

量子論・古典論の統一はできるか
第 II 部 1 時点 1 方向確定の理論 [序章]

松原邦彦

2020 年 1 月 19 日

目次

第 II 部 1 時点 1 方向確定の理論	2
第 1 章 序章	3
1.1 点発散と時空構造	3
1.2 質量、電荷、スピンの起源と時空構造	5
1.3 量子力学における観測問題	7
1.4 時空構造の概念の変更	10
参考文献	12

第 II 部

1 時点 1 方向確定の理論

第 1 章

序章

1.1 点発散と時空構造

現在、我々が物質の基本粒子として、素粒子について抱いているイメージは点粒子である。この原点はニュートン力学の質点というイメージであり、古典力学では質点が集まって物質ができていると考えれば十分であった。相対論を考慮しなくても良い場合には、素粒子のモデルとして、例えば球形の剛体などをイメージして質点の集まりと考えて取り扱っても、特別な困難は発生しなかった。しかし特殊相対論を取り入れるようになると、有限の広がりを持つ剛体などを考えても、剛体内部での 2 質点間で相互作用があれば、どんなに微少な距離であっても光速で、つまり有限の時間をかけて作用が伝播すると考えなければならず、さらに基本粒子に分けることが要求されてくる。そこで相対論的量子力学で理論を構築する素粒子論では点粒子を基本として取り扱われてきた。

このような素粒子の自己を含めた相互作用の計算には固有の点発散の困難が伴っている。相互作用の結果、受け取るエネルギーからその粒子の質量などを摂動論に基づき計算すると高次の補正項で積分が無限大となってしまう、無意味な計算結果を与えてしまう。これは紫外発散または紫外異変と呼ばれ、点粒子の近傍で無限に小さい波長の波動場が存在することが原因になっている。そこで現れたのはいわゆる「くりこみ理論」であった。計算に現れる無限大の振動エネルギーを素粒子の質量に繰り込んで集約し、これを質量の実験値で置き換える手法である。その後ゲージ場理論の展開を経て弱い力の相互作用および強い力の相互作用にも応用が可能となり [1]、この手法を用いた計算は極めて高い精度で実験値を予言した。現在では、くりこみ可能であることが、理論の真偽のほどを判別する手段にもなっている [2]。

このくりこみ理論は場の量子論の発散の困難を基本的に解決したとはみなされておらず、便宜的な数学的手段の域を出るものではないことは物理学者によく認識されている。くりこみ理論はどこかで物理的事実を反映しているであろうが、我々はその必然性を明らかにする指導原理をまだ把握していない。この状況はファインマン [3] をして「不完全なのは真に量子力学なのか、粒子内の電荷分布に対する仮定なのか分からない。これらの粒子とその間の相互作用に対するもっと完全な理論が得られたとき、現在の量子電気力学の限界が明らかとなろう」と言わしめている。本来、基本粒子の引き起こす事象において無限大という物理量が存在すること自体あり得ないことであるから、理論のどこかで有限の値になる機構がなければならない。しかし従来の相対論的量子場の理論はそれを必然の結果として導くような原理機構をもっていないのである。

これらを踏まえて、いくつかの新しい原理の導入が試みられてきた。発散の困難は、素粒子が大きさを持たない点であることから生じてくることに着目して、素粒子に広がりを与えることによって発散の困難を

乗り越えようとする理論が1950年代から1970年代初めにかけて多く現れた[4]。これらの主なものは、剛体・弾性体模型、非局所場理論などである。しかしいずれもミクロの世界で相対論的因果律との衝突は避けられず、20年以上も模索の時代が続いた。湯川[5]は素粒子自体でなく時空間そのものに、無限に分割できない原子性の考えを導入して「素領域の理論」を唱えた。しかしこの場合もミクロの世界で相対論的な因果律との衝突は避けられず、理論展開には多くの困難が存在した。結局、4次元時空の不連続化の必要性を説きながらも、これを論ずるのはなお時期尚早とみなすことで終わっている。

次に現れたのは1次元ひも模型[4]である。この理論は1969年頃、素粒子の多様性を説明しようとして提案されたもので、必ずしも紫外発散を回避することを目指したものではなかったが、発散の問題を解決できるかもしれないとの期待があった。ひも理論におけるひもとは我々の日常生活で経験するひもからイメージするものとはかなりかけ離れており、粒子または質点が連なったものではなく、電磁気のような空間分布する場の連なったものでもない。ただ実体として存在するものといえば、エネルギーまたは質量そのものであって、どのような物質からできているか不明確である。量子論によれば、エネルギーは振動数と結びついて表される。素粒子の散乱衝突実験によって示されるある粒子の発生を量子論によって理解するならば、量子的振動状態にある素粒子が衝突により特定周波数で共鳴を引き起こし、特定の粒子を発生させる、ということになる。このことから、その振動を受けもつものをひものようなものとイメージしているのである。従来の点粒子と考えられていたものはひもの端部に相当するとして、点粒子を単独では取り出せず、切断すると端部が対で発生し、単体のクォークを取り出せない機構に相当するとした。

実際、ひものイメージのまま様々な相互作用を考慮に入れてゆくと、実に奇妙なひもの実態が明らかになってくる。ひもの4次元時空での振舞いを考えると世界線ではなく世界面が形成される。この世界面上で相対論的要請を満たし、しかも負ノルムなどの非物理的状態を除去するためには、時空を26次元にしなければならないことが明らかにされてくる。この理論は最初ボーズ粒子のみを対象にしていたが、1971年頃には半整数スピンのフェルミオンも取り込む試みがなされていた。しかし素粒子物理学の分野ではさらに重要なテーマに関心が移り、かくしてこの理論もまた収束の道を見失ってしまった。

1970年代を経て強い力と弱い力を組合わせて統一的に記述できる大統一理論が提起されると、1984年に超ひも理論が浮上してきた。グリーンとシュワルツ[6]はボーズ粒子とフェルミ粒子が同時に取り扱えるSO(32)と呼ばれる超対称性に従うように理論を組み立てるとアノマリー（保存則が量子効果のために敗れる異常現象）が消え、また無限大が消えることを明らかにした。これによって物理学界には2度目のひも理論のブームがわき起こり、超対称性を取り入れることから超ひも理論と呼ばれるようになった。この理論は自然界の力として重力を包含できるようになっており、ゲージ場と重力場が協同してアノマリーを消すとされている。重力場が関係することからひもの長さはプランク長程度($\sim 10^{-33}$ cm)であると考えられている。

しかしこの理論もまたいろいろな問題を抱えている。第1の課題は、この理論を展開する時空は10次元を必要としていることである。現実には我々は4次元時空の中に住んでおり、この時空のもとで実験結果を出し、理論と付き合っている。測定の手段を持たない余分な次元を表面から消去しない限り、この4次元世界での物理事象を説明する手段としては不十分である。この余分な6次元を巻き取る方法として、例えばプランク長程度に巻き取られた次元を考えるのであるが、この理論の原理としてその内部は測定できないようになっているから、それを実験によって検証するには困難がつきまとっている。ひもの長さを既に発見されている素粒子のエネルギーに対応した長さ（対応する波動の波長）からずっとかけ離れた小さなものにしてするために、現在の観測技術、実験技術の領域をはるかに超えるエネルギー領域に入り、実証不可能に陥っている。このため物理学の定説としての地位を得るには至っていない。

点発散に関しては古典論における点粒子もまた矛盾に満ちたものである。粒子衝突は粒子の広がりがあった初めて発生するが、点粒子は広がりを持たないから、それ自身では衝突しようがない。点粒子の周囲空間で相互作用をしなければならないが、その相互作用する力場の大きさは点の近傍で無限大に近づく。どのような法則で相互作用する範囲を決めるか、その解明なくしては古典的な点粒子は物理像として成立しない。また点粒子自身が持つ電荷による自己エネルギーを計算すると無限大になり、粒子の静止エネルギーが静止質量を構成すると考えると質量は無限大となり、矛盾が生ずる。筆者はこれらの困難の源は古典論における場の構成概念にあると考える。新しい理論では点発散というものがない時空構造になっていなければならない。なぜならば無限大の値を持つ局所場というものがこの世に存在しえないからである。

1.2 質量、電荷、スピンの起源と時空構造

質量という物理量は最も身近な量でありながら、その起源を究明しようとすると容易にはその姿を見せてくれない。質量の定義はニュートンによれば、「物質の密度と体積をかけて得られる物質の測度」であるとす。我々は物質の密度と体積を測定値から求める。質量は体積を持つ物質と考えられ、形を持たない物体についてそもそもニュートンは質量の定義をしていない。我々は解析の分解能を上げるために、物体の内部に入って、その構成要素がさらにお互いに何らかの力によって結ばれていると見なし、その構成要素に固有の質量を負わせている。我々は物質は原子の集団からなり、その原子は素粒子から成り立っていると知っているから、一つ一つの素粒子に実験から決められた質量を背負わせることで、物質の密度が決まるとしている。

相対性理論によれば質量とエネルギーは同等のものであり、エネルギーは質量の原因である。しかし素粒子の静止質量は前節に述べたように、場の量子論において素粒子間の相互作用から計算しようとしても無限大という答えに阻まれて、その実態を見ることはできない。ポアンカレ [7] は「科学と仮説」の中で加速度の法則に関して検討し、加速度は測定可能な量であるから、加速度の法則を力の定義式であると解釈する。質量とは何であるかを問い、結局は「質量とは力の計算に導入すると便利な係数である」との定義に到っている。古典力学の範囲では質量、電荷、スピンは常に点粒子に付与の量として測定値を与えるしかないのである。点の上にどうやって質量を載せられるのであろうか。それとも点の周りに雲のようにエネルギーや質量をまとめているのであろうか。そうすると質量の空間分布という厄介な問題を再び抱えることになる。空間分布はさらに空間の各点にその要素を要求してくるのである。

質量の起源に関して論ずる場合には2つの立場がある。一つは古典力学で取り扱っているように、まさに質量とは力の計算に導入する一つの係数であるとする立場である。そこでは与えられた素粒子ごとに一定の質量を負わせれば理論上の矛盾は発生しない。質量の有る無しは素粒子ごとに与えられ、あとはその大きさがどのようにして決まるかだけが問題となる。もう一つは量子力学の枠組みをもって構成される素粒子の標準理論に依拠する立場である。標準理論で採用されている電弱統一場理論ではゲージ場によって粒子を記述する。ゲージ対称性が保たれる限り記述される粒子は質量ゼロである。したがって粒子が質量を持つためには何らかの理由によりゲージ対称性が破れていなければならない。そこでこの対称性が自発的に敗れるような場を導入することによって、ゲージ場に質量を持たせる機構を考えた。これをヒッグス機構と呼び、導入した場をヒッグス場、その場に対応した粒子をヒッグス粒子と呼んでいる。弱い力を担うウイークボソンはヒッグス機構により質量を得ているとされている。またクォークやレプトンもヒッグス場との相互作用により質量を得ているとしている。2012年7月に欧州合同原子核研究機関 (CERN) で「ヒッグス粒子」が発見されたとして科学の世界で話題を呼んだ。

一方、電荷は $e = \pm 1.602176634 \times 10^{19}$ coulomb という最小単位があり、これ以上分割された電荷は観測されない。この素電荷をもつ電子、陽電子、陽子、中間子その他の素粒子は質量を持っている。中性の素粒子、例えば中性子はどうか。これらは壊変して電子と陽子になったとき、陰と陽との荷電粒子になって現れるから、中性子は電荷が無いというよりはむしろ何らかの形でプラスとマイナスの電荷が何らかの形で共存したものであろう。もちろん質量は電荷に比例していない。このため、従来は電荷と質量は独立した存在物として考えられてきた。そして電荷についてはそれ以上掘り下げて考えず、電荷のある物質に寄生して存在するもので、それが寄生した物質にクーロン力を及ぼすもの、という見方をしてきた。それでは電荷というものは形がなく、質量のないものにも寄生できるのであろうか。実際にはこれは不可能であって、クーロン力は必ず質量とともにある電荷に働きかけて力を及ぼしてはじめて存在が確認できる。もしここに、ある点に電荷のみがあって質量がない存在を想定してみよう。このような点が2つあったとすれば、両者の間にはクーロン力が働く。もし一方がプラスの電荷で他方がマイナスの電荷なら、両者は質量がないから、光速で走って結合して消滅してしまう。質量がないから何のエネルギーも放散しない。もしどちらもマイナスであれば、やはり光速で離反し、宇宙の彼方に遠ざかってしまう。したがって我々の宇宙には存在し得ないことになろう。質量と電荷は存在の原因が共通しているものと捉えるのが妥当であるように思われる。電荷のない物質粒子はただ正負電荷が共存しているに過ぎないと考えられる。我々は第 II 部でこの見方を前提にして理論を展開する。

原子が射出する光のスペクトルの研究から、電子はスピン角運動量を持っていて、小さな磁石のような振舞いをするのが分かっている。それはある意味ではコマのような自転を表すものとも、また光の偏光のような内部状態を表すものとも考えられている。スピンの概念は回転するコマのイメージに似ていても、単なる物体の回転ではない。その性質を列挙すれば、

- 1) 素粒子のスピンはいつも同じ値をもっており、素粒子同士が衝突し、エネルギーが変わっても既に存在するものを取り去ったり、追加することはできない。
- 2) 素粒子のスピンは原子核の周囲に運動している電子の軌道運動量モーメントに加えることもできし、その運動量モーメントから差し引くこともできる。
- 3) スピンはその素粒子から切り離すことができず、その素粒子自身が別の粒子に転換しない限り変わることはない。

ハンス・オハニアン [8] は”スピンの物理的構造を明らかにすることは、単に量子のメカニズムを理解するにとどまらず、物質の根源に迫ることを可能にする”と述べている。紫外発散の解決のために提起されたいくつかの理論でも、同時にスピンの存在を説明することのできるモデルが目標であった。剛体モデルでは剛体の自転でスピンを説明しようとした。しかし半整数のように固定したスピンの値を理論的に導くことは難しく、量子的に付与の性質として与えなければならなかった。非局所場理論や素領域の理論では内部に何らかの空間的広がりを持ち、その自由度の一つとして自転を考え、スピンを説明しようとした。しかしいずれの場合も半整数スピンを必然の結果として導出することは困難であった。ここでも量子化の時点でスピンを所与の性質として与える以外になかった。ひも理論においても量子化の過程で同様の論理的飛躍は存在している。古典力学的な概念を用いて量子世界のスピンを必然の結果として導く試みは過去においてすべて失敗している。スピンの性質については古典物理学にそれに相当するものが見あたらず、ただ自転に似たものと表現するほかはなく、内部に x, y, z の3つの自由度のほかにも第4の自由度をもっているものとして点を考える以外になかった。

相対論的量子力学によれば、ディラック方程式によって自動的に電子のスピンが導かれる。そこでこの理

論がスピンの起源を示しているとする見方がある。つまり、量子論と相対性理論の中にスピンの起源が潜んでいるというのである。しかしながらどのような具体的構造によってスピンが生まれるか、内部状態を表す仕組みはどのようなものかを説明してくれる訳ではない。ディラック方程式からスピンの物理的構造を引き出そうとする努力は多くの研究者によって手がけられており、それぞれの説明がなされている。そこで試みられるスピンモデルは2つの傾向があり、一つは量子論的に半整数が現れるならよいとする抽象的な数式モデルで、もう一つは複素数で表される場に何らかの古典論的な回転構造を持ちこんでスピンの起源を説明しようとするものである。前者の多くは zitterbewegung (震える場) の中に起源を見出そうとする [9]。後者の多くはクリフォード代数 (Clifford algebra) に根拠を求める [10]。しかしいずれも奇妙さを持つモデルを前提にし、依然としてスピン発生の物理構造を誰でも納得できるように説明するものは見受けられない。いずれにしても、古典論的回転の概念を根底に持つ素粒子のスピンの起源の説明に成功した理論は見当たらない。

素粒子が大きさを持たない点であるとすれば、古典力学的にはスピン角運動量を持つことはできない。半整数スピンもまた質量や電荷と同じように存在の原因が同じであると考えるのが妥当と思われる。我々の時空の成り立ちについての知識に何か欠けるところがあって、スピンの存在を筋道立てて説明できないのではないだろうか。著者は第3章でこの問題について1つの解答を与えようと思う。ここでは質量、電荷、スピンがたった一つの物理的存在物を起源として説明される。

1.3 量子力学における観測問題

量子力学の状態は波動関数 ϕ によって与えられる。ある物理量を観測した場合、状態 ϕ の二乗はその物理量が観測される確率を表すというのが量子力学の解釈である。この時 ϕ を確率振幅という。たとえばある粒子の振る舞いを量子力学によって記述している場合、その粒子が測定装置によって観測されたとき、実際そこに粒子があることが確認されたのだから、その時点でその場所での確率は1となる。対応する波動関数はその1点でのみ値を持つものになっているとしなければならない。これを波束の収縮という。波束の収縮はどのように説明されるかの問題を量子力学の観測問題と呼ぶ。この観測問題は波動関数の物理的解釈に大きく係わり、量子力学全体の物理的解釈のあり方に及ぶ。波動関数の確率解釈も含めて論ずるときこの問題は量子力学の解釈問題と呼ばれる。

従来の量子力学における観測問題および解釈問題を巡って様々な考え方が提起されている。これらの分類は簡単ではないが、便宜のため以下には概略的に4つに分類して考察しておく。

考え方-その1 : 測定したときに物理的実体が確定する。

観測が行われるまでは、波動関数が量子的状態を表し、観測装置によって観測されたときに、物理的な実体が確定すると考える。波動関数は観測されたとき、突然に収縮し、粒子として現れる。いったん観測にかかれば、観測された状態以外は全て捨てられ、再びよみがえることはない。そしてその後の波動の時間発展は観測によって選り出された状態からスタートする。かくして物理的実体を決定する役割を観測装置に負わせる。観測装置はマクロな大きさを持ち、常に古典力学に従って機能している。したがって観測装置は古典力学によって支配されているとせざるを得ない。連続的な波動関数と不連続的な粒子の奇妙な同居を一般原理へと昇格させ、自然界がもつ相補性として受け入れようというわけである [12]。

この考えはいわゆるコペンハーゲン学派の解釈として、量子力学の主流的考え方をなし、現在まで行われてきた実験操作と矛盾しない、という点で妥当性をもつ。現実のあらゆる現象を観察してみても、一度粒子

が特定の位置に、あるエネルギーと運動量を持って観測された以上、それと矛盾する現象は決してその後に見られることはない。この理論はそのプロセスを検証するため、如何なる実験と測定を行っても、その結果は無矛盾であるように組み立てられている。

一方、この考え方に沿う人々はこれで全て満足しているかといえば、決してそのようには見えない。コペンハーゲン学派の中心人物であるボーアでさえ、その友人ペーテルセンに語ったところによると、「量子的世界というものは存在していません。抽象的な物理的記述が存在しているにすぎません。物理学のなすべき仕事は、自然界はどのように存在しているのかを見つけだすことと考えるのは間違っています。物理学にとって重要なのは、自然界について何を述べるができるか、なのです。[13]」つまり、数学的記述さえできればそれでよしとして、なぜそうなるかの解明を放棄せざるを得なくなっている。そこで、この考え方に沿う科学者はその不満足を補うため、観測装置の解釈をめぐる再びいくつかの派に分かれる。(この辺の事情は [14] に詳しい)

a) 観測装置も量子力学的な状態ベクトルで記述されるべきであるとして、その観測の機能を理論的に古典力学の機構に導こうとする考え方のグループ。

b) 観測の本質は測定器の「不可逆過程」そのものであるとする。測定器を作動させるためにエネルギー供給して増幅する過程が不可逆過程となり、その乱雑性が波動関数の収縮を起こすとする考え方のグループ。

しかし誰でもが納得する、明確に説得力のある回答を出したグループは見当たらない。

考え方－その2 : 意識が波動関数を収束させる。

この考え方はコペンハーゲン学派の考え方にに基づきながら、上記 a) の考えにそってその不満足な点を補おうとするものである。観測装置も量子力学的な状態で表されるとすれば、観測のステップでは波動関数の収束を求めることはできない。その次のステップには観測者がいる。観測者もまた量子力学的な状態で記述されるべきであるとする、測定の最終段階は脳細胞によって認識されることになる。この考え方は波動関数の収束は観測の最終末端における「意識」によって起こるとする。この捉え方は観測問題を「物理的世界」と「意識の世界」の原理の異なる2つの世界にまたがる事象として、両者が接触する境界面に特別な性質を持たせようとする点で、他には見られない説得力をもつ。ユージン・ウィグナーがこの立場の指導的な提案者であった [15]。ペンローズ [16] は明かにこの考え方にに基づきながら、波束の収束を「客観的収縮 OR (Objective Reduction)」と名付け、これをもって逆に脳神経つまり心の働きを説明しようとする。この観点では、意識の世界は線形なシュレーディンガー方程式では記述できないことを前提にする。

しかし、意識する主体は必ずしも人間とは限定しないとしても、では生命体ならどのレベルまでのものなのか判然としない。生命体が現れる以前の地球や、生命体の全くいない宇宙空間においてはいかなる波束も収束することがない、という矛盾に満ちた考え方に導く。

考え方－その3 : 波動関数は知識の状態を記述するものである。

波動関数は物理系の状態を記述するのではなく、われわれが得ることのできる知識の状態を記述するものととらえる。こうすることによって解決できる問題は、波動関数に見られる連続的な構造と、観測によって確認される不連続的な構造との間に存在する思考上のギャップを立ち切ることである。この考えに沿えば、波動関数の突然の収束についてはそれ以上の説明を不要とする。

この考え方の芽生えはマックス・ボルンの解釈 [17] にみられる。考え方－その1で引用したボーアの言葉の中にさえ、この考え方が一部混入しているのがみられる。ボーアの到達した考え方は、ボルンの解釈を基にし、そこから一歩進めて到達したものと考えられる。波動関数は量子的な粒子の運動について統計的な

情報を与えるものとする限り、この考え方は妥当な側面を持っている。この解釈によれば、粒子の運動の不連続性が本質的なものであって、波動関数はそれらの情報について与えられる統計的な知識を記述したものにすぎないと解釈される。しかし統計的な情報というのは様々な多数のプロセスの集まりに対してあるサンプルを採ったデータの集約であるから、個々のプロセスは何か、という疑問が発生してくる。たった1つの電子でさえ、なぜ統計的にならなければいけないかという疑問に対して明確な解答を与えない。

この考え方をとる物理学者はそこで発生した不都合を解決すべく次の2つの方向に分かれる。1つは、波動関数は単なる計算の道具であるから、それ以上の解釈は無意味であるとする。(例えば [18]) その極限において、マックス・ボルンも予想しなかった考え方、つまり量子論は認識の科学であって、認識状態はすなわち自然の姿であり、それ以上の追求は必要ない、という認識論が待っている。

第2の方向は、波動関数による記述を原理とはみなさず、情報の完全な記述方法があるはずであると主張する方向である。アインシュタインは最初ボルンの考え方をういた。しかしそれでは納得できず、この第2の方向を模索した。ディヴィッド・ボームは完全な記述を支える隠れた変数があるはずであるとする理論を展開した。彼は34才のころ「観測過程の解釈を考えてはいけない」としきりに書いていたが、次第にこの問題に嵌り込み、観測に伴って現れる確率的状態変化の裏にはそれを必然的に記述する隠れた変数がある、とする量子論を世に送り出した。しかし晩年のインタビュー記事 [19] には「量子力学が記述するのは統計的なものだけで、個々の現象や事象については何も記述できず、確率しか論じ得ない。」と語ったとある。隠れた変数理論は非局所場を含み、一般には認知されていない。

考え方 - その4 : 多世界に分岐したものの1つが実現する。

波動関数によって予想されるプロセスは全て存在すると考える。すべてシュレーディンガー方程式に従って時間発展するのが量子力学的状態だとし、ある物理量を観測するとその観測された状態が人間によって現在の世界と認識されるのであって、別の観測された状態があればそれがその観測を行った者の現実の世界だと考える。こう考えると量子力学的世界は連続的に変化しているのであって、「波束の収縮」などは考えなくてよい。この考え方は1957年にヒュー・エヴェレットによって提案された [20]。

和田純夫氏 [21] によれば、波動関数を局在する波としてデルタ関数の重ね合わせで表し、各局在波それぞれを、そこに存在する粒子に対応させる。考えている粒子は1つなのに、それが「場所 a にある状態」、「場所 b にある状態」など、一般的に考えれば無限の状態が共存していると解釈する。そこで、波動関数は粒子の存在の「共存度 (coexistence)」を表すという。この共存度は観測が行われる前はお互いに干渉効果を示すが、観測が行われたあとは干渉を起こさないとする。共存するそれぞれの状態のうちの1つがどのようにして実現するかという疑問には次のように答える。観測者は共存するそれぞれの状態、言い換えればそれぞれの世界にいるとして、我々はたまたま観測結果を得たところの世界に属していたのである。この考え方に基づくと、それぞれの瞬間に世界は様々な観測可能性の数だけ分岐していく。そして観測して確定した数だけ世界が実在することになる。それぞれ観測にかかった世界は分岐し、他の世界とは干渉することなく連続的に時間発展していく。従って異なる観測値を得た別の世界の結果はこちらの世界に何の影響も与えない。かくして同時に存在する多数の平行宇宙が何の相互作用をすることなしに存在し続ける。そこで「多世界解釈」とも呼ばれる。

このプロセスを許容すれば、まともな説明が不可能となっている「波束の収縮」という現象から逃れることができる。波束は収縮することなく、どこまでも連続的に時間発展していく。そして物理世界は論理的に一貫しており、突然の飛躍を持ち込む必要がなくなるというわけである。しかし、この考え方にも多くの批判がある。第1にその多世界が存在することを証明する事ができないように組み立てられている点である。

確認できなければ、正しいかどうかわからない。第2に時間と共に限りなく多くの世界に枝分かれしていくという世界は、「実在」の意味を根底から揺るがすというものである。

上に見たように、波束の収束という問題は波動関数を確率振幅とする解釈から発生する。もし和田氏のようにこれを「共存度」、あるいは「可能性」、「潜在性」と解釈すれば波束の収束のメカニズムなどは必要でなくなる。確率解釈以外の場合、その共存度、可能性、潜在性を担う実態を実時空間に存在する具体的な描像をもって与えることができたとき、量子力学の解釈問題は解決するであろう。第4章では存在確定の理論に基づき独特の波動場が導入される。そして従来の量子力学における波動の解釈との関係について検討する。そこで得られる結果は和田氏の解釈に最も近いことが示されるであろう。

1.4 時空構造の概念の変更

第I部1.2節で、今まで量子論と古典論はなぜ衝突したまま進行してきたのか、その背景を述べ、両者の間の断絶は、時空間のもつ性質、あるいはその成り立ちの理解に十分に立ち至っていないために両者間にかげ橋がかけられないのであろうと推測した。従来の問題の取り上げ方は全て量子力学側から古典論側へ架け橋を試みて失敗していた。古典論側における時空概念の変更は相対性理論の導入の影響が大きかっただけに、古典論における時空にその余地が見出せなかったともいえる。しかし点発散の問題も含めて問題の核心に迫るには量子論・古典論の両側からその架け橋を構築する必要があるであろう。

波動と粒子の相補性に関して筆者が思うには、純粋な粒子説は振動数を定義しうる要素を一つも持っていない。そこで周期性を持つ波動の概念を粒子に持たせようとするところから思想上のパラドックスが始まる。“純粋な”ということは粒子の運動により、粒子の存在する点を取り巻く空間に何も変化が起きないということの意味する。古典的な点粒子は空間的拡がりを持たないから、点粒子の周辺空間に仕掛けが必要になる。量子力学では周辺空間との相互作用を再び点粒子の交換関係に置き換えてしまう。粒子とそれを取り巻く時空間との相互作用は曖昧のままである。そこで粒子の存在は周囲の空間の存在と無関係ではないとすれば事情は変わってくる。第I部においては、いわゆる素粒子は自分自身の入れ物として時空を常に創生しているという考え方を導入した。そこでは粒子の存在を確定すべき信号がその源から同時に全方向に光速で伝わり、空間を埋め尽くすという確定のしかたをするアインシュタインの時空間のとらえ方に従っていた。一つの基本粒子が点粒子だとすると、自己を中心にしてその存在を確定するには何らかの信号が発せられなければならない。それが存在確定信号だとすると、筆者の問題提起は3次元空間のあらゆる方向に対してこの信号を発するには無限数のプロセスが必要なのではないかという問題であった。アインシュタインの時空間のとらえ方では、物理的存在を確定すべき信号がその源から同時に全方向に光速で伝わり、空間を埋め尽くすという確定のしかたをする。たった1カ所に無限のプロセスが要求されるところ必ずや無限大が発生するであろう。筆者がここに展開しようとする理論では、いわゆる素粒子が自分自身の入れ物として時空を創生し続けるのであるが、その存在の確定は「同時刻に1方向かせいぜい2方向にしか確定しない」とする仮説を導入する。つまり「同時に全方向への確定」はできないとするのである。

このような仮説の導入は過去に例がなく、しかも時空生成の過程とその構造に概念の変更を伴うため多くの抵抗があるであろう。それにも関わらず筆者がこの仮説に至ったきっかけは次のようなものである。筆者は1979年ころ日本原子力研究所において原子炉内の中性子束分布を高速に計算するプログラムコードのアルゴリズムを検討していたが、当然のことながら予測精度を上げるためには領域をできるだけ多くのセルに分割してセル間の中性子の拡散を取り扱わなければならない。例えばある中性子源の周辺に多数のセルを設定したとすれば、デジタル計算コードとしては時分割で一つ一つのセルごとに中性子のやり取りを求めて行

くことになる。計算を高速化するためには並列計算機を使用して、同時に中性子源に接するすべてのセルに情報をやり取りする必要がある。それには計算情報を送受信する回路をセルの数だけ中性子源のセルに接続しなければならない。セル分割は一種の近似であるから精度を上げるためには無限個の情報回路を接続しなければならない。同時に無限多方向のセルに対して計算の回路を持つとき理想的なシュミレータができる。そのようなシュミレータを作ったとしたらどんなに微細な回路を用いたとしても中性子源部分は無限大の大きさを持つ。自然界は果たしてそのような構造をゆるすであろうか。我々は現実にはそれができないから時分割でこれを行っているのである。中性子源を1個の電子に置き換えてみた。電子が周辺の空間と場の情報をやり取りするとして。我々が考える古典的電子描像は同時に無限数の方向に情報を送受信する回路を設定した上のようなシュミレータに相当するものであることに気が付いた。これではどの様に仕組んだとしても無限大の源になる。自然界も我々がデジタル計算コードで取り扱うように、点源という空間構造を持たないものについては、その基本過程に立ち戻ってみれば時分割で周辺空間とやり取りしているに違いない。そうであれば無限大という値を持たないで済むであろう。これが上記の仮説の設定に至ったきっかけである。この仮説が以下に展開する理論の根幹をなすのであるが、それが妥当なものであるかどうかはそこから導かれる結果の検証如何にかかっていることは言うまでもない。詳細は2.2節に論ずる。

第II部で導き出す主要な項目は次のとおりである。

- (1) 古典的な場の理論が持つ源の発散の困難を最初から持たない源が定義できる。古典的な場の理論が持つ電子の自己エネルギーの発散の困難を解決できることを示す。この理論を展開すると、湯川ら [5] の主張した、いわゆる素領域に似た空間を自動的に生み出す。しかしそのシステムは素領域の理論とは異なり、空間連続性が時間軸の介入で達成され、事象が完全に相対性理論に従う。
- (2) 第I部で角運動量が光行差ベクトルで表されることを明らかにしたが、この観点に立って古典論的な時空構造に「1時点1方向確定」という属性を持ち込むと素粒子のスピンが発生機構について、物理モデルが提唱できる。このモデルは点粒子でありながら角運動量を持ち、しかも半整数のスピンを示す。
- (3) 存在の確定理論に基づき、1時点1方向の確定を仮定し、時分割の形態を回転放射とすると、量子論におけるド・ブローイ-アインシュタインの関係式の依ってきたるべき時空構造を新たな観点から説明することができる。この新たな場から量子力学におけるシュレーディンガー方程式を導くことができる。
- (4) 不確定性関係のもつ物理的構造に新たな説明を与える。シュレーディンガー方程式に現れる波動関数に独特の解釈が与えられる。(第3章)
- (5) ニュートン力学で定義される仕事には最小単位があり、粒子性を持つことを古典力学と論理的な連続性をもって説明することができる。(第4章)
- (6) 等価原理に新しい解釈を与えるとともに、量子的構造を持つ存在確定の場の集積が重力場を示すという構造を、古典力学と論理的な連続性をもって説明することができる。

参考文献

- [1] 西島和彦, 中西 襄 編集, "場の理論 III", 新編物理学選集 189, 日本物理学会 (1975), p.191.
- [2] 中西 襄 著, "場の量子論", 新物理学シリーズ 19, 培風館 (1975), p.247.
- [3] R. P. ファインマン/A. R. ヒップス著, 北原和夫 訳, "ファインマン経路積分と量子力学", マグロウヒル出版 (1991), p.242. 原著: R. P. Feynman/ A. R. Hibbs, "QUANTUM MECHANICS AND PATH INTEGRALS", McGraw-Hill (1965).
- [4] 田中 正, 石田 晋 編集, "素粒子の拡がりと模型", 新編物理学選集 62, 日本物理学会 (1975). 非局所場理論については p.234, 1次元ひも模型については p.236 参照のこと.
- [5] Hideki Yukawa, Quantum Theory of Non-Local Fields. Part . Free Fields, Phys. Rev. 77 (1959) 219-226, Y. Katayama, H. Yukawa, Field Theory of Elementary Domain and Particles I, Progress of Theoretical Physics, Supplements, No. 41, p.1-21, And Y. Katayama, I. Umemura and H. Yukawa, Ditto, II, p. 22-55. 他に、湯川秀樹, 物理講義, 原 治 編, 講談社 (1975). 通俗的な解説書としては例えば 湯川秀樹、片山泰久、福留秀雄 著, "素粒子", 第二版, 岩波新書 710 (1969), P.213 などがある。
- [6] M. B. Green, J. H. Schwarz & E. Witten, "Superstring theory", Vol. 1 and Vol. 2, Cambridge monographs on mathematical physics, Cambridge University Press(1987).
- [7] Henri Poincaré, La Science et l'Hypothèse, Translated by Isaburou Kawano, Kagamu to Kasetsu, Iwanami Syoten(1982).
- [8] Hans C. Ohanian, What is spin? American Journal of Physics, Vol. 54, No. 6, p500 (1986).
- [9] David Hestenes, Zitterbewegung in Quantum Mechanics - a research program, arXiv:0802.2728v1 [quant-ph] Feb 2008.
- [10] W.E. Baylis, R. Cabrera and J.D. Keselica, Quantum/Cassical Interface: Classical Geometric Origin of Fermion Spin, Advances in Applied Clifford Algebras, 20(2010), p517-545.
- [11] "超弦理論, 統一理論へ向けて", 数理科学, Vol. 11, 1986 (サイエンス社). 通俗解説には ブライアン グリーン, "エレガントな宇宙", 林 一, 林 大 訳, 草思社 (2001). 原著: Brian Greene, "The Elegant Universe", W. W. Norton & Company, New York(1999).
- [12] バスティン編, "量子力学は越えられるか", 柳瀬睦男、他 訳, 東京図書 (1973). 原著: "QUANTUM THEORY AND BEYOND", edited by Ted Bastin, Cambridge University Press, London (1971).
- [13] J.C ポーキングホーン, "量子力学の考え方", 宮崎 忠 訳, 講談社 (1987) p.208. 第 8 章にポーアとアージ・ペーテルセンという友人との個人的会話であるとして紹介されている。この引用はさらにマックス・ヤンマー著, 「量子力学の哲学」からのものである。
- [14] 並木美喜雄, "量子力学の観測問題をめぐって", 日本物理学会誌 第 37 巻第 7 号 (1982), p.535. a) として v. Neumann, E..P. Wigner を挙げ、b) として H. S. Green, A. Daneli, A. Loinger, G. M.

Prosper, L. Rosenfeld を挙げている。これらの論文のいくつかは ”新編物理学選集 69 量子力学における観測の理論”, 日本物理学会、東京、1978 に収録されている。並木美喜雄, ”観測問題とその周辺”, 数理科学 No. 392 (Feb. 1996), サイエンス社, p.5 にもその解説がある。

- [15] E. .P. Wigner, ”Remarks on the mind-body question”, in *The Scientist Speculates*, p. 284-302, edited by I. J. Good, Heinemann, London(1961).
- [16] ロジャー・ペンローズ, ”心は量子で語られるか”, 中村和幸 訳, p.131, 講談社 (1998). 原著 : Original: Roger Penrose, ”The Large, the Small and the Human Mind” Cambridge University Press (Cambridge).
- [17] Born, M., *Atomic Physics*, Blackie(1944). (ポルン, ”現代物理学”, 鈴木、金 関 訳, みすず書房. ポルンの考え方を解説したレポートはほかにも見られる。例えば [12] の p.4. その他、ピーター・ギビンス, ”量子論理の限界”, 金子 務・宇多村俊介訳, 産業図書 (1993), p.81. 原著 : Peter Gibbins, ”Particles and Paradoxes, The Limits of Quantum Logic, Little Ldd, London(1987).
- [18] Christopher A. Fuchs and Asher Peres, Quantum Theory Needs No 'Interpretation', *Physics Today*, Vol.53, No.3 (March 2000), American Institute of Physics p.70.
- [19] 井本信之, ”量子力学の解釈問題”, 数理科学 (特集: 波動関数のミステリー), Vol.7, サイエンス社 (2002.7), P.52. それぞれの解釈問題の旗手にインタビューしたときの記事。 ”ボームに聞く” を参照。
- [20] H. Everett, *Rev. Mod. Phys.* 29, 454(1957).
- [21] 和田純夫, ”状態の共存と波動関数の解釈”, 数理科学 (特集 波動関数のミステリー) , Vol.7, サイエンス社 (2002.7), P.7.
- [22] F.David Peat, *Superstring and the Search for the Theory of Everything*, Comtemporary Book Inc, New York(1988) 日本語訳、久志本克己、監修、宮崎忠、”超ひも理論入門 (下)”ブルーバックス、講談社 (1990), P27