

力学的自然観に対する近代物理学の立場

1910年9月23日プライスガム・ケーニッヒスベルグに於ける
第82回ドイツ自然科学者及び医学者年会でなされた講演

マックス・プランク著
石原純訳

我々の学会が年々に開かれたすべての都市のうちで、今年の会合地ほど、物理学理論の近代発展への一瞥を投げるのに適わしい場処は他にない。私は、天才的の大胆さをもって我々の宇宙の始原をまでも物理学的法則に従わしめようとした偉大なケーニッヒスベルグの哲学者を想うばかりではない、私はドイツに於ける理論物理学の始祖フランツ・ノイマンをも想う。物理的科学的その学派はそれの最も顕著な研究者を贈った。私はエネルギー恒存の原理の発見者ヘルマン・ヘルムホルツを想う。彼は56年前にここで物理経済学会の会員の前に、その当時にはまるで新しい概念であったポテンシャル並びに運動エネルギー（「張力」並びに「活力」）を、水力で揚げられ又下降させられる鎚の例で説明した。

誰でも知っている通りに、その時以来物理学に於て豫期しない変化が起った。ヘルムホルツが今日我々の間に座したとしたなら、彼は疑もなく物理的の事柄を聞いてその大部分について頭を錯乱させる程に驚くであろう。第一に実験的技術の非常な進歩が変革を惹き起したのであった。それによって成功した結果は種々の関係から見てまるで期待されないものばかりで、僅かに数十年前にはまだ誰も手をつけられなかったような問題でさえも、今日では解かれたと考えられるようになり、技術的に絶対不可能であると見做されるものは原理的に殆んどなくなってしまった程である。だが併し^{しか}実際家に於て形づくられた意向のよい断片が理論家に報ぜられて、彼等は今は以前の時代には見ることでできない大胆さで仕事に従い、どの物理的法則も現在では疑問を超えるわけにゆかなくなり、あらゆるどの物理的真理も議論されるようになる。だから理論物理学に於ては再び混沌の時代があらわれたかのように^{しばしば}屢々思われる。

併し^{しか}新しい事実の満足が混乱して、新しい思想の多くが雑然と我々に迫れば迫る程、益々命令的に他方に於ては再び統括した思考方法への叫びが揚ってくる。実際どんな実験の結果も確かに一つの適当な整序と解釈とによって始めて確実にせられ、同様に或る作用仮説が広い範囲に用いられ、正しい問題の立場に到達するためには、やはり合目的な物理的世界観によって媒せられる必要がある。そして単に物理学に対してばかりでなく、全自然科学に対しても統括する自然観へのこの叫びは意味深い。なぜなら物理学的原理の範囲に於ける変革はその外のあらゆる自然科学に対して影響を及ぼさずにはいないからである。

従来物理学に最も重大な功績を与えたような自然観は云うまでもなく力学的のものである。それはすべての性質上の差違を最後には運動によって説明すると云うことになるのを考えると、我々は力学的自然観を次のように定義してもいいであろう。それは即ちすべての物理的過程を完全に不変的な同種の質点若しくは質量要素の運動に属せしめようとするところの見解である。ともかくも私はここでこの意味に於て力学的自然観を解しておこう。ところでこの仮説は今日物理学の新発展に対しても亦基礎的のものであり、且つ依然として成り立つであろうか。

以前から、この疑問の承認を殆んど自明の事として見做し、之をまさに物理学的研究の公準として考えていた物理学者及び哲学者があった。この見解によれば、理論物理学の問題は自然に於けるすべての過程を運動に帰することに於て成立する。之に反して懐疑派の人々は、問題のかような形式化の根本的性質を疑い、全自然過程のまるで雑多なものを包括するためには力学的自然観を餘りに狭過ぎるとなした。之等二つの反対意見のどちらが決定的勝利を従来に得たかを云うことはできない。今日に至って始めて最後の裁断が準備されるようにも見える。それは理論物理学を把握したところの深刻な運動——その波動が単に固有な物理学ばかりでなく、遙かに之を超えて化学や天文学の隣接範囲にも及ぼし、更に認識論にまでも到達し、その結果として起った科学的争闘に対比すべきものは単にコペルニクスの世界観によって導かれたところのものだけであると云ってもよい程の過激的な革命的の種類の一つの運動——の結果である。何がこの革命に導いたのであるか、いかにして之によって喚び起された危機が取り除かれるであろうか、それを私は次に説明して見たい。

力学的自然観の満開期は前世紀にあった。最初の大きな衝動を之はエネルギー

恒存の原理の発見によって受けたのであって、特にその発見当初に於ては^{しばしば}屢々エネルギー原理と同一視されたことさえあった。この誤解は何と云っても、力学的自然観の立場からエネルギー原理がいかにも容易に演繹されるために生じたのである。なぜなら、すべてのエネルギーが力学的性質のものであるとするならば、エネルギー原理は根本に於て、既に久しい以前から力学に於て知られていた活力（運動エネルギー）の法則以外の何ものでもないからである。そうすれば全自然に於て^{そもそも}抑も唯だ二種類のエネルギー、連動及びポテンシャル・エネルギーだけが存在することになり、或る種類のエネルギー、例えば熱、電気、磁気などに於ては、それが運動的の性質であるか、ポテンシャル的のものであるかをさえ判定すればよいのである。これは丁度、ヘルムホルツがエネルギーの恒存に関する最初の劃時代的論文に於て取ったところの立場である。エネルギー恒存の法則だけではまだエネルギーの性質に関して何事をも云いあらわしてはいないと云うことが判るまでには、それから更に或る時期が経過した。この意見は熱の力学的当量の発見者である、ユリウス・ロバート・マイヤーが最初から保持していたものであったのは即知の事柄である。

力学的自然観にその固有な特殊の衝動を与えたところのものは、^{むしろ}寧ろ運動学的気体論の発展であった。之は都合よくも化学的研究が提示したところの方向と相合した。そこでは分子と原子とを精確に差別する問題に於て（アボガドロの法則に、並びに気体状の分子の最も都合のいい定義に到達したが、この法則こそまさに運動学的気体論の厳格な結果であって、その際我々は温度を測るものとして運動分子の運動エネルギーを導き入れた。かようにして力学的思考のもとに分子の解離及び結合、等質異形、光学的能動性などが微細の点までも、摩擦や拡散や熱伝導の物理的過程と同じ効果をもって、力学的考察によって説明されることができた。

併しながら^{しか}尚^なお、化学的元素の差異がいかにして運動によって説明されるかと云う疑問が最後の最も重大な問題として残っていた。だが、ここでも亦望みがな^ないわけではなかった。なぜなら元素の週期的体系は明瞭に、結局は単に一種類の物質だけが存在することを啓示するよう^なに見えたからである。そして、水素がこの根元物質である^なと云うプラウトの仮説は、原子量が必ずしも水素原子量の整数倍でないと云う理由で、^{しばしば}屢々不当と見られはしたが、それでもすべての化学的元

素の共通な構成要素たる根元原子をもっと小さく選んで、それによって根元物質の単一性を維持させる可能性はやはり残存しているのであった。

一つの深刻な危険が或る時期の間原子的理論に対してエネルギーの方面から、即ち純粹の熱力学から起されるように見えた。上に挙げた通り、既に、力学的自然観がエネルギー原理によっては決して要求されるものではないことを知ったのであったが、更に熱力学の第二主則及び特に物理的化學の範圍に於けるその多くの応用は原子論に対する或る不信用に導いた。純粹の熱力学から容易に完全な精確さで且つ全体をも引き出した一般法則、例えば蒸発熱及び融解熱の法則、滲透圧、電氣的解離、氷点降下及び沸騰点上昇の法則の如きは、原子論の思考では却って労多く、しかも或る近似に於てのみ導き出すことができたのであって、特に原子論がまだ全く本当には導き入れられなかったところの液体や固体の範圍に於てはそうであった。之に反して熱力学の方法は三つの集合状態のどれにも同様によく当て嵌まり、殊に溶液の範圍に於てはその最も輝かしい効果をも發揮した。原子論に対する困難のなかでも、殊に自然過程の非可逆性は力学的自然観をその儘では許さなかった。力学に於てすべての過程は可逆的であるから、原子論を熱理論の第二主則と調和せしめるばかりでなく、却って第二主則の根本思想を原子論によって始めて理解させるようにするためには、深奥な解析と一人のルードウィヒ・ボルツマンの屈撓しない科学的樂觀主義とを必要としたのであった。すべて之等の困難な問題は遊戯的に征服された、と云うよりはそれは寧ろ純粹の熱力学の支持者に対しては全然存在しなかったのである。彼等は熱及び化學的エネルギーを力學的エネルギーに歸することをまるで問題として認めずに、却って種々の種類のエネルギーを假定するのに止まっていた。——この事情はボルツマンをして屢々運動學的氣體論を流行のように思った、その敵對者に向って注意した処のものであった。だが、數年後には彼ももはや然うは云わないようになった。なぜなら丁度その頃に運動學的氣體論は從來少くとも評価を受けなかったところの効果を漸くにして集収するに至ったからである。

先ず純粹の熱力学は忽ちにしてその自然的限界に到達した。即ち第二主則は一般には単に一つの不等式を供給するだけであって、只平衡状態に対してのみ完全な一般性と精確さをもった方程式がそれから導き出されるに適ぎない。けれどもこの範圍を去ってしまつて、物理的若しくは化學的過程の時間的経過を問題とすると、第二主則は單に方向を指示するだけで、たかだか平衡状態と極僅かし

か隔たらないような過程に対して幾らかの性質的解答を与え得るに過ぎない。反応速度に対する数量的規定値をそれは供給しないし、その過程の一々に対する展望に至っては殆んど何も云わない。つまりここでは原子的考想に依らねばならないのであって、それはすべての方向に確証された。特に重要なのはイオン化の法則並びに電子に関するすべての過程の法則に対してである。ここでは簡単に、分散現象や、陰極線及びエックス線や、広大な範囲を只一つの言葉で云ってしまえば、全放射性現象などが単に運動学的原子論の基礎の上にもみ理解せられると云うことを指摘すれば、それで足りる。

そればかりでなく、熱力学の固有の範囲である平衡^も若しくは定常状態に於てさえも、純粹熱力学では暗黒に残された或る疑問に対して運動体的理論は光明を照り互らせた。それは熱輻射の発散及び吸収を理解せしめ、更に謂わゆるブラウン分子連動の説明に於てその正当さと必要とに対する直接の、云わば手に取るような証明を供給し、之によって始めて最近にその最高の勝利を祝福した。総括して云えば、熱体、化体、電子論の範囲^かに於て運動体的原子論はもはや単なる作業仮説ではなくて、一つの固定的に且つ永久的に基礎づけられた理論である。

ところで併し^{しか}それは力学的自然観とどんな関係に立つか。後者は決して物質及び電気の原子論だけでは満足しないで、更にそれ以上にあらゆる自然現象が単純の質点の連動として意味づけられ得ることを要請するのであろう。

原理的にあらゆる自然現象を運動に帰着せしめようとする最も大袈裟な、だが亦恐らく最後の試図は、ハインリッヒ・ヘルツの力学に含まれていた。ここに力学的自然観を単一の世界形像たらしめようとする努力が或る理想的完結にまでも持ち来された。ヘルツの力学は元来現実の物理学ではなく、寧ろ^{むし}将来の物理学若しくは云わば一種の信念考想である。それは要望された帰結と調和とを有する一つのプログラムを設立する。同じ目的に向けられた従前のすべての試案を後方に退けるところのものである。ヘルツは即ち、全物理学的宇宙の唯一の眞の建築石材たる単純な同種の質点の連動の仮定に基づいて力学的自然観を完全に実現せしめることを要請するだけで満足しないで、尚おヘルムホルツが彼の力の恒存に於て取った立脚点を超え、ポテンシャル・エネルギーと運動エネルギーとの差別、従って特殊のエネルギーの種類の研究に関するすべての問題を最初から除外してしまった。ヘルツに依れば、単に唯一の物質の種類、即ち質点が存在するだけでなく、エネルギーも亦唯一の種類、即ち連動エネルギーしか存在しないので

ある。すべての他のエネルギー、例えば我々がポテンシャル・エネルギーとして、亦電磁的、化学的、熱学的エネルギーとしてあらわすところのものは、実際には視えない質点の運動のエネルギーであって、之等のエネルギーの有様がどんなに異なっていようとも、自然に於てその質点の位置と速度との間に成り立つ固定的連絡は唯一単独のものである。この連結はエネルギー原理の適用性に少しも影響しない。なぜならそれは運動の方向を左右するとも、活力の大いさには少しも影響しないこと、丁度走っている汽車が軌道の屈曲によって向きを変えはするが決して遅くはならないのと同様であるからである。自然に於けるすべての運動はそれ故ヘルツに従えば結局は単に物質の惰性にのみ依るのである。この見解に対する好例を運動学的気体論が供給する。それは従来静止せる気体粒子のポテンシャル・エネルギーとして見做していた弾性的エネルギーを連動せる気体粒子の運動エネルギーによって置き換えている。このように思い切って仮定を簡単にした結果は、ヘルツの力学の法則に驚くべき簡単さと透見性とを恵んだ。

けれども詳しく観察すると、困難が消滅したのでなくて、単に後退したに過ぎない、しかも実験的検証の殆んど届きかねる範囲に押し退けられたに過ぎない。ヘルツ自身も之を感じたに相違なかった。なぜなら彼は、ヘルムホルツも亦遺著の序文に於て強調した通りに、彼の導き入れた不可視的運動の種類とそれの固有の連結とを或る簡単な場合に於て示そうとする試みだけでも決して為さなかったからである。今日でも亦我々はこの方向に一步も進んではいない。反対に我々は物理学がその間に全く異った路を拓いたのを見るであろう。それはヘルツのと異なるばかりでなく、抑も力学的見解とは遙かに隔ったところのものである。なぜなら恰度最も精密に研究された物理的過程のうちに、力学的自然観の徹底に向つて恐らく打ち勝ち難い抵抗を及ぼすような一つの大きな集^な群が尚お存在するからである。

私は今力学的理論の本来の悲劇兒たる光エーテルに自分を向ける。光波を稀薄に分布された物質の運動として解しようとする努力はホイヘンスの波動論以来の事であり、又この謎めいた媒質の構成について時代の経過につれて形作られた沢山の考想は相応に雑色づけられた。物質的エーテルの存在は確かに力学的自然観の一要請であるが、——之によればエネルギーの在る処には亦運動があり、運動の在る処には動くところの何ものかがなければならぬ——、でもその性状は不思議にもすべてその外に知られた物質とは似つかないのである。既にその密度

が非常に小さいにも拘わらず、光波の巨大な伝播速度を生ずるためにその弾性は非常に大きくなければならない。光波を縦波として考えたホイヘンスによれば、エーテルを尚お稀薄の気体のように見ることができたが、横波性を確実にしたフレネルに依れば、エーテルは固体と云われなければならなかった。なぜなら気体エーテルは光の横波を伝えることが不可能であったからである。横波をどうかして気体中にも起るところの摩擦様の過程で説明しようとする試みも屢々なされたけれども、併しこの方法では、自由エーテル中で光の吸収も存在しないし、伝播速度が色に関係しないと云う事実を説明するわけにゆかない。そこで止むなく固体を仮定しながら、しかもこのなかを天体が何等の抵抗もあらわさずに通過すると云う奇妙な性質を之に与えなければならぬのであった。ところがそれはまだ困難の最初に過ぎなかった。固体の弾性論の方程式をエーテルに應用してみると、縦波をも生ずることが要求されるのであるが、之は実際には存在しないし、少くとも種々の方法で十分な努力を払っても之を見出すことができなかった。従つてこの縦波を取り除くために、エーテルの圧縮性を無限に小さいとするか又は無限に大きいと仮定するより外はなかった。併し然うしてさえも、二つの異った媒質の境界面に於ける限界条件を完全に満足させることは不可能であった。

私はここでは之等の困難を征服しようとして試みられた種々の、多少複雑な仮定を述べることを止めて、只無駄な仮説を引き入れるように習慣づけるところの、そしてそれが亦現に取り扱っている問題の場合にも自ら不愉快に感じさせるところの一つの疑問的な症候を指摘して置きたい。私は、まるで測定によって判断することのできないような物理学的論争の出現を意味するのである。中でも、直線的に偏った光の振動方向と偏光面との関係に関するフレネルとノイマンとの間の有名な論争は之に属する。根本に於て解き得ないと思われる問題についてこれ程執拗な争闘がしかも考想せられる限りの実験及び理論の武器をもって行われた物理学の範囲は恐らく他にはあるまい。

電磁的光論の進出と共に漸くこの争闘は無意味として知られ且つ中止せられた——無意味と云うのは併し単に、光を電気力学的過程として見做すことで満足する見解に対してのことである。なぜなら、光波の力学的解釈の問題は解かれずに残っているからであつて、それはすべての電磁的過程、即ち静的及び動的過程を運動に帰着させようとする遙かに一般的の問題の解決にまで移されたに過ぎな

かった。そして実際に、電気力学が益々発展すると共にこのより大きな問題への興味が再び益々強く生長した。更に包括的な補助手段を用いて、より一般的な推量からして、その解決をより詳しく導こうとしたので、之によってエーテルの重要さが再び亦高まって来た。なぜなら、それはこれ迄は単に光波の場処でしかなかったのに、今は少くとも純粹空間に於ける全電磁現象を荷う者となったからである。

だがすべては無駄であった——エーテルは之を力学的に解しようとするすべての努力を斥けてしまった。電気及び磁気のエネルギーが或る意味で運動及び位置のエネルギーと同様に対立することだけは明らかであったが、それで先ず電気又は磁気のエネルギーのどちらが運動エネルギーとして見做さるべきかが問題とせられた。光学では前者はフレネルの理論に、後者はノイマンの理論に導くのであった。けれども、静的の且つ定常的の場の特質を引き入れることによって光学的の範囲では不可能な判断に対する必要な支持点が供給されるであろうと云う望みは実現されなかった。反対にそれは単に困難の度を増大するだけであった。エーテルの構造を基礎づけるためのあらゆる提案と結合とが考え盡された。大物理学者のうちでロード・ケルヴィンは恐らくこの方向に於て彼の生涯を終るまで最も働いた人であった。でも、自由エーテルに於ける電気力学的過程を単一の力学的仮説から導き出すことは遂に不可能であることがわかった。——併しそれは驚くべき簡単さで、又今日まであらゆる微細の点に互って確められた精密さをもって、マクスウェル・ヘルツの微分方程式によって云いあらわされるのである。即ち法則それ自身は最も詳細にまでも知られたのであったが、只この簡単な法則の力学的説明は成功しなかった。しかも完全に且つ終局的にである。少くとも私は、純粹エーテルに於ける電気力学的過程に対して、簡単なマクスウェル・ヘルツの微分方程式を仮定することがその力学的説明の可能性と相容れないものであると綜括的に云うとしても、物理学者の仲間のなかで決して深刻な反対に出遇わないことを信じている。マクスウェルが最初に力学的思考を借りて彼の方程式に達したと云うことは、勿論この事柄を左右するものではない。全く十分でない思想を結合して精密に正しい結果が見出だされたことは、之が始めではなかったであろう。今日自由エーテルに於ける電気力学的過程の力学的見解に執着しようとするものは、誰でもマクスウェル・ヘルツの方程式を全く精確と見做さないで、之により小さな程度の或る項を附加して精密にする必要をもつのである。この立

場を正当であるとするのに対しては豫め非難するわけにはゆかないし、ここに尚おあらゆる種類の想像に対する餘地が存するのであるが、併し他方に於て、その確立は単に実験の方法で行うことができるに過ぎないと云うこと、並びにかような試みに際してはこれ迄いつも無駄になった沢山の実験に尚お一つの新しいものを補足することの可能性を一層強く豫期しなければならないと云うことを、注意しなくてはならない。かような実験については既に私は述べた。だが、一つを私はまだ話さなかった。しかもそれはすべてのうちで最も重要なものであり、実際その重要さはエーテルの性質に関してより立ち入ってなされるすべての仮定とはまるで無関係のものである。

即ちエーテルの構造についてどのように考えようとも、之を連続的として、又は不連続的にエーテル原子若しくは中性子 (Neutron) から成り立っていると見做そうとも、いつも次の疑問が起る。或る透明体の運動に際してそのなかに存在するエーテルは運動物体に伴われて動くであろうか、又は物体が運動してもエーテルは全部若しくは一部分静止しているであろうかと云う事である。この疑問に対して確かに答え得る事柄は、いずれにしてもエーテルが完全には物体に伴われることはなく、場合によっては一部分だけとか又はまるで伴われないかも知れないと云うことである。なぜなら、運動せる硝子のなかで、又は例えば運動せる空気ガラスのなかで、光は硝子の速度とは殆ど無関係に進むのであって、若し私が少しく思い切って大胆に云うならば、光は風に逆らって丁度風と同じ速さで進むのである。この事は既に前世紀の中頃にフィゾーが精細な干渉実験によって証明した処のものであった。だから我々は光波の進行するエーテルが運動せる空気によって殆ど影響されずに始終静止していると考えなくてはならない。併し若し然うであるならば、当然もう一步を進めて問わなければならない。それなら、大気がエーテルを通じて動く速さはどれ程の大いさであるかと。

ところでこの疑問は従来どんな場合にも、どんな測定によっても答えることはできなかつた。地球を取り囲む大気は大体に於て地球と一緒に動いている。即ち太陽に対して凡そ毎秒30キロメートルの速さを有し、その方向は季節に従って漸次に変るのである。この速度は光速度の1万分の1にしか過ぎないけれども、それでも光学的実験は、我々が光学で知っている処に従えば、この程度の速さを測ることをも可能とするであろうと思われる。エーテルに対する地球運動の測定に関する研究はアンナーレン・デル・フィジーク (訳者註、ドイツの物理学の主要な

雑誌)の多数の頁を占有している。けれどもあらゆる鋭感も、あらゆる実験的技術も事実の執拗さに於て失敗させられた。自然は沈黙したままで解答を拒絶した。我々の大気中に於ける光学的過程に対する地球運動の影響は決してどこにも見出だされなかった。この関係に於て最も顕著なものはマイケルソンの実験の結果である。そこでは地球運動の方向に於ける光の進行が地球運動の方向に垂直な光の進行と比較されたのであった。この実験に於ては関係は原理的に非常に簡単であり、測定の方法は非常に感じがよくて、地球運動の影響は悉く明瞭にあらわされねばならない筈であった。それにも拘わらず求められた効果は存在しなかったのである。

理論物理学に対してそれ程も困難な謎めいたこの事柄に關して、寧ろエーテルの問題を全く異なった方面から捕捉することがより良くはなكارるかと言う思考は、必ずしも当らないものではない。エーテルの力学的性質に関するあらゆる実験の失敗は或る原理的理由をもつのであったろうか。エーテルの構造、密度、弾性的性質や、エーテル縦波や、エーテルの速度と偏光面との関係や、エーテルに対する地球大気^の速度などに関する既述の疑問は、すべてまるで何等の物理的意味をももたないのであろうか。然うであるとしたなら、之等の問題を解こうとする努力は、丁度永久機関を構成しようとする努力と同じ階級に立つものでもあったであろう。そしてそれ故に我々は決断的の転向点に到達するのである。

私が冒頭に述べたヘルムホルツのケーニッヒスベルグに於ける講演のなかで、彼が特別の印象をもって強調した事柄は、エネルギー原理の発見への第一歩が、永久機関を造ることの不可能であるとした際に自然力の間^にどんな関係が存しなければならぬかと言う疑問を起したことによって、踏み出されたと言うことであつた。之と同様に相対性原理の発見への第一歩は、エーテルに何等の物質的性質をも証明することが不可能であるとした際に、自然力の間^にどんな関係が存しなければならぬかと言う疑問に帰着することを確かに正当に主張することができる。即ち光波は抑も物質的荷担者^にに執着することなしに空間を進むのであるか。そうであるならば、勿論エーテルに対する運動物体の速度は全く定義することもできないし、又実際に測るわけにもゆかなかつたであろう。

力学的の自然観がこの見解と相容れないものであることは、私が特に指示するまでもあるまい。それ故力学的自然観を物理学的思考の一つの公準として見做す人は、相対性理論をもっては決して満足することができないであろう。けれども

自由に判断する人は、先ずその原理が我々をどこへ導くかを尋ねるのであろう。そこに先ず、現に与えられた純粹に不定的な新原理の表現が、之と經驗から採り入れられた肯定的な基礎とを結合するとき始めて効果ある内容を得ることがわかる。かような肯定的な基礎としては既に述べたところの、自由エーテルに於ける、——若しくは今は寧ろ純粹真空に於けると云う方がよい——電氣力学的過程のマクスウェル・ヘルツ方程式が最もよく適する。なぜなら、あらゆる媒質のうちで真空が思考し得る最も単純なものであり、そして之に相応して全物理学に於て、一般原理を除外すれば、之れ程微妙な過程をあらわし、しかも之等の方程式程に精確に成立するように見えるどんな関係も知られてはいないからである。

一つの新しい真理は、併しいつも最初には或る困難と戦わねばならない。そうでない限り、それはもっとずっと以前に見出だされていた筈であるからである。相対性理論の場合には、主要の困難が、時の概念の見解に関して是非とも赴かねばならないところの、非常に深遠な、寧ろ革命的と云ってもよい一つの帰結に於て横たわっている。この主要点を一つの具体的の例について少々詳しく説明して見よう。

相対性原理によれば、我々の太陽系に於てそのあらゆる構成部分の共通な一定の速度を体系内部の測定によって証拠立てることは全く不可能である。かような速度は、それがどれ程大きくあつたとしても、体系内部の作用によってはどんな風にも決してあらわされはしないのである。天文学者にはこの法則はその儘で周知のものである。だが、それは亦物理学者に対しても適用される筈である。ところで誰でも学問あるものは、一つの天体、例えば太陽に於て或る特別な現象を観測する際に、その出来事が地球上で認められるのと同じ瞬間に太陽の上で起るのではなく、却つて出来事とそれの観測との間には幾らかの時間が経過していることを知っている。その時間はつまり太陽から地球に光が到達するのに必要な時間である。若し太陽と地球とが両方とも静止していると仮定するならば——太陽の周りの地球の運動を我々はここでは全く度外視する、——この時間は凡そ8分となる。若し併し太陽と地球とが共通の速度で、例えば地球から太陽に向う方向に、動いているならば、従つて地球は太陽に向つて進み、太陽は同じ速度で地球から遠ざかつてゆくならば、この時間はもっと短くなる、なぜなら、光波が使者として太陽の出来事の報知を地球に持ち来るに當つて、それが太陽を離れ去つた後に、太陽の速度とは無関係に光速度をもって宇宙空間を走り、そして地球がこ

の使者に出会うのであるから、それは静止して使者の到着を期待する場合よりも、もっと以前に之に出会うわけである。反対に、若し地球が太陽から遠ざかり、太陽が一定の距離で地球の跡を追うならば、出来事と観測の時間はより長くなる。

そこで斯う尋ねる。太陽の上の出来事と地球上の観測との間に「現実」にどれだけの時間が経過するのであるかと。この間は次のものと全く同じ意味である。太陽と地球との「現実」の速度は幾らであるか。ところでこの疑問は相対性原理によれば全然物理的意味をもつことができないのであるから、先に述べた間に対してもやはり然うでなければならぬ。云い換えれば、時間決定は物理学に於ては、之を行うべき観測者の速度状態が考慮に入れられた上で、始めて一定の意味をもつのである。

この結論によれば、時間は丁度速度と同様に単に相対的の意味しかもたないし、従って異った場処に於ける二つの互いに独立な出来事に於て、「前」、「後」の概念が二人の異った観測者に対してまさに逆になることもできるのであるから、之は普通の常識では一見途方もないことのように見え、全く承認し難くも思われる。——でも我々が鉛直と呼ぶ方向が決して絶対に一定のものではなく、二十四時間毎に空間に於て一つの円錐を描くものであると云う主張が、五百年前に不思議に感ぜられたのに比べれば、多分まだしもさ程ではあるまい。直観の要求は、多くの場合には正しいと云っても、或る事情のもとには、特に科学に於て新しい大きな思想が入り込むことに対して、却って有害な妨げになることもあり得るのである。確かに多くの有数な物理学的思想は直接の直観に基づいて生長したのであるけれども、併しいつも亦、無用な直観と戦って始めてその地位を確保しなければならなかったようなものが必ずしも尠くはなかった。

我々は誰でも子供の時分の直観能力をもって、我々の方へ逆に足を向けている人間が地球上に存在し、そう云う人たちも我々と同じ様に地面を歩んで、しかも地球から落ちることもなく、又少くとも頭脳の方に、不愉快な逆上を感ずることもないと云うようなことを、最初に考えようと骨折ったときに、困難を感じたことを思い出すであろう。併し今日に於て直観を缺くことをもって、すべての空間的方向の相対的性質に対する事実上の非難としようと思うものがあつたなら、その人は単に笑殺されてしまうであろう。私は五百年後に時間の相対的性質を疑おうとした人に之と同じ事が^{あては}当嵌まるであろうかを確かには云われぬ。

新らしい物理学的仮説を評価すべき尺度は、その直観性にあるのではなく、そ

の効用能力に存するのである。仮説が^{ひとたび}一度効果あるものとして認められたなら、人々は之に慣れて、だんだんに或る直観性がおのずから伴って来る。電磁的作用の研究が^な尚お不完全であった頃には、^{しばしば}屢々ガルバーニ電流や動電力や磁気指力線などを直観させるために、水流や水力ポンプや引張られたゴム紐などの思考を缺く事ができないと信ぜられていた。今日では電気工学者は大部分之等の不完全な類推を^{むし}寧ろ恥じて、習慣上彼等に信用されるようになった電磁的思考をもって直接に仕事している。それどころではなく私には、反対により複雑な液体流動、例えばヘルムホルツの渦動の如きものを電磁的類推によって直観的にしようと試みられたことさえ、眼につくのである。

さてこの関係は相対性理論ではどうなるのであろうか。之は物理学的抽象性に関しては非常に遙かな要請を起すのであるが、併しその方法は^{しか}便利で又普遍的であり、殊に^{こと}一義的な、比較的容易に形式立てられる結果を与えるものである。新地歩に対する功労者のうちで先ず挙げるべきはヘンドリク・アントーン・ローレンツであるが、彼は相対的時間の概念を見出だし、之を電気力学に導き入れたけれども、まだそれ程過激的な結論までは到達しなかった。次にアルベルト・アインシュタインがすべての時間決定の相対性を普遍的公準として始めて大胆に宣言し、ヘルマン・ミンコフスキーに至って、相対性理論をみごとな数学的体系に持ち来すことに成功した。

この抽象的な問題が^{なかならず}就中数学者の間に興味と刺戟とを見出だしたのは決して偶然ではなく、特にここにあらわされる数学的方法が大部分四次元の幾何学に於て発達したものと全く同じものであることが示された上では^{もちろん}勿論である。だが亦真の、豫断することのない実験物理学者も相対性理論に対して決して最初から敵対するのではなく、単にその立場を、実験的検証がどんな結果を与えるであろうかに関係せしめるのである。この点に関して先ず挙げるべきことは、相対性理論から出る物理学的結論は非常に数多いけれども、併し^{しか}それらの検証は測定の精密さに関して何れも観測器械の作用能力の極度までを發揮することを必要とすると云うことである。それは主として、我々が測定の際に物体に与える速度が光速度に比べて通常小さいと云うことから起るのである。最も速い運動は電子に於て見られるから、従って電子の力学の範囲に於て最初の確実な積極的結果が期待されるわけである。ところが器械の作用能力は時間と共に増し、測定の精確さを高め、

理論の検証を細密にするであろう。ここでも亦上に引用した例に於て地球の大いさとの比較をなすのと同様である。若し地球の半径が実験の際に扱う長さ^もに比べてそれ程大きくなかったであろうならば、地球の球状やすべての空間的方向の相対性は何れにしてももっとずっと以前に知られていたにちがいない。

併し^{しか}ながら私が既に繰り返して云ったところの、空間と時間との間のこの類推は尚お遙かに押し進められる。それは一つの類推以上のものであり、少くとも数学的の意味では、恒等である。時間を適当な、併し^{しか}虚数的の、単位で測ると、空間の三つの次元と時間の一つの次元とが物理学上の根本法則のなかに絶対に対称的に入り込むと云うことを示したのは、ミンコフスキーの主要な効績である。一つの空間的方向から他への転移はそれによれば^か数学的に且つ物理学的に一つの速度から他の速度への転移と全く同等であって、^{おのおの}各の速度状態の相対的意味に関する学問は単に^{おのおの}各の空間的方向の相対性の学問の補足に過ぎない。後者が久しい争闘の後に始めて一般的の承認を^か贏ち得たように、前者に於ても亦^{おのおの}各の場合に一層激しい戦闘に値いするであろう。——戦闘は今日では少くとも、あの当時のように決して近代人の身体や生命への危険を伴いはしないけれども、併し^{しか}判断を持ち来すための最もよい手段、寧ろ唯一の手段は、新思想が導くところの^{むし}帰結をもっと追究することにある。そしてこの意味で私の次に述べる処をも解してもらいたい。

相対性原理によれば、我々が観測することのできる物理学的世界は四つの完全に^か等権利な且つ交換し得る次元を有する。その中の三つを我々は空間と名づけ、第四を時間と名づける。そして^{おのおの}各の物理学法則から、そのなかにあらわれる世界坐標を交換することによって三つの他の法則を導き出すことができる。

最上の物理学法則、即ちこの全体系の王冠を作るものは、少くとも私の意見では、最小作用の原理であって、それは四つの世界坐標を、完全に対称的な序列に於て含んでいる¹⁾。この中心原理から四つの世界次元に相応して、四つの方向へ対称的に四つの全く等値の原理が放出する。空間的次元には(三重の)連動量の原理が相応し、時間的次元にはエネルギーの原理が相応する。之等の原理のより深い意味並びに共通の根源を根柢までも溯って追究することは、以前には決して可能ではなかったのである。

1) 最小作用の原理は通常は一つの時間積分によって云いあらわされているから、そこには時間の特権が存するように見える。併しこの一面性は単に外見的のものであり、記述方法の種類に関係するのである、なぜなら、或る物理的過程の「作用積分」(その変分が消失するような量)はすべてのローレンツ転換に対して不変であるからである。

力学的自然観のエネルギー的自然観に対する関係も亦この見解によって新らしい光明のもとに置かれる。なぜなら、エネルギー的自然観がエネルギー原理に基づくと同じ様に、力学的自然観は運動量原理に基づくからである。能く知られたニュートンの三つの連動方程式は、一つの質点に応用せられて、運動量の原理を云いあらわしたものに外ならない。之に従えば運動量の変化は力の衝撃に等しいのであって、一方でエネルギー原理に従えばエネルギーの変化は力の仕事に等しいのである。力学的並びにエネルギー的自然観のどちらもそれ故に或る一面性に偏しているのであって、只前者が運動量のヴェクトルの性質に相応して三つの方程式を与え、之に反して後者は単に一つの方程式をしか供給しない限り、前者の方が本質的に後者よりも優っているだけである。勿論前述の事柄は唯一の質点の運動に対してばかりでなく、力学、電気力学及び熱力学の範囲に於ける各の可逆的過程に対しても成り立つのである。

一つの連動物体の運動量若しくはエネルギーからその惰性的質量が導き出されるが、それはこのような考察に際してはそれの要素的性質を失って、第二次的の概念に沈下してしまう。実際にこの方法に於ては物体の惰性的質量は一定のものでなく、却って速度に関係し、且つ物体の速度が光速度にまで上るときに惰性的質量はあらゆる限界を超えて増すと云う風になる。それ故に相対性理論に従えば、一つの物体を、光速度と同様な、若しくはそれ以上に達する速度に持ち来すことは到底不可能である。その外物体の惰性的質量が常数でなくて、厳密に云えば温度にさえも関係すると云うことは、相対性理論から離れても、既に簡単に、各の物体が内部に輻射熱の幾らかの分量を温度に関係して含蔵して居り、フリッツ・ハーゼンエールが最初に示したように、之が惰性をもっていることからも結論される。

そこで次の疑問が起る。従来一般に根本的のものとして仮定していた質点の概念が恒常性及び不発性を失うとすれば、本来実質的なものは何であり、物理学的世界建造物が組み立てられるところの不変的な築材は果して何であるか。——之に対しては次のように答えられる。相対性原理の上に基礎づけられた物理学の体系の不変的要素は謂ゆる普遍的常数である。就中、真空に於ける光速度、電子の電気量及び静質量、熱輻射から得られた、そして多分化学的現象に於ても亦根本的の役目を演ずるところの「要素的作用量子」、万有引力常数、並びにその外のものである。之等の量は、それらの値が観測者の性質や立場や速度状態に無

関係である限りに於て、実在的の意味をもっている。その外我々は、ここで詳細に説明すべき^な尚お多くの事柄の存在することを考えてみなくてはならない。若し我々があらゆるかような疑問を満足的に答えることができたでもあろうなら、物理学はもはや帰納的科学でなくなってしまうわけであるが、それは併し^{しか}確かにいつも帰納的に残るのであろう。

之等の僅少な注意で既にわかる通りに、相対性原理は決して単に破壊的、革命的のものではなく——それはまさに科学を無理に拡張して既に之なしにも遮られねばならなかった一つの形式を抛棄させるに過ぎない——却^{かえ}ってずっと高い程度に於て整序的、建造的なのである。それは昔の餘りに狭くなった殿堂の代りに新たな包括的な^か且つ永続的なものを築造する。この新殿堂は旧者のすべての財宝、^{もちろん}勿論私が上に述べた全原子学をも、透見し易いように分類を変更して採り納れ、更に新らしく期待されるものに対しても豫定された場処を保証する。それは物理学的世界形像から非本質的な、単に我々人間の直観及び習慣の偶然さによって持ち込まれた要素を取り去って、物理学を人間的な、物理学者の個性に由来する夾雑物から純化する。かような夾雑物を全く取り除くことが今日の物理学的認識の真の目的であると言うことは、私が既に他の場処で論じた処である。それは亦豫め学識のある研究者に純粹の測り難い広さと高さへの透視を開き、前時代には誰も想い及ばなかったような、又ハインリッヒ・ヘルツの形式上完全した力学でさえも^な尚お知られずに残されねばならなかったところの見地に彼を導く。之等の新らしい見解によって思想を深めるべく、一度^{ひとたび}歩を踏み出した人は、誰でも之等から出発するところの魔術からもはや手を引くことはできない。そして、科学から餘りにも早く死別したヘルマン・ミンコフスキーの天性のような芸術的に恵まれた精神が之等によって興奮に燃え上らずにはいられなかったことも、よく理解される。

だが、物理学上の問題は芸術的の見地から判断さるべきものではなく、^{かえ}却って実験に依るべきであり、そして之はすべての場合に思慮深い、骨の折れる、忍耐強い、細かに仕事を要するのである。相対性原理の高い物理学的意味は実に、それが以前には全く暗黒に横たわっていた沢山の物理学的疑問に対して実験によって確めることのできる精細な解答を与える点に存する。それ故にエーテルの力学的仮説とは丁度反対に、この原理を少くとも、非常な効用性のある一つの作用仮説として認めなければならない。現在では電子の力学の範囲に於て戦闘が最も熟

しているが、之は自由に飛走する電子の電氣的及び磁氣的偏倚^{へんい}の発見によって精細な観測を行い得るようになった。種々の実験室に於て今互いに独立に、経験に富んだ頭や技巧に熟した手が仕事している。測定が最初に相対性原理の要求に矛盾するように見えていたから、この戦闘^{なりゆき}の成行について多少緊張されるわけである。尤^もも今日では天秤の血は再び相対性原理に都合のよいように傾くと見られている。

多数の物理学者とその周囲との眼がこの根本的実験に向けられていると同時に、我々の学会も亦、トレンクル賞金の一部分をかような実験的研究に賭けたことによって、之に対する興味を有している。我々は学会からも亦この問題の解決に資する価値ある仕事があらわされんことを望むものである。——

さて判断がどんな風に落着しようとも、——相対性原理が確証されるか又はそれが棄てられねばならないか、我々が実際に全く新しい自然観の入口に立つか、又はこの突撃も亦暗黒から抜け出ることができないか、——何れにしてもあらゆる事情のもとに明瞭さが得られねばならないわけであり、それに対してはどんな値も高過ぎはしない。なぜなら、迷誤を取り去ることは、それが単に根本的であり、決断的であるならば、やはり一つの進歩を意味するのであり、献身と結合せられた犠牲は新しい認識の財宝を獲得することによって十分に浪立たせられるでもあろうからである。私は之等の言葉を本当に我々の学会に向って云い得ることを信ずる。我々の学会は決して最初から固定された科学的行程と結びつけられているのではなく、そこに行われるどんな実験をでもいつも決定的に示したことを学会の特別の名誉と解せねばならないからである。我々は将来に於てもそうであろうことを疑ってはならない。そして我々の解決は物理学に於けると等しく亦^{おのおの}各の自然科学に於ても絶えず前方に進み、結果の種類^{かか}に拘わることなく、唯真理の光明に向って赴くであろう。

-
- ・『世界大思想全集』第48巻（春秋社，1930年12月）所収。
 - ・底本は縦組みであるが，数式を考慮して横組みにした。
 - ・旧漢字は新漢字に，旧かな使いは新かな使いに変更したが，一部旧漢字のままにしたところもある。
 - ・人名については底本によらず，通行の表記にした。
 - ・PDF化には $\text{L}^{\text{A}}\text{T}_{\text{E}}\text{X} 2_{\epsilon}$ でタイプセッティングを行い，`dvipdfmx`を使用した。

- ・科学の古典文献の電子図書館「科学図書館」

<http://www.cam.hi-ho.ne.jp/munehiro/sciencelib.html>

- ・「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。