

10.9 新分野放浪記

湯川哲之

yukawa@koryuw02.soken.ac.jp

教育研究交流センター

多分小学生の頃だっただろうか、たまに親に連れられて初めての路線を電車で旅行することがあった。そんな時私は電車の先頭の箱より最後尾に好んで乗った。最後尾の車窓から走り去る景色を眺めていると、急に線路が右や左からやってきて私達がたどっている線路と一緒にになる。その線路はどんな土地を通ってきたのだろうか、いつかその道を遡って探検したい、と夢想した。どうしてその車両が先頭ではなく最後尾だったのか、はっきりとは記憶にない。多分その時は気にせずを選んだのだろうが、今考えてみると先頭の箱では自分がこれから行こうとしている目的地への期待のほうが大きすぎてわき道にまで心が向かないとか、一瞬のうちに分岐点が視界から消え去り分岐していったもうひとつの道を夢想する余韻がなかったからかも知れない。

さて、はじめ「新分野開拓記」を書くつもりであったが、意に反してこんなタイトルの出だしになってしまったのは、私の現在までの研究がそんな子供の頃の気持ちを引きずっているからであろう。いつも自分なりに懸命に取り組んでいるものはあったが、時々面白そうな問題が急に目に飛び込んでくる。すぐにはそれに没頭することは出来なくても、ひまが出来たらもっと知りたいと考えていたことがたくさんある。現在、特にひまが出来たわけでは無いが私の性格上か仕事の性質上からかいろいろな事に頭を突っ込んできた。そこで今まで出会った線路を振り返りどこが開拓地として有望か見てきた感じを書くことにした。

10.9.1 原子核と社会科学と量子力学

私は大学院に入って物理学の研究を原子核理論から始めた。原子核を見るとその特徴はいろいろな意味で中途半端というところにある。系の広がりや核子(陽子と中性子)数が有限ということから典型的な量子系だと考えられるが、核子数が200ぐらいの原子核(例えば鉛)では運動の自由度数は十分大きく古典的な近似が良い場合がある。孤立した系ではあるが統計モデルがよく成り立つ現象もある。また、中間子を介し強く相互作用しているはずなのに独立粒子の描像(殻模型と呼ばれる)で理解できる現象も多い。水滴に似た振動や回転などの集団的運動が顕著な中にそれからの揺らぎも大きい等々、実に二重性格の性質が多い。

さらに、原子核の運動パターンはその有限性のため振動・回転等の集団運動や独立粒子運動だけでなく系全体が関与する核融合・核分裂や外系からまたは外系への粒子の吸収・蒸発など多様である。このようなあやふやさ、揺らぎの大きさ、集団と個の共存、そして多様な運動の形態など原子核の性質を見ると実に人間社会ともよく似ている。原子核を知ることにより社会学の研究に何かヒントが与えられるかもしれないとの期待も出てくる。事実、昨今は複雑系の影響もあって力学の言葉を使った社会学の論文も見かける。

この比喻では核子が個人で原子核が社会にあたるとが、こんな話をするとはばかばかしいと物理学者なら誰でも一笑に付すに違いない。原子核の運動は、核子間の力としてよく知られた核力を媒介として量子力学で記述できるが、社会には人間間(にんげんかん)力を媒介とする科学的な運動法則があるだろうか。しかも、ここになぜミクロの法則である量子力学が出てくるのかまったく理解できない。たとえ心理学が人間間の相互作用を明らかにするとしても、社会法則は力学のように決定論的な法則としてはなりたらず、人間特有の不確定な要素が入るに違いない。そう考えるのが常識的である。社会学を科学的に記述できるとしたらそこで用いる言葉はどのような構造を持つべきか、それはわかっていないが少なくとも単純な力学的言語ではなさそうである。

私が最近非常に興味を持っている話にブラック・ショールズの金融理論があるが、これを

知ってから社会学が原子核物理学とまったく縁の無いものと言い切れない気がしている。この理論自体は大分前に提案され、ノーベル経済学賞を授賞したとか、授賞者の一人がこの理論を使った取引で失敗したなどいろいろと話題は多いが、興味深いことはこの理論のテーマである金融派生商品（デリヴァティブ）の価格を決める方程式が量子力学や熱拡散方程式として知られる微分方程式と同じ形をしていることである。まったく関係がないと思われていた量子力学とデリヴァティブの価格付け理論がこのような共通点を持つ理由は、それらの背後に確率過程が共通に存在するからである。理論の基礎となっている伊藤の確率微分方程式は量子力学の定番であるファイマンの経路積分であらわすことが出来る。このように経済など不確実性を伴う現象が確率微分方程式で書き表せるなら、社会法則は同様な方程式で記述でき、その解は原子核と同じような性質を持っているとしても不思議ではない。斜陽に苦しむ原子核理論研究者が数理社会学者として再び活躍する時代が来るかも知れない。

10.9.2 量子力学とカオスと観測

私が次に注目したのはカオスである。実はカオスが自由度の小さい系でも発生することより、少数体系に統計的な取り扱いを導入する可能性を示していることから、これは原子核にも統計力学を導入する基礎付けになると考えたのが始まりである。しかし、研究を進めて行くに従い基本的な問題に突き当たった。物理学において力学の基礎は量子力学である。古典力学は量子力学のある極限で成立すると考えられている。量子力学は線形方程式と呼ばれる比較的単純な数学で表わされるが、それからどのようにして非線形方程式に特徴的なカオスが生まれるのだろうか。線型方程式からカオスは生まれないとされているが、カオスなしに量子系の統計力学がどうして成立するのだろうか。

この問題に直接関係していたわけではないが、量子系に統計力学原理が関わってくる問題を探していて原子核のエネルギー・レベルの統計理論に出会った。原子核の中性子レゾナンスのエネルギー・スペクトルはランダム行列理論でよく説明できることは古くからウイグナーやダイソンなど物理学の巨人達により示されていたが、どのような統計原理のもとにランダムさが導入されるのかは問われなかった。ただし、これまでもレゾナンス・エネルギーを粒子の位置座標と考えてその粒子間に適当な相互作用を仮定し、平衡状態の分布関数を実験に合うよう経験的に定める試みはあった。そこで、私は原子核のスペクトルを決めるハミルトニアンの中に1つのパラメーター（それを t とする）に比例する相互作用項を導入し、このパラメーターを時間に、またエネルギー固有値を座標にみなしその運動方程式を求めた。この固有値の集団は1次元古典多粒子系として取り扱え、通常の統計力学の方法を適用するとまさに求めるレベルの統計性が導けることを見出した。量子系にも統計力学の原理が成り立ったのである。

肝心の量子系におけるカオスの存在や統計力学の基礎について私はまだ完全に理解したわけではないが、量子系が古典系のカオスと結合すると量子位相の干渉が起こり古典系に転移することから、多くの結合した量子系が自発的にカオスを誘導し古典系に転移するとも考えられる。はじめは存在しなかったカオスがカオス存在のもとになっているという理論であるが、このシナリオを再現するモデルを作ることが出来た。その系では量子系に対応する純粋状態と古典統計系に対応する混合状態の分布関数の差は考えている系がカオスのとき、系の自由度数と共に指数関数的にゼロになることが示される。

これはひとつが倒れるとそれにつられて全部が倒れるドミノ理論だが、量子系ではよく似た現象は数多くあり、中でも観測過程はその典型であろう。測定の初期は量子力学の法則により測定される系も測定器も時間発展している。測定器の特徴は小さな入力次第々となだれ現象を起こしつつには巨大な電流となり巨視的な測定器の針を動かすことになることである。測定器を働かせているのはまさにカオスなのである。量子力学の観測の問題は己を知る研究者にはなるだけ避けたい問題

であるが、観測問題をカオスという観点から物理過程として取り扱えればもう少し生産的な議論も生まれるのではなかろうか。

10.9.3 カオスと量子重力

カオスには非線形性に起因するランダムさがあるが、量子力学にも重ね合わせの原理に由来する不確定性がある。この二つの確率過程が交錯するメゾスコピックな系は量子と古典の二つの運動法則に関係していて興味深い対象である。微細加工技術が進み量子コンピュータの実現可能性も盛んに議論され始めている。その技術を使ってビット演算ができる量子素子の製作に成功したというニュースも聞く。次はそれを2次元的に組み合わせることによりマルチ・ビット量子演算素子が出来るのも夢でなくなってきた。ただ量子力学的な相関をどれぐらいのサイズまで保持できるかが問題である。2次元量子素子がランダムな2次元格子と等価なら当然低次元量子系に特徴的なアンダーソン局在が起り、信号が流れなくなる。並進運動にたいする対称性の破れに起因する局在化をいかに回避できるかがその技術の鍵になろう。

このような対称性の破れによる量子力学系から古典力学系への遷移が大々的に起こるのは量子重力系であろう。アインシュタインの一般相対論では時空も物質の運動に従って揺らぐ。すなわち物質も時空もともに力学的対象なのである。全ての力学的対象は量子力学を基礎としているから、時空も量子化されなければならない。物理学者の解決すべき重要な問題のひとつに重力の量子論をつくることがある。しかしこれは難題で、他の3つの相互作用、すなわち電磁気力、弱い核力、そして強い核力、が矛盾のない場の理論として出来上がって「るにもかかわらず重力だけがいまだ十分に理解されていない。どのようにして重力を量子化するかについては、目下スーパー・ストリング理論を中心に大きく展開中でありここでは取り上げないが、量子化した時空はどのようなものかを考えてみたい。

量子化した時空の物理学的なイメージとして、やわらかい結晶を考えればよい。ただし時空の場合は金属などの結晶と違って規則的になる機構は組み込まれていない。したがって、理論的には平坦な空間よりしわくちゃな空間のほうがエントロピーは大きく、自然は大きいエントロピーの状態を好むから、現実にも空間が不規則な骨組みを持つ可能性が高い。非常に小さいスケールで時空はフラクタル的になっていると予想される。ランダムな空間の量子系には非常に奇妙な性質がある。空間が1次元や2次元ではアンダーソン局在が起り、特殊な場合を除いて粒子が空間に張り付き動けなくなる。さいわい3次元空間では局在化は起らない。しかし現実には、光の伝播などで私達が普段経験する時空はランダムではなく非常に平坦である。勿論、現実世界にはこのようなことはいくらかでもある。どれほどスムーズに見える鏡の面でも、どれほど平坦に見える静水面でも原子程度のサイズに拡大するとさまざまな原子・分子の大きさを反映してぎざぎざである。しかし、量子力学が予想する最も小さいスケール（これはプランク・スケールと呼ばれる）でぎざぎざな空間が、どのぐらいのスケールでスムーズな空間に見えるのか、そのスケールは何で決まるのかを説明する必要がある。空間のランダムさと関連した重力場の詳細な分析はこれからの問題であるが、フラクタル次元のような空間の非整数次元性、ヒッグス・メカニズムによらない粒子の質量起原など興味深い問題は残されている。

10.9.4 時空と生命の起原、そして

何も無いところから何かが生まれることは決してない。しかし、すでに見たようにカオスはカオスの無い量子的世界から生まれてきたように見える。一般相対論を量子化するというは何も無いところから時空が生まれることだろうし、生命の起原とは無生物から生物が生まれることである。起原の本質は自己組織化にあるという物理学者は多い。自己組織化という概念自体、物理法則を超

越したのではなく法則それ自体だと私は思うが、その言い表し方に何かそれ以上のものを期待する心が見える。

それでは時空は何が自己組織化したものなのか。現在、一番ポピュラーな考え方に三角形がちなぎ合わさってひもが出来、それが10次元空間を漂っているというスーパー・ストリング模型がある。それではひもを構成する三角形は何から出来ているのか。それはマトリックスから出来ているというのが最近(?)の流行である。マトリックスが何から出来ているのかはもう問わない。

生命の起原においては、アミノ酸がまず自然的に合成されたという立場で私たちは実験的に検証しようとしている。アミノ酸が自己組織化して自分をコピーする機能を身につけたというシナリオだが、詳しくは別稿「生命の起原に向けて」を呼んでいただきたい。さて、ここまで来れば最後に何が残っているかはほとんど明らかであろう。私たちがこのようなことを考えるに至った本質、すなわち、意識の起原である。これこそ自己組織化の最終プロダクトであり、我々が解くべき究極の問題である。現在、総研大の共同研究として、遺伝研の齋藤さんを班長とした「意識の進化」研究グループがスタートした。出来ればこの研究を足がかりに意識の起原に迫りたいと考えている。あまり勝手なことばかり書いたのでこの原稿の出版は4月1日になることを願っている。