

電子と陽電子の理論

デイラック

下村寅太郎譯

この小篇は、デイラック氏が新量子論の建設者としてハイゼンベルク（一九三二）、シュレディンガーと共にノーベル賞を受けた際の記念講演であつて、一九三三年ストックホルムに於て行はれたものである。この新理論が提供する哲學的問題の重要性は既に周知の如くである。シュレディンガー、ハイゼンベルク兩氏の通俗的な解説は既に種々な機會に於て公にされてゐるが、當今最も獨創的構想家と稱せられるデイラック氏のものばこれが最初である様である。

固より極めて簡単な小篇であるが、哲學と共に古き概念たる「原子」、物的自然の「極的要素」が、現代の實證的研究の尖端に於て如何なる状況にあるかに對して興味深き示唆を與へることと思ふ。猶ほ、前記二氏のノーベル講演は雜誌「科學」に譯載されてゐる。

實驗物理學者は、物質が種々なる種類の微粒子より成ること、然し、各の種類の粒子相互は全く等しいことを

發見した、これらの微粒子の若干に付いては、それが合成されてゐること、而も他のより單純な種類の粒子から合成されてゐることが認められてゐる。他の微粒子は合成的であることは證明されてゐない、それでこれは要素的基本微粒子と見做されてゐる。

一般的哲學的な根據からは、いきなり、出来る限り少い種類の要素的微粒子、例へば單に一種類、或はせいぜいで二種類しか存在しないこと、又、すべての物質がこれらの種類の要素的微粒子より構成されてゐることが求められるでもあらう。然し實驗の結果からは、單に一、二種類丈でなくそれ以上の微粒子が存在するといふ結論になる様に見える。それ所が要素的微粒子の數はこの數

年の間に増加して行く相當不安な傾向を示してゐるとす
ら言ふことが出来る。

然し事情はそんなに悪いものではない、と云ふのは、
要素的微粒子和合成的微粒子和の嚴密な區別は全然なさ
れないことが、より正確な研究によつて明かになつたか
らである。最近の實驗の結果の若干を解釋し得るため
に、微粒子が創造されたり、絶滅されたりし得ることを
假定せねばならない。それ故、ある微粒子がある他の微
粒子から出て來ることが觀察されても、もはやこの後者
のものが合成的であるとは正確に推論され得なくなる。
前者も新しく出來上つたのであるかもしれない。かくし
て要素的微粒子和合成的微粒子和の區別は便宜上の問題
になる。かくしてこの根據だけで、すべての物質が一種
類、若しくは二種類の礎材から合成されてゐるといふ確
かに甚だ魅力のある哲學的理念を我々に斷念せしめるに
充分である。

以下、私は比較的單純な種類の微粒子に付いて談り、
そしてこれらに關していかなることが純粹に理論的な考

察から確言されるかをみて見たいと思ふ。比較的單純な
種類の微粒子とは次の如きものである。——

1、光がそれより成るところの「光子」或は「光量子」
2、「電子」と近頃發見された「陽電子」、陽電子は電子
と唯だその荷電の符號が違ふだけであるから、電
子の一種の映像である様に思はれる。

3、比較的重い微粒子、即ち「陽子」と「中性子」

以下私はこれらの種類の微粒子の中で殆ど専ら「電子」
と「陽電子」を取り扱はうと思ふ。——尤もそれらが最
も興味があるからと言ふのではなく、これの場合にはそ
の理論が既に廣く展開されてゐるからである。實際に他
の微粒子の性質に付いては理論的には殆ど何事も推論さ
れないのである。一方「光子」は極めて簡單であるため、
容易に何らかの理論的圖式の中に處理されることが出
來、従つてその理論からその性質に對するいかなる制
限も生じない。他方、「陽子」と「中性子」とは餘りに複雑
である様に思はれる。實際今日に到るまで猶ほこの微粒
子の理論に對しては何ら信頼すべき基礎は見出されてゐ

ないのである。

先づ第一に、我々は、抑、如何にして理論が一般に何らか要素的微粒子の性質に付いて教示し得るかの問題を考察せねばならぬ。ところで今日では或る任意の微粒子の運動を記述するために利用され得る一般的量子力学が存在する、これに於いては微粒子がいかなる種類の性質を有するかには全く無頓着である。尤もこの一般的量子力学は、唯だ微粒子が小さい速度を有する場合にのみ妥當するが、然し、光速度に比せられるべき速度の場合には、従つて相對性論的效果が現はれる場合には、直ちに、この理論は駄目になる。任意の性質をもつた微粒子に適用される相對性論的量子力学（即ち、大きな速度にも妥當する量子力学）は存在しない。従つてこのことは、量子力学を相對性論の要求に従はしめやうとする場合には、微粒子の性質に制限が加へられると言ふことを意味してゐる。かくの如くして、一般的物理學の原理に基づく純粹に理論的攻究から微粒子の本性に關する陳述が獲得されるのである。

ところでこの取扱ひ方は「電子」と「陽電子」の場合には成功する。將來に於ては何らか同様な取り扱ひ方が他の微粒子の場合に對しても見出されるであらうと思ふ。私は此處では、いかにして電子のスピン性質を導出し得るか、次に、いかにして、同様なスピン性質をもち、電子との衝突によつて絶滅される能力をもつた陽電子の實存を推論し得るか、を示すことによつて、電子と陽電子に對する取り扱ひ方を略述して見たい。

我々は先づ、相對性論的、古典的力学に於ける一つの微粒子の運動エネルギー W と力積 P_r ($r = 1, 2, 3$) とが互に結合した次の方程式から始める。

$$\frac{W^2}{c^2} - P_r^2 - m^2 c^2 = 0 \quad (1)$$

この式から我々は、左邊を演算子として波動函數 ψ に作用せしめ、 W と P_r とを演算子 \hat{W} 及び \hat{P}_r と解するならば、量子力学の一つの波動方程式を得ることが出来る。それ故、この意味の W と P とをもつた波動方程式は次の形式をもつ――

$$\left[\frac{\hat{W}^2}{c^2} - \hat{P}_r^2 - m^2 c^2 \right] \psi = 0 \quad (2)$$

ところで演算子 W 或は $\partial/\partial t$ に關して一次であることが量子力學的波動方程式に對する一般的要求である、従つてこの方程式は使はれない。我々はこの方程式を演算子 W に關して一次である方程式によつて置換へねばならぬそして又この方程式が相對性論的に不變的であるために、それは D_t に於ても亦一次でなければならぬ。

かくして我々は次の種類の方程式を考察せねばならぬことになる——

$$\left[\frac{W}{c} - \alpha_1 p_x - \alpha_2 mc \right] \psi = 0 \quad (3)$$

この方程式は演算子として ψ に作用する四つの新しい變數 α_r と α_0 を含む。我々は、それらが次の條件

$$\begin{aligned} p_x \psi &= p_x \psi = 0, \quad 1, 2, 3 && \text{に對し} \\ \alpha_0^2 &= 1, \quad \alpha_\mu \alpha_\nu + \alpha_\nu \alpha_\mu = 0 \end{aligned}$$

を満足すること、更に α は P と W とに交換可能であることを假定したい。 α に關するこの特殊な假定により方程式(3)はある程度まで方程式(2)と等價になる、何とならば方程式(3)を今度は左から $W + \alpha_1 p_x + \alpha_2 mc$ で乗じると、正さしく(2)が得られるからである。

W に於いて一次の相對性論的波動方程式を維持するために導入せねばならない所のこれらの新しい變數 α は電子のスピンを呈示する。量子力學の一般の原理から、電子に對するこれらの變數が二分の一量子のスピン角運動量及、角運動量に反對の方向にある「ボアア磁子」の磁氣能率を呈示することは、容易に推論される。これらの結果は觀察と一致してゐる。否な寧ろそれは當初分光學の實驗的事實から起り、然る後始めて理論によつて立證されたのである。

しかしこの變數 α は電子の運動に於ける若干の稍豫期されなかつた現象をも呈示する。シュレディンガーが初めてこの歸結を完全に引き出した。すなはち、我々には稍遅く運動してゐる様に見える電子に於いて、我々が知覺するその運動には、振幅の小さい甚だ高度の振動數の振動が重疊してゐねばならないことが明にされた。この理論からの歸結は直接實驗によつて證明されない、と云ふのはこの振動の振動數は甚だ高度であつて、その振幅は甚だ小であるからである。だが然しこの理論よりの

歸結は信ぜられねばならない、と云ふのはこれと不可離的に結合してゐるこの理論からの他の歸結、例へば電子に於ける光の散亂の法則の如きものが、實驗によつて證明されてゐるからである。

今や更にこの方程式の他の一つの性質——「陽電子」を前提せしめる様になつた夫の性質を語る場合になつた。方程式(1)を注意して見ると、この方程式は、運動エネルギー W が E_0 以上の正の量であるか、若しくは、 $-E_0$ 以下の負の量であるかの何れかを許すことに氣がつく。この結果は方程式(2)或は(3)に移つても依然として變らない。それ故、この量子論的方程式は、それを量子力學の普通の規則に従つて解釋するならば、 W の測定の可能的結果として E_0 より大なる値、若しくは $-E_0$ より小なる値の何れかを許容するのである。

處で微粒子の運動エネルギーは實際上、常に正である。それ故、上述の方程式は電子に二種の運動を許すが、その中の一種が我々が實驗上知つてゐるものに對應すると云ふことになる。第二の種類は甚だ奇妙な運動をする

電子に對應する、即ちそれが速く運動すればする程、それは少いエネルギーをもち、それを靜止せしめるには、それにエネルギーを加へねばならないといふことになる。

それで、現實界にはこの二種類の運動の中一種しか現はれないといふことを、新らしい假定としてこの理論に導入することが當然となるであらう。然しこの假定によつて一つの新らしい困難が生じる、何故なら、この理論は我々が電子を擾すならば、我々は正のエネルギーをもつたある状態から負のエネルギーをもつたある状態への移行を起させ得ることを示すからである。それ故譬へ初め世界中のすべての電子が正のエネルギーをもつた状態に在ると假定しても、若干の時間の後には負のエネルギーをもつた状態にある電子も亦現はれるであらう。

それ故、この理論が負のエネルギーを持つた状態を認めることによつて、この理論は、我々が實驗によつて知るものには全く對應しない様に見えるが、然し他方又簡單に新らしい假定によつては除去され得ない如き或るも

のを呈示する。それ故、我々は是非ともこれらの状態に對して一つの意味を見出さねばならない。

これらの状態の情况をある電磁場に於いて驗して見ると、それは、普通の負の電荷の代りに正の電荷をもつた電子——即ち今日、實驗物理學者が「陽電子」と呼ぶものの性質をもつた物質——の運動に對應することが明になる。それ故、負のエネルギーの状態にある電子が正さしくかゝる陽電子であることが假定される傾向があつたかもしれない。しかしその様に簡單にはいかない、なぜなら觀察された陽電子は確かに何ら負のエネルギーをもたないからである。しかしやはりより間接的な仕方では負のエネルギーの状態にある電子と陽電子との間に一つの關係が立せられるのである。

我々はこれに對して、ある運動状態にては常に唯だ一つの電子しか存在しないと云ふ「パウリの原理」を利用する。そこで我々は、我々の知つてゐる世界に於ては電子がとり得る負のエネルギーの殆どすべての状態は既に占められて居り、而も各の状態は一つの電子で占められて

ゐることを假定する。それから更に、すべての状態が負のエネルギーで一樣に充されてゐることは我々には全然觀察され得ないことを假定する。最後に猶ほ、未だ占められてゐない負のエネルギーの状態は、一樣な充填からの、偏倚を示すものである故、觀察され得ること、そして正さしく陽電子として現はれることを假定する。

占められてゐない負のエネルギーの状態、或は簡略に云ふならば「空孔」は正のエネルギーをもつてゐる。何となればそれは負のエネルギーの缺けてゐる場所だからである。「空孔」は實際に普通の微粒子と正さしく同じ様な情況にある、そしてかゝる「空孔」を陽電子と同一視することは、我々の方程式に負のエネルギーの現はれることから生じた困難を免れるための最も理性的な路である様に思はれる。この考察法に於ては陽電子は正さしく電子の映シニセイゲルホルト像、即ち同一の質量と方向の反對の等しい電荷をもつ微粒子である。これまでのことは實驗がこの理論を少くとも粗大な近似値に於て證明してゐる。ところで陽電子も電子の如く更に等しいスピン性質を示すべきで

あらうが、それは實驗によつて今日まで猶ほ證明されてゐない。

いま我々の描いた理論的形像に従へば、我々は、正のエネルギーを持つた普通の電子は「空孔」の中へ落ちこみ、「空孔」を充たすことが出来ることを期待せねばならないであらう。その場合、自由になつたエネルギーは電磁的放射の形式で現はれねばならないであらう。それ故この事象は電子と陽電子とが互に相殺することに基いてゐるのであらう。同様に又反對の事象、即ち電磁的放射から電子と陽電子との創造が可能でなければならぬであらう。この様な諸事象は既に實驗の中に現はれてゐる様に思へる、そして實驗物理學者はこれらの事象を一層詳しく研究しやうとしてゐる。

私がこゝに略述した電子と陽電子の理論は、すべての現在知られてゐる經驗的事實と一致したそれ自身の中に矛盾を含まない一つの理論である。もし、同様に満足な陽子に對する理論が出来たならば甚だ美しいことであらう。恐らく陽子に對しても同様な理論的攻究が企てられ

ることが考へ得るであらう。然しこれは、普通の、正の電荷をもつた陽子の映像を形成し得る様な負の電荷をもつた陽子も亦存在することを要求するであらう。ところが、シュテルンは最近、この陽子の理論に矛盾する所の、陽子の磁氣的スピン能率に關する若干の實驗の結果を得た。陽子は電子よりは遙かに重いのであるから、その説明には遙かに複雑な理論が必要であることは全くあり得べきことである。然し目下のところ此の理論が如何なるものになるかは全く云ふことは出来ない。

兎に角私は、負の陽子も存在し得ることをあり得べきことと考へ度い、なぜなら、確かに今日まで理論が確かめられてゐる限りでは、正と負の電荷の間に完全な均齊が存して居り、そして、もし、この均齊が自然に於いて實際に基本的であるならば見る種類の微粒子の電荷を逆にする事が可能でなければならぬ。言ふまでもなく、負の陽子を實驗的に造り出す事は遙かに困難であるであらう。その比較的大なる質量に應じてエネルギーも遙かに大なるものが必要であらうから。

我々は正と負の電荷の間の完全な均齊と云ふ觀念を、自然の根本法則に關する限り、假定するならば、我々は、地球上に於ては（そして又恐らく太陽系に於ては）負の電荷の電子と正の電荷の陽子プロトンの方が優勢であることを言はゞ一つの偶然と見做さねばならない。そうすれば、若干の星に於ては正さくし逆の状態が支配して居り、従つてこれらの星は本質上陽電子と負の電荷の陽子プロトンから構成されてゐることは、全く可能である。實際確かに凡べての星の半ばは一方の種類に、半ばは他の種類に屬し得るであらう。兩種の星は全く同一のスペクトルを示すであらう、そしてそれを現在の天文學的方法で區別する可能性は全く存しないであらう。