

量子論の諸問題

湯川 秀 樹

量子論の一般的な方法は既に確立され、各方面に適用されて充分その眞價を發揮した。近來その哲學的意味も段々明瞭になつて來た。少くとも相對律を顧慮する必要のない範圍に於ては、理論は進むべき所まで進んで一段

へば、吾々の直觀が力を振ふ餘地が益々少くなり、自然現象が吾々に新たに何を強制してゐるか愈々見當が付き難くなつたからである。

落に到達したといへるであらう。勿論最近に於て、現在の量子論をそのまま、原子核・宇宙線の問題にも應用しようとする企圖は益々熾んで、既に相當の成果を收めて居ることは見逃し得ない。併しこの場合、内的聯關の不明

かゝる時期に於て、量子論の前途に横はる諸問題の素描を試みることも徒爾ではあるまい。併し、數式の省略と用語の不備の爲めに、誤解を招き易い箇所があるかも知れぬ。この點は豫め御諒承を乞ふ次第である。

一、電子と電磁場の問題

な多くの假説を前提とする點に於て到底暫定的な理論たるを免れないであらう。この意味に於て現在、量子論がこれらの問題を契機として、次の段階に移るべき過渡期であるとも考へられる。近代物理学は既に幾度か、かゝる時期を経過し、その度毎に生みの苦を味つたのであるが、今度は一層難産であるかも知れぬ。何故かとい

一言にして言へば、現在までの量子論の主要なる部分は古典的な電子と電磁場の理論の延長に他ならぬ。原子核の如きは最近までは殆んど電子に作用する電磁場の原因としてのみ問題になつた。一箇の電子が與へられた電磁場に於て如何に振舞ふかを規定するものは所謂波動方程式である。特殊相對律の範圍内に於るその正確な

形は、既にディラックによつて決定された。一方かゝる電子によつて如何なる電磁場が惹起されるかを規定するものは、舊來のマックスウェルの場方程式に他ならぬ。唯々式中の電荷及び電流の密度が電子の波動函數を含んで居る點が古典論と異なる。併しそれ丈では光が他方に於て粒子の性質を有することを説明し得ないから、電磁場も電子と同様一種の量子力學的體系であつて、兩者が相集つて一つの閉じた體系を形成すると考へる必要がある。この立場から出發したディラックの輻射論は更に發展して、特殊相對律の要求を満足するハイゼンベルク・パウリの量子電氣力學になつた。これが正しければ、從來取扱はれて來た範圍内の問題は何でも一義的に解決出来る筈であつた。事實この理論は多くの場合に極めて明確な解答を與へた。併し物理的な意味から考へて當然有限なるべき種々の量が無限大になるといふ結果は、理論自身の中に矛盾が含まれてゐることを示すものであつた。この矛盾の一部は既に古典論に於る點電子の模型の中に存在して居たのが、そのまゝ量子論に持越されたものである。而して古典論に於ては、電子と電磁場と

を二元的な對立的なものと考へることは不満足と考へられて居た。この意味に於て、ポルンは先づ古典的電磁場一元論中に電子の半徑に相當する量を自然的に導入することを試みた。併し上記の無限大の中には量子論特有のものもあり、又後述の陽電子の問題とも關聯して、眞の解決は今後に殘されてゐる。

一方ボーア及びローゼンフェルトはこの問題を別の方面から考察した。それによると、電磁場の測定に際して、測定手段の原子的な構造を無視する限りに於て、現在の量子電氣力學を適用し得る。従つて電磁場を原子に比して大きな領域で平均したものが物理的な意味を有する。場の量子化には、プランクの常數 h と光速 c が入つて來るが、それと電荷の素量 e の存在といふ事實の間に有機的な關聯がない。今後の理論に於ては、此等を組合して出来る次元の無い數 $\frac{2\pi e^2}{hc}$ が大體 $\frac{1}{137}$ なる値を有する事實を説明することが問題になるであらう。兩者の所説は以上の如くであるが、測定の問題は尙後にも論ずることとする。

二、陽電子の問題

以上述べたのは量子電氣力學の難點であつたが、更に溯ればディラックの電子論にも、勢力が負である様な状態に如何なる物理的な意味を與へるべきかといふ難問題があつた。ディラックの最初の解決法に従へば、通常の場合、負勢力の状態は各々一箇づゝの電子によつて充されてゐるが、その中の一つの電子が外部から勢力を供給されて正勢力の状態に飛上ると一つの穴が出来、この穴は恰も正電荷を持つた粒子の如く振舞ふ故、陽子に他ならぬと考へられた。併し間もなく、質量が電子と同じでなければならぬことがわかつたので、この假説は放棄され、この穴を反電子と名づけた。之がその後宇宙線中に發見された陽電子に他ならぬことは周知の通りである。而して宇宙線の霧函寫真中に屢々發見される陰陽電子對はガンマ線が物質を通過する際にその勢力を負勢力状態の電子に與へ、之を正勢力状態に飛上らせた結果であるとして説明し得る。更に一枚の寫真中に一點附近から發散する多數の陰陽電子の軌跡が現はれる場合があり、之をシャワーを稱して居るが、その成因は定説が無く、現在の量子論の範圍では説明が困難と考へられ

て居た。しかるに最近、上記の理論に従つて、非常に速い電子が物質中を通過する際に勢力の大きなガンマ線を發生し、それが陰陽電子對を創り、それが各々又ガンマ線を出すといふ様にして、電子の數が増加して行く過程に關する詳細な計算が行はれ、シャワーの現象を定量的にも相當よく説明し得たことは注目に値する。併し、凡てのシャワーがかゝる原因に依るものであるかどうかは尙疑點がある。更に又非常に貫通力の強い一次線の本性が何であるか未だ不明である以上、宇宙線の問題の根本的な解決は未だしと言はねばならぬ。最近の實驗結果によると、これは或は從來知られてゐるどの素粒子とも異なる新しい粒子であるかも知れない。

この様にして電子が一つの状態から他の状態へ轉移を行ふ確率に關する限り、理論は正しい結果を與へる。併し、陽電子理論の根柢に横はる「負勢力の状態は殆んど全部電子によつて満されてゐる、」といふ假定を數學的に矛盾なく表現することは頗る困難である。何故かといへば、負勢力の状態は無限にあり、従つて、空間到る所無數の電子が潜在することになり、その影響は屢々無限

に大きくなるからである。この無限大を最初から出て来ない様にする理論は未だ出来て居ない。この問題は前述の電氣力學の困難と共に、極めて根本的な意味を有する如く感ぜられる。或は時空の構造の連續性・不連續性の問題にまで關係してゐるかも知れぬ。

三、觀測に關する問題

以上述べて來たのは凡て相對性量子力學に關する問題であつた。最初に述べた様に非相對性量子力學の一般的な方法は既に確立され、何等の疑義を残して居ない様であるが、ここにも屢々看過されてゐる次の如き問題がある。

先づ理論の根本假定を述べると、第一に考へてゐる體系は一定の實驗裝置の一定の操作によつて、一定の状態に齎らされる。第二にその状態に於てある物理的な量を測定して色々な結果の得られる確率は理論的に決定し得る。第三に測定後の體系の状態は得られた結果によつて一義的に決定され、直ちにもう一度同じ物理的な量を測定すれば必ず同じ結果が得られる。即ち測定は反覆可能である。

以上三つの假定の中、第三の假定は、ランダウ、バイヤルスが注意した様に、一般には正しくない。例へば、運動量の測定を行ふ場合、時間を充分長くかけた場合に限つて反覆可能になるが、その間に運動量が變化する場合にはかゝる測定は無意味になる。併し、彼等に從へば、反覆可能の假定は理論の構成には不必要で、唯々測定の不確定性の假定で充分である。即ち、體系のどの状態を取つても、それに適當したある測定を行へば、結果は一定であることを假定しさえすればよい。

相對律を考慮すると問題は更に複雑になり、一般に、物理的な量を有限時間内に正確に測定することが不可能になる。従つて、今後建設さるべき正しい相對性量子力學に於ても、かゝる制限を無視することは出来ないであらう。彼等は更に、よく知られて居る電子の位置と運動量の測定の間にある不確定性原理より一步進んで、電子の位置の測定自身が、ある程度以上正確に行ひ得ないことを述べて居る。併し、これは負勢力の状態を除外した結果であつて、陽電子の存在を考慮するならば、この結論は訂正せねばならぬ。

いづれにしても、測定の間とその正確さの間の關係の問題及び個々の測定の正確さの限度の問題が今後重要な意味を持つて來るであらう。更に、測定の對象も測定の機械も共に原子的な構造を有する以上、それらに關する事柄を連續的な時空を基礎として論じ得るや否や、當然疑問視さるべきであるが、唯々自然現象が何を強制するかが不明である限り、問題は將來に残る。

四、重粒子の問題

量子論が原子核の問題を取上げたのは必ずしも新しくはない。併し、中性子が發見される迄は、陽子と電子とを原子核の構成要素と考へて居た爲めに、理論を充分發展させ得なかつた。何故かと言ふと、原子核の様な小さな空間に、電子の如き軽い粒子を閉ぢ籠めるに要する束縛勢力は極めて大きなものであり、實驗的に質量缺陷から決定される束縛勢力の十倍程度になるからである。その後核の構成要素を重粒子即ち陽子と中性子丈と假定する理論がハイゼンベルクその他の人々によつて發展された。この場合には、重粒子の質量が大きい爲めに、上記の様な困難が生じないのみならず、その速度は

原子核内に於ても光速度に比して小さいと見做し得る故、非相對性量子力學が近似的に適用され、問題は著しく簡單になる。唯々重粒子相互の間に働く力が如何なるものであるかを決定する理論がないので、色々可能な場合を檢討して見て、結果が實驗と最もよく一致するものを搜し出す他はない。今の所二箇の重粒子が非常に接近した時丈強い力が働き、その力は原子間の化學的な方の様に飽和する性質のものであらうと認められてゐる。併し重粒子の満足すべき正確な波動方程式を發見し、且その相互作用を理論的に一義的に決定せぬ限り、遂に現象論的な説明法の域を脱し得ないであらう。極最近の諸實驗の結果は、重粒子の相互作用に對する從來の考へ方に、相當本質的な改變を要求する様に思はれる。

この様にして、吾々は原子核に關する現象を支配する法則の正確な形を知らないのであるが、昨年來ボーアの強調する、原子構造と原子核構造の對蹠的な相違なるものは、少くとも定性的には、今後の理論の動向如何に拘はらず、不變な意味を有するであらう。それによると、通常の原子に於ては、太陽系に於るが如く電子が原子核を

廻る軌道の大きさはそれ等自身の半徑とは比較にならぬ程大きい。即ち非常に疎なる構造を持つてゐる。而して近似的に、電子は相互に獨立に原子核の場の中で動くとして考へてよい。之に反して原子核内に於ては、固體か液體の様に、中性子陽子がこれ以上殆んど壓縮し得ない位に密集して居ると考へるべきで、従つて外部から一箇の粒子が飛込んで來て核内の粒子の一つに衝突して勢力を與へるとすると後者は又他の粒子に衝突し、かゝることが引續いて結局短時間の間に多數の粒子に勢力が分配され、それ等の中の一箇丈が充分の勢力を蓄へて外部へ飛出すまでには相當に時間を要し、従つてその間にガンマ線を放出して過剩勢力を失つて了ふ機會が多くなるであらう。

この見地に從ふと、從來の單純な衝突理論では理解し難かつた色々な現象をよりよく説明し得る。併しかゝる密なる構造を有する體系の正確な取扱ひは技術的に容易でなく、上記の純理論的な困難と重疊して、問題を愈々複雑化して居る。

五、輕粒子の問題

以上述べた様に、原子核中には重粒子丈が存在すると考へると、放射能原子核から陰電子又は陽電子が放出される現象は次の如く考へる必要を生ずる。即ち重粒子は中性子と陽子といふ二つの状態を有し、その一方から他方へ轉移を行ふと同時に、陰又は陽電子が創造されると考へる。更にその際、勢力・運動量等の保存の法則が成立する爲めには、未だ觀測されぬ輕い中性の粒子、即ちニュートリーノが同時に創造されると假定する必要がある。かゝる見地から出發したフェルミその他の人々の理論は、ビーター放射能に關する實驗的事實を相當よく説明し得る。この場合、陰陽電子、ニュートリーノ、アンチ・ニュートリーノ等の輕粒子の速度は一般に光速度に極めて近いから、問題は相對性量子力學の範圍に屬し、今の所輕粒子に對してディラック型の波動方程式が成立つと假定するより他ないのであるが、それが何處まで正しいか決定することが今後の問題である。それと同時に、重粒子と輕粒子の相互作用の正しい形を決定することも重要である。現在に於ては、この相互作用は最も基本的なものであつて、重粒子間の相互作用はそれから導

き出される二次的な結果であると考へられてゐる。それは丁度量子電氣力學に於て帶電粒子と電磁場の相互作用が基本的で、帶電粒子間の相互作用は電磁場を仲介とする二次的なものであると考へることに對應して居る。この意味に於て、輕粒子は重粒子の相互作用の仲介者として、一種の場の役割を演じて居ると言はれる。併しこの見界の數學的形式化には種々の困難があり、尙全く假説の域を脱しない。

以上吾々は現在の量子論の未だ解き得ざる主な問題を列擧して見た。それは箇別的に見れば、要するに種々なる素粒子の固有の性質と相互作用の問題に他ならぬが、その共通な土臺として、相對性量子力學の確立といふ問題を抜きにすることが出来ない。成程電子の性質の問題と相對性の要求とはディラックの波動方程式に於て美事に統一されてゐる。併しそれは問題の核心への第一歩に過ぎない。何となればその場合、相對性の要求は全く形式的に採入れられた中で、量子論の物理的意味づけに於て、時間と空間とはどこまで對稱化し得るか、ど

ここに本質的な相違があるかといふ問題には觸れて居ない。更に時間、空間自身の量子化が必要であるか否かといふ點に至つては、全てを將來に期待する他はない。この様にして、現在の量子論はある一部分を除いては、尙未だ現象論的説明の段階にある。例へば「原子核は如何なる構造を有するか」といふ問に對しても、立入つた解答をすることを躊躇せざるを得ない。寧ろ、ボーアに從つて、現在の諸實驗と矛盾しない範圍内で融通性のある、併し半古典的な定性的な模型を持出すに如かないのである。

最近に於て、原子核、宇宙線に關する實驗結果は、驚くべき速さで蓄積されつゝある。併し、吾々はその中から理論の根柢を明かにすべき本當の鍵を未だ發見することは却々容易ではない。筆者は固より量子論の過去の成果の美しさを賞讃するに吝かではない。唯々更に大いなる發展を將來に期待するが故に、ことさらに現在の量子論の不備な點を強調した次第である。

(六月七日夜脫稿)