

談話室

F. エンゲルスの「運動の基本的諸形態」(『自然の弁証法』)から見えてくること(補遺)—ディラックの空孔論の光と翳

樋浦 明夫*

前回の論稿¹⁾を執筆中に生じたいくつかの疑問について、その後、筆者の理解できた範囲で紹介したい。それらの疑問の一つは、ディラック P. Dirac(1902～1970)の空孔理論とは何だったのかということ。二つ目は、空間を満たすと考えられたエーテル理論と1920年代の後半から台頭してきた場の量子論とはどのような関係があるのか、ということである。これらの疑問の背景にあるのは物質の究極的な姿、つまり光と電子の相矛盾した側面、粒子性と波動性が何に由来するのかということにつきる。

ディラックの空孔論(本小論では、“電子の海”と“空孔論”を同じ意味で使っている)はディラックの方程式を知らないで理解できないのではないかと疑問を抱いた²⁾。それでも彼のアイデアである電子の海は何か意味のあるものと思っていた。ガモフ G. Gamow(ロシア生まれでアメリカの物理学者、1904～1968)は、ディラックの“電子の海と空孔論”がパウリとボーアの猛烈な批判を浴びたこと(第7回ソルベイユ会議、1933年10月、ブリュッセル)を当然知っていたと思われるが、“かかる奇妙な仮説が、単に空想の産物としてディラックの頭脳に生まれたのではありまして、彼は普通の陰電子理論に関する深い考察の末、やむなくこの結論に到達したともいえるのであります”と好意的に紹介している²⁾。しかし、吉田伸夫著『光の場、電子の海(量子場理論への道)』³⁾を読んでみると、“空孔論”が正しい理論ではなかったということが分かる。以下、この理論とそれにかかわる物理学上の事柄を主として吉田氏の著書を拠り所にして話しを進めたい。

ディラックの方程式はどのようにして作られたのか

(1)ディラックの量子条件

ボーア N. Bohr(1885～1962)は、電子が原子核に接近して衝突し、原子が崩壊するのを防ぐためにプランクの量子仮説を用いて $mvr = nh/2\pi$ という量子条件を苦心して設定した。この式から、電子の円運動の半

径 r は量子数 $n=1$ の時に最小となり、それより小さい軌道は存在しないので電子の原子核への接近は起こらないので、原子は崩壊しない。ディラックは、電子の位置 x と運動量 p に関する量子条件(物理量が離散的な値になる条件、つまり物理量が古典力学のように連続的ではなく、飛び飛びの値をとる条件)として、 $px - xp = h/2\pi i$ という式を導入した。 p と x は古典的な数(classic number, c 数)ならゼロになる。しかし、これは量子論的な数(quantum number, q 数)といい、席の順番を入れ代えてもゼロにならない数である。 q 数は確定した値を持つ数で表せない。そこで、行列やシュレーディンガー E. Schrödinger(1887～1961)の波動関数 ψ [時間に依存しない波動関数は、 $(1/2m)(\hbar/2\pi)^2 \nabla^2 \psi + (E + e^2/r)\psi = 0$ と表される。モデル二乗演算子 ∇^2 は波動関数 ψ の場所ごとの変化を表す。時間に依存する場合は、 $-\hbar/2m \nabla^2 \psi + V\psi = i\hbar \partial \psi / \partial t$ となる。 \hbar (バー h) = $h/2\pi$ 、 $V = E + e^2/r$ で電子にはたらく力(エネルギー)、特に、 e^2/r は電子を原子内に拘束する位置エネルギー、 $l^2 = -1$] は q 数を表すために導入された c 数ということになる。ディラックは、ハイゼンベルクの行列やシュレーディンガーの波動関数を用いることなく、量子力学における曖昧さ(不確定性)を表現した。

ハイゼンベルク W. Heisenberg(1901～1970)は、電子の位置と運動量の確定しうる精度がディラックの量子条件によって制限されることを見出した。位置と運動量の不確かさを Δx 、 Δp とすると、位置を正確に測定しようとする(Δx をゼロにする)、 p が決まらない(Δp が無限大になる)。逆に、 p を正確に測定しようとする(Δp をゼロにする)、 x が決まらない(Δx が無限大になる)。この関係は $\Delta x \Delta p = h$ と表され、ハイゼンベルクの有名な不確定性原理を表す。ディラックの量子条件を満足する q 数の組 x と p は、どちらも値が一つに定まらず、ぼんやりとした広がりを示す。 x と p によって表されるシステムは波のように振る舞い、その結果、不確定性原理に従う。こうしてディラックの量子条件は電子の粒子性と波動性を併せ持つ理

* 徳島大学・歯

論となった。物質の最小微粒子のゆらぎ(不確定性)は波動性と粒子性を併せ持つことに由来する。

著者は、このディラックの量子条件を“量子力学に含まれるさまざまな不思議がここに凝縮されている”, とか“この量子条件に秘められた真の意味を理解できる人間が地球上にいるとは思えない”と言っている。そうであれば、素人の筆者が量子条件の由来を理解できないままに話を進めることもまた十分に許されるのではないかと思われる。

(2)場の量子条件

次に、ディラックは電子と光の相互作用について考察し、「光の放出と吸収の量子論」(1927年)を表した。プランク M. Planck(1858~1947)は物質内部の振動子(電子やイオンを想定していた)がエネルギーの担い手で、振動子が波動を電磁場に伝えると考えた。それに対し、アインシュタイン(1879~1955)は電磁場自身がエネルギーの塊になる、つまり、波動自身がエネルギーの塊になると考えていた(光量子仮説)。ディラックは、光とは電磁場の振動が波として伝わるもので、振動しているものが何であれ、それがディラックの量子条件を満足することを仮定すれば、エネルギーが $h\nu$ の整数倍に離散化された振動の量子論が作れることに気づいた。この場合、振動のエネルギーの要素は光量子(後に光子と呼ばれる)と呼ばれた。光量子は電磁場の振動状態を表し、電磁気的な相互作用は光子をやりとりすることによって伝わるという考えが生まれた。このことは、1930年代の素粒子が力を媒介するという発想の基礎になった。素粒子というのは、光子と同じように場の振動状態を表し、ビリヤード球のような粒子とは異なるものとされ、場の「状態」や「作用」を数学的に表したものとされる³⁾。電磁場は電場と磁場を使って表され、この二つの場は相互に誘起しあうという複雑さがある。そこで、ディラックは式の形がより単純な電磁ポテンシャル $A(t, x)$ を利用した。 $A(t, x)$ に量子条件を適用すると、振動のエネルギーは $nh\nu$ になることをヨルダン P. Jordan(1902~1980, 1933年に突然ナチ党の突撃隊員になる。そのせいか、ノーベル賞を逃している)とパウリ W. Pauli(1900~1958)が定式化した。 $nh\nu$ はプランクの量子仮説(古典力学にはなかった非連続的な量がプランクによって初めて導入された。 n は整数1, 2, 3...を表す。 h はプランク定数、 ν は振動数)を示し、固有振動数 ν の振動子は、エネルギー要素 $h\nu$ の整数倍、すなわち、 $h\nu$, $2h\nu$, $3h\nu$...といった飛び飛びのエネルギーでしか振動できないというもの。だから、電磁ポテンシャルは、

電場や磁場と同じように振動が波として伝わる量となる。従って、電磁ポテンシャルこそが光の担い手であり、光の場ということが出来る。電場や磁場が量子論に従うならば(電場や磁場が q 数で表されるならば)、電磁場のエネルギーは、調和振動子(同じ振動数を有する振動子。フックの法則に従うバネの振動や空洞に閉じ込められた波動=定在波など)と同じく、 $nh\nu$ となる。これは、エネルギー $h\nu$ のまとまりが n 個あることを意味する。この n 個のまとまりが光量子で、光は粒子というより振動のエネルギーの要素 $nh\nu$ の集積したものである。これが振動数などの物理量が離散的になるという量子化の現象である。波の一般的な性質として、空間に閉じ込められた波動は特定の振動パターンだけが許されるという特徴がある。言い換えると、最終的に同じ場所で上下動を繰り返す定在波となる。光量子(光子)は電磁場が振動数 ν で振動するときのエネルギーを表し、波であることと切り離せない。では、光の粒子性は何に由来するのか。それは、振動する光の場 $A(t, x)$ が、空間のあらゆる場所で“閉じ込められた波”のように振舞うからとされる。

(3)ヨルダンによる場の量子論

場の量子条件の設定に先立ち、ヨルダンは伸びた長さに比例した力で縮もうとするゴム紐のような弦の振動を想定して、光の粒子性と波動性を量子論的に考察した。こうした弦は、小さなバネとおもり(錘)を無数に連結したシステムと同じで、複雑な振動パターンを示す(図1)。連結した個々のバネが量子論的な振る舞いをする結果、弦全体は粒子と波の二重性を現す。一つ一つのバネはそれぞれ $nh\nu$ というエネルギーを持つ粒子性を示し、これら個々のバネの間で影響し合う異なる振動数を持つバネの連結である弦全体は、振動が弦を伝わることによる波動的な性質を示すことになる。ヨルダンは、それまでの何もない空間の中を飛び回る電子を扱う理論(原子論的立場)だった波動力学や行列力学から、拡がりをもつ対称(場)に量子論を適用した。

ディラックは、波動関数自体を観測可能な物理的実体ではなく、電子の状態(波動関数の一種)を規定するものとした。それに対して、パウリは波動関数とは別に、ダイナミックに振動を伝える電子の場を想定した。この場合、 q 数になるのは波動関数ではなく、電子の場になる。著者にならば、電子の場を波動関数 Ψ との違いを示すために小文字の ψ で表すと、 $\psi(t, x)$ は、波動関数のように電子が位置 x に存在する確立を表すのではなく、時刻 t , 場所 x における電子の場を表す。

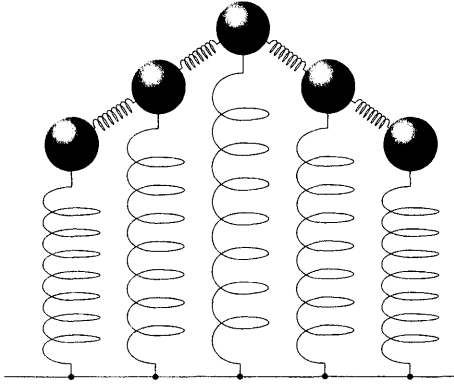


図1 電子の場の想像図(参考3から借用)

電子の場 ψ は一端が固定されたバネと、相互に連結されたバネが組み合わせられたものとイメージされている。小さなバネと錘は連結して、伸びた分だけ縮むゴムひものような弦を構成する。弦の両端が固定されることで、いくつかの振動パターンだけが許される定在波ができる。その場合、微小な空間そのものによってバネは固定されると想像したらいいのであろうか。また、錘は何を表すのだろうか。さらに、多次元空間でのこれらのバネの組み合わせはどのように想像すればいいのか。最終的に、一つ一つのバネが量子論的な振る舞いをする結果、弦全体は粒子と波動の二重性を示すと説明されている。

主役は場であり、粒子は派生的なもので、電子の実体も、光と同じように場の振動による。電子は、光と違って質量を持っていて、静止することが可能なので、粒子のような振る舞いをする。全ての場所で ψ が一樣に振動すると、場は mc^2 というエネルギーのまとまりが整数個(n)存在するケースに相当する。従って、電子の個数とは、ビリヤード球のような粒子の数ではなく、 mc^2 というエネルギーのまとまりの数を意味する(量子場の理論)。ヨルダンによる弦を用いた光の量子論的な説明は、量子場の理論構築の第一歩だった。しかし、ヨルダンの理論には電子と光の相互作用は含まれていなかった。

ここで、常識的な実感からかけ離れた光や電子の波動性に由来する奇妙な振る舞いに対する相反する代表的な見解をアル・カーリーリの著書⁹⁾から紹介する。ボーア、ハイゼンベルクやパウリらは、量子の世界を物質的に描像する視覚にこだわる理解の仕方を容認しなかった(コペンハーゲン解釈)。コペンハーゲン解釈は、光や電子など粒子の奇妙な振る舞い(1個の電子が二つのスリットを同時に通過する。従って光のように背後のスクリーンに干渉縞ができる)はそれを測定する装置と観測者抜きに説明できないというもので、測定結果だけが実在するとする考え方をさす。いわば、客観的な粒子の実在を否定することになる。アインシュ

タイン、ド・ブロイ、シュレーディンガーはコペンハーゲン解釈に反対の立場をとった。D. ボーム(英国に移住したアメリカ人物理学者)は、はっきりとした粒子という考えに基づいてシュレーディンガー方程式を練り直し、波動関数が物理的な存在を表すと結論した(ド・ブロイ=ボーム解釈)。ド・ブロイ=ボーム解釈では、量子の不確定性と曖昧さの起源である隠れた変数(波動関数)は粒子の確定した位置を表す。アル・カーリーリは、ボーアの主張“物理学の仕事は自然がどのようなものであるかを見つけ出すことだと考えるのは間違っている。物理学は私たちが自然に関していえること(だけ)に関係する”という言葉に反対している。むしろ、理論物理学の仕事“物理的な実在の真実にできる限り近づくこと”としたアインシュタインの言葉に信頼を置いている。筆者もボーアの主張は主観的という意味で、アル・カーリーリに組みしたい。

(4)量子力学の電磁場への適用

ディラックは電子と光が相互作用を行っている場(電磁場)に量子力学を適用する方法を案出した。“微小な時空間内での過程にたいしてなんらかの不連続性があることを認めるなら、「位置」の概念も「速度」の概念も断念しなければならない”(ハイゼンベルク⁷⁾、ということから、ディラックは、とらえにくい極微の世界の振動という現象を位置が時間とともに変化する動きとしてではなく、エネルギーと位相(振動する物体の相対的な位置)という二つの量で表すとともに、光と電子の相互作用を光量子の個数の変化(増減)という形でとらえた。電子の作用によって光量子が1個生成される場合と、逆に光量子が1個消滅する場合などのように、古典的な摂動論(ズレを補正する方法)を使って、摂動の回数が増えるごとに光量子の増減の回数も増える。例えば、1回(一次)の補正をすることで、光量子が1個生成あるいは消滅し、その結果、光量子数が1個分増減した状態(=電子が光量子を1個放出する、あるいは1個吸収する過程)となる。光量子の個数の変化が電磁場の状態変化を表し、電磁気的な相互作用は光量子をやりとりすることによって伝わるという考えをもたらした。このように光量子が粒子的な振る舞いすることから、光量子は光子と呼ばれるようになった。電磁場の要素波が持つエネルギー $nh\nu$ ($h\nu$ の n 個の集まり)のうちの一つの $h\nu$ が光子である。だから、電磁場の振動がもつ飛び飛びのエネルギーを粒子であるかのように表現したものが光子で、それは生成、消滅を繰り返し、もともと位置を特定できる粒子ではない。ディラックの電子と光に関

する相互作用の説明は、1930年代になると他の相互作用にも適用され、空間中の実体のない素粒子が力を媒介するという理論 [例えば、中性子と陽子の間の引力=核力は中間子を相互にやりとりすることで生じる(湯川の間接子論)など] に発展した。ボーアは、電子対の創生・消滅の現象は排他原理に表れた量子統計法の新たな側面と密接したもので、それは、逆説的にはアインシュタインが求めるような量子的自然界での観測可能な現象の説明を拒否するものと、量子力学の曖昧さを弁護した⁸⁾。

(5) 光と電子の相互作用の数学的定式化

次いで、ディラックは電子と光の相互作用の完全な定式化、つまり電子と光が従う方程式の全貌を明らかにすることにし、光の場 $A(t, x)$ での電子の振る舞いを表すシュレーディンガー方程式を求めることにした。ところが、電子の波動関数 $\Psi(x)$ と光の場 $A(t, x)$ は、前者が時間的な量(エネルギーや振動数など)と空間的な量(運動量や波長 L の逆数 $1/L$ の波数など)がペア(対)にならない非相対論的(空間的な量だけが表れている)なのに対して、後者は時間的な量と空間的な量が対になるという(特殊)相対論を満たしている。相対論を満たすということは、“すべての慣性系に対して光速度が一定である(真空中でも、高速度で動いている座標系でも)ことから、時間というものはその絶対的な性格を失って、代数的には同種の性格をもつものとして、空間座標と一緒にされることになった(四次元的な記述)”⁶⁾ ことからきている。ディラックは、電子の振る舞いを光の場の中で相対論的に表すことができるように(相対論の要請に合うように)、電子の波動方程式を書き直した。相対論では、時間と空間が密接にリンクしている(二つの共扼な変数として扱う)結果として、時間的な量も空間的な量も必ず対(ペア)になる必然性がある。対になるというのは、例えば、ある一つの方程式でエネルギー E が二乗(E^2)ならば、運動量 P も二乗(P^2)になる必要があるということ。電子や光などの光速に近い運動速度をもつ物質を扱うときにはこの相対論の効果を無視できない。相対論による修正を加えると、エネルギー (E) と運動量 (p) の関係は、 $E^2 = (cp)^2 + (mc^2)^2$ という方程式で表せる(なぜこうなるのかの著者による詳しい説明がないので、筆者にもこれ以上の説明のしようがない)。ともかく、エネルギーの項と運動量の項がともに二乗になっているので、相対論の要請を満たしていることが分かる。 c は光の速度で 30 万 km/秒。電子が原子に束縛されない、空間を自由に飛びまわる際の電子のシュレーディ

ンガーの波動方程式は、 $E\Psi = \{(h\nabla/2\pi)^2/2m\}\Psi$ と表され、 E は一重項である(先のシュレーディンガーの波動方程式で、電子を原子内に束縛するエネルギー e^2/r をゼロにして、左右の項に Ψ を掛けるとこの式になる)。だから、先の方程式を E の一重項で表そうとすると、 $(cp)^2 + (mc^2)^2$ の平方根を求めなければならない、 p は二次式の平方根になり、相対論の要請を満たすことができない。

そこで、ディラックは E が p の一次式で表せるという前提で、エネルギーと運動量の式を係数 α と β を用いて、 $E = cp\alpha + mc^2\beta$ と表した。この式を二乗すると、 $E^2 = (cp)^2\alpha^2 + cpmc^2(\alpha\beta + \beta\alpha) + (mc^2)^2\beta^2$ となる。これが、 E と p の一重項の式になるためには、 $\alpha^2 = 1$ 、 $\alpha\beta + \beta\alpha = 0$ 、 $\beta^2 = 1$ という関係が成立しなくてはならない。ふつうの数(c 数)ならば、順番を入れ替えても掛け算の結果は変わらないので、 $\alpha\beta = \beta\alpha$ となる。 $\alpha\beta + \beta\alpha = 0$ を満たすには、 α か β のどちらかが 0 になる。これでは、 $\alpha^2 = 1$ 、 $\beta^2 = 1$ という二つの式は成立しない。しかし、行列や q 数では、積の順番を入れ替えるとその結果が変わるから、 α と β を次のように 2 行 2 列の行列で表した。 $\alpha = \begin{pmatrix} 0 & 1 \\ 1 & 0 \end{pmatrix}$ 、 $\beta = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & -1 \end{pmatrix}$ 。行列特有の計算方法から $\alpha^2 = 1$ 、 $\beta^2 = 1$ 、 $\alpha\beta + \beta\alpha = 0$ となる。これだと、 $E = cp + mc^2$ と表せる。ディラックは行列を波動方程式に適用することで、不可能なことを可能にした。係数 α と β が 2 行 2 列の行列になったので、波動関数 Ψ も、 $\Psi(+)$ と $\Psi(-)$ の二つの成分を持つと考えなくてはならなくなった(係数 β の 2 行 2 列目が -1 なので $\Psi(-)$ 成分が出現するのであろうが、なぜ 2 行 2 列目が -1 なのか筆者には分からない)。ここまで著者の記述に従って述べてきたが、筆者の素人目には、ディラックが係数 α と β を導入し、それらに 2 行 2 列の行列をあてはめたこと(行列内の数字、0, 1, -1 は何を表すのか)に、どうも釈然としない恣意的な操作というものを感ずる(結論に合わせるために α と β を導入した、というふう)。 $\Psi(-)$ の導出はディラック方程式の本質を表す最重要事項と思われるので、それがなぜ表れることになったかの丁寧な説明が必要である。ともかく、ディラックは、パウリの行列(行と列に複数の数を含む)を使って波動方程式を表す方法を発展させて、電子の相対論的な波動方程式を確立した。

パウリは、ディラックの方程式は、あくまでも電子にたいする相対論的な場の方程式であって、1 個の電子の確率振幅(1 個の粒子が空間の x 点に存在する確率)と考えることはできない、という立場をとった¹⁰⁾。

なぜかという、ディラック方程式を1個の電子の確率振幅の方程式だとすると、電子が負のエネルギーを持つという奇妙な状態が現われ、正エネルギー電子も電磁場との相互作用によってエネルギーを放出して、負エネルギー状態に落ち込んでしまうからである(後述)。

ディラックの電子の海の謎

パウリに反し、ディラックは自分が導いた方程式を電子1個の確率振幅を表すと考えていた。ディラック方程式で、運動量 $p=0$ とすると、 $E\Psi(+)$ 、 $E\Psi(-)$ は、

$$E\Psi(+)=mc^2\Psi(+)\dots$$

静止している電子の正の質量エネルギー(mc^2)、

$$E\Psi(-)=-mc^2\Psi(-)\dots$$

静止している負の質量エネルギーを持つ電子の存在

をそれぞれ意味し、現実と矛盾するおかしな現象が生じることになる。1928年のディラックにとって、負エネルギーの電子の存在は説明のつかないやっかいごとだったので、彼は“負のエネルギーを持つ状態に対応する粒子は現実に存在しない”という常識的な見解をとった。その後、“世界はすでに負のエネルギーの電子で満たされている(電子の海)”とすれば、パウリの排他原理によって正エネルギー電子が負エネルギー準位に落ち込むことはできない、と考えた。電子は質量エネルギー mc^2 を持つので、そのままでは真空の中に潜むことができないので、ディラックの方程式に現われる負エネルギーの状態は、電子が潜む(安定した状態になる)のにちょうど良い安住の地を提供した。負エネルギーの電子の海に生じた空孔は通常の粒子であるかのように振舞い、空孔が偽装する粒子を陽子と考えた(負の欠如=否定は正を意味すると、ディラックは考えた)。真の粒子である電子のみが物質を構成し、陽子は電子の海における泡のようなものと、ディラックは想定した。電子の海の充満が不完全で、どこかの負エネルギー準位に電子の欠如(空孔)があると、その空孔は正エネルギーを持ち、正電荷を持つように振舞う(空孔は正電荷の電子のように見える)。それに対して、マンハッタン計画の中心的な科学者で、原爆の父と呼ばれている移民二世のアメリカの物理学者オッペンハイマー R. Oppenheimer (1904~1967)は、陽子が電子の海に開いた空孔だとすると、物質内部にある電子は陽子と合体して、両者とも消滅し、すべての

物質は10億分の1秒程度で消滅すると、反論した。さらに、ドイツの数理論物理学者ワイル H. Weyl (1885~1955)はディラックの方程式から、空孔は電子と同じ質量の粒子のように振舞うはずで、陽子のように電子の2000倍近い質量を持つはずがない点を指摘した。正当な批判に直面したディラックは、1931年に“空孔によって表されるのは、電子と同じ質量を持つ未発見の粒子”とその解釈を改めた。パウリは、 $\Psi(-)$ は負エネルギーの電子ではなく、正エネルギーを持つ反電子(電子の反粒子)の状態を表すと考えた。このことは、エネルギーを持つ光子が電子の海に照射すると、負準位の電子が正エネルギーに励起され(正エネルギー・負電荷の電子の創生)、その空孔には正エネルギーの電子と、正準位の空孔(=正エネルギー・正電荷の電子)が創生される(対生成)、という考えを生んだ。幸運にも、翌1932年にアンダーソン C. D. Anderson (1936年ノーベル物理学賞、1905~1991)によって、宇宙から飛来する電子の中に、電子と同じ質量と正電荷を持つ陽電子 positron が発見された。彼は、1937年にもネッダーマイヤーと共に宇宙線からミューオン muon (後述)を発見している。

パウリの排他率を利用した、エネルギーの値が負になる定常状態は全て電子に占有されているというディラックの電子の海のアイデアは、安定した低いエネルギー状態(定常状態)が電子に占有されている原子のイメージを全空間に拡大したものである³⁾。奇しくも、パウリの排他率が、ディラック方程式の負エネルギーの困難を救済した。1933年の第7回ソルベイユ会議で、ディラックの理論は、パウリによって計算に無限大がつきまとうことと、真空の持つエネルギーの定義の曖昧さ、また、ボーアによって空孔理論の実験的検証の難しさが指摘された。だが、ディラックは陽電子の存在の予見で、1933年12月にシュレーディンガーとともにノーベル物理学賞を受賞した。パウリは、1934年に“空孔理論は歴史的には役に立つ面があったものの、もはや捨て去るべきだ”、とハイゼンベルクに進言した。吉田氏は、「“電子の海と空孔”というアイデアは、全くの間違いだ。天才だけが思いつくことのできる壮大な間違いだ」と言っている³⁾。しかし、電子の海と空孔のアイデアは、以下に見られるような物質観の発展をもたらしたのだから、全くの間違いだということの言い過ぎであろう。

まれにディラックの電子の海に空きが生じると、そこはしばらく反電子(負電荷の電子がなくなるから、その空孔は正電荷になるという考え—上述)が存在す

るかのような状態として維持された後、正のエネルギーを持った電子が光を放出して空孔に落ち込んでくるという想定は、光が対生成で電子と陽電子になると、つじつまを合わせるように解釈された。しかし、常識的には理解しがたいという点で、やはり間違っていた。ディラックの方程式からの奇妙な予測によって、電子を鏡に写したような粒子(電子と反対の電荷を持ち、質量の同じ反粒子=反物質)、すなわち陽電子の存在が明らかになった。われわれの周りの物質はすべて電子、陽子、中性子といった物質の粒子(フェルミオン)でできている。今では、こうしたすべての素粒子が反物質パートナーを持っていることが分かっている。電子と陽電子が接触すると互いに完全に消滅(対消滅)し、二つの粒子の質量は純粋なエネルギーに変換される。生成されるエネルギーの大きさはアインシュタインの $E=mc^2$ に従う。反対に、光のエネルギーの塊である光子は、対生成という過程で電子と陽電子に姿を変える。上のアインシュタインの式の左項から右項への過程である。ともかくにも、ディラックによる思いがけない陽電子(反物質パートナー)の存在が、物質からエネルギーまた反対にエネルギーから物質への相互転化の究極的な姿を解明する道を開いたといえる。

エンゲルスの運動という観点からみると、粒子と反粒子が対生成する過程は反発でエネルギーを得る過程(能動的)、対消滅(牽引)はエネルギーを与える過程(受動的)ととらえることができる¹⁾。反物質の存在は、正電荷と負電荷、牽引と反発など自然界の対立とその統一という弁証法的な概念をいっそう豊かにしたといえる。また、弁証法的な自然観からその予測は可能だったともいえる。

ディラックは、数学的な天才を発揮して電子と光の相互作用を数式で表したが、それは現実では説明できない矛盾(負のエネルギー電子の存在)を含んでいた。その矛盾を電子の海というアイデアで切り抜けようとしたが、それは間違いだった。数学的な理論があまりにも先行した故の失敗だったといえる。ディラックの名誉のために一言すると、今イギリスにおいて、ディラックはアイザック・ニュートンに次ぐ偉大な物理学者と目されている。

エーテル理論と場の量子論

どちらも空間を満たすと考えられた、19世紀に現われた電磁波を媒介するエーテル理論と1920年代末に登場した量子場の理論はどのような関連があるのか、あるいはないのかについて論じてみたい。

エーテルは目にとらえがたい物質で、一見空虚であるような空間に存在しているものと考えられてきた。ニュートンは、重力をエーテル内の圧力の差によって説明しようとしたが、うまくいかなかった。空間に存在するエーテルの仮説は、どんな既知の現象を使ってもその構造を説明できなかつただけでなく、エーテルという媒質の運動の本性をはっきりさせることができなかった。ホイヘンスは、光の伝播を説明するのにエーテルを想定した。エーテルはガラスなどの透明な物体の内部、および不透明な物体の内部にもあるとされた。マクスウェル J. Maxwell(1831~1879)は、エーテルがポテンシャルエネルギーと媒質の運動を担う運動エネルギーを持つと考えた。さらに、電磁気現象と関係するエーテルの組成は、分子から成る媒質であっても弾性、あるいは圧縮性を持つことから、連続的な性質を持つ分子であると想定した⁹⁾。

エンゲルスは、電気はすべての可秤量的な物質を貫き通している光エーテルの微粒子の物体分子へ反作用する一運動である、という当時の電気現象に関する進歩的な見解を擁護した¹¹⁾。また、電気が直接に光の運動を変化させる(偏向面を回転させる)こと、ある不導体の誘電率の平方根がその物質の光屈折率に等しいこと、つまり、光と電気の相互作用からマクスウェルのエーテル理論は確証された、と言っている。だが、電気の諸仮説から確固たる理論を作るにはまだ相当時間がかかること、あるいはエーテル説すらも全く新しい学説にとって代わられるまでは、電気の学問ははなはだ不愉快な状態に置かれている、と柔軟な態度を示した。

当時、エーテルがあるとすると、それが止まっているのか動いているのか、特に地球に対して相対的に動いているのか、止まっているのかが“エーテルの謎”として問題となった⁵⁾。これに関わることの一つとして、アメリカの物理学者マイケルソン A. Michelson(1852~1931)は1887年にエーテル風で光の速度を遅らせることができないという実験結果から、エーテルの存在を疑問視した。アインシュタインは、場が存在するということは電気を帯びた物体がそこに導入されたときに初めて明らかになると考えた。また、光の波は振動的な電磁場の空間内の伝播であると見なした。アインシュタインの特殊相対論とは、次の二つの原理を満たすことを要請される理論で、それらは、①相互に一定の速度で動いている慣性系(慣性の法則が成立する空間=座標系)のどれに関しても、物理法則は同じ形をしている。②光の速度はどんな慣性系において

も同じ値をとる(光速不変の原理)。エーテルのような存在を仮定すると、異なる慣性系では物理法則が異なり、光の速度が各慣性系で違ってくる(エーテルの速度を光の速度に加えると、光速不変の原理に反する—マイケルソンはこの原理を実証した)ことになり、二つの要請と矛盾することになる。光は真空中でも伝わることができ、エーテルなどの媒体を必要としない。こういったことで、1905年にアインシュタインの特殊相対論によってエーテルは無用な長物として捨てられ、エーテルの謎は解決をみた。

筆者の考えでは、エーテル理論に変わるものとして1920年代後半に量子場の理論が登場した。アインシュタインは、“量子力学が真理の美しい一片をとらえたものであること、そしてそれがなんらかの将来の理論の基礎にたいする一つの試金石になるものだろうということは、疑う余地がありません”と言いつつ、不確定性(曖昧さ)でもって表現しなければならない量子力学について、“それは実在するものの不完全な表現”とか“私は、この理論が物理学の統一の基礎をめざすわれわれの探求において、われわれを欺いて誤らせることになりがちだ、と信じるものです”⁶⁾と肯首しなかった。しかし、アインシュタインはさしあたり空虚な空間中の電磁場一般にだけに限られるとしたうえで、場の概念以外に粒子に関係するなんらかの概念が存在しないこと、ニュートン力学で演じた質点と同じ役割を場の理論が果たすと、言っている。さらに“一般相対性理論によれば、場の方程式の特異点をもたない解が存在し、それは粒子を表現するものと解釈することができる”とか、場の理論が物質の分子構造や量子現象の説明を与えることができないという信念は、偏見に基づくもの“と述べている⁶⁾。微小粒子が併せ持つ波動という現象から生じる不確定な振る舞い容認する量子力学を信じなかったアインシュタインは、場の波動から粒子像が生まれるという後の場の量子論を予測していたのであろうか。

いずれにしても、あらゆる空間(物質の内部も含む)にあるとされ、光や電子を伝播すると想定された便利なエーテルの微粒子仮説は否定された。

量子場理論の正当性

前述したように、 q 数の物理量は、 c 数の場合と異なって確定した値を持たず、量子論的なゆらぎによって波のような広がりを表す。量子力学では、電子の位置はゆらいでいる q 数なので不確定になる。これをアインシュタインは容認したがらなかった。それに対し、

量子場の理論は電子の位置ではなく、空間のいたるところに小さなバネが存在するものとしてイメージされる。電子の場が q 数で表わされる。このバネの伸び縮みが量子論的にゆらいで確定しない。電子の場が行う基本振動(エネルギー= mc^2)はあらゆる場所で共通なので(全ての場所で ψ が同じように振動する)、質量エネルギー mc^2 の粒子(整数個存在する)のように振舞うことになり、これが電子の実体とされる。量子場の理論では、波が二重に現われる。一つの波は電子の場 $\psi(t, x)$ のゆらぎによる波、もう一つの波は波動関数 Ψ 自体が q 数であることによって、あらゆる場所でゆらぐ波である。電子の位置と運動量の不確定性が説明できない量子力学よりは、電子が場の波であるために不確定性が生じるという量子場の理論は明快だと著者は言っている³⁾。

今でも、素粒子は空間の中を動き回る小さな粒子で、互いに力を及ぼし合いながらくっついて物質を構成している、と一般のわれわれは考え易い。ところが、量子場の理論は、あらゆる物理現象が空間を満たしている場のダイナミックな波動から起こると考える。素粒子の種類ごとにクオーク場(粒子としてはクオーク Quark。陽子、中性子、中間子といった素粒子はハドロン Hadron と総称され、より基本的な粒子であるクオークから成る)、レプトン場(電子、ニュートリノ、ミューオン= μ 粒子などのレプトン Lepton = 軽粒子、を含む。これ以上分割できない素粒子と目されている)、ゲージ場(ゲージ粒子=交換粒子を含む。8種類のグルーオンは、クオーク間、反クオーク間に介在する強い力のゲージ粒子。中性子は“弱い力”を媒介するゲージ粒子であるウィークボゾン(3種)のW粒子を放出して陽子に変わり、W粒子は電子と反ニュートリノになる。質量のない光子は電磁気力を媒介するゲージ粒子)、ヒッグズ場(場の量子論では、力の原因となるヒッグズ粒子が仮定されているが、未発見)、などの量子場が存在し、これらの場があらゆる地点で量子論的にゆらいでいる結果、エネルギーがとびとびの値になる。こうしたとびとびのエネルギーの一つ一つのまとまりが素粒子というわけである。

現在、重力作用以外のほとんどの物理現象は、ヤン=ミルズ理論という量子場理論によって統一的に記述することができるかとされている。ヤン(楊)=ミルズ理論というのは、ゲージ場との相互作用によって、アイソスピン空間(陽子方向や中性子方向といった特別な振動方向がない等方性を、ゲージ対称性という)内部で、方向が定まっていない連続的な回転が起きると

する量子場の理論をいう。この量子場の概念に基づく包括的な理論の枠組みを標準模型とっている。また、この標準模型では、クォーク(6種類)と反クォーク、レプトンと反レプトンを基本粒子と呼んでいる。

この世界の最も基本的な構成要素は空間の至る所に存在する場であり、ありとあらゆる物理現象は、場の振動が波として伝わっていく過程として表される、というのが量子場の理論である。吉田氏によると、この理論では場があらゆる物理現象の担い手で、ただ一つの物理的実在となる³⁾。量子場は、近接する場のつながり(無数の稠密なバネが連結している状態)によって空間的な拡がりを作っているのだから、空虚な空間を必要としない。従って、量子場という概念は空間的な拡がりをそれ自身のうちに含んでいる。著者は次のように言っている、“量子場の最大の特徴は、振動が起きるスペースとして、空間や時間とは別の次元を内包している点である”³⁾。また、ニュートン力学では別個の概念として扱われていた空間―時間―物質―力が、量子場という一つの概念に集約されると、とも言っている。さらに、われわれが三次元の空間と一次元の時間として認識しているものは、実は無数の次元が集まった超高次元の世界で、現象の複雑さは、膨大な次元数を持つ世界のどの部分次元で生起するかに依存する³⁾。われわれの感覚できる世界(空間)は、実はわれわれには認識できない無数の次元から成っているから複雑怪奇であるということ。これを説明できるのは量子場の理論であるということになる。しかし、この著書の最後に“このような振動スペースがはたして現実的なものか、それとも、理論の記述に現われるだけの数学的な虚構かは、今の時点では何とも言えない”とあり、はなはだ曖昧で肩透かしをくわされた感じがする。専門家が虚構と言っていることを素人のわれわれはどう考えたらいいのであろうか。

量子場理論の登場によって、波と思われていた光が粒子的であったり、粒子と思われていた電子が波動性をもっていたりすることの謎が一応理論的に説明できるようになった。しかし、この考えは物質(素粒子)の波動性と粒子性という二面性を考慮した場合、波動性に力点を置いた理論(波動場から粒子ができる)といえる。

最後に、素人から見た量子場の理論に対するいくつかの疑問を挙げたい。密に連結したバネから成る場と多次元世界を想起しなければならない場の量子論は、日常の感覚(直感)からあまりにもかけ離れていて、一般の人にとって理解するのが極めて難しいといわざる

を得ない。さらに、場と電子が切り離せない関係にあるとしたら、場(例えば、原子内)から電子がはじき出されるとき、あるいは超高圧電流によって金属からはじきだされる電子は場からちぎれて純粋な粒子になるのであろうか、それとも場を伴うのであろうか。伴うとしたら、どんな場(空間)を想像しなければならないのであろうか。一般の人は、物質をどこまでも分解していくとある最小微粒子から成るという考えに慣れているので、その究極的な姿が実体のない場の振動によるという考えは想像を絶するほど難しい。ここでいう場というのは、エーテルではない媒質(例えば、ヨルダンの考えた連続したバネは一つの例)を仮想し、それを単に“量子場”と呼んでいるにすぎない。“電子の場が振動することによるエネルギーは、 $h\nu=mc^2$ の整数倍となる”、また“電子の実体は、光と違って質量を持っており、静止することが可能(全てのバネが同じ振幅と位相で伸縮している状態)なので、いかにも粒子のように振舞う”³⁾とあるが、 m が電子の質量を意味するならば、これは何から生じるのであろうか。“質量”という語を用いていることはすでに電子の粒子性を前提していると言えないだろうか。そもそもバネに錘が必要なのであろうか、必要だとするとそれらは何を表しているのだらうか。

本小論の背景をなす吉田氏の著書は読む度に分からないところがでてくる奥の深い著書である。換言すれば、内容的に現代人の理解力を超えるだけでなく、過去の天才的な物理学者の跡をたどることがいかに難雑かを示している。

参考

- 1) 樋浦明夫, “F. エンゲルスの「運動の基本的諸形態」(『自然の弁証法』)から見えてくること”, 徳島科学史雑誌, 27巻, pp.32-50(2008)
- 2) G. ガモフ著, 『原子の国のトムキンス(ガモフ全集4)』(伏見康治, 市井三郎訳), 白楊社(1970, 第6刷)
- 3) 吉田伸夫著, 『光の場, 電子の海』, 新潮選書(2008)
- 4) ジム・アル・カリーリ著(林田陽子訳), 『見て楽しむ量子物理学の世界』, 日経BP社(2008)
- 5) “20世紀の科学思想” 湯川秀樹, 井上健著, pp.7-90, 『現代の科学II(世界の名著80)』(湯川秀樹・井上健責任編集), 中央公論社(1997, 第5版)
- 6) “物理学と実在” アインシュタイン著(井上健訳), pp.209-252, 『現代の科学II(世界の名著80)』, 中央

公論社(1997, 第5版)

7) “量子論的な運動学および力学の直感的内容” ハイゼンベルク著(河辺六男訳), pp.327-355, 『現代の科学II(世界の名著80)』, 中央公論社(1997, 第5版)

8) “原子物理学における認識論的諸問題にかんするアインシュタインとの討論”, ボーア著(井上健訳), pp.277-323, 『現代の科学II(世界の名著80)』, 中央公論社(1997, 第5版)

9) “原子・引力・エーテル” マクスウェル著(井上健訳), pp.305-375, 『現代の科学I(世界の名著79)』(湯川・井上責任編集), 中央公論社(1997年, 第5版)

10) 朝永振一郎著, 『スピンはめぐる』(新版), みすず書房(2008)

11) “IX 電気” エンゲルス著, pp.156-237, 『自然の弁証法(上)』(田辺振太郎訳), 岩波文庫, (1970, 第15刷)