

「巨大加速器LHCで探る誕生直後の宇宙」

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

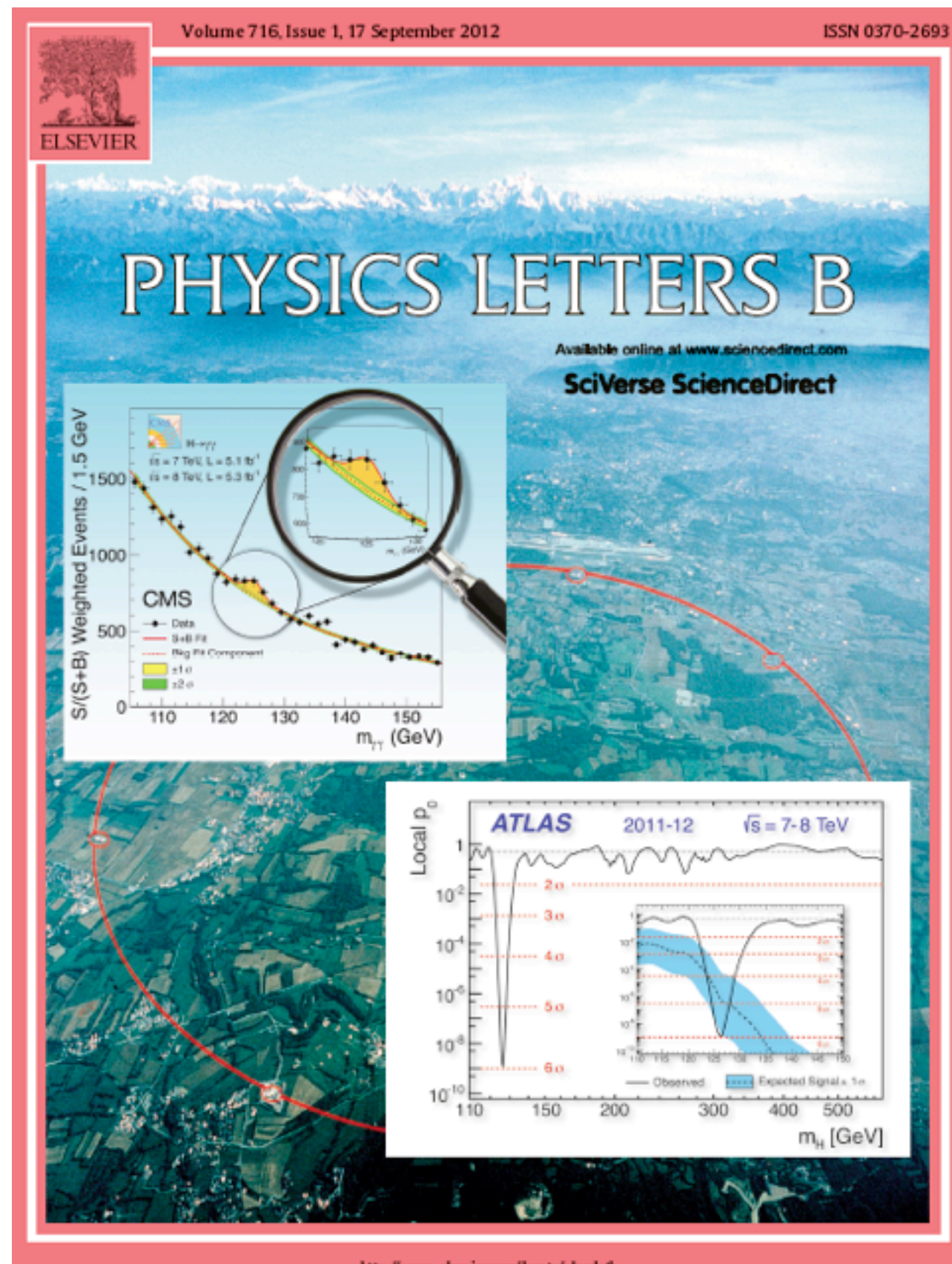
准教授 戸本 誠

2012年7月4日

17番目の素粒子「ヒッグス粒子」の発見



アングレールさん ヒッグスさん



素粒子分野の日本人ノーベル賞受賞者



1949年 湯川秀樹先生



1965年 朝永振一郎先生



2002年 小柴昌俊先生



2008年 南部陽一郎先生



2008年 益川敏英先生



2008年 小林誠先生



2015年 梶田隆章先生

素粒子物理は
日本のお家芸

内容

素粒子物理学とは？

素粒子の質量起源とヒッグス粒子

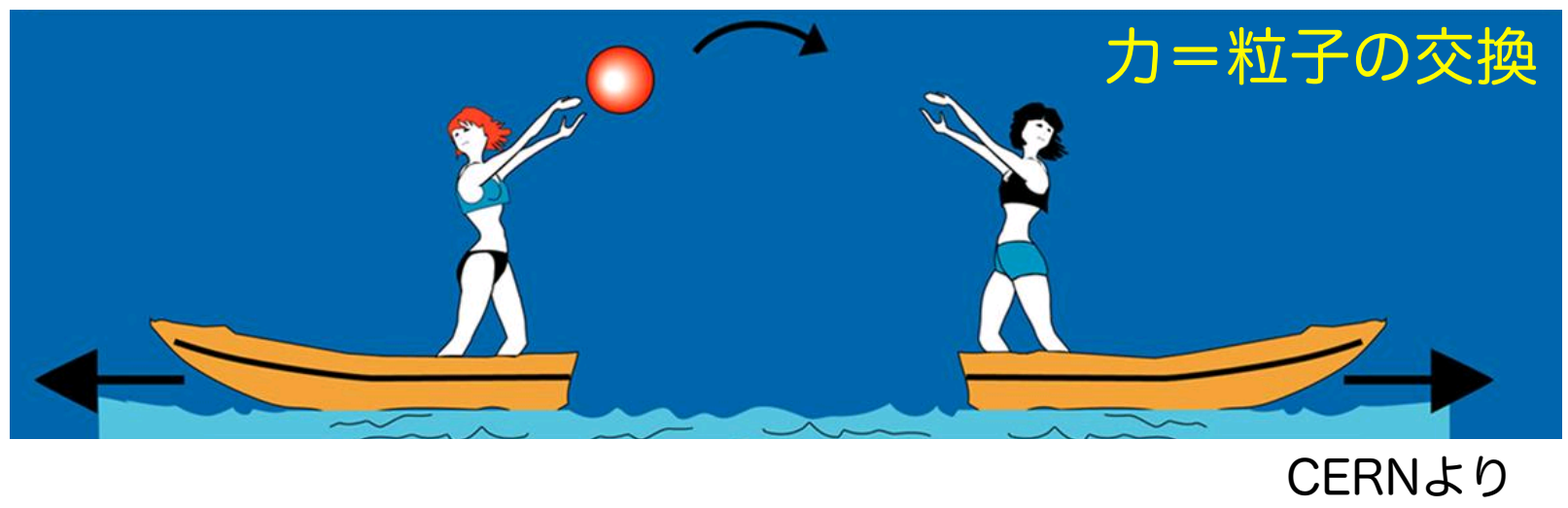
ヒッグス発見で面白くなった素粒子物理学

最先端の素粒子実験

素粒子物理学とは？

素粒子物理学とは？ 2

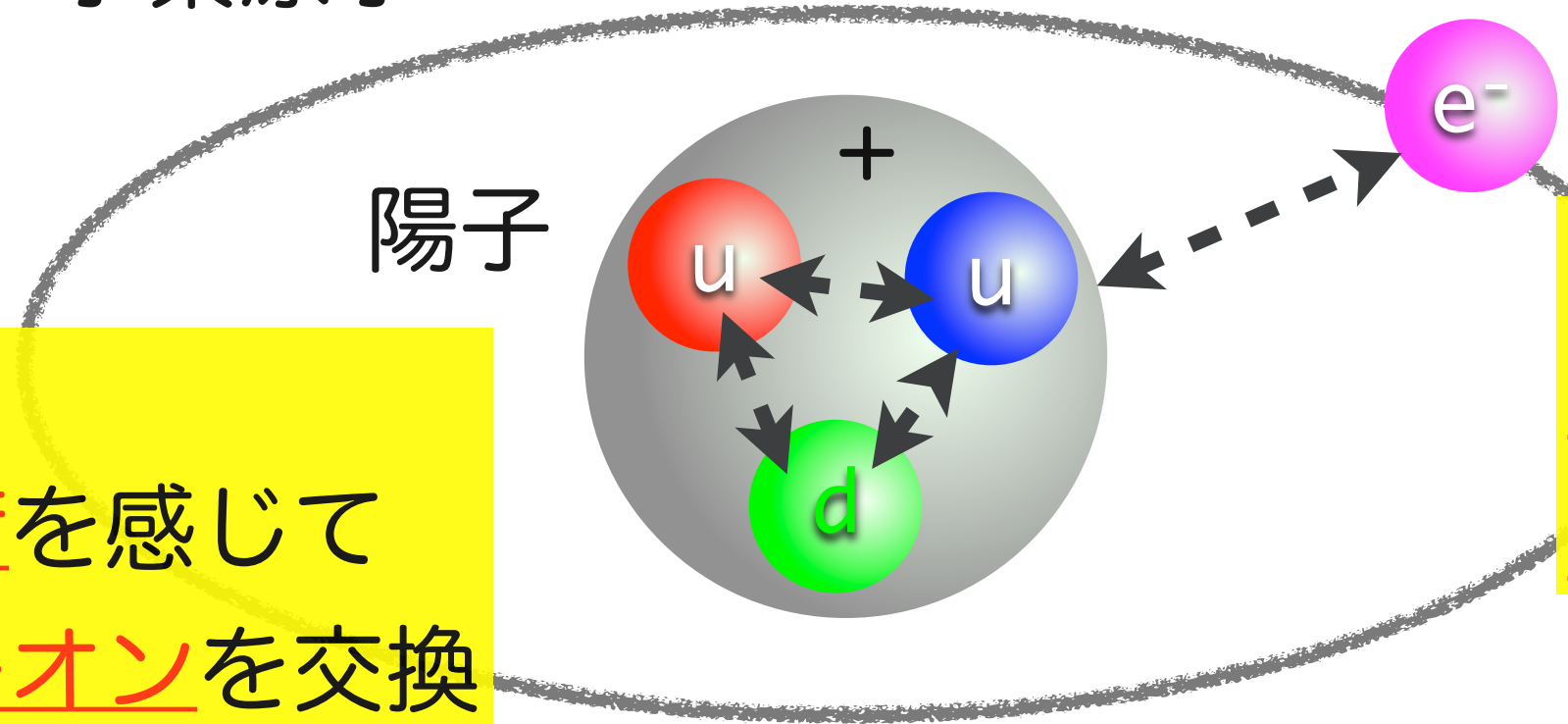
素粒子が従う力学法則は？



水素原子

電子

陽子

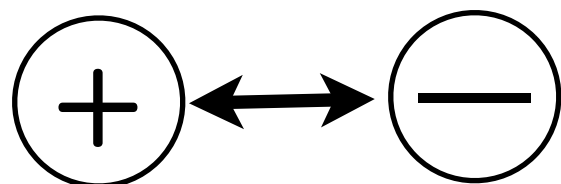


強い力
色電荷を感じて
グルーオンを交換

電磁気力
電荷を感じて
光子を交換

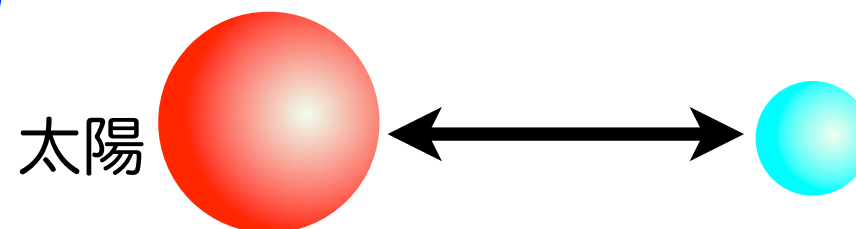
4種のカ

電磁気力



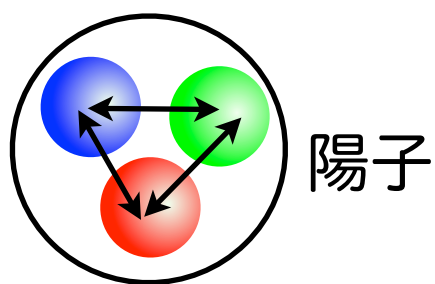
電荷：光子を交換

重力



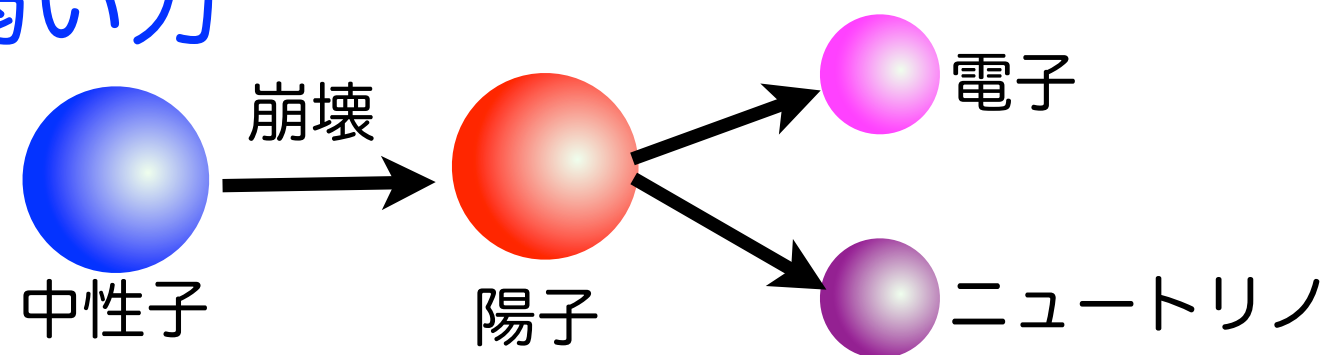
質量：グラビトン(未発見)を交換

強い力



色電荷：グルーオンを交換

弱い力

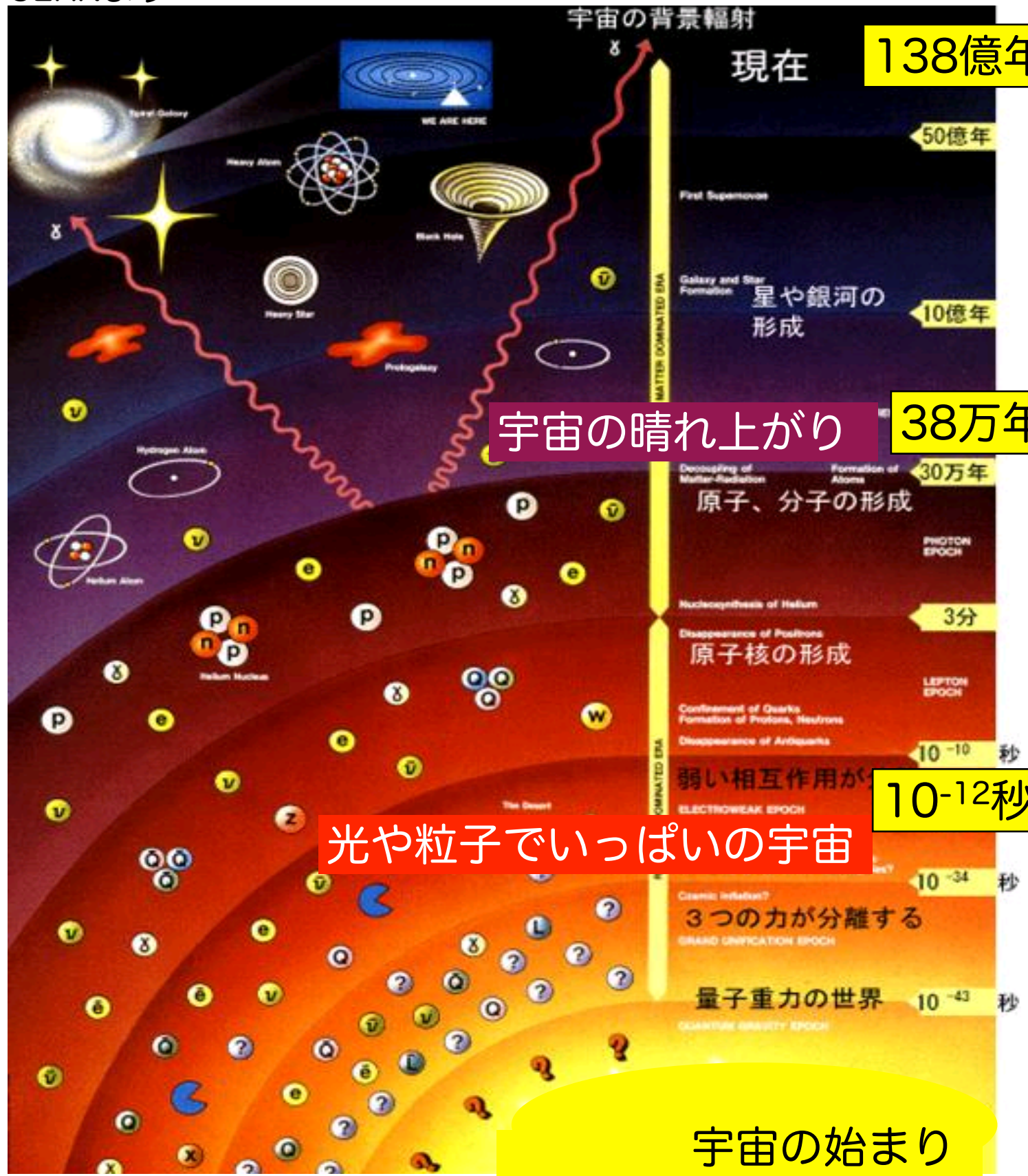


弱電荷：W、Z粒子を交換

素粒子物理学とは？ 3

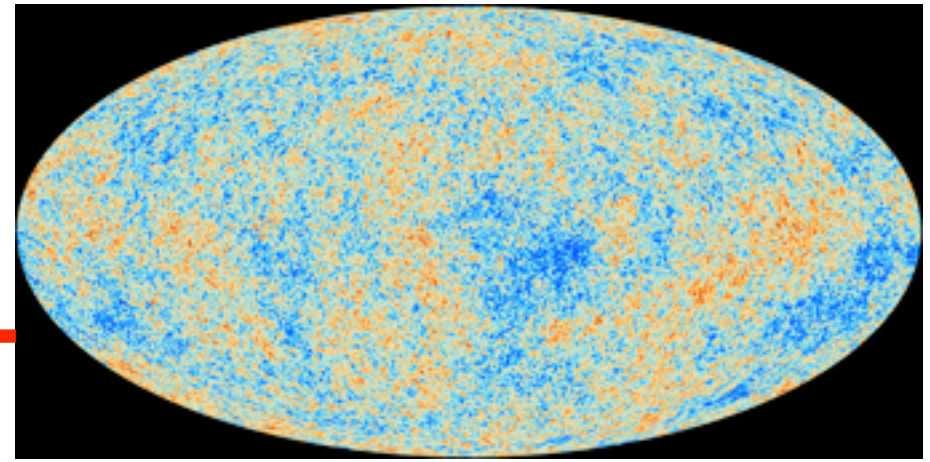
宇宙誕生の謎に迫る

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>

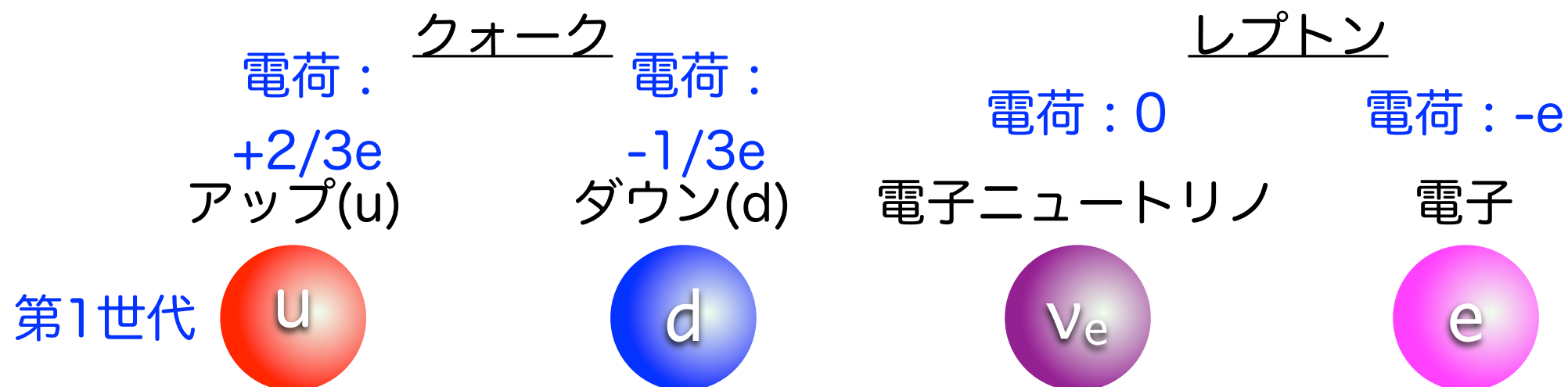
光による
それ以前の宇宙の観測は無理

← 加速器で初期宇宙を再現
LHCで10⁻¹²秒後までさかのぼる

これまでの研究でわかっている素粒子

素粒子標準模型

物質を構成する



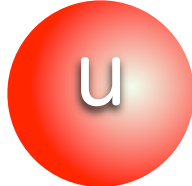



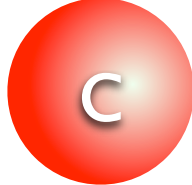



力を伝える



これまでの研究でわかっている素粒子

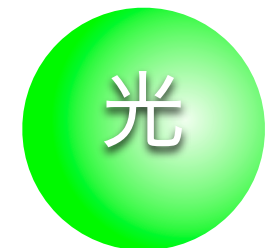
素粒子標準模型

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 

力を伝える

電磁気力：光子



強い力：グルーオン



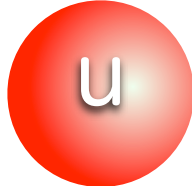



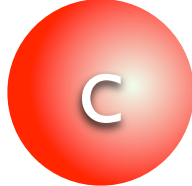



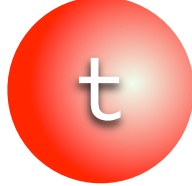



弱い力：Z、W粒子






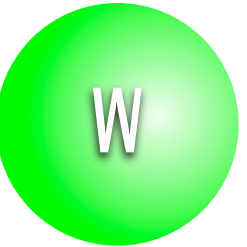
これまでの研究でわかっている素粒子

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 

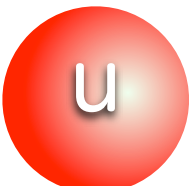


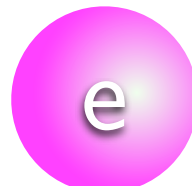
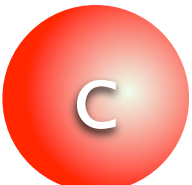



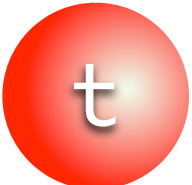



力を伝える

電磁気力：光子 
強い力：グルーオン 
弱い力：Z、W粒子  

これまでの研究でわかっている素粒子

素粒子標準模型

物質を構成する

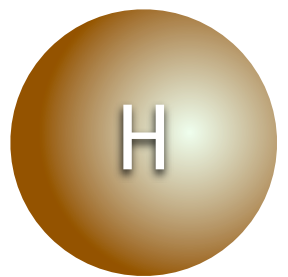
	クォーク		レプトン	
	電荷： $+2/3e$	電荷： $-1/3e$	電荷： 0	電荷： $-e$
第1世代	アップ(u) 	ダウン(d) 	電子ニュートリノ 	電子 
第2世代	チャーム(c) 	ストレンジ(s) 	ミューニュートリノ 	ミュー粒子 
第3世代	トップ(t) 	ボトム(b) 	タウニュートリノ 	タウ粒子 

力を伝える

- 電磁気力：光子

- 強い力：グルーオン

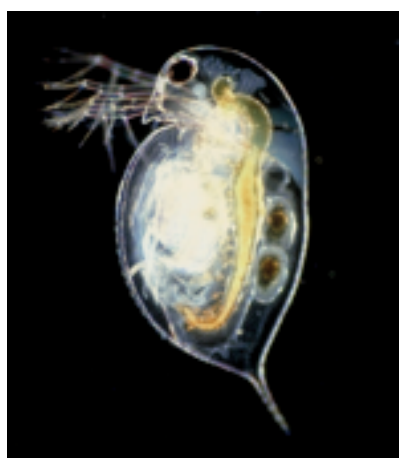
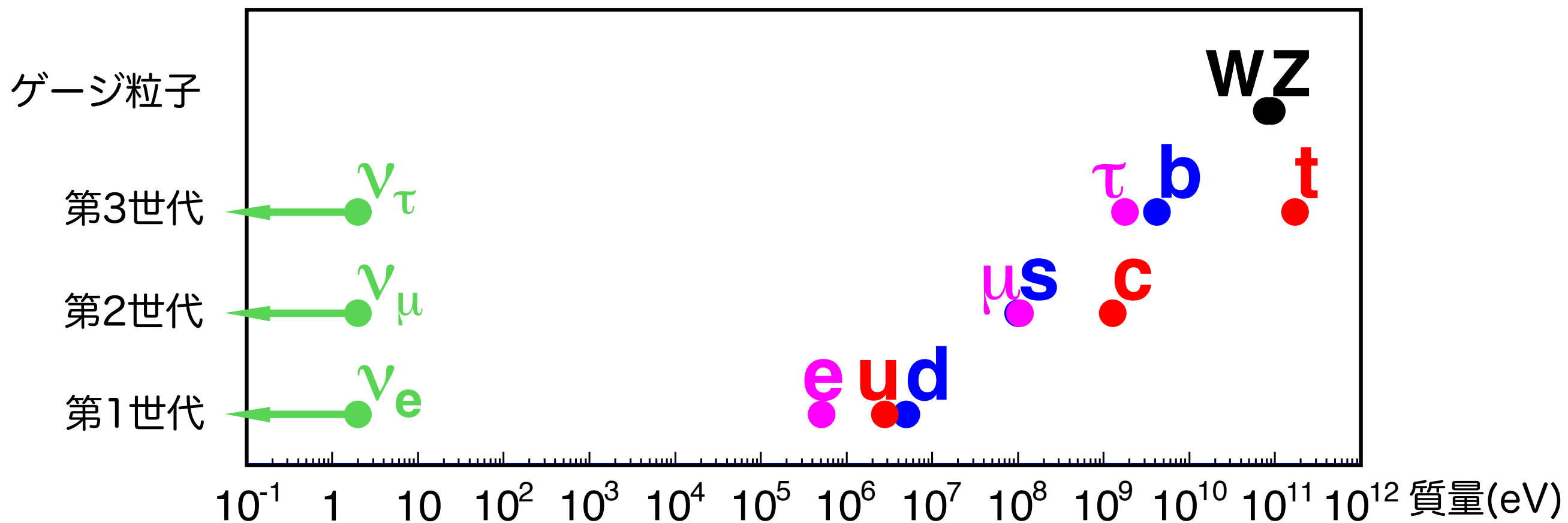
- 弱い力：Z、W粒子
 



ヒッグス粒子：素粒子に質量を与える

質量の起源とヒッグス粒子

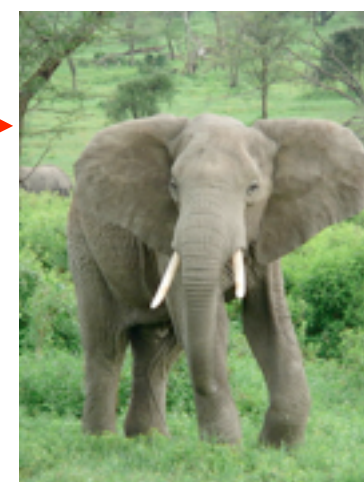
素粒子の質量起源



1/1000mg



1000kg



「質量」を理論の中に単純に入れると物理法則が破綻する
 → ヒッグス粒子が鍵を握る

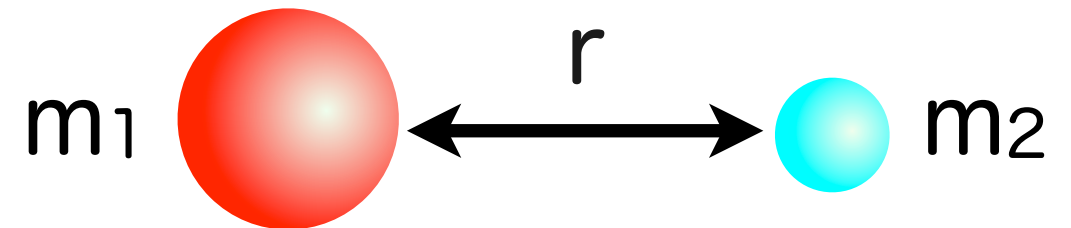
質量とは？

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)

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

(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

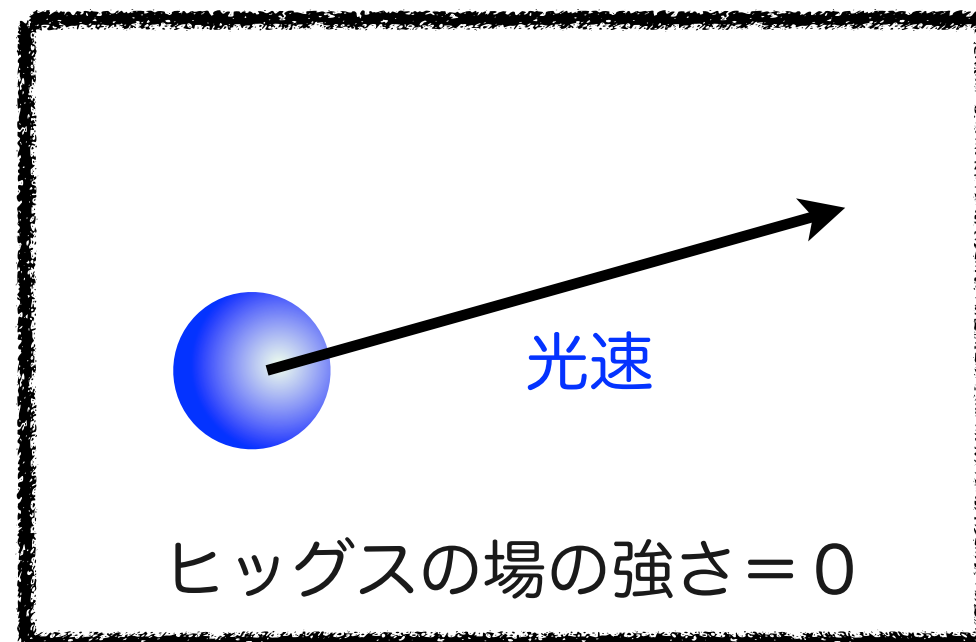
素粒子の質量起源

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

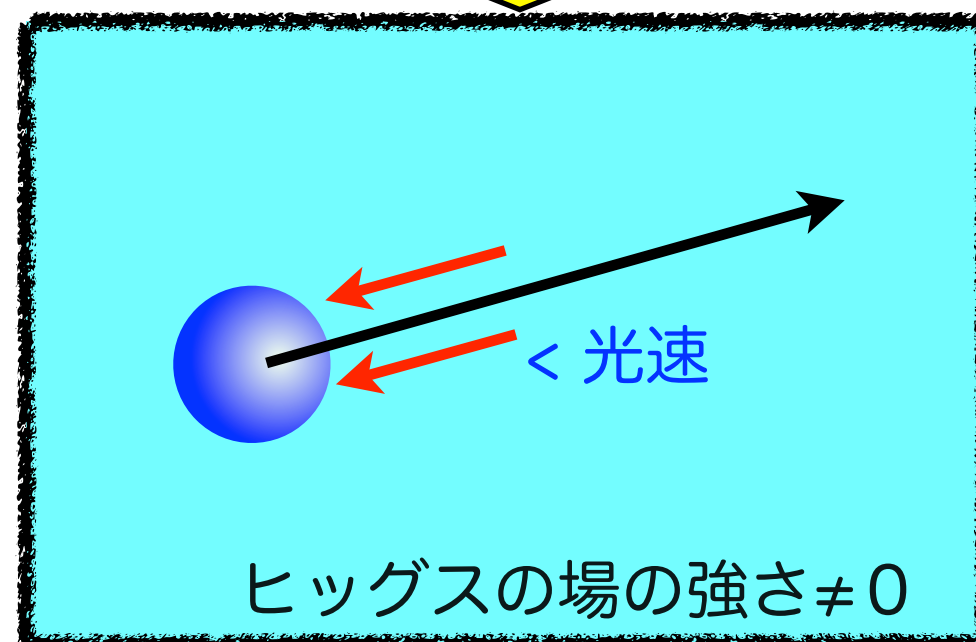


相転移

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



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

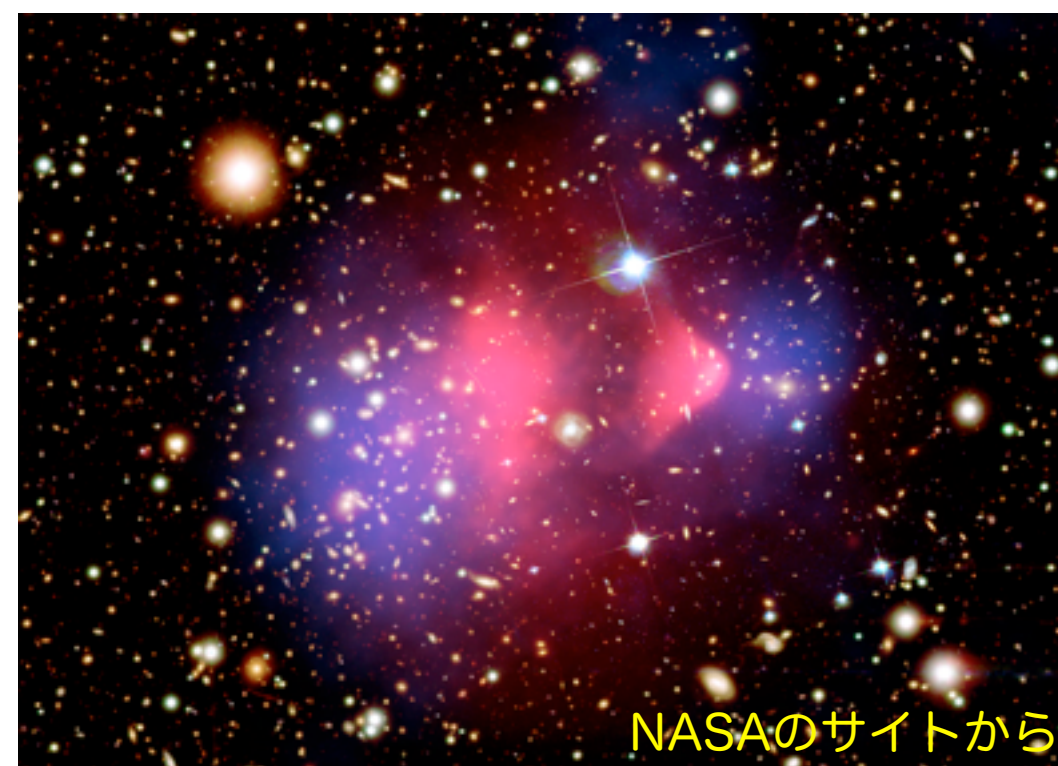
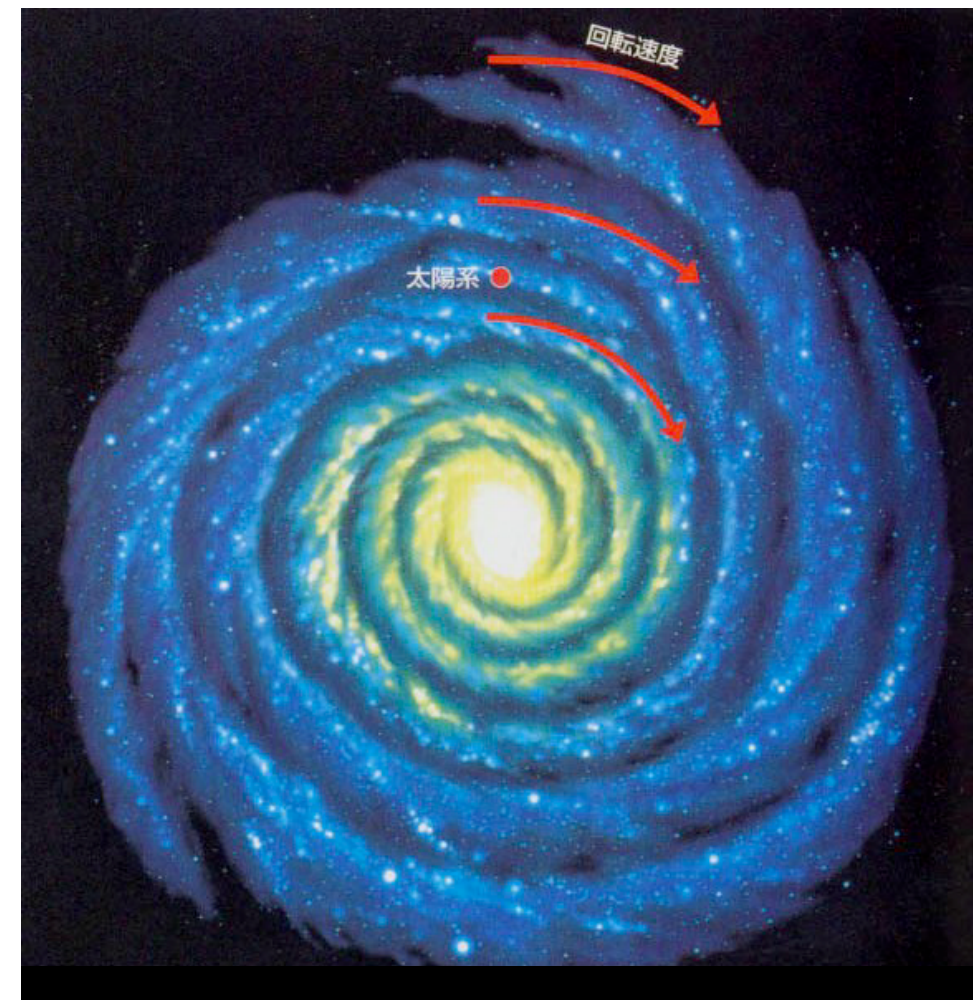
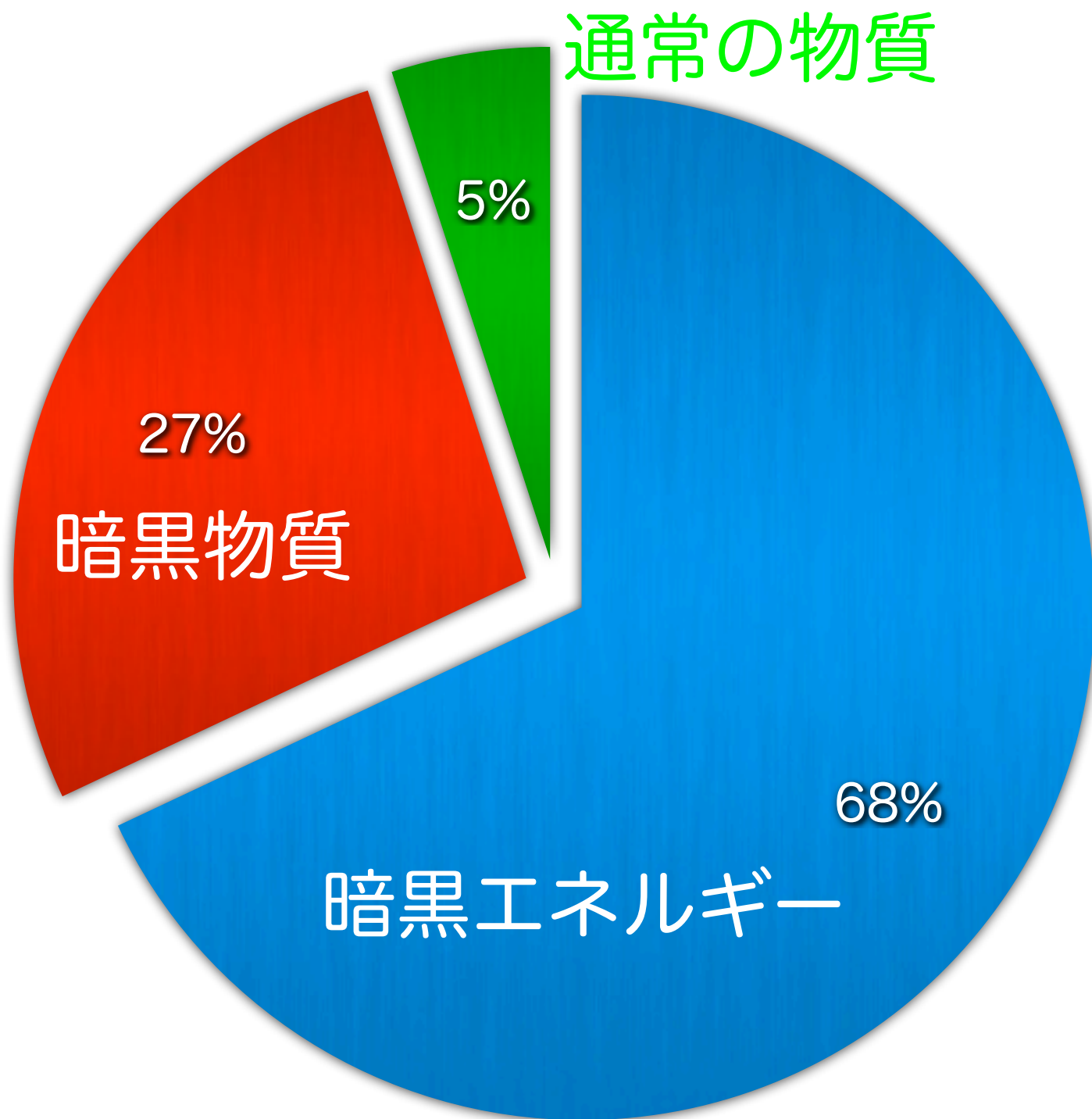
思いっ切りたたか → 高エネルギーでたたか

ヒッグス粒子は、不安定ですぐに崩壊する

2012年7月にそういう粒子が実験的に発見された！！！！

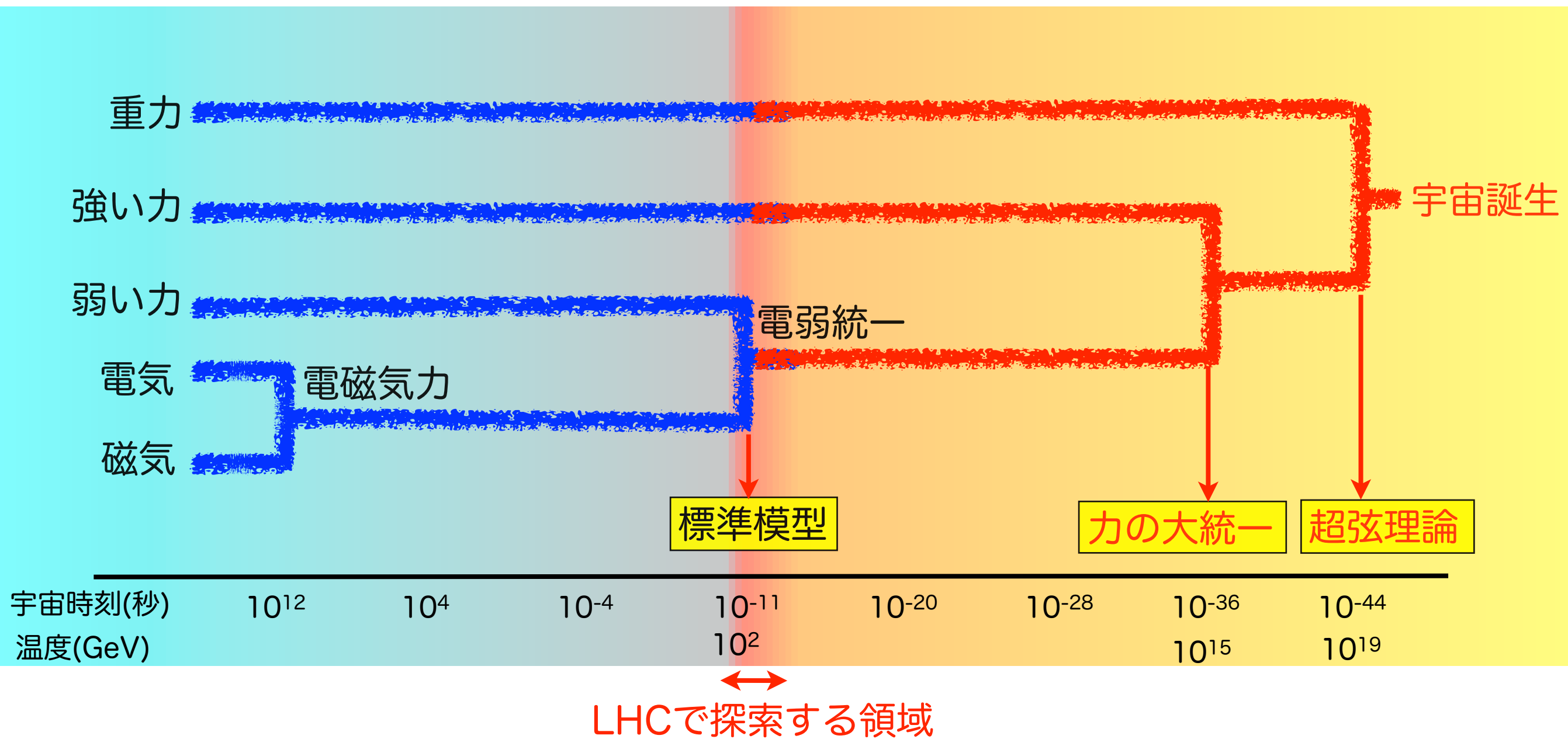
ヒッグス発見で面白くなった 素粒子物理学

暗黒物質の謎



新しい素粒子の存在？

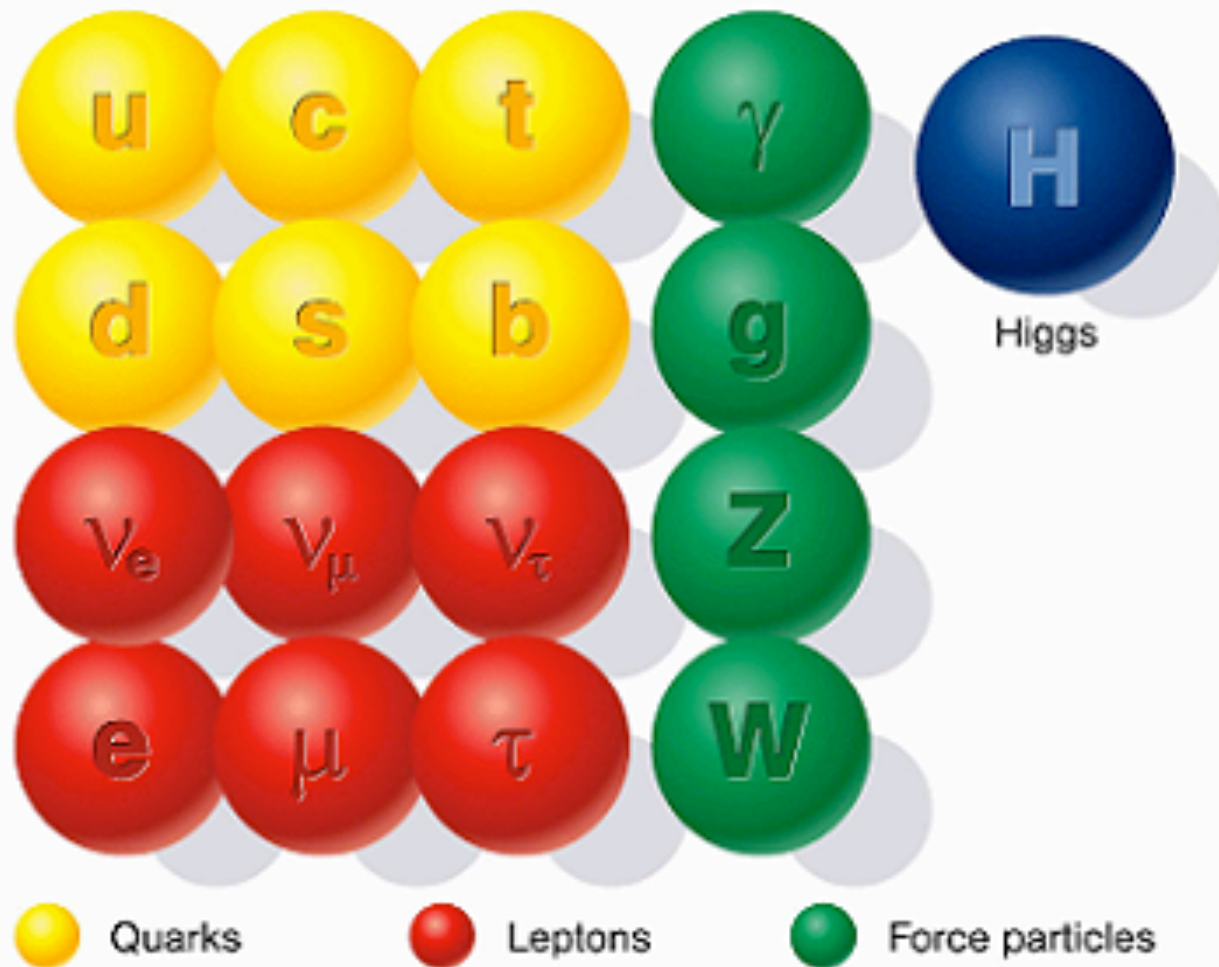
力の統一



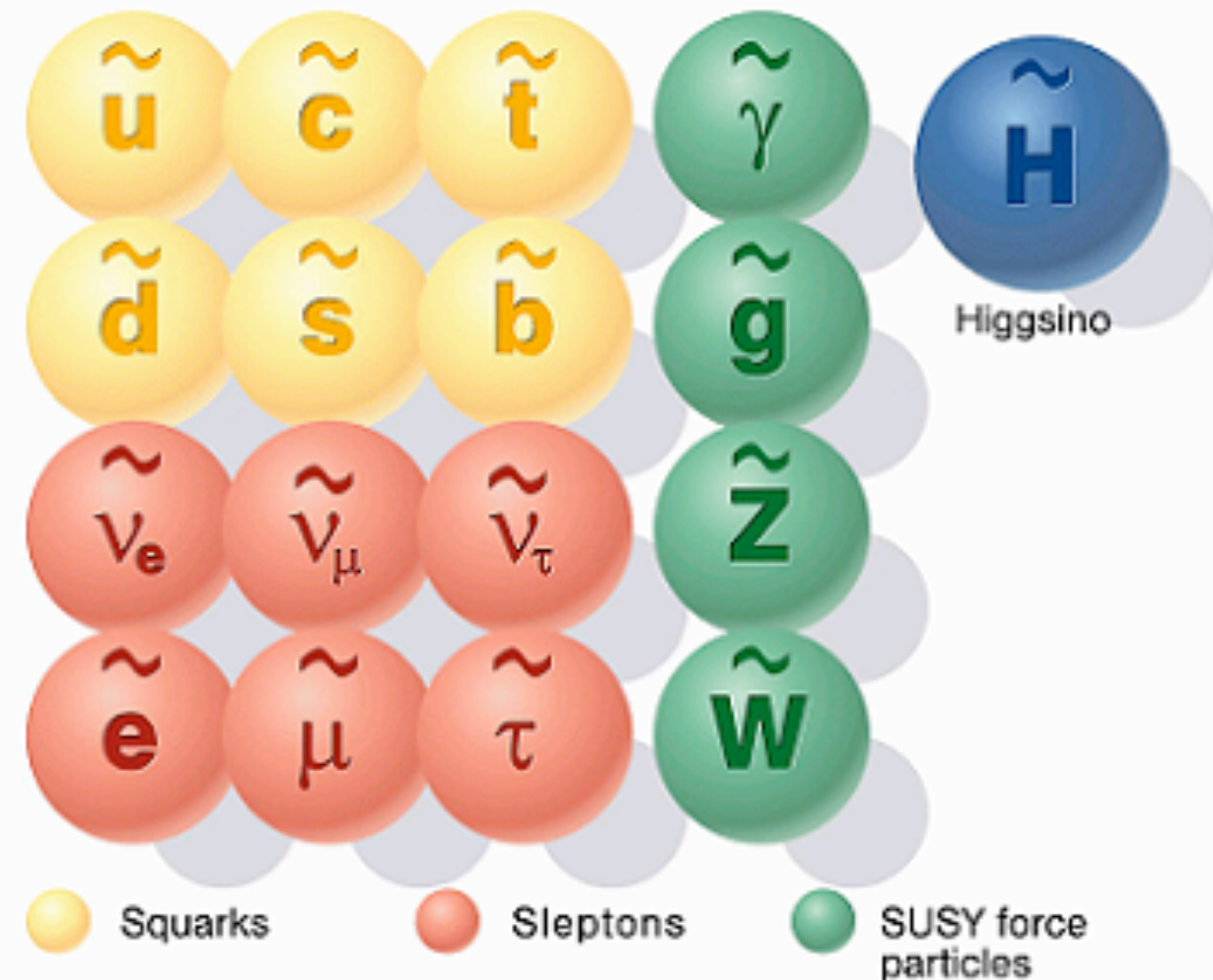
現在の加速器で発見可能な領域に新しい粒子が存在すると3つの力がもともと同じであったということが言えそうだ。

超対称性粒子

Standard particles



SUSY particles



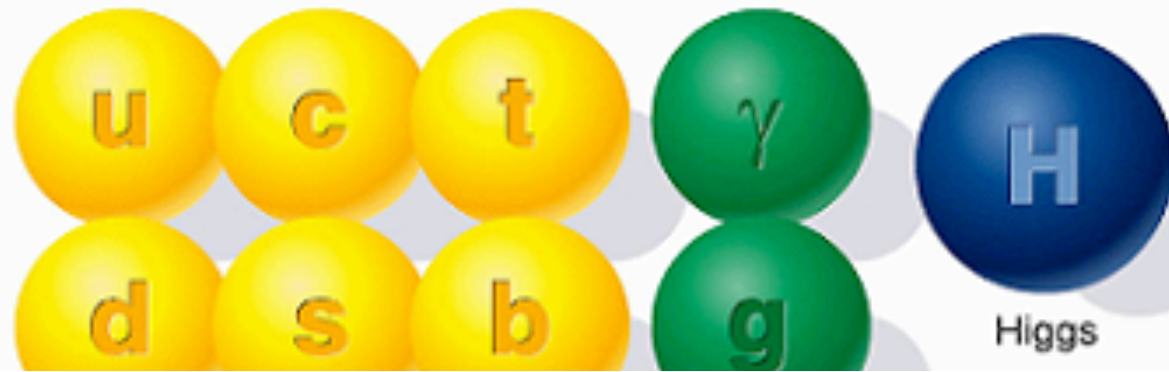
“スピン”という素粒子固有の性質だけが違う

他にも、

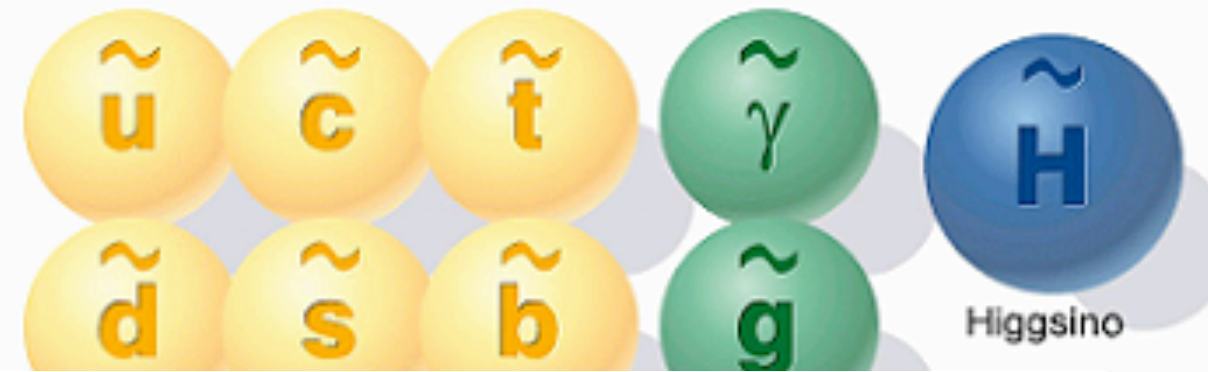
余剰次元や、標準模型を超える様々な理論が提唱されている

超対称性粒子

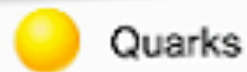
Standard particles



SUSY particles



次に発見されるものは新物理
実験が重要！



Quarks



Leptons



Force particles



Squarks



Sleptons



SUSY force particles

“スピン”という素粒子固有の性質だけが違う

他にも、

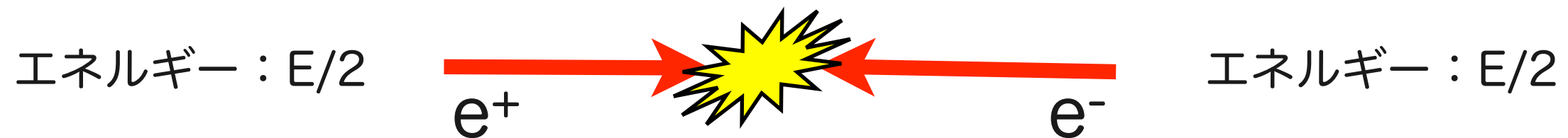
余剰次元や、標準模型を超える様々な理論が提唱されている

新粒子の発見と
宇宙誕生の謎に迫る
最先端の素粒子実験

素粒子実験の考え方

未知粒子を作り出し、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



$$E = Mc^2$$

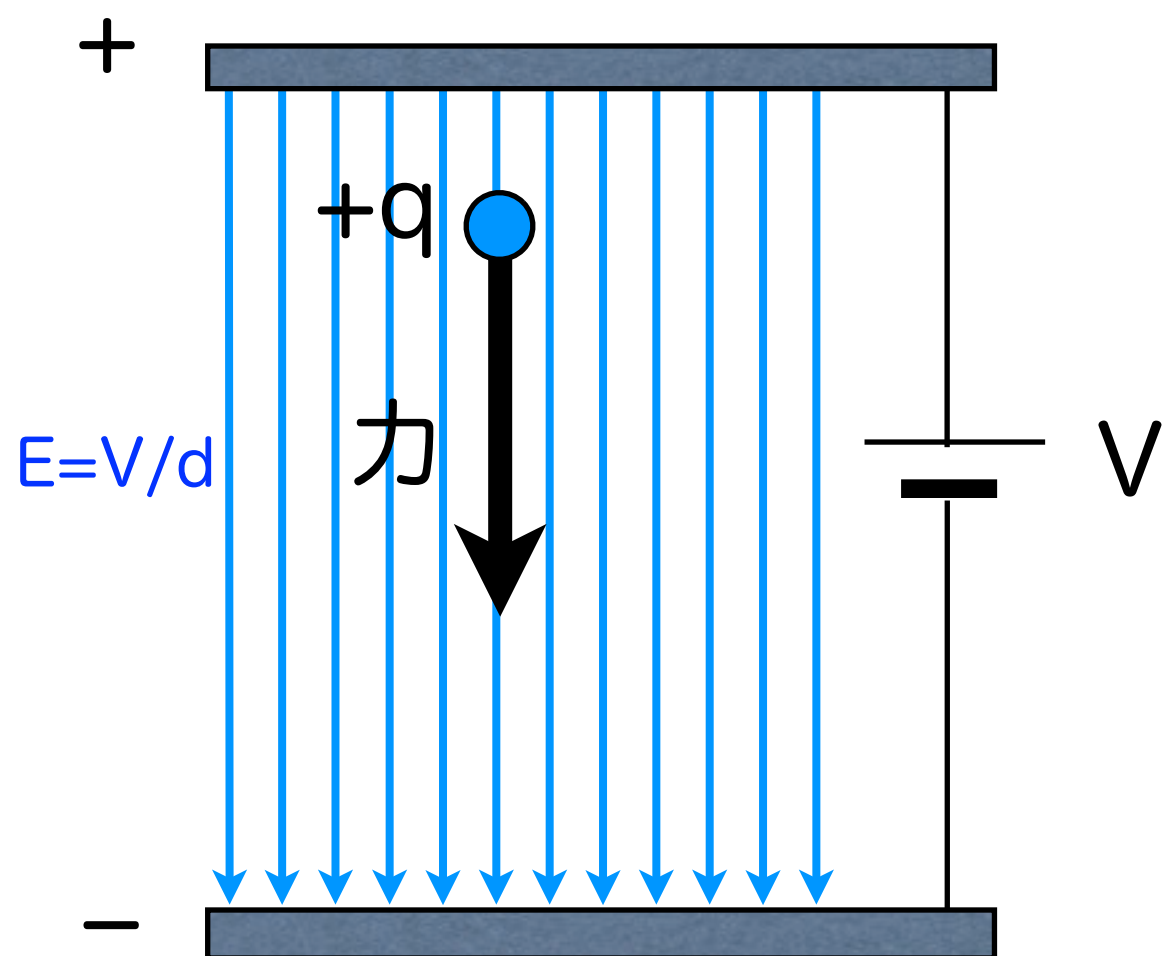
質量 $M = E/c^2$ の未知なる素粒子を生成する能力

加速した粒子を衝突させる

高エネルギー！

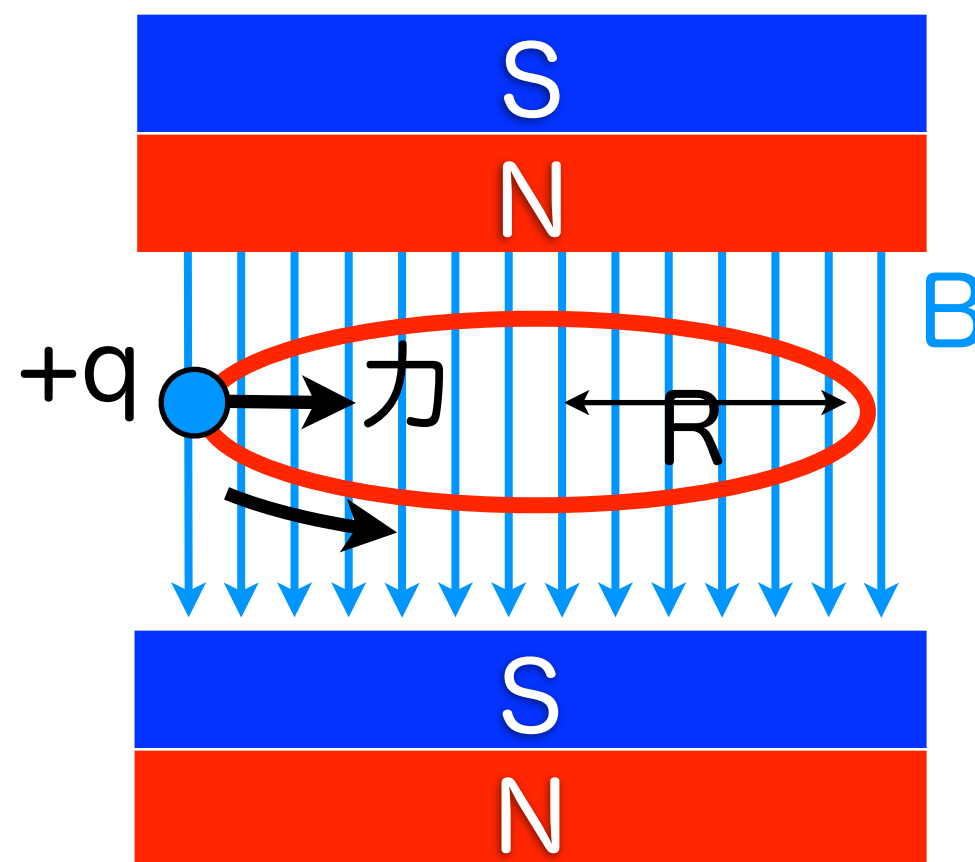
粒子を加速する

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

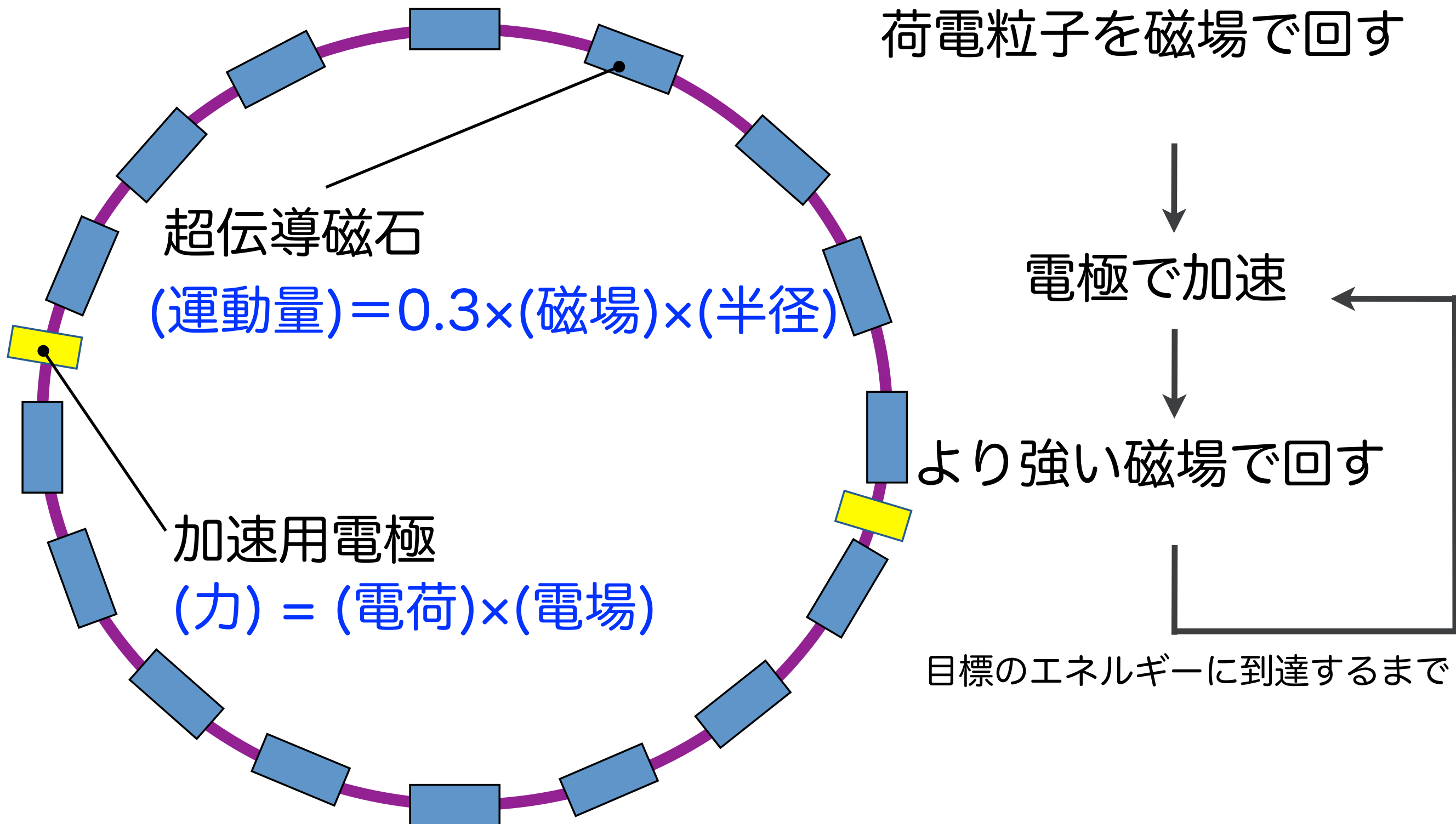
$$(\text{力}) = (\text{電荷}) \times (\text{電場})$$



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

高エネルギー陽子を光速の99.99999991%にまで加速させ、その衝突によって宇宙誕生直後 ($\sim 10^{-12}$ 秒後)の世界を再現。ヒッグス粒子, 未知の素粒子を作り出して研究する。

CERNより

MontBlanc

レマン湖

ジュネーブ空港

CERN研究所

LHCb

ATLAS

CMS

ALICE

陽子

陽子

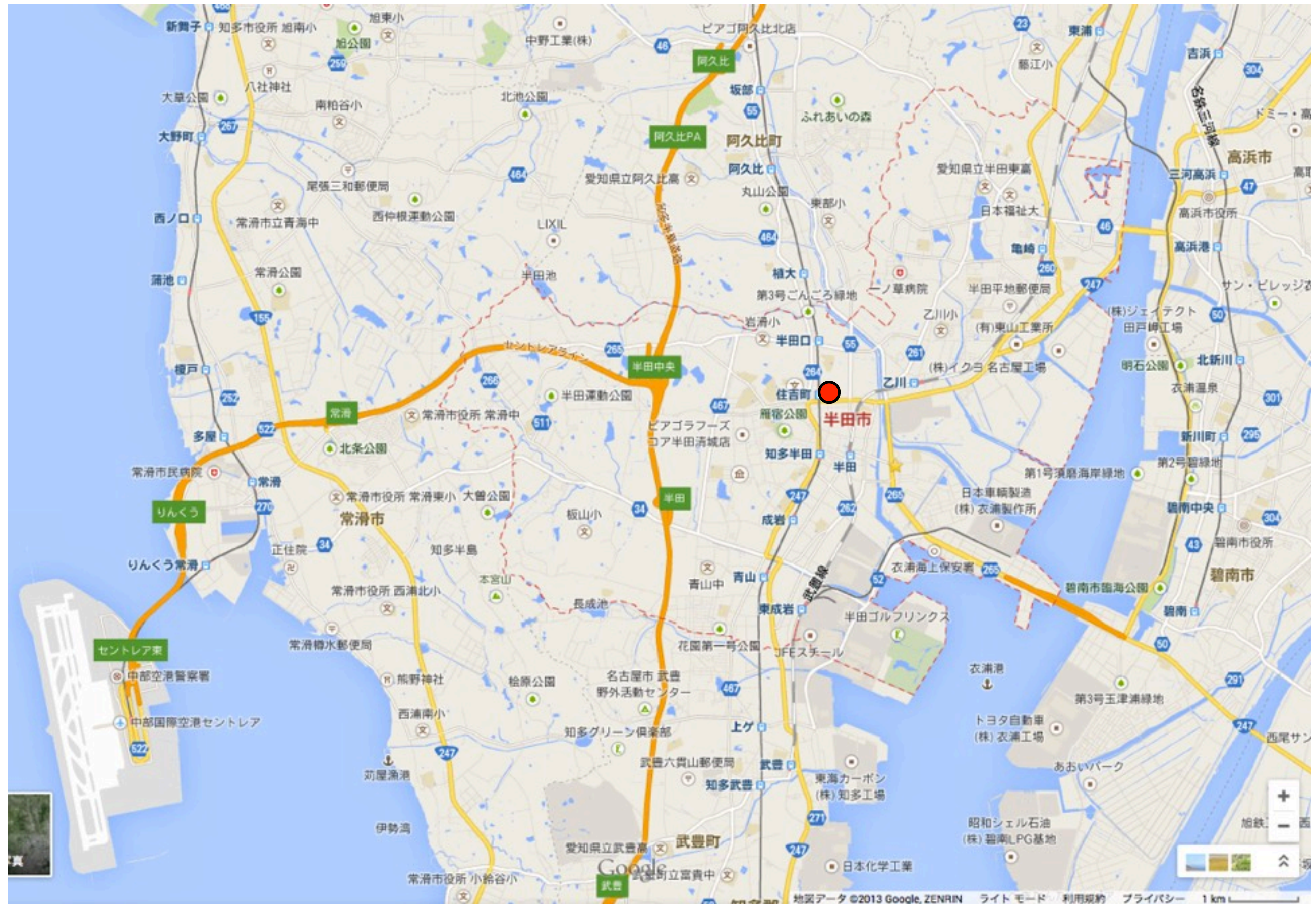
1232台の 8.33T 超伝導磁石(15m)
液体ヘリウムで冷却, -271°C

CERNより

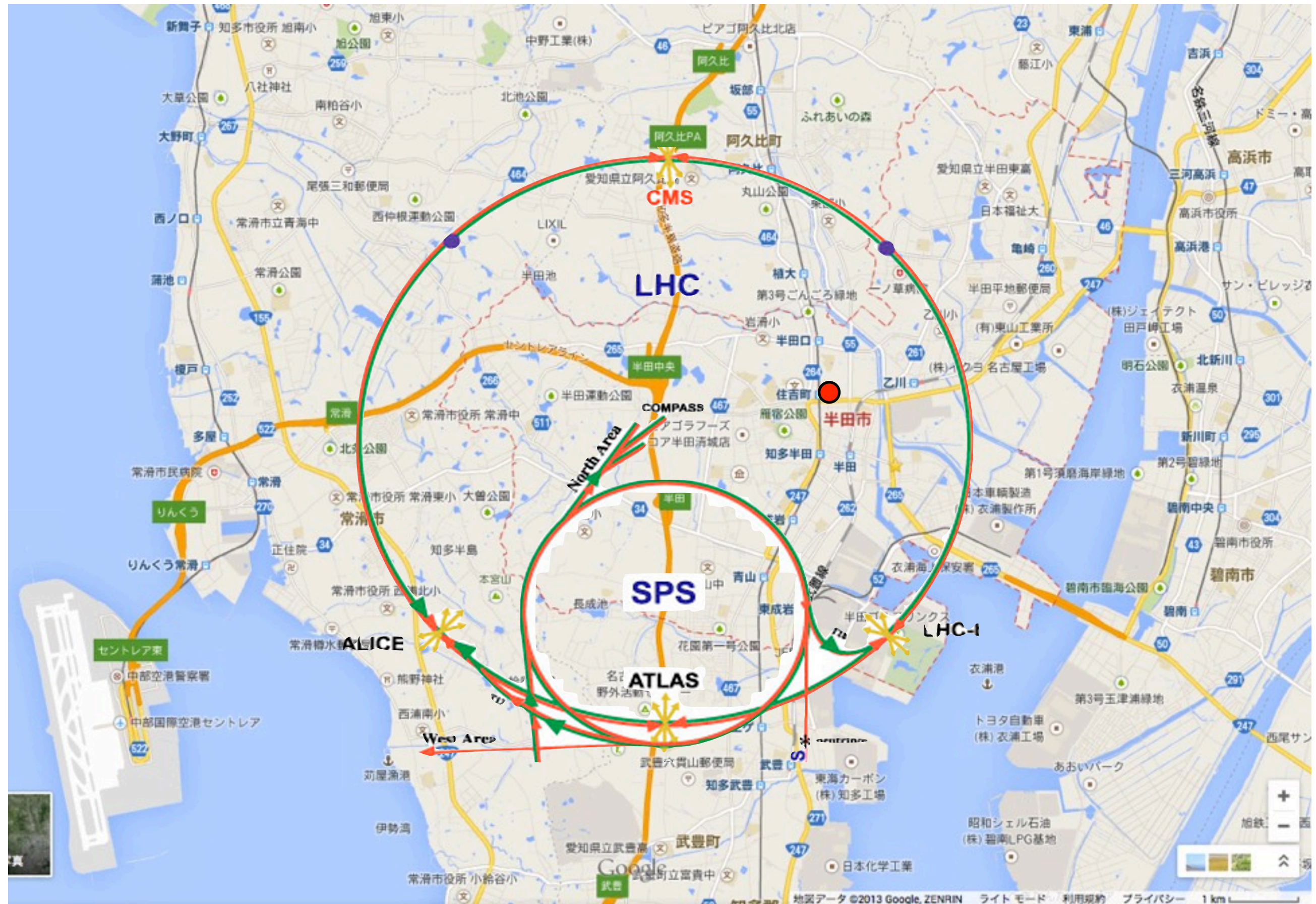
毎秒 1 億回の陽子・陽子衝突
(1年 = 31,536,000秒 \rightarrow 千万秒)

- 2011年と2012年から第1実験
2000兆回の陽子・陽子衝突データ取得
- 2015年6月から第2実験
400兆回の陽子・陽子衝突データ取得
1.6倍の衝突エネルギー

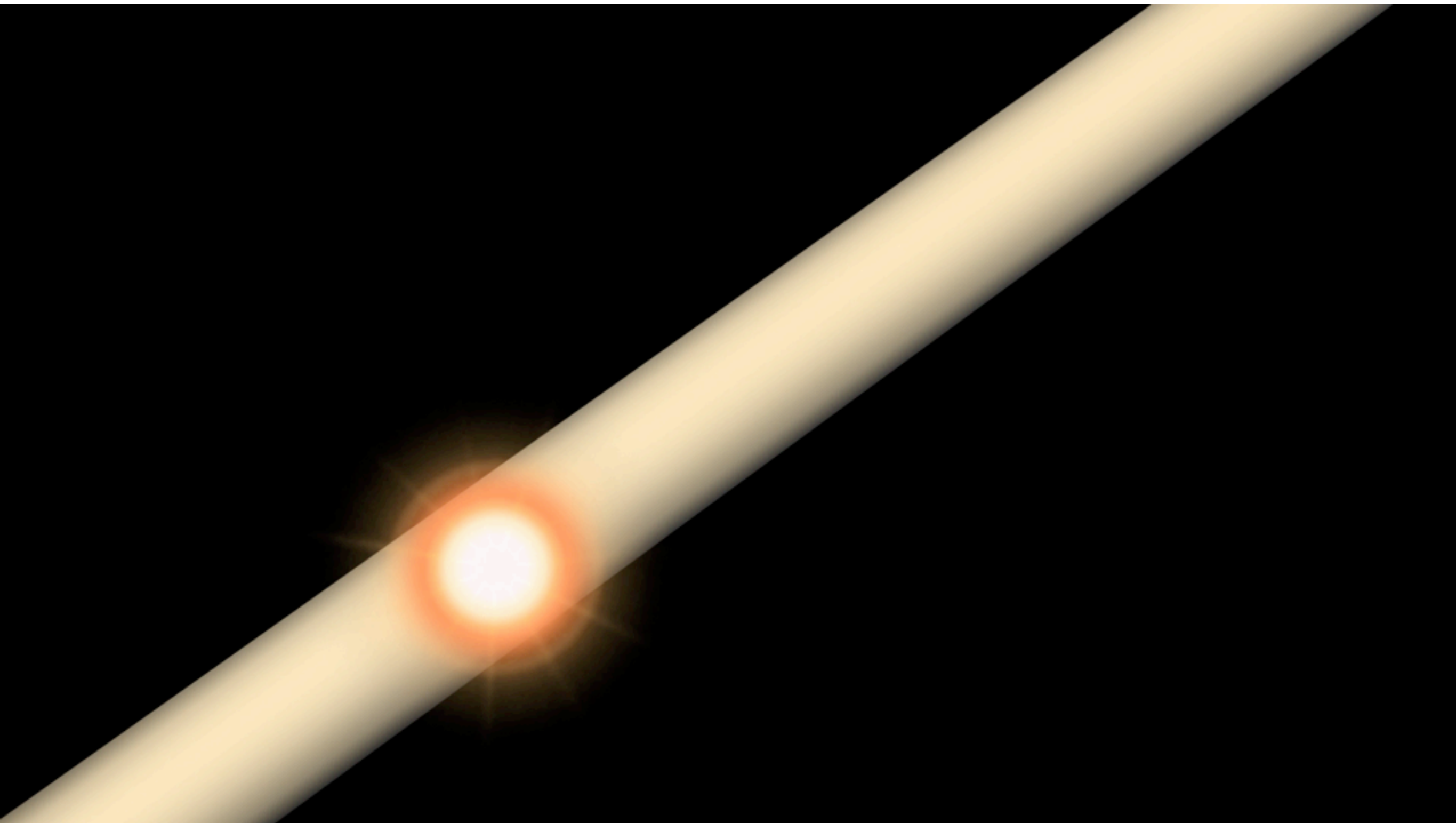
LHC加速器の大きさ



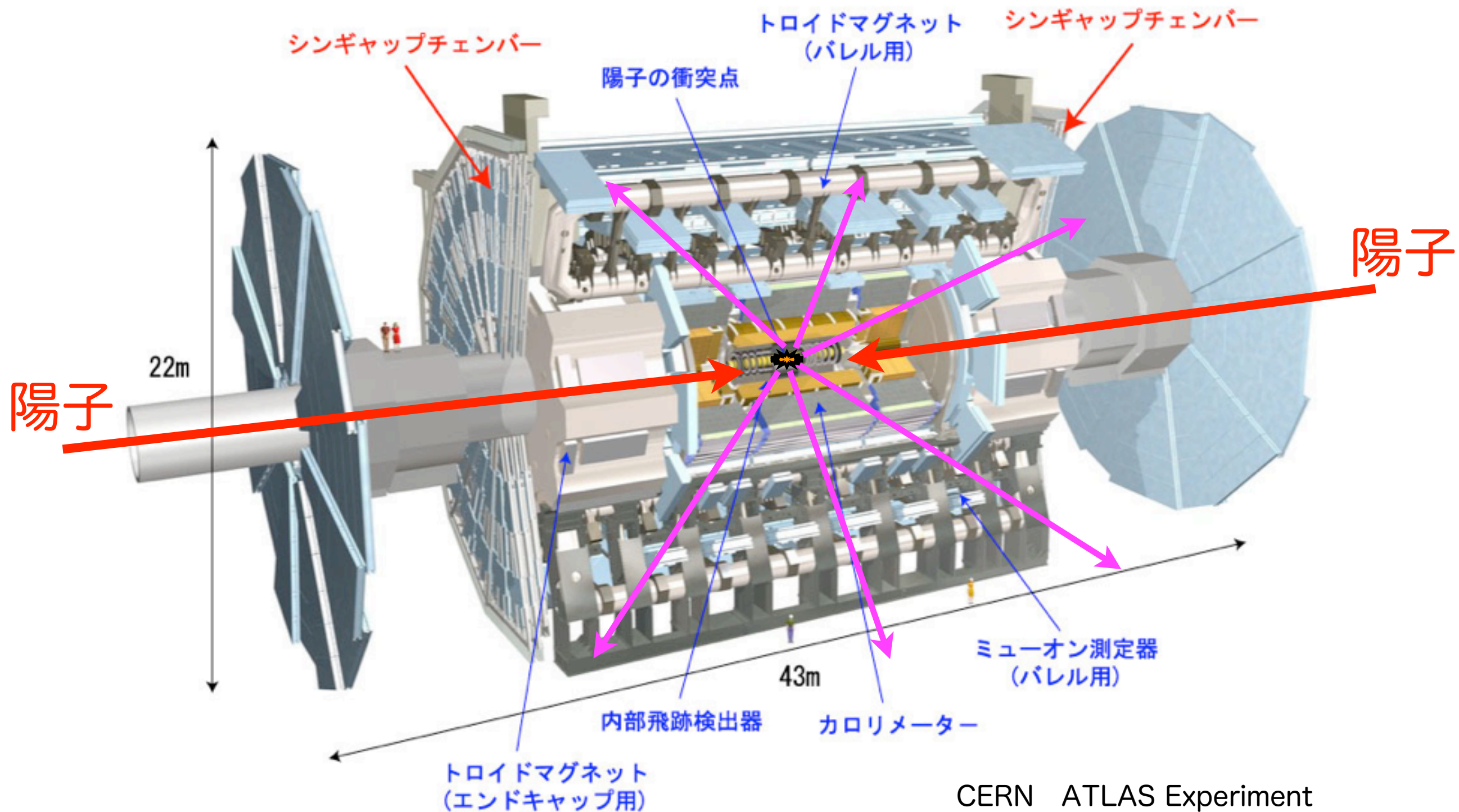
LHC加速器の大きさ



陽子・陽子衝突のアニメーション



検出器 アトラス検出器

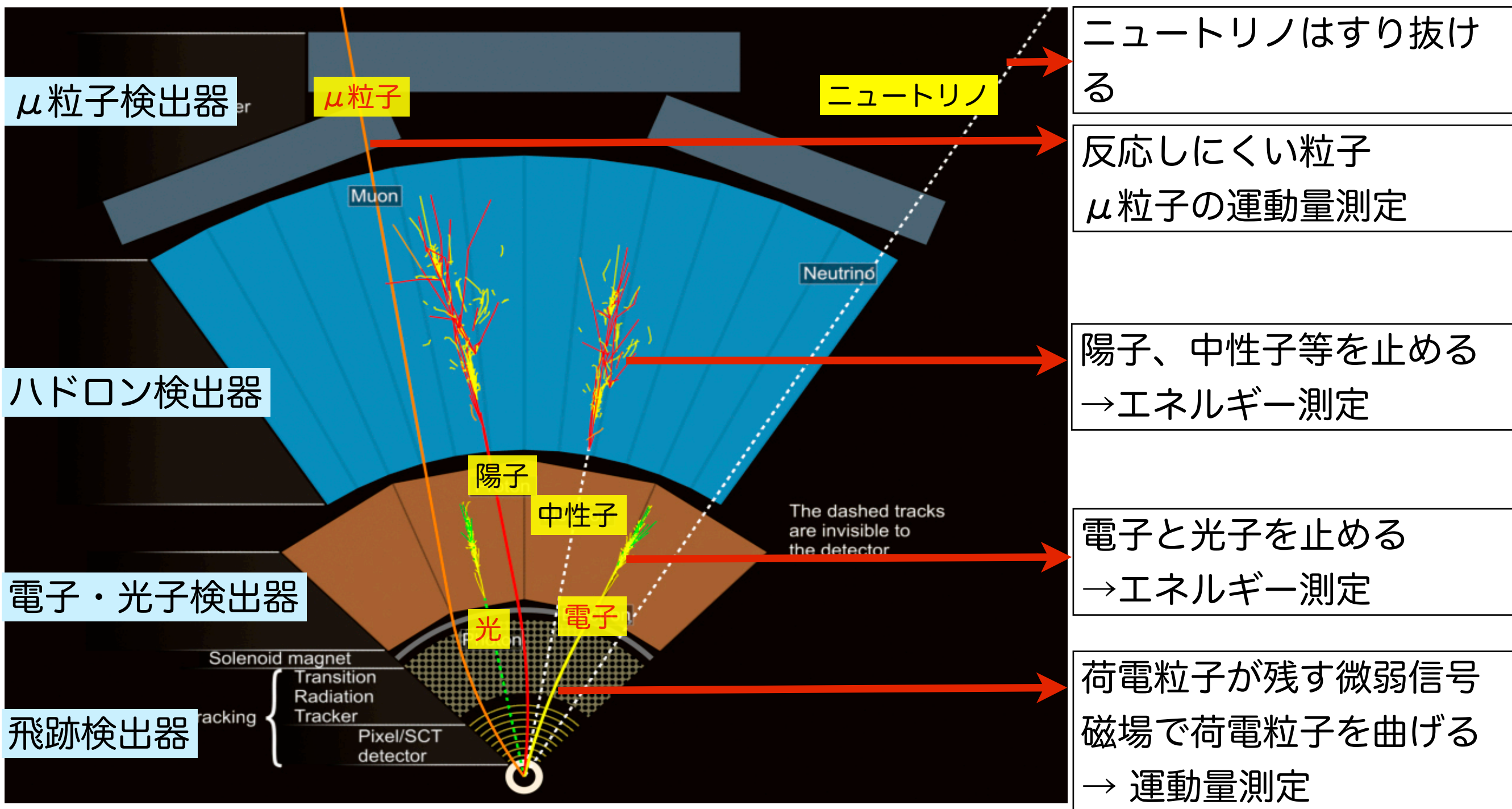


未知の素粒子を作る → 崩壊した軽い安定粒子を観測

光、電子、 μ 粒子、陽子、中性子、 π 中間子、K中間子、ニュートリノ

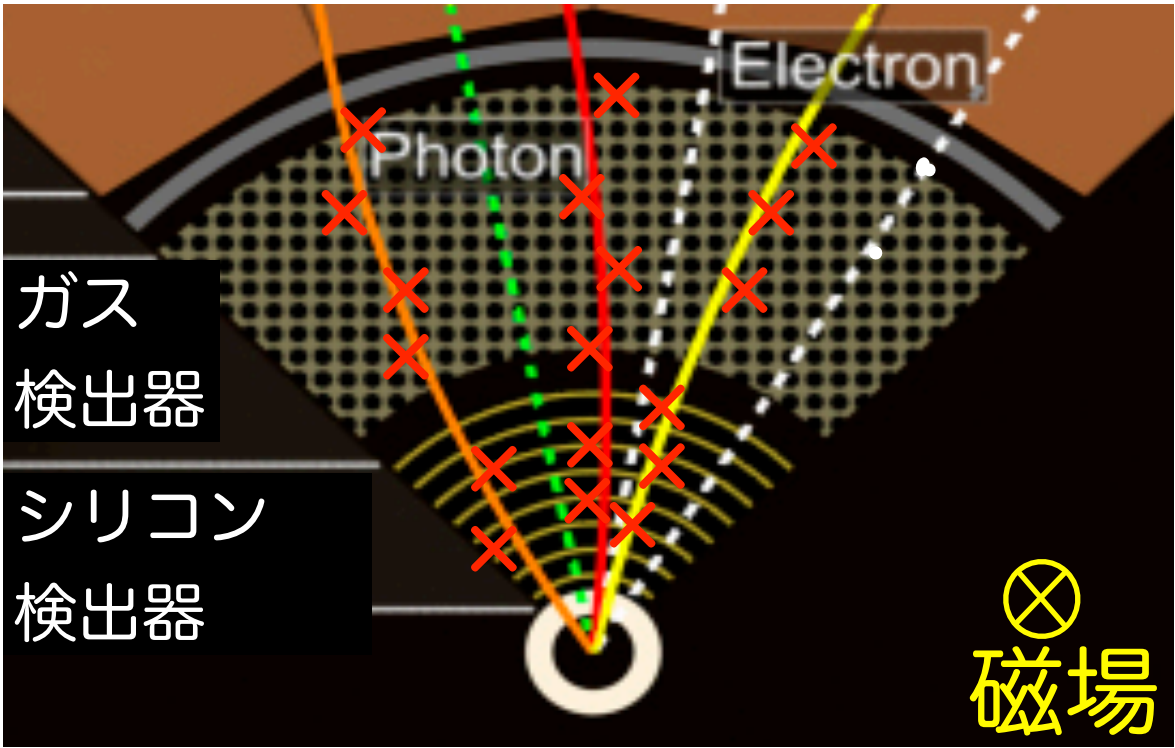
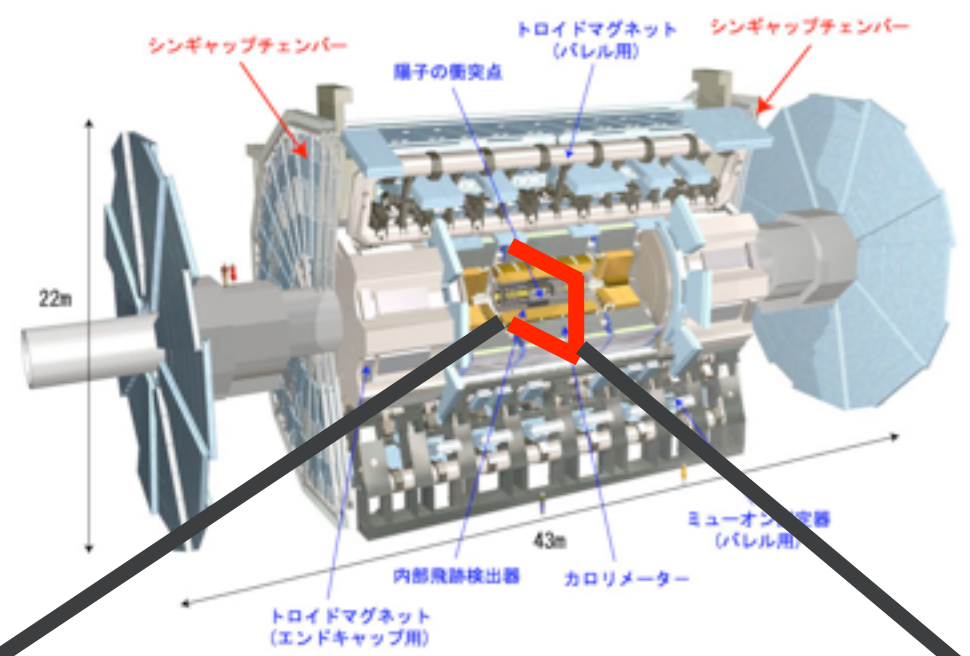
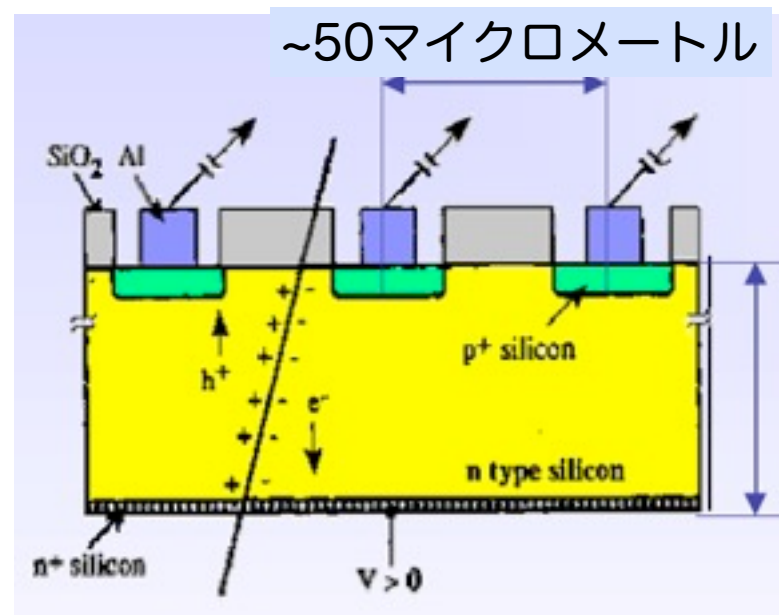
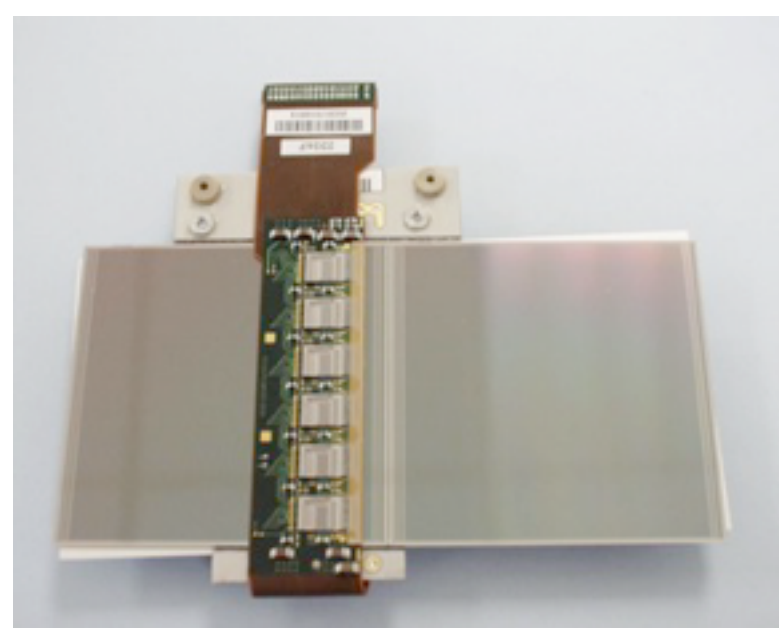
検出器の原理

検出器の物質と粒子との相互作用を利用する

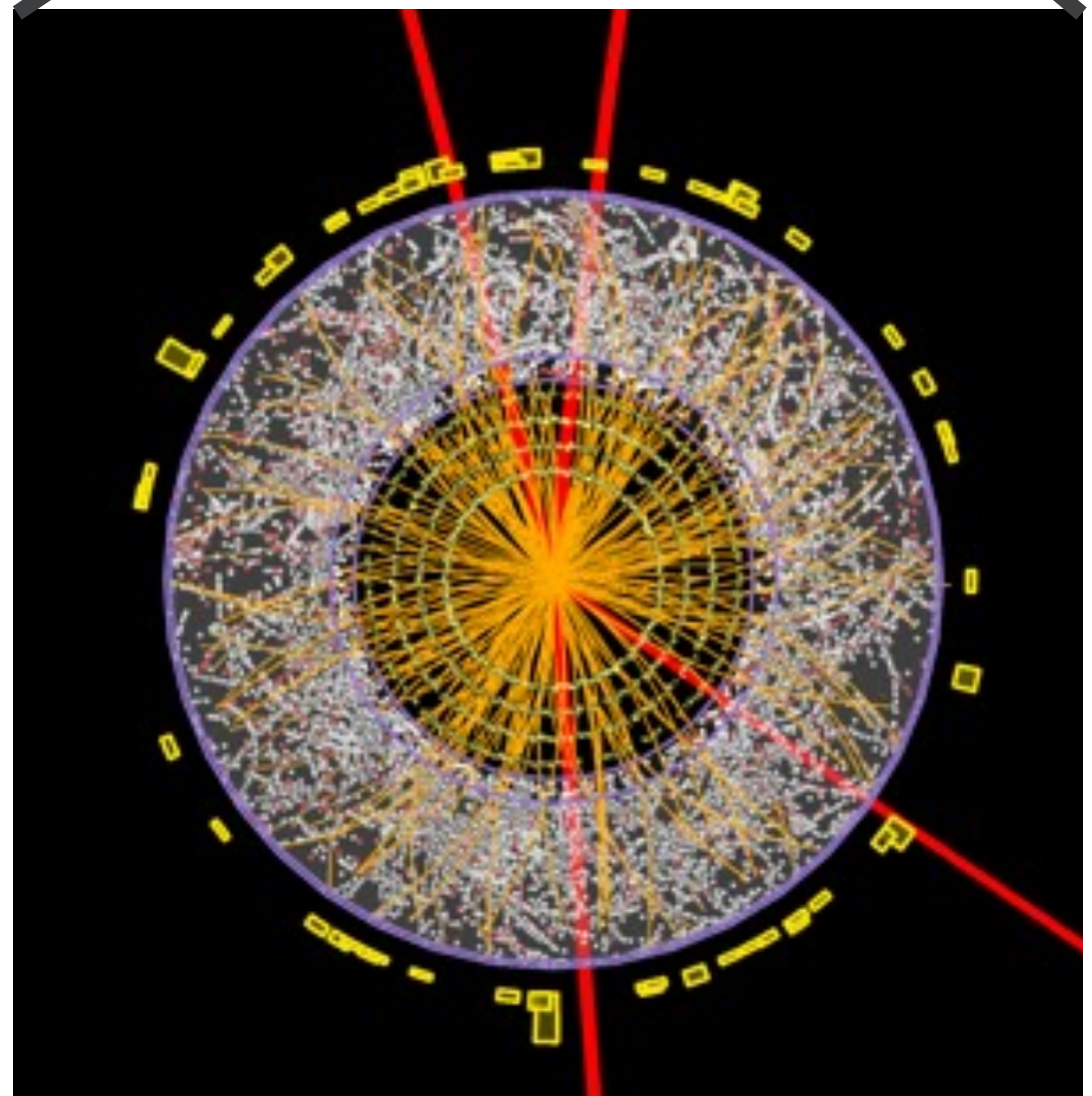


粒子の種類、エネルギー、運動量を測定

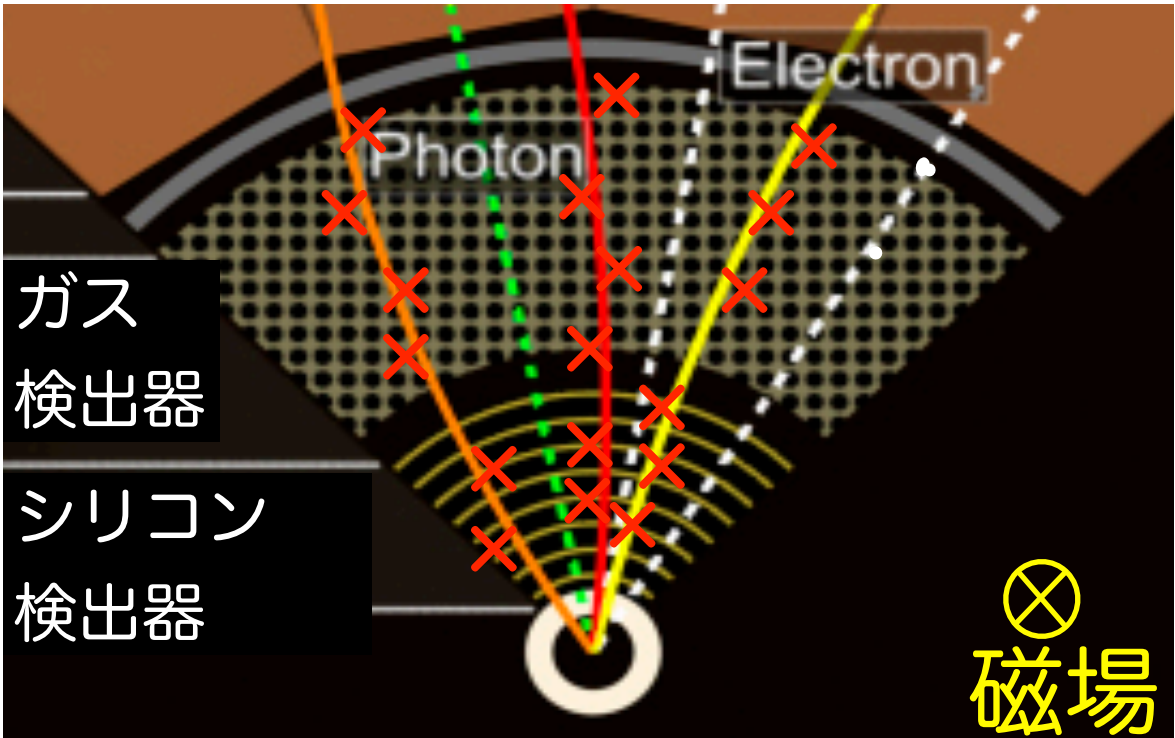
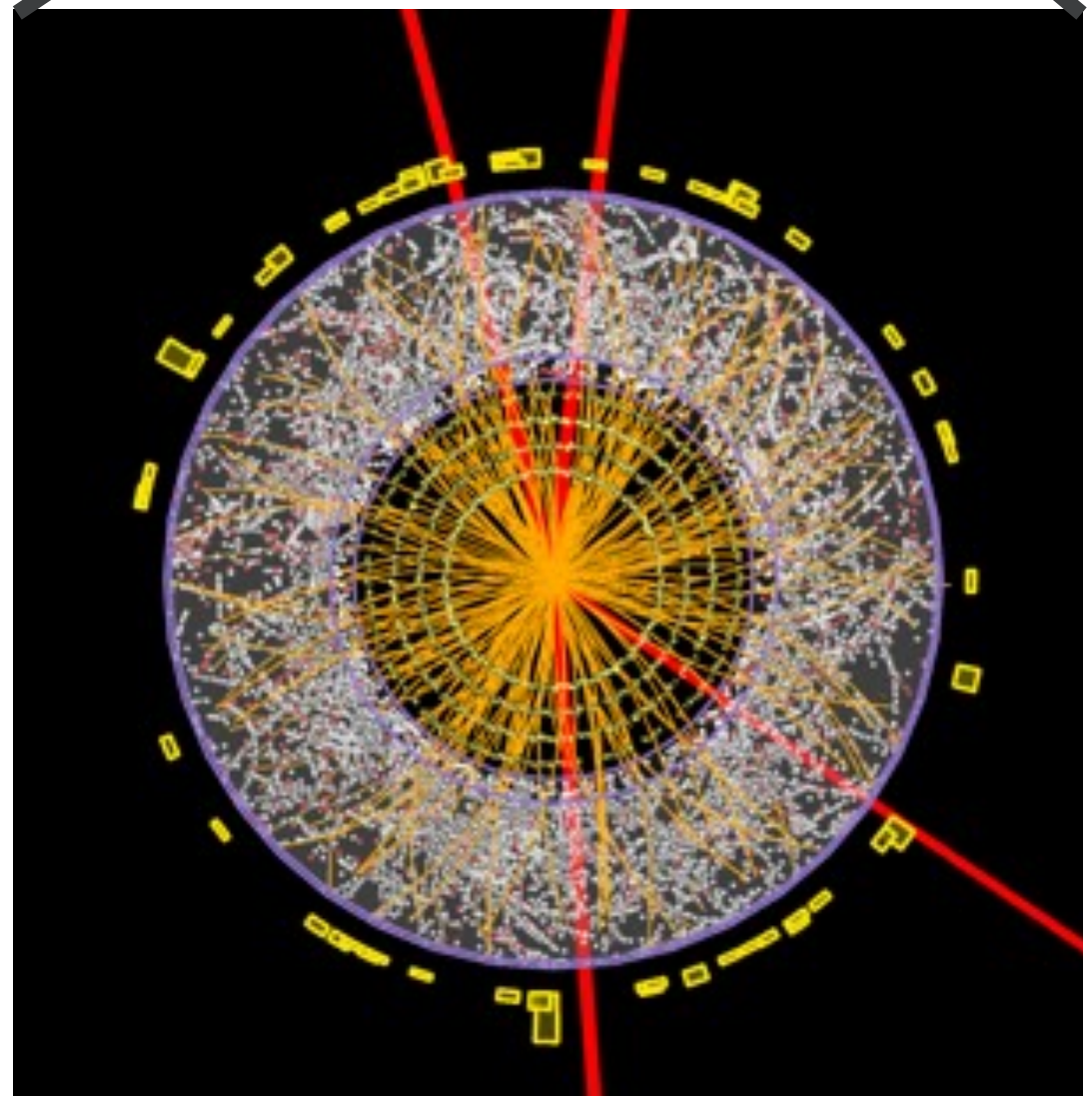
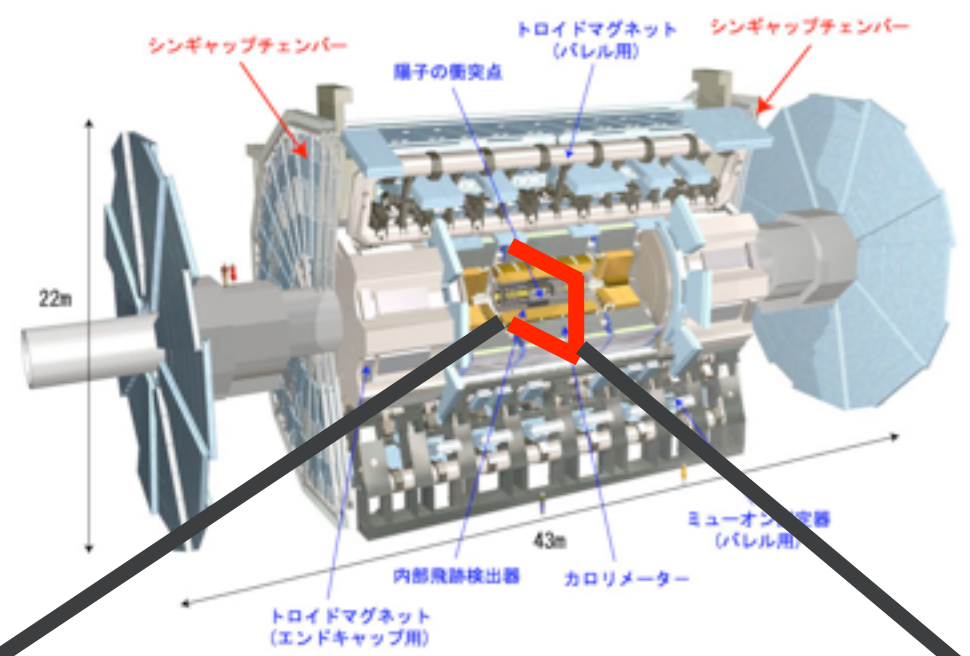
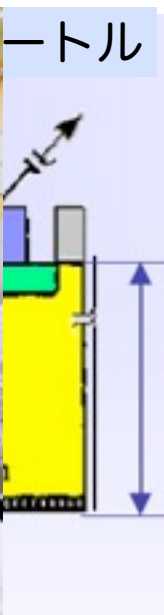
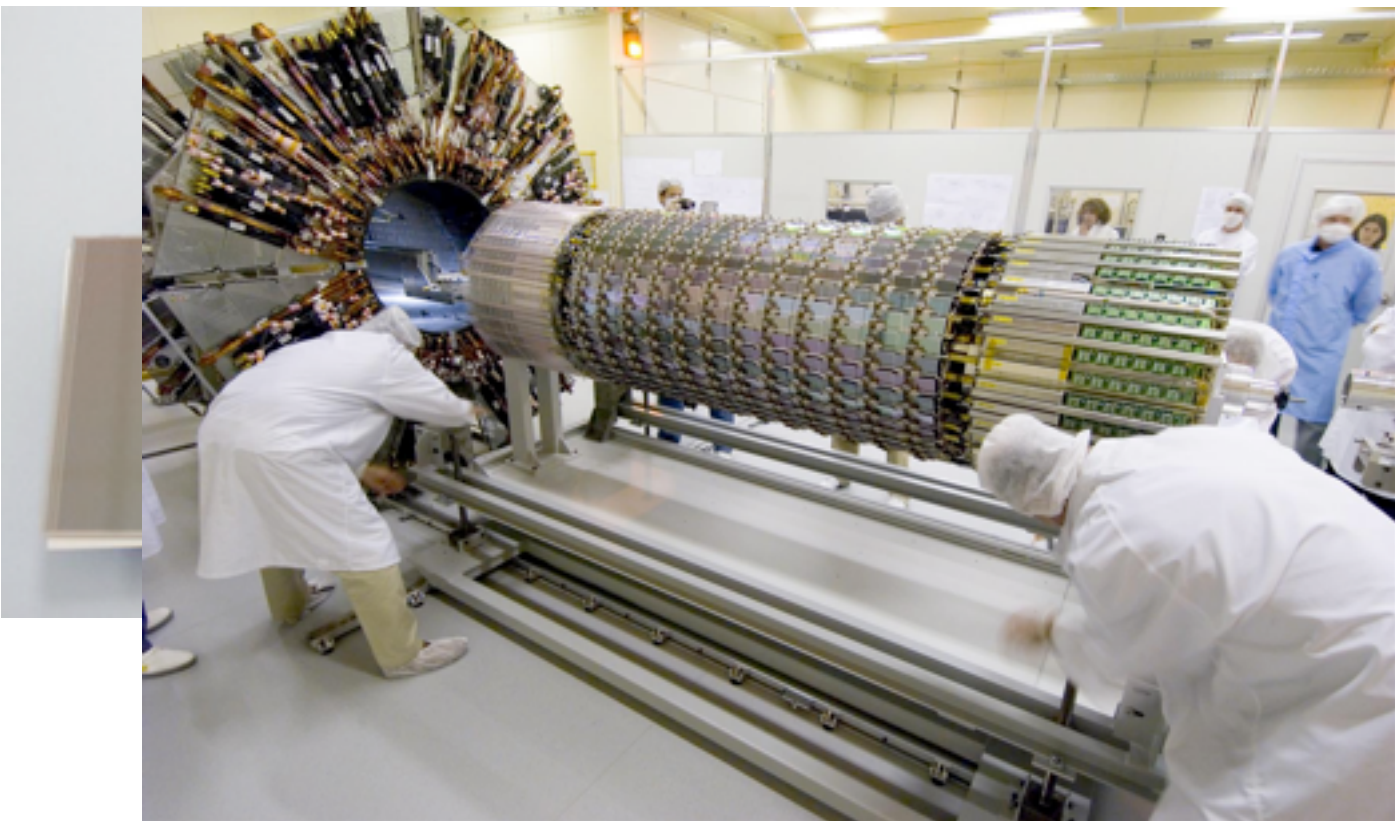
運動量測定 (飛跡検出器)



(運動量) = 0.3 × (磁場) × (半径)



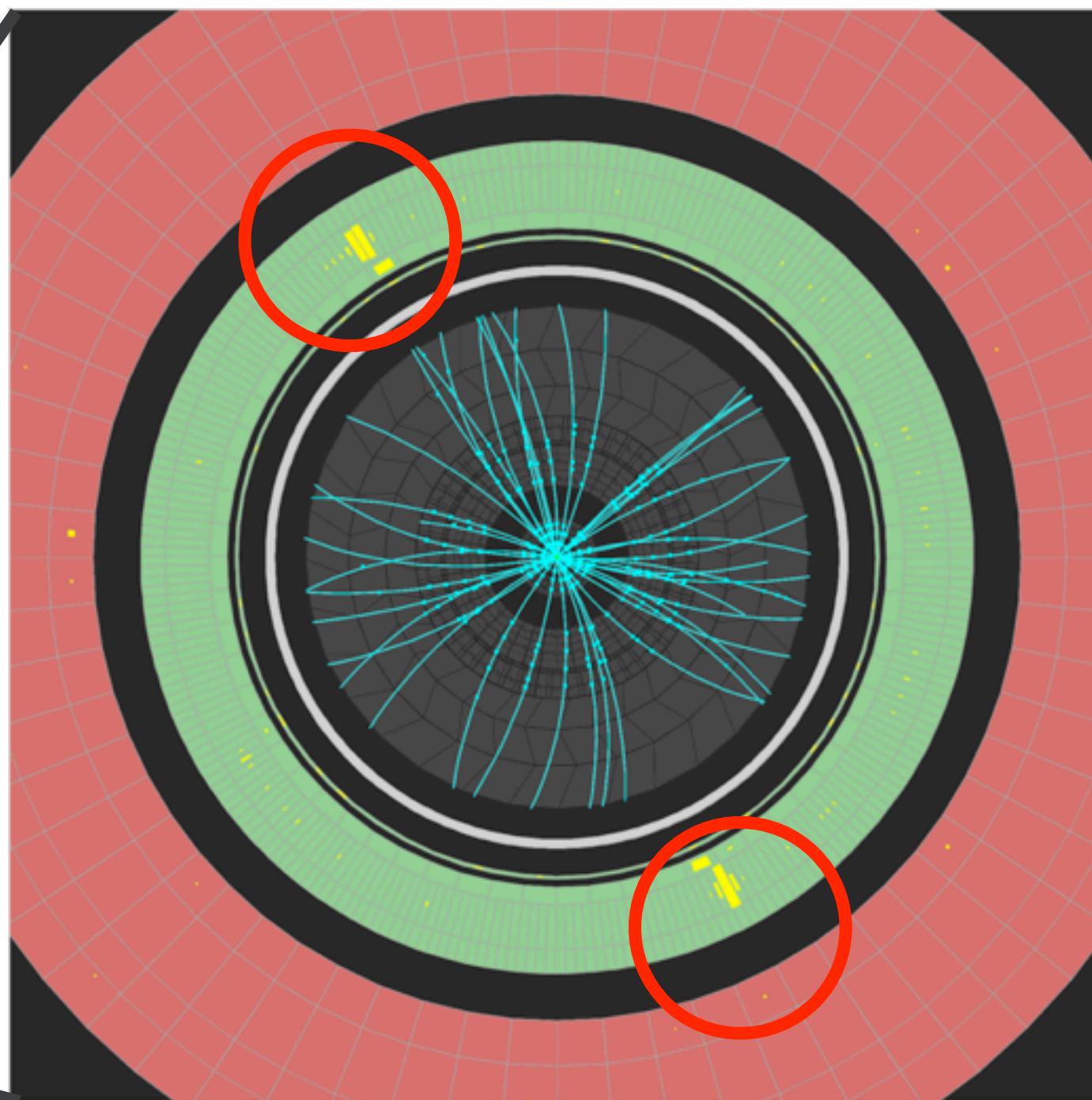
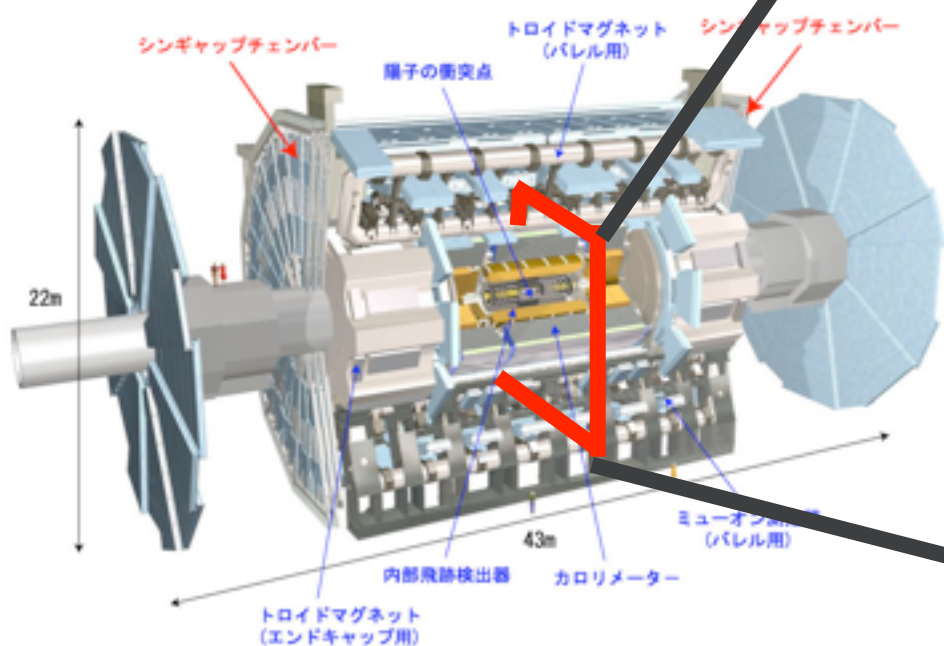
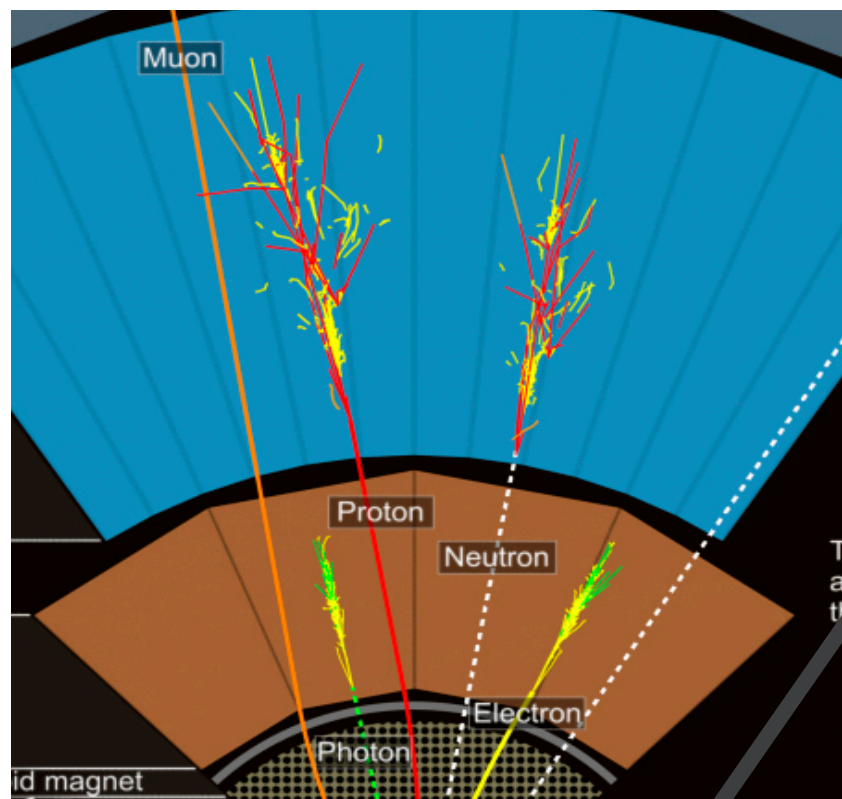
運動量測定 (飛跡検出器)



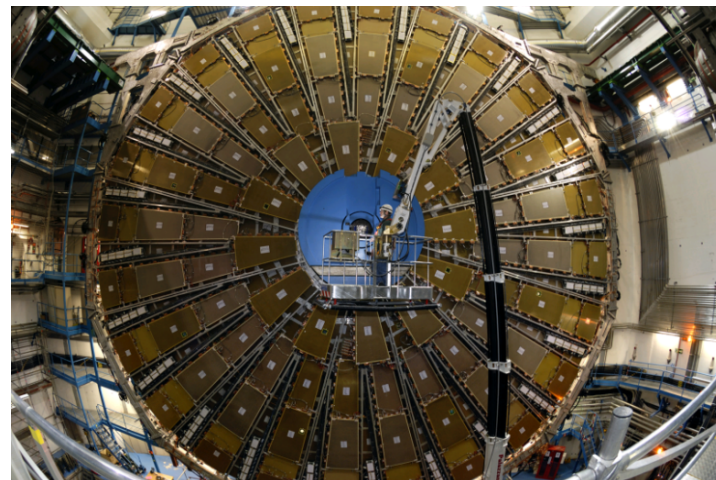
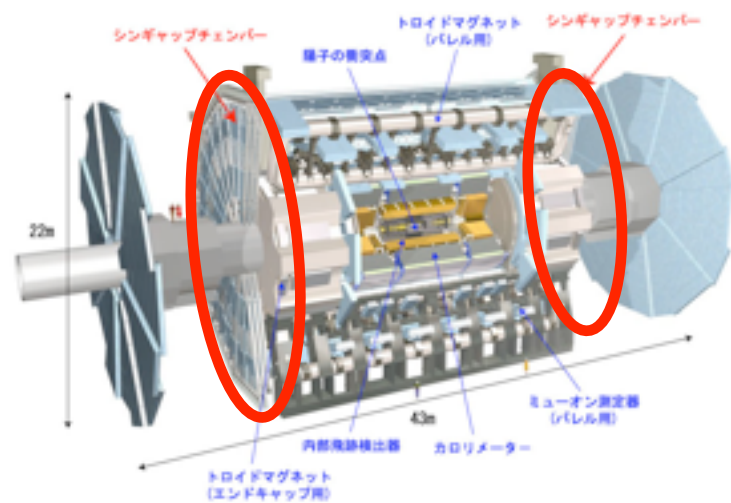
$(運動量) = 0.3 \times (磁場) \times (半径)$

エネルギー測定器（カロリメータ）

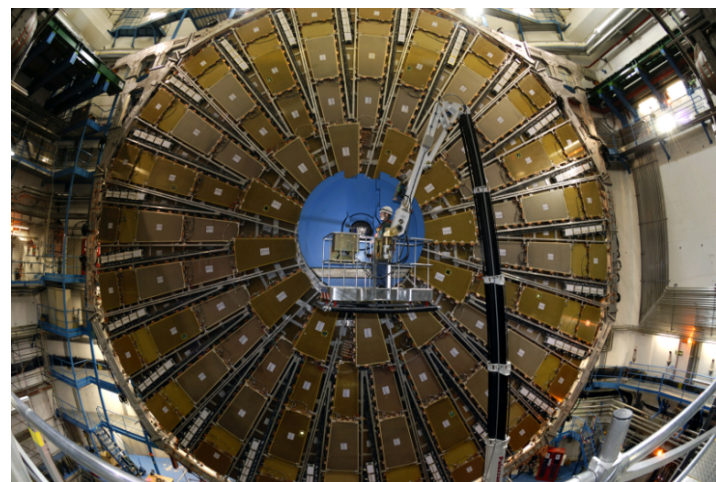
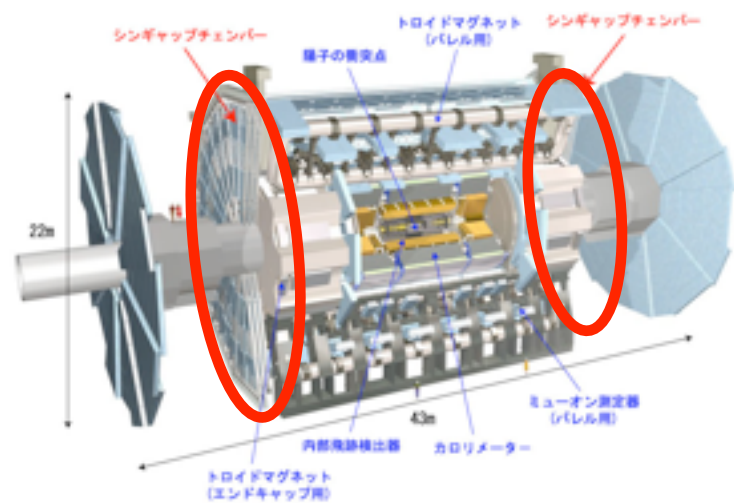
光子、電子、陽子、中性子などを物質で止める
そのとき出る光や熱を電気信号として捉える



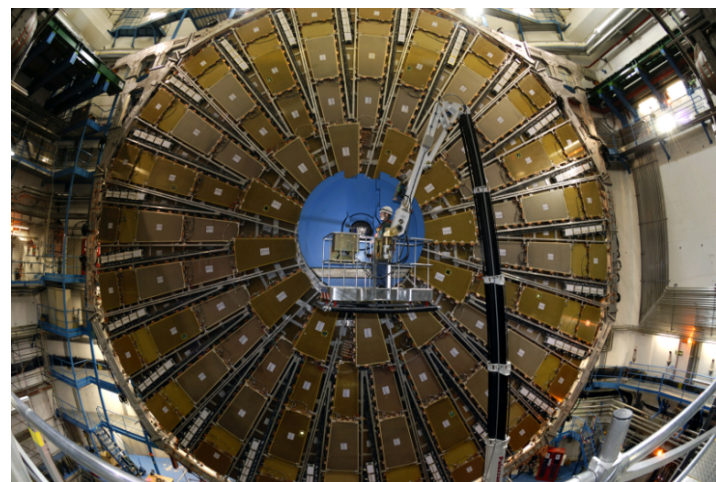
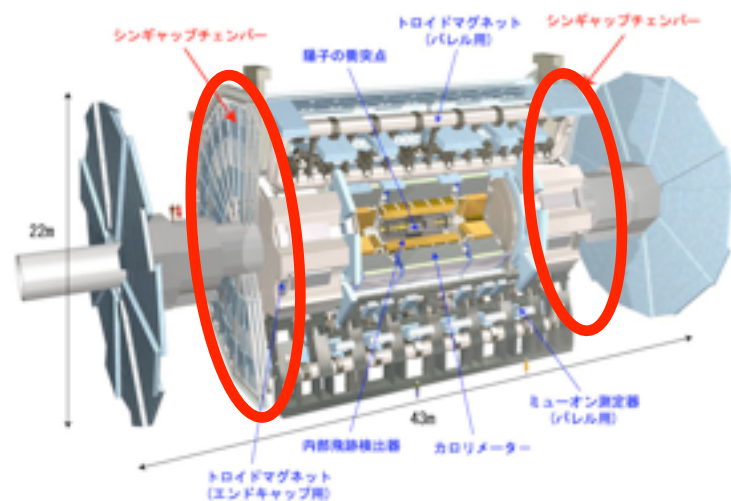
μ 粒子検出器の組み立て



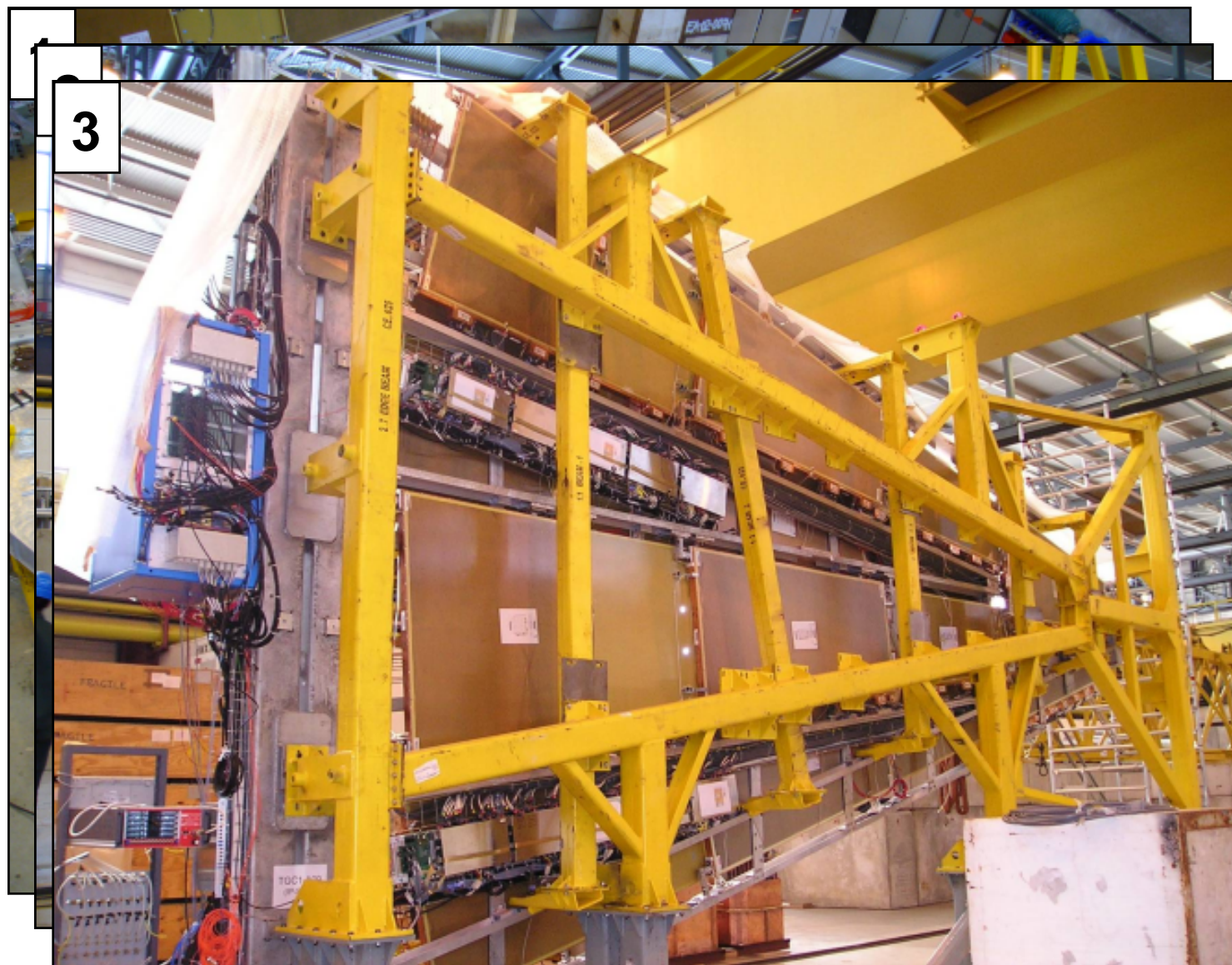
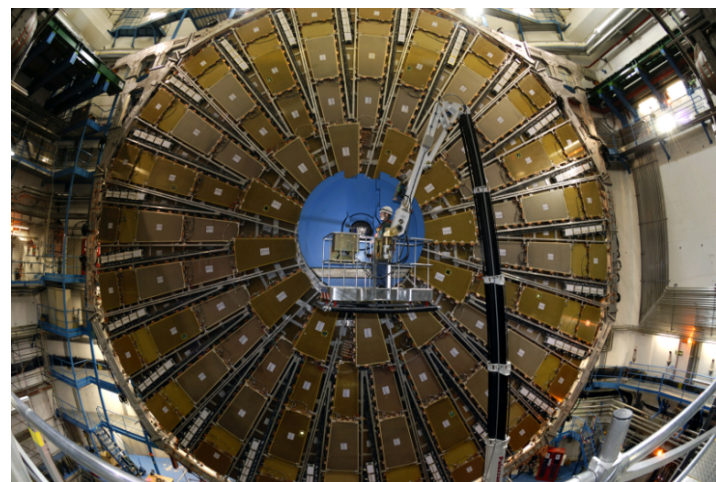
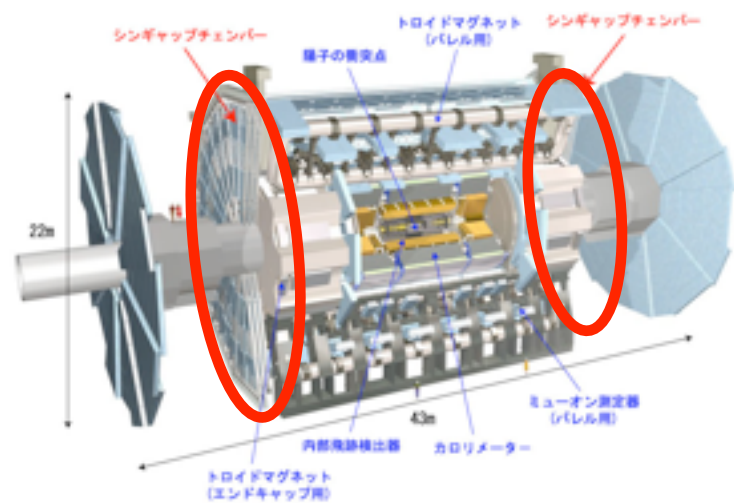
μ 粒子検出器の組み立て



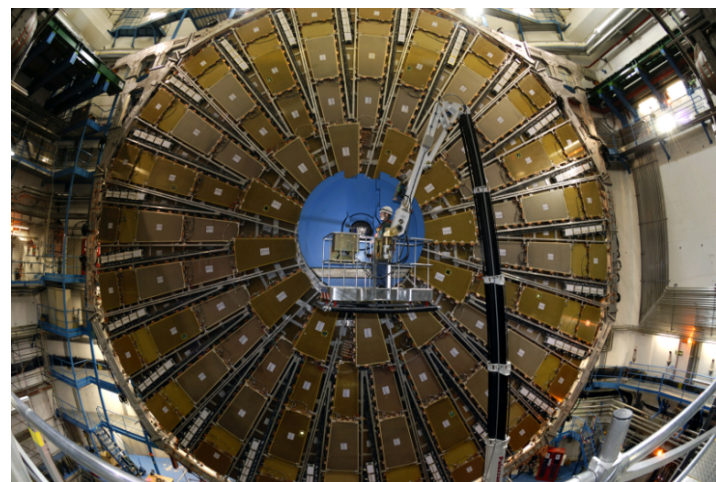
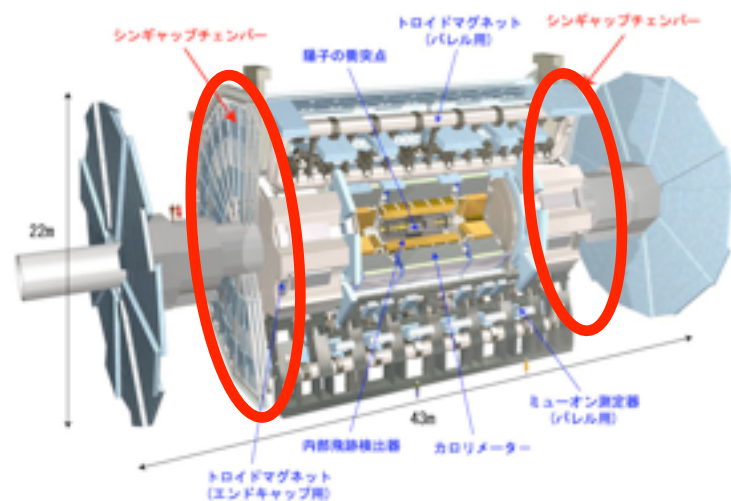
μ 粒子検出器の組み立て



μ 粒子検出器の組み立て



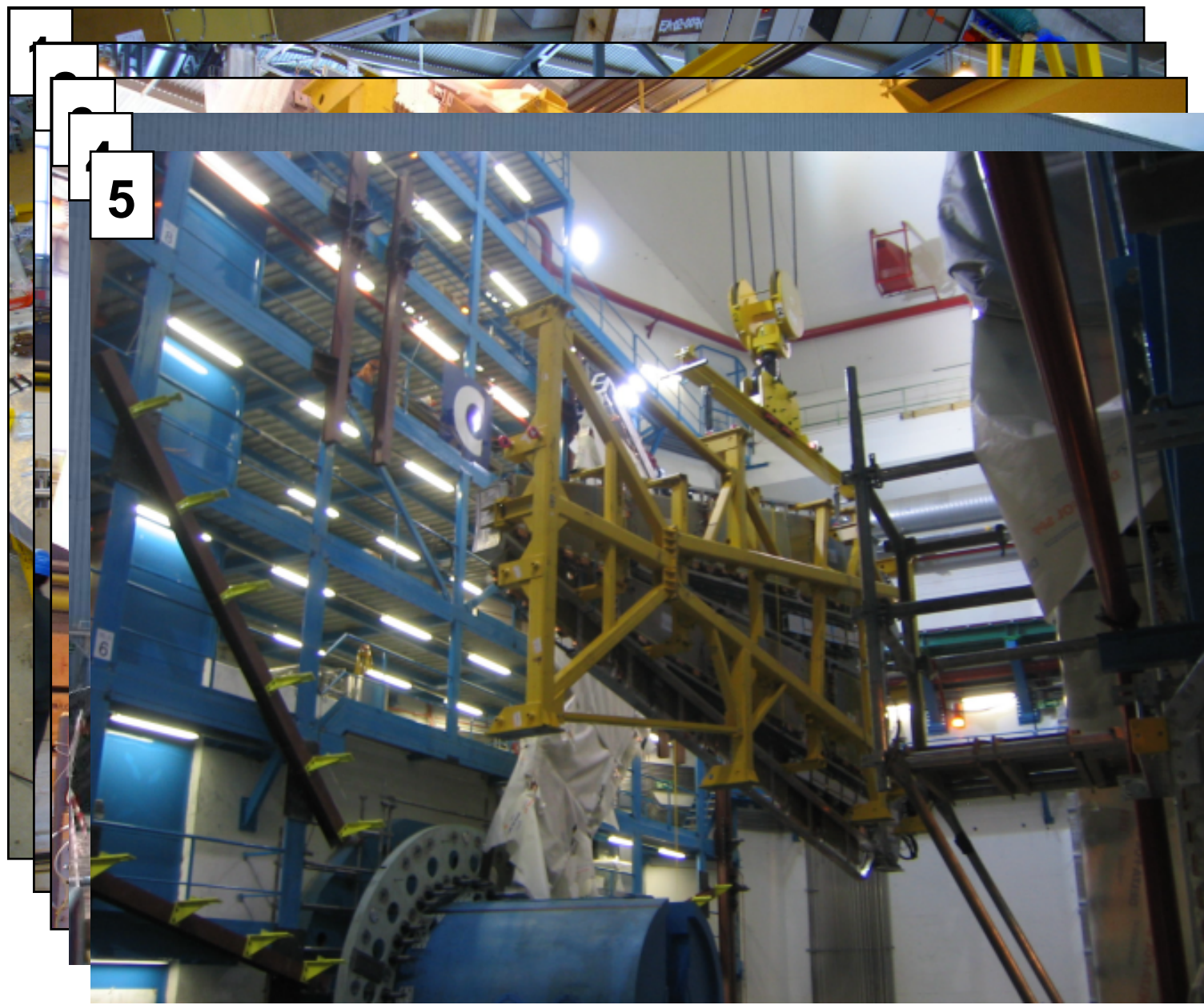
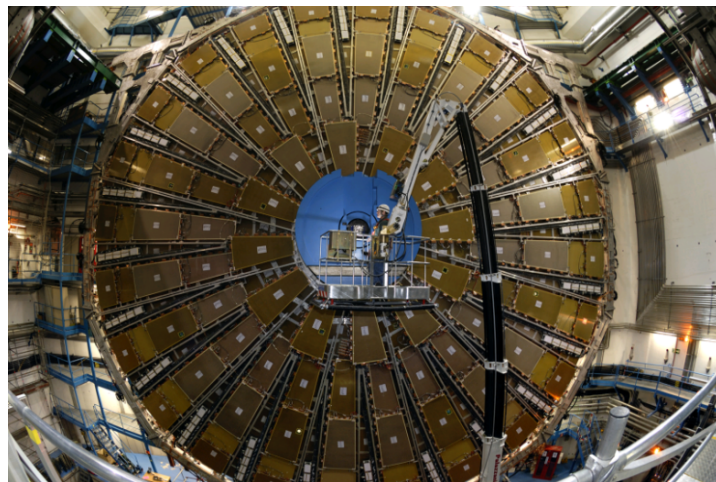
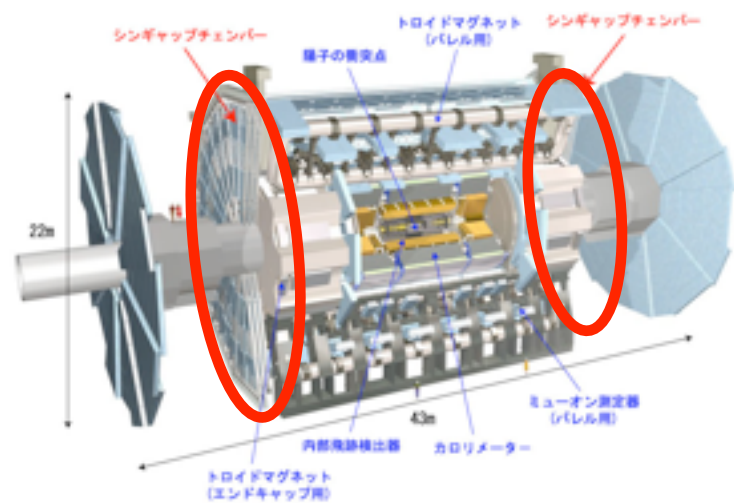
μ 粒子検出器の組み立て



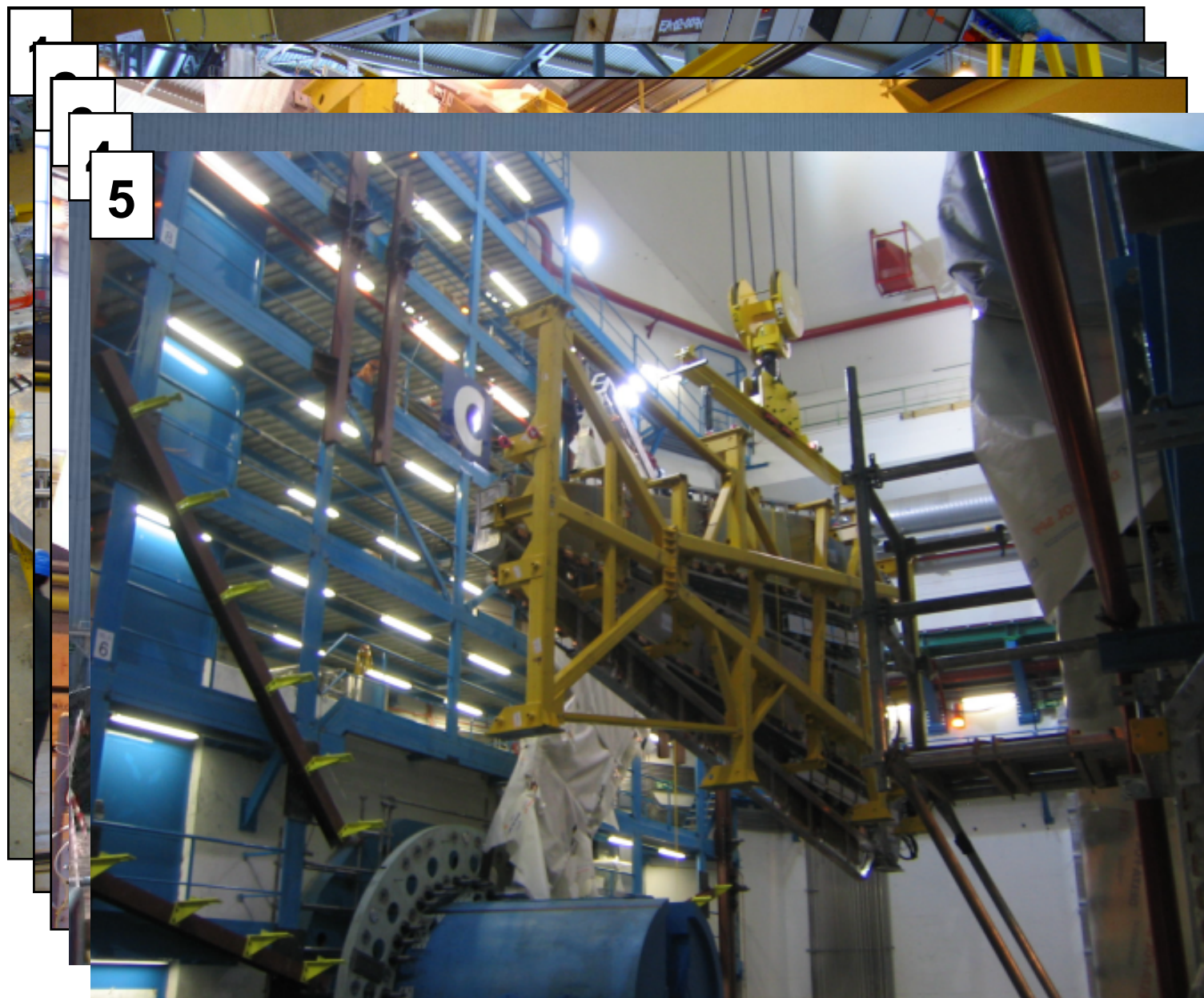
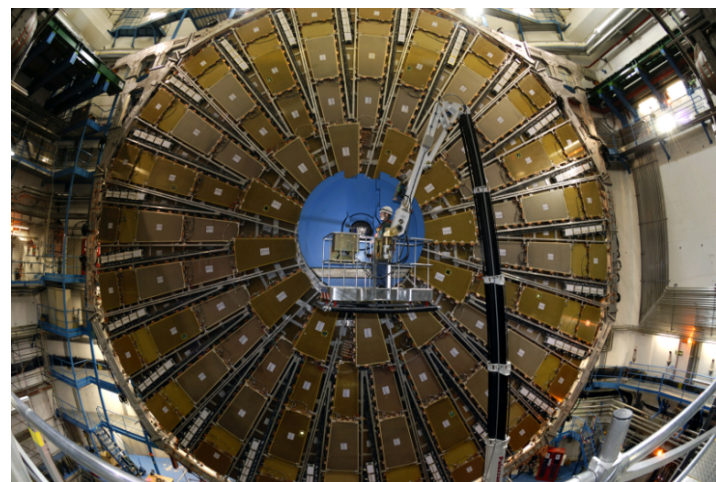
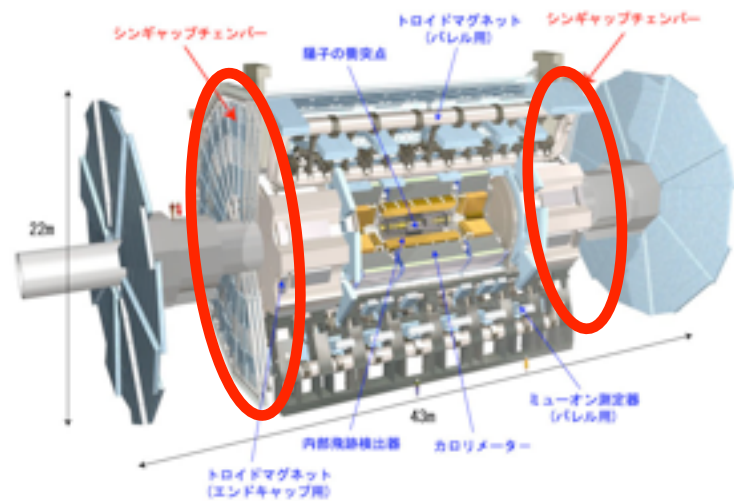
4



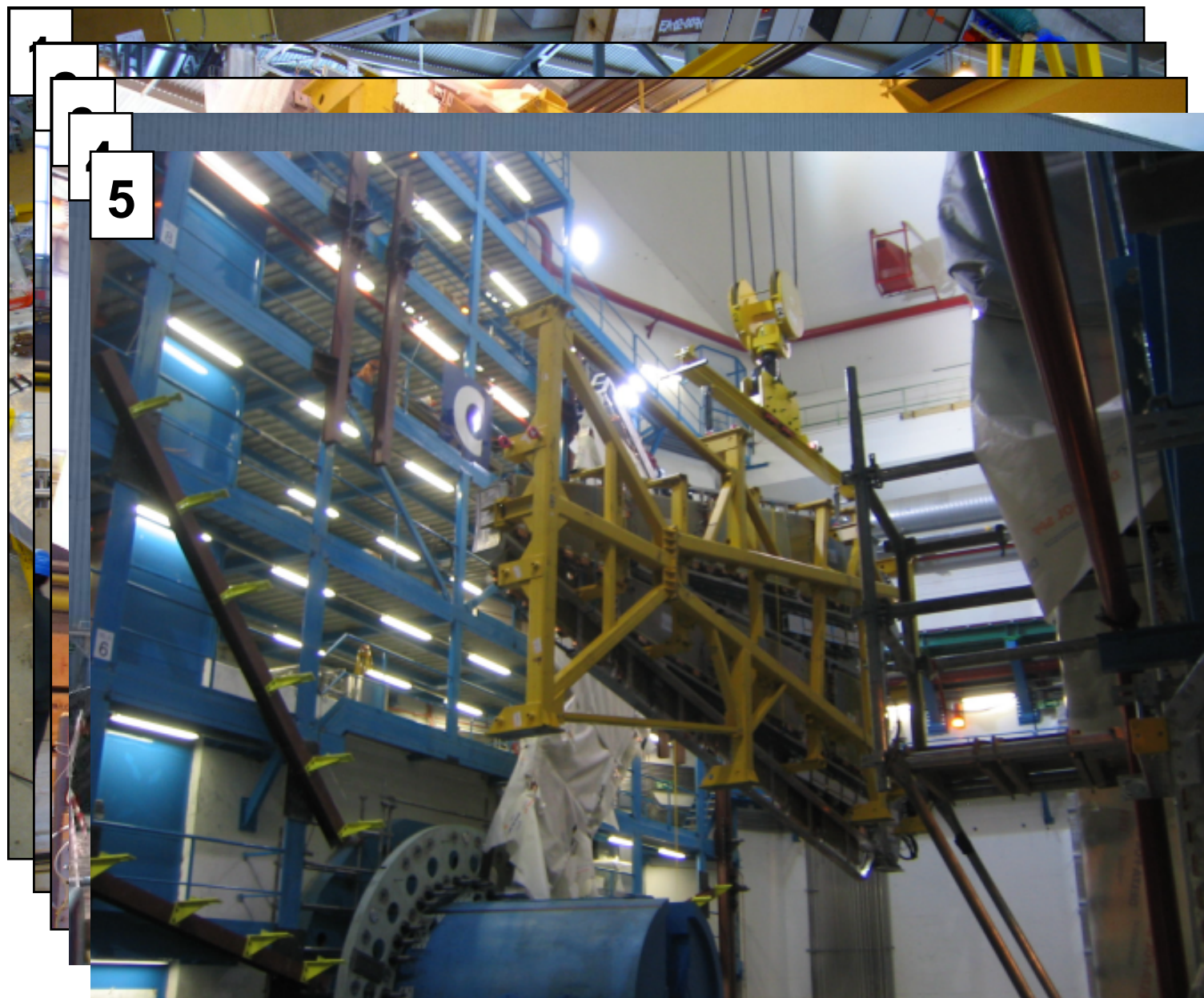
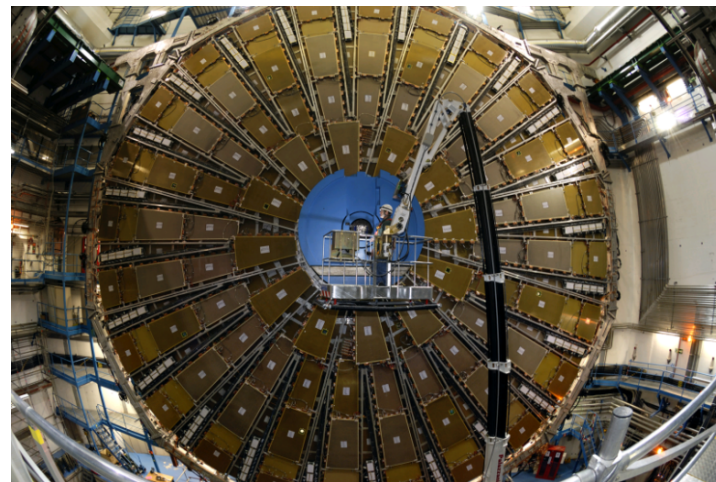
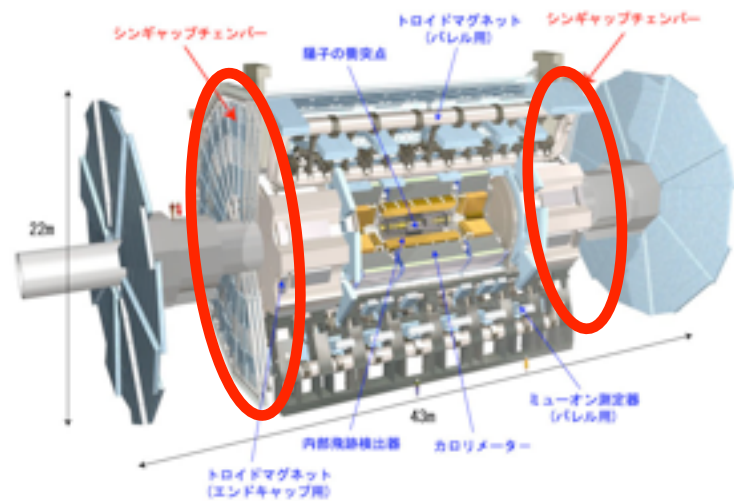
μ 粒子検出器の組み立て



μ 粒子検出器の組み立て

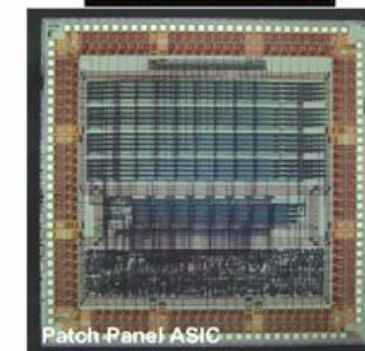
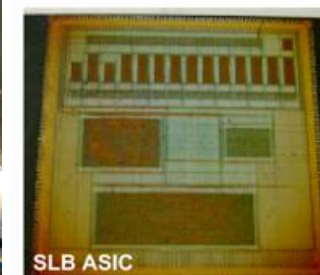
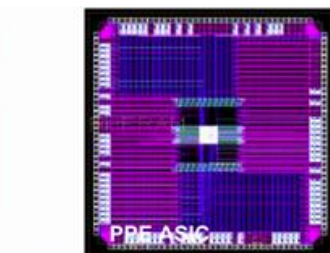
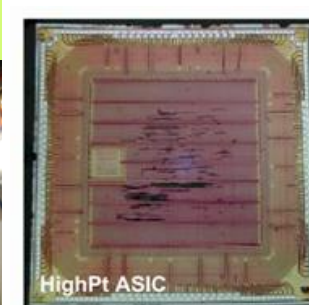
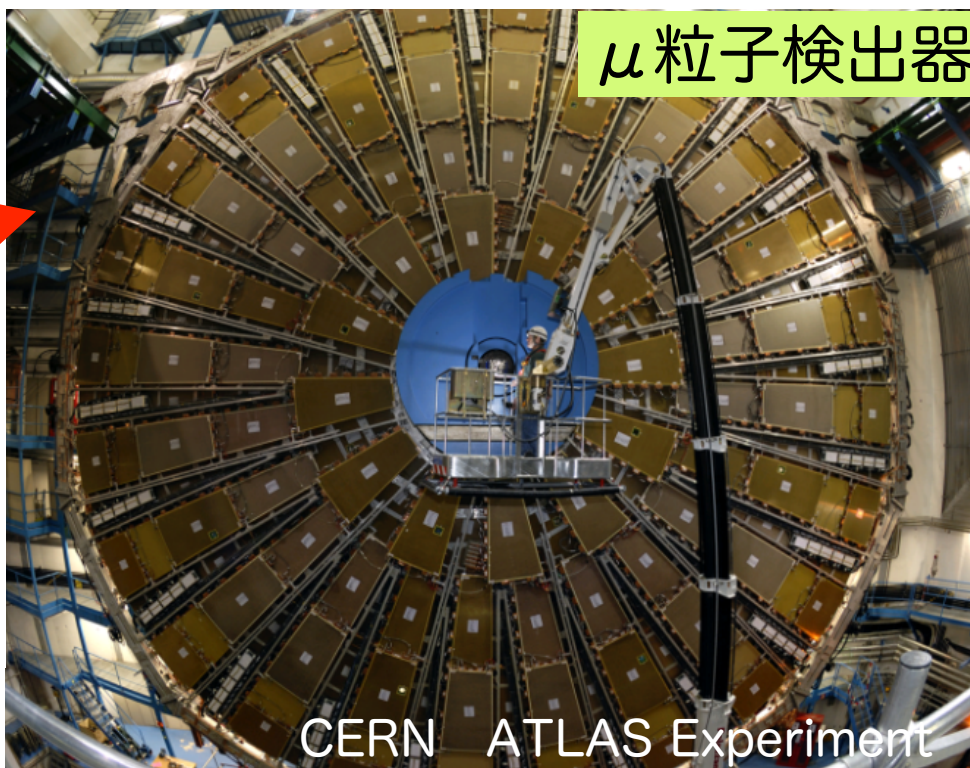
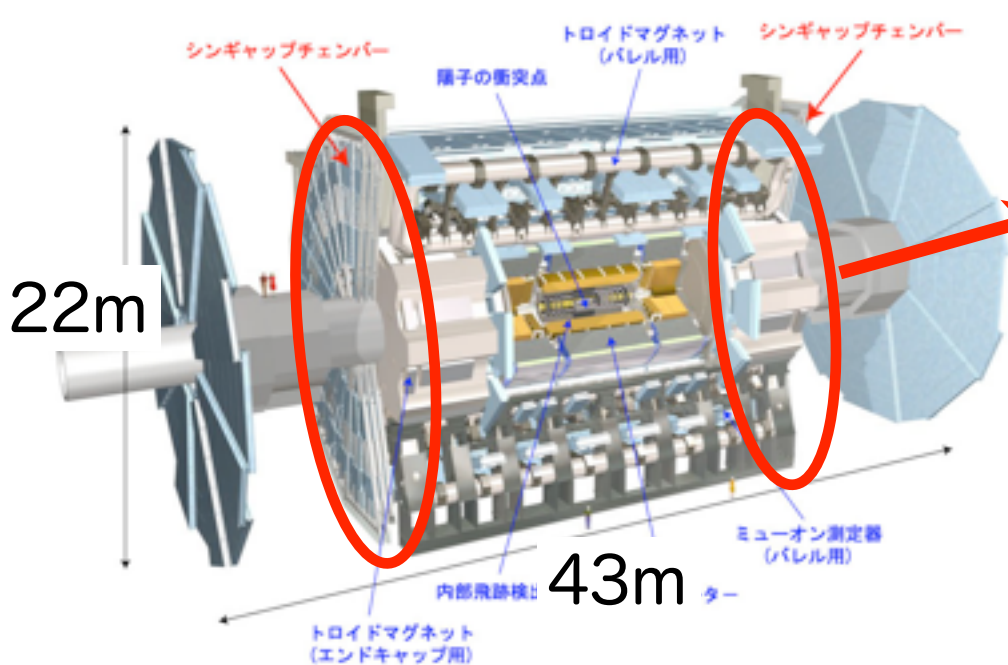


μ 粒子検出器の組み立て



検出器の建設

検出器も、回路も研究者の手作り

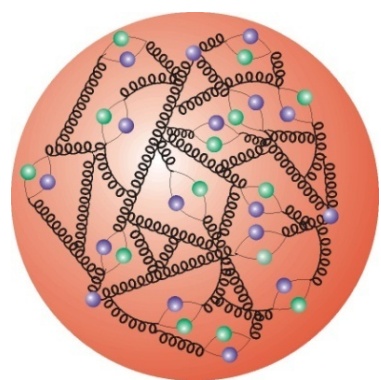


若い学生達が頑張っています!!!

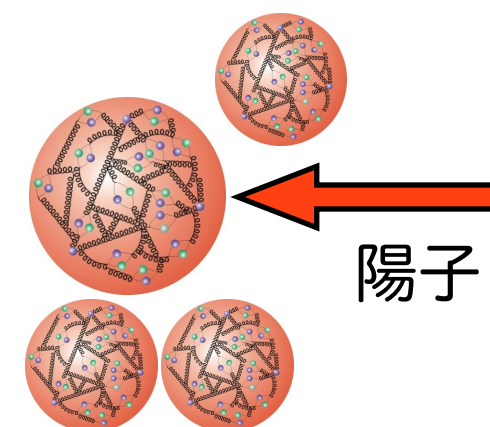
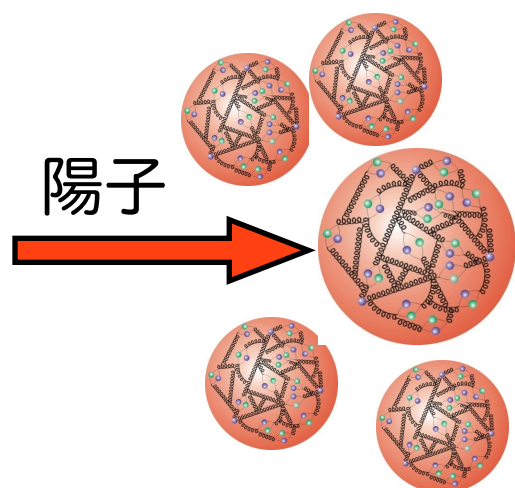


陽子・陽子衝突

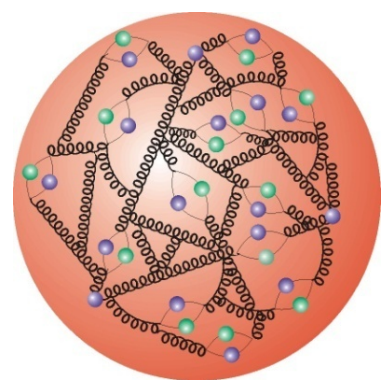
陽子・陽子衝突



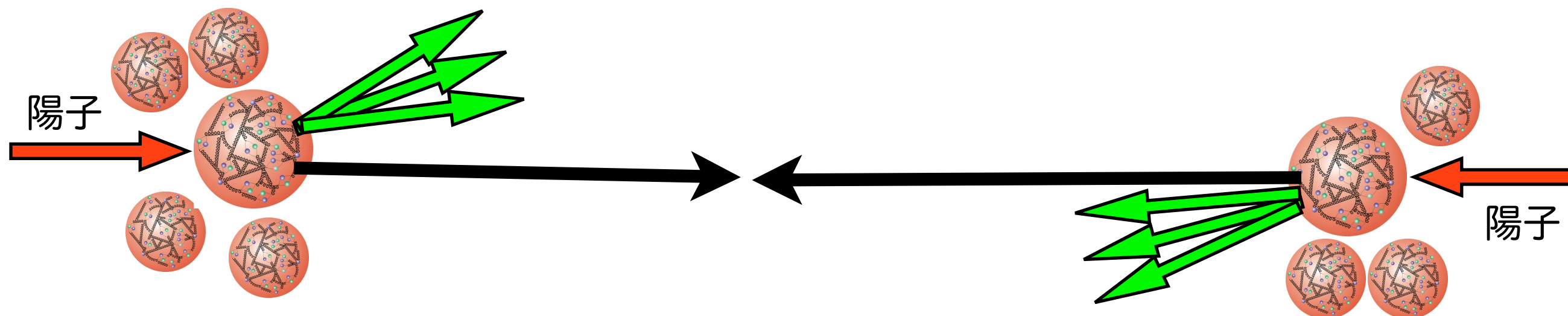
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン
一部だけが衝突による反応に関与



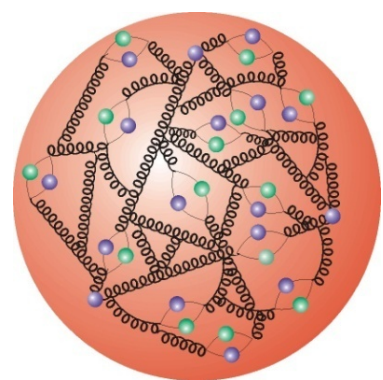
陽子・陽子衝突



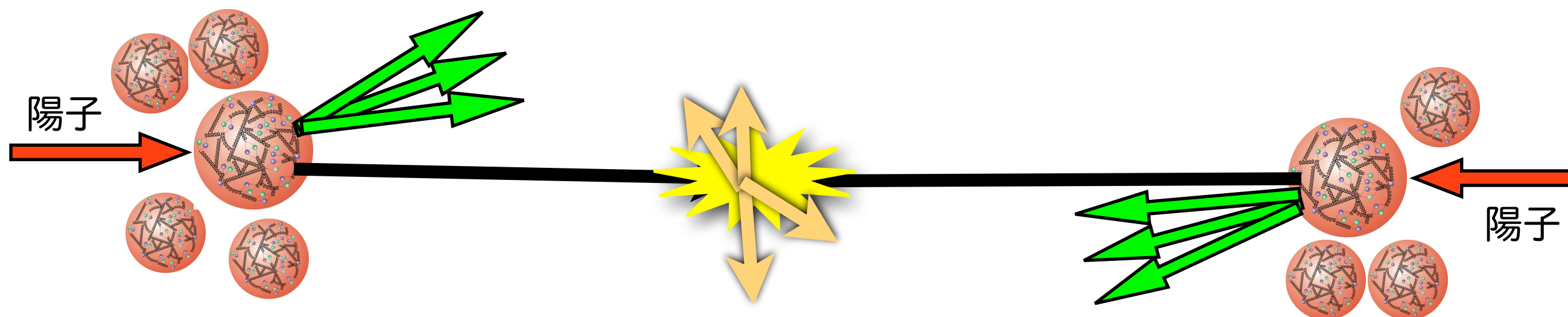
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン
一部だけが衝突による反応に関与



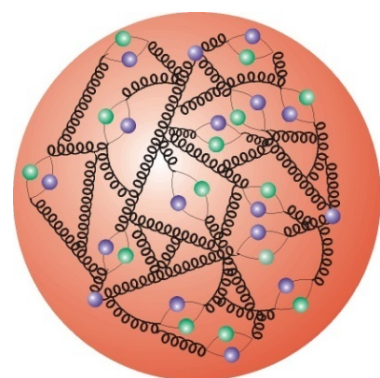
陽子・陽子衝突



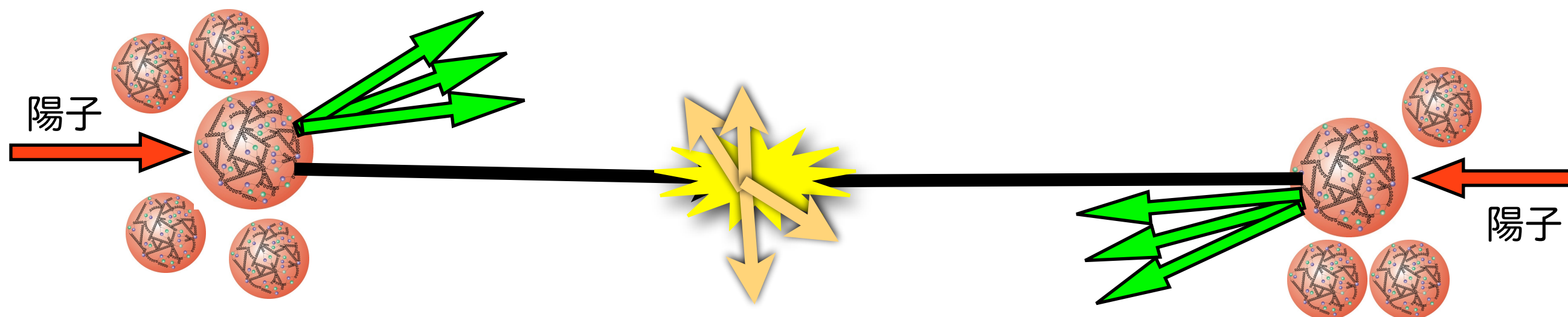
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン
一部だけが衝突による反応に関与



陽子・陽子衝突

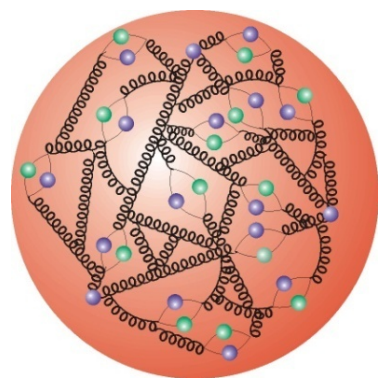


陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン
一部だけが衝突による反応に関与

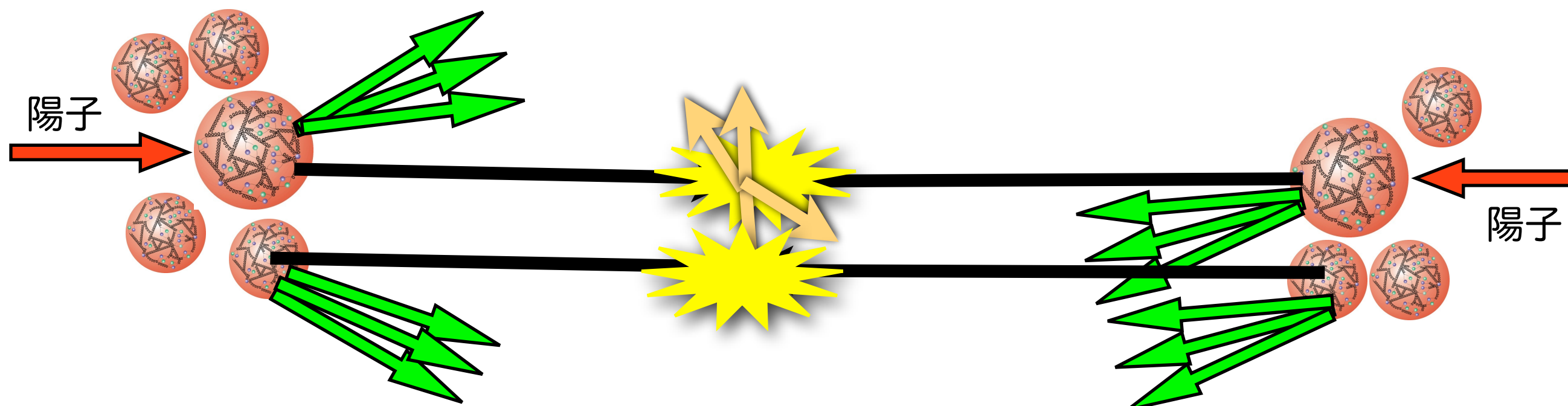


反応	反応頻度
LHC加速器で起こる任意の反応 (ほとんど、軽いクォーク、グルーオン)	毎秒 5千万 回
ヒッグス粒子生成	100秒間に 1 回

陽子・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



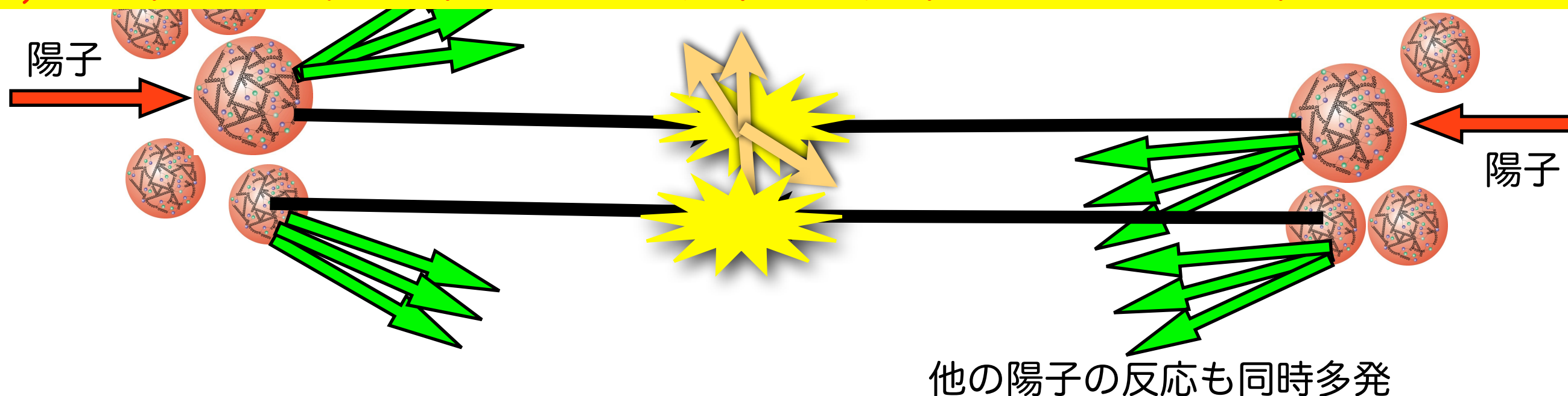
他の陽子の反応も同時多発

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・陽子衝突

例えば、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！

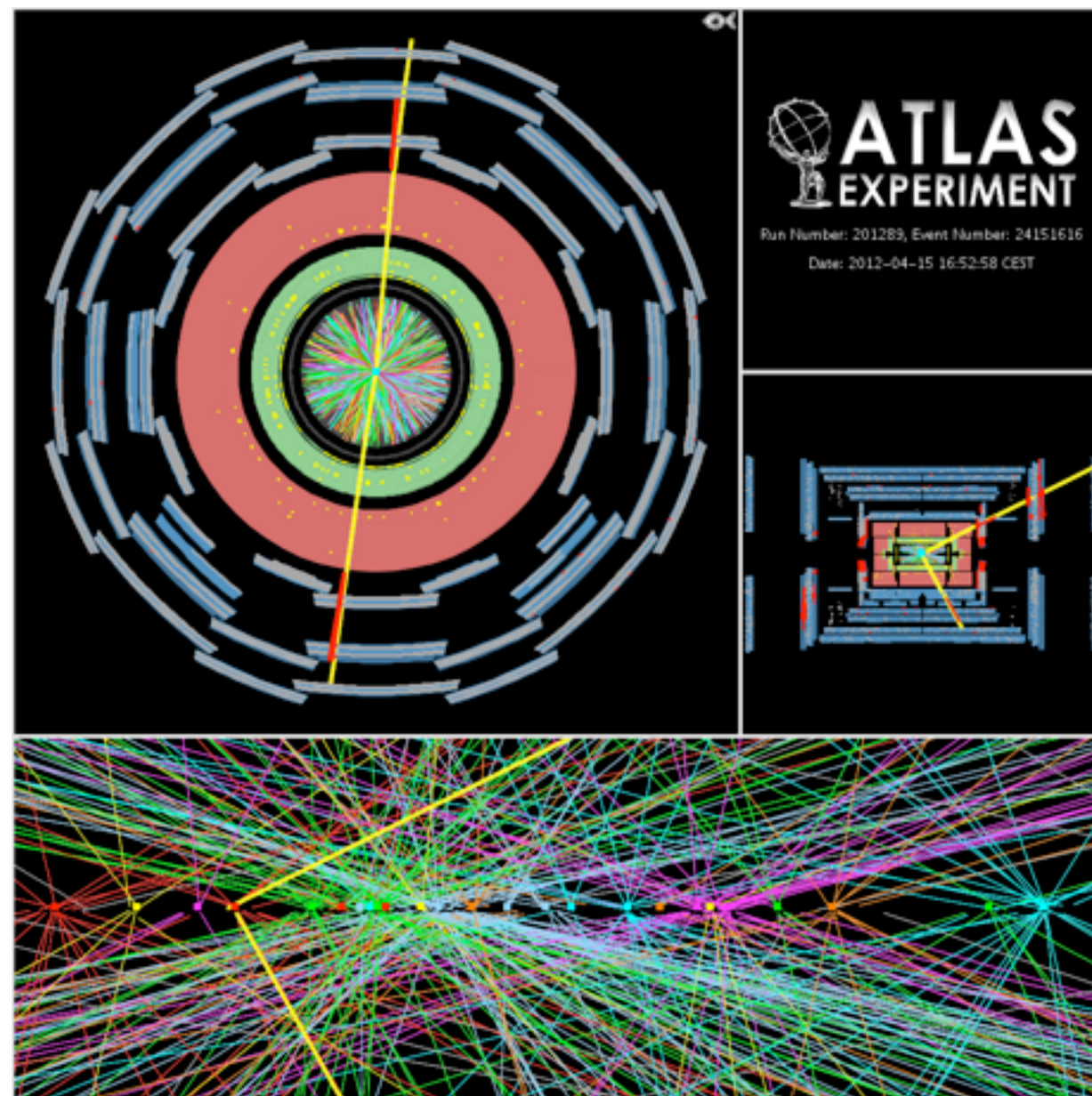
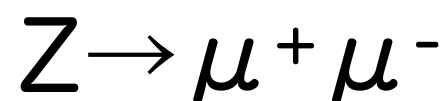
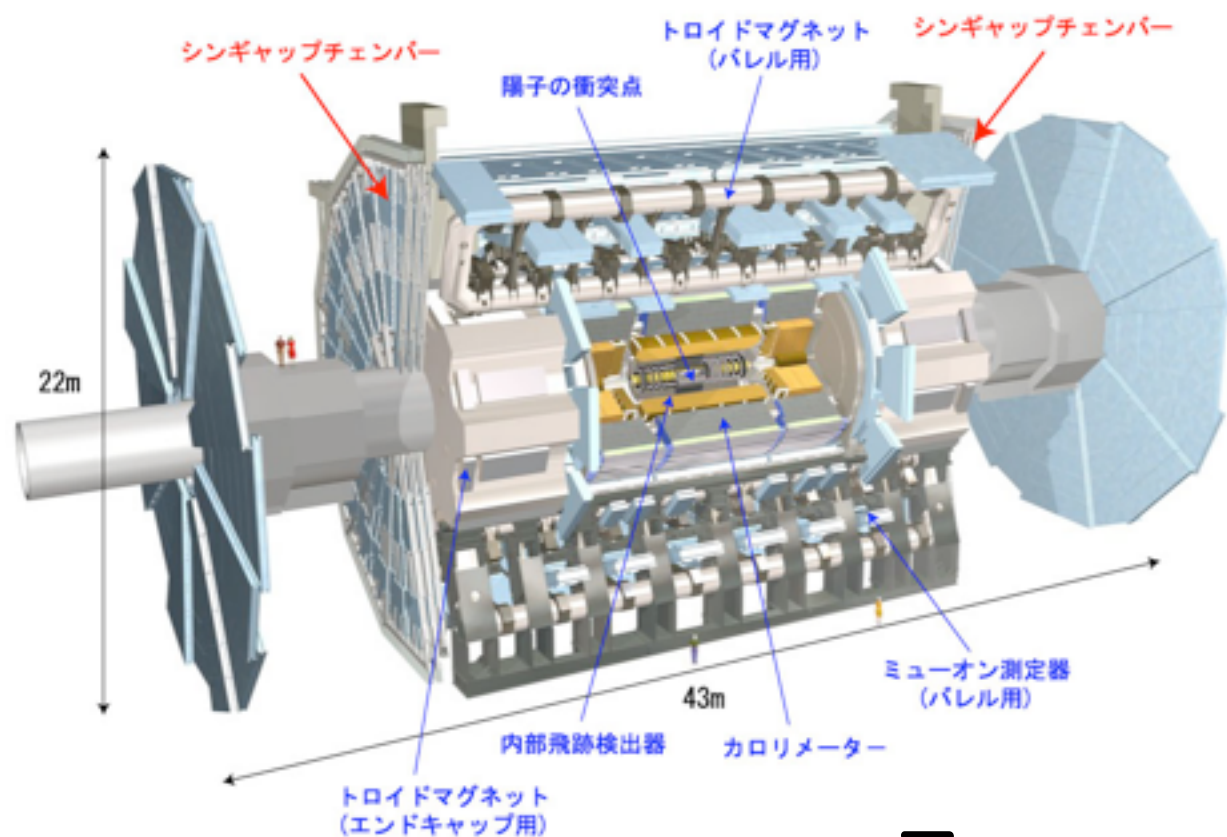
2,400兆回の陽子衝突では、約50万個のヒッグス粒子が生成



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

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



新粒子の見つけ方：

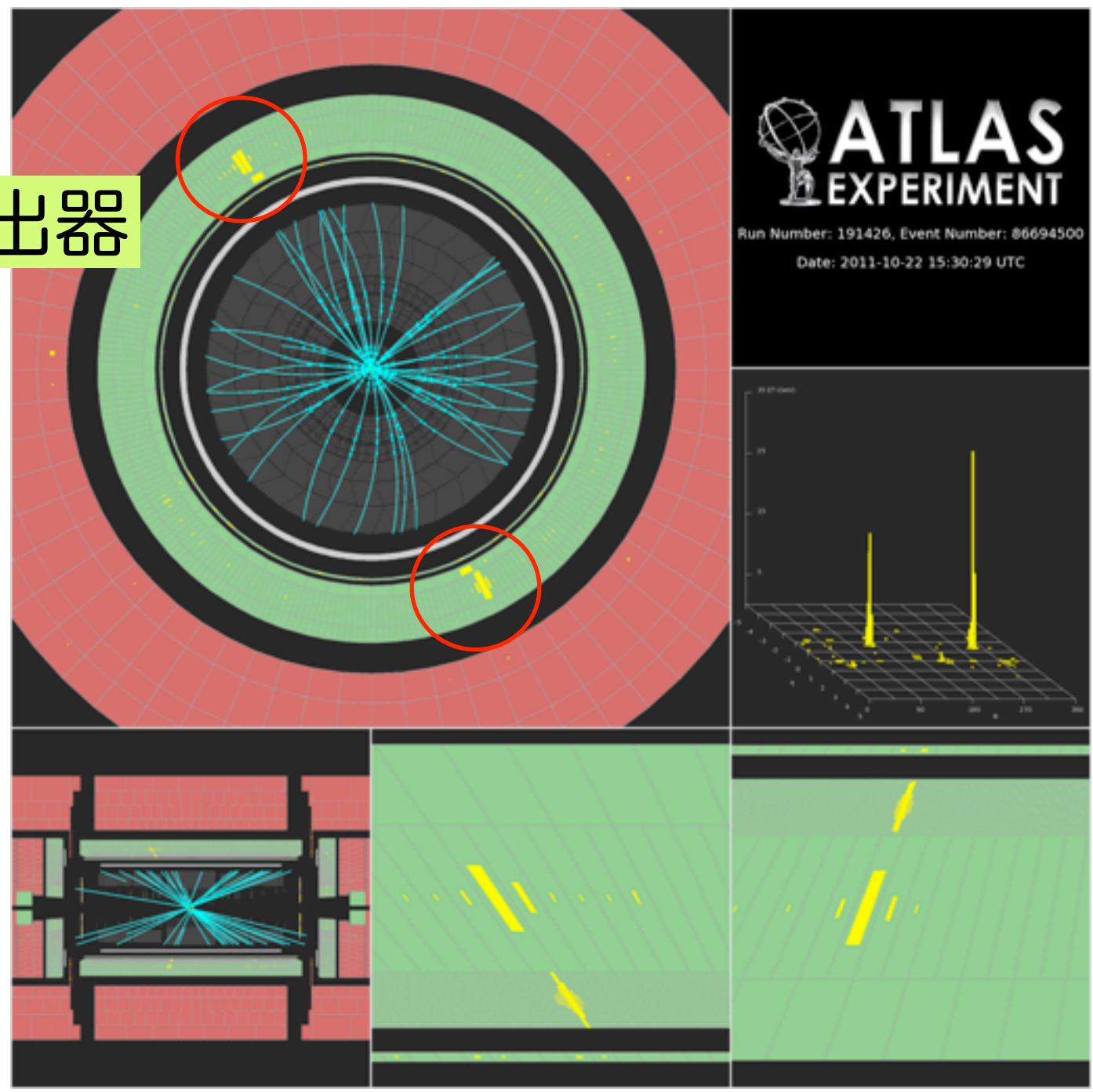
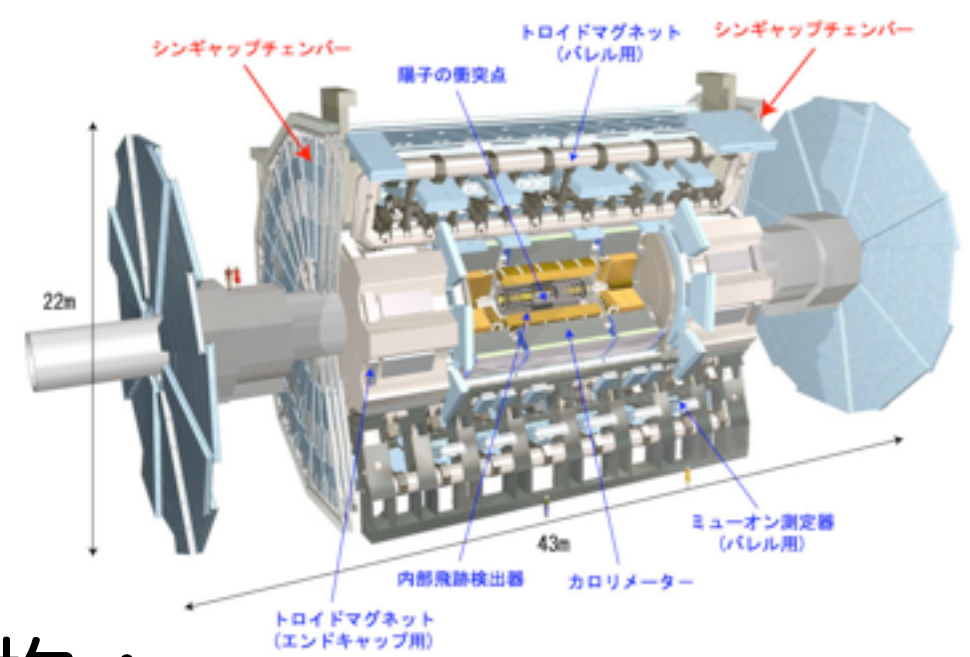
これまでに貯めた2400兆回の陽子衝突から、

1. 興味のある反応を選ぶ
2. 選んだ反応の中に、本物があることが確かめる

ヒッグス粒子はどのように発見されたか？

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

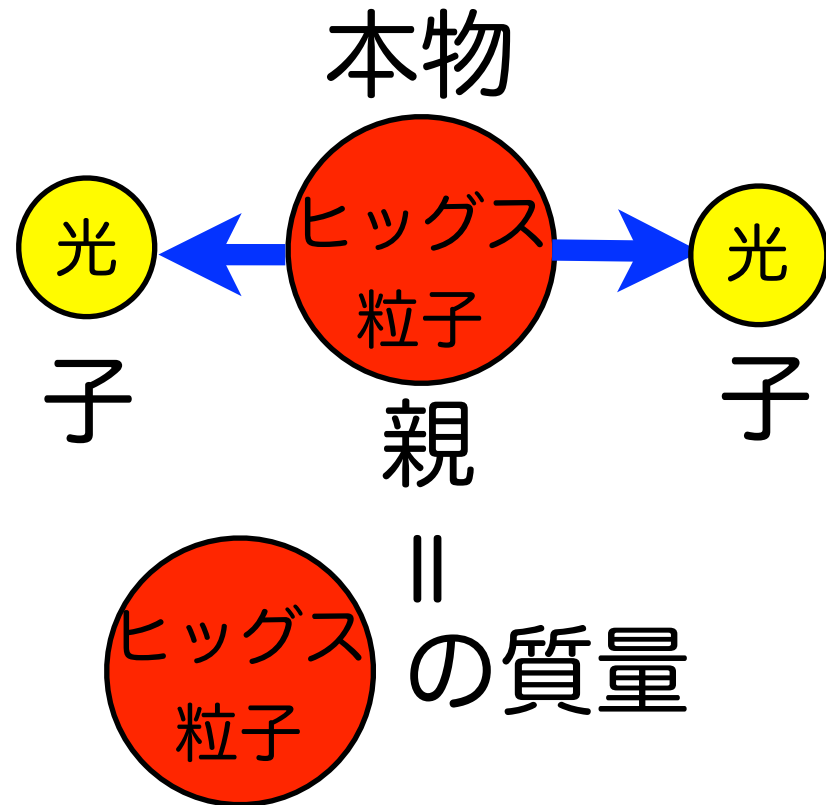
親と子の粒子の関係

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

質量の復元

親と子の粒子の関係

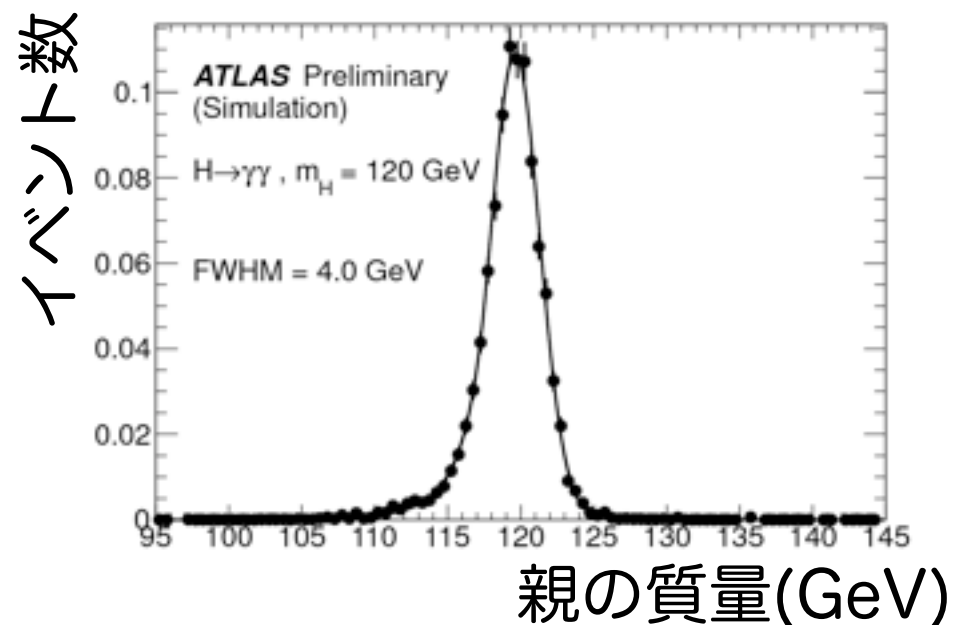
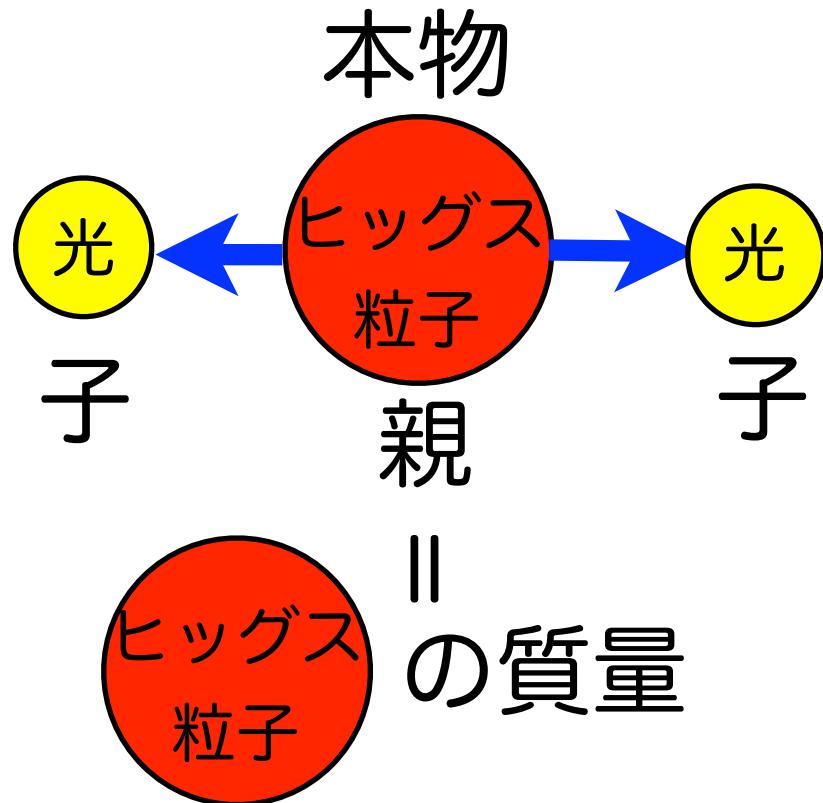
$$(親の質量)^2 = (子のエネルギー和)^2 - (子の運動量和)^2$$



質量の復元

親と子の粒子の関係

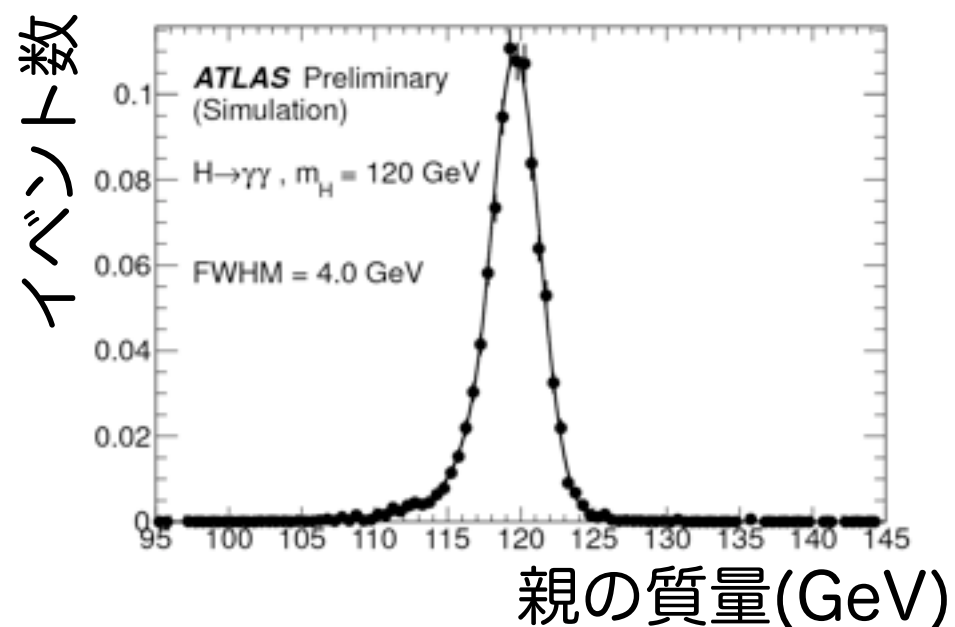
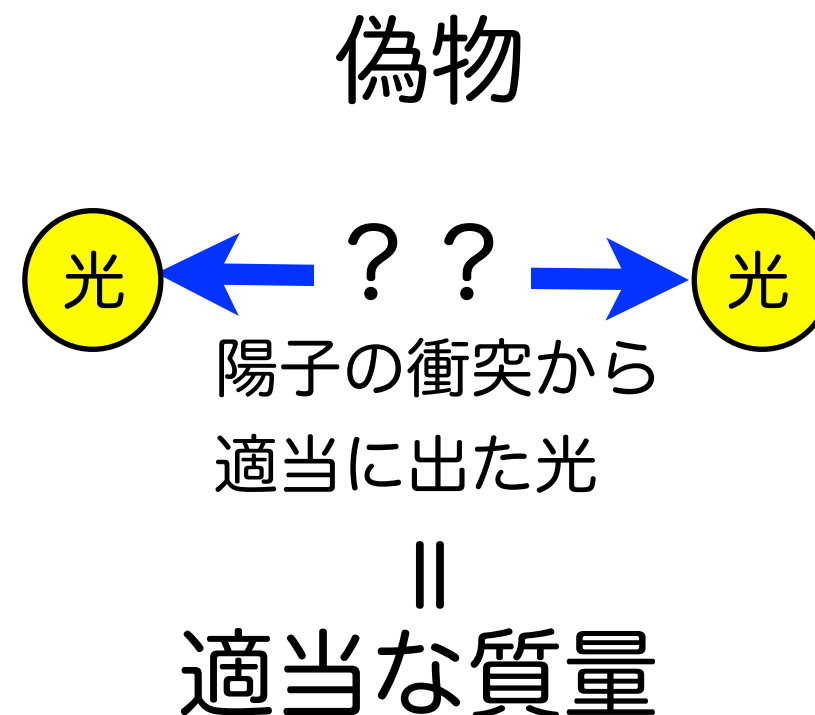
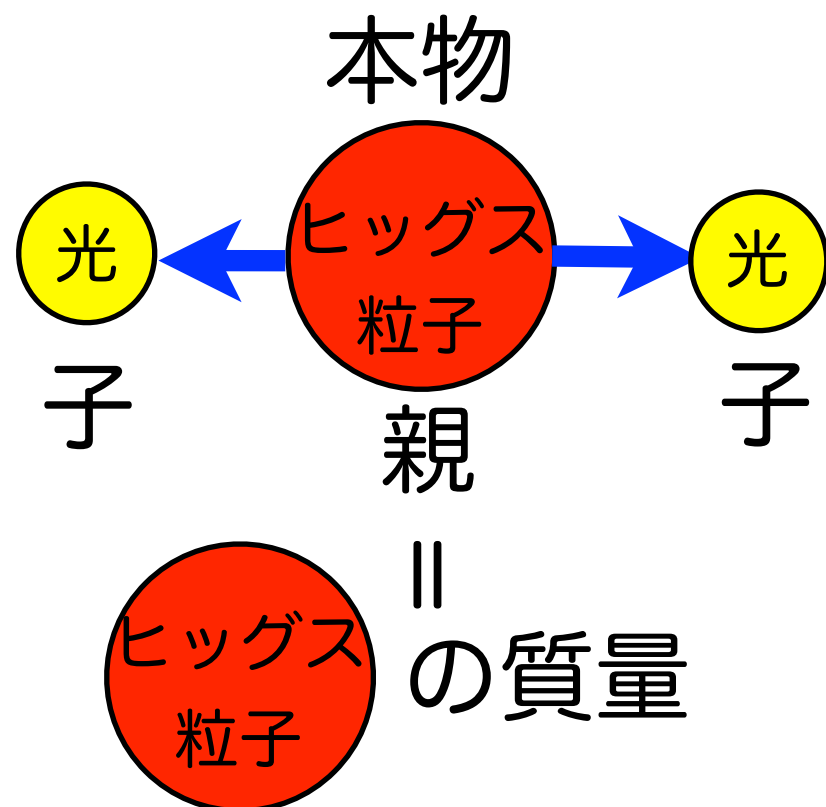
$$(親の質量)^2 = (子のエネルギー和)^2 - (子の運動量和)^2$$



質量の復元

親と子の粒子の関係

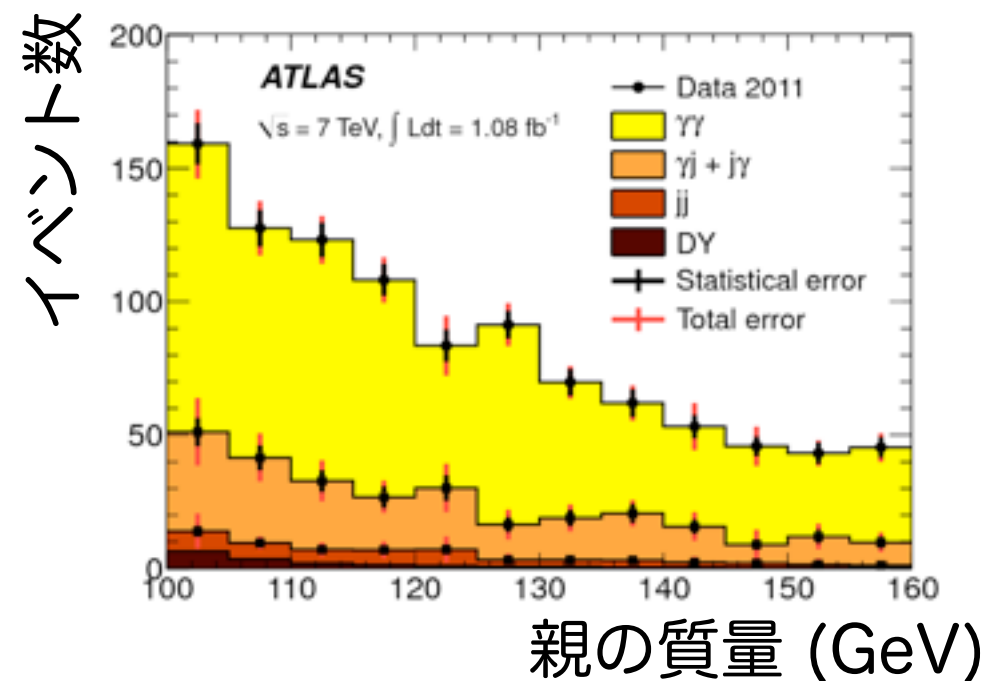
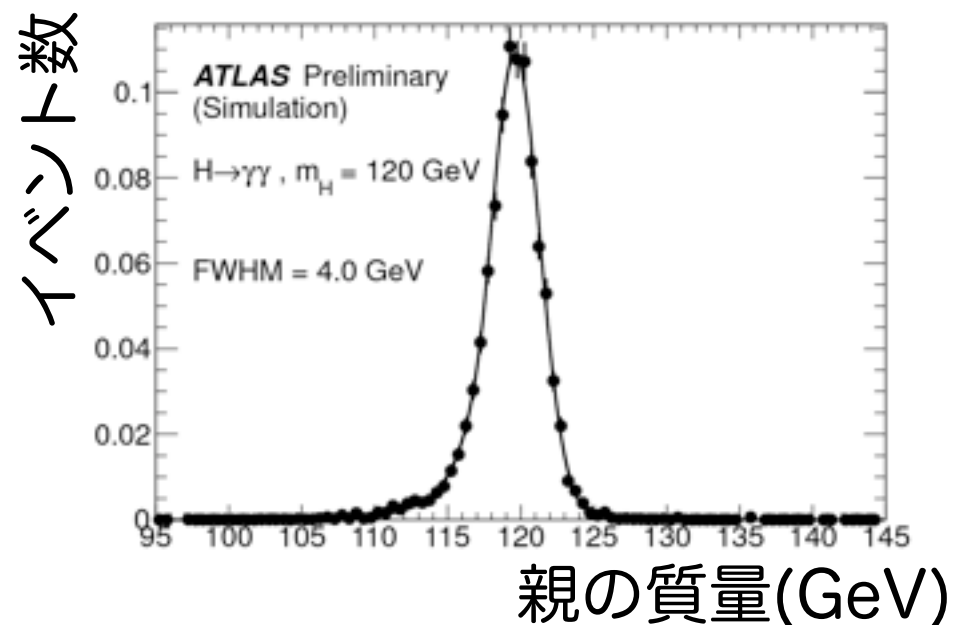
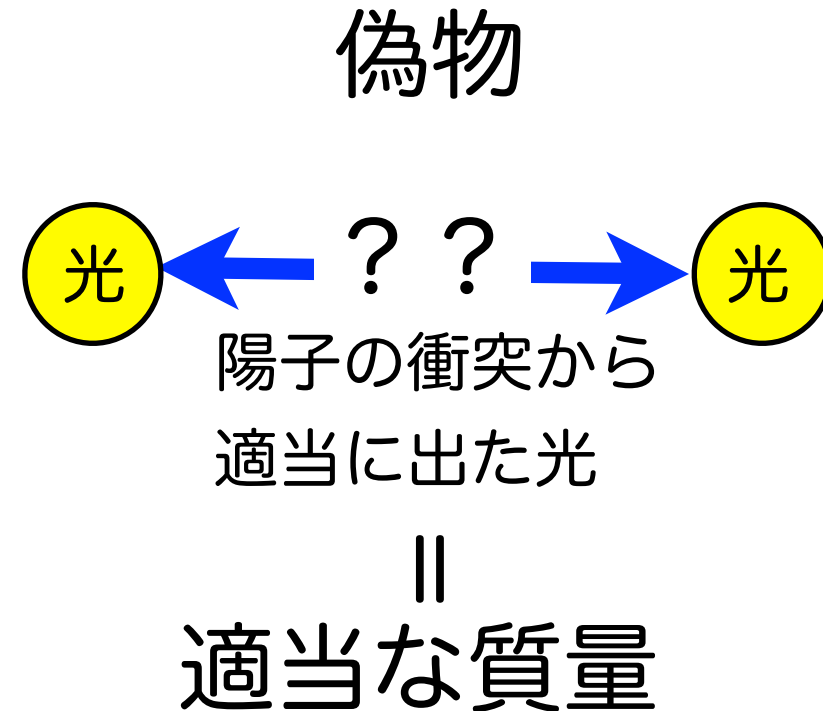
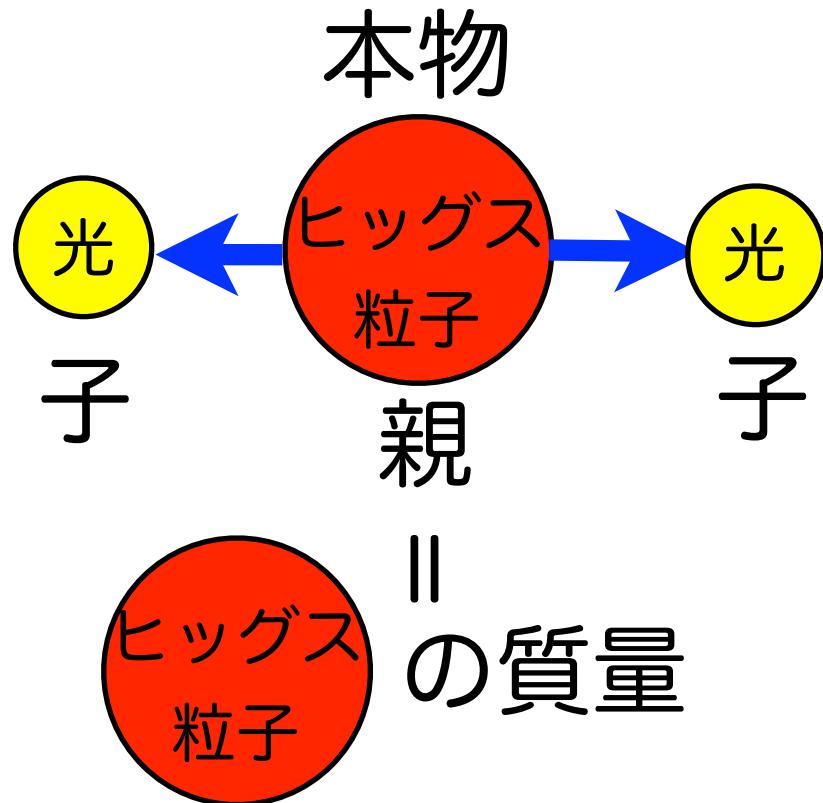
$$(親の質量)^2 = (子のエネルギー和)^2 - (子の運動量和)^2$$



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

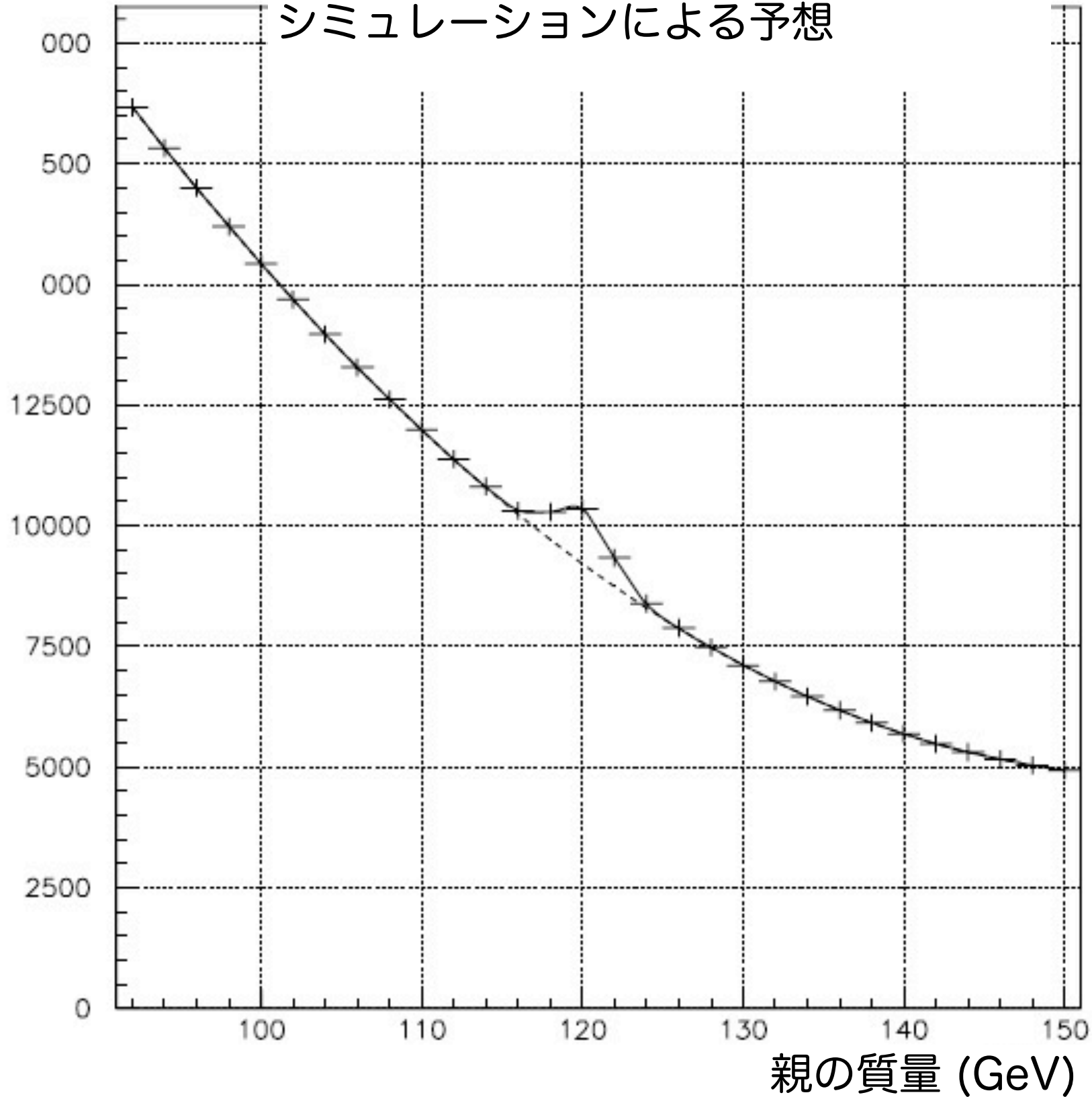
親と子の*

(親の質量

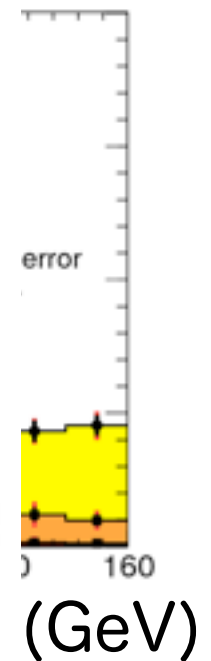
$$M_H = 120 \text{ GeV}$$

シミュレーションによる予想

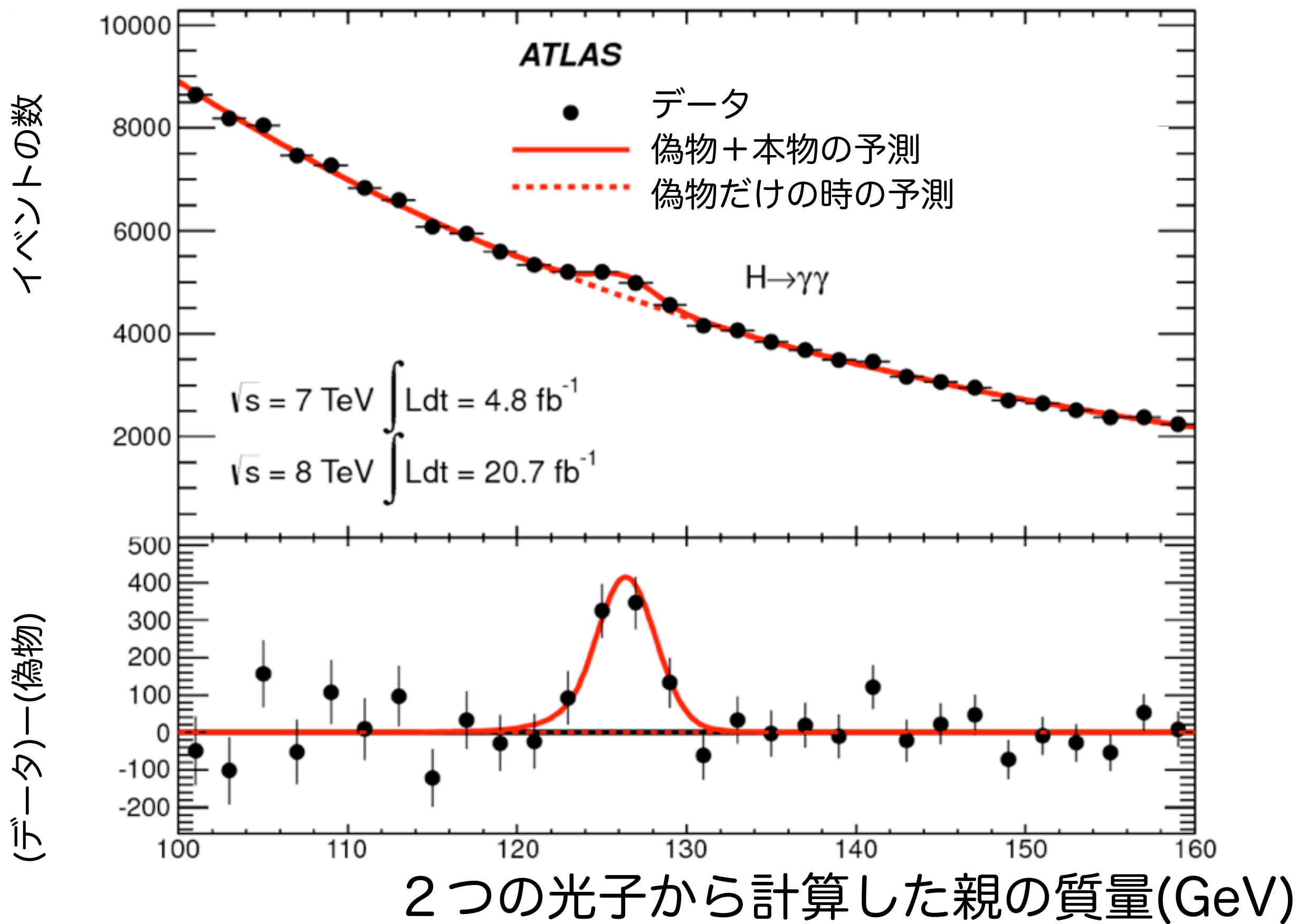
(和)²



光子



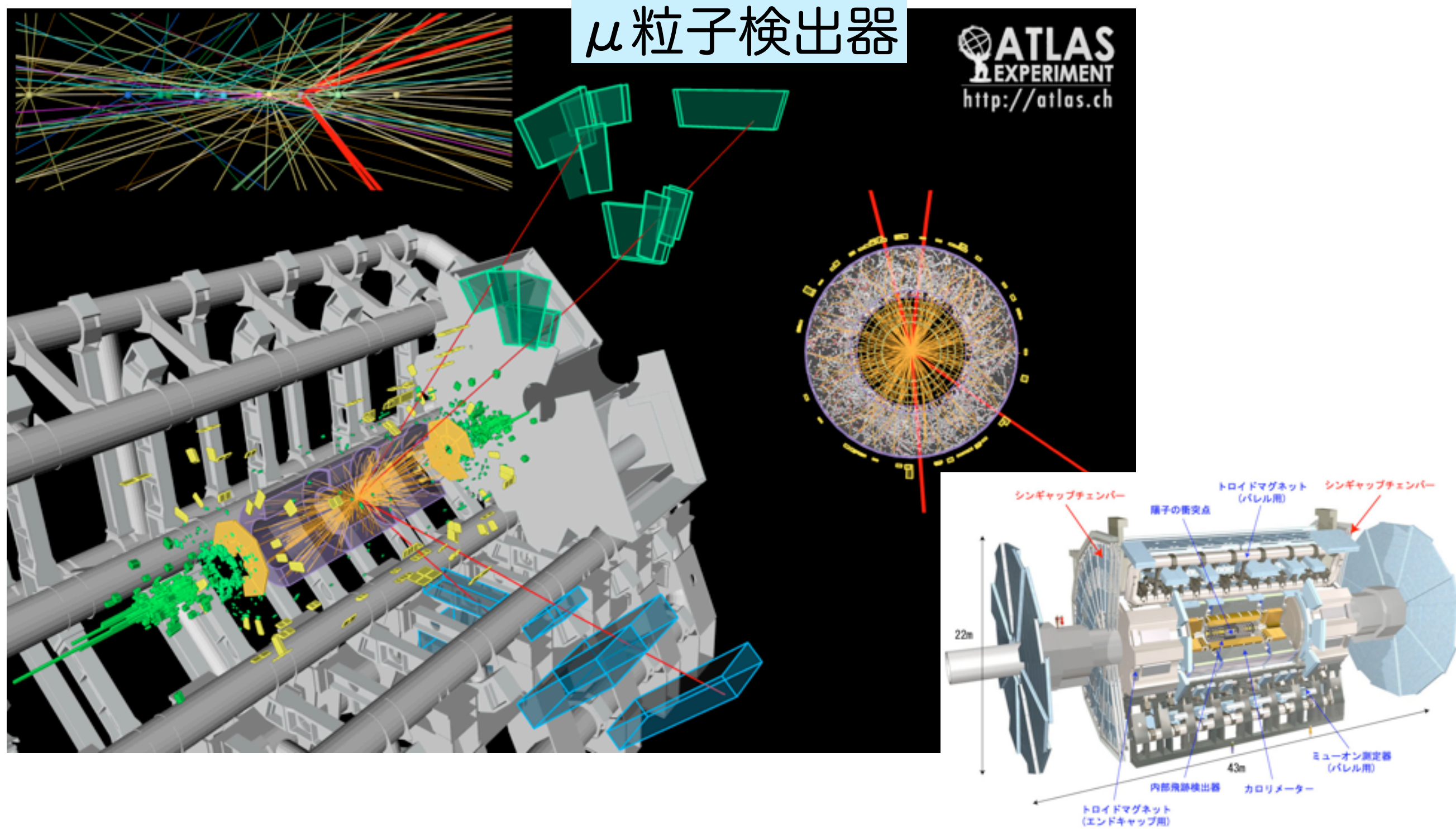
ヒッグス粒子があることを確かめた



陽子 + 陽子 \rightarrow H \rightarrow ZZ

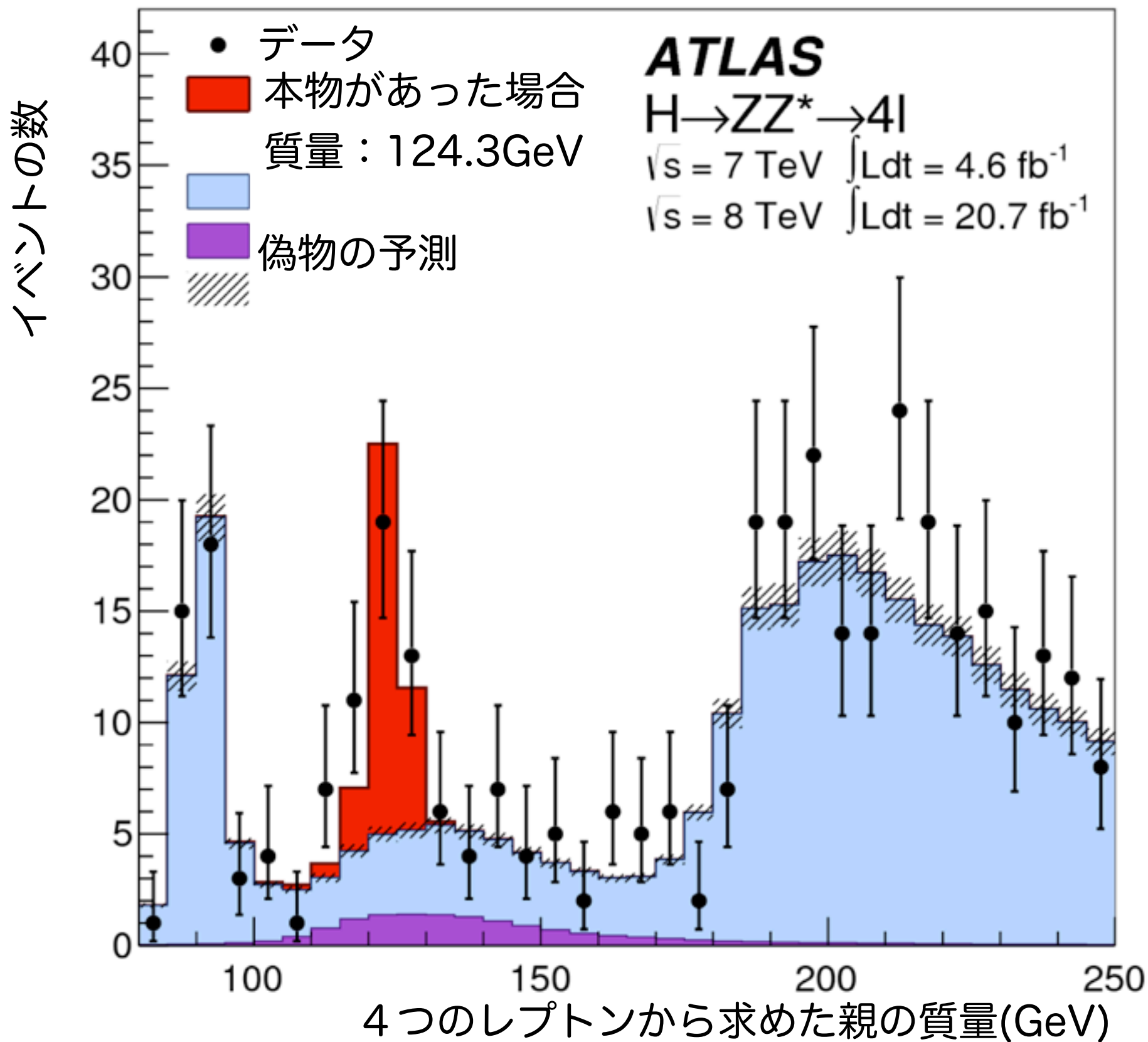
陽子陽子 \rightarrow H \rightarrow ZZ \rightarrow $\mu\mu\mu\mu$

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

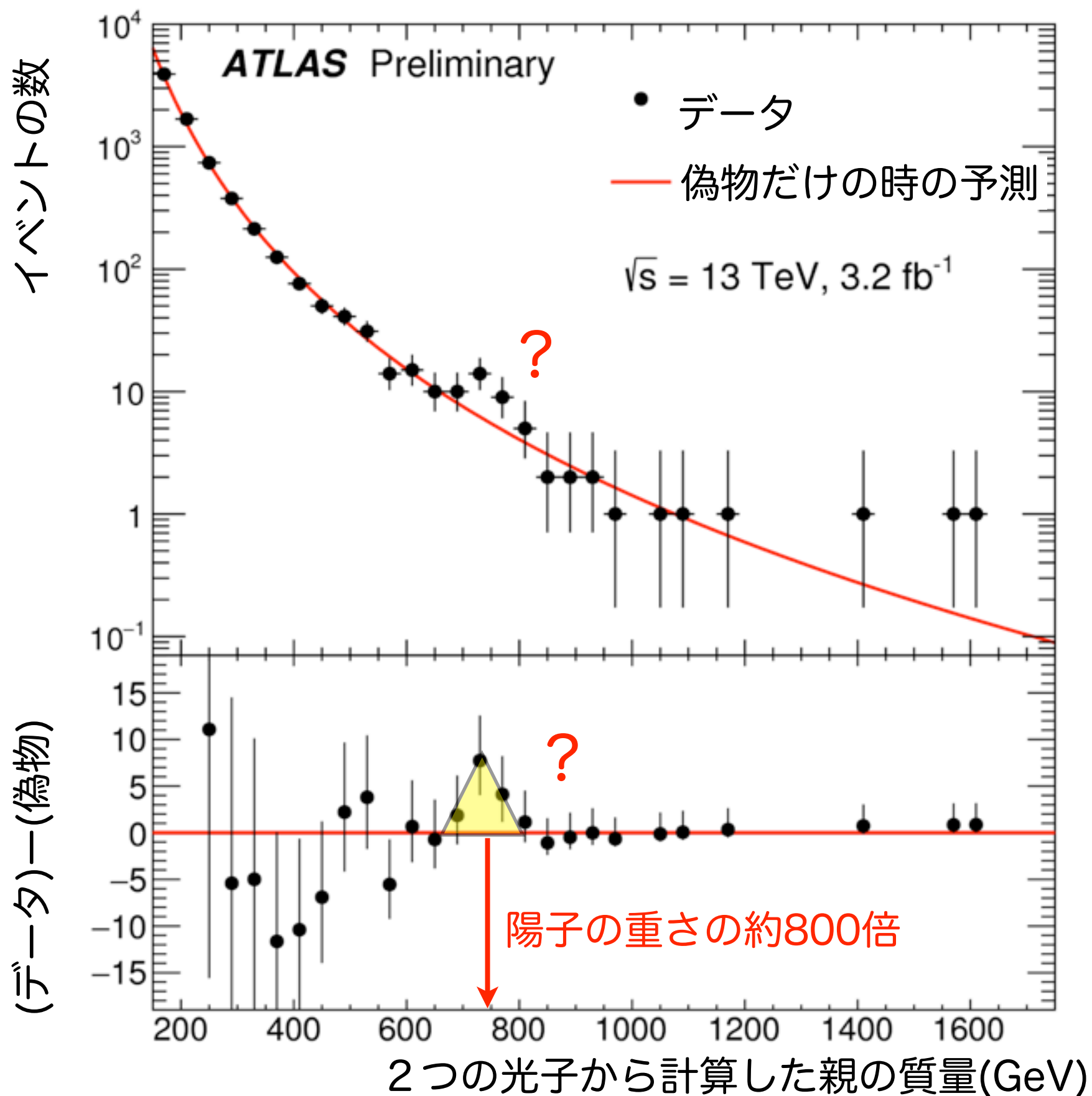


陽子陽子 \rightarrow H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 レプトン

陽子陽子 \rightarrow H \rightarrow ZZ \rightarrow 4 μ , 4電子, 2 μ 2電子



2015年の収集した最新のデータから



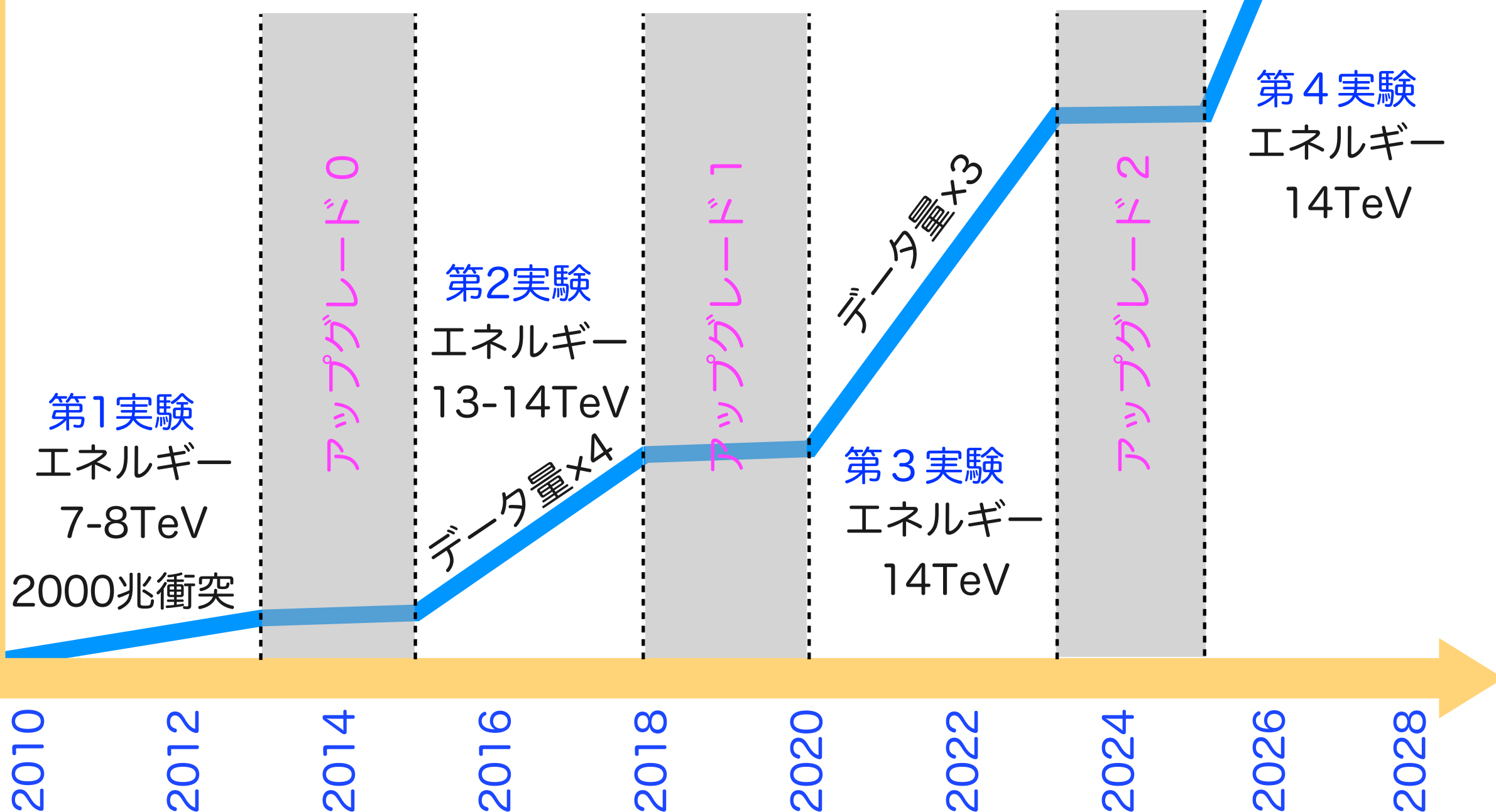
LHC実験の今後

より高エネルギーへ、より沢山の陽子衝突を

新しい素粒子の発見
ヒッグス粒子の精密測定

→ 新しい標準模型を作り上げる！！

データ量

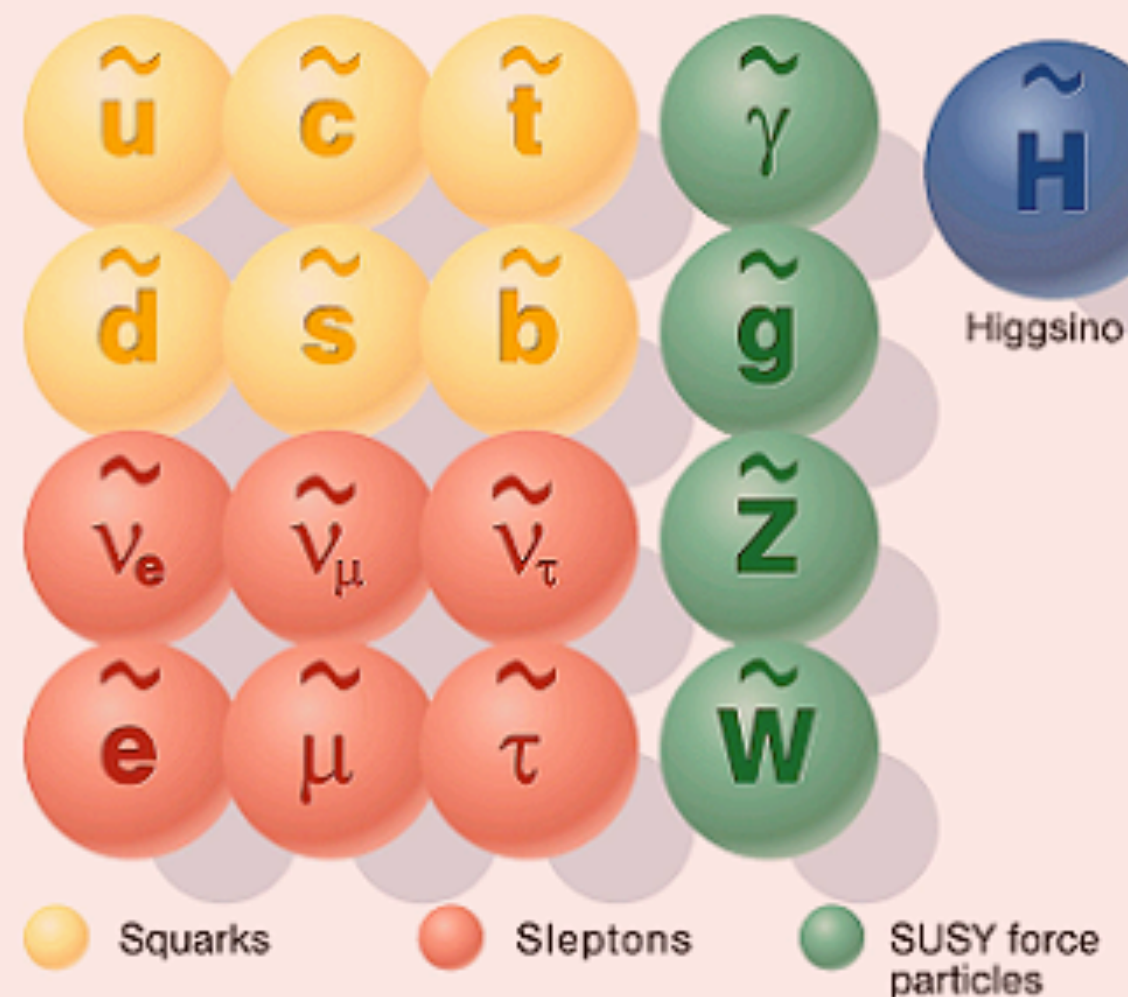


今後の展開

標準模型の素粒子

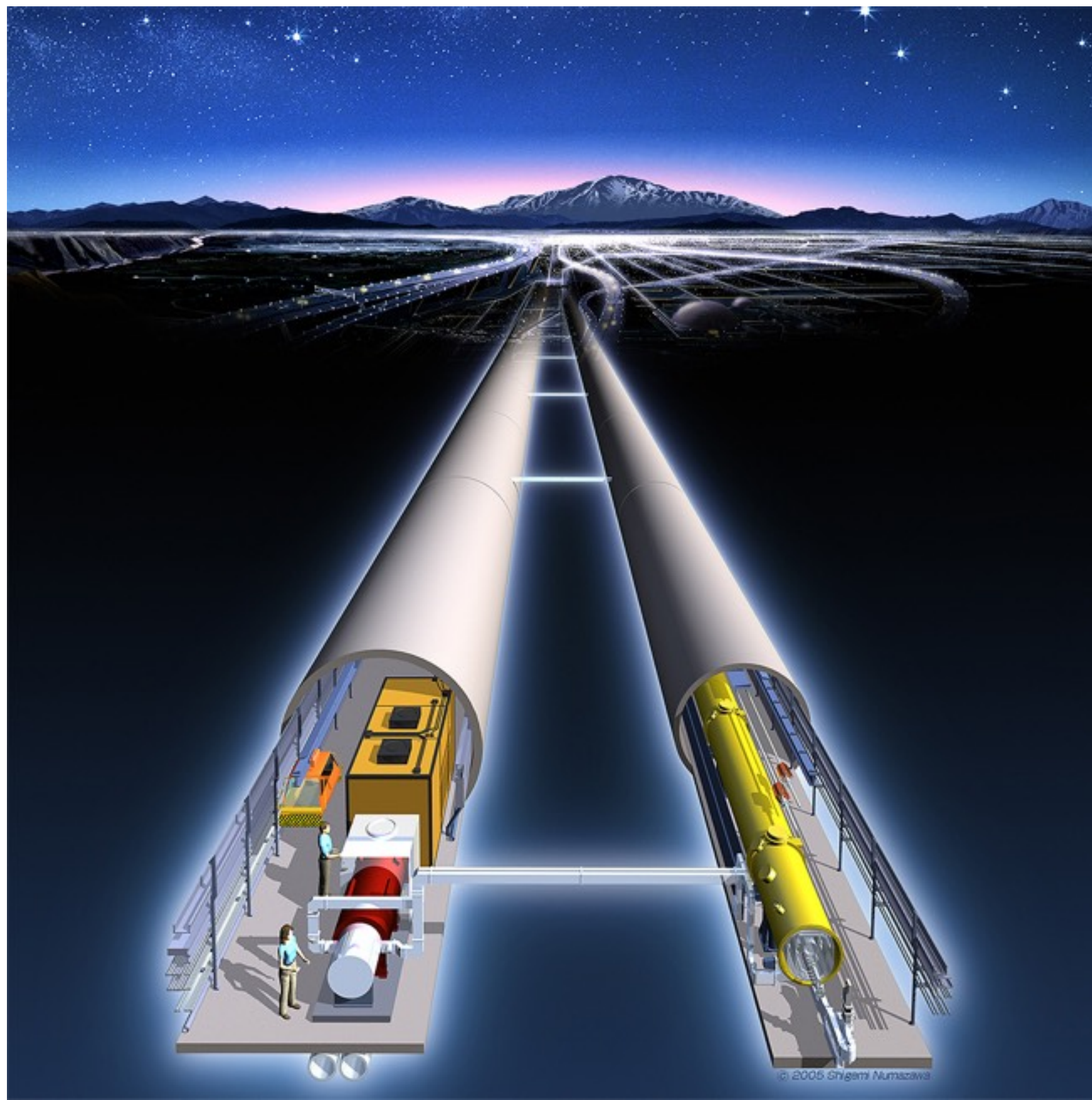


超対称性粒子 未発見



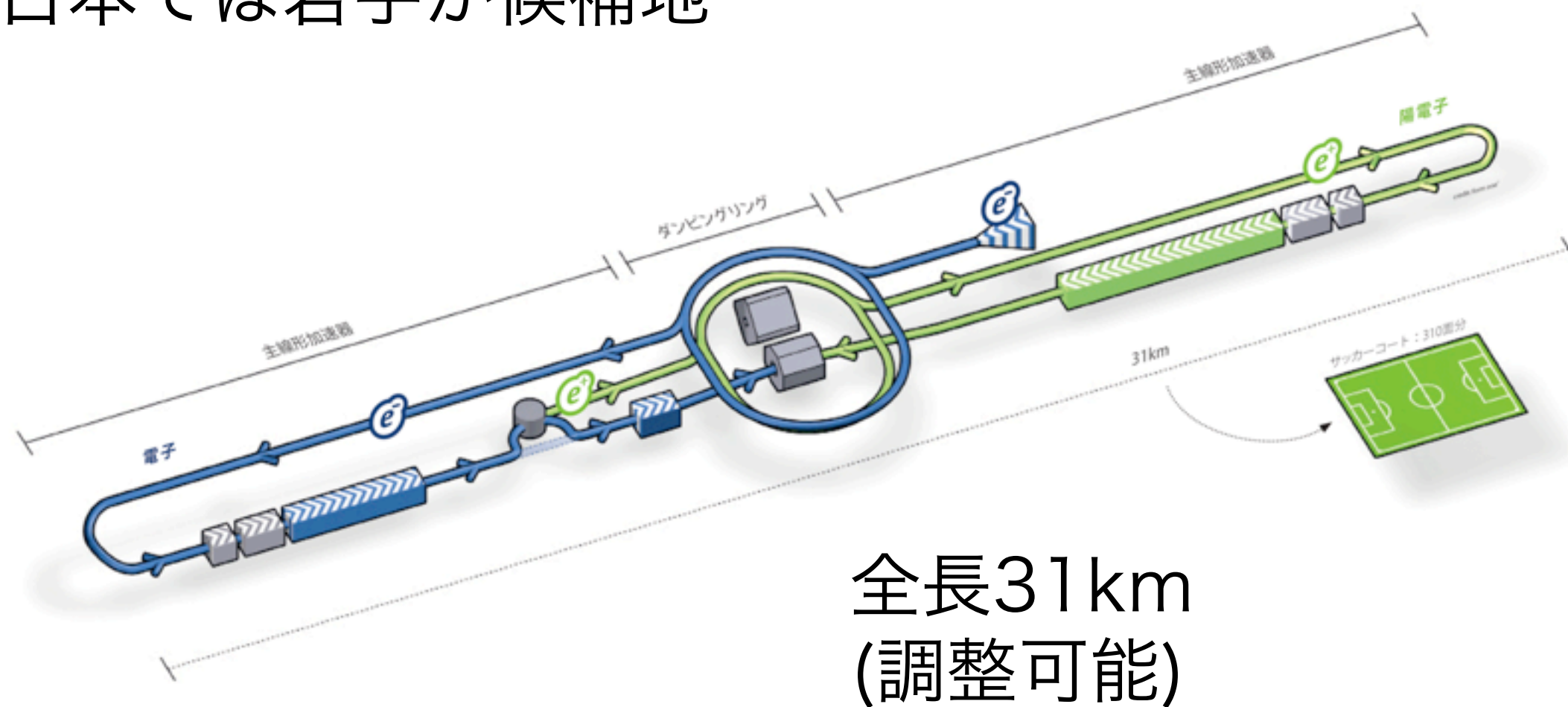
- 新しい素粒子(暗黒物質、超対称性粒子、、、)の発見
→ 衝突エネルギーを上げる
 - ヒッグス粒子の性質をより深く理解
→ 沢山の陽子衝突
- 新しい素粒子物理学の幕開け

国際リニアコライダー計画

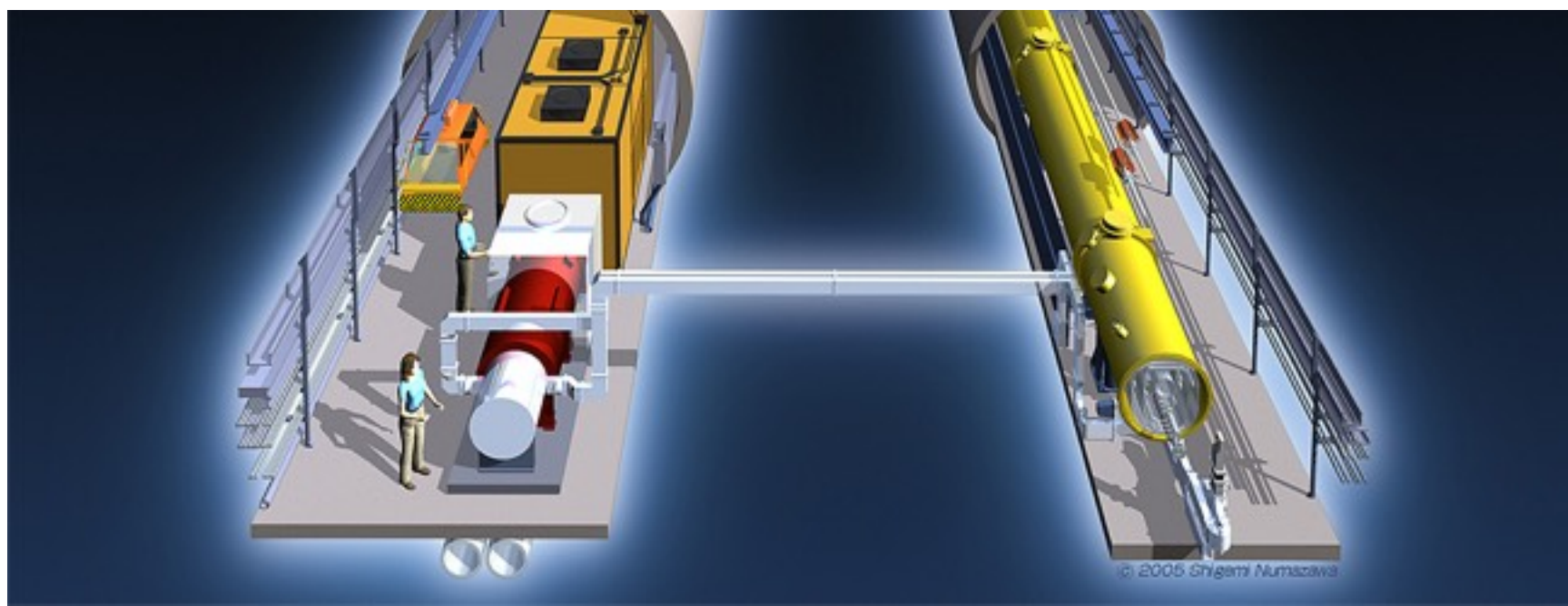


国際リニアコライダー計画

日本では岩手が候補地



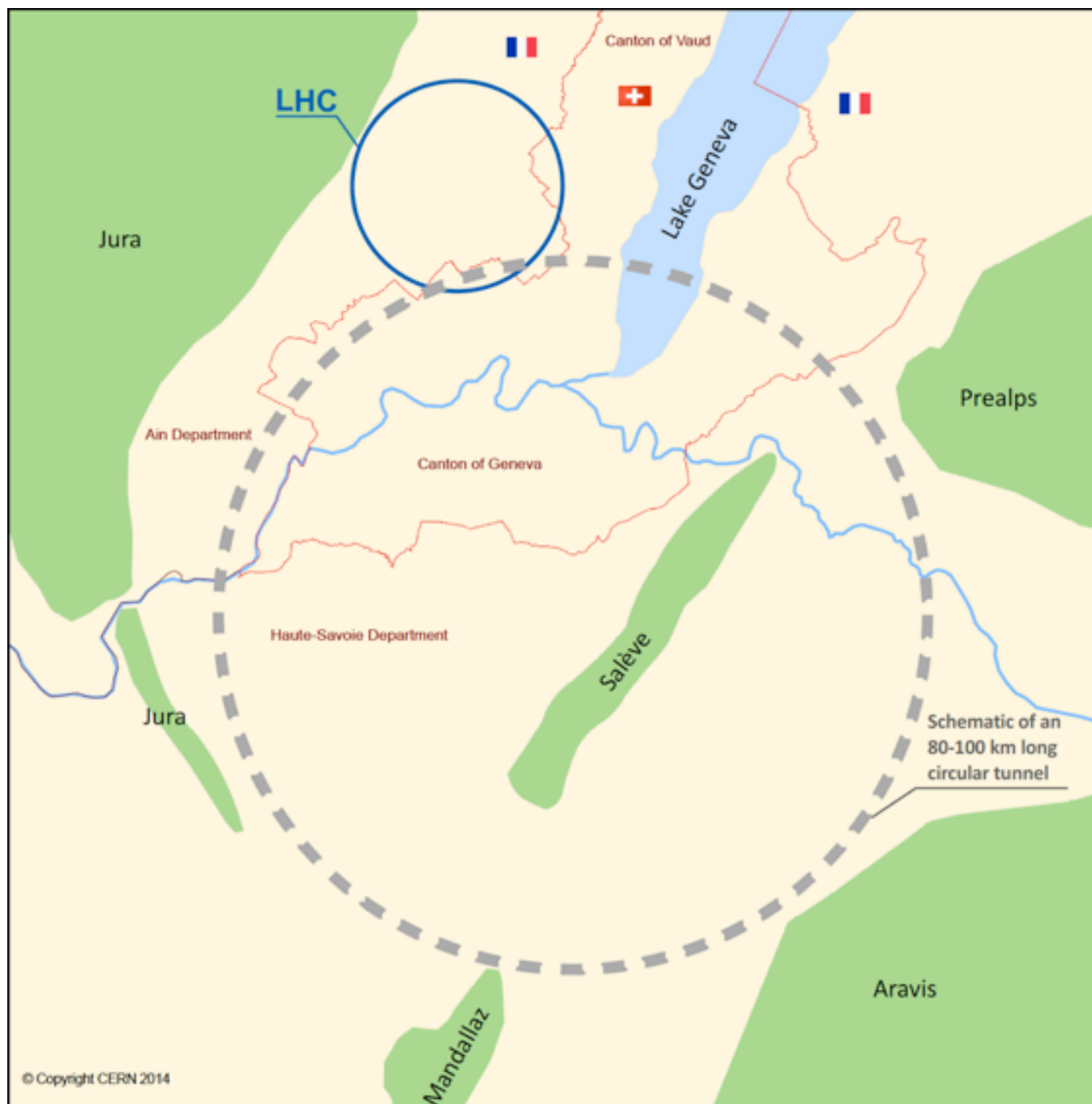
全長31km
(調整可能)



Future Circular Collider

周長100kmの加速器

LHCの7倍以上の陽子陽子衝突エネルギーを目指す



素粒子物理は
これからが面白い！

さいごに

将来、最先端の科学分野で活躍するためには、

1. 基礎力が重要

最先端科学の中で、小中高と繰り返し学んできた力学や電磁気などが「直接的」に出てくることはほとんどありません。でも、そこにある基礎的な考え方は、いかなる最先端科学で最も重要な要素となります。例えば、現代素粒子物理学は、量子力学、特殊相対性理論、ゲージ原理の3大指導原理の上で記述されているが、高校や大学1、2年次で学習する物理や数学の基礎を深く理解している人ほど、素粒子物理学の理解も深い。また、最先端科学から逆に古典的な力学や電磁気学の考え方を再認識させられることもある。

2. 語学力 (国語と外国語)やコミュニケーション能力も重要

どんな研究でも、リーダーシップを発揮するためには、適切な言葉を選んで物事を伝える能力が重要

Backup