



「ヒッグス粒子・ノーベル賞受賞に関して」

- 1 発表日時 2013年10月8日(火)
 (19時より) 解説及び背景の説明
 (20時より) CERN¹⁾での会見中継
- 2 発表場所 東京大学理学部1号館2階 小柴ホール
- 3 解説者
 浅井 祥仁 (東京大学大学院 理学系研究科 教授 物理解析責任者)
 小林 富雄 (東京大学 素粒子物理国際研究センター 教授、
 アトラス日本グループ共同代表者)

4 連絡先

- 東京大学 素粒子物理国際研究センター
 Tel: 03-3815-8384 Fax: 03-3814-8806
 E-mail: hisho@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

報道に関する連絡先:

- 東京大学大学院理学系研究科 広報・科学コミュニケーション
 アトラス実験広報担当 准教授 横山広美
 電話: 03-5841-8856
 メール: kouhou@adm.s.u-tokyo.ac.jp 、 pr-atlasj@icepp.s.u-tokyo.ac.jp

5 発表内容 (別紙スライド参照)

- 5.1 受賞理由の説明とその意義
- 5.2 ヒッグス粒子研究の現状と素粒子研究の今後
- 5.3 LHC 加速器とアトラス実験への日本の研究者の貢献
- 5.4 LHC 計画全体に対する日本企業の技術力
- 5.5 一般講演会 「ヒッグス粒子発見」のお知らせ

6 基礎資料

6.1 LHC 加速器とアトラス実験・日本の貢献

LHC 加速器²⁾(写真 図 1)は、円周 27km の地下トンネルに、最先端の超伝導磁石(写真：図 2)を並べて、4TeV³⁾のエネルギーまで加速した陽子同士を正面衝突させます。この時、陽子の速度は光速の 99.999997%になっています。この衝突で 8 TeV という高エネルギー状態を作り出し、宇宙誕生直後(10⁻¹²秒後)のビッグバンを再現することが出来ます。この様な高温(約 1 京度 10¹⁶K)の状態から、ヒッグス粒子や超対称性粒子⁴⁾などの未知の新粒子を作り出すことを目的としています。

LHC 加速器は、2009 年より本格運用がはじまりました。2010,2011 年は衝突エネルギー 7TeV で実験が行われ、2012 年から 8TeV に衝突エネルギーが増強されました。実験は順調に進み、積算ルミノシティ⁷⁾約 27 fb⁻¹ (インバース・フェムトバーン)⁸⁾のデータが収集されました。これは約 2000 兆回の陽子・陽子衝突に相当するものです。

LHC 加速器は、CERN 加盟国に日・米・露・カナダ・インドなどが協力して 16 年の歳月をかけて完成されました。日本は、資金面ばかりでなく、4 重極磁石の設計・製作、加速器全体の鍵となる、超伝導線材や、冷却システム(全体が液体ヘリウムで 1.9K にまで冷やされている)で大きな貢献をしました。

高エネルギー衝突で生成されるヒッグス粒子や超対称性粒子などを検出するためにアトラス実験⁵⁾(写真図 3)と CMS 実験⁶⁾の二つの国際共同実験が組織され切磋琢磨しています。アトラス実験には、38 ヶ国からの研究者約 3000 人が参加しており、日本からも東京大学や KEK を始めとする 16 の大学・研究機関から約 110 名が参加し、検出器の建設から物理研究まで大きな貢献をしてきました。

検出器建設では、ソレノイド超伝導磁石、半導体飛跡検出器、ミュオントリガー検出器、高速トリガーシステムを担当し、全体の 10%にあたる部分を建設しました。

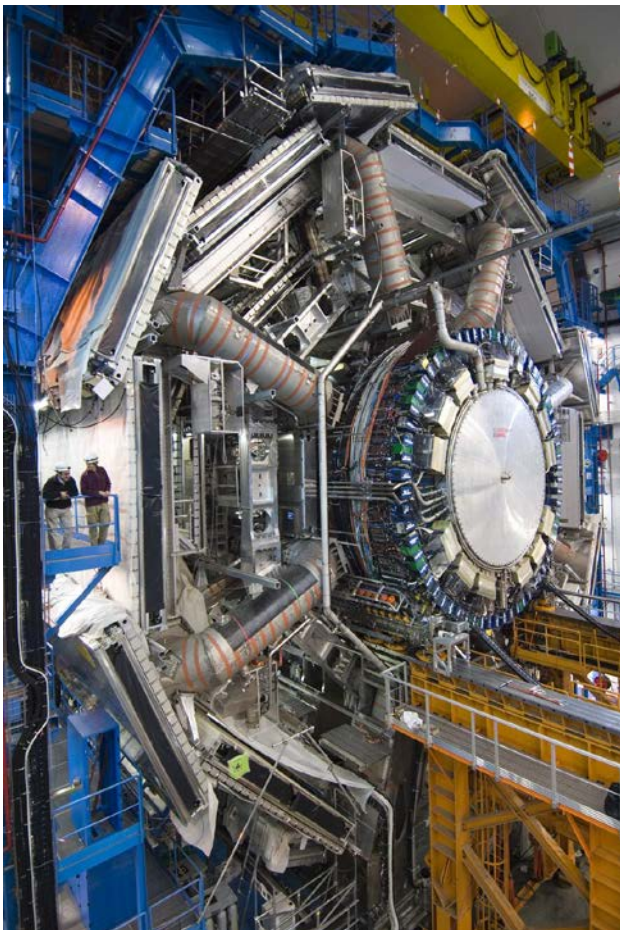
物理解析においても、ヒッグス探索では、今回の成果の鍵となった「ヒッグスが 2 つの光子に崩壊」「ヒッグスが 2 つの W 粒子に崩壊」する二つのチャンネルの物理解析で中心的な役割を果たしています。またアトラス日本グループが製作したミュオン検出器とそのデータの質の高さは、「ヒッグスが 2 つの Z 粒子に崩壊」「ヒッグスが 2 つの W 粒子に崩壊」時の物理解析で決定的な役割を果たしています。



(図 1 LHC 加速器:航空写真
Copyright CERN)



(図2 LHC加速器 Copyright CERN)



(図3 アトラス検出器
Copyright CERN)

6.2 LHC 加速器の現状と将来

2012年12月にLHCは実験を停止して、調整・修理を2年かけて行います。超伝導磁石を結ぶ銅製のバー（超伝導が破れた時に約1万アンペアの電流を逃がすため）の接触不良の修理を行います。2014年いっぱいまで修理が終了する予定です。

LHCは、2015年3月より衝突エネルギーを約2倍に増強し、14TeVの実験を再開する予定です。14TeVではより重い新しい素粒子の発見が可能になり、超対称性粒子などの発見が期待されています。

6.3 ヒッグス粒子の歴史、標準理論⁹⁾の歴史

ヒッグスの研究と超伝導研究は密接な関係があります。

1911年オンネスは、水銀の電気抵抗が4.2K（マイナス269度）でゼロになる現象、超伝導を発見しました。いまからほぼ100年前です。しかし、何故こんなことが起こるのかはなかなか解明できませんでした。1933年に、マイスナー効果が発見されます。これは、磁場が超伝導体の中に入れない現象です。これに大きなヒントがありました。実は超伝導体の中では、光が質量をもっている様に見えるため、入ることができないのです。1957年に超伝導の基礎となるBCS理論（バーティーン、クーパー、シュリーファー）が提案されました。電子と電子が引力で結びつき（クーパーペア）になることで、ボーズ・アインシュタイン凝縮がおこり、全部が同じ状態になって対称性が破れ、超伝導がおきています。

南部先生は、このBCS理論を見て興奮すると同時に困惑しました。このモデルでは素粒子的に考えるといろいろな問題を引き起こすからです。このモデルを研究することで南部先生は、「自発的対称性の破れ」に到達します(1960)。南部先生の凄いところは、超伝導材の中と言う特殊な世界で起きていることを、宇宙全体に適用したところです。自発的に対称性が破れて、特殊な状態に落ち着くことが自然に起きることを予言しました。ここで大きな問題が起こります。自発的に対称性がやぶれると、質量ゼロの粒子が出てくるはずですが、（これを南部ゴールドストーンボソンと言います）この例がパイ粒子です。しかし自然にはこれに対応する粒子がありません。

この問題を解決したのが、1964年 ブロウト、アンブレール、ヒッグスの3人です（物質の中で解明したのはアンダーソンで、アンダーソン・ヒッグス機構と呼ぶ人もいます） 実は特殊な場合（力を伝える素粒子：ゲージ場があるとき）、南部ゴールドストーンボソンはこれに吸収されてしまって観測されないことを示したものです。

1966年にヒッグスは、二つ目の論文を出しましたが、数学であって物理でないと言われて却下されました。そこで彼は、この方法と強い力を伝えるグルオンを使って「質量」の説明が出来るかもしれないと一文を付け加えました。この一文が、「質量」に言及したはじめてのものでこれがヒッグス機構と言われる由縁です。

1964年の段階では、特殊な場合が実際に何なのかは全く考察されていませんでした。これを実際のものへと考察を深めたのが、1968年、ワインバーグ・サラム・グラシヨウです。特殊な場合は、弱い力を媒介するゲージ粒子があればいいということを示しました。これが現在の「標準理論」の重要な一部をなしています。

初めはゲージ粒子など、誰も相手にしませんでした。1973年にCERNでニュートリノを泡箱にうつと、非常にまれに電子が蹴飛ばされることがあることが発見され（中性流）ました。1974年11月にはチャームクォークが発見されて、ゲージ理論・標準理論がにわかに注目を浴びるようになり、1979グルオン発見、1983 W/Z 粒子の発見で標準理論は今の地位を確立し、1994年トップクォーク発見、1998年タウニュートリノの発見でヒッグス粒子以外の標準モデル素粒子は全部発見された。また1989-2000年に稼働したLEPにより、素粒子は3世代しかない、ヒッグスは存在しそうでその質量は $160\text{GeV}/c^2$ より軽いことが分かった。こうして、標準理論の最後の未発見ピースである、ヒッグス粒子に注目が集まりました。

2012年7月4日にはLHCのアトラス実験、CMS実験で「ヒッグス粒子と思われる新粒子」が発見され大きな話題になりました。新しい新粒子が発見されたことは間違いありませんでしたが、まだその性質が分かっていないので「と思われる新粒子」になっていました。その後 LHCは更に実験をつづけてデータを2.5倍にして

- 1) スピン ゼロ であることを確定
- 2) パリティ（鏡に映して性質が変わるか？） 正
- 3) ゲージ粒子ばかりでなく、フェルミ粒子にも結合している

ことがわかり、2013年3月に質量 $126\text{GeV}/c^2$ ¹⁰⁾「ヒッグス粒子」であることがわかりました。

用語解説

1) 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。現在の加盟国はヨーロッパの20カ国（オーストリア、ベルギー、ブルガリア、チェコ、デンマーク、フィンランド、フランス、ドイツ、ギリシア、ハンガリー、イタリア、オランダ、ノルウェー、ポーランド、ポルトガル、スロバキア、スペイン、スウェーデン、スイス、イギリス）。ルーマニアは現在加盟準備国、イスラエルは加盟準備のためのアソシエート国。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。世界の素粒子物理学研究者の半数以上（約10000人）が施設を利用している。

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

2009年より運用を開始した大型の陽子・陽子衝突装置。現在の衝突エネルギーは世界最高の7 TeV(テラ電子ボルト)であり、ヒッグス粒子や超対称性粒子などを直接研究出来る唯一の施設である。2014年から衝突エネルギーを14 TeVにあげる予定。

3) TeV (テラ電子ボルト)

エネルギーあるいは質量(eV/c^2)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

4) 超対称性 [スーパーシンメトリー]

素粒子にはフェルミ粒子 (スピンが半整数) とボーズ粒子 (スピンが整数) の2種類が

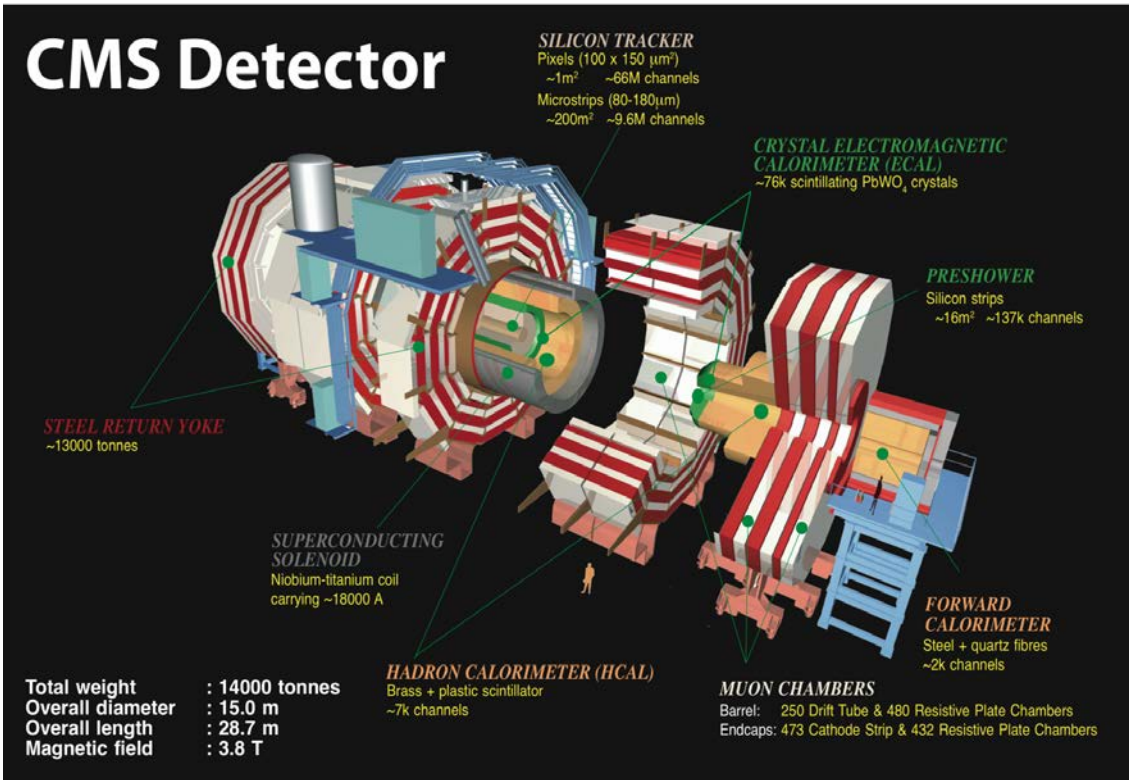
ある。超対称性とは、これら 2 種類の間に対称性で、すべてのフェルミ粒子（ボーズ粒子）には、性質がまったく同じでスピンのみ異なるボーズ粒子（フェルミ粒子）の存在を要請する。すなわち、通常の素粒子に対応して、スピンが異なるパートナー（超対称性粒子）が存在するものと仮定する。一見、人工的に見えるこの対称性は、「時空とは何か」を考えていくと自然に導き出すことが出来る性質である。超対称性理論は、超対称性を仮定した理論で、素粒子の標準理論を超える有力な理論の一つである。標準理論では無限大に発散して意味がなくなってしまう物質量を、超対称性粒子の導入によって防ぐことができる。また、超対称性理論は、今のところ、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。

5) アトラス(ATLAS)実験

A Toroidal LHC Apparatus の略。LHC を用いた二大実験の一つで、世界中の 38 か国、174 の大学・研究機関が参加する国際共同研究で、約 1000 人の大学院生を含む、約 3000 人の研究者からなる。日本からも東京大学や KEK を始めとする 16 の大学・研究機関から約 110 人が参加。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。

6) 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。40 か国の 172 の大学・研究所からの、約 3000 人の研究者、技術者、大学院生が参加している。日本の大学・研究所は参加していない。アトラス実験が大きなトロイド磁石を使った検出器を備えてミュオン検出に力を入れるのに対し、CMS はその名前 (Compact Muon Solenoid: コンパクトなミュオン検出器とソレノイド磁石を備えた実験) にあるように、ミュオン検出器を小さく抑える代わりに、光子を検出する測定器に高性能のものを使うなど、アトラス実験と CMS 実験は違った設計方針で作られています。総合的な新粒子検出の性能はほぼ同程度であり、よい競争相手となっています。



7) ルミノシティ (単位: $\text{cm}^{-2}\text{s}^{-1}$)

ビームとビームの衝突地点において、単位面積あたり毎秒何回ビーム粒子が交差したのかを表す指標で、衝突型加速器の要となるビームの衝突性能に相当。反応の起こりやすさとして面積を考える。イメージとしては、的の大きさ（断面積）が大きいとぶつかって反応しやすいのに対して、的の大きさが小さいと反応が起きにくい。素粒子の反応は起こりにくく、この面積が 10^{-36} cm^2 (pb:ピコバーン)程度と非常に小さいため、大きなルミノシティで実験を行う必要がある。

一方原子核である陽子自体同士の反応は、 10^{-25} cm^2 と素粒子の典型的な反応の10桁ほど大きい。このような大きなバックグラウンドの中なら「面白い素粒子反応」を見つけ出す難しさがある。干し草の山の中から針を探すような難しい研究である。

8) 1fb^{-1} (インバース・フェムトバーン)

ルミノシティの強さを表す単位。1 インバースフェムトバーンは、約100兆回の陽子・陽子反応に対応する。

9) 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、これらの間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。

10) GeV/c^2 (ギガ電子ボルト)

質量の単位で、水素原子の質量が約 $1 \text{ GeV}/c^2$