

量子論に於ける客観と因果律

仁科芳雄

緒言

總ての物質を構成する電子、原子、分子及びそれ等と光との作用する、超顕微鏡的世界に行われる物理学の体系を量子論と唱える。これが始めて一貫した数学的形体を与えられ、發展完成せられて其物理学の意義の闡明に一段落を告げたのは1925—1928年であつた。

此発見者としてはL. de Broglie, Heisenberg, Schrödingerの名が挙げられ、其發展に貢献した人としてはDirac, Pauli, Born, Jordan 其他多くの物理学者がある。そして其物理学の並に哲学的意義を明にしたのはHeisenberg, Bohrの功である。殊にBohrの業績として特筆すべきは、量子論完成に至る路を拓いた事であつて、Heisenbergの所謂「Kopenhagener Geist der Quantentheorie」〔量子論のコペンハーゲンの精神〕は量子論の生誕より完成に至る迄の行程に於て、其指導精神として斯界を率いたもので、更に将来の進展もこれに負う所が多いであろう。茲に述べるのもやはり此「Kopenhagener Geist」の自分を通しての表現に過ぎない。

此量子論に対比して、目に見える様な日常の物体、即ち原子、分子の無数に多く集合した体系の世界に行われる物理学——それは一言にして盡せばNewtonの力学及びMaxwellの電磁力学、並にEinsteinの相対性理論

の名を以て知られて居るもの——を古典論と呼んで居る。古典論は量子論の特別の場合と見らるべきものであつて、後者は其極限に於て漸近的に前者に一致するものである。即ち理論の体系として量子論は古典論の更に一般化せられたものと見られる。従つて量子論の支配する世界に於ては、古典論に全く類例のない特徴のある事象に遭遇する。それは従来の経験の範囲を超越するものであつて、これが今世紀に入つてから二十五年間も物理学者に不可解事として持て余あまされた理由である。

量子論的現象は古典論の領域外にあるものであるから、古典論の見地からこれを理解する事の出来ないのは当然である。つまり従来 of 経験から築き上げられた古典論の枠には嵌まらない事象である。従つて過去の経験に類推を求めるといふ心理作用、即ち「理解」されるには餘りに不慣れな現象の体系が、超顕微鏡的世界には行われて居るものである。量子論完成の結果は、これ等の事象が一の理論的体系の中に如何に整理、配列せられるかという事が明になった。そしてそれが古典論と如何なる対応をし、極限に於て如何に両者が一致するものであるかという事、従つて量子論が古典論の極めて自然な発展に外ならぬ事が解つて来た。

哲学は物理学の体系をも其礎石の一個とし、其上に築かれて居る殿堂とも見られる。其物理学たるや従来は古典論に終始して居た。然るに今日は其旧殻を脱した量子論に迄拡張せられて居る。此基礎的進展が哲学の建築に如何なる影響を及ぼすものであるか、それは門外漢たる自分の判断の範囲外にある。只自分は量子論の本質が古典論と如何なる差異を有するものであるかを明にし、量子論に於ける客観性並ならびに因果律について、主流量子論者の主張する所を述べようと思う。此量子論の成果が、学問の他の分野に何等かの形に於て影響を与えるものであると云う事は、相対性理論樹立の当時、哲学者の側から提起せられた種々の議論よりも想像する事が出来る。量子論の出現が吾人の物理学的概念に与えた革変は、相対性理論にも劣らず基礎

的、劃期的なものである。従つて其影響も物理学の範圍を越えて他の領域に及ぶものと期待せられる。

量子現象

物理学の行つて居る事は、実験によつて多くの自然現象を確認し、これを整理し、其中から最も簡単にし最も普遍的な法則を抽象し、更に其適用範圍を検討するという事である。そして其適用範圍外の現象が発見せられると、又これをも包含する法則を立てて行くというのが、物理学進歩の行程である。

斯様にして前世紀の終末迄に出来上つたものが、既述の Newton の力学並に Maxwell の電磁力学であつて、前者は物体の力学的現象を、後者は電磁気現象並に光学現象を、夫れ夫れ其当時迄に知られて居つたものは悉く説明し盡して余す処がなかつた。然るに其後 Michelson-Morley により、時間空間の絶対性に関する実験に於て、豫期に反した結果が発見せられたので、これを包含し且つ万有引力の現象をも網羅する Einstein の相対性理論が生れて来た。斯くして達成せられた古典論は、終始一貫した完全な独立体系であつた。従つて此物質界の物理学的現象は、凡てこれに包含し盡されるものであると云う様な豫想が、一時有力となつた事があつた。

所が前世紀の終末より今世紀の初頭に互つて発見せられた陰極線、X線、放射性元素は、吾人に物質の窮極構造を探究するに屈竟な武器を提供し、これによつて電子、原子、分子の實在が明にせられ、それ等の活躍する世界に於て、上述の古典論が適用せられるか否かという事が立入つて実験研究せられた。其結果として、此超顕微鏡的世界の現象の説明に対しては、古典論は全く無力であるという事が明にせられた。即ちこれ等の現象は古典論の体系には包含せられて居ないという事である。此結論に導いた実験的事実の顯著なも

のを挙げて見よう。

一、エネルギー量子の発見

光の輻射並に吸収現象は、其根源を原子、分子に有するものであるという事は、早くから知られて居った。其中で所謂黒体の温度を高めて行くとこれが光を発し、其温度と光の波長との関係は物質の如何に拘らず一定であるという実験事實は、此発光作用が凡ての物質に共通な原因を有するものである事を示した。此現象を古典論によつて説明しようとする、物質は帯電粒子から出来て居ると考え、これが温度の上昇に従つて振動する。そうするとMaxwellの電磁力学によつて光が輻射せられるという風に考えるのが自然である。そこで此模像に古典論を適用して計算して見ると、豫期に反して実験事實とは全く異なる結果を得た。

Planck(1900)は色々苦心の末、此事實を説明する為には、古典論に全く類例のない新しい要素を理論に導入しなくてはならぬ事を発見した。即ち単位時間に ω なる振動数で振動して居る帯電粒子の有ち得るエネルギー E は、 $h\nu$ の整数倍だけであつて、それ以外の振動は許されないと仮定すると実験と一致する結果を得た。式で表わすと

$$E = nh\nu \quad (1)$$

茲に h はPlanckの常数と呼ばれる一般常数で、 n は整数である。古典論に於ては振動体のエネルギーは其振幅の二乗に比例する。そして振幅は連続的に如何様にも変え得るから、エネルギーも振動数とは無關係に勝手な値を採り得るものであつて、Planckの仮定とは全く相容れないものである。

以上がエネルギー量子 $h\nu$ の発見であつて、此領域に於ける古典論の無力を明白に示す最初の事象であつた。茲に表われたエネルギーの不連続性は量子論の特性であつて、エネルギーのみならず運動量、角運動量等に

於ても、同様の事態の存し得る事が後に知られた。それは光に於ても物質に於ても同様である。此不連続性が量子論と古典論との根本的差異を生ずる源であつて、これが Planck の発見に明確に表われて居るのは著しい事である。

二 光の波動性と粒子性

Maxwell の説に従えば光は電磁波動である。即ち光の進行方向に対して直角の方向に振動する、電氣横波と磁氣横波とが、互に直角な面内に一定の位相を以て相関聯して居るものである。これによつて時間空間的の光の伝播現象は余す所なく説明せられる。殊に光の干涉現象、例えば薄膜の色であるとか、光学器械の示す干涉縞とか云うものは、斯様な波動が Maxwell の電磁方程式によつて、重畳原理に従う事から明に説明せられる。即ち二つ又は二つ以上の電磁波が一点に会すると、其振幅は個々の波動の振幅の代数的和で表わされるものである。要するに光の現象は凡て Maxwell の電磁方程式に含まれて、残る所はないものと信ぜられて居つた。

所が電子が発見せられて後、此古典論の範囲に入り得ない現象のある事が解つた。其第一は光電効果である。即ち波長の短い光を金属に当てると電子を飛び出させるという現象である。只それだけならば古典論でも説明される事であるが、茲に古典論の枠にどうしても入り得ない事態が発見せられた。それは飛び出す電子の速度が光の強さには無関係であつて、只其波長のみならず左右せられるという事である。波長の短い程、即ち其単位時間の振動数が高い程、電子の速度は大きい。

今若し此現象を上述の波動論で説明しようとする、金属内の電子は光の電磁力のために振動させられる。そして光の強度が充分大であつて従つて電磁力が強いと、電子の振動の振幅は増し、遂に金属結晶の羈絆を

脱して外に飛び出させられるものと解釈すべきである。若しそうだとすると電子の速度は当然光の強度に支配せらるべきである。然るに事實はこれに反して、光の強度を増しても電子の速度には変りなく、只其数を増すだけである。

そこで Einstein は、光の波動論に含まれて居ない全く新しい仮定を導入して、此光電効果を説明した。即ち光は波動ではなく一種の微粒子であつて、エネルギー E と運動量 \vec{P} (\rightarrow はベクトルを意味する) とを有し、それは光の有する他の属性を表わす量である振動数 ν 、波動数 σ ($\parallel \vec{n}$ は光の進行方向に引いた単位長さのベクトル、 λ は波長) と夫れ夫れ次の関係で結ばれて居るものとする。

$$E = h\nu, \quad \vec{P} = h\vec{\sigma} \quad (2)$$

此微粒子を光子と唱えた。(2) は Planck と類似の形を有つて居る。

斯様な光子が金属電子に衝突すると、電子はエネルギー並に運動量不滅の法則に従つて飛び出させられるから、其速度は光の波長に關聯して理論的に求められる。此結果は実験と完全に一致した、又光の強度の強いという事は、此見地よりすれば光子の数の多いという事であつて、従つて飛び出す電子の数も多くなる筈である。斯様にして光電効果は少しの無理もなく説明せられた。

然し此光子説は光の干渉という事に対しては全く無力で、これを説明する事はどうしても波動論によらなくてはならぬ。其結果として、Newton, Huygens によつて提起せられ、干渉現象の発見によつて終結を告げたとせられた、光の粒子説と波動説との論争が、再び復活せられた形となつたものであつた。

其後光子説を強める他の実験事實が発見せられた。それは Compton 効果である。即ち X 線又はガンマ線

を物質に当てて散乱させると、散乱された線の波長が其方向によつて異なるといふ事實である。これも波動論で説明する事は困難である。即ち光の散乱現象は此理論に従えば、物質を構成する電子が、入射の電磁波によつてこれと同じ振動数をもつ振動をさせられ、Maxwellの理論に従つて生ずる輻射が散乱となつて表われるとするものであるから、其振動数即ち波長は、孰れいずの方向に対しても入射波と同じでなくてはならぬ。

然るに光量子説に従うと、光の散乱というのは、電子に光量子が衝突して其方向を変える事であつて、此際電子に与える反動が方向によつて異なる為、光量子の有つエネルギー即ち振動数も散乱方向によつて異なる事になる。此模像にエネルギー、運動量の不滅法則を適用して、散乱された光の波長を求めて見ると全く実験結果と一致する。又此際電子の受ける反動も実験で確証せられた。これによつて光量子説は益々其実験的根拠を固めた。

一方波動説の方でも、其支配する領域内に於ては、波長の長短に拘らずかかわ其实在性を確証せられて行つた。それはX線及びガンマ線の結晶による干渉であつて、これは光量子説の全く手の出せない領分である。此二重性は(2)式に明に示されて居る。即ち粒子に属する E 、 \vec{p} なる量が、波動に属する ν 、 \vec{m} と、 h なる量を介して結ばれて居る事既述の通りである。

此結果より見ると、波動説と光量子説とは各々其特有の適用範囲を有つて居るものであつて、時間空間の伝播でんぱに関する問題は波動説に従つて解かれ、エネルギー、運動量に関する限り光量子説によつて取扱われなくてはならぬといふ事が明となつた。これは量子論特有の事態であつて、古典論には全く類例がない。従つて当時物理学者は古典論の立場から不可解事として其解決に苦んだ。これは古典論の範囲外にある現象を、古典論の枠に嵌めて眺めようとした為めに起つた困難である。然し後述しかの通り吾人は此枠以外に代るべきもの

は持ち得ないのであるから、此事態は何処迄も避くべからざるものなのである。

尚光量子説には、やはり前述の量子論特有のエネルギー、運動量の不連続性が明に表われて居る。殊に光量子の持つ $h\nu$ 並に $h\nu/c$ は各一種の個性を以て存在するものであって、それが存在する限り此エネルギーと運動量とを保持し、それを任意に小さく分割して其一部を取出して見るといふ様な事は不可能である。

三 古典論と原子構造

量子論の君臨する領域として最も典型的なものは原子である。原子は長岡博士、Rutherfordの研究によつて、中心に其質量の殆ど全部を占める原子核があり、其外側を電子によつて包圍せられて居るといふ事が明にせられた。其電子はこれより先 J. J. Thomson の研究により、極めて小さな (10^{-13} 糶の程度) 微粒子であつて、一定の陰電気を帯び、其質量は水素原子の約二〇〇〇分の一とせられた。原子核も同様に小さな微粒子であつて、これは陽電気を帯びて居り、従つて外側の電子との間に Coulomb の引力が作用して居る。原子の有する電子の数は元素によつて異り、最も少いのは水素原子の一個で、最も多いのはウラン原子の九十二個である。そして外側電子の有つ陰電気の總量と、核の有つ陽電気が丁度等しく、従つて普通の状態に於て原子は全体として中性である。

斯様な原子模型は恰度太陽系に似て居る。即ち原子核が太陽で電子は惑星に相当する。よつて簡単な場合には、此体系に古典論を適用して電子の運動を解く事が出来る。然し其結果は色々の点に於て困難に遭遇した。先ず明な事は斯様な体系は古典論に従えば到底存在し得ない。即ち電子は核の周囲を回轉する間に光を輻射しなくてはならぬ。其結果エネルギーを失つて次第に核に近寄り、遂に其中に落ち込んで中和されて了う筈である。従つて斯様な模型の原子は存在し得ない事になる。又こんな体系は外部からの攪乱により、直

ちに其運動状態を変えるから、各元素の原子が示す様に、常に一定の性質を保持する事は不可能である。

然るに周知の通り Bohr は茲でも、古典論には全く含まれて居ない次の二仮定を導入する事により、原子の示す特別な安定度と其有する性質とを説明し、依つて原子構造の理論を樹立する事が出来た。即ち

- (I) 原子内に於ける各電子の運動状態は、或る特定の群のものだけが許される。斯様な原子は定常状態にあるという。此状態にある原子のもつエネルギーは、順次に不連続的に變つて居るのが普通である。そして原子が苟くも其状態を変える場合には、必ず一つの定常状態から他の定常状態に移つて了い、如何なる事情の下にも其中間の状態を採り得ない。これは古典論では説明し得られぬ所であつて、原子の安定度もこれから生じて来る。

- (II) 一つの定常状態から他の定常状態に移る場合には、次の條件で与えられる振動数 ν を有する電磁波を、輻射又は吸収する。

$$h\nu = E_1 - E_2 \quad (3)$$

但し E_1 、 E_2 は夫れ夫れ初と終の定常状態にある原子のエネルギーである。最小エネルギーの定常状態を平常状態と云い、此状態にある原子は輻射を行わない。

此二仮定が古典論の範囲を脱して居る事は、今更述べる必要もない事である。古典論では斯様な模像に於ける電子は色々の振動数の光を同時に輻射し、連続的に任意のエネルギーを有ち得る。従つて一定波長のスペクトルを生ずるという事が、既に古典論では説明出来ない。茲にも量子論特有の不連続性がエネルギーの上に出して居る。

Bohr の仮定の実在を最も直接に実証したのは Franck と Hertz の実験であつた、これは電子を加速し、これ

を平常状態にある原子に衝突させて見ると、電子のエネルギーが小さい間は、全然原子にエネルギーを与えない。次第に速度を増して、 $\rho_1 \rho_2$ に相当するエネルギーを持つと始めて原子はエネルギーを受け、平常状態から他の定常状態に移される。そして又元に戻る時(3)で与えられる ν の光を出す事も実証せられた。

四 物資の粒子性と波動性

電子又は原子核は、上述の通り従来は微粒子と考えられ、これによつて色々の現象が古典論の立場から説明せられた。例えば電子が高速度で走る時、空気分子を電離して進む状態を写真に撮つて見ると、恰度弾丸の飛んだ跡と同様な足跡を示して居る。

所が L. de Broglie は光に粒子性と波動性とがある事の類推からして、物質にも同様の事態のある事を発見した。即ち電子や原子は、一方微粒子としてエネルギー E 、運動量 \vec{p} を持つものであるが、他方波動として振動数 ν 、波動数 σ を有し、それが光の場合同様に(2)式によつて結ばれて居るとするものである。

斯様に考えると原子の模像も太陽系とは全く異つた図となつて表われて来る。即ち中央には原子核の波動の一塊があり、其周囲には電子の波動が定常波をなして居る。それは盪の中の水の定常波と似て居る。一定の大きさの盪の中に定常波が出来るためには、其波長は任意ではなく、不連続的に變つた一組のものでなくてはならぬ。それと同様に電子が核の周囲に或る定常波を形成する為には、其波長は不連続的の値をもつ一組のものを必要とする。従つて(2)式により其エネルギーも不連続的な一群だけが許される事となる。斯様にして Bohr の仮定が出て来る。然し此場合忘れてならぬ事は(2)式を用いたという事で、これは光と同様に物質に二重性のある事を意味するものである。

物質の波動性を最も簡明に示したものは、結晶による電子の干渉であつて、これは光の干渉と同様に波動

説によつて残りなく説明せられる。只光と異なる処はそれが電気を帯びて居る事であつて、其為に現象に差を生ずる。

然らば物質の波動説によつて電子、原子等の現象が全部古典論的に包括され得るかというに、上記の(2)式を用いる事からでも知れる様にそれは不可能である。此点は光の波動説がエネルギー、運動量の問題に無力であつたと同様である。若し古典論的に物質のエネルギーが、物質波の振幅の二乗に比例するものと考えると、エネルギー、運動量に関する問題は実験と一致しない結果に到達する。例えば Frank-Hertz の実験の様に、原子と電子との不連続的な現象は出て来ない。これにはどうしても(2)式に従つて粒子として取扱う必要がある。斯様に波動、粒子の二重性は光の場合と全く並行に表われるものである。

これを要するに時間空間に於ける運動伝播の問題に於ては波動性が表われ、エネルギー、運動量に関する限りは粒子性が出て来る。従来電子の運動が、これを粒子と見て相当の正確さを以て取扱ひ得たのは、其波長が問題に入つて来る物の長さ比べて短い為であつて、光に於ても波長の短い場合の伝播状態は、これを粒子と見做して取扱ひ得るといふ事は、Hamilton 以来知られた事である。

量子力学と不確定原理

以上の説明によつて知られる通り、量子現象はこれを古典論の立場より説明しようとする、其古典論には含まれて居ない新しい仮定を用いなくてはならぬといふ事態に立至つた。これは理論としては甚だ不満足なものであつて、統一された独立の体系ではない。

然るに此困難が最初に挙げた人々の手によつて打開せられ、完全な量子論が樹立せられた。此量子論は一

貫した独立の体系であつて、前述の様に古典論から見れば不合理の様に見える不連続性も、又一つの実在が波動性と粒子性との両面を表わす事も、自ら其中おのずかに含んで居るものである。そしてこれは吾人が実験によつて電子や光子の位置を求めたり、其エネルギーを定めたりすると、当然表われて来る事態で、到底避くべからざるものである事が知れる。此意味から云うと、古典物理現象は吾々の脳裡に明瞭な映像を与え、所謂これを理解する事が可能であつたに反し、量子現象は数式によつてこれを表わす事は出来ても、これを時間空間の内に因果的に表現する事は不可能である。これは畢竟吾々の物理的概念が、古典物理学の支配する原子、分子の無数に集合した物体の世界から、抽象して形成せられたものである事に基くものであつて、斯様な概念は、量子論の支配する超顕微鏡的世界の現象の全面を歸一的に表現するには不足である。而かも此世界を認識する為めに用いる吾々の実験なるものは、時間とか位置とか、或は速度とかエネルギーとかを測る場合に鑑かんみても明であるように、古典論的概念に依つて行ふより外はないのであるから、此事態は避け得ない。これ等の現象の全般的表現に適するものは量子論の数式であるが、これを古典論的概念によつて吾々の経験に照して解釈しようとする、其半面を表現するに止まる。従つて場合に依つて吾々の脳裡に描く像は異つたものとならざるを得ない。恰度群盲ちやうとが象の只一部分に触れ、過去の経験に照してこれを理解して居る事に似て居る。相対性理論に於てもこれに似た事態に遭遇する。即ち吾人の直接体験するものは四次元現象其儘ではなく、其三次元的断面に外ならないものである。

以上の論結は、量子論の数学的形体の物理的意義を闡明せんめいする事によつて到達されたもので、今其概要を述べよう。先ず物質の量子論から始める。これには物質を粒子と見るのと波動と見るのとの二つの立場がある。孰れすいから出発しても同じ結果に到達するから、茲こゝには前者を採る事とする。此出发点となつたものは従來の古

典力学である。其運動方程式に入る量には一つの質点毎に、二つの座標 q_x, q_y, q_z と運動量の三成分 p_x, p_y, p_z とがある。これ等は或る時間に於て、皆一定の数値を採り得るものであつて、当然

$$p_k q_l - q_k p_l = 0, \quad k = x, y, z \quad (4)$$

を満足する。此古典力学を拡張して、電子、原子等の現象を含むものとするには、これを改造する事即ち量子化する必要がある。それはこれ等の量の間に関係を与える事によつて行われる。斯様にして出来上つたものを古典力学に対して量子力学という。

$$\left. \begin{aligned} p_k q_l - q_l p_k &= \frac{h}{2\pi i} \delta_{kl} \\ p_k p_l - p_l p_k &= 0 \\ q_k q_l - q_l q_k &= 0 \end{aligned} \right\} \begin{aligned} &\text{但し } k, l = x, y, z \\ &k = l \text{ の時 } \delta_{kl} = 1 \\ &k \neq l \text{ の時 } \delta_{kl} = 0 \\ &i = \sqrt{-1} \end{aligned} \quad (5)$$

これから直ちに知られるのは、量子論に於ける $p_k q_l$ などは、同時に数値を与え得る古典論的の量ではなく、一種の記号的のものであるという事である。斯様な量子論的の量によつて表わされる運動方程式は、形式だけは古典論其儘のものを採る事にするが、其内容は全く異なるものである。

(4)と(5)の対比により、古典論と量子論との関係が形式的に解る。即ち Planck の h が問題になる $p_k q_l$ に対して無視し得る様な小さいものである時は、其極限に於て(5)は(4)と一致し、量子論は古典論に形式上漸近的に移つて行くものである。

以上は Heisenberg の提唱した量子論の形式であるが、其發展並に適用に際し、且つ其物理的意義の究明に當つて、最も有力な役を演じたものは Schrödinger の与えた形式である。これは所謂波動方程式の発見であつ

た。即ち古典論のエネルギーを表わす Hamilton 函数 $H(p_k, q_k)$ に於て、 p_k の代りに $\frac{h}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial q_k}$ と置き、これを波動函数 ψ に対する演算子として取扱ひ、次の微分方程式を樹立したものである。

$$-\frac{h}{2\pi i} \frac{\partial \psi}{\partial t} = H \left(\frac{h}{2\pi i} \frac{\partial}{\partial q_k}, q_k \right) \psi \quad (6)$$

但し t は時間を表わす変数である。此式は古典論に於ける波動を表わす微分方程式とよく似た形を持つて居るので、波動方程式と名付けられた。茲に物質の波動性が含まれる事となる。但し此形式に於ては、波動は統計的結果として表われるものである事後述の通りである。此理論の形式を波動力学と呼んで居る。

Schrödinger は始め、前述の de Broglie の物質波に対する方程式を建てるといふ目的の下に、此式を発見したものである。然し此 ψ は電子が N 個ある場合には、 $3N$ 次元空間の波動の形を採り、光や水の様な三次元空間の波動とは全く意味を異にして居る。(只 $N=1$ の場合 ψ は de Broglie の波動をも表わす事になる。それが物質を波動と見る立場よりの量子論の出発点となる。) それで其後の研究の結果、此波動方程式は Heisenberg の提唱した量子論の運動方程式の他の表現方式で、同じ内容を持ち且つ最も有利な武器であるといふ事が明にせられた。

此見地よりする時 ψ は如何なる物理的意味を持つかといふと、量子論を古典論の自然な発展と見做し、極限(5)に於て両者が一致するという立場より見て、それは一つの確率を与えるものであるといふ事が知れる。例えば(6)を水素原子の問題に適用すると、波動方程式の解として $\psi(E, q_k)$ なるものを得る。茲に E は水素原子のエネルギーを表わすものであつて、Bohr の仮定した通りの不連続的(場合によつては連続的)の一群の値を採る。即ち Bohr の仮定は此中に含まれて居る。此場合 $\psi(E, q_k)$ は如何なる物理的意味を有つかといふと、水素原子のエネルギーが或る E なる値を採つた状態に於て、電子の位置を求める実験を行うと、そ

れを (q_x, q_y, q_z) なる位置 $\wedge (q_x + dq_x, q_y + dq_y, q_z + dq_z)$ なる位置との間に見出す確率が $|\psi(E, q_k)|^2 dq_x dq_y dq_z$ で与えられると云うのである。

これによつて明である様に、量子論に於ては古典論と異り、一般には凡ての力学的の量が同時に全部与えられるものではなく（此事は(5)が既にこれを示して居る）、只一定の値を採る確率が求められるだけである。但し特別の場合には此確率が 1 となる事がある。例えばエネルギー、運動量だけの問題がこれであつて、即ち此時はこれ等の量の不滅則が量子論に於ても成立する。斯様に一般に確率を与えるというのが量子論の顕著な特徴であつて、これが他の特徴であるエネルギー、運動量等の不連続性と如何なる関聯があり、従来物理学を支配して居ると考えられた因果律に、如何なる影響を及ぼすものであるかは後に述べる。

以上は物質の量子論であるが、光に於ても Maxwell の電磁論を量子化する事により、 $h\nu$ なるエネルギーと $h\nu$ なる運動量を持つ、光量子の存在を含む光の量子論を立てる事が出来る。而して此理論でも光量子の時間空間的運動を因果的に与える事は不可能であつて、只これを確率的に表わし得るだけである。そして其統計的結果が Maxwell の式による光の伝播と一致する事が解る。其詳細は茲には省略する。

斯様にして出来上つた量子論は、既述の通り完全な独立体系であつて、光電効果や原子構造の問題に於て、古典論にない Einstein 又は Bohr の仮定を別に必要とせず、これを理論自体の中に含んで居る。又光と物質の波動性と粒子性も自然と現われて来る。其意味は此数学的体系(5)又は(6)（光に於てはこれに相応するもの）がこれを含めて居るといふ事である。即ち此式を検べて見ると、ある場合には光又は電子が、古典論の粒子から抽象して得られた量を用いて表わされる運動をなし、他の場合には古典論の波動から抽象せられた量で表わされる性質を示すのが当然であるといふ事が出て来るといふのであつて、古典論の場合の様に一個の模

像により、粒子から波動に移る状態を脳裡に描くという様な事は出来ない。これは既述の通り古典論の概念を以て量子現象に臨む為に生ずる事態であつて止むを得ない。此点から云うと量子現象の説明に用いた前述の諸假定は、皆量子領域に於ける現象の窮極の姿其儘であつて、吾人の古典的概念を以て、これ以上に其機構を追求するという事は出来ないものである。只量子論の方程式はこれを一纏めにして含んで居る。然し此数式を実験事実に対照し適用するに當つては、どうしても古典論的概念に頼らざるを得ないから、事象の解釈が半面的となつて来る。これは既述の通り、吾々の実験なるものが常に古典論的概念に従つて行われるものであるという事情に基くものである。

不確定原理並に量子論に於ける実験と客観

これ等の事情を更に具体的に示すものは、Heisenberg-Bohrの不確定原理である。これは

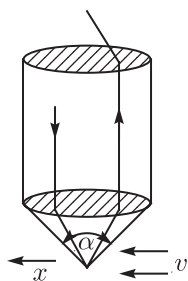
$$\Delta x \Delta p_x \cong h, \Delta y \Delta p_y \cong h, \Delta z \Delta p_z \cong h, \Delta t \Delta E \cong h \quad (7)$$

で表わされる。即ち電子又は光子の時間(t)空間(x, y, z)に於ける位置が、夫れ夫れ $\Delta t, \Delta x, \Delta y, \Delta z$ の精度(誤差)で与えられた時には、其エネルギーと運動量とは、夫れ夫れ上式を満足する $\Delta E, \Delta p_x, \Delta p_y, \Delta p_z$ 以上の精度(以下の誤差)では与え得ないと云う原理である。これは是等の量を測定する測定器の不完全によるものではなく、量子論が行われる領域では、原則として古典論的概念に加えられる制限なのである。それは(7)が(5)又は(6)から直接又は間接に導き出される事からでも解る。

不確定原理は量子論の物理的内容を簡潔に表わすものであつて、量子論に於ける実験の結果と完全に一致する。従つて斯様な実験の検討によつて、此原理の基因する処、即ち量子論の内容が具体的に明瞭になり、且

つ量子論に於ける実験なるものの意味を明にする事が出来る。依つて其一例を挙げて見よう。

今よく述べられて居る電子の位置を定める実験を行つて見る。其方法としては古典論に於て行う様に顕微鏡を用いる事とする。それにはガンマ線を使用する顕微鏡が必要であろう。然し今日そんなものは存在しない。従つて斯様なものを仮定する必要があり、実験は所謂思考実験となる。此思考実験を行うと云ふ事は、此問題には差支ないというよりはよく目的に適して居る。其理由は(7)式に入つて居る量は皆古典論的の量である。例えば位置にしても、古典論の実験に於て定められる意味での位置を求めて見ると、(7)で表わされた不確定性を示すというのである。従つて思考実験に於ても古典論に於けると同一原理による実験を行つて位置を定めれば好い。それは丁度ガンマ線顕微鏡で目的が達せられる訳である。



今速度 (v) 従つて運動量の確實に知れた (他の実験により) 電子の群が、上図矢で示す様に並行に x 方向に走つて居るとする。実験は其中の一つのものの位置を、ガンマ線顕微鏡を用いて測定するのである。電子の位置を求めするには、ガンマ線を顕微鏡の対物レンズを通して電子に当て、これが電子から反射されて再び対物レンズを通り、更に対眼レンズを通して其焦点面に像を結ぶ。此焦点面内の各点が、対物レンズの焦点面内にある電子の各位置に対応するから、像の位置から電子の位置が求められる。

今用いるガンマ線の波長を λ とすると、顕微鏡の分解能、即ち区別して見得る最小距離は、光の波動論から $\Delta x = \frac{\lambda}{2\epsilon}$ である。但し $\epsilon = \sin \frac{\alpha}{2}$, α は対物レンズが其焦点で張る角である。

此実験に於てガンマ線と電子とのエネルギー、運動量の交換を検べて見る。即ちガンマ線を光量子と見ると、それが電子に衝突し Compton 効果によって跳ね返り、写真板又は肉眼に其エネルギーを与える事によつ

て、電子の位置を示す事になる。従つて電子が観測せられる以上、必然的に光量子から反動のエネルギー及び運動量を受取る事になる。所がレンズがガンマ線の波動性を利用して居る必然の結果として、此光量子は α なる角の範囲内では、孰れいすの方向から来て電子に衝突し、孰れいすの方向に反射せられたものか原則として知る事が出来ない。即ちガンマ光量子の運動量の方向も大きさも、対物レンズに入る前、並ならびにこれを通して歸つて来た後はこれを精確に知り得ても、対物レンズの焦点面内の x 方向には大体 $+\frac{2h\nu}{c}$ と $-\frac{2h\nu}{c}$ との間の量だけ是不明である。即ち光量子が電子に衝突する前後に於て、 x 方向の運動量に $|\frac{2h\nu}{c}|$ だけの不精確度がある。従つて電子に与える反動もこれだけの不精確度の範囲内で求められる事になる。それ故仮令、測定前に電子の運動量が正確に知れて居つても、それが観測せられた結果、必然的に x 方向に $\Delta p_x \sim \frac{2h\nu}{c}$ なる不確定度を有する事となる。よつて上の Δx と組合せると $\Delta x \Delta p_x \sim h$ 、即ち(7)を得る。他の式も同様にして求められる。これによつて量子論の歸結(7)は実験と完全に一致する事が知れる。

此結果の因つて来る処は何処にあるか茲こゝに点検して見よう。先ず重要な事は、電子が観測せられる為には、どうしても観測の主体たるガンマ線と、有限のエネルギー、運動量の交換を必要とするという事である。而して此交換せられる量は、それが量子現象特有の粒子的不連続性——茲こゝでは光量子性——を有する為に、これは無視し得ない大きさであるという事、其上に量子現象特有の他の半面として波動性が存在する為、此交換せられる量（又は交換の起る時間空間）が原則的に精確に知り得ないという事、此二点に不確定原理の起源の凡すべてが存する。これが古典論と全く異なる処である。

古典論では観測に當つて、其主体が被観測体に及ぼす影響は、問題に入つて来る量に比べてこれを無視し得

るか、又は其影響される量が精確に求められてこれを補正し得るかである。従つて古典論に於ては観測体と被観測現象とを完全に區別し得る。然るに上述の通り、量子論に於ては影響の量に原則的不確定度を伴う為、此兩者を完全に分難する事が出来ない事態にある。即ち古典論に於ては観測作用と無関係な、独立した客観的現象の存在を認め得るものであるが、量子論に於ては観測作用を離れた客観的現象は存在し得ない。一言にして云えば主観と客観とが完全に分離し得ないという事情にある。

上述の顕微鏡の場合に於て、用いる光の波長を充分長くすれば交換するエネルギー、運動量は無視し得る程小さくし得る。然しそれでは Δx が大きくなつて位置の観測という目的を達し得ない。其為にはどうしても無視し得ない相互作用を必要とする。又此実験に於てガンマ線、従つて顕微鏡の受ける反動の運動量を何等かの方法で求めれば、電子に与えた運動量はそれに等しいから、上述の不確定度を除き得る様に考えられるがこれは誤謬である。何となればそれが為には、別に顕微鏡の位置と運動量とを正確に観測する器械を必要とする。然るにそれに対して顕微鏡の運動量と位置とは、やはり(7)なる制限を受けるから、結局此不確定原理は免れ得ない。

これを要するに何処迄を観測体とし、何処迄を被観測体としても、其観測が本来の性質として古典論の像による手段を用いる限り、常に不確定原理に到達する。それは観測体と被観測現象との完全な分離を妨げる相互作用に基くものである。

量子論の半面性と因果律

(7)式で表わされて居る通り、時間空間とエネルギー運動量とは、其一方が精確に知られると他方は全く不

明である。これは量子論に特有な事態であつて、これを量子論の片面性と云つて好いであろう。古典論ではこれが両方共精確に知り得る。それは量子論の極限として $\Delta x \rightarrow 0$ とすれば、(7)は $\Delta x \Delta p_x \rightarrow 0$ 等となるから解る事である。

古典論に於てはこれ等の量が客観的に全部精確に知れるから、従つて因果律が成立する。即ち「一つの独立体系に於て、ある時間に於ける状態が完全に与えられると、それよりして其後の状態は一義的に定められる」。然し量子論に於ては全く事情を異にして居る。前述の通り観測の客観化が原則として行われない結果、独立した体系というものが古典論の意味に於て存在しない。例えば時間空間の位置を精確に求めると、観測の影響によつてエネルギー、運動量は或る程度迄不明となつて了しまう。即ち此体系は古典論の意味に於て状態の明に知れた独立のものとは云い得ない。従つて古典論の立場から云つても、其運動が確率的には解つても因果的には定め得ないのが当然である。而して此場合に其運動を定めるものは Schrödinger の波動方程式であつて、これは前述の通り此後の運動の確率だけを与えるものであるという事は、因果律其者の立場よりして終始一貫、満足すべき事態である。此意味よりして量子論に於ては因果律は否定されるものではなく、只其適用の対象を失つたものであると云う人がある。例えば前述の思考実験に於て、最初に電子の有する運動量が全く同じく、且つ顕微鏡で測定した第一の位置が同じであつても、一定の時間を経て此同じ電子の占める第二の位置は実験の度毎に変化する。即ち第二の位置については因果的には豫知し得ない、只確率を与え得るだけである。これは上述の見地よりすると因果律の否定ではなく、第一の位置測定に於て電子の受けたエネルギー、運動量が、場合によつて異なる為に第二の測定結果が違ふのである。斯か様な不確定の体系にあつては古典論に於ても因果律は適用せられないで、確率が与えられるだけである。即ち量子論は因果律の適用される領域で

ないというだけで、これを否定するものではないと云うのである。

然し他の人に云わせると、第一測定に於て電子の受けた影響は原則的に不明なものであつて、これを確定的に求める手段はない。従つて最初状態の定め方はこれ以上どうする事も出来ない。而して同じ最初状態（最初の速度と第一の位置）からして異なる結果（第二の位置）を生ずる事は因果律の否定を意味するものであるとする。

此両説の妥否は因果律の内容を如何に解釈するかによつて定まる問題である。即ち最初の状態が定まれば其後の状態が定まるといふ其「状態」なるものを如何に定義するかという事に歸する。もし古典論的に定義するならば前説が当り、量子論的に吾人のなし得る限りを以て定義するならば後説が好いであろう。其孰れを採るべきかは、他の領域に於ける問題とも關聯して定むべきであらうから門外漢には解らない。只従来の儘の内容をもつ因果律は、量子現象に対して縁の遠いものである事は否み得ない。

然し因果律の内容の定め方によつては、量子論に於てもこれが成立すると云い得るであらう。今ある体系のある瞬間に於ける波動函数の形を与えたとする。此事は波動函数の物理的意義よりすれば、電子の位置を定める実験を同じ状態に置いた体系について度々繰り返し、 ∞ 次元空間に於ける其確率の分布を与えたという事になる。そうすると其後の波動函数は一義的に豫知出来るから、従つて其後に同様な実験を繰り返して得られる確率分布は因果的に定まる事になる。即ち状態という事を確率の分布、換言すれば統計的状态と解積するならば、因果律は量子論に於ても成立する事となる。然しこれは従来の因果律とは其内容が余程異つたものである。斯様に一般化して何処迄も因果律の適用範囲を拡めるといふのも一つの行き方である。然しこれも科学の他の領域に於ける問題と關聯して其妥否を定むべきであらう。

因果律の形式の問題は兎も角、(7)式に従えば物質又は光の時間空間に於ける運動伝播を追求する場合には、エネルギー、運動量は全く不明となるから、後の状態に関する個々の実験結果は因果的に豫知する事は出来ない。只其確率を与え得るだけである。而して此確率は波動函数で表わされるものであるから波動性を示す訳である。即ち時間空間の問題には従来の意味での因果律は適用し得ないで只確率が与えられ、其統計的結果は波動性を表わすものである。従つて量子論の波動とは全く趣を異にするものである。

逆に粒子性の表われるのはエネルギー、運動量が問題となる場合であつて、此時は(7)式により時間空間の状態は全く不明である。従つて量子論の粒子性は、古典論で考える様に小さな空間にエネルギー、運動量が集中せられ、其時間空間的の運動を云為する事を許さぬものである。只エネルギー、運動量だけが粒子の様に作用するもので、これ等の量については既述の通り、量子論に於ても不滅法則の成立する事が証明せられるから、従来の意味での因果律が適用せられる。

即ち時間空間内の運動伝播状態を描述する事と、従来の意味での因果律とは両立しないのが量子論の特徴であつて、 $\psi \rightarrow 0$ の極限に於てはこれが両立し、統計的結果として古典論となるものである。これは量子論の半面性を明に示すものであつて、前者に於ては波動性を、後者に於ては粒子性を表わす事は何等矛盾ではない。

結 語

物理学に於ては、古典論の極めて自然的な発展の結果として、観測体と被観測現象との区別を截然と行い得ない領域のある事が発見せられた。これは他の学問の分野に於ても屢々問題となる、主観と客観との区別の困難によく似て居る。そして其結果として個々の現象に就いては時間空間的状态の描述と、従来の意味に

於ける因果律の適用とは両立しないという事態が存在する。而してこれが自然界を構成する窮極の世界である。斯様な世界の発見が今後哲学、心理学、生物学等の他の学問の分野に如何なる影響を与えるものであるかは、将来に貽された問題であろう。

是等の結果は今日迄の量子論の発展によつて到達されたものであつて、更に将来の物理学の進歩によりこれが如何に変転するか、それは豫知し得る限りではない。ある人々によれば、其結果は内容を改めた古典論への帰還でなくてはならぬともいう。然し左様に学問の進歩が豫定し得るかどうか疑問である。寧ろ多くの量子論者の云う様に、益々古典論的表現から遠ざかるものではなからうか。然しこれは従来 of 経験に基く単なる想像に過ぎない。

(昭和一〇、九、九)

-
- 『思想』（一六一号、一九三五年一〇月号、岩波書店）所収。
 - 収録にあたり旧字は新字に、旧かなは新かなに改めたが、一部の漢字は旧漢字のままにした。
 - 読みやすさのために、適宜振り仮名をつけた。
 - PDF化にはL^AT_EX_{2 ϵ} 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。