

平成20年9月9日

大学共同利用機関法人
高エネルギー加速器研究機構 (KEK)
アトラス日本グループ

LHC 加速器及び ATLAS 実験記者会見要旨

～ 9月10日に LHC ビーム初周回 ～

欧州合同原子核研究機関 (CERN) に建設した大型ハドロン衝突型加速器 (Large Hadron Collider: LHC) の最初のビーム周回テストを明日9月10日現地時間午前から始める予定です。前段の加速器で0.45TeV (4500億電子ボルト) に加速された陽子ビームをLHCに入射して、初めてリングを周回させます。その後約2カ月のLHC内での陽子ビームの加速の試験を経たうえで、陽子ビーム同士の衝突実験が始まります。1994年の計画決定以来、長期にわたってLHC加速器と実験装置の建設が進んできましたが、明日はついに実験期間へと移行する記念すべき日となります。本日は世紀の出発点を前にして、LHC計画の意義、日本の貢献、現在の実験準備状況、そして今後の予定を報告します。

LHC 計画

LHCでは光速の99.9999991%まで加速した、エネルギー7TeVの陽子ビーム同士を衝突させて、重心エネルギー14TeVと、人類が作りだす最高エネルギーでの実験が行われます。これまでの最高エネルギーであった米国フェルミ国立加速器研究所のテバトロン7倍の重心エネルギーです。質量の起源を解くためのヒッグス粒子の発見と、宇宙に広がる暗黒物質の謎を解く鍵を得られると期待しています。

LHCは、周長27kmのトンネルの中を時計まわりと反時計まわりに陽子ビームが周り4か所で衝突します。長さ14.2m、中心磁場8.33テスラの超伝導双極磁石1,232台が周上にならび、陽子ビームを軌道に乗せています。ビームを収束するための超伝導磁石や常伝導磁石も含めると、総合計9,593台の磁石が使われています。

1994年の建設決定以来14年の年月をかけて建設を進めてきました。LHC加速器と実験装置を合わせた建設費は約5000億円で、CERNのメンバー国、および日本、アメリカ、インド、カナダ、ロシア等が貢献する国際プロジェクトです。日本はメンバー国以外で最初に貢献を表明した国であり、加速器建設に総額138.5億円を拠出しました。これによって、日本はLHC計画において準メンバー国としての扱いを受け、CERN理事会にもオブザーバーとして招かれています。さらに、高エネルギー加速器研究機構(KEK)が技術開発を担い、周回しているビームを衝突点で収束し、高い輝度での衝突を可能にするための装置であるビーム収束用超伝導四極磁石の開発建設を、米国フェルミ国立加速器研究所と協力して行いました。また、日本企業は磁石のための超伝導線材、非磁性構造材、そして半導体検出器の納入等、加速器・実験装置の両面で多くの貢献をしています。

2007年4月にすべての超伝導双極磁石をトンネル内に設置し、2007年11月に磁石の電気的な接続が完了しました。磁石の冷却が進み、2008年7月末には全ての超伝導双極磁石が設定温度(絶対温度で1.9度、摂氏マイナス271.25度)になりました。8月8日に前段加速器からの最初の入射タイミングの調整(時計回り方向)が行われ、8月22日には反時計まわりの入射タイミング調整ができました。9月10日には、入射エネルギーである0.45TeVで、初めてLHC加速器のなかをビームが周回する予定です。

明日の周回運転が始まった後、2か月程度かけてビームの加速試験と衝突の調整をおこない、それから実際の衝突実験が始まります。2008年中は、陽子ビームの加速は5TeVまでにして、重心エネルギー10TeVでの陽子・陽子衝突の実験を行います。12月の運転終了後にさらに調整を行い、2009年の運転では設計値の7TeVビーム同士の重心エネルギー14TeVでの衝突実験を行う

予定です。

LHC で探る物理

20 世紀の物理学では、極微の世界での物質の究極の構造と宇宙誕生からの発展の歴史の理解が非常に進みました。この中で粒子を高エネルギーに加速する加速器での実験が大きく貢献してきました。20 世紀後半には「標準理論」という理論が確立し、物質の最小単位である素粒子やそれらの間に働く力がよく理解できるようになりました。しかし、この理論の中で鍵となるものがヒッグス機構で、これによって本来光速で飛んでいた素粒子が質量をもつようになりました。標準理論が正しいことを示すにはこの理論から予言される電荷をもたない粒子（ヒッグス粒子）が存在するはずですが、未だ発見されていません。LHC での実験の一番大きな目的は、このヒッグス粒子の発見です。

また、近年、標準理論だけでは説明のつかない現象があることがいろいろわかってきました。ニュートリノに質量があり混合することの発見や、宇宙の観測によると宇宙には標準理論に出てくる粒子以外の物質（暗黒物質）の存在などです。これらは、標準理論を超える物理があることを示しており、それは重力も含めて自然界の 4 つのすべての力を統一する究極の理論につながることも考えられます。現在多くのモデルが提唱されていますが、多くの場合には LHC で探索できるエネルギー領域に新粒子があることを示唆しています。LHC で新粒子の発見ができれば、百花繚乱のたくさんのモデルの中から特定が可能になり、究極の理論を構築するための大きな飛躍となります。たとえば、現在あるすべての粒子にはスピンの異なるパートナーが存在するという超対称性は究極の理論での重大要素と考えられています。LHC ではクォークやグルーオンのパートナーである、スクォークやグルーイノと呼ばれる超対称性粒子を数 TeV までの質量であれば発見できます。その粒子の崩壊からできる中性粒子が暗黒物質の候補かもしれません。

また、統一理論では、空間が 3 次元より高い次元である可能性も指摘されています。このような余剰次元がある場合にその効果が LHC で探るエネルギー領域にでも見えてくる可能性が、最近指摘されており、その中では生成して瞬時に崩壊するというミニブラックホールが生成されるかもしれません。

このように、LHC においては、標準理論の中で唯一未発見の粒子であるヒッグス粒子を探索することと、標準理論のさらに先にある現象を始めて明らかにして究極の理論への大きな前進となると考えています。

陽子陽子衝突実験の難しさ

LHC では 1 秒間に陽子ビームが 4 千万回交差し、設計値の輝度（ルミノシティ）ではそのたびに平均約 20 個の陽子と陽子が衝突しています。多くの場合は、それぞれの陽子の中にたくさんあるクォークやグルーオンが衝突して、たくさんの粒子を発生させる事象です。それに対し予想されるヒッグス粒子は約 1 分間に一つ程度しかできません。ヒッグスを探索するのは世界中の人たちの中から特定の一人を探し出すより難しい作業になります。

このため、衝突でいろいろな方向に発生した粒子を可能な限り沢山とらえて、反応の特徴をしっかりと調べることが肝要になります。衝突点の周りをできるだけ全方向で覆ったうえで、発生粒子の特徴（粒子の種別、エネルギーの大きさ、方向）を精度よく測る検出器が必要です。

このような理由で、種類の異なった検出器を何層にも重ねた巨大な測定器が必要となります。

ATLAS 国際共同実験

LHC では、主に 4 つの大きな国際共同実験（ATLAS, CMS, ALICE, LHCb）が組織され、そのうちの ATLAS（アトラス）と CMS が、未発見のヒッグス粒子や、理論で予想されている様々な新粒子の発見を目指した汎用実験グループです。

アトラス実験には、日本から KEK や東京大学素粒子物理国際研究センターを含む 15 の大学・研究所から約 100 人の研究者が参加し、測定器の開発設計、建設、物理解析のための計算機設備の整備、物理解析準備に携わっています。実験全体では 37 の国と地域からの約 2200 人の研究者

が共同で研究しています。

アトラス測定器は直径 25m 長さ 44m の巨大な円筒型をした検出器です。内部から、磁場中の粒子の飛跡を見て運動量を測る内部飛跡検出器、粒子を止めてエネルギーを測るカロリメーター、そこを突き抜けてくるミュオン粒子を検出する測定器などが詰まっています。アトラス測定器全体で約 9000 万個の検出器が積み重なってできています。

日本グループは其中で、粒子の飛跡を曲げるための超伝導磁石（ソレノイド）、内部飛跡検出器の中でもシリコン検出器をつかった飛跡検出器、ミュオンが発生したことを検知するためのミュオントリガー検出器の製作を進めてきました。これらの測定器建設に対して日本の寄与は約 28 億円になります。

ソレノイドは、直径 2.3m 長さ 5.3m の円筒型の超伝導磁石で、2 テスラの磁場を衝突点の周りに作ります。

シリコン検出器はソレノイドの内部におかれて、粒子の飛んだ位置を十数ミクロンの精度で測定できます。1 辺 6.4cm のシリコンの板上に、80 ミクロン間隔で電極（ストリップ）を設けてあり、粒子が通過した近くのストリップから電気信号が取り出せます。シリコンの板を約 16,000 枚衝突点の周りに並べてあります。日本は衝突点周りを囲む円筒形部分の検出器モジュールの約半分を担当し、組立て精度は日本の成績が一番でした。また、検出器を精度よく素早く固定するためのロボットを日本が開発し、英国に搬送してそこで検出器の組上げを行いました。

ミュオン検出器はアトラス測定器の一番外側になるので、広大な面積をカバーする必要があります。ミュオン粒子ができたかどうかを判定する信号（トリガー）を作る測定器は、TGC とよばれる、畳ぐらいの大きさの薄いガス検出器を 3588 枚使って、検出器の両端部を覆う直径約 25m の円盤にします。日本グループはこのうち 1100 台の検出器を作るとともに、この検出器の読み出し回路と、ミュオン粒子ができたかどうかを判定する論理回路全体を担当しました。全部で約 32 万チャンネル分ある信号を組み合わせて判定を行う回路は非常に複雑で、専用の集積回路の開発を必要としました。

地下 92m の実験室が完成した 2003 年以來、順々に検出器を搬入してアトラス測定器を組上げてきました。2006 年にはシリコン検出器が組み込まれました。ミュオントリガー検出器は、扇型の部品が地上で組み立てられて、それを地下に搬入して円盤に組み立てました。2007 年 9 月には 6 個すべての円盤が完成しました。

2008 年の 6 月にはアトラス検出器の中に LHC 加速器のビームパイプが接続され測定器と加速器が一体になりました。LHC にビームが入るまでは、宇宙線を使ってアトラス検出器全体の調整が進んでいます。

データ解析

LHC での実験は、すべての陽子・陽子衝突の情報を記録することは不可能なので、新発見につながる事象や、W/Z 粒子やトップクォークなどができた場合を精選して、1 秒間に約 200 事象程度記録します。たくさんの検出器の信号を記録するので、15 秒で DVD（1 枚の容量 5GB 弱）がいっぱいになる勢いです。それらの解析に必要な計算処理能力は膨大になります。また、実験で生成されるデータを計算機シミュレーションで再現することは非常に重要な解析手法ですが、1 事象のシミュレーションに最新の CPU で 5 分かかります。そういったシミュレーションを年間に数億事象分行う必要もあります。

それらの大量のデータを解析するためには膨大な量の記憶装置と計算処理装置が必要になります。それらを実験参加国が平等に負担し提供する世界分散解析のスキームとして、コンピューティンググリッド技術が導入されました。CERN 研究所で生成された大量のデータは国際ネットワークを経由して各国の解析センターに転送され、そこで処理され保管されます。このデータを利用する各国の研究者は世界中に分散したデータにネットワーク経由でアクセスして解析を行います。LHC の 4 実験全体で、現在 33 ヶ国 69 研究機関を超えるサイトが運用しています。我が国では東京大学素粒子物理国際研究センターにグリッド拠点を設立しています。

物理成果の見通し

LHC で衝突が始まってデータがどれだけ順調に蓄積できるかはまだ多くの不定性があります。今年、重心系エネルギー10TeVでの運転で、来年には14TeVにエネルギーを上げた上で徐々に輝度をあげていきます。

ヒッグスの探索では現在想定されているすべての質量領域(0.1TeVから1TeV)のどこにあっても、3年程度で確実に探すことができます。見つけやすい質量領域にあれば来年のデータからも発見があるかもしれません。

スクォークやグルーイノなどの超対称性粒子やミニブラックホールに関しては、質量領域2TeVぐらいまでであれば非常に早く見つかる可能性があります。今年の10TeVの運転のデータでも、これまでに探索された領域を大幅に拡張できますので、発見の可能性があり期待しています。

しかし、滅多におこらない新現象の事象にたいして、陽子内のクォークやグルーオンの散乱事象が圧倒的にたくさん起こっているの、見間違いでないことをきちんと確認することが私たちの重要な使命です。このため実験の初期は、測定器の性能が期待したとおりにになっているかの確認が最優先の課題となります。測定器の検証が終わって初めて物理成果を発表できるので、今年収集するデータからの最初の成果発表は早くも2009年の春か夏になると思います。

注) アトラス日本グループとは、アトラス実験に参加している日本の研究者グループのことである。現在の参加メンバーは、次の15の研究機関に所属している: 高エネルギー加速器研究機構、筑波大学、東京大学、首都大学東京、信州大学、名古屋大学、立命館大学、京都大学、京都教育大学、大阪大学、神戸大学、岡山大学、広島大学、広島工業大学、長崎総合科学大学。

用語解説

☆ 欧州合同原子核研究機関（CERN）

ヨーロッパ諸国により設立された素粒子物理学のための国際研究機関。設立は1954年。所在地はスイスジュネーブ郊外。加盟国はヨーロッパの20カ国。日本は、米国、ロシア等と共に、オブザーバー国として参加している。

☆ 大型ハドロン衝突型加速器（LHC、Large Hadron Collider）

CERNで現在建設中の大型陽子陽子衝突装置。衝突エネルギーは世界最高の14TeVであり、TeV領域の物理を研究出来る唯一の施設である。

☆ TeV（tera electron volt）

エネルギーあるいは質量の単位。1eV（電子ボルト）は1個の電子が1Vの電位差で加速される時のエネルギー。1TeV = 10^{12} eV

☆ アトラス（ATLAS）実験

A Troidal LHC Apparatusの略。LHCを用いた二大実験の一つで、世界中の37の国と地域からの約2200人の研究者が参加する国際共同研究である。日本からもKEKや東京大学を始めとする15の大学・研究機関が参加。ヒッグス粒子や超対称性粒子の探索や研究など、素粒子物理最先端の研究を行うことが可能である。

☆ CMS実験

Compact Muon Solenoidの略。ATLAS実験と同じ研究目的を持つ、LHCを用いた二大実験の一つ。

☆ 標準理論（標準モデル）

クォークとレプトンが物質の基本粒子であると考え、これらに働く相互作用は電弱統一理論と量子色力学で記述されるとする理論。量子色力学は、強い相互作用を記述する理論であり、電弱相互作用とは統一されていない。

☆ ヒッグス粒子と素粒子の質量の起源

標準理論では、 W^\pm や Z^0 粒子に質量を与えるために“ヒッグス粒子”が導入される。この粒子の導入により、 W^\pm や Z^0 のみでなくクォーク、レプトンらにも質量を与えることができる。しかし、ヒッグス粒子はその存在が確実と思われているにもかかわらず、未だ実験的に発見されていない。その質量は理論で予言することができない。LEP実験により115GeVから200GeVの間であることがほぼ確実となり、LHC実験での発見が期待されている。（1GeVは 10^9 eV）

☆ 超対称性

素粒子にはフェルミ粒子（スピンの半整数）とボーズ粒子（スピンの整数）の2種類がある。超対称性とは、これら2種類の間に対称性で、すべてのフェルミ粒子（ボーズ粒子）には、性質がまったく同じでスピンのみ異なるボーズ粒子（フェルミ粒子）の存在を要請する。すなわち、通常の素粒子に対応して、スピンが異なるパートナー（超対称性粒子）が存在するものと仮定する。一見、人工的に見えるこの対称性は、「時間とは何か」を考えていくと自然に導き出すことが出来る性質である。クォークのパートナーをスクォーク、グルーオンのパートナーをグルーイノと呼ぶ。

☆ 超対称性理論

超対称性を仮定した理論で、素粒子の標準理論を超える有力な理論の一つ。標準理論では無限大に発散して意味がなくなってしまう物質質量を、超対称性粒子の導入によって防ぐことができる。また、超対称性理論は、今のところ、重力をも含めた全ての相互作用を統一する可能性を秘めた唯一の理論である。

☆ 時空の構造と余剰次元

アインシュタインの相対性理論によれば、物理学は3次元の空間と1次元の時間により記述される（4次元時空）。しかしながら、重力を含めたすべての力を統一する理論の記述には10次元ないしは11次元の時空が必要とされる。ではこれら余分な次元の構造はどうなっているのかが、大きな問題として浮かびあがっている。余剰次元の効果がLHCでミニブラックホールの生成という形であらわれる可能性も指摘されている。

☆ コンピューティンググリッド

ネットワーク上に分散配置された計算機資源（計算機及びデータ蓄積装置等）を簡便に利用するための統合的手段。データ処理全般をネットワーク上の多数の計算機で自動的に実行できるようにし、手許の計算機があたかも巨大な計算機センターの端末であるかのように利用できるようになる。