

仁科記念講演

素粒子物理学は どこへ向かうのか

小林 誠

高エネルギー加速器研究機構名誉教授
国際高等研究所フェロー

2006年12月

本財団の2006年度の仁科記念講演会は次のように開かれた。この仁科記念財団冊子NKZ-46はその講演録である。

2007年4月 仁科記念財団

第52回定例 仁科記念講演会

『素粒子物理学はどこへ向かうのか』

日時：2006年12月1日(金) 16:30～18:00

場所：東京大学理学部4号館1220号室

講師：小林 誠 高エネルギー加速器研究機構名誉教授

国際高等研究所フェロー

主催：仁科記念財団・東京大学理学部物理学教室

NKZ-46

第52回定例 仁科記念講演

『素粒子物理学はどこへ向かうのか』

© 2007 Nishina Memorial Foundation



素粒子物理学はどこへ向かうのか

小林 誠

高エネルギー加速器研究機構名誉教授

国際高等研究所フェロー

こういうタイトルでお話をする事になりましたが、どこへいくのか分かっていれば苦労はないのでありまして、これに対する答えをお話できるわけではありません。素粒子物理学の時間的发展を振り返ってみて、進むべき方向を考えてみるということにしたいと思います。その意味で、未来の話より、過去、現在の話が多くなるかと思います。

素粒子物理といいますと、素粒子、つまり物質の一番ミクロの構成要素は何かということが中心の研究と思われるかもしれませんが、もちろんこれも重要な研究テーマですが、同時に素粒子物理学は自然法則の最も基本的な姿を追求する研究でもあります。当然のことながらこれらは不可分の関係にあって、両者が相まって自然の認識が進展してきたという長い歴史があるわけで、その先端がいわゆる素粒子と呼ばれるものに到達していることから素粒子物理学と呼ばれているということです。

基本的な構成要素を追求するというほうの歴史的進展は、原子・分子、原子核、核子といういわゆる物質の階層性を明らかにしてきたわけですが、こちらのほうは比較的ポピュラーなので、その話は省略して、ここでは基本的な自然法則を追求する流れについてまず考えることにします。

少々時代をさかのぼりますが、ニュートンから始めることにします。プリンキピアが書かれたのが1687年ということですから、17世紀までさかのぼることになります。科学史の話をしようというわけではなく、概念的な進展を大づかみにとらえたいということで、科学史的な正確さにはあまり注意を

払っていませんので、間違ったことを言うかもしれませんが、その点ご容赦ください。

さてニュートンですが、彼は物理学や数学で大変多くの重要な貢献をしています。ここで考えるのはいわゆるニュートン力学つまり古典的な力学の理論です。ニュートン力学は大きく分けて二つの要素から成り立っていると考えられます。ひとつは運動の法則であり、もうひとつは万有引力の法則つまり重力の本性を明らかにした部分です。

運動の法則の基本は運動方程式

$$m \frac{d}{dt} \vec{v} = \vec{F}$$

で、物体の運動の加速度は力に比例するという事です。この意味することは、力が分かっているれば、対象の運動の時間発展はこれによってきまるということになります。つまり適当な初期条件を与えられたときそのシステムが時間とともにどう変化していくかを決めているのが力学の法則ということになります。

このことは単にニュートン力学にとどまらず、物理学全体に対して大きな影響を与えていて、時間発展を記述することが物理法則の主要な役割と考えられるようになっていきます。量子力学もその考え方の上にできています。

一方万有引力の法則の方は良く知られているように、物体の間にはその質量の積に比例する引力がはたらき、その大きさは距離の二乗に反比例するというものです。

$$\vec{F} = -G \frac{m_1 m_2}{r^2} \frac{\vec{r}}{r}$$

ところで運動方程式の右辺の力は、どんな力でも良いのであって、万有引力つまり重力の力はその一種類に過ぎないわけです。つまり運動の法則は大変一般的な枠組みであり、その中にいろいろな力を許容するという構造をしています。ニュートンのやったことは一般的な枠組みとしての運動の法則と力の一種類である重力の本性を明らかにしたということになります。

さて時代は進んで、重力と並んで重要な力である電気・磁気の力の理解が進みます。そしてその集大成として19世紀の中ごろにマクスウェルの理論が完成します。ここで電磁気学の詳細に立ち入るつもりはありませんが、マクスウェル方程式のひとつの帰結として、電磁波の存在があります。重要な

のはその伝播速度が当時知られていた光の速度とよく一致したことです。その結果、光の正体が電磁波であることが決定的になったわけです。

ここで大きな問題が起きます。この電磁波の伝播速度つまり光速は何に対する速さかということです。当時の人が考えたように、電磁波を伝える何らかの媒質があって、それに対する速度と考えたくなるところですが、よく知られているように、そうした媒質の存在は否定されることになります。ここでは歴史的な発展の詳細には立ち入らないで、問題の形式的な側面に注目してみます。

ニュートンの運動方程式は、互いに等速度で運動する座標系、すなわち慣性系では等しく成立します。速度 v で運動している物体を v_0 で動いている観測者から見ると、 $v - v_0$ となる。つまり観測者の運動速度分だけ足したり引いたりされる、もっと正確にはベクトルの的に足されるわけですが、これをガリレイ変換と言います。

したがってニュートン方程式はガリレイ変換に対し不変であると言えます。ガリレイ変換では速度は観測者によって変るわけですから、どの慣性系でも同じというわけにはいかないのが、光の速度が決まってしまうマクスウェル理論はガリレイ不変ではないということになります。

この謎をといたのがアインシュタインの特殊相対性理論で、形式的に言えば、互いに等速運動する観測者間、つまり慣性系の間の変換は、ガリレイ変換ではなくローレンツ変換で結ばれるべきであるということになったわけです。もちろんこれは時空に対する概念を根本的に変えることを意味していて、ニュートン力学とは相容れないのですが、ニュートン力学が間違っているかという、そうではないわけです。ニュートン力学は速度が光の速度に比べて遅いときには正しい理論になっており、これを速い速度のときも相対論と矛盾しない形に書き換えることはそれほど難しいことではありません。

実際、速度のローレンツ変換の式

$$v' = \frac{v - v_0}{1 - \frac{vv_0}{c^2}}$$

を見ると、 v か v_0 が光速 c にくらべて小さければ、分母の第2項が無視できて、ガリレイ変換にもどります。

特殊相対性理論の論文が発表されたのは1905年のことです。余談ですが、この年はよく奇跡の年と言われています。それはこの年にアインシュタイン

がブラウン運動、光電効果と特殊相対論という3つの論文を相次いで発表したことによります。

さて特殊相対性理論と並んで20世紀初頭のもうひとつの重要な進展は量子力学の完成です。量子力学の成立にいたる歴史は大変興味深いもので、アインシュタインの光電効果もその端緒となる発見であるわけですが、ここではそれには立ち入らないで、大きな流れの中での量子力学の位置づけを考えてみます。

量子力学は物理量やその測定を従来のそれから大きく変えました。電子は粒子であるのと同時に波としての性質も持つ、逆に光は波であるのと同時に粒子性も併せ持つとか、粒子の位置と運動量を同時に正確に決定することはできないなどという、従来の概念では理解できないような性質を持つことが分かってきました。

結局どういうことであったかをまとめてみると、従来は物体の位置とかエネルギーは連続的な値をとるもので、測定すればその値を知ることができると考えられていて、物理量と測定値を本質的に区別することは無かった。それに対し量子力学では状態は波動関数で、物理量は演算子として記述され、測定して得られる値はその演算子の固有値ということになります。状態、物理量、測定値がそれぞれある数学的枠組みの中の異なる量で表されるということになったわけです。

量子力学はこのように基本的な概念の変更を迫るものでありましたが、ある意味でニュートン力学に連続的に繋がるものであります。すなわち、量子力学の基本的な定数はプランク定数と呼ばれるものでありますが、これは作用の次元を持つ量です。ちょうど角運動量と同じ次元になります。そこで、少し抽象的になりますがこういうことが言えます。作用がプランク定数にくらべて充分大きいときにはニュートン力学による記述ができるようになる。もう少し正確に言えば量子力学で計算した測定値の平均値がニュートン力学に従うということが言えて、これを対応原理といいます。光速度にくらべて遅い現象では相対論と古典論が一致するというのと同じような関係です。

さてこのように物理学の大変革をもたらした相対性理論と量子力学ですが、それぞれ単独には古典的な物理学との折り合いをつけることはそれほど難しくないということを説明しました。ところがこの二つを両立させることが意外に難しいのです。極言すれば両者を整合させることつまり、相対性理

論に矛盾しない量子論を作ることが素粒子物理の中心課題であり、現在なお最終的な解決に至っていないといえるのです。

そこでこの点をもう少し具体的に見ていこうと思います。量子力学の基本方程式はシュレーディンガー方程式ですが、その際、ハミルトニアンという量が基本になります。これはエネルギーを表すもので、通常

$$H = \frac{p^2}{2m} + V(x)$$

という形をしています。最初の項は運動エネルギーを表すもので、これはニュートン力学でおなじみのものですが、相対論的ではない表式です。そこで単にこれを相対論的なエネルギーを表す表式にすればよいかというと、それではうまくいかないのです。その説明はすこし込み入っているので、省略することにしますが、この問題に取り組んだのがディラックで、有名なディラックの方程式を提唱し、その結果、反粒子の存在を予言することになります。これは1930年ごろのことです。

さて反粒子の存在は、粒子・反粒子の対生成や対消滅という現象が起きることを意味します。つまり相対論と量子論をドッキングさせると粒子の生成消滅ということに導かれるわけですが、こうなると一つの粒子に着目してその座標といった量を追っかけるだけでは済まなくなります。根底から現象の記述を変える必要に迫られることになります。

この目的で発展したのが場の量子論であります。場という考え方はすでに電場や磁場ですでに登場しているわけですが、場の量子論では電子のような物質を構成する粒子も場として記述します。場の量子論は粒子の生成や消滅を記述するのに都合の良い理論形式であります。

場の量子論は一定の成功を収めますが、具体的な力を記述しようとするときと重大な困難に直面します。いわゆる発散の困難と呼ばれるものです。すなわち相互作用の高次効果を量子論的に計算しようとするとき、いたるところに発散する量が現れるという問題です。

この困難の度合いは力の種類によって異なります。一番初めにこの困難の克服に成功したのは電磁気の力つまり電磁相互作用の場合ですが、実はこの時点までに重力と電磁気の力の他にもう二種類の基本的な力が存在することが分かってきましたので、まずその話をしておきたいと思います。

ところで、ここまで力の種類という言い方をしてきましたが、一方で相互

作用という言葉も使いました。力も相互作用も同じことと思っていただいてもよいのですが、少しニュアンスが違うので、その関係を考えておきましょう。

電磁気を例にとりますと、たとえば電荷を持った粒子は電場や磁場から力を受けるというのはよく知られたことです。これは確かに力というイメージでよく理解できます。しかしこの力が発生するためには、電荷や電流が電場や磁場を作り出すという作用とセットになって初めて成り立つことです。そしてこの電場や磁場を作り出す作用は電磁波や光を放出する作用でもあります。これらの作用は力というイメージではとらえにくいものです。そこでこうした作用全体を表す言葉として相互作用という言葉を使うほうが適切だということになります。

さて本題に戻って、重力相互作用と電磁相互作用に加えて、新たに認識された二種類の相互作用とは強い相互作用と弱い相互作用です。「強い」、[弱い] は単なる形容詞ではなく、「強い相互作用」、「弱い相互作用」というれっきとした相互作用の名前です。

まず強い相互作用ですが、1932年に中性子が発見されて、初めて原子核が陽子と中性子からできていることが分かりました。陽子も中性子も同じくらいの重さで、陽子のほうはプラスの電荷を持っているのに対し、中性子のほうはその名の通り電荷を持ちません。ここで問題になったのが、陽子と中性子を強く結びつけて原子核を作る力は何かということです。これを解明したのが湯川秀樹の仕事です。湯川理論によれば、新しい力を媒介する未知の粒子が存在するはずだということになり、湯川中間子、現在のパイ中間子の存在が予言されたわけです。

とにかく陽子や中性子には、重力でも電磁力でもない相互作用がはたらき、これによってパイ中間子の放出・吸収が起こり、その結果原子核を作るような力が生ずることになります。この相互作用のことを強い相互作用と呼ぶということです。強い相互作用の研究のその後の発展はまたあとで説明することにして、ここでは二つのことを述べておきます。

ひとつは強い相互作用は、その到達距離が、原子核のサイズ程度の $10^{-14} \sim 10^{-13} \text{cm}$ と非常に短いことです。これに対し、重力や電気力は距離の2乗に反比例して距離とともに弱くはなりますが、それでも遠方まで到達する力です。さて原子は原子核のまわりを電子が取り囲み 10^{-8}cm 程度の大きさを持っていますので、原子の外まで強い力が染み出すことはありません。これがそ

れまで強い相互作用の存在が知られることが無かった理由です。もちろん太陽の中のような高圧、高温の状態では原子核同士が衝突して反応が起きます。太陽のエネルギー源として強い相互作用の恩恵を受けているわけですが、それが分かるのは後のことです。

もう一点は、強い相互作用の到達距離は短いのですが、その中では相互作用の強さは大変強いということです、それゆえ強い相互作用と呼ばれるわけです。

次に弱い相互作用ですが、これは原子核の β 崩壊を引き起こす相互作用のことです。放射線の発見は19世紀の終わりのことです。自然放射線には α 線、 β 線、 γ 線の3種類があることは良く知られていますが、このうち β 線の正体が電子であることが分かったのは20世紀に入ってからだと思います。当初は原子核の中にある電子が染み出してくるのが β 線と思われたこともあったのですが、原子核の構造が明らかになって、原子核の中の中性子が陽子になるときに電子とニュートリノを放出するということが分かってきました。この結果、この反応を引き起こすのはそれまでに知られていたどの相互作用とも違う新しいものということになり、弱い相互作用と呼ばれるようになりました。弱い相互作用という名前は、その強さが強い相互作用や電磁相互作用に比べて非常に小さいことからきています。

ちなみに、 γ 線は波長の短い電磁波であり、 α 線は陽子2個と中性子2個の塊が原子核の中から飛び出してくるもので、いずれも新しい相互作用の存在を意味するものではありません。

弱い相互作用の場合、力というイメージはほとんどありません。しかし β 崩壊のような反応が起きるのは何らかの作用の結果であって、その正体が弱い相互作用ということになります。弱い相互作用も強い相互作用と同じように到達距離の短い相互作用であり、到達距離は強い相互作用よりさらに短く、実用上一点で作用すると考えてよいほどです。

さて少し回り道をして基本的な相互作用には4種類あるということを説明しましたが、もとにもどります。何が問題であったかという、相対論と量子論を両立させるために場の量子論でこれらの相互作用を記述しようとする、と発散の困難に出会うということでした。

この発散の困難を最初に克服できたのは電磁相互作用の場合でした。これは朝永振一郎のノーベル賞で有名な繰り込み理論というものによるもので

す。詳しい説明をする時間的余裕はありませんが、一言で言うと、発散を測定にはかからない数個のパラメータに押し付ける、つまり繰り込むことができて、測定量の間の関係には発散は現れないようにできるということです。質量を例にとると、相互作用が無いときの質量として裸の質量というものを考えることができますが、実際には相互作用の結果としてこれに補正が加わります。つまり相互作用という服を着た質量が実験で測れるもので、裸の質量のほうを直接測ることはできません。今この服の重さを計算してみると発散つまり無限大になるというのが問題です。繰り込み理論によれば、他のいろいろな測定量を服を着た質量で表してやれば、そこには発散はもはや現れないということになります。もちろんその関係式のなかには量子論的な効果はきちんと入っているわけで、たとえば電子の磁気能率という量がありますが、これはすばらしい精度で実験と一致していることが知られています。

服の重さが発散するということから、発散を相殺する裸の質量も無限大ということになり、問題が最終的に解決しているとはいい難いところもありますが、実験との一致が証明しているように、少なくとも測定量の間の正しい関係をあたえる処方という意味で、量子論と相対論に矛盾しない理論を手にしたことになります。これは1940年代の終わりのことです。

電磁相互作用ではうまくいった繰り込み理論ですが、そのままでは他の相互作用には適用できませんでした。理由はいろいろありますが、ここでは後の話との関連で重要なことについてのみ説明します。

電磁相互作用はゲージ理論と呼ばれる場の量子論の中の一形式で記述されます。ゲージ理論の特徴は、ゲージ粒子と呼ばれる特別の粒子が相互作用を媒介します。電磁相互作用の場合は光子がゲージ粒子になります。そしてゲージ粒子と他の粒子の相互作用はゲージ対称性と呼ばれる特別の対称性によってその形が決定されるのですが、この特別の理論形式のおかげで繰り込み理論が成立したと言えます。

これを他の相互作用に当てはめようとするといろいろな違いが出てきます。まず電磁相互作用の場合はゲージ粒子が光子一個だけでしたが、他の相互作用の場合には複数のゲージ粒子が互いにカップルしているものを考えることが必要になります。これが第一の違いです。電磁相互作用のような場合を可換ゲージ理論、後者の場合を非可換ゲージ理論と呼びます。可換、非可換は対称性の数学的構造を表すことばですが、ここではその詳しい意味は分

からなくてもかまいません。第2にゲージ粒子の質量は素直に考えると、ゼロであることが期待されます。光子はそのとおりゼロですが、強い相互作用や弱い相互作用では対応する質量ゼロの粒子は存在していません。

これらの問題の解決に20年以上がかかったのですが、結論を言えば、1970年代の初めに、非可換ゲージ理論が繰り込み可能であることが証明され、さらにゲージ粒子の質量の問題にも回答が与えられました。

その結果、強い相互作用と弱い相互作用についてもゲージ理論の形式で記述できるようになったわけです。ただし重力相互作用についてはこれでは解決しませんが、通常の素粒子現象には重力相互作用ほとんど効かないので、現実の素粒子現象を記述する枠組みは整ったことになります。その結果、いわゆる標準模型が成立することになります。

標準模型の成立にはゲージ理論の進展とともに1970年代に相次いで新粒子が発見されたことも大きな要素であります。これを巡るエピソードもたくさんありますが、今日は法則の問題に重点を置こうと思いますので、そこには立ち入らないで、標準模型の完成した姿を簡単に説明することにしたいと思います。

模型、英語ではモデルと言いますが、この言葉からは何か本物ではないというような印象を持たれるかもしれません。たしかに物理学でモデルは、そう考えてみてうまく現象を説明できるかどうかを試すための仮説という役割があります。標準模型も当初はそういう仮説としてスタートしたのですが、いろいろな側面からの検証を経て、現在では確かに自然はそのとおりにできていると考えてよいものです。

さてその内容ですが、まず自然界を構成する基本的な構成要素は表1に示す6種のクォークと6種のレプトンです。6種のクォークにはそれぞれ名前がついていますが、いまは無視して結構です。レプトンの中に、おなじみの電子があります。ニュートリノもレプトンの仲間です。

そしてこれらのクォークやレプトンがどんな相互作用をするかというと、まず強い相互作用はクォークのみに働き、レプトンには働きません。電磁相互作用は、電荷を持っている粒子に作用するので、それぞれの電荷が表1に示してありますが、ニュートリノ以外に働きます。そして弱い相互作用はすべてに働きます。重力相互作用もすべてに働きますが、前にも言ったように通常の素粒子現象にはほとんど効きませんので標準模型では無視します。

これが標準模型の基本的な枠組みです。ここで念のため、標準模型でわれわれの身の回りの物質の構造がどう説明されるかの道筋を簡単に説明しておきます。通常物質を構成するのは、クォーク・レプトンのうち、 u -、 d -クォークと電子です。まず u -、 d -クォークに強い相互作用が働き、それらの束縛状態として、陽子と中性子ができます。陽子と中性子の違いは u 、 d の数の違いで、その結果、電荷の差が生じます。

陽子と中性子はさらに結合して原子核をつくります。これも強い相互作用の効果です。少し乱暴に言えば、いくつかのクォークが強い相互作用の結果、ぎゅっと固まったのが原子核だということになります。

そして原子核はプラスの電荷を持ちますが、これと電子のマイナスの電荷が電磁相互作用により引き合って、束縛状態を作ったのが原子ということになります。原子の大きさは、電磁相互作用の強さと電子の重さで決まりますが、原子核より桁違いに大きくなります。つまり原子の表面は電子の雲で覆われていることになります。その結果、原子が分子を作ったり分子が化学反応をおこしたりするのはすべて外側の電子の働き、つまり電磁相互作用によるということになります。こういうと簡単に聞こえますが、もちろん複雑な系で何がおきるかがすべて解明されているわけではありません。しかし少なくとも原理的な意味では分かったと言って良いでしょう。

なおここでは弱い相互作用は登場しませんでした。自然界の現象の中でも、原子核のベータ崩壊や太陽の中の核融合反応で弱い相互作用は重要な役目を果たしています。

さてここで標準模型成立の意味を整理しておきましょう。まとめると「既知の素粒子現象を、相対論と量子論に矛盾せずに、基本的な構成要素のレベルから原理的には記述できるようになった」と言うことができます。これはかなり画期的なことだということをお分かりいただけるでしょうか。

標準模型の成立は1970年代のことです。もちろんその後の検証によって、より確かになったのですが、実は標準模型以降、ここで考えているような大きなスケールで考えたときの進展という意味での、決定的な進展はなく、素粒子物理学は停滞していると言ってよいと思います。そこで将来に向けて何が課題なのかについて話を進めることにします。

まず標準模型ですが、これは現象を矛盾なく説明できるものでありますが、不満がないわけではありません。標準模型の構造にはある種の原理があ

りますが、それでもかなりのインプットが必要です。さらに先ほどの説明では言いませんでした、クォークやレプトンの質量や混合角といった量をパラメータとして実験に合うように調節するということが必要です。こうしたことから、標準模型は自然法則の最も基本的な姿というよりは、さらに基本的な原理から導かれるべきものと思われます。

もう少し具体的にどうということが説明したいかをあげてみると、第一になぜそれぞれ6種類のクォーク・レプトンがあるのかということです。特に電荷で整理すると、同じパターンが3重に存在しているのはなぜかということです。

第2はなぜ強さの違う3種の相互作用が存在するかという点です。第3は先ほど述べたことですが、これらの質量や混合角がどのように決まるかということです。

第4は標準模型のエネルギースケールはどのようにして決まるのかということです、これは少し説明が必要です。標準模型に現れる粒子の質量は、ニュートリノは別にしても、一番軽い電子から一番重い t -クォークまで6桁ぐらいの開きがありますが、理論的にはこれらは標準模型の質量の元となるある量と関係づけられています。ある量というのはヒッグス場の真空期待値というものです。エネルギーにしておよそ300GeV程度です。この値がどのようにして決まったかというのが問題です。

これらの問題についての答えは現在のところ分かっていないのです。これらに答えることが将来の素粒子物理学の課題であります。

この中で特に第4の問題と関連して、標準模型を特徴付けるエネルギーである300GeVかあるいはその少し上のエネルギーの領域に新しい粒子が存在したり新しい現象が起きたりする可能性があると考えられるようになってきました。

詳しいことを説明する時間はありませんが、自然界のエネルギーの基準は基本的な物理定数の組み合わせで決まる値にとるのが自然です。この値としてはすでに、プランクエネルギーが知られています。プランクエネルギーは相対性理論を特徴付ける光速と量子力学を特徴付けるプランク定数と重力定数からきまるエネルギーの値で 10^{19} GeV程度の大きさです。標準模型のスケールはこれに比べて10数桁も小さいのですが、これは少々不自然ではないか、そうなるような理由は何かというのが第4の問題の意味です。

この問題に完全な解答を与えているわけではありませんが、ひとつの有力な可能性として超対称理論というものがあります。少し難しくなるかもしれませんが、素粒子にはボーズ統計に従うものとフェルミ統計に従うものの二つのタイプがありますが、超対称性理論ではこの二つのタイプが必ず対になって存在します。これを標準理論の場合に当てはめてみますと、標準理論に登場する粒子に対になるものが、新たに存在しているはずだということになります。そしてそれらの新しい素粒子が標準理論のエネルギースケールかその少し上にあるだろうと考えられます。これは比較的近い将来の実験的研究の主要な課題となるため注目を集めています。

こうした超対称粒子を直接確認するには、高いエネルギーの加速器を使って粒子を生成することが必要になります。スイスのジュネーブ郊外、スイスとフランスにまたがったところにある CERN で、現在 LHC と呼ばれる加速器を建設中です。周長約 27km のトンネルで 7 TeV の陽子同士を正面衝突させるものです。これは 2008 年から本格的に実験が始まる予定です。ここで超対称粒子が見つかる可能性があり、期待が高まっています。

さて超対称理論は、標準模型の先に位置するものとして有力な可能性であり、もしそれが実験的に確認されれば重要な進展であることにはまちがいはありませんが、さきほどあげた標準模型の課題、特に 1 番や 3 番については直接的には何も答えていません。2 番や 4 番についても解決の助けにはなっても答えを与えるところまで行きません。したがって先の課題は依然として課題であることを記憶しておいてもうひとつの重要な未解決問題である重力相互作用に進みます。

重力の出発点はニュートンでしたが、これを相対論の立場から考え直したのが、アインシュタインの一般相対性理論です。相対論という名前がついていますが、これは重力相互作用を記述するための理論です。もちろん相対論との整合性はあるのですが、量子論のことは考えられていないのであって、その意味で古典論ということになります。

量子論になってはいませんが、一般相対論は宇宙進化の問題に対して重要な役割を果たしています。すなわちビッグバン宇宙論と呼ばれるものの基礎となっているわけです。ビッグバンについてはいろいろところで解説されていますし、時間もありませんので省略して、宇宙の問題で今日の話に関連することを少しだけお話しておきます。

宇宙膨張の様子は、重力を生み出す宇宙のエネルギー密度によってきまるのですが、最近の詳しい観測から、星などの普通の物質は4%ぐらいで20%ぐらいは暗黒物質と呼ばれる光を出さない物質、そして76%は暗黒エネルギーと呼ばれるものということが分かってきました。暗黒エネルギーの正体はまだ確かではありませんが、一番簡単な可能性は一般相対論の中で宇宙項と呼ばれるもの、真空のエネルギー密度という感じのものです。問題はその大きさです。エネルギーの4乗の次元ですが、 $(10^{-12}\text{GeV})^4$ 程度になります。先ほどの標準模型のエネルギースケールと同じように、プランクエネルギーと比べてみると異常に小さいことが重要な問題とされています。

2番目は宇宙にはなぜ反物質がないのかという問題で、これは素粒子レベルの問題として、CP対称性の破れという問題と密接な関係があり、標準模型だけでは説明が難しいと考えられています。

第3に、宇宙のはじめのころ、エネルギー密度が猛烈に高かったときとか、ブラックホールの特殊な性質を問題にしようとする、重力相互作用を古典論に従って考えていたのでは不十分で、量子論のことを考えることが必要になってきます。

そこで相対論と量子論の両立という大問題に戻しましょう。重力相互作用だけが未解決だということでした。じつは一般相対論も広い意味でのゲージ理論という性質を持っているのですが、これを通常の場合の量子論の立場から取り扱おうとするといろいろと難しい問題が生じます。発散の問題ひとつをとっても、通常の繰り込み理論の処方は通用しないことが分かりました。一言で言えば、発散が強すぎるのです。

重力の理論の進展は思いがけないところから起きました。素粒子の反応の現象論的なモデルとして発展した弦理論、素粒子を点粒子ではなく、紐、つまりストリング状のものとする理論ですが、これが重力相互作用の理論になることが発見されたのです。

この点について簡単に説明してみます。超弦理論と言いますが、超は超対称性の超で超対称な弦理論ということですが、難しくなるのでそこは無視して、点状の粒子の代わりに紐を考えると、これが重力相互作用を自然に記述していることが分かってきました。なぜそんなことになるかという、重力相互作用を媒介する粒子、重力子と言いますが、これはまだ粒子として見つかってはいませんが、理論的には重力子はスピン、つまり自転角運動量2

を持つと考えられ、これが他の相互作用と決定的に違う点です。一方弦理論のほうには、このスピン2の粒子が極めて自然に現れて、重力相互作用としての性質を満たしているという事情によるものです。

場の量子論の問題は量子補正を計算すると発散することでしたが、弦理論には発散は現れません。簡単に言えば、点の代わりに弦という広がったものからできているためと考えられます。これは大変なメリットです。

そのかわりというわけでもありませんが、時空の次元が4次元ではなく、10次元でなくてはならないというようなことが結論されます。これも現実と矛盾するわけではありません。余った次元はコンパクト化、つまり通常の空間としては認識されないほど小さくなっていると考えればよいわけです。

また弦理論はそれ自身の中に通常のゲージ理論や物質を構成する粒子をも内包する可能性があることが分かってきました。

こうして超弦理論が重力の量子論の最有力の候補となって盛んに研究が行われてきました。しかしこの理論は未完成です。未完成ながら、というか未完成であるからこそ、そこからはいろいろな新しい考え方が生まれて大変刺激的な研究分野になっています。数学にも大きな影響を与えています。その全貌はとても説明できませんので、ここから先は、その一部について、わたくしの偏見の混じえた話をしてみます。

さて矛盾のない弦理論を作ろうとすると強い制約があります。当初そうした矛盾のない弦理論は5種類あると思われていました。そしてその中のどれかが実現していると考えられたのですが、実は元をただせばひとつの理論であって、それをただ別の方向から見ているだけではないか考えられるようになってきました。

このことは大変重要な意味を持っています。今までの基本的な理論、たとえばニュートンの運動の法則とか、標準模型を作るときのゲージ理論はいわば基本的な法則の枠組みであって、その中にいろいろな力や相互作用を取り込むことができました。ニュートンの運動方程式でしたら右辺の力の項に新しい力を付け加えることができました。ゲージ理論の場合はゲージ対称性の数学的構造を変えることにより何種類ものゲージ理論ができます。それだからこそ、標準模型の課題の中で、なぜ3種類もの相互作用が存在するかということが問題になりました。

それにたいして、弦理論ではひとつの理論しか許されないとするとこれ

は決定的な違いです。ひとつしか許されないとすると、その中に、強い相互作用や電磁相互作用や弱い相互作用も入っていなければなりません。そればかりか、クォークやレプトンといった物質を構成するものもその中に入っていることが必要です。まさに Theory of Everything です。この理論が完成して、その解をもとめることができれば、さきほどの標準模型のところであげた課題もすべて解決するはずですよ。

したがって、Theory of Everything としての期待が大いに高まったのですが、事態はそう簡単ではないことが分かってきたのです。そもそも理論は未完成の段階ですが、それはそれとして、弦理論の予言能力についての疑問が出てきたのです。正確に言うのはむづかしいのですが、簡単に言えば、弦理論の解は無数にあって、どれがこの世界として実現するかを決める理由が見つからないのではないかとということです。

こうした中で最近よく話題になるのが「人間原理」という考え方です。たとえばある量、さきほどの宇宙項という量が引き合いに出されることが多いのですが、クォークの質量を思い浮かべてもよいでしょう。宇宙項の値がとんでもなく小さいということを言いましたが、弦理論の解は無数にあるので、小さな値から大きな値まで解として可能だと考えられます。その際、現実是非常に特殊、つまり著しく小さな値をとるということを説明するのに、その特殊な値でなければ、人類が誕生し、文明が発展し、そういうことを考える頭脳が存在しないからだという考え方です。いわば理論の予言能力をあきらめた立場であり、敗北主義として嫌う人もいます。私の意見は常識的なもので、人間原理が働いている可能性は否定できないが、その前に理論的必然性の結果としてどこまで説明できるかを徹底的に解明することが必要だと考えます。

重力の量子論、それはすべての相互作用を包含する理論になる可能性が高いわけですが、これは未完成だと言いました。何が問題かを具体的に見るのは専門的になりすぎますが、その問題の背景にどんな難しさがあるかはある程度お分かりいただけるかと思いますので最後にそれをお話します。

さきほど、数種類ある弦理論はあるひとつの理論の違う側面を見ていると言いましたが、この弦理論を越えるある理論、これをマスター理論とでも呼ぶことにすると、このマスター理論の正体がよく分かっていないのです。現状は、これをいろいろな方向から見るとああ見えるこう見えるといってい

る段階といってよいでしょう。そしてマスター理論を完成するには、なにか根本的な概念の変更が必要だと思われています。たとえば時間空間そのものが、あらかじめ与えられたものではなく、理論の帰結として導き出されるものと考えられます。私には、時空や物理量の概念を根本的に変更することが必要とされていた、相対論や量子論誕生直前の20世紀初頭と比べることができるように思えます。

次にもっと基本的な問題として、時空あるいは宇宙そのものが対象になることから来る困難があります。実験室の中で扱うようなシステムの場合は初期値をいろいろに変えるということができますが、宇宙全体を対象にする場合には初期値を変えてみるというわけには行きません。ここに人間原理が入り込む余地があるわけですが、何をもって理論の検証とするか、そもそも検証可能かという問題があります。もちろん何か実験的検証可能な決定的な理論的予言があって、それが近い将来の実験的なものと結びついていればよいのですが、今予想されているように、解が無数にあってどんな状態も許されるとしたら検証の意味はなくなってしまいます。かりに理論が、初期値を与えられたときその時間発展を予言するという能力を備えていても、それが知りたいことの主要な部分ではないかもしれないわけです。

そしてもうひとつ、今日の話にはほとんどでてきませんでしたが、量子力学の観測に関する問題です。実験室レベルで量子力学の実用的な適用には問題はないのですが、観測の解釈をめぐるはまださまざまな議論があります。特に宇宙全体を量子力学の対象にしたときの観測問題あるいは確率解釈の意味というのはよく分かっていないと言ってよいと思われています。

ここまでの話で、素粒子物理がどこに向かおうとしているか、そしてそれがいかに深い背景のある問題であるかが多少とも分かっていただけたでしょうか。われわれの前にあるのは、あるいは物理学のあり方を変えるかもしれないほどの大きな問題です。それがいつどんな風に解決されるか予想ができません。相対論や量子論が20台の若い頭脳でつくられたように、このなぞを解く主役がここにいる皆さんの中から出てくることを期待しています。

	電荷	第1世代	第2世代	第3世代	相互作用		
クォーク	2/3	u	c	t	強い相互作用	電磁相互作用	弱い相互作用
	-1/3	d	s	b			
レプトン	-1	e	μ	τ			
	0	ν_e	ν_μ	ν_τ			

表1 標準模型における基本粒子