

究極理論の完成へ

基礎物理学専攻 伊藤 克司 研究室

伊藤 克司 教授 1962年岩手県生まれ。東京大学大学院理学系研究科物理学専攻博士課程修了。1993年より筑波大学物理学系助手、1998年より京都大学基礎物理学研究所助教授。2000年より東京工業大学大学院理工学研究科基礎物理学専攻助教授、2009年より同教授。



伊藤研究室では超弦理論等の素粒子物理学の最先端分野を扱っている。本稿では、素粒子物理学の諸理論を説明したのち、伊藤研究室で扱われている最先端の研究について触れる。完成するのは100年後とも言われる研究分野の一端をお見せしよう。また、壮大な研究に挑む先生が描く理想の物理学者像についても紹介する。

素粒子物理学の現在

物理学者の夢、それは究極の理論をつくりあげることである。彼らが目指す究極の理論とは、あらゆる素粒子や力の起源を説明できる、シンプルで美しい理論のことである。この夢の実現に対して、目下のところ非常に大きな障害となっているのが力の統一だ。

自然界にある力には、重力・電磁気力・強い力・弱い力の4種類がある。重力と電磁気力は我々に身近な、りんごが木から落ちる、磁石にものがくっつくなどの現象を引き起こす力である。一方、強い力と弱い力とは聞き慣れないかもしれないが、それぞれ中性子と陽子を結びつける力、ベータ崩壊を引き起こす力である。

究極の理論を完成させるためには、この4つの力を1つの起原から説明できなければならない。これが力の統一である。しかし、このような見かけが全く異なる力を1つにまとめる、という試み

は困難を極める。実際、4つの力の統一を成し遂げた理論はいまだ存在していない（図1）。それでも、統一にむけた試みはどこまで進んでいるのだろうか。

電磁気力と弱い力についてはすでに統一されており、これは電弱統一理論と呼ばれる。また、強い力に関しては量子色力学と呼ばれる理論で説明されている。電弱統一理論と量子色力学を合わせ

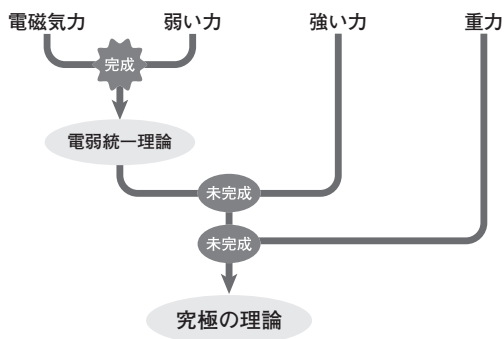


図1 力の統一への道

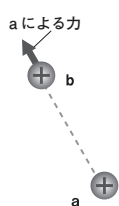
たものは素粒子の標準模型と呼ばれる理論で、現在の素粒子論において基本的な考え方とされている。これはこの理論がこれまでに行われてきた実験結果のほぼすべてを矛盾なく説明できていることによる。

現実をことごとく説明できていることを考えれば、標準模型が究極の理論でもよいのではないかという気がしてしまうがそうはいかない。この理論は私たちにとって最も身近な力である重力を含んでいないのである。また、くわしくは後述するが標準模型はほかにも問題を抱えていることがわかっていて。

標準模型を超える理論、あるいは標準模型とは異なる新しい統一の枠組みをつくる試みは世界中で行われている。そのなかでも最も有力な理論と考えられているのが超弦理論である。伊藤研究室では現在、超弦理論完成に向けた試みの一環として、超弦理論を用いて超対称ゲージ理論を解析すること、具体的には超対称ゲージ理論におけるさまざまな物理量を厳密に求めることを目標とした研究を行なっている。超対称ゲージ理論の解析が進めば、今度は逆に超弦理論の未知の領域の解明が期待できる。

では、超弦理論や超対称ゲージ理論とはいったいどのような理論なのか。また、このような新しい理論はどのような経緯で要請されるようになったのか。具体的な研究内容に踏み込む前にそれらを明らかにしたい。そこでまずは標準模型について説明する。

古典的解釈



現代的解釈

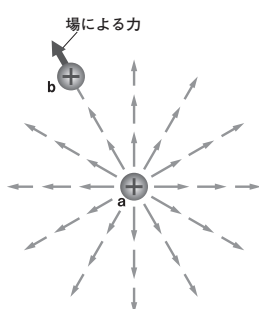


図2 場の概念

古典的な解釈では力を物体間の相互作用とみるが、場の理論においては物体が作り出す場から力を受けるとみる。

標準模型とその問題点

標準模型とはゲージ理論の一種であり、このゲージ理論は“場”という概念に基づいて記述されている。

場という概念は現代物理学における基本的な枠組みで、空間そのものに力を伝える性質がある、と捉える考え方である。ここでは、私たちにとって身近な場である電場を例にとってみる。

空間に電荷aと電荷bがあるとしよう。簡単のため、2次元の空間を考える。符号が同じだとすると、ふたつの電荷は斥力を及ぼしあう。このとき、古典的な解釈ではbがaから力を受けたと考える。一方、現代的な解釈では場の理論を用いて、bはaがつくる電場から力を受けたと考える（図2）。つまり、電荷の存在によって空間の各点に対して電場というベクトルが生じ、これによって電荷が力を受ける、と解釈するのである。このように、場から力を受けるという視点で力を捉えた理論が場の理論である。

この場の概念をもとにして、ゲージ場という場を考えたものがゲージ理論だ。ゲージ理論での対象は素粒子全般であり、これらの相互作用がゲージ場を介して起こるとするものである。

そしてこのゲージ理論のなかで、今までに見つかったすべての素粒子間の相互作用を説明しようと試みた理論が素粒子の標準模型である。

前述のとおり、この標準模型はこれまでの素粒子の実験結果をほぼ矛盾なく説明できている。では、どのような点が問題なのか詳細にみてみることにしよう。

まず、最も大きな問題点として挙げられるのが重力を含めることができなかった点である。これは、重力を量子化する、つまり重力の理論である一般相対性理論に量子力学を適用できていないことによる。素粒子レベルのスケールに働く力を計算すると、無限大が生じてしまう。この無限大は物理的には意味を成さないものであるため、なんとか解消する必要がある。重力以外の3つの力はいくりこみと呼ばれる数学的手法によってこの困難を解決しているのだが、重力の場合はそれが通用しない状態にある。統一理論という観点からは、

重力が含まれていないことは大きな問題であろう。

また、もうひとつ大きな問題点として任意定数が多すぎるということも挙げられる。任意定数とは計算上発生する、任意に値を取れる定数のことであり、これは実験によって定めるしかない。つまり、理論から予言することができないということだ。理論の美しさが損なわれてしまっているのである。

そして、これはある意味素朴なものかもしれないが、そもそも“素”粒子が十数種類もあるのか、という疑問である。標準模型は物質のもととなるフェルミオンと力を伝えるボソンに大別される計16種類の素粒子で記述されているが、物質の最小単位がこれほどあるというのはたしかに違和感を覚える（図3）。

標準模型は暫定的に素粒子論の基本的な位置にあるが、重力の欠如、任意定数の多さ、あまりにも多い素粒子の種類といった問題点を抱えている。

これらの問題を一挙に解決する可能性があるのが超弦理論である。物理学者たちを魅了するこの理論の魅力にせまる。

超弦理論

超弦理論とはなにか。それは、弦理論に超対称性を組み込んだ理論である。超弦理論の“超”は超対称性の“超”を表している。

弦理論とは、それまで大きさのない点状のものだと考えられていた素粒子像を、1次元的な広がりをもつもののようなものとする理論である。以下、このひものようなものを弦と呼ぶ。

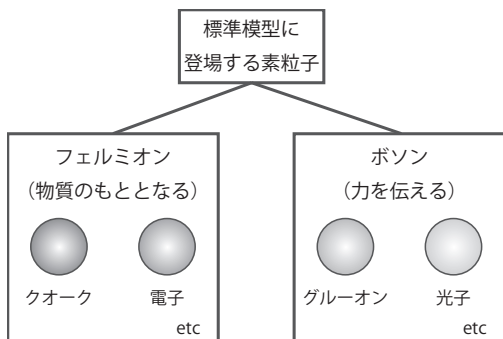


図3 標準模型における分類

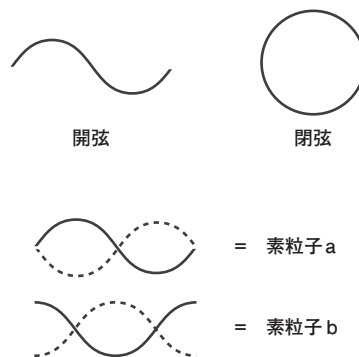


図4 超弦理論

開弦と閉弦、およびその振動状態の違いで素粒子を表現する。

超対称性とはボソンとフェルミオンを交換する対称性を理論に仮定したものである。これは例えばボソンに注目すると、それに対応するフェルミオンの存在を仮定するということである。フェルミオンに関しても同様にボソンを仮定することができる。

この2つの発想によって、標準模型で生じる問題点は解決しうる。

まず、重力の量子化に際する無限大の問題は素粒子が“幅”をもっていることによって解消される。これを粒子同士の衝突を例にとりて考えてみよう。素粒子が点であると考えたと衝突の際に粒子間の距離が0になる。重力は $1/r^2$ に比例するため、このとき重力の値が無限大に発散してしまう。しかし、素粒子が点ではなく弦だとすると衝突をしても粒子間の距離が弦の幅以下にはならない。すなわち、無限大が発生しないのである（図4）。

また、この理論には開いた弦と、開いた弦の端がくっついた形の閉じた弦が登場し、このうち閉弦は重力を伝えるボソン、つまり重力子を表している。重力子は電磁気理論における光子のようなもので、光子が電磁波を伝えるのに対し重力子は重力を伝える。理論のなかに自然と重力を含んでいるのである。

任意定数の多さも解決している。これは超弦理論が数学的な制約を強く受けていることによるものである。実際、超弦理論は数学的な制約により10次元時空、すなわち空間9次元+時間1次元でしか成り立たない。一般に物理の理論がどんな次

元でも成り立つことを考えれば、非常に強い限定を受けていることがわかる。このような強い数学的なしぼりのために超弦理論は非常に少ない任意定数で理論が記述されている。

加えて、超弦理論では標準模型に登場するような“素”粒子を弦の振動状態の違いで分類している（図5）。あくまでもとになっているのは素粒子の違いに関わらずある長さの弦であり、異なる素粒子に見えるのは弦の振動状態の違いであるという解釈をしている。このようにして、素粒子の個数が不自然に多いという問題も解決される。

現在、有用性が認められている超弦理論は5種類存在している。5種類と聞いて、そんなにあるのかと思う読者がいるかもしれないが、実は非常に少ない。これも数学的な制約によるものである。

そして最近ではこの5つの理論の母体である理論、M理論が発見されている。実はこの5種類の理論はM理論の見方を変えたただけのものであり、この5種類が本質的には同じものにすぎないということがわかってきた（図6）。この、見方を変えたただけで本質的に同じであるという性質を「双対性」と呼ぶ。この双対性は超弦理論を特徴づけるキーワードであり、非常に重要な概念である。

この双対性というキーワードのもと、いよいよ伊藤研究室の研究テーマである超弦理論で超対称ゲージ理論を解析するというトピックについて迫ってみよう。

双対性で理論の本質に迫る

まずは双対性について詳しく見てみよう。理論と理論の間に双対性があるというのは、主に結合定数を逆数にするという変換を施すと2つの理論

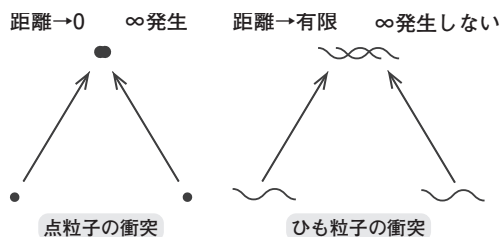


図5 重力の無限大

ひも粒子同士の衝突では距離が有限の値で存在するので、衝突に際して無限大が発生しない。

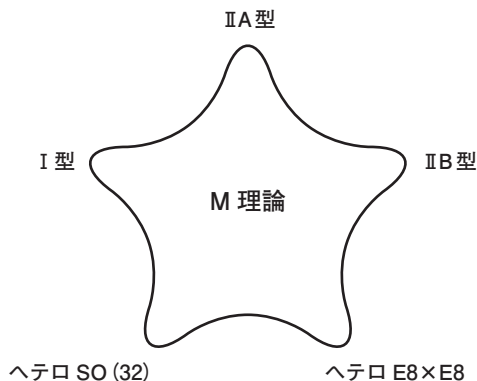


図6 5種類の超弦理論の関係性とM理論

5種類の超弦理論は図のように双対性で結びつき、それぞれが等価であることが知られている。また、それら5種類の超弦理論を統一するM理論というのが近年注目されている。

が等価になるということを指している。結合定数とは相互作用の強さを表す定数で、電磁場の理論で言えば電荷 e にあたる。電磁場では $e \rightarrow 1/e$ という変換が電場 $\vec{E} \rightarrow$ 磁場 \vec{B} に対応している。

伊藤研究室ではこの双対性のなかでもAdS/CFT対応という双対性を用いて研究をしている。これはゲージ理論と超弦理論を対応づける関係であり、伊藤研究室においては超対称ゲージ理論の一種である $N=4$ 超対称ヤンミルズ理論の解析に使われている。

それでは双対性を用いる対象である超対称ゲージ理論について詳しく見てみよう。超対称ゲージ理論はゲージ理論に超対称性を付加したもので、 $N=4$ 超対称ヤンミルズ理論は、ボソンひとつに対して4つのフェルミオンの存在を仮定する。フェルミオンを4つ仮定するような対称性は超対称性のなかでも最も高い対称性をもっており、 $N=4$ 超対称ヤンミルズ理論はそれによっていくつかの優れた点をもっている。そのうちのひとつには無限大の解消が挙げられる。これは、ボソンに関する計算を行なっているときに発生した無限大が、仮定した4つのフェルミオンによって相殺されることによる。また、双対性を検証する枠組みとしても機能しており、現在までいくつかの双対性が検証されている。ほかにも、質量の量子補正における不自然さの解消やダークマターの正体の解明など、標準模型のかかえる問題点を解決するよう

な興味深い性質をもっているがここでは長くなるので割愛する。

さて、 $N = 4$ 超対称ヤンミルズ理論の解析に AdS/CFT 対応はどのように活用されているのだろうか。これは超対称ゲージ理論における強結合領域の解析の際に現れる。強結合とはすなわち結合定数が大きいうことであり、一般に結合定数大きい理論は解析が難しい。無限級数の例をとって考えてみよう。無限級数の計算は物理においてよく登場するが、代表的な例として粒子の散乱振幅の計算が挙げられる。散乱振幅とは結合定数で特徴づけられる物理量であり、粒子と粒子が衝突して飛び散る際の強さを表す量である。仮に結合定数を g とすると、以下のような無限級数が登場する。

$$a_0 + a_1 g + a_2 g^2 + \dots$$

$a_0, a_1, a_2, a_3 \dots$ は各項につく係数である。散乱振幅等の物理量を求めるためにはこの係数も量子力学に基づき決定しなければならない。この計算において、 g が非常に小さいとき、すなわち弱結合のときはある程度次数の大きい項は無視することができる。つまり、有効な近似ができるのである。しかし、 g がある程度大きい強結合のときにはそうはいかない。各項のオーダーが似通ってきてしまうため有効な近似ができず、各項につく係数も含めて大量の項を計算しなければいけなくなるからである。

このように弱結合で有効な計算でも強結合になると途端に解析が難しくなってしまうことがあるのである。 $N = 4$ 超対称ヤンミルズ理論においても強結合領域の計算にはこの種の困難がつきまとう。しかし、双対性、この場合は AdS/CFT 対応を使えば、超対称ゲージ理論では強結合領域となるため計算が困難だった部分も、結合定数が逆数となる超弦理論では弱結合となり容易に計算することができるようになる。

以上のように双対性を利用することで、2つの理論間を行き来することができる。それによって対応する物理量を計算して比較することが可能になり、2つの理論の相互扶助的な発展が期待できるのである。

研究室の様子

以上で見てきたような最先端の理論物理を扱う伊藤研究室はどのようにして研究を進めているのだろうか。基本的な方針として、伊藤研究室では個人ベースでそれぞれの学生が自由にやりたいことをやるという形をとっている。伊藤先生自身も学生時代には自分の興味がある分野の勉強に打ち込んでいたという。また、そういった自由に研究ができるという環境において、なによりも大切なのが“初心を忘れない”ということであるとも述べている。周りの研究者でも成功しているのは、やはり物理が好きであるという気持ちを忘れないで研究している人だという。

とはいえ、理論物理は難しいイメージがある。数学的な部分も難解で心が折れてしまうのではないか。そう思われる読者も多いことだろう。事実、先生の研究室には見るからに難解そうな物理・数学の書籍がズラリと並ぶ。取材の際、これだけの量の勉強をするのは大変ではないのかと尋ねてみた。すると、自分が研究を進める上で必要なことを勉強するだけです、とサラリ。結局のところ、物理が好きだという気持ちがあれば膨大な勉強量も苦にならないということだろう。

研究に大切なのは熱意や情熱と語る伊藤先生は、実際にお話ししてみるととても淡々と物事を語る印象を受ける。その振る舞いからは究極の理論の完成という夢もあっさり果たしてしまうのではないかとさえ思わせられる。物理学の大きな野望を実現するのに必要なのは淡々とやるべきことを続けていく姿勢なのかもしれない。

執筆者より

ご多忙のなか、快く取材を引き受けていただいた伊藤先生に厚く御礼申し上げます。取材では、素粒子物理学に関する興味深い内容をとてもわかりやすく説明していただきました。それを通して、最先端の研究分野に触れることができ、とても貴重な体験となったと感じています。末筆となりますが、伊藤研究室の皆様のさらなるご活躍を心よりお祈りいたします。
(鈴木 健太)