったならば、正確な時間測定は寧ろ困難であつたに違いない<sup>1)</sup>。

併しながら天体連動の理論が示す通りにその週周期性は絶対に正確ではない。地球の自転及び公転の如きも種々の原因からその週期を漸次的に変ずるであろうことは否定することのできない事実である。従<sup>したが</sup>って時間の不変的単位を決定するには他に理論的に正確な週期を有する現象に於て最後の根拠を求めなくてはならない。そしてこの目的に叶うものとして我々は幸にして光の週周期性を挙げることができる。

<sup>1)</sup>我々の時間意識の最初はやはり脈拍や心臓鼓動や呼吸などの週期的生理現象によつたのであろう。

これらの週期的現象に関して我々は併し<sup>しか</sup>物理学的理論の上から二つの異常な困難に遭遇した。その第一は、第 18 節に於て絶対空間の問題に関して言い及ぼした如の、絶対廻転の問題である。この問題は既に古代に於ける天動説と地動説との争論のなかに内在していた。コペルニクス (Kopernikus) が始めて地動説を称え、ガリレイやケプレルなどがこれを主張した際には、それは常識的の天動説に対する正当な科学的批判として見<sup>みな</sup>做されるべきものであったし、そしてニュートンの力学や万有引力理論が我々の物理学の根本を形作ると共に亦この地動説を完全に裏書するに及んで、もはや誰も天動説を固持するものはないようになったけれども、併し<sup>しか</sup>ながら我々が認識論的に運動の相対性を是認して再びこの問題を反省するに至って、ここに再び深刻な疑問を懐かねばならないのであった。天体力学に於ては便宜上地球に固定した座標を取ってこれに関して天体の運動を記述することは珍らしくない。この場合に多くの惑星の外見上の軌道が複雑にあらわれることは勿<sup>もちろん</sup>論であるが、単にそればかりではなく、個々の天体に作用する力として万有引力の外にコリオリス力の如<sup>ごと</sup>きものを仮定しなければならない。ニュートン力学の立場からは、前者を実在的の力として、後者を座標転換のためにあらわれる非実在的の力として見<sup>みな</sup>做するのであるが、何故に我々はこの立場を強要せられるのであろうか。それは地動説の云う如の地球廻転の“事実”を示すのではなくて、事実に対する一つの“解釈”に過ぎないのではないであろうか。又ニュートンの水桶の実験や、フーコー振子の実験や、地球の南北軸の方向に於ける扁平の事実などは、“絶対廻転”を証するものとして解せられるけれども、絶対空間と共に絶対廻転なるものは認識論上抑も無意味に帰しはしないであろうか。之<sup>これら</sup>等の疑問がニュートン力学を取り囲んで十九世紀の後半に於て盛んに投げ出された。そしてノイマンをしてこれに答えるために  $\alpha$  体なる非感覺的物体の存在<sup>1)</sup>を仮想せしめた。

絶対廻転の問題は、絶対空間のそれと共に、アインシュタインの一般相対性理論によって漸<sup>ようや</sup>く解決することができた。そこでは即ち座標転換のためにあらわれ

<sup>1)</sup>絶対空間それ自身が認識の対象となり得ないために、これに代るものとして  $\alpha$  体なるものが宇宙空間に存在すると仮想したのである。

るコリオリス力の如きもの<sup>ごと</sup>をすべて万有引力と共に実在せる力として解し、依って地動説と同様に天動説の可能であることを示したのである。けれどもこの場合に宇宙限界に関する困難な問題が新たにあらわれた。アインシュタインはこれを取り除くために、その最初の理論を多少変更して、遂に限界の存在しない宇宙形態を想像した。大体に於てそれは三次元球面に近似せらるべきものであって、その半径が宇宙空間の全質量によって決定せられることを見出した。

週期的現象に関する困難の第二は光の週周期性について起された。ニュートンが光を一種の微粒子の放射として仮定した際に、彼の名によって知られている干渉の輪に於て示されるような週期的現象をいかに解すべきかについて彼自身既に苦心し、止むを得ず微粒子の週期的変化を想像した。光がフイヘンスの波動理論によって説明せられるようになってからは、その週周期性に関する困難は全く消滅した如く<sup>ごと</sup>に見えた。波動源としては最初は物質内部の弾性的振動が仮定されたが、光を電磁的波動であるとするマクスウェルの理論が事実上証明せられてからは、当時に於ける電子発見の顕著な事柄と相結びついて、それが原子内部に於ける電子の準弾性的振動<sup>1)</sup>によって起ると考えられた。ローレンツがこの理論によって始めて単純なゼーマン効果を完全に証明し得た際には、人々はその理論的勝利に酔わされて、これを満足な解決として肯づく外はなかった。けれども自然は徐々にその奥に深く蔵匿していた最も複雑な<sup>しか</sup>、併し驚くべく巧妙な姿を最も大きな謎として我々に示し来った。各<sup>おのおの</sup>の物質があらわすところの、あの多数のスペクトル線がいかに美事に規則正しく並んでいることであろう！ その一々の週期（振動数）が果してどんな機構によって規定されるのであろう？ ここに再び光の週周期性に関する困難な問題が萌芽し始めた。

原子の内部的構造が始めて（1903年）タムソン（J. J. Thomson）及び長岡によって論ぜられたときに原子は太陽系に於ける惑星のように一定の軌道を描いて周廻することが仮定せられた。光の週周期性はこの軌道運動<sup>も</sup>若しくはその左右に於ける振動と結びつけられたが、併し<sup>しか</sup>後者は電気力学的にはその輻射のために滅

<sup>1)</sup>振動を生ずる力が弾性振動に於けると同じ法則に従うものを指す。

衰させられて、スペクトル線の示すような一定不変の週期を現ずることはできない。この困難を救うために、ボール[ボーア](Bohr)は量子的仮定<sup>1)</sup>を導き入れて、軌道の安定と不変とを条件づけた。そこには数個の定常軌道なるものが結果して、電子がその一つから他に転移するに伴ってエネルギーを輻射し若しくは吸収すると解せられた。そしてこのエネルギーを量子として仮定し、これに相当する振動数<sup>したが</sup>、従って週期を計算することにより、極めて能く水素のスペクトル系列を証明することができた。この顯著なる成功によってボール[ボーア]の理論の価値は動かすことのできないものとして認められるに至ったが、併し輻射せられる光の週期性の根源については却って全く暗黒のなかに葬られねばならなかった。なぜなら上述の電子の軌道転移は決して週期的現象ではないからである。

この問題は量子仮説の不思議な性質と共に今日に残されている。近時量子的現象を論ずる有力な方法の一つとして起ったハイゼンベルグ(Heisenberg)の量子力学に於ては、電子の軌道の如きものも我々の到底観測することのできないものであり、従って認識論的対象として肯定すべきものでないと云う論察から、単に電子の何等かの、定常状態とそれの転移とだけを考えるに止めようとしている。光の週期性が何に依存するかの問題は、それ故にここでは最早や全く解答せられないであろう。我々は一つの望みを量子力学に対立するシュレーディンゲル(Schöredinger)の波動力学<sup>2)</sup>に繋ぐだけである。

## 22. 現象の不連続性 (量子法則)

物質が連続的構成をもっている<sup>みな</sup>と見做される範囲、即ち巨視的に見られる限りに於ては、現象も亦連続的に起ることは当然である。我々はこれによって微分法則の成立することを常に経験した。併しながらすべての物質は決して絶対的に連続的構成を有するものでなく、その構成的要素として分子、原子及び電子等が存在することが種々の現象によって漸次明確にせられた。従って種々の数量的概念のうちで、<sup>これら</sup>之等の要素に一定の値が帰せられ、且つ物質全体に於てはそれらの和

1)次節参照。

2)次節参照。



としてあらわれるような量は少なくとも原理的には不連続的でなければならないこと云うまでもない。電気量の如きは即ちこれであって、たとえ我々が実際に物質の電気量を連続的に取り扱うことは許されるとしても、それは個々の電子の電気量即ち電気素量と称せられるものを無視し得られる場合であり、又事情に応じてはこの電気素量の倍数のみがあらわれる場合もないではない<sup>1)</sup>。併し之等の不連続的構成要素に於ても現象それ自身は常に連続的に微分法則に従って起ることが従来信ぜられていた。分子や原子や電子の運動の如きはそうであって、従って之等に於けるエネルギー変化なども当然連続的であるとしか考えられなかった。ところが、それにも拘わらず、熱輻射の現象に於て我々に全く未知の不連続性があらわれたことは実に意外であり不可解の謎でもあった。

それは既に述べた通りプランクの量子仮説として熱輻射の法則を導き出すために提案せられた処のものであった。これによれば輻射エネルギーは常に一定のエネルギー量子の整数倍としてのみ輻射現象に与かるのであって、その理論的根拠が全く不明であつたに拘わらず、この仮定なしには輻射の実験的事実が到底説明し得られないように見えた。単に熱輻射の法則ばかりでなく、光の種々の作用(化学作用、光電効果、蛍光作用、コムプトン効果等)に於ても同様の仮定の必要であることが、アインシュタインの光量子仮説として再び示された。爾後このエネルギー量子若しくは光量子が何であるかについて実に多くの論究が重ねられた。

エネルギー量子の特質はその大いさが輻射の振動数 $\nu$ に比例することであつた。プランクはこれを $h\nu$ としてあらわし、この普遍的常数 $h$ に対して作用量子なる名を与えた。量子論の主眼点、即ち我々の問題としている現象の不連続性の根拠は畢竟この作用量子なるものの存在に対してどんな原理的規定が与えられたかと云うことに存するのである。これを見出すには先ず現象的事実が実験から供給されねばならなかつた。なぜなら我々は、従来嘗つてかような不連続性を経験したことがなかつたし、更に又かような現象に対する先験的要請を少し有たなかつたからである。幸にして原子から発するスペクトル線の系列法則のうちで最も簡単な水素のバルマー公式がこの量子的仮定を原子機構に應用することによって殆

<sup>1)</sup>電気分解の現象はこれを示している。

んど完全にボール[ボーア]の手で理論的に演繹せられ、次いでゾムマーフェルドがこの理論を拡張してスペクトル線の微細構造を論じ、観測との驚くべき一致をもって水素に於けるシュタルク効果やゼーマン効果などが説明せられるに至って、量子論は動かすことのできない根柢を得たのであった。

ボール[ボーア]-ゾムマーフェルドの理論では不連続性が二つの部分から成り立っている。第一は原子内部に於ける電子軌道の転移が或る許容せられた定常軌道の間のみ行われることである。この軌道の運動エネルギー  $E$  を個々の独立の座標  $q_k (k = 1, 2, \dots)$  だけの函数の和として云い表わされるように、座標  $q_k$  を選ぶならば、次の条件を満足する軌道のみが定常軌道として許容されるのである。

$$\int \frac{\partial E}{\partial \dot{q}_k} dq_k = n_k h,$$

ここに  $\dot{q}_k$  は  $q_k$  の時間的微分係数即ち速度であり、<sup>したが</sup>従って  $\frac{\partial E}{\partial \dot{q}_k} = p$  は  $q_k$  に対する運動量である。左側の積分は軌道の一週期に広げるのであって、この場合に  $n_k$  は任意の整数となる。実際には  $n_k$  は  $1, 2, \dots$  の小さな数としてあらわれるが、<sup>これ</sup>之は定常軌道を決定するものであって、量子数と名づけられる。さてかような軌道の間転移によってエネルギーが輻射せられるのであるが、これが空間に於て再び量子的に存在すると云う仮定、即ちこのエネルギーを  $h\nu$  に等しいと置くことによって輻射の振動数  $\nu$  が計算されるのであった。ここに第一の不連続性と独立に第二の不連続性があらわれるわけである。

量子論はともかくもかようにして原子構成に関する種々の問題を解くことができたけれども、<sup>しか</sup>併し尚<sup>な</sup>おその理論的根柢並びに實際上の応用に対して多くの困難が存在した。そしてこれが解決のためにどれ程多数の学者が苦心を費したかわからない。現代物理学の最も中心的な問題としてここにすべての視聴を集中し尽すの観があった。最大の困難の第一は、たとえ上述の量子法則が電子の週期的運動に関して成立するとしても、電子のその他の非週期的運動は何故に古典的電気力学の法則に従うのであるかと云う疑問であった。この両者の間には明らかに矛盾としか見られない背馳がある。例えば電子の曲線的加速運動は後者によれば常に

エネルギーの輻射を伴うものであるのに反し、前者に於ては何故にそうでないかと云う点について、我々はもっと原理的調和を求めねばならない。第二は、原子の構成機構に対して上述の量子的不連続性を仮定するとしても、更に別に輻射エネルギーに対して、例えばアインシュタインの光量子仮説に於ける如き不連続的構成を仮定することは、従来多くの光学的現象に於て美事にその説明を遂げている連続的波動理論と果して相寄れることができるであろうかと云う疑問である。波動のエネルギーは四方に広がって伝播を続けるに拘らず、これが物質によって吸収せられる場合に再び量子的に結合することは、いかにしても不可解であると云わねばならない。

之等の根本的疑問は久しく我々の眼前を瘤腫のように塞いでいた。ところが最近(1925年)に至って偶然にも全く出発点を異にする二つの理論的方法によってその解決への希望を繋ぐことができるようになったことは特筆すべき事柄である。その一つはハイゼンベルグ(Heisenberg)によって創説せられ、ボルン(Born)、ヨルダン(Jordan)、ディラック(Dirac)等の人々によって発展せられた量子力学であり、もう一つはド・ブローリー[ブローイ](De Broglie)並びにシュレーディンゲル(Schrödinger)によって展開せられた波動力学である。

原子内部の電子軌道が量子数  $n_k$  によって決定されることは上に述べたが、軌道が平面的であるならば二つの独立座標に応じて二つの量子数が与えられねばならない。輻射エネルギーや振動数はかような量子数の函数であると見做される。ところで量子数は任意の整数であることができるから、我々はこの場合にエネルギーや振動数の可能な値の全体を第二次無限マトリクスとして取り扱うことができる。更にポール[ボア]-ゾムマーフェルドの量子論に於て電子の軌道上の運動とか軌道転移の過程の如きは我々の到底観測することの不可能なものであるから、之等がどんなものであるかを論ずるのは實際上無意味である。それ故量子力学では単に電子の週期的運動とそれに対する量子法則とだけを考え、これから観測し得る量の間を導き出そうとするのである。q をマトリクスとして意味づけられたハミルトン座標、p をこれに相応する運動量とするならば、この際量

子法則は、

$$\mathbf{pq} - \mathbf{qp} = \frac{h}{2\pi i} \mathbf{1}$$

であらわされることとなる。ここに  $\mathbf{1}$  は単位マトリクス、 $h$  は作用量子、 $i$  は  $\sqrt{-1}$  を示す。かようにして量子力学は従来の量子論以上に種々の量子的事実を説明することに成功したばかりでなく、尚お非週期的運動にもこれを応用して古典的力学との調和を能く結果することができた点に於て寧ろ驚くべきものがある。

この量子力学が全く不連続的概念の上に根柢を置いているに反し、波動力学は却って逆にすべての不連続性を連続的理論によって説明するのであって、そこに著しい対照を形作っている。シュレーディンゲルに拠れば、一つの物体の運動を追隨する従来の力学は一本の光線の通路を論ずる幾何光学と同様であって、後者が光の波長と比較せらるべき小さな範囲に於ては波動理論によって置き換えられねばならなかったように、電子の如きもの運動に於てはやはり同様の変更が必要なのである。しかもそれはド・ブローリー[ブローイ]の考想した位相波なるものによって置き換えられるとするのが波動力学の眼差す処である。一方で力学の原理がハミルトンの方程式によってあらわされ、且つこれが既に屢々量子論に於ても応用せられていたことと、他方でこの方程式が波動の伝播を云いあらわすのにも用いられたこととを結びつけて、シュレーディンゲルは極めて巧妙に彼の波動力学の根本方程式を演繹し、与えられた原始及び限界条件のもとにこれを解くことによって種々の量子論的問題を明快に解決した。この場合に量子法則が波動函数の有限であると言う条件によって最も自然的に結果することは、我々に取って最も興味がある。電子や光量子は等しく位相波のエネルギーの集合状態として解せられ、之等の軌道の曲率半径が非常に大なる場合にはその運動は古典的力学に従うけれども、曲率半径が波長に比較し得る程小さいような週期的運動に在っては波動の特別な定常状態があらわれて、それが量子法則を結果するのであると考えられる。

量子論によって明らかにせられた現象の不連続性は我々の古典的理論に対していかにしても救い難い矛盾を含むものと見做されていたにも拘らず、今日我々が

量子力学及び波動力学によってその絶望の淵から免がれ得るであろうところの路を見出だすことができたのは、畢竟理論物理学の最後の光輝ある勝利を予想せしめるに十分である。我々は未だそこに<sup>ひら</sup>展かれた二つの路の相互の関係を完全には見透すことができないけれども、両者が共に或る点までの真実をあらわすことは恐らく否定されないのであって、やがてはそれらの背後に於ける何等かの融和が持ち来されることも望まれるであろう。近代物理学の顯著な発展は我々に殆んど<sup>ほと</sup>解き難いに見える多くの困難にも打ち勝ち得る確信を益々起さしめる。否、抑も<sup>そもそ</sup>“予定された自然の調和”がこれを我々に可能ならしめるのであろう。

## 第四章 物理学と認識論

### 23. 直観と認識

物理学の法則が経験的事実を記述せるものであることは既に説いた通りであるが、事実が経験せられるためにはそれが先ず何等かの感覚を通じて直観の形を取るべきこと云うまでもない。その上で我々は直観のなかから種々の概念とその間の関係とを導き出し、そして先に述べた方法によって物理学の法則及び理論に到達するのである。我々は通常かくして得られた認識を以て科学上の真理と解している。

直観からかような物理学的認識に達する迄には第二章に説明した種々の段階が踏み越えられねばならない。此間に我々は感覚若くは直接経験から漸次に遠ざかって単に抽象的たる概念若くは理論に移ることは明らかである。直観と認識とはかくて全く相異なつた形式をとるけれども、我々は固より之等両者を互いに独立であるとは見做すわけにゆかないので、寧ろ前者から不要の要素を取り去って思惟の根本法則に従つて整序したものを後者として考えねばならない。併しながら思惟内容は或る程度まで我々自身の自由に歸せられることも否定せられない。それ故に科学上の真理を何れに於て認めるかに関してここに哲学上の重大な問題が起る。

マッハの如き実証論的哲学者は科学的に真実なるものを思惟に於てでなく、却つて直接に感覚に於て眺めようとした。之は少なくとも最も誤らない見解であるかも知れない。併し感覚によってあらわれる直観の階段に止まる限り、そこに何等の科学的体系の発展は存在し得ないこと確かである。従つて‘科学として’の真実若くは真理なるものを直観それ自身に求めることは不可能である。我々は之を科学的方法によって到達し得たところの認識に於て始めて把握し得るとなすより外はないであらう。

この関係に於て我々は第 10 節に述べたように高次的概念を全く用いないで物

理学の体系を形作ると云う試図が重要な意味をもつこととなる。若しそれが可能でもあるならば、我々は物理学の諸法則を出来るだけ直観に近い形であらわし、そして之等これらをいつでも感覺的經驗によって実証することが容易にせられるからである。だが、例えばヘルツの力学がこの試図に於て成功を収め得なかつたことを深く考えるならば<sup>1)</sup>、かような希望は恐らく自然の複雑なる内容に対して寧ろ放棄せねばならないものであるであろう。更に第2節に説いたところの感覺よりの離脱が我々の物理学に於て必要である限り、我々が或る高次的概念や理論に赴くべきことは止むを得ない事柄である。

## 24. 模写論

我々はその知覚經驗せるところのものから空間や時間や物質や、又之等これらに附属せる多くの概念を抽象してその間の関係を描いているが、之等これらのものは現実なる自然それ自身ではないのであって、それを或る形に於て我々の脳裏に取り入れたものに外ならない。然らば物理学的に描いた自然の形像なるものは自然それ自身とどんな関係に立つであろうか。

とは云うものの哲学的に厳密に考えるならば、自然の實在は我々が之を感覺し知覚することによって始めて歸結せられるのであって、之これなしに最初から与えられた自然なるものは却って概念的存在でしかない。即ち素朴的實在論もし若くは唯物論は哲学以前のものである。併ししかながら我々は之これがために自然を以て我々の感覺にのみ依存するとなす觀念論者若くは唯心論者の説に従うことのできないのは、第1節に述べた通りである。自然科学に於ては感覺の対象としての自然の普遍的客観性を認識し、そこに主観と独立なる自然の實在を許容する。そして之これに対して自然の形像なるものを云うんい為するのである。

自然の形像は實在せる自然の模写であると嘗て我々は考えた。物理学の理論が謂いわゆる現象論的方法を採る限りに於てはそれは実際に自然の模写を以て目的と

<sup>1)</sup>ヘルツの力学が上の意味に於て成功しなかつたことは、結局彼が力を遠隔作用としてのみ取り扱ったのに歸せられるらしい。アインシュタインは後にヘルツの用いたのと殆んど同じ形式を借りて、只万有引力の如き空間の場の近接作用と見做すことによって一般相対論的力学を發展せしめたことは我々の知っている処である。併しこの場合にヘルツが最初回避した高次的概念が必ずしも取り除かれているとは考えられないのである。

するように見えた。之<sup>これ</sup>にあつては何等<sup>なんら</sup>か適当な仮定を形作つて現象の記述を行うことを専ら<sup>もっぱ</sup>とする。そして現象の異なるに従つて暫時的にはあつてもそれぞれ箇々独立の仮定が設けられる。併し<sup>しか</sup>之<sup>これら</sup>等の仮定相互間の関係には深く立ち入らない。例えば熱や電気の伝導の有様を記述するために熱や電気を各一種の流体として仮定する如き<sup>ごと</sup>はそれであつて、之<sup>これ</sup>によつて伝導現象の法則が得られるならばそれで一応は満足せられ、進んで熱流体と電気流体とがどんな関係を有するか又はそれらが普通の物質とどう関係するか等の問題は暫ら<sup>しば</sup>く措いて尋ねないのである。物理学理論の初期にあつてはかような方法も亦止むを得ないものであつた。なぜなら我々はともかくも種々の観測せられた現象を数学的に記述し、依つて与えられた他の条件のもとにそれがいかに起るかを知ることがを以て急務としたからである。

力学的世界観のもとに試みられた種々の現象の力学的模型<sup>ごと</sup>の如きも上の意味に於ける模写と考えることができる。原子構造の理論の最初に於て J.J. タムソンやボール[ボーア]が原子模型を形作つたことも、原子の全体の性質をあらわすかどうかと云う程度に達しないで、単にそれらに於て取り扱おうとした一部の性質を模写的に記述しようとする意味に於てなされたのであつた。

併し<sup>しか</sup>ながら物理学は漸次に進歩発展するに従つて、決してかような階段にいつまでも止まることに満足するわけにゆかないのは当然であつた。熱や電気が実際に流体であるかどうか、若し<sup>も</sup>流体であるとすれば普通の流体に対して何によつて差別せられるか等は当然起らねばならない重大な疑問である。物理学の歴史はやがて熱が分子運動のエネルギーであり、又電気の伝導が電子の運動であることを教えるに至つた。電子なるものに関してはそれが空間に於ける電磁場<sup>なんら</sup>の何の特異点であることが知られ、更に最近の波動力学に於てはそれが或る波動の干渉によるエネルギー焦点にあると考えられるようになった。かようにして模写はもはや決して任意的でなくて、却<sup>かえ</sup>つて自然本質の認識にまで進化すべきことが明らかである。

## 25. 実在の認識



模写が実在の認識にまで進むためにはその形像に対して十分確実なる普遍性と客観性とが与えられなければならない。我々が物理学に於て<sup>ま</sup>先ず感覺的概念を棄てて<sup>これ</sup>之に代うるに客観的概念を以てし、且つ<sup>か</sup>之等<sup>これら</sup>に数量的内容を与えて常に測定を可能ならしめ、多くの場合に於て任意に実験によって之を検証することのできるようにするのは<sup>これ</sup>之が為めである。又物理学の理論が形作られる最初に於ては<sup>しばしば</sup>屢々仮説や種々の仮定が必要とせられるけれども、いかなる仮説的对象に対してもそれが感覺を置き換えたところの客観的概念と必然的に結びつくことによって客観性及び普遍性が保証せられなければならない。例えば原子や電子の<sup>ごと</sup>如きものも最初は単にその仮説的存在だけが考えられ、<sup>これ</sup>之によって種々の現象が理論的に記述せられさえすればよかつたのであるが、漸次多くの関係が知られるに従い到底原子又は電子の仮定なしには解釈することのできない事実が確認せられ、仮説が益々必然的となることによって我々は<sup>つい</sup>遂に<sup>これら</sup>之等の実在を認識するに至るのである。エネルギーの概念の<sup>ごと</sup>如きに対しても亦同様である。

エーテルの実在<sup>いかに</sup>如何は<sup>しばしば</sup>屢々物理学の歴史に於て問題とせられた。エーテルが最初光の媒質として仮説的に導き入れられたことは誰も知る通りである。そして光の波動論が実験的に事実として示されたときに、エーテルはこの波動の媒質として実在すべき権利を与えられたと云わなければならない。かような実在者は古典的には一つの物質として考えるよりほかはなかった。たとえそれが天体の運動の<sup>ごと</sup>如きに対して少しの抵抗をも生じないような、<sup>ほと</sup>即ち殆んど觸覚に感じ得ないようなものであったにせよ、人々はそこに密度の極めて小さい弾性媒質を想像した。<sup>しか</sup>併し光波の性質はこの媒質に対して再び固体性や非圧縮性を要求した。更に物体の運動に関してそれは<sup>い</sup>謂わゆるフレネルの随伴係数なるものが<sup>ごと</sup>云い表わす如き特殊の関係を示さねばならなかつた。それでも当時のエーテル理論に従えばかような対象が理論的に認識せられる限り、エーテルは一種の物質として実在したのであった。

マクスウェルの光の電磁的理論以後、エーテルは光並びに電磁場の媒質の役目を負わせられた。そして電磁場の力学的模型が不成功に見限られると共にエー

テルはもはや単なる弾性物質ではなく、却<sup>かえ</sup>って之と異なった純粹の仮説的物質となつてしまった。それにしても尚<sup>な</sup>お力の媒質であるが故に人々は之を物質<sup>み</sup>的に見做<sup>な</sup>すことの未練を残していた。併<sup>しか</sup>しながら他方に於て物質に歸せられねばならない諸條件が多く<sup>な</sup>の事実から確定せられて来た。特にそれが原子から構成せられること及び原子が更に電子をその構成要素として有<sup>ごと</sup>することの如きは根本的のものである。電子がその周囲に電磁場を運ぶと云う事実に至<sup>ごと</sup>っては、一般に電磁場が電子若<sup>もし</sup>くは之<sup>これ</sup>から組成せられる物質とどんな關係に立つかを明らかに我々に示すものであった。かくて認識論的にエーテルを物質の一種として解することは絶対に不可能とせられた。ところが丁<sup>ちやうど</sup>度之と同時に有名なマイケルソン・モーレーの實驗に基づいてアインシュタインの相對性理論が成立するに及び謂<sup>い</sup>わゆる‘エーテルの否定’が宣言せられた。この言葉の意味は、エーテルを運動の基準体とすることの不可能によってその物質性を否定したのであった。たとえそれが電磁場の媒質ではあつても、即ち少なくとも空間的占有性<sup>も</sup>を有<sup>も</sup>っているにしても、一定の座標へ固着することのできないものとせられた。それはもはやあらゆる物質性を褫<sup>しんだつ</sup>奪せられて、たかだか空間そのものと同等に裸にせられた觀がある。只純粹幾何学で規定せられる抽象的の空間と異なる處はその各部分に物理的作用を呈せしめ得る‘力の場’の性質があらわれる点だけである。我々はここにエーテルを實在的空間それ自身として見<sup>み</sup>做<sup>な</sup>すべき十分の理由を見出したのであった。

アインシュタインの一般相對性理論や更に後の‘場の單一的理論’に至<sup>ごと</sup>っては一步を進めて空間の幾何学的性質そのものなかに物理的なる力の場の法則を求めている。ここでは力の場と共に空間及び時間<sup>も</sup>の實在が一般の幾何学的關係によって認識せらるるに至<sup>ごと</sup>つたと云つてよいであろう。エーテルの問題は単にそれがかような空間に与えられる一名称として融<sup>これら</sup>け込んでしまった。我々はすべて之等の数学的關係によってあらわされるところの内容に対して實在の認識を歸しなければならぬ。

原子模型<sup>ごと</sup>の如きも、若<sup>も</sup>し之<sup>これ</sup>によって云い表わされるすべての關係が實際の原子のあらゆる性質<sup>も</sup>に対応することが示される場合にそれは實在せる原子形像として

認識せられなければならない。但し近時ハイゼンベルグの量子力学に於て指摘せられた通りに、原子内部に於ける電子の軌道上の位置の如きは、之を観測するがために光を当てるならばその作用によって軌道から外ずされてしまわねばならないから原理的観測不可能であると云うこと等に対しては特に注意を必要とする。同様の意味で原子の形体の如きも直接には観測不可能である。併し之等の場合に仮定せられた形像に対して必然的に結びつけられる理論的帰結が何等かの実験によって証明せられ得るならばその形像を實在として見做すことはやはり不当ではないであろう。波動力学に於ける位相波の如きに対しては之が實在するか否かに就いて最も多く論議の的となるでもあろうが、その判断は亦上述の實在なる概念の意味に於て下されねばなるまい。

力学に於ける質点とか剛体とか、完全流体とか熱学に於ける理想気体、電気学に於ける完全導体等の諸概念は何れも實在のものではないと考えられるけれども、實在認識を得んがための物理学に於て却って最も重要な概念であることは注目し得る。之は物理学に於ける實在認識が常に近似的であることに由来するのであって、近似の最初の階段に於て上記の諸概念は實在をあらわすのであり、そして之等に関する事柄を実証することが可能であり、それが簡單なる近似的形像として役立つからである。

## 26. 世界形像の唯一性

物理学の歴史を見ると、同一の現象に対して種々の異なった理論が提出されることが屢々ある。例えば光に対して一方でニュートンの微粒説並びに幾何光学的理論が行われると共に他方でホイヘンスの波動説並びに波動光学的理論があらわれた如き其著しい場合である。電流の伝導に関しても最初デュフェー又はシンメルの二流体説に対してフランクリンの一流体説があった。すべての現象に就て多少とも異なった理論や説明の行われるのは殆んど常態である。それらの理論のうちの何れが正しいかどうかは第一に実験的検証によって決せられねばならないのは勿論であるが、若し可能なるすべての実験に矛盾しないような二つ以上の理論が存在したならば我々はいかなる論拠によって之等の優劣若しくは

正否を判断すべきであろうかと云うことが問題となるであろう。理論の許容性即ちそれが論理的矛盾を含まないことは我々の当然の第二の要請である。これに関しては恐らく論議を要しないが、更に之これに加えられるべき第三の要請こそ理論の運命を決定すべき重要な焦点として見られるであろう。それは即ち理論の合目的性 (Zweckmässigkeit) として考えられた。そして理論が理論としての目的を達し得ることのそれに対して古来多く簡単性が挙げられた。我々が‘出来るだけ簡単に’自然を記述し説明すること、之これが自然科学の実際の任務として解せられたからであった。

併しかしながら理論の簡単性が重要視せられ、又之これによって種々の理論の採否が云うんい為せられるのは多くは理論発展の初期であって、やがて之これに関聯する多数の事実が明らかにせられるに従い、之これら等によるところの理論の正否がおのずからその運命を決定するに至るのが常である。惑星の運動に関する地球中心説と太陽中心説とは、最初は後者が前者よりもより簡単な法則によって事実をあらわし得る点で正しいとせられていたが、両者は本質的には基準座標系の選択によって相異なるだけであり、ニュートン力学に於て基準座標系が謂いわゆる惰性系 (Inertial System) に属しなければならぬと云う事実によって始めて一義的に決定せられた。即ちここでは惰性系を採ることがより簡単であると云うよりも寧ろそれに依らずには事実の記述が不可能と考えられたのであった。一般相対性理論に於てはニュートン力学に於ける力の概念の変革によって惰性系の特権が失われ、従って上の両説の正否の問題も無意味に帰せしめられたけれども、この理論は普通の意味に於て決して簡単であると云うわけではなく、寧ろ先験的むし要請たる運動の相対性を徹底せしめるために、従ってそれだけ論理の透徹を期するために導き入れられたのであり、そしてその結果は万有引力に関してニュートンの法則よりも一層よ能く事実に適合することが見出だされたのである。

之これら等の事情を顧みると、多くの理論は漸次経験的事実との不一致によって淘汰せられ、若くは近似性のより大なる他の理論によって置き換えられて、我々を絶えず或る一定の世界形像に向って進ましめるように見える。世界形像が最後に於

て必らず唯一的に帰著するかどうかは固より従来の経過から推察すべき予想に過ぎない。マッハの如き<sup>ママ</sup>實用主義論者<sup>もと</sup>にあつてはこの経過<sup>むし</sup>を寧ろ甚だ軽く見ている。理論は事実の記述に役立ちさえすればよいのであつて、たとえそこに数種の理論が与えられるにしても、我々はそのうちの最も簡単なものを採択すればよい。之が思惟の上に於て最も経済的であるからであると彼は説いたのであつた。之<sup>これ</sup>に反してプランクの如き<sup>ごと</sup>理想主義論者は上に述べたように論理と経験とが常に我々の世界形像をして唯一的に導くところの事実を挙げてその唯一性を高調し、少なくとも之を信ずることが自然科学研究者をしてその高大なる理想的境地<sup>しやうけい</sup>への憧憬を思わしめ、依つて彼等自身の研究に対して興味と熱心とを保たしめるために大なる効果を有することを指摘した。

世界形像の唯一性を仮定することは一方で理想主義哲学に取つては実在若くは科学的真理の認識を保証せしめる点で重要な意味をもつであらう。之<sup>これ</sup>に反して多種の理論の可能性を許容し、単に思惟経済の原理に基づく採択を目的とするならば、それらの理論<sup>いず</sup>の何れをも真理として認めることとなり、真理の唯一性なる要請に対して不満足を持ち来たすであらう。併しながらかような場合に於ける真理と実用を充たすことによって決定せられるとする實用主義者の見地に立つならば、必ずしもその唯一性を要求する必要もないであらう。結局両者の見地の互いに異なることから結果する争論に外ならない。只多くの科学者は現在に於て同一の事象に対する二つ以上の異なつた理論<sup>もし</sup>若くは形像を同等に許容すべきものとして認めることを恐らく躊躇するであらうし、彼等<sup>しか</sup>はかようなものに対して論理若くは経験に依存する、より以上の判断を絶えず求めて止まないであらうことは、プランクの論ずる通りであらう。そして物質現象の全体を唯一つの世界形像<sup>まと</sup>に纏めようとするのが彼等の願望であり、之<sup>これ</sup>がためには必らずしも論理的關係即ち数理形式の益々複雑になることをさえも少しも辞しないように見える。相対性理論の出現<sup>ごと</sup>の如きはその著しい例であつて之<sup>これ</sup>がために従来の空間及び時間の概念や力学法則などがいかに複雑化されたかは誰も知る処である。それにも拘<sup>かか</sup>わらず之によって物質に根本的に帰属する万有引力及び電磁氣力の場が単一的に世界空間の

幾何学に於て云いあらわされ、力学現象ばかりでなく電磁気現象や光学的現象などがすべて単一の形像のなかに整えられることに於て全体の機構を見透すことのできる簡単さがあらわれるのである。この意味に於ては全機構の連絡を缺くことは却<sup>かえ</sup>って思惟上簡単ではないのであって、箇々の部分的記述に対する簡単さはここでは重要さに於て劣るものとなる。そして理想主義論から見るならば、ともかくも全体の世界形像がかようにして恐らく唯一の整然たる論理的体系として構成せられることが、自然それ自身の思惟經濟原理にかなう所以<sup>ゆえん</sup>であると解せられる。

## 27. 物理学の実用性

理想主義的に見るならば自然科学の研究は自然に於ける科学的真理<sup>せんめい</sup>を闡明することによってその他の何もののためでもない。科学者はこの真理を体験して自然そのものを知ればよいのである。之<sup>これ</sup>が実用に供せられると否との如きは彼の敢て関する処ではない。従ってその研究題目の採択<sup>ごと</sup>の如きも後者に対する要求<sup>いかに</sup>の如何によって何等<sup>なんら</sup>煩わされる事を要しない。かような見地からポアンカレ (Poincaré) の如き学者によって謂わゆる‘科学のための科学’が高調<sup>しか</sup>せられた。併しながら他方に於て自然科学が我々の実生活に対する関係はその実用性に於て絶大である事は否定せられない。物理学の法則に従って我々が種々の機械を作りいかに多くの便益を得て人類の生活を豊富ならしめているかは一々数えるに余る程である。實用主義者の見地から云うならば自然科学はこのような目的を達しさえすればそれでよいのである。只<sup>これら</sup>之等両者の見地は各の人生觀並びに哲学觀の異なるに依るのであってそれは止むを得ないけれども、いずれにしても自然科学の發展を望む上に於ては同一である。今日の物質文化が既に或る程度に達しているとは云え、一方に於てその種々の弊害<sup>ひつきょう</sup>が挙げられるのは、畢竟するに科学が尚お十分に之等を除くべき手段を準備しないために過ぎない。この点からしても我々は更にその一層の發達を必要とするのである。

物理学の実用性を増大するためにその純粹な根本的理論の進歩が必要であるのはここに説くを要しないであろう。いかに実用性から遠いと思われる理論でさえも、それが実証的なる限りに於て即ち經驗的事實の上に立てられる限り、多

くの実在の現象を記述するものでなければならない。相対性理論が殆んど抽象的な机上理論の如くに見えろとは云え、それが例えば原子構造論に應用せられて原子スペクトルの正しい説明を与え、引いて原子の構造が明確にせられるとすれば、原子の変化の如き實際上の問題にまで關聯することが知られるであろう。即ち物理学理論の進歩發展の悉くが一方に於て実在認識の階段を高めると共に、他方に於て亦実用上の価値を増すのであると云って差支えない。

物理学が進歩するに従って屢々その理論の変革が行われることは既知の事柄である。この変革の有無は併し物理学の実用性に取っては何等の障害を及ぼさないことは注目すべきである。ニュートンの万有引力の法則は今日の物理学的世界形像に於ては一般相対性理論から導き出されるものによって置き換えられねばならなかったけれども、今日まで星の運動に應用せられて、新しい惑星の発見を成功せしめ、彗星の再現を予知せしめ、日蝕や月蝕の日時を正しく云いあらわし、我々に日常の曆を供給する便宜を与える点に於て依然として実用に役立つであろう。之は或る近似の限界内に於て事実を記述するからである。すべての物理学的法則がそれぞれの近似性を有していることは単にそれらの実用性に於てばかりでなく、認識論の上に於ても極めて大切な事柄である。之等の法則が科学的真理を云いあらわすと云うことのみを一見すれば、法則の変革は真理の交代を意味し、従って今日我々の認める処の何れのものも将来の変革の絶無を保証し難い故に、必らずしも真理として見做すわけにゆかないと云う論理が成立するに違いない。併しながら之は科学的真理なるものの本質を見誤っているのであって、すべての経験並びに之から帰納せられる処の法則と共に、少なくとも我々が手にし得る科学的真理は悉く近似的であることを許さねばならないのである。世界形像の唯一性とか絶対の真理とか云うものは単に理想的にのみ追究せられるであろうところのものに外ならない。現實に与えられるものは之に反してすべて近似的である。只物理学の進歩はその近似性を絶えず高めるであろう。そして実用的にはこの近似性の向上を望みさえすればよいが、理想主義的にはそれが限界なしにどこまでも高まり得ることを要請しなければならないのである。ここに理想主義の

現実超越が結果するわけである。

要するに我々は現実的には常に或る程度の近似性に踏み止まるより外はないのであるが、若し可能であるならば之を理想的極限にまで押し進めることの要求に対して敢て阻止する必要はないであろう。物理学に於ては力の場の連続的理論のみが世界形像を支配していた当時<sup>も</sup>あつては、即ち相対性理論の発展に至る迄は後の要求が特に強くはたらき、それがプランクやポアンカレの理想主義としてあらわれたことは当然であつたが、新たに不連続的な量子論の発展に伴って最近の量子力学や波動力学が行われ、特にそれらが原子内部の電子的状態に対して単に統計学的にしか記述することのできないと云う事実を明らかにし、依つて従来信ぜられていた物理学的法則の必然性を否定して単なる蓋然性によって之を置き換えようとするに至って、恐らく純粹の理想主義への疑問が起されないわけにはゆかないであろう。この点に関する詳論はここでは省略する。



---

本PDFは、

石原純『物理学概論』（「岩波講座 物理学及び化学・物理学 1A」1929年6月、岩波書店）

を元に作成したものに、

1931年6月発行の「増補版」から、

第4章「物理学と認識」

を追加したものである。

PDF化にあたって、旧漢字は新漢字に、仮名遣いは新仮名遣いに変更した。漢字の一部には振り仮名をつけた。

科学の古典文献を電子図書館「科学図書館」

<http://fomalhaut.web.infoseek.co.jp/sciencelib.html>

に収録してあります。

「科学図書館」に新しく収録した文献の案内、その他「科学図書館」に関する意見などは、

「科学図書館掲示板」

<http://6325.teacup.com/munehiroumeda/bbs>

を御覧いただくか、書き込みください。