

素粒子の謎に迫る

—ビッグバン宇宙の始まりを高エネルギー粒子加速器で探る—

金 信弘

筑波大学 数理物質系
数理物質科学研究科 物理学専攻
理工学群 物理学類

筑波大学公開講演会
2012年9月1日

- はじめに
- 自発的対称性の破れと質量の起源
- 高エネルギー粒子衝突実験による質量起源のヒッグス粒子探索の歴史

素粒子とは？

Scale in m:

10^{-10} m

atom
原子

10^{-14} m

nucleus
原子核

10^{-15} m

proton
陽子

$\leq 10^{-18}$ m

quark
クォーク

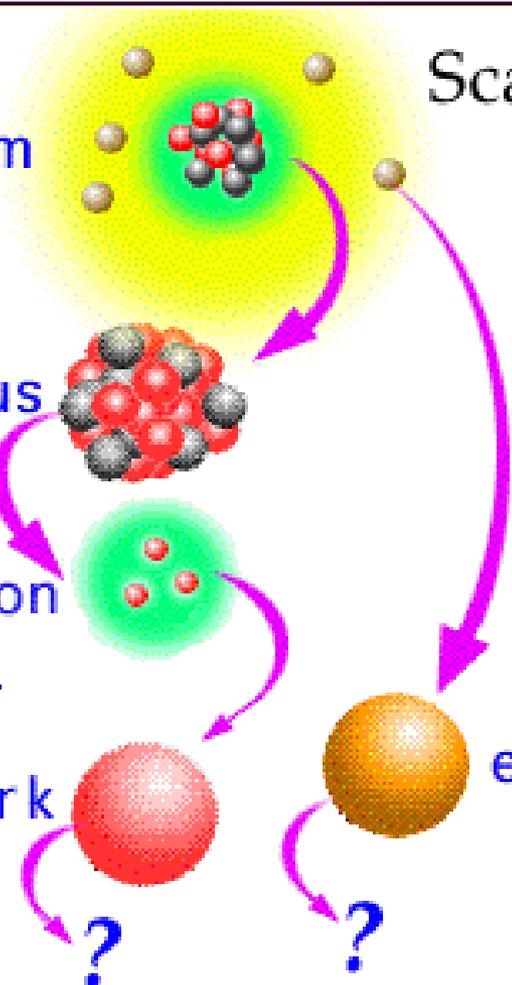
Scale in 10^{-18} m:

100,000,000

10,000

1,000

≤ 1



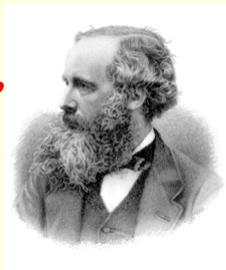
物理学発展の歴史



17世紀半ば

古典力学

ニュートン,



19世紀後半

電磁気学

マックスウェル, ...

1900年

1881年 マイケルソン・モーレー
の光速測定実験→エーテル否定

黒体輻射測定

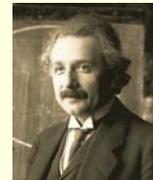
1896年 ベクレル放射線発見

1897年 トムソン電子発見

2000年

相対論

アインシュタイン



量子力学

ディラック, ハイゼンベルグ, ...



量子力学とは？

古典力学

$F = ma$: 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)

$i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \Psi(x,t) = H\Psi(x,t)$: 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



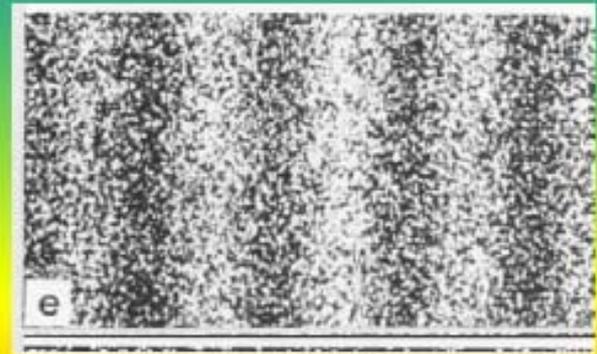
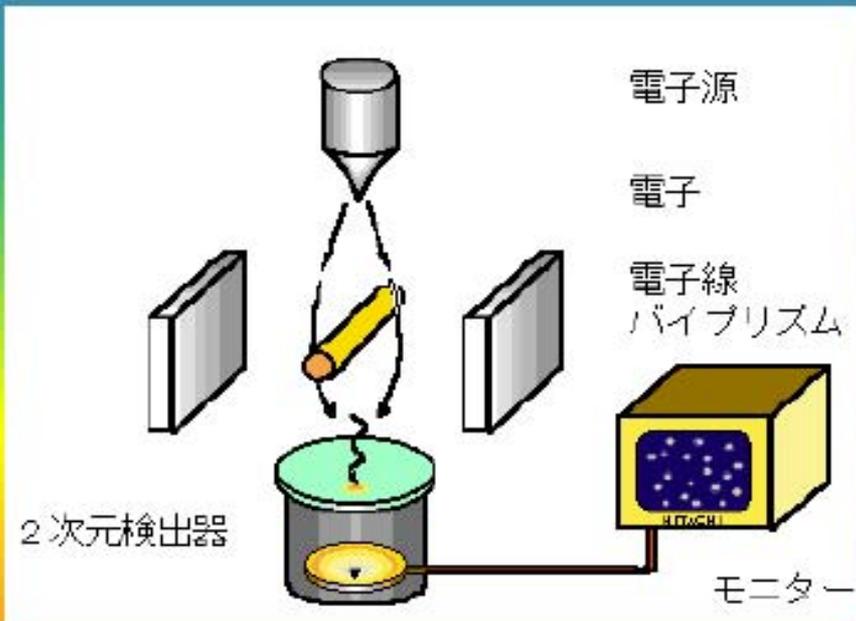
: 粒子の運動は波動関数によって確率的に決まる。 すなわち、粒子の運動は力と初期状態が決まっても、一意には決まらない。 **粒子=波動**

: 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。」

$$t \rightarrow t' = t$$

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。

特殊相対論 (非常に高速なところでの運動を正しく記述)

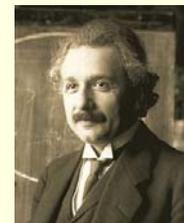
：光速度不変の原理「真空中の光の速さは、光源の運動状態に影響されない一定値 c である。」

：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。

$$F = \frac{dp}{dt} = \frac{d}{dt}(mv)$$

： 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。

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

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

〜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。

1897年：電子の発見 (J. J. Thomson)

1900

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)

1948年：量子電磁力学QED (くりこみ理論)

(朝永振一郎, R. Feynman, J. Schwinger)

1950

朝永振一郎

(ともなが しんいちろう)



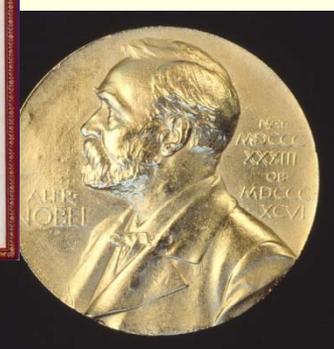
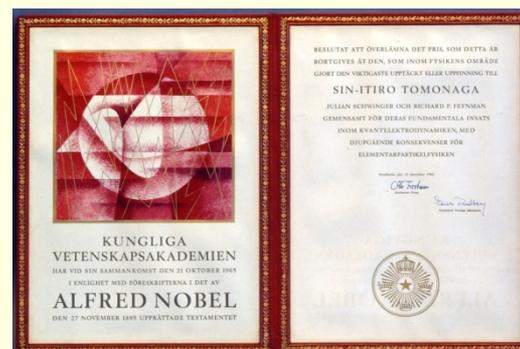
1906年3月31日

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

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
そして最後になぞかどける
これが科学の花です
朝永振一郎

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



素粒子物理学の歴史

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

1960

1956年： ν_e の発見 (F. Reines)

1956年：反陽子の発見 (O. Chamberlain, E. Segre)

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 [ヒッグス機構]

(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)

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)

1970

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： $J/\psi(cc)$ の発見= c クォークの発見 (S. Ting, B. Richter)

1976年： τ の発見 (M. Perl)

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

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

1980

1980年：グルオンジェットの発見 (at PETRA)

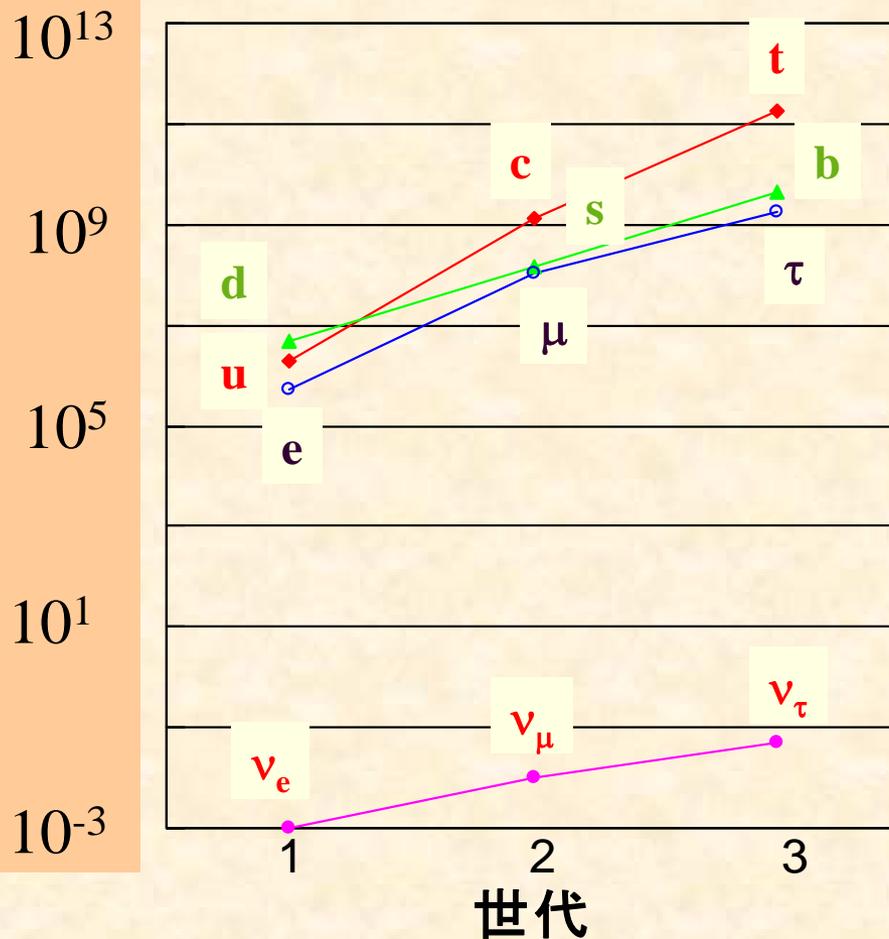
素粒子と素粒子間の力(素粒子標準理論)

| | | 物質粒子 | | | 力を伝える粒子 | | | | |
|------|------|---|---|--|---|--|--|-------|--|
| 電荷 | | 第1世代 | 第2世代 | 第3世代 | 強い力 | | | 電荷 | |
| 2/3 | クォーク |  アップ |  チャーム |  トップ |  グルーオン | | | 0 | |
| -1/3 | クォーク |  ダウン |  ストレンジ |  ボトム | 電磁力 | | | 0 | |
| 0 | レプトン |  eニュートリノ |  μニュートリノ |  τニュートリノ |  光子 | | | 0 | |
| -1 | |  電子 |  ミューオン |  タウ | 弱い力 | | | ±1, 0 | |
| | | スピン 1/2 | | | Wボソン | | | Zボソン | |
| | | | | | スピン 1 | | | | |

宇宙の目に見える物質(星、生命)は、アップクォーク、ダウンクォーク、電子(第1世代)のみでできている。

素粒子の質量

質量(電子ボルト)

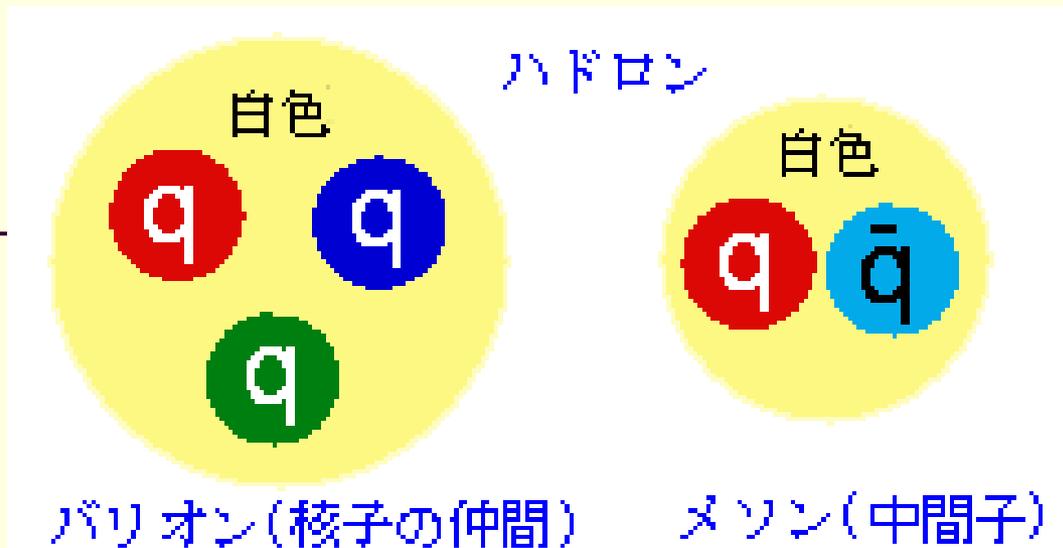


← W, Z

← 陽子(水素原子核)

$M_t > 10^5 M_e$
 $M_e > 10^8 M_{\nu_e}$

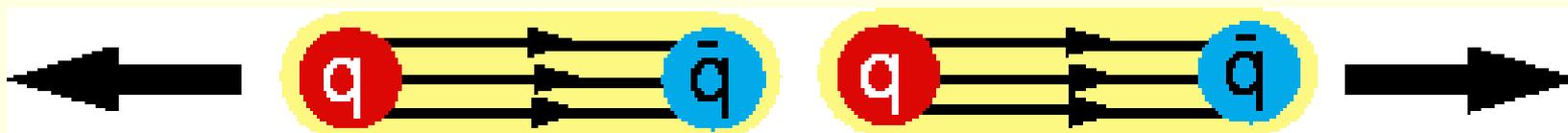
ハドロン



陽子(uud),中性子(udd)など

π^+ (u \bar{d})中間子, K^+ (u \bar{s})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。



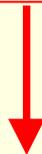
真空から産まれた
クォーク・反クォーク対

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(エネルギー保存則)、
空間一様性(運動量保存則)

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。(QCDカイラル凝縮)
2. ヒッグス機構で、ゲージ対称性が破れてヒッグス粒子(スピン0)が真空中に凝縮して、ゲージボソン(W, Z粒子)、クォーク、レプトンに質量を与えている。

新しい真空の概念

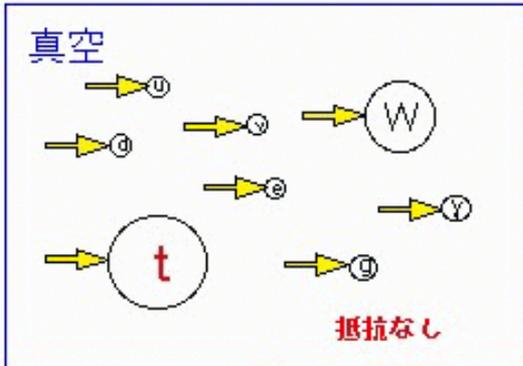
革命的な物理の枠組の変化
粒子=波動 (量子力学)
4次元時空 (相対論)

質量の起源 (ヒッグス機構)



ヒッグスポテンシャル

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



標準理論の考え方

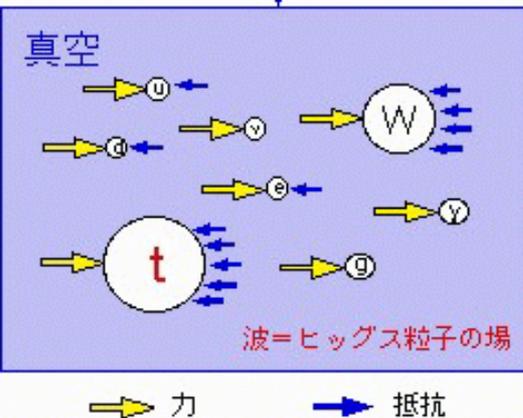
ビッグバン直後

真空から抵抗を受けないので粒子の質量は0。

$\mu^2 > 0$ (ビッグバン直後)

真空の相転移 (対称性の破れ)

$\mu^2 < 0$ (現在)



宇宙が膨張するとともに冷え、水蒸気が水になるように真空にヒッグス粒子の場が凝結する。

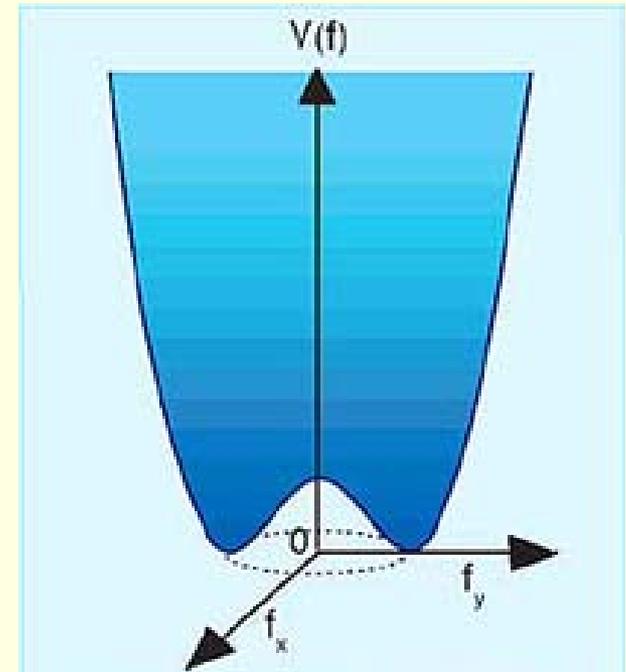
現在

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



ヒッグスポテンシャル $V(f)$: 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。

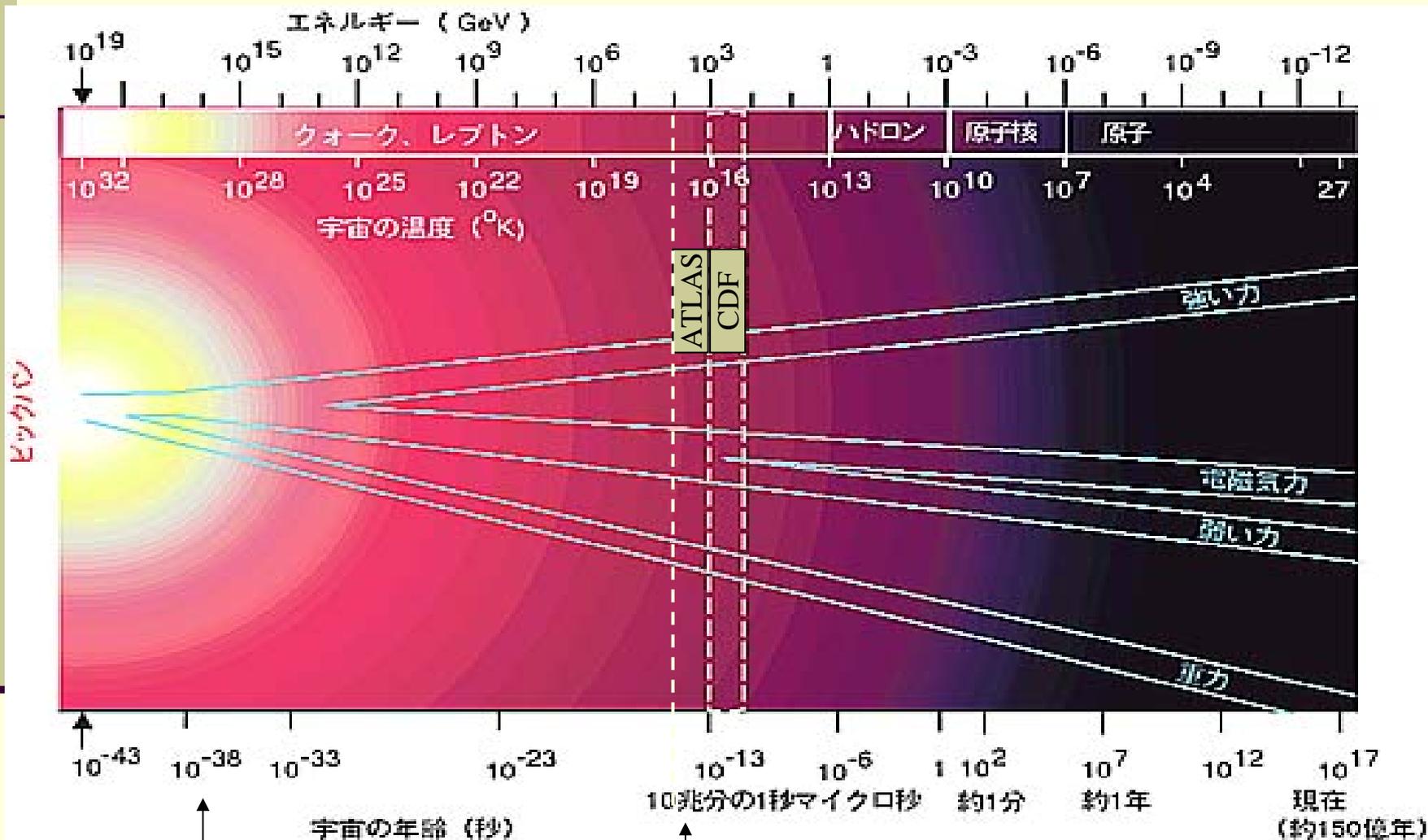
南部「自発的対称性の破れ」理論を基にしている標準理論の根幹となる仮説

自発的対称性の破れの原理は、
物理の基本法則は
多くの対称性をもっているのに
現実世界は何故これほど複雑なのか、
を理解するための鍵となっています。

基本法則は単純ですが、
世界は退屈でない、
なんと理想的な組み合わせ
ではありませんか。

南部 陽一郎

ビッグバン宇宙と素粒子物理

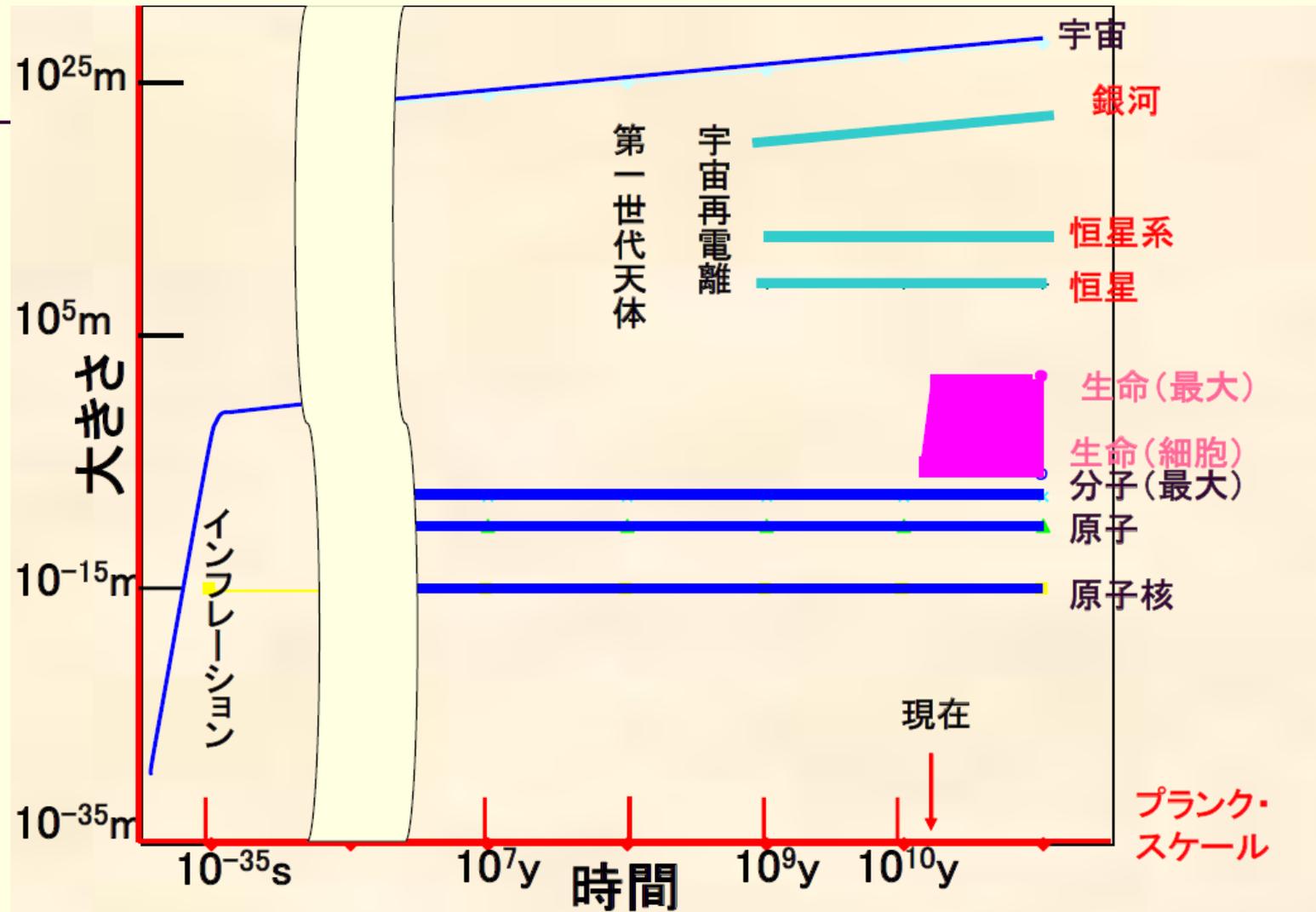


大統一理論
真空の相転移

電弱統一理論
ヒッグス粒子
真空の相転移

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

宇宙・物質・生命の階層と歴史



2007年度～ 宇宙史一貫教育プログラム

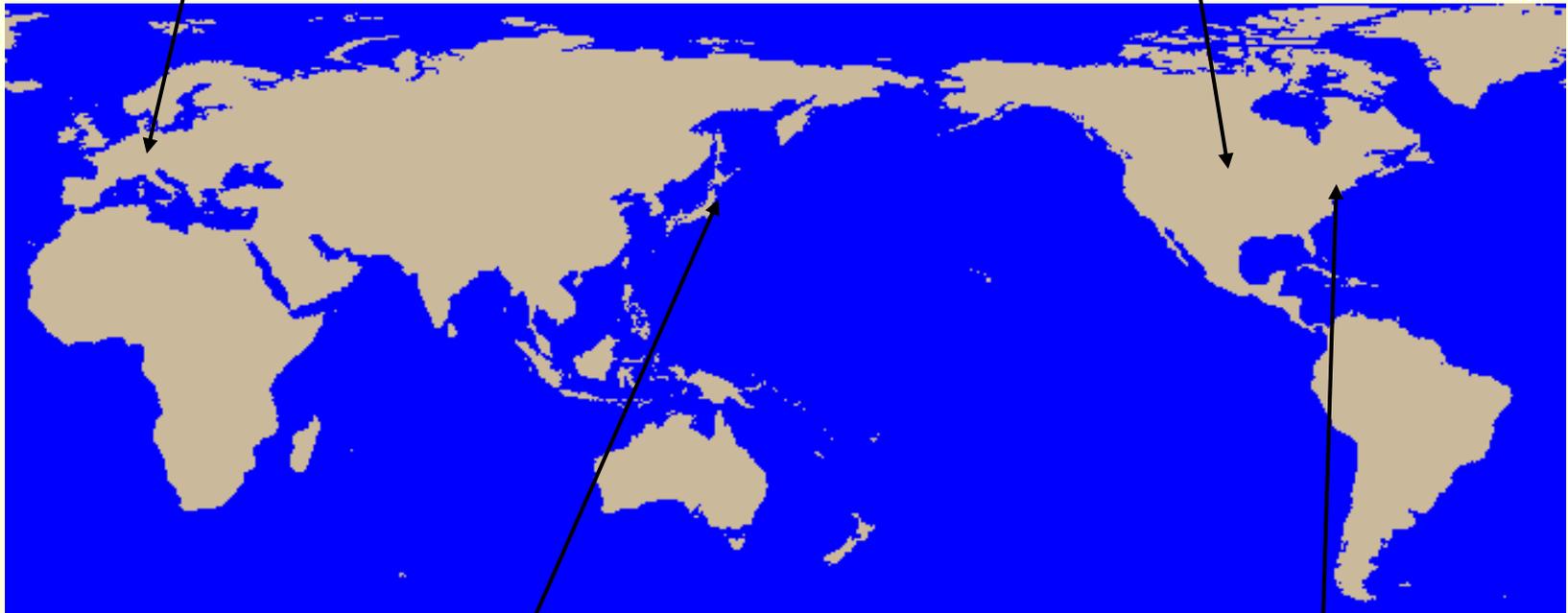
筑波大で素粒子・原子核・宇宙観測を統合的に教育。

CDF,RHIC,LHC,電波望遠鏡観測,宇宙赤外線観測。 2011年度 修士21名 博士15名

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
LHC加速器ATLAS実験

フェルミ国立加速器研究所(米国) FERMILAB
テバトロン加速器CDF実験

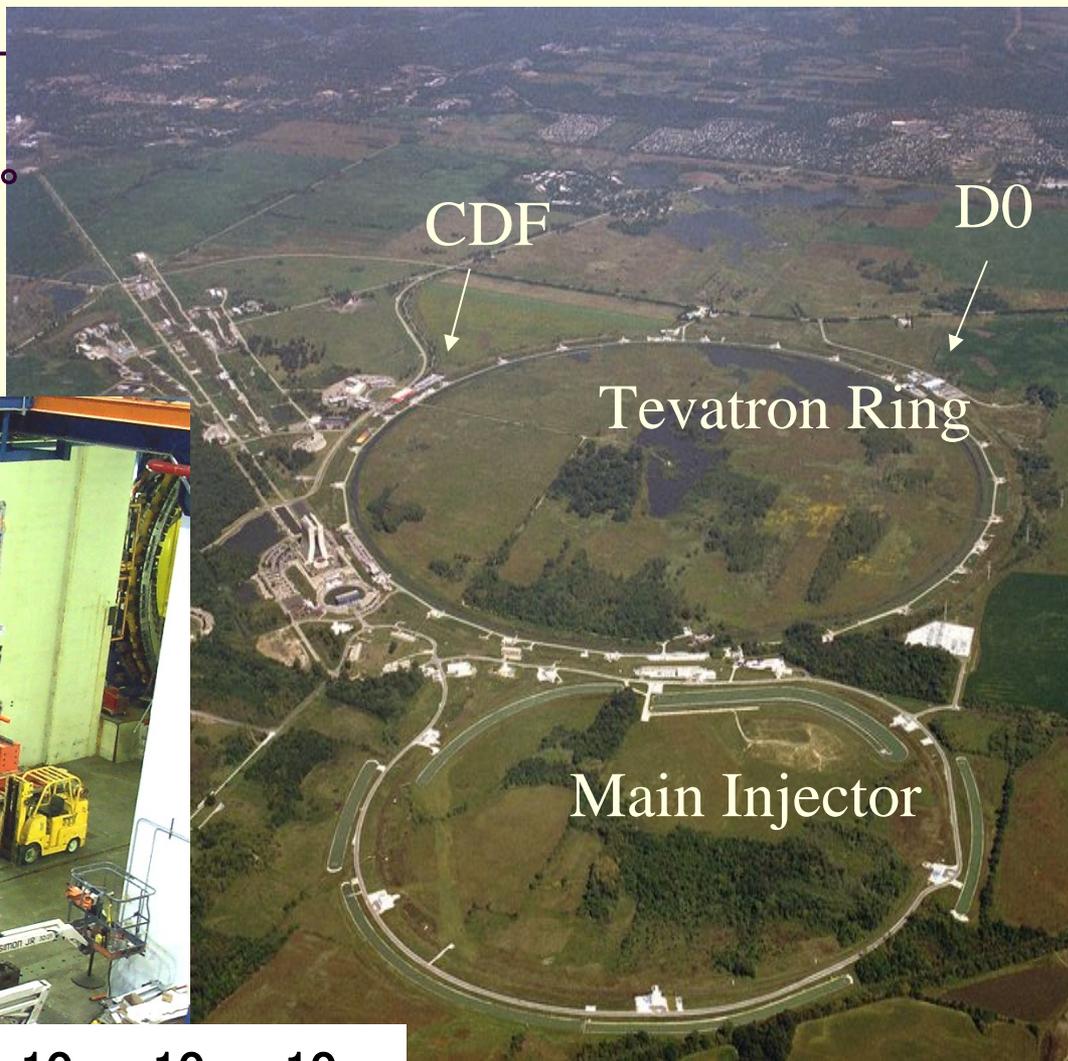


高エネルギー加速器研究機構(日本) KEK

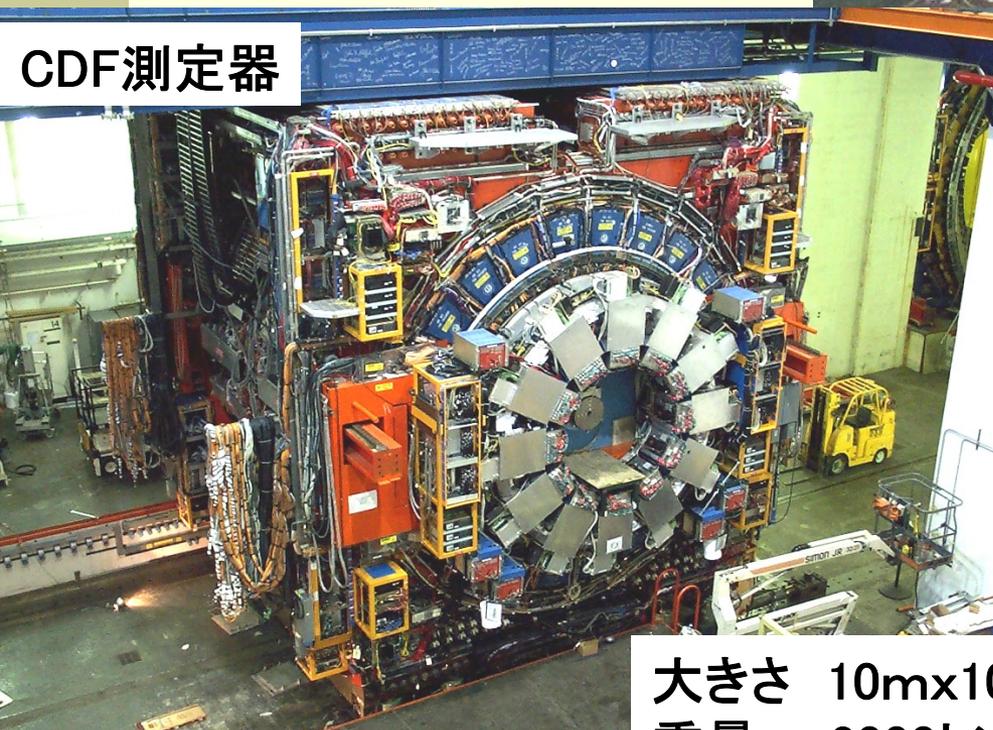
ブルックヘブン国立加速器
研究所(米国) BNL

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のテバトロン加速器。
陽子・反陽子衝突エネルギー
が2TeV(2×10^{12} 電子ボルト)



CDF測定器

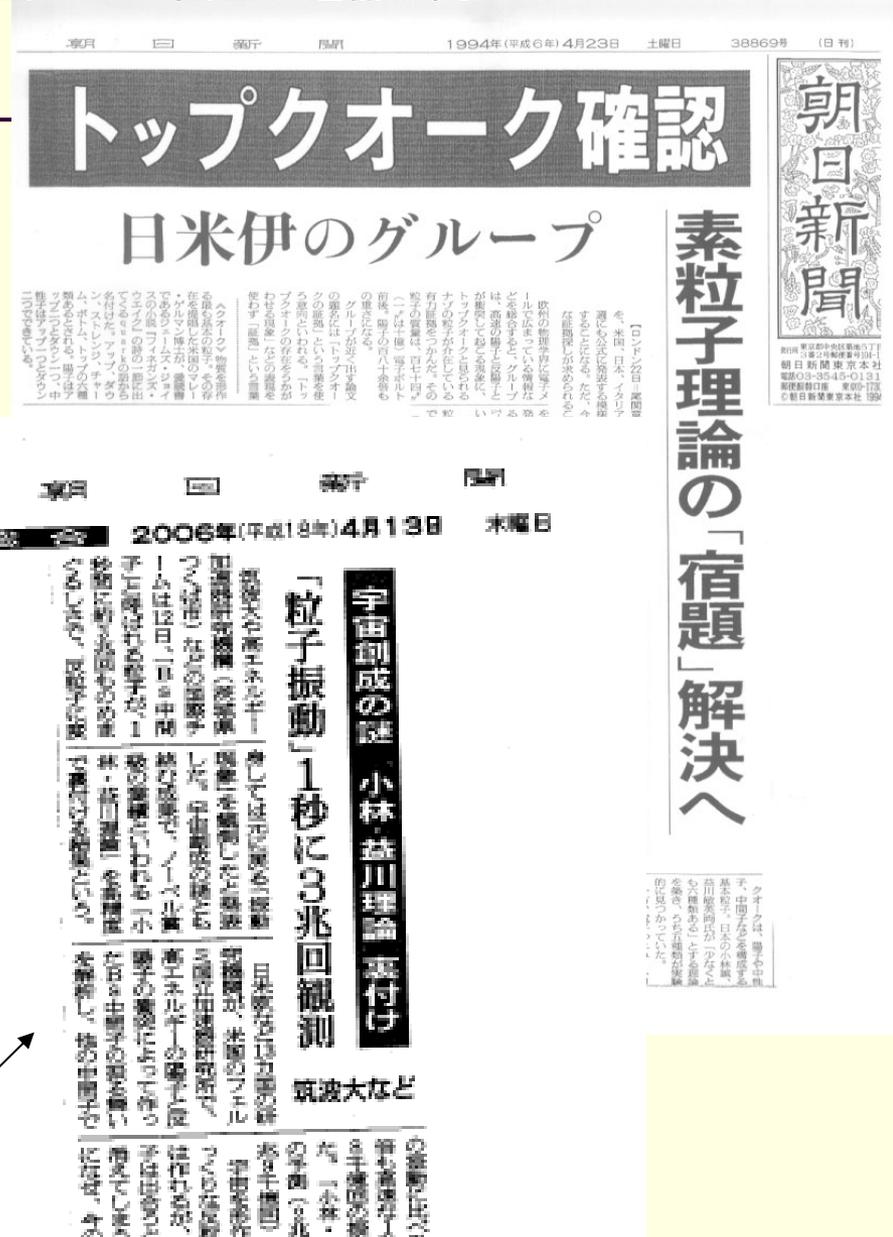


大きさ 10mx10mx10m
重量 3000トン

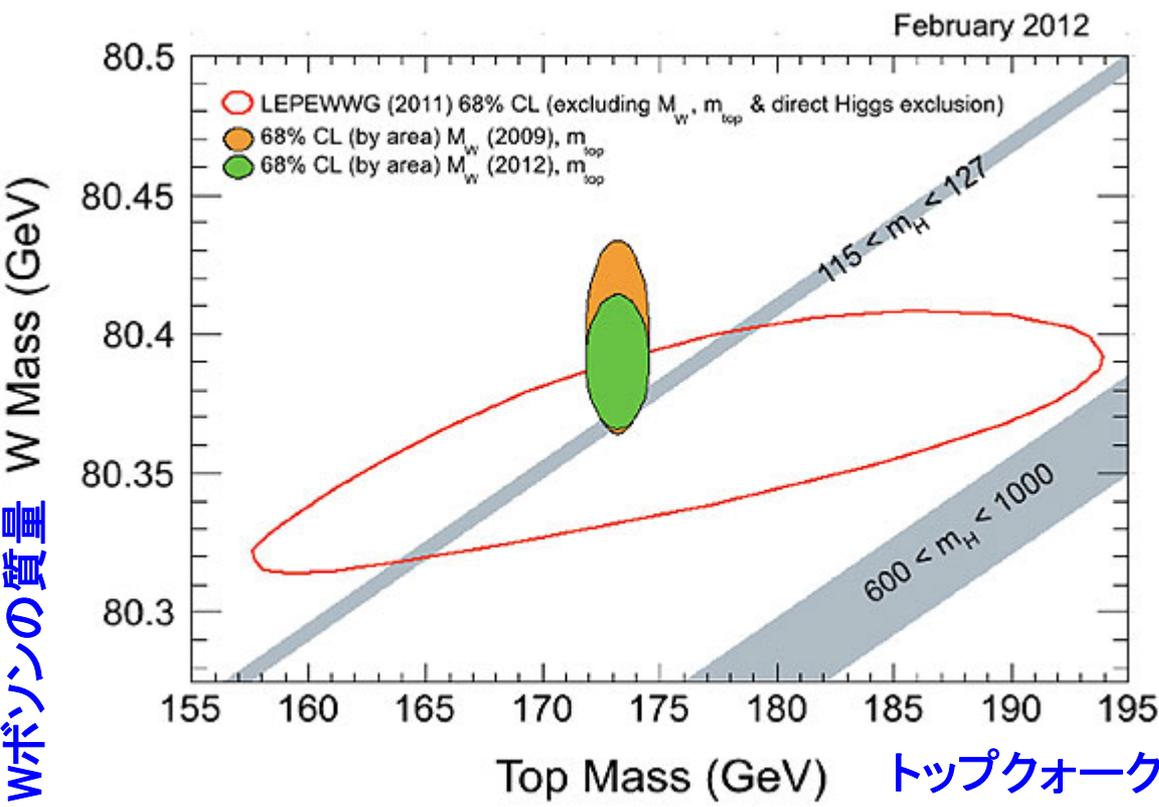
CDF実験の経過と主要な成果

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)
(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
- 2011年9月 実験終了



トップとWの質量測定によるヒッグス粒子の間接探索



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

1GeV = 10^9 電子ボルト

トップクォークの質量(Tevatron): $M_{top} = 173.1 \pm 0.9 \text{ GeV}/c^2$

Wボソンの質量(LEP2 + Tevatron): $M_W = 80.390 \pm 0.016 \text{ GeV}/c^2$

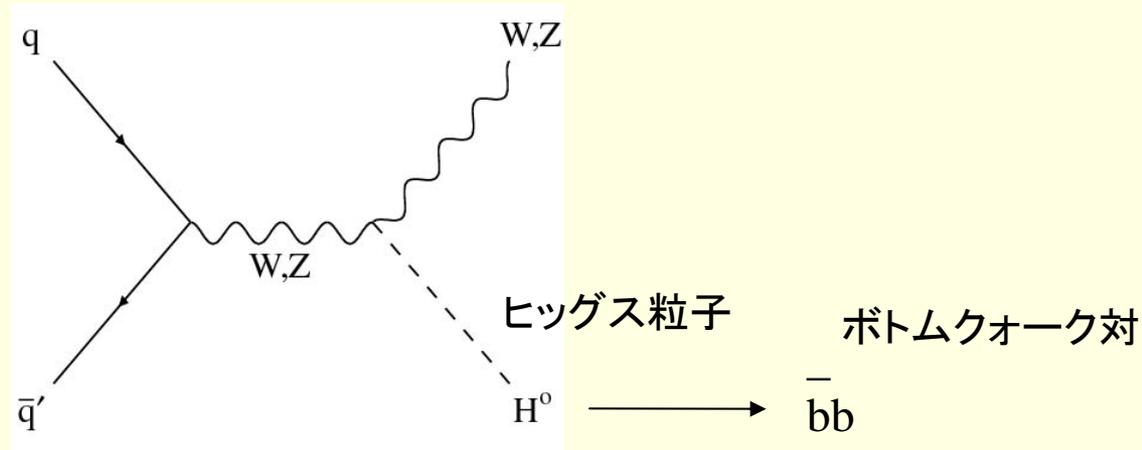
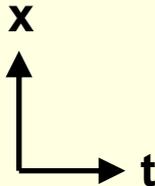
ヒッグス粒子の質量: $M_{Higgs} < 145 \text{ GeV}/c^2$ (95%信頼度)

テバトロン実験 (CDF + D0) での ヒッグス粒子の直接探索

軽いヒッグス粒子 ($M_H < 130 \text{ GeV}/c^2$)

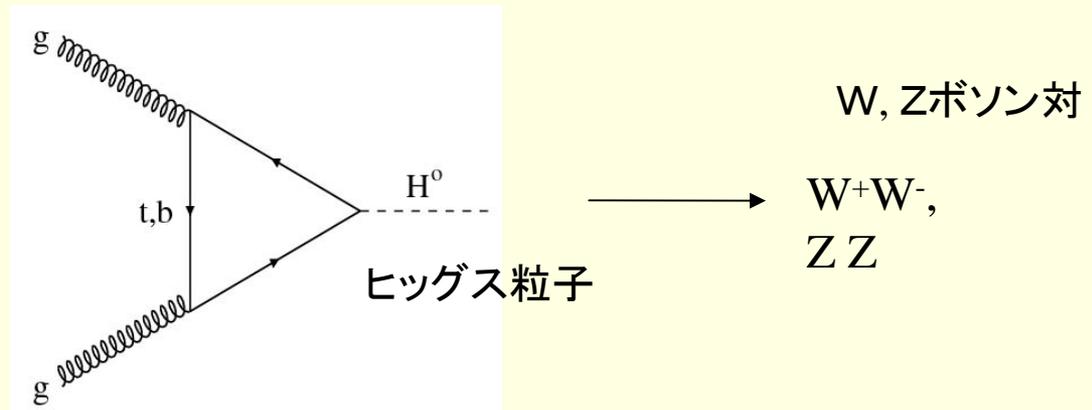
陽子中のクォーク
反陽子中の反クォーク

ファインマン
ダイアグラム



重いヒッグス粒子 ($M_H > 130 \text{ GeV}/c^2$)

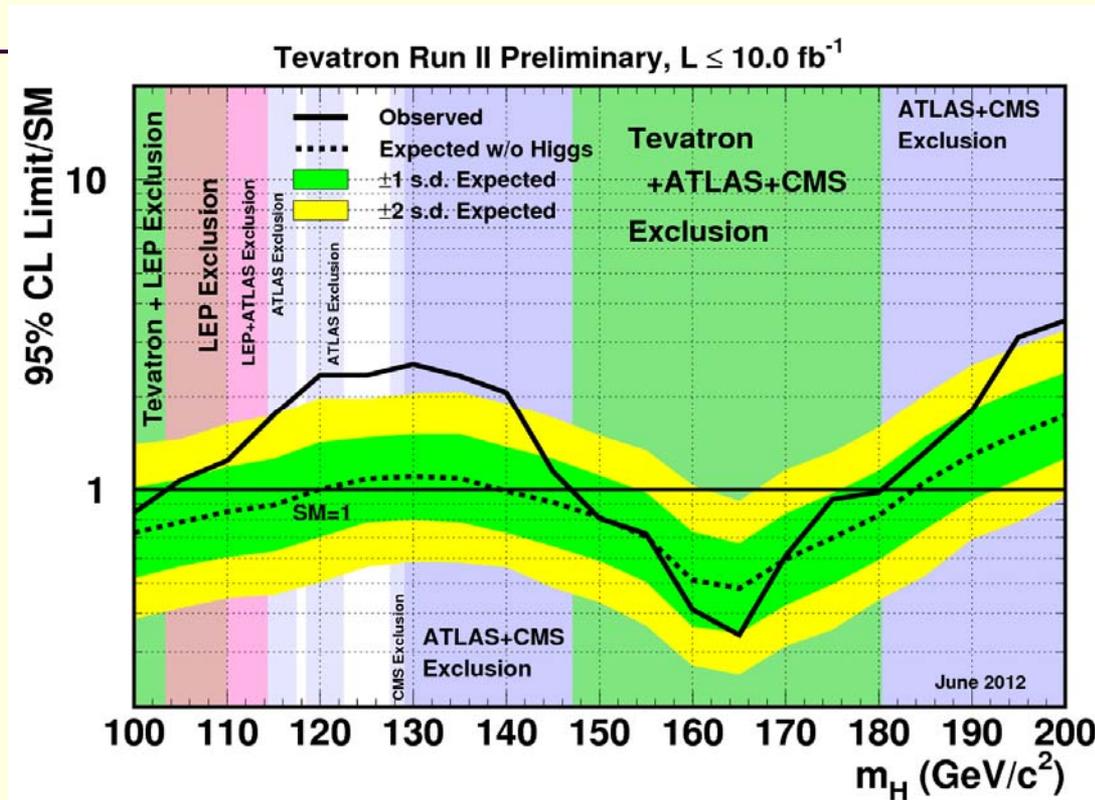
陽子中のグルオン
反陽子中のグルオン



テバトロンでのヒッグス粒子探索の結果

10fb⁻¹

断面積上限値(95%信頼度)
理論予言断面積



■ $M_H < 130 \text{ GeV}/c^2$ $pp \rightarrow WHX \rightarrow l \nu + bb + X$ 博士論文: 増淵達也, 永井義一(筑波大)

2012年7月2日

$147 < m_H < 180 \text{ GeV}/c^2$, $100 < m_H < 103 \text{ GeV}/c^2$ を95%信頼度で排除。

$115 < m_H < 135 \text{ GeV}/c^2$ の信号の有意性 2.5σ (99.4%信頼度)

2012年7月27日 $H \rightarrow b\bar{b}$ チャンネルだけを用いると有意性 3.1σ (99.9%信頼度)

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たいとされる欧州の加速器の本格稼働も、年々近づいている。

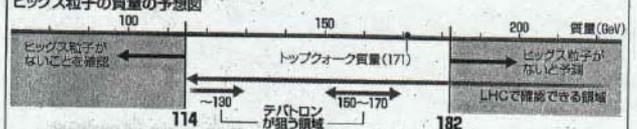
質量の謎解き 熱気帯びる

はゼロ。しかし、それは物質粒子と弱い力粒子に偏る。物理学者多くは、ヒッグス粒子という未知の粒が、この質量の謎を解くと考えている。ヒッグス粒子発見最初の候補として、ジュネーブ郊外の欧州原子核研究機構(CERN)で建設中なのが史上最大の加速器LHCの衝突エネルギー帯びる。

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 | 6.4km |
| 衝突エネルギー | 14000GeV | 8000GeV |
| 実験期間 | 2008年~ | 2001~09年(第2期) |
| 所在地 | ジュネーブ郊外 | シカゴ郊外 |



あなたはなぜ重いか

光、グルーオンなど
質量はなく光速で飛ぶ

電子、W粒子など
ヒッグス粒子の底粒と相互作用する

クォークのみ
ヒッグス(9%)

クォーク、反クォーク(99%)
の総和で2重の質量

クォーク・反クォークの海

ヒッグス粒子の海

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たしていたが、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砕氷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。光子のように光速で飛ぶ質量ゼロの粒子は、抵抗を受けないスケート靴を履いているようなものだ。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

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有二准教授は、今春、計算機内の仮想空間にクォークを置き、クォーク対の海で起きる現象を再現した。

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19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南部先生の功績が

テバトロンはLHC稼働前の最後の輝きに挑んでいる。陽子質量(1GeV)の30倍に達する質量粒子まで作り出すことができる。中性子と陽子でできている。それらが質量を帯びる。それが質量の源だ。ヒッグス粒子は、陽子と陽子を加速して衝突させれば瞬間的に発見する。エネルギーは同じものなのに、衝突エネルギーが大きいほど、衝突エネルギーが大きいほど、ヒッグス粒子発見の確率は高くなる。

テバトロンは現在最後の5GeV(10億電子ボルト)の衝突エネルギー帯びる。LHCの本格稼働は08年夏から、09年にはテバトロンがそれまでの約1年を延長したのには並ぶ。データを毎日蓄積し、分析する。年々近づいている。テバトロンは、LHCの本格稼働は08年夏から、09年にはテバトロンがそれまでの約1年を延長したのには並ぶ。データを毎日蓄積し、分析する。年々近づいている。テバトロンは、LHCの本格稼働は08年夏から、09年にはテバトロンがそれまでの約1年を延長したのには並ぶ。データを毎日蓄積し、分析する。年々近づいている。

現在説明不能な実験事実

1. 異常に重いトップクォーク、異常に軽いニュートリノ

$$M_{\text{top}}/M_e = 3.5 \times 10^5$$

$$M_\nu/M_e = 10^{-8} \sim 10^{-6}$$

ヒッグス粒子
トップクォーク
ニュートリノ

2. なぜ3世代か？

なぜ質量起源として、ヒッグス機構とQCDカイラル凝縮の2段階あるのか？

3. 暗黒物質とは？ 暗黒エネルギーとは？

ヒッグス粒子の発見とその性質の解明は特に1の疑問に対する答のヒントを与えるであろう。

おわりに

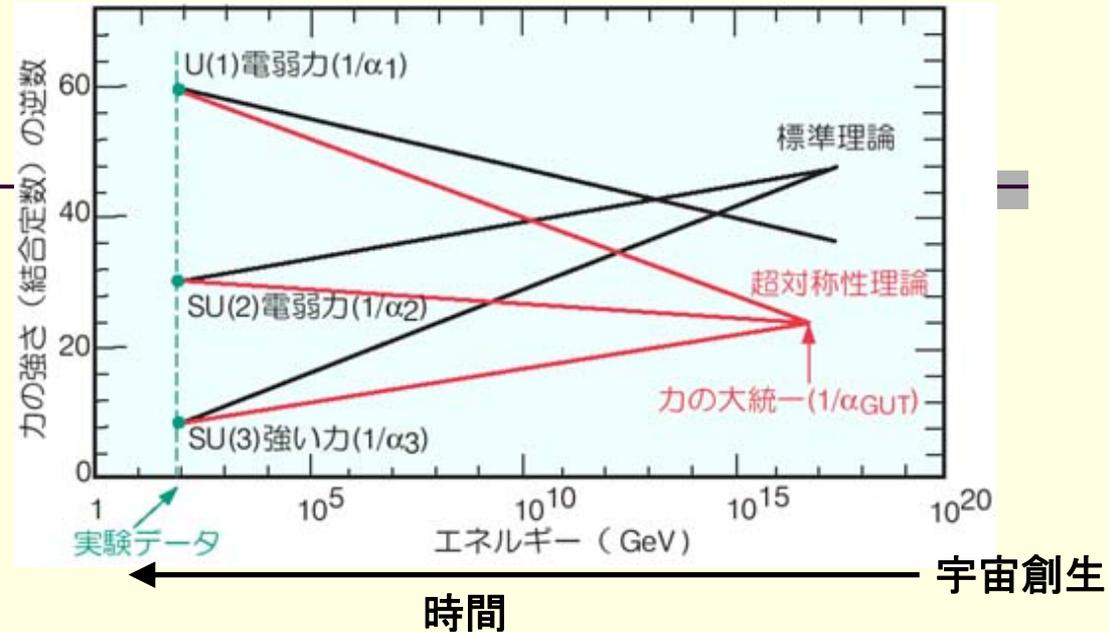
素粒子標準理論の根幹には、**自発的対称性のやぶれの理論**を基にして、物質の質量が与えられるというヒッグス機構がある。この機構はビッグバン宇宙がどのように進化したのかを説明する重要な役割をはたす。 → **「新しい真空の概念」**

今後、ヒッグス粒子の基本的な性質(質量、崩壊分岐比、生成断面積など)をもっと精密に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ことが期待される。**

BACKUP

大統一理論

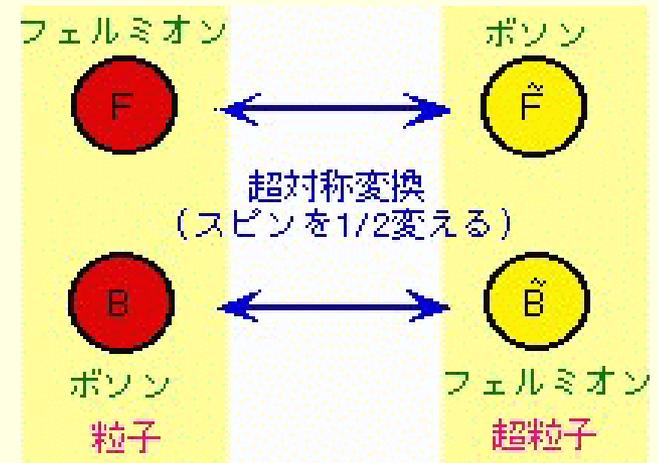
三つの力(電磁力、弱い力、強い力)は、宇宙創生直後の高温時には対称性が成り立ち、同一の力であった。それが冷えてきたときに対称性が破れて異なる力に見えるようになった。



超対称性理論

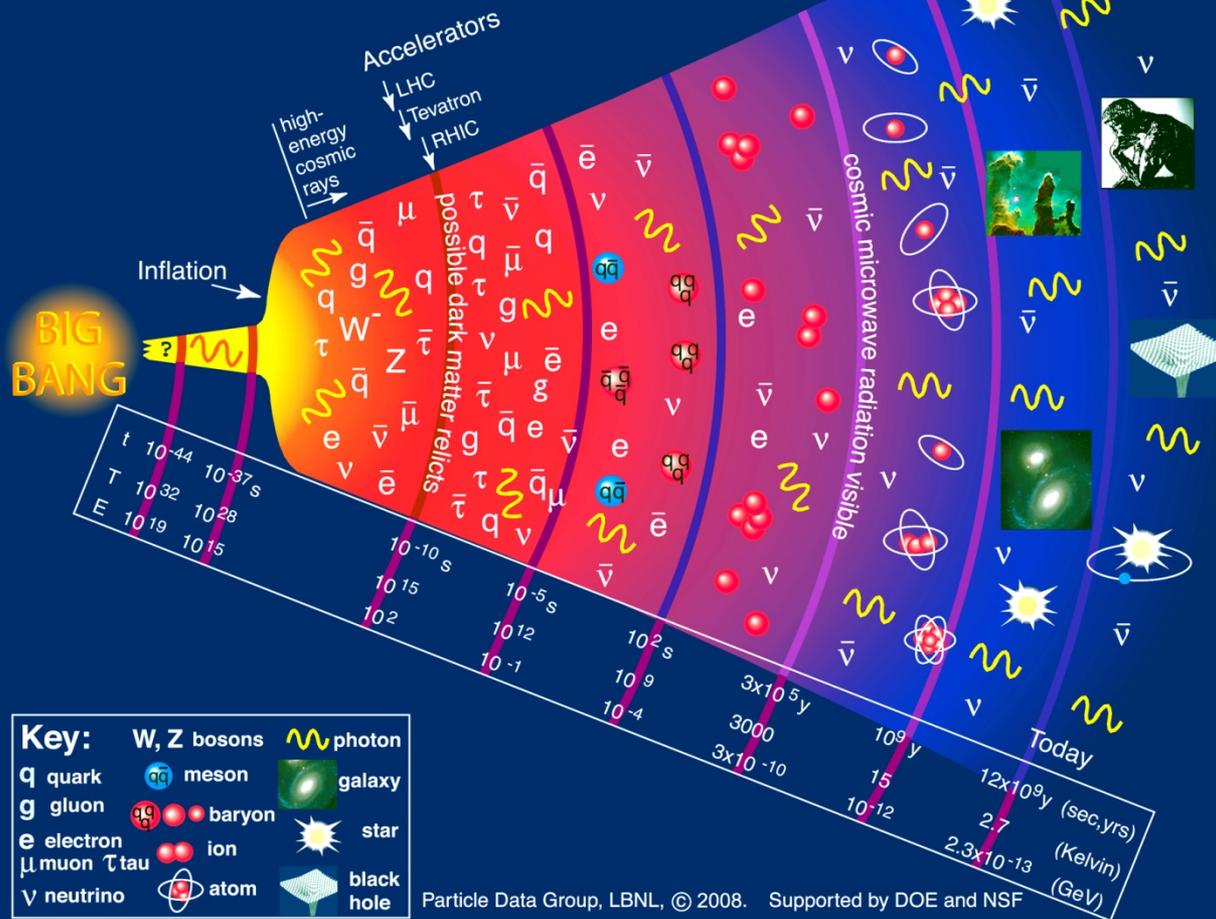
すべてのフェルミオン(ボソン)には超対称粒子のボソン(フェルミオン)のパートナーが存在する。この超対称性を仮定すると、三つの力の大統一がある高温状態で成り立つ。

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。



宇宙史

History of the Universe



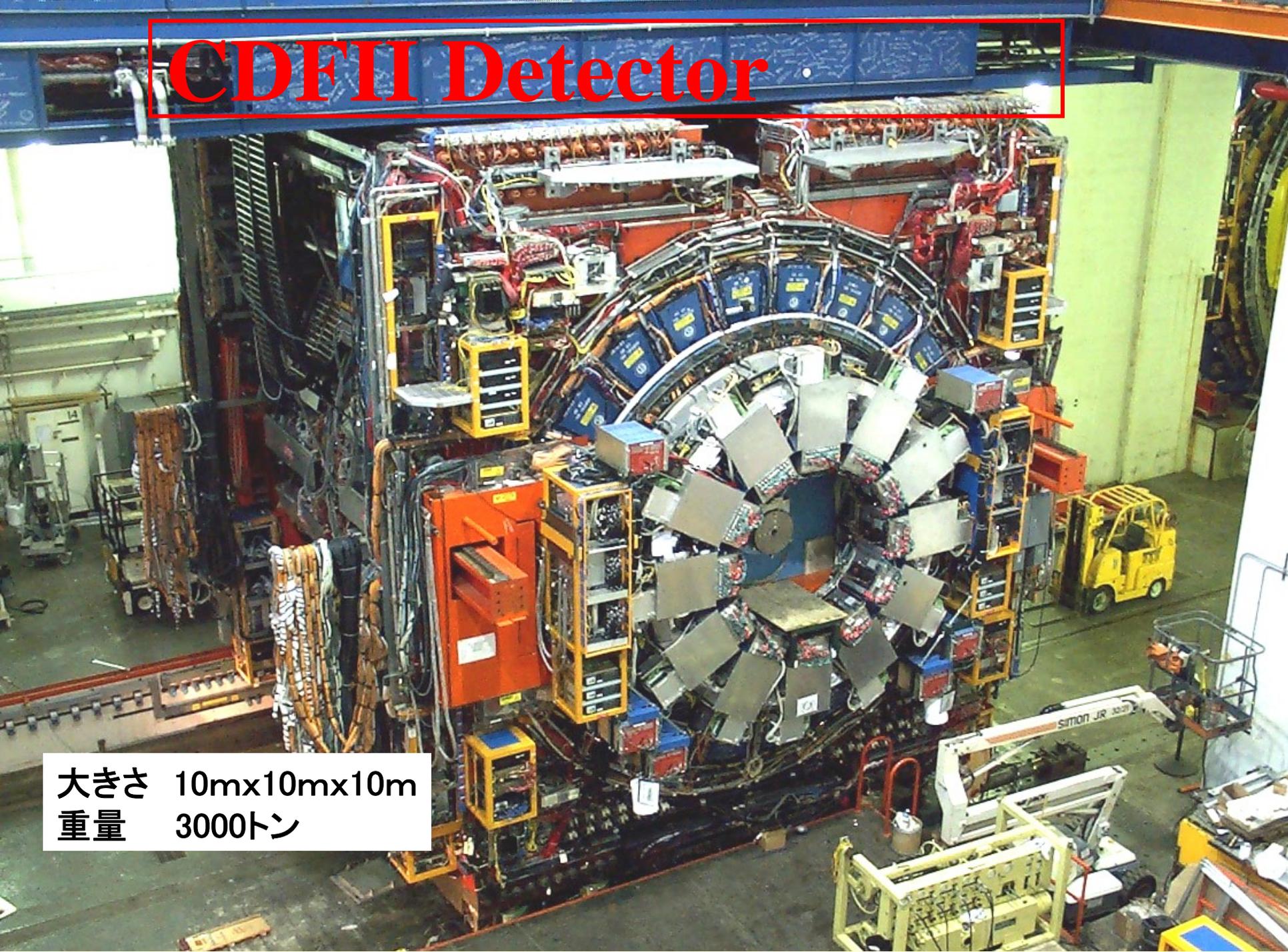
2007年度～ 宇宙史一貫教育プログラム

筑波大で素粒子・原子核・宇宙観測を統合的に教育。

CDF,RHIC,LHC,電波望遠鏡観測,宇宙赤外線観測。 2011年度 修士21名 博士15名

CDFII Detector

大きさ 10m×10m×10m
重量 3000トン





Muon System

Central Calor.

New

Old

Partially
New

Solenoid

Plug Calor.

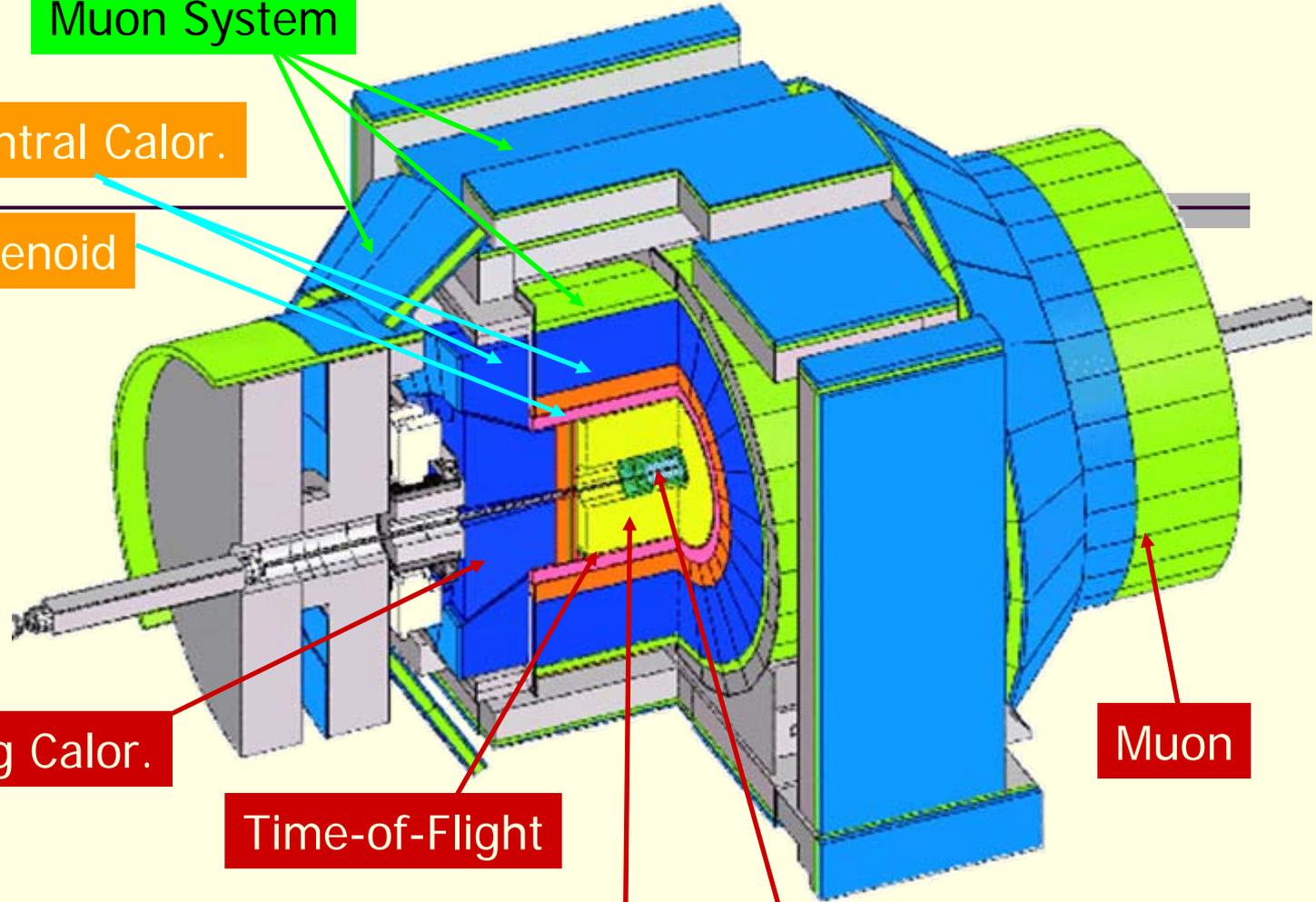
Time-of-Flight

Drift Chamber

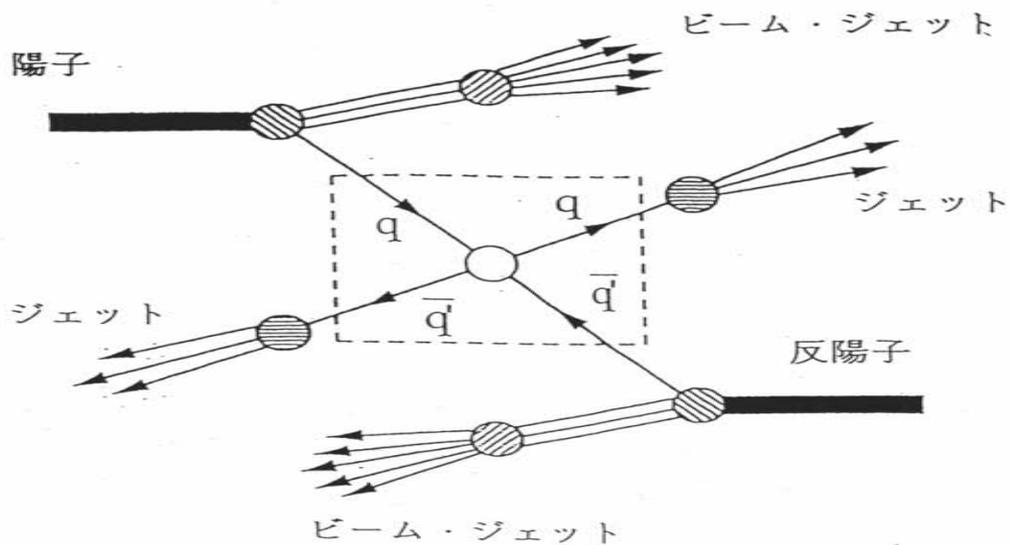
Silicon Microstrip
Tracker

Muon

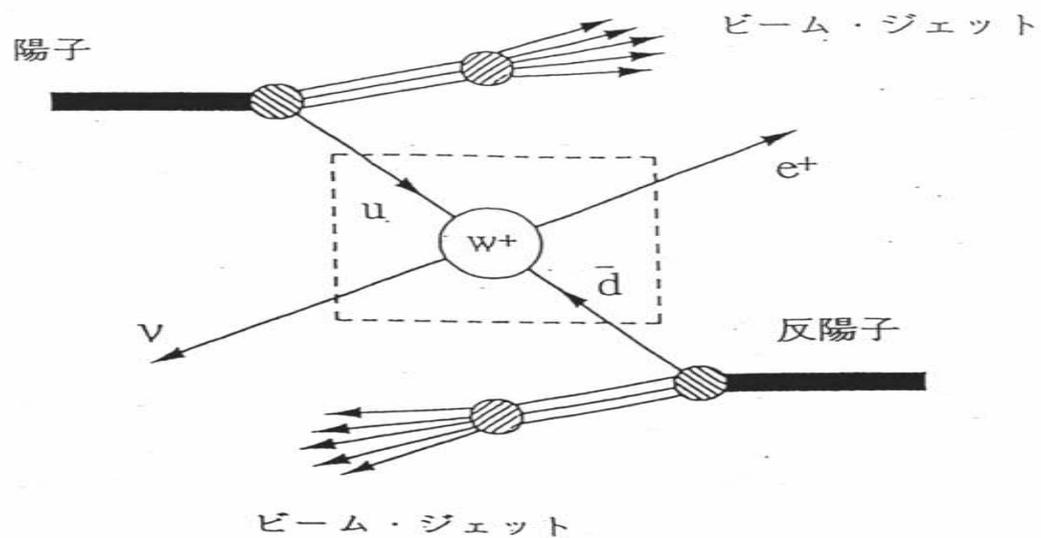
Front End Electronics
Triggers / DAQ (pipeline)
Online & Offline Software



(a)

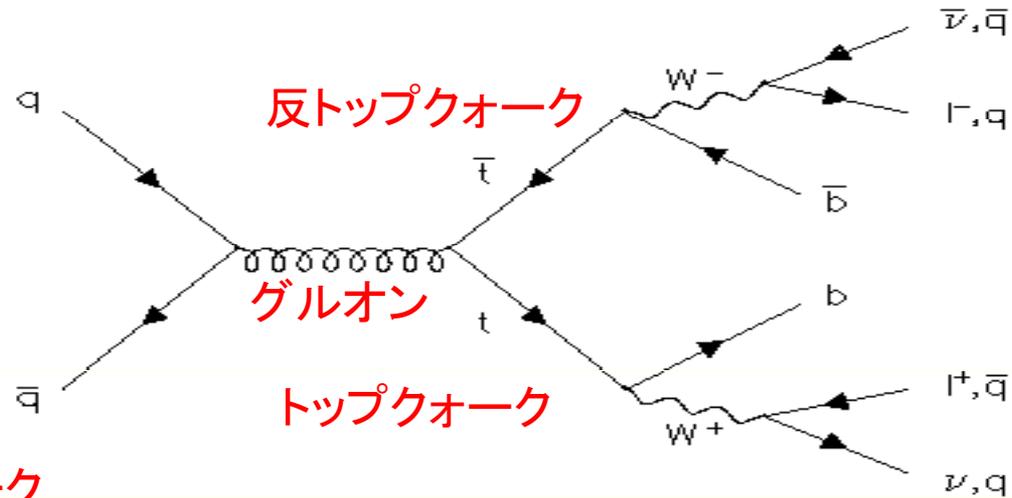


(b)



トップクォーク対生成のファインマン図

陽子の中のクォーク



反陽子の中の反クォーク

- 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

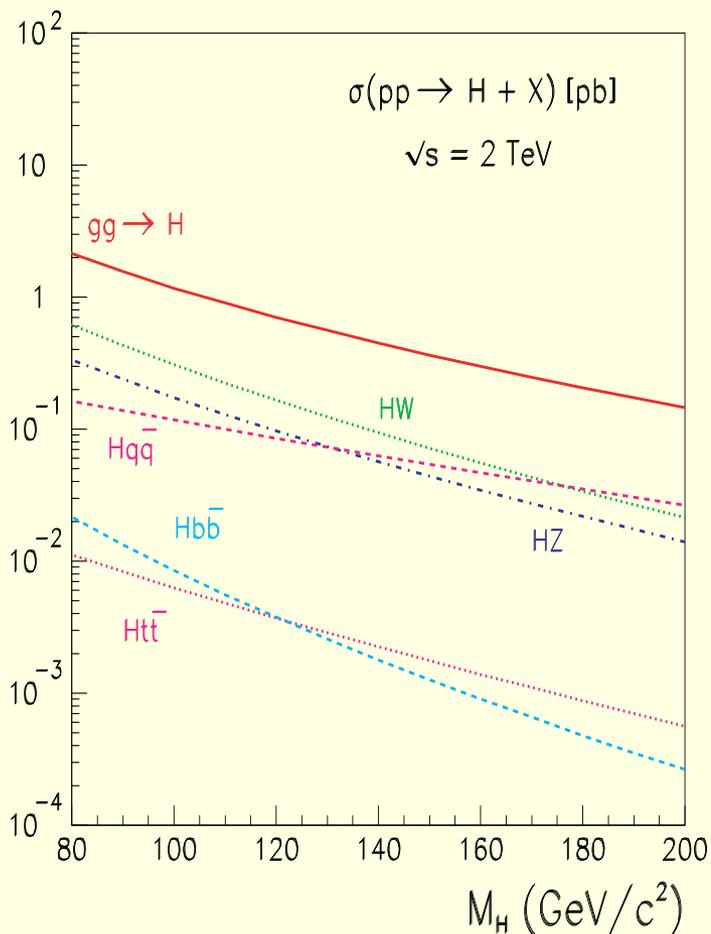
$$t \bar{t} \rightarrow W^+ b W^- \bar{b} \rightarrow l^\pm \nu q' \bar{q} b \bar{b}$$

- Multi-Jets (All Hadronic)チャンネル

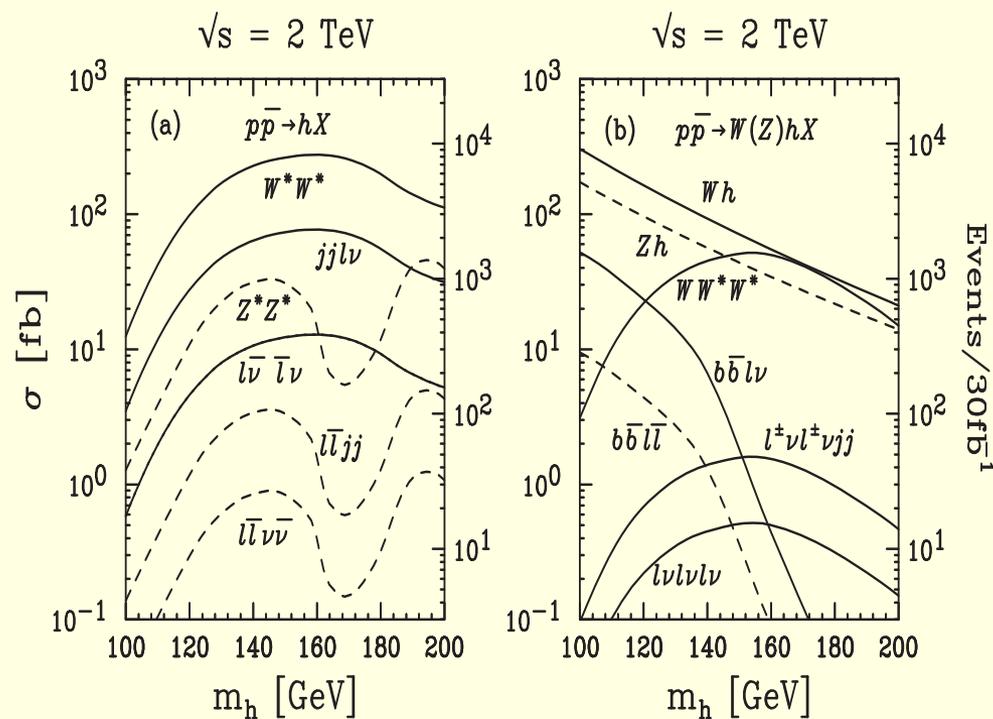
$$t \bar{t} \rightarrow W^+ b W^- \bar{b} \rightarrow q' \bar{q} q' \bar{q} b \bar{b}$$

ヒッグス粒子(標準模型)の生成断面積と崩壊分岐比 (TEVATRON)

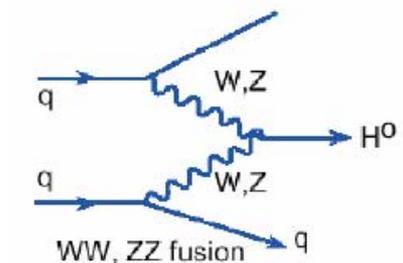
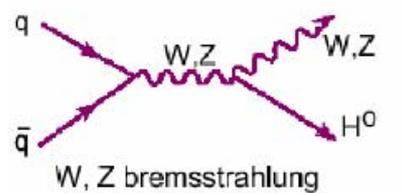
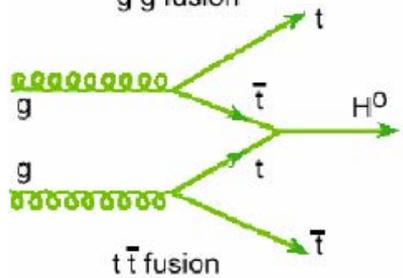
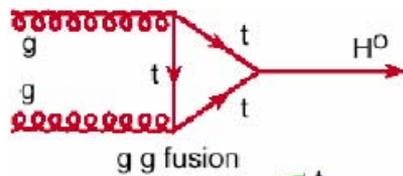
生成断面積(TEVATRON)



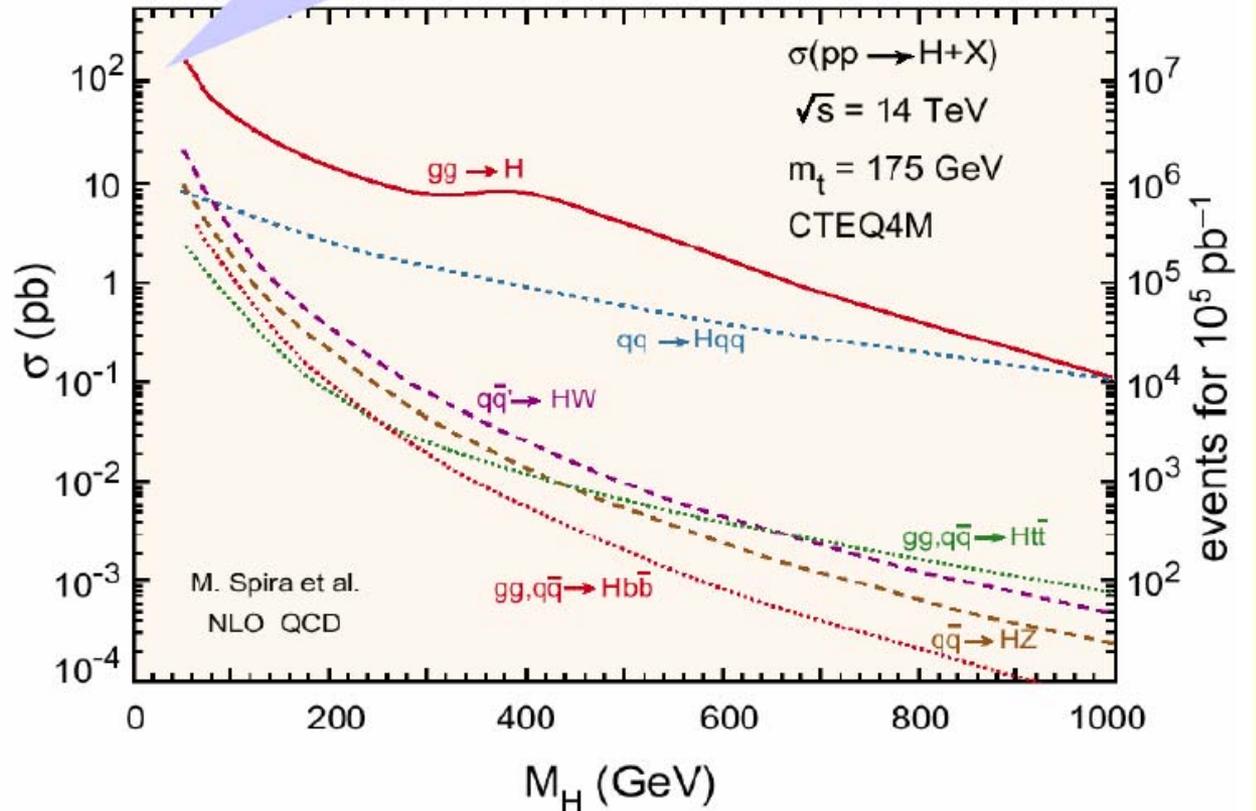
生成断面積×分岐比



ヒッグス粒子(標準模型)の生成断面積(LHC)

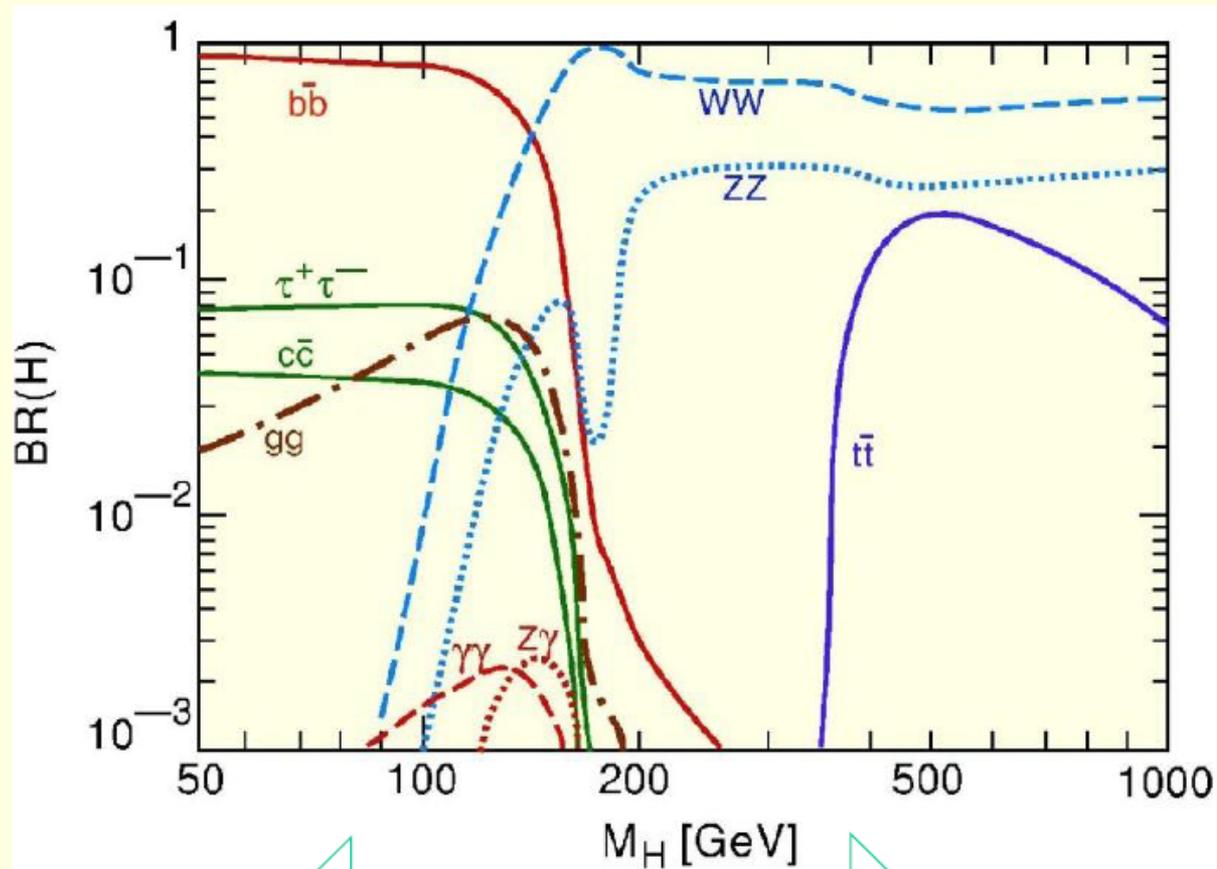


100 pb: 1 事象/s @ $10^{34}/\text{cm}^2/\text{s}$



~事象/y

ヒッグス粒子(標準模型)の崩壊比



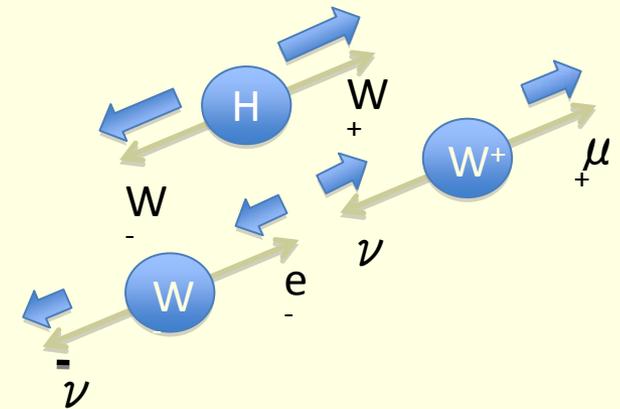
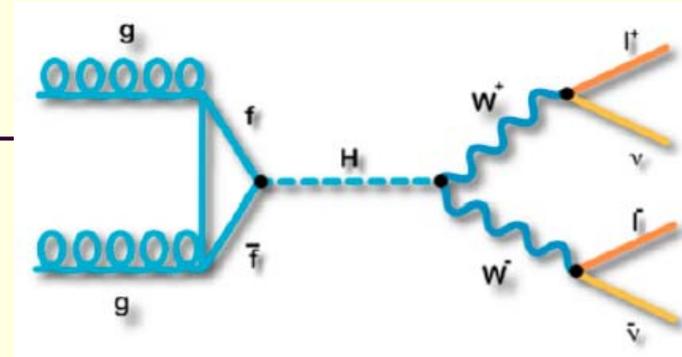
$bb, \tau\tau$

WW, ZZ

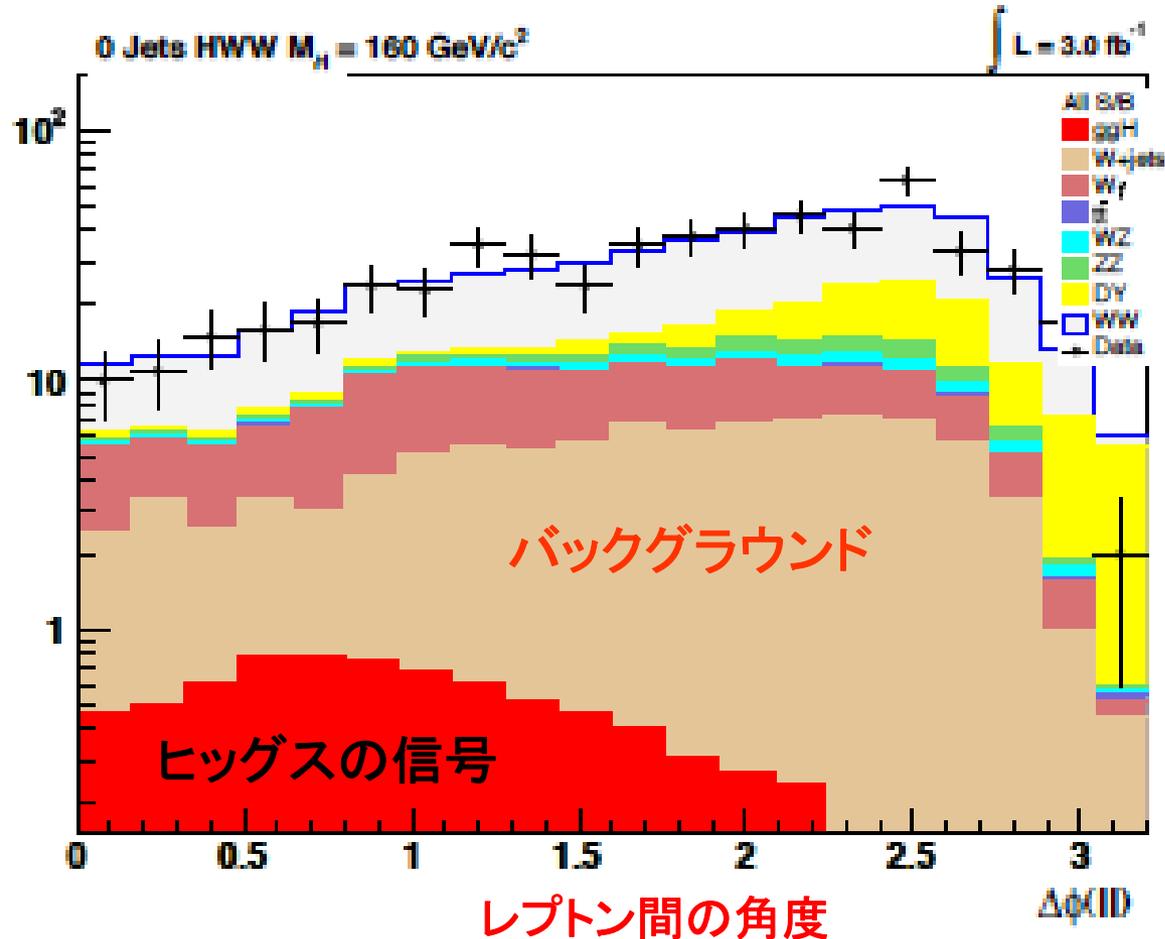
重い領域でのヒッグス粒子探索

■ $H \rightarrow WW \rightarrow l\nu l\nu$

2つの荷電レプトン(電子かミュー粒子)

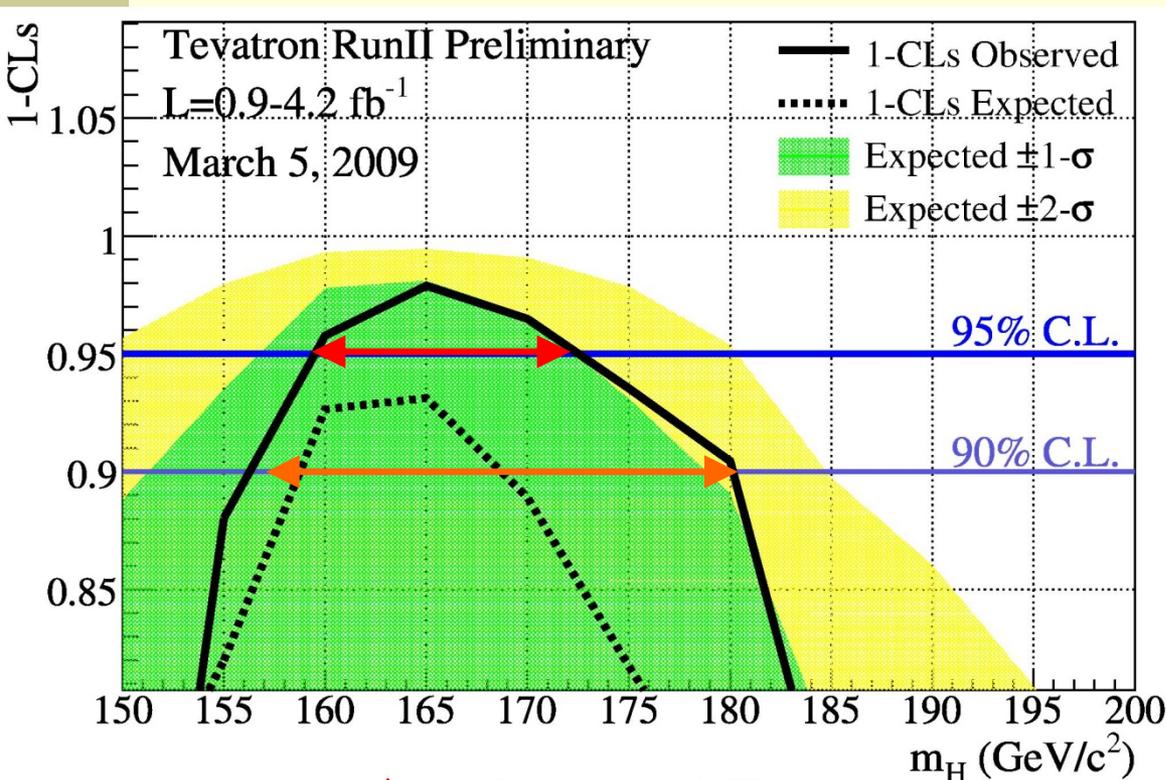


ヒッグス粒子の崩壊で生成したレプトン間の角度は小さくなる。一方、バックグラウンドの角度分布は異なる。



重い領域でのヒッグス粒子探索

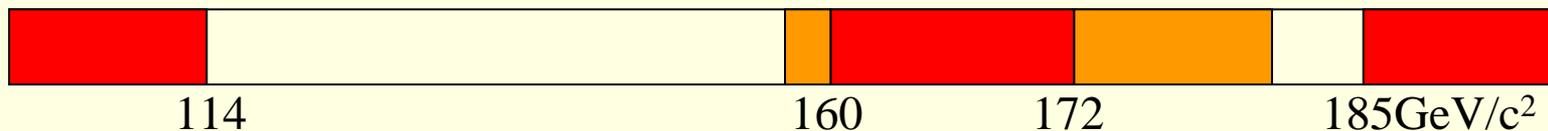
ヒッグス粒子の存在を否定する信頼度



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。

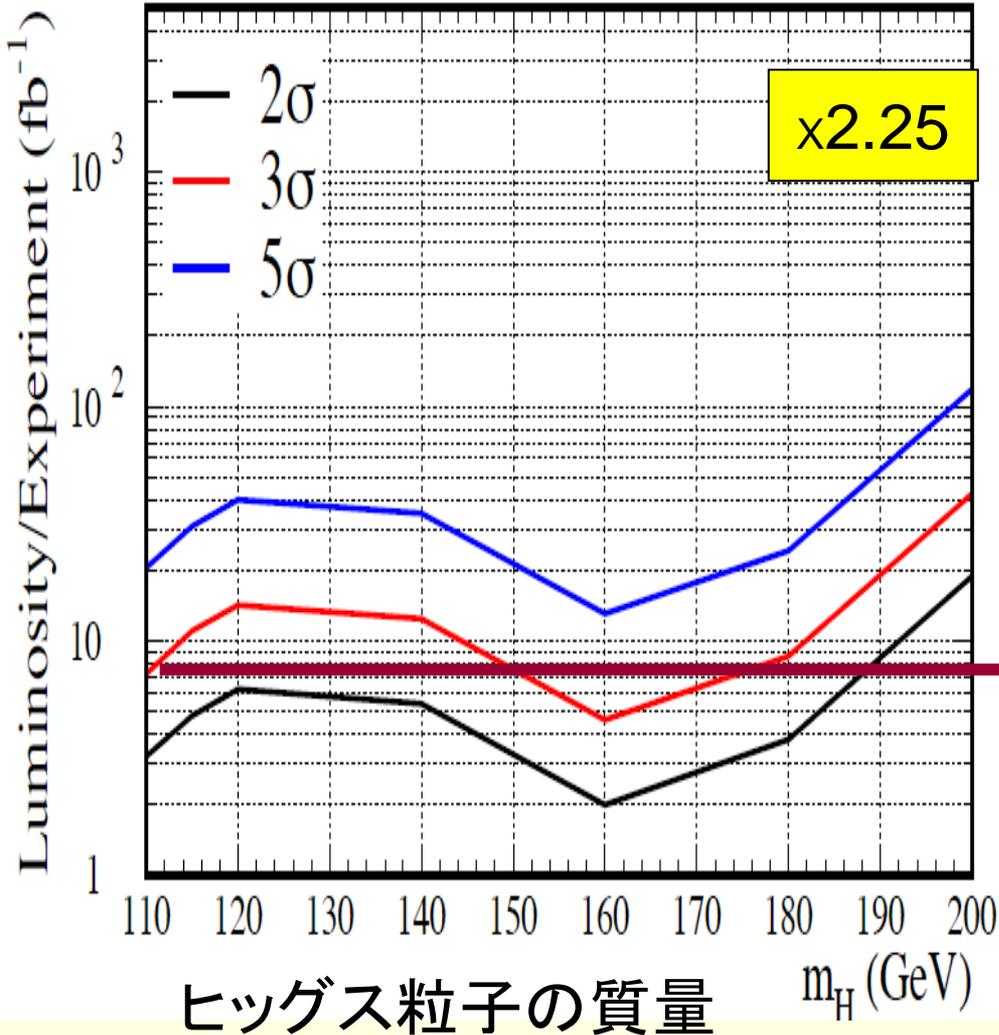
信頼度90%で、
質量157～180GeV/c²
のヒッグス粒子の存在
を否定した。



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

・185GeV/c²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150~170GeV/c²のヒッグス粒子を検出。

→ 7.0

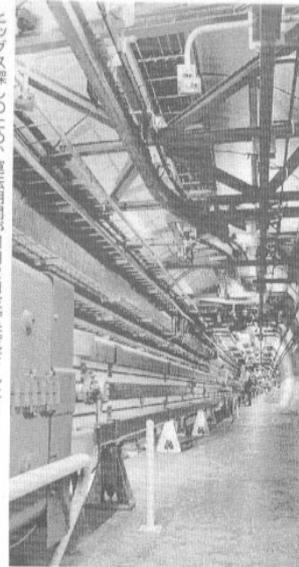
素粒子物理、宇宙物理についての解説書

- 「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

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ころが簡単ではない。質量のかぎを握る未知の粒子ヒッグスの存在を示すこれまでに最も信頼性の高いデータが、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さる。

力ギ握る粒子「ヒッグス」 欧州チーム「存在示唆」



ヒッグス探しのため、運転期間が1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)

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からな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に決めなければならない。

ぶつかった、動きが鈍くなるため、質量があるように見えると観測された。未知の粒子は提唱者にちなみ「ヒッグス」と呼ばれる。米国フェルミ国立加速器研究所の加速器パトロンがヒッグス探しに挑む金原弘・筑波大学教授によ

ると、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まれな場合にしか現れない。人工的につくるには非常に高いエネルギーが必要。

いエネルギーが要る。八〇年代、ヒッグスを探す大加速器計画が登場した。米国のSSC(二〇八十七キロ)とCERNのLHC(四十二キロ)。計画では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は建設費を二千億程度に抑え、二〇〇五年の運転開始を目指している。

だ、あと二カ月実験できれば、今回の原因がヒッグスかどうかはほぼ確定できる。LEPの運転は特別な兆候がない限り、今月末で終わる予定だったが、今回の結果を受けて十一月一日まで約一カ月の延長が決まった。それまでに確定できるかどうかは「微妙なところ」(胸宮さん)。

既存の加速器にチャンス
とこが最近、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下方修正された。これならCERNの運転中の加速器LEPや、テパトロン(能力でも見つかるとも)かもしれない。

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を見えてくる」と胸宮さん。

慎重な見方をする
「観測したのは、ヒッグスが崩壊したときみられる約五通りのパターンのうち一通りだけ。残りの三パターンはまだ有意な事象も観測していない。データ数が少ないので、科学的に確定できる段階ではない。た

り、LHCはむしろ、日本が中心となってアジアで進めているJLC計画に期待がかかる。二十〇〇〇年前後の運転開始を目標にしている。

ヒッグス粒子探索についての記事 (2000年)

CERN研究所の電子・陽電子衝突実験(LEP2実験)で質量115GeVのヒッグス粒子の候補事象が見えた。これがヒッグス粒子かどうかはフェルミ研究所での陽子反陽子衝突実験で明らかにできる。

「レプ」がこのほか、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

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と「超

「LHCはヒッグス以外の粒子もつく。上空から全体を見渡すような加速器だ。これに対し、ヒッグス工場としてこの粒子をシャブりつくすJLCのような加速器もますます必要になる

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)

| | 第1世代 | 第2世代 | 第3世代 | 電荷 |
|------|------------------|---------------------|---------------------|--------|
| クォーク | アップ u (0.002) | チャーム c (1.3) | トップ t (175) | $2/3$ |
| | ダウン d (0.005) | ストレンジ s (0.14) | ボトム b (4.2) | $-1/3$ |
| レプトン | 電子 e (0.0005) | ミュー粒子 μ (0.106) | タウ粒子 τ (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)

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)

()内の数字はGeVの
単位で書かれた質量。
 $1\text{ GeV} = 10^9$ 電子ボルト

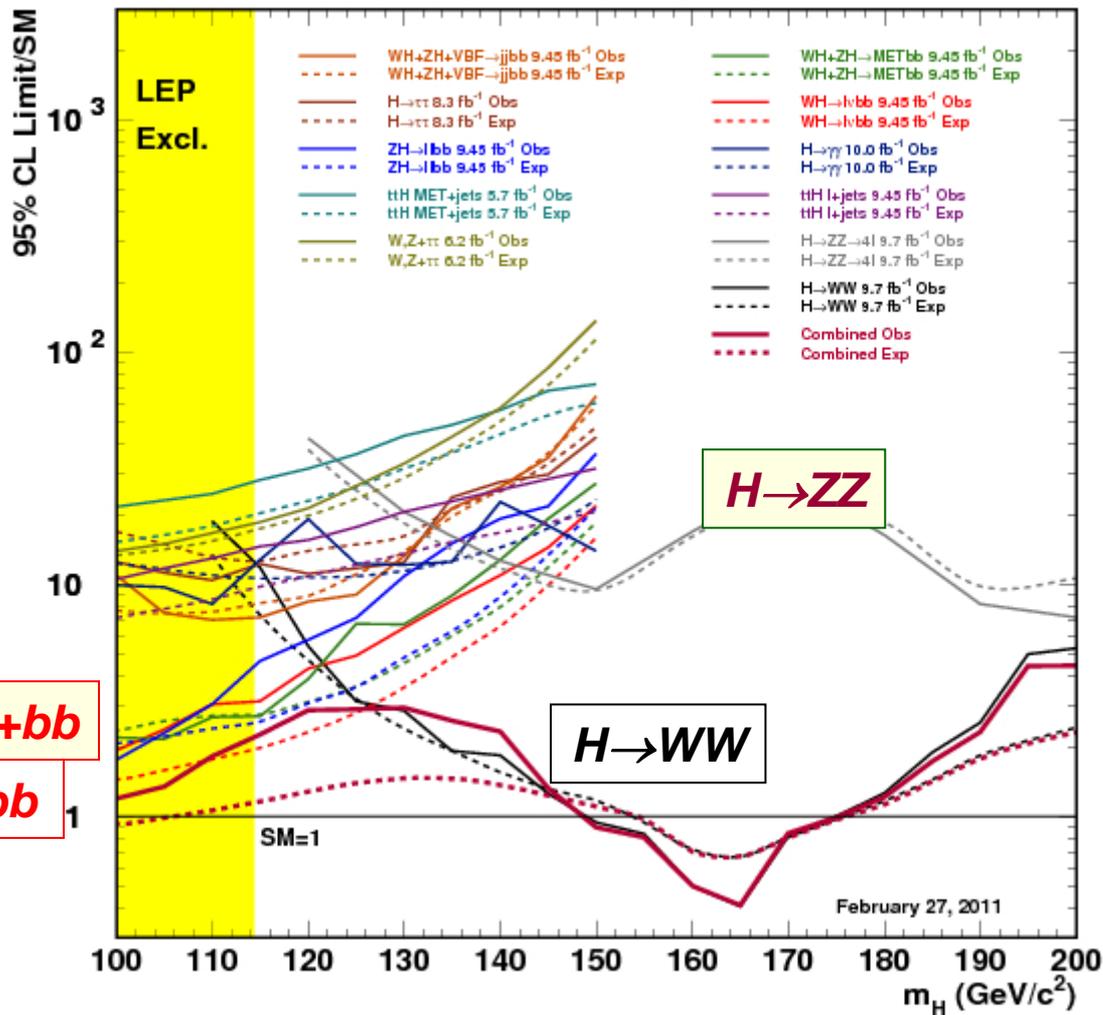
ヒッグス粒子の直接探索の結果

断面積上限値 (95%信頼度)
理論予言断面積

$WH, ZH \rightarrow \text{Met} + bb$

$WH \rightarrow l\nu bb$

CDF Run II Preliminary, $L \leq 10.0 \text{ fb}^{-1}$



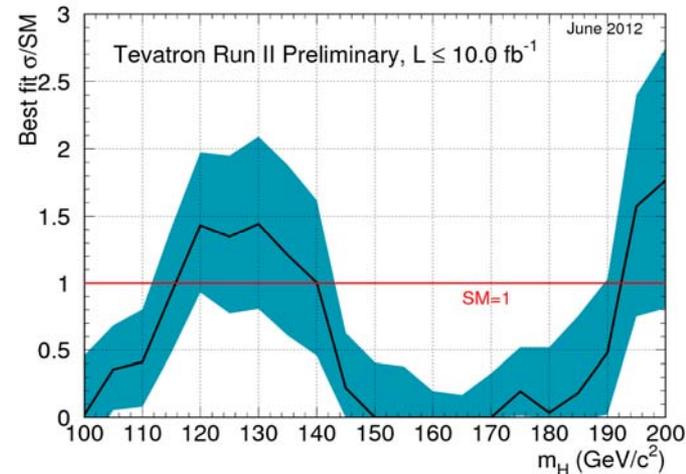
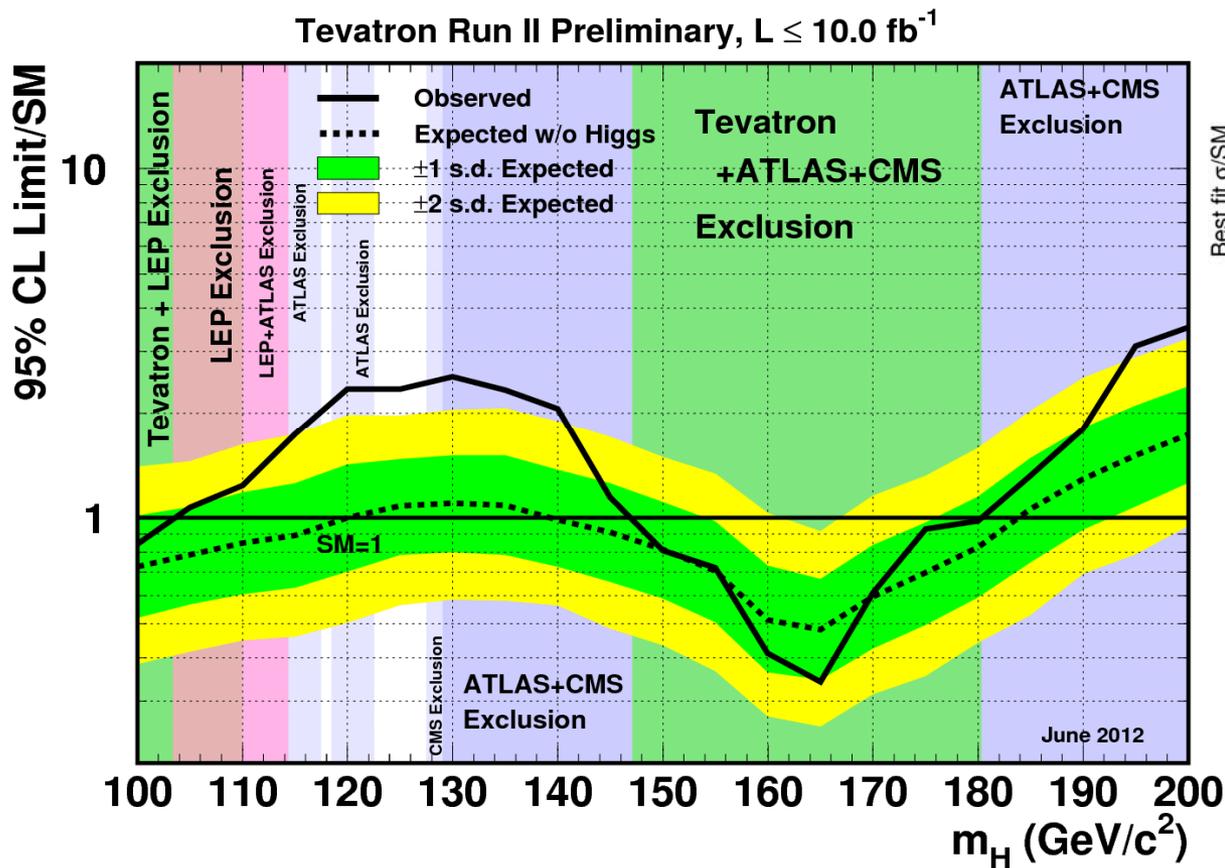
■ $M_H < 130 \text{ GeV}/c^2$

$pp \rightarrow WHX \rightarrow l \nu + bb + X$

博士論文: 増淵達也(筑波大), 永井義一(筑波大)

テバトロンでのヒッグス粒子探索の結果

10fb⁻¹



2012年7月2日 $147 < m_H < 180 \text{ GeV}/c^2$, $100 < m_H < 103 \text{ GeV}/c^2$ を95% C.L.で排除。
 $115 < m_H < 135 \text{ GeV}/c^2$ のexcessの有意性 2.5σ

(2012年7月27日 $H \rightarrow b\bar{b}$ チャンネルだけを用いると有意性 3.1σ)