

## 講演6. 小林 誠（日本学術振興会理事）

[小林] 現代物理学において、いかにニュートン力学的な考えが支配的であるかということとその限界ということでお話ししたいと思います。

当然ですが、ニュートン力学というのは二つの要素から成り立っております。一つは運動の法則。もう一つは万有引力です。

運動の法則の意味というのは、力が与えられていれば、その後の時間発展が完全に決まるということです。その考え方はその後の物理学のすべてを支配しているということが一つ。

一方、万有引力の法則は重力の力は質量に比例する形で決まるということを主張しているわけで、これは二つ別々の要素です。

運動の法則の方の右辺の力というのは必ずしも重力でなくてもよろしくて、いろいろな力が入ってくる構造になっています。どんな力であっても微分方程式である初期条件を与えれば先のことが決まってしまうということがその後の物理学に大きな影響を与えます。

その力として重力以外でまず明らかになってきたのは電磁気の流れ、荷電粒子に対しては電場に比例する力が働くということ。さらに電磁場に対する基本方程式としてマクスウェルの方程式が登場します。マクスウェルの方程式が許す波の伝播の速度が当時知られていた光の速度に一致することから光の正体がわかることとなります。これはさらに、この先、相対論につながることとなります。

その部分は省略して、次の重大な進展は量子力学の誕生です。量子力学の誕生は1925年ですが、きっかけは20世紀の当初からありました。

ここで、今日の話のポイントになることですが、量子力学というのは従来の概念を大幅に変えたものです。その中でまず物質の波動性という、電子のように粒子と思っただけものが波動の性質を持つ。それから波と思っていた光が粒子性を持つ。そういう波動・粒子の二重性があります。

それから、位置と運動量は両方を正確には決められない、ある不確定な範囲でのみ可能ということがわかってきました。ただ、ここで言いたいことは、そういうような重要な性質を言葉で言っただけではおそらくそれ以上なかなか進めなかった。幸いというか必然というか、そこが問題ですが、この従来の概念ではとらえられないようなことを明確に表現する数学のスキームがあったことが重要ではないか。

従来は対象の状態というのは物理量の値を与えることで、つまり速度とか位置を与えることで、それがその状態そのものの記述になる。ところが量子力学となるとそうではないというわ

けです。状態を表すのは波動関数でベクトルというものになる。物理量はそれに働く演算子というわけで、ベクトルではなくて行列。測定値に相当するのは演算子の固有値。

つまり直感的、古典的には状態も物理量も測定値もみんな縮退した概念であったものが、それぞれ別のものとしてそれぞれの位置づけを獲得した。二重性とか不確定性とか言葉で言っているだけでははっきりしない概念を明確に表現することができるということが非常に重要ではないかという気がします。

そういう概念の変更があったにもかかわらず、状態の時間発展はシュレディンガー方程式で決定される。この点でニュートン的な考えを踏襲しています。つまり初期条件を与えれば状態はどう時間的に進むかというのは微分方程式で完璧に決まる。そういう構造が成り立つわけです。

もちろん量子力学と古典力学は全く別の力学ではなくて、あるいは量子力学によって古典力学が否定されたわけではなくて、それは連続的につながるもの、つまり「作用」がプランク定数に比べて十分大きければ古典力学で正しく記述される。

これが20世紀の初めです。スキップしましたが、ちょうどこの間に相対性理論が誕生します。問題は相対論と量子論を両立させることが大変なことだという点です。それぞれを従来の考えとつなぎ合わせることはそれほど難しいことではないのですが、2つを同時に考えると難しい。量子論というのは先ほどのシュレディンガー方程式にありましたように、明らかに時間と空間の扱いが対称ではない。相対論的ではないわけです。よく知られたように、これを相対論的に書き換えたのがディラックの方程式と言われるものです。そこでは時間と空間の扱いが、一階の微分方程式で対等になっている。ところが、これが結構たいへんなことを意味していて、微分方程式の解の中に粒子と同じ質量を持つ反粒子が存在する。反粒子の存在が何を意味するかというと、粒子と反粒子の対生成とか対消滅ということが起こるわけです。

ということは、従来の状態の記述の仕方を根本的に変えなければいけない。つまり従来、1個の粒子の位置を追いかけていけばすんでいたものが、消滅とか生成ということが起こるとそれではすまなくなってしまう。粒子の個数が変わってしまいますから。それを記述するのが場の量子論ですね。これが1930年ごろの話になります。

これと並行して何が起こっていたか。重力についてはニュートンの最初に述べた万有引力があります。これは相対論の誕生とともにアインシュタインの一般相対論になってきますが、これは量子論は無視した形です。電磁相互作用は先ほどのマクスウェル理論。これはすでに相対論的な形をしております。それ以外に基本的な力として強い力と弱い力というのがある。素粒子レベルに初めてその存在がわかったことですが、そういう力があるということで、四

つの力があるということがわかってきたわけです。

ここで問題が発生します。相対論と量子論を両立させるために場の量子論になったわけですが、これで事が解決したかというところではなかった。それは相互作用の効果を少しでも量子論的に計算しようとする、摂動論による計算にはやたら無限大が出てくる。

この問題を電磁相互作用の場合について解決したのが朝永、シュウィンガー、ファインマンで、朝永先生のノーベル賞のお仕事でありました。これは簡単にいうと、計算すると出てくる発散は、実は見えない裸の質量に押しつけることができる。観測されるのは裸の質量に量子力学的な補正を加えたものですが、合わせたものは有限だが、補正にも裸の質量にも発散があって発散項がお互いに打ち消しあう。こういうふうにしてすべてつじつまを合わせることができるとするのがくりこみ理論です。そういう手段で問題を回避したと言ったほうがいいかもしれません。とにかく一応電磁相互作用については相対論と量子論を一応矛盾なく統合できたというのがこの時点、1940年代の話です。ただし、この時点では電磁相互作用だけ。四つの力のうちの一つに対して答えが出た。

その次の進展はゲージ理論の理解が進んだ結果、四つの相互作用のうち電磁相互作用と強い相互作用と弱い相互作用、この3種類の相互作用に対して先ほどのくりこみ理論の手法が使えるということがわかってきた段階で、1970年代です。それを使って素粒子のコンシステントな描像を確立したのが素粒子の標準模型と呼ばれるものです。

ここまでで何が起こったかと言いますと、20世紀の初めに相対論、量子論という二つのものが必要になったわけです。それを両立させようということが、四つの力のうち三つについてはできたというのが、70年代のことですが、実は現時点もその段階を超えていないわけです。何が残っているかと言いますと、重力の相互作用を量子論的に扱うということが今なおできていない。というのがニュートンから始まって現在までの物理法則の一番基本の部分について言えることです。

重力の何が難しいかを簡単に言いますと、まずくりこみ理論が適用できないということですが、理由を簡単に言えば、ほかの力に比べて発散が強すぎるためにこの手法は使えない。それに対してどういう道がありそうかというところ、よく言われるひも理論とか弦理論と呼ばれるものがそれに対して答えてくれるだろうということです。

ひも理論とは何かというと、素粒子が点だと思っていたのを、もともとストリング、ひもの自由度があると考えます。こういうものを考えると、不思議なことに重力を伝える粒子といわれる重力子というのが自動的に出てくるとか、先ほどの発散の問題が完全になくなるというす

ばらしい性質を持っています。そのかわり、時空が4次元ではコンシステントな理論ができなくて、10次元になる。それから、この理論は必然的に残りの三つの相互作用や物質も全部を包括している。つまりすべてをまとめて矛盾ない形にならない。

そういうものですが、単純な超弦理論それ自身ではすべてのことが説明できなくて、これでコンシステントな理論を作ろうと思うとひもだけでは閉じないということになって、最近では10次元の中の何次元かの面とか、そういうものも一緒に考えないととにかく全体が閉じないということがわかってきましたので、そういうもの全体をひっくるめて、その先に何かザ・量子重力というものがあるだろうと思われています。

ここでやっかいなことは、要するにこの正体が不明なのです、今のところ。ある側面を見るとこういうひものように見える。ある側面で見ると別のひものように見える。ある側面を見ると面のように見える。そういう不明なものをあっちやこっちから見ているときのある簡単な描像だけがわかっていて、その正体がわからない。

この状態は先ほどの量子力学の誕生のときとある程度似ているのではないかという気がします。つまり量子力学的な対象がある場合で言えば粒子に見える、ある場合で言えば波動に見える。そういうのに似ています。ですから、今言ったわけのわからない正体を表すような数学的なロジック、枠組みがあるかというのが多分今問題なのだという気がします。

量子力学の例は基本法則が数学的に表現できるということがいかにパワフルであるかということをや非常によく物語っているのではないかと思います。当然ながら言葉の解釈の違いによるぶれが数学的に表せることによってなくなる。それから同じことかもしれないかもしれませんが、その積み重ねです。ベースがしっかりすることにより、そのベースの上に積みあげる議論が可能になる、そういうメリットがあると思います。量子力学は数学的表現なしには成立しなかったといえると思います。

以上の部分は、以前に仁科記念講演会で話した内容と重なりますが、ここから先は少し離れます。

蛇足ですが、同じ量子力学の中でも数学的表現を持たないがゆえに問題がクリアになっていない例として観測問題というのがあります。観測問題というのは簡単にいいますと量子力学の対象は波動関数で記述できる。この対象の量子的な反応を測定器で観測しますと、不連続な変化があって、測定は波動関数の二乗、確率で記述される。このとき、測定器も含めた全系も波動関数で記述できるはず。そうだとすると、この観測過程で出てくる不連続な現象は、この全体の波動関数でどう記述できるのかということになると、これがわからない。ここで納得のい

く理解ができないというのが観測問題です。要するにこの関係を明確に数学的に表せていないことに原因があると思われます。

ここから、ニュートン力学の限界ということを知りたいと思いますが、観測問題を持ち出したのは、共通する点があるような気がするからです。すなわち、観測問題では測定器というマクロなものを含めて記述することに困難があった。ニュートン力学も対象の自由度が増えると弱点が出てくる。初期条件を与えればその後の時間発展が分かるというのが原理ですが、自由度の数がふえると初期条件を与えることは困難になる。もっと本質的に重要なことは、わずかな初期条件の違いがあると、結果が大きく変わる。エントロピーが増大の法則というようなものも、もとはここにあるのだらうと思いますけれども、そういうことだと思います。

そのことから言うとニュートン的な論理というのは、限られた部分系では非常に有効ですが、ちょっと系が複雑になれば、完全に無力とはいませんが、相対的に予言能力というか、そういうものがグッと落ちる。そういう構造を持っているということです。

ここから先はだんだん乱暴な議論になりますが、現代の文明というものはニュートン力学の上に成立しているといえると思います。それがゆえにニュートン力学と共通の弱点を持っているのではないかと。要するに予言能力が有効であるようにどういうことをやっているかという、雑音に相当する部分を必死で取り除くわけです。必死に取り除いて純粋にニュートン方程式が当てはめられるような部分系を一生懸命に抜き出す。その抜き出した部分は確かにその先どうなるかというのが予測できます。そのかわり雑音として取り除いたものはその先どうなるか知らないというのがパターンなわけです。

現実の文明もその論理の上に成り立っているのではないかと。何らかの形で人間が設計したとおりに動くものを必死でつくりだす。そのために邪魔になるものを一生懸命取り除いてやっとなつくる。これはある意味で普通に起こることに反することをやっているわけです。普通なら何かものを投げても、押してもすぐに摩擦か何かで止まってしまうのを一生懸命に摩擦を取り除いて、どこまでも動く機械をつくる。そういうことによつてのみ成り立っている世界だと思います。

その意味で非常に限られた部分だけを巨大に発展させたのが現代の文明ではないか。その結果、その弱点として、その部分が巨大になり過ぎて想定外のことが起きる。何か大きな機械をつくったら、それが暴走するとかそういう。

それから対象の外側で起きることをコントロールできない。公害なんていうのはその典型だと思います。とにかく設計したシステムの外側で起こることは何かということについてコント

ロールできないということが起きているというのが現実ではないか。

ここまでは多分以前に佐藤文隆さんもそういう趣旨のことをおっしゃっていたのではないかと思います。ここからは非常に勝手なことを言います。

何かニュートン的なとか、今まで見てきたようなロジックの外側でそれに代わるような原理、法則というものがあるのではないか。もちろん私の専門外のことに對して勝手なことを言うわけで、荒唐無稽なことを言っているかもしれません。もしあるとすれば、それがパワフルであるためには明確な数学的表現を持ってほしい。そういうことを期待したいということです。

そういうものがあってもよいのではないかという程度の意味ですが、どういうところが考えられるかという、物理に近いところと言えば、いわゆる複雑系の科学といわれているものが、そういうことを目指しているのではないかというふうに思う。つまり自由度の多い系の中に自由度が多いことに基づく別の論理が存在するのではないか、そういう意味かと思えます。重なるかもしれませんが、もう一つは生命系です。これはもちろん非平衡の開放系としてある秩序を維持しているというのは、ニュートン的なものと非常に対照の位置にあるのではないか。その先には生命とは何かというような、何か別の基本的な論理というのもあり得るのかなど。その中で遺伝のメカニズムにはすでにそういうものがあるのではないか。つまりDNAの中に情報を書き込んで、それによって秩序を維持するというメカニズムがあるわけです。それは微分方程式で将来を支配するのはすでに違うメカニズムのような気がするので、何かそこには違う論理があると言ってもいいのではないかなという気がします。

それから、脳とか情報というところにも独自の論理があり得るのかなという気がします。物質の中にデジタルな情報を書き込むという意味ではコンピュータも共通していますが、その中で生命のように秩序を自分自身で維持するようなシステムが誕生するところには何かまだ知らないものがあるのか。そういう気がいたします。

もう一つ問題は、仮にこういうところで何らかの新しいロジックなりなんなりを人間が手にしたとしたら何が起こるかということです。例えば遺伝のメカニズムを知る。すぐに遺伝子操作か何かをして人間の役に立つものをすぐ作ろうとするわけです。そういうものは先ほどのいわゆるニュートン的なものの上に成り立っている文明の繰り返しにすぎないかもしれないという気がしまして、進歩主義の後継という問題に必ずしも答えを与えてくれるのではないかもしれませんが、少なくともサイエンスとか、その意味ではこういう分野がもしあるとすれば、それは全く新しい展開ではないかという気がします。外からこういうことに興味を持って眺めているというのが今のところ。以上です。(拍手)

## 小林 誠氏の講演についての討議

[湯 川] 小林さんがおっしゃったように銀河系でも構造が複雑になればカオス系になるというのはそうですが、カオスというのは構造の簡単なものにも自由度が保存量よりも多くなると起こる。そのときに完全にカオスになるかということ、世の中完全にカオスになっていないのは構造安定性、不安定性がある。構造安定性というのはものすごくカオティックなものが全体集まってスムーズになる。統計力学はそれで成り立っているわけです。

構造不安定系というのは、例えば重力系のようにすべてが引力になっているから、落ちるところまで落ちていかなければしょうがない。これは構造不安定です。

それともう一つは、それは力学系の話ですが、非力学系、例えば株価とか、北川先生が話をされたかもしれないですが、株価なんていうのは1つひとつは非常に簡単なルールで行っていますが、全体は自分を再生しながら値段をつけるものだから、どこに行くかわからないとか基準がないんです。だから、ニュートンに代わるものとはいうときに、それは二つの構造は不安定だけれども数学的に記述できる系と、本当に数学で記述できるかできないかわからないような株価、できると思っている人はいるかもしれないですが、そういうような脳の中身とか生命の中の科学技術、そういうことはあるのではないかという気がします。

[小 林] ですから要素の法則ではなくて、そういう複雑系とか、そういうところである秩序を維持するような別のロジックはどういうものか。そういうものにどういう普遍性があるかということだろうと思います。多分、カオスとかいろいろな研究もそういうことをどこかでは意識されているのだろうという気がします。

[湯 川] カオスの中も二つの検証が行われます。一つは、統計力学のようなものを正当化するための検証と、それと別に……。

[小 林] それはそういうことを言っているわけではない。

[湯 川] 別の方向ですね。だから生命とか、要するに……。

[小 林] 決して運動方程式で成り立っているわけではなくて、別の秩序を維持する……。

[湯 川] 非平衡、平常ベース。

[小 林] そういうことですね。そういうものに共通する原理があるかということ。

[廣 田] 重力が関係する未解決な問題として暗黒物質とか暗黒エネルギーというのはどういうことになっているのですか。

[小 林] それはどちらかということ観測から出てきています。暗黒エネルギー、ダークエネル

ギーというのが存在する。存在するというのは過去の進化を観測すれば見えるわけですがけれども、その正体は何かというのは今はわかっていないということですね。それがあれば宇宙の膨張がどうなるかとか、そういうことは一応わかるわけですがけれども。

[廣 田] 重力的な観測ですか。重力の観測は非常に大きい。

[小 林] 基本的には重力的な観測ですね。

[廣 田] やはりおっしゃった問題と関連なしではない？

[小 林] ただ、それはあまり量子重力ではなくて。

[廣 田] 古典的な。

[湯 川] 暗黒物質と暗黒エネルギーは基本的に違うというか、性格も全然違う。暗黒物質というのは小林さんの得意な理論の中でもいつかは発見されるようなものとしての切り替えは可能だと思うんだけど、暗黒エネルギーというのは我々が今宇宙の膨張というのを力学系として考えると、そんなエネルギーが必要というだけで量子重力というのは重力の本質がわかっていないから、例えば膨張するというのが中から膨らみますという力として膨張するような考え方と、例えば結晶の成長のように大きくなるのは多分どんどん何かしら力でなくて、ただ境界が広がっていただけだと。

[小 林] 圧力として見たときの性質の違いですね。ダークマターなのかダークエネルギーか。負の圧力なのか、普通の物質的な正の圧力を持っているものか。そういう違いが膨張の式を変えてくるといって、それだけの違いなので、例えばいわゆる潜熱みたいなものでもダークエネルギーにはなれるわけです。

[湯 川] そういう解釈もできるという。

[小 林] もできるという。

[本 島] 今、急速に研究が進んでいるようですから比較的早いタイミングでかなりはっきりしたことはわかるのではないかと思います。そのあたりはどうなんですか。

[小 林] 観測は今の手段を精密化できるのだらうと思います。正体は何かというほうの話はなかなか進まないんです。むしろダークマターというのはいろいろな候補がありますから、この候補に対してはこういう観測をする、こういう実験をするというのがありますけれども、それがヒットしなければわからない。ダークエネルギーのほうは実はそれ以上に正体を明らかにするのは難しいだらうと思います。

[本 島] 昔、たしか大学2年のときだったと思いますが、デイラックの教科書を読んだ時のことです。私にはものすごく頭のいい研究者の方だなという印象がまずあって、わりあいわか



りやすかったような気がいたします。その教科書の最後のページだったと思いますが、万有引力定数が変わる可能性があるという指摘をされていて、私は非常にショックを受けたことを今思い出しました。

[小 林] そういう話は今まだあります。

[湯 川] 小林さんに最後に聞きたいのは、スーパーストリングという研究がずいぶん長くされています。そして最初からすごいセオリー・オブ・エブリシングという格好で話はずいぶん長く続けているけれども、続けば続くほどわからなくなっていっているような気がするんですけども、今は乱世期とかありとあらゆる話が出て、最近はあまりセオリー・オブ・エブリシングとは言わなくて、ADCF Tとか、特別ほかの性格がそこに入ってきて、本当の量子重力をわかりたいというような性格がどんどん薄まっているけれども、本当にスーパーストリングというのはあれだけ長いことみんながやっていて、答えがないというのは正しいんですか。どう思いますか。スーパーストリングはみんなが思うように正しい理論なのでしょうか。

[小 林] 量子重力という理論ができるメニューがあるとしたら、スーパーストリングの延長線上にしかないというのは正しい。

[湯 川] なぜ。

[小 林] 単にストリングでなくてあらゆる可能性を包含して、その間が全部つながっている。だから、ある意味それ以外のもは考えられないということと、さっき言いましたように、それは発散とかそういうものがないし、すべてを含んでいるとか、そういう条件を満たしているとか。

[湯 川] 量子が大きいからということ。

[小 林] 単にストリングでなくてあらゆる可能性を包含して、その間が全部つながっているというような、そういう正体がということになっているんですね。だから、ある意味それ以外のもは考えられないということと、さっき言いましたように、それは発散とかそういうものがないし、それからいろいろ含んでいるとか、そういう条件を満たしているとか。

[湯 川] それはずいぶん前にわかっている。

[小 林] それの正体を見ていくと、包含する部分がどんどん大きくなってきた。それを今、記述しきれないというところが問題で。

[湯 川] もっと記述できなくなりつつあると言うべきで。

[小 林] そうかもしれない。ですから、それを記述するような数学はあるのかという。

[高 畑] それは10次元を落とすのでストリングという。10次元そのものの中で見ることでは

きていないんですか。

[小 林] 要するにストリングというのは、ある極限をとるとストリングということで、それが本当に実際に相互作用している実態として全体を見ようと思うと、そんなものだけでは閉じませんよということが、逆にわかってきたということ。

[廣 田] 次の物理学の基本的な理論が出る前夜というのか、いろいろ実験データが集積していますね。それでよくわからないということもあって、それを積み重ねていったときにポカッと出てきたような、あるとしたら量子論しか知りませんが。今、観測のほうはやはりコライダーみたいなものですか。

[小 林] 素粒子の実験という意味ではそういうところですけども、それは量子重力とどう繋がるかは分からない。

[廣 田] むしろ天文観測。

[小 林] 天文観測で出ているのも重力ではありますがあまり量子重力には。これを導いているのはすべて論理のコンシステンシーみたいなところですね。

[湯 川] だけれどCMPだから。宇宙の初期の初期までいけば必ず量子論と重力理論のスケールが同じになる時期があるはずだから。

[小 林] それはそれとして、もっとほかのところにこういう何か本質的な。

[高 畑] 先生は現代文明がニュートン力学の上に成立しているとおっしゃった。これは初めて聞いて、何か目から鱗が落ちるような。非常に本質的な側面をおっしゃったのではないかという気がしています。量子力学とはおっしゃらない？

[小 林] 最近のことを言えば、それは影響しているかもしれませんが、もう少し長いタイムスパンで見たと、何か大きい意味でニュートン的なロジックが大きく膨らんだ結果ではないかな、そういう気がします。

[本 島] 我々の分野ですとプラズマの閉じ込めという概念が非常に重要になってきます。原子核の閉じ込めという概念もハドロン中にクォークが閉じ込められていることと、プラズマの様にナビエ・ストークスとブラソフ方程式によって支配される閉じ込めの概念の理解については共にクレイ研究所の千年紀問題になっていて、かなり面白い問題として指摘がされています。その際ですが、初期条件のことを考えたり、外界とのパラメータのやりとりとかを見ていく場合に閉じ込めるという概念はどれぐらい重要になってくるのでしょうか。生命にも案外閉じ込めの概念が当てはまっていて、境界が非常にはっきりしていますね。複雑系というのも境界条件とか、繰り返しの境界条件を仮定すると流れが出てきたりとか、いろいろ面白いこ

とがわかってきているように思うんですけど。先生がおっしゃったことはいわゆる閉じ込めという概念とは全く関係がないのでしょうか。

[小 林] あまりそういうことを考えたことがないので、あるかないかわかりません。

[本 島] 例えば複雑系について考えた場合もダイナモ効果と呼ばれる現象が出てきて、カッシーニの発見した木星の帯なんかそうですが、ゾーナルフローと呼ばれる安定な層流が形成されます。自然界では、色々なものに自律性があるというか、結局、自己組織化するという面が必ずあるようですし。

[小 林] そういうのが個別にそれぞれ説明があるのはそれでよいのですが、そこで終わっていいのか、その先に行けないのかというのが一番気になるところです。

[廣 田] では、ありがとうございました。