

市民  
講座

# 物理と宇宙

第1回

京都大学の先生方が物理学・宇宙物理学の最先端の話題を分かりやすく解説！

2013年 11月9日（土）13:00～17:30

京都大学百周年時計台記念館（大ホール）にて

受講料無料・中高生以上対象・定員500名

\*講演会終了後講師の方々との懇親会（質疑応答）を予定しています（17:30～18:30）。

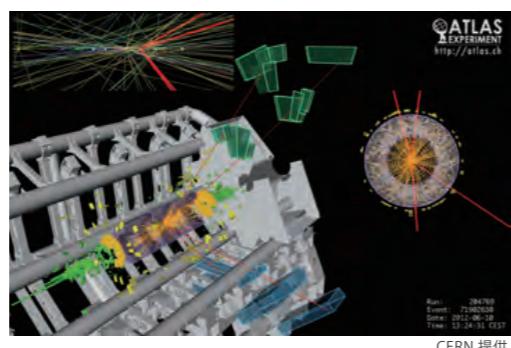
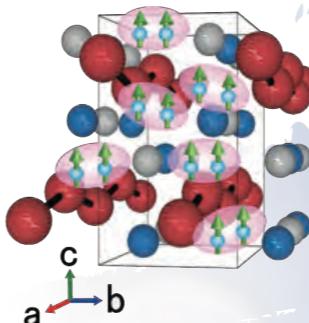
受講者  
募集中

申し込み締め切り  
11月6日（水）

## lecture 1.

多様な超伝導状態：  
新奇超伝導体の最前線

石田 憲二（いしだ・けんじ）  
京都大学理学部 物理学第一教室 教授



## lecture 2.

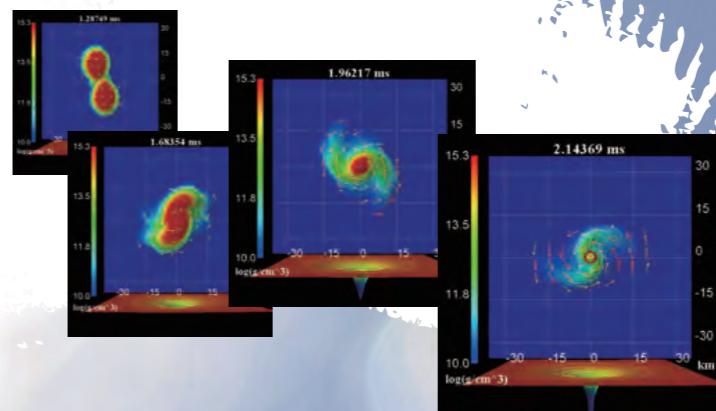
ヒッグス粒子をみつける方法

石野 雅也（いしの・まさや）  
京都大学理学部 物理学第二教室 准教授

## lecture 3.

ブラックホールを創る

柴田 大（しばた・まさる）  
京都大学 基礎物理学研究所 教授



▶申し込み・お問い合わせ

締め切り：11月6日（水）

# 2013年10月・ノーベル物理学賞

F. Englert



P. Higgs



2012.07.04  
写真：CERN

The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs "for **the theoretical discovery** of a mechanism that contributes to our understanding of **the origin of mass** of subatomic particles, and which recently was confirmed through **the discovery** of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments **at CERN's Large Hadron Collider**"

# 2013年10月・ノーベル物理学賞

F. Englert



P. Higgs



2012.07.04  
写真：CERN

1964年

素粒子の質量起源のしくみ、について 理論的に 「発見」 した

CERNのLHCで、ATLAS・CMSが (実験的に) 「発見」 した



どうやって? ↗

2012年 7月

「どうやって？」 … という、はなしに行く前に、

# 素粒子の標準模型

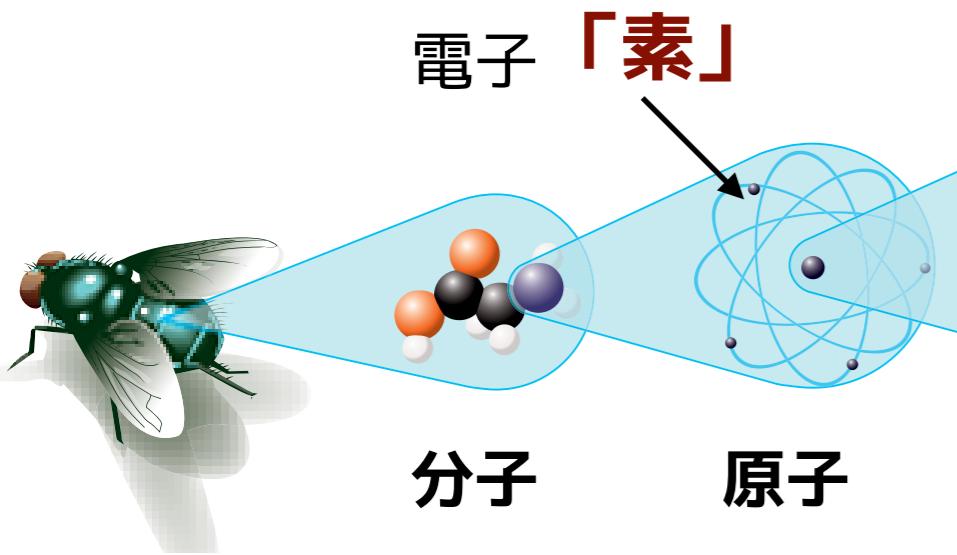
(ヒッグス場) · 自発的な対称性の破れ



# 物質の「素」



[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2008/popular-physicsprize2008.pdf](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2008/popular-physicsprize2008.pdf)



$\frac{1}{10,000,000,000}$

$10^{-10}\text{m}$

$\sim 10^{-14}\text{m}$

1932, n

1969

→ 次  
(?)

分子 原子 原子核 陽子・中性子 クォーク

今のところ「素」(点)  
 $< 10^{-18}\text{m}$ より小さい

元素周期表	
表記一覧	
色	元素記号
● 典型元素	原子番号
○ 金属	元素名
△ 非金属	元素記号
◆ アルカリ金属	元素名
▲ アルカリ土類金属	元素記号
◆ ハロゲン	元素名
◆ ヒガス	元素記号
■ 固体	液体
■ 液体	气体
元素記号	
1 H 氢素 Hydrogen 1.008	2 He ヘリウム Helium 4.003
3 Li リチウム Lithium 6.941	4 Be ベリリウム Beryllium 9.012
5 Na ナトリウム Sodium 22.99	6 Mg マグネシウム Magnesium 24.31
7 K チタニウム Potassium 39.10	8 Ca カルシウム Calcium 40.08
9 Sc ラジウム Radium 87.62	10 Ti テルルium Thorium 132.9
11 Al バリウム Barium 137.3	12 V フラニウム Uranium 186.9
13 Cr チタニウム Titanium 52.00	14 Mn マンガニウム Manganese 54.94
15 Fe フェニウム Iron 55.85	16 Co コルリウム Cobalt 58.93
17 Ni ニッケル Nickel 58.69	18 Cu ニッケル Copper 63.55
19 Zn ジンク Zinc 65.41	20 Ga ガリウム Gallium 69.72
21 Ge ジンク Gallium 72.64	22 As アスリニウム Arsenic 73.98
23 Br ブラニウム Bromine 79.90	24 Se セレンium Selenium 83.80
25 Kr クリプトーン Krypton 83.80	26 Rn ラドン Radon [222]
27 La ランタン Lanthanum 138.9	28 Ce チタニウム Cerium 140.1
29 Pr プラジウム Praseodymium 140.9	30 Nd ネオジウム Neodymium 144.2
31 Sm プロミセウム Promethium 145.0	32 Eu エラチウム Erbium 150.4
33 Gd ジュラニウム Gadolinium 152.0	34 Tb テルビウム Terbium 157.3
35 Dy ディルビウム Dysprosium 158.9	36 Ho ホリビウム Holmium 164.9
37 Er エリビウム Erbium 167.3	38 Tm テルビウム Thulium 168.9
39 Yb ヨリビウム Ytterbium 173.0	40 Lu ルテチウム Lutetium 175.0
41 La ランタン Lanthanum 138.9	42 Ce チタニウム Cerium 140.1
43 Pr プラジウム Praseodymium 140.9	44 Nd ネオジウム Neodymium 144.2
45 Sm プロミセウム Promethium 145.0	46 Eu エラチウム Erbium 150.4
47 Gd ジュラニウム Gadolinium 152.0	48 Tb テルビウム Terbium 157.3
49 Dy ディルビウム Dysprosium 158.9	50 Ho ホリビウム Holmium 164.9
51 Er エリビウム Erbium 167.3	52 Tm テルビウム Thulium 168.9
53 Yb ヨリビウム Ytterbium 173.0	54 Lu ルテチウム Lutetium 175.0
55 Fr フラニウム Francium [223]	56 Ra ラジウム Radium [226]
57 Rf ラフニウム Rutherfordium [261]	58 Db ドーフニウム Dubnium [262]
59 Sg シザニウム Simeoniun [265]	60 Bk ボルニウム Bohrium [272]
61 Db ドーフニウム Domanium [281]	62 Hs ハニウム Hassium [277]
63 Mt メトニウム Meitnerium [286]	64 Ds ダムニウム Darmstadtium [281]
65 Rg ローベルニウム Roerigenium [286]	66 Cn コーネニウム Copernicium [285]
67 Uut ユウニウム Ununtrium [278]	68 Uup ユウニウム Ununpentium [280]
69 Ac アクチニウム Actinium [227]	70 Th テリウム Thorium 232.0
71 Pa パトニウム Protactinium 231.0	72 U ウラニウム Uranium 238.0
73 Np ノブニウム Neptunium [237]	74 Pu プロトニウム Plutonium [239]
75 Am アメリカニウム Americium [243]	76 Cm キュリウム Curium [247]
77 Cf ベリニウム Berkelium [247]	78 Es カルカニウム Einsteinium [252]
79 Bk ベリニウム Beryllium [252]	80 Fm フルビニウム Fermium [257]
81 Cf カルカニウム Californium [252]	82 Md メドニウム Mendelevium [258]
83 Es エインシニウム Einsteinium [252]	84 No ノベリウム Nobelium [259]
85 Fm フルビニウム Fermium [257]	86 Lr ラーヴニウム Lawrencium [262]

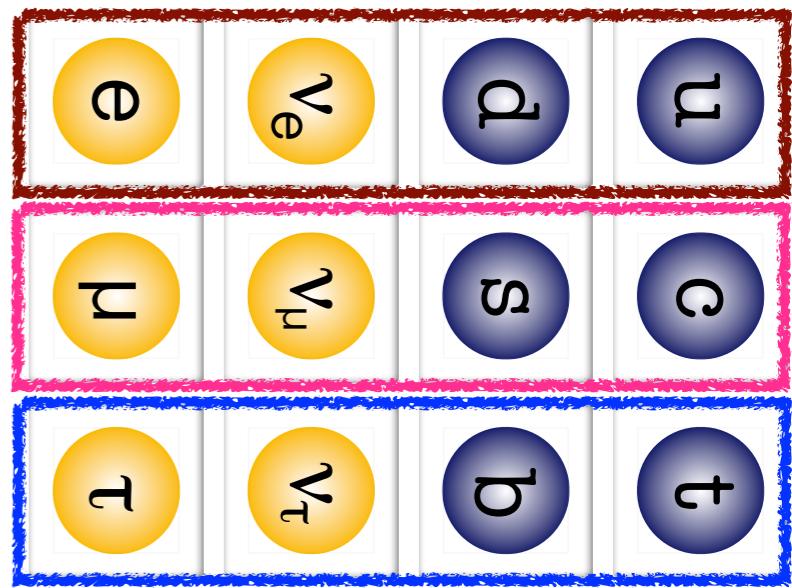
<http://www.wiquitous.com/shukihyo.pdf>

113

第1世代

第2

第3



12

レプトン

クォーク

# 「素粒子」の質量

$$E = mc^2$$

(エネルギー=質量)



電荷1の粒子（例：電子）が  
1.5Vの電位差でえるエネルギー  
 $1.5\text{eV} = 10^{-36}\text{ kg}$

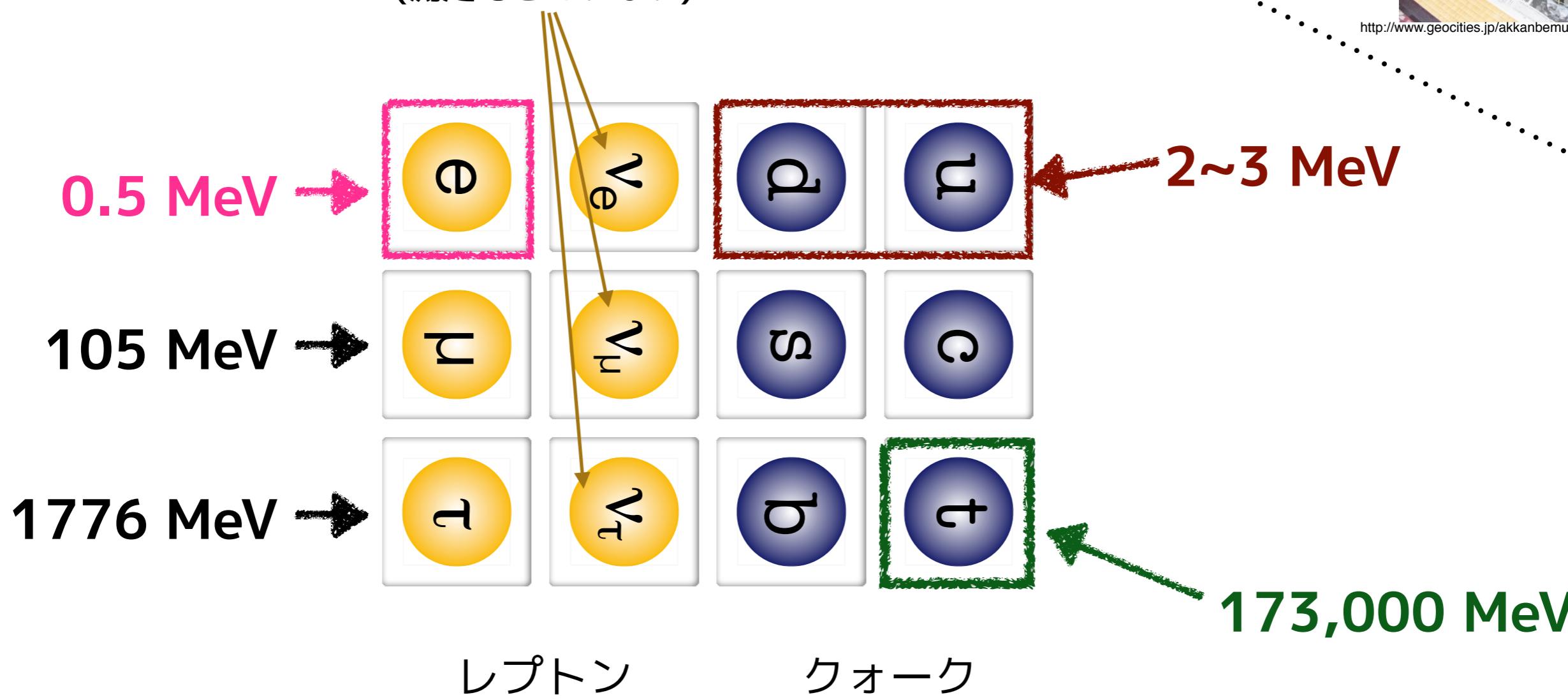
K : キロ : $10^3$
M : メガ : $10^6$
G : ギガ : $10^9$
T : テラ : $10^{12}$

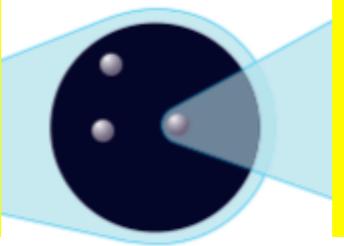
ブラウン管の電子銃= 20KeV



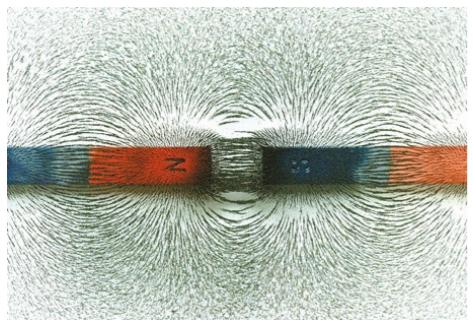
<http://www.geocities.jp/akkanbemura/factory8.html>

質量が小さい、でも、0ではない！  
(測定できていない)





陽子・中性子

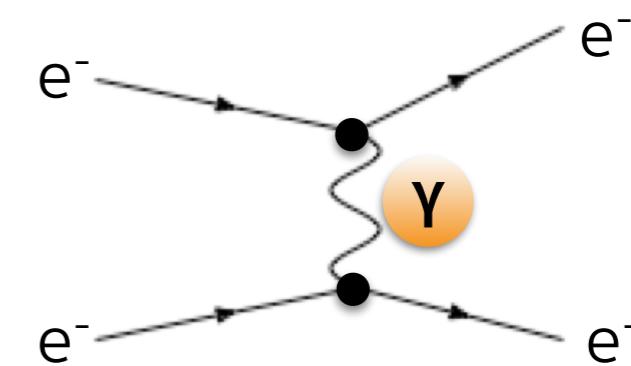
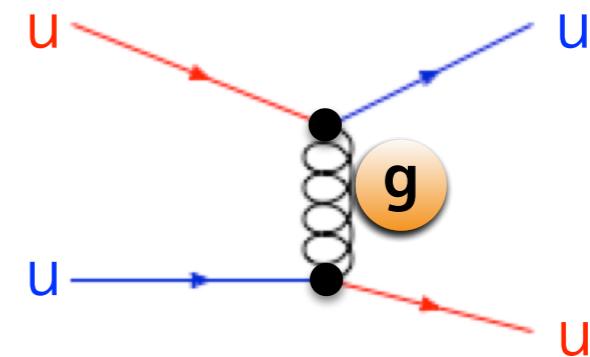
**強い力**

電気力

磁気力

**電磁気力** $W^\pm$  $Z^0$ **弱い力** $Cs$   
(d) $Ba$   
(u) $W^-$  $e^-$  $\bar{\nu}_e$ **重力**

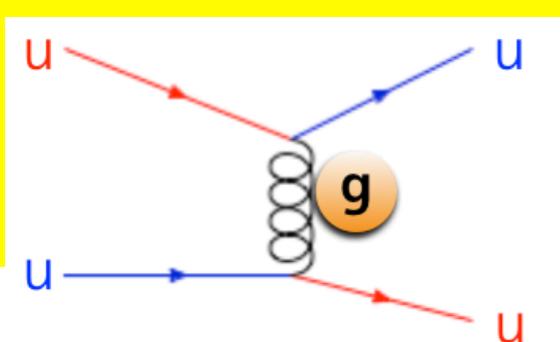
# 「力」

**力を伝える粒子**

交換する粒子によって,

 $g$  $\gamma$  $Z^0$   $W^\pm$ **強さ・性質**が、ちがう

でも、似ている…?



# 対称性 $\leftrightarrow$ 保存則

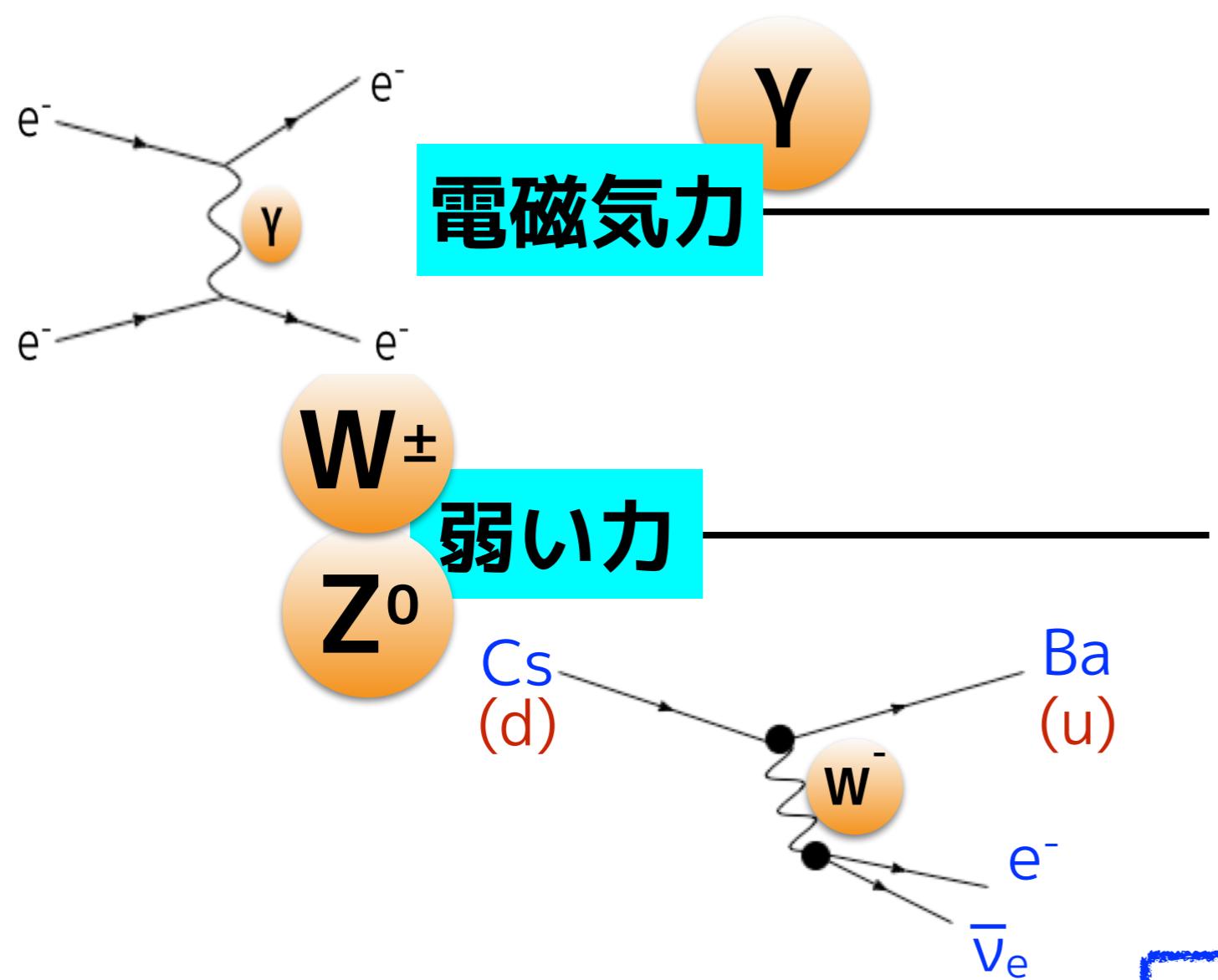


Noether

**g 強い力**

見方によって、物理の法則が変わらない

対称性  $\leftrightarrow$  保存則  $\leftrightarrow$  力

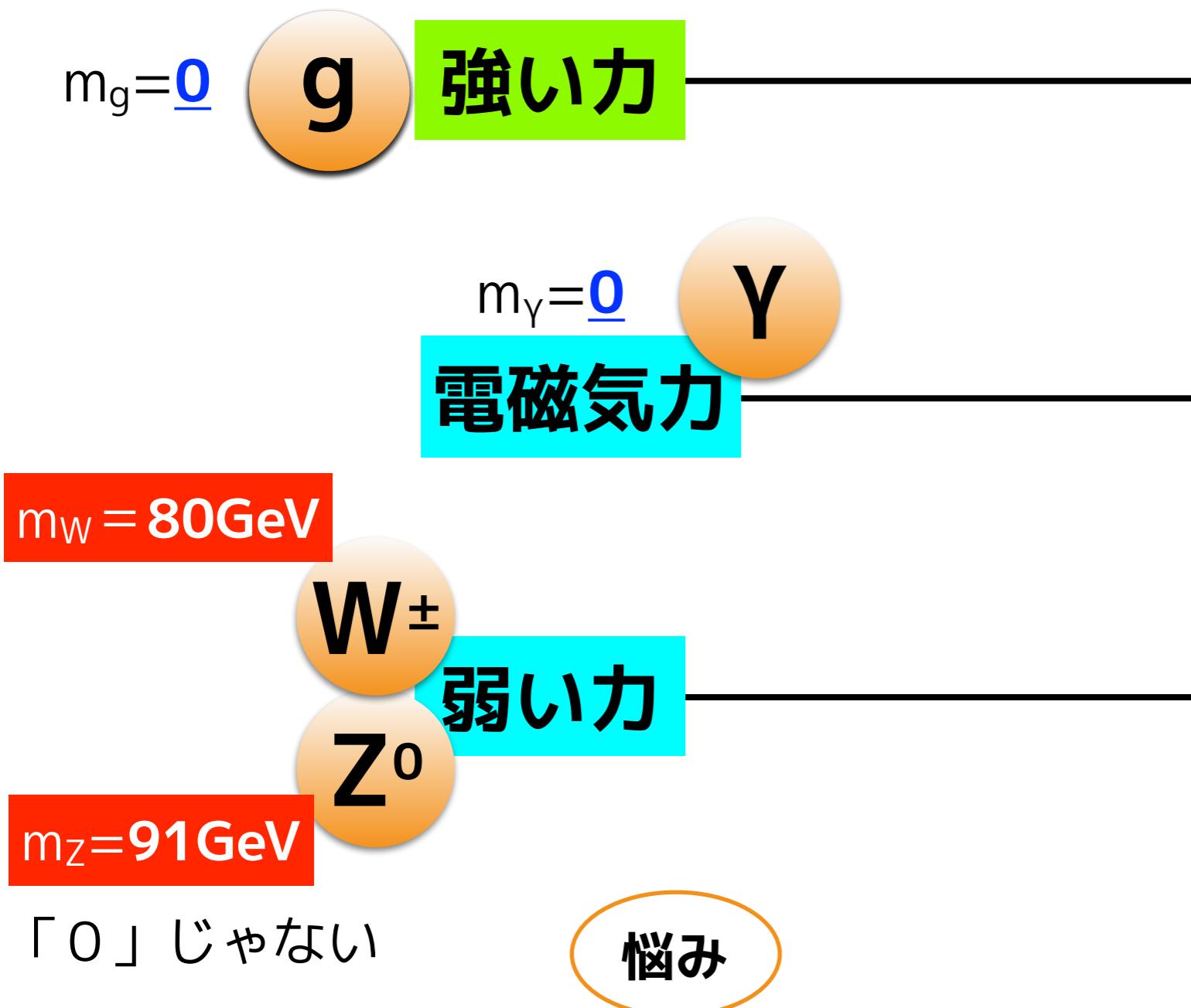


SU(3)	色荷	強い力
SU(2)	弱荷	弱い力
U(1)	電荷	電磁力

粒子の内部空間の回転に対する  
局所ゲージ対称性

これを満たす理論を作る  
⇒ Lagrangianが決まる・実験に合う

# 弱い力：質量をもったゲージ粒子，W/Z



		ゲージ 粒子	
		$g$	強い力
SU(3)			
SU(2)	$W^\pm$ $Z^0$		弱い力
U(1)	$\gamma$		電磁力

ゲージ対称性を要請

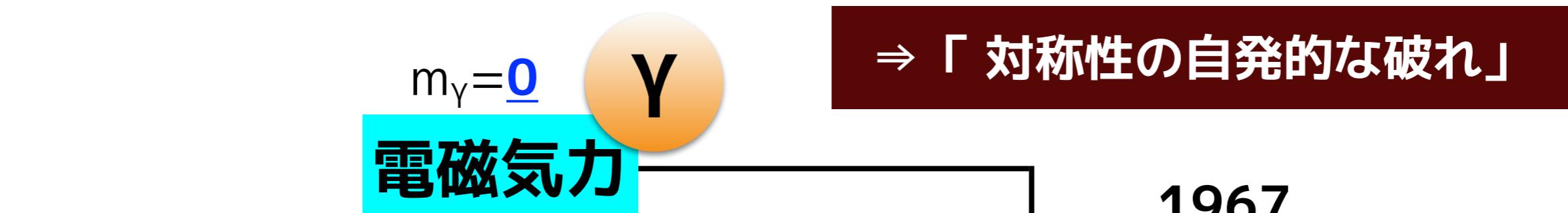
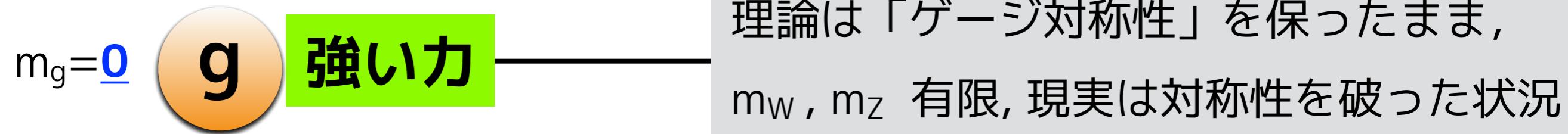


ゲージ粒子の質量 = 0

「弱い力」だけ仲間はずれ？

「ゲージ対称性」の要求が、そもそも間違い？

# 対称性の自発的な破れ・その応用



南部

1960

超伝導

フェルミオン質量

1967

電弱理論



[http://www.nobelprize.org/nobel\\_prizes/physics/laureates/2013/](http://www.nobelprize.org/nobel_prizes/physics/laureates/2013/)

ヒッグス場

10<sup>-11</sup>秒

Big-Bang

.....



ワインバーグ サラム



ヒッグス場の導入 ⇒ 一般論  
としてゲージボソンに質量  
Higgs , Englert-Brout 1964

L : ラグランジアン

$$\begin{aligned} \mathcal{L} = & -\frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu} \\ & + i \bar{\psi} \not{D} \psi + h.c. \\ & + \bar{\chi}_i Y_{ij} \chi_j \phi + h.c. \\ & + |\partial_\mu \phi|^2 - V(\phi) \end{aligned}$$

## ヒッグス場 ( $\phi$ )

電子と場の L

ヒッグス場 ( $\phi$ ) の  
ポテンシャル

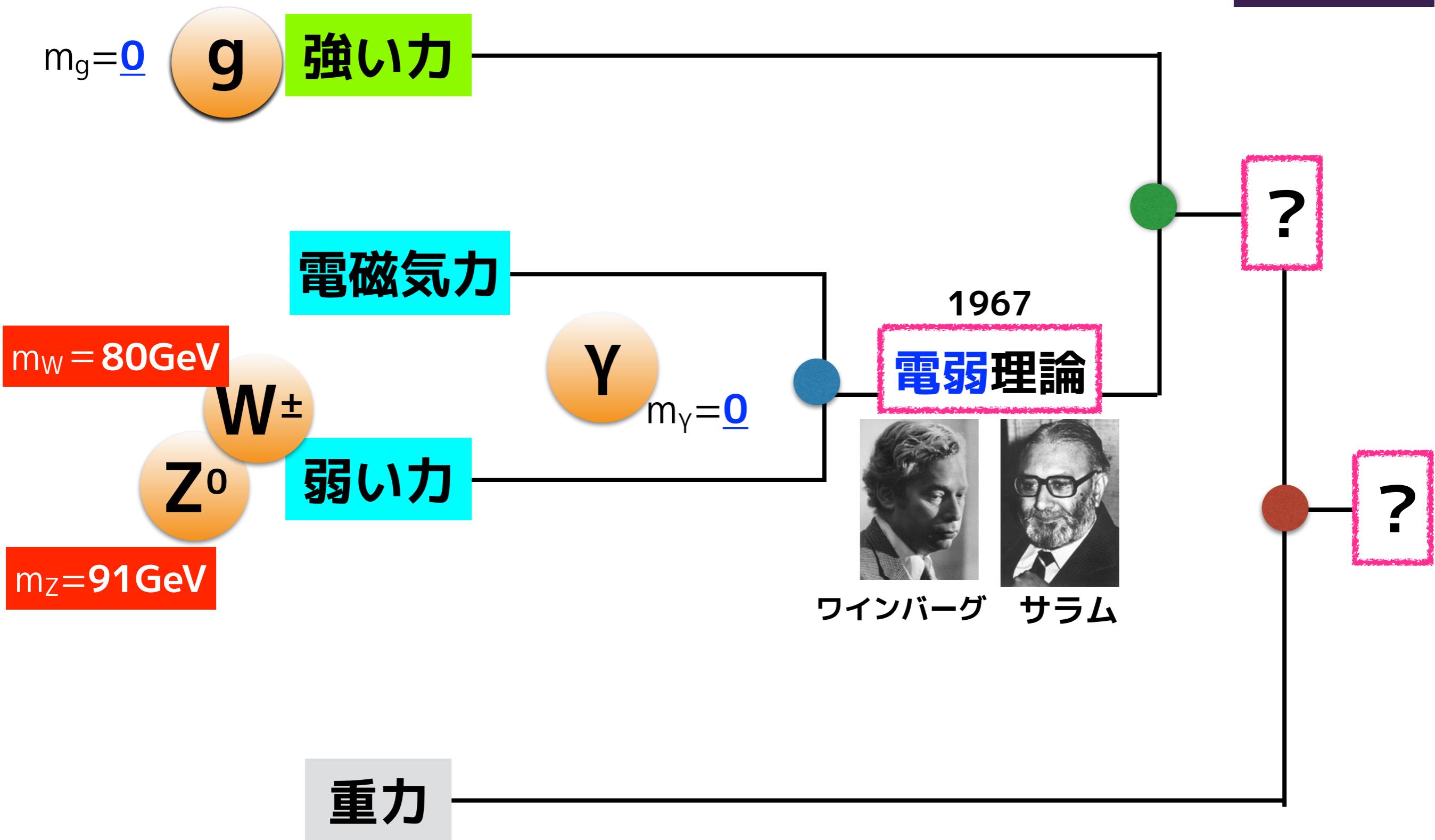
ヒッグス場が  
電子の質量をつくる

$$\mathcal{L} = \bar{L} i \gamma^\mu \partial_\mu L + \bar{R} i \gamma^\mu \partial_\mu R - \frac{1}{4} \vec{W}^{\mu\nu} \cdot \vec{W}_{\mu\nu} - \frac{1}{4} B^{\mu\nu} B_{\mu\nu} + |\partial_\mu \Phi|^2 - \left\{ \mu^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2 \right\} - G_e [\bar{R} \Phi^\dagger L + \bar{L} \Phi R]$$

where  $\partial_\mu \equiv \partial_\mu + ig \vec{W}_\mu \cdot \frac{\vec{\tau}}{2} + ig' \frac{1}{2} B_\mu Y$ ,  $B_{\mu\nu} \equiv \partial_\nu B_\mu - \partial_\mu B_\nu$ ,  $L \equiv \begin{pmatrix} \nu_e \\ e^- \end{pmatrix}_L$ ,  $R \equiv e_R^-$

# お楽しみは、これから !!

統一



# 対称性の自発的な破れ



⇒ 「対称性の自発的な破れ」



南部  
1960  
超伝導

フェルミオン質量

幻冬舎新書、強い力と弱い力、大栗博司 p.203より

ノーベル賞受賞（素粒子物理学における対称性の自発的破れの発見）講演での、しめくくりの言葉

物理学の基本法則は多くの対称性を持っているのに 現実世界はなぜこれほど複雑なのか。対称性の自発的破れの原理は、これ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、世界は退屈ではない。  
なんと理想的な組み合わせではありませんか

# 2012.07.04 ヒッグス粒子の発見 (... を発表)

年)7月5日 木曜日 朝日新聞 1892年3月17日第3種郵便物認可

**2012.07.05 朝日新聞**

万物に質量（重さ）を与える万物に質量（重さ）を与える  
ヒッグス粒子とみられる新粒子を発見した  
と考へられてきた「ヒッグス粒子」と考へられてきた「ヒッグス粒子」  
とみられる新粒子を発見した  
たと、スイス・ジュネーブ近郊  
にある欧州合同原子核研究機関  
(CERN)が4日、発表した。  
ヒッグス粒子は素粒子物理学の基礎となる「標準理論」の中で唯一見つかっていなかった素粒子だ。宇宙がいかにして現在の姿に至ったかを解明する意味がある。

▼3面=「神の粒子」捉えた

ヒッグス粒子は、137億年前の「ビッグバン」によって宇宙が誕生した直後に、光速で飛び回る素粒子に対して水あめのように作用して、動きにくくなったと考えられている。この「動きにくさ」こそ、質量を持ったことを意味する。宇宙はその後、少しずつ温度を下げ、動きにくくなつた素粒子はやがて相互に結びつき、陽子や中性子を形成した。それらは原子や分子を作り、物質やわれわれ人間、それすべてを含む今の宇宙になったとされる。

今回発表されたのは、東大や筑波大など日本の16研究機関が参加する「ATLAS」と、欧米を中心とした「CMS」という二つの研究チームの実験成果。ともに、2008年に稼働を開始したCERNの巨大加速器「LHC」を使って探

**年内にも確定**

**国際チーム 万物の質量の源**

**「ヒッグス粒子」発見**

LHCに設置されている検出装置「ATLAS」=CERN、アトラス実験グループ提供

ヒッグス粒子はすぐに壊れるため、別の粒子や光に変わることをとらえる

1 検出器 陽子どうしを衝突させる  
2 粒子 ヒッグス粒子 光

物質の質量起源  
電弱対称性の破れ

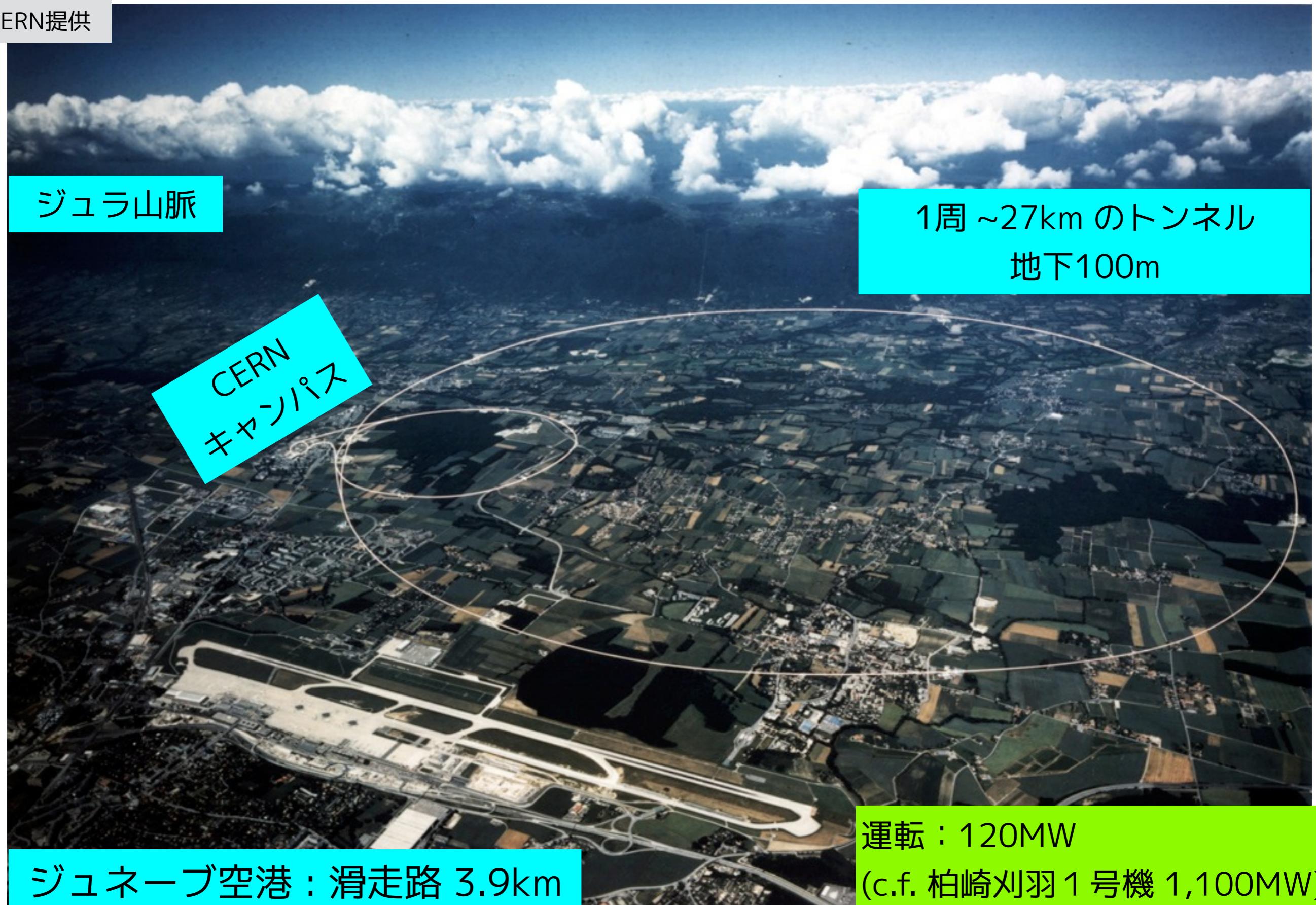
発見の意義は大きい

さらに新しい物理へ ...

どうやってみつけたのか？

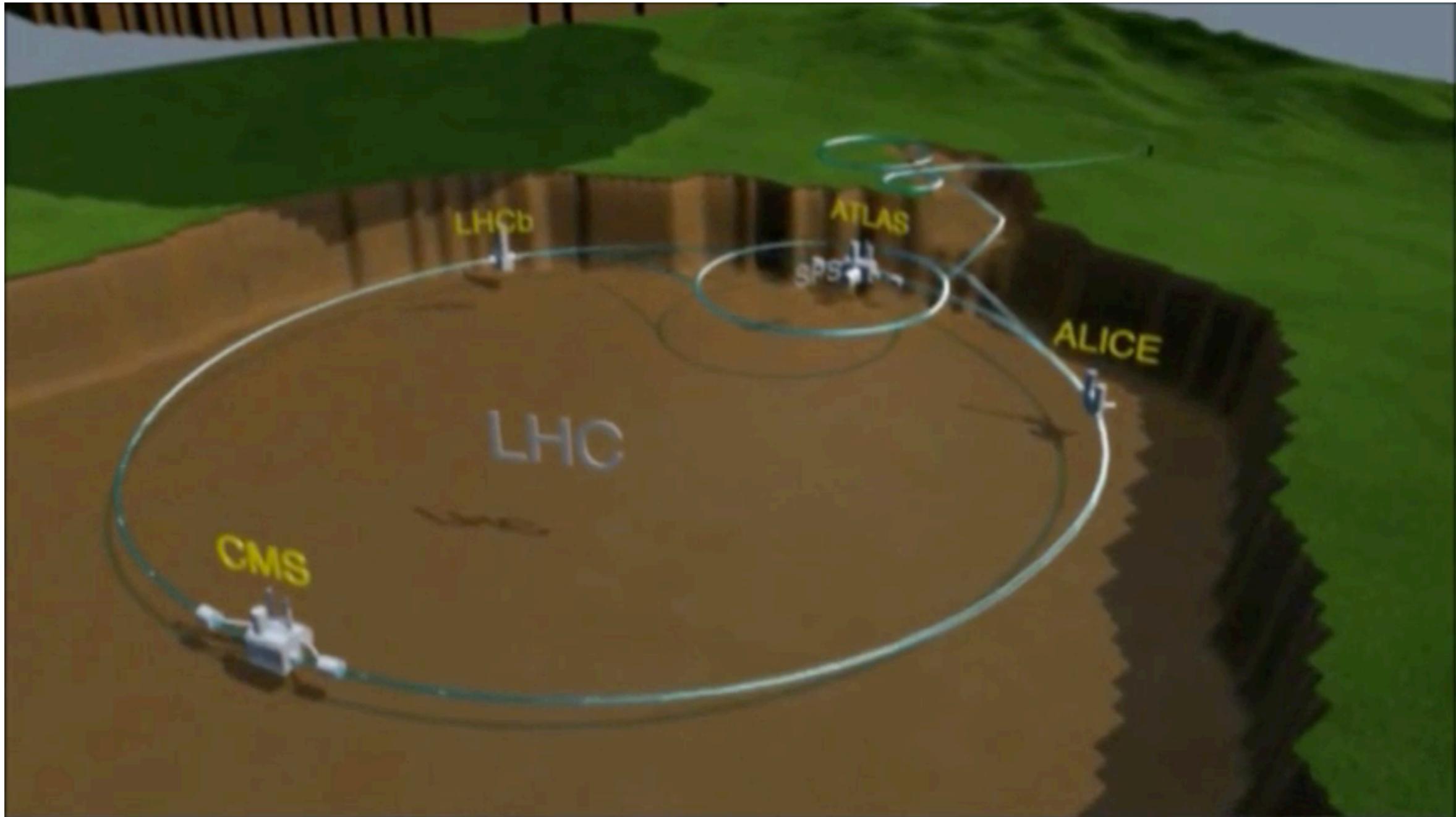
# 巨大な加速器：LHC

CERN提供

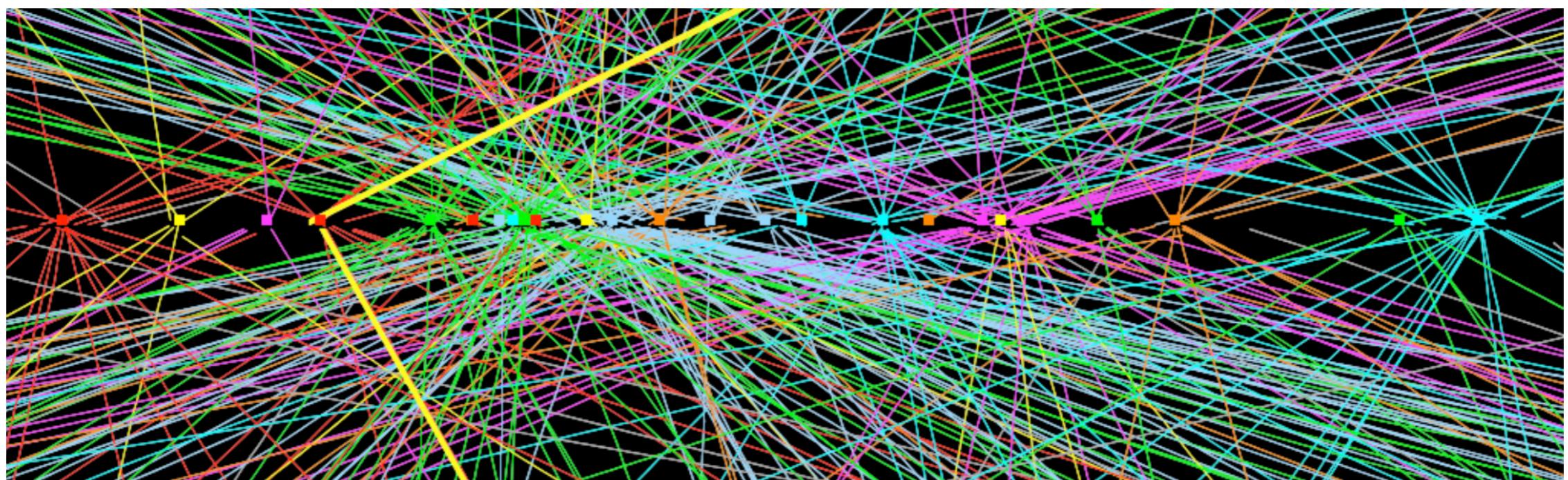
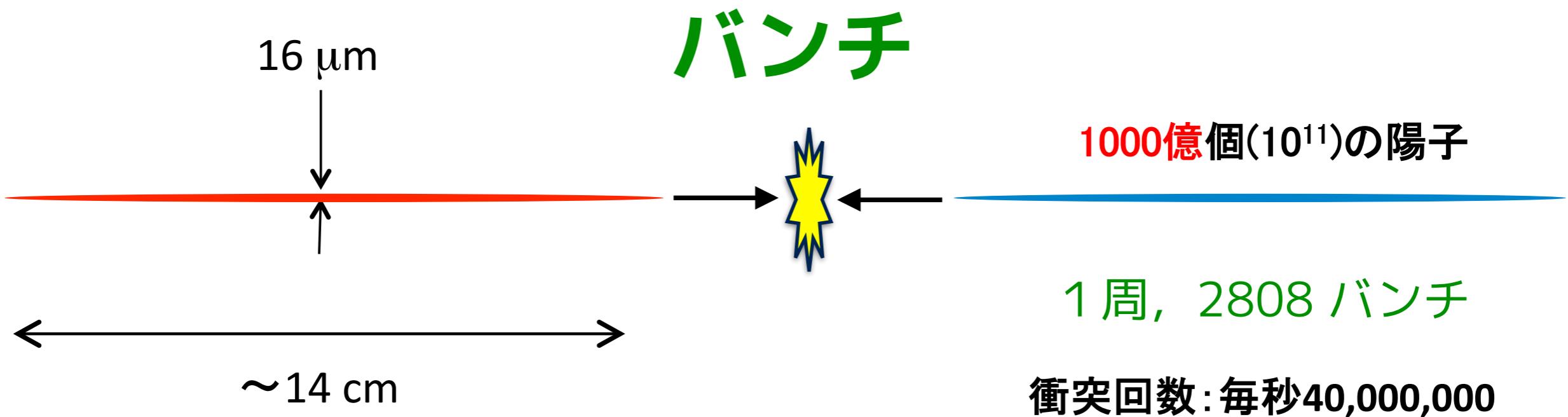


5段の加速器で、陽子を7TeV（世界最高）まで加速

50秒



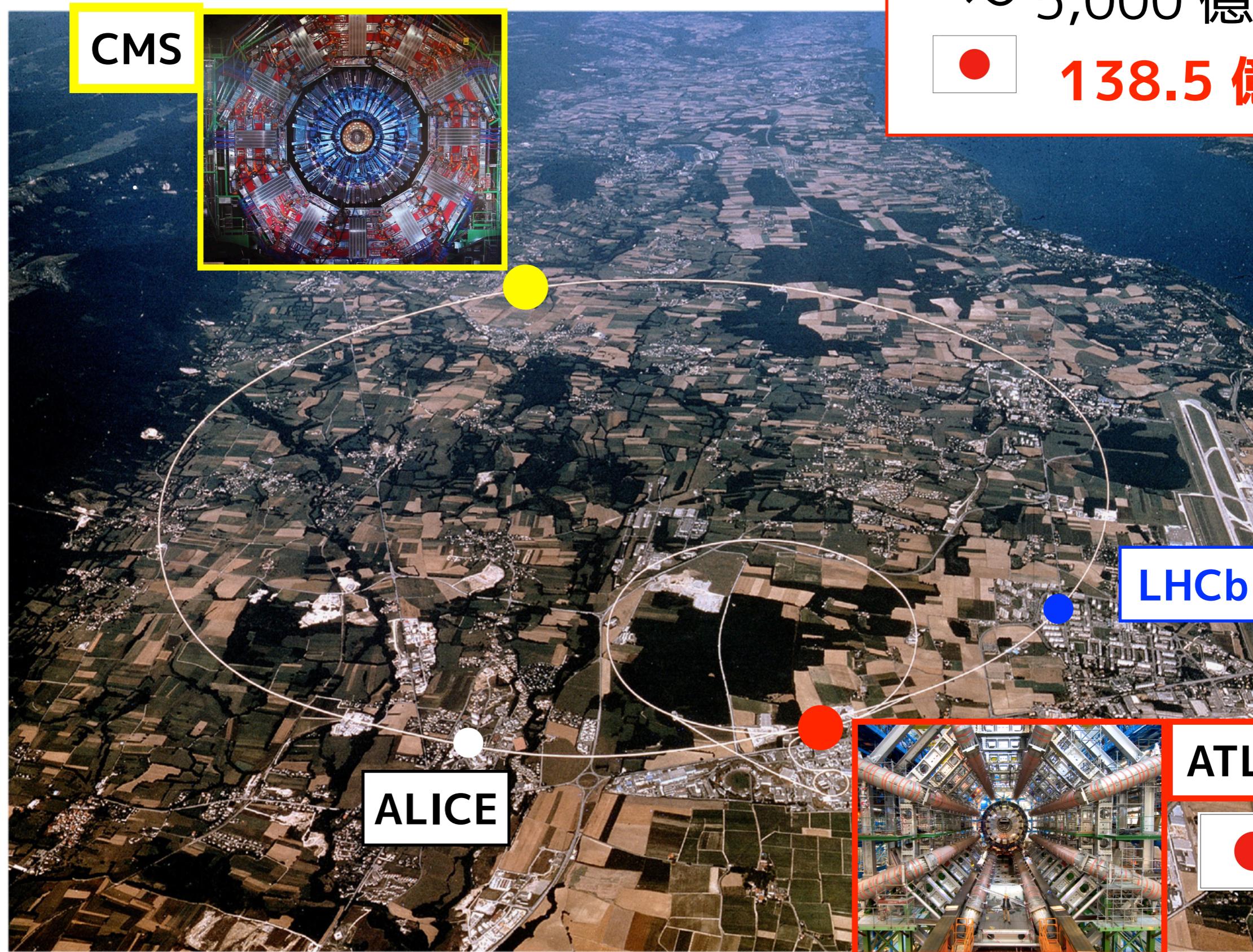
# 粒子（のかたまり）の衝突



~14cm

# 実験施設

CERN提供



**LHC + 4実験**

～ 5,000 億円



**138.5 億円**

# 国際協力で、建設できた LHC



CERN提供

与謝野文部大臣

ダルマ

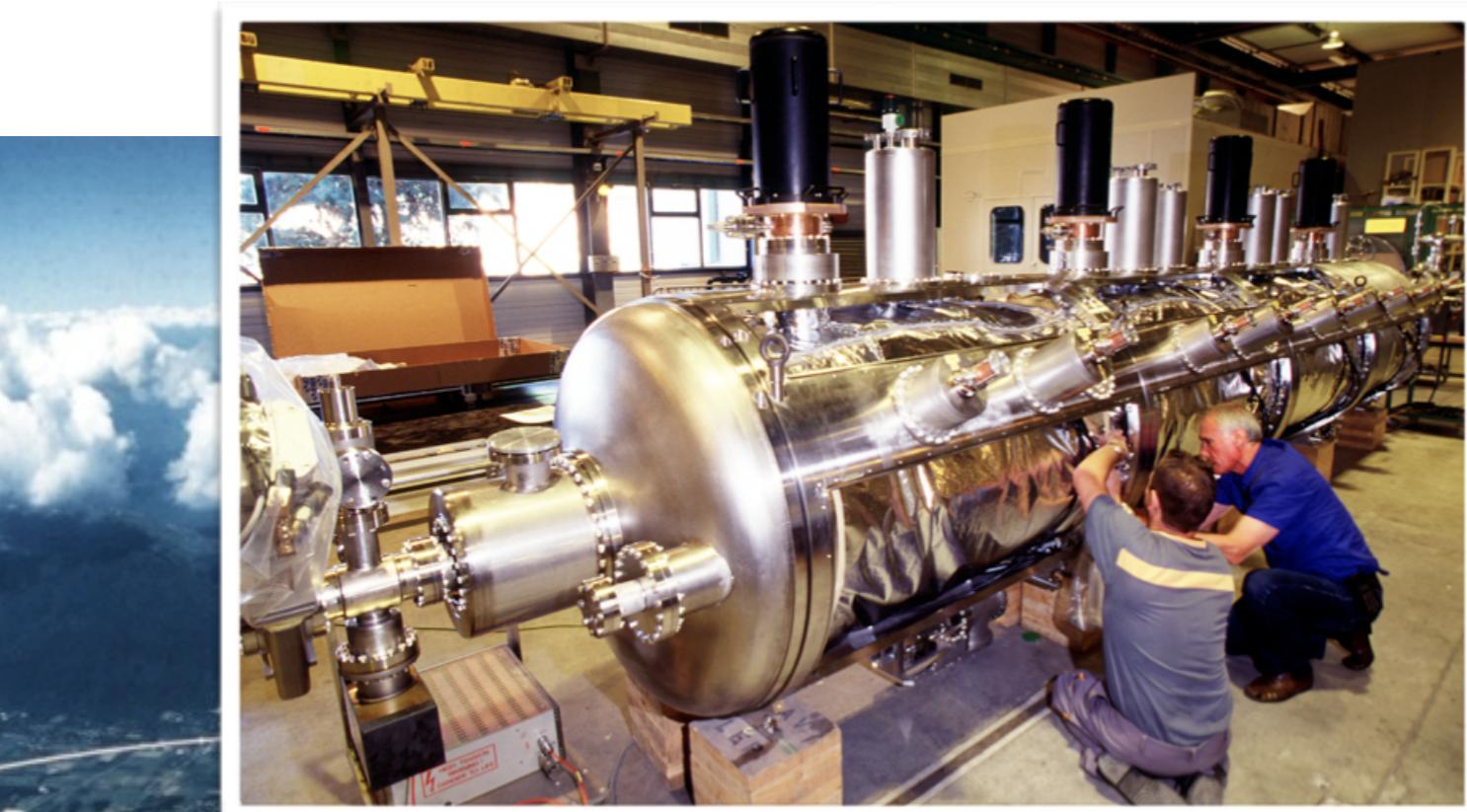
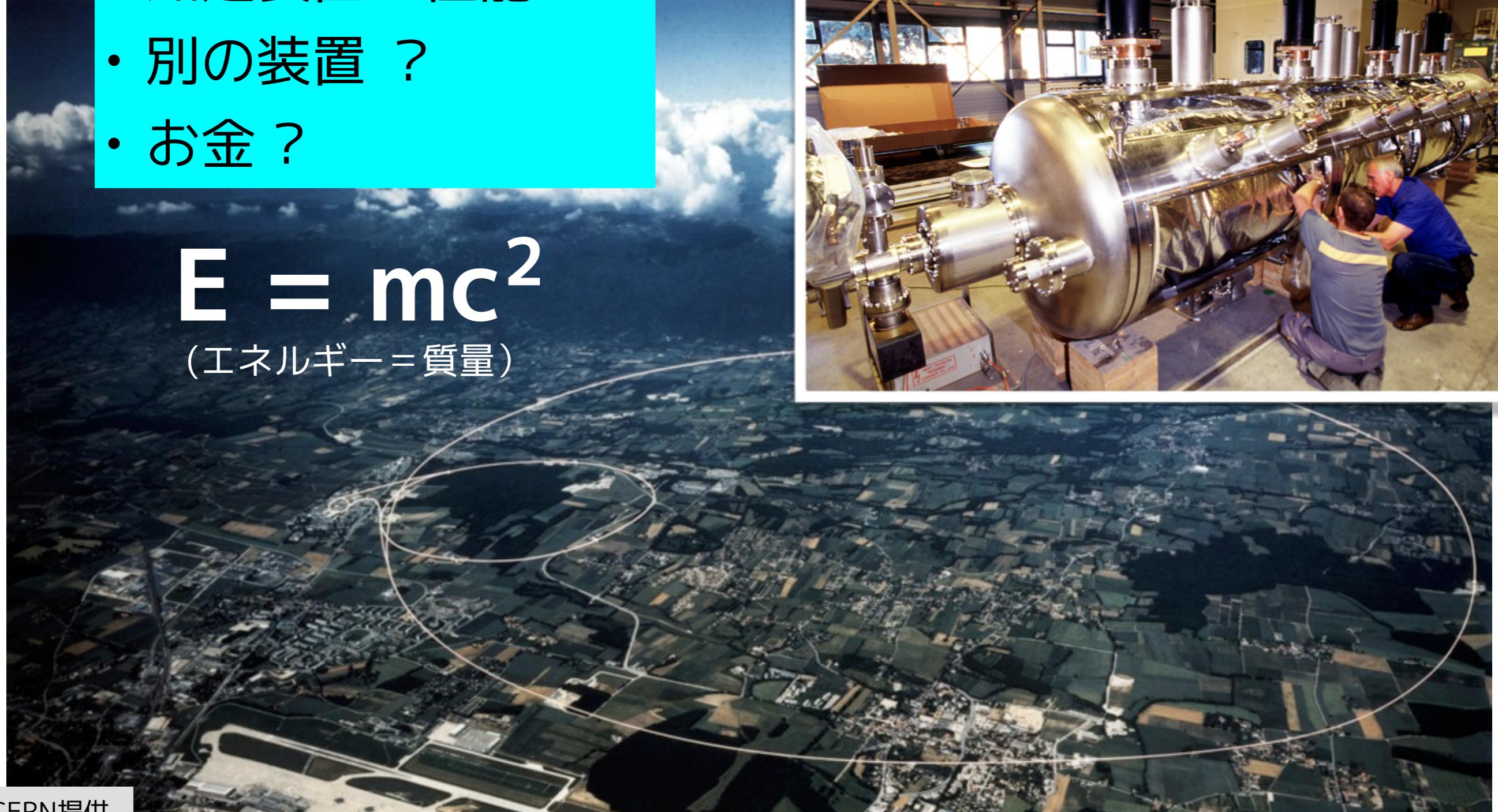
1995年6月23日 に与謝野馨文部大臣がCERN理事会に出席し、  
日本によるLHC建設協力を表明した。 総計**138.5億円**の建設資金協力

# 最高到達エネルギーの限界は なにで決まるのか？ (@ LHC)

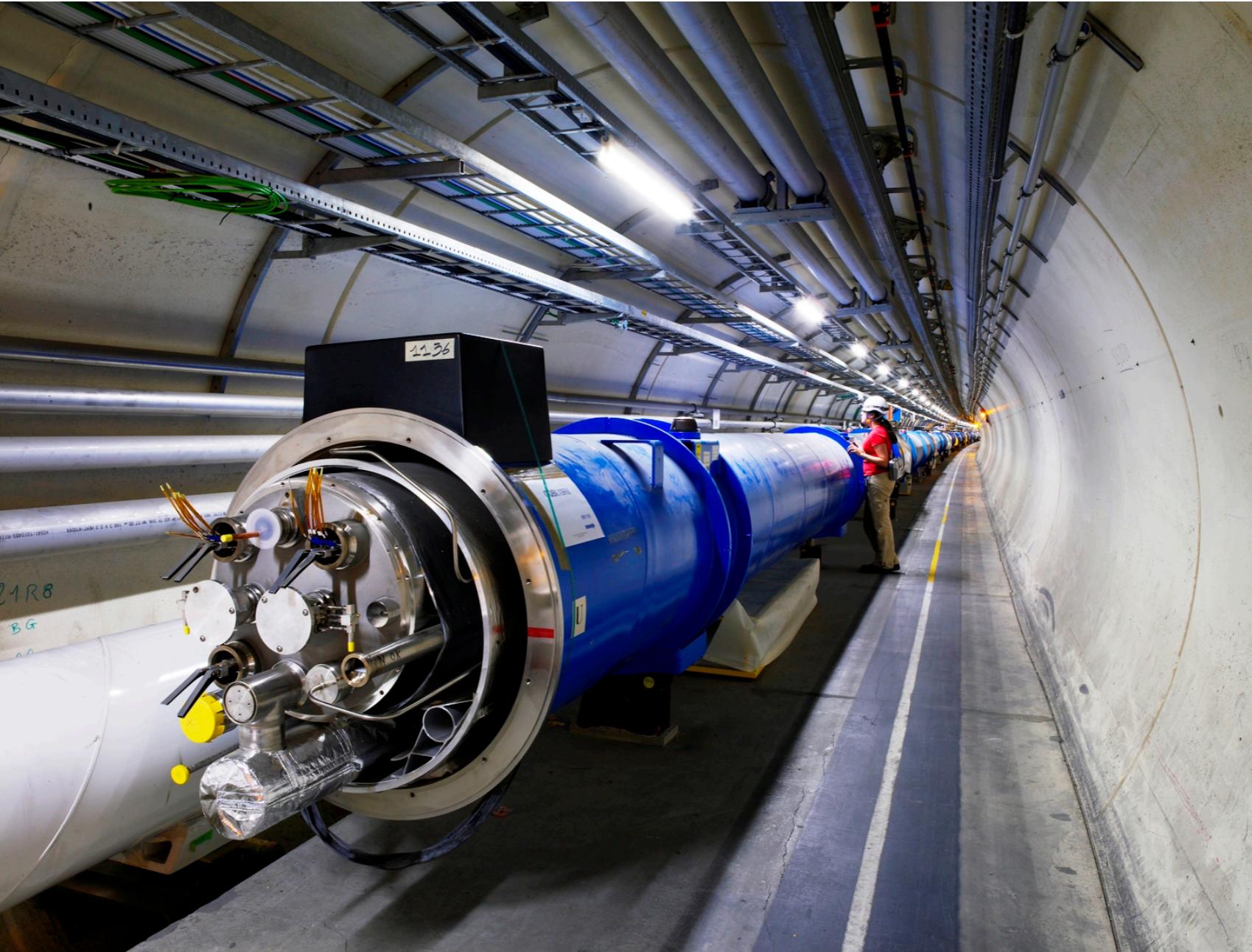
- 加速装置の性能？
- 別の装置？
- お金？

$$E = mc^2$$

(エネルギー=質量)



# 最高到達エネルギーの限界は なにで決まるのか？ (@ LHC)



[ A ] : 磁石 : 粒子の加速には直接関係ないけれど …

# 超伝導磁石：曲率半径、必要な磁場

トンネルは再利用：18km(曲部) + 9km(直線)

CERN提供

磁場で曲げる



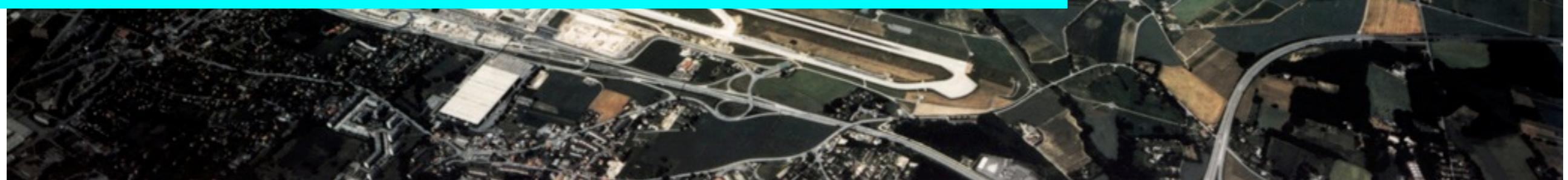
(フレミングの左手の法則)

高い加速エネルギー→強い力で、円周上にひきとめる



$$\text{運動量 [GeV/c]} = 0.3 \times \text{磁場 [T]} \times \text{半径 [m]}$$

運動量で7TeV/cに到達したい → 必要な磁場？



# 超伝導磁石：曲率半径、必要な磁場

トンネルは再利用：18km(曲部) + 9km(直線)

CERN提供

磁場で曲げる



高い加速エネルギー→強い力で、円周上にひきとめる

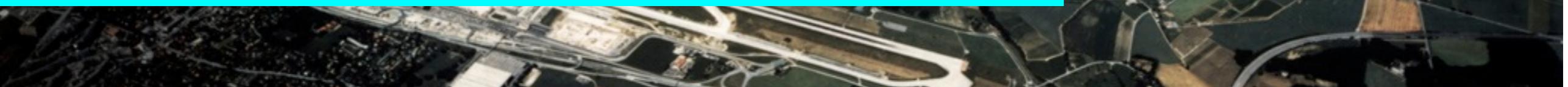
半径=2,860m

B~8.2[T] (8.3[T])

超伝導磁石が唯一の解

運動量 [GeV/c] = 0.3 × 磁場[T] × 半径[m]

運動量で7TeV/cに到達したい → 必要な磁場？

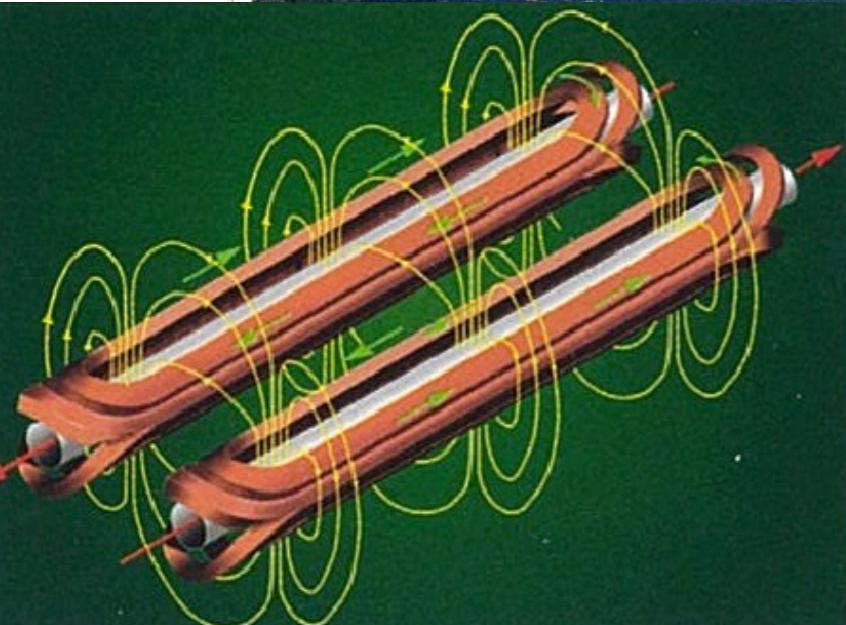


LHC：加速より、曲げる方が 到達エネルギー限界を決める

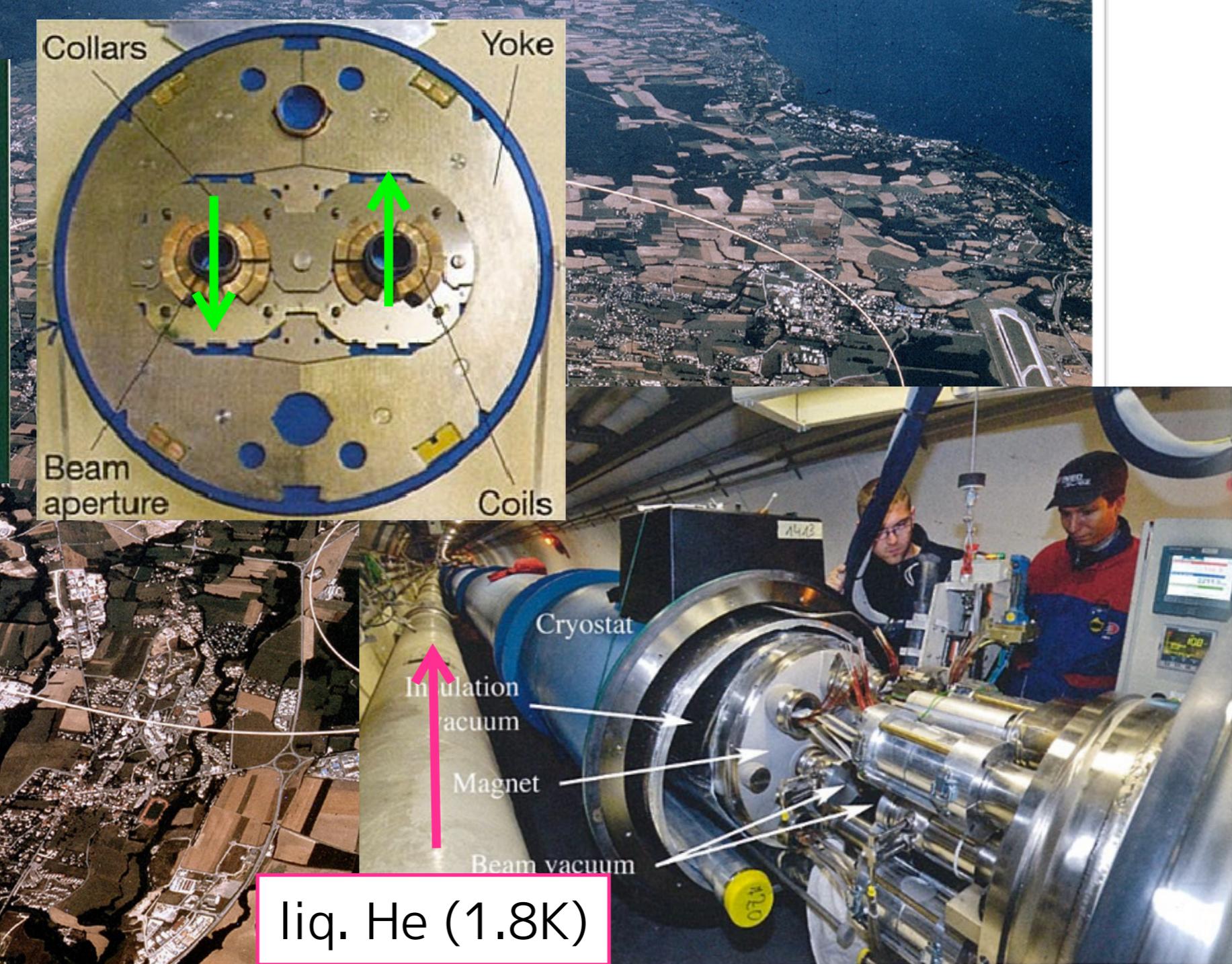
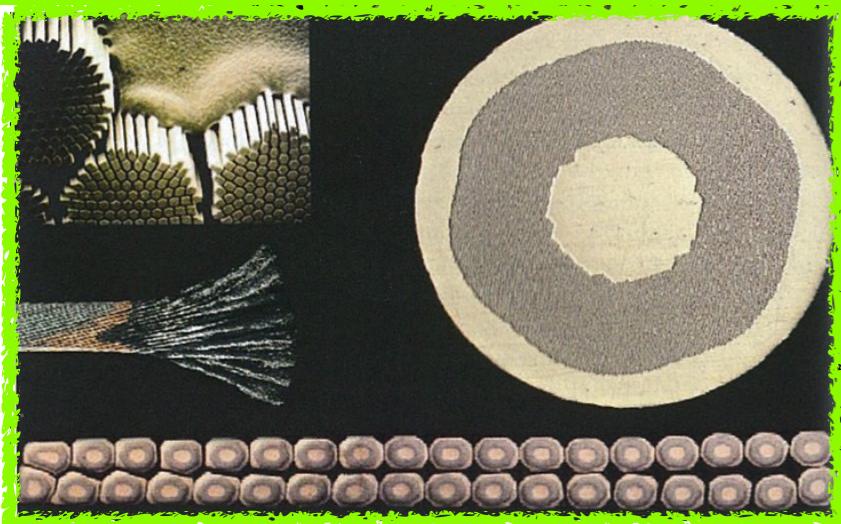


# B~8.3 [T]

CERN提供



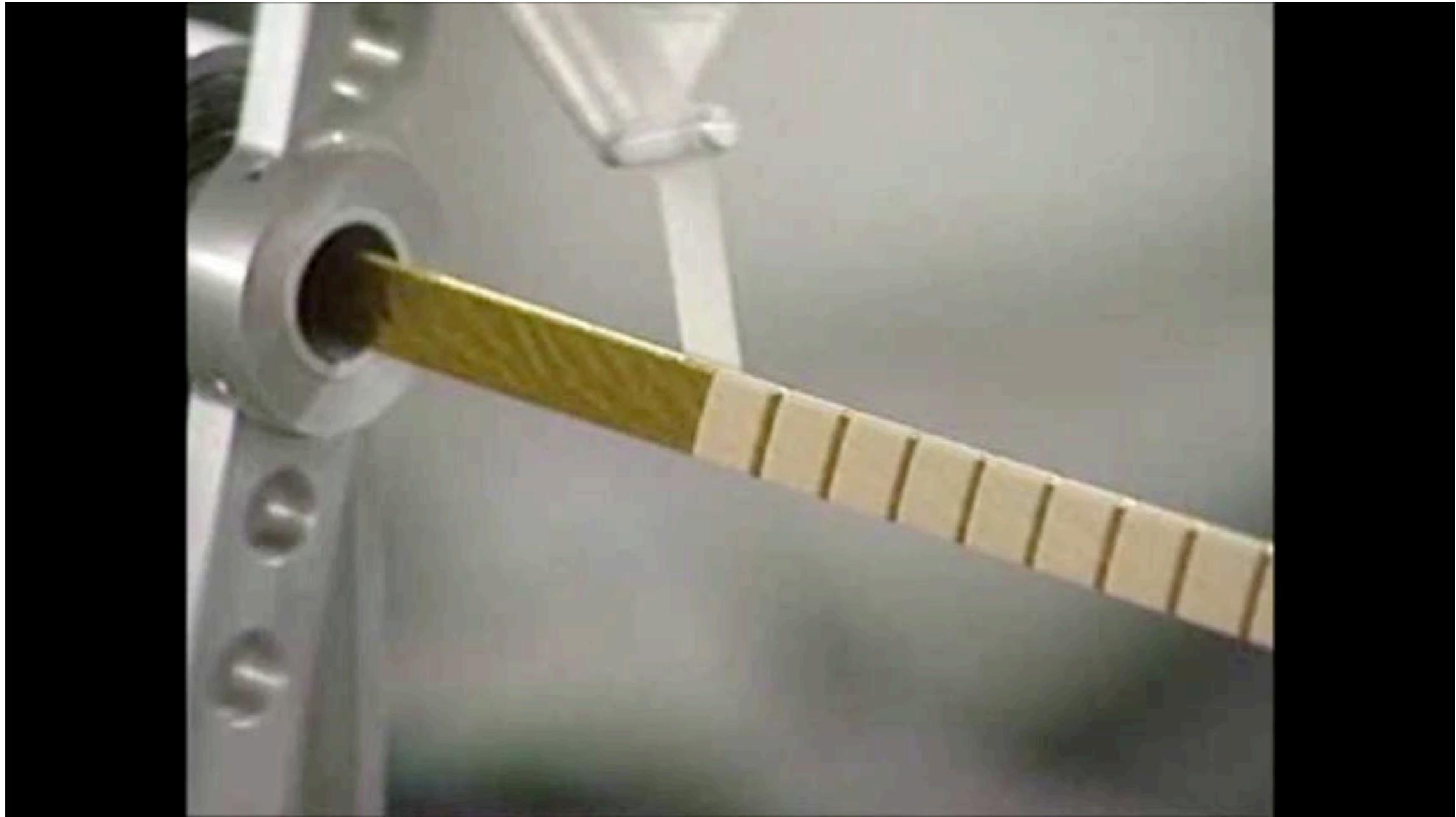
Nb-Ti conductor



古河電氣工業	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

# 超伝導電磁石の、 製造・設置

90秒



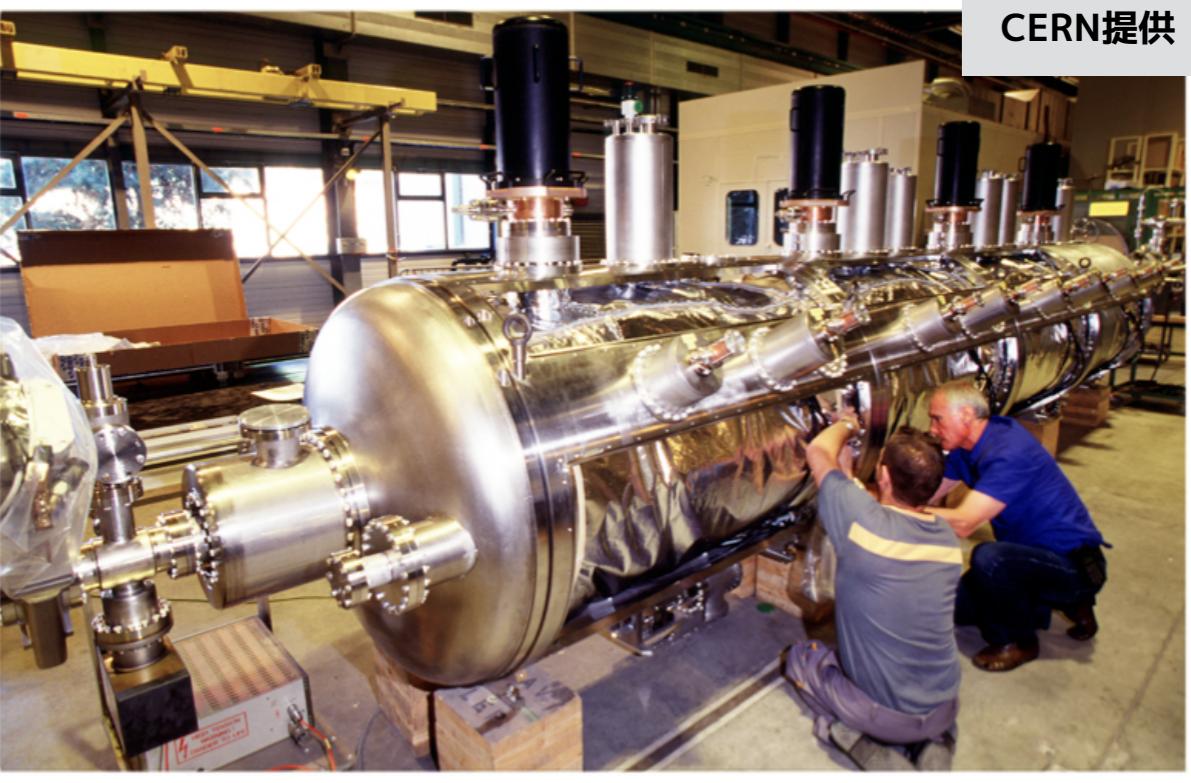
# LHC：粒子の加速

1回通過で、485keV エネルギー増加

1秒間に 11,245回加速

$$(3500-450) \times 10^9 \div (485 \times 10^3 \times 11245) \div 60$$

~ 10分



LHC Page1

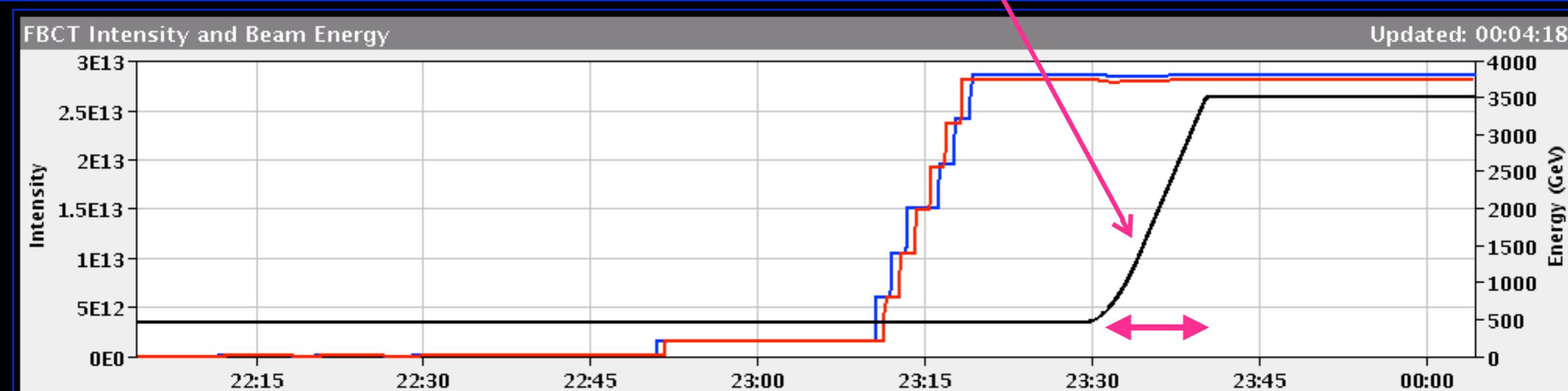
Fill: 1713

E: 3500 GeV

16-04-2011 00:04:17

## PROTON PHYSICS: ADJUST

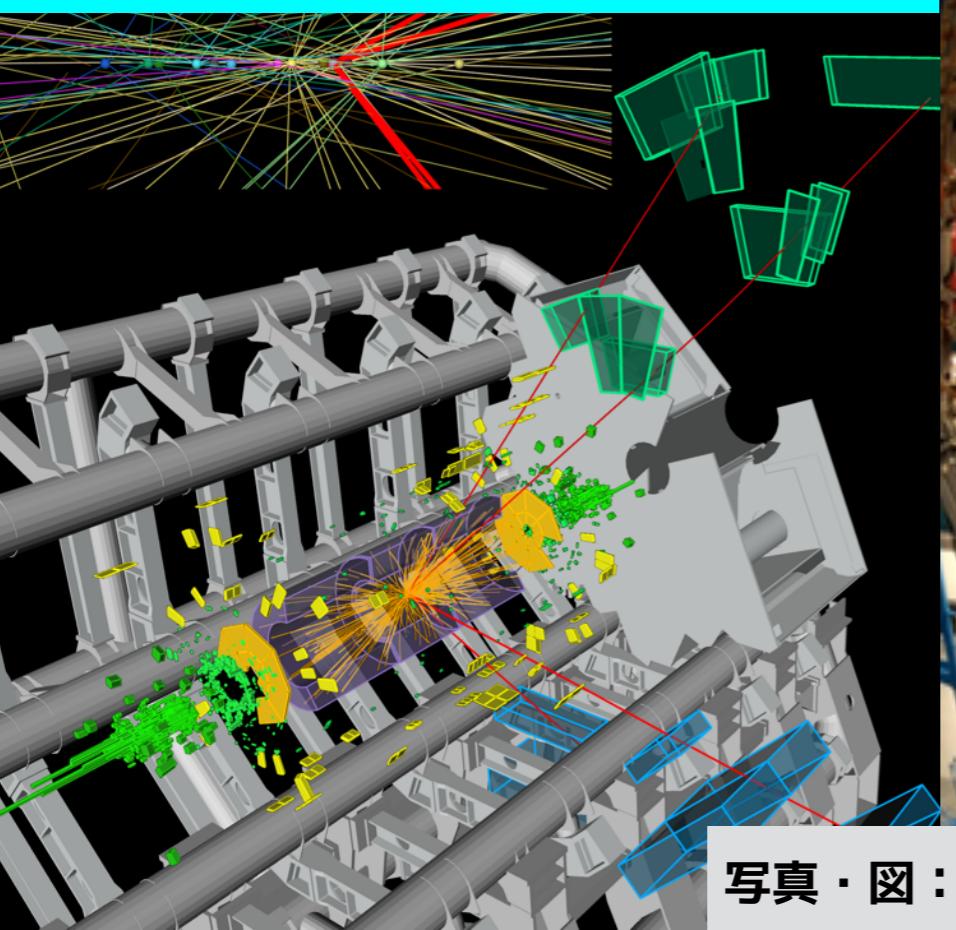
Energy:	3500 GeV	I(B1):	2.85e+13	I(B2):	2.86e+13
---------	----------	--------	----------	--------	----------



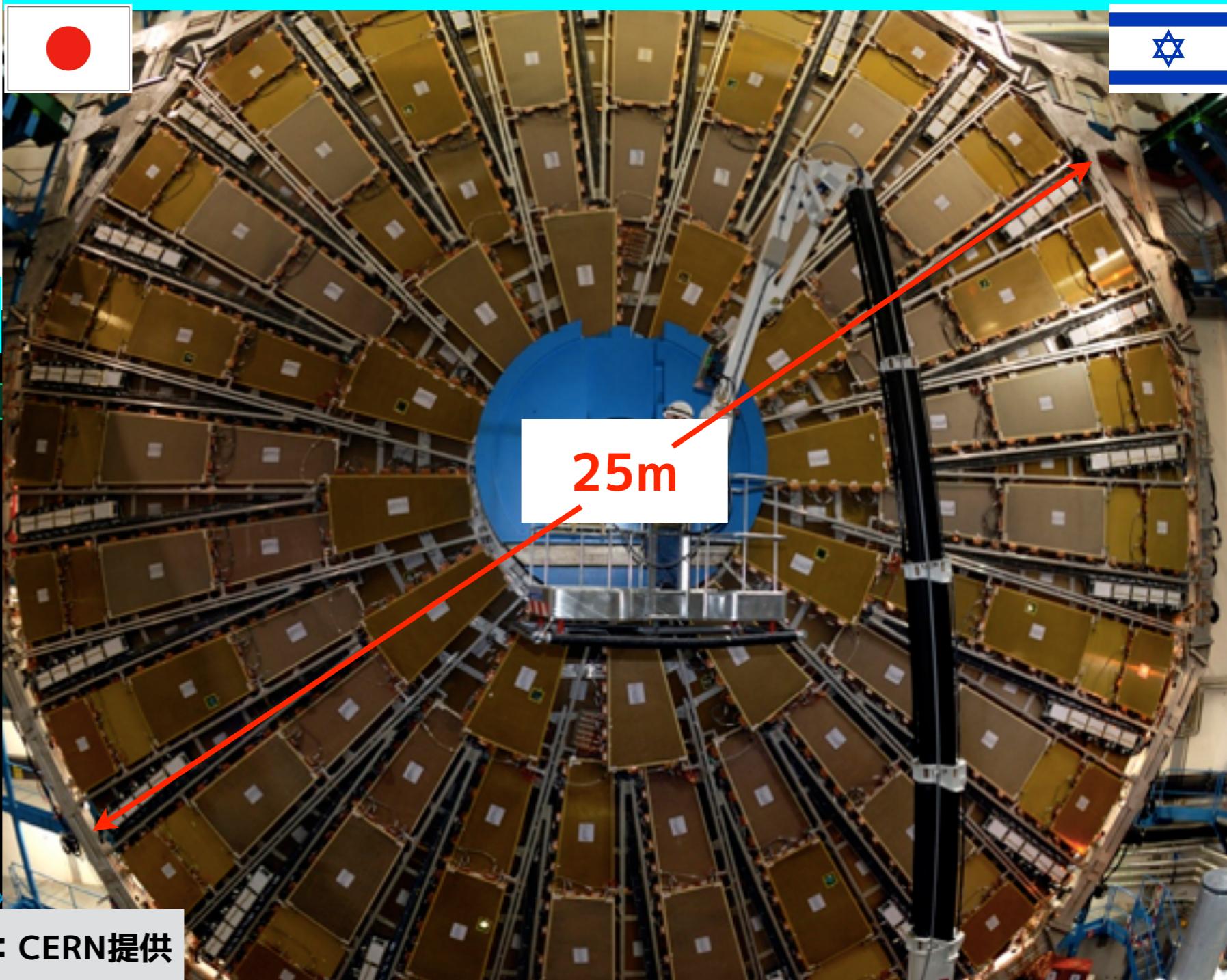
# 「巨大な測定装置」

加速器が作った新粒子を  
“キャッチ”する  
**「しあげ」**

「しあげ」にひっかかった Higgs粒子



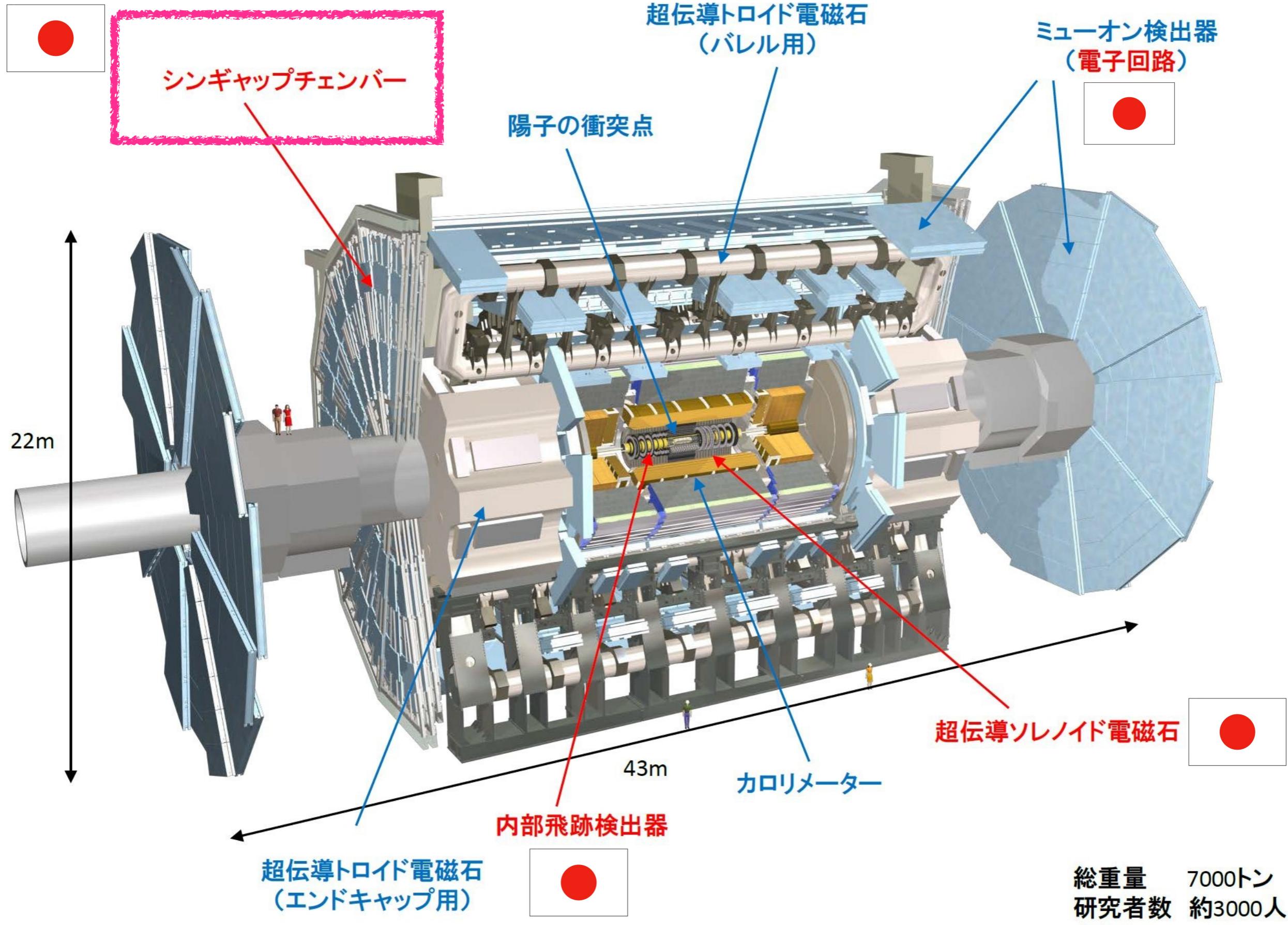
日本・イスラエル共同で製作・運転する、  
大型ミューオン検出器

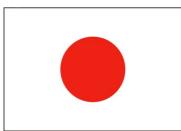


写真・図：CERN提供

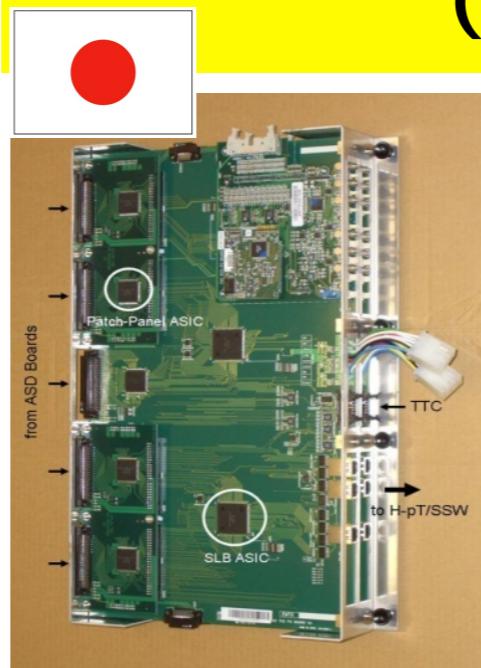
# ATLAS検出器の建設・1分間 早回し

ATLAS Detector  
Assembly



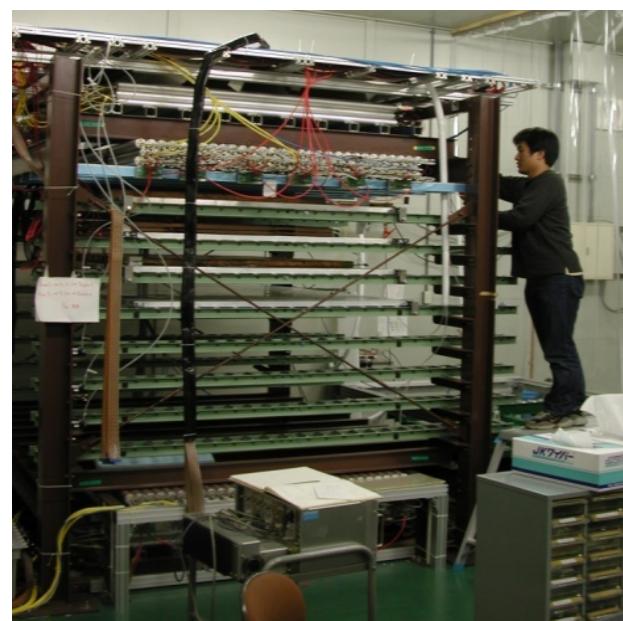


1200台のチャンバーをKEK  
で製造(2000–2004)



# $\mu$ -トリガー 検出器

( 2000 → 2008 → 今 )



神戸大で全数を宇  
宙線で検査



CERN地上でのセクター  
組立 (2005–2007)



地下実験ホールでの総合組立完成  
(2006–2008)

# μ-トリガー

6.4秒に 1 Higgs粒子・1 時間に 560個

毎衝突、何かおこる → 1秒に 40,000,000回

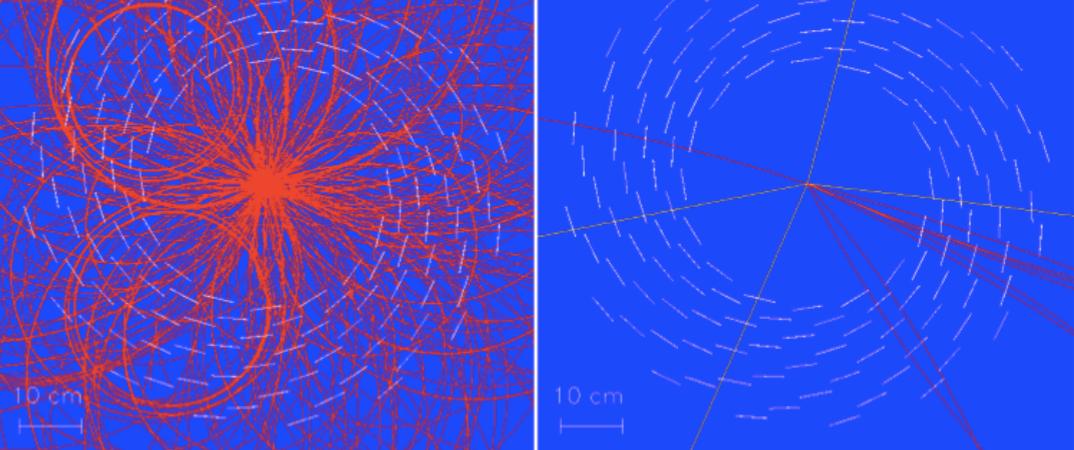
記録可能 → 1秒に 400回

99,999する 1えらぶ

ヒッグス崩壊 → 高エネルギー $\mu$ が出る,  
という特徴を, 2マイクロ秒で判断

のち, 解析 : 999する 1えらぶ

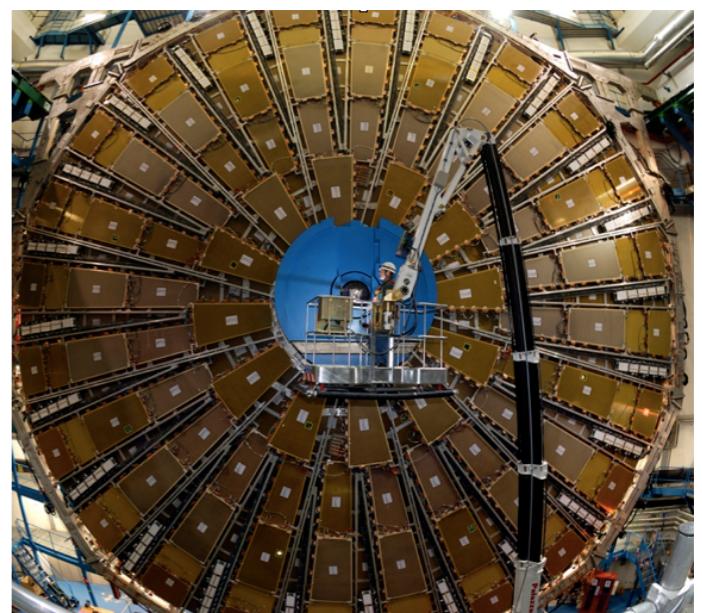
新粒子1は  
その他 100,000,000  
のゴミの中に含まれる

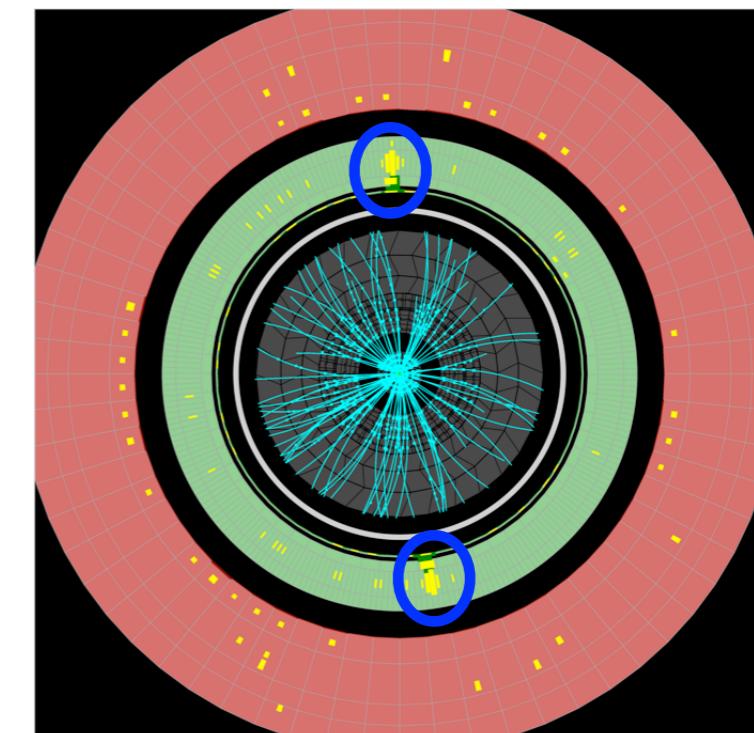
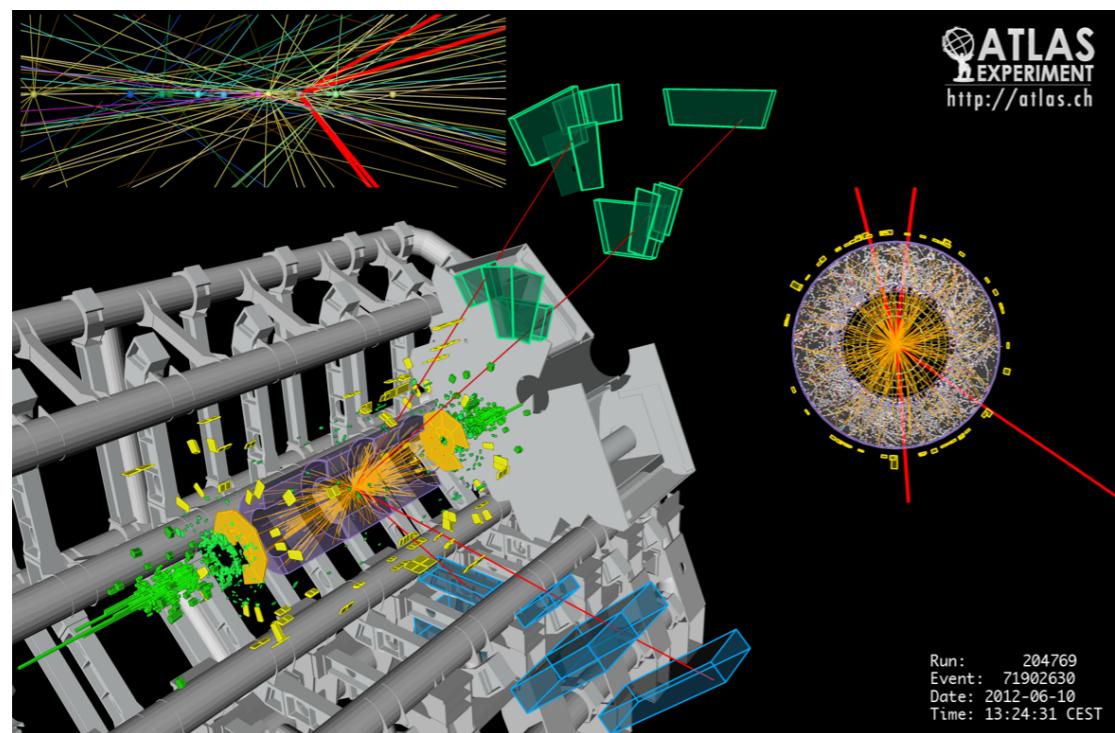


不要と判断

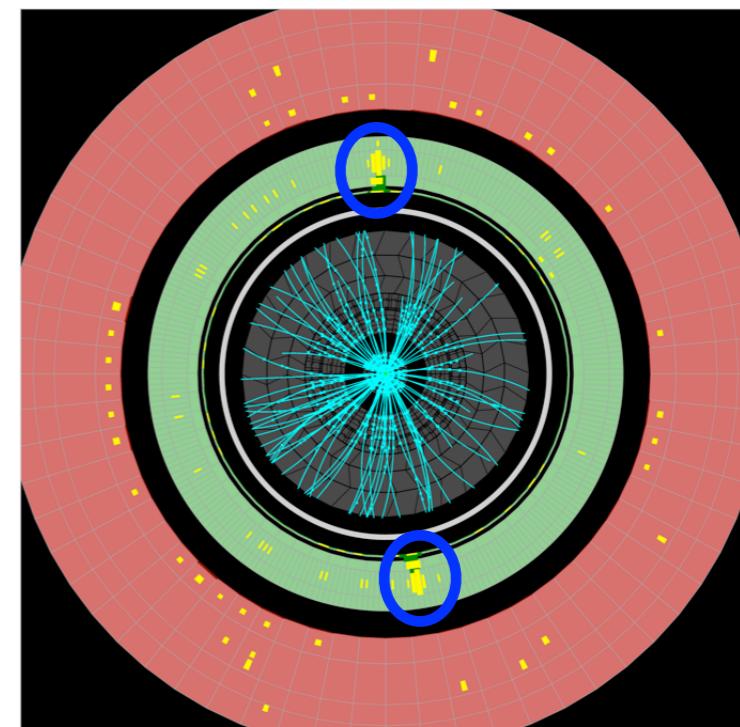
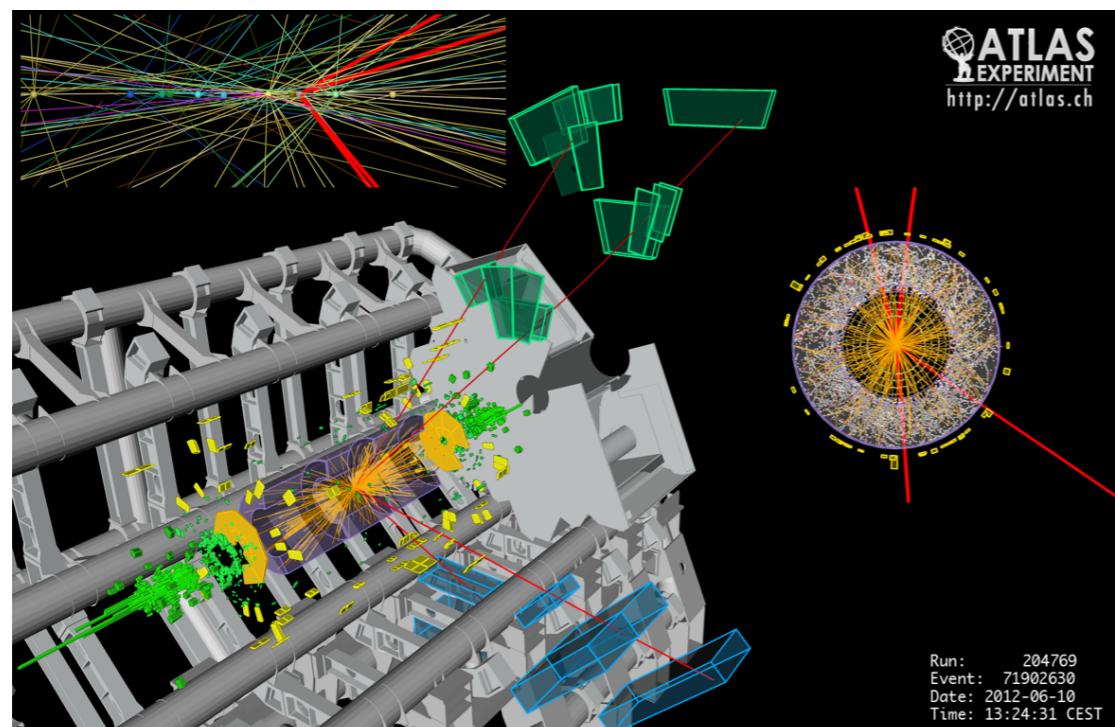
→ 本当に! 記録しない

→ やりなおせない





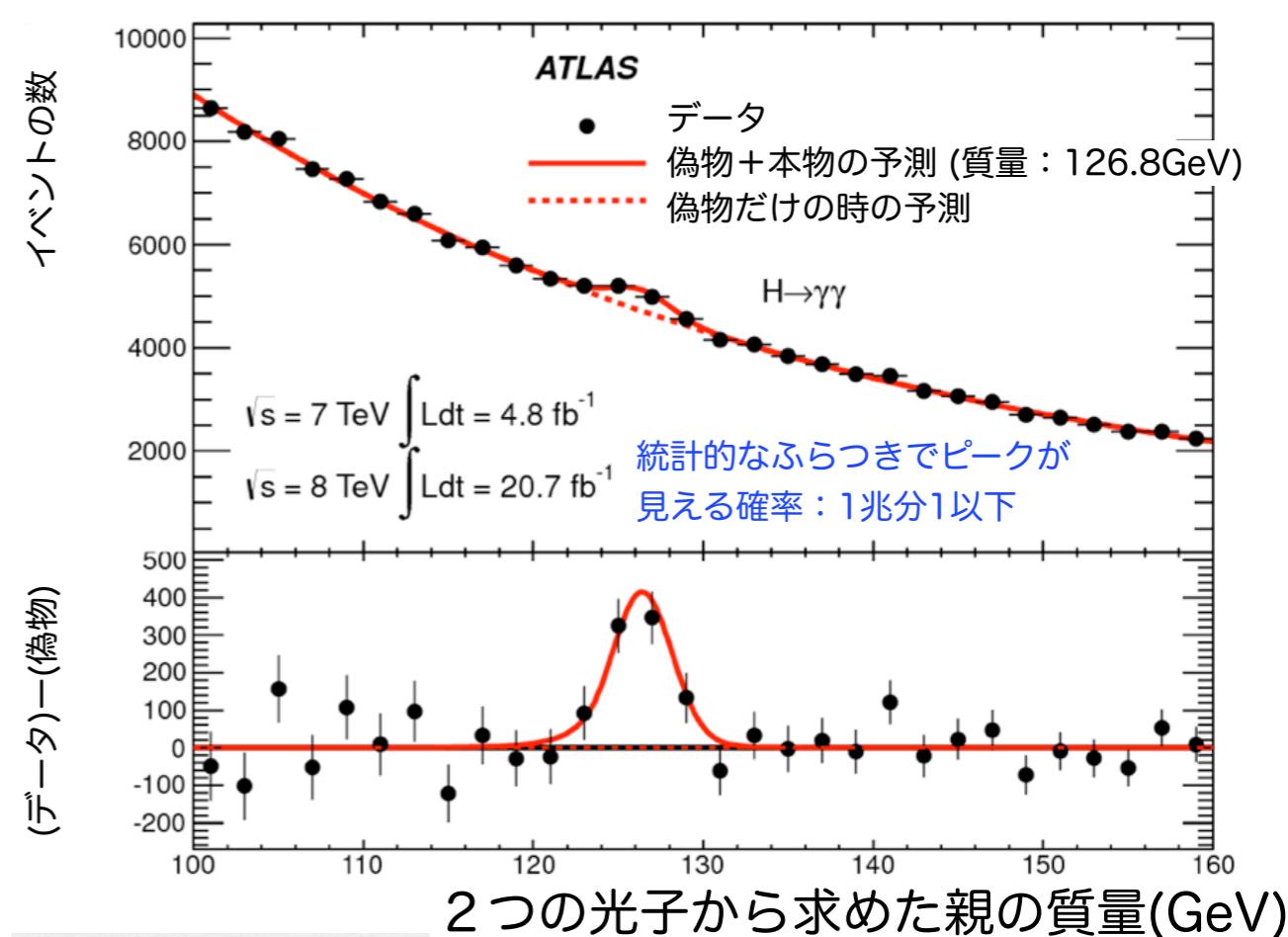
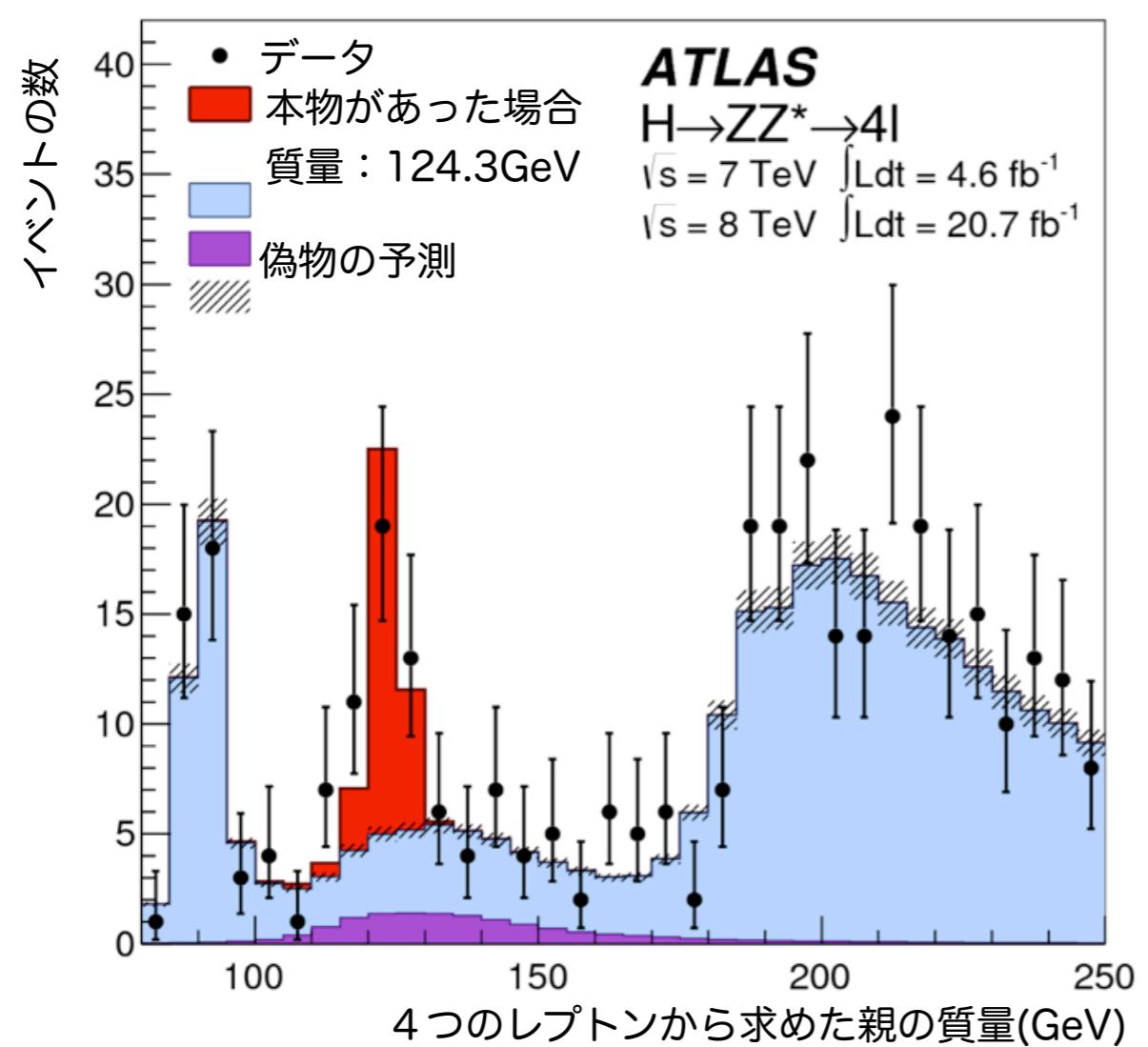
ヒッグス粒子が崩壊した結果、とんできたように見える、  
電子、 $\mu$ 、 $\gamma$ 線、のエネルギーを精密測定。  
→ **親粒子の質量を計算する。**



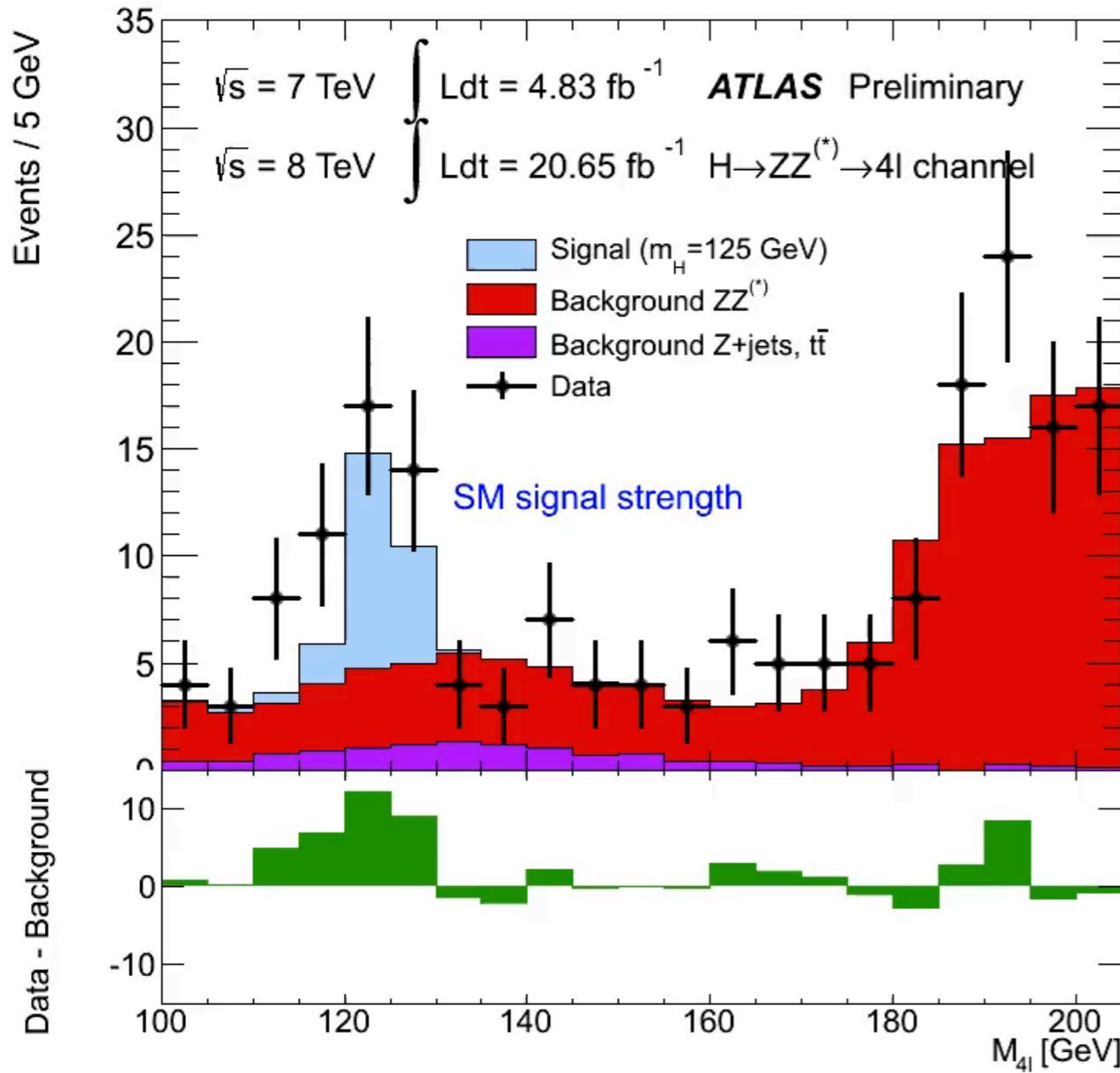
CERN提供

ヒッグス粒子が崩壊した結果、とんできたように見える、電子、 $\mu$ 、 $\gamma$ 線、のエネルギーを精密測定

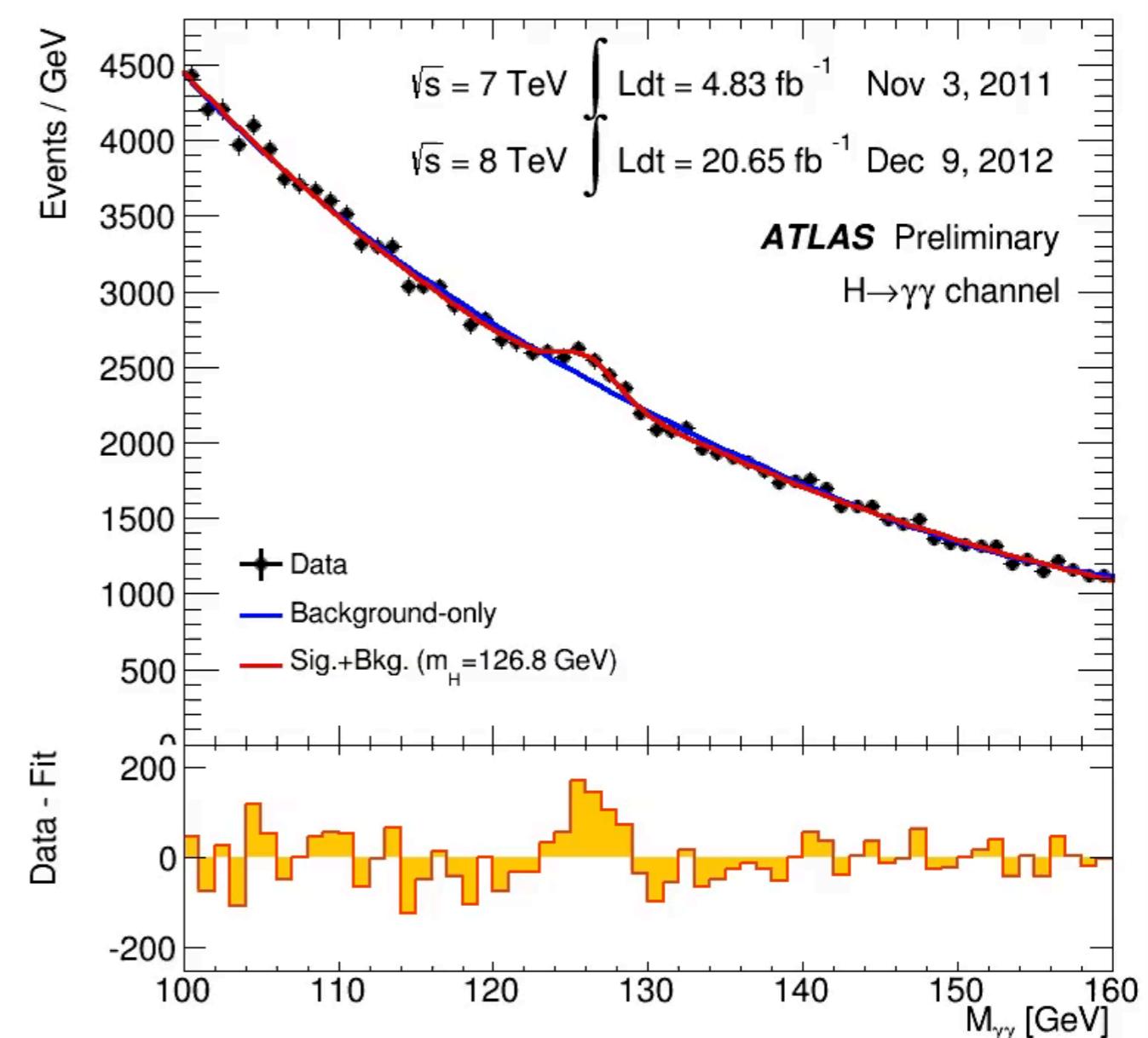
→ 親粒子の質量を計算する



$H \rightarrow 4\mu$  or  $4e$  or  $2\mu 2e$

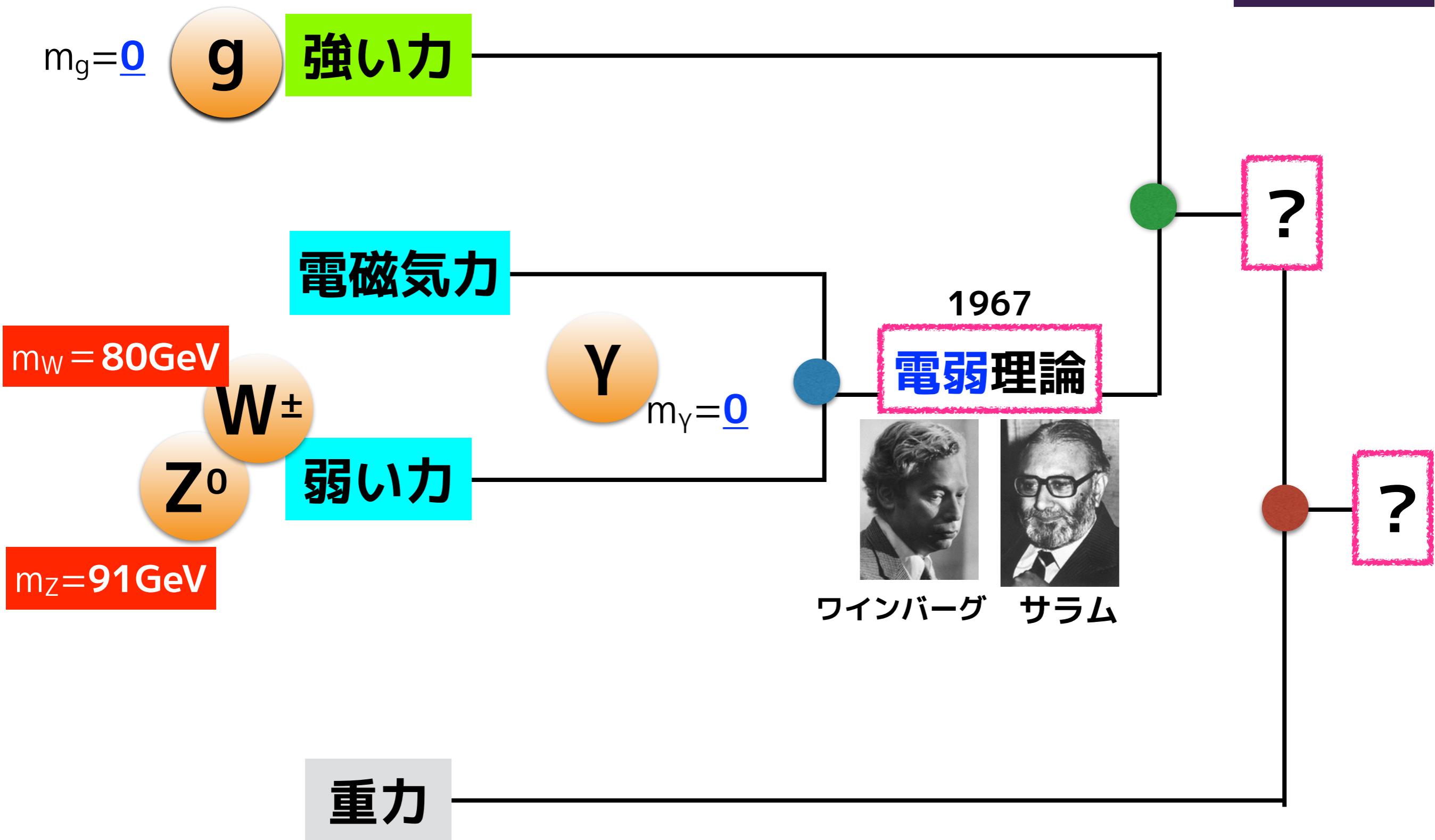


Higgs  $\rightarrow 2\gamma$



# お楽しみは、これから !!

統一



# 「世界中から集まった仲間たち」



ありがとうございました

写真:CERN提供