

2014年9月14日

愛知県図書館 サイエンスセミナー

ヒッグス粒子の見つけ方

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

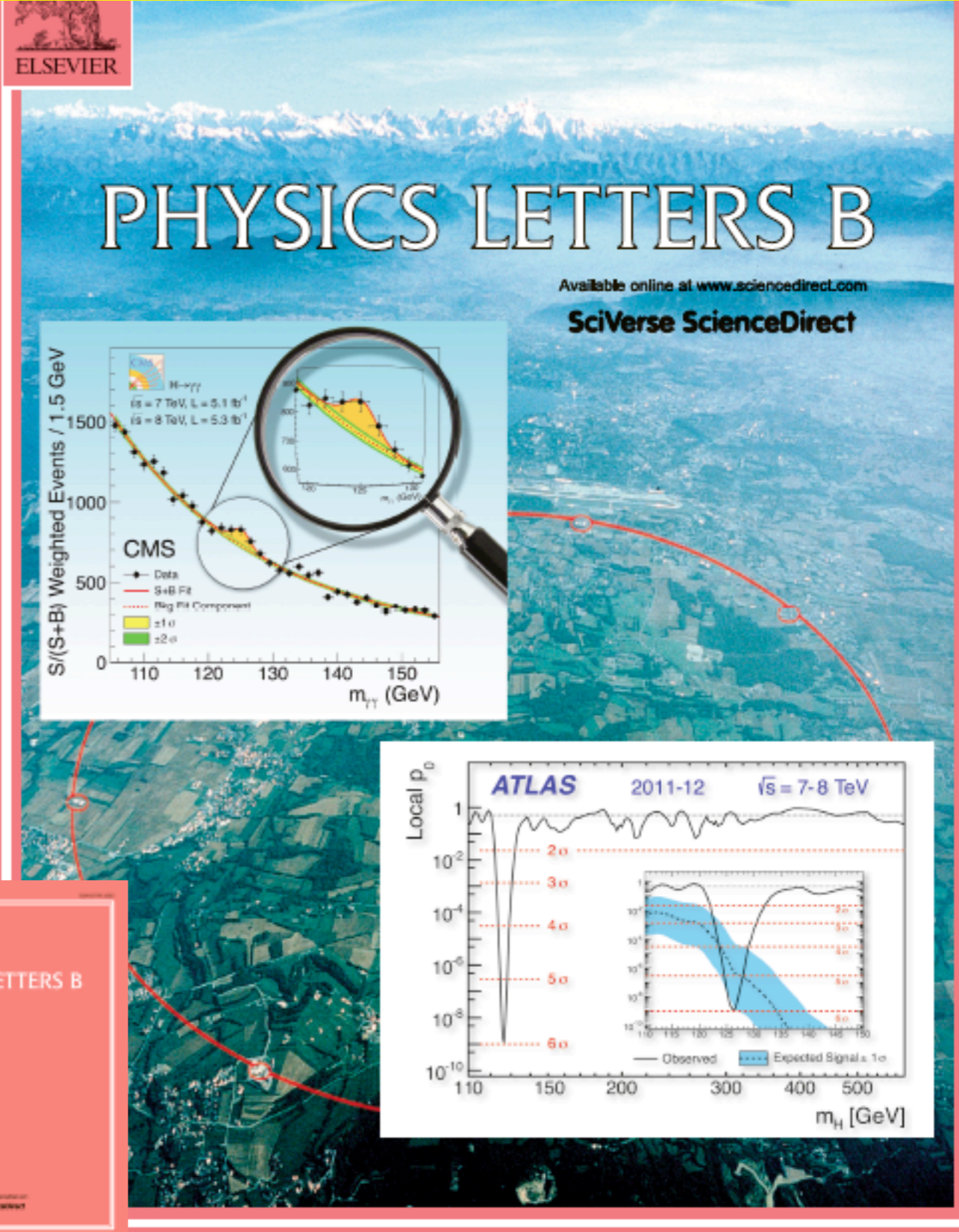
ヒッグス粒子発見

2012年7月4日：ヒッグス粒子と思われる新粒子発見！！！！

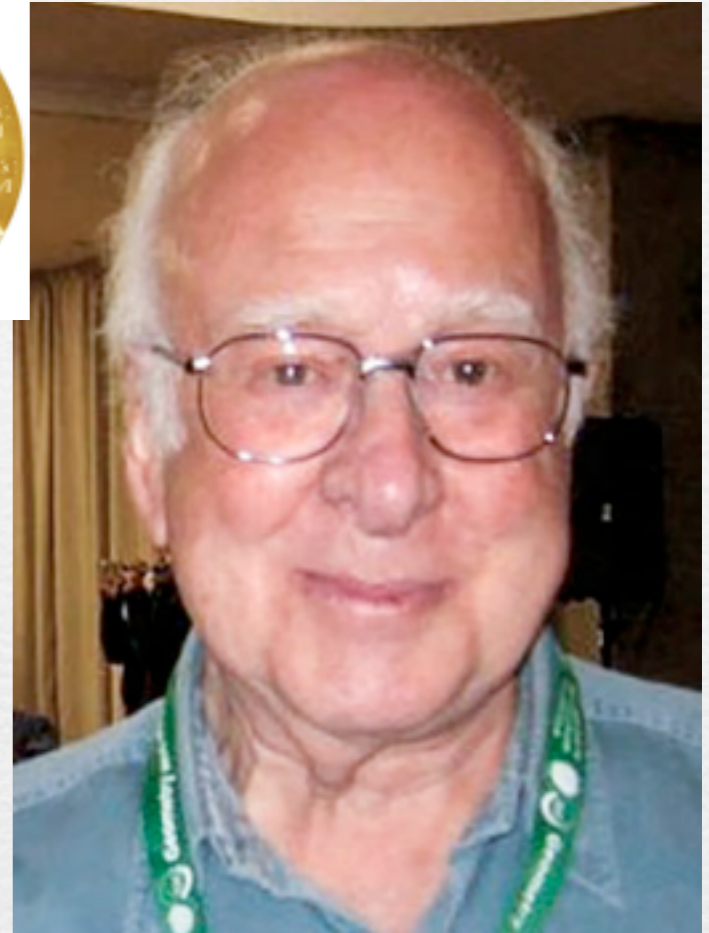
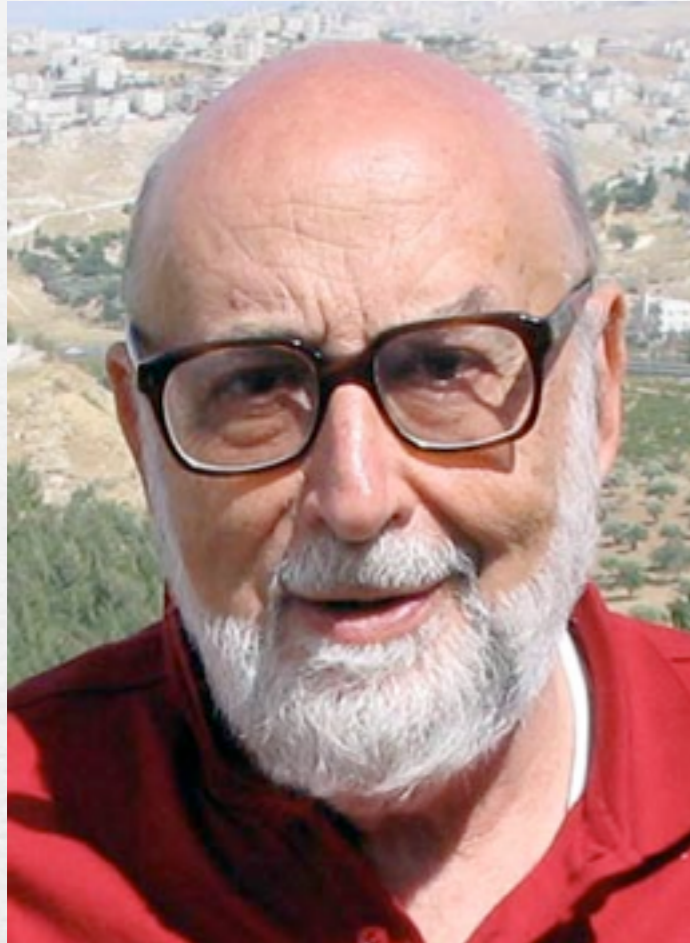


アンブレールさん

ヒッグスさん



2013年 ノーベル物理学賞

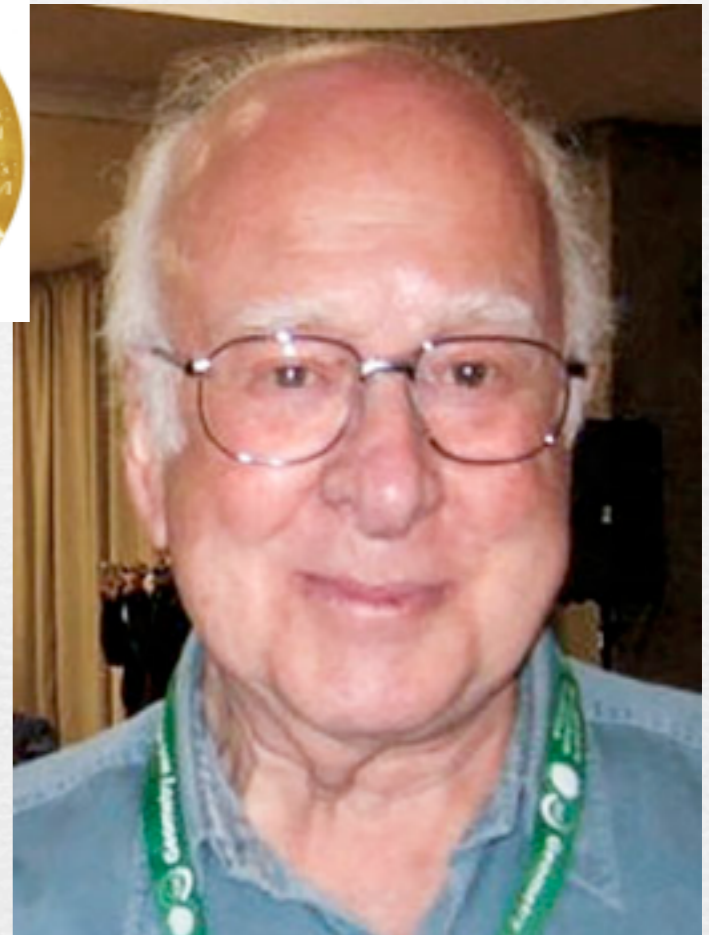
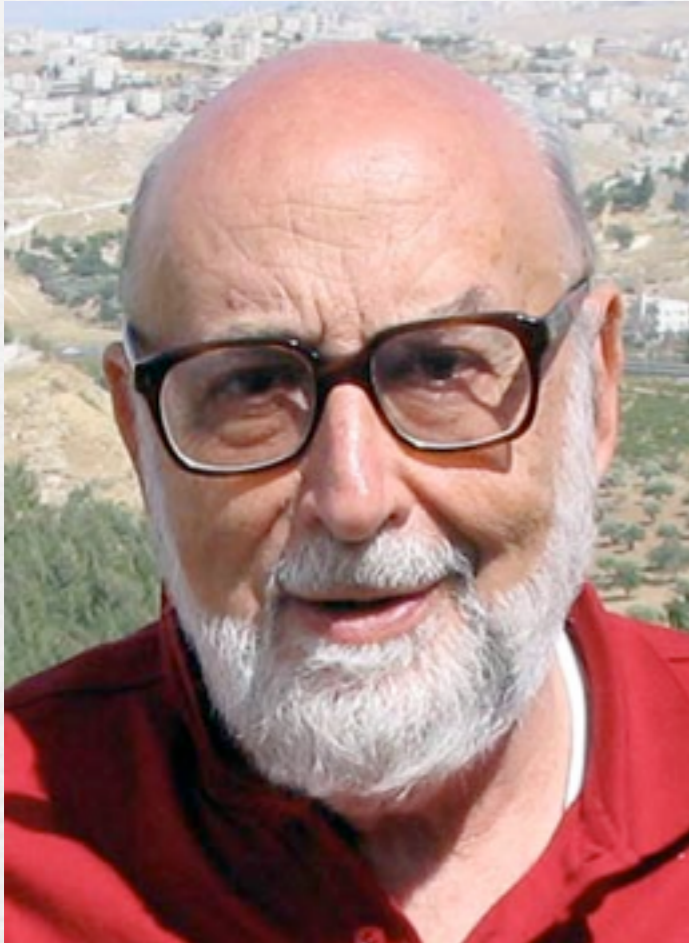


フランソワ・アングレール氏

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"*

2013年 ノーベル物理学賞



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**によって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！！

中日新聞 2013年(平成25年)10月9日(水曜日) ©中日新聞社 2013 (日刊)



ノーベル賞
物理学賞
質量の起源解明
ヒッグス粒子予言の2氏

「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(八八)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(八〇)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

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

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。

名大など16機関参加

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)

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

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、実験チームの一人として、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ー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。

内容

素粒子物理学とは？

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

宣伝

ヒッグス粒子の見つけ方 ~質量の起源を追う~ (丸善出版)

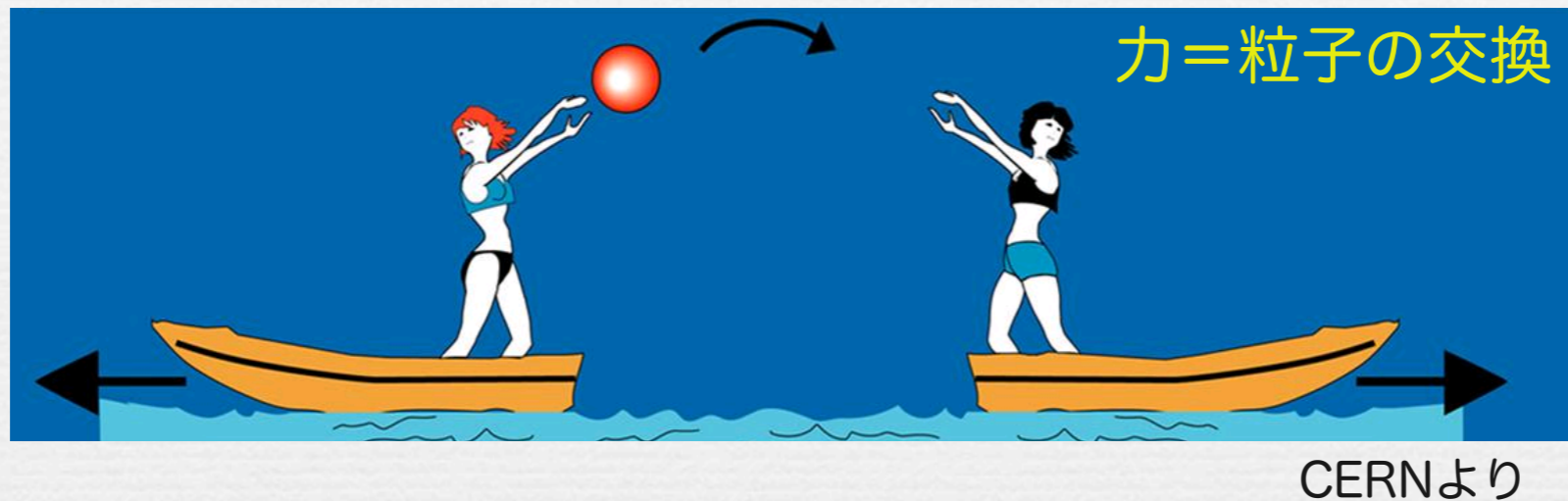
著：山崎祐司、戸本誠、花垣和則



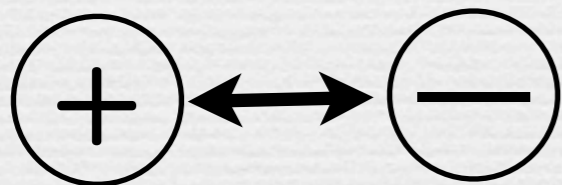
素粒子物理学とは？

素粒子物理学とは？ 2

素粒子が従う力学法則は？

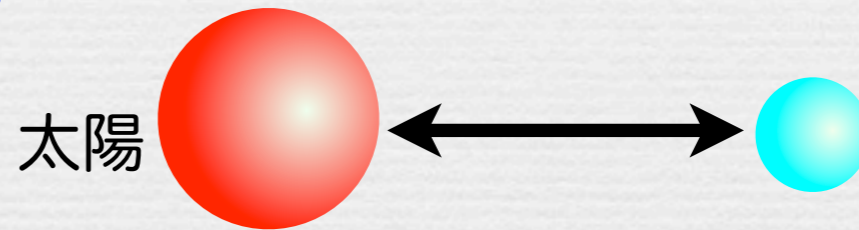


電磁気力



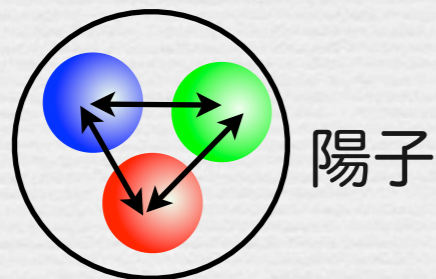
電荷：光子を交換

重力



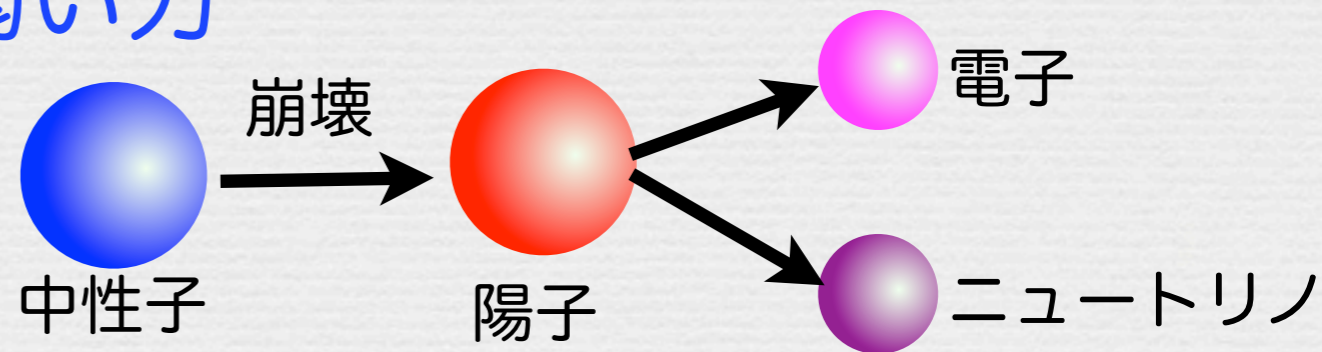
質量：グラビトン(未発見)を交換

強い力



色電荷：グルーオンを交換

弱い力

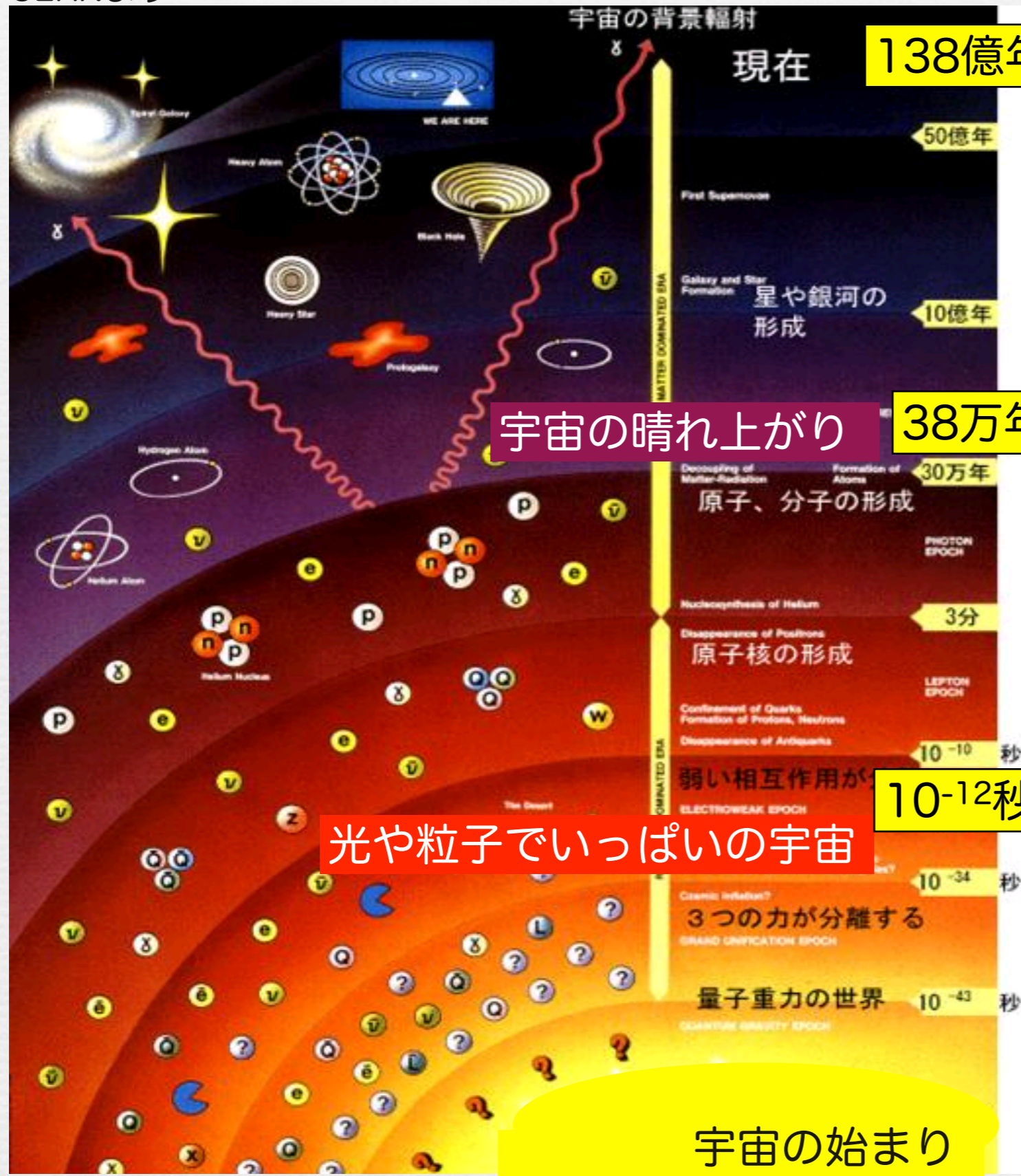


弱電荷：W、Z粒子を交換

素粒子物理学とは？ 3

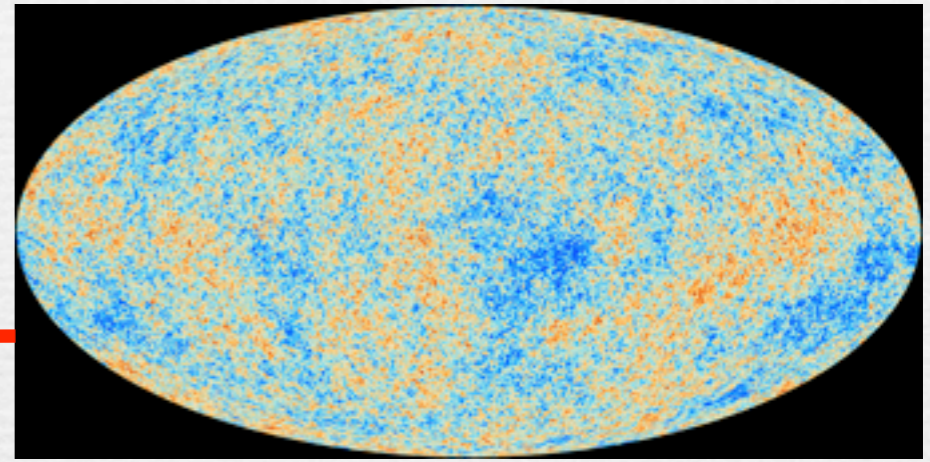
宇宙誕生の謎に迫る

CERNより



← 現在の宇宙の姿

光で38万年後の宇宙を観測



プランク <http://www.esa.int>

光による

それ以前の宇宙の観測は無理

← 加速器で初期宇宙を再現

LHCで10⁻¹²秒後までさかのぼる

これまでの素粒子物理学

素粒子標準模型

物質を構成する



力を伝える



これまでの素粒子物理学

素粒子標準模型

物質を構成する



力を伝える

電磁気力：光子



強い力：グルーオン







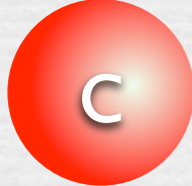







弱い力：Z、W粒子



これまでの素粒子物理学

素粒子標準模型

物質を構成する

	クォーク		レプトン	
	電荷： $+2/3e$	電荷： $-1/3e$	電荷： 0	電荷： $-e$
第1世代	アップ(u) 	ダウン(d) 	電子ニュートリノ 	電子 
第2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3世代	トップ(t) 	ボトム(b) 	タウニュートリノ 	タウ粒子 

力を伝える

電磁気力：光子



強い力：グルーオン







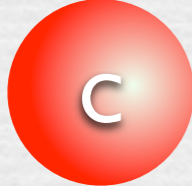





弱い力：Z、W粒子



これまでの素粒子物理学

素粒子標準模型

物質を構成する

	クォーク		レプトン	
	電荷： $+2/3e$	電荷： $-1/3e$	電荷： 0	電荷： $-e$
第1世代	アップ(u) 	ダウン(d) 	電子ニュートリノ 	電子 
第2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3世代	トップ(t) 	ボトム(b) 	タウニュートリノ 	タウ粒子 

力を伝える

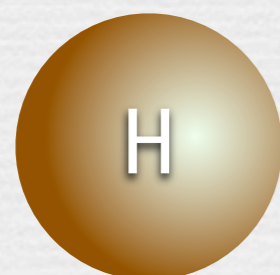
電磁気力：光子



強い力：グルーオン



弱い力：Z、W粒子



ヒッグス粒子：素粒子に質量を与える

ヒッグス粒子とは？

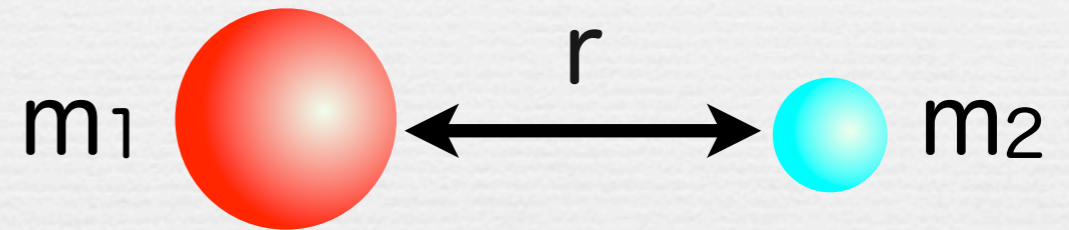
質量とは？

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

動かしにくさ、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)

光 (質量ゼロ) のエネルギーはゼロ??

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

(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

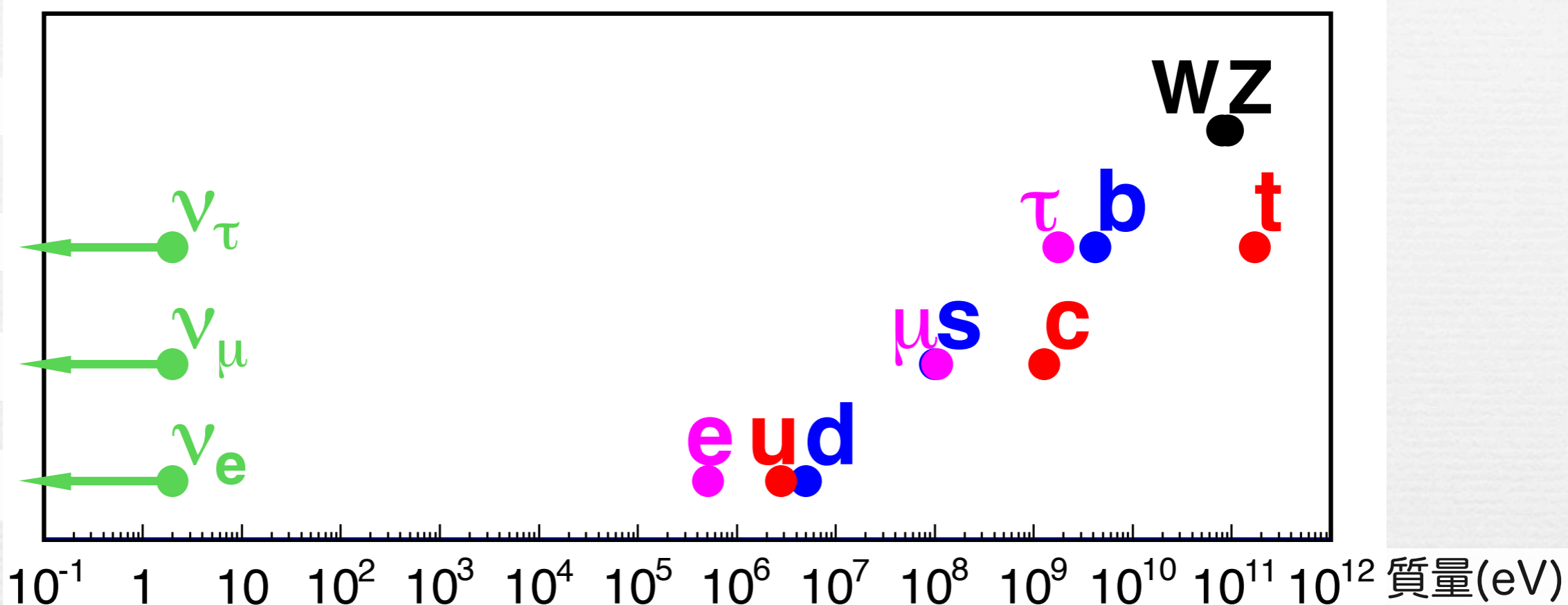
素粒子の質量

ゲージ粒子

第3世代

第2世代

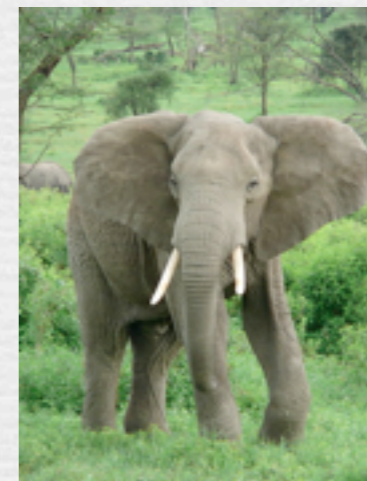
第1世代



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：物質のない空間（広辞苑）

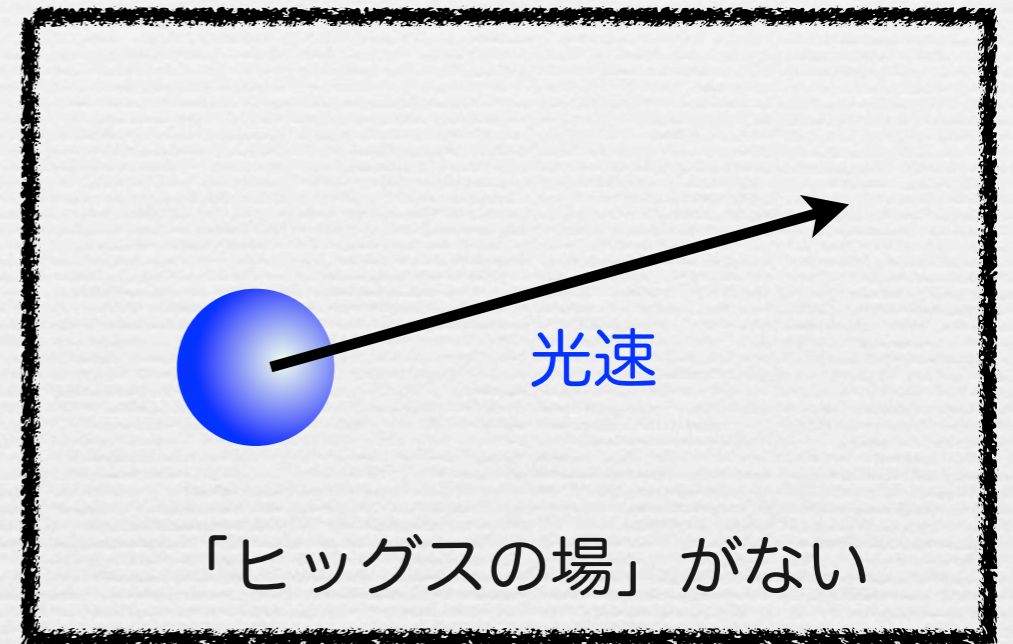
：「ヒッグスの場」で満たされた状態（素粒子語辞典）

宇宙誕生直後：高温・高エネルギー

「ヒッグスの場」がない状態

→ 粒子は光速で運動

→ 素粒子の質量は全てゼロ



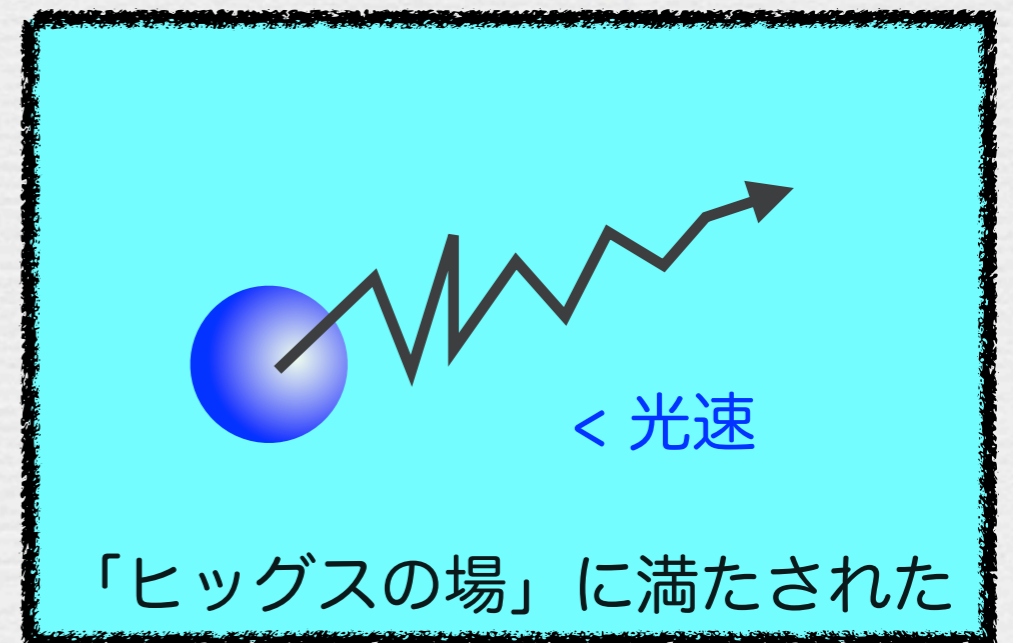
10⁻¹⁰秒後の宇宙：宇宙が冷える

「ヒッグスの場」に満たされた状態

→ 粒子が動きにくくなる

→ 光速より遅く運動

→ 素粒子が質量を持つ



ヒッグス場がどう質量を与えるか？

イメージ

障害物のない所では、、、エネルギー＝運動量

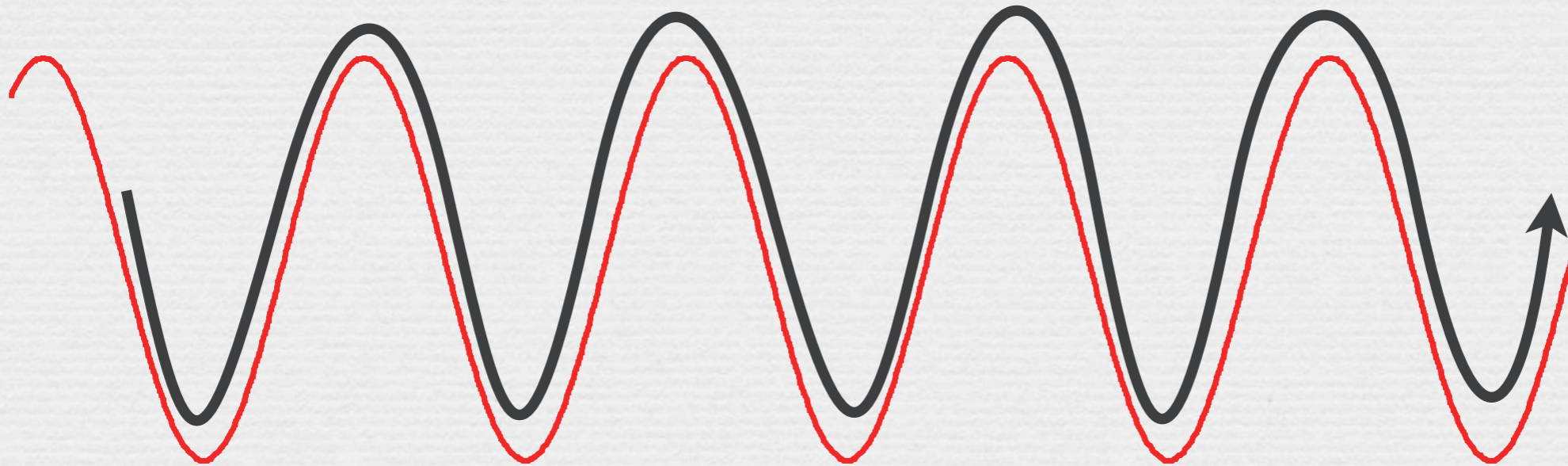
光速で進む

光速



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

エネルギーの一部が振動に使われる → 遅くなる

遠くからみると光より遅く見える＝質量を獲得

ヒッグス場がどう質量を与えるか？

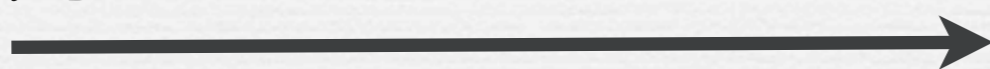
エネルギーが小さいと

イメージ

障害物のない所では、 \dots エネルギー = 運動量

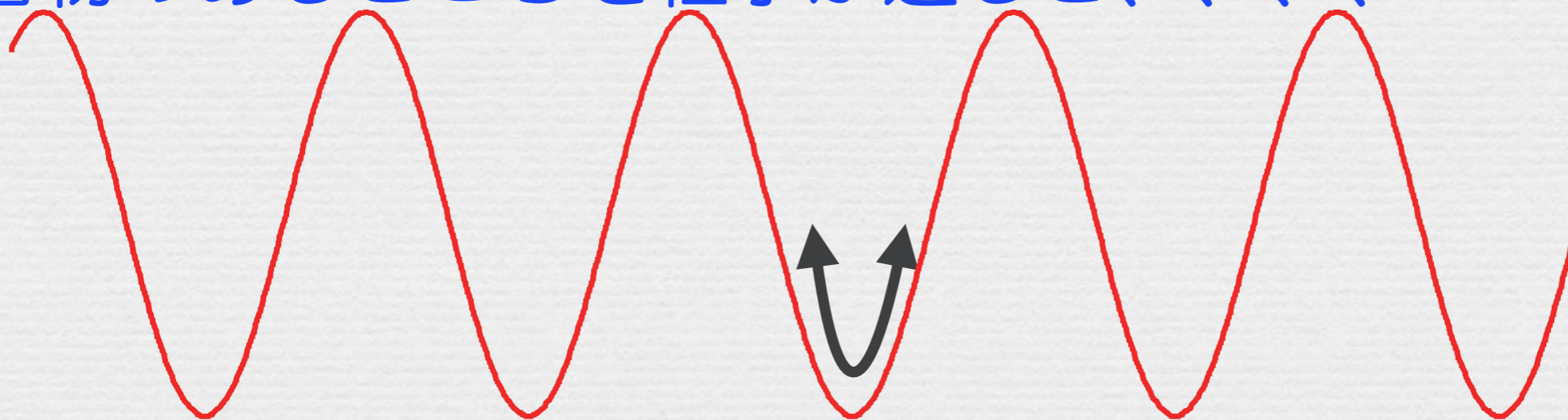
光速で進む

光速



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、 \dots



ヒッグスの場による障害物

エネルギーが振動に使われる \rightarrow 止まる

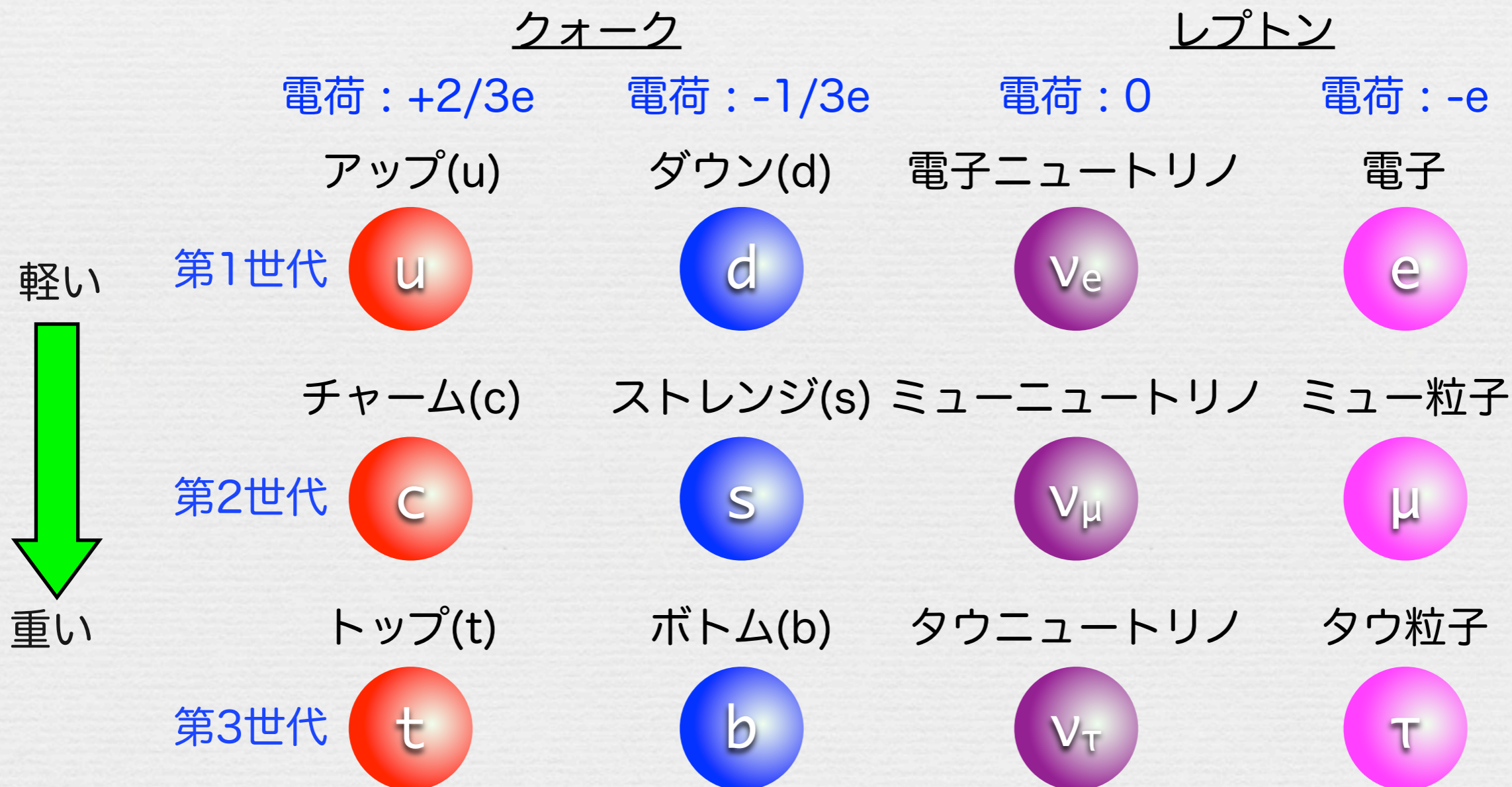
遠くからみると静止して見える = 静止エネルギー

障壁 = (ヒッグス場の強さ) \times (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



ヒッグスの場を見るには？

ヒッグス場を直接見ることはできない。

真空中にエネルギーをつぎ込むと粒子として現れる

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

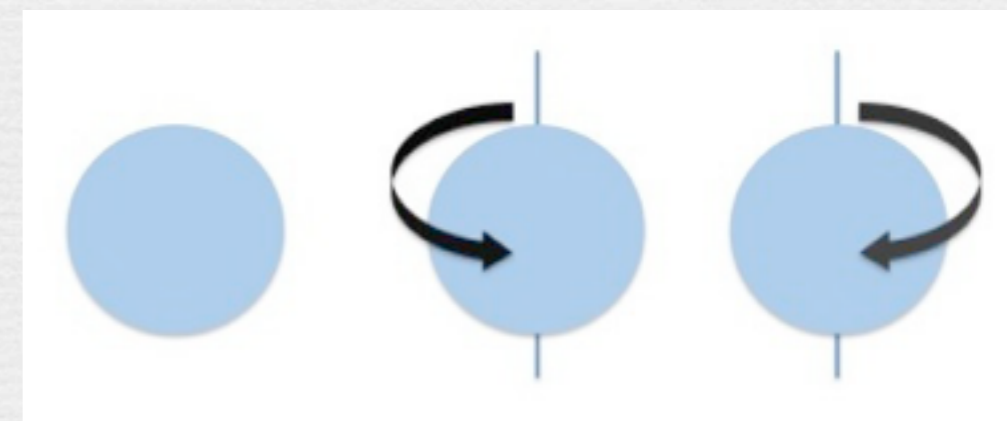
スピンの0の粒子(向きなし粒子)

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

質量の大きい素粒子と反応しやすい

不安定ですぐにより安定な粒子に化ける (崩壊する)



素粒子には固有のスピン

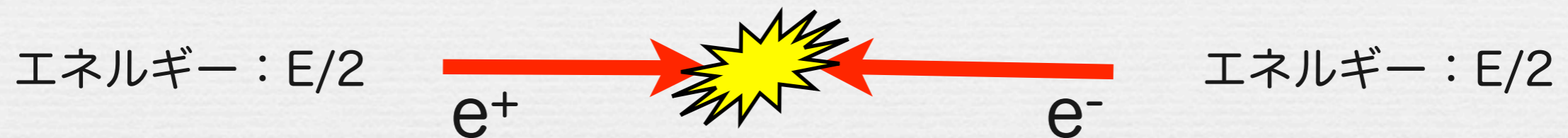
そういう粒子を実験的にさがしてみる→**素粒子実験**

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



$$E = Mc^2$$

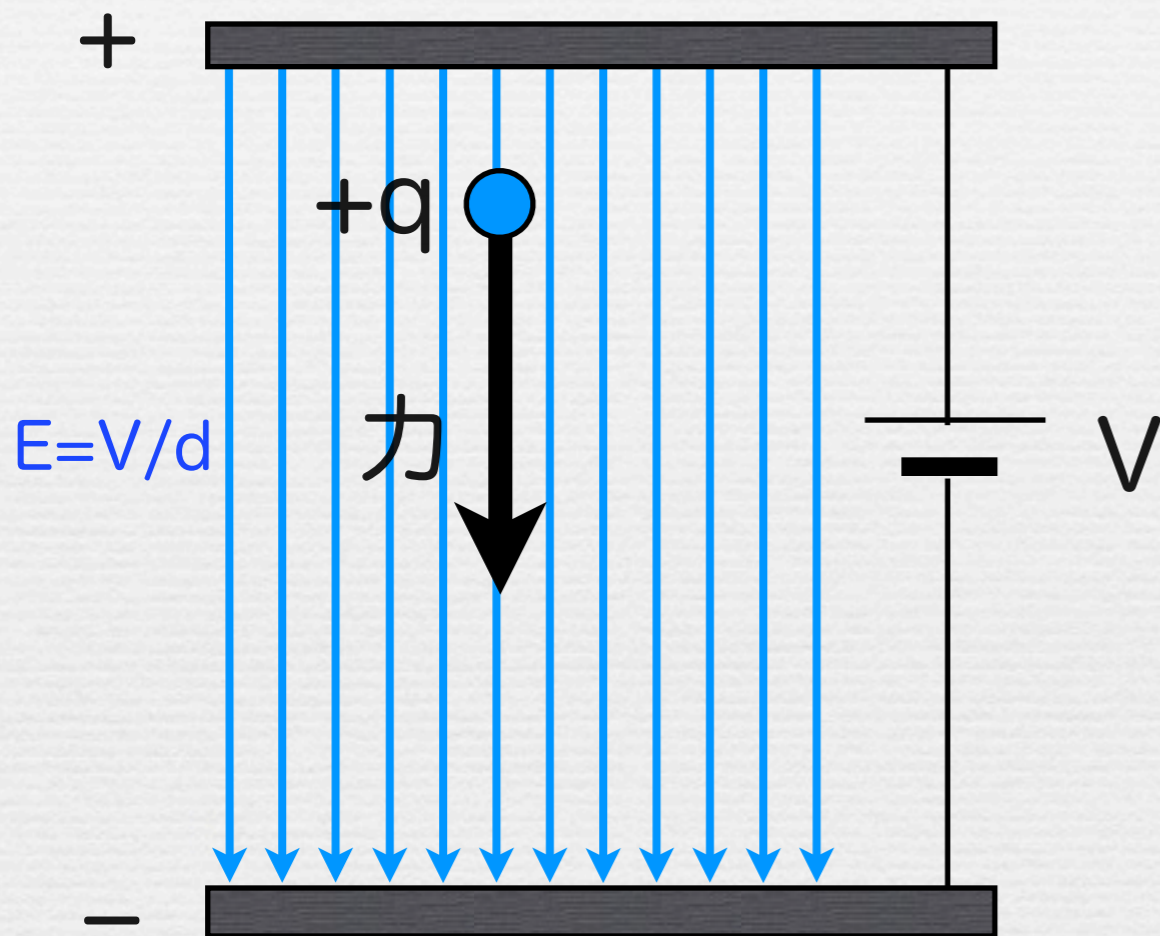
質量 M の未知なる素粒子を生成する能力

加速した粒子を衝突させる

高エネルギー！

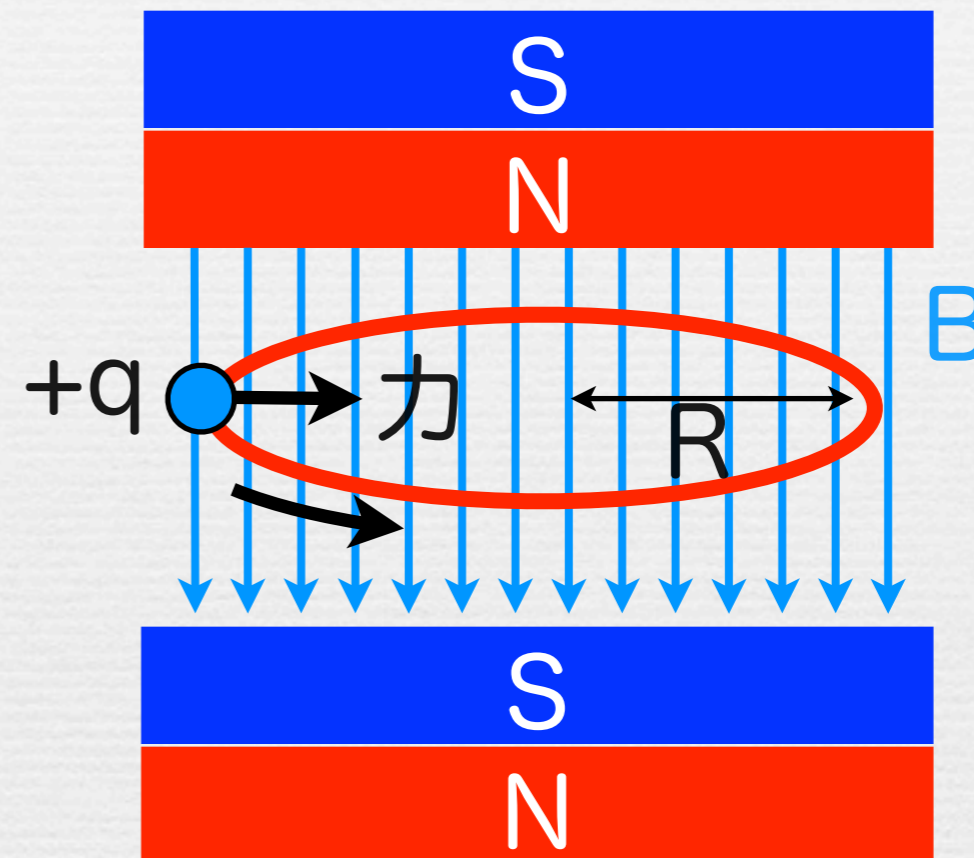
粒子を加速する

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

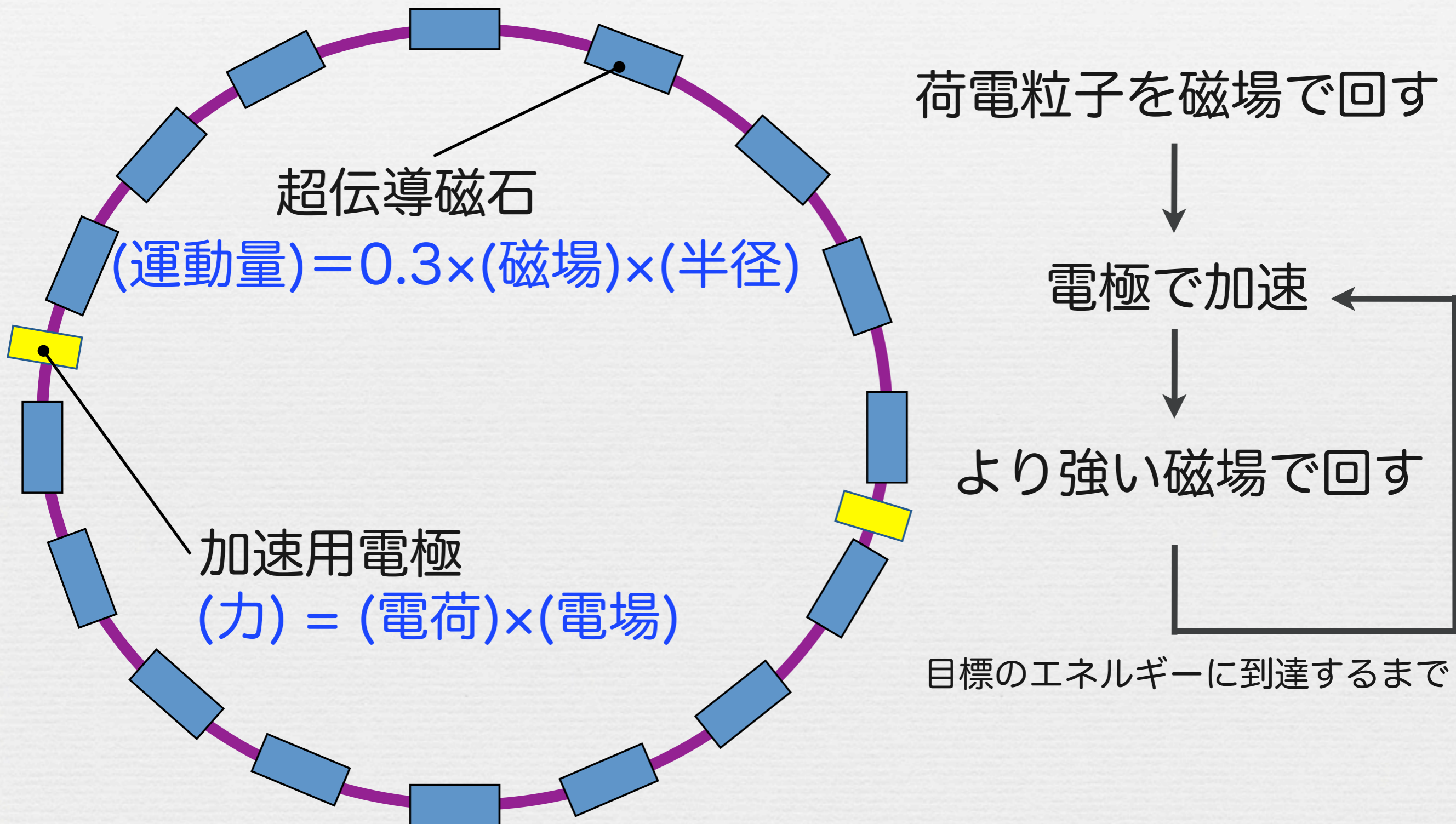
$$(\text{力}) = (\text{電荷}) \times (\text{電場})$$



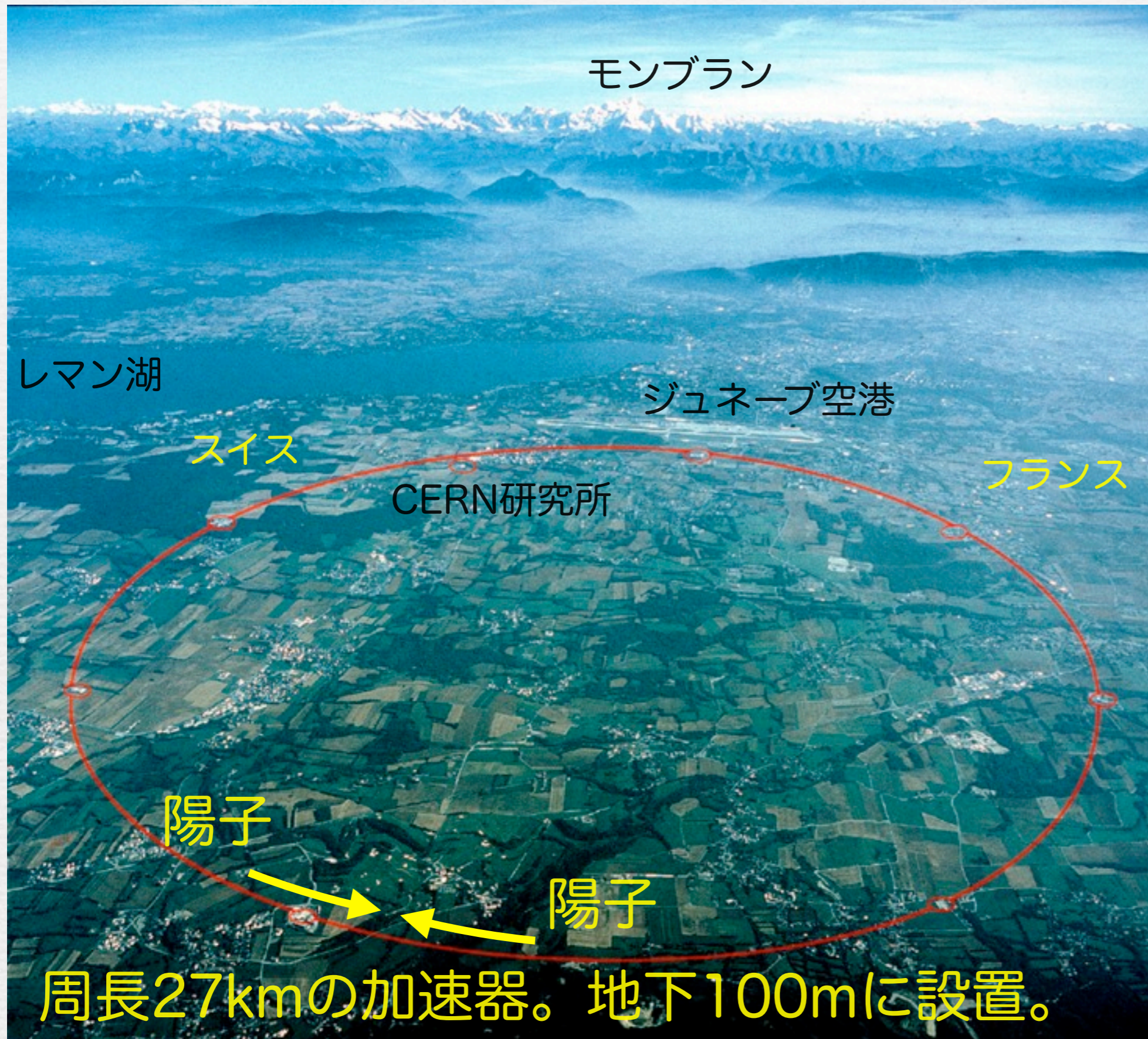
磁場を大きくして
より加速した荷電粒子を回す

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

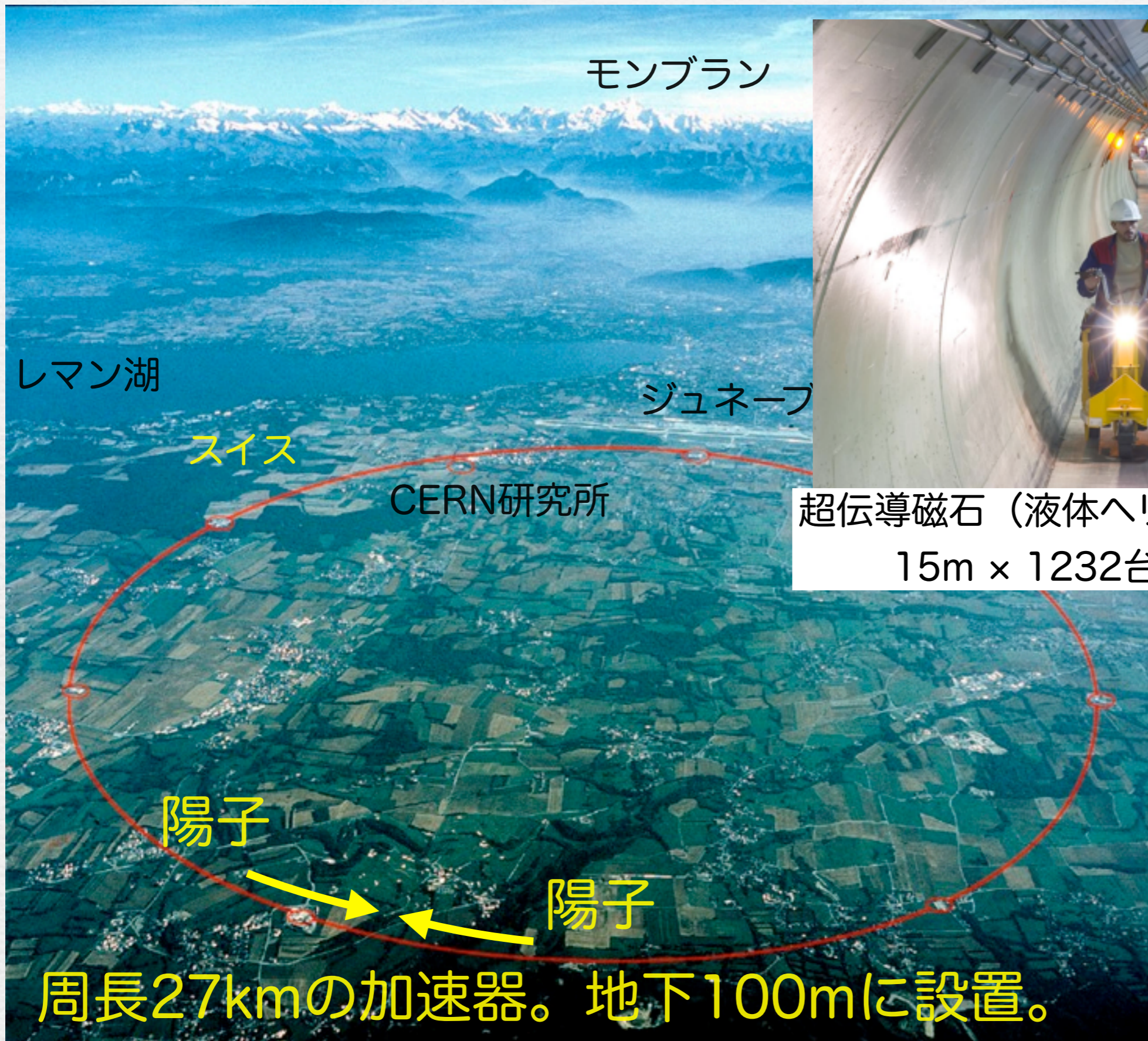
加速器の原理



最先端加速器 Large Hadron Collider



最先端加速器 Large Hadron Collider



モンブラン



超伝導磁石 (液体ヘリウムで冷却, -271°C)
 15m x 1232台=18km(27km中)

レマン湖

ジュネーブ

スイス

CERN研究所

陽子

陽子

周長27kmの加速器。地下100mに設置。

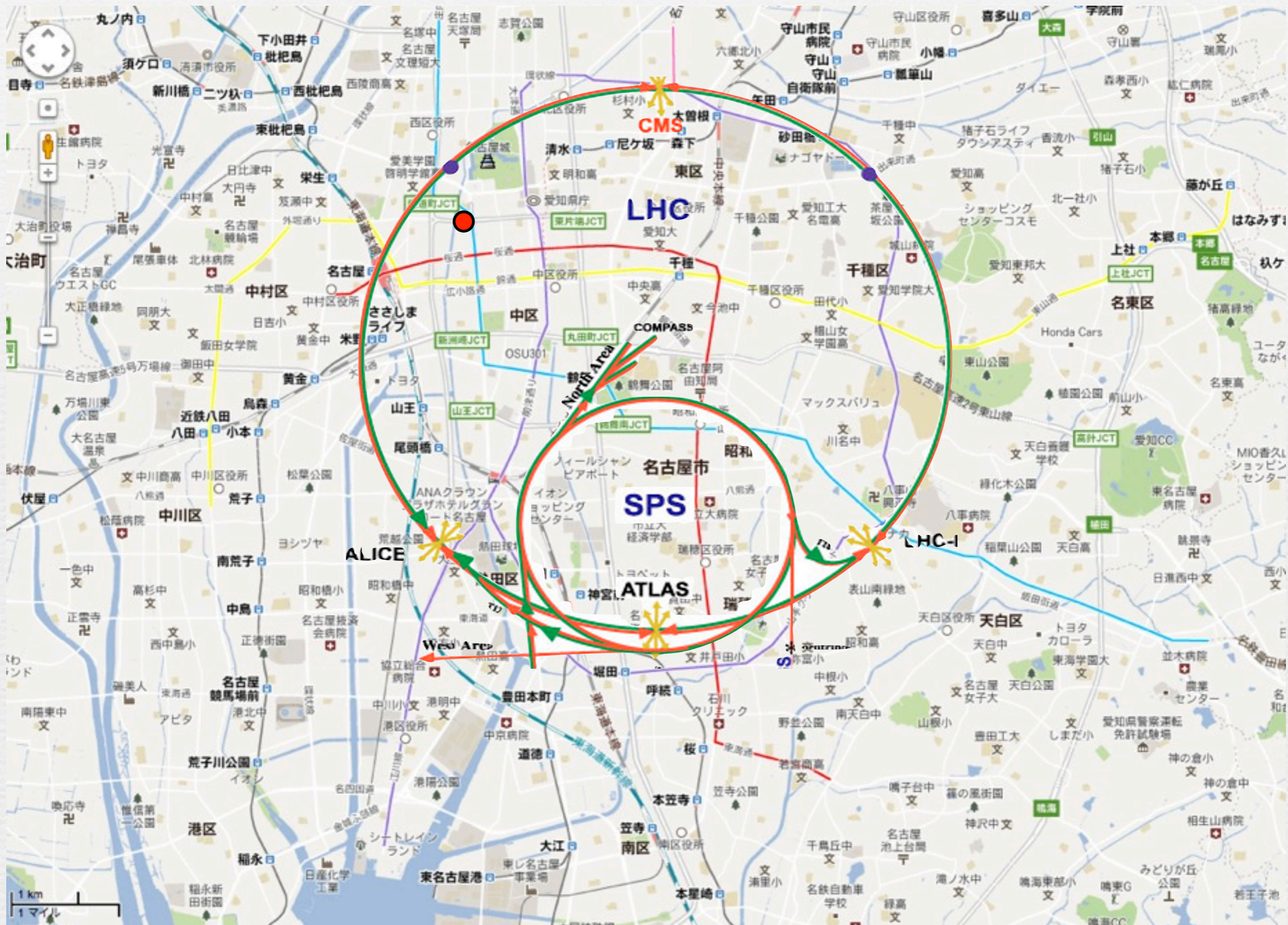
LHC加速器の大きさ



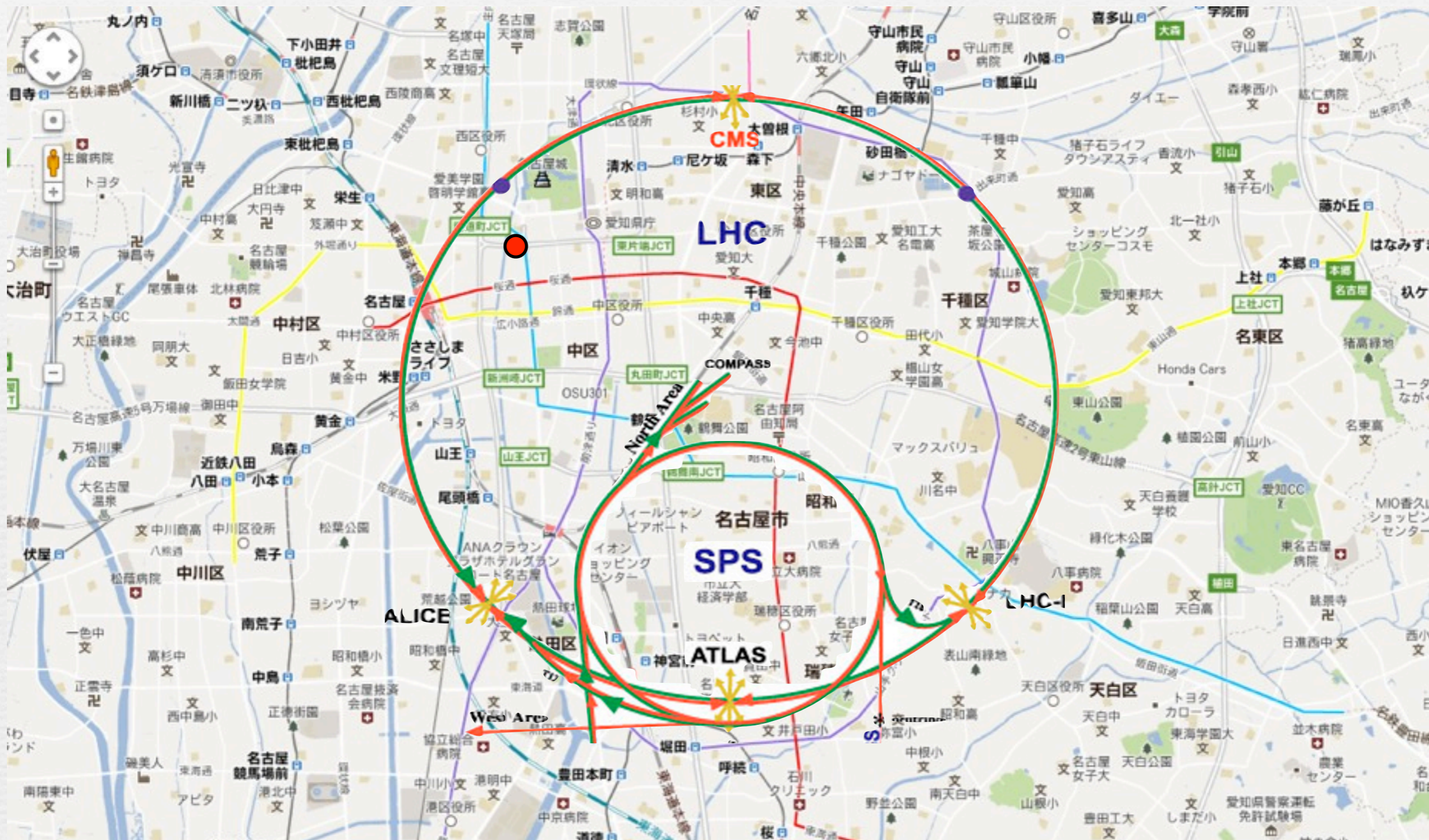
LHC加速器の大きさ



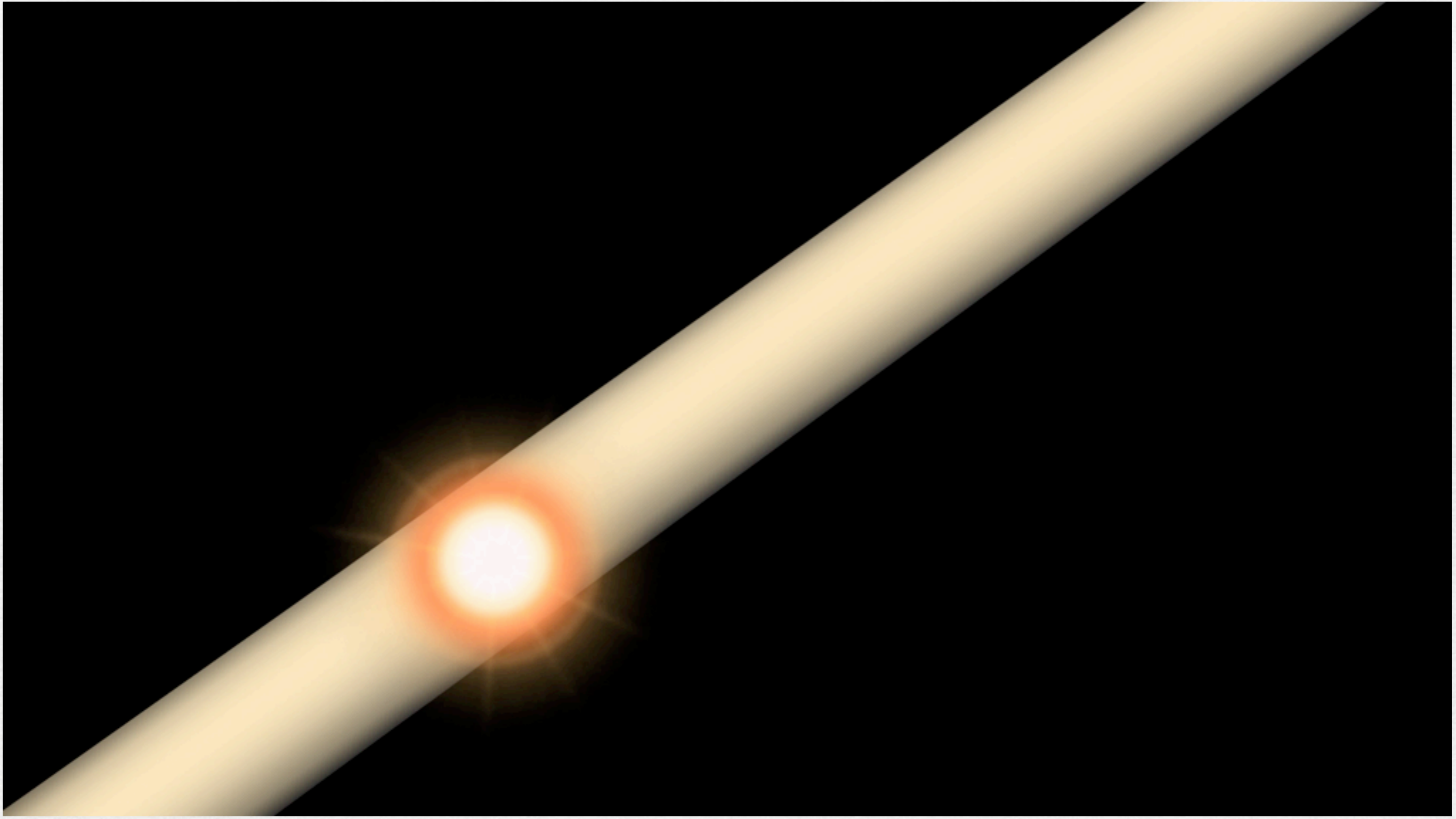
LHC加速器の大きさ



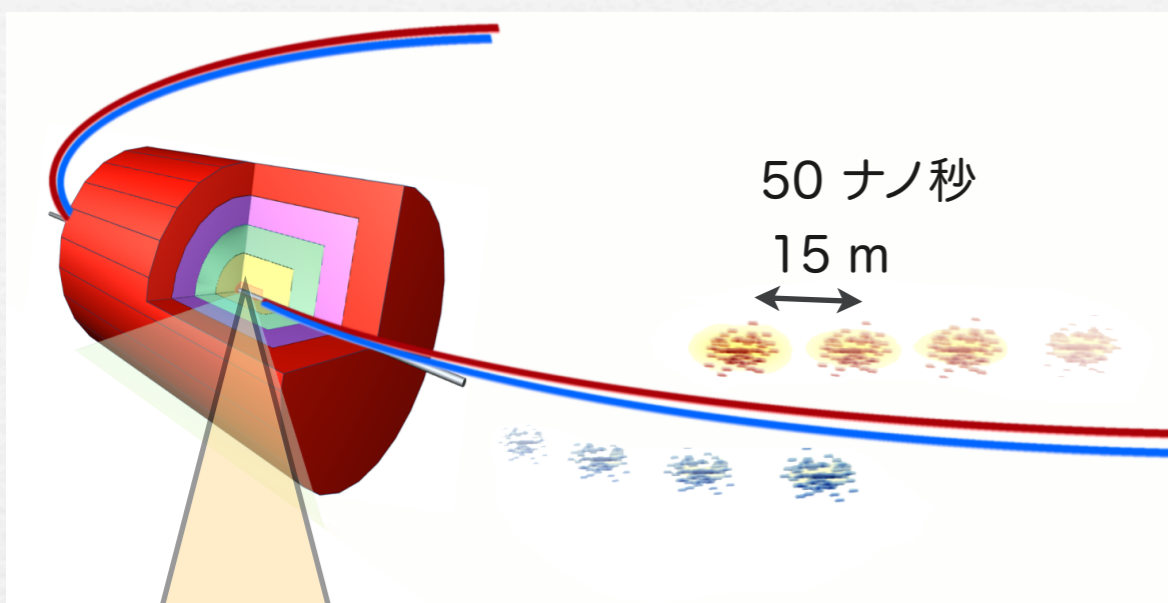
LHC加速器の大きさ



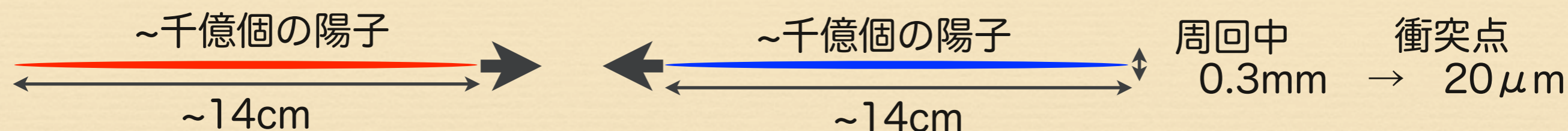
大阪環状線 < LHC~名古屋地下鉄名城線 < 東京山手線
 ~21km ~27km ~34.5km



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



陽子を光の速度の99.999997%に加速 (光速 - 30km/時)

エネルギーは4TeV (陽子の質量の4000倍程度)

衝突点では4TeV+4TeV=8TeVのエネルギーの世界を再現

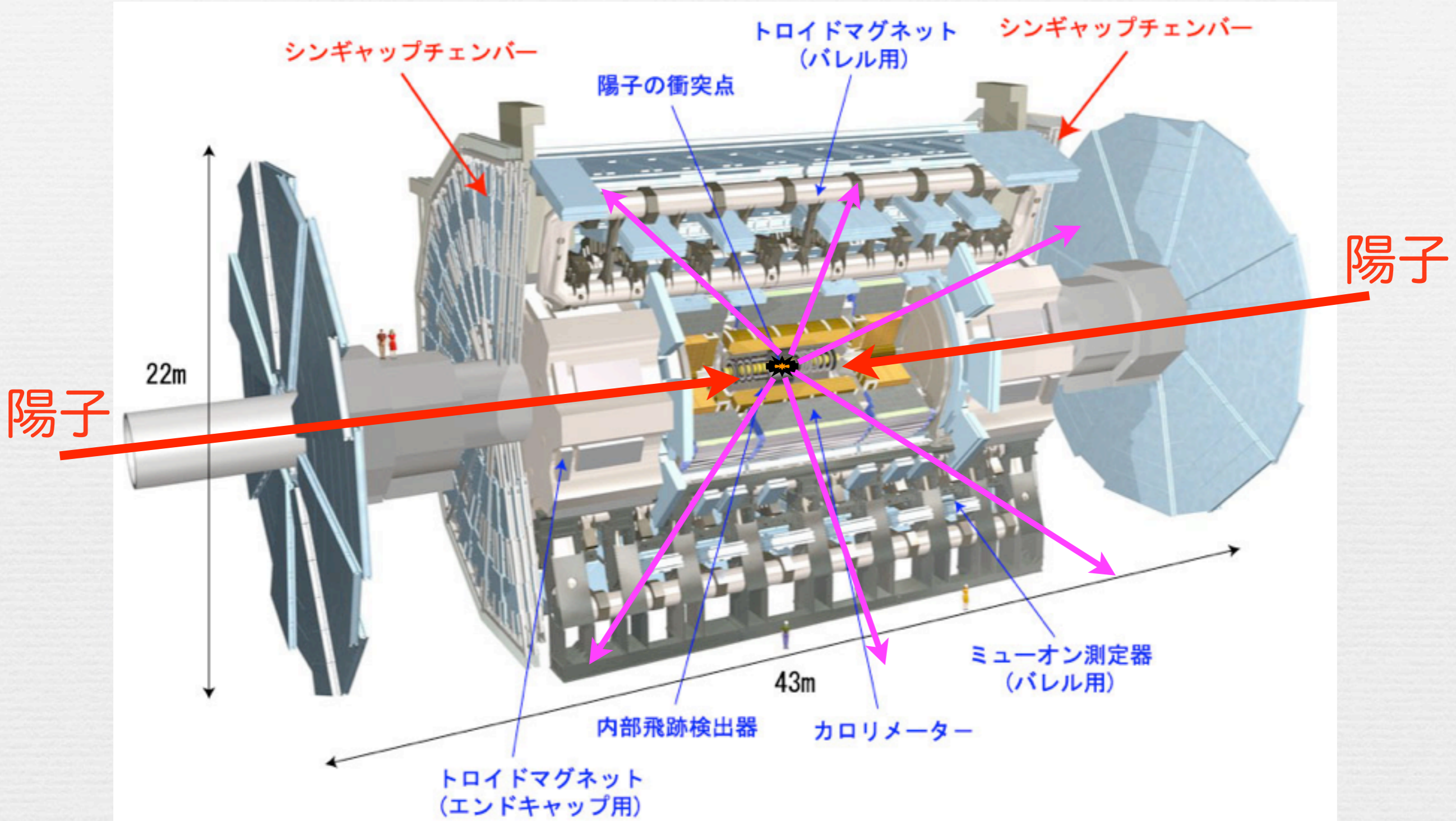
宇宙誕生直後(10^{-12} 秒後)の世界

2011年と2012年の実験(Run I)で2000兆回の陽子衝突

2015年からRun II実験 : 13~14TeVにエネルギー増強、陽子衝突数もさらに増やす

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

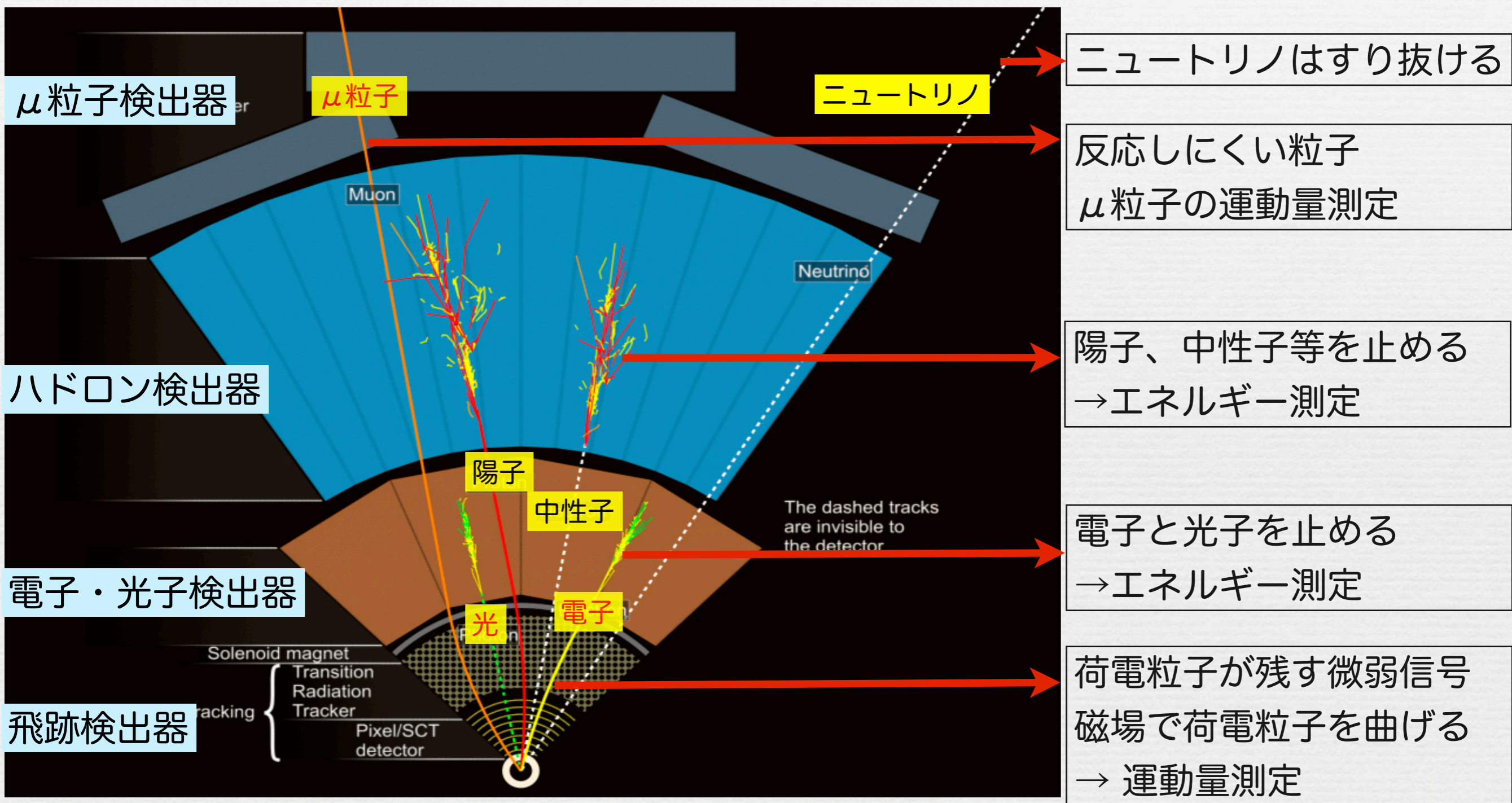


ヒッグス粒子は不安定 → 軽い安定粒子に化ける (崩壊)

光、電子、 μ 粒子、ハドロン(クォークの複合粒子)、ニュートリノ

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

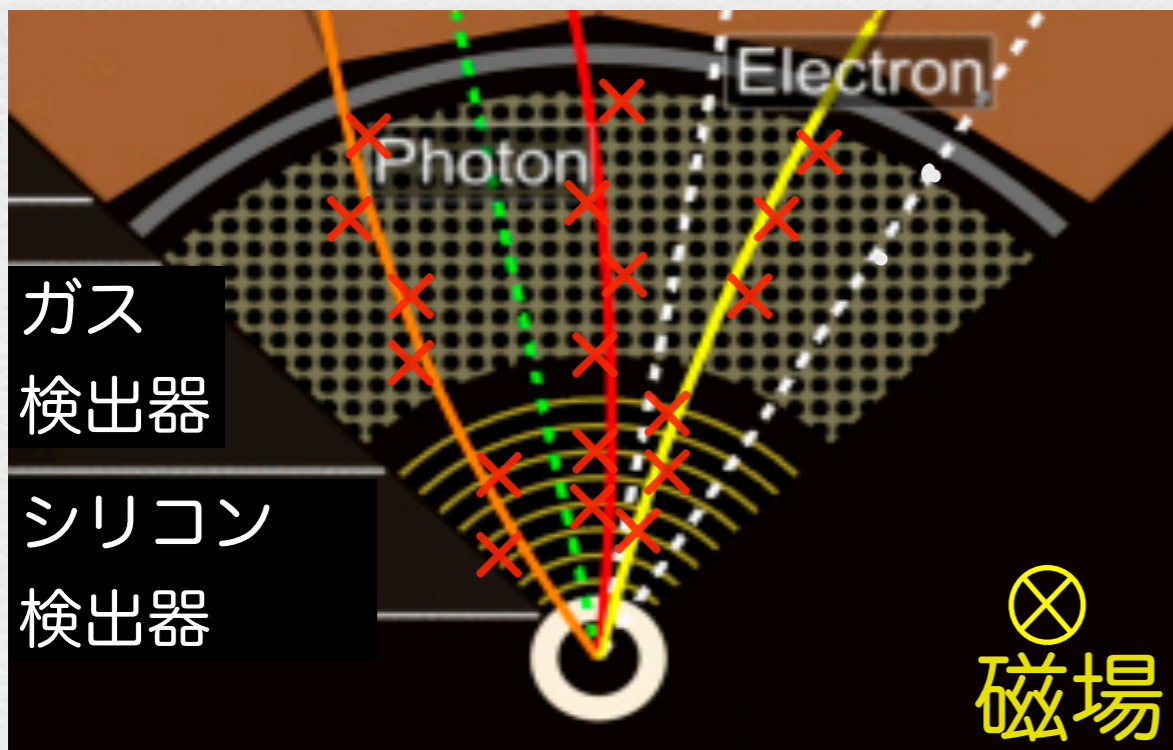
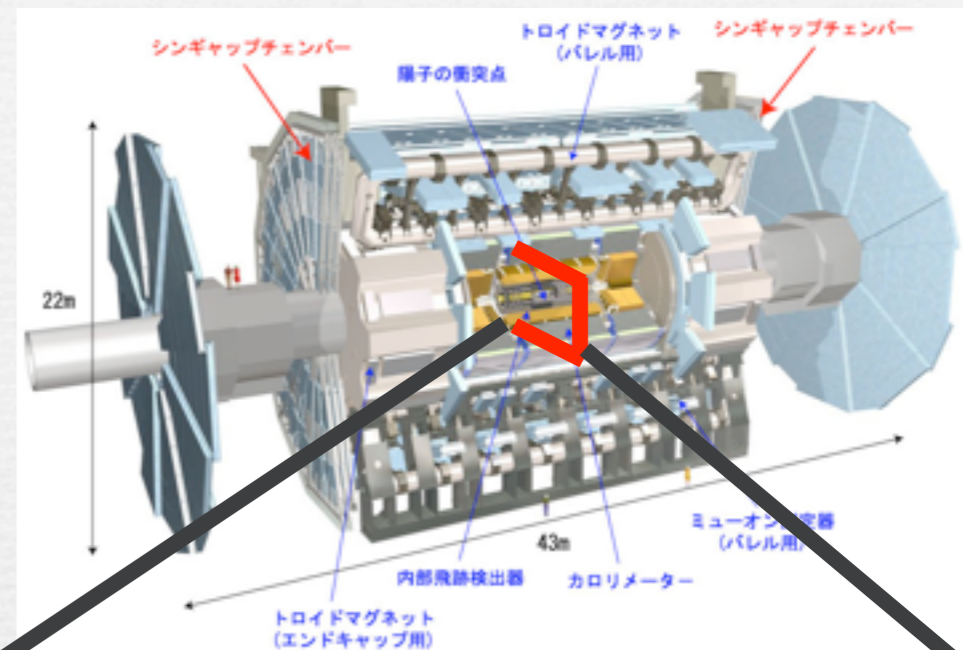
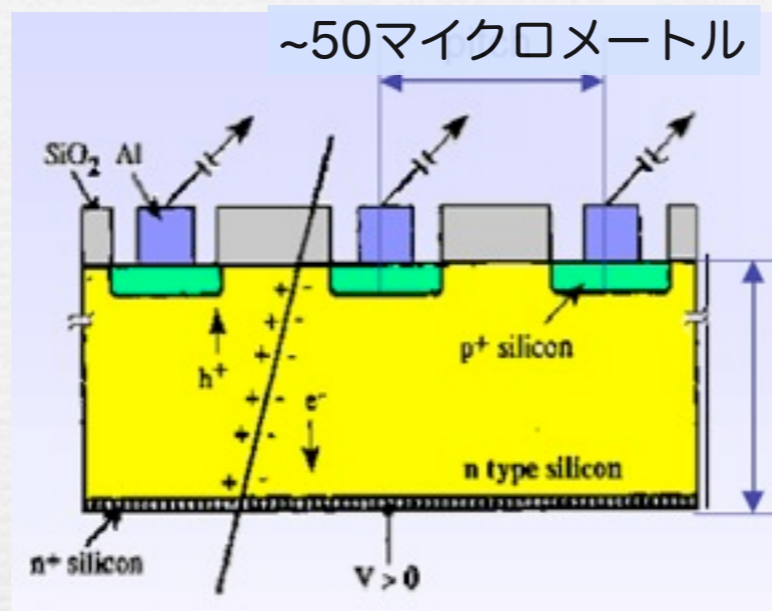
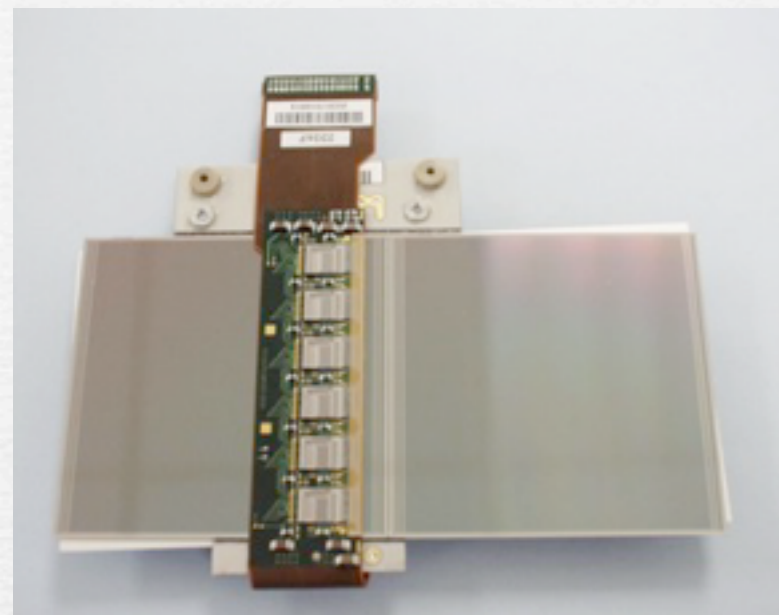
陽子、中性子等を止める
→エネルギー測定

電子と光子を止める
→エネルギー測定

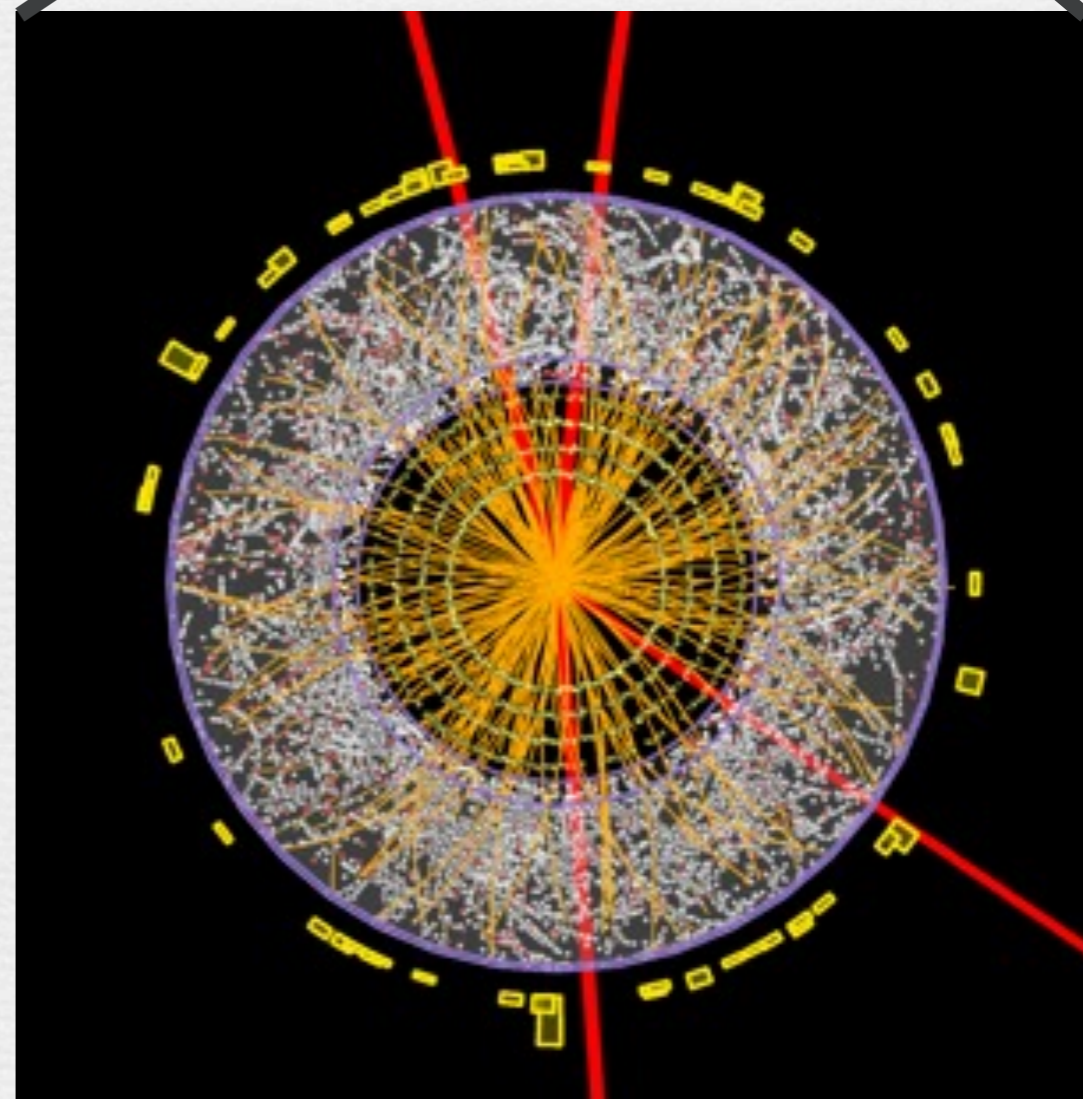
荷電粒子が残す微弱信号
磁場で荷電粒子を曲げる
→運動量測定

粒子の種類、エネルギー、運動量を測定

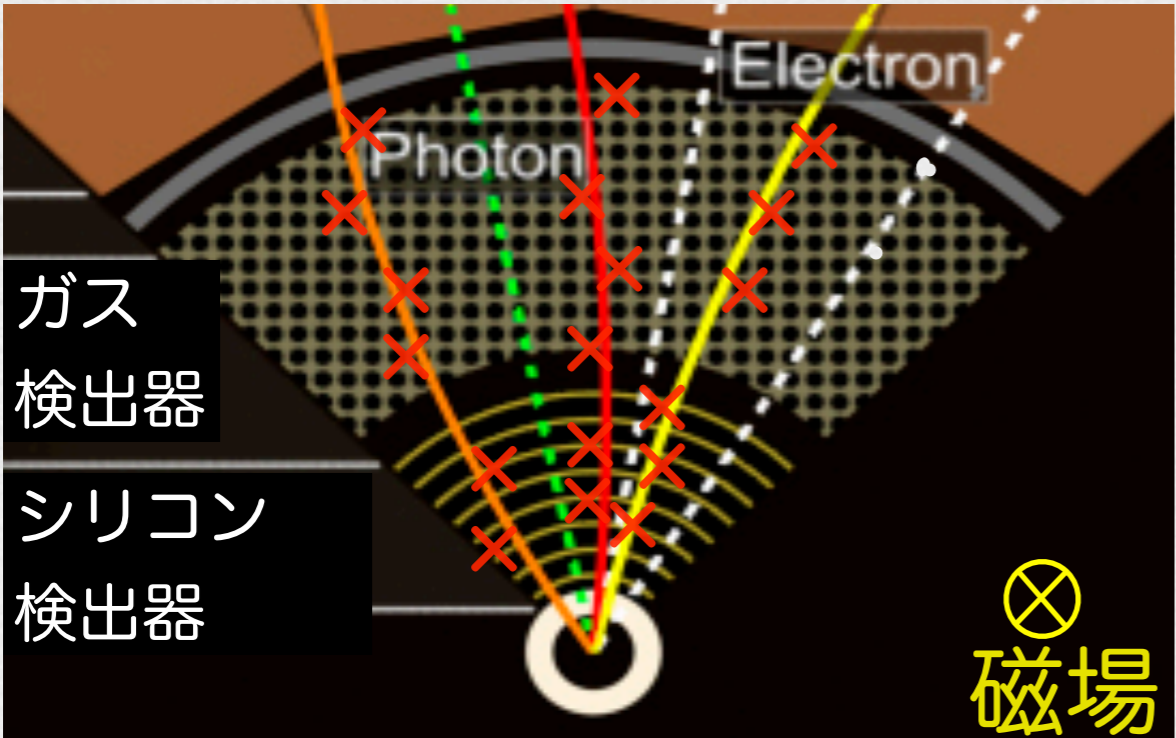
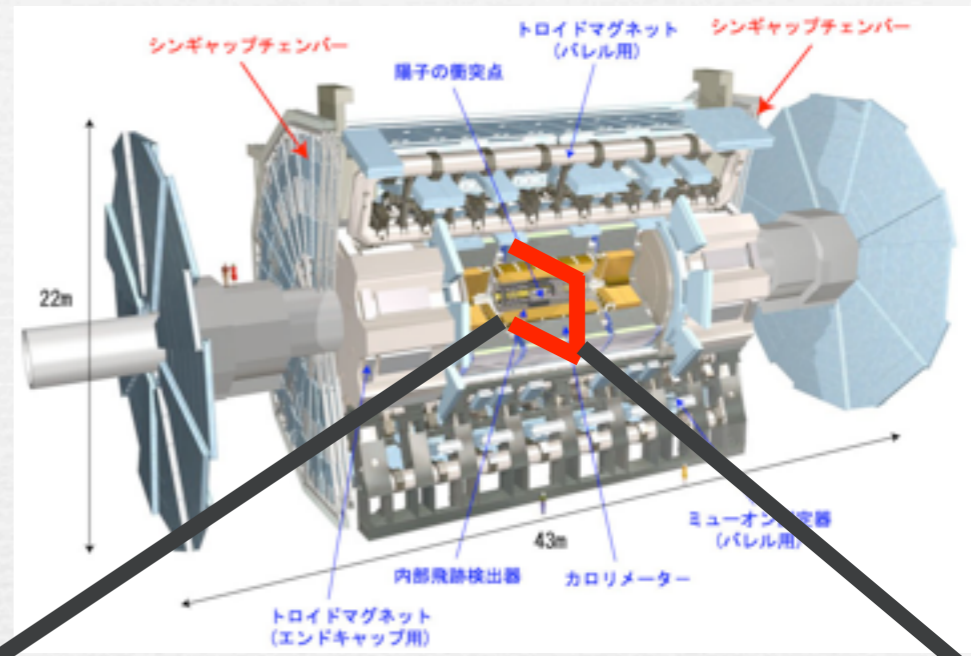
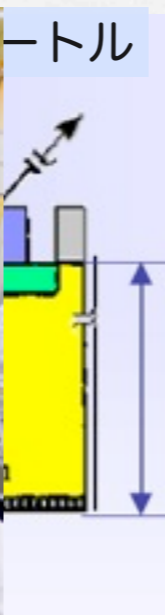
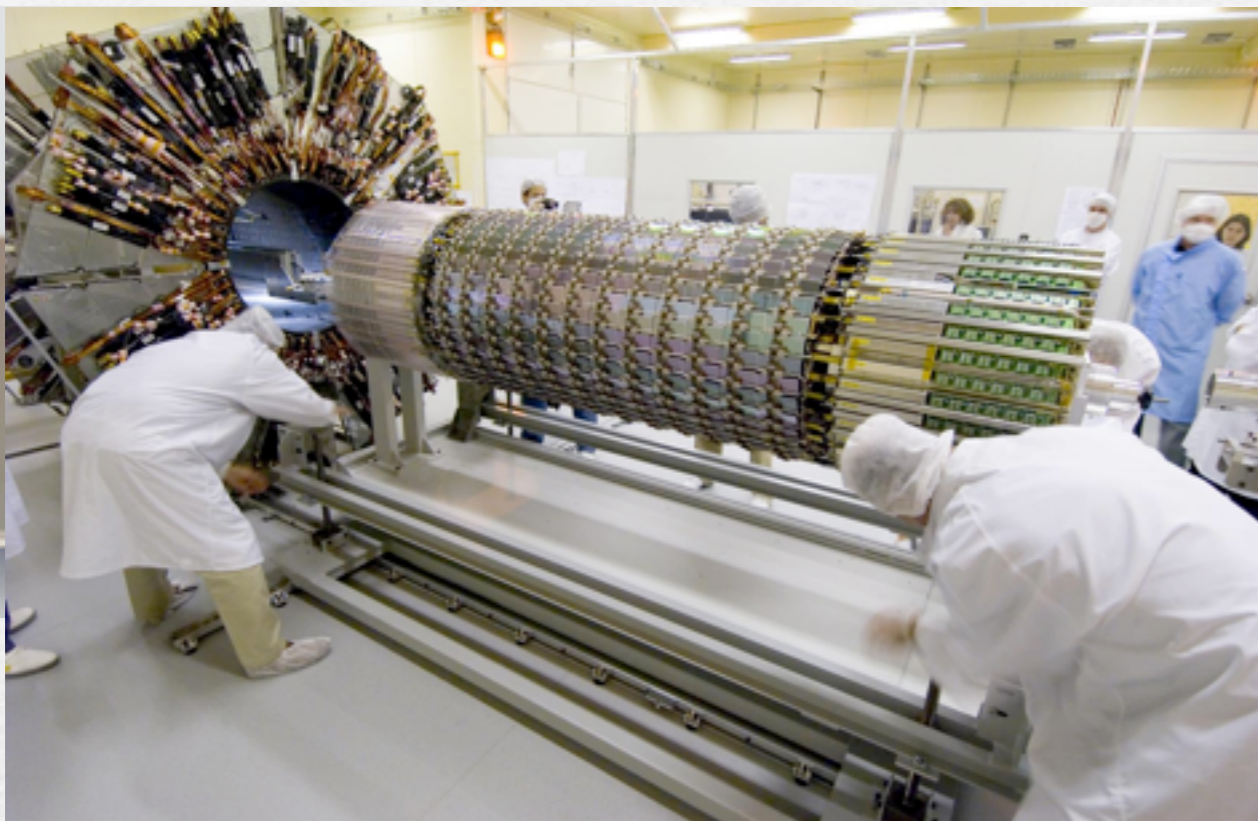
運動量測定 (飛跡検出器)



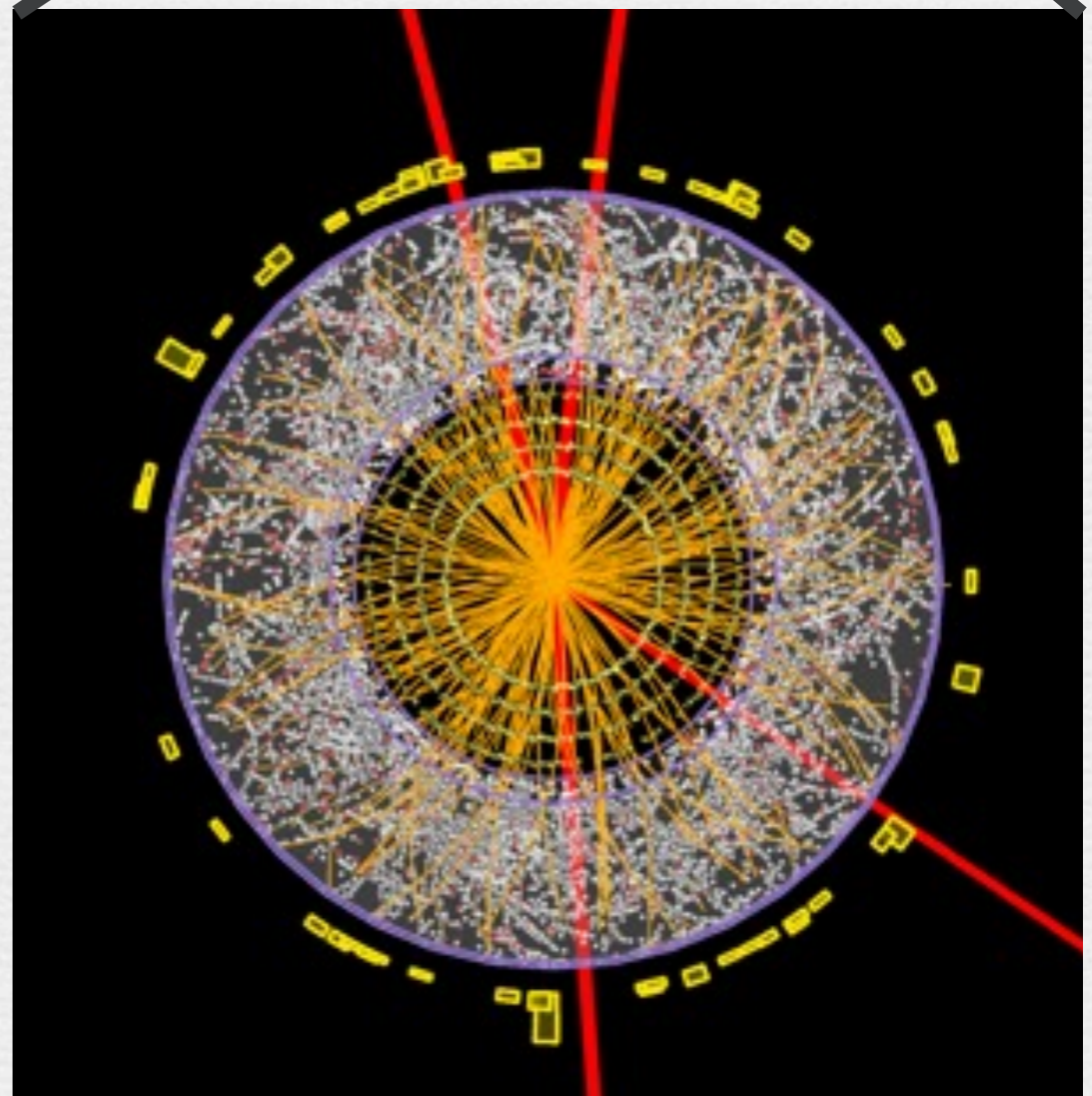
(運動量) = 0.3 × (磁場) × (半径)



運動量測定 (飛跡検出器)

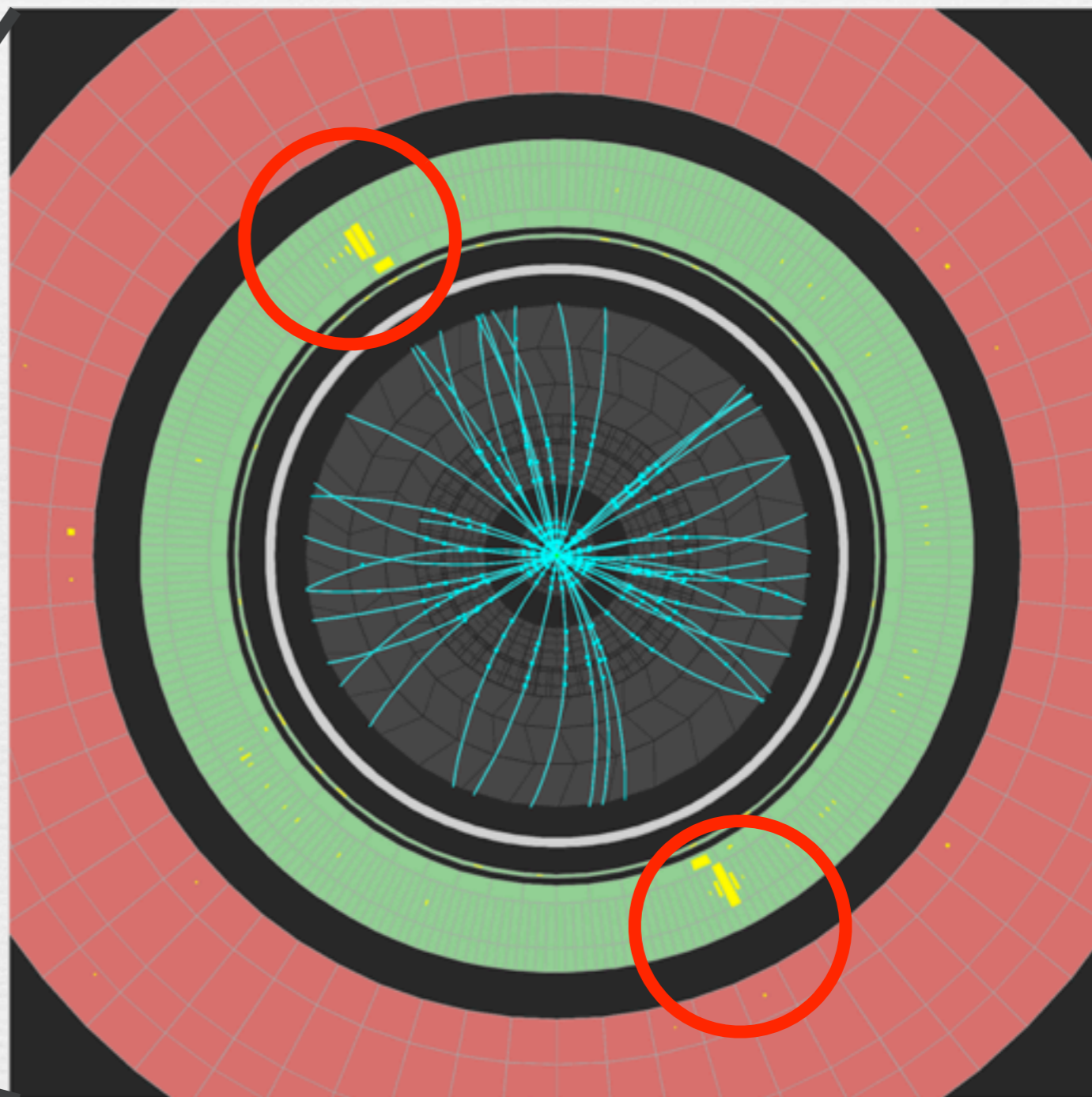
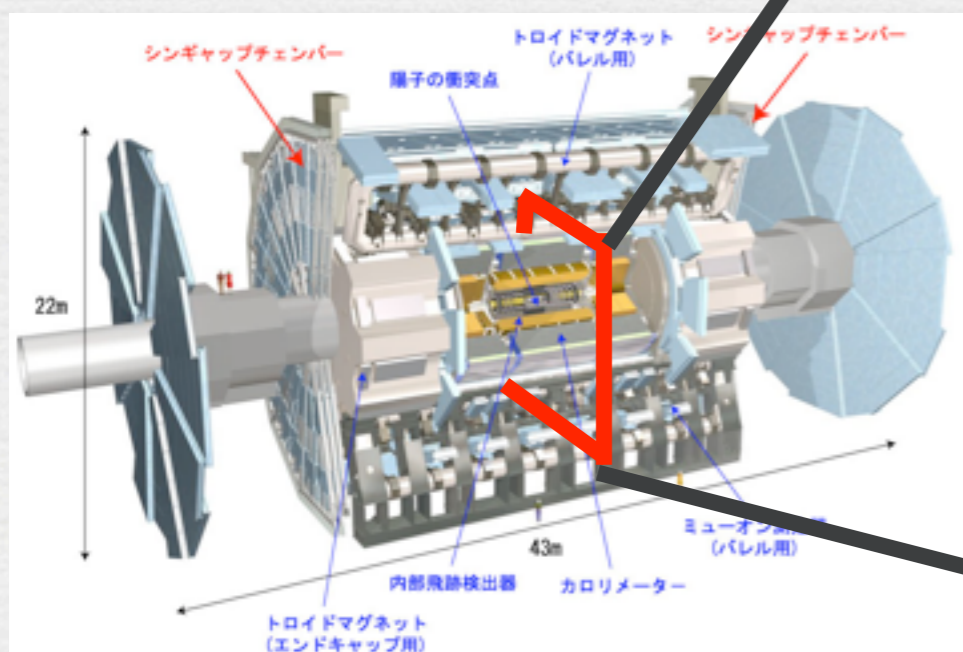
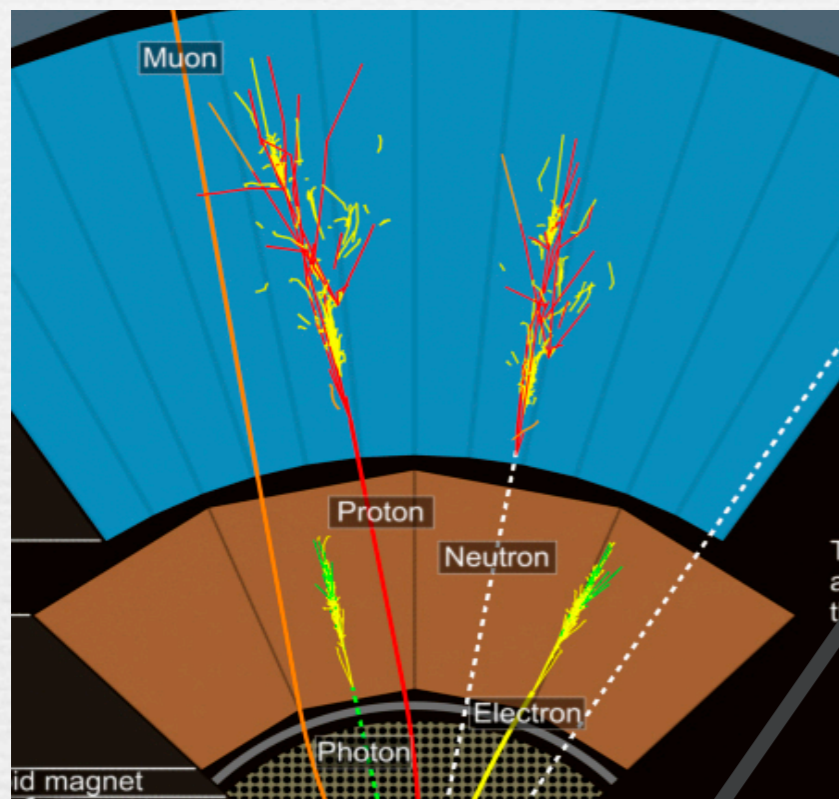


$(運動量) = 0.3 \times (磁場) \times (半径)$

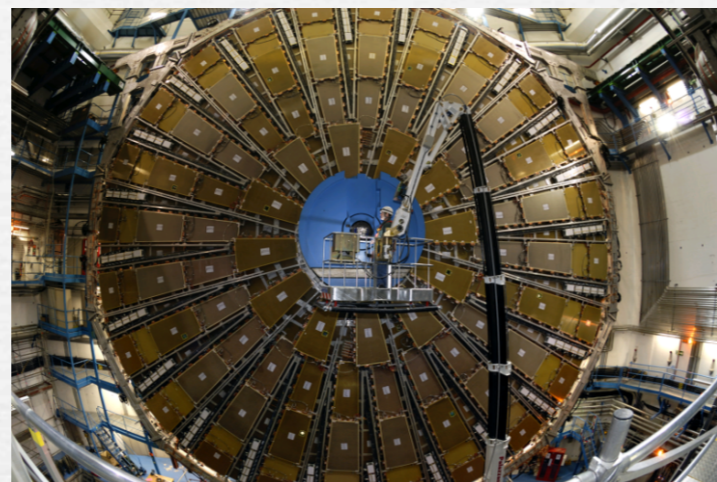
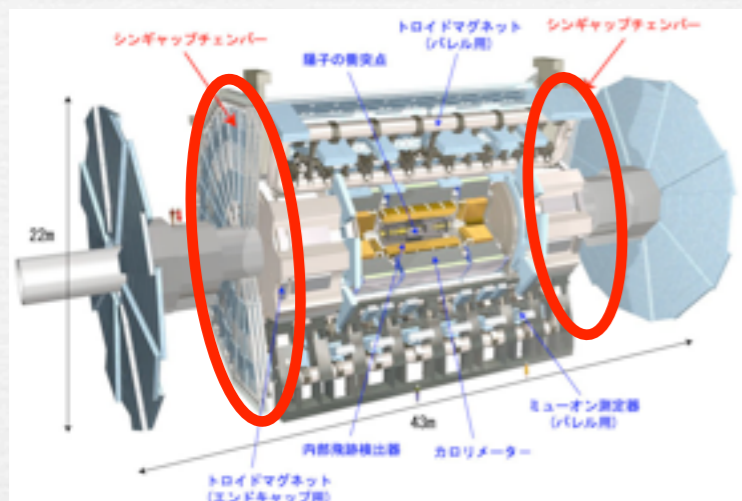


エネルギー測定器（カロリメータ）

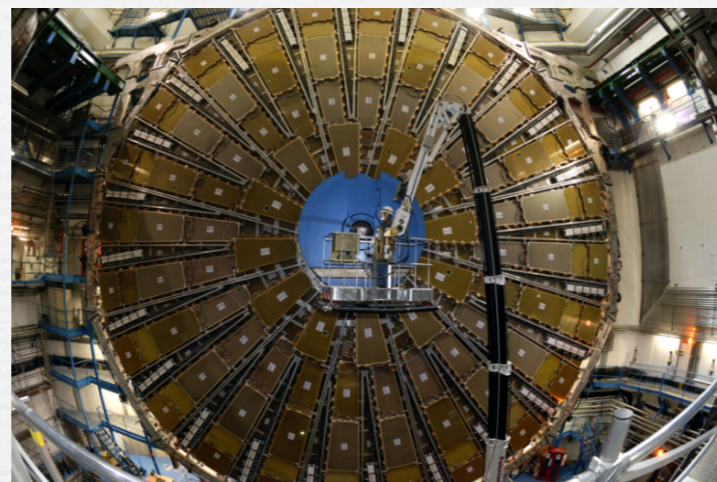
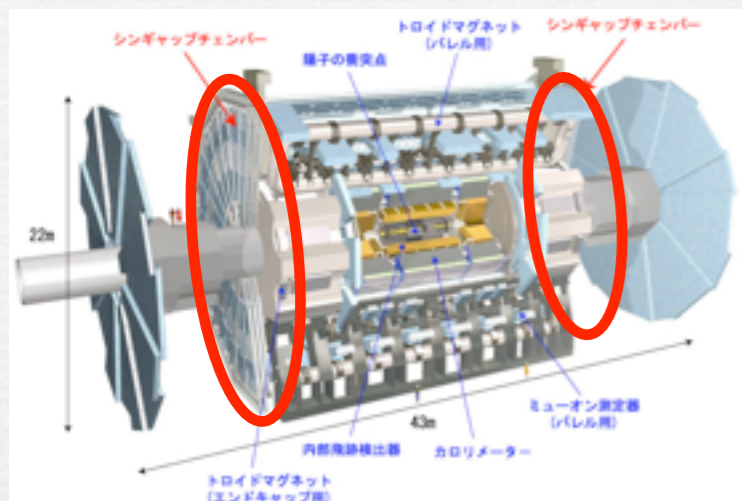
光子、電子、陽子、中性子などを物質で止める
そのとき出る光や熱を電気信号として捉える



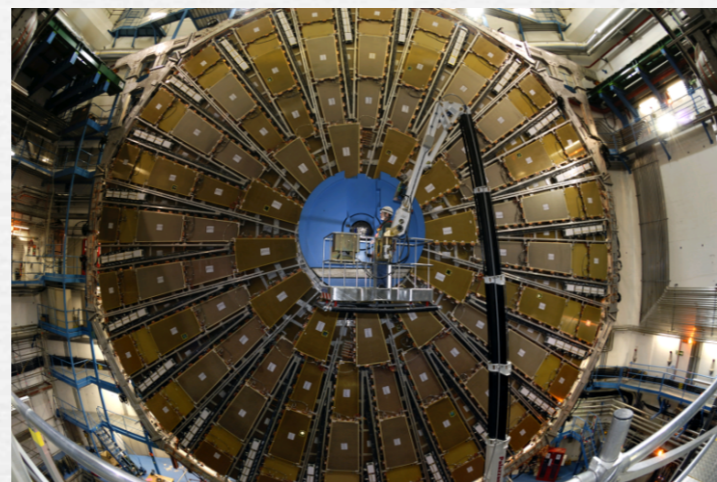
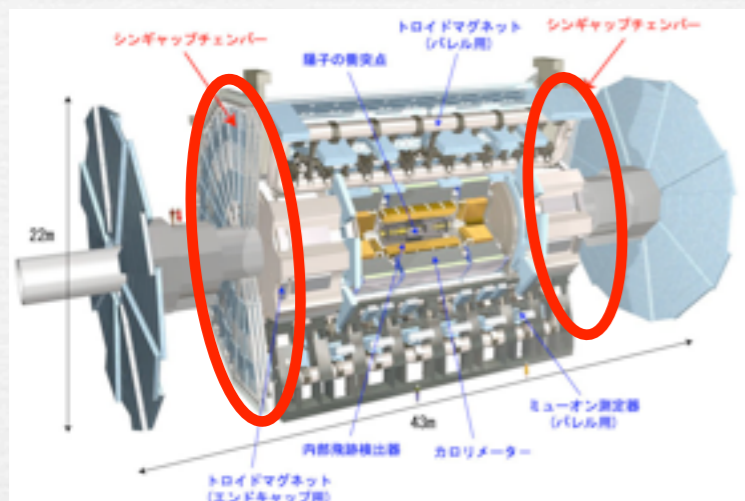
μ 粒子検出器の組み立て



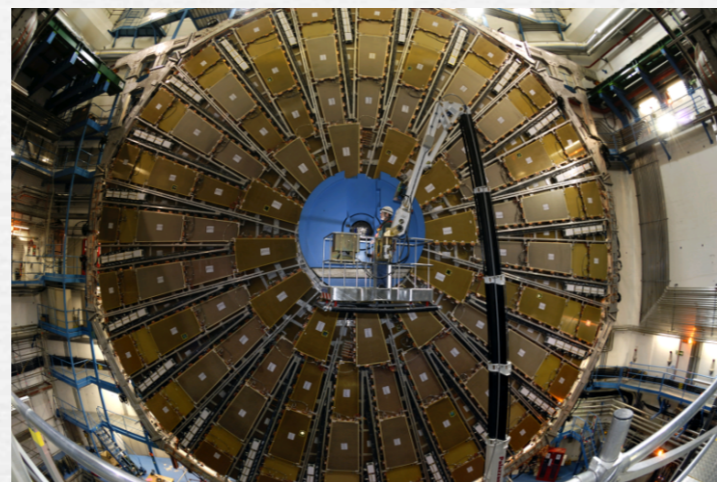
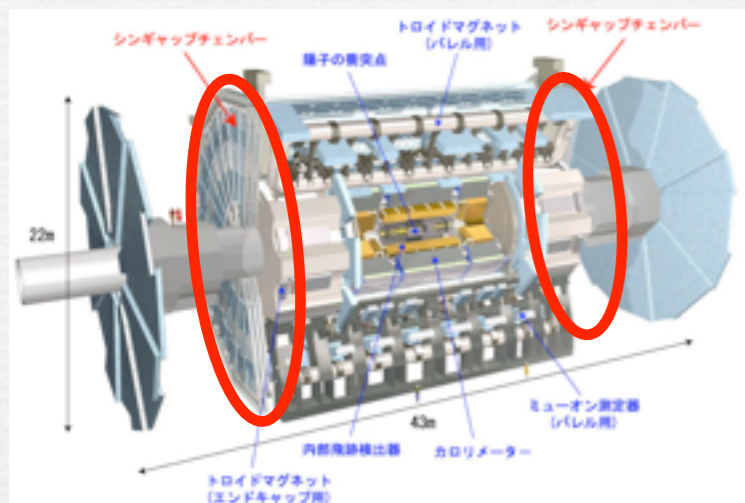
μ 粒子検出器の組み立て



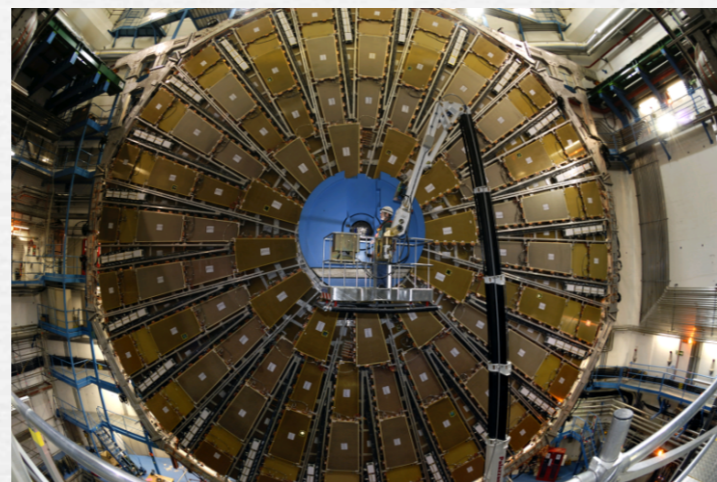
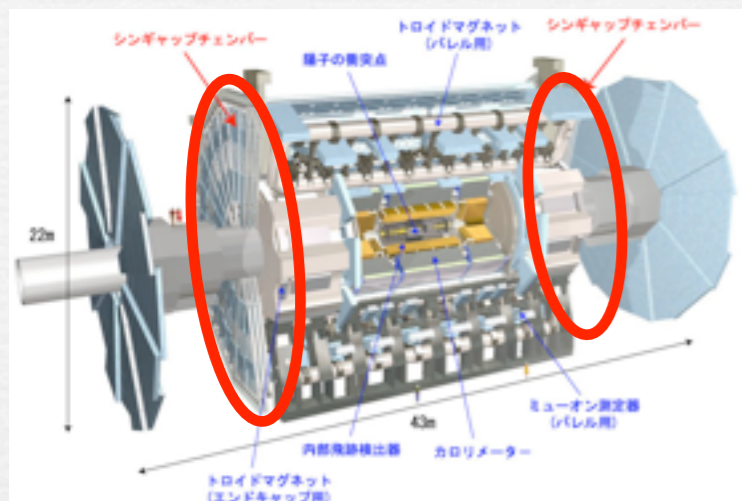
μ 粒子検出器の組み立て



μ 粒子検出器の組み立て



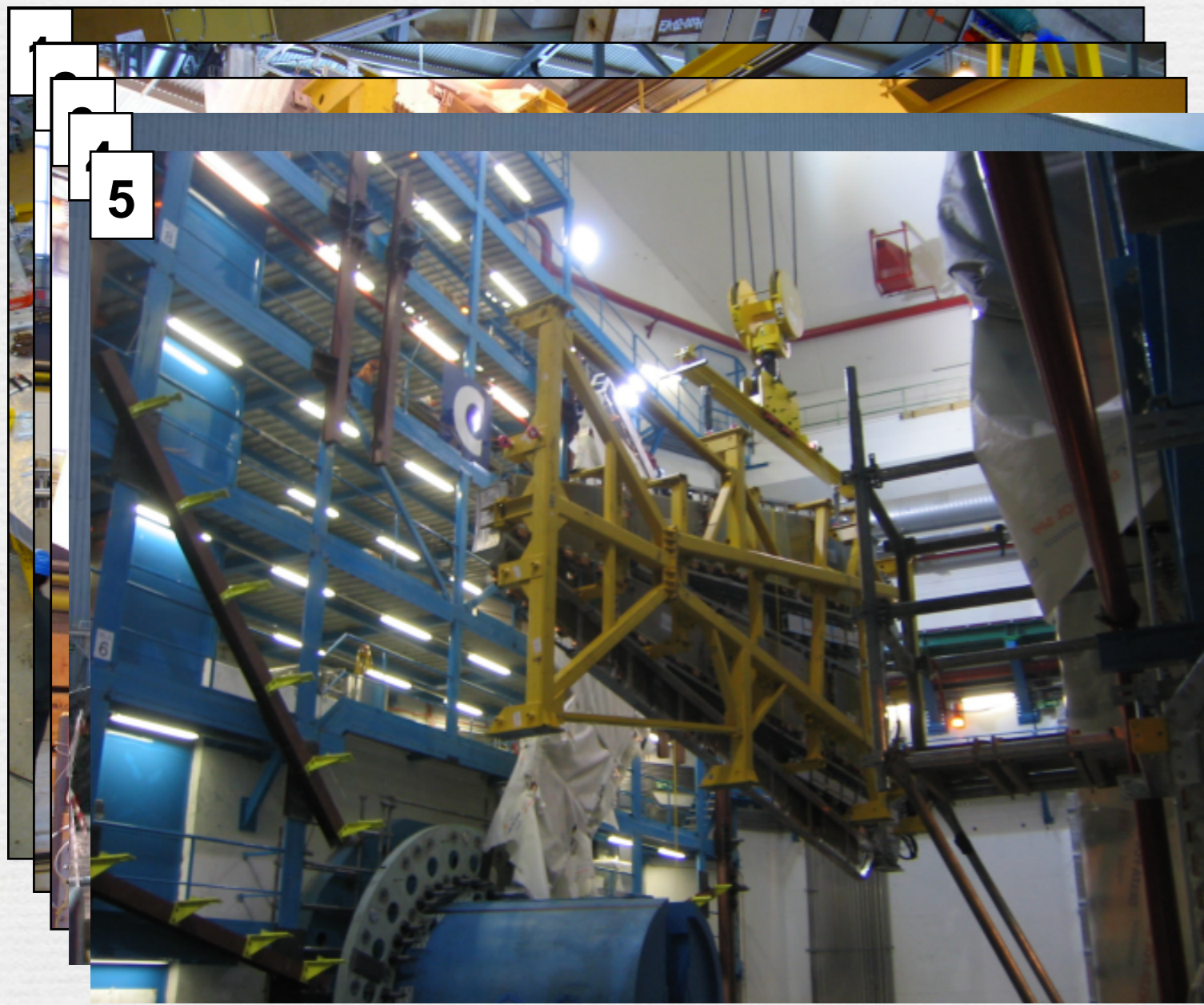
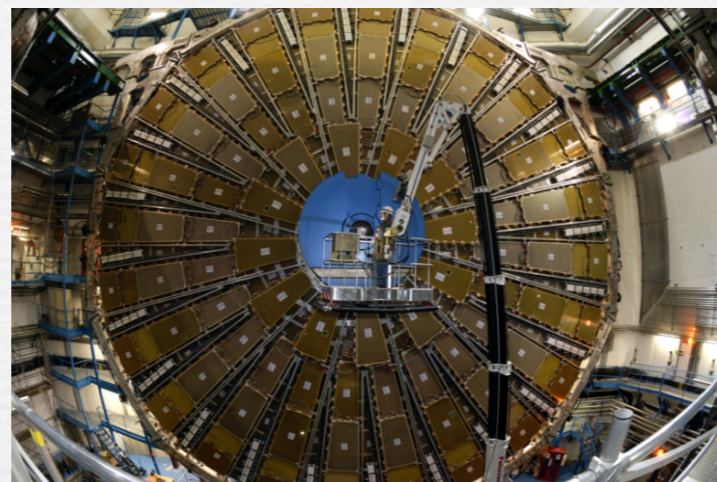
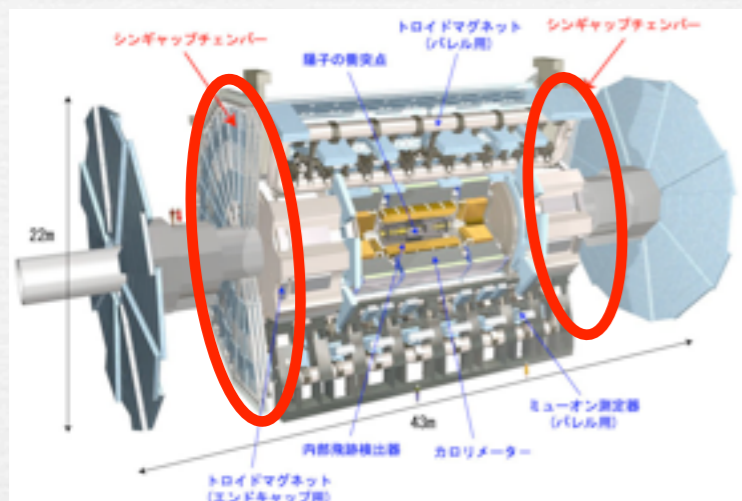
μ 粒子検出器の組み立て



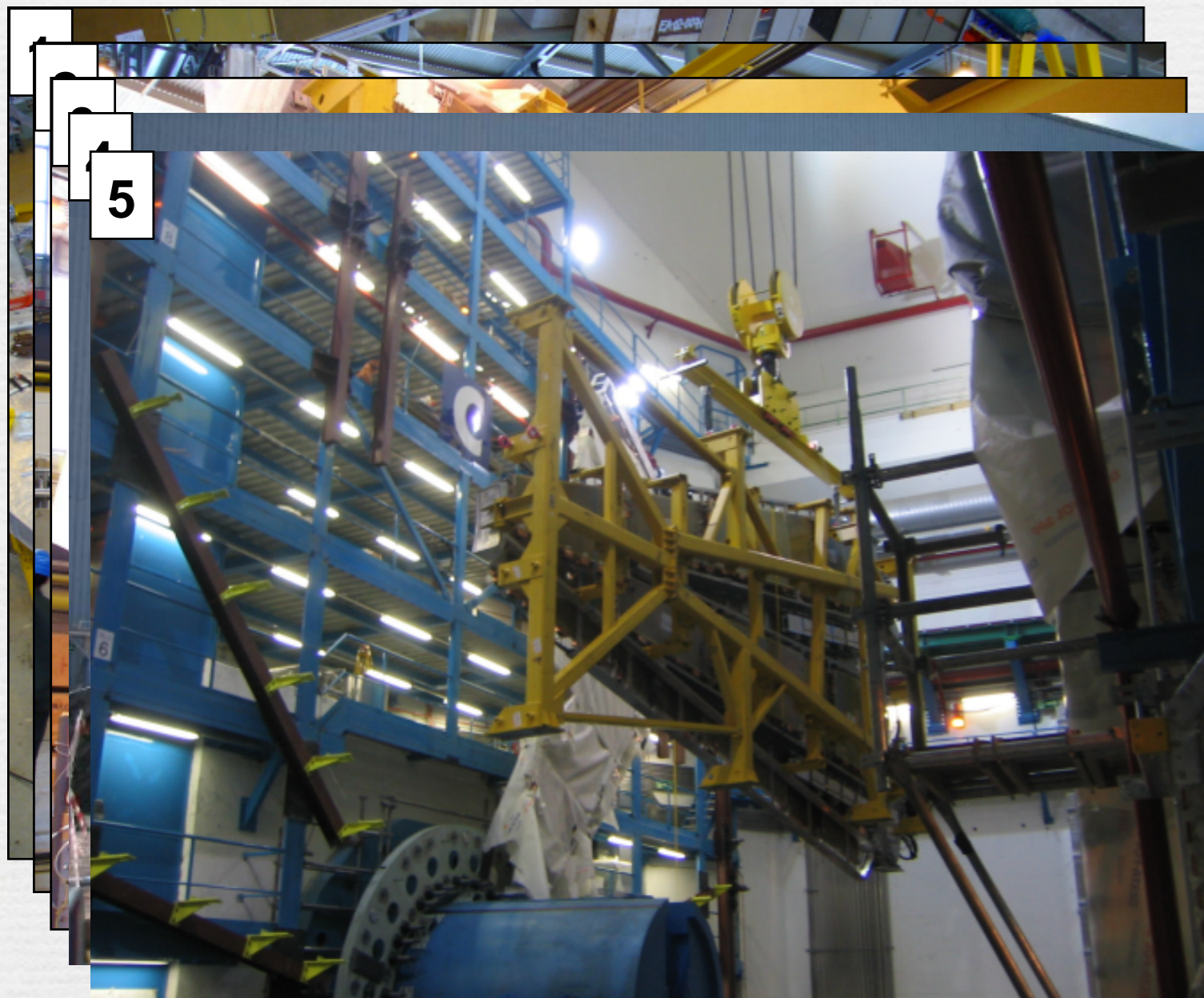
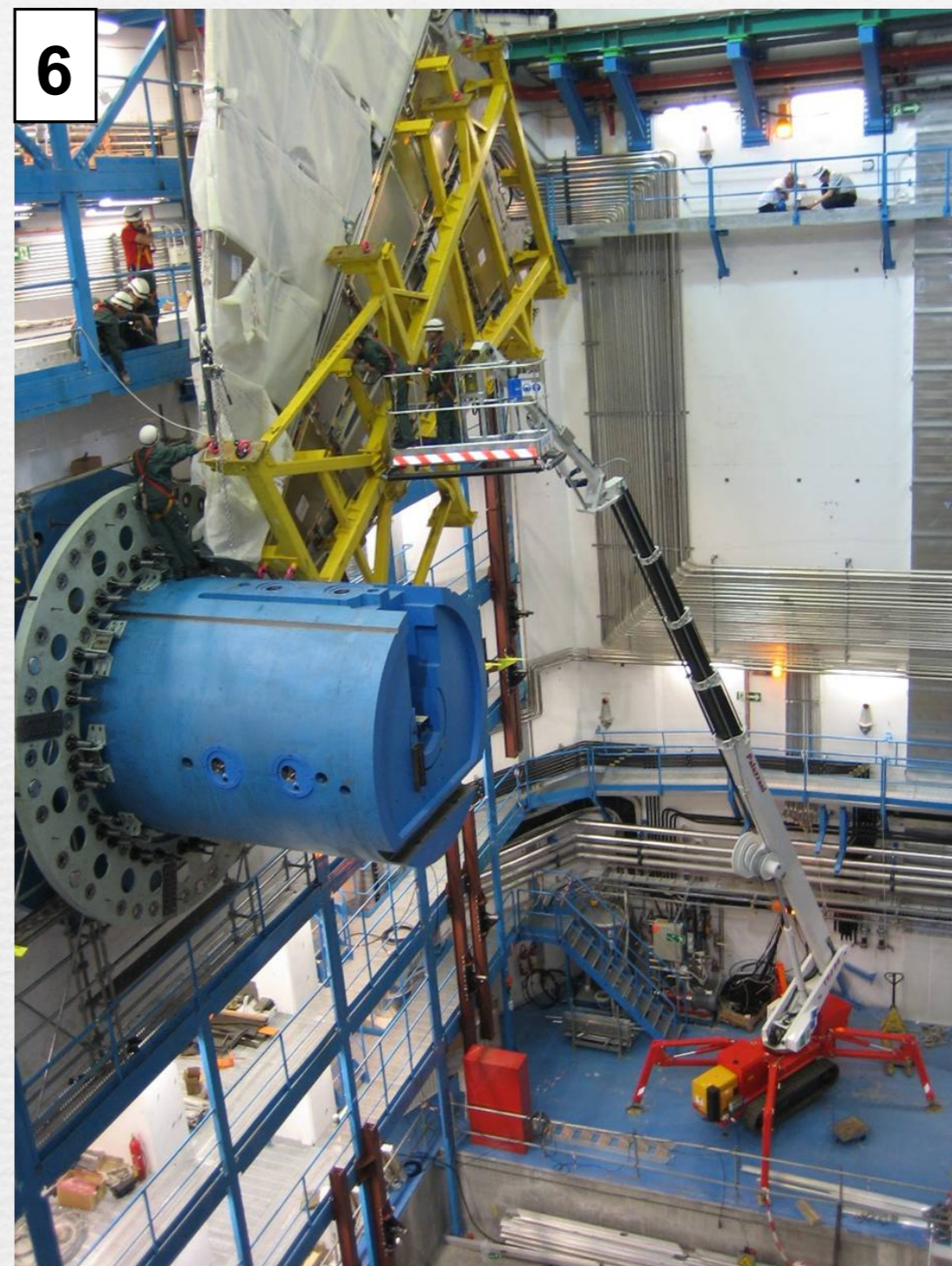
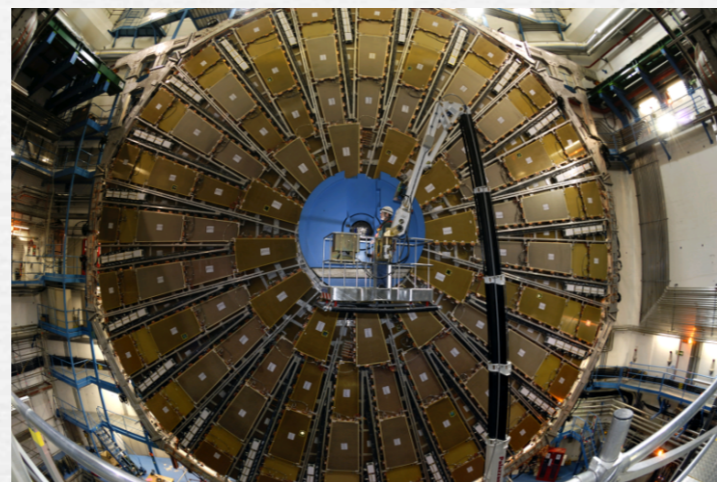
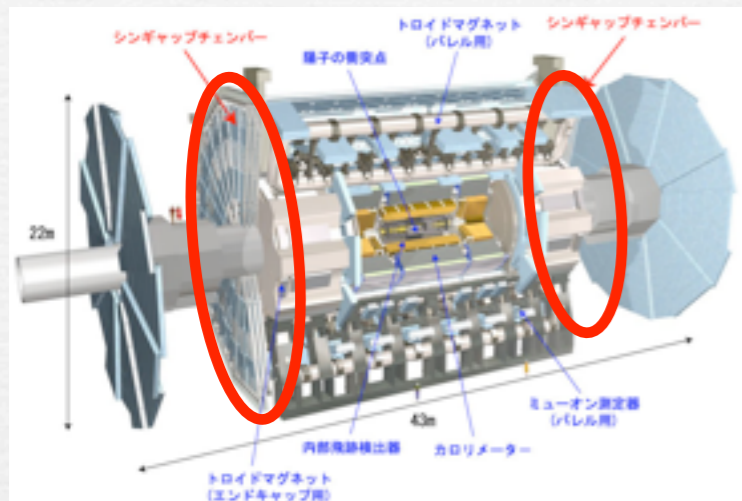
4



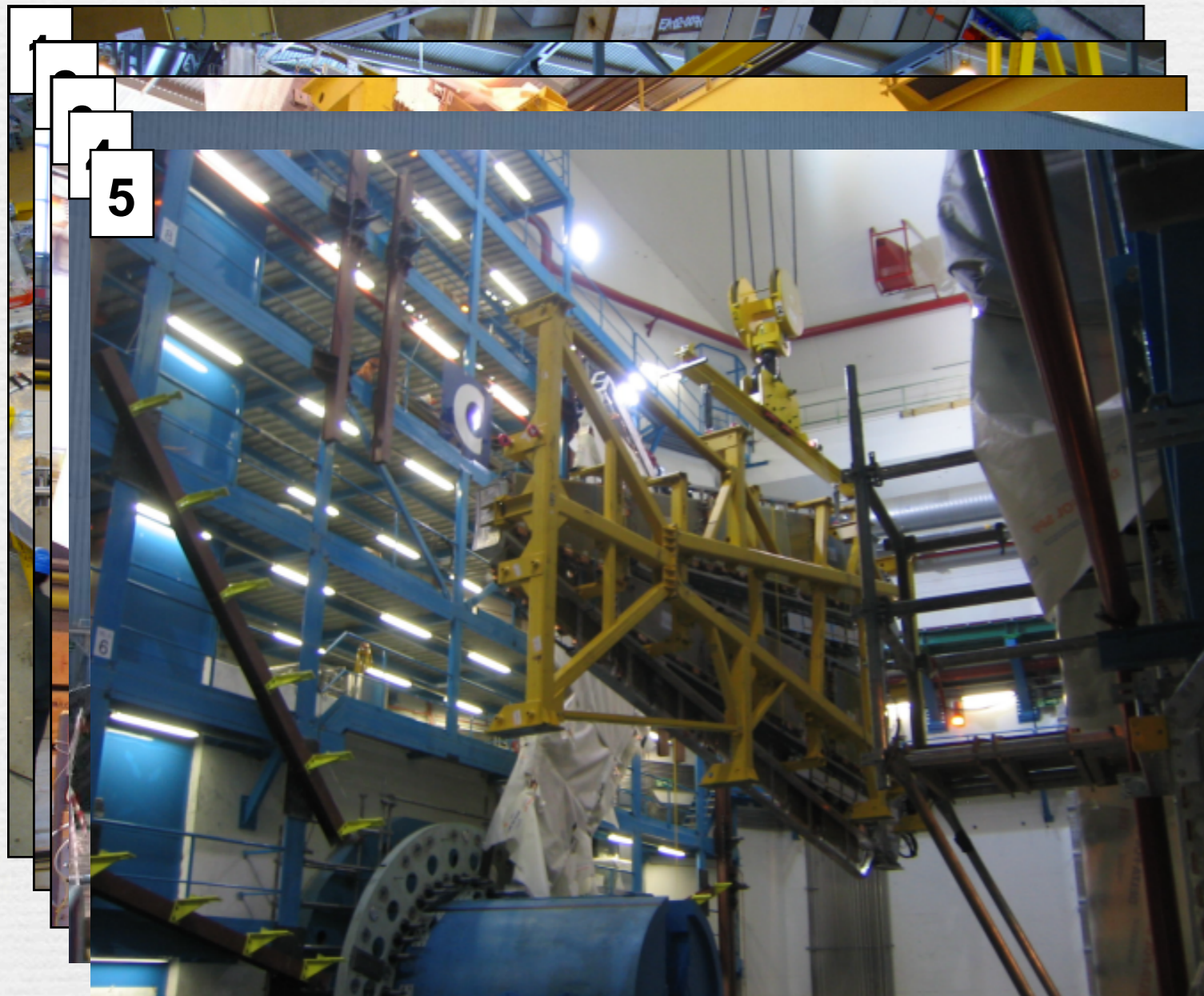
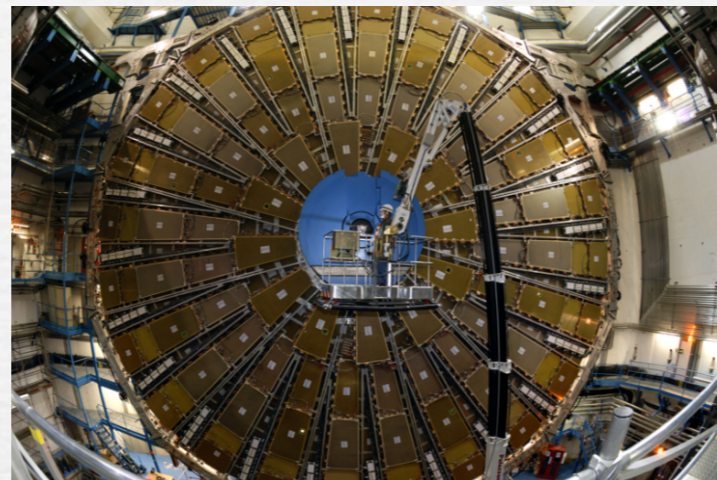
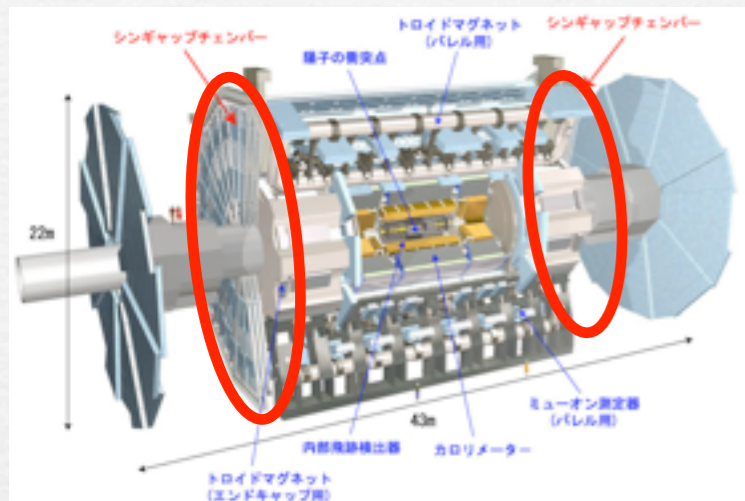
μ 粒子検出器の組み立て



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

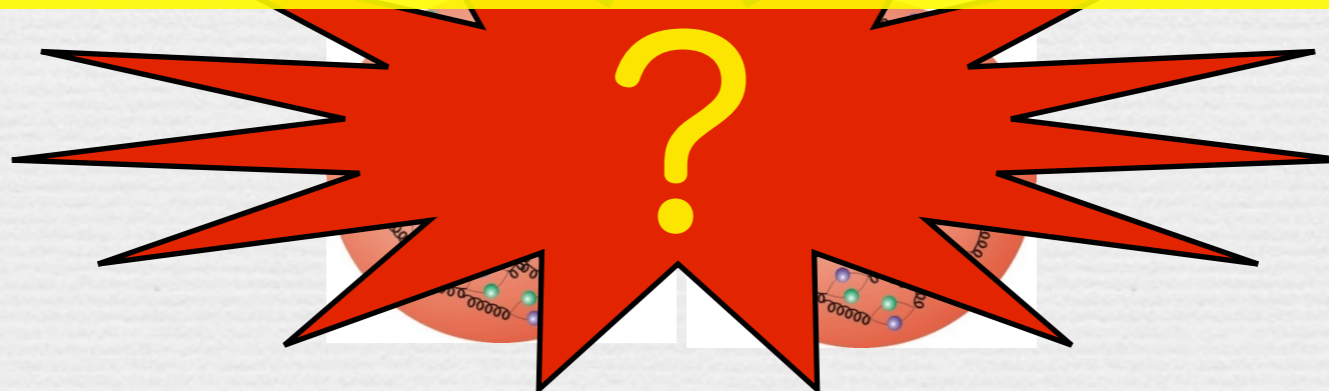
陽子・陽子衝突

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!

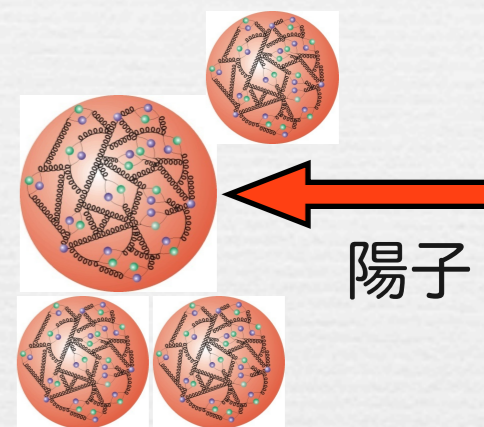
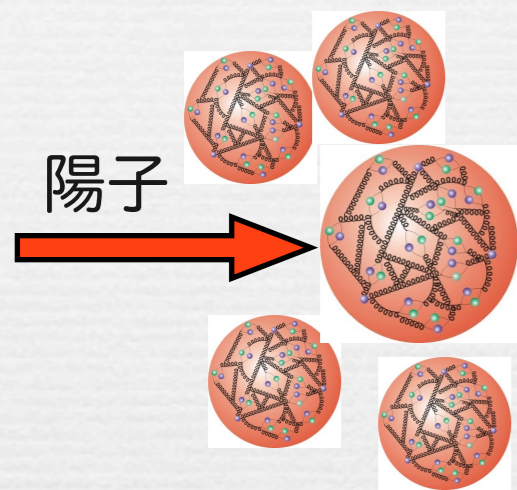
2,000兆回の陽子衝突では、40万個のヒッグス粒子が生成



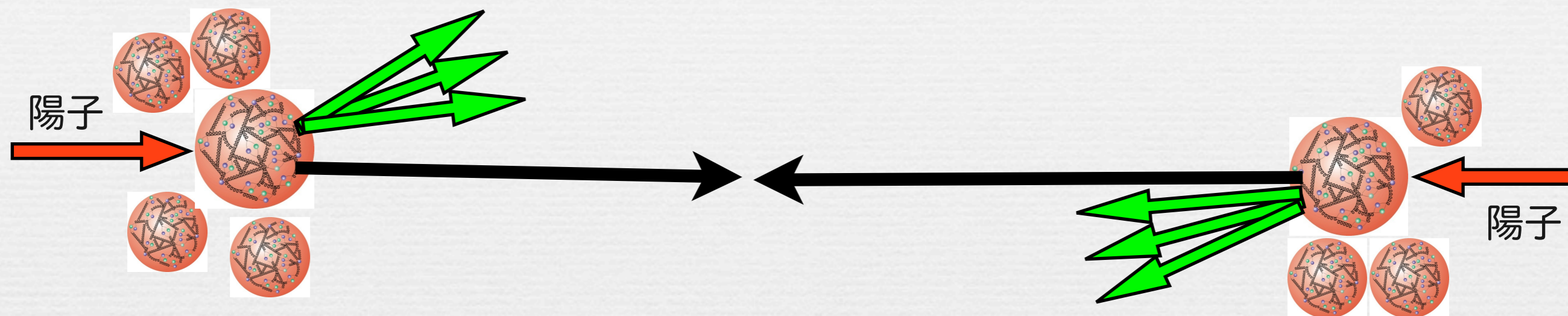
陽子同士の衝突：次の反応は予測不可能
反応の起こる確率は解る

陽子・陽子衝突

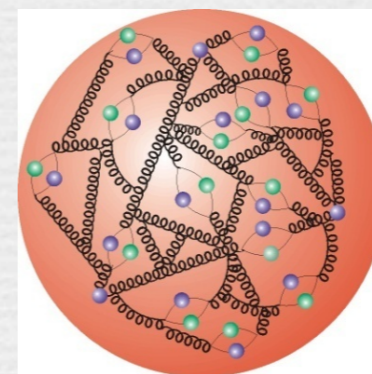
陽子・陽子衝突



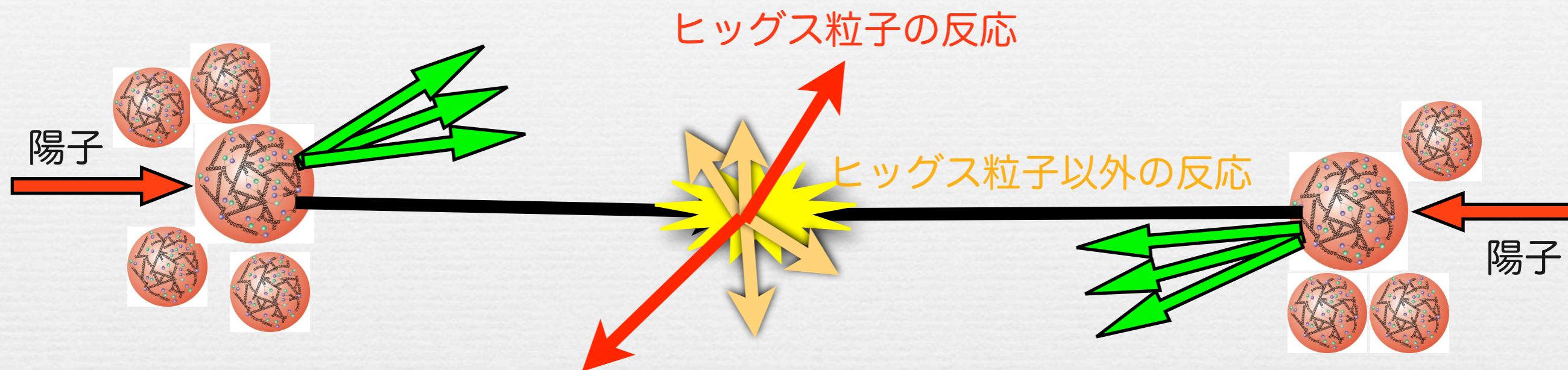
陽子・陽子衝突



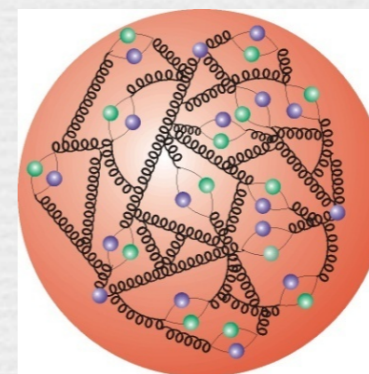
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン
一部だけが衝突による反応に関与



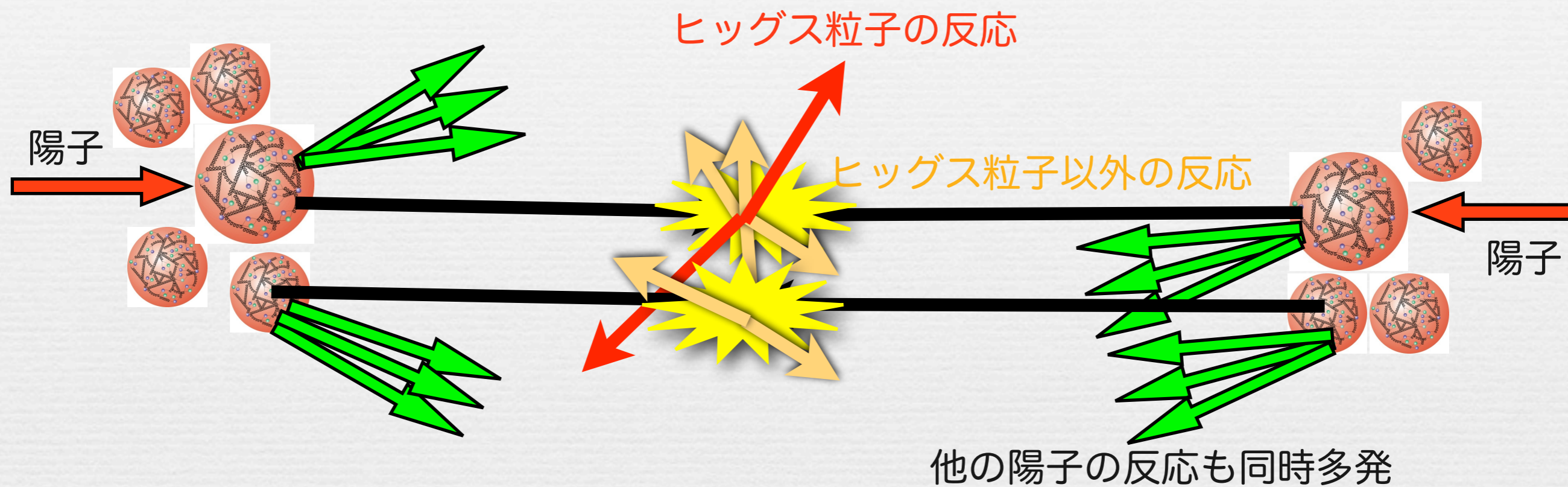
陽子・陽子衝突



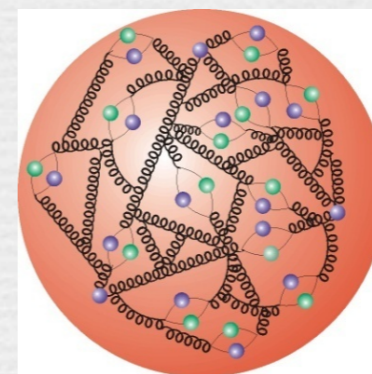
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン
一部だけが衝突による反応に関与



陽子・陽子衝突

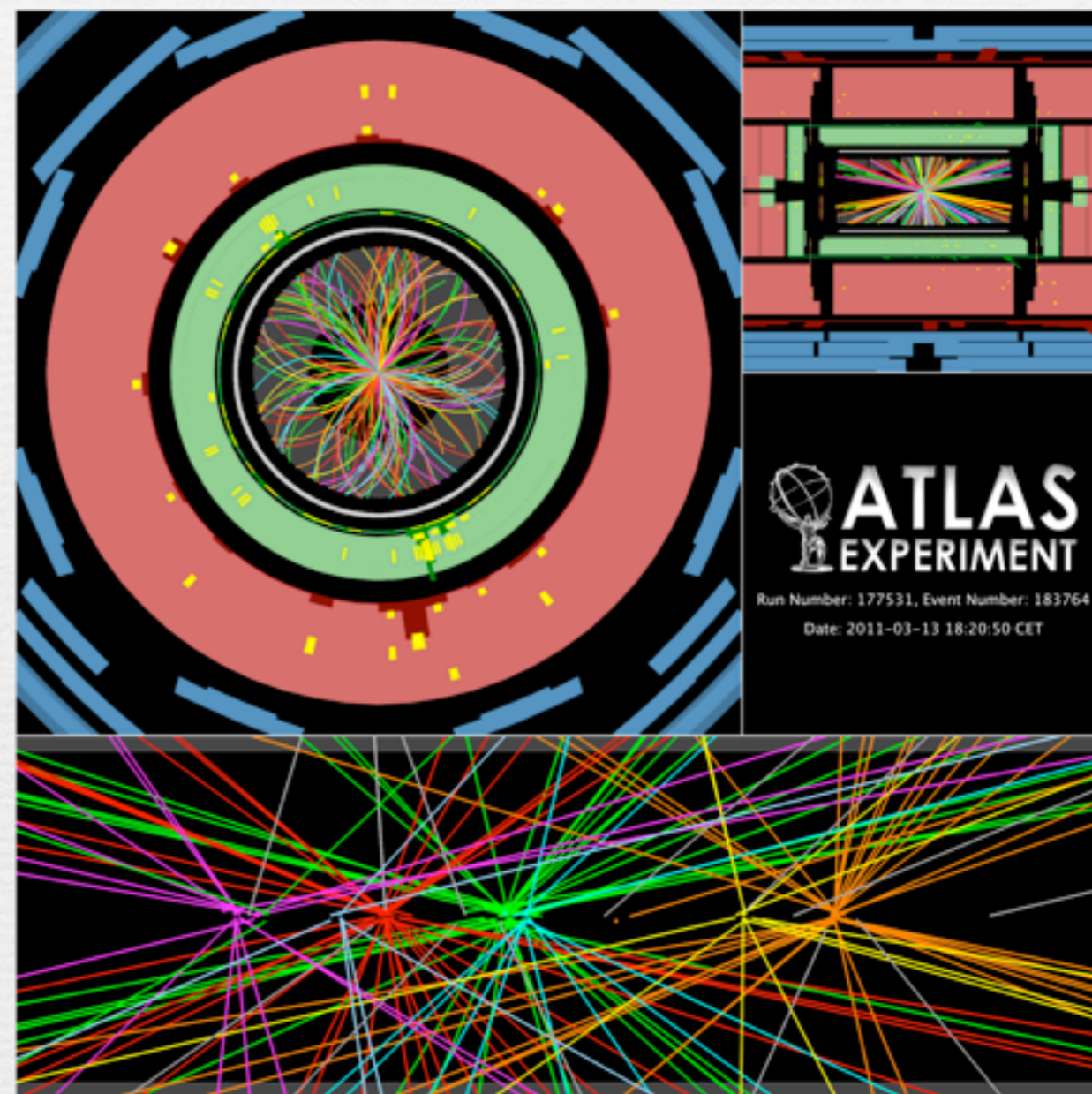
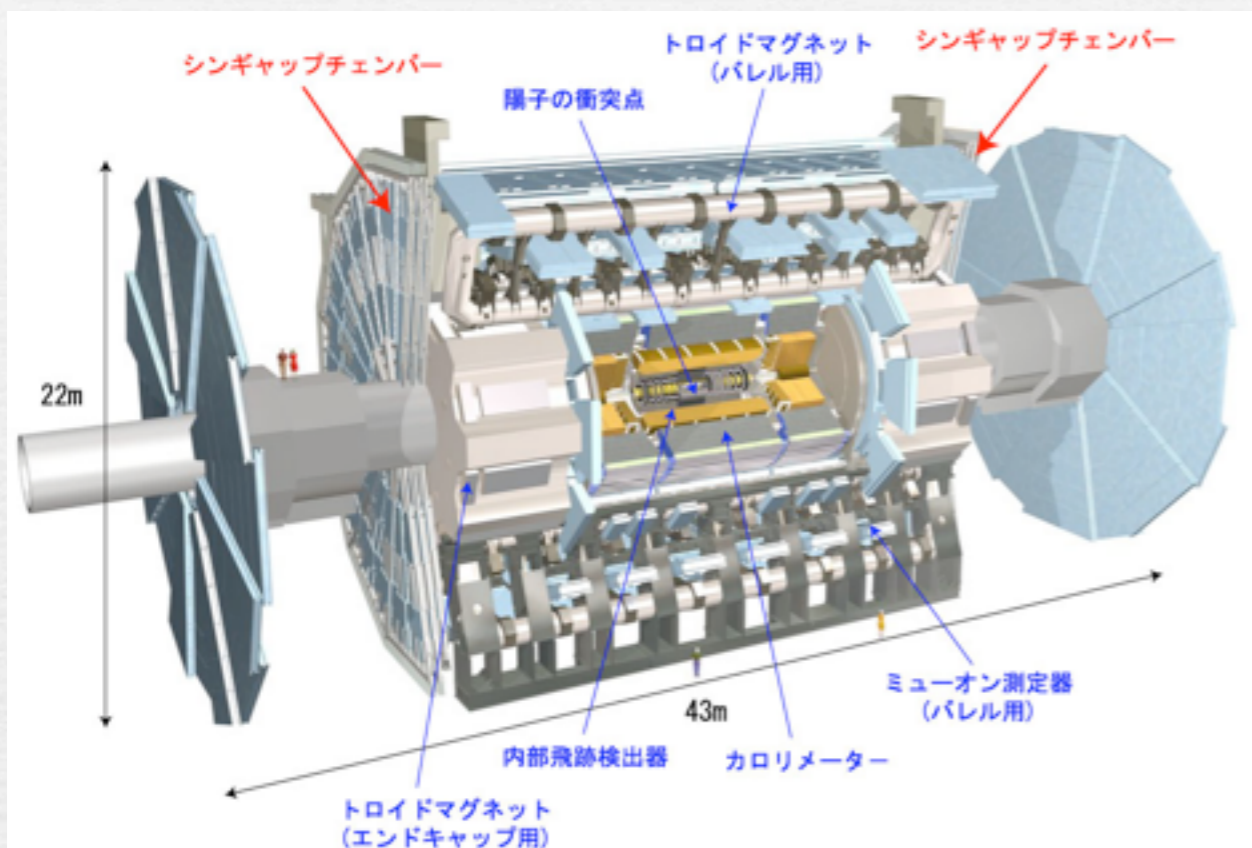


陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン
一部だけが衝突による反応に関与



実際の陽子陽子衝突反応

全ての反応は、無数の安定粒子になる



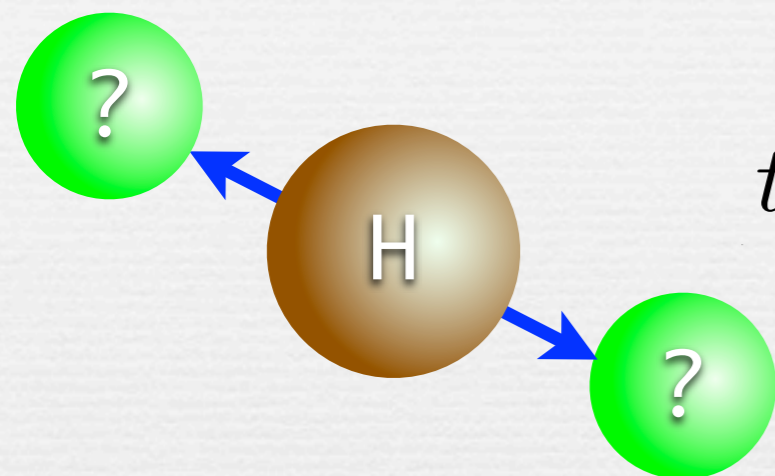
ヒッグス粒子の見つけ方：

2000兆回の陽子衝突から、

1. ヒッグス粒子による反応だと思われるものを選ぶ
2. 選んだ反応の中に、本物があることが立証する

ヒッグス粒子は何に化けるか？

ヒッグス粒子は、質量の大きな素粒子ほど反応しやすい



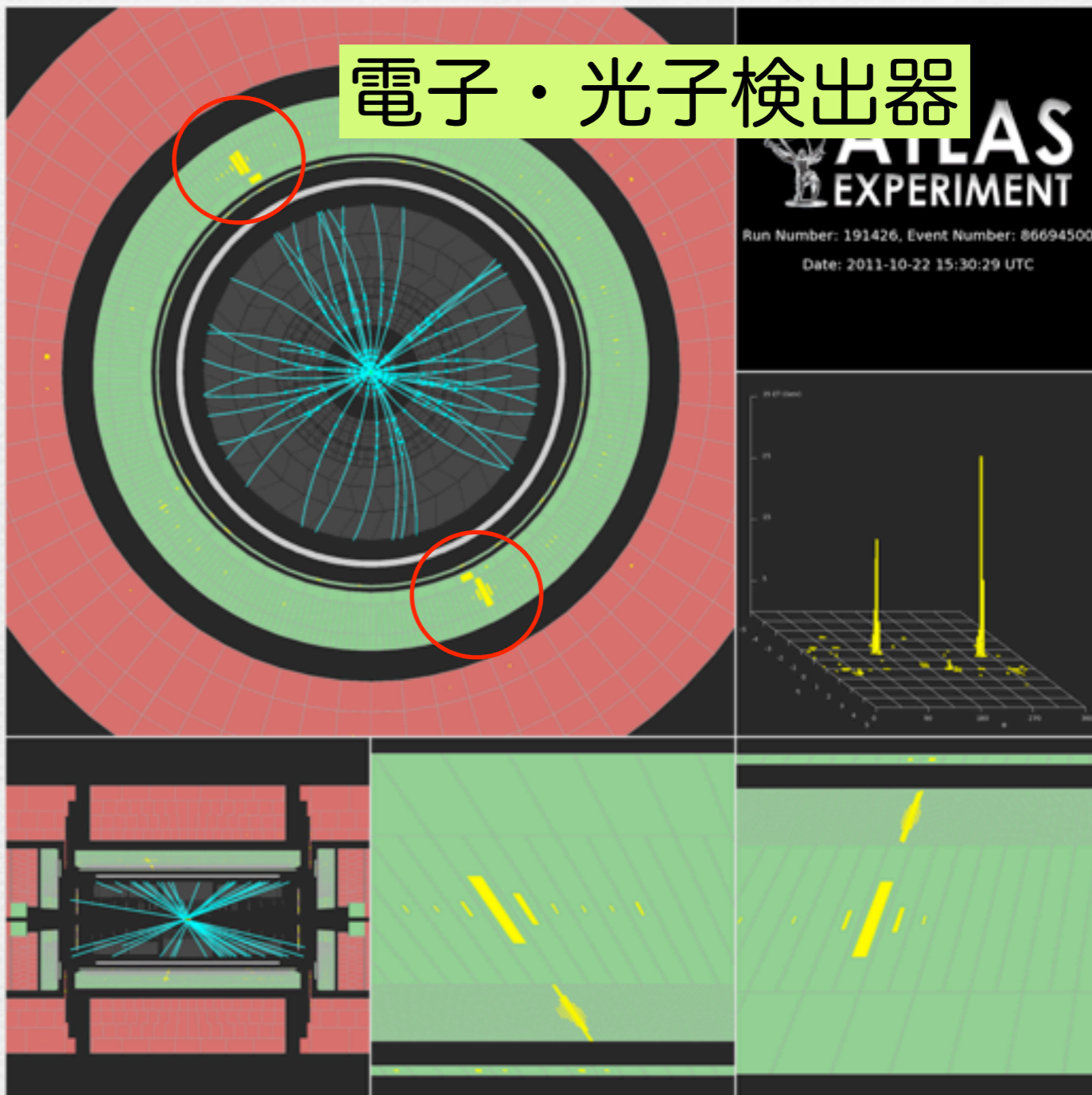
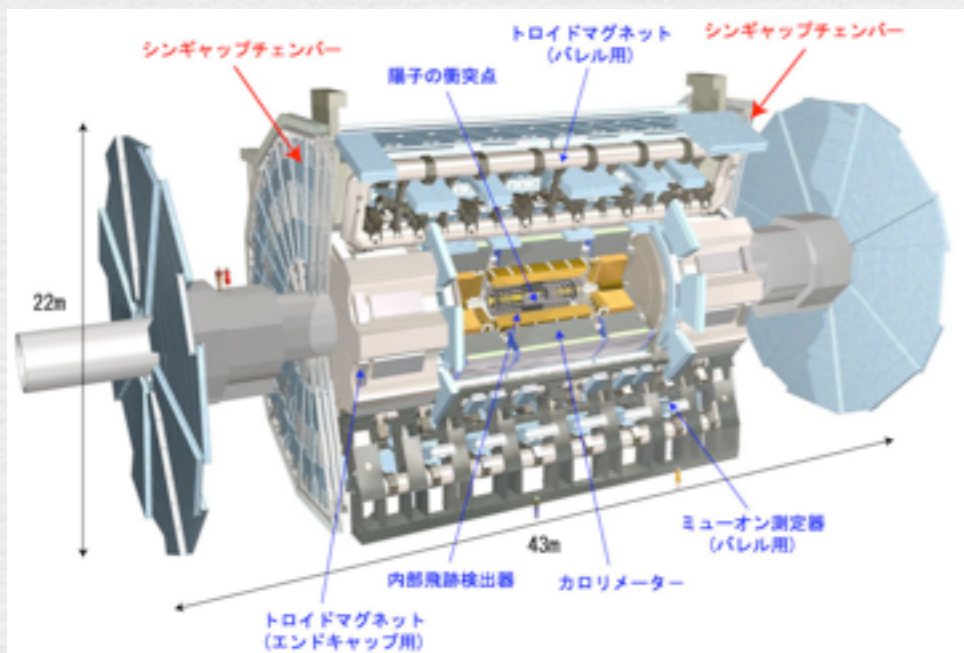
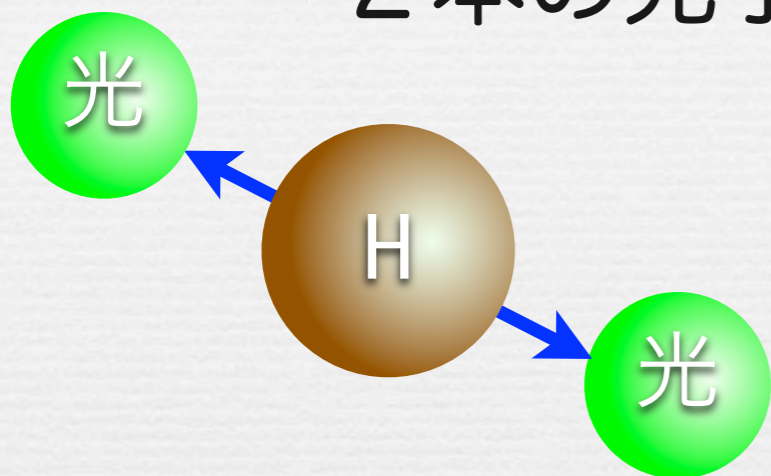
$t\bar{t}$, ZZ , W^+W^- , $b\bar{b}$, $\tau^+\tau^-$, ... 光子 光子

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



偽物：

陽子 + 陽子 → 光子 光子

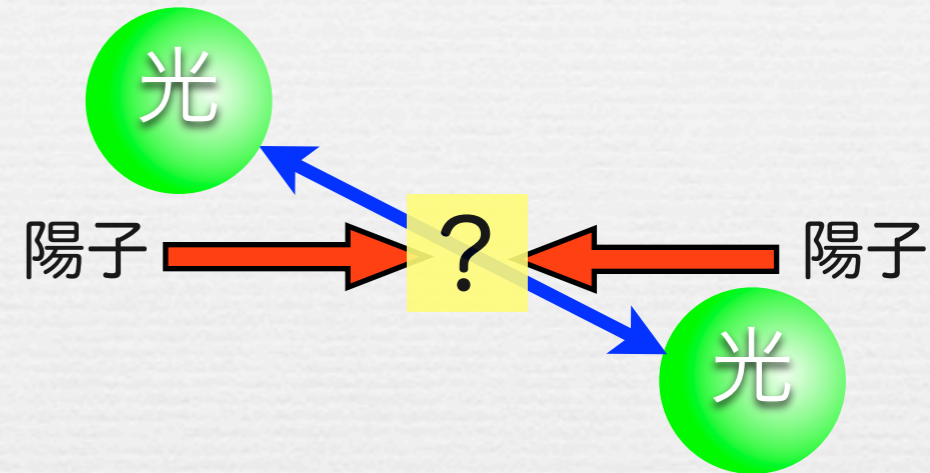
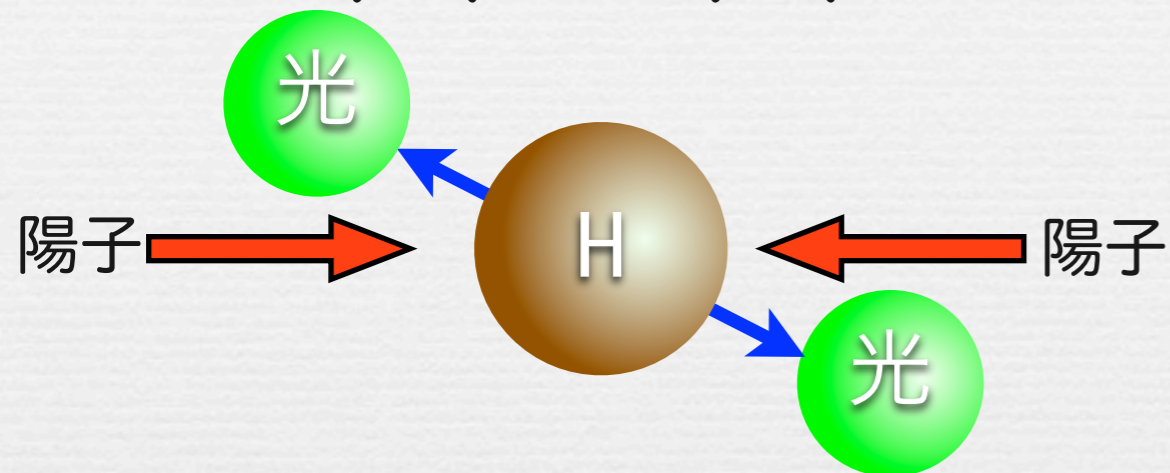
光のエネルギー、運動量を検出器で測定

質量の復元

親子の関係を知る式： $(\text{子のエネルギー和})^2 - (\text{子の運動量和})^2$

本物：H(親)→光(子)が2つ

偽物：陽子陽子衝突→光が2つ



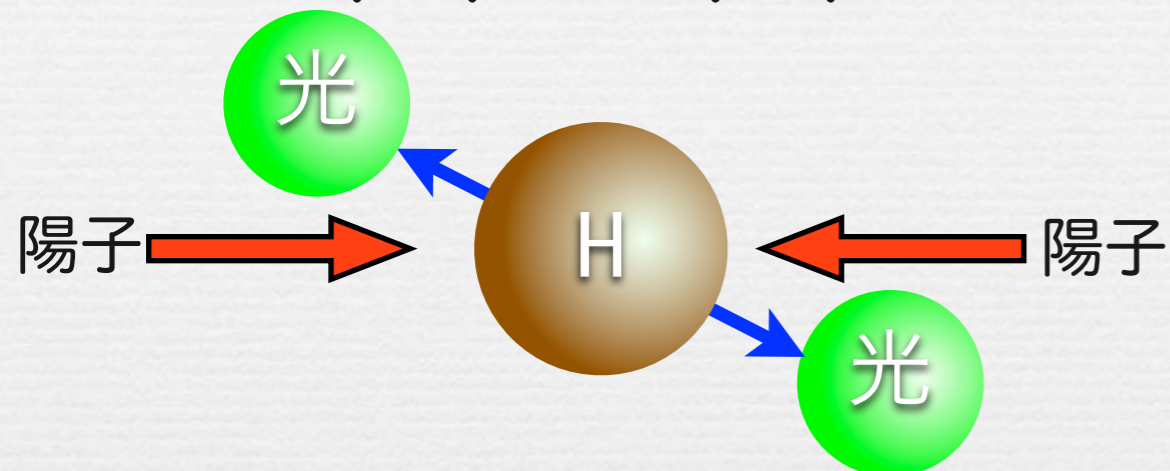
親子の関係=  の質量²

親子の関係式=適当な値

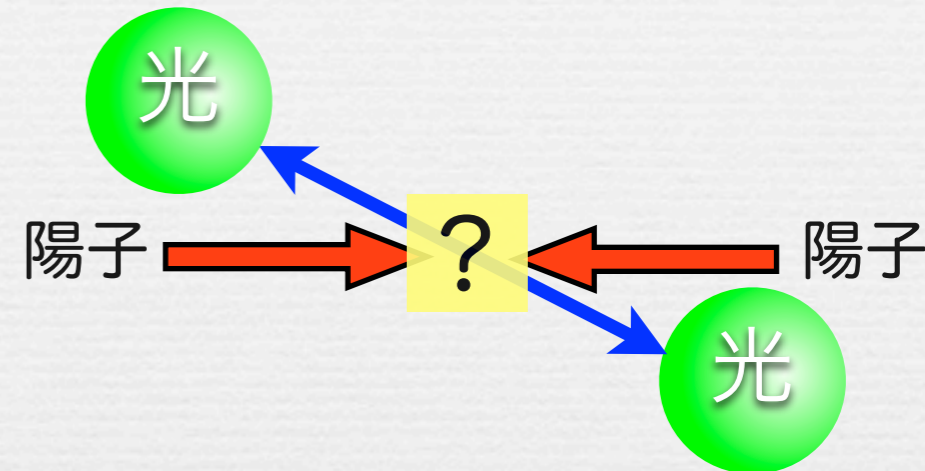
質量の復元

親子の関係を知る式： $(\text{子のエネルギー和})^2 - (\text{子の運動量和})^2$

本物：H(親)→光(子)が2つ

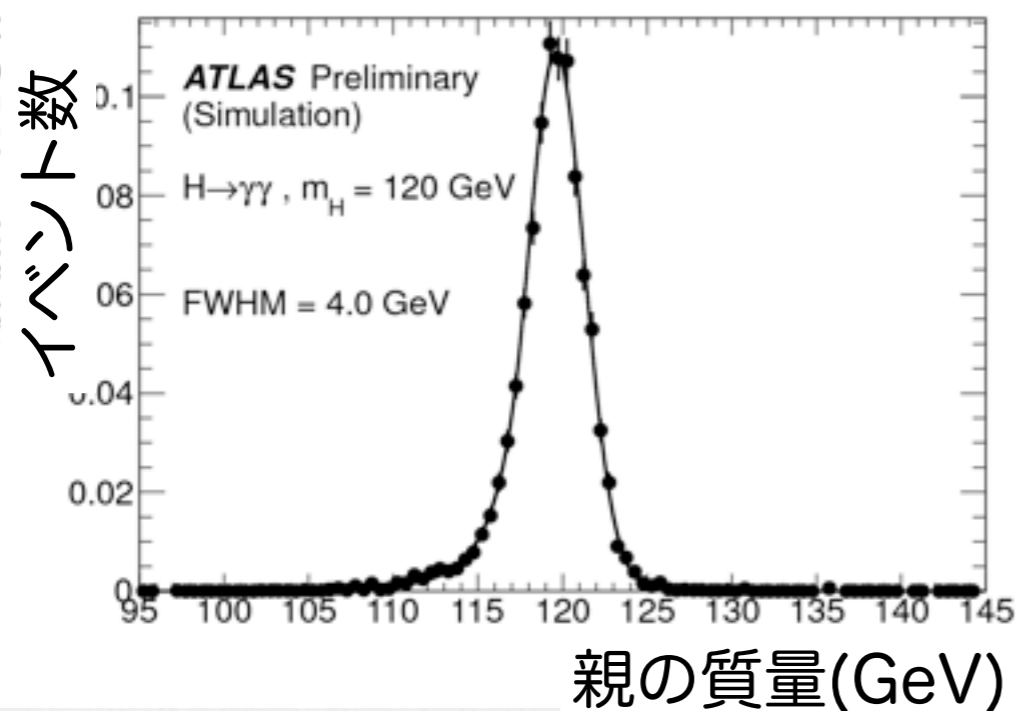


偽物：陽子陽子衝突→光が2つ



親子の関係=  の質量²

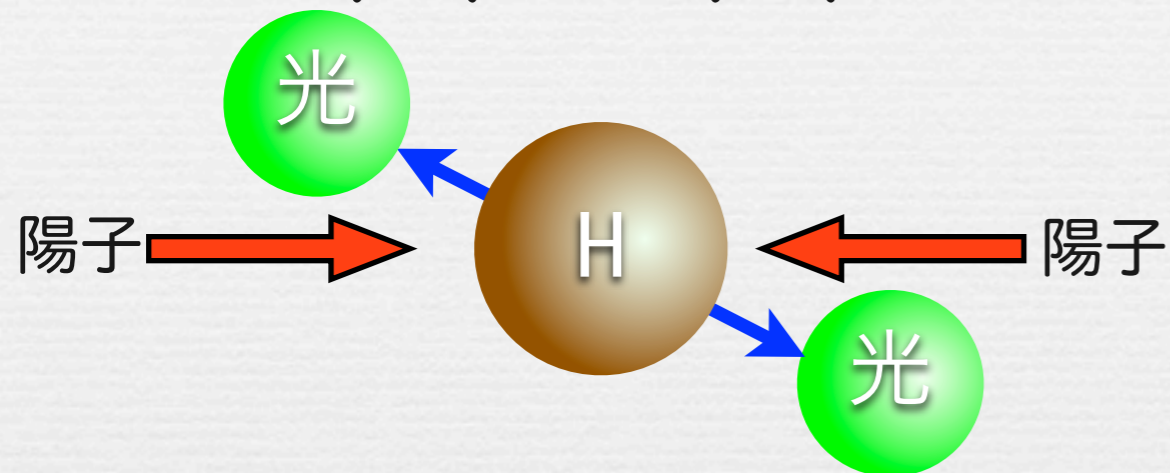
親子の関係式=適当な値



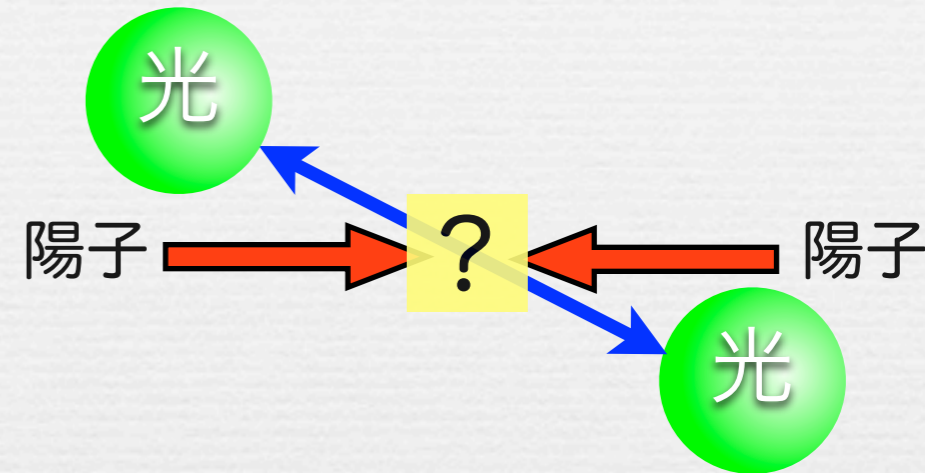
質量の復元

親子の関係を知る式： $(\text{子のエネルギー和})^2 - (\text{子の運動量和})^2$

本物：H(親)→光(子)が2つ

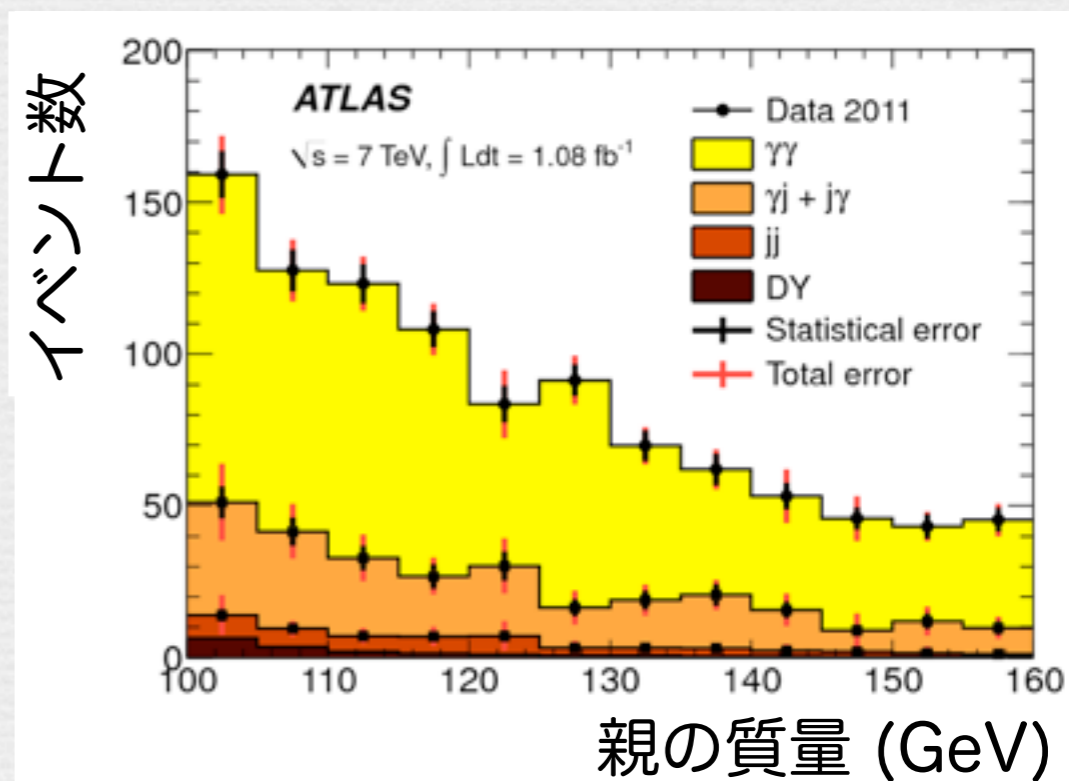
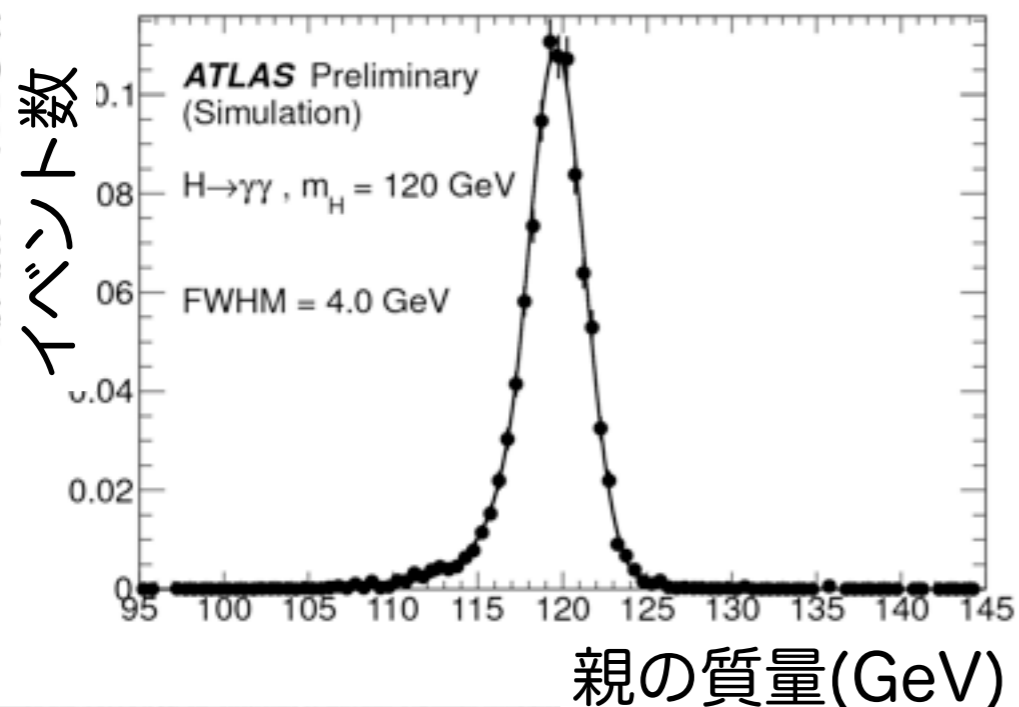


偽物：陽子陽子衝突→光が2つ



親子の関係式 = H の質量²

親子の関係式 = 適当な値



質量の復元

親子の関係:

本物: H(親)

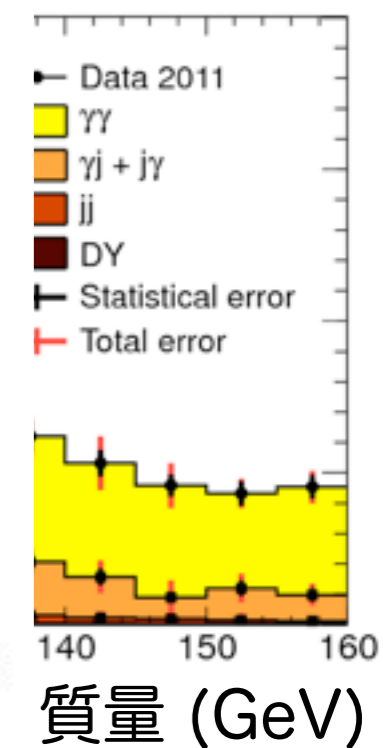


(運動量和)²

→ 光が2つ

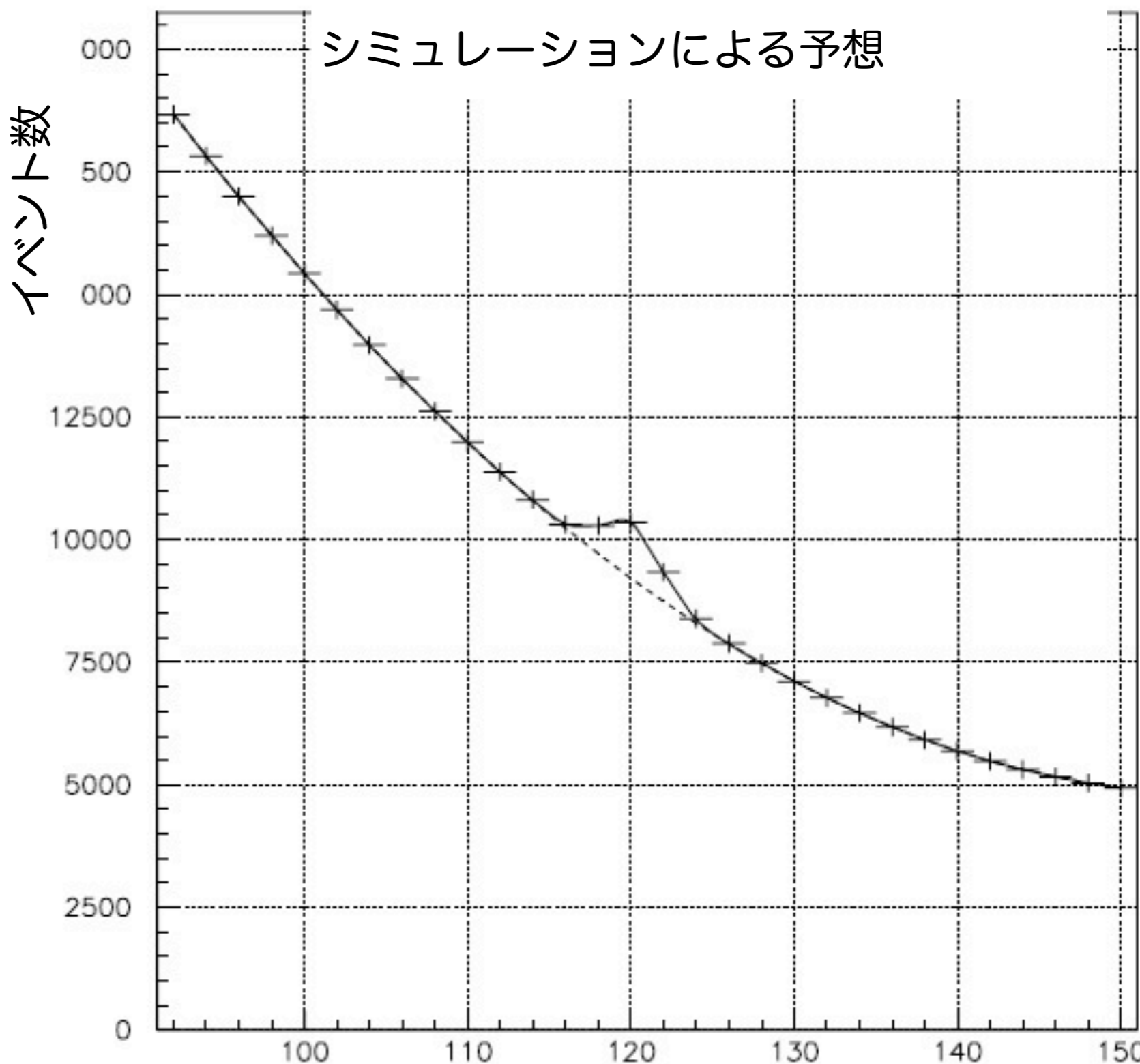


適当な値



M_H = 120 GeV

シミュレーションによる予想

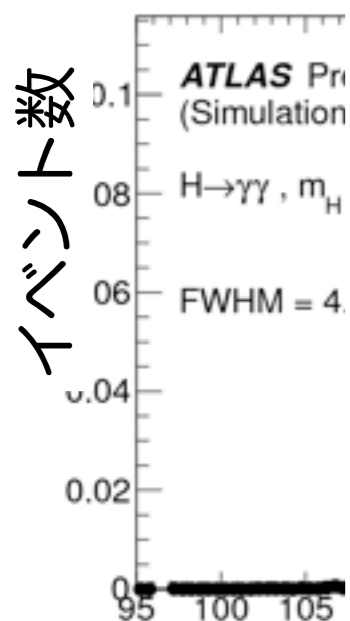


母の質量 (GeV)

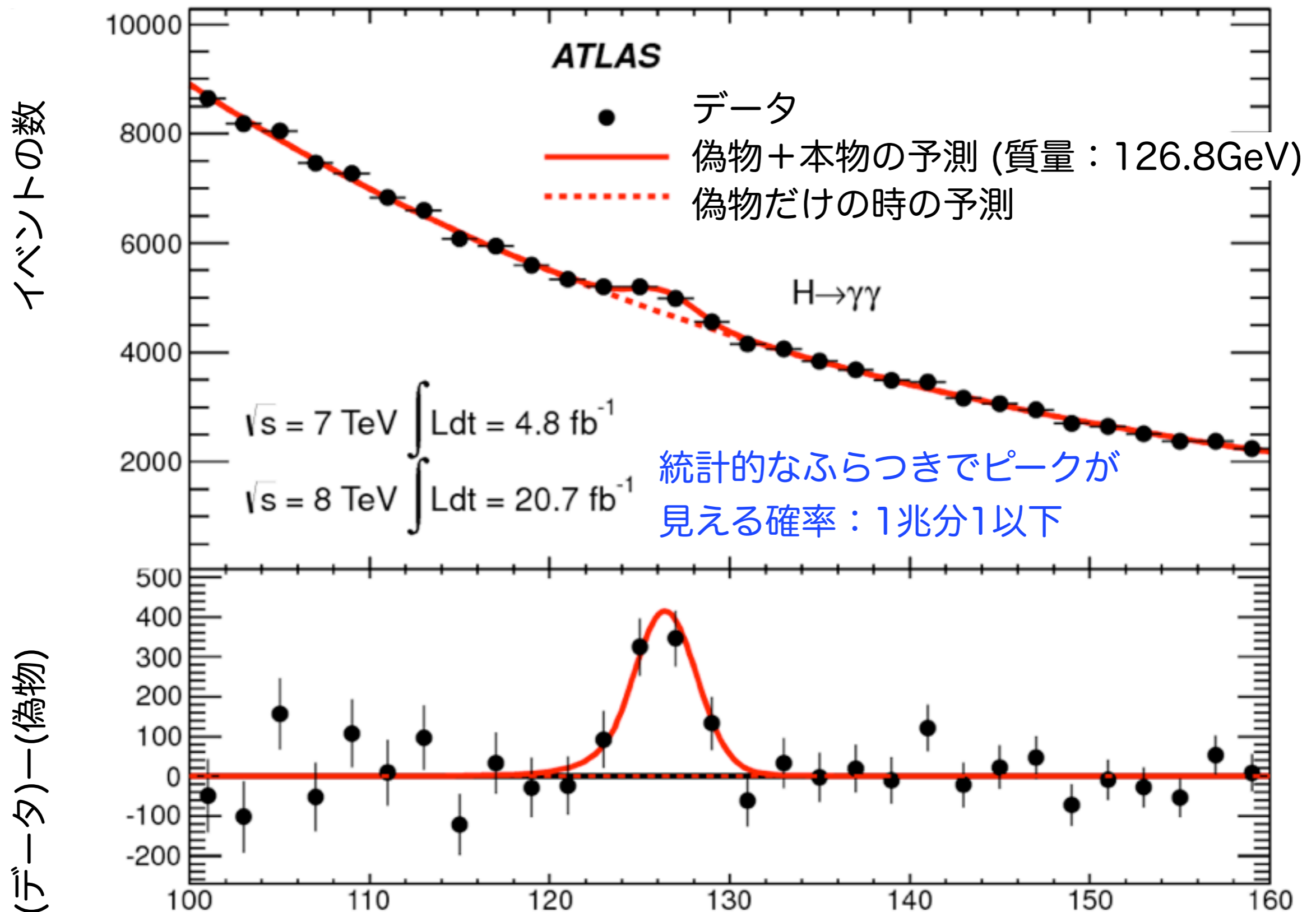
質量 (GeV)

親子の関係:

イベント数



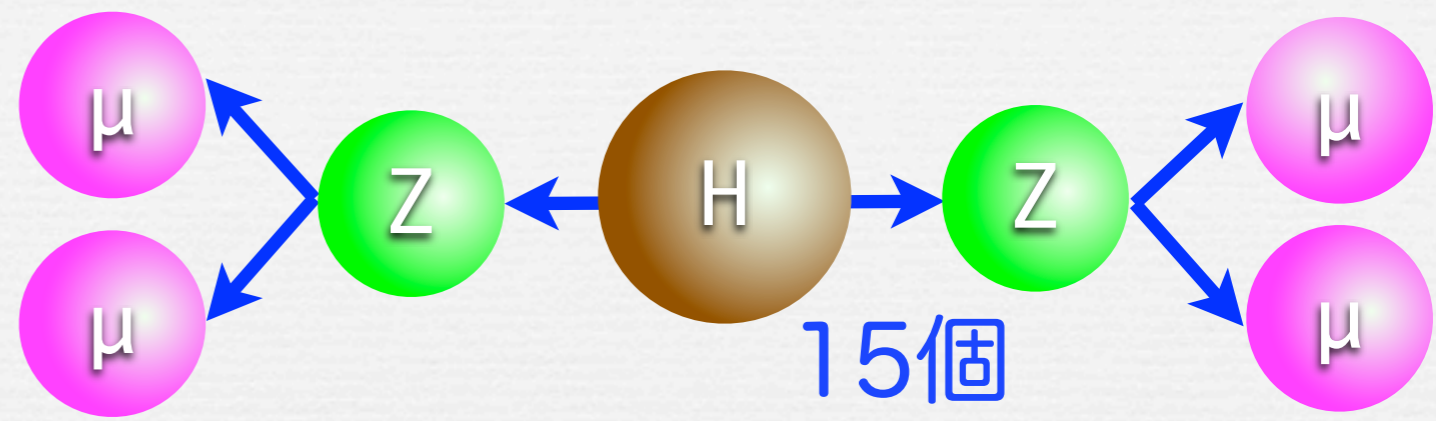
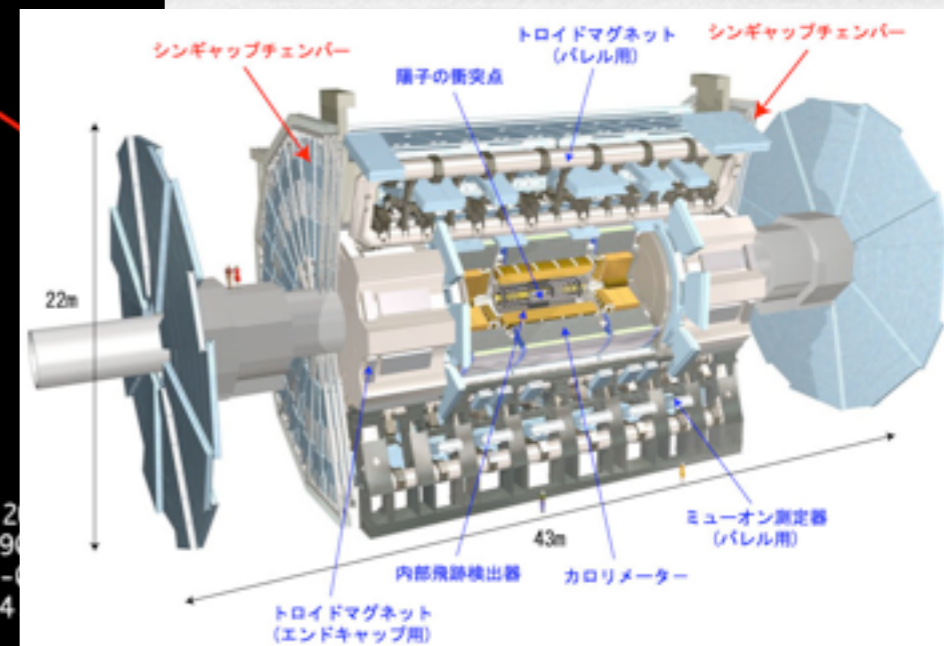
実際のデータ(H \rightarrow 光子光子)



2つの光子から計算した親の質量(GeV)

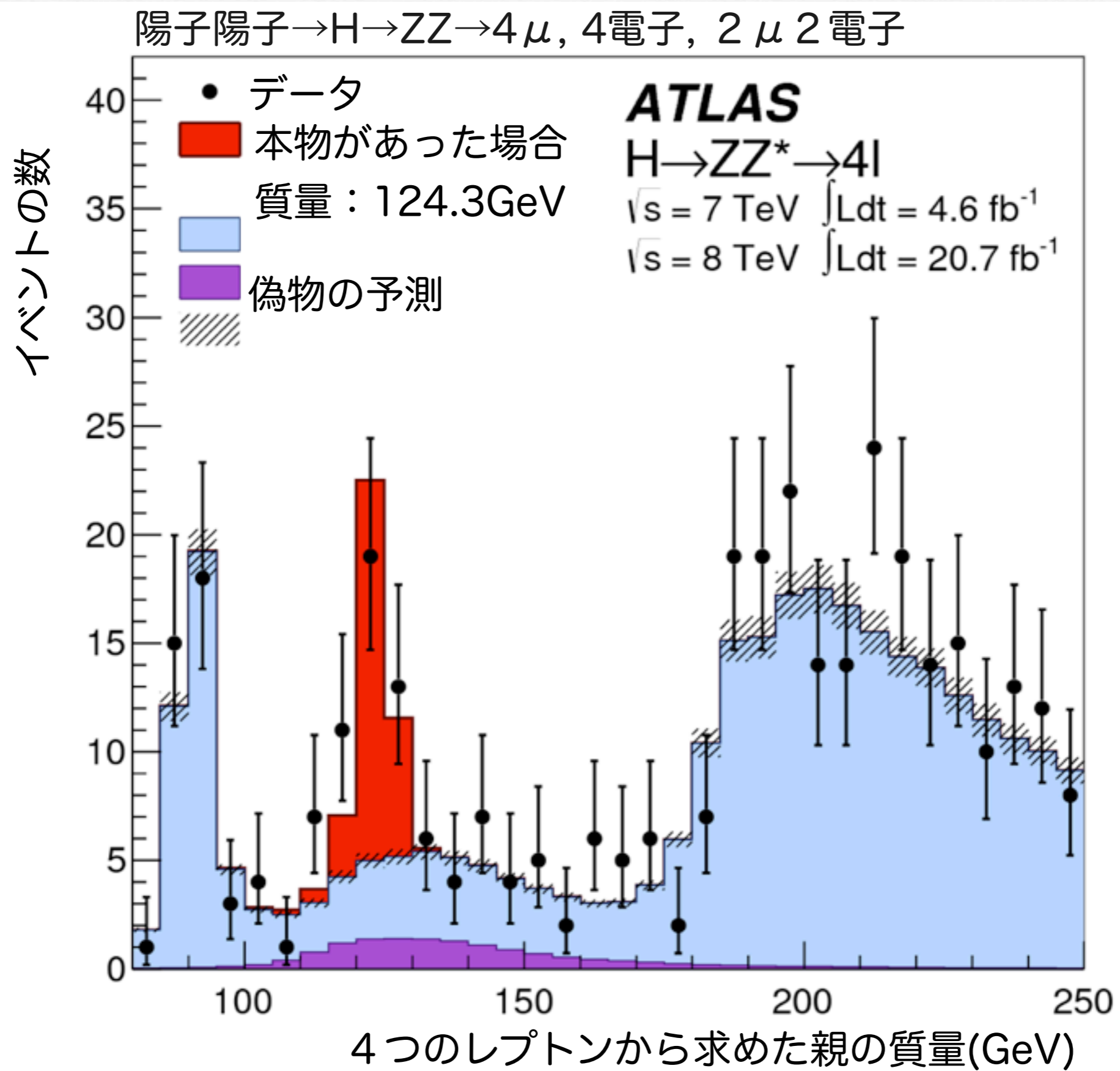
陽子 + 陽子 \rightarrow H \rightarrow ZZ

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

親子の関係を知る式 : (子のエネルギー和)² - (子の運動量和)²

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

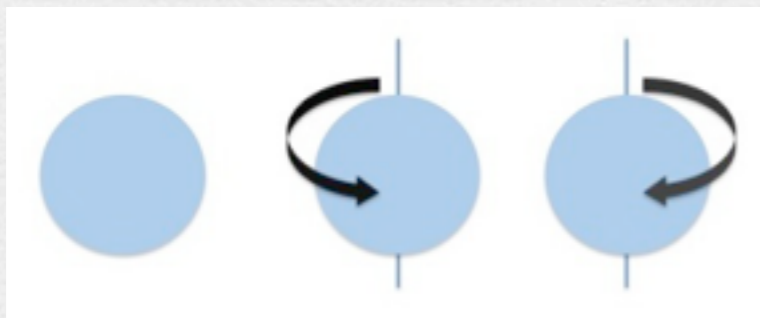


発見された粒子に関してわかったこと

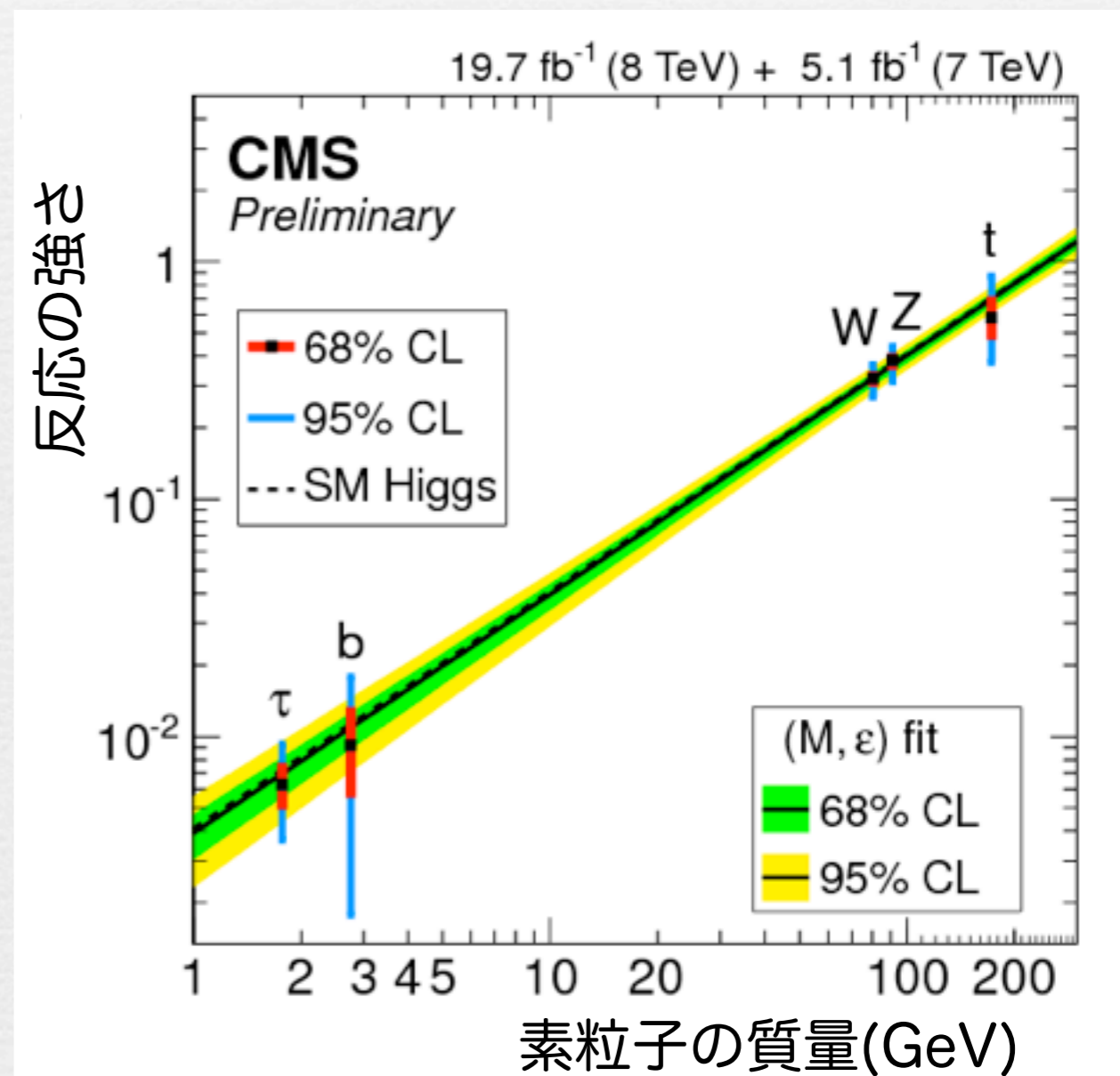
- 光子 光子、 ZZ 、 WW 、 $\tau\tau$,, に化ける粒子
→ 質量と反応の強さに関連

- 質量は、125GeV位

- スピンが0 (向きなし)
→ スピンがある可能性を棄却



素粒子には固有のスピン

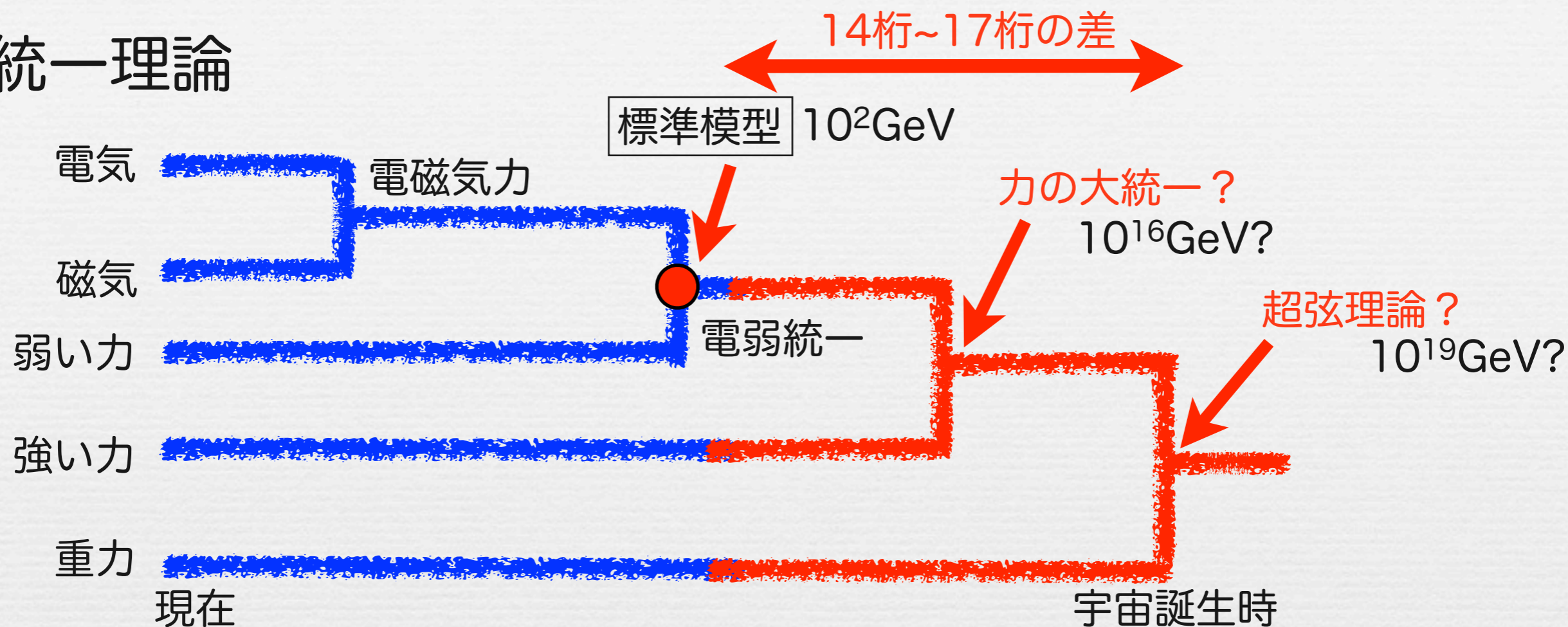


ヒッグス粒子発見！

ヒッグス粒子発見の意義とこれから

ヒッグス粒子の発見の向こうに

大統一理論



ヒッグス場をなんら原理なく導入している

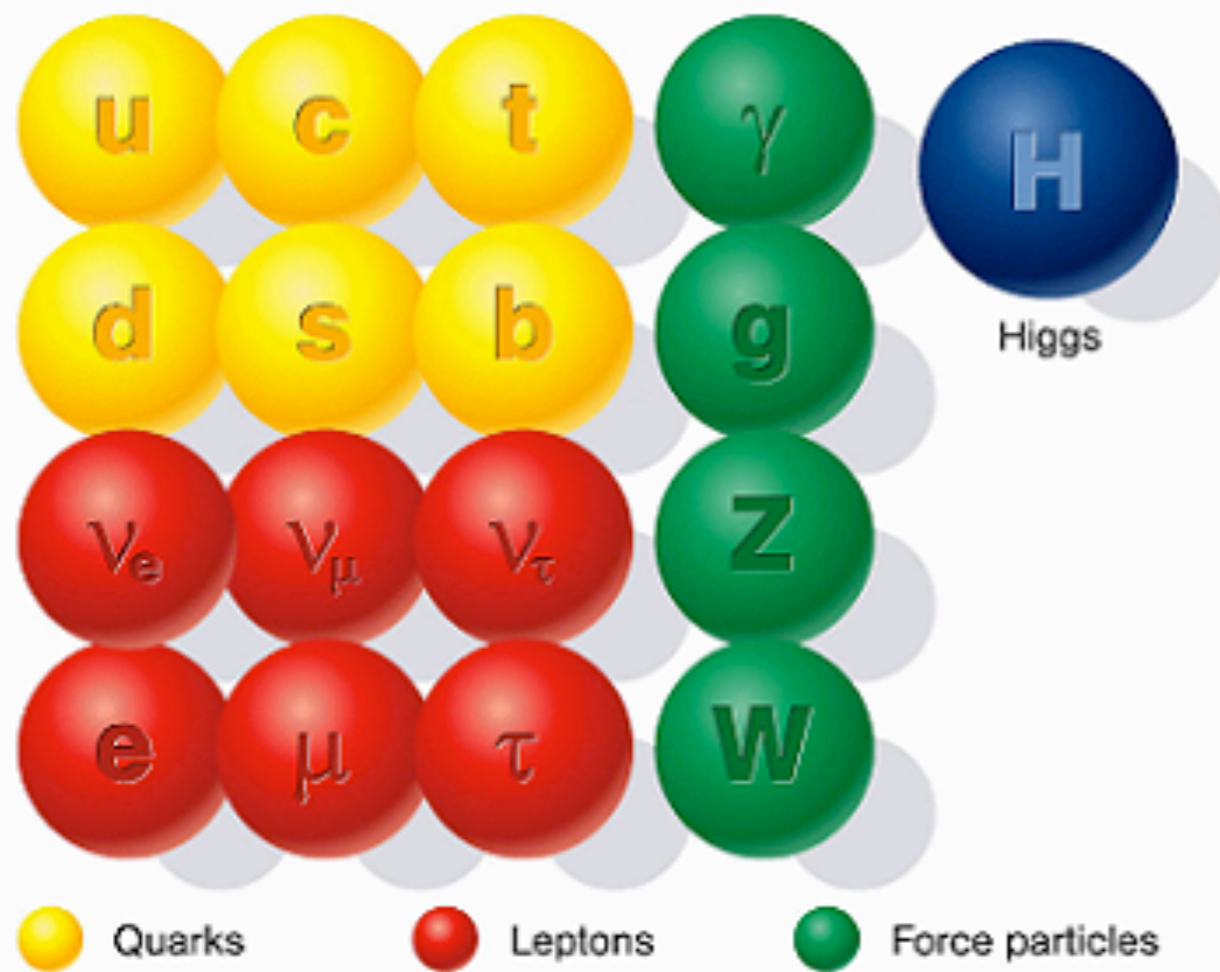
ヒッグス粒子質量の不自然さ

$$\begin{aligned}
 (\text{測定された質量})^2 &= (\text{大統一理論での質量})^2 - (\text{補正量})^2 \\
 125^2 &= (16\text{桁})^2 - (16\text{桁})^2
 \end{aligned}$$

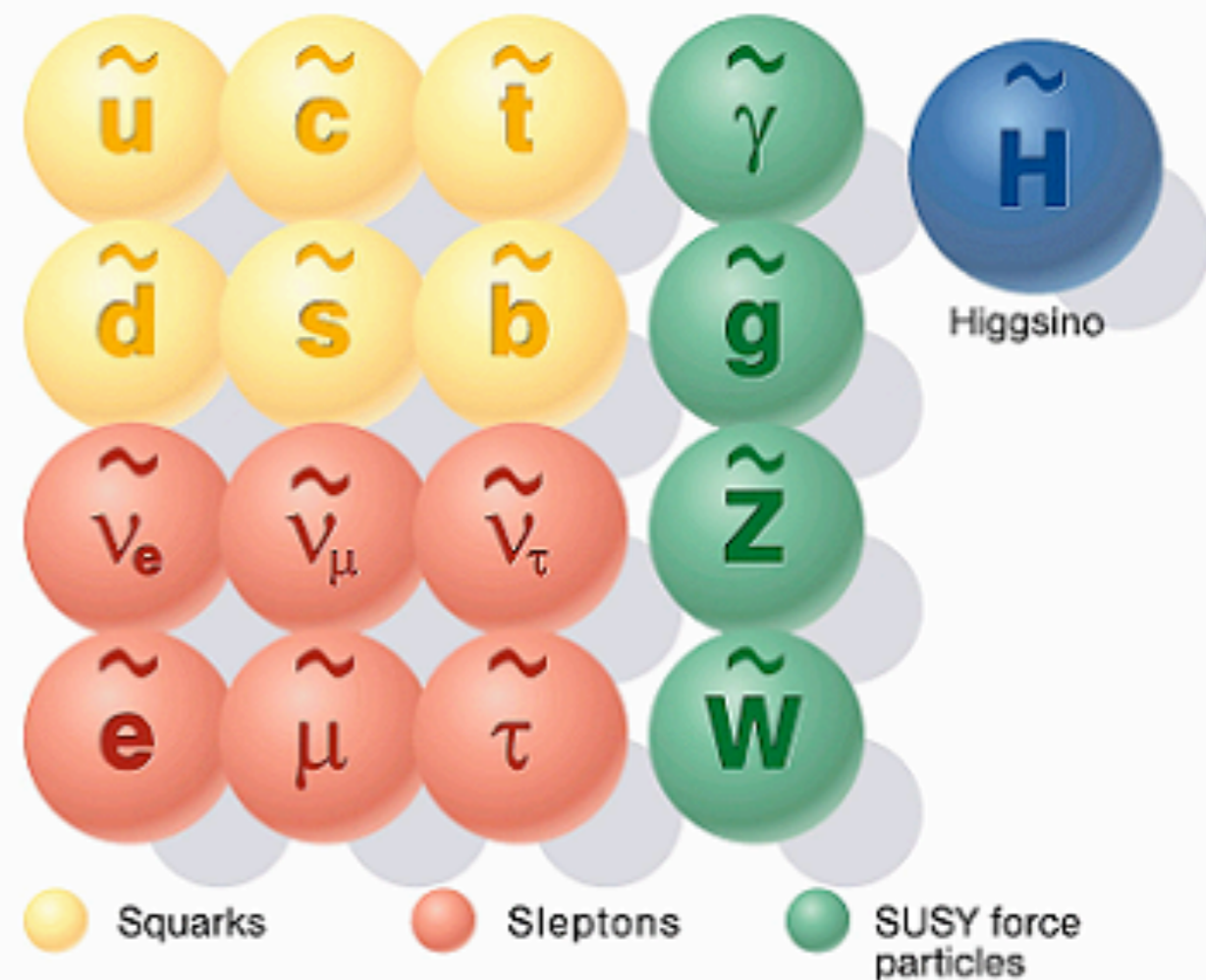
この解決には、“超対称性”や“余剰次元”などの新物理が必要

超対称性粒子

Standard particles



SUSY particles

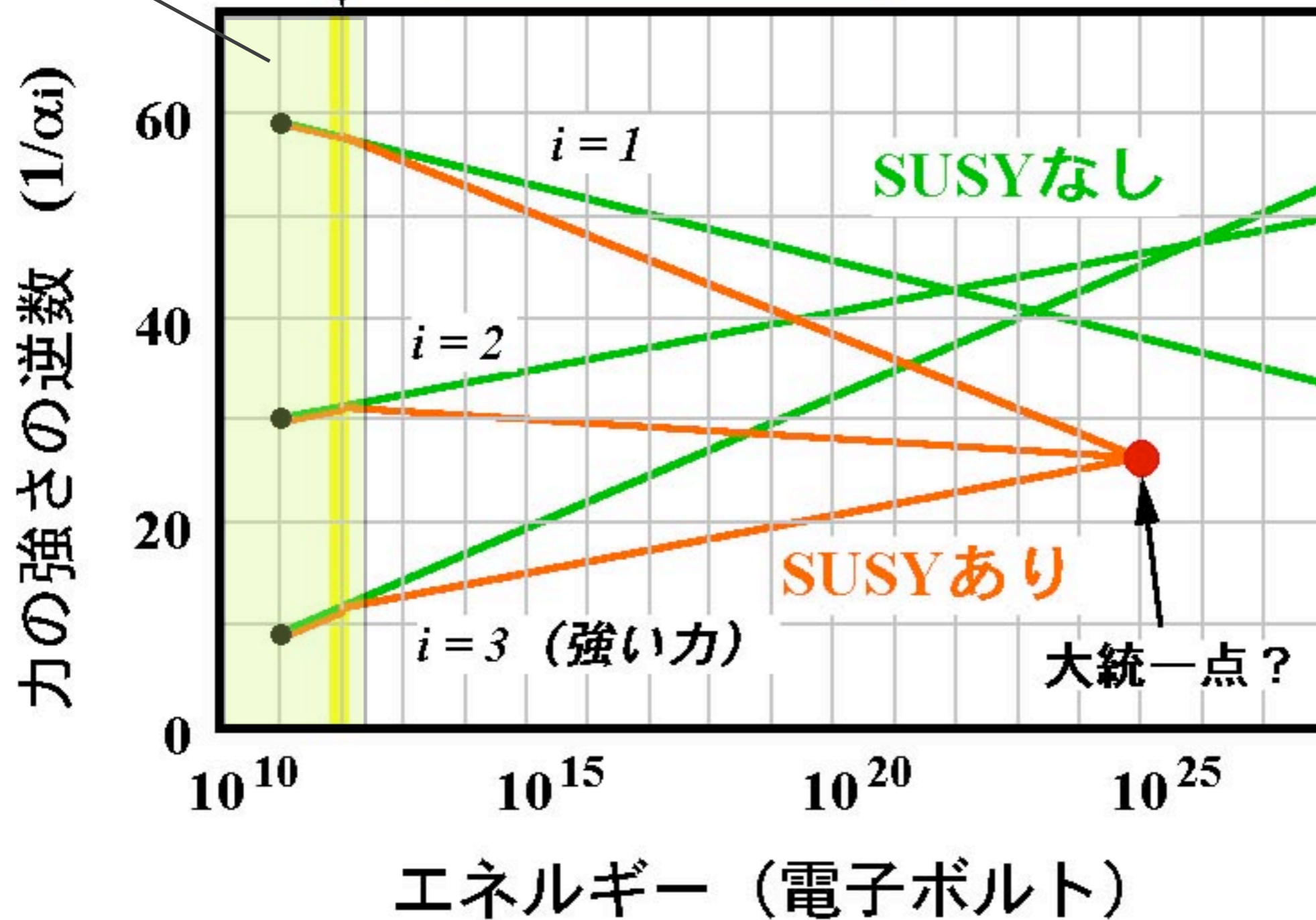


→ LHC実験で探索！！

超対称性粒子があると：力の統一

LHCが探索する領域

SUSY粒子の存在領域

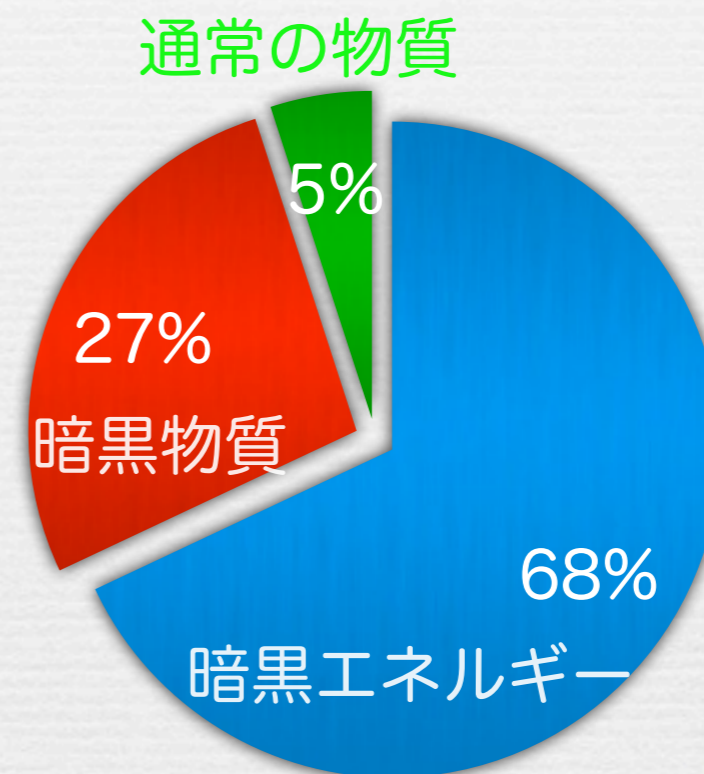


ヒッグス粒子発見で物理学が面白い！！

真空(ヒッグス粒子)に対する新しい知見
ダークマター(暗黒物質)となる素粒子の追求



NASAのサイトから



超対称性や余剰次元の探索 → 時空に対する新しい知見

新しい素粒子物理学

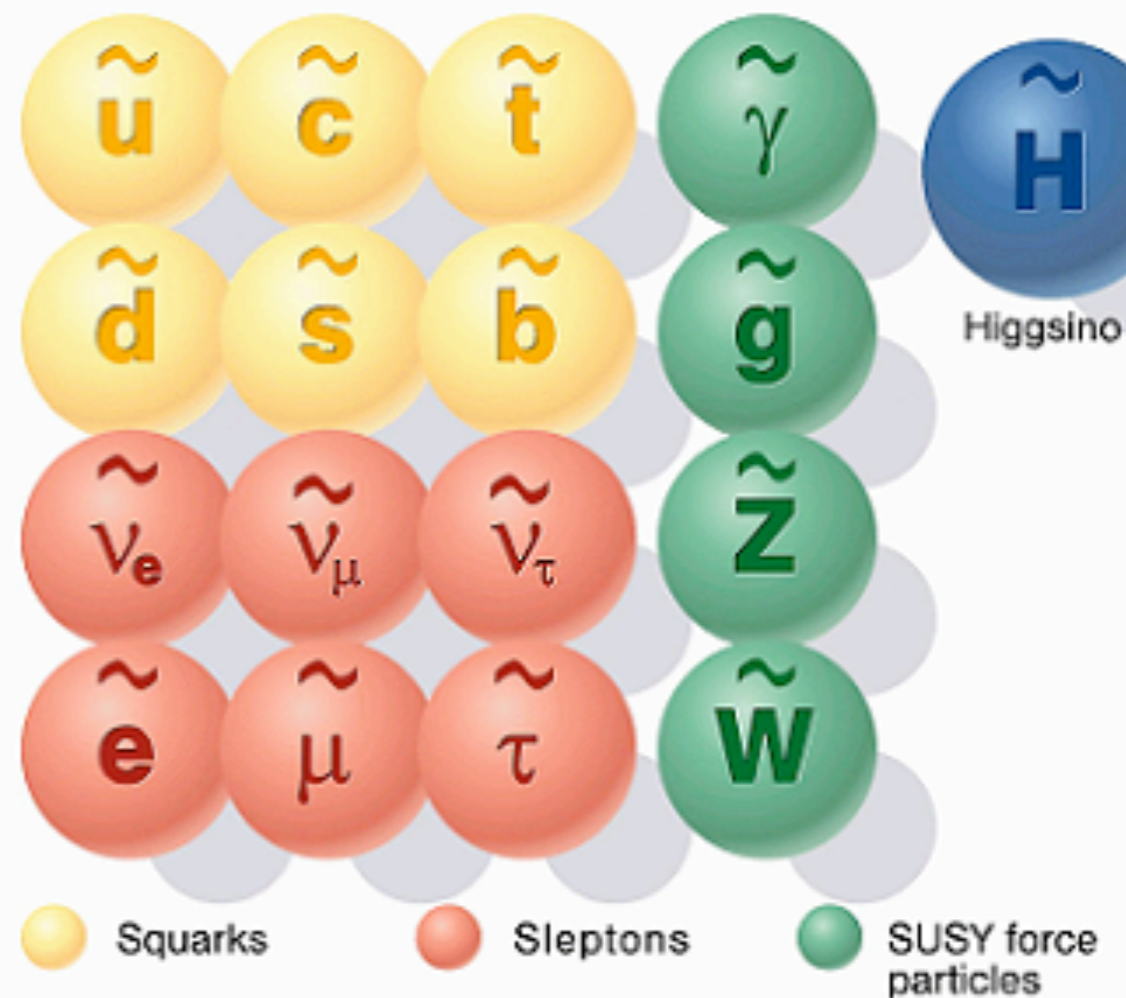
素粒子を使って、真空と時空の構造を解明する

今後の展開

標準模型の素粒子 **全て発見!**



超対称性粒子 **未発見**



- ヒッグス粒子の性質の理解

沢山のヒッグス粒子を作る→沢山の陽子衝突

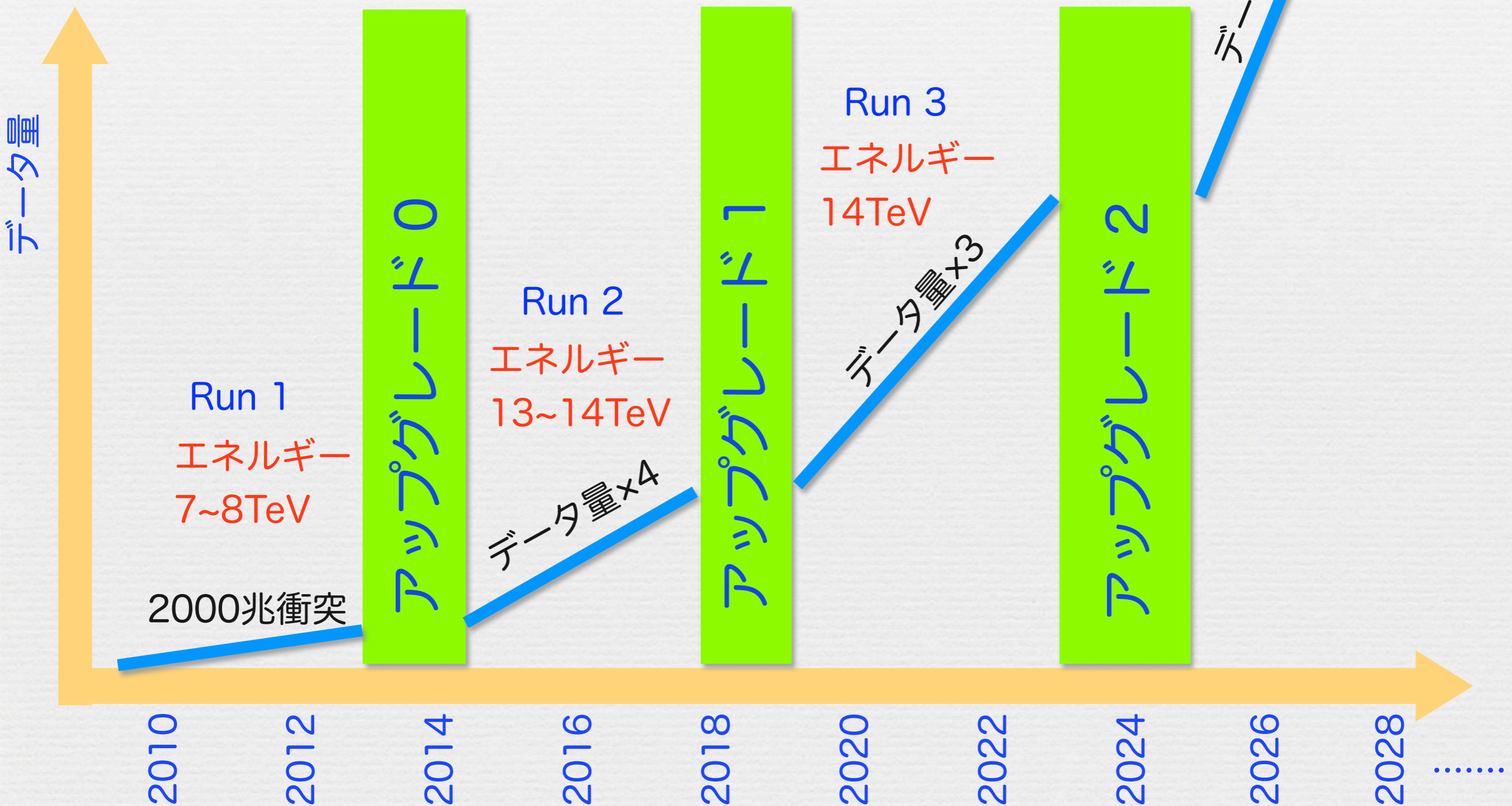
- 新しい素粒子(超対称性粒子など)の発見

重い素粒子を作る: 衝突エネルギーを8TeV から 13~14TeVに

LHCアップグレード計画

加速器と検出器のアップグレード

高いエネルギーとより多くの陽子衝突のデータ収集を目指す



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

ヒッグス粒子発見

実験主導の時代の幕開け

真空の性質に関する新たな知見がえられる

さらなる新粒子が発見される可能性が高い

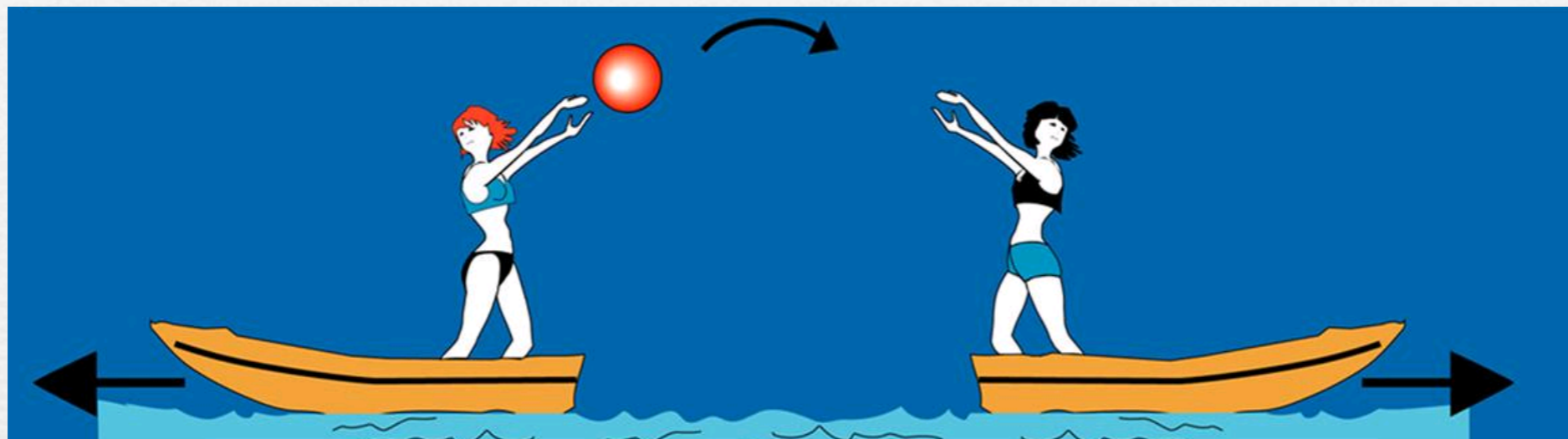
→LHC実験がますます重要

これからの素粒子は面白い！

Backup

素粒子に働く力

力 = 力を伝える粒子の交換



水素原子

電子

