

2013年6月8日 名古屋大学 理学懇話会  
「素粒子物理の7月革命 ～ヒッグス粒子発見～」

# 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

# 7月革命

7月4日：ヒッグス粒子と思われる新粒子の発見！！！！

# 7月革命

7月4日：ヒッグス粒子と思われる新粒子の発見！！！！



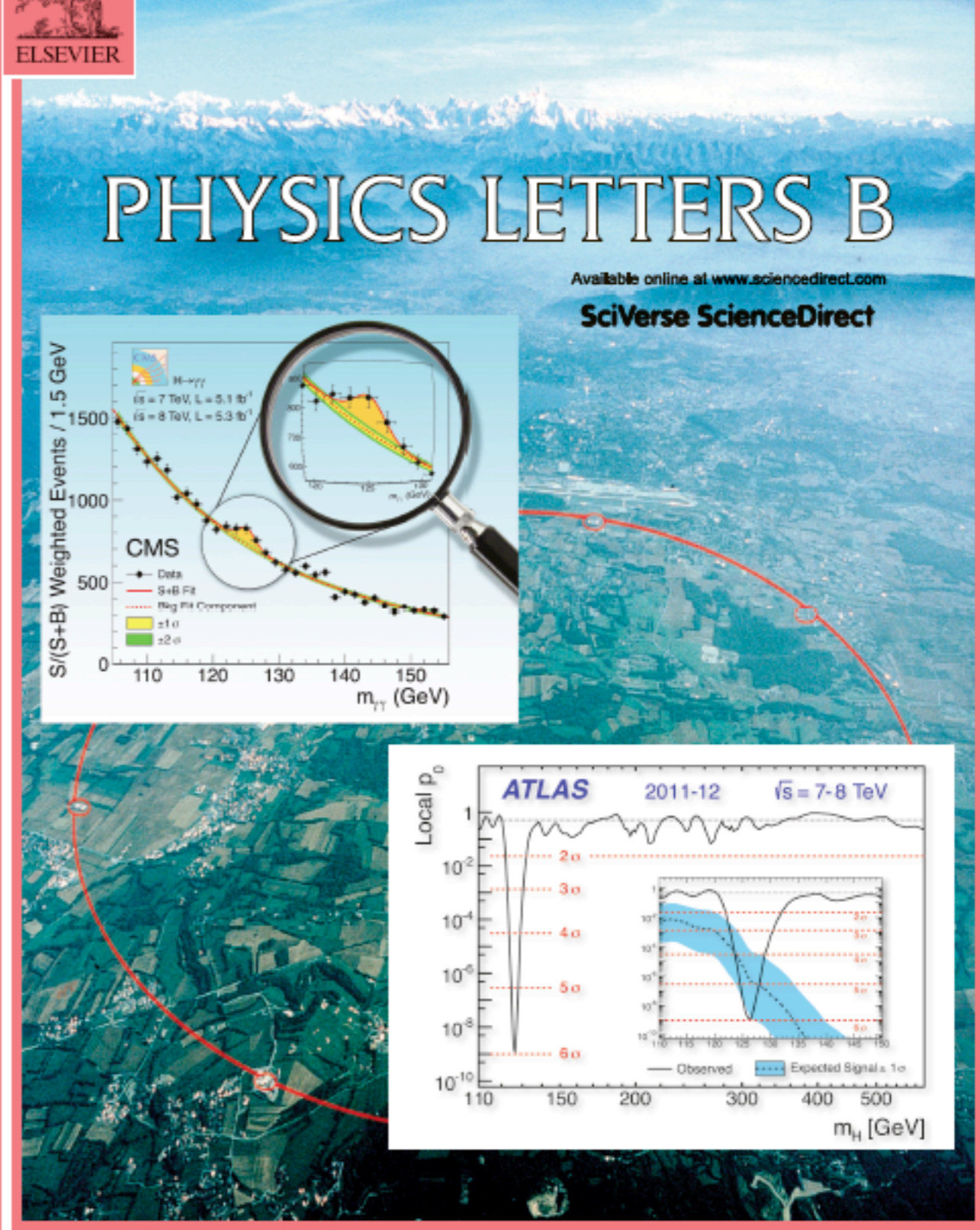
イングレールさん

ヒッグスさん

# 7月革命

7月4日：ヒッグス粒子と思われる新粒子の発見！！！！

ISSN 0370-2693



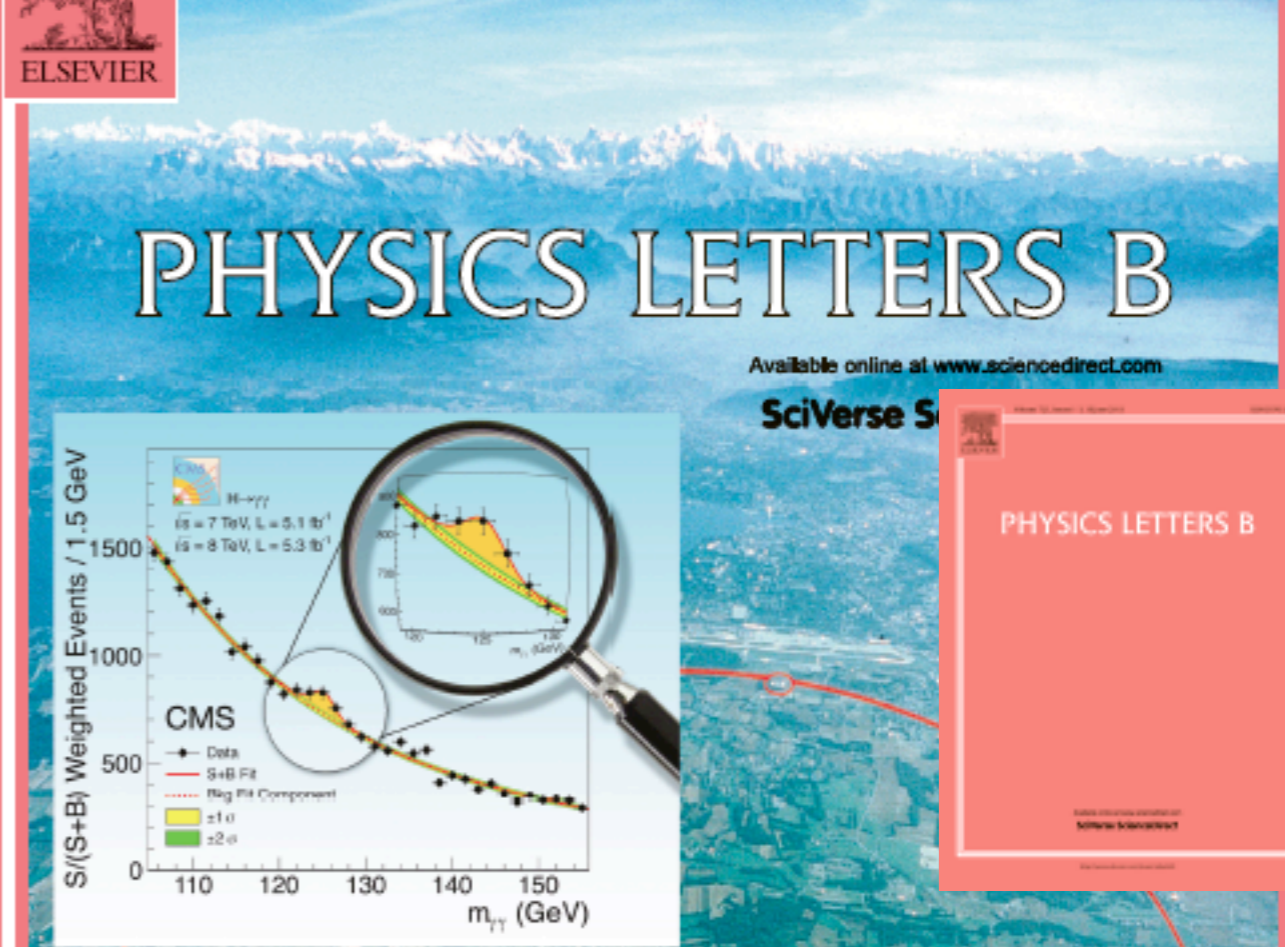
イングレールさん

ヒッグスさん

# 7月革命

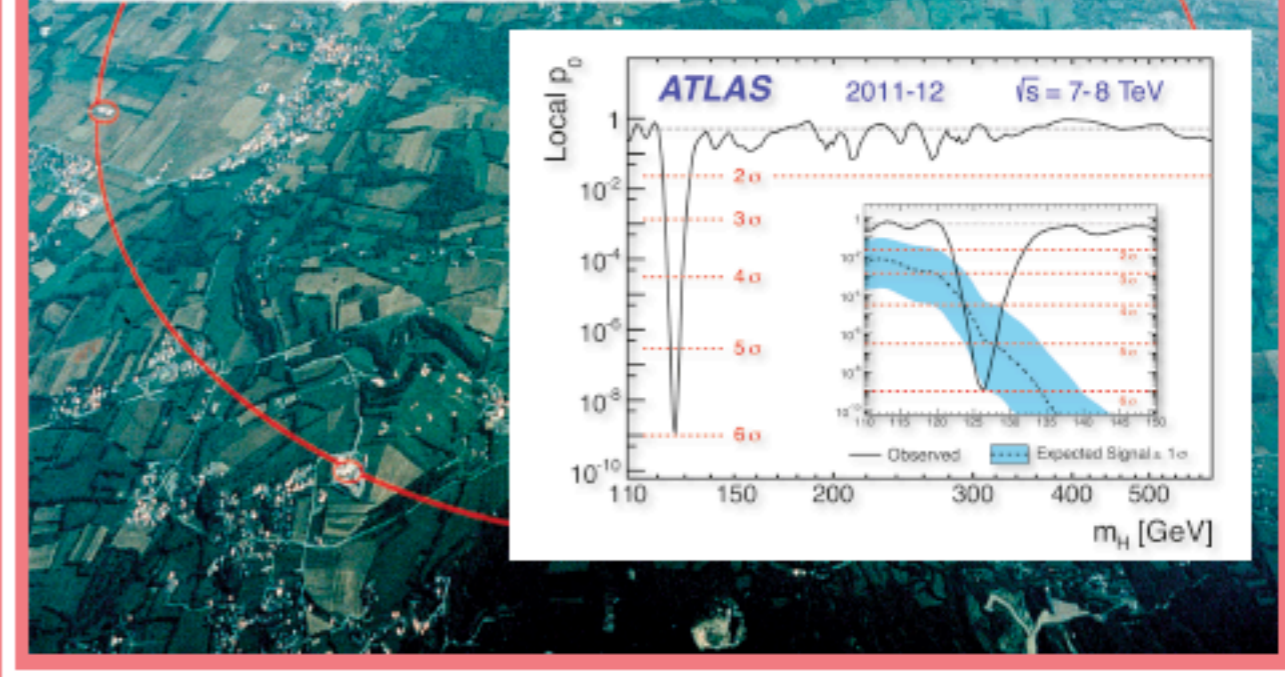
7月4日：ヒッグス粒子と思われる新粒子の発見！！！！

ISSN 0370-2693



イングレルさん

ヒッグスさん



# 名古屋では、、、



# 名古屋では、



久野先生



私

## ヒッグス粒子

# 提唱者「おめでとう」

### スイスの沸き立ち拍手の嵐

発表会場、意を示した。最初に発表した男性研究者は「おめでとう」と語り、「驚嘆している」とも述べた。発表が終了したばかりの拍手は、会場をわきまはらった。立ち上がり拍手、ヒッグス粒子発見が確定したかのようなお祝いムードに包まれた。

## 益川さん「物理学に新時代」

貴重な発表だったが、一方、東京都文京区准教授は「何がが見えようか」と疑問を抱き、交えながら説明した。浜松トニックスの部長も検出に貢献した。ヒッグス粒子を捉える装置に使用されているのは、製造部が心臓部に使われている。

浜松トニックスが開発・製造したのは、素粒子のエネルギーを光に転換して検出する装置で、素粒子の飛跡を追いかける検出器の基板の部品。CERN実験チームの要請に応じて、一九九八年から十年間かけて製作。社員万個以上を納入しているとい

### 国際チームに名大関係者

ヒッグス粒子の存在は、素粒子の存在を証明する「標準理論」を支える大きな柱で、益川教授らが確立した。

7月5日  
中日新聞朝刊より

7月5日  
中日新聞朝刊より

# 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

ヒッグス粒子の見つけかた

新粒子発見の意義とこれから

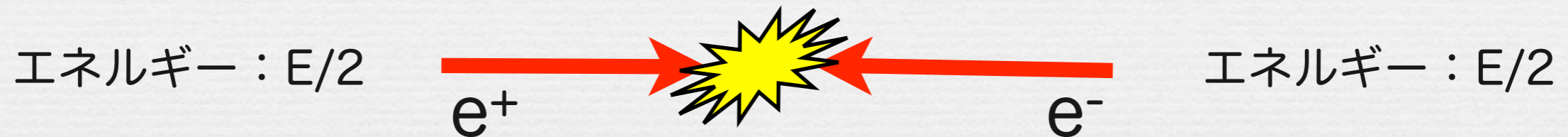


# ヒッグス粒子を作る 加速器

# 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



$$E = Mc^2$$

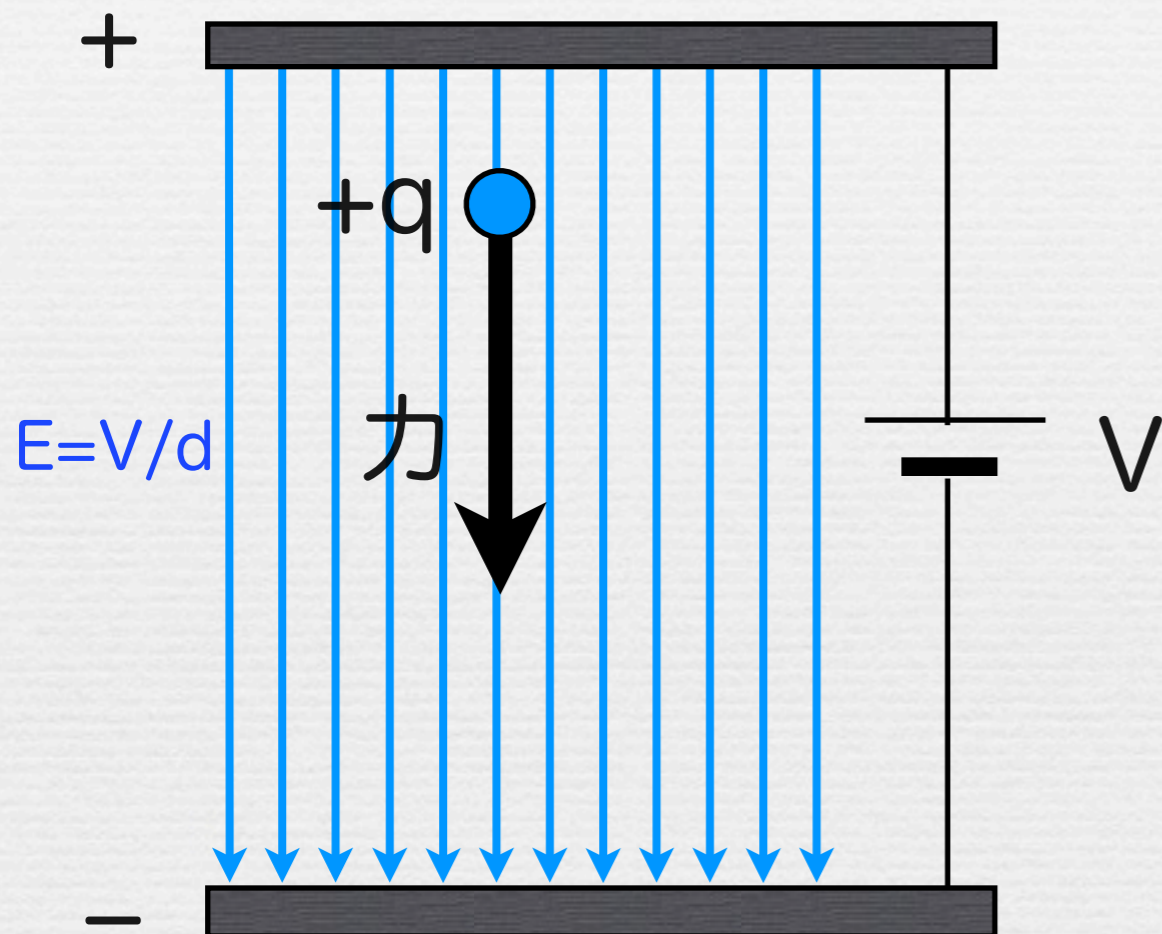
質量 $M$ の未知なる素粒子を生成する能力

加速した粒子を衝突させる

高エネルギー！

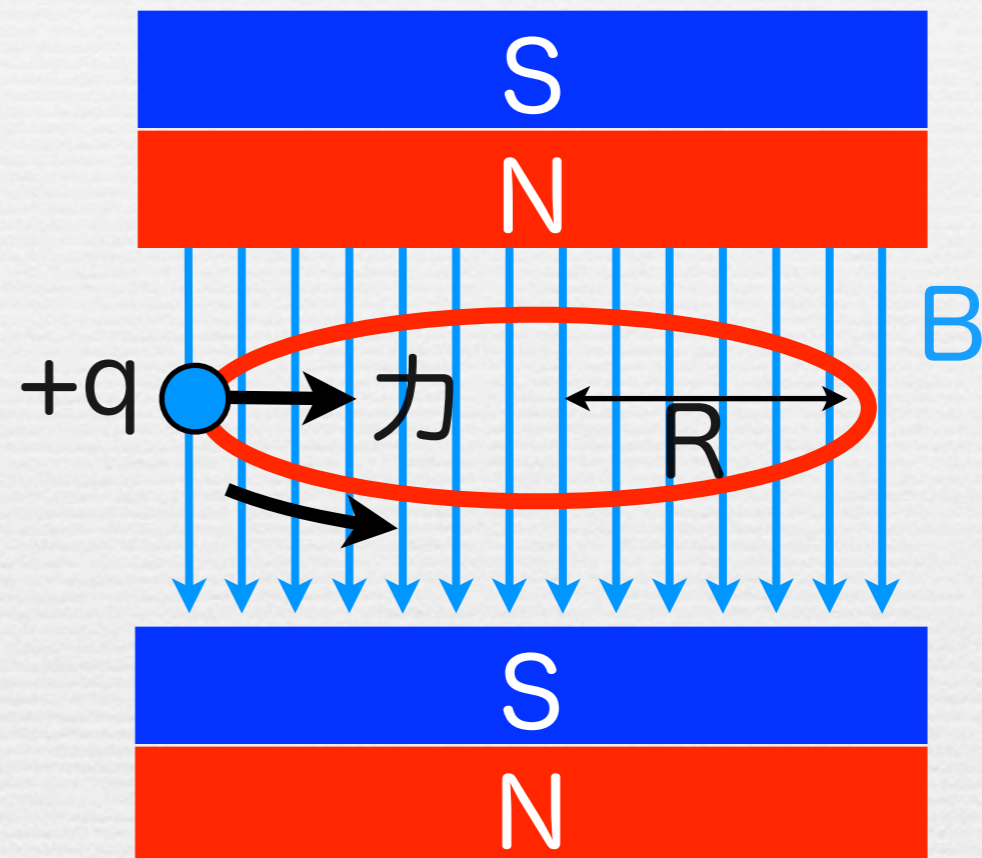
# 粒子を加速する

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

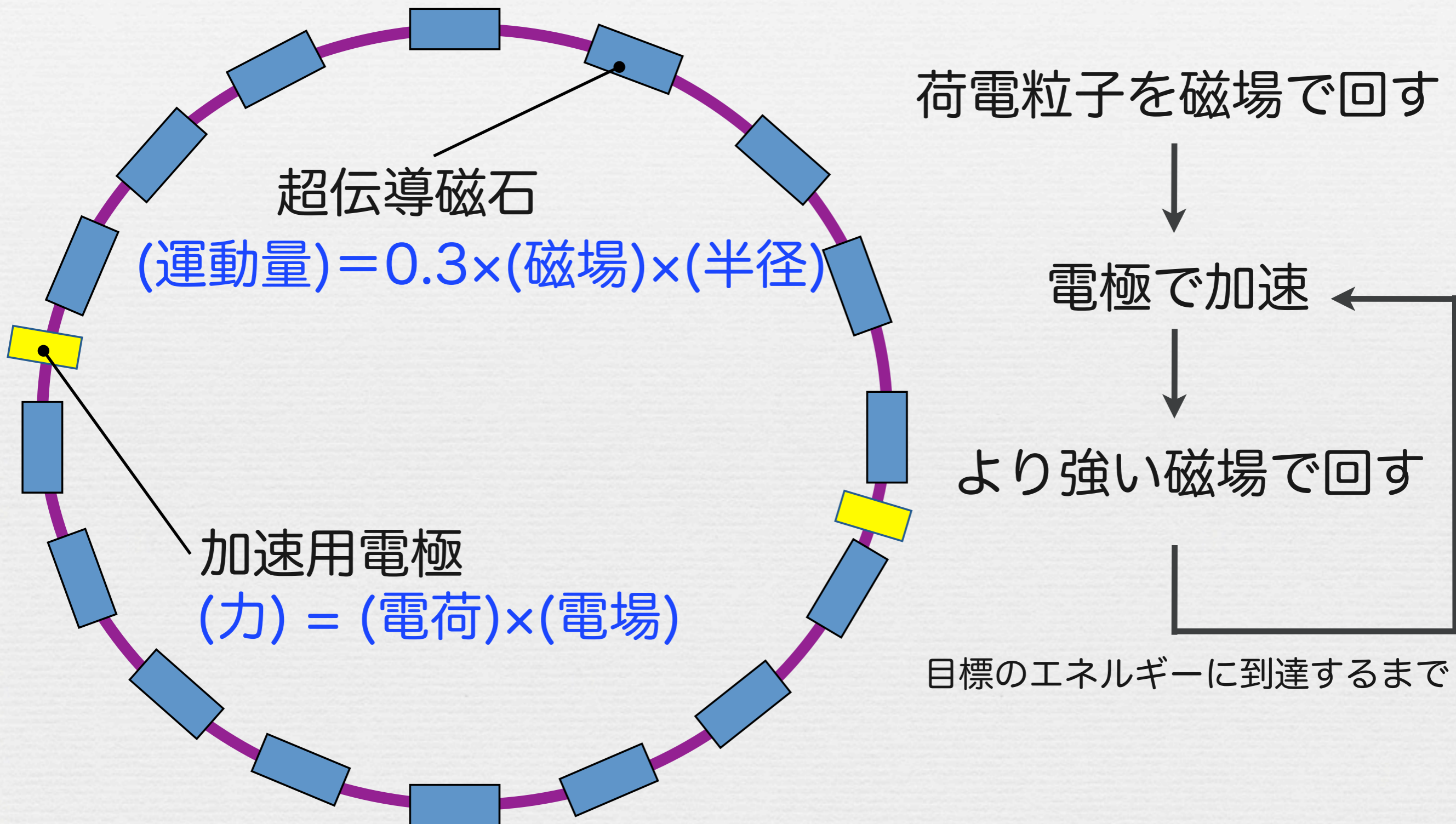
$$(\text{力}) = (\text{電荷}) \times (\text{電場})$$



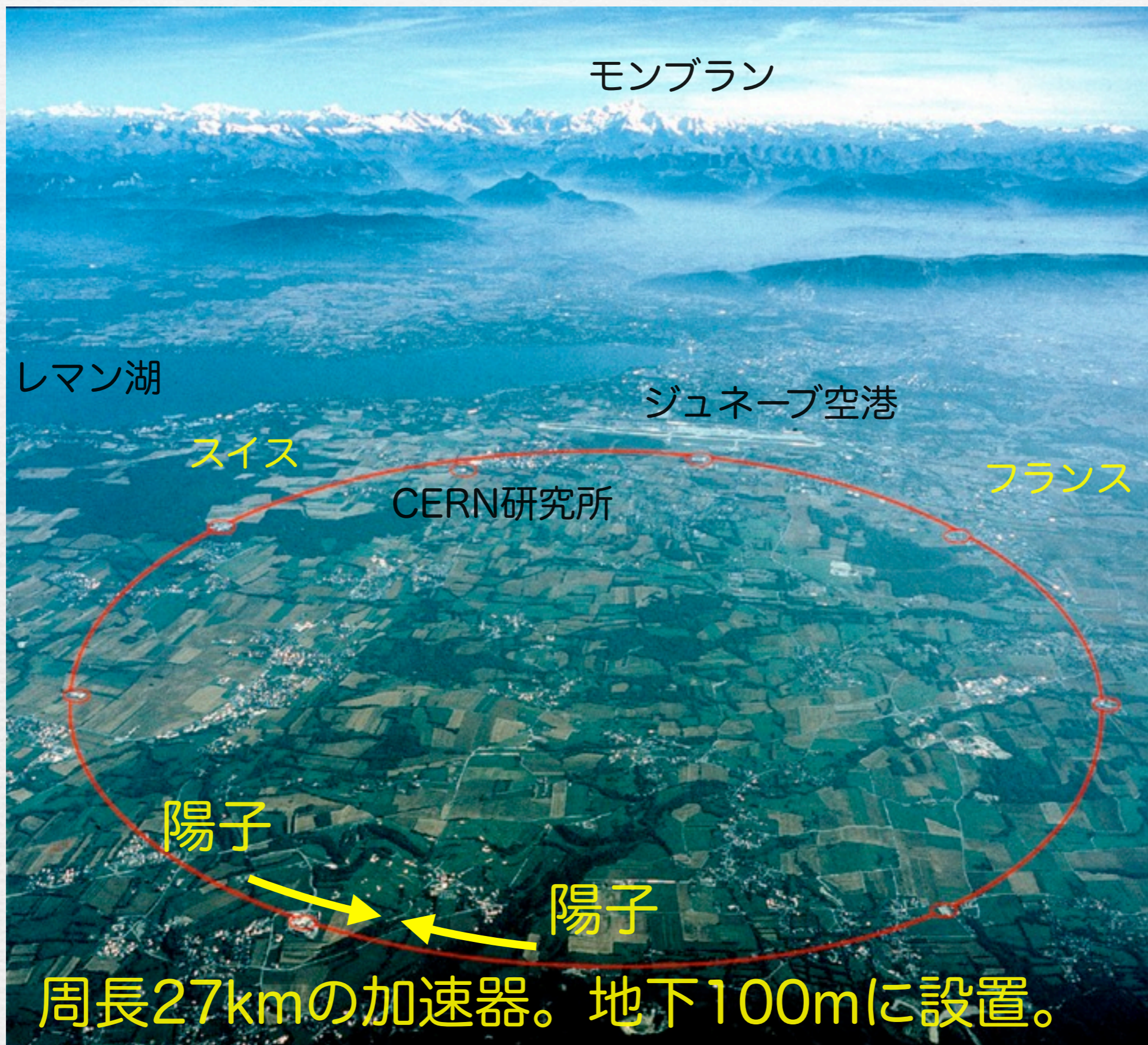
磁場  
回転半径 を大きくして  
より加速した荷電粒子を回す

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

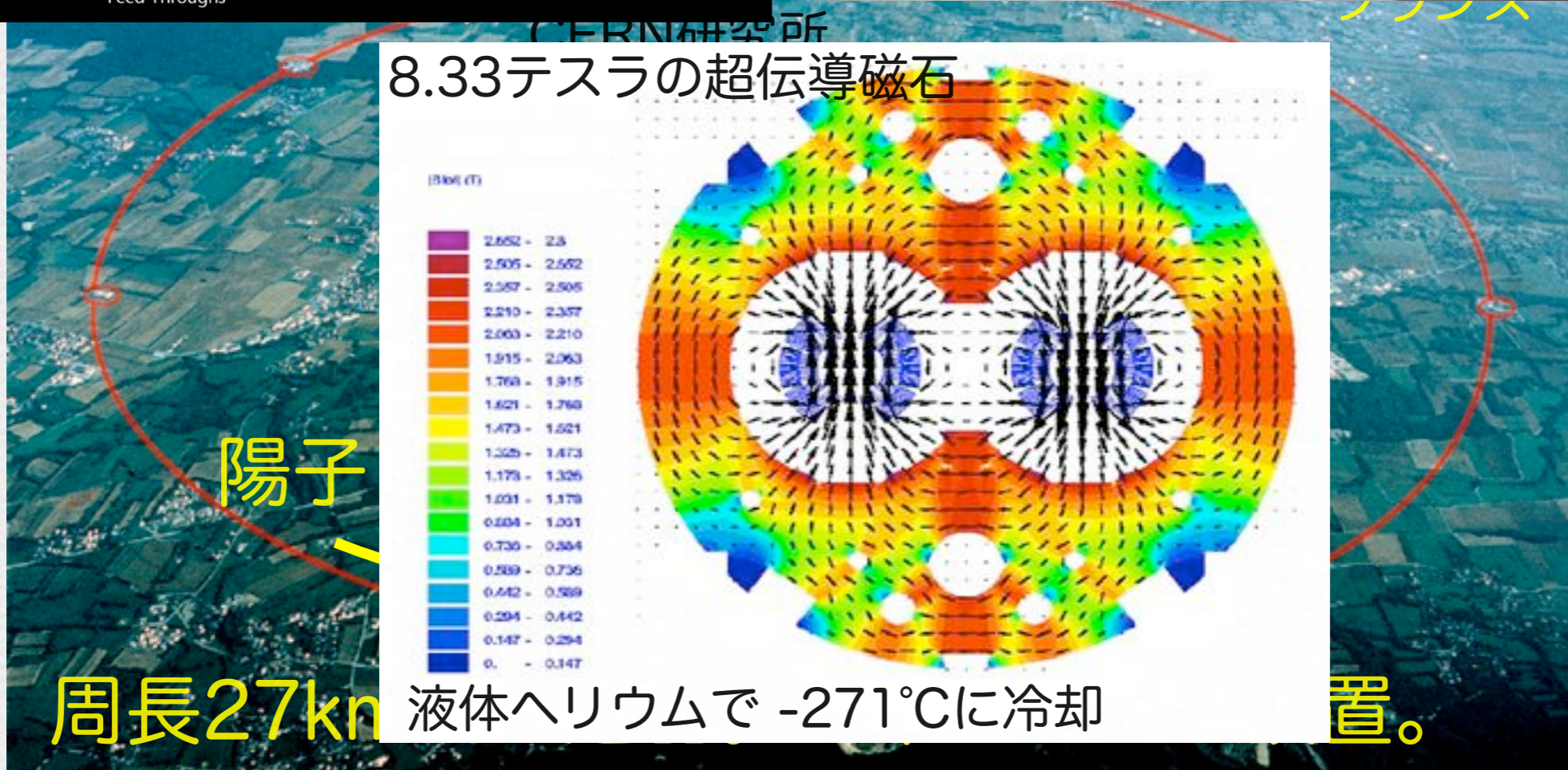
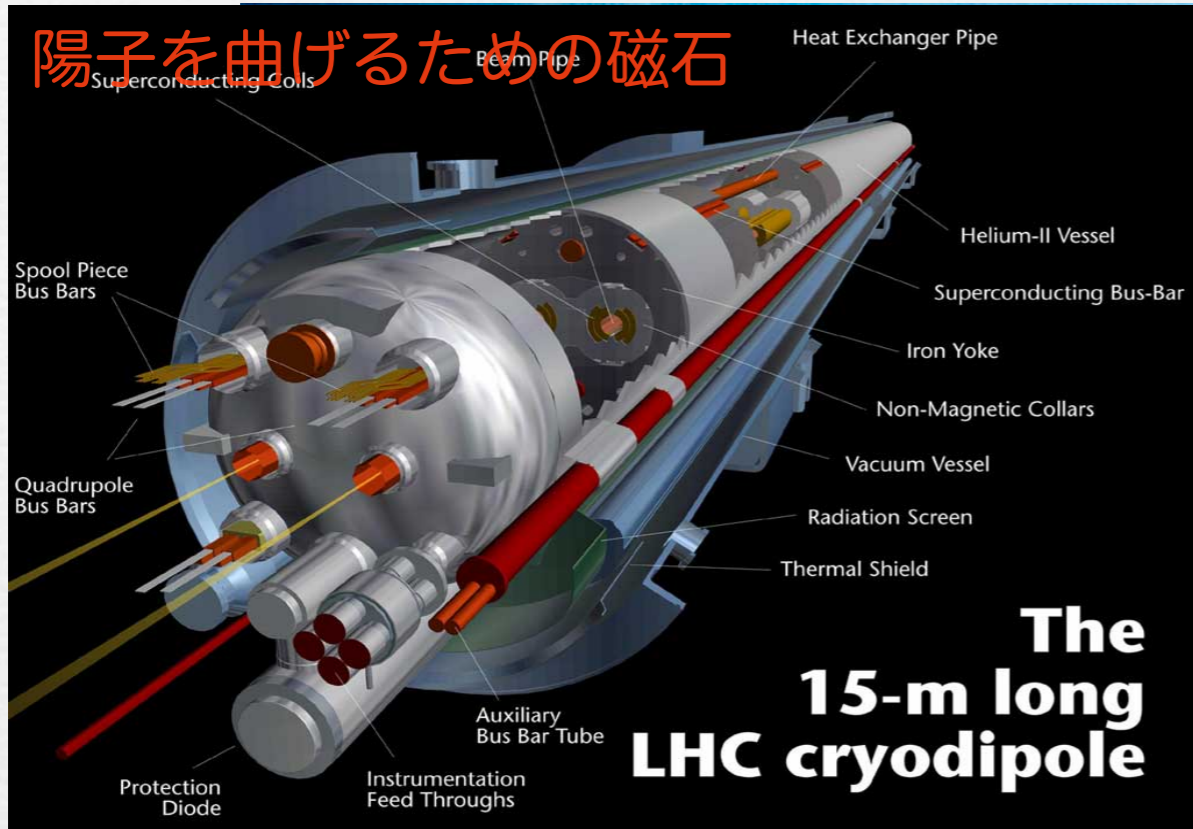
# 加速器の原理



# 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

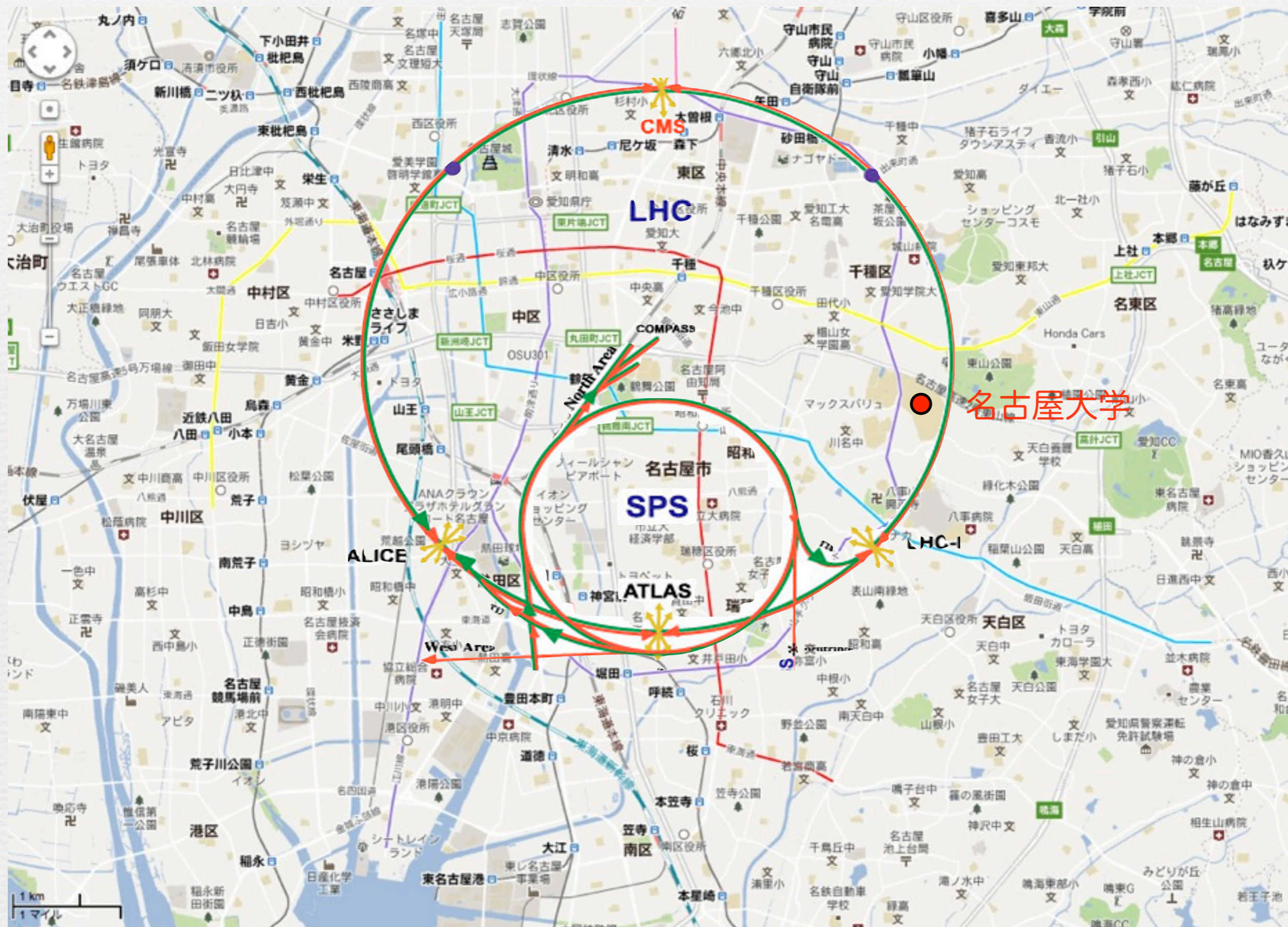


# LHC加速器の大きさ

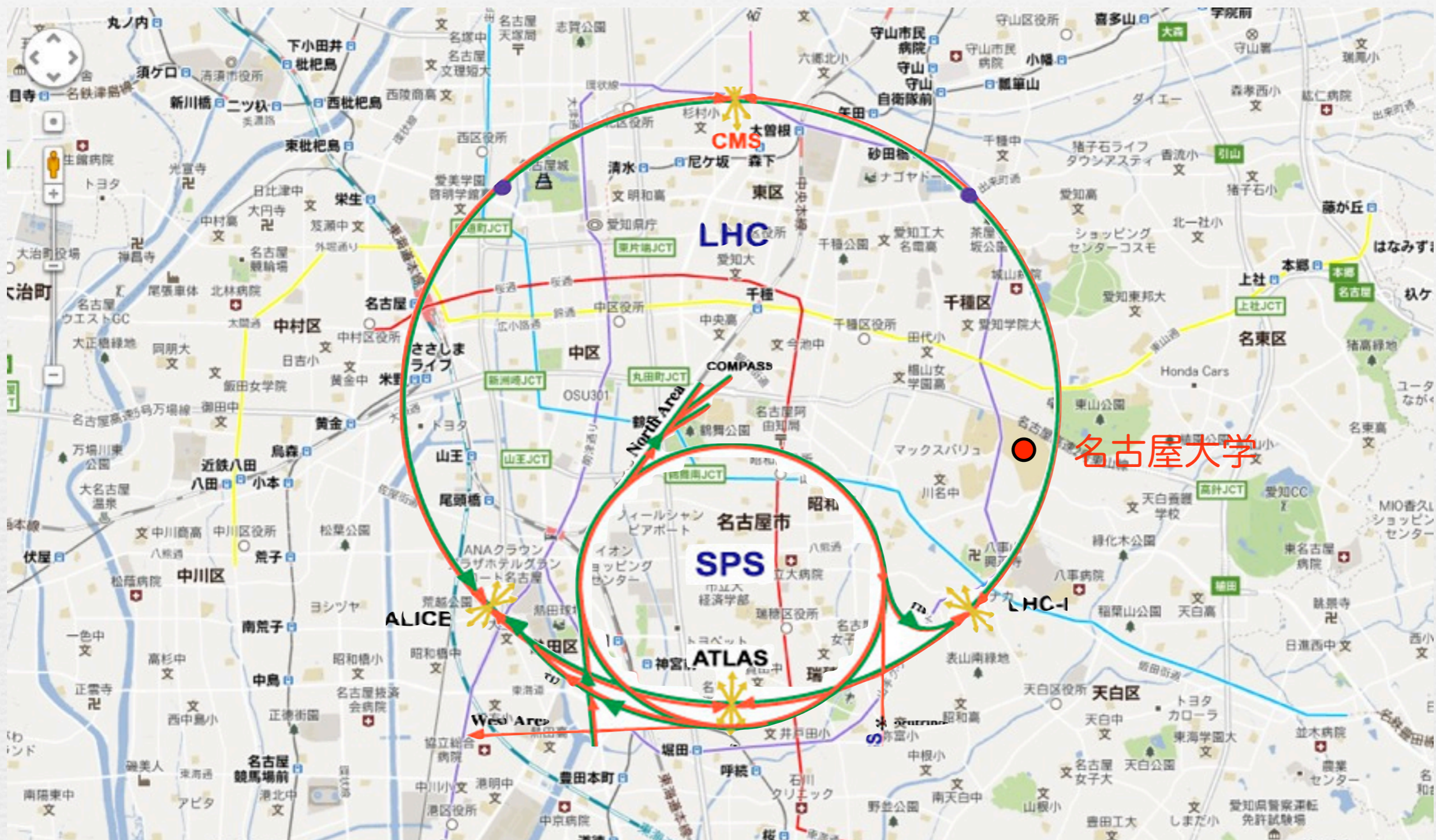




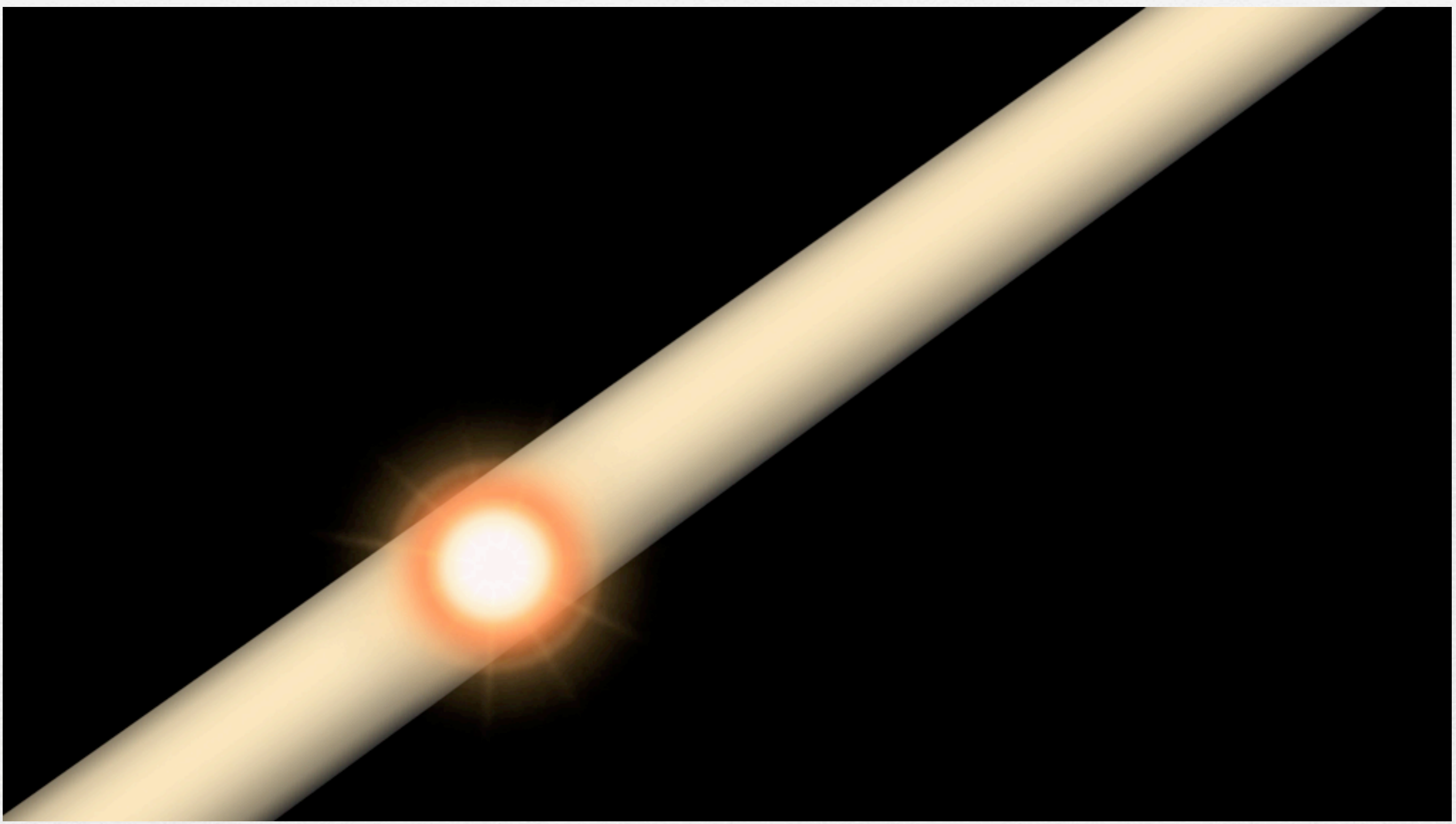
# LHC加速器の大きさ



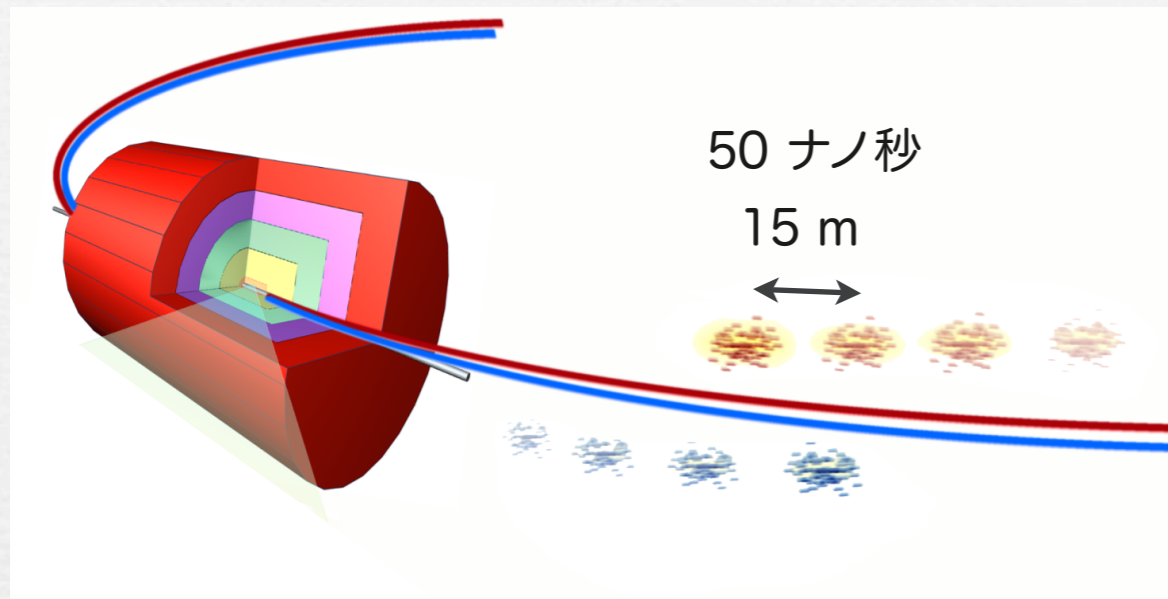
# LHC加速器の大きさ



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

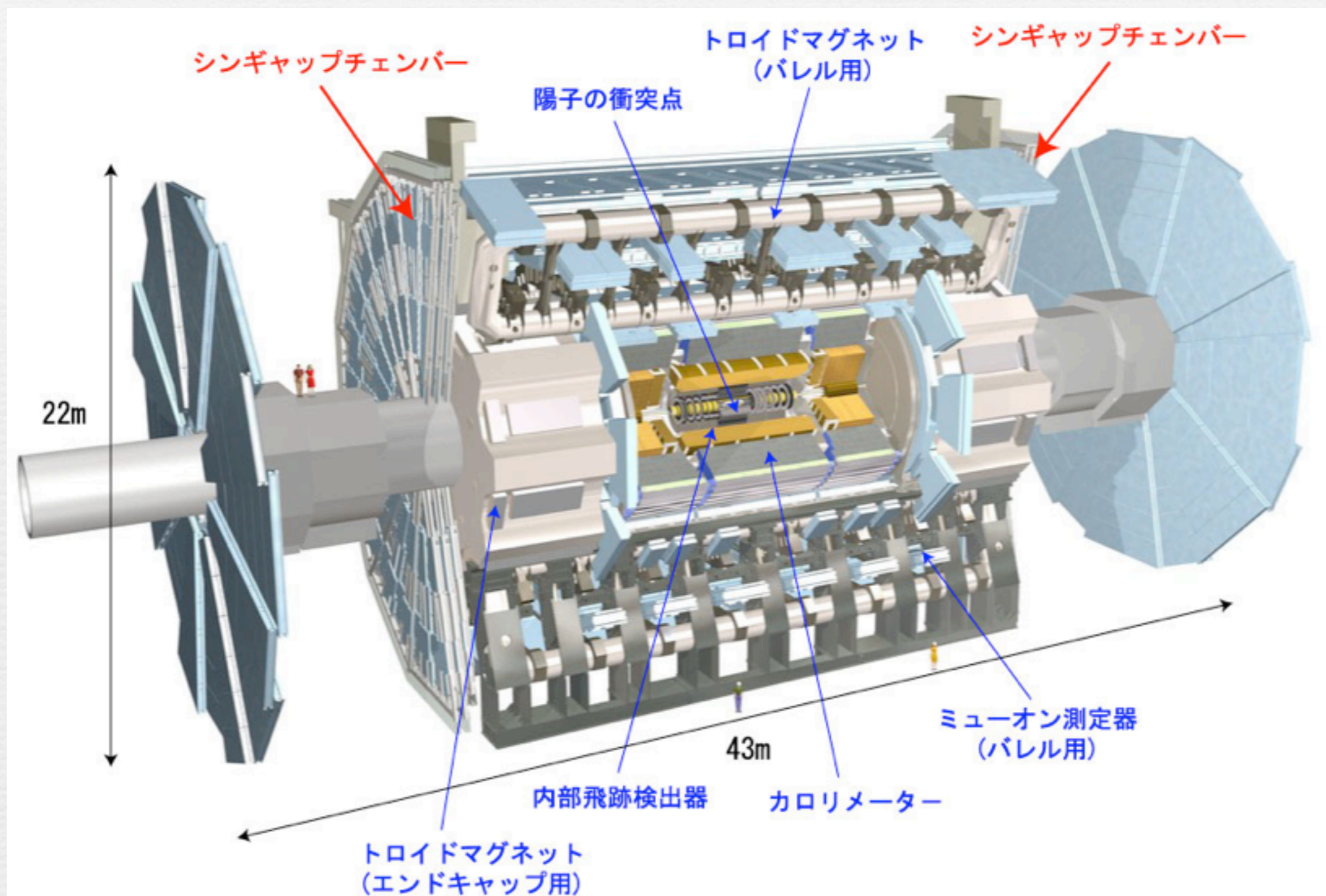
陽子1個 ... コバエの運動エネルギー程度

加速器内の全陽子 ...



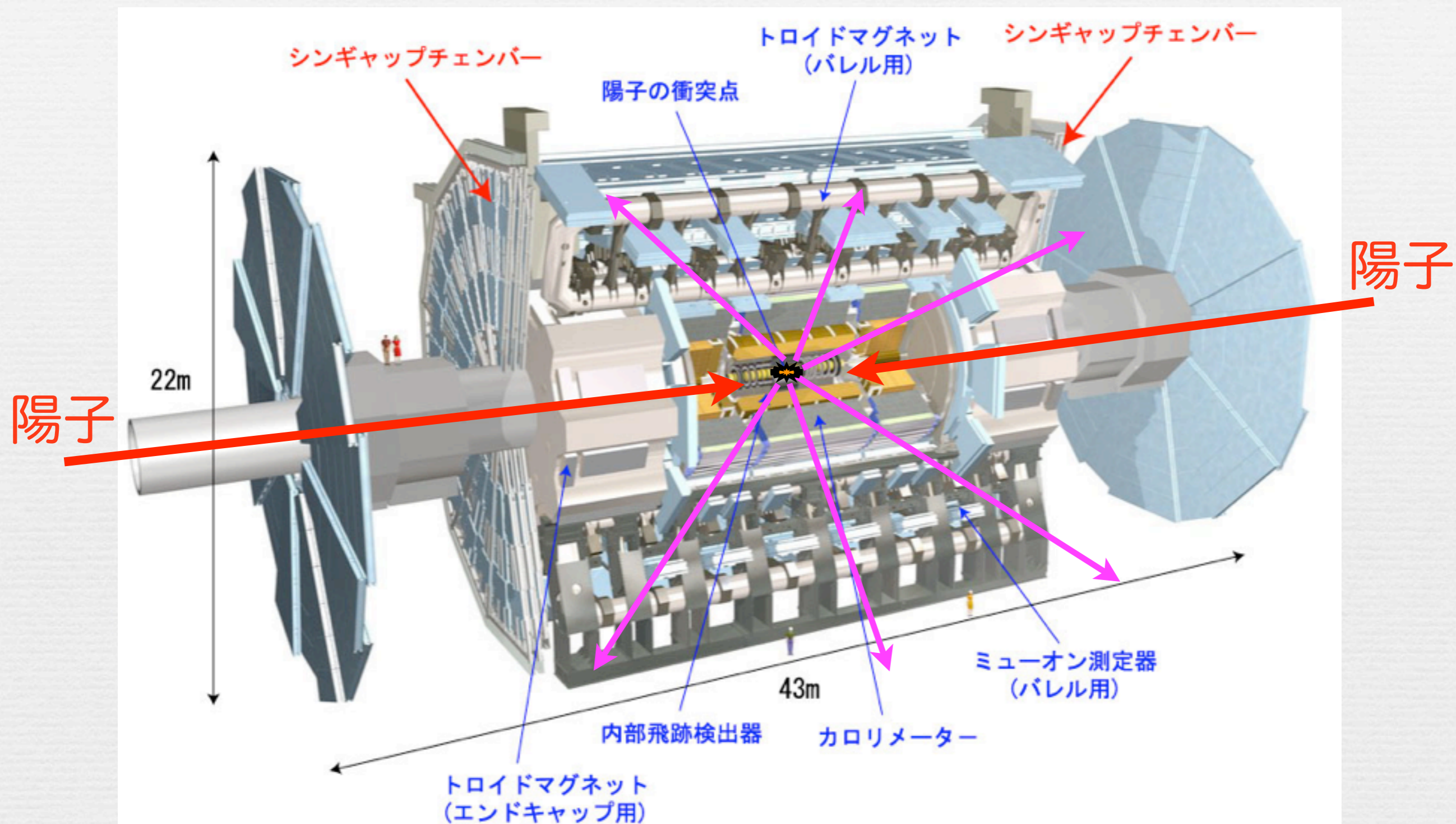
# ヒッグス粒子を捕まえる 検出器

# 粒子検出器 アトラス検出器



総重量：7000トン

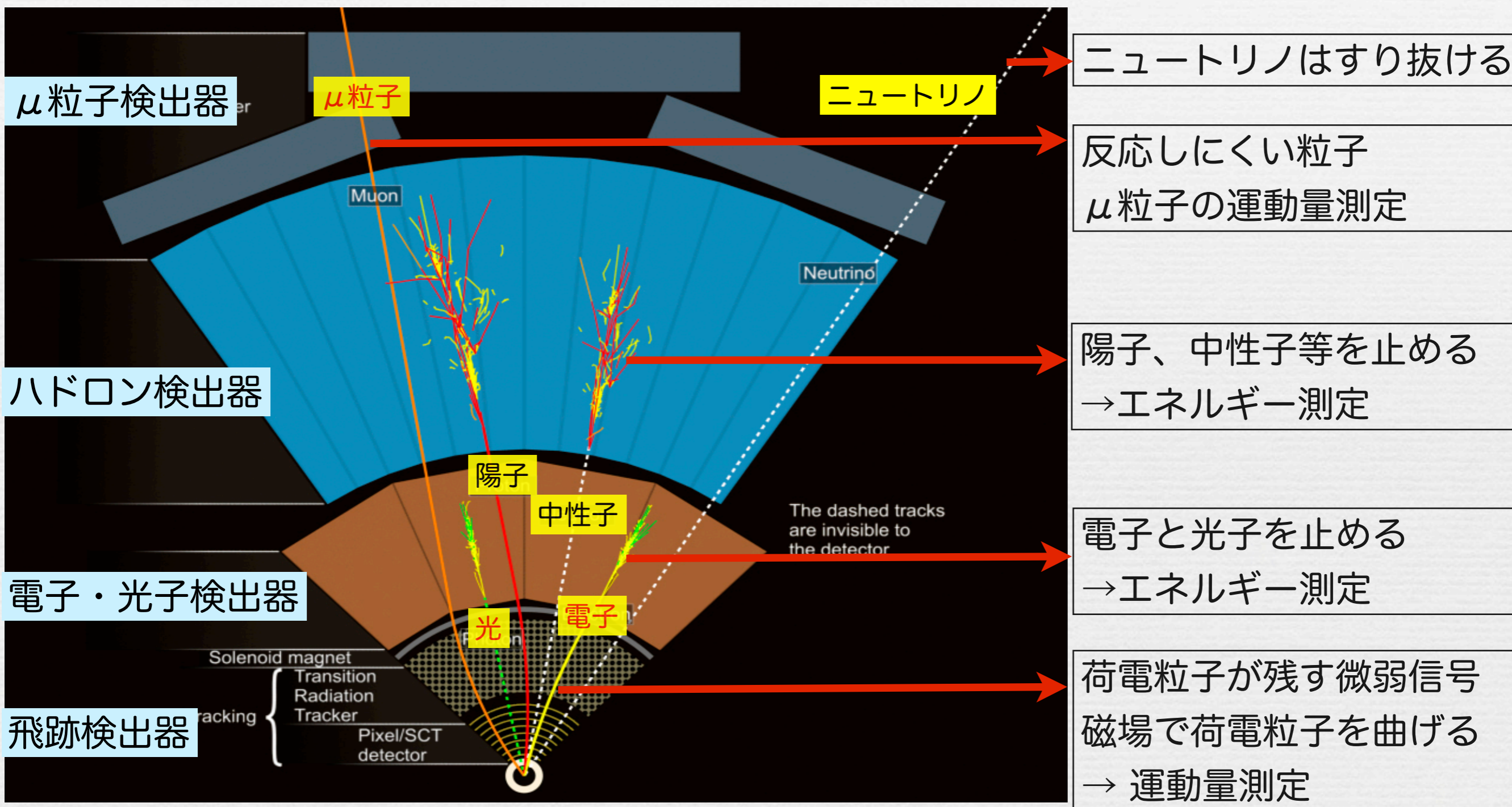
# 粒子検出器 アトラス検出器



ヒッグス粒子は不安定 → 軽い安定粒子に化ける (崩壊)  
 衝突点で起きたイベントの写真を安定粒子を使って撮影  
 読み出し数：1億6千万チャンネル (1億6千万画素デジカメ)

# 検出器の原理

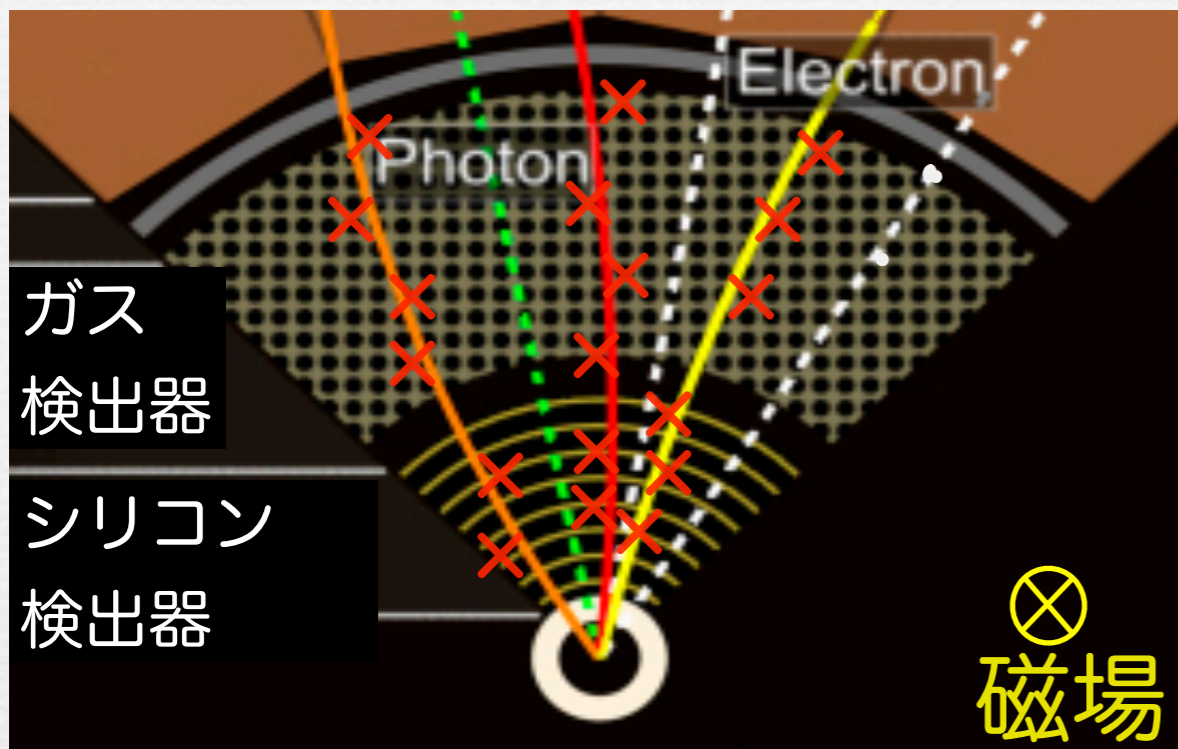
検出器の物質と粒子との相互作用を利用する



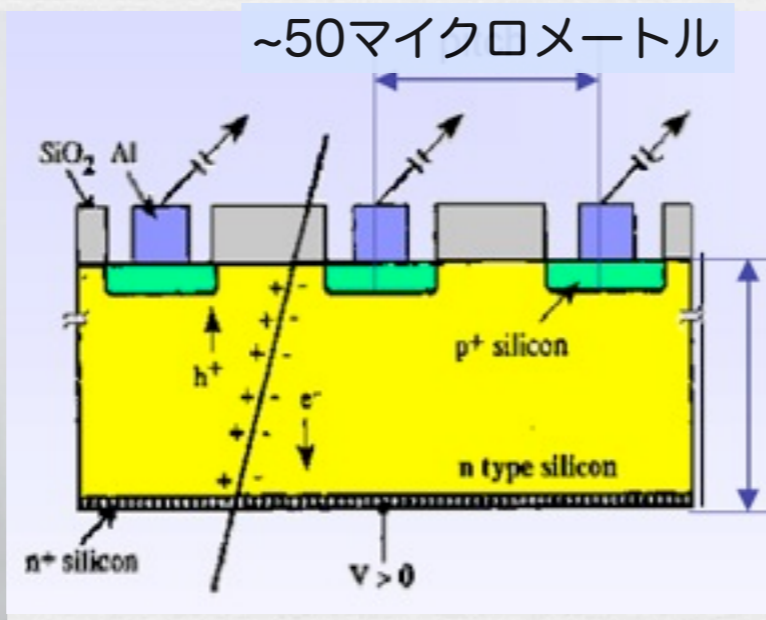
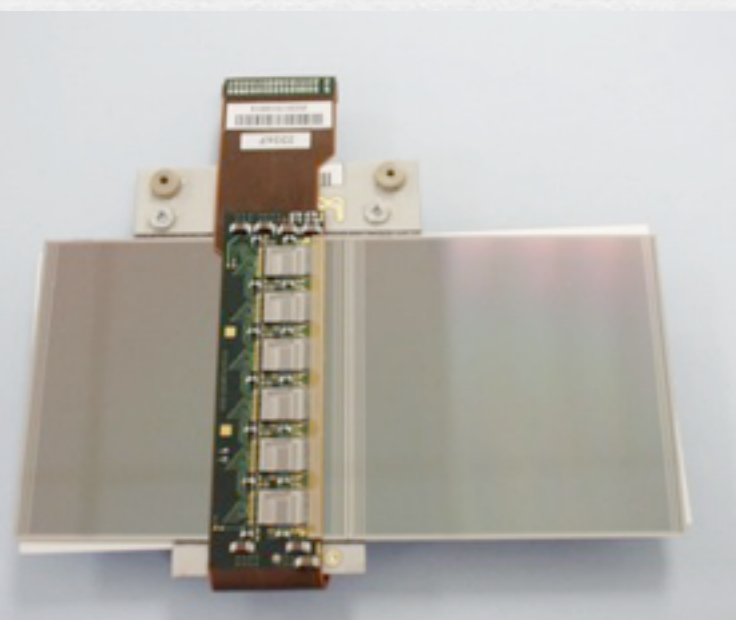
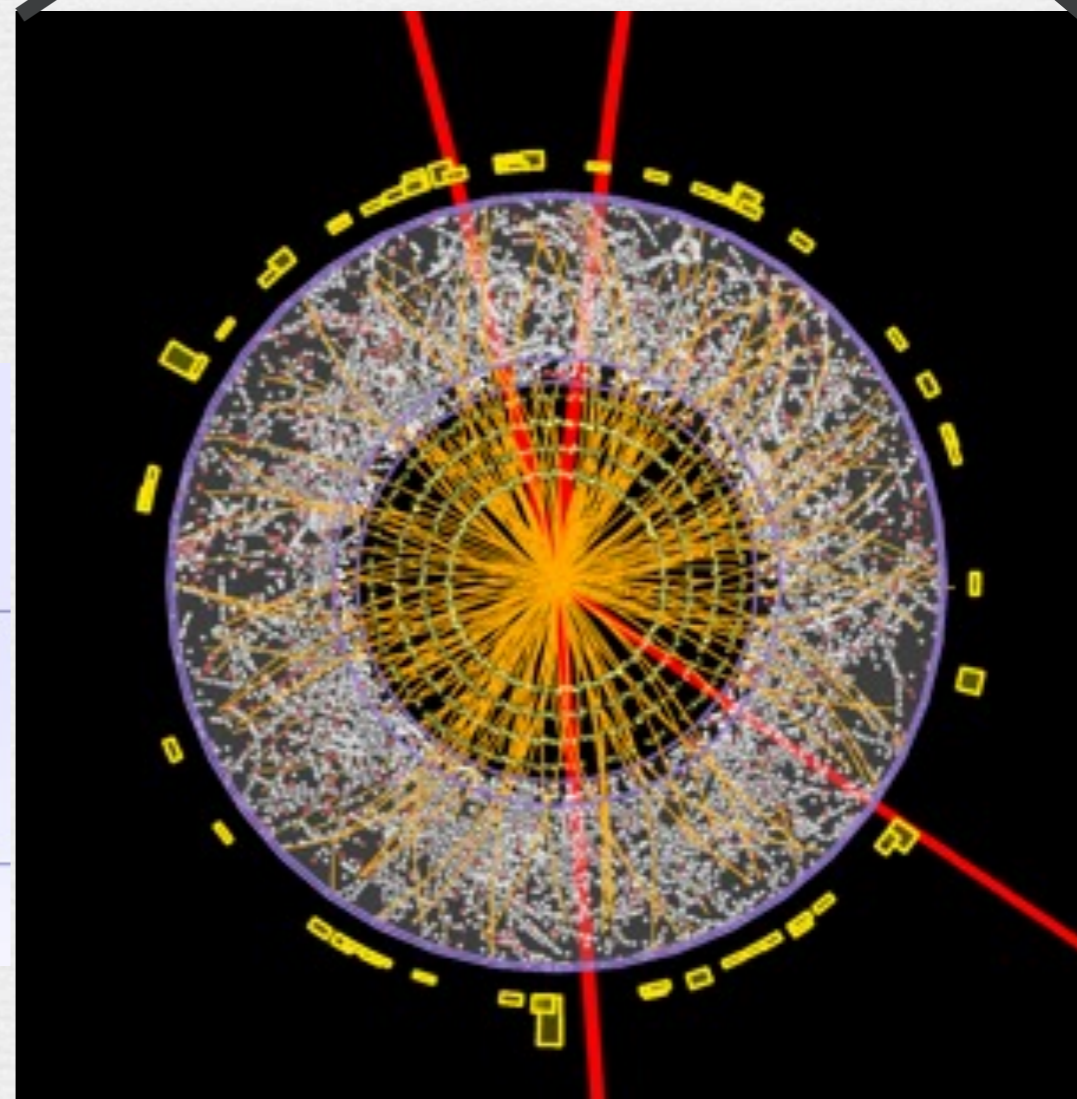
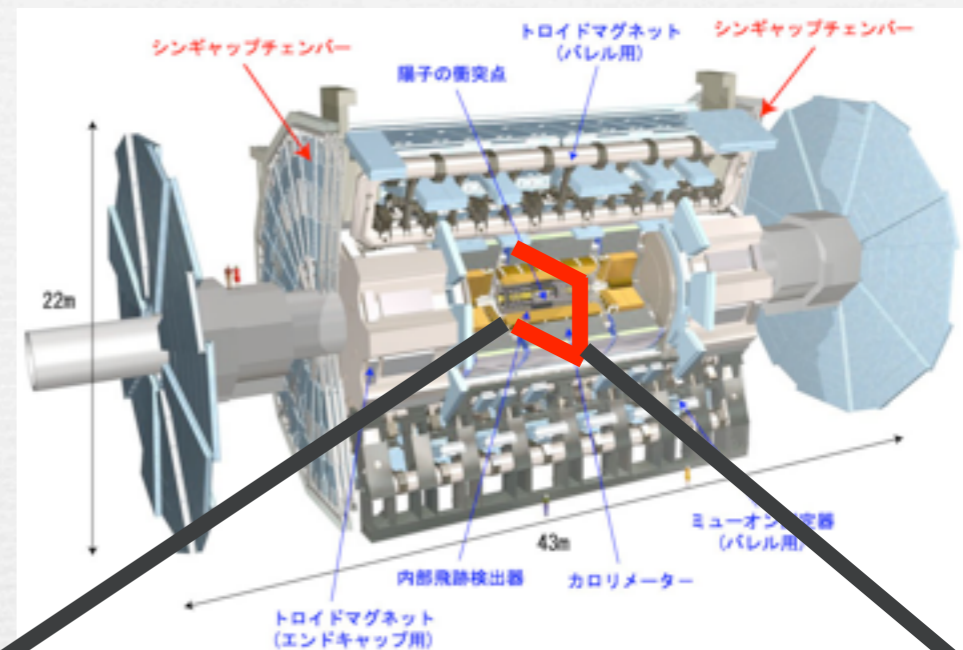
粒子の種類、エネルギー、運動量を測定



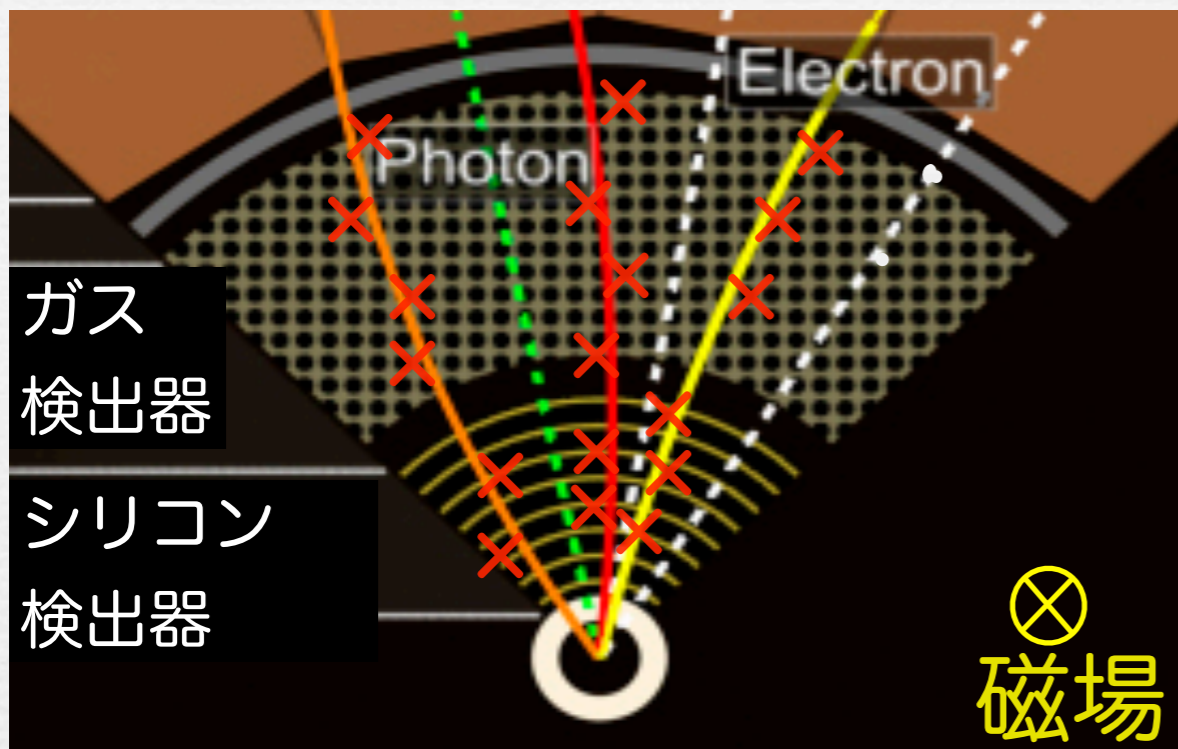
# 運動量測定 (飛跡検出器)



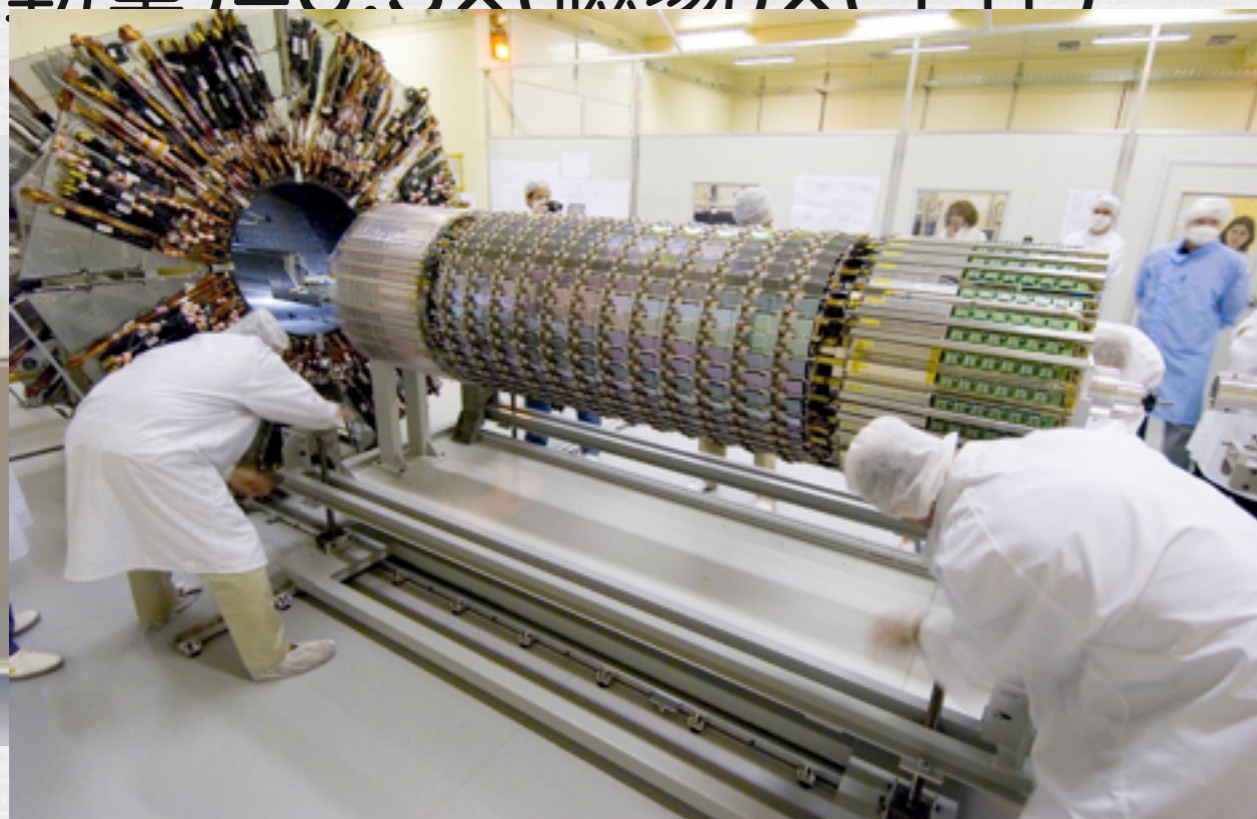
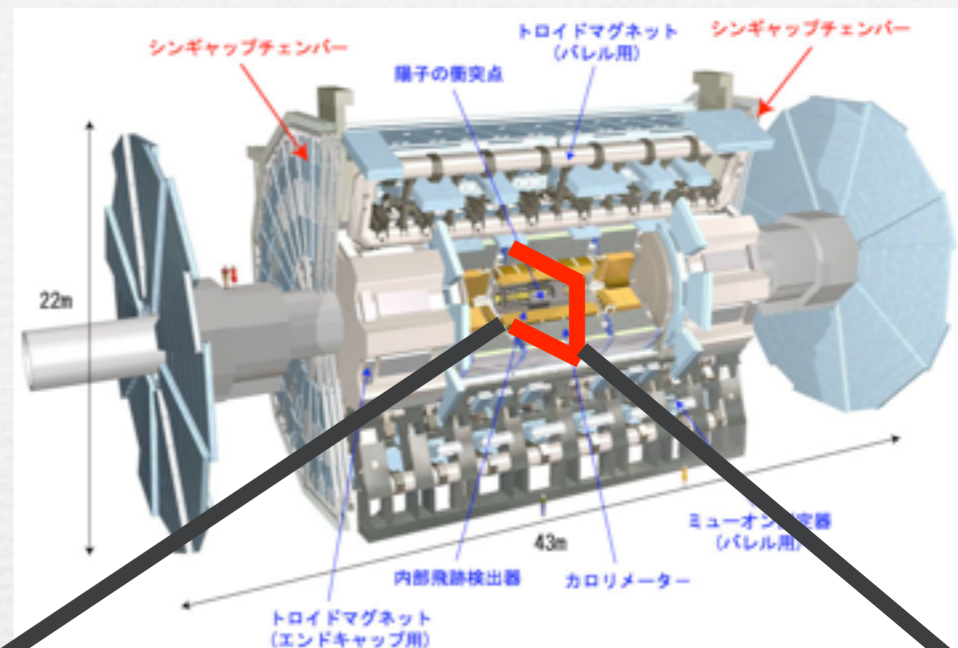
$$(\text{運動量}) = 0.3 \times (\text{磁場}) \times (\text{半径})$$



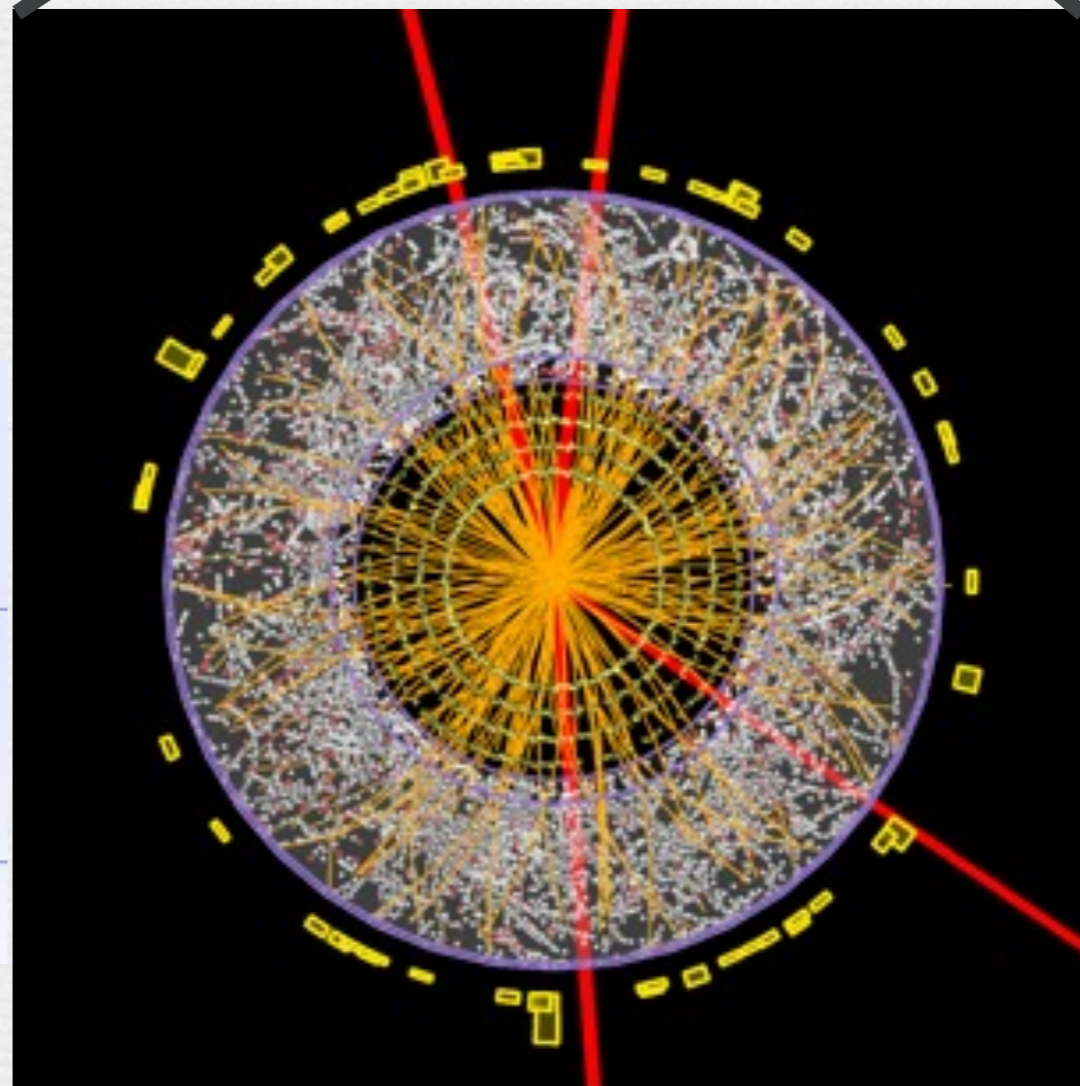
# 運動量測定 (飛跡検出器)



(運動量) = 0.3 × (磁場) × (半径)

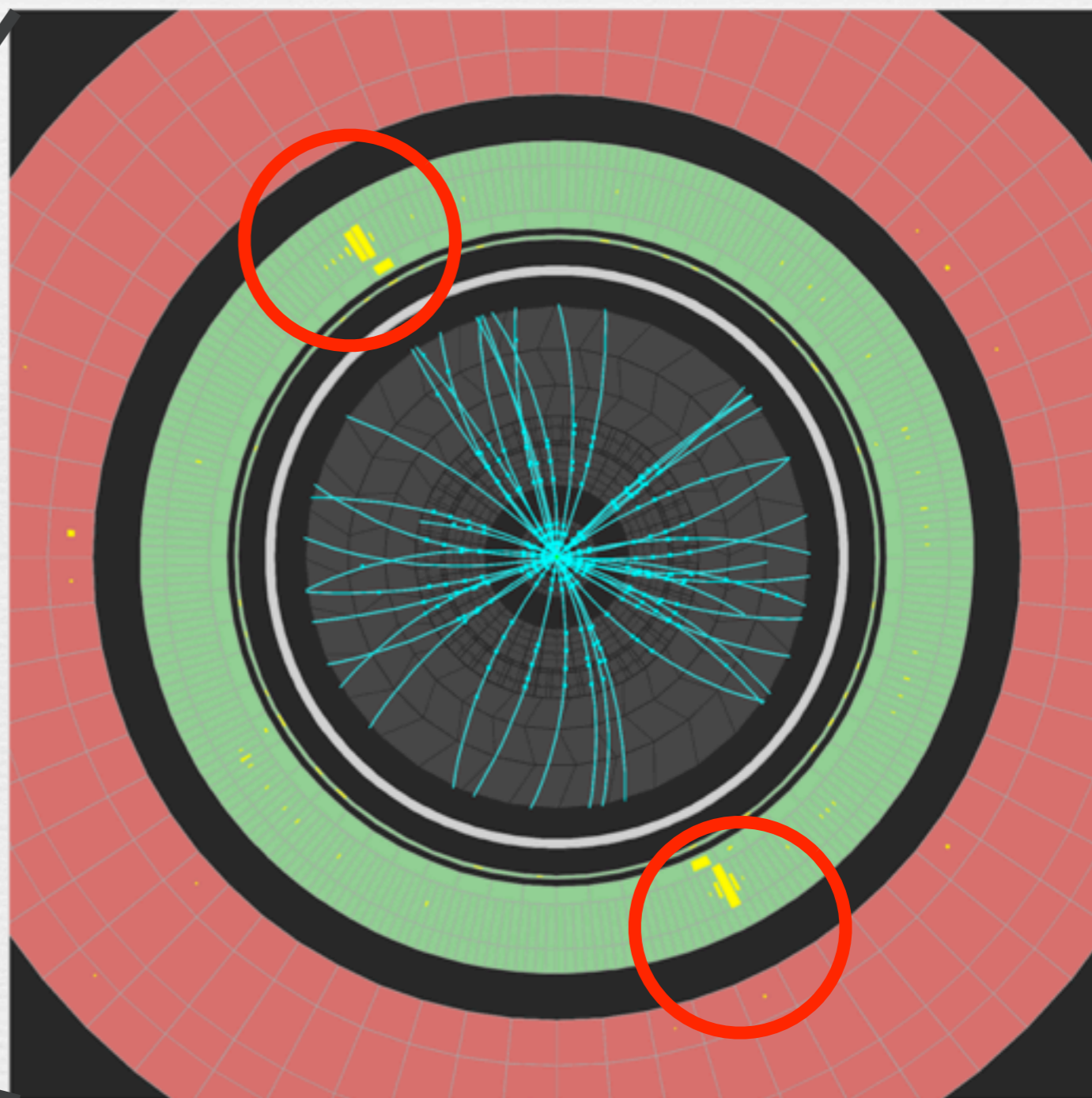
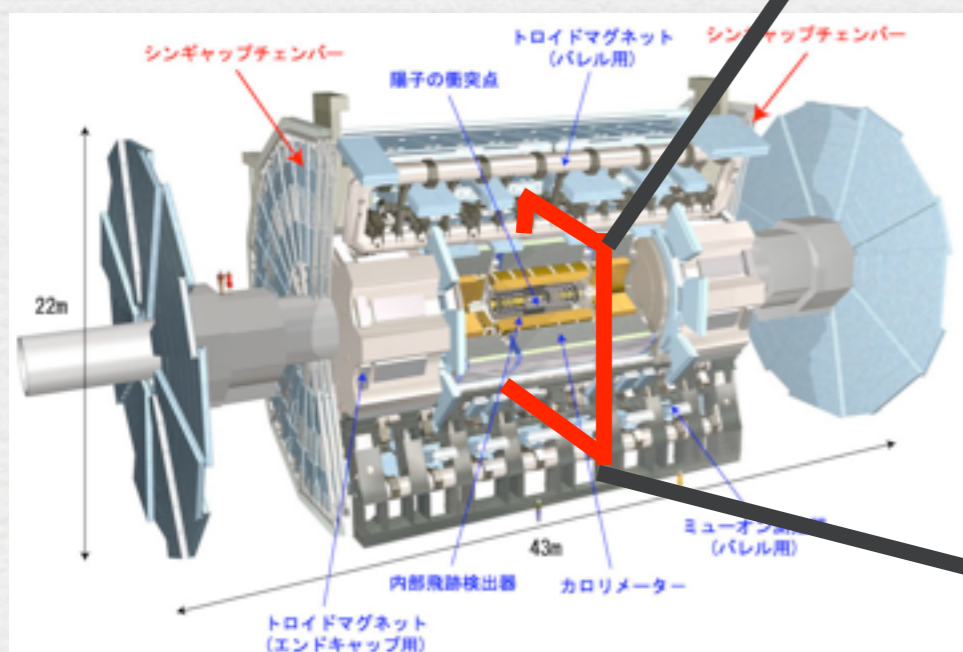
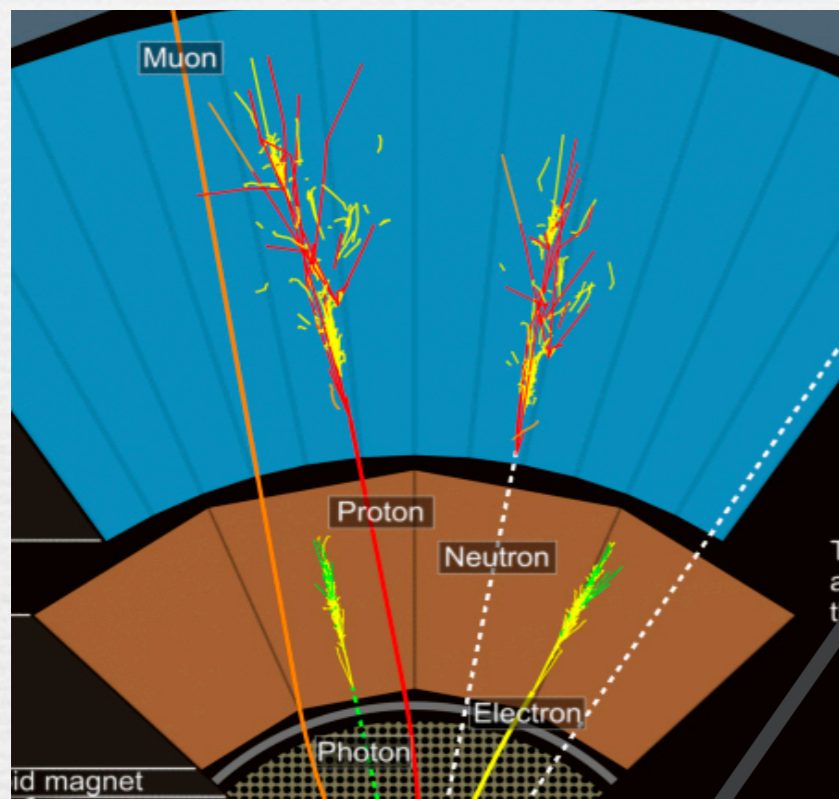


ル

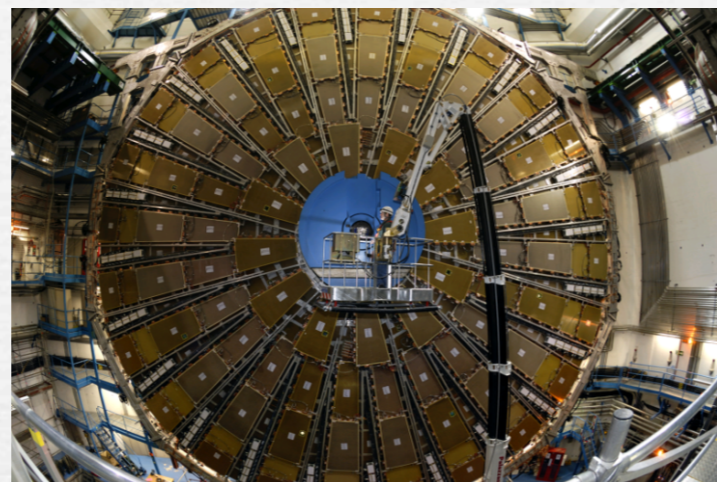
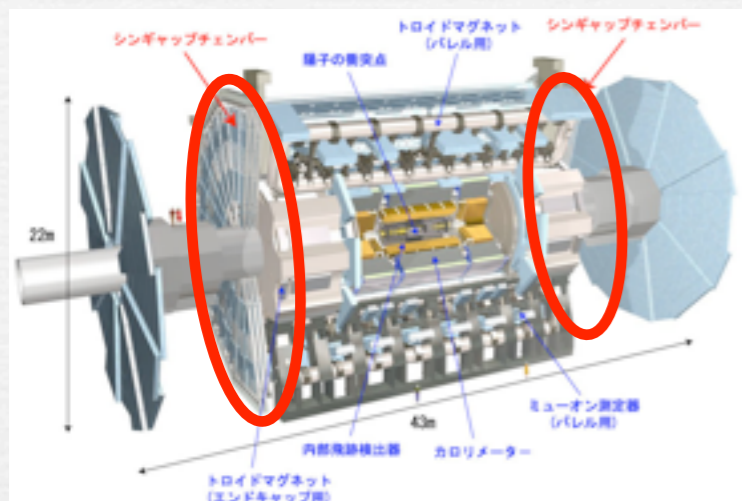


# エネルギー測定器（カロリメータ）

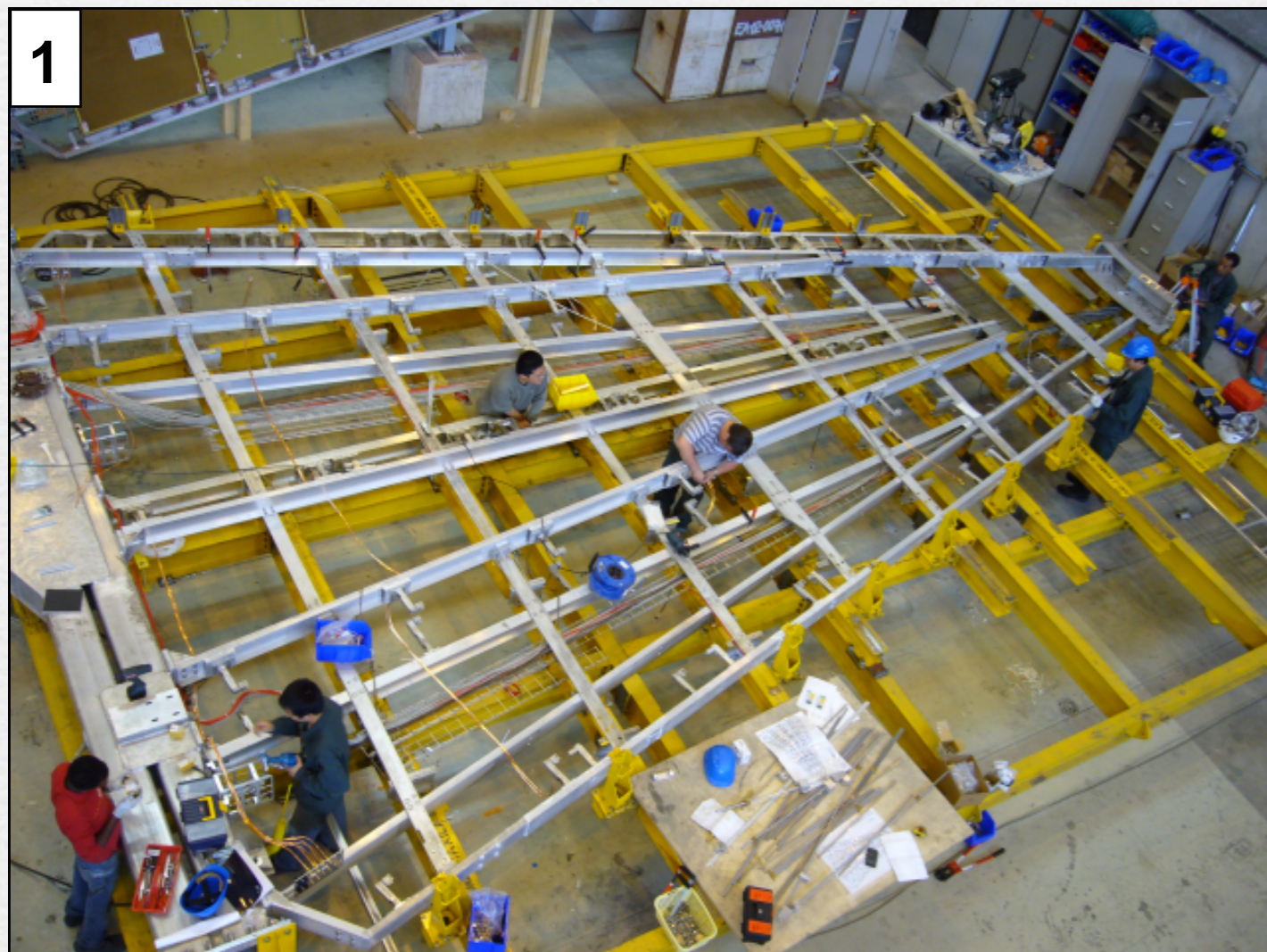
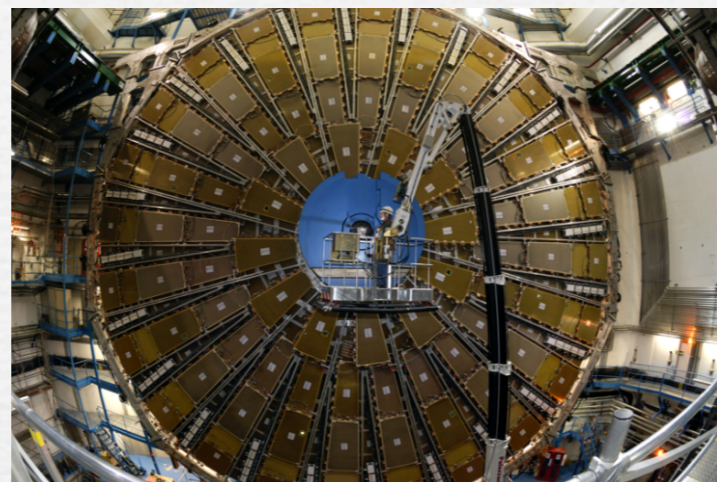
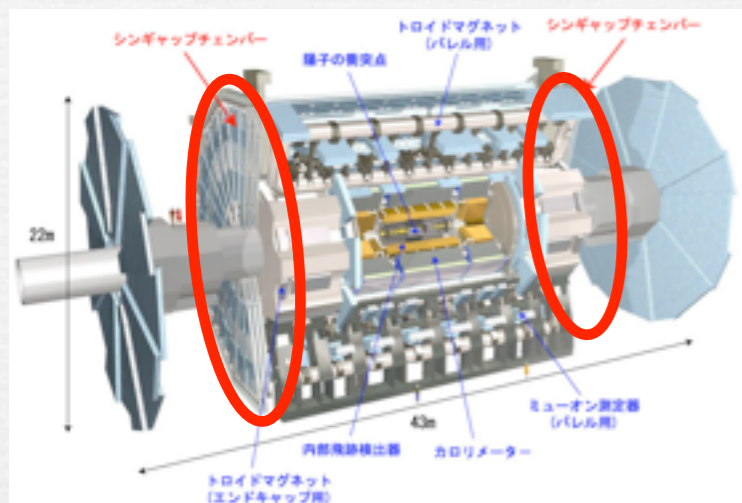
粒子（光子、電子、陽子、中性子など）を物質で止める  
そのとき出る光や熱を電気信号として捉える



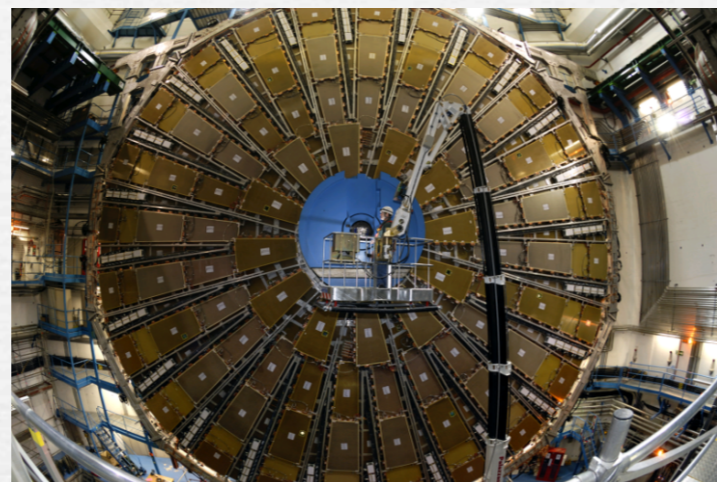
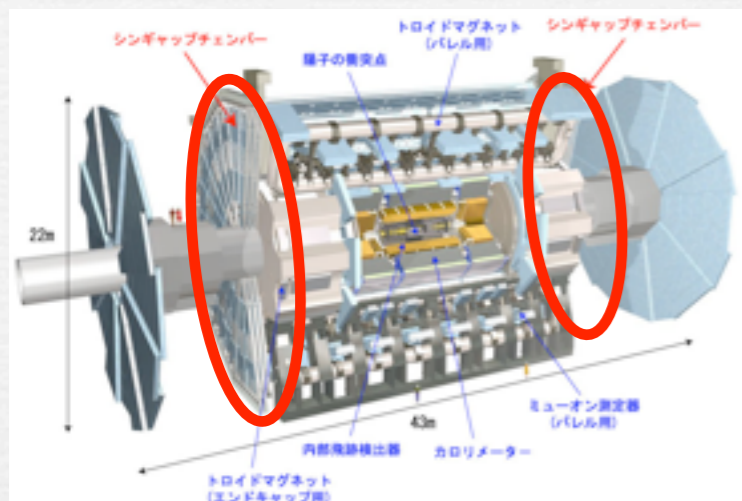
# $\mu$ 粒子検出器の組み立て



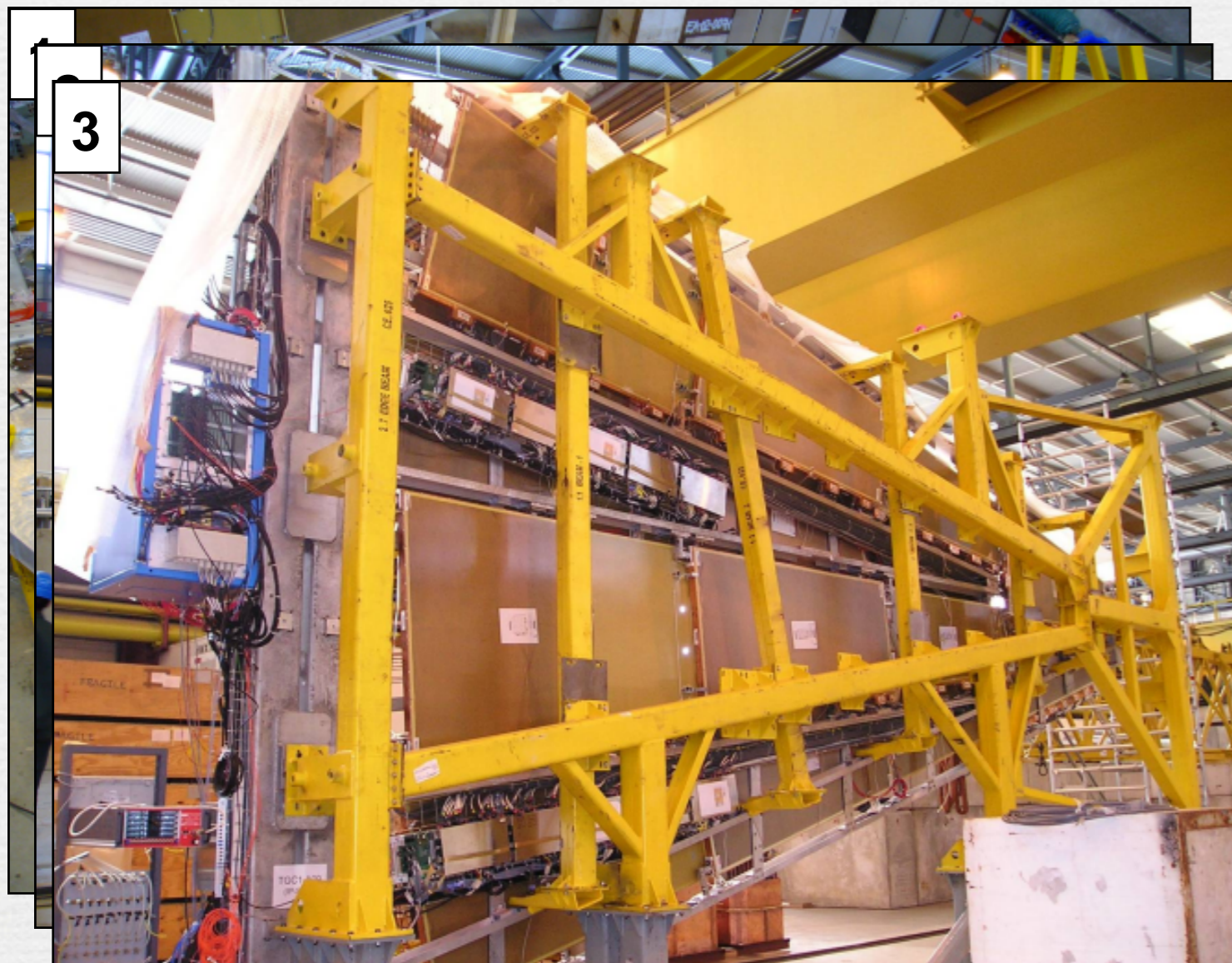
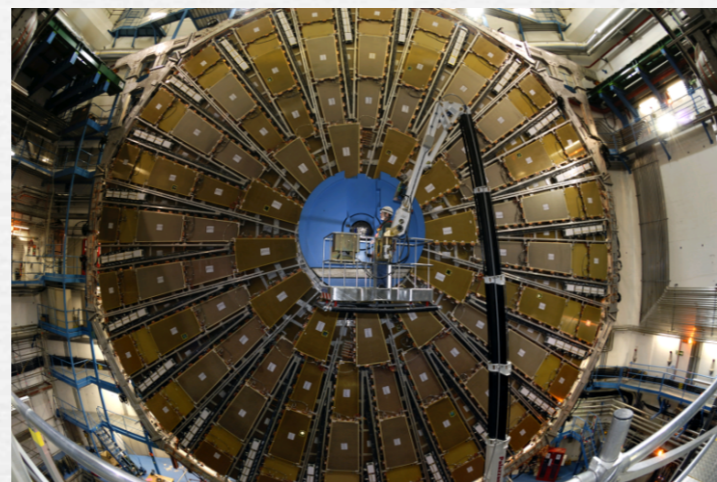
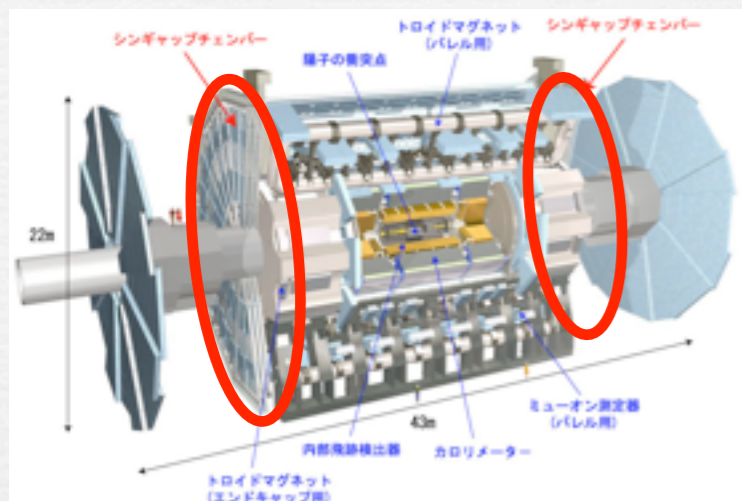
# $\mu$ 粒子検出器の組み立て



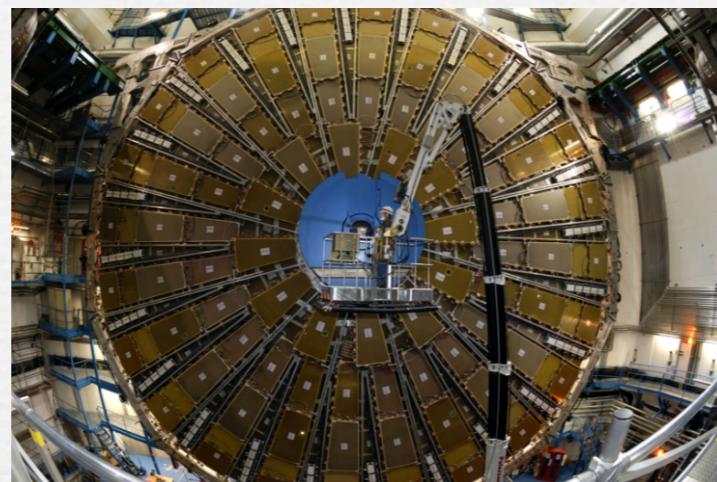
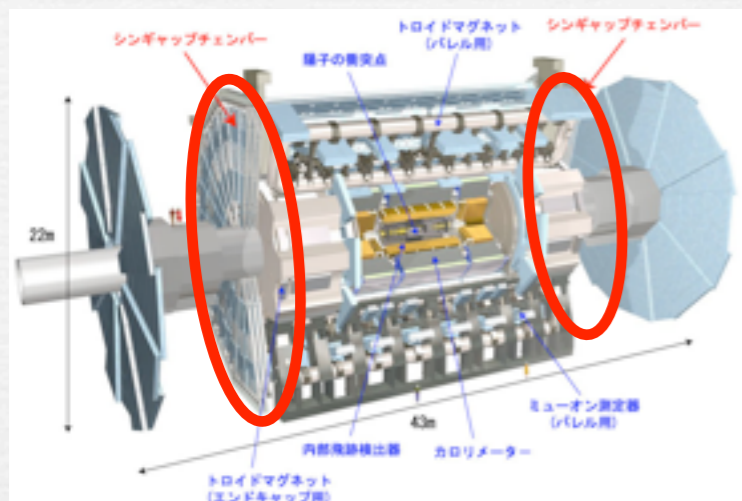
# $\mu$ 粒子検出器の組み立て



# $\mu$ 粒子検出器の組み立て



# $\mu$ 粒子検出器の組み立て

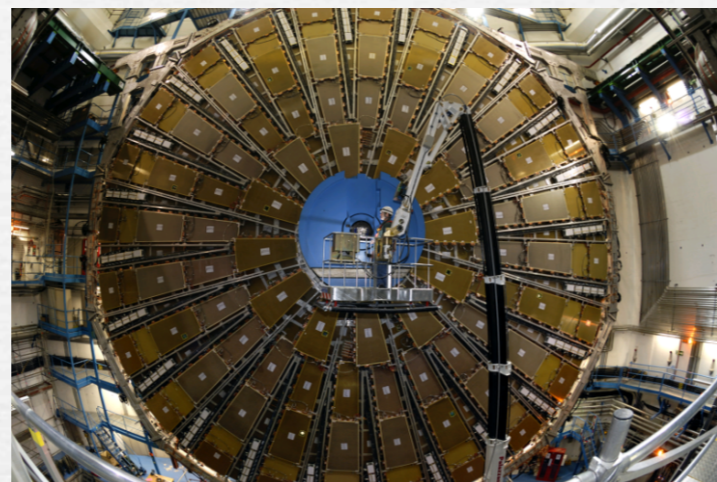
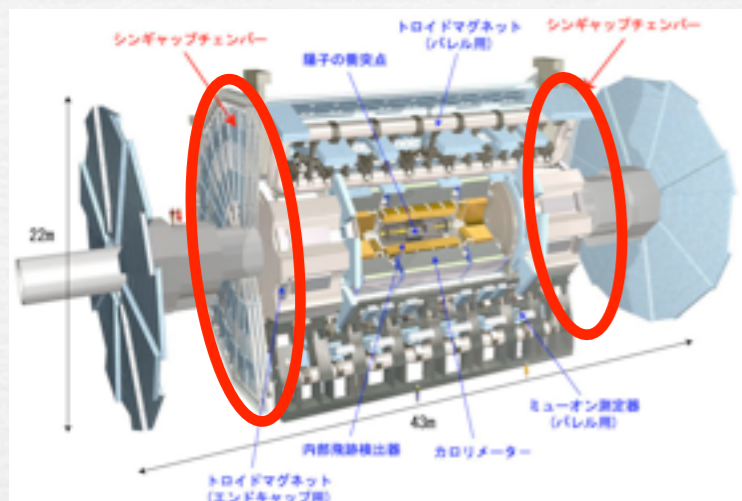


4

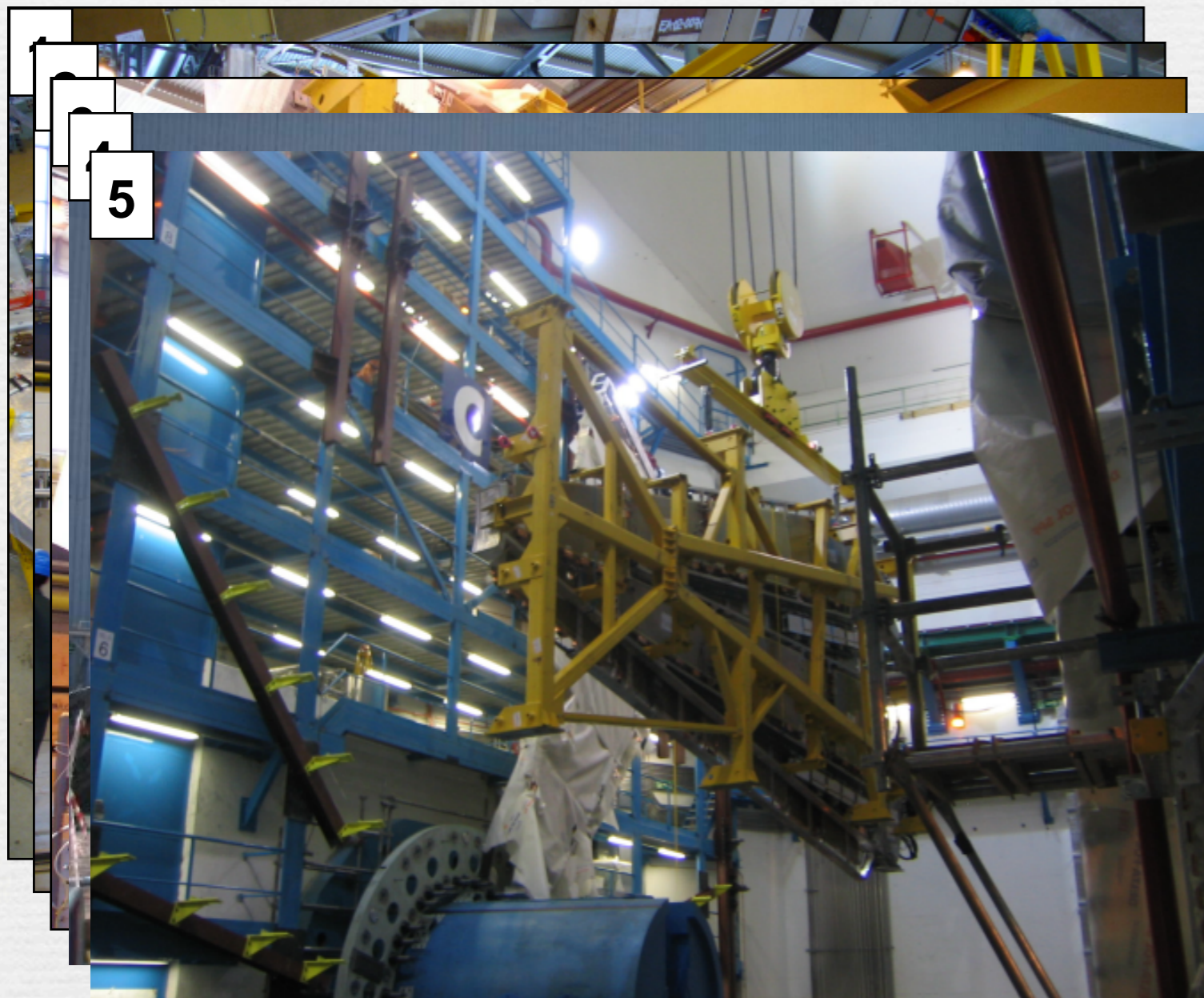
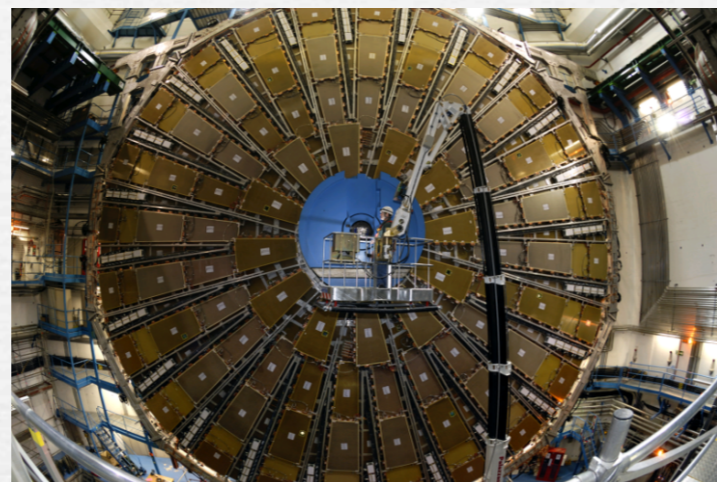
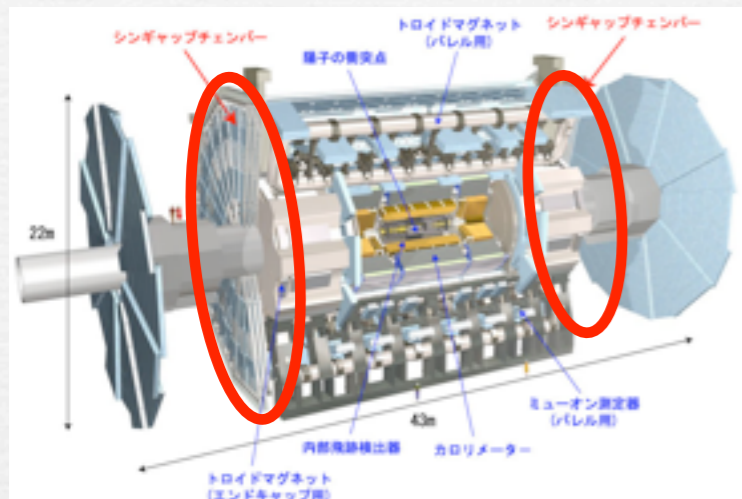




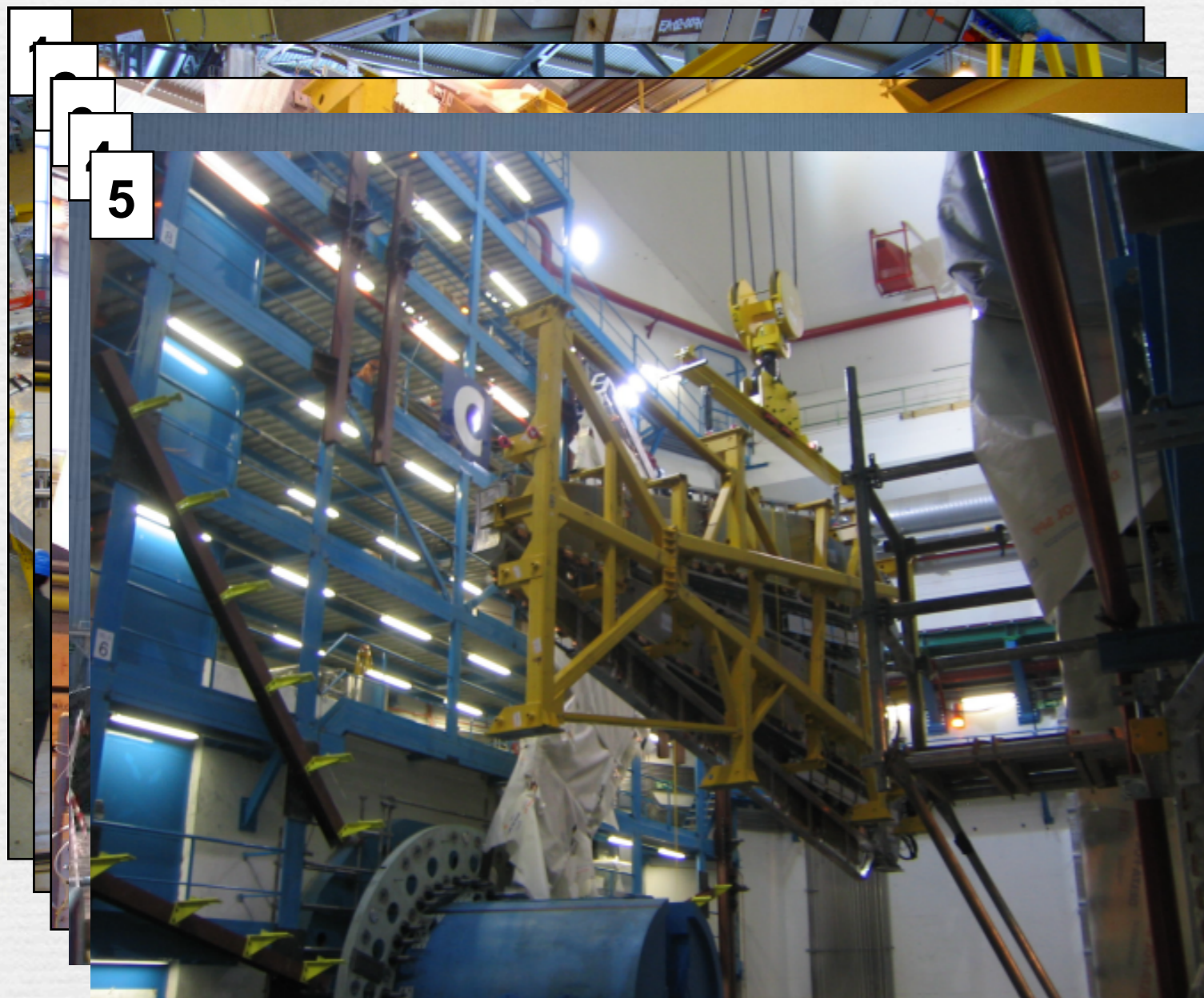
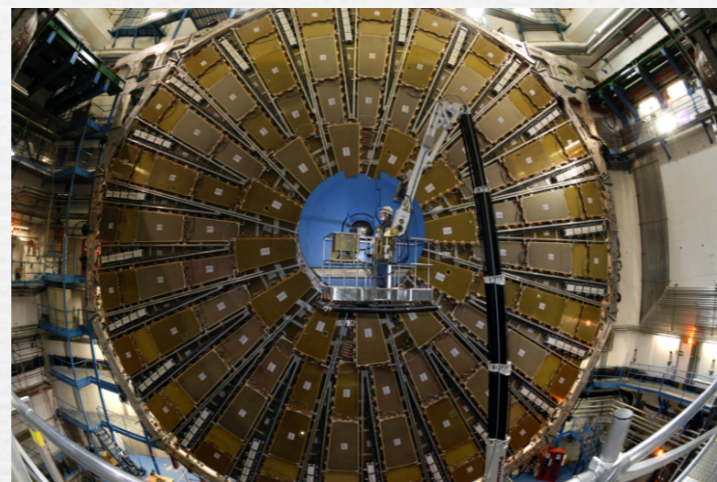
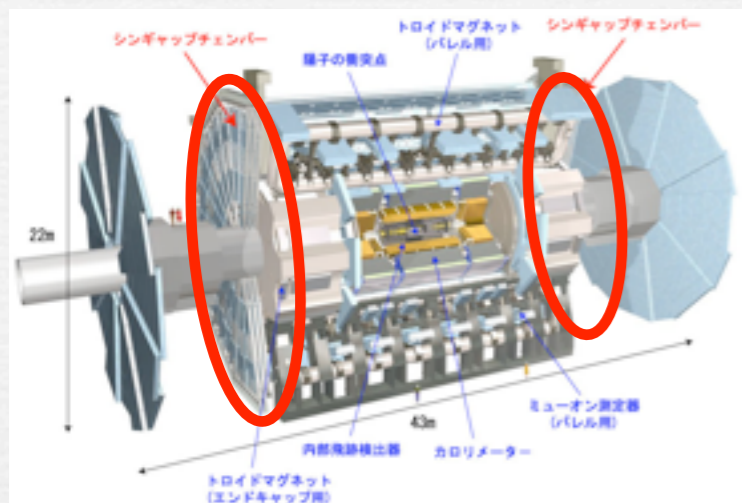
# $\mu$ 粒子検出器の組み立て



# $\mu$ 粒子検出器の組み立て



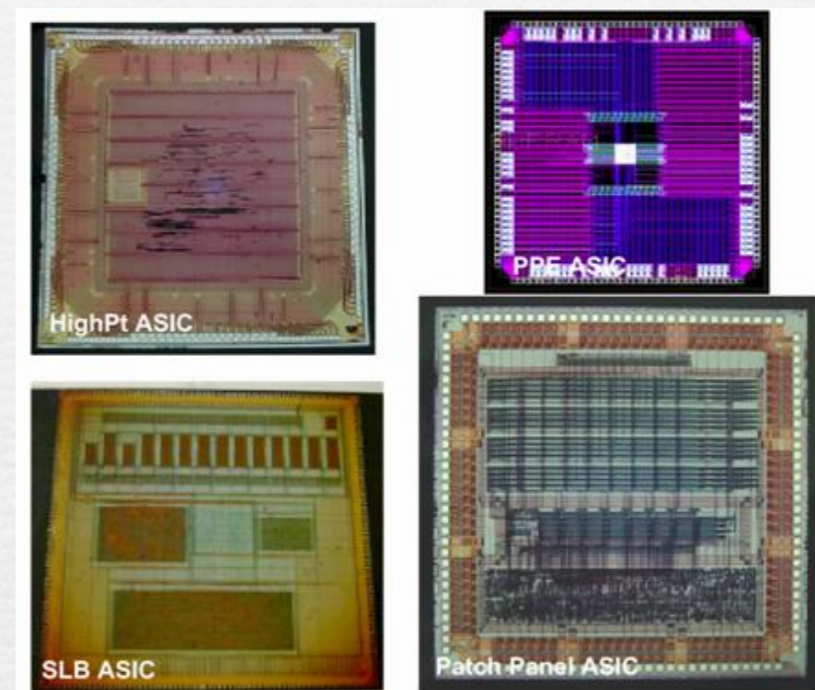
# $\mu$ 粒子検出器の組み立て



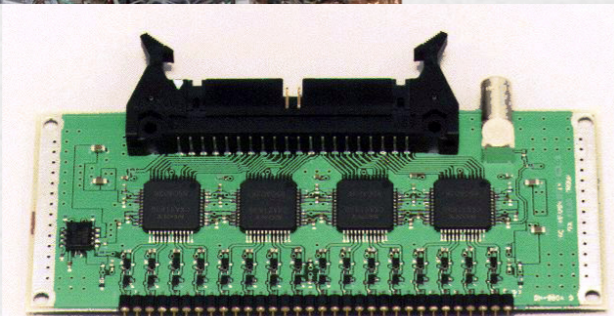
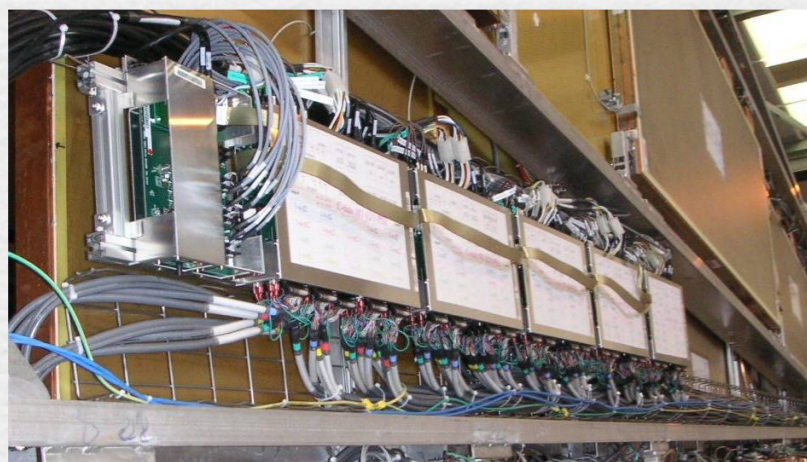
# 検出器の建設



32万チャンネルの回路も研究者の手作り



若い学生達が頑張っています！！！！



# 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 (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 (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

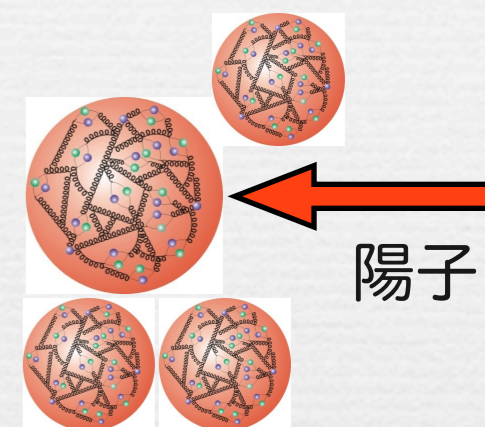
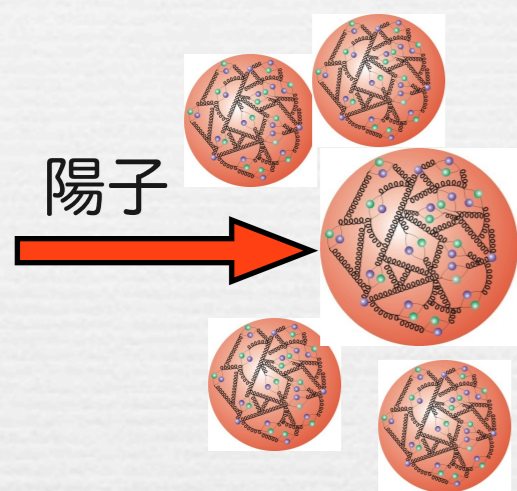
ヒッグス粒子は、  
5,000,000,000(五十億)回に1回程度しか生成しない！



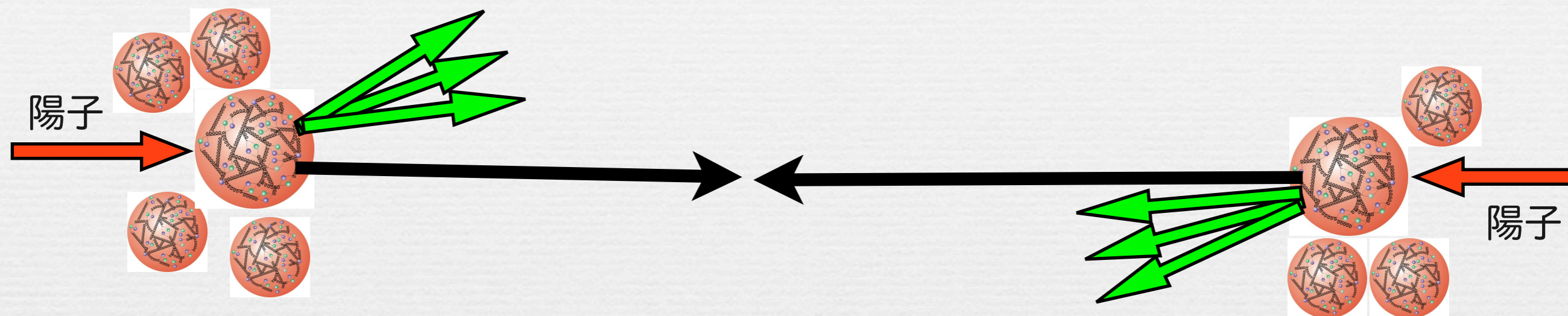
陽子同士の衝突：次の反応は予測不可能  
反応の起こる確率は解る

# 陽子・陽子衝突

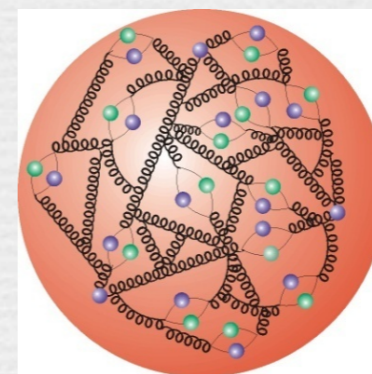
# 陽子・陽子衝突



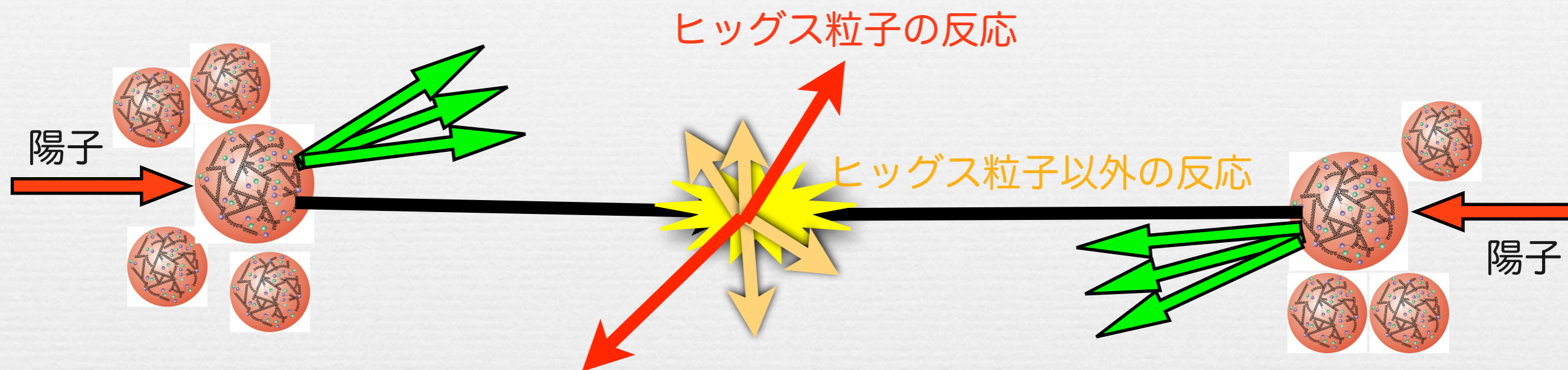
# 陽子・陽子衝突



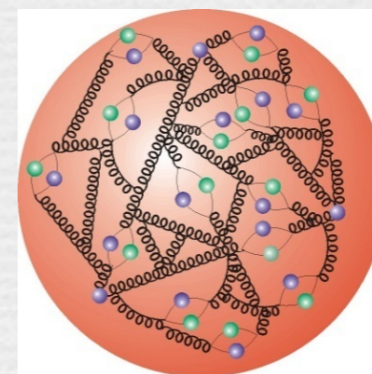
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン  
一部だけが衝突による反応に関与



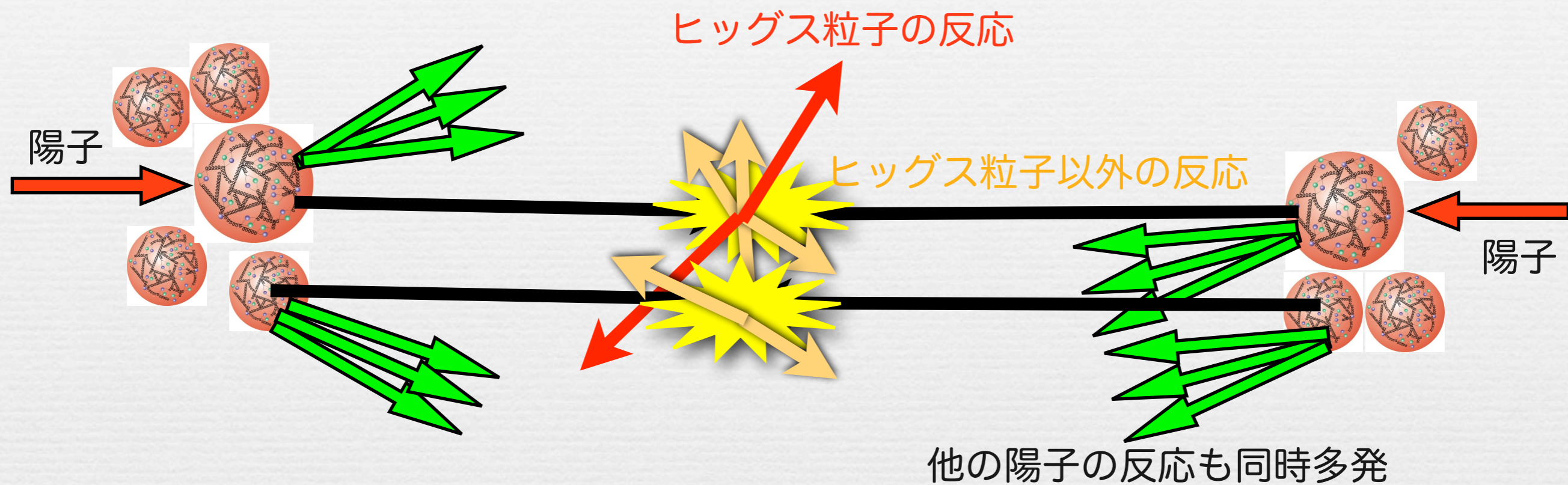
# 陽子・陽子衝突



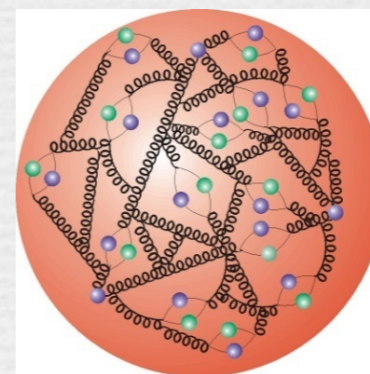
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン  
一部だけが衝突による反応に関与



# 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

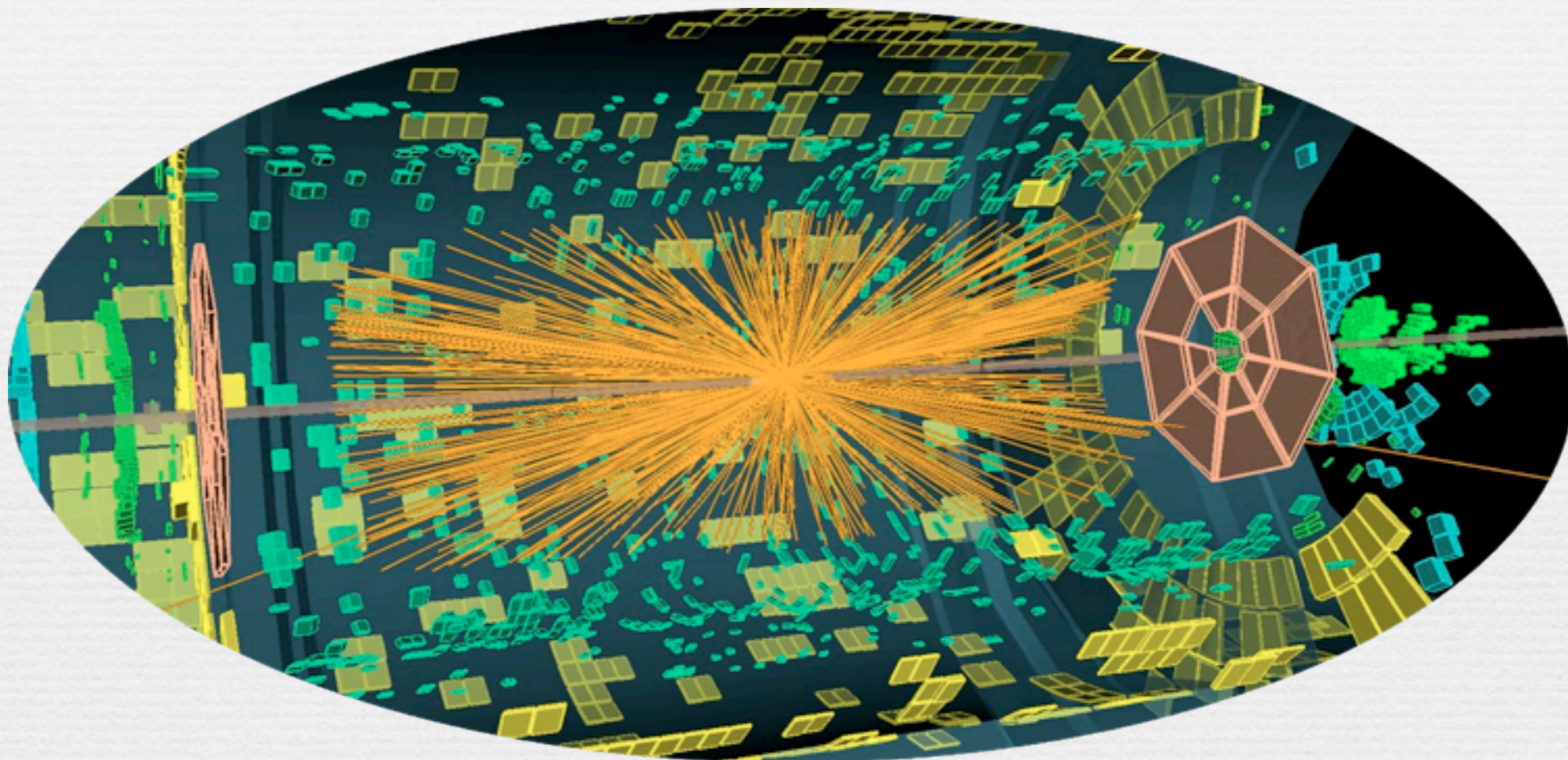




# 実際の陽子陽子衝突反応

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



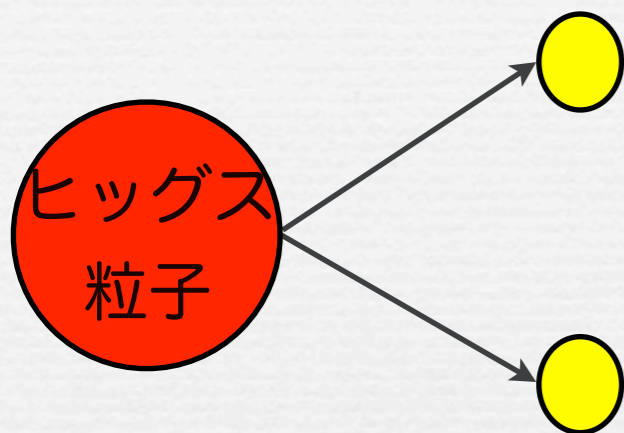
ヒッグス粒子がどんな安定粒子に化けるか知えう

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

# ヒッグス粒子が何に化けるか？



ヒッグス粒子は、質量の大きな素粒子が好き  
 $t\bar{t}$ ,  $ZZ$ ,  $W^+W^-$ ,  $b\bar{b}$ ,  $\tau^+\tau^-$ , ... 光子 光子

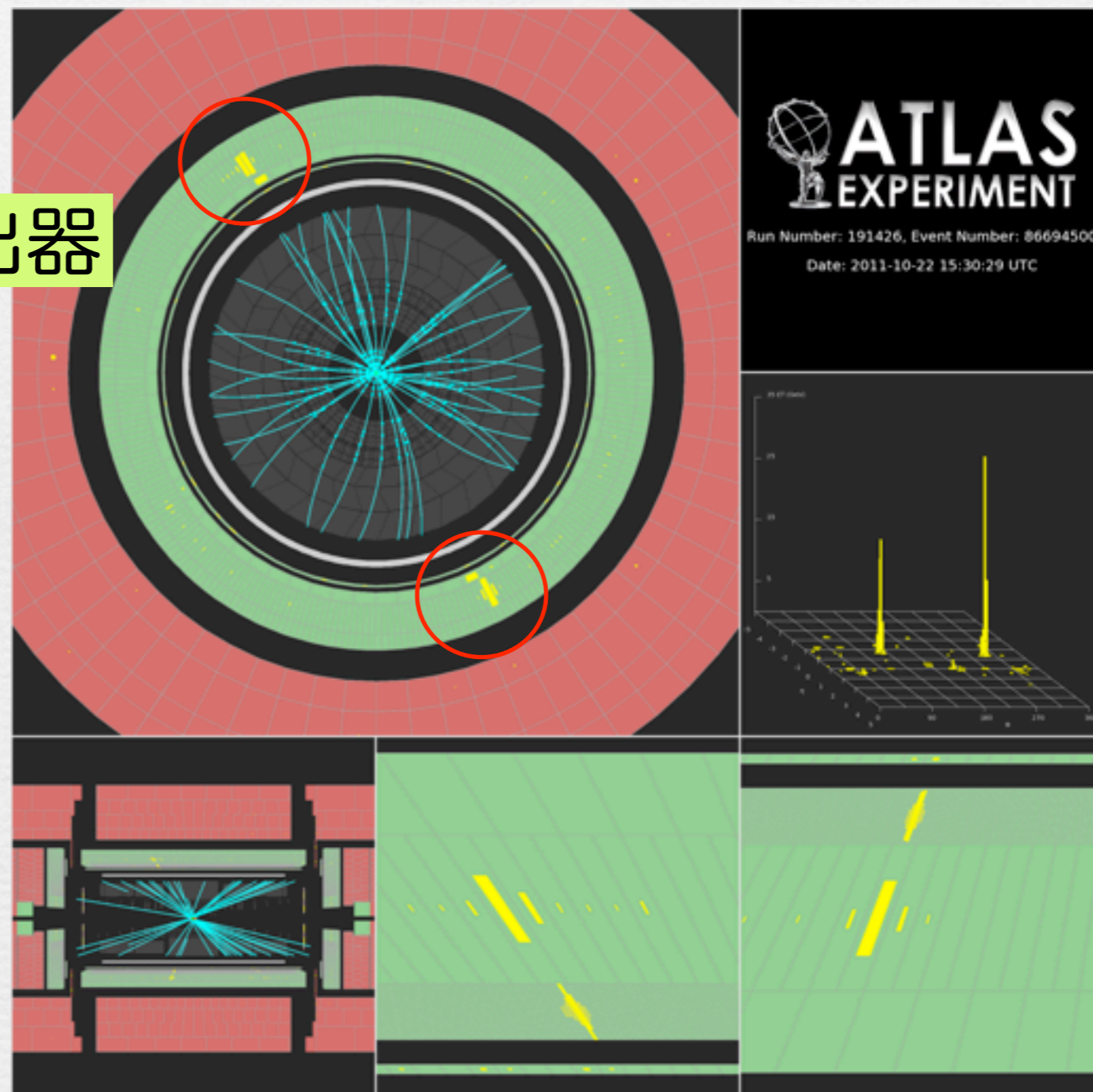
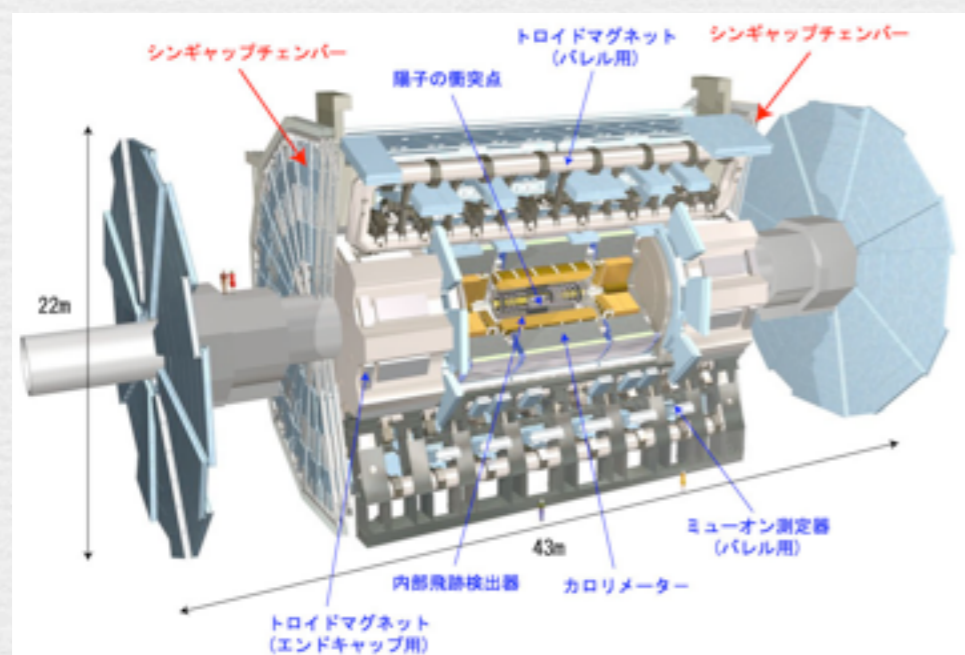
化ける確率はわかるが、何に化けるかは予想できない

$H \rightarrow ZZ$	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



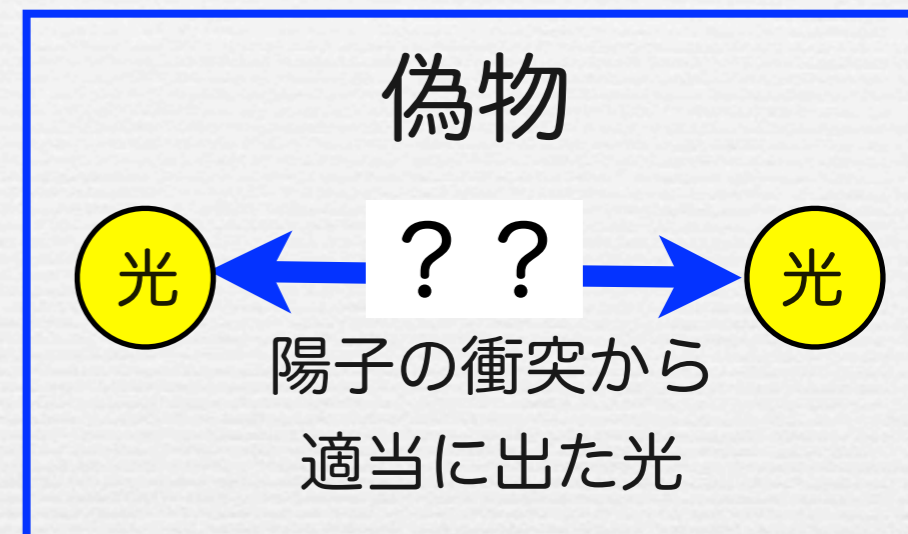
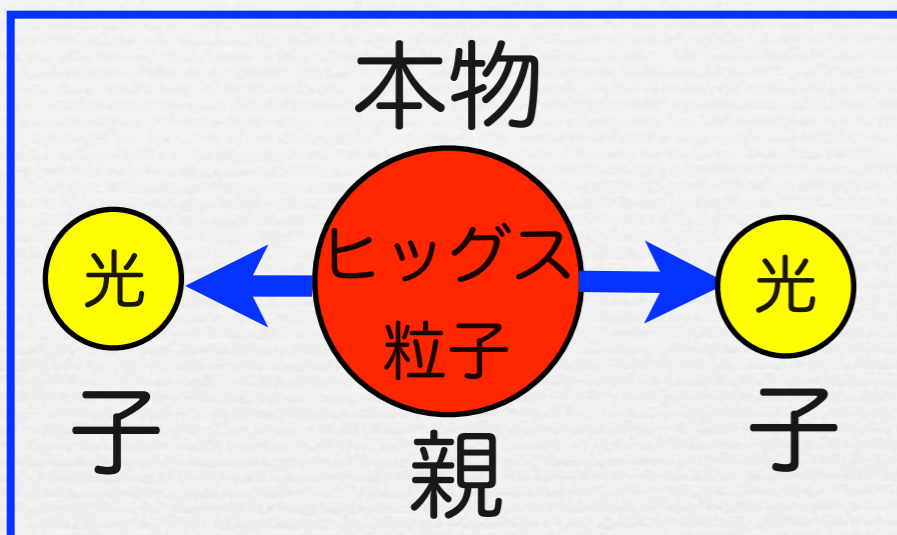
偽物：

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

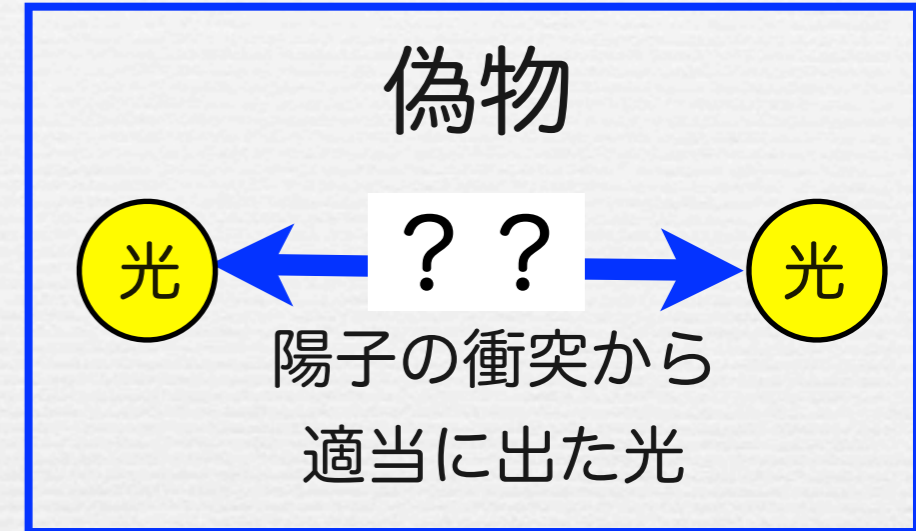
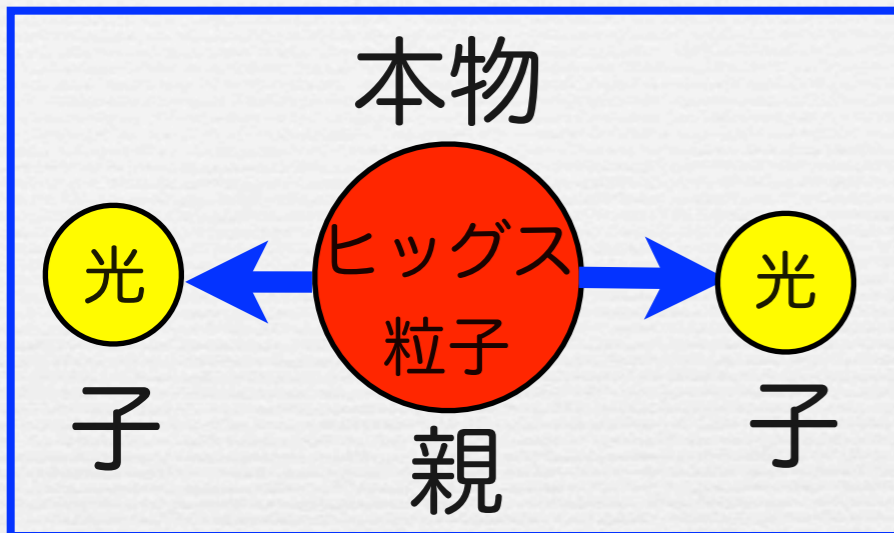
# 質量の復元

2本の光子のあるイベントは2種類に大別される



# 質量の復元

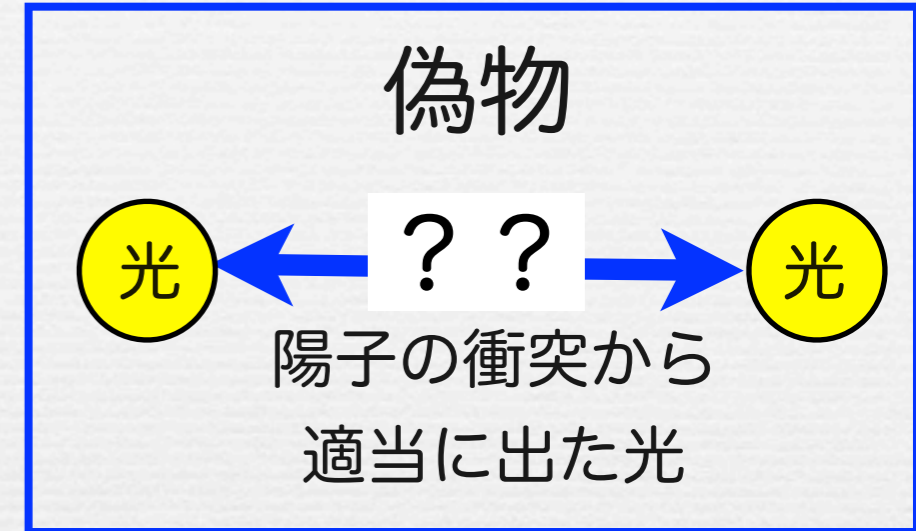
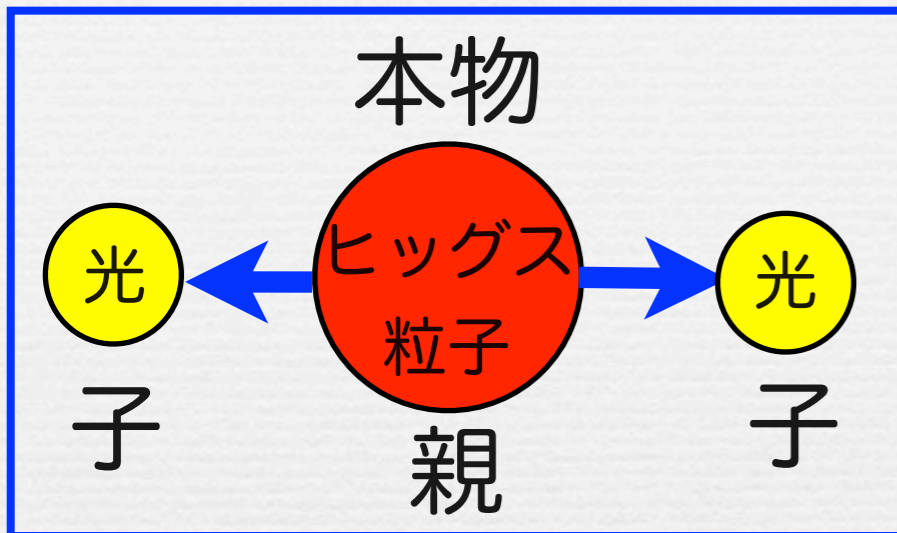
2本の光子のあるイベントは2種類に大別される



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

# 質量の復元

2本の光子のあるイベントは2種類に大別される



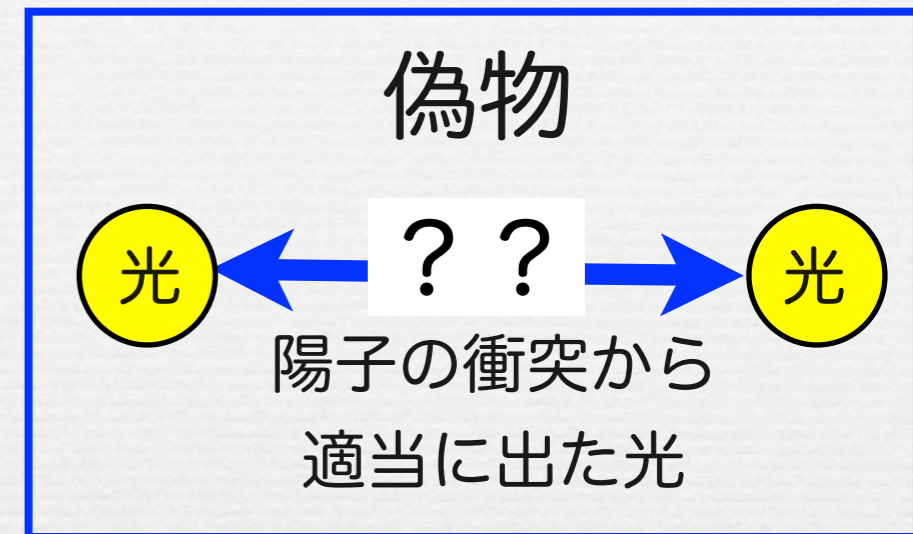
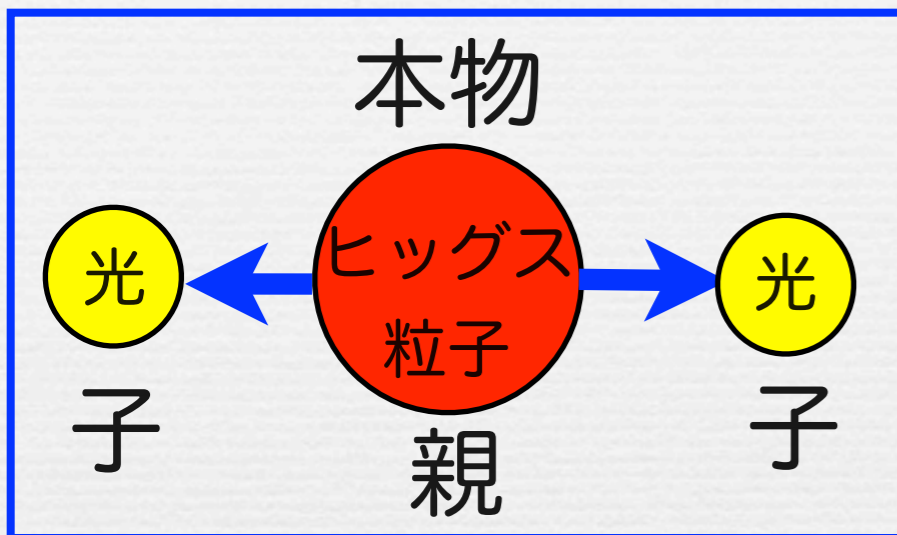
$$(親の質量)^2 = (子のエネルギー和)^2 - (子の運動量和)^2$$

ヒッグス粒子  
||  
の質量

||  
適当な質量

# 質量の復元

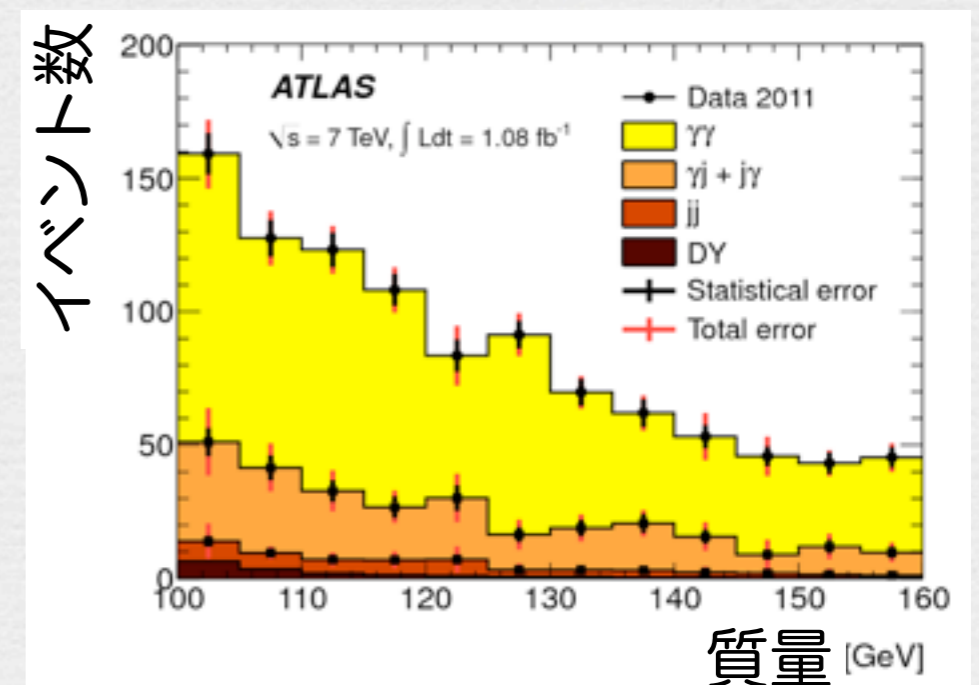
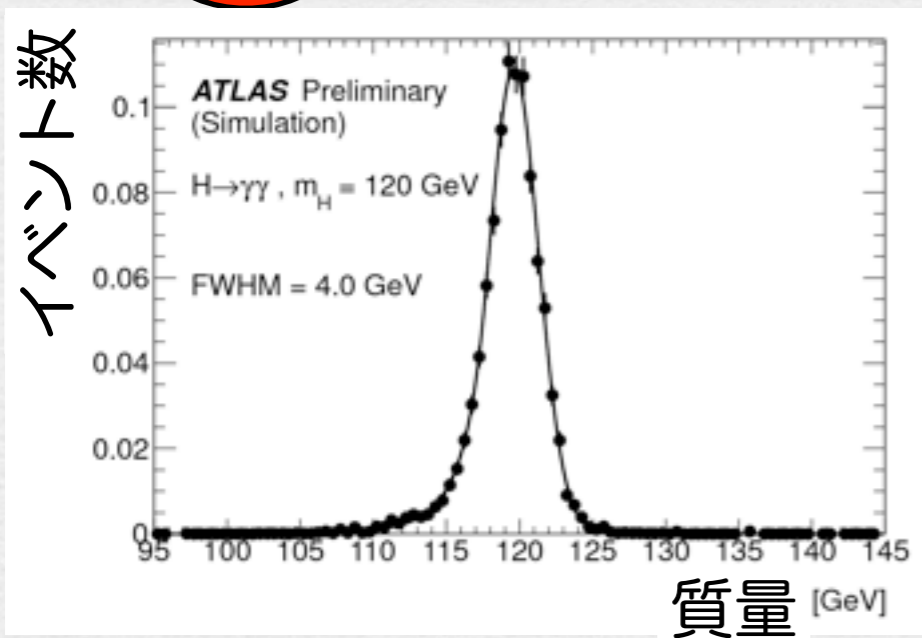
2本の光子のあるイベントは2種類に大別される



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

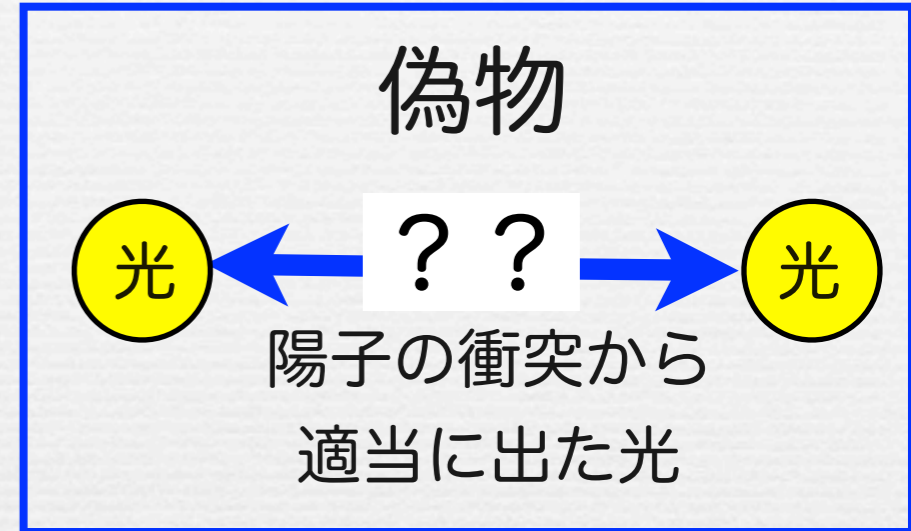
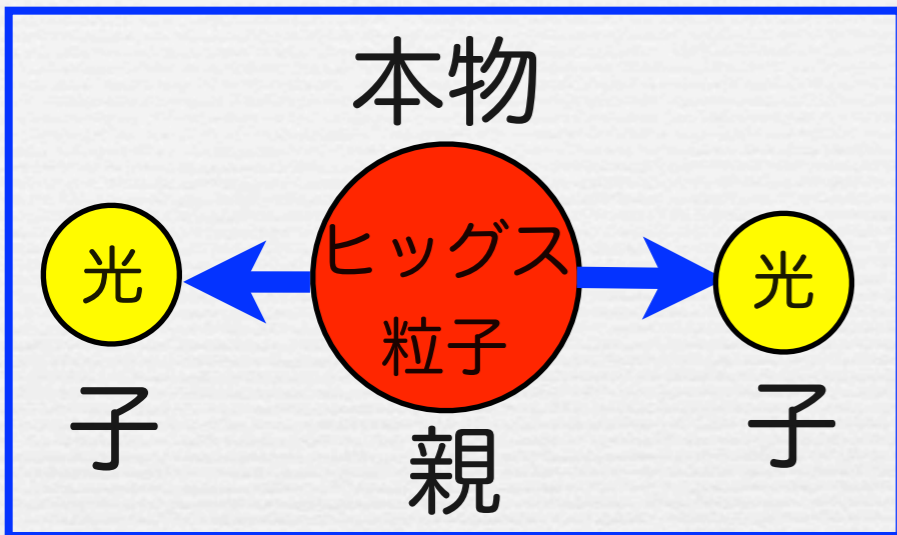
ヒッグス粒子  
||  
の質量

||  
適当な質量



# 質量の復元

2本の光子のあるイベントは2種類に大別される



$(\text{親の質量})^2 =$

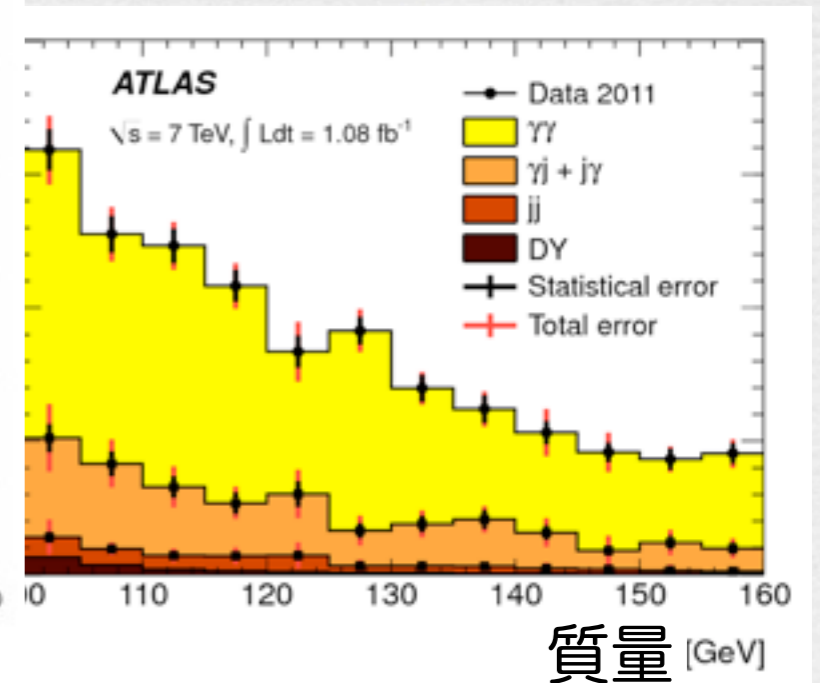
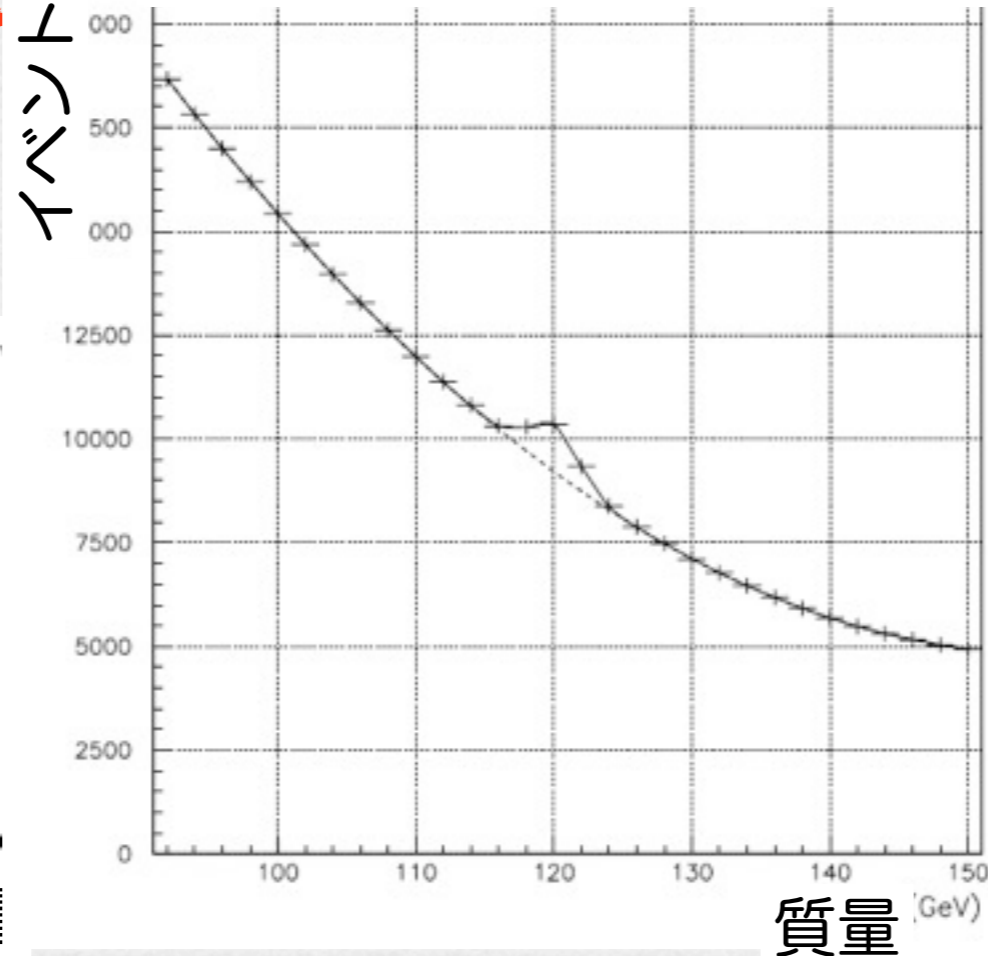
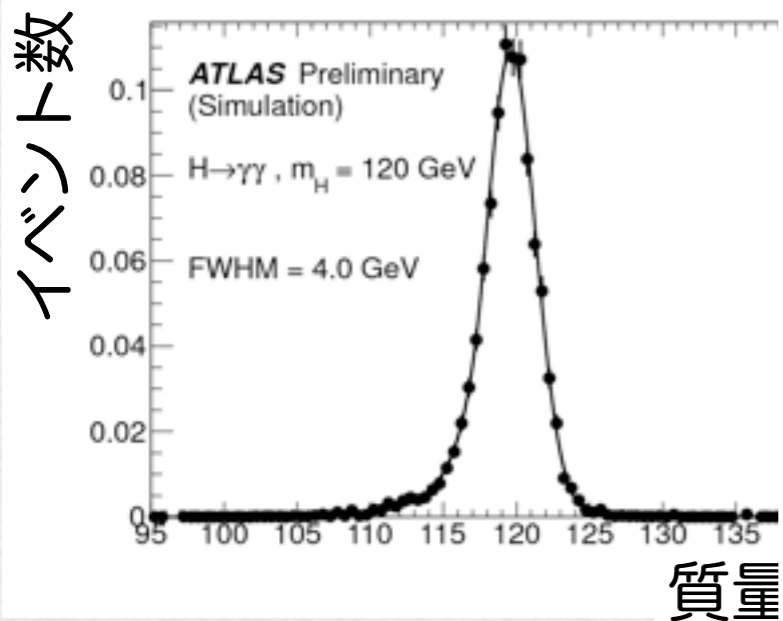
ヒッグス粒子の質量

総イベント数

シミュレーションによる予想

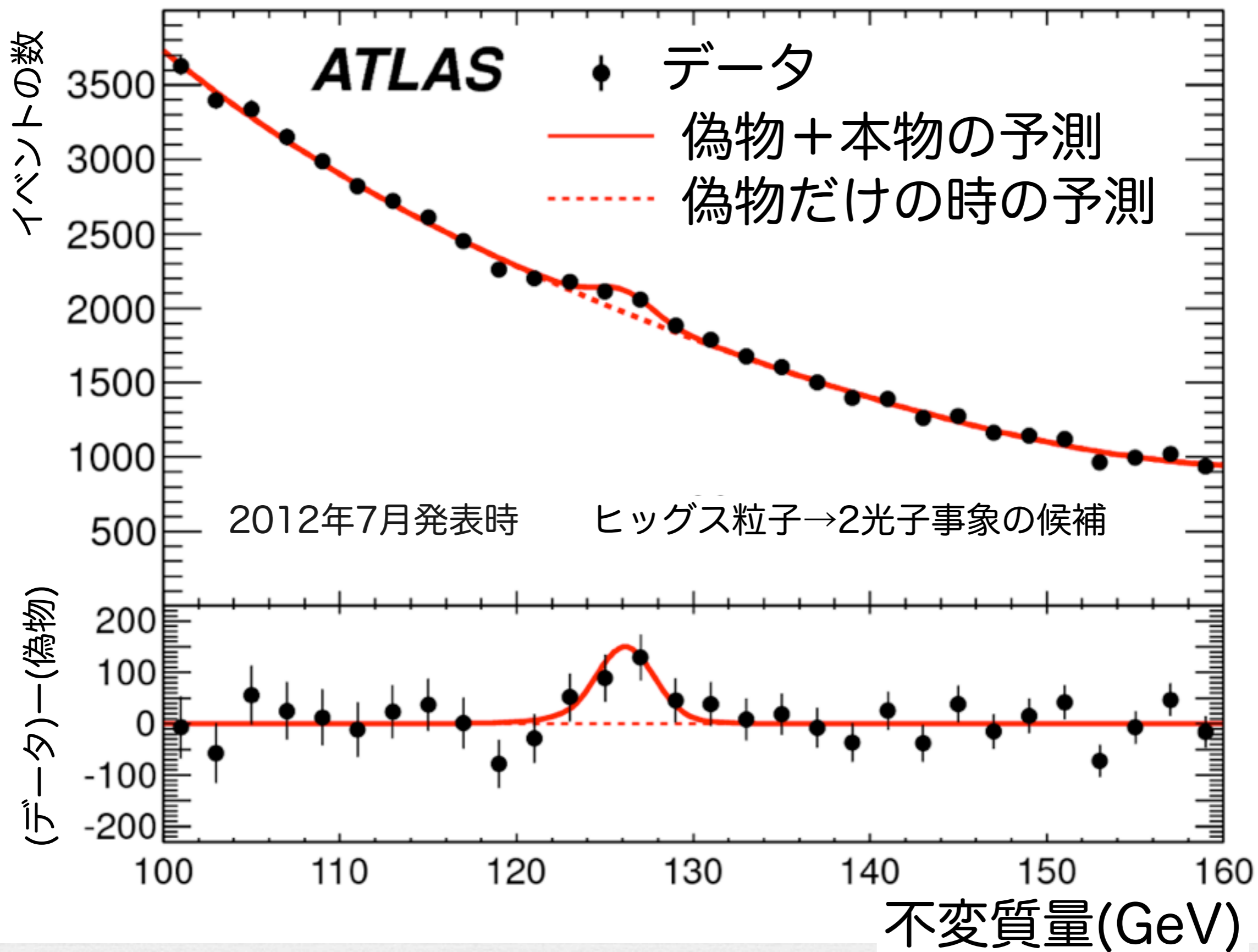
$(\text{子の運動量和})^2$

適当な質量

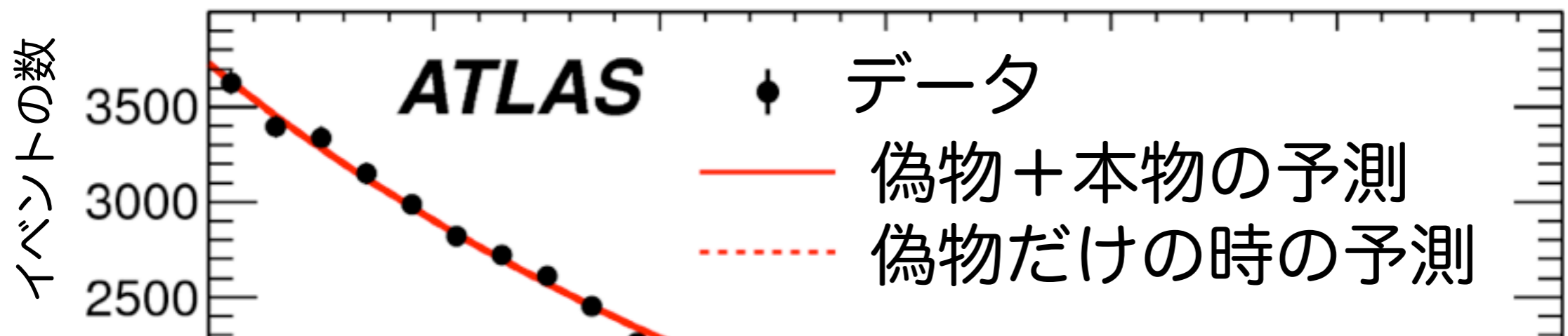




# 実際のデータ



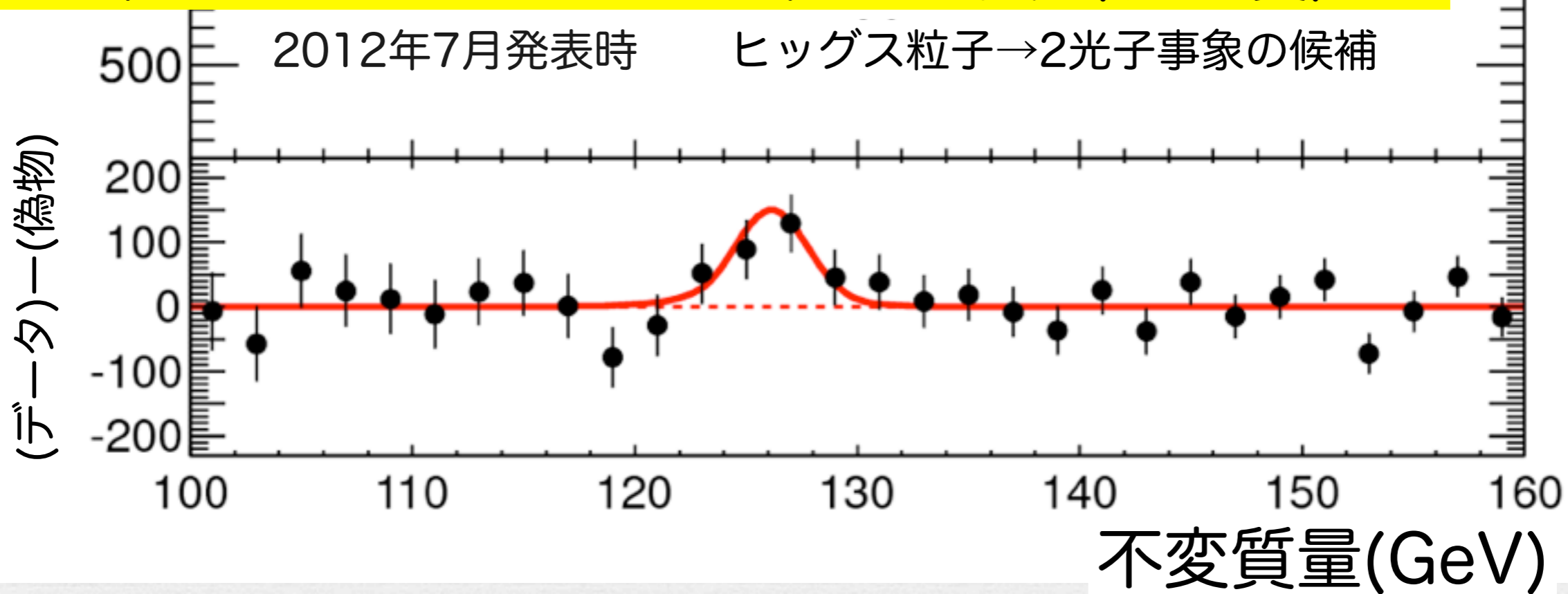
# 実際のデータ



他の実験との比較

現在・過去・未来の比較

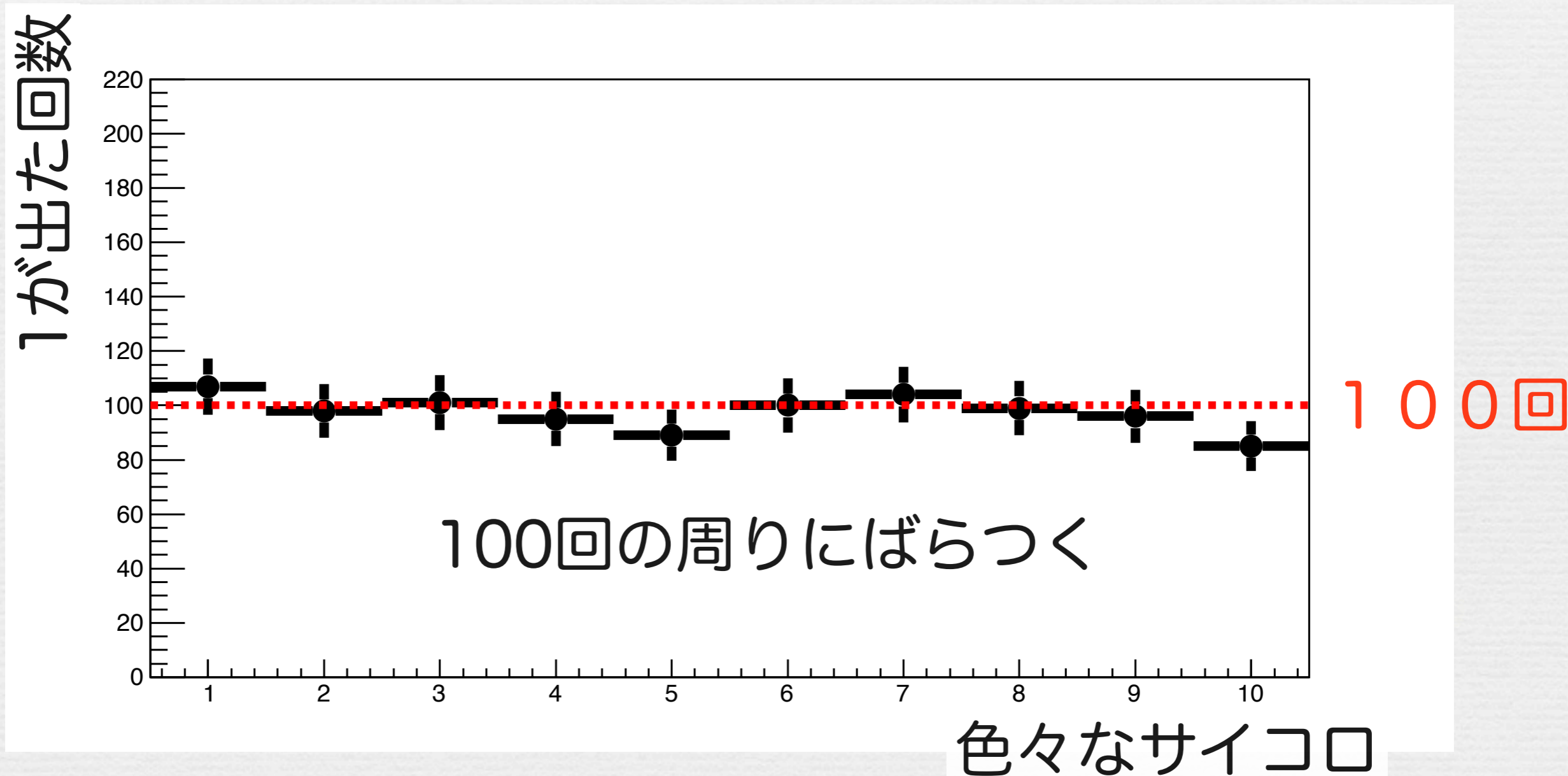
→統計学にもとづいた指標が必要 (有意度)



# いかさまサイコロを探す

普通のさいころの1の目が出る確率  $1/6$

10個のサイコロをそれぞれ600回ずつ振ってみる



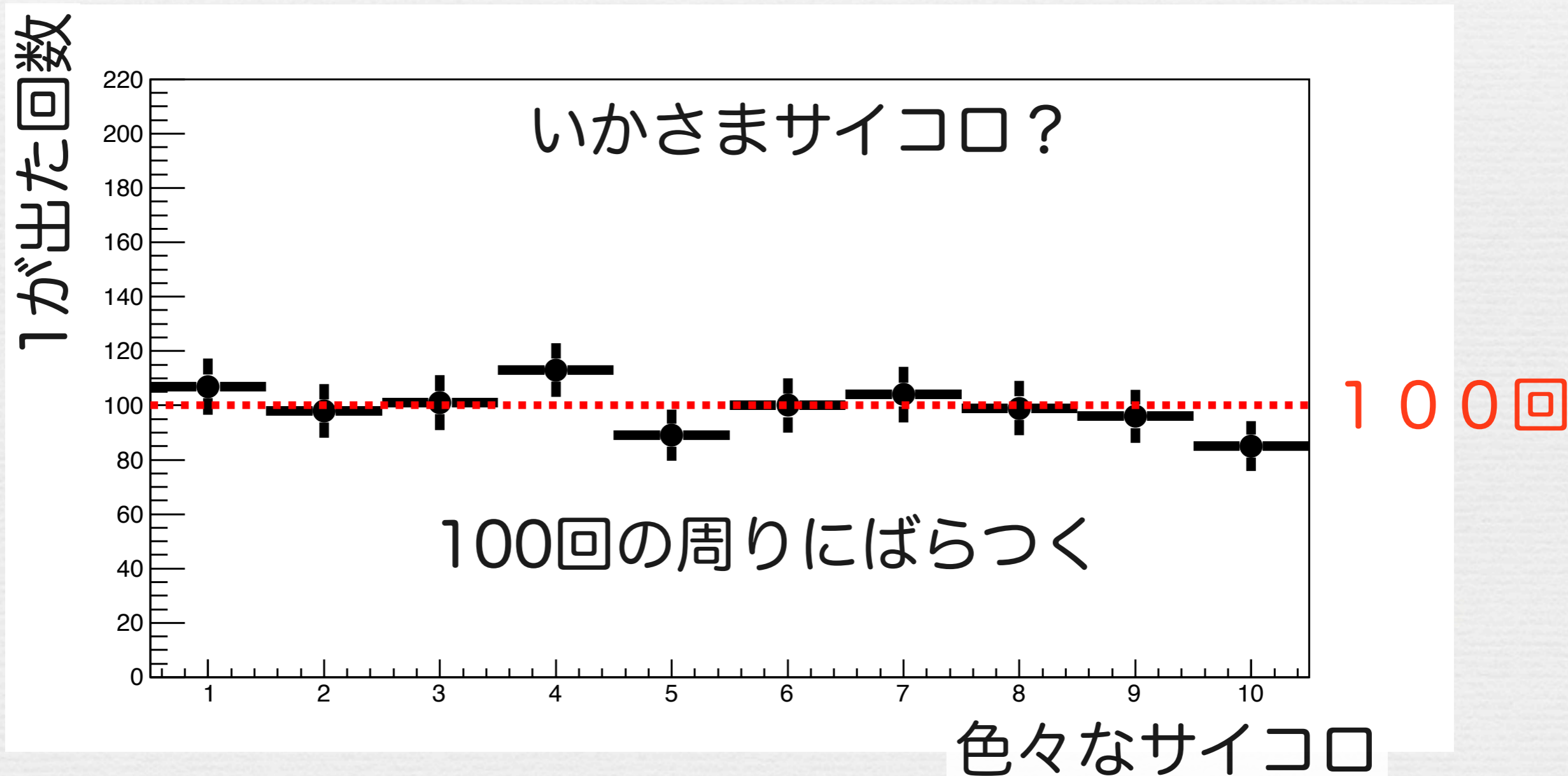
# いかさまサイコロを探す

普通のさいころの1の目が出る確率  $1/6$

10個のサイコロをそれぞれ600回ずつ振ってみる

9個は普通

1個は $1/5$ で1の目が出るいかさまサイコロ



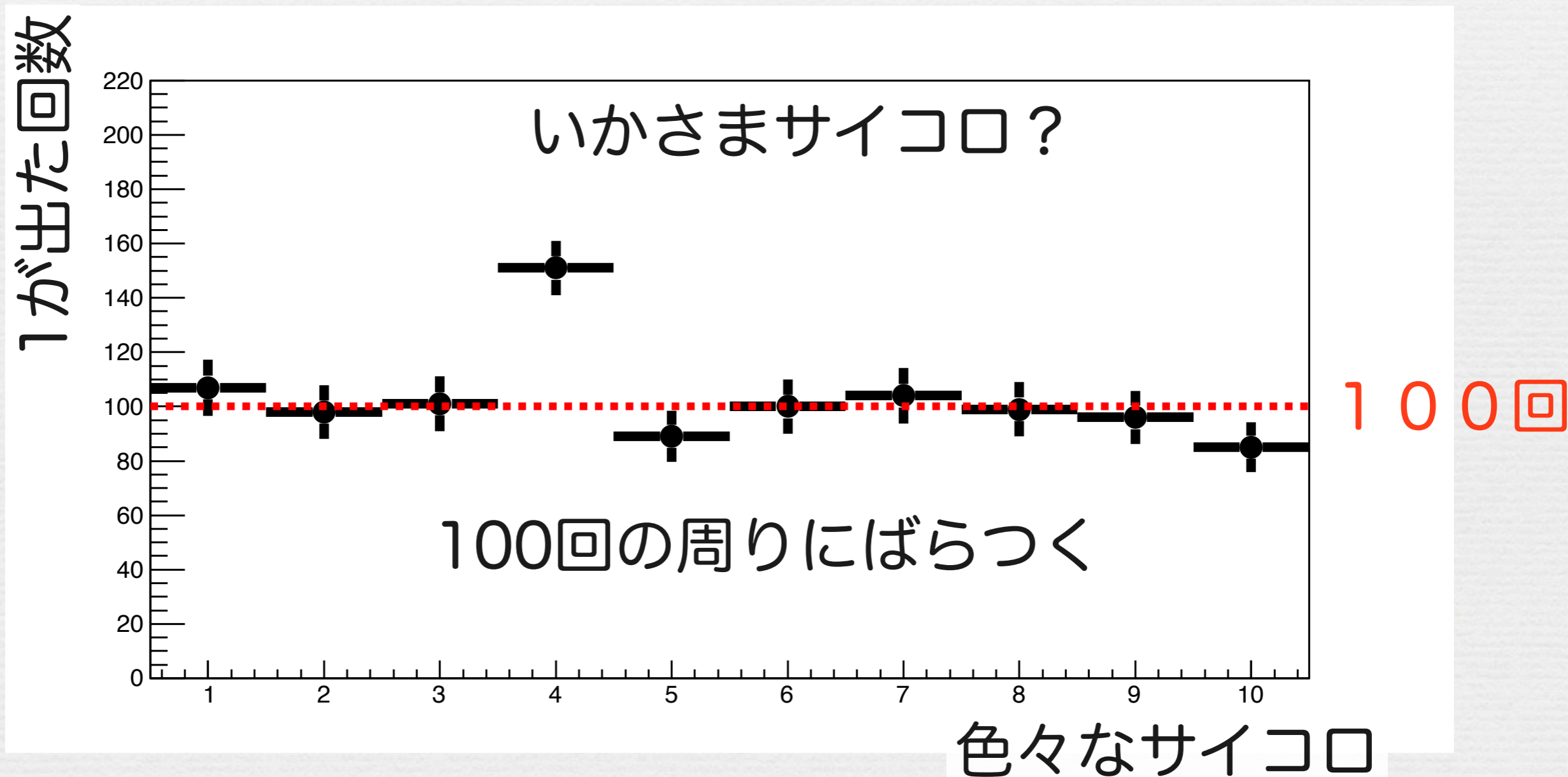
# いかさまサイコロを探す

普通のさいころの1の目が出る確率  $1/6$

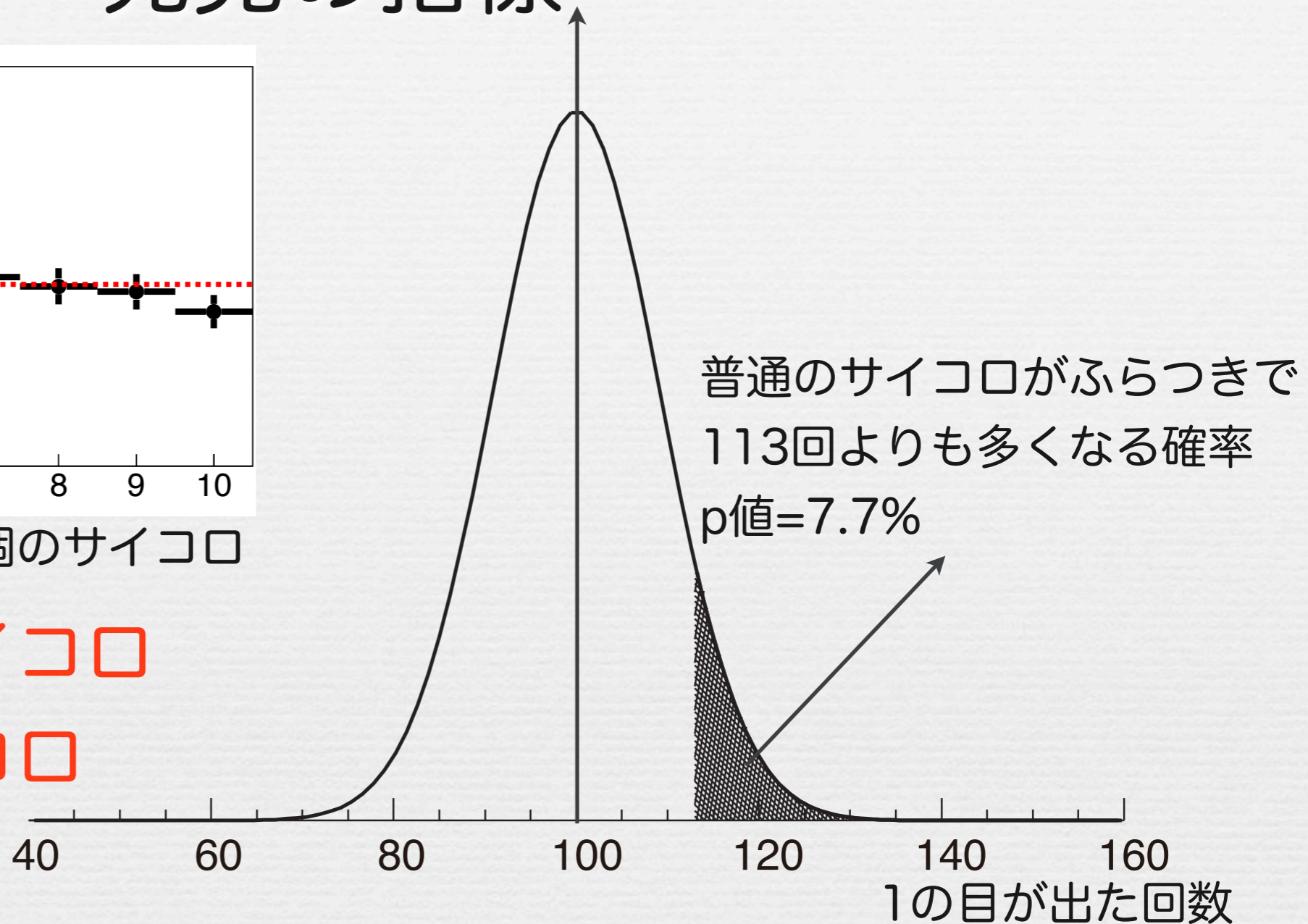
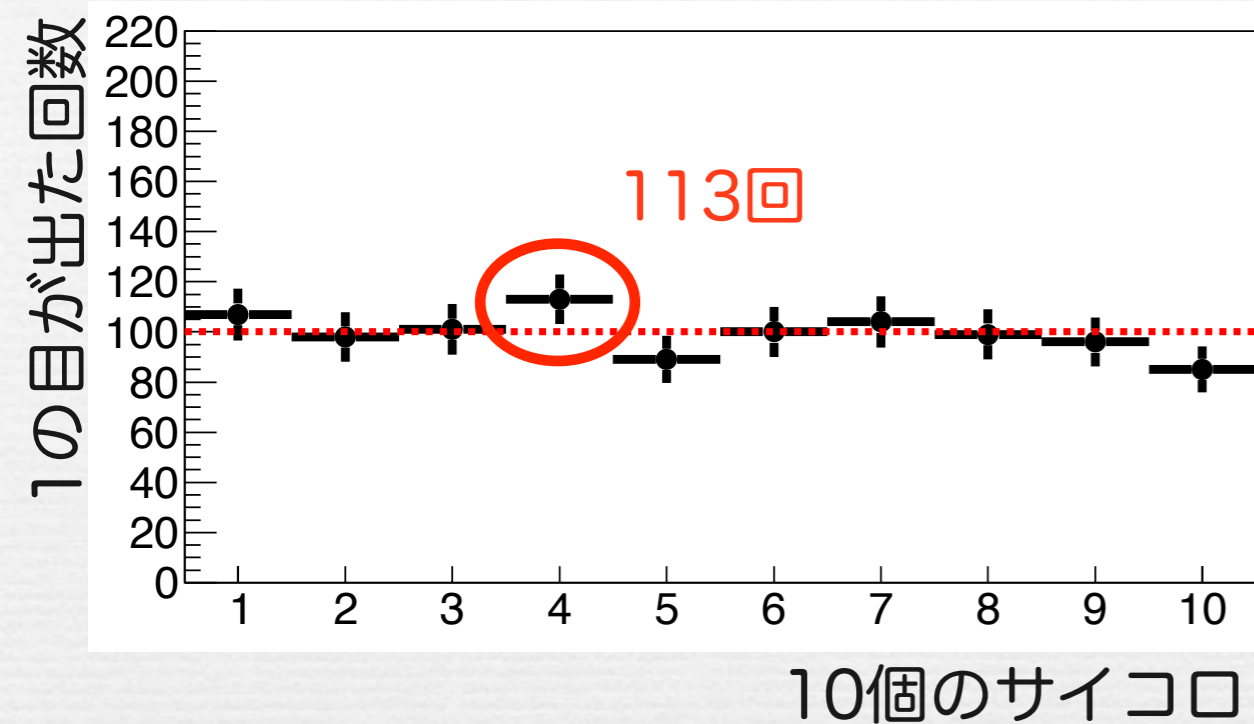
10個のサイコロをそれぞれ600回ずつ振ってみる

9個は普通

1個は $1/4$ で1の目が出るいかさまサイコロ



# 発見の指標



本物 = いかさまサイコロ

偽物 = 普通のサイコロ

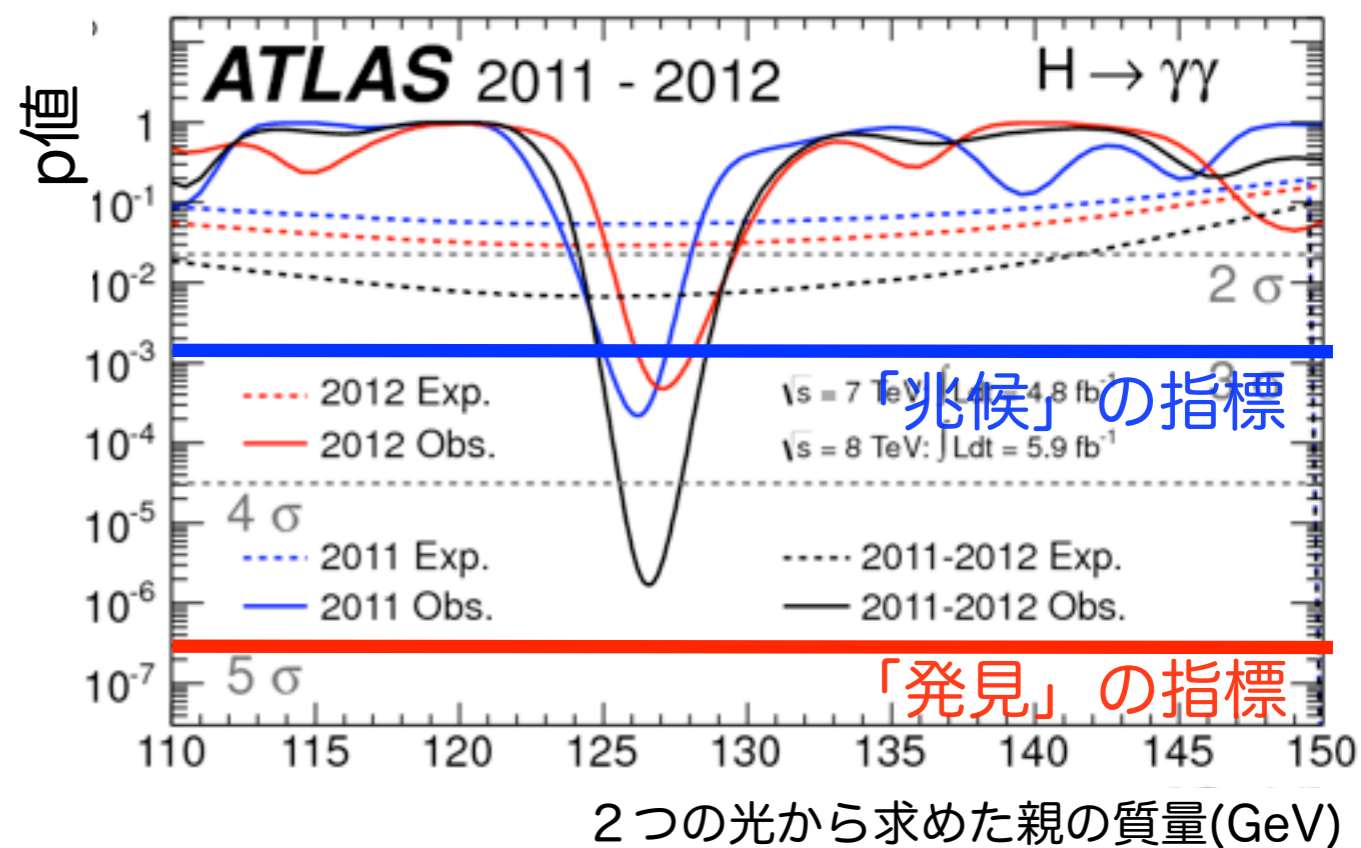
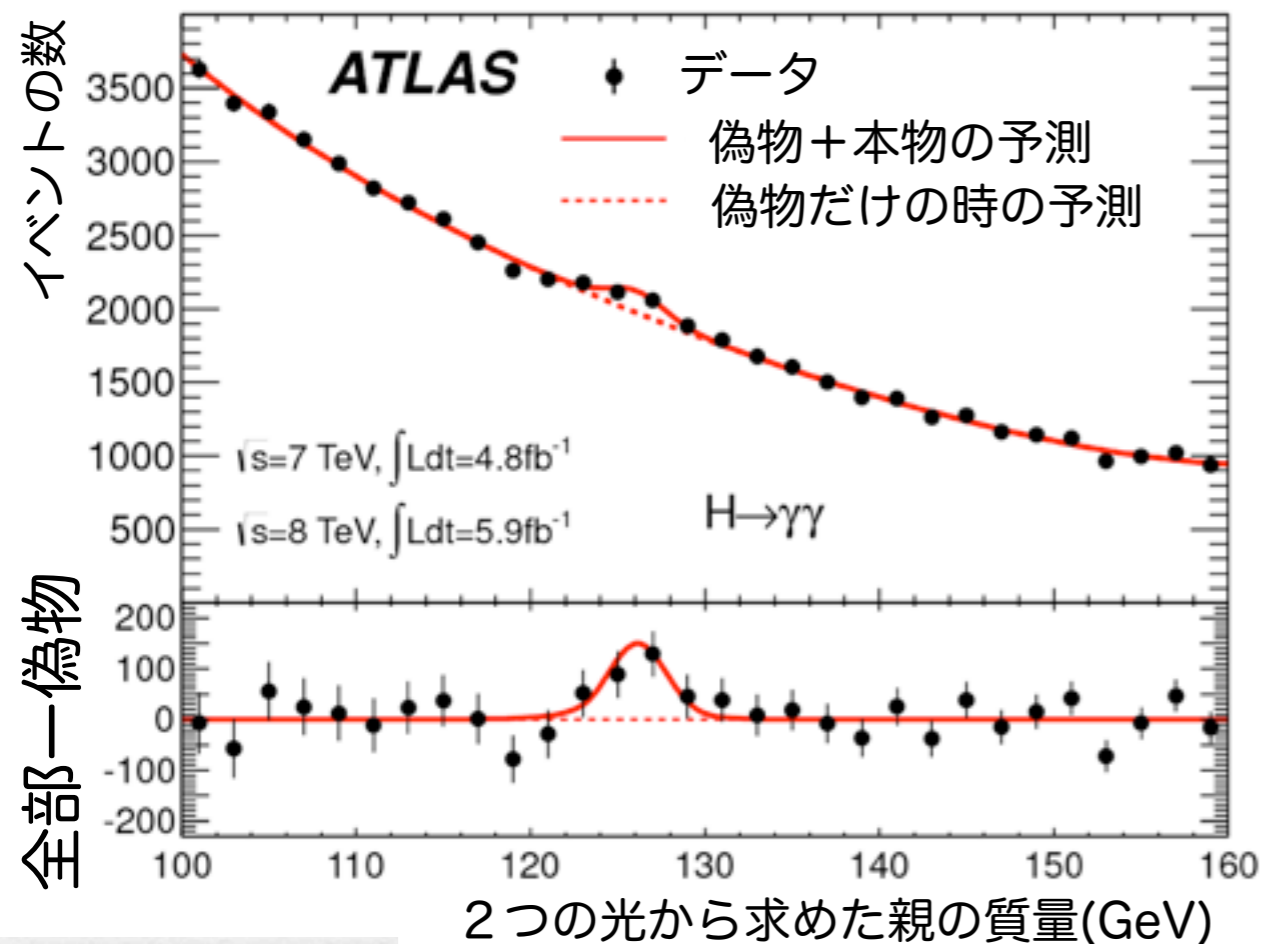
素粒子実験研究者が良く用いる指標

p値 = 740分の1 兆候

p値 = 350万分の1 発見

# 陽子陽子 $\rightarrow$ H $\rightarrow$ 光子 光子

7月4日の発表時

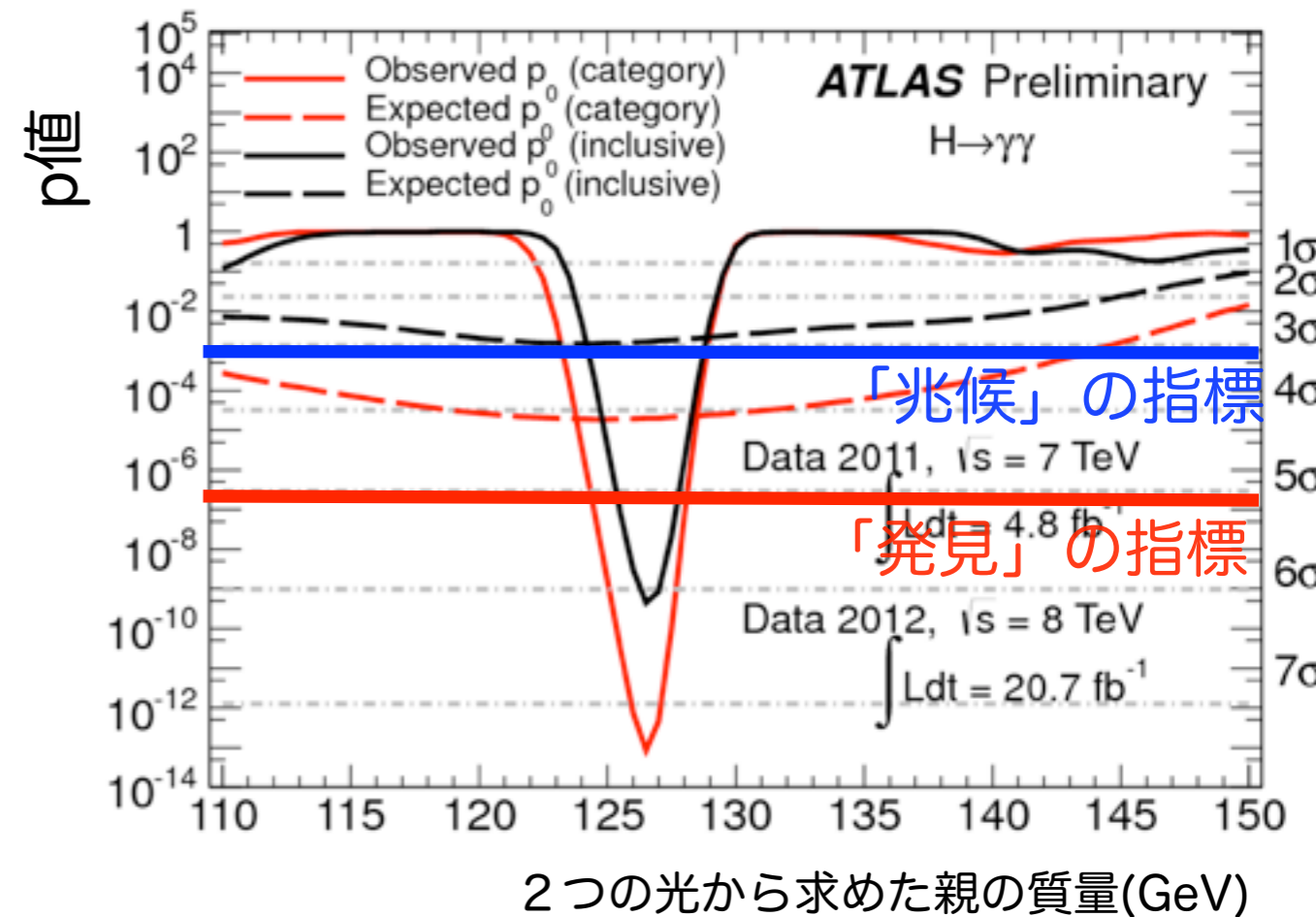
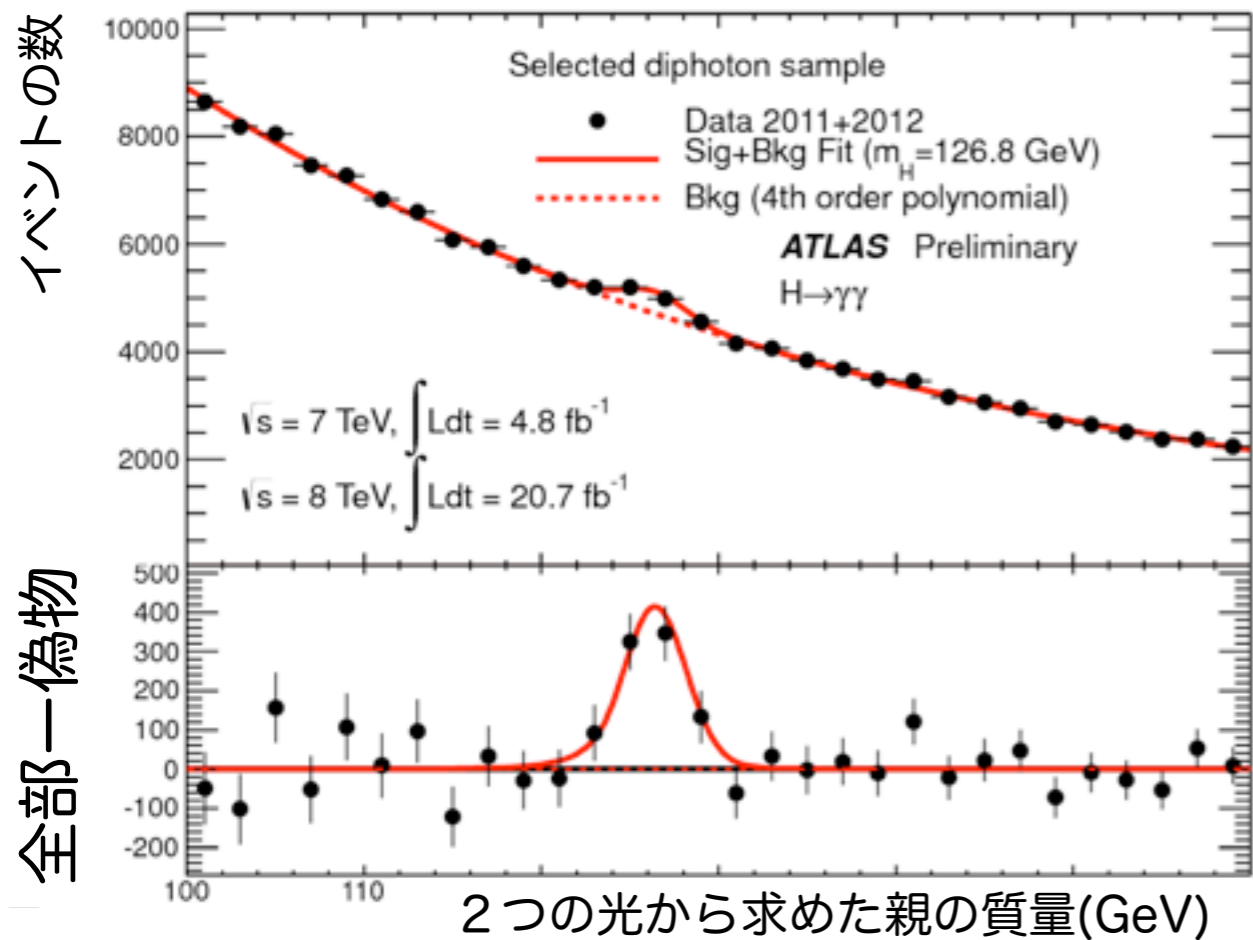


偽物が統計的にふらついて本物と間違える確率

p値 = 30万分の1

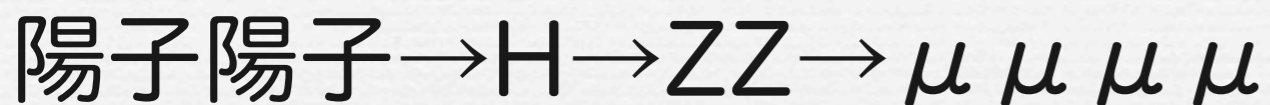
# 陽子陽子 $\rightarrow$ H $\rightarrow$ 光子 光子

これまでの全データ (7月から倍のデータ)

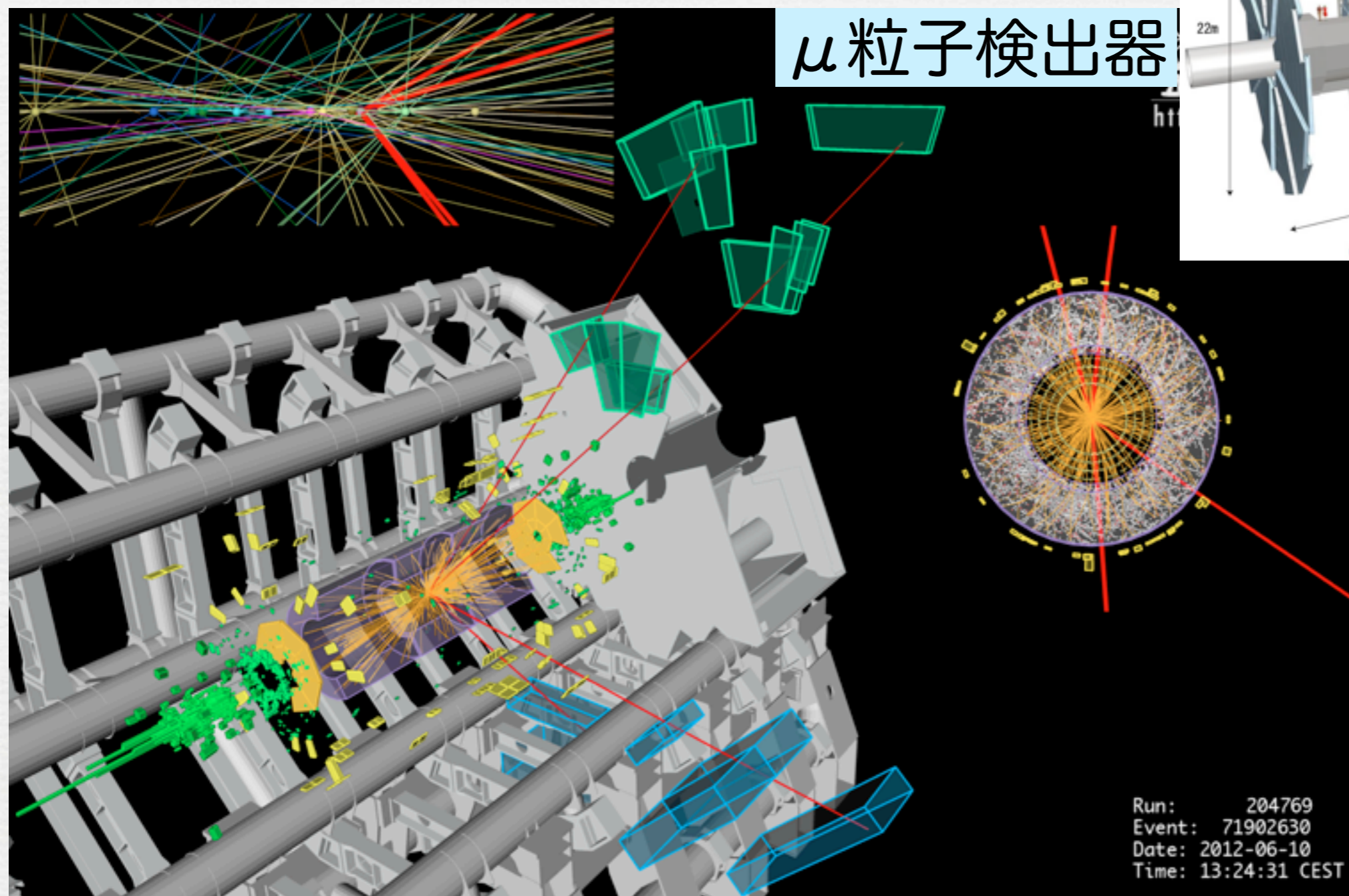
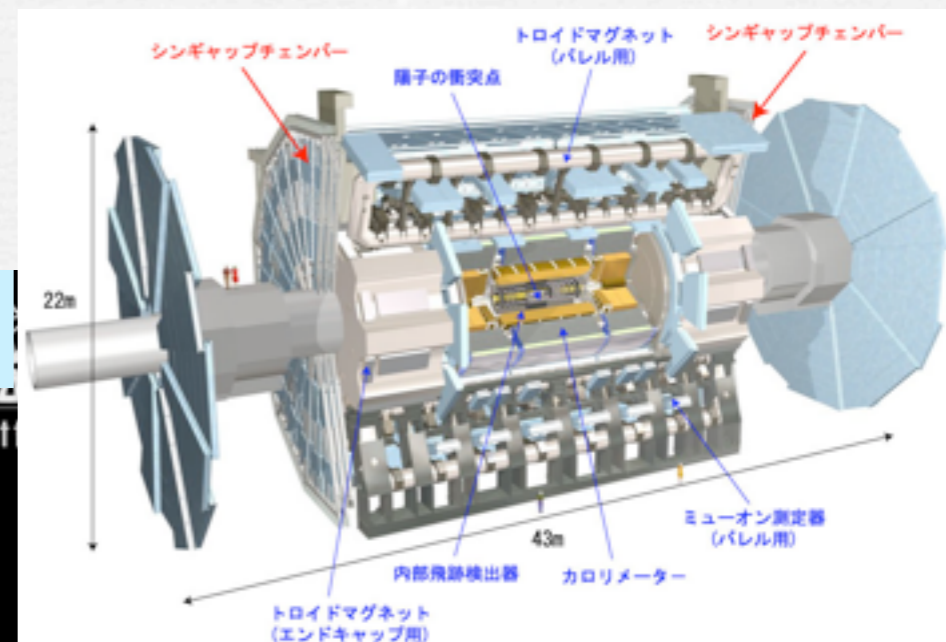


p値 < 1兆分1以下 発見！！





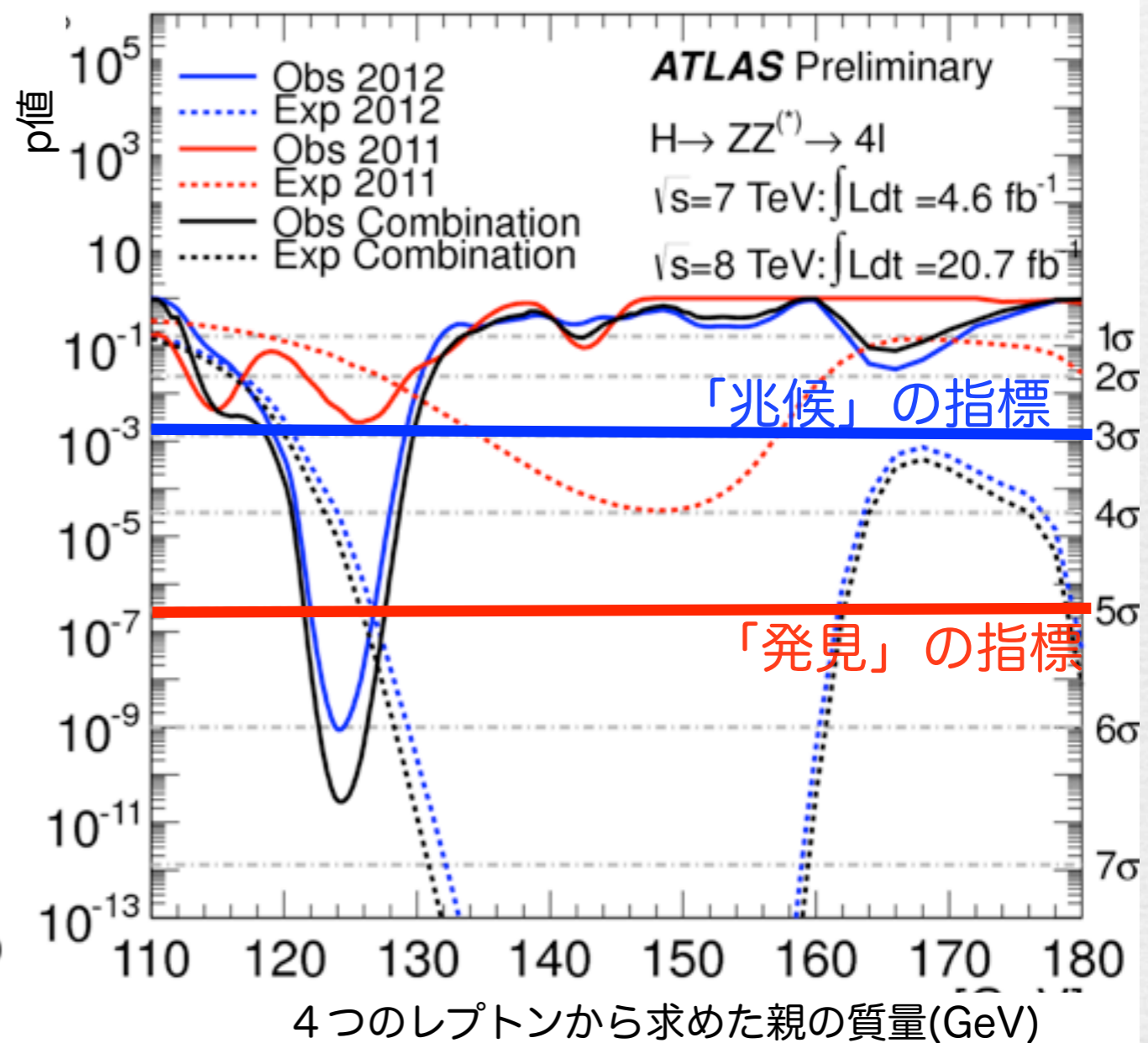
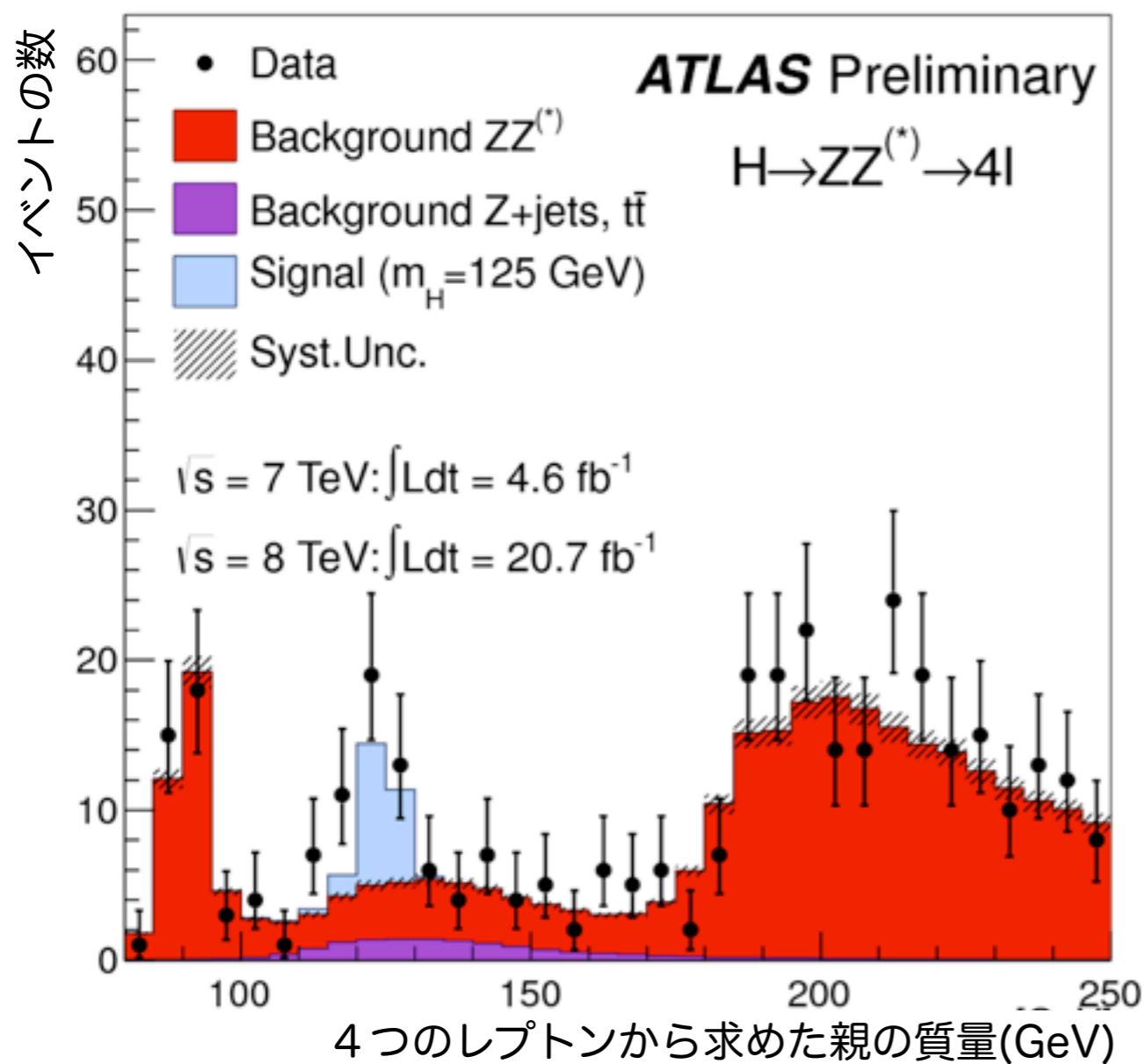
$\mu$  粒子検出器



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

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

これまでの全データ



p値 < 百億分1以下 **発見！！**

# 新粒子発見の意義とこれから

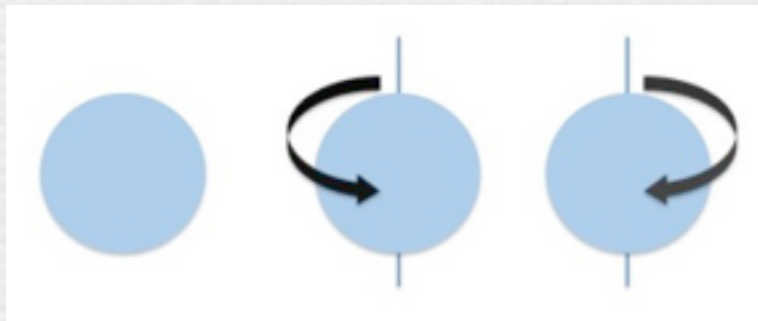
# 発見した粒子の解釈（7月）

- 光子 光子、 $ZZ$  に化ける粒子
- 質量は、 $126\text{GeV}$
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
  
- 2つの実験で独立に確認  
ヒッグス粒子と思われる新しい粒子を発見！



# 発見した粒子の解釈（現在）

- 光子 光子、 $ZZ$ 、 $WW$  に化ける粒子
- 質量は、 $126\text{GeV}$
- スピンがゼロ(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

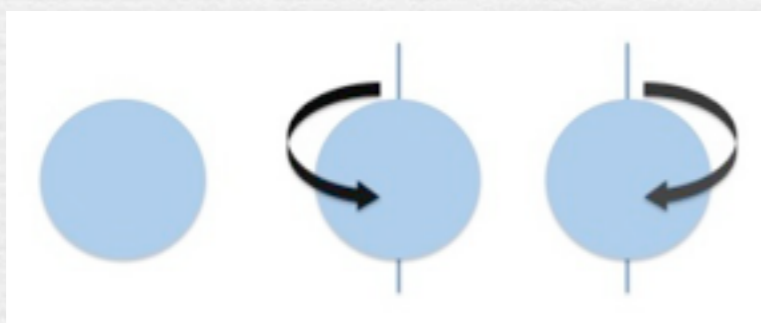


素粒子には固有のスピン

- 2つの実験で独立に確認

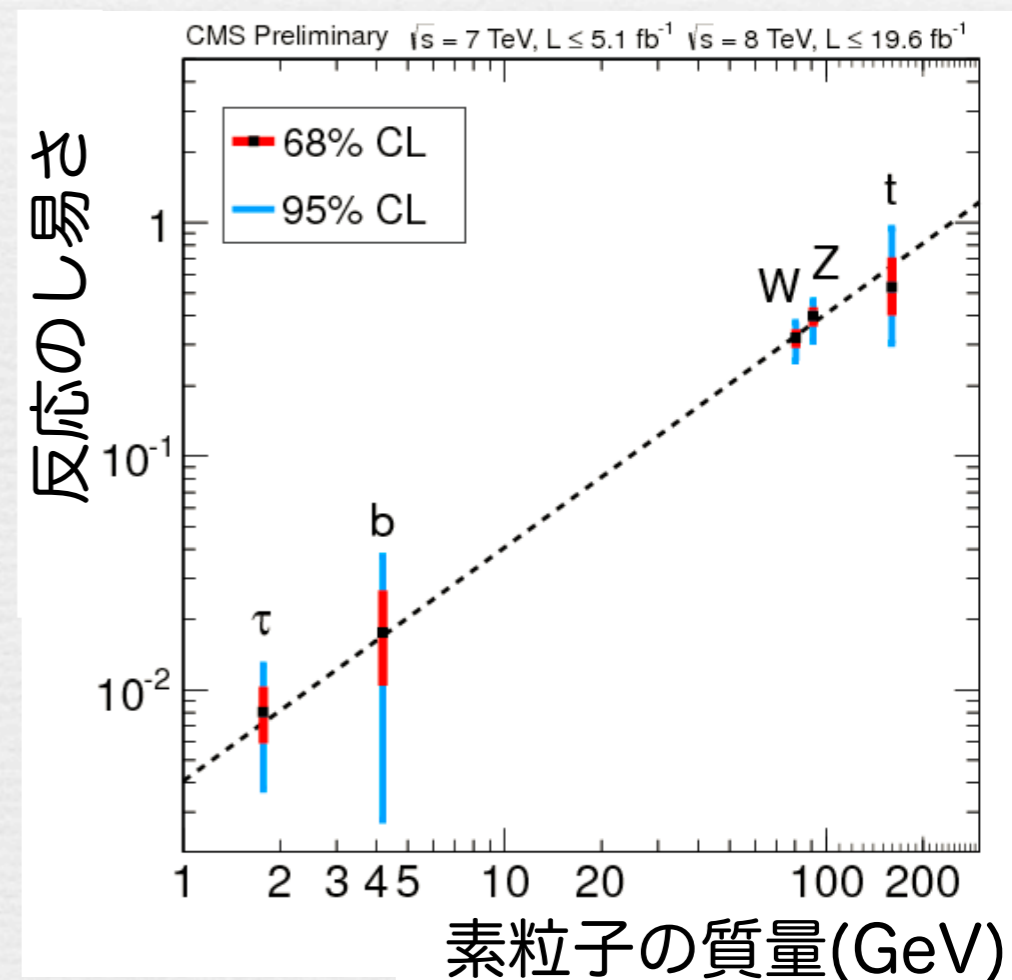
# 発見した粒子の解釈（現在）

- 光子 光子、ZZ、**WW** に化ける粒子
- 質量は、126GeV
- スピンがゼロ(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



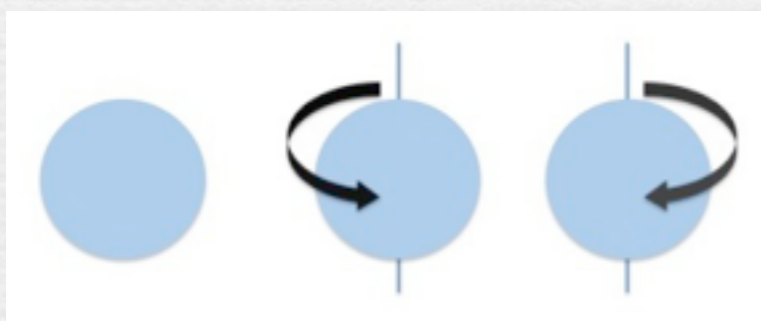
素粒子には固有のスピン

- 重い粒子ほど反応しやすい
- 2つの実験で独立に確認



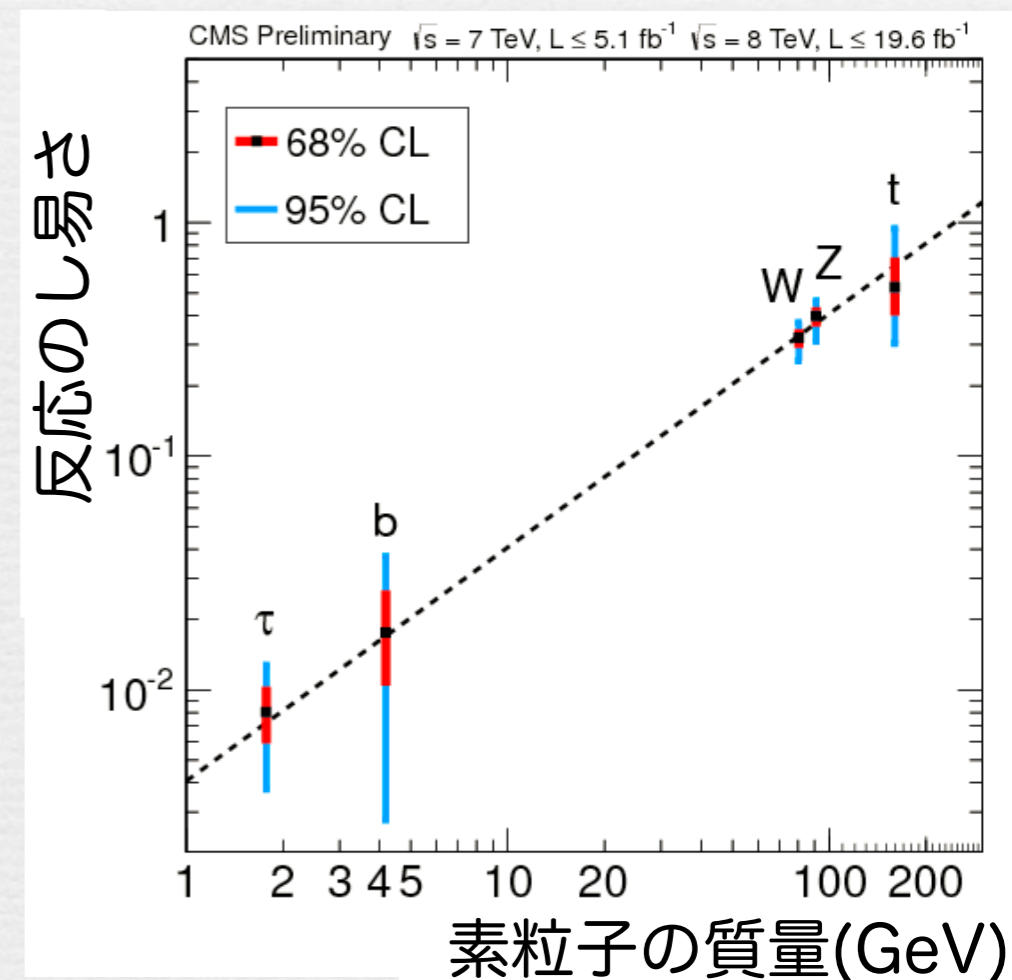
# 発見した粒子の解釈（現在）

- 光子 光子、ZZ、**WW** に化ける粒子
- 質量は、126GeV
- スピンがゼロ(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
- 2つの実験で独立に確認



素粒子の質量と関係する粒子 → **ヒッグス粒子発見!**



# どんなヒッグスなのか？

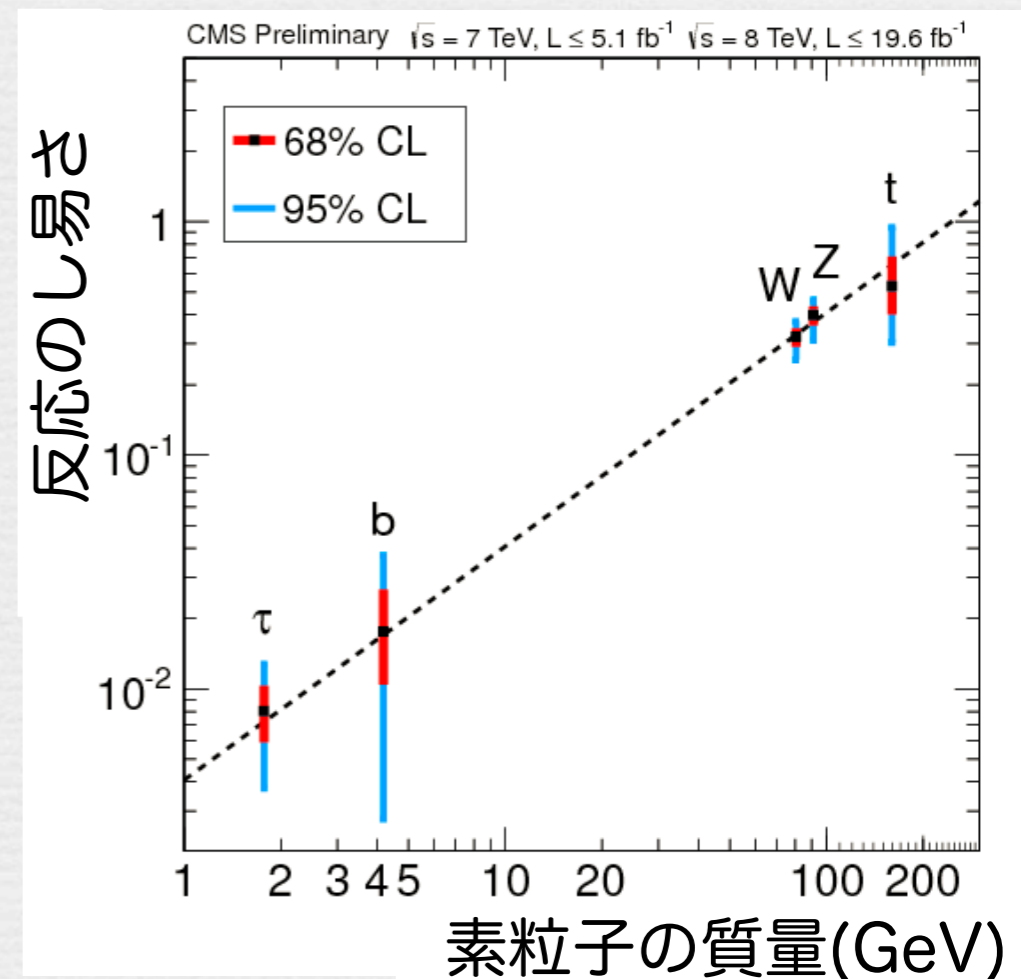
標準模型が予言するヒッグス粒子かどうかはわからない

ヒッグス粒子の性質には理論的な裏付けがない

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固有の精密に測定する
- tクォーク、bクォーク、 $\tau$ 粒子との反応を精密に測定
- 仲間を探す
- .....

ヒッグス粒子を使った  
新たな物理探索が始まった！！！！



# ヒッグス粒子発見はさらなる新発見の序章

## 微調整問題

$$(\text{実際の質量})^2 = (\text{裸の質量})^2 + (\text{補正量})^2$$

$$126^2 = 10000000000000000126^2 - \underline{100000000000000000000^2}$$

大きな補正量

→ ヒッグス粒子固有の問題

# ヒッグス粒子発見はさらなる新発見の序章

## 微調整問題

$$(\text{実際の質量})^2 = (\text{裸の質量})^2 + (\text{補正量})^2$$

$$126^2 = 10000000000000000126^2 - \underline{100000000000000000000^2}$$

大きな補正量

→ ヒッグス粒子固有の問題

この解決には、さらに、“超対称性”などの新物理が必要

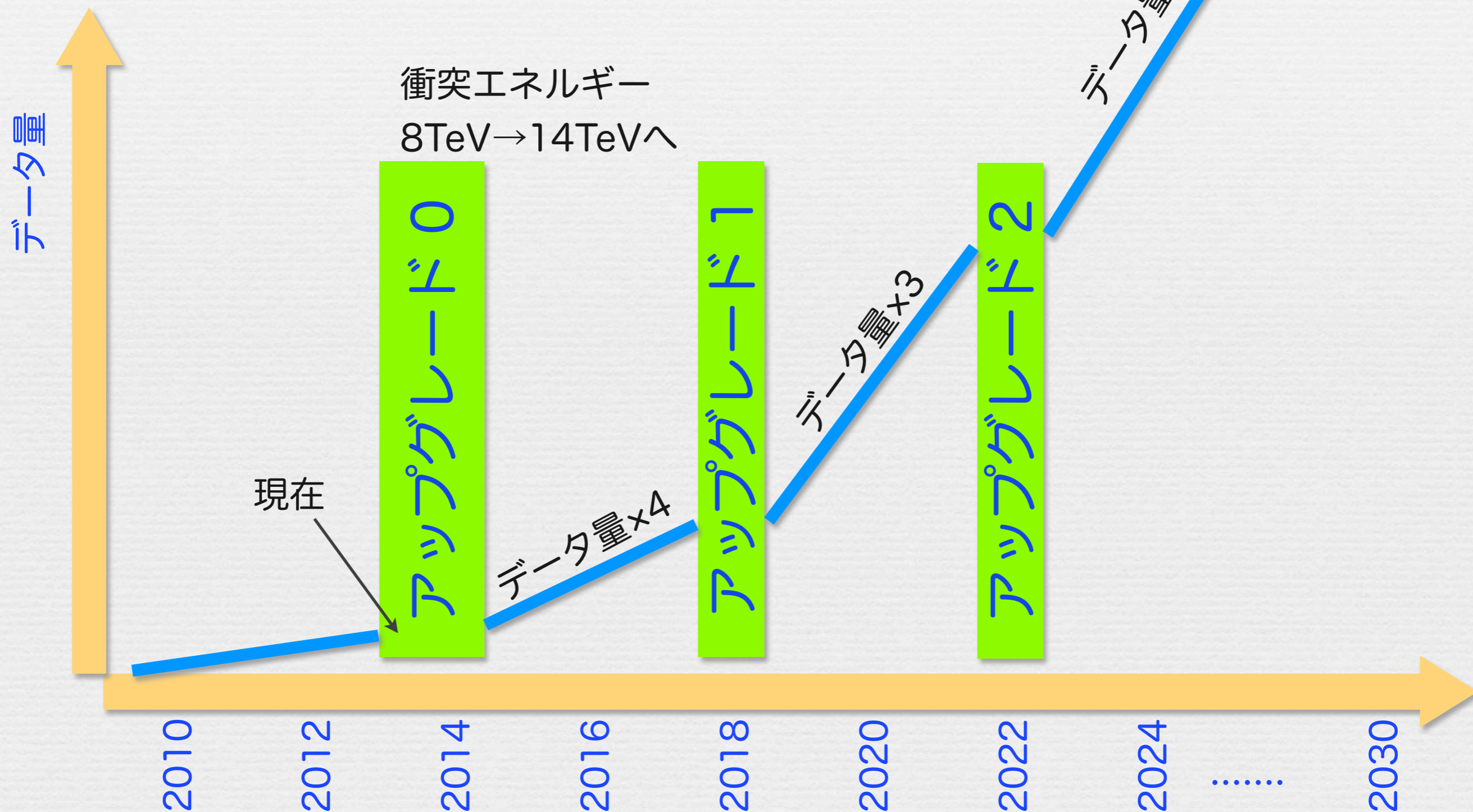
超対称性：Supersymmetry (SUSY)

→ LHC実験にて探索中

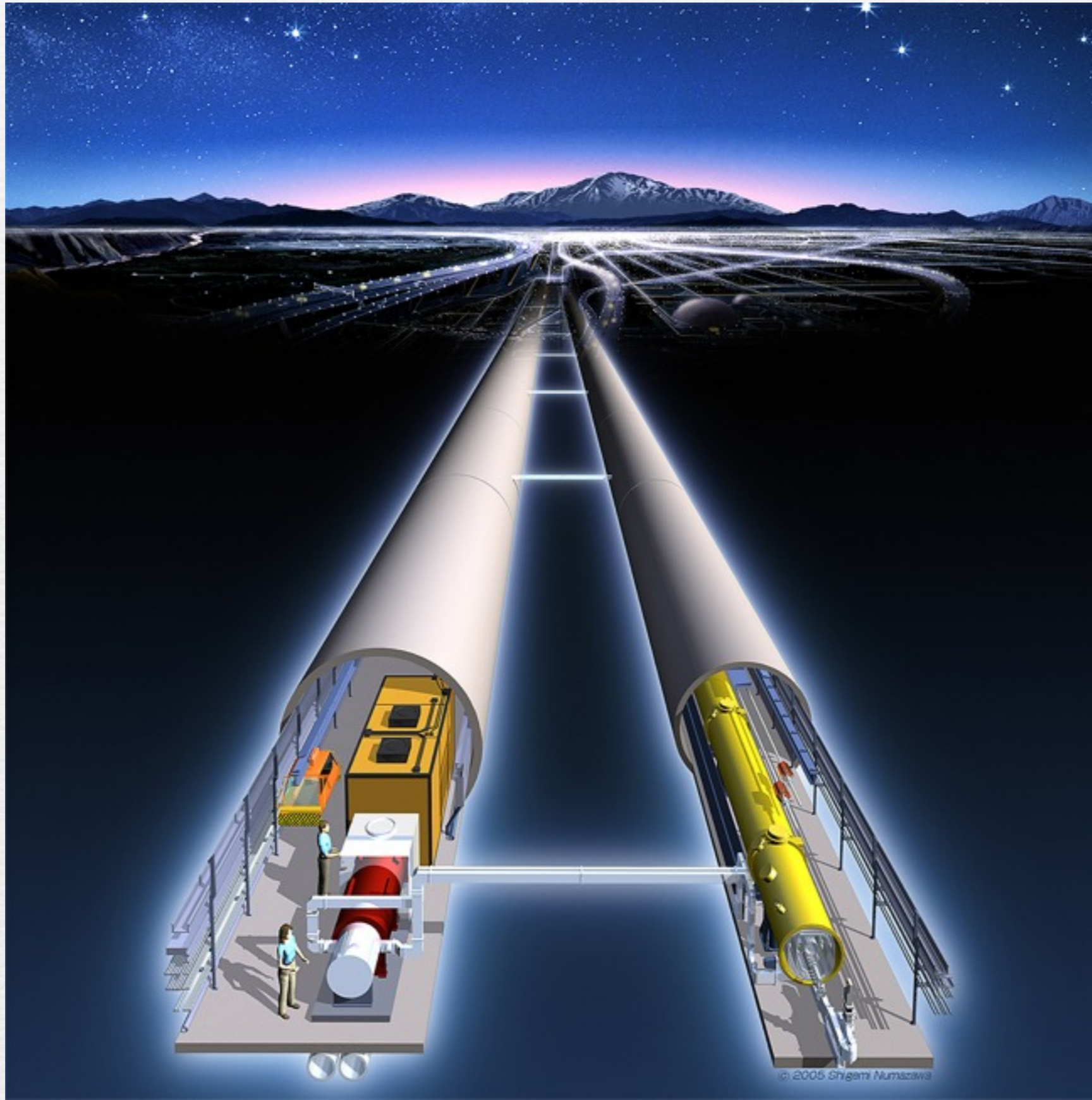
# LHC実験はまだまだ続く

## 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

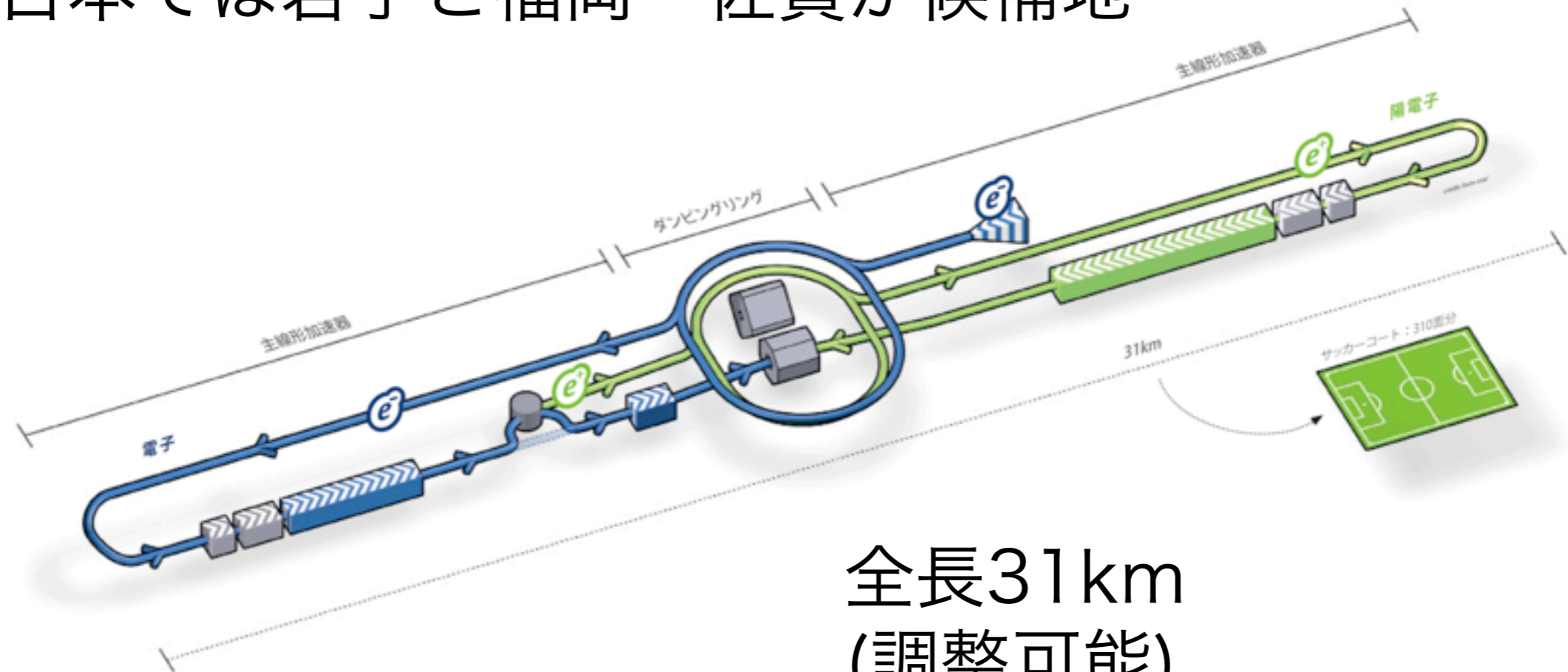


# 国際リニアコライダー計画



# 国際リニアコライダー計画

日本では岩手と福岡・佐賀が候補地



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

2013年3月14日

発見した新粒子はヒッグス粒子であることを示唆

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

→様々な次期計画

これからの素粒子は面白い！

backup



# 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	アトラス	超伝導ソレノイド
浜松ホトニクス	アトラス, 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	アトラス, CMS	液体Arカロリメータ容器, 鉄構造体
林栄精器	アトラス	ワイヤーチェンバー
東芝	アトラス	信号読み出し集積回路
ソニー	アトラス	検出器信号アンプ
ジーエヌディー	アトラス	トリガー用電子回路
フジクラ	アトラス	耐放射線性光ファイバー
クラレ	アトラス	シンチレーションファイバー
有沢製作所	アトラス	銅箔ポリイミド電極シート