

物理学的世界形像の単一性

ライデン大学の学生研究会の自然科学分科に於て
1908年12月9日になされた講演

マックス・プランク著
石原純訳

尊敬する諸君よ。ここで諸君の前に私の専攻科学の一題目について話せと云う親愛な招待が私に伝えられたときに、私が最初に感じたことは、でも物理学がまさにオランダではどれ程か周到に扱まっているか、どんな榮譽ある世界的な氏名がここで日々諸君の前に輝いているか、従って理論物理学に関する講演を行っても、殊にもとのライデンに於ては諸君に何等の本質的な新らしさをも呈することができまいと云う事柄であった。それでも私が今諸君の注意を暫時惹き集めようと云う試みを敢てしようと思うのは、吾々の科学即ち物理学がその目的を一直線に達するわけではなく、却って屢々まがりくねって之に近づくことができるだけであり、そしてそれ故に亦物理学に於ては箇々の研究に対して広い場所が空けられていると云うことについて疑問が生じ得るからである。例えば一人はこの方面に、他は別の方面に、又一人はこの方法で、他は異なった方法で研究し、従って吾々のすべてが努力するところの世界形像は現時に於て各人に於て幾らかづつ異なって描かれている。それ故私がここにこれから諸君に物理学的世界形像の大梗を示し、それが私の知り得る限りの経験と見解とからどんな風に形づくられたか、又将来に於て豫想的にどうなってゆくであろうかを話そうとするならば、聊か諸君の興味をも惹くに足りるであろうと望むのである。

I

自然考察が存在する限り、之には抑も最後の最高目的として物理現象の多彩な複雑なものを単一な体系に綜合すること、出来るならば唯一の公式にまとめる

ことが期待され、且つこの問題を解くに当って最初から二つの方法が対立していた。それらは屢々相互に連関し、尚お相互に補正し合い影響し合い、殊に同一の研究者に於て共通の仕事に結合したときに最も豊富に交渉するところのものである。一つの方法はより少壯的であって、箇々の経験を速かに一般化し、大胆な把握をもって全体に綜合し、形像の中心に最初から唯一の概念又は原則を置き、このなかに多少の効果をもって全自然並びにそのあらゆる外観を追放しようと企てるものである。例えばミレトスのターレスは「水」を、ウィルヘルム・オストワルドは「エネルギー」を、ハインリッヒ・ヘルツは「最直線軌道の原理」を彼の物理学的世界形像の主要且つ中心点となし、之にすべての物理的過程がその関係と説明とを見出だすとなした。

他の方法はより省応的な、より謙遜的な、且つより許容的なものであるが、それだけに前者の衝撃力にまでは久しく成長せず、従ってずっと遅れて名誉に到達するのである。それは豫め最後の結果を設けることなく、最初はただ直接の経験によって完全に確実にされて見える箇々の事実だけを形像に描き、その爾後の発展を将来の研究に委ねるものである。その最もすばらしい代表は恐らくグスターフ・キルヒホッフが能く知られている通りに力学の問題の定義を自然に行われる運動の「記述」として与えたものに見出だされたであろう。二つの方法は相互に補い合うのであって、物理学的研究は決してそれらの一方を缺いてはならない。

けれども吾々の科学の之等の二重の方法論について私は今諸君に話したいのではなく、寧ろ私は、この固有の方法論がどこへ導いて行ったか、又豫想的に尚おどこへ導くであろうかと云う主要な問題へ諸君の注意を向けたいと思う。物理学がその発展に於て実際に進歩をなしたこと、吾々が自然を10年毎に著しくよりよく学び知ることは、人間が自然を自分達の目的に使役することのできる補助手段が数に於て並びに意味に於て常に増しているのを一目すれば明瞭である。だが、之等の進歩が全体に於てどの方向に動くのであるか。吾々が努力する目標、即ち単一体系に実際に近づくことをどの範囲に云うことができるか。之を考究することは、眼を開いて彼の科学の進歩を見守ろうとする各の物理学者に取って非常な重要なものに見えなければならぬ。しかも吾々がこの問題について将来を豫見することができるとするならば、吾々は更に進んで今日再び熱烈に争論されて

いる問題、即ち吾々が物理学的形像と名づけるところのものは根本に於て何を意味するかと云う問題に関しても亦成算を与えることができるようになるであろう。この形像は果して単に一つの合目的性な、併し^{しか}根本に於ては任意的な吾々の精神の創造に過ぎないのであるか、又は之と反対に、それが吾々とは全く独立な現実の自然過程を反映するものであると云う見解に吾々は追いやられるのであるか。

物理学の発展がどちらの方向に動いているかを知るためには、唯一^{いっしょくた}の方法が存在する。即ちそれが現在にある状態を過去の時代に於けるものと比較すればよい。併し^{しか}ながら更に、一つの科学の発展状態に対する最もよい特徴がどんな外観を呈するかを問うならば、私は科学がその根本概念をいかに定義し、その種々の領域をいかに分つかと云う方法及び種類よりもより一般的な何ものをも名指すことを知らなかったであろう。なぜなら、定義の精確さと合目的性とをなかに、並びに素材の分類の方法のなかに、少しく深く省察するすべての人々に知られている通りに、研究の最後の最熟の結果さえもが既に^{しばしば}屢々内在的に含まれて存するからである。

吾々は今この関係が物理学に於てどうなっているかを見よう。そこに吾々は先ず、科学的な物理研究がそのどんな範囲に於ても直接な実用上の要求にか又は特に珍しい自然現象に繋がっているのを認める。そして物理学の原始的な分類とそれの箇々の部分の名称とはおのずから之等の見解点に向っている。例えば幾何学は土地測量術から、力学は機械製作術から、音響学、光学、熱学は之等に相応する独特の感覚知識から、電気学は摩擦された琥珀に於ける注目すべき観察から、磁気学はマグネシヤの市の近傍で発見された鉄鉱の著しい性質から起っている。あらゆる吾々の経験が吾々の感官^{しか}に連結すると云う法則に相応して、すべての物理学上の定義には生理的の要素が侵入している。短く云えば、全物理学、即ちその定義並びにその全体の構造は、根原的には或る意味で人間的の特質を負っている。

近時の理論物理学の学的建築が吾々に示すところの形像は之とはいかに異なっていることか！先ず全体が遙かに単一的の印象を示している。即ち物理学の箇々の部分の数は、相関聯せる領域が互いに融合することによって、著しく減じている。例えば音響学は全く力学に含まれ、磁気学及び光学は全く電気力学に赴いてしまった。そしてこの単純化はすべての物理学的定義に於ける人間的歴史的の要素の著しい退化に伴われてあらわれる。物理学者の誰が今日電気^なに於て尚お摩

擦された琥珀を思い、磁気に於て最初の自然磁石の発見地たる小アジアを想うであらうか。又物理学的音響学、光学、熱学に於ても特殊の感覚はまさに除外されている。音調や色や温度の物理学的定義は今日ではもはや決して相応する感官による直接の知覚から採用されるのではなく、音調と色とは振動数若しくは波長によって、温度は理論的には熱理論の第二原則から取られた絶対的の温度目盛によって、運動学的気体論に於ては分子運動の運動エネルギーによって、実用的には寒暖計用物質の体積変化によって、並びにボロメーター又は熱電池の目盛り読みによって定義せられている。之に反し熱感覚に就ては温度の場合にもはや何も話されはしない。

力の概念も全く同様に变化した。「力」と云う言葉は根原的には疑もなく人間的の力を意味していたため、最初の且つ最古の機械、即ち槓杆や滑車や螺旋が人間又は動物によって動かされたと云う事情に相応し、力の概念が根原的に力覚又は筋覚、即ち一種の感覚から採用されたことを証拠立てている。けれども力の近代的定義に於ては、色の定義に於て色覚が除外されているのと同様に、特殊の感覚は除去されて見える。

まことに、物理学的概念の定義から特殊な感覚的要素がこのように退去することは益々進んで、物理学の或る範囲の如きは根原的には一定の感覚に帰せられるために全く単一のものとして特質づけられていたのが、連絡する紐糸の失われたために却って種々の全く分離された部分に分れてしまい、単一化及び融合化に対する一般的の進行に丁度相反するものさえある。之に対する最もよい例は熱学で示される。以前には熱は物理学の一定の領域を形作り熱感官の感覚によって特質づけられ、従ってよく限定された単一的の部分であった。ところが今日では物理学のどの書物を見ても熱輻射なる全体の範囲は熱から引き離されて、光学に於て論ぜられている。熱感覚の意味はもう、異種の部分を結合するに十分ではない。寧ろ今は一部分は光学又は電気力学に、他の部分は力学、特に物質の運動学的理論に分属されているのである。

これまでの事を顧みると、吾々は短くつまんで斯う云うことができる。理論物理学の従来の全発展の特徴は、人間的要素、特に独特の感覚の或る除去によってもくろまれるところの、その体系の単一化である。他方に、併し感覚がどこまでもすべての物理学的研究の出発点を形づくと云うことを考えるならば、根本仮定からのこの意識的な疎遠はどうも驚くべきことであり、迷論的にさえも思わ

れる。しかもそれにも拘わらず物理学上の歴史に於てこれ程明瞭な事実はない。本当に、かような原理的な自己抛棄に値いするところのものこそ値ぶみし難い程の利益でなければなるまい！

吾々はこの重大な点により深く立ち入る前に、もう少し吾々の眼を過去及び現在から将来に向けようと思う。将来の世紀に於て物理学の体系はどう分割されるであろうか。現在ではそこに尚お二つの大きな範囲が対立している。即ち力学と電気力学とであり、又言い換えれば、物質の物理学とエーテルの物理学とである。前者は同時に音響学、物体熱、化学的現象を包含し、後者は磁気、光学及び輻射熱を包含する。この分割は最終的であるであろうか。私はそうは信じない。なぜなら、之等の二つの領域は全く互いにはっきりとは限界されていないからである。例えば光の輻射は力学に属するか、それとも電気力学に属するか。或は、電子の運動法則をどちらの領域に算えるべきであるか。多分一見しては斯う云うかも知れない。電子の場合には重さのある物質がまるで何の役目をも演じないから、電気力学に属すると。だが、金属内の自由電子の運動にちょっと眼を止めて見ればそれでよい。そこでは例えば H. A. ローレンツの研究論文に於て、その法則が電気力学に於けるよりも遙かによく運動学的気体論に適合しているのを見出すであろう。抑も私にはエーテルと物質との間の根原的の対照がどうも漸く消滅してゆくように見える。電気力学と力学とは、通常諸方でまるで違ったもののように仮定せられ、既に力学的並びに電気力学的世界観の間の争論さえも話されているけれども、それ程実は別々に立っているものではない。力学はその基礎づけに対し原理的には只空間、時間及び運動するものだけを要するのであって、この運動者を物質又は状態としてあらわすのである。けれども電気力学も亦之等と同じ概念を缺くことはできない。だから、力学の適当に一般化された見解は亦電気力学をも包括することができたのであろうし、そして実際に多くの徴証は、之等の二つの、既に今でも一部分は互いに重なり合っている領域が遂には唯一のもの即ち一般力学に結合してしまうであろうことを話している。

それ故若しもエーテルと物質との間の対照が一度び架橋されるならば、その時には物理学の体系の分類の最終的方法に於てどんな見解点が基礎に置かれるのであるか。吾々が上に見た処によれば、この問題こそは同時に吾々の科学の将来の発展の全態に対して特質的のものである。でもそれをもっと詳しく考究するため

には、吾々が物理学的原理の固有態にこれまでよりももう少し深く押し入ることが必要である。

II

私は諸君がこの目的のために先ず私に随従して、これまで単に哲学者が仮定した物理学の単一体系の事実上の現実化への第一歩を踏み出した点に来ることを望むのである。それは即ちエネルギー恒存の原理である。なぜなら、エネルギーの概念は空間及び時間の概念と共にあらゆる物理学上の領域に共通な唯一のものであるからである。私が上に述べ来たつすべてに依れば、エネルギー原理も亦根原的には、即ちそれがマイエル、ジュール及びヘルムホルツによって一般的に形式づけられたよりもっと以前には、人間的の性質を荷っていたと云うことは、諸君には理解されるであろうし、又殆んど自明的に見えるであろう。即ちその最初の根幹は既に、無から要用の仕事を得ることが誰人にも出来得ないと云う知識に存している。そしてこの知識は他方では元来、永久動作 (perpetuum mobile) の発明と云う技術的の問題の解決に対する実験で集められた経験から由来している。つまり物理学に取って永久動作と云うものは丁度化学に対する煉金術と同様な意味のものとなったのであって、之等の実験の肯定的ではなく、却って反対に否定的の結果からして科学が利益を引き出したのであった。今日では吾々はエネルギー原理を全く人間的な若しくは技術的な見解点にも関係をもたせずに云いあらわしている。吾々は、外部と孤立した物体体系の全エネルギーの大いさが体系の内部に起るどんな過程によっても増し又は減ずることのできないことを云うのであって、この法則の成り立つ精確度が一つの永久動作の実現の問題を試めすために現在吾々が持っている方法の細かさに関係していると云うようなことはまるで考えていない。この一般化は精確に云えば証明することのできないものであり、だが素朴的な威力をもって圧迫するものであるが、上に説明した人間的要素の除去は実にここに横たわっている。

かようにエネルギー原理は一つの完成的な自立的な形像として、その発展の歴史の偶然性から解放され独立にされて、吾々の前に立っているのに反し、ルドルフ・クラウジウスが熱理論の第二原則の名で物理学に導き入れたところの原理の場合には、同じ事柄がまだ決して等しい程度に実現されない。しかもこの法則が今日でも尚お完全にはその発展の外殻を脱離しなかつたと云う事情は、了度吾々

の今日の講話に於て之に特別の興味を与える。実際に熱理論の第二原則は、少なくとも普通の判断に於ては、尚おはっきりと人間的な性質を負っている。多数の著名な物理学者でも、之が成立するのは、人間が箇々の分子の世界に立ち入って、マクスウェルの怪魔が行うように、何も仕事を費さずに、単に小さな瓣の適切な開閉によって、気体分子の速いものと遅いものとを分離するようなことはできないと云う事柄に關聯していると思っている。併し、第二原則の核は人間の能力と何も関係する処はなく、従って亦その最終的の形式立ては、何れかの自然過程の人間技術による実行可能性とは少しも関係しないような方法で結果されなければならないし、又結果するであろうと云うことを確実に豫言するためには、決して豫言者たることを必要とはしない。第二原則のこの除去のために、以下述べるものが幾らか貢献することのできることを私は望むのである。

吾々は先ず第二原則の内容と、そのエネルギー原理への關係に少し詳しく立ち入ろう。エネルギー原理は自然現象の経過を制限して、決してエネルギーの生成又は消滅を許さずに、只エネルギーの変化だけを許容しているのに比べて、第二原則は制限を一層進め、変化のあらゆる種類でなく、只或る条件のもとに起るような或るものだけを許容する。かようにして力学的の仕事はその儘、例えば摩擦によって、熱に変化するが、併し反対に熱はその儘で仕事には変らない。若しそれが可能であったなら、例えば吾々に無制限にさえも供給される地球体の熱を使って発動機を動かすこともできたであろう。しかもこの場合にはこの発動機が地球体を冷やすから、之を同時に冷却機関として使用することもできると云う二重の利益をももつであろう。

かような発動機は亦第二種の永久動作と名づけられているが、經驗的に之が不可能であることからは必然的に、自然に於てはどの様にしても完全に可逆的にすることのできない現象が存在すると云うことが結果する。なぜなら、若し例えば力学的の仕事を熱に変えるところの摩擦現象が、どんなに複雑であろうとも何等かの機械を用いて何等かの方法で完全に可逆的になされるとしたならば、この機械はまさに前述の発動機、即ち第二種の永久動作に外ならなかったであろう。この事は、機械が何を仕途げるであろうかを即ち他に残存されるどんな変化もなしに熱を仕事に変化することを明瞭に考えるならば、すぐにわかる。

どんな方法でも完全に可逆的になされないと云うところのかような過程を非可逆的過程と名づけ、その外のすべての過程を可逆的過程と名づけるならば、熱理論の第

二原則の核点は丁度、自然に於ては非可逆的過程が存在すると云うことであらわされる。それに依れば自然に於ける変化は一面的方向をもっているのであって、即ち各^{おのおの}の箇々の非可逆的過程と共に世界は一步を前進し、その痕跡はどんな事情のもとにも完全に消失させるわけにはゆかないのである。非可逆的過程の例は摩擦以外には熱伝導、拡散、電気伝導、光及び熱輻射の発射、放射性物質の原子崩壊等である。之に反して可逆的過程の例は惑星運動、真空中の自由落下、非減衰的振子運動、光波及び音波の吸収及び廻折を伴わない進行、非減衰的電気振動等である。すべて之等の過程は既にそれ自身週期的であるか、又は適当な装置によって完全に可逆的になされ、しかも何等の変化をも自然には残存しない。例えば一つの物体の自由落下では得られた速度を利用して之を再び旧^{もと}の高さに上げることによって、光及び音の波動では適当な方法で之を完全な鏡面で反射させることによって可能になる。

ところで非可逆的過程の一般的性質並びに特徴は何であるか。又非可逆性の一般的な数量的測度は何であるか。この問題は種々の方法で試みられ且つ^か答えられた。そしてその歴史を研究すると、丁度一般的な物理学的理論の型的発展を見るのに特別に都合がいい。根原的に永久動作の技術的問題によってエネルギー原理の痕跡に到達したのと同様に、亦再び一つの技術的問題即ち蒸気機関のそれが非可逆的及び可逆的過程の差別に導いた。サディ・カルノーは熱の性質について誤った考想を用いてはいるが、彼は既に、非可逆的過程が可逆的のものよりも不経済的であること、即ち非可逆的過程に於ては機械的の仕事^かを熱から得る或る機会が利用されずに残されていることを知っていた。ところで一つの過程の非可逆性の測度に対して全く一般的に、之によって決定的に失われてゆくところの機械的の仕事の量を確定すると云う考よりも何がより近く横わっていたか。そうなれば可逆的の過程に対しては^{もちろん}勿論決定的に失われた仕事を零に置けばよいのであった。この見解は実際に或る特別の場合、例えば等温的過程に対しては適用のできることが証された、従ってそれは今日にまでも或る意味では残っている、けれども一般的の場合に対してはそれは用いられないばかりでなく誤ってさえいることが示された。その理由は、どんなエネルギーの源から仕事^かが得らるべきであったかが詳細に与えられない限りは、一定の非可逆的過程に於て失われた仕事に対する問題が決して一定には答えられないと云うことに在るのである。

一つの例が之を明らかにするであろう。熱伝導は一つの非可逆的過程である。

或は、クラウジウスの云いあらわす処によれば、熱は代償なしには冷たい物体から暖かい物体に移ることはできない。ところで、(小さな) 熱量 Q が直接の伝導によって温度 T_1 の暖かい物体から温度 T_2 の冷たい物体に移るときに決定的に失われてゆく仕事は何であるか。この問題に答えるために、吾々は二つの物体を熱貯蔵物として之等の間に可逆的のカルノーの輪還過程を行うのに上述の熱移動を用いる。その際には能く知られているように或る仕事を得られるのであるが、この仕事はまさに吾々の求めるそれである。なぜなら、それは伝導による熱の直接移動の際には丁度失われてゆくからである。だが、この仕事の量は、どこから仕事が由来すべきか、例えば暖かい物体からか又は冷たい物体からか又はその外の何処からかを吾々が知らない前には、決して一定の値をもたないのである。つまり、暖かい物体から供給せられた熱は可逆的輪還過程に於ては決して冷たい物体に取り込まれた熱に等しくないのであって、それだからこそ或る分量だけの熱が仕事に変わってゆくのであると云うことを考えて見ればいい。しかも全く同じ権利をもって直接の伝導過程に於て移された熱量 Q を輪還過程に於て暖かい物体から供給せられた熱又は冷たい物体に取り込まれた熱と同一であることができる。第一の方を行うか、又は第二を行うかに従って、伝導過程で失われた仕事の量に対して

$$Q = \frac{T_1 - T_2}{T_1} \quad \text{又は} \quad Q = \frac{T_1 - T_2}{T_2}$$

を得る。この不決定を多分クラウジウスも知っていたので、それ故単純なカルノーの輪還過程を第三の熱貯蔵物の仮定によって一般化したのであった。ところが之の温度は全く不定であり、従って之に相応してやはり仕事も不定になるのである¹⁾

それ故、一つの過程の非可逆性を数学的に解しようとするために提案した道は一般には目的に達しないことがわかる。且つ同時に亦、なぜ之が成功し得なかつたかの本来の理由もわかる。問題の立て方が餘りに人間的に色づけられている。それは何を置いても要用の仕事を得ようとする人間の要求に餘りに重きを置き過ぎている。若し一定の解答を自然からもとうと思うならば、もっと一般的な、それ程実用的に興味をもたないような立脚点からして之に対しなければならぬ。それを今吾々は行ってみようと思う。

自然に行われる何等かの一つの過程を見ると、それはすべて之に与^{あず}かっている

1) R. Clausius, Die mechanische Wärmetheorie, 2. Aufl. I. Bd., S. 96, 1876.

物体を、一定の始原状態、即ち私が状態 A と名づけようと思うものから一定の終局状態 B に導いてゆく。過程は可逆的であるか又は非可逆的であるかの何れかであって、第三のものは不可能である。それが併し可逆的であるか又は非可逆的であるかは、唯二つの状態 A 及び B の性質だけに関し、過程がその外にどう行われるかと云う有様には関しない。なぜなら、その際問題の解答に入り込むものは、状態 B が一度到達されたときに、 A への完全の帰還が何等かの方法で遂げられることができるかどうかと云うことだからである。ところで A から B への完全の帰還が不可能であるなら、即ち過程が非可逆的であるなら、明らかに状態 B は自然に於て或る性質によって状態 A とは差別されるわけである。私は数年前に、之を云いあらわすのに、自然が状態 B に対して状態 A に対するよりもより大きな「愛着」を有していると云う表現を用いた。この云い方に従えば、自然が始原状態に対するよりも終局状態に対してより小さな愛着を有するような過程は、自然に於ては全く不可能である。可逆的過程は一つの限界の場合を形づくる。之に於て自然は始原並びに終局状態に対して等しい愛着をもつ。そして之等の間には移動が任意に二つの方向に向って結果することができる。

さてそこで、一つの状態に対する自然の愛着の一般的測度として役立ち得るような物理学的の量を求めなければならない。之は考察せる体系の状態によって直接に決定せられる量に相違ないのであって、体系の履歴については、何も少しも知る必要のないのは、体系のエネルギー、体積及びその他の性質に於けると同様である、この量はあらゆる非可逆的過程に於て増大し、之に反してあらゆる可逆的過程に於て変化せずに残るような特質を有し、一つの過程に於けるその変化の大きさは過程の非可逆性に対して一般的の測度を与えるのであろう。

ところで R. クラウジウスはこの量を実際に発見して、之を「エントロピー」と名づけた。各の物体体系は各の状態に於て一定のエントロピーを有して居り、且つこのエントロピーはその状態に対する自然の愛着をあらわしている。それは体系の内部で行われるすべての過程に於ては常に只増すことができるだけであって、決して減ずることはできない。体系に対して外部からの作用が起るような過程を考察しようとするならば、作用の発する物体を体系に属するものとして一緒に考察しなければならない。そうすれば法則は再び上の形式に於て成り立つ。その場合に物体体系のエントロピーは簡単に箇々の物体のエントロピーの和に等しいのである。箇々の物体のエントロピーはクラウジウスによれば或る可逆的輸

還過程を用いて見出だされる。熱の伝導は物体のエントロピーを増大させるのであって、それは丁度導き加えられた熱量を物体の温度で除した商である。之に反して単なる圧縮はエントロピーを変じない。

上述の例、即ち温度 T_1 の暖かい物体から温度 T_2 の冷たい物体に直接に伝導された熱 Q の場合に戻ると、この過程では今説明した処に従って暖かい物体のエントロピーは減じ、冷たい方の物体のそれは増すのであって、二つの変化の和、即ち両物体の全エントロピーの変化は

$$-\frac{Q}{T_1} + \frac{Q}{T_2} > 0$$

である。この正の量がすべての任意さを離れて熱伝導過程の非可逆性に対する測度を与える。かような例は勿論無数に多く引用することができる。化学的過程はどれもその仲間に属する。

かようにして熱理論の第二原則はそのあらゆる帰結を共にしてエントロピー増大の原理になってしまった。そこで聡明な諸君には多分もう解っているであろうが、私は上に提出した問題に關聯して私の意見を次のように云いあらわそうとするのである。将来の理論物理学に於てはあらゆる物理学的過程の第一の最も重要な分類は可逆的並びに非可逆的過程へのそれであろう。

実際にすべての可逆的過程は、それが物質又はエーテルのどちらに於て、又は両者に於て行われようとも、互いに比較して見て、何等かの非可逆的過程に比べたよりも遙かに大きな相似性を示している。この事は既にそれらを支配する微分方程式を見ればわかる。可逆的過程の微分方程式のなかには時間微分がいつも只偶数^{べき}幕に於てあらわれるのであって、時間の符号を逆にしても差支えないと云う事情に相応している。それは同様に振子の振動、電気振動、音波及び光波、並びに質点又は電子の運動^{いず}に対して、何れもそれぞれの減衰を除外した場合に成り立つ。熱力学で考察された無限に遅く行われる過程も亦之に属する。それは単なる平衡状態から成り立っているのであってそれに於ては時間がまるで何の役目をも演じないのであり、云い換えれば零乗^{べき}幕であらわれ、之も亦偶数^{べき}幕に算入されるわけである。すべて之等の可逆的過程の有する共通の特質は、ヘルムホルツが示した通りに、それらが完全に最小作用の原理によってあらわされ、之によって測り得る経過に関するどんな問題に対しても一義的な解答が与えられると云うことである。そしてこの点で可逆的過程の理論は完全に閉結されたと云うことができ

る。その代りに可逆的過程は、一緒にしても別々にしても、単なる理念的のものに過ぎないと云う缺点をもっている。現実的の自然に於ては決して唯一可逆的過程さえも存在しないのであって、どんな自然的過程も多少は摩擦又は熱伝導と結びつけられている。非可逆的過程の範囲に於ては併し^{しか}最小作用の原理はもはや不十分である。なぜなら、エントロピー増大の原理は物理学的形像に於て全く新しい、作用原理自身には知られない、従って亦特別な数学的処理を必要とするような要素を持ち来すからである。過程の一方的経過、固定せる終局状態の到達が之に相応している。

上の説明で十分に次の事柄が明らかになったと私は思う。可逆的及び非可逆的過程の対照は力学的及び電氣的過程のそれよりも遙かに深いものであり、それ故この差別はその外のどんなものよりもよりまさった権利をもつてすべての物理学的過程の最も高級な分類理由になされ、将来の物理学的形像に於て終結的に主役を演ずることができるであろう。――

だが、説明された分類は^な尚お全く本質的の改良を必要とする。なぜなら、上述の形式に於ては物理学の体系は^な尚おまだ強い服量をもつて人間主義に中毒されていることを否むわけにゆかないからである。即ち非可逆性並びにエントロピーの定義に於て自然に於ける或る変化の^な実行可能性に關係づけられて居り、従って根本に於てはやはり物理学的過程の分類が人間の^な実験技術の成功能力に關すると云うことに外ならないのである。併し^{しか}実験技術は確かにいつも一定の段階に止まるものではなくて、常にだんだんと完全にされてゆく。だから若しも^も可逆的及び非可逆的過程の間の差別が本当にすべての時代に保存される意味をもつべきであるならば、それはもっと本質的に深められ特に人間能力へのどんな關係をももたないようになされなければならない。どうしてそれが出来得るかを私は次に話したいと思う。

III

吾々が見た通りに、非可逆性の根原的定義は人間能力の一定の限界を仮定すると云う点で疑わしい缺陷をもっている。かような限界は現実^なに於て全く証明せらるべきものではなく、寧ろ^{むし}反対に、人間は彼の成功能力の現在の限界を常に先方へ追い退けるためにあらゆる努力をなすのであり、そして吾々は恐らく今日多くの人々に不可能と見えるところのものをもいつか後の時代に多様に成功するであ

ろうことを望んでいる。それ故、今までいつも非可逆的と見なされている過程が新しい発見又は発明によって可逆的として示されるようなことが、どうかしてあらわれ得ないであろうか。若しそうなれば、第二原則の全建築は否応なく崩壊してしまうであろう。なぜなら、容易に証明される通りに、唯一箇の過程の非可逆性がその外のすべてのものをも限定しているからである。

吾々は一つの具体的の例を取って見よう。一つの流体に浮遊している小さな粒子の行うちらちらした運動は顕微鏡で能く認められる著しく珍しいもので、ブラウンの分子運動と名づけられているが、之は最近の研究によれば流体分子が粒子に対して絶えず衝突するための直接の結果である。ところで何等かの甚だ精細な装置によって箇々の粒子に対して方向を換え秩序を正し、しかも計算に取られる程の仕事を経さずにはたらし、無秩序の運動からどんなにかの秩序的な運動が発生させることができたとしたならば、疑いもなくそれは、流体熱の一部分を代償なしに可視的の運動に、従って亦利用され得る運動エネルギーに変化させるような一つの手段の発見に相違なかったであろう。之は熱理論の第二原則に対する矛盾ではなかったであろうか。若しこの間が肯定されたとしたならば、そのときにはこの法則は確かにもはや原理の階級を主張することはできなかつたであろう。その適用が実験技術の進歩に関係しているからである。だから、第二原則に原理的の意味を確保させるための唯一の手段は、只非可逆性の概念をすべての人間的関係から独立になすと云うこと以外にはない。

そこで非可逆性の概念はエントロピーの概念に戻る。なぜなら、一つの過程はエントロピーの増加と結びつけられるときに非可逆的であるからである。之によって問題はエントロピーの定義の適当な改良に帰せられる。最初のクラウジウスの定義によれば、エントロピーは或る可逆的過程によって測られているので、この定義の弱点は、多くのかような可逆的過程、否根本的に云えばすべての可逆的過程が現実には全く実行され得ないと云うことに存する。尤もこの際問題はまるで現実的な過程や現実的の物理学者に関するのではなく、理念的の過程、謂わゆる思考実験や、すべての実験的方法を絶対の精確さをもって行う理念的物理学者に関するのであると答える幾らかの権利はあるかも知れない。けれどもまさにここに再び困難が存するのである。現に理念的物理学者のかような理念的測定はどこまで遙かに到達するのであるか。一つの気体をその気体の圧に等しい圧力で圧縮し、気体と同じ温度をもっている熱貯蔵器で暖めることは適当な限界へ

の移行を用いて理解されるけれども、併し^{しか}例えば飽和蒸気を等温的圧縮によって可逆的方法で液体に変え、しかも熱力学に於ける或る考察に於て仮定される通りに、物質の等質性が失われてしまうことのないようにと云うのは、既に疑わしく見えなければならない。もっと著しいのは、物理学的化学に於て思考実験に関し理論家に信用せられている事柄である。彼の半透過壁なるものは現実には只或る特殊の事情のもとに、しかも只或る近似をもって実現せられ得るに過ぎないのであるが、彼は之をもって可逆的方法で任意に異なったあらゆる分子の種類を、安定の状態にあらうとも不安定の状態にあらうともかまわず分離するばかりでなく、反対に荷電せられたイオンをさえも互いに且つ^か解離されない分子からも分離し、そしてその際にかような分離に反抗する強大な静電気力によって妨害されることもなく、尚おまた現実には分離の最初に於てすぐに分子が一部分再び解離し、イオンが一部分再び結合すると云う事情をも無視^{しか}してしまう。併しかような理念的過程は解離されない分子のエントロピーを解離された分子のエントロピーと比較し得るために、どうしても必要なのである。すべて之等の大胆な思考過程がその結果を経験によって試められてそれ程よく成り立ったと云うことは、本当に驚くべきでなければならない。

けれども他方に、すべて之等の結果に於てはその理念的過程の現実的な実行可能性に関するどの点も再び消滅している——それは実に只温度、熱発生、濃度等のような直接に測り得る量の間の関係である——ことを考えるならば、恐らくかような理念的過程を暫定的に導き入れるのもすべて根本に於ては一つの迂廻路を意味するのであり、そしてエントロピー増大の原理の本来の内容はそのすべての帰結と共に非可逆性の根原的概念から、即ち第二種の永久動作の不可能性から解放されることのできることを、丁度エネルギー恒存の原理が第一種の永久動作の不可能性から解放されたのと同様であると云う推測も手の裏を示すべきではない。

この進歩、即ちエントロピー概念を人間の実験技術から除外すること、及びそれによって第二原則を真の原理に高揚することこそ、ルドウィッヒ・ボルツマンの科学的生涯を通じてなされたのであった。簡単に云えば、それはエントロピーの概念を確度の概念に帰することに存する。それによって同時に亦私が上に助言的に用いた言葉、即ち一定の状態に対する自然の「愛着」と云うことの意味も説明される。自然はまさに確度のより大きな状態をそのより少ないものよりも

ひいき
 最^{ひいき}戻し、従ってそれは只より大きな確度の方向への転移のみを実行する。熱がより高い温度の物体からより低い温度の物体に移るのは、等しい温度分布の状態が異なった温度分布のどの状態よりも確度が大きいからである。

一つの物体体系の各^{おのおの}の状態に対する確度の一定の大いさの計算は、原子的理論及び統計的考察方法を導き入れることによって可能にされる。箇々の原子の交互作用に対してはその際一般力学、機械学及び電気力学の既知の法則が全体として全くその儘^{まま}変えられずに成り立つことができたであろう。

この見解によって熱理論の第二原則は一撃のもとにその孤立した位置から退けられ、自然の愛着に関する神秘は消滅し、そしてエントロピー原理は原子論の導入によって能く基礎^よづけられた確度計算法の法則として物理学的世界形像に結びつくのである。

世界形像の単一化に於けるこの一層の進歩は勿論^{もちろん}多くの犠牲をもって購われたことは否定されない。最も貴重な犠牲は、恐らく一つの物理学的過程の箇々の事柄に関するすべての問題の解答が単に統計的考察を持ち来すだけでその実際に完全な解答を見限らなければならないことである。なぜなら、吾々が只平均値だけで計算するに当っては、それが形づくられている箇々の要素について何も知らないからである。

第二の疑問とすべき不利は、物理学的状態の根原的結合の二つの異なった種類、即ち一方には絶対的必然性、他方にはそれらの関係の単なる偶然性を導き入れることに存するように思われる。一つの静止する重い液体がより低い水平に赴くならば、それはエネルギー恒存の法則に従って、只ポテンシャル・エネルギーが減少するとき、即ち重心の位置が低くなる時にのみ液体が運動に達し、運動エネルギーを得ることができると云う事情の必然^{しか}的结果なのである。併しより暖かい物体が之に接触する冷たい物体に熱を与えるならば、それは単に非常に確からしいだけであって、決して絶対に必然的なのではない。なぜなら、原子の全く特殊な秩序と速度状態とを考えると、それに於ては丁度反対の事柄が起ることもあり得るからである。ボルツマンは之から次の帰結を引き出した。即ち熱理論の第二原則に背反するかような特有の過程も自然に於て恐らくあらわれ得たであろうし、従って彼の物理学的世界形像に於ては之等にも一つの場所を解放し与えたのであった。さて併し^{しか}之が、私の意見では必ずしも彼に従うことを要しない一つの

点なのである。なぜなら、より暖かい物体への熱の逆流又は二つの互いに拡散された気体の突然の分離と云うような事柄の起る一つの自然は、まさにもはや吾々の自然ではなかったであろうからである。吾々が単に後者を論ずべきである限り、吾々は寧ろ^{むし}かような稀有な過程を許さないで、反対にどんなすべての経験にも背反する現象を最初から除外するところの一般的の條件を探求し、自然に於て実現すると仮定する方がまさっているであろう。ボルツマン自身はその條件を気体論に対して形式立てた。全く一般的に云えば、それは「要素的無秩序の仮説」であって、簡単に説明すると、統計的考察を行おうとする箇々の要素が完全に互いに独立に挙動すると云う仮定である。この條件を導き入れると共にすべての自然現象の必然性が再び恢復される。なぜなら、その充足は確度計算法の法則に従ってエントロピーの増大を直接の帰結として引き込むからであって、従って熱理論の第二原則の本質を亦要素的無秩序の原理と名づけることもできる。この形式化に於てはエントロピー原理は之が導き出されるところの、純粋に数学的基礎の上に立つ確度計算法と同様に、決して矛盾に陥ることはない。

さて一つの体系の確度はそのエントロピーとどう関係するか。之は簡単に、二つの互いに独立な体系の確度が箇の確度の積によってあらわされるが ($W = W_1 W_2$), ^{しか}併しエントロピーは箇々のエントロピーの和によってあらわされる ($S = S_1 + S_2$) と云う法則から結果する。之に従えばエントロピーは確度の対数に比例する ($S = k \log W$)。この法則は与えられた状態に於ける体系のエントロピーを計算するための、一つの新しい、通常の熱力学の補助手段を超えてそれ以上に達する方法への入口を開く。特に之によればエントロピーの定義は、通常の熱力学に於て殆んどそればかりを考察しているような平衡状態に於てばかりでなく、同様に亦任意の力学的状態にまで拡張される可逆的過程を実行する必要もなく、人間的技術のすべてから無関係にされる。人間主義は一つの言葉をもってこの定義から全く取り除かれ、従って第二原則は第一と同様に真の基礎の上に置かれる。

エントロピーの新しい定義の効果は併し^{しか}運動学的気体論に於てばかりでなく、亦輻射熱の理論に於ても示された。それによってそこでは経験と能く一致する法則を立てることができた。輻射熱も亦エントロピーをもつことは既に熱輻射を発する物体が熱の損失、即ちエントロピーの減少をうけることから結果する。一つの体系の全エントロピーは増すことができるばかりであるから、従って全体系のエントロピーの一部は輻射された熱に含まれていなければならない。それ故

に亦 ^{おのおの}各の単色的輻射線も一定の、只その明るさにのみ関する温度をもっている。それは同じ明るさの輻射を発する黒体がもつと同じ温度である。輻射論と運動学輻射論との間の主要な相違は、輻射熱ではエントロピーを限定する無秩序の要素が気体に於けるような原子ではなくて、非常に多数の単純な正弦的な部分振動であることに存するのであって、どんな光線でも亦最も、等質的な輻射線で之から集合されていると見做されなければならない。

自由エーテル内の熱輻射の法則に対して特に注目すべきことは、之等のなかにはあらわれる常数が万有引力常数と同様に普遍的性質をもち、どんな特殊の物質にも亦どんな特殊の物体にも関係しないと云うことである。それ故之を用いて長さ、時間、質量、温度に対する単位を立てる可能性が与えられるのであって、しかもかような単位はその意味をあらゆる時代、あらゆる文化に対し、更に亦地球以外の、並びに人間以外の文化に対してさえ必然的に保存しなければならないものである。それは即ち知られた通りに決して吾々の慣用的な測度体系の単位については成り立たない。なぜなら、之等は、たとえ通常は絶対単位と名づけられていても、それでも全く吾々の現在の地上文化の特殊的事情に適応するものである。センチメートルは吾々の地球の今日の大きさから取り出され、秒はその自転の時間から、グラムは地球表面の主要成分としての水から、温度は水の基点から取り出されている。併し ^{しか}前述の単位は亦火星住民や ^{そもそ}抑も吾々の自然に存在するすべての知的生物が——若しも既に之に衝き当らなかつたとするれば——必然的に一度は之に衝き当らねばならないようなものである。

エントロピーの本質が確度とのその結合によって経験したところの、もう一つの非常に著しい解説について、尚 ^なお私はここに考えたいと思う。二つの体系の確度が箇々の体系の確度の積であるとする法則は上に用いたが、^よ能く知られたようにそれが成り立つ場合は只、二つの体系が確度計算法の意味で互いに独立であるときだけである。その外の場合には確度は異なって来る。それ故、或る場合には二つの体系の全エントロピーが箇々のエントロピーの和と異なっていると云うことも推測される筈であった。かような場合が現実に自然にあらわれると云う証明は近頃実際にマックス・ラウエによって与えられた。二つの全く ^も若しくは部分的に「干渉し得る」光線（即ち同じ光線から由来するものは）確度計算法の意味で互いに独立ではない。なぜなら、一方の光線の部分振動によって他方のそれが

一部分限定されるからである。そこで事実上一つの簡単な光学的装置を考案して、それによって任意の温度の二つの光線が直接に二つの異なったものに変化し、而もそれらの温度の差がより大きくなるようにもくろむことができる。即ち熱が代価なしに冷たい物体から、暖かい物体に移ることはできないと云う昔のクラウジウスの根本法則は、干渉し得る熱輻射に対しては成り立たない。併しながらエントロピー増大の原理はここでも亦その成立を保っている。只以前の輻射のエントロピーがそれらの箇々のエントロピーの和に等しくなくて、却ってそれよりも小さいのに過ぎない¹⁾。

ところで、ブラウンの分子運動を利用し得る仕事に変えると云う上に提案した問題に関しても明らかに全く同様になる。なぜなら、箇々の運動している分子の方向を換え秩序立てるようにはたらくような装置は、技術的に作ることができようとも又はできなくとも、何れにしろそれが作用を始める限り、粒子の運動と或る意味で「干渉し得る」ものであって、それ故にその働きから利用し得る運動エネルギーが生じて、それは決して第二原則に対する矛盾を意味しはしないであろう。只分子運動のエントロピーが簡単にその装置のエントロピーに加算されなかつたであろうことを考慮すればいいのである。

かような考察は、集合体系のエントロピーを部分体系のエントロピーから計算する際にいかに注意深く行われねばならないかを示している。厳密に考えれば各^{おのおの}部分体系に於て先ず、全体系のどこかの場処に恐らく干渉し得る部分体系が存在しはしないかを問わなければならない。それでなければ二つの部分体系の相互作用の場合に全く豫期しない且つエントロピー原理に外見上矛盾するような過程が起つたかも知れない。けれども二つの部分体系が相互作用を起さないうちは、それらの干渉性に注意しないために起る過誤は全く認められないであろう。

干渉性のこの特有な結果現象を見ると、精神生活に於ける神秘的な交互関係をどうしても想い起さずにはいられないだろう。それは屢々まるで隠れていて、そのためにうっかりと無視せられていても大過のないものではあるが、併し一度特別な外部的事情があらわれると、全く豫想されないような結果を惹き起すことがある。

も
若しまた吾々が想像を逞ましようとしたであろうならば、吾々は次のような可能性

1) M. Lane, Ann. d. Phys. 20, 365, 1906; 23, 1, 795, 1907; Verh. d. Dtsch. Physik. Ges. 9, 606, 1907; Phys. Ztschr. 9, 778, 1908.

をも描き得ないことはない。即ち吾々が到底距離を測り得ないような遠方に吾々を取り囲む物体世界に対して或る干渉し得る物体が存在している。吾々の世界から離れている間は全く同様に当りまえに振るまっているが、之と交互作用を始めようになると、エントロピー原理からの外見的な、だがやはり只外見的に止まる除外例があらわれることがあるかも知れない。このようにして第二原則の側から強要される一般的熱死滅の危険は、多くの物理学者や哲学者にはこの法則を敵対視する理由となったけれども、その普遍的成立には少しも触れることなしに、しかも避けられることができないとは断ぜられない。併し私にはこの技工的な豫測手段なしにも亦既に吾々の観察に入り込む世界の無限に拡張することのためにその危険は何等の不安にも値いすべきものでないように見える。現在にはもっと差し迫っている多くの問題がその研究を待ち望んでいるではないか。

IV

私は将来の物理学的形像が多分斯うもあるであろうと云う根本方向の二三を簡単に諸君に示そうと試みた。吾々が今科学の発展に伴って世界形像の受けた変遷を顧みて眺めるならば、そして再び上に見出だされたこの発展の特徴を現前に持ち来すならば、以前の形像が人間生活の沢山の要求から萌芽し、之に対してすべての独自の感覚が重要なものとなっただけに、それが華美の色彩を示していたのに反し、将来の形像は著しく褪色せられ、気抜けし、直後の明瞭さを奪い去られて見えることを許さねばならない。これは精密科学の評価に対して一つの重大な缺点である。之に加えてあらわれるもう一つの重要な事情は、吾々がすべての吾々の経験の認知された源泉を止めるわけにはゆかないから、感覚の絶対的除去が全く不可能であると云うこと、即ち絶対の直接認識については全く話すことができないと云うことである。

だが、之等の明白な缺点にも拘らず、将来の世界に向ってすべての以前のものに換えることのできる決定的の優勝を与えるところの特権は何であるか。それは形像の単一性より外の何ものでもない。形像のあらゆる箇々系列に関する単一性、あらゆる場処と時とに関する単一性、あらゆる探究者あらゆる国民、あらゆる文化に関する単一性である。

つまり詳しく見ると、物理学の昔の体系は全く唯一の形像に等しくなくて、寧ろ一つの絵画蒐集にも似ている。なぜなら、自然現象の各の種類に対して特別

の形像をもっていたからである。しかも之等の種々の形像は互いに連繋してもいない。そのうちの一つを取り去っても他のものに影響することもない。将来の物理学的形像に於てはそうはゆかない。それのどの箇々の部分も非本質的として取り除けられることはできないであろうし、^{おのおの}各は全体の必要な成分であって、そのために観察された自然に対して一定の意味をもつ。そして逆に^{おのおの}各の観察された物理的現象は形像のなかで之に丁度相応する場所を見出だすであろうし、又そうしなければならない。通常の形像は或る関係だけで本源に相応し、^{しか}併しすべての関係に於てと云うのではないのであって、之等に対する相違がここに存するのである。この相違は時として亦物理学者の範囲に於ても十分に注意されていないと私は信ずる。現に近時の専門文献に於て^{しばしば}屢々次のような注意が見出だされるのもそれである。即ち電子論又は運動学的気体論を応用するに当って、それが単に実在の近似的な形像を与えるだけのものであることを常に眼中に置かなければならないと云うことである。この注意が、運動学的気体論の^{すべての}帰結から経験事実への適応を期待してはならないと云うようにでも解されたとしたならば、かような見解は浅薄な誤解に基づくのもあろう。

ルドルフ・クラウジウスが前世紀の中頃に運動学的気体論の基礎仮定から、気体分子の速度が通常濃度に於て毎秒数百メートルに達することを帰結したときに、彼に対する反撥として、二つの気体が非常に遅くしか拡散しないことや、気体中の局部的温度動揺がやはり非常に遅くしか平均されることが挙げられた。クラウジウスは彼の仮説を支持するために、それが単に実在の近似的形像を描くに過ぎないものであるとか、従ってそれから餘り多くを期待してはならないなどとは辯護しないで、^{かえ}却って彼は平均自由径路の計算によって、彼の与えた形像が著名になされた二つの事柄に於ても亦物理学的観測に実際に相応することを示した。なぜなら、彼は、唯一の決定的な矛盾が確定されれば同時に新らしい気体論は物理学的世界形像に於けるその位置を止むなく失ってしまわねばならないことを、^よ能く知っていたからである。この事は今日でもやはり成り立つわけである。

丁度この物理学的世界形像に向って置かるべき高い要請を容認すると云うことのために、^{そもそ}抑もその世界形像が、個々の研究者の良心と独立に、民族や時代とも独立に、更に人間性そのものとさえも独立に、一般的認識を強要するだけの権利が生ずるのである。だが、斯う云う主張は、たとえ背理とは見えないまでも、一見しては議論の種となるかも知れない。けれども、例えば吾々が火星住民の物理

学に関して以前に引き出した結論を想起すならばここに主張された一般化するものも、日常物理学で決して人間的観測で検証され得ないような結論を直接観測を超えて引き出しているのと同じものに過ぎないのであって、従って之等の結論の意味や証明力を認めない人々はそれ自身物理学的の思考方法から放たれているのであることを、少なくとも許容しなければならないであろう。

誰も紫外線を見たものもなければ、亦紫外線に対する特殊の感官を具えるような生物を見たことはないけれどももしそう云う生物が物理学的知能を恵まれて存在するとするなら、それが紫外線を可視光線と同種のものとして認めるでもあろうと云う主張の許容性を、多分どんな物理学者だって疑いはしないし、又化学者が彼の試験管内に太陽に存在するナトリウムを実際に充たすことの到底望まれないことを知っても、誰だってそれが地上のナトリウムと同じ化学的性質をもつことを疑いもしまい。

ここに述べたことで、私が諸言の終りに提起した問題の解答に既に立ち入ったのである。その問題と云うのは即ち物理学的世界形像は単に我々の精神の多少任意的な創造であるか、又は之と反対にそれが我々とは全く独立な実在の自然過程を反映するものであると云う見解に達するかと云うことである。具体的に云えば、我々はエネルギー恒存の原理が、どんな人間もそれについて思考し得なかったときに既に自然に於て存していたことや、又は我々の地球がすべてのその住民と共に滅亡してしまった際にも、天体はやはり引力法則に従って運動するであろうことを、理性的に主張してもいいであろうかと云う問題である。

私が上述の諸関係からしてこの疑問に然りと答えたとするならば、その際私は、この解答が、現にエルンスト・マッハの指導のもとに自然科学者の間に歓迎されている自然哲学の方向とは幾分反対にあることを能く自覚している。この哲学によれば、独自の感覚以外には何の実在も存しないのであり、そしてすべての自然科学は結局は単に我々の思想を感覚に対して経済的に適応させることに過ぎないのであり、生存闘争によって我々は之に強要せられると云うのである。物理的なものと心理的なものとの限界は単に実用的^か且つ便宜的のものであって、世界の本来の^か且つ唯一の要素は感覚¹⁾なのである。

この原則を、物理学の実際上の発展過程に関して我々の見直したところのものと結合させると、我々は必然的に次の独特な結論に到達する。即ちこの発展の特

1) Ernst Mach, Beiträge zur Analyse der Empfindungen, Tena. 1886, S. 23, 142.

徴は物理学的世界形像から世界の本来の要素を絶えず除去することに於てあらわされると云うことである。だから、良心ある物理学者は誰でも慎重に努めて、本来の世界形像を何か概念的に単一のものとして、且つすべての他のものとは全然異なったものとして精密に差別しなければならなかったのであろうし、又屢々二人の専門学者が互いにまるで独立に同じ物理実験を行って、しかも反対の結果を見出だしたと主張することもないではないが、その両者のうちの一方が間違っている筈だとでも結論しようとしたなら、それは飛んでもない錯誤であるだろう。なぜと云えば、両方の世界形像の相違のために反対の結果が出て来ることがないとは限らないからである。——そんな場合に正しい物理学者なら決してそう云う妙な思考過程には陥るまいと私は信ずる。

とは云え私は、経験的にいかにも確らしくないことは実際に原理的の不可能性と大差がないと認めたい。それを私がここで特に言明したいわけは、原子仮説や電子理論に対して或る側から向けられる反駁が不当であり誤っていると思うからである。そう云う反対論に向って私は却って次の主張を対抗させたいのである。——しかも私はそのために孤立しないのを知っている。——原子の詳細な性質についてたとえ我々が知悉しないとしても、併し原子が実在的であるのは天体や又は吾々を包圍する地上の物体と同様である。又水素原子が 1.6×10^{-24} グラムだけ重いと云うのは、月の重さが 7×10^{25} グラムであると云う知識と少しも変りはしない。勿論私は一つの水素原子を天秤の皿に載せることもできないし、又それを全然見るわけにもゆかないけれども、月だってもやはり天秤の皿には載せられないし、又視覚に関しては、能く知られた通りに質量は多少詳しく測られていながら、観ることのできない天体も存在する。海王星の如きは、天文学者がまだその望遠鏡を之に向けなかった以前に、既にその質量が測られていたではないか。だが、帰納に基づく知識がまるで取り除けられているような物理学測定の方法は全然存在しない。それは直接の秤量に対しても成立する。精密実験室を見さえすれば、丁度外見的にはいかにも簡単なかような測定が含まれる経験と抽象との総和が示される。

もう一つ問うべきことは、マッハの認識論が自然科学者の間に大いに拡まったのは何故であるかと云うことである。若し私が誤まらないとすれば、それは根本に於ては、或る時代以前にエネルギー原理の発見の結果、例えばエミル・デュ・ボア・レイモンの著書に含まれているような特殊の力学的自然観と結びついた

ところの誇負的豫期に対する一種の反動と見られる。私は、この豫期が永続的価値のある多くの顕著な業績——私は唯運動学的気体論だけを挙げておこう——を示さなかったと云おうとするのではない。だが、大体から見て、それは餘りに誇張的にあらわれたのであった。現に物理学は統計学をその考察に導き入れることによって、原子の力学の完成を断念してしまった、当然来るべき覚醒の哲学的沈澱物はマッハの実証論であった。懷疑が脅迫するに対してあらゆる自然研究の唯一の正当な出発点を感覚に於て再び見出だしたことは全くその功績に歸せられる。併し^{しか}之も亦その目的を超えて逸脱してしまい、力学的世界形像と共に同時に物理学的世界形像を全然^{ほうへん}褒貶するに至った。

私は、マッハの体系が若し実際に正しく論結されるならば、何等の内部的矛盾を示すべきものでないのを確信しているし、その意味は根本的には単に形式論的のものであって、自然科学の本質に関しないと云うことも確であると思われる。なぜなら、之には^{おのおの}各の自然科学的研究の最も高貴な表徴たる、恒常的の従って時代及び民族変遷に関しない世界形像の要請と云うことが缺けているからである。マッハの連続性原理は之に対する代価を供与しない。連続性は恒常性とは異なるからである。

恒常的な単一の世界形像は、私が示そうとした通りに、現実の自然科学がそのあらゆる変遷のなかに絶えず近づくとところの固定目標であって、物理学に於ても我々は正当に^こ斯う主張してもよいのである。既に我々の現在の世界形像は、たとえ^な尚お研究者の個性の異なる毎によほど異なった色彩に輝いてはいるが、それでも之が含む或る部分はどんな革命によっても、亦自然^も若しくは人間精神に於ても決して消滅し得ないものであると。この恒常的な、^{おのおの}各の人間の、知的個性と独立なものこそまさに我々が実在と名づけるところのものなのである。さもなくば、例えば今日実際に真摯な物理学者であって、しかもエネルギー原理の実在に対し疑うものがあるか。寧ろ^{むし}反対に、之の実在の承認をば科学的評価に於ける豫件とさえするのが常である。

勿論^{もちろん}、将来の世界形像の主体を既に今日に於て確立したかについてどれ程まで豫測していかと云うことは、一般の規則で定めるわけにはゆかない。ここに最大の関心がある。併し^{しか}この疑問は要するに第二義的のものである。ここでもっと必要なのは、たとえ決して到達せられないにしても、ともかく斯様な固定目標の承認である。そしてこの目標は——我々の思惟の感覚に対する完全な適応ではな

く、却^{かえ}って——物理学的世界形像を創造精神の個性から完全に解放^やすることである。これが、私の上に人間的要素の除去と名づけたところのものの少々詳細な叙述に外ならない。私は世界形像が創造精神から全然解放されねばならなかったかのような誤解を避けるために、そう名づけたのであった。自然の解放は矛盾をもって始まるものでもあろう。

最後に、孰^{いず}れにしる人間的経済的の観察点をもっと重く見ようとしている人たちに、多分これまでの事物的な考察よりも一層多くの印象を与えるようなもう一つの議論をしよう。偉大な精密自然科学者たちが彼等の思想を科学に投げかけたときに、即ちニコラウス・コペルニクスが地球を世界の中心から遠ざけたとき、ヨハンネス・ケプラーが彼の名を負わされた法則を形式立てたとき、アイザック・ニュートンが万有引力を発見したとき、諸君の偉大な国人クリスチアン・ホイゲンスが光の波動説を立てたとき、マイケル・ファラデイが電気力学の基礎をおいたとき、——こんな系列はもっと長く続くだろう——そこには経済的観察点がたしかに之等の人々をして無駄な思いつきや力強い伝統に反抗する戦いに踏み止まらせたところの最後の立脚地であった。否、——それこそは彼等の世界形像の真実性に対する頑丈な進行であり、人為的と云ってよいか、宗教的と云ってよいような基礎の上に安置せられる信仰である。だが併^{しか}しこのような幾分理屈の通らない事実に関して、若しもマッハの経済原理が実際に認識論の中心から退けらるべきであったとしたなら、かような指導者たちの思考径路が妨げられ、彼等の妄想の飛躍が緩み、それによって科学の進歩が恐らく不運にも阻止されるであろうと推測するわけにはゆかない。経済の原理にもう少し謙遜した位置を与える方が寧ろ「より経済的」ではないであろうか。尚お諸君は既にこの問題の叙述からして、私が勿論^{もちろん}高級な意味での経済に顧慮しなかつたり、又はまるで之を無視しようとするのではないことを推察されるであろう。

いや、我々はもう一步を進めることができる。人々は世界形像とは云わずに、世界とか自然とか云っているが、彼等の「世界」と、我々の「将来の世界形像」との間にどんなかの差別が認められるであろうか。確かにそうではない。なぜなら、かような差別を試めず方法のないことがインマヌエル・カントを通じてあらゆる思想家の常識となったからである。「世界形像」なる組み立てられた言葉は単に、或る妄像^{あらかじ}を豫め避けようとする用心のために慣用されるようになったのである。

だから、我々は、そう云う用心をした上で、その理念的な未来形像だけを世界と云う言葉であらわそうともくろむときに限って、この簡単な言葉で置き換えてもいいのであるし、そしてその際には寧ろ現実的な表現法に達するわけであって、経済的の立場から見ても之は却って、根本に於て複雑な且つ思考的にも困難なマツハの実証論よりも遙かにいいと思われるばかりでなく、亦事実上物理学者が自分の専門の言葉で話す場合にいつも用いられるところのものである。――

私は今妄像と云うことをお話したが、若し私が上に述べたことだけで一般に十分だと思ったり、亦一般に理解を得ようと望んだとしたなら、それこそ私から云って小さな妄像であるかも知れない。だから私は之に陥らないようにどこまでも注意深く努めよう。実際この根本的な問題についてはまだまだ多くのことが考えられ、又書かれるであろう。理論家は沢山にあって、筆紙は盡きはしない。だからこそ我々は、すべての人たちが除外例なしにいつも承認し賛成しなければならないところのものを、益々一致してひた向きに強調しようと思うのである。それが第一には自己批判に於ける良心であると共に、ともかくも正当として承認せられたものに対する戦闘に於ける忍耐であり、第二には科学的の敵手の人格に対する本当の尊敬であって、誤解によって動かされるようなものではなく、尚おその外には、十九世紀以来最後の、最も偽らない象徴として虚偽の豫言者を真実のそれと辨別せしめるところの次の言葉の威力に対する沈着な信用である。「結果に於ておまえはそれを承認せよ！」

-
- 『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。
 - 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。