

ヒッグス粒子の正体に迫る！

2013年10月17日 名古屋大学

# ヒッグス粒子の発見 と

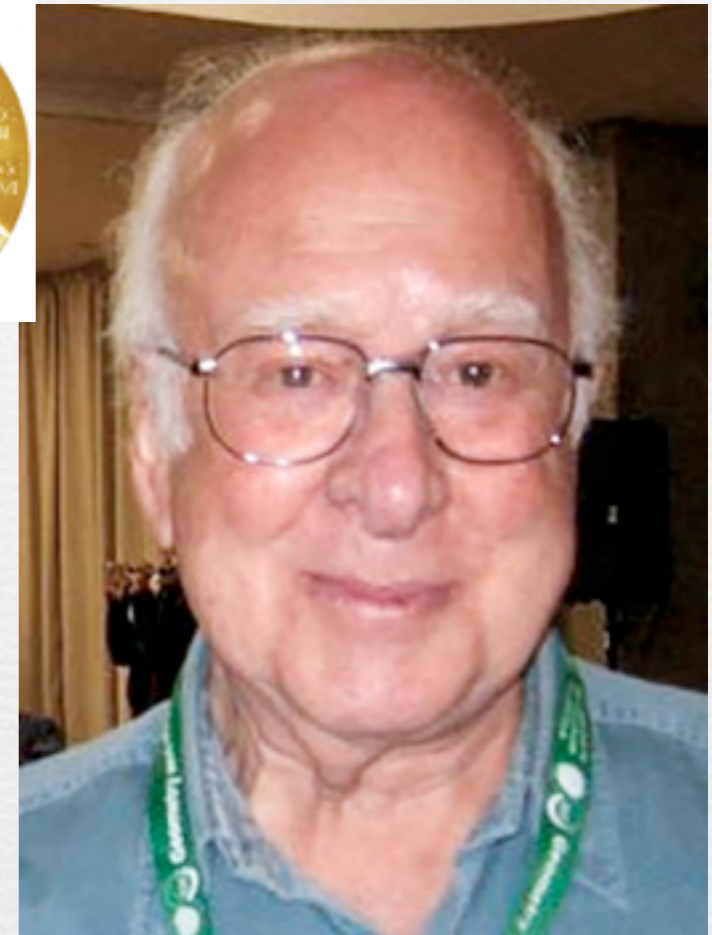
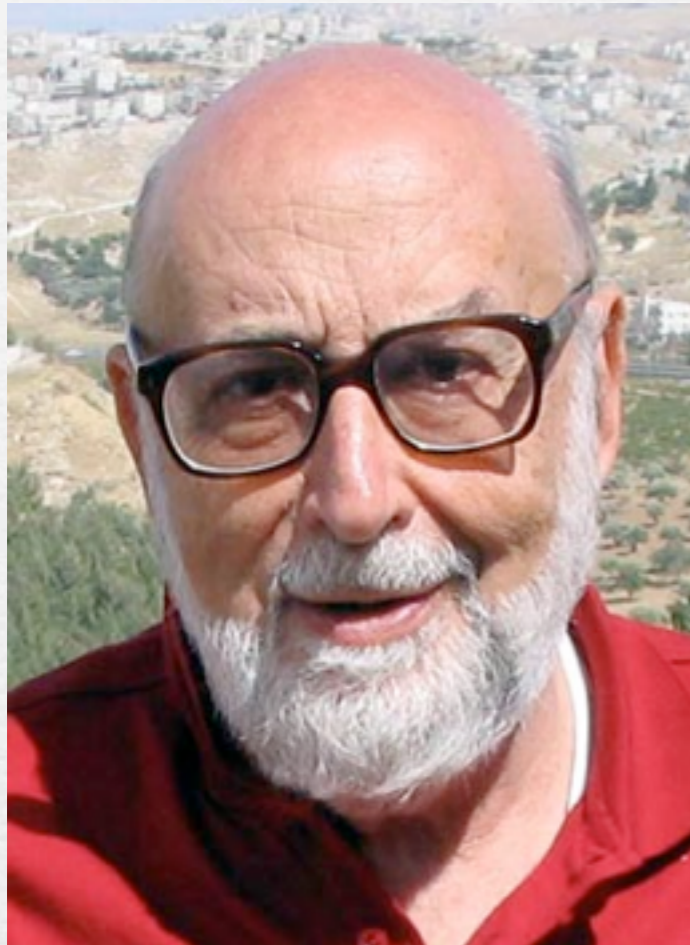
## さらなる新粒子を求めて

戸本 誠

名古屋大学大学院理学研究科 タウ・レプトン物理研究センター

名古屋大学素粒子宇宙起源研究機構 現象解析研究センター

# ノーベル物理学賞、おめでとうございます！

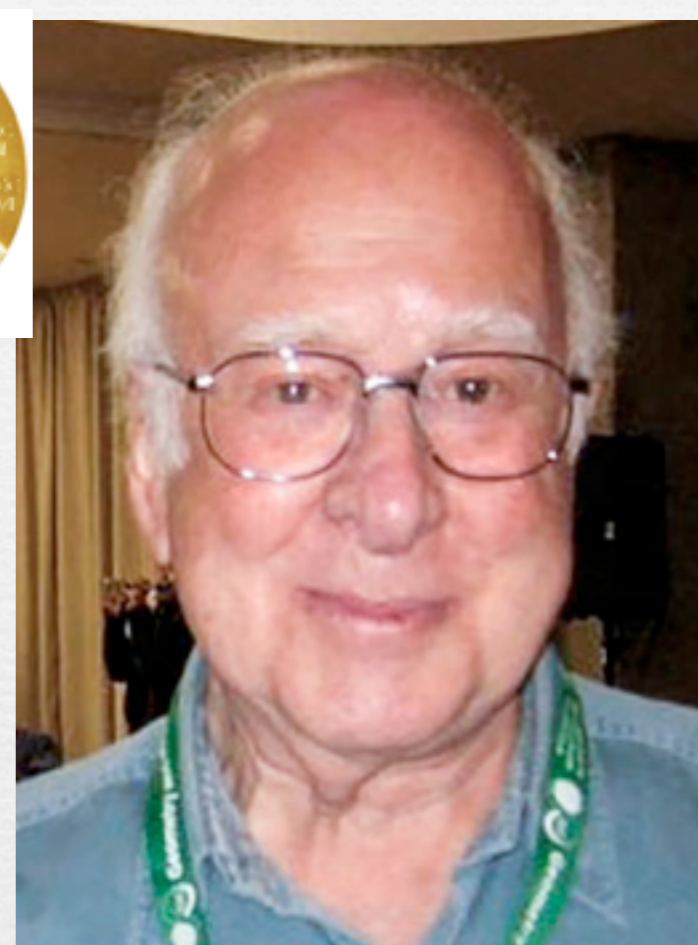
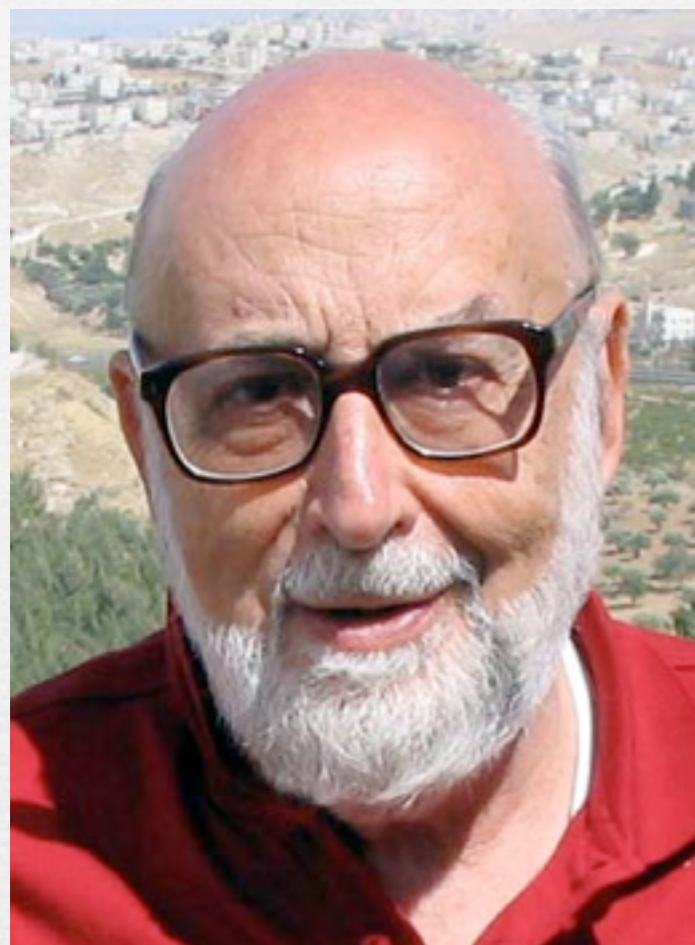


フランソワ・アングレール氏

ピーター・ヒッグス氏

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*"

# ノーベル物理学賞、おめでとうございます！



フランソワ・アングレール氏

ピーター・ヒッグス氏

2013年のノーベル物理学賞は、**フランソワ・アングレール氏**と**ピーター・ヒッグス氏**に、「素粒子の**質量起源の理解を与える仕組みを理論的に発見**し、理論によって予言される**基本粒子をCERN LHCのATLAS実験とCMS実験が発見した**ことにより理論の正しさが確認された」ことにより授与される。

# 日本の実験チームが貢献！！



ノーベル物理学賞に決まったヒッグス氏と、共同受賞者のアンダレール氏=2012年7月、スイスのCERNで (A P)

## ノーベル賞

# ヒッグス粒子予言の2氏

## 物理学賞 質量の起源解明

【ストックホルム＝共同】スウェーデンの王立科学アカデミーは八日、二〇一三年のノーベル物理学賞を、物質に重さを与える「ヒッグス粒子」の存在を半世紀前に予言した英エディンバラ大のピーター・ヒッグス名誉教授(ハセ)と、ベルギーのブリュッセル自由大のフランソワ・アンダレール名誉教授(ハセ)の二人に授与すると発表した。「神の粒子」実験誇り①面、関連②面、社説⑦面

### 日本の技術が貢献

ヒッグス粒子の発見には日本が重要な役割を果たした。ヒッグス粒子を探す実験は二〇〇九年に始まり、名古屋大や東京大など十六機関の約百十人が参加した。欧州合同原子核研究所の世界最大の加速器LHCの建設費は三千八百億円で、うち日本は約百四十億円を拠出した。陽子同士を衝突させる加

### 名大など16機関参加

速器の鍵と、古河電用いられて、粒子の生成を調べる検出器の開発には東芝や川崎重工業などが参加した。素粒子が飛んだ軌跡を調べる装置には光検出機器で高い技術誇る浜松ホトニクス(浜松市)の製品が採用されている。



発行所 中日新聞社  
名古屋市中区三の丸一丁目6番1号  
〒460-8511 電話 052(201)8811

就職率ランキング  
文系大学日本一  
東京福祉大学  
名古屋キャンパス

オープン  
キャンパス

11/30(土)  
12/21(土)

※併修・公開講座・授業・ビジネス専門学校

http://www.tokyo-fukushu.ac.jp/

10月9日中日新聞朝刊

KEK, 筑波大, 東大, 早稲田大, 東工大, 名大, 京大, 阪大, 神戸大, 九大など16研究機関

落合 博満氏(おちいひろみつ)  
あい・ひろみつ)  
E2月)日E  
53 谷繁 元信捕手(た  
0

# 神の粒子 実験誇り

## ノーベル物理学賞



ノーベル物理学賞に「ヒッグス粒子」が決まり、笑顔を見せる戸本誠准教授（前列中央）と学生ら＝8日夜、名古屋市千種区の名古屋大で

# 参加の名大 歓喜 「必ずある信じていた」

決まったヒューター・ヒッグス博士らが半世紀前に存在を予言したヒッグス粒子。「神の粒子」とも呼ばれた存在を裏付けたのは欧州合同原子核研究所（CERN）の実験だった。実験に参加した研究者や、検出器を製作したメーカーの担当者らは八日、受賞決定を誇らしげに喜び合った。＝〇面参照

名古屋市千種区の名古屋大東山キャンパス。大学院理学研究科の戸本誠准教授（四）と研究室の学生ら十人は、会議室で発表を待った。受賞者が発表される「おー」と歓声。拍手が起こり、「やったー」「乾杯や！」と笑顔があふれた。同じ研究室の飯嶋徹教授はとっておきのワインも用意。全員で「ヒッグス粒子に乾杯」と祝杯をあげた。

戸本さんは〇六―〇九年、実験チームの一員として、衝突時に生じる粒子を観測する検出器の製作を担当した。検出器とコンピュータをつなぐ三十二万本の回線の一本一本がきちんと作動するかを確認。気の遠くなるような、ミスの許されない作業の積み重ねが偉業につながった。「ヒッグス粒子は、

必ずあると信じていた。五十年に一度の発見。その実験に関われたことを誇りに思う」

CERNはフランスとスイスの国境に世界最大の円形加速器を持つ研究機関。加速器は地下百メートルに設置されたトンネル型の実験装置で、全長二十七キは名古屋市の地下鉄名城線の一周分とほぼ同じ。〇八年から秒速三十万キまで加速した陽子を一秒間に二千万回衝突させる実験を重ね、データを集めていた。

ヒッグス粒子は存在が予言されていた十七の素粒子のうち、未発見だった「最後のピース」。戸本さんは「理論に実験が追いついた。これからヒッグス粒子の解析が進み、同時に新しい素粒子の探索という段階に入る。わくわくしますね」と声を弾ませた。

# 内容

ヒッグス粒子を作る加速器

ヒッグス粒子を捕まえる検出器

ヒッグス粒子の発見かた

ヒッグス粒子発見の意義とこれから

# ヒッグスを見るには？

ヒッグスを簡単に見ることができない。

エネルギーをつぎ込むと見る事ができる

加速器で高エネルギー状態を作る

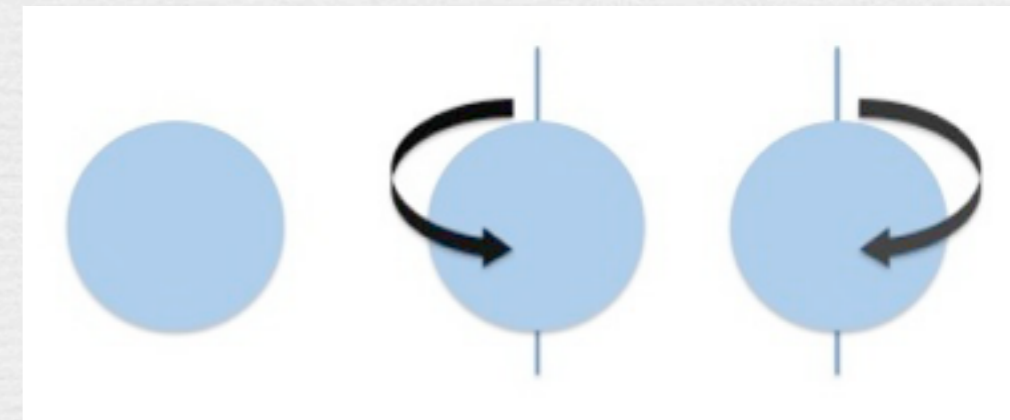
→ ヒッグス粒子が出てくる

電荷が0の粒子

スピンの0の粒子(向きなし粒子)

クォーク、レプトンのスピン： $1/2$

力を伝える粒子のスピン： $1$



素粒子には固有のスピン

質量の大きい素粒子とほど反応する

不安定ですぐにより安定な粒子に崩壊する

そういう粒子を実験的にさがしてみる→**素粒子実験**

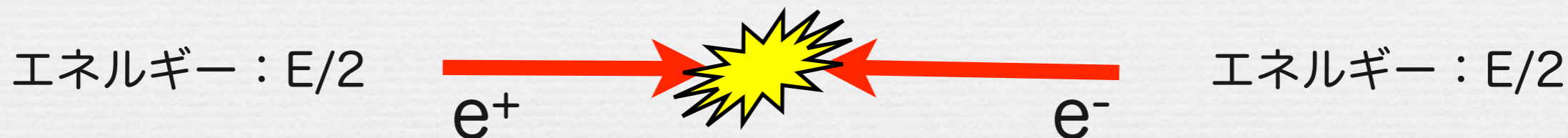
# ヒッグス粒子を作る 加速器



# 素粒子実験の考え方

未知粒子であるヒッグス粒子を作り出し、それを観測する

未知粒子 = これまでの実験では作り出せない → 重い



$$E = Mc^2$$

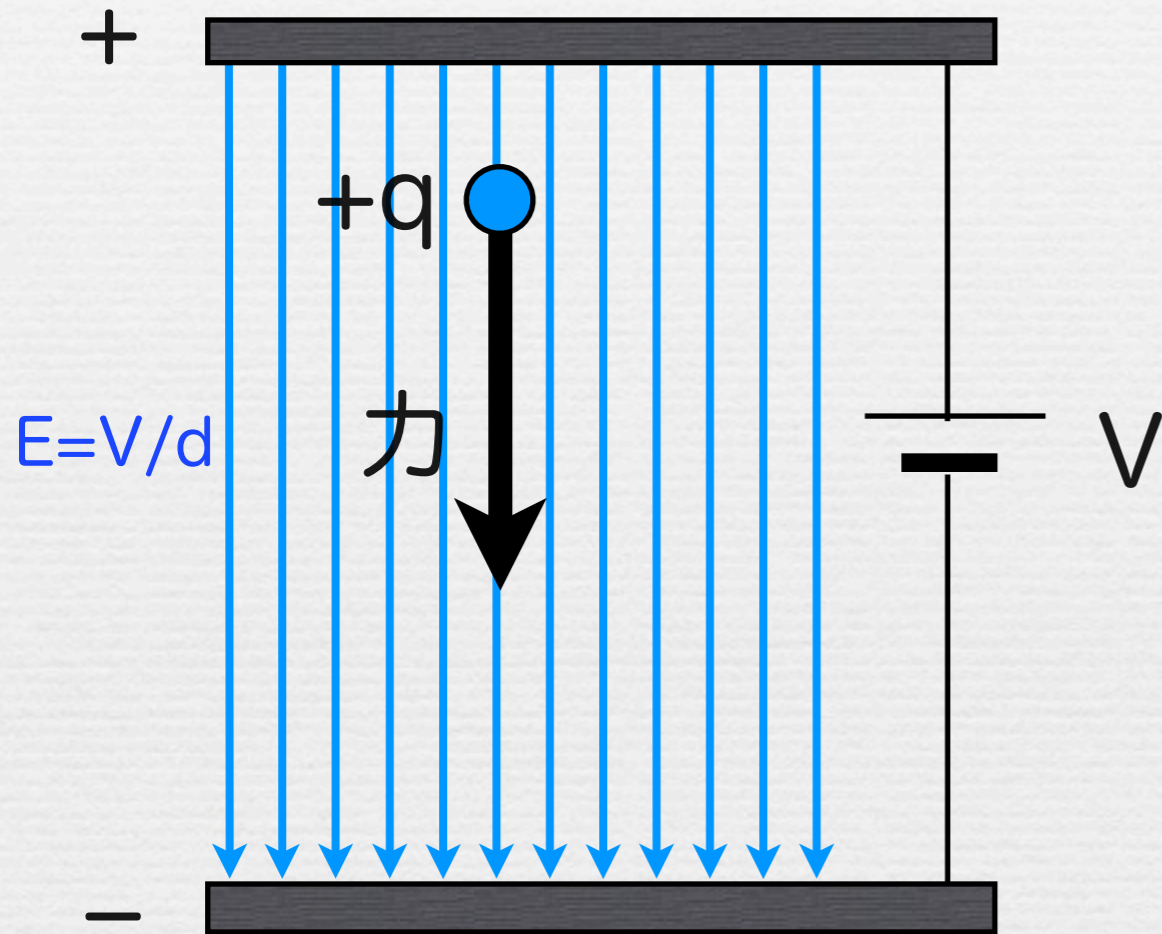
質量 $M$ の未知なる素粒子を生成する能力

加速した粒子を衝突させる

高エネルギー！

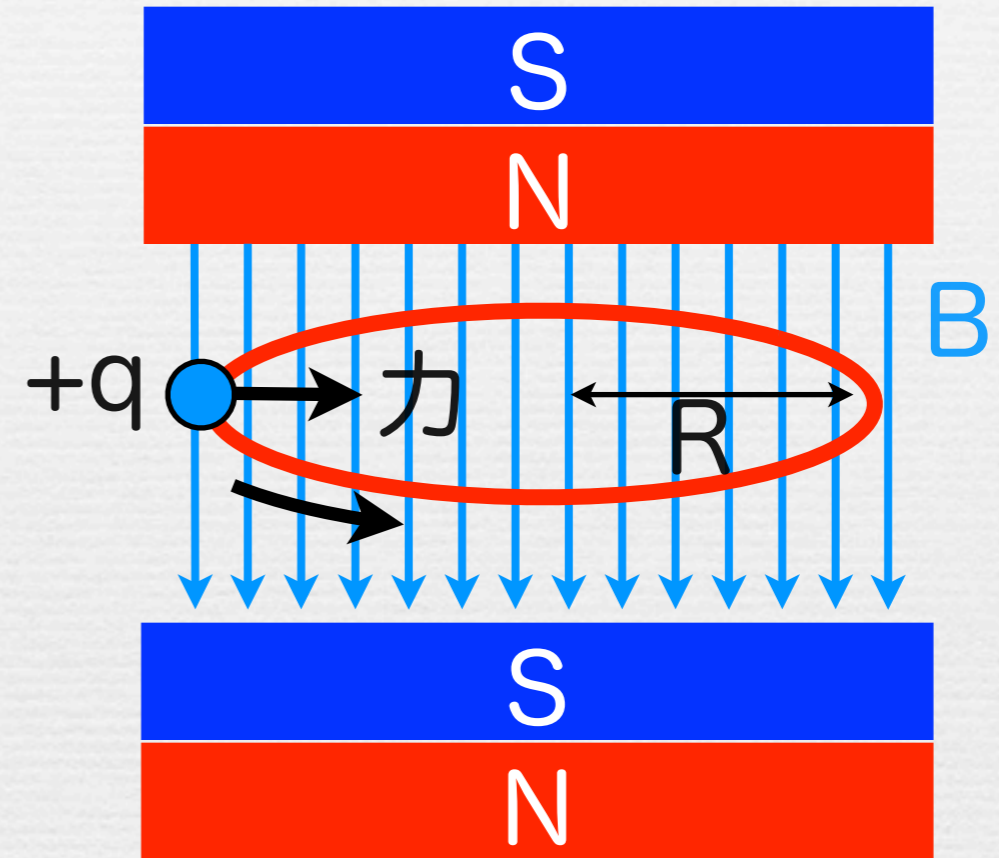
# 粒子を加速する

電荷を持った粒子を電場や磁場の中で運動させる



電場が大きいと  
荷電粒子の加速大

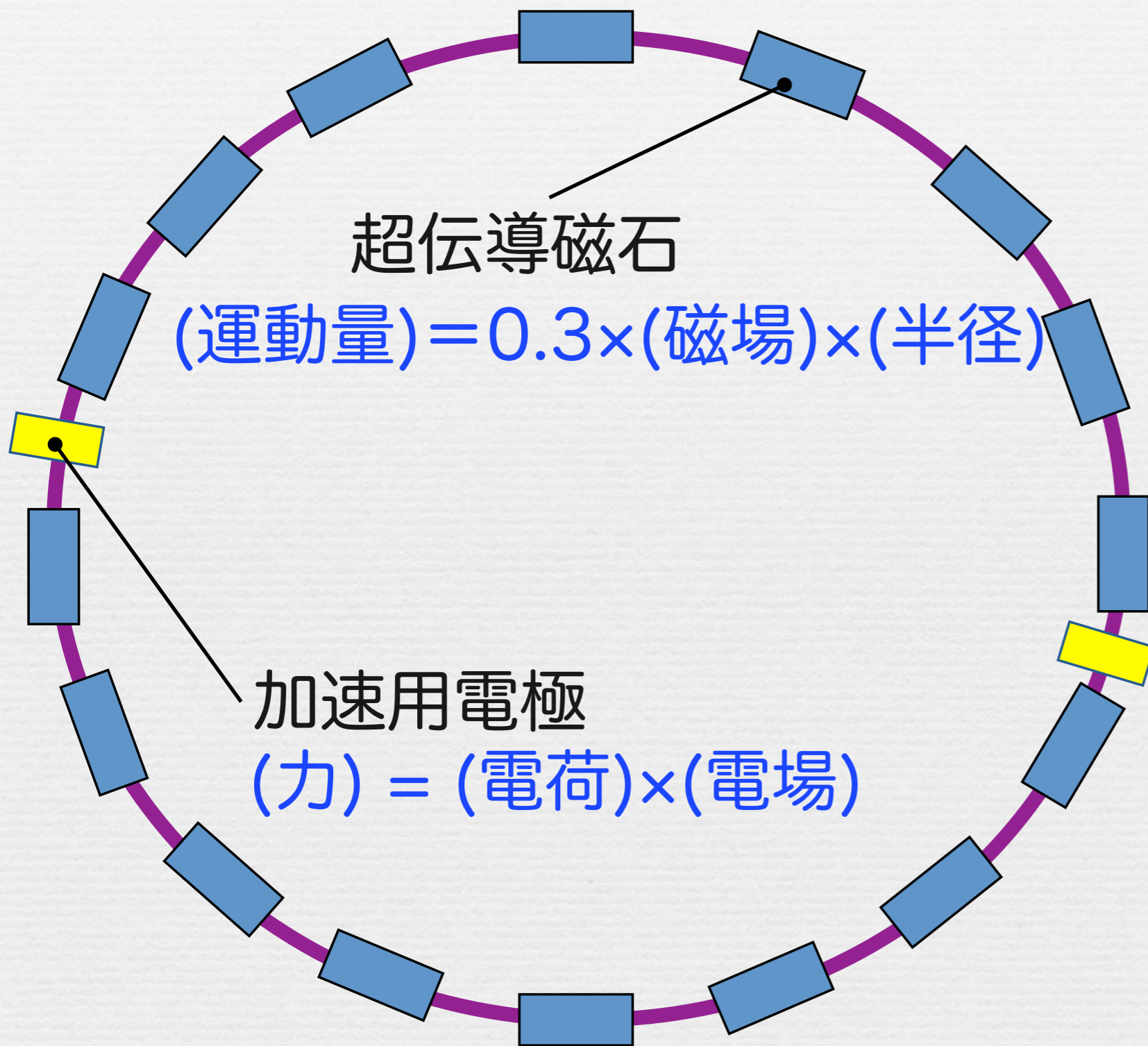
$$(\text{力}) = (\text{電荷}) \times (\text{電場})$$



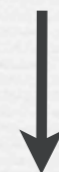
磁場を大きくして  
より加速した荷電粒子を回す

$$(\text{運動量}) = 0.3 \times (\text{磁場}) \times (\text{半径})$$

# 加速器の原理



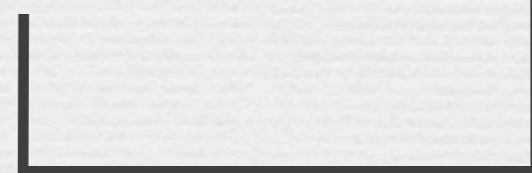
荷電粒子を磁場で回す



電極で加速

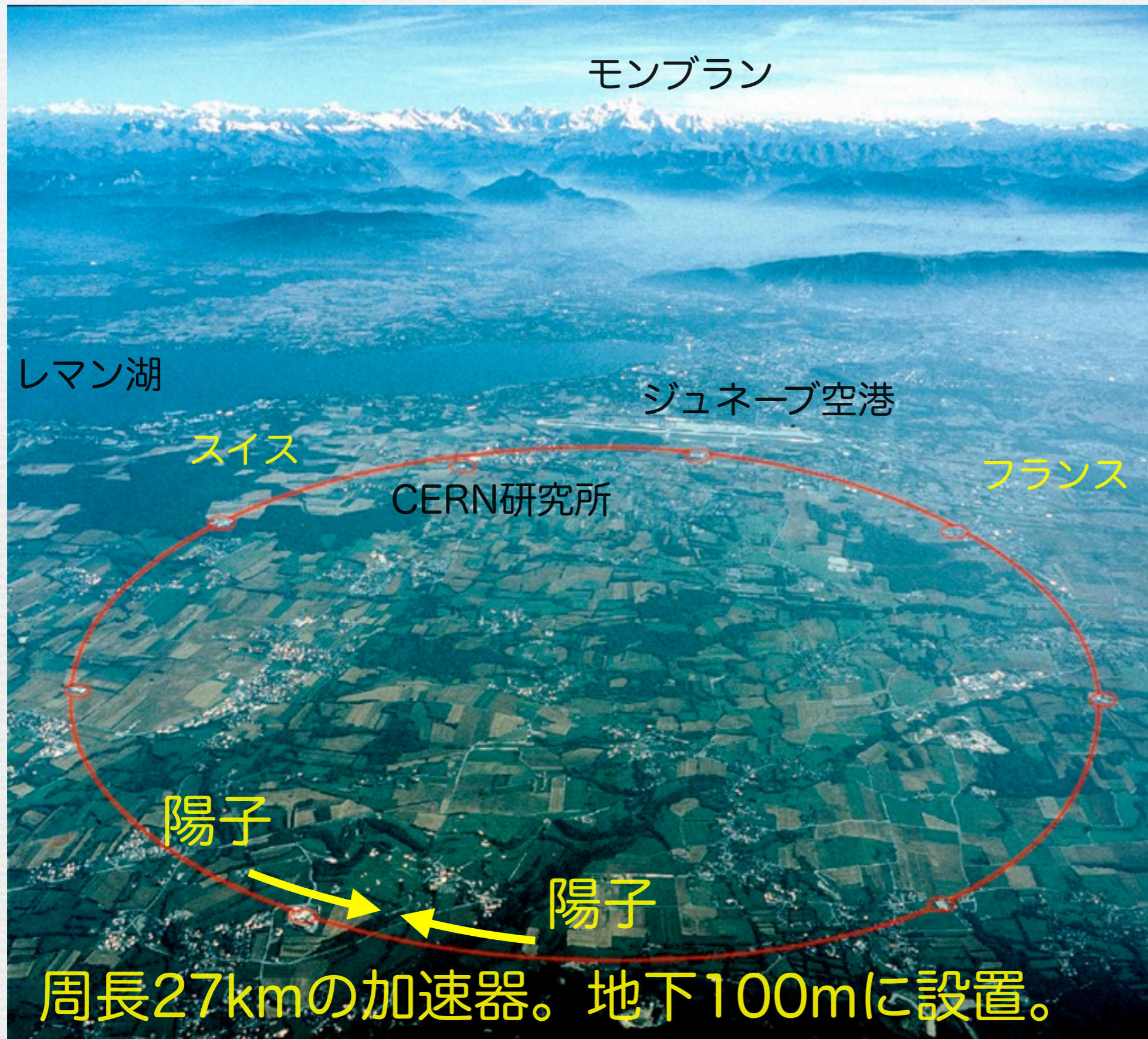


より強い磁場で回す

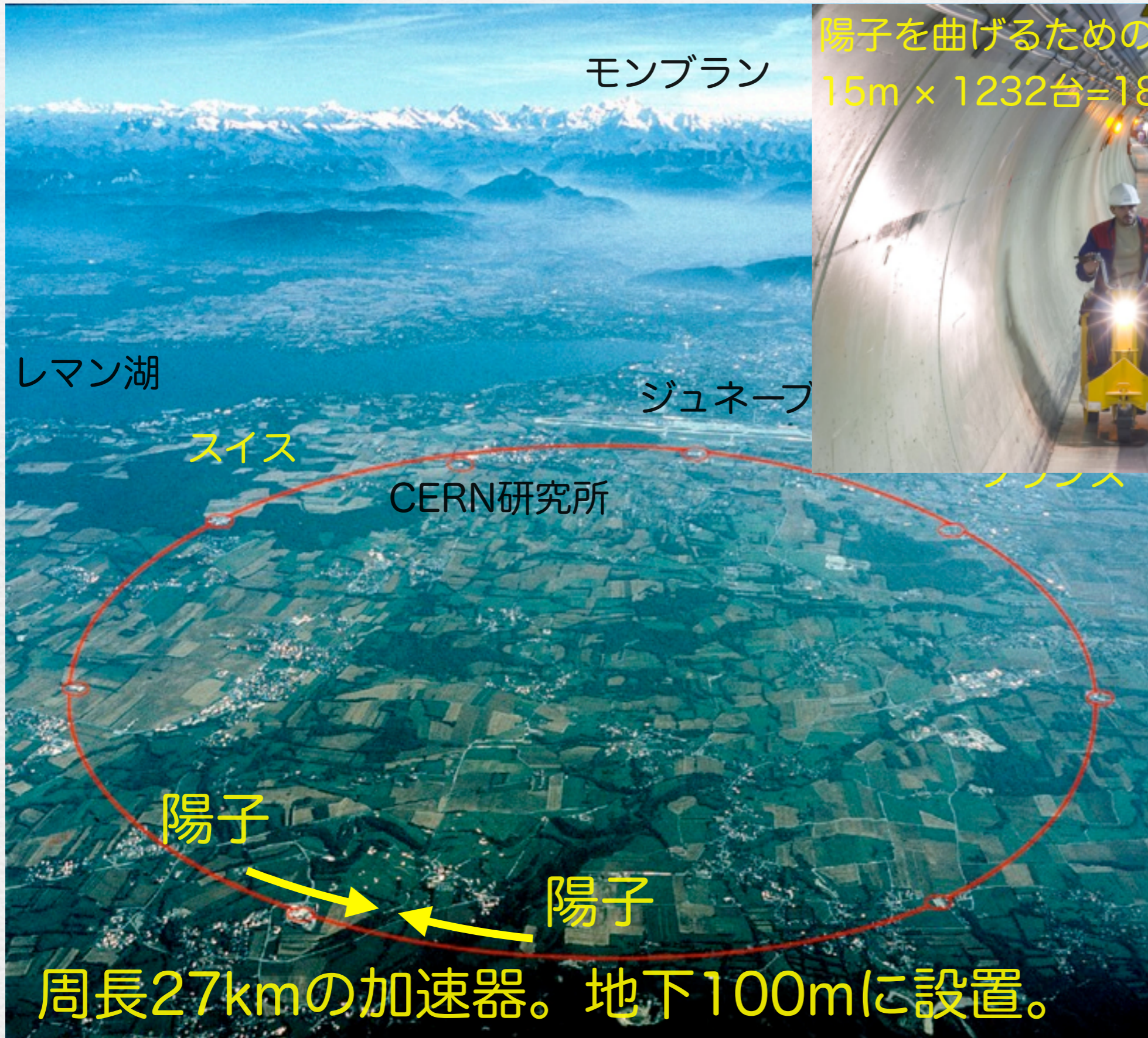


目標のエネルギーに到達するまで

# 最先端加速器 Large Hadron Collider



# 最先端加速器 Large Hadron Collider



~~~~~

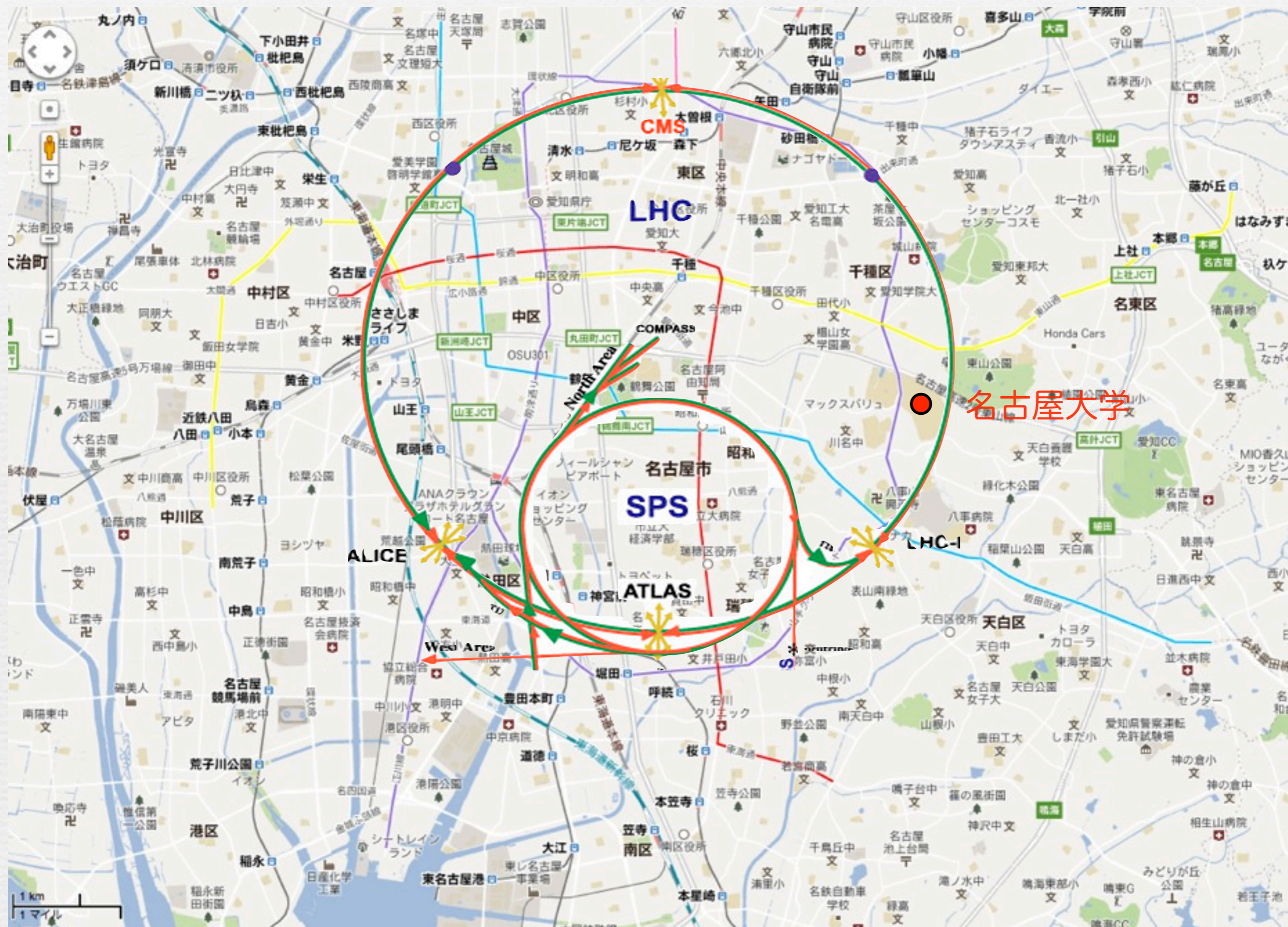
# LHC加速器の大きさ



# LHC加速器の大きさ

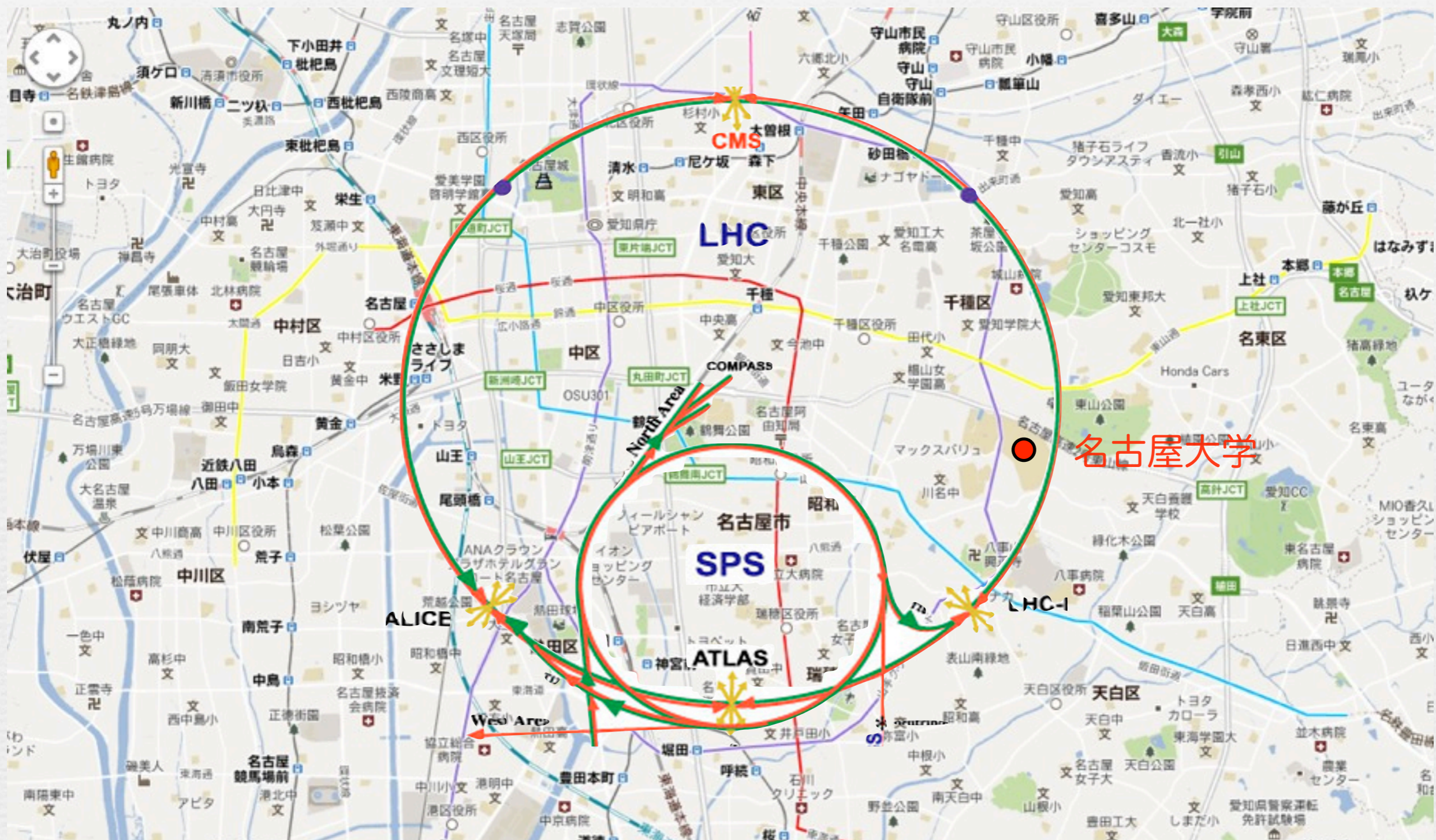


# LHC加速器の大きさ

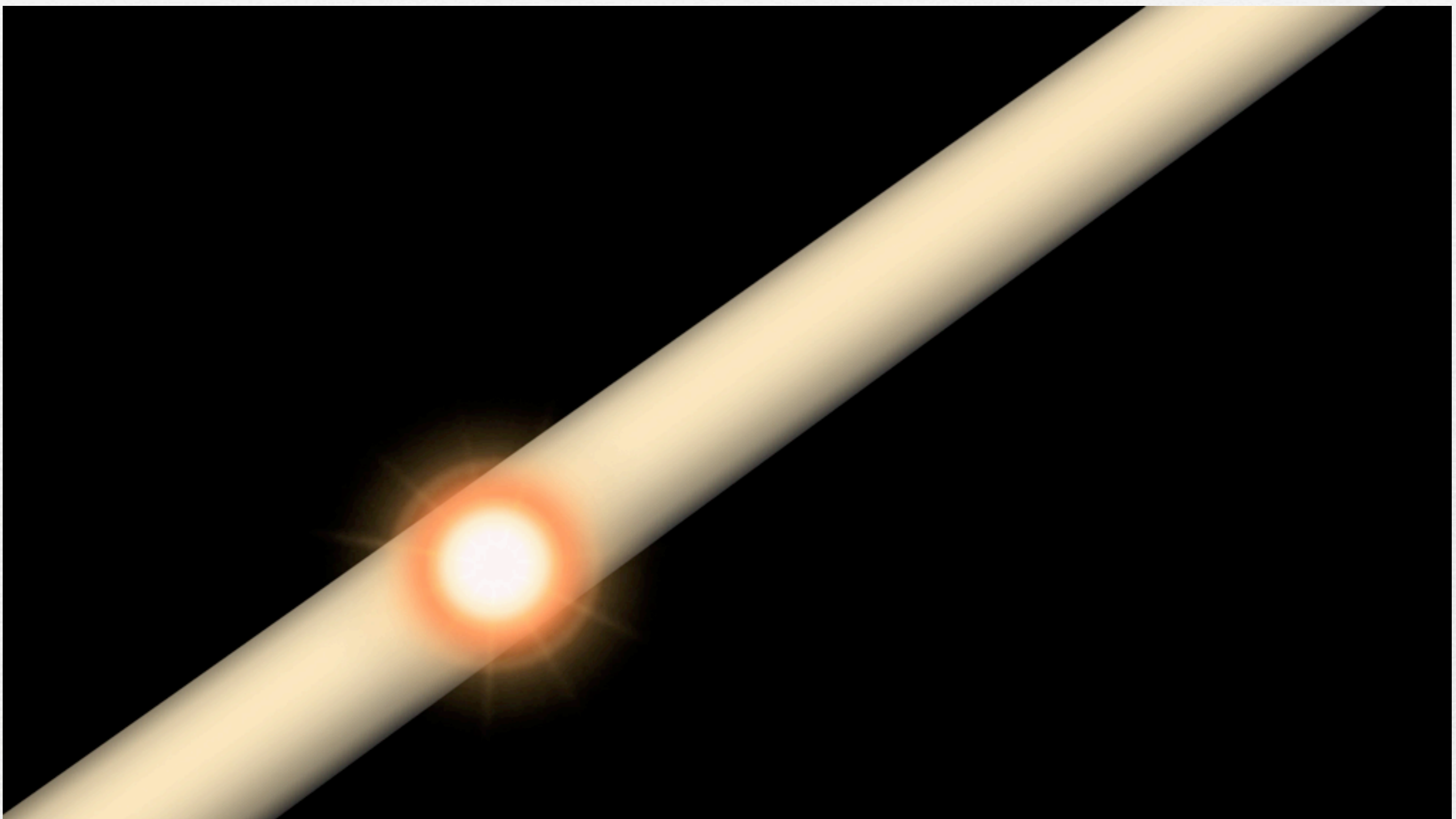




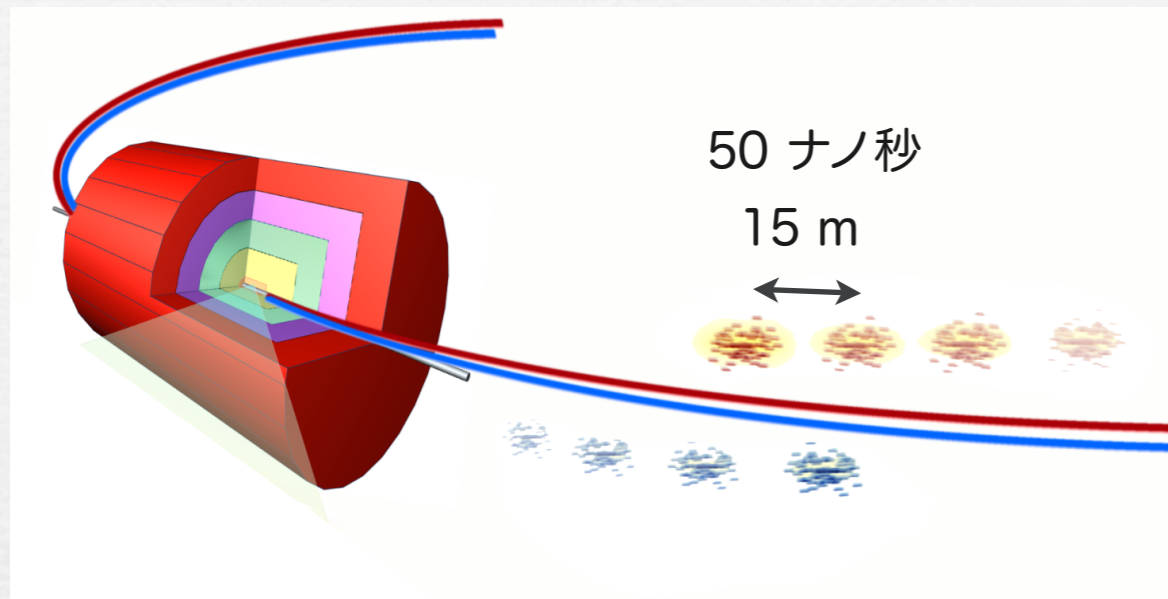
# LHC加速器の大きさ



大阪環状線 < LHC~名古屋地下鉄名城線 < 東京山手線  
 ~21km ~27km ~34.5km



# LHC加速器の性能



|             |           |
|-------------|-----------|
| 加速粒子        | 陽子×陽子     |
| ビーム塊あたりの陽子数 | 千億 個      |
| 陽子ビーム塊の数    | 1380      |
| ビーム塊の間隔     | 15メートル    |
| 衝突点でのビーム半径  | ~0.020 mm |
| エネルギー       | 4TeV+4TeV |

## ○ 4TeVに加速した陽子の速度

光の速度の99.9999997%の速度      **光速 - 30km/時**

## ○ 4TeVに加速した陽子のエネルギー

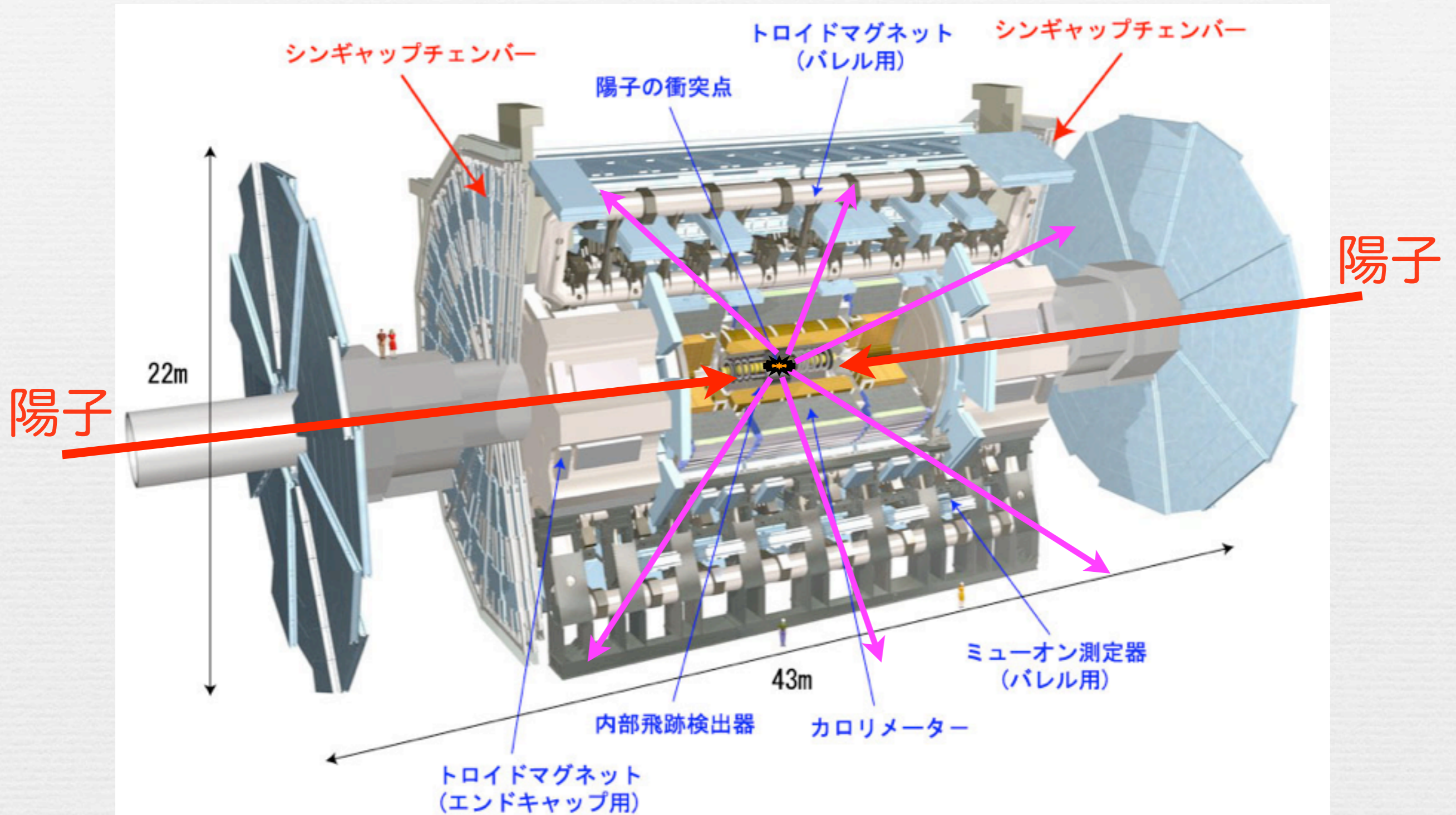
陽子1個 ... コバエの運動エネルギー程度

加速器内の全陽子 ...



# ヒッグス粒子を捕まえる 検出器

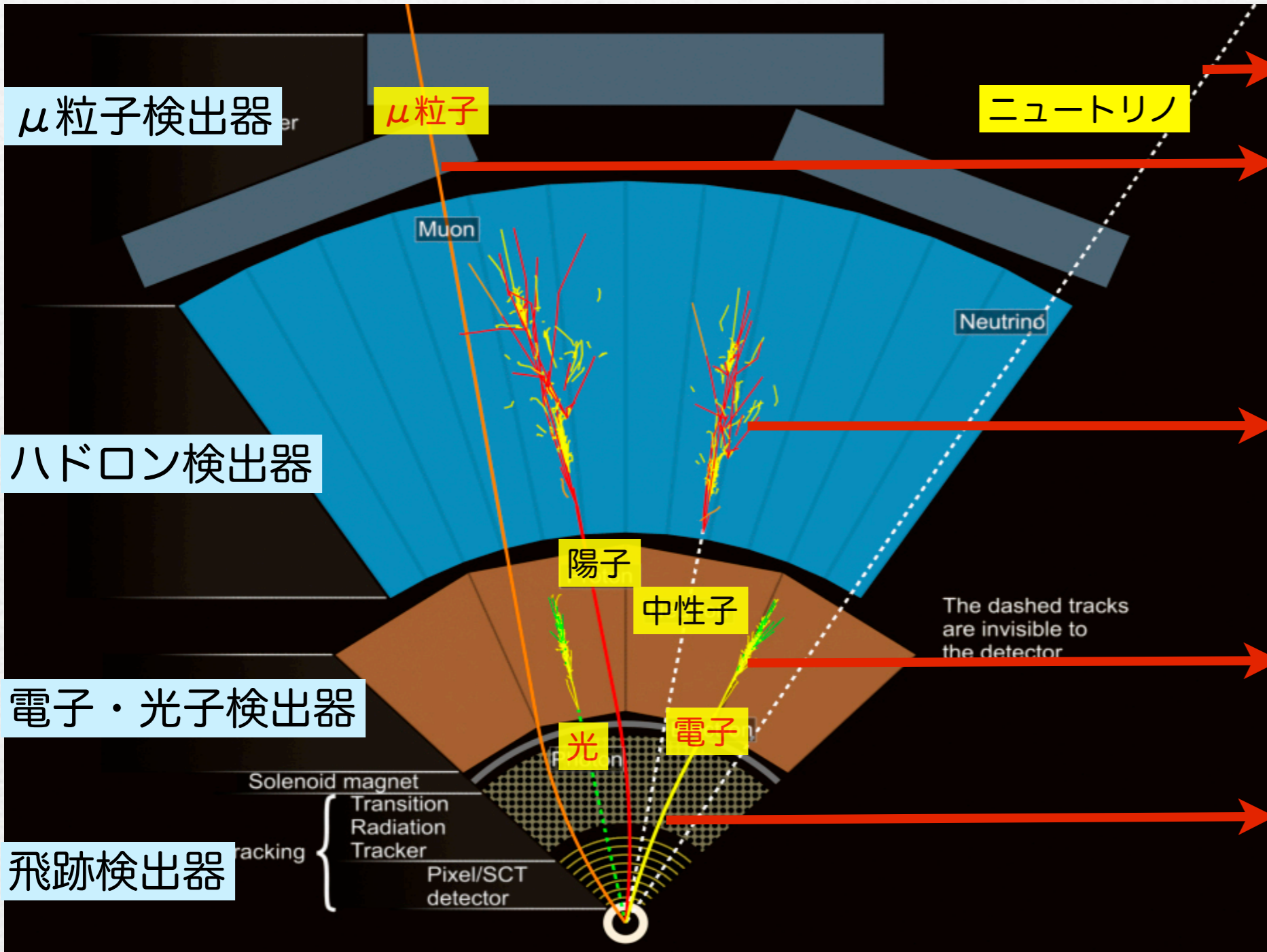
# 粒子検出器 アトラス検出器



ヒッグス粒子は不安定 → 軽い安定粒子に化ける (崩壊)

# 検出器の原理

検出器の物質と粒子との相互作用を利用する



ニュートリノはすり抜ける

反応しにくい粒子  
μ粒子の運動量測定

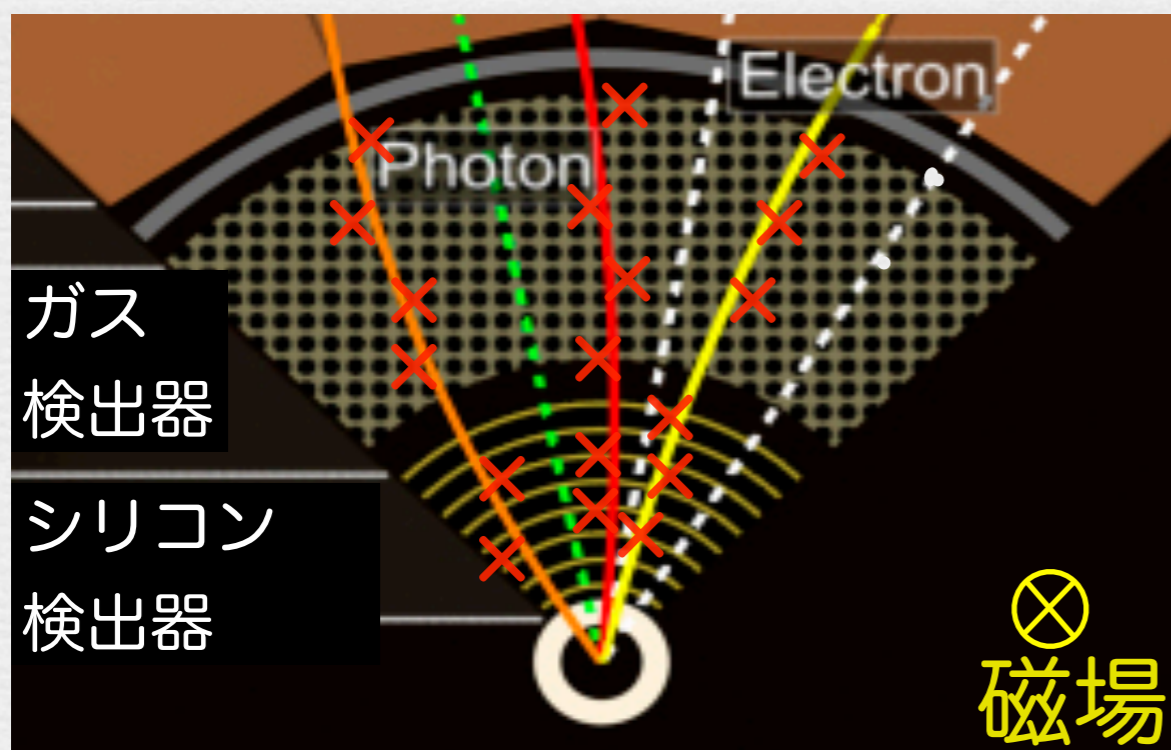
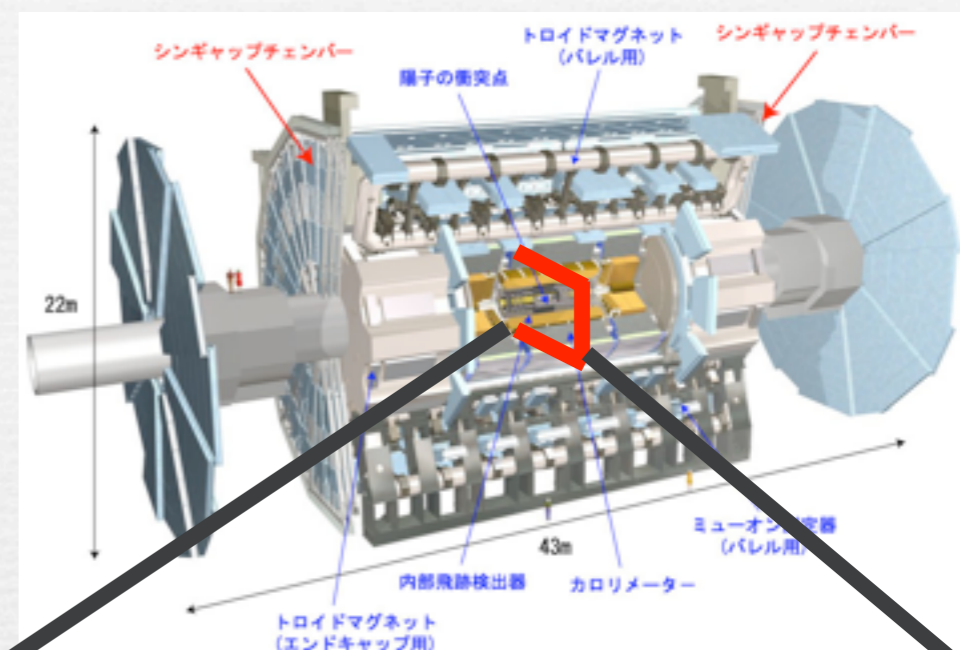
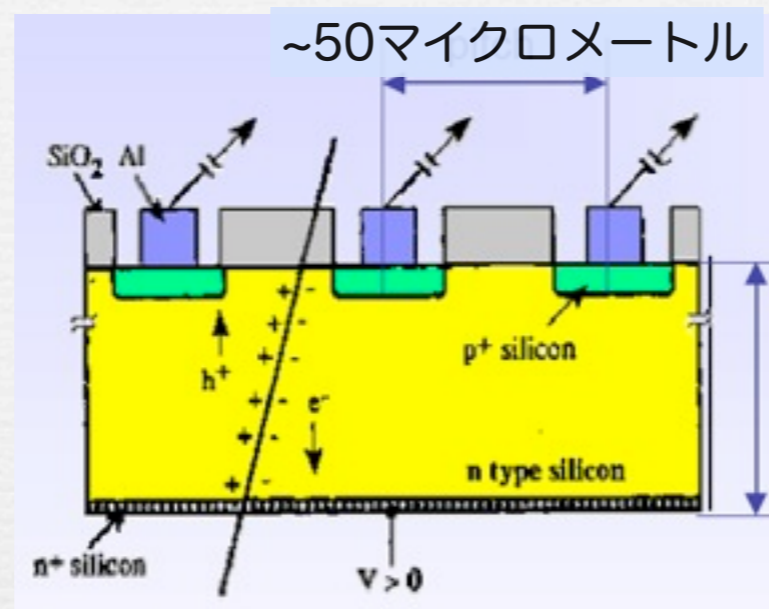
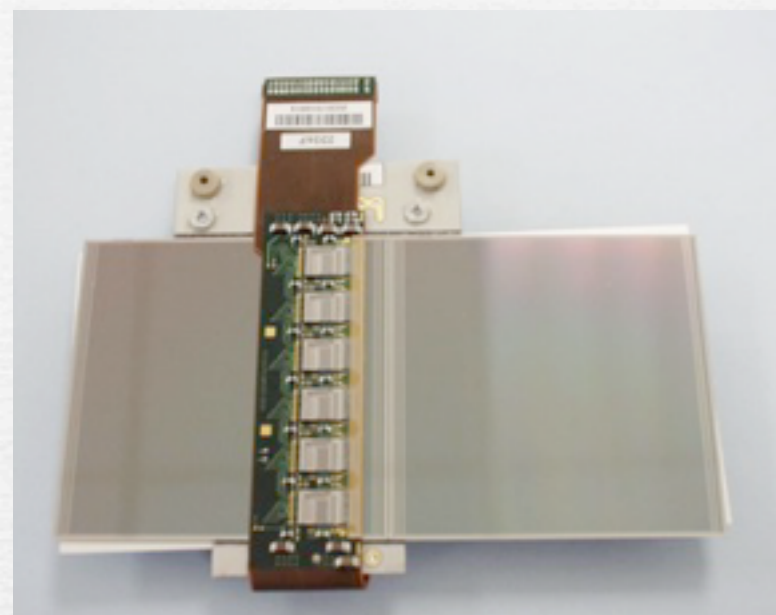
陽子、中性子等を止める  
→エネルギー測定

電子と光子を止める  
→エネルギー測定

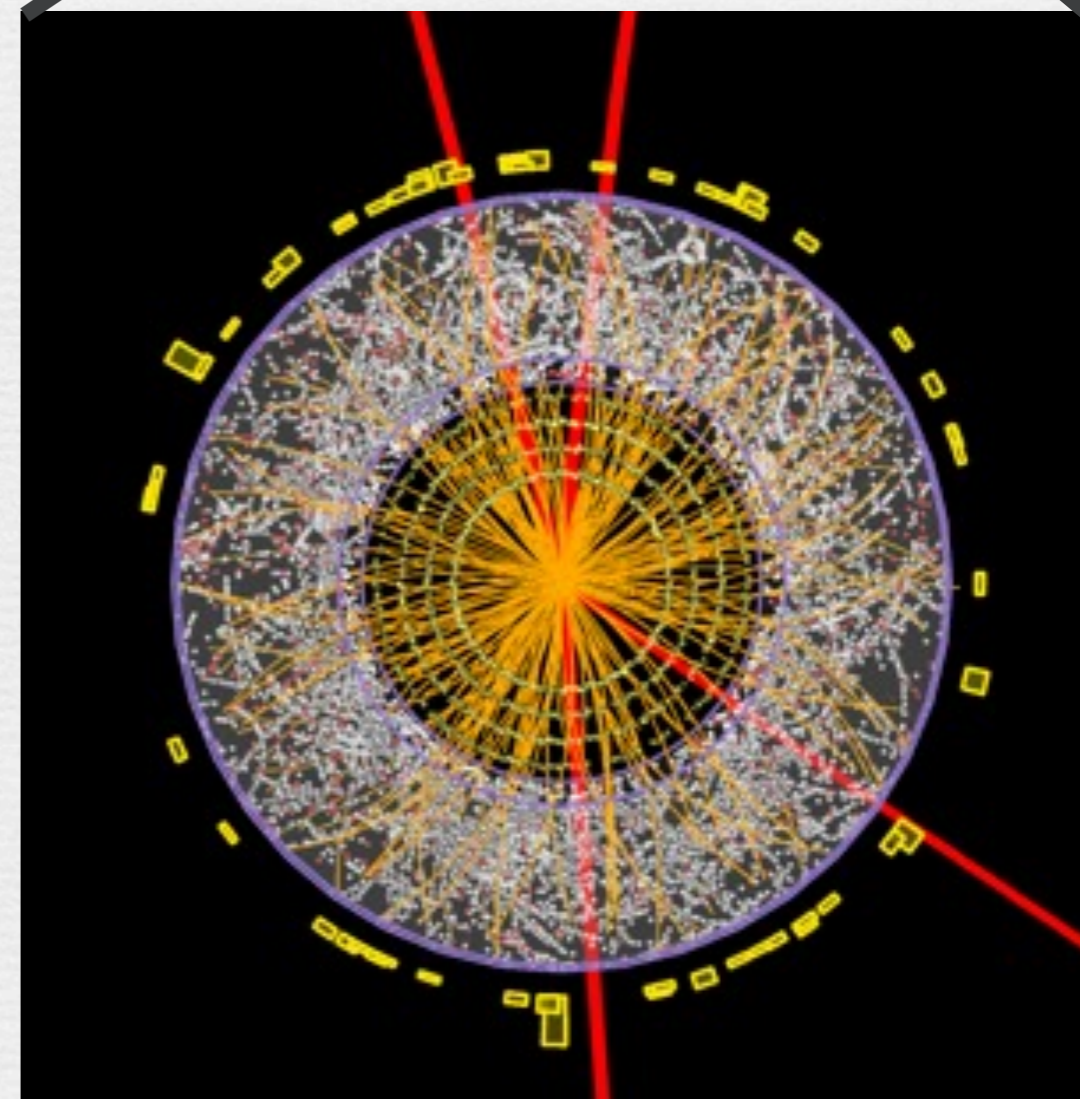
荷電粒子が残す微弱信号  
磁場で荷電粒子を曲げる  
→ 運動量測定

粒子の種類、エネルギー、運動量を測定

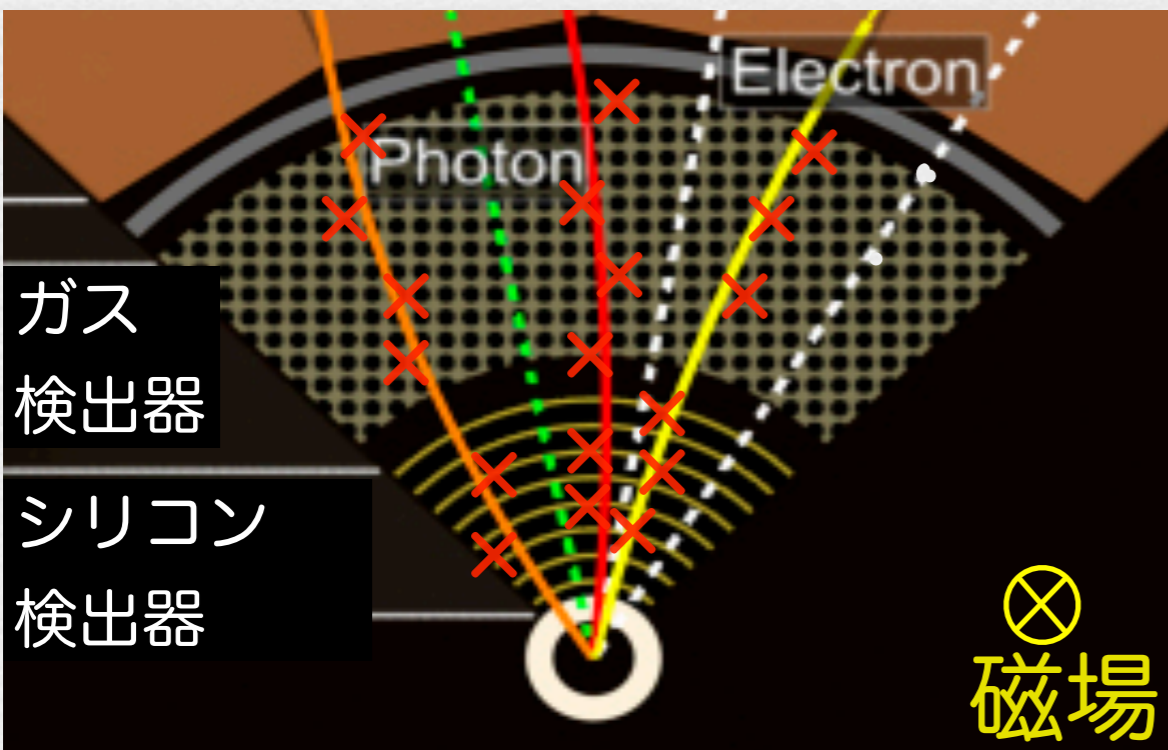
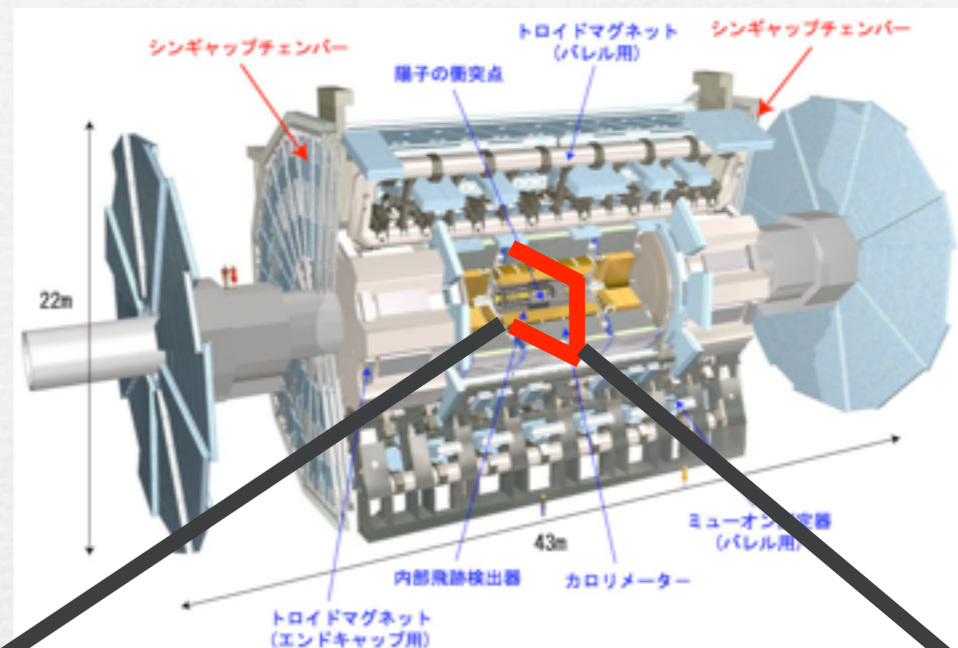
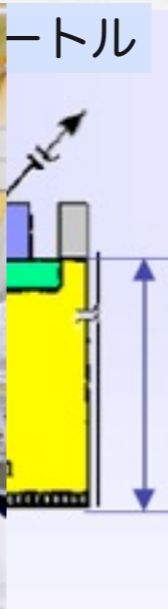
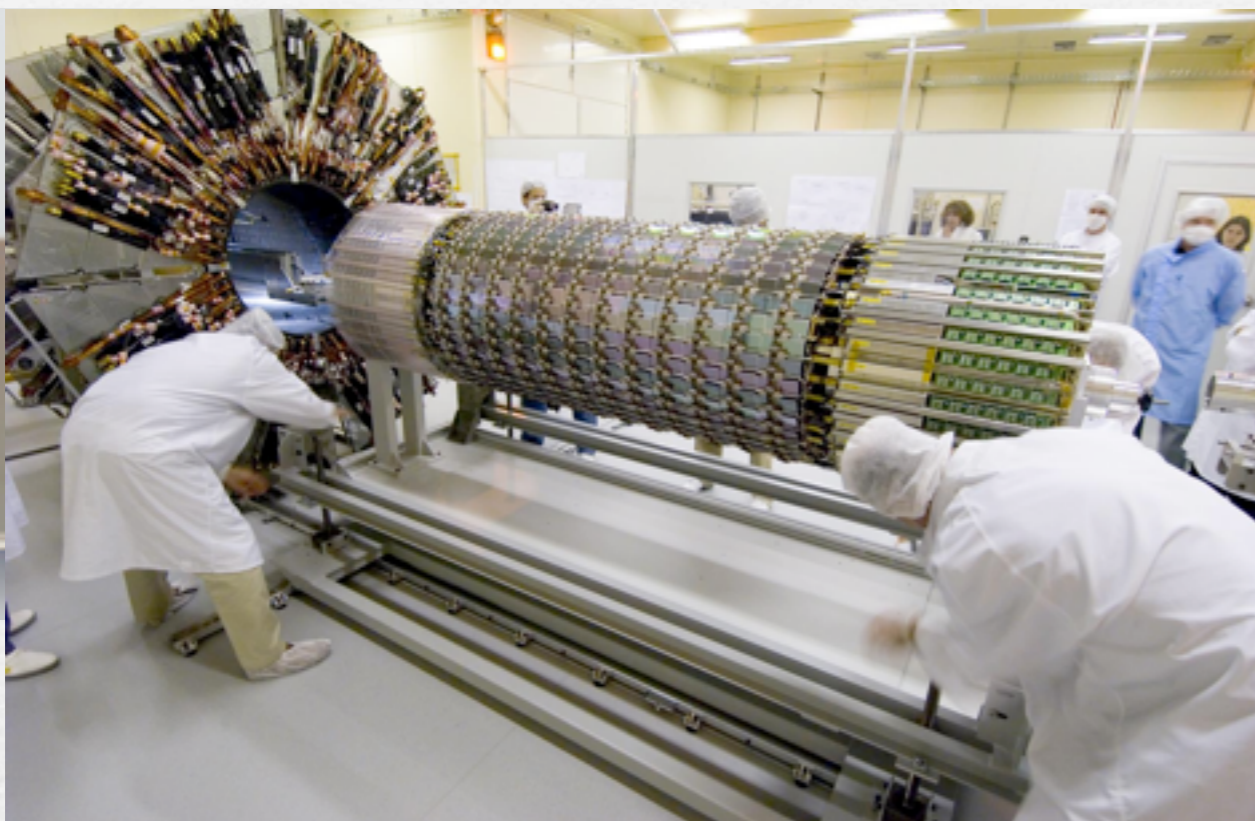
# 運動量測定 (飛跡検出器)



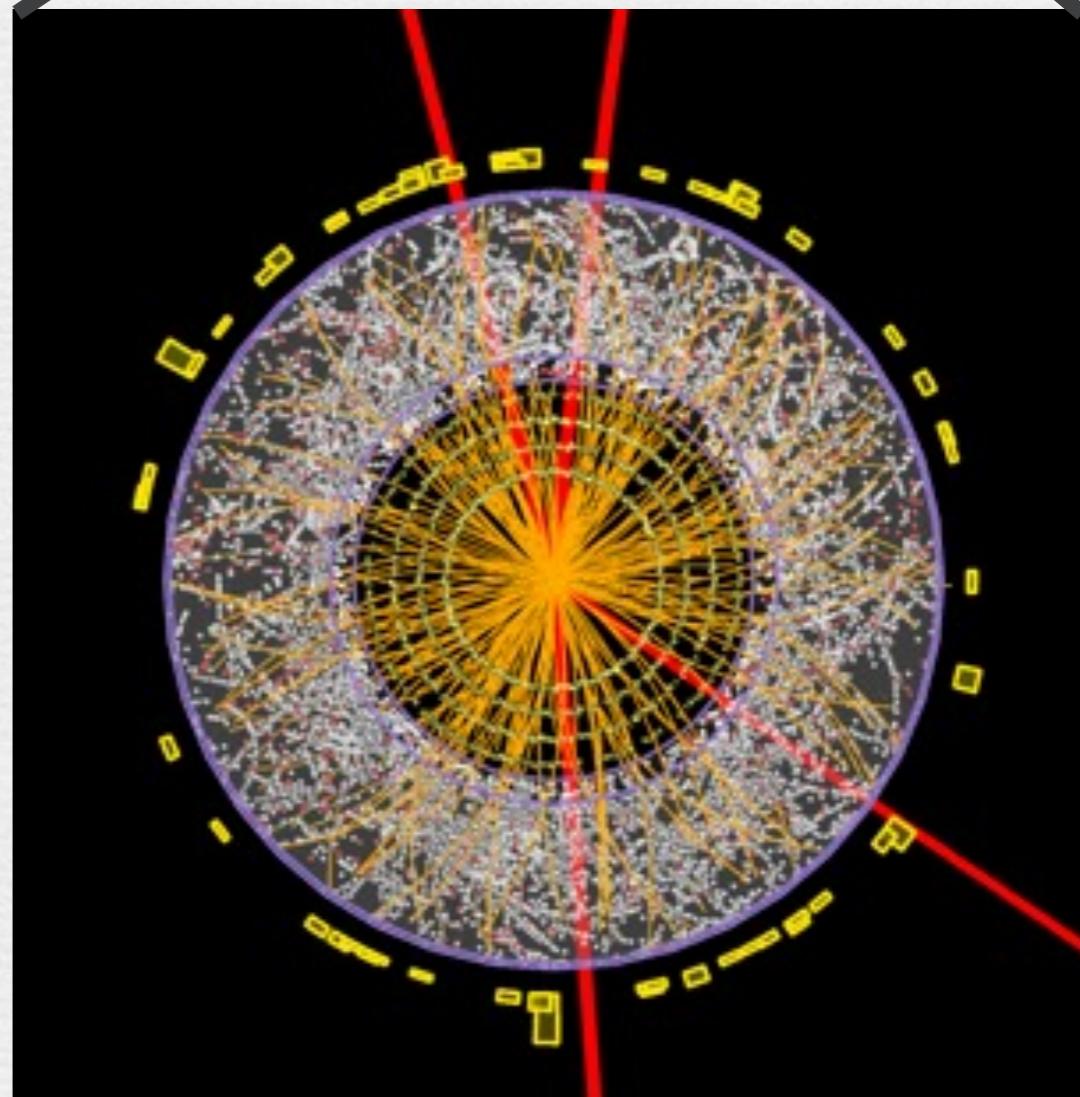
$$(\text{運動量}) = 0.3 \times (\text{磁場}) \times (\text{半径})$$



# 運動量測定 (飛跡検出器)



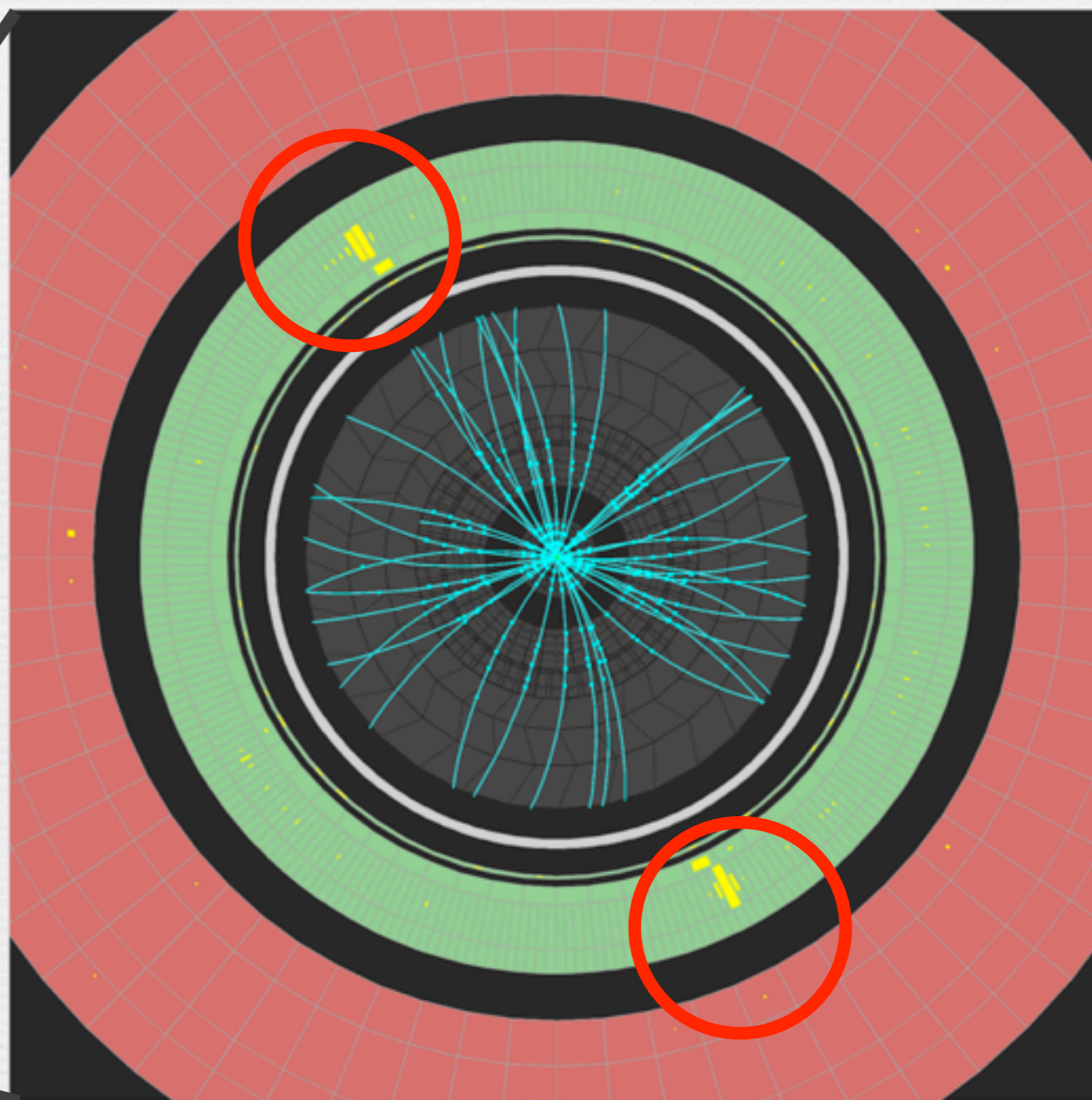
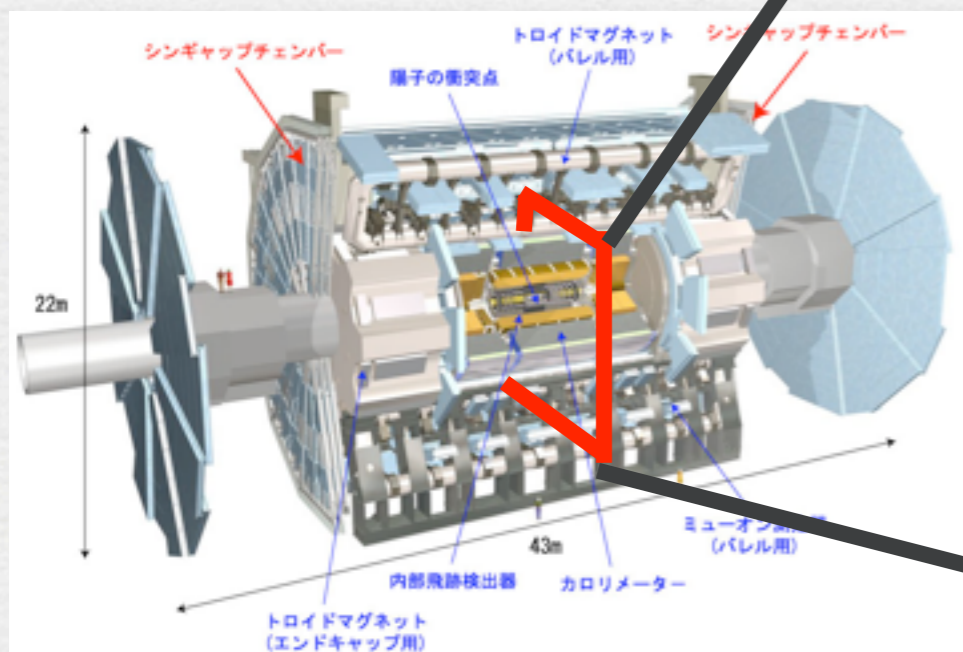
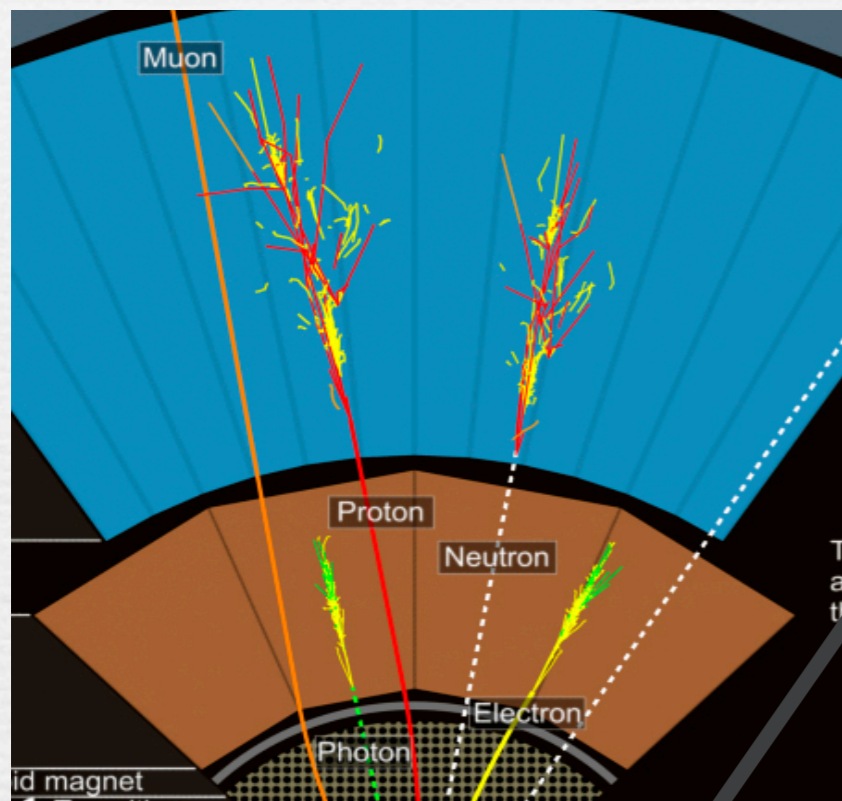
$(\text{運動量}) = 0.3 \times (\text{磁場}) \times (\text{半径})$



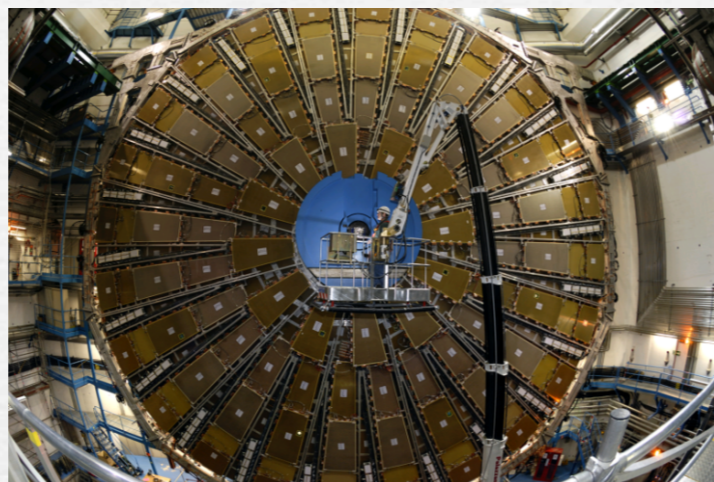
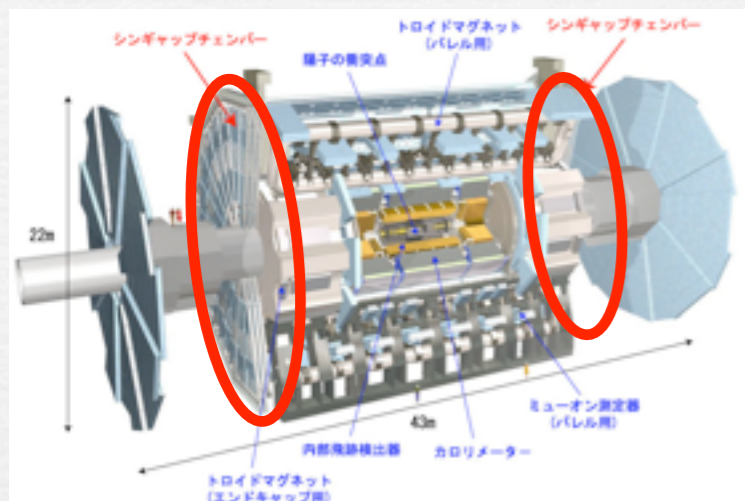


# エネルギー測定器（カロリメータ）

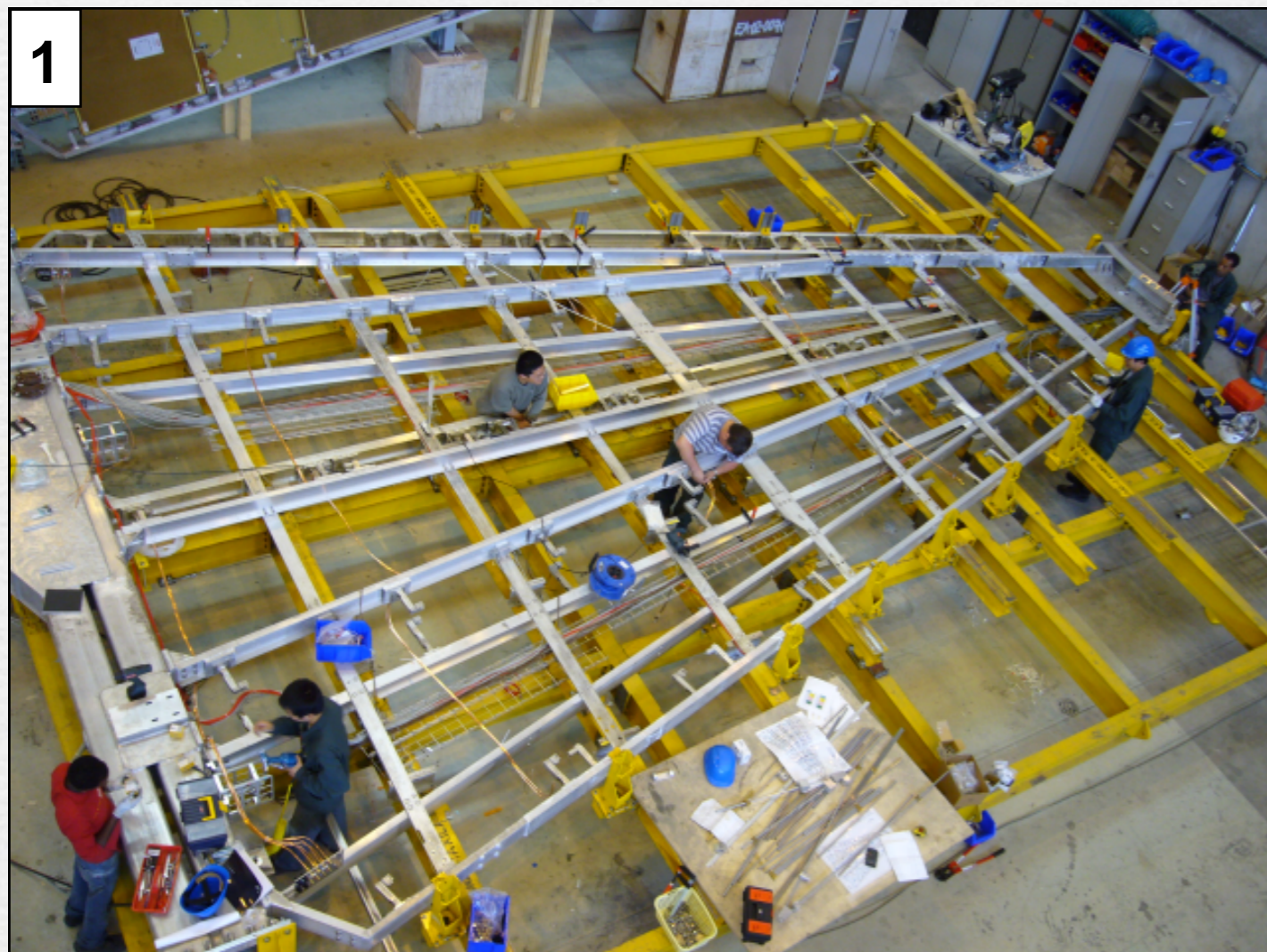
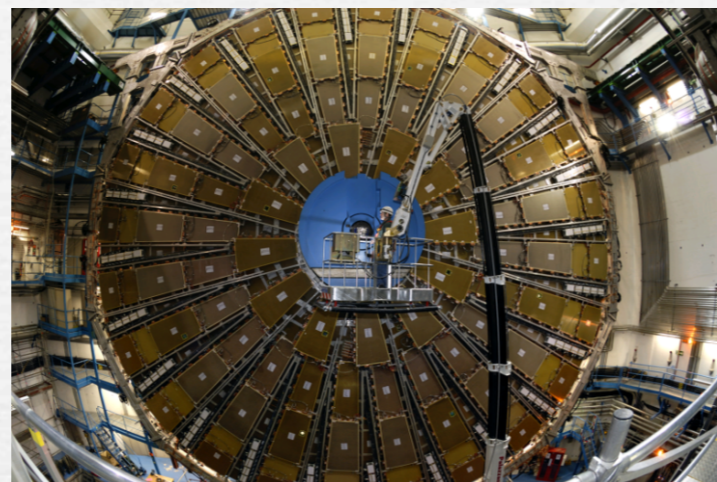
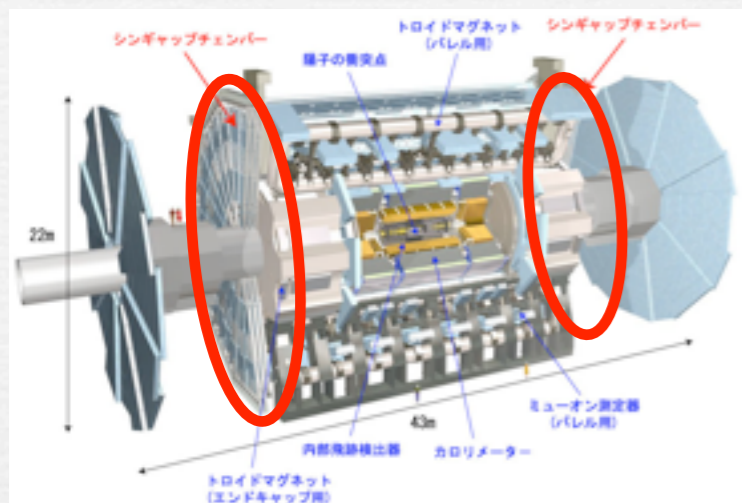
光子、電子、陽子、中性子などを物質で止める  
そのとき出る光や熱を電気信号として捉える



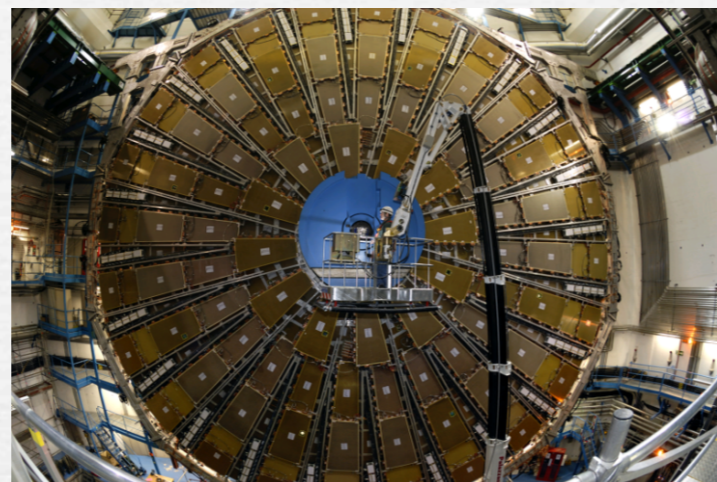
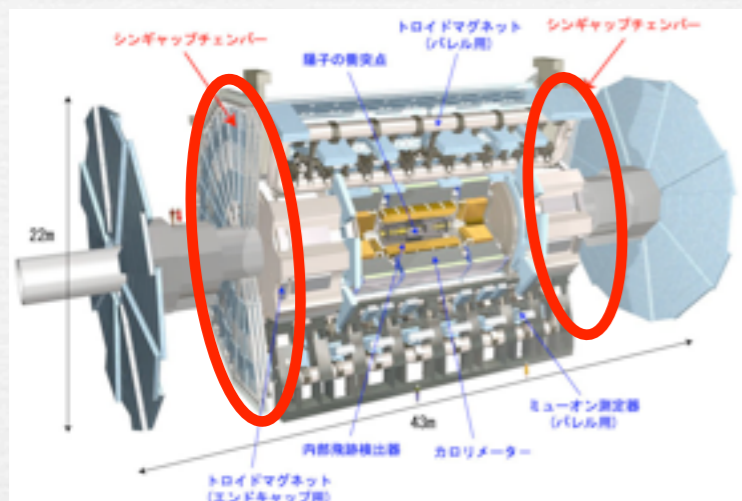
# $\mu$ 粒子検出器の組み立て



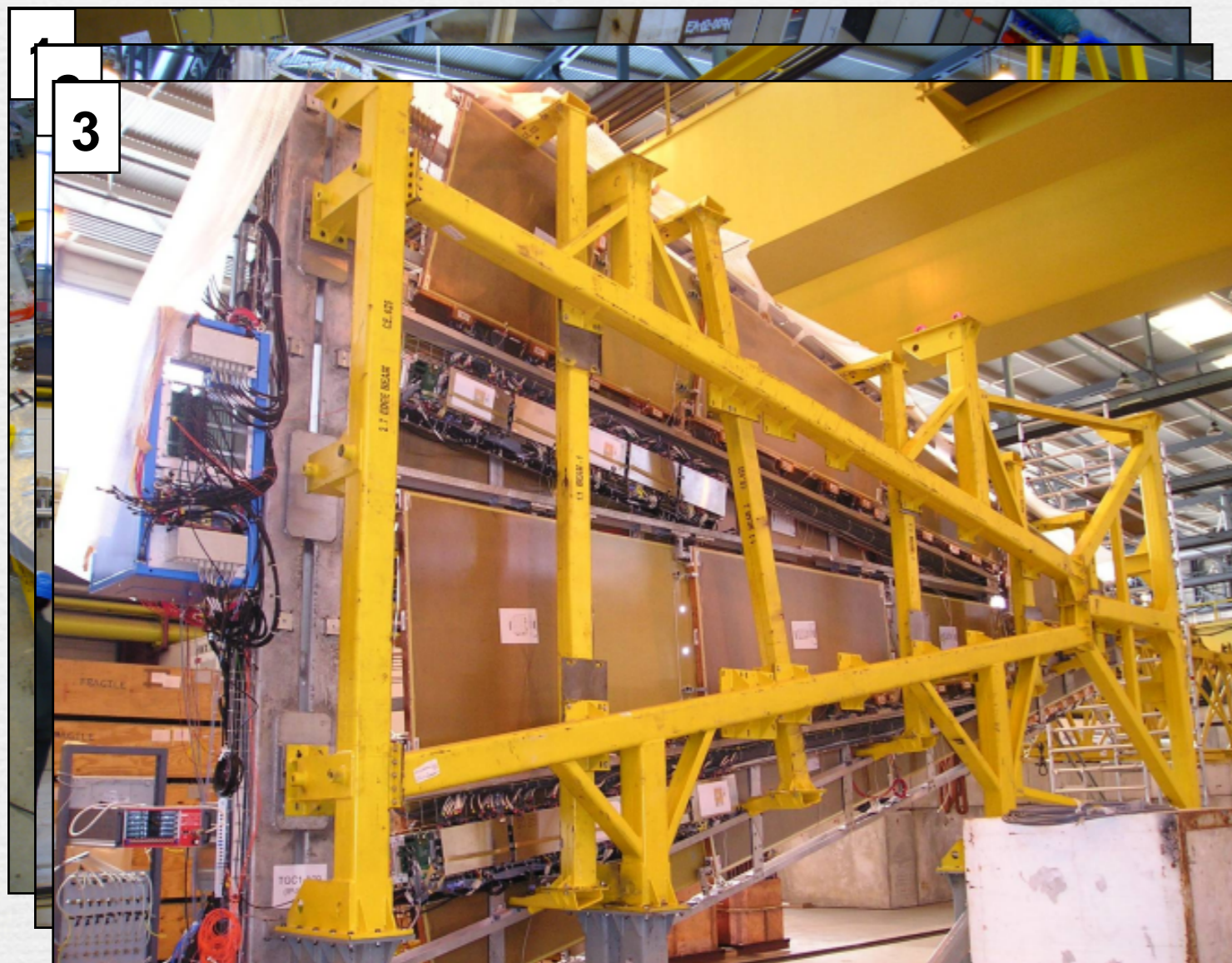
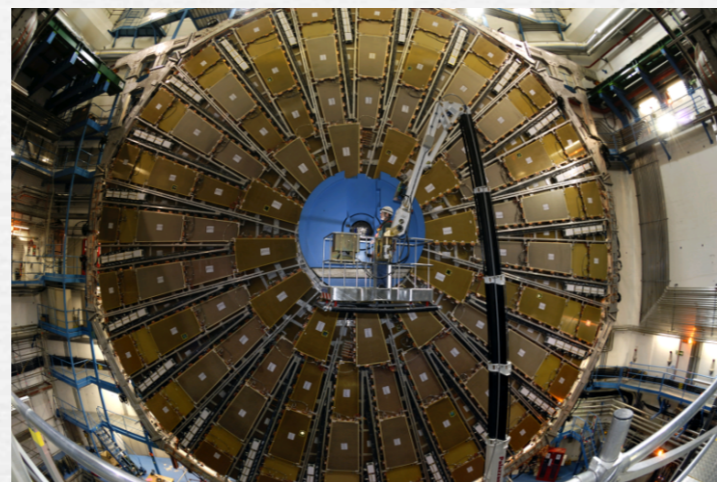
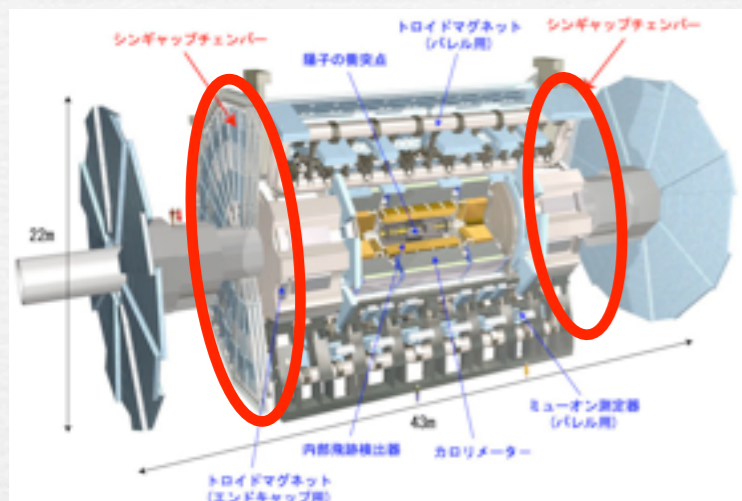
# $\mu$ 粒子検出器の組み立て



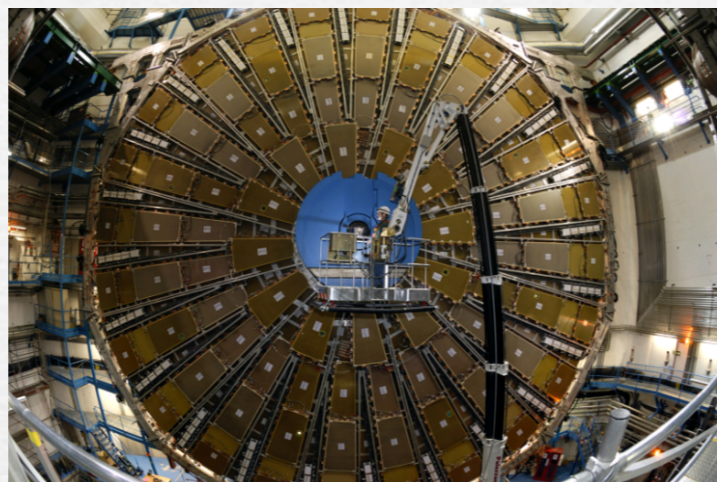
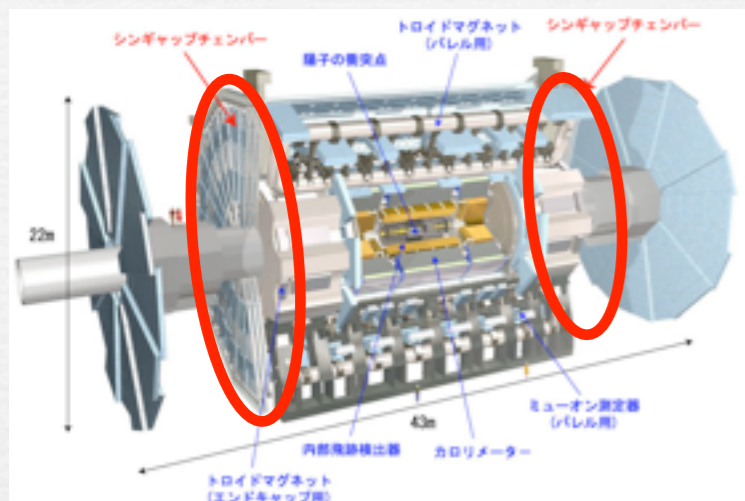
# $\mu$ 粒子検出器の組み立て



# $\mu$ 粒子検出器の組み立て



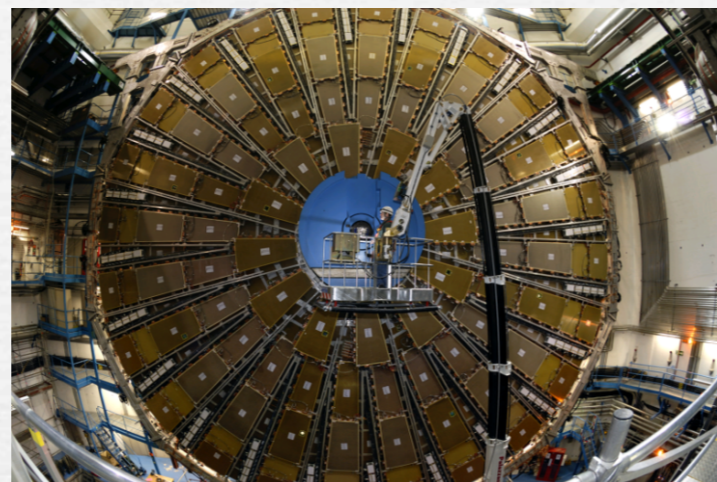
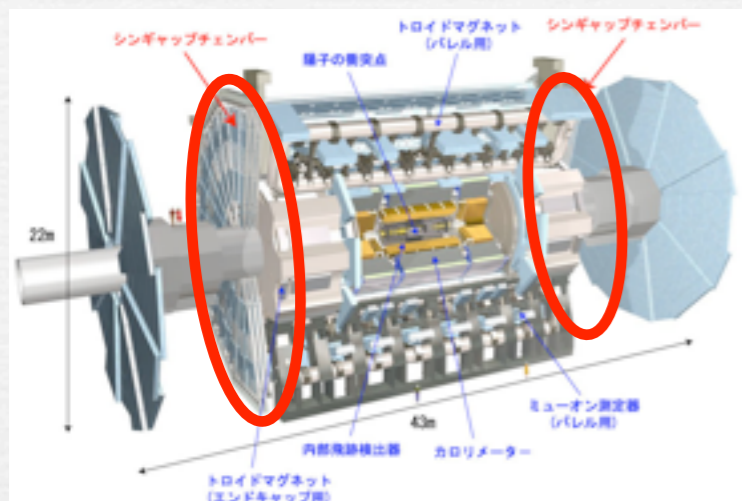
# $\mu$ 粒子検出器の組み立て



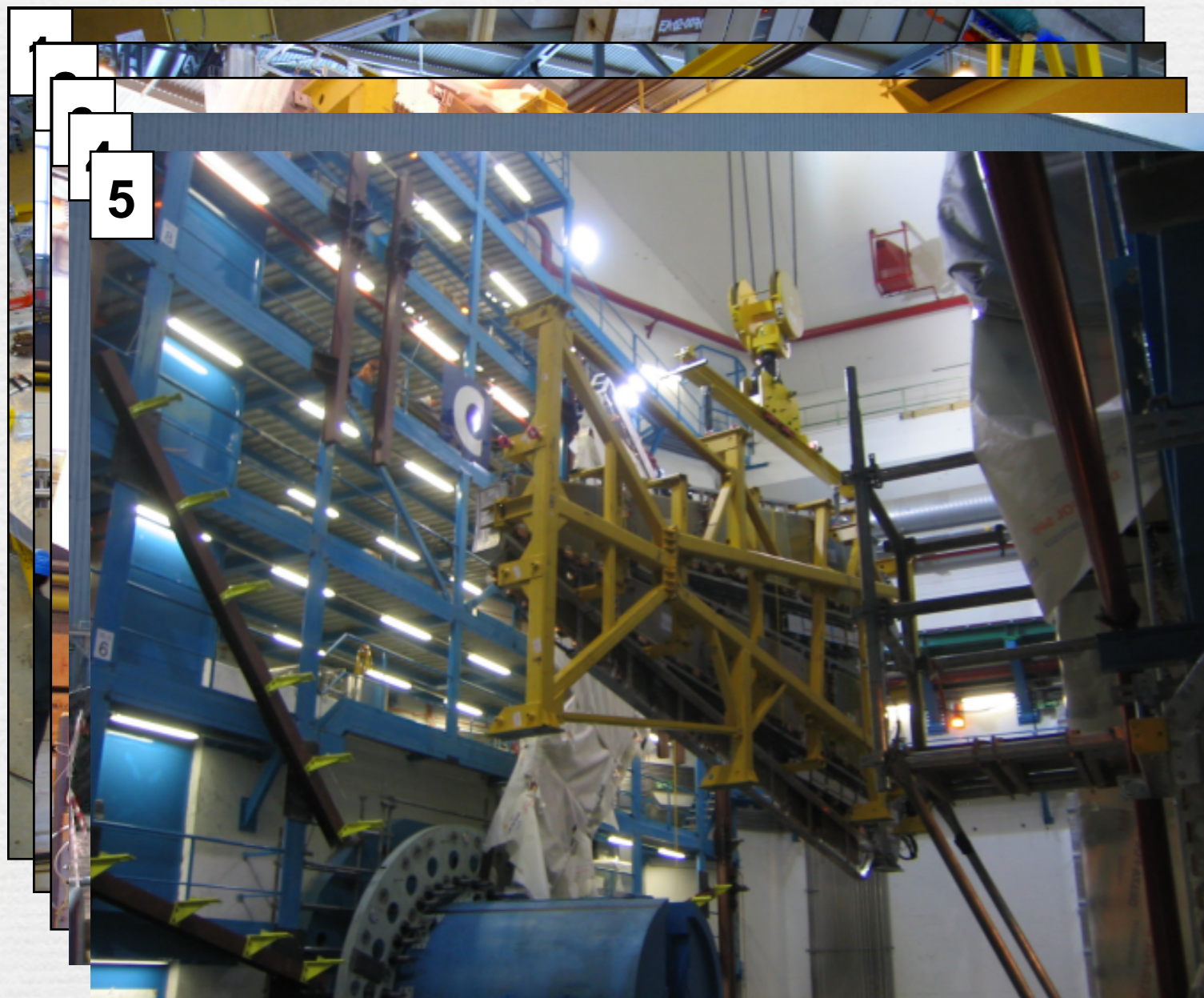
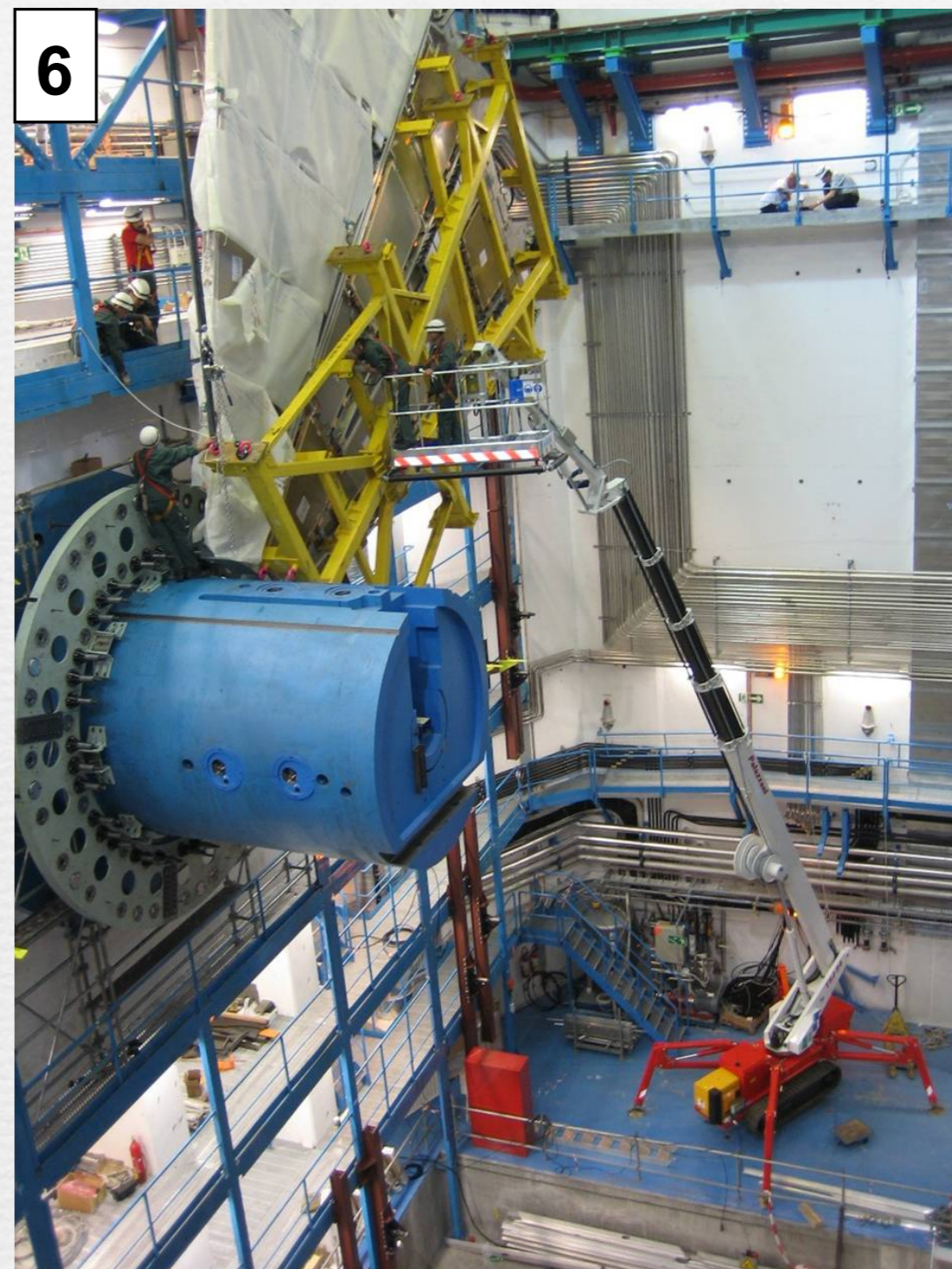
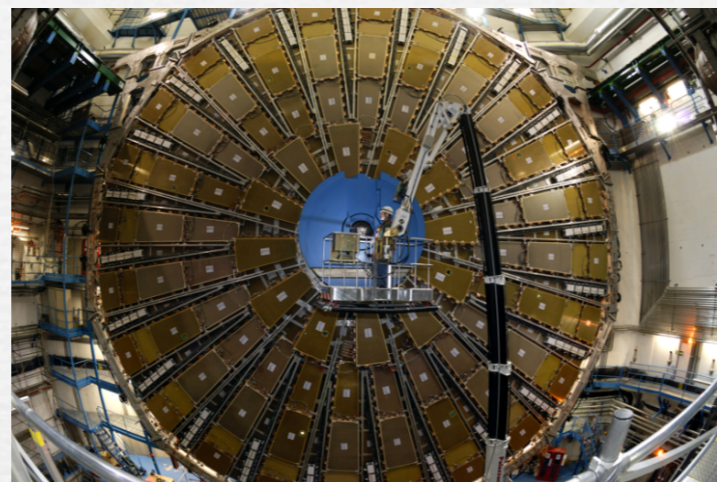
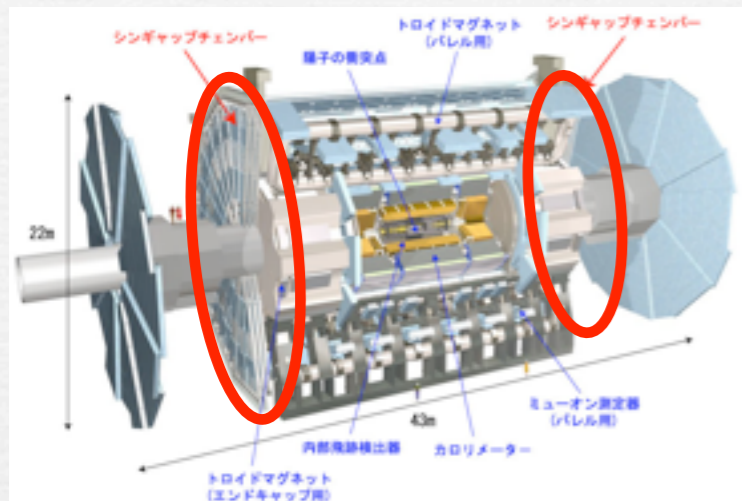
4



# $\mu$ 粒子検出器の組み立て

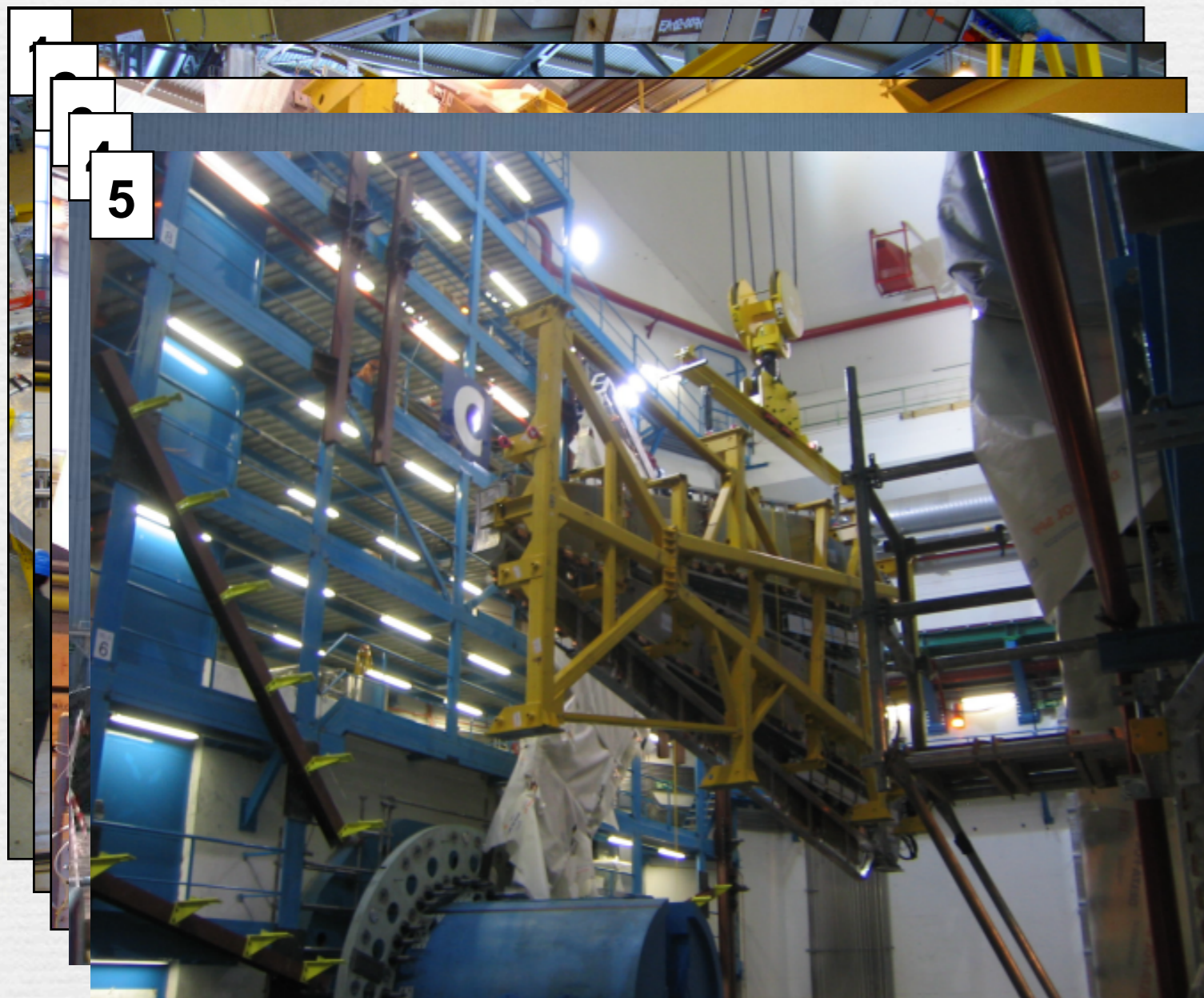
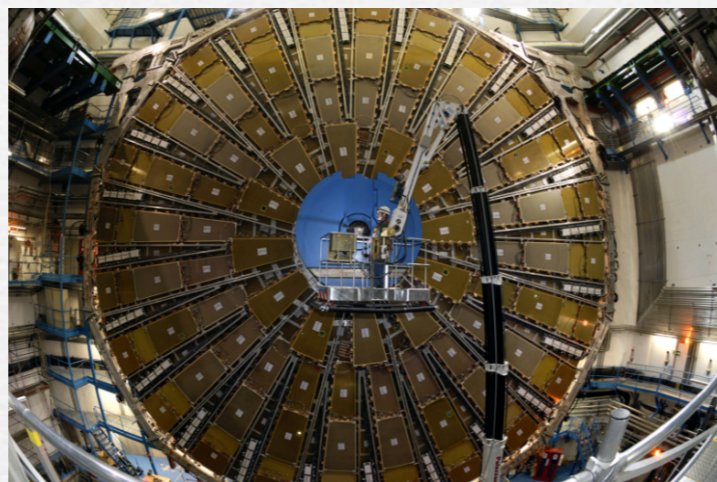
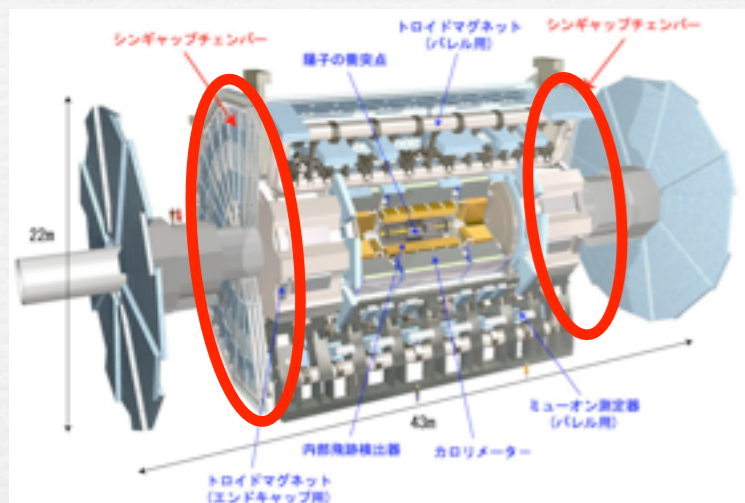


# $\mu$ 粒子検出器の組み立て





# $\mu$ 粒子検出器の組み立て



# ヒッグス粒子の見つけ方

# 陽子・陽子衝突

# 陽子・陽子衝突

# 陽子・陽子衝突

ボール同士の衝突：次の反応が予測可能

# 陽子・陽子衝突

ボール同士の衝突：次の反応が予測可能



陽子同士の衝突：次の反応は予測不可能  
反応の起こる確率は解る

# 陽子・陽子衝突

| 反応                                     | 反応頻度     |
|----------------------------------------|----------|
| LHC加速器で起こる任意の反応<br>(ほとんど、軽いクォーク、グルーオン) | 毎秒 5千万 回 |
| ヒッグス粒子生成                               | 100秒間に1回 |



陽子同士の衝突：次の反応は予測不可能  
反応の起こる確率は解る

# 陽子・陽子衝突

| 反応                                     | 反応頻度     |
|----------------------------------------|----------|
| LHC加速器で起こる任意の反応<br>(ほとんど、軽いクォーク、グルーオン) | 毎秒 5千万 回 |
| ヒッグス粒子生成                               | 100秒間に1回 |

ヒッグス粒子は、  
5,000,000,000(五十億)回に1回程度しか生成しない！

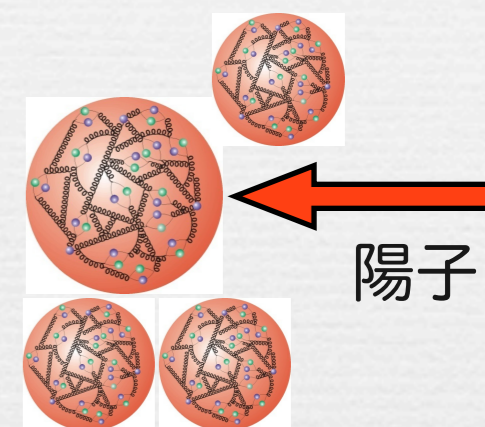
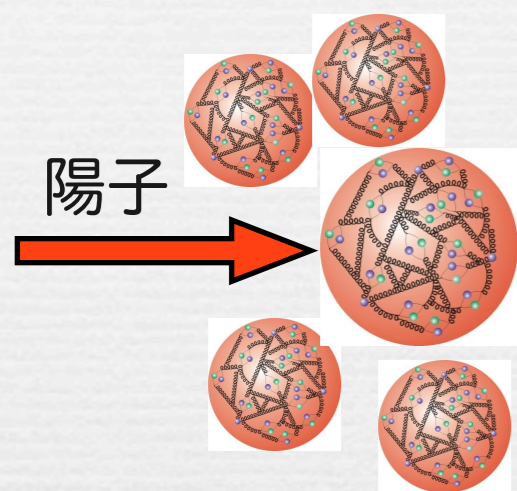


陽子同士の衝突：次の反応は予測不可能  
反応の起こる確率は解る

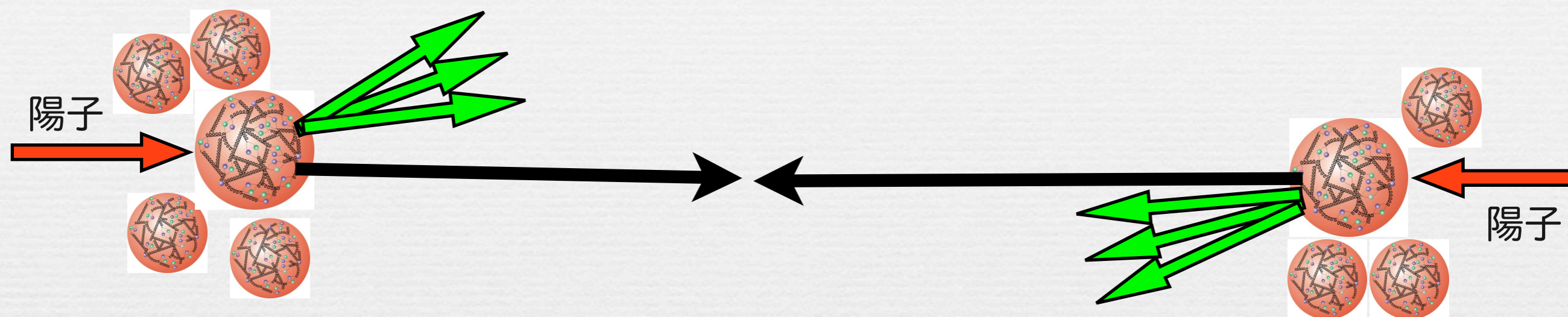


# 陽子・陽子衝突

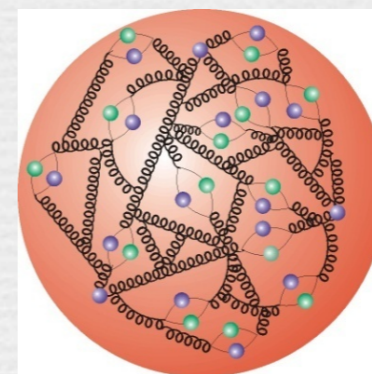
# 陽子・陽子衝突



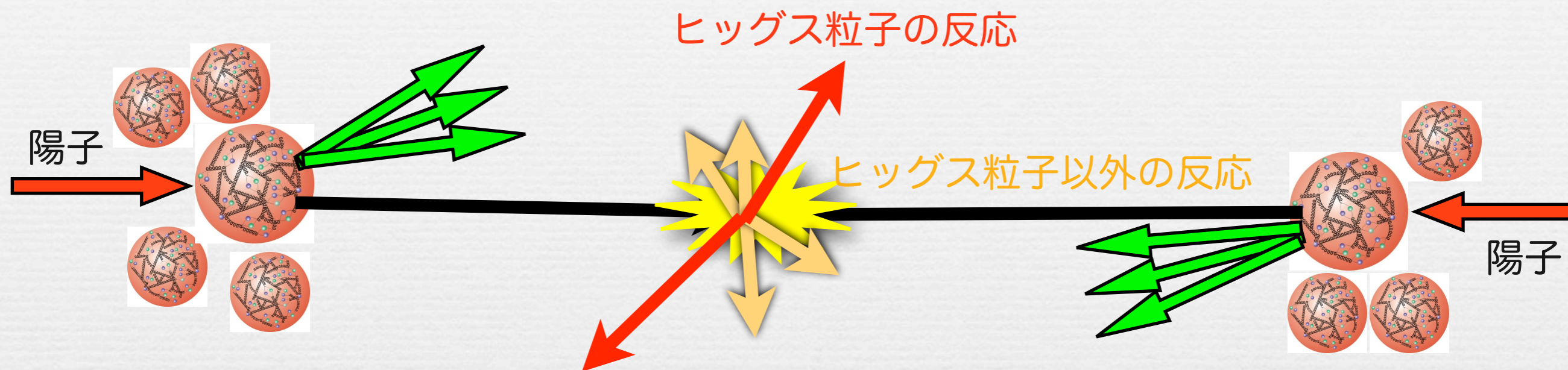
# 陽子・陽子衝突



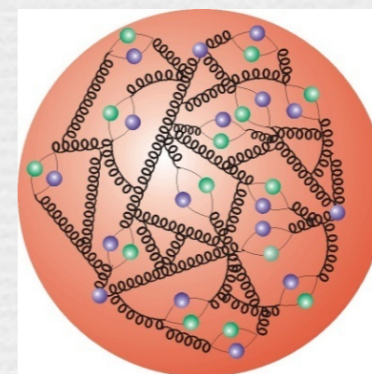
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン  
一部だけが衝突による反応に関与



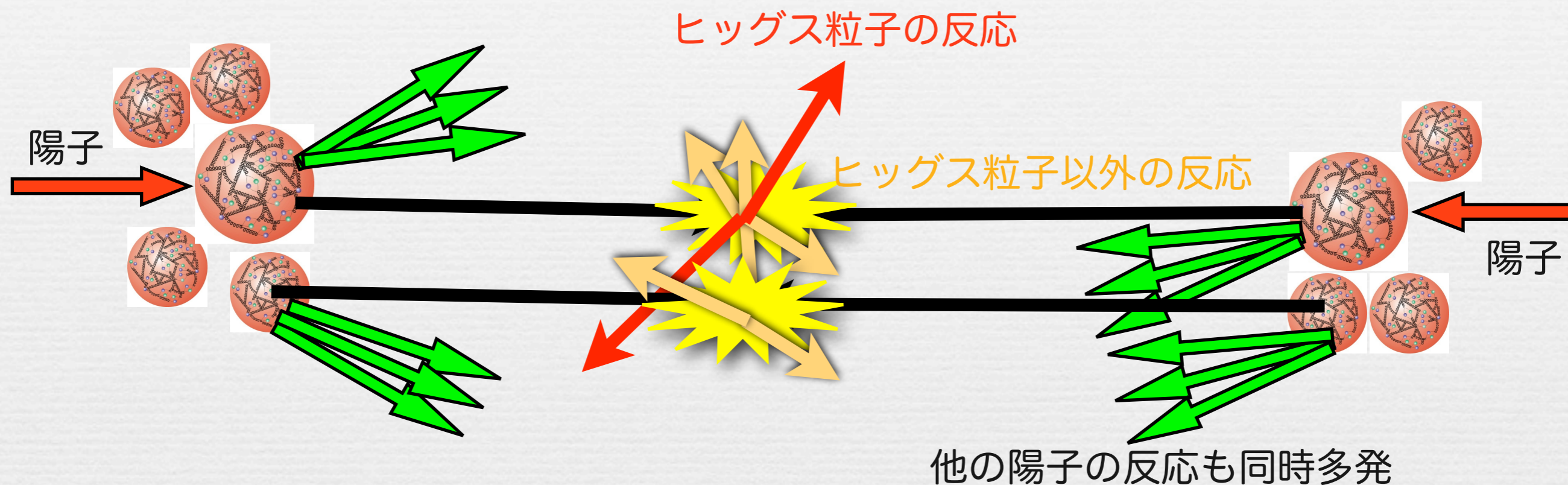
# 陽子・陽子衝突



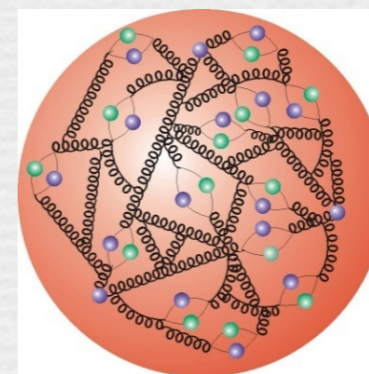
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン  
一部だけが衝突による反応に関与



# 陽子・陽子衝突



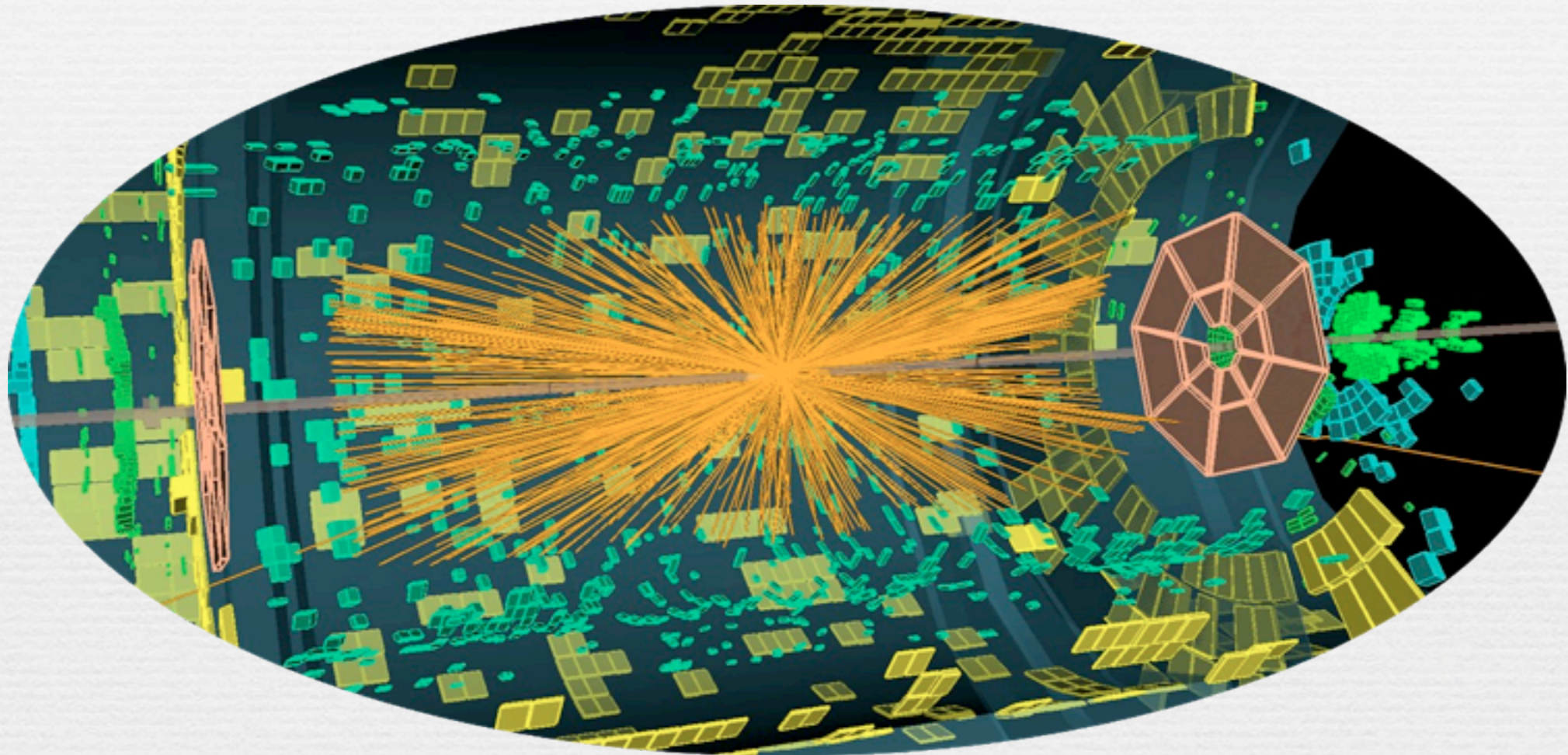
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン  
一部だけが衝突による反応に関与



# 実際の陽子陽子衝突反応

ヒッグス粒子があってもなくても

全ての反応は、無数の安定粒子になる



ヒッグス粒子の性質(何に化けるか?など)を知っておく

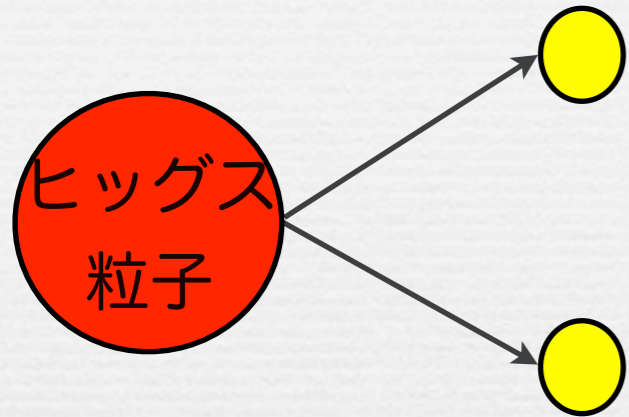
ヒッグス粒子を含む事象(50億分の1)を選ぶ

ヒッグス粒子から化けた安定粒子を選ぶ

安定粒子を使ってヒッグス粒子を復元する

# ヒッグス粒子の性質

ヒッグス粒子は、質量の大きな素粒子ほど反応しやすい



$t\bar{t}$ ,  $ZZ$ ,  $W^+W^-$ ,  $b\bar{b}$ ,  $\tau^+\tau^-$ , ... 光子 光子

化ける確率はわかるが、何に化けるかは予想できない

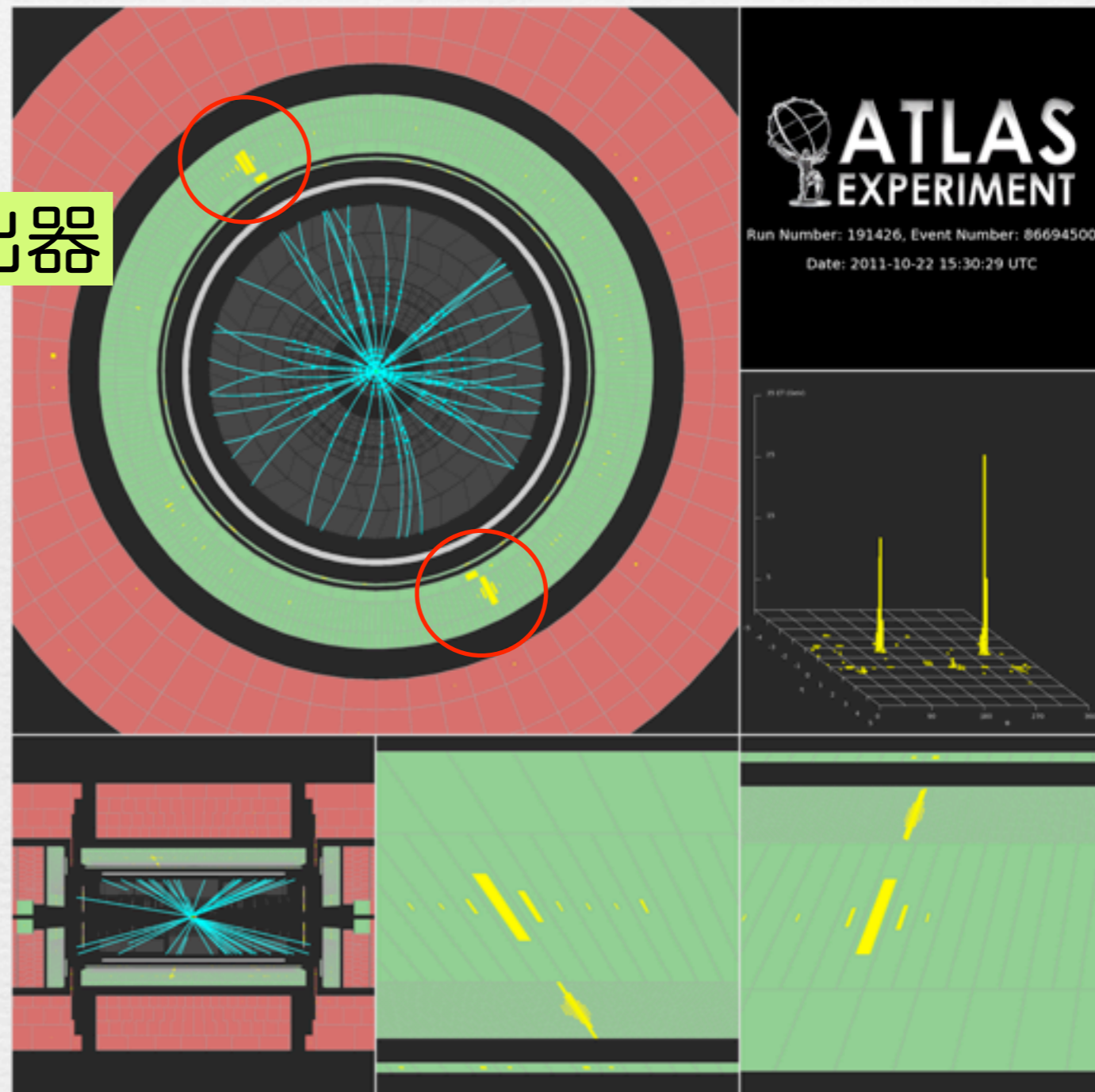
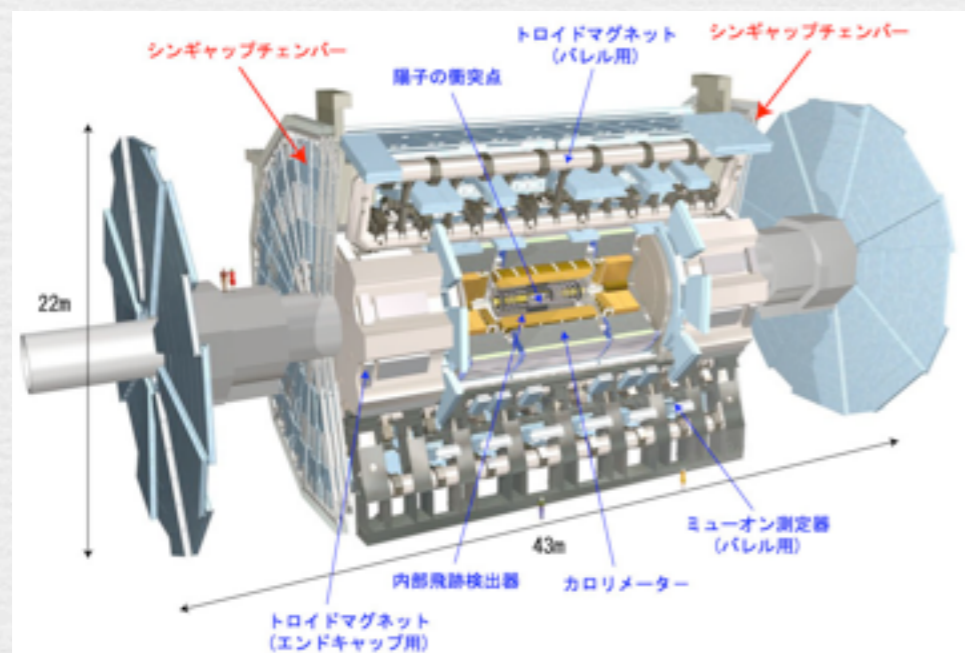
|                              |       |
|------------------------------|-------|
| $H \rightarrow ZZ$           | 2.9%  |
| $H \rightarrow W^+W^-$       | 23%   |
| $H \rightarrow b\bar{b}$     | 56%   |
| $H \rightarrow \tau^+\tau^-$ | 6.2%  |
| $H \rightarrow \text{光子 光子}$ | 0.23% |

ヒッグス粒子の質量が126GeV位の時

# ヒッグス粒子らしきイベントを集める

陽子 + 陽子 → ヒッグス粒子 → 光子 光子を探す  
 → 2本の光子のあるイベントを沢山集める

## 電子・光子検出器



偽物：

陽子 + 陽子 → 光子 光子

光のエネルギー、運動量を検出器で測定



# 質量の復元

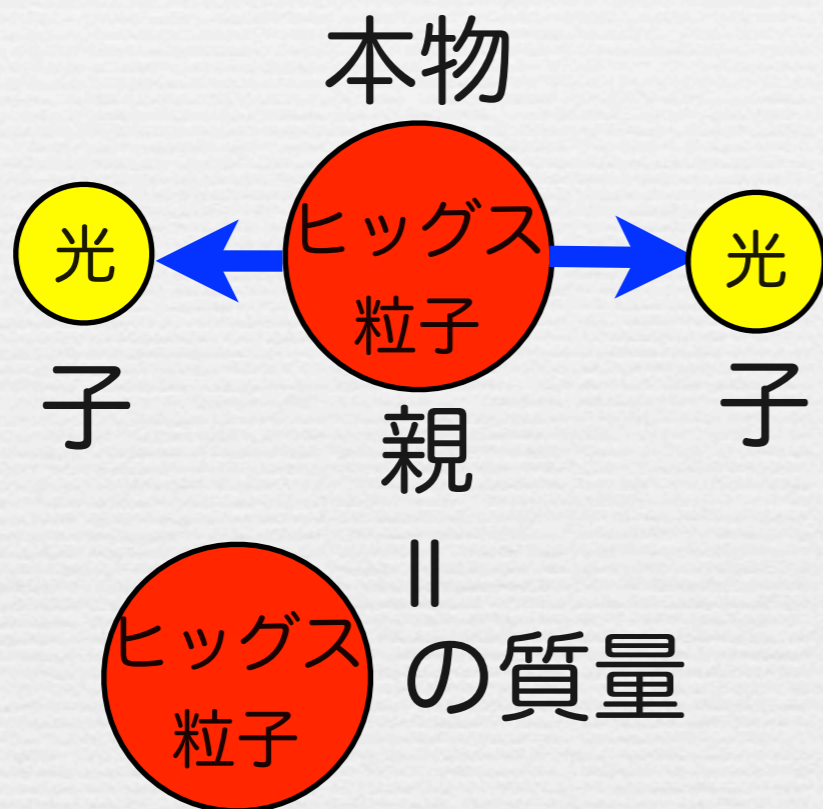
親と子の粒子の関係

$$(\text{親の質量})^2 = (\text{子のエネルギー和})^2 - (\text{子の運動量和})^2$$

# 質量の復元

親と子の粒子の関係

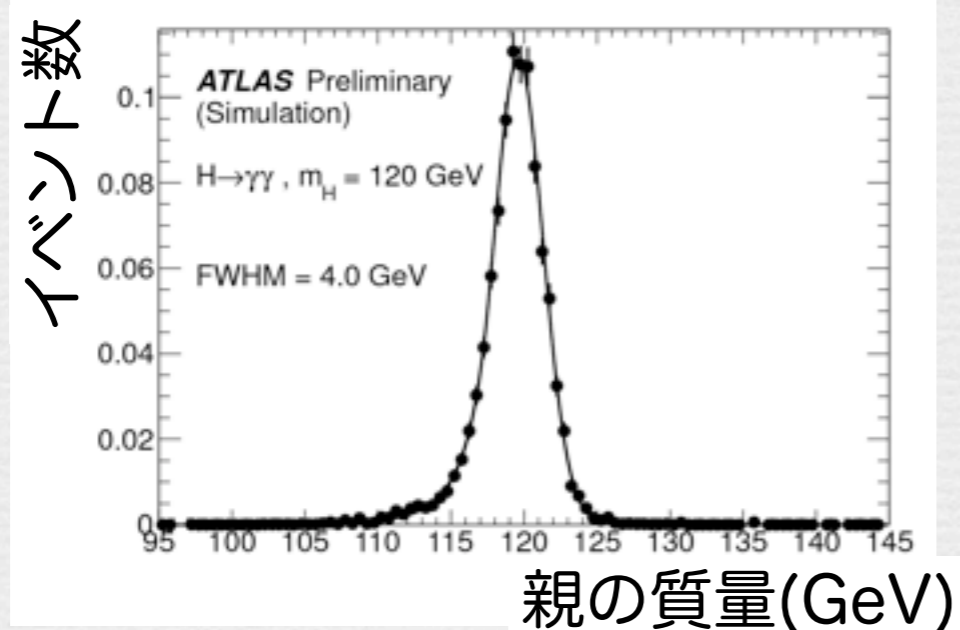
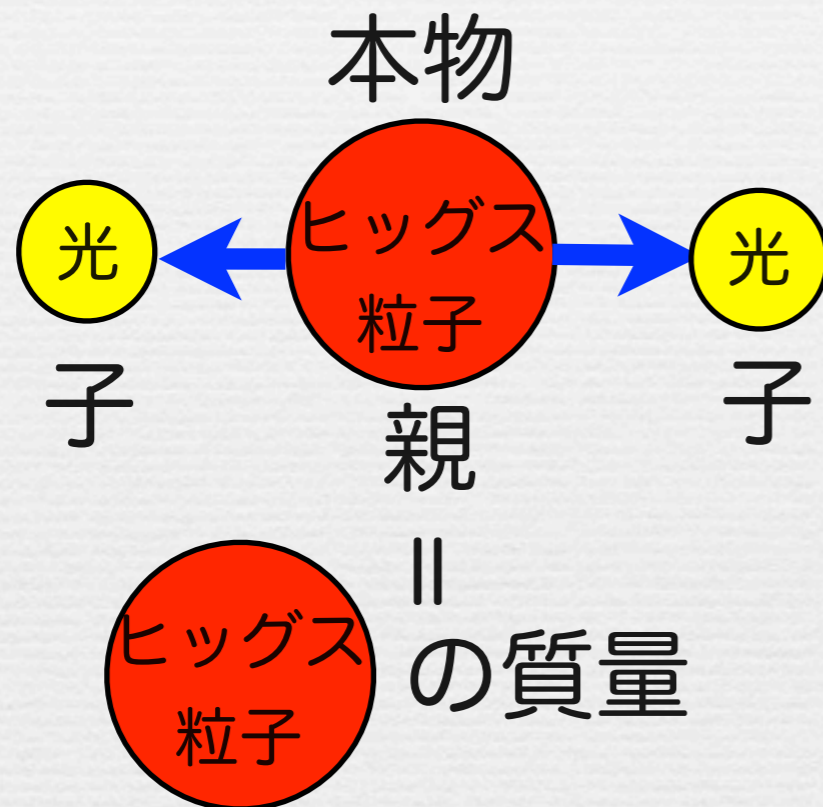
$$(親の質量)^2 = (子のエネルギー和)^2 - (子の運動量和)^2$$



# 質量の復元

親と子の粒子の関係

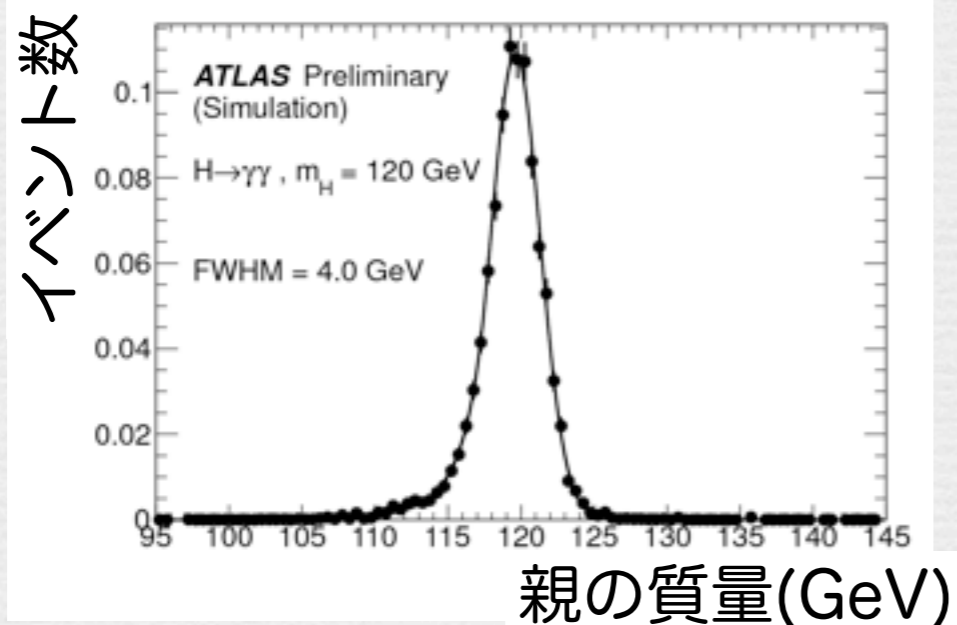
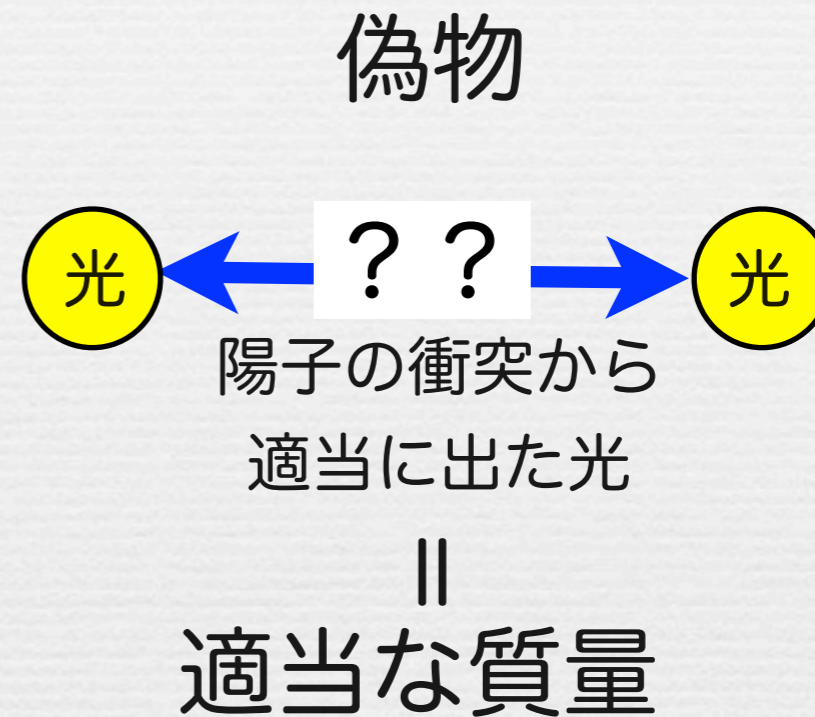
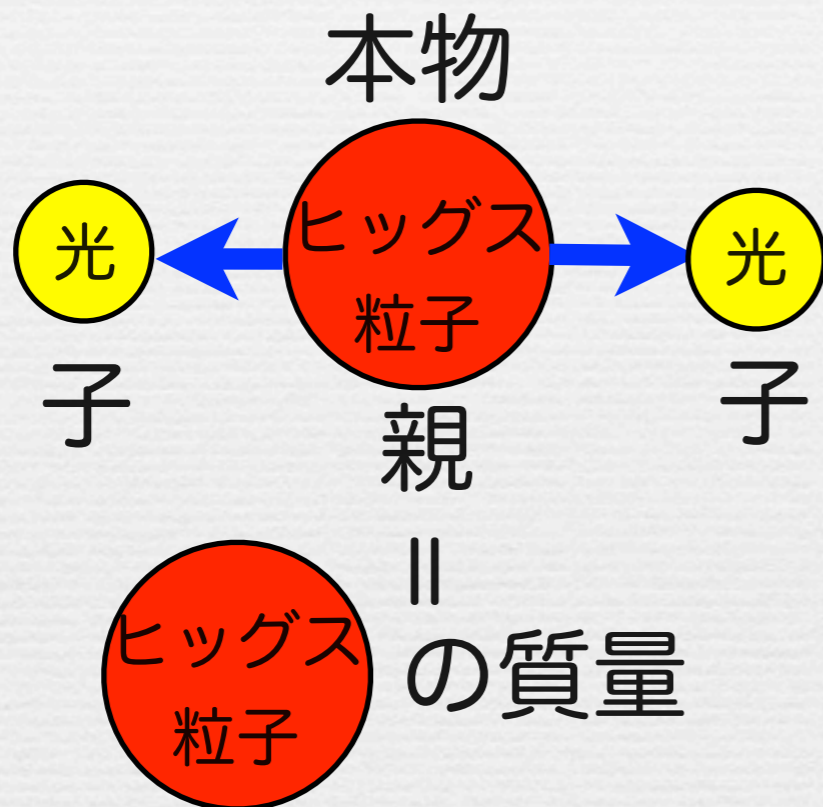
$$(親の質量)^2 = (子のエネルギー和)^2 - (子の運動量和)^2$$



# 質量の復元

親と子の粒子の関係

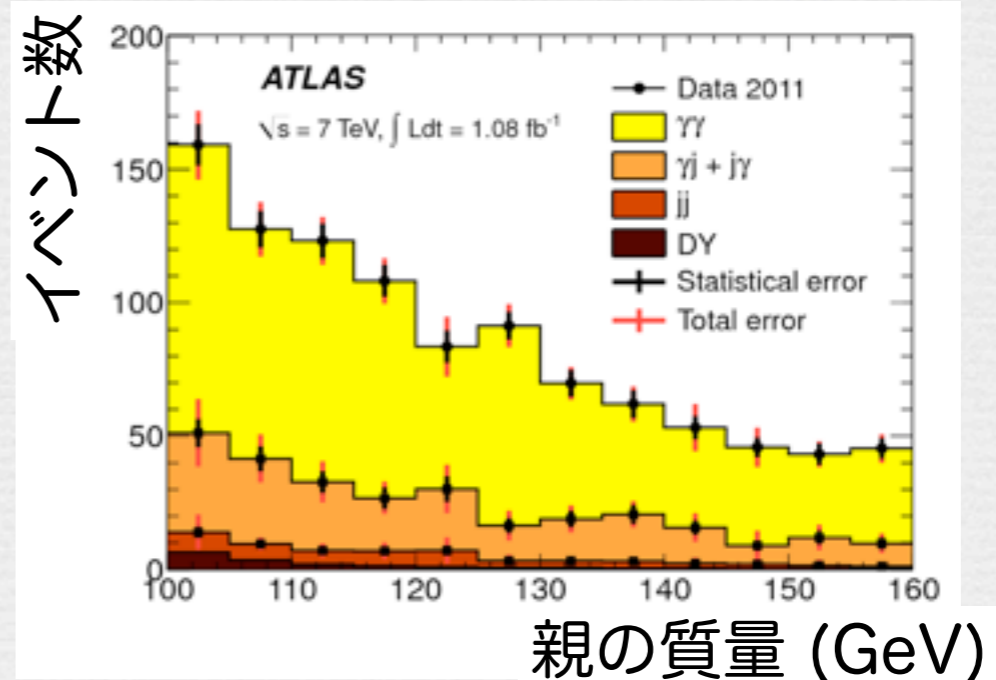
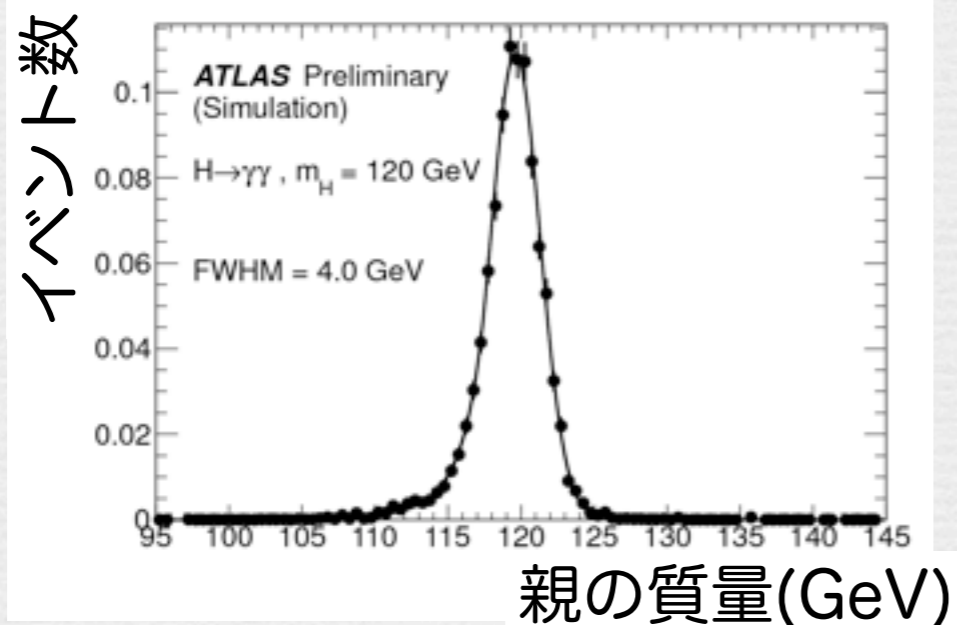
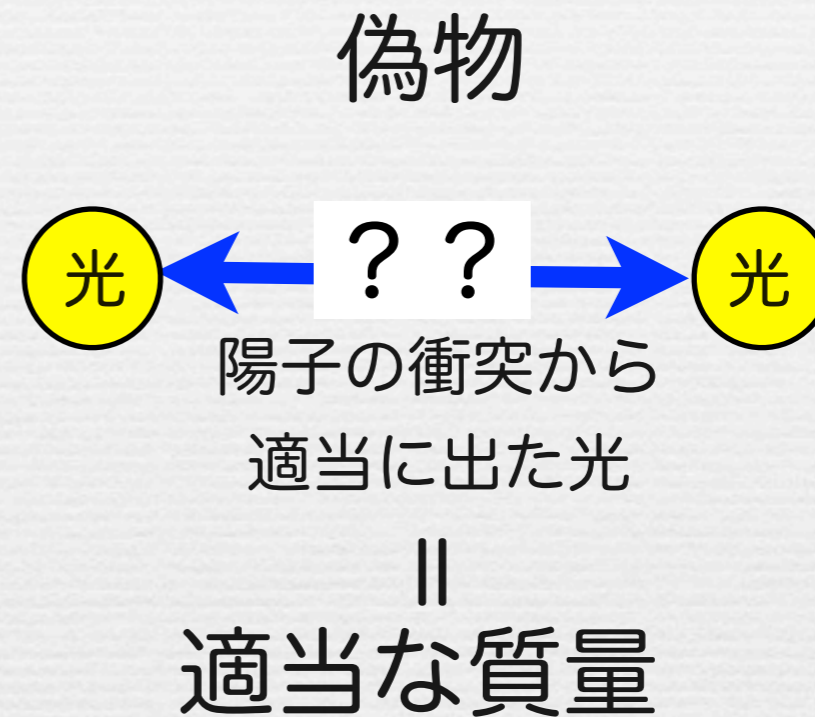
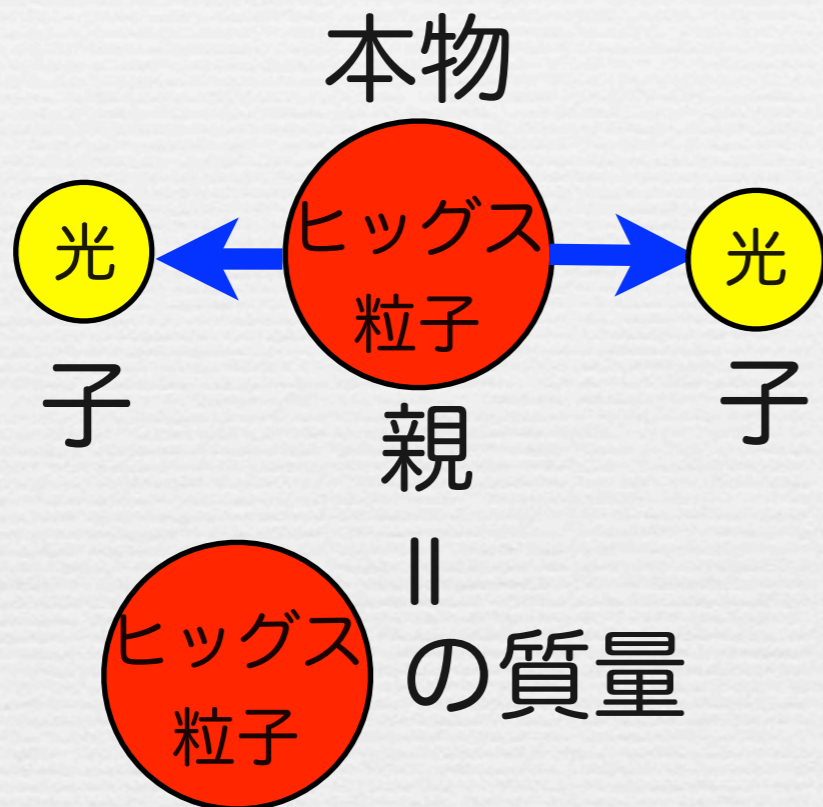
$$(親の質量)^2 = (子のエネルギー和)^2 - (子の運動量和)^2$$



# 質量の復元

親と子の粒子の関係

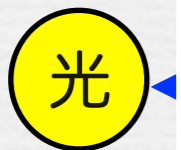
$$(親の質量)^2 = (子のエネルギー和)^2 - (子の運動量和)^2$$



# 質量の復元

親と子の粒

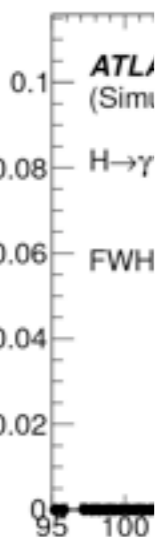
(親の質量)



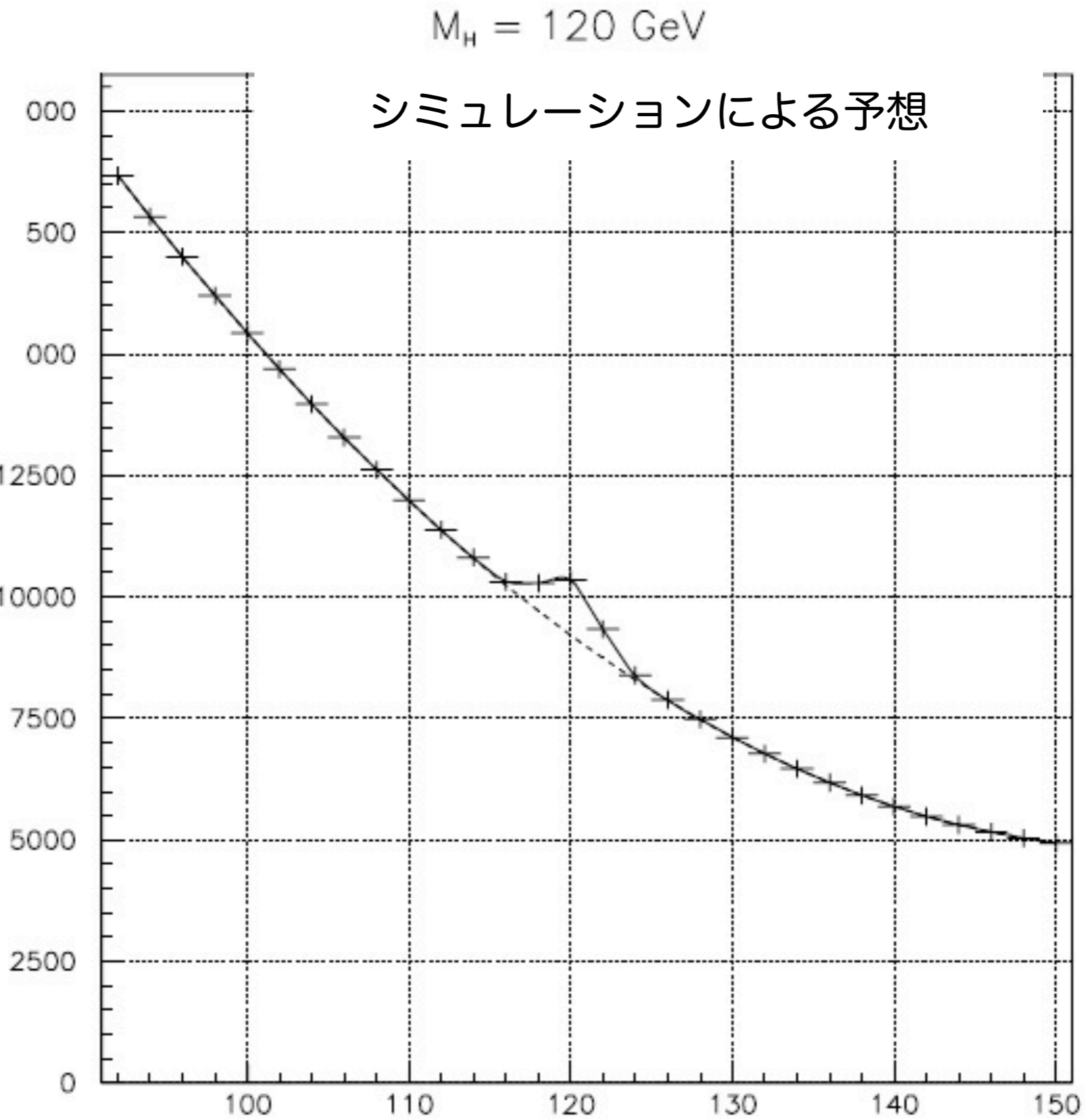
子



イベント数



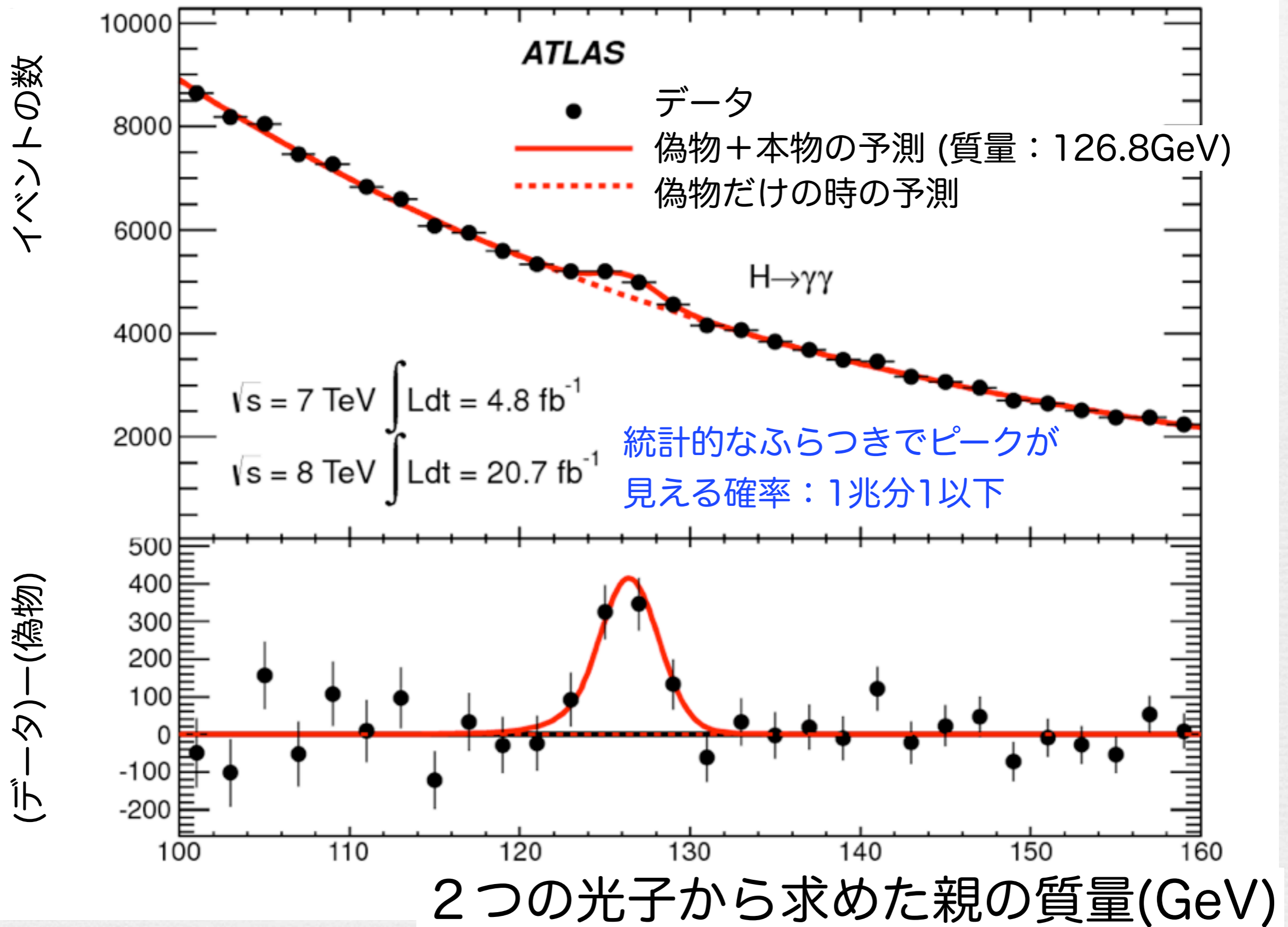
イベント数



和)<sup>2</sup>

親の質量 (GeV) (eV)

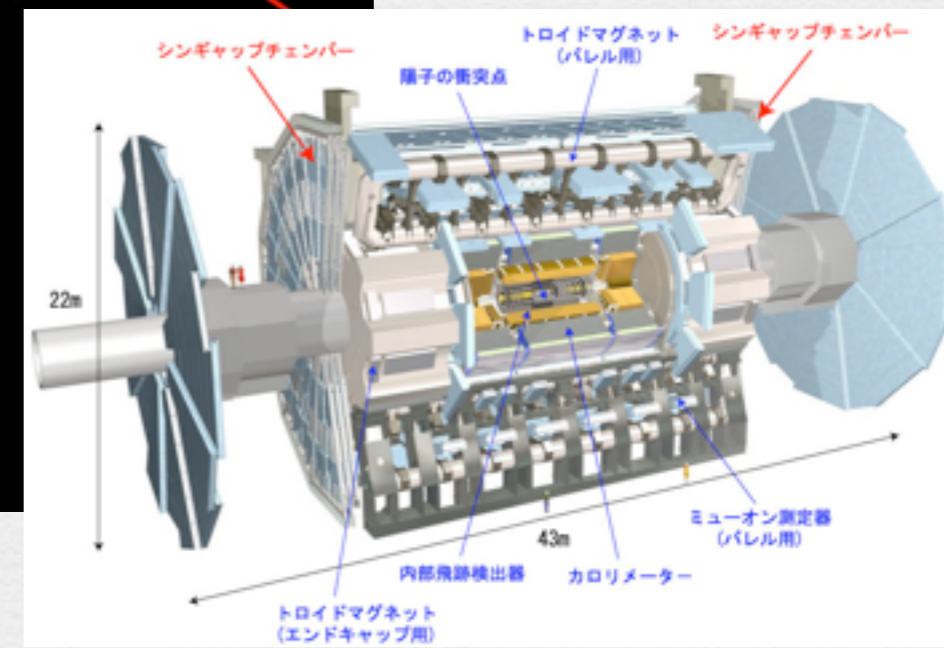
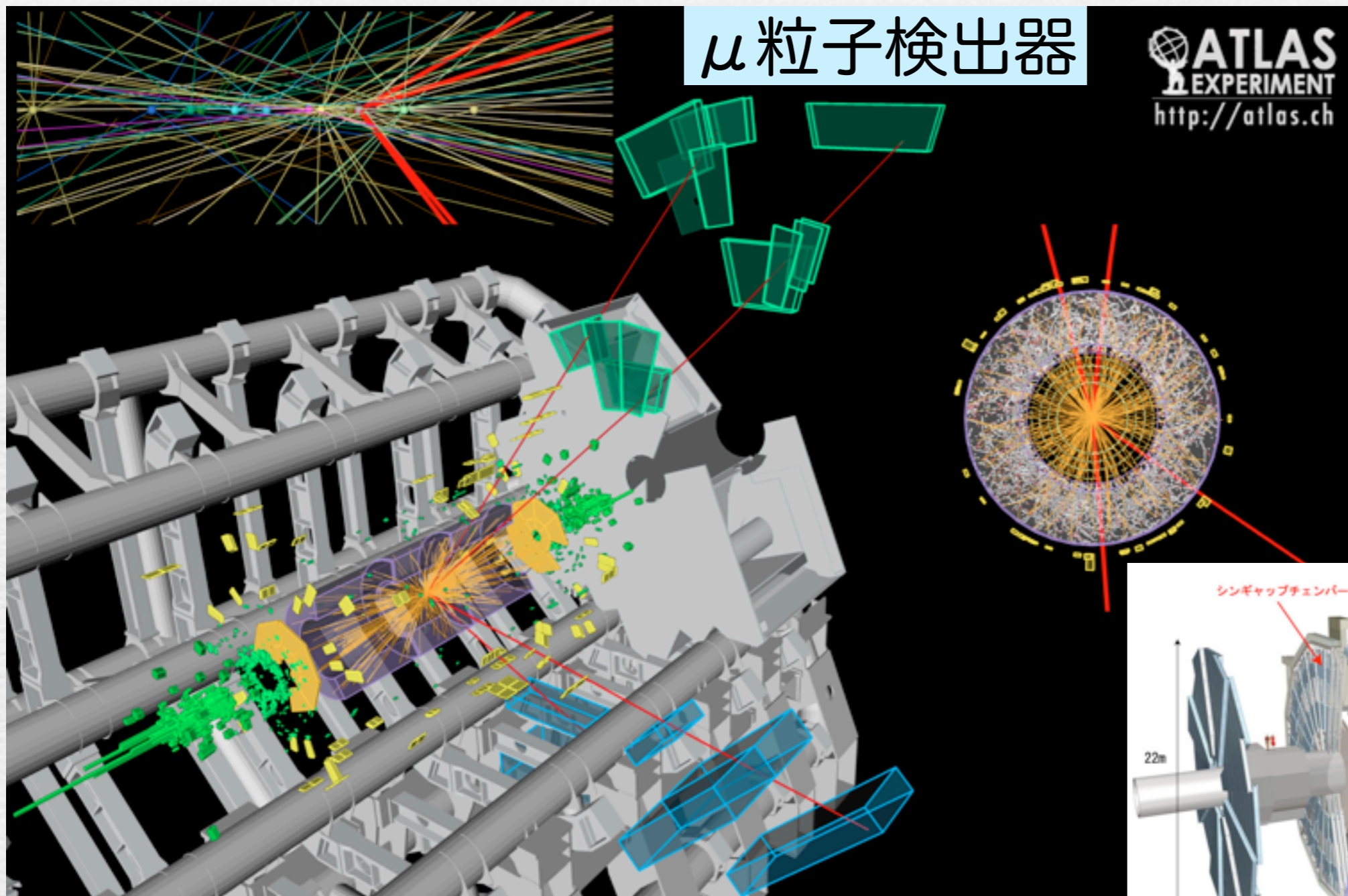
# 実際のデータ(H $\rightarrow$ 光子光子)



陽子 + 陽子  $\rightarrow$  H  $\rightarrow$  ZZ

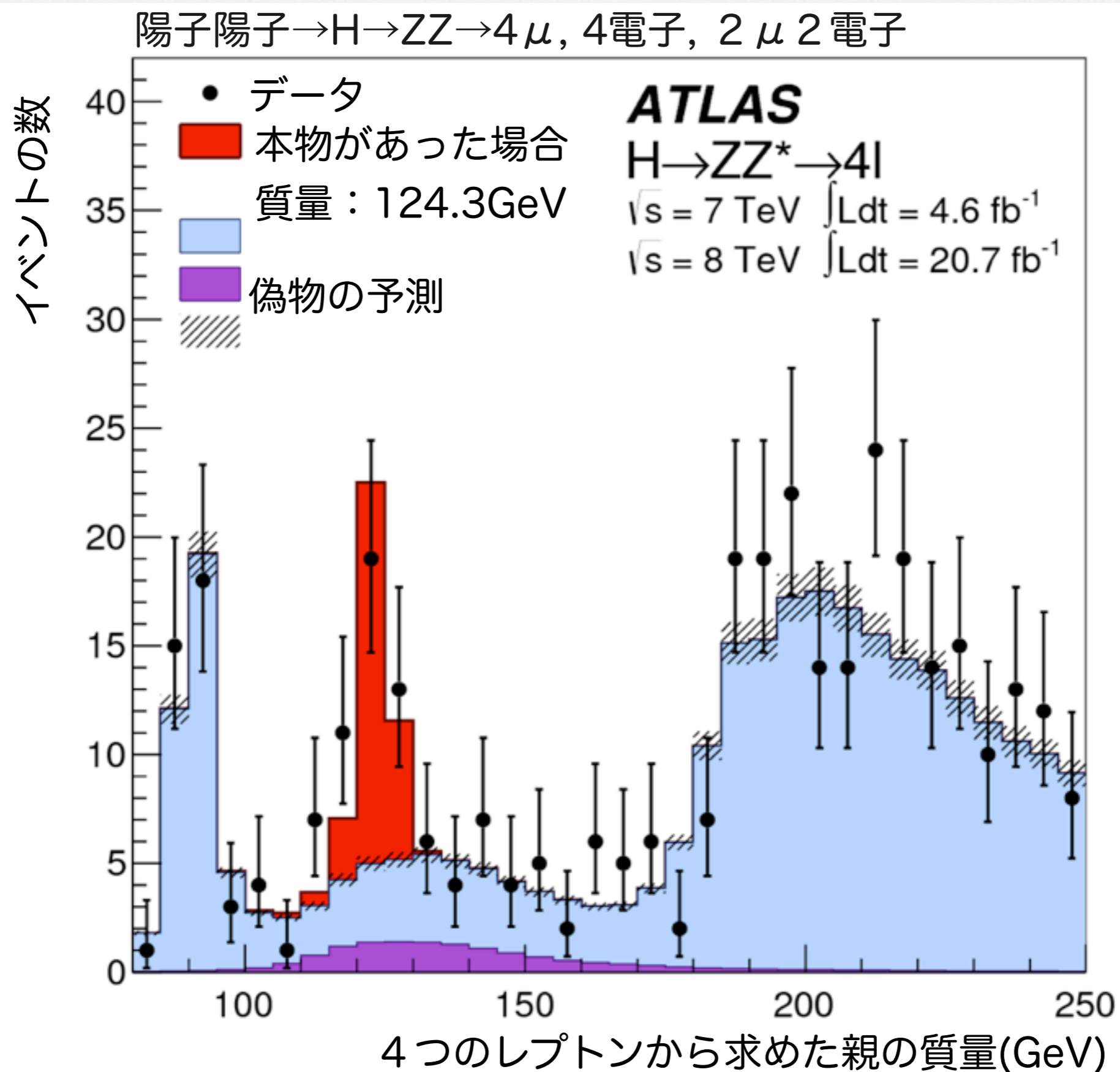
陽子陽子  $\rightarrow$  H  $\rightarrow$  ZZ  $\rightarrow$   $\mu\mu\mu\mu$

$$(\text{親の質量})^2 = (\text{子のエネルギー和})^2 - (\text{子の運動量和})^2$$





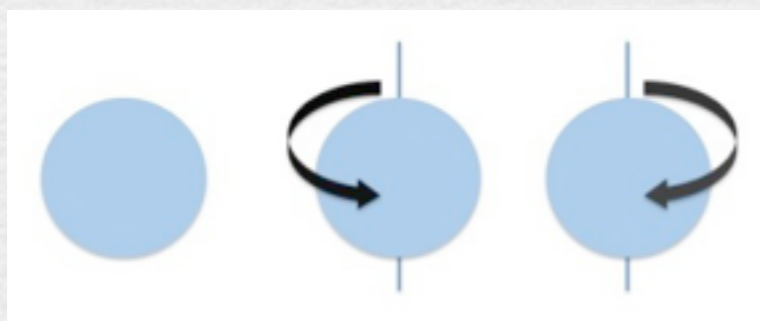
# 陽子陽子 $\rightarrow$ H $\rightarrow$ ZZ $\rightarrow$ 4 レプトン



# 発見した粒子はヒッグス粒子か？

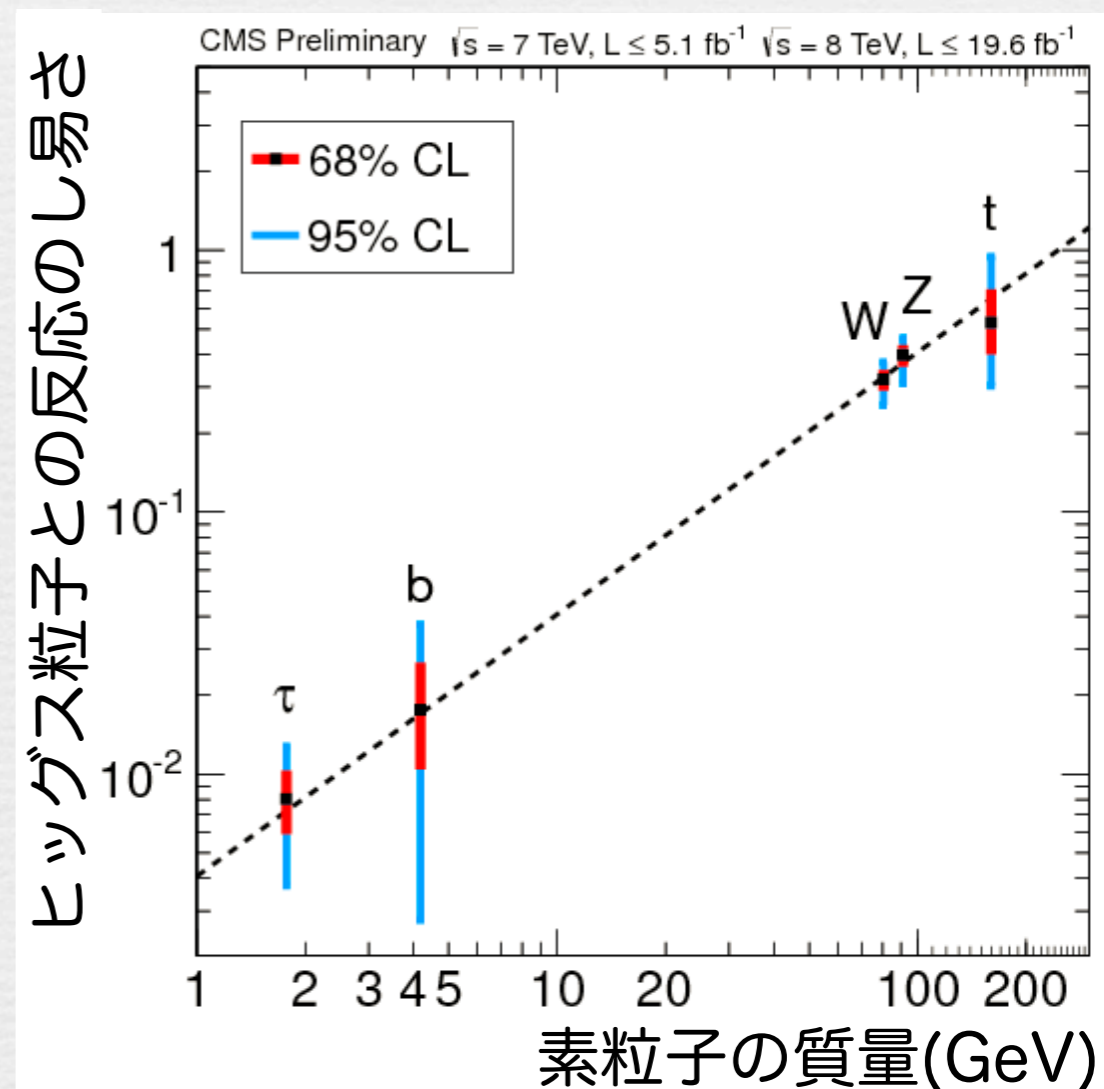
- 光子 光子、ZZ、WW に化ける粒子
- 質量は、126GeV位
- スピンが0 (向きなし)である可能性が高い

→ スピンがある可能性を棄却



素粒子には固有のスピン

- 重い粒子ほど反応しやすい



素粒子の質量と関係する粒子 → ヒッグス粒子発見！

# ヒッグス粒子発見の意義とこれから

# どんなヒッグス粒子なのか？

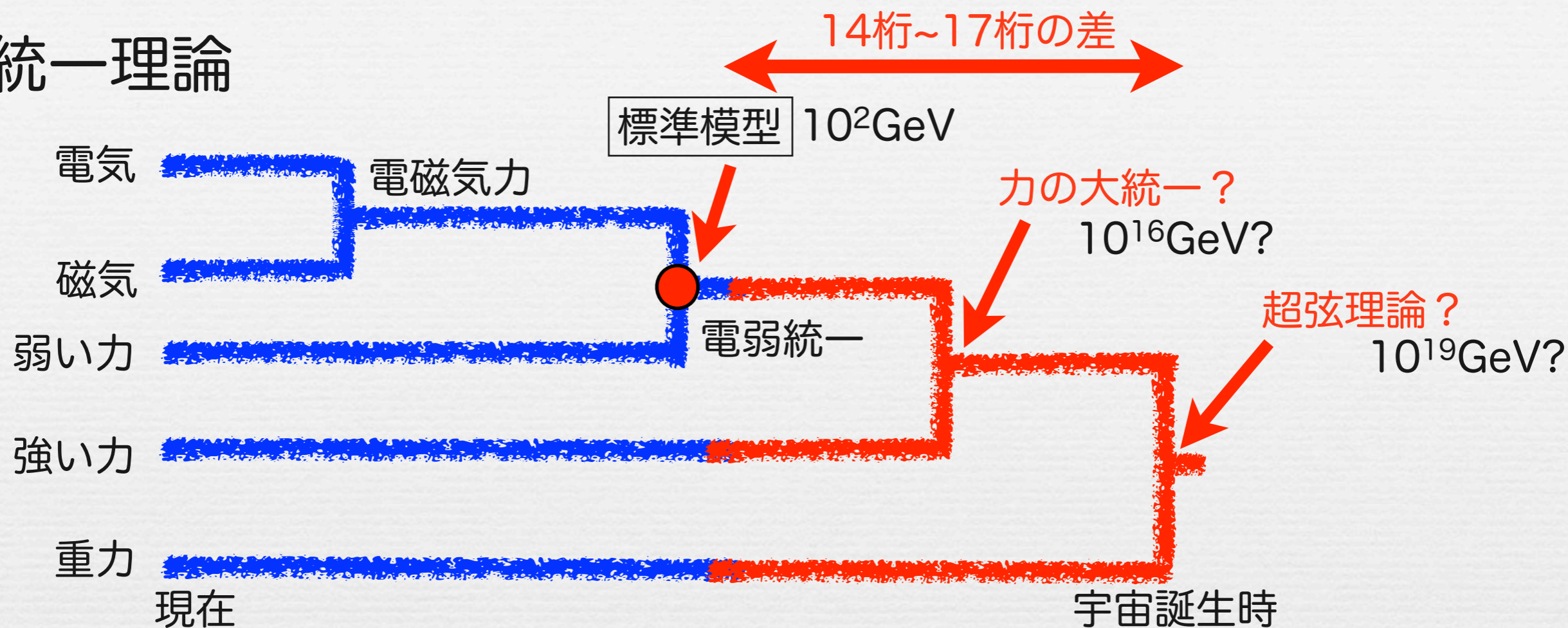
標準模型が予言するヒッグス粒子かどうかはわからない

実験による新しい知見が不可欠！

- スピンなどのヒッグス粒子の性質を精密に測定する
- tクォーク、bクォーク、 $\tau$ 粒子との反応を精密に測定
- 仲間がいるか？  
「標準模型」はヒッグス粒子は1つ
- .....

# ヒッグス粒子発見はさらなる新発見の序章

## 大統一理論



## ヒッグス粒子質量の不自然さ

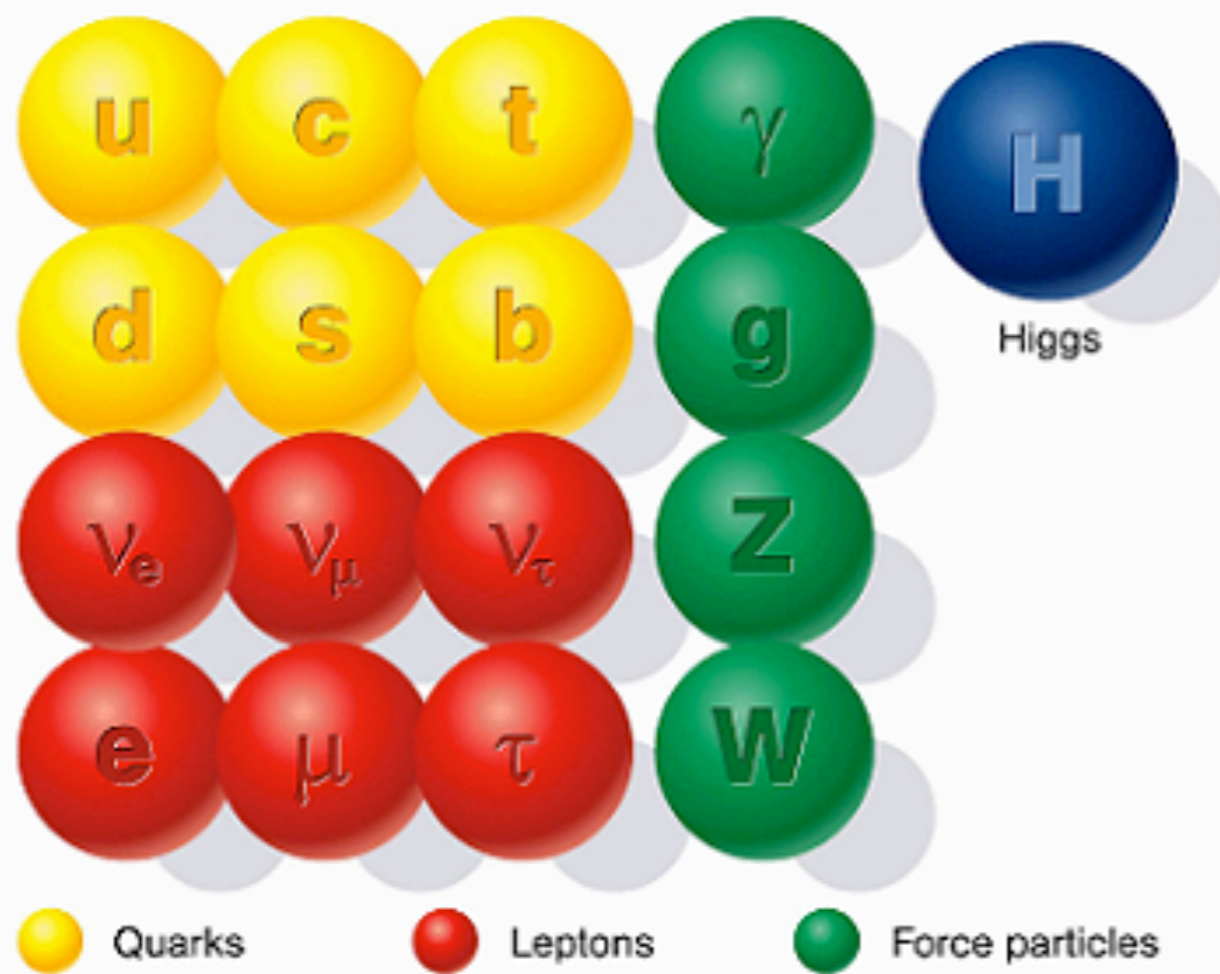
$$\begin{aligned}
 (\text{測定された質量})^2 &= (\text{大統一理論での質量})^2 - (\text{補正量})^2 \\
 126^2 &= (16\text{桁})^2 - (16\text{桁})^2
 \end{aligned}$$

→ ヒッグス粒子固有の問題

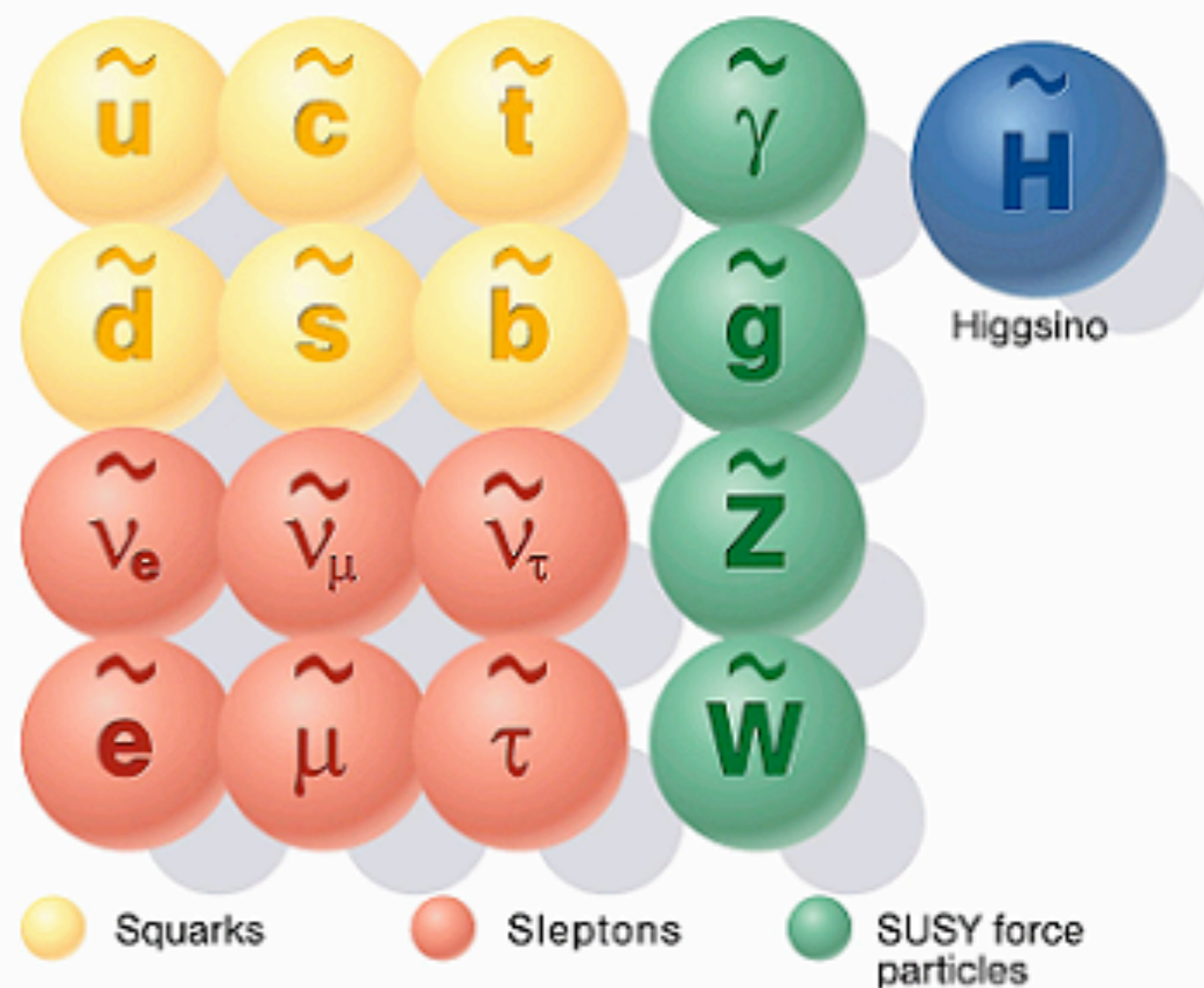
この解決には、”超対称性”などの新物理が必要

# 超対称性粒子

## Standard particles



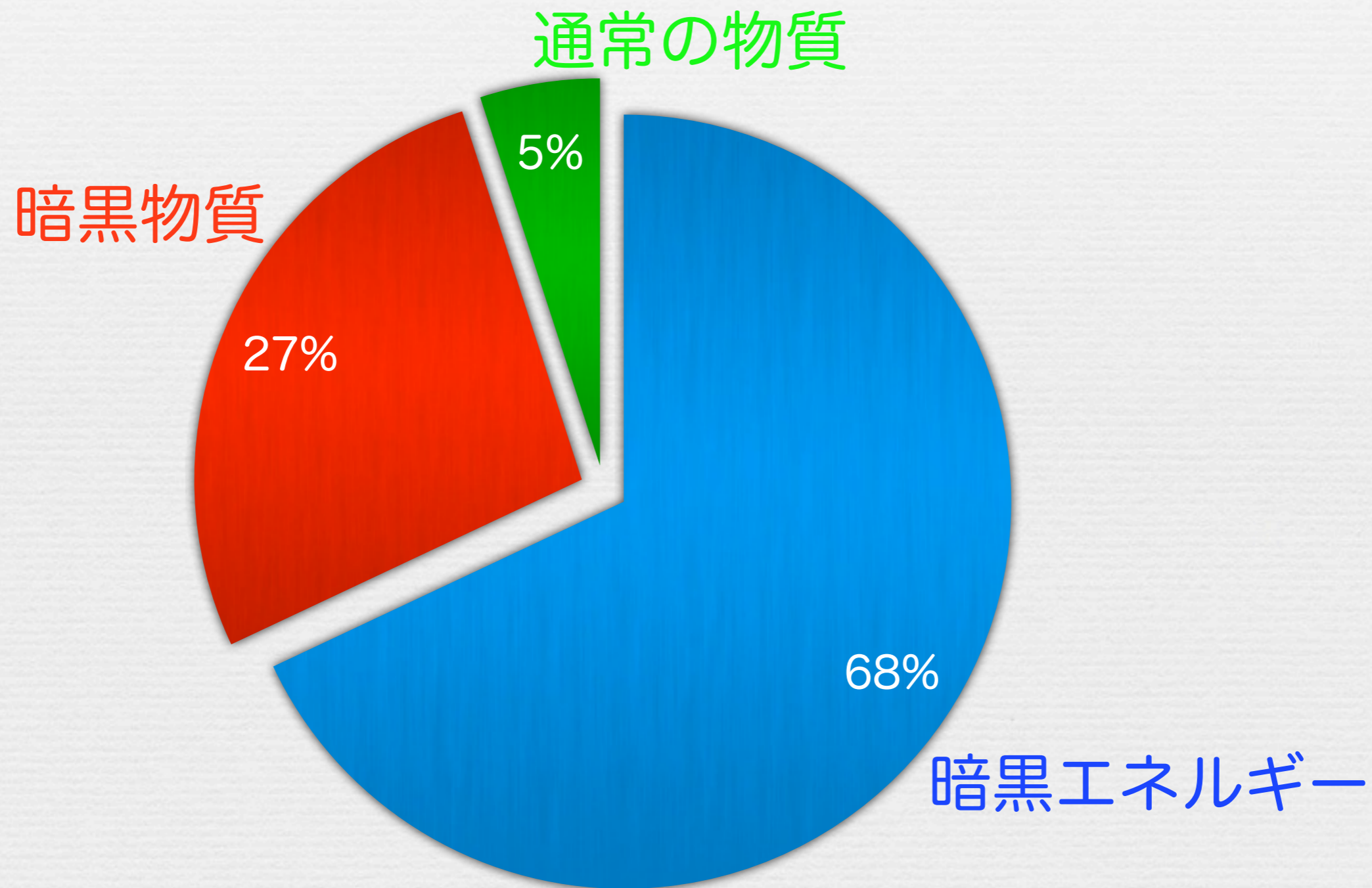
## SUSY particles



→ LHC実験にて探索中

# 超対称性粒子があると

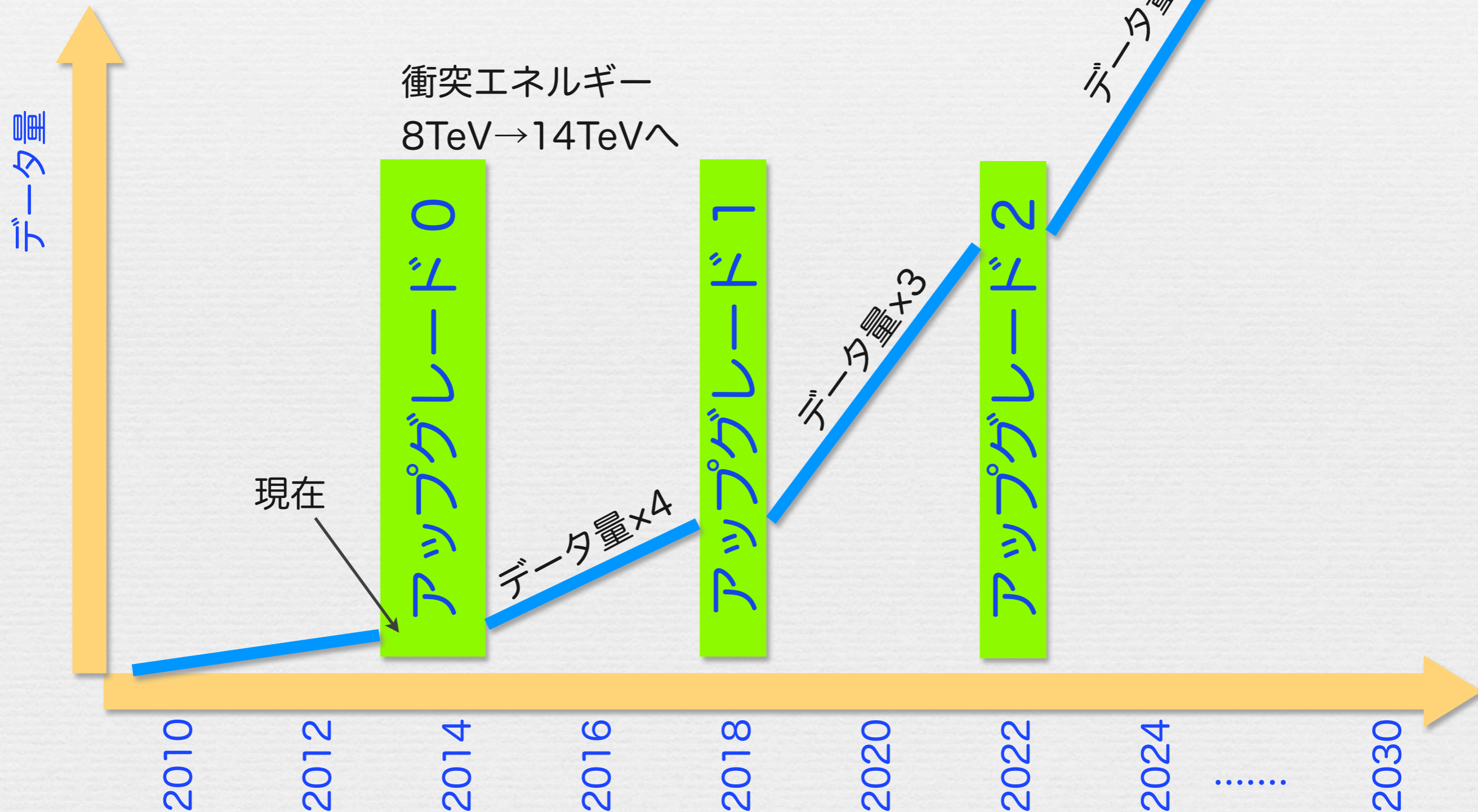
暗黒物質の有力候補



# LHC実験はまだまだ続く

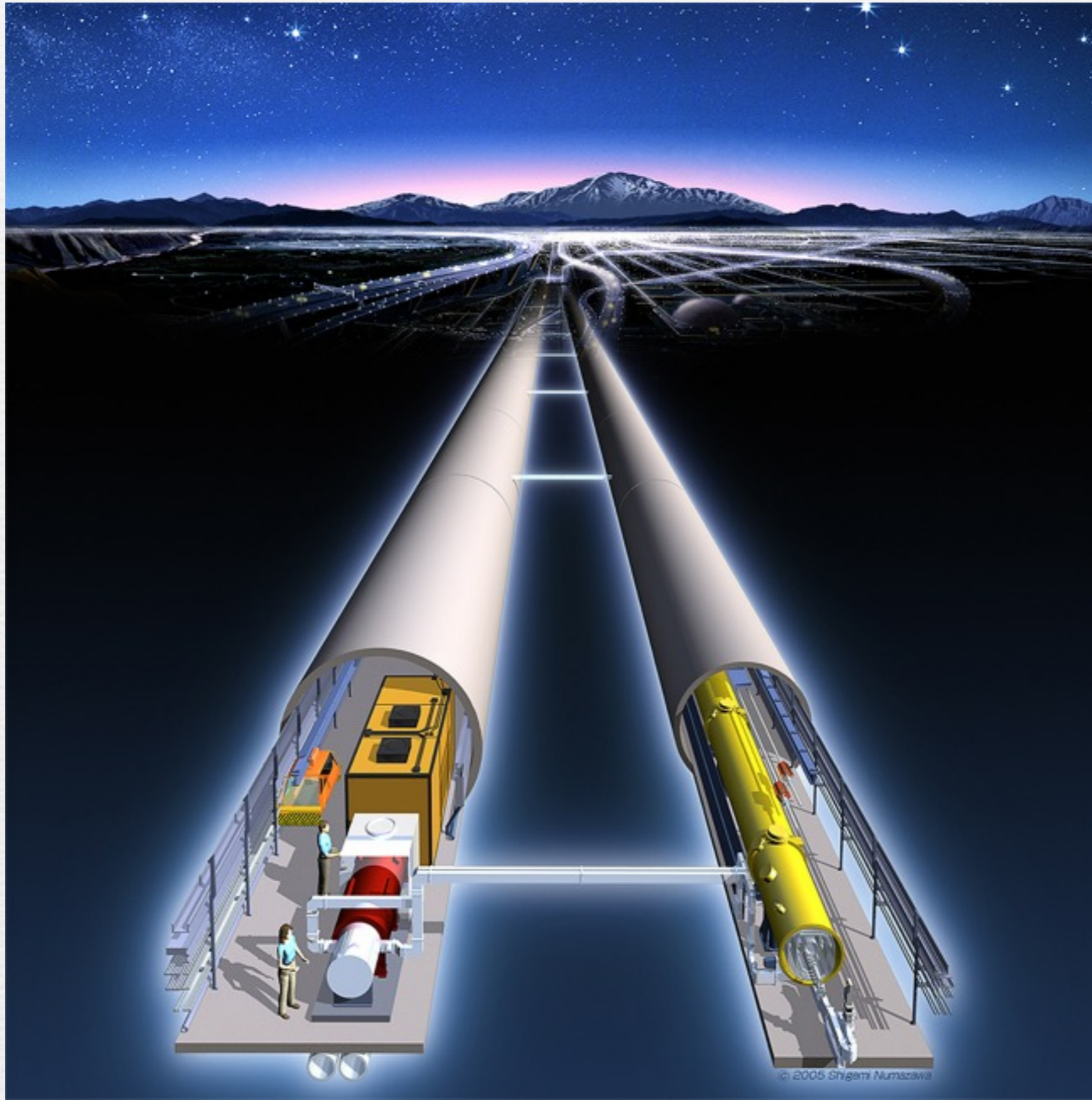
## 加速器と検出器をアップグレード

ヒッグス粒子の性質を理解とさらなる新粒子の発見を目指す



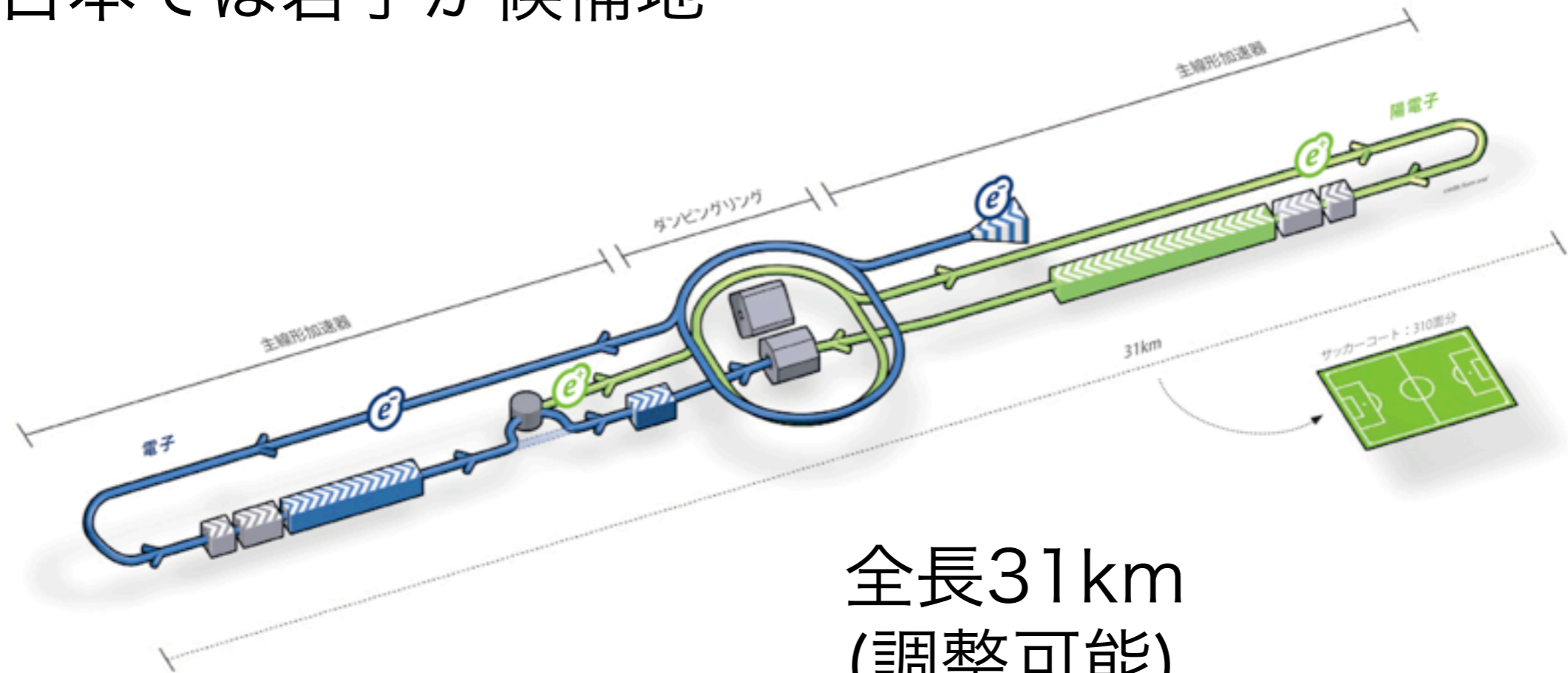


# 国際リニアコライダー計画



# 国際リニアコライダー計画

日本では岩手が候補地



全長31km  
(調整可能)



# まとめ

LHC実験は、  
2009年から物理データを収集開始、順調に動いている

2012年7月4日

質量126GeV付近にヒッグス粒子と思われる新粒子を発見

実験主導の時代の幕開け

ヒッグス粒子の性質に関する新たな知見がえられる  
さらなる新しい粒子が発見される可能性が高い

→LHCの増強計画 から ILC計画

これからの素粒子は面白い！