

名古屋市立大学 サイエンスカフェ in 名古屋

第88回

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

2012年7月4日：ヒッグス粒子と思われる新粒子発見！！！！



アンゲレルさん

ヒッグスさん

ELSEVIER

PHYSICS LETTERS B

Available online at www.sciencedirect.com
SciVerse ScienceDirect

S/(S+B) Weighted Events / 1.5 GeV

$m_{\gamma\gamma}$ (GeV)

Legend: Data, S+B Fit, Sig Fit Component, $\pm 1\sigma$, $\pm 2\sigma$

Parameters: $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}, L = 5.1 \text{ fb}^{-1}$; $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}, L = 5.3 \text{ fb}^{-1}$

CMS

Local p_0

ATLAS 2011-12 $\sqrt{s} = 7-8 \text{ TeV}$

m_H [GeV]

Legend: Observed, Expected Signals: 1 σ

Significance levels: 2 σ , 3 σ , 4 σ , 5 σ , 6 σ

PHYSICS LETTERS B

<http://www.elsevier.com/locate/physletb>

名古屋では、、、



名古屋では、、、



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

【ジュネーブ＝共同】ヒッグス粒子をみられる新粒子を発見した。研究チームの発表は、割れんばかりの拍手に包まれた。会場の欧州合同原子核研究所（CERN、スイス）の講壇は四日、通路に座る人も出るほど。半世紀近く前、ヒッグス粒子を提唱したピーター・ヒッグス英エディンバラ大名誉教授へは座席で発表を聞き「おめでとう」と祝辞を送った。○面参照

最初に発表した男性研究者は「驚異的な発表」と評し、発表が終ると「おめでとう」と拍手が止まらないうちに、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。ヒッグス氏は発表終了後に会場に紹介され、大きな拍手で迎えられた。「素晴らしい成果を挙げた皆さんを祝福します」と感謝の意を示した。

発表者らは「新粒子」をヒッグス粒子と考へても矛盾はない」など慎重な姿勢だったが、同会者は「国際的な協力が実を結んだ大きな成功だ。歴史的な出来事だが始まりにすぎない」と述べた。

一方、東京都文京区准教授は「何が見えようもないので、冗談を交えながら説明した。浜松ホトニクスのは、もう少し詳しく調べて見守った。記者会見は準備発表のよい見せつけだ」と述べた。

ヒッグス粒子の発見を受けた記者会見を終え、資料を手に笑顔を見せる益川敏英さん。4日午後、名古屋市千種区の名古屋大で。

益川さん「物理学に新時代」

CERNの発表を受けて名古屋大で四日夕方会見した、素粒子の研究でノーベル物理学賞を受賞した名大の益川敏英特別教授は「あるべきものがあつた印象。今後はヒッグス粒子に絡む不思議な現象が見つかるはずだ。そういう発見が物理学の発展につながる」と期待している」と感想を語った。

国際チームに名大関係者

ヒッグス粒子の存在は、宇宙の成り立ちを説明する「標準理論」を支える大きな柱で、益川教授らが確立した。

益川・小林理論もこれに開いている。益川教授は、研究者や大学院生ら百人以上とインターネット中継に目をやりながら、国際研究チームに参加する名大の西本誠准教授らの説明に耳を傾けた。

益川教授は「これまで物理学の世界は、理論上の予想を実験で証明する時代。知っていたことが確認されるような印象だった。しかし、これから未知の実験結果を説明するために理論を新たに構築する新時代が来る」と転換期の到来を指摘。「血湧き肉躍る」と興奮気味に話した。

CERNの実験では、地下鉄の名城線（名古屋）とほぼ同じ「四十七」の駅状の「通路」を使う。通路に次々と飛ばした電子同士を衝突させ、十億回に一回の割合で発生するヒッグス粒子の破片を捉える。

西本准教授が担当したのは、破片を抽出する装置の開発だ。世界中から六千人の研究参加者が参加する「アループ」の中でも、ヒッグス粒子発見の要となる技術と言える。

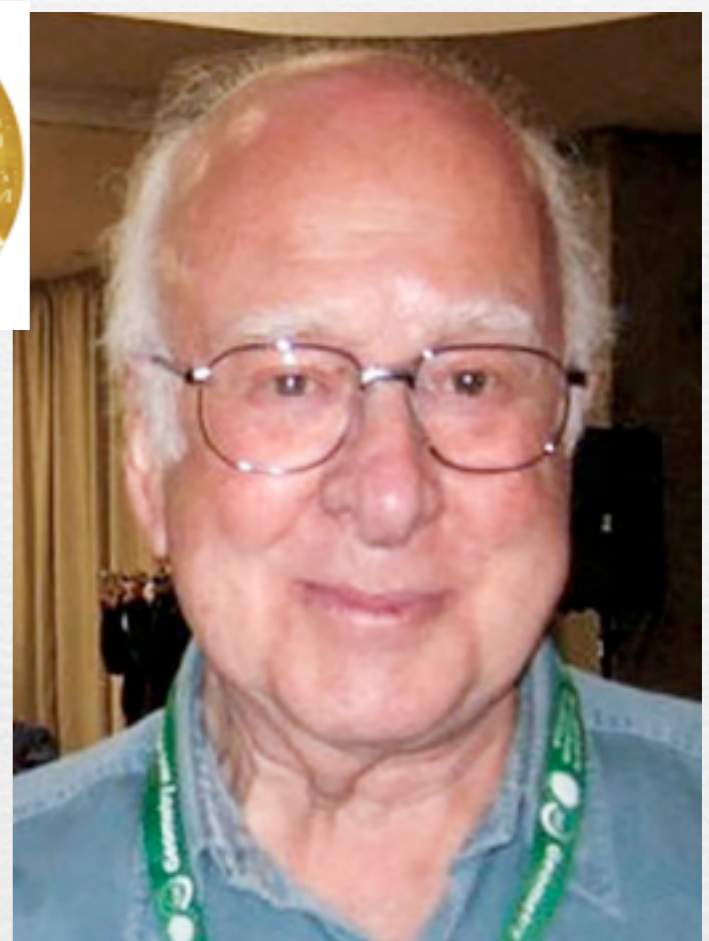
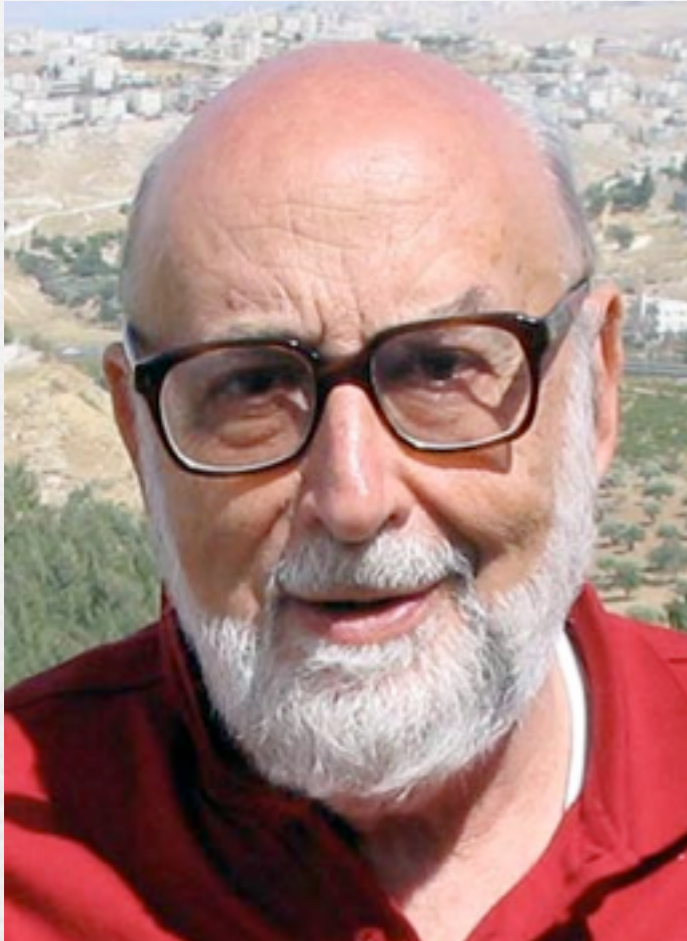
浜松ホトニクスが開発・製造したのは、素粒子のエネルギーを光に転換して検出する装置と、素粒子の飛跡を追いかける検出器の基板の部品。

CERN実験チームの要望に応じて、一九九八年から十年間かけて製作。計五万個以上を納入しているという。



7月5日
中日新聞朝刊より

2013年 ノーベル物理学賞



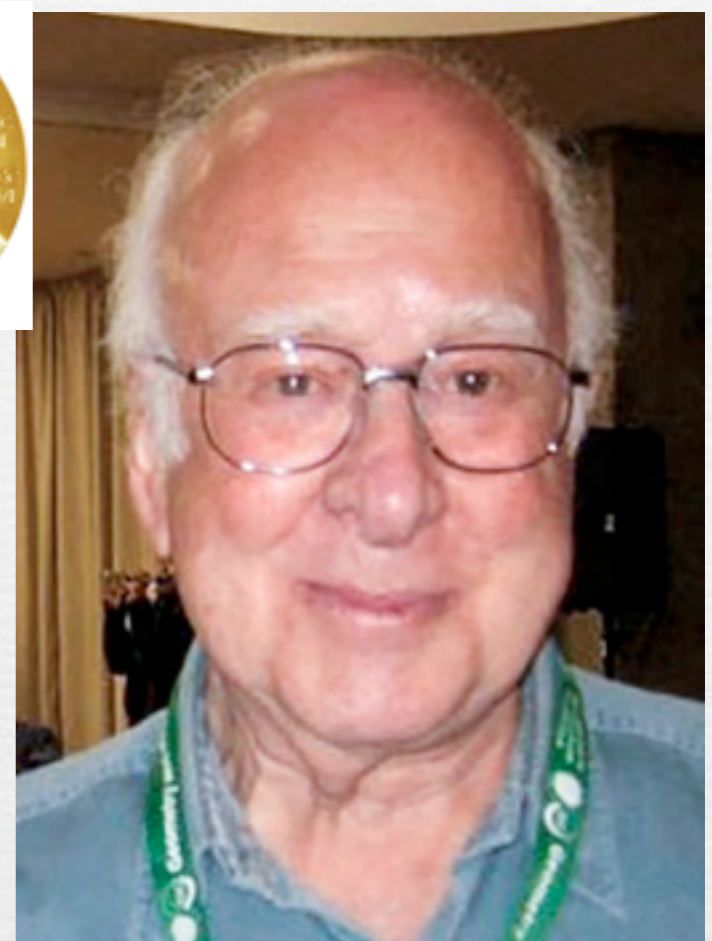
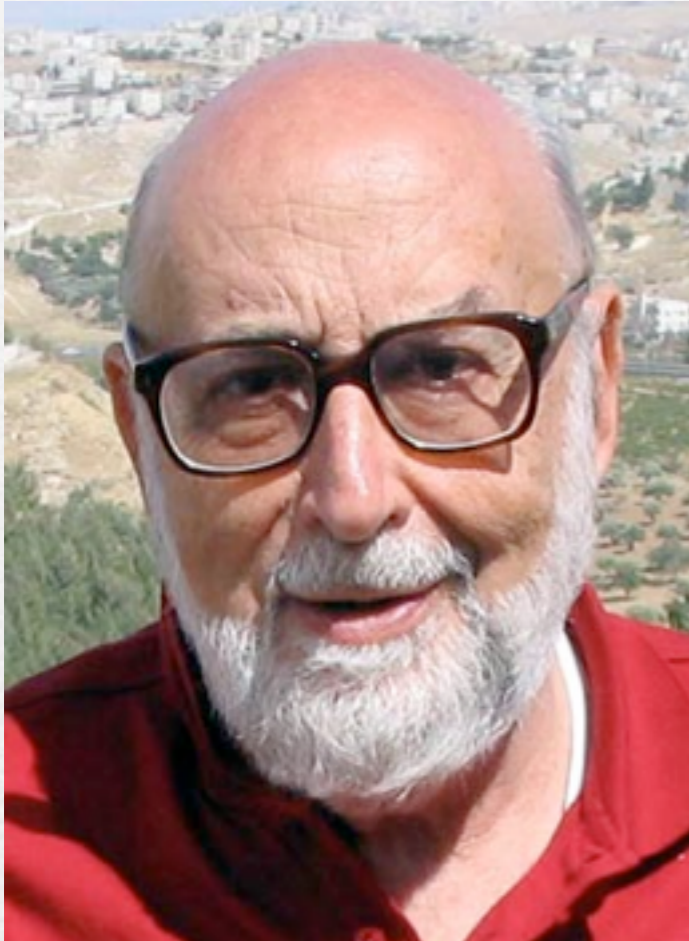
フランソワ・アングレール氏

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*"

www.nobelprize.orgより

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**ことにより理論の正しさが確認された」ことにより授与される。

www.nobelprize.orgより

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 (AP)

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(左)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(右)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。ヒッグス粒子を探る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。

落合 博満氏(おちあい・ひろみつ) 月に野球殿堂入り。谷繁 元信捕手(たに 53)

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



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8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をつなぐ二二万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

ヒッグス粒子とは？

ヒッグス粒子を作る加速器

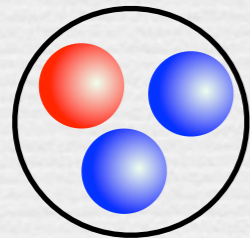
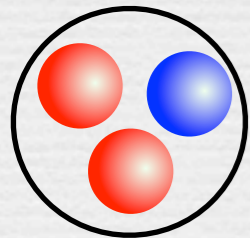
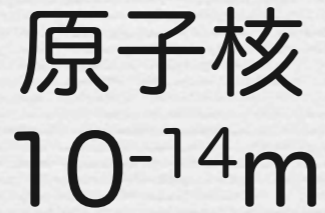
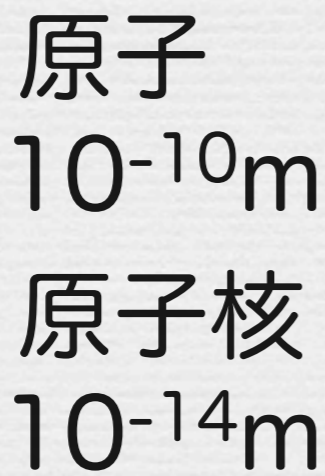
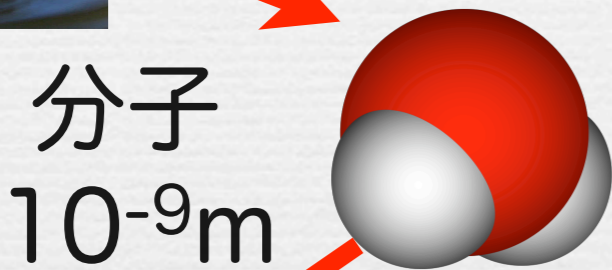
ヒッグス粒子を捕まえる検出器

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？

物を構成している素粒子



$10^{-15}m$

クォーク

| | |
|---------|---------|
| アップ(u) | ダウン(d) |
| $+2/3e$ | $-1/3e$ |

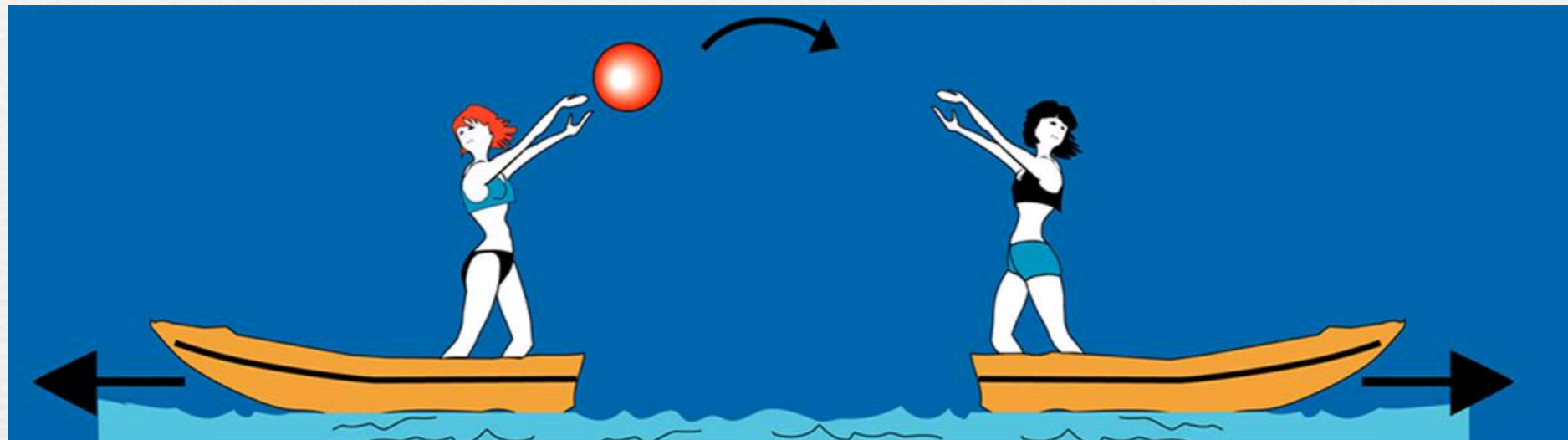
レプトン

| | |
|------|--------|
| 電子 | ニュートリノ |
| $-e$ | 0 |

$10^{-18}m =$
 $0.000000000000000000000000000001m$
 10億分の1 m の 10億分の1

素粒子に働く力

力=力を伝える粒子の交換

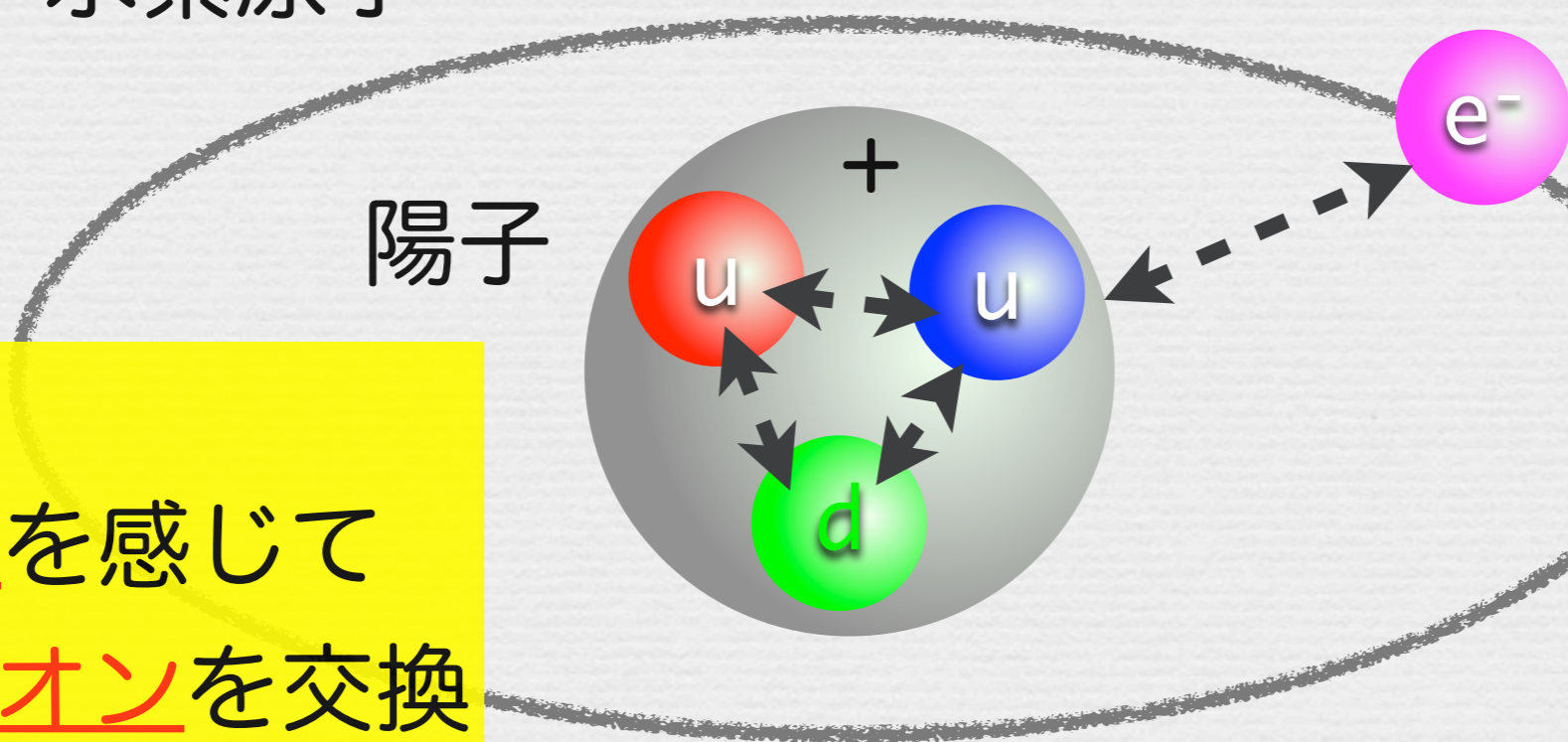


水素原子

電子

陽子

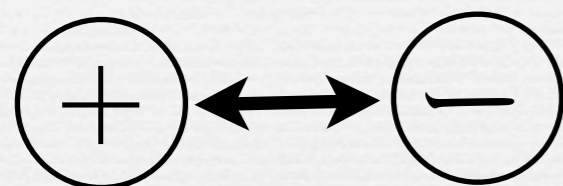
強い力
色電荷を感じて
グルーオンを交換



電磁気力
電荷を感じて
光子を交換

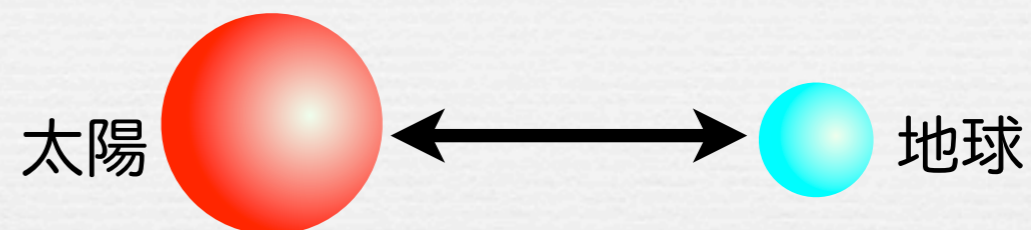
4種類の力

電磁気力



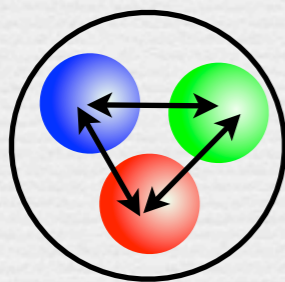
電荷を感じて
光子を交換

重力



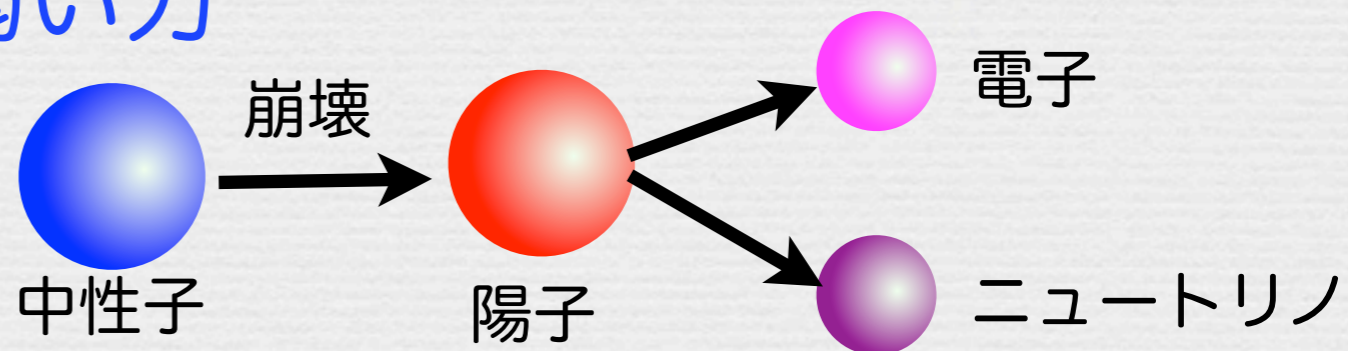
質量を感じて
グラビトンを交換

強い力



色電荷を感じて
グルーオンを交換

弱い力

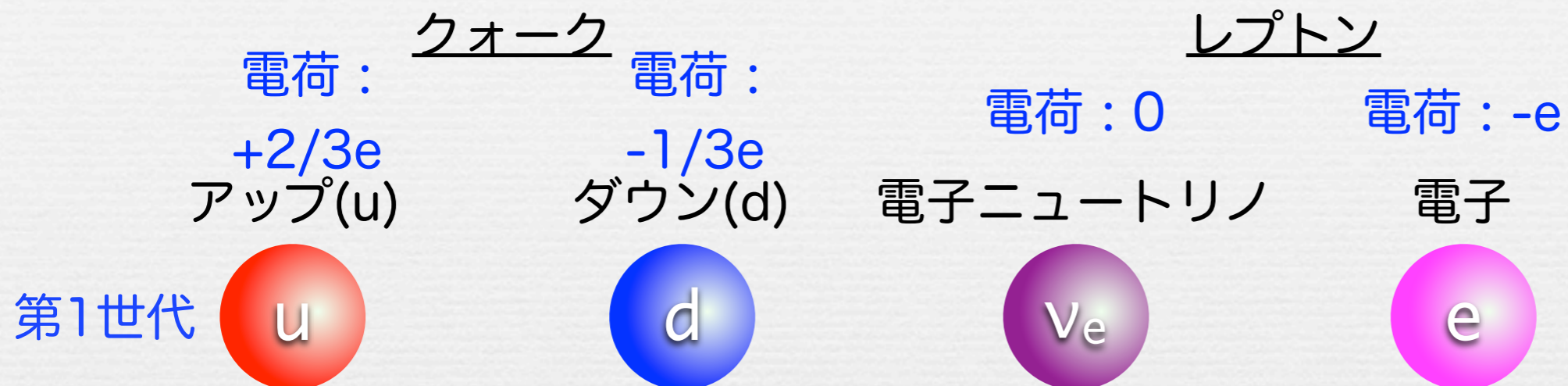


弱電荷を感じて
W、Z粒子を交換

素粒子の標準模型

物質を構成する

力を伝える



電磁気力 : 光子



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



素粒子の標準模型

物質を構成する

力を伝える



素粒子の標準模型

物質を構成する

力を伝える



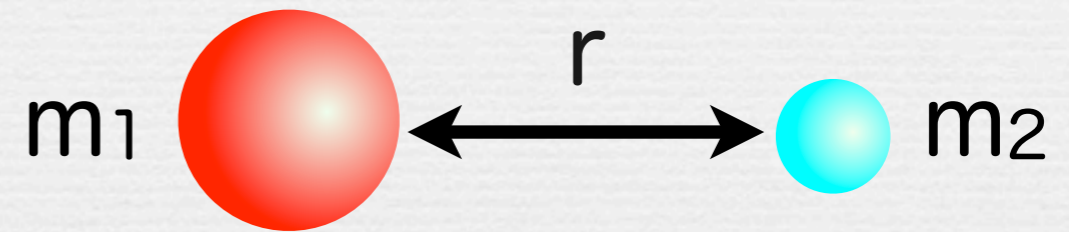
質量とは？

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

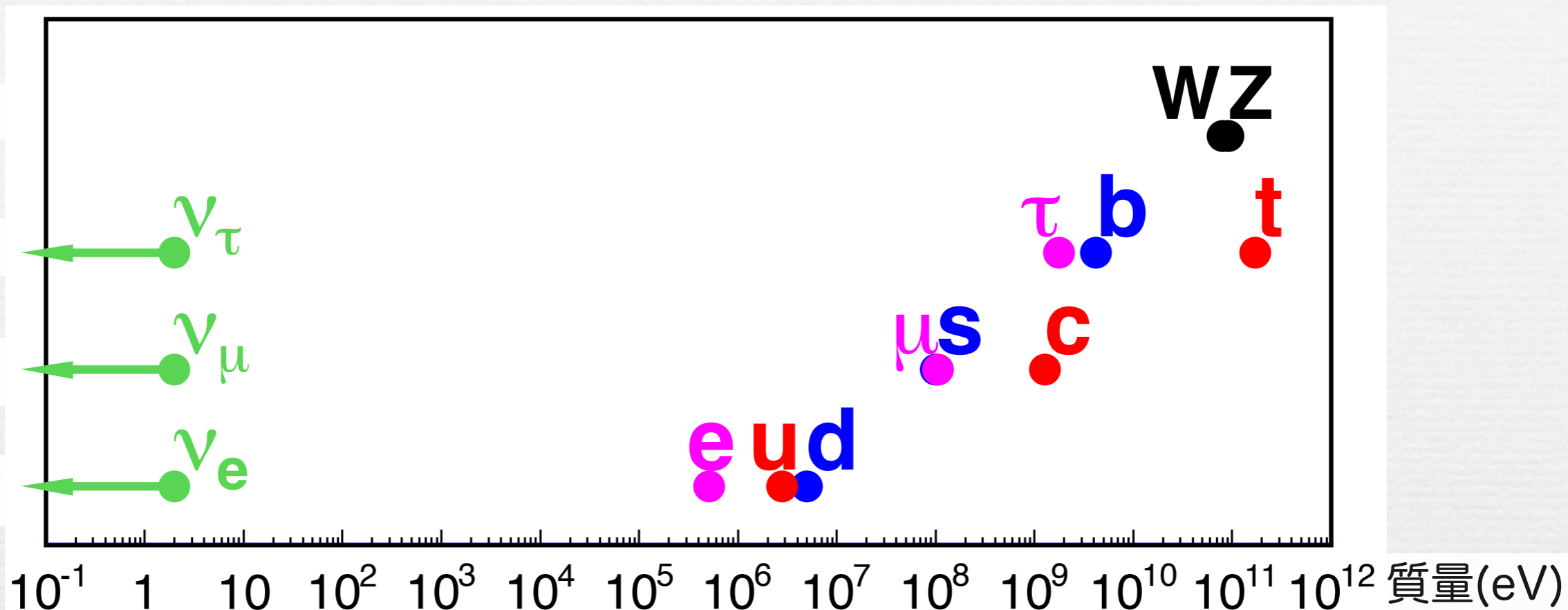
素粒子の質量

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

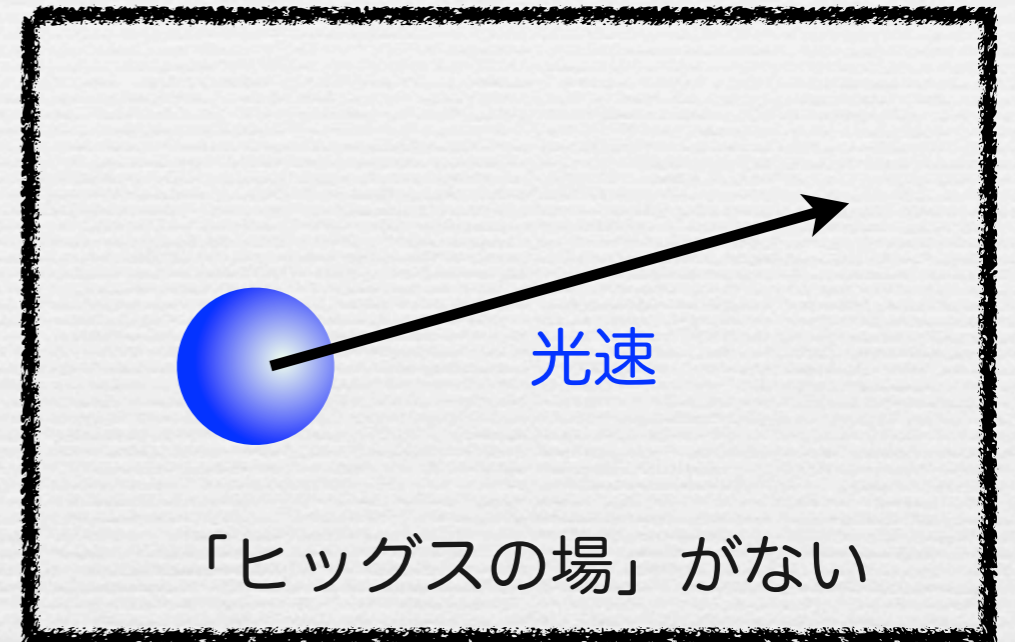
素粒子の質量起源

宇宙の進化とともに、真空が「ヒッグスの場」で満たされる

宇宙初期：ビッグバン直後

「ヒッグスの場」がない状態

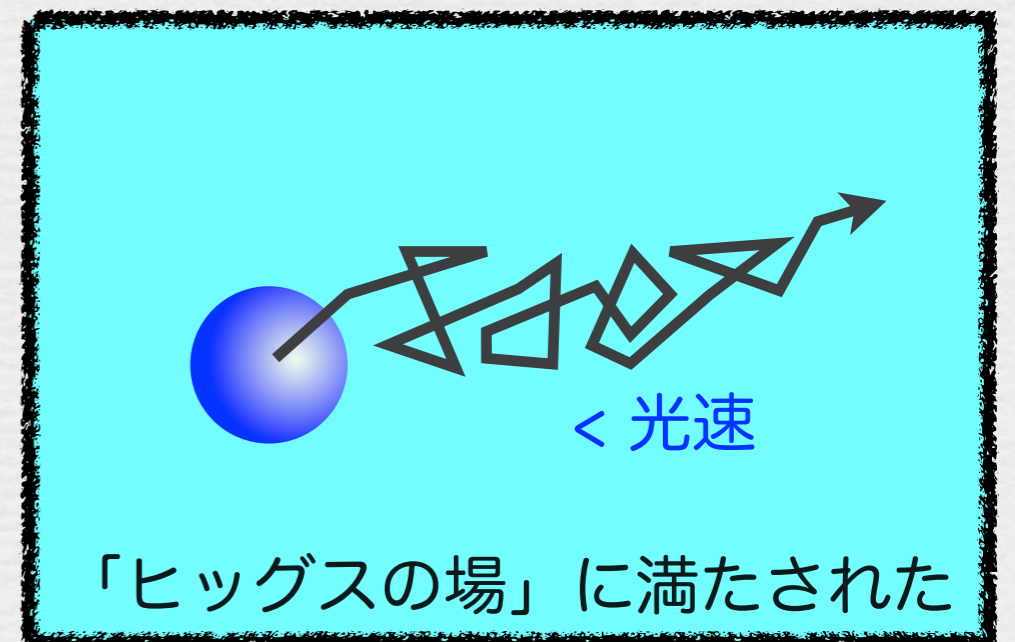
- 粒子は光速で運動
- 素粒子の質量は全てゼロ



宇宙が冷える：現在

「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
- 質量を獲得する



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

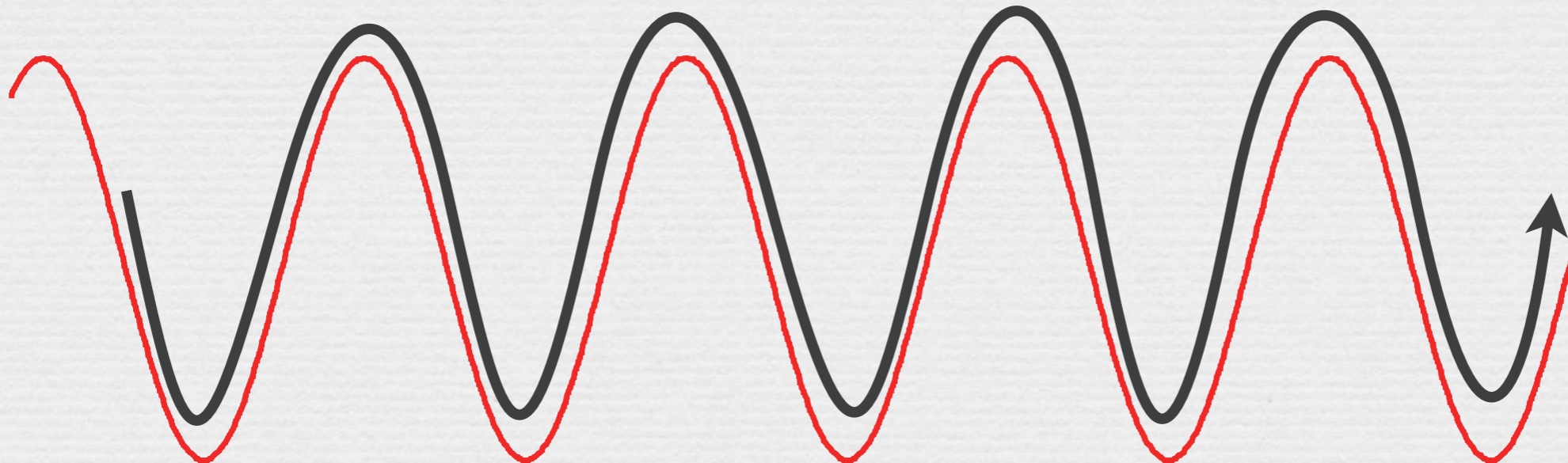
光速で進む

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、、、遅くなる



ヒッグスの場による障害物

一部のエネルギーが振動に使われる

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？

イメージ

エネルギーが小さくても、

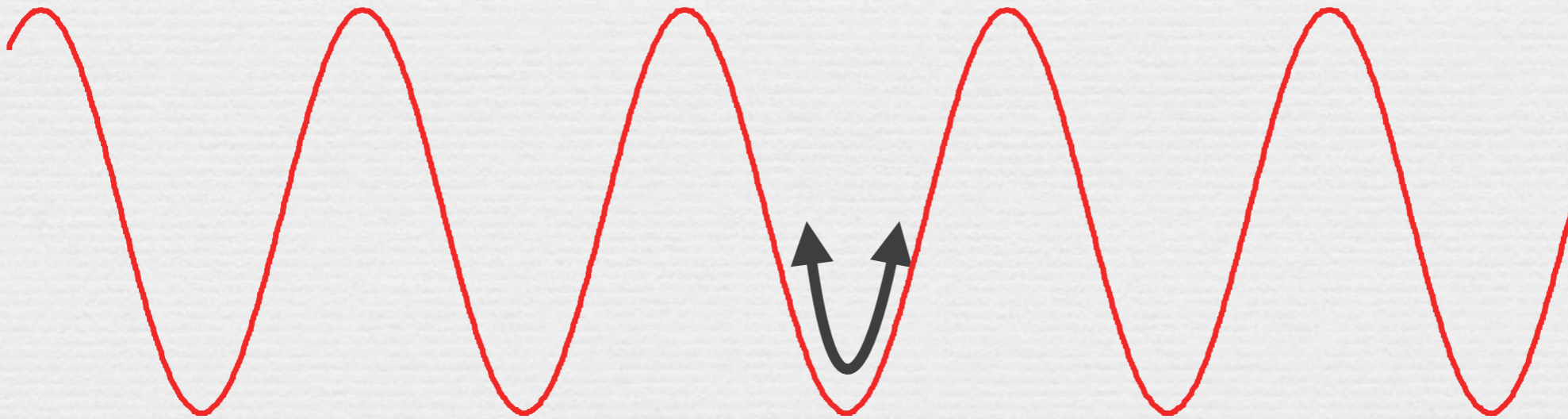
障害物のない所では、、、エネルギー＝運動量

光速で進む

光速



障害物のあるところを粒子が通ると、、、止まり、振動する



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

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

スピンのない粒子(向きなし粒子)

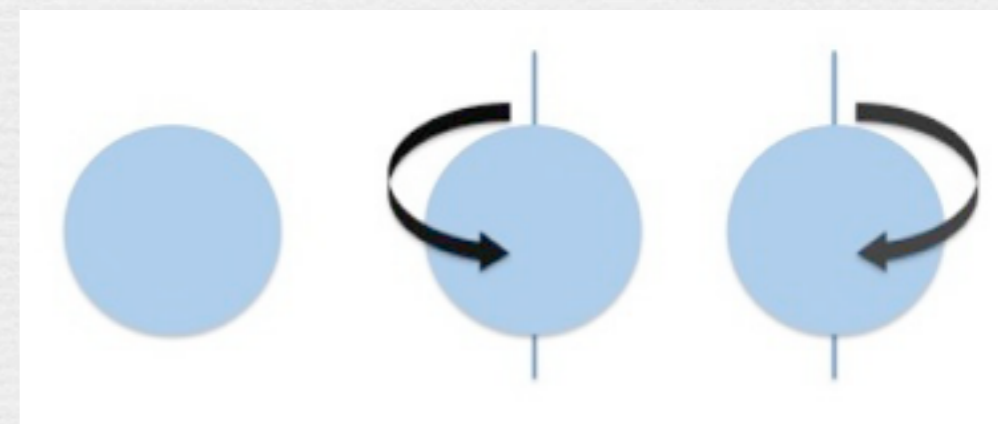
クォーク、レプトンのスピン： $1/2$

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)

そういう粒子を実験的にさがしてみる→**素粒子実験**



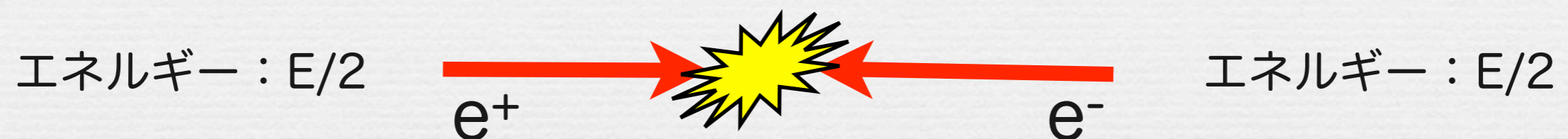
素粒子には固有のスピン

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



$$E = Mc^2$$

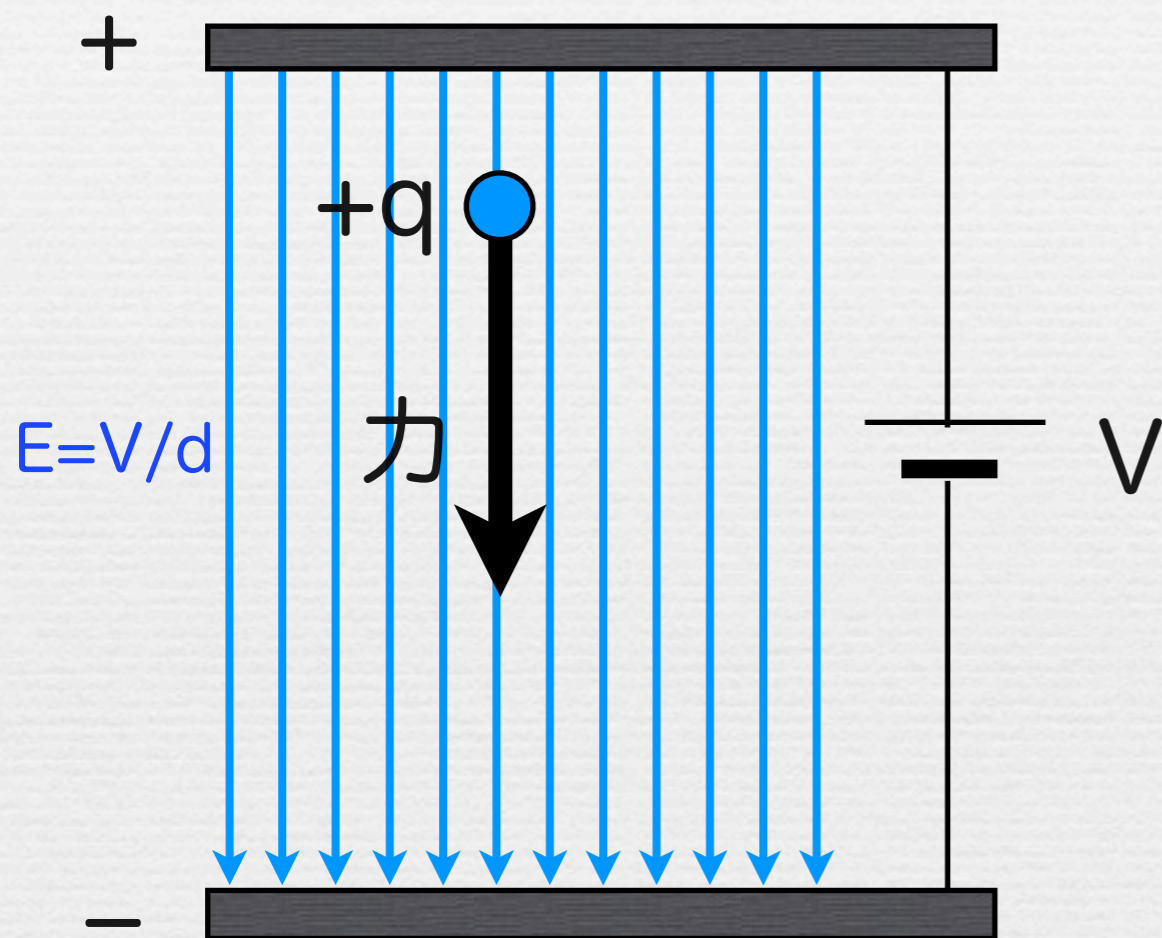
質量 M の未知なる素粒子を生成する能力

加速した粒子を衝突させる

高エネルギー！

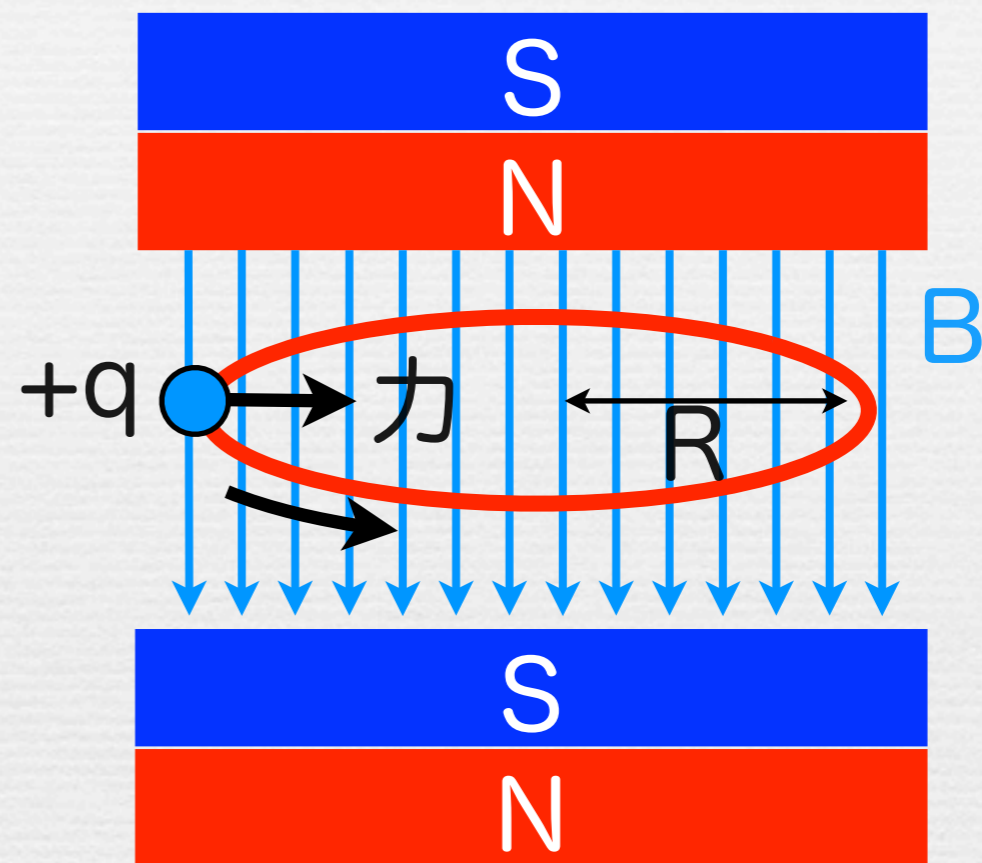
粒子を加速する

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

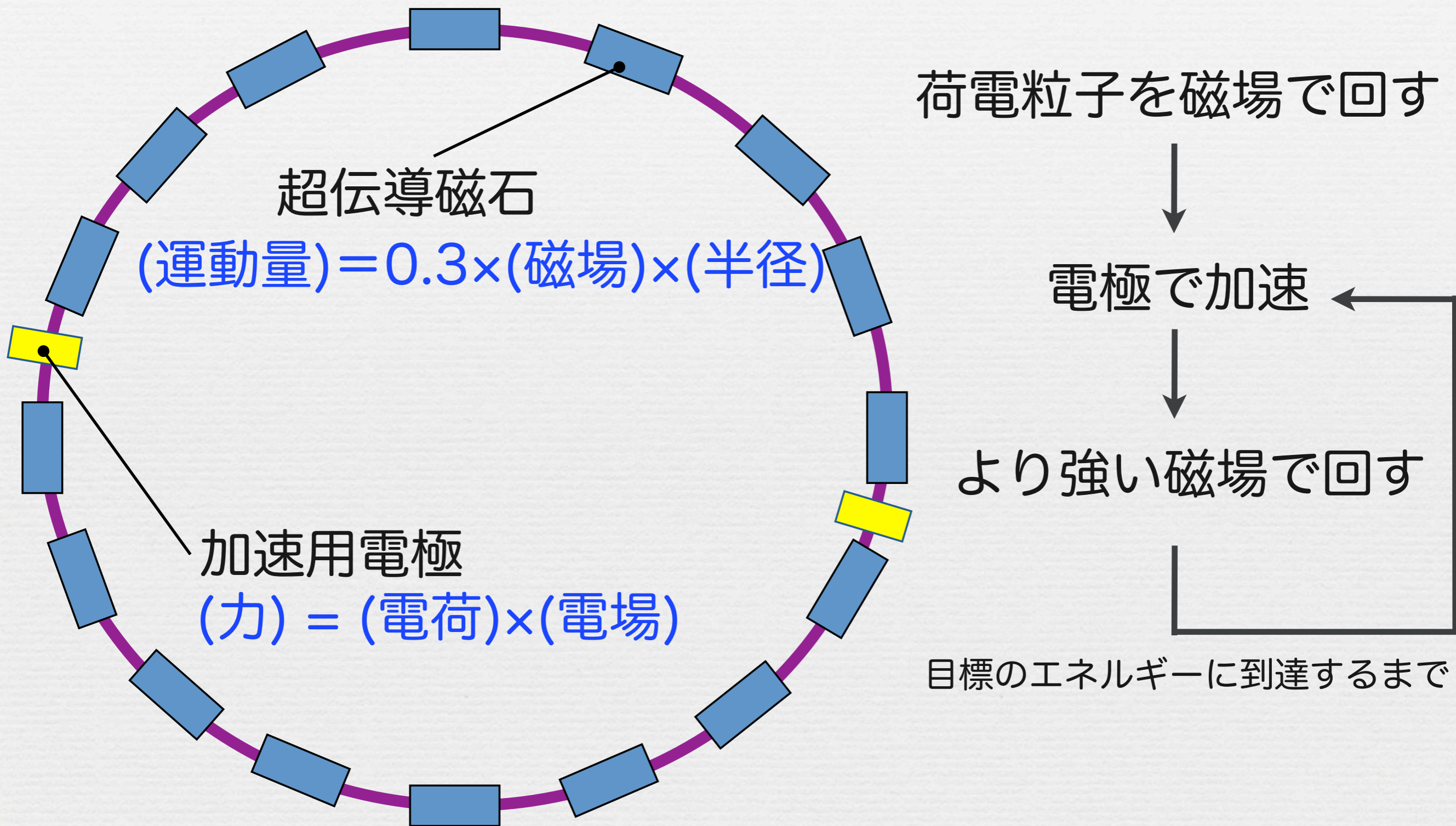
$$(\text{力}) = (\text{電荷}) \times (\text{電場})$$



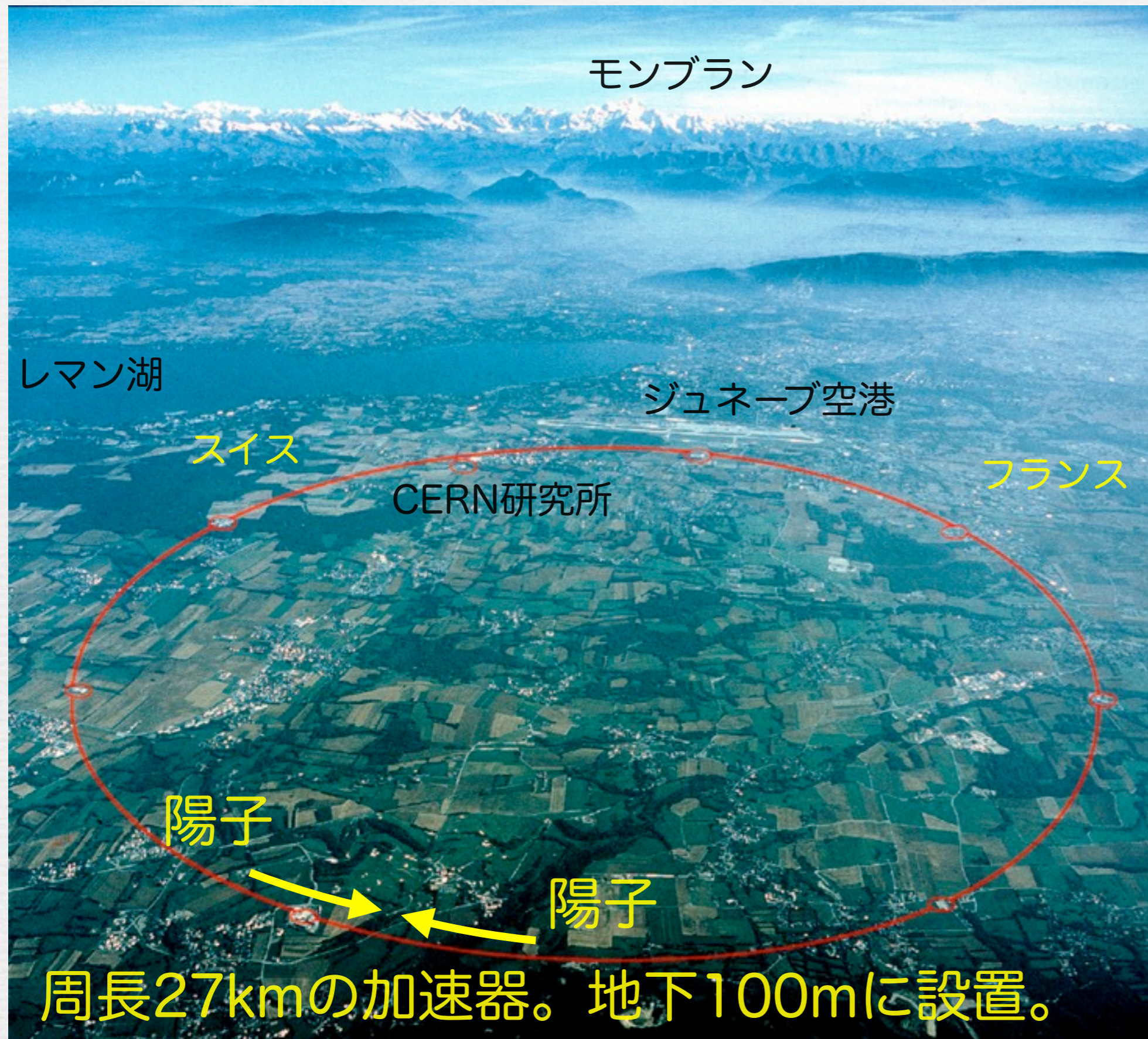
磁場を大きくして
より加速した荷電粒子を回す

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

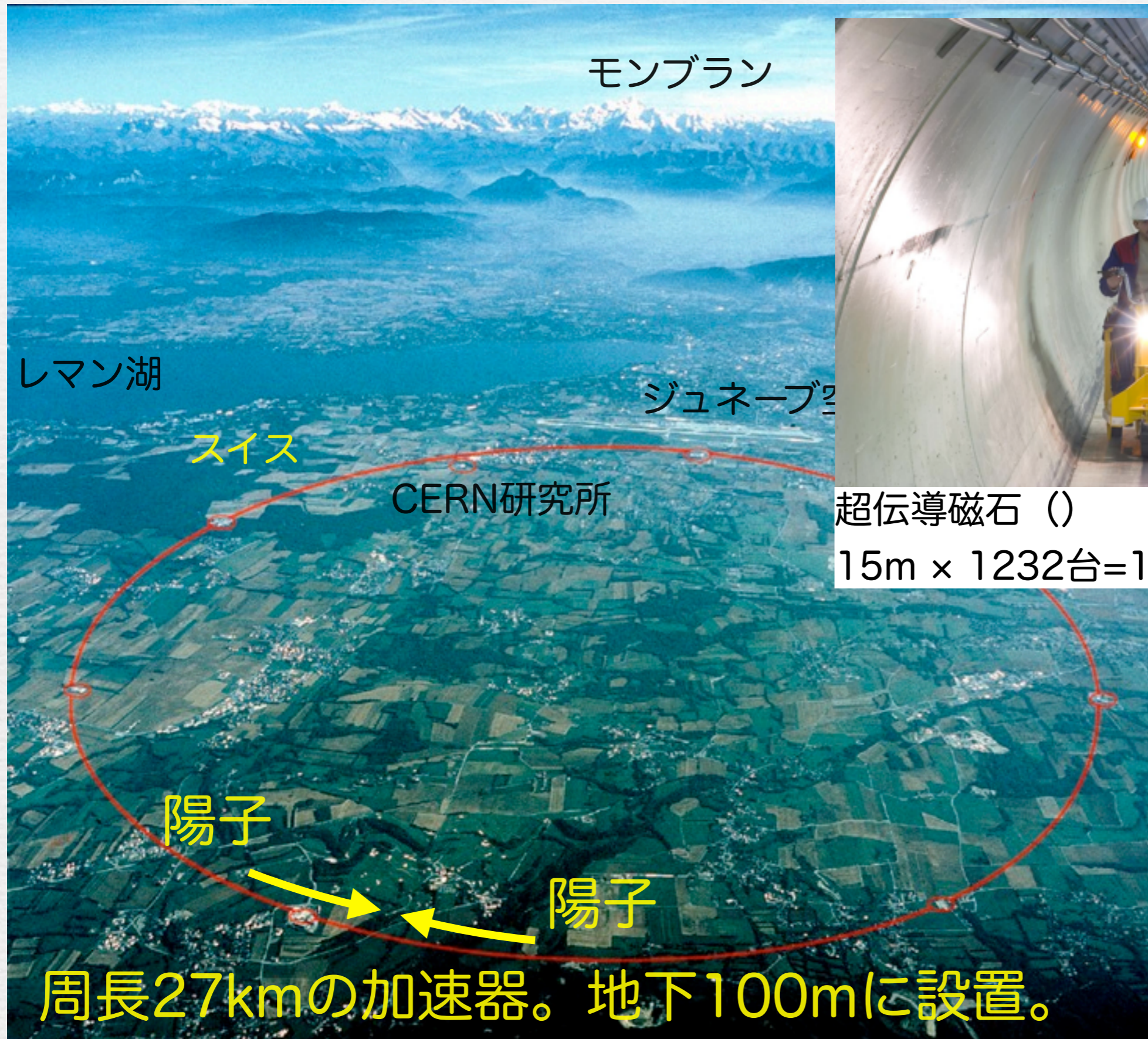
加速器の原理



最先端加速器 Large Hadron Collider



最先端加速器 Large Hadron Collider



超伝導磁石 ()

15m × 1232台=18km(27km中)

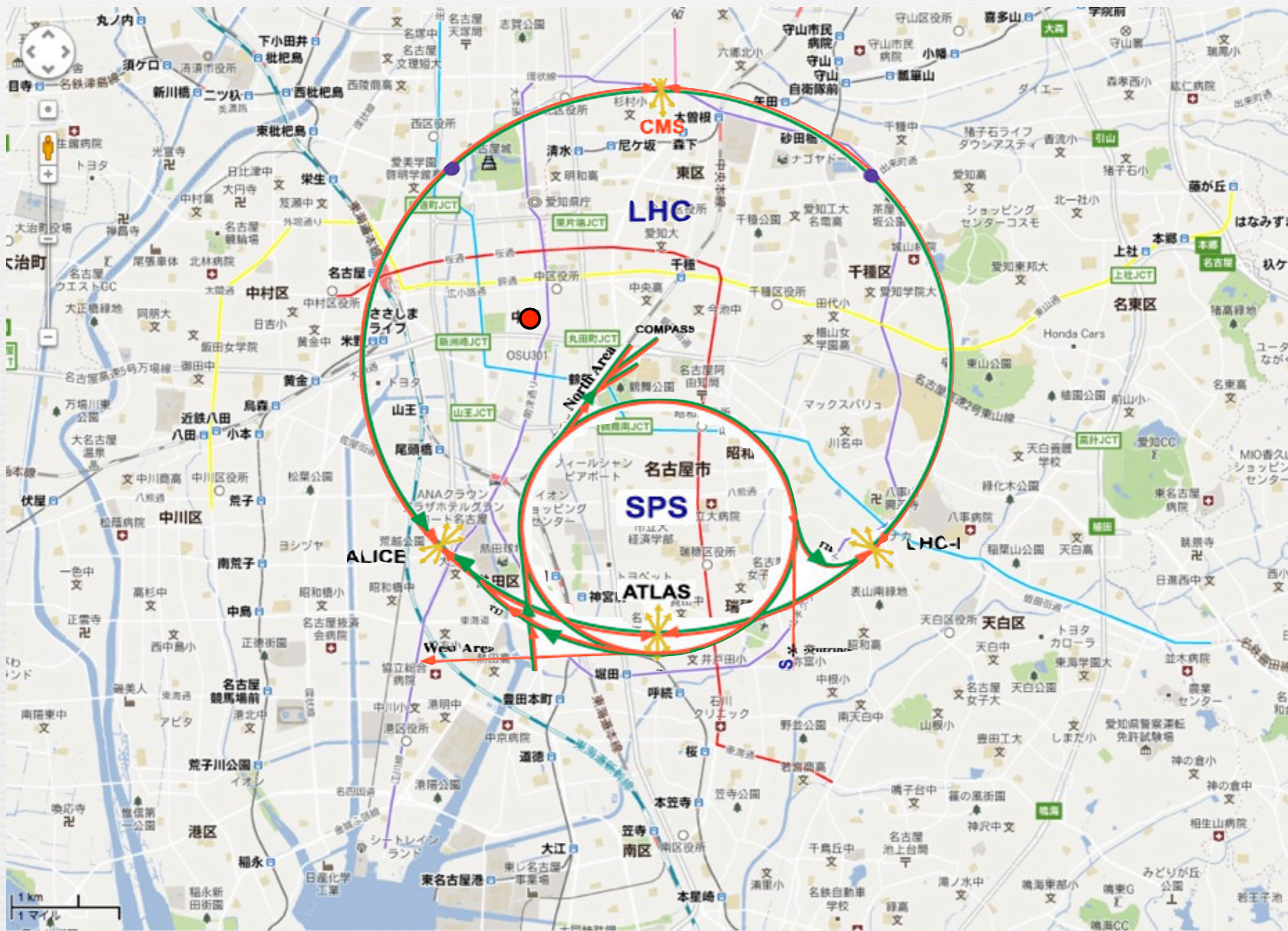
LHC加速器の大きさ



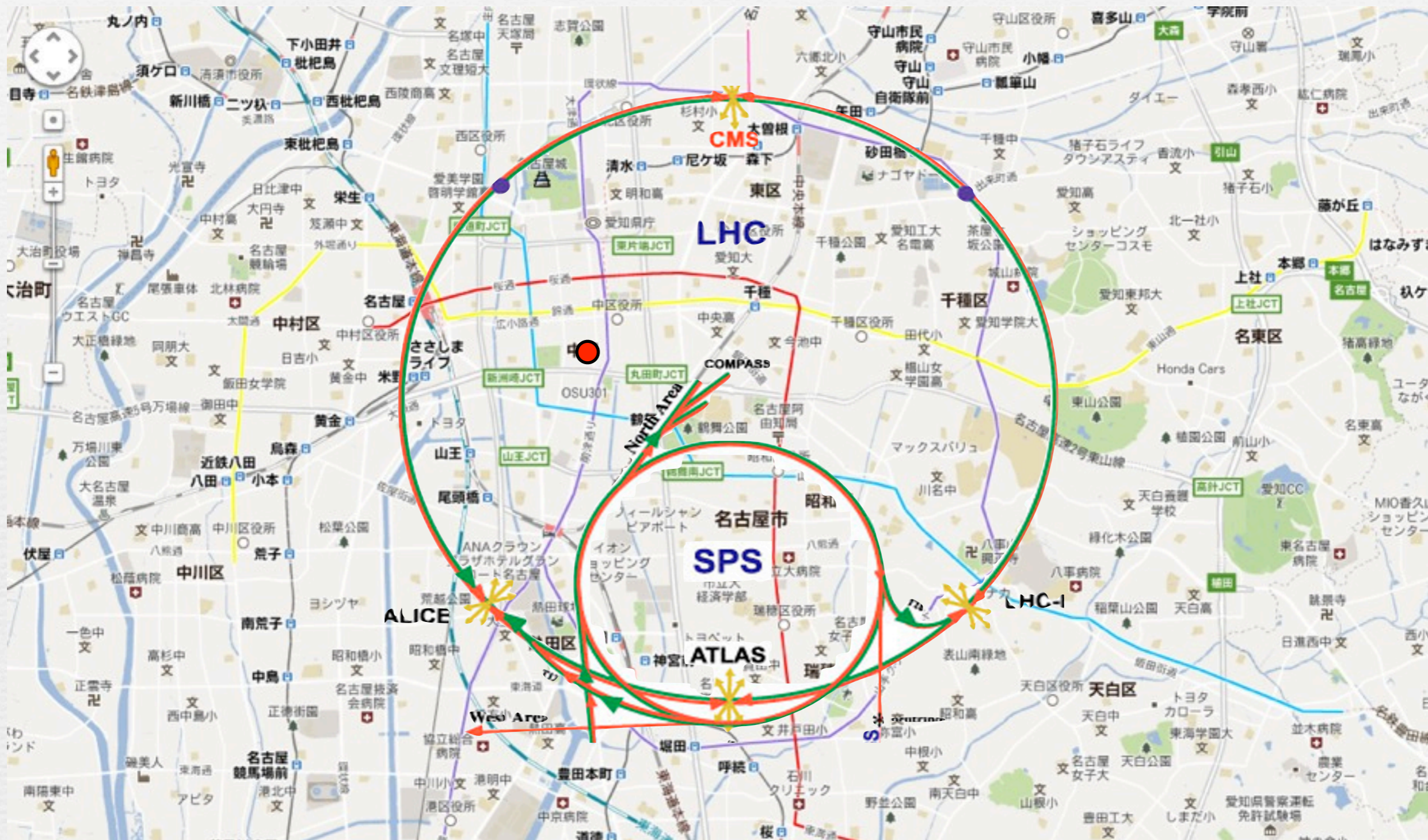
LHC加速器の大きさ



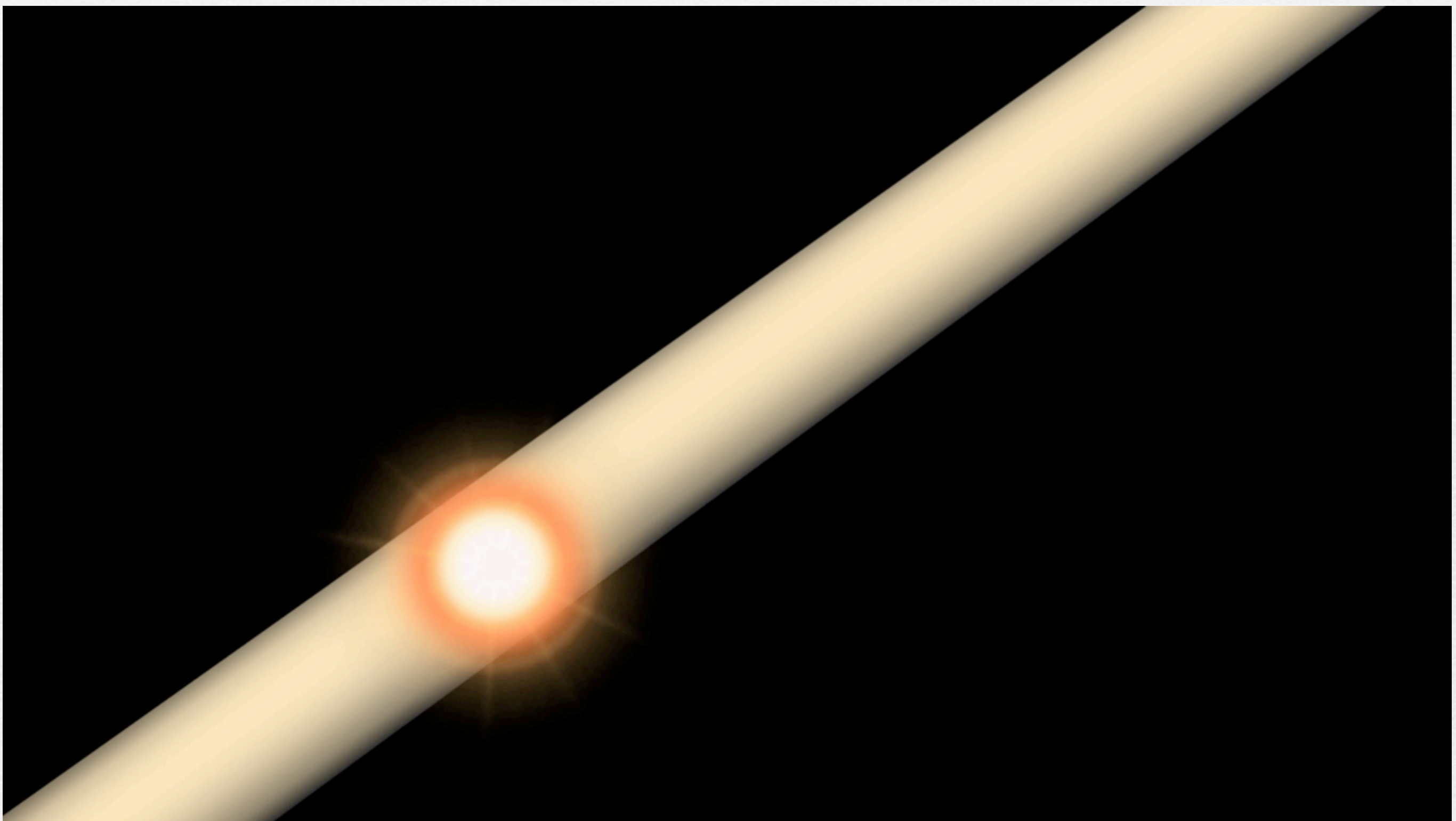
LHC加速器の大きさ



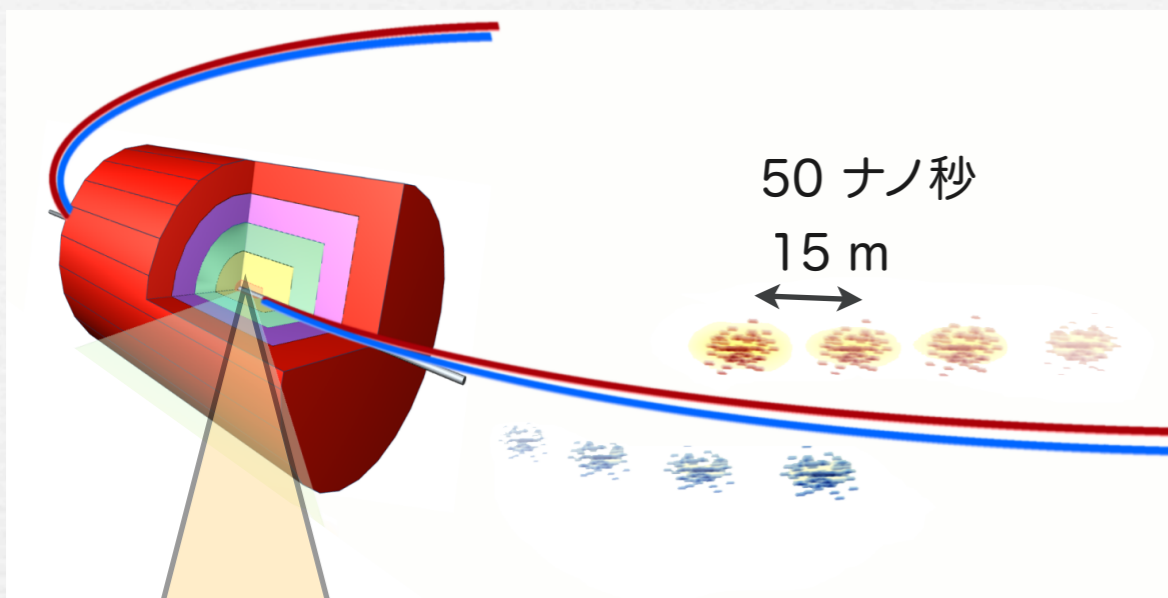
LHC加速器の大きさ



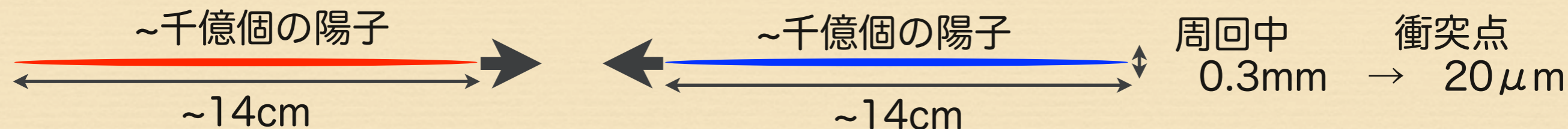
大阪環状線 < LHC~名古屋地下鉄名城線 < 東京山手線
 ~21km ~27km ~34.5km



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

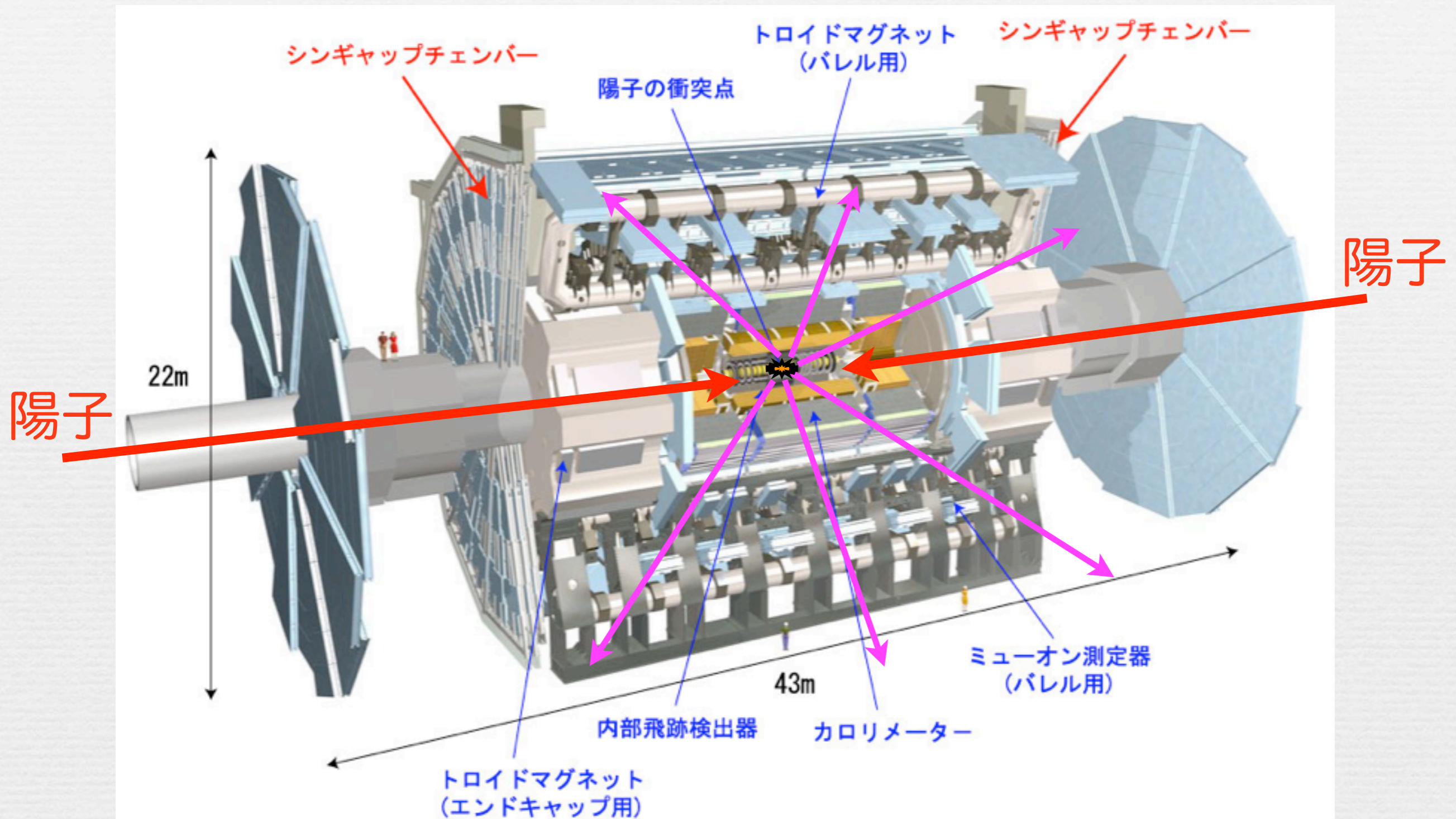
宇宙誕生直後(10^{-12} 秒後)の世界

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)

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

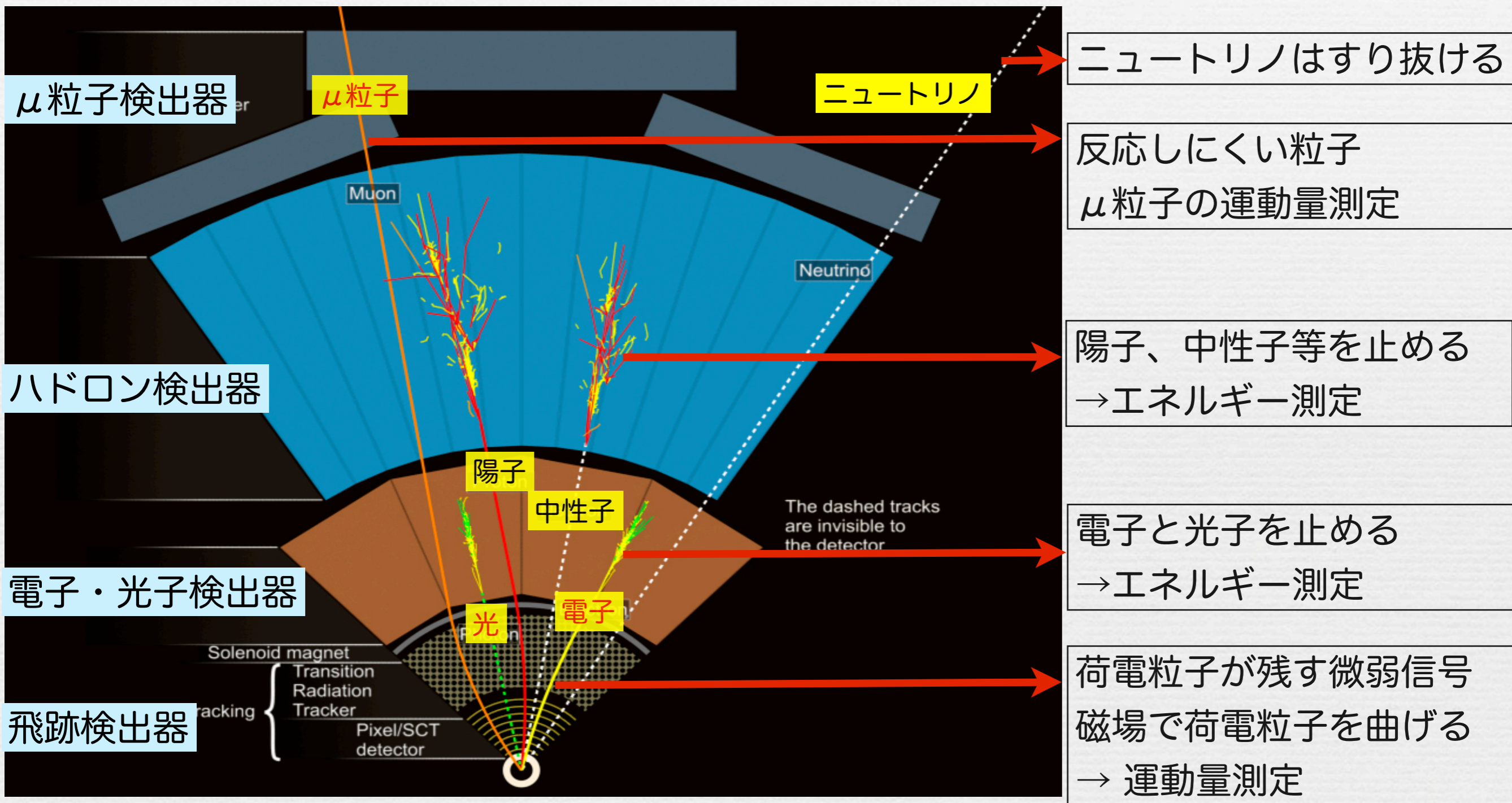


ヒッグス粒子は不安定 → 軽い安定粒子に化ける (崩壊)

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

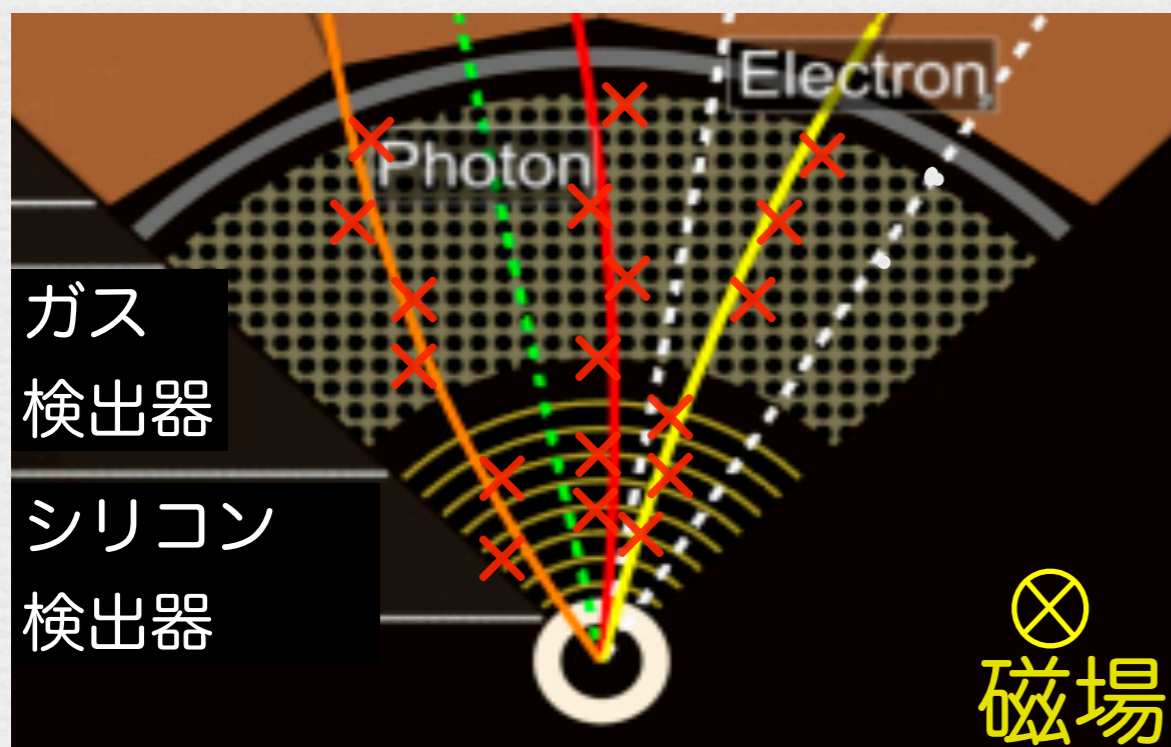
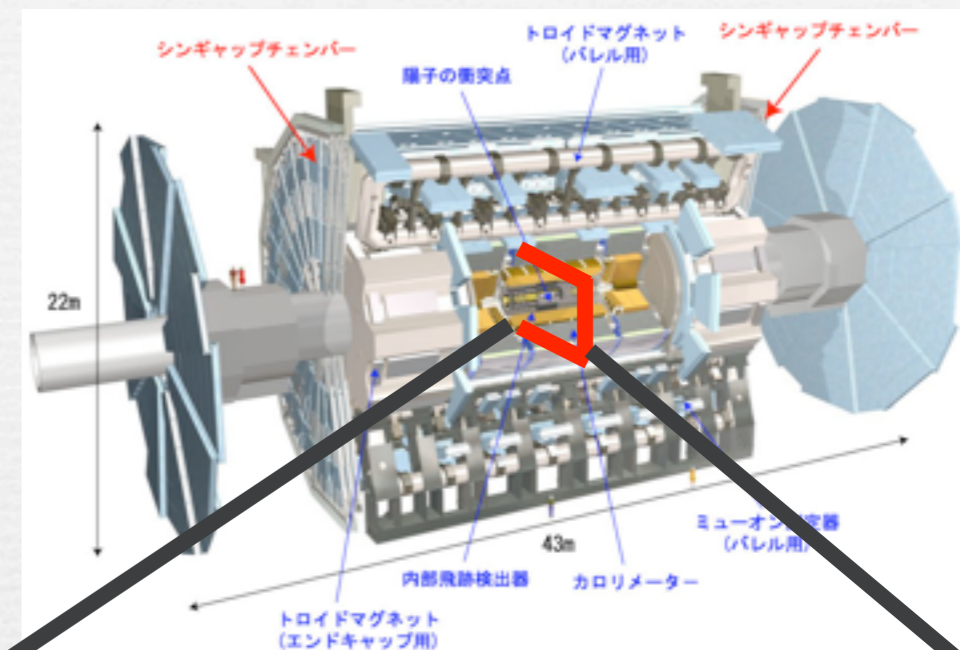
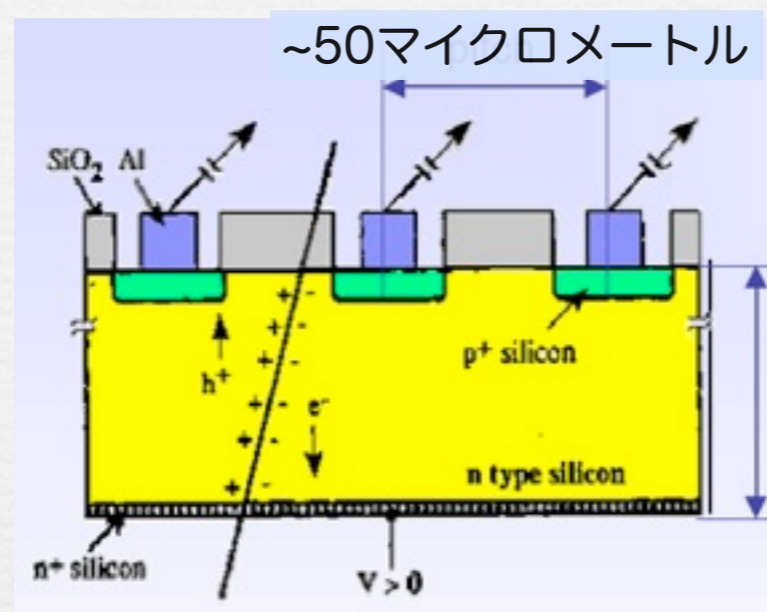
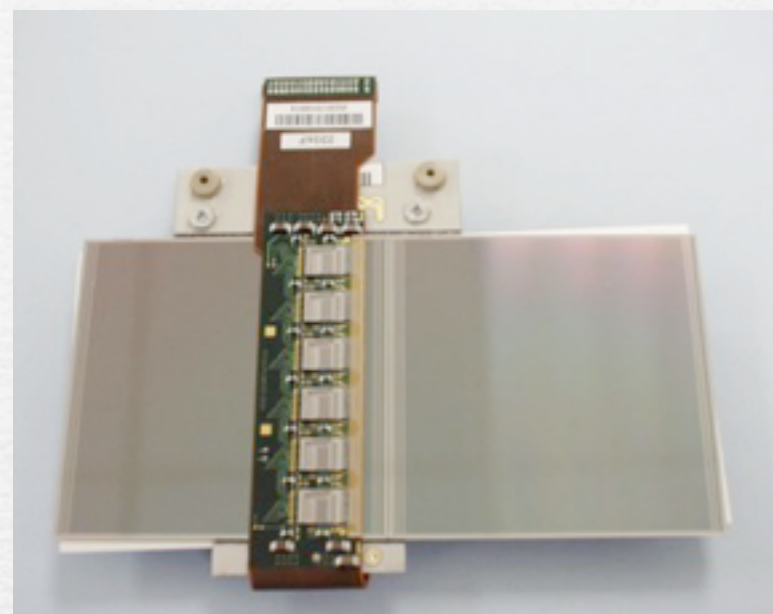
検出器の原理

検出器の物質と粒子との相互作用を利用する

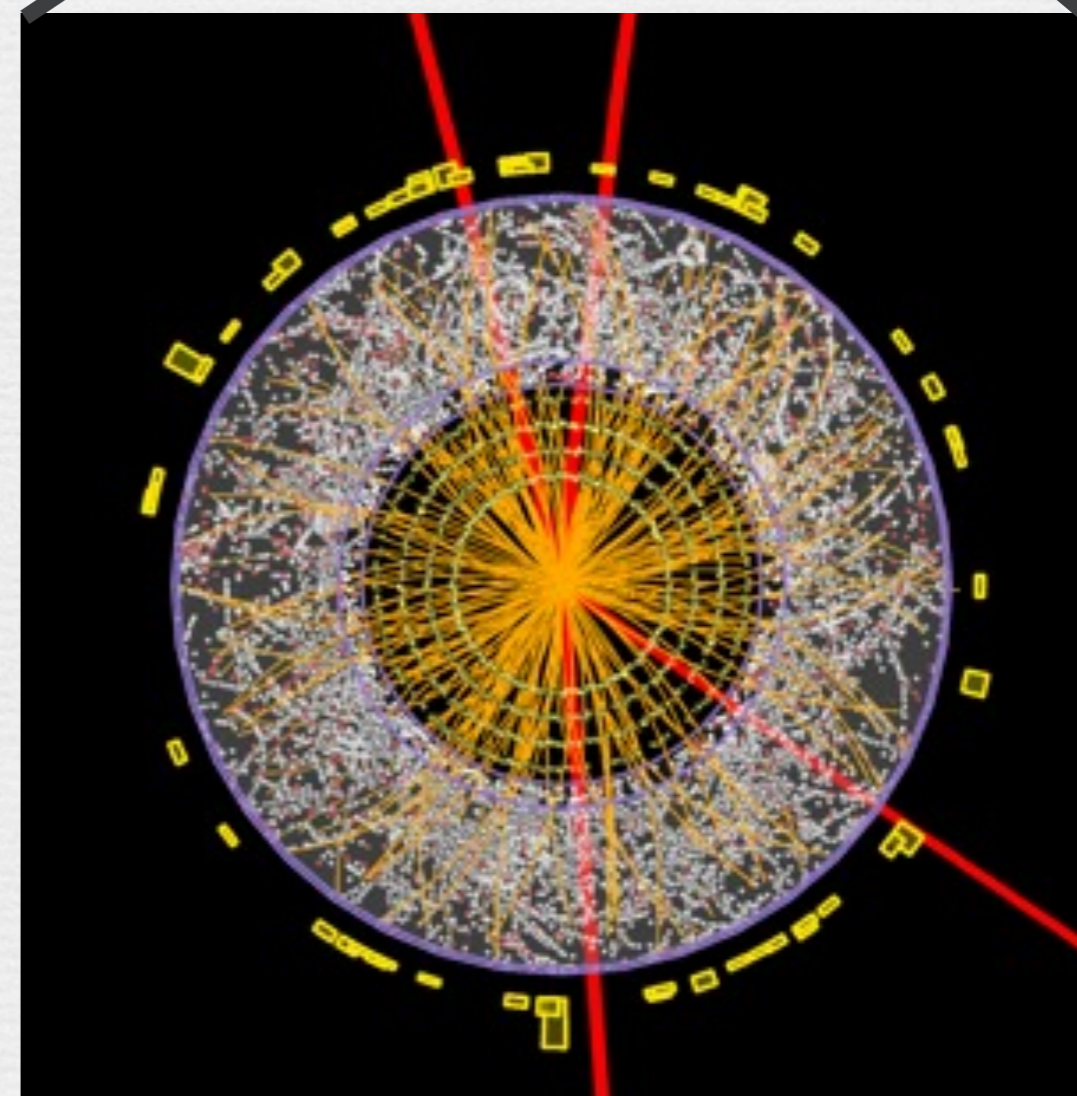


粒子の種類、エネルギー、運動量を測定

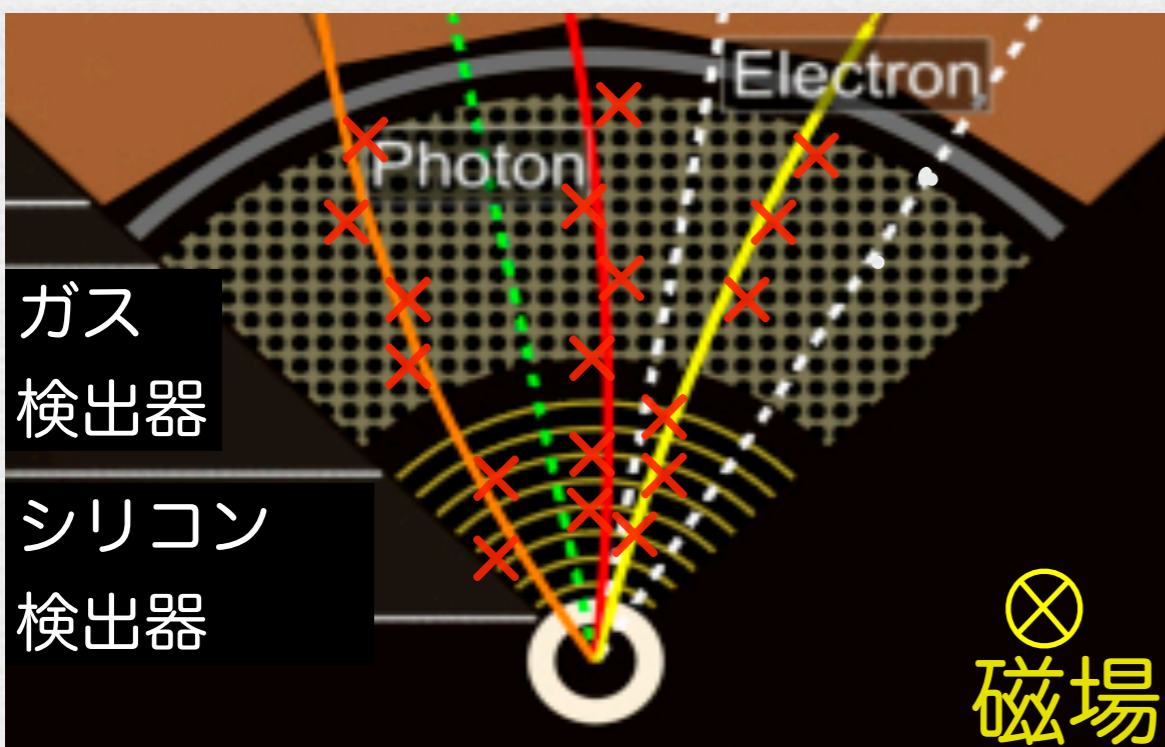
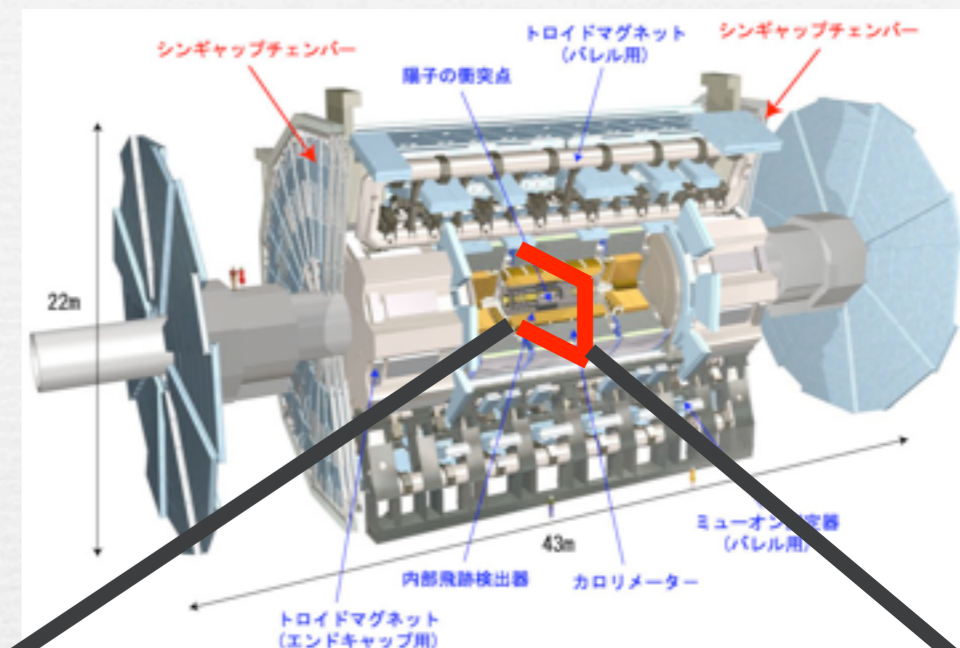
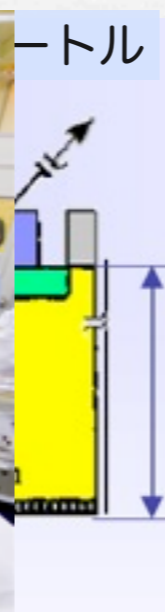
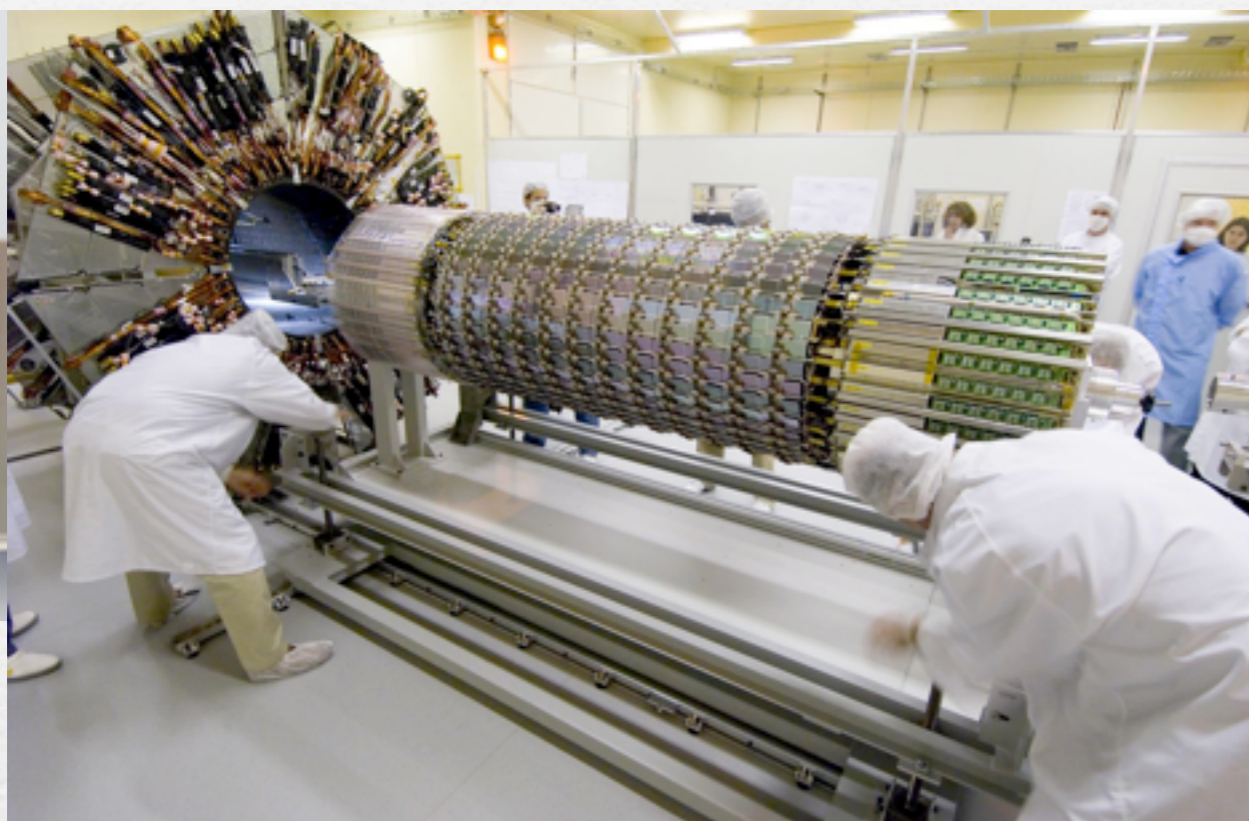
運動量測定 (飛跡検出器)



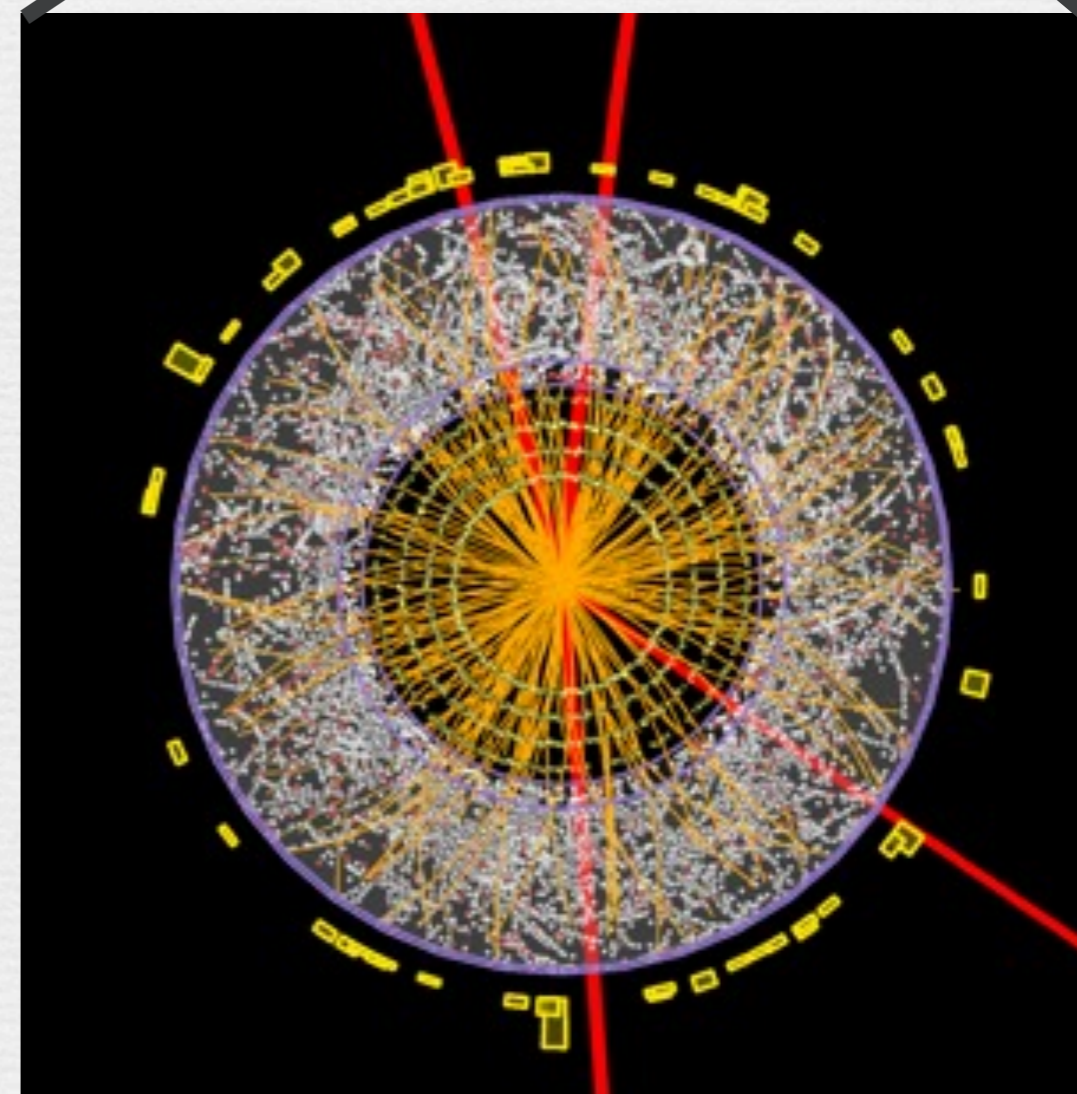
$$(\text{運動量}) = 0.3 \times (\text{磁場}) \times (\text{半径})$$



運動量測定 (飛跡検出器)

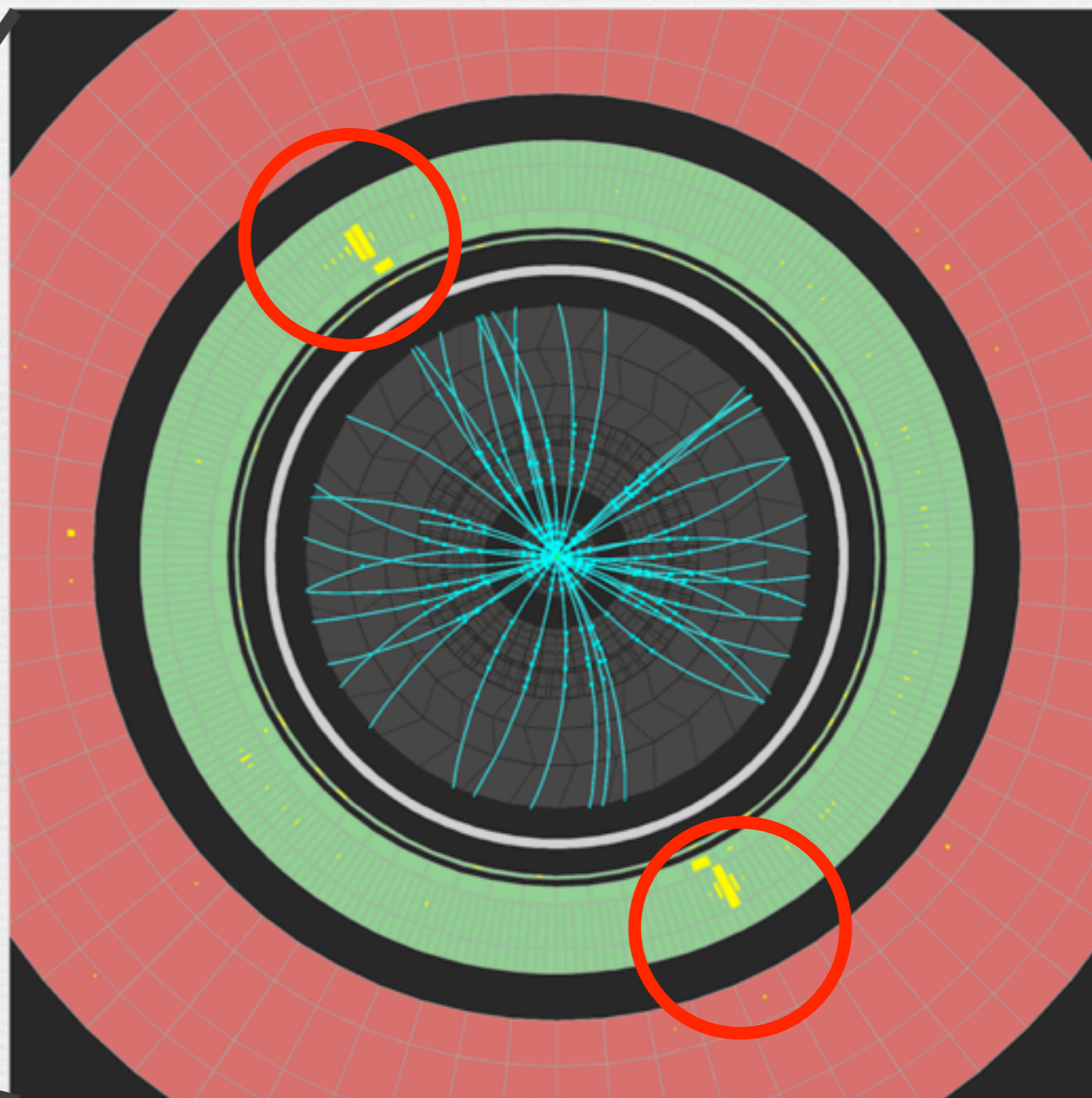
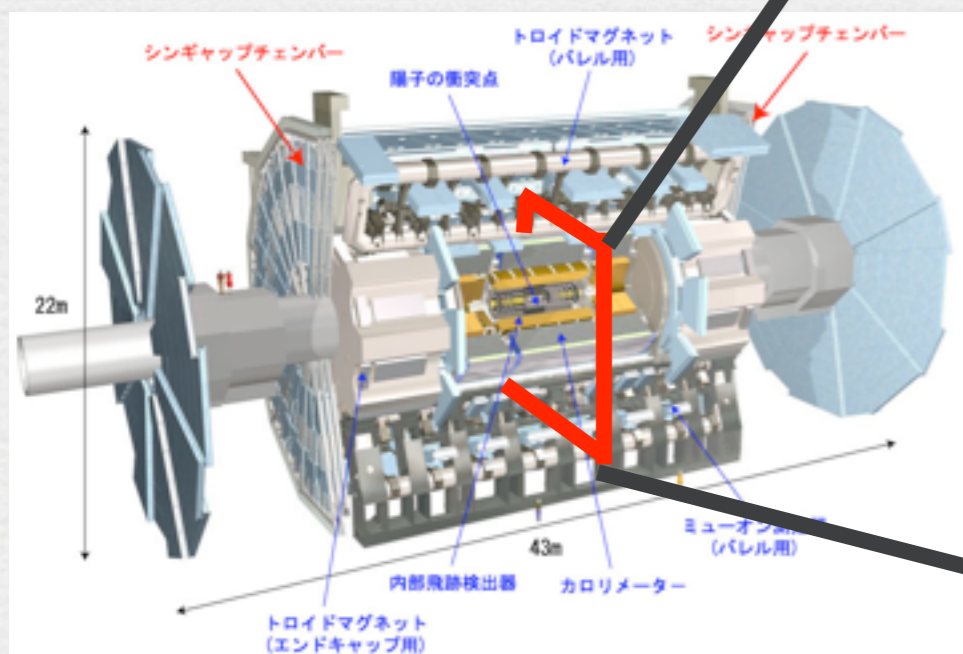
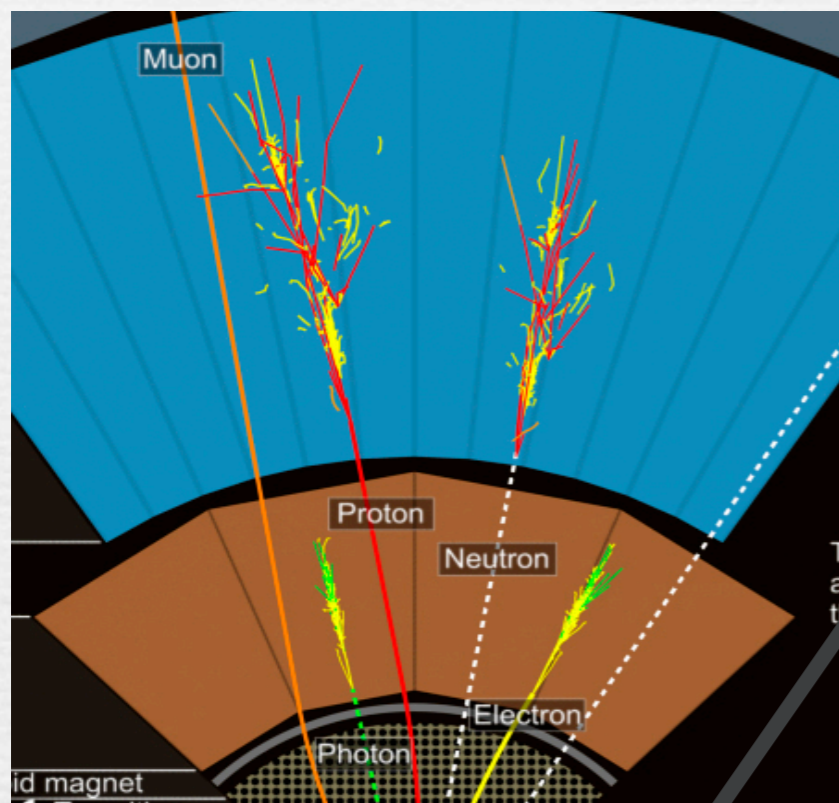


$$(\text{運動量}) = 0.3 \times (\text{磁場}) \times (\text{半径})$$

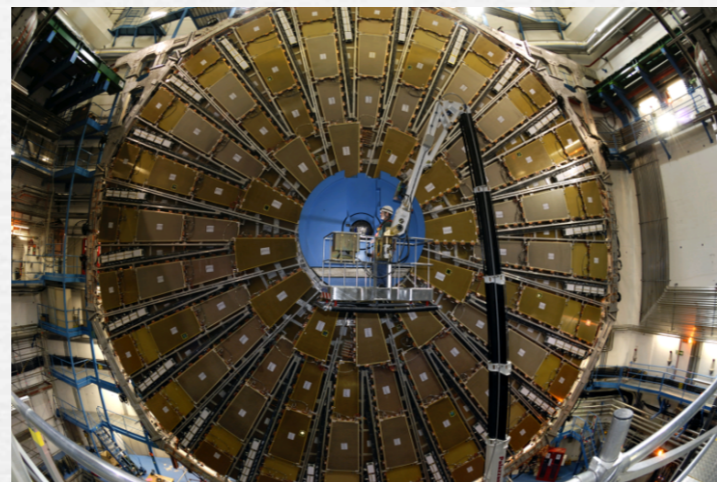
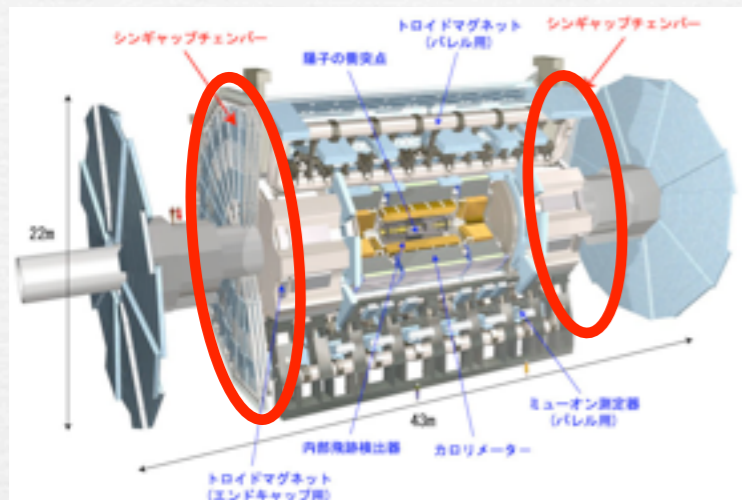


エネルギー測定器（カロリメータ）

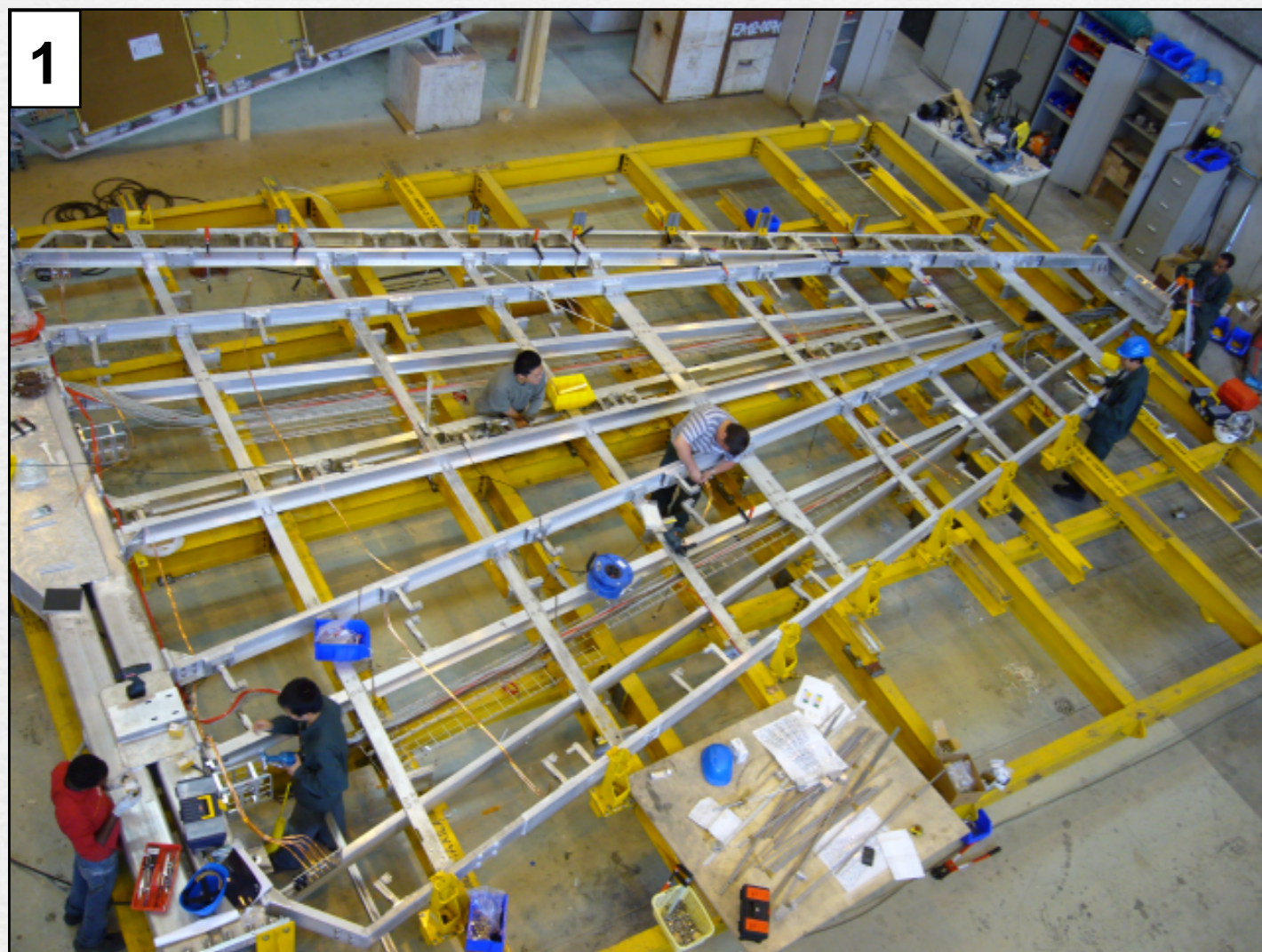
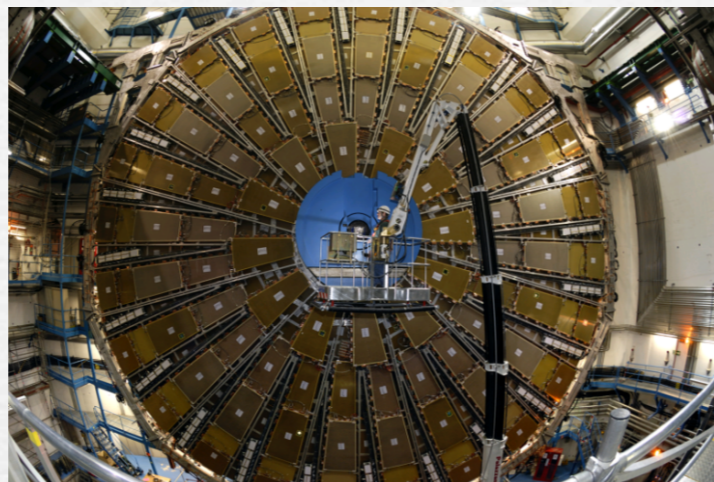
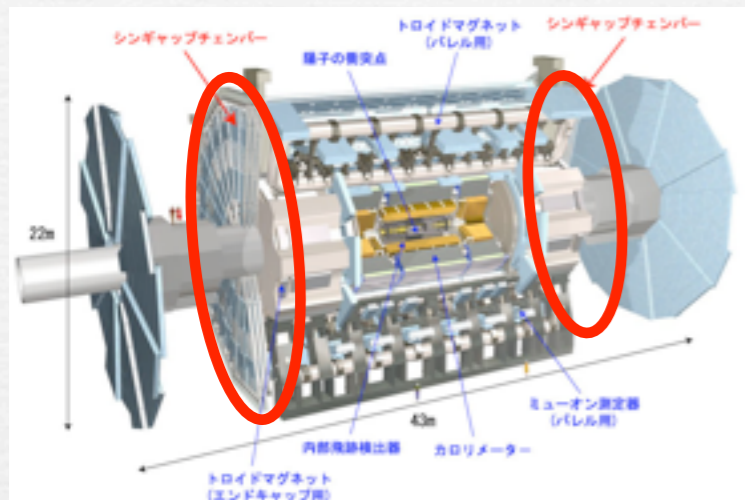
光子、電子、陽子、中性子などを物質で止める
そのとき出る光や熱を電気信号として捉える



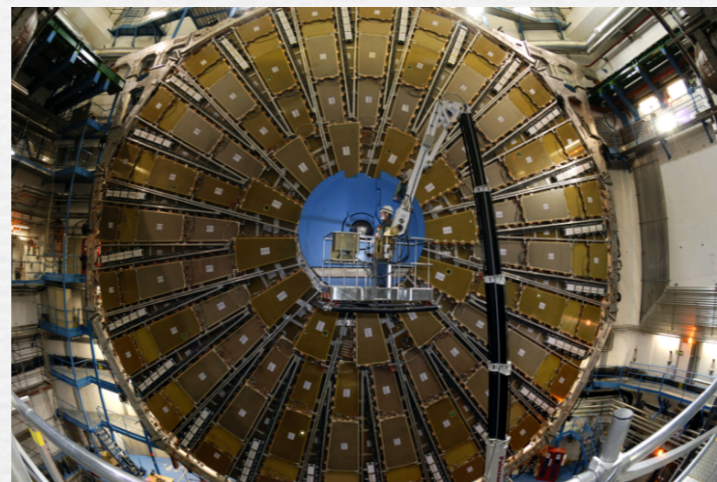
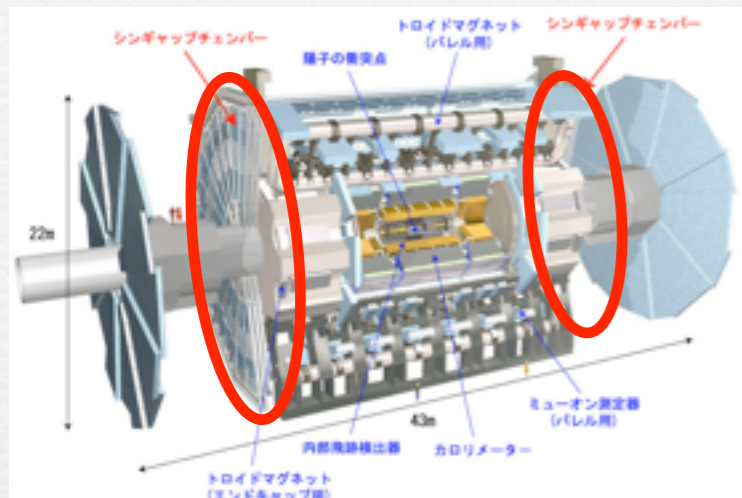
μ 粒子検出器の組み立て



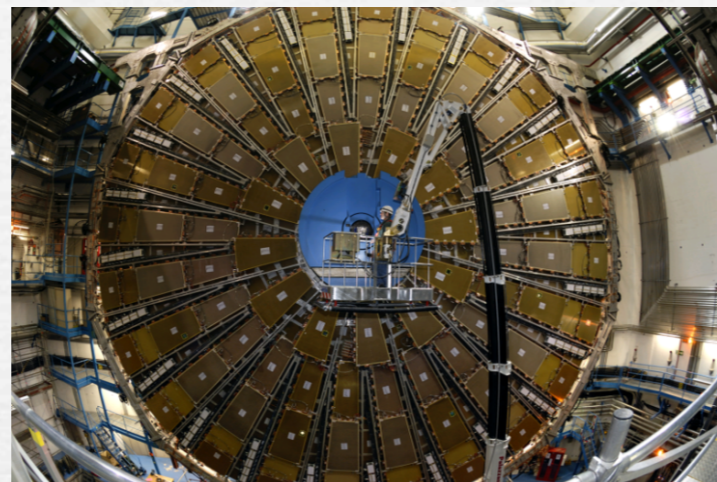
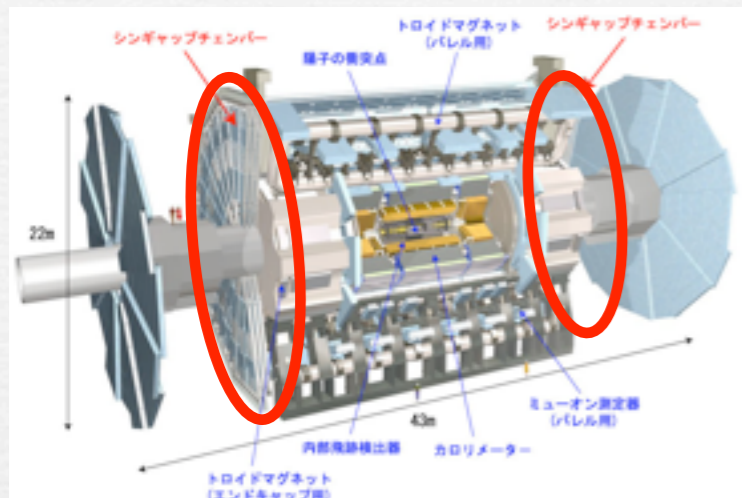
μ 粒子検出器の組み立て



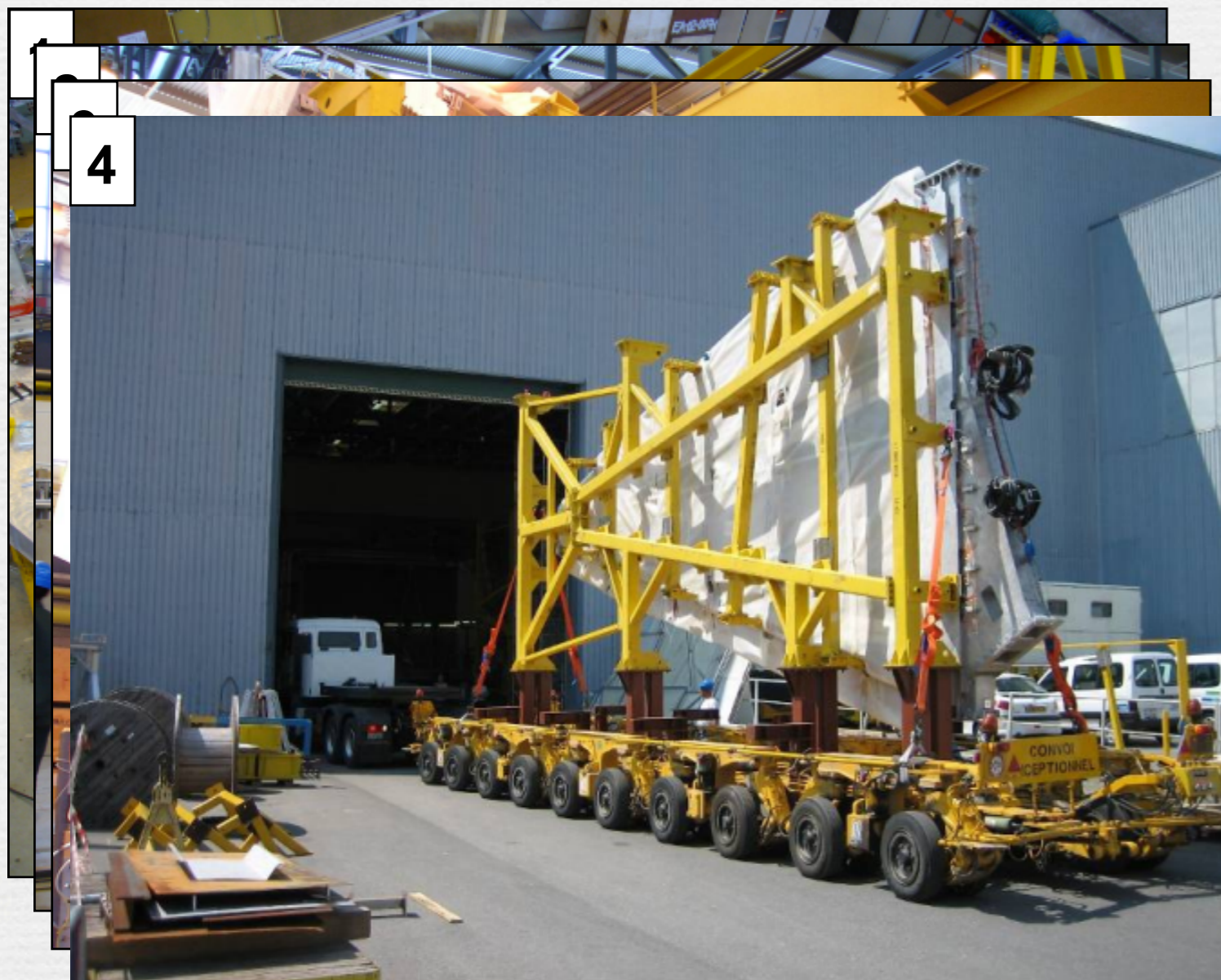
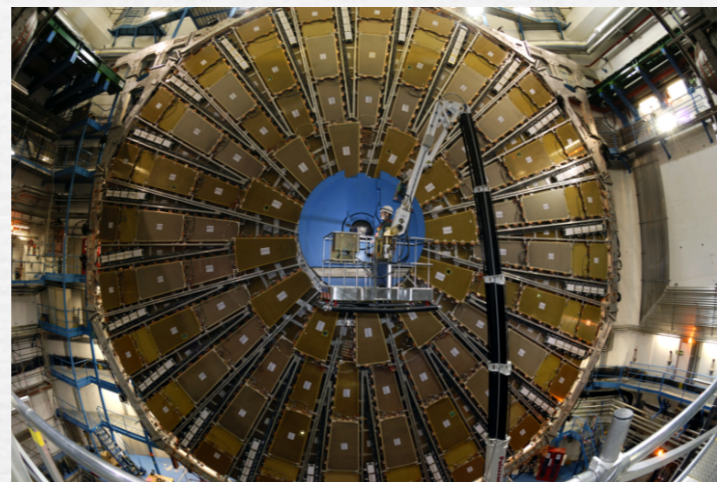
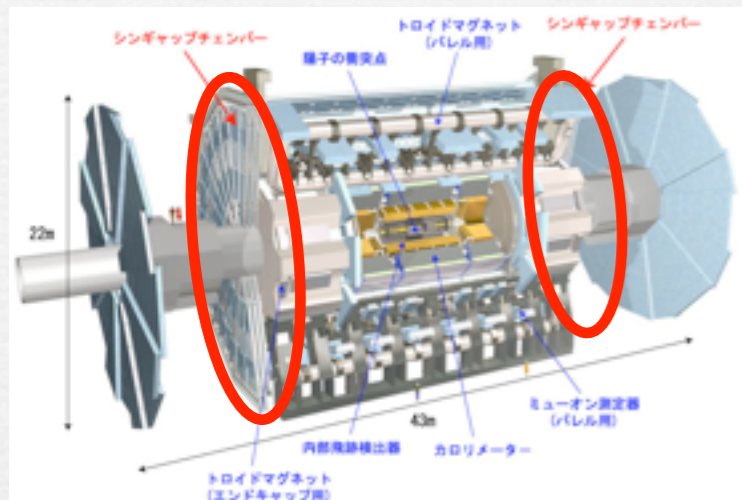
μ 粒子検出器の組み立て



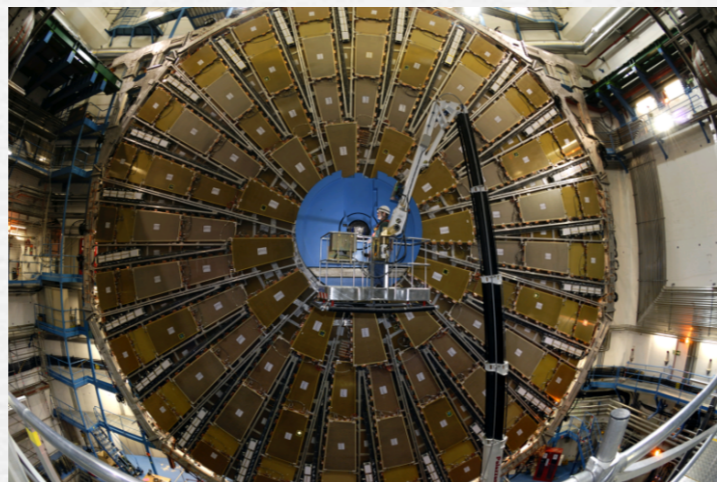
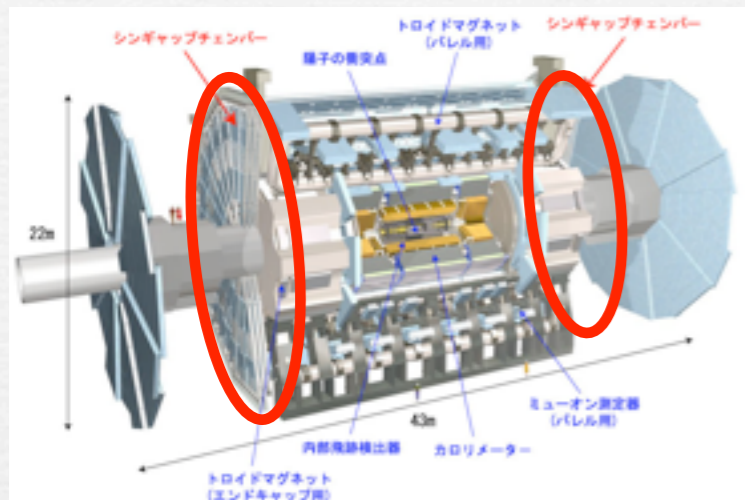
μ 粒子検出器の組み立て



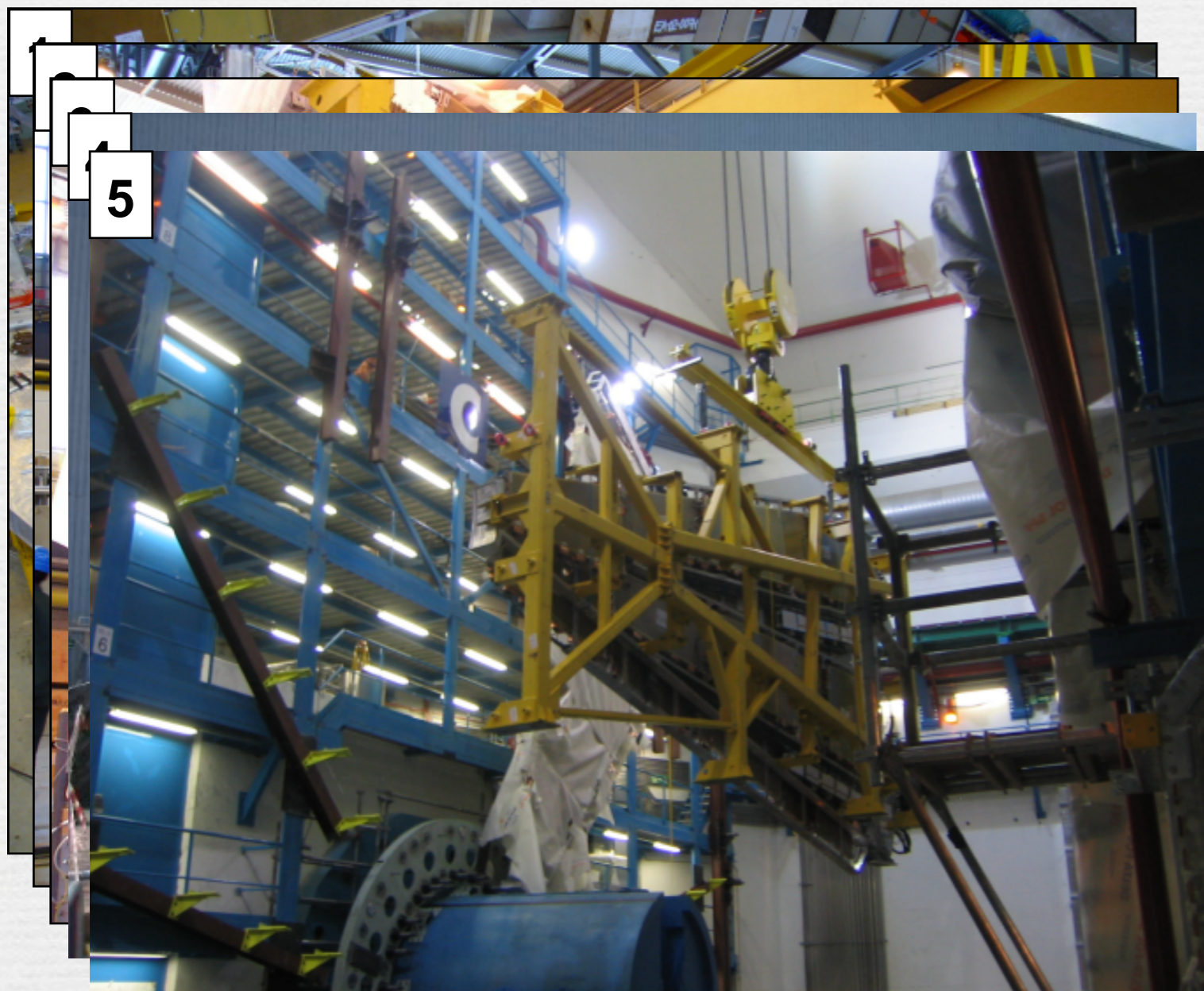
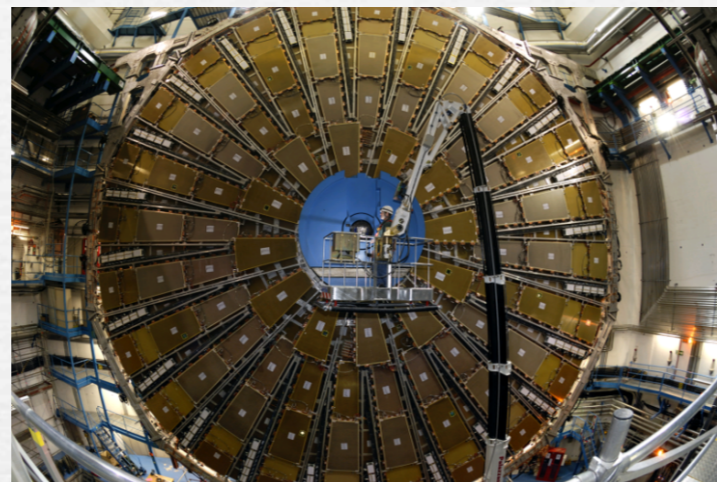
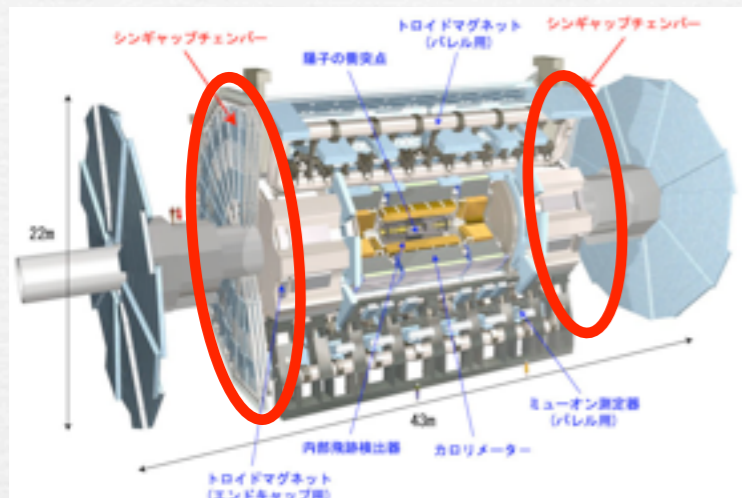
μ 粒子検出器の組み立て



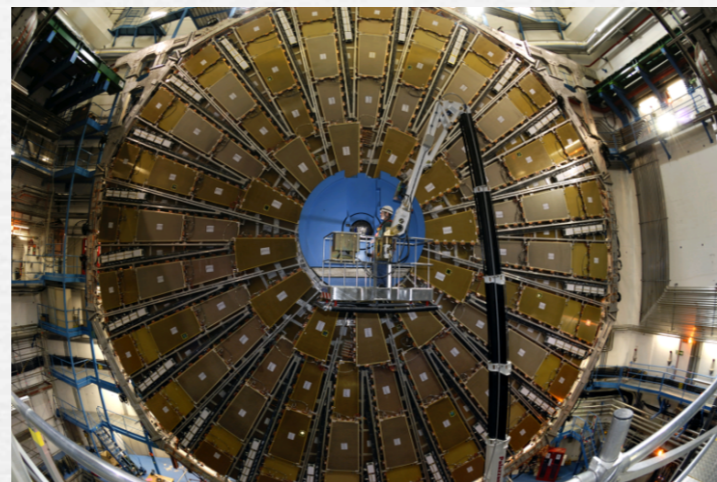
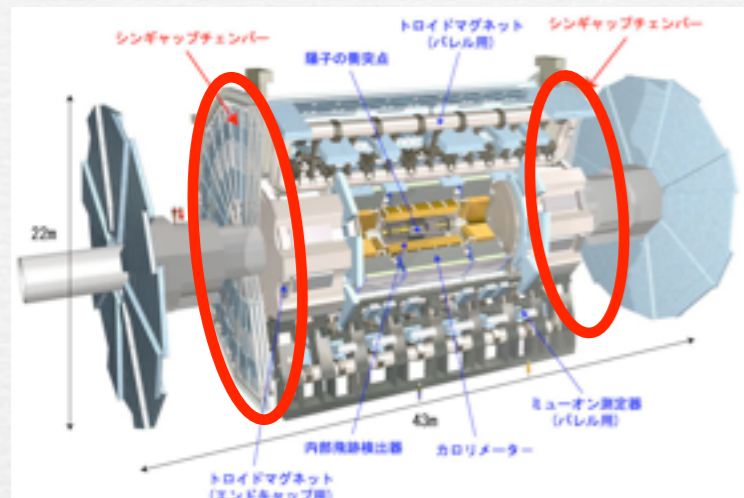
μ 粒子検出器の組み立て



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

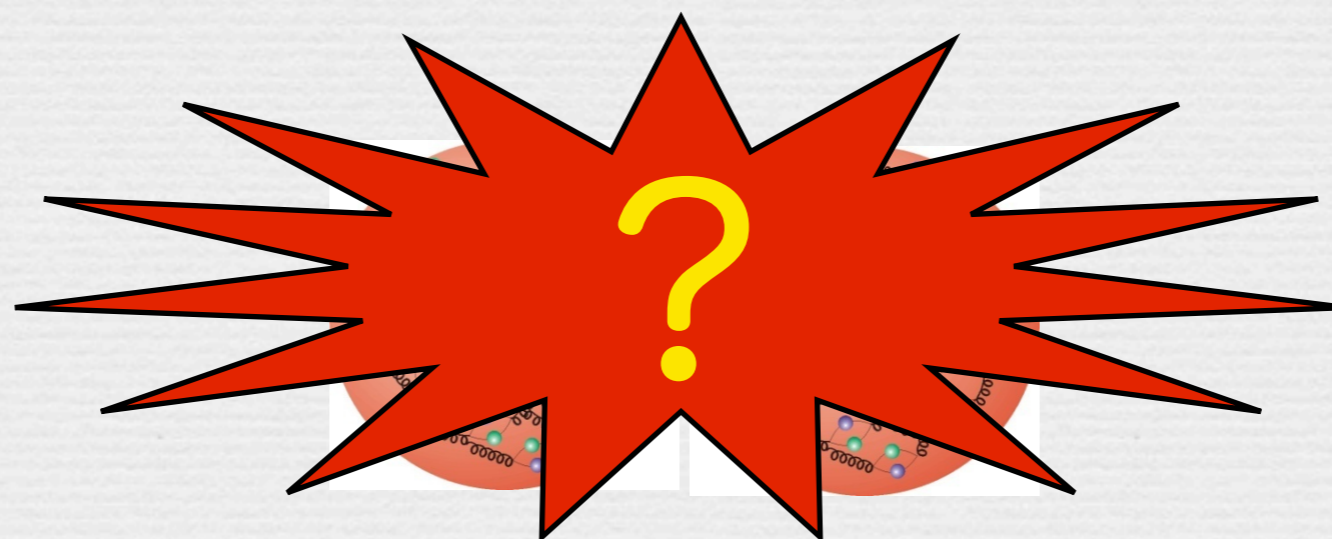
陽子・陽子衝突

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

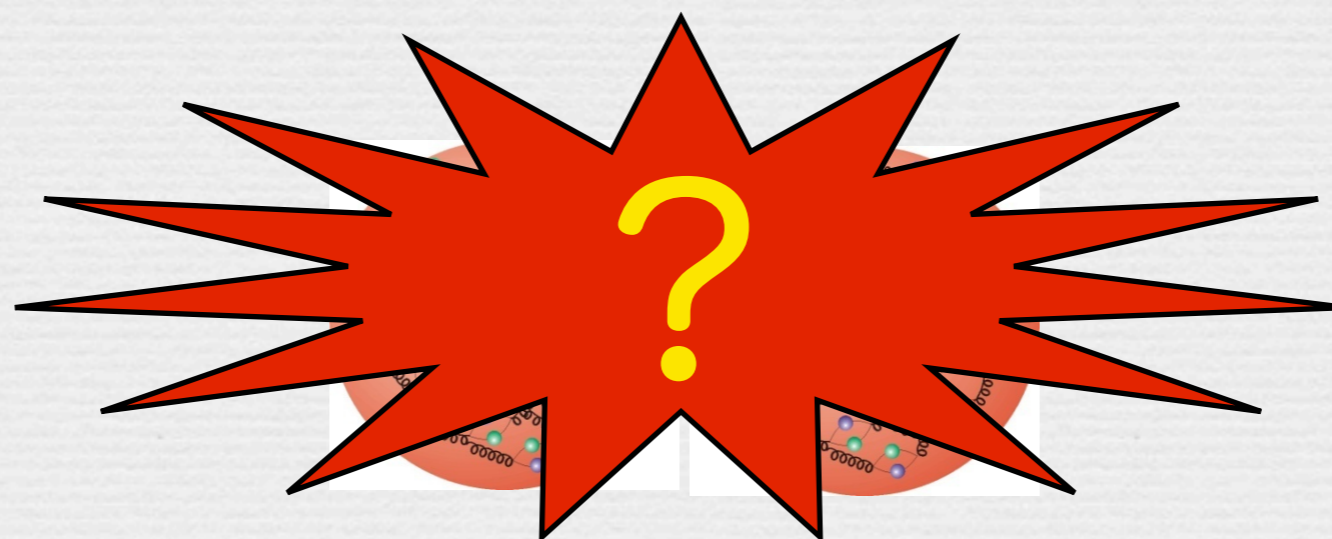
ボール同士の衝突：次の反応が予測可能



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

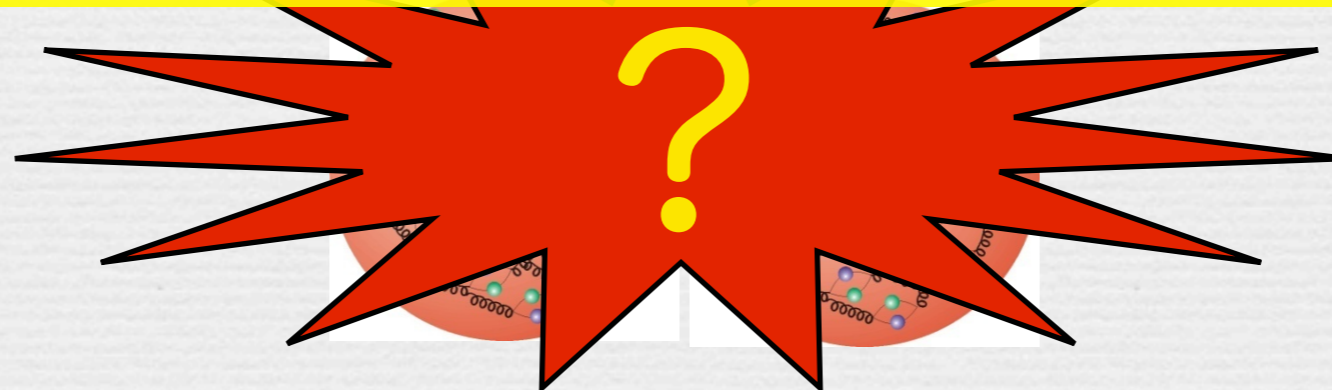
陽子・陽子衝突

| 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！

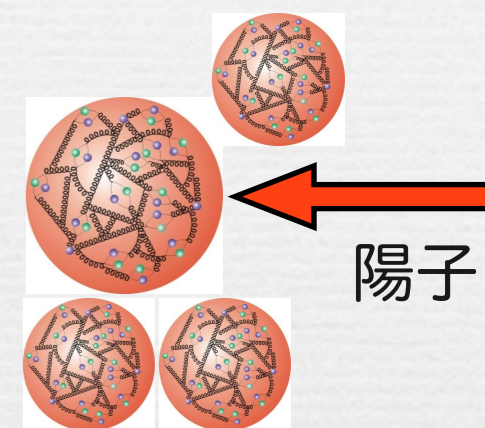
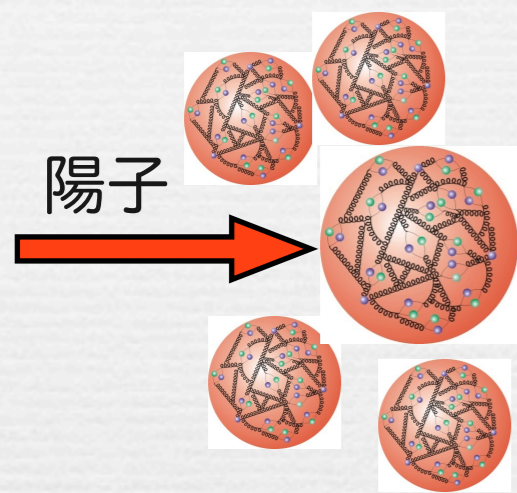
2,000兆回の陽子衝突では、40万個のヒッグス粒子が生成



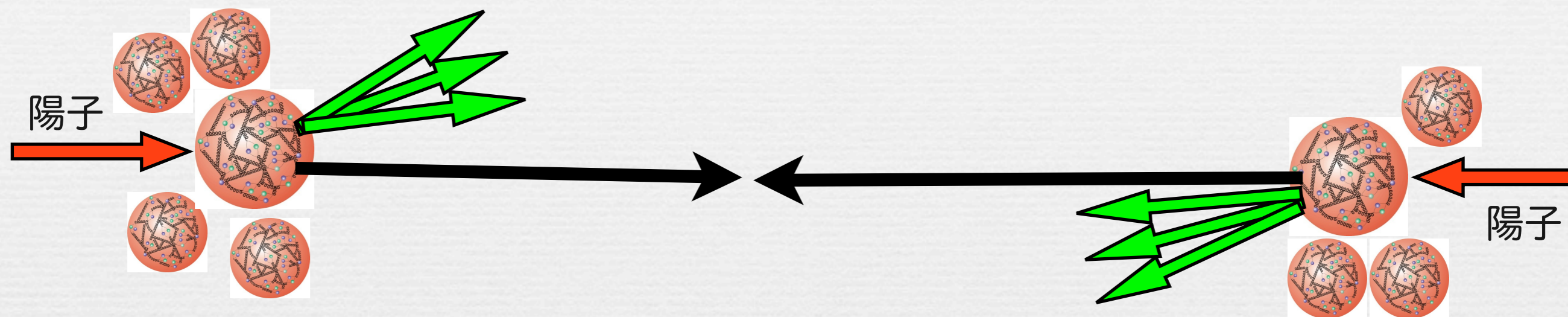
陽子同士の衝突：次の反応は予測不可能
反応の起こる確率は解る

陽子・陽子衝突

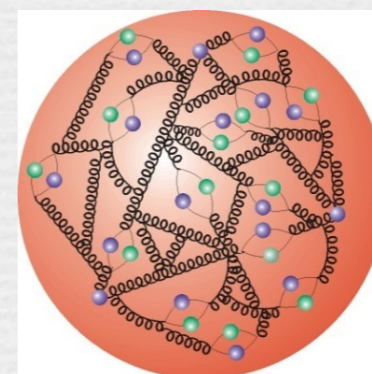
陽子・陽子衝突



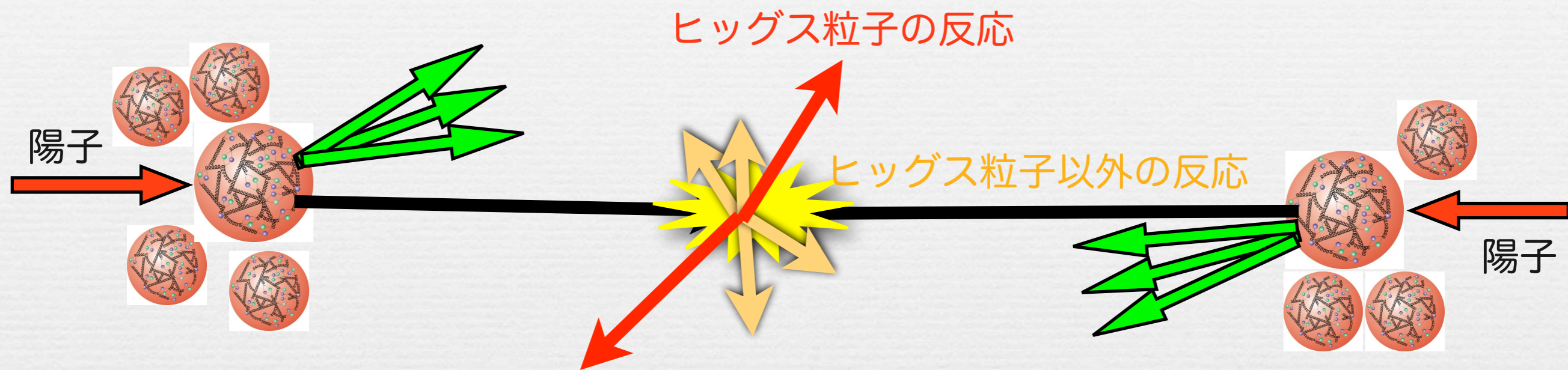
陽子・陽子衝突



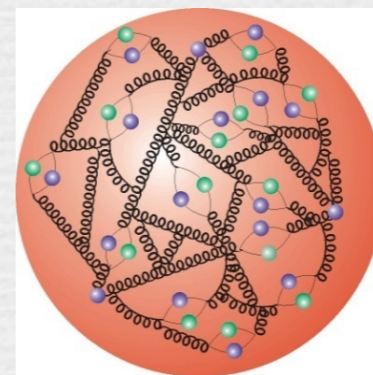
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン
一部だけが衝突による反応に関与



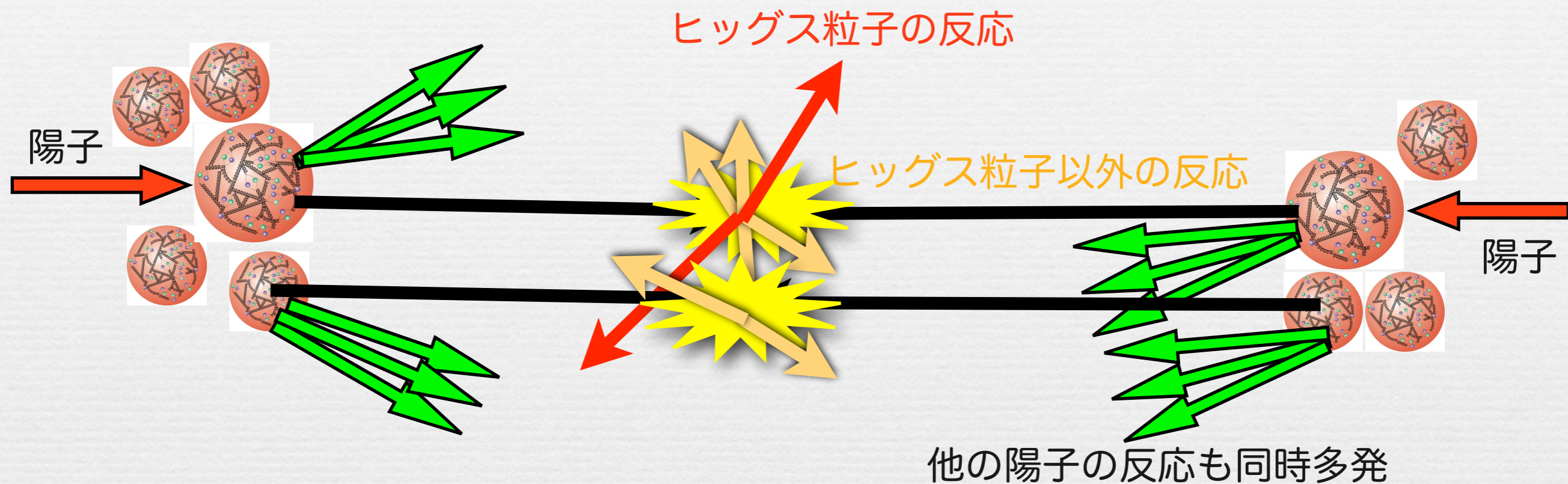
陽子・陽子衝突



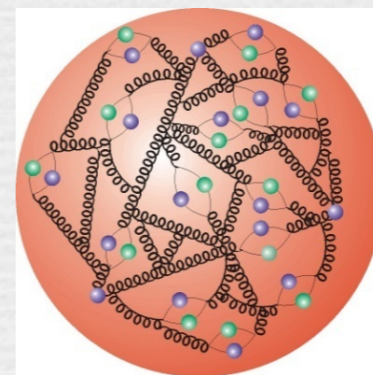
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン
一部だけが衝突による反応に関与



陽子・陽子衝突



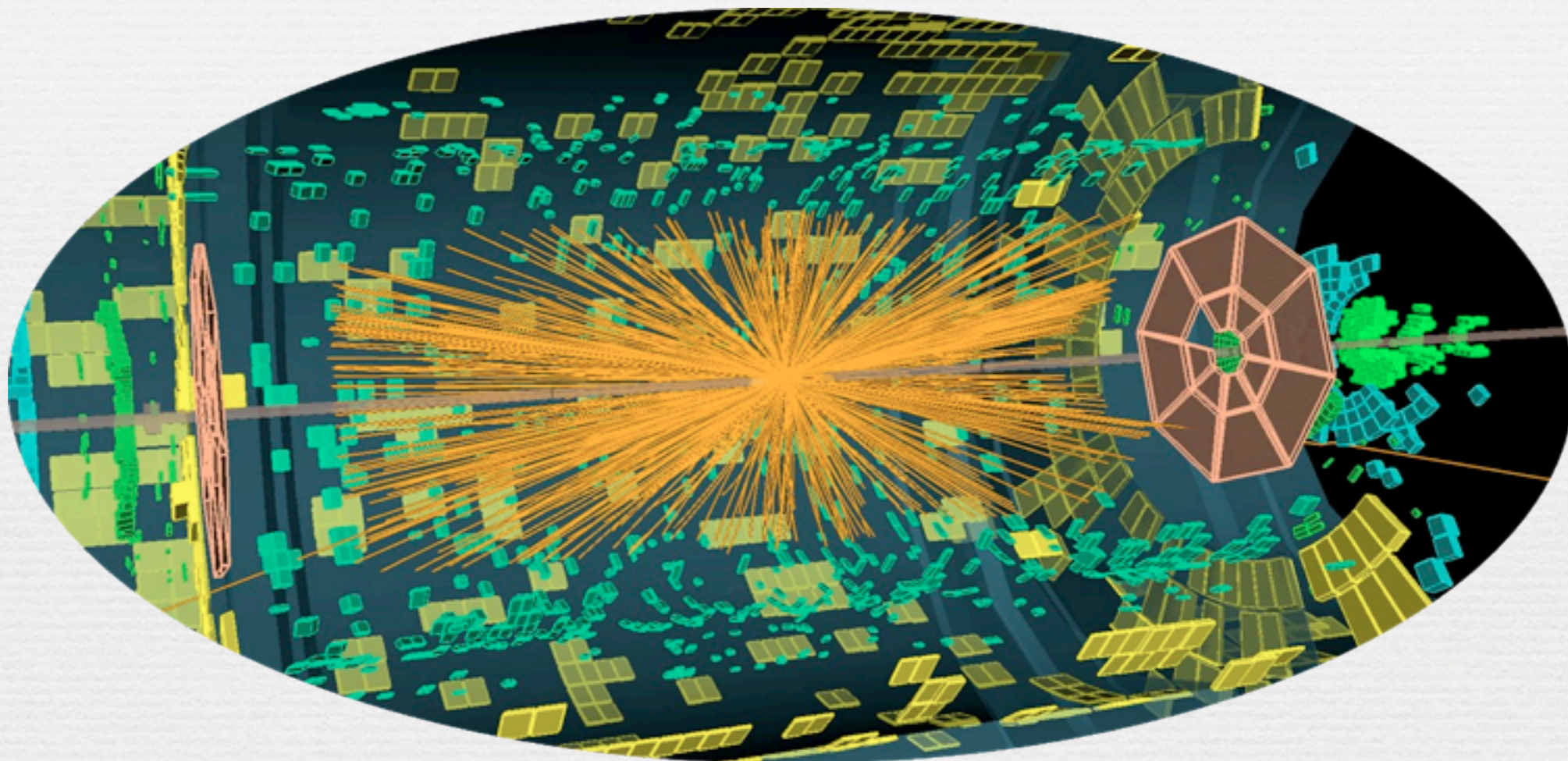
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン
一部だけが衝突による反応に関与



実際の陽子陽子衝突反応

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

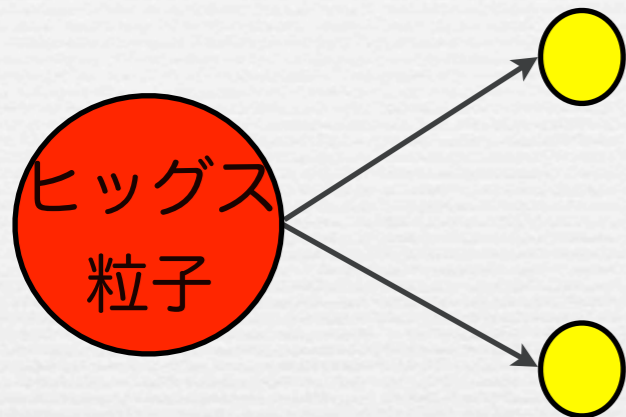
ヒッグス粒子を含む事象(50億分の1)を選ぶ

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

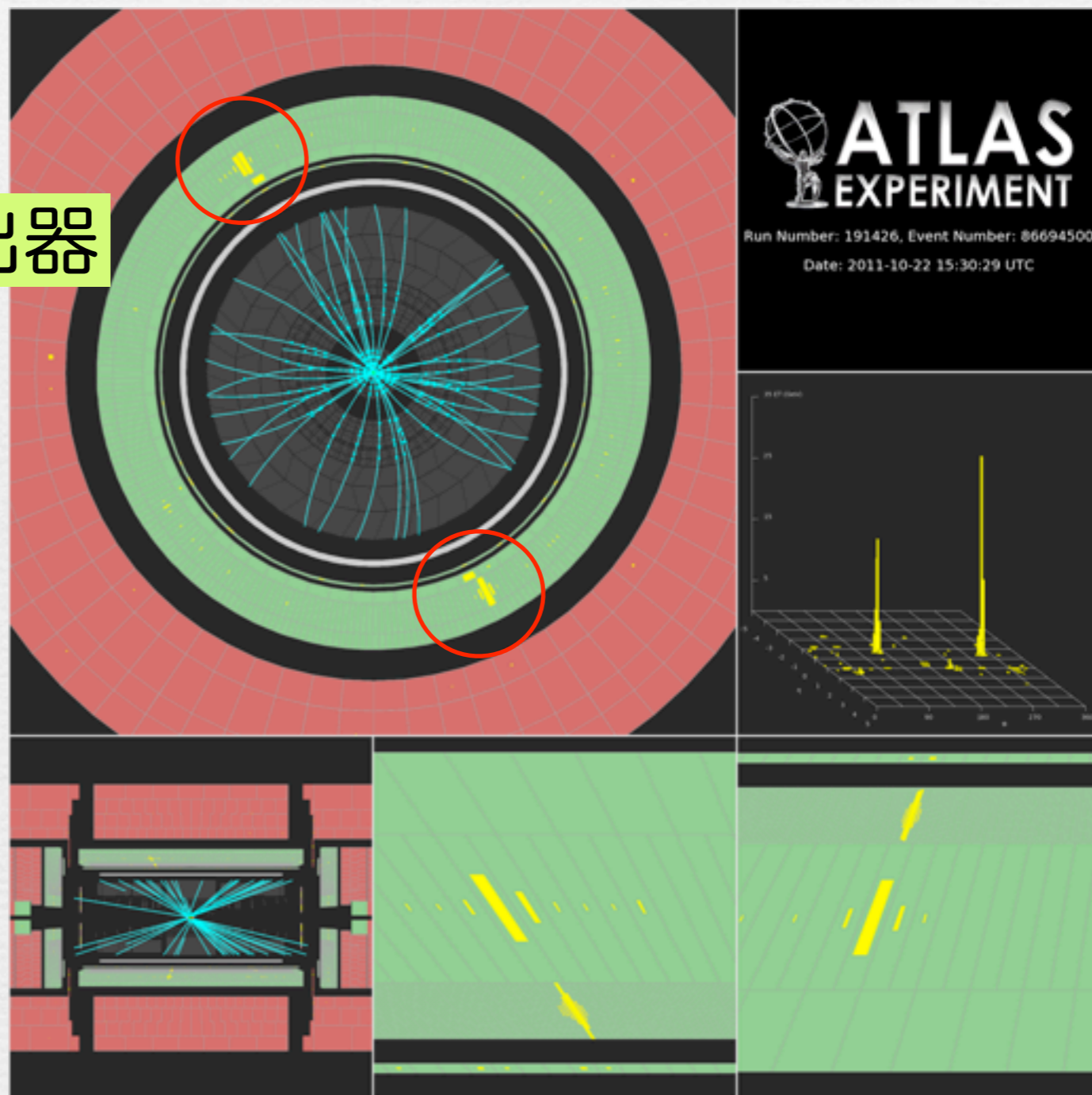
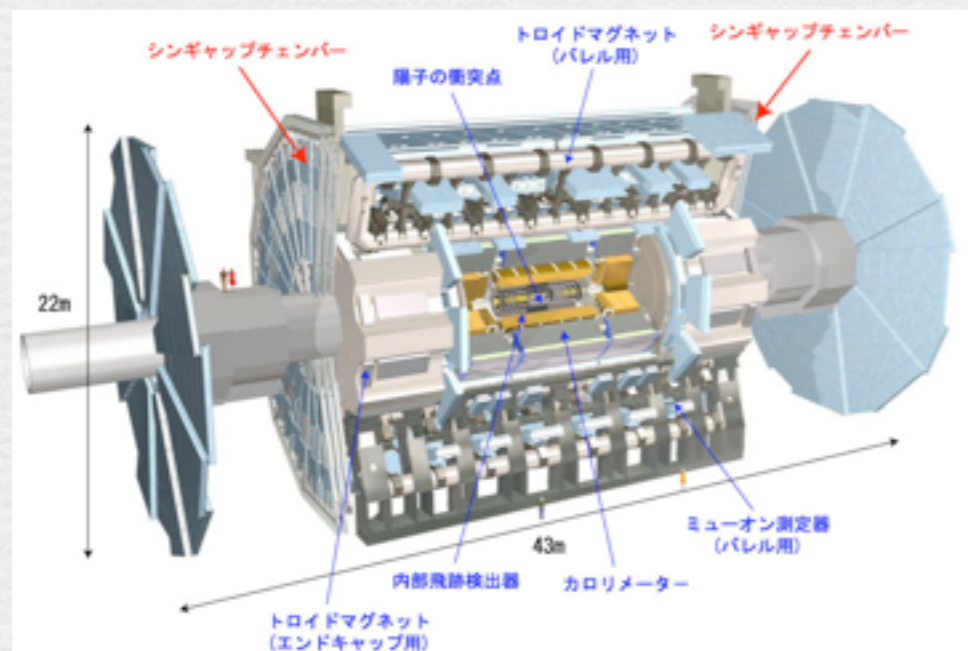
化ける確率はわかるが、何に化けるかは予想できない

| | |
|------------------------------|-------|
| $H \rightarrow ZZ$ | 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

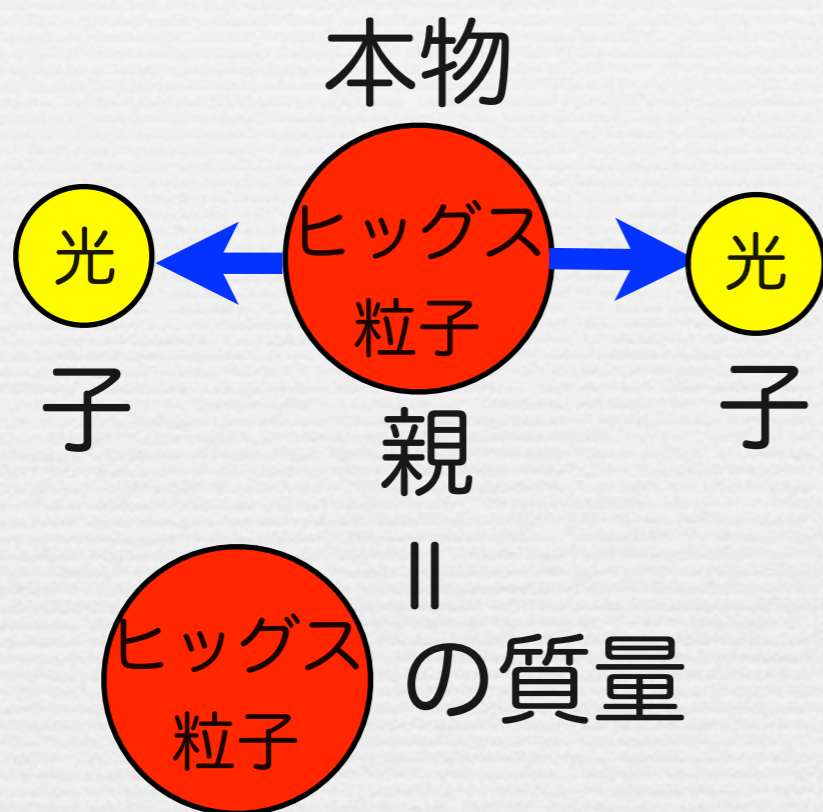
親と子の粒子の関係

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

質量の復元

親と子の粒子の関係

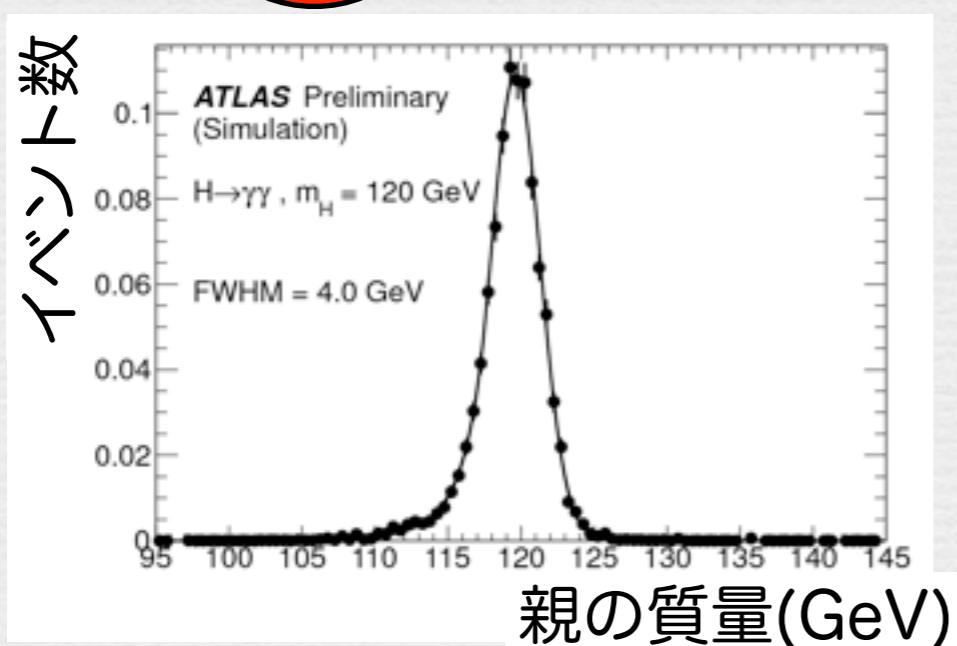
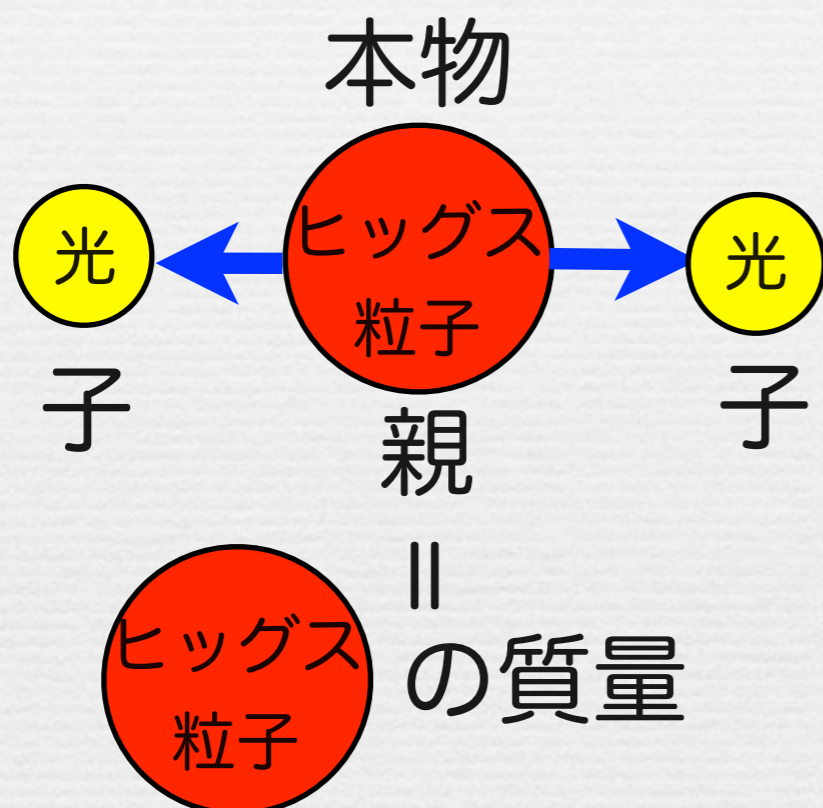
$$(親の質量)^2 = (子のエネルギー和)^2 - (子の運動量和)^2$$



質量の復元

親と子の粒子の関係

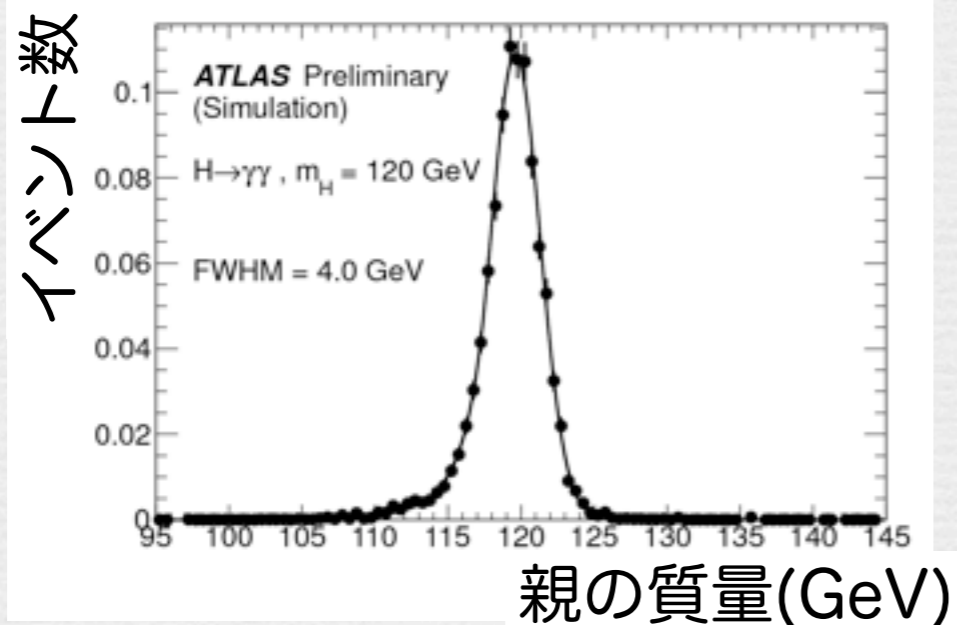
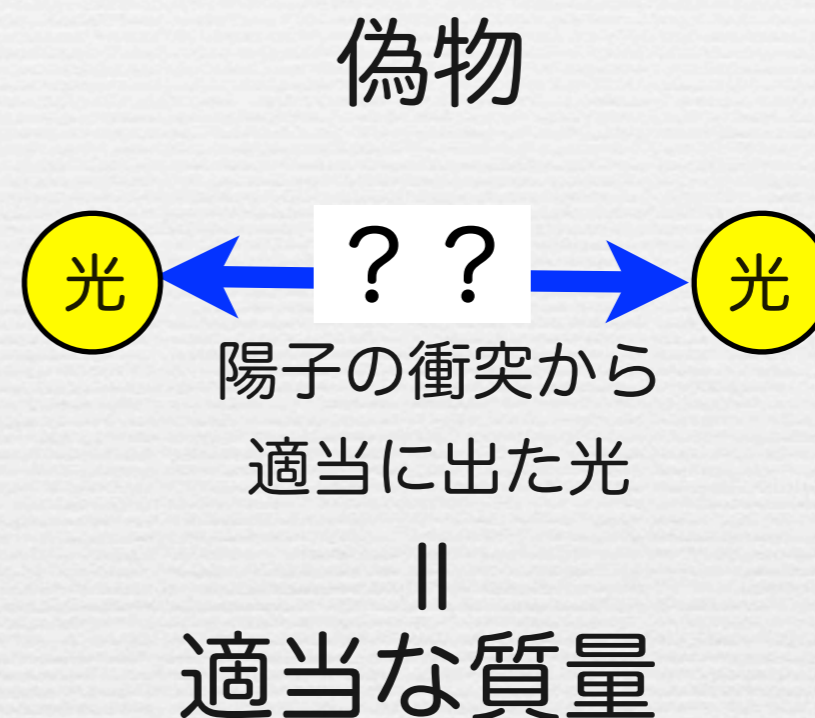
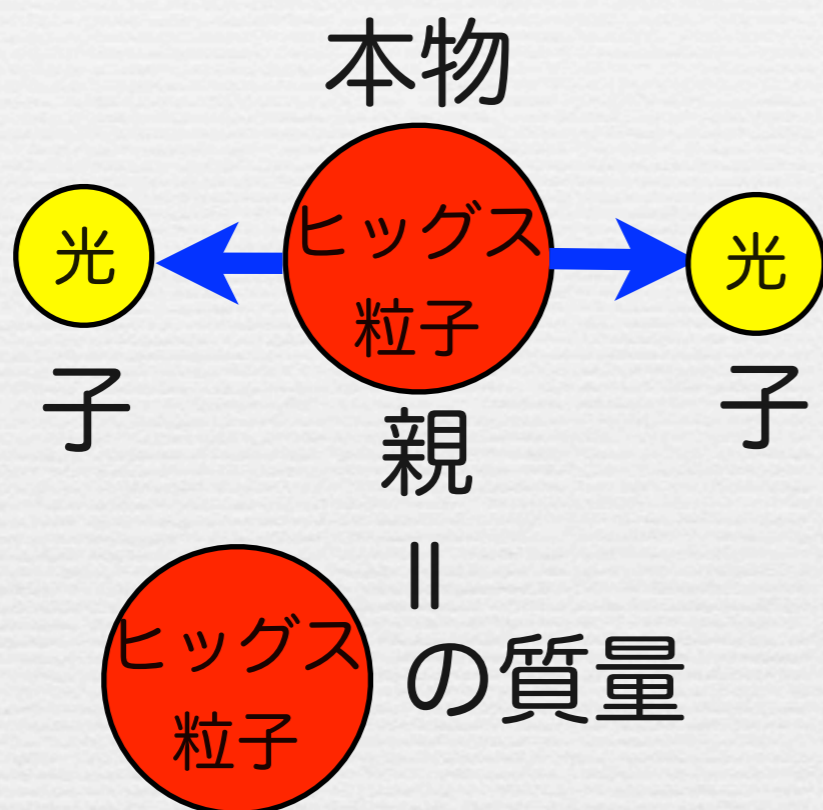
$$(親の質量)^2 = (子のエネルギー和)^2 - (子の運動量和)^2$$



質量の復元

親と子の粒子の関係

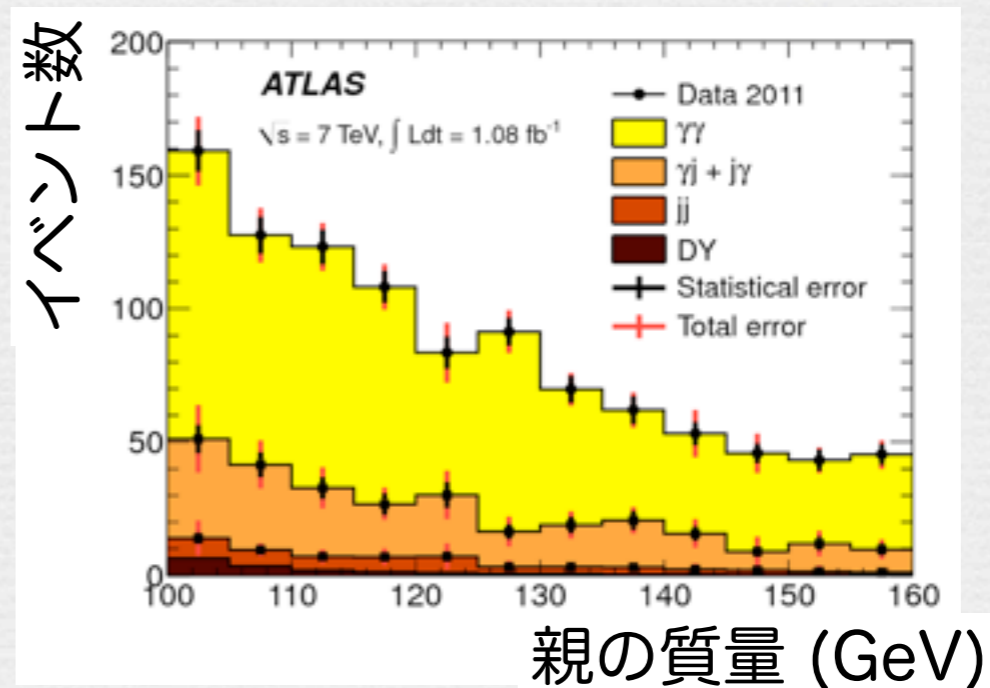
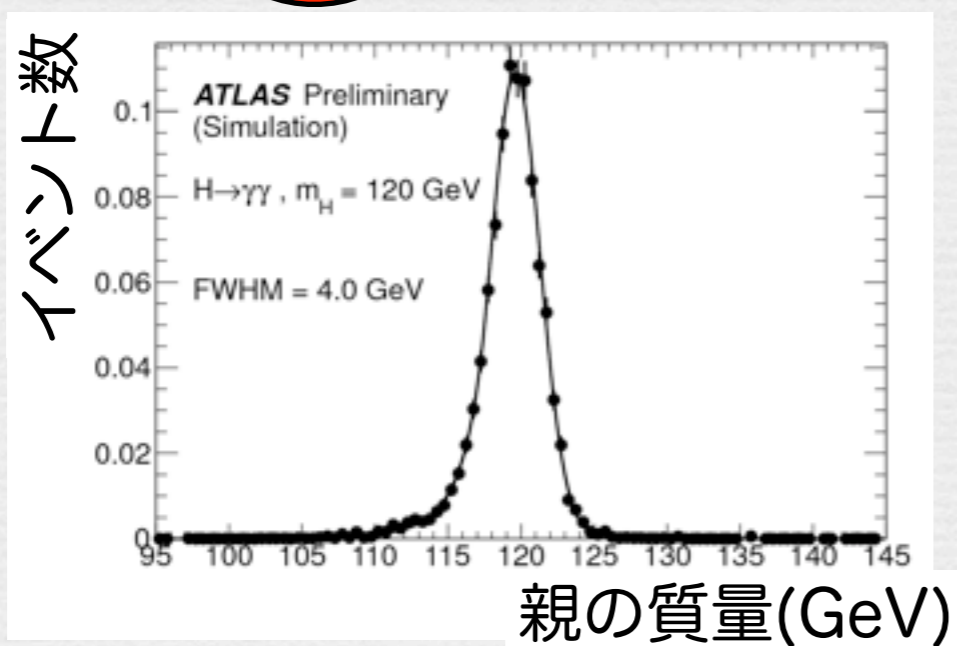
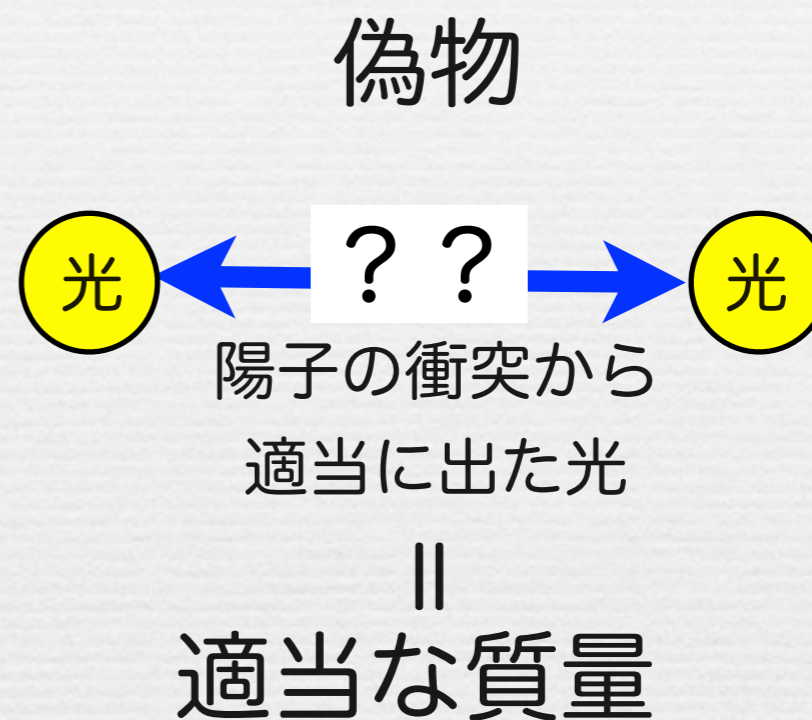
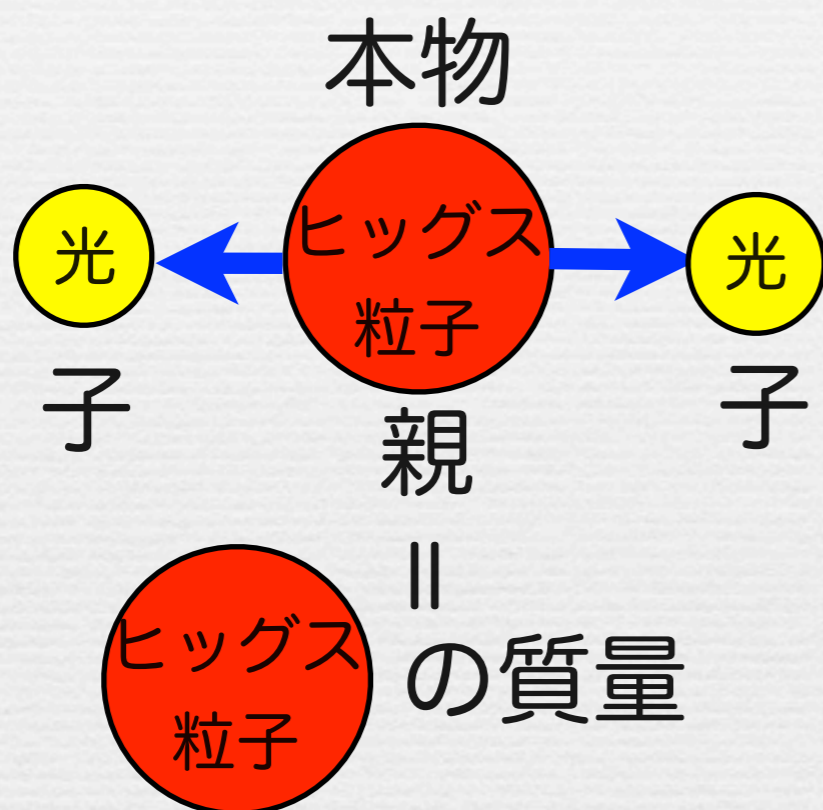
$$(親の質量)^2 = (子のエネルギー和)^2 - (子の運動量和)^2$$



質量の復元

親と子の粒子の関係

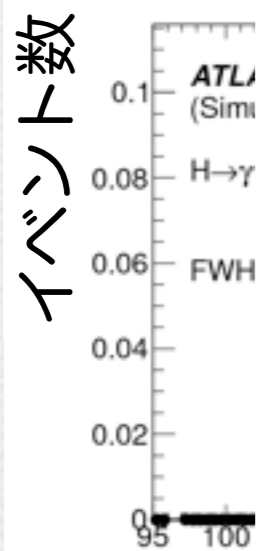
$$(親の質量)^2 = (子のエネルギー和)^2 - (子の運動量和)^2$$



質量の復元

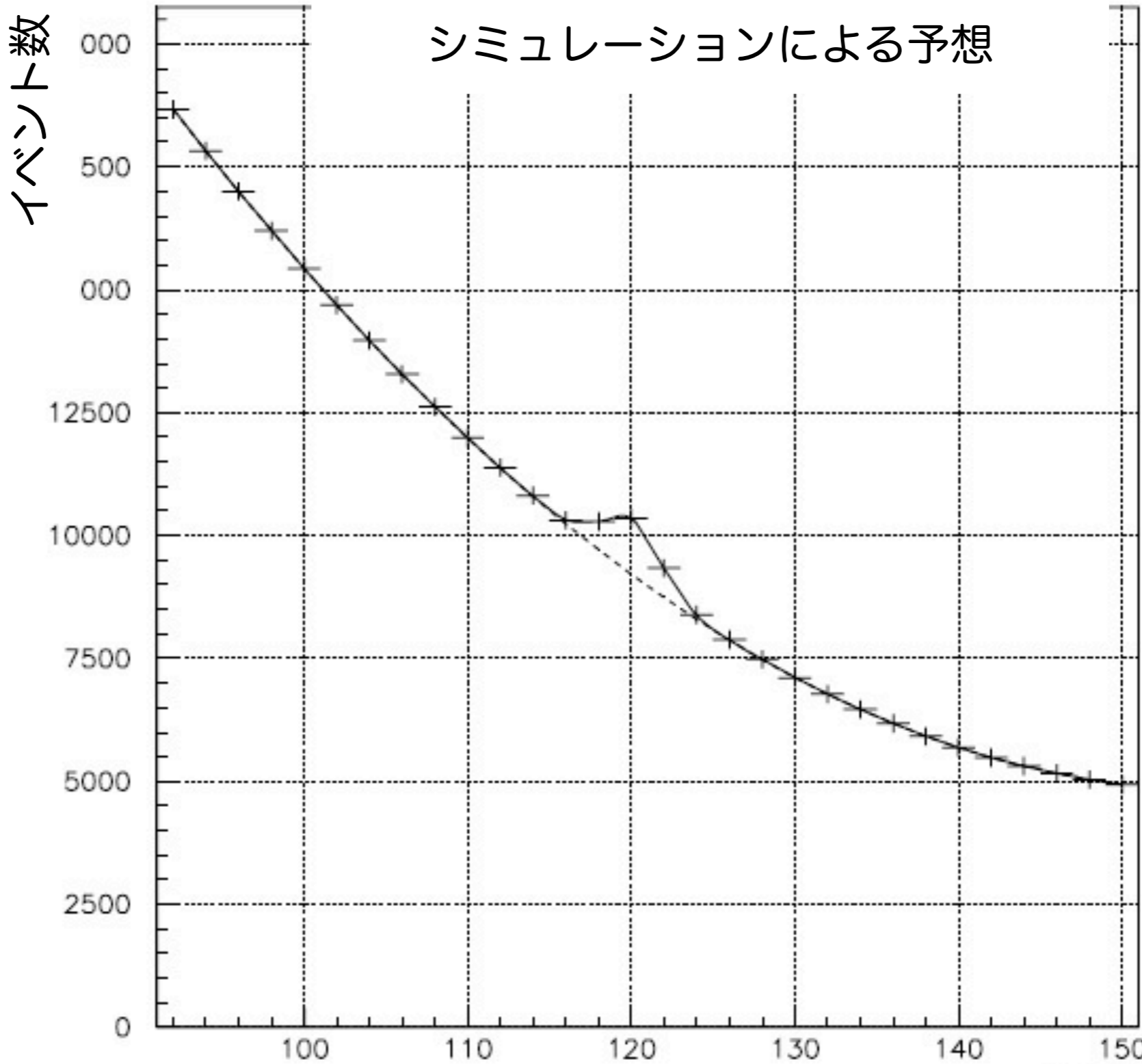
親と子の粒

(親の質量)



$M_H = 120 \text{ GeV}$

シミュレーションによる予想

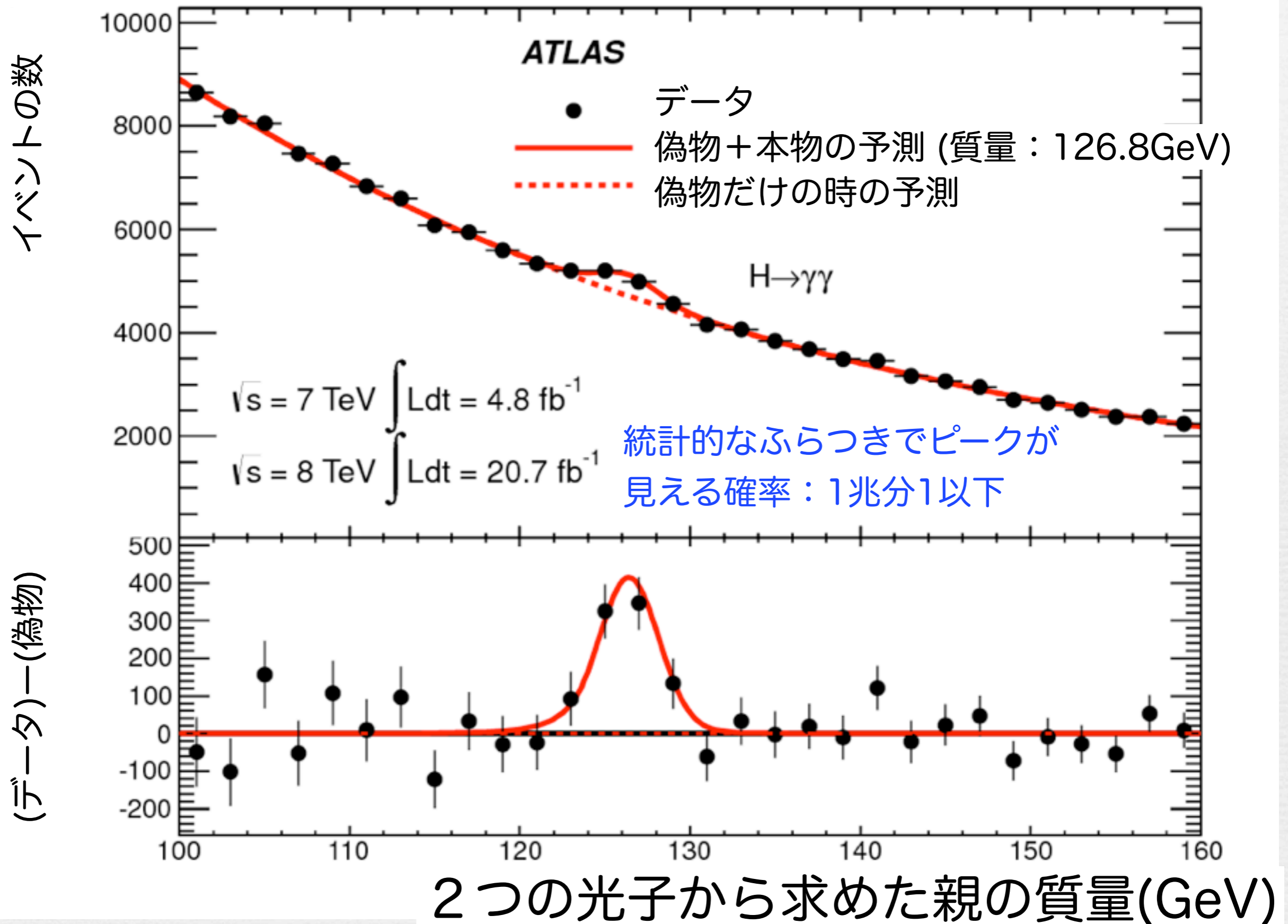


(和)²



親の質量 (GeV) (eV)

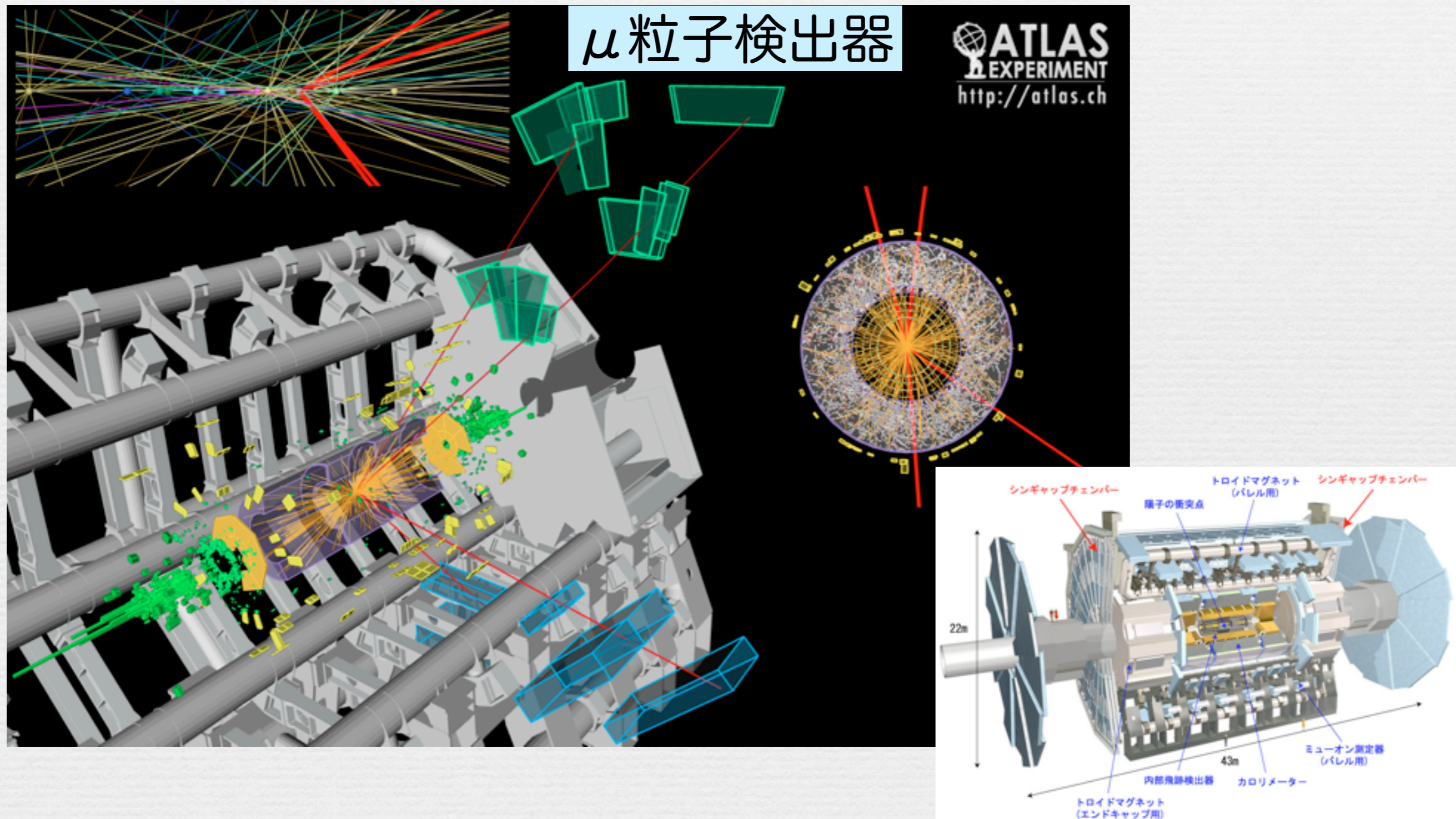
実際のデータ(H \rightarrow 光子光子)



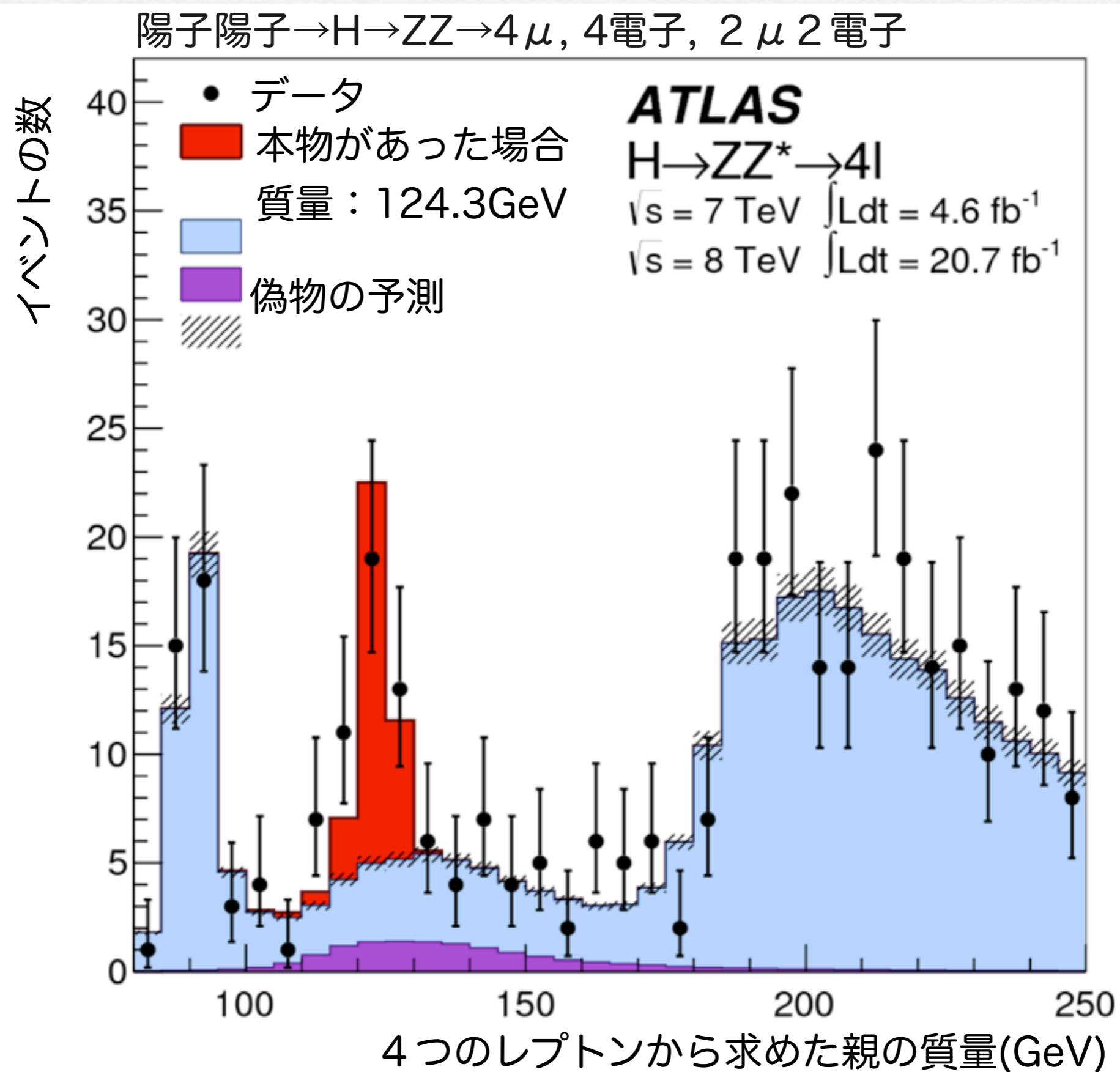
陽子 + 陽子 \rightarrow H \rightarrow ZZ

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

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



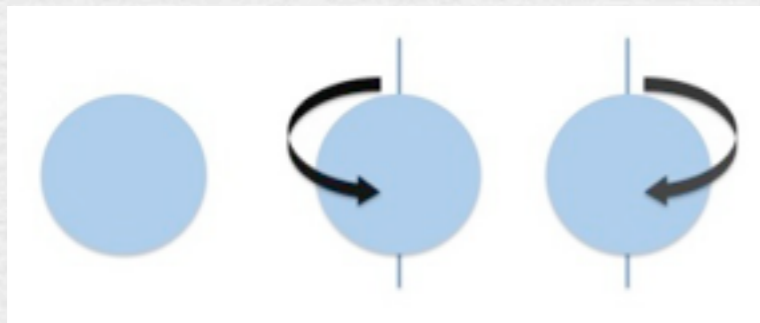
陽子陽子 \rightarrow H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 レプトン



発見した粒子はヒッグス粒子か？

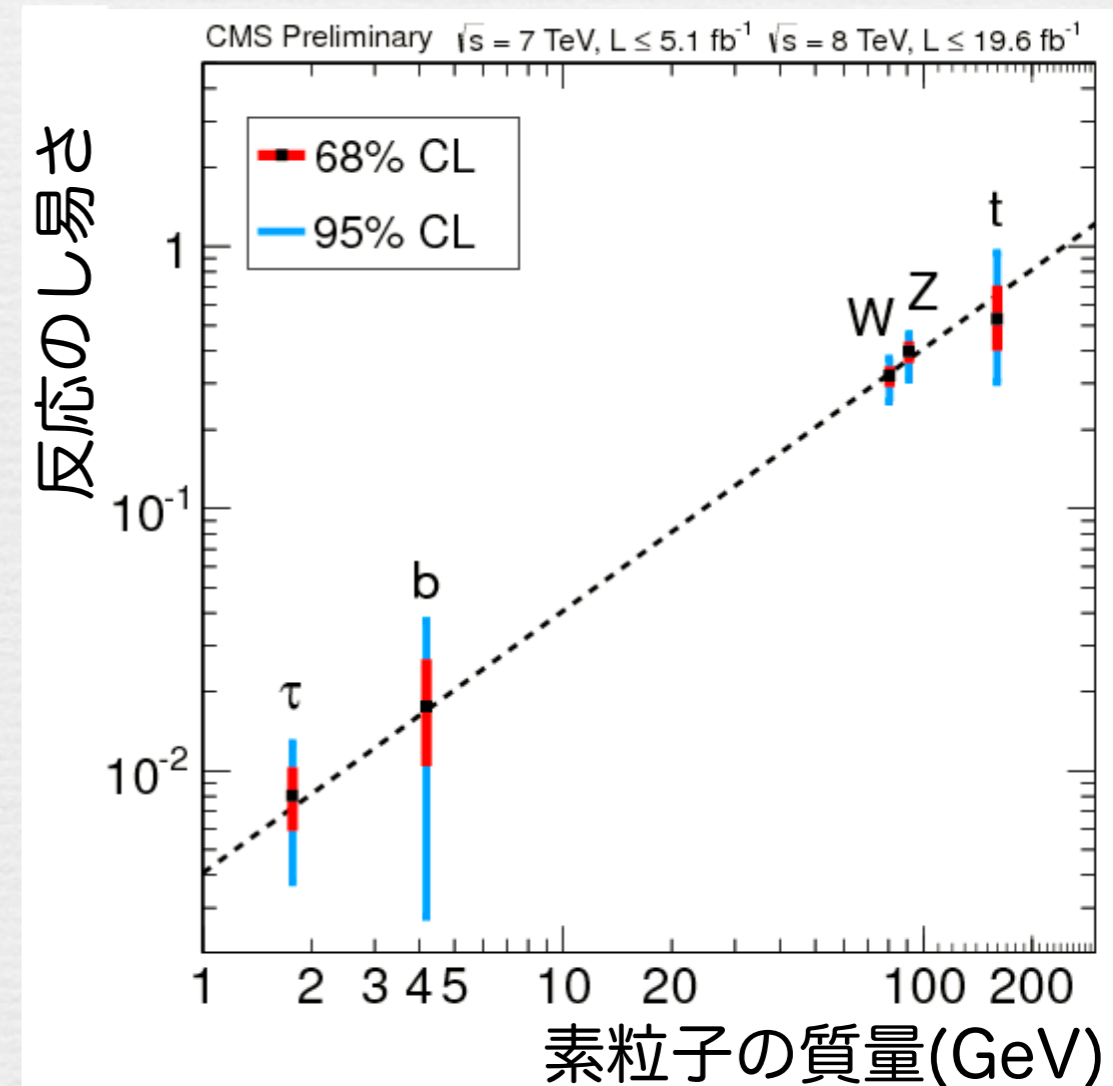
- 光子 光子、ZZ、WW、 $\tau\tau$,, に化ける粒子
- 質量は、126GeV位
- スピンが0 (向きなし)である可能性が高い

→ 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

ヒッグス粒子発見の意義

単に、17番目の新しい素粒子を発見しただけではない

真空の新たな考え：「ヒッグスの場」で満たされている？

どうやって、「ヒッグスの場」が真空に満ちたのか？

ヒッグスの場は、なぜ素粒子の種類がわかるのか？

実験による新しい知見が不可欠！

ヒッグス粒子の性質の理解が不可欠

質量、スピンなどの精密測定

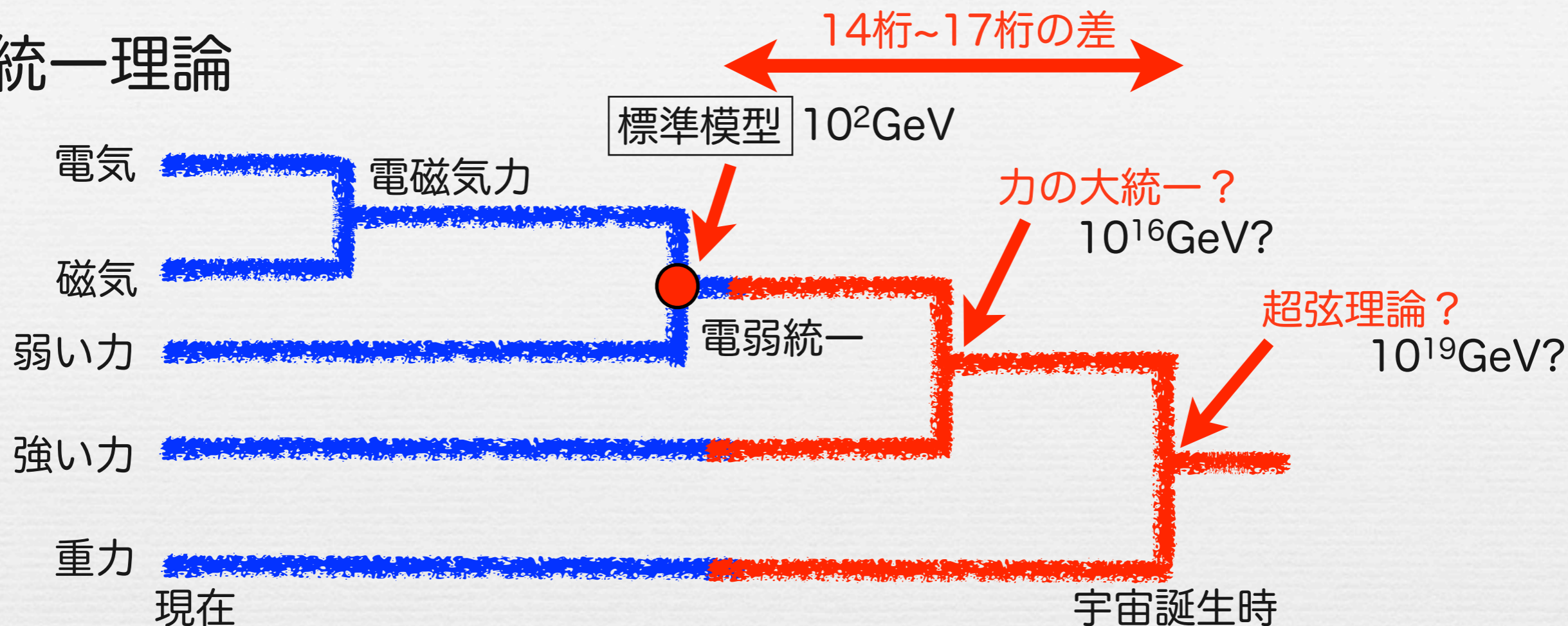
tクォーク、bクォーク、 τ 粒子との結合の強さ

ヒッグス粒子は素粒子か？

ヒッグス粒子の仲間を探す (標準模型では1種類)

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

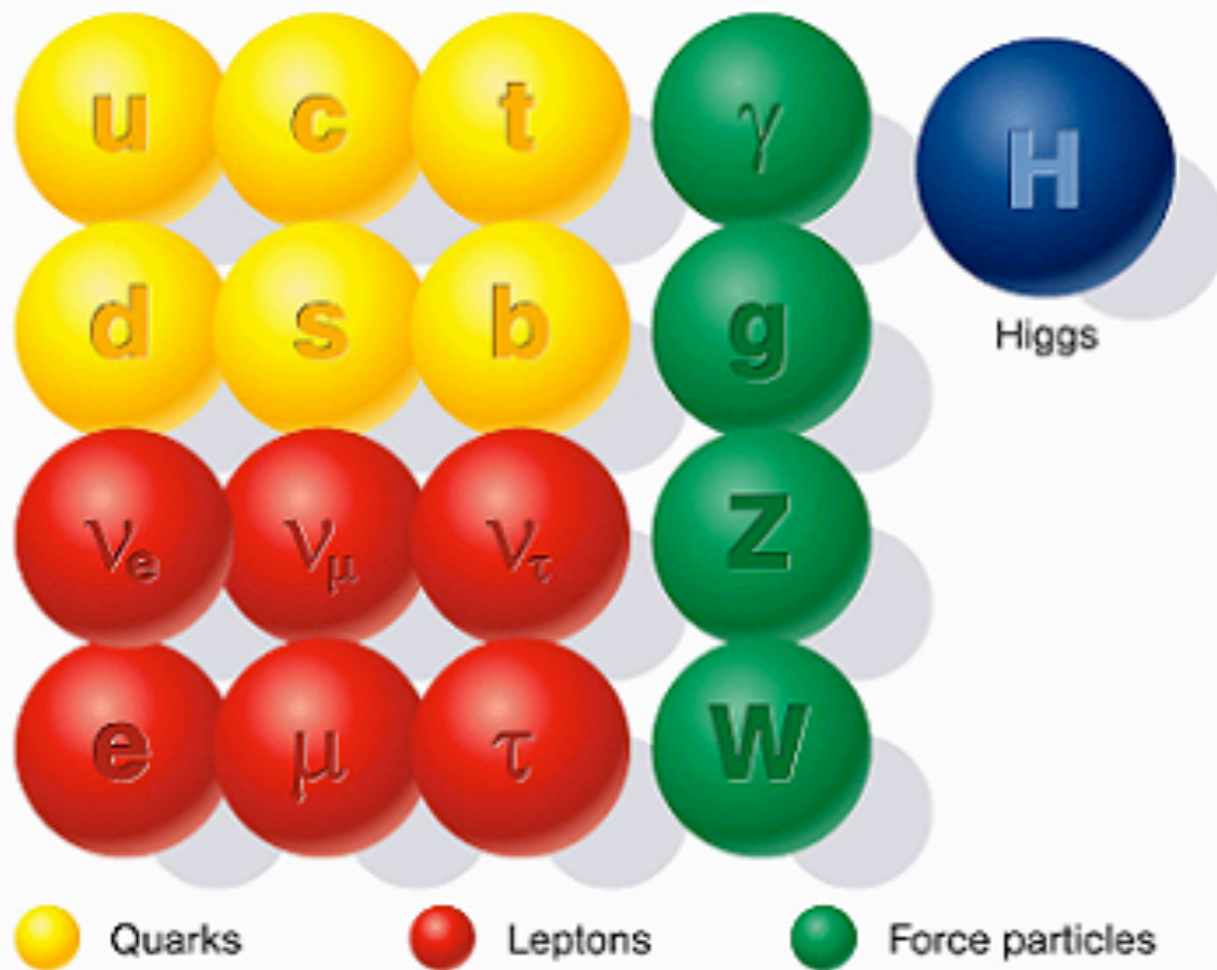
$$\begin{aligned}
 (\text{測定された質量})^2 &= (\text{大統一理論での質量})^2 - (\text{補正量})^2 \\
 126^2 &= (16\text{桁})^2 - (16\text{桁})^2
 \end{aligned}$$

→ ヒッグス粒子固有の問題

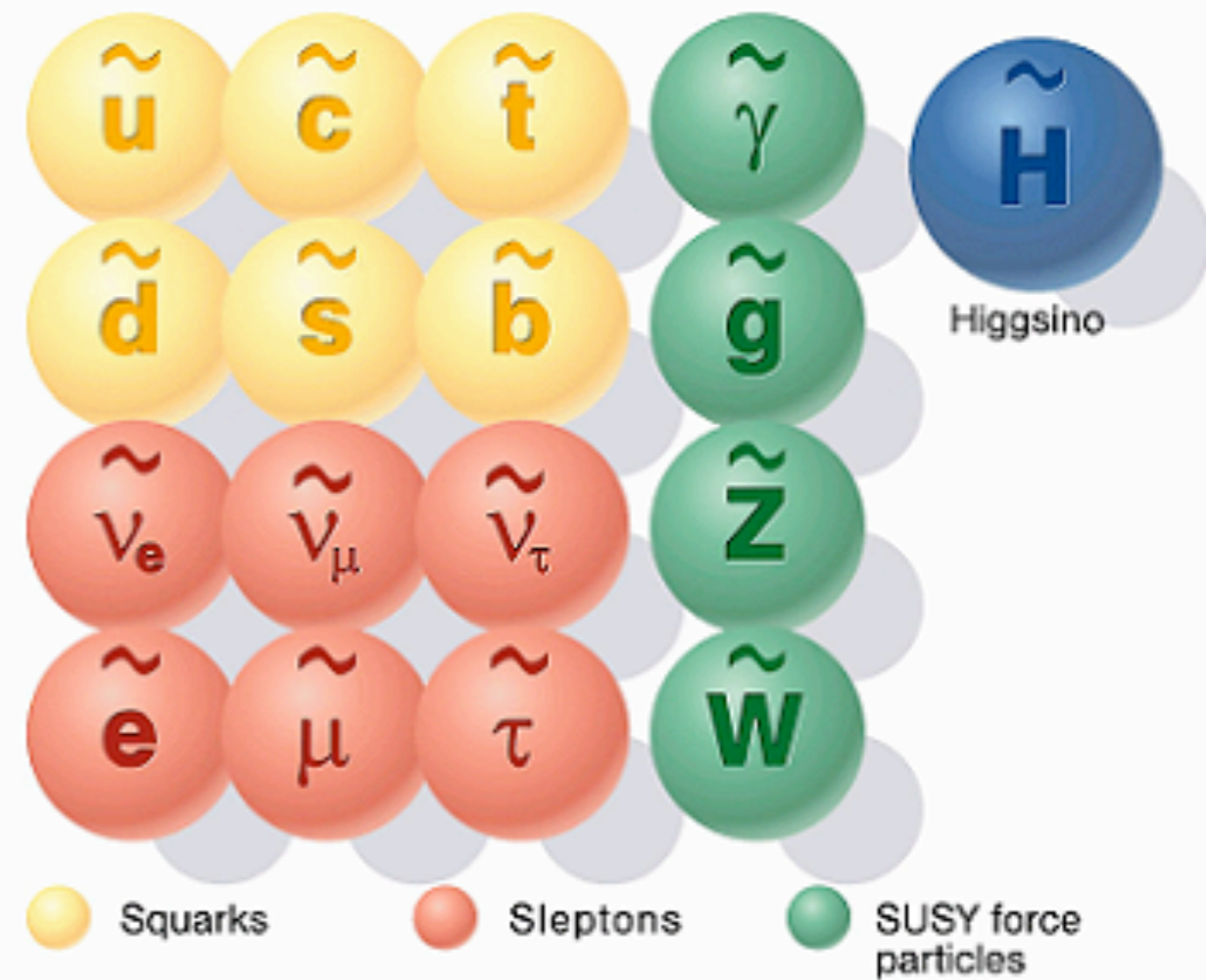
この解決には、“超対称性”などの新物理が必要

超対称性粒子

Standard particles



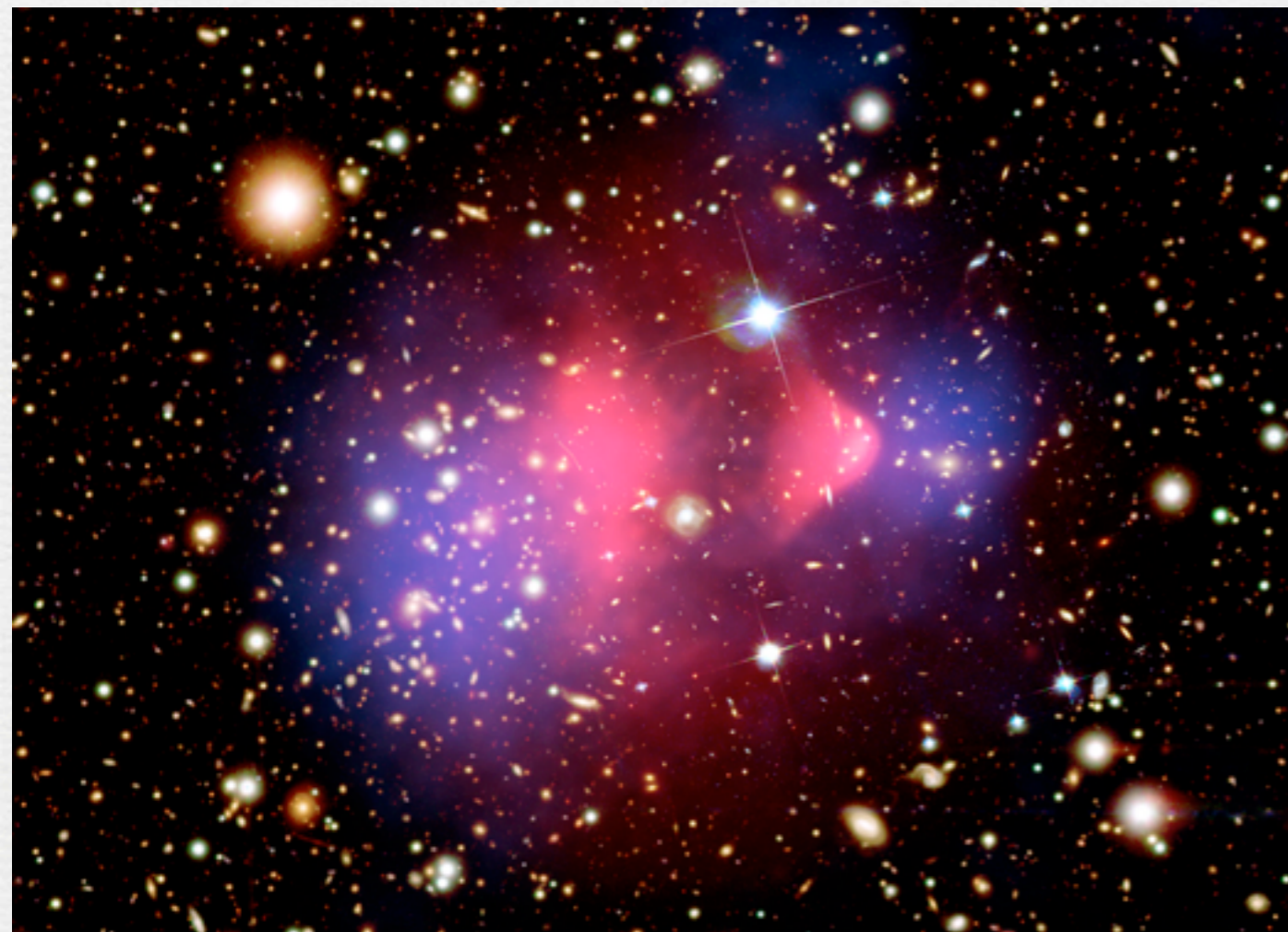
SUSY particles



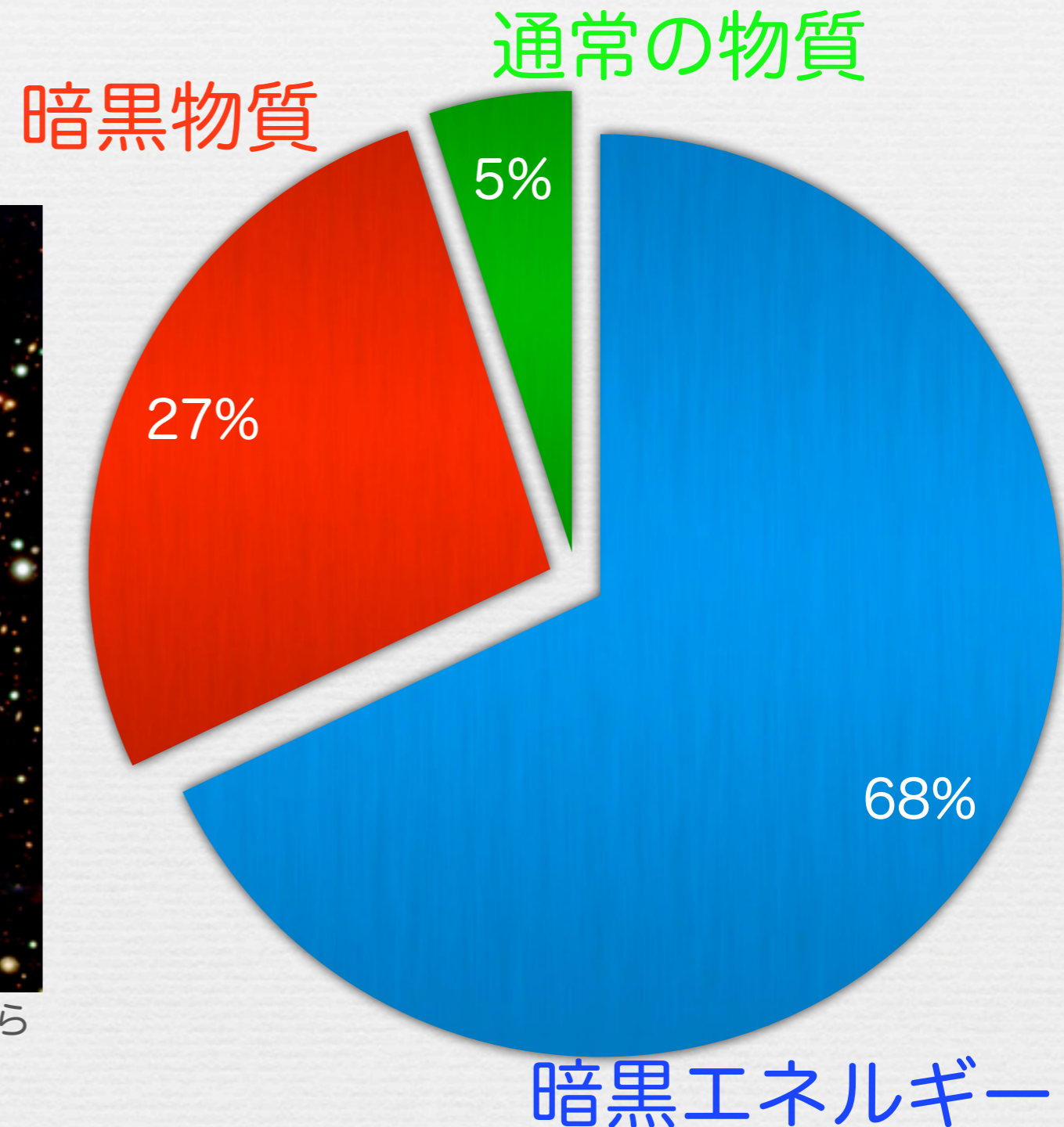
→ LHC実験で探索！！

さらに、超対称性粒子があると、、、

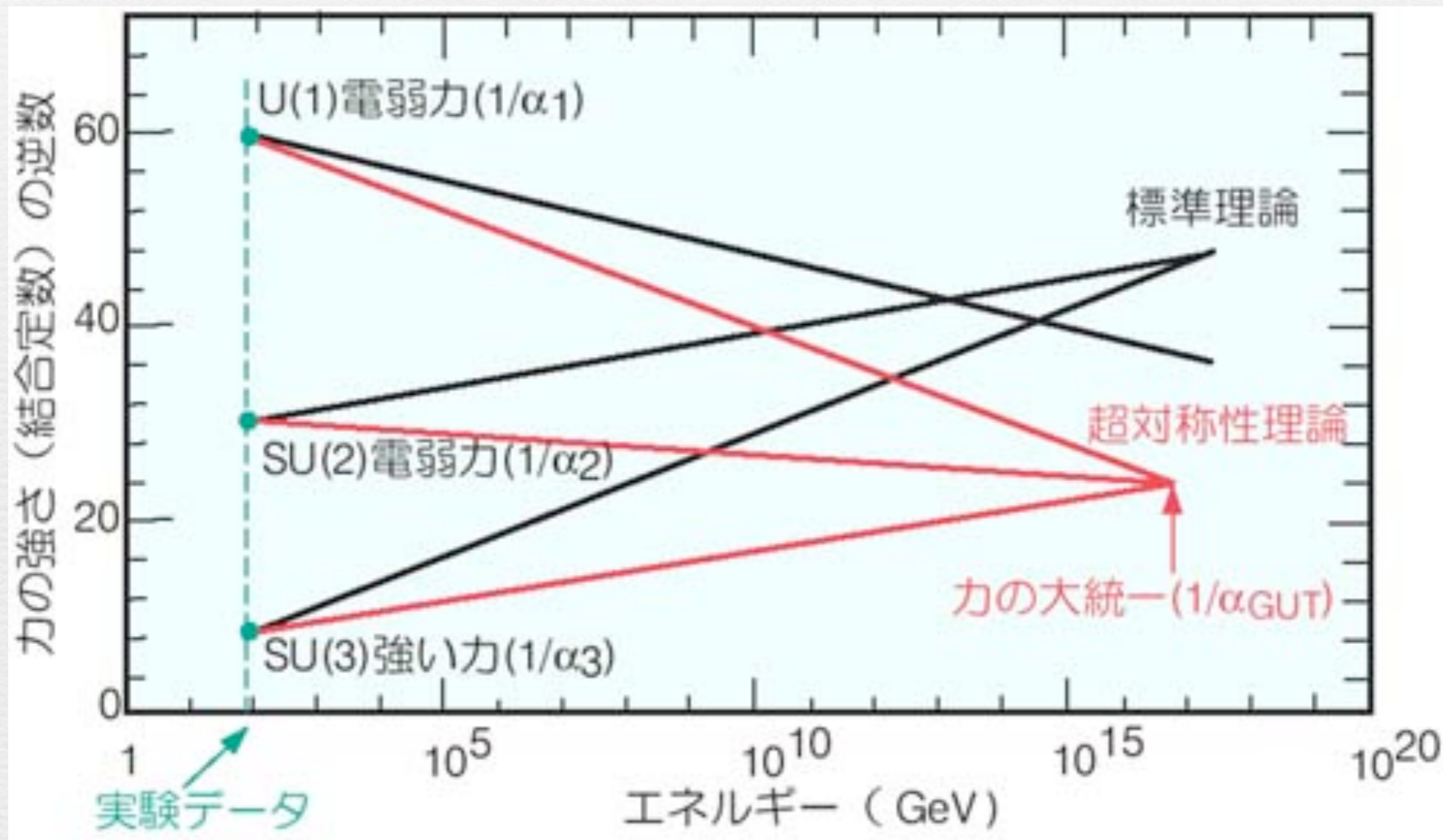
宇宙観測からはあると言われている暗黒物質の有力候補



NASAのサイトから



超対称性粒子があると：力の統一

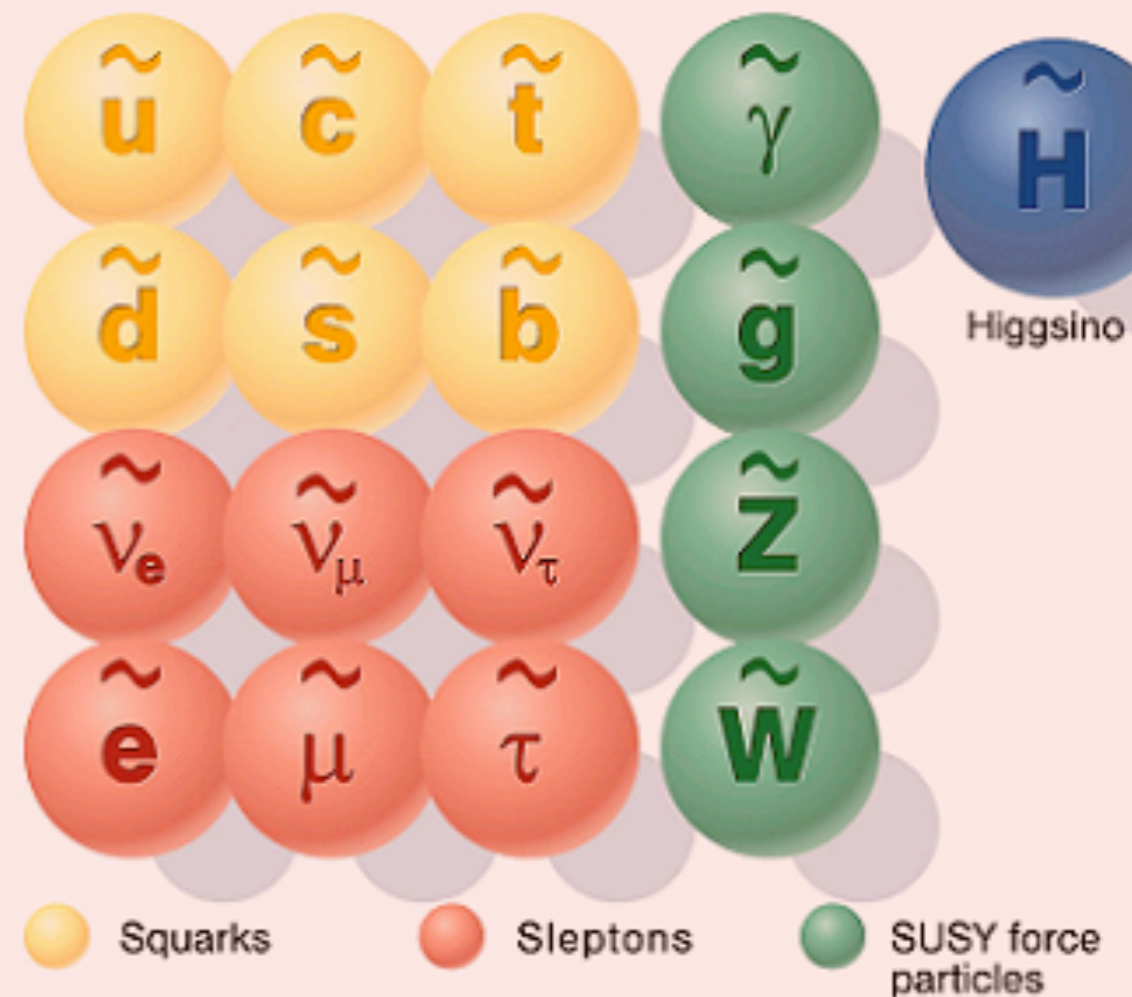


今後の展開

標準模型の素粒子



超対称性粒子 未発見



- ヒッグス粒子の発見→性質の理解

沢山のヒッグス粒子→沢山の陽子衝突

- 新しい素粒子(超対称性粒子など)の発見

暗黒物質の候補、力の大統一の可能性、...

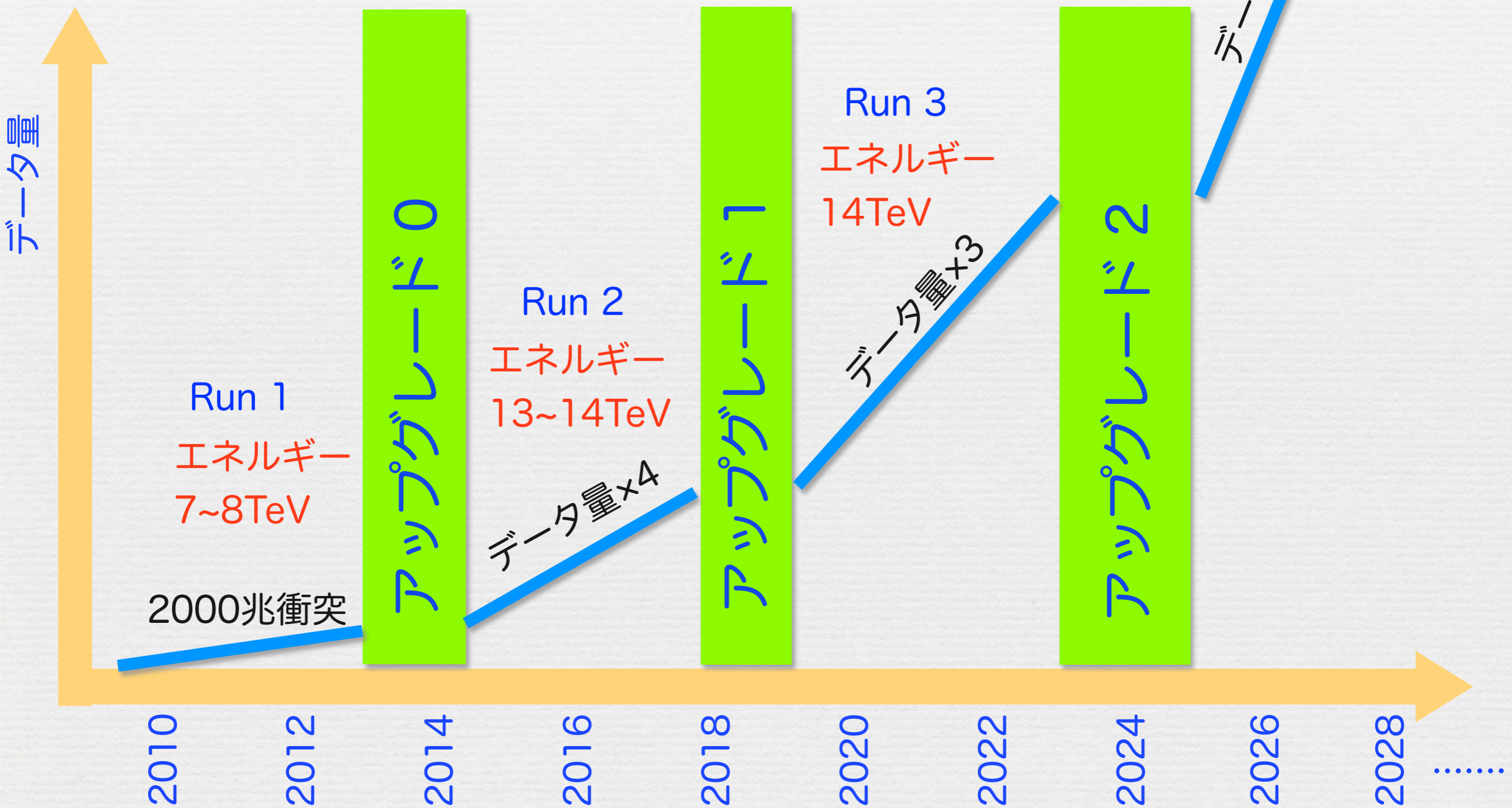
→ 重い粒子：衝突エネルギーを8TeV から 13~14TeVに

- 標準模型の精密検証

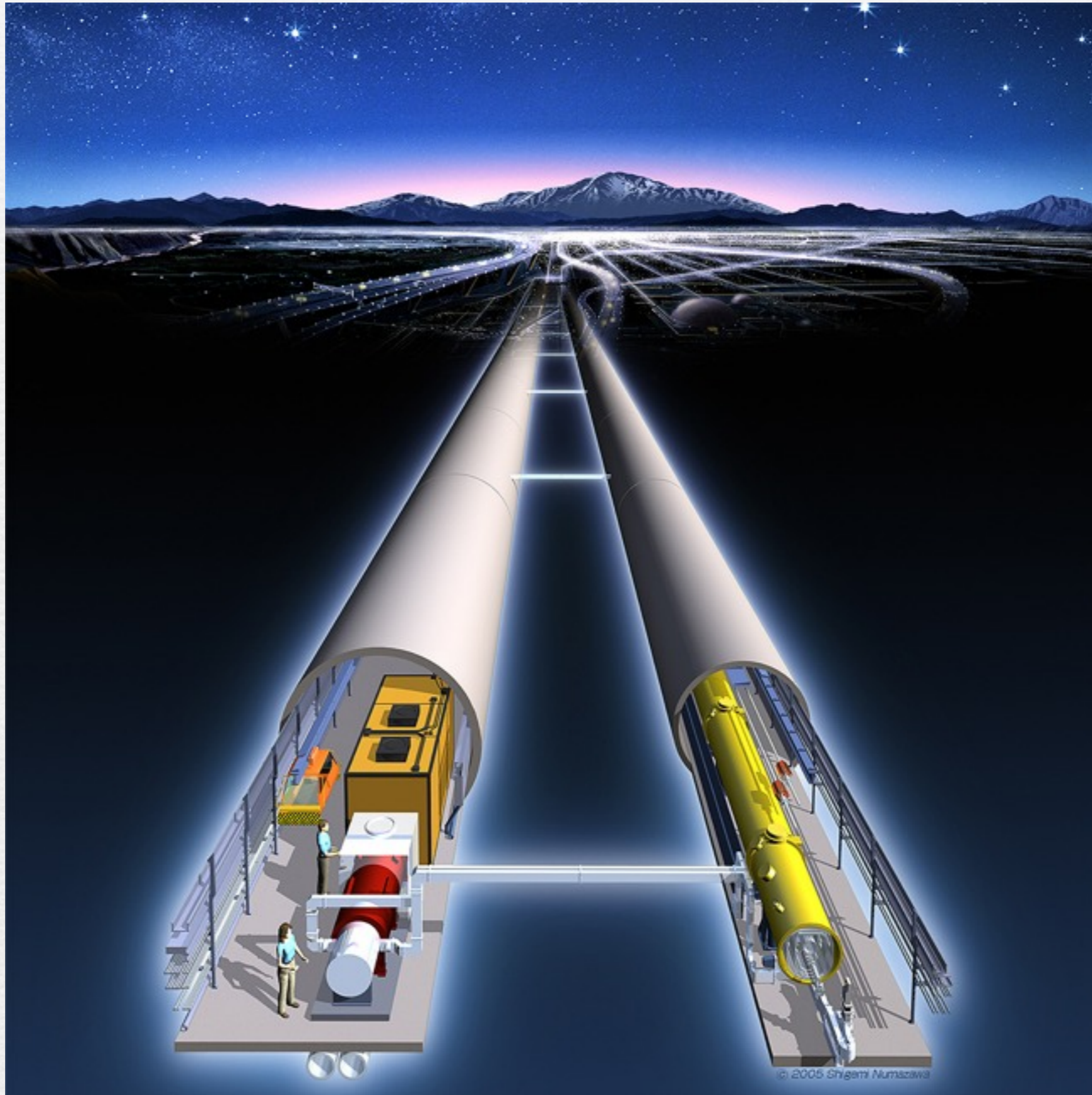
LHCアップグレード計画

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

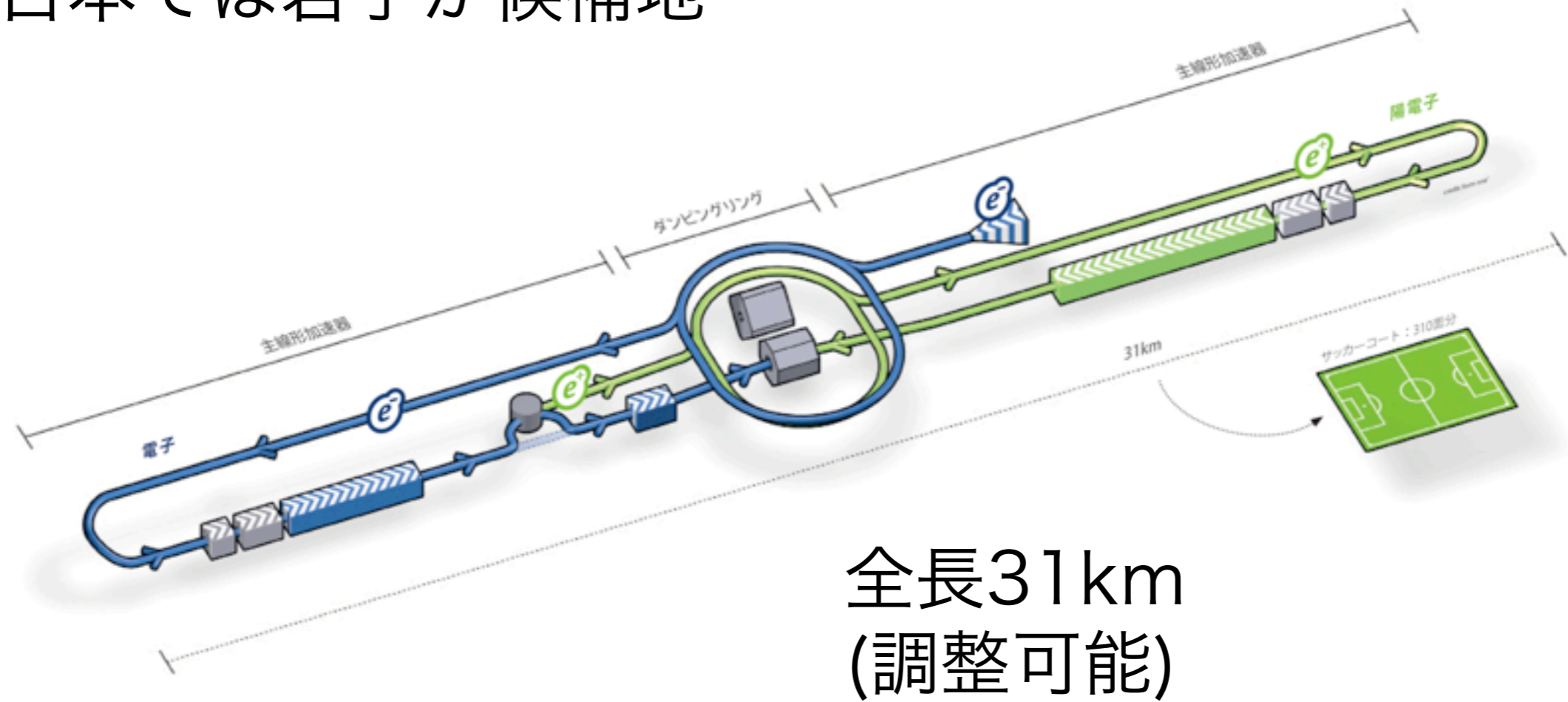


国際リニアコライダー計画

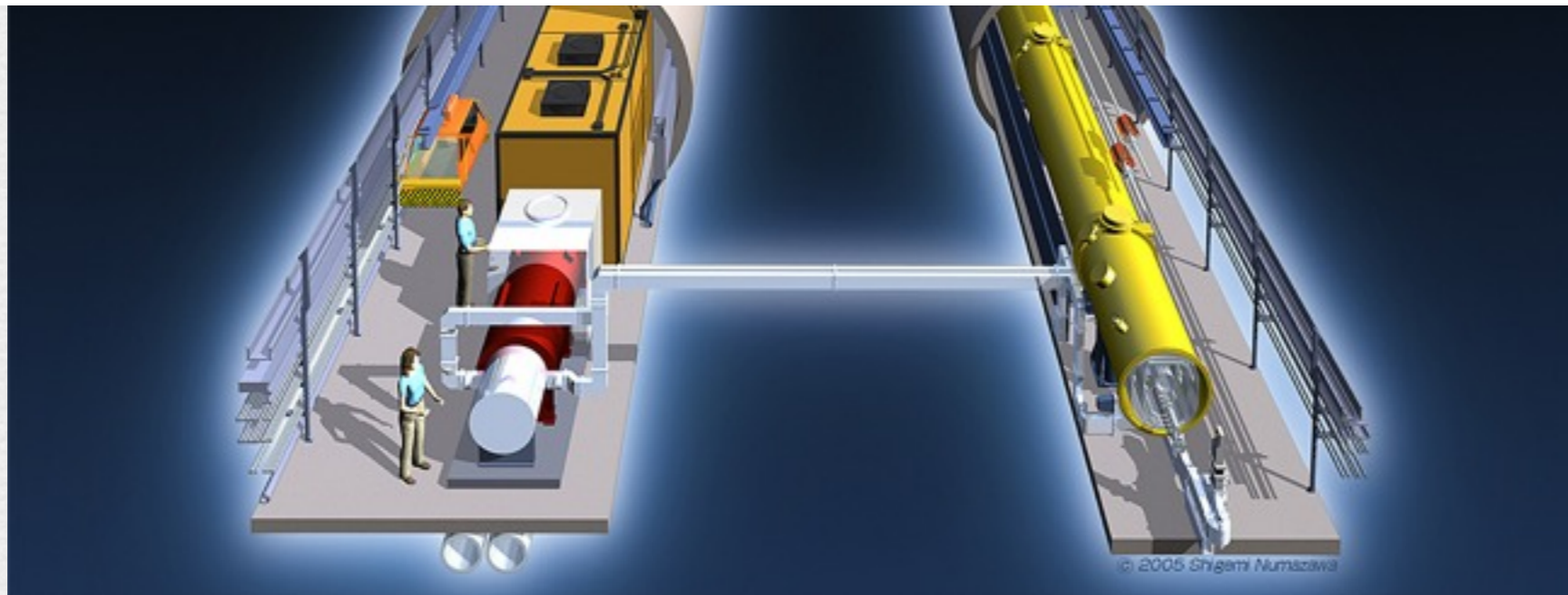


国際リニアコライダー計画

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

ヒッグス粒子発見

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！

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

ナショナルジオグラフィックス (Web版)

「研究室」に行ってみた。CERNの日本人研究者たち(全6回)

<http://nationalgeographic.jp/nng/article/20140428/394973/>

理学部広報誌 (理philosophia)

<http://www.sci.nagoya-u.ac.jp/kouhou/philosophia.html>

第25号、第17号