

研究室訪問②

初期の宇宙に想いをめぐらす —素粒子物理の最前線

磯・坂井研究室
物理学科

宇宙は様々な物質で満たされている。しかしそれら性質の違う様々な物質もみな「原子」から構成されている。以前は原子が物質を構成する最も基本的な単位と考えられてきた。だがその原子も実は陽子、中性子、電子から成り、さらにそれらの粒子

もクォーク等の「素粒子」から成ることがわかっている。素粒子の振舞を研究することによって現在の自然界を、あるいは初期の宇宙像を理解しようとするのが素粒子物理学と呼ばれる学問の一つの目標である。そうした「究極の世界の物理—素粒子

物理」を専門に研究しているのが、東工大理学部物理学科の磯・坂井研究室である。磯教授も坂井助教授も素粒子物理、特に素粒子の統一理論について熱心に語ってくださった。

力の本質とは何であろうか。

素粒子物理の描き出す自然像、宇宙像とはどのようなものなのだろうか。そこにはどのようなドラマが繰り広げられるのだろうか。

自然界には様々な力がある。古くから知られているのは、重力と電磁力である。例えば電磁力の場合、距離の2乗に反比例する、同符号の電荷は、反発する等の性質があるが、この性質は空間におかれる電荷によっ

て全て決定される。この「電荷」のような量を保存量といい、逆に言えば保存量が力の性質を全て決め、その性質を空間に及ぼすのである。このような空間を「場」と名づければ、力とは保存量によって決まる「場」であるといえよう。素粒子物理とはその「場」の様子を詳しく調べ、力の本質を見極める学問である。

「力」を運ぶのはゲージ場である。

今述べた力の様子を具体的に見てみよう。電磁場を例にとると、その性質は電荷量だけで決まり他には依らない。ところで電荷がどんな値であるかは、数学的には複素関数 ($e^{i\alpha}$ など) で表わされるが、そこに出て

くる位相 α の原点をどこにとるかは人間の勝手な基準であり、力の性質には全く関係ない。電磁場の場合、その方程式によって規定されるあるベクトルの向き (注1) が↑であれば電荷は+であり↓であれば-であ

ると仮定するのは人間の都合であり別に \downarrow を $+$ としても物理現象が変わるはずはない。人間の都合で決めたことによって物理現象は左右されない。これを一般化して、ある場を表わす関数の位相を各点で独立に変えても場の性質は変化しないことが要求される。このような場をゲージ場と呼び、実は力とはゲージ場のことなのである。つまり各点で位相を変えても、その力を表わす基礎方程式(注2)は変わらないことが必要なのである。

もう一度電磁場を例にとろう。今の話によれば、電磁場とは保存量である電荷だけで決まり、電荷を決め尺度 $\rightarrow \uparrow$ を $+$ と呼ぶetc. \rightarrow を変えてやっても電磁力の性質は変わらない。では電磁力とは何であろうか。ゲージ場の考えでは電磁力とは、この点では \uparrow を $+$ と決めているという信号を隣の点に知らせるものなのだ。

このことを一般的にいえば、ある点での位相の基準点を隣の点に知らせるのが力なのである。

ところで、空間の各点の位相を連

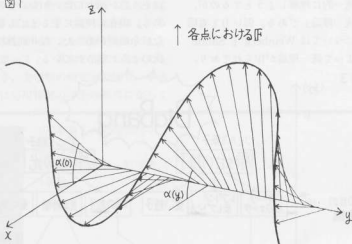
続的に変えてやると、波動となる。(図1)つまり、信号を伝える力とはこの波動に対応しているのだ。量子力学では波動とは粒子であるので、結局「力」は「波動」であり「粒子」であることがわかる。

このことを別の側面から見てみよう。電磁場を再び例にとる。(図2)ある点にプラスの電荷があり、この電荷から力が信号として送られていく。この力が時間 t によって変動す

ればそれは波動であることがわかるであろう。そしてこの波動に対応する粒子をゲージ粒子と呼び、この粒子もまた素粒子である。(一番よく知られているゲージ粒子は光子である。)

つまり力とはゲージ粒子という素粒子によって運搬される。「力」は一方の粒子から放出されたゲージ粒子が、別の粒子に吸収されることによって生ずるのである。

図1



自然界には4つの力がある。

現在知られている自然界の力には4種類ある。

強い力—クオーク間に働く力。この(保存量電荷)の力を運搬するゲージ粒子はグルーオンと呼ばれる粒子である。

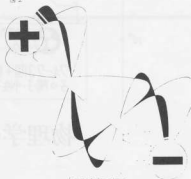
電磁力—強さは強い力のほぼ $\frac{1}{100}$ 。(保存量電荷) ゲージ粒子は光子であり、光子の放出・吸収

によって電磁力が生ずるのである。

弱い力—原子核のベータ崩壊などに(保存量電荷)に作用する力。ゲージ粒子は「重い光」とも言うべきウィークボソンである。(普通の光と違い重い質量をもつ。)

重力—ゲージ粒子は重力子。

図2



力は波動である

注1: 正確には \uparrow とは $\alpha=0$, \downarrow とは $\alpha=\pi$ と考えられたい。つまり電荷が $+$ のとき $\alpha=0$, 電荷が $-$ のとき $\alpha=\pi$ と仮定するのが人間の都合なのである。

注2: 力学の基礎方程式は古典的には Newton の運動方程式となる。現在の重力理論は一般相対論で等価原理が出发点となっている。電磁場では、基礎方程式は Maxwell の4つのベクトル方程式である。

宇宙の進化とともに4つの力は分化した。

ビッグバンから始まる宇宙の初期には、これら4つの力はすべて同じであったと考えられている。だが宇宙が冷えていくにつれ、クォーク等の基本粒子が凝縮して生成され、ゲージ粒子もあるものは質量を持ち、あるものは質量0のままで残るなど粒子の対称性が崩れ始め、力が分化してきたと予想されている。(図3)

それゆえ4つの力を全て同じ理論で統一的に理解しようとするのが、「統一理論」である。弱い力と電磁力については Weinberg と Salam によって統一理論が作られており、

それに強い力を含めて考えるのが大統一理論と呼ばれるものである。この大統一理論はまだ完成されていない。例えば図3に示した通り、第1回目の凝縮(相転移)と2回目のそれとはエネルギースケールがあまりにも違いすぎるという不自然さもあり、大統一理論はこれからが正念場だといえよう。

このように、理論の進歩というのはそう思い通りにはいかないものである。現在の理論に至るまでも様々な紆余曲折があった。坂井助教授は次のように話されている。

「ゲージ場の考えも最初は実用的な理論になるとは誰も考えませんでした。しかし実験事実合うことが徐々に分かってきて、やっとゲージ場を皆信じるようになったのです。」

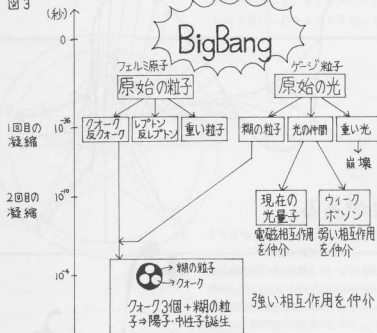
「加速器によって多数の粒子が確認されると、それを少数の粒子の組合せによって説明しようと考えます。例えば、3個の粒子の組合せで $3^3=27$ 個の粒子を予想します。そのうち、20個くらいは確認されても、残りが見つからない。そうした場合この理論は正しいのかそうでないのか、問題は残ります。」

磯教授も言われる。

「現在確立している素粒子のクォーク模型の前身であるSU(3)模型が確立してゆく過程でも他にも色々な模型が提出されると共に古い理論の立場からの強い批判も出されていました。それが一旦確立したのは Ω 粒子がその質量までも含めて予言通りに実験で見つかったからです。それでも尚、素粒子の模型の全体系(ピラミッド)はその頂点(Ω 粒子)でさか立ちに支えられているというマンガを国際会議で書いた人が居ました。物理学というのはこういう形に進んでゆくものです。」

結局その理論が正しいか否かはその理論から予想される要となる粒子が見つかるかどうかで判断される、と坂井助教授は説明された。

図3



物理学の究極の理論のあるべき姿とは何か。

このように紆余曲折を経て進歩してきた物理理論であるが、その最終理論とはどのようなものだろうか。

ゲージ場の理論からそれぞれの場を表わす基礎方程式を導きましたが、その過程において実験事実を経験則として理論にインプットしている。電磁力の場合、保存力は+と-の2つの自由度をもつ「電荷」で、ゲ

ージ粒子は質量0で-といったことを条件として理論に代入して方程式を導いているが、究極理論では、理論自体から計算することで全ての観測量を導かなくてはならない。観測量を、パラメータとして代入する必要がない理論なのだ。そしてそれには自然界に存在する4つの力を統一的に記述しなければならない。そのう

ち3つの力を統一しようとするのが大統一理論であり、重力も含めたすべての力を統一しようとするのが超統一理論である。そしてその候補が

磯・坂井研において、坂井助教授を中心とする人たちが研究を進めている super-string 理論である。

Super-string 理論-4つの力の統一的理解を目指して。

Super-string 理論(超対称弦理論)は重力を含めた4つの力の統一理論である超対称性理論の一種である。坂井助教授は次のように説明された。

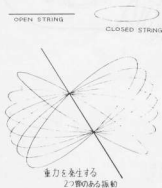
「今まではゲージ粒子にせよクォークにせよ、大きさを考えない粒々のものと考えてきました。Super-string では粒々というよりは、何かこう一次元的に広がった大きさを持つ紐のようなものを考え、それが振動しているとみなします。振動が激しいとそれはエネルギーの高い重い粒子に対応し、小さい振動だと軽い粒子に対応します。そうした考えがなぜ良いかという、重力や電磁力、クォーク間に働く強い力等の違いが、その紐がどれぐらい激しくどのような形で振動しているかという違いだけで全部説明できると信じられている

からです。」

つまりこの理論から、自然界の4つの力やクォークなどの素粒子の種類、質量が全部導き出せるのではないかという期待があるのである。紐がこのようなに振動すれば光子となり、従って電磁力が働く—こんな事を具体的に示すことができれば、現在の自然像をより明確に我々は知ることができるだろう。

Super-string ではなぜそうした試みが可能なのだろうか。一番大きな理由は最後の難関—「重力」を統一理論に含める—が Super-string では容易になるかもしれないという見通しがあるからなのだ。例えば電磁気の場合、それを量子力学的に扱うとき「くりこみ」という方法を使うことによって電磁力の場の理論を作り上げることができた。しかし重力では、ある理由からこの「くりこみ」が使えず、重力を量子力学的に扱うことが困難であり、その点が重力を統一理論に含めるための最大の課題になっていた。しかし Super-string では「くりこみ」の操作を必要とせずに理論を記述できるため、重力も統一的に理解することが可能となったのである。(注3) 坂井助教授によれば Super-string の最も簡単な振動、つまり節の2回ある振動からは重力が生じることがわかっているそうだ。(図4) Super-string による重力理論はまだまだ完成されたわけではないが、今のところ一般相対性原理は満たしているようである。しかし現在

図4



の重力理論であり、一般相対性原理の一つの帰結である Einstein の一般相対性理論とは小さなスケールでみると食い違っており、仮に Super-string が正しいとするならば一般相対論に修正を加える必要がでてくるかもしれない。

Super-string 理論のこれからの課題は何であらうか。坂井助教授にお聞きしてみた。

「まだきちつと解けないんですね。難しくて。誰もそれをきちんと解いて、『それみなさい、ここにクォークがあります。この様に振動するとそれは電子です』と示せないんです。

注3：例えば、クーロン場の場合ポテンシャルエネルギーは $1/r$ に比例するので粒子に大きさを与えない場合粒子自身の位置でのポテンシャルは $1/0$ となり自己エネルギーは無限大に発散してしまう。この困難を解決したのが「くりこみ」理論であるが、Super-string の場合大きさがあるのでポテンシャルもある位置から一定になり自己エネルギーは発散しないので「くりこみ」を使う必要はない。

まだ。またこれは究極理論ですから、あらゆる実験事実を全て計算のみで導かねばならないのです。理論にあ

らかじめ条件をインプットしないのですからこれは案外大変なんです。」そうやって苦笑された。

理論が実験をつくり、実験が理論を育てる。

素粒子物理学の理論の検証は加速器実験によってなされている。また逆に、予想もしない結果が出たために理論が修正されることも多い。弱い力のゲージ粒子である「重い光」ウィークボソンの存在は何十年も前から期待されていたが、実験してみると理論屋の予想よりはるかに高いエネルギーを持っていることがわかり、Weinberg-Salam 理論が提出されて始めて予言に成功した。磯教授は次のように話されている。

「加速器のエネルギーレベルをあげても予想された結果しか出ないという歴史はありません。今世界中で大型の加速器が建設中で、それが稼動し始めると何か予想もしないものが出てくるかもしれません。」

坂井助教授も言われる。

「確かにそうした可能性はあります。今のところは理論が先行している状態として、次の加速器実験が行われるまで理論屋の方で考えられるところは考えておきましょうと。そう考えているんです。」

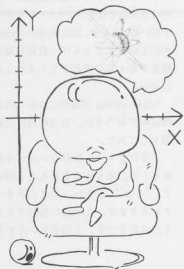
磯教授はこうも言われる。

「坂井さんの手がけている Super-string 理論も非常に魅力的ですしおもしろいと思うのですが、また実験から何か新たな事実が出てくるような気もするんですがね。インプットとして何か必要じゃないかなという感じもあるですよ。」

磯教授は次のようにも言われた。

「実験結果によっては理論のわく組みが全く変わってしまう事も起こり得ます。Super-string 理論もそうで、まだ絶対的な理論はないんです。それをわかってやっている坂井さんなんかは大丈夫ですが、学生が一つの理論に猪突猛進しているのをみるとね、危険を感じることもあるのですよ。あるとき突然ある特定の方向のはしごがはずされることもある。きちっとした学生は新しい方向を見出せる。が、そうでない例をたくさん見えていますから。」

大学の教授や助教授になってもまだ理論に確信がもてずにいろいろな方向を模索している。これが本当の研究者の態度なのだろう。



宇宙論への応用も行われている。

最近素粒子物理も宇宙論に足場を提供できるようになった。宇宙論の研究者にとって初期の宇宙、特にビッグバン以降の最初の3分間を理解することは現在の宇宙像の理解に不可欠であるが、初期の宇宙を理解するには素粒子の知識が必要であるし、素粒子論の研究者にとっても初期の宇宙を巨大な加速器ととらえると、地球上の実験で得られないエネ

ルギースケールの話がわかる。それゆえ、将来ますます宇宙論の研究者との協力は密接になってゆくだろう。本学の物理科にも今年5月に、宇宙論の研究を専門にしておられる荒船氏が教授として着任された。坂井助教授の友人でもあるそうで、一緒に研究する機会を楽しみにしているとおっしゃっていた。

磯教授・坂井助教授から学生へ

磯教授から理論を目指す学生へ伝えたいことは、「同時に二つの仕事を」ということであった。磯教授は、

「 $1+1$ は2ではありません。3にも4にもなるんです。逃げ道を用意しておくというのではなく、片方の仕事をしっかりやるということはもう片方の仕事をする上に非常に役に立つということが多いのです。」とおっしゃられた。

東工大の学生についてお伺いしたところ、磯教授も坂井助教授も非常に高く東工大生を評価しておられるようである。磯教授がおっしゃられるには、東工大には期待できる学生、教えがいのある学生が多く、研究者になるには相当の人でないといろいろ困難があるが、それでもやっているとされる学生がいるということである。また、坂井助教授がおっしゃられるには、東工大には真面目な学生が多く、人間的にしっかりしていて教えたり、指導したりするのにそれほど苦労は感じられず、安心しておられるそうである。また院生の場合には、ドクターになるまでに自分一人で論文が書けるようになる

のが普通だそうで、このことにも感心しておられた。ただ、磯教授が次のように語られたのは印象的であった。

「昔は学生同志と一緒に勉強したのですが、最近は少ないような気がするんですね。もうちょっとあってもいいような……。」

また、研究室ではどんな学生を期待しておられるのですか、という質問に対して、坂井助教授は次のように語られた。

「大学院に来る人のすべてがドクターまでいつて研究者になることを目指す必要はないと思います。それぞれの人がそれぞれの道に沿っていけばいいと思います。」

磯教授は次のように語られた。

「ここしか好きではないから他はやらないという人はうまくいかない気がします。科学が面白いというようなばい興味を持てる人が成功するのではないのでしょうか。柔軟な人であれば、例えば、素粒子でなくても他に興味を持てるから、そういう人はどんな分野であっても成功するのではないのでしょうか。」



初期の宇宙を理解する—そこには何か壮大なロマンが感じられる。統一理論を完成させた Weinberg がその著書 “The First Three Minutes” で述べている言葉を紹介しよう。

「宇宙を理解しようとする努力は、人間の生活を道化芝居の水準からほんの少し引きあげ、それに悲劇の優雅さをわずかに添える非常に数少ないことのひとつである。」