

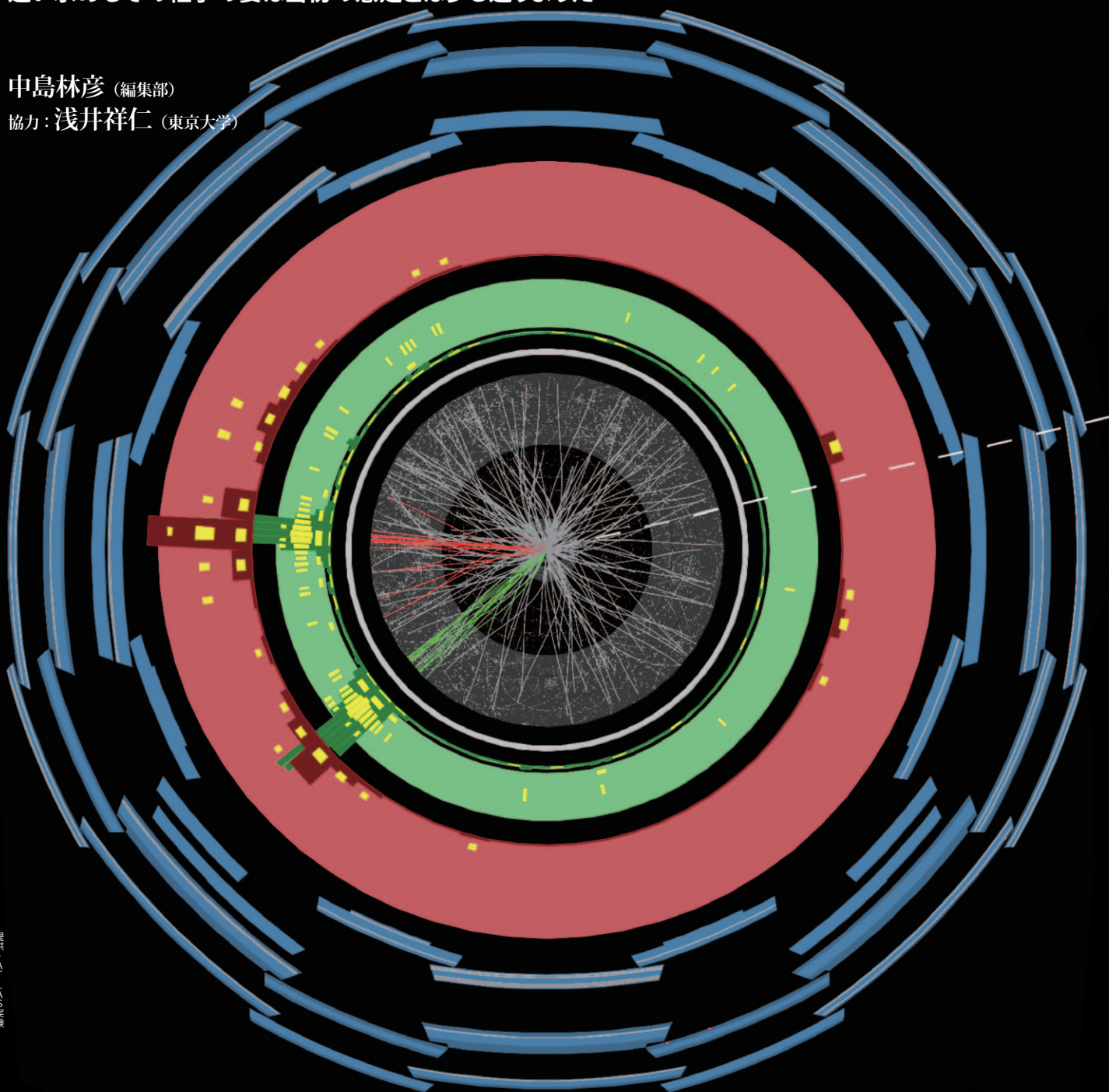
日経サイエンス

特集 素粒子論の危機

問われる 究極理論への道筋

まったく異なる存在のように見える物質と力
超対称性粒子はそれらの起源解明のカギを握る
追い求めるその粒子の姿は当初の想定とは少し違うようだ

中島林彦 (編集部)
協力: 浅井祥仁 (東京大学)



超対称性理論、愛称SUSY（スージー）は現在の素粒子論の枠組み「標準モデル」を超える理論の最有力候補だ。SUSYが存在を予言する超対称性粒子は、スイス・ジュネーブ近郊の欧州合同原子核研究機構（CERN）にある世界最強の大型ハドロン衝突型加速器LHCの2つの国際共同実験、ATLASとCMSで発見が期待された。だが昨年2月までの第1期実験では、標準モデルで唯一未発見だったヒッグス粒子は見つかったものの、超対称性粒子は存在の兆候すら得られなかった。

SUSYには様々なモデルがあり、超対称性粒子の質量（静止エネルギー）はモデルによって異なる。LHCの第1期実験では、多くの研究者が支持するナチュラルSUSYというモデルが予言する超対称性粒子の質量領域を探索したが見つからなかった。その先見の明から“予言者”と称されるノーベル賞学者の南部陽一郎博士は昨夏、大阪大学での記者会見で超対称性粒子の存在に否定的なコメントをしている。

だがSUSYが悲観的になったわけではない。ナチュラルSUSY以外の可能性が十分に残っているからだ。SUSYは標準モデルでは理解が難しい問題をいくつもうまく説明するが、その中の1つ、ヒッグス粒子の質量に関する問題の解決に重点を置いたのがナチュラルSUSYだ。一方、宇宙に大量に存在する暗黒物質の正体が超対称性粒子で

超対称性粒子の候補イベント ATLAS検出器（39ページの写真）が観測した陽子衝突反応（イベント）の一例。陽子は誌面に垂直方向の手前側と奥側からやって来て正面衝突、超高エネルギー状態が生み出され、その中から出てきた各種粒子の飛跡が示されている。画面の赤色と緑色の線の集まりで示す領域はジェット状に噴出する多数の粒子。運動量とエネルギーの保存則を考えると、これら2つのジェットとは反対方向に、検出器では捉えられない電荷ゼロの高エネルギー粒子が飛び去ったことがわかる。超対称性粒子の可能性があるが、データを増やして同じ現象が繰り返し起きるかどうかを確認しなければ、物理的に意味あるものかどうかはわからない。

あると考えた場合、超対称性粒子の質量は来年始まるLHC第2期実験で探索する領域が有望になる。

また一口に超対称性粒子といっても多数の種類があり、物理的性質が大きく異なる2つのグループに分かれる。ナチュラルSUSYで重要な役割を担うのはその一方のグループに属するものなのに対し、暗黒物質の有力候補はもう一方に属する。探索する超対称性粒子のタイプがまったく異なる。

第1期実験で探索したエネルギー領域で超対称性粒子が見つからなかったということは、SUSYのモデルが絞り込まれたことを意味する。「ナチュラルSUSYがほぼ否定されたことで、かえって超対称性粒子探索の見通しがよくなった。SUSY実証の時がいよいよ近づいた」とATLAS実験に取り組む東京大学の浅井祥仁教授は期待を込めて話す。

LHCの第2期実験で超対称性粒子が見つかってSUSYが実証され、極微の世界を支配する3つの力を理論的に統合する大統一理論、さらには重力をも統合する超弦理論（超ひも理論）への道筋が見えてくるのか、それとも何も見つからず物理学の行く手に深い霧が立ちこめることになるのか。いずれ

にしる劇的なドラマが展開されることは確かなようだ。

SUSYとは何か

素粒子は物質を構成するフェルミ粒子、力を伝えるゲージ粒子、それらに質量を与えるヒッグス粒子からなり、ゲージ粒子とヒッグス粒子は性質が似ているのでボース粒子と総称される。フェルミ粒子とボース粒子は空間に関する特性が正反対だ。フェルミ粒子は空間のある一点には1個しか存在できない。だからフェルミ粒子が集まれば一定の空間が占有され、それを私たちは物質として認識する。これに対しボース粒子は空間のある一点に何個でも存在できる。そのボース粒子の数の多少を私たちは力の強弱として認識する。標準モデルでは両者はまったく別々の独立した存在として扱われ、それぞれの起源について何も述べていない。

一方で、フェルミ粒子とボース粒子は非常に密接に結びついている。電子と光子を例にとると、電子は光子を放出したり吸収したりするし、光子は電子と陽電子（電子の反粒子。反粒子については後述）のペアになったり、そのペアが出合って光子に戻ったりする。2つの電子の間には電磁気的な斥力が

KEY CONCEPTS

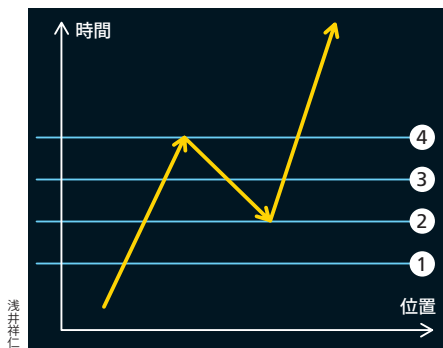
絞り込まれたターゲット

- 素粒子はスピンという物理量の違いで二分される。スピン1/2はクォークや電子など物質を構成するフェルミ粒子で、スピン整数（0, 1, 2）は光子やグルーオンなど力を伝えるボース粒子だ。超対称性理論（SUSY）によればフェルミ粒子とよりふたつでスピンの整数のスフェルミオン、ボース粒子とよりふたつでスピンの1/2のボシーノが存在する。両者合わせて超対称性粒子と総称され、世界最強の加速器LHCで探索されている。
- 超対称性粒子の質量（エネルギー）は理論モデルによって違い、LHCの第1期実験ではナチュラルSUSYというモデルの予想のもとにスフェルミオンの一種、ストップの発見に期待がかかったが見つからなかった。その結果を踏まえ、来年始まる第2期実験（第1期より高いエネルギー領域を探索）では暗黒物質の候補とされるボシーノがターゲットになる。

働くが、それは電子間で光子を放出したり吸収したりするキャッチボールが繰り返されることによっている。

SUSYはフェルミ粒子とボース粒子の起源は共通であって、自然界は物質と力という空間的特性の違い以外はうりふたつの素粒子のペアから構成されていると説く。電子と同じ質量と電荷を持ちながら力としての特性を帯びた素粒子や、光子と同様、質量と電荷がゼロでありながら物質としての特性を帯びた素粒子が存在することになる。標準モデルのフェルミ粒子の相方となるボース粒子をスフェルミオン、同ボース粒子の相方となるフェルミ粒子をボシーノといい、両者合わせて超対称性粒子と総称する。

つまりSUSYによれば標準モデルの素粒子セットを鏡に映して役割をあべこべにしたような素粒子セットが存在することになる。実際には1つの超対称性粒子も見つかっていないので、絵空事のようにも思えるが、少なくとも時間に関する特性があべこべになっている素粒子のセットは実在する。粒子と反粒子（物質粒子と反物質粒子）だ。



時空を動き回る 素粒子は時間と空間が一体となった時空の中を動き回っていて、時の流れを逆行することもある。その場合、時の流れを順行する私たちの目には、電荷が反転した反粒子が時の流れを順行する姿として映る。素粒子の動きを縦軸を時間、横軸を位置としたグラフで示す。例えば①～④の時刻では単独の粒子が次のように見える。①粒子が1個。②粒子が1個と、別の場所で粒子と反粒子のペアが発生。③粒子2個と反粒子1個。④粒子が1個と、別の場所で粒子と反粒子が出合って消滅。

時の流れを遡る

物質粒子（フェルミ粒子）は電子やクォーク（陽子や中性子を構成する素粒子）などからなるが、それらには電荷の符号が逆である以外、うりふたつの素粒子が存在する。それが反粒子だ（右ページの図）。例えば電子の反粒子は正電荷を持つ陽電子。これまでの実験では陽電子の質量と電荷量は非常に高い精度で電子と一致する。そして電子と陽電子など同種の粒子と反粒子が出合えば消滅反応が起き、純粋なエネルギーに変わる。力を伝えるボース粒子にも反粒子が存在する。放射性元素の崩壊などを起こす「弱い力」を担う正電荷の W^+ 粒子と負電荷の W^- 粒子のペアが一例だ。電荷ゼロの光子などは粒子と反粒子が同一になる。

反粒子は時間の流れと密接なつながりがある。過去から未来への時間の流れを順行、未来から過去への流れを逆行とすると、日常世界は常に順行だが、極微の世界では事情が違って来る。私たちは時間と空間を別物と認識しているが、相対性理論によると両者は一体的な時空として捉えられる。実際、素粒子は時空を自由に動き回っており、時間軸で見ると逆行する場合も頻繁にある（左図）。

ただ私たち自身は時間を順行する存在なので、時を逆行する素粒子をそのまま素直に認識できず、電荷の符号が反転した反粒子が時間を順行する姿として認識する。例えば陽電子は時間を逆行している電子だ。このように考えれば陽電子の質量と電荷量が電子とうりふたつなことも自然に理解できる。両者は見かけは別ものだが、実は同じ粒子の異なる動きを見ていることになるからだ。

粒子と反粒子は宇宙誕生直後、きっかり等量が生み出されたと考えられているが、現在の宇宙には粒子しか残っていない。弱い力の作用における粒子と反粒子の間の微妙な差異、「CP対

称性の破れ」によって、数の不均衡が生じたためとみられている。この対称性の破れのおかげで宇宙は空っぽにならないですんでいる。また量は限られるが、宇宙から飛来する高エネルギー荷電粒子（宇宙線）と大気との衝突で反粒子が生み出されており、最初に発見された反粒子は宇宙線由来のものだった。LHCがあるCERNでは、陽電子と反クォークからなる反水素原子などを特殊な加速器で作出し、その性質を調べている。

量子力学と相対性理論

粒子・反粒子ペアを少し詳しく紹介したのは、フェルミ粒子とボース粒子の違いをもたらず物理量である「スピン」と理論的に不可分だからだ。

素粒子は普通にイメージする粒子とは2つの点で大きく違う。第1に素粒子は粒子と波、両方の性質を併せ持つ。そのため素粒子の振る舞いはニュートン力学ではなく量子力学で説明される。第2に素粒子は一般に超高速、最高では光速で運動しており、相対性理論を適用する必要があることだ。

当初、量子力学で取り扱っていたのは非相対論的な運動で、相対性理論から導き出される静止エネルギーは考慮されていなかった。相対性理論によると時間と空間は一体だが、当初の量子力学の方程式（シュレーディンガー方程式）では時間と空間の扱い方がかなり違っていた。

そこで方程式に静止エネルギーの項を追加し、さらに時間と空間を同じ形で扱うように変えた式（ディラック方程式）にして解いたところ、素粒子は4つの異なる状態がワンセット、いわば三位一体ならぬ四位一体であることがわかった。4状態のうち2つは粒子、残り2つは反粒子のもので、粒子と反粒子のそれぞれ2状態はスピンの符号の正負の状態に対応する。

反粒子の存在はディラック方程式の

物質を構成する素粒子

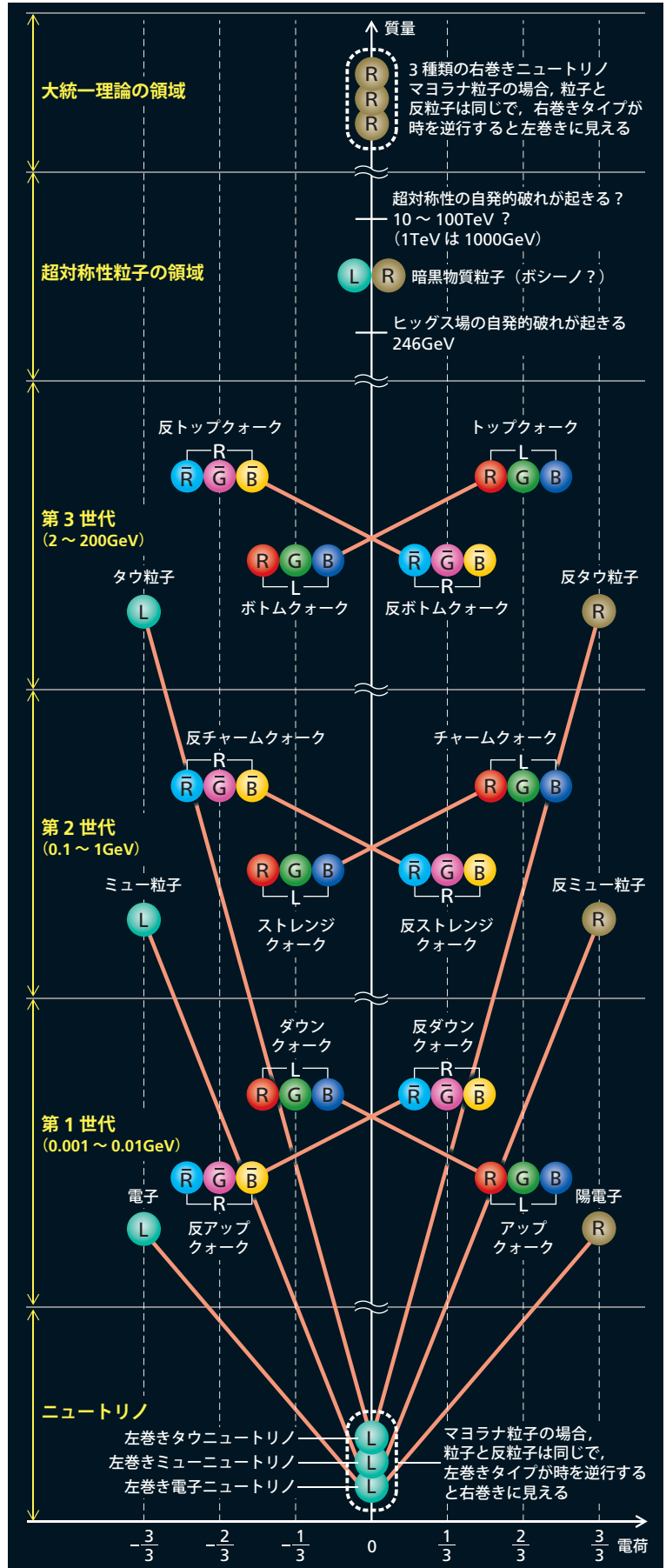
物質を構成する素粒子はフェルミ粒子と総称され質量や電荷などの値によって区別される。その一覧を示す。縦軸の質量はエネルギーの単位であるギガ電子ボルト(GeV)で表す。陽子の質量は約1GeV, 電子はその1/2000の約0.0005GeVになる。横軸の電荷は電子の電荷を-1とした値。フェルミ粒子は4種類1セットで3セットからなる。各セットを世代と呼び, 世代が上がるにつれて質量が大きくなる。SUSYが事実なら, 第3世代よりもっと上の質量領域に超対称性粒子, 例えばフェルミ粒子であればボシーノが位置する。ボシーノは正体不明の暗黒物質の有力候補となっている。

世代の中で最も質量が小さい第1世代は私たちが日常接する物質を構成する。電荷+2/3のアップクォークと-1/3のダウンクォーク, 電荷-3/3の電子, 電荷0の電子ニュートリノからなる。クォークは電荷のほかに赤(R)と緑(G), 青(B)という三原色になぞらえたカラー(色荷)のいずれかを持つ。反クォークは電荷の符号が反転するが, カラーも反転して三原色の補色, 反赤(\bar{R} , シアン)か反緑(\bar{G} , マゼンタ), 反青(\bar{B} , 黄色)になる。クォーク間の色の入れ替わりと, 反クォーク間の補色の入れ替わりは, 強い力を担うグルーオンのキャッチボールによる。

各世代のニュートリノの質量はまだ確定していないが他の素粒子と比べれば質量ゼロとみなしてよいほど小さい。質量の階層としてはニュートリノの3種類が最も下で, その次は第1世代(ニュートリノを除く), そして第2世代, 第3世代となり, 第3世代の中ではトップクォークが飛び抜けて大きい。本文中で紹介するヒッグス場における対称性の自発的破れや超対称性の自発的破れもトップクォークより上のエネルギー領域で起きる。

素粒子には右巻き(R)と左巻き(L)の区別もある。弱い力は左巻きの粒子と右巻きの反粒子のみに作用し, 弱い力を担うボース粒子のうち正負の電荷を持つW粒子は素粒子の種類を入れ替える働きがある。図中にはW粒子(オレンジ色の棒線)のキャッチボールによってどの素粒子ペアが入れ替わるかを示す。例えば第1世代のアップクォークはW粒子の作用で同世代のダウンクォークになるが, 頻度は低いもののダウンと同じ電荷を持つ第2世代のストレンジ, 第3世代のボトムにもなる。

ニュートリノは質量以外の点でも他のフェルミ粒子とかなり性質が違う。3種のニュートリノは粒子では左巻き, 反粒子では右巻きしか確認されていない。この点について, 電荷ゼロのニュートリノは粒子と反粒子が同一の「マヨラナ粒子」と呼ばれるタイプであって, 私たちが「右巻き反ニュートリノ」と認識しているのは, 実は時を逆行している「左巻きニュートリノ」ではないかとの説がある。この説が正しければ, 未発見の右巻きニュートリノは桁違いに質量が大きいと考えられている。また各世代のニュートリノは飛んでいる間に相互に変身する性質があり, いわば混合していることが近年わかった。グラフ中では3種ニュートリノを点線で囲って混合を表した。



解として理論的に予言され、後に実際の反粒子が見つかった。一方、スピンは実験では知られていたが、ディラック方程式の解として理論上の根拠が与えられることになった。

言い換えれば、粒子・反粒子ペアとスピンは宇宙の基本、つまり素粒子が粒子と波の性質を併せ持ち、時空が一体であることを式に書き下ろせば自然に立ち現れてくる。それではSUSYが予言するフェルミ粒子・ボース粒子ペアの存在もディラック方程式から導き出せるかということ、そうはならない。

ディラック方程式は相対性理論を組み込んでいるといっても、それは平坦な時空で等速直線運動する粒子を想定した特殊相対性理論だ。素粒子に力が作用して加速度運動している状態を厳密に考えるには、歪んだ時空を扱う一般相対性理論が必要になるが、現在でも量子力学と一般相対性理論の統合は成し遂げられていない。

もし統合できればフェルミ粒子・ボース粒子ペアも、その統合理論の方程式の解として導き出されるかもしれないが、よくわからない。だからまずはSUSYを実証することで、両者を統合する理論の手がかりを得ようというのが現在の研究方針だ。そしてSUSYを理解する上で重要になるのがスピンド。

スピンとは何か

素粒子は一種の自転をしていると考えられている。光子は電磁波とみることができ、電磁波の振動方向は進行方向に垂直な面内で回転しており、時間的に追っていくと振動面は螺旋を描く。円偏光と呼ばれるもので、これが光子の自転の表れと理解できる。また電子はミクロの棒磁石のようになっていて、磁気モーメントという物理量を持つが、磁気モーメントは電荷を帯びた球が自転していると考えれば自然に生じる。

スピンは、こうした素粒子の自転に

よって生み出される自転角運動量のようなもののみならずことができ、自転方向の違いに応じて正負の符号が付く。円偏光を光子の自転の表れとみれば、光子の自転軸は光子の進行方向に沿っていて、右ねじの進む方向の自転をスピン正（右巻き）、その逆向きをスピン負（左巻き）と定めている。

素粒子の基本的な物理量として振動数1Hzの光子（光が1秒間に飛ぶ距離を波長とする電磁波）のエネルギーがあり、これをプランク定数という。1Hzの光子の運動量はプランク定数を光速で割った値になるが、自転角運動量はどんな値になるか？ 1回転は 360° つまり 2π なのでプランク定数を 2π で割った値が候補として考えられるが、現実にはそうなる。これが素粒子のスピンの単位で、振動数1Hzの光子はスピン1を持っている。光子は振動数によってエネルギーと運動量は変わるが、スピンの値は変わらない。

理論研究と実験から光子など微小世界を支配する3つの力（電磁気力と弱い力、クォークを結ぶ強い力）を伝えるボース粒子のスピンはすべて1であることがわかっている。ヒッグス粒子は各種素粒子に作用して質量を与えることから力の一種とされ、スピンは0だ。スピン0はいわば自転が停止した状態で、本当にそんな素粒子が存在するのか懐疑的な見方もあったが、ヒッグス粒子が一昨年発見され、存在が実証された。また重力を伝える重力子は未発見だが、理論的考察からスピン2になる。

一方、電子やクォークなどのフェルミ粒子のスピンはすべて $1/2$ になる。これがスピンの不思議なところで、自転角運動量なら、素粒子の質量や運動状態によって変わってもよいところだが、すべて同じ値だ。

実際、スピンを自転角運動量とみるのは便宜上の話だ。普通にイメージする自転角運動量は物質粒子が持つもの

で、光子など質量ゼロの素粒子にはあてはまらない。電子などの物質粒子にしても、それが超微小の球体であって、その自転で磁気モーメントを生み出そうとすると、球の表面上の一点が自転に伴って動くスピードは光速をはるかに超え、相対性理論と矛盾する。また、素粒子は大きさのない点と考えられており、点であれば自転角運動量は生じない。

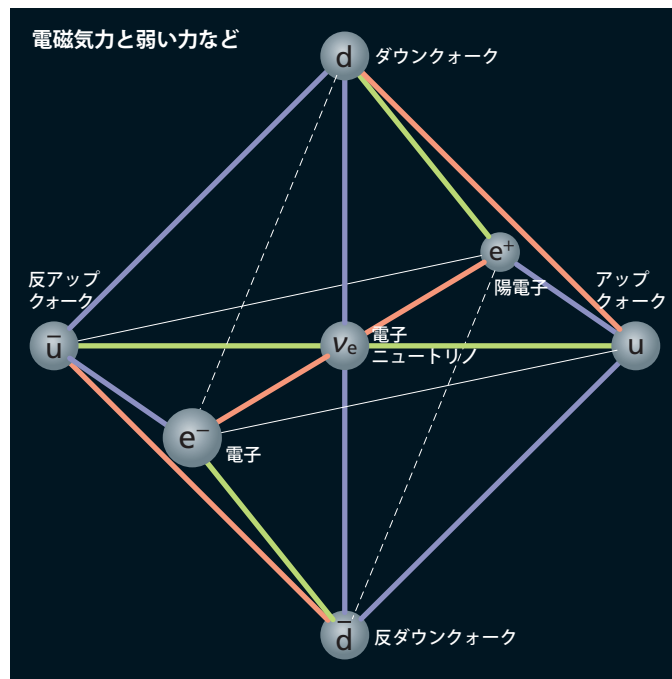
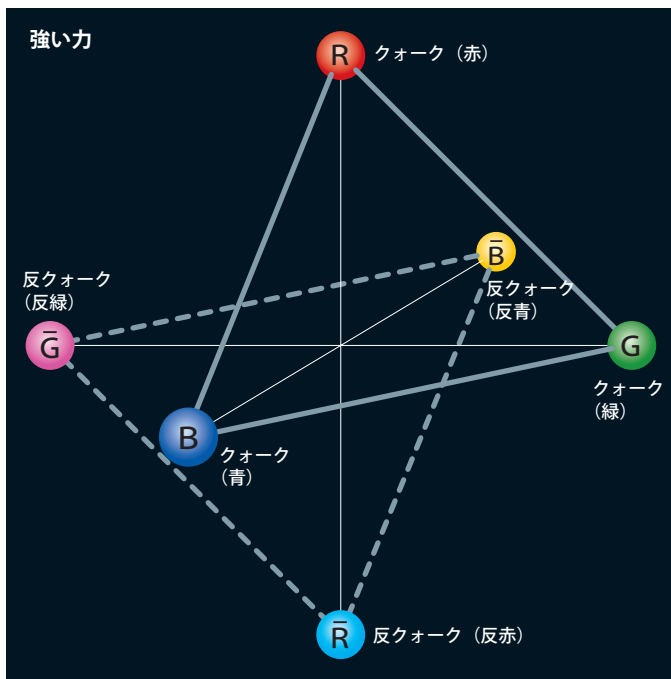
ここまでみてくると、私たちが普通にイメージする自転角運動量としてスピンを解釈することは到底できないことがわかる。そもそもスピンの値からフェルミ粒子、ボース粒子の区別がなされ、物質と力の性質が生じている。物質とはスピン $1/2$ の素粒子の集まりで、それらがバラバラにならないのは、スピンの0, 1, 2の素粒子によって結ばれ、相互に距離を置きながら全体として形を保っているからだ。

とはいえ円偏光や電子の磁気モーメントは素粒子の自転をイメージさせ、磁場中の電子は自転しているコマの歳差運動とそっくりの動きをする。

ここで素粒子とは何であるかを改めて考えると、素粒子は粒子であると同時に波として捉えることができ、その波は場の揺らぎとして理解される。光子は電磁場、電子は電子場、ヒッグス粒子はヒッグス場の揺らぎで、その揺らぎが空間を伝わる状況を私たちは光子や電子、ヒッグス粒子が飛んでいると認識する。だとするとスピンは場に備わった固有の空間的な特性、いわば渦のようなパターンであって、場が揺らいだ時に、円偏光や電子の磁気モーメントなどの形でその特性が顕在化すると考えることができる。

実時空と超空間

ではスピンの場の空間的な特性だとすると、スピン $1/2$ のフェルミ粒子とスピン整数、例えばスピン1のボース粒子では何が違うのか？ ここまで素



田村 雅彦

粒子を外から眺めてきたが、視点を変えて素粒子の立場から周囲を眺めると空間がどのように見えるのか考える。スピンは自転になぞらえられるから、回転イスに座ってぐるっと回転しながら周囲を眺めたと考えてみる。

理論的考察からスピン1のボース粒子は360°回転すると回転前と同じ景色が見えてくる。私たちが日常経験するのと同じ空間の見え方で、光子の円偏光を考えれば、それも当然と思えるかもしれない。

これに対してスピン1/2のフェルミ粒子は720°回転して初めてもとの景色に戻る。フェルミ粒子にとって、空間は私たちの2倍の広がりを持つように見えるわけだ。720°のうち半分の360°はなじみのある実時空だとすると、残り半分は私たちが認識できない“見えない時空”になる。

紙テープをひとひねりして貼り合わせるとメビウスの輪ができ、その表面をなぞると2周、つまり720°回転してもとに戻る。スピン1/2を説明する時、よく引き合いに出されるが、そのイメージが物理的世界とどうつながるかは不明だ。

力を伝える素粒子

極微の世界を支配する力は3種類。電磁気力と放射性元素の崩壊などを起こす弱い力、クォークを結びつける強い力だ。力は引力と斥力、素粒子の種類を変える作用を持つ。これら3作用を併せ持つのがクォークのカラー(色荷)に関わる強い力だ(左図)。クォークは三原色になぞらえた赤(R)、緑(G)、青(B)のいずれかを持ち、反クォークはその補色の反赤(R̄)、反緑(Ḡ)、反青(B̄)のいずれかになる。強い力を伝えるグルーオンは8種類あり、三原色とその補色をそれぞれ1つ持つ(52ページの図)。クォークや反クォークの距離が離れている時、グルーオンは引力として働くが、非常に近くなると斥力に転じる。同時に色の変化を起こす(グルーオンのうち2種類は色の変化を起こさない)。引力や斥力が作用しないのは、カラーが組み合わせさせて無色になる場合で具体的には次の3つだ。①クォーク3個で三原色が揃う(左図、灰色の太い棒線で結んだ三角形)。②反陽子など反クォーク3個で三原色の補色が揃う(灰色の太い破線で結んだ三角形)。③クォークと反クォークのペアで三原色のいずれかの色とその補色が揃う(細い実線で結ばれた対向ペア)。現実の粒子でいうと①が陽子や中性子など、②が反陽子や反中性子など、③が各種の中間子になる。標準モデルでは電磁気力と弱い力が統合されて電弱統一理論で説明される。電磁気力を伝える光子は電荷に反応して引力と斥力を生じる、弱い力を伝えるW粒子は種類の変化を起こすが、Z粒子は種類の変化を起こさない。大統一理論ではX粒子とY粒子というボース粒子の存在が予言されている。右図にW粒子(オレンジ色の棒線)とX粒子(緑色の棒線)、Y粒子(紫色の棒線)による第1世代の素粒子間の種類の入替わり関係を示す(図ではわからないがアップクォークと反アップクォークの間は電子ニュートリノを介さずにX粒子で結ばれる)。

素粒子論では、この奇妙な時空認識を持つフェルミ粒子を説明するため、通常の4次元時空のほかに、いわば第2の4次元時空を加えた「超空間」を設定している。私たちは時空を表現するのにx軸を距離、y軸を時間とする図を使うが(46ページと51ページの図)、第2の時空はいわばz軸になる。

第2の時空を構成する4つの次元をフェルミオン次元といい、物理的にはそれぞれ長さの1/2乗の次元を持つ。私たちがイメージする空間の次元とはかなり異なる。またフェルミオン次元の値は実数ではなくグラスマン数という特殊な数で表される。

グラスマン数は2つの数aとbのかけ算が $a \times b = -b \times a$ となる数の体系だ。かけ算の順番を入れ替えると符号が反転するわけで、符号反転しない実数とはかなり異なる。また同じ数のかけ算は $a \times a = a^2 = 0$ となる。つまりグラスマン数は2乗や3乗などというものが存在せず、1乗だけの数だ。何十乗でもできる実数とはこの点でも違う。

超空間を考えた場合、実時空のある一点に存在する素粒子には、グラスマン数空間の座標がゼロではない状態とゼロの状態があり、そこで自転をしているような状況になる。前者をスピン

1/2のフェルミ粒子、後者をスピン1のボース粒子とみれば、フェルミ粒子は空間のある一点に1個しか存在できないのに対し、ボース粒子は何十個でも存在可能なことがうまく説明できる。電子と光子の関係のように、フェルミ粒子とボース粒子は同じ空間を共有する密接な関係にあることも自然に理解できる。

角運動量保存則とSUSY

実時空では角運動量保存則が成立していることを考えると、超空間でも同様なことがあってもおかしくない。例えば原子核の周囲を回る電子の角運動量の総量は、周回によって生じる軌道角運動量（実時空の角運動量）にスピン（フェルミオン次元がからむ角運動量）を合算したもので、一般には保存量として扱われている。

原子核を周回する電子の軌道角運動量はボース粒子のスピンと同様、プランク定数を 2π で割った値の整数倍になる（ちなみに電子の軌道角運動量1単位によって生じる磁気モーメントは、電子のスピン1/2による磁気モーメントの値と同じだ。角運動量としてはスピンは軌道角運動量の半分だから、磁気モーメントも半分ではいいはずだが、そうはなっていない。ここにもスピン1/2の特異な時空認識が表れている）。

もし超空間でも角運動量保存則が成り立っていれば、超空間でも回転対称性が成り立つことになる。私たちは適当な3次元空間座標を設定することで物理法則を定式化しているが、その座標系を自由に回転させても物理法則を同じ式で表せる時、回転対称性があるといい、それは角運動量保存則が成立することを意味する。

だから超空間で角運動量保存則が成り立てば、実時空とフェルミオン次元が合わさった座標系を自由に回転させても物理法則の式が同じになる。極端な場合、座標系の回転で実時空とフェ

ルミオン次元が入れ替わっても物理法則の式が変わらないことになるわけで、これはフェルミ粒子とボース粒子を入れ替えても物理法則が同じ式にならないければならないことを意味する。こうした要請をする理論がSUSYで、その要請から導き出される素粒子が超対称性粒子だ。粒子・反粒子ペアは時間軸に関わる運動方向の違いなのに対し、フェルミ粒子・ボース粒子ペアは超空間における自転の仕方の違いになる。

粒子と反粒子の入れ替えは電荷の符号を反転することだったが、フェルミ粒子とボース粒子の入れ替えではスピンの値を1/2ずらすことになる。理論研究からスピン1/2のフェルミ粒子の相方のスフェルミオンはスピン0。光子やヒッグス粒子などスピン1と0のボース粒子の相方のボシーノは同1/2、スピン2の重力子の相方は3/2だ。

標準モデルの素粒子と超対称性粒子を合わせるとスピン1/2の素粒子は30種類近くになり、スピン0と1がその半分くらい、重力関連でスピン3/2と2が各1種類。もしかするとスピンは1/2が根源的状态なのかもしれない。スピン整数の粒子はスピン1/2の粒子を組み合わせれば実現できるが、逆は不可能だ（スピン0は+1/2と-1/2の組み合わせ）。

質量を与えるメカニズム

超対称性粒子の存在を仮定するもとなつた要請は超空間における回転対称性なのだから、標準モデルの素粒子とその相方の超対称性粒子の質量は同じはずだ。とすれば電子の相方であるスエレクトロンなどが普通に存在しているもよいのに、自然界には見当たらない。

反粒子も超対称性粒子と同様、自然界には見当たらない。その理由は弱い力に関わるCP対称性の破れという物理現象で説明されている。ただ、反粒子は加速器実験によって生み出すこと

ができ、その質量は精密測定の範囲内において、相方の粒子と同じだ。

一方、超対称性粒子は加速器実験によっても、今のところ生み出せていない。超対称性粒子は存在したとしても、その質量は加速器実験で実現できるエネルギーより高いことになる。そして反粒子の不在の背景にCP対称性の破れがあったように、超対称性粒子の不在の背景には、何らかの対称性の破れがあると理解される。それは質量に関することから、まずは標準モデルの素粒子とヒッグス粒子（ヒッグス場）との反応について考えてみる。

光子など質量ゼロの素粒子は常に光速で飛ぶが、ほんのわずかでも質量のある粒子は静止できる。静止状態から動かすには力が必要で、質量が大きい素粒子ほど大きな力が必要になる（この質量を慣性質量と呼び、現代の物理学では慣性質量は重力質量に等しいとしている）。

ただ静止状態にある素粒子も非常にミクロなレベルで見れば常に光速で飛んでいて、ヒッグス場との頻繁な相互作用によって狭い領域を往復運動していると理解されている。ヒッグス場との結びつきが強いほど相互作用の頻度が高いので、大きな力を加えなければ、その往復運動から抜け出せない。一方、ヒッグス場との結びつきが弱く相互作用の頻度が低ければ、少しの力で往復運動から離脱して一方向に動く。素粒子とヒッグス場との結びつきの強弱が質量の大小になる。

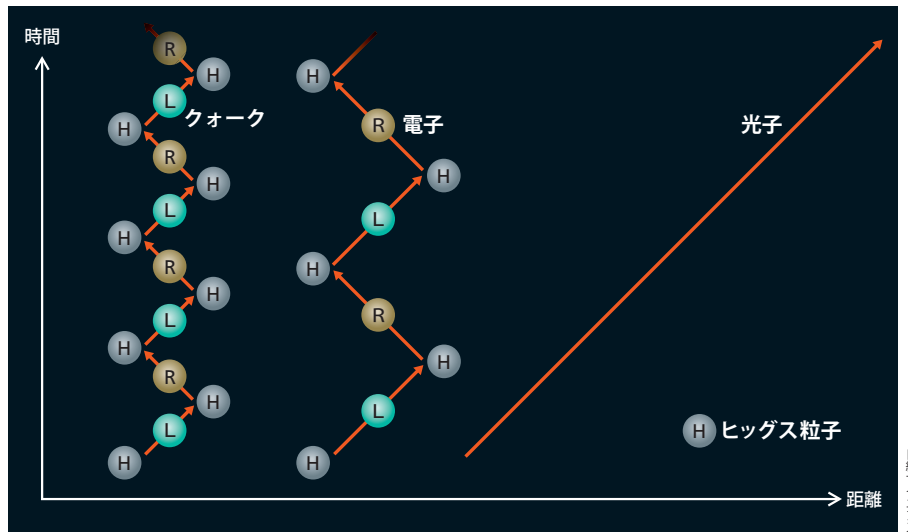
ヒッグス場との結びつきの強さは右巻き粒子と左巻き粒子の結びつきの強さでもある。スピンは便宜上、素粒子の自転とみることができ、光子など質量ゼロで光速で飛ぶ素粒子の場合、自転軸は素粒子の進行方向に沿っていて、右ねじの進む方向の自転を右巻き、その逆を左巻きとしている。もし飛行速度がゆっくりなら、右巻き粒子を追い抜き、振り返ってその粒子を見ると左

巻きに見えるようなことが起きる。しかし粒子が光速で飛んでいけば、相対性理論の要請から何者も光速より速くは動けないので、その粒子を追い抜くことはできない。光速で飛ぶ粒子の右巻き・左巻きの区別は電荷の正負と同様、変わることがない。右巻き粒子・左巻き粒子ペアは粒子・反粒子ペアと似たような関係にある。

ここで素粒子が静止している状態、つまり光速で飛ぶ素粒子がヒッグス場と相互作用して往復運動している時、自転方向（スピンの向き）は変わらないが、進行方向は反転を繰り返すので、素粒子は右巻き状態と左巻き状態が交互に現れる。この状況はヒッグス粒子のキャッチボール〔正確には「弱い力の電荷」（ウィーク荷）のキャッチボール〕として理解できる。現在の宇宙では真空はヒッグス場に満ちた状態になっている。粒子と反粒子、例えば電子と陽電子の間では光子をキャッチボールすることで電磁気力が伝わるが、右巻き粒子は周囲の真空との間でヒッグス粒子のキャッチボールをして左巻き粒子に、左巻き粒子は右巻き粒子になる（右上図）。

粒子と反粒子では電荷量が多いほど、光子のキャッチボールの頻度が高まって電磁気力で強く結ばれるように、右巻き粒子と左巻き粒子が“ヒッグス荷”と呼べるような荷量を持っているとすると、その値が多いほど真空との間のヒッグス粒子のキャッチボールの頻度が高まり、頻繁に右巻き・左巻きの反転が起きるとみることができる。これが大きな質量を持つ状態になる。光子などはヒッグス荷がゼロで、真空との間でヒッグス粒子をキャッチボールすることはない。

宇宙誕生直後の超高エネルギー状態では、真空はヒッグス場に満ちてはいなかったようだ。素粒子がヒッグス荷を持っていても、キャッチボールするボールがなかったので質量ゼロだった。



生み出される質量 すべての素粒子は光速で飛んでいるが、ヒッグス荷を持っている素粒子はヒッグス場と相互作用して一定の場所にとどまり続ける（静止する）ことができる。その状況を超マイクロで見ると、素粒子はヒッグス場と頻繁に相互作用して光速で往復運動をしていることになる。スピンの自転方向は変わらないから、運動方向の反転によって素粒子は右巻き状態（R）と左巻き状態（L）の間を往復する。ヒッグス荷が多いほどヒッグス場と相互作用する頻度が高いため、外力を与えても場所を移動しにくく、これを私たちは大きな慣性質量として認識する。例えば電子よりクォークの方が高頻度に往復運動するので慣性質量が大きい。光子はヒッグス荷（弱い力の電荷）を持たないので、そのまま飛び続ける。

それが宇宙が冷え、あるエネルギーレベルまで下がると、真空はヒッグス場に満ち、ヒッグス荷を持つ素粒子に質量が生じた。ヒッグス場における対称性の自発的破れという現象で、これが起きなかったら宇宙には質量が生じなかっただろう。

ナチュラルスUSY

ここまで説明したのは標準モデルの素粒子における質量獲得の機構で、超対称性粒子の質量の起源については解明されていない。ただし、標準モデルの素粒子とその相方の超対称性粒子は宇宙誕生直後、スピン以外はうりふたつだったはず。それが現在、両者の質量が異なるということは、宇宙が冷える過程で、超対称性を破る何かがあったと考えられる。

おそらくはヒッグス場の対称性（電弱対称性）が自発的に破れて真空にヒッグス場が満ちたのと同様、超対称性が自発的に破れて“何か”が真空に満ちたと考えられている。その正体の解明は素粒子論研究の重要テーマとなっ

ている。

さらに、こうして真空に詰まった「超対称性を破るもの」がどのような相互作用で、超対称性粒子と反応し、質量が生じているかの機構もわかっていない。重力のような機構なのか、電磁気力などのような普通の力の反応なのか、それとも時空に関係した「量子異常」と呼ばれるものなのか諸説ある。

ただ確実に言えるのは、超対称性の自発的破れは、CP対称性の破れやヒッグス場における対称性の自発的破れと同様、現在の宇宙を形成する上で、必須要素となっているということだ。もし超対称性の自発的破れが起きていなければ、電子の相方のスエレクトロンが現在も宇宙を飛び交い、原子核の正電荷を遮蔽する結果、原子核を周回する電子はわずかになり、分子はできなくなるだろう。

ここでヒッグス場の自発的対称性の破れが起きたのは宇宙のエネルギーが約246ギガ電子ボルト（246GeV、陽子の質量は約1GeV）まで下がった頃であることが加速器実験と理論研究か

らわかっている。だとすれば超対称性の自発的破れもほぼ同じエネルギー領域、おそらく1000GeV (1TeV) あたりで起きたと考えるのが自然なのではないかとのアイデアが出てきた。これら2つの対称性の破れが、かけ離れたエネルギーレベルで起こると、いろいろやっかいな問題が生じてくるからだ。このような考えから提唱されたのが、冒頭で紹介したナチュラルSUSYだ。

ナチュラルSUSYの場合、標準モデルの素粒子と超対称性粒子の質量差はそれほど大きくならない。もしそうなら、先述のヒッグス粒子の質量問題もうまく説明できる。

ヒッグス粒子は様々な素粒子と相互作用するが、最も結びつきが強いのは標準モデルの素粒子の中で飛び抜けて質量が大きいトップクォークだ。光子は電子と陽電子のペアになったり、ペアが出合って光子に戻ったりするが、ヒッグス粒子の場合はトップクォークとその反粒子のペアになったり、ペアが出合ってヒッグス粒子に戻ったりする。こうした状況を考慮してヒッグス粒子の質量を理論計算すると、ヒッグス粒子がLHCで観測された質量(約126GeV)を安定的に維持するのは非常に難しく、それより桁違いに重くな

る可能性が高い。

ところがトップクォークの相方となる超対称性粒子、ストップが存在すると状況が一変する。ヒッグス粒子がストップとその反粒子のペアになり、ペアが出合ってヒッグス粒子に戻ったりする現象も起きるので、ヒッグス粒子の質量に及ぼすトップクォークの影響がストップが及ぼす影響によって相殺される。しかもナチュラルSUSYのようにストップの質量がトップクォーク(約170GeV)よりやや大きい数百GeV ~ 1TeVであれば相殺の効果は高く、ヒッグス粒子の質量を100GeV程度に安定できる。LHCの第1期実験で探索したのはこの質量領域だったが、ストップは姿を現さなかった。

ターゲットはボシーノ

ただヒッグス粒子は発見された当初から、観測されたヒッグスの質量はナチュラルSUSYで説明するにはやや大きいとみられていた。LHC第1期実験でストップが発見できなかったことから、超対称性の破れが起きるエネルギーはナチュラルSUSYの予想より1桁~2桁上の10~100TeVではないかとの見方が出ている。その場合、ストップの質量は10TeV程度でLHC第2期実験で探索する領域より上になる。

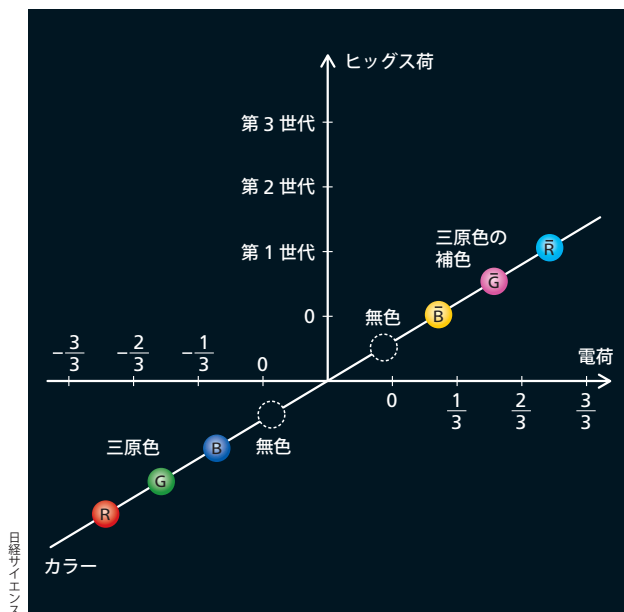
もっともLHCでは難しくても別タイプの実験、例えばB中間子や電子の仲間であるミ

ュー粒子の崩壊を天文学的な回数観測し、極めて希に起こる崩壊パターンを調べることで、10TeV超の領域を間接的に探ることができる。電子やミュー粒子が持つ可能性がある電気モーメントの超精密実験によっても探索できる。

こうした現状認識の中で注目を集めるようになったのが超対称性粒子のもう一方のグループ、ボシーノだ。超対称性の自発的破れの機構には、前述のように様々なモデルがあり、どのタイプの超対称性粒子が軽くなるかはモデルによって異なる。

だから超対称性を破る場との反応の仕方によっては、ボシーノの質量がスフェルミオンの1/10~1/100であっても不思議はない。仮に超対称性の破れが起きたのは10~100TeVで、スフェルミオンの質量が10TeVだとしたら、ボシーノの質量が数百GeV~数TeVの可能性があり、これはLHC第2期実験の探索領域になる。

ボシーノは広い意味では物質粒子の一種だ。宇宙誕生直後に大量に生み出され、質量が大きいものから小さいものへと次第に崩壊し、現在の宇宙で安定的に存在しているのは電荷ゼロのタイプと考えられている。その有力候補がウィーノ。光子と弱い力を担うZ粒子のそれぞれ一部を構成するW⁰粒子の相方となる超対称性粒子だ。ヒッグス粒子の相方であるヒグシーノも候補となっている。これらは混ざり合っ



日経サイエンス

素粒子の内部空間 素粒子の立場から見ると、空間は概念的には外部空間と内部空間の2つがある。外部空間は素粒子から見た外側、私たちが認識する時空だ。内部空間は素粒子の電荷やカラー(色荷)、質量(ヒッグス荷)をそれぞれ1つの次元に見立てた座標系で、素粒子の物理特性に対応して内部空間での「位置」が定まる。その事例としてフェルミ粒子(47ページの図)の内部空間を示す。SUSYが事実なら、これと同じ内部空間を持つボース粒子(スフェルミオン)が存在する。外部空間は空間3次元と時間1次元の「3+1」次元だが、内部空間にも「3+1」に似た特徴がある。電荷は電子の電荷量を1とするとフェルミ粒子の電荷は「1/3, 2/3, 3/3, 0」、カラーは「赤(R), 緑(G), 青(B), 無色(電子やニュートリノ)」、ヒッグス荷は「第1世代, 第2世代, 第3世代, ニュートリノグループ(質量がほぼゼロ)」となる。電荷は正負、カラーは三原色と補色の区別がある(カラーの数直線上の配置にはあまり意味はない)。

変えている可能性もある。

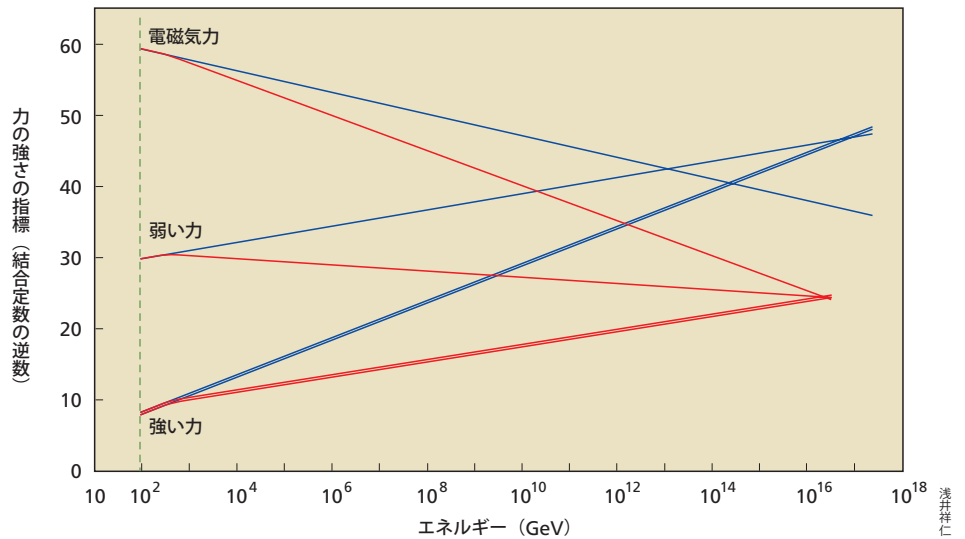
一方、天文衛星 WMAP やプランク衛星の観測によると、宇宙には普通の物質の5倍以上の正体不明の暗黒物質粒子が存在している。電荷ゼロで、普通の物質粒子とは重力だけを介して相互作用しているとみられる。これまで加速器実験で見つかっていないことと、観測的宇宙論の要請などからその質量は数百 GeV 以上とみられ、これは LHC 第2期実験の探索領域になる。この暗黒物質の最有力候補がウィーノやヒグシーノ、ニュートラリーノだ。ヒッグス粒子の質量問題を説明するのはナチュラル SUSY より難しくなるが、実際の自然にとってはこちらの方が“ナチュラル”なのかもしれない。

大統一理論への道

超対称性の破れが $10 \sim 100\text{TeV}$ で起きたのであれば、それは大統一理論を考える上でより望ましいこともわかってきた。標準モデルにおいて、微小世界を支配する3つの力のうちの2つ、電磁気力と弱い力は電弱統一理論で説明されるが、強い力の作用は量子色力学で記述されている。この両者を統合するのが大統一理論だ。

標準モデルでは電子の負電荷と、クォークからなる陽子の正電荷がなぜきっかり同じで原子が電荷ゼロになるのか説明できないが、大統一理論なら説明がつく。同理論によればレプトンと総称される電子などの仲間とクォークは、X粒子とY粒子というボース粒子で結びつき、クォークからレプトンになったり、その逆も起きる(49ページ右図)。クォークからレプトンへの変化を私たちは陽子の崩壊として認識することになる。

標準モデルでは陽子の寿命は無限だが、陽子崩壊を予言する大統一理論では陽子は寿命を持ち、遠い未来、物質は消滅することになる。カミオカンデやスーパーカミオカンデは世界的なニ



超対称性粒子がカギを握る3つの力の統合

電磁気力の強さは各素粒子が持つ電荷の量と、電荷と電磁気力の結びつきの強さ「結合定数」のかけ算になる。同様に他の力も荷量と結合定数を持ち、結合定数が力の強さの指標になる。極微の世界を支配する3つの力の結合定数は加速器実験で精密測定されているが、その値は宇宙のエネルギーレベルによって変化すると考えられている。その関係を表したのが上のグラフだ(縦軸は結合定数の逆数)。標準モデルでは電磁気力と弱い力は電弱統一理論によって「電弱力」に統合され、現在、電弱力と強い力を統合する大統一理論が提案されている。超対称性粒子がない場合の大統一理論では、電磁気力と弱い力の結合定数は宇宙初期の超高エネルギー状態、およそ 10^{13}GeV (陽子の静止エネルギーは約 1GeV) で同じになるが、強い力の結合定数は一致しない(青線)。一方、超対称性粒子がある場合の大統一理論では3つの力の結合定数はおよそ 10^{16}GeV で一致すると推定される(赤線)。

ュートリノ実験施設としてよく知られているが、陽子崩壊実験でも中心的役割を果たしており、それらの実験から陽子の寿命は SUSY を組み込まない大統一理論の予測より長いことが確定している。一方、SUSY を前提とした超対称大統一理論はより長い陽子の寿命を予言しており、現在、スーパーカミオカンデなどで検証実験が進んでいる。

大統一理論における SUSY の重要性はもう1つある。大統一理論が正しければ宇宙誕生直後に原初の力が存在し、宇宙が冷えると枝分かれして3つの力になったことになる。だとすれば宇宙誕生直後のような超高エネルギー状態になると、3つの力の強さは一致するはずだ。これまでの実験結果から推定すると、SUSY を組み込まない大統一理論では一致しないが、超対称大統一理論では一致する(上のグラフ)。そして超対称性の破れが起きるエネルギーレベルはナチュラル SUSY より $1 \sim 2$ 桁上の方が、3つの力の強さの一致

度がより高まるらしいことがわかってきた。

また SUSY は究極理論の候補である超弦理論の大前提で、各種素粒子は超空間の中で様々なパターンで振動するひもに対応するとしている。スピン0の超対称性粒子の場(スカラー場)は宇宙のインフレーションを起こすインフラトン場の有力候補で、暗黒エネルギーとも関係する可能性がある。宇宙における粒子と反粒子の不均衡は CP 対称性の破れとともに超対称性粒子の存在がカギを握るとされる。

SUSY は物理学と天文学の多くの謎を解くキーワードであり、LHC 第2期実験で超対称性粒子が存在する兆候すら得られない場合、素粒子物理学は標準モデルをベースにまったく新たな方向性を模索することになる。第2期実験の開始まであと半年だ。 ■

協力 浅井祥仁(あさい・しょうじ)
43ページの監修者紹介の項を参照。