

ビッグバン宇宙の極初期を 高エネルギー粒子加速器で探る

— 質量起源のヒッグス粒子を探して —

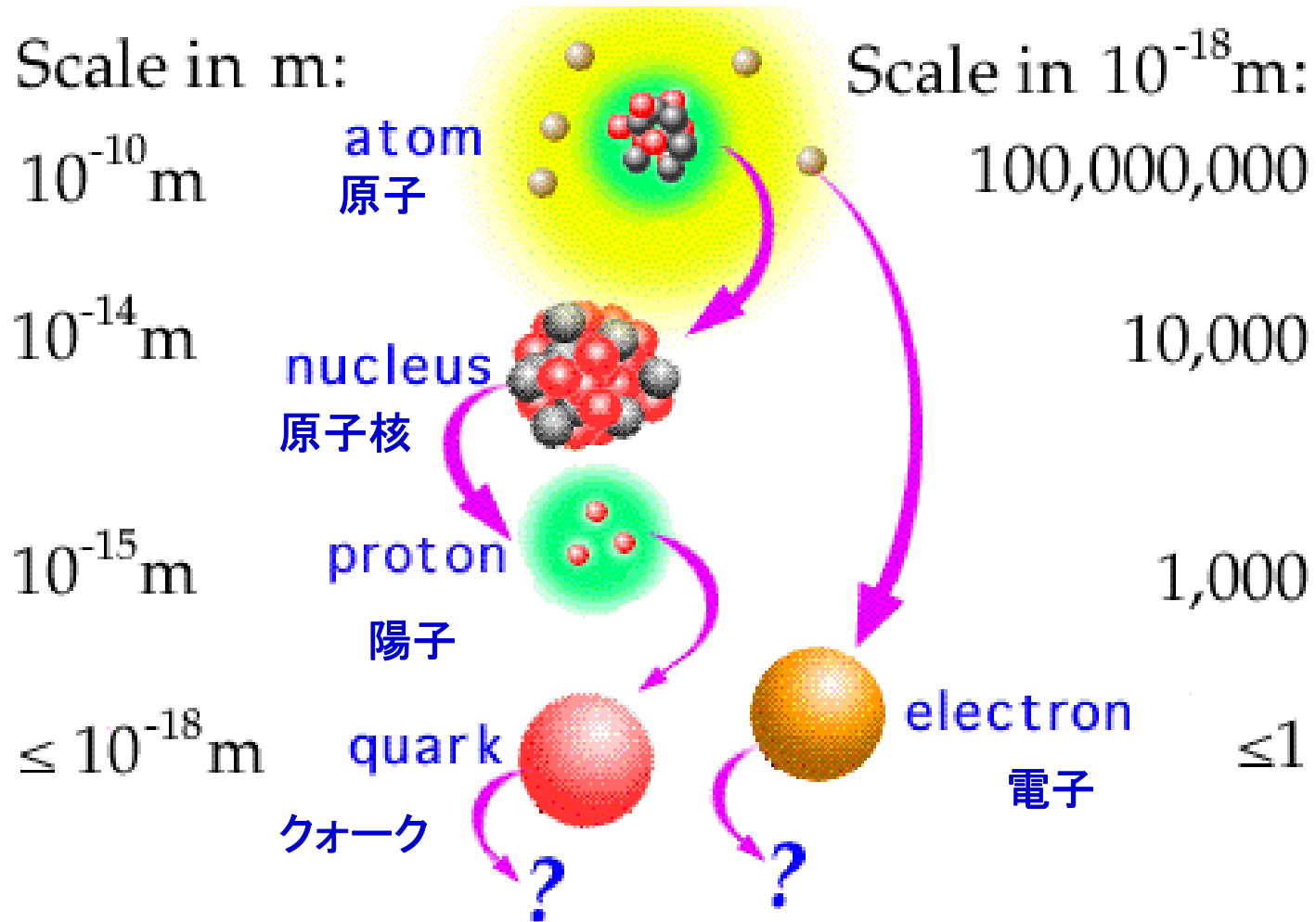
金 信弘

筑波大学大学院数理物質科学研究科物理学専攻
理工学群物理学類

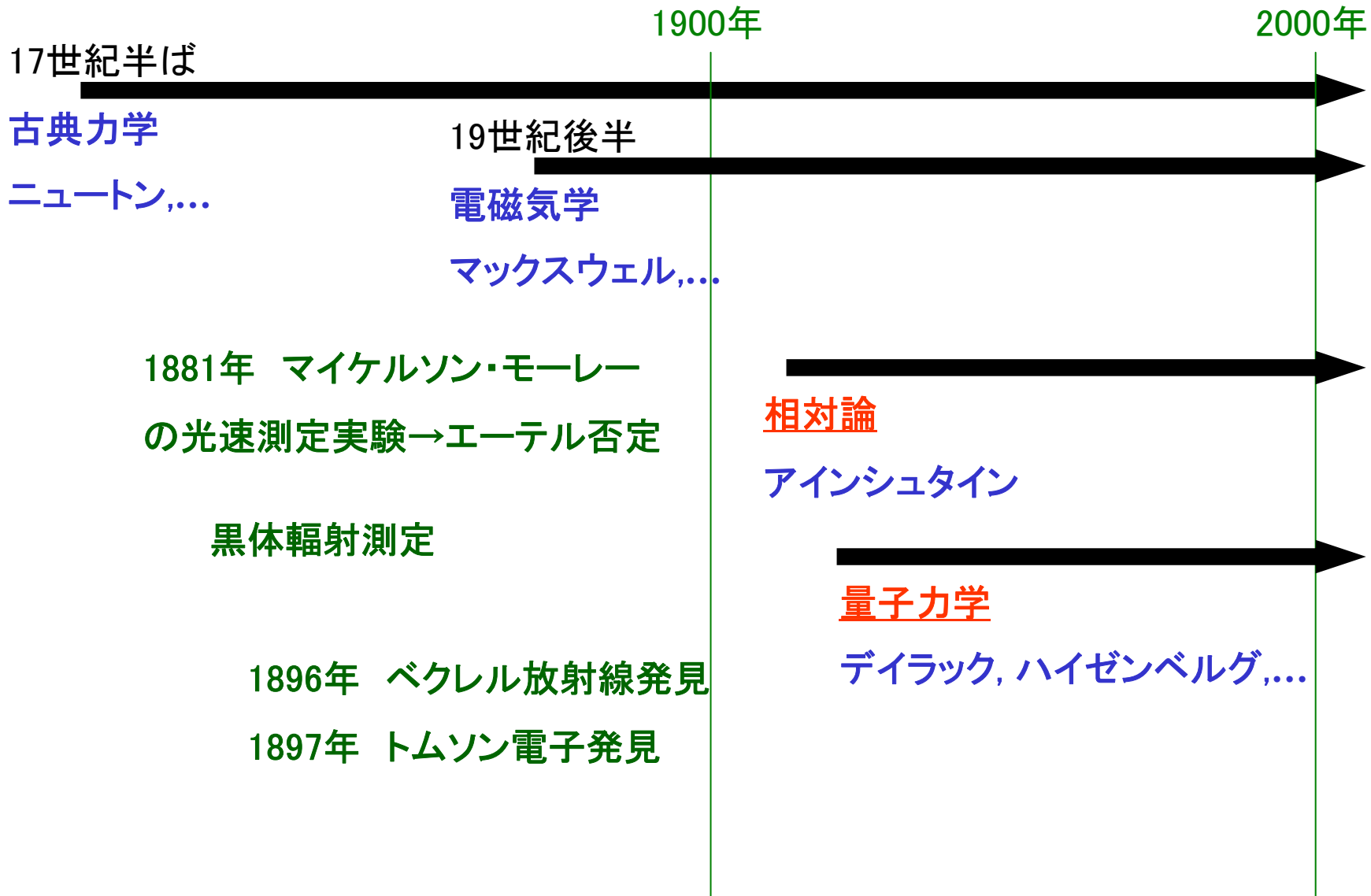
科学講演 於 静岡県立沼津東高等学校
2009年11月7日

- はじめに
- 自発的対称性の破れと質量の起源
- 高エネルギー陽子・反陽子衝突実験による質量起源のヒッグス粒子探索
- 今後の展望

素粒子とは？



物理学発展の歴史



量子力学とは？

古典力学

$$F = ma \quad : \quad \text{ニュートンの運動方程式}$$

力 = 質量 × 加速度

: 力が加わらなければ、物体は静止あるいは等速直線運動を続ける。

: 物体の運動は力と初期状態が決まれば、決まる。

量子力学(非常に小さなところでの運動を正しく記述)

$$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x,t) = H\Psi(x,t) \quad : \quad \text{シュレディンガー波動方程式}$$

$\Psi(x,t)$: 波動関数, $\hbar = \frac{h}{2\pi}$ h : プランク定数,

H : ハミルトニアン (全力学的エネルギー), $i^2 = -1$ i : 虚数単位

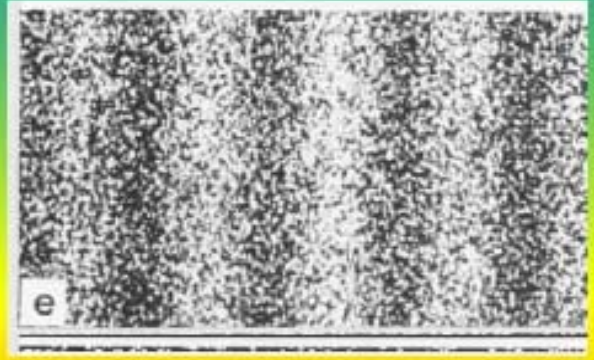
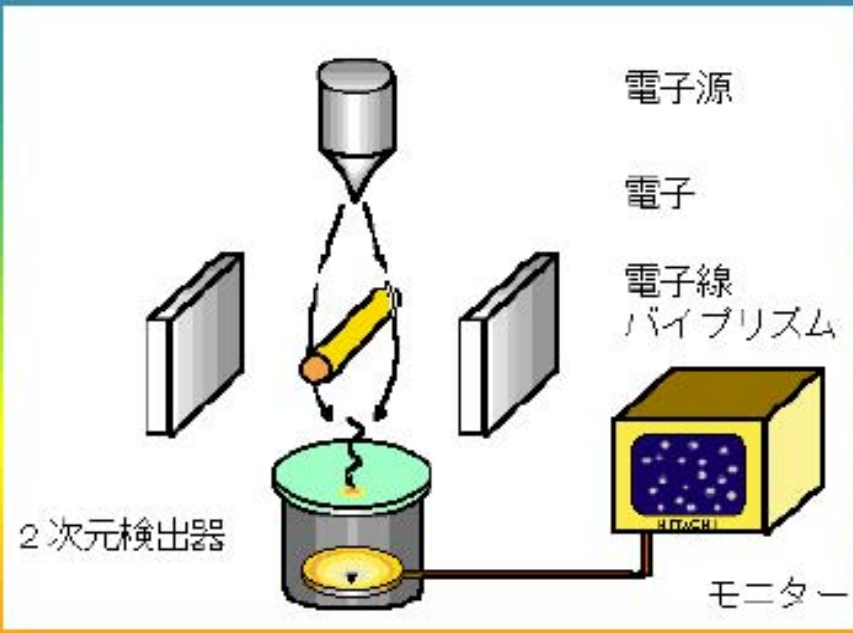
: 粒子の運動は波動関数によって確率的に決まる。すなわち、粒子の運動は力と初期状態が決まっても、一意には決まらない。 **粒子=波動**

: 不確定性原理 $\Delta p \Delta x \geq \hbar / 2$ に従い、運動量が完全に決まれば、位置が決まらず、位置が完全に決まれば、運動量が決まらない。

電子の二重スリットによる干渉実験

(1920年代に量子力学が誕生した頃は「思考実験」でしかなかったことを実現！)

日立製作所 基礎研究所
<http://www.englink21.com/i-eng/column/>

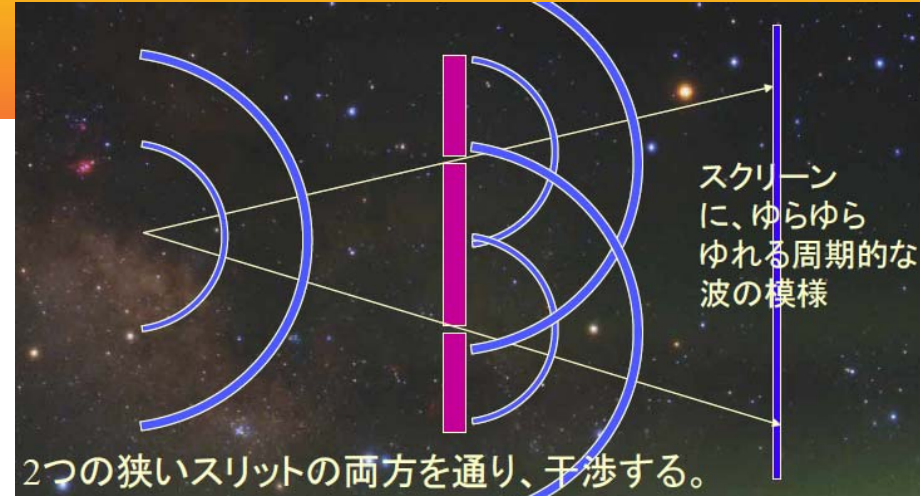


Copyright (C) Hitachi Ltd.

Copyright (C) Hitachi Ltd.

粒子 = 波動

電子も波であり、光や水の波のように干渉を起こす。



相対論とは？

古典力学

:ガリレイの相対性原理「お互いに等速度で運動しているすべての慣性系において、ニュートンの運動法則は、まったく同じ形で表される。」

慣性系間の座標変換(ガリレイ変換)は、三次元空間を変換するだけで、時間を変えない。
 $t \rightarrow t' = t$

特殊相対論(非常に高速なところでの運動を正しく記述)

:光速度不変の原理「真空中の光の速さは、光源の運動状態に影響されない一定値 c である。」

:特殊相対性原理「お互いに等速度で運動しているすべての慣性系において、すべての基本的物理法則(力学、電磁気学)は、まったく同じ形で表される。」

以上の二つの原理から、慣性系間の座標変換(ローレンツ変換)は、時間と空間が互いに混ざり合って変換する。三次元空間→四次元時空。

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{d}{dt}(mv) \quad : \quad \text{相対論的運動方程式}$$

$$t \rightarrow t' = \frac{t - vx/c^2}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}}$$

ただし、 p は運動量、 v は速度である。

エネルギーと質量は等価

エネルギーと質量(慣性質量)は同じものである。

$$E = mc^2 \quad : \text{アインシュタインの方程式}$$

静止質量 m_0 を用いると

$$E = \sqrt{m_0^2 c^4 + p^2 c^2}$$

慣性質量 m と静止質量 m_0 との間には次の関係が成り立つ。

$$m = \frac{m_0}{\sqrt{1 - \frac{v^2}{c^2}}} \quad (m_0 \neq 0 \text{ の場合}), \quad m = \frac{p}{c} \quad (m_0 = 0 \text{ の場合})$$

素粒子物理学の歴史(1)

〜BC4c.「物質はすべて均質で不可分のA-TOM[原子]からできている。」
古代ギリシャ自然哲学者デモクリトス

19〜20c初め 物質の構成要素である原子の発見。

1900

1897年: 電子の発見(J.J.Thomson)

1905年: 特殊相対論(A.Einstein)
前期量子論(M.Planck, N.Bohr)

1911年: 原子の構造 = 原子核 + 電子(E.Rutherford)

1913年: 一般相対論(A.Einstein)

1913年: 陽子の発見(E.Rutherford)

量子力学(W.Heisenberg, E.Schrodinger, P.Dirac)

1932年: 中性子の発見(J.Chadwick)

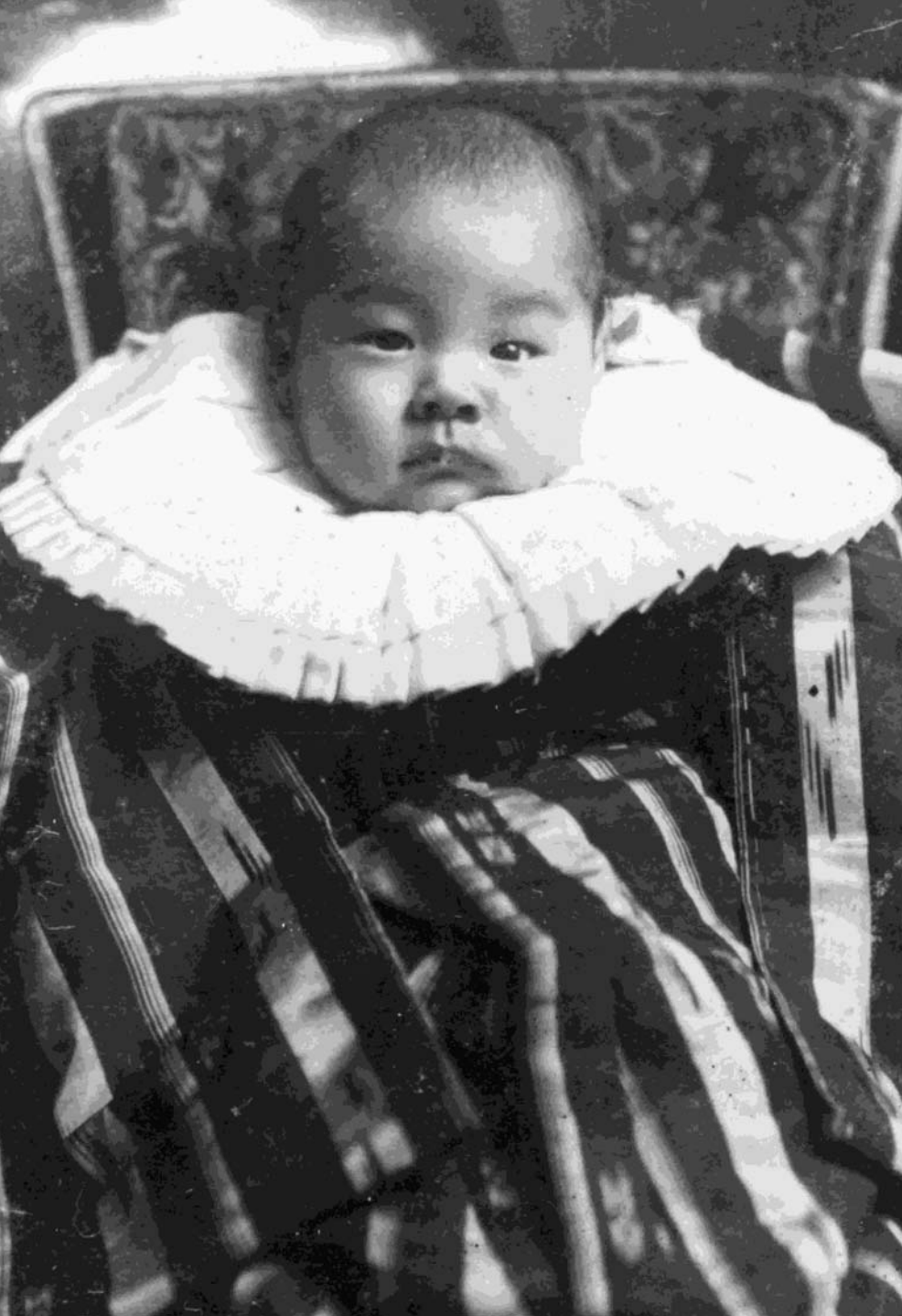
1933年: 陽電子の発見(C.Anderson)

1935年: 中間子論(湯川秀樹)

1937年: μ 粒子の発見(C.Anderson)

1950

1948年: 量子電磁力学QED(くりこみ理論)
(朝永振一郎, R.Feynman, J.Schwinger)



朝永振一郎

(ともなが しんいちろう)



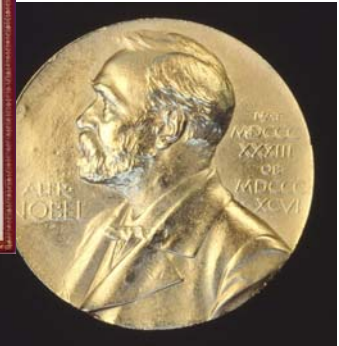
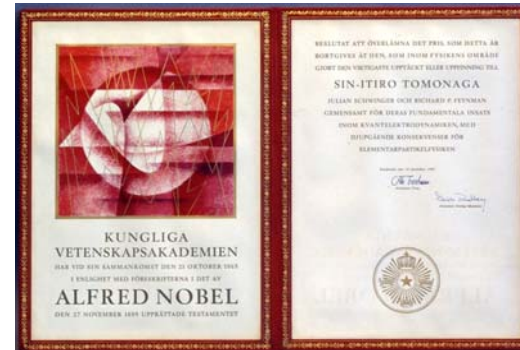
1906年3月31日

東京小石川生まれ

1965年 ノーベル物理学賞

素粒子物理学

(湯川秀樹に続き、日本で2番目)



1941年～ 東京文理科大学
(現:筑波大学)教授

1956-1962年 東京教育大学
(現:筑波大学)学長

日本のノーベル物理学賞

1949 湯川秀樹

核力の研究と中間子の予言

1965 朝永振一郎

量子電気力学

1973 江崎玲於奈

半導体のトンネル効果

2002 小柴昌俊

天体物理学と宇宙ニュートリノ

2008 南部陽一郎

自発的対称性の破れ

益川敏英

小林誠

粒子反粒子対称性の破れの起源



ふしぎだと思ふこと

これが科学の芽です

よく観察してたしかめ

そして考へること

これが科学の茎です

そして最後になぞがとける

これが科学の花です

朝永振一郎

素粒子物理学の歴史(2)

1950

20c半ば: 1947年の π 中間子の発見を皮切りに多くのハドロン(中間子、バリオン)発見

1956年: ν_e の発見(F.Reines)

1956年: 反陽子の発見(O.Chamberlain, E.Segre)

1960

1956年: パリティ保存則の破れ(T.D.Lee, C.N.Yan)

1961年: 自発的対称性の破れ(南部)

1962年: ν_μ の発見(L.Lederman, M.Schwartz, J.Steinberger)

1964年: クォーク模型(M.Gell-Mann, G.Zweig) SU(3)3重項の u, d, sクォーク

1964年: CP保存則の破れの発見(J.Cronin, V.Fitch)

1967年: 電弱統一理論

(S.Weinberg, S.Glashow, A.Salam)+QCD = **素粒子標準理論(1973年)**

1969年: パートン模型(R.Feynman)

1970

1969年: 電子陽子深非弾性散乱 = パートン模型で説明 (J.Friedman, H.Kendall, R.Taylor)

1971年: Yang-Mills 場の理論はくりこみ可能 (G.'t Hooft)

1973年: クォーク3世代間の小林益川混合行列(小林、益川)

1974年: $J/\psi(c\bar{c})$ の発見 = c クォークの発見 (S.Ting, B.Richter)

1976年: τ の発見(M.Peri)

1976年: $\bar{\nu}_\mu e \rightarrow \bar{\nu}_\mu e$ の発見(Gargamelle Group)

1980

1977年: $Y(b\bar{b})$ の発見 = b クォークの発見(L.Lederman)

1980年: グルオンジェットの発見(at PETRA)

素粒子と素粒子間の力(素粒子標準理論)

物質を構成する粒子(フェルミオン)

クォーク

アップ(0.002)	チャーム(1.3)	トップ(175)	電荷 2/3
ダウン(0.005)	ストレンジ(0.14)	ボトム(4.2)	- 1/3

レプトン

電子(0.0005)	ミュー粒子(0.106)	タウレプトン(1.8)	- 1
電子ニュートリノ ν_e	ミューニュートリノ ν_μ	タウニュートリノ ν_τ	0

力を伝える粒子(ゲージボソン)

()内の数字はGeVの
単位で書かれた質量。
1GeV=10⁹電子ボルト

強い力

グルオン(0)

電磁気力

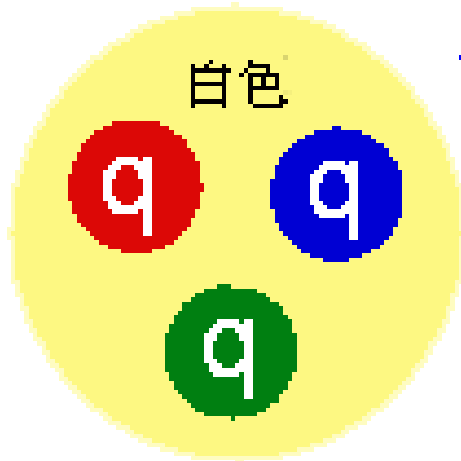
光子(0)

弱い力

W粒子(80)

Z粒子(91)

ハドロン

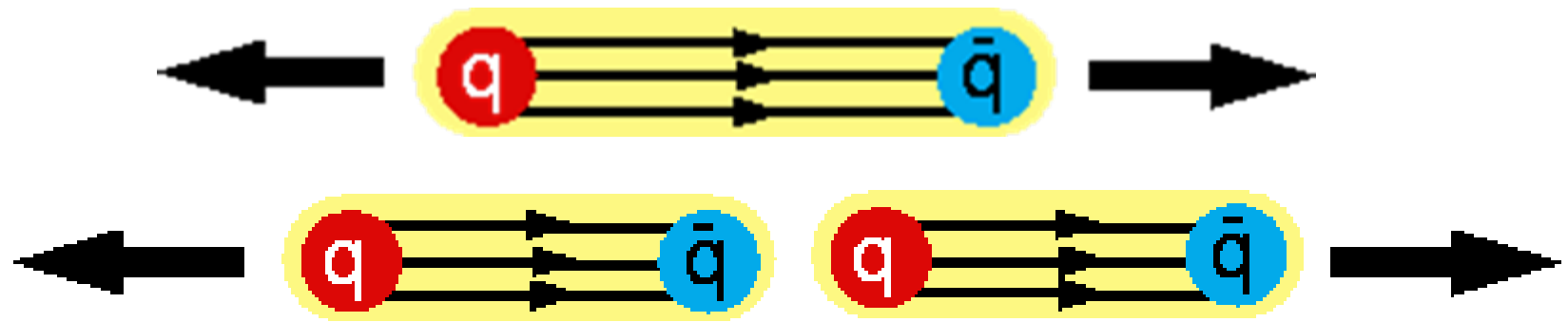


バリオン(核子の仲間)
陽子、中性子など



メソン(中間子)
π中間子、K中間子など

クォークの閉じ込め: クォークは3種類のカラー(赤、青、緑)を持っており、白色の粒子(ハドロン)のみが観測にかかる。クォークを単独で取り出すことはできない。



真空から産まれた
クォーク・反クォーク対

ゲージ対称性(素粒子標準理論の根幹の1つ)

素粒子物理学における対称性＝ある変換で運動法則が不変
例) 時間一様性、空間一様性

ゲージ対称性 = 局所ゲージ変換をしても運動法則が不変
局所ゲージ変換: 波動関数 $\Psi(x) \rightarrow \Psi(x)' = e^{i\theta(x)}\Psi(x)$

- ゲージボソン(W, Z, γ , g)がなければならない。
- ゲージボソンの質量は0でなければならない。



W, Zボソンは質量を持つので、ゲージ対称性が破れてW, Zボソンが質量を持つ機構が必要

南部理論(自発的対称性の破れ→質量の起源)

超伝導体内: クーパー対(スピン・運動量逆向きの電子対)が凝縮



素粒子物理学におけるカイラル対称性の自発的なやぶれ

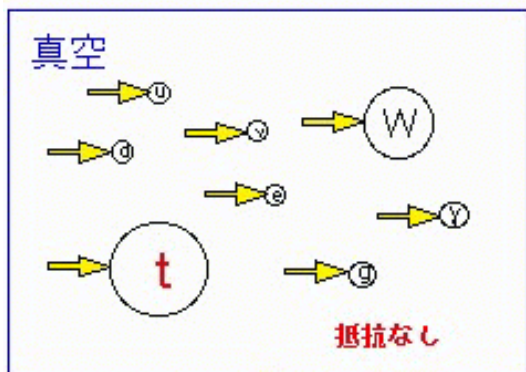
真空: 陽子・反陽子対が凝縮 → 陽子、中性子に質量を与える

現在の発展形:

1. クォーク・反クォーク対が真空中に凝縮して、ハドロン(陽子、中性子、中間子など)に質量を与えている。
2. ヒッグス機構で、ゲージ対称性が破れてヒッグス粒子が真空中に凝縮して、クォーク、レプトン、ゲージボソン(W, Z粒子)に質量を与えている。

新しい真空の概念

質量の起源(ヒッグス機構)

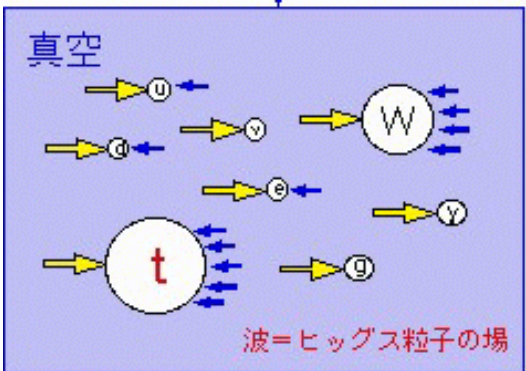


標準理論の考え方

ビッグバン直後

真空から抵抗を受けないので粒子の質量は0。

真空の相転移



現在

真空にはヒッグスが充満している！

粒子を加速しようとする時、ヒッグスにぶつかる。

$$m(\text{質量}) = g(\text{衝突確率}) \times v(\text{ヒッグスの密度})$$

ぶつかりやすいほど重い！

→ 力 → 抵抗

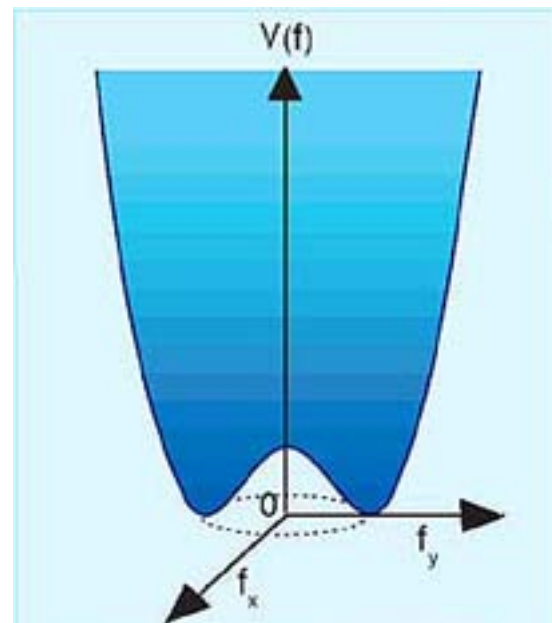
ヒッグスポテンシャル

$$V(\phi) = \mu^2 \phi^2 / 2 + \lambda \phi^4 / 4 \quad (\lambda > 0)$$

$\mu^2 > 0$ (ビッグバン直後)

真空の相転移(対称性の破れ)

$\mu^2 < 0$ (現在)

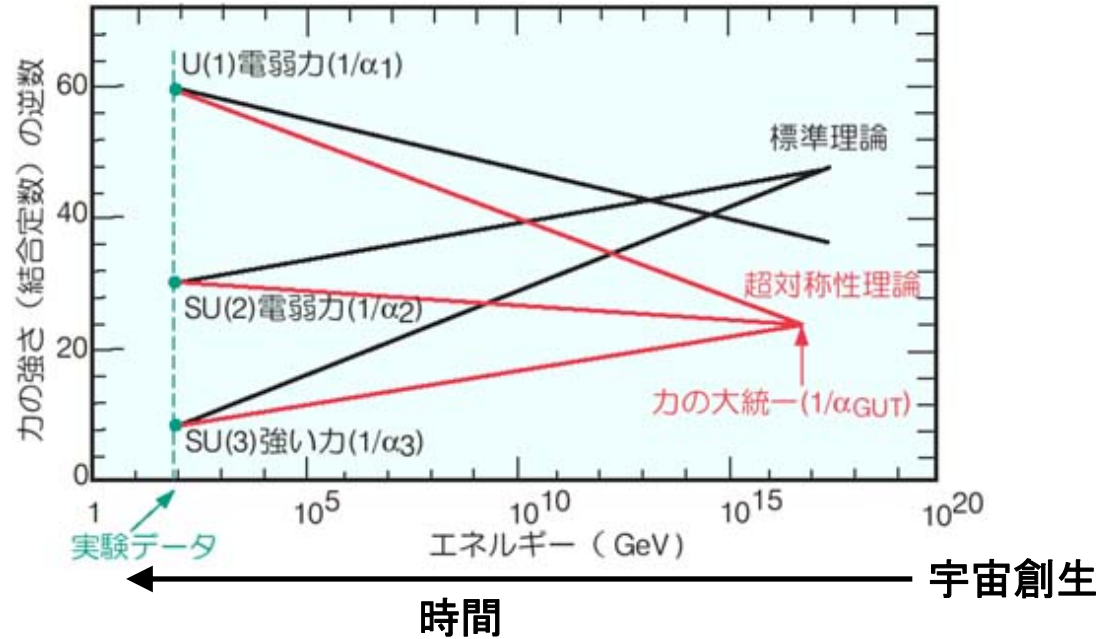


ヒッグスポテンシャル $V(\phi)$: ヒッグス場が点線上任意の所で最小値0を持てるため(ヒッグスボソンの凝縮)、真空の対称性が破れてしまいます。

南部「自発的対称性の破れ」理論を基にしている標準理論の根幹となる仮説

大統一理論

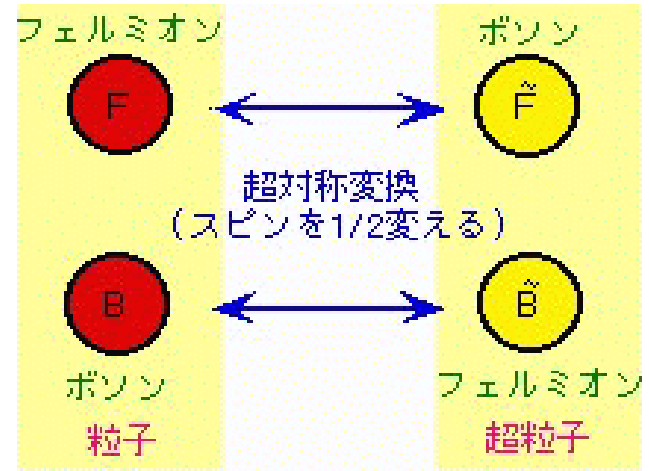
三つの力(電磁力、弱い力、強い力)は、宇宙創生直後の高温時には対称性が成り立ち、同一の力であった。それが冷えてきたときに対称性が破れて異なる力に見えるようになった。



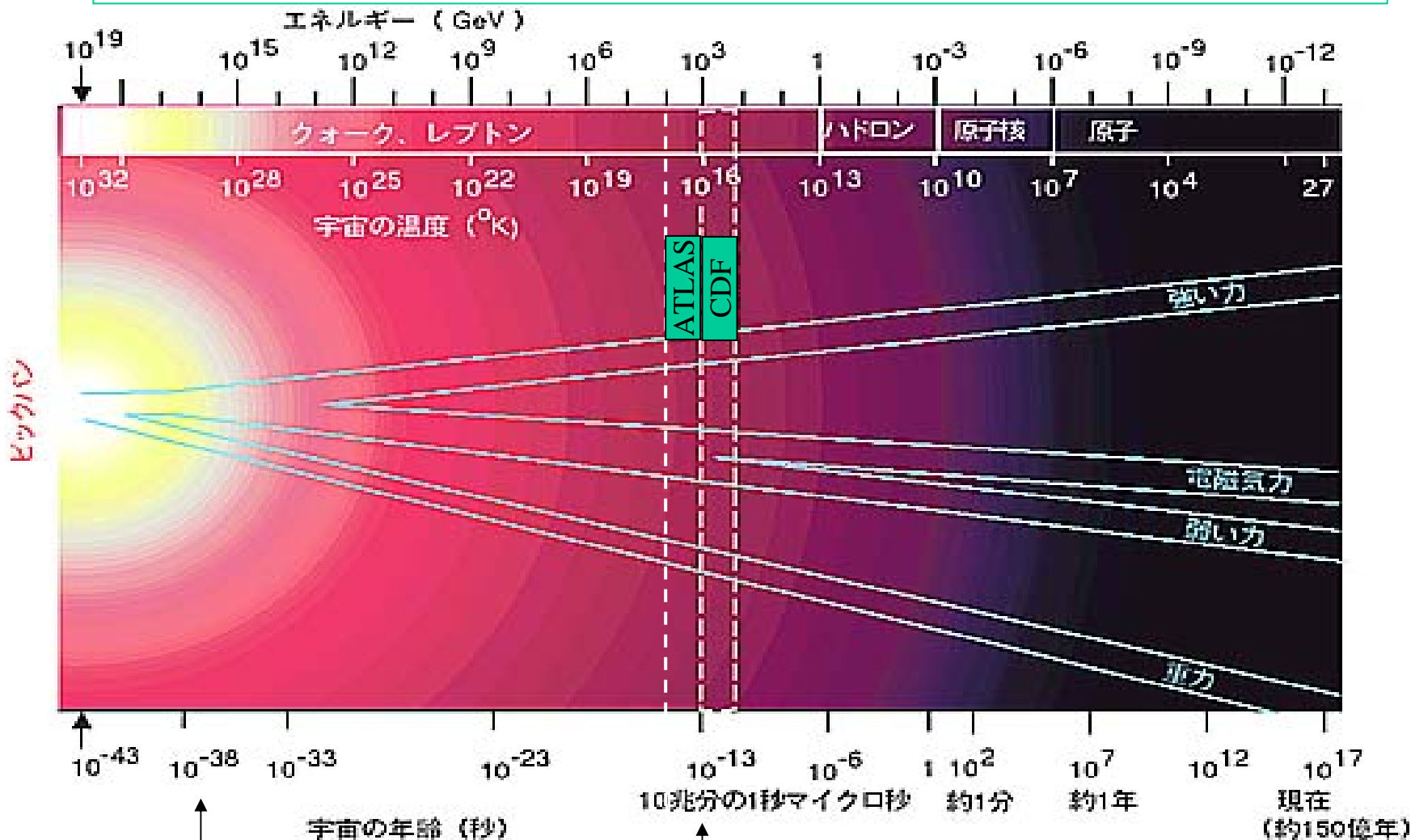
超対称性理論

すべてのフェルミオン(ボソン)には超対称粒子のボソン(フェルミオン)のパートナーが存在する。この超対称性を仮定すると、三つの力の大統一がある高温状態で成り立つ。

この理論は有望であると考えられている。この理論が正しいければ、質量 $150\text{GeV}/c^2$ 以下のヒッグス粒子が存在するし、また標準理論で期待される以上のK中間子、 τ 粒子、B中間子の稀崩壊が起こる。



ビッグバン宇宙と素粒子物理



大統一理論

真空の相転移

粒子反粒子対称性の破れ

電弱統一理論

ヒッグス粒子

素粒子物理の研究→より微細

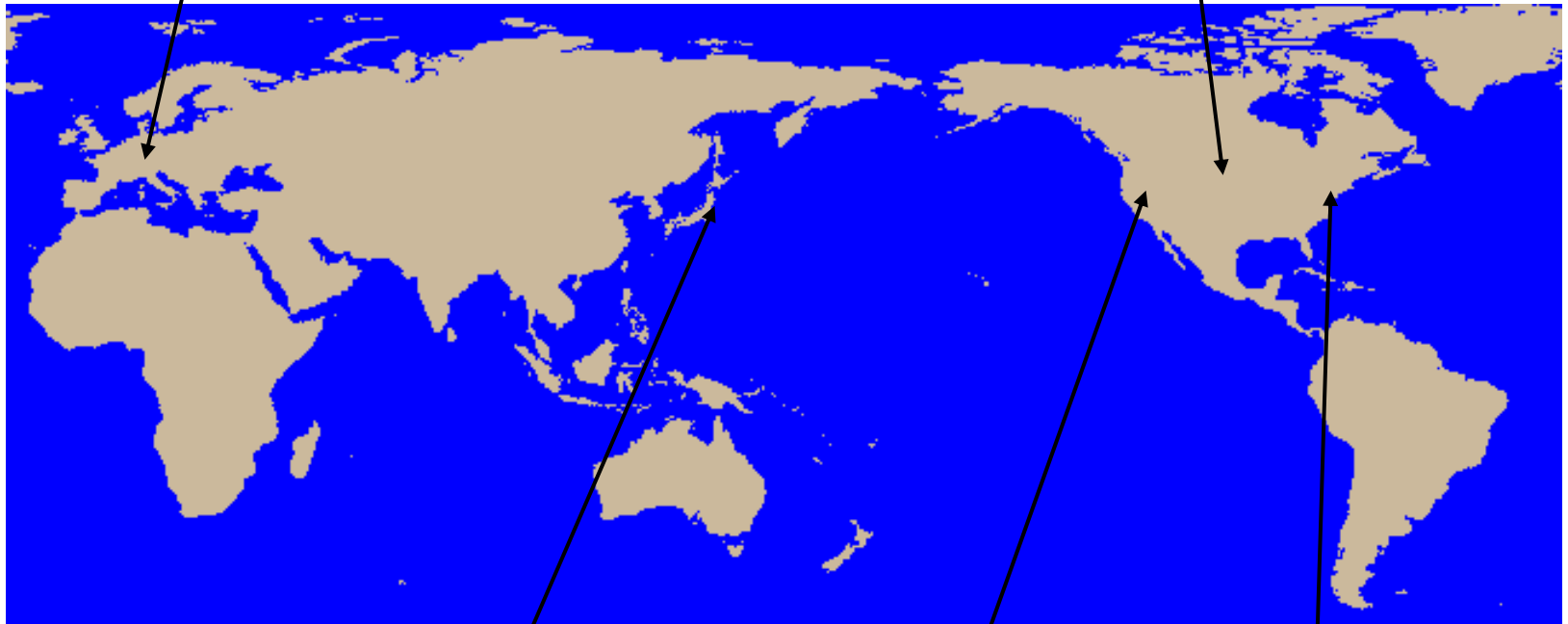
||

宇宙物理の研究→より初期の宇宙

主要な高エネルギー加速器研究所

欧州共同原子核研究所(欧) CERN

フェルミ国立加速器研究所
(米国) FERMILAB

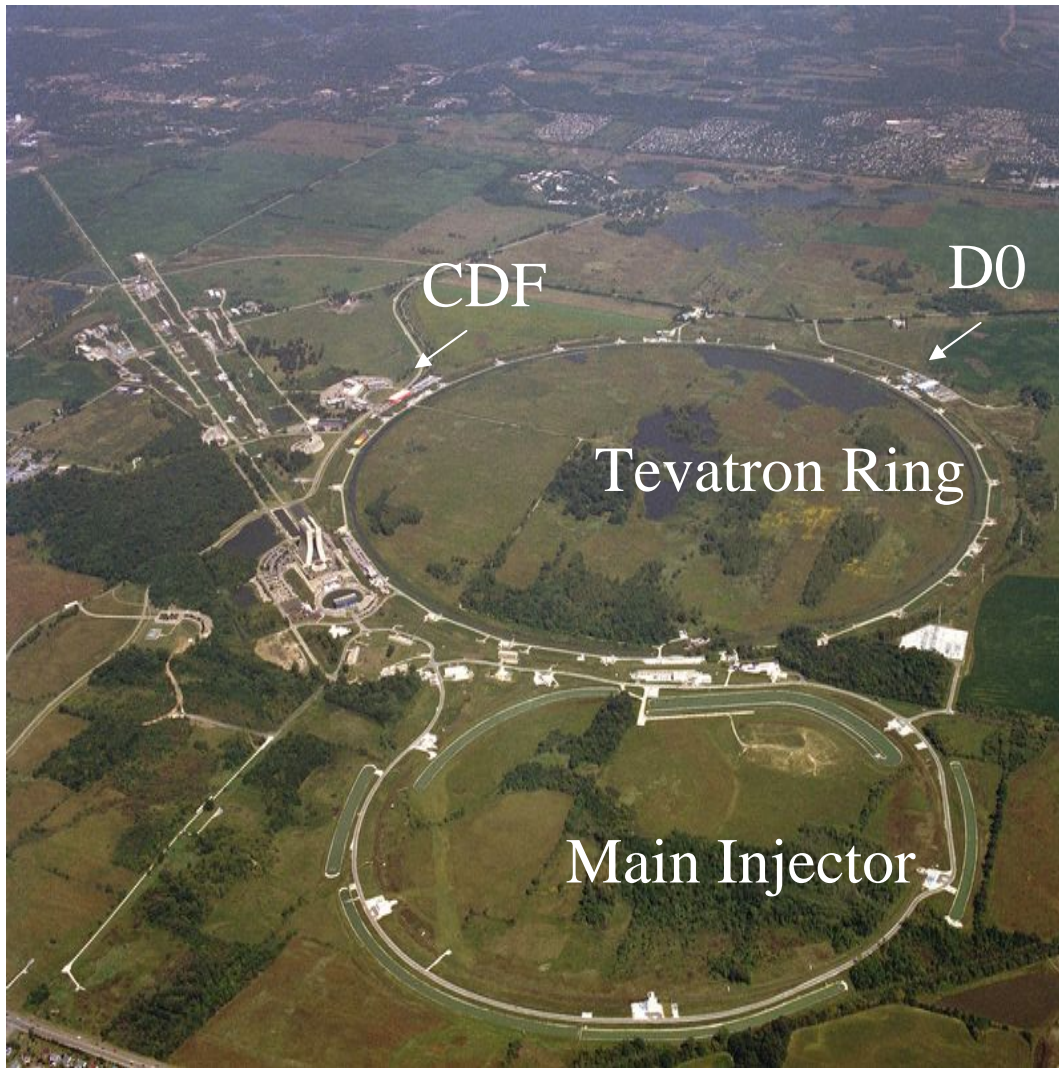


高エネルギー加速器研究機構(日本) KEK

ブルックヘブン国立加速器
研究所(米国) BNL

スタンフォード線形加速器研究所(米国) SLAC

2TeV陽子・反陽子衝突実験(CDF実験、D0実験)
米国フェルミ国立加速器研究所テバトロン加速器



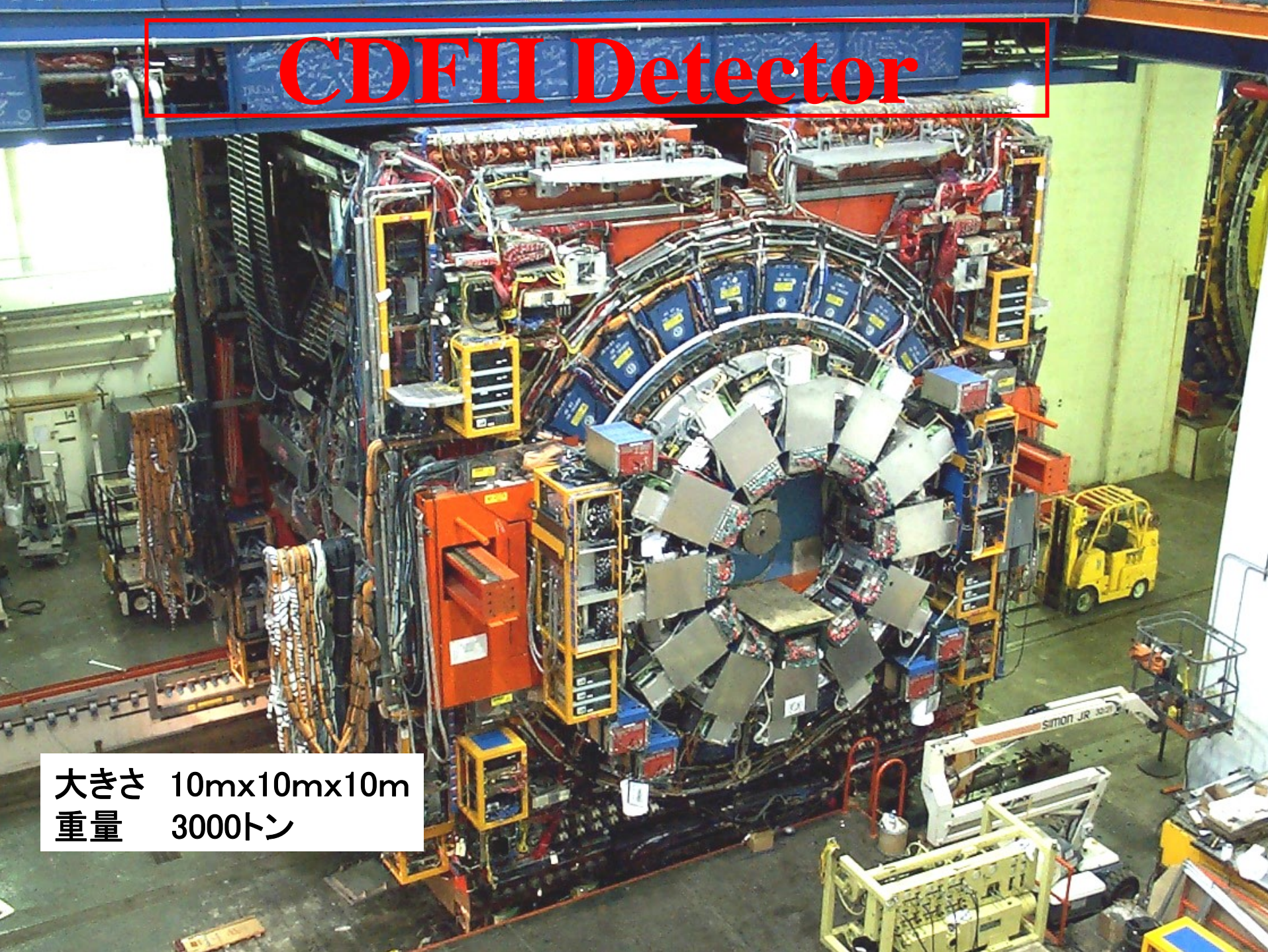
米国シカゴ郊外の研究所。

直径2kmの加速器。

陽子・反陽子衝突エネルギーが
2TeV(2×10^{12} 電子ボルト)

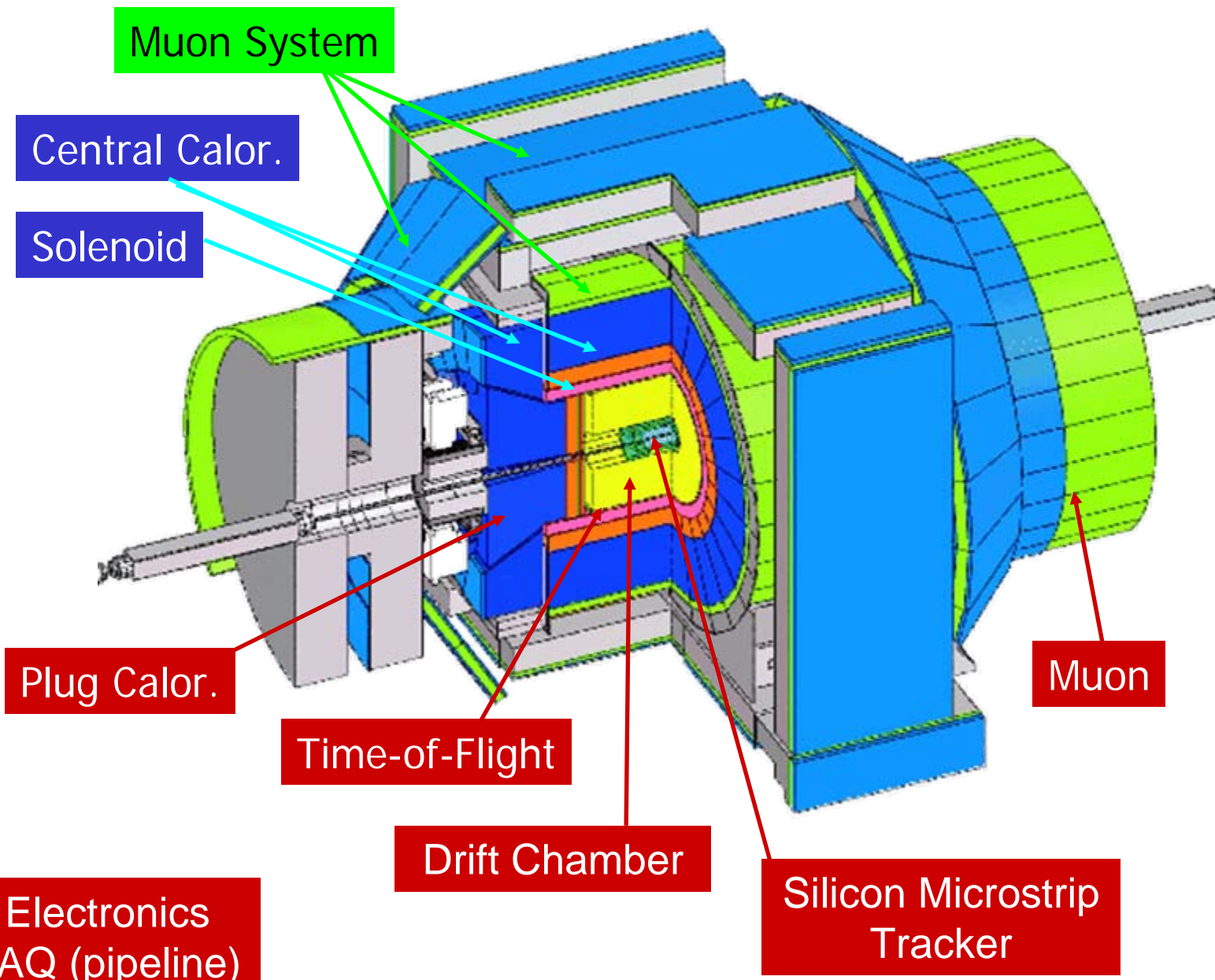
CDFII Detector

大きさ 10m x 10m x 10m
重量 3000トン



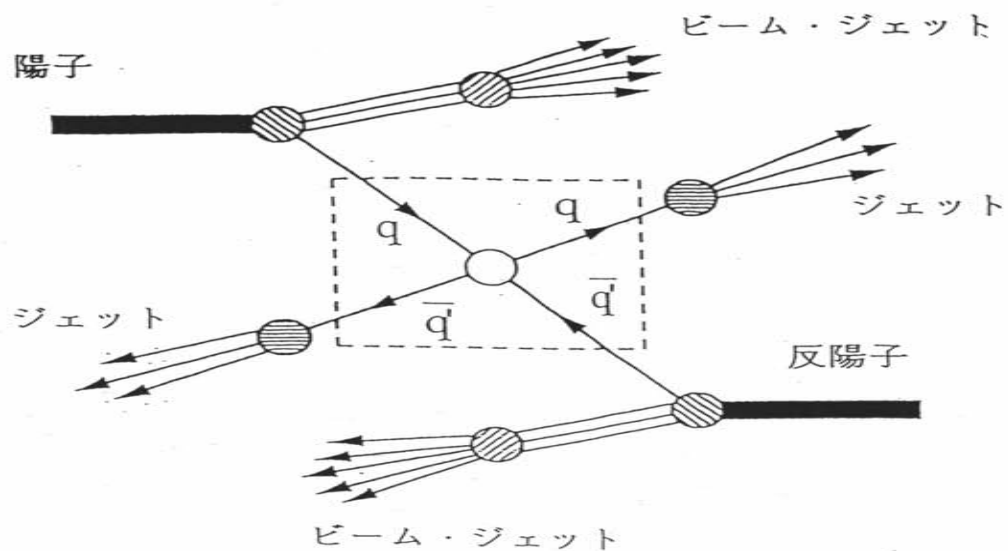


- New
- Old
- Partially New

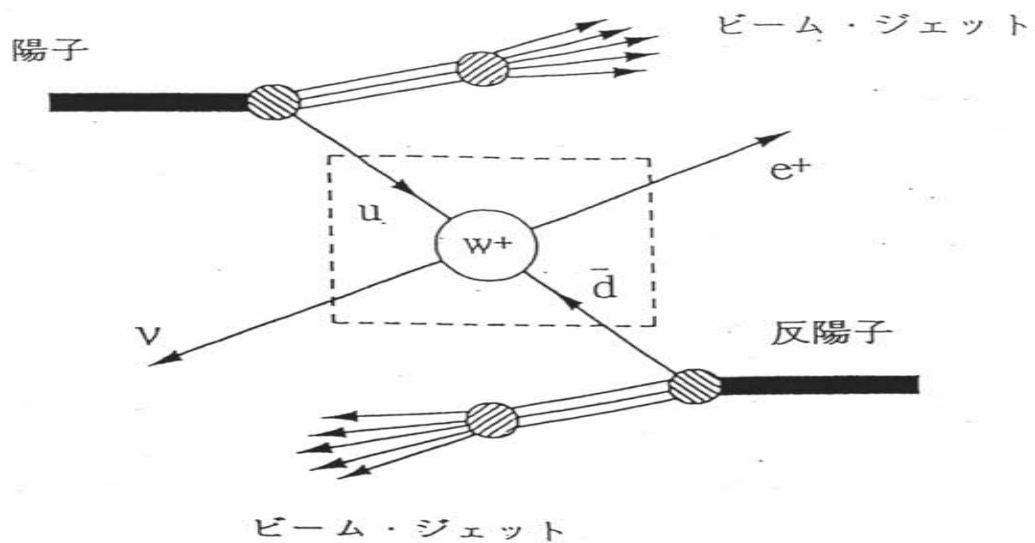


Front End Electronics
Triggers / DAQ (pipeline)
Online & Offline Software

(a)



(b)



CDF実験の経過と主要な成果

陽子・反陽子衝突実験(米国フェルミ国立加速器研究所)

1981年8月 CDF設計報告書
(日米伊87名)

1985年10月 陽子・反陽子初衝突

1987年 テスト実験

1988年6月 物理実験(Run0)

～1989年5月

1992年4月 物理実験(Run1)

～1996年2月 (7カ国445名)

1994年 **トックオーク発見**

1998年 **B_c 中間子発見**

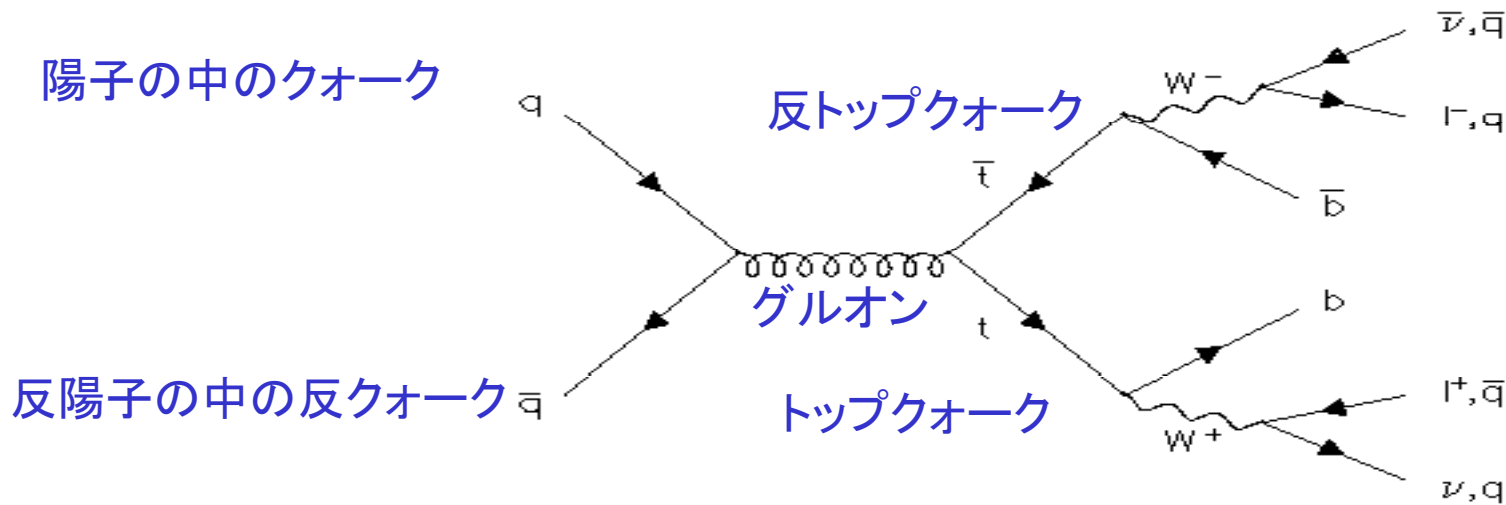
2001年4月～ 物理実験(Run2)再開
(12カ国600名)

2005年 **ヒッグス粒子の質量上限決定**

2006年 **B_s 中間子の粒子反粒子振動
の発見**



トップクォーク対生成のファインマン図



- Dilepton チャンネル

$$t \bar{t} \rightarrow W^+ b W^- \bar{b} \rightarrow l^+ l^- \nu \bar{\nu} b \bar{b}$$

- ● Lepton + Jets チャンネル

$$t \bar{t} \rightarrow W^+ b W^- \bar{b} \rightarrow l^\pm \nu q' \bar{q} b \bar{b}$$

- Multi-Jets (All Hadronic)チャンネル

$$t \bar{t} \rightarrow W^+ b W^- \bar{b} \rightarrow q' \bar{q} q' \bar{q} b \bar{b}$$

トップクォーク候補事象の一例

e + 4 jet event

40758_44414

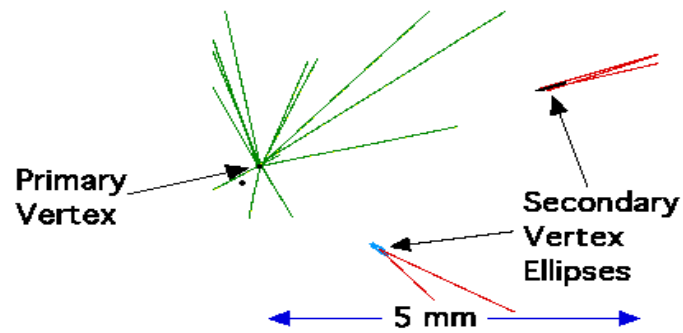
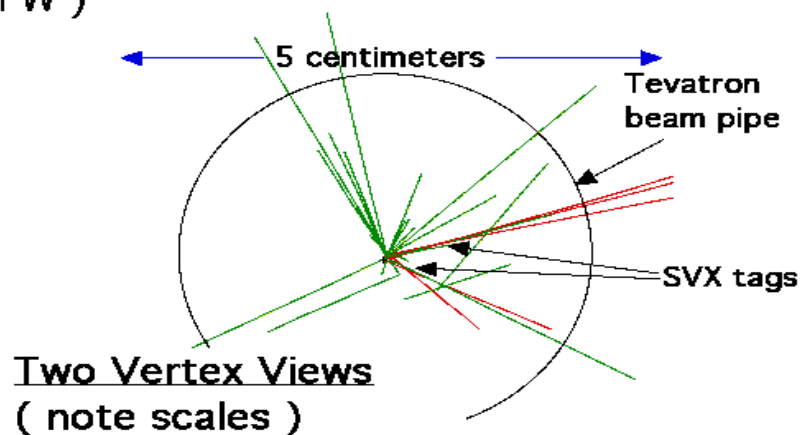
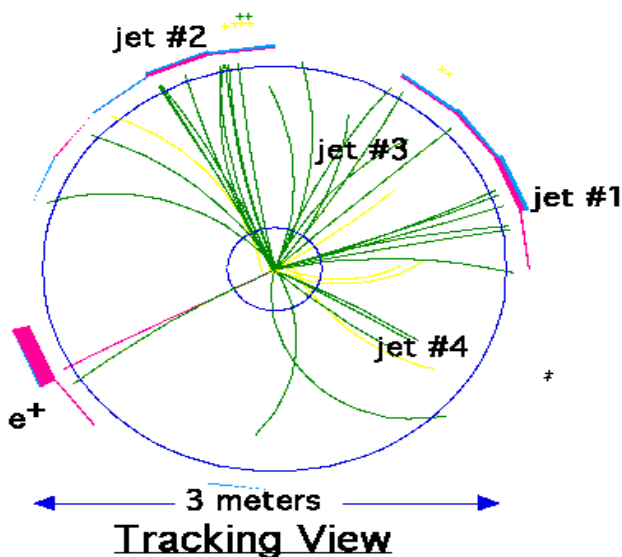
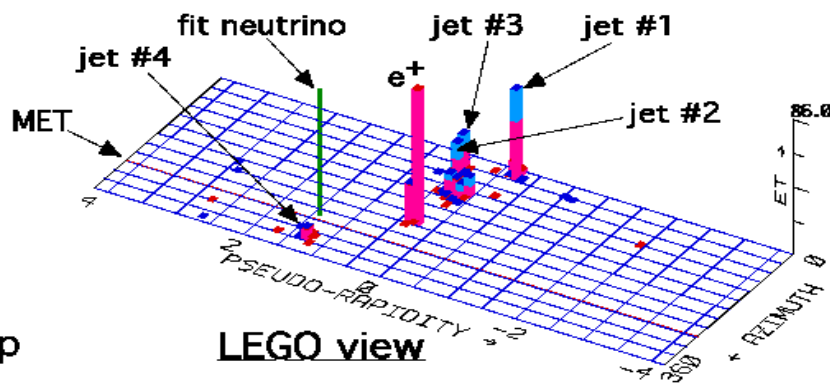
24-September, 1992

TWO jets tagged by SVX

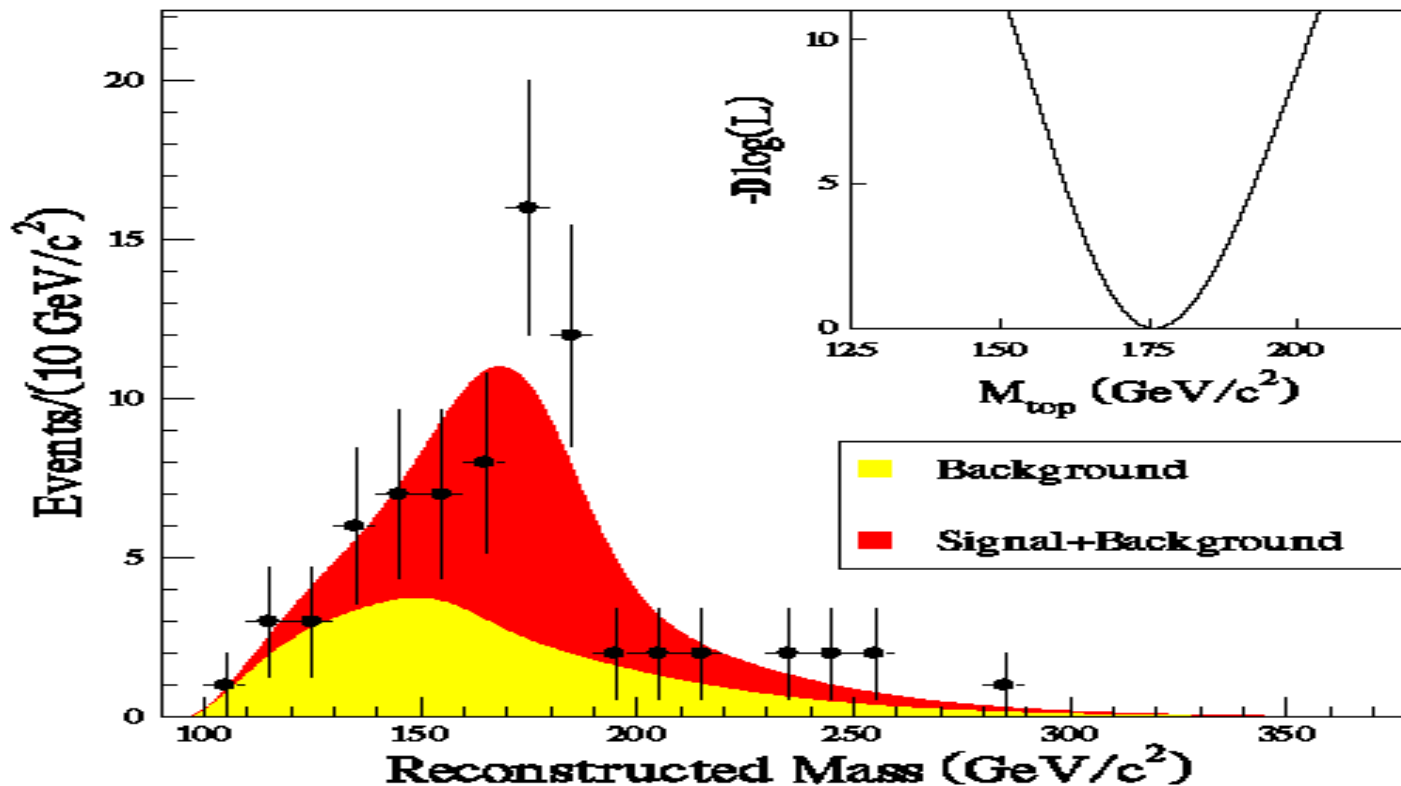
fit top mass is 170 ± 10 GeV

e^+ , Missing E_T , jet #4 from top

jets 1,2,3 from top (2&3 from W)

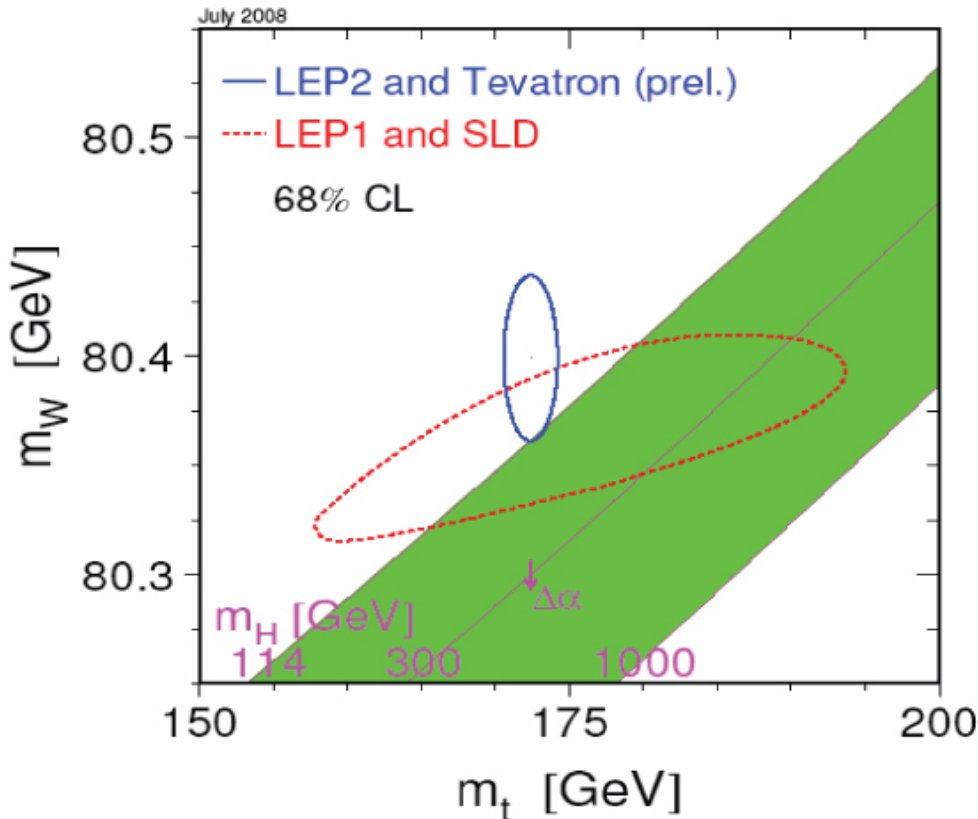


レプトン+4ジェット事象のトップクォーク質量分布： 76事象(4つのサブサンプルの和)



$M_{\text{top}} = 175.9 \pm 4.8 \text{ (stat)} \pm 4.9 \text{ (syst)} \text{ GeV}/c^2 = 175.9 \pm 6.9 \text{ GeV}/c^2$
Combined CDF results (all channels)
 $M_{\text{top}} = 176.1 \pm 6.6 \text{ GeV}/c^2$
Combined Tevatron results (CDF+D0)
 $M_{\text{top}} = 174.3 \pm 5.1 \text{ GeV}/c^2$

トップクォークとWボソンの質量測定による ヒッグス粒子の質量の間接決定



質量の輻射補正計算より、ヒッグス粒子の質量はトップクォークの質量とWボソンの質量に左図のように関係づけられる。

トップとWの質量測定→ヒッグスの質量決定

テバトロン実験：世界最高エネルギー
 2TeVの陽子・反陽子衝突による
 トップクォーク対生成 $p\bar{p} \rightarrow t\bar{t}X$
 (唯一のトップファクトリー)

2008年夏 テバトロン実験の結果：

トップクォークの質量： $M_{\text{top}} = 172.4 \pm 1.2 \text{ GeV}/c^2$

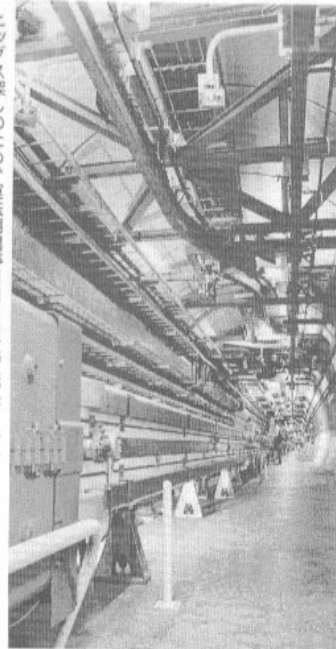
ヒッグス粒子の質量： $114\text{GeV}/c^2 < M_{\text{Higgs}} < 185 \text{ GeV}/c^2$

重さの正体つかまえる

物には重さがある。当たり前のようだが、物理学的に説明しようとするとうる簡単ではない。質量のかき振る未知の粒子ヒッグスの存在を示すこれまでで最も信頼度の高いデータが、欧州合同原子核研究機関(CERN)の加速器実験で得られた。世界中の素粒子物理学者が探し続けてきた粒子で、現代物理学の基礎となっている「標準理論」を検証するだけでなく、「大統一理論」など新たな枠組みづくりにつながる可能性もある。日米欧の大型加速器計画にもはつきりつきてきた。(杉本 誠)

カギ握る粒子「ヒッグス」 欧州チーム「存在示唆」

物質は原子の集まり。原子は電子と原子核の集まり。原子核は陽子と中性子の集まり。そして陽子と中性子はクォークの集まり。標準理論によれば、私たちの世界は、六種類のクォークと、電子など軽い粒子で、ある六種類のレプトンからできている。標準理論では、不思議なことにこれらの粒子の質量はゼロでなければならぬ。だが、現実にはほとんどの粒子に質量がある。一九六〇年代に英国の物理学者ヒッグスがこの矛盾を解決する仕組みを提唱。宇宙にはある未知の粒子が満ちている。ほかの粒子はそれに



ヒッグス探しのため、運転期間が11月2日まで延長されたCERNの加速器LEP。スイスとフランスの国境にある(CERN提供)

ヒッグス粒子探索 についての記事 (2000年9月)

2000年にCERN研究所(ジュネーブ)LEP実験で質量115GeV/c²のヒッグス粒子の候補事象が見えた(95%信頼度)。同時に114GeV/c²以下のヒッグス粒子は存在しないことを示した。

フェルミ研究所テバトロン加速器を用いた陽子・反陽子衝突実験で現在ヒッグス粒子探索中。

LEPは性能を上げ、四月から本格的にヒッグス探索を始めた。東京大学素粒子物理国際研究センターも加わる「オパール」など四つの実験グループがあり、粒子の崩壊の様子などを観測している。四グループのうちの「アレフ」がこのほど、ヒッグスの存在を示唆する現象を観測。四グループ分を合わせると、解析にもよるが、ヒッグスが存在しないときには一回程度しか観測されないまれな事象が五回

と、標準理論では、ヒッグスは少なくとも四種類からなる。宇宙の誕生直後につくられたが、一種を除いて消え、質量を与える粒子になった。これら消えた三種類には質量がなく、観測することはできない。残った一種類が「見えるヒッグス」。自然界では、高いエネルギーを持つ陽子同士が衝突するようなら、人工的につくるには非常に高

いエネルギーが必要。八〇年代、ヒッグスを探す二大加速器計画が登場した。米国のSSC(二四八七・七)とCERNのLHC(同二十七・七)。計画では、いずれもトンネル内で陽子同士を衝突させ、十兆電子ボルトを超えるエネルギーを生む。SSCは建設費が巨額で中止になった。LHCは建設費を二千億円程度に抑え、二〇〇五年の運転開始を目指している。

既存の加速器にチャンス

と、これが最近、一兆電子ボルト以下とされていたヒッグスの質量が、千五十億〜二千五百億電子ボルト以下で正された。これならCERNの運転中の加速器LEPや、テバトロンでも見つかるかもしれない。LEPは性能を上げ、四月から本格的にヒッグス探索を始めた。東京大学素粒子物理国際研究センターも加わる「オパール」など四つの実験グループがあり、粒子の崩壊の様子などを観測している。

大統一理論への糸口にも

ヒッグスが見つければ、重さの正体は解ける。私たちの世界にある四つの力のうち電磁気力と「弱い力」を統一した標準理論は検証されたことになる。さらに「物理学の次の枠組みも見えてくる」と胸を膨らませ、「強い力」を加えた三つの力の統一を目指す「大統一理論」は、標準理論の粒子それぞれに、地球の自転に相当するスピンの値が異なる粒子があるとする「超

本邦の進捗状況は、ヒッグス探索の糸口にも、大統一理論への糸口にも、重要な柱の一つ。超対称性を前提とする大統一理論は、質量千五百億電子ボルト以下の「軽いヒッグス」の存在を予測している。「見えるヒッグス」がそれである可能性もある。正体がわかれば、「大統一理論の入り口に立つことになる」と金さん。ただ、これらの理論に十分な確信を得るには、ヒッグスを見つけただけでは不十分だ。性質を見極める必要がある。

テバトロン実験でのヒッグス粒子の直接探索

軽いヒッグス粒子 ($M_H < 135\text{GeV}/c^2$)

陽子中のクォーク

q

反陽子中の
反クォーク

\bar{q}'

W,Z

W,Z

H^0

ヒッグス粒子

$b\bar{b}$

ボトムクォーク対

重いヒッグス粒子 ($M_H > 135\text{GeV}/c^2$)

陽子中のグルオン

g

ヒッグス粒子

Wボソン対

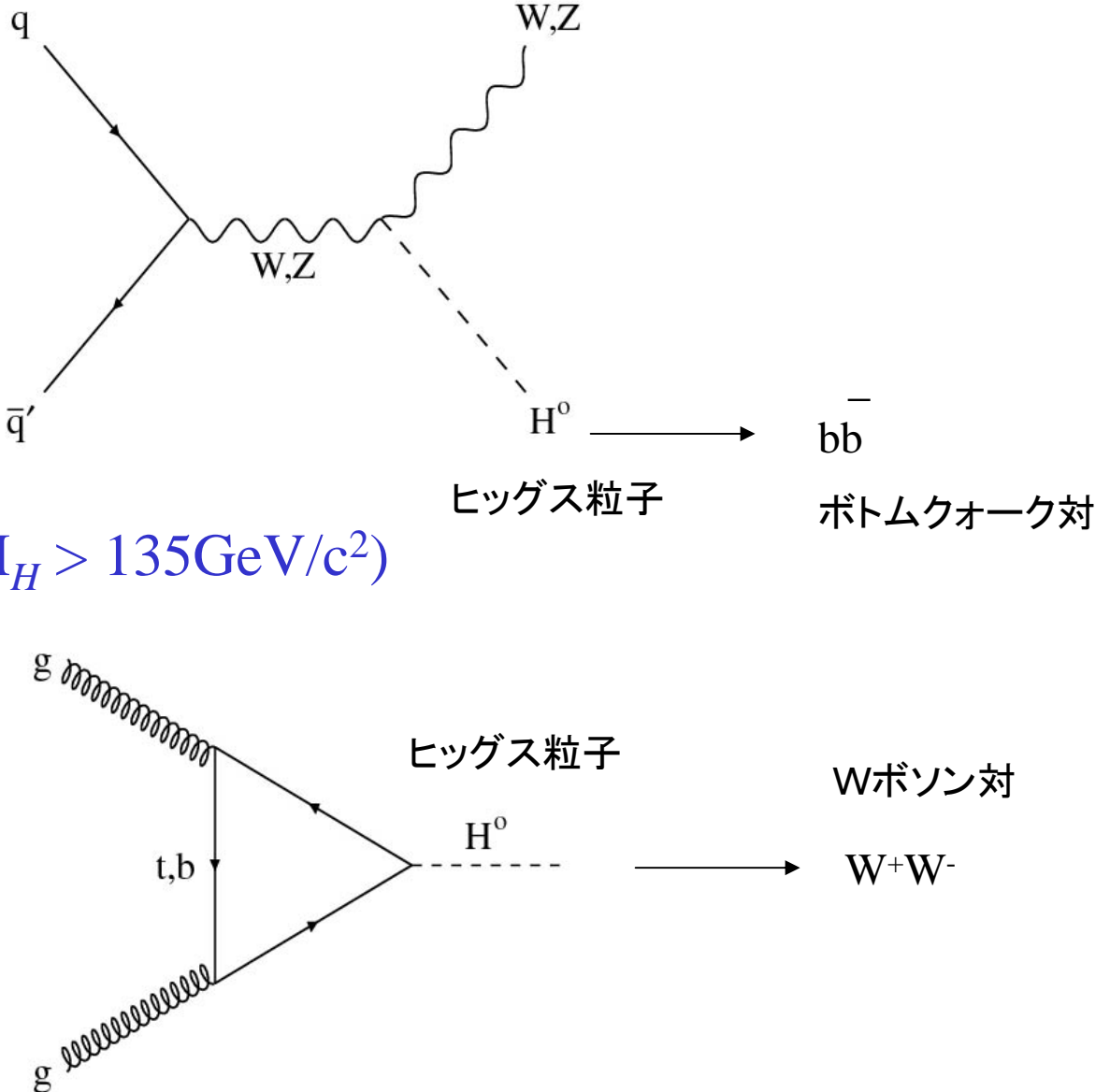
t,b

H^0

W^+W^-

反陽子中のグルオン

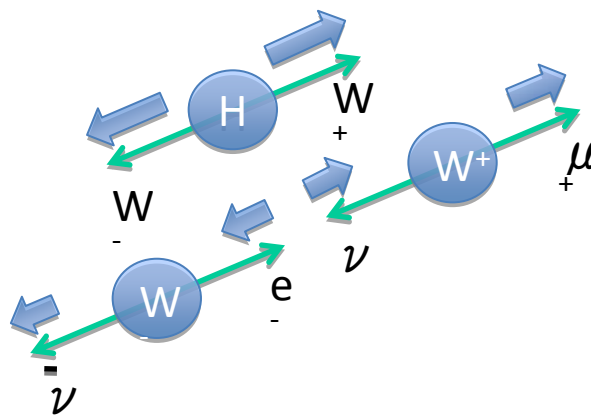
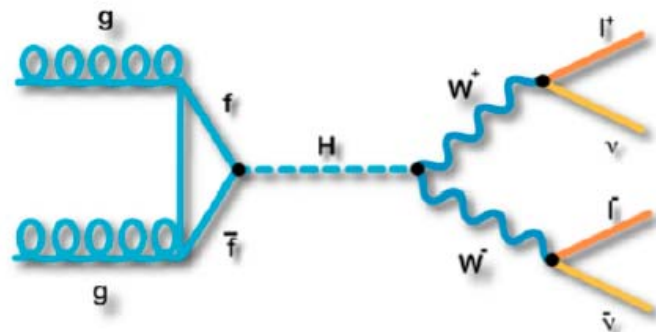
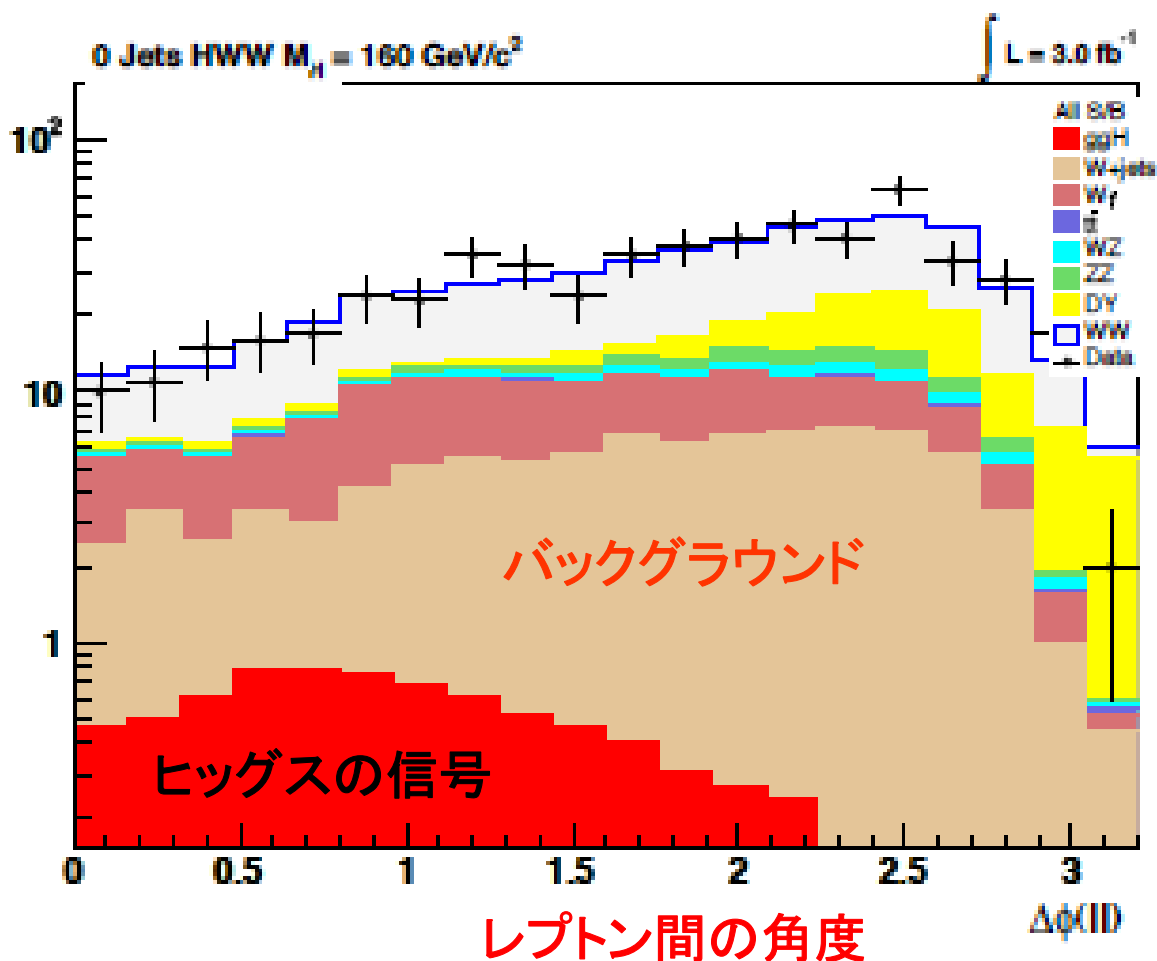
g



重い領域でのヒッグス粒子探索

• $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$

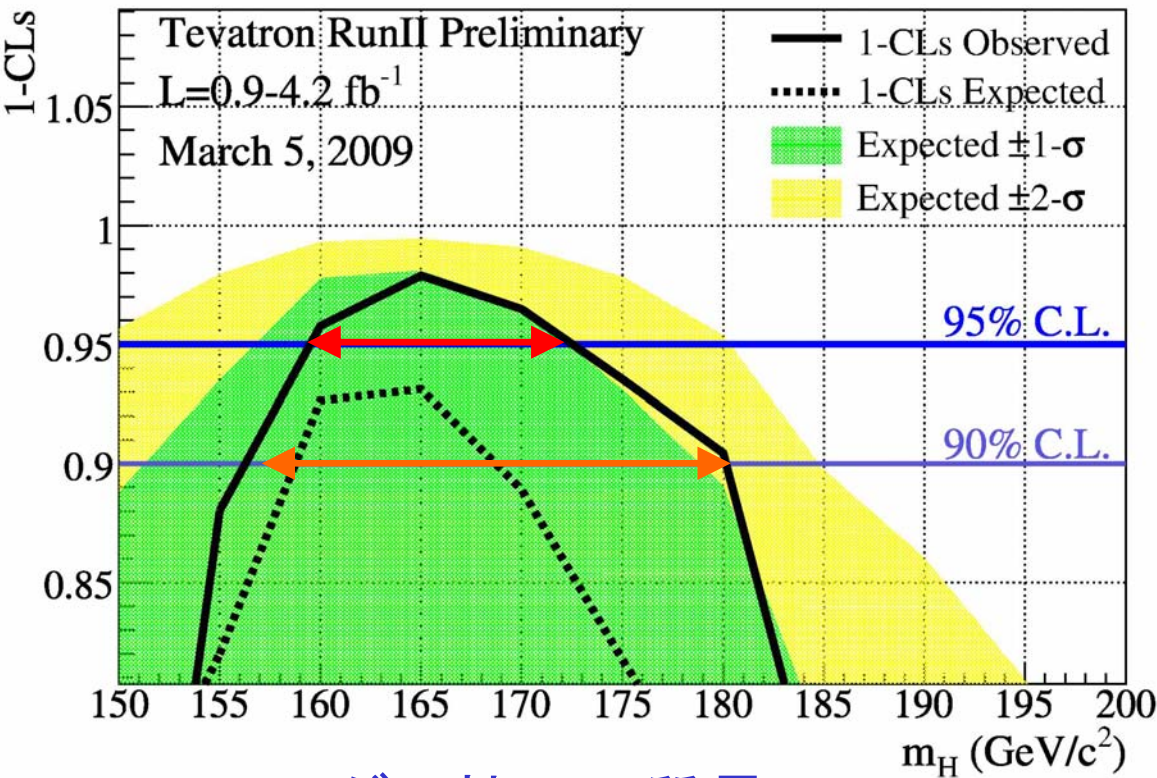
2つの荷電レプトン(電子かミュー粒子)



ヒッグス粒子の崩壊で生成したレプトン間の角度は小さくなる。一方、バックグラウンドの角度分布は異なる。

重い領域でのヒッグス粒子探索

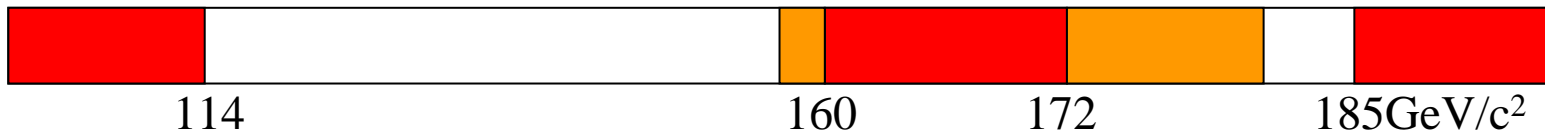
ヒッグス粒子の存在を否定する信頼度



ヒッグス粒子の質量

信頼度95%で、
質量160～172GeV/c²
のヒッグス粒子の存在
を否定した。

信頼度90%で、
質量157～180GeV/c²
のヒッグス粒子の存在
を否定した。



ヒッグス粒子の存在が否定された質量領域(信頼度95%、90%)

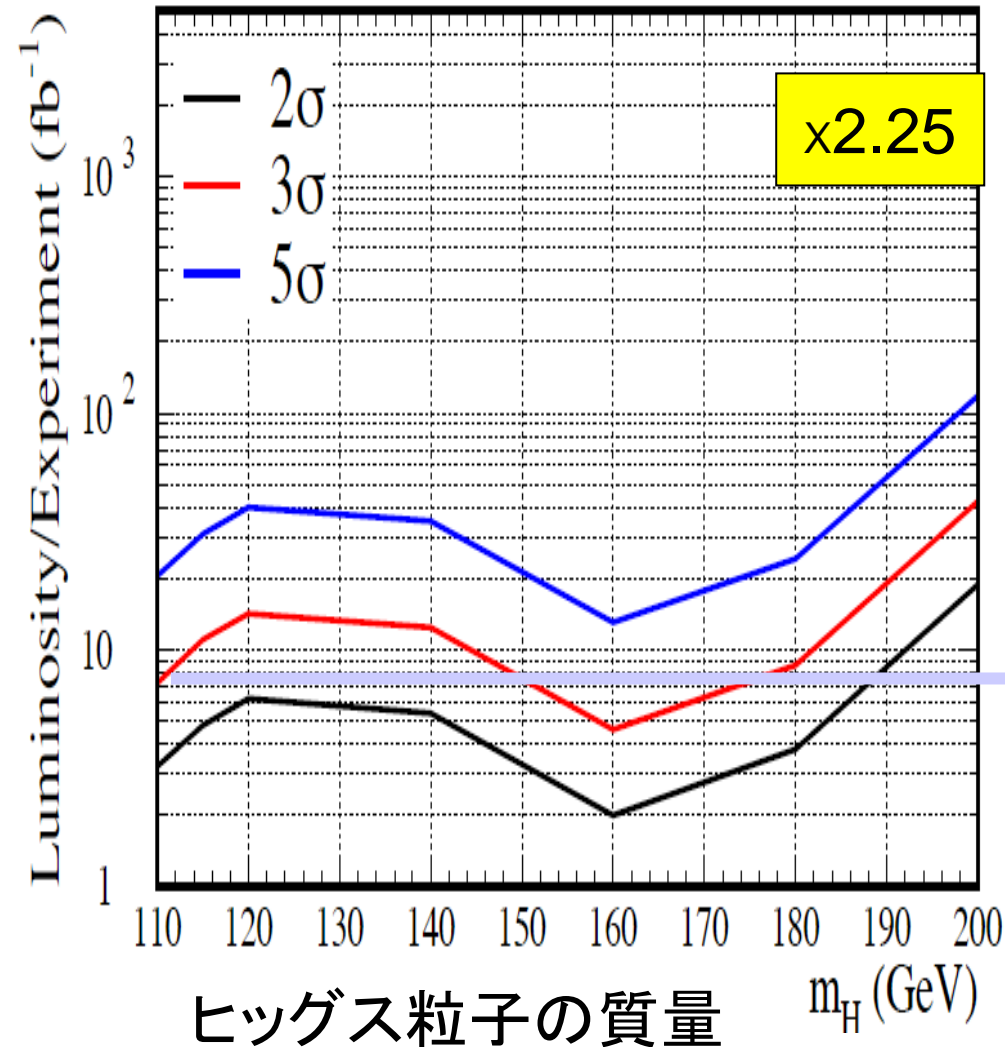
テバトロン実験でどこまでヒッグス粒子に迫れるか

ヒッグス粒子検出に必要なデータ量

2010年末: 7 fb^{-1}

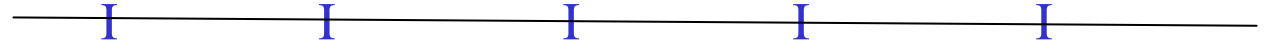
・ $185 \text{ GeV}/c^2$ の以下にヒッグス粒子が存在しなければ、95%の信頼度(2σ)で、存在しないことを実証する。

・99.7%の信頼度(3σ)で $150 \sim 170 \text{ GeV}/c^2$ のヒッグス粒子を検出。



超高エネルギー衝突実験の現状と計画

2000年 2005年 2010年 2015年 2020年



テバトロン陽子・反陽子
衝突実験 (FNAL, 米国)
2TeV



$M_H < 180 \text{ GeV}/c^2$ ならばヒッグス粒子検出
(95%信頼度)

LEP電子・陽電子衝突実験
(CERN, ヨーロッパ)
206GeV



$M_H = 115 \text{ GeV}/c^2 ?$
(95%信頼度)

LHC陽子・陽子衝突実験
(CERN, ヨーロッパ)
14TeV



$M_H < 1 \text{ TeV}/c^2$ ならばヒッグス粒子検出
超対称性粒子も存在すれば検出

LC電子・陽電子衝突実験
(建設地未定)
500GeV- 1TeV



$M_H < 0.9 \text{ TeV}/c^2$ ならばヒッグス粒子検出
超対称性粒子も存在すれば検出

LHC 陽子・陽子衝突実験

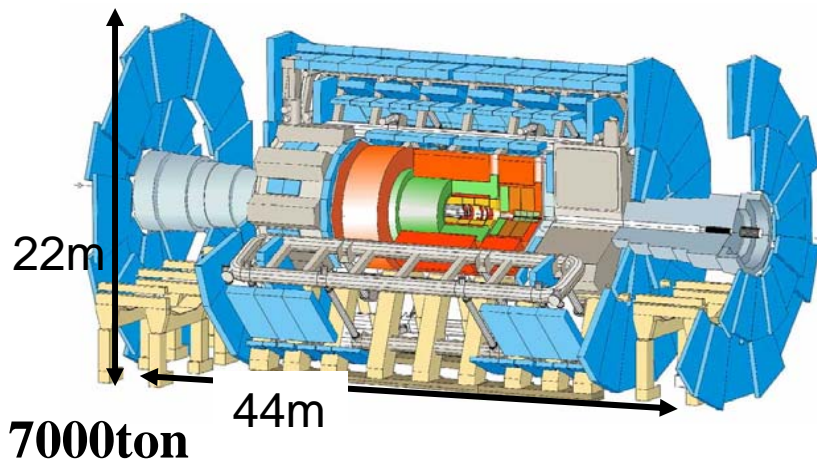


LHC (Large Hadron Collider):

スイス・ジュネーブのCERN研究所の陽子・陽子衝突型加速器。衝突エネルギー14TeV (14×10^{12} 電子ボルト)。加速器の大きさは直径約8km。

2010年から本格実験開始。

実験目的: ヒッグス粒子の発見とその性質の研究、超対称性粒子の探索



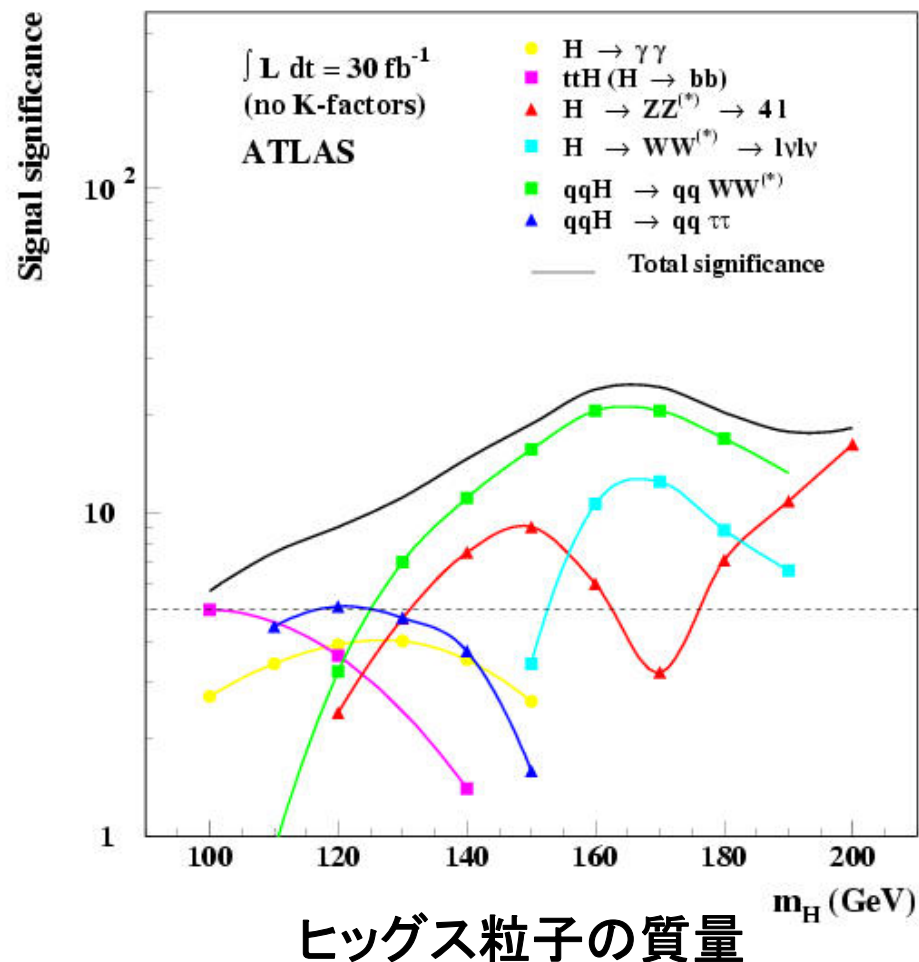
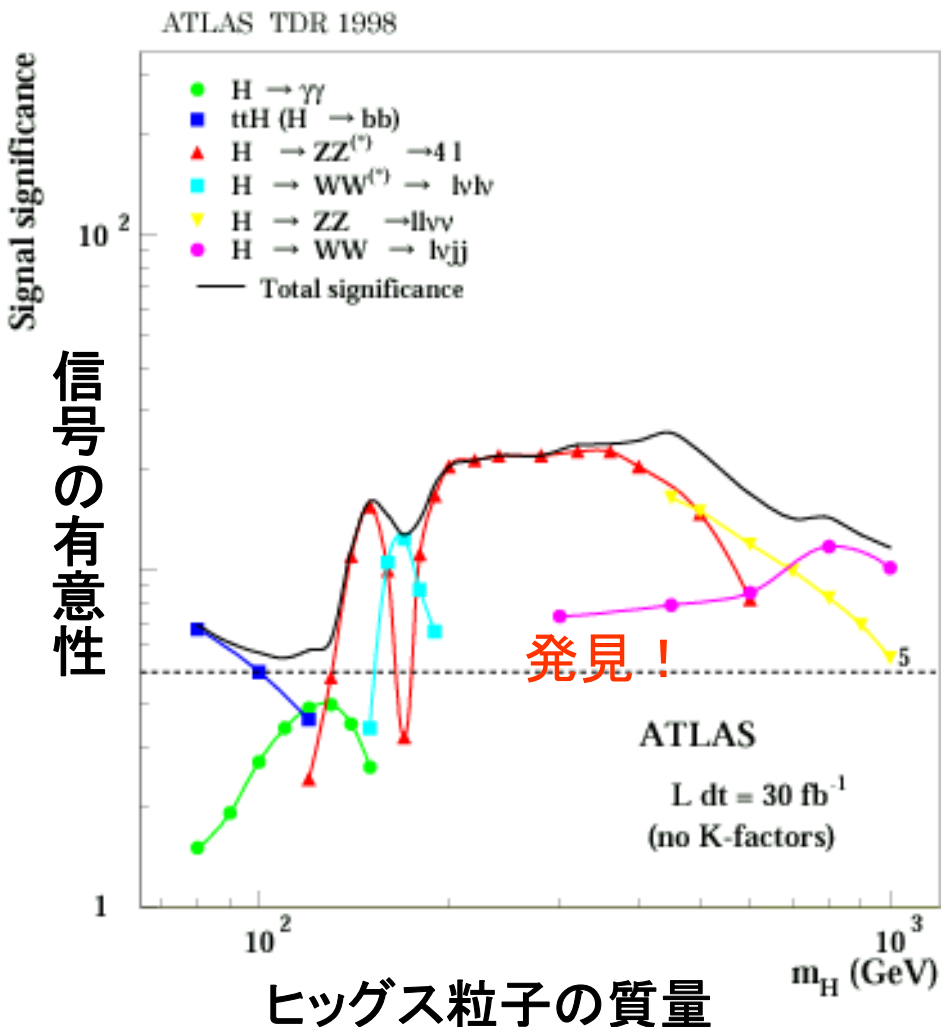
ATLAS測定器:

LHC加速器の陽子陽子衝突点に置かれて、衝突で出てくる粒子を検出し、そのエネルギーを測る。

ATLAS実験でのヒッグス粒子探索

ATLAS TDR1998

2013年頃のデータ量



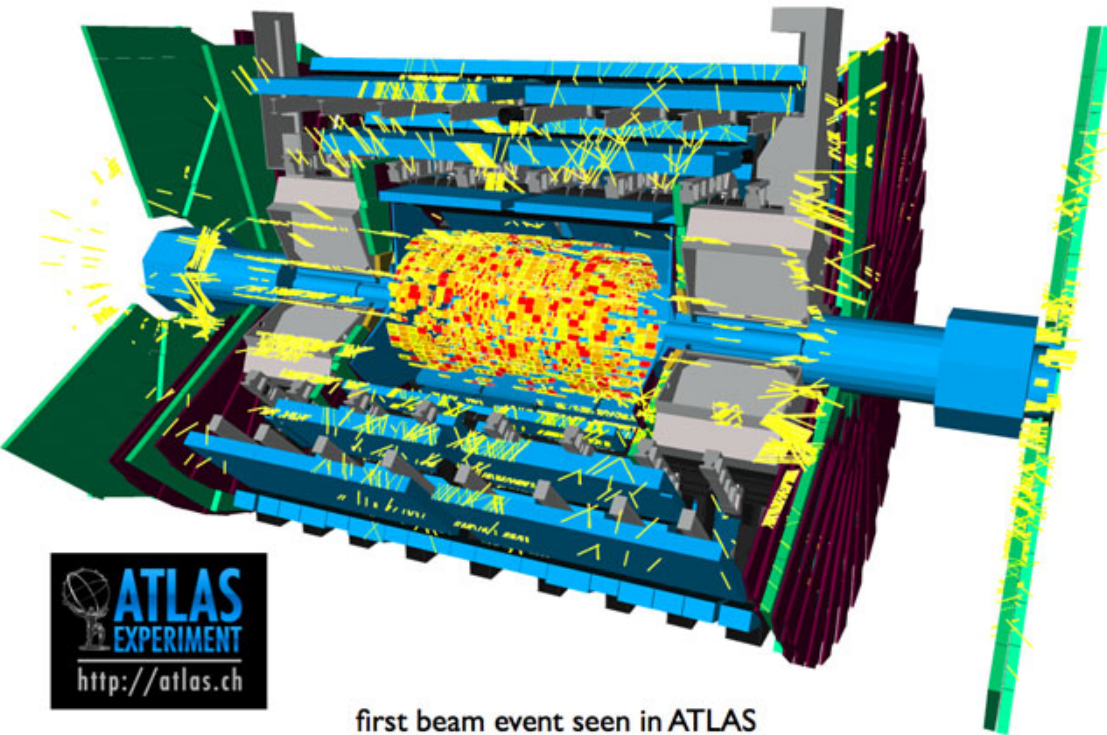
Higgs粒子が存在すれば、質量1TeVまでの領域でLHC実験で必ず発見できる。

LHC加速器で 陽子ビーム初周回に成功

2008年9月10日

LHC加速器リングを陽子ビームが周回した。

その際にATLAS測定器で最初に観測された事象。陽子ビームがビームパイプの中の残留ガスやビームを制御するためのコリメーターと衝突した際に発生する二次粒子が、ATLAS測定器を通過しながら反応して行く様子が観測された。



first beam event seen in ATLAS

2009年11月加速器運転再開

2010年から本格実験開始。

今後の展望

テバトロン実験 (2010年あるいは2011年末 まで運転)

- ・185GeV/c²以下にヒッグス粒子が存在しなければ、95%の信頼度(2σ)で、存在しないことを実証する
- ・99.7%の信頼度(3σ)で150~170GeV/c²のヒッグス粒子を検出

LHC実験 (2010年から本格運転)

- 2013年頃
- ・1TeV/c²以下のヒッグス粒子を99.99994%の信頼度(5σ)で検出

「ヒッグス」探せ米・欧競ろ

素粒子の質量の源と考えられている「ヒッグス粒子」探しが、米国の加速器テバトロンで熱を帯びてきた。最新の研究で意外に軽いかもしれないとわかってきて、見つかる希望が出てきたためだ。間違いないヒッグスを捕らえられるとされる欧州の加速器の本格稼働は来年。あと2年が勝負だ。

質量の謎解き 熱気帯びる

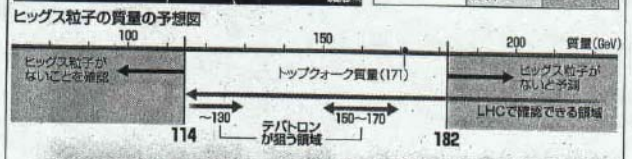
「実験期はあとをきき、きききりて、ヒッグス粒子の探索データを集め上げられるかもしれない」と、米シカゴ郊外、フェリス国立加速器研究所にある大塚加速器テバトロンに集まる研究者の大勢。ヒッグス粒子の質量の予想図(CERN提供) 4個のミュオン粒子のエネルギーを足し合わせると、崩壊前のヒッグス粒子の質量になる

ヒッグスはこう見える

LHCでヒッグス粒子を観測したときの予想図(CERN提供)

4個のミュオン粒子のエネルギーを足し合わせると、崩壊前のヒッグス粒子の質量になる

名前	LHC	テバトロン
衝突させる粒子	陽子-陽子	陽子-反陽子
主リング円周	27km	6.3km
衝突エネルギー	14000GeV	2000GeV
実験期間	2008年~	2001~09年(再2期)
所在地	ジュネーブ郊外	シカゴ郊外



基本粒子とその質量

粒子	質量 (GeV/c ²)
グルーオン(強い力)	0
光子(電磁気力)	0
W粒子(弱い力)	80
Z粒子(弱い力)	91
ニュートリノ(実質)	0
電子の仲間(3種)	
電子	0.0005
ミュオン	0.1
タウ粒子	1.8
ニュートリノ(3種)	ごく小さい
クォーク(6種)	
アップ	0.003
ダウン	0.006
ストレンジ	0.1
チャーム	1.2
ボトム	4.2
トップ	171
ヒッグス	114~182
陽子、中性子	1



南部博士の考え根底に

ヒッグス粒子は宇宙誕生時には水蒸気のように真空を満ちていたが、すぐに水や氷のような状態に変化したと、物理学者はみる。「相転移」という現象だ。このため多くの粒子は氷海を進む氷水船のようにヒッグス粒子の抵抗を受けることになり、この動きにくさが質量として観測されるという。さらに、部品であるクォーク3個の質量を足しても、陽子や中性子の質量全体の2%にしかならない

それが「クォーク・反クォークの対」だ。真空にヒッグス粒子と同じように詰まっていた、この抵抗によって残りの98%の質量が生まれたという。高エネルギー加速器研究機構の橋本晋二准教授は今年、計算機内での仮想空間にクォークを置き、クォーク対の海で起る現象を再現した。

ヒッグス粒子もクォーク対も、南部陽一郎博士(米シカゴ大名誉教授)が1961年に提案した「カイラル対称性の自発的破れ」という考えが根底にある。「質量起源の検証が進めば宇宙誕生の生み出したものがわかるかもしれない」と、南部博士は語る。

ヒッグス粒子の質量の謎解き、熱気帯びる。ヒッグス粒子の質量の謎解き、熱気帯びる。ヒッグス粒子の質量の謎解き、熱気帯びる。

おわりに

素粒子標準理論の根幹には、自発的対称性のやぶれの理論を基にして、物質の質量が与えられるというヒッグス機構がある。この機構はビッグバン宇宙がどのように進化したのかを説明する重要な役割をはたす。しかし、質量起源のヒッグス粒子は未だ発見されていない。

テバトロン実験とLHC実験のヒッグス粒子の探索競争により、近い将来ヒッグス粒子が発見される。

ヒッグス粒子の質量、崩壊分岐比、生成断面積などの基本的な性質を測定することによって、ヒッグス粒子が標準理論予言どおりのものか、あるいは標準理論を超えた理論に従うものかが明らかになる。それは新しい物理の始まりを告げるものになるかもしれない。

素粒子物理、宇宙物理についての解説書

- 「クォーク」 南部陽一郎 Blue Backs 講談社
- 「ビッグバン」 佐藤文隆 Blue Backs 講談社
- 「なっとくする宇宙論」 二間瀬敏史 講談社

この講演のファイルは以下のURLに置いてあります。

<http://hep.px.tsukuba.ac.jp/~skim/precollege2009-CDF.pdf>

