

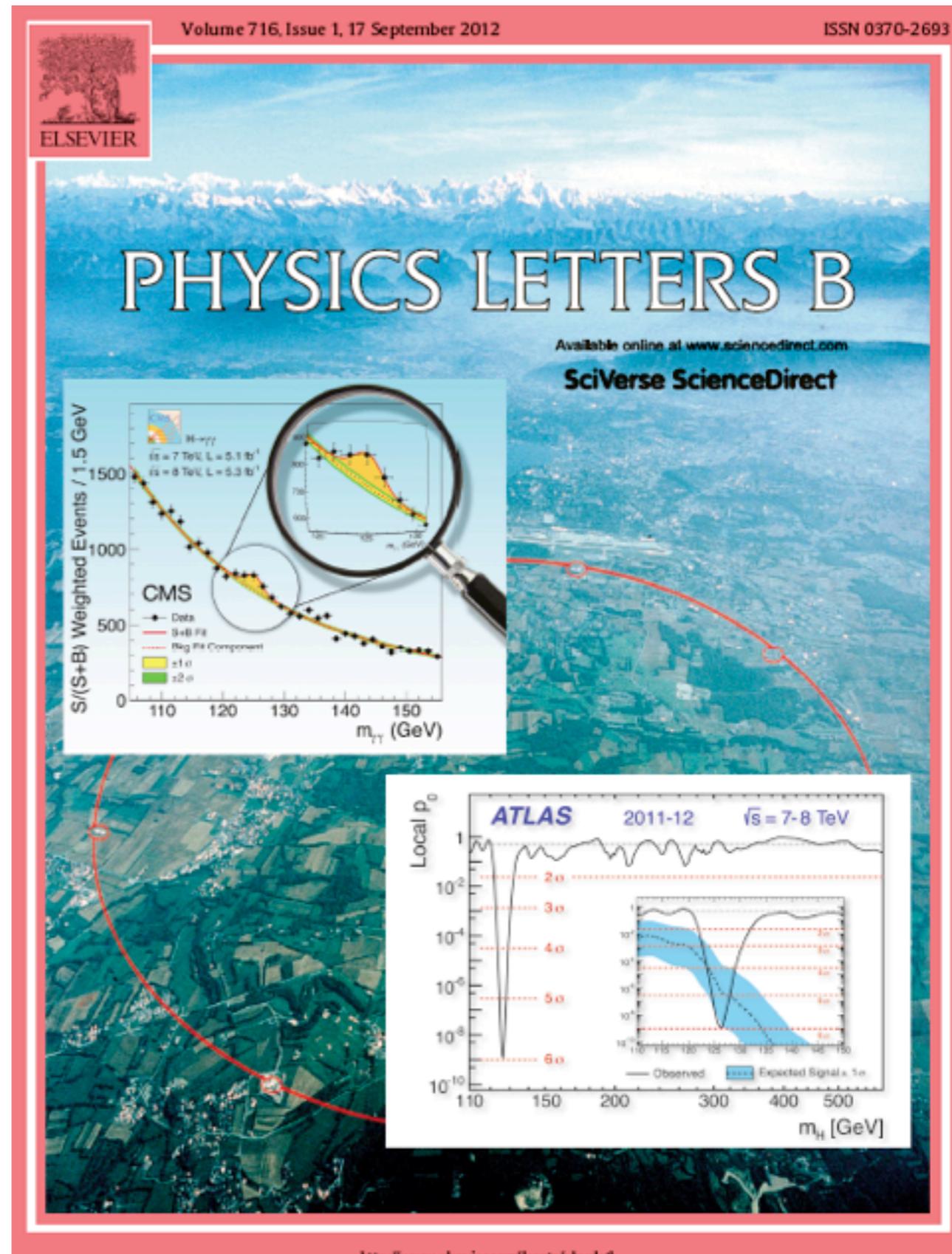
「巨大加速器LHCで探る誕生直後の宇宙」

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



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？

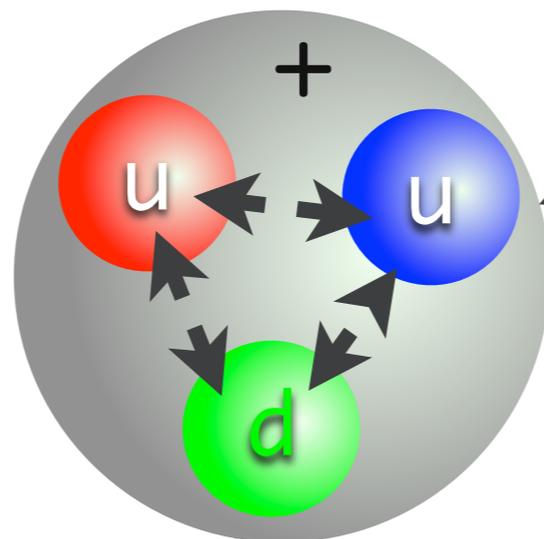


水素原子

電子

陽子

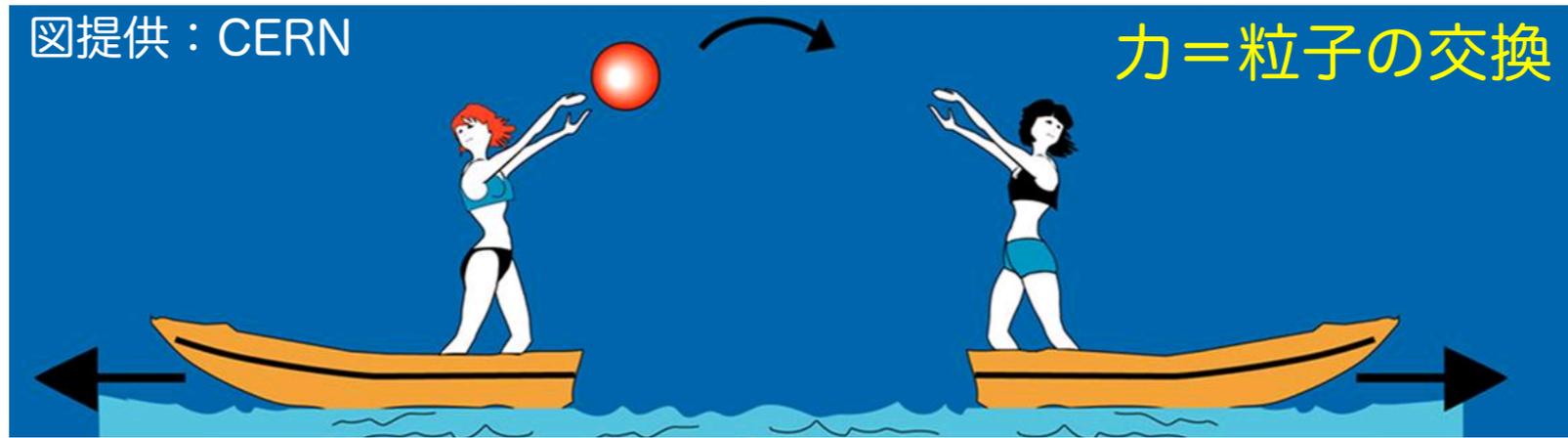
強い力
色電荷を感じて
グルーオンを交換



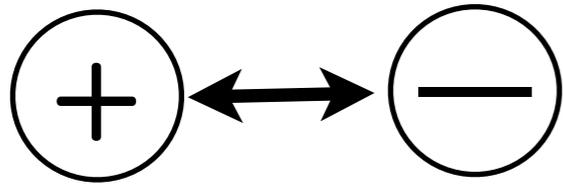
電磁気力
電荷を感じて
光子を交換

素粒子物理学とは？ 2

素粒子が従う力学法則は？

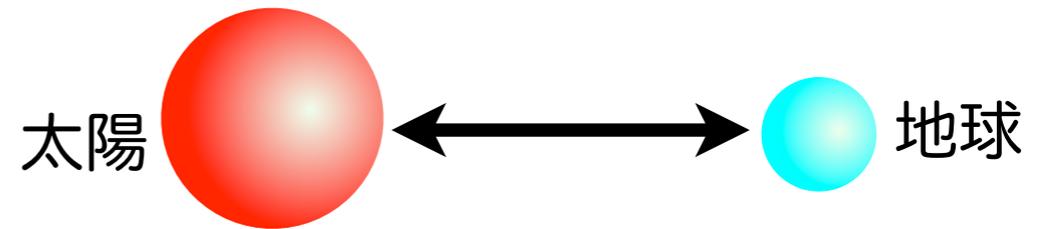


電磁気力



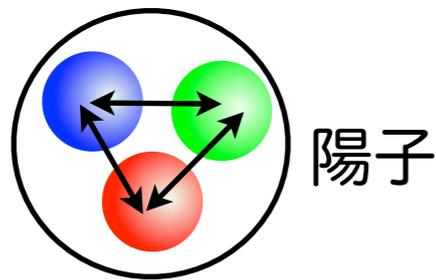
電荷：光子を交換

重力



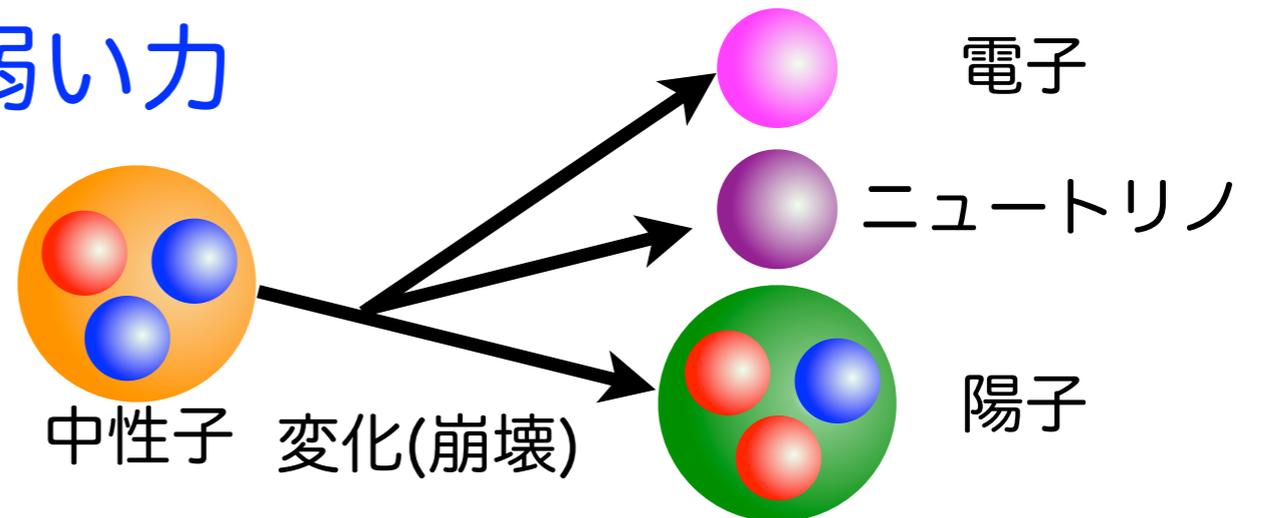
質量：グラビトン(未発見)を交換

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

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



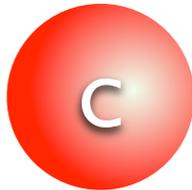
力を伝える



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



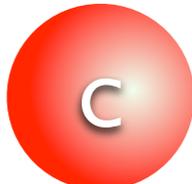
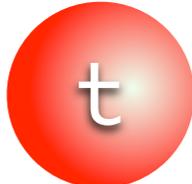
弱い力：Z、W粒子



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 

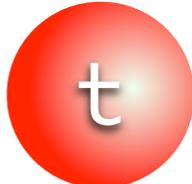
力を伝える

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

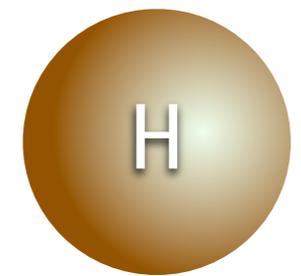
素粒子標準模型

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  

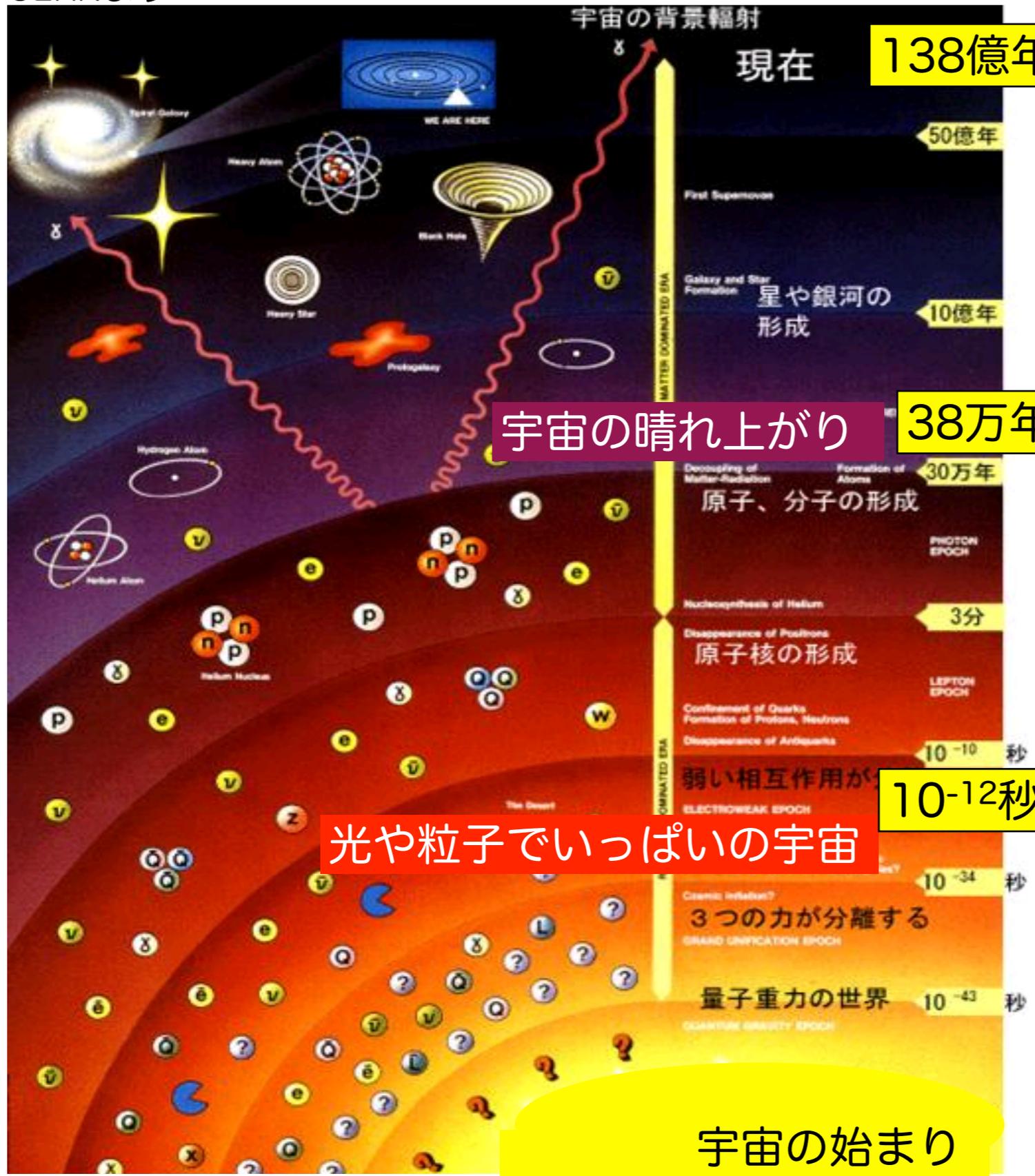


ヒッグス粒子：素粒子に質量を与える

素粒子物理学とは？ 3

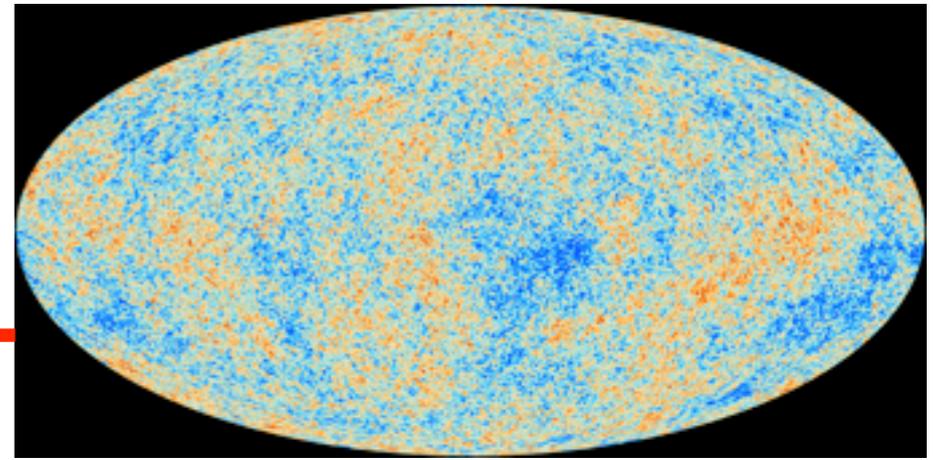
宇宙誕生の謎に迫る

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

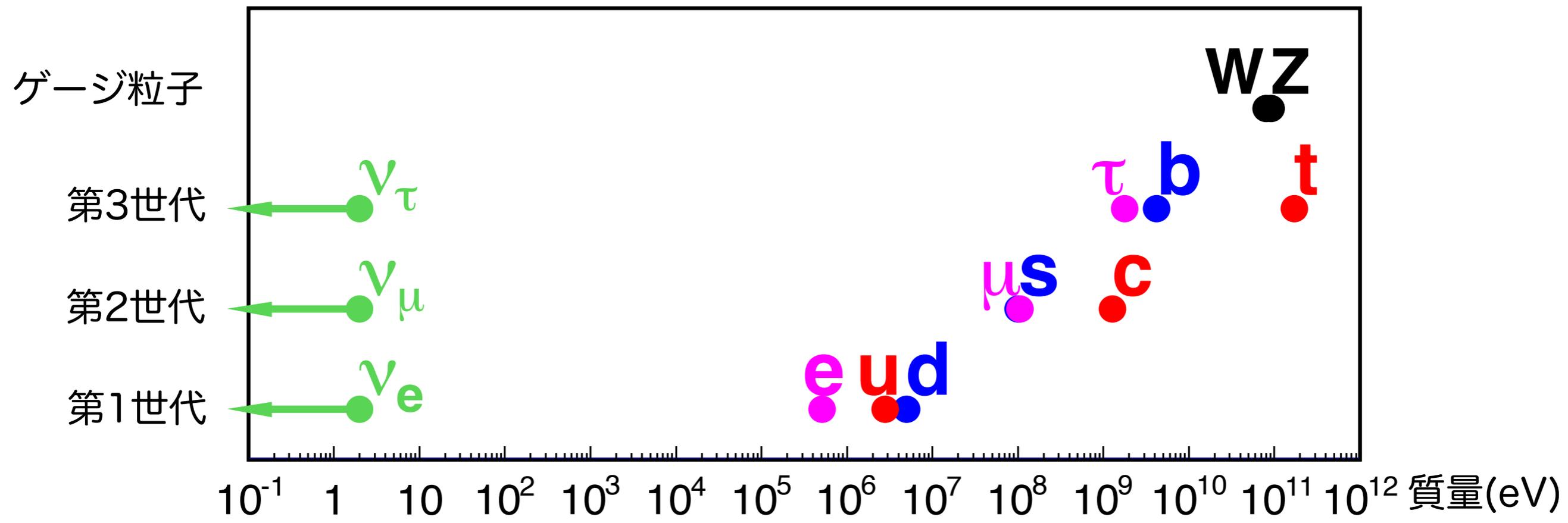
それ以前の宇宙の観測は無理

← 加速器で初期宇宙を再現

LHCで10⁻¹²秒後までさかのぼる

質量の起源とヒッグス粒子

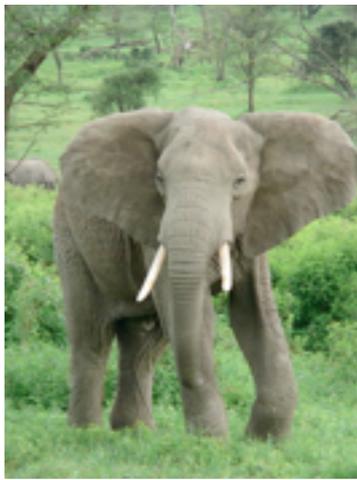
素粒子の質量起源



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

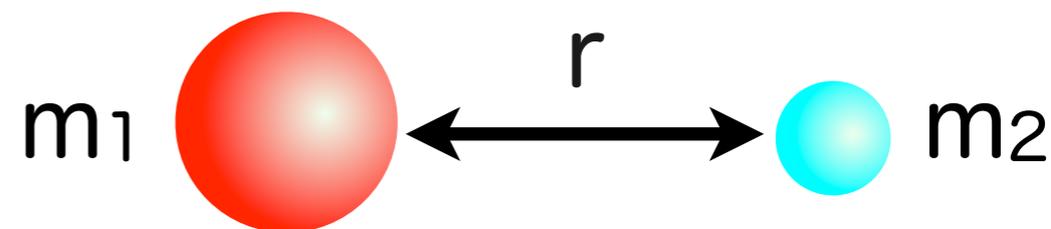
質量とは？

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

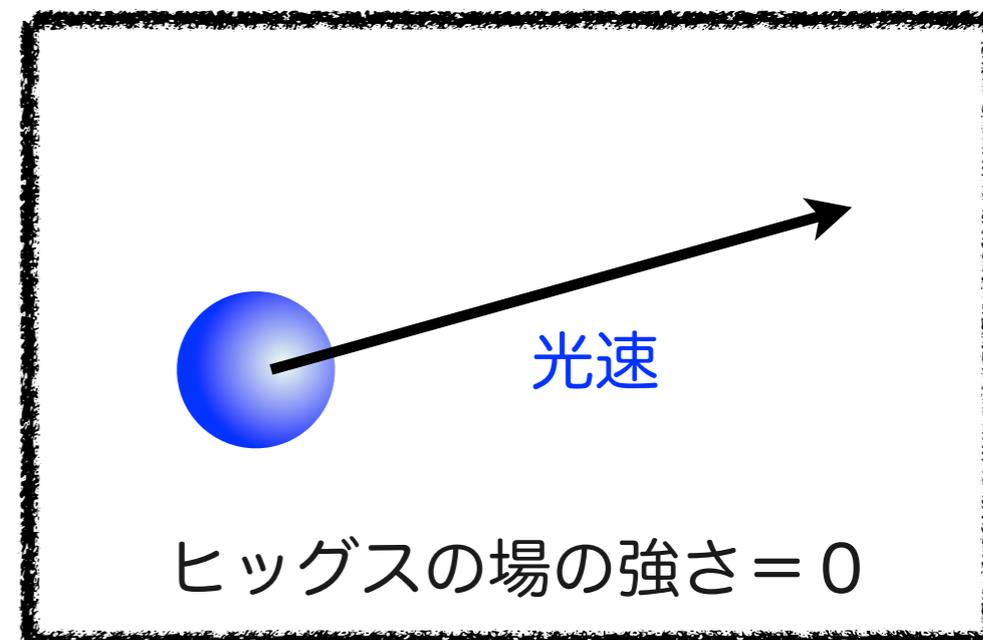
慣性質量 = 静止エネルギー

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

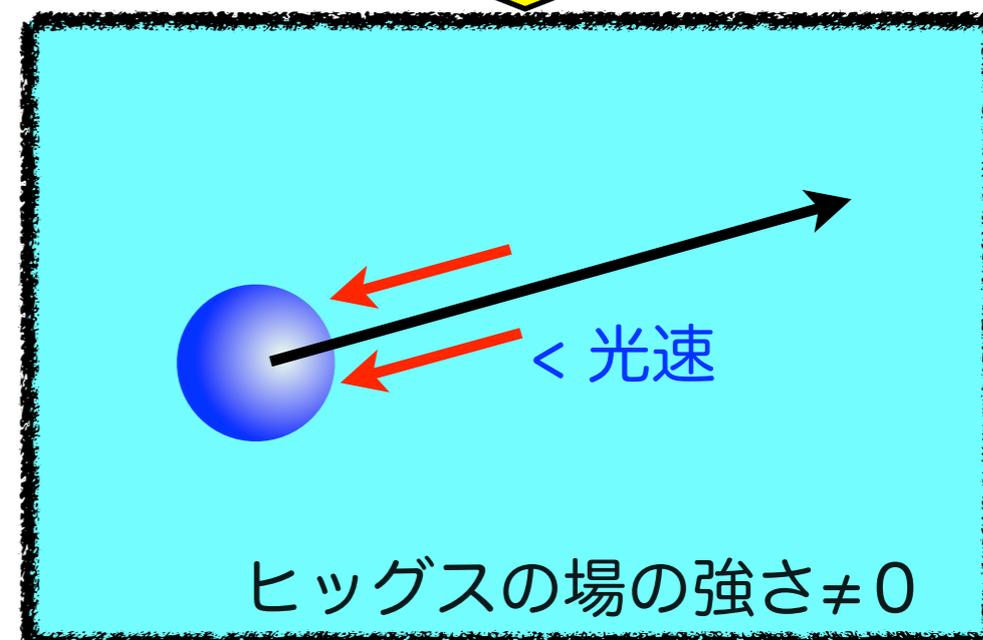
- 「ヒッグスの場」の強さはゼロ
- 粒子は光速で運動
- 素粒子の質量は全てゼロ



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

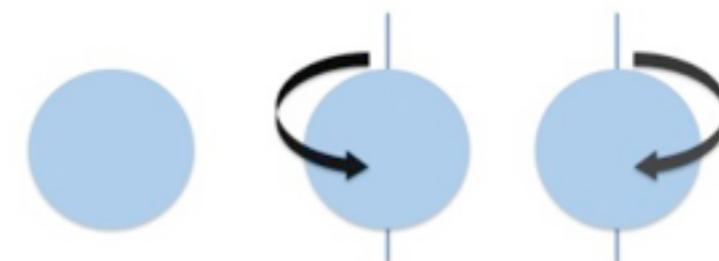
→ ヒッグス粒子

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

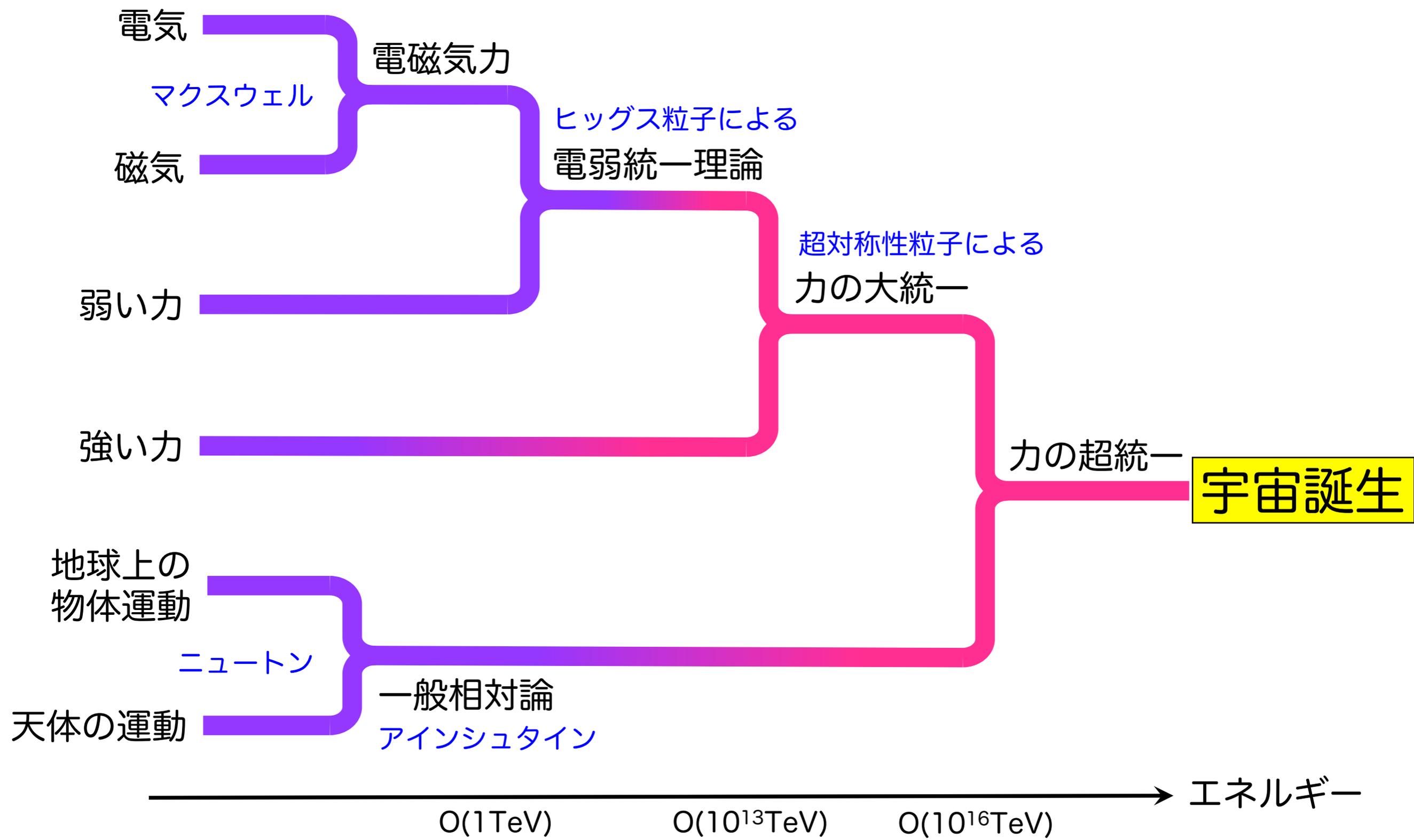
思いっ切りたたく → 高エネルギーでたたく

ヒッグス粒子は、不安定ですぐに崩壊する

2012年7月にそういう粒子が実験的に発見された！！！！

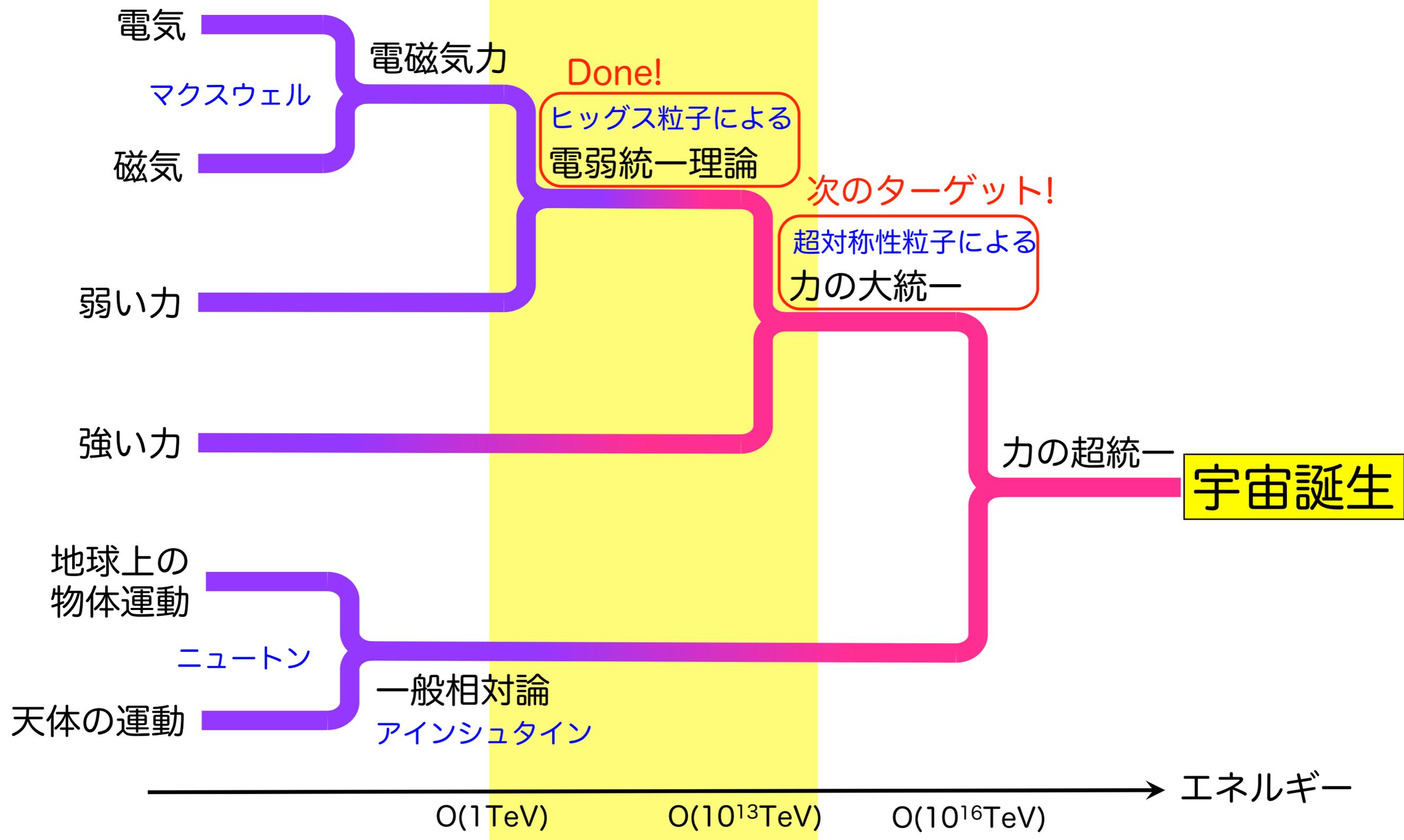
ヒッグス発見で面白くなった 素粒子物理学

力の統一



力の統一

LHC実験の探索領域



超対称性粒子

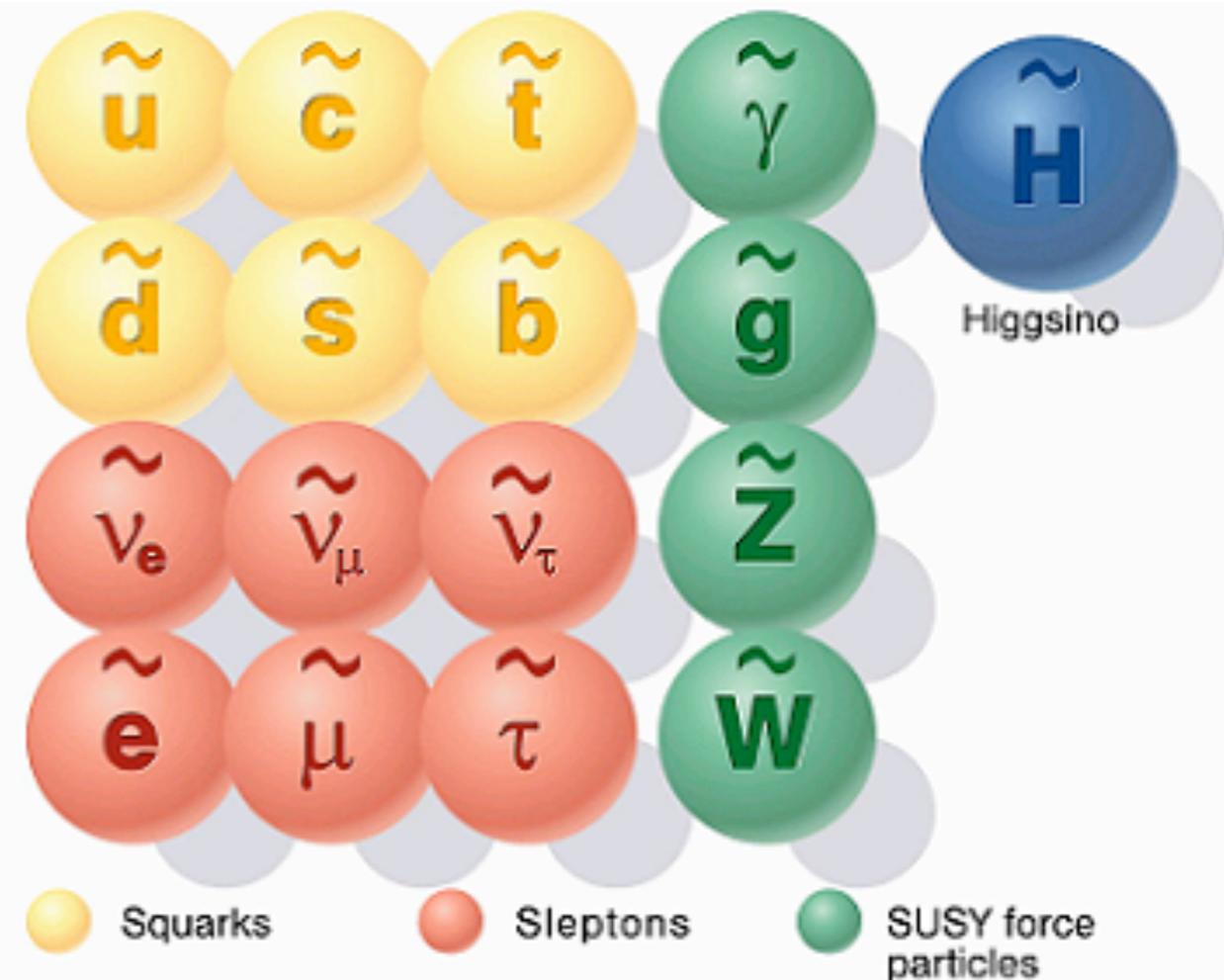
標準模型による既知の素粒子

超対称性による未知の素粒子

全て発見済み



全て未発見

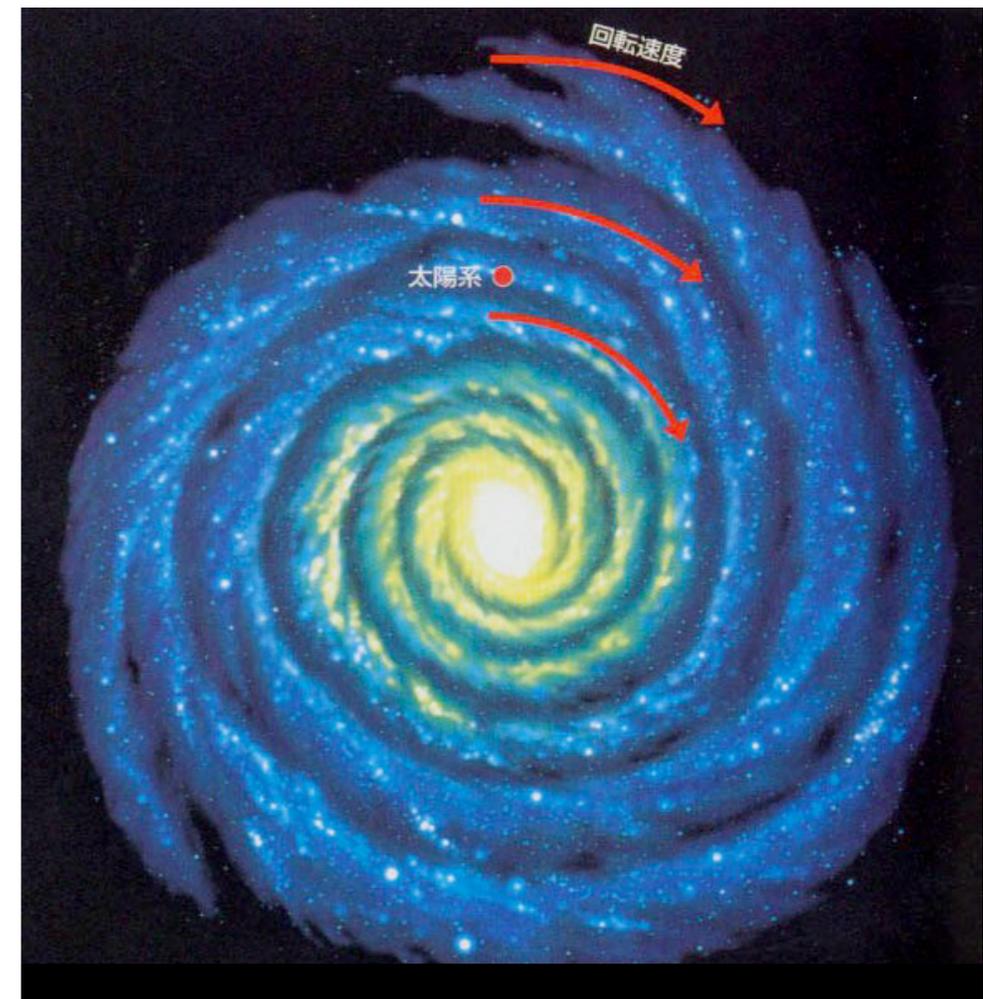
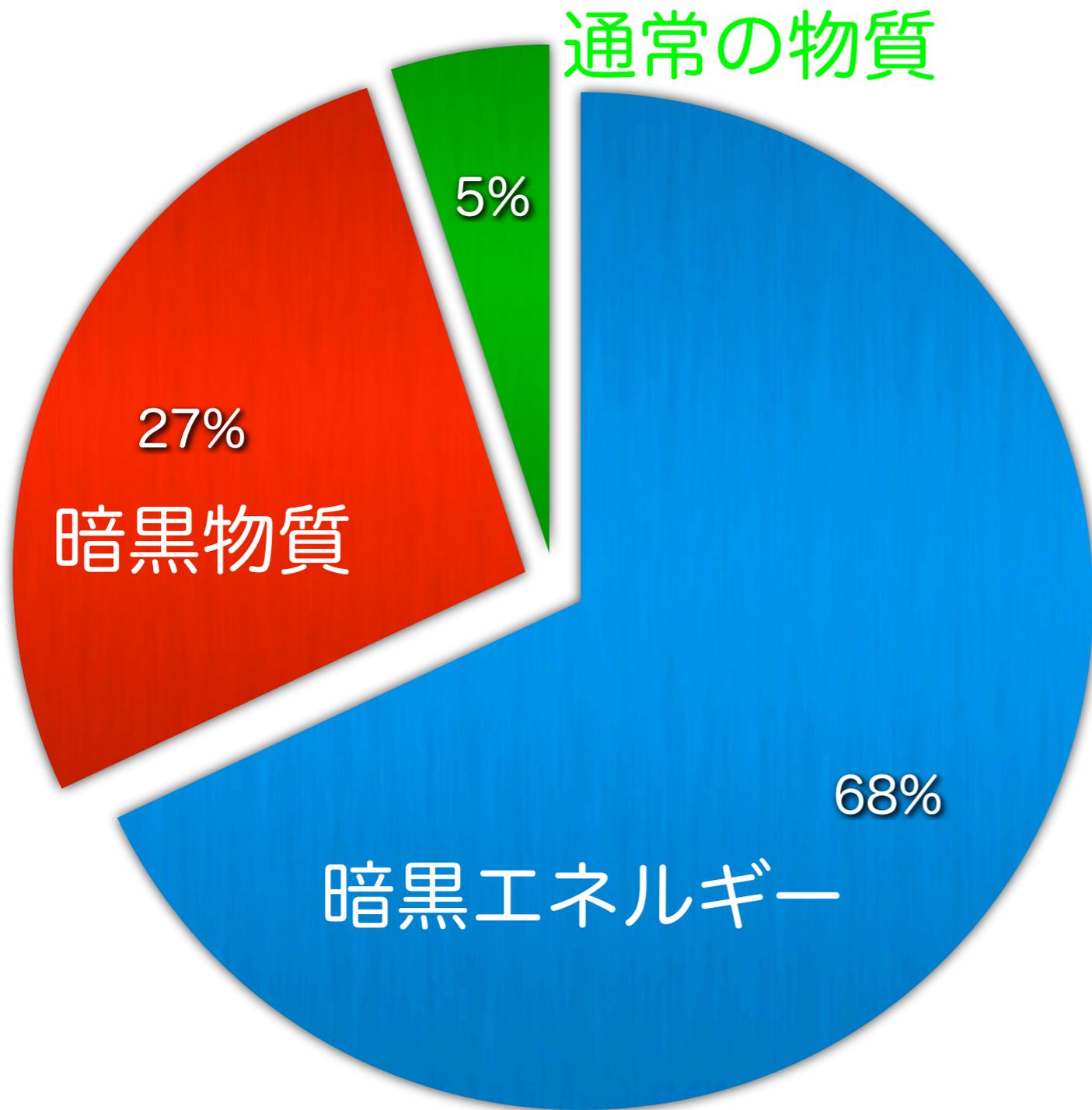


“スピン”という素粒子固有の性質だけが違う

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

暗黒物質の謎



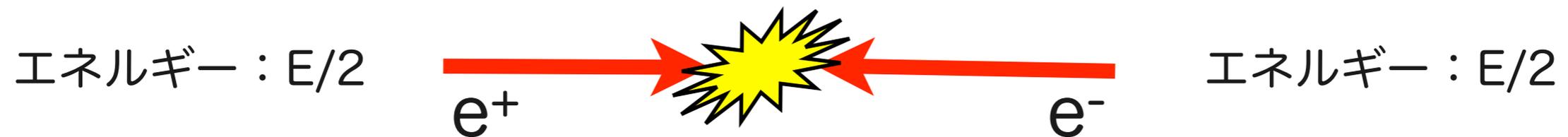
超対称性粒子は暗黒物質の候補

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



$$E = Mc^2$$

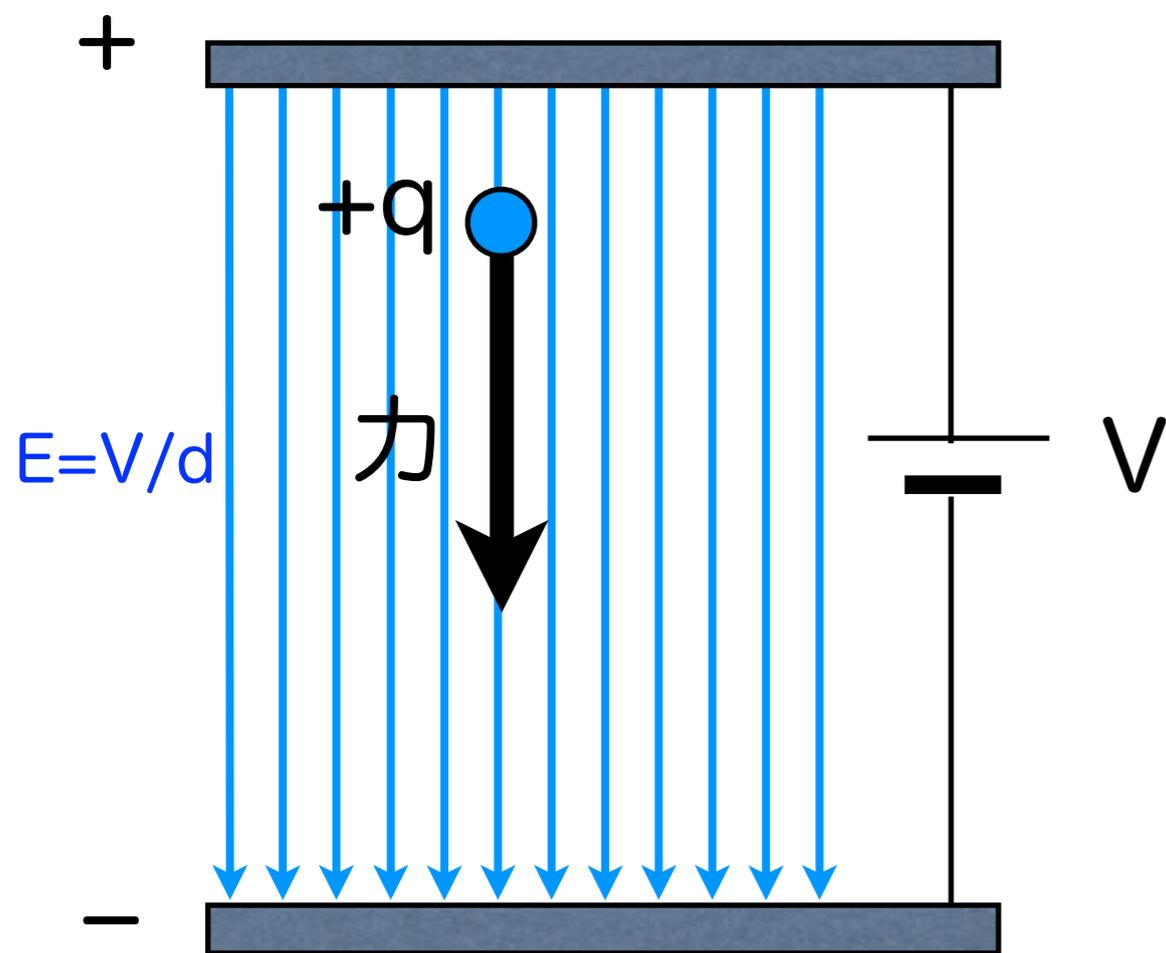
質量 $M = E/c^2$ の未知なる素粒子を生成する能力

加速した粒子を衝突させる

高エネルギー！

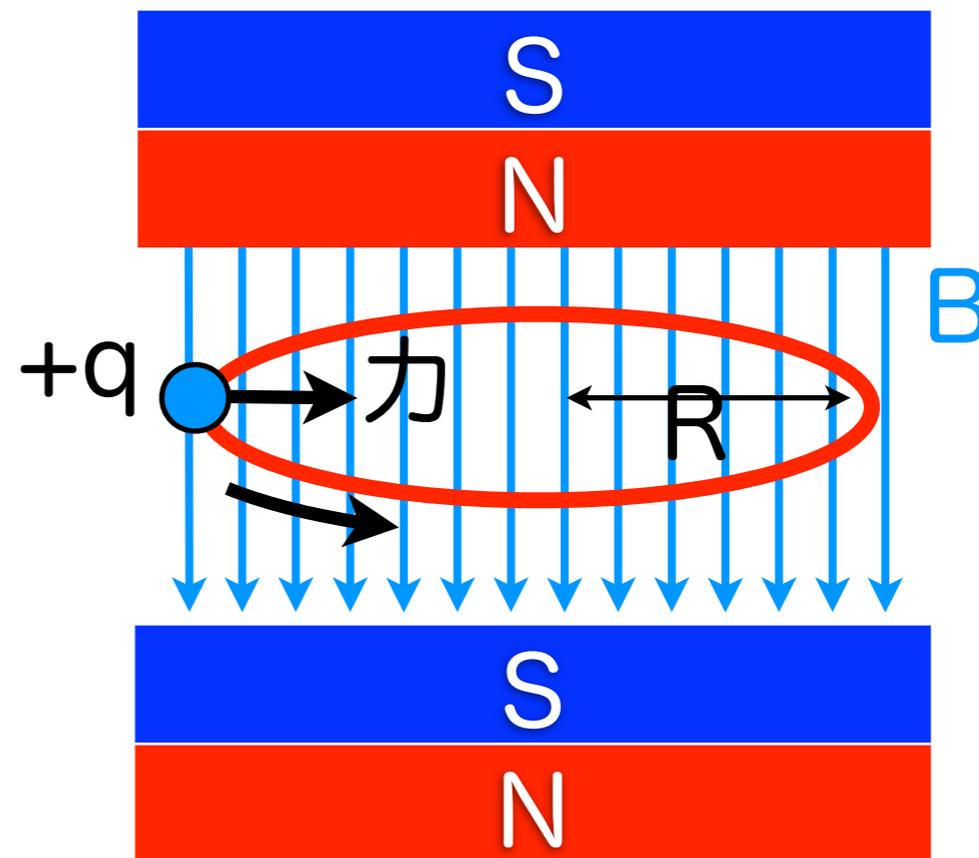
粒子を加速する

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

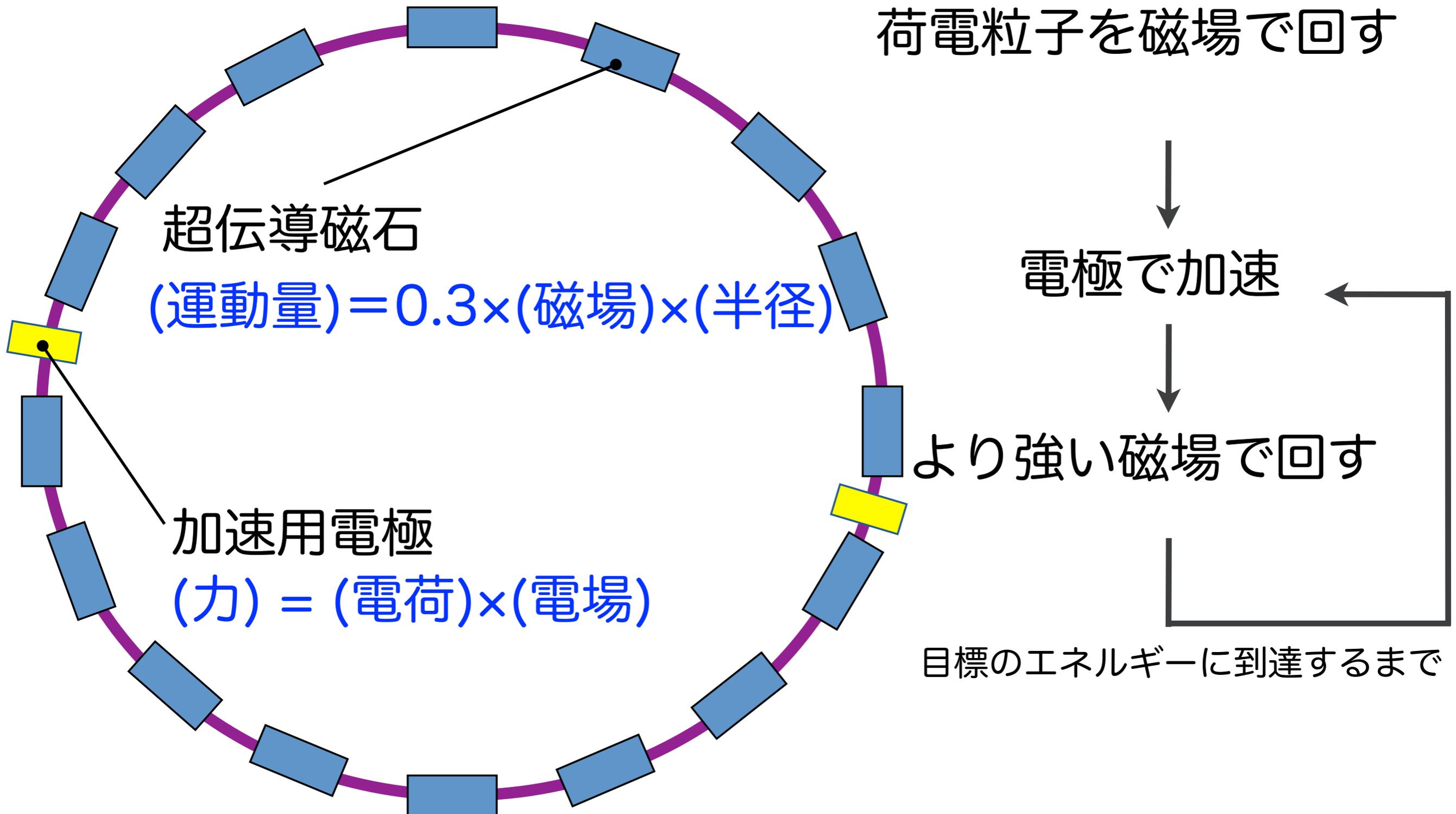
$$(\text{力}) = (\text{電荷}) \times (\text{電場})$$



磁場を大きくして
より加速した荷電粒子を回す

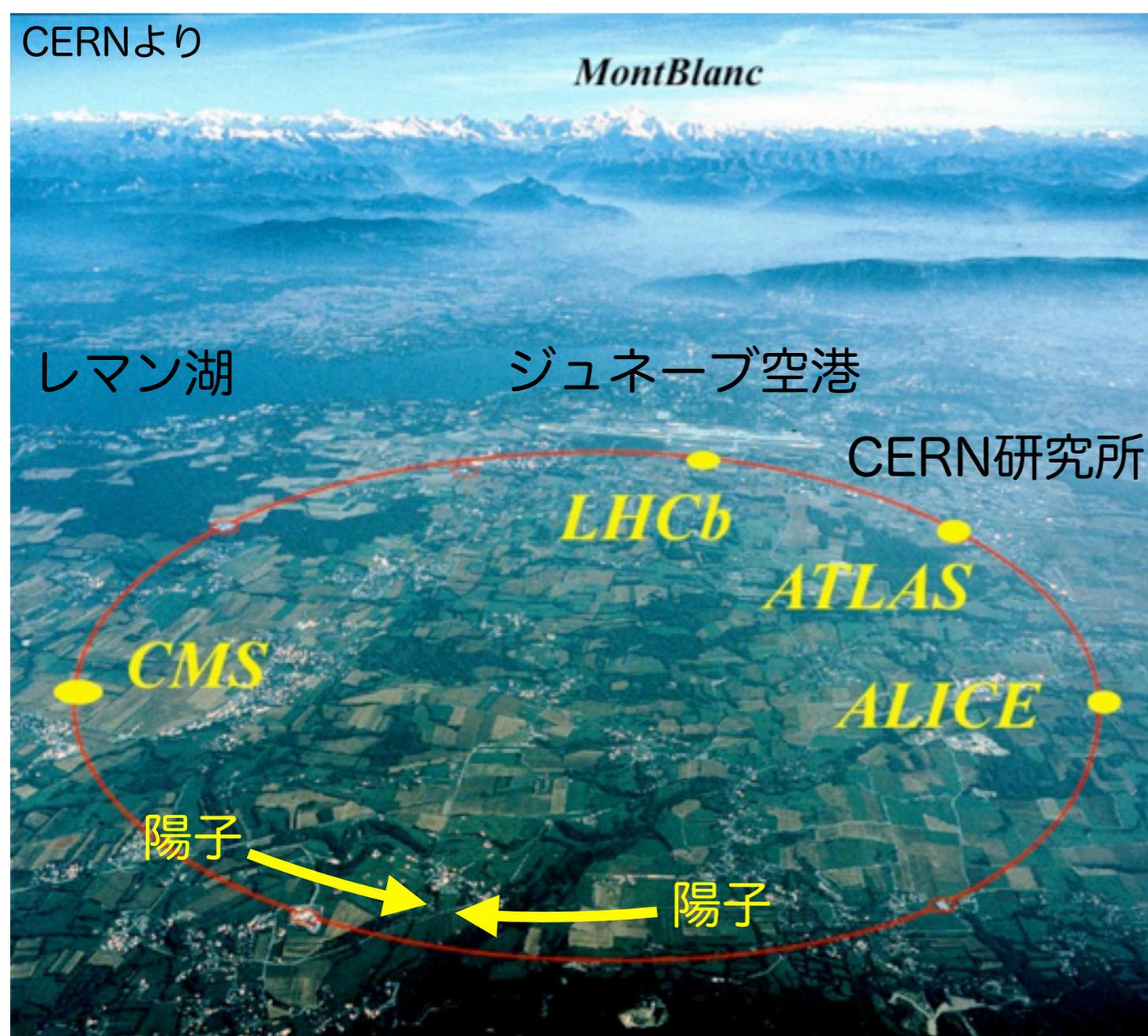
$$(\text{運動量}) = 0.3 \times (\text{磁場}) \times (\text{半径})$$

加速器の原理



最先端加速器 Large Hadron Collider

光速の99.99999991%にまで加速した陽子を衝突させ、誕生直後 ($\sim 10^{-12}$ 秒後)の宇宙を再現。初期宇宙にあった素粒子を作り出して研究する。2012年にヒッグス粒子を発見した。



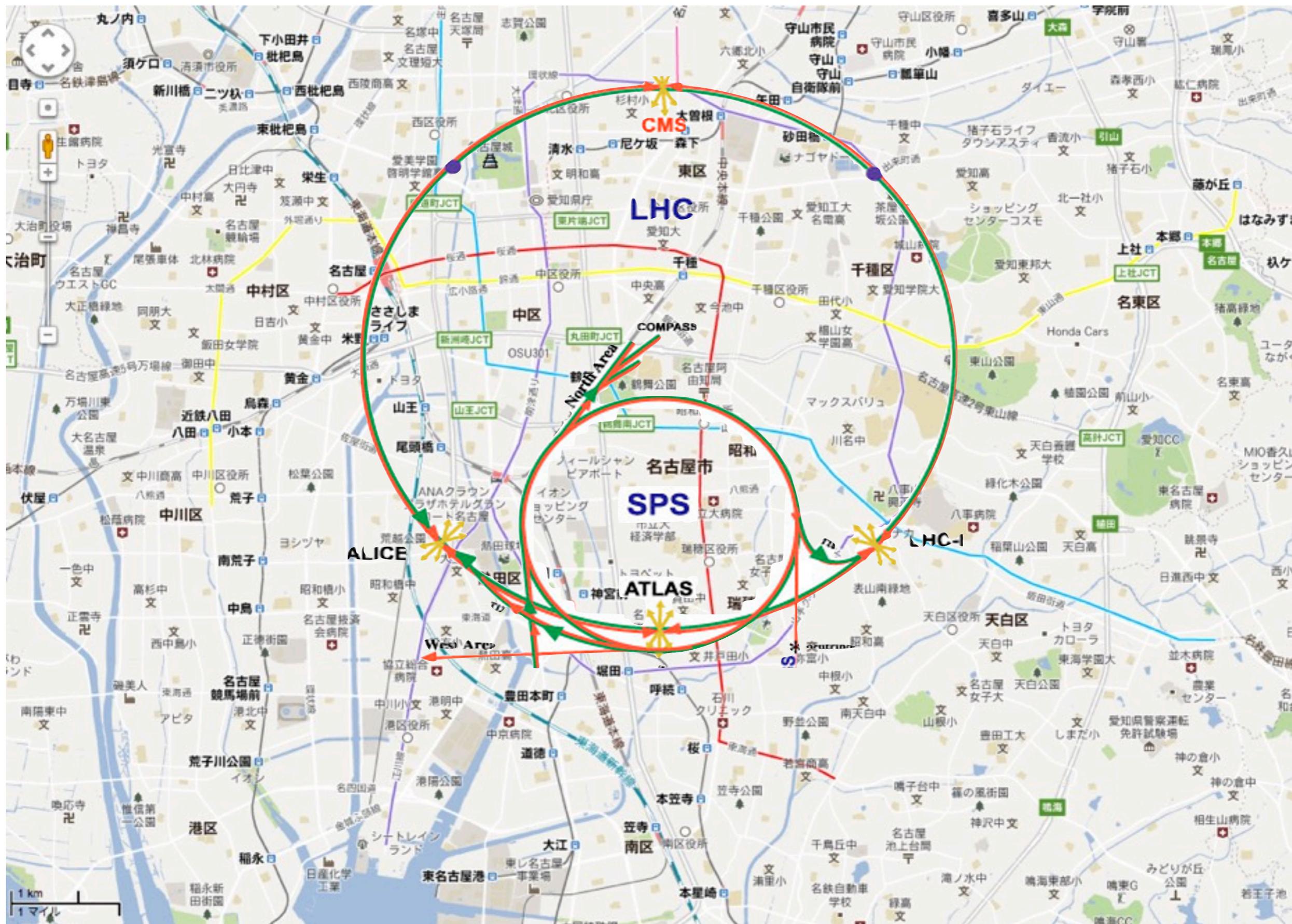
毎秒 8 億回の陽子・陽子衝突事象

- 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年から現在まで：第2実験
1.6倍の衝突エネルギー
4000兆回の陽子・陽子衝突データ取得

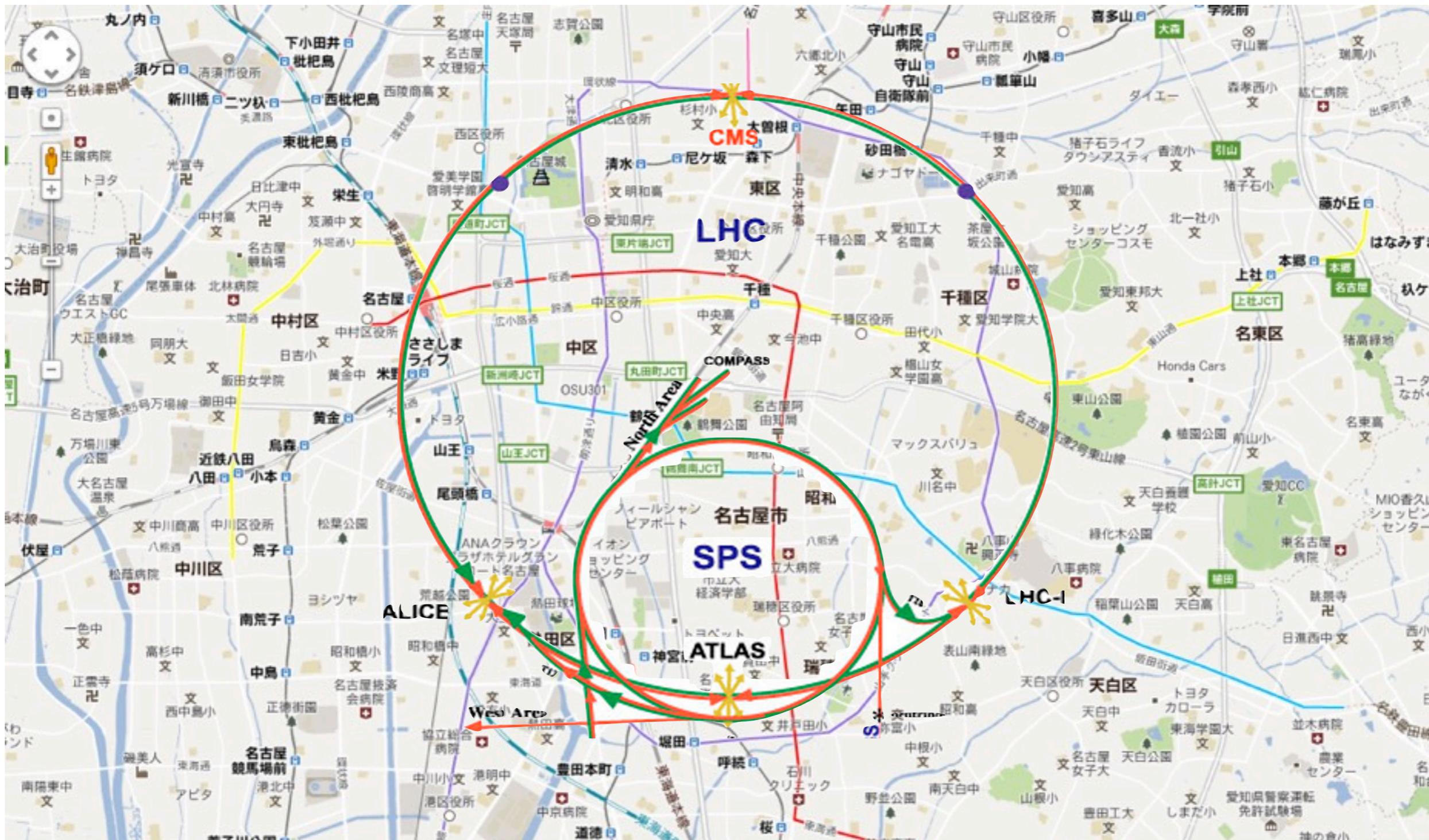
LHC加速器の大きさ



LHC加速器の大きさ

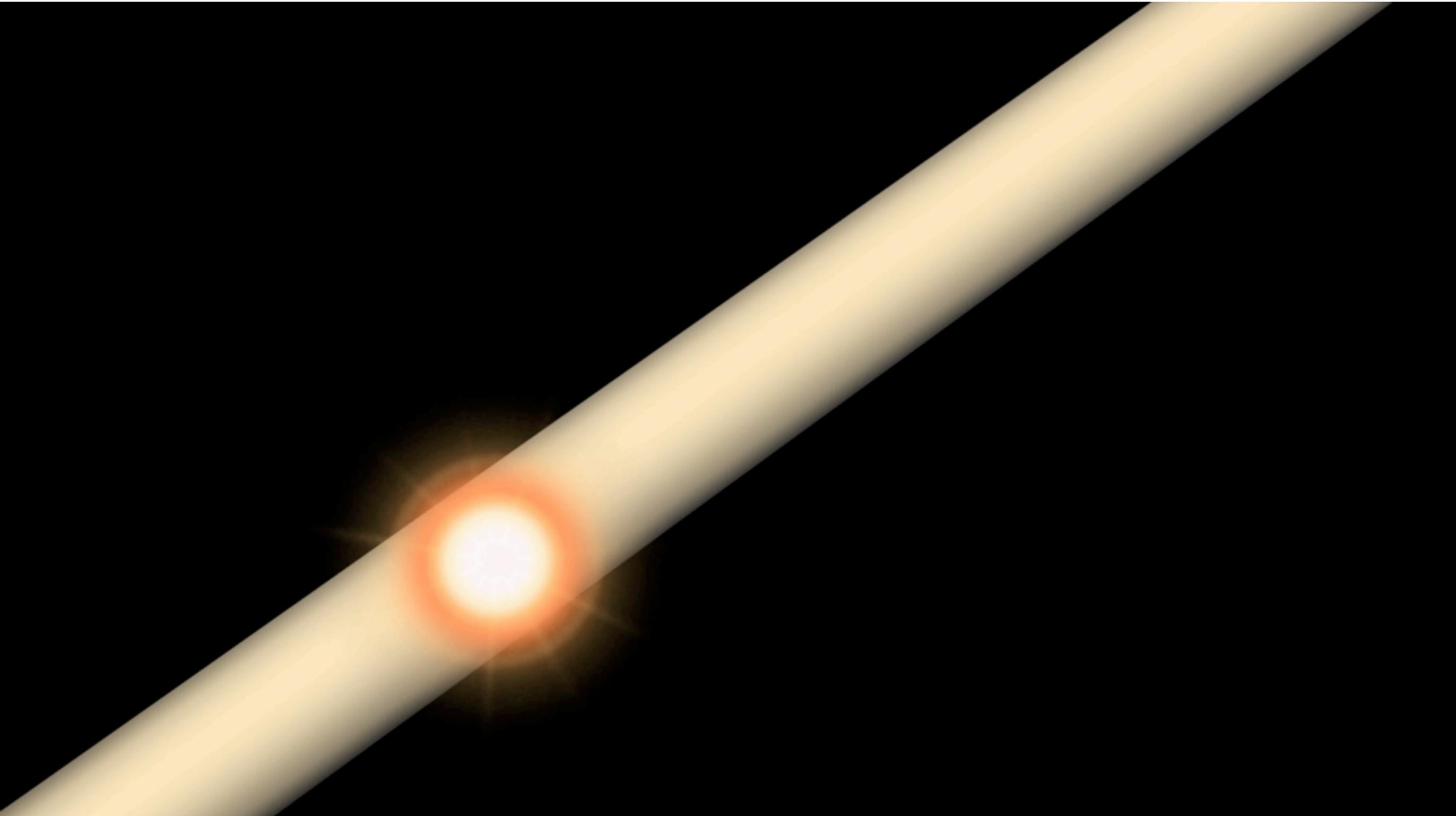


LHC加速器の大きさ

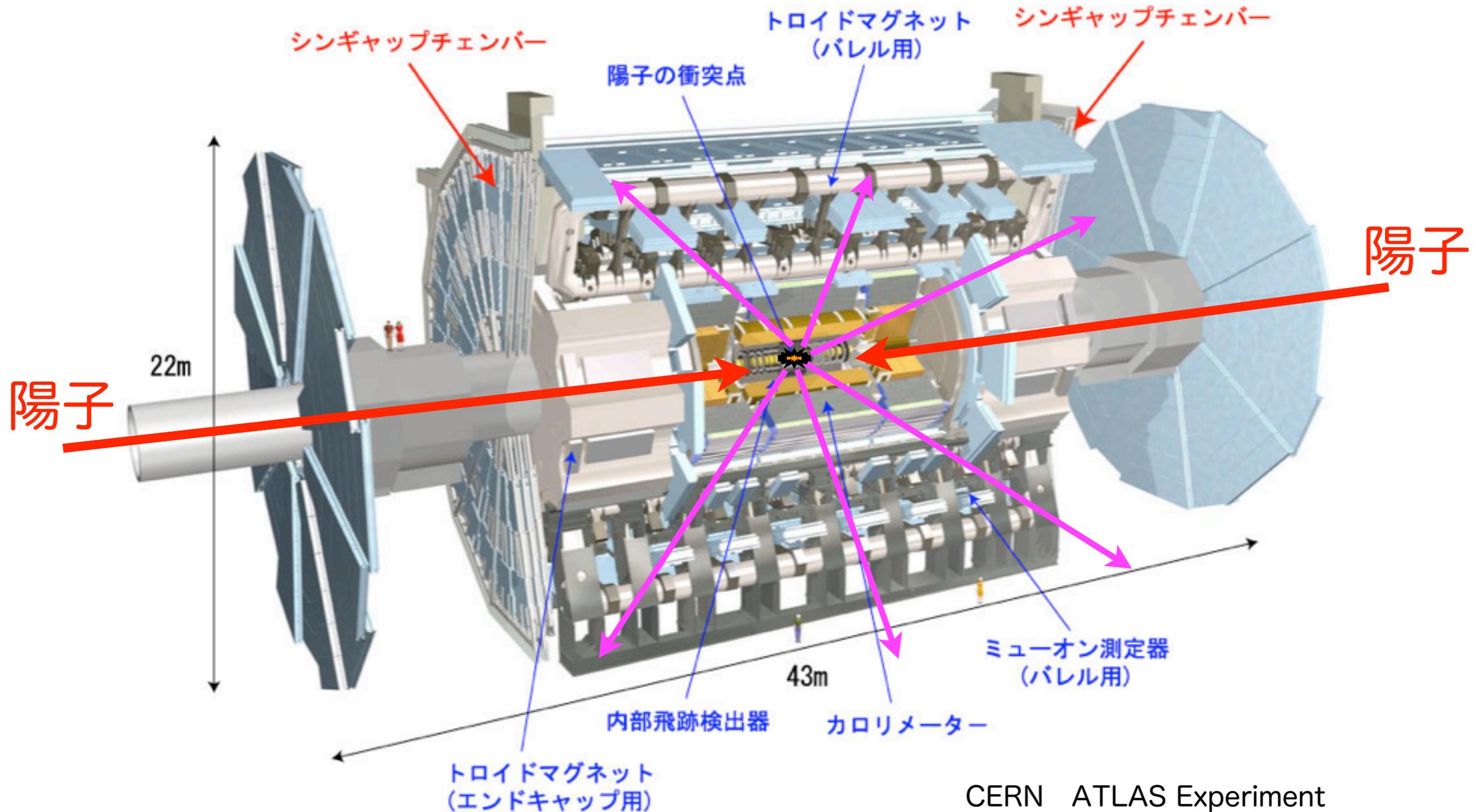


大阪環状線 < LHC~名古屋地下鉄名城線 < 東京山手線
 ~21km ~27km ~34.5km

陽子・陽子衝突のアニメーション



検出器 アトラス検出器

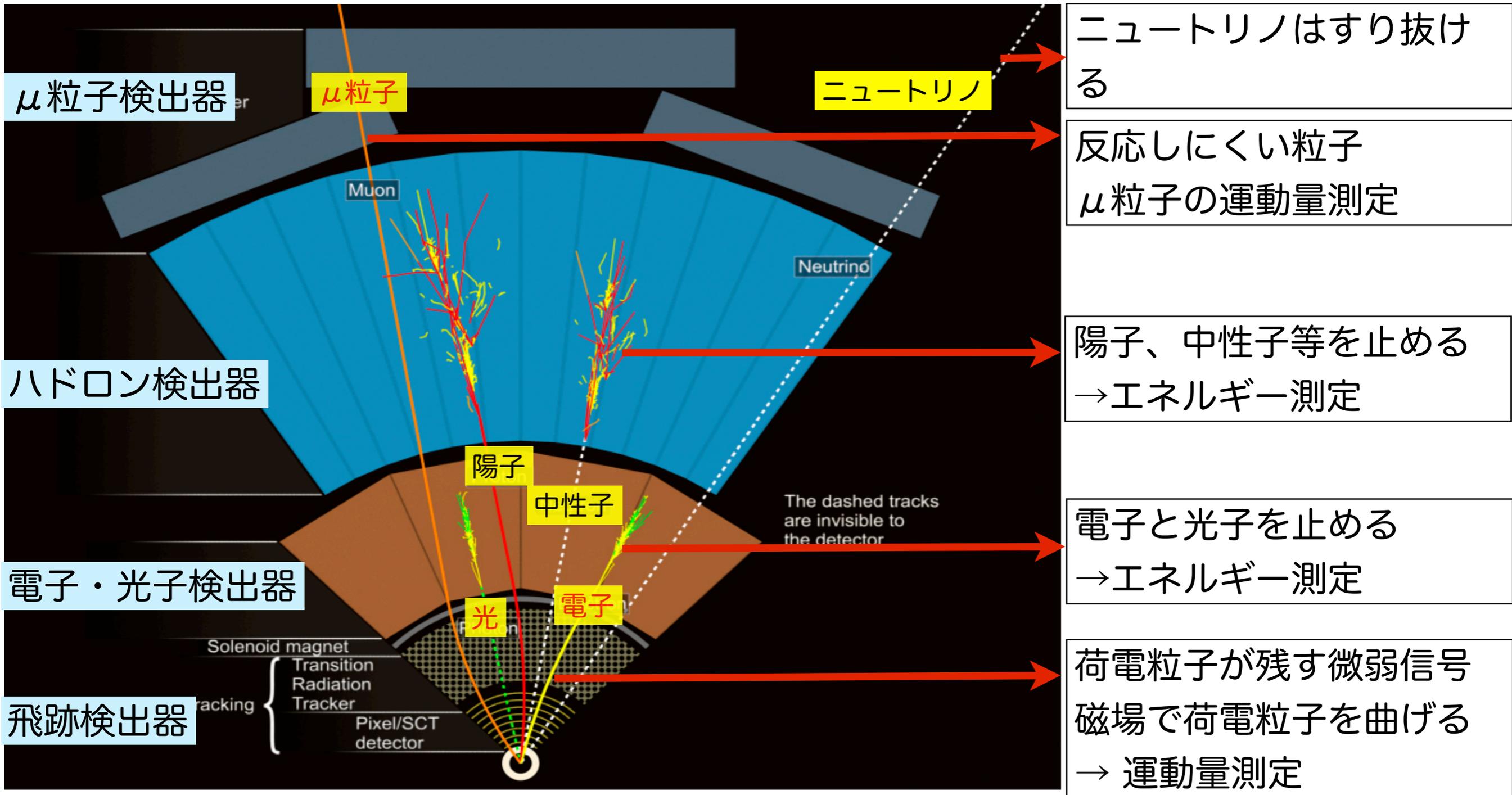


未知の素粒子を作る → 崩壊した軽い安定粒子を観測

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

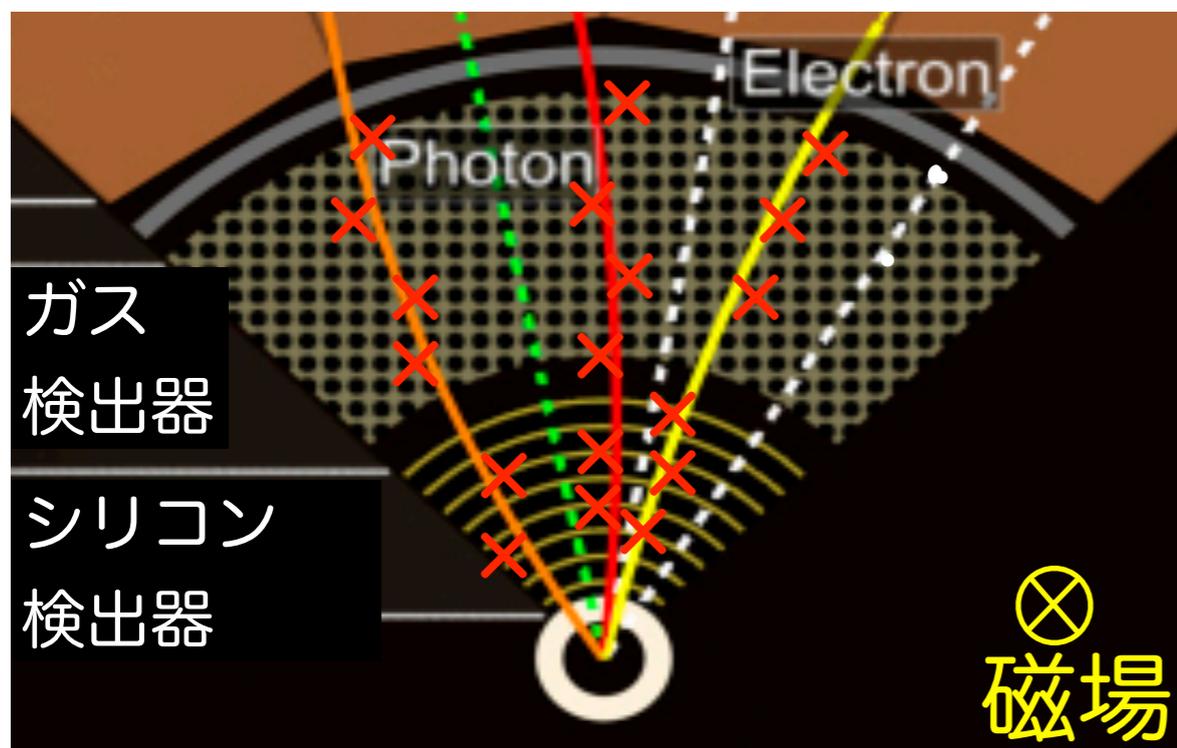
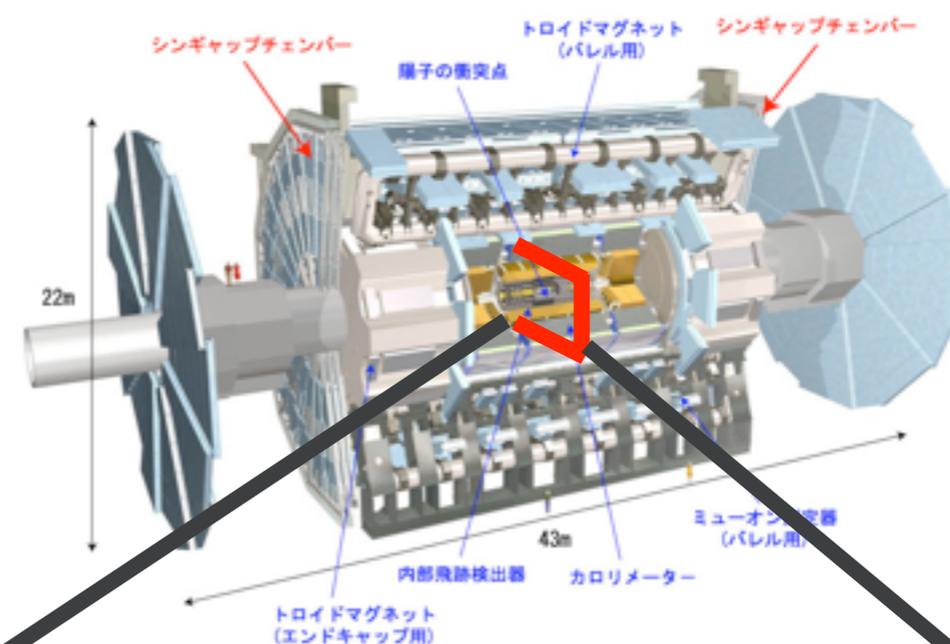
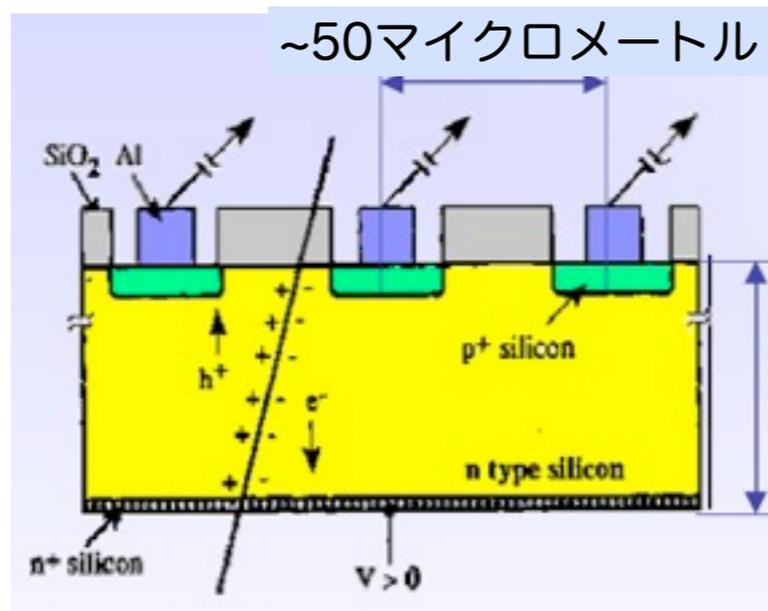
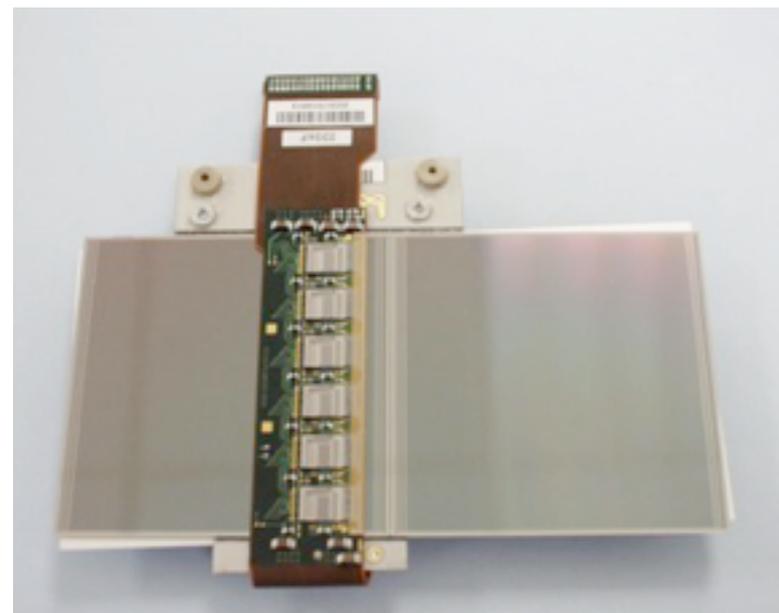
検出器の原理

検出器の物質と粒子との相互作用を利用する

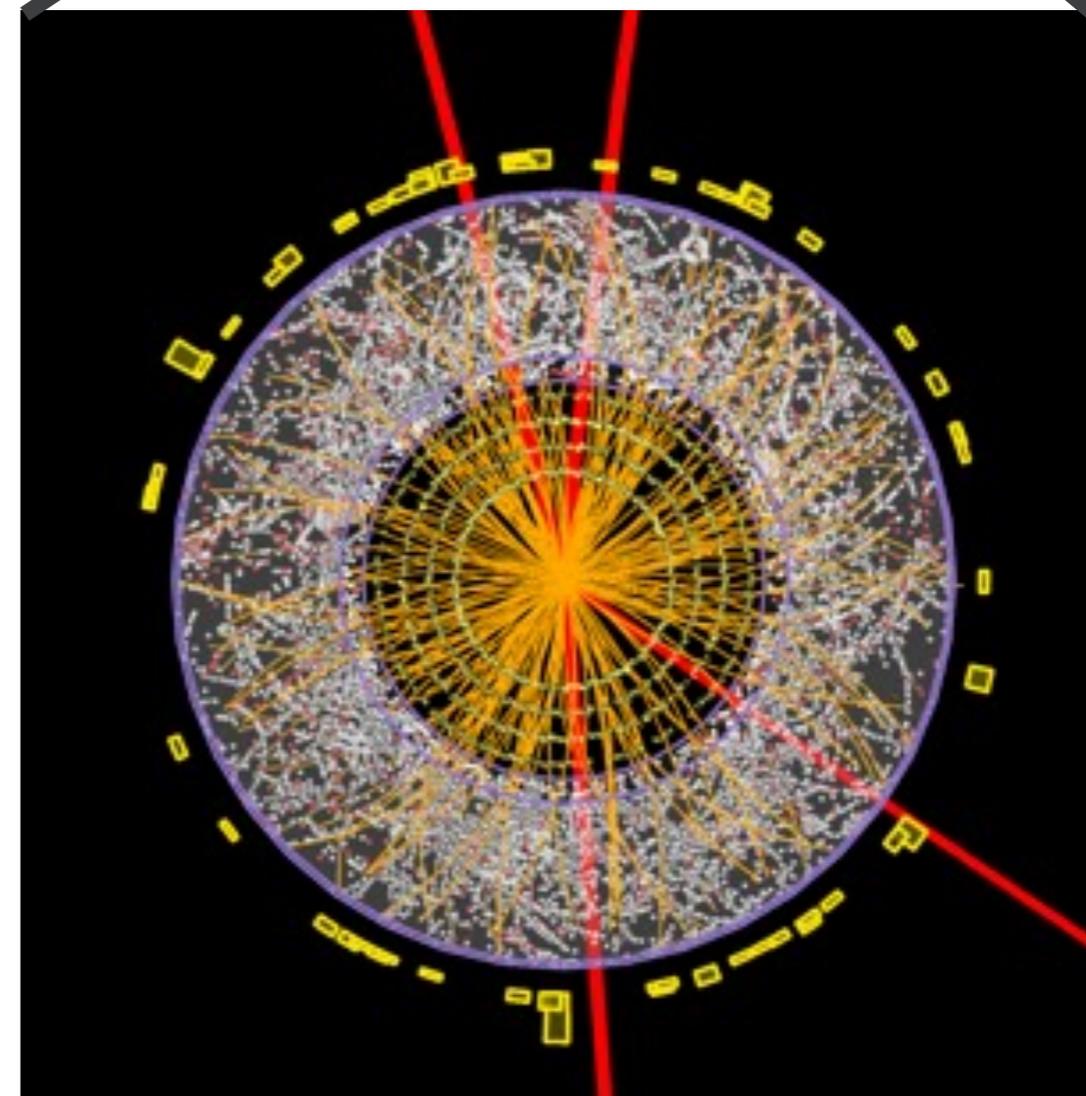


粒子の種類、エネルギー、運動量を測定

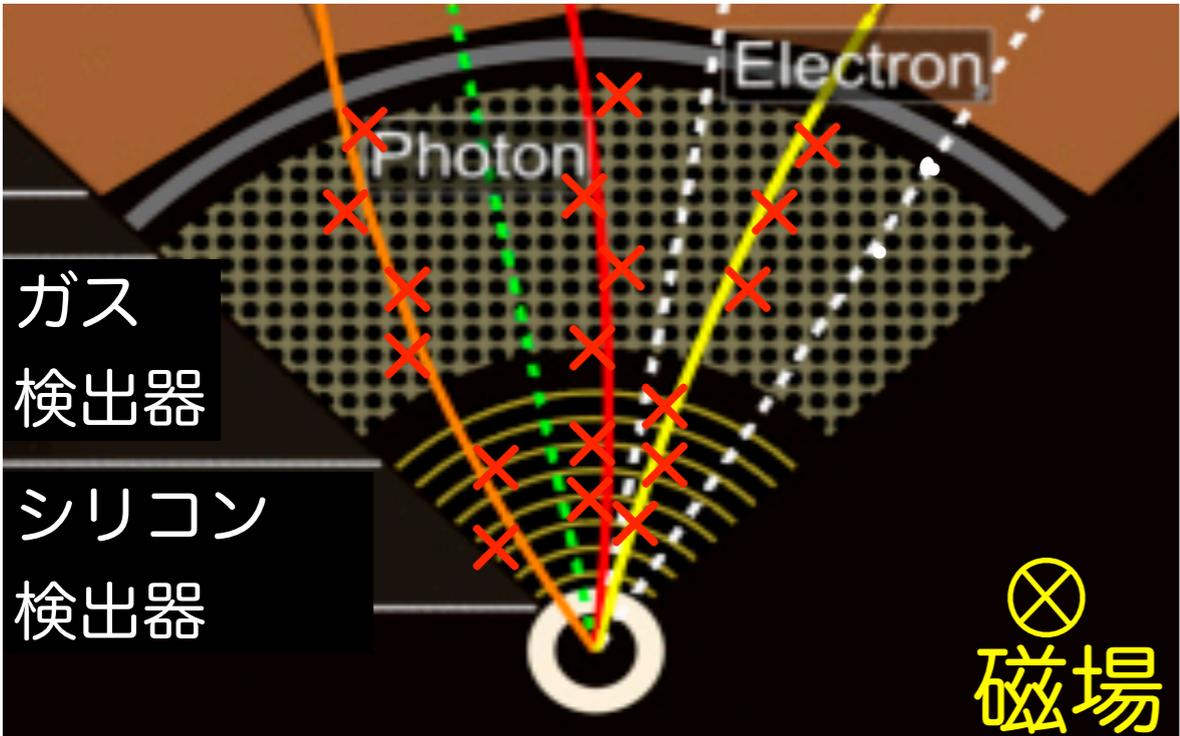
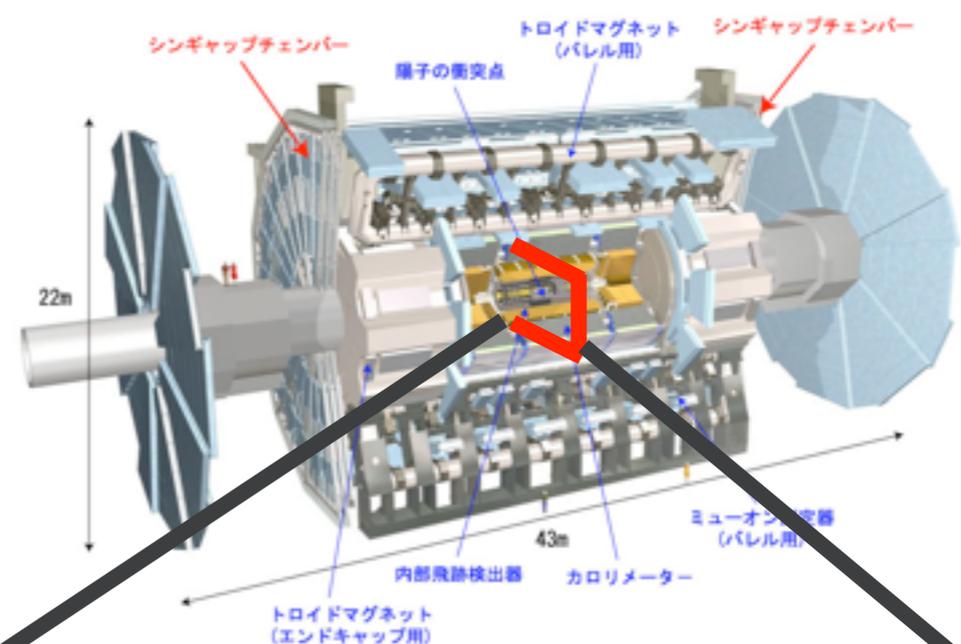
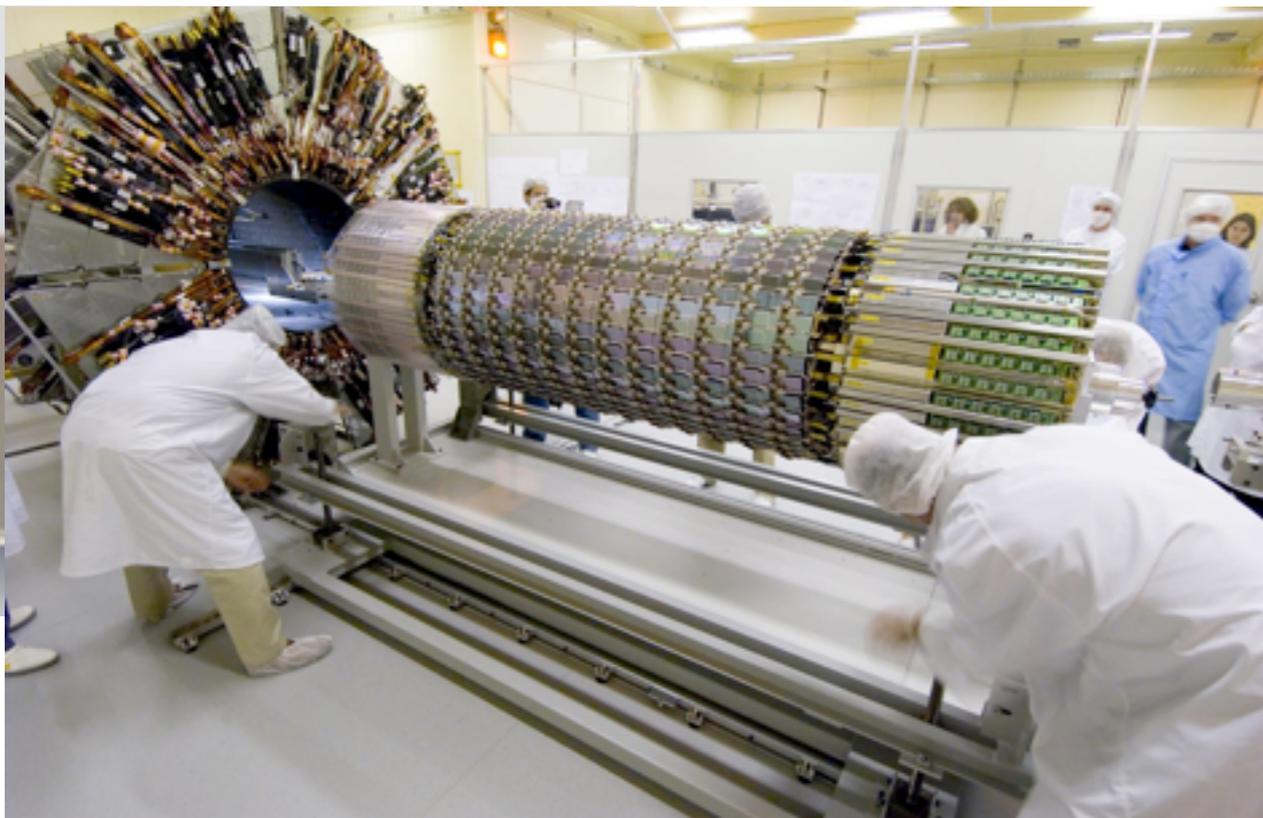
運動量測定 (飛跡検出器)



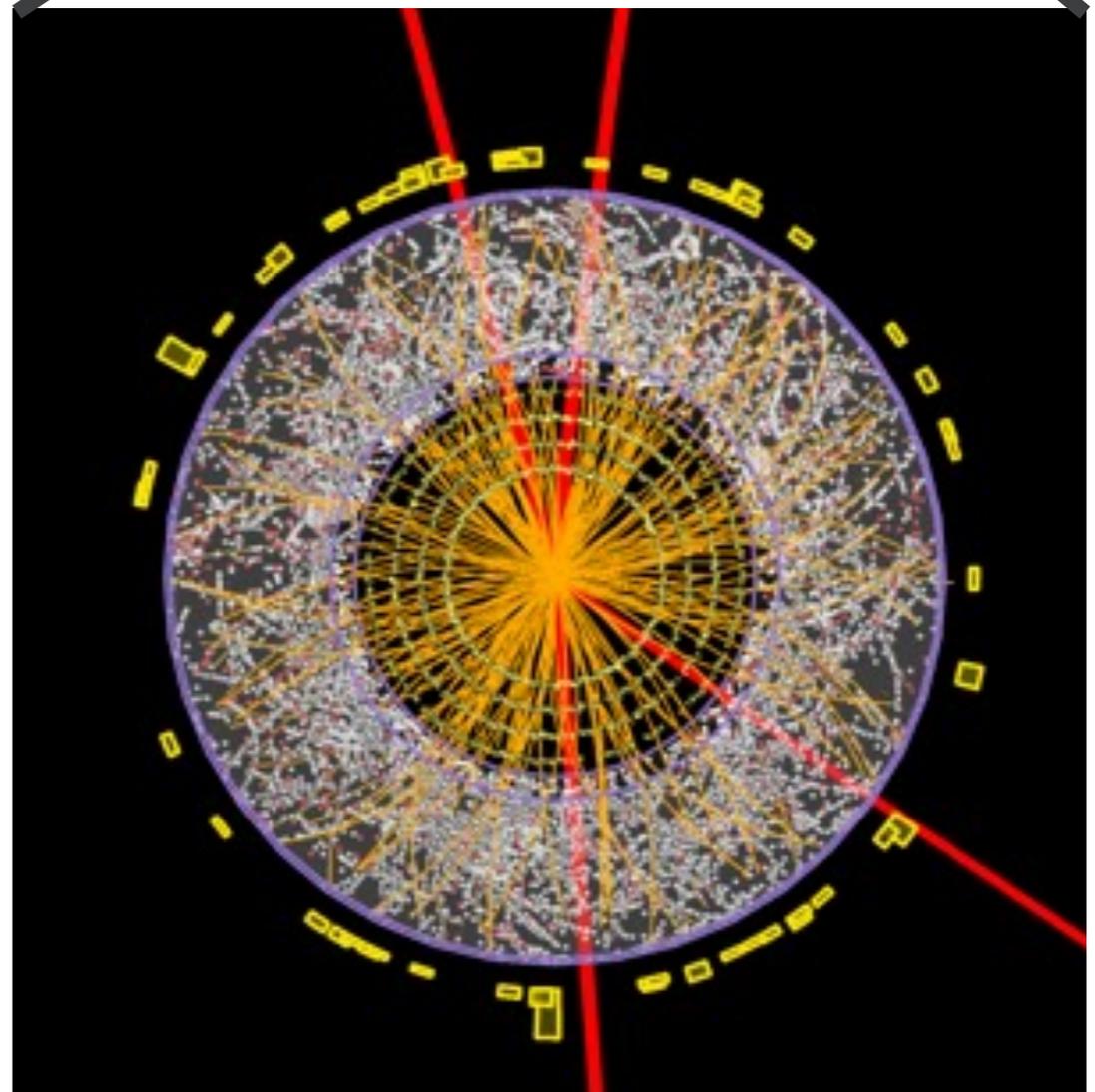
(運動量) = 0.3 × (磁場) × (半径)



運動量測定 (飛跡検出器)

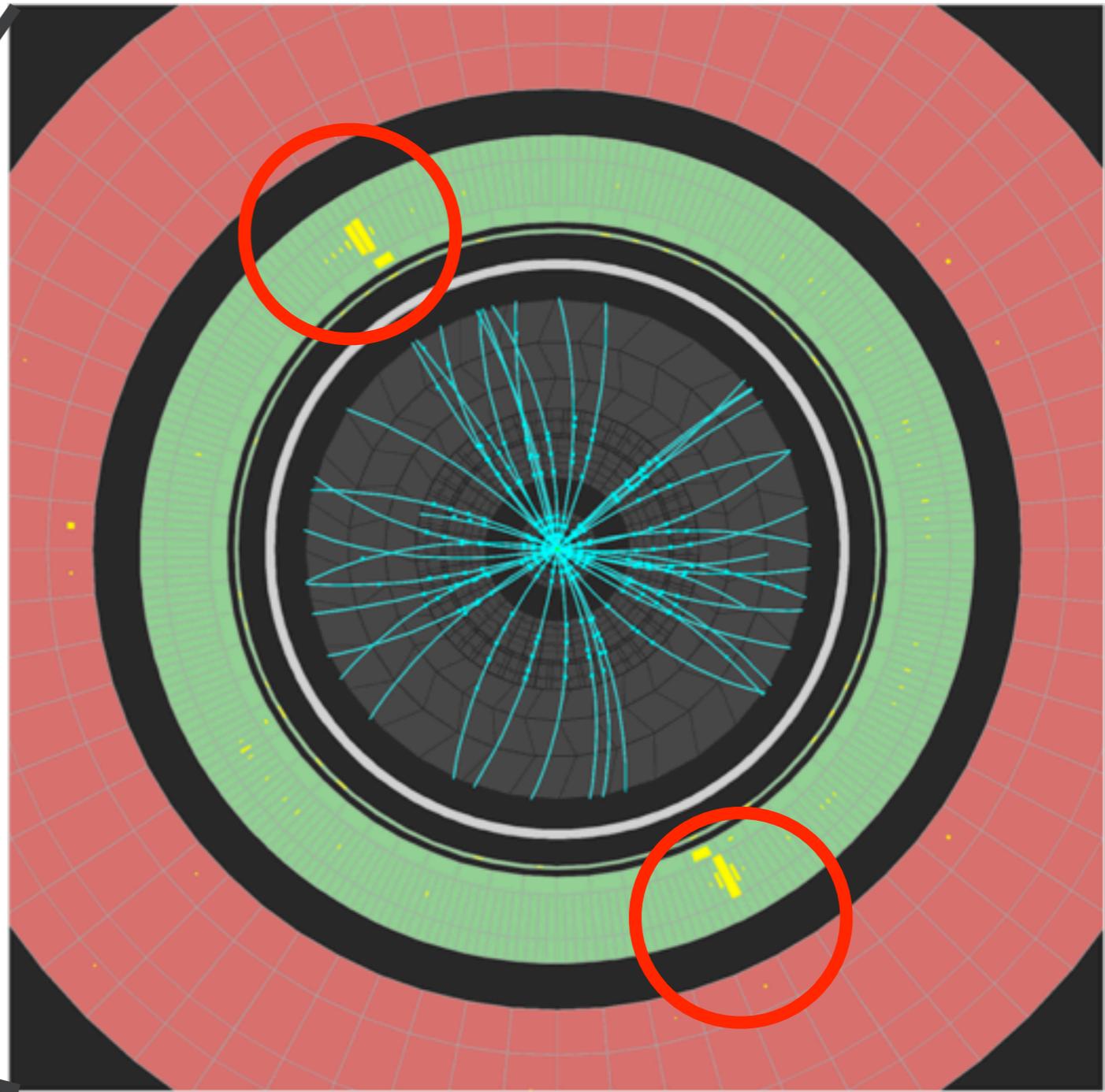
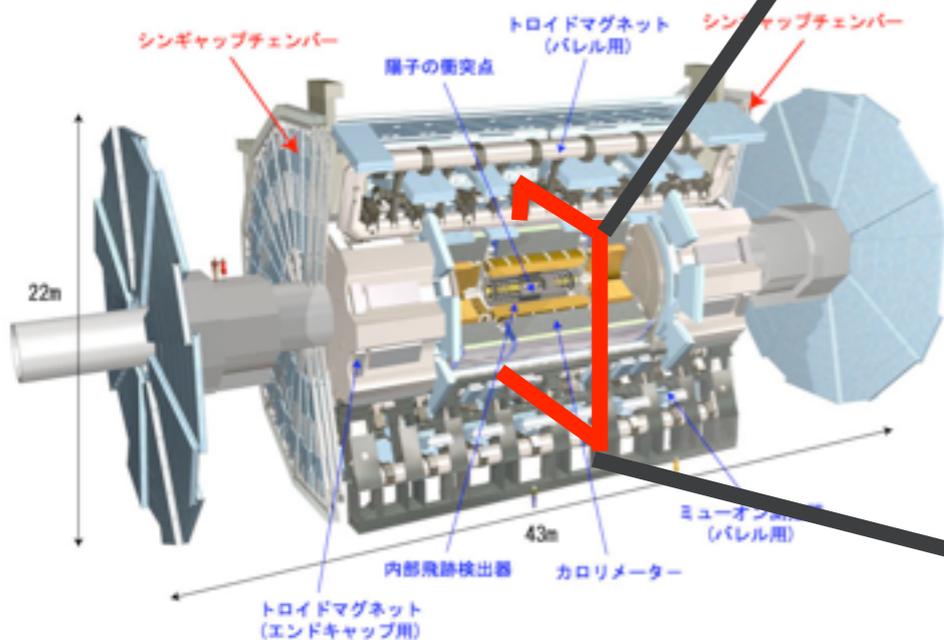
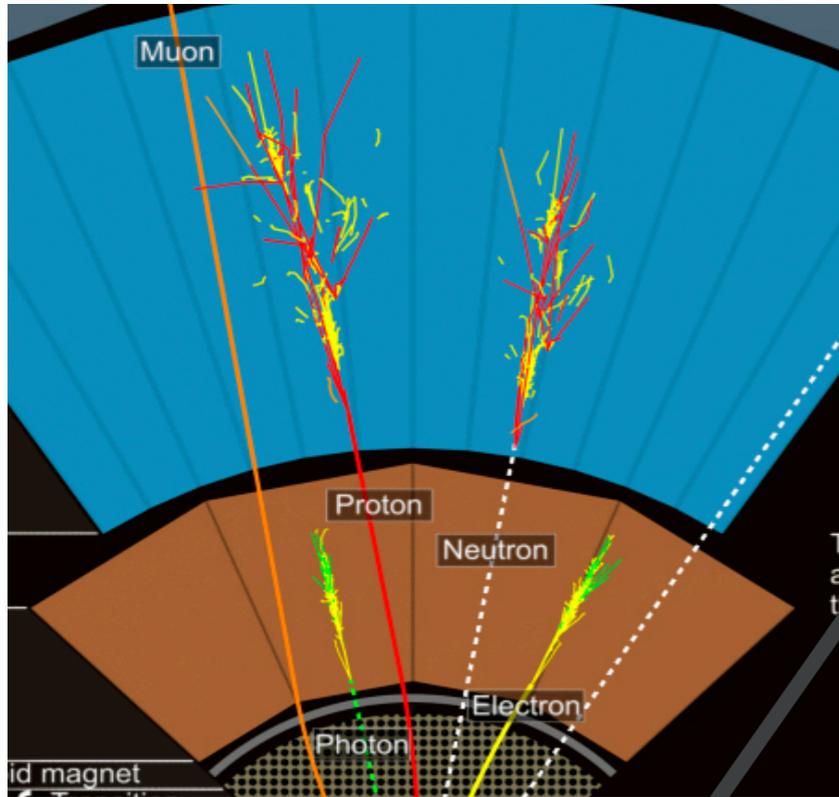


$(運動量) = 0.3 \times (磁場) \times (半径)$

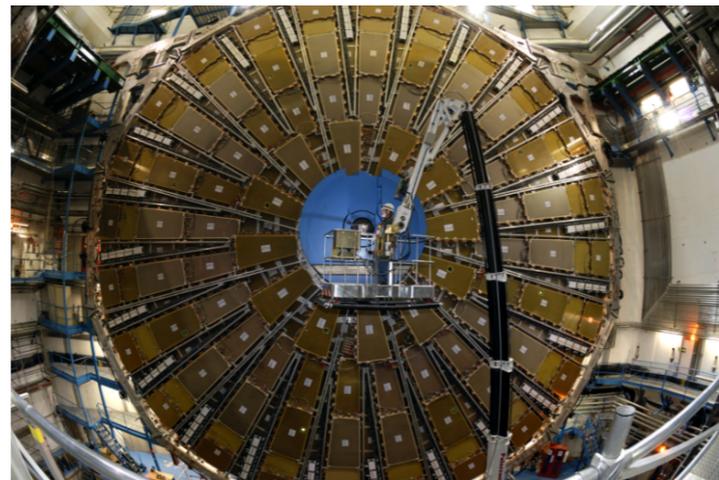
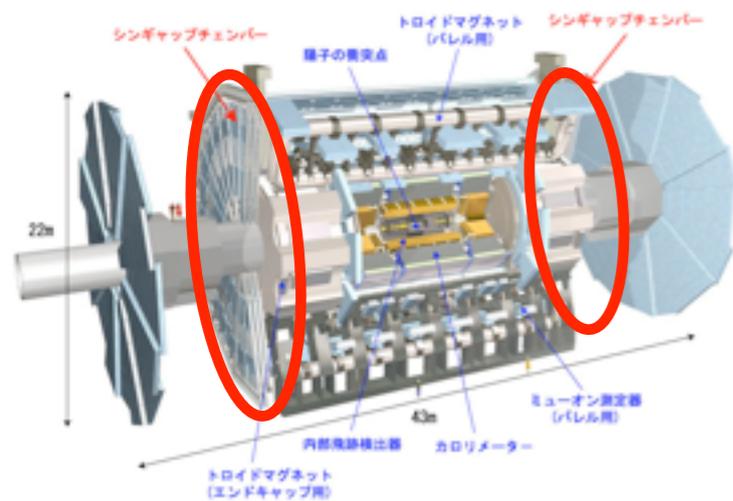


エネルギー測定器（カロリメータ）

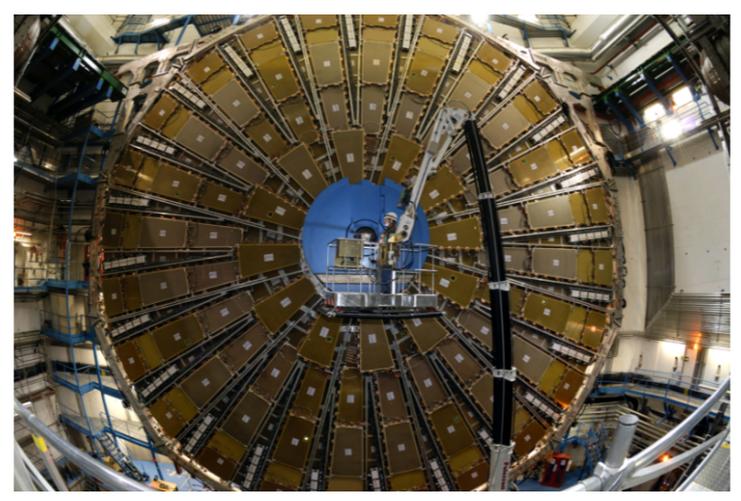
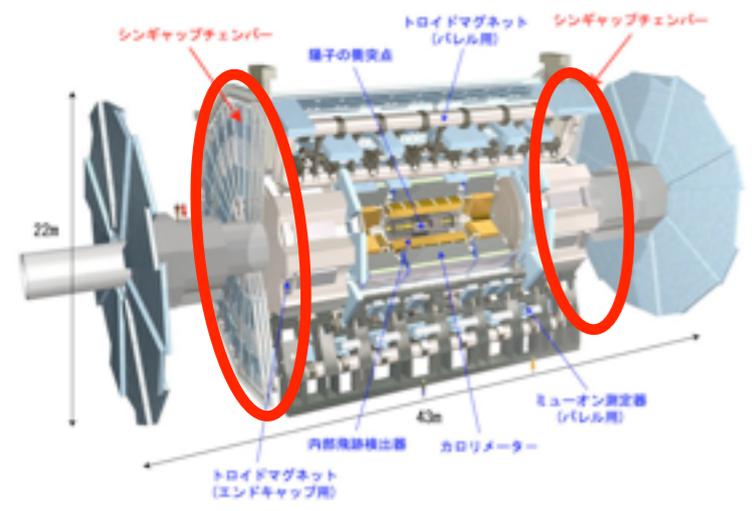
光子、電子、陽子、中性子などを物質で止める
そのとき出る光や熱を電気信号として捉える



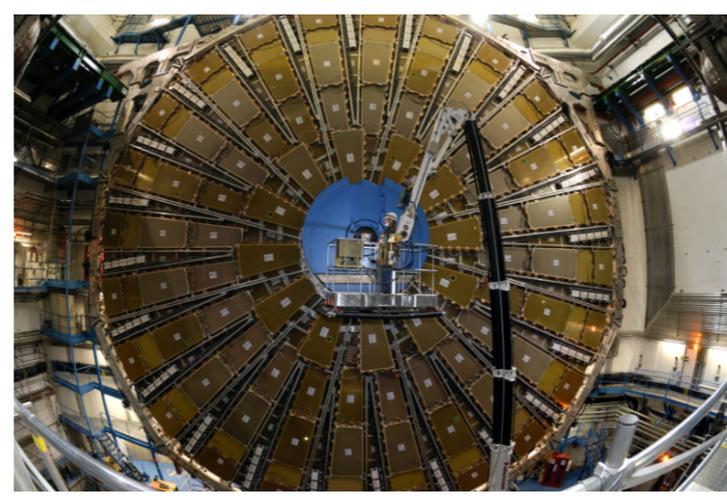
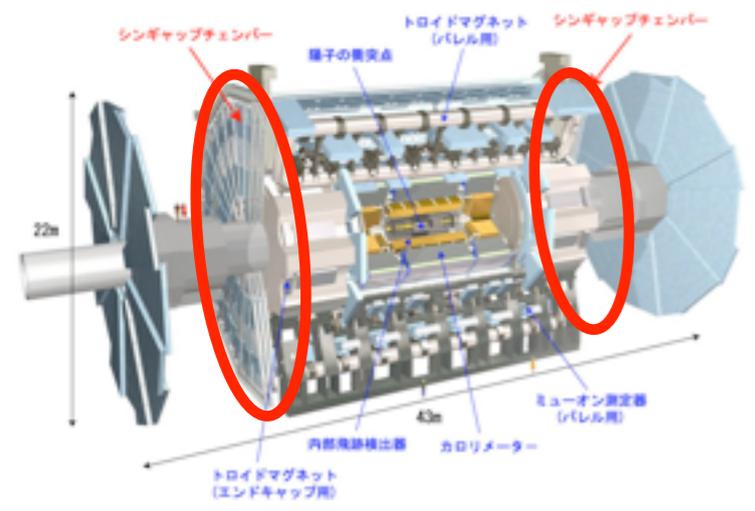
μ 粒子検出器の組み立て



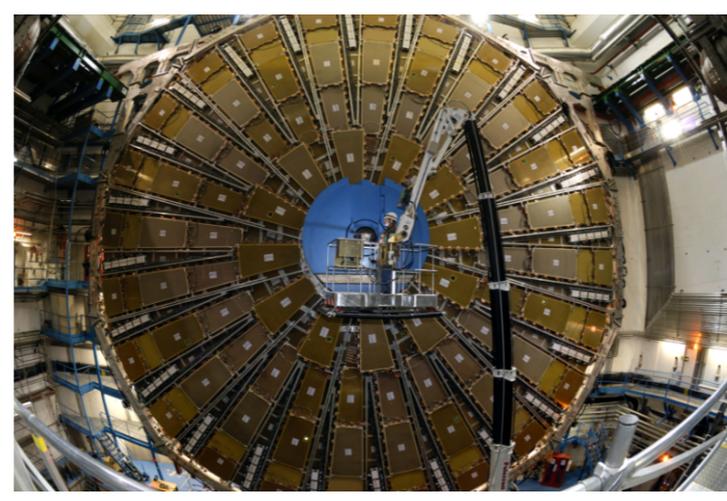
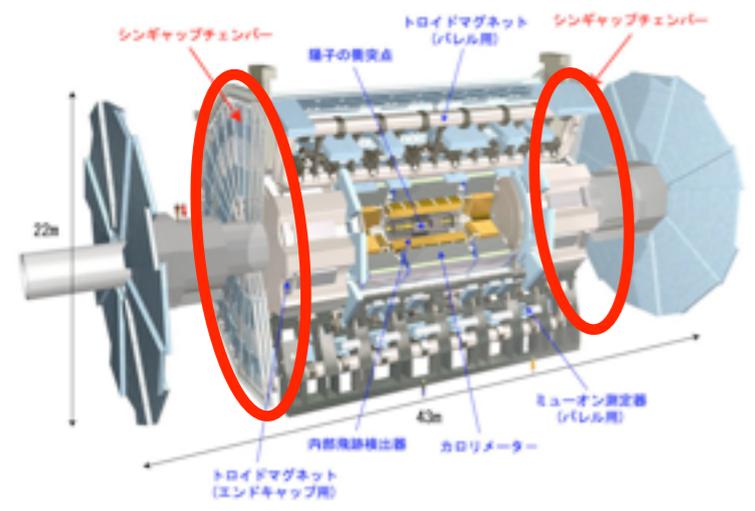
μ 粒子検出器の組み立て



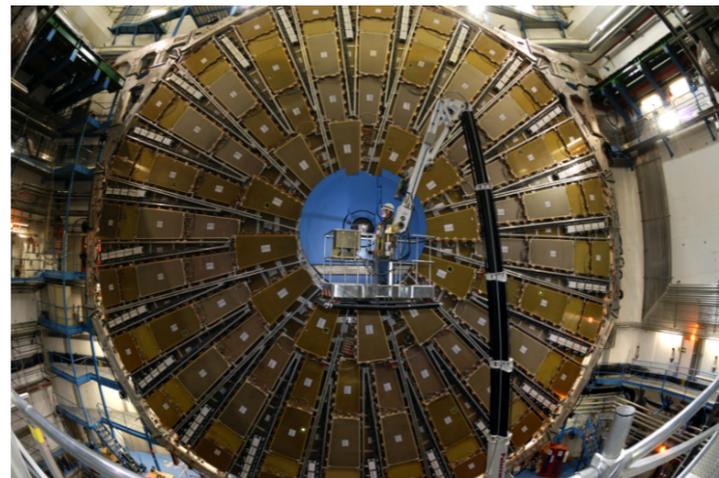
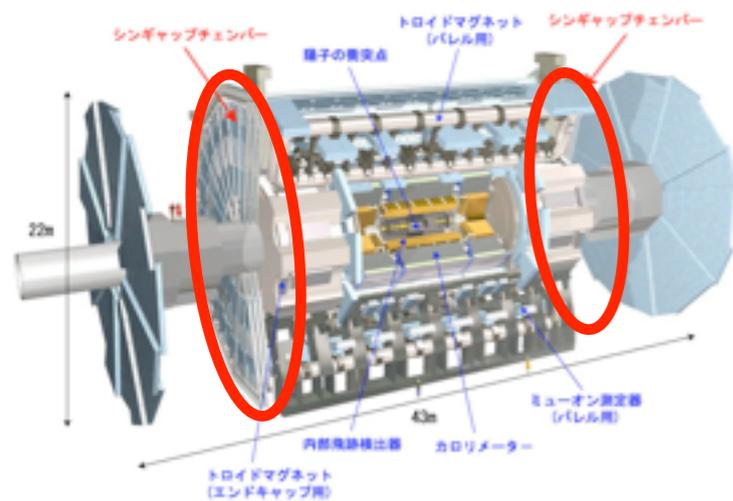
μ 粒子検出器の組み立て



μ 粒子検出器の組み立て



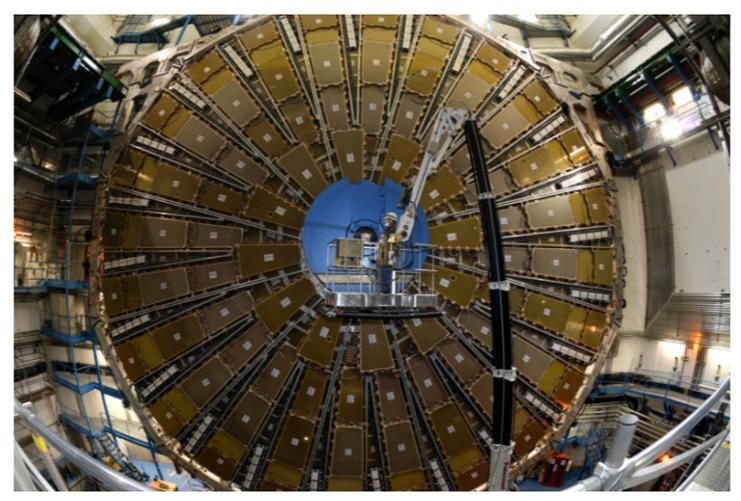
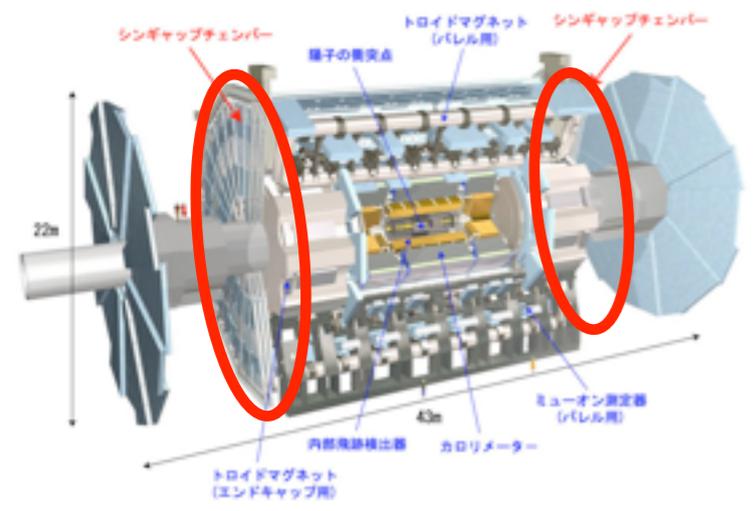
μ 粒子検出器の組み立て



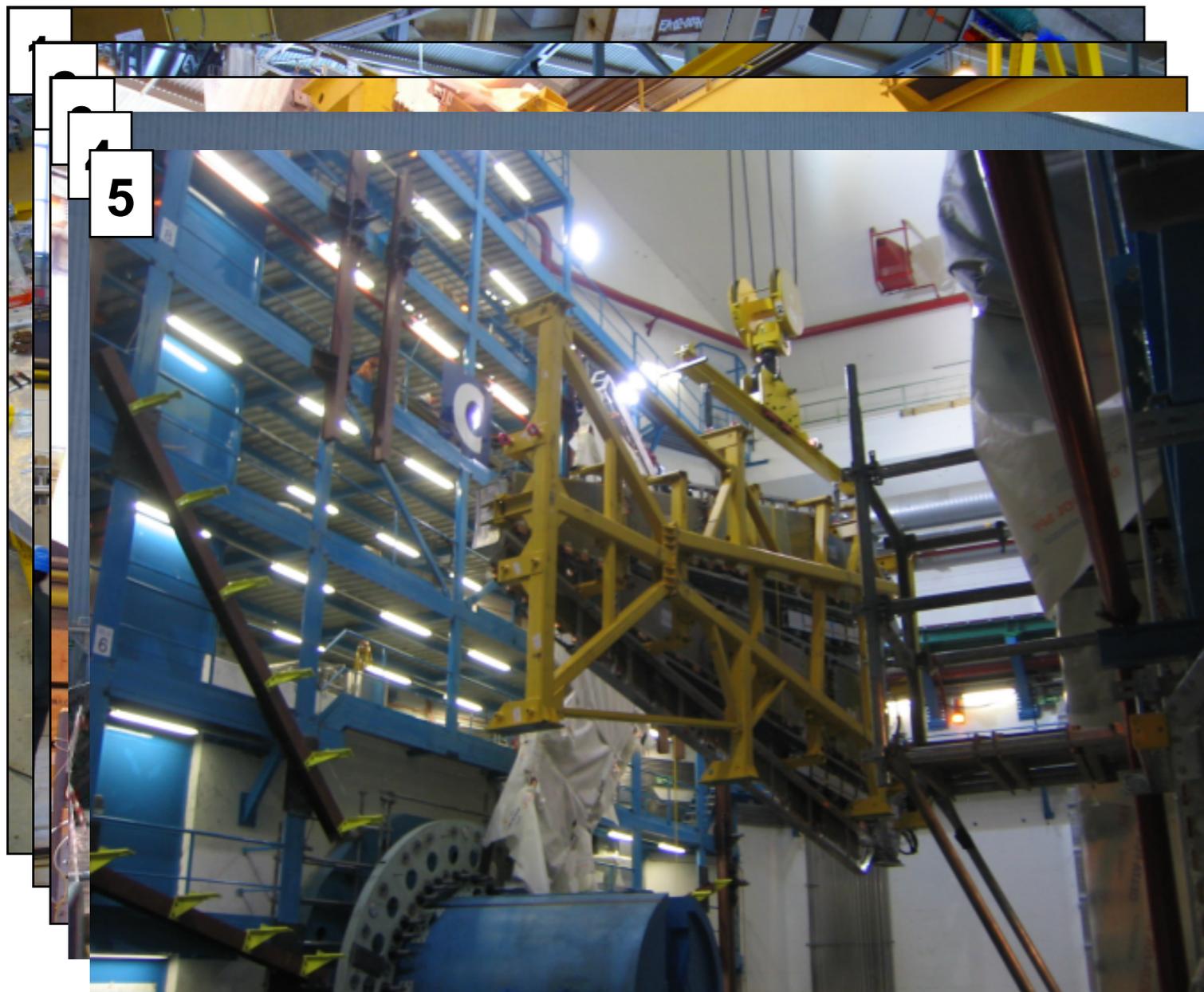
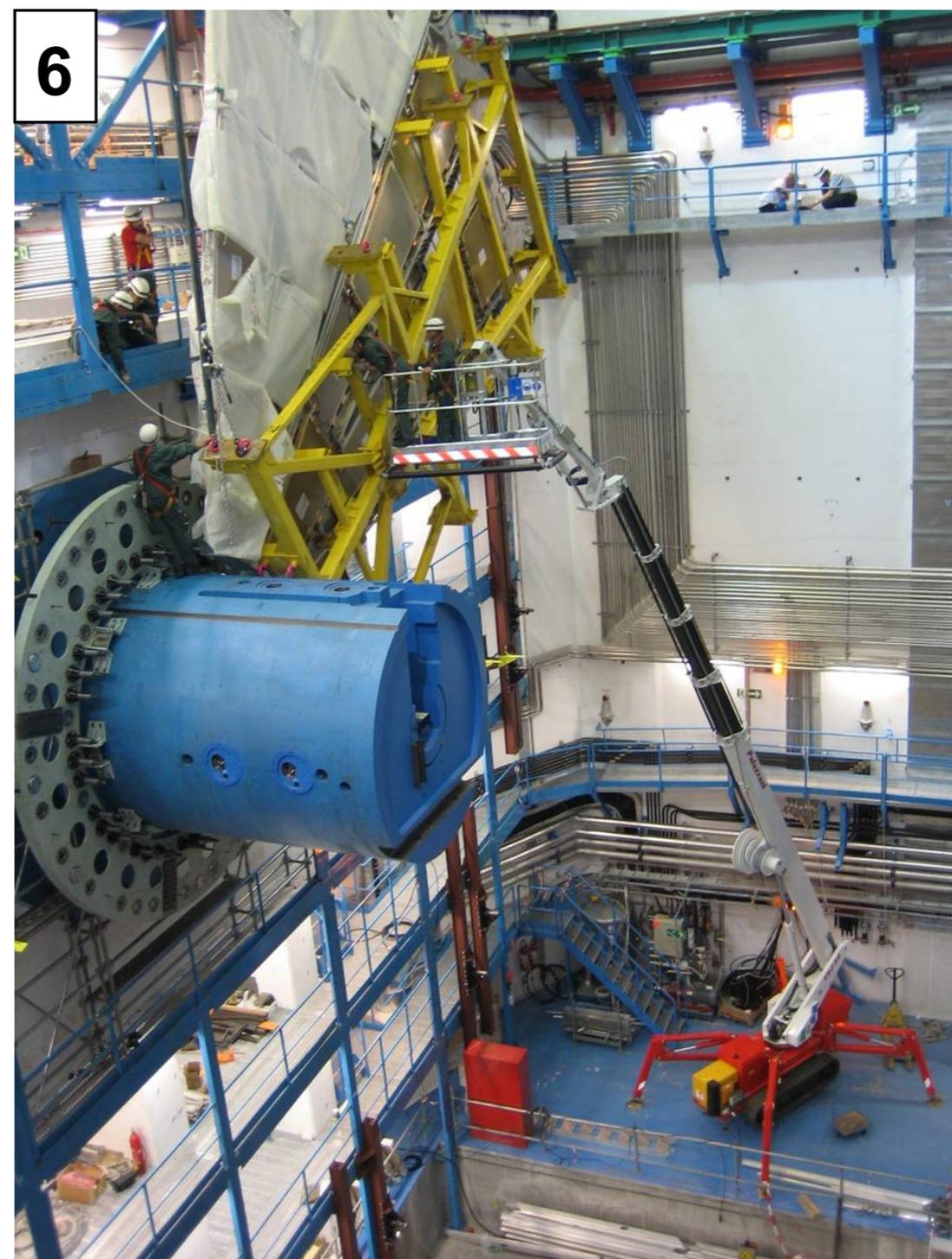
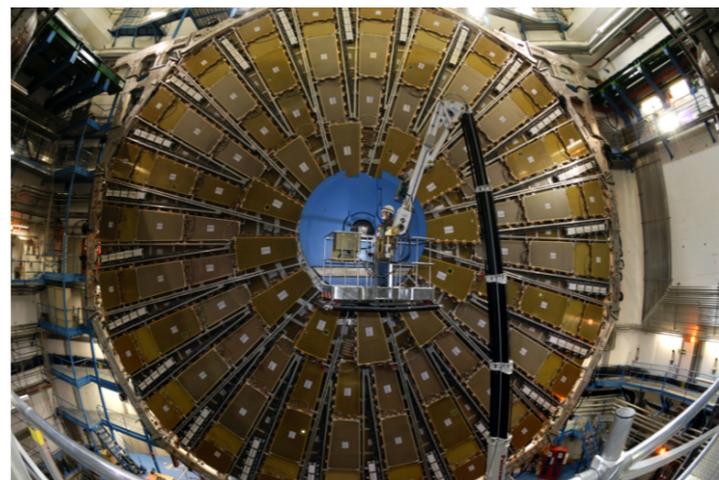
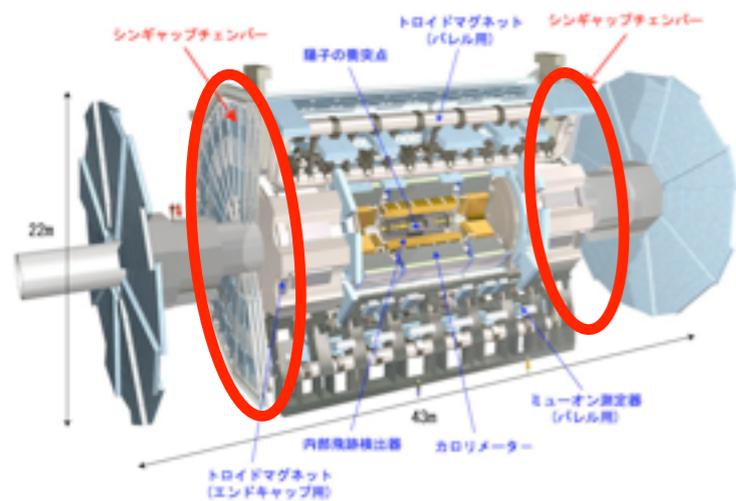
4



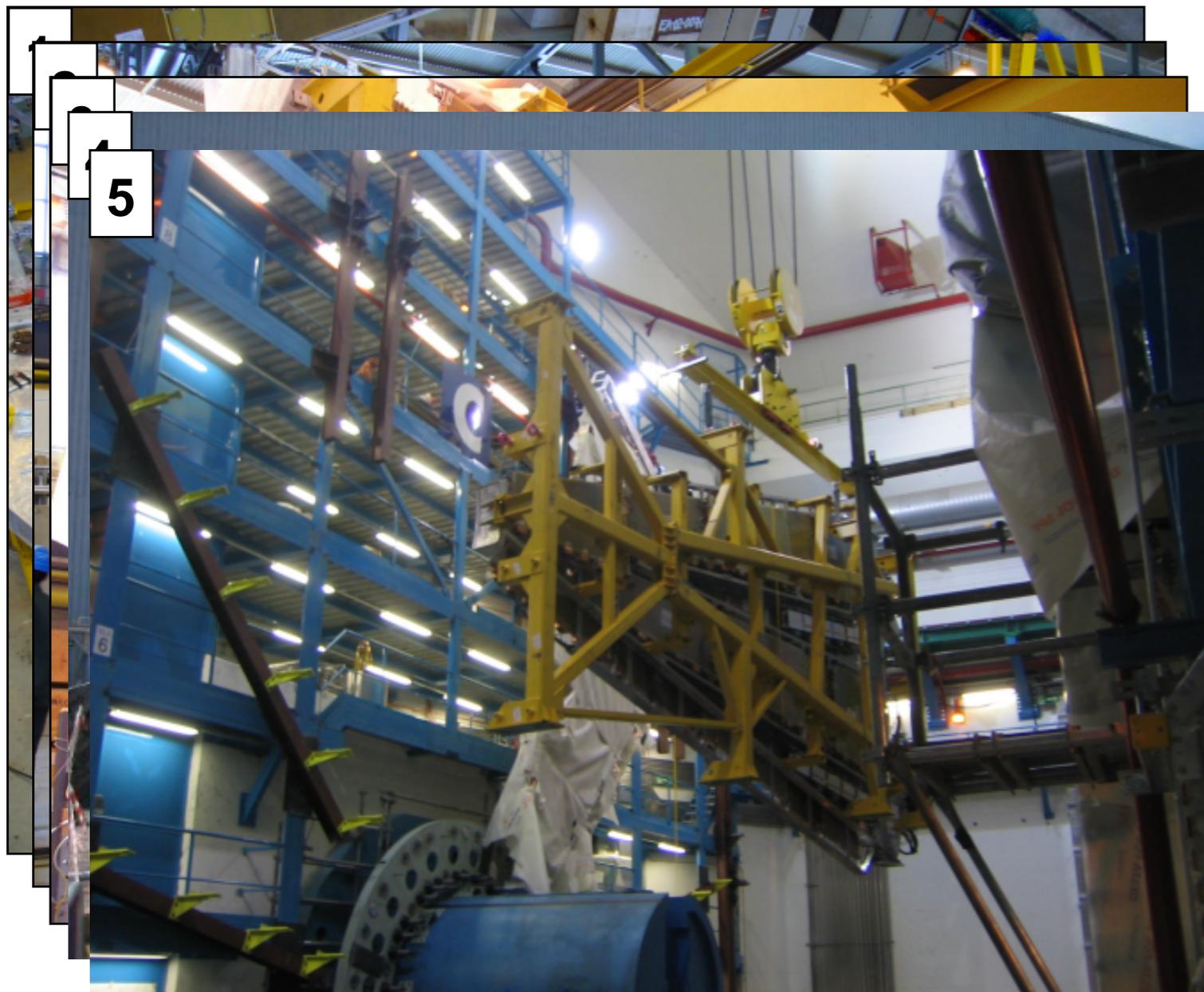
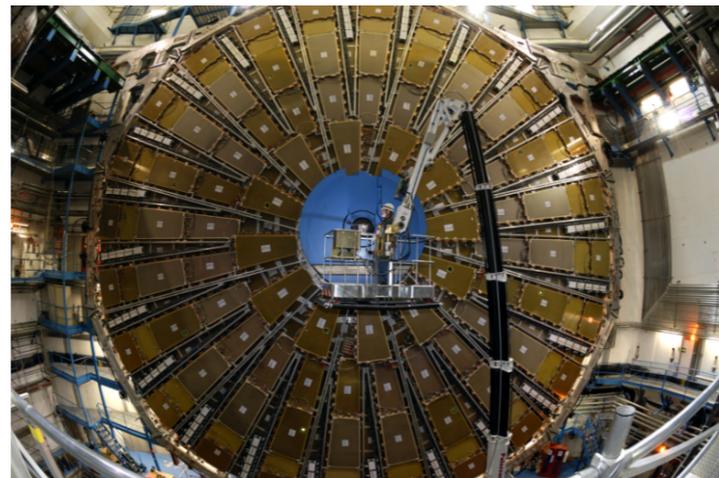
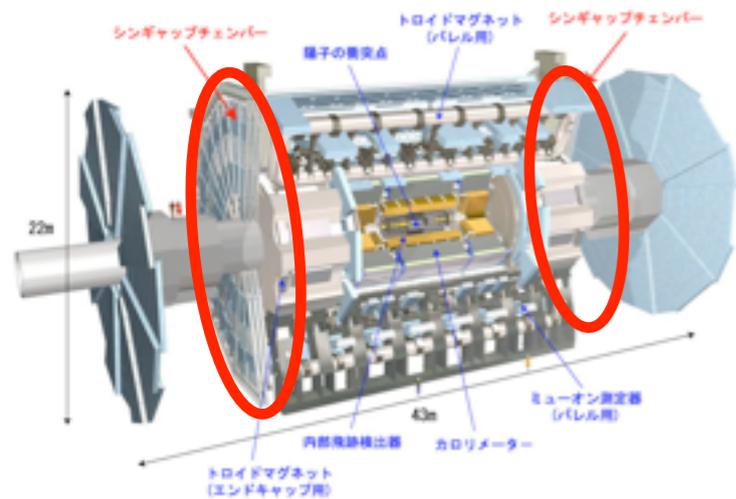
μ 粒子検出器の組み立て



μ 粒子検出器の組み立て

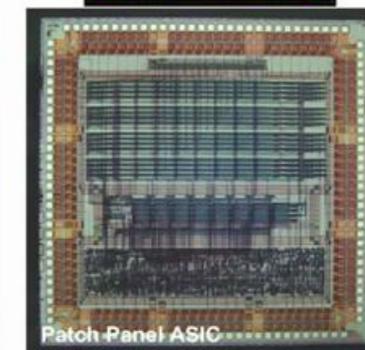
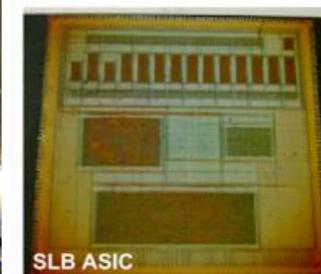
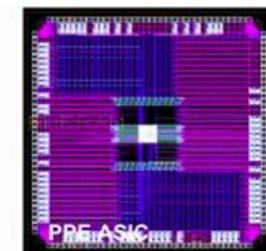
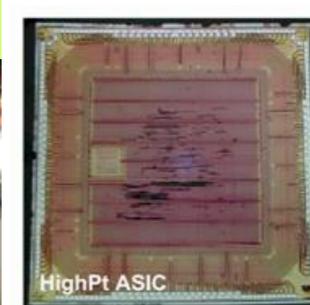
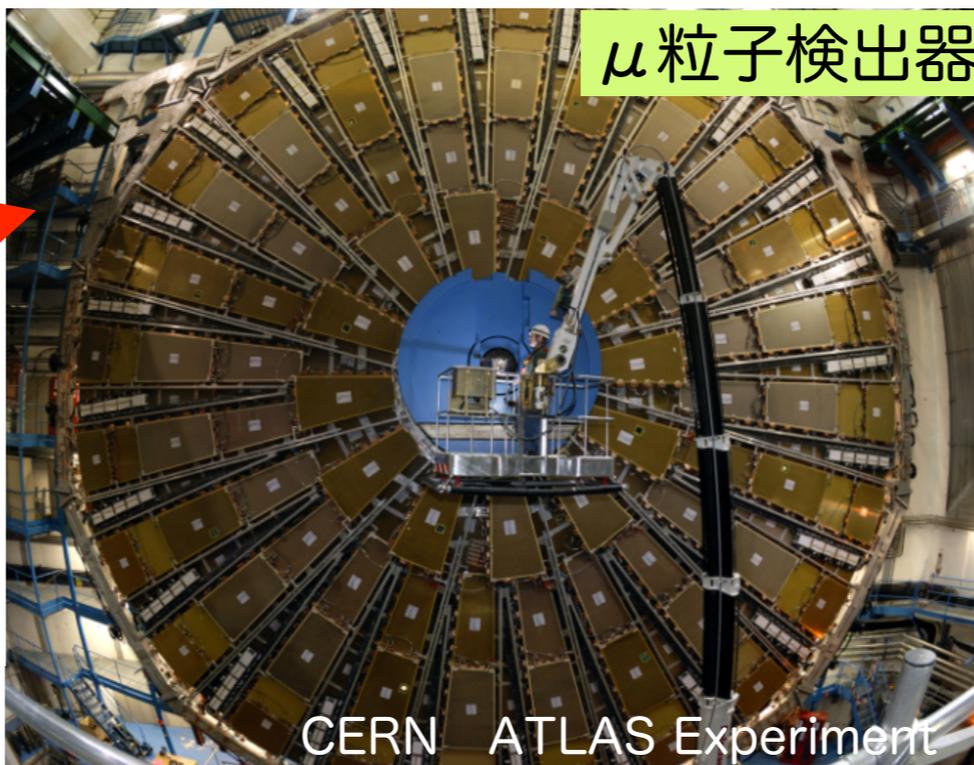
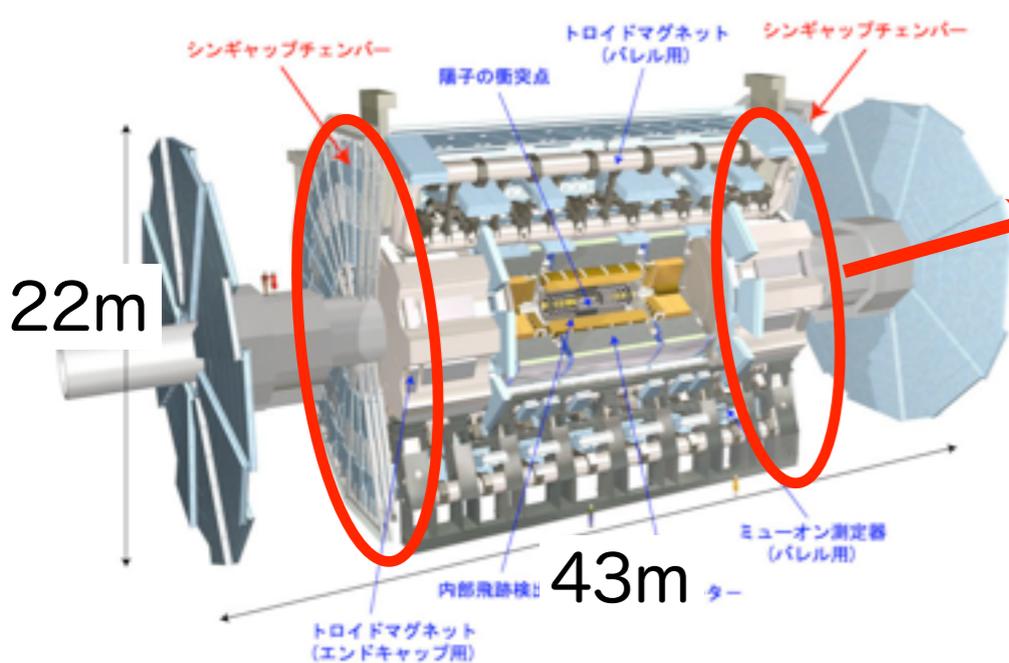


μ 粒子検出器の組み立て



検出器の建設

検出器も、回路も研究者の手作り

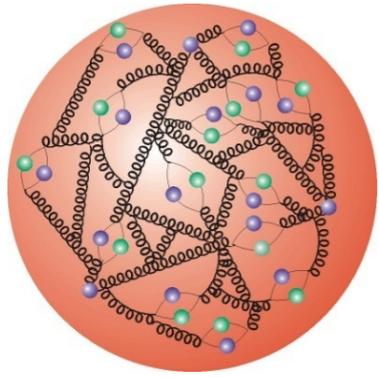


若い学生達が頑張っています！！！！

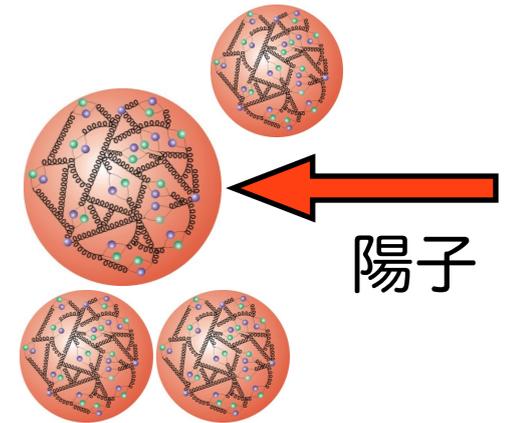
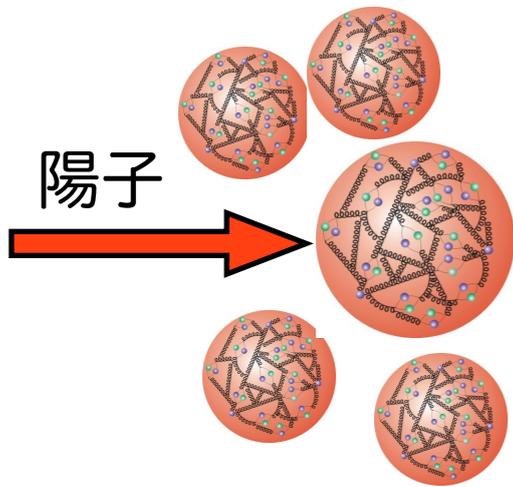


陽子・陽子衝突

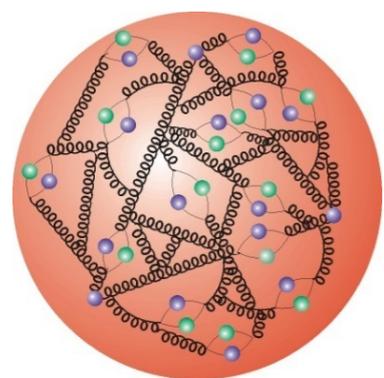
陽子・陽子衝突



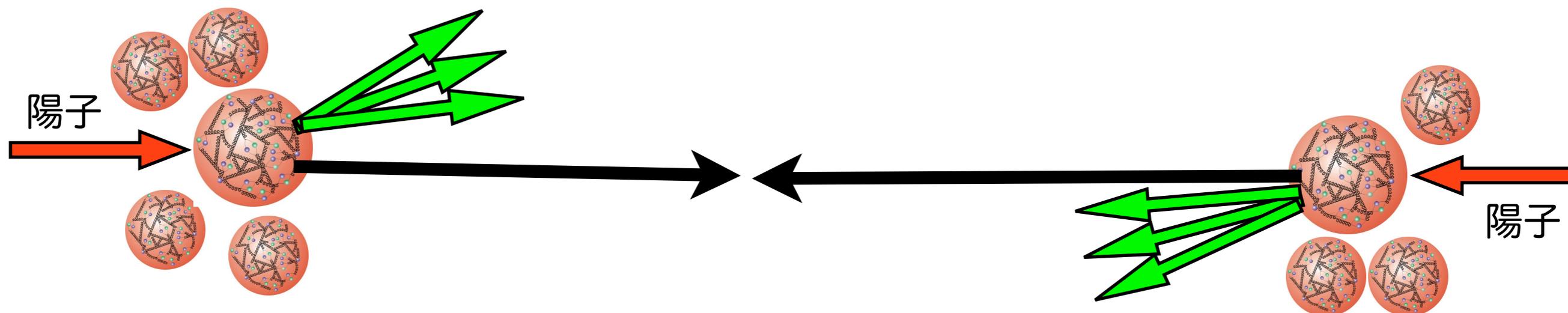
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン
一部だけが衝突による反応に関与



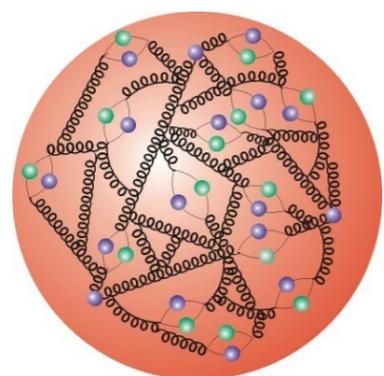
陽子・陽子衝突



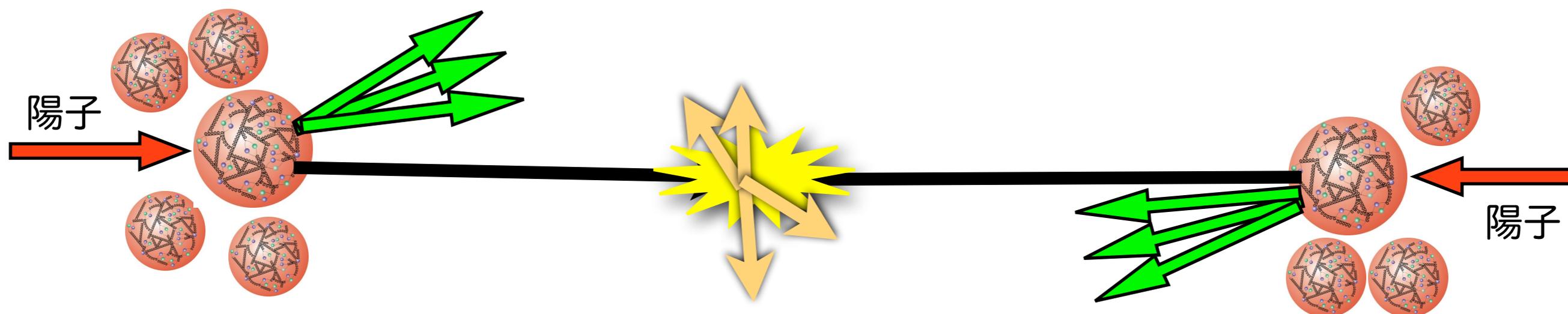
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン
一部だけが衝突による反応に関与



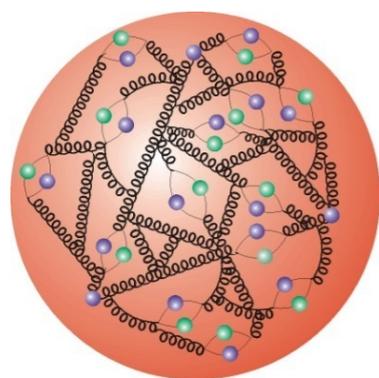
陽子・陽子衝突



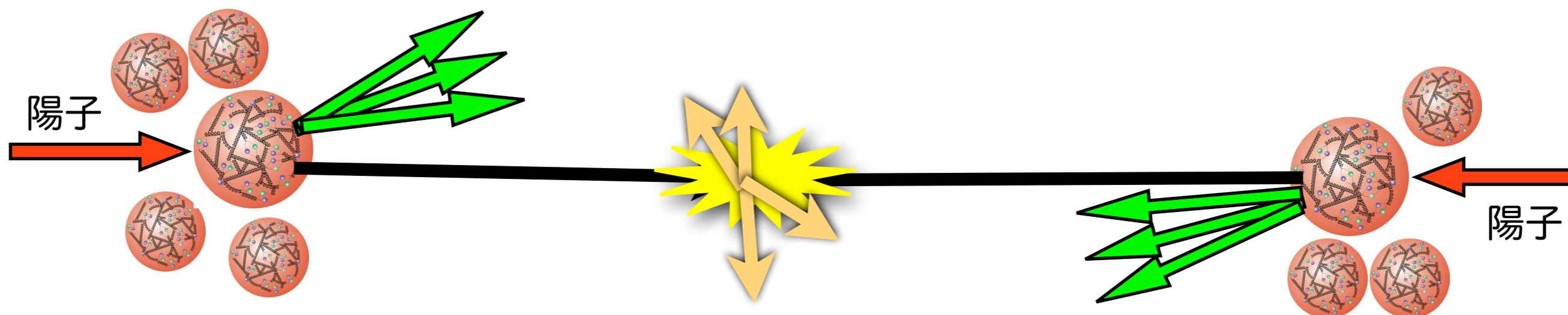
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン
一部だけが衝突による反応に関与



陽子・陽子衝突

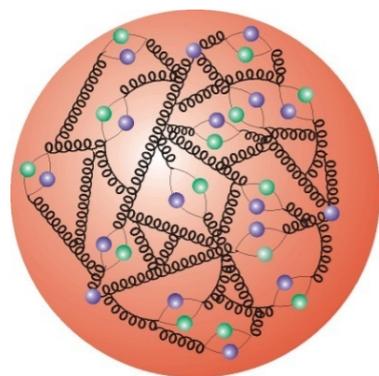


陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン
一部だけが衝突による反応に関与

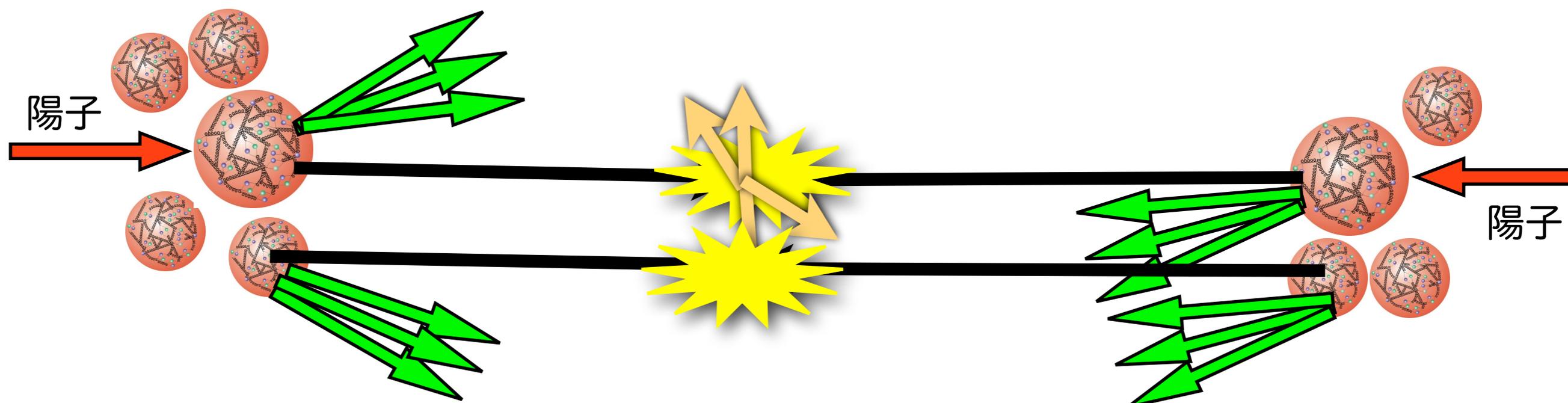


反応	反応頻度
LHC加速器で起こる任意の反応 (ほとんど、軽いクォーク、グルーオン)	毎秒 8億回
ヒッグス粒子生成	100秒間に1回

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

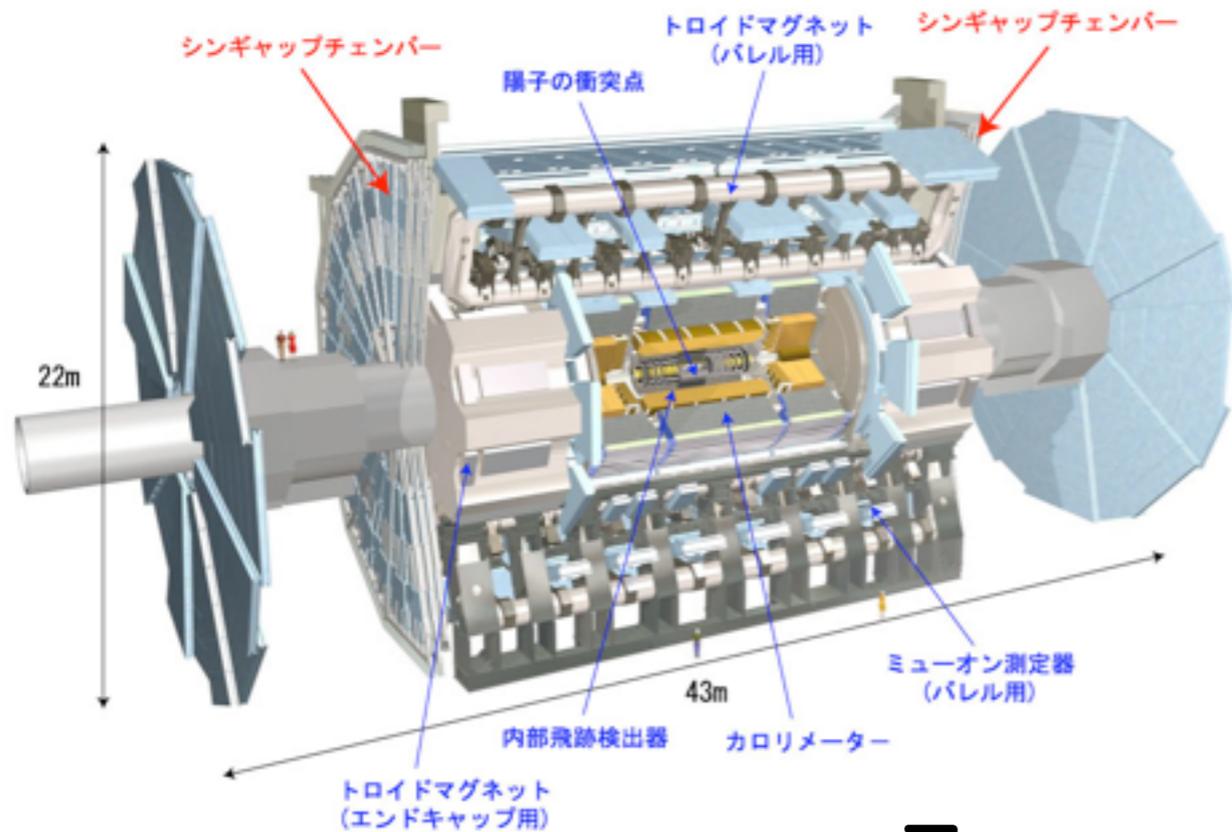


他の陽子の反応も同時多発

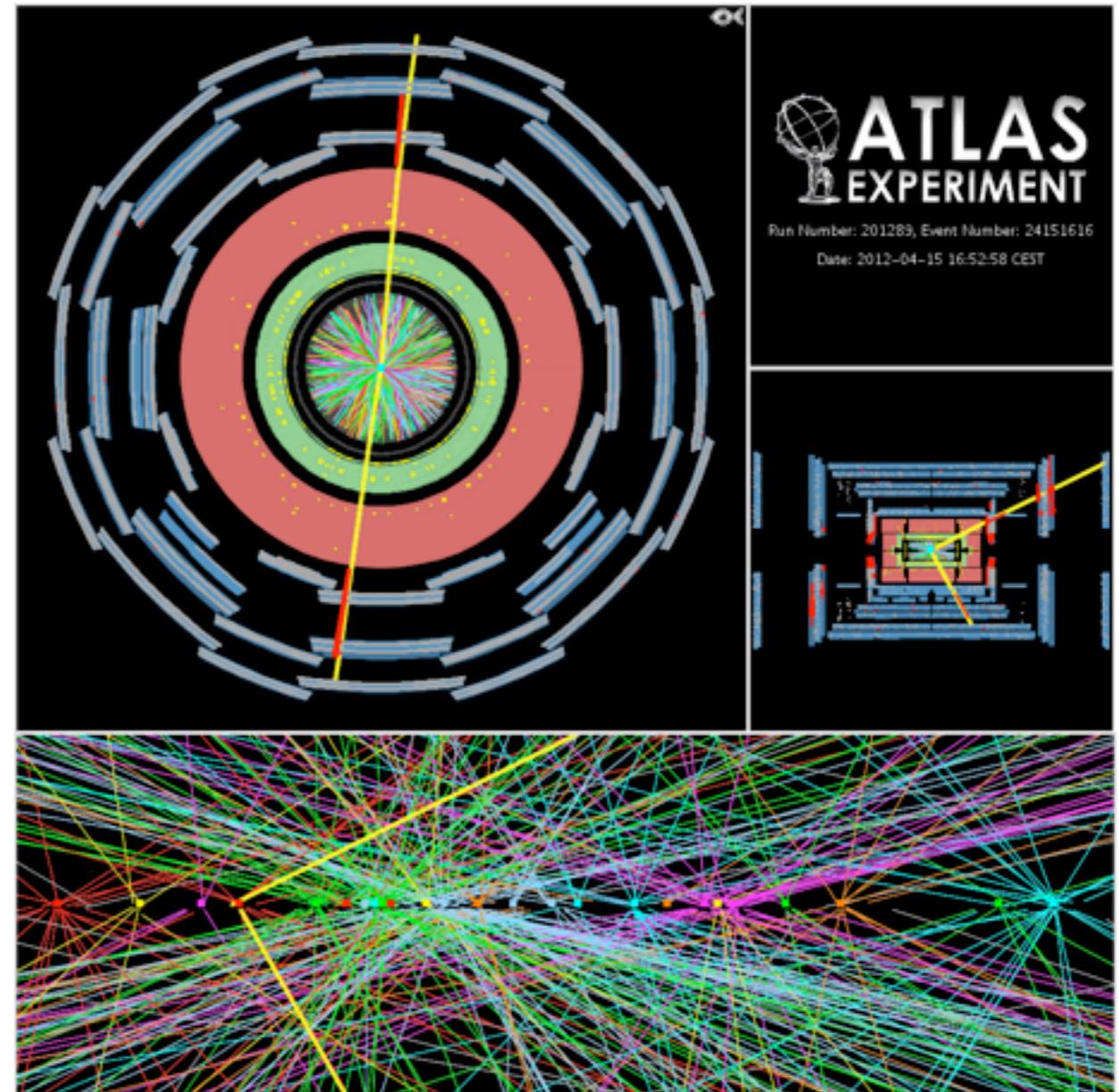
反応	反応頻度
LHC加速器で起こる任意の反応 (ほとんど、軽いクォーク、グルーオン)	毎秒 8億回
ヒッグス粒子生成	100秒間に1回

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



$$Z \rightarrow \mu^+ \mu^-$$



新粒子の見つけ方：

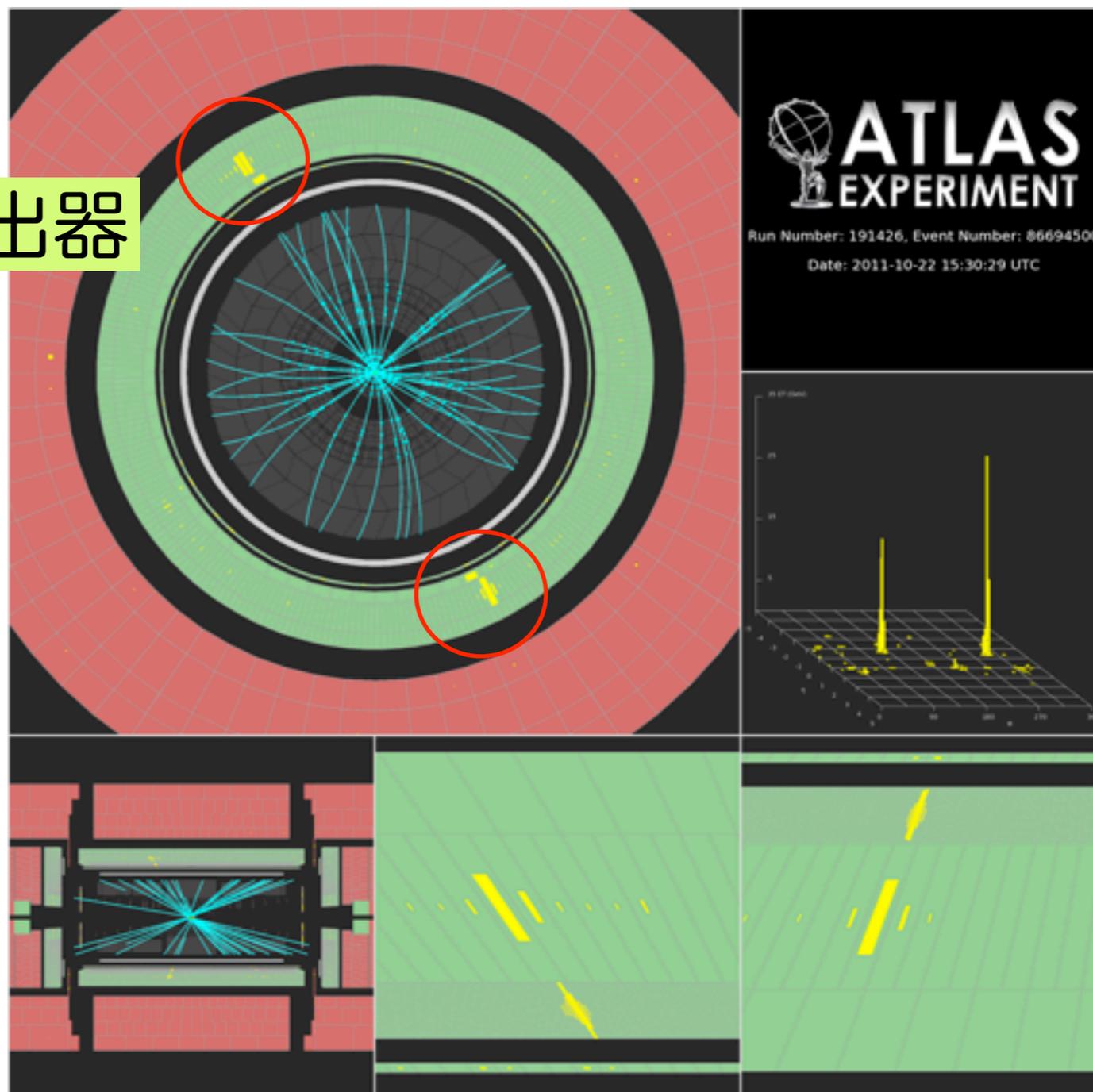
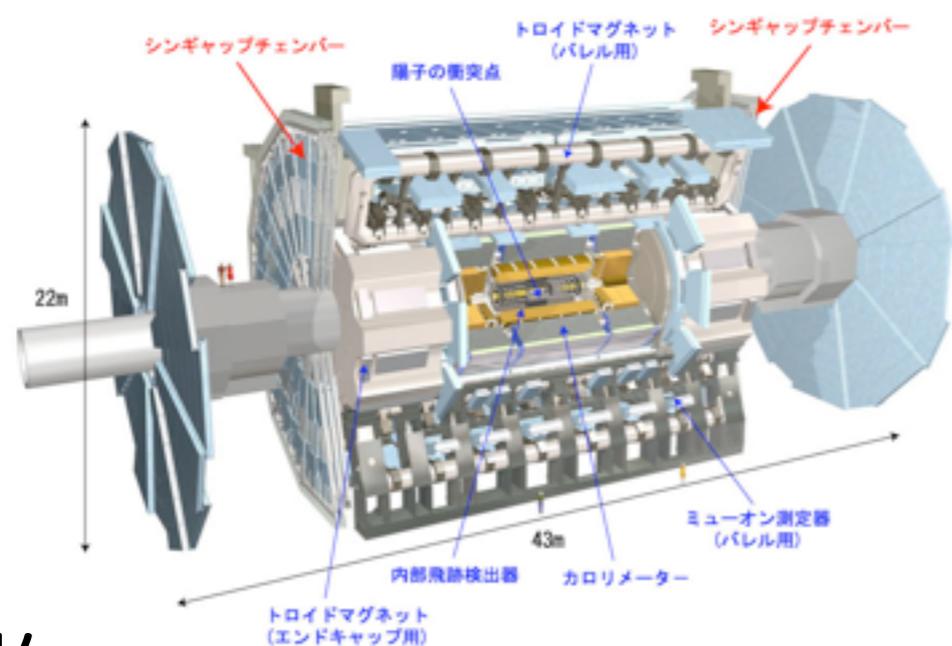
陽子衝突から、

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

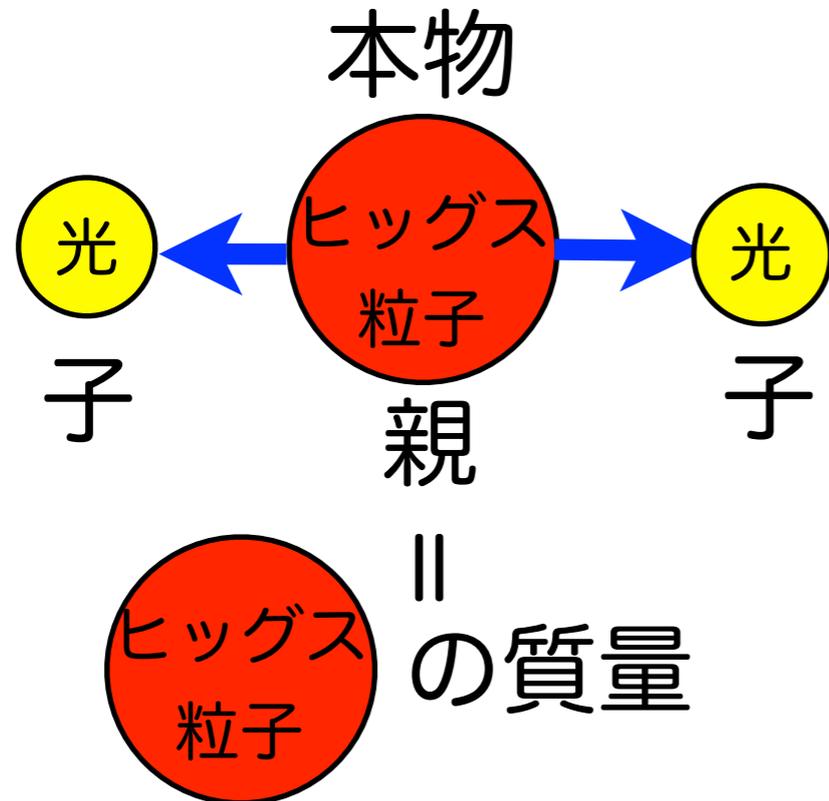
親と子の粒子の関係

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

質量の復元

親と子の粒子の関係

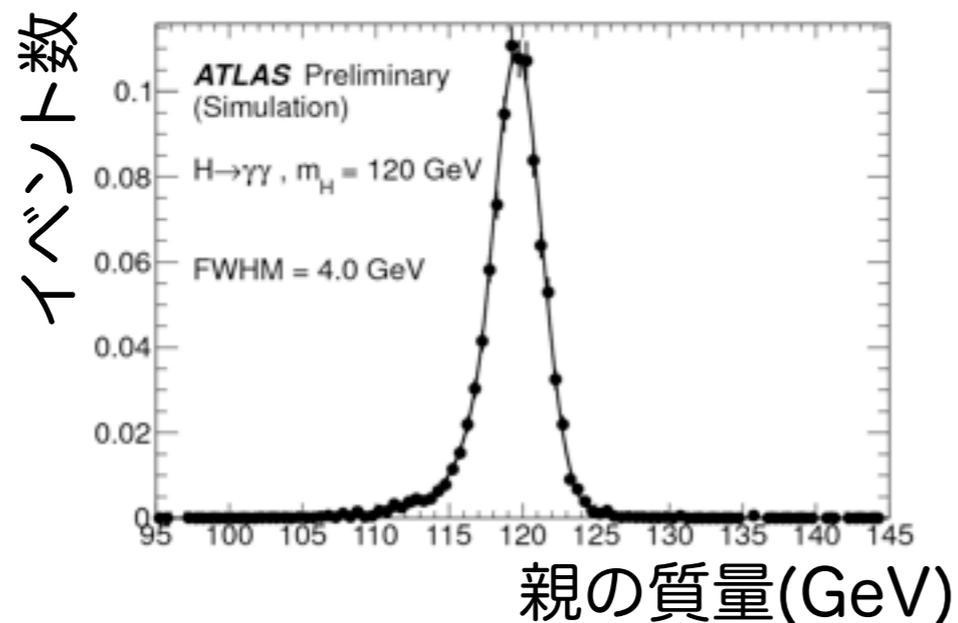
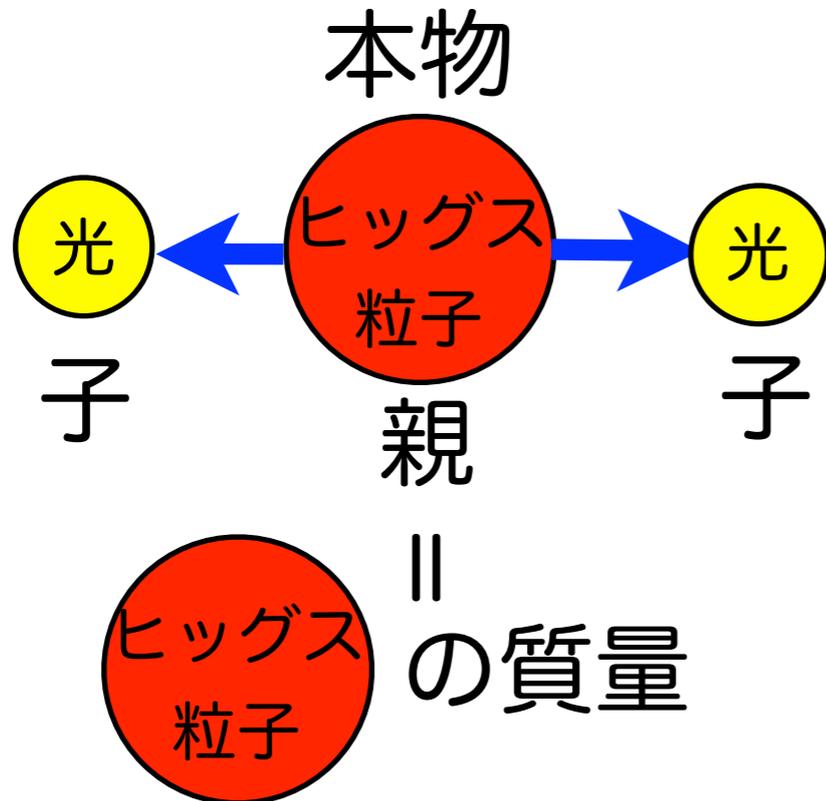
$$(親の質量)^2 = (子のエネルギー和)^2 - (子の運動量和)^2$$



質量の復元

親と子の粒子の関係

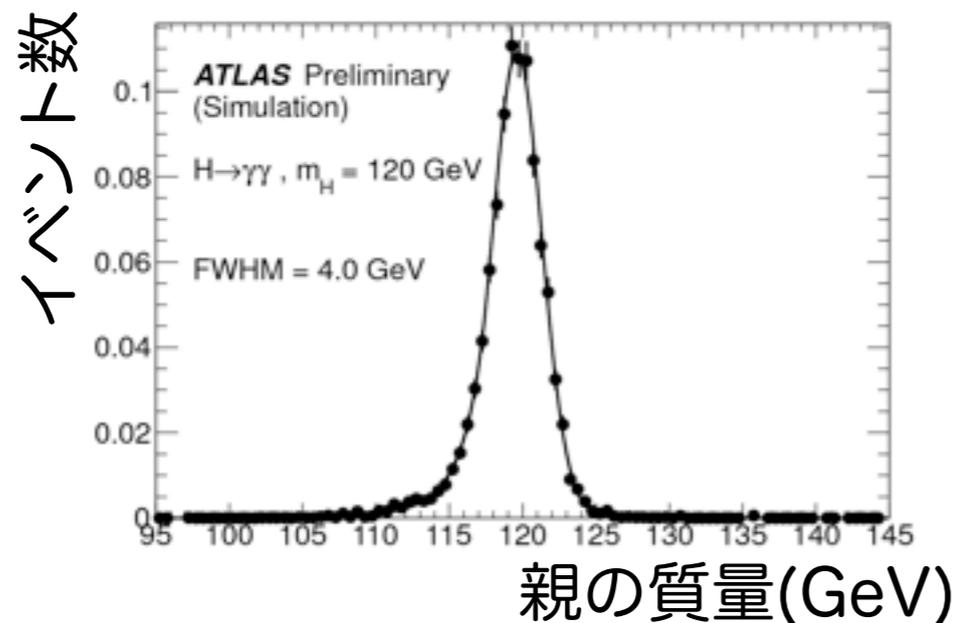
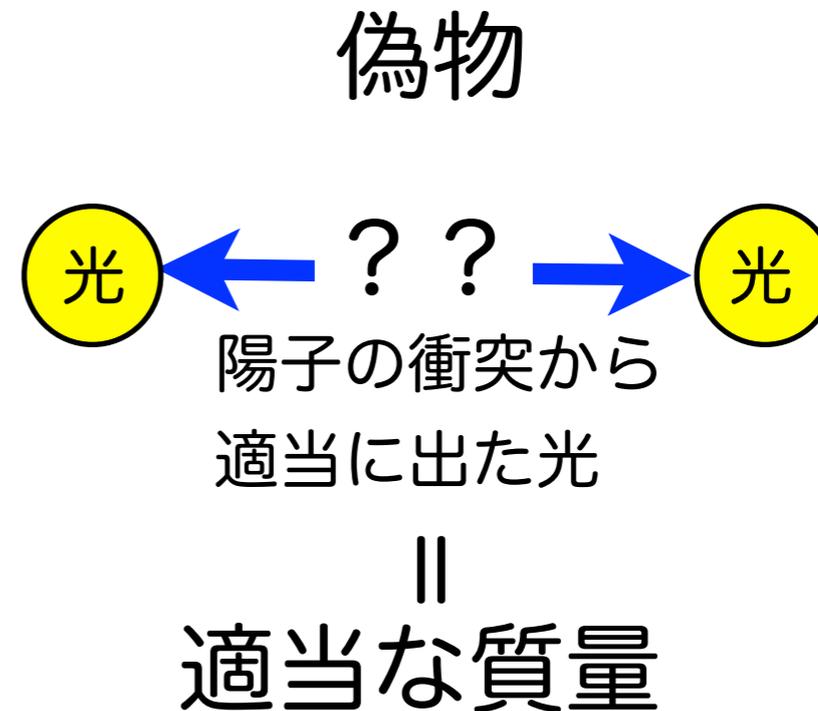
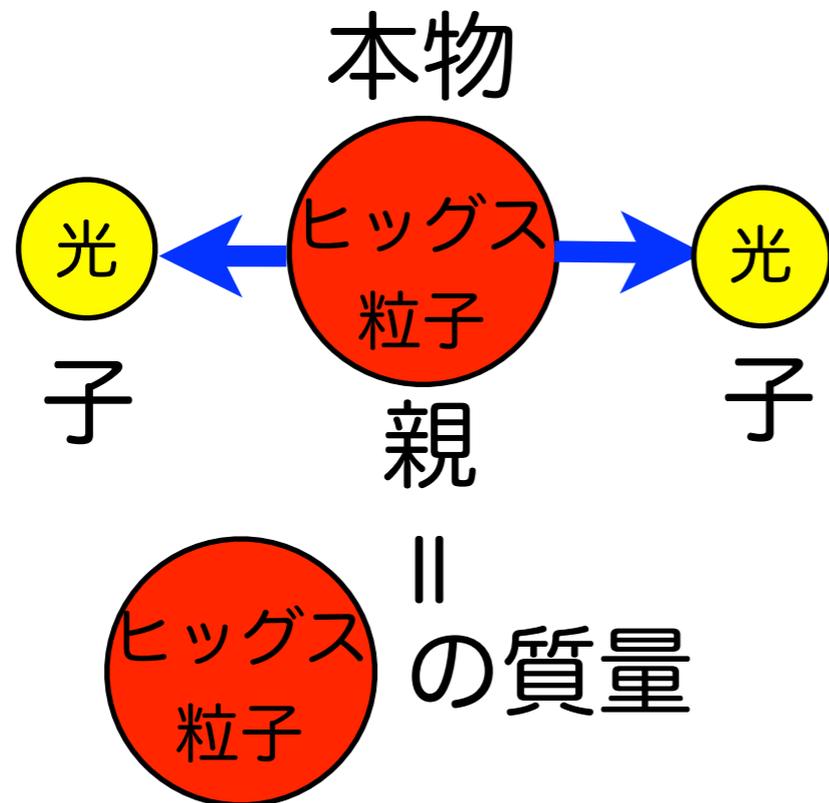
$$(親の質量)^2 = (子のエネルギー和)^2 - (子の運動量和)^2$$



質量の復元

親と子の粒子の関係

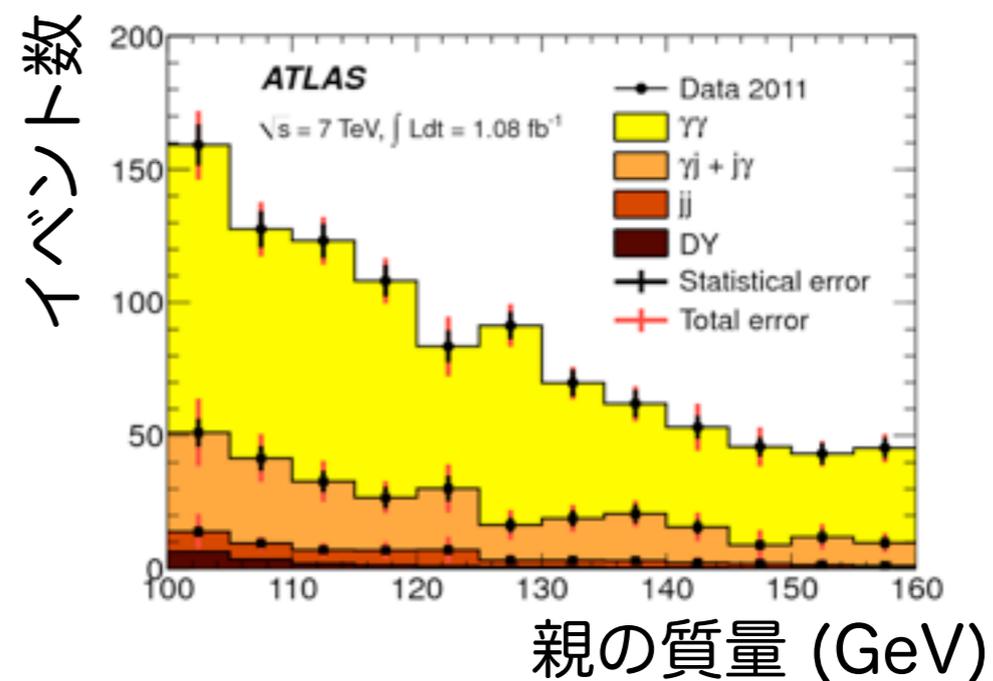
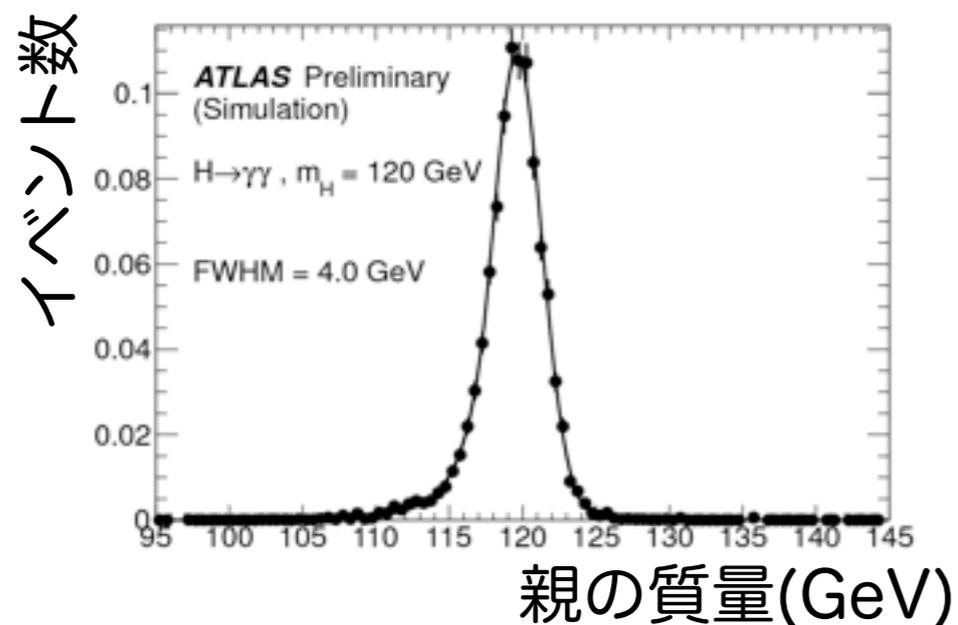
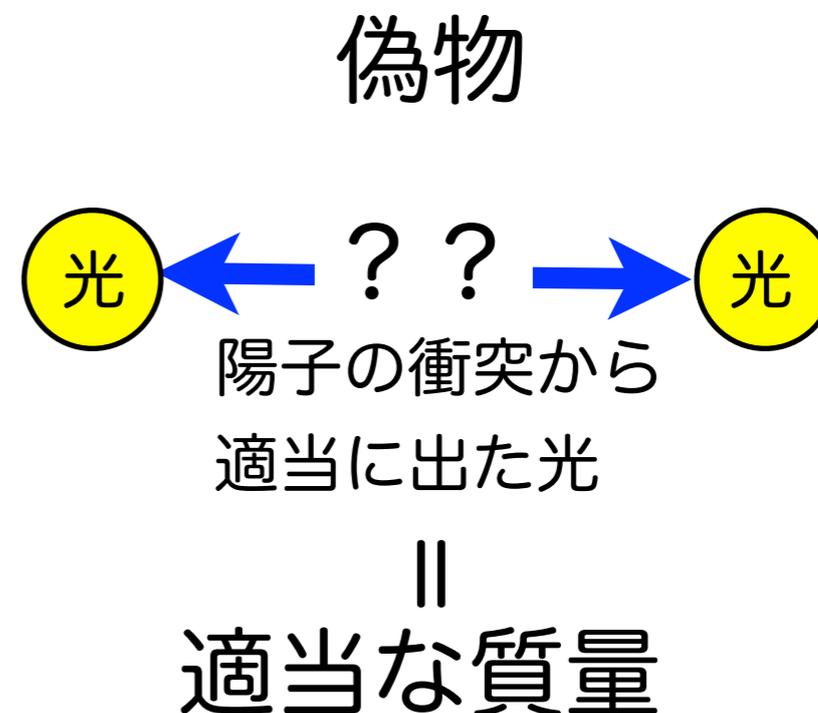
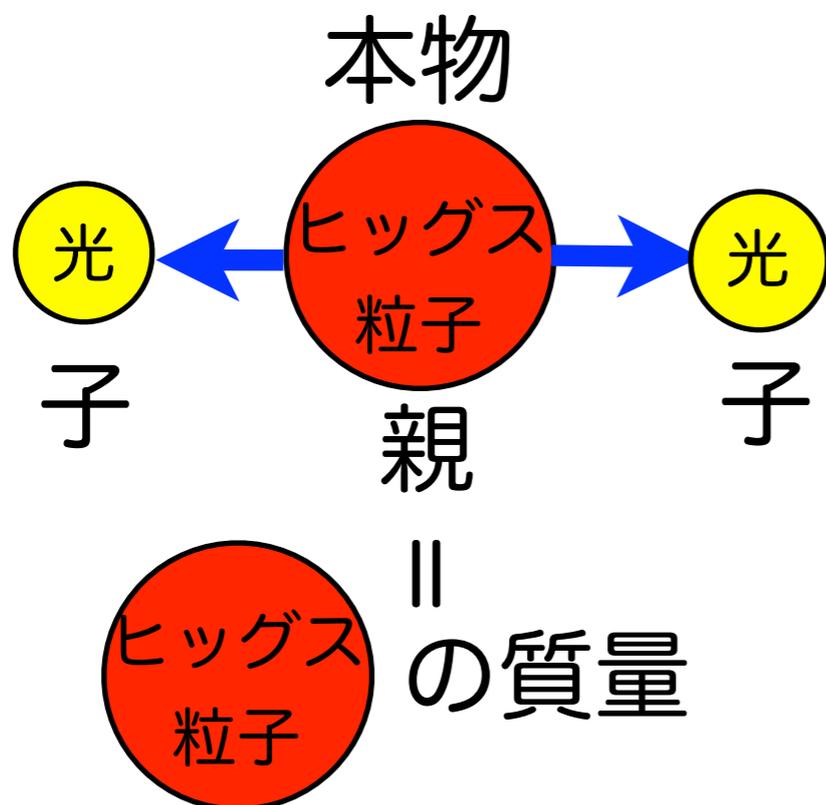
$$(親の質量)^2 = (子のエネルギー和)^2 - (子の運動量和)^2$$



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*

(親の質量

光子

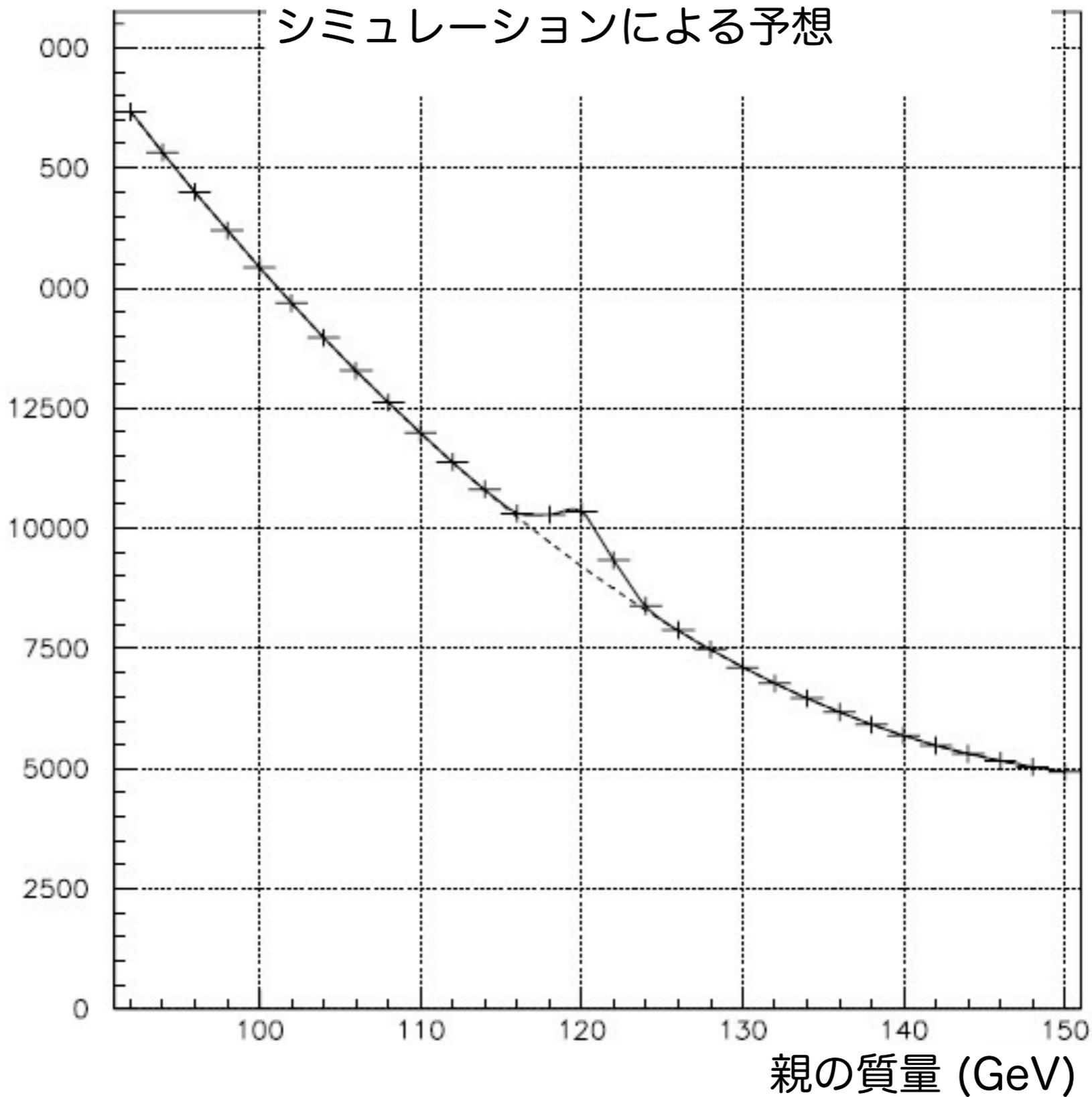
イベント数

イベント数

0.1
0.08
0.06
0.04
0.02
95

$M_H = 120 \text{ GeV}$

シミュレーションによる予想



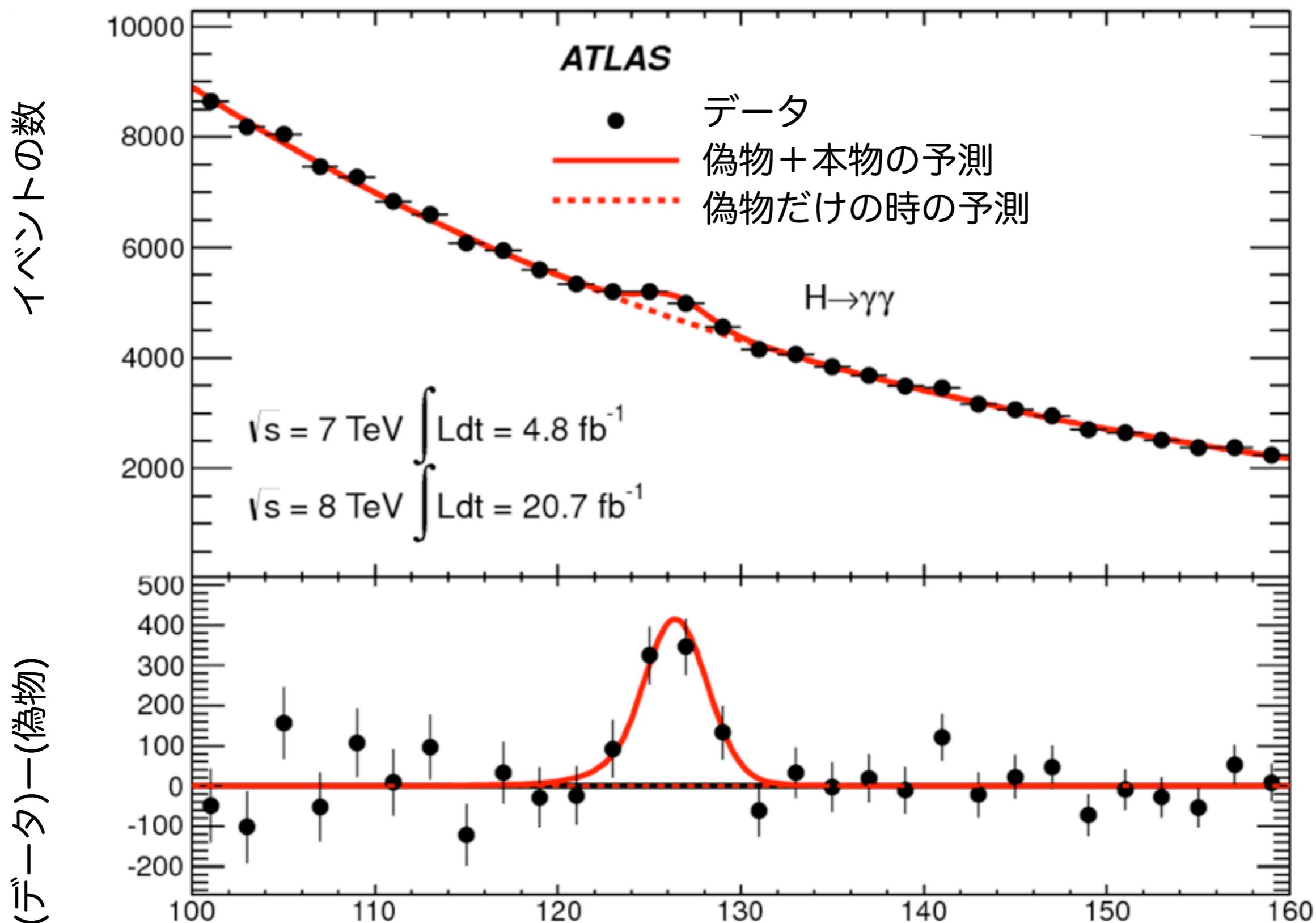
和)²

光子

error

160 (GeV)

ヒッグス粒子があることを確かめた

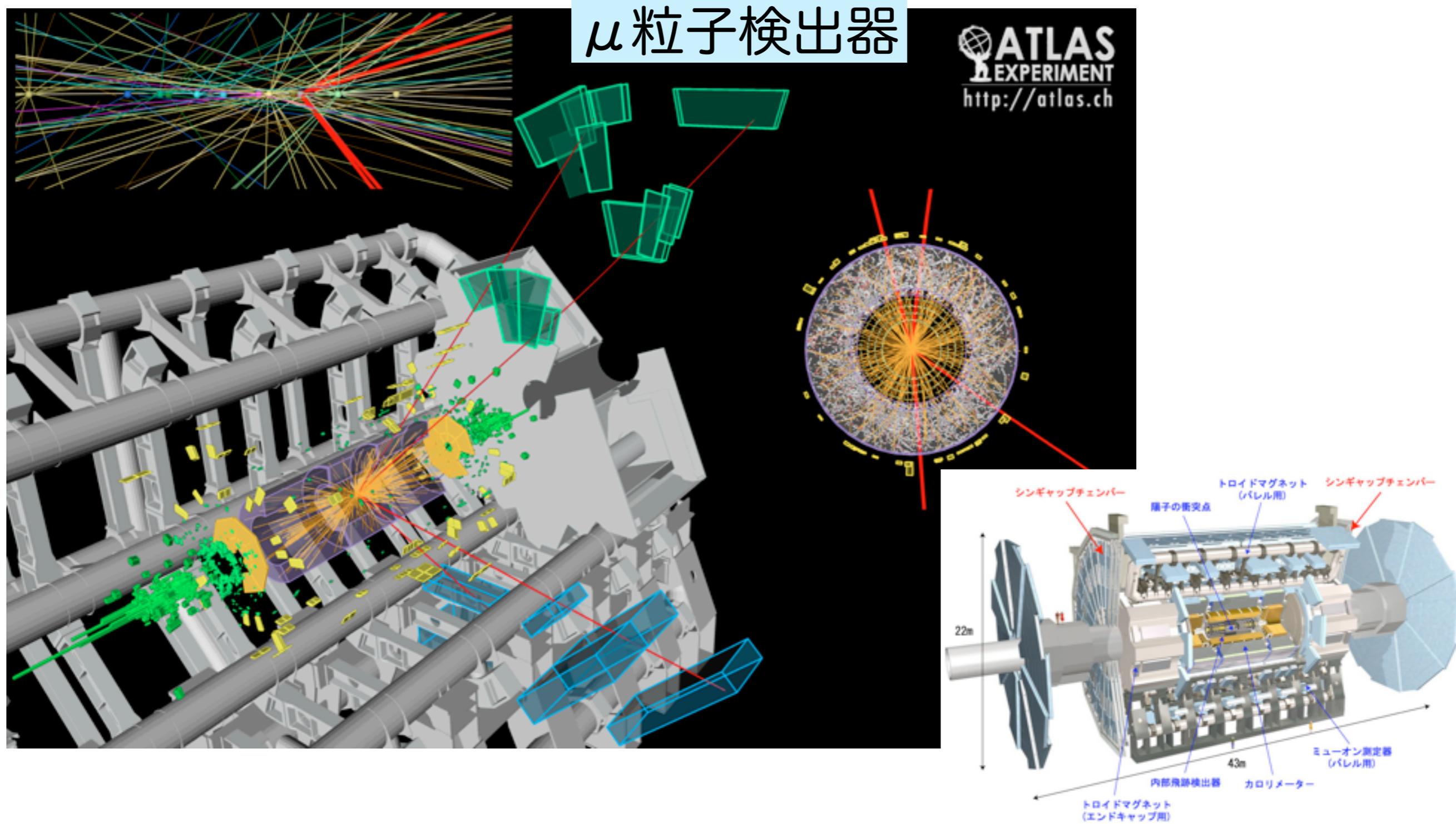


2つの光子から計算した親の質量(GeV)

陽子 + 陽子 \rightarrow H \rightarrow ZZ

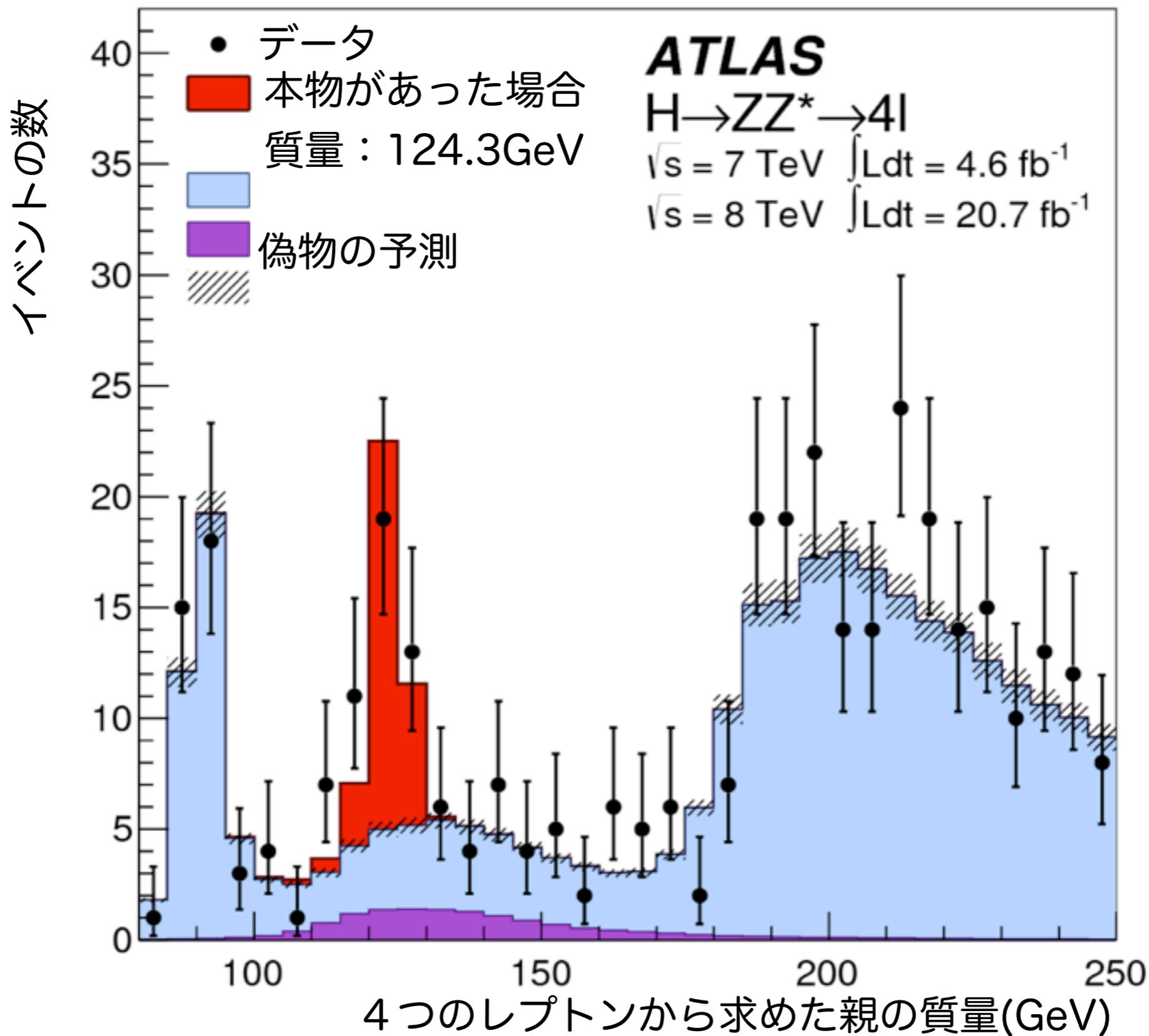
陽子陽子 \rightarrow H \rightarrow ZZ \rightarrow $\mu\mu\mu\mu$

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



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



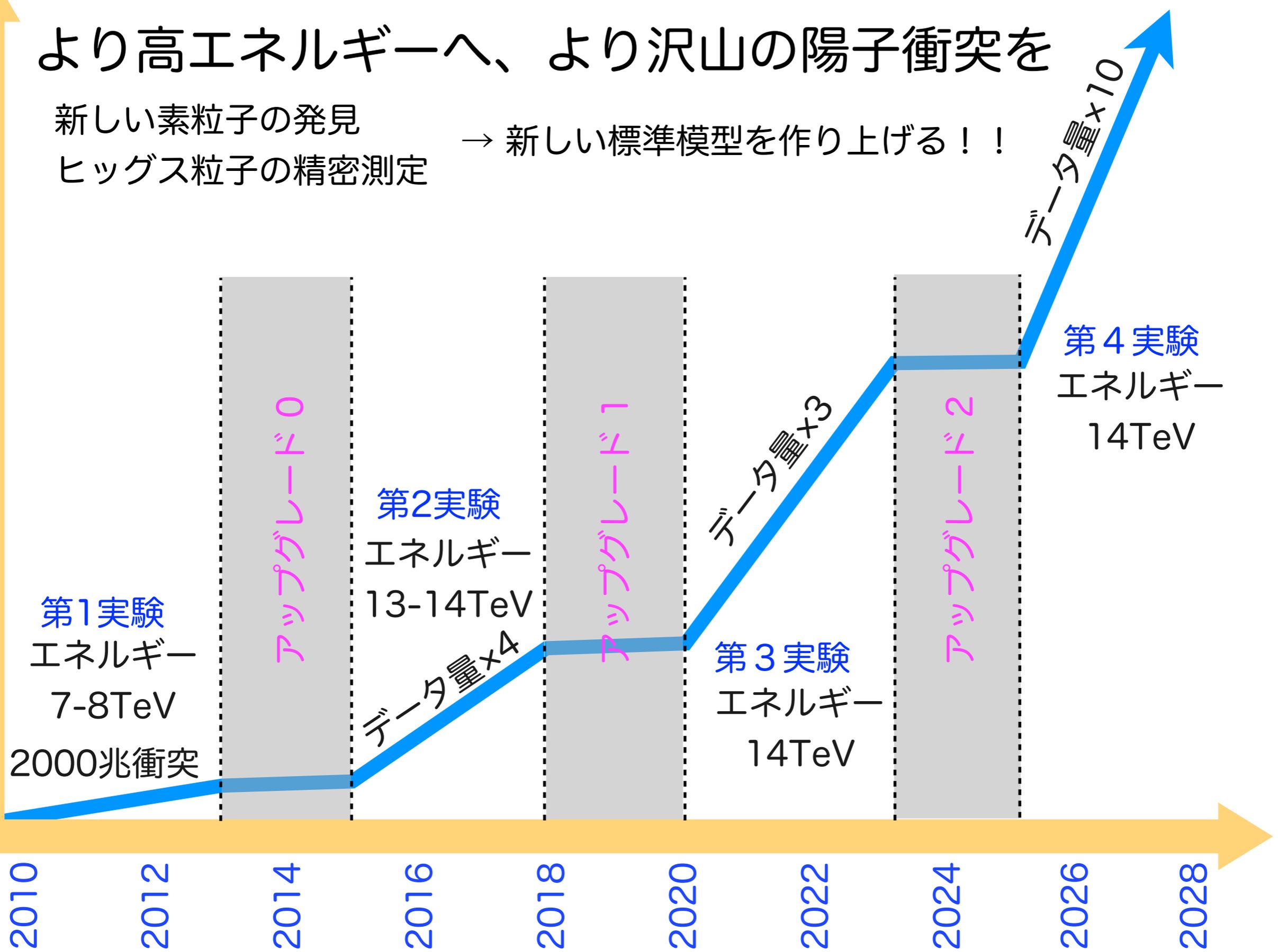
LHC実験の今後

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

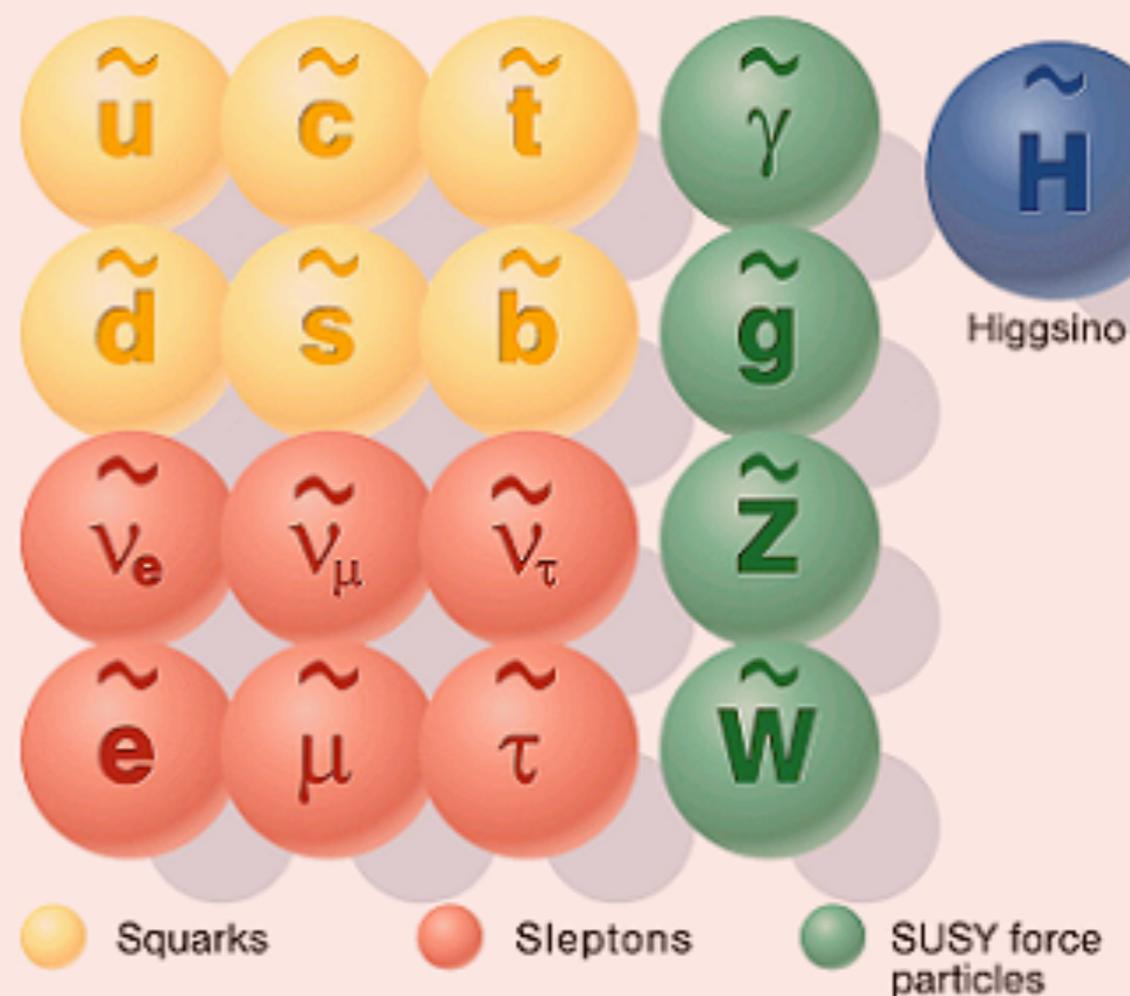


今後の展開

標準模型の素粒子

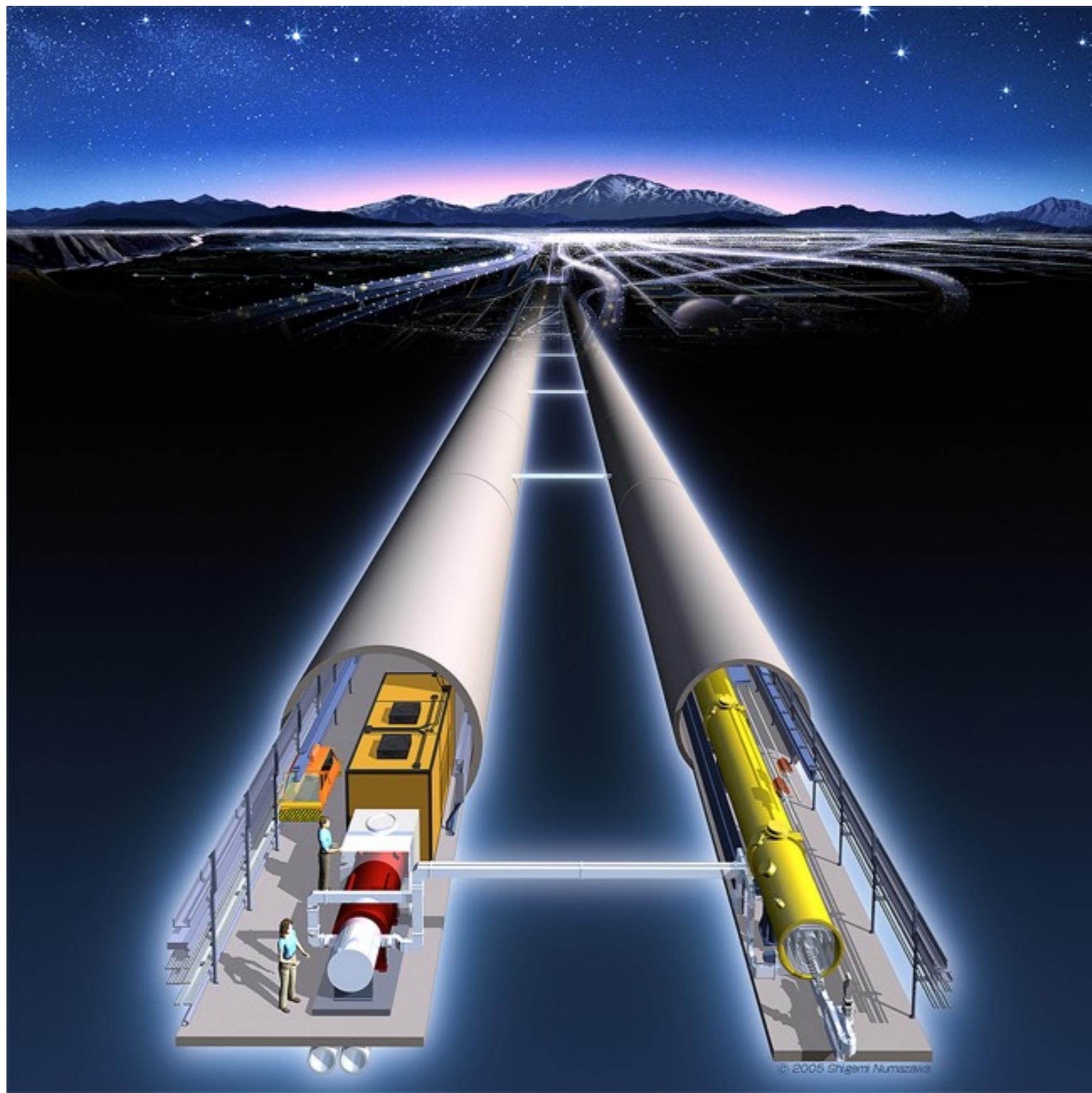


超対称性粒子 未発見



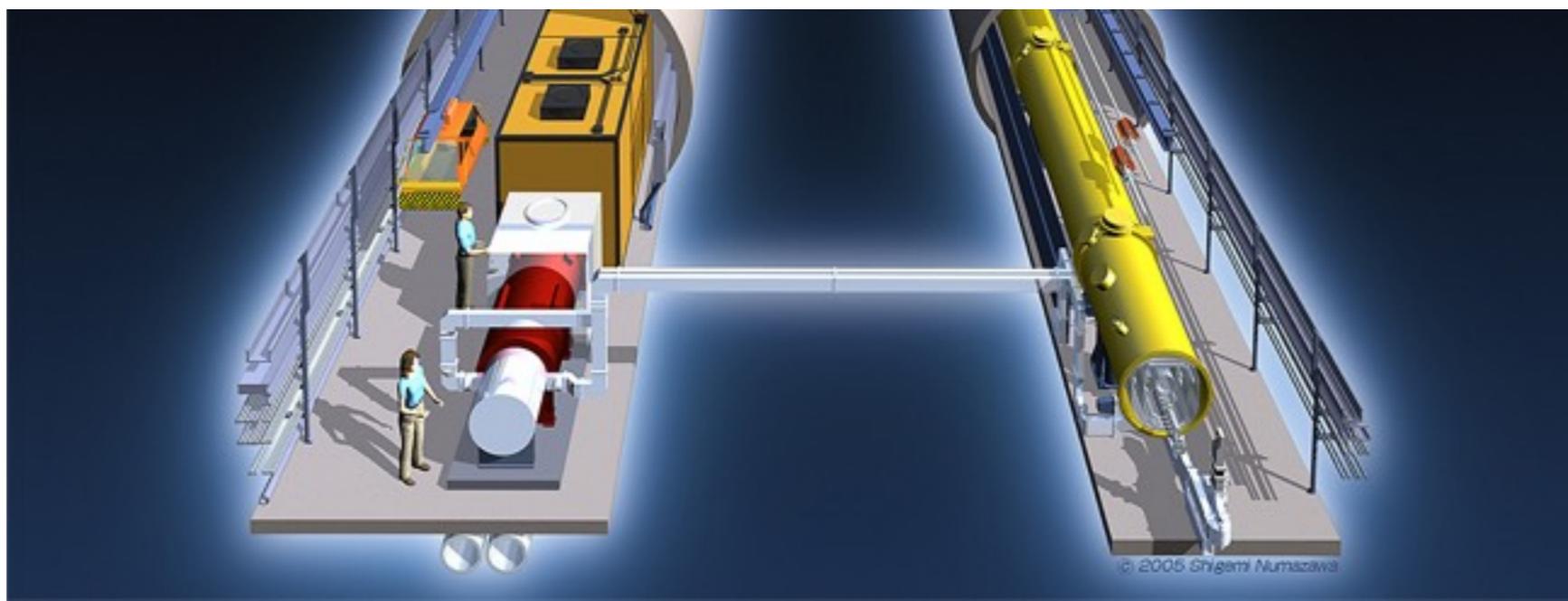
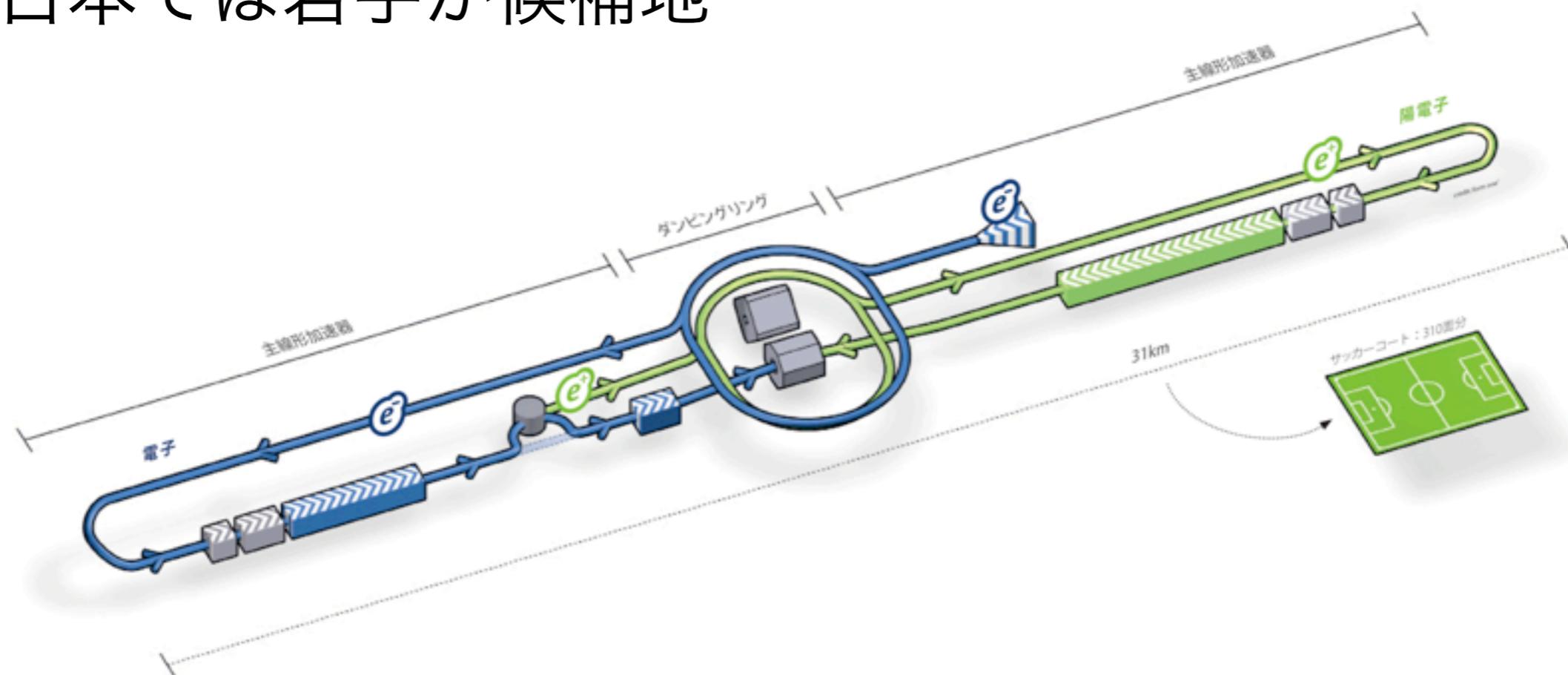
- 新しい素粒子(暗黒物質、超対称性粒子、、、)の発見
→ 衝突エネルギーを上げる
 - ヒッグス粒子の性質をより深く理解
→ 沢山の陽子衝突
- 新しい素粒子物理学の幕開け

国際リニアコライダー計画



国際リニアコライダー計画

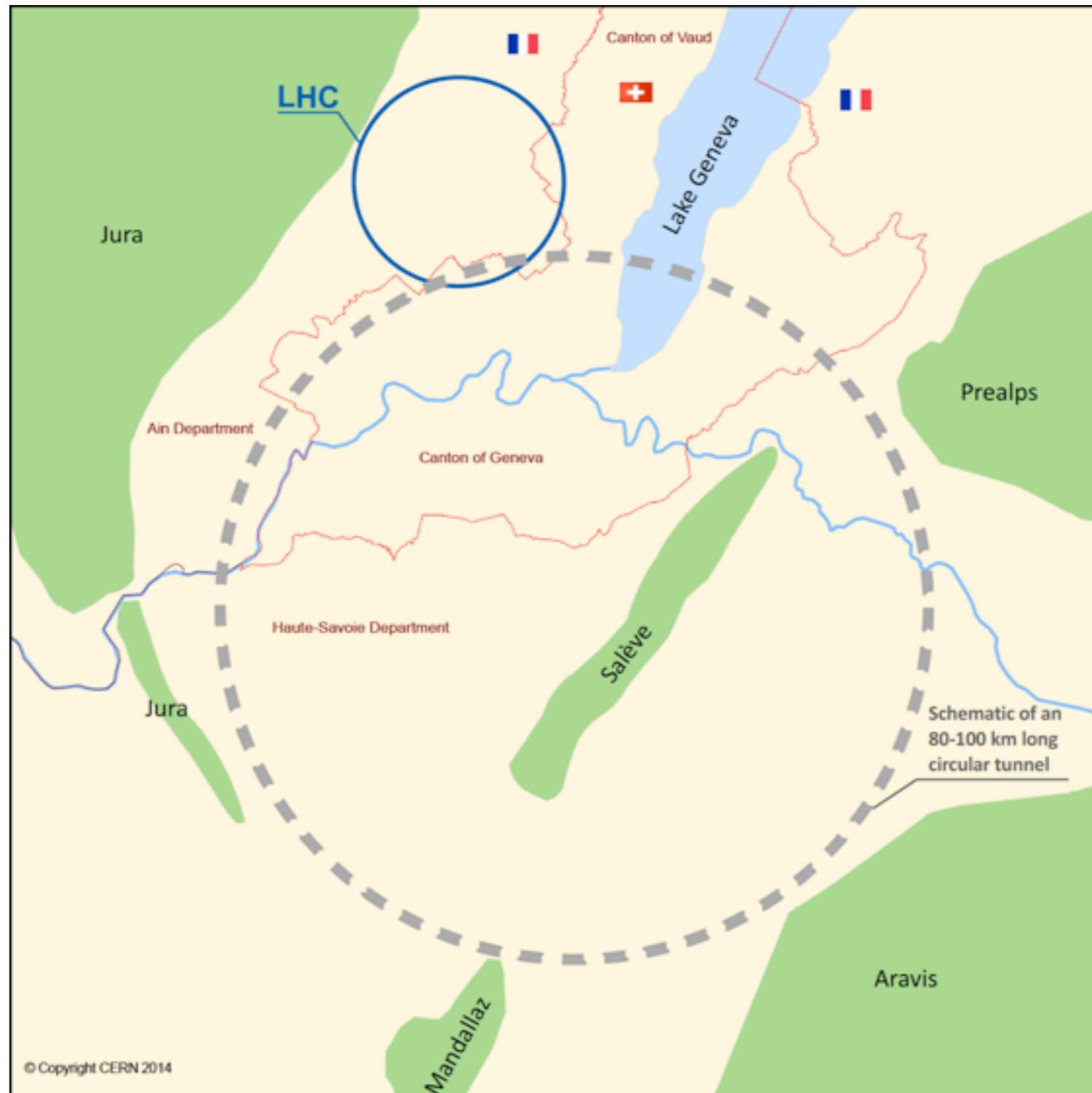
日本では岩手が候補地



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！