

新体系物理学 (統一体系物理学)† の易しい紹介¹⁾

東大・理 物理 飯 田 修 一

(1985年3月28日受理)

§ 1. はじめに

ボーアの対応原理に表現されているように、古典物理学と量子物理学は、原子の構造に至るまで、実に良く対応している。しかしながら、その対応は定性的なもので、対応原理を定量的に表現した文章は文献に見当たらない。^{2,3)} 筆者は昭和22年学部を卒業したものであるが、古典物理学と量子物理学を数学的並びに物理学的に矛盾点を残さないで統合し、全体系として把握して、物理現象の理解を進めることは、その当時以来の夢であった。今や筆者は、この夢が遂に実現されたと宣言することが出来るように思う。とくに、この努力の最終段階で、いくつかの物理学上の新しい概念が創造されたが、これらの概念が、余りにも既存の常識的な物理概念と異なる為はその研究論文の公表が不可能になるという予想されなかった困難が発生した。⁴⁾ しかしながら、幸い、昨年10月～11月、米国サンフランシスコで開催された第4回フェライト国際会議が、その冒頭のPlenary Sessionで、“Introduction to the New Frames in Physics”を、その招待講演とすることを決定要請し、又米国の物理学会会長より、ある国際雑誌に長文の紹介論文を書いてはとの示唆の手紙を戴くなどの事情が発展したので、上記の状況は既に解消の方向に向っている。なお、フェライト国際会議では、そのTechnical Sessionsの冒頭A1で、“Magnetism and Physics of Iron-Cobalt Oxides”が、招待講演として予定され、それに加えての要請であり、又、新体系物理学関係の既刊の論文文献、とくに、その当時は未印刷であった、物性研究誌公表の論文“Rigorous Deduction of the Dynamical Equations for the Persistent Current Electron with $g = -2(1 + \alpha/2\pi)$ ”⁵⁾が、そのプレプリントの形で、同国際会議プログラム委員会に予め送付されていた状況下で、決定されていたことを附記する。

† 英語では、いまのところ“The New Frames in Physics”¹⁾と呼んでいる。“新”という言葉は年月と共に相応わしくなくなってゆくの、 “The Unified Framework of Physics”と呼ぶことも考えられる。簡単に‘Iida’s Frames (飯田の体系)’と呼ばれても、筆者としては差支えはない。

さて、上記国際会議Proceeding のゲラ校正も済み、5月頃出版の予定となっているが*、物性研究誌は以上の新体系物理学を育てて戴いた親雑誌であるから、上記の内容を是非日本語で、物性研究読者諸氏にお伝えしたいと考えてこの小稿を執筆した。同国際会議には、A. H. Morrish, J. Smit, R. M. White のような物理学理論に十分堪能な人達も参加しているが、大部分の人達は物理学を専門としない人達である。従って、数理的な話はできるだけ避け、談話会風に、スラリと流すことにしたので、大学院学生諸君や実験に専念して居られる一般の物理学者の読者層が、気楽に読める、新体系物理学の紹介解説と理解して戴いて結構である。ただし、随所に最新の考え方が、盛り込まれていることも注意される。

§ 2. 新体系物理学構成に伴う認識論的課題と、MKSP系併用の推薦

量子物理学の成立に際して、物理学理論の本質に関する認識論的、方法論的課題が発生し、必然的にその課題に対する立場の明確化が謀られた³⁾。そうした上で、その認識論的理解の詳細に関しては、現在に至るまで、なお議論が継続している状況がある⁶⁾。従って、古典物理学と量子物理学を含めて、その接続関係と基本構造を再構成しようとする新体系物理学建設の努力には、当然のことながら、物理学に関する認識論的な枠組み、立場の明確化が、先づ要求される。その第一歩として、筆者は、物理学における真理とは、物理的経験事実を記述するための、“矛盾のない論理体系”であって、かつ、“単純であり、従って便宜な”枠組み(Framework)と定義したい。真理については、もっと厳粛な定義、意義づけが可能そうに思えるが、以上の文章よりも、より決定的な言葉は存在しないと判断する。例えば、天動説は、当時の人達に対しては、物理学上の真理であって、地動説は、その後、新らしい経験事実を加えた上で、新らしい真理として、古い真理と交代して登場したのであって、こうした事実を認めた上では、上記の言葉より、より適切な表現は、われわれ有限の能力しかない人類には、発見できないのである。

さて、以上の見地に立つと、物理学上の真理と、便宜上の枠組みとの間に、明確な区別が、つけられなくなる。その結果として、方法論的な選択は、物理学に於て、真理を規定してゆく重要な因子の一つを構成する事になる。物理学は既にそれ自身十分に複雑であるから、もし、上記の見地から見て不必要な、方法論的な複雑性が、人為的に導入されると、それは真理を不必要に汚損したことになるかと筆者は判断するのである。

以上の原則に立ち、新体系物理学ではMKS有理化ガウス単位系；MKSP系(PはPhysi-

* 別刷御希望の場合は申し出られたい。(送料同封を望む)

cal の P) を電磁気学の基本単位系として使用し^{7,8)} SI系 (MKSA系) を必要により併用する立場を取る。MKSP系によるマクスウェルの方程式は

$$\left. \begin{aligned} \nabla \times \mathbf{E} &= -\frac{\partial \mathbf{B}}{c \partial t}, & \nabla \times \mathbf{H} &= \frac{\mathbf{j}}{c} + \frac{\partial \mathbf{D}}{c \partial t} \\ \nabla \cdot \mathbf{B} &= 0, & \nabla \cdot \mathbf{D} &= \rho \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

$$\mathbf{D} = \mathbf{E} + \mathbf{P}, \quad \mathbf{B} = \mathbf{H} + \mathbf{M} \quad (2)$$

である。MKSP系もMKSA系も、両者ともMKS有理系であるから、その間の式および数値の換算は、極めて容易であることを特記する。さてこの主張の根拠となる例として、磁気的な電磁エネルギーの熱力学的な変分表示を、三つの異なる単位系で示そう。それは

強磁性・常磁性 反磁性

$$\text{CGSガウス系} \quad \frac{1}{4\pi} \mathbf{H} \cdot \delta \mathbf{B} = \frac{1}{4\pi} \mathbf{H} \cdot \delta \mathbf{H} + \mathbf{H} \cdot \delta \mathbf{M} = \frac{1}{4\pi} \mathbf{B} \cdot \delta \mathbf{B} - \mathbf{M} \cdot \delta \mathbf{B} \quad (3)$$

$$\text{S.I.} \left\{ \begin{aligned} \mathbf{E}-\mathbf{H} \text{ 対応} & \quad \mathbf{H} \cdot \delta \mathbf{B} = \mathbf{H} \cdot \mu_0 \delta \mathbf{H} + \mathbf{H} \cdot \delta \mathbf{M} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} \cdot \delta \mathbf{B} - \frac{\mathbf{M}}{\mu_0} \cdot \delta \mathbf{B} \\ \mathbf{E}-\mathbf{B} \text{ 対応} & \quad \mathbf{H} \cdot \delta \mathbf{B} = \mathbf{H} \cdot \mu_0 \delta \mathbf{H} + \mathbf{H} \cdot \mu_0 \delta \mathbf{M} = \frac{\mathbf{B}}{\mu_0} \cdot \delta \mathbf{B} - \mathbf{M} \cdot \delta \mathbf{B} \end{aligned} \right. \quad (4)$$

$$\text{MKSP系} \quad \mathbf{H} \cdot \delta \mathbf{B} = \mathbf{H} \cdot \delta \mathbf{H} + \mathbf{H} \cdot \delta \mathbf{M} = \mathbf{B} \cdot \delta \mathbf{B} - \mathbf{M} \cdot \delta \mathbf{B} \quad (6)$$

である⁹⁾。現在の常識的な物理学では上記の各項の意味が必ずしも明瞭ではないが、簡単に説明すると¹⁰⁾、強磁性・常磁性は永久磁気能率が磁場 $\mathbf{H} = 0$ でも存在して、磁化 \mathbf{M} の原因になっている場合で、 $\mathbf{H} \cdot \delta \mathbf{M}$ (MKSP系で記述) はゼーマン・エネルギーの変分の逆として物質が受け取るエネルギー、 $\mathbf{H} \cdot \delta \mathbf{H}$ は磁場のエネルギーの増分である。又反磁性の場合は、磁場 $\mathbf{H} = 0$ では永久磁気能率のない場合で、 $\mathbf{B} \cdot \delta \mathbf{B}$ は体系の磁場のエネルギーの変分、 $-\mathbf{M} \cdot \delta \mathbf{B}$ は、反磁性として誘起された磁化 \mathbf{M} を構成する永久電流に、磁気誘導によって伝達されたエネルギーの変分を意味するものである。いづれにしても、使用する単位系に依存して、その表現は多様になり、とくに、国際的に推薦されているSI系では、二つの異なる表示が共存し、理解を一層困難にさせている。MKSP系の優位性は明瞭であり、その事と真理の本質とが、無関係と言い切れないことが、新体系物理学の一つの主張になる。

§ 3. 電磁気学におけるゲージ (gauge) の自由度の廃止

次に数理物理学では、あらゆる物理法則を、数学の許す限り、出来るだけ一般化して、適用

範囲を広げようとする傾向がある。事実この手法によって、多くの新しい見地、新しい真理、又真理のもつ、より一般的な意義が発見されて来た歴史がある。しかしながら、電子と電磁波が主として関与する物質の物理学においては、既にその一般化は過去に十分に行われて居り、従って、その範囲に適用される物理法則の内容と限界が、十分に判っていると言える。従って、その範囲に於て、上記の一般化が、もし物理学上は必要ではなかったとき、それは物理学に不必要な複雑性を持ち込んで了う危険性が指摘される。従って、新体系物理学ではいくつかの場合について、一つの基準となる枠組みを設定し、他の枠組みはその数学変換と見做す立場を採用する。理由は“矛盾がなく、より単純で便宜になる”からである。

まず、電磁気学に就いてゲージの自由度を取り除くことを提案する⁸⁾。いわゆる電磁ポテンシャル、

$$\{\mathbf{A}(\mathbf{r}, t), \mathbf{i}\Phi(\mathbf{r}, t)\}^* \quad (7)$$

は、もし、相対論の要請を入れてローレンツ・ゲージを採用し、更に全世界どこにも、数学的な特異点のようなものがないと要求すると、定数を除いて殆んど一義的に決定し、唯残っている自由度は、空間を光速度で進行する波束で、 \mathbf{E} にも \mathbf{H} にも効かないものだけになる。自由電磁波と結合させて、例えば

$$\nabla \cdot \mathbf{A} = 0, \quad \Phi = 0, \quad \nabla \cdot \mathbf{A} + \frac{1}{c} \frac{\partial \Phi}{\partial t} = 0 \quad (8)$$

といった形で、ローレンツ・ゲージとクーロン・ゲージの両者を満足させる波束、が構成できる¹¹⁾と言った、特殊な場合の数学操作上の応用を除き、こうした観測に掛らず、かつ、実験体系の持つ時空間的対称性と無関係の幽霊波束は、無視するのが物理学の習慣である。そう考えると、この新しい立場では、電圧 V とも呼ばれるスカラー・ポテンシャル $\Phi(\mathbf{r}, t)$ と同様^{**}、ベクトル・ポテンシャル $\mathbf{A}(\mathbf{r}, t)$ も又物理的実在であって、電流回路の電流を変化させる際に発生する誘導起電力は、一義的に

$$\mathbf{E} = -\frac{1}{c} \frac{\partial \mathbf{A}}{\partial t} - \nabla \Phi \quad (9)$$

* \mathbf{i} は、四次元空間量の複素数表示に伴う虚数単位で、 $e^{i\omega t}$ などと区別して \mathbf{i} と記している。⁸⁾

** 式(7)により、 $\Phi = V$ と \mathbf{A} は四次元ベクトルを形成する。従って、 Φ を実在と考えたことは \mathbf{A} も実在と考えたことになることを注意する。

$$\mathbf{A}(\mathbf{r}_1, t_1) = \iiint \frac{[\mathbf{j} + \frac{\partial \mathbf{P}}{\partial t} + c \nabla \times \mathbf{M}](\mathbf{r}_2, t_2 = t_1 - r_{12}/c)}{4\pi r_{12}c} dV_2 \quad (10)$$

として導出できる。\$-\nabla\Phi\$の括弧は、上記の実験状況では重要にならないことを意味する。この新概念は、磁気記録工学などで有用である。例えば、強磁性体単結晶に於て、その磁区の境界である磁壁の移動に伴う起電力などは、式(9)、(10)によって容易に計算できるが、旧概念の枠組みを使用した場合、普通の人は困難に直面する。

一般に \$\mathbf{E}\$, \$\mathbf{H}\$ は電磁ポテンシャルの局所的な時空間微分に対応し、ローレンツ力など、多くの物理量では、それだけが重要であり、従ってゲージ不変の性質になる。しかしながら、広い空間に亘って、\$\mathbf{E}\$, \$\mathbf{H}\$ などが積分された大局的な量としての \$\mathbf{A}(\mathbf{r}, t)\$, \$\Phi(\mathbf{r}, t)\$ が、問題となる場合は、決して零ではない。われわれが、通常実在として使っている電圧 \$V\$ や、前記の誘導起電力などはその種の量であるが、更に、古典電気力学及び量子力学のハミルトニアンに現れる \$(-e)\mathbf{A}/c\$ は、関係している磁場の源を含めた全体系の中に形成されている電磁運動量を示しており、^{12,13)} 運動方程式としてはゲージの自由度があっても、電磁運動量式にはゲージの自由度はなく、荷電粒子の運動量に関する式

$$\mathbf{p} = m\mathbf{v} + \frac{(-e)}{c}\mathbf{A} \quad , \quad m\mathbf{v} = \mathbf{p} - \frac{(-e)}{c}\mathbf{A} \quad (11)$$

は、明瞭な運動量の合成則を示していると新体系物理学では理解する。[†] 上記文献 12) の式(19)、(20)は、この課題に対する最終的な解答を示しているが、その式を十分に理解するためには、これから説明しようとする電子の古典モデルの理解を必要とするので、この章ではこれ以上は立ち入らないことにする。

§ 4. ゼーマン・エネルギー

さてこれから、新体系物理学の一つの重要成果であるマイスナー効果の古典電磁熱力学的導出の説明の方向に向う。

さて、過去を振り返って見ると、量子物理学は1920年代に建設が始まった。量子電磁力学 (Quantum Electrodynamics ; Q. E. D.) は1940年代に発展した。1970年代に於て、筆者は、既存の量子物理学の枠組みと、通常信じられていた古典電磁気学の枠組みとの間に、重大な矛盾、もしくは不整合のあることに気が付いた。その一例はゼーマン・エネルギーであつ

[†] この認識に欠けるため、符号に過まりを生じて居る例が、少ない。

て、磁場の持つエネルギーと、ゼーマン・エネルギーとの関係を、明瞭に述べた解説は、何処にも存在しないことが判ったのである。この不統一発生の理由は、多分、電気学と磁気学の対応関係に原因があり、当初磁荷が実在と信じられ、従って、電気二重極能率 \mathbf{p} の場合に存在し、矛盾のないことが証明されている、電場のエネルギーと電気二重極能率との間のゼーマン・エネルギー類似の関係式

$$U_E = -\mathbf{p} \cdot \mathbf{E} \quad (12)$$

に、その根拠を得ていたように考えられる。ところが、量子電磁力学の発展と共に、電子のスピン磁気能率の原因は、スピン角運動量を伴う、スピン電流にあり、¹⁴⁾ 磁荷は、少なくとも通常の電子と電磁場の世界に、存在する可能性がないことが明瞭化するに及んで、その従来の根拠が失われた。しかしながら、結果的には実験事実を矛盾なく説明して来たので、その不整合の根拠をとくに問うことなく年月が経過したという事情に思える。

筆者の得た結論は次の通りである。今図1に、理想化された状況が示されている。C₁, C₂ は超電導体のリングで、内部に磁束, Φ_1, Φ_2 を維持して居り、従って永久電流 $\mathbf{j}_1, \mathbf{j}_2$ が流れているものとする。C₁ は大きく、C₂ は小さく、C₂ によって、磁気能率 μ_2 を代表させるものとし、 μ_2 はC₁ よりの磁場 \mathbf{H}_1 の中にあるものとする。

そうすると、全体系の磁気エネルギー, U_m , は

$$U_m = \iiint \frac{\mathbf{H}^2}{2} dV = \iiint \frac{(\mathbf{H}_1 + \mathbf{H}_2)^2}{2} dV \quad (13)$$

であって、ゼーマン・エネルギーは

$$U_{\text{Zeeman}} = -(\mu_2 \cdot \mathbf{H}_1) \quad (14)$$

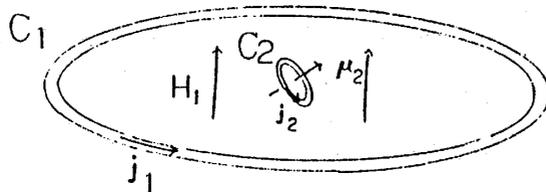


図1. 二つのリング状の超電導体 C₁, C₂ より成立する系。C₁ は大きく、C₂ は小さい。いずれも磁束 Φ_1, Φ_2 を維持し、電流 \mathbf{j}_1 と \mathbf{j}_2 が流れ、C₂ は磁気能率 μ_2 を表示し、C₁ よりの磁場 \mathbf{H}_1 の中に置かれている。

である。筆者の結論は,^{15, 16)}

$$\delta (G_1 + U_m + G_2) = \delta (-\mu_2 \cdot \mathbf{H}_1) \quad (15)$$

$$\delta G_1 = \delta G_2 = -\delta U_m = \delta (-\mu_2 \cdot \mathbf{H}_1) \quad (16)$$

である。（特にRef. 16)の Appendix B）ここに、 G_1, G_2 は、 C_1, C_2 の持つ磁気的でないエネルギー、この場合は、超電導電子の運動エネルギーなどであって、 $\delta G_1, \delta G_2$ は、 C_1 と C_2 の相互位置関係に変化があったとき、電磁誘導によって誘起される G_1 と G_2 の変分を示すものである。

現在の量子物理学は、Q. E. D.を含めて、 δG_1 と δU_m を完全に無視している。

$$\delta (G_1 + U_m) = 0 \quad (17)$$

が厳密に成立するから,^{15, 16)}この欠陥は従来の量子物理学の範囲内の物理量の計算精度には影響しないけれども、この理論の枠組みを物質の物理学にまで、連続的に延長することは明らかに不可能である。卑近な例として、その物理学の枠組みの中には、変圧器の動作原理が欠除するのである。更に新体系物理学の発展によって明らかにされたことは、この過去の理論の欠陥が、磁場中にある多数箇の荷電粒子の熱統計力学の結果に関して、重大な誤解を発生させていたという事実である。（対象とした過った取り扱いは、上記の系が、全く磁化しないとするヴァン・リューエンの取り扱いや、極く僅かに磁化するとするランダウの反磁性である。）¹⁷⁾

§ 5. マイスナー効果の古典電磁熱統計力学的導出

多数箇の荷電粒子に磁場を付加した場合に新体系物理学の熱統計力学によって出された結論は劇的なものとなった。すなわち、もし、体系が理想化されて、永久電流を維持できるものであるならば、それは古典電磁熱力学によって、超電導体の示すマイスナー効果と全く同様に、完全反磁性を示すと帰結するのである。従って、超電導体は、完全導体、即ち永久電流を維持できる固体になる点に関して、量子物理学が必要であるが、一旦、完全導体になると、マイスナー効果（Meissner-Ochsenfeld Effect）は、その古典的な当然の属性であるということになる。

新体系物理学が、以上のことを結論した論理体系は尨大なものであって、^{16, 17, 15)}それを良く判るようにこの小稿に提示することは不可能である。従って、極く簡単に、以上の新しい物理学体系の側面を描写してみることにする。

先づ、これらの努力を通じて、新体系物理学の基本的な骨格を構成する、古典物理学と量子物理学の統合という考え方の発生が指摘される。基礎となった考えは、「古典物理学も量子物

理学も、いずれも自然界に存在する同一の物理的対象の異なる二つの側面であると共に、場合により、 10^{-8} 、あるいはそれ以上という、非常な精度を保持している。こうした事実は、その二つの物理学体系の間に、非常に一般的で、かつ厳密な、従って数学的に表現できる接続関係がなければ、起り得ない筈である。」ということである。

さて、提案され、確立された接続関係は次の通りである。すなわち、「 c -数方程式として表現された古典物理学の方程式は、その式を q -数方程式と読み直し、それらの方程式の演算対象である量子物理学の状態関数を加えて考えることにより、直接的かつ厳密に量子物理学の方程式に移行する。」ということである。^{18,16)} ここで、 c -はclassical, 古典物理学的ということであって、 c -数方程式とは通常の数方程式を意味し、 q -はquantal, 量子物理学的ということであって、 q -数方程式とは、通常量子物理学に現れるのと同様な、演算子(オペレーター)としての方程式を意味するものである。従来の枠組みとの大きい相異は、ハミルトニアン方程式に限定されず、ラグランジアン方程式も又上記の適用範囲内にあることが明らかにされた点である。¹⁹⁾ 更に、ラグランジアン方程式は、古典物理学で最も多用される方程式であるが、その方が、ハミルトニアン方程式よりも、より基礎的な方程式であることが主張される。ハミルトニアン q -数方程式は従来の量子物理学で多用されたものであるが、それは一般的に言って、小さい系、即ち、素粒子、原子、分子のような、その内部での電磁シグナルの伝達速度を無視することが可能である体系に対して、非常に有効な手段であるに過ぎないと考える。ハミルトニアン量子物理学は、時間変化が $e^{-iEt/\hbar}$ と言った風に容易に分離され、定常状態の概念を多用することが出来るなど、大変便利であるが、もし、系が巨視的であって、その系の中を電磁シグナルが伝達される時間が無視されない状況になると、その効力は減殺され、場合により、全く過まった結論を導く場合すらあると帰結されたのである。

ハミルトニアン物理学と、ラグランジアン物理学の相異は、最も劇的にマイスナー効果の場合に現れる。¹⁶⁾ 図1に於て、もし、 C_2 の位置に、球状の超電導体を置いたものと考え、 C_2 中の超電導電子は、 C_1 よりの磁場 H_1 の中で、反磁性のサイクロトロン軌道運動を開始する。^{*} この運動は、その運動の発生した時点で、少なくとも、その局所内の磁場 H の値を下げ、磁場の持つ磁気エネルギーを下げる点で、古典力学に於ける運動とポテンシャル・エネルギーの関係に類似したものになっている。ところが、この電子の集団としての反磁性的な運動の発生を示

* この際、ヴァン・リューエンの言うような、 C_2 の境界面近くを、境界と衝突を繰返しながら、常磁性的に運動する電子は、100 eVと言った高い磁気エネルギーを必要とし、熱統計力学的に存在しないと結論される。しかし、その納得の行く説明は、本稿では行わない。その点に興味のある読者は、文献16) 17)を詳読されたい。

す電磁シグナルが、 C_1 に到達すると、 C_1 は超電導体の電磁特性に従って、 C_1 内の全磁束 Φ_1 を一定に保つように、応答することになる。その結果 \mathbf{j}_1 は「電磁誘導」により、増大し、 Φ_1 は一定に保たれ、そして、驚くべきことに、磁場の持つ磁気エネルギー U_m は逆に増大する。これは、まさに、最初磁場の中で、超電導電子が、反磁性運動を開始した際に予定された方向と、丁度逆になって了うのである。もちろんこの結果は、電磁シグナルが、 C_2 と C_1 を往復する時間だけ、遅延して発生する。

新体系物理学は、ラグランジアン量子物理学の根拠に立って、この機微なマイスナー効果発生機構を嚴重に追跡し、とくに、反磁性的な電子の集団運動が、最初に発生するか否かに関して、新しい熱力学の原理、“遷移エネルギーの原理”を提案して、以上の経過が、従来の熱力学の考え方の自然な延長の上に成立することを、疑問の余地のない姿で、示したと考える。なお、“遷移エネルギーの原理” (Transient Energy Principle)は、静止状態より出発する限り、ポテンシャル・エネルギーの低い方に運動しようとする動力学的な物理学原理と、エントロピーを増大させようとする熱力学の原理が、競合する際に、不可逆過程の進行方向を決定できる熱力学の新原理であって、

$$[T. E.] + T \delta S > 0 \quad (18)$$

と表現される。ここに $[T. E.]$ は遷移エネルギーの変分であって、巨視的な運動のエネルギーや、空中を飛翔している巨視的な電磁エネルギー等がその例であり、準静的定常的に考えることの出来ることを特徴とする熱力学の配位空間 (Configuration Space)²⁰⁾の中に位置づけることの出来ない遷移状態のエネルギーを意味するものである。

ハミルトニアン物理学では、少くとも既存のハミルトニアン体系による限り、こうした機微な機構に従う物理過程を追跡することが不可能である。ハミルトニアン物理学に於て、電磁波の伝播を取扱うことの出来る手法として、ハイトラーなどの発展させた、基準モード分解の方法²¹⁾は、遅延電磁波を、その無限箇の重畳によって、表現することが、原理的には可能であっても、その遅延電磁波に熱力学的意義を与えて、不可逆性の方向を、追跡することは不可能である。又、基準モード分解の方法では、図1でいう、 C_1 よりの定常な印加磁場 \mathbf{H}_1 を、 C_2 よりの電磁誘導作用を含めた上で、体系の中に正しく位置づけることが出来ない。 \mathbf{H}_1 は単に附加定数として、基準モードの枠外に置く方法しか、従来の物理学では考えられなかったのである。

§ 6. 電子の永久電流モデル

ここまで、新体系物理学に馴れて戴くために、意識して、電子のスピン構造に触れることを

避けて、軌道運動の範囲内で話を進めて来た。しかしながら、もちろん c -数方程式としての古典物理学を完結するためには、電子自身の適切な古典モデルを得ることが、不可欠である。そのモデルは、量子物理学的実在である電子の古典物理学的側面を、最も正確に、忠実に、そして矛盾なく表示するものであることが望まれる。考究の結果、筆者が1974年に提案した電子の永久電流モデル^{22, 18)}が、この要請を満足する最善のモデルであることが明確化された。

図2に示されているように、このモデルは非常に細いリング状の永久電流であって、連続的に分布する全電符の総量は $(-e)$ であり、流速は、光速度 c である。このモデルは異常磁気能率に関し Q. E. D. の二次摂動結果までを正しく含み、波動性を除く殆んどすべての電子の特性を正確に保持しているのである。

そのリングの半径、 R ; リングの弧の断面の半径、 η ; その電気エネルギーおよび磁気エネルギー、 U_E と U_M は

$$R = 2 \left(1 + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \frac{\hbar}{mc} = 0.773185 \times 10^{-12} \text{m} \sim 0.0077 \text{ \AA} \sim 0.01 \text{ \AA} \quad (19)$$

$$\alpha = \frac{e^2}{4\pi\hbar c} = 0.0072973506 \sim \frac{1}{137}$$

$$\eta = 0.967 \times 10^{-386} \text{m} \text{ (表面電荷, 表面電流として)} \quad (20)$$

$$U_E = \frac{mc^2}{2} + \frac{e^2}{8\pi^2 R} = \frac{mc^2}{2} \left(1 + \frac{\frac{\alpha}{2\pi}}{1 + \frac{\alpha}{2\pi}} \right) = \frac{e^2}{8\pi^2 R} \left(\ln \frac{8R}{\eta} \right) \quad (21)$$

$$U_M = \frac{mc^2}{2} - \frac{e^2}{8\pi^2 R} = \frac{mc^2}{2} \left(1 - \frac{1}{1 + \frac{\alpha}{2\pi}} \right) = \frac{e^2}{8\pi^2 R} \left(\ln \frac{8R}{\eta} - 2 \right) \quad (22)$$

である。この電子モデルの持つ、 R , α , η 間の、実に微妙な、見事な関係に注目されたい。筆者は、このモデルを VR (Vortex Ring) モデルと呼ぶことにしている⁵⁾。とくに VR ではローレンツの電気力と磁気力が殆んど正確に相殺し、重力の作用を考慮して電磁的に安定と考えることが出来る。従って VR には発散の問題が存在せず、電磁的なソリトン (Soliton) と考えることが出来るのである¹²⁾。

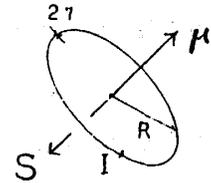


図2. 電子の永久電流モデル。角運動量ベクトル S と、磁気能率 μ の方向は逆平行である。

VR の持つ電磁角運動量と、磁気能率は、それぞれ

$$\hbar \text{ および } 2 \left(1 + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \mu_B \quad (23)$$

である。又 VR は量子化された磁束

$$\frac{2 \hbar c}{e} \quad (24)$$

を持ち、その値は、磁場を印加しても不変と予想することが出来る⁵⁾。また、量子物理学的な電子を、次のような簡単な、アンサンブル(集合; ensemble)モデルによって近似することが可能である。すなわち、z方向にスピン成分 $\hbar/2$ を持った量子状態 α を、VRの角運動量ベクトルの尖端が、その原点を中心とし \hbar の半径を持つ球の上半球に一様に分布したアンサンブルによって代表させるのである。こうすると、平均の電荷分布は球状となって、電気二重極能率のない量子物理学的電子を正しく表現し、又、その角運動量と磁気能率の z-成分は

$$\frac{\hbar}{2} \text{ および } \left(1 + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \mu_B \quad (25)$$

となって、 10^{-6} に近い精度で、実在の電子を正しく表示する。このモデルは更に同一の精度で、イオンや原子の原子核に働く、周囲の電子よりの超微細電磁場を正しく表示するのである¹⁸⁾

この VR モデルに於て、その電磁角運動量を計算する際に、自己因子、 $1/2$ 、が導入された。すなわち、巨視的な電磁気学や、自由電磁波では、その電磁運動量は

$$\frac{\mathbf{E} \times \mathbf{H}}{c} \quad \text{或は} \quad \frac{\mathbf{e} \times \mathbf{h}}{c} \quad (26)$$

であるが、VRの微視的な電磁場の持つ電磁運動量は

$$\frac{1}{2} \frac{\mathbf{e} \times \mathbf{h}}{c} \quad (27)$$

であると仮定される。この自己因子 $1/2$ は、静電磁気学のエネルギー表現の際に普通に現われるものであって、式(27)は、その単なる拡張に過ぎないが、電磁エネルギーと電磁運動量は、相対論的に四次元ベクトルを構成して居り、従ってエネルギーに現われる因子は、運動量にも現われなければならないという簡単な論理がその基底にある。しかしながら、結果としては、これが VR モデル導入に際して達成された最も重大な電磁気学概念構成上の進歩であると筆者は考えて居り¹²⁾、例えば Landau-Lifshitz や、Feynman は、こうした考え方に到達して居らず、従って VR モデルにも到達しなかったし、又電磁運動量と電磁エネルギーの出入に関して、矛盾のない電磁気学を構成することが、出来なかったのである²³⁾

この因子は、式(26)の自由電磁波には存在しないと結論される。式(26)の巨視的電磁運動量の場合には、その内容の圧倒的多数が、異なる源からの e_i と h_j の相互項より成立して居り、従って、自己因子 $1/2$ は不要になっていると結論される。¹²⁾ これらの考え方が、電磁気学における新体系確立のための必要な諸要素であって、それらによって、筆者はポアンカレ・パラドックス²²⁾ その他従来存在した電磁気学の矛盾点²³⁾ を一掃し、矛盾のない統一体系であり、かつ量子物理学との接続関係の明瞭な古典電磁気学を完成させたものとする^{12, 15, 16)}

§ 7. 電子に関する古典物理学と量子物理学の詳細な接続関係の樹立

新体系物理学では、シュレディンガー表示を量子物理学の基準に取り重視する。その理由は、系が大きくなって巨視的になったとき、この表示による状態関数(波動関数とも呼ばれる。)のみが、直接且つ連続的に古典物理学の状態に移行してゆくからである。電子の軌道運動に関しては、新体系物理学は従来の量子物理学の理解にそれ程多くのものを加えない。唯々、もし、演算子としての物理量 A が与えられると、その時間微分を示す物理量 dA/dt は

$$\left\langle \frac{dA}{dt} \right\rangle = \frac{d}{dt} \langle A \rangle \quad (28)$$

として、完全に厳密に定義され、使用することが出来ることを、明確に認識している。¹⁹⁾ $\langle A \rangle$ は、ある任意の状態についての、 A の期待値を意味するものである。この事は、これによって古典物理学のラグランジアン方程式は、そのまま直接、量子物理学の q -数方程式に移行することが保証される点に重要な意義がある。

スピン運動が関係すると、方程式の精度は、一段と高いものでなければならなくなる。§ 6 で述べた VR モデルを基礎に取り、相対論的な最小作用の原理を厳密に適用することによってスピン角運動量を持つ古典電子のすべての基礎運動方程式が、数学的に導出されることが判った。⁵⁾ この物性研究報告の論文、Ref. 5) は、電子の古典物理学に対する集大成のような形態になって居り、Covariant Action Principle の考え方、その他多くのオリジナルな考え方が導入されているので、必要な方は御一読願いたい。新体系物理学に関する他の論文と同様、ある部分は相当に省略して書かざるを得ず、VR 電子の持つ諸公式、諸性格などは結論的なものだけにしたので、疑問のある場合、お問い合わせ戴ければ、説明できよう。

さて、スピンを含めた電子の運動を記述するべく導出された式は、

$$\frac{d}{ds} \left[\left(mc^2 - \frac{1}{2} M^{\lambda\sigma} \bar{F}_{\lambda\sigma} \right) \dot{x}^\mu + \left(\frac{2}{g} + 1 \right) M^{\lambda\mu} \bar{F}_{\lambda\sigma} \dot{x}^\sigma \right] = -(-e) \dot{x}^\lambda \bar{F}_{\lambda}{}^\mu - M^{\lambda\sigma} \bar{F}_{\lambda}{}^\mu{}_{,\sigma} \quad (29)$$

が軌道運動に対するもの、又スピン運動に対しては、

$$c\dot{S}^{\mu\nu} = \ddot{x}_\lambda c S^{\lambda[\mu} \dot{x}^{\nu]} + M^{\lambda[\nu} \{\overline{\overline{F}}^{\mu]}_{\lambda} - \dot{x}_\sigma \overline{\overline{F}}^{\sigma}_{\lambda} \dot{x}^{\mu}\} + \dot{x}^{\lambda} \overline{\overline{F}}^{\mu}_{\lambda, \sigma} Q^{\sigma\nu} \quad (30)$$

である。まず四次元座標に関しては、ミンコフスキー記法を使用している。初等電磁気学の単純な延長の場合には、虚数表示（式(7)）も一つの方法であるが、式(29)、(30)のように複雑な式を扱い始め、更にディラック方程式への移行を考えて、その相対論的量子物理学に伴う、虚数 i が、関与してくることを考慮すると、相対論に関する枠組みは、ミンコフスキー記法を使用して、虚数 i を避けることは必然的であって、多くの点で、他の記法に比し格段に便利である。唯、筆者は常に両方の記法を頭の中に保持し、とくに具体的な計算には、三次元空間のベクトル表示を多用する立場を取っている⁵⁾ さて、 $\overline{\overline{x}}^\mu$ はVRの中心の座標である。 $S^{\mu\nu}$ はスピン角運動量の四次元テンソルであって、

$$M^{\mu\nu} = \frac{g e}{2 m c} S^{\mu\nu} \quad (g < 0) \quad (31)$$

は、スピン磁気能率テンソルである。 $\overline{\overline{F}}_{\lambda\sigma}$ の上の二重線はVRのリングに関して、平均を取ることを意味しており、 F は通常の電磁場テンソルである。式(29)を、外場 $F^{\mu\nu}$ ではなく、その電磁ポテンシャル表現 $A^{\nu, \mu}$ などによって、表現することも可能であって、その場合に左辺を全運動量として示すことも出来るが、式(29)では移項して、卑近なローレンツ力の現われる形式にしている。 $A^{\nu, \mu}$ は $\partial A^\nu / \partial x_\mu$ の意味である。又式(30)で $S^{\lambda[\mu} \dot{x}^{\nu]} = S^{\lambda\mu} \dot{x}^\nu - S^{\lambda\nu} \dot{x}^\mu$ である。 $\dot{S} = dS/ds$, $s = c\tau$ で、 τ は固有時間である。もちろんVRであるから

$$g = -2 \left(1 + \frac{\alpha}{2\pi} \right), \quad \frac{\alpha}{2\pi} = 0.001161 \quad (32)$$

であって、電子の全運動方程式を、第一原理から初めて古典的に導出したのである²⁴⁾

式(29)の右辺の第一項はローレンツ力、第二項は電磁能率（磁気能率と相対論的に誘起された電気二重極能率）に働く、ローレンツ力の高次項であって新らしくはない、左辺の最終項は、式(31)、(32)によって

$$\frac{e}{m c} \left(1 + \frac{g}{2} \right) S^{\lambda\mu} \overline{\overline{F}}_{\lambda\sigma} \dot{x}^\sigma = - \frac{e}{m c} \frac{\alpha}{2\pi} S^{\lambda\mu} \overline{\overline{F}}_{\lambda\sigma} \dot{x}^\sigma \quad (33)$$

であって、異常運動量（Anomalous Momentum）と言ってよい形を持って居り、スピン軌道相互作用よりの、運動量に対する反作用寄与を示すものである。

式(30)については、一番最後の項が新しい項であって、非一様な電場、たとえば回転する電場は、VRに電氣的にトルクを及ぼし、スピンの摂動運動に効くことを示している。他の既知の項²⁵⁾ に比して、大きくはないが、無限小と考えた従来の電子には存在できない項である。

さて、これらの式の q -数化であるが、式(29),(30)の形をそのまま保持して、 q -数化することは困難である。それは相対論の世界では、トーマス摂動や、スピン-軌道相互作用に代表されるように、軌道運動とスピン運動が、本質的に相関する。従って、極めて嚴重な相対論的無矛盾性の枠組みを予め用意しないで居て、先づ q -数化して、その後で、これらの条件を入れると言った形式で相対論の要請を入れることは困難に思える。従って、ディラックの開発した γ -マトリックスを使用した q -数化の手法を踏襲し、 $g \approx -2$ の因子をそれに加えることによって、 q -数化をまず行う。

この場合、ディラックに従って、4つの成分のシュレディンガーの波動関数 $\phi_{(1)}, \phi_{(2)}, \phi_{(3)}, \phi_{(4)}$ を考え、

$$\sigma^{\mu\nu} = \frac{2}{\hbar} S^{\mu\nu} = \frac{\gamma^\mu \gamma^\nu - \gamma^\nu \gamma^\mu}{2i} \quad (34)$$

を、スピン発生子 (Spin generator) として使用することになる*。その結果

$$g = -2 \left(1 + \frac{\alpha}{2\pi} \right) \quad (35)$$

の相対論的電子の波動方程式が容易に得られる²⁶⁾。その方程式に、FWT変換 (Foldy-Wouthuysen-Tani Transformation)^{27, 28)}を加えると、 $(V/c)^n$ に対するテイラー展開の形式となり、非相対論的近似と称せられて、ダーウィン項 (Darwin term) や、スピン-軌道相互作用項などが、当初の四成分波動関数に関する表示と異なり、パウリの二行二列のスピン・マトリックスを使用した、パウリ近似のハミルトニアンに分離され、波動関数はその電子に対して二成分となり、通常の実験結果と合せられるハミルトニアン表示が得られることは、良く知られている²⁷⁾。従って、整理のため、新しい方程式に FWT 変換を施して見ると、† 式(35)の異常磁気能率因子の添加に伴う、この近似での変形は極く僅少であって、顕著な結果として、ダーウィン項と、スピン-軌道相互作用項には、いづれも

$$\left(1 + \frac{\alpha}{\pi} \right) \quad (36)$$

の因子が附加される。これは、ダーウィン項の場合には電子の大きさが、 $g = -2$ の場合に比

* 群論および相対論に関する数学的無矛盾性に関しては、一部に、江口徹氏、西島和彦氏等からの寄与、討議がある。ただし、両氏は本文を承知して居られないし、責任は全くない。

† 研究の順序は逆であって、 $(\alpha/2\pi)$ 項の添加と共に多数の未知の項が現われるが、その物理的意義と、添加方法の正当性を保証するため、FWT変換が行われて常に検討されたのである。

し、式(19)に従って、 $(1 + \alpha/2\pi)$ 倍となり、その二乗が掛るため

$$\left(1 + \frac{\alpha}{2\pi}\right)^2 = 1 + \frac{\alpha}{\pi} \left[+ \left(\frac{\alpha}{2\pi}\right)^2 \right] \quad (37)$$

と理解され、スピン-軌道相互作用の場合には、トーマス摂動効果の引き算があり、

$$2 \left(1 + \frac{\alpha}{2\pi}\right) - 1 = 1 + \frac{\alpha}{\pi} \quad (38)$$

と理解されて、物理的に当然と結論される。

なお文献5)の §5 では、VRモデルのスピン-軌道相互作用と量子化電子との関係を長々と論じたが、式(30)には、 $S^{\mu\nu}$ が、その軌道運動速度 V との相対的位置関係で、ローレンツ短縮が変動することに伴う幾何学的な数値変動があり、相対論的方程式の特徴として、この効果が、一種のトルク項の存在として式に現われ、従って、実質に帰因しないリップル・トルクを形成することの認識が不十分であったため、多少冗長な記述になっている。この点は近く英文報告で訂正する心算であることをお断りする。

新らしい電子の相対論的方程式は、電子の磁気能率に関して 10^{-6} に近い精度を既に持っている。Q. E. D. の複雑な“くりこみ理論”の操作の枠組みを理解することなく、この精度を持つことは物質の物理学に取っては非常な福音である。上記方程式はラム・シフト(Lamb Shift)に関しても、観測値の8%程度の値を与え、水素原子の $2S^{1/2}$ と $2P^{1/2}$ のレベルは、この段階で既に縮退が解ける。VRモデルの立場に立ち、式(25)の附近で述べたアンサンブル近似の単純な立場に立つと、そのダーウィン項は*、ディラック式のダーウィン項の5.3倍となり、逆に100倍のラム・シフトを与える。しかし、全く古典的に考えたとき、VRが、ある一定エネルギーの状態、原子核に近づくと、当然、その円弧の部分は、原子核からの龍大な電場に、より強く吸引されて、より原子核に近づくとであろう。従って、式(25)のアンサンブルは、こうした場合正しい平均値でなくなることが予想される。簡単なオーダー計算は、この種の考慮を行ったクーロン・エネルギーの平均値計算が、丁度ラム・シフトの桁を与えることを推定させる。もちろん、量子化された電磁場の零点振動効果も正しく計算に入れる必要がある。これらは今後の新体系物理学の課題である。たとえば全く古典的に式(29)、(30)を解いたとき、そのエネルギー表示の中で、ダーウィン項相当項の平均値はどうなるであろうか。とくに水素原子の $2S^{1/2}$ の場合の値はどのようになるかは、興味のあるところであり、後述の新理論体系の開発により、数学的支持の得られる状況が発生している。もちろん、Q. E. D.

* ダーウィン項が、ラム・シフトに重要なことは良く知られている。

が、 10^{-8} といった詳しい計算と、非常な精度での実験との一致が得られている現状のもとで、今さら、この種の計算に意義を見出すことは出来ないとお考えになることも個人の自由である。筆者の立場は、新体系物理学が、少なくとも、物質の物理学に対してより見通しのよい枠組みを提供しつつあるとするものであって、その立場の適用限界を知りたいのである。なお、電子計算科学の発達した今日、上記課題の解答を得るための原理的困難は全くない。

点と考えた従来の電子の古典像と異なり、 10^{-2} Å程度の拡がりを考える新体系物理学の立場は、ディラック方程式の解釈に関しても、いくつかの相異を産むことになる。ディラックの方程式は、そのままでは、二行二列のパウリのスピン・マトリックスを使用した、パウリ近似のハミルトニアンに接続せず、FWT変換²⁸⁾を加えて、初めて、パウリ近似のディラック・ハミルトニアンになるのであるが、その際、坐標 \mathbf{r} 、従って、電磁ポテンシャル $\{\mathbf{A}(\mathbf{r}, t), \phi(\mathbf{r}, t)\}$ などが、すべて、位置坐標に関し、 \hbar/mc の程度離れた場所での値の平均値を取ることになることが、良く知られている。^{28, 29)} この事実は新体系物理学では、VRが有限の大きさを持つ結果、実際に作用する電磁場は、その中心での値ではなく、 $|g| \hbar/mc$ の程度、離れた位置の値の平均値であるという、式(29)、(30)の平均値記号 $\overline{F}_{\lambda\sigma}$ と、まさしく対応する事実と解釈される。従って古典物理学と量子物理学の接続関係は、この状況を加えた形式で理解されることになる。Zitterbewegung の考え方と、本質に於て異なることも当然である。もともとVRを構成する連続電荷は、光速度 c で運動して居り、相対論の特徴として、光速度 c で動く実体は、その実体を担っている本体が、如何に運動しようとも、その速度 c を変えることは出来ない。この事実と、ディラック電子の特徴とは、良く対応しているように思われる。新体系物理学の立場で、ディラックの原初の方程式は、 $\alpha/2\pi \sim 10^{-3}$ だけ、磁気能率の値が異なり、その点で完全ではないけれども、 $g = -2$ と近似する限りで、相対論的量子物理学的実在としての電子の特徴を、かなりの程度に忠実に表現する、神の与えてくれた、良い数学体系であると言える。たゞし、完全ということは新体系物理学の立場では常にあり得ないので、例えば水素原子の観測されたスペクトル線の数値の絶対値の全体と、ディラック式の与える数値との対応関係などに就いて、要領のよい解説書が、あれば、御知らせ戴ければ幸いである。

§ 8. 電子場の概念の明確化

新体系物理学では、シュレディンガー表示の状態関数は、それがその系に関する最大の情報を表示しているものと見做し、その際、実在的な物質波、すなわち、電子そのものを示す“電子場”(Electron Field)と、統計確率的な、あるいは、数学的に手段として導入された仮想波とが、本質的に融合し、不可分になっていると考える。¹⁹⁾ 過去において、ボルンの解釈、即ち

電子を点と考え、 $\psi^*(\mathbf{r}, t) \psi(\mathbf{r}, t)$ が、電子の存在確率を示すから、従って $\psi(\mathbf{r}, t)$ は、その確率振巾の意義を持つという考え方が、強調され過ぎたように判断する。電子は大きさの殆んどない点であるという考え方は、一種の迷信であって、³⁰⁾ α -粒子などと異なり、そのコンプトン波長 \hbar/mc は $3.8 \times 10^{-13} \text{m}$ であり、式(19)の半径を持つ、VRモデルが成立するのであるから、新体系物理学では、“電子場”をむしろ、電子そのものを示す状況に近いと考える。何故なら、新物理学の量子物理学的世界には、電子に対して、それ以外に客観的に考えることのできる存在がないからである。（しかし、もちろん位相に関しても重畳を認めねばならない。）

もし、電子場が、ハイゼンベルグの不確定性原理で許される最小の領域の中に集中している場合には、この電子場は物理的実在に十分近いと考えるべきである。従って、原子やイオンは、丁度この例であり、その形を、電子場の形によって判断しても差支えないと考える。さらに、量子化された輻射場を使う、従来の量子物理学の計算によって既に十分に立証される事であるが、原子、イオン、分子等が、電磁輻射（光子）を放射したり、吸収したりしている場合には、電子場は、まさしく、これらの電磁波の放射・吸収を、古典的なマクスウェル・ローレンツ方程式としても、行なうように、その形状を時間的に変動させているのである。

この事を最も簡単に示すのは時間依存性の摂動計算であって、水素原子の波動関数 $\psi(\mathbf{r}, t)$ を

$$\bar{\psi}(\mathbf{r}, t) = \sum_{\ell} c_{\ell}(t) u_{\ell}(\mathbf{r}) e^{-iE_{\ell}t/\hbar} \quad (39)$$

と展開し、 $c_A(0) = 1$, $c_{\ell}(0) = 0$ ($\ell \neq A$), であって、 $t > 0$ で、 $c_B(t) \propto b_B t$ として、状態Aより、状態Bへの遷移が起っているものとする、

$$\psi(\mathbf{r}, t) = (1 - i b_A t) u_A(\mathbf{r}) e^{-iE_A t/\hbar} + b_B t u_B(\mathbf{r}) e^{-iE_B t/\hbar} \quad (40)$$

$$\begin{aligned} \psi^*(\mathbf{r}, t) \psi(\mathbf{r}, t) &= u_A^*(\mathbf{r}) u_A(\mathbf{r}) \\ &+ \{ \cos \omega t [b_B u_A^*(\mathbf{r}) u_B(\mathbf{r}) + b_B^* u_A(\mathbf{r}) u_B^*(\mathbf{r})] \\ &+ \sin \omega t i [b_B u_A^*(\mathbf{r}) u_B(\mathbf{r}) - b_B^* u_A(\mathbf{r}) u_B^*(\mathbf{r})] \} t \end{aligned} \quad (41)$$

となり、A状態の電子場に加えて、AとBの電子場の重畳している部分に、 $\omega = (E_A - E_B)/\hbar$ で振動する電子場が、時間に比例して増大する。

また逆に、電子と原子核より成立する多体系に関して、そのマクスウェル・ローレンツの電磁気学方程式より出発して、その体系のパウリ近似のディラック・ハミルトニアンを導出することが、可能である。^{15,16)} この際、スピン磁気能率や、軌道運動に伴う磁場など、磁性の関係し

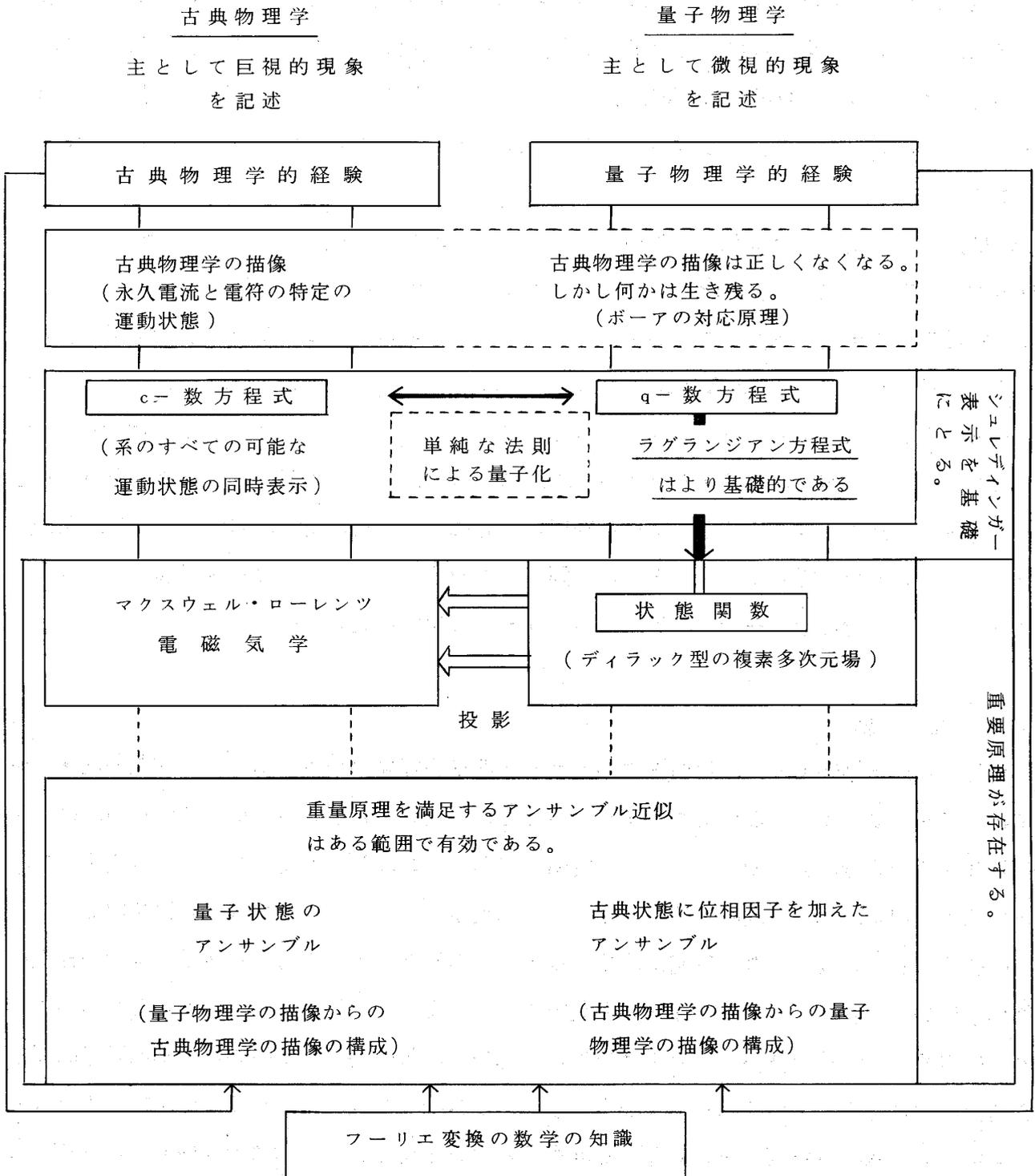
たエネルギー項は、電磁エネルギーだけでは、全体系のエネルギー表示として不十分であって、丁度 § 4 でゼーマン・エネルギーの解明の際に使ったものと同じの論理を適用して、そのエネルギー項の符号や、係数を整理することが要求される事は当然である。 γ -マトリックスを使用したディラックの枠組みは、こうしたことが、自動的にその数学体系の中に含まれる誠に巧妙な状況にあったとも言えるのである。

新体系物理学は、更に電子坐標の交換に関して、反対称性を要求するパウリの原理も、古典的に解釈できることを示す。簡単のため二電子で考え、二つの VR が、コンプトン波長 \hbar/mc の距離に近接する場合を考えると、その間の磁氣的相互作用のエネルギーは尨大となり、クーロンの電氣的相互作用と同一の桁になる。しかも電氣的相互作用と異なり、その符号が、二つの VR の相互位置関係によって、正負に変化する。従って、この磁氣的相互作用項を、シュレディンガー方程式のハミルトニアンに加え、更に、軌道運動を記述する二電子問題の波動関数は、二つの電子が近接した場合にも、数学的に異常な特異点を形成してはならないと要請すると、パウリの原理が、必要になる。簡単に言うと、二つの VR のスピン角運動量が反平行であれば、全角運動量零を変えないで、相互に回転できるから、どの方向から近接した場合も磁気エネルギーの変動零の相互位置関係を維持することが出来る。ところが、もし、スピンの平行であると、全角運動量を変えないで、相互に回転することが出来ないから、近づく方向に依存して、正負の尨大な磁気エネルギーが現れる。従って、シュレディンガー方程式を、特異性のない軌道運動波動関数によって成立させるためには、この場合二つの電子の近接する可能性を消さねばならず、これは反対称の軌道関数によって、達成できる。他方、電子坐標の交換に伴う、波動関数の変形と、縮退に関する一般論によって、縮退していないエネルギーの固有状態は、電子坐標の交換に対して、対称、もしくは反対称のいずれかであり、両者を共有することは出来ないから、数学的並びに物理学的に、電子に関して、成立可能な電子場関数は、全体として反対称なものが結論されて了うのである。³²⁾

§ 9. 新体系物理学の見る、多重構造を持つ物理学的世界の全体像

ダイアグラム 1 に、新体系物理学の見る物理学の全体像が示される。ここでマクスウェル・ローレンツの電磁気学は、量子物理学の状態関数の c -数的側面の一つになっている。従って、マクスウェル・ローレンツの電磁気学には重畳原理が適用できる。又、摩擦などによるエネルギーの散逸は、巨視的なエネルギーの、微視的なエネルギーへの移動である。マクスウェル・ローレンツの世界には、それ以下の超微視的な世界がない。従って、マクスウェル・ローレンツの世界は、摩擦のない世界である。この点は、機構を特定できない種類のエネルギーの散逸

ダイアグラム 1. 新体系物理学の見る
物理学的世界の多重構造



c: 古典物理学的, q: 量子物理学的

が、常に存在している巨視的な世界とは、大変に異なっているところである。新体系物理学にとって、われわれの通常経験の巨視的世界の下部構造に、このような、ある意味で理想的な微視的世界が存在しているという事実の認識は、本質的に重要であって、しかも、ある場合には、この微視的世界の特徴的な性格が、巨視的にも現れて来る。例えば、超電導体で造られた電流回路は、その中に磁束を保持して、電流が永久に流れる状況になるし、又、光量子は、適切な設備を設けた場合、原理的にはその運動量とエネルギーを変えないで、一秒間に地球を7回半廻ることが可能である。少くとも星から来る光は、そうした性格のものであると考えられるのである。

本解説では言及に止めるが、古典物理学の代数方程式のみならず、その代数的解が、その初期条件を指定する q_r, p_r 変数を、 q -数、すなわち、オペレーターと見做すことによって、量子物理学の表示式と見做すことが可能である。その代表的な例は、単振子や輻射場の量子化に際して見られる Creation-Annihilation Operators a, a^\dagger であって、ハミルトニアンは、これら新しい演算子によって簡潔になると共に、各 a_k, a_k^\dagger には、それに附随する古典的なモードという明確な物理像が与えられる。第二量子化は、古典解モードの量子物理学的意義を明確化した枠組みであると、新体系物理学は見做す。従来の記述は明確にこうした立場に立っていないので、従って、モードと位相因子との関連などに関して曖昧さが残っている^{31,2)}。これら新しい物理学の詳細は、近く予定される英文報告に発表される。

§ 10. 結 語

最後に、新体系物理学は、物質を中心とする物理学的経験の記述に関して、古典物理学と量子物理学を、疑いようのない形で、統合することに成功したと言える。従ってわれわれは、今後物理学的な観測結果の記述、もしくは説明に対して、われわれの持っている、古典物理学的及び量子物理学的知識を同時に使用することが出来る^{16,17,5,33)}。二つの物理学の接続関係の詳細を明確化すること自身、既に豊富な成果の期待できる研究対象である⁵⁾。新体系物理学の提案は、物理学に於ける新しい鉤脈の露頭の発見であって、幾多の応用が望見される。それらの中には、巨視的に非均一な体系、たとえば超高速計算用の固体回路素子や微妙な生物物理学的機能を持つ、生体器官などが含まれ、又一方、多分、微視的な対象、たとえば、原子核のような基本微粒子の理解と解析も、その対象になり得るものと予想される。物質の究極要素に存在する永久電流の概念や、量子化された磁束の存在なども今後検討されるべき事項であろう。 c -数、 q -数の対応関係も、一つの解析の道しるべになることは既に述べて来た通りである。

量子物理学の建設に際して、ボーアとアインシュタインの間で、有名な論争 (dialog)³⁾ の

表 1. 新体系物理学の導入した物理学概念の変革

旧 概 念	新 ら し い 概 念
<p>電子の古典像は 10^{-16} m 以下の大きさの点で、多くの実験で支持される。</p>	<p>電子が点であると古典的に証明する実験はない。電子の最善の古典像はそのコンプトン波長 $g \hbar/mc \sim 10^{-2}$ Å 程度の大きさの永久電流であって、理論的並びに実験的に支持される。</p>
<p>シュレディンガー表示、ハイゼンベルグ表示、その他多様な表示が物理学的に等価である。</p>	<p>電子の軌道状態に関しては、シュレディンガー表示の状態関数のみが、系の巨視的になったとき、直接連続的に古典物理学の状態に移行する。従って、基準となる表示と見做す。</p>
<p>ハミルトニアン量子物理学は、物質の物理学に絶対的に重要である。</p>	<p>ハミルトニアン量子物理学は、微小な系に対しては数学的に便利である。しかしラグランジアン量子物理学はより基礎的であって、とくに電磁場の遅延効果を考慮する必要のある場合、ラグランジアン物理学が優位に立つ。</p>
<p>量子電磁力学 (Q. E. D.) は物理現象を 10^{-10} といった精度で記述できる最も基本的な唯一の理論的枠組みである。</p>	<p>量子電磁力学は単純な物理系に対して高精度の近似方法である。しかし電磁誘導によるエネルギーの移動と磁気エネルギーの役割りが不明瞭となり、異常磁気能率を得るため極めて複雑なくりこみ理論が必要である。新体系物理学は、上記の欠点を持たず古典物理学と厳密に接続する今一つの便宜な近似方法である。</p>
<p>電磁場 \mathbf{E}, \mathbf{H} は実在であるが、電磁ポテンシャル $\{\mathbf{A}, \underline{i}\phi\}$ にはゲージの自由度があり実在ではない。</p>	<p>ローレンツ・ゲージの電磁ポテンシャル $\{\mathbf{A}, \underline{i}\phi\}$ を、客観的実在と考えることにより、無矛盾で、単純で便利な物理学が形成できる。従って、新体系物理学では、$\{\mathbf{A}, (\mathbf{r}, t), \underline{i}\phi(\mathbf{r}, t)\}$ は (\mathbf{E}, \mathbf{H}) と同程度に客観的実在と見做される。</p>

飯田修一

あったことが、想起される。新体系物理学の提案はボーアとハイゼンベルグの立場を幾分下げ、アインシュタインとシュレディンガーの立場を、少くとも、それ以前より、かなり優位にしたと言えるのではなからうか。

最後に表 1 に、新体系物理学の導入した概念の変革の代表例を示す。

謝 辞

新体系物理学の確立までには、多くの物理学者の人達との討議、寄与がある。これらの方々は、あるいは友人として、あるいはレフェリーとして、更に論敵として、それぞれの時点で、その心血を注ぐ物理学上の努力をされた筈であって、それらの方々に厚い謝辞を呈したい。ただし現時点ではお名前は挙げない方が適切と判断したので、御了承戴きたい。

唯御一人、米国 A. T. T. ベル研究所の Melvin Lax 博士は、容易に読破できるとは考えていない、文献 5) を、詳読されたものと推定され、昨年 11 月筆者の訪門時の講演と討議に際して、鋭い質問、とくに、§ 7 に紹介した FWT 変換²⁸⁾ と新体系物理学の基礎となる VR 電子との重要な相関を筆者にコメントされた点について、厚く感謝させて戴く。

参考文献

- 1) S. Iida: "Introduction to the New Frames in Physics", Proc. Int. Conf. on Ferrites, American Ceramic Society (1985) 5 月頃出版予定
- 2) A. Messiah: *Quantum Mechanics*, I. John Wiley & Sons, New York et al. とくに p. 29
- 3) J. A. Wheeler and W. H. Zurek: *Quantum Theory and Measurement*, Princeton Univ. Press, Princeton N. J., (1983) p. 105.
- 4) 飯田修一: 物性研究, 40 - 4 (1983) 350 - 403.
- 5) S. Iida: "Rigorous Deduction of the Dynamical Equations for the Persistent Current Electron with $g = -2(1 + \alpha/2\pi)$ ", 物性研究 43 - 1 (1984) 1 - 37.
- 6) Proc. Int. Symp. on "Foundation of Quantum Mechanics", Phys. Soc. Jpn., (1984).
- 7) 飯田修一: 日本物理教育学会誌, 29 (1981) 87 - 92.
- 8) 飯田修一: "新電磁気学", 上, 下, 丸善, (1975).
- 9) 飯田修一: 日本物理学会誌, 35 (1980) 739 - 742.
- 10) S. Iida: "Basic Concepts in the Thermodynamics of Magnetizable Materials by the Unified Consistent Frame of Physics" 未公表
- 11) 西島和彦: 相対論的量子力学, 培風館, (1973) p. 81.
- 12) S. Iida: "The New Frame in Electromagnetism", 物性研究 42 - 6 (1984) 719 - 738.

- 13) C. Kittel: *Introduction to Solid State Physics*, 4th Ed. John Wiley and Sons, Inc., New York et al. (1971) p. 729
- 14) 飯田修一：物性研究 **32** (1979) 16 – 18.
- 15) S. Iida: “Energy Transfer by Induction and Classical Derivation of the Dirac Hamiltonian in Pauli’s Approximation” 未公表
- 16) S. Iida: “New Frame in Physics, New Thermodynamic Principles, and Classical Derivation of the Meissner–Ochsenfeld Effect”, 物性研究 **40** – 5 (1983) 435 – 473.
- 17) 飯田修一：“新体系物理学が，電子の軌道運動とその反磁性の理解に与えた進歩の内容に就いて”，物性研究 **42** – 2 (1984) 160 – 203.
- 18) S. Iida: “New Frame in Physics and its Application to the Hyperfine Fields in Ferrites”, Proc. 3rd Int. Conf. on Ferrites, Ctr. Acad. Pub. Jpn, Univ. Tokyo (1981) p.p. 141–145.
- 19) Ref. 16), § 5.
- 20) H. B. Callen: *Thermodynamics*, John Willey & Sons Inc., Chap. 5.
- 21) Ref. 11), 2–1.
- 22) S. Iida: J. Phys. Soc. Jpn., **37** (1974) 1183–1190.
- 23) R. P. Feynman, R. B. Leighton, M. Sands: *The Feynman Lectures on Physics*, II, Addison-Wesley Co., (1964), Sec. 28.
- 24) A. O. Barut: *Electrodynamics and Classical Theory of Fields and Particles*, The MacMillan Co., New York et al., (1964) p. 77. この本に示されている運動方程式と筆者の式とはかなり類似している。しかし，この本の理論内容を厳密に理解することは不可能である。
- 25) V. Bergmann, L. Michel and V. L. Telegdi: Phys. Rev. Lett. **2** (1959) 435.
- 26) 飯田修一：“新体系物理学の立場で導出された電子の運動方程式の q – 数化とディラック方程式”，日本物理学会年会予稿集，31aD1 – 10 (1985)。
- 27) Ref. 2), Chap. XX § 33.
- 28) L. L. Foldy and S. A. Wouthuysen: Phys. Rev. **78** (1950) 29–36.
- 29) Ref. 2), p.p. 943–945, 947–948.
- 30) Ref. 16), Appendix A.
- 31) J. J. Sakurai, *Advanced Quantum Mechanics*, Addison-Wesley Pub. Co., Reading, Mass. et al., (1973) Chap. 2.
- 32) S. Iida: “Derivation of the Pauli Principle for Electrons by the New Consistent Frame of Physics”, 未公表
- 33) 飯田修一：新体系物理学による任意磁場分布下での Stern-Gerlach 実験の厳密解析”，日本物理学会年会予稿集 **3** (1984) 125.