The race to break the standard model

「標準模型」を打倒せよ

Nature Vol.455 (156-159) / 11 September 2008

素粒子物理学の「標準模型」は、腹立たしいほどの成功を収めている。大型ハドロン衝突型加速器（LHC）は、この標準模型を打倒するきっかけとなる現象を見つけ出そうとする最新の試みであるが、唯一の試みではない。LHCがフルパワーで運転し始める前に、こうした現象を発見しようとしのぎを削るライバルたちの挑戦を Geoff Brumfiel 記者が報告する。

それは強力で、おそらく厄介な存在だが、いつかは倒される運命にある。物理学者たちはそれを「標準模型」とよんでいる。それは信じられないほど成功した方程式の集合体であり、1個の原子からはるか彼方の銀河まで、我々が知るすべての物質を記述し、自然界の4つの基本的な力のうちの3つ（強い相互作用、弱い相互作用、電磁相互作用）を記述し、あらゆる実験結果を比類なき正確さで予言する。こんなにも強力であるにもかかわらず、それは完全にはほど遠い存在である。根拠が不明な定数があちこちにある。おそらく最も気がかりなのは、最後の基本的な力である重力を組み込もうとするあらゆる挑戦を退けていることである。

1970年代に標準模型が組み立てられた当初からずっと、物理学者たちはこれを超越する理論を打ち立てようと努力

してきた。標準模型を超えるためには、この完璧に近い方程式に矛盾する実験データをつかんで、標準模型を打ち碎かなければならない。そして、標準模型の破片から、より新しく、よりすぐれた理論を組み立てるのだ。このほど、スイスのジュネーブ近郊にある欧州原子核共同研究機関（CERN）で稼働し始めた大型ハドロン衝突型加速器（LHC）は、標準模型を超えるデータを手に入れるための最新の試みである。多くの研究者は、LHCが成功することはほぼ確実であるとみている。LHCが作り出す桁外れのエネルギーは、標準模型がカバーできない領域に達するはずであるからだ。マサチューセッツ工科大学（米国マサチューセッツ州ケンブリッジ）の理論研究者であり、標準模型の構築への貢献により2004年のノーベル物理学賞を受賞したFrank Wilczekも、「本命はLHCです」という。

しかし、標準模型の打倒をねらっているのはLHCだけではない。物理学者たちは何十年前前から、加速器を使ったり、非常にまれな現象の精密測定を行ったり、宇宙観測を行ったりして、標準模型を超える現象をとらえようと試みてきた。稼働し始めたLHCが最高エネルギーに達するまでには時間がかかり、最初の実験結果が得られるのは早くても来年夏とみられているため（コラム「動き出した巨大加速器」参照）、ライバルの実験グループの一部は、自分たちが一番乗りをするチャンスはまだあると考えている。もちろんそれは容易なことではない。標準模型はおそらく手強く、安易な攻撃では歯が立たないからである。標準模型を打ち破るためには、これまでにない高感度の実験と、多くのデータと、少なからぬ幸運が必要である。以下では、LHCの向こうを張る強者たちを簡単に紹介していこう。

テバトロン

LHCが陽子のスピードを徐々に上げている間に、その前をゆく古参の巨大粒子加速器は、標準模型を超える現象を

最初にとらえようとひたすら走り続けている。米国イリノイ州バタビアにあるフェルミ国立加速器研究所の加速器テバトロンは、2001年以来、陽子と反陽子を約1テラ電子ボルト（1兆電子ボルト）に加速してきた。

このエネルギーはLHCの最終的なエネルギーの7分の1にすぎないが、新しい物理現象の探索の成否はエネルギーだけで決まるわけではない。標準模型におさまらない新粒子が生成するような衝突はごくまれにしか起こらないため、加速器を長く運転するほど、より多くのデータが蓄積し、発見のチャンスが大きくなるからである。ゆえにテバトロンは、しばらくの間、データ量の面ではLHCに対するリードを保ち続けることになる。おそらく2009年夏までは、テバトロンが新参のライバルの数倍のデータを持っているという状況は変わらないだろう。

テバトロンのデータはすでに、標準模型を超える現象を暗示する、不確かではあるが気になる徴候を示している。標準模型からの逸脱とみられる現象の1つは、 B_s 中間子という粒子の測定で見つかった。 B_s 中間子は、ストレンジクォークと反ボトムクォークから成り、最も重い中間子の1つである。標準模型は、CP対称性という法則により、 B_s 中間子はその反粒子である反 B_s 中間子（反ストレンジクォークとボトムクォーク

クから成る)と同じように崩壊すると予言する。しかし、両者の測定は、その崩壊に違いがあることを示唆している。テバトロンの D ゼロ実験グループのスポークスマンである Dmitri Denisov は、この違いは重要な手がかりとなる可能性がある」と指摘する。これは、風変わりな性質をもつ新しい粒子の存在や、これまで知られていなかった法則の存在を示しているのかもしれない。「いずれにせよ、非常におもしろい測定結果です」と彼は話す。

テバトロンのもう 1 つの主要な実験グループである CDF 実験のスポークスマンの Robert Roser は、「テバトロンでは、ほかにも異常が見つかっています」と指摘する。彼が興味をもっているのは、トップクォークと反トップクォークの対の崩壊でみられた異常な特徴である。彼は、この現象も確実とはほど遠いものであることを認めながらも、「テバトロンが見つけたこれらの徴候の一部が、今後、重要性を認められるよう

になるかもしれません」という。「データを蓄積していけば、どれかが現実になるかもしれないのです」。

当然かもしれないが、CERN の理論研究者である John Ellis は、こうした見方には懐疑的である。「たしかにテバトロンは気になる徴候をつかんだかもしれませんが、LHC が本格的に始動する前にテバトロンが決定的な発見をする可能性はほとんどないでしょう」と彼はいう。「素粒子物理学の世界では、平均値 $\pm 5\sigma$ (σ は標準偏差) の範囲内に 99.99994267 パーセントのデータが入るレベルに達しない精度の実験でみられた現象など、発見とはよばないからです」。これだけ厳しい基準を満たすためには、テバトロンが今日まで蓄積してきたよりもはるかに大量のデータを蓄積する必要があるが、テバトロンが新参のライバルに追いつかれる前にデータ量をそこまで増やすことはできそうにない。「テバトロンは、極めて不利な状況に置かれています。

LHC が本格的に始動する前にテバトロンが成功を収めるとは思えません」と Ellis は話す。

宇宙

高エネルギー物理学者たちが加速器の制御室に集まっているとき、別のグループの物理学者たちは空を見上げている。彼らは、宇宙が協力的であるならば、標準模型を打ち砕くものが見つかるはずだと考えているのだ。

彼らは人工衛星を打ち上げて、主としてダークマター（暗黒物質）の存在を示す証拠を探している。ダークマターは、この宇宙の物質の 85 パーセントを占めている可能性のある、幽霊のような物質である。天文学者たちは今のところ、ダークマターの重力が銀河に及ぼす引力重力と、宇宙の形状への影響を通してしか、その存在を知ることができずにいる。ダークマターは、恒星や惑星や人間を構成する通常の物質を素通りしてしまうらしい。おそらく、通常の物質とはほと

動き出した巨大加速器

この記事に掲載した *Nature* が印刷に回ころ、ジュネーブ近郊の欧州原子核共同研究機関 (CERN) の大型ハドロン衝突型加速器 (LHC) は、陽子を初めて加速させる間際だった。しかし、LHC が発表できる成果をあげるまでには、やるべきことが山ほどある。これからの数か月間は、オペレーターらが加速器そのものを微調整していく一方で、ほかの物理学者たちは、リングに沿って配置されている検出器を始動させていくことになる (注: LHC は 9 月 10 日に運転を開始したものの、19 日にヘリウム流出事故が起きたため、現在は運転を停止している。CERN は 9 月 23 日のプレスリリースで、運転再開

は 2009 年の春以降になる見通しとの見解を発表した)。

ビルほどの大きさの検出器を始動させるのは容易ではない。個々の検出器は、数十万個のより小さな検出器から構成されており、衝突で生まれる粒子を追跡するためにはそれらを同調させなければならない。ATLAS 実験グループのスポークスマンである Peter Jenni は、「今は、宇宙線を使って検出器を調整しているところです」と話す。しかし、実際の陽子衝突で生成する粒子をとらえることは、宇宙線をとらえるのとはまったく違った作業である。陽子ビームが衝突すると、毎秒数億の「イベント」が発生し、1 つのイベントで数十万個の

破片粒子が衝突ポイントから広がっていく。検出器はこれらの粒子のほとんどすべてを個別に追跡するように設計されているため、その結果は、実験家が扱い切れないほどのデータ量になる。幸い、大部分の衝突ではありふれた粒子しか生成しないため、実験家たちは、興味深い衝突とそうでない衝突を識別する電子的な「トリガー」を検出器に備えつけている。例えば、ある簡単なトリガーは、ミュー粒子 (もっと重い粒子の崩壊によって生成することがある粒子) ができた衝突に目印をつけるようになっている。Jenni は、「特定の興味深いイベントのデータを保存するようにそれぞれのトリガーを設計し、

んど反応しない粒子の「もや」のようなものなのだ。こうした粒子の正体は、標準模型では説明されていないということ以外は、まだよくわかっていない。

1つの候補は「超対称性理論」が予言している。この理論によれば、標準模型のあらゆる粒子は、標準模型に含まれない重い粒子をパートナーにもっている。そして、超対称性パートナーのうち最も軽いニュートラリーノという粒子

が、ダークマター候補として都合のよい性質をもつと予言されているのである。

地上の望遠鏡や宇宙望遠鏡を使ってニュートラリーノを直接見ることはできない。しかし、2個のニュートラリーノが衝突して対消滅するときには、ありふれた粒子のシャワーが生じ、人工衛星の検出器でとらえられる可能性がある。これに関してはすでに興味深い手がかりが得られており、ロシア、イタリア、ドイツ、スウェーデンが共同して2006年に打ち上げたPAMELA衛星に搭載された観測装置が、ダークマターの対消滅によって生成した可能性のある陽電子の過剰を検出したことが非公式に報告されている(*Nature* **454**, 808; 2008を参照)。PAMELAのデータを見たカリフォルニア大学ロサンゼルス校の物理学者 Graciela Gelmini は、「きれいな結果です」という。「ただし、この測定は複雑なので、注意を要します」。

また、最近打ち上げられた観測衛星も、ニュートラリーノの時ならぬ消滅を

発見できるかもしれない。米国などが6億9000万ドル(約690億円)を投じて今年6月に打ち上げたフェルミガンマ線宇宙望遠鏡は、超高エネルギーの光子を探して全天を走査することができる。ニュートラリーノが衝突して超高エネルギーのガンマ線が生成すると、この衛星に搭載された検出器が描く天球図の至るところに「もや」として現れる可能性がある。この宇宙望遠鏡のプロジェクトサイエンティストである米航空宇宙局(NASA)ゴダード宇宙飛行センター(メリーランド州グリーンベルト)のSteven Ritzは、「それが見えたら、とてつもなくすばらしいサインになります」と話す。

シカゴ大学(イリノイ州)の宇宙論研究者であるMichael Turnerは、「そのようなサインを見つけて確認することができれば、LHCに先んじて標準模型を超える現象を発見できたことになります」といい切る。けれどもRitzは、「厳密に言えば、宇宙物理学の分野で最初

大型ハドロン衝突型加速器(LHC)の2つの超伝導磁石を溶接工が初めて接続させた。

注意深く調整する必要があるのです」と話す。

ふるいにかけられて残ったデータは分析しなければならない。実験データは、数ペタバイト(1ペタ=1000兆)のデータをやりとりできる巨大な計算機ネットワークを通じて、世界各地の大学研究室に所属する数千人の物理学者のもとに送られる。CERNのもう1つの主要な実験グループであるCMSのスークスマンのJim Virdeeは、「最初のテストはうまくいきました」と話す。ATLAS実験グループとCMS実験グループは、現在、コンピューターで作った粒子データで分析の練習を繰り返している。

JenniもVirdeeも、「順調

にいけば、2009年夏にも結果が出るでしょう」と話す。ただしそのためには、LHCはフルパワーの7テラ電子ボルトで数か月間運転している必要があり、技術的な問題を解決するための時間も必要である。

LHCは、この最初の運転で新しい物理現象を見つけることができるだろうか? その可能性はある。LHCは、これまで世界最強だったフェルミ国立加速器研究所(米国イリノイ州バタビア)の加速器テバトロンの約7倍のエネルギーで粒子を衝突させる予定である。「これは大きな飛躍であり、原理的にはすぐにも新しい粒子が見つかる可能性があります」とVirdeeは話す。「フェルミ研究所の業

績を超えるのに、それほど多くのデータを調べる必要はないでしょう」。

もちろん、フェルミ研究所の物理学者たちはこの予想には懐疑的だ。同研究所のCDF実験グループのスークスマンであるRobert Roserは、「テバトロンでは、この加速器の特性を完全に把握するのに丸2年かかりました」と話す。同研究所のDゼロ実験グループのスークスマンであるDmitri Denisovは、「より高いエネルギーを使っても、新しいものを見つけるためにはかなりの数の衝突が必要で」と付け加える。「検出器の真ん中で1個の陽子を1個の陽子とぶつけただけでは十分ではないのです」。

に発見することはできても、それ以上のことはできないでしょう」と指摘する。陽電子やガンマ線などのサインは、新しい粒子のおおよその質量は教えてくれるかもしれないが、超対称性がどのように成り立っているかについては何も教えてくれないだろう。こうした理由から Ritz は、宇宙観測だけでは本質的な問題がたくさん残り、その問題は LHC でなければ解決できないだろうと考えている。

暗闇

ほかの物理学者たちは、光よりも暗闇を選んだ。彼らは、使われなくなった鉱山やトンネルの中で多数の高感度検出器を見つめて、超対称性パートナーのニュートラリーノを含むダークマターの直接的なサインを検出しようとしている (*Nature* **448**, 240; 2007 を参照)。

このような検出器は 5 種類以上に分類できるが、基本的な発想は同じである。すなわち、ダークマターに反応しそうな物質を選び、宇宙線などの邪魔者の影響を受けない地下深くに設置して、何かが起こるのを待つのである。「草が伸びるのを見守るような作業です」と Wilczek はいう。

この方法は、LHC のライバルとしては派手に欠けているものの、検出器は著しい進歩を遂げている。現在、米国ミネソタ州のスーダン鉱山の地下深くでデータを蓄積している CDMS2 実験に従事する研究者たちは、今年末までに検出器の感度を現在の 3 倍にしようとしている。また、イタリアのグランサッソ山の地下トンネルで行われている XENON100 実験は、LHC がその検出器の実験結果を分析し終える前に最初の観測結果を出せる可能性がある。XENON100 実験の研究責任者であるコロンビア大学 (米国ニューヨーク州) の Elena Aprile は、「現在、この分野は猛スピードで進んでいて、非常に激しい競争があります。並大抵のことでは勝ち残りません。本当にすごい時期なのです」と話す。

さらに、ある研究グループはすでにダークマターを検出したと主張している。今年、これもイタリアのグランサッソ国立研究所で実験を行っている DAMA/LIBRA 実験グループが、最新型の検出器によりダークマターのシグナルを検出したと発表した (*Nature* **452**, 918; 2008 を参照)。しかし、DAMA/LIBRA 実験グループの隣の地下室で実験をしている Aprile は、「彼らの発見は、ほかの研究グループを困惑させました」と話す。「彼らが発見したと主張するシグナルを、ほかのどの研究チームも確認できていないのです。それどころか、矛盾した結果さえ出ているようです。その点で、我々は明らかに一枚岩ではないのです」。

検出器は長足の進歩を遂げているようだが、アキレス腱もある。これらは、まだ見ぬダークマターが、少なくともときどきは通常の物質と相互作用しないかぎり役に立たないのである。「ところが、こうした反応が起こる保証はないのです」と Ellis は話す。「その意味で、この実験は暗闇で銃を撃つようなものであるともいえます」。

とはいえ Ellis は、彼らがこの秘教めいた探索方法で LHC よりも早く何かを見つけるチャンスはあると認めている。「ダークマター探索グループは、このレースのダークホースかもしれません」と彼は話す。

ニュートリノ

LHC に先んじようと奮闘する科学者の多くは、これから数か月間は、カフェインに頼りながら昼夜を分かたず仕事をしなければならないだろう。しかし、ニュートリノ物理学者たちは泰然と構えていることができる。彼らは、もう 10 年も前に新しい領域を切り開いているからである。

ニュートリノは、電子を含むレプトンとよばれるグループに属する、電氣的に中性の粒子である。標準模型のもとでのバージョンは、ニュートリノの質量は完全にゼロだと予言していたが、実験家たちはそうは考えなかった。太陽からやってくるニュートリノの数が理論研究者の予測よりも少ないことを、実験家たちはかなり前から知っていたからである。1 つの説明は、太陽ニュートリノの種類が変化すると考えることである。ただし、そうした変化は、ニュートリノに質量がある場合にしか起こらない。1998 年、日本の物理学者たちが岐阜県神岡鉱山の観測装置スーパーカミオカンデでニュートリノの変化をとらえて、標準模型に挑戦する最初の (そして今日でも唯一の) 確実な発見であると主張した。

残念ながら、ニュートリノの質量は、方程式に少数の簡単な修正をするだけで標準模型に組み込むことができる。「何かを追加することは比較的簡単にできるのです」と Ellis はいう。そのため、ニュートリノ物理学者たちが標準模型を超える発見をしたと主張することはできないのだが、彼らの発見は、物理学の新しいモデルを模索する理論研究者の助けにはなっていないのである。

しかし、ニュートリノの役目はまだ終わっていないのかもしれない。米国、欧州、日本の実験家たちは、現在、ニュートリノのビームを検出器に打ち込んで、ニュートリノの種類が変化する仕組みを解明しようとしている。ハーバード大学 (米国マサチューセッツ州ケンブリッジ) の理論研究者である Lisa Randall は、「ニュートリノが変化する

現象の詳細が明らかになれば、新しい理論モデルの絞り込みに役立つ可能性があります」という。

さらに、2基の新しい検出器が新たな成果を上げるかもしれない。欧州の共同研究プロジェクトとして、フランスのトゥーロン沖の地中海の海中で「ANTARES」というニュートリノ望遠鏡が稼働し始めた。一方、米国の研究チームは、南極大陸の氷の下にニュートリノ望遠鏡「IceCube」を設置している。いずれの計画も、宇宙線に含まれる高エネルギーニュートリノが水や氷に衝突する現象を検出するために、多数の検出器が並べられている。ANTARESは今年5月に完成したが、IceCubeは計70列になる予定の検出器の約半分を設置したところである。しかし、IceCubeの研究責任者であるウィスコンシン大学マディソン校のFrancis Halzenによれば、IceCubeの感度はすでにスーパーカミオカンデの5倍に達している。「私たちが何かを発見することも、ありえなくはないのです」。

その「何か」が何であるかについては議論がある。1つの可能性は、太陽のコアにとらえられたダークマター粒子が作り出したニュートリノである。しか

し、ここでもまた、「ニュートリノ実験で得られた結果は、ほぼ間違いなく、LHCによる追跡調査を必要とするでしょう」とHalzenは話す。「私は、これらの実験は互いに補い合うものだと思います。けれども、選択の機会があるならば、私は最初に発見するほうを選びます」。

勝算

では、これらのプロジェクトのどれかが標準模型を超えることはできるのだろうか？ Wilczekは懐疑的だ。「私はあまり期待していません」。過去の実績を見れば、標準模型は「連戦連勝」であるようだ。彼は、既存のパラダイムを超える可能性を本当にもっているのはLHCだけだと考えている。

そして、この巨大加速器でさえ、新しい発見ができる保証はない。「超対称性は2009年半ば以降に現れてくる可能性があります、いつまでたっても現れてこない可能性もあります」とEllisは話す。「もし現れてこなかったら、物理学者たちは『最悪のシナリオ』に直面することになります。これは恐ろしいことです。そうなったら、我々は次に何をすればよいのでしょうか？」。

しかし、Turnerの意見は異なっている。つまるところ、これらの実験とLHCは同じ敵と闘っているのだ。彼らのデータをLHCのデータと結びつけることにより、標準模型を打倒し、新しい物理学を発見することができるとTurnerは確信している。「今は大きな革命の前夜なのです」と彼は語った。 ■

Geoff Brumfielはロンドン駐在のNatureのシニア記者。

LHCの始動についてもっと読みたい読者は、Nature News special (<http://tinyurl.com/5usrfl>) にどうぞ。なお、LHCは9月10日に運転を開始したものの、19日にヘリウム流出事故が起きたため、現在は運転を停止しています。CERNは9月23日のプレスリリースで、運転再開は2009年の春以降になる見通しとの見解を発表しました。