



謎のヒッグス粒子はもうすぐ発見されるか？

LHC計画とその現状

2007年10月27日

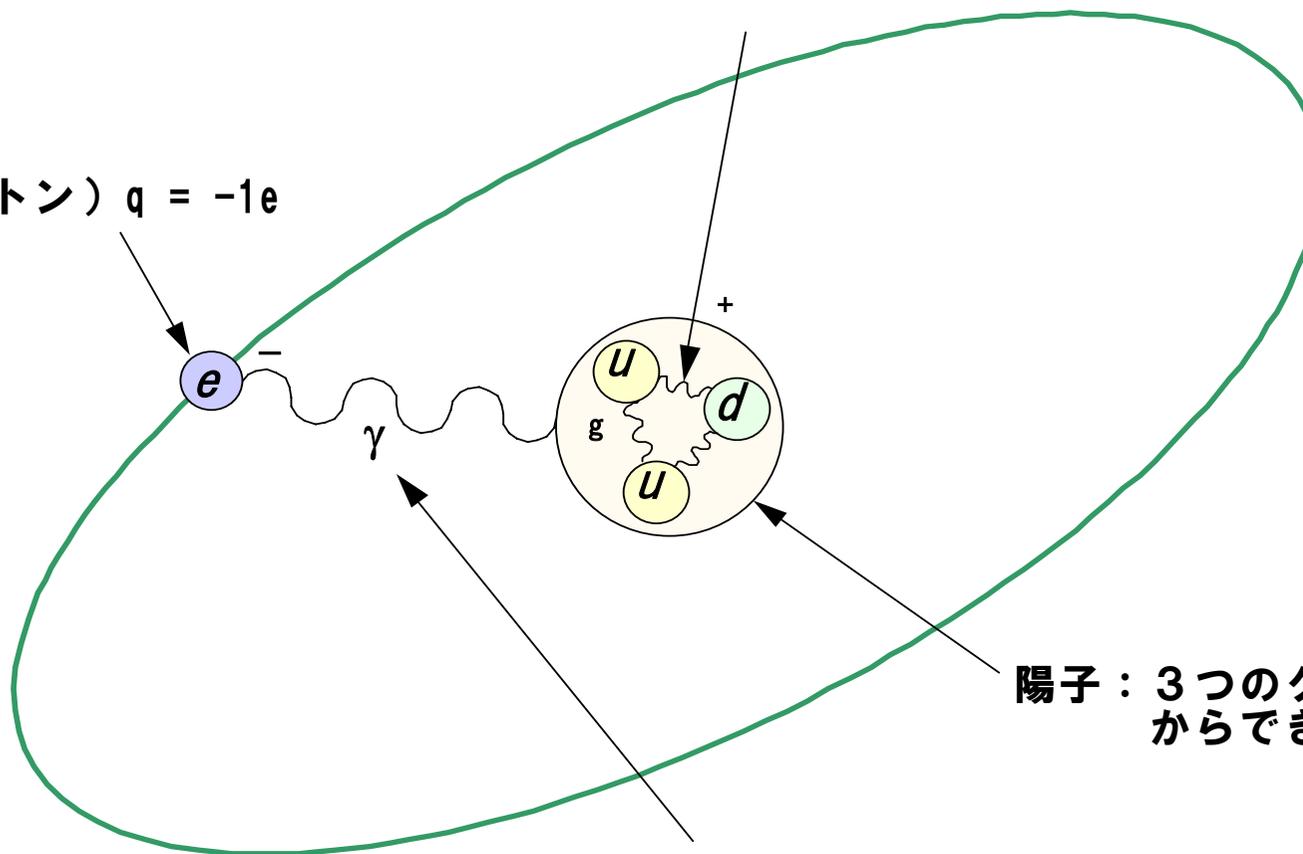
高エネルギー加速器研究機構(KEK)

近藤敬比古

水素原子

グルーオン g を交換することによってクォーク間に引力が生じている (強い相互作用)

電子 (レプトン) $q = -1e$

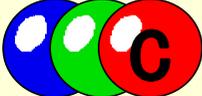
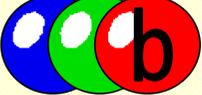


陽子 : 3つのクォークからできている

光子を交換することによって引力が生じている (電磁相互作用)

標準モデルの世界

物質粒子

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	 アップ	 チャーム	 トップ
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム
レプトン	 電子ニュートリノ	 ミューニュートリノ	 タウニュートリノ
	 電子	 ミューオン	 タウ

物質をつくる素粒子はクォークとレプトンからなる。

標準モデルの世界

物質粒子

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	 アップ	 チャーム	 トップ
	 ダウン	 ストレンジ	 ボトム
レプトン	 電子ニュートリノ	 ミューニュートリノ	 タウニュートリノ
	 電子	 ミューオン	 タウ

電荷

$$+\frac{2}{3}e$$

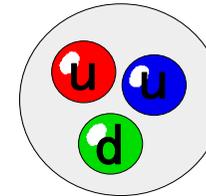
$$-\frac{1}{3}e$$

$$0e$$

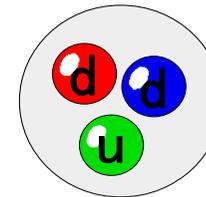
$$-1e$$

クォークモデル

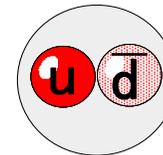
粒子(質量)



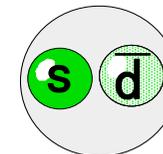
陽子 (938.3 MeV)



中性子 (939.6 MeV)



π^+ (139.6 MeV)



K^- (493.7 MeV)

この他に物質粒子同士を結びつける
力(相互作用)が必要である。

標準モデルの世界

物質粒子

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	アップ	チャーム	トップ
	ダウン	ストレンジ	ボトム
レプトン	電子ニュートリノ	ミューニュートリノ	タウニュートリノ
	電子	ミューオン	タウ

力の場に伴う粒子

グルーオン	強い相互作用
光子	電磁相互作用
Wボゾン Zボゾン	弱い相互作用

- ・ 重力を除く3つの力が標準モデルで記述できる。
- ・ このうち電磁力は1940-50年代の量子電磁力学の成功により、厳密な理論計算ができるようになった。

自然界には4種類の力が存在する

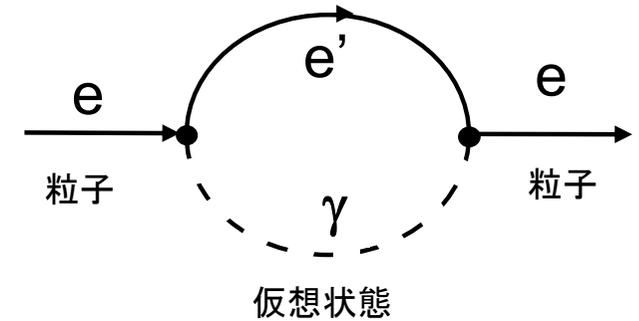
力の種類	力の到達距離	力の源	力を伝える粒子
強い力	10^{-13} cm	カラー	 8種類のグルーオン（重さ=0）
電磁力	無限遠	電荷	 光子（重さ=0）
弱い力	10^{-16} cm	ウイーク電荷	  1983 ルビア、ヴァンデル・メーア ウイークボソンの発見
重力	無限遠	質量	 重力子（重さ=0）

主要な2つの疑問

- (1) なぜ強い力は短距離しか届かないのか？
- (2) なぜ弱い力を伝える粒子(W,Z)のみ質量があるのか？

$M_\gamma = 0$ であるのに $M_W \sim M_Z \sim 80-91 \text{ GeV}$ ($\sim 100 \times M_p$)

量子電磁力学(QED)の成功

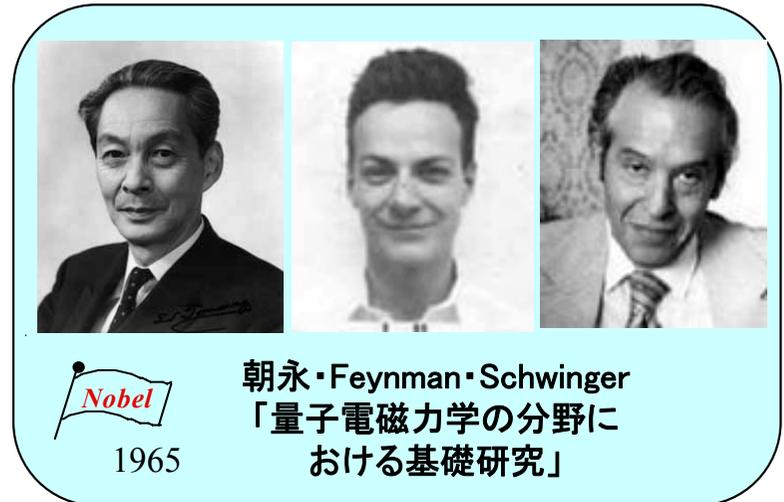


・ミクロの世界では不確定性原理により、粒子は短時間だが仮想状態になりうる。これらの量子補正効果を積分すると**無限大**になってしまう。

・朝永・ファインマン・シュビンガーらは、直接観測できない裸の量(質量や電荷)を観測される量で置き換えることにより、有限の物理量を計算することに成功した(**くりこみ理論**)。

・例: 電子の異常磁気能率

$$a_e \equiv \frac{g-2}{2} = 0.00115965218085 \quad (\text{実験})$$
$$= 0.00115965218870 \quad (\text{理論})$$



・このよう**くりこみが可能な理由**は、局所ゲージ対称性が背後にあって、光子の質量がゼロであることによる。

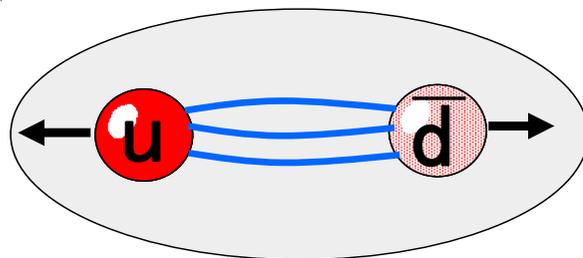
→ 以後、**くりこみ可能性**と**ゲージ対称性**が理論のキーワードになった。

局所ゲージ対称性
波動関数の位相を任意の場所で任意に変えても運動方程式が変わらない。

疑問点 (1) なぜ強い力は短距離しか届かないのか？

答: Quantum Chromodynamics (QCD 量子色力学)

- クォークは3種のカラー荷電を持ちグルーオン(8種類)を交換する。
- 漸近的自由性**: 短距離ほど力が弱まり、長距離ほど力が強まる。
 - クォークは単独に存在できない(クォークの閉じ込めに成功)。
- 1979年 グルーオンの発見 @ DESY(独)
- 2004年 ノーベル物理学賞受賞
- ただし力が強すぎて摂動計算が使えない。



離れるほど力が強まる！！



Gross

Politzer

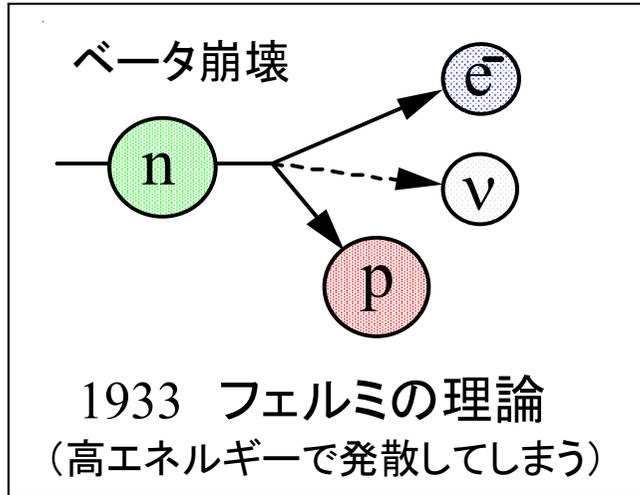
Wilczek

Nobel
2004

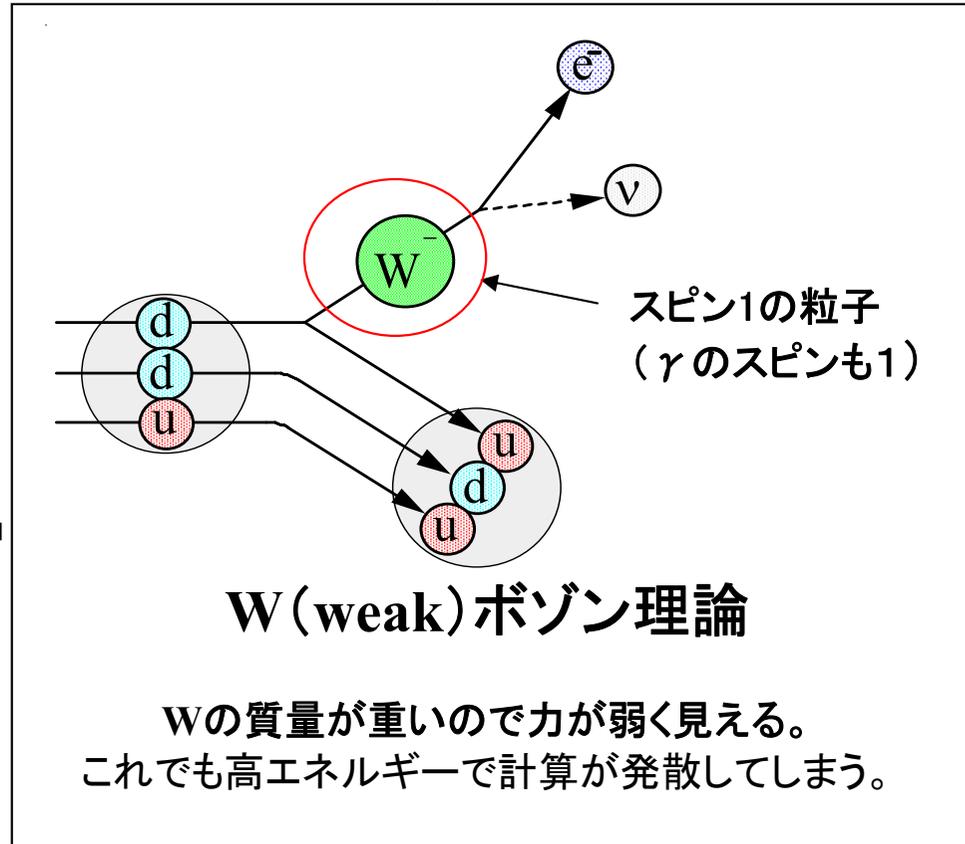
「強い相互作用の理論における
漸近的自由性の発見」

疑問点 (2) なぜ弱い力を伝えるW,Zにのみ質量があるのか？

弱い相互作用の研究の発展



1957 李政道、楊振寧
パリティ非保存の発見→V-A理論
左巻きのクォーク・レプトンにのみ反応する。



1960 S. グラシヨー
電磁力と弱い力の統一を提案
(SU2 × U1ゲージ場の導入)

Z粒子の存在を予言した。
しかしWの質量の問題が残った。

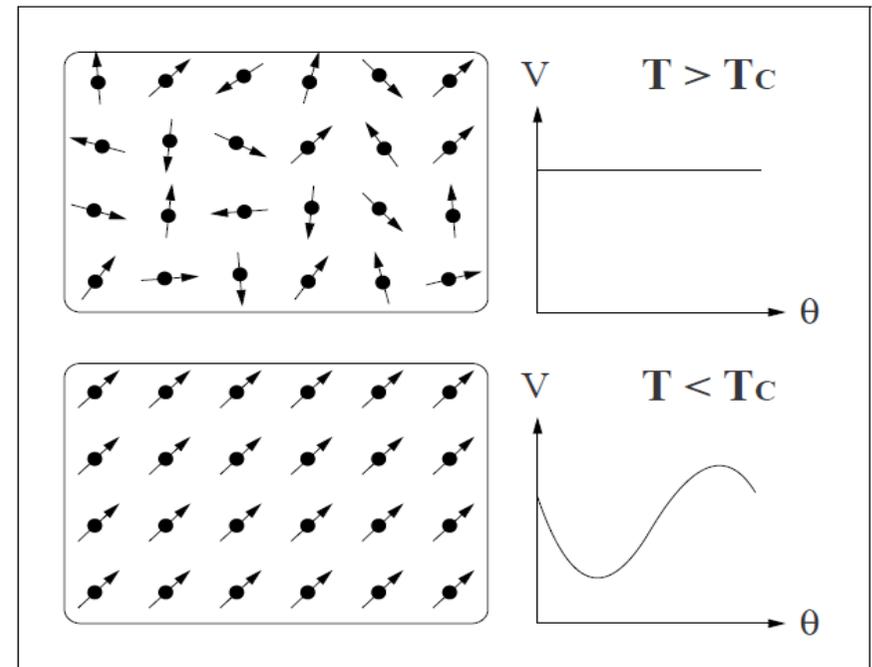
粒子が質量を持つと困る！

- 量子電磁気学：局所ゲージ対称性を持つ運動方程式は、**くりこみ可能**。
- しかし、**質量を持つ粒子**を運動方程式に加えると、**局所ゲージ対称性が破れる**→くりこみ不可→発散する。

↓
解決策

- 自発的対称性の破れ**で説明する。

基礎方程式は局所ゲージ対称性を持っているが、現実の物理状態はその対称性を破っている。



例：磁性体：方程式は回転対称性を持つが、キュリー温度 T_c 以下で磁化の方向が揃い、回転対称性が破れている。どの方向が選ばれるかはspontaneous(自然発生的)である。

ブロート-アンブレア-ヒッグス機構

(Brout - Englert - Higgs mechanism、通称 ヒッグス機構と呼んでいる)

1964年

スピン=1で質量=0のゲージ粒子と、自己相互作用をもつスピン=0のスカラー粒子があるとき、自発的対称性の破れが起こると、ゲージ粒子が質量を持つようになる。

自発的対称性の破れ

宇宙の温度が高いとき

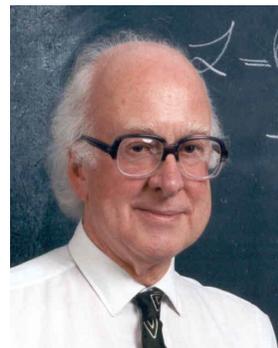
宇宙が冷えたとき



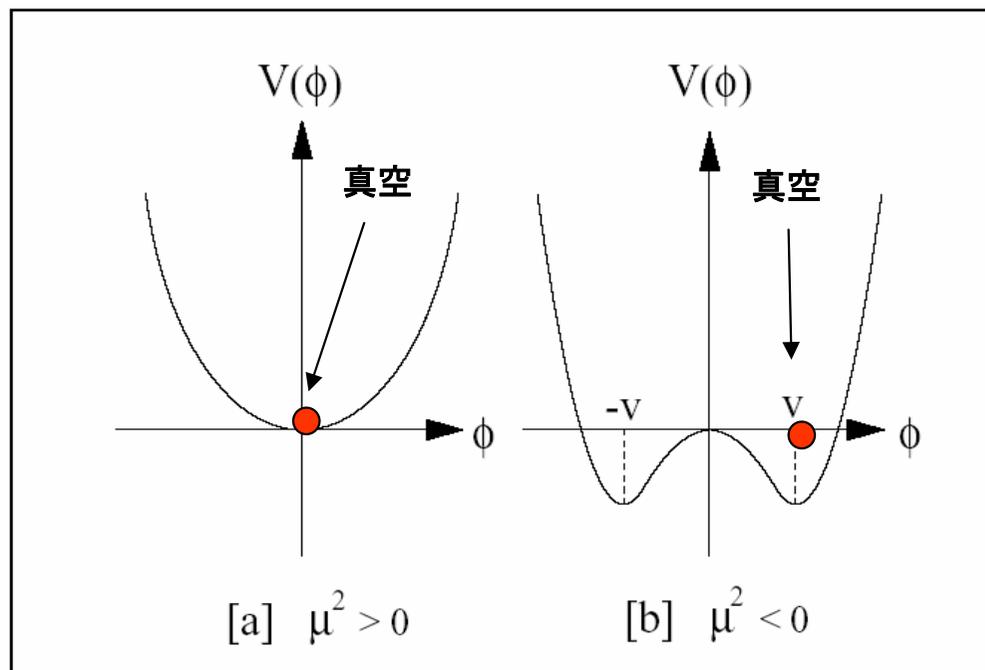
Robert Brout
1928, USA



Francois Englert
1932, Belgium



Peter W. Higgs
1929, UK

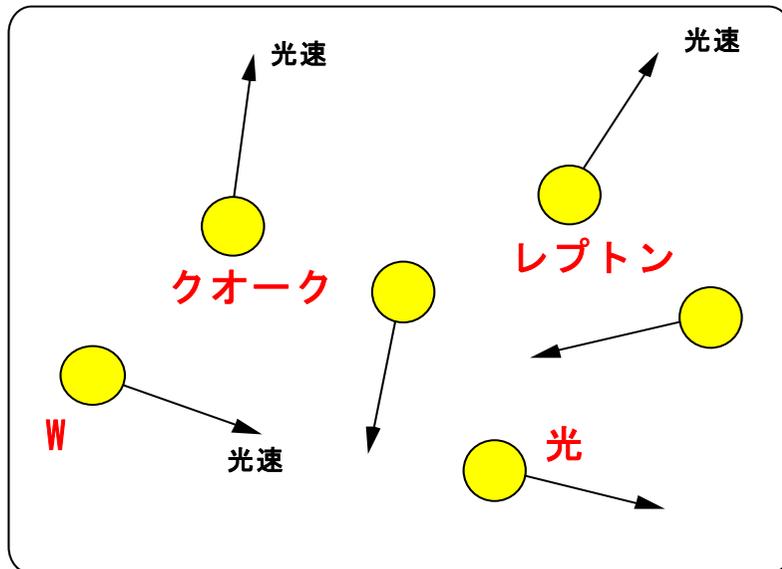


電弱統一理論の場合 $v = \frac{1}{\sqrt{\sqrt{2}G_F}} = 246 \text{ GeV}$

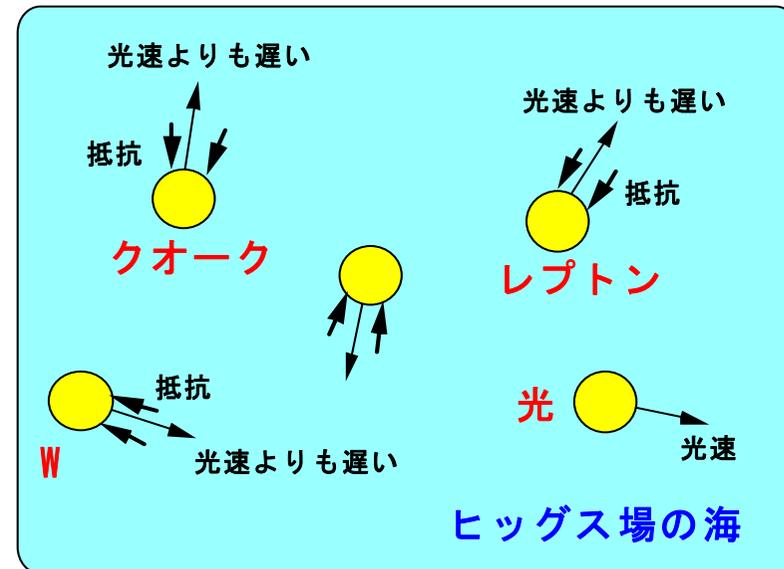
ヒッグス場の存在による質量(重さ)の創生の世俗的説明

- W/Zボゾンやクォーク・レプトンは、ヒッグス場との相互作用のため、運動にブレーキがかかり、それは質量を得たとみなすことができる。光はヒッグス場と結びつかないので質量=0である。

真空の対称性がある場合

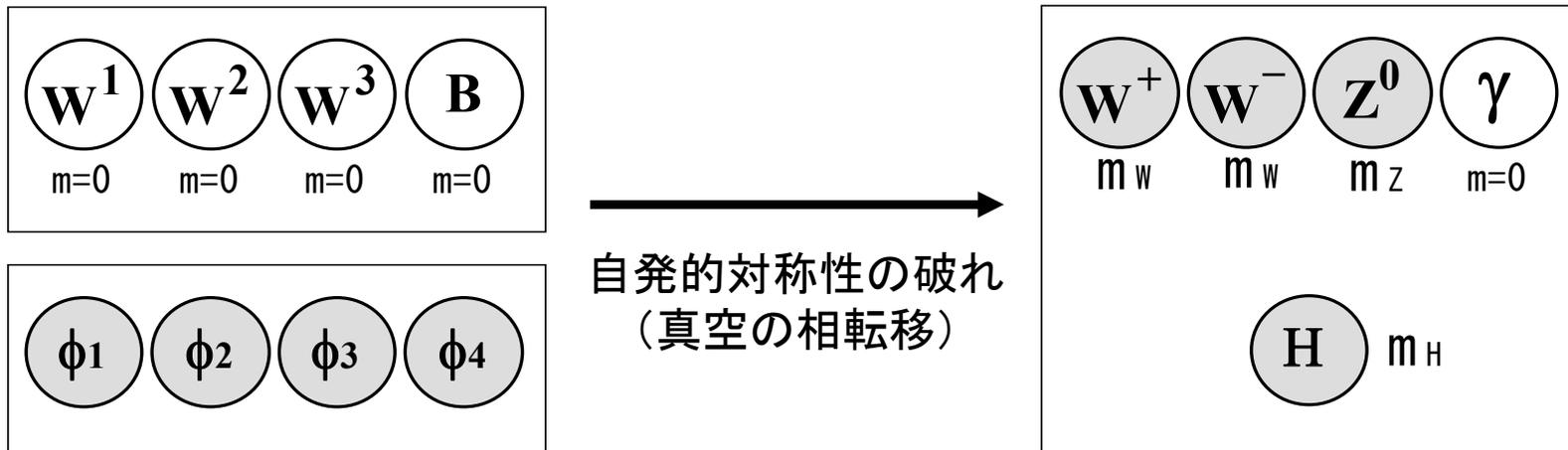


現実の世界

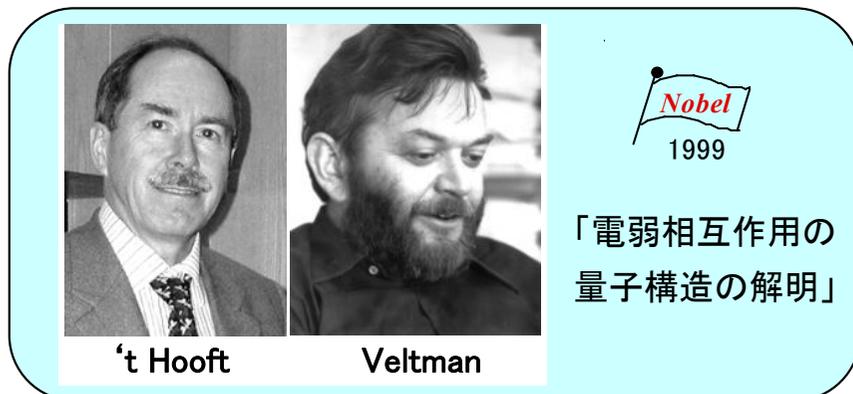


電弱統一理論 (ワインバーグ・サラム・グラシヨウ模型) の成立

1967年 スティーヴン・ワインバーグ
1968年 アブドゥス・サラム



ヒッグス粒子の $\phi_1, \phi_2, \phi_3, \phi_4$ を導入し、自発的対称性の破れでそのうち3成分が W^+, W^-, Z^0 に食われて、それらが質量を持つようになる。残りの一つがヒッグス粒子Hになる。

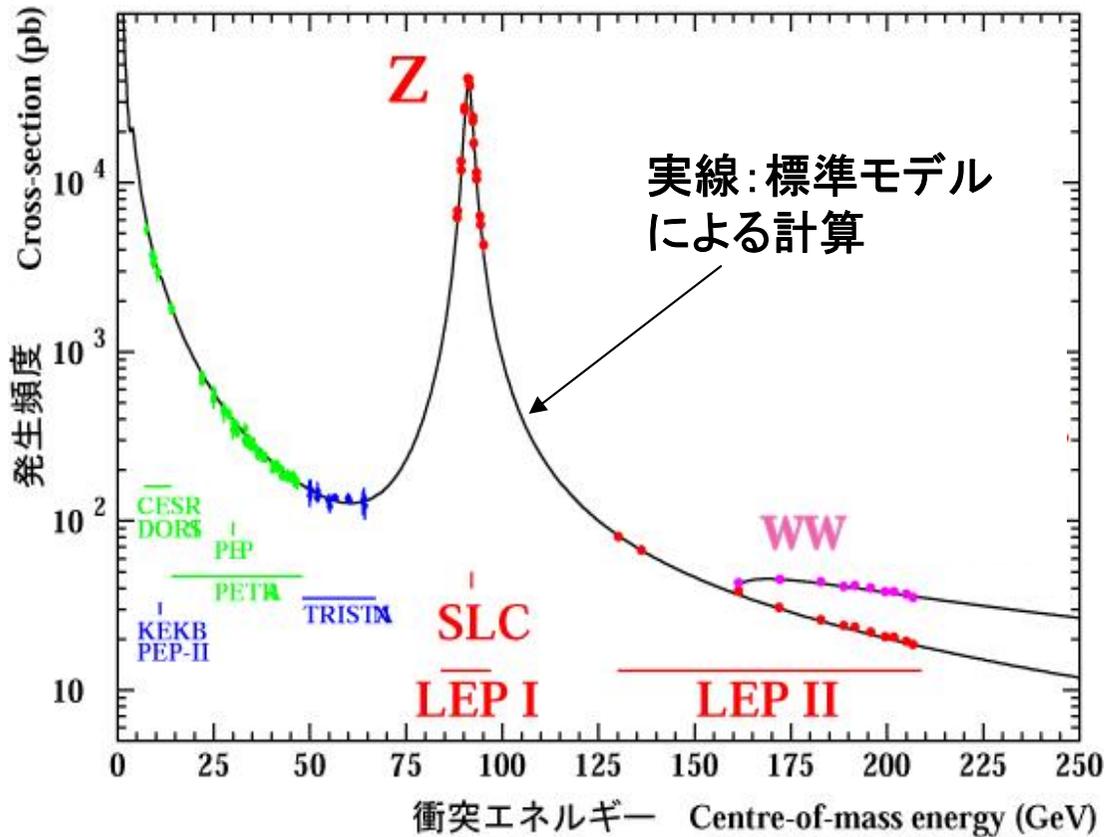


1971年 ゲラルド・トフーフトがこの理論がくりこみ可能であることを証明した。

1970年代 各種実験で実証された
1983年 W, Z粒子が発見された。



標準モデル(QCD+電弱理論)による計算値と測定値の比較



	Measurement	Fit	$ \frac{\sigma_{meas} - \sigma_{fit}}{\sigma_{meas}} $
$\Delta\alpha_{had}^{(5)}(m_Z)$	0.02758 ± 0.00035	0.02766	0.00008
m_Z [GeV]	91.1875 ± 0.0021	91.1874	0.0001
Γ_Z [GeV]	2.4952 ± 0.0023	2.4957	0.0005
σ_{had}^0 [nb]	41.540 ± 0.037	41.477	0.063
R_l	20.767 ± 0.025	20.744	0.023
$A_{fb}^{0,l}$	0.01714 ± 0.00095	0.01640	0.00074
$A_l(P_\tau)$	0.1465 ± 0.0032	0.1479	0.0014
R_b	0.21629 ± 0.00066	0.21585	0.00044
R_c	0.1721 ± 0.0030	0.1722	0.0001
$A_{fb}^{0,b}$	0.0992 ± 0.0016	0.1037	0.0045
$A_{fb}^{0,c}$	0.0707 ± 0.0035	0.0741	0.0034
A_b	0.923 ± 0.020	0.935	0.012
A_c	0.670 ± 0.027	0.668	0.002
$A_l(\text{SLD})$	0.1513 ± 0.0021	0.1479	0.0034
$\sin^2\theta_{eff}^{lept}(Q_{fb})$	0.2324 ± 0.0012	0.2314	0.0010
m_W [GeV]	80.392 ± 0.029	80.371	0.021
Γ_W [GeV]	2.147 ± 0.060	2.091	0.056
m_t [GeV]	171.4 ± 2.1	171.7	0.3

$e^+ e^- \rightarrow$ quarks, Z, WW
の生成断面積

物理量の測定と計算の一致度

x軸 = (測定量 - 計算量) / 測定誤差
全てが 3 σ 以内で一致している!

標準モデルの世界

物質粒子

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	アップ	チャーム	トップ
	ダウン	ストレンジ	ボトム
レプトン	電子ニュートリノ	ミューニュートリノ	タウニュートリノ
	電子	ミューオン	タウ

力の場に伴う粒子

グルーオン	強い相互作用
光子	電磁相互作用
Wボゾン Zボゾン	弱い相互作用

ヒッグス粒子が発見されれば
標準モデルが完結する !



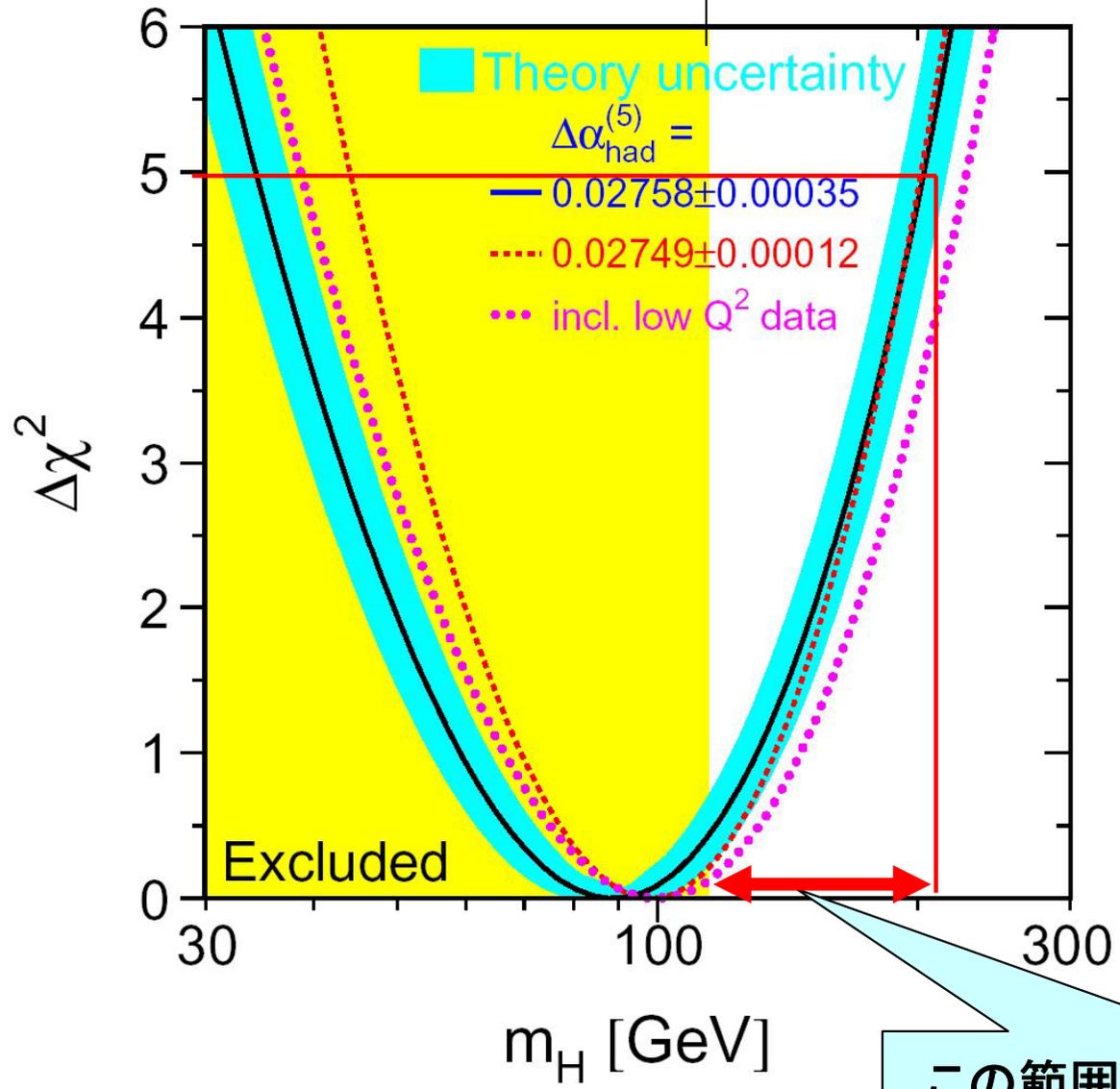
ヒッグス粒子の主な性質

- ヒッグス場があれば**最低1種類のヒッグス粒子**が存在する。
- (実に不思議なことに)ヒッグス粒子の質量 m_H のみは標準モデルの範囲では予言できない。しかし m_H さえわかれば、全ての他の性質は予言できる。
- 理論的には $m_H=100\sim 300$ GeVが有力である。1000 GeV以上では標準モデルが破綻する。
- これまでのヒッグス探索実験:
 - 直接探索: LEP実験から 114.5 GeV以下には存在しないことが判明。
 - 間接探索: 仮想ヒッグス粒子による量子補正効果から、ヒッグス粒子の質量 m_H のありそうな範囲は $114\sim 200$ GeVである。

 **LHC加速器でヒッグス粒子を発見できる！**

114 GeV

LEPでの直接観測で見
つからなかった範囲



ヒッグス粒子の直接・間接探索

輻射補正項の中に m_H が入っているの
で実験データをfitすると、 m_H の許され
る範囲が推定できる。

横軸: SM Higgs mass
縦軸: $\Delta\chi^2 = \chi^2 - \chi^2_{\text{min}}$

黒い線がすべてのデータを使ったとき
の結果。青バンドは理論の誤差。黄色
は直接ヒッグス探査による除外区域。

<http://lepewwg.web.cern.ch/LEPEWWG/plots/winter2006/>

この範囲に存在する確率が高い

粒子の質量 (単位 : GeV)

	第1世代	第2世代	第3世代
クォーク	0.003 アップ	1.25 チャーム	172.3 トップ
	0.005 ダウン	0.095 ストレンジ	4.2 ボトム
レプトン	~0 電子ニュートリノ	~0 ミューニュートリノ	~0 タウニュートリノ
	0.00051 電子	0.1057 ミューオン	1.777 タウ

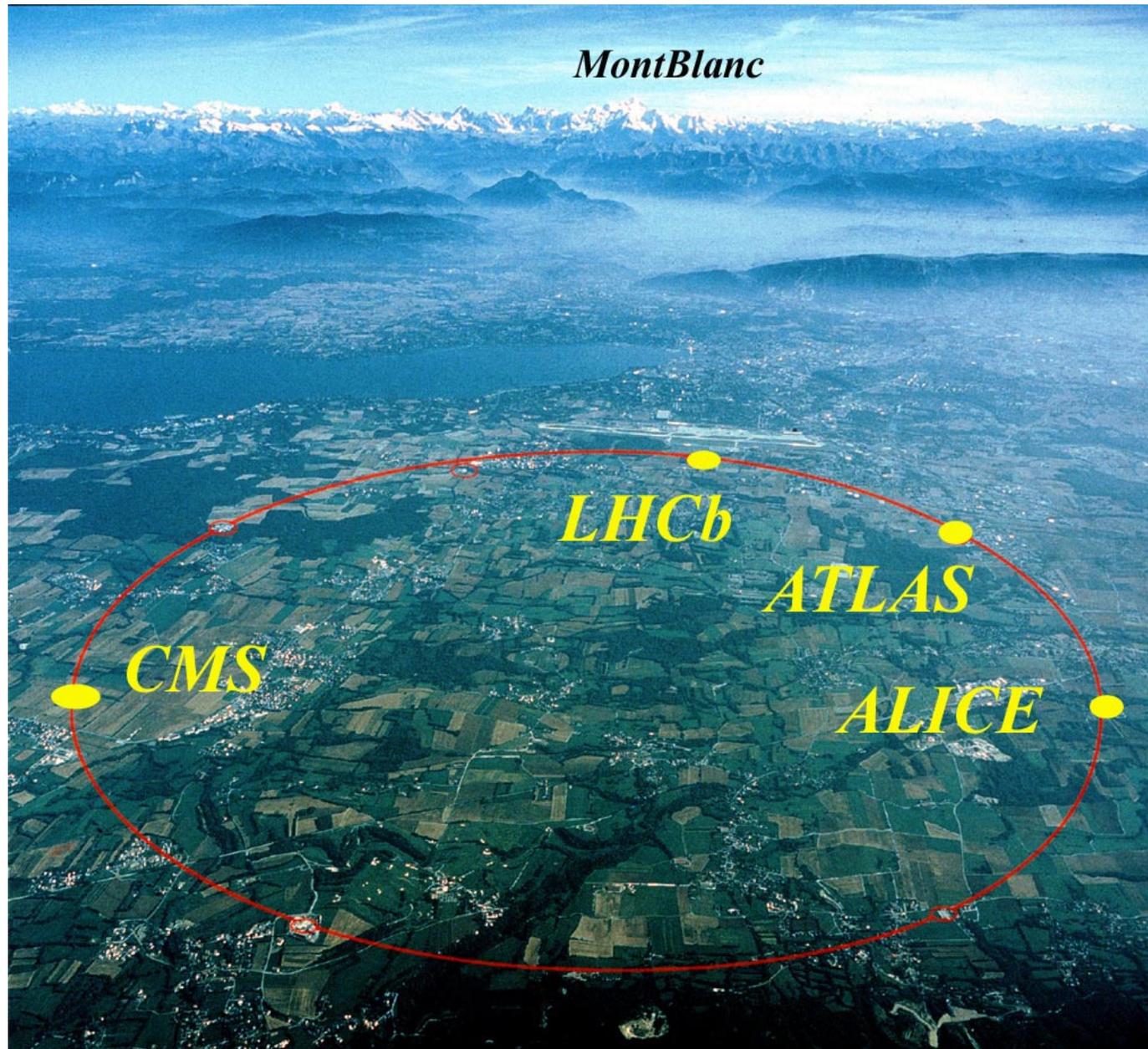
0 グルーオン
0 光子
80.4 80.4 91.2 Wボゾン Zボゾン

W, Zを有限質量にした同じヒッグス機構でクォークとレプトンの質量も説明可である。しかし粒子毎にヒッグス場との湯川結合 (ϕqq) を人工的に入れなくてはならない。

ヒッグス場による自発的対称性の破れで、これらの有限質量が説明できた。

説明はある程度わかったが、なぜヒッグス場が存在するのか?...第5の力ではないか??
→ **とにかく見つけよう!**

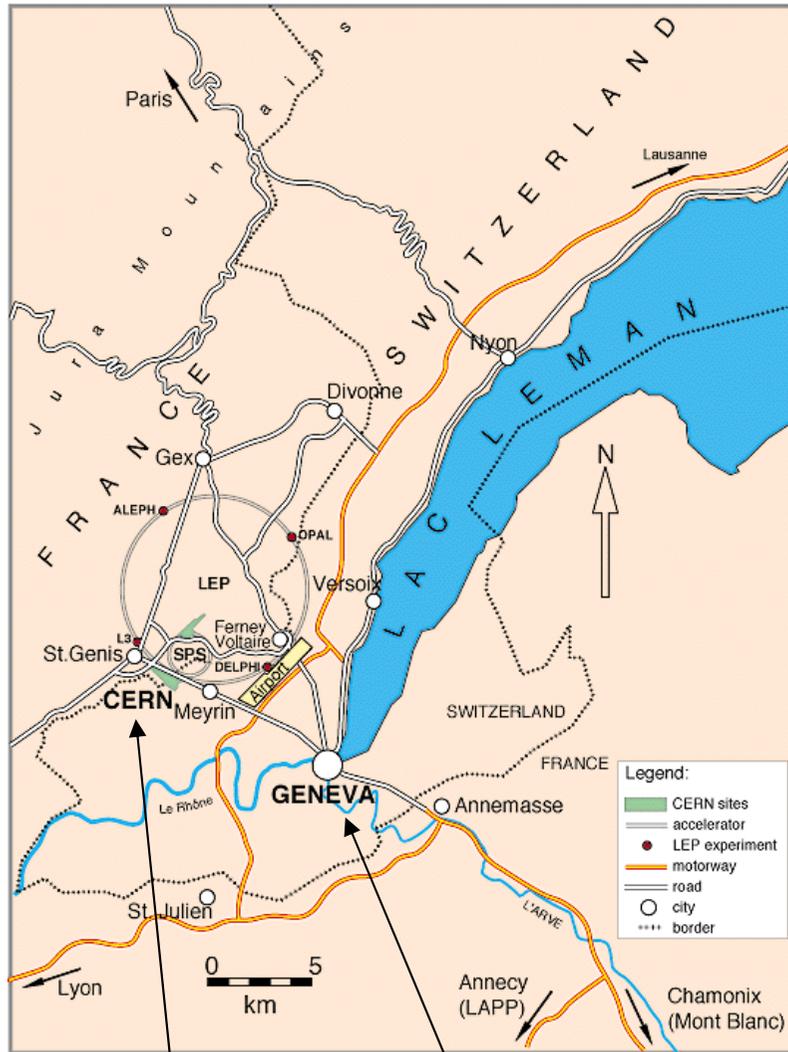
LHC (Large Hadron Collider)



周長27kmのLEPTンネル(地下深度～100m)を再利用して、LHC加速器を2008年に完成させて、重心系エネルギー 14 TeVの陽子・陽子衝突を実現する。

参考: 山の手線の周長は約34km

CERN (Conseil Europeen pour la Recherche Nucleaire)



- ・欧州合同の高エネルギー物理学研究所
- ・加盟国20カ国が国民総生産に比例して出資
- ・年間予算 1000億円
- ・1954年設立
- ・職員数 2500人
- ・利用者数 全世界から6千人
- ・加速器: PS (28GeV), ISR, SPS (450GeV), LEP (215GeV) LHC(14,000GeV)
- ・ノーベル物理学賞: 3

World Wide Webの誕生地！！

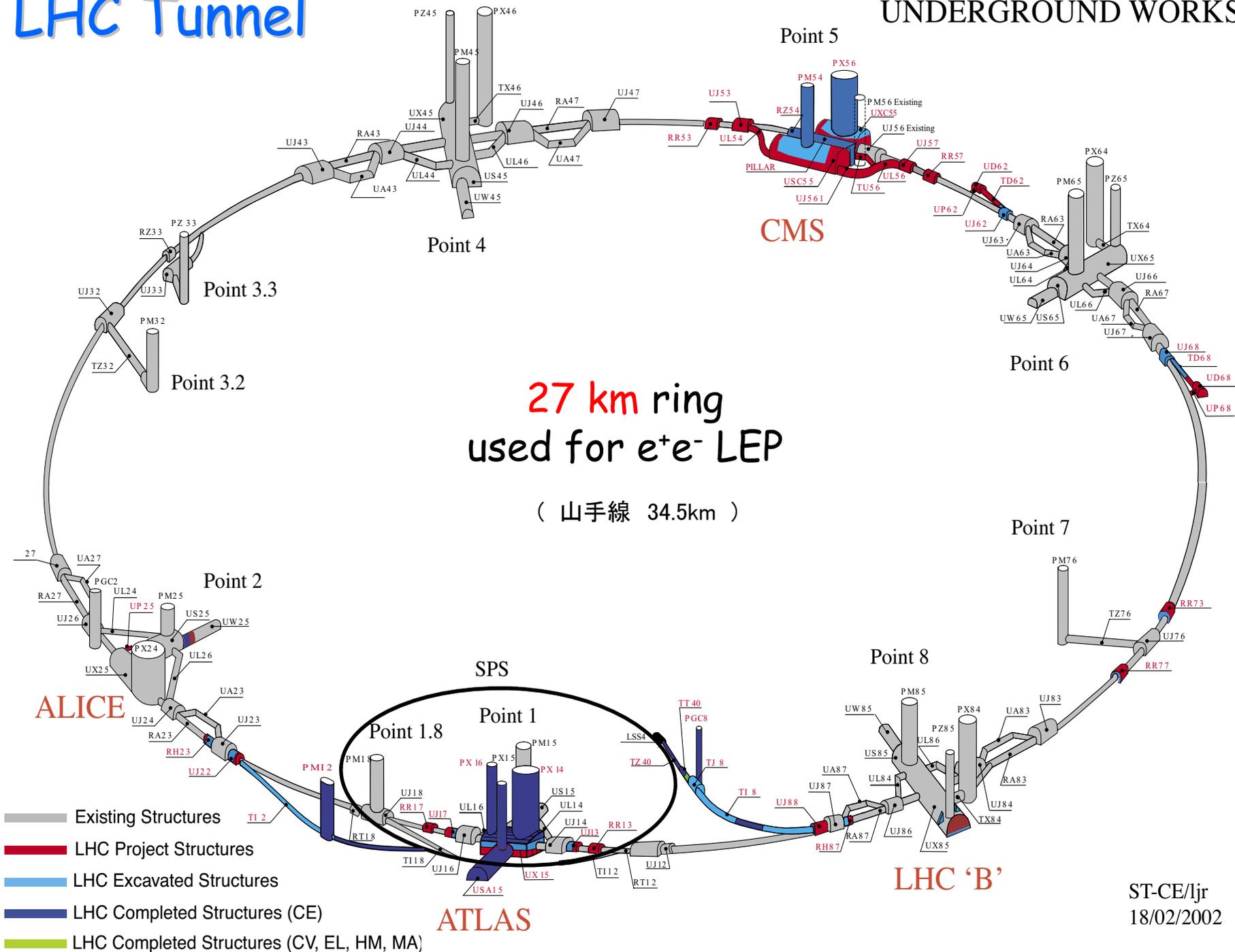
CERN計算機部門の Tim Berners-Lee氏は、世界中に散らばっている実験チームのメンバーの研究者間で、瞬時に同じ情報をアクセスするにはどうしたらよいか悩んだ末、1990年も年の暮れ近くにWebの発明に至った。

CERN

ジュネーブ

LHC Tunnel

UNDERGROUND WORKS

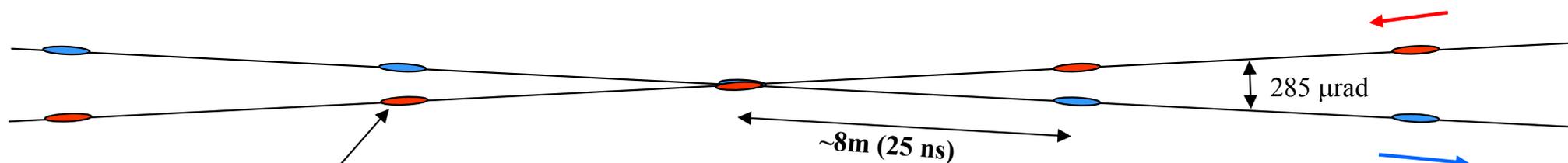


LHC加速器の主要性能

主リング周長	26.6 km
陽子ビームのエネルギー	7.0 TeV (7×10^{12} eV)
ルミノシティ (輝度)	$10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
バンチ間隔	25 ns (40 MHz)
バンチ当りの陽子数	10^{11} 個
超伝導ダイポール電磁石	1232台、磁場 8.36テスラ
衝突点でのビーム半径	16 μm
バンチ衝突当りの陽子衝突	20 pp 衝突

重要

衝突点付近でのビームの様子



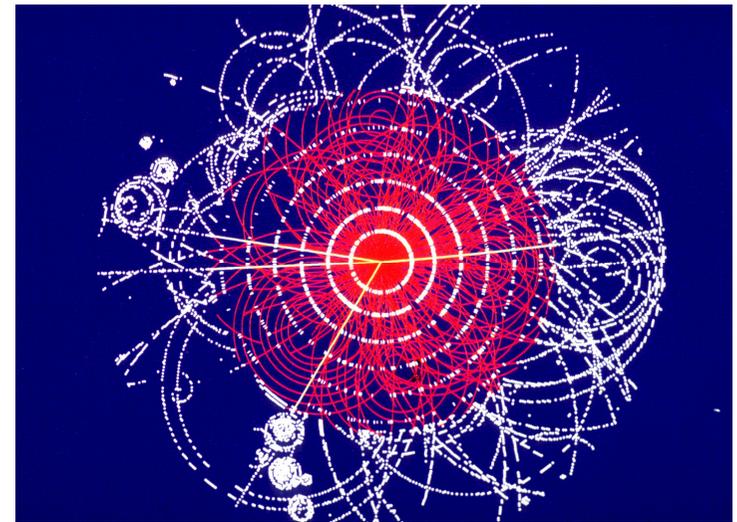
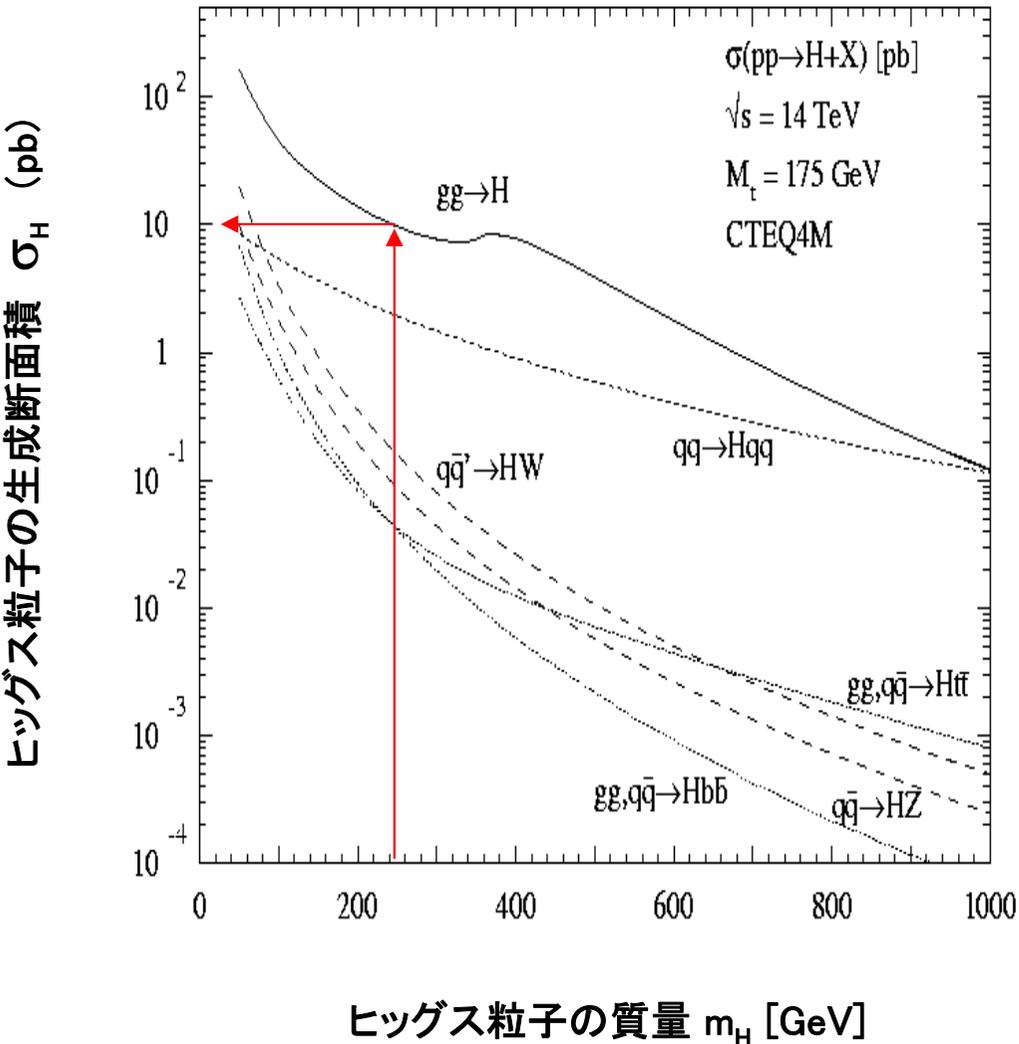
$$\sigma_x = \sigma_y = 16 \mu\text{m},$$

$$\sigma_z = 7.6 \text{mm}, n_p = 10^{11}$$

Luminosity概算

$$L = \frac{f \cdot N_B^2}{4\pi\sigma_x\sigma_y} \approx \frac{40 \times 10^6 \cdot (10^{11})^2}{4\pi \cdot (16 \mu\text{m})^2} \approx 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$$

LHC加速器の重要なパラメーターは
 ルミノシティ(輝度) $L=10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$



- ・作られるヒッグス粒子(250GeV)の数 N_H は

$$N_H = L \times \sigma_H \times T$$

$$= 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1} \times 10 \text{ pb} \times 100 \text{ days}$$

$$= 860,000 \approx \text{百万個/年}$$

- ・観測されるヒッグス粒子の数 N_{obs} は

$$N_{obs} = N_H \times BR \times \varepsilon \text{ (測定効率)}$$

$$= 860,000 \times 0.3 \times 0.34^2 \times 0.01$$

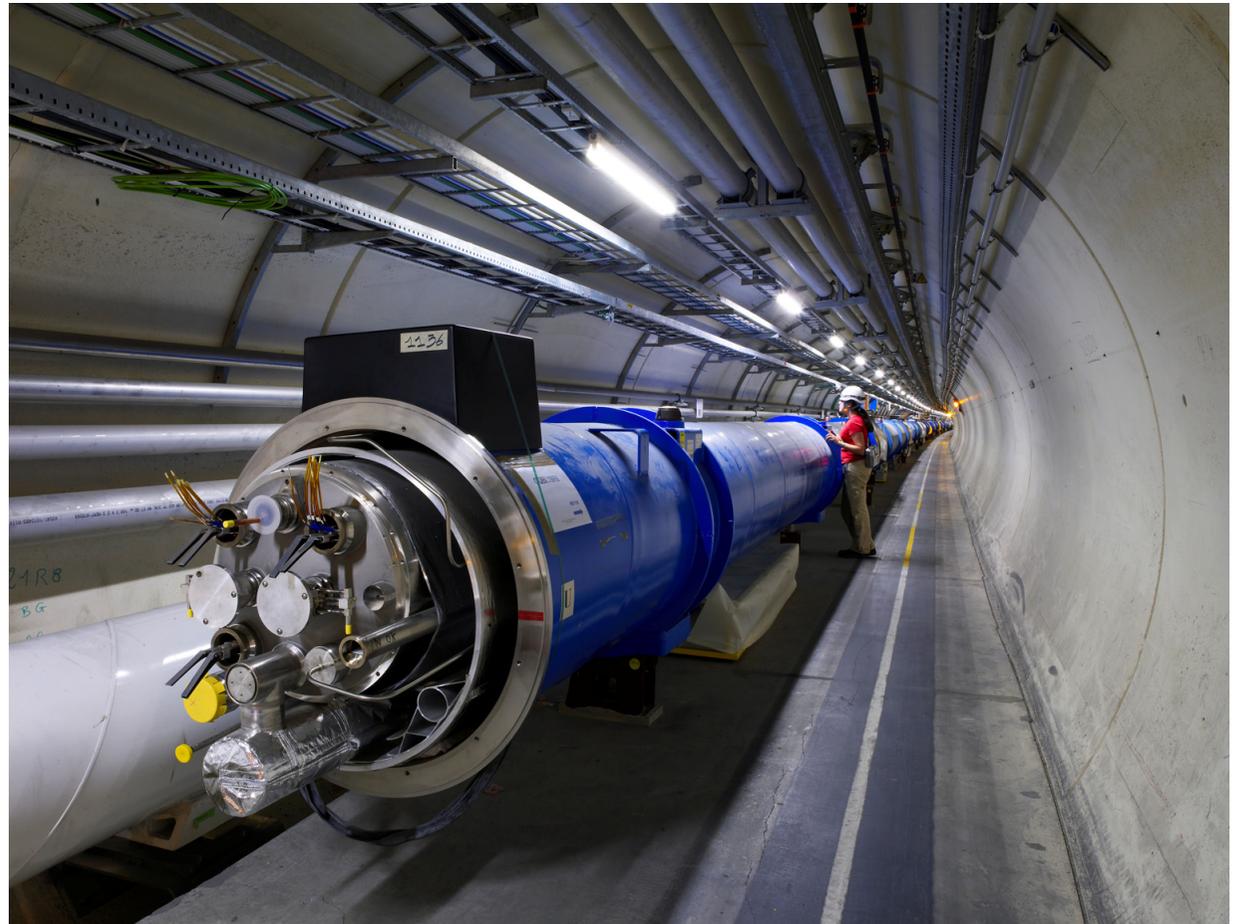
$$\approx 300 / \text{年}$$

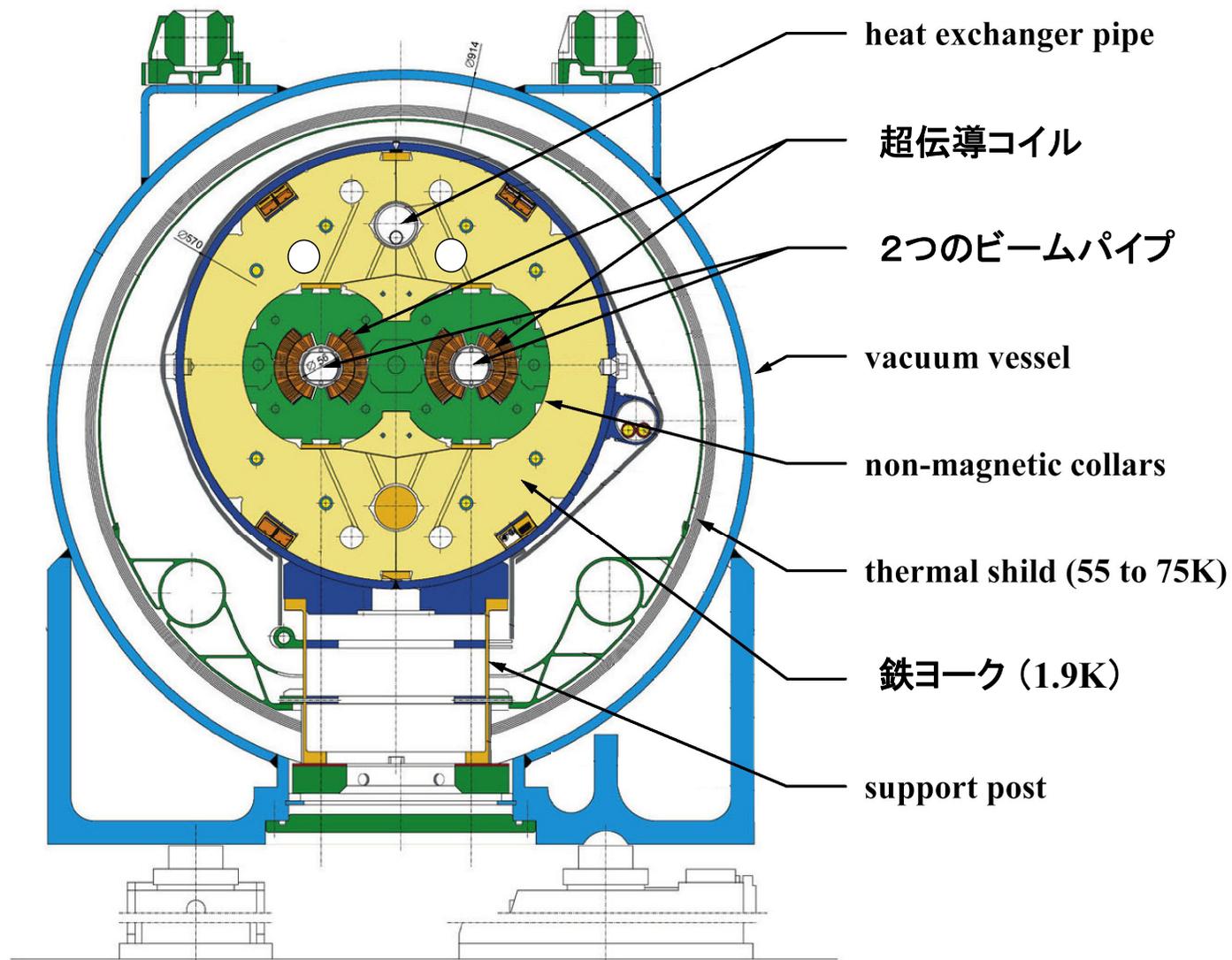
LHCマグネットの生産・検査・据付

1232台の超伝導ダイポールマグネットは、CERNが技術開発し、欧州の3企業に技術移転して量産を行っている。2006年11月まで全台数が納入された。全数CERNで冷却・励磁検査を受け殆どが合格した。



2007年4月までにすべての超伝導マグネットが地下トンネルに据え付けられた。





Main Dipole 断面図: 2つのダイポール磁場とビームパイプを一つのヨークとクライオスタットの中に入れる 2-in-1 型。Cold-mass部分は超流動ヘリウムを使って 1.9 K まで冷やす。

Magnet - Cryostat Assembly & Test



Cryostating	425 FTE.years
Cold tests	640 FTE.years
(major contribution by India)	



Magnet installation

LHCのビーム衝突点用超伝導四極マグネット(1)

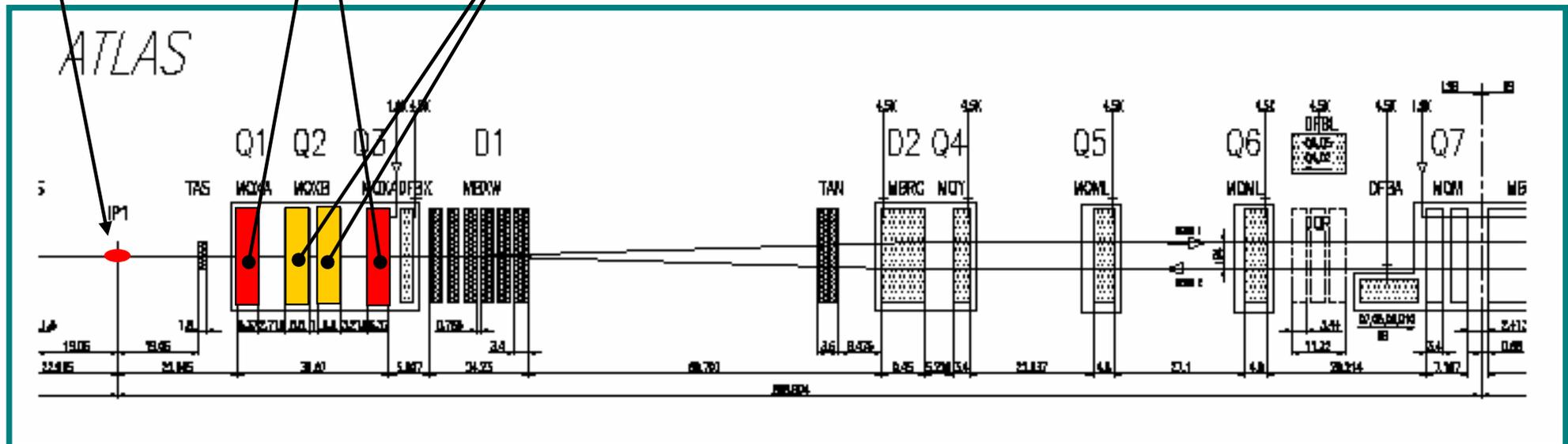
ビーム衝突点では、陽子ビームを10ミクロンの太さに絞りこむ。このためにレンズの役割をする超伝導4極マグネットが必要で日本と米国とが設計・製造した。



LHCトンネル内に設置された超伝導4極マグネット

KEK製
Fermilab製

ビーム衝突点



LHCのビーム衝突点用超伝導四極マグネット(2)

KEKが設計、東芝が製造

磁場勾配 = 215 T/m

長さ 5 m、口径 70 mm

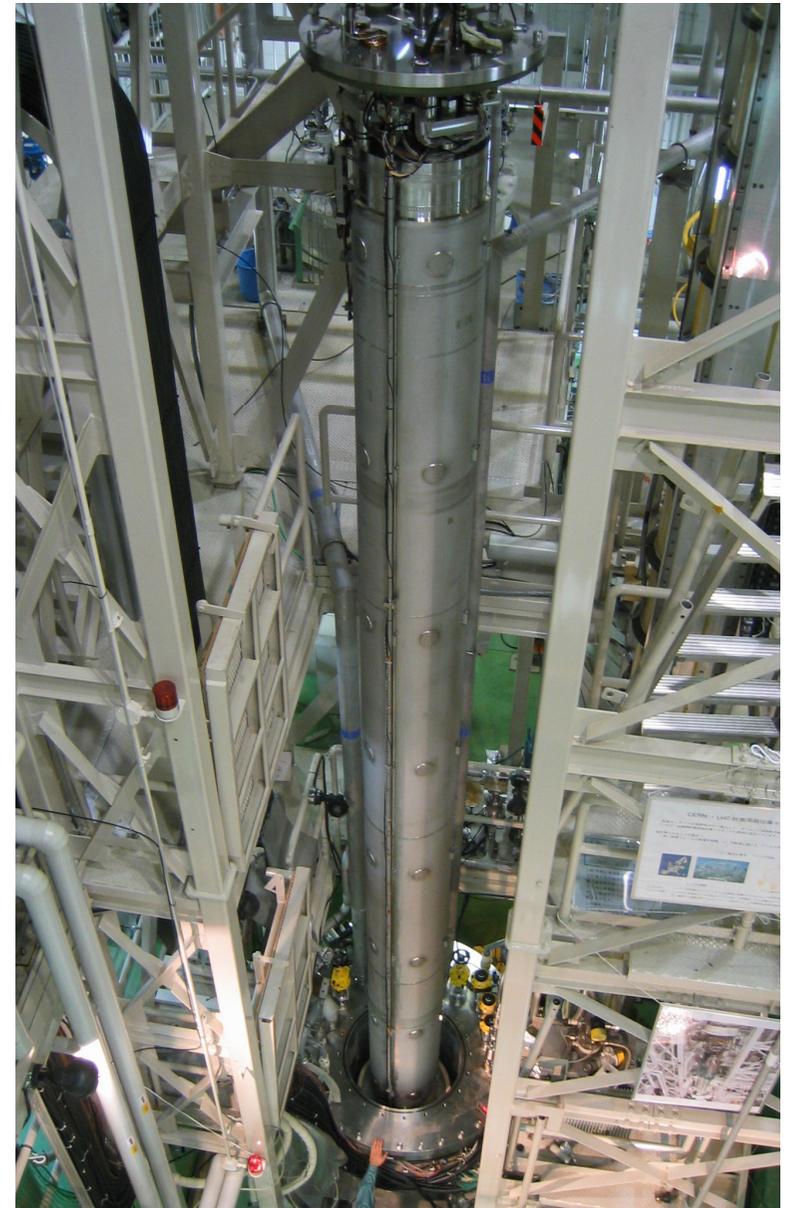
2005年に18台の生産と検査を完了した。



コイルの断面図



超伝導ケーブルを巻く
作業(東芝京浜工場)



コイルを検査するために垂直型
クライオスタットに入れる(KEK)₃₀



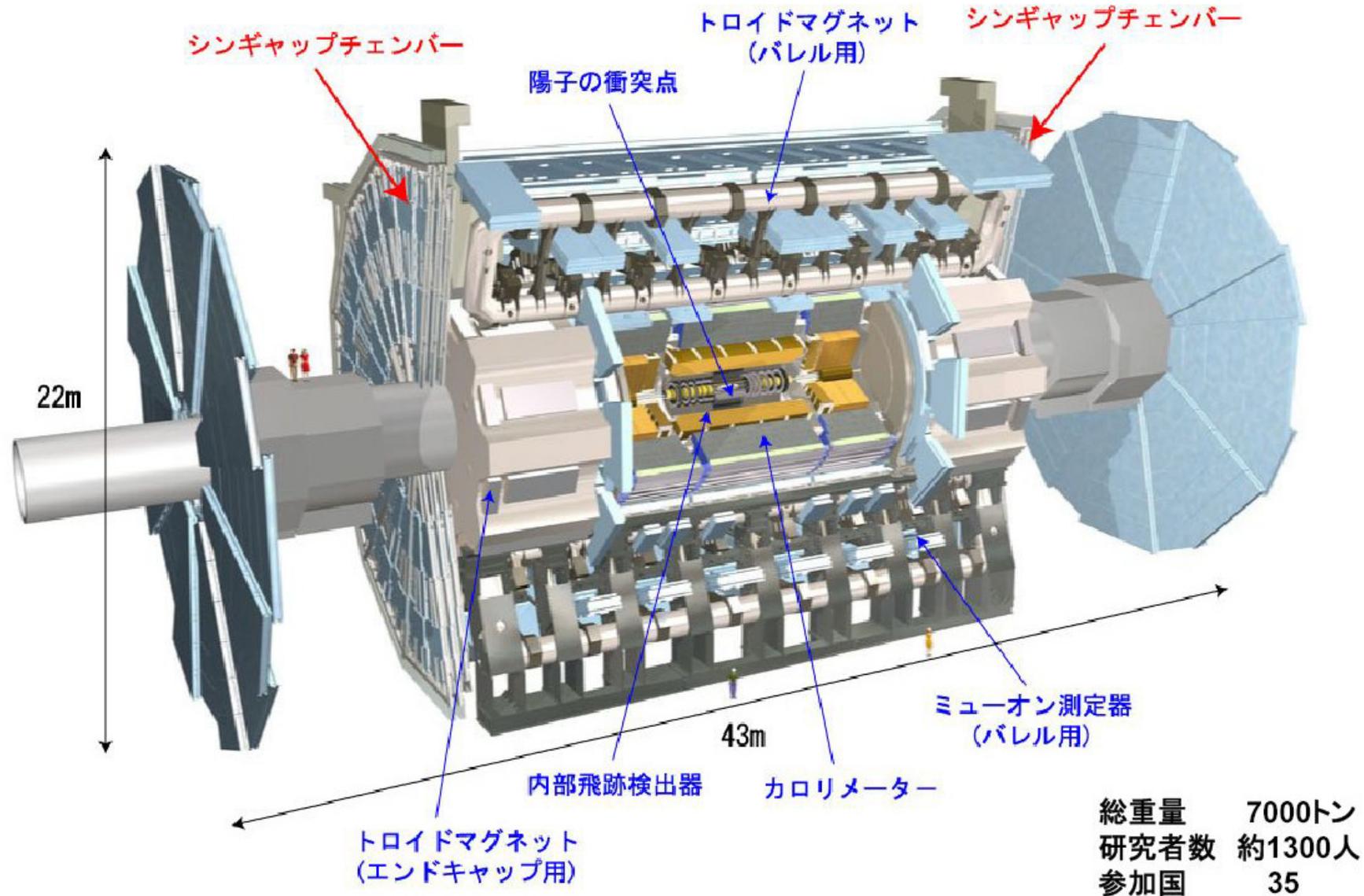
文部大臣 与謝野 馨

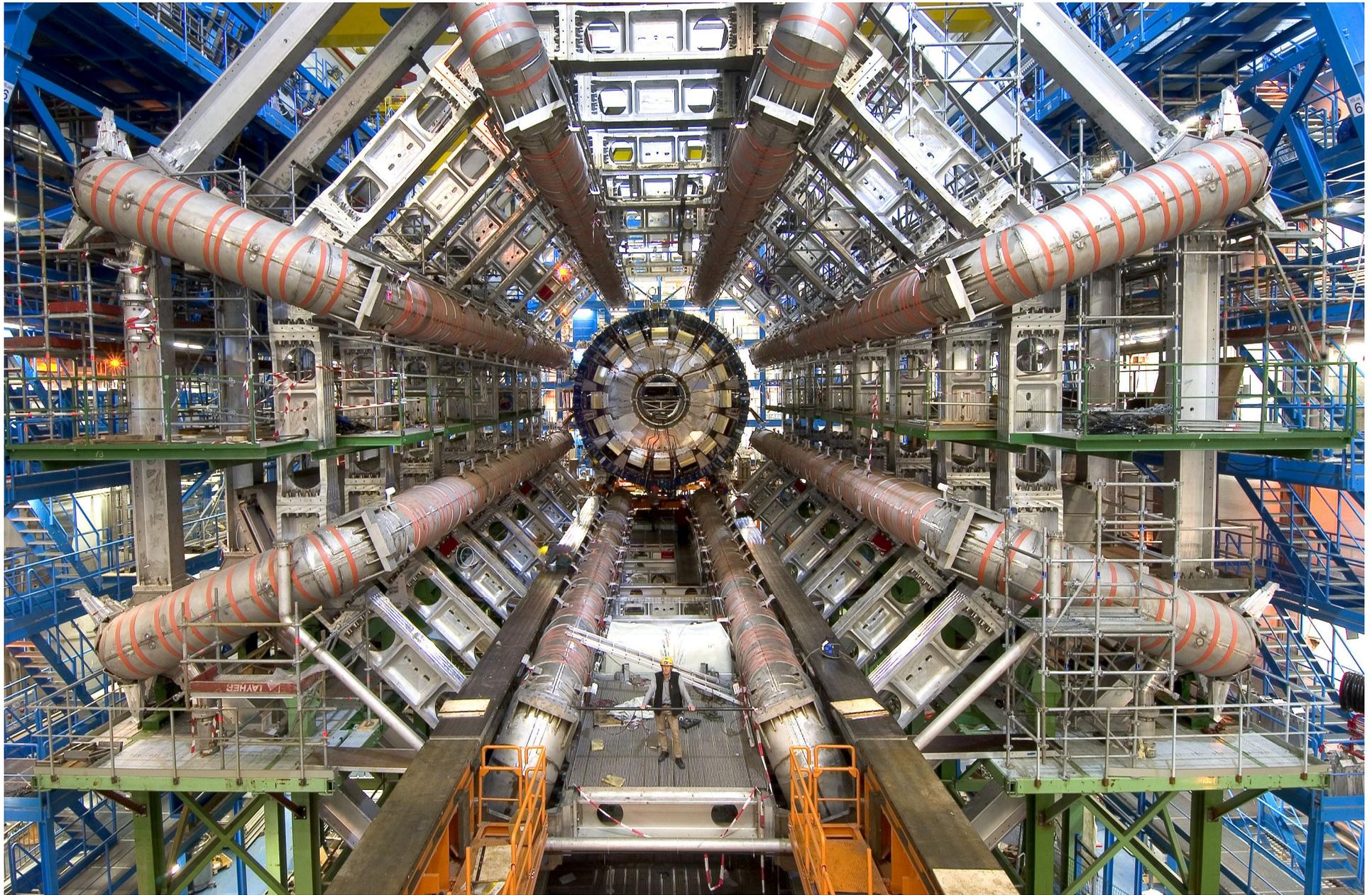
達磨(片目!)

CERN 所長
クリス・リュエリンズミス

June 23, 1995 : 与謝野文部大臣(当時)がCERN理事会に出席し、日本のLHC加速器建設協力(50億円)を発表した。

LHC計画 アトラス実験装置





地下実験室で建設中のアトラス実験装置 2005年11月
(超伝導ソレノイド+中央カロリメターを中心に移動する直前)

アトラス建設 日本の分担(1)

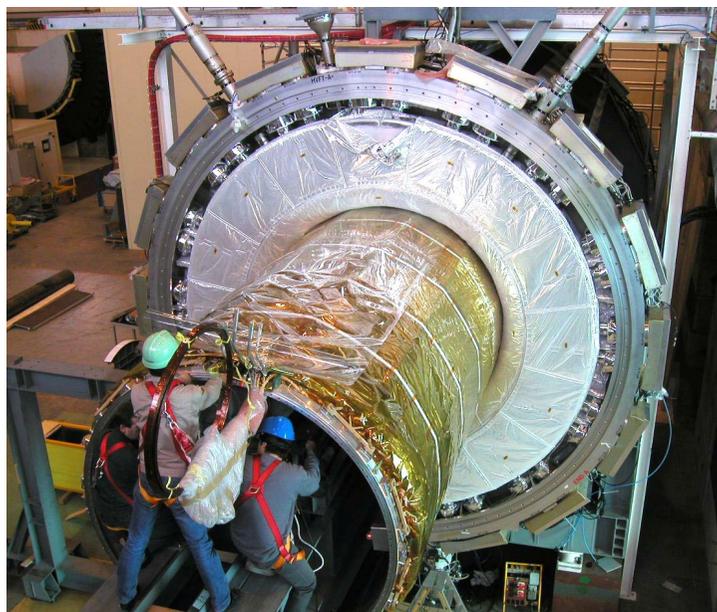
アトラスの中心部に磁場を形成するための超伝導ソレノイドはKEKが設計し東芝が製造した。



コイル部完成@東芝京浜工場(1999年)



励磁成功(2000年12月)@東芝



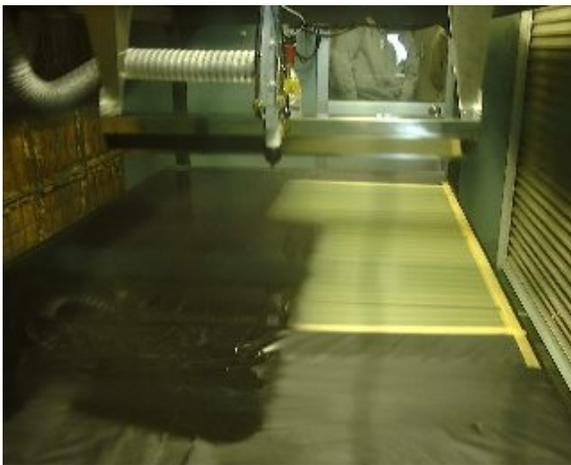
CERN地上でLARクライオスタットへ据付
(2004年2月)



2005年11月アトラス測定器に設置完了

アトラス建設:日本の分担(2)

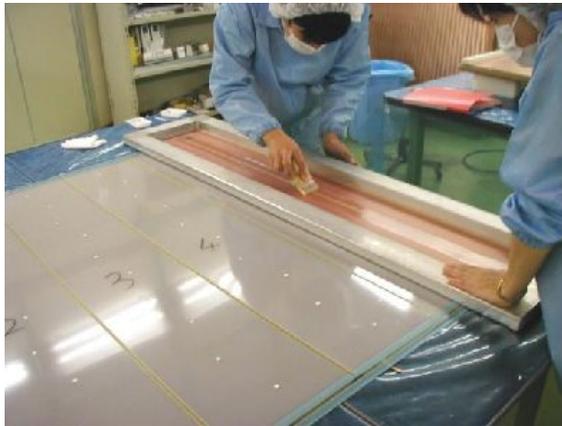
端部ミュオントリガー チェンバーの建設



カーボン塗布



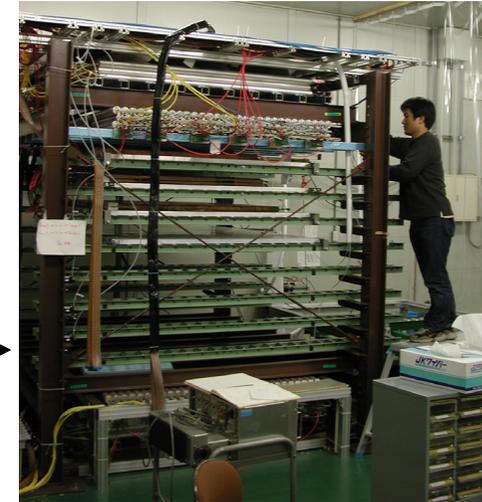
ハンダ付け



エポキシ接着



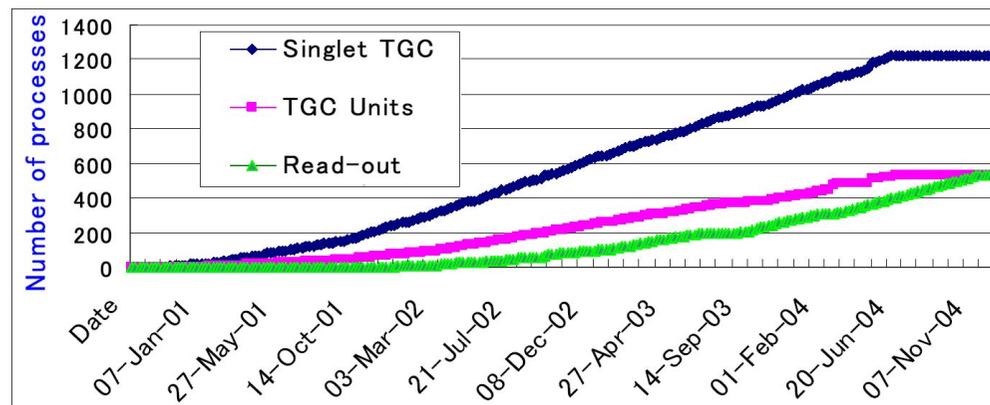
組立・検査作業



KEKより神戸大へ輸送し
宇宙線で全数検査をした。



自動ワイヤー巻き作業

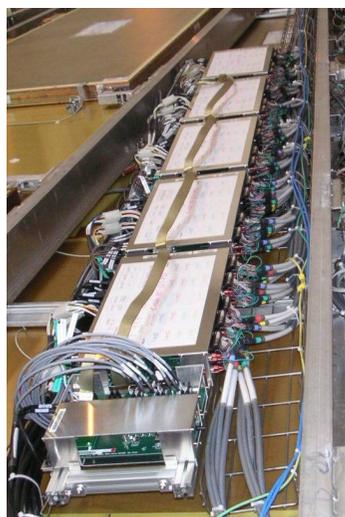


トリガー用ワイヤーチェンバー:1200台を4年間をかけてKEKにて製造

アトラス建設: 日本の分担(2) CERNでTGC組立・設置作業



↑ 2005.7よりTGCの設置と検査 ↓



35万chの電子回路

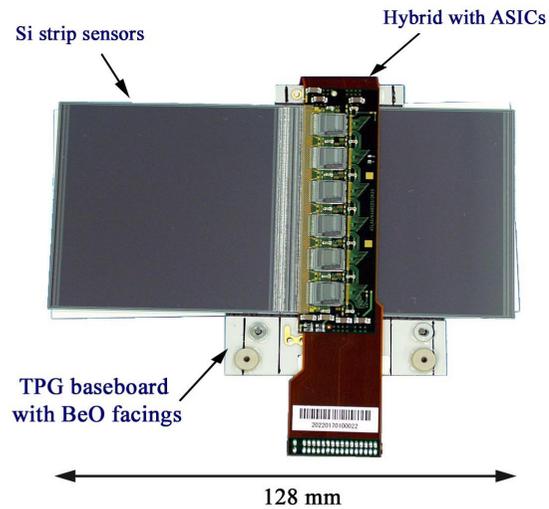


72枚のセクターを地下に移動

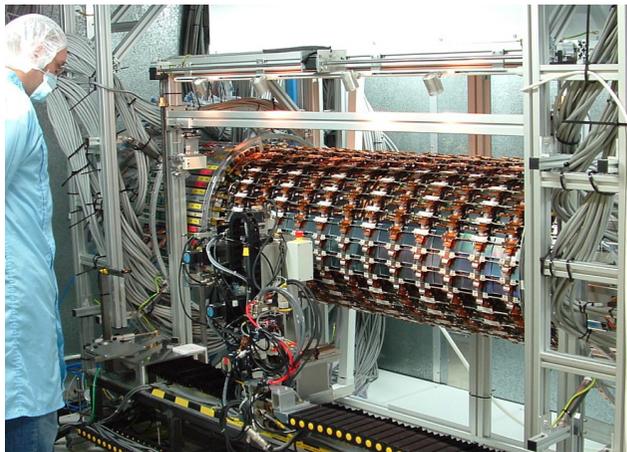


2007.9.21 8枚のビッグウイーの組み立てを終了

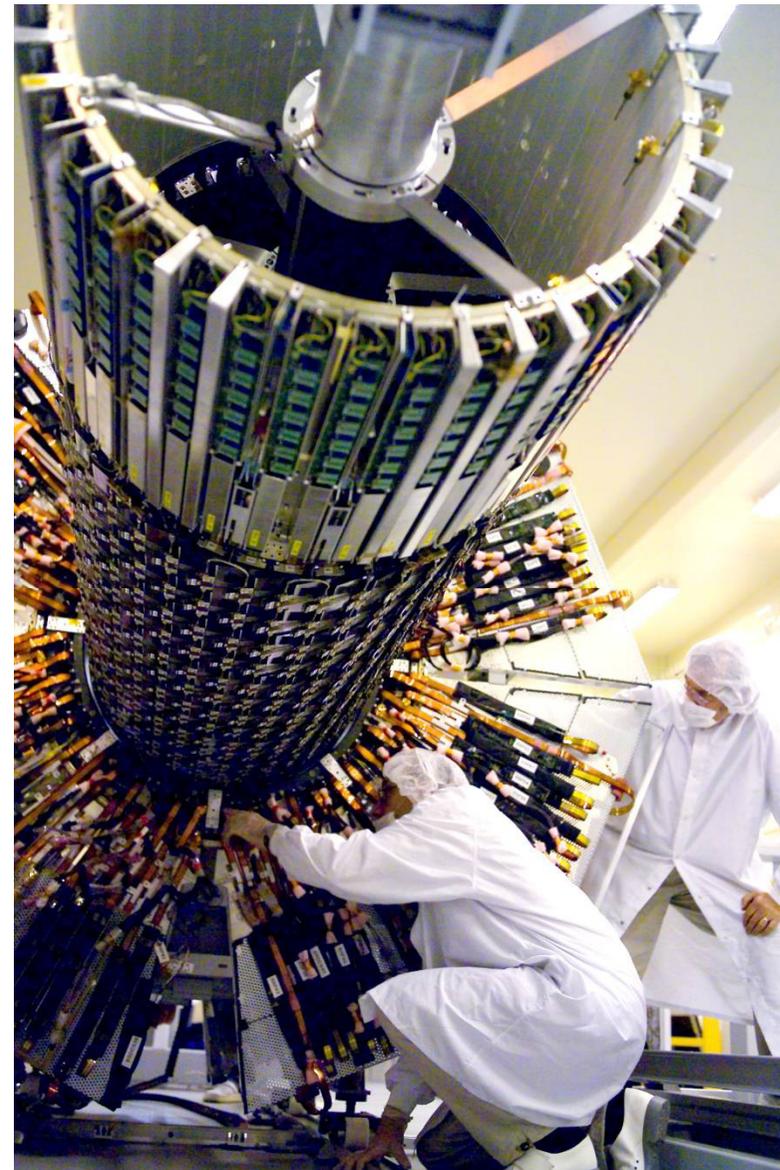
アトラス建設: 日本分担(3) シリコン半導体飛跡検出器



日本は6000枚のセンサーと1000台(40%)
のモジュールの製造を担当し完成した。

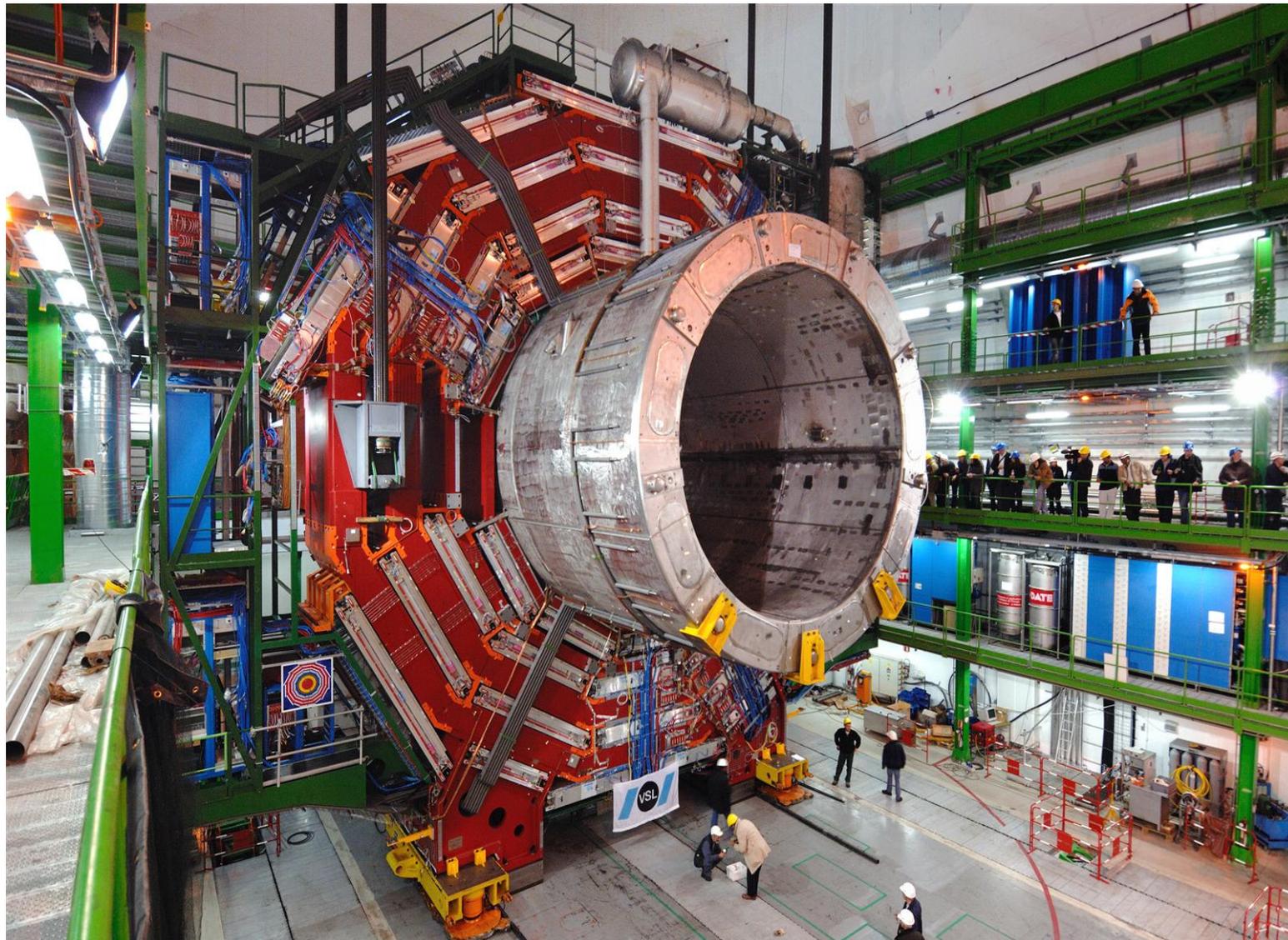


日本が設計・製造したロボットで2200台の
モジュールをマウント(Oxford大)



2005~2006 シリンダー一組合わせ作業@CERN

CMS (Compact Muon Solenoid) 測定器も完成近い



2007.2.28 CMS測定器の最も重い部分(1920トン)が地下実験室に下ろされた。

シミュレーションによるヒッグス粒子の探索例

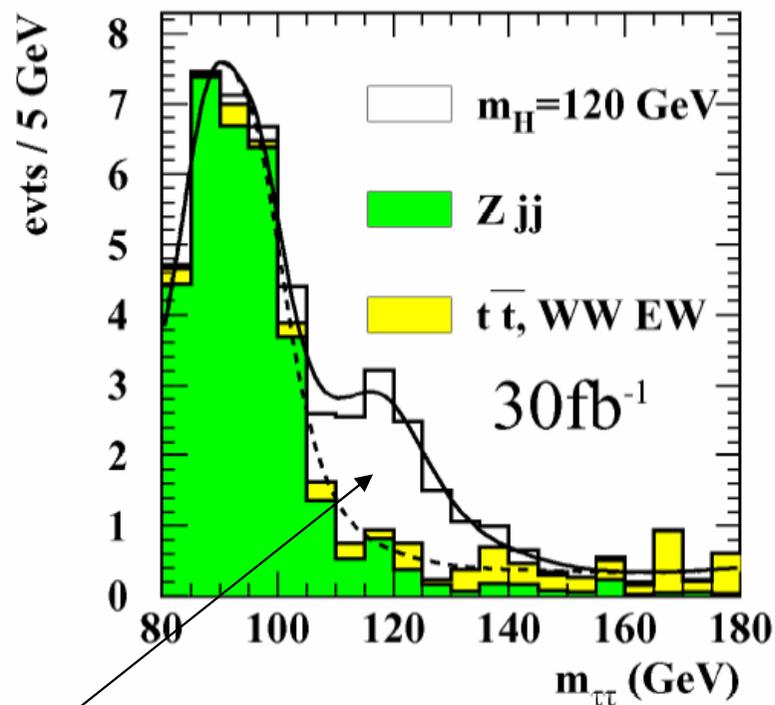
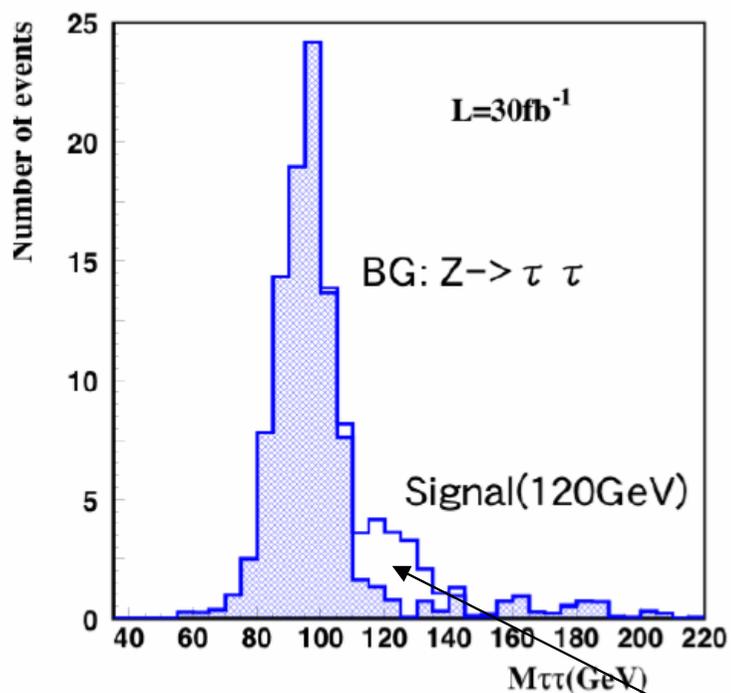
VBF $H \rightarrow \tau \tau$ の $M_{\tau \tau}$ 分布

BG: D Y : Z + N jets

$M_H = 120 \text{ GeV}$

$$\tau^+ \tau^- \rightarrow h \nu_\tau \ell \nu_\tau \nu_\ell$$

$$\tau^+ \tau^- \rightarrow \ell \ell 4 \nu$$

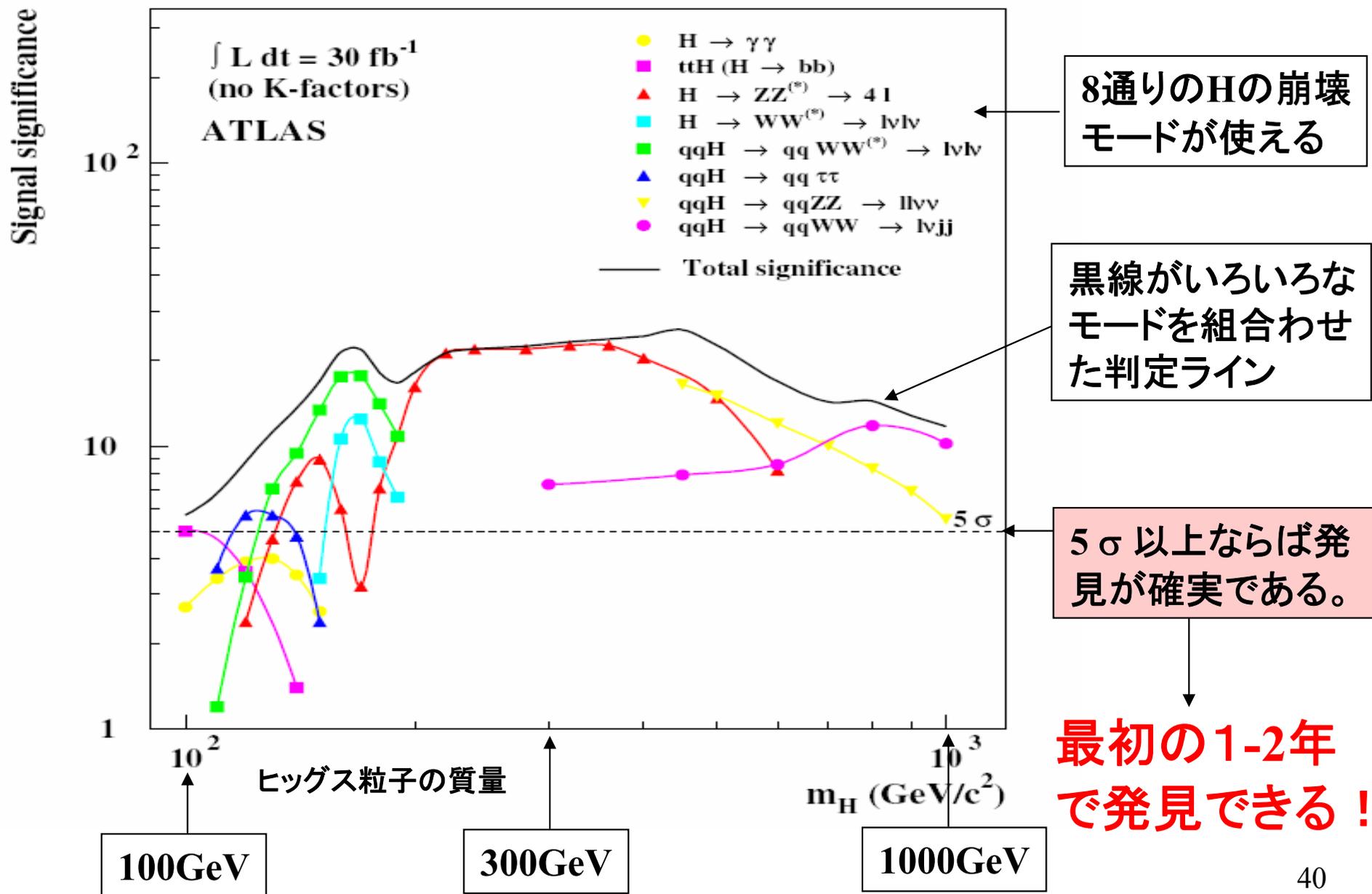


LHC運転2年で

120 GeVのヒッグス粒子

標準ヒッグス粒子Hの発見可能性

アトラス実験: 積分ルミノシティで 30 fb^{-1} (初期の約2年分)

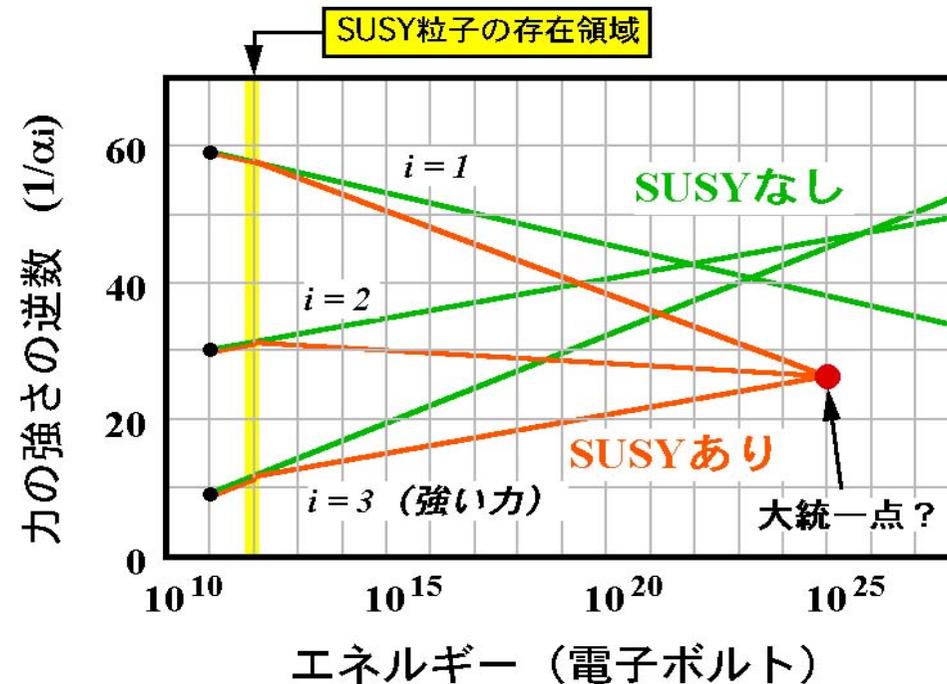


LHCの2大目標:

- (1) ヒッグス粒子を発見して標準モデルを完成する。
- (2) 超対称性(SUSY)粒子などの新しい物理を発見する。

超対称性粒子がLHCで発見される可能性が高い。

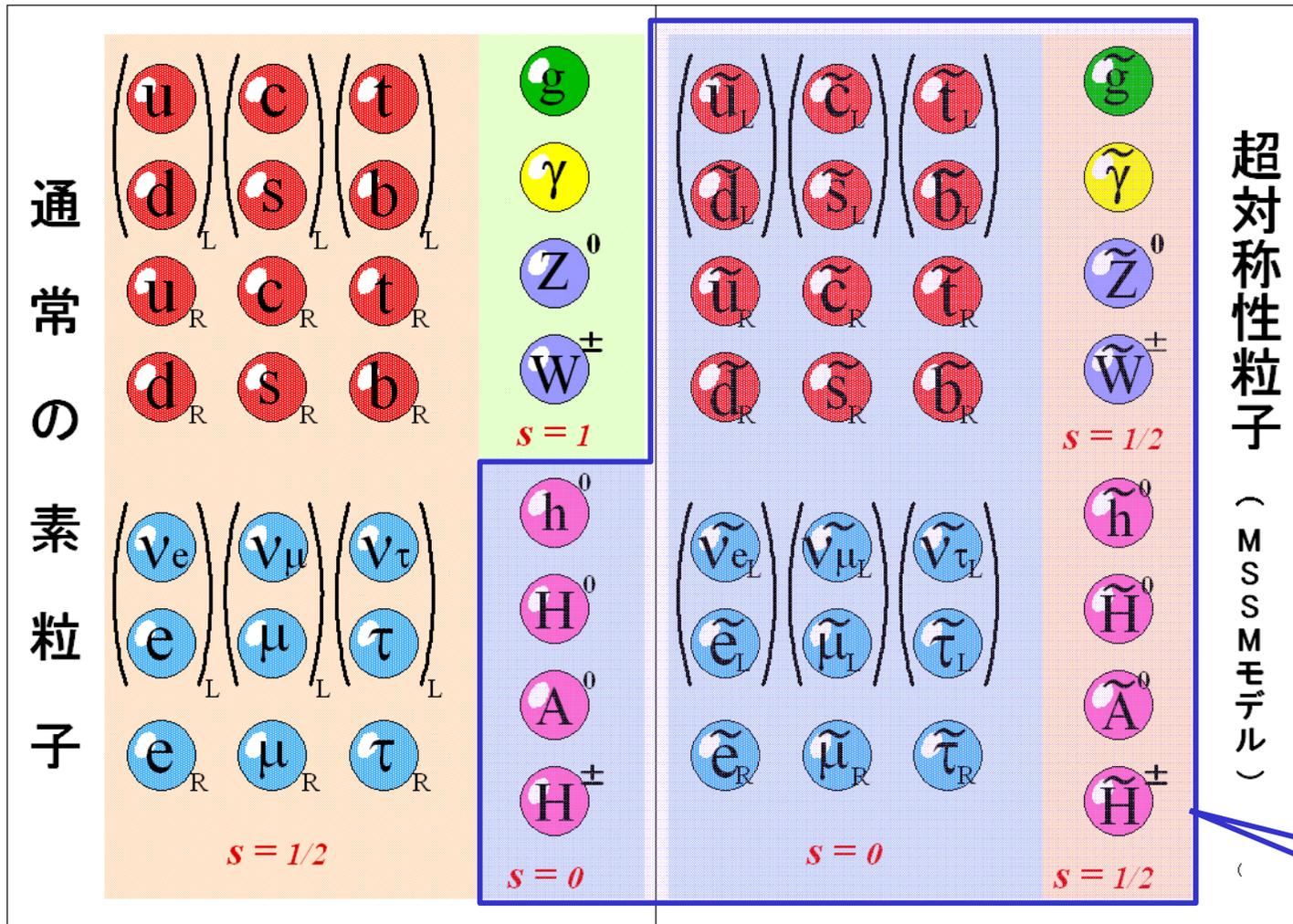
- ① 3つの力が 10^{25} eV付近で **大統一**できる。
- ② ヒッグス粒子の質量の量子補正による不安定性が解決する。
- ③ **暗黒物質**の有力候補。



走る結合定数: 力の強さはエネルギーと共に変化する。
1 TeV付近に超対称性粒子が存在すると、3つの力が
 10^{16} GeV付近で1点に交わり大統一が可能になる。

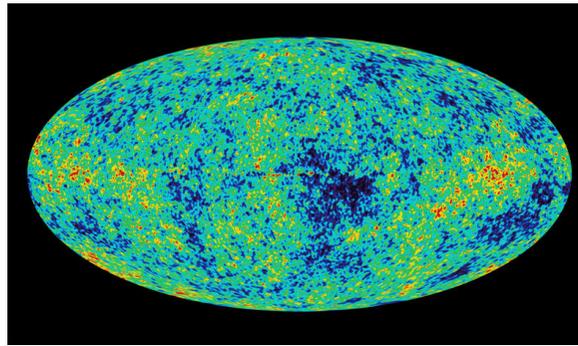
超対称性(Supersymmetry, SUSY)

フェルミ粒子(スピン=1/2)とボーズ粒子(スピン=0,1)を入れ換える対称性

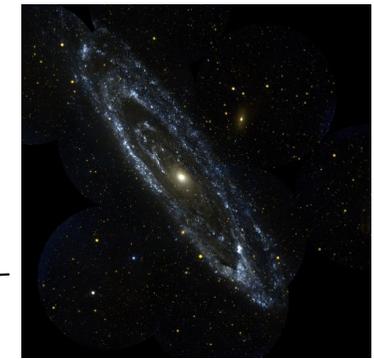
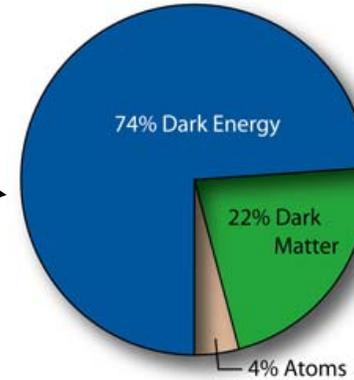


L= 左巻き成分, R= 右巻き成分, s = スピン

③ 暗黒物質



NASA WMAP



銀河の回転速度

超対称性理論では、**Rパリティ保存**を仮定している。

$$R_p = (-1)^{3B+L+2S}$$

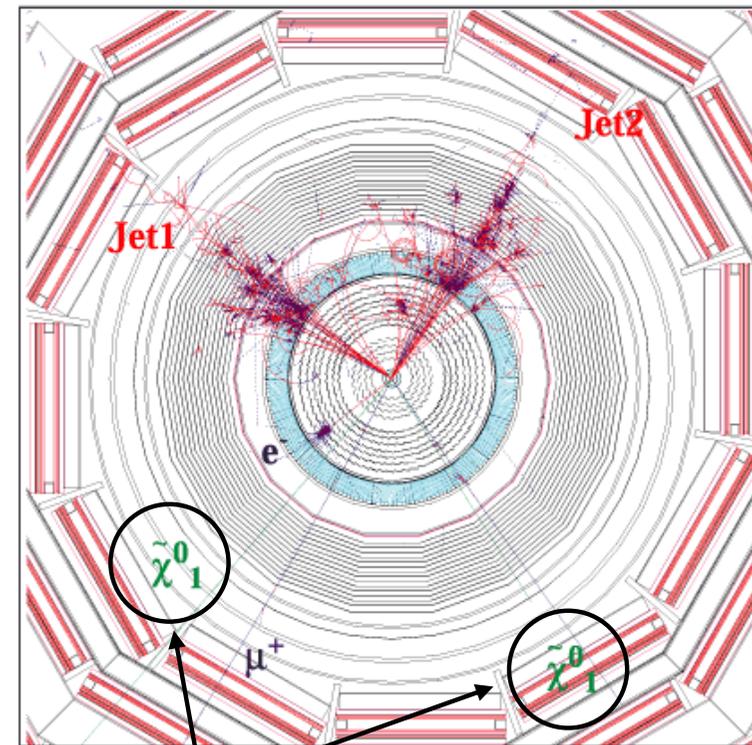
B = バリオン数、
L = レプトン数、
S = スピン値

通常の粒子は $R_p = +1$ 、SUSY粒子は $R_p = -1$ なので、

- ① SUSY粒子はペアで生成されなければならない。
- ② SUSY粒子が崩壊して最も軽いSUSY粒子 (LSP, lightest supersymmetric particle)が残る。
- ③ LSPは電荷を持たず中性である $\tilde{\nu}, \tilde{\gamma}, \tilde{h}^0, \tilde{H}^0$ か、またはその混合状態(ニュートラリーノ $\tilde{\chi}_1^0$)。

この結果

- (1) LSP粒子は暗黒物質に適した性質を持っている。
- (2) LSP粒子は測定器から抜け出る→横エネルギー損失



2つのニュートラリーノが発生し、それらは測定器では捕まられないで逃げてしまう。

まとめ

- 標準モデルは非常に高い精度で実証された理論である。
- しかしW, Z 粒子が質量を持つには、ヒッグス場が存在しなくてはならない。クォークやレプトンの質量も同時に説明できる。
- ヒッグス粒子が最低1種類存在し、その質量は 100～数百GeV であり、1～2年のLHC運転で発見できる。
- CERNにおいて、LHC加速器と実験装置の建設が急ピッチで進んでおり、2008年春の実験開始を目指して進んでいる。
- 新しい物理の超対称性粒子や暗黒物質が発見される可能性も高い。