

連携記事

ヒッグス粒子の発見

Discovery of the Higgs Particle

近藤敬比古

Takahiko Kondo

高エネルギー加速器研究機構
名誉教授

1 世紀のヒッグス粒子の発見

2012年7月4日にCERNは、LHC加速器を使った2つの実験装置（アトラスとCMS）でヒッグス粒子を発見したと発表した¹⁾。そのニュースは直ちに世界を駆け巡り、翌朝の世界の主要新聞のトップを占めた。素粒子物理学史上で待ちに待った発見であった。2013年12月にはヒッグス粒子の発見を受けて、50年前の1964年にヒッグス粒子の基となる理論を提唱したP. ヒッグスとF. アンブレール（F. Englert）の2人の理論物理学者にノーベル物理学賞が授与された。

宇宙に「ヒッグス場」が存在すればクォークや電子などの素粒子は質量を持つことができる。ヒッグス場の存在を示すヒッグス粒子を探すこと50年、人類未踏のエネルギーに到達したLHC加速器でようやく発見された。加速器・実験装置の建設・運転に関わった1万人以上の人々の結晶とも言える。

2 CERN（セルン、欧州原子核研究機構）

CERNはスイスのジュネーブ市郊外にある原子核素粒子物理学の研究所である。シンクロトロンと呼ばれる加速器で陽子や電子・原子核などを高いエネルギーまで加速して物質の根源を研究することを目的としている。第二次世界大戦でどん底まで疲弊した欧州の統一をめざし、欧州に科学者を引き止め、かつ新しい科学を欧州の地で再興し展開するため、量子力学を確立した科学者たちド・ブロイ、ボーア、トンプソン卿、ハイゼンベルグ等が協力して運動を起こし1954年に設立された。先の大戦で原爆の製造にまで関与した償いの一つとして、同じ物理学者達が平和のために設立したという意味もあったと言われる。欧州の12（今は21）ヶ国が締結した条約に基づき、CERNの予算（約1000億円/年）は国民総生産に比例して加盟国が負担している。

CERNは1960-70年代では新粒子の発見や新現象の研究において米国に後れを取っていたが、その後次第にCERNが最先端研究をリードしはじめた。1983年に弱い力（相互作用ともいう）を媒介するW、Z粒子がCERNで発見された。また1990年にはWWWを発明したことで知られている。

3 世界最大最強のLHC加速器

LHC（Large Hadron Collider）加速器は山手線ほどの周長27kmで地下深度約100mのトンネルに設置されている（図1）。それは前世代の電子陽電子衝突型加速器（LEP）のために1980年代に掘られたものである。トンネルの大部分は1700以上の超伝導マグネット（図2）で埋め尽くされている。ここでは人類史上最高のエネルギー4 TeV（4兆電子ボルト）



図1 円形のリングは周長27 kmのLHCトンネル。丸印が実験装置。遠くにはジュネーブ市やアルプス山脈が見える（CERN提供）

まで加速された約500兆個の陽子が超伝導マグネットの磁場によって曲げられて回り続け、4か所に設置された実験装置の中心で、互いに反対方向に回る陽子同士の正面衝突が毎秒10億回ほど起こり、衝突毎に多量の素粒子が発生する。

LHC加速器は起案(1984年)から運転開始(2008年)まで24年を要し、総建設費は人件費も含めると1兆円程度かかった。物理学史上初めての超大型計画だったが、すんなり事が進んだわけではない。

実は人類未踏の最高エネルギーに到達する加速器計画では米国が先頭を走っていた。1989年にSSC(Superconducting Super Collider)加速器の建設がテキサス州ダラス市の近郊で始まった。ビームのエネルギーは20 TeVでLHCの3倍にもなるためLHC計画には疑問符がつき瀕死の状態に陥った。これをともかくも生き残らせたのはW、Z粒子の発見で1984年にノーベル物理学賞を受賞したルビア(Carlo Rubbia)である。彼は「エネルギーでの劣勢はルミノシティ(輝度)をSSCの10倍に上げることで挽回できる。しかも既存のLEPトンネルや入射加速器を利用することでSSCよりはるかに安くできる」と主張した。

そして1993年10月、すでに地下トンネル87kmの27%を掘削していたSSC計画は米国議会によって中止が決定された。建設予算が予定の3倍以上の1兆2千億円に増加したことが主原因である。私自身も含め夢を抱いてSSC計画に参加していた多くの物理学者はいわば物理難民となり大西洋を渡ってLHC計画に参加したいと表明した。しかし当時のヨーロッパの財政事情は暗く、大計画を承認する雰囲気ではなかった。最大の出資国ドイツは東西ドイツ統一のためのコストで、他の多くのCERN加盟国もEU創設のマーストリヒト条約を満たすために苦しんでいる時期だった。特にドイツとイギリスがLHC計画の全面承認を渋り続けた。



図2 LHC加速器。約1700台の超伝導マグネットを据付中のLHCトンネルの写真(CERN提供)

ヨーロッパ以外の国で最初にLHC加速器建設に協力を表明したのは日本で、時は1995年6月で支援規模は50億円であった。その後インド・ロシア・カナダ・そして最後に米国がLHC協力を表明し、欧州ベースの全世界的プロジェクトになった。しかし承認されたLHC計画は、予備費が全て削除された最小予算で、かつ計画を立てた1993年にはまだ肝心の超伝導マグネットのプロトタイプも完成していなかった。果たして2001年にCERNは18%のコスト超過が判明し大問題になった。科学雑誌ネイチャーには「物理学者に大計画は任せられない」と手厳しく報道された。特別外部レビュー委員会の提案に従い、CERNの活動の殆どをLHCに集中し、銀行から有利子借金をし、かつLHC完成を2005から2007年に延ばすことで決着した。

LHC加速器建設自体はおおむね順調に進み、長さ15m重さ34tonの超伝導マグネットは毎週25台のペースでトンネル内に搬入・設置され、マグネット間の溶接と電気・ビームパイプの接続は12,300ヶ所にも達した。2007年4月には1746台の超伝導マグネット全ての設置が完了した。建設途中で多くの技術的困難に出会ったがその都度現場中心に対応策が図られた。2008年9月10日に入射エネルギーでのビーム周囲に成功した。しかしその10日後には超伝導マグネットの試運転中に液体ヘリウム漏れによる大事故が発生した。1700台の超伝導マグネットは殆ど完璧だったのに、そのマグネット同士を超伝導線で接続する半田付けが一か所で不良だったせいである。その修復に約1年かかった。2010年4月よりようやく本格的な加速器運転と物理実験が始まった。

4 超伝導マグネットと非磁性鋼

LHC加速器の主要パラメーターを表1に示す。LHC加速器の心臓部分は超伝導マグネットとヘリウム冷却装置である。素粒子物理ではエネルギーが高い加速器ほど新粒子の発見の確率が高い。LHCではそれまでの超伝導マグネットを60%も上回る8.3テスラ(83,000ガウス)のダイポール磁場を実現した。1つのマグネットの中に2対の超伝導コイルと真

表1 LHC加速器の主要パラメーター²⁾

主リング周長	26.7 km
陽子ビームエネルギー	7 兆電子ボルト (7 TeV)
陽子ビーム強度	1.15x10 ¹¹ p/bunch, 2808 bunch
ルミノシティ (pp)	10 ³⁴ cm ⁻² s ⁻¹
超伝導双極マグネット	8.33 Tesla, 11.85kA, 1232 台
冷却部分の全重量	37,000 tons
冷却用ヘリウム総量	96 tons

空ビームパイプを設置して逆方向に回るビームを同時に取り扱う2-in-1方式が採用された(図3)。さらにニオブチタン線で巻かれたコイルをヘリウムのラムダ点より低い1.9K(Kは絶対温度を示す)の超流動ヘリウムを使って冷却して磁場を高める技術がCERN主導で開発された。このため大規模で革新的なクライオシステムが必要となった。

1.9Kまで冷却される物質の全重量は37,000トンで、そのために超流動ヘリウム約80トンが必要である。超流動状態で運転するとより磁場を高くできるのみならず、その低い粘性のためヘリウムが狭いコイル導体間に侵入でき、超伝導体の2000倍もある高い比熱のために熱の揺らぎを容易に吸収できる。また熱伝導率が無酸素銅の1000倍もあるのでヘリウムを循環させなくても熱を効率的に伝えることができる。

冷却されるマグネットコア一部分は1気圧の液体ヘリウム容器の中にじゃぶ漬けて置かれる。マグネット上部にある熱交換パイプの内圧を15mbarに引き(ここでIHI製のコールドコンプレッサが使われている)、J-Tバルブを通じて膨張したヘリウムの温度は1.8Kになる。パイプの中に残る少量の超流動ヘリウムが蒸発する潜熱でマグネット全体が冷やされる。

双極マグネットでは電磁力で機械的な力が300 tons/mにも達しコイルを外側に押し出す。その力は鉄ヨークと非磁性鋼カラーで保持される⁹⁾。必要な非磁性鋼カラーの総量は11,000トンであった。ビームが通るコイルの中心では一様磁場が必要なため、コイルのすぐ近傍に使われるカラー材の透磁率は可能な限り1.000に近くかつ磁場依存性があってはならない。欧米日の4社の非磁性鋼サンプルを精密打抜きしてテストした上で競争入札を行い新日鐵(当時)のYUS130Sが選ばれた。その透磁率は温度1.9Kで $B=0.1\sim 3$ Teslaで変わら

ず1.0019である上に、量産された材料のロッド間のばらつきも殆どなく安定していたと報告されている³⁾。

15m長の双極マグネットの両端部では、超伝導コイルが3次元的に曲げられている。そのため鉄ヨークをそのままの形状で端部まで延長するとコイル上での磁場が強くなりすぎてクエンチ(超伝導状態が破れること)が起こり易くなる。そのためマグネット端部付近では鉄ヨークの一部を非磁性鋼で置き換えることにした。鉄ヨークの中に埋め込むため熱収縮率が鉄と殆ど同じ 1.8×10^{-3} の川崎製鉄(当時)の非磁性鋼KHMNが使われた。必要な総量は1700トンであった。

超伝導マグネットの製造は歴史に残る事業だった。CERNからの技術移転を受けて、双極マグネットのコールド部分を欧州の3社で、四極マグネットは1社で行われた。クライオスタットへの組込は全てCERNで行われ、トンネルに降ろす前に全数が性能試験された。殆どが2回以下のトレーニングクエンチ(クエンチでコイルがより安定な場所に収まる現象)で予定の磁場を達成した。ケーブル製造からすべてのマグネットの設置が完了するまで6年を要した。

LHCでヒッグス粒子などの新粒子を発見するには、高いエネルギーのみならず高いルミノシティ(衝突頻度)が必要である。そのため約1ミリ幅で周回している陽子ビームを衝突点では16ミクロンに絞り込む必要がある。ビームを集束する役を果たすのは衝突点前後に設置された特殊な超伝導四極マグネットである。そこではビームを一旦大きく膨らませるため大きな口径(7cm ϕ)が要求される。日本の高エネルギー加速器研究機構(KEK、つくば市)と米国のフェルミ研究所が半分ずつ分担し、独立に技術開発し製造した。日本部分の製造は東芝が請け負った。その他2つのビームを同じ軌道に載せるための特殊なマグネットや常伝導から超伝導ケーブルに変換するフィードボックスは米国で作られた。インド、ロシアからも各種の直線部分用のマグネットの供給を受けた。大型加速器建設における国際協力のいい一例である。

5 日本企業による参加

LHC計画にはかなりの日本企業が関与した。CERNの予算は欧州の加盟国による出資なので、それ以外の国の企業には入札資格は本来ない。しかしLHC計画に日本政府が建設協力として総計138.5億円の資金を提供したおかげで、加速器の部品や材料の製造に日本企業が参加できた(表2の*印がその部分を示す)。日本企業の製造した材料や装置は押し並べて品質が高く一定しており、かつ納期を守り途中で価格を吊り上げないので、CERNスタッフや実験装置の研究者達から絶賛に近い高い評価を頂いた。

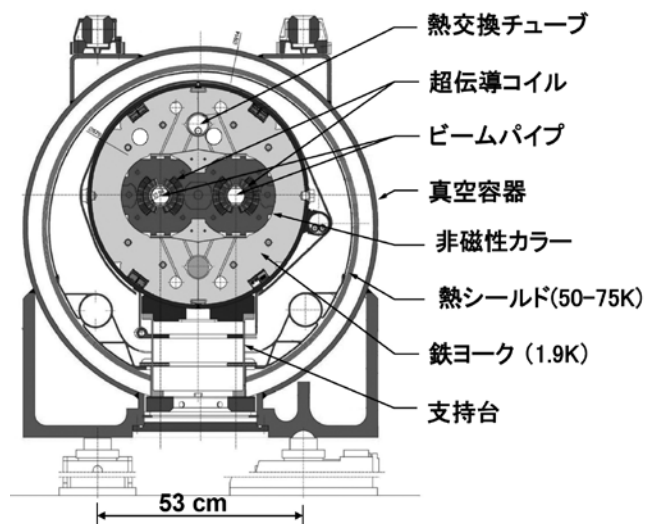


図3 主リングの超伝導双極マグネットの断面図 (CERN提供)

表2 LHC建設に貢献した主な日本企業⁴⁾

古河電気工業	超伝導ケーブル(*)
新日鉄住金	超伝導マグネット用非磁性鋼(*)
JFE スチール	超伝導マグネット用非磁性鋼(*)
東芝	収束用超伝導四極電磁石(*)
カネカ	超伝導ケーブル用ポリイミド絶縁材(*)
I H I	低温ヘリウムコンプレッサー(*)
東芝	超伝導ソレノイドマグネット
浜松ホトニクス	シリコン飛跡検出器, 光電子増倍管など
川崎重工業	カロリメーター用低温容器, 鉄構造体
林栄精器	ワイヤーチェンバー
クラレ	シンチレーティングファイバー
有沢製作所	銅箔ポリイミド電極シート
東芝、ソニー	電子回路用特殊チップ
ジーエヌディ	電子回路
フジクラ	耐放射線性光ファイバー

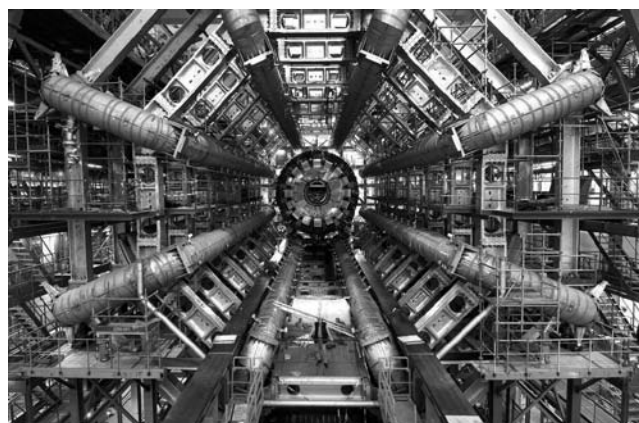


図4 建設中のアトラス測定器の中央部分。8本のトロイダル型超伝導マグネットの長さは25mである (CERN提供)

6 ヒッグス粒子観測のための実験装置

LHCでは陽子を7TeVまで加速し正面衝突させると、パイオン・電子・ γ 線などの素粒子が数個から数百個が発生する。ごく稀に陽子の数百倍の質量の粒子も発生する。

陽子衝突で発生したヒッグス粒子を観測するには図4 (ただし写真は建設中のもの) に示すように超大型の実験装置を使う。この中には各種の粒子検出器(シリコン半導体検出器、ワイヤーチェンバー、シンチレーター、液体アルゴンカロリメーターなど)が数多く設置されている。検出器からの信号数は1億チャンネルに近い。衝突点で発生した粒子はそれらの検出器を通過するときに微小な電気信号を出す。それらの電気信号を計算機処理することによって発生した粒子のエネルギーや方向・種類を求めることができる。

LHCでは4台の大型実験装置が国際協力で作られた⁵⁾。そのうちアトラス実験装置とCMS実験装置がヒッグス粒子などの新粒子発見を目指す測定器である。アトラス実験装置は高さ25m長さ45mの巨大な装置である。装置の建設に15年かかり、総建設費は500億円程度である。これまでにない大きな国際協力であり、日本を含む37カ国から約3000人の研究者が分担して装置を設計・建設し運転してきた⁸⁾。

陽子衝突は毎秒2千万回起こる。これを全部記録したのでは計算機が直ちにパンクしてしまう。検出器群に直接繋がっている電子回路と3段階のオンライン計算機で面白いイベントのみを毎秒あたり数百イベントほど選び、残りはその場で捨てる。トリガーされたイベントはオフライン解析用に貯蔵されるが、そのデータ量は1年間の実験で数ペタバイト(ペタ=10¹⁵)に達する。オフライン解析用に選ばれた生データは世界各地に分散した計算機センターに光ファイバーを通じて送られ貯蔵される。実験グループに属する研究者は、世界の何処からでもアクセスできるグローバル計算機システム

(グリッドと呼ぶ)を使ってデータ解析を進める。

7 標準模型と質量の問題

物質の構成物を追求していくと陽子・中性子・電子に行きあたる。陽子や中性子は3個ずつのクォークから出来ている(図5)。これまで6種類のクォークが発見されている(u,d,s,c,b,t)。この他に電子やニュートリノを総称したレプトンも6種類存在する。それらの基本粒子の間には3種類の力(強い力、電磁力、弱い力)が働いている。それらの力はそれぞれグルーオン、光子、W/Z(総称してゲージ粒子と呼ぶ)によって伝えられる。レプトンは強い力に反応しない。図6にこれらの基本粒子をまとめた。重力は余りに弱すぎて加速器を使った研究の対象外である。

これらの素粒子の間の3つの力は「標準模型」と呼ばれる運動方程式で記述できる。現在まで知られている全ての素粒子現象を非常に高い精度で計算し予言できる強力な理論である。20世紀初めに発見された量子力学と特殊相対性理論をその源流にもつ場の量子論を使って記述され、局所ゲージ対称性(粒子が持つ内部座標を場所に関わらず回転していい)を根本原理としている。この原理は力を伝えるゲージ粒子の質量はゼロであることを要求している。標準模型は1970年代にほぼ形が出来上がり、30名を越えるノーベル物理学賞を受賞した物理学者が標準模型の形成に関与している。

標準模型のうち光子が媒介する電磁力は、マックスウェルの古典電磁気学を発展させた量子電磁力学に従う。発散の困難をくりこみ理論で解決した朝永振一郎らの仕事で完成した。その結果、たとえば電子の異常磁気能率の実験値は理論と10桁もの高い精度で一致する。電磁力を媒介するゲージ粒子の光子の質量はゼロである。

3個のクォークを結びつけて陽子や中性子を作っているの

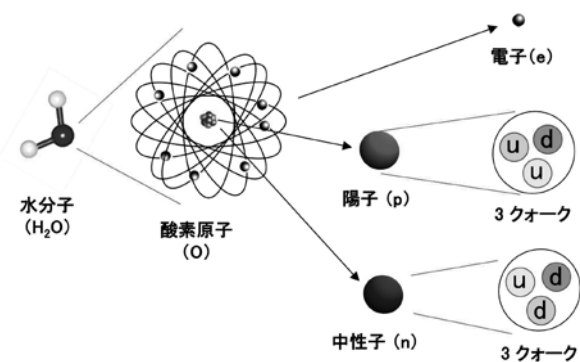


図5 物質はクォークと電子から出来ている

物質粒子				力を伝える粒子	
	第1世代	第2世代	第3世代		
クォーク	u アップ	c チャーム	t トップ	強い力 g グルーオン	
	d ダウン	s ストレンジ	b ボトム	電磁力 γ 光子	
レプトン	ν_e 電子ニュートリノ	ν_μ μ ニュートリノ	ν_τ τ ニュートリノ	弱い力 W^+ W^- Z Wボソン Zボソン	
	e 電子	μ ミューオン	τ タウ		
ヒッグス場に伴う粒子				H $?$ $?$ $\dots$ ヒッグス粒子	

図6 現在まで見つかった素粒子

は強い力である。多くの実験でクォークが陽子・中性子の中にあることはわかっているが、どんなに高いエネルギーで叩いても裸のクォークが出てこない。この不思議は、あたかもゴムのように離れるほどクォーク間に働く力が強くなる、という常識外の理論上の発見で1970年代にほぼ解決した。この理論は量子色力学と呼ばれる。ここでも力を伝えるグルーオンの質量はゼロとして矛盾ない。

残る問題は弱い力であった。弱い力はベータ崩壊のように、放射線を出して原子核が崩壊する現象を司る。太陽内で起こる核融合反応で、2つの陽子が結合して重陽子と電子とニュートリノになる反応も弱い力による。弱い力は様々な実験結果から、陽子の100倍ほどの質量をもつWとZと呼ばれるゲージ粒子を交換して作用することがわかった。ところが弱い力の方程式はやはり局所ゲージ対称性に従うため、WとZ粒子の質量は理論ではゼロでなくてはならない。しかし実験は有限質量を示している。たとえばZ粒子の質量は陽子の97.2倍である。

その上、弱い力ではパリティ（右と左の空間対称性）が最

表3 素粒子の質量 (GeV=10億電子ボルト)

素粒子	記号	理論予想	実験値
光子	γ	0	0
W粒子	W	0	80.4 GeV
アップクォーク	u	0	0.002 GeV
ダウンクォーク	d	0	0.005 GeV
トップクォーク	t	0	173.1 GeV
電子	e	0	0.00051 GeV

(註：ここで理論予想はヒッグス場が存在しない場合の値)

大限に破れていることが1957年に発見された。クォークや電子などは固有のスピン（自転角運動量、駒の回転のようなもの）を持っている。弱い力は、左巻きのスピンを持つ粒子にのみ働くが、右巻きスピンの粒子とは作用しないことが実験で証明された。ところがこの実験事実を方程式に盛り込むと、クォークも電子も質量が持たなくなってしまう。しかし実際にはそれらは質量がある。たとえば電子の質量はエネルギー換算で0.51MeVである。

8 ヒッグス場とヒッグス粒子

クォークや電子および力を伝える粒子の質量はすべてゼロでないと理論は成り立たない。しかし現実には表3に示すように殆どの粒子が質量を持つ。この理論と現実の矛盾は、2008年のノーベル物理学賞を受賞した南部陽一郎が初めて提唱した「自発的対称性の破れ」を用いて解決した。方程式は対称性を持っているが現実の世界はその対称性を破っているとする。よく使われるたとえ話は、鉛筆を机の上に立てて指を離すと倒れるが、倒れる方向はある一つの方向が選ばれる。重力（運動方程式）のもつ360°の対称性は鉛筆による倒れ（＝現実）で破られた、と言う。

ヒッグス達は1964年に南部の概念を発展させて、スピンのないヒッグス場（場とは空間が持つ性質。地上に住む我々は地球の重力場に中にいる）が存在すれば、ゲージ粒子の質量はゼロでなくてもいいという理論の解を見つけた。昨年のノーベル物理学賞はこの理論上の発見を称えたものである。ヒッグス達の研究の3年後にワインバーグら（1979年ノーベル物理学賞受賞）がこの理論を弱い力に應用して成功した。同時にクォークや電子の質量も同じヒッグス場で作られうるとも指摘した。

図7にこのアイデアを図示した。現在の宇宙は弱い力をもつヒッグス場で埋まっているとする。クォークやW粒子は弱い力に感応するので空間に埋め込まれたヒッグス場に頻りに衝突して光速で走れなくなり質量を持つ。衝突頻度によって

質量が違う。

ヒッグス場は真空中に埋め込まれているので見えない。しかし加速器で高いエネルギーを一点に集中させるとヒッグス場の弱い力を通じてヒッグス粒子が飛び出してくる。このヒッグス粒子は今まで知られている16個の素粒子(図6参照)とは全く違い、スピンを持たない「異端」粒子である。ヒッグス粒子の寿命や崩壊の仕方や作られ方は標準模型で計算できる。わからないのはヒッグス粒子の質量だけだったが、LHC加速器の高いエネルギーと輝度があれば数年で見つかるかと期待されていた。そもそもヒッグス粒子の発見がLHC計画の主目的であった。

9 ヒッグス粒子の発見

2010年4月から待望のLHC加速器に陽子ビームを回して衝突させる実験が始まった。ただし2008年に起きた事故の原因であった超伝導ケーブル接続部の修理がまだ完全でないので安全をとって設計値の半分のビームエネルギー3.5 TeV(2012年は4 TeV)で運転された。2012年末までにアトラス実験装置の真ん中で引き起こされた陽子衝突は約2,500兆回にのぼる(CMS実験も同程度)。

集められた膨大なデータは世界に分散する計算機センターに光ファイバーで送られ、運転と同時並行してそれらのデータの中に潜んでいると思われるヒッグス粒子の搜索が大学院生やポスドクなど若い研究者達で行なわれた。ヒッグス粒子探しは、標準模型で予言されている2つの崩壊モード $Higgs \rightarrow \gamma\gamma$ と $Higgs \rightarrow ZZ \rightarrow \ell\ell\ell\ell$ (ℓ は電子またはミューオン)に重点を置いて、昼夜の休みもなく精力的に進められた。

ヒッグス粒子の兆候は2011年後半にアトラス・CMS両実

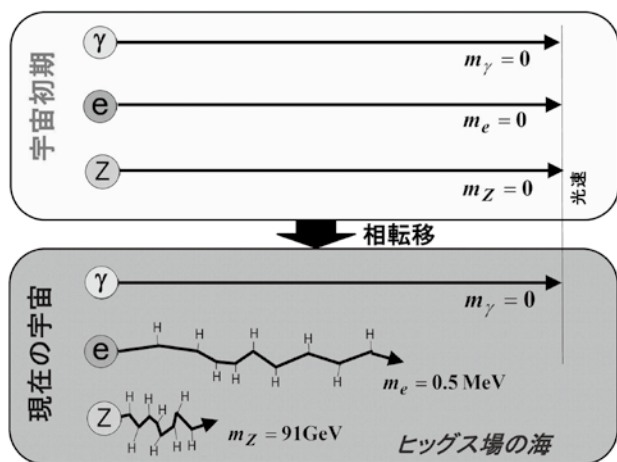


図7 (上=宇宙初期) ヒッグス場のない時、(下=現在) ヒッグス場の海が空間に満ちているときの粒子の運動

験に見え始めた。しかしヒッグス粒子らしきピークはバックグラウンドのふらつきで偶然に出来て研究者が騙されることもある。過去に苦い経験が何度もあったので、考えられる可能性を全て検討した上で、ピークが偶然にできる確率が標準偏差の5シグマにあたる0.00003%以下になった時に発見とよぶ習慣になっている。2012年の春は関係する研究者にとってピークが消え去るか増長するかドキドキの日々であった。幸い2つの実験とも質量が126 GeV付近で5シグマのピークを確認できた。図8は2012年末までのデータをアトラス実験グループが解析した結果である。X軸は親の粒子の質量である。図9はピーク付近で観測されたイベントの例である。標準模型の予言に沿った崩壊モードが見えている。

10 まだ多くの謎が残っている

めでたくヒッグス粒子は発見され標準模型が厳密に正しい

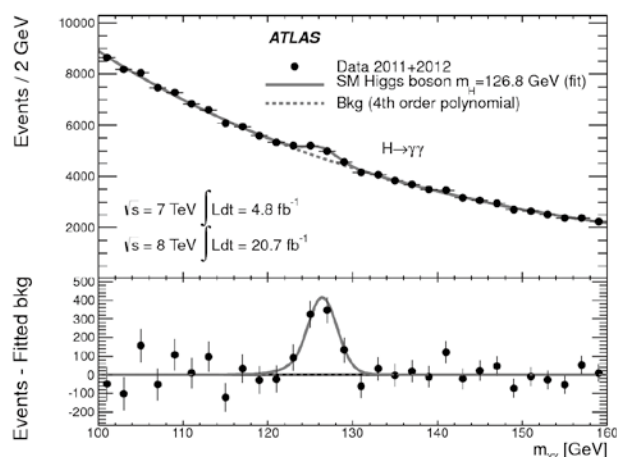


図8 アトラス実験で観測された $\gamma + \gamma$ の親粒子の質量分布。126 GeV 付近の山がヒッグス粒子の崩壊によるもの⁶⁾

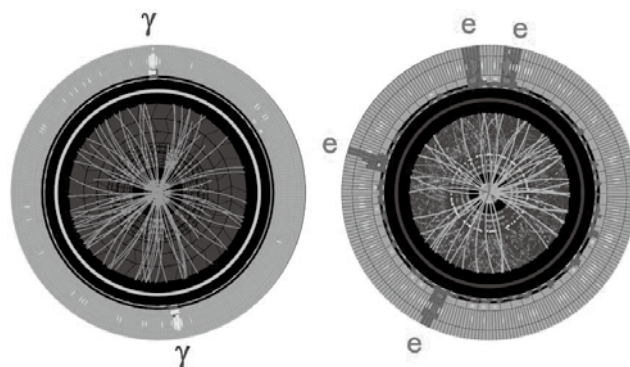


図9 観測されたヒッグス粒子の候補イベントの例：
(左) $Higgs \rightarrow \gamma + \gamma$ (右) $Higgs \rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^-e^+e^-$
アトラス実験の中心付近のみを切り出した図⁷⁾

ことが証明された。しかし自然には謎が多く残っている。最近めざましく発展している宇宙観測によれば、標準模型が扱う物質は宇宙の4%しか占めず、残りは正体不明の暗黒物質(22%)と暗黒エネルギー(74%)が占めている。また理論屋が期待している超対称性粒子はまだLHCでは一つも見つかっていない。2015年からエネルギーを上げて2035年までLHC運転で、それらの新粒子が見つかるのではと期待される。

加速器による超高エネルギーでの物質の法則の追及は宇宙の起源の研究にもつながる。LHCで到達したエネルギーは137億年前に1点から膨張したビッグバン宇宙の誕生後の1兆分の1秒の温度に相当するのである。

参考文献

- 1) http://atlas.kek.jp/sub/CERN-LHC/PR17.12_J.pdf,
<http://cds.cern.ch/record/1462525> (発表時のビデオ)
- 2) L.Evans and P.Bryant : 2008 JINST 3 S08001 (<http://iopscience.iop.org/1748-0221/3/08/S08001/>)
- 3) C.Lanza and D.Perini : IEEE Trans. on Applied Superconductivity, 12 (2002) , 1252.
- 4) http://atlas.kek.jp/JapanCompanyPoster_A4.pdf
- 5) 日本物理学会誌2007年12月号「LHC実験が始まる」,
http://ci.nii.ac.jp/vol_issue/nels/AN00196952/ISS0000414153_jp.html
- 6) ATLAS Collab., Physics Letters, B726 (2013) , 88.
- 7) <http://cds.cern.ch/record/1459488>,ATLAS-CONF-2012-091
- 8) アトラス日本広報ページ (<http://atlas.kek.jp/>) には資料・写真・ビデオなどが多く掲載されています (日本語)
- 9) 新富孝和 : 大型加速器用超伝導マグネットにおける構造材料, 非磁性鋼における最近の進歩 (高Mn鋼, ステンレス鋼, 鉄基超合金), 日本鉄鋼協会基礎研究会非磁性鋼調査研究部会報告, (平成2年12月), 78-85.
(2014年5月7日受付)