

不確定性原理について

石原 純

電子が波動性を有すると云うことは実に最近の驚くべき大発見である。そしてそれは既に多くの実験によって実証されたことは否定できない事実である。さて併し我々はこの意外な事実に対していかにしても直ぐに諒解することのできないような従来の多くの経験をどう処理したらよいのであろうか。即ち従来の経験から見れば電子は明らかに粒子性を有している。その抑もの最初の発見に導いた陰極線が軽い物体を動かしたり熱したり又蛍光板を光らせたりすることは粒子としての性質を如実に示すものであった。他方に於て若しも電子が波動力学の示す通りに或る集団波から成り立ち、それが一定の群速度をもつて個体の如くに進行するとするならば、電子それ自身を取り囲む波動限界は、たとえ或る時に判然としても、波動の当然の性質として漸次拡散していつまでもその儘に残るわけにはゆかない。波動の占める体積が大きくなればなるほど拡散の割合は減少するであろうけれども、それでも時間が十分に経てば全空間へと拡がるのを免かれない。我々が普通に見る物体をかような波動から成ると考えるならば、体積の大きいことにより波動はかなりの時間保留されてはいるが、やはり何時までも然うではないであらう。電子若くは物質に関する之等二様の事実は一見して互いに矛盾するように見えるが、我々はそれをどう解釈したならよいのであろうか。

丁度之と同様の矛盾は光に対しても存在していた。光の進行が光線として幾何光学的に取り扱われる限りに於ては、ニュートンの放射説でも示された通りに之に粒子性を帰することができ、殊に近時のアインシュタインの光量子説で説明せられる諸現象に於ては光が空間内に於ても常に一定の範囲に限られた光量子として保たれているように見えるのであつて、之が他方に於て波動光学で論ぜられるような光の波動性に対して明らかに矛盾するものとして理論的困難が考えられていた。光の吸収や光電効果やコンプトン効果の如き現象が光量子の実在を最も適確に示しながら、それでも干渉や廻折現象によつて波動性を否定し得ない我々は已むなく量子的機構を光それ自身にはなく、却つて物質原子内のみ求めようとどれ程努力したかわからない。ところがこの原子内に於ける機構に関する量子理論の發展が意外にも電子に対して全く同様の矛盾する両性質を見出だすに至つたことは、実に我々が自然の神秘に突き進むおもしろい徑路を示すものである。

さてこの問題に対して今日その解決を与えることができたのは新しい量子力学の發展のお蔭であつて、主としてハイゼンベルク及びボーアによつてそれが明らかにせられた。この解釈に従えば上に述べたような両様の性質は矛盾ではなくて、寧ろ互いに補足する所のものである。物質又は電子なり、若くは光なり、それらの物理学的対象は種々の実験によつてその性質を探究せられるのであるが、或る実験的方法では粒子性を示し、他の場合には波動性を示すと云うのが本当であつて、どんな方法を考案しようとも之等を同時に、見ることはできない。我々は現に見ることのできるものだけを事実としなければならぬ。一概に物質や光を粒子と定めてしまつたり、波動として押し通そうとするのが間違つていたのである。それぞれの現象に於て之等は粒子として若くは波動としてあらわれることを認めなければならぬ。そしてかような認識が新しい

量子理論に取って特有のものであり、之これによって始めて従来の困難が救われるに至ったのである。

例たとえば我々が一つの電子の径路に互いに十分に近い二つの小さな孔を置いて之これを通過せしめたとすれば、電子は波動として廻折現象を起すことはG・P・タムソン等の実験の示す通りである。即ち孔の向う側に蛍光板を置いたとすれば、或る場所は暗く、之これを隔てて光った帯が見られるでもあろう。ところが孔を全く取り除けてしまえば、電子は粒子として蛍光板の一点を光らせるようになる。そこで更に我々がこの両様の性質を同時に見るような工夫をして見たらどうであらうか。例たとえば二つの孔の一方を極めて薄い蛍光板でふさぎ、之これに電子が出遇う際に粒子としての輝点を見ると同時に、この板が十分薄ければ電子は透過してゆくから、その向う側では他の孔を通った部分と干渉して波動性をもあらわすことができはしないであらうか。このような実験は併しかし理論上不可能である。なぜなら、電子波は孔を透過したとしても、そこで蛍光を起す場合には位相及び波長を不連続的に変化して、もはや以前のように他の孔から来たものと干渉しなくなるからである。つまり粒子としての電子を経験すると同時にその波動性を経験することはここでもできない。

この関係は丁度我々の主観的感覚と客観的事実との間のそれに幾分似通っている所がある。或る物体の色を見て主観的に赤いと感ずることと、客観的に光の波長を測定して云いあらわすこととは、互いに矛盾しているのではなくて、明らかに互いに補足しているのである。主観的の色感には光の波動性はあらわれないし、客観的に波長を云う場合には主観的感覚は失われている。併しかしどちらも本当であり、互いにその半面を物語るに過ぎないのである。又普通の力学で物体の連続性を仮定する巨視的な観方と、之これを分子論的に即ち微視的に観るのとはやはり同様の関係である。この場合に前者に於ける諸性質はすべて後者の言葉で翻譯するこ

とができると云う意味で単に物体の不連続的構成のみを真実であると考えるのが普通であるが、併し温度とか圧力とかの概念は連続性を仮定せずには成り立たないのであり、しかも經驗的事実としての之等の概念間の關係を我々は決して否定するわけにはゆかないのである。

さてド・ブローイーの与えた式によれば、物体の運動量と波長との乗積はプランクの常数 h に等しくなる。我々が波動性を明瞭に実験するために波長の大きいものを用いようとするには運動量の小さいものを選ばねばならない。電子では質量が小さいので最も能くこの條件に適するけれども、陽子や原子になると質量がずっと大きくなるから速度のよほど遅いものを用いないと波長が短か過ぎて之を見るのが困難になるし、又一方で速度が余り遅くなると何等の効果をも起すことができなくなってしまう。併し今日では実験上の困難が漸次打ち勝たれて陽子や水素原子の廻折現象をも観測せられるに至った。

ここで物体の速度と云うのは、物質波の集団の群速度である。之が相当に大きくなり、且つ波長も相当のものである為には、我々は上述の通り電子を採らねばならないが、この場合に我々はその速度を測ることができても、その位置は確定的に知られない。なぜなら集団波の存在するいづれの場合にでも電子は在ると考えねばならないからである。又之に反して若し電子の存在する場所を確定することができたとしても、集団波は或る拡がりをもって居るから、電子の存在する場所として考えられた或る点の進む速さは却つて精密に群速度と等しくならないかも知れないので、従つて電子の速度なるものを確定するわけにはゆかなくなる。我々は即ち電子の位置及び速度の何れかに対して或る不確定さを免かれ得ないであろう。之が即ちハイゼンベルク及びボーアによつて示された不確定性原理の根柢を形作るものである。

一般には波長の大きい程位置が確定しない代りに、速度は小さくなって比較的に精密に定まる。反対に波長が小さくて位置が少々精密に与えられる場合には速度が大きくなってその不確定性を増大する。数量的に云えば、位置と運動量との不確定さの積が作用量子の値以下にはならないと云うことになる。波長の代りに振動数を採用するならば、エネルギーは振動数と作用量子との積で与えられるから、エネルギーと時間との間に同様の不確定関係があらわれる。

この不確定性は光の量子的作用と直接に関係している。我々が電子の位置を精密に観るためには十分に波長の小さい光を之に当てる必要がある。併しかような光は同時に電子に作用してその位置を変化せしめてしまふであろう。位置を元の儘に保つて、しかも電子を視ると云う方法は原理的に不可能であることが斯く悟られる。

不確定性原理の結果として我々は、たとえ或る時に於て電子の位置と速度とを決定的に想像したとしても、それが将来に於てどう動くかを規定することはできない。事実の上に於て之を精密に知るような何等の方法も存在しないからである。我々の知り得るのは只或る確率の範囲に於て量子的関係としてあらわれる所のものに過ぎないのである。

この事實は電子に対して謂わゆる因果律の放棄を強要するものとして今日喧ましく議論されている。或る人々は之と自由意志の問題をさえ関聯せしめようと試みた。実際に於て従来の意味に於ける因果律がこの場合に成立しないことは確かである。併しながら我々が通常経験するところの物理学的法則に関しては、たとえそれが窮極に於ては不確定的な電子現象に分析せられるものであり、従つて常に一つの確率的結果に外な

らないとしても、併し現実にこの法則から外ずれるような現象の起る確率が極度に小さい限りに於ては、大體に於てその厳格な成立を承認し、因果律を救うことが寧ろ当然であると思われる。

現に今日迄の間にも古典物理学に於ける因果律の意味を精細に考へるならば、それはやはり經驗的事実間の確率的結果の叙述に外ならないのであり、特に気体の運動学的理論の如きに於てはその物理的状态を多数の分子の確率的状態としてのみ云いあらわすことは能く知られた通りである。只從來の意味に於ける因果律に対しては、之等の確率をどこまでも1に近づけしめることができる云う点で、之を將來の予言に用いることができたのであった。量子力学に於ては併しそれが必ずしも可能でないと云う点に相違を生ずる。

例えば光線の通路に二つの細隙を置いて廻折現象を生ぜしめ、二つの光電池に当てる場合に、個々の光子がその何れに入るかは同等の確率を有する。この際最初の光量子が光電池Aに入ったときには適當の増幅装置によってダイナマイトを爆発させるとか又は同様の著しい結果を起させるようにし、之に反して他の光電池Bに入ったときには、それらの結果の起らないようにスイッチを切るようにすることはできる。併しそうした場合に我々は光線が細隙を通過した際の結果がどうかと云う問に対して何れとも決定的に答へることはできないのである。

斯くて旧來の意味に於ける因果律をどこまでも固守しようとする人々に取つては、量子力学はその廢棄を要求する。それは丁度空間をどこまでもユークリッド幾何学によつてのみ規定しようとする人々に取つて、相對性理論がその誤謬を教えたのと全く同様である。因果律にしろユークリッド空間にしろ、之を絶対のものとするのは先驗的独斷論に墮するものである。我々が新たな經驗によつてリーマン空間若くはその他の空間

の存在を知り、又因果律の意味を拡張せしめようとする事は、自然科学の方法に於て正当な歩みでなければならぬ。

(科学、昭和六年十月号)

-
- 『自然科学的世界像』（岩波書店、一九四〇年二月、第四刷）所収。
 - PDF化するにあたり、旧仮名遣いは新仮名遣いに改めた。
 - 旧漢字は新漢字に改めた。
 - 読みやすさのために、適宜振り仮名をつけた。
 - PDF化には`LATEX2ε`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。