

【予習・復習 ☆ LHC】

LHCの開く新しい素粒子の世界

日笠健一 ひかさ けんいち (東北大学大学院理学研究科・素粒子理論)

LHCは素粒子の高エネルギーフロンティアをほぼ20年ぶりに広げる加速器である。従来の加速器に比べて到達可能なエネルギーを1桁近くも更新することにより、質量の起源に迫ることができる。予測通りヒッグス粒子の存在が証明されれば、新しいタイプの素粒子および自然界の基本相互作用が発見されたことになる。それ以外にもさまざまな未知の現象の発見が期待されている。

素粒子とその相互作用

素粒子とは物質を構成する最も基本的な要素である。物質の階層構造が次第に明らかになるにつれて、何が素粒子かという認識も原子から原子核・電子、陽子・中性子へと変化してきた。1969年出版の岩波新書『素粒子 第2版』(湯川秀樹他著)の巻末に2ページにわたって載せられている「素粒子の表」には90種類ほどの「素粒子」が掲載されているが、そのうち現在でも素粒子と認められているのはたった5つに過ぎない。この概念の変革が起こったのは1970年代であり、それ以後、物質を構成する素粒子として認められているのはクォークとレプトンと総称される粒子である。現在、クォーク・レプトンはコラム1の表

にしめすようにそれぞれ6種類が知られている。この種類のことをフレーバー(アイスクリームのフレーバーを連想してもらえばよい)と呼んでいる。それ以外にゲージボソンと呼ばれる素粒子が知られている。これは光子に代表されるもので、素粒子の間の相互作用を生み出す粒子である。

素粒子物理学のめざすものは、自然界の最も基本的な物理法則を明らかにすることであるといつてよいであろう。何か自然現象が起こるとき、そこには何らかの力(物と他の物との相互作用)が働いている。多種多様な力が存在するが、そのほとんどはより基礎的な力に還元することができる。たとえば、化学的な結合力は電子のやりとりによるもので、電磁気力に由来する。最も基本的な相互作用は、素粒子の間に働く力であり、これがどのようなものであるかというのが素粒子物理学の根本的な問である。

素粒子の基本相互作用としては、よく知られた重力、電磁相互作用、そして「強い相互作用」、「弱い相互作用」と呼ばれる全部で4つの存在が知られている。強い相互作用の現れる局面としては、原子核の安定性がある。原子核は正電荷を持つ陽子と電荷を持たない中性子からなっている。陽子間には電気的な斥力が働くが、それより強い

コラム1 素粒子にはどんな種類があるか

表にあるように、6種のクォークは質量の小さいほうからアップ(u)、ダウン(d)、ストレンジ(s)、チャーム(c)、ボトム(b)、トップ(t)という名がつけられている。このうちu, c, tの3つは電荷 $+2/3$ (素電荷を単位として)を持っており、残りの3つは電荷 $-1/3$ を持つ。レプトンには電荷 -1 を持つ電子(e)、ミュー(μ)、タウ(τ)および電荷を持たない3つのニュートリノ(ν_1, ν_2, ν_3)がある。さらに、u, d, s, c, b, tの区別を「フレーバー」というが、各フレーバーのクォークには見分けのつかない3種類がある。この自由度を「カラー(色)」と呼ぶ。クォーク間の力を媒介するグルオンも8種のカラーを持っている。電荷を持つ粒子のみが電磁相互作用をするように、カラー自由度を持つ粒子のみが強い相互

表——素粒子の種類。

種類	スピン	電荷	カラー	名称
クォーク	1/2	+2/3	3	u(アップ), c(チャーム), t(トップ)
		-1/3	3	d(ダウン), s(ストレンジ), b(ボトム)
レプトン	1/2	0	1	ν_1, ν_2, ν_3 (ニュートリノ)
		-1	1	e(電子), μ (ミュー), τ (タウ)
ゲージボソン	1	0	8	g(グルオン)
		0	1	γ (光子)
		0	1	Z
		1	1	W

作用をする。

素粒子はそれぞれスピンと呼ばれる固有の角運動量を持っている。たとえば光子はその進行方向に大きさが \hbar (プランク定数) に等しい角運動量を持っていて(スピン1という)、2つの円偏光状態に対応する正負2通りの向きをとる。電子はその半分の大きさ(スピン1/2)の固有角運動量を持っている。物質粒子であるクォーク、レプトンはすべてスピン1/2の粒子であり、光子などの力を伝える粒子はスピン1を持っている。

表には示していないが、それぞれの素粒子には反粒子が存在する。反粒子は粒子と等しい性質を持つが、電荷などの符号は反対である。たとえば電子の反粒子である陽電子は電子と同じ質量を持つが、電荷は正である。W以外のゲージボソンについては、反粒子は粒子と同じものである。

核力と呼ばれる引力が働いているために、原子核が安定に存在できる。核力は強い相互作用に由来する力である。一方、弱い相互作用は多くの素粒子の不安定性をもたらす相互作用である。これらについて見ていく前に、対称性の概念についてふれておこう。

対称性

素粒子物理において対称性の果たす役割は非常に大きい。対称性は、ハイゼンベルクが陽子と中性子の間の近似的対称性(アイソスピン)を導入して以来、素粒子の分類手段として有効であったが、いわゆるゲージ理論により、対称性が素粒子間の相互作用をも規定していることが明らかになった。さらに、基本的物理法則は何かという根本的な問

題に対しても、対称性が高度になればなるほど、物理法則の可能な姿が激しく制約を受けることが知られている。逆に言えば対称性により理論の予言能力が高くなるということになる。

この制約は力の統一理論、とくにいわゆる超弦理論において最も著しく、たとえば超弦理論においては、時空の次元が10次元でなければ理論が矛盾をきたすことが知られている。これほど高度な制約ではないが、既にアインシュタインの特殊相対性理論においても、力の性質は相対論的対称性の影響を大きく受ける。

相対性理論では、物理法則がどの慣性系においても同じ形をもつことが基本原理から要請される。このことは力の性質に対し大きな意味を持つ。非相対論的な理論においては、力を与えるポテンシャルの形には多様な関数を想定することができ、

それはどのような物質、環境を扱うかによってさまざまな場合がある。しかし、相対性原理をみたく素粒子間の相互作用は勝手な形をとることはできない。

素粒子の間の力は、粒子が他の粒子を吸収・放出することにより生ずる。たとえば電磁力の基礎過程は、電子などの荷電粒子が光子を吸収したり放出する過程である。ある電子が放出した光子を別の電子が吸収すると、2つの電子間に電磁力が働く(これを光子の「交換」と呼ぶ)。2粒子間の力がどのようなポテンシャルで記述されるかは2つの物理量によって決まる。1つは相互作用の結合定数 g であり、これによって力の強さが決まる。もう1つは交換する粒子の質量 m で、力の到達距離を決める。質量と到達距離 λ との関係は、 $\lambda = \hbar/mc$ で与えられ(c は光速)、ポテンシャルは

$$V(r) \propto \frac{g^2 e^{-r/\lambda}}{r}$$

という形(湯川ポテンシャル)となる。これが相対論的に許される力の形である。

粒子間の距離が λ より大きくなると、力は急激に弱まり実質上検知できなくなる。電磁相互作用の場合には、光子の質量が0であるため、上式の指数関数の部分はなくなり、よく知られたクーロンポテンシャルとなる。このとき力は無限遠まで到達できる。重力も同様である。

陽子などの複合粒子も、それが十分に点状粒子とみなせる範囲内では同様に扱うことができる。陽子・中性子の間の核力の到達距離は π 中間子(パイオン)の質量によって決まり、およそ1 fm(f はフェムトで 10^{-15})である。実際、湯川がパイオンの存在を予測した際には、その質量を核力の到達距離から逆算したのであった。

基本相互作用とその性質

冒頭で述べた1969年の「素粒子の表」には、現在は素粒子とみなされていないものも含まれていて、それらはハドロンと呼ばれる粒子である。

これには陽子・中性子(核子と総称)、パイオン(π)などが含まれる。ハドロンはクォークからなる複合粒子であり、たとえば陽子は(uud)、中性子は(udd)、 π^+ は($u\bar{d}$)(バーは反粒子を表わす)に相当している。

ハドロンをつくっている力は核力と同様強い相互作用で、グルオンと呼ばれる粒子の交換により生ずる。光子が電荷を持つ粒子と相互作用するように、グルオンはクォークのようにカラーと呼ばれる自由度を持つ粒子とだけ相互作用する。電子を始めレプトンはカラーを持たず強い相互作用をしない。グルオンは光子と同様にスピン1を持っており、質量は0である。

電磁相互作用と異なる点は、グルオン自身もカラーを持っていて、グルオンがグルオンを吸収放出できることである。このことに起因して強い相互作用はカラーの閉じこめと呼ばれる性質を持つことになる。これは、クォークやグルオンは単独の粒子として取り出すことができないという奇妙な性質を示すことを意味する。この性質は、磁石のN極とS極を分離できないことと類似している。

弱い相互作用は原子核のベータ崩壊や多くの素粒子の崩壊を引き起こす相互作用である。コラム1の表のうち安定な素粒子は、電子、ニュートリノ、光子である。クォークからなるハドロンの中では、陽子のみが安定である。これ以外の素粒子はつくられても決まった平均寿命で他の素粒子にこわれてしまう。これらの素粒子の崩壊は、W粒子という電荷1、スピン1の粒子によって引き起こされている。それに加え、Z粒子と呼ばれる電荷を持たない粒子も弱い相互作用を媒介する(中性の弱い相互作用)。中性の弱い相互作用の存在は、後で述べるゲージ理論によって理論的に予測され、そのうち実験で確認されたものである。

ニュートリノは電荷もカラーも持たず、重力以外には弱い相互作用しかしない粒子である。太陽からは大量のニュートリノが放出され、地上では1秒1 m^2 あたり10兆個近くが飛来しているが、そのほとんどは何もすることなく地球を通過して

しまう。このように「弱い」相互作用が弱い理由は、粒子同士が 10^{-18} mほどの超近距離に接近しないと力が働かないためである。これは弱い相互作用を引き起こすW粒子の質量が、パイオンのおよそ1000倍もあることによる。

太陽から光の他に多数のニュートリノが放出されていることは、太陽のエネルギー源である核融合反応に弱い相互作用が関与している証拠である。さらに、弱い相互作用がその名の通り弱いことが、太陽が100億年もの長い寿命をもつ理由の1つである。もし弱い相互作用がなかったとしたら、太陽は輝かず、われわれも存在していないことであろう。

力の統一的理解と質量の起源

20世紀後半の素粒子物理学の最大の成果は強、電磁、弱の3つの相互作用が統一的に理解できるようになったことであろう。この見かけ上非常に異なる3つが、いずれもスピン1の素粒子によって引き起こされているということは多数の実験事実により確認されている。スピン1の素粒子を記述する理論はゲージ理論と呼ばれ、美しい性質を持っている。相互作用の強さを決める結合定数は1つしかなく、粒子の種類によって変わることがない。たとえば、W粒子の結合の強さは、クォークでもレプトンでも同じである。これを普遍性と呼ぶが、このことは理論の対称性が高く予測能力が非常に大きいことを示している。

ゲージ理論は、素粒子の相互作用を記述するのに大きな成功を収めたが、代わりに質量に関する問題が生ずることとなった。ゲージ理論に登場するスピン1の素粒子はゲージボソンと呼ばれるが、理論の持つ対称性のため、その質量は0となる。実際、光子の質量は0であるし、グルオンの質量も0として矛盾しない。ところが、弱い相互作用を起こすW、Z粒子は陽子の100倍ほどの大きな質量を持っている。

さらに、クォーク・レプトンの質量も問題である。たとえば、電子はスピン1/2を持ち、進行

方向に対してスピンの向きが同じか反対かによって、「右巻き」「左巻き」の2通りの状態があるが、W粒子と相互作用するのは左巻きの電子のみである。(左巻き電子はW粒子を吸収するとニュートリノに変化する。)これは右巻き電子と左巻き電子がゲージ対称性のもとで異なる性質を示すことを意味する。質量を持つと静止系では右巻き左巻きの区別があいまいになるので、質量を持つことは対称性と相容れなくなってしまう。質量がなければ静止することがないので矛盾は生じない。他のクォーク・レプトンも同様である。

このように、ゲージ理論には、対称性に由来してすべての素粒子の質量がゼロになってしまうという困難がある。これを解決するのが南部陽一郎のノーベル物理学賞受賞理由となった「自発的対称性の破れ」の概念である。対称性を持つ本来の世界では、ニュートリノと左巻き電子というまったく性質の異なる粒子は、見分けのつかない兄弟粒子なのであるが、「対称性の破れ」によって見かけ上違う性質を示すようになる。この考えを実現するために、スピン0の粒子に対応するヒッグス場という場を導入するのが、いわゆる素粒子の標準理論である。ヒッグス場が0でない大きさを持つ状態がわれわれの真空であり、ヒッグス場によって本来のゲージ対称性が見かけ上破れる(通常「自発的」破れと呼ぶ)。このとき、ヒッグス場とクォーク・レプトン、ゲージボソンの相互作用からそれぞれの質量が生ずることがわかる。このようにして現実と一致する理論である「標準理論」が構築されている。

素粒子の標準理論には、このように未発見の粒子であるスピン0のヒッグス粒子が存在する。この粒子の質量は一般的な議論から1 TeV(Tはテラで 10^{12})程度以下、既存の実験データからは115 GeVから200 GeV程度の間にあると予測されている。スピン0の素粒子は今まで知られておらず、これが発見されれば新しいタイプの素粒子となる。LHCにおける実験では、この粒子が存在するならば検出が確実視されている。

ヒッグス粒子の発見の意義はこれだけではない。

強、電磁、弱相互作用はすべてゲージボソンによる「ベクトル力」である。(重力はスピン2の重力子による「テンソル力」である。) 質量の起源に関係したヒッグス粒子の相互作用は、これとはまったく性質の異なるもので、「スカラー力」と呼ぶことができよう。これにはクォーク・レプトンの質量を与えるいわゆる湯川相互作用、およびW、Z粒子の質量生成に関与する「ヒッグス凝集力」がある。これらが存在する証拠が得られれば、質量の起源に対する解答となるとともに、まったく新しいタイプの基本相互作用が見いだされたことになる。

現状ではヒッグス場の存在を仮定する標準理論は一つの仮説に過ぎず、その正否は実験により検証される必要がある。しかし、一般的な考察から、標準理論が間違っているとしてもLHCにおいて何か別の現象が見えるはずだということが言える。仮想実験としてW粒子同士の散乱を考える。もし既知の素粒子以外に何も新しいものが存在しないとすると、散乱過程の重心系エネルギーを上げるにつれて散乱確率は増加し、1 TeV程度のエネルギーでは、確率保存から導かれるいわゆるユニタリ性の上限を突破してしまう。このことから、1 TeVのスケール以下で何か新しい現象が起きていることが予想される。標準理論においては、ヒッグス粒子の効果によって散乱確率の上昇は止まり問題は起こらないが、ヒッグス粒子が存在しなければ何か別の効果によりユニタリ性を回復しなければならない。

新しい物理

LHCにおいて観測の期待される新しい現象はこれだけではない。実際、標準理論が素粒子の基本相互作用の最終的な姿ではない証拠はいくつも挙げられる。重力が含まれていないことは別にしても、宇宙の暗黒物質、暗黒エネルギーが説明できないこと、物質・反物質の非対称性を説明するには、小林・益川のCP対称性の破れだけでは足りないこと、宇宙初期のインフレーションを起こ

す機構が含まれないことなどである。標準理論を超える法則として理論的にさまざまな可能性が探求されているが、その代表的なものとして超対称性と余剰次元がある。

超対称性は、スピンの異なる粒子を結びつける対称性である。相対性理論のポアンカレ対称性を拡張しようとする、この超対称性がある意味で唯一のものであることが知られている。また超弦理論においては、矛盾のない理論をつくるために超対称性の存在が重要である。さらに、超対称性を持つ理論は、通常の理論では生じる無限大の零点振動の問題が起こらないなど、理論的に美しい性質を持っている。

自然が超対称性を持つためには、既知の素粒子以外に、スピンの異なる超対称パートナーという粒子が存在しなければならない。この超対称粒子の質量がどの程度であるかの一つの手がかりは、標準理論におけるヒッグス粒子の質量の問題である。およそ 10^2 GeVであるヒッグス粒子の質量を、通常は無視できるほど弱い重力が強くなるエネルギースケールであるプランクスケール 10^{19} GeVに比して、いかに安定に保つかといういわゆる階層性問題は、超対称粒子の質量が1 TeVあたりまでにあれば理解が可能となる。この程度の超対称粒子はLHCの射程範囲内にある。超対称性を持つ標準理論の有利な点として、3つの相互作用のゲージ結合定数が、もともと1つのものから派生したとして矛盾しないこと(いわゆるゲージ相互作用の大統一)がある。さらに、この理論には、宇宙の暗黒物質の候補となる粒子が含まれている。

われわれの空間は3次元であるが、超弦理論によれば9次元でなければならない。余分の空間の次元を余剰次元と呼ぶ。その存在が今まで知られていないことは、余剰次元の方向は微小な有限の大きさしかないことを意味する。われわれの住む世界が余剰次元方向の全体に広がっているのか、あるいは特定の場所(「ブレーン(膜)」上)にいるのか、また余剰次元空間の曲がり具合や余剰次元のうちに大小があるのか、などいろいろな場合が

ありうる。先に述べた階層性問題から、余剰次元のスケールが TeV のエネルギーに相当する 10^{-18} m 程度である可能性が考えられる。このような余剰次元が存在すれば、余剰次元方向への励起モードが新しい粒子として観測できることが期待される。また、このような理論では、重力相互作用が LHC のエネルギー領域で他の相互作用と同じぐらい強くなり、スピン 2 の重力子による新しい現象も起こるはずである。LHC においてブラックホールが生成される可能性も議論されている。ブラックホール生成が起こった際の安全性に関しては一般にも話題になったところである。

* *

素粒子の研究には極微のスケールを分離する解像度が必要であるが、量子力学の不確定性関係により、高エネルギーの素粒子反応を観測することがその手段となる。高エネルギーのフロンティアを久しぶりに大きく広げる LHC での実験結果にはきわめて大きな関心が寄せられている。ヒッグス粒子の発見により質量の起源についての手がかりが得られると予想されるが、さらにそれ以外の未知の素粒子や新現象の観測が期待される。30 年以上にわたって理論家がさまざまな可能性を調べ尽くしてきているが、自然はさらにその上を行くかもしれない。素粒子物理の発展、われわれの自然像の変革がすぐそこに迫っていることを予感している。