

誕生直後の宇宙を再現

～いよいよ始まった世界最大の加速器実験～



研究ノート

花垣和則*

To reproduce the state of the space just after the birth.
The experiment using the world's largest accelerator finally starts.

Key Words : reproduce, the state of the space, world's largest accelerator

1 はじめに

編集委員のSさんに記事の執筆を依頼されたのが約3ヶ月前。Sさんに何か頼まれたら断れない筆者は即答で快諾したものの、工学系の記事を扱っている雑誌で、応用とはかけ離れた、そう、たぶん基礎研究の中でも最も応用とはかけ離れた分野である素粒子物理学の面白さをどう伝えようか考えあぐねました。そうこうしてるうちに締め切り直前になってしまい（単にサボっていただけという説もあるが）、もはや、読者のニーズを考える余裕などなくなってしまったので、人類最大の実験装置ともいえる巨大加速器を使った実験とその見所について、自分が面白いと感じることを勝手に述べていきます。

2 極小と極大の世界を繋ぐ

素粒子物理学は、我々の世界が何からできているのか、その構成物の間に働く相互作用がどのようなものかを探求する学問であり、極小の世界の物理法則を解き明かそうとする。一方、宇宙論は宇宙の始まり、そしてその後の成長の過程を探求する学問であり、極大の世界の物理法則を解き明かそうとする。ところが、ビッグバン宇宙論が実証されたことで、誕生直後の宇宙が極小の世界であったことが明らかになった。極大の世界である宇宙の始まりを理解するには、素粒子物理学の知識が不可欠となったので

ある。たとえば、宇宙が誕生してから約0.00001秒後までは、クォークや電子などの素粒子は束縛状態を作らず、つまり、原子核すら作らず、まさに“素”である粒子が支配する世界であった。

よく知られているように、誕生直後の宇宙は高温高エネルギー状態で、時間の経過とともに温度が下がっている。ということは、高エネルギー状態を作るということは、より過去の宇宙の姿を再現することになる。加速器を使い達成できる粒子同士の衝突エネルギーは、宇宙が誕生してから 10^{-10} 秒程度経ったときのエネルギーにまで到達しており、たとえば、それくらいまで衝突エネルギーを上げると＝昔にまで時間を遡ると、今の世界に存在する4種類の相互作用のうち、少なくとも電磁気力と弱い力が統一された世界（「電弱相互作用」として記述される）になることが実験的に確認されている。逆に言うと、誕生直後 10^{-10} 秒しか経っていない初期宇宙にまで適用できる（と実証されている）物理法則を人類は手に入れているわけである。

そこからさらに、時間を遡っても適用可能な普遍的な物理法則の確立を現代素粒子物理学は目指している。様々な仮説が打ち立てられるが、自然を記述する理論を見つけるには実験に答えを求めるしかなく、その答えを求めて巨大加速器LHCが建設された。

3 実験装置

スイスのジュネーブ郊外、フランスとの国境にまたがる欧州原子核研究機構（CERN）にLHCは建設された。円周27kmにもおよぶ巨大な加速器で、建設が正式に承認されたのが1994年。開発と建設に15年をかけ、2009年に加速器の運転をようやく開始し、2010年から本格的にデータ収集を行っている。

LHCは陽子同士を正面衝突させるための加速器で、地下100mのトンネル内に2本のリングを持ち、2



*Kazunori HANAGAKI

1969年6月生
大阪大学大学院理学研究科博士課程修了
(1998年)
現在、大阪大学 理学研究科 准教授
博士 高エネルギー物理学
TEL : 06-6850-5357
FAX : 06-6850-5532
E-mail : kazu@champ.hep.sci.osaka-u.ac.jp

つの陽子ビームがそれぞれ反対方向に加速回転されている。光速近くまで加速した陽子を4箇所ある衝突地点でそれぞれ正面衝突させる。各衝突地点の周りには、陽子の衝突によって生成される事象を観測するための検出器群が設置されている。この中の一つがATLAS実験と呼ばれ、筆者はこの実験に参画している。

ところで、SFや映画などで「粒子を光速近くまで加速する」という言葉をよく聞くが、我々の実験で計画通りのエネルギーにまで加速した場合、陽子の速度は時速で「光速-10km/h」にまで到達する。ちなみに、現在は「光速-20km/h」くらい。CERNを一躍有名にした(?)映画『天使と悪魔』でも陽子を光速の99%にまで加速したという台詞が出てくるのだが、99%では「光速-10⁷km/h」と桁が6桁も違う。実際のLHCで加速された陽子がいかに光速に近いかを実感していただきたい。

4 ヒッグスと超対称性探索

宇宙の誕生直後は全ての素粒子の質量がゼロであったが、宇宙が冷えてくるとヒッグス粒子との相互作用で有限の質量を持つようになった、と考えることで物理法則の整合性が成り立っている。しかし、肝心のヒッグス粒子は性質が明らかになっていないどころか、まだ発見すらされていない。これまでも幾つかの大型実験で探索されたが、ヒッグスが重いために生成できていないか、あるいは生成できていたとしても観測できるほどの数を生成できていなかったと考えられており、LHCでその発見が期待されている。ヒッグスに限らず、未発見の粒子は加速器で到達できるエネルギーよりも重いと考えられるので、加速器をより大型にしてより重い粒子を生成発見しようというのが素粒子物理学実験の基本方針の一つである。

ヒッグスと並んでLHCで発見が期待されている粒子に超対称性(Supersymmetry; SUSY)粒子というものがある。超対称性とは、フェルミオンとボソンの入れ替えに対する対称性で、もしこの対称性が宇宙に存在すると、現在既に見つかっているフェルミオンにはボソンのパートナーが、ボソンにはフェルミオンのパートナーが存在する。力の統一は素粒子物理学のゴールの一つだが、SUSYにより電弱相互作用と強い相互作用を統一できるということから、

SUSYの有無により素粒子物理学の今後の方向性が決まるくらい重要な理論である。また、既知の粒子のパートナーのことを超対称性粒子と呼ぶのだが、この超対称性粒子のなかに、最近の宇宙論が明らかにした暗黒物質の性質(質量や相互作用の強さなど)に非常に近いものがあるため、素粒子物理学だけでなく宇宙論などの分野でもSUSYの検証が強く期待されている。

5 ミニブラックホール

重力、あるいは万有引力の法則はよく知られているように逆2乗則に従う。点光源からの光の強さを考えてもらうとわかるように、光源からの距離 r の地点で光の強さが $1/r^2$ になるということは我々の住むこの世界が空間的に3次元であることを意味している。ところが重力の強さが逆2乗則に従うということが実証されているのは、2つの物体間の距離 r が約100 μm 程度以上のときである。それよりも短距離の世界では逆2乗則に従っているか、すなわち、空間が3次元であるかどうかを人類は知らないのである。

空間が3次元よりさらに多くの次元を持つと、 10^{-10} 秒経った世界よりも過去の宇宙にまで適用可能な理論を構築する際に、より整合性の高い理論を構築できることが近年示唆されている。100 μm 以下の短距離では空間が3次元であることが実証されていないという事実とあわせて、SFチックだが、さらなる高次元(=余剰次元)を探索する実験がLHCで行われている。

物体間の距離がある閾値(=シュバルツシルト半径)よりも小さくなると、仮に物体が光速で動いたとしてもその運動エネルギーより重力のポテンシャルエネルギーのほうが大きくなる。光速以上で動ける物体は存在しないので、重力からの束縛力から逃れられなくなりブラックホールができる。重力の強さが逆2乗則に従っている場合、シュバルツシルト半径はとてつもなく小さいので人間の力ではブラックホールは生成不能である。ところが、余剰次元が存在すると、重力が逆 n 乗則($n > 2$)となりシュバルツシルト半径が指数関数的に大きくなるので、LHCでも衝突する陽子同士の間距離がシュバルツシルト半径よりも接近させることが可能となる。つまり、余剰次元があるとミニブラックホールを作

れるのだ。というわけで、LHCでは余剰次元の探索としてミニブラックホールの探索を行っている。

6 現状と展望

LHCは2009年に実験を開始し、2010年から本格的にデータを収集。徐々にビームの衝突頻度を上げている。今年は衝突頻度が設計値の1/10程度にまで到達し、非常に順調にデータを収集している。既知の粒子の中で最も重いトップクォークなども予定通りの数を観測し(図1)、新粒子発見の期待が高まっている。

今のところニュースになるような大きな発見はないが、このまま順調に実験が進めば、今年中あるいは遅くとも2012年内くらいには、我々の想定する性質を持ったヒッグスであれば発見、もしくは兆候を見つけれられるはずである。SUSYや余剰次元については、もし存在したとしてもそれをいつ見つけれられるかを人間は予言できないので、我々としても辛抱強く待っているというのが正直なところである。いずれにせよ、新聞紙上を賑わすような発見を期待していただきたい。

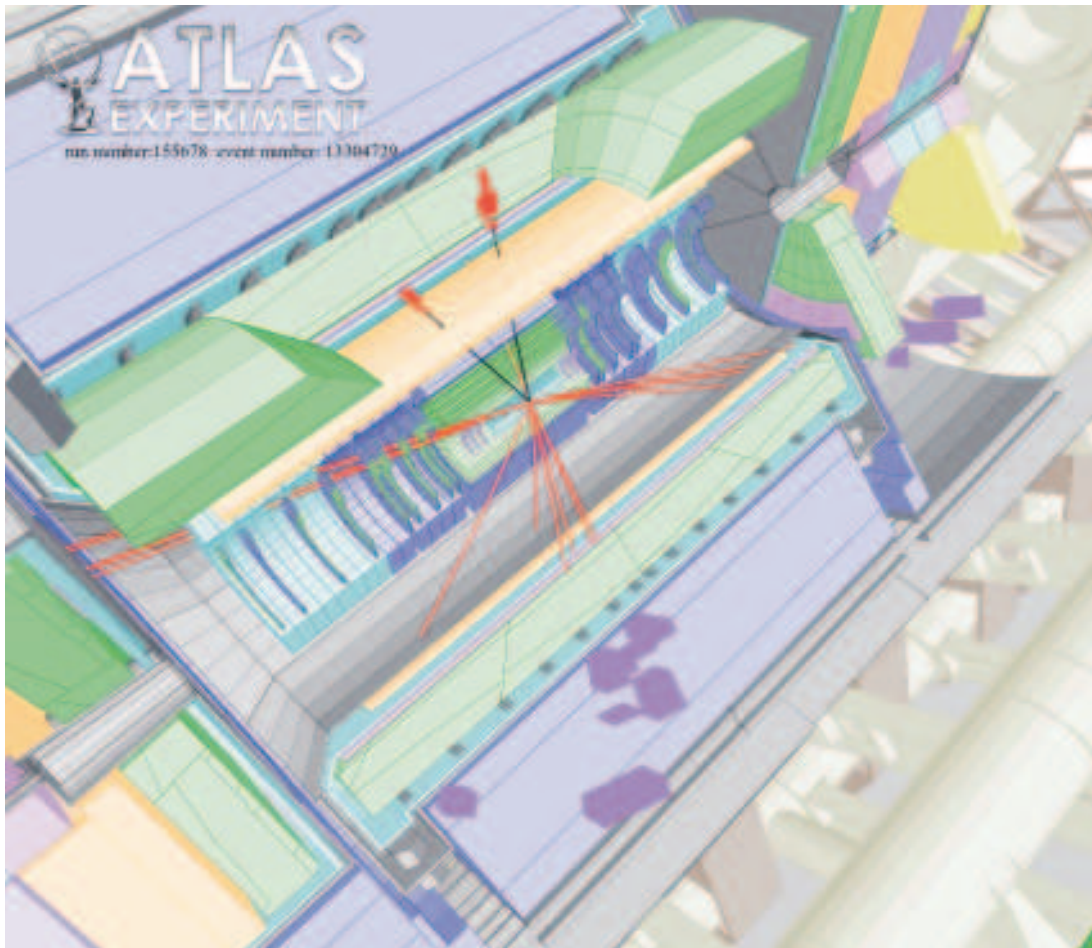


図1：実際の陽子陽子衝突によって生成されたトップクォーク対。トップクォークはほぼ100%の確率で b クォークと W 粒子に崩壊する。この事象は、 W が両方とも電子と電子型ニュートリノに崩壊している。