

P. A. M. Dirac, 電子及び陽電子の理論

北 川 徹 三

Stockholm に於て行はれた 1933, Nobel 受賞記念講演會に於て Dirac が爲した演説 (W. Bloch の獨譯による) より譯述した。電子理論の開拓者たる彼が非常に簡潔なる言葉を以て彼の理論に就て明快に概説を行つてゐるので紹介する事にした。成る可く原文に忠實なる様に努めたが、譯者の不才により正しく文意を傳へ得るや否やを恐れてゐる。幸に御諒恕あらん事を希ふ。尙この理論を支持する一々の實驗的事實に就ては簡単に所々に註解を加へてゐたが、尙奮しくは本誌、第8巻(紹) 31頁を御参照願ひたい。

物質は種々の微小なる粒子より構成せられ、而も同じ種類の粒子は夫々、互に等しいものである事が實驗物理學者によつて見出された。これ等の粒子の内の二三は更に或る組成を有し一層簡單なる他種の粒子によつて構成せられてゐる事が明かになつた。その他の粒子に於ては斯様な組成は實證されて居らないが故に、是等を以て、要素的な基本粒子と見做す事が出来る。

一般に哲學的根據より見れば、一見して基本粒子の種類は出来る限り少數なる事、即ち恐らく一種又は多くとも二種しかなく、總べての物質はこの基本粒子より構成せられてゐるといふ事が希望せられる。然るに實驗の結果によれば、粒子は唯一種もしくは二種のみではなく、より以上に多く存在する様に思はれる。加之最近數年間に基本粒子の種類の数、漸次増加するといふかなり不安なる傾向をさへ示してゐると云ふ事が出来る。

それにも拘らずこれが爲に大して困る事はあるまいといふのは、更に精密なる研究に依れば、基本粒子と構成粒子との間には、全く嚴密なる區別が立て得られないと云ふ事が明かになつたからである。即ち最近行はれた二三の實驗結果は物質粒子の創成及び絶滅の可能性を假定に置かなくては説明し得られない。従つて、今或一の粒子が他の粒子より生成する事が觀察せられたとしても、もはや此の粒子は組成を有するとは斷言出来ない。先の粒子は當に新しく創成される可能性があるのである。それ故に基本及び構成粒子の區別は、唯便宜上の問題に過ぎなくなる。そして、只この理由のみにて、總べての物質は一種又は多分二種の構成要素より構成されるといふ斷然興味ある哲學的概念を放棄せざるを得ざらしむるに充分である。

初て次に私は比較的簡單なる種類の粒子に就いて論じて見たいと思ふ。而して純粹に理論的な思索によつて、之等に関して、何を報告し得るかを考へて見度い。粒子の比較的簡單なる種類とは次の如きものである。

1. 光子 (Photon) 或は光量子 (Lichtquant) 光は之に依つて組成される。
2. 電子 (Elektron) 及び最近發見された陽電子 (Positron). 之は電子の一種の映像と見られる、なんとすれば陽電子と電子との相異は、唯その電荷の符號に於けるのみであるからである。
3. 比較的重い粒子、即ちプロトン (Proton) 及び中性子 (Neutron).

以下に於て、私は之等の粒子のうち、唯電子と陽電子とのみを獨占的に取扱つて見ようと思ふ。その故は、之等が最も興味が深いからでなくして、此等の場合に於て、既に他よりも廣く理論的發展が遂げられてゐるからである。實際其他の粒子の性質に関しては、何等かの理論的結論を得る事は殆ど不可能である。一方に於て光子は非常に簡單であるが故に、容易に或る理論的形式にあてはめる事が出来、従つてその性質に関して、理論に依つて制限を受ける事はない。他方に於て、プロト

ン及び中性子は非常に複雑なものの如く、今日迄、未だ嘗て之等の粒子の理論に關して信頼すべき原理は見出されてゐない。

然らば、果して結局この理論が、如何にして要素的粒子の性質に關して、何等かの報告を與へ得るかと云ふ問題に、先づ吾々は注目しなければならぬ。扱今日任意の粒子の運動を記述するに用ゐられる一般量子力学が存在する。そして粒子の性質に關しては全く無關係である。この一般的量子力学は、確かに粒子の速度が小なる場合にだけは適てはまるが、然し光速に比すべき速度に對しては、直ちに相對性の影響が現はれて來て、用ゐる事が出来ない。即ち任意の性質の粒子に適用され得る相對性量子力学(言ひかふれば高速度にも適用され得る量子力学)は存在しない。従つてこの事は、若し量子力学をして相對性理論の要求に合致せしめるならば、粒子の性質に或る種の制限を置く事を意味してゐる。斯くの如くにして、吾人は一般物理的原則の上に立つ、純粹に理論的な思索によりて、その粒子の本性に關して論ずる事が出来るのである。

斯くの如きやり方は、現今電子及び陽電子の場合に於て、成功を収めてゐる。他の粒子の場合に於ても、亦將來は何か同様な取扱ひ方法が見出されるものと期待し得る。私は茲に電子及び陽電子に關する取扱ひ方法の輪廓を述べ、而して如何にして電子のスピン^{*}の性質を誘導し得るか、又如何にして電子と同様のスピンの性質を有し、電子との衝突に依つて絶滅する事の可能な陽電子の存在に關して、推論し得るかと云ふ事に就いて述べたいと思ふ。

先づ最初に、1 個の粒子の運動エネルギー、 W 及びその運動量、 p_r ($r=1, 2, 3$) を相對性古典力学によつて互に結びつける方程式を考へて見る。

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

今若し左邊を Operator と見做して、波動函数 ψ の上に働かせ、 W 及び P_r を、夫々 $i\hbar^* \frac{\partial}{\partial t}$ 及び $-i\hbar^* \frac{\partial}{\partial x}$ なる Operator と考へる時は^{*}、この式より量子力学に於ける波動方程式を得る事が出来る。従つて W 及び p に斯様な意味を與ふれば、波動方程式は次の如き形をとる。

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

扱て量子力學的波動方程式に於ては、一般に Operator W 或は $\frac{\partial}{\partial t}$ に關して、一次である事が必要なるが故に、この方程式は用ゐる事が出来ない。我々は之を Operator W に關して一次なる式と置きかへねばならない。又此の方程式が、相對性的に不變なる爲には、 p_r に關しても亦一次でなければならない。

それ故に、我々は次の如き方程式を考へることになる。

$$\left[\frac{W}{c} - a_r p_r - a_0 m c \right] \psi = 0 \quad (3)$$

この方程式は、Operator として ψ の上にはたらく 4 個の新しい變數、 a_r ($r=1, 2, 3$) 及び a_0 を含むでゐる。我々は今これらは次の條件を満足するものと假定したい。

$$\begin{aligned} a_\mu^2 &= 1, \\ a_\mu a_\nu + a_\nu a_\mu &= 0, \quad (\text{但し } \mu \neq \nu), \\ \mu, \nu &= 0, 1, 2, 3. \end{aligned}$$

譯者註: $\hbar^$ は Planck の恒數 $\hbar$ を 2π で割つた $\frac{\hbar}{2\pi}$ を表はす。

尚この他に α は p 及び W に関して、交換可能であると假定しよう。斯くの如く α に対して、特別な假定を置けば、方程式 (3) は或る程度迄方程式 (2) と同等になる、即ち方程式 (3) の左邊に、今 $\frac{W}{c} + \alpha p + \alpha mc$ を乗すれば、確かに (2) を得るからである。

この新しい變數 α 、それは W に関して一次の相對性波動方程式を得る爲に導入しなければならないのであるが、之等が電子のスピンを與へる事になる。即ち量子力學の一般基礎法則によりて容易に是等の變數は電子に對して、半量子のスピン角運動量、及び角運動量と正反對の方向に於てドローア磁量子の磁氣能率とを與へると云ふ結果を導き出す事が出来る。これ等の結果は観測によく一致する。のみならず之は先づ最初スペクトルの實驗報告に依つて得られたもので、後に始めて理論的に確證されたのである。

變數 α に依つて、尚この他に電子の運動に關して可なり思ひがけない二三の現象が現はれた。Schrödinger によつて最初に之等の推論が完成せられたのである。その結果は一の電子が我々にとつては可なり遅い運動を行つて居る様に見えても、吾人の認識する運動に對して、振幅の小さい又非常に高周波の振動が附隨してゐなければならないことになる。この振動は振動數が餘りに高く又振幅が餘りに小さいので、實驗によつて直接この理論的推論を確める事は出来ないが、それにも拘らずこの理論による推論を信じない譯にはゆかないのである。なんとすれば之と離る可からざる關係を有する他の理論による推論、例へば電子に依る光の散亂の法則等が實驗的に確證されてゐるからである。

私は今此の方程式の他の一性質に就いて述べて見たいと思ふ。その性質とは、吾々が彼の陽電子の豫言に導いたものである。今方程式 (1) を見るに、運動エネルギー W は mc^2 より大なる正の値であつても、或は又 $-mc^2$ より小なる負の値であつても此の方程式は成立する。又方程式 (2) 又は (3) へと移つて行つてもこの結果は同様である。従つても量子力學の普通の規約に従つて解釋すれば此の量子力學的波動方程式は W の測定結果として mc^2 より大なる値を取つても或は $-mc^2$ より小なる値を取つても差支えないと云ふ事を表はして居る。

さて實際に於て粒子の運動エネルギーは常に正值である。従つてこの方程式は一個の電子に對する二種類の運動方法に適合するものであつて、吾人が實驗により知り得るものは唯その内の一種類のみに相當してゐる事が分る。他の一種類は電子に於ける非常に特異なる運動を行ふものに相當してゐる。即ち電子が速く運動すればする程、益々その所有するエネルギーは少くなり、それ等を靜止せしめる爲にはエネルギーを與へなければならないのである。

即ち二種の運動の内只一種しか實際に現はれない事を理論の新假定として導入すれば良い。然るにこの假定に依つて更に一の新しい困難を生ずる。それは若し電子を擾亂する時は、正エネルギー状態より負エネルギー状態への轉移を誘起し得る事が理論的に示されるからである。夫れ故にたとへ最初は此の世界に於ける總べての電子は正エネルギー状態に存在すると假定しても、暫時の後には再び負エネルギー状態の電子が出現する事となる。

理論的に負エネルギーの状態が許容されてゐるといふ事は、たとへ實驗的に知り得るものの内には之に相當するものが存在しない様に見へても、他方に於て新らしい假定によつても尚簡単に除き得ない何か或るものの存在を指示してゐる。それ故に吾人はこの状態に對する意義をどこ迄も見出さなくてはならない。

*譯者註。スピン軌道線の微細構造を説明するには、電子のスピンと相對性の影響とを考へる。而して從來は電子のスピンの性質は相對性の影響とは全然獨立のものであると考へられてゐたが、Dirac の理論によりて電子のスピンの性質は相對性の必然の結果として現れて來る事になった。

此状態の電磁場に於ける行動を吟味すると、それは丁度1個の電子が普通の陰電荷の代りに陽の電荷を有する所の運動に相等してゐる事が分る。——之は現在實驗物理學者等によつて陽電子と呼ばれるものと同様の事柄の下に在る現象である。夫れ故にややもすれば負エネルギー状態の電子は、當に陽電子共のものにちがひないといふ假定が爲され易いのであるが、事實はさう簡単に行かない。といふのは觀測にかゝる陽電子は確かに負エネルギーを所有して居らないからである。然し乍ら茲に間接的な方法によつて、負エネルギー状態の電子と陽電子との間に或る關係を恢復せしめる事が出来る。

我々は之に對して Pauli の原理を應用する；それに據れば或る一の運動状態に對して唯1個の電子しか存在し得ないのである。扱て我々が知り得る世界に於ては電子に課せられた殆ど總ての負エネルギー状態は既に占められて居り、而も各状態は只1個ずつの電子を以て飽和せられてゐるものと假定する。そして更に次の假定を行ふ。即ち總べての負エネルギー状態が一様に飽和せられる時は、我々にとつて全く觀測不可能であると。最後にもう一つの假定をする、それは未だ飽和せられない一の負エネルギー状態は一様に飽和せられた中の一の例外を爲すが故に觀測が可能であると、而もそれは當に1個の陽電子として出現する。

未だ飽和せられない負エネルギー状態、或は簡単に孔と呼ぼうと思ふが、之は負のエネルギーが缺除してゐる個所であるから正のエネルギーを所有してゐる。1個の孔は實際に於て丁度普通の粒子の如き行動をとる、そして此の如き孔を以て1個の陽電子に外ならないと考へる事は、我々の方程式に於て負のエネルギーの出現の爲に生じた難點を乗り越えるに最も賢明なる方法であると思はれる。斯くの如き觀察法よりすれば陽電子は丁度電子の映像であり、電子と同一の質量及び符號反對で等しい荷電を有する1個の粒子である。こゝ迄は少く共實驗によつて此の理論は大體粗雑乍ら確かめられてゐる。* 陽電子は更にこの他に電子と同一のスピンを有すべき筈であるが、之は未だ實驗的に確かめられては居らない。

今述べた理論的比喩によつて、吾人は恐らく正エネルギーを有する普通の電子は孔に墜落し、孔を充滿する事が出来ると期待しなければならない。その際に自由に放出されるエネルギーは必ずや電磁的輻射(即ち γ 線)の形となつて現れるであらう。即ち一の電子と一の陽電子とが互に自ら絶滅する事によつてこの現象は成り立つ。同様に逆の現象即ち電磁的輻射に依つて一の電子と一の陽電子とが創成される事も亦可能でなければならないであらう。是等の現象は實驗的研究に於て既に現れて居り、又實驗物理學者によつて正にこの現象の一層精密なる研究にとりかゝらんとせられてゐる様である。†

今輪廓を述べた電子及び陽電子の理論は現在知られてゐる總べての經驗事實と合致する異議の無い理論である。同様に満足なる理論がプロトンに對しても得られたならば非常に美事な事であらう。恐らく同様な理論的考察はプロトンに對しても亦適用さるべきものと考へられる。然し恐らく普通の陽電荷を有するプロトンの映像となる事の出来る陰電荷を有するプロトンの存在が要求せられる事になるであらう。然し Stern はここに最近プロトンの磁氣スピン能率に關してプロトンの

* 譯者註。陽電子の質量に關して現在實驗的に得られた最も正確なる値は Chadwick, Blackett 及び Occhialini (Proc. Roy. Soc. A, 144, 235, 1934) によりて

$$m_+ = (1.02 \pm 0.10) m_-$$

但し m_+ 及び m_- は夫々陽電子及び陰電子の質量を表はしてゐる。

† 譯者註。Curie 及び Joliot, Meitner 及び Philipp 等のの人々によつて近來 γ 線によつて金屬板より一對の陰陽電子が生成する事が確證せられ、又 Joliot 及び Thibaud 等は陽電子が絶滅する際に γ 線を發生する事を明かにした。尙本誌第8巻、(紹)37頁參照。

理論に一致しない二三の實驗結果を得てゐる。^{*} プロトンは電子よりも遙かに重いが故に是の説明には一層複雑なる理論が必要である事は確かである。然し現在に於てはこの理論によつて恐らく何處まで見極め得るものか全く述べる事は出来ない。

私は是非共陰プロトンも亦存在し得るものと考へたい；何となれば今迄理論的に確證せられた範圍内に於ては、陽及び陰電荷の間には完全なる對稱性が成り立つて居るからである。而して此の對稱性が實際自然の根本的なものならば、各種の粒子の荷電は互に轉倒し得るにちがひないのである。然し乍ら陰プロトンを實驗的に發生せしむるには確かに非常なる困難が伴ふ事であろう。なんとなれば其重い質量に相當して更に莫大なるエネルギーを必要とするからである。

吾人はそれが自然の根本原則に觸れる限りに於て、陰陽電荷の間に完全なる對稱性が成立すると云ふ概念を假定して見よう。然る時は地球上に於て（而して恐らく太陽系全體に於て）陰電子及び陽プロトンが卓越して存在すると云ふ事實は寧ろ偶然と見做さねばならない。確かに或る天體に於ては當然全く正反對の狀態に支配せられてゐる事が有り得る。従つて之等の天體は本質的に陽電子及び陰プロトンより構成せられてゐる事になる。實際に於てあらゆる天體の正半分はその一方に屬し、他の正半分は他方に屬するであらう。此の二種類の星は恐らく全然同一のスペクトルを現すが故に、現在の天文學的方法に依つては之を識別する事は全然不可能事であろう。（昭和9年9月13日）

^{*}譯者註. R. Frisch u. O. Stern, *Z. Physik*, 85, 4 (1933); I. Estermann u. O. Stern, *Z. Physik*, 85, 17 (1933).
プロトンの磁氣能率が量子論の豫期に反し大きい事が判つた。