

記者会見資料 その1



東京大学 素粒子物理国際研究センター



KEK 高エネルギー加速器研究機構



アトラス日本グループ

「LHC実験の最新成果」

- 1 発表日時** 2011年12月13日(火) 21時00分から24時00分頃
(第1部) 今回の研究成果の説明
(第2部) 22時よりCERNでのセミナーと記者会見を中継しながら解説
- 2 注意事項** 報道の解禁: 2011年12月13日23時20分 予定
(CERNの発表時間にあわせて調整。
最新の解禁状況の情報は、以下に掲載いたします。
<http://www.icepp.jp/atlas-japan/PR20111213/>)
- 3 発表場所** 東京大学理学部1号館10階 素粒子物理国際研究センター会議室
- 4 出席者**
アトラス日本グループ^(注)
浅井 祥仁 (東京大学大学院 理学系研究科 准教授)
海野 義信 (高エネルギー加速器研究機構 素粒子原子核研究所 准教授)
川越 清以 (九州大学大学院 理学研究院 教授^(注))
久世 正弘 (東京工業大学大学院 理工学研究科 准教授)
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)
坂本 宏 (東京大学 素粒子物理国際研究センター 教授)
竹下 徹 (信州大学 理学部 教授)
戸本 誠 (名古屋大学大学院 理学研究科 准教授)
花垣 和則 (大阪大学大学院 理学研究科 准教授)
原 和彦 (筑波大学 数理物質系 准教授)
寄田 浩平 (早稲田大学 理工学術院 准教授)
広報担当
森田 洋平 (高エネルギー加速器研究機構 広報室長)
横山 広美 (東京大学大学院 理学系研究科 准教授 科学コミュニケーション)

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、東京工業大学、首都大学東京、早稲田大学、信州大学、名古屋大学、京都大学、京都教育大学、大阪大学、神戸大学、岡山大学、広島工業大学、長崎総合科学大学。九州大学は、加盟申請中。

5 発表内容

- 5.1 CERN¹⁾公式プレスリリースの和訳と英文 (別紙)
- 5.2 LHC 加速器とアトラス実験
- 5.3 ヒッグス信号の見え方概論と確率の説明・LEE
- 5.4 ヒッグス粒子の背景
- 5.5 ヒッグス粒子の学術的なインパクト
- 5.6 一般講演会 「ヒッグス粒子の謎」 2012年3月31日 安田講堂 お知らせ
- 5.7 LHC アトラス実験のヒッグス研究成果 (別紙)
- 5.8 LHC CMS 実験でのヒッグス研究成果 (別紙)

5.2 LHC 加速器とアトラス実験

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(磁場強度 8.3 テスラ(現在は半分) 長さ 15m 写真: 図 2)を 1232 本並べて、3.5TeV³⁾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 99.999996%になっています。この衝突で 7TeV 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 10^{16} K)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、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、2009 年より本格運用がはじまりました。LHC の衝突エネルギーは 2014 年より 2 倍の 14TeV に引き上げられ、より重い未知の素粒子の発見に大きな期待が寄せられています。

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⁴⁾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 15 の大学・研究機関から約 100 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。特に、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。

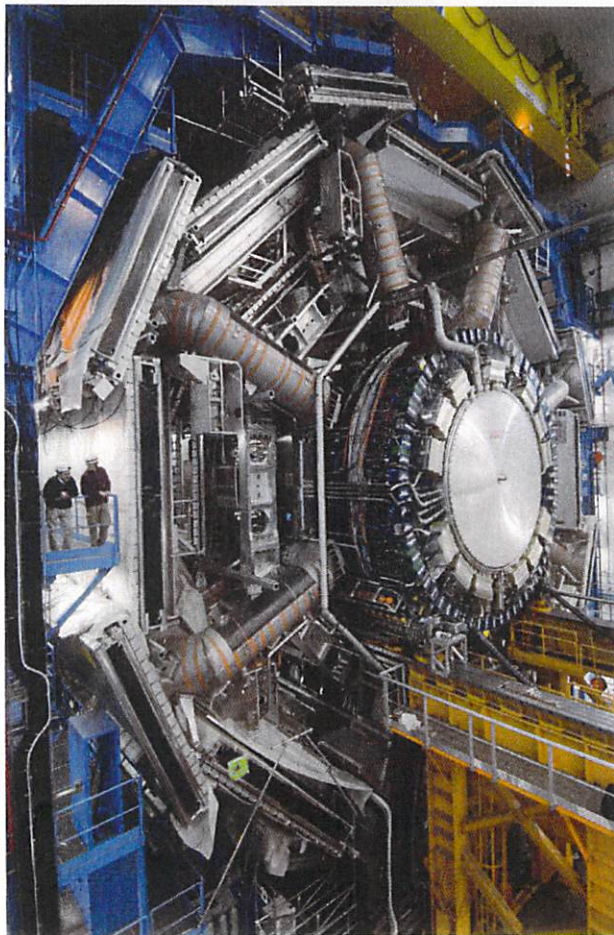
2011 年に LHC は、順調に稼働し目標にしていた積算ルミノシティ⁷⁾ 1fb^{-1} (インバース・フェムトバーン)⁸⁾ を大きく超えて、それぞれ約 5fb^{-1} のデータを収集出来ました。今回の成果は、このデータを解析して得られたものです。陽子は、素粒子ではなく、クォークやグルオン(図 5)などの素粒子で構成されている。素粒子反応の起こりやすさは小さいので高いルミノシティが不可欠です。



(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)

5.3 ヒッグス信号の見え方概論と確率の説明・LEE

ヒッグスは直接観測されるのではなく、生成されたヒッグス粒子が壊れ（図7参照）、そこから放出された粒子がアトラスやCMS実験で観測されます。この放出された粒子を選んできて、エネルギーや運動量を足し揚げ、アインシュタインの有名な $m^2=E^2-p^2$ からもとめた m (質量)の分布をつくると、ヒッグス粒子が存在した場合は、ヒッグス粒子の質量の場所に多数信号が観測されます。

しかし、ヒッグスを探す上でバックグラウンドがあります。これは、ヒッグス粒子と関係ない「標準モデルの素粒子反応」から粒子が放出されるものです。ただ、これらのバックグラウンド反応は、 $m^2=E^2-p^2$ からもとめた m (質量)は図4に示す様に一カ所に集まらずなだらかな分布になります。この上にヒッグスの信号が重なって観測されます。

ここで問題になるのは、素粒子の反応は全て確率反応であり、観測されるバックグラウンドの数も統計的に変動することです。図4の赤の部分が、オレンジのバックグラウンドがたまたま多めに観測されたのか？それともヒッグスの信号が本当に観測されたのか判断しなければなりません。

バックグラウンドの数のふらつき（標準偏差）を σ とします。バックグラウンドの数が $+1\sigma$ のふらつきに収まる確率は68%になります。

「発見」というのは、赤の部分の数が 5σ 以上になった時をいいます。本当はヒッグスの信号がなくて、オレンジのバックグラウンドが「たまたま」ふらついて信号の様に見えるてしまうまちがいの確率が100万分の1(100万回やって起きる回数は1回以下)です。こうなるとはじめて「発見」になります。

その前段階が「兆候」で赤の部分の数が 3σ 以上になった時をいいます。このときは、オレンジのバックグラウンドが「たまたま」ふらついて信号の様に見えるてしまう確率(まちがい)が0.13%(1000回に1回です)です。一般生活では考えられないほど低い確率であるが、非常に多数の素粒子現象を観測しているため、「たまたま」ふらついた可能性を完全に排除できません。

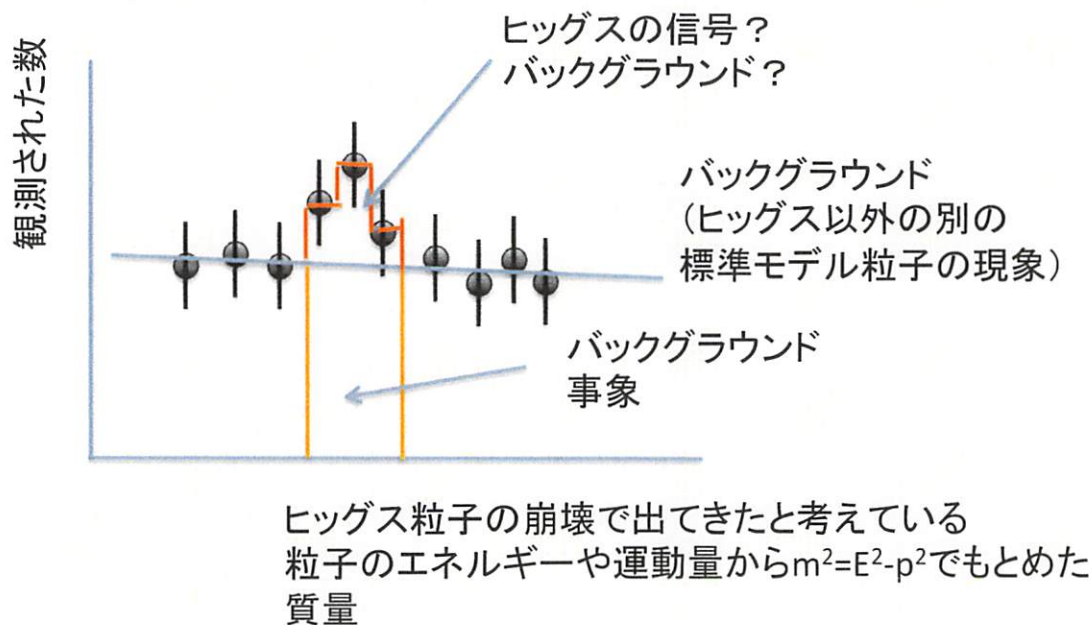


図4 ヒッグス信号の見え方模式図

LEE(Looking Elsewhere Effect) 「どこでも効果」について：

例として誕生日を考えます。1年365日生まれる確率は一定だとします。二人の誕生日がたまたま1月1日で一致する確率は、 $(1/365)*(1/365) \sim 10^{-6}$ (100万回に1回しかおきない) となり、 5σ 近い非常に希なことになります。しかし、どこでもいいから一致する確率は $365*(1/365)*(1/365) = 1/365 \sim 0.3\%$ (1000回に3回) と結構大きな値になります。どの日でもいいが、たまたま一致して、この一致した日が1月1日の可能性もあります。このようにどこでも良いが、「たまたま」一致する効果を LEE といいます。(余談ですが、30人にクラスで誕生日が一致する確率は $1 - {}_{365}C_{30} / (365)^{30} > 50\%$ おおきくなります)

例え話から、アトラスのヒッグス粒子の結果に戻すと、「 $126\text{GeV}/c^2$ 」のヒッグスがある！」と考えると、この126は意味のある数字で、この $m=126\text{GeV}/c^2$ の位置で「たまたま」いろいろなバックグラウンドがふらついて、信号の様に間違えてしまう確率は、 0.02% (3.5σ) となります。しかし、どこでも効果を考えて、どこで一致してもよかったのですが、たまたま一致した場所が $126\text{GeV}/c^2$ だと考えると、バックグラウンドが信号の様にまちがって見えてしまう確率は 1.1% (2.3σ) になってしまいます。100回に1回は起きる頻度になります。もう少しデータをためて注意深く見守っていく必要があるわけですね。

いろんな探索モードでアトラス実験も、CMS実験も共にヒッグスを探しており、気になる構造が“同じようなところ”に見えてきている状態であり、我々は期待をもってこれらの構造を見ているのは事実です。しかし、科学的には、まだ発見したとも兆候があったともいえない状況であり、来年より多くのデータが取れ、これが本当のシグナルかがはっきりすることが出来ます。

5.4 ヒッグス粒子の背景

「質量」と言うのは、光の速度からどれだけ遅い速度で運動するかに関係する量である。質量のある素粒子は、光より遅く運動し、重くなればなるほど遅くなる。「重さ」とは、素粒子の感じる重力の強さで、厳密には「質量」とは異なるが、実験的に高い精度でこの二つは一致している（この一致を「(弱い) 等価原理」⁹⁾と言う)。

光とグルオン以外の素粒子は、全て質量がある。標準モデル¹⁰⁾の登場粒子を図5にまとめる。質量が、水素原子の約180倍の重い素粒子(トップ)もいれば、水素原子の約100兆分の1以下の軽い素粒子(ニュートリノ)いる。そして光の様に質量のない素粒子もいる。この違いを説明し、素粒子に質量をあたえる役割をするのが「ヒッグス場」であり、特別の役割を果たしているので「神の素粒子」とも言われている。

真空は、実は空っぽではなくて「ヒッグス場」に満たされていると考えられている。素粒子がその中を運動する時、ヒッグス場と反応してまっすぐ進めなくなり、結果として速度が遅くなり、質量が生じる。水泳で水の抵抗で速度が遅くなるイメージ。ヒッグス場と強く反応する粒子(トップクォークやW/Zなどのゲージ粒子)は、遅くなり重くなる、一方、ニュートリノなどはあまり反応せず、質量は軽い。光子やグルオンは全く反応せず、光速のまま進む。(図6)

LHCは高いエネルギーの素粒子同士を衝突・消滅させ、真空にエネルギーだけが残った状態を作り出し、エネルギーが残った真空から「ヒッグス粒子」が生成される。ヒッグス粒子は、重い素粒子と強く結合するため、瞬時に崩壊する(図7)。崩壊で出てきた粒子を探し出し、集めることでヒッグス粒子が存在していたことを確認する。(光子は質量がないので直接ヒッグス粒子に結合しない。しかし量子力学では、不確定性原理の許す短い時間で、仮想の粒子が存在することが許されるので、重いトップクォークやW粒子が短い時間だけ現れて消える。それらの粒子から光子が放出されるのでヒッグスが2つの光子に崩壊することが出来る。)

「ヒッグス場」と「ヒッグス粒子」の違い：真空に潜んでいる状態が「ヒッグス場」で粒子として取り出したものが「ヒッグス粒子」で厳密には異なりますが、簡単にするため「ヒッグス粒子」で統一しても構わないと思います。

標準モデルに登場する素粒子

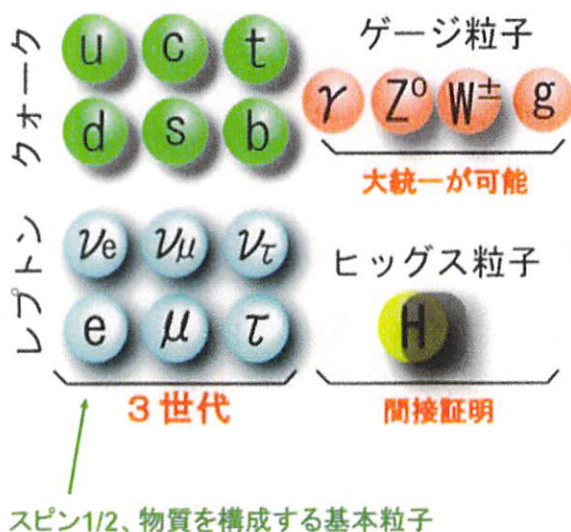


図5 標準モデルの素粒子(影のない粒子は質量がない)

物質を形づくっているのがクォークとレプトン(スピン1/2をもっている)である。一方、力を伝達する粒子がゲージ粒子であり、光子(γ :電磁気力を伝える)、Z/Wボソン(弱い力を伝える)、グルオン(g :強い力を伝える)、これらのゲージ粒子はスピン1を持っている。これらに質量を与えると考えられているのがスピンゼロのヒッグス粒子である。まだ確実な発見には至っていない

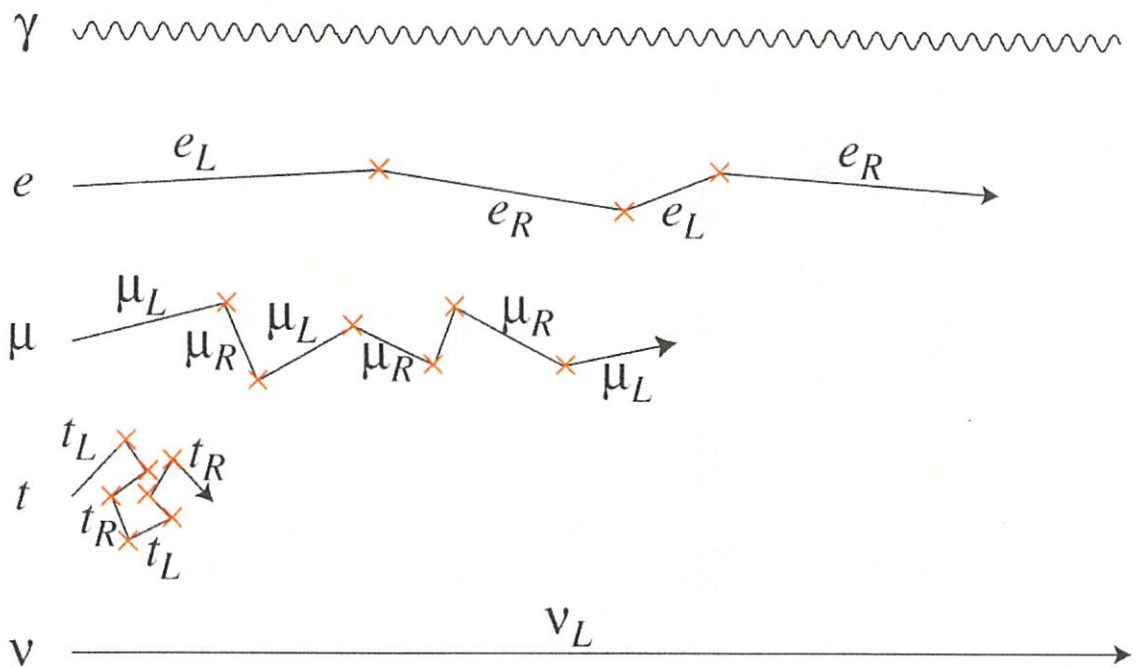


図6 ヒッグスと素粒子の反応

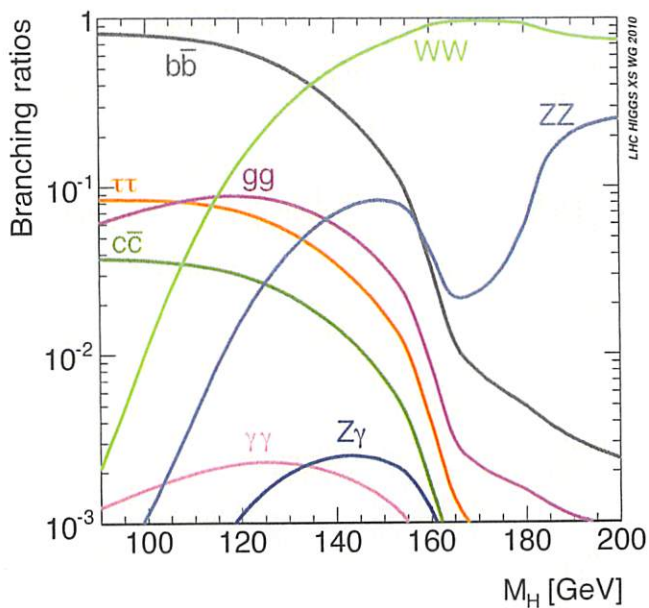
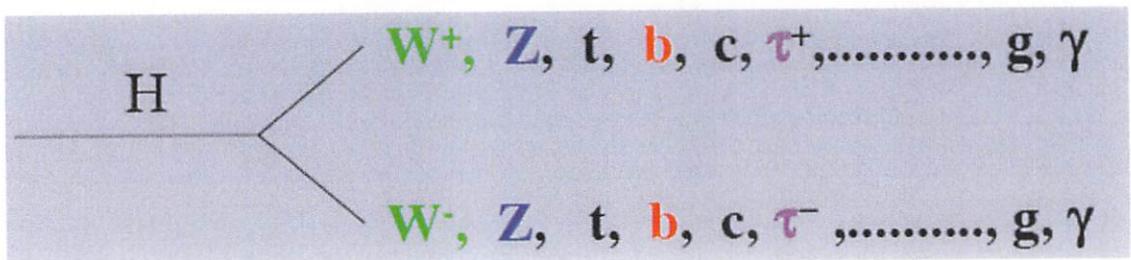


図7 ヒッグスの崩壊の様子
 横軸はヒッグスの質量で縦軸が崩壊する割合。ヒッグス粒子の質量が $125\text{GeV}/c^2$ 付近だと、 bb , WW , gg , $\tau\tau$, cc , ZZ , $\gamma\gamma$ の順に崩壊する割合が高い。バックグラウンドとの兼ね合いで WW , ZZ , $\gamma\gamma$, $\tau\tau$, bb の5つが有力である。(5.7, 5.8章参考)



5.5 ヒッグス粒子の学術的なインパクト

まだ発見や確実な証拠を掴んだわけではありません。もっとデータが必要で2012年の実験が重要な役割をはたします。データが増えてヒッグス粒子の確実な証拠を掴んだ場合、非常に大きな意味を持ちます。

(1) 標準モデル(図5)の全ての素粒子が揃い、質量起源の解明、「真空」が空ではなくて、ヒッグス場と言う特別な場に満たされていることを示す。「真空」(まことの空と書きますが)の新しい概念を打ち立てる。図5をみると

A: 物質を構成する素粒子:(クォーク、レプトン)

B: 力を伝える素粒子:(γ , Z, W, g)の2極でなく

C: 従来「ただの入れ物」だと考えられていた「真空」が大きな意味(ヒッグス)をもち、上の二種類の粒子達に質量を与えていたことを示す。ヒッグスが「神の素粒子」と呼ばれているのは、他の素粒子と違い、普遍的に存在し(真空に潜み)、素粒子達(自分自身もふくめて)に質量を与える重要な役割を果たしているからです。

(2) ビックバン直後は、光とそれから生成された質量のない素粒子だけが存在していた。この熱い宇宙が膨張し、 10^{-10} 秒後に温度が約千兆度にまで冷め、大きな変化が起こる。2008年ノーベル物理学賞受賞 南部陽一郎先生が提唱した「自発的に対称性がやぶれた」真空への変化(相転移)です(図8)。温度が高いときは、ヒッグス場は存在していますが、+にも-にも存在している為平均をとるとゼロになります(高い対称性の状態にあった)。この為ヒッグス場と衝突しても平均的に効果がなくなり、素粒子は光速のまま運動していました。ところが温度が約千兆度より下がって(0度以下で水が氷に相転移するように)、ヒッグス場も相転移がおこります。ヒッグス場の状態が偏ってしまい(図8のワインボトルの底の部分に落ちてしまう)、平均を取るとゼロでなくなってしまう状態(対称性が破れた)に落ちてしまうと、ヒッグス場との反応が相殺されずに残り質量が生じます。単調だった世界に、違い[多様性]が生まれる機構の解明につながります。(図9)

(3) ヒッグス粒子の質量がなぜ115-130GeVと軽いのか?という深刻な問題に直面する。量子力学的な効果でヒッグス粒子の質量は不安定でもっと重くなるはずで、標準モデルではこの問題は深刻で解決できません。この問題を解決するために、標準理論を超えた新しい素粒子現象がLHCで到達可能な領域(数TeV以下)に必要となります。この発見が重要となってきます。

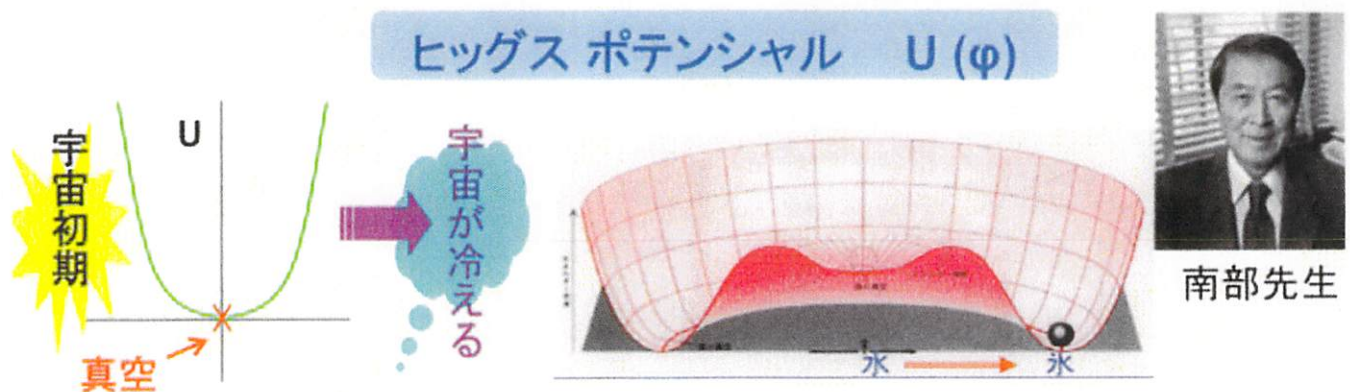


図8 自発的対称性の破れとヒッグス場の相転移

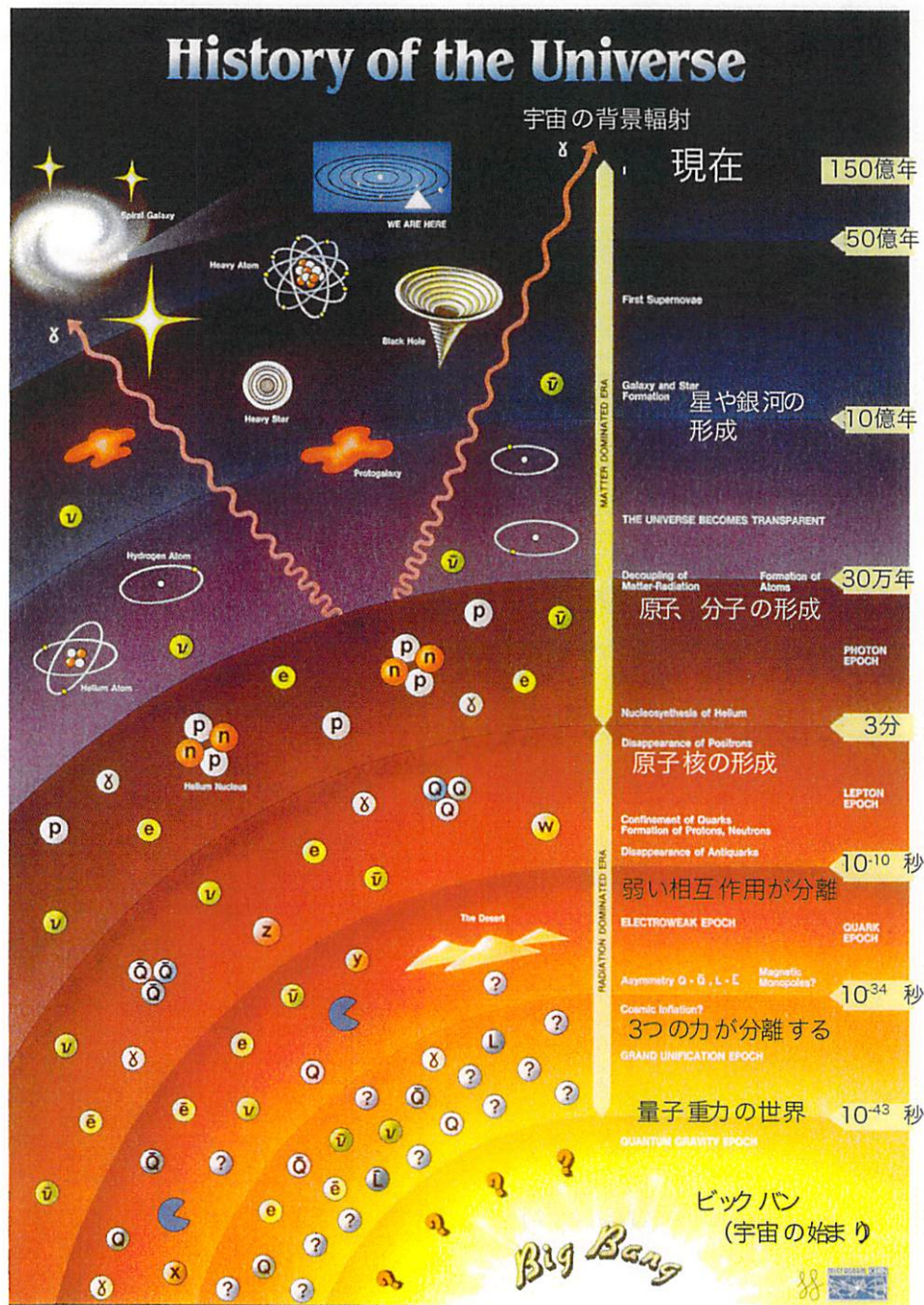


図9 多様性が生じていく宇宙の過程

10⁻¹⁰ 秒 ヒッグス場が相転移して、素粒子がさまざまな質量をもち、多様な世界が誕生した。質量のない世界では、すべての素粒子は光速で運動し、止まることもできない。

5.6 一般講演会 「ヒッグス粒子の謎」のお知らせ

日時 2012年3月31日(土曜日)

12:00 開場

13:30 講演 開始

「宇宙とヒッグス粒子」(講師 未定)

「LHCでのヒッグス粒子研究の最新成果」(東京大学理学系研究科 浅井祥仁)

質疑応答

15:30 終了予定

場所 東京大学 安田講堂

定員 900名(先着順)

無料

共催:

新学術領域「先端加速器 LHC が切り拓くテラスケールの素粒子物理学」

東京大学・素粒子物理国際研究センター、理学系研究科

KEK・高エネルギー加速器研究機構

問い合わせ先

東京大学・素粒子物理研究センター

電話 03-3815-8384 fax 03-3814-8806

ホームページ <http://www.icepp.s.u-tokyo.ac.jp/>

講演会概要

世界最高エネルギーの素粒子実験LHCが、現在スイスのジュネーブで稼働している。この実験で期待されている大きな成果のひとつに、「ヒッグス粒子」の発見がある。宇宙のビッグバン直後は、全ての素粒子は、光と同じ速度で運動し、質量もない、綺麗な(対称性の高い)状態であったと考えられている。宇宙が膨張し温度が低くなると、南部先生(2008年ノーベル物理学賞)の予言した機構(自発的に対称性の破れ)により、ヒッグス粒子が氷の様に凝縮が起こり、特別な真空となった。素粒子はこの凝縮したヒッグスにぶつかり、質量が生じたと考えられている。様々な質量をもった素粒子による「宇宙の多様性」もこのヒッグス粒子が源である。

LHCでは、真空中に凝縮したヒッグスを直接とりだして観測することが可能であり、まもなくこの大きな成果を得られる。

質量誕生の謎にせまる最新成果を一般(中高生以上)の方にわかりやすく伝える目的の講演会です。

用語解説

1) 欧州素粒子原子核研究所(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 14TeV 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 種類の間の対称性で、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、スピンの異なるパートナー (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。

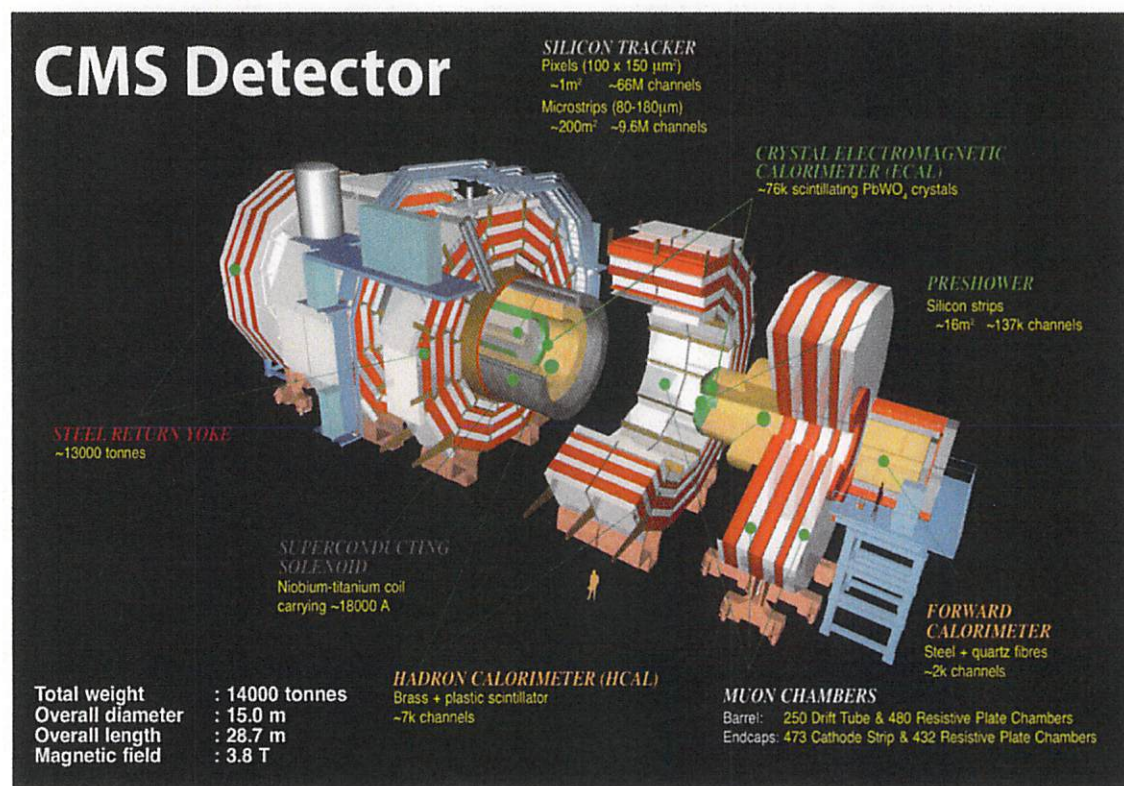
5) アトラス(ATLAS)実験

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 15 の大学・研究機関から約 100 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 程度 (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)

1 インバース・フェムトバーンとは 上で述べた典型的な素粒子の反応の大きさである。1pbの反応が1000回起きるルミノシティに対応する。上に述べた陽子自体同士の反応は、このとき、100兆回起きている。

9) 等価原理

アインシュタインの一般相対論の基礎となった仮定

「(強い)等価原理」は加速度による力と重力場が区別が付かないという区別して、「重力質量」と「慣性質量」が同じと言う実験事実

10) 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。

11) 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 $1 \text{ GeV}/c^2$