

第3回 サイエンスコミュニケーション

2013年10月12日 半田空の科学館

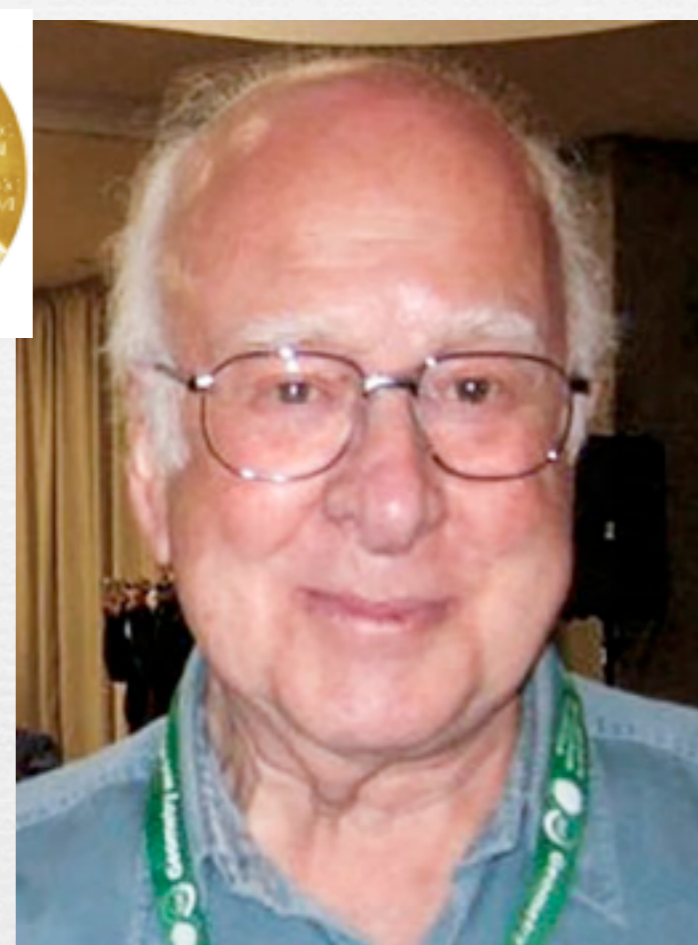
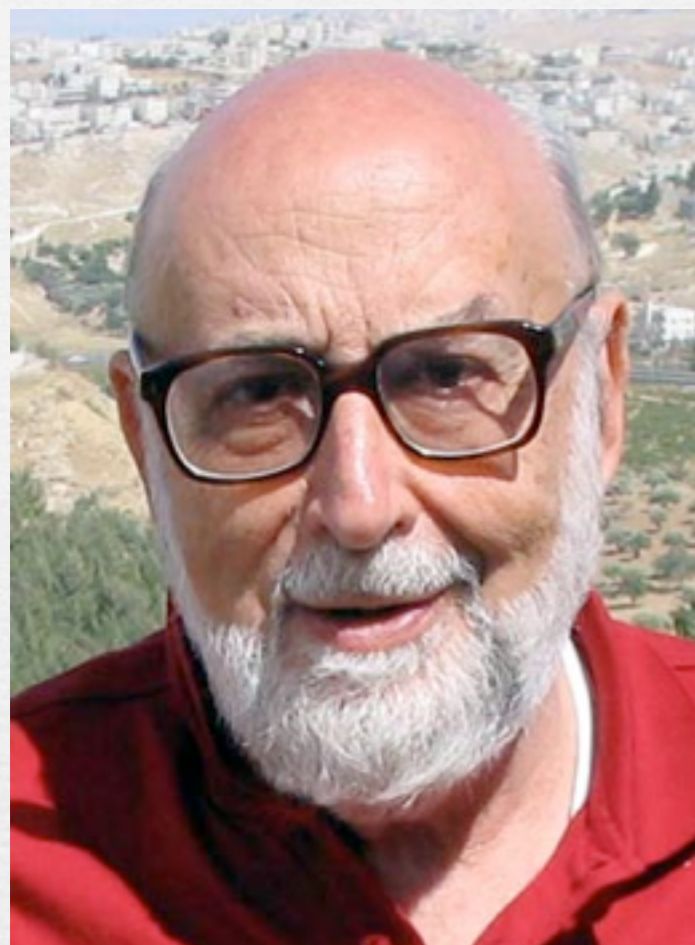
ヒッグス粒子の発見 と

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

ノーベル物理学賞、おめでとうございます！

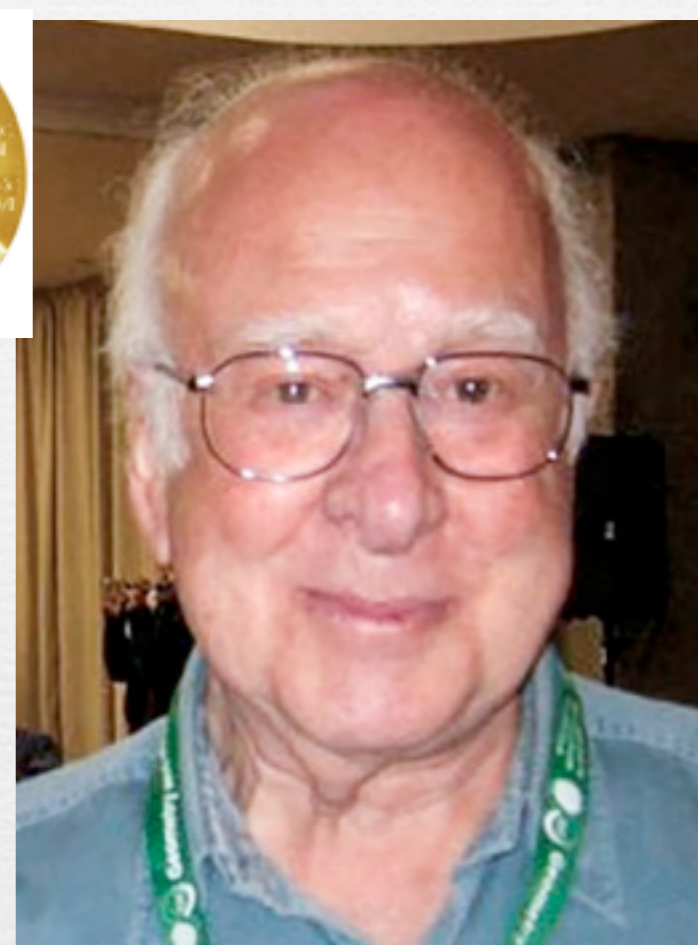
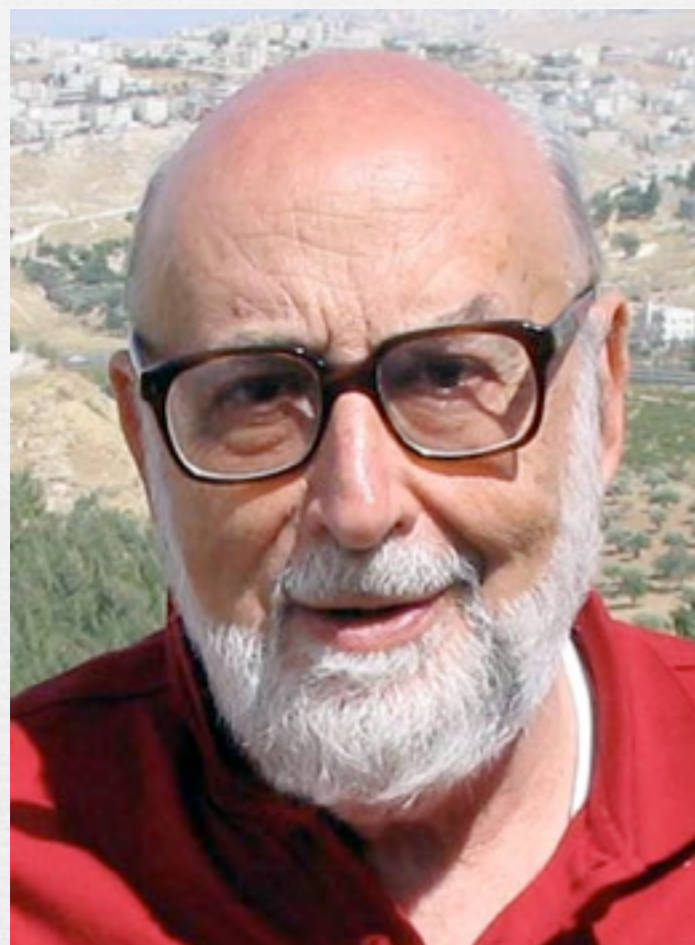


フランソワ・アングレール氏

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、共同受賞者のアングレール氏=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・アングレール名誉教授(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を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)

〒460-0835 名古屋市中区三の丸一丁目6番1号

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) 53 谷繁 元信捕手(たに げん) 30

神の粒子 実験誇り

ノーベル物理学賞

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



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

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。加速器は地下百々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。

受賞の研究業績には、受賞が決まった2氏の功績に加えて、日本も関わったLHCの粒子検出器ATLASの名前も明記された。

東京大や名古屋大など16の研究機関からなる日本勢は二つの検出器のうち、ATLASに加わり、複数の解析グループの責任者も務める。リーダーの一人、浅

井祥仁・東京大教授はこの日、記者会見し、「実験グループとしては受賞できなかったが、我々も今回の受賞に貢献できてうれしい」と話し、日本チームの存在意義を示した。

検出器の組み立てに携わり、名古屋の研究室で発表を見守った戸本誠・名大准教授も「ヒッグス粒子が絶

対にあるという信念で実験を続けてきた。これまで素粒子の世界は理論先行だったが、これからは実験が主導する形で新しい粒子を発見したい」と話した。

LHCに使われている電磁石は、高エネルギー加速器研究機構が設計し、東芝が製造。特殊なステンレス材を提供した新日鉄住金、

内容

ヒッグス粒子とは？

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

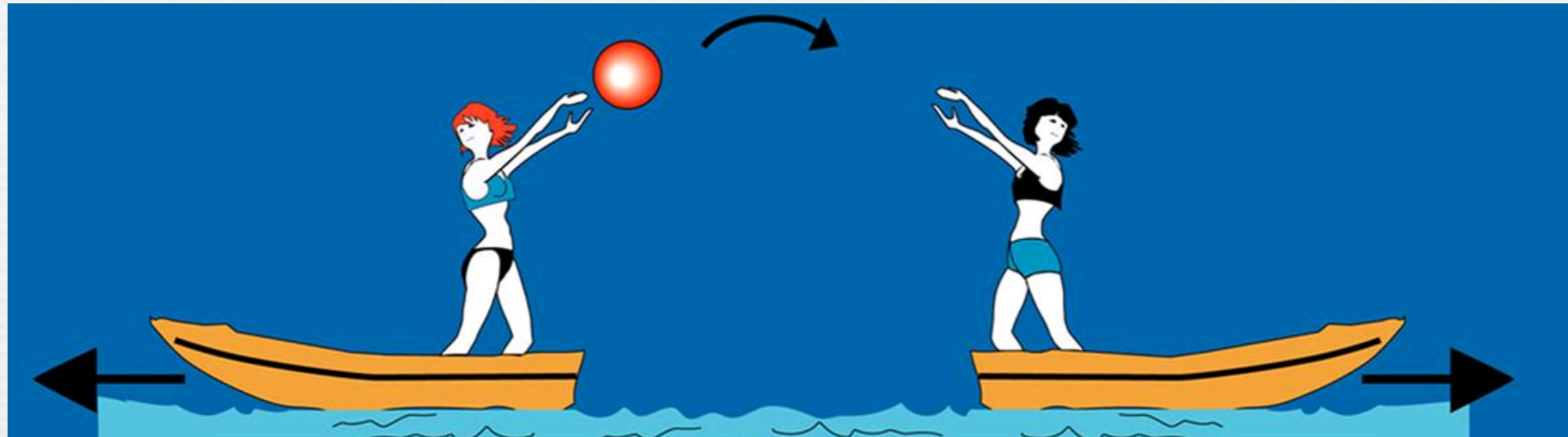
ヒッグス粒子の見つけかた

ヒッグス粒子発見の意義とこれから

ヒッグス粒子とは？

素粒子に働く力

力 = 力を伝える粒子の交換

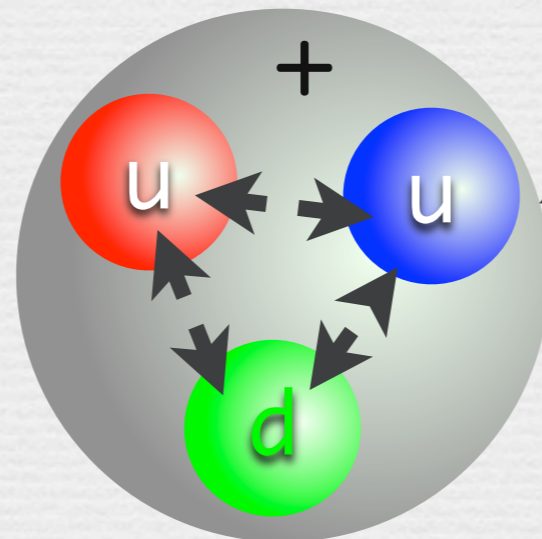


水素原子

電子

陽子

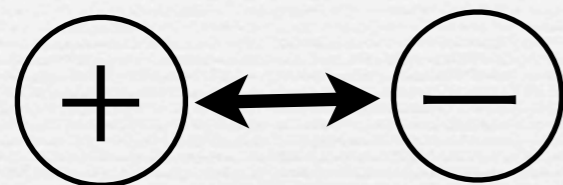
強い力
色電荷を感じて
グルーオンを交換



電磁気力
電荷を感じて
光子を交換

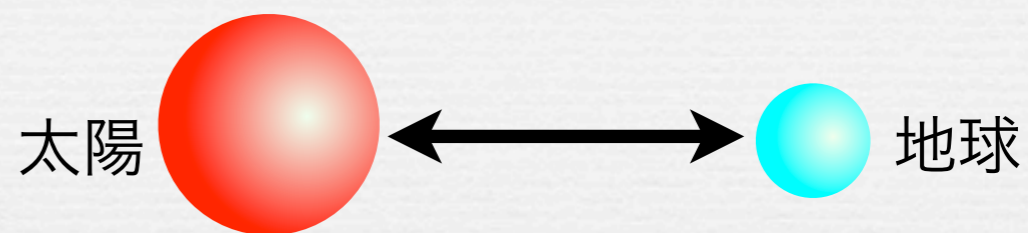
4種のか

電磁気力



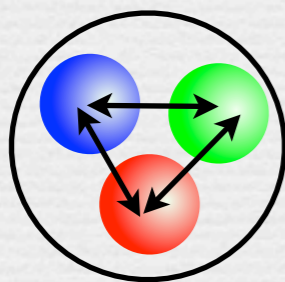
電荷を感じて
光子を交換

重力



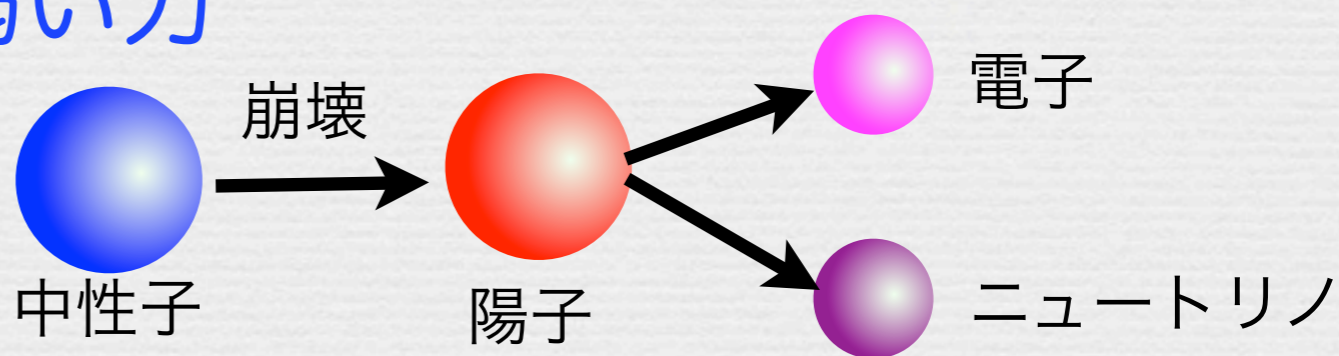
質量を感じて
グラビトンを交換

強い力



色電荷を感じて
グルーオンを交換

弱い力



弱電荷を感じて
W、Z粒子を交換

素粒子の標準模型

物質を構成する

力を伝える

クォーク

レプトン

電荷 : $+2/3e$

電荷 : $-1/3e$

電荷 : 0

電荷 : $-e$

アップ(u)

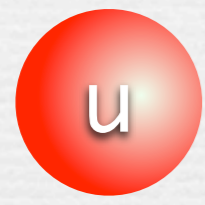
ダウン(d)

電子ニュートリノ

電子

電磁気力 : 光子

第1世代



強い力 : グルーオン



弱い力 : Z、W粒子



素粒子の標準模型

物質を構成する

力を伝える

クォーク

レプトン

電荷 : $+2/3e$

電荷 : $-1/3e$

電荷 : 0

電荷 : $-e$

電磁気力 : 光子



強い力 : グルーオン



弱い力 : Z、W粒子



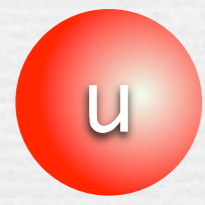
アップ(u)

ダウン(d)

電子ニュートリノ

電子

第1世代



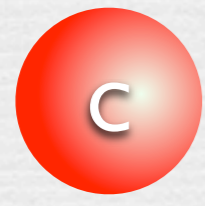
チャーム(c)

ストレンジ(s)

ミューニュートリノ

ミュー粒子

第2世代



素粒子の標準模型

物質を構成する

力を伝える

クォーク

レプトン

電荷 : $+2/3e$

電荷 : $-1/3e$

電荷 : 0

電荷 : $-e$

電磁気力 : 光子

アップ(u)

ダウン(d)

電子ニュートリノ

電子

強い力 : グルーオン

第1世代



チャーム(c)

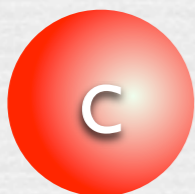
ストレンジ(s)

ミューニュートリノ

ミュー粒子

弱い力 : Z、W粒子

第2世代



トップ(t)

ボトム(b)

タウニュートリノ

タウ粒子

第3世代



素粒子の標準模型

物質を構成する

力を伝える

クォーク

レプトン

電荷 : $+2/3e$

電荷 : $-1/3e$

電荷 : 0

電荷 : $-e$

電磁気力 : 光子

アップ(u)

ダウン(d)

電子ニュートリノ

電子

強い力 : グルーオン

第1世代



チャーム(c)

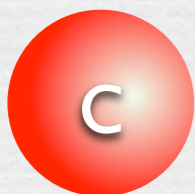
ストレンジ(s)

ミューニュートリノ

ミュー粒子

弱い力 : Z、W粒子

第2世代



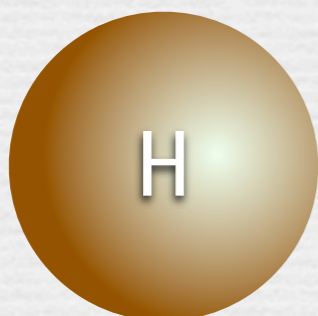
トップ(t)

ボトム(b)

タウニュートリノ

タウ粒子

第3世代



ヒッグス粒子 : 素粒子に質量を与える

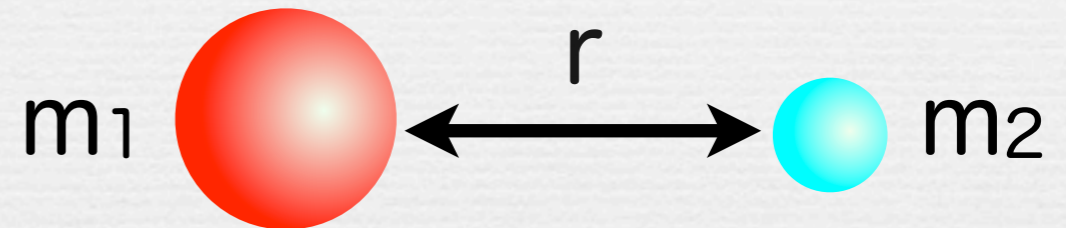
質量とは？

全ての物の性質を表す量

1. 重力のもと (重力質量)

重いものを持ち上げるのは、たいへん

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$



2. 動きにくさ (慣性質量) ← ヒッグス粒子と関連

動かすにくさ、止めにくさ。

$$F = ma$$

等価原理：重力質量＝慣性質量

慣性質量

$$E = mc^2$$

(静止した物体の持つエネルギー) = (質量)

$$E = \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2}$$

(全エネルギー) = (静止エネルギー) ⊕ (運動エネルギー)

質量ゼロの粒子 (光) ... 光速で進み、静止できない

$$E = pc$$

(エネルギー) = (運動量)

質量を持つ粒子 ... 光速では進めない。静止できる

慣性質量 = 静止エネルギー

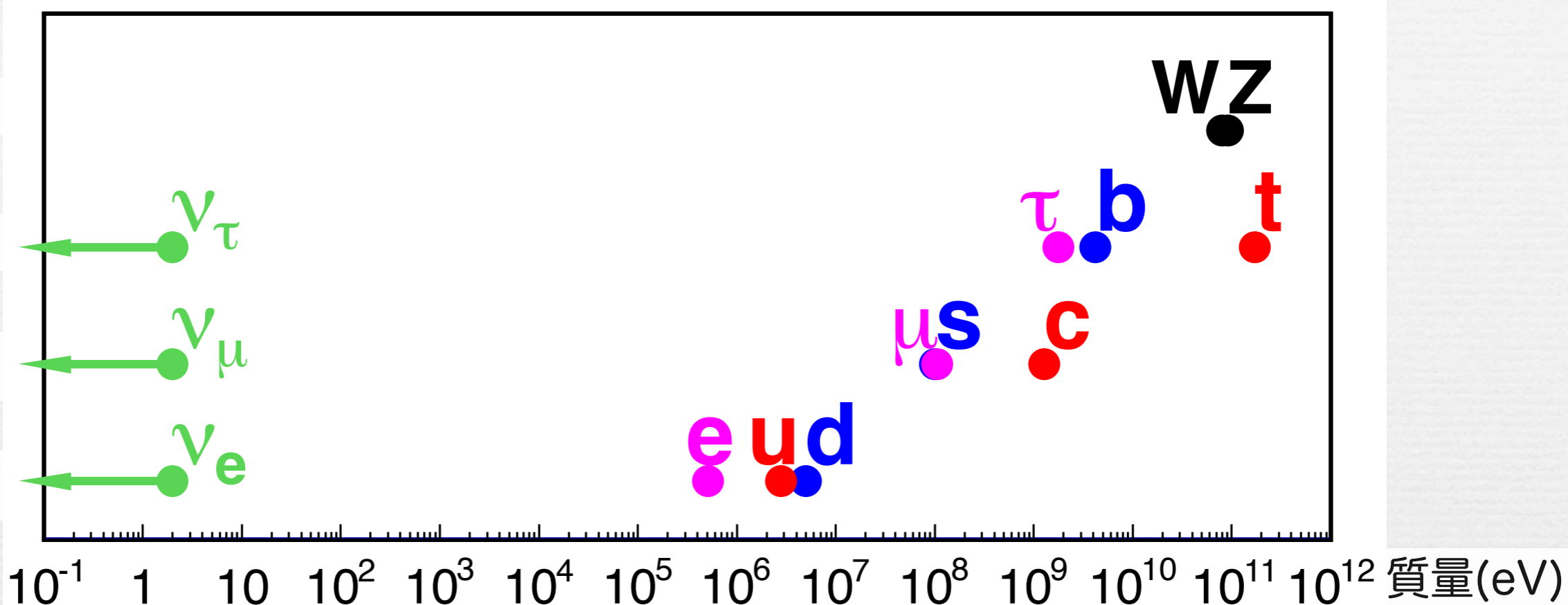
素粒子の質量

ゲージ粒子

第3世代

第2世代

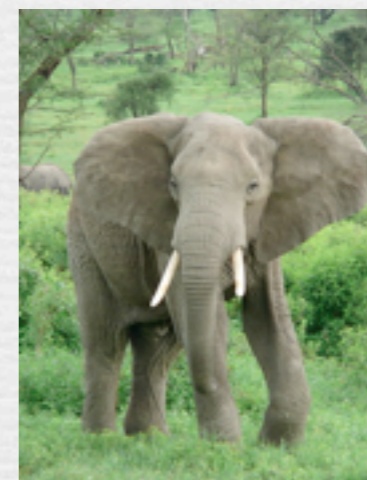
第1世代



1/1000mg



1000kg



「標準模型」

指導原理：量子力学 + (特殊)相対性理論 + ゲージ対称性

→ 質量 = 0 でないと「標準模型」がうまくいかない

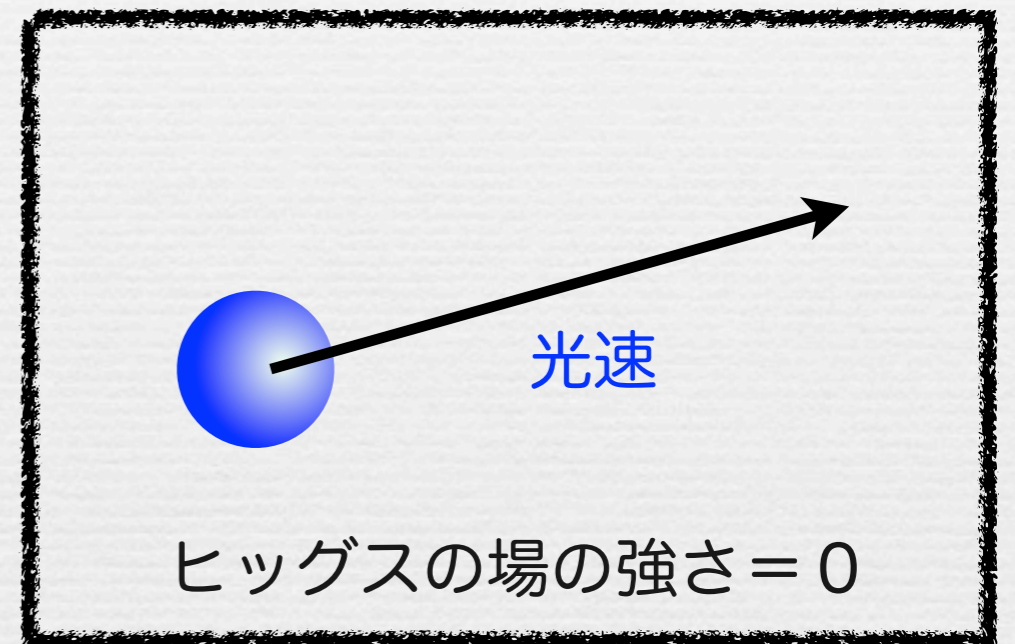
素粒子の質量起源

真空は「ヒッグスの場」で満たされている
宇宙の進化とともに、「ヒッグスの場」の性質が変化

宇宙初期：ビッグバン直後

「ヒッグスの場」の強さはゼロ

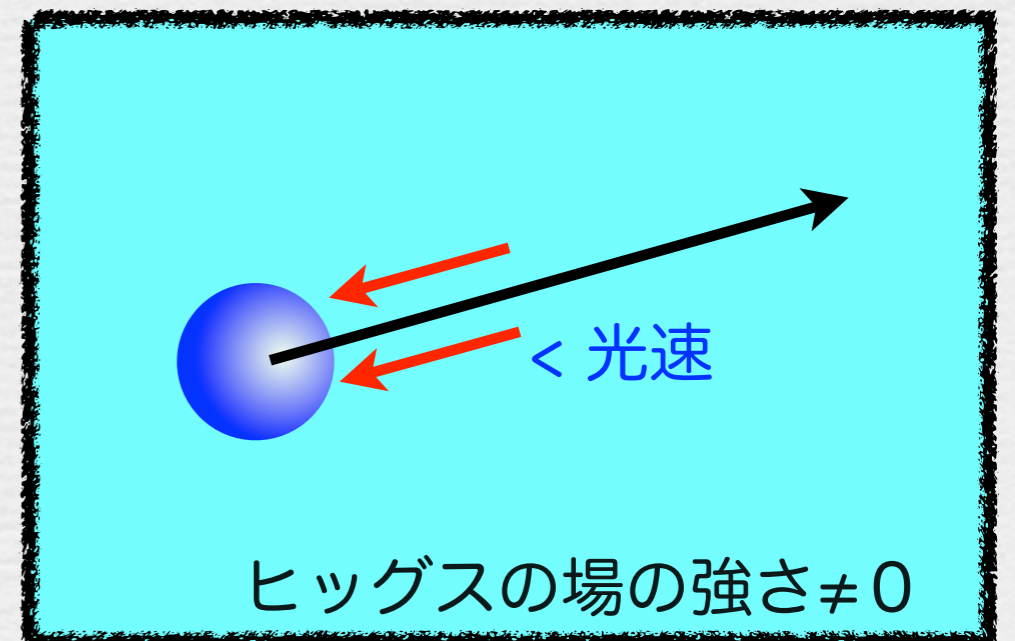
- 粒子は光速で運動
- 素粒子の質量は全てゼロ



宇宙が冷える：現在

「ヒッグスの場」が強さを持つ

- 粒子が動きにくくなる
- 光速より遅く運動
- 質量を獲得する

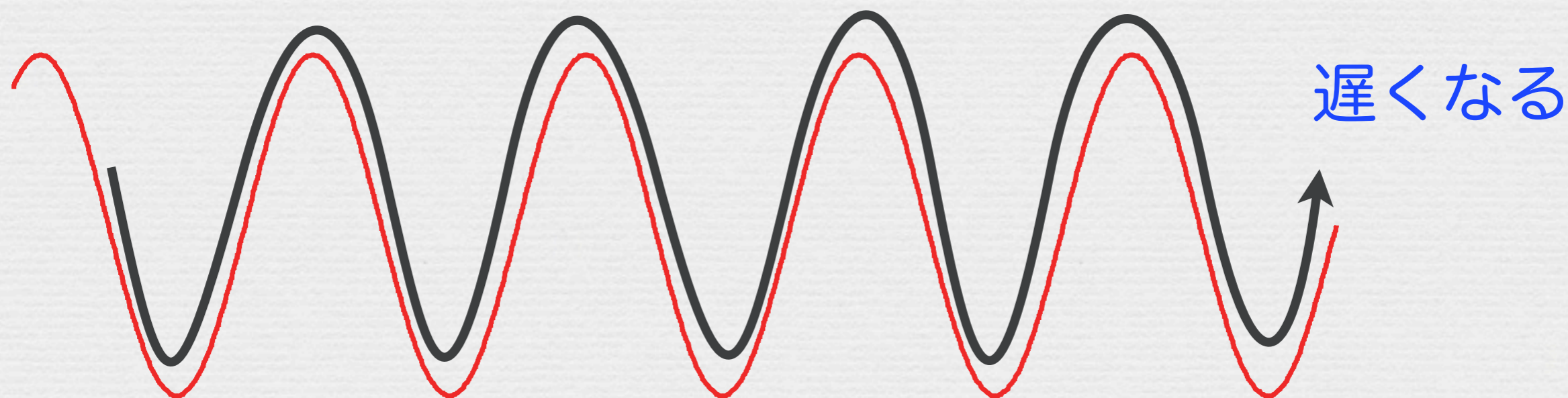


どう質量を与えるか？

障害物のない所では、、、エネルギー＝運動量
光速で進む



宇宙が冷えて突然でてきた「ヒッグスの場」による
障害物のあるところを粒子が通ると、、、



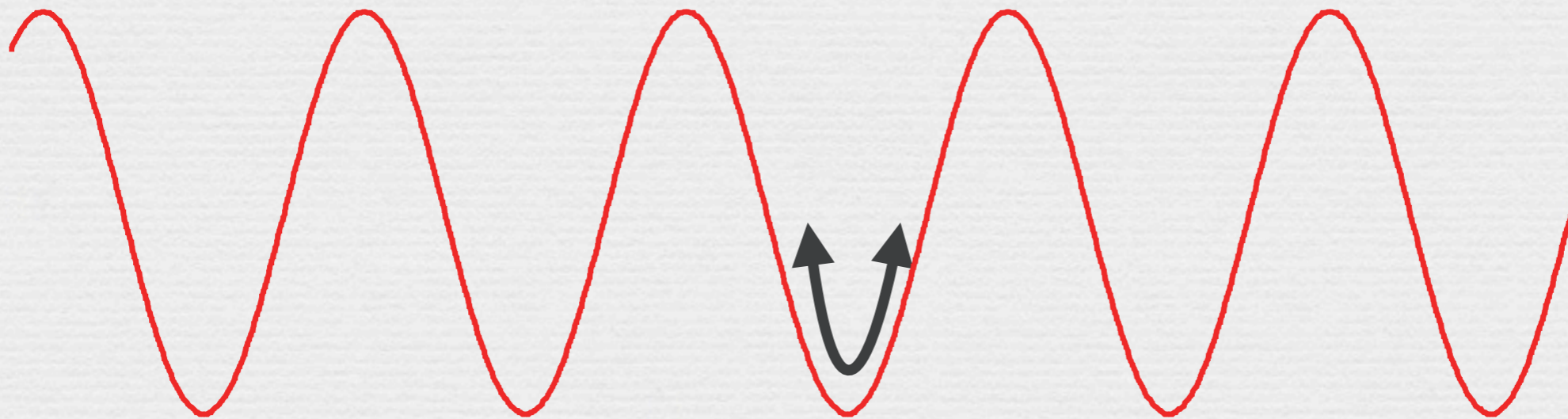
ヒッグスの場による障害物

どう質量を与えるか？

エネルギーが小さいと、
障害物のない所では、、、エネルギー＝運動量
光速で進む



障害物のあるところを粒子が通ると、、、止まり、振動する



エネルギーが振動に使われる

ヒッグスの場による障害物

遠くからみると静止して見える＝静止エネルギー

障壁＝(ヒッグス場の強さ)×(粒子の質量に比例する係数)

素粒子の質量起源

W粒子とZ粒子に対する障壁の高さは弱い力の強さで決まる

クォーク、レプトンは種類に応じた障壁の高さ

素粒子の種類ごとに湯川結合



ヒッグスを見るには？

ヒッグスの場そのものを見ることはできない。
エネルギーをつぎ込むと見る事ができる

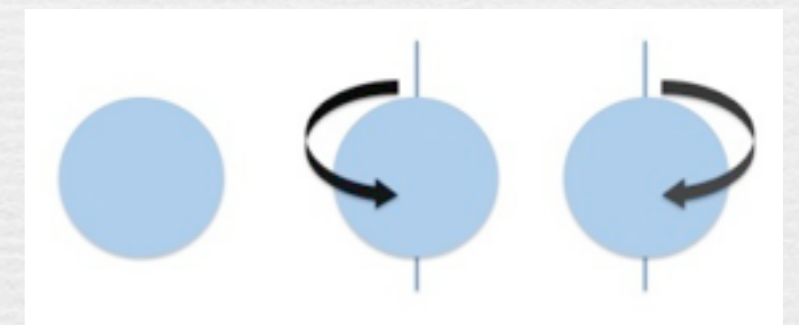
→ ヒッグス粒子

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：1/2

力を伝える粒子：1



素粒子には固有のスピン

加速器でヒッグス場をたたけばヒッグス粒子が見える

思いっ切りたたく → 高エネルギーでたたく

ヒッグス粒子は、不安定ですぐに崩壊する

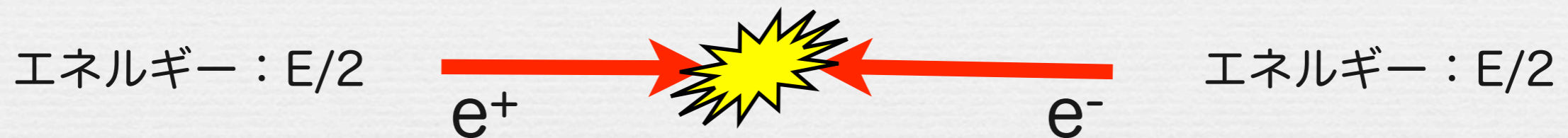
そういう粒子を実験的にさがしてみる → **素粒子実験**

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



$$E = Mc^2$$

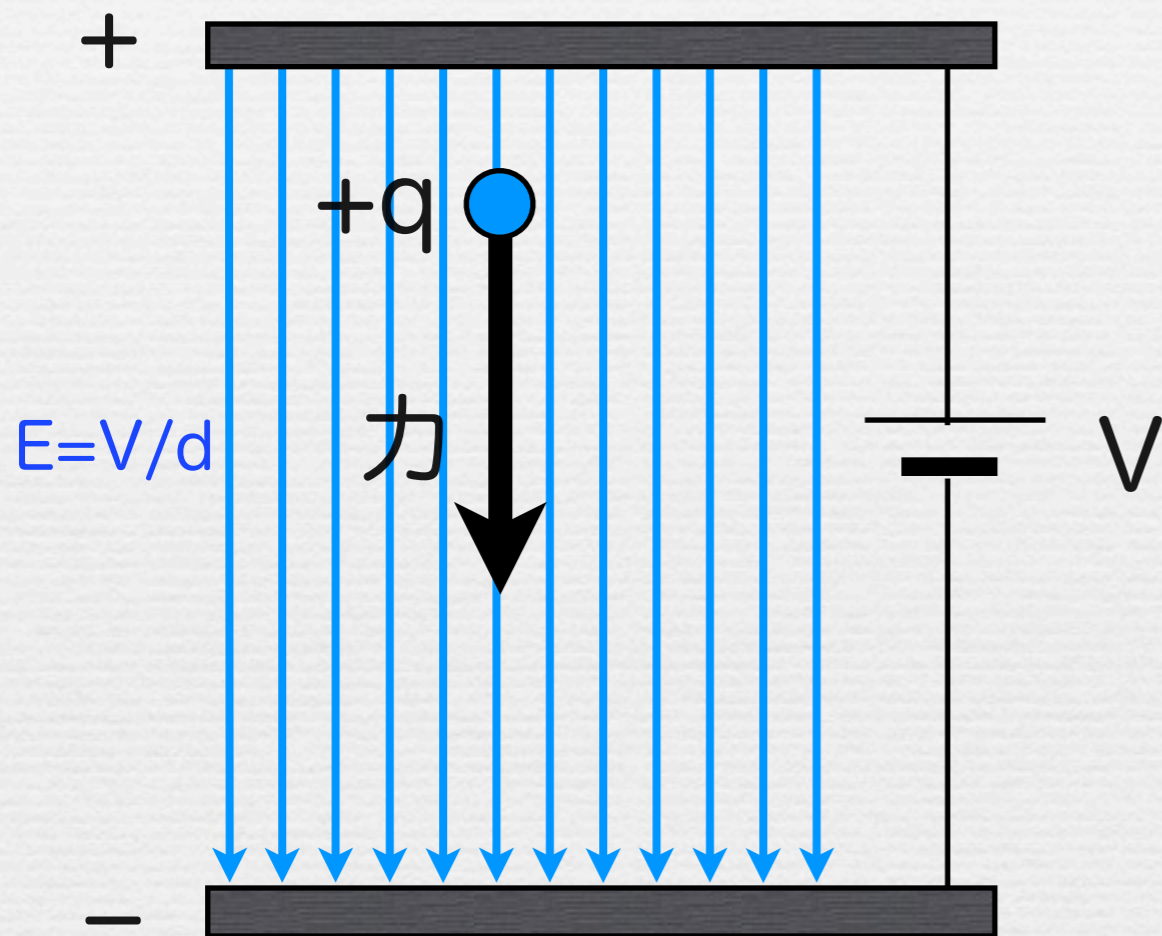
質量 M の未知なる素粒子を生成する能力

加速した粒子を衝突させる

高エネルギー！

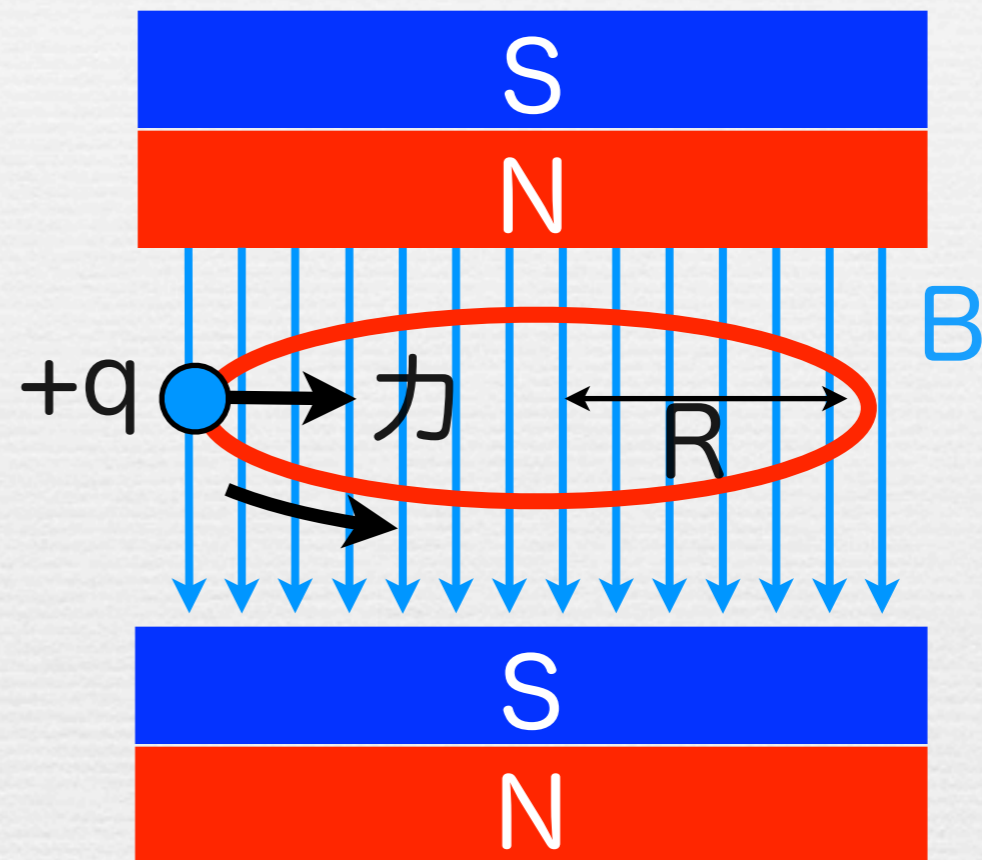
粒子を加速する

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

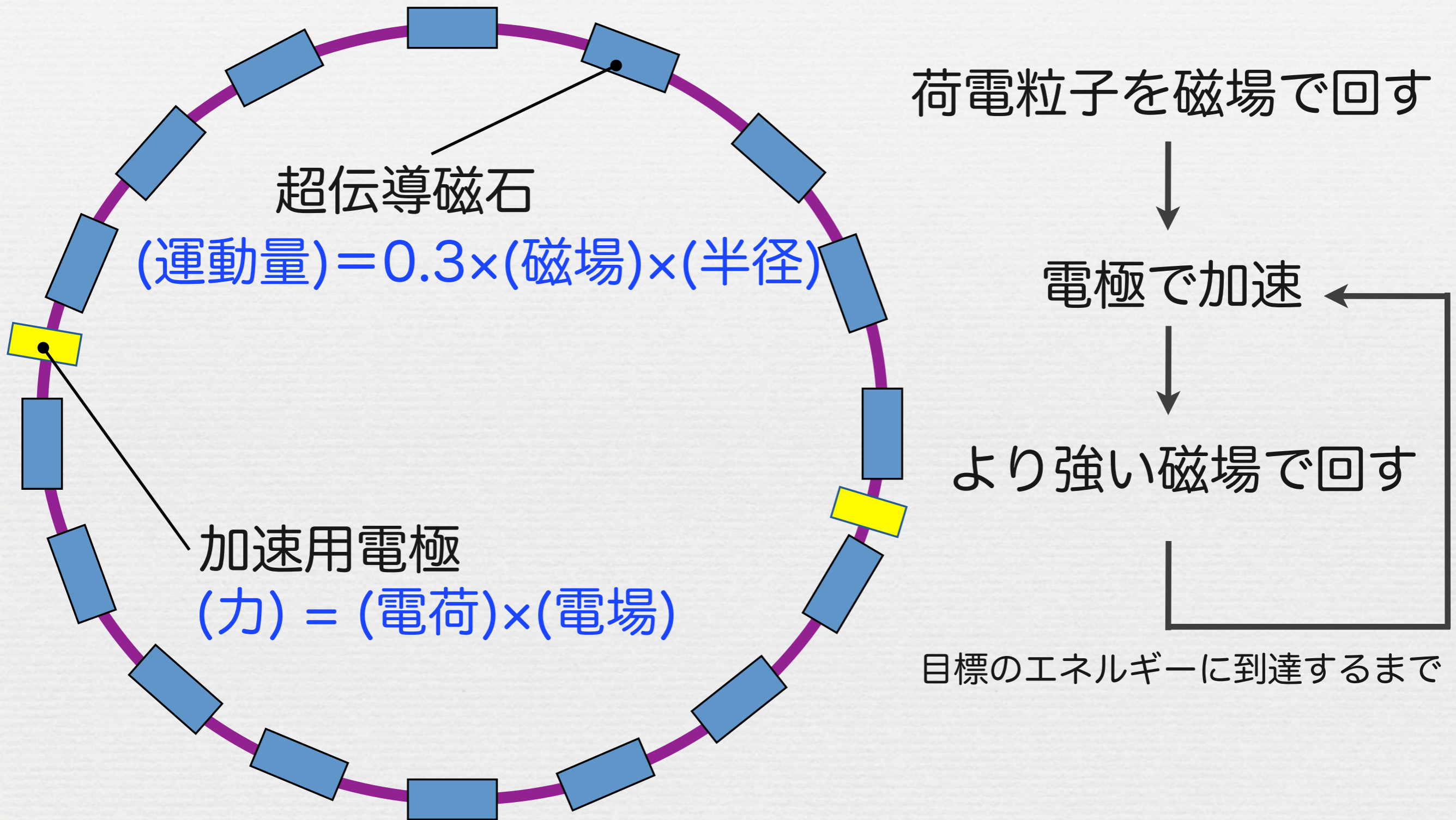
$$(\text{力}) = (\text{電荷}) \times (\text{電場})$$



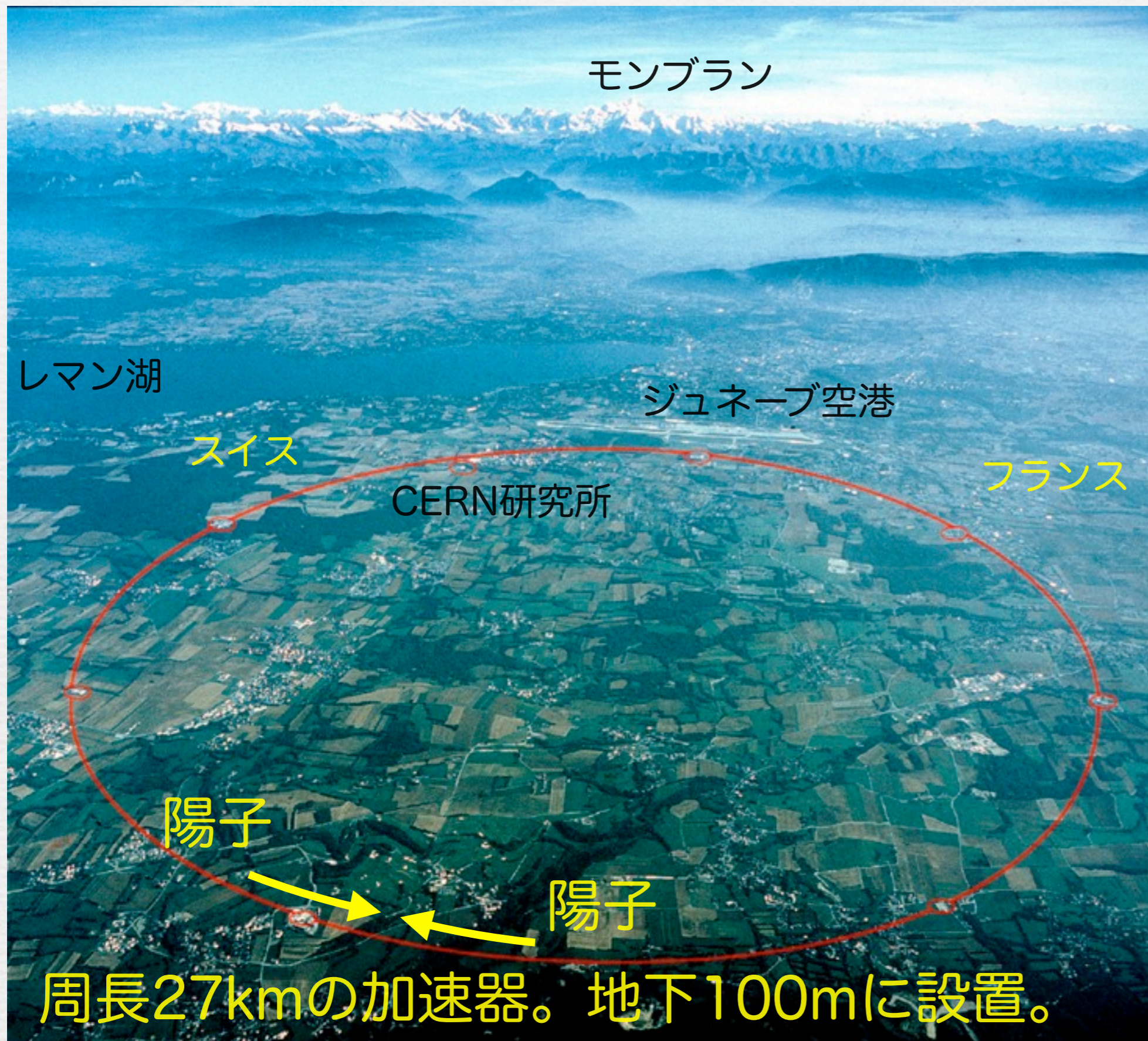
磁場を大きくして
より加速した荷電粒子を回す

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

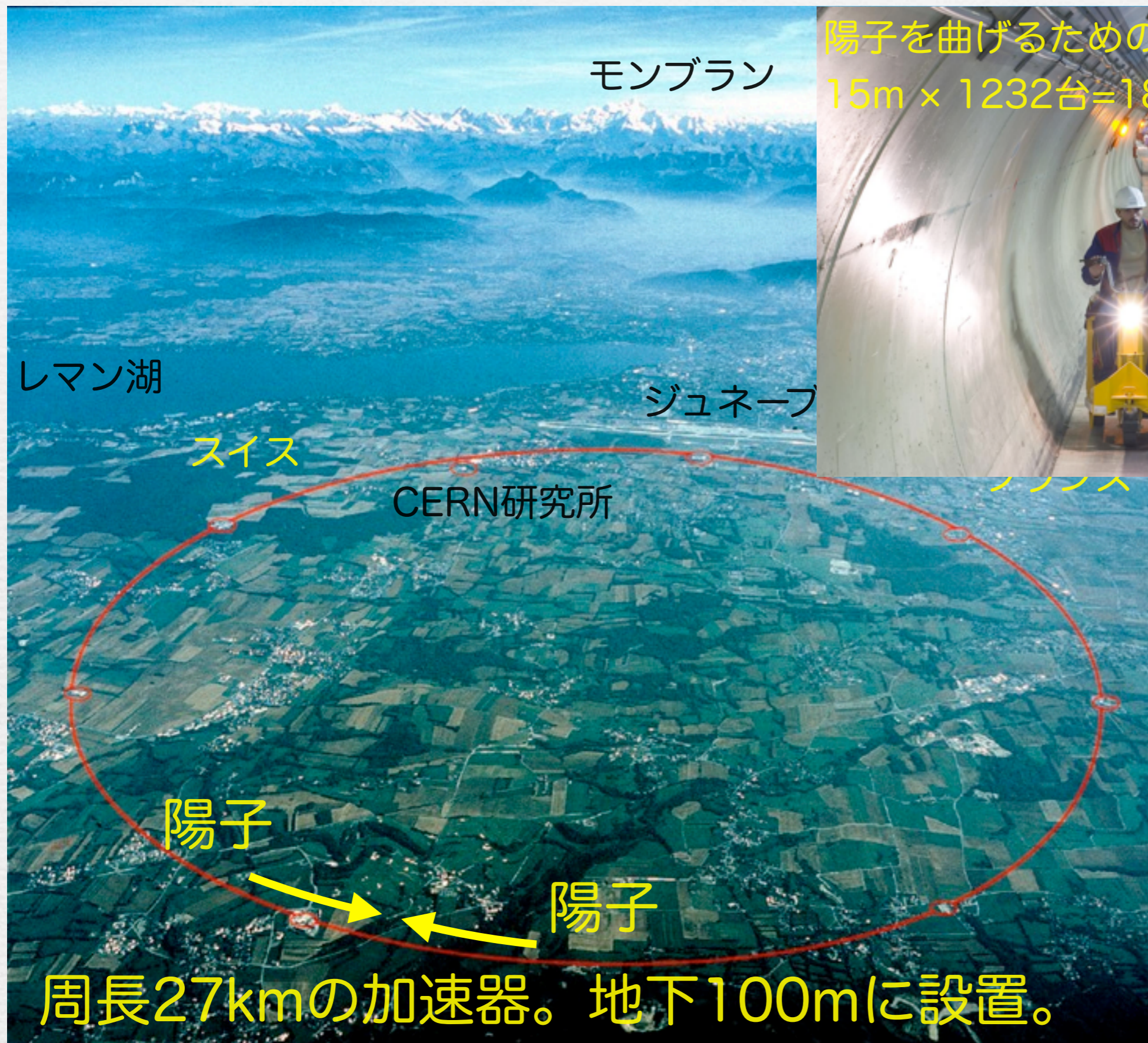
加速器の原理



最先端加速器 Large Hadron Collider



最先端加速器 Large Hadron Collider



陽子を曲げるための磁石
15m × 1232台 = 18km (27km中)

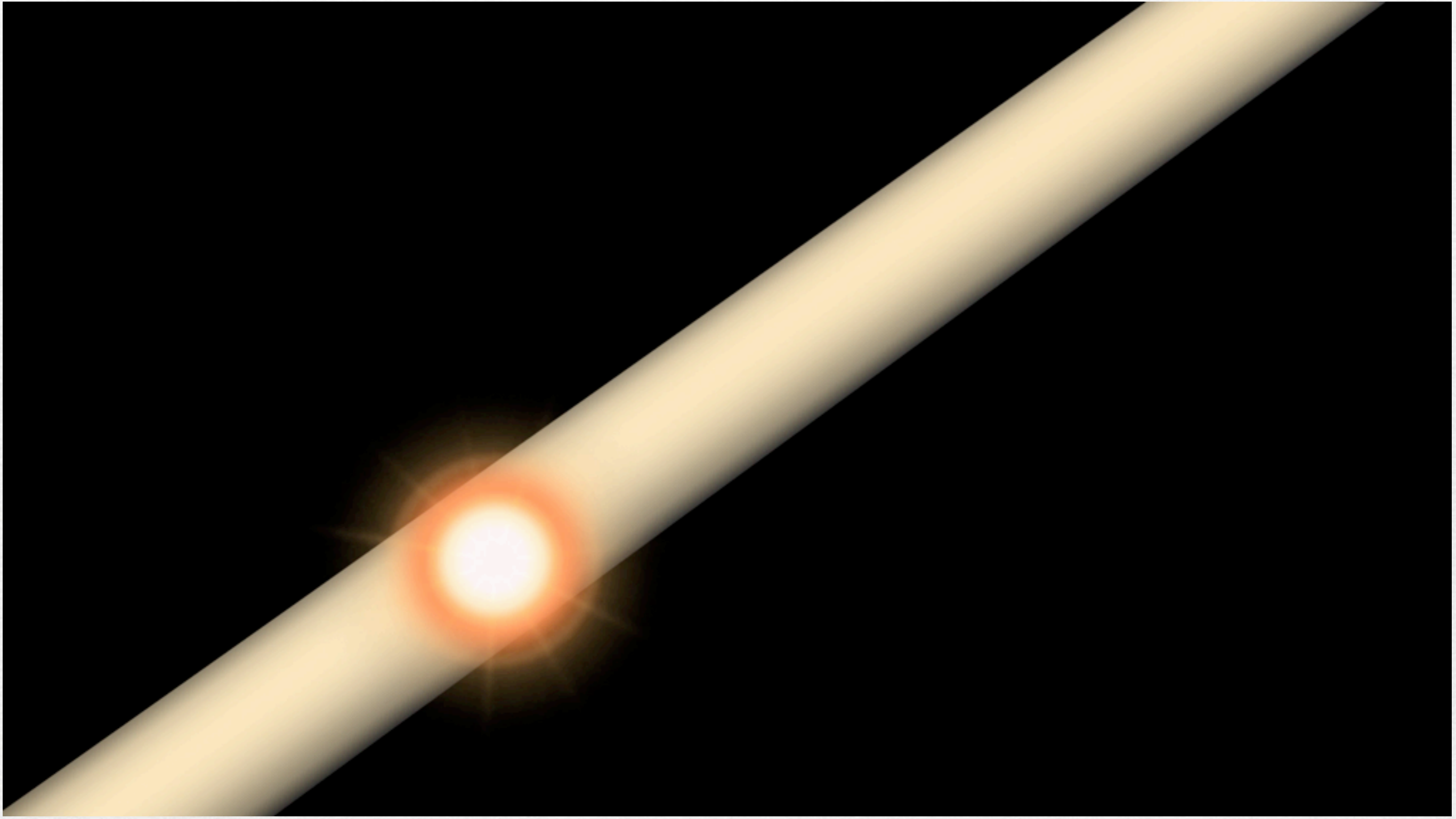
This photograph shows the interior of the LHC tunnel. A worker wearing a white hard hat and a blue jacket is riding a yellow motorized cart. The tunnel is lined with large, blue superconducting magnets that are used to bend the proton beams. The text above indicates that there are 1232 magnets, each 15 meters long, totaling 18 km of the 27 km tunnel.

LHC加速器の大きさ

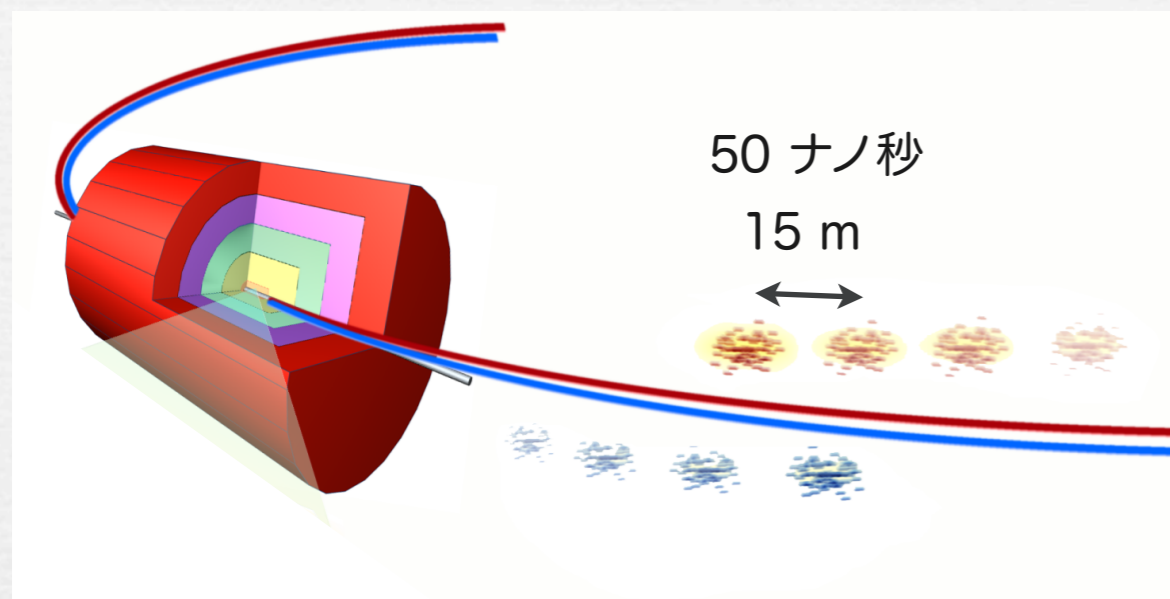


LHC加速器の大きさ





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

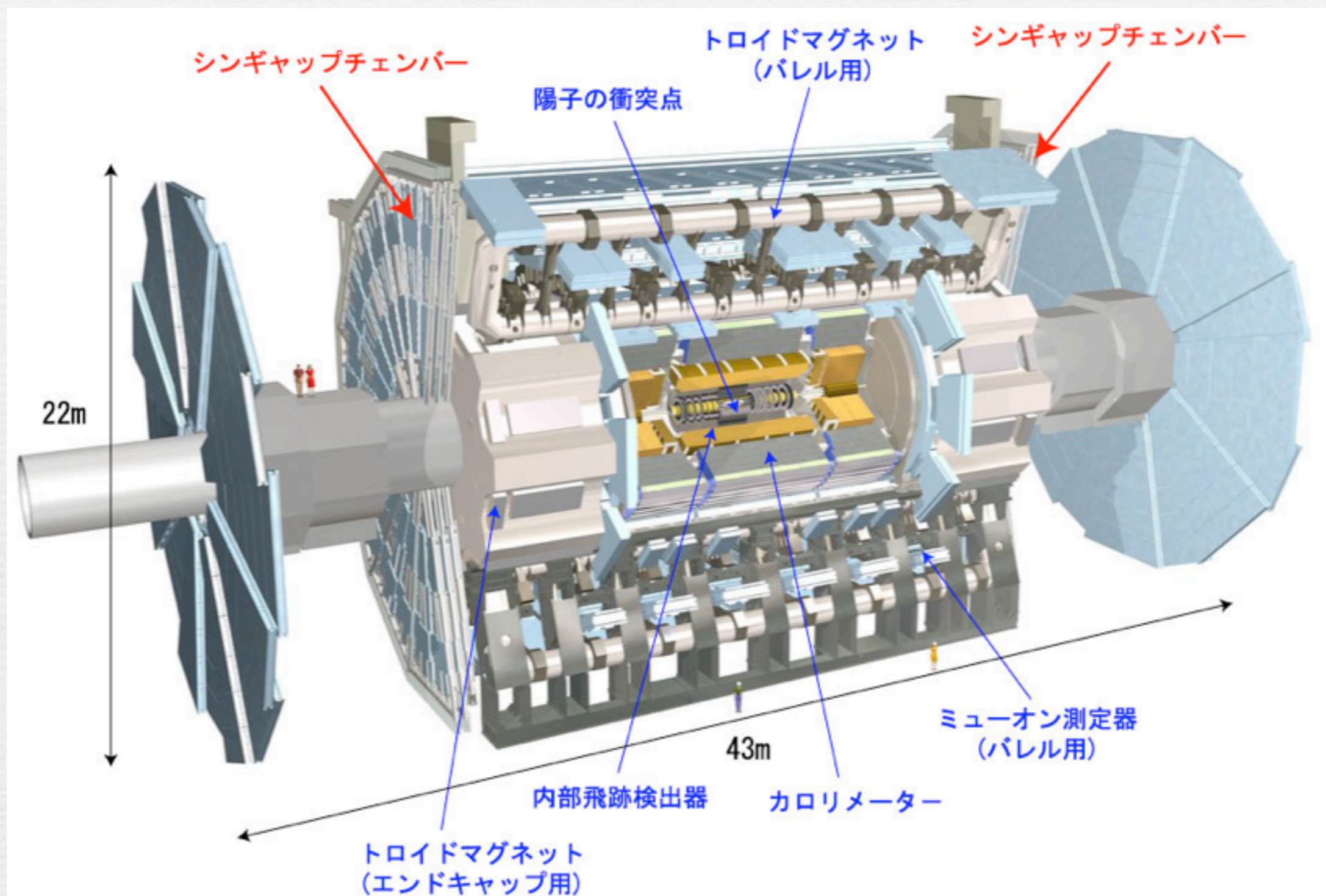
陽子1個 ... コバエの運動エネルギー程度

加速器内の全陽子 ...



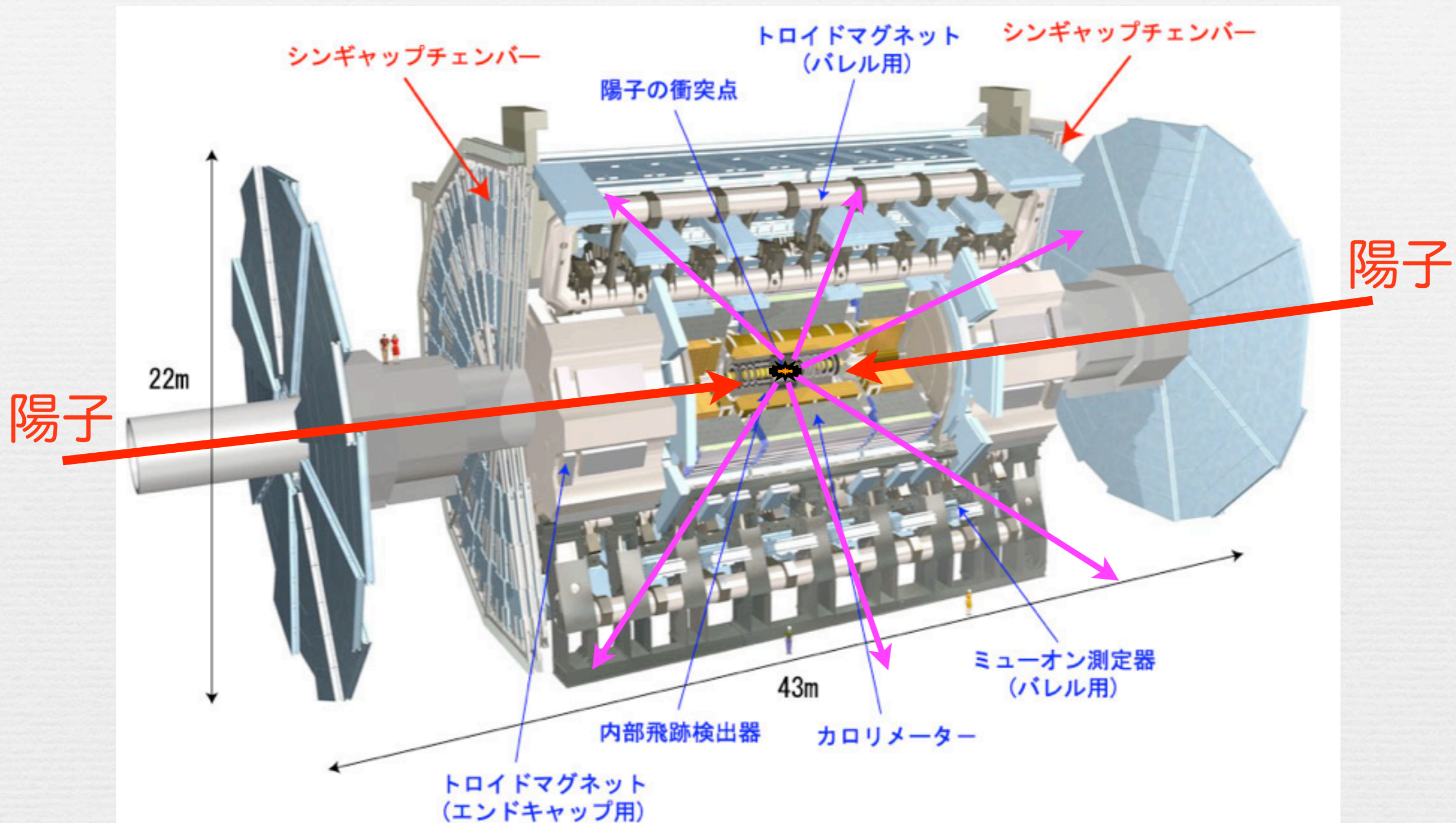
ヒッグス粒子を捕まえる 検出器

粒子検出器 アトラス検出器



総重量：7000トン

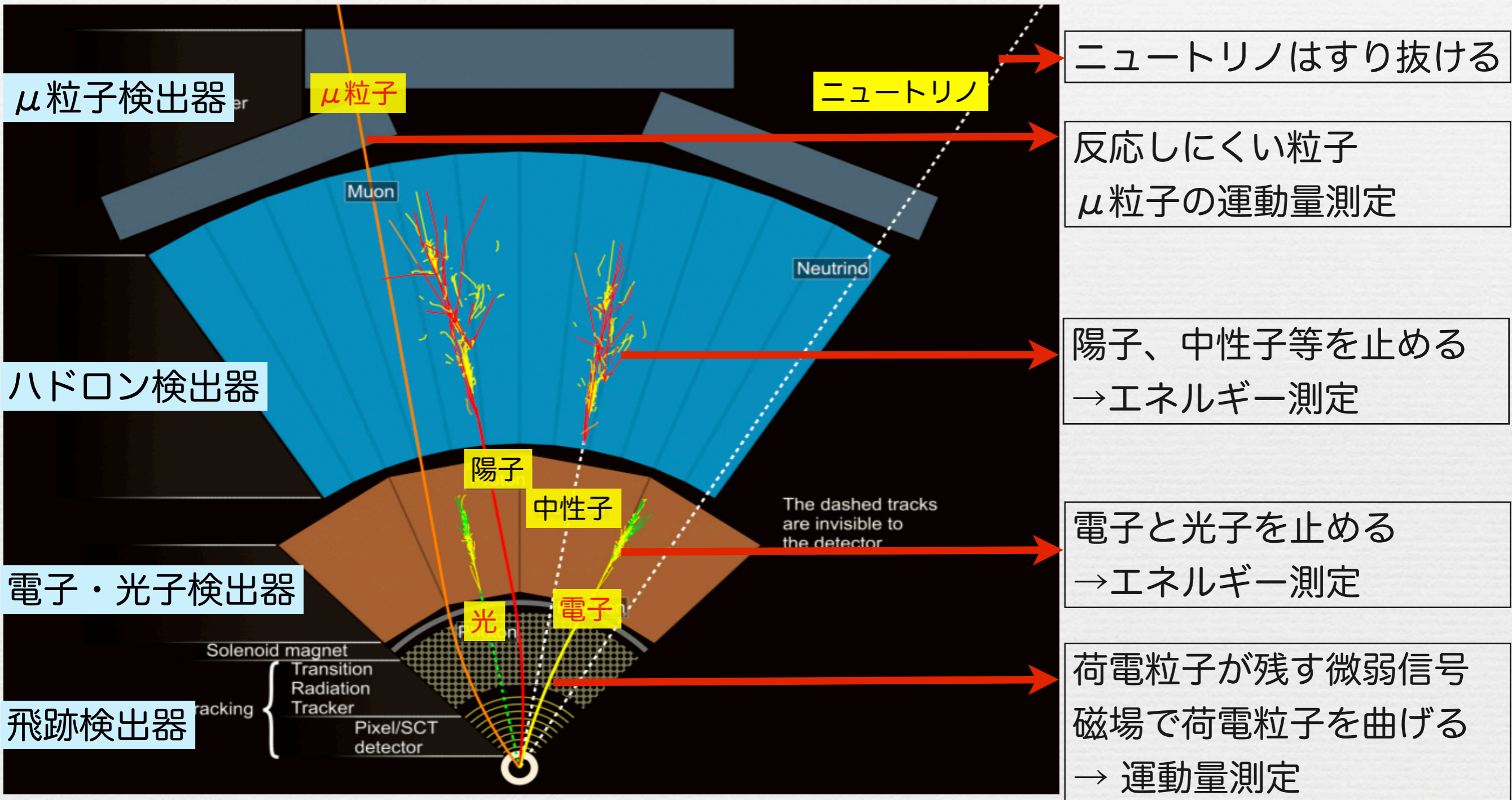
粒子検出器 アトラス検出器



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)

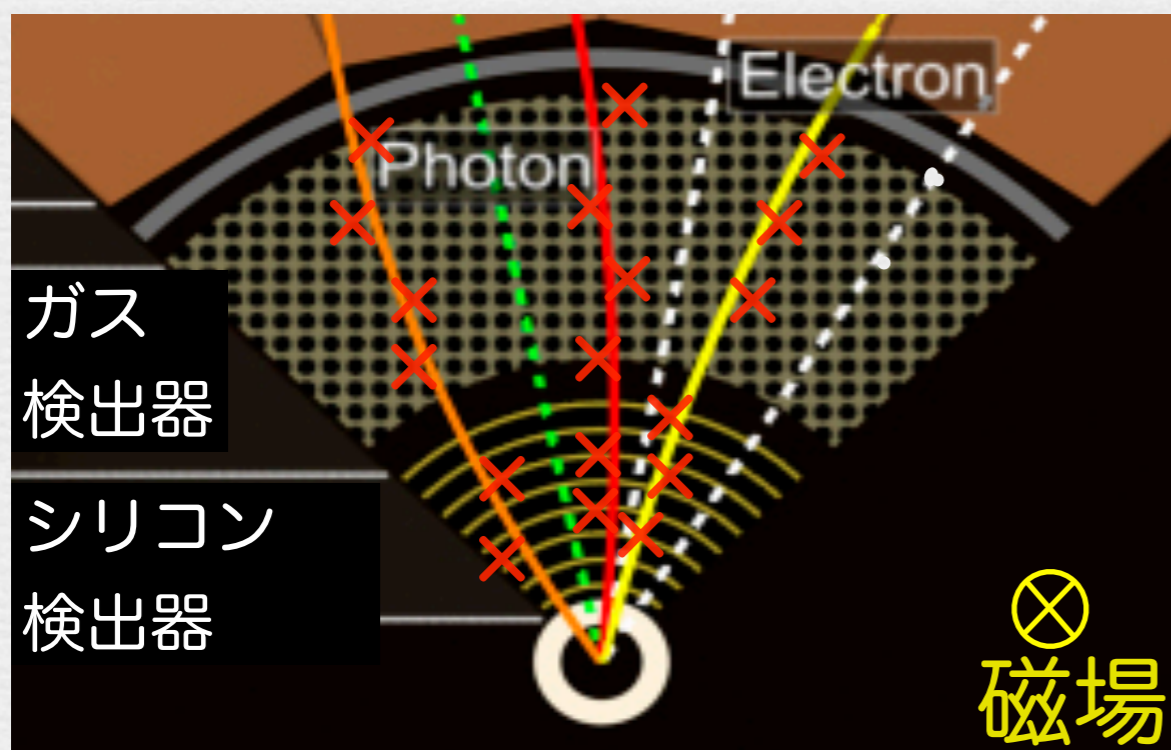
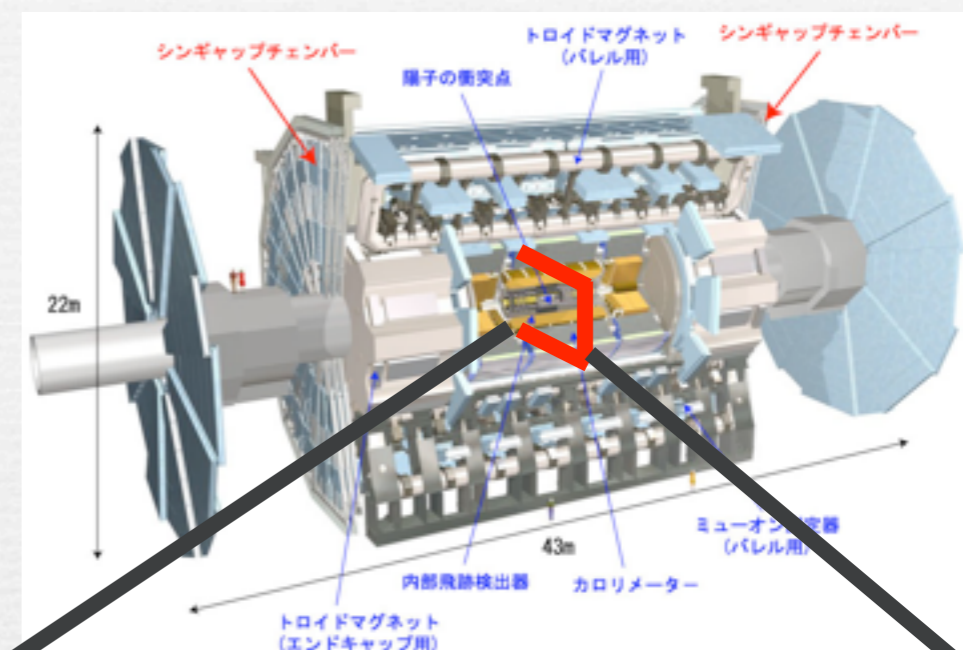
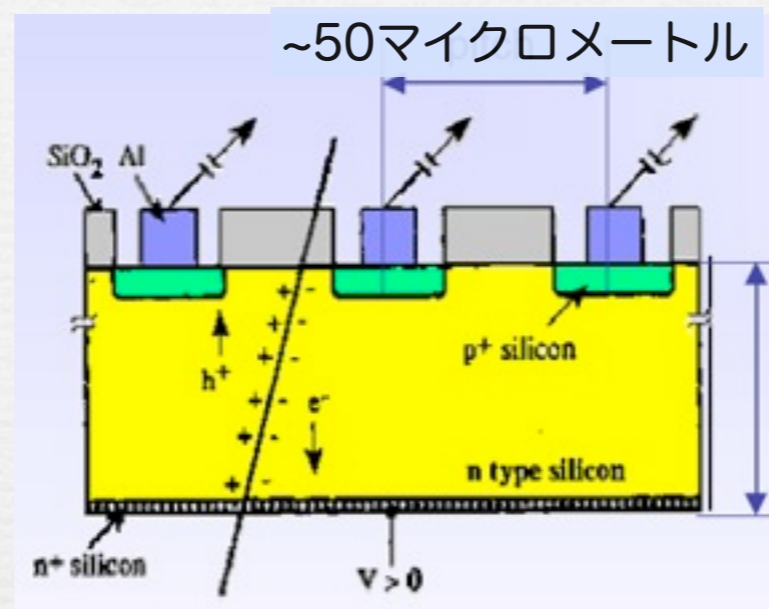
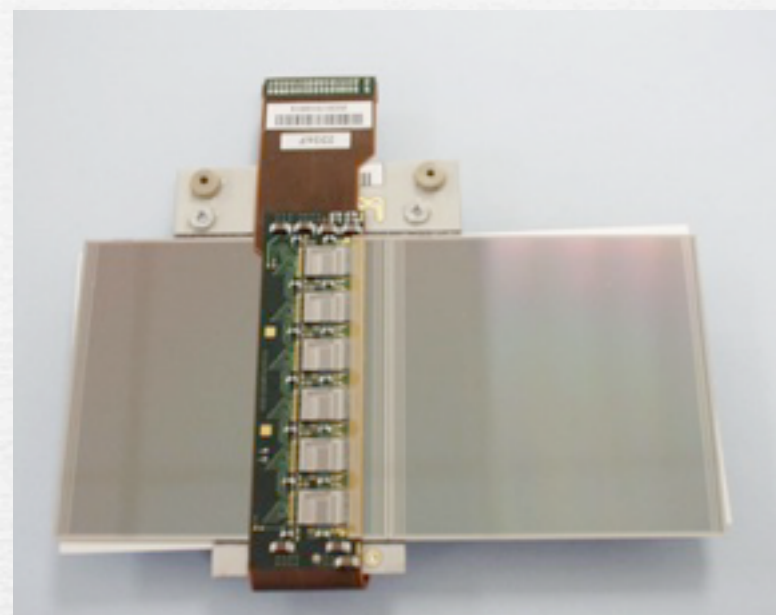
検出器の原理

検出器の物質と粒子との相互作用を利用する

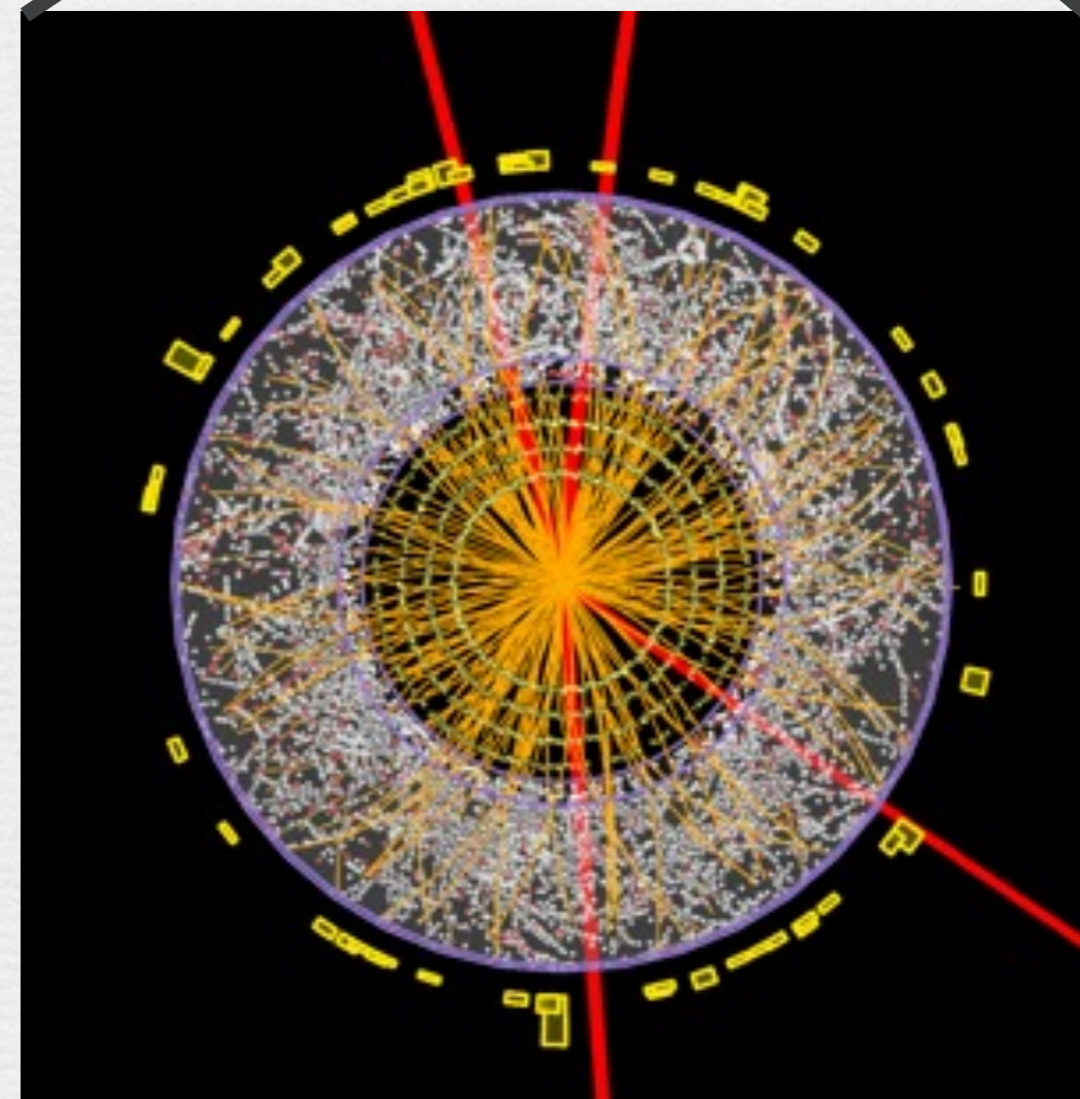


粒子の種類、エネルギー、運動量を測定

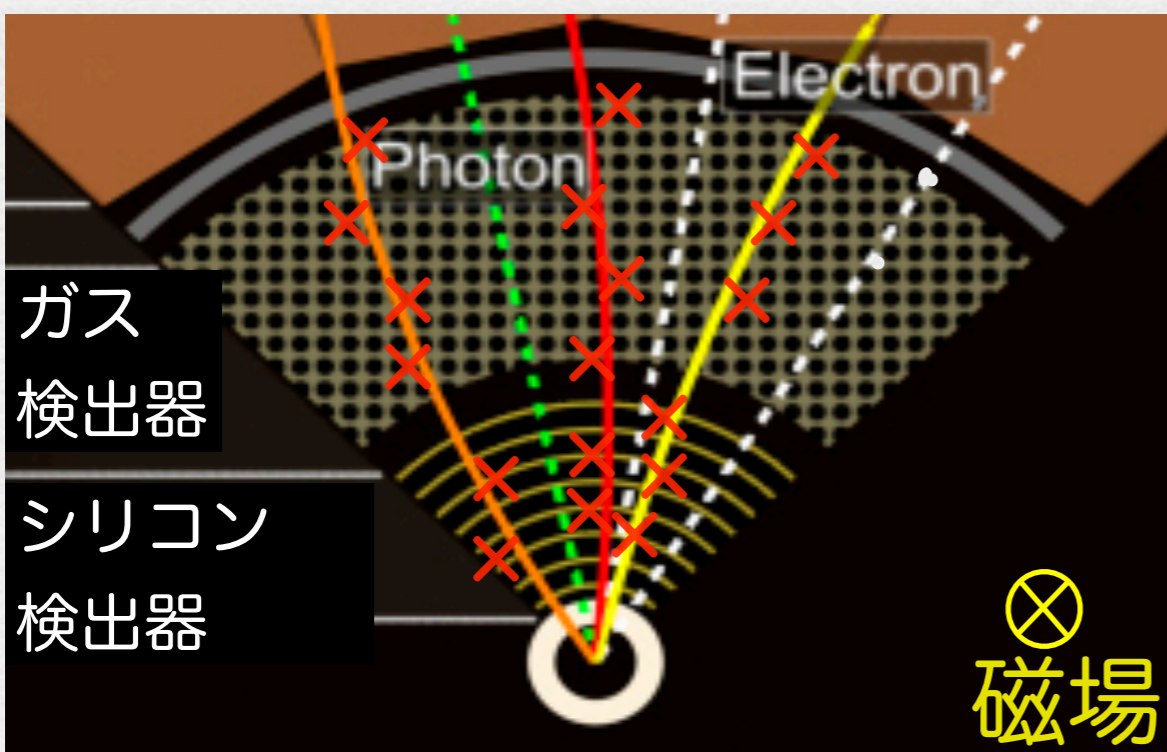
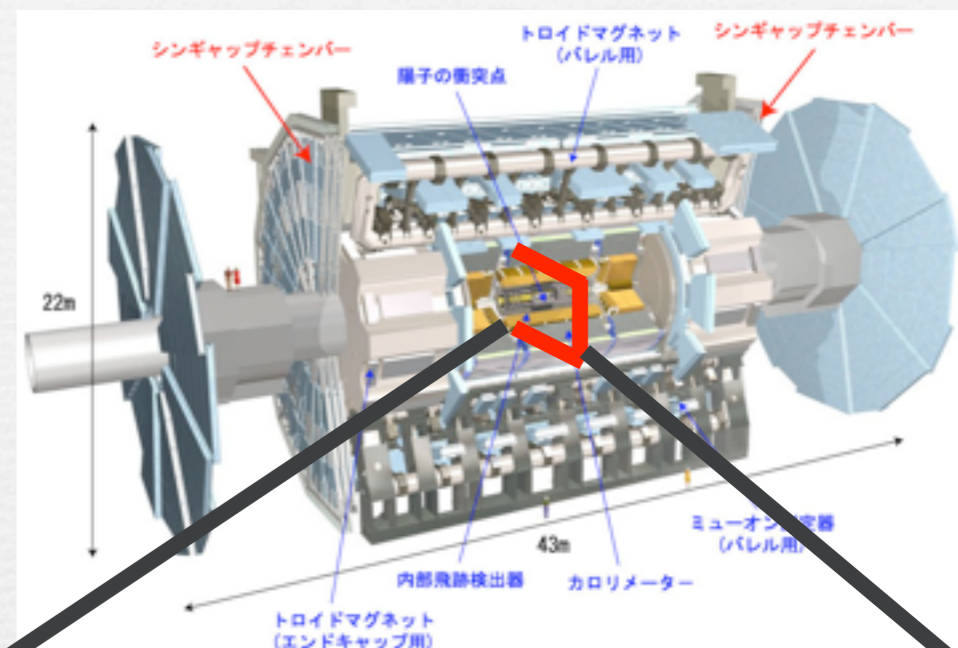
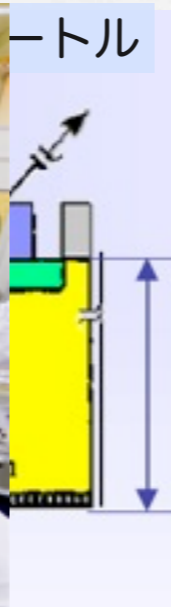
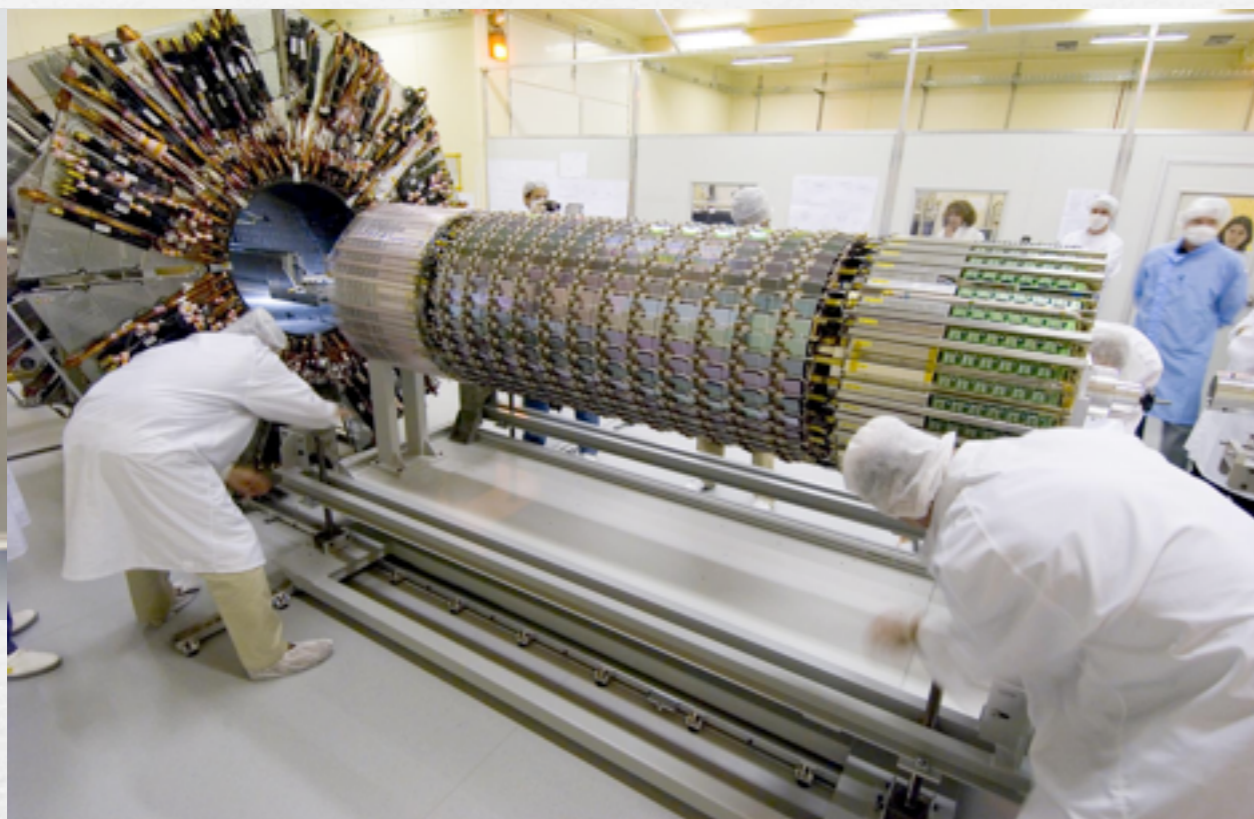
運動量測定 (飛跡検出器)



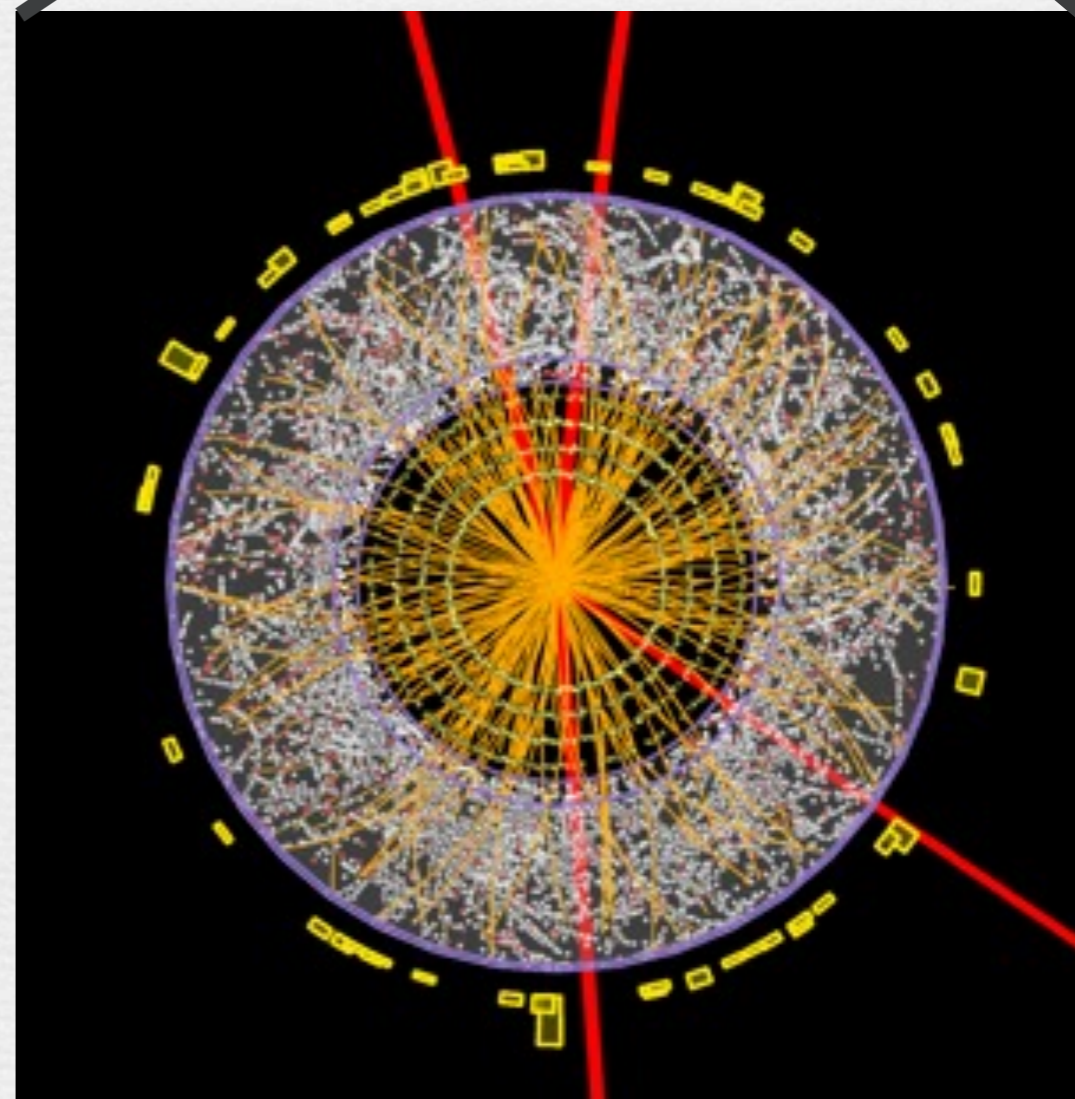
$$(\text{運動量}) = 0.3 \times (\text{磁場}) \times (\text{半径})$$



運動量測定 (飛跡検出器)

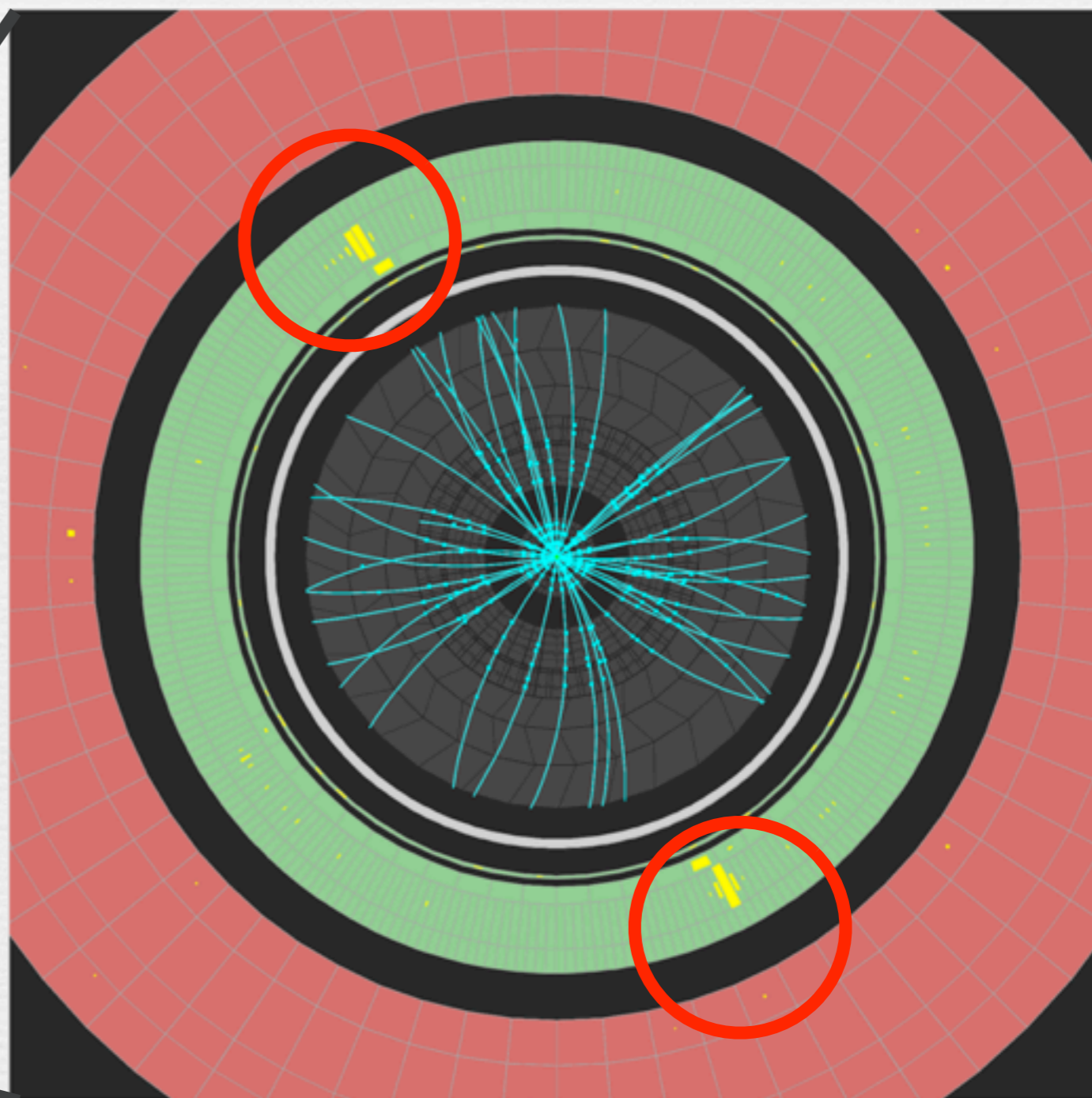
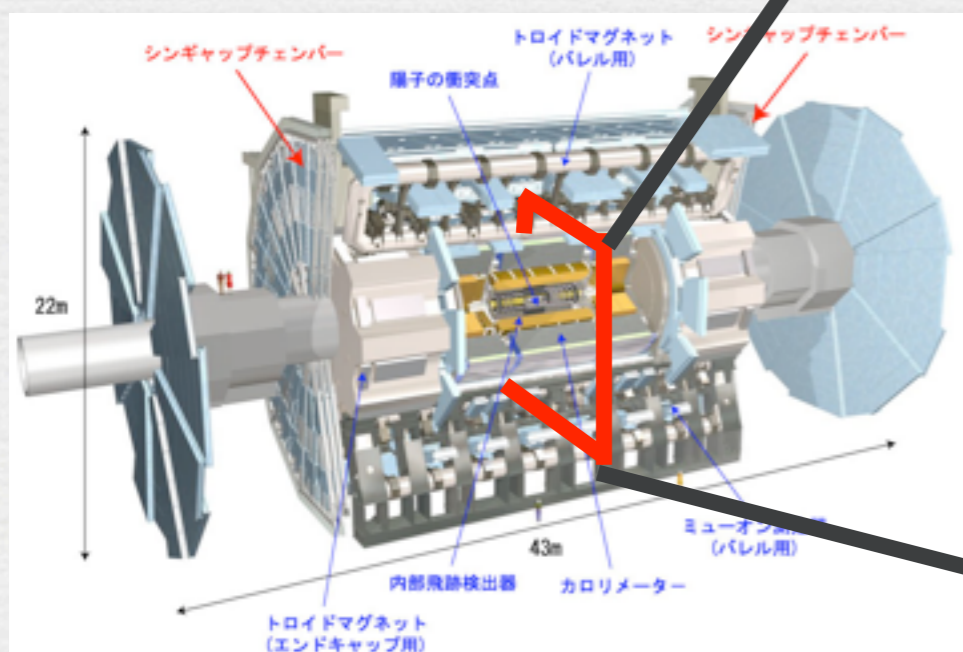
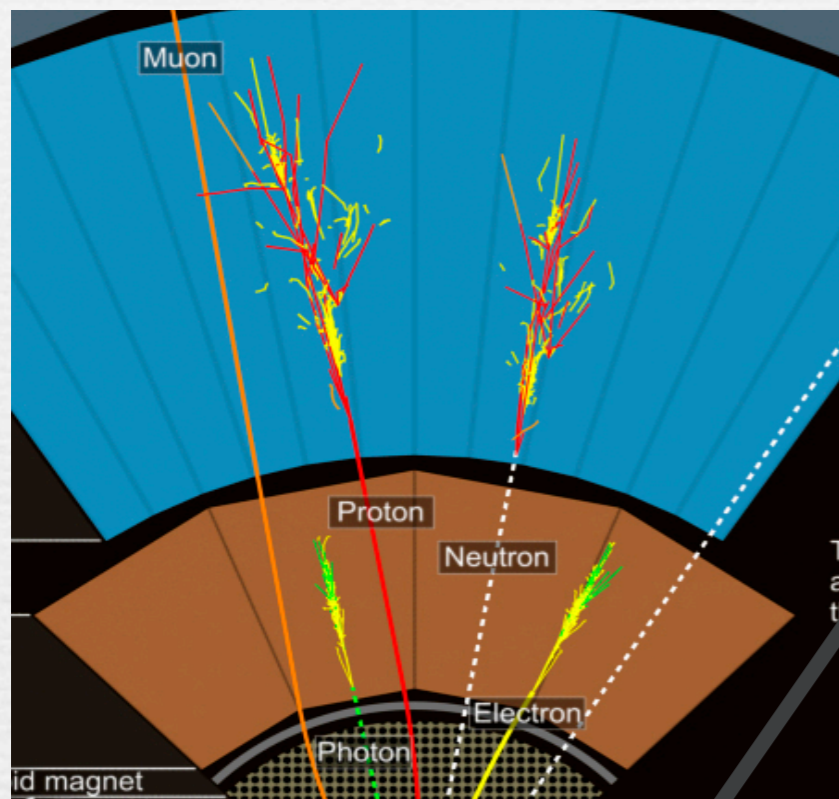


$$(\text{運動量}) = 0.3 \times (\text{磁場}) \times (\text{半径})$$

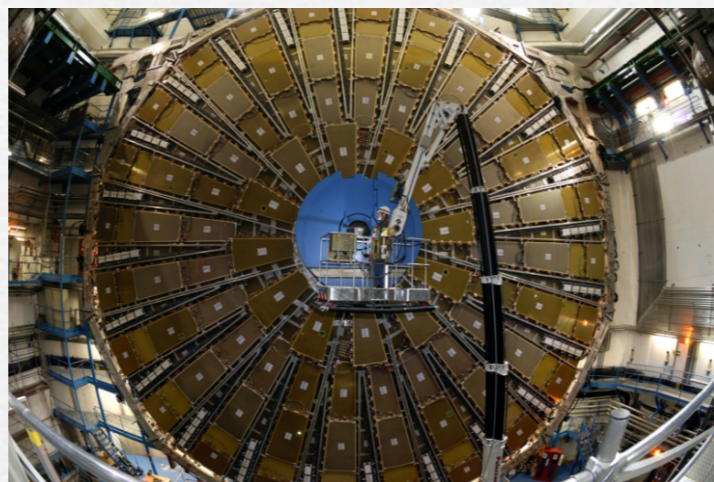
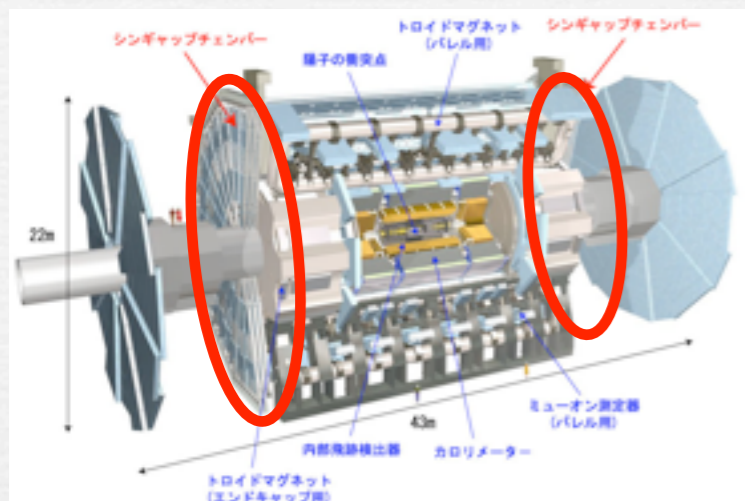


エネルギー測定器（カロリメータ）

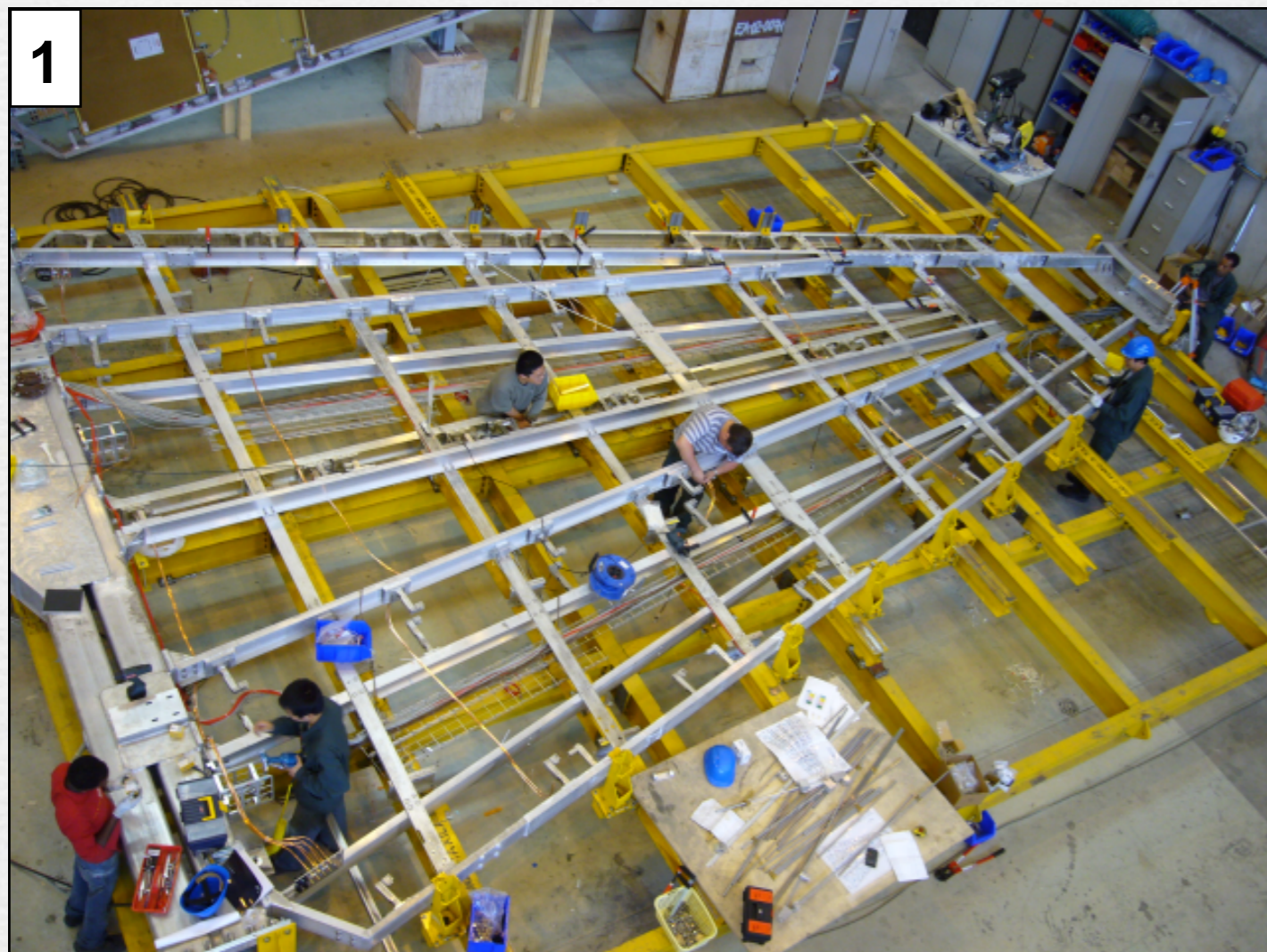
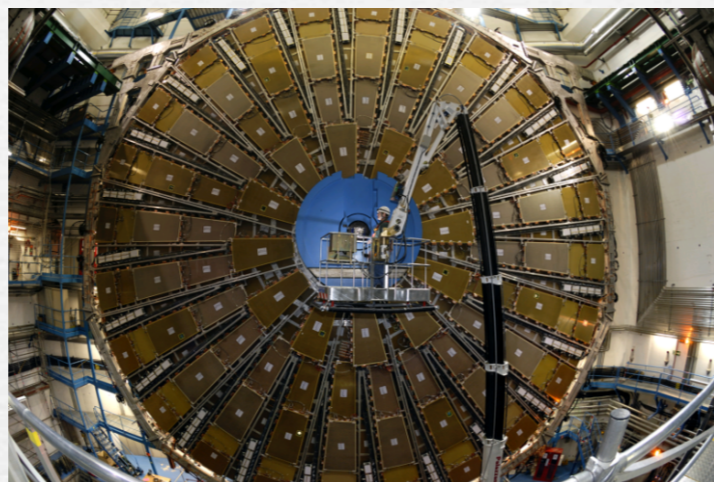
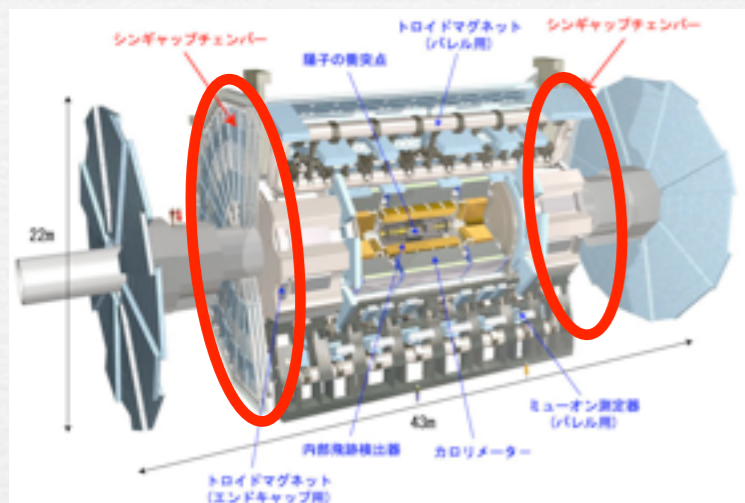
光子、電子、陽子、中性子などを物質で止める
そのとき出る光や熱を電気信号として捉える



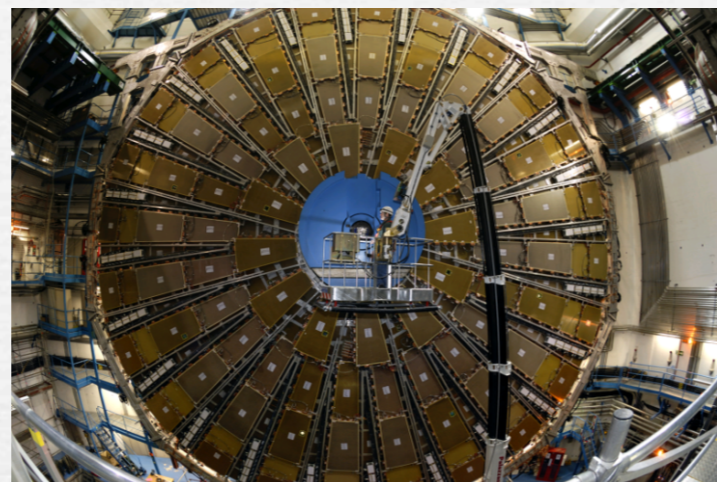
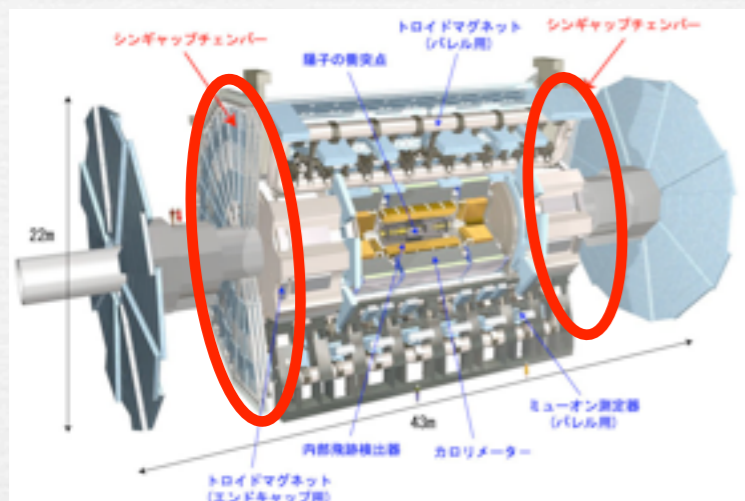
μ 粒子検出器の組み立て



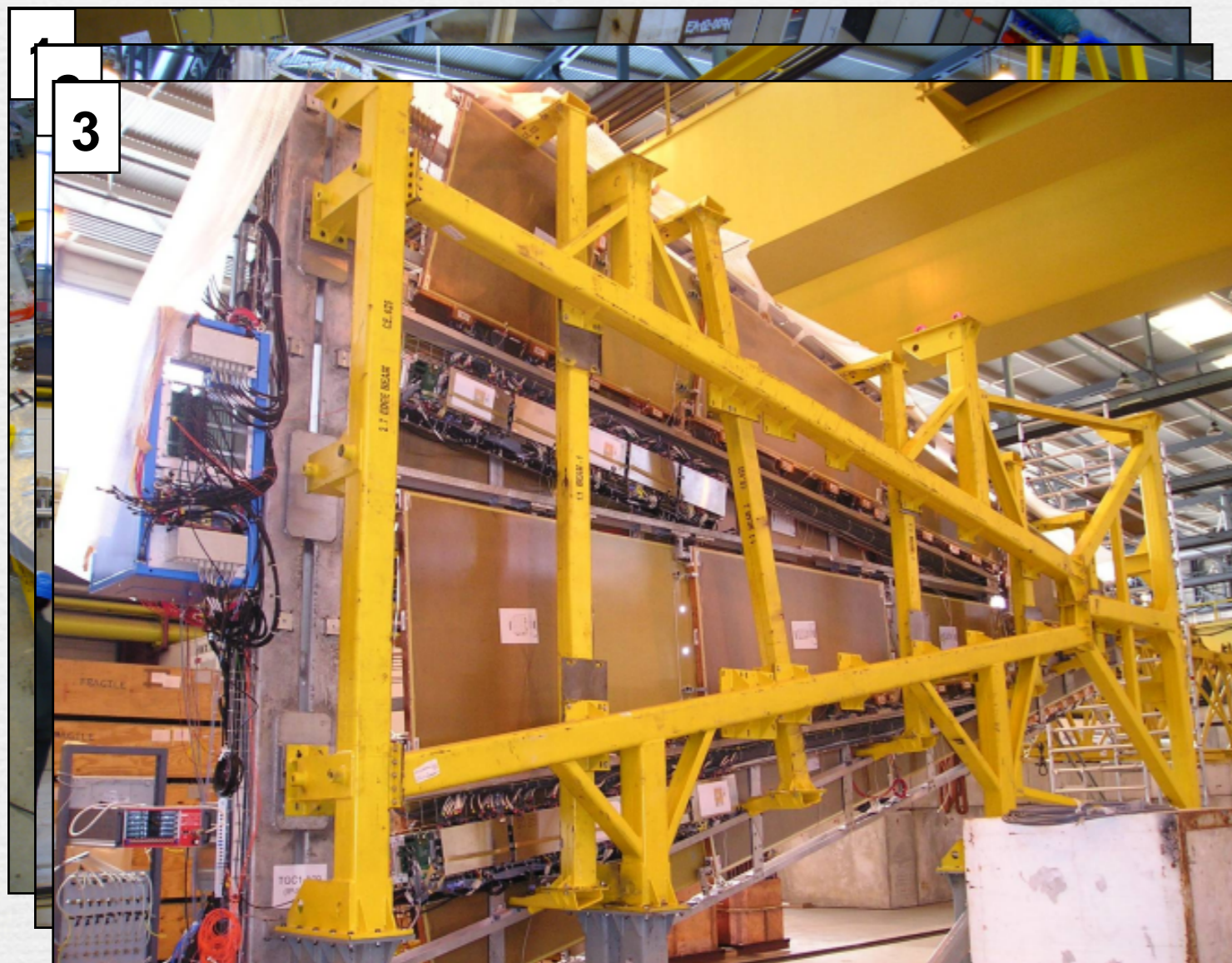
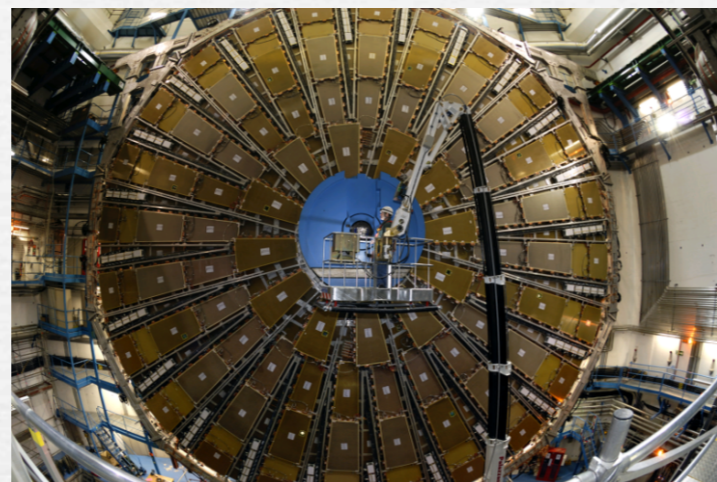
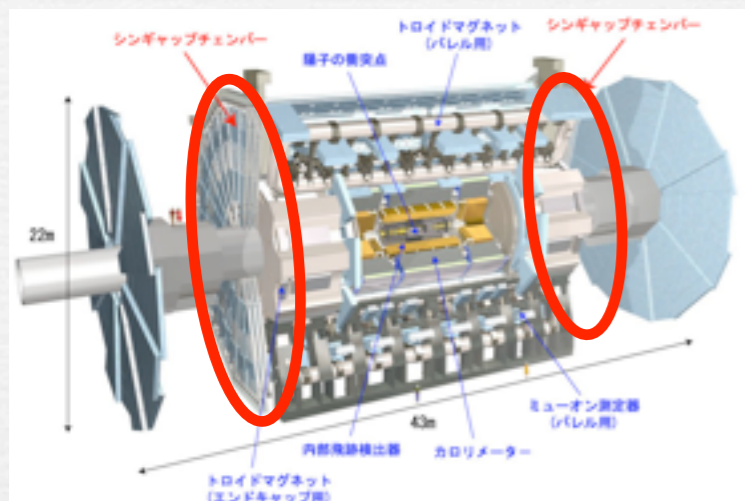
μ 粒子検出器の組み立て



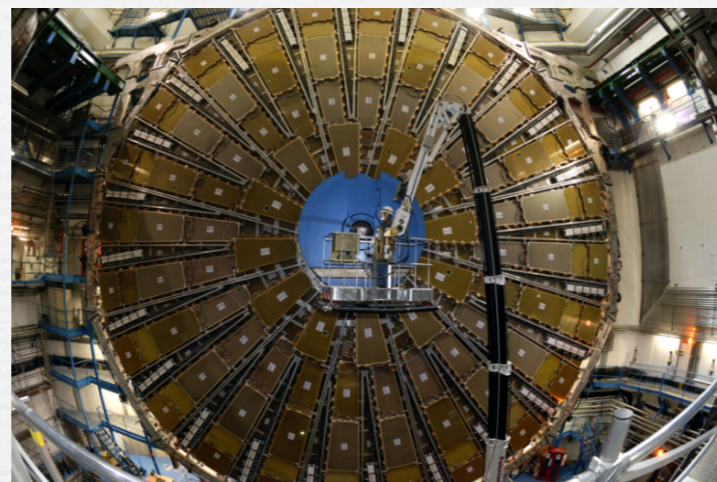
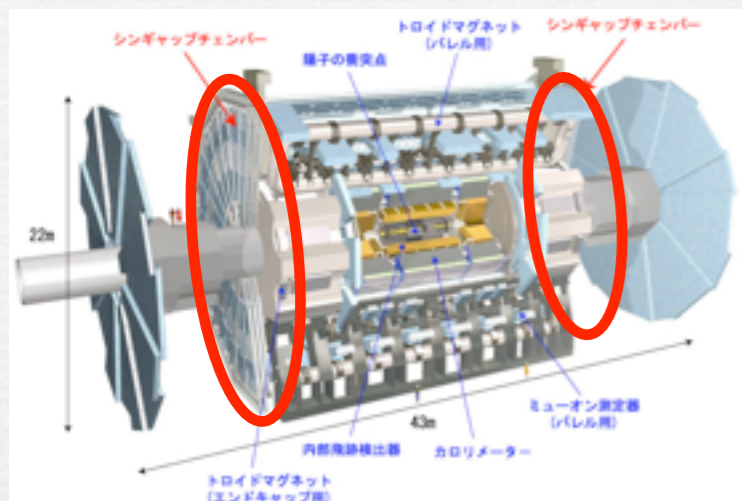
μ 粒子検出器の組み立て



μ 粒子検出器の組み立て



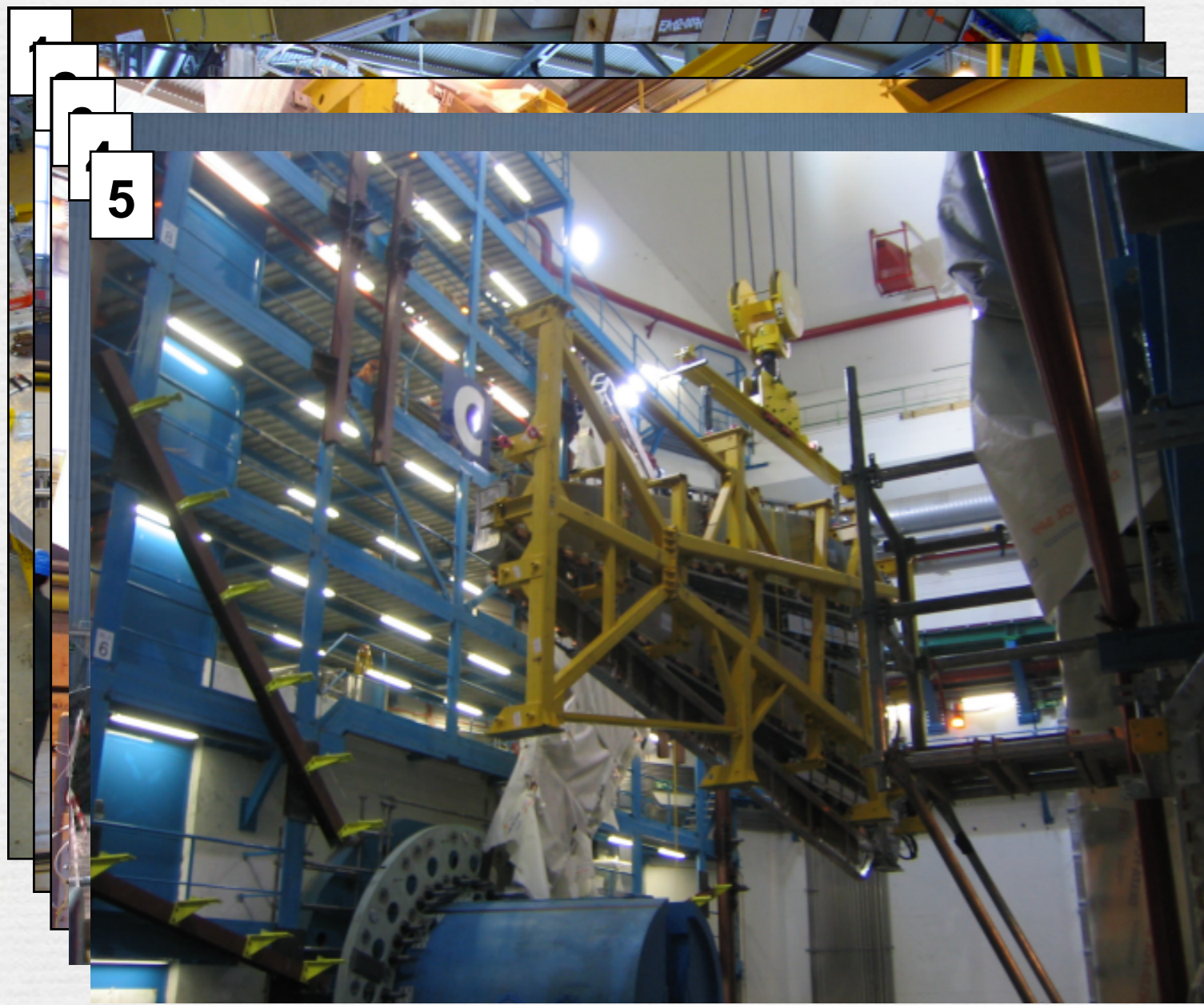
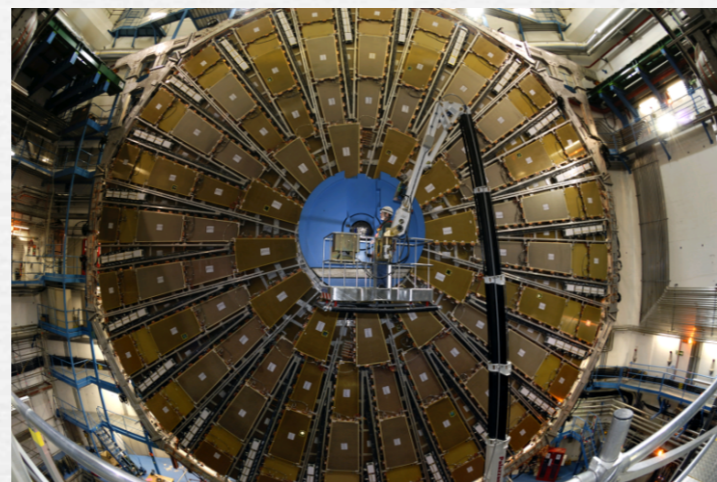
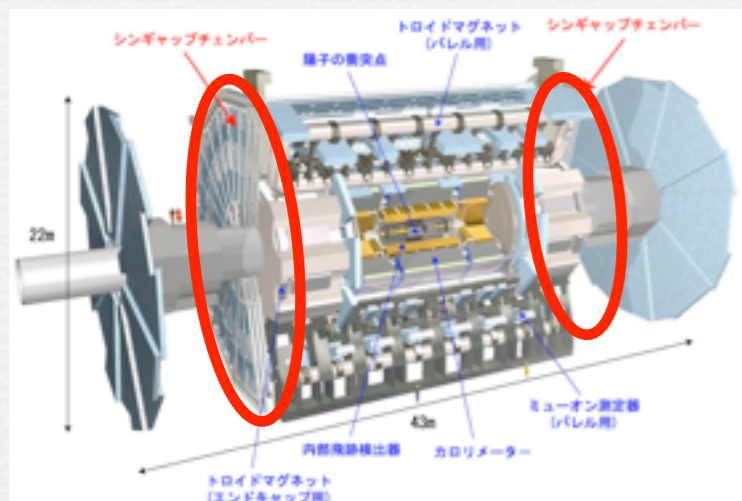
μ 粒子検出器の組み立て



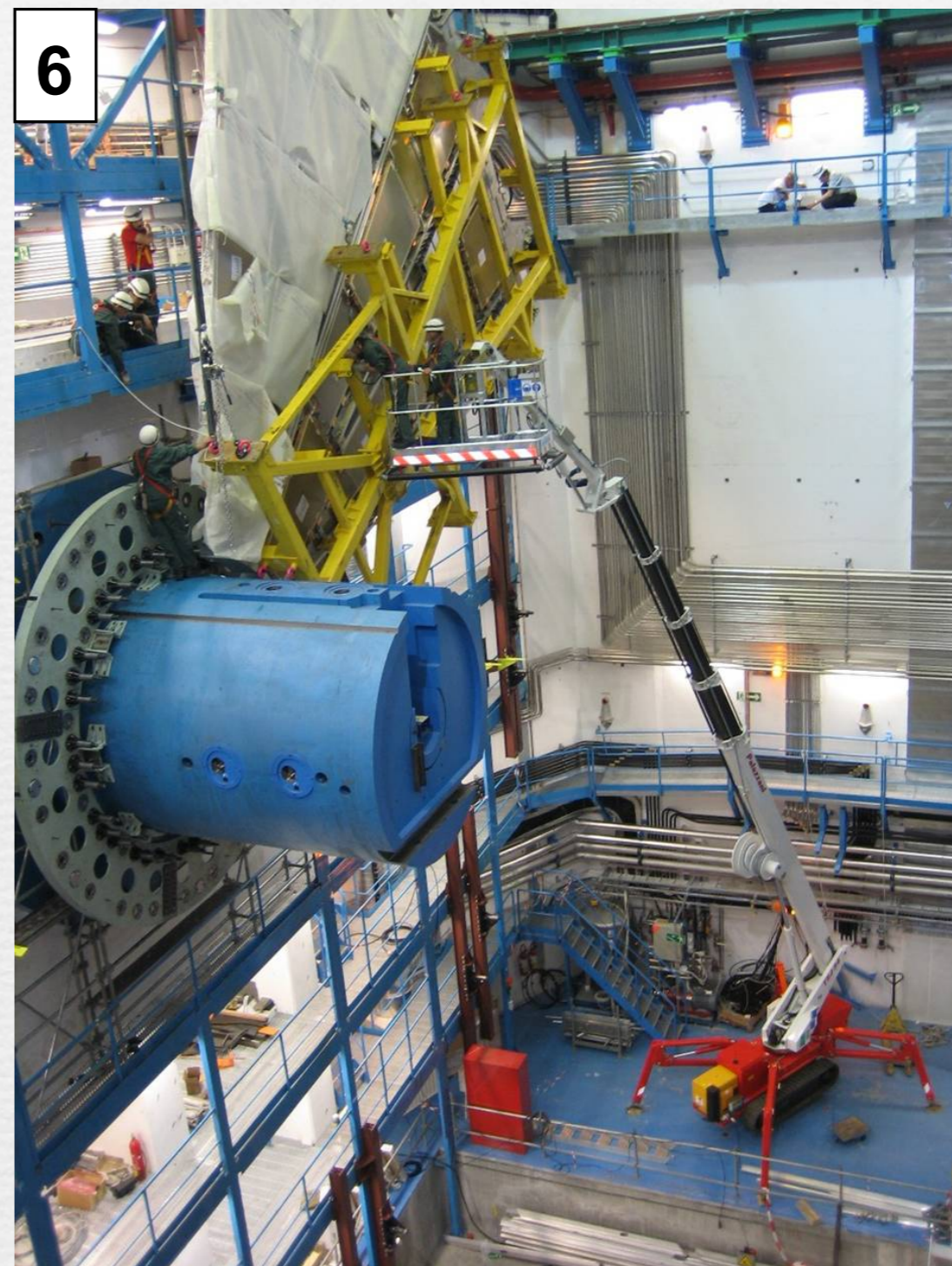
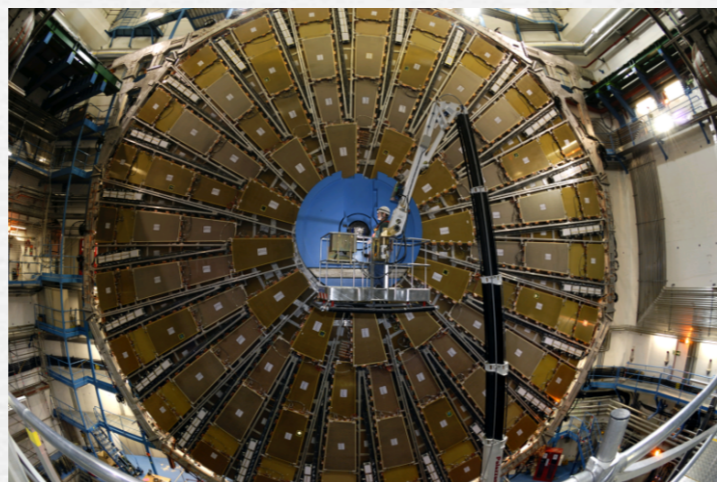
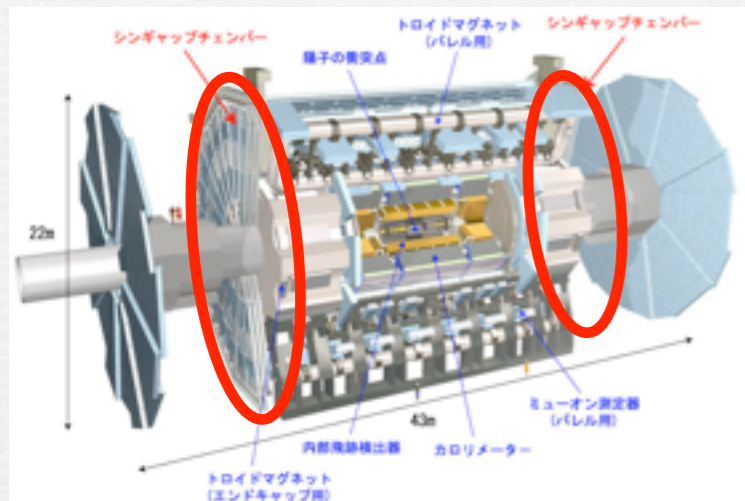
4



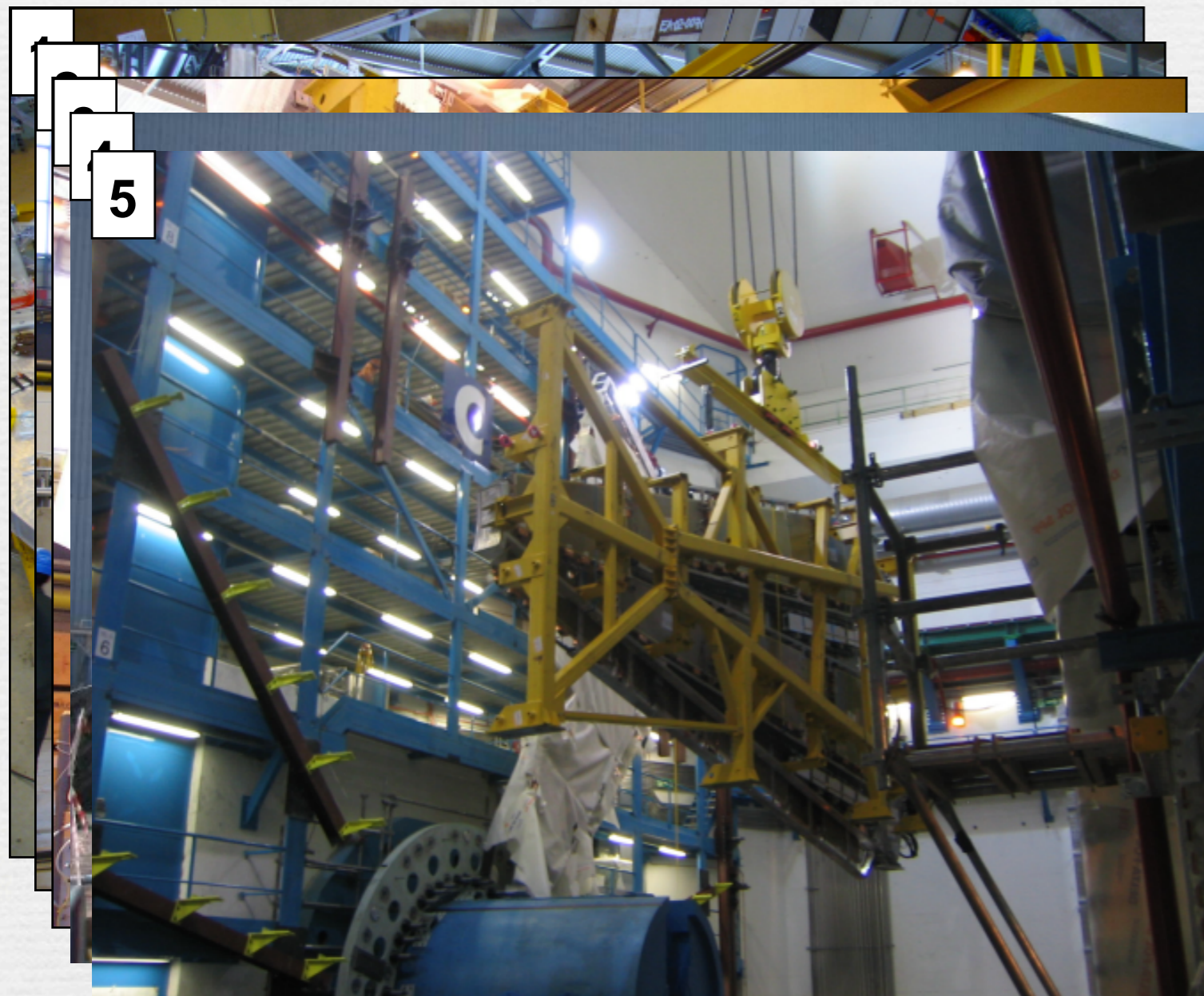
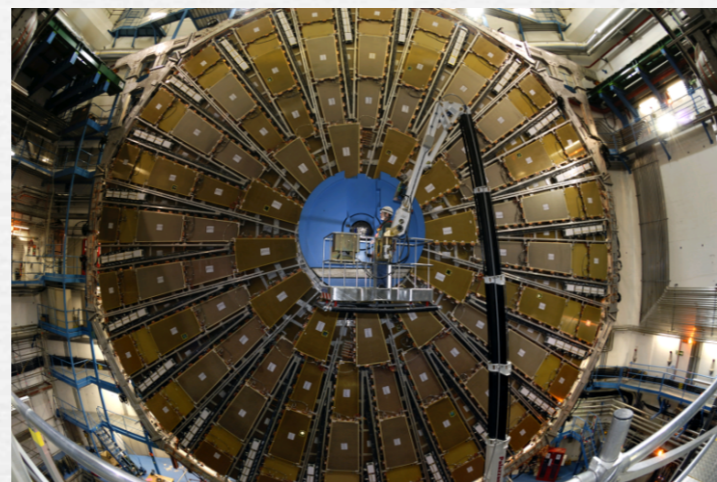
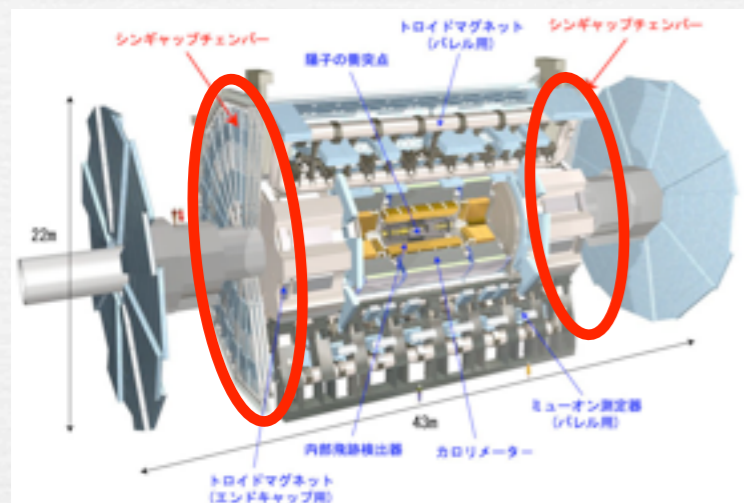
μ 粒子検出器の組み立て



μ 粒子検出器の組み立て



μ 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 (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

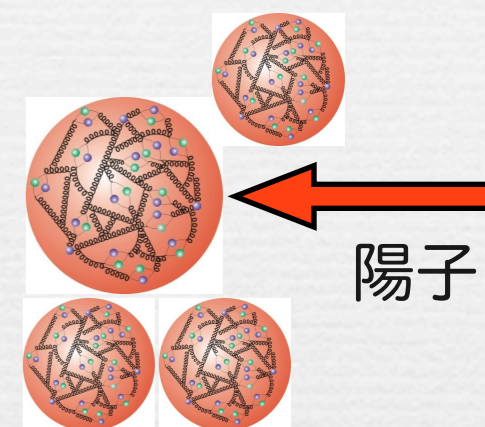
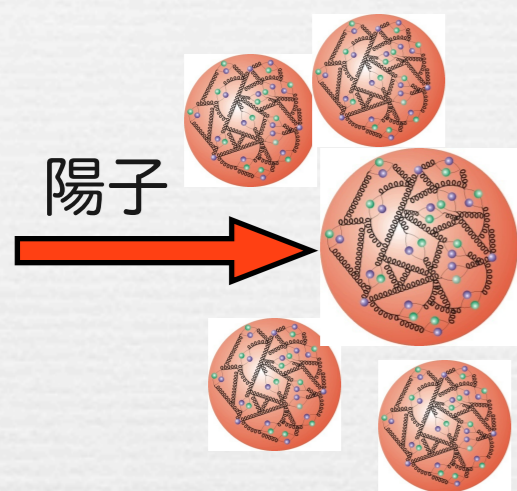
ヒッグス粒子は、
5,000,000,000(五十億)回に1回程度しか生成しない！



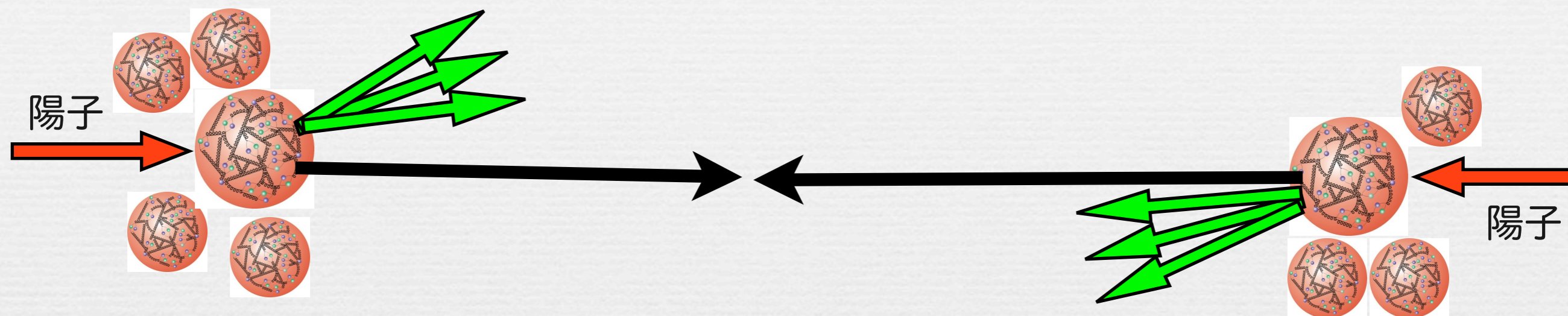
陽子同士の衝突：次の反応は予測不可能
反応の起こる確率は解る

陽子・陽子衝突

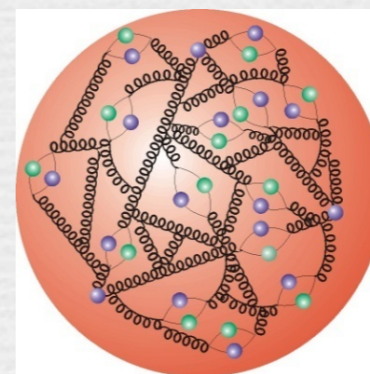
陽子・陽子衝突



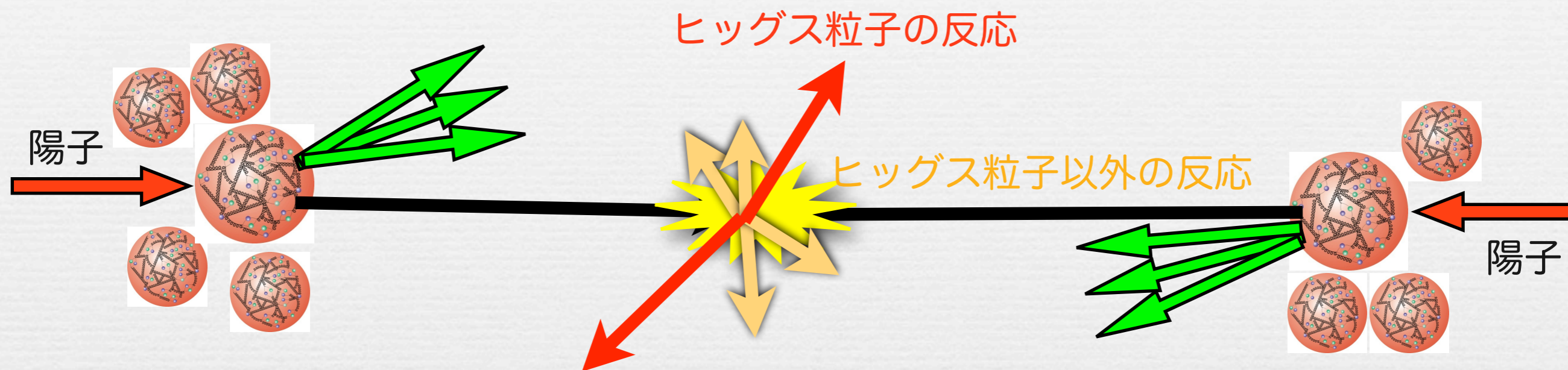
陽子・陽子衝突



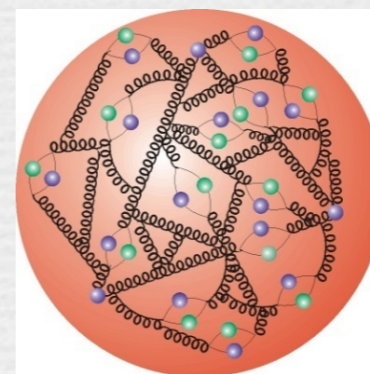
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン
一部だけが衝突による反応に関与



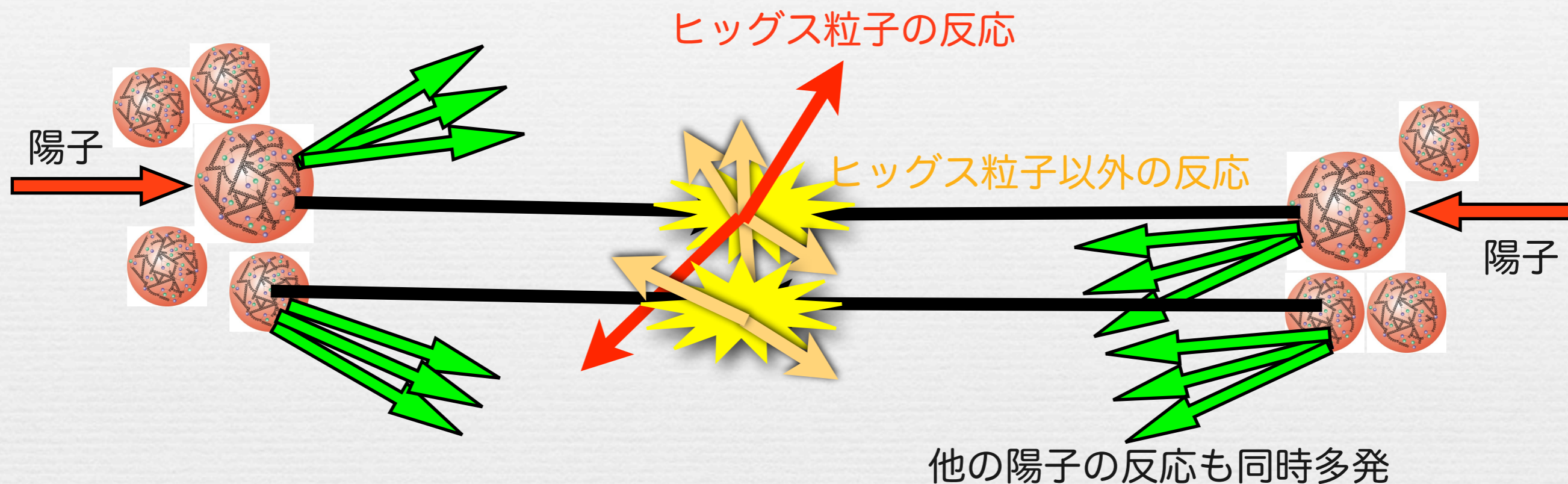
陽子・陽子衝突



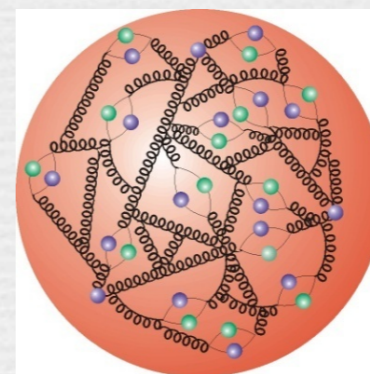
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン
一部だけが衝突による反応に関与



陽子・陽子衝突



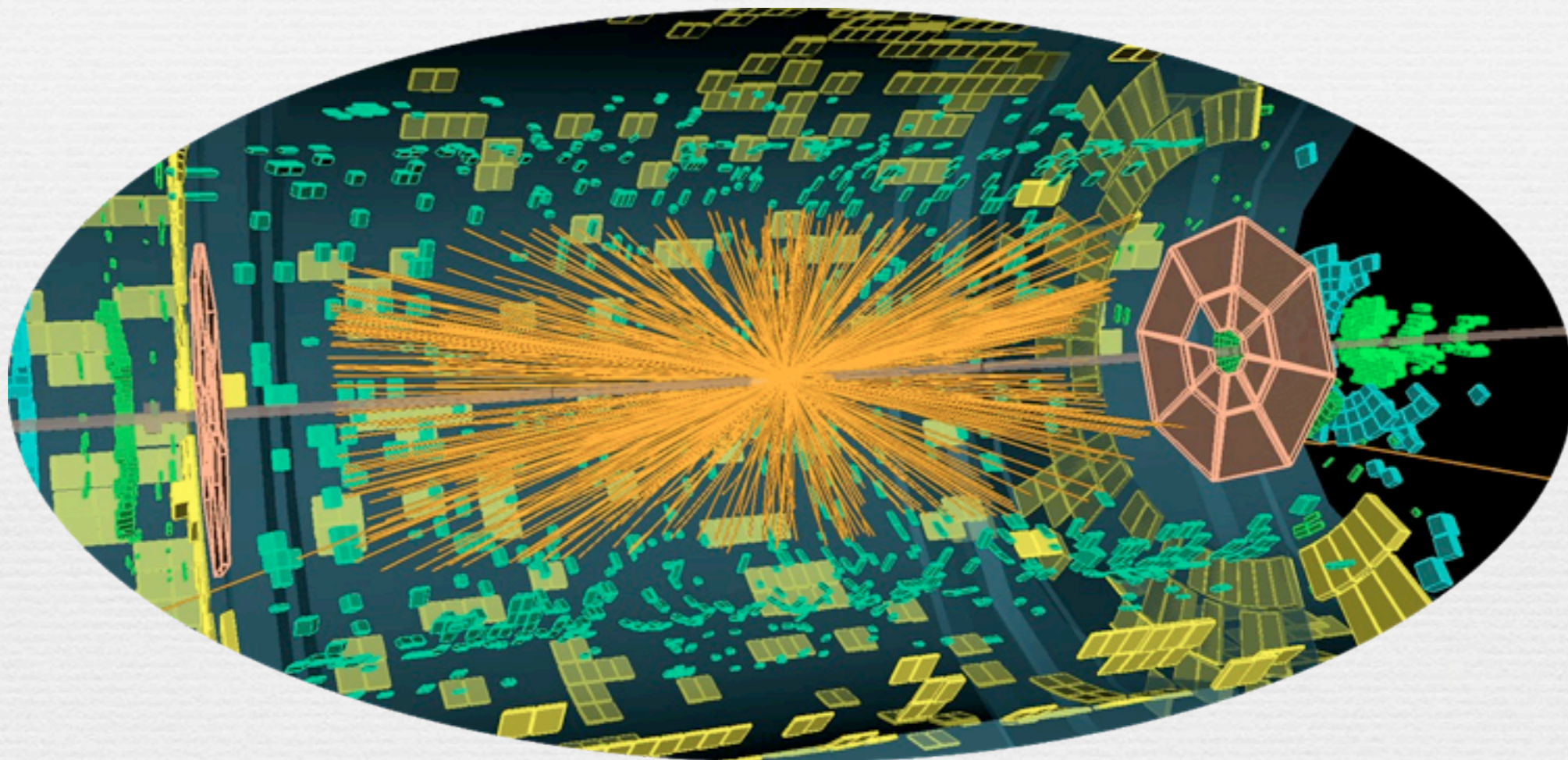
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン
一部だけが衝突による反応に関与



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

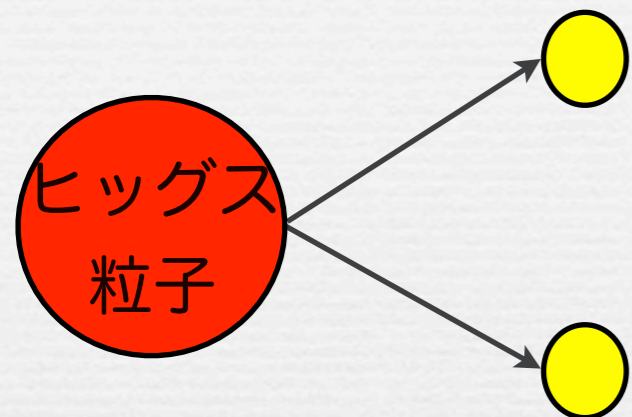
ヒッグス粒子を含む事象(50億分の1)を選ぶ

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

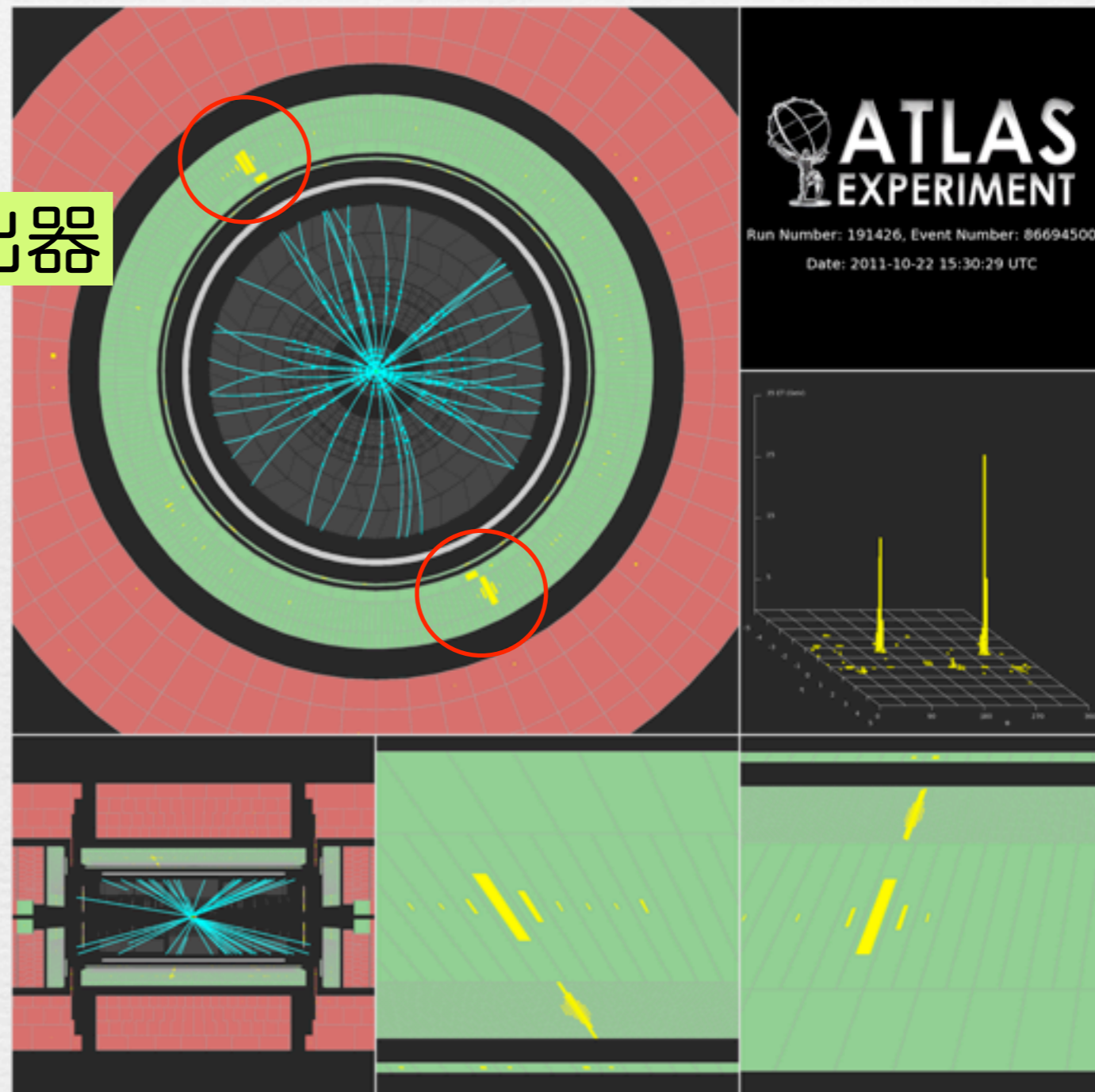
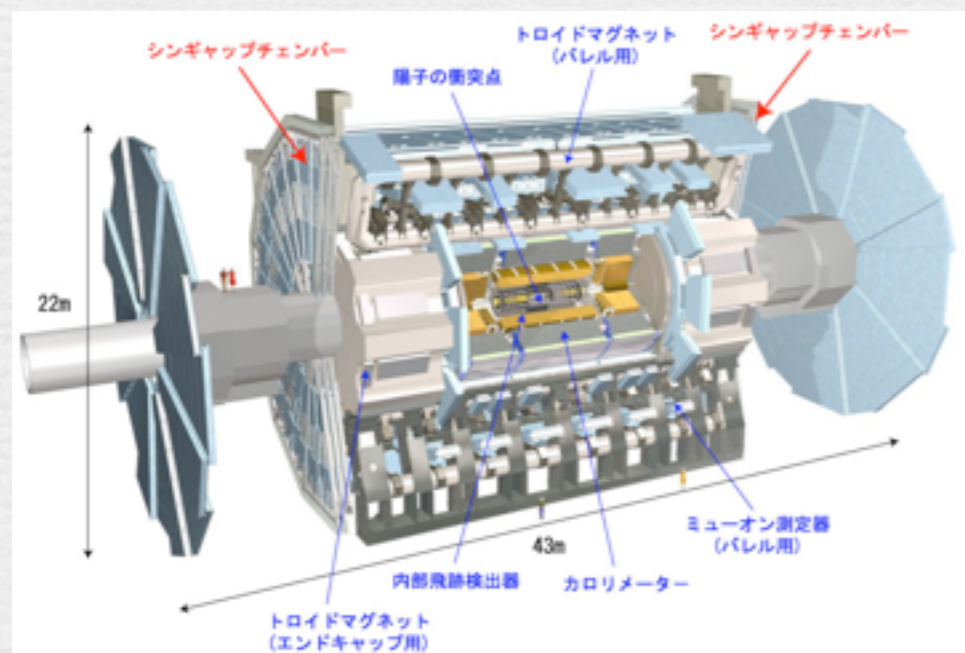
化ける確率はわかるが、何に化けるかは予想できない

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

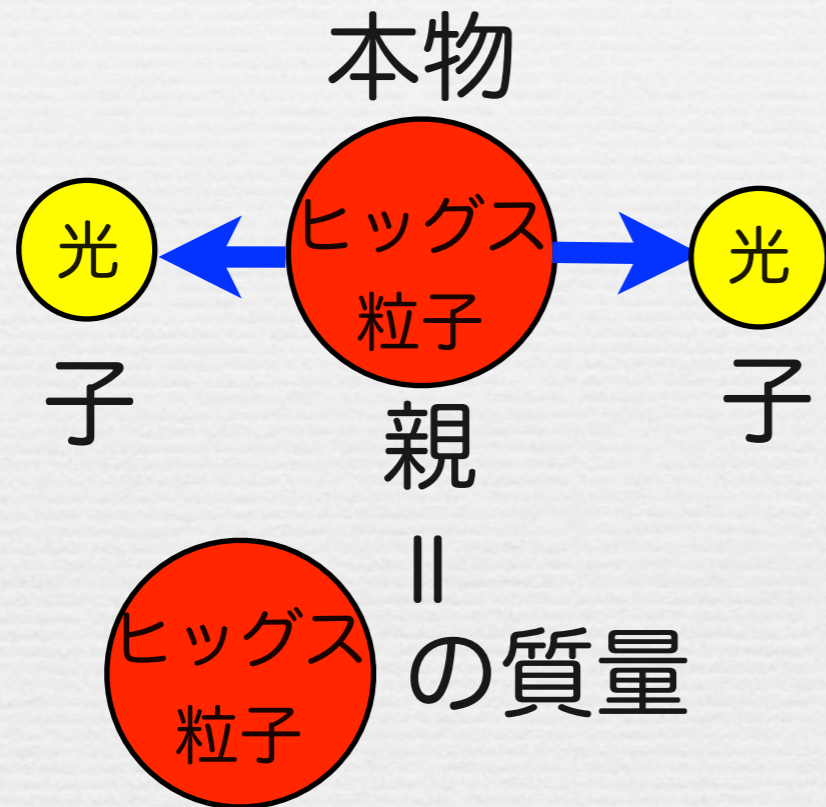
親と子の粒子の関係

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

質量の復元

親と子の粒子の関係

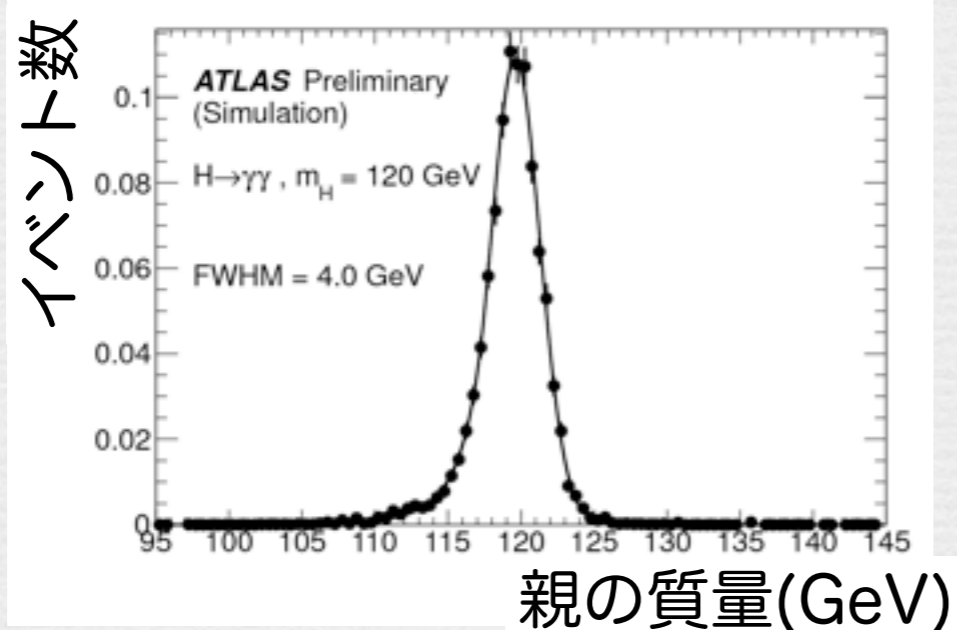
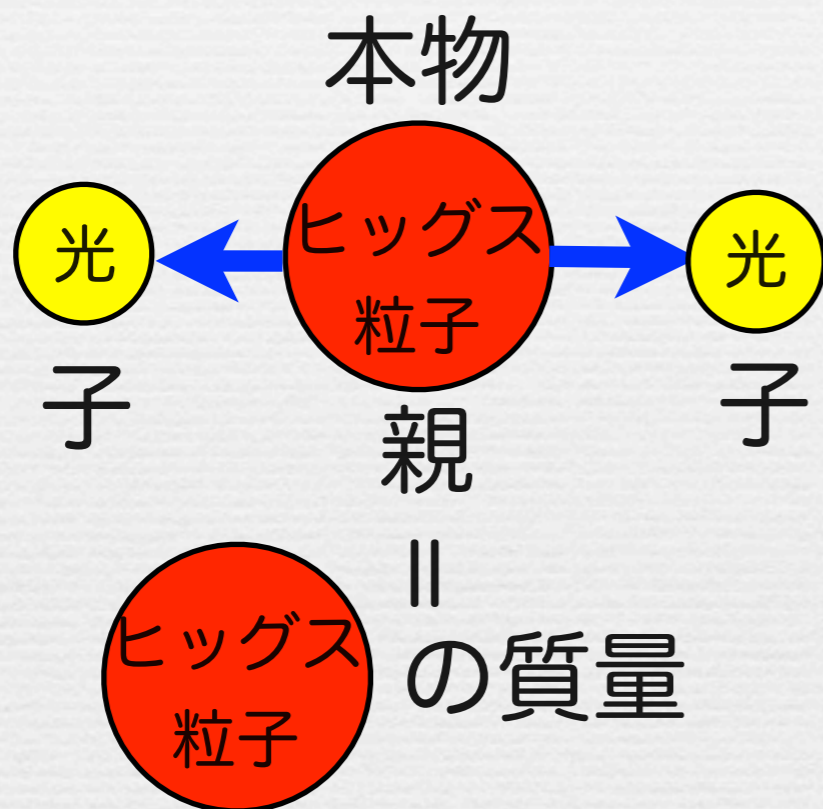
$$(親の質量)^2 = (子のエネルギー和)^2 - (子の運動量和)^2$$



質量の復元

親と子の粒子の関係

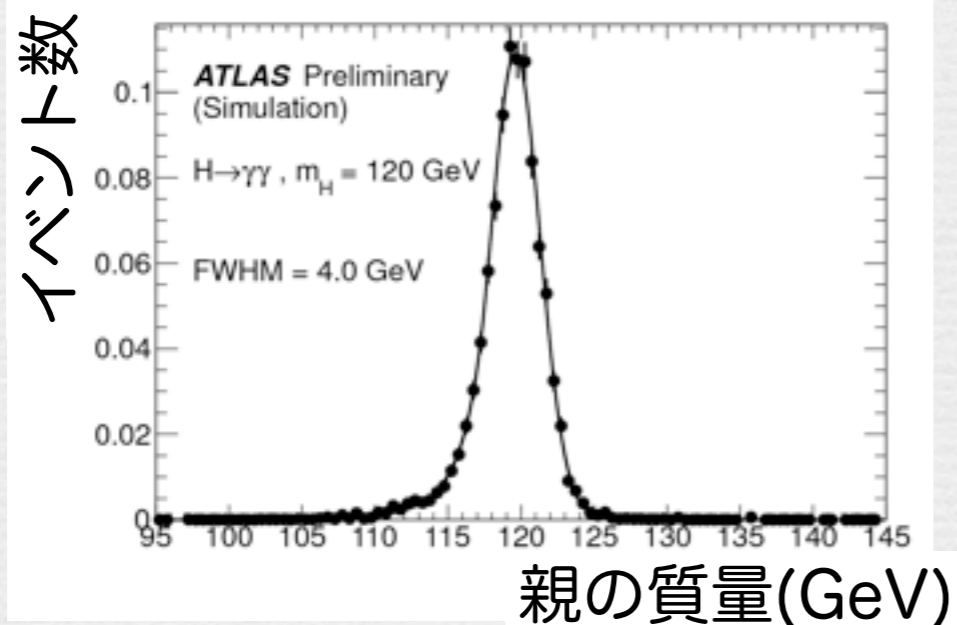
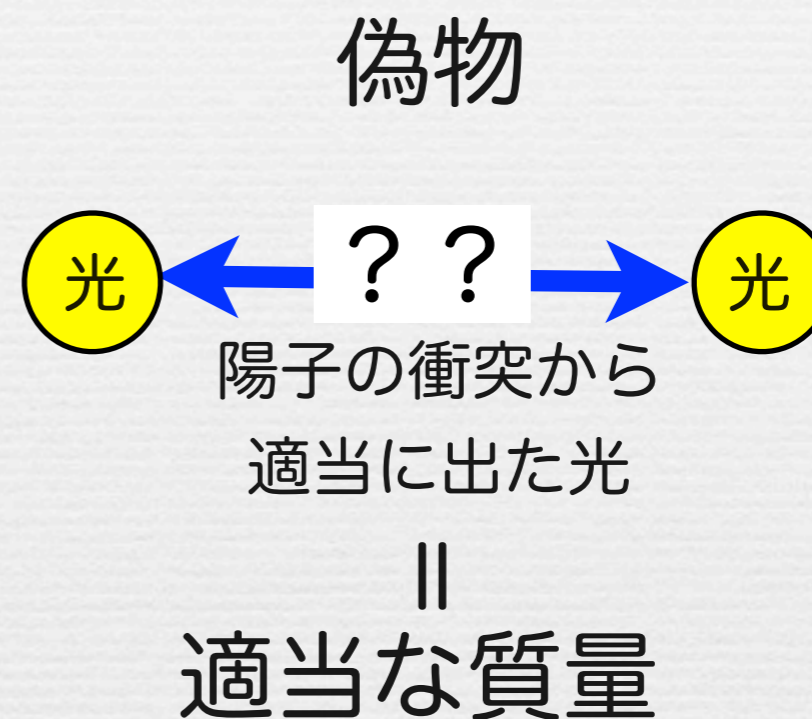
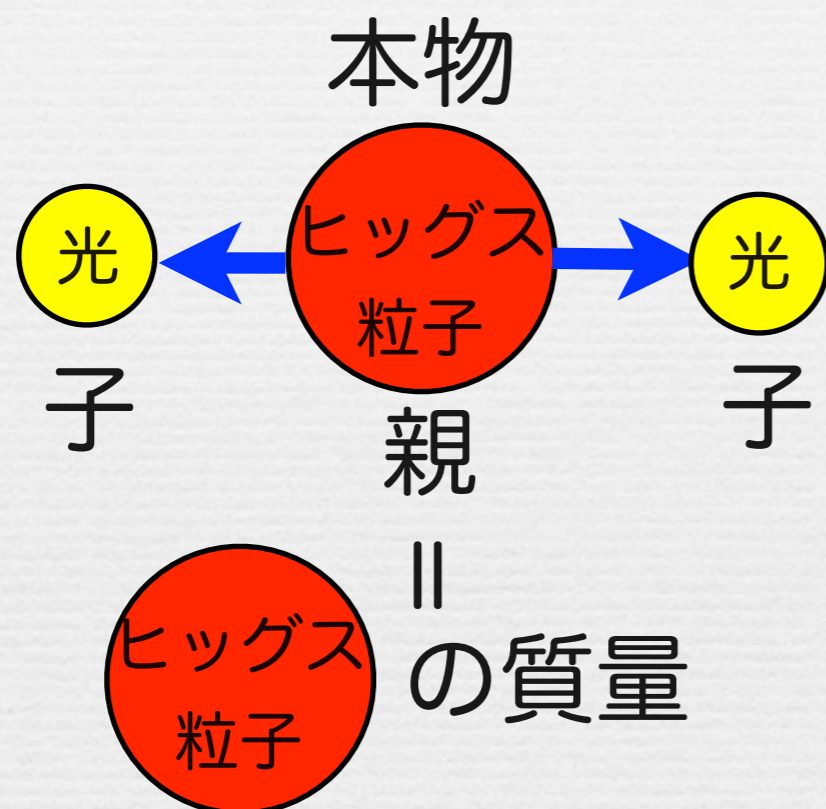
$$(親の質量)^2 = (子のエネルギー和)^2 - (子の運動量和)^2$$



質量の復元

親と子の粒子の関係

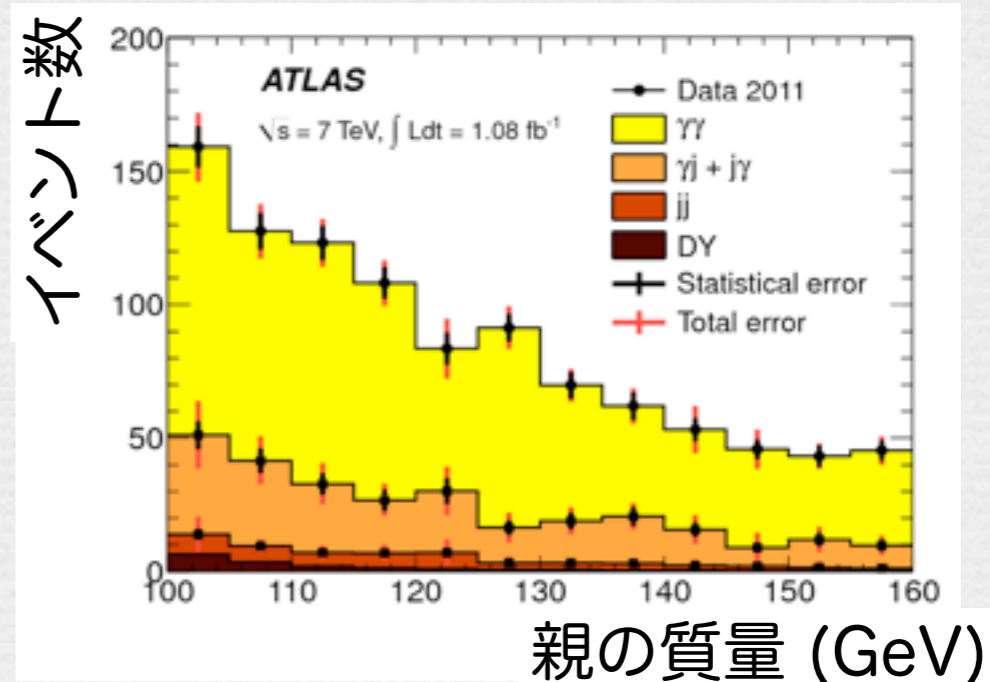
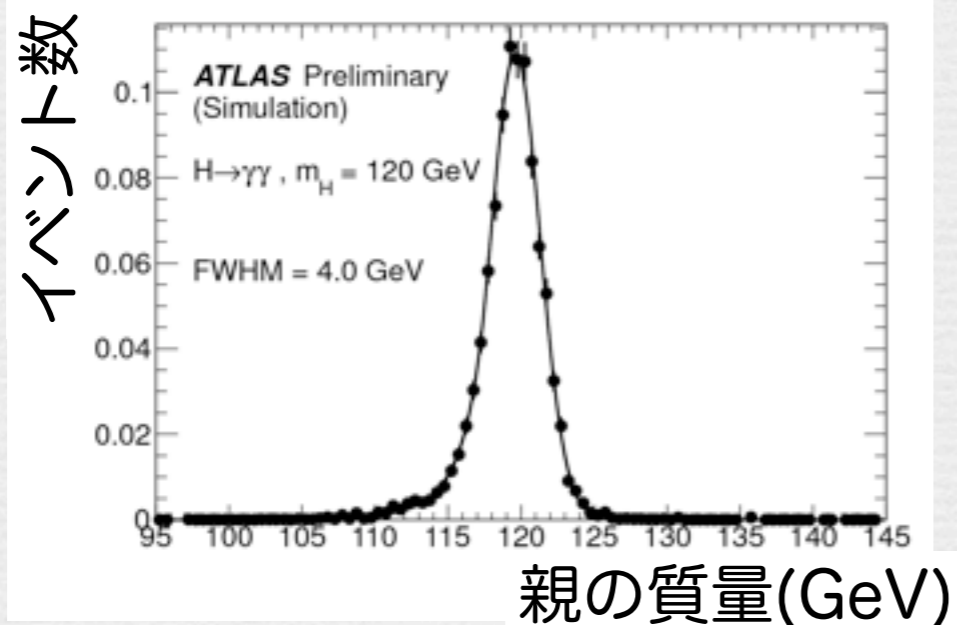
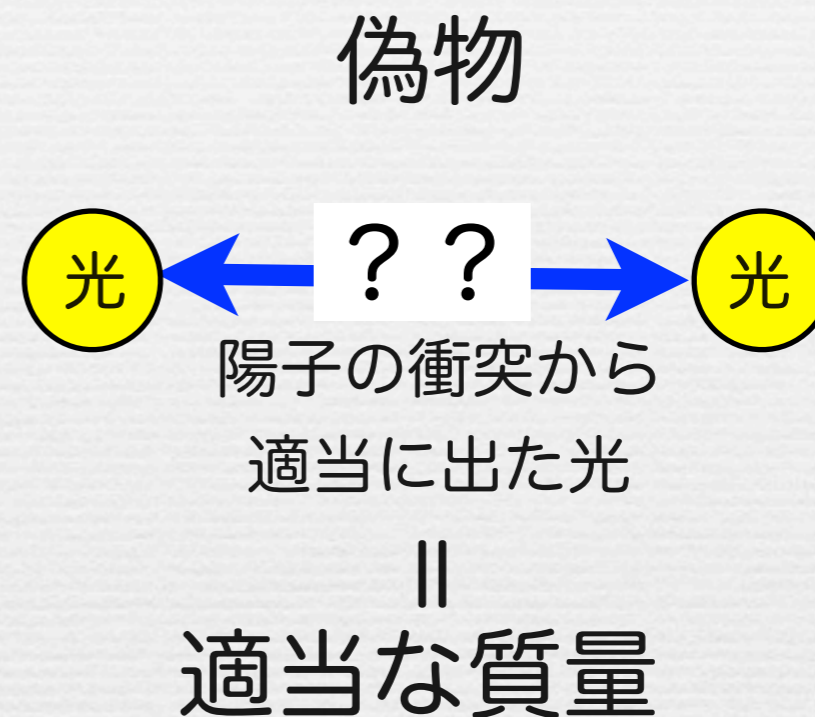
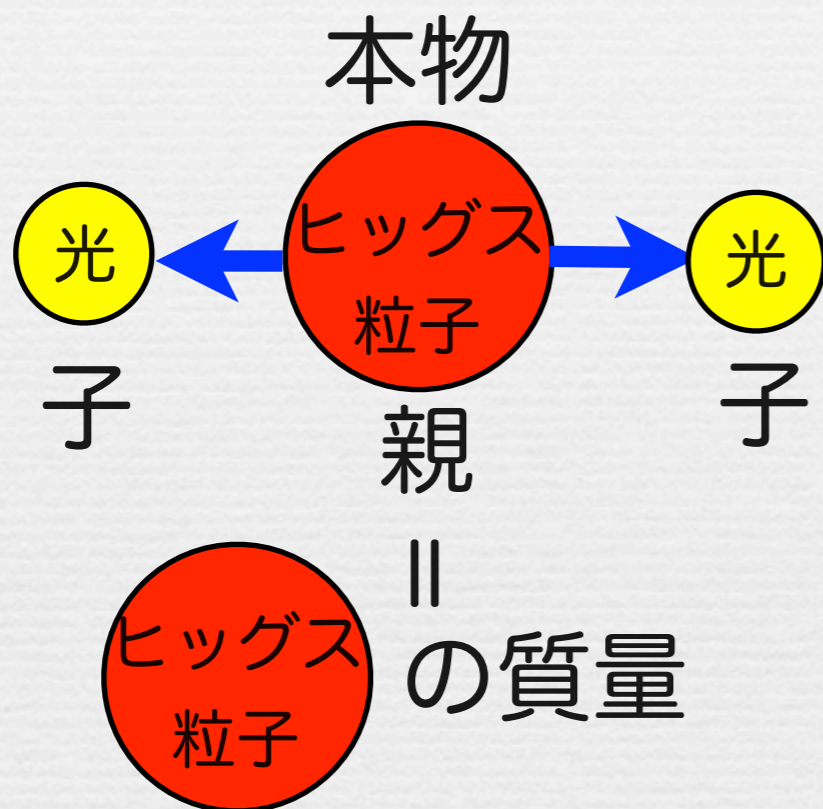
$$(親の質量)^2 = (子のエネルギー和)^2 - (子の運動量和)^2$$



質量の復元

親と子の粒子の関係

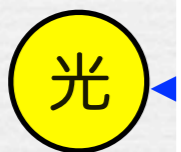
$$(親の質量)^2 = (子のエネルギー和)^2 - (子の運動量和)^2$$



質量の復元

親と子の粒

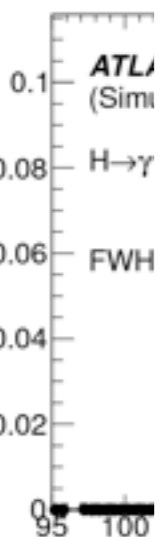
(親の質量)



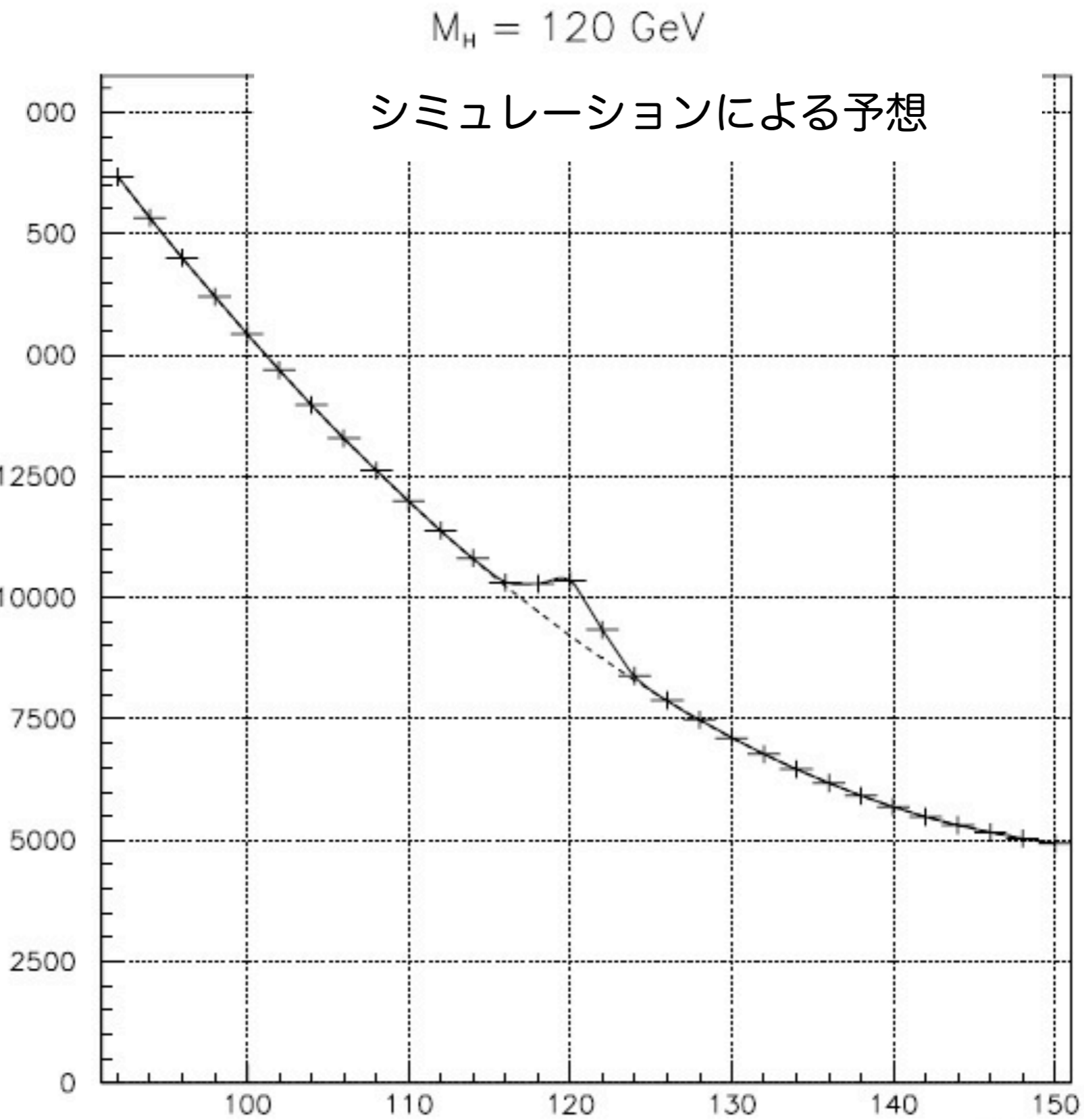
子



イベント数



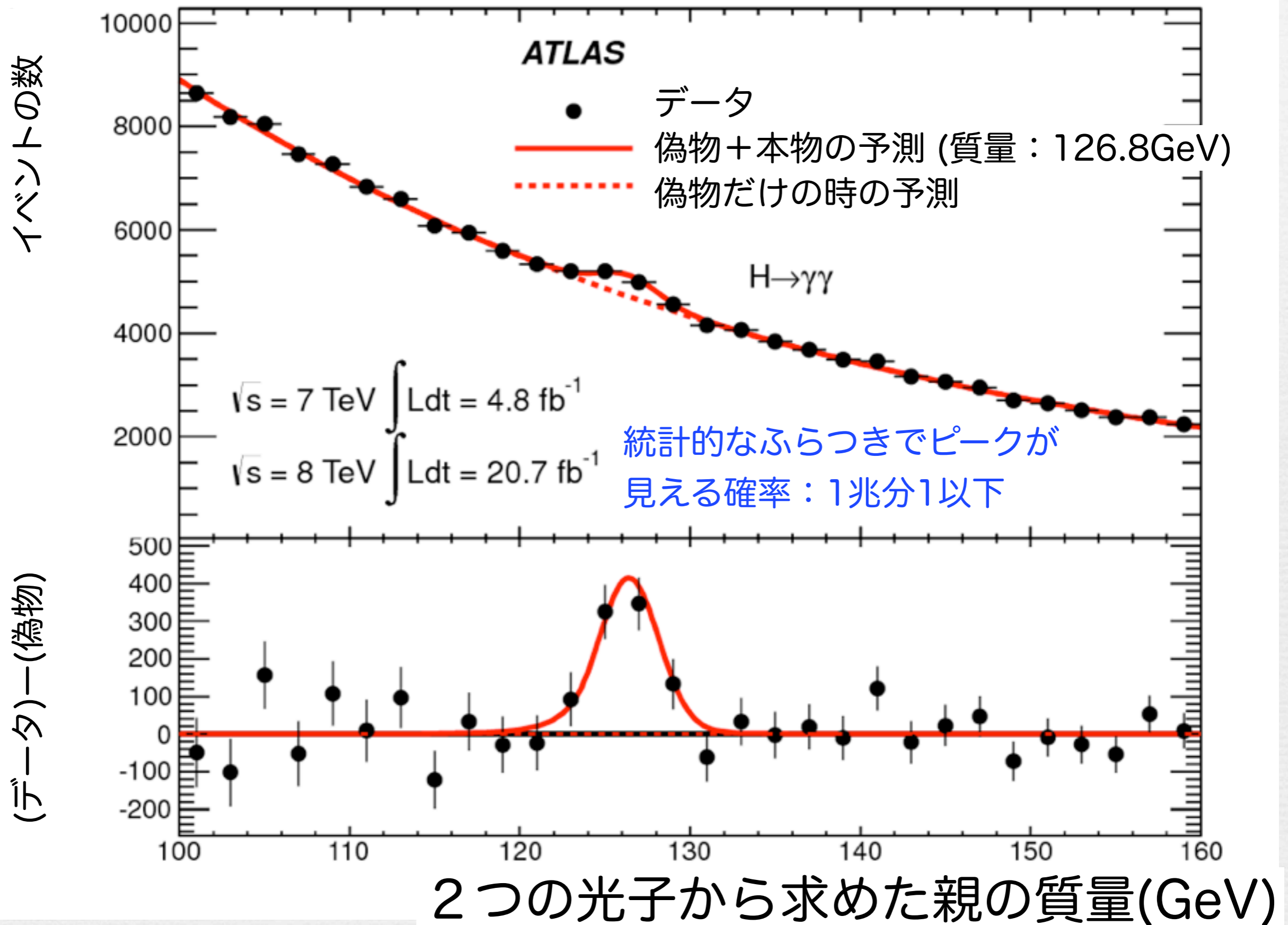
イベント数



和)²

親の質量 (GeV) (eV)

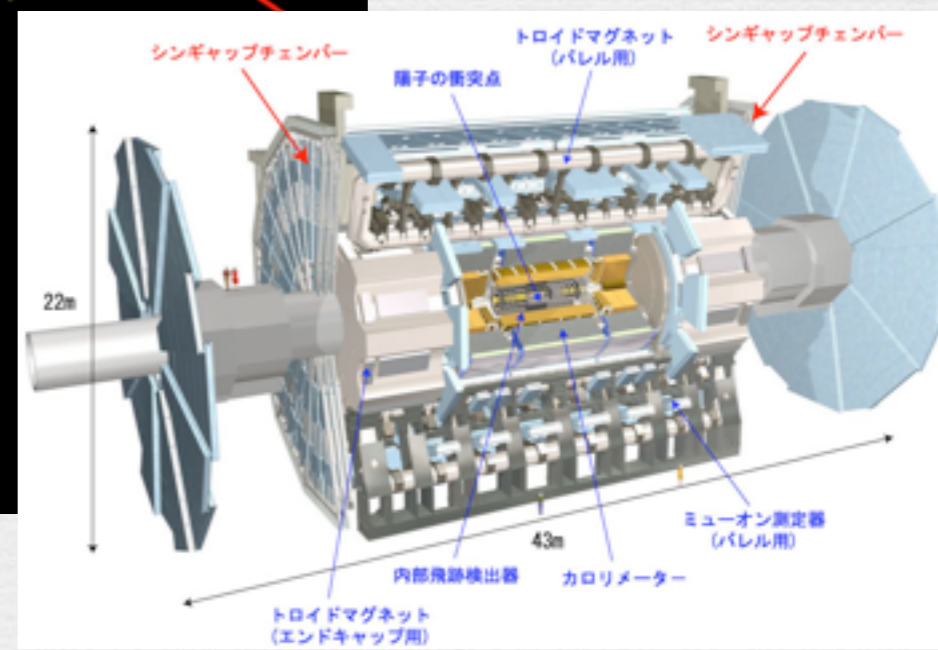
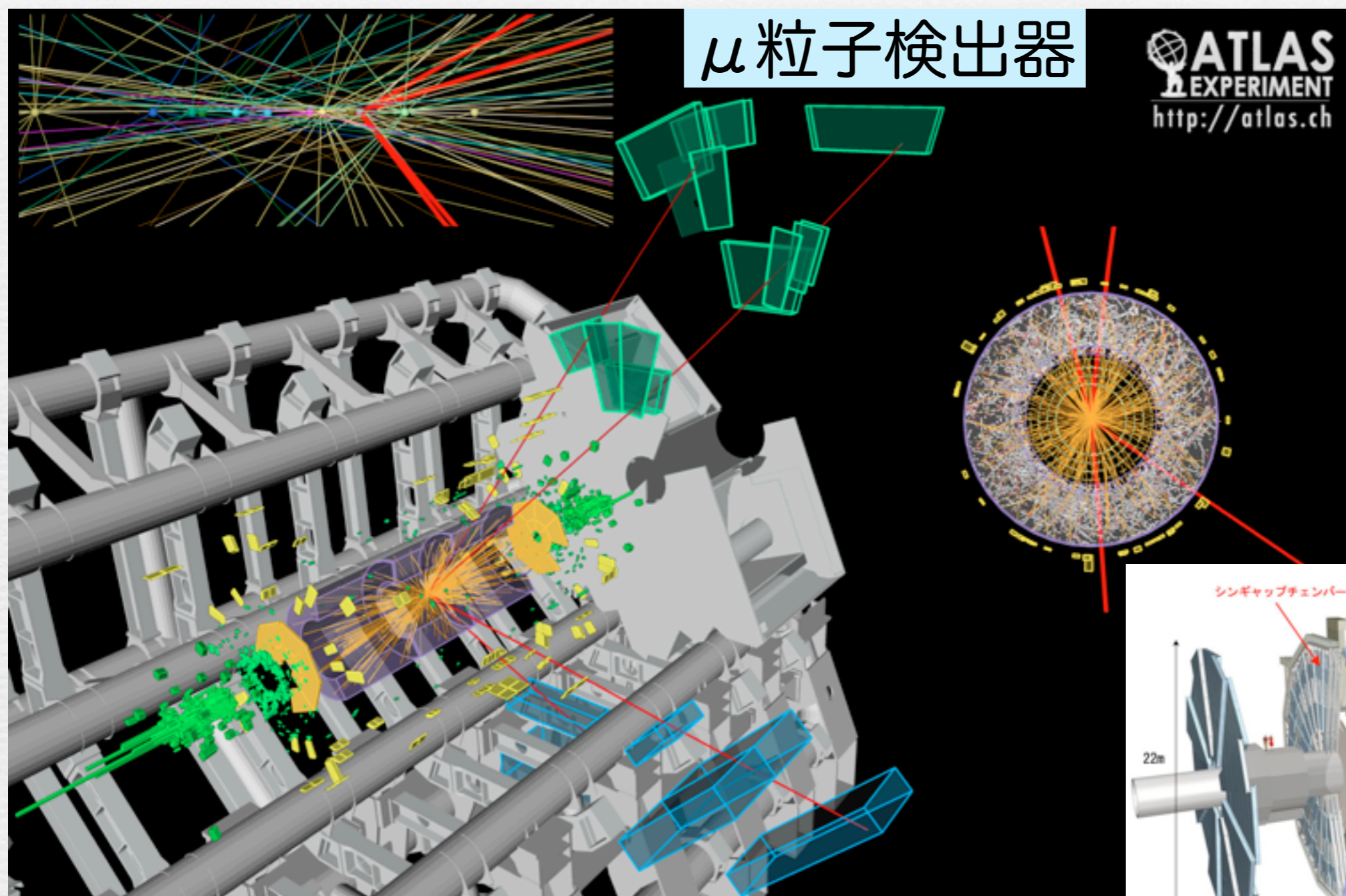
実際のデータ(H \rightarrow 光子光子)



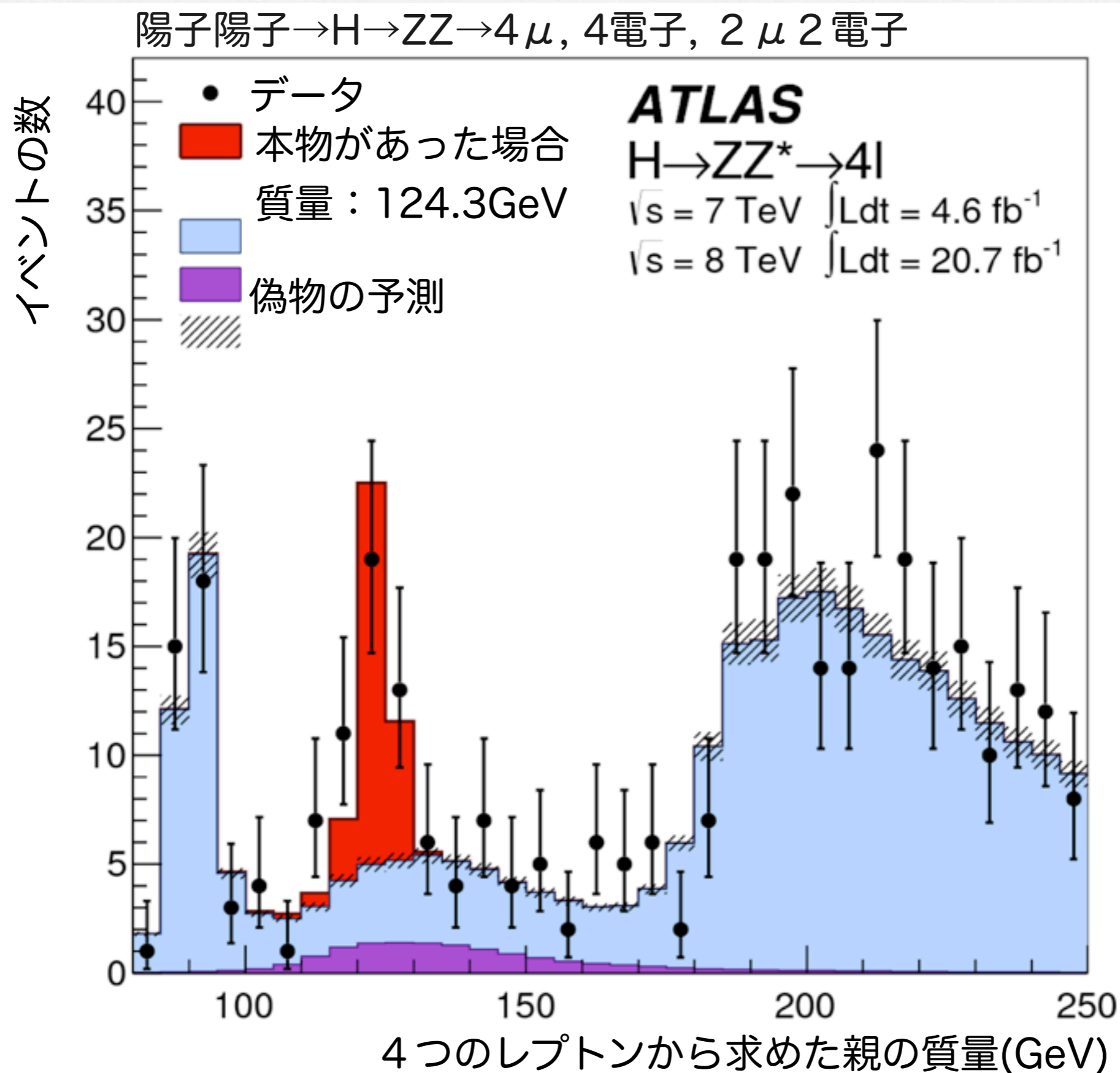
陽子 + 陽子 \rightarrow H \rightarrow ZZ

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

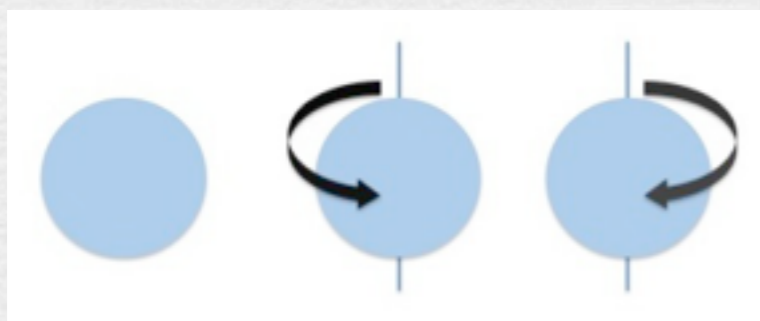


ヒッグス粒子発見の意義とこれから

発見した粒子はヒッグス粒子か？

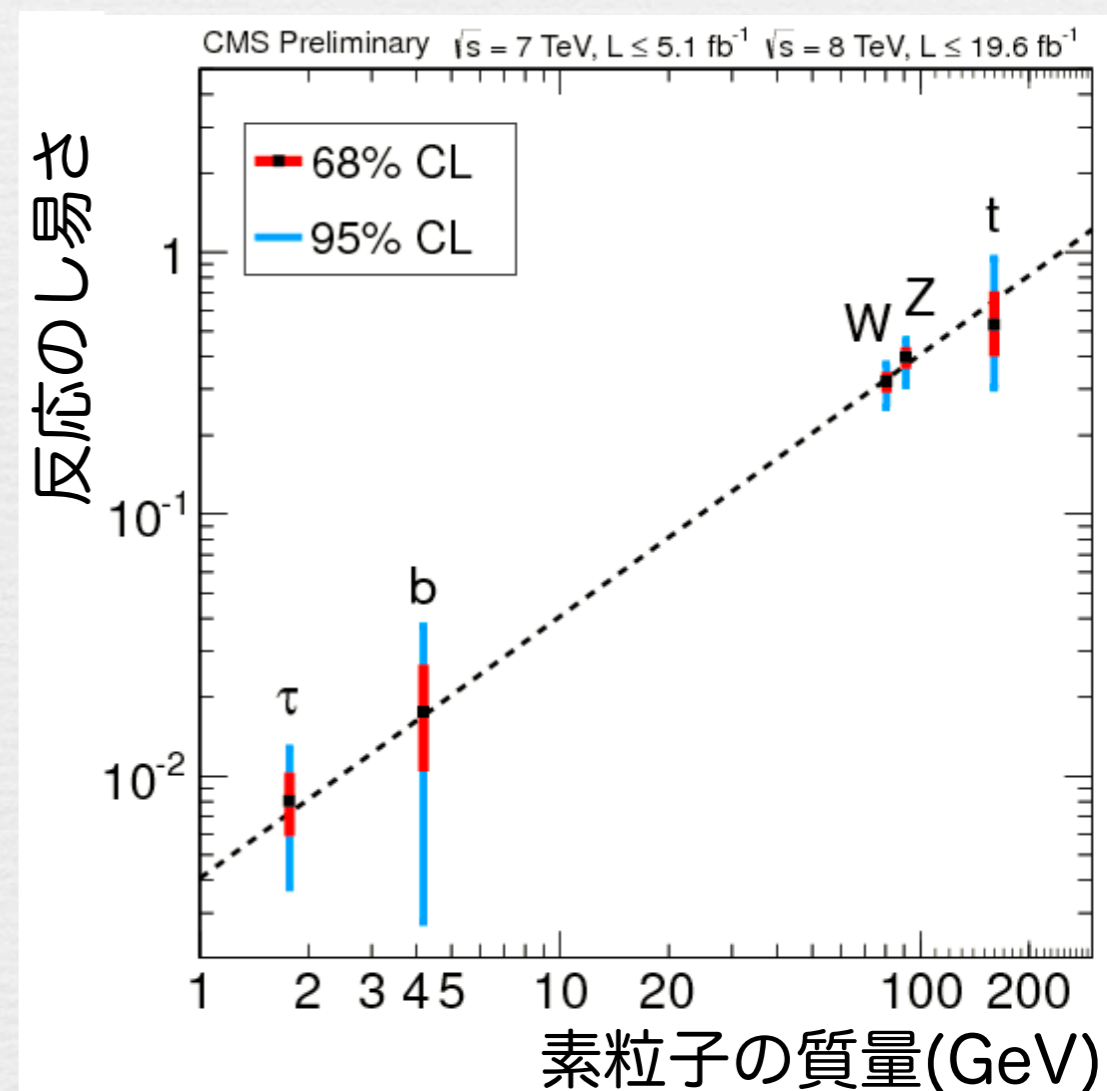
- 光子 光子、ZZ、WW に化ける粒子
- 質量は、126GeV位
- スピンが0 (向きなし)である可能性が高い

→ 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!**

どんなヒッグス粒子なのか？

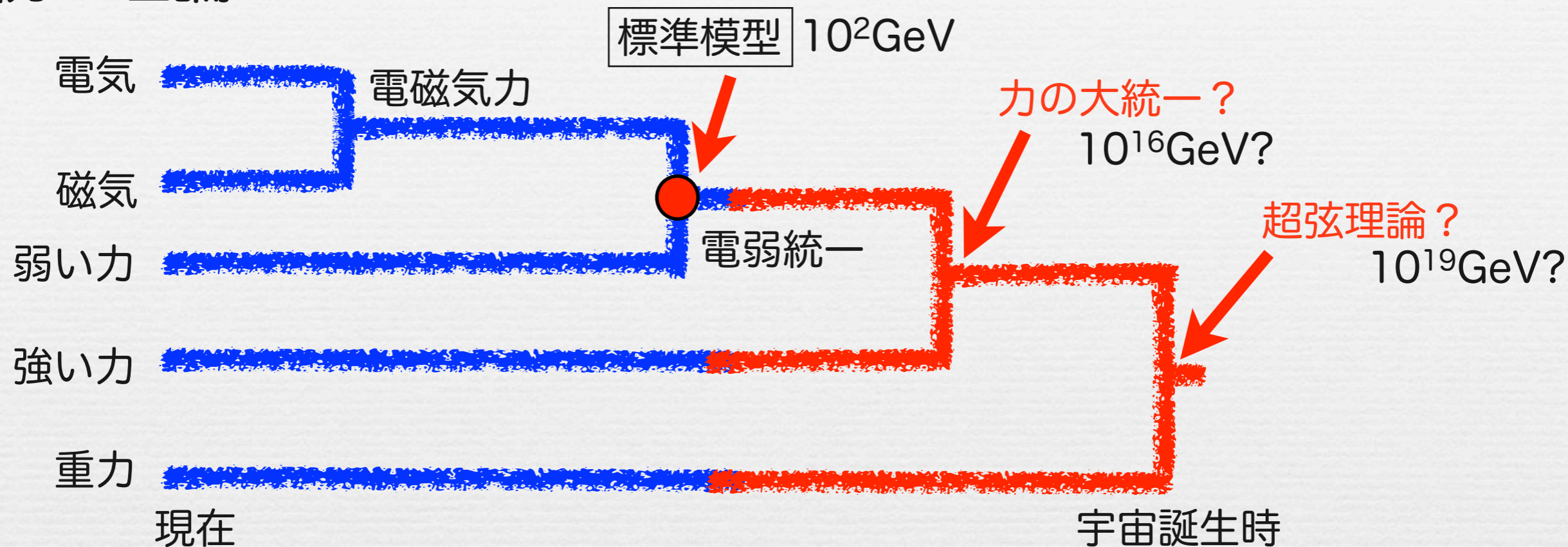
標準模型が予言するヒッグス粒子かどうかはわからない

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、 τ 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



ヒッグス粒子の質量の不自然さ

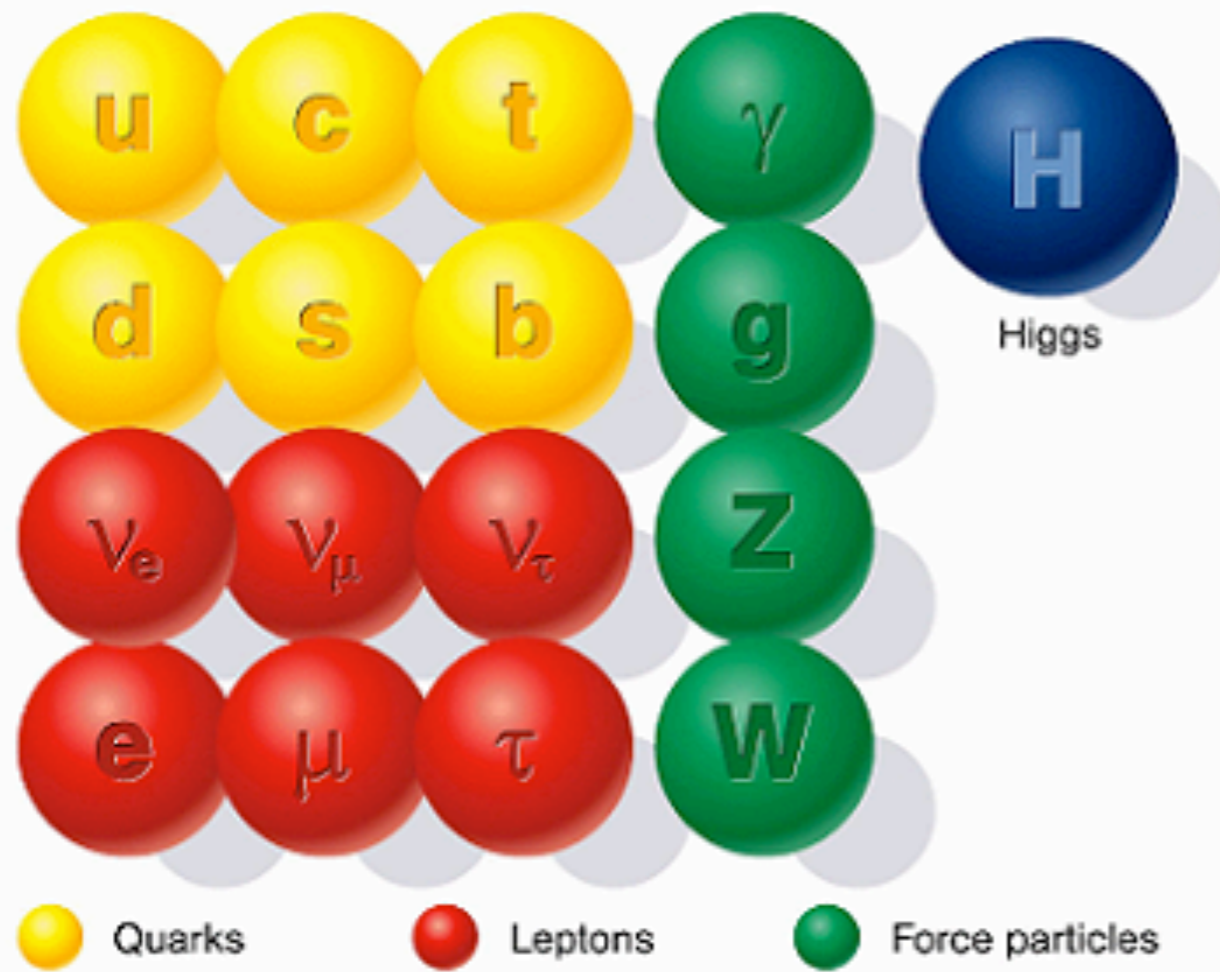
$$\begin{aligned}
 (\text{測定された質量})^2 &= (\text{大統一理論での質量})^2 - (\text{補正量})^2 \\
 126^2 &= (16\text{桁})^2 - (16\text{桁})^2
 \end{aligned}$$

→ ヒッグス粒子固有の問題

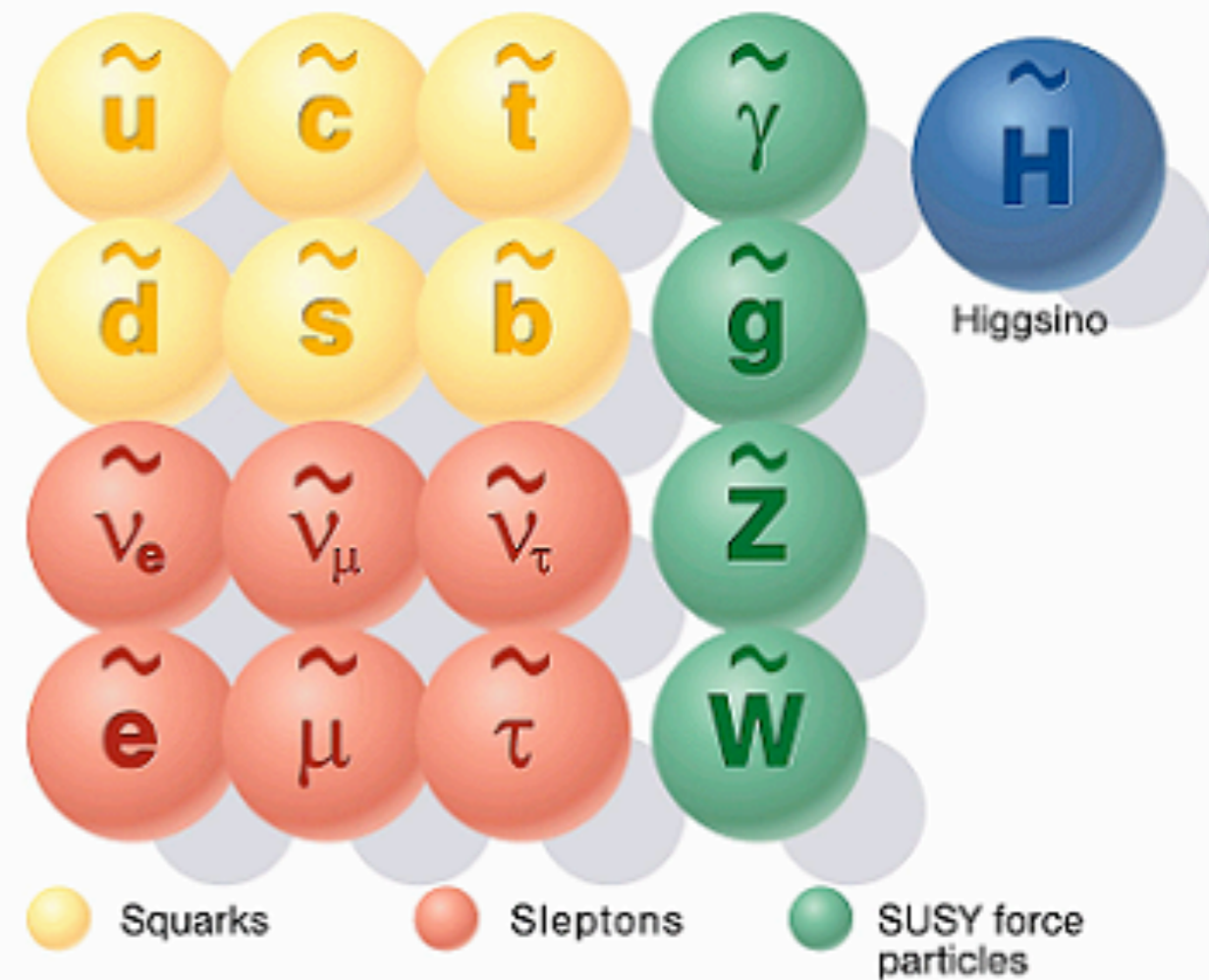
この解決には、さらに、“超対称性”などの新物理が必要

超対称性粒子

Standard particles



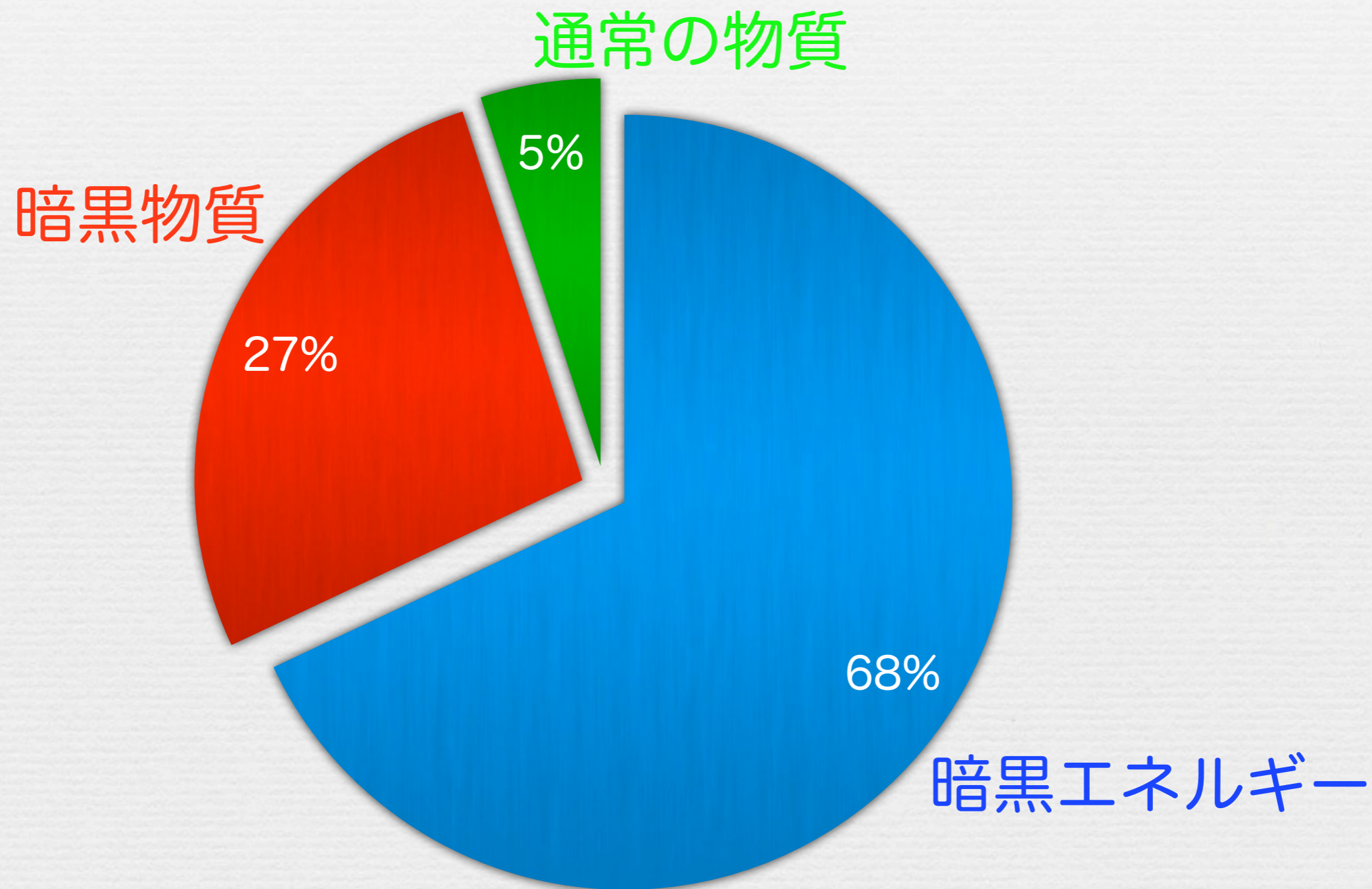
SUSY particles



→ LHC実験にて探索中

超対称性粒子があると

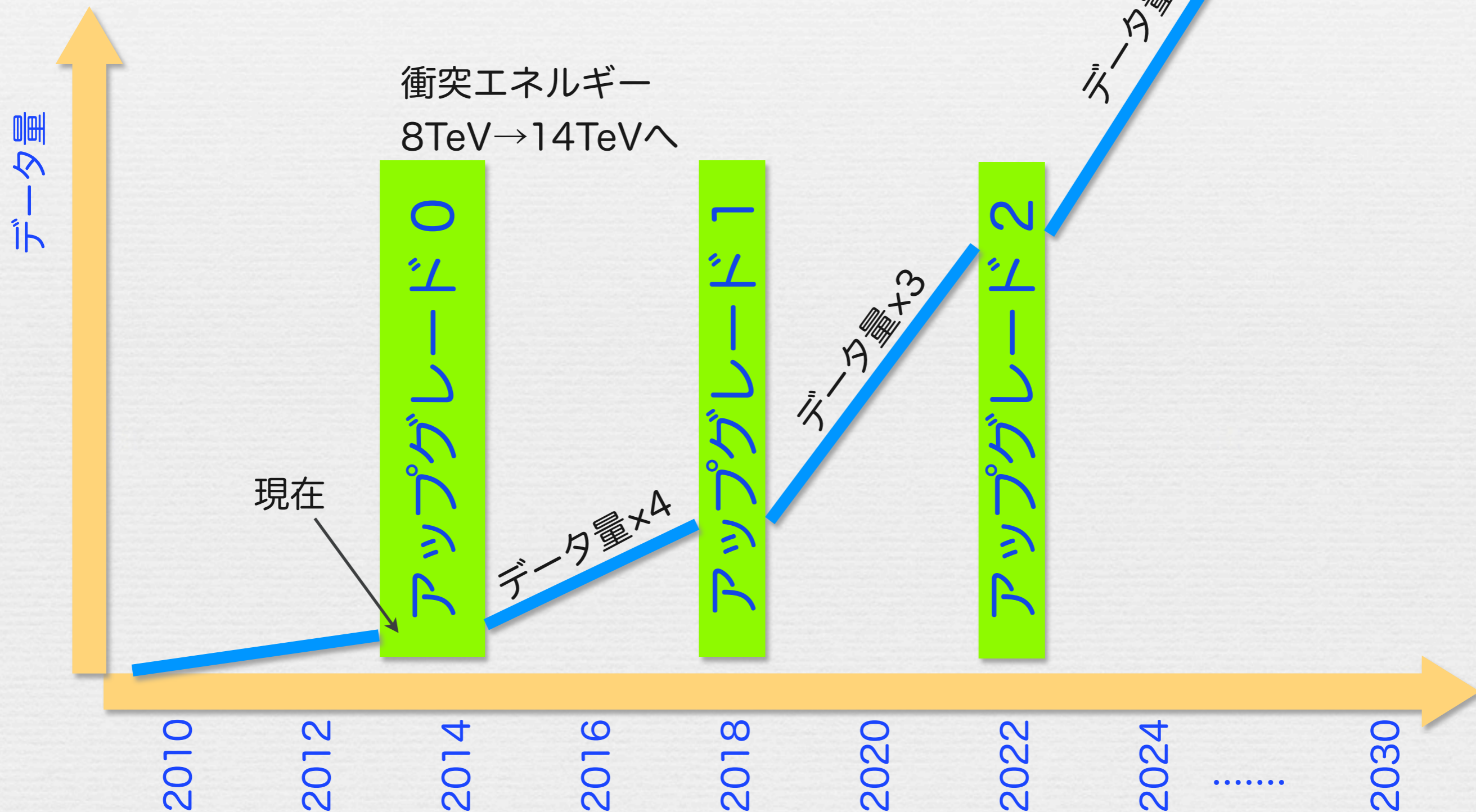
暗黒物質の有力候補



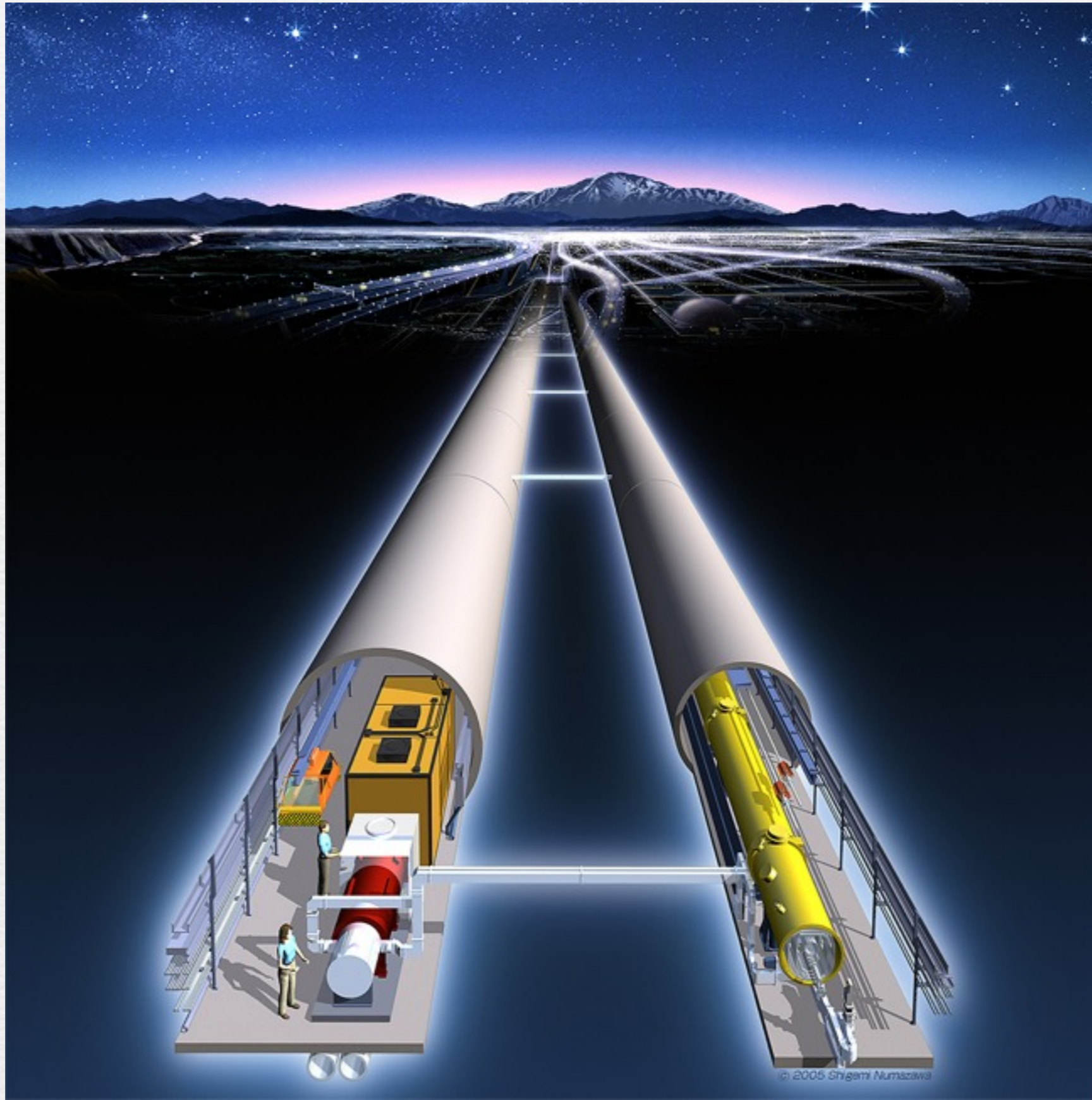
LHC実験はまだまだ続く

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

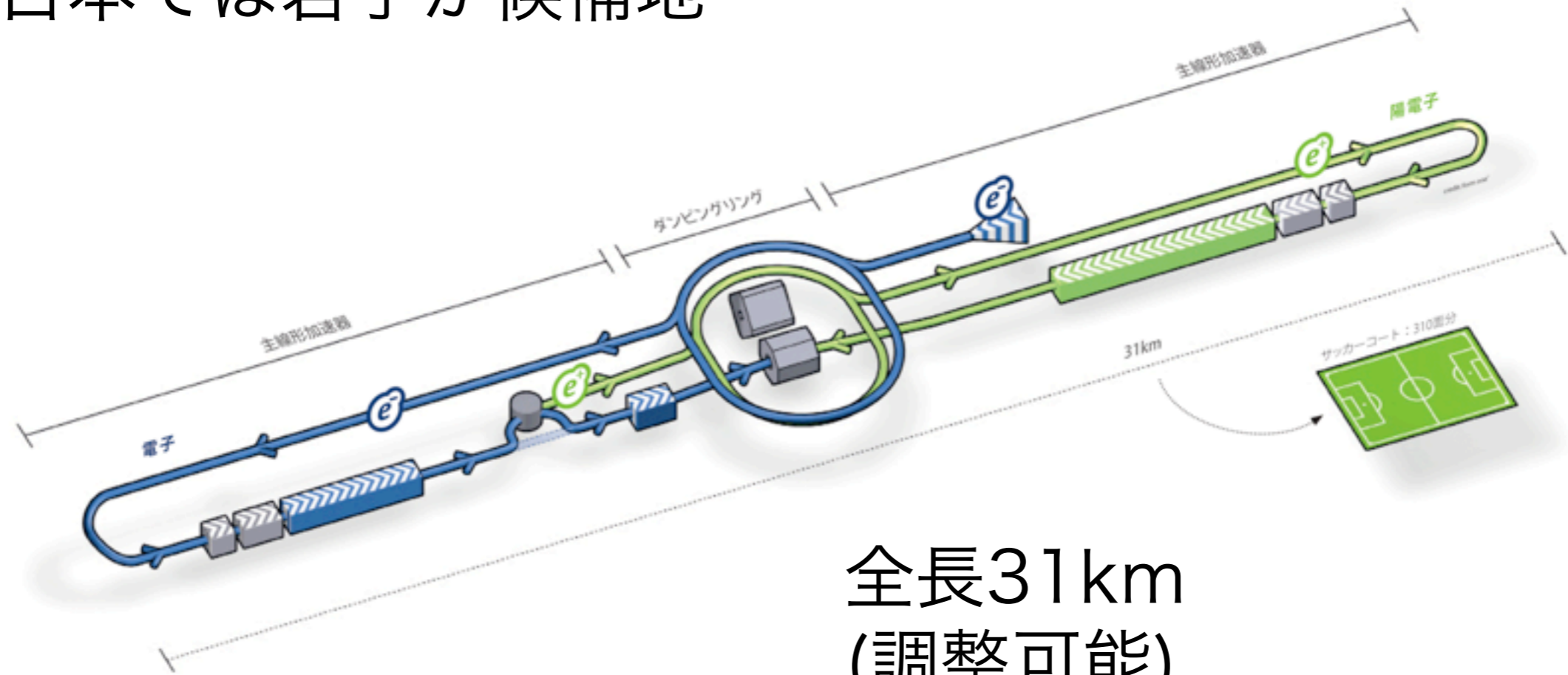


国際リニアコライダー計画



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

→様々な次期計画

これからの素粒子は面白い！