

湯川先生

素粒子論の方法 (坂田昌一)

203

- (11) CHRISTY & KUSAKA: Phys. Rev. 59 (1941), 405.
- (12) S. TOMONAGA: I.P.C.R. 39 (1941), 247
- (13) S. TOMONAGA: I.P.C.R. 40 (1942), 73
- (14) WATAGIN: ZS. f. Phys., 83 (1934), 92
- (15) SCHERZER: Ann. d. Phys. 34 (1939), 585.
- (16) MARKOV: Journal of Phys. URSS, 2 (1940), 453.
- (17) DIRAC, FOCK & PODOLSKY: Sow Phys. 2 (1932), 468
- (18) WENTZEL: Ze't. f. Phys. 8 (1933), 479, 635; 87 (1934), 726.
- (19) PAULI: Rev. of Mod. Phys. 15 (1943), 175. この論文について討論していた朝永, 宮島の諸氏に感謝する.
- (20) DIRAC: Phys. Z. USSR, 3 (1933), 64.
- (21) 湯川: 科学 12 (昭 17), 251, 282, 322.
- (22) 朝永: 理研集報 22 輯 (昭和 18), 546.
- (23) 渡邊: 科学 14 (昭 19), 102;
- (24) 谷川: 科学 15 (昭 20).
- (25) MIE: Ann. d. Phys. 37 (1912), 511; 39 (1912), 85 (1923), 711.
- (26) BORN: Proc. Roy. Soc. London 143 (1933), 410
- (27) BORN & INFELD: Proc. Roy. Soc. London 144 (1934), 425; 147 (1934), 522; 150 (1935), 141.
- (28) EOPP: Ann. d. Phys. 38 (1940), 345.
- (29) BORN: ebenda
- (30) WEYL: Phys. Rev. 45 (1934), 505.

素 粒 子 論 の 方 法†

— 素粒子の相互作用の理論 I —

坂 田 昌 一*

周知の如く現在の素粒子論は次の三つの段階から構成されてゐる。先づ始めに自然界にどんな種類の素粒子が存在し、それらがどんな相互作用のもとにあるかといふ対象の模型に關する假定が設けられ、次にこの體系に HEISENBERG 及び PAULI の場の量子論が適用される段階があり、最後にこの理論から適当な近似法(主として摂動論)を用ひて實驗と比較できる様な結論を導き出す過程がある。従つて現在の如く、これらの結論が實際とひどく喰ひ違つたり(例へば中間子の壽命, 自分自身の中に矛盾を含んでゐる様な場合には(例へば無限大の自己エネルギー), その困難の原因を上へのべた三つの段階に對應して (i) 模型の適否, (ii) 量子論の適用限界, (iii) 近似法の良否の 3 點について注意深く探し求めねばならない。近似法殊に摂動論のよしあしについては朝永氏一派及び WENTZEL 一派等によつて詳しく研究され甚だ實り多き成果が擧げられてゐる。私共は主として模型の問題を研究し模型の變更により或る種の困難例へば中間子の壽命の問題等の解決が可能であることを示した⁽¹⁾。所が LORENTZ の電子論以來引繼がれてゐる電子の自己エネルギーの問題など場の理論にあらはれる種々な發散の困難に關しては量子論の適用限界に結びついた問題として新しい理論の發展が久しく待たれてゐる。HEISENBERG がこの問題を論じて相對性理論と量

子論の統合の際考へに入れるべき長さの次元をもつ新しい普遍常數を無視したために現はれた矛盾であるとしてゐるのはよく知られたことであり、今日素粒子論研究者の指導原理となつてゐる。私共も彼の豫想が將來裏書されるであらうと信じて居るが、この問題はもう少し掘り下げて考察することが必要であると思ふ。

理論が將來いかなる方向へ向つて進むであらうかといふ物理学の發展の法則を見つけだすことができ、この法則を具體的な問題の分析に意識的に適用することができたならば、研究者の天才的直観による偶然的な成功に頼るよりも遙かに容易にしかも確實に目的を果すに違ひない。HEISENBERG が相對性理論や量子論の發達した歴史の經過を跡づけ、その形成過程の中から上に述べた様な法則を見出そうと努めてゐることは高く評價すべきであらう。併し類推のみをもととして行つた彼の議論は post hoc (これに續いて)であつても propter hoc (これの故に)であることはできない。毎日朝日の昇ることから、明朝再び太陽が昇るであらうとの推論は生じないのである。(類比がすぐれた發見的方法であつても本質的な關係をあらはす論理でないことについては武谷三男氏の「革命期における思惟の基準」(自然科学 1 (1946), 7)の中に詳しく論ぜられてゐる。)それ故に HEISENBERG も確信をもつて「普遍的長さ」の存在を豫想したのではなく、かやうな考へが naheliegend であると述べてゐるのである。

私共の素粒子論の研究における仲間であり、我國における最もすぐれた科學史の研究者である武谷三男氏は

* 名古屋帝國大學理學部物理学教室。
† この論文は名大素粒子論研究團による共同研究「素粒子の相互作用の理論の一部」をなすものである。



$$L = -\frac{1}{2} \int \left\{ f_t^2 + \frac{1}{\kappa^2} \left(\frac{\partial f_t}{\partial x_i} \right)^2 \right\} dv,$$

$$f = \frac{\partial \varphi}{\partial x_i}$$

をとり、スカラーポテンシャルを

$$\varphi(x, t) = \sum_k a(k, t) e^{i k x}$$

$$a^*(k, t) = a(-k, t)$$

と展開すると、これから得られるハミルトニアンを $\dot{a}(k, t)$, $\ddot{a}(k, t)$, $\ddot{\dot{a}}(k, t)$ を使って表はすことができる。ところがそれは

$$H = \sum_k \left[\frac{Ak^2 + 4 + \kappa^2}{2\kappa^2} a^*(k) \dot{a}(k) + \frac{k^2(\kappa^2 - k^2)}{2\kappa^2} a^*(k) a(k) - \frac{1}{\kappa^2} \ddot{a}^*(k) \ddot{a}(k) + \frac{1}{\kappa^2} \ddot{\dot{a}}^*(k) \ddot{\dot{a}}(k) \right]$$

となり positive definite な形になることができない。勿論この場合でも湧源のない自由な場に対しては適当な附加条件によつて一種類の粒子としての解釋を強行することが不可能でないがこれは當然のことであり又 trivial である。相互作用のある場合まで一貫して量子化が可能である適当な条件（例へば電磁場の縦の部分を消去するローレンツ条件に似た様な）をつけて、一種類の粒子としての解釋を可能にすることも考へられるが未だ成功してゐない。

3 理論の物理的解釋の變更 ディラックは新しい場の量子化の方法を提唱し、それによつて負エネルギー光子場が導入されることを示し、發散問題に對する年來の引算法を更に押し進めようとして居る。この際あらはれる負エネルギーに對してはさきにも述べた様な一般的な困難が附隨してゐるので、彼はこれを理論の物理的解釋の變更により避け様としてゐる。パウリによるとそれには正負のエネルギーの光子場を記述する二組の變數の間の正準變換を使つて、一方の組の變數では全然負のエネルギー準位が現はれないものとして、他方の（正負のエネルギーが許され、計算に便利な、しかし現實の光子とは解釋できない）組で計算を行つた後に、その結果を或る規約で、現實の過程に翻譯するといふ手續をとつてゐる。吾々の場合も始めから付け加へた中間子場を相互作用から除いて考へれば良いわけであるが、そうすると湧源の自己エネルギーに對して無効になる。ディラックの場合と平行な翻譯規則とこの規約を兩立させることはこの場合には静止質量の異つた場の組合せといふ事情によつて不可能になる。従つて寧ろ異つた場の組合せといふ

ことに、ディラックの意味での負エネルギーの導入と異つた吾々の方法の本質的な特徴があるのではないかと思ふ。尙ほディラックは新しい量子化によつて導入された負の確率といふことに期待してゐる様であるが、吾々としては、それ自身曖昧な負確率といふ概念よりも正の確率をもつた負エネルギーの對象を選んだわけである。しかし負エネルギーと負の確率といふ概念との本質的な關聯については更に検討を要すると思ふ。

4 電磁場とスカラー中性中間子場の混合理論 スタティックな自己エネルギーを有限にする目的のためには、負エネルギーのベクトル中間子場を使はなくても、これ迄の中間子理論における核力の計算から豫想される様に普通のスカラー中性中間子場を電磁場に付け加へればよい。即ちその場合全系のハミルトニアンは次の式で與へられる：

$$\bar{H} = \bar{H}_p + \bar{H}_e + \bar{H}_u + \bar{H}'_e + \bar{H}'_f$$

但し \bar{H}_e , \bar{H}_u は夫々電磁場及び中間子場のエネルギー、 \bar{H}_p は電子のエネルギー、 \bar{H}_e , \bar{H}'_f は電子と電磁場及び中間子場との相互作用のエネルギーで

$$\bar{H}_p = \int \psi^\dagger [\kappa^2 \vec{a} \vec{p} + \epsilon m c^2] \psi dv,$$

$$\bar{H}_e = \frac{1}{8\pi} \int [E^2 + H^2] dv$$

$$\bar{H}_u = \int \left[4\pi e^2 U^2 + \frac{1}{4\pi} (\text{grad } U)^2 + \frac{\kappa^2}{4\pi} U^2 \right] dv$$

$$\bar{H}_e = \int \psi^\dagger [e\phi - e(\vec{a} \cdot \vec{A})] \psi dv,$$

$$\bar{H}'_f = f \int \psi^\dagger (\beta U) \psi dv$$

である。これから電子のスタティックな自己エネルギーを計算すると

$$E_{st} = \sum_k \left(2\pi e^2 \frac{1}{k^2} - 2\pi f^2 \frac{1}{k^2 + \kappa^2} \right)$$

となり、若し $e=f$ と假定すれば $\frac{\kappa e^2}{2}$ なる有限な値が得られる。

この組合せは正エネルギーの中性中間子場ではスカラー場の静電ポテンシャルが斥力になるといふ特殊な事情を利用して負エネルギーの導入を避けたものであるが、餘りにも ad hoc であるといふそりを免がれない。

以上の考察から電子の自己エネルギーを有限にするために導入された負エネルギーの場は現在の所多分に機能的に理解せねばならないことが分つた。但しそれが現在發散問題に對して行はれてゐる種々雑多な方法、手續に對して如何なる意味で、統一的な表現を與へるかといふことに現在の問題と將來の發展への契機を見たいと思ふ。

「ニュートン力学の形成について」⁽²⁾その他において次の様な見解が正當であることを明示された。即ち吾人の自然認識は HEGEL の概念論における判断の3段階に相應した環をくりかへして螺旋的に進む弁證法的過程であるといふ見地である⁽³⁾。氏はこれらを現象論的段階、實體論的段階、本質論的段階とよんで居られるが、第一の現象論的段階とは個別的事實が記述される an sich な段階をいふのでニュートン力学ではチコ・ブラーエの業績が演じた役割によつて示される様な段階に相當して居る。第二は現象が起るべき實體的な構造を知り、この構造の知識によつて現象の記述が整理されて法則性を得る段階で、ここでは法則は實體の属性としての意味をもつ。これは特殊な構造は特殊な条件で特殊な現象をもつことを述べる für sich な段階でケプレルの段階である。最後に本質論的段階とは任意の構造をもつ實體が任意の条件の下にいかなる現象を起すかを明かにする an und für sich の段階をいひ、ニュートンの段階に相當する。武谷氏はこの見方を中間子理論の現状に適用し、現段階は實體論から本質論への移行に當つて先づ實體論的な整理を行ひながら本質論へ高まる路を探してある状態であると規定された。

さて發散の困難において最も明瞭に示されてある素粒子論の現段階の矛盾に對する解決策として種々な理論が提唱されて居るが、私共はこれを上に述べた見地に立つて典型的に分類し理論の正しい發展の方向を見出したいと思ふ。先づ SCHERZER, MARCH 等の切斷の方法、DIRAC, BHABHA 等の引算の方法、WENTZEL, DIRAC の λ 極限過程⁽⁴⁾等はすべて現在の理論に或る操作(相対性論的不變な)を行ひ發散を生ずる部分を切り棄てることにより困難を救はうとしたもので、現象論的段階に屬する理論と見られる。これに對して MIE, BORN, BOPP の新電磁場理論は素粒子の相互作用の實體的構造を明かにせんとする意圖を持つもので、電磁場の量と電子の位置の間に不可換な交換關係を導入した MARKOV の理論等と共に實體論的段階へ分類されてよいであらう。もとよりこの様な分類は形式的に行つてはならないことに注意すべきである。

私共は昨秋疎開地信州富士見高原に武谷氏を招き種々討論を行つたが、そのときの同氏の示唆にもとづき實體論的段階にある BORN, BOPP の系列の理論の構造を詳しく調べて見た。BORN の理論は非線型の理論として有名で數學的興味を唆つて居るが、その本質は非線型性にあるのではなく LAGRANGE 函数の中に potential の2階以上の微係数がふくまれた點にあることは BOPP の指摘した通りであり、BOPP は線型でありながら有限な自己エネルギーを與へる理論をつくることに成功した。この理論の量子化は彼自身も行つて居るが、最近 PODOLSKY 達が行つてある。その結果と同一であるが、私共の研究室でも原治君⁽⁵⁾が正準變換の方法によつて BOPP

の理論は電磁場と負エネルギー中性ヴェクトル湯川場の混合場理論であることを證明した。混合場理論といふのは曾つて MÖLLER 及び ROSENFELD が核力の $\frac{1}{r^3}$ の特異性を除くためにヴェクトル場と擬スカラー場の混合を考へそれらと核子との相互作用の常數の間に特定の數值的關係を假定したのと同じ類型に屬するからである。

電磁場の static potential は $\frac{e^2}{r}$ の形をもち負エネルギー中性ヴェクトル湯川場の static potential は $-g^2 e^{-kr}/r$ であるから (e, g は夫々の場の相互作用の常數, $h\kappa/c$ は中間子の質量, r は距離)。若し $e=g$ とおいた混合場を探ると全體の static potential は $e^2 \left(\frac{1}{r} - \frac{e^{-kr}}{r} \right)$ となり、自己エネルギーは $e^2 k$ といふ有限な値になる。BORN や BOPP の本来の意圖は一元論的見地の正當化にあつたが、私共は次に述べる理由により混合場といふ點にこの理論の本質を求めたいと考へてある。

従來は場の理論において個々の場の相互作用が單獨に取出され他と切離して研究されて來た。所が私共は同一の粒子と作用するすべての場及び同一の場の湧源となるすべての粒子の相互作用間の内部的な關係を探究することが今後の理論的發展の有力な方法であり、現在の理論の困難を解決する有望な路であるといふことを主張したのである。上に述べた BOPP の理論や MÖLLER 及び ROSENFELD の混合場理論は確かにこの様な方向を指示してゐる。又核場の湧源である核子の状態の多様性(種々な大きさのスピンの及び荷電)を假定した HEITLER 及び MA の理論や更に正及び負エネルギーの光子場の混合へ導く DIRAC の新量子化理論⁽⁶⁾等は何れも私共の立場の正しさを證明するもの如くである。曾つて DIRAC の電子論は單體問題に對する相対性論的量子力学の可能性を假定して出發した所、負エネルギーの困難に遭遇し、この問題を解決するために假定に反して無限に多くの負エネルギー電子の存在を假定する空孔理論へ移行せねばならなかつた。これと同様のことが素粒子論の發散の困難についても言へるのではないであらうか。私共は素粒子間の全體的關係を無視した従來の理論における形而上學的方法の偏狭さを示すものが發散の困難であるとみなしたのである。自然を全體的關係から引き離してその個別において研究する態度は自然科学の發展の初期の段階においては極めて有力な方法であり、近代自然科学の偉大な進歩の根本条件であつた。併し BACON に始まるかような形而上學的方法はその適用限界を超へればたちまち一面的な偏狭なものとし、解くべからざる矛盾に迷ひこむのである。それは個々の事物のためにその關係を忘れ、その存在のためにその生成及び消滅を忘れ、その静止のためにその運動を忘れるからであり、樹を見て森を見ないからである。上に擧げた DIRAC の電子論の

例は特別な場合ではなく、形而上學的方法が不當に適用されたときはいつでも充分徹底せしめられると出發點の正反對へ到達するものである⁽⁷⁾。研究者の多數がなほかやうな方法の限界を意識してゐないために生ずる混亂と矛盾は各領域において非常に多いのではないかと考へられる。

私共はこの様な方法論の見地から先づ混合場理論によつて素粒子論の難點がどの程度まで除き得るかを検討しようと思つてゐる。又さきに現象論的段階にあるといつた切斷の方法、引算の方法、極限過程等がならぬ形で混合場理論によつて裏付けられるのではないかといふ點も研究中である。併し混合場理論の如く單に相互作用の常數間に一定の數值關係を設けた理論は相互作用の相互關係についての外部的な偶然的な認識をふくんだ現象論的實體論的段階の理論であつて、將來相互作用の間のもつと内部的な必然的な關係を明かにする本質論的段階へ止揚されねばならない。MÖLLER の5次元の理論は

電子の自己エネルギー†

— 素粒子の相互作用の理論 II —

井上 健*・高木 修二*

1 負エネルギー中間子の問題 電磁場を媒介として行はれる相互作用の理論に現はれる自己エネルギーの發散の問題は、電磁場と形式的に負エネルギーの中性中間子場と解釋される場との混合場理論をとることによつて、或る程度收斂させ得ることが示された。勿論その結果は決して満足すべきものではない。このことはそこに採用されてゐる理論形式が吾々の立場において考へられる可能性の内での、一つの特異な、しかも最もプリミティブな段階に對照してゐるといふ事情によつて理解できると思ふ。しかしその際現はれた「負エネルギーの中間子」といふ概念はかなり一般的な性格の問題を提出してゐると考へられるので以下これについて少しく考へてみる。

まづ負エネルギーの粒子といふものは現在實驗にかゝつて來ないものである。この様なものを理論の内に取り入れることは徒に困難さを増すものとしか見えぬ。更にそれのみでなく、良く知られて居る様に、負領域にエネルギーの準位の存在を許すといふことは(その場が BOSE 統計に従ふ場合) その場自身に對して定常状態の意味を不明瞭ならしめ嚴密な意味での定常解の存在を否定するといふ矛盾を理論自身の内部に含むことになり、更に又原子内の電子がその様な負エネルギーの粒子

* 名古屋帝國大學理學部物理學教室。
† この論文は名古屋帝國大學理學部物理學研究所による共同研究の一部をなすものである。

この方向へ向ふ研究として注目すべきものであり、私共も理論を一層高い段階へ高めることに最終的目標のあることを常に忘れてはならない。この場合恐らく、武谷氏の⁽⁸⁾詳しく論じて居られる如く、場と物質の對立の統一といふ問題が根本的に重要な役割を演ずるに違ひない。私共が湧源の多様性をも含めた混合場理論の綜合的研究の必要を説く所以は、本質論への移行に先立つて現象論的實體論的段階の整理が大切な仕事であるからである。

文獻

- (1) 坂田昌一: 素粒子論における模型の問題(中間子討論會豫稿), 1943.
- (2) 武谷三男: 科学 12 (1942), 807.
- (3) ENGELS: Dialektik der Natur.
- (4) PAULI: Rev. Mod. Phys. 15 (1943), 175.
- (5) BOPP: Ann. d. Phys. 38 (1940), 345.
- (6) 原治: 日本物理學會年會講演 (1946).
- (7) 武谷三男: 科学 16 (1946), 199.

の自然放出を伴ひながら漸次加速されて遂に原子系の安定が破壞されるといふ様なカタストロフィシな結果を導くことになるであらう。もともと素粒子の存在を支へるために導入された場の存在が原子系の安定と兩立しないといふ事實は何よりも明瞭にかゝる場の存在が未だ充分満足すべき實體化に至らぬ段階において導入されてゐることを示すものである。従つて現在の(理論的、實驗的)段階においては、吾々はかやうな場の導入を一應機能的、操作的に解釋して置かねばならないと思ふ。この點は最近展開されてゐるディラックの新量子化法による負エネルギーの光子場の導入、又はディラック及びヴェンツェルの λ 極限過程等の操作との關係においてその本質が明らかにされ得るものと考へられる。これらの相互關係性については後に觸れることとし、以下では負エネルギーを避けるといふ目的のために、現在の理論形式の内において可能らしく思はれる二三の試みについて述べよう。

2 BOPP 場を一種の粒子の場と解釋すること。吾等は BOPP 場を電磁場とヴェクトル中性中間子場との混合場と考へたのであるが、若しこれを一種の粒子の場と解釋することが許されるならば、上に述べた負のエネルギーの問題は一應回避できそうに思はれる。BOPP の場は一見かやうな解釋を許す様であるが、實はそうで無いことは BOPP の場のハミルトニアンが positive definite でないことから分る。即ち簡單のためにスカラーの部分を見て見ると

