

第1部

物質の根源

- 1 素粒子の統一理論 川合光(京都大理)
- 2 ニュートリノ地球科学 鈴木厚人(KEK)
- 3 クォーク・グルオン・プラズマ 初田哲男(東京大理)
- 4 CP対称性の破れと質量の起源 高崎史彦(KEK)
- 5 格子量子色力学と計算素粒子物理学 宇川彰(筑波大数理)

素粒子の統一理論

素粒子論とはなにか

自然界には多種多様な現象があるが、そのもとになる基本法則は単純なものはずである。それを追求するのが素粒子論であるが、過去 100 年間で大きく理解が進み、今やすべての物質と力を統一的に記述できる可能性が見えてきている。

標準模型

自然界の物質のもとになる基本粒子はクォークとレプトンとよばれる 2 種類に大別され、それぞれ 6 種類あることがわかっている。また、これらの間には 4 つの力が働いている。電磁力、弱い力、強い力、それから重力である。このうち重力をのぞいた 3 つの力とクォーク・レプトンの相互作用は、標準模型とよばれるゲージ場の量子論によって非常にうまく記述されている。現在の加速器で到達できるエネルギーは数百 GeV、距離に換算すると 10 のマイナス 17 乗メートルくらいであるが、少なくともこの範囲で、標準模型と矛盾する実験結果は知られていない。

標準模型に現れる粒子のうち、まだ実験で確認されていないものが 1 つだけあり、ヒグス粒子とよばれている。ヒグス粒子は LHC とよばれる加速器により数年のうちに発見されると思われるが、その質量は素粒子物理

の今後の方向を決める上で重要である。もし、ヒグス粒子の質量が 150 GeV から 200 GeV の間にあれば、標準模型はプランクスケール、すなわち重力との統一が重要になるスケールまで修正を加える必要がない。一方、ヒグス粒子の質量が 150 GeV 以下であれば、標準模型を拡張して、超対称性という大きな対称性をもつようにしたほうが自然である。また、ヒグス粒子の質量が 200 GeV 以上であれば、ヒグス粒子自身が複合粒子である可能性が高い。この場合、クォークやレプトンも複合粒子であり、標準模型よりもっと基本的な構造が、数百 GeV のエネルギー領域で見えてくるかもしれない。このように、標準模型自身を適宜修正していく必要はあるかもしれないが、いずれにしても、ゲージ場の量子論の枠内で遂行できると思われる。

重力とプランクスケール

一方、重力まで含めた量子論を作るのは大変難しい。それは、重力以外の 3 つの力はくりこみ可能であるのに対して、重力はくりこみ不可能だからである。すなわち、重力場は波長の短いフーリエ成分ほど大きな量子ゆらぎをもつため、時空の各点で値が与えられるとする普通の場合では、なかなかうまく表せない。大雑把に言うと、重力は点粒子の現象ではなく、何か拡がりをもった現象としてとらえたほうが自然なのである。この拡がりの大きさは、アインシュタイン方程式から計量場の量子ゆらぎを見積もってみればわかる。そうすると、あるスケールより短い波長のフーリエ成分は大きなゆらぎをもち、それより短い距離を考えること自体が意味をなさないことがわかる。これが上にも述べたプランクスケールであり、ニュートン定数と光速とプランク定数から作られる長さの次元をもった量に他ならない。その値は 10 のマイナス 35 乗メートルである。

ここでは、場のゆらぎに注目したが、力の大きさに注目しても同様なスケールがでてくる。例えば、2 つの電子の間に働く電気力と重力の大きさを比べてみる。2 電子間の距離が電子のコンプトン波長に比べて大きいときは、電気力はクーロンの法則に従い、重力はニュートンの万有引力の法則に従うとしてよい。どちらも逆 2 乗法則であるが、比例係数の大きさはまったく異なっており、重力は電気力に比べて 42 桁も小さい¹⁾。ところが、

2 つの電子を近づけていくとまったく違う様相が見えてくる。電荷は距離によらない量であるから、電気力は距離がコンプトン波長より短くなって基本的な逆 2 乗法則に従う。実際は、対数的な量子補正を受けるが、それほど大きな効果ではない。一方、重力はエネルギー間の力であるため、距離がコンプトン波長より短くなると、距離の 4 乗に逆比例して大きくなる。これは、各電子のエネルギーは超相対論的な領域では波長の逆数に比例して大きくなるからである。そうすると、2 電子間の距離がコンプトン波長の 10 のマイナス 21 乗倍程度になると電気力と重力はほぼ同じ大きさになるはずである。この距離の値は 10 のマイナス 34 乗メートルである。これは上で述べたプランクスケールと 1 桁違うが、これは電気力の大きさ自身が無次元量であらわすと $\alpha = \frac{e^2}{4\pi\epsilon_0\hbar c} \sim \frac{1}{137}$ と 1 より少し小さいからであり、もしこれが 1 程度であれば、ここで考えている長さはプランクスケールと完全に一致する¹⁾。

大統一理論

上では例として電気力をとりあげたが、重力以外の 3 つの力はどれもゲージ場の量子論で表すことができ、互いによく似ている。これらの力は、電気力について述べたように、量子補正のため、近距離では逆 2 乗則から対数的にずれる。そのずれを計算してみると、あるスケールで 3 つの力がほぼ同じ大きさになることがわかる。そのスケールを大統一スケールとよんでいるが、値は 10 のマイナス 32 乗メートルであり、上でみたものより、2 桁ほど大きい。

この 2 桁の違いをまともに受け止めるか、あるいはほとんど同じだとみなすかは立場の分かれるところであるが、前者の立場に立つと、次のようなことが起こっているといえる。現在の加速器で直接見ることができる 10 のマイナス 17 乗メートルくらいの距離では、4 つの力の大きさはずいぶん異なっている。しかしそれらは近距離になるにつれだんだん等しくな

1) このような小さな力であるにもかかわらず、我々が日常的に電気力よりも重力を感じているのは、電気力は電荷の間の力であるためプラスとマイナスで相殺するのに対し、重力はエネルギーの間の力であるため決して相殺しないからである。