

質量の起源とヒッグス粒子



- 1) 素粒子物理
- 2) ヒッグス粒子とは？
- 3) ヒッグス粒子発見を可能にした最先端技術
- 4) ヒッグス粒子発見とその意味

9.Nov.2013

浜松ホトニクス フォトンフェア

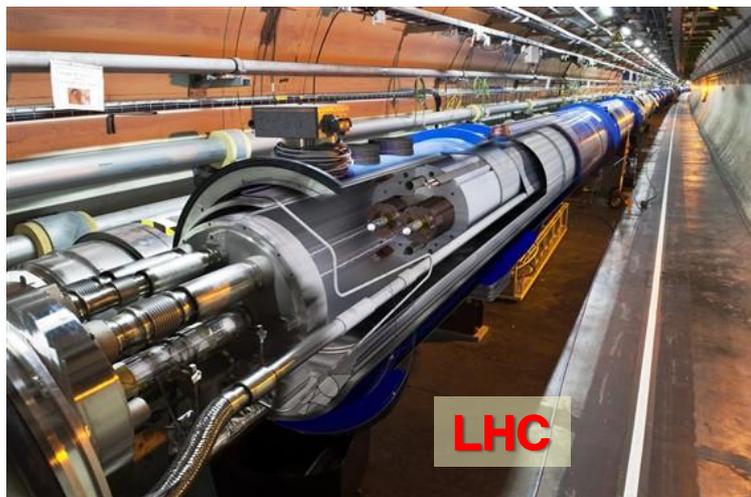
小林富雄

東京大学 素粒子物理国際研究センター

2013年ノーベル物理学賞：F.アンブレール, P.ヒッグス

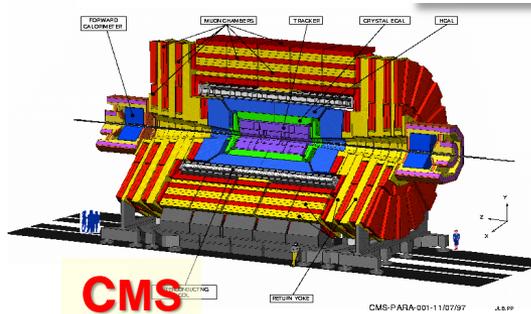


“理論的発見”から49年目の
“スピード受賞”

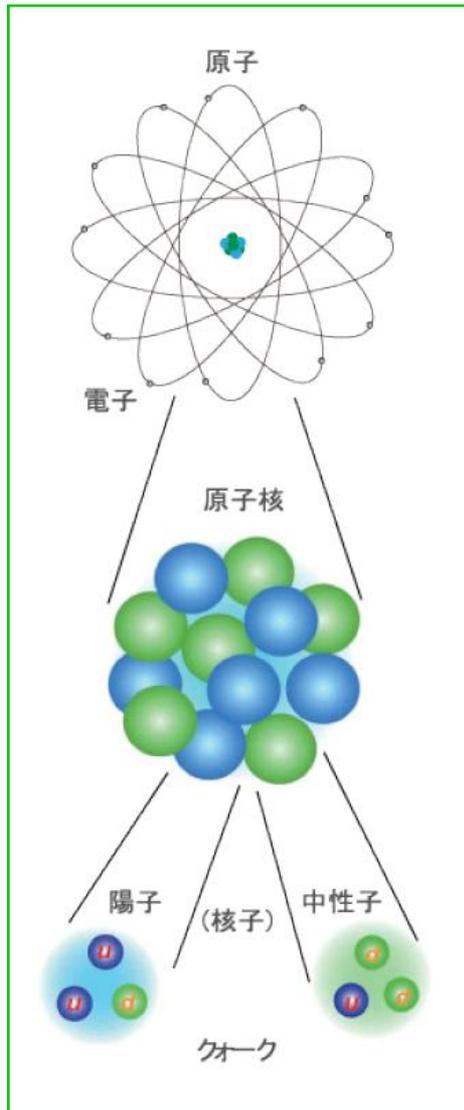


受賞理由：

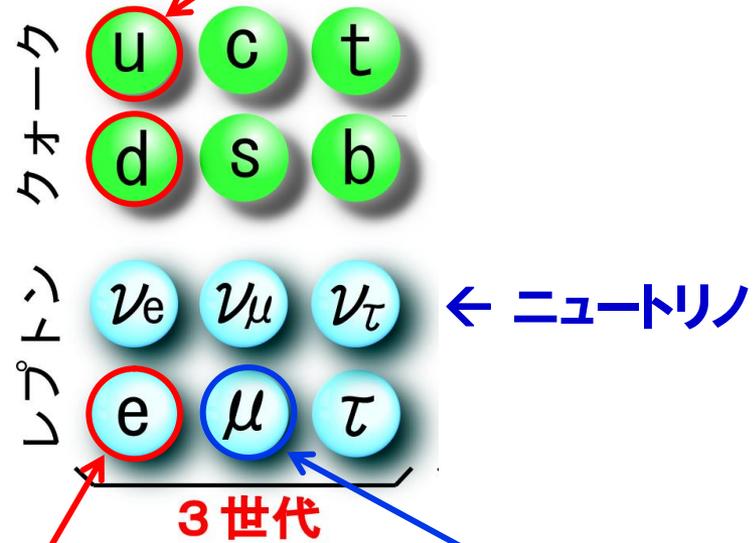
“素粒子の質量の起源に関する理解につながる機構の理論的発見。それは最近、この理論が予測した基本的粒子が、CERNのLHC(大型ハドロンコライダー)を用いたATLASとCMS実験によって発見されたことを通して、確認されたことによる”



素粒子物理の第1の問い： 物質は何からできているのか？



陽子や中性子は、u-クォークとd-クォークでできている

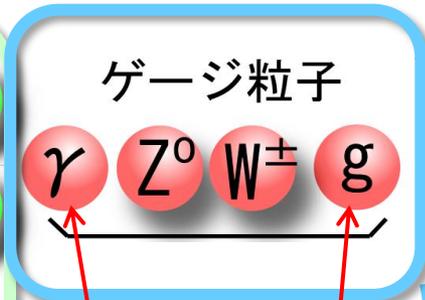
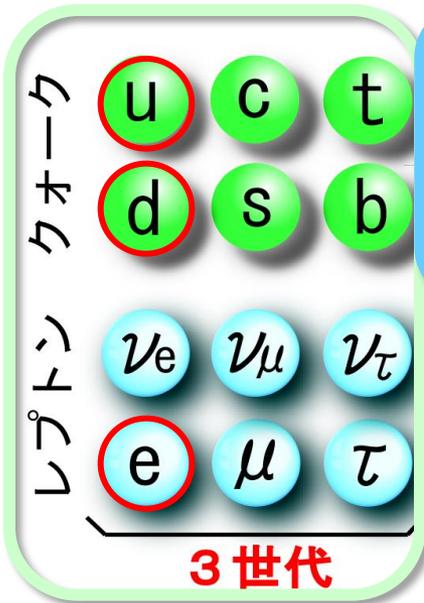
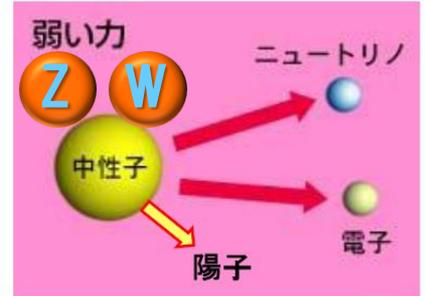
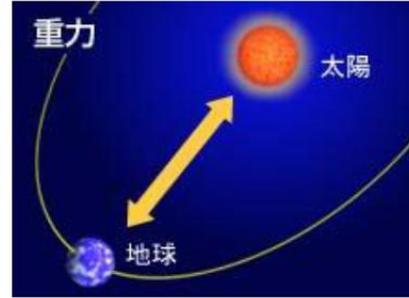


電子

ミューオン

物質の構成粒子：
6種類のクォークと6種類のレプトン

素粒子物理の第2の問い： クォークやレプトンの 間に働く力は？



光子

グルーオン

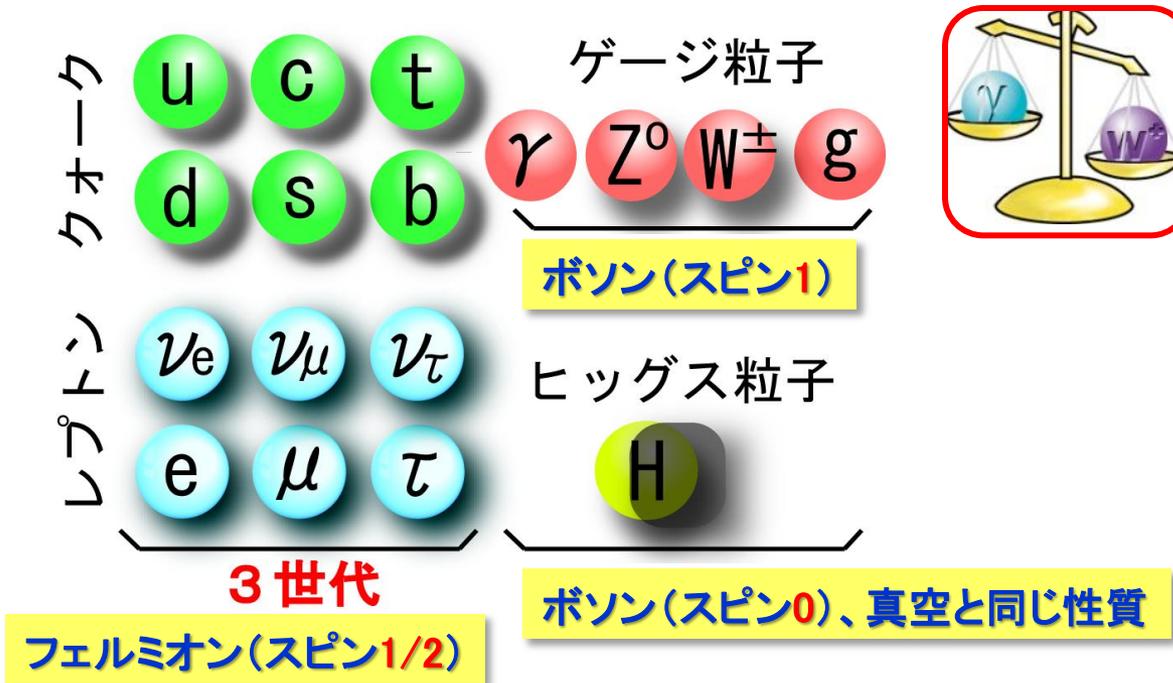
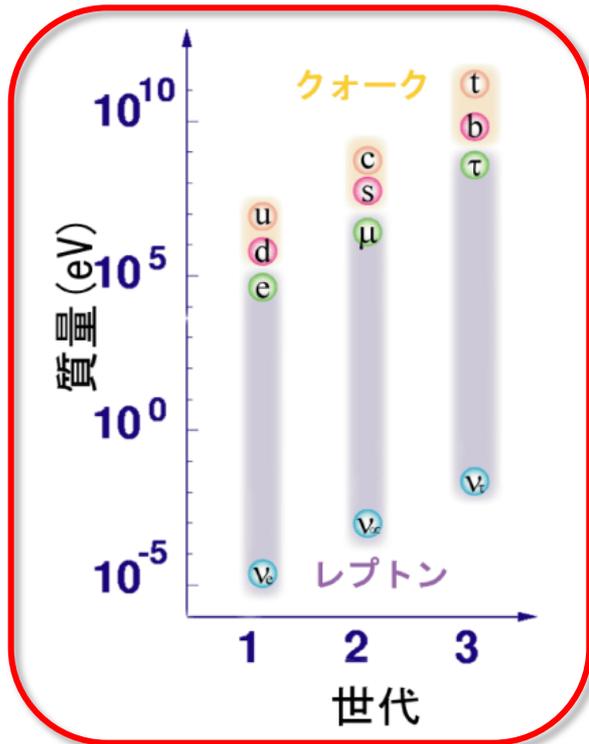
力を媒介する
素粒子



物質を構成する
素粒子

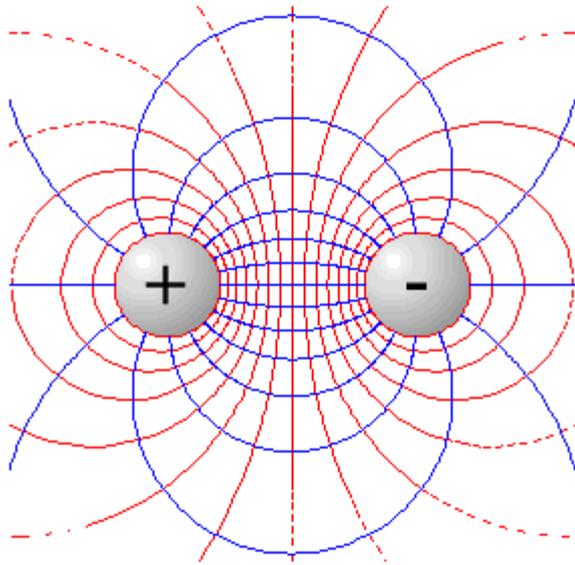
これらの力(相互作用)を
記述するのが標準モデル
(ゲージ理論)

素粒子物理の第3の問い： 素粒子の質量はどこから？

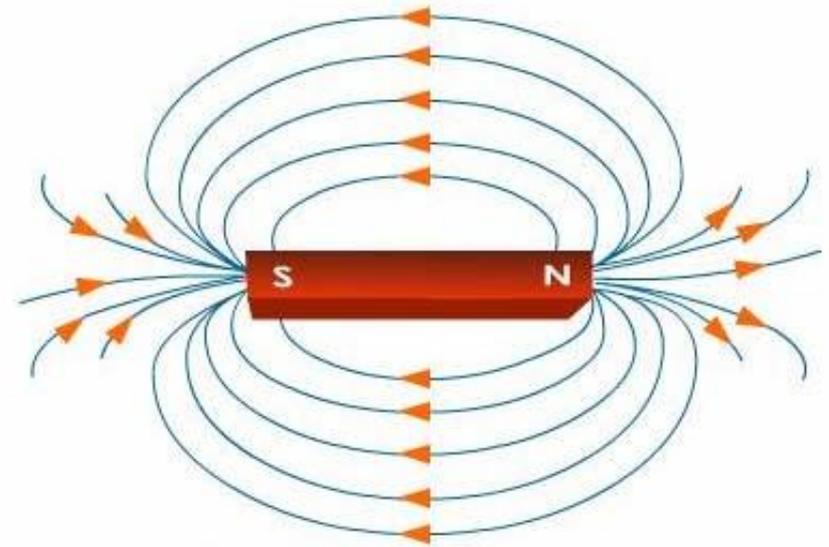


- 現在の素粒子の理論(標準モデル)では、**ヒッグス場**を仮定して質量を説明する
- だがその結果生じる**ヒッグス粒子**だけが未確認だった

場とは？



電場



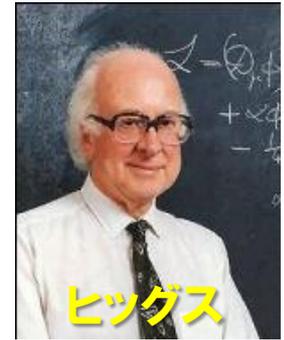
磁場

- 電場や磁場はベクトル場 (スピン1)
- ヒッグス場は方向性を持たないスカラー場 (スピン0)

ヒッグス場が質量を生み出す仕組み “自発的対称性の破れ”と “BEH (ヒッグス) 機構”



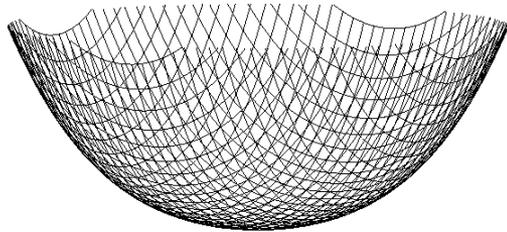
南部先生



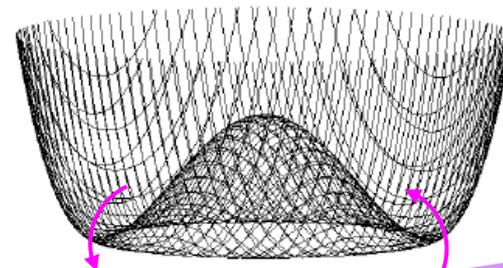
ヒッグス

真空の対称性が破れると
質量0の粒子(NGボソン)が存在
--- 南部・ゴールドストーン

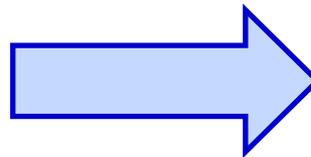
NGボソンが
素粒子の質量に



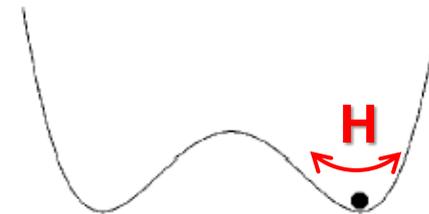
ヒッグス場の
ポテンシャル



NGボソン



真空の
相転移



ヒッグス粒子

ビッグバン直後の真空

ビッグバンの 10^{-10} 秒後の真空



CERNの概要

設立: 1954年
運営: 年間予算 約1,200MCHF (1,000億円相当)、
職員数 約2,500人、加盟国 ヨーロッパの20カ国
オブザーバー国 日本、米国、ロシアなど
(LHC加速器建設に協力)
利用: CERNの加速器を利用する研究者は約1万人
(全世界の高エネルギー研究者の約半数)

CERNが建設した加速器

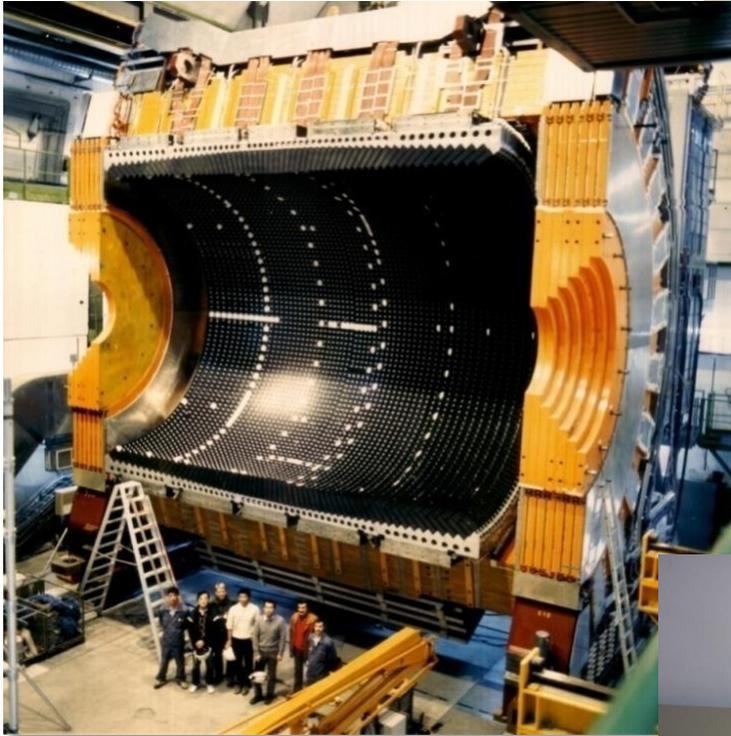
1959年: 28GeV 陽子シンクロトロン (PS)
1971年: 56GeV 陽子・陽子コライダー (ISR)
1976年: 450GeV 大型陽子加速器 (SPS)
1989年: 100GeV 電子・陽電子コライダー (LEP)
2008年: 14TeV 陽子・陽子コライダー (LHC)

LEP

(大型電子-陽電子コライダー)



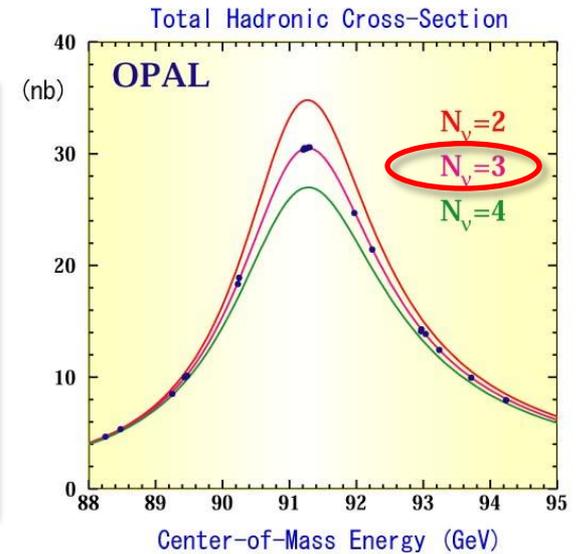
(1989-2000)



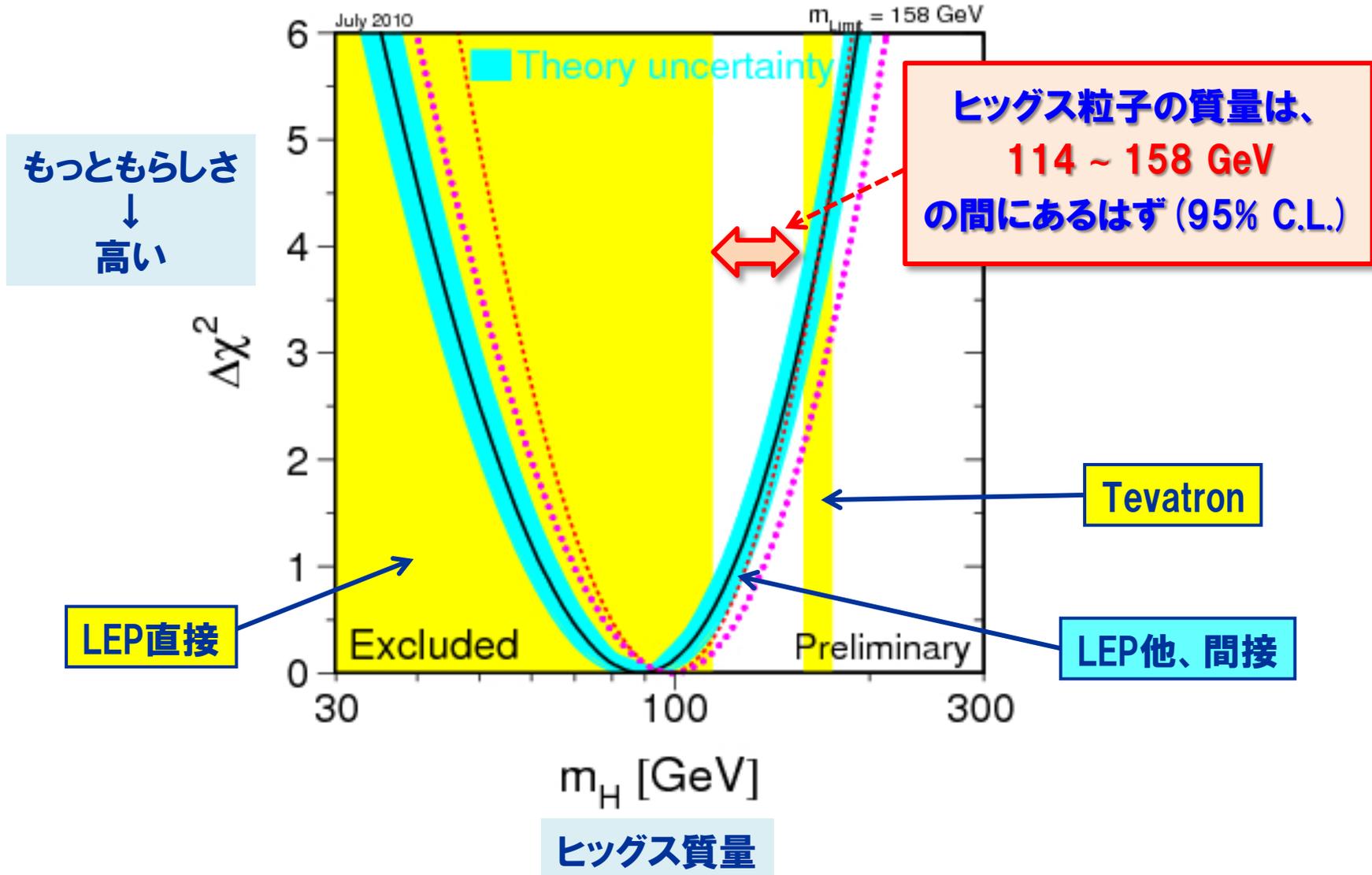
OPAL実験
(電磁シャワーカロリメータ)



R2238(浜松ホトニクス)



LEPでのヒッグス粒子探索



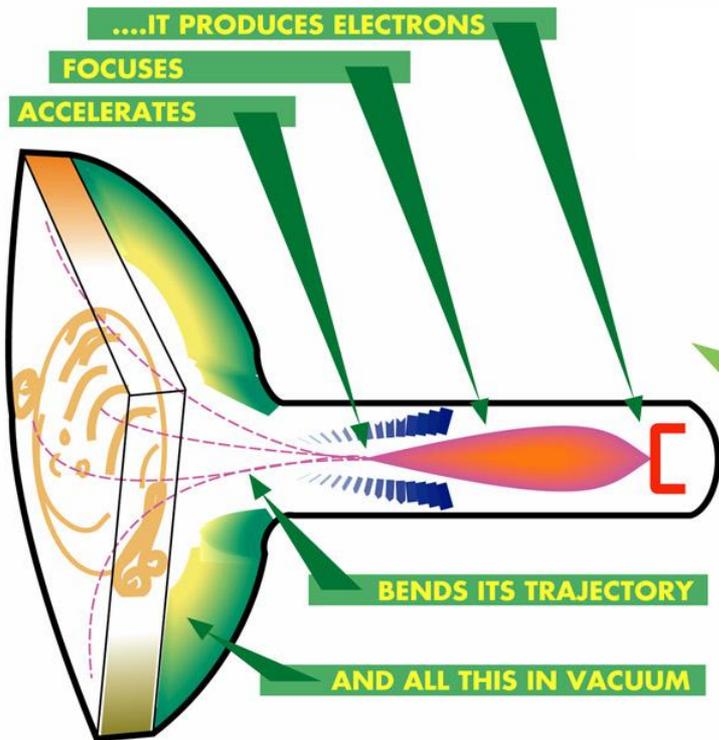
LHC Large Hadron Collider at CERN 大型ハドロン衝突装置

7TeV 陽子 7TeV 陽子
→ ←

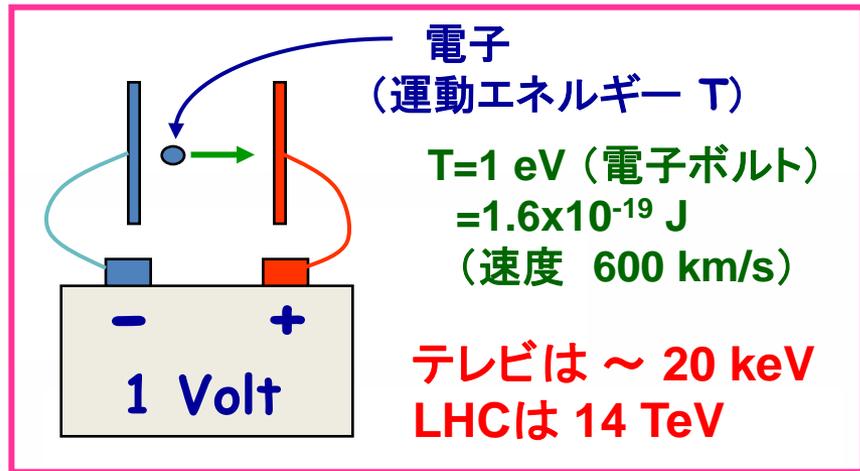
- LEPTunnel内に建設
（1994年に建設決定）
- 8.3テスラの超伝導磁石
- 2008年9月に完成、…
- 3.5+3.5TeV（世界最高エネルギー）での運転を
2010年3月に開始

TeV = テラ電子ボルト = 10^{12} eV

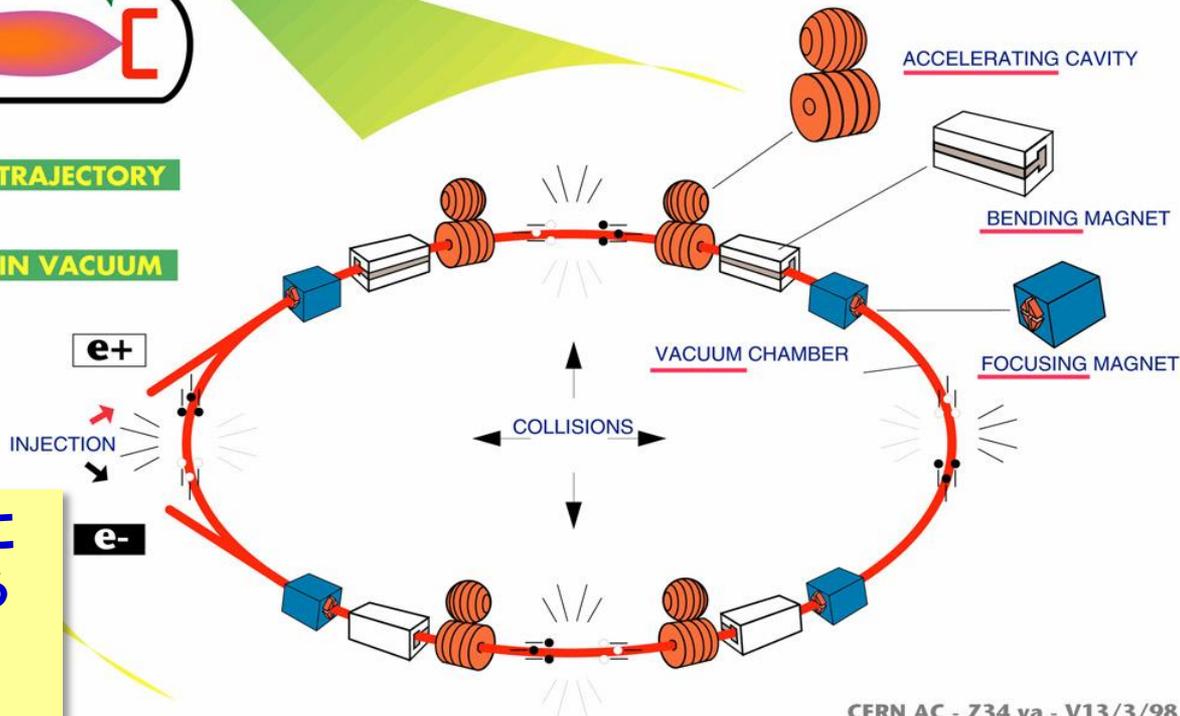
加速器の原理



乾電池3兆個 (3×10^{12}) を直列につなぐと4.5TeVの加速器ができる
 $\rightarrow 5\text{cm} \times 3\text{兆} = 1.5\text{億km}$
 (地球と太陽の距離)



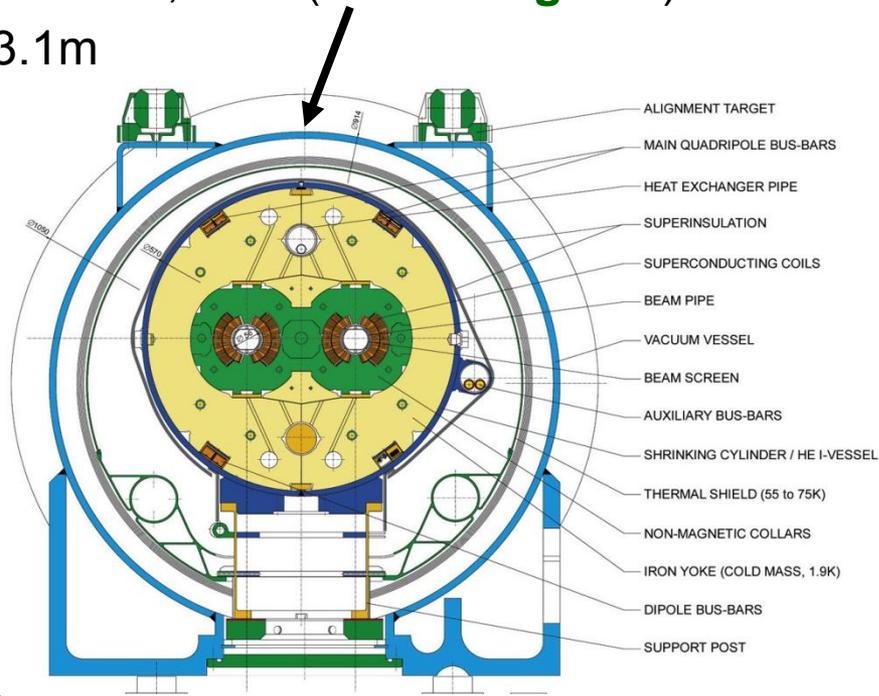
k(キロ、 10^3) T(テラ、 10^{12})



LHC加速器の設計パラメータ

Proton-Proton Collider

Circumference:	26.7 km	(using LEP tunnel)
Beam Energy:	7 TeV	(Injection E: 450 GeV, PS→SPS→LHC)
1232 MR dipoles	B=8.33 Tesla , L=14.3m, 1.9K	(2-in-1 magnets)
368 MR quads	B'=223 T/m, L=3.1m	
No. of Bunches:	2808	
Bunch spacing:	25 ns	
Bunch size at IP:	16 μm	
Bunch length at IP:	77 mm	
Half crossing angle:	160 μrad	
Luminosity:	10³⁴ cm⁻²s⁻¹	

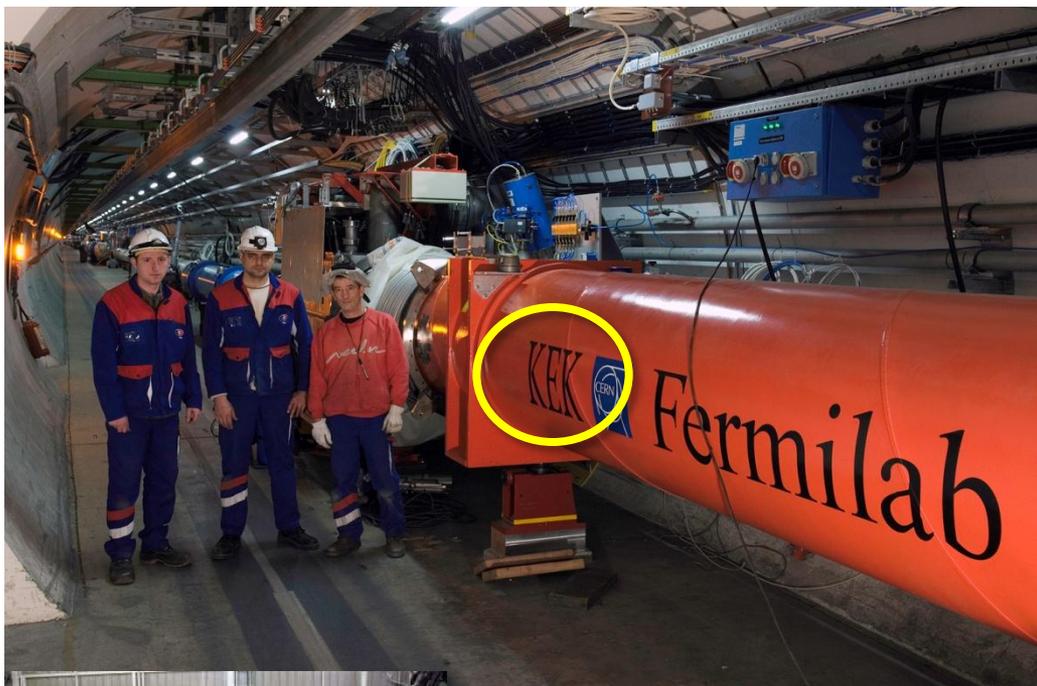


Heavy Ion Collider

Pb-Pb E _{cm} :	1148 TeV
Pb-Pb Luminosity:	10 ²⁷ cm ⁻² s ⁻¹

~23 pp collisions/crossing

LHC加速器建設に対する日本の貢献（技術面）



最終ビーム収束4重極マグネット



東芝



古河電工、
JFEスチール
(川崎製鉄)



主リング用
二重極マグネット

新日本製鉄



古河電気工業
(NbTi 超伝導線材)



IHI
(低温Heコンプレッサー)



カネカ
(ポリイミド絶縁テープ)

LHC建設に貢献した主な日本企業

古河電気工業	LHC加速器	超伝導ケーブル
新日本製鐵	LHC加速器	双極電磁石の特殊ステンレス材
東芝	LHC加速器	収束用超伝導四極電磁石
JFEスチール	LHC加速器	電磁石用非磁性鋼材
カネカ	LHC加速器	電磁石用ポリイミド絶縁テープ
IHI (+Linde)	LHC加速器	低温ヘリウムコンプレッサー
東芝	ATLAS	超伝導ソレノイド
浜松ホトニクス	ATLAS, CMS, LHCb	シリコン検出器, 光電子増倍管, 光検出ダイオード
川崎重工業	ATLAS, CMS	LArカロリメータ容器, 鉄構造体
林栄精器	ATLAS	ワイヤーチェンバー (TGC)
東芝	ATLAS	信号読み出し集積回路
ソニー	ATLAS	検出器信号アンプ
ジーエヌディー	ATLAS	トリガー用電子回路
フジクラ	ATLAS	耐放射線性光ファイバー
クラレ	ATLAS	シンチレーションファイバー
有沢製作所	ATLAS	銅箔ポリイミド電極シート

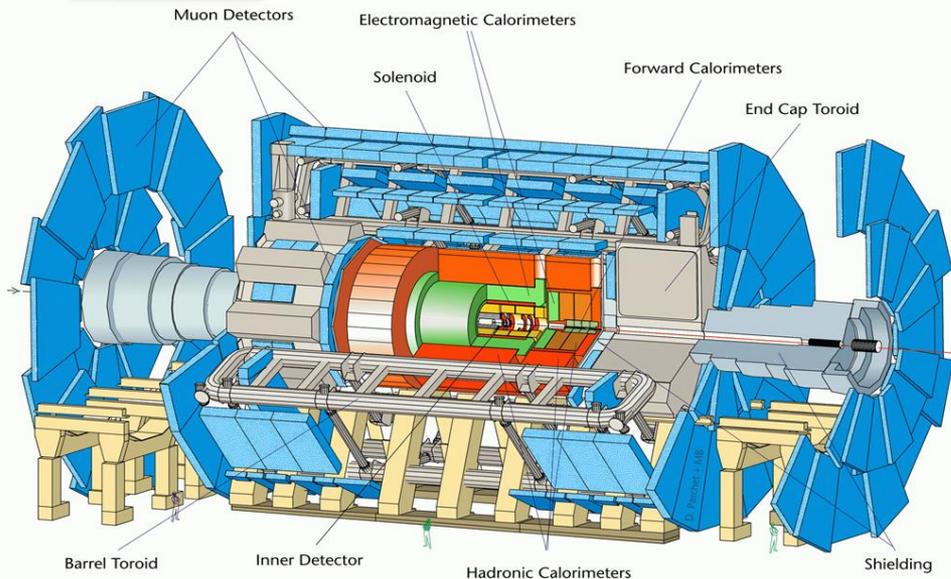
**“Your failure is our failure,
your success is our success.”**



Golden Hadron Award 受賞

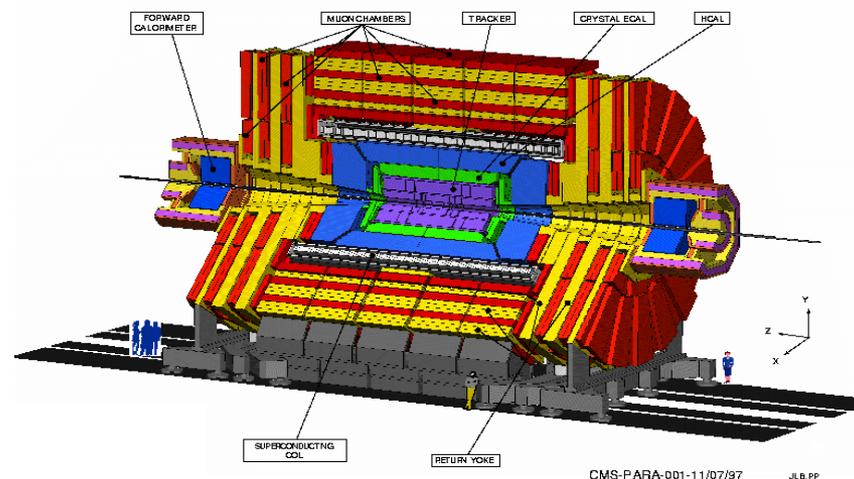
LHC陽子-陽子衝突反応を調べるための 汎用粒子検出器

ATLAS



Length : ~45 m
 Diameter : ~24 m
 Weight : ~ 7,000 tons
 Solenoid : 2 T
 Air-core toroids
 日本グループが参加

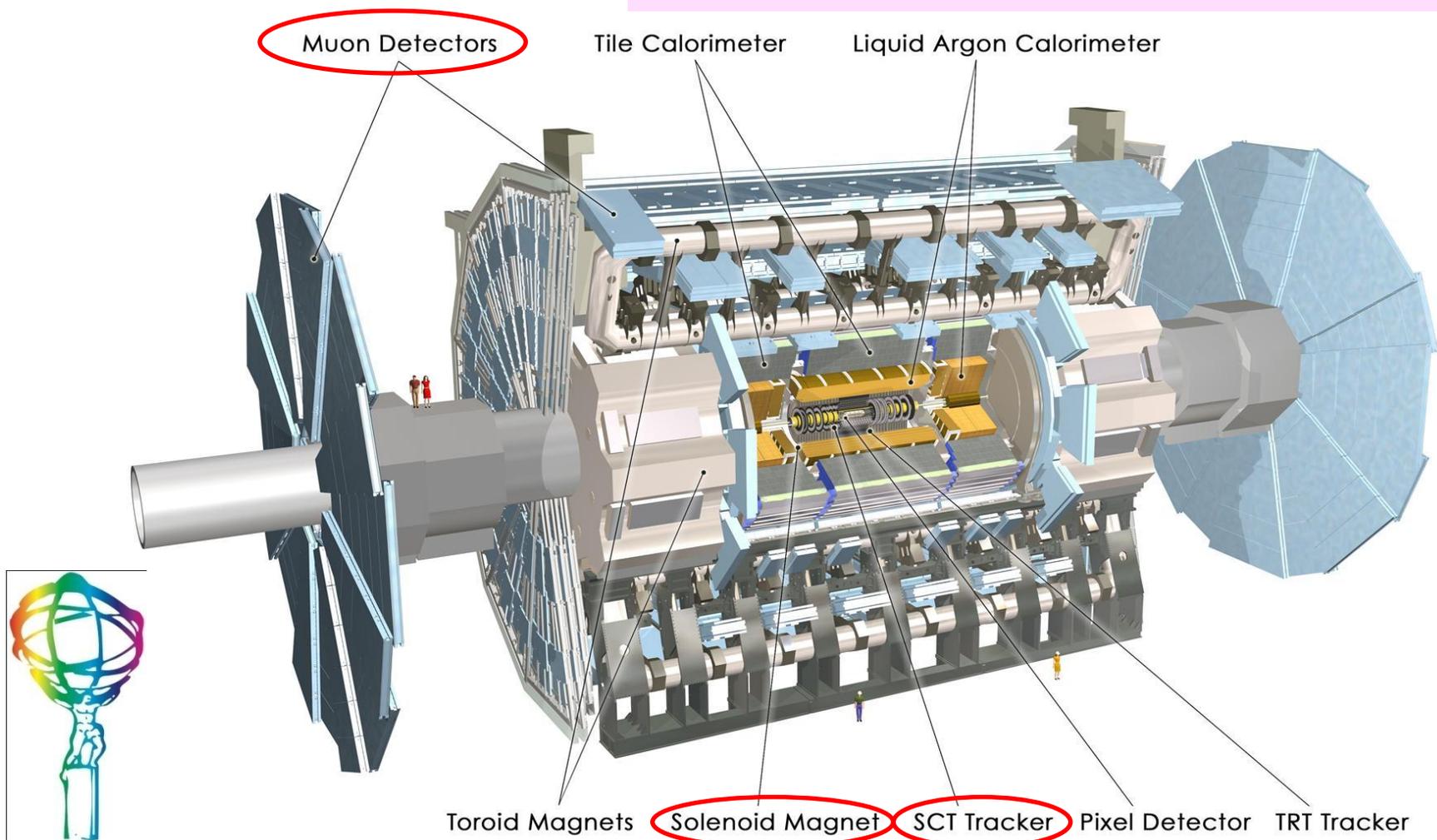
CMS



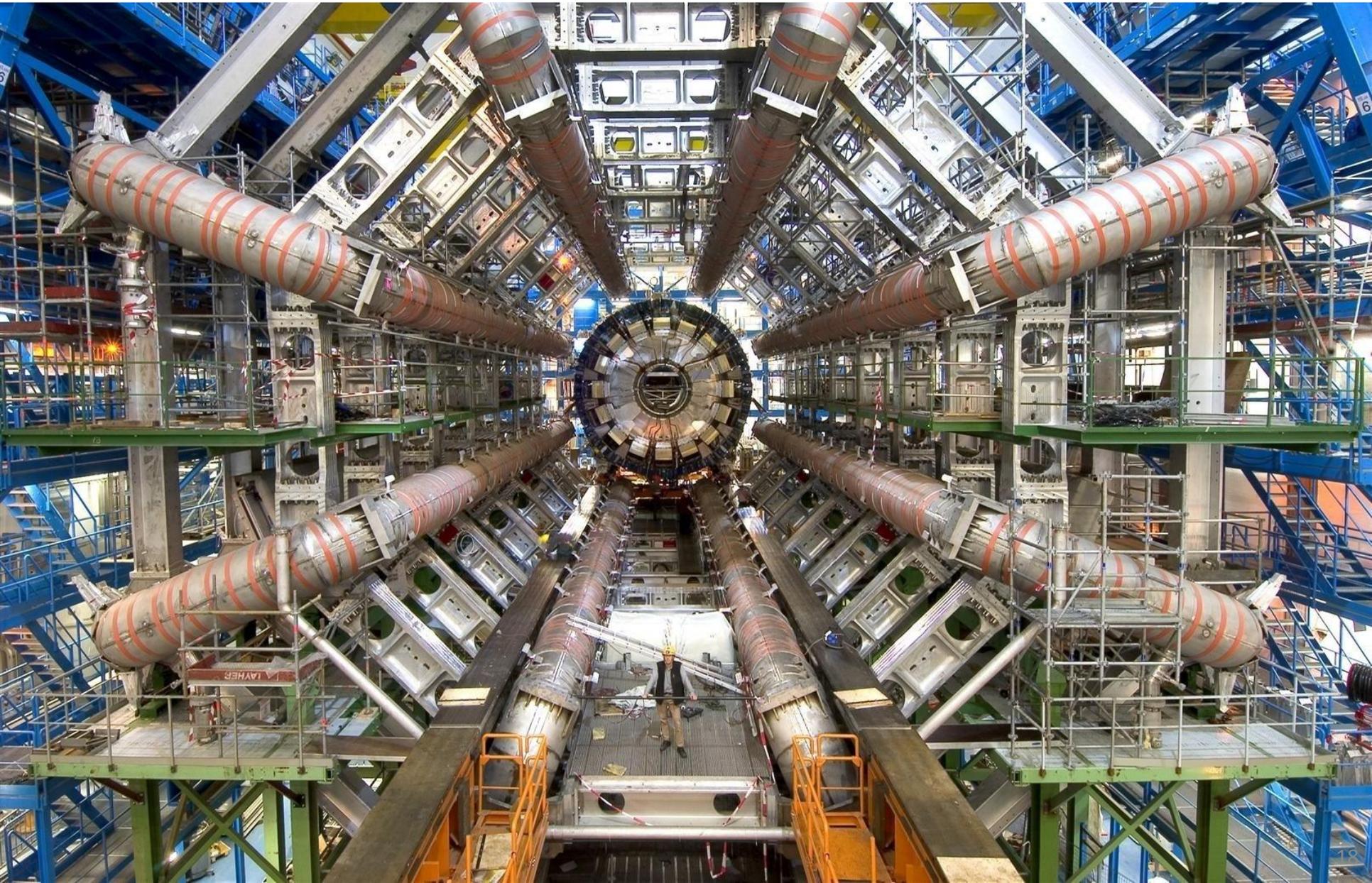
Length : ~22 m
 Diameter : ~14 m
 Weight : ~ 12,500 tons
 Solenoid : 4 T
 Fe yoke
 Compact and modular

国際協力による ATLAS実験 (A Toroidal LHC Apparatus)

- 直径 22m、長さ 44m、重さ 7000t
- 世界最大の超伝導トロイド磁石
- 粒子検出器のセンサー数は全部で約1億チャンネル
- 38ヵ国からの約3000名の研究者による国際共同実験
- 日本グループ(15の大学・研究所、110名)は**ミュオントリガー検出器、内部飛跡検出器、ソレノイド超伝導磁石**などに貢献



ATLAS実験の超伝導トロイド磁石



ATLAS実験：日本の貢献



ミュオントリガー検出器
Thin Gap Chamber (TGC)



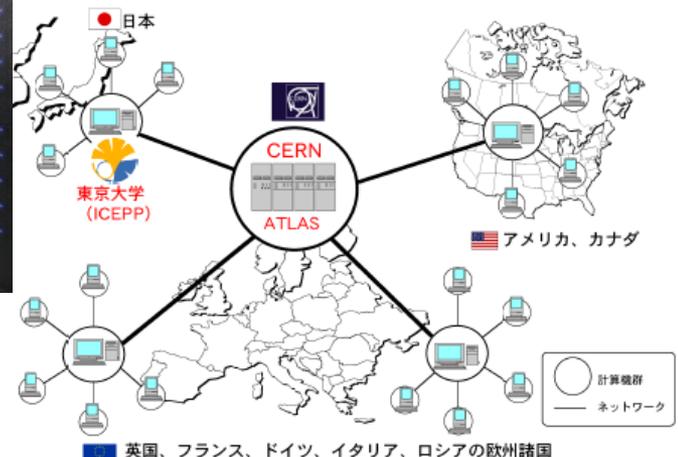
内部飛跡検出器
浜松ホトニクス



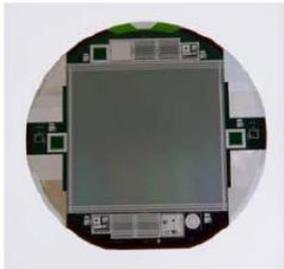
超伝導ソレノイド磁石
KEK、東芝、
古川電工、日立電線



LHC Computing Grid
地域解析センター



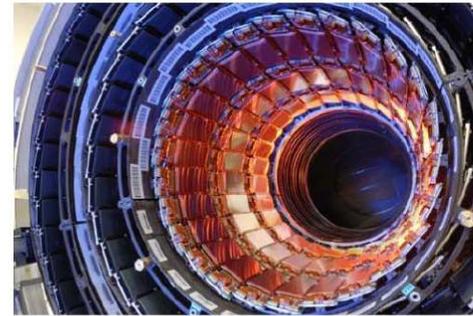
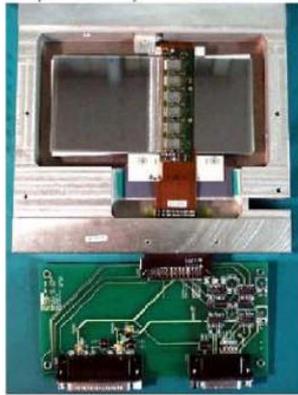
浜松ホトニクス:ATLASとCMSのの半導体検出器のほぼ全数を製造



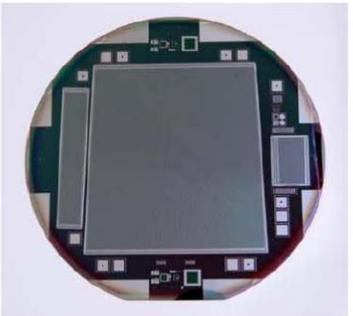
4インチウエハーから
1個のSSDを製作



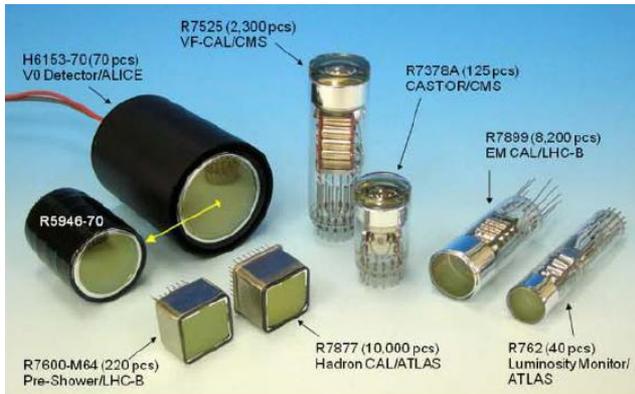
SSD モジュール



CMS に配置された SSD



6インチウエハーから
1個のSSDを製作



光電子増倍管



CMS のカロリメーター用 APD

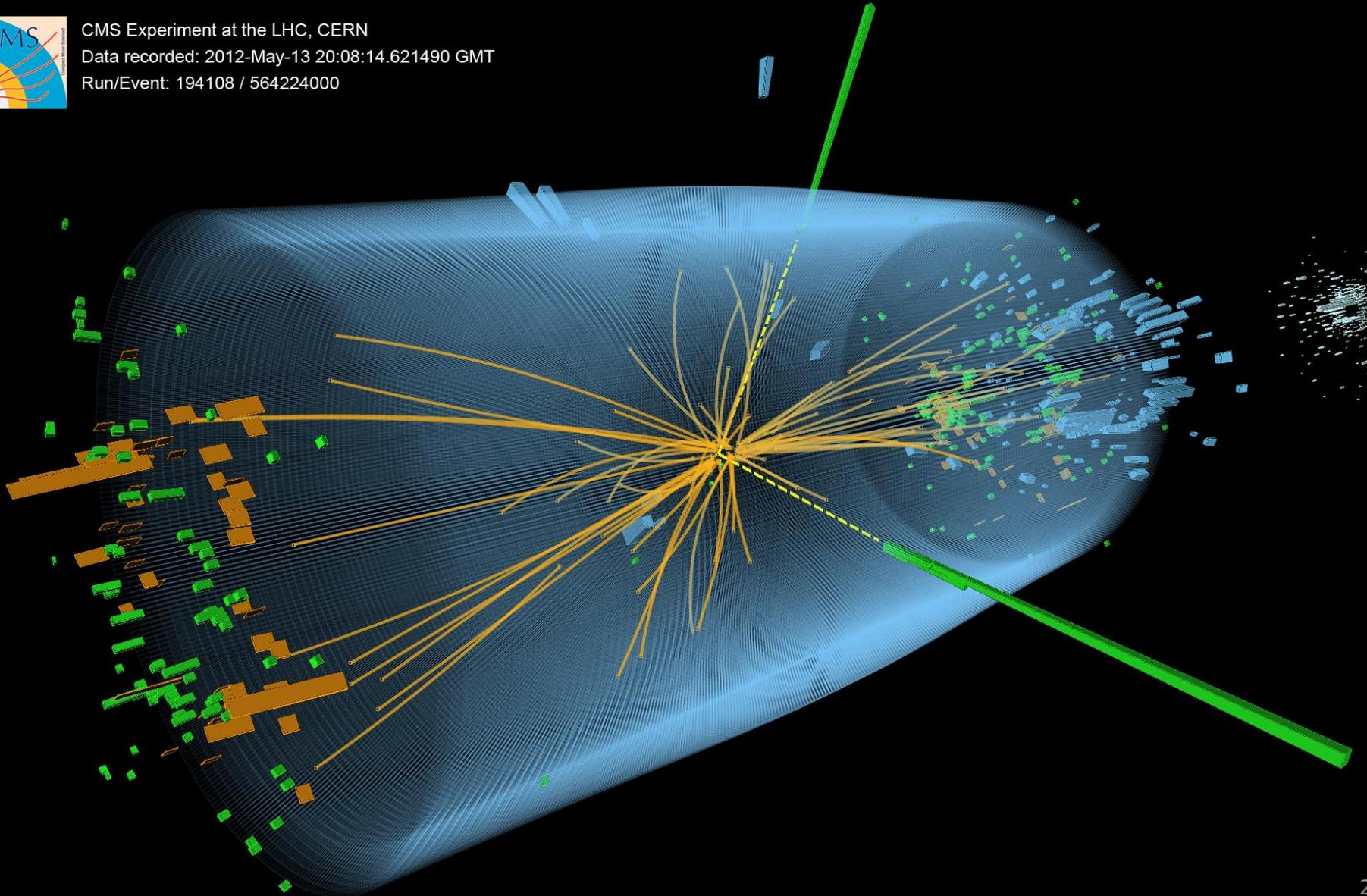
**ATLAS, CMS,
LHCb から表彰**



ヒッグス粒子が2つの光子に崩壊した候補事象 (CMS実験)

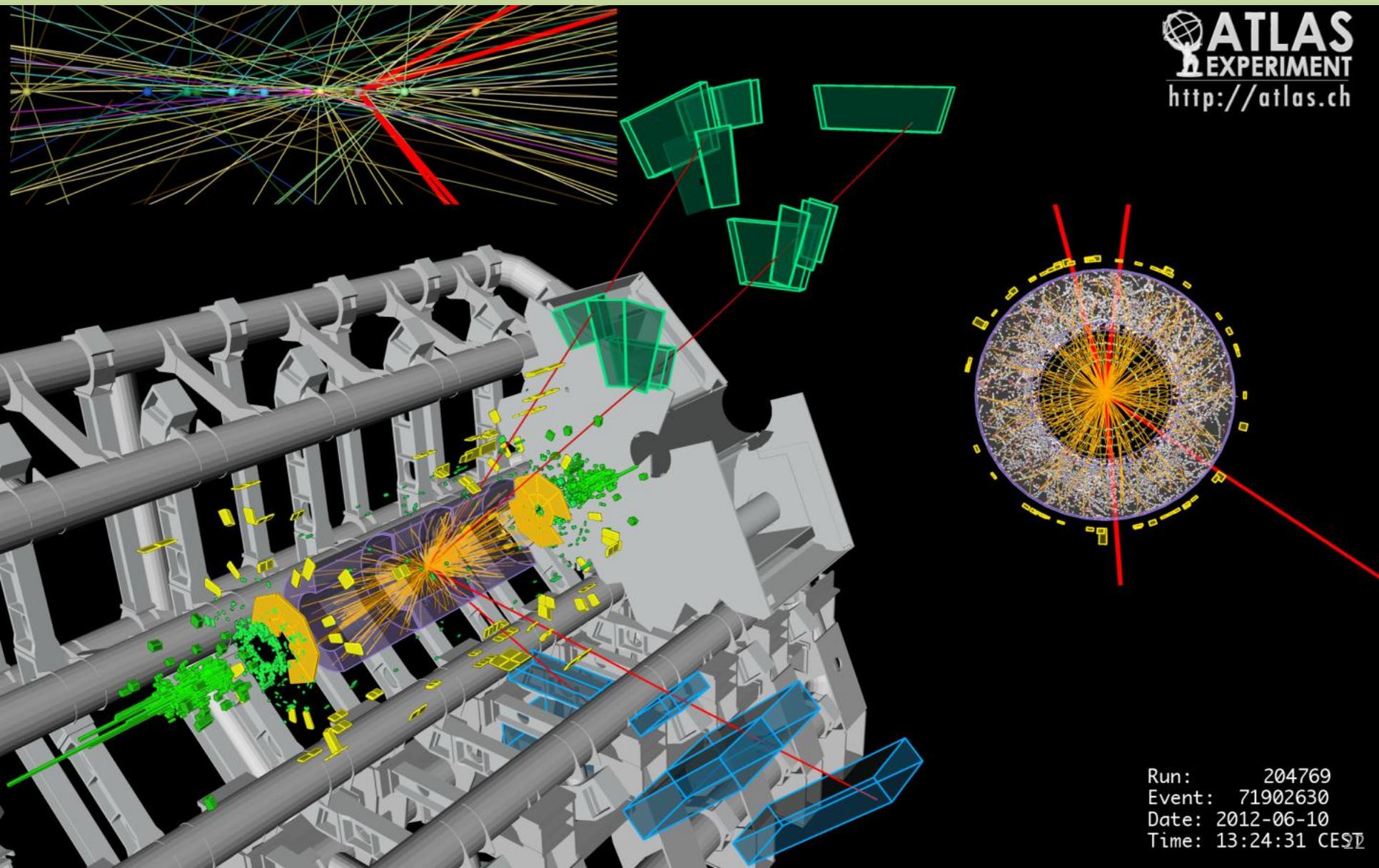


CMS Experiment at the LHC, CERN
Data recorded: 2012-May-13 20:08:14.621490 GMT
Run/Event: 194108 / 564224000



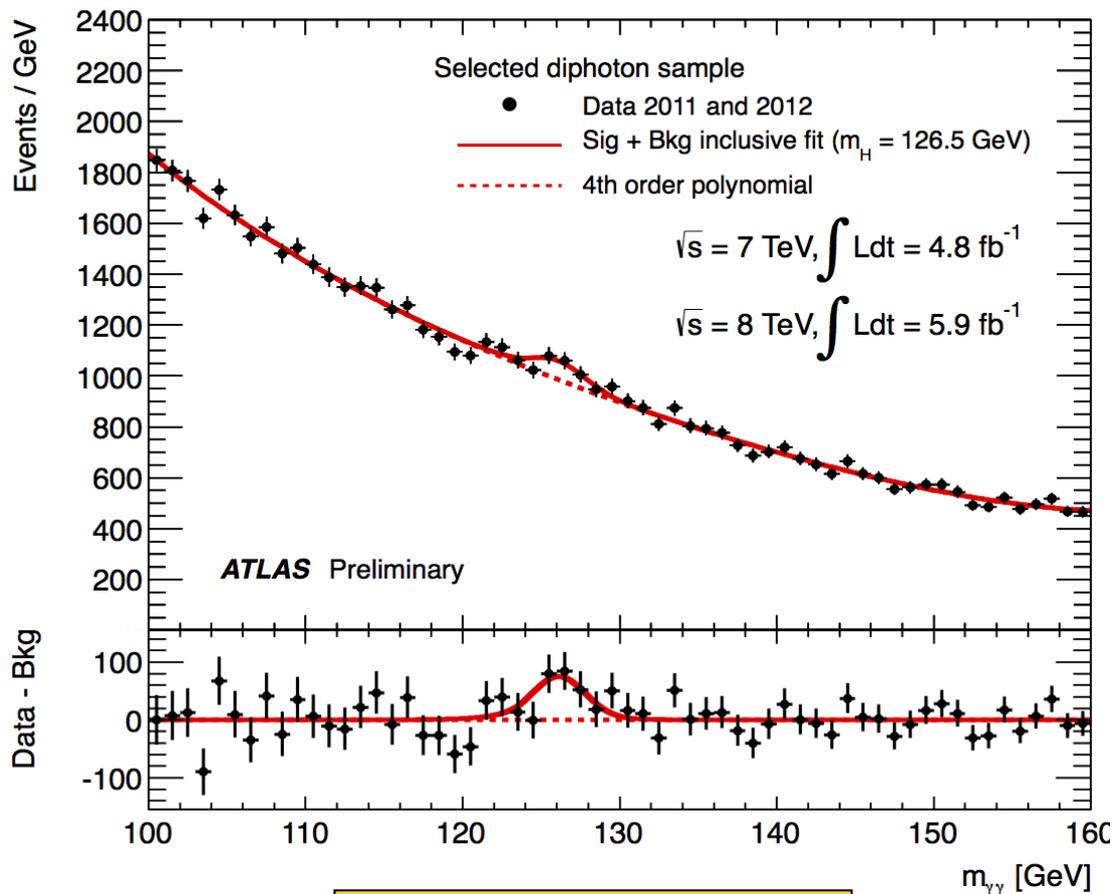
ヒッグス粒子が4本のミュオンに崩壊した候補事象 (ATLAS実験)

ATLAS
EXPERIMENT
<http://atlas.ch>

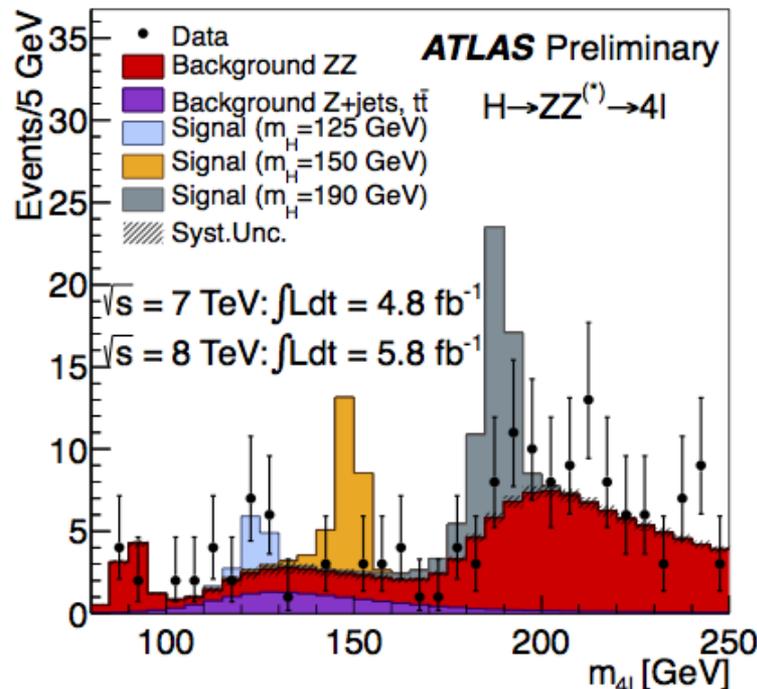


Run: 204769
Event: 71902630
Date: 2012-06-10
Time: 13:24:31 CEST

ヒッグス粒子とみられる 新粒子を発見 (2012年7月4日発表)



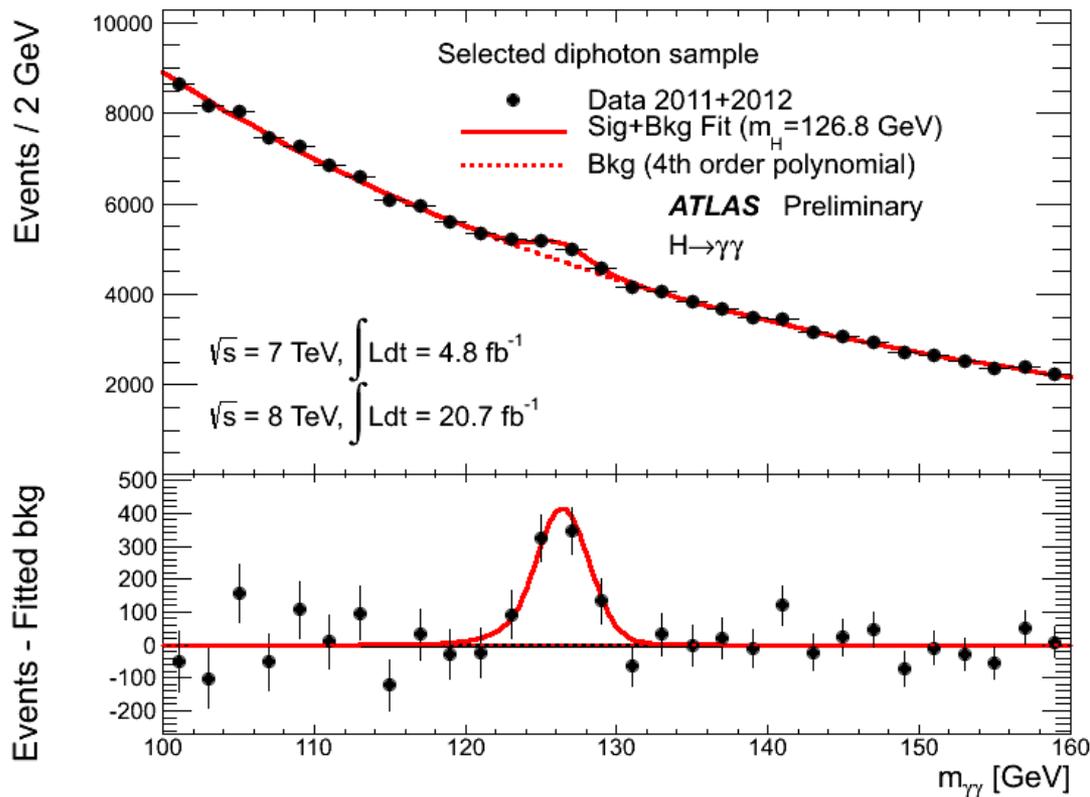
γγ 不変質量分布



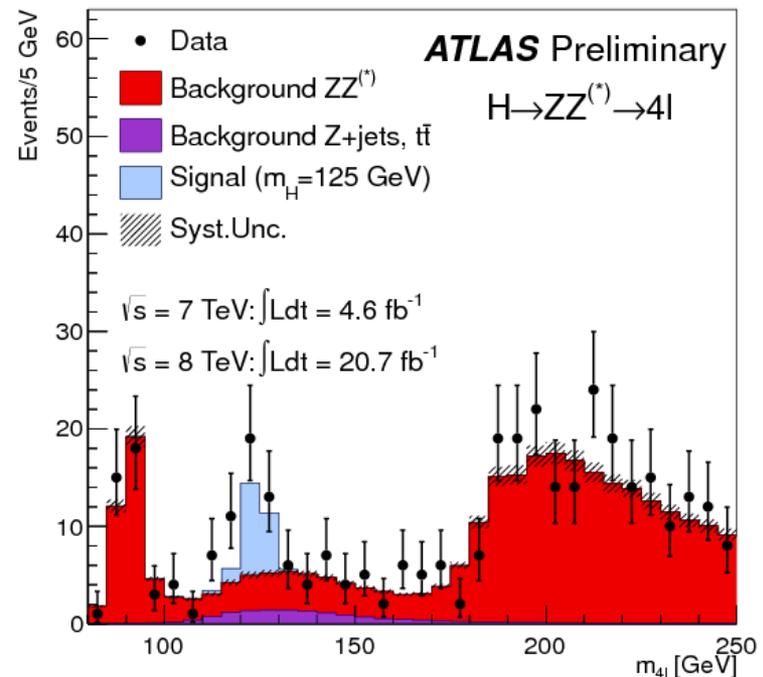
4レプトン不変質量分布

ヒッグス粒子とほぼ断定

(2013年3月発表)



$\gamma\gamma$ 不変質量分布

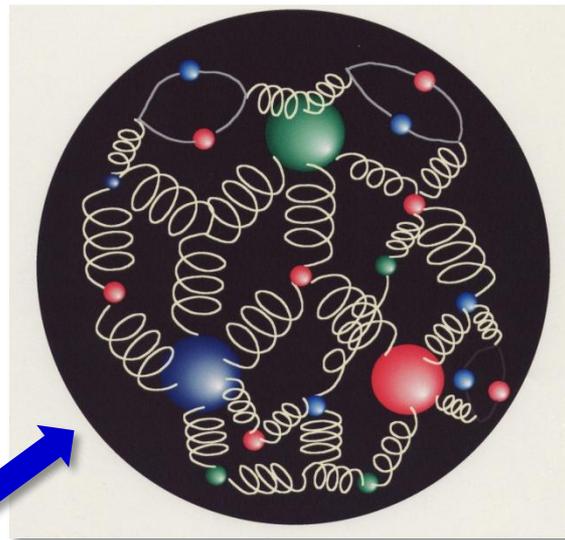
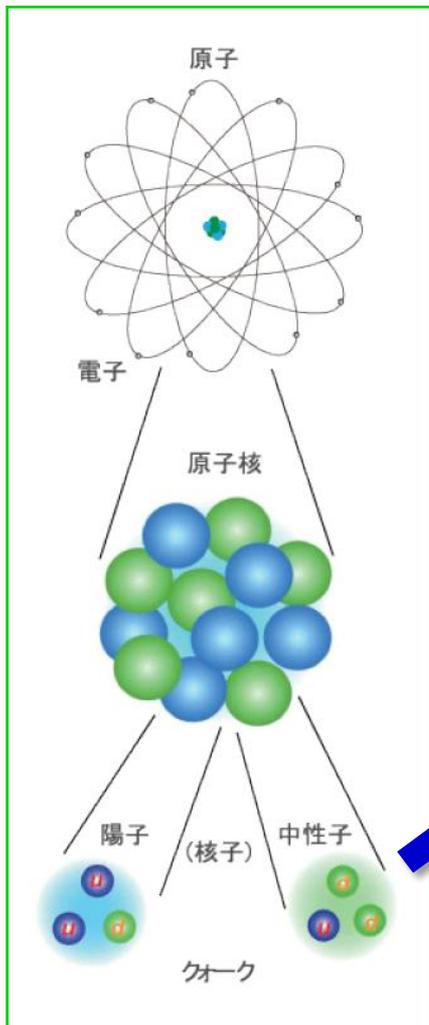


4レプトン不変質量分布

スピンとパリティも 0^+ と確定

質量の起源

クォークの質量は核子の約1%。
核子の質量の99%はグルーオンのエネルギー。



$$E = mc^2$$

(質量はエネルギーに転換できる)

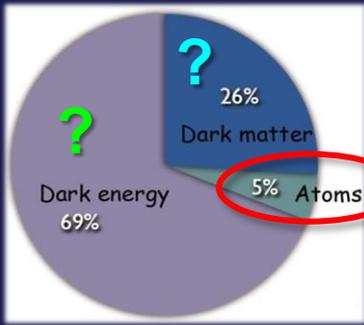


$$m = E/c^2$$

(質量の起源はエネルギー)

電子やクォークの質量はBEH (ヒッグス) 機構から。
つまりは、ヒッグス場との相互作用エネルギー。
BEH機構が働かなければ、物質は存在していない。

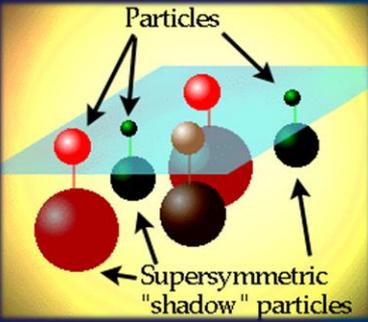
History of the Universe



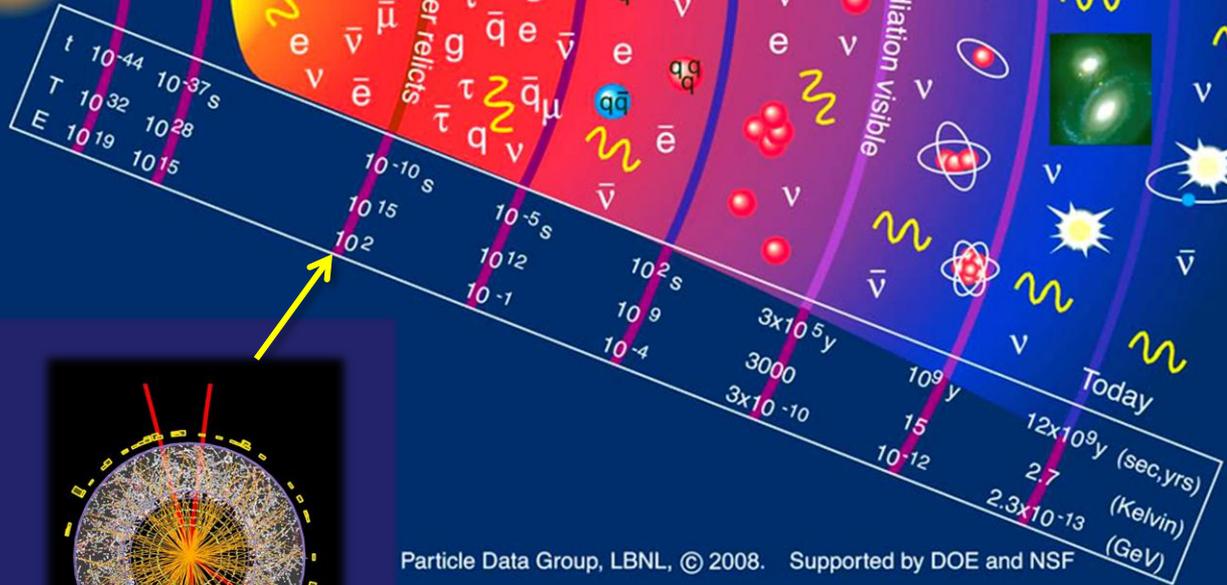
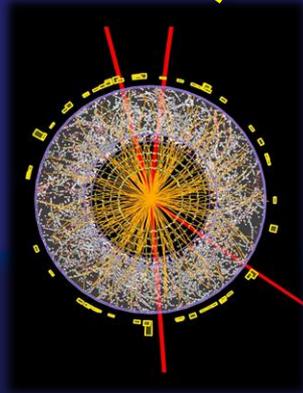
インフレーション

ビッグバン

BIG BANG

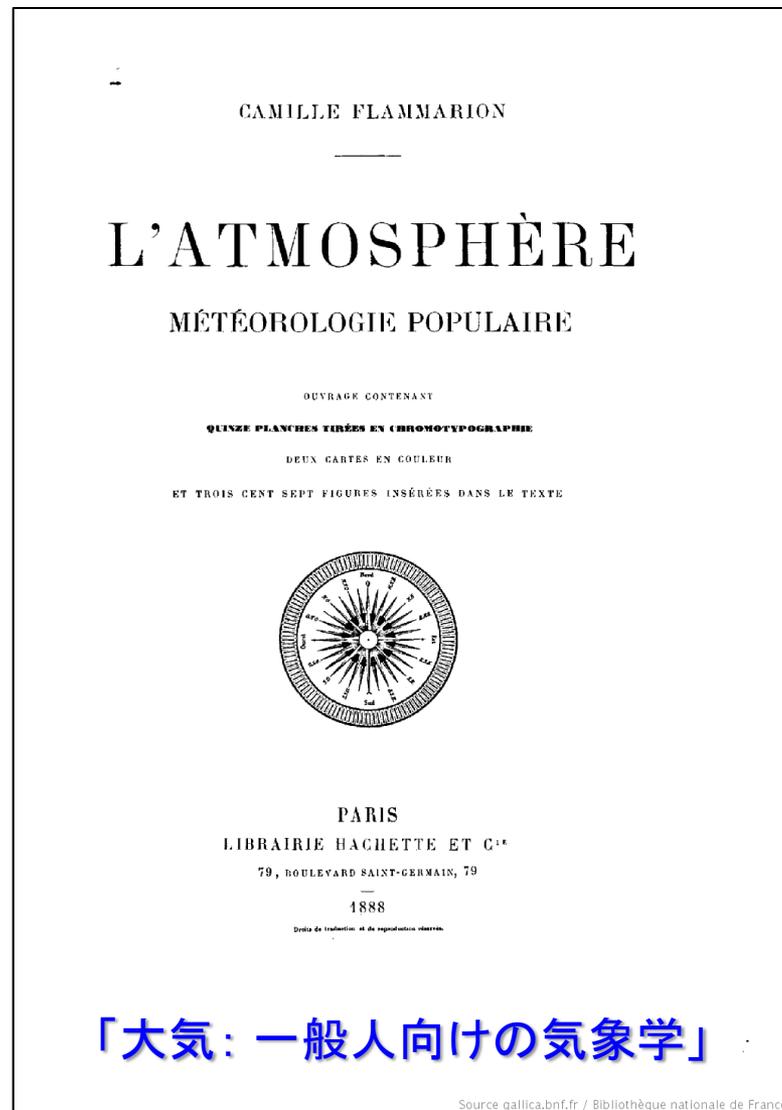
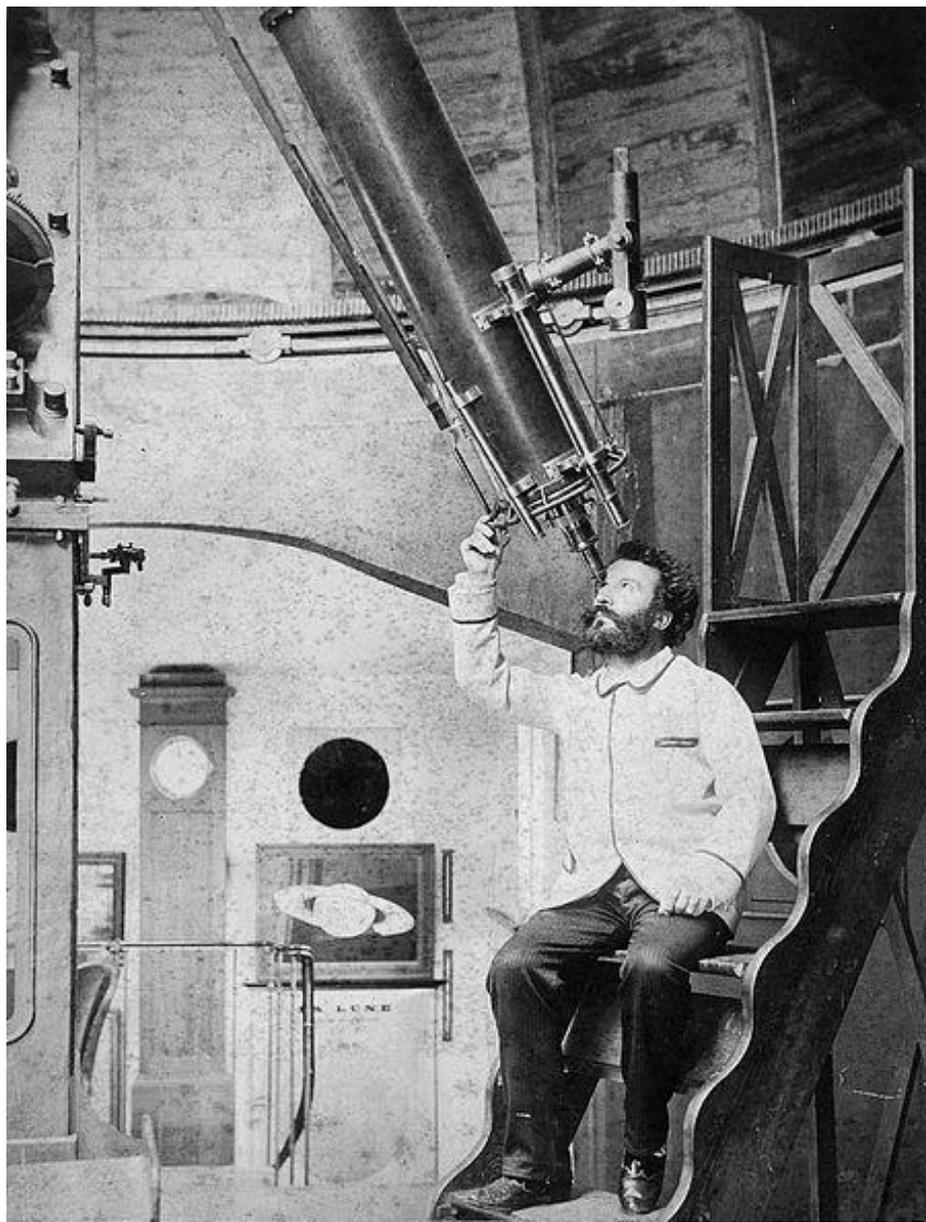


?



Particle Data Group, LBNL, © 2008. Supported by DOE and NSF

カミーユ・フラマリオン (1842-1925)、フランスの天文学者





フラマリオン木版画
『天と地の出会うところを発見した人』

u r b i et o r b i