

# ヒッグス粒子をつかまえる

名大カフェ “Science, And Me”

2012年9月5日

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

# 万物をつくる 質量の起源



CERNでのセミナーで、研究者を祝福するヒッグス粒子の提唱者、ピーター・ヒッグス英工大インバラ大名誉教授＝4日、スイス・ジュネーブ郊外で（ロイター・共同）

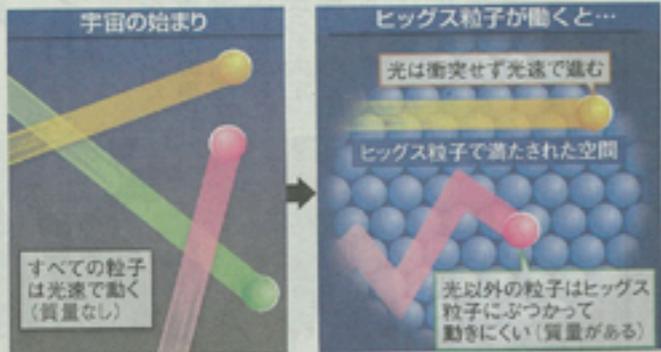
原子核研究所（CERN、セルン）の実験チームが4日、発表した。ヒッグス粒子の特徴を示しており、「発見」はほぼ確実になった。「神の粒子」とも呼ばれるヒッグス粒子の発見で、物理学の標準理論で予言されていた十七種類の素粒子が出そろった。宇宙の成り立ちの解明にもつながる画期的成果だ。『宇宙解明のパスル完成』面、関連場面

# 「ヒッグス粒子」発見

## 中日新聞

中日新聞社  
名古屋市中区三の丸一丁目6番1号  
〒460-0511 電話(052)2011811

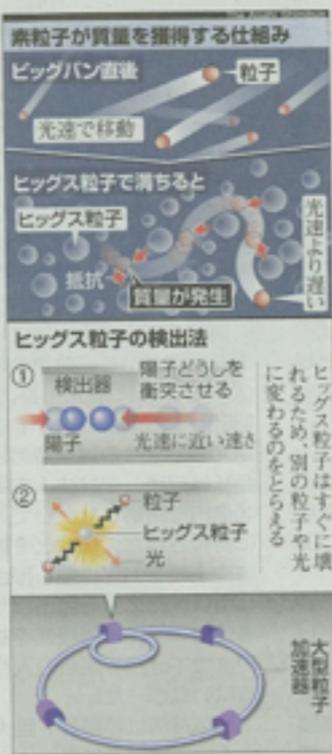
名古屋の味を  
ソースに生かす  
サンキョー  
ヒカリソー



国際チーム

# ヒッグス粒子が 発見

## 国際チーム 年内にも確定へ

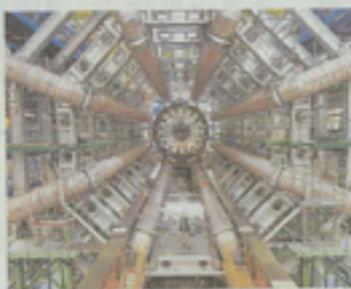


ヒッグス粒子は、137億年前の「ビッグバン」によって宇宙が誕生した直後に、光速で飛び回る素粒子に対して水あめのように作用して、動きにくくしたと考えられている。この「動きにくさ」こそ、質量を持つことの意味する。宇宙はその後、少しずつ温度を下げ、動きにくくなった素粒子はやがて相互に結びつき、陽子や中性子を形成した。それらは原子や分子を形作り、物質やわれわれ人間、それらすべてを含む今の宇宙になったとされる。

## 万物の重さの起源

万物に質量（重さ）を与えると考えられてきた「ヒッグス粒子」とみられる新粒子を発見したと、スイス・ジュネーブ近郊にある欧州合同原子核研究機関（CERN）が4日、発表した。ヒッグス粒子は素粒子物理学の基礎となる「標準理論」の中で唯一見つかっていなかった素粒子だ。宇宙がいかにして現在の姿に至ったかを解明する意味がある。

▶3面＝宇宙の謎追った40年  
▶34面＝名大でも喜び



LHCに設置されている検出装置「ATLAS」＝CERN、アトラス実験グループ提供

2012年（平成24年）  
7月5日  
木曜日

# 朝日新聞

Weather forecast table for various cities in Japan.

朝日新聞名古屋本社 発行所：〒460-8488 名古屋市中区栄1-3-3 電話：(052)231-8131 www.asahi.com

新しい高齢者マンション SunCity 0120-66-2526

オビニオン・社説・声 12.13面 社説 年金の代行廃止を／消費税転嫁の課題

原発 動かぬ福島第二に人と金

事故が起きた東京電力福島第一原発にほど近い第二原発。再び動く見通しはないにもかかわらず...

# 万物をつくる 質量の起源



原子核研究所（CERN、セルン）の実験チームが四を示しており、「発見」はほぼ確実になった。「神の発見で、物理学の標準理論で予言されていた十七種類のうちの説明にもつながる画期的成果だ。」「宇宙の謎のバツ実験チームは、東京「アトラス」チームと、光速まで大や名古屋大など日本、欧米中心の「CMS」チームと、同じ十六機関も参加する「ATLAS」チーム。両チームはほぼ、突合せ、

中日新聞社・APIITA presents  
キッズ&ジュニア  
**ストリートダンスコンテスト2012**  
エントリー受付中!  
アピタストリートダンス

益川教授らが確立した説明する「標準理論」を支える大きな柱で、益川教授らが確立した説明に耳を傾けた。益川教授は「ここまでの物理の世界は、理論上の予想を実験で証明する時代。知っていることが追認されるような印象だった。しかし、戸本准教授らが担当したのは、破片を検出する装置の開発だ。世界中から六千人の研究者が参加する二グループの中でも、ヒッグス粒子発見の要となる技術と言える。

## 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説明に耳を傾けた。益川教授は、研究者や大学院生ら百人とともに発表を見守った。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戸本准教授らの説明に耳を傾けた。益川教授は「ここまでの物理の世界は、理論上の予想を実験で証明する時代。知っていることが追認されるような印象だった。しかし、戸本准教授らが担当したのは、破片を検出する装置の開発だ。世界中から六千人の研究者が参加する二グループの中でも、ヒッグス粒子発見の要となる技術と言える。

し、これからは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「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（名古屋市）とほぼ同じ一周二十七キロの環状の「通路」を使う。通路に次々と飛ばした陽子同士を衝突させ、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。

2006年からチームに参加し、実験で使う長さ44センチ、直径20センチある検出器の組み立てに携わってきたという名古屋大学の戸本准教授は「素粒子の標準理論の中で『無くてはならない』と言われていた物を、今回の実験ではっきりとつかむことができた」と話す。

# 「これをバネに」新発見期待

## 「ヒッグス粒子が発見」名大でも喜び

ヒッグス粒子の研究チームの一つ「ATLAS」には、名古屋大からも研究者や学生が参加している。ヒッグス粒子とみられる素粒子が見つかったという知らせに、4日、関係者からは喜びや「これからが大事」といった声が上がった。

▼1面参照

ス粒子の兆候が見つかった昨年、精度を高めて実験や解析を重ねてきた。戸本さんは「これをバネに、今後はより精密に研究を進めたい」と意気込む。

名古屋大現象解析研究センター長を務める飯嶋徹教授は「ヒッグス粒子発見の可能性が高まったことは、素粒子物理学にとって大きな前進だ」と話す。

## 万物の重さの起源

ヒッグス粒子は、137億年前の「ビッグバン」によって宇宙が誕生した直後に、光速で飛び回る素粒子に対して水あめのように作用して、動きにくくしたと考えられている。この「動きにくさ」こそ、質量を持つことの意味だ。宇宙はその後、少しずつ温度を下げ、動きにくくなった素粒子はやがて相互に結びつき、陽子や中性子を形成した。それらは原子や分子を形作り、物質やわれわれ人間、それらすべてを含む今の宇宙になったとされる。

今回発表されたのは、東大や筑波大など日本の16研究機関が参加する「ATLAS」と、欧米を中心とした「CMS」という二つの研究チームの実験結果だ。ATLASは、素粒子の質量を測定するために、大規模な加速器で、素粒子を衝突させることで、衝突した素粒子の質量を測定することを目指す。ATLASは、素粒子の質量を測定するために、大規模な加速器で、素粒子を衝突させることで、衝突した素粒子の質量を測定することを目指す。

天気	6	9	12	15	18	21	24
名古屋	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴
岐阜	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴
高山	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴
津	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴
尾張	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴
浜松	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴
東京	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴
大阪	晴	晴	晴	晴	晴	晴	晴

朝日新聞名古屋本社  
発行所：〒460-8488 名古屋市中央区栄1-3-3  
電話：(052) 231-8131 www.asahi.com

新しい高齢者マンション SunCity  
もう半世紀すこやかに  
0120-66-2526 (株) ハーフセブチーモア

オビニオン・社説・声 12.13  
■社説 年金の代行廃止を/消費税転嫁の課題  
■対話なき政治 平田オリザ氏が唱える「言葉」

原稿 動かぬ福島第二に人と金  
事故が起きた東京電力福島第一原発にほど近い第二原発。再び動く見通しはないにもかかわらず、

# 万物をつくる 質量の起源



原子核研究所（フツ）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



中日新聞社・APiTA presents キッズ&ジュニア ストリートダンスコンテスト2012

「期待している」と期待している。益川教授は「あ、宇宙の成り立ちを説明する「標準」を支える大きな益川教授らが確

## お話の内容

## ヒッグス粒子とは？ 加速器と検出器

## ヒッグス粒子をつかまえる

## 新粒子の発見とその意義

2006年からチームに参加し、実験で使う長さ44センチ、直径20センチある検出器の組み立てに携わってきたという名大理学部

理論の中で『無くてはならない』と言われていた物を、今回の実験ではっきりとつかむことができた」と話す。

名大現象解析研究センター長を務める飯嶋徹教授は「ヒッグス粒子発見の可能性が高まったことは、素粒子物理学にとって大きな前

「期待している」と期待している。益川教授は「あ、宇宙の成り立ちを説明する「標準」を支える大きな益川教授らが確

も喜び

期待

の起源

12.13

原 動かめ福島第二に人と金

事故が起きた東京電力福島第一原発にほど近い第二原発。再び動く見通しはないにもかかわらず

ヒッグス粒子とは？

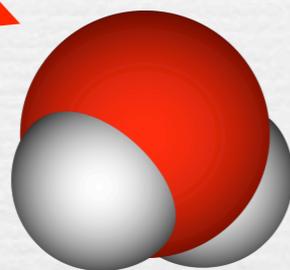
# 物を構成している素粒子



# 物を構成している素粒子



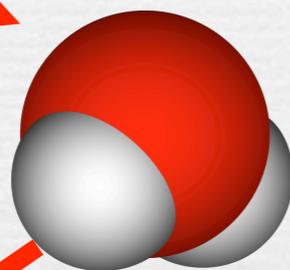
分子  
 $10^{-9}\text{m}$



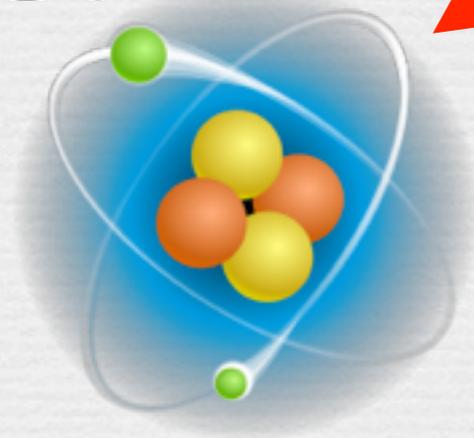
# 物を構成している素粒子



分子  
 $10^{-9}\text{m}$



電子

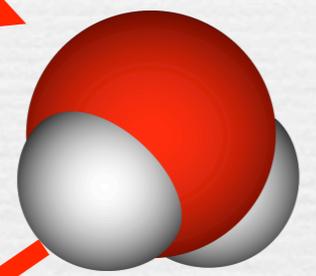


原子  
 $10^{-10}\text{m}$   
原子核  
 $10^{-14}\text{m}$

# 物を構成している素粒子

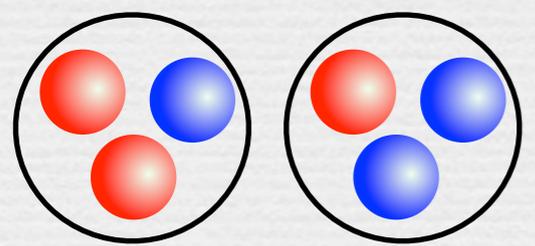
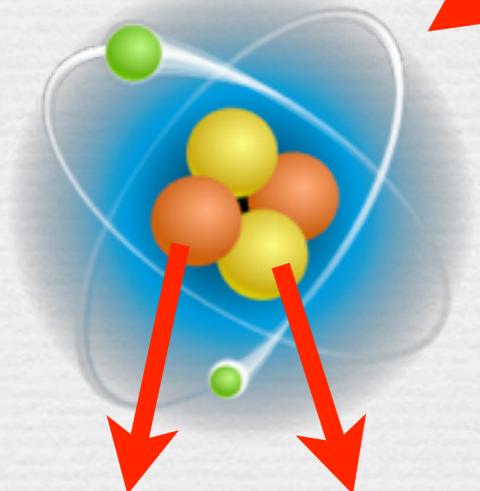


分子  
 $10^{-9}m$



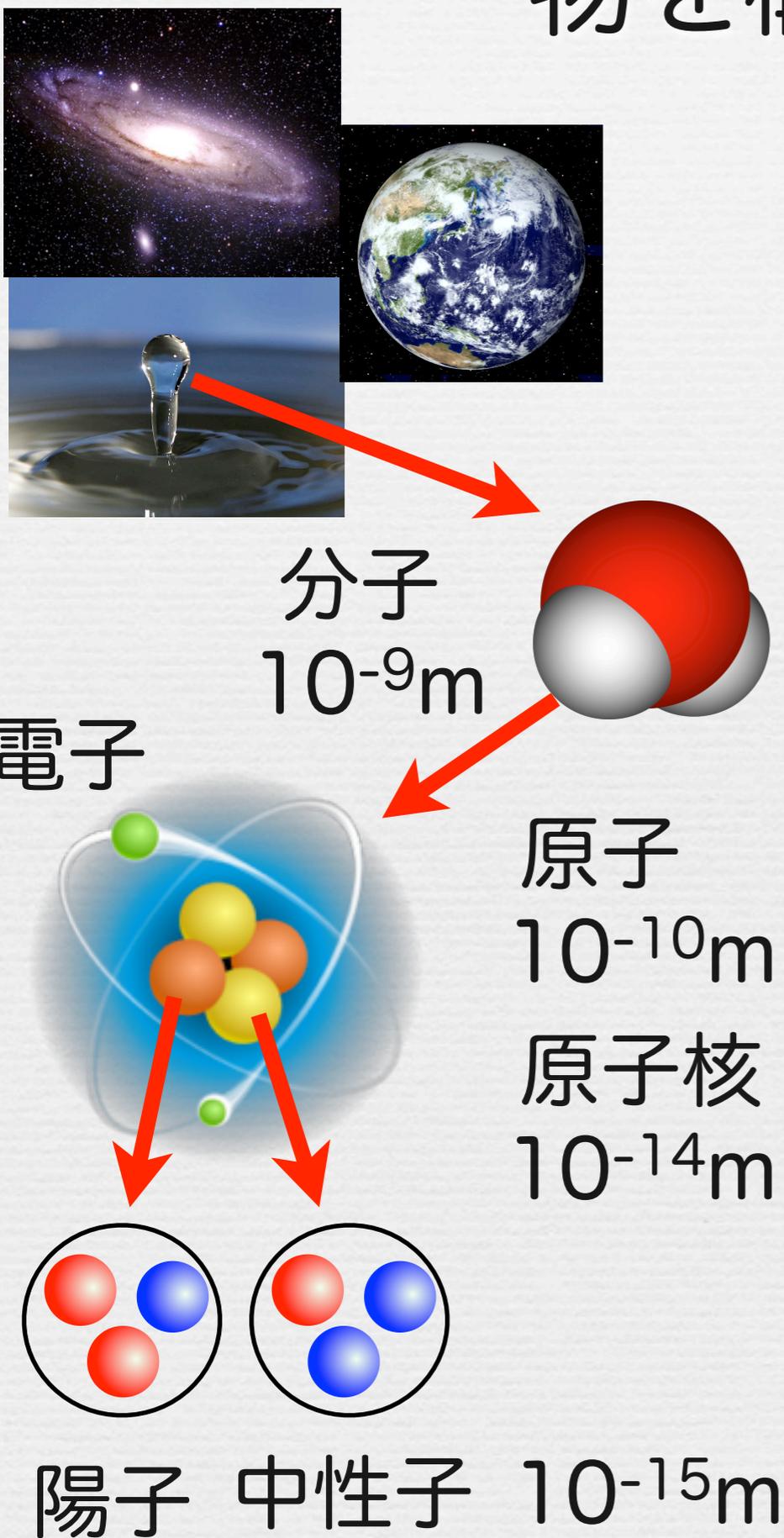
電子

原子  
 $10^{-10}m$   
原子核  
 $10^{-14}m$



陽子 中性子  $10^{-15}m$

# 物を構成している素粒子

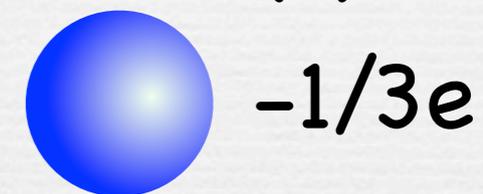


## クォーク

アップ(u)

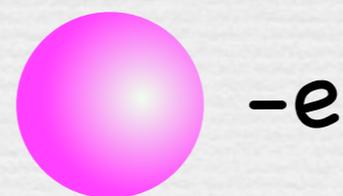


ダウン(d)

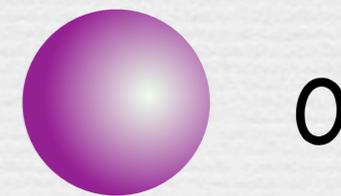


## レプトン

電子



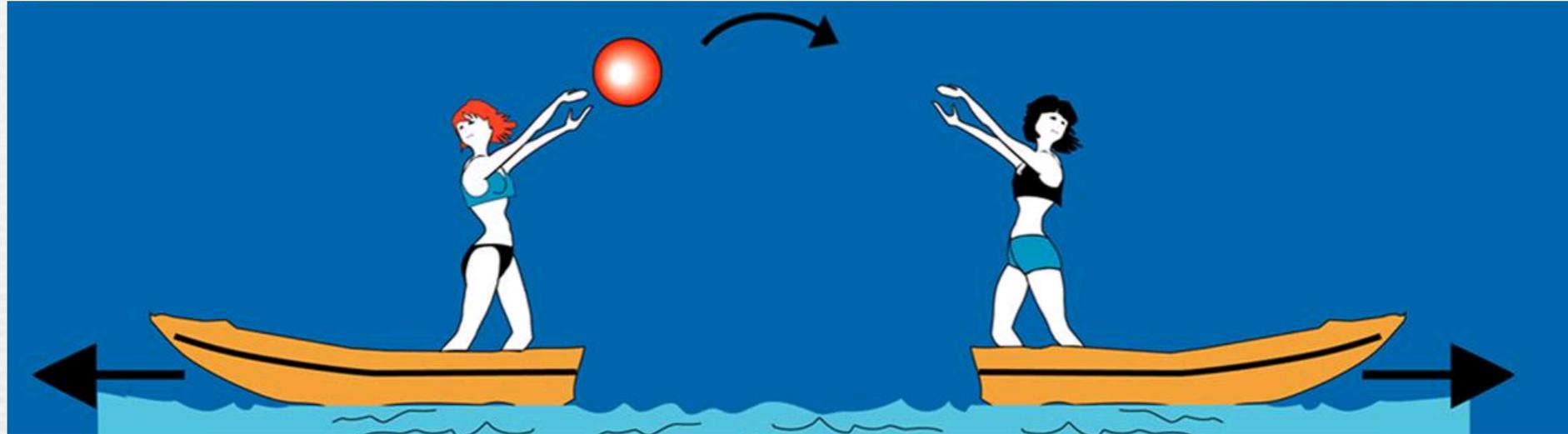
ニュートリノ





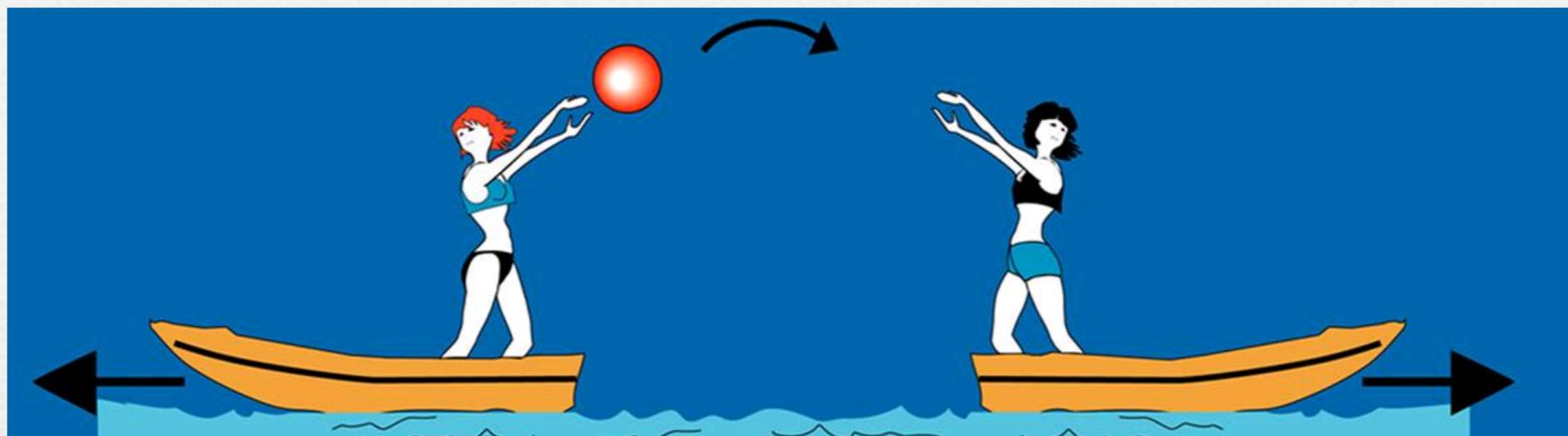
# 素粒子に働く力

力 = 力を伝える粒子の交換



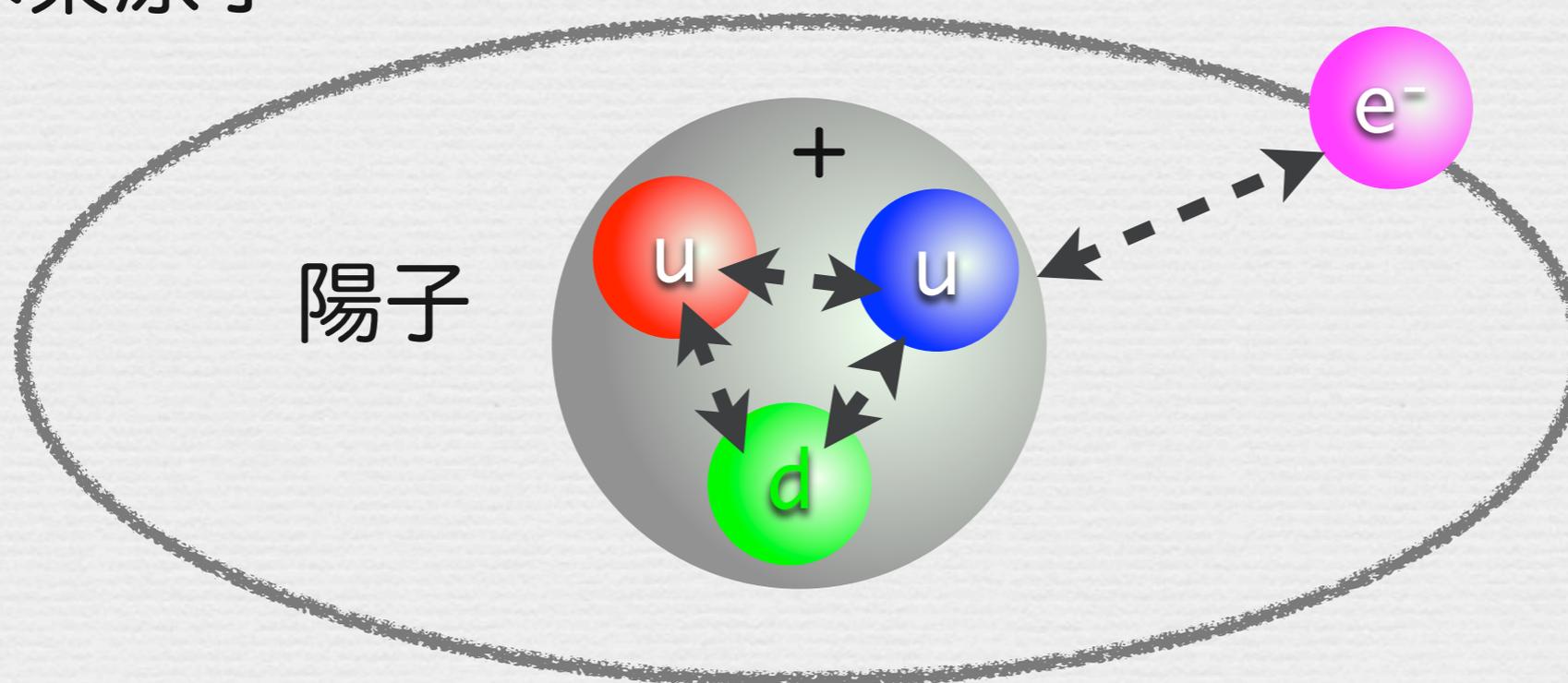
# 素粒子に働く力

力 = 力を伝える粒子の交換



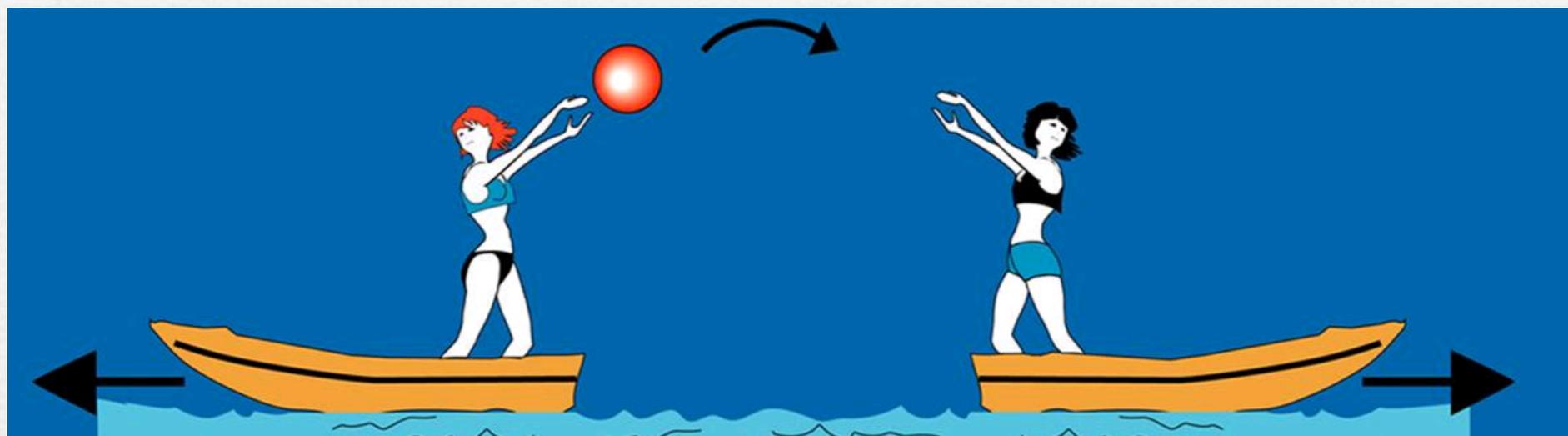
水素原子

電子



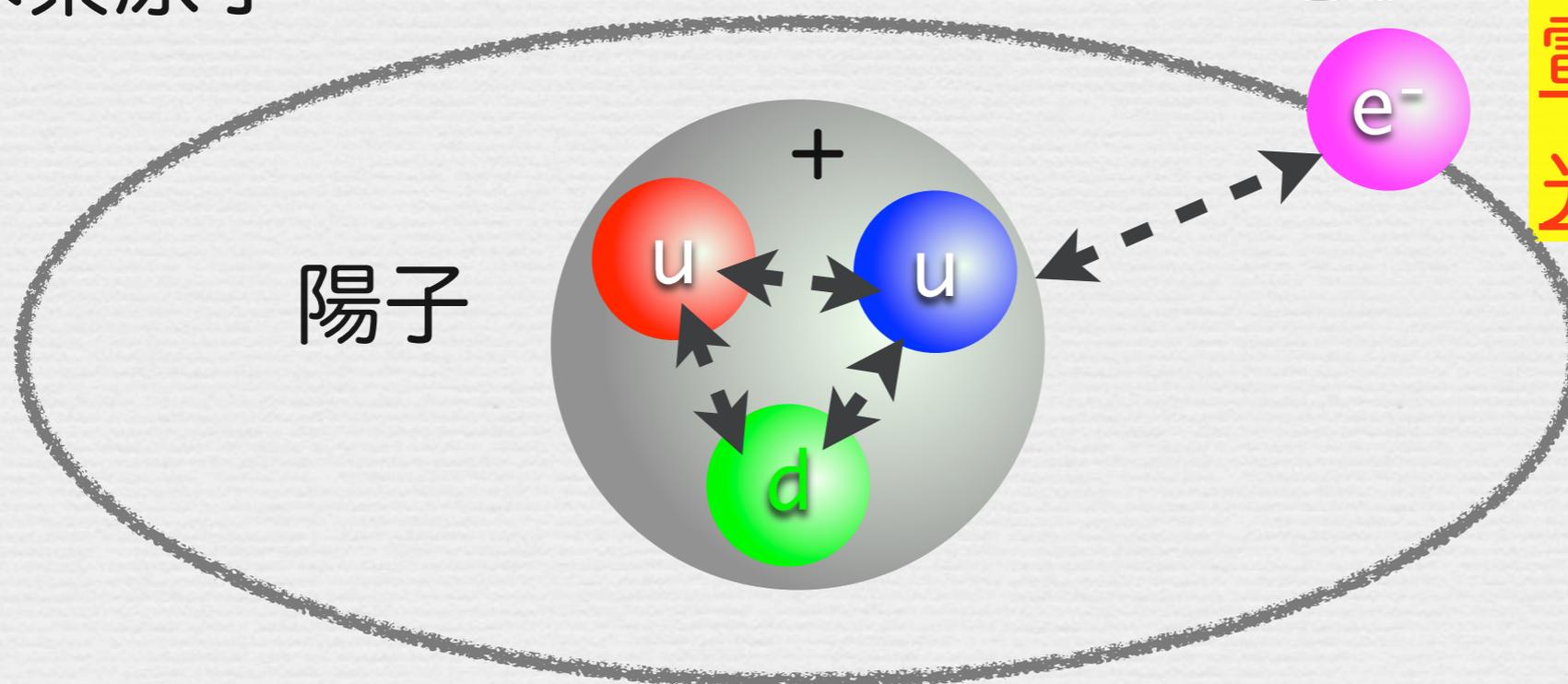
# 素粒子に働く力

力 = 力を伝える粒子の交換



水素原子

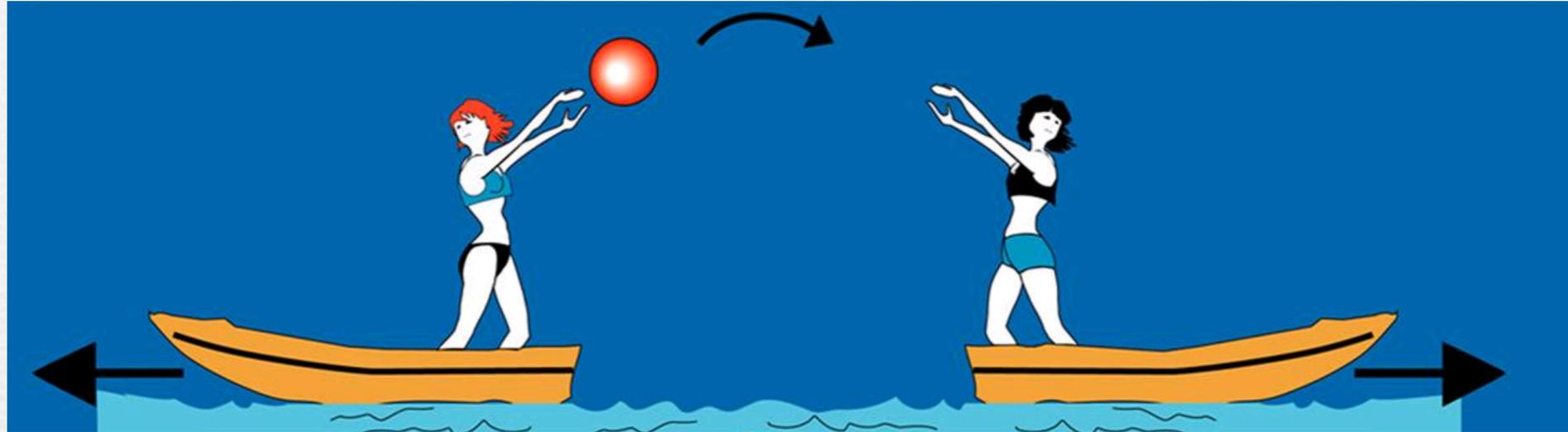
電子



電磁気力  
電荷を感じて  
光子を交換

# 素粒子に働く力

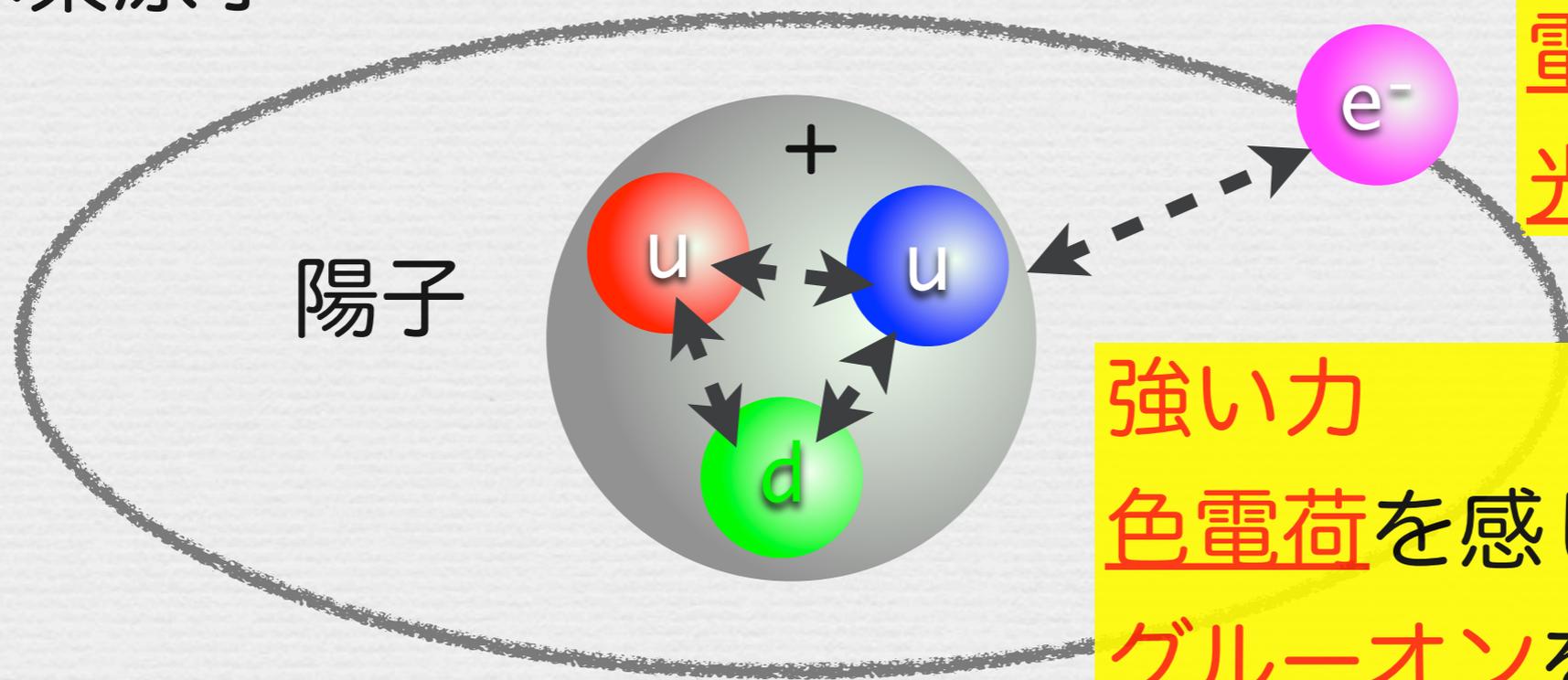
力=力を伝える粒子の交換



水素原子

電子

電磁気力  
電荷を感じて  
光子を交換

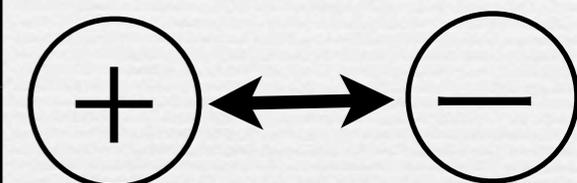


強い力  
色電荷を感じて  
グルーオンを交換

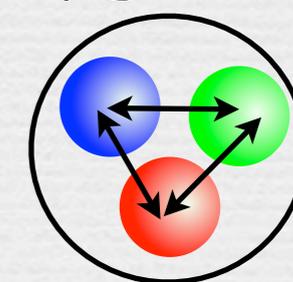
# 4種の力

種類	強さ	到達距離	電荷	伝える粒子
電磁気力	1/137	無限	電荷 (+/-)	光子 (フォトン)
強い力	~0.1	$10^{-15}\text{m}$	色電荷 (3種)	グルーオン
弱い力	$10^{-5}$	$10^{-18}\text{m}$	弱電荷	$W^{\pm}$ 、Z粒子
重力	$10^{-38}$	無限	質量	グラビトン (未発見)

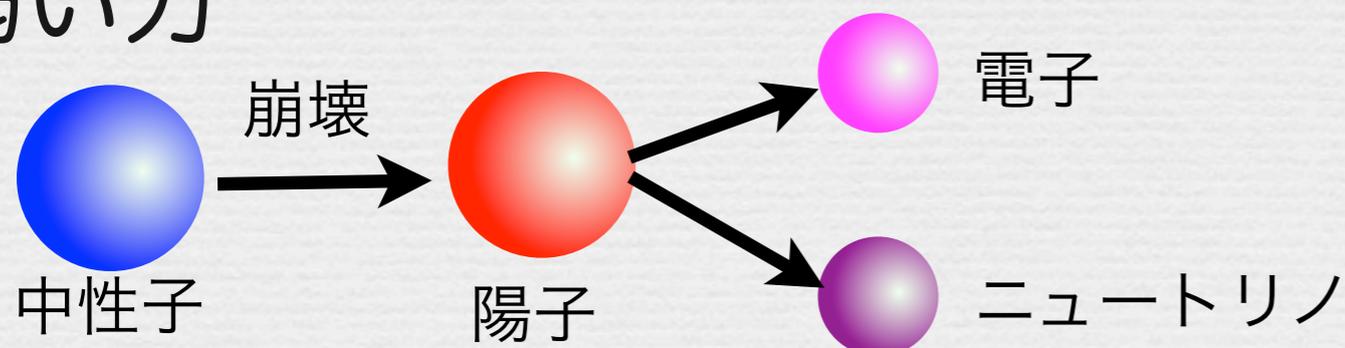
電磁気力



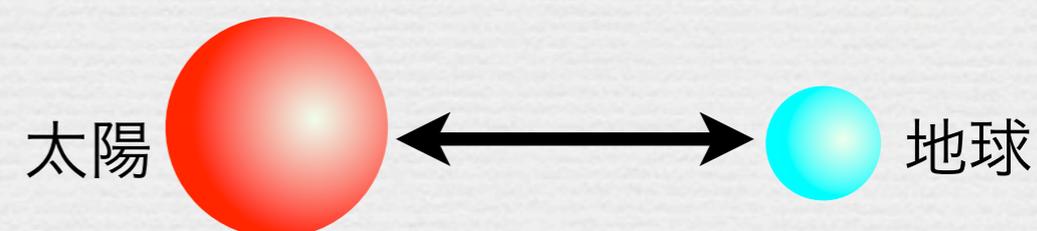
強い力



弱い力



重力



# 素粒子の標準模型

物質を構成する

力を伝える

クォーク

レプトン

電荷 :  $+2/3e$

電荷 :  $-1/3e$

電荷 :  $0$

電荷 :  $-e$

アップ(u)

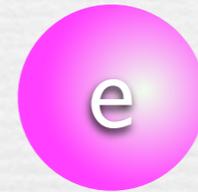
ダウン(d)

電子ニュートリノ

電子

電磁気力 : 光子

第1世代



強い力 : グルーオン



弱い力 : Z、W粒子



# 素粒子の標準模型

## 物質を構成する

## 力を伝える

クォーク

レプトン

電荷 :  $+2/3e$

電荷 :  $-1/3e$

電荷 :  $0$

電荷 :  $-e$

電磁気力 : 光子



強い力 : グルーオン



弱い力 : Z、W粒子



アップ(u)

ダウン(d)

電子ニュートリノ

電子

第1世代



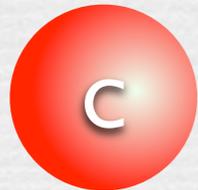
チャーム(c)

ストレンジ(s)

ミューニュートリノ

ミュー粒子

第2世代



# 素粒子の標準模型

## 物質を構成する

## 力を伝える

クォーク

レプトン

電荷 :  $+2/3e$

電荷 :  $-1/3e$

電荷 :  $0$

電荷 :  $-e$

電磁気力 : 光子

アップ(u)

ダウン(d)

電子ニュートリノ

電子

強い力 : グルーオン

第1世代



チャーム(c)

ストレンジ(s)

ミューニュートリノ

ミュー粒子

弱い力 : Z、W粒子

第2世代



トップ(t)

ボトム(b)

タウニュートリノ

タウ粒子

第3世代



# 素粒子の標準模型

物質を構成する

力を伝える

クォーク

レプトン

電荷 :  $+2/3e$

電荷 :  $-1/3e$

電荷 : 0

電荷 :  $-e$

電磁気力 : 光子

アップ(u)

ダウン(d)

電子ニュートリノ

電子

強い力 : グルーオン

第1世代



チャーム(c)

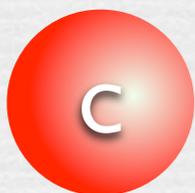
ストレンジ(s)

ミューニュートリノ

ミュー粒子

弱い力 : Z、W粒子

第2世代



トップ(t)

ボトム(b)

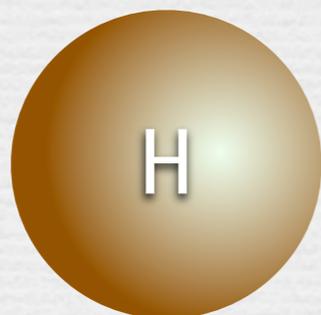
タウニュートリノ

タウ粒子

第3世代



未発見! ?



ヒッグス粒子 : 素粒子に質量を与える

# 質量とは？

# 質量とは？

全ての物の性質を表す量

# 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

# 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

## 2. 動きにくさ (慣性質量)

重いものは動かすにくい。

動いている重いものは止めににくい。

# 質量とは？

全ての物の性質を表す量

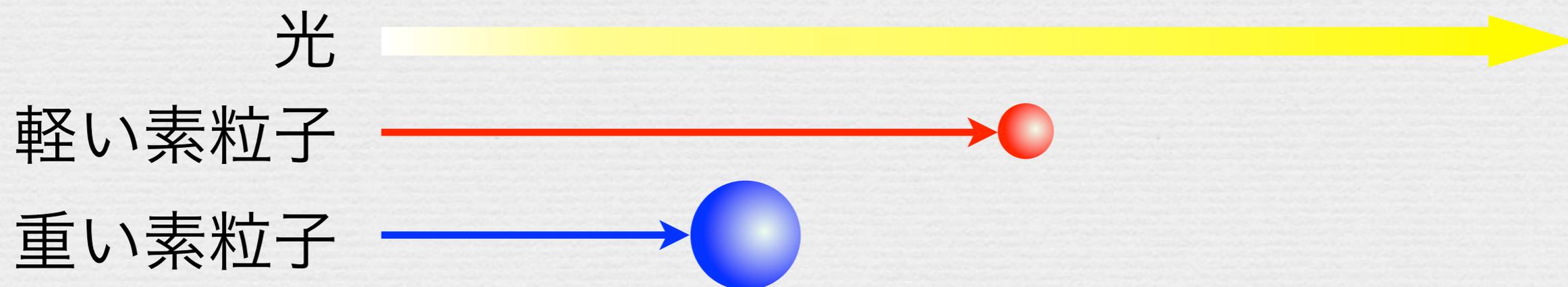
## 1. 重力のもと (重力質量)

重いものを持ち上げるのは、たいへん

## 2. 動きにくさ (慣性質量)

重いものは動かしにくい。

動いている重いものは止めににくい。



# 質量の起源

# 質量の起源

現在の素粒子の「標準模型」では、質量=0であるべき

ビッグバン直後、全ての素粒子は光速で走っていた

その後、宇宙が冷えて、素粒子は質量を得た

# 質量の起源

現在の素粒子の「標準模型」では、質量=0であるべき

ビッグバン直後、全ての素粒子は光速で走っていた

その後、宇宙が冷えて、素粒子は質量を得た

そもそも、質量がなかったら、どうなるか？

# 質量の起源

現在の素粒子の「標準模型」では、質量=0であるべき

ビッグバン直後、全ての素粒子は光速で走っていた

その後、宇宙が冷えて、素粒子は質量を得た

そもそも、質量がなかったら、どうなるか？

ダイエットしなくても良い？

# 質量の起源

現在の素粒子の「標準模型」では、質量=0であるべき

ビッグバン直後、全ての素粒子は光速で走っていた

その後、宇宙が冷えて、素粒子は質量を得た

そもそも、質量がなかったら、どうなるか？

ダイエットしなくても良い？

**正解**：皆が光速で走り始める

質量が大きい → 動かしにくい、止めにくい。

質量のない粒子 → 止められない。

# 質量の起源

現在の素粒子の「標準模型」では、質量=0であるべき

ビッグバン直後、全ての素粒子は光速で走っていた

その後、宇宙が冷えて、素粒子は質量を得た

そもそも、質量がなかったら、どうなるか？

ダイエットしなくても良い？

**正解**：皆が光速で走り始める

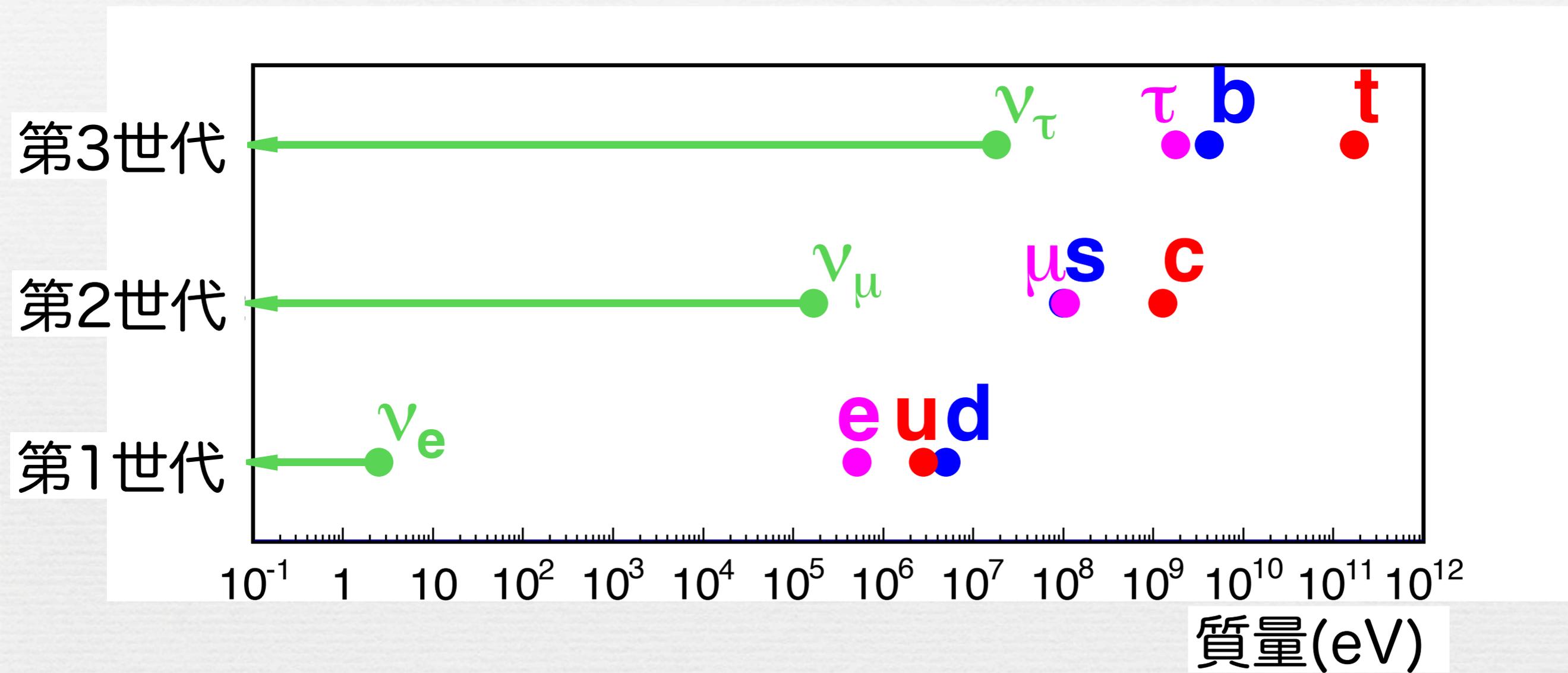
質量が大きい → 動かしにくい、止めにくい。

質量のない粒子 → 止まらない。

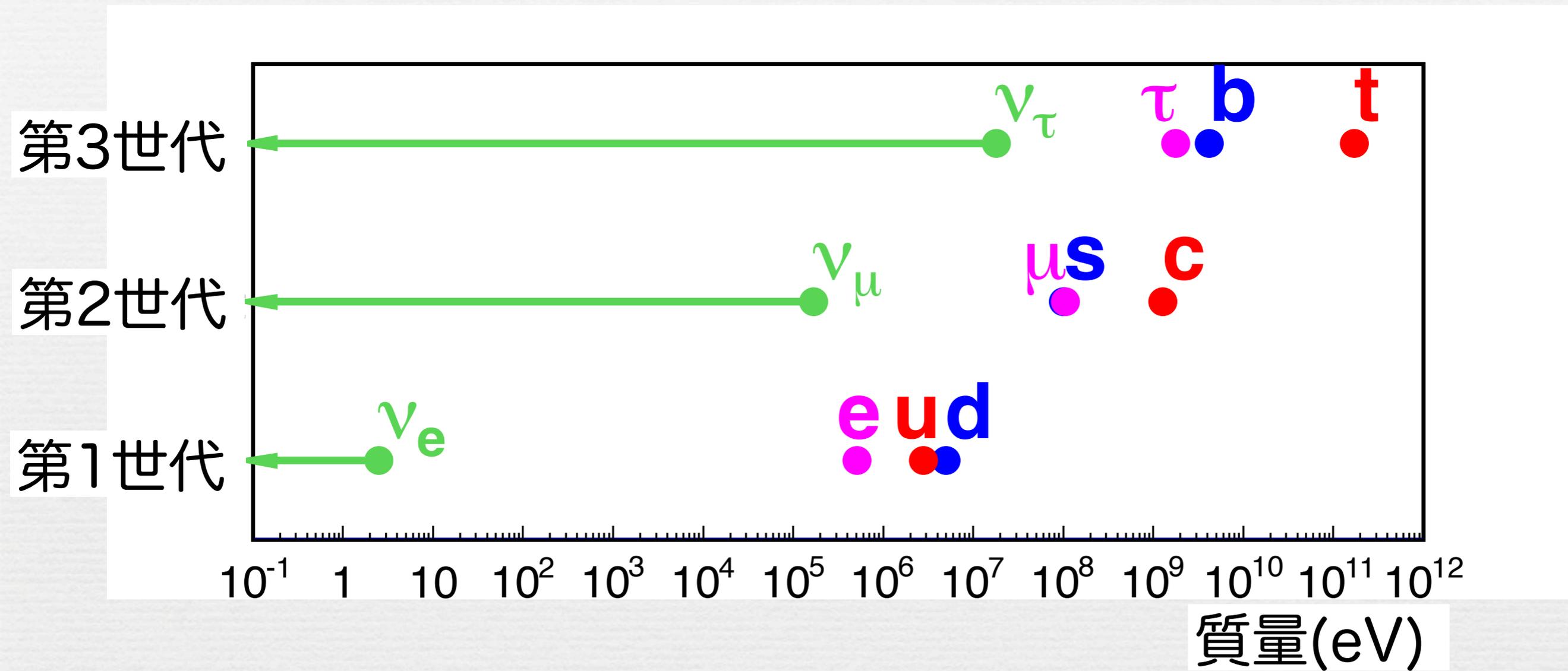
銀河も、星も、地球も、人間もないことになります。

# 素粒子の質量の違い

# 素粒子の質量の違い



# 素粒子の質量の違い



1/1000mg



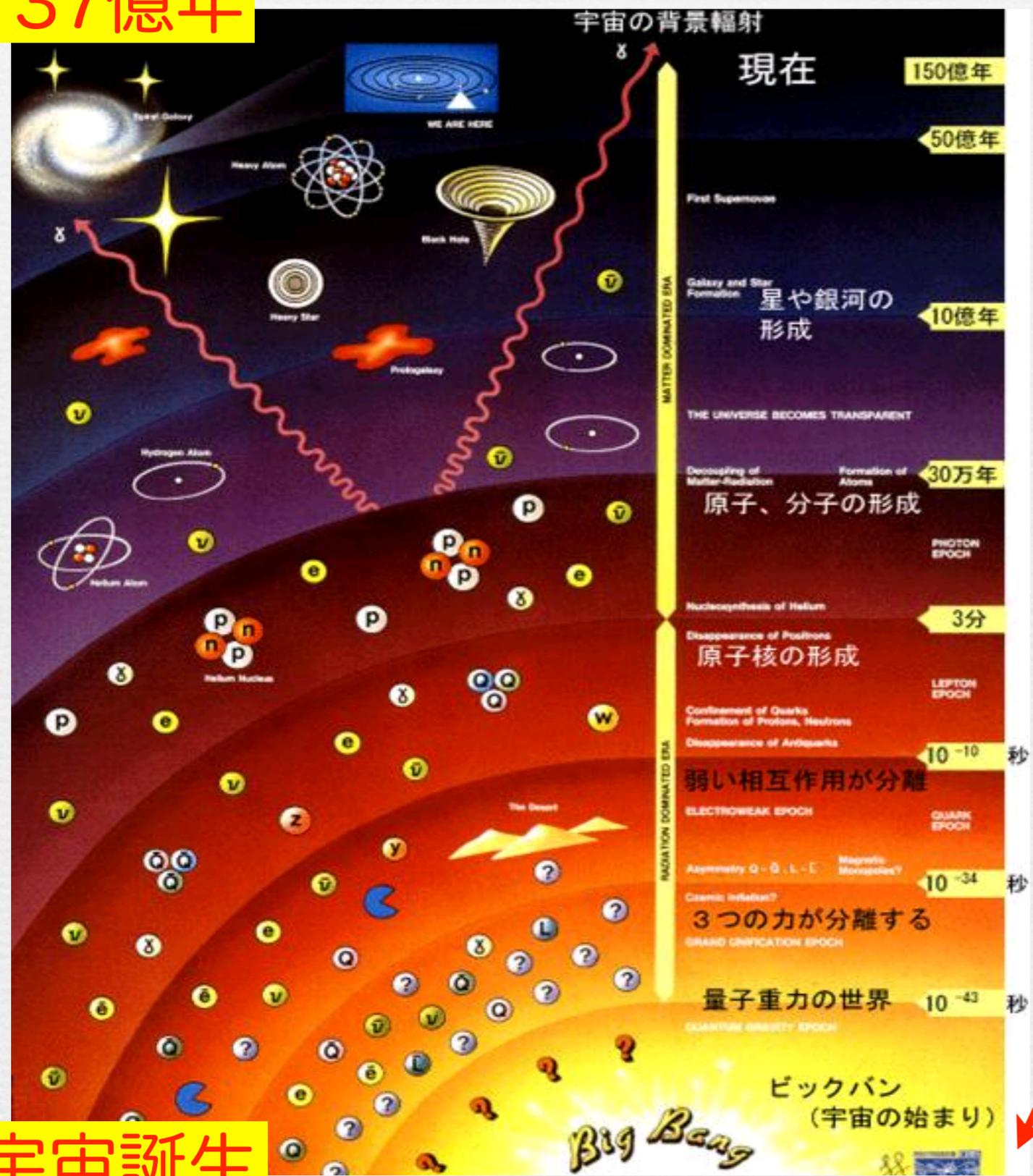
1000kg



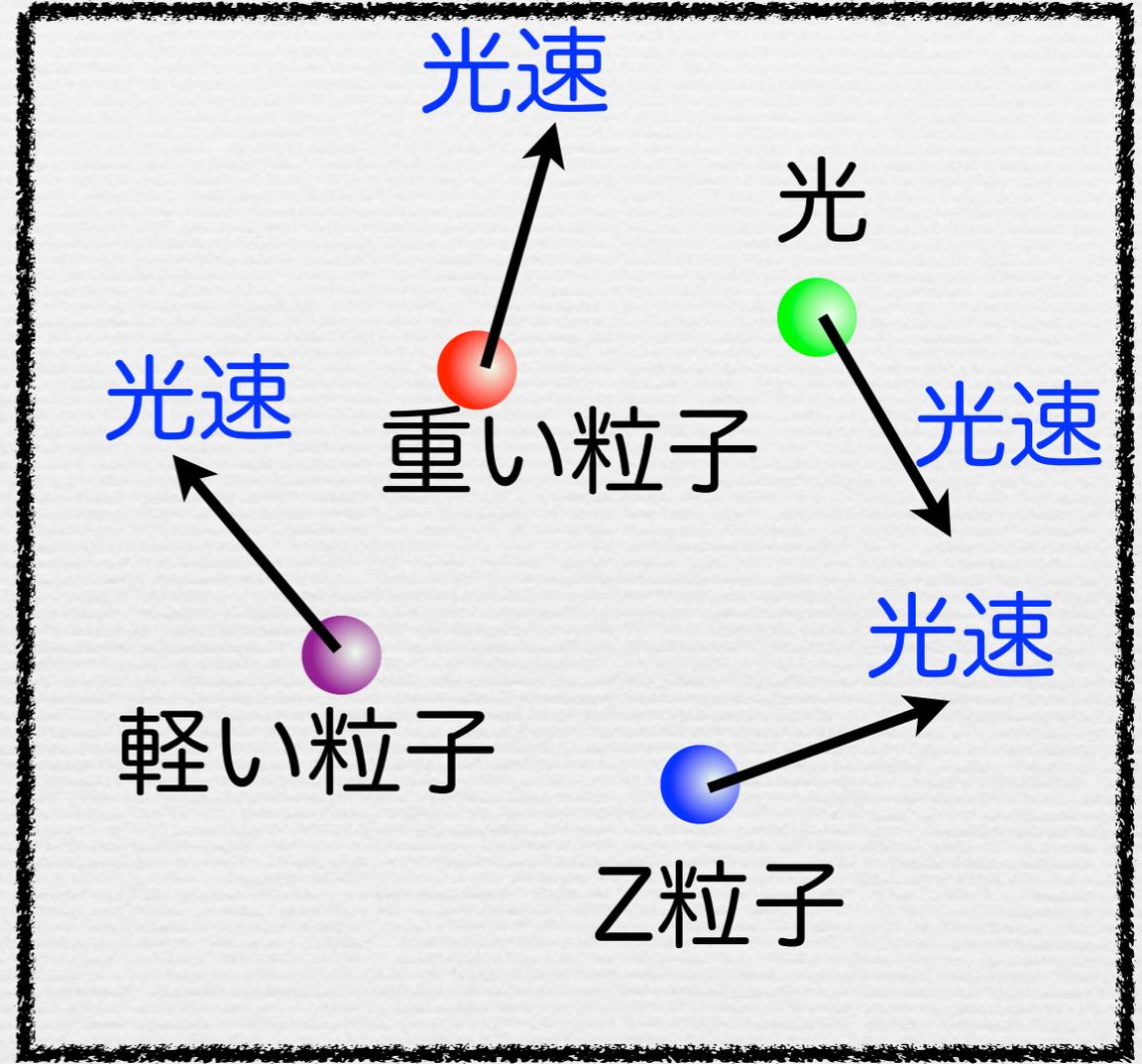
# ヒッグス機構

宇宙はヒッグスの海で満たされている

137億年



宇宙誕生

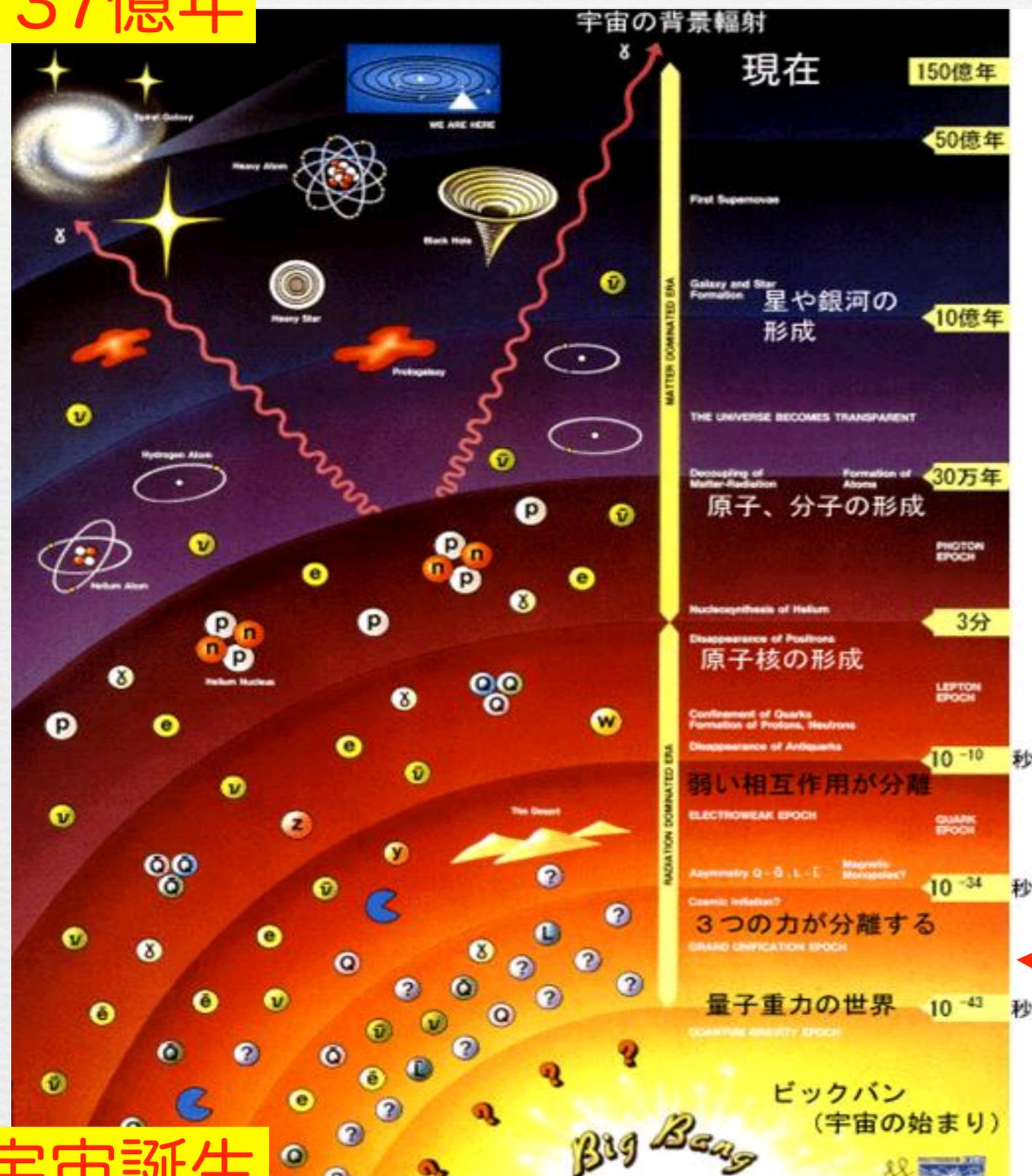


ビッグバン直後

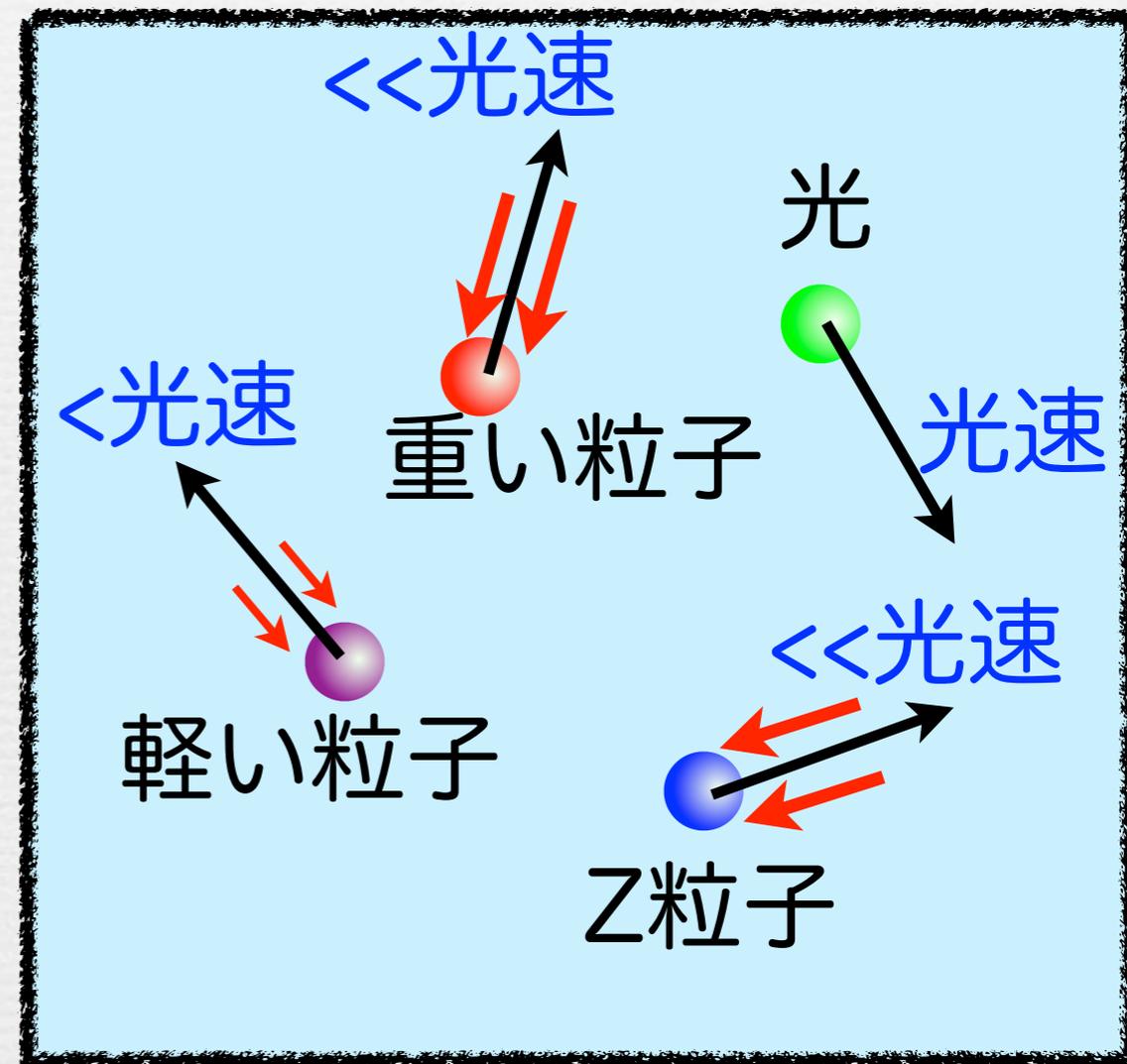
ヒッグスの海はサラサラ

# ヒッグス機構

137億年



宇宙が冷えて、ヒッグスの海の性質が変化。



宇宙が冷える

ヒッグスの海はネバネバ

宇宙誕生

# ヒッグスの性質

重い粒子ほど、ヒッグスに人気がある（よくくっつく）



ヒッグス粒子は粒子によってくっつく度合いを変えている？

	クォーク		レプトン	
	電荷 : $+2/3e$	電荷 : $-1/3e$	電荷 : 0	電荷 : $-e$
軽い				
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 
重い	トップ(t) 	ボトム(b) 	タウニュートリノ 	タウ粒子 

質量がなければ同じ粒子？

素粒子は自分が誰かわからない  
ヒッグスの海が粒子を区別する

# ヒッグスを見るには？

ヒッグスの海は、空間にうまっています、、、、  
ヒッグスの海そのものは見る事ができません

ヒッグスの海にエネルギーをつぎ込むとヒッグスを取り出す事ができる → **ヒッグス粒子**

加速器でヒッグスの海をたたけば見える  
思いっ切りたたく → 高エネルギーでたたく

ヒッグス粒子は、不安定ですぐに崩壊する



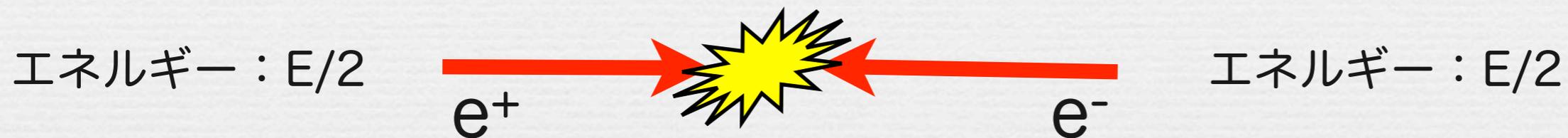
そういう粒子を実験的にさがしてみる → **素粒子実験**

# 加速器と検出器

# 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、それを測定する

未知粒子 = 既知の実験では作り出せない → 重たい



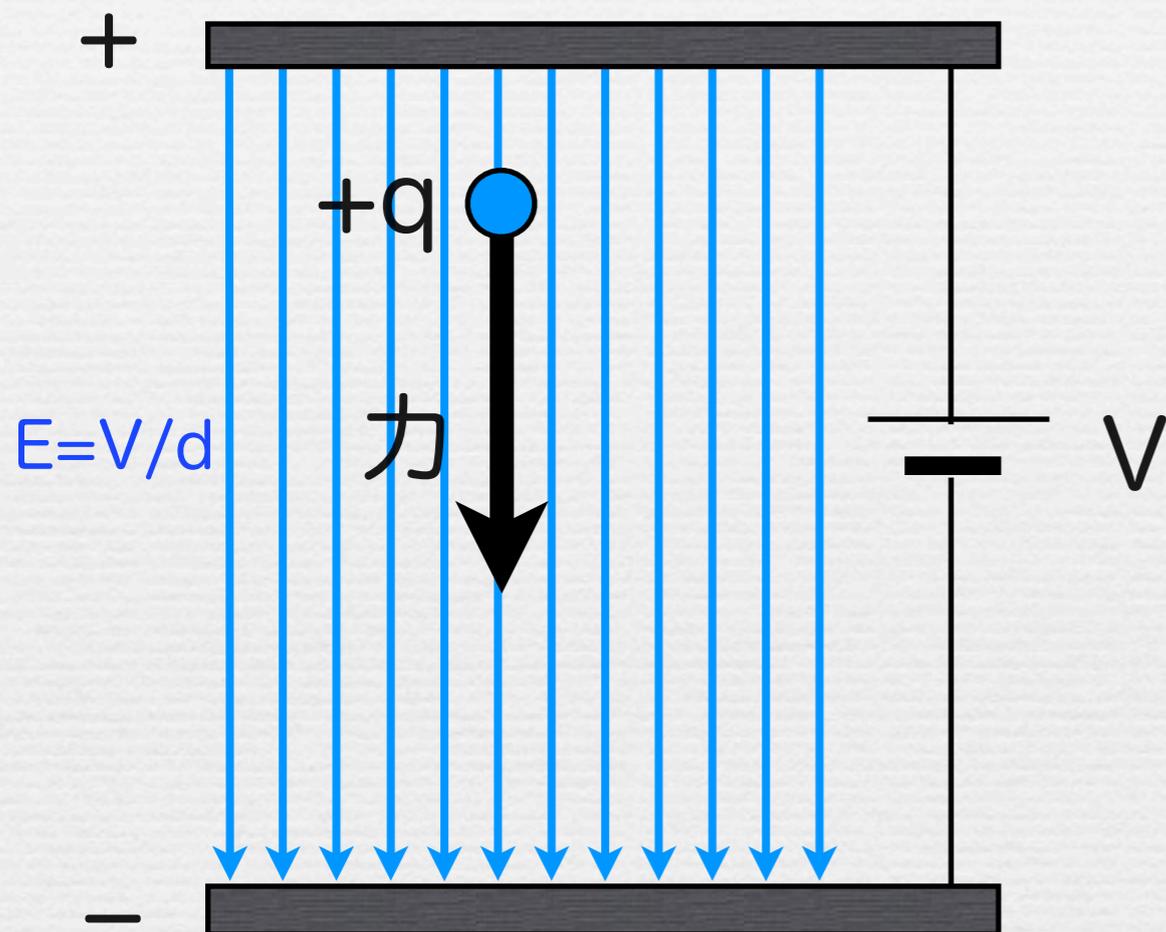
$$E = Mc^2$$

質量 $M$ の未知なる素粒子を生成する能力

高エネルギー！ → 加速した粒子を衝突させる

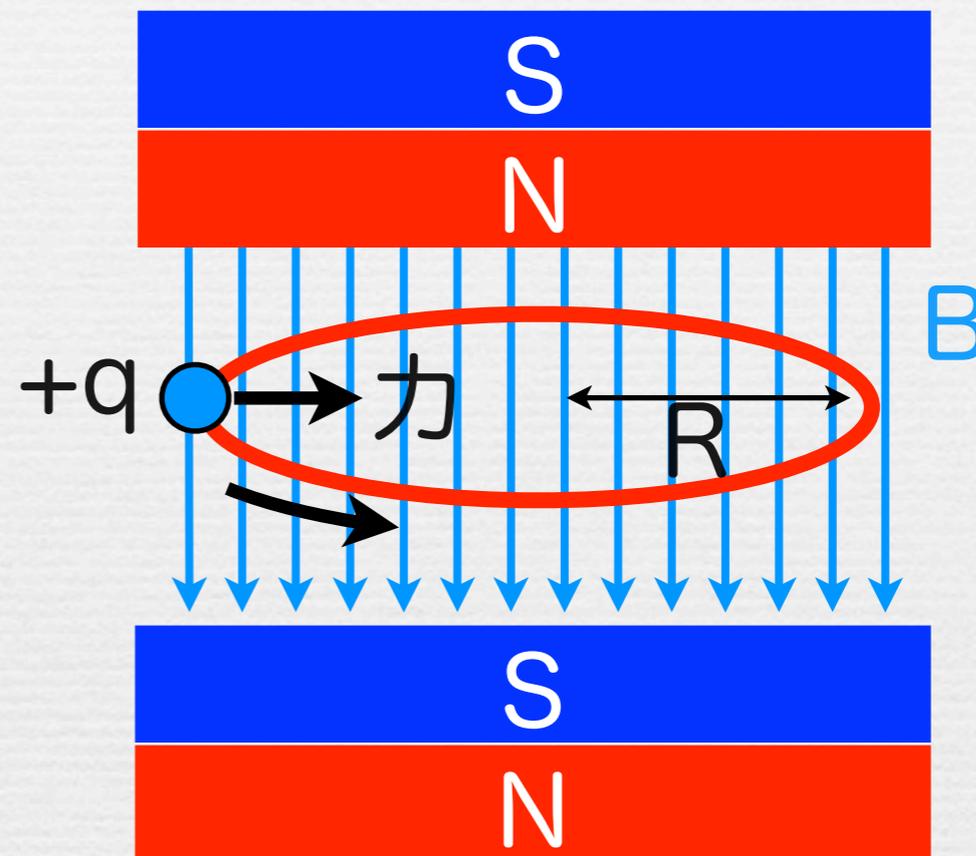
# 粒子を加速する

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

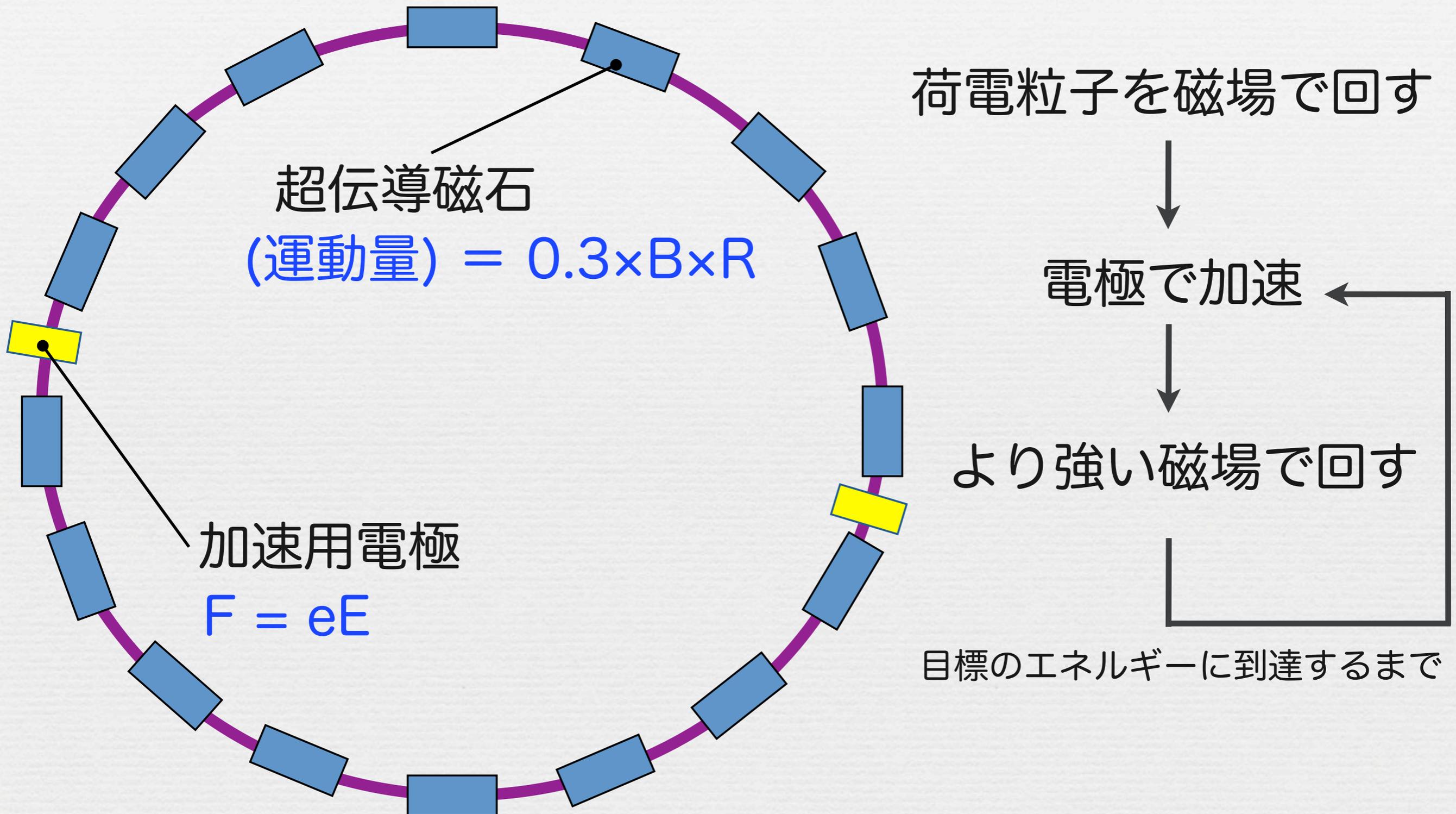
$$F = qE$$



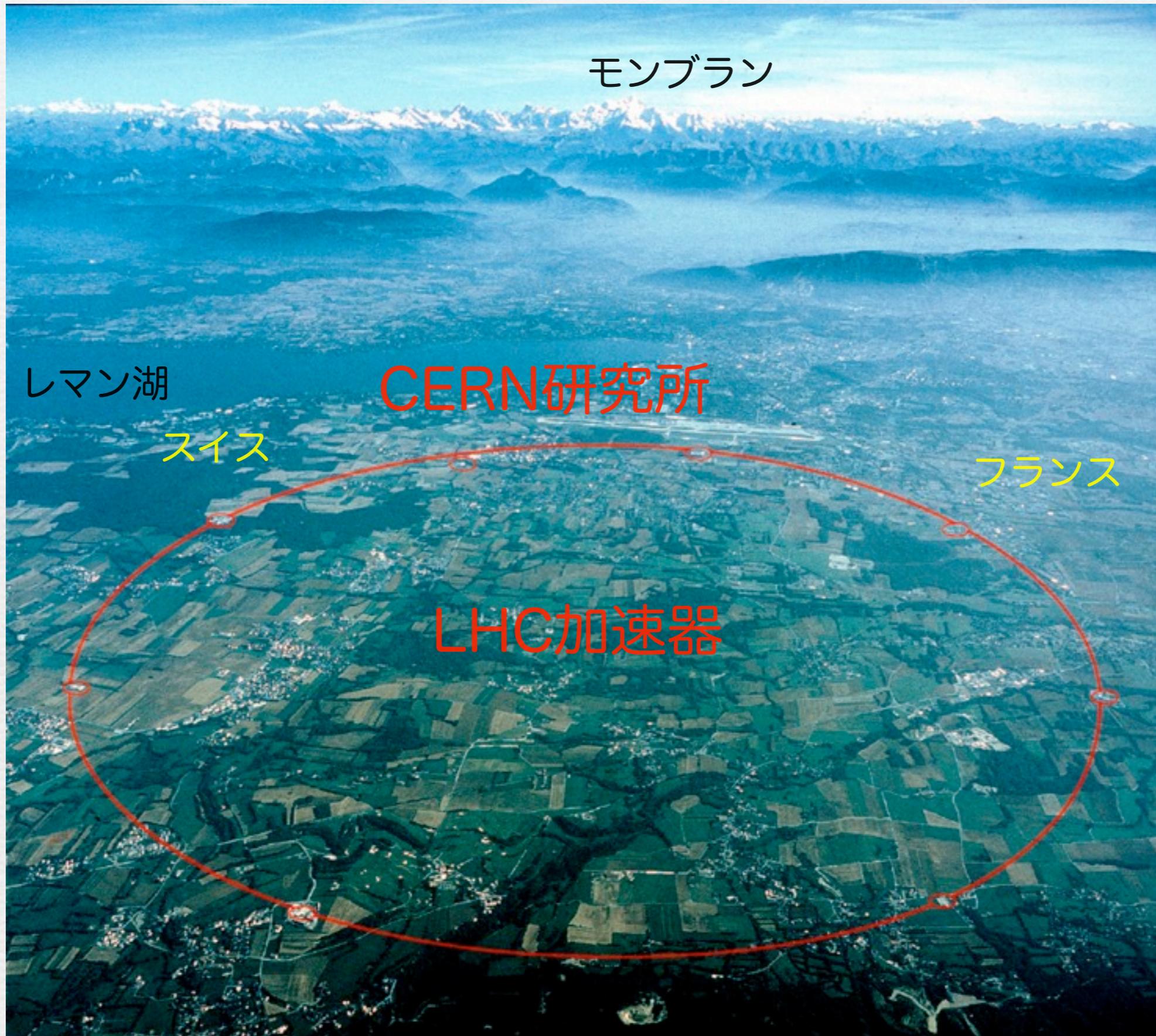
磁場  
回転半径を大きくして  
より加速した荷電粒子を回す

$$(\text{運動量}) = 0.3 \times B \times R$$

# 加速器の原理



# 最先端加速器 Large Hadron Collider



# LHC加速器の大きさ



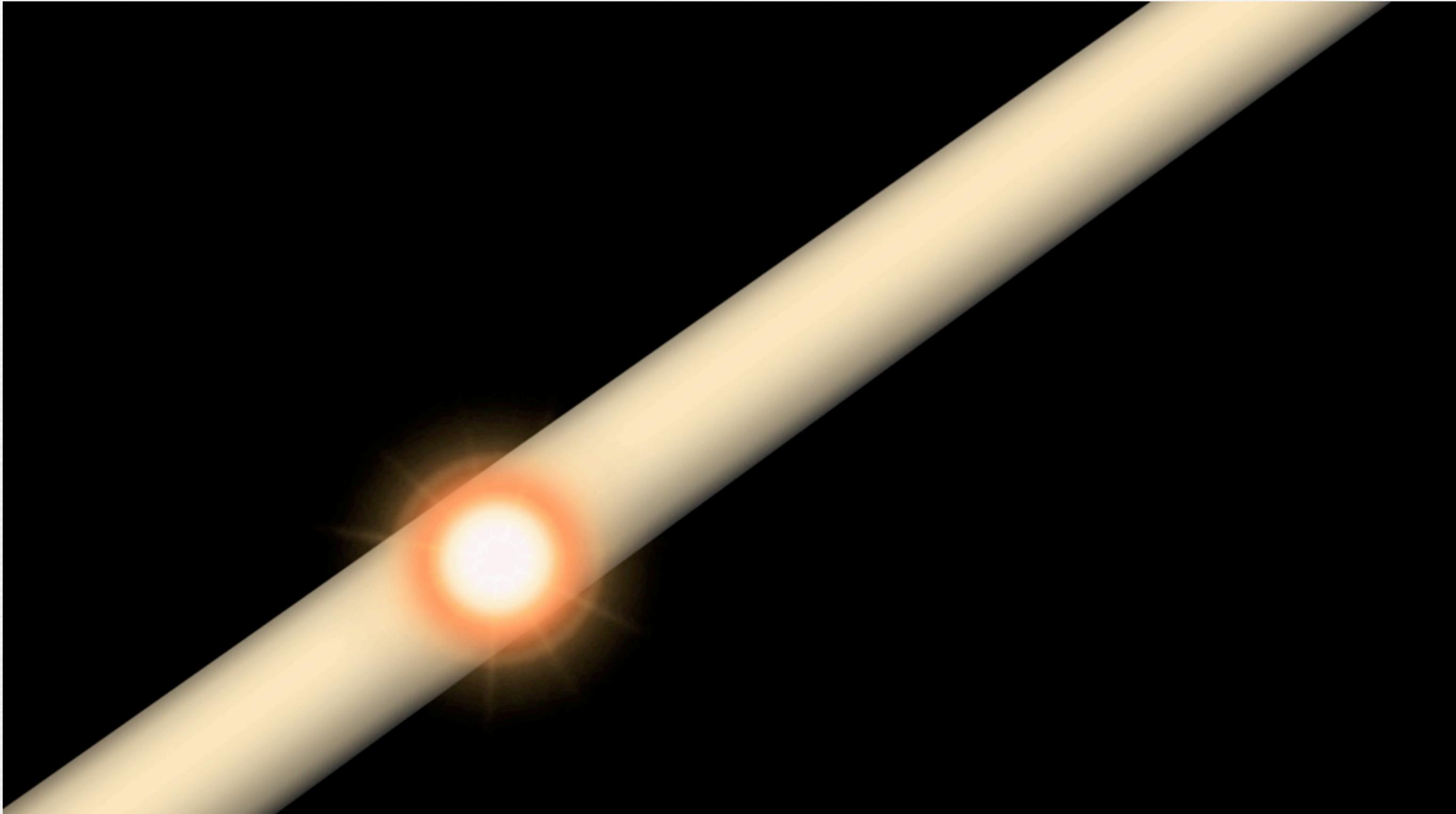
# LHC加速器の大きさ



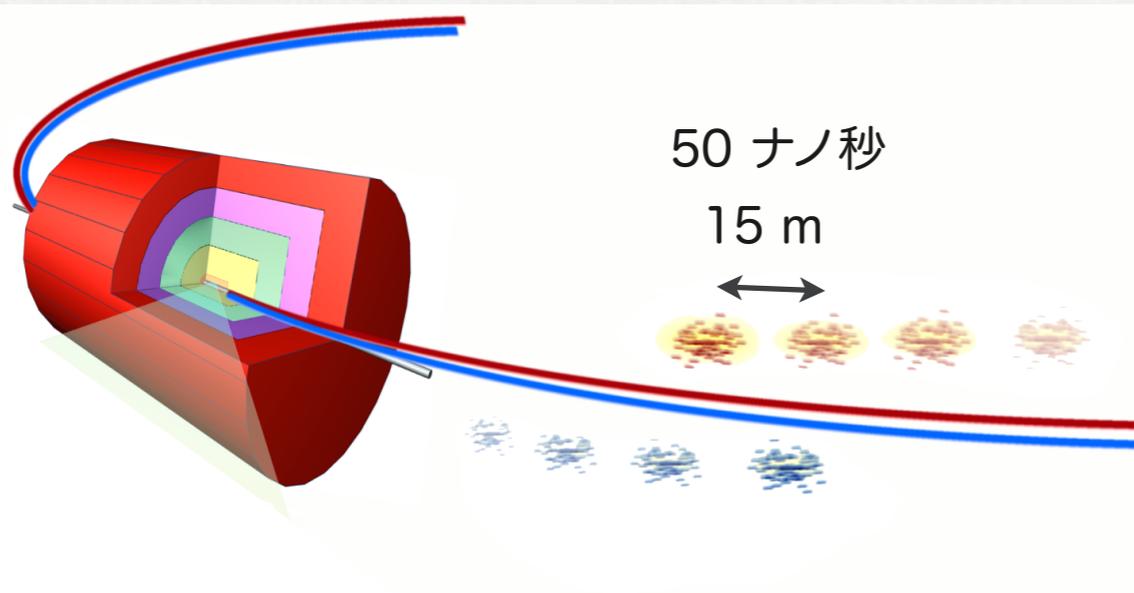
# LHC加速器の大きさ



周長 27 km !!  
地下鉄名城線と同じ



# 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	50ナノ秒
衝突点でのビーム半径	~0.020 mm
エネルギー	4TeV×4TeV

## 4 TeVに加速した陽子:

### ○ 速度

光の速度の99.9999997%の速度

光速 - 30km/時

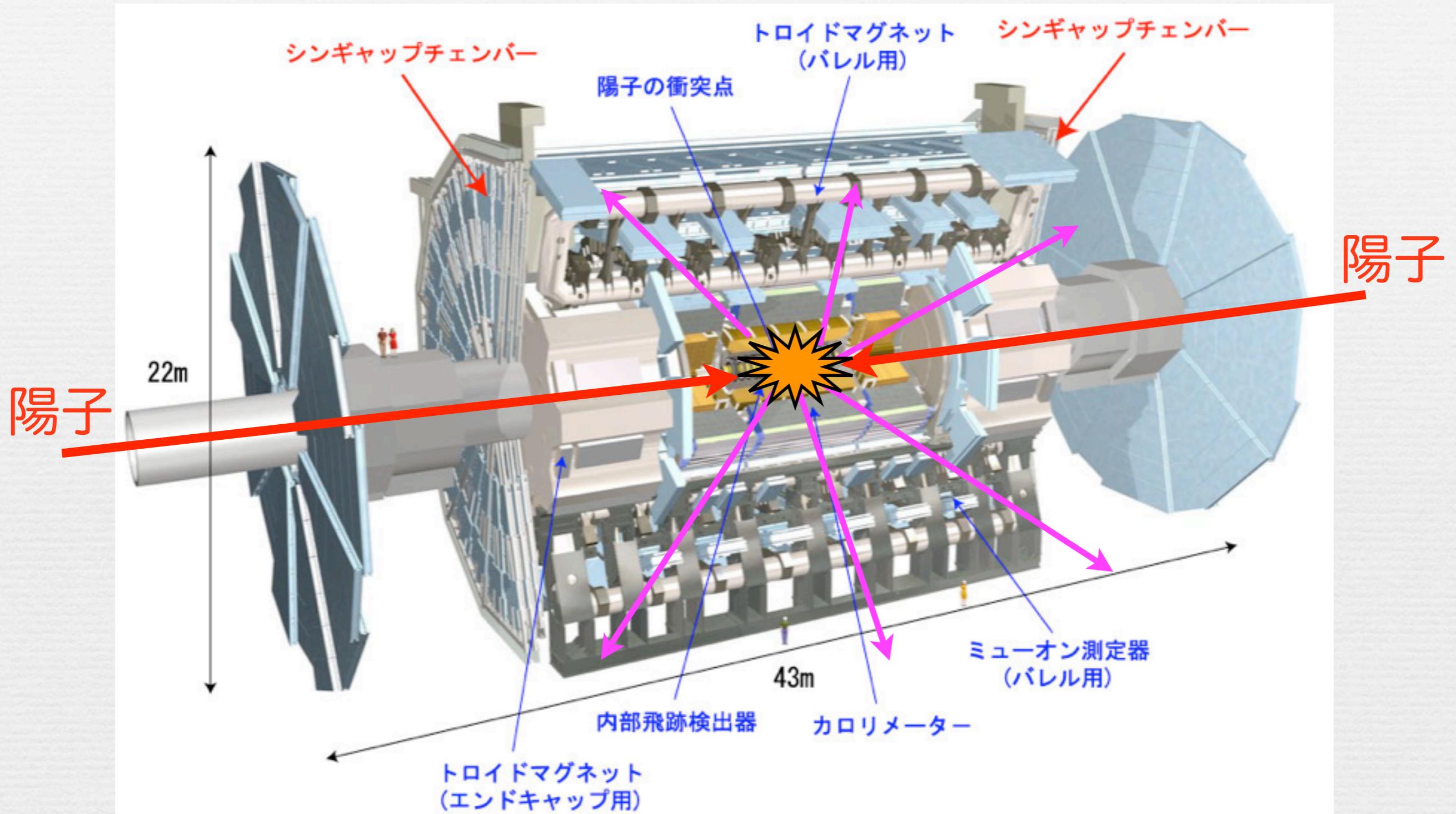
### ○ エネルギー

陽子1個 ... 子バエの運動エネルギー程度

加速器内の全陽子 ...



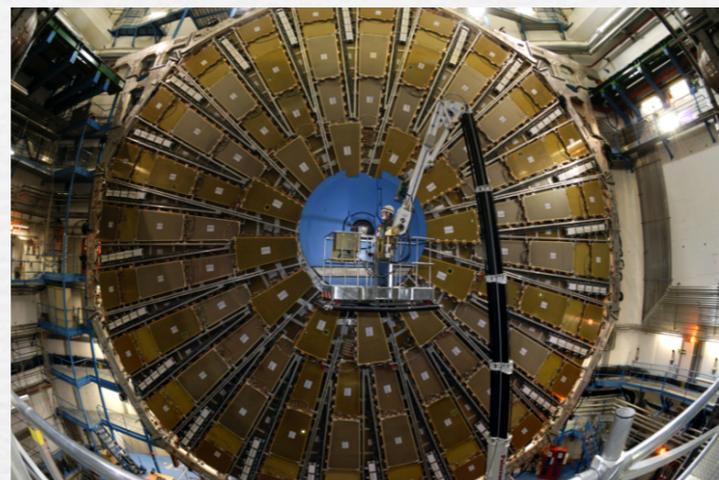
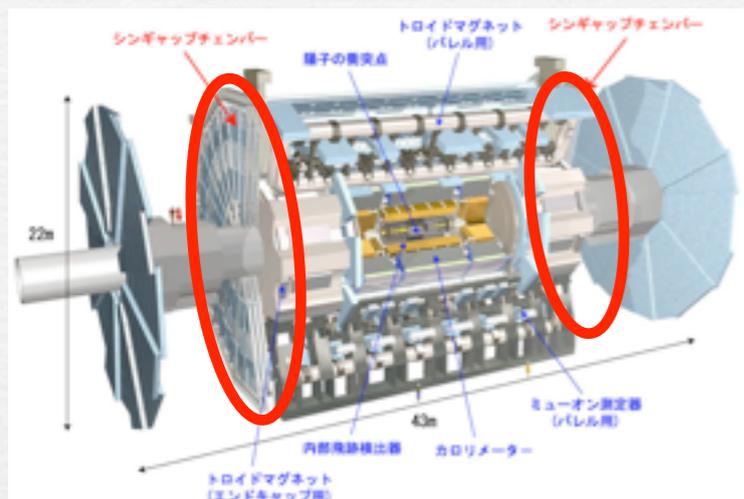
# 粒子検出器 アトラス検出器



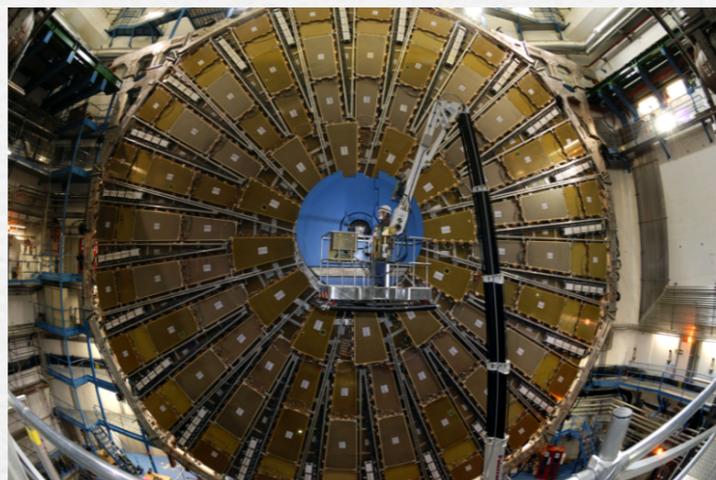
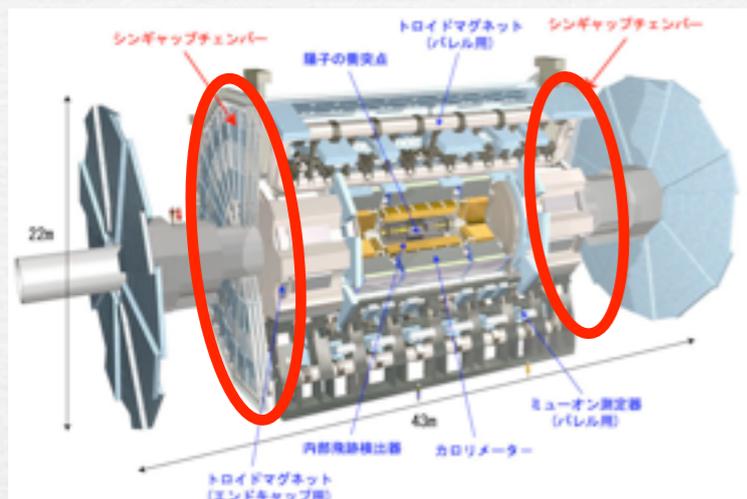
ヒッグス粒子は不安定 → 複数の安定粒子に化ける(崩壊する)

電子、光子、 $\mu$ 粒子、 $\pi^0$ 粒子、 $\pi^\pm$ 粒子、 $K^\pm$ 粒子、陽子、中性子

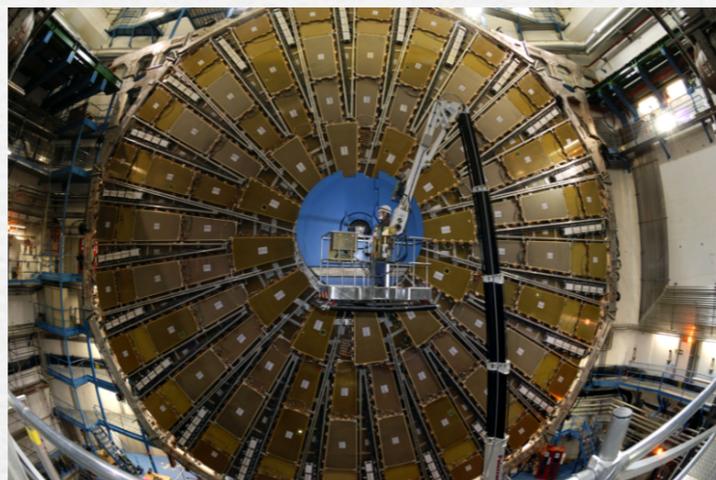
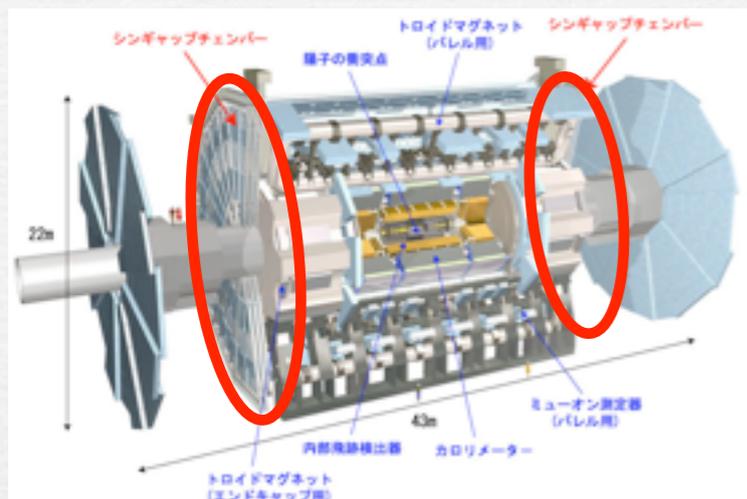
# 検出器の建設



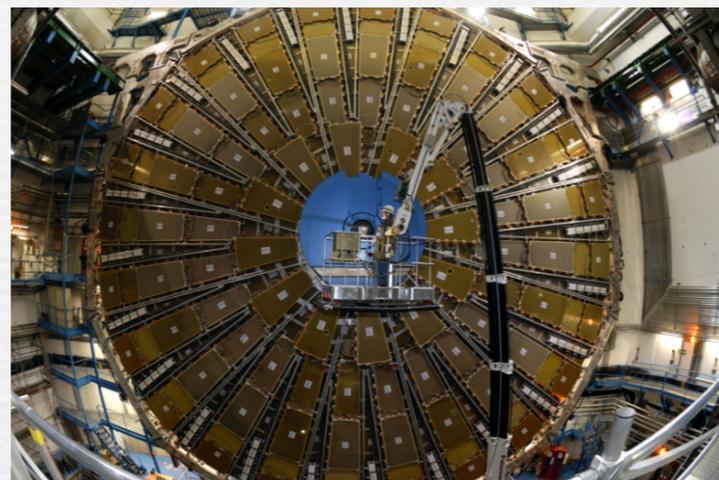
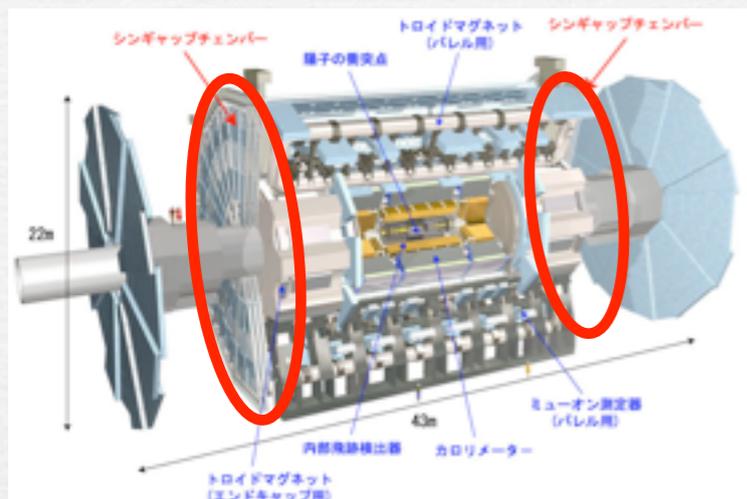
# 検出器の建設



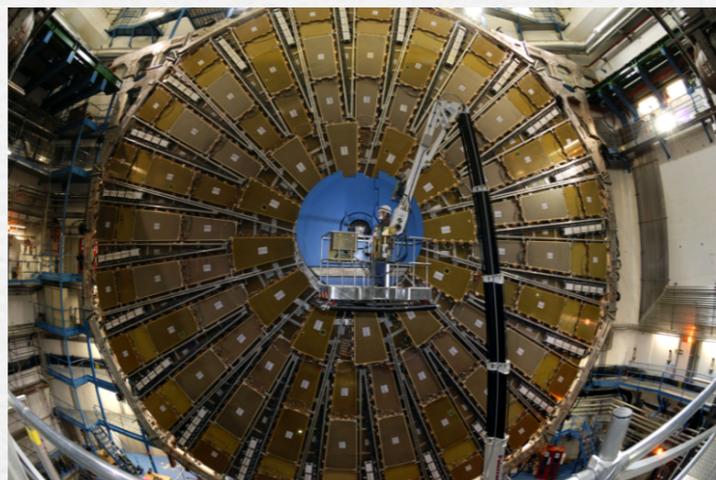
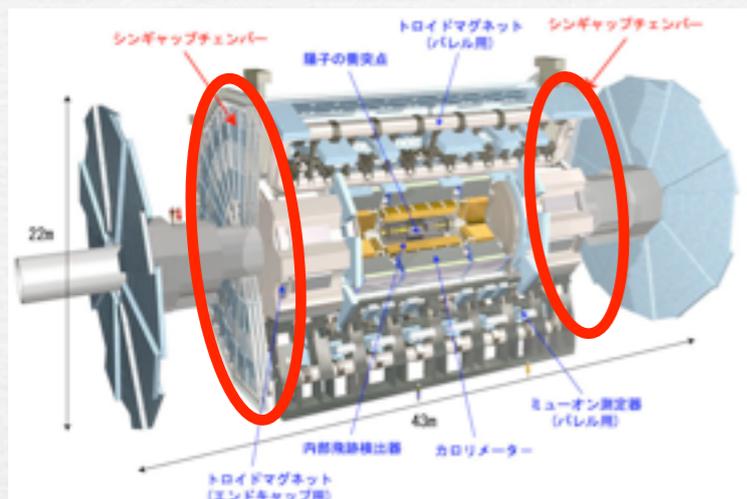
# 検出器の建設



# 検出器の建設



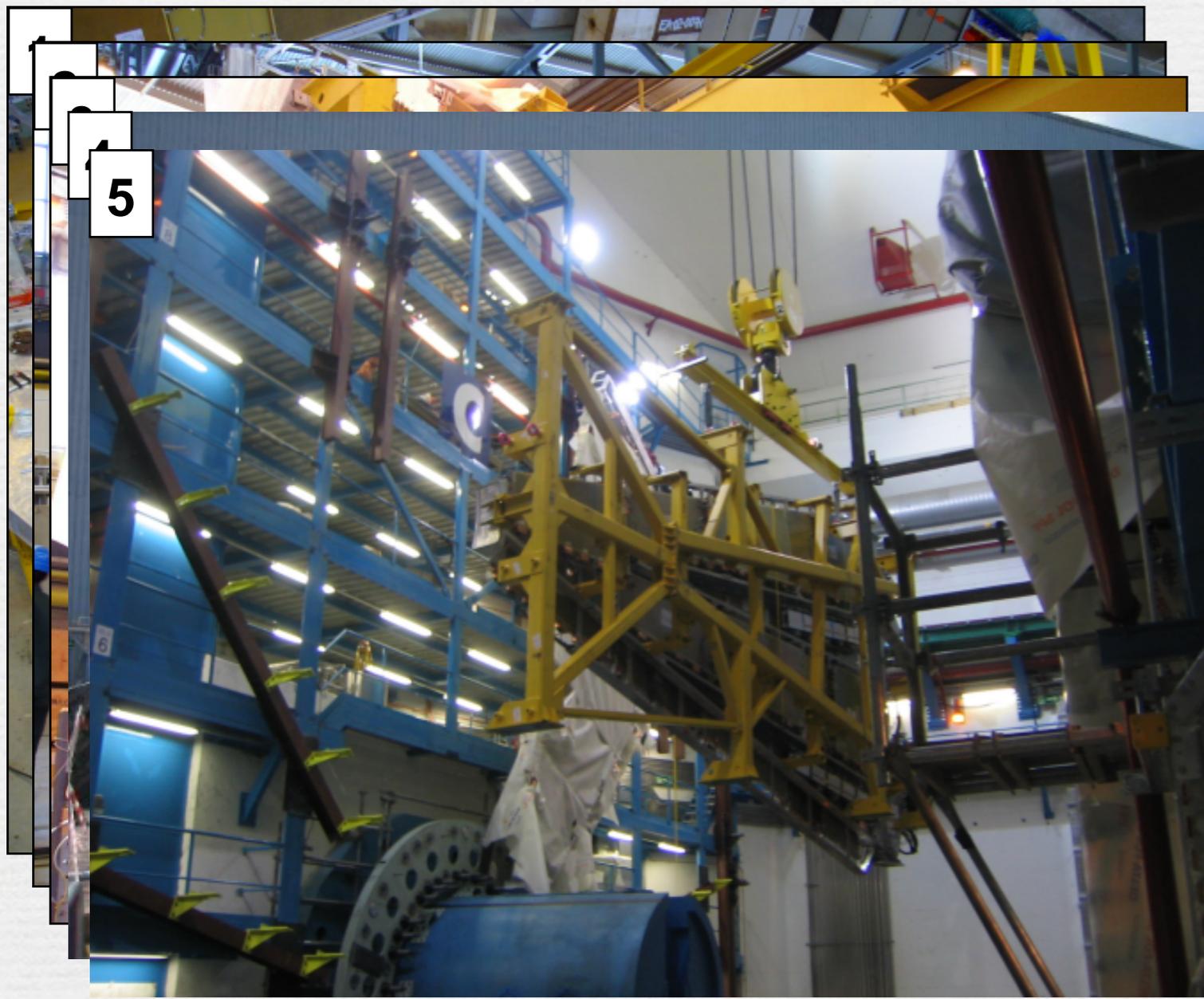
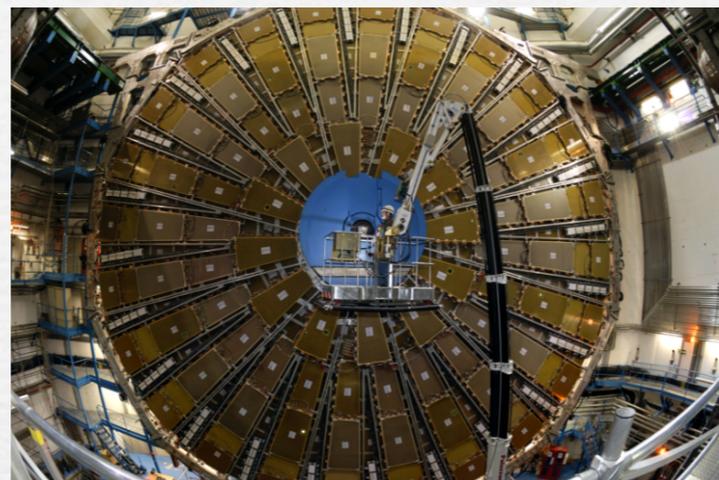
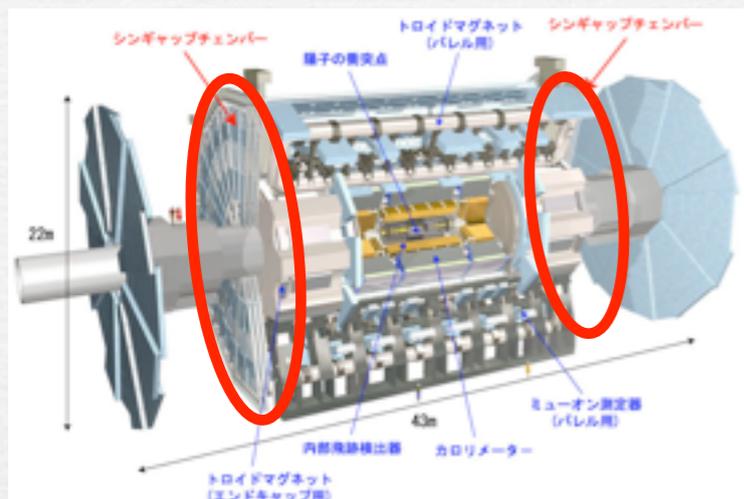
# 検出器の建設



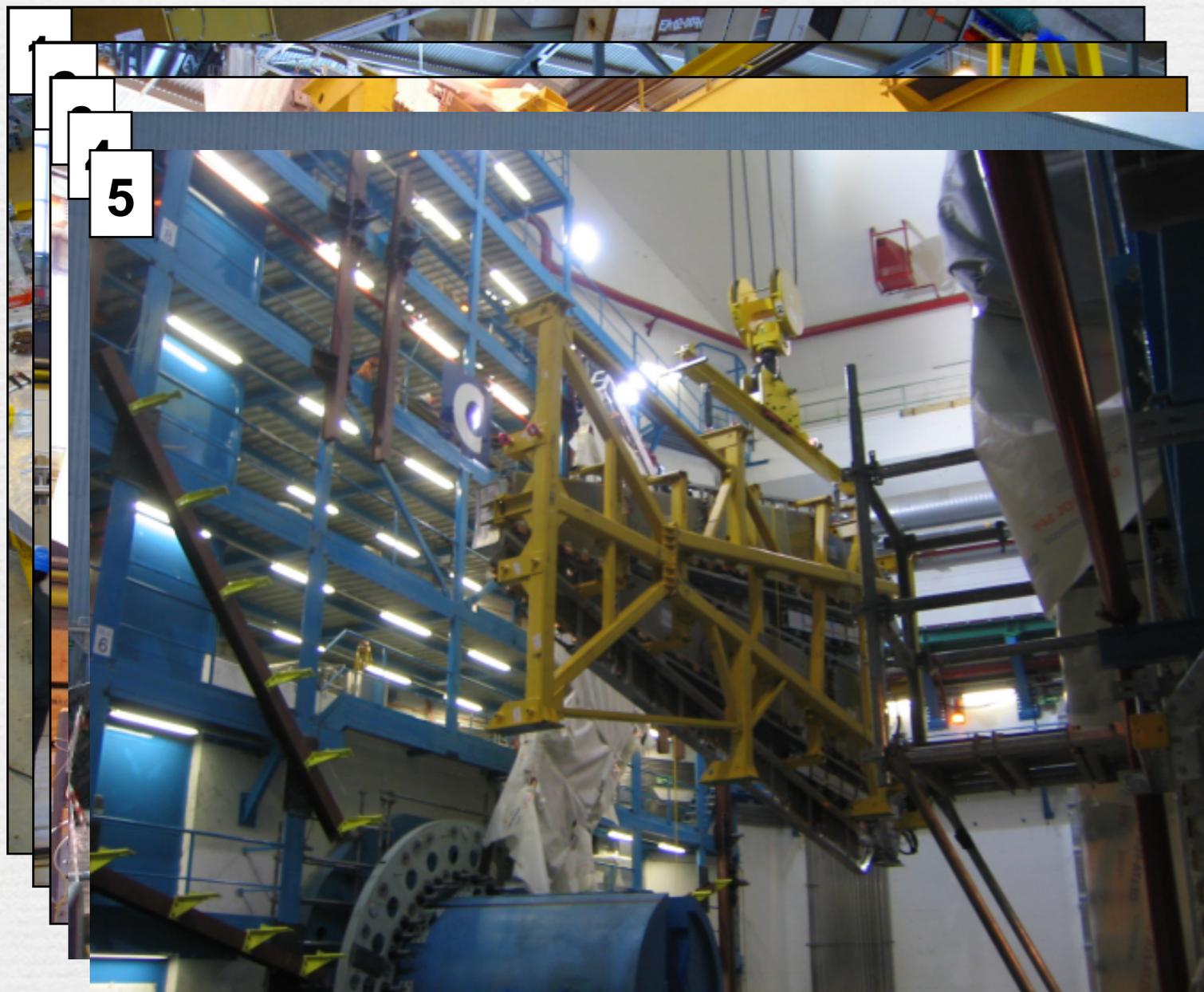
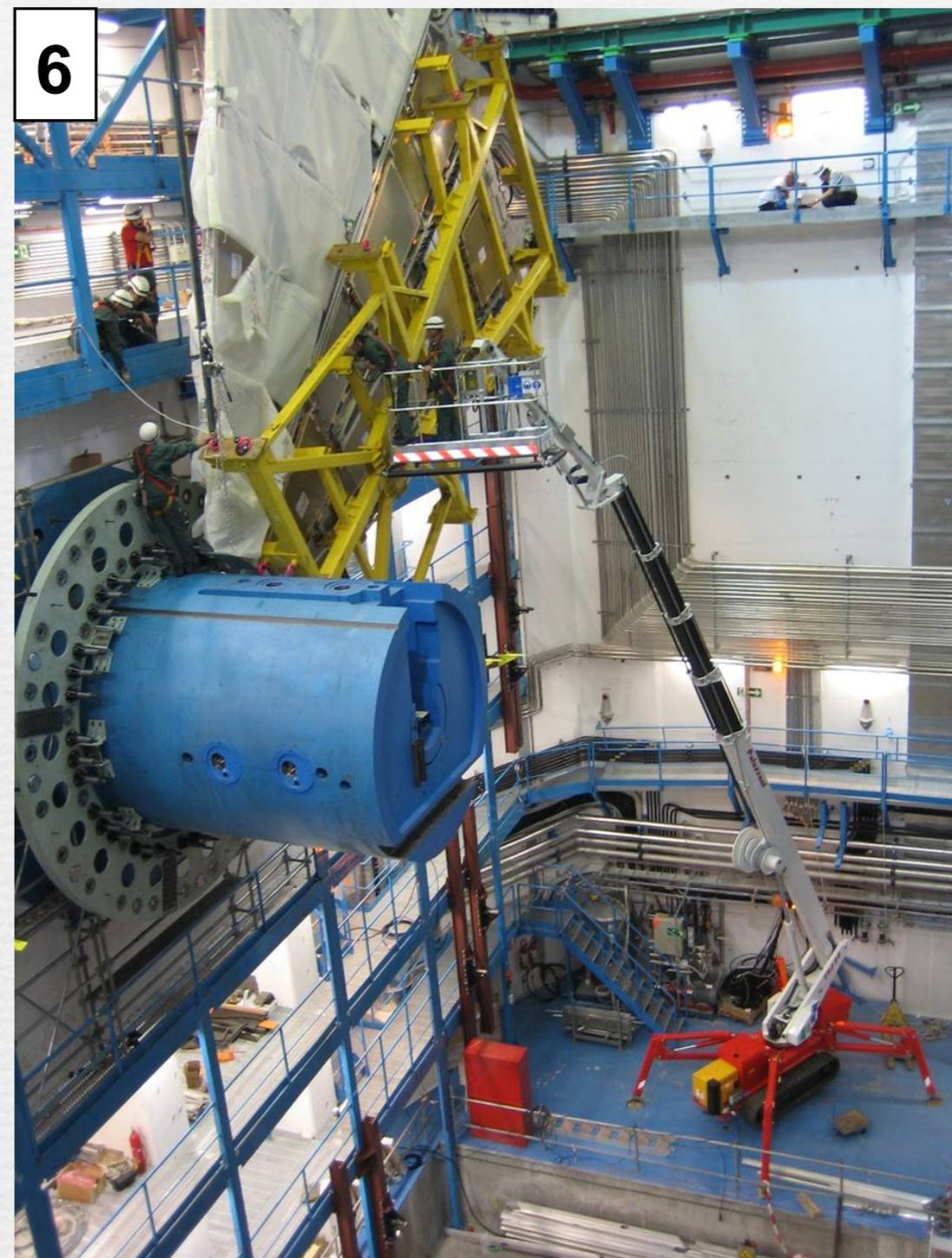
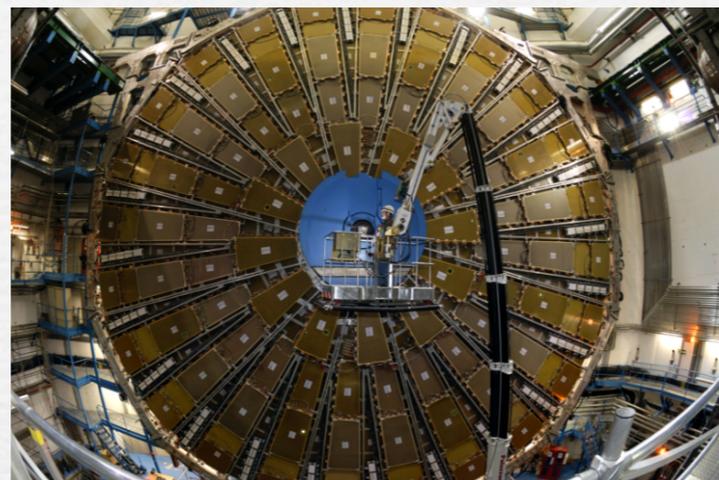
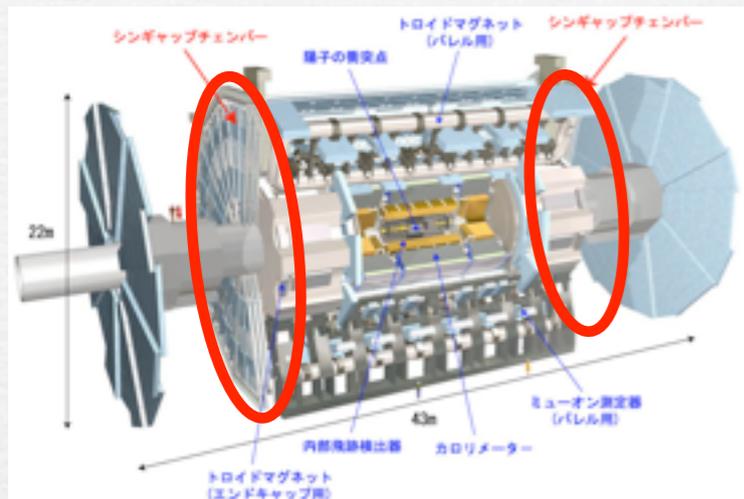
4



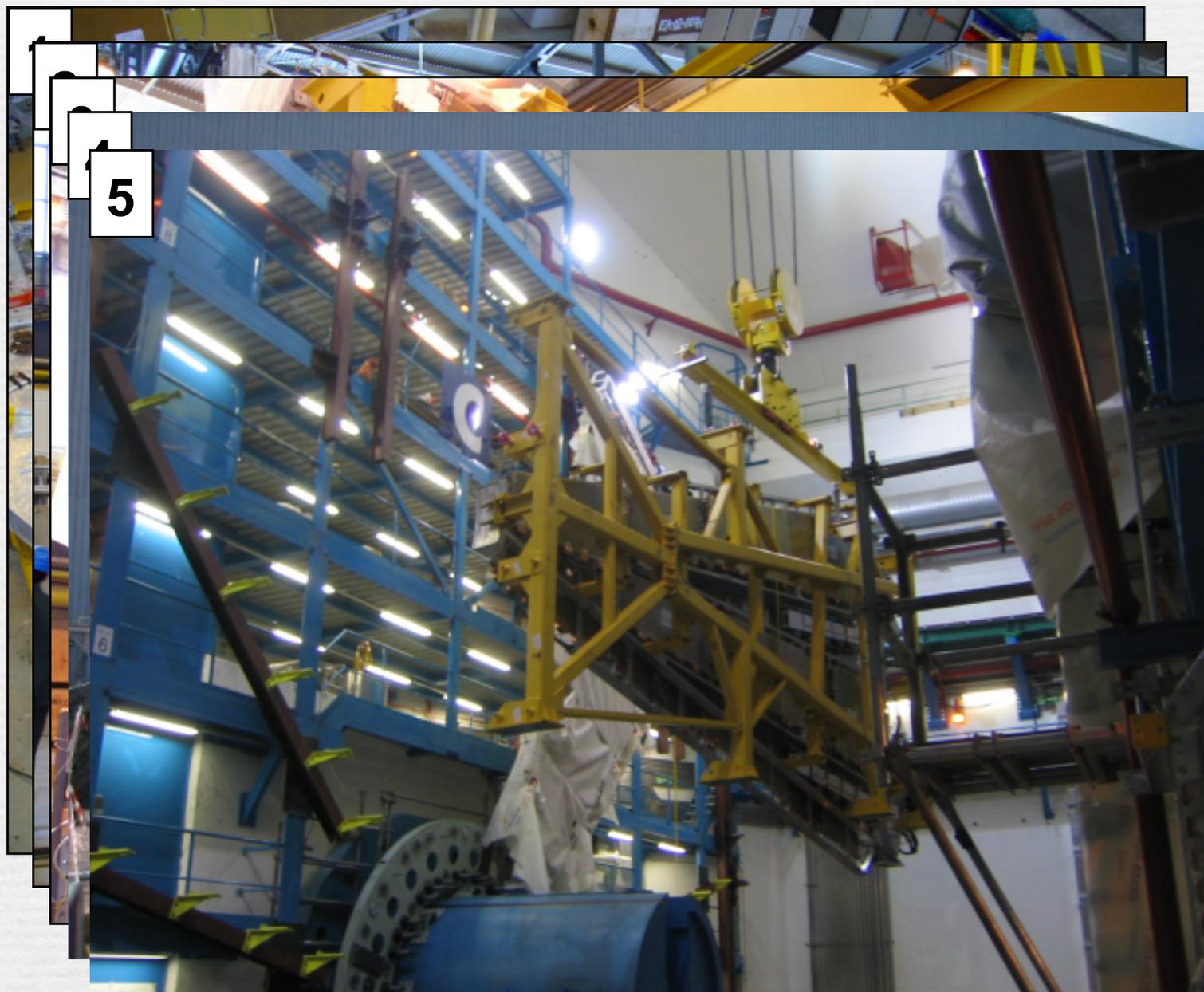
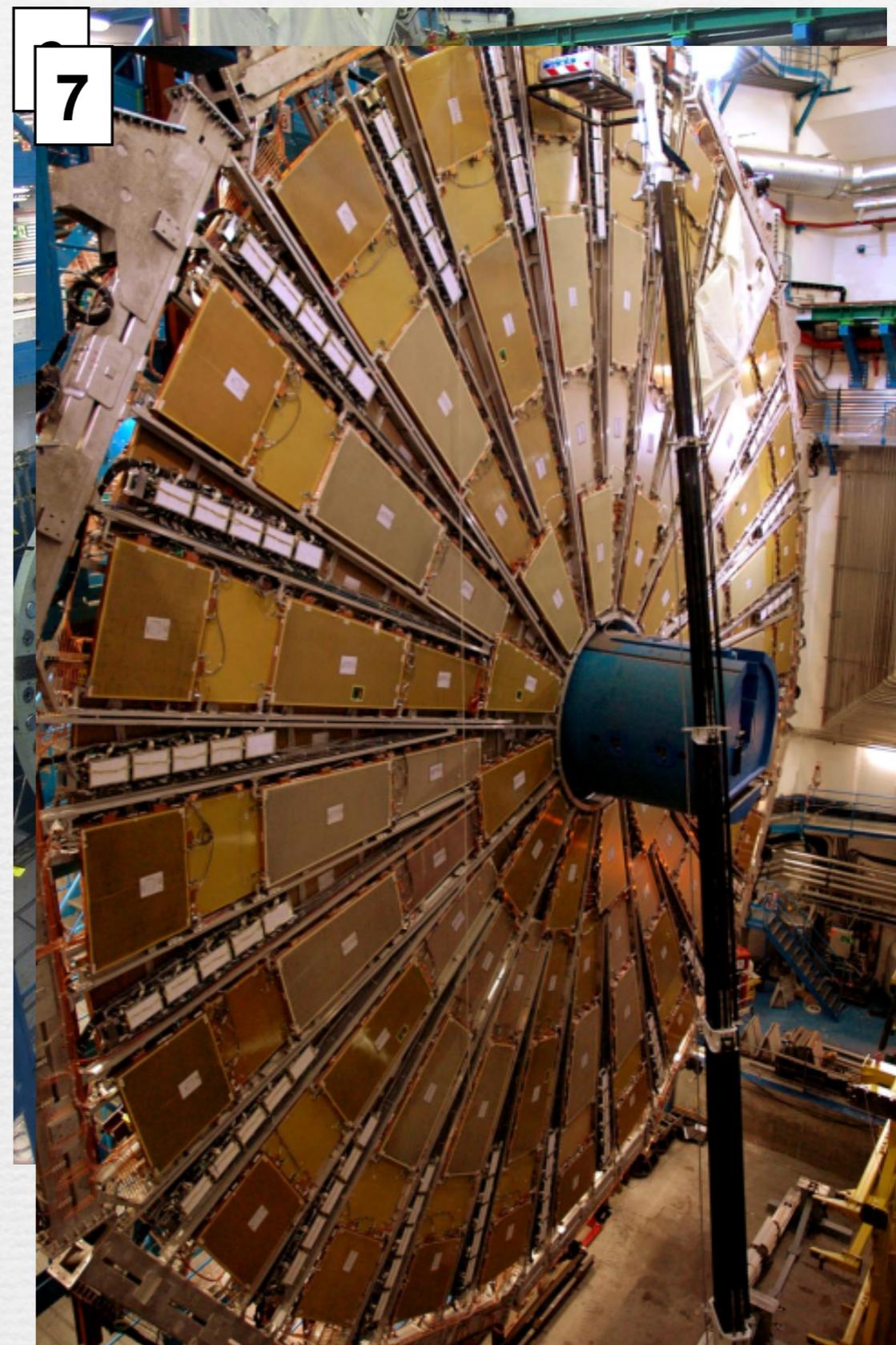
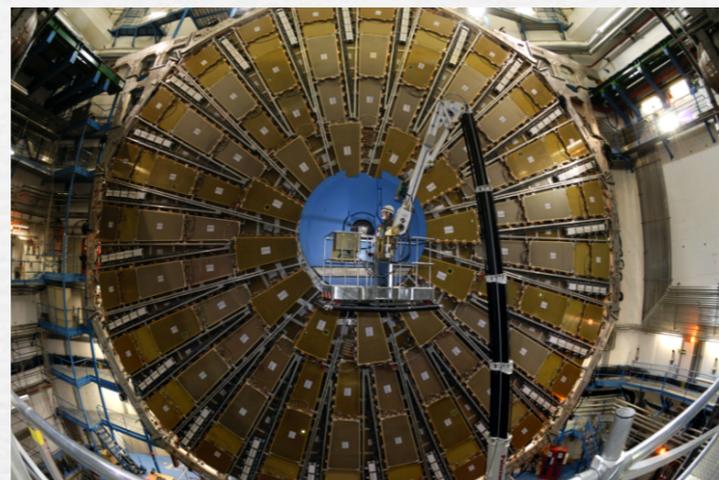
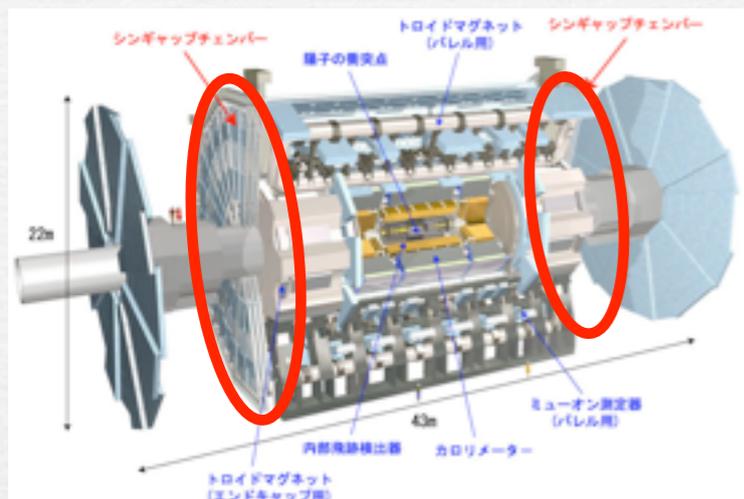
# 検出器の建設



# 検出器の建設



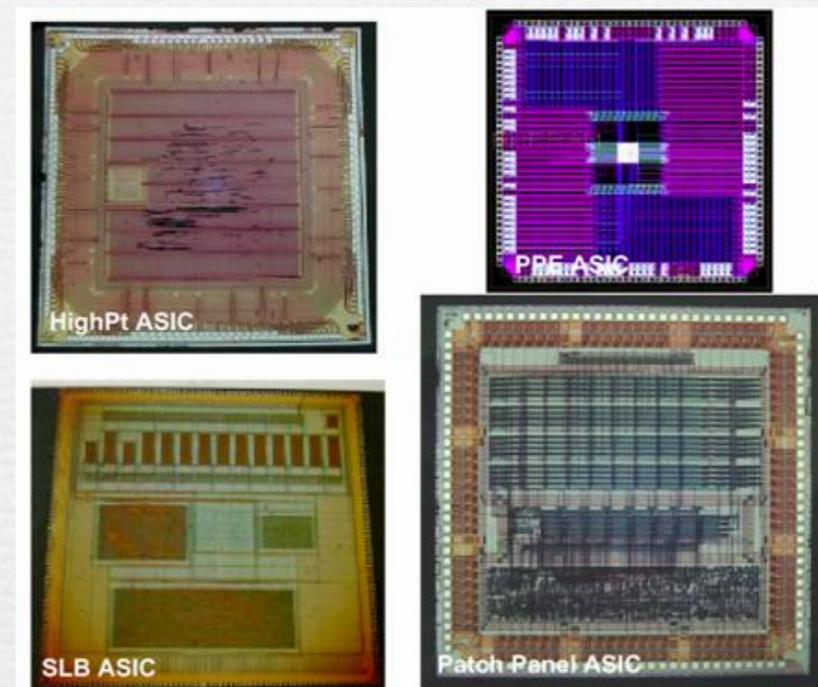
# 検出器の建設



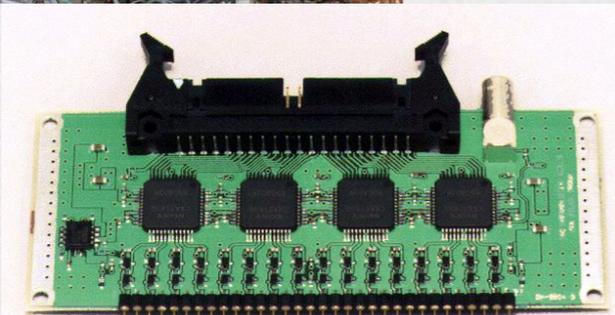
# 検出器の建設



32万チャンネルの回路も研究者の手作り



若い学生達が頑張っています！！！！



# 新粒子の発見とその意義

# 陽子・陽子衝突

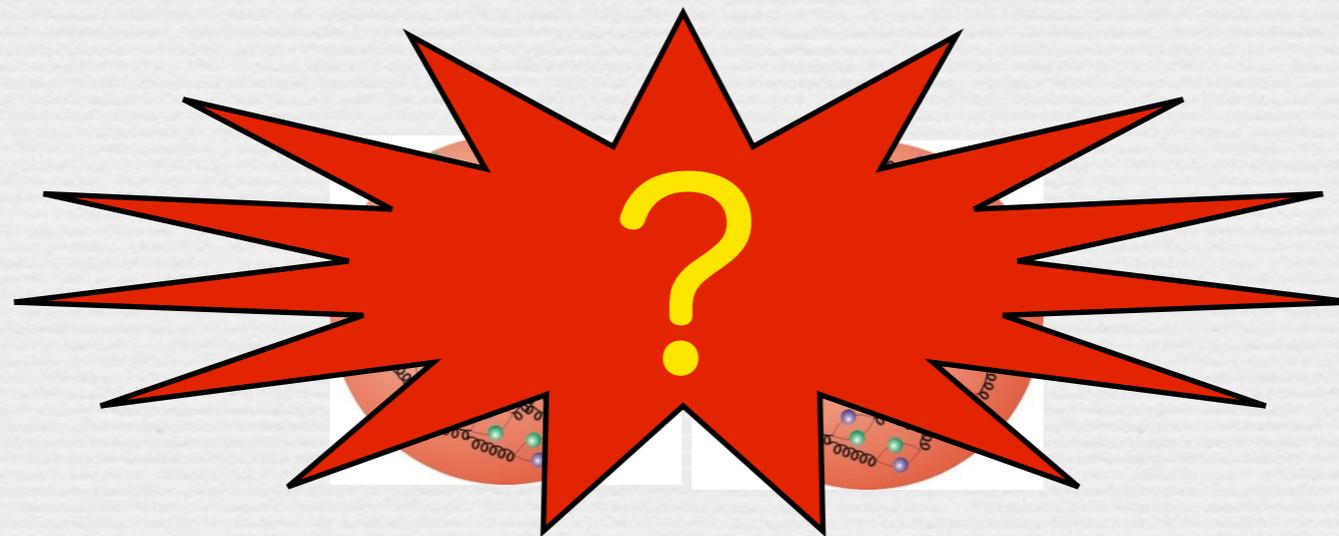
# 陽子・陽子衝突

# 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	これまでの反応回数
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 7千万 回	700兆 回
ヒッグス粒子生成	100秒間に1回	10万 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	これまでの反応回数
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 7千万 回	700兆 回
ヒッグス粒子生成	100秒間に1回	10万 回

ヒッグス粒子は、  
10,000,000,000(百億)回に1回程度しか生成しない！



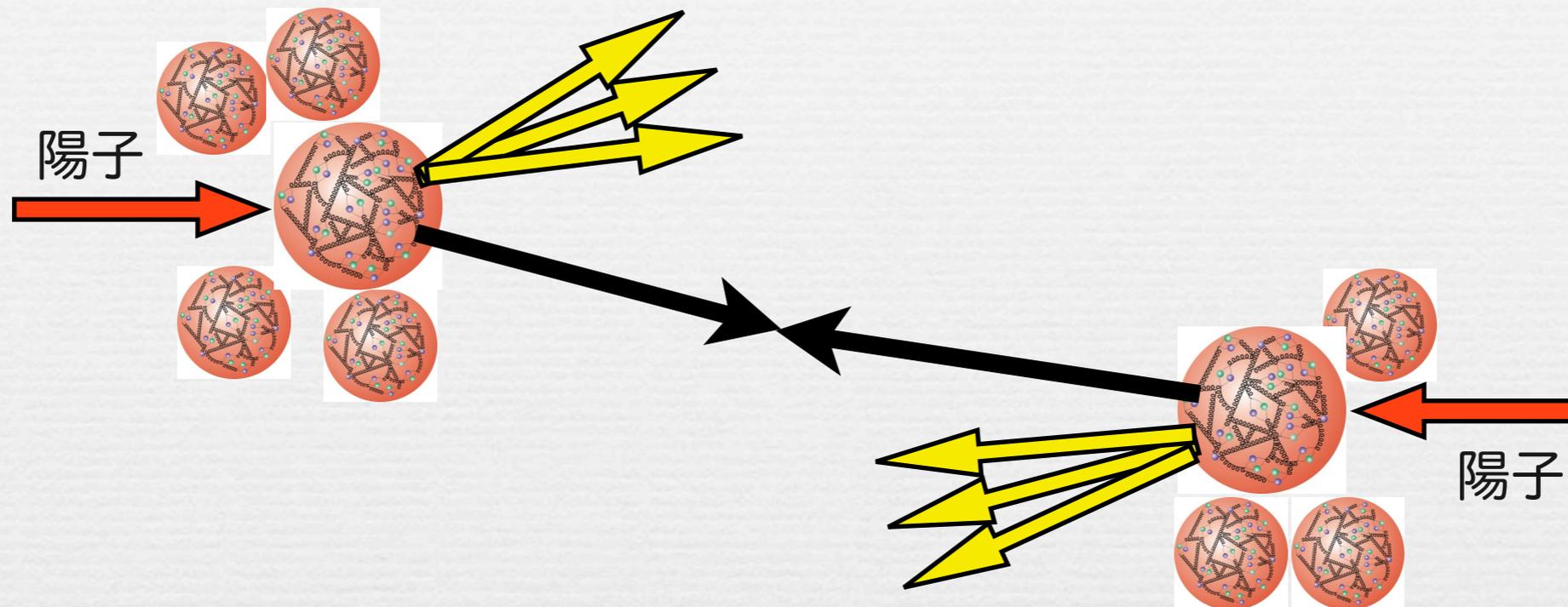
陽子同士の衝突：次の反応は予測不可能  
反応の起こる確率は解る

# 陽子・陽子衝突

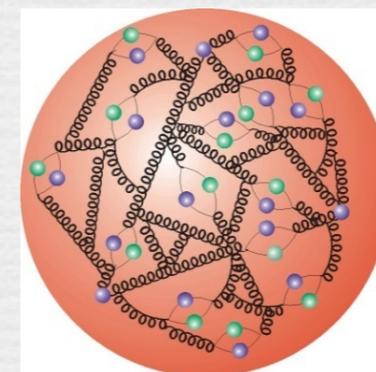
# 陽子・陽子衝突



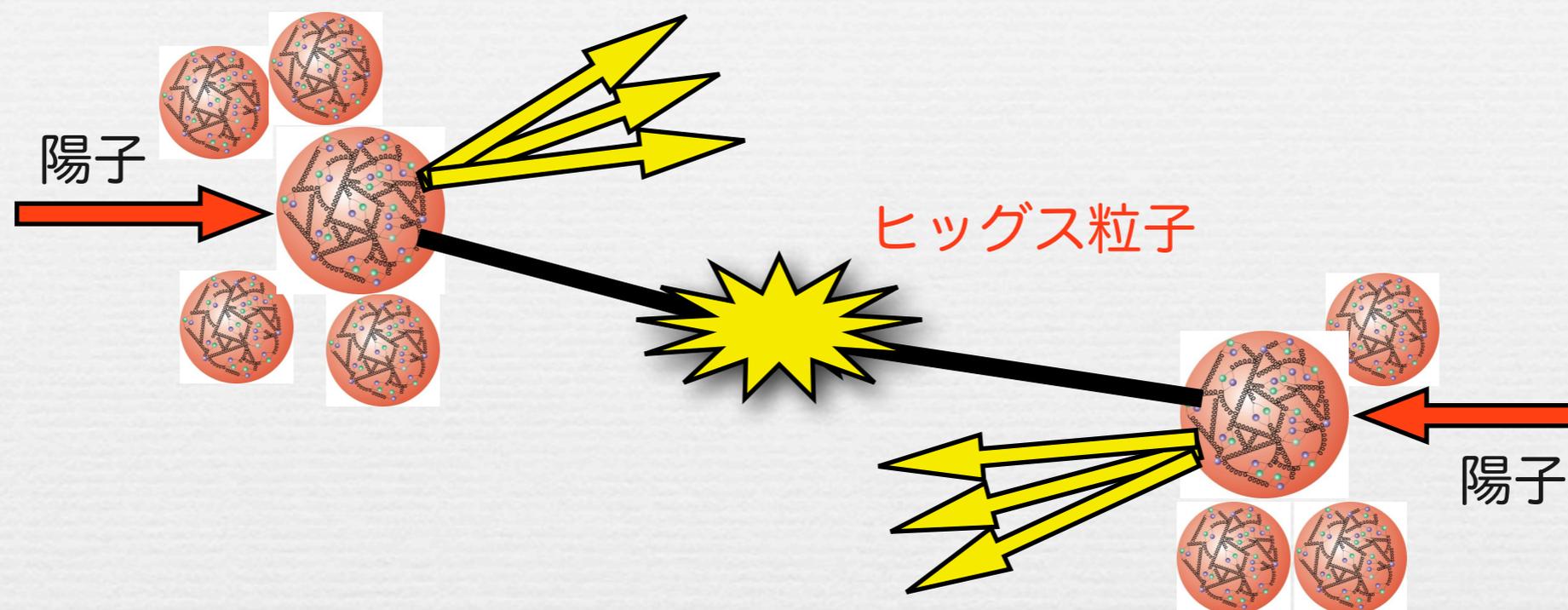
# 陽子・陽子衝突



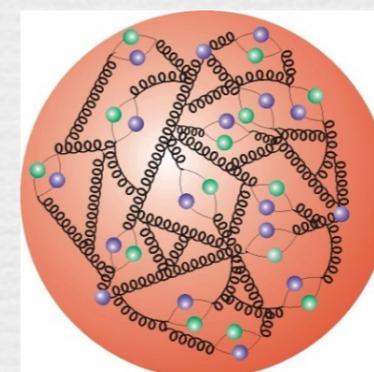
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン  
一部だけが衝突による反応に関与



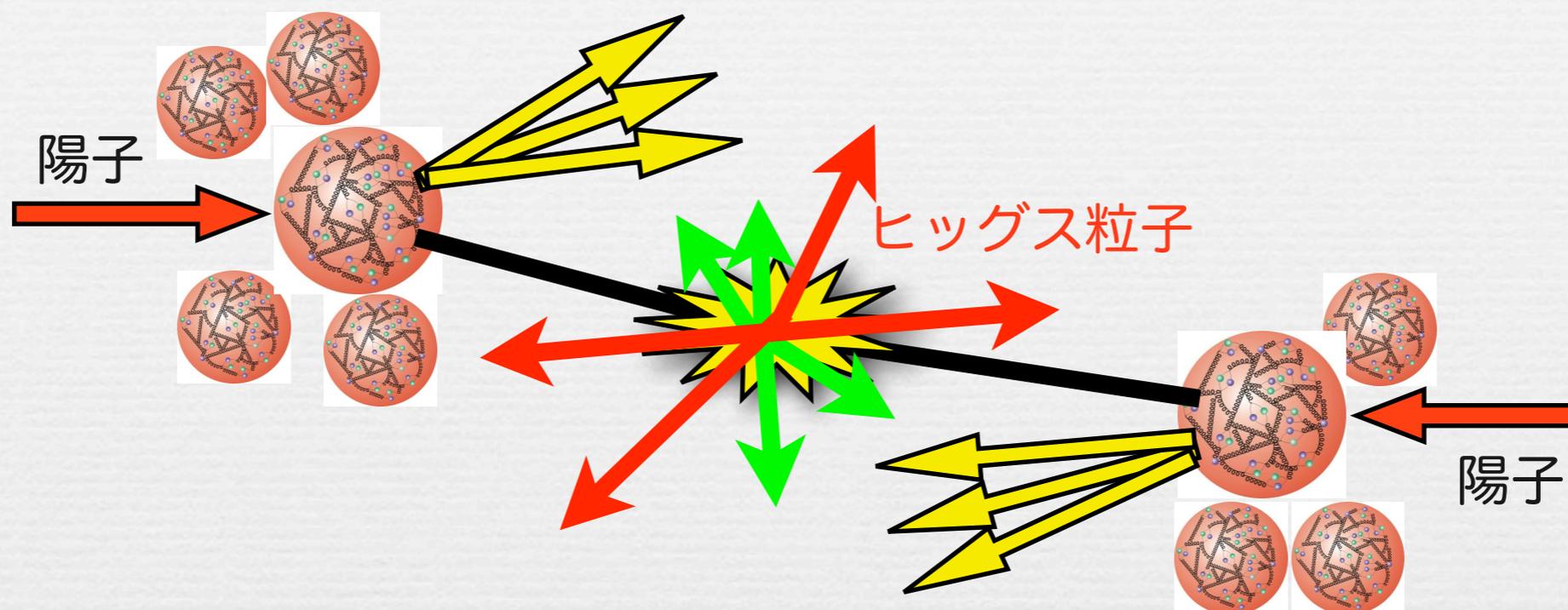
# 陽子・陽子衝突



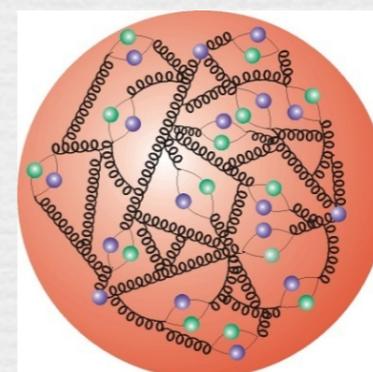
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン  
一部だけが衝突による反応に関与



# 陽子・陽子衝突

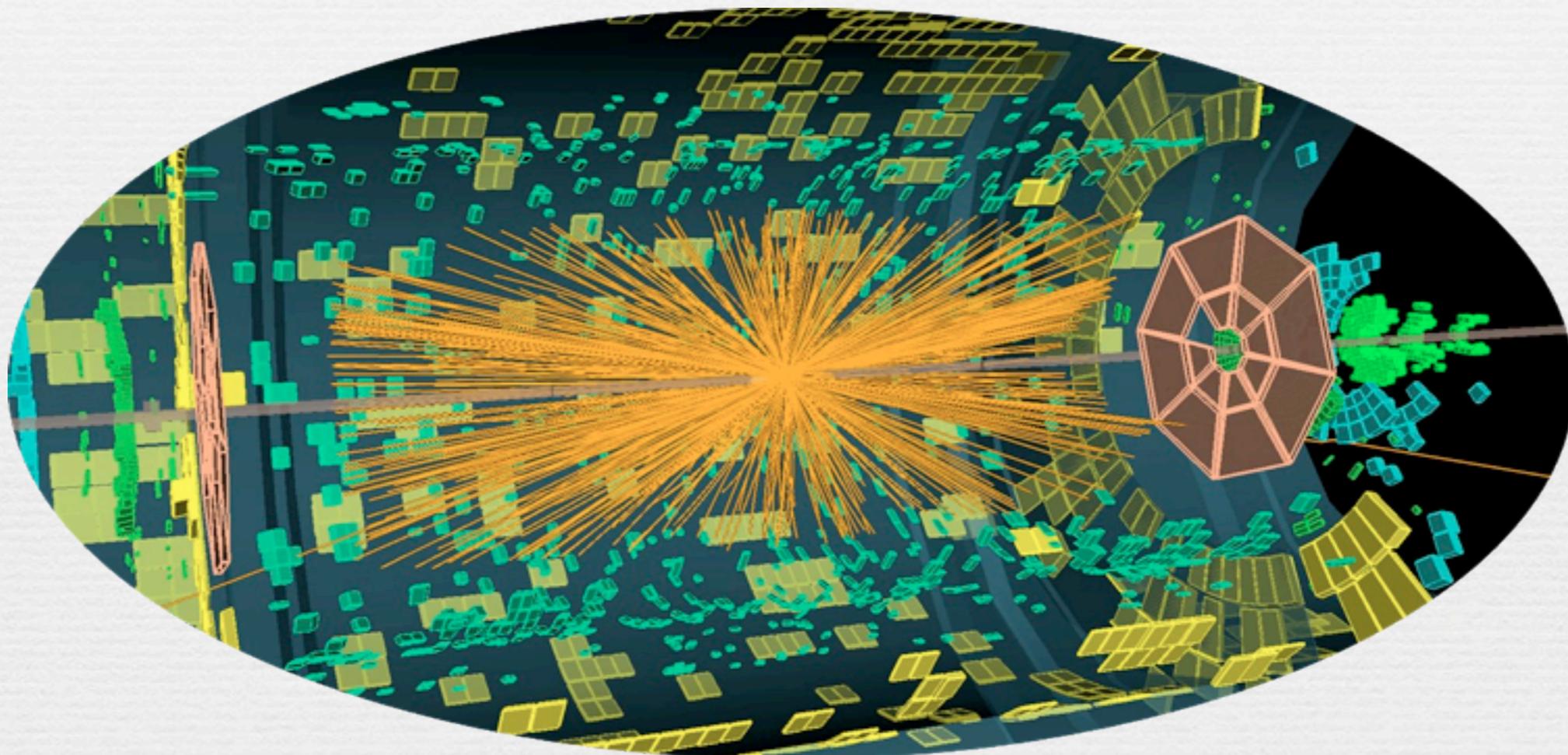


陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン  
一部だけが衝突による反応に関与



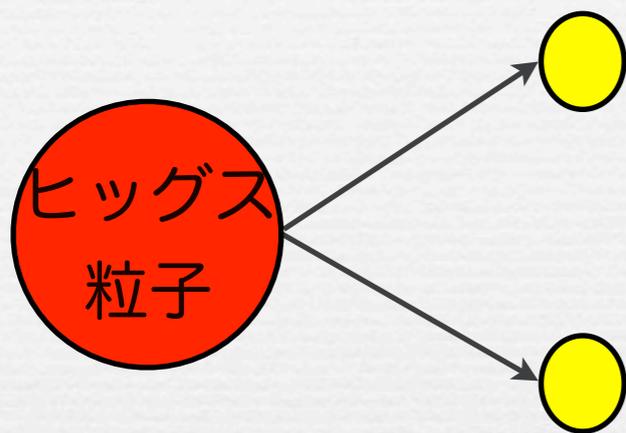
# 実際の陽子陽子衝突反応

全ての反応は、無数の安定粒子になる  
ヒッグス粒子があってもなくても



ヒッグス粒子を含む事象(百億分の1)を選ぶ  
ヒッグス粒子から崩壊した安定粒子を選ぶ  
ヒッグス粒子を復元する

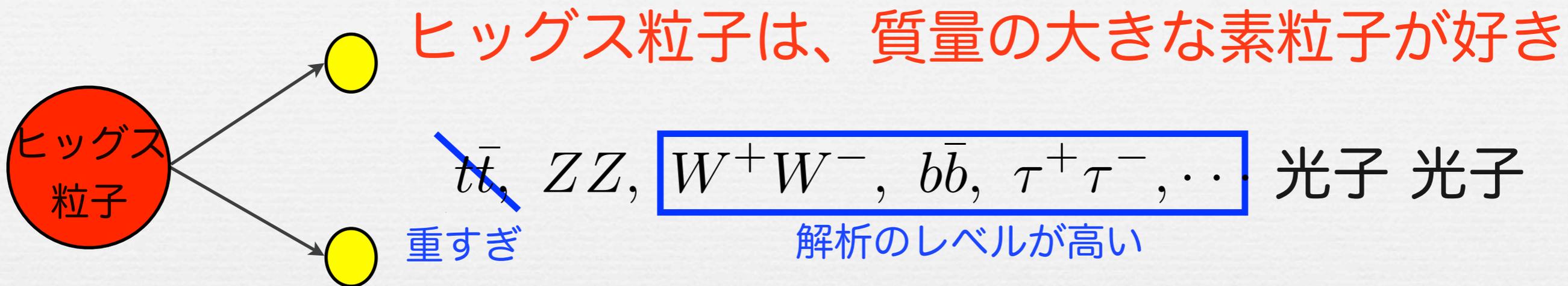
# ① ヒッグス粒子が何に化けるか？



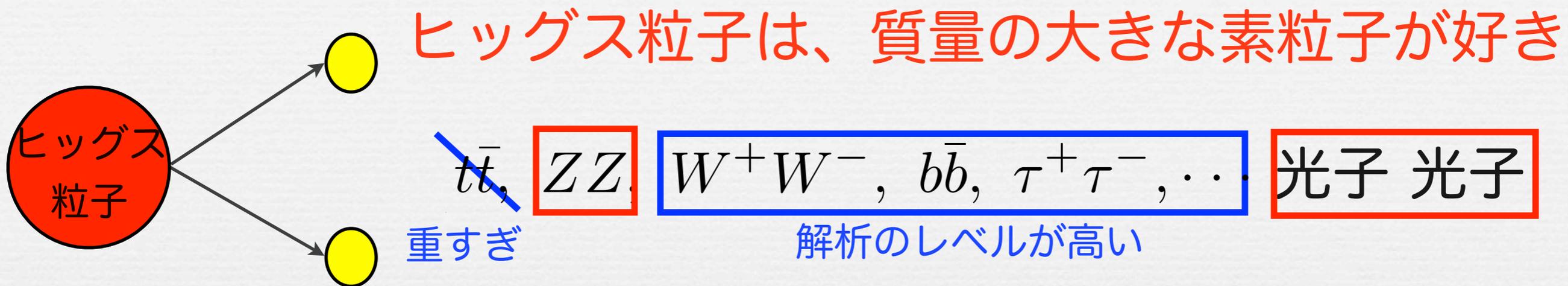
ヒッグス粒子は、質量の大きな素粒子が好き

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

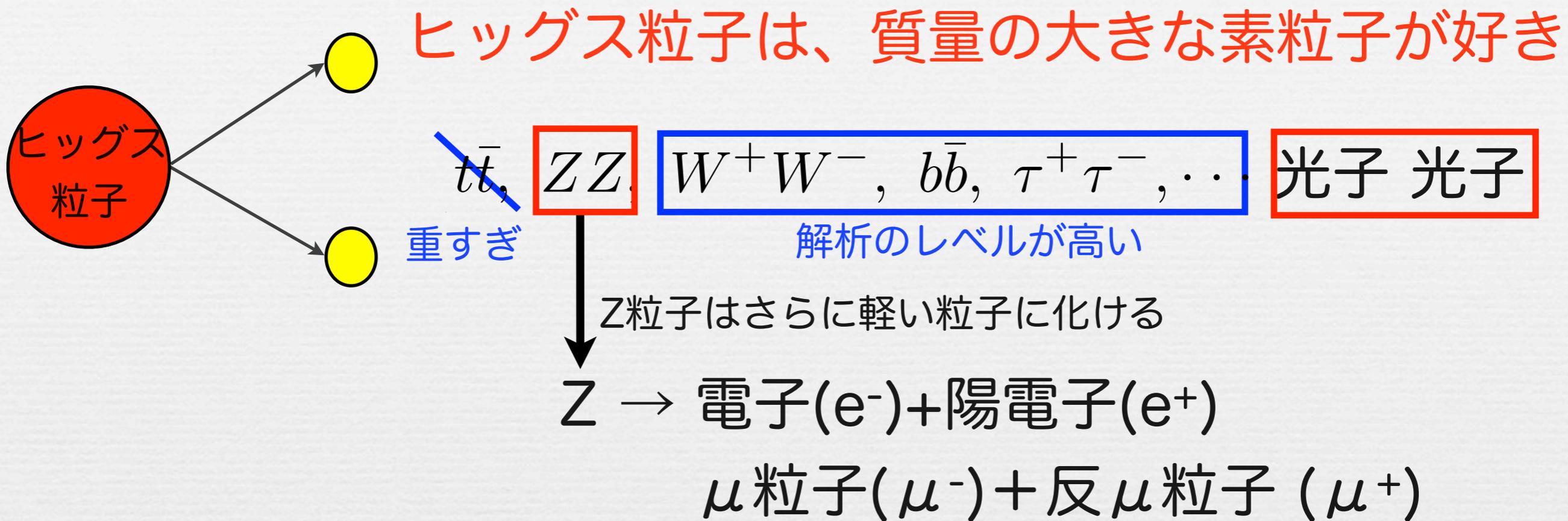
# ① ヒッグス粒子が何に化けるか？



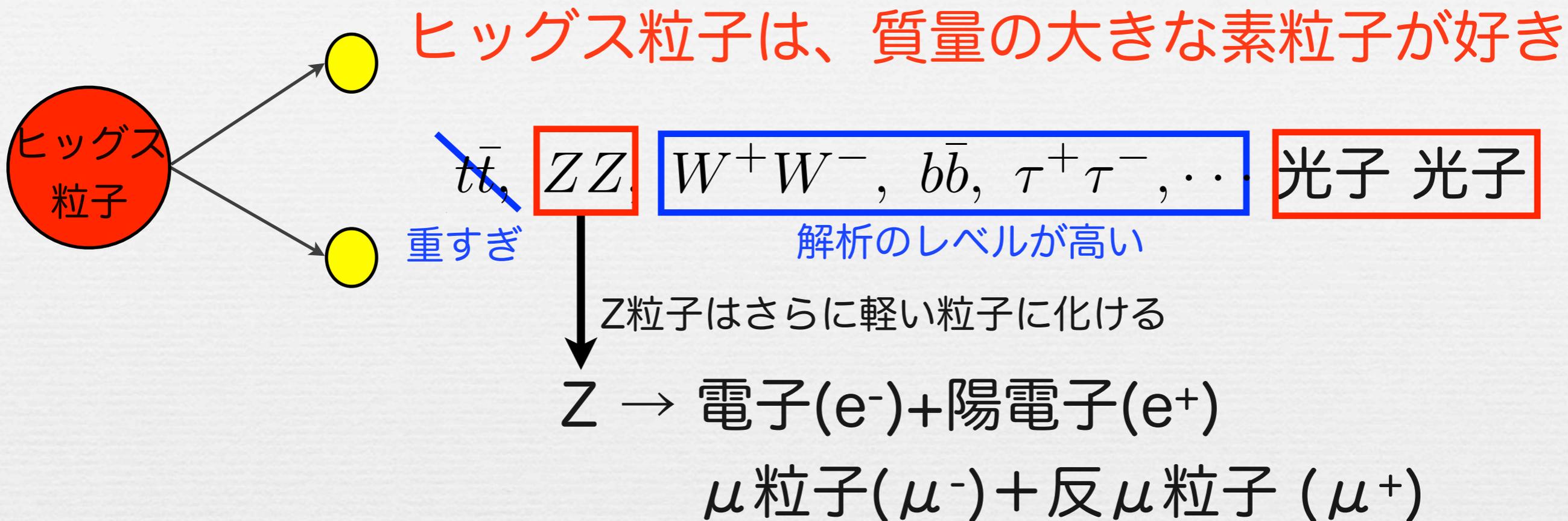
# ① ヒッグス粒子が何に化けるか？



# ① ヒッグス粒子が何に化けるか？



# ① ヒッグス粒子が何に化けるか？



ヒッグス粒子  $\rightarrow$  光子 光子

ヒッグス粒子  $\rightarrow ZZ \rightarrow e^+e^- e^+e^-, e^+e^- \mu^+\mu^-, \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$

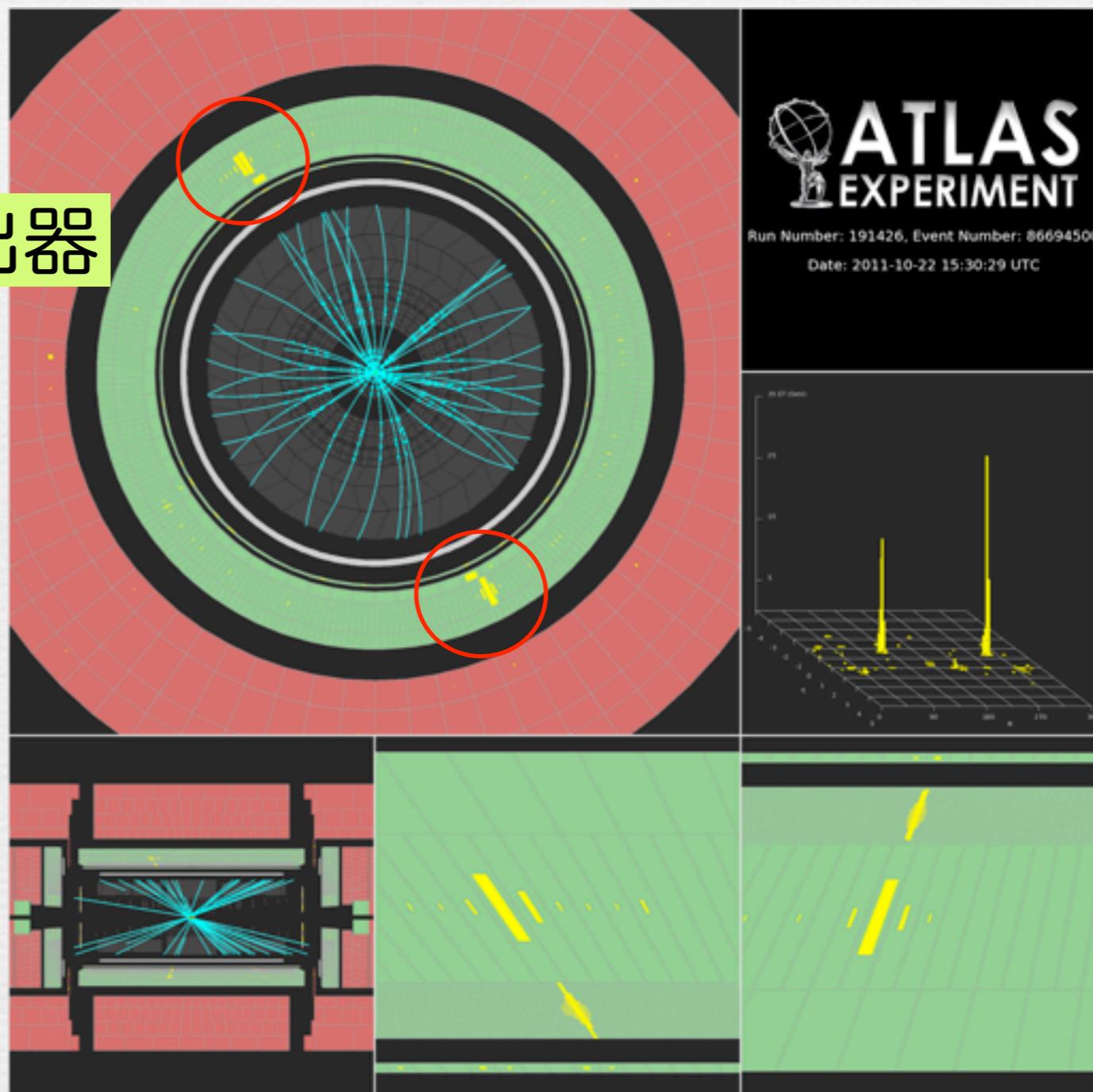
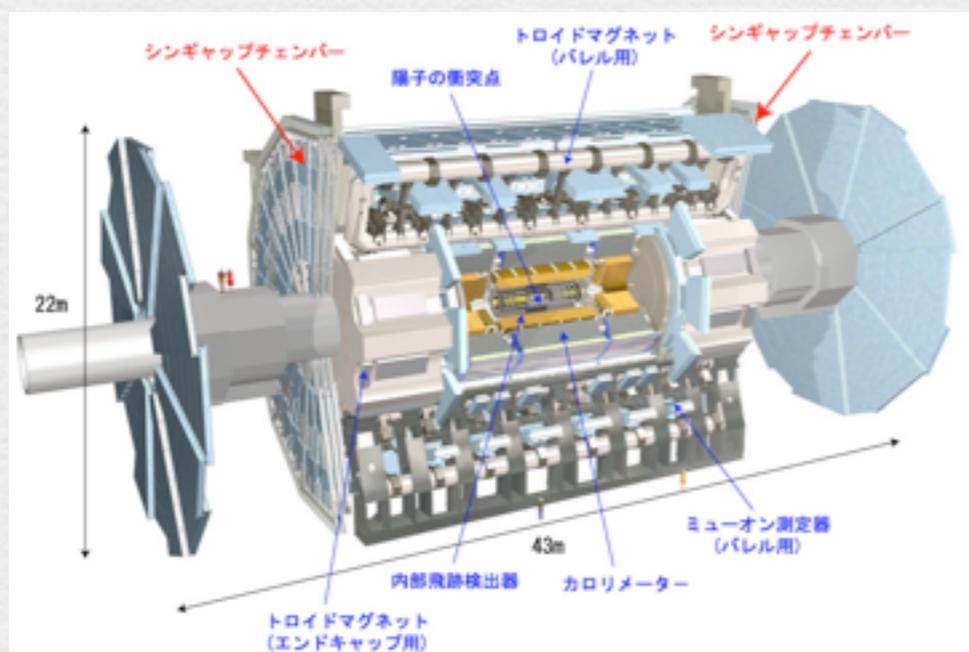
を例にして解析の詳細を紹介します

電子、 $\mu$ 粒子、光子からヒッグス粒子を「復元」する

## ② 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



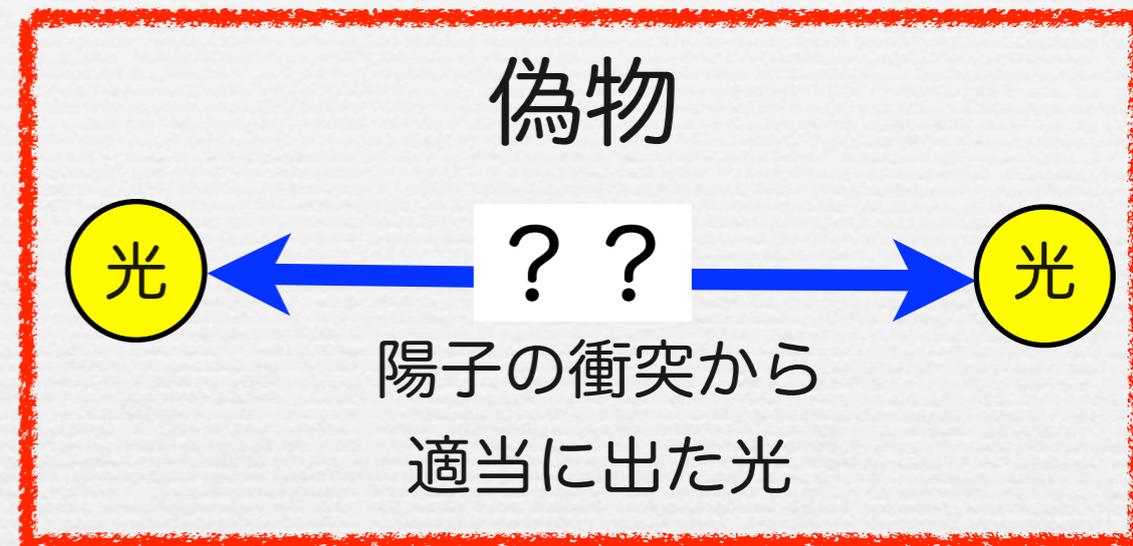
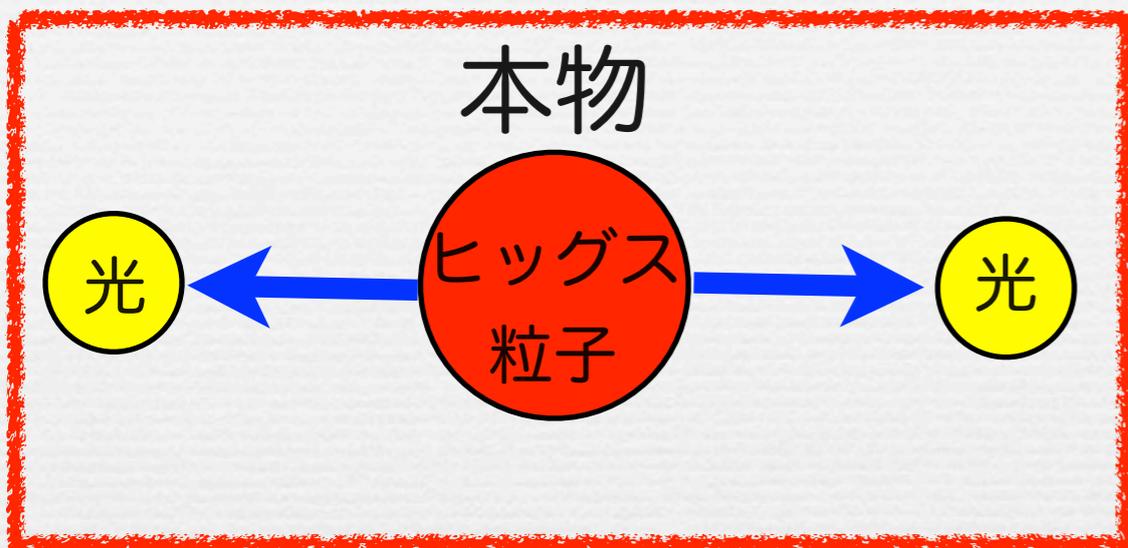
偽物：

陽子 + 陽子 → 光子 光子

光のエネルギーを検出器で測定

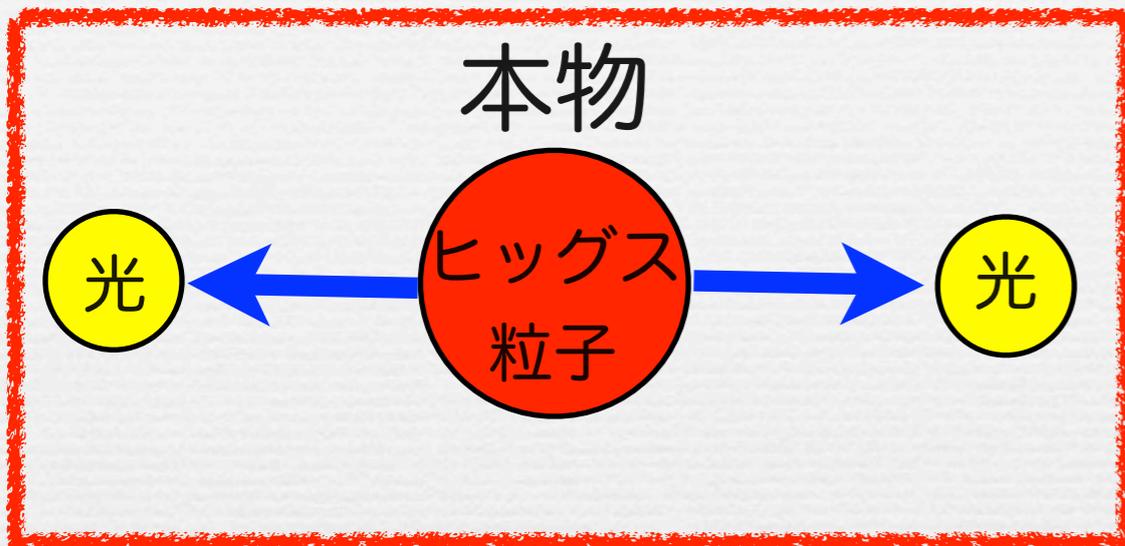
### ③ 質量の復元

2本の光子のあるイベントは2種類に大別される

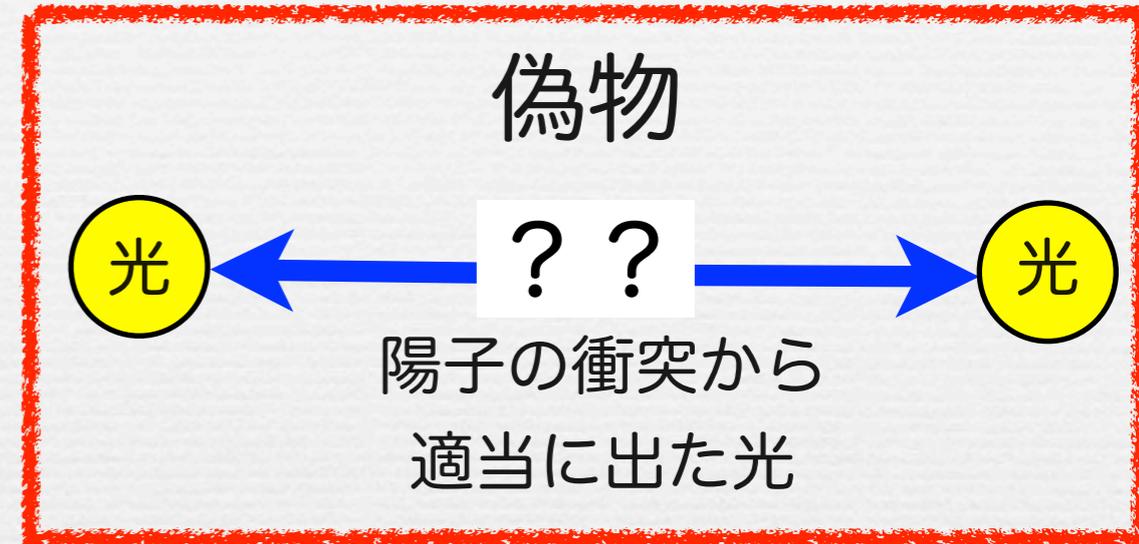


### ③ 質量の復元

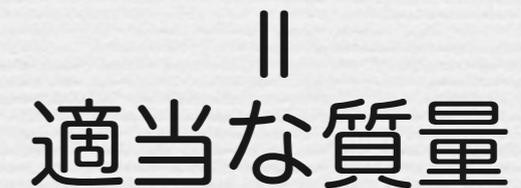
2本の光子のあるイベントは2種類に大別される



2個の光のエネルギー

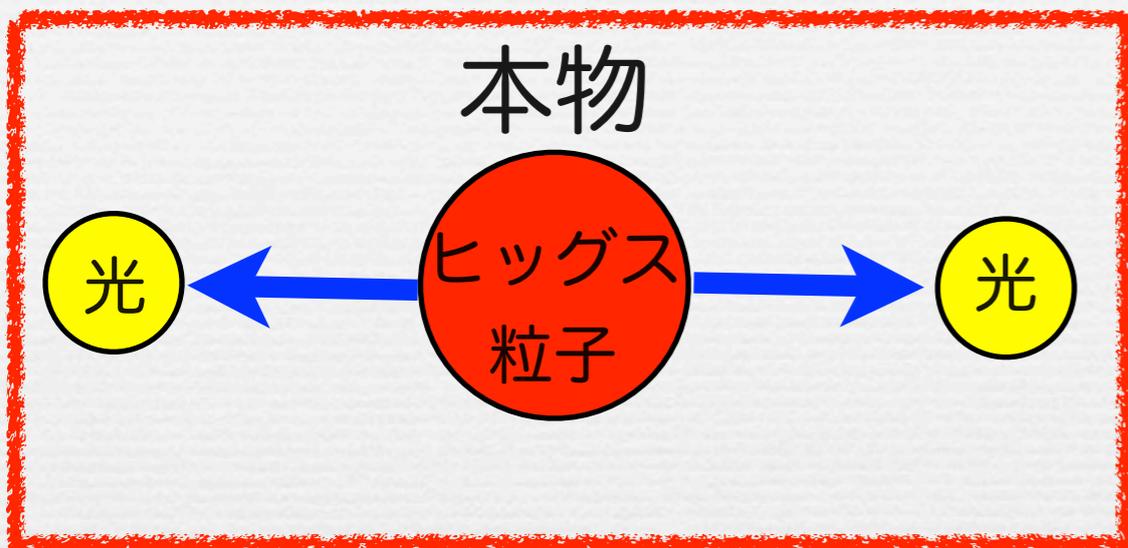


2個の光のエネルギー



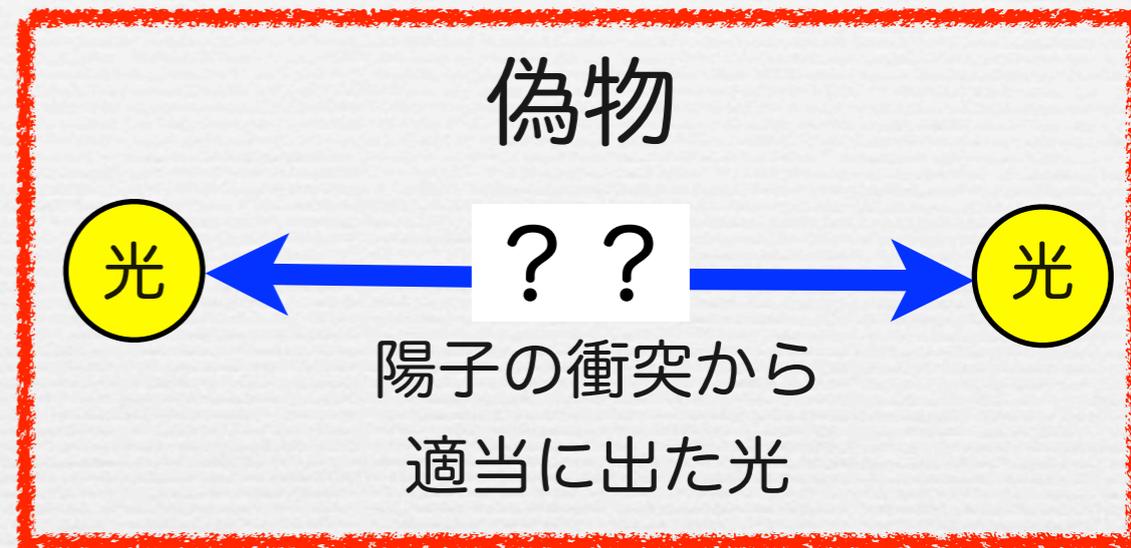
### ③ 質量の復元

2本の光子のあるイベントは2種類に大別される



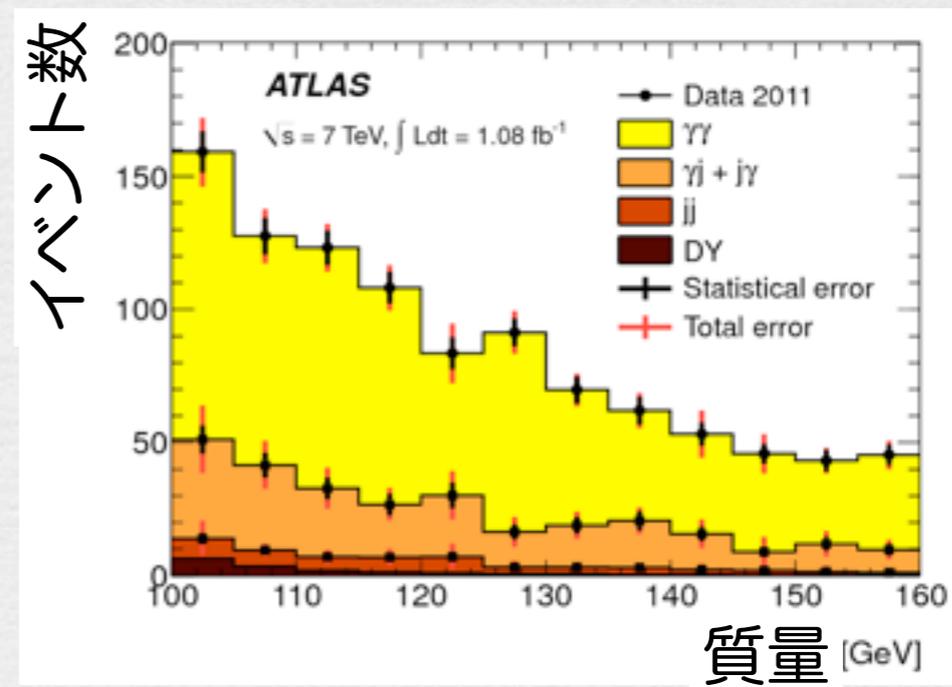
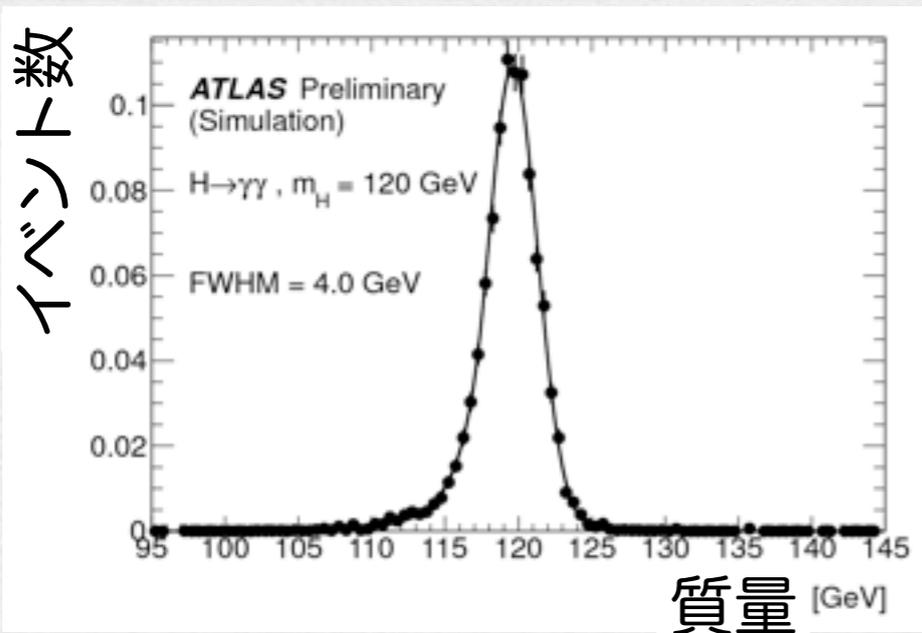
2個の光のエネルギー

||  
ヒッグス  
粒子の質量



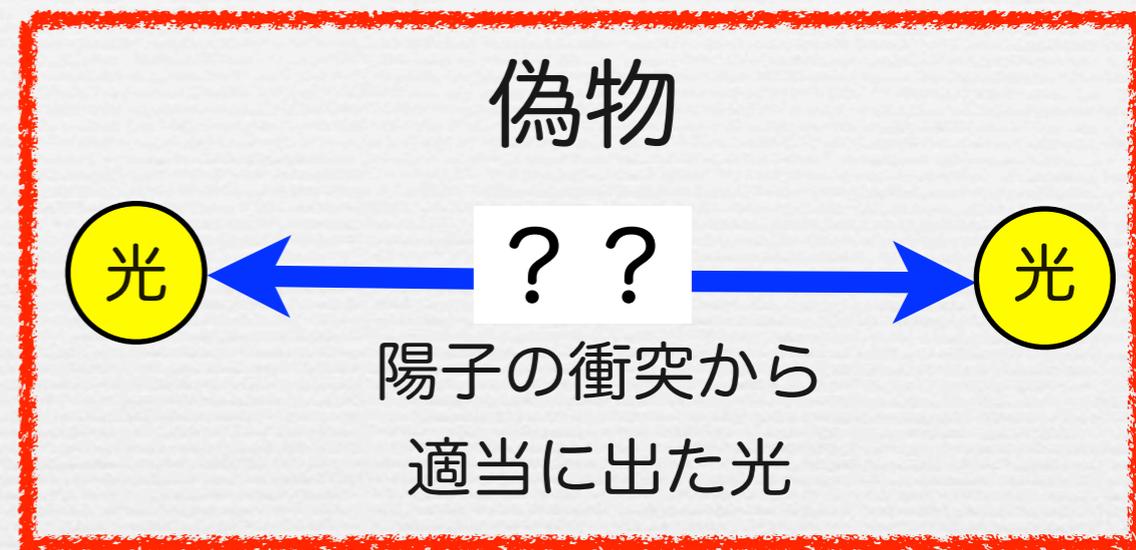
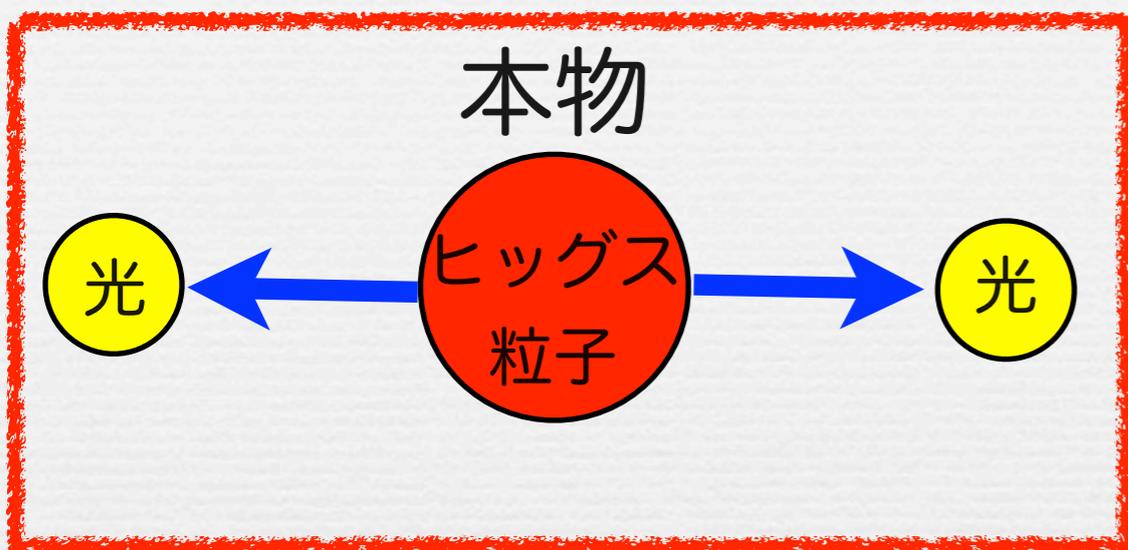
2個の光のエネルギー

||  
適当な質量



### ③ 質量の復元

2本の光子のあるイベントは2種類に大別される



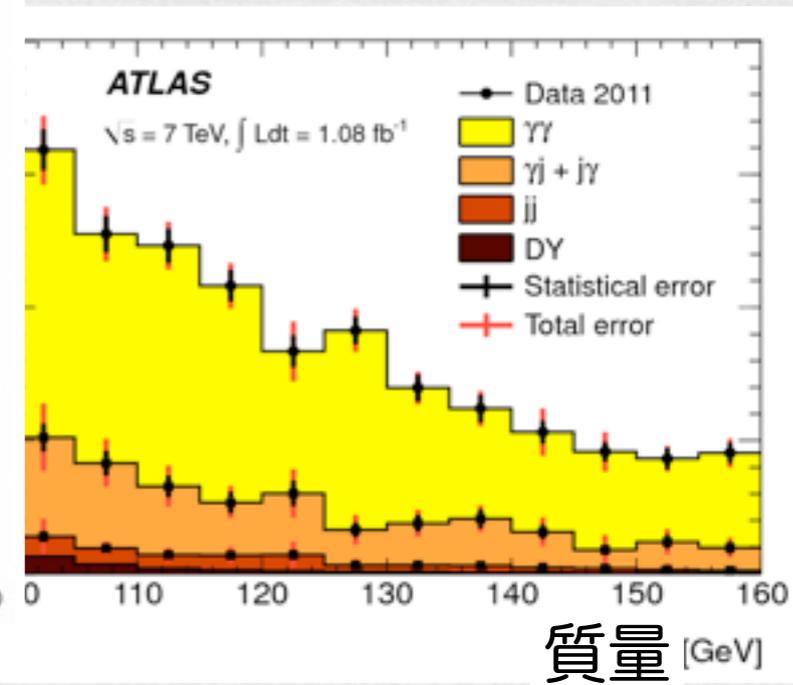
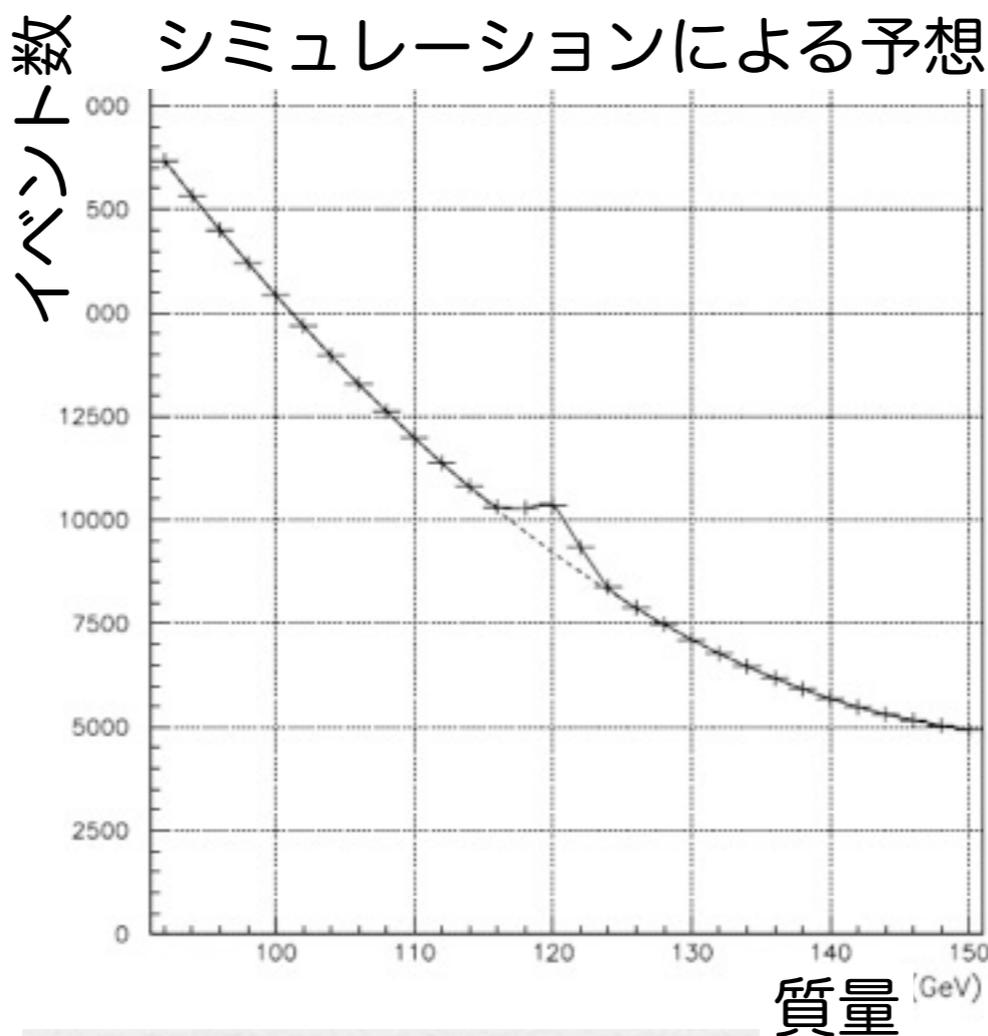
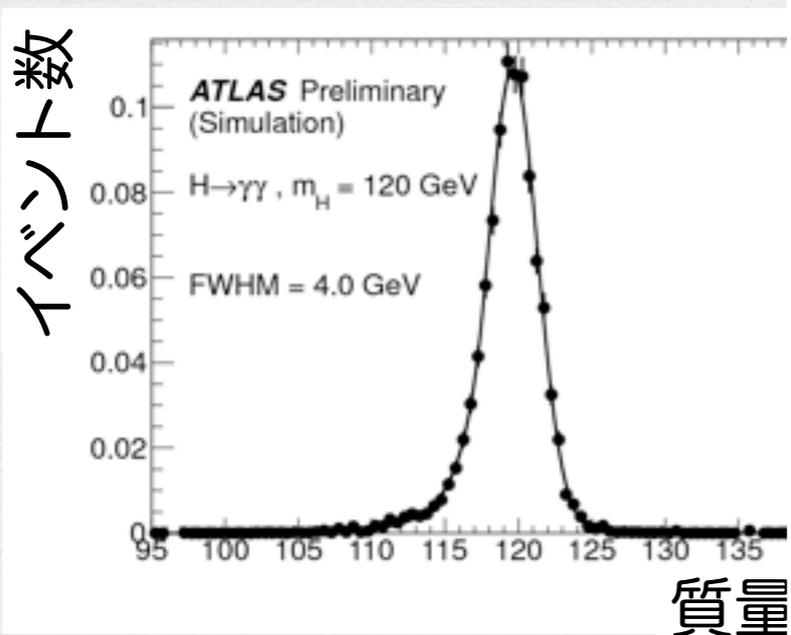
2個の光のエネルギー

ヒッグス粒子の質量

シミュレーションによる予想

2個の光のエネルギー

適切な質量

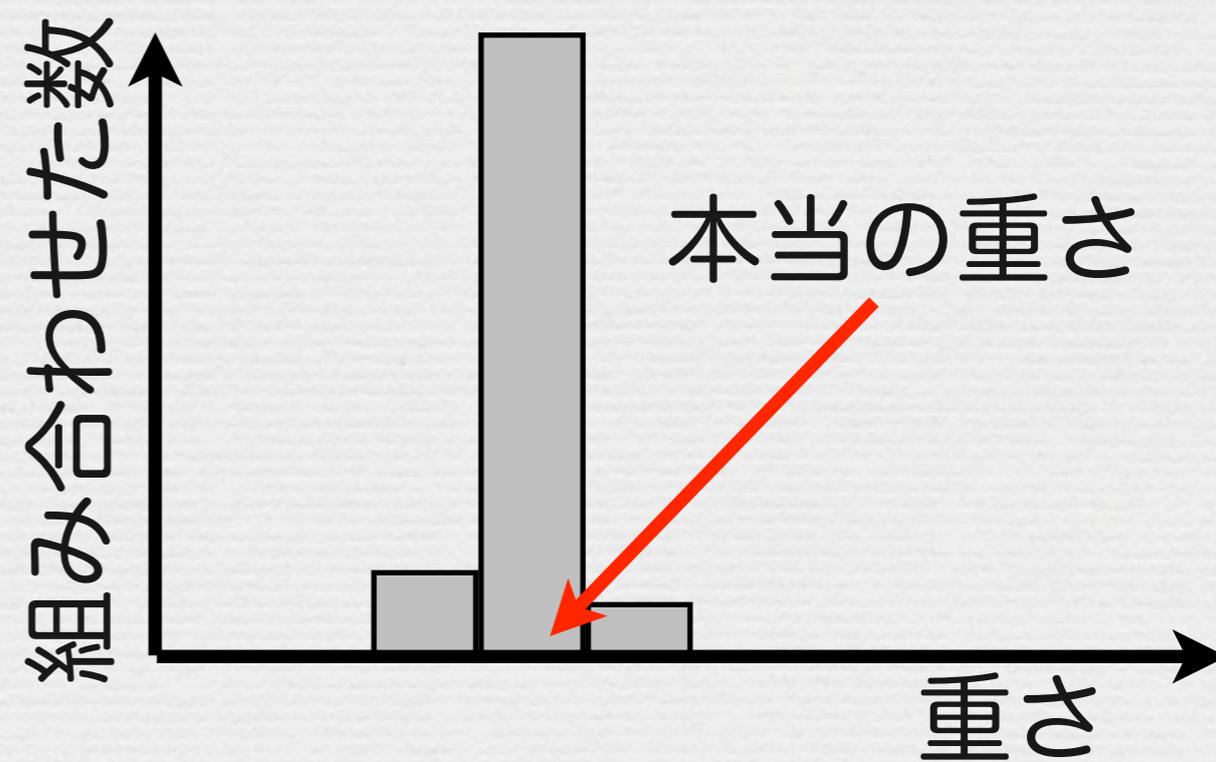
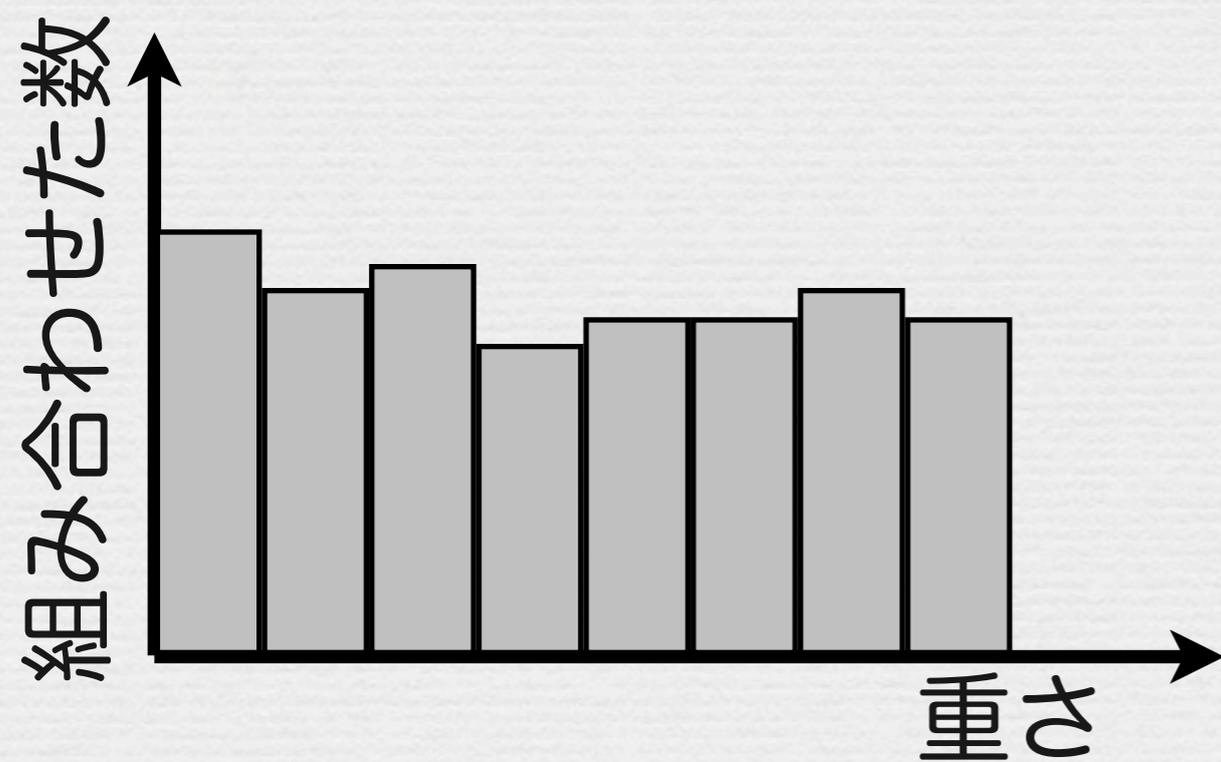


# 親粒子の復元

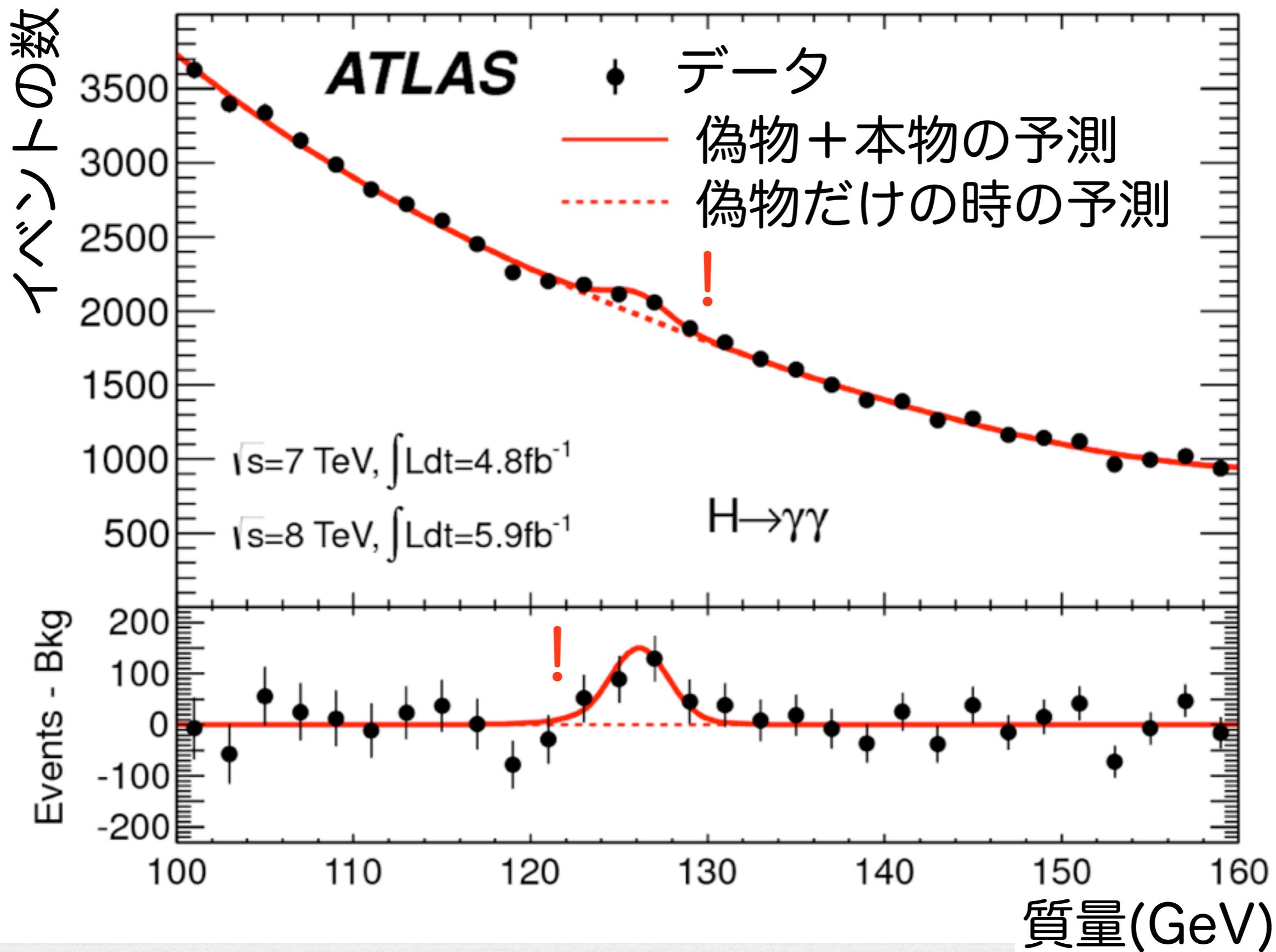


間違えて土器を組み立てると？

正しく組み合わせると？



# 実際のデータ

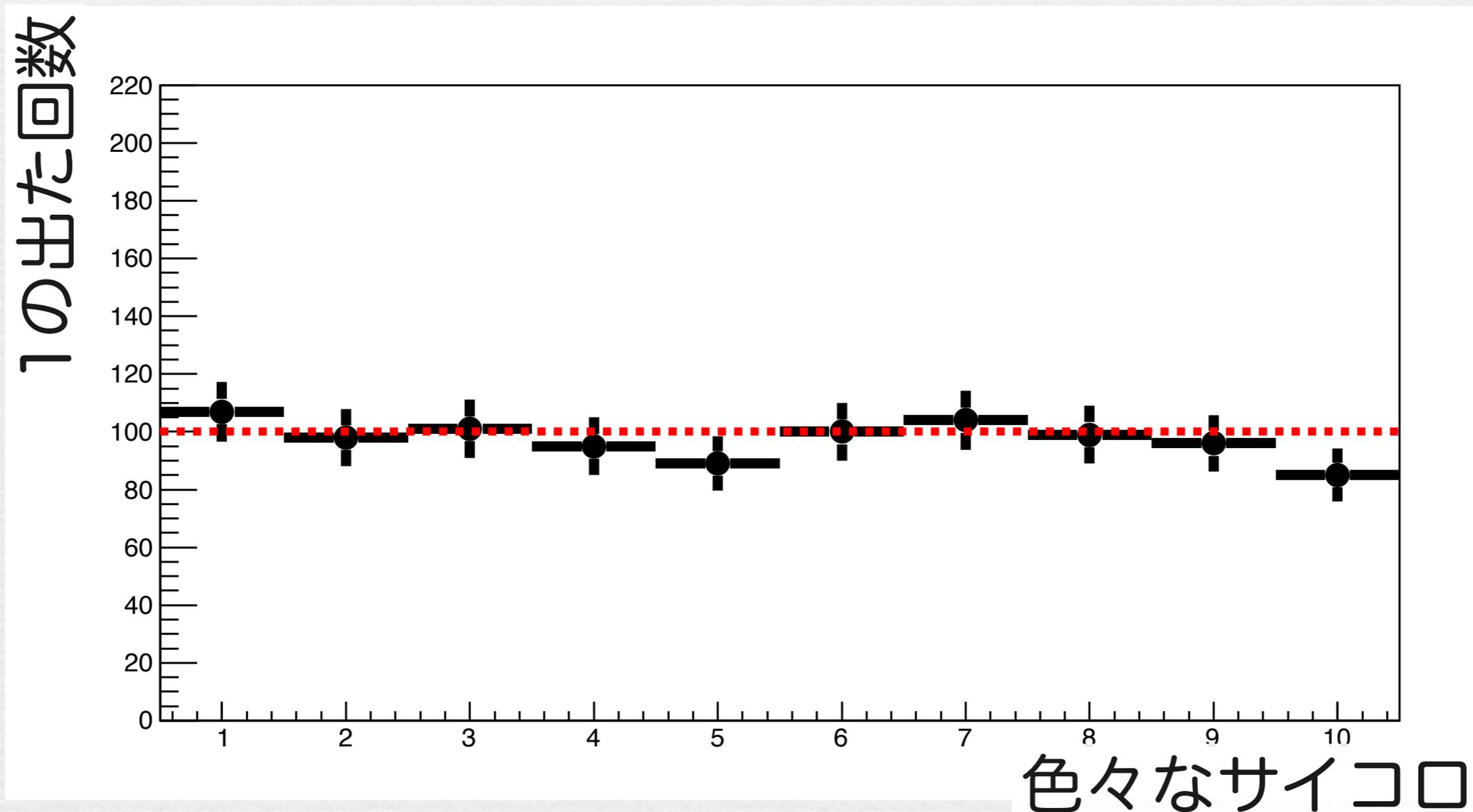


# いかさまサイコロを探せ！

1の目が出る確率  $1/6$

10個のサイコロをそれぞれ600回ずつ振ってみる

10個とも普通のサイコロ（いかさまはない）

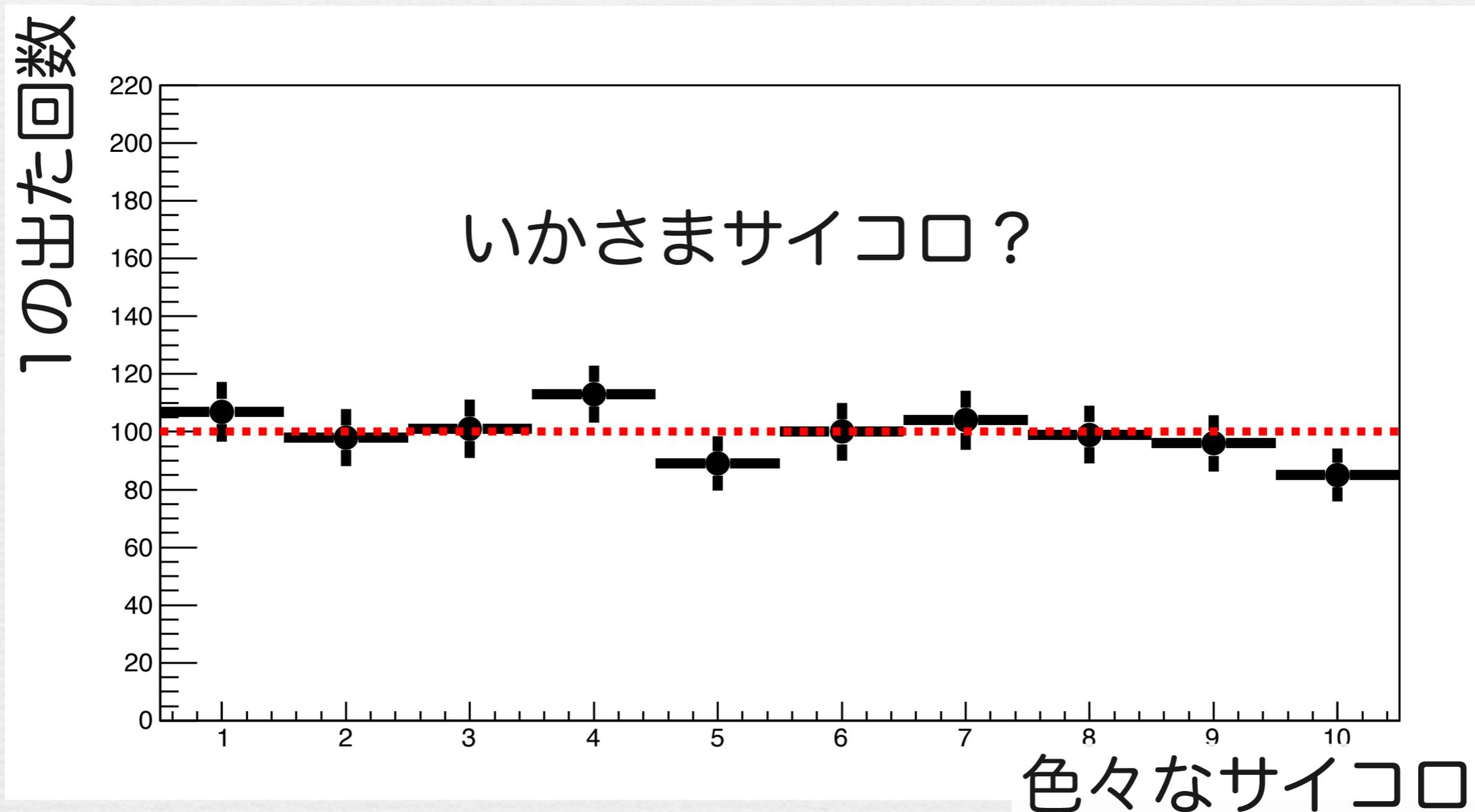


# いかさまサイコロを探せ！

1の目が出る確率  $1/6$

10個のサイコロをそれぞれ600回ずつ振ってみる

9個は普通 1個は $1/5$ で1の目が出るいかさまサイコロ

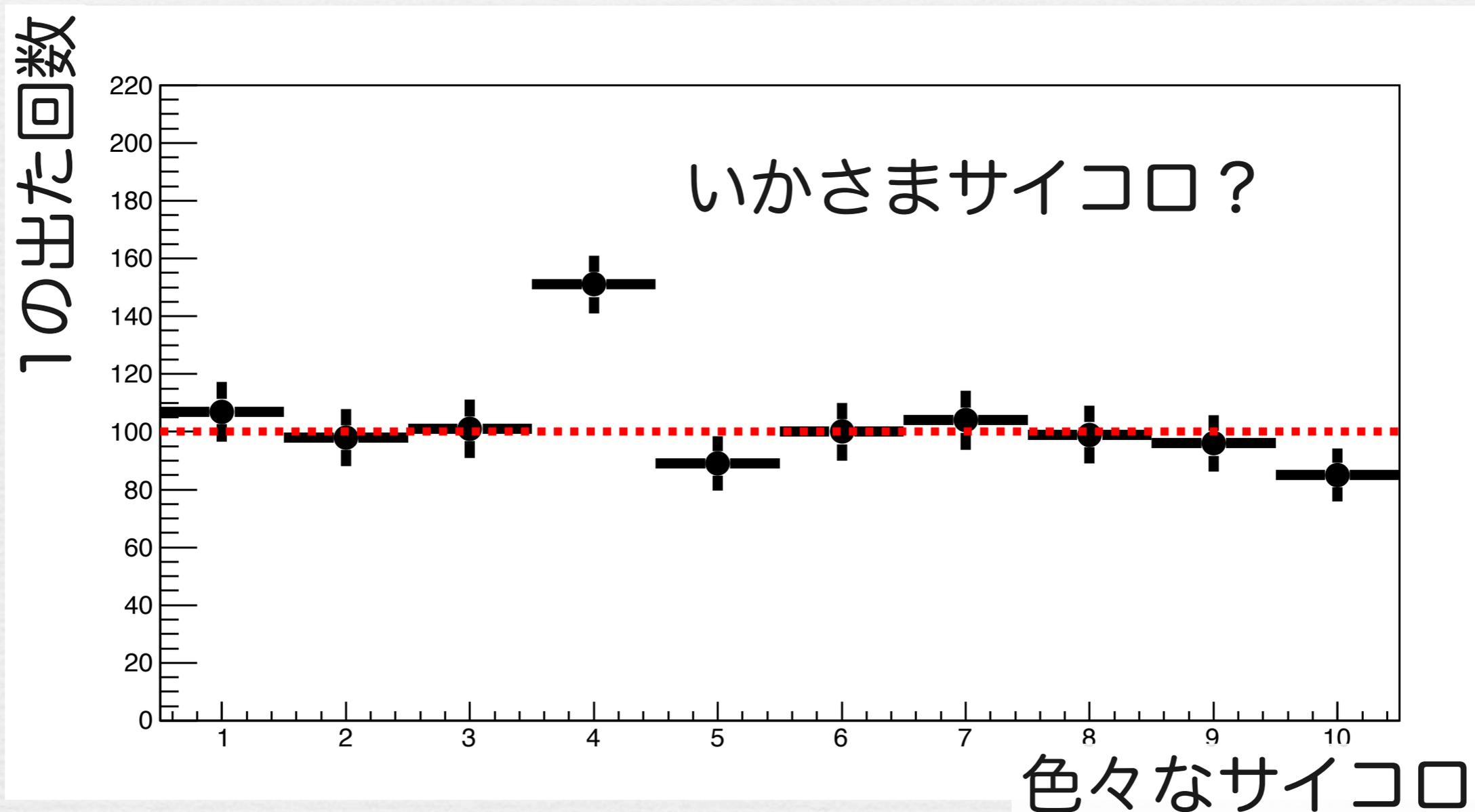


# いかさまサイコロを探せ！

1の目が出る確率  $1/6$

10個のサイコロをそれぞれ600回ずつ振ってみる

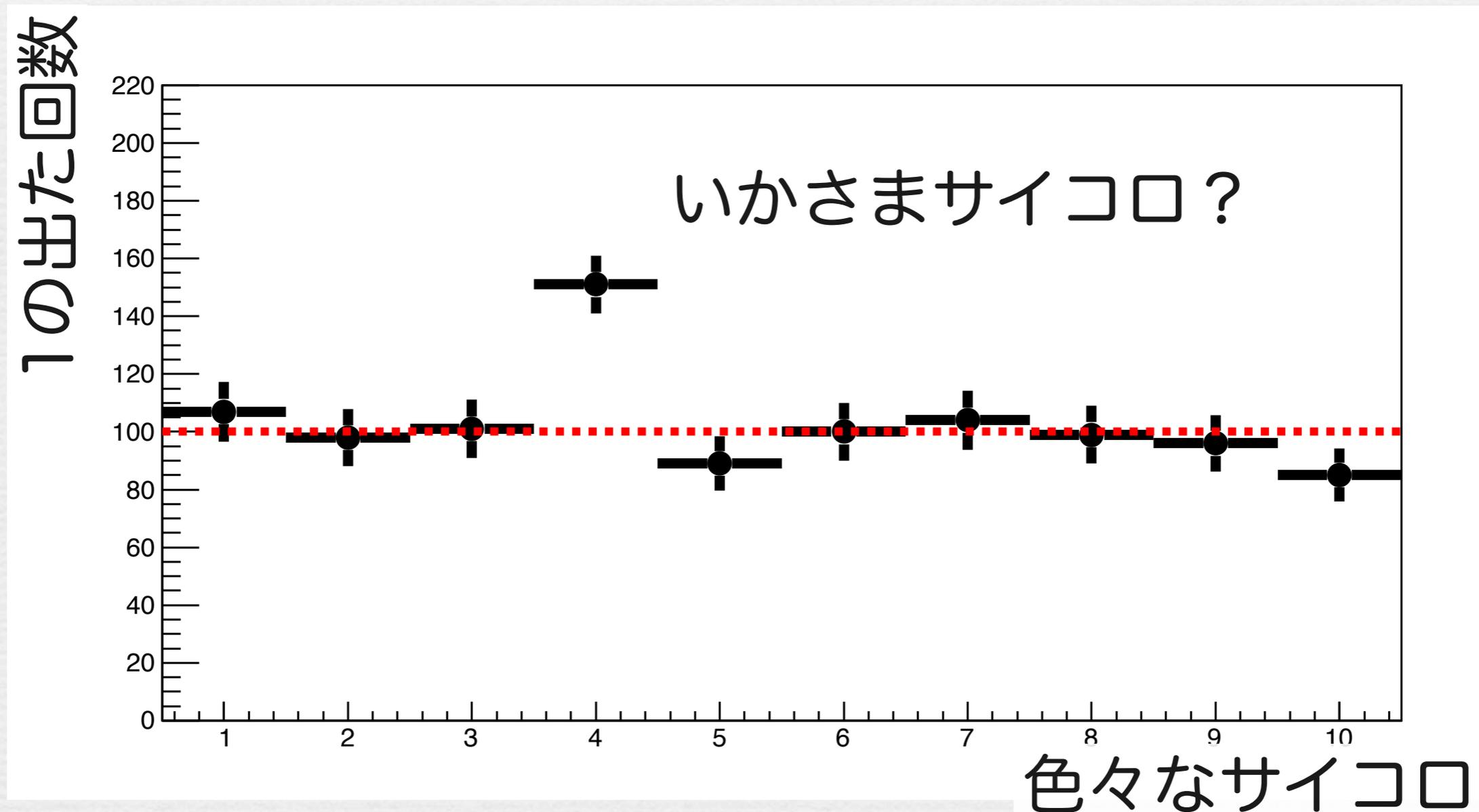
9個は普通 1個は $1/4$ で1の目が出るいかさまサイコロ



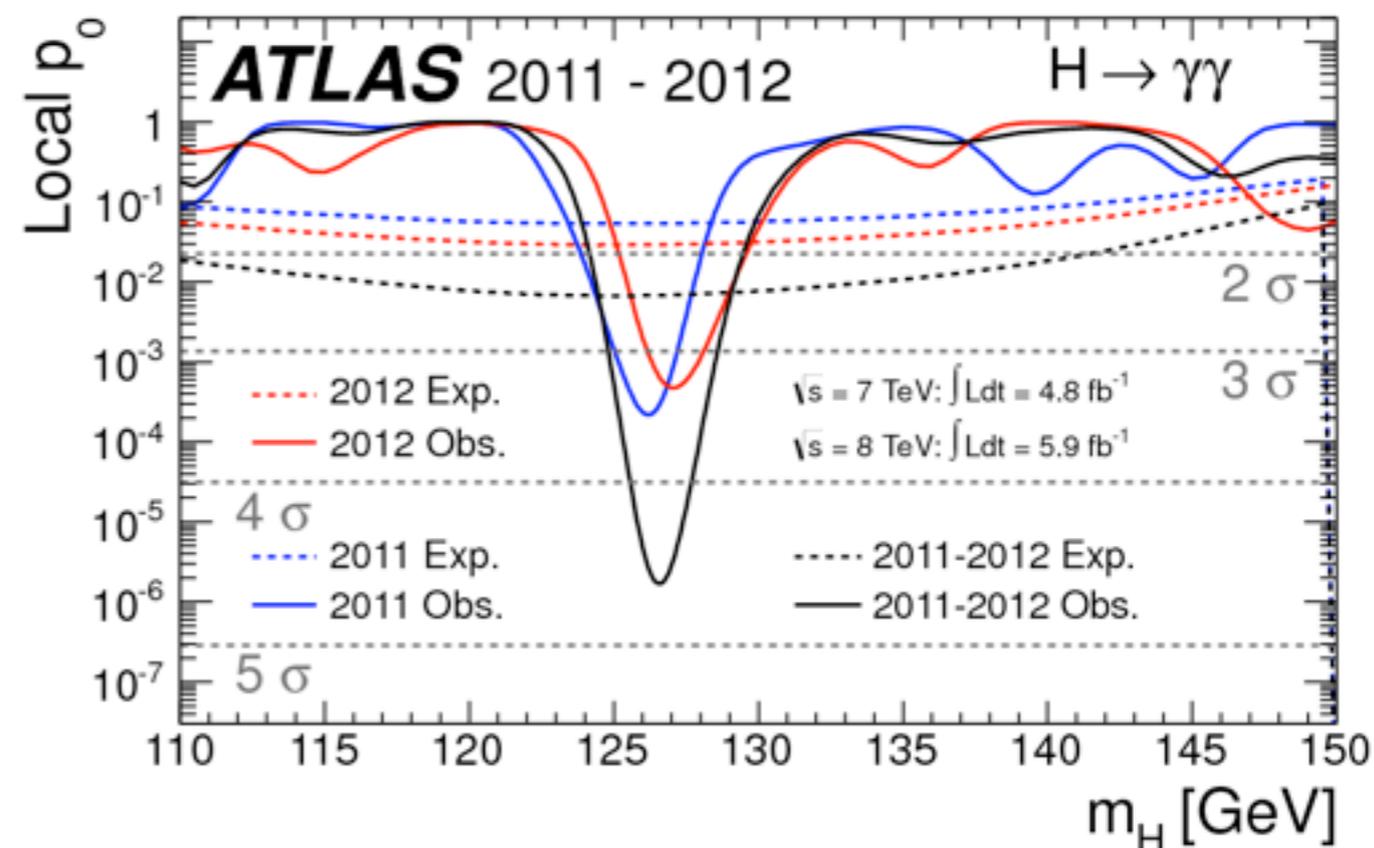
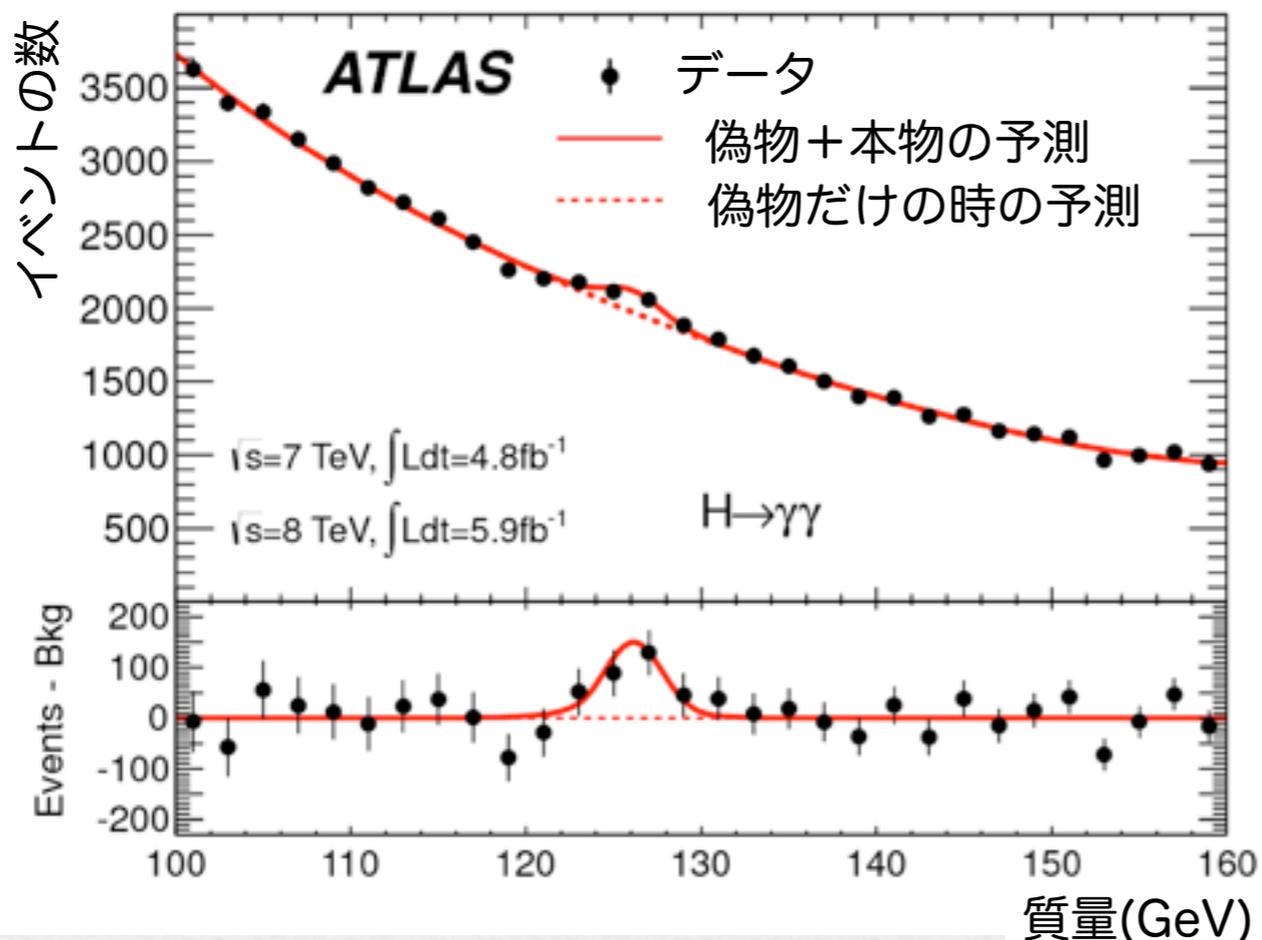
# 指標

偽物からのズレが有意かどうか？

偽物が統計的にふらついて本物と間違える確率  $\equiv p$



# 陽子陽子 $\rightarrow$ H $\rightarrow$ 光子 光子

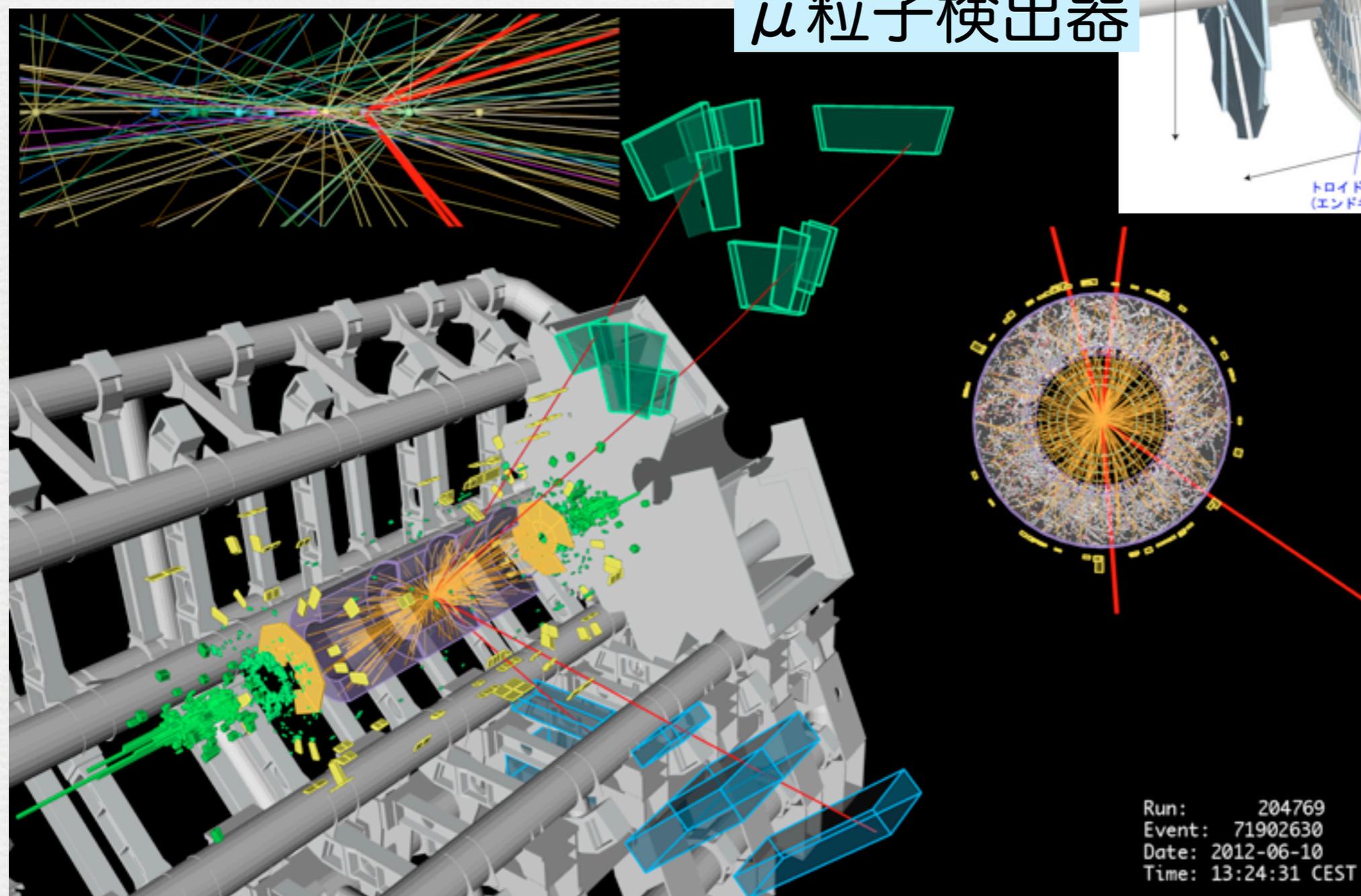
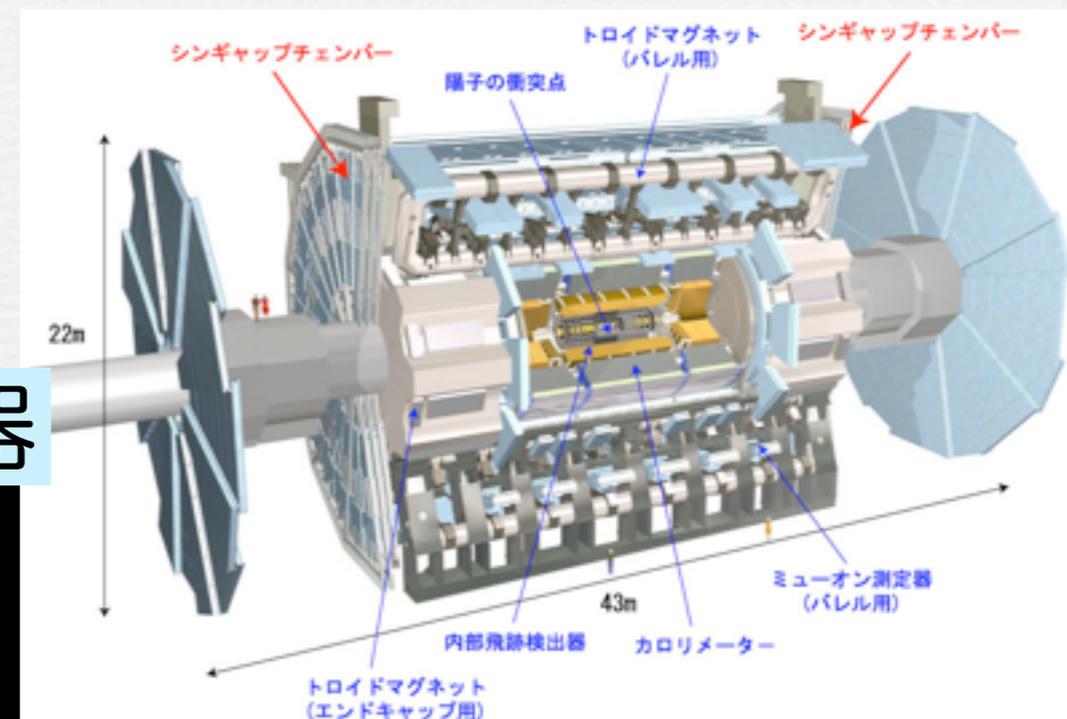


偽物が統計的にふらついて本物と間違える確率

$p = 30$  万分の 1

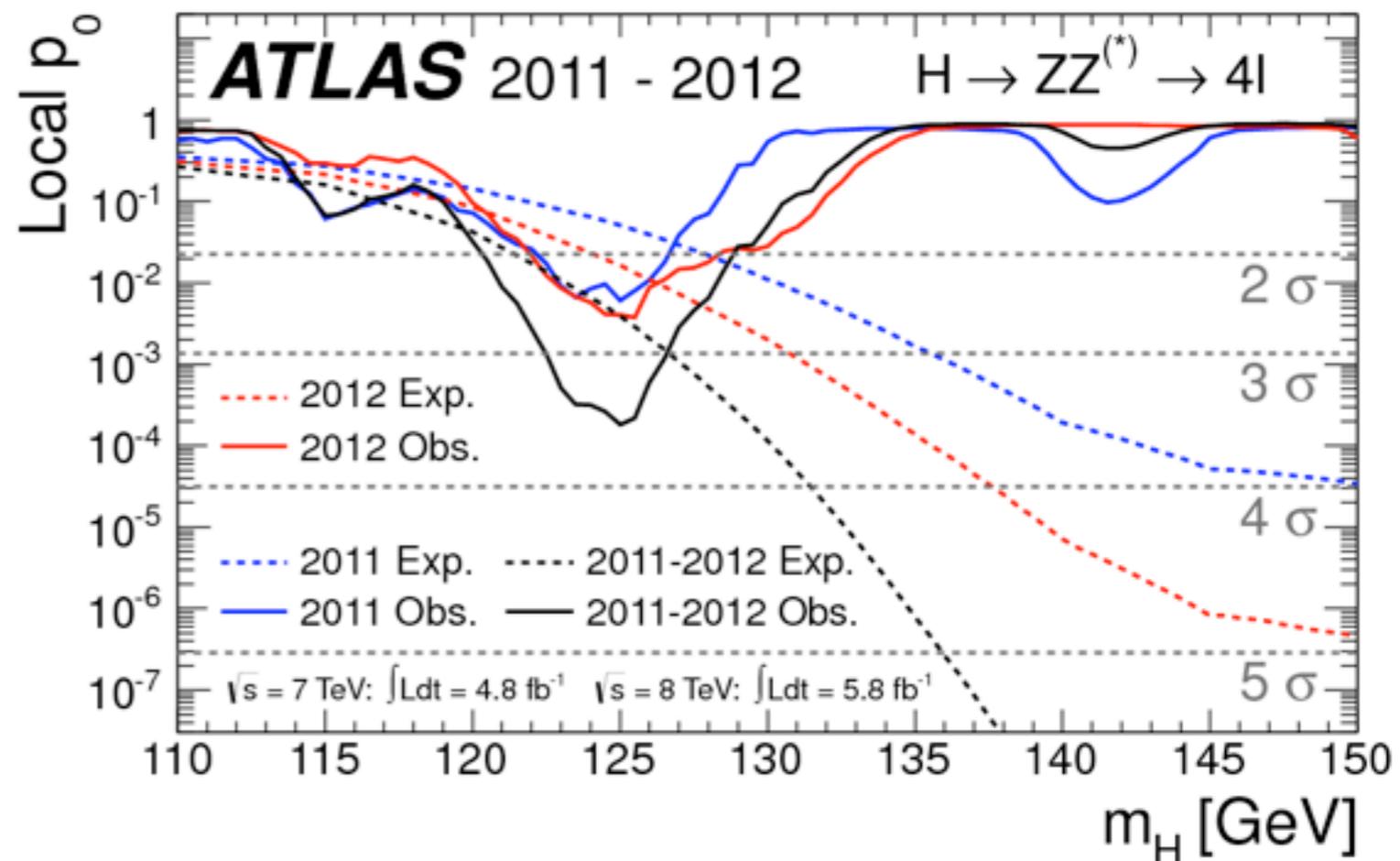
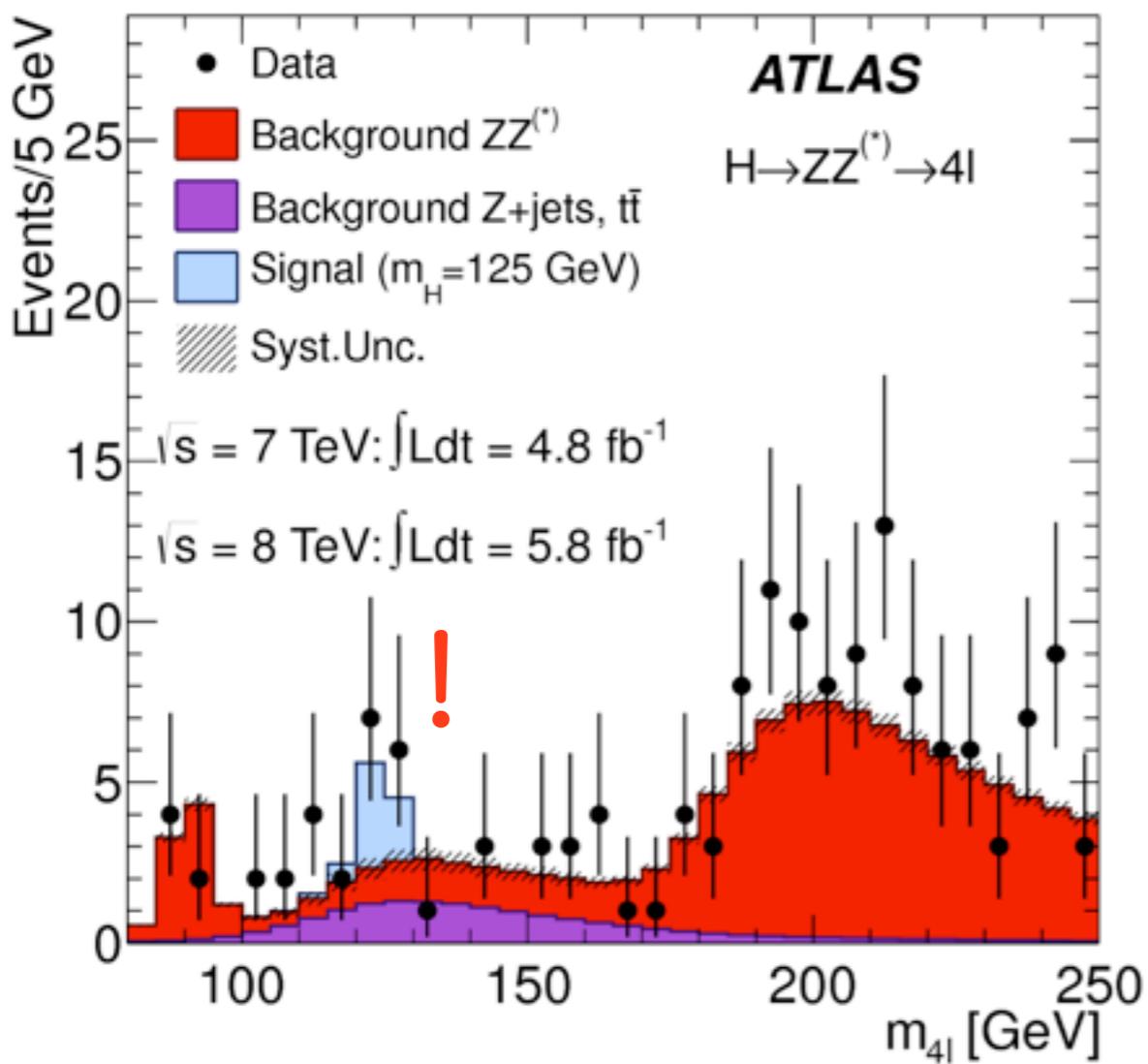
陽子 + 陽子  $\rightarrow$  H  $\rightarrow$  ZZ  $\rightarrow$  4 $\mu$  候補事象

$\mu$  粒子検出器



Run: 204769  
Event: 71902630  
Date: 2012-06-10  
Time: 13:24:31 CEST

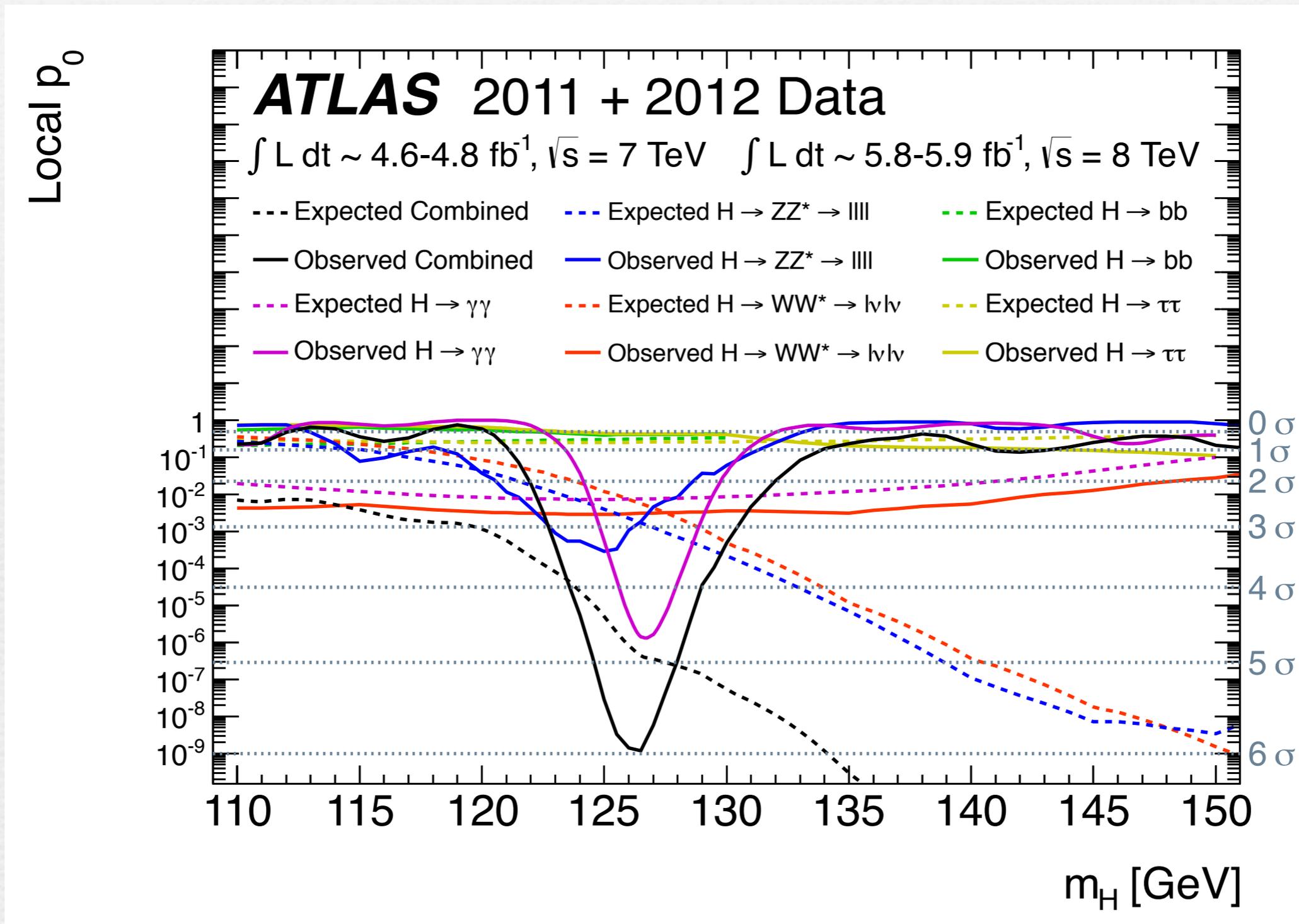
# 陽子陽子 $\rightarrow$ H $\rightarrow$ ZZ $\rightarrow$ 4 レプトン



偽物が統計的にふらついて本物と間違える確率

$p = 6$ 千分の1

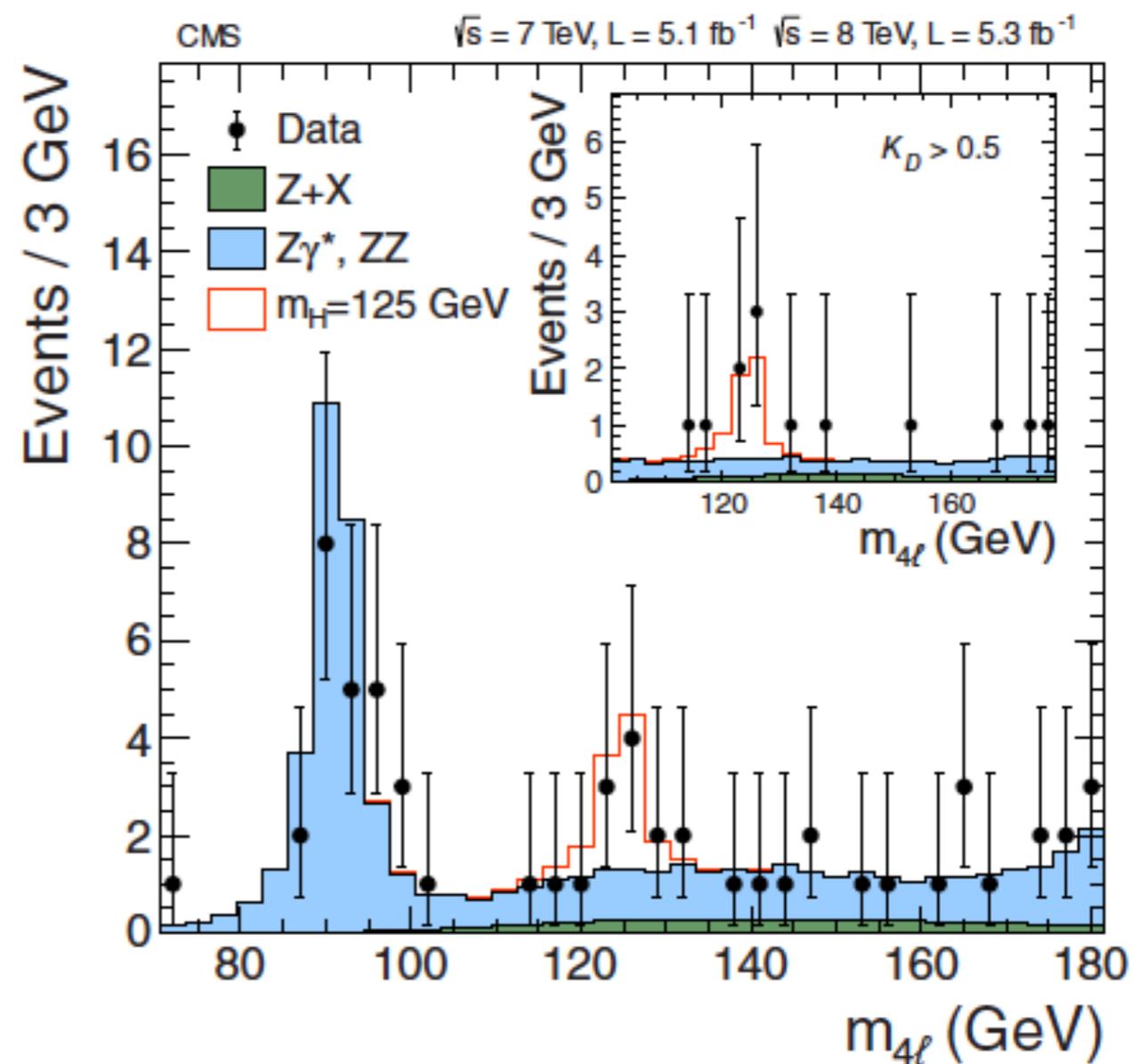
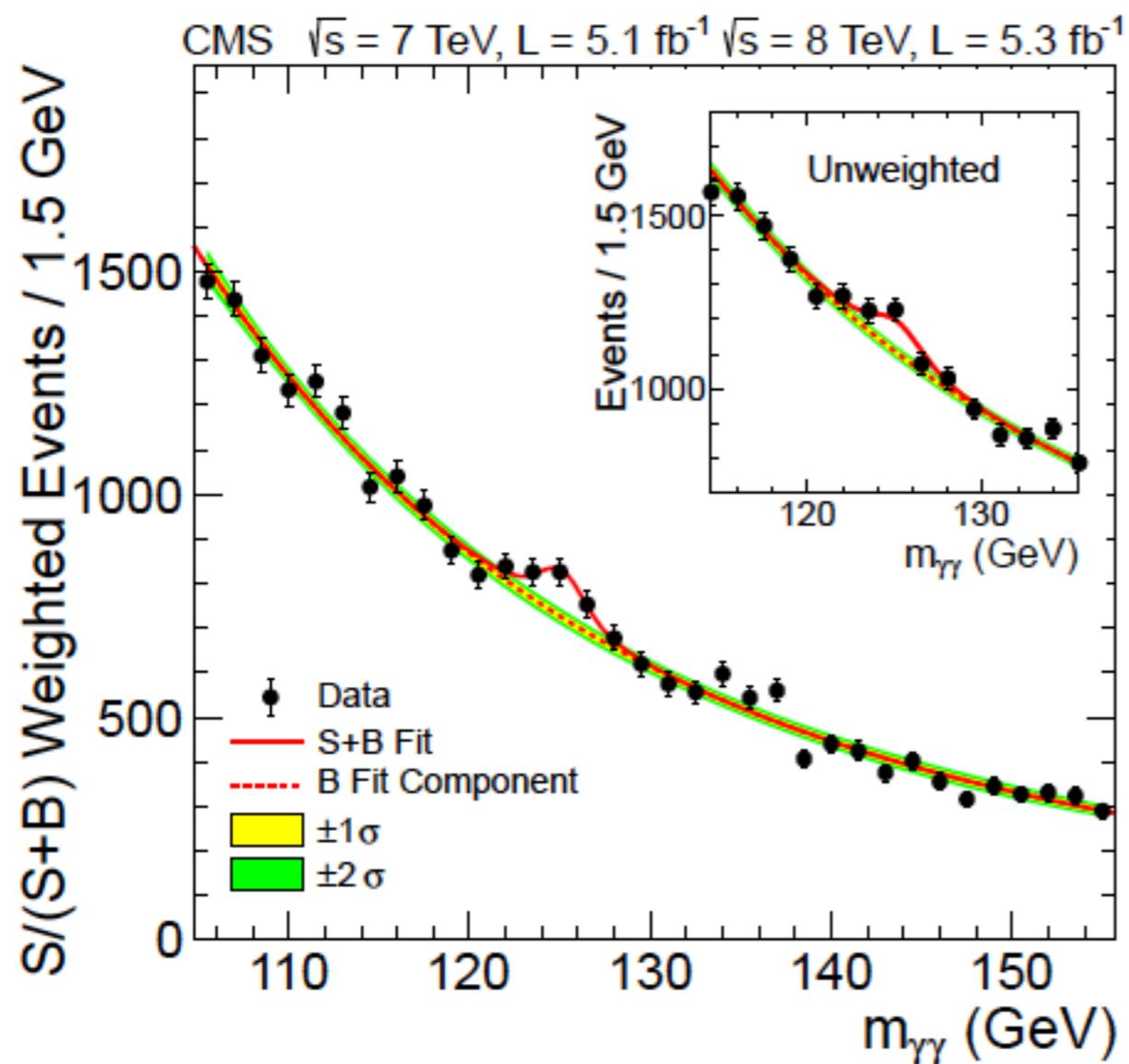
# 全ての探索をあわせると、、、



偽物が統計的にふらついて本物と間違える確率

$p = 6$ 億分の1

# となりのCMS実験でも確認



$p = 350$  万分の1

# 観測結果の解釈

質量126GeV付近に新粒子を発見

光子 光子

$ZZ \rightarrow 4$ レプトン 同じ質量の新粒子を確認

隣の実験でも、同じ質量の新粒子を確認

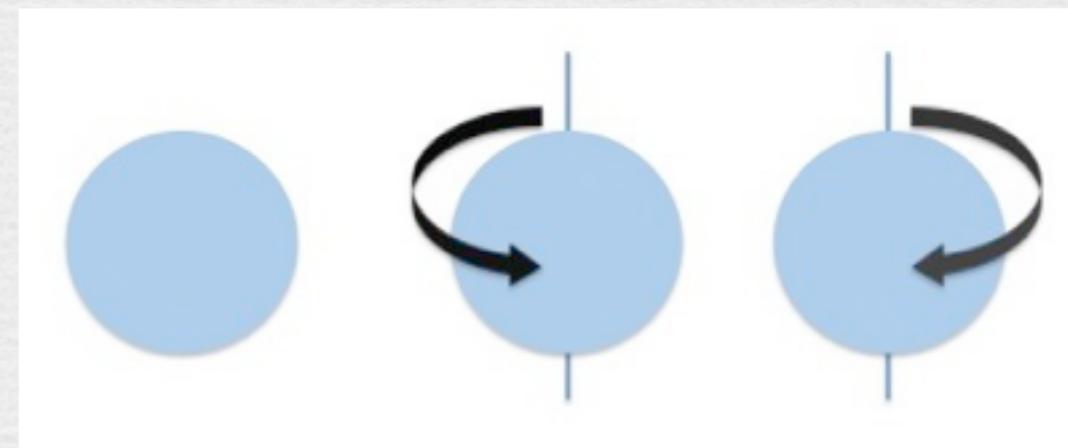
新粒子は、ヒッグス粒子か？

その可能性は大きいですが、未確定  
さらなる身元確認が必要

ヒッグスならば？

スピンのゼロ

重い粒子ほどくっつきやすい



素粒子には固有のスピン

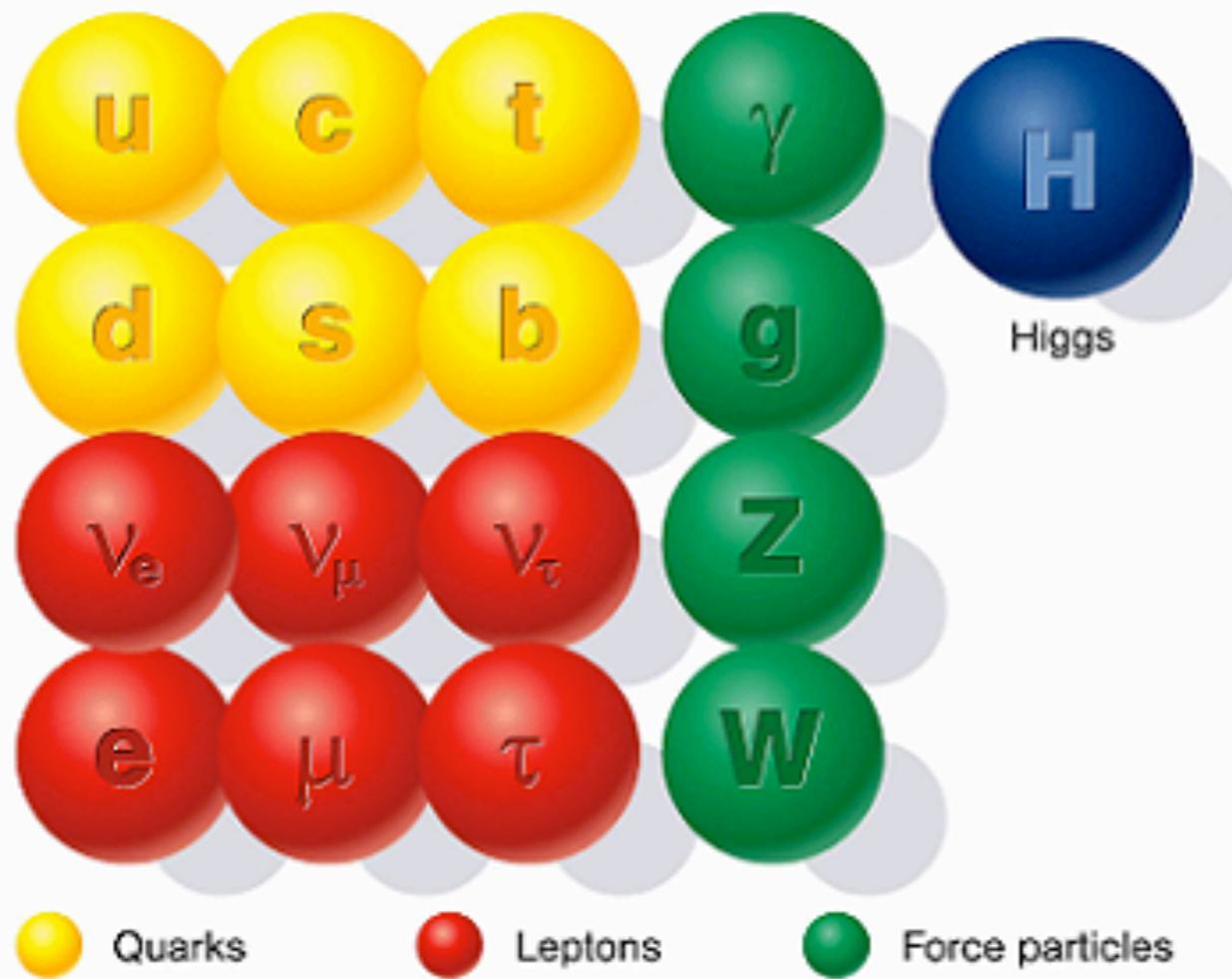
ヒッグス粒子の発見を超えて



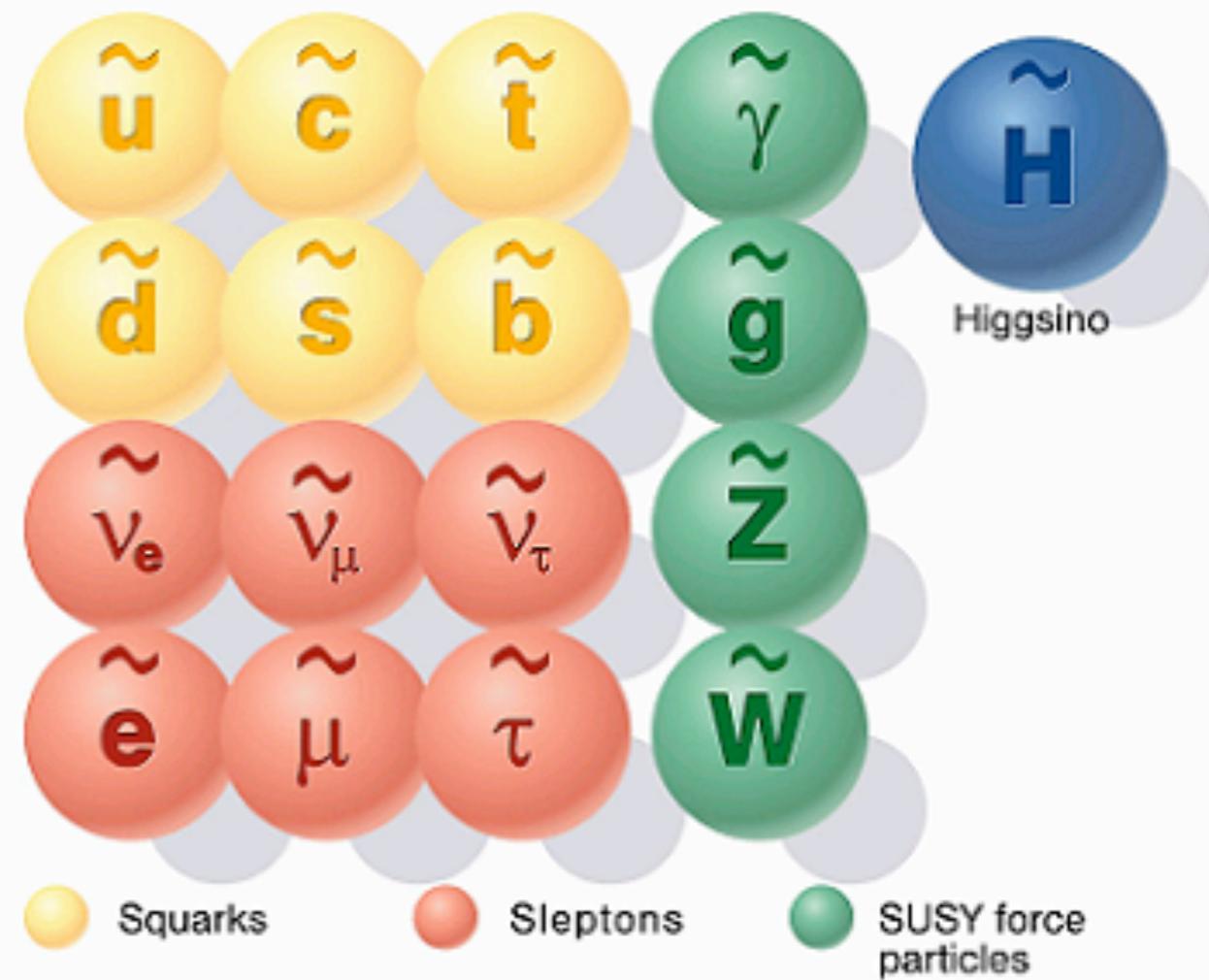


# 超对称性 (SUSY) 粒子

## Standard particles



## SUSY particles



# SUSYがあると

- 電磁気力、弱い力、強い力の統一の可能性
- 万物の理論 (Theory of Everything)が構築できるか？  
重力まで含め力の統一的理解



電気

マクスウェル

磁気

電磁気力

ワインバーグ等  
弱い力

電弱統一

強い力

力の大統一？

ひも理論？

惑星

ニュートン

りんご

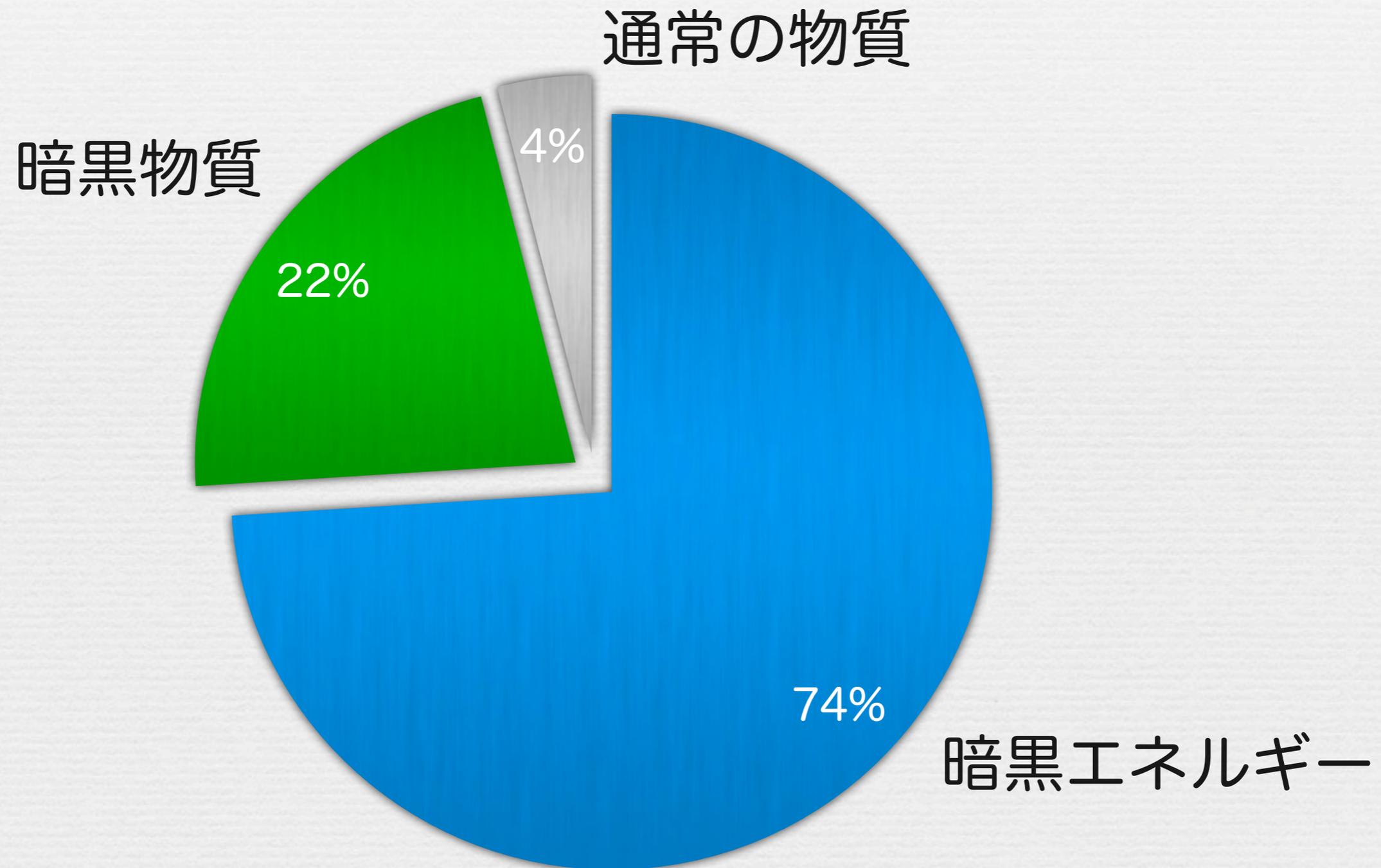
重力

アインシュタイン

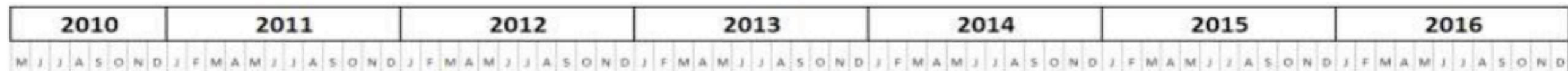


# SUSYがあると

## - 暗黒物質の有力候補



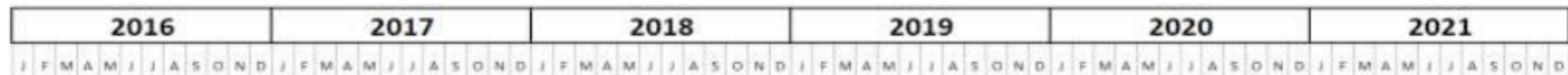
# まだまだ続くLHC実験



7-8 TeV :  $\sim 20 \text{ fb}^{-1}$

13-14 TeV:

休止して14 TeVの  
ための修理を行う。

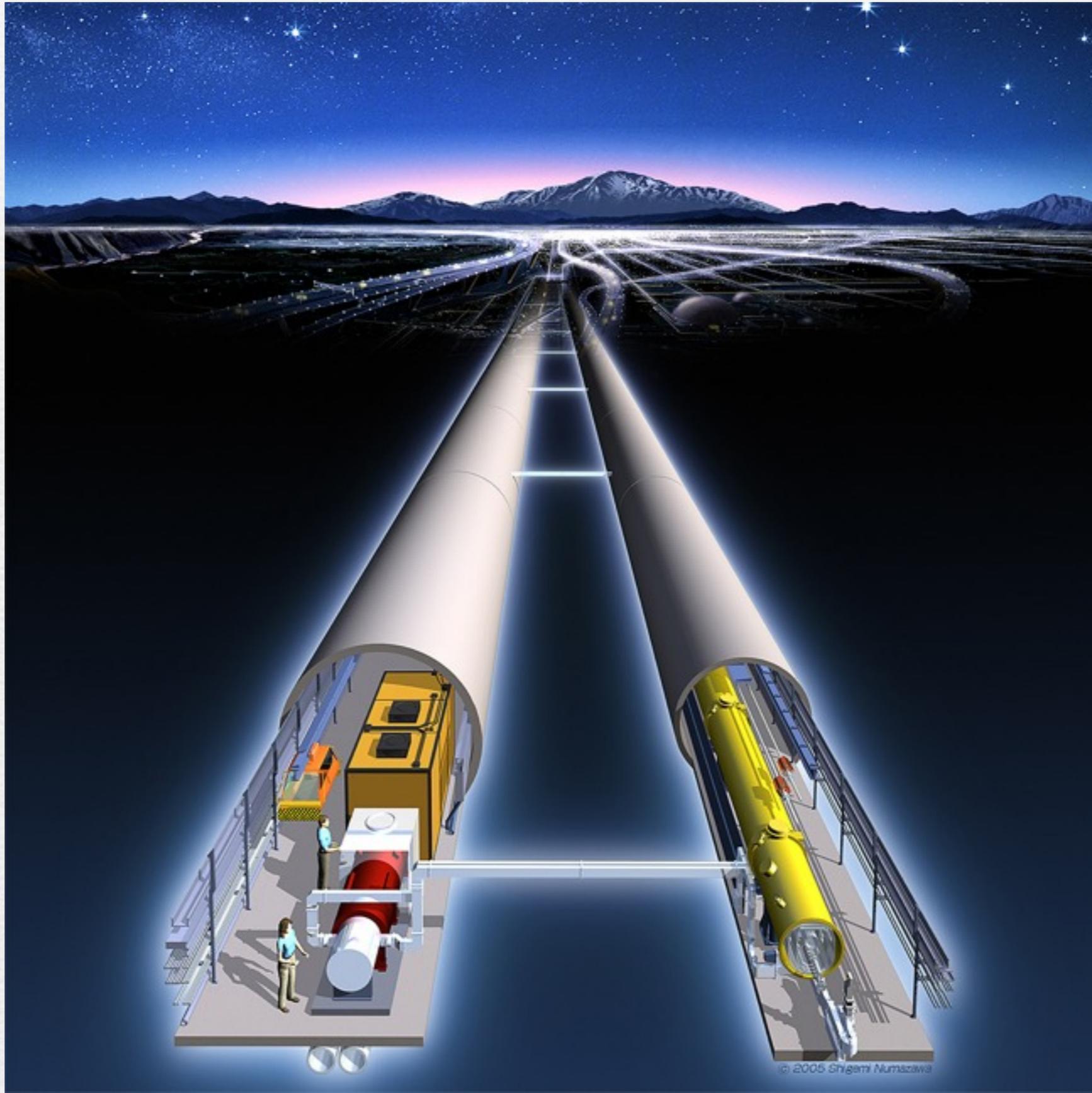


13-14 TeV: up to  $300 \text{ fb}^{-1}$

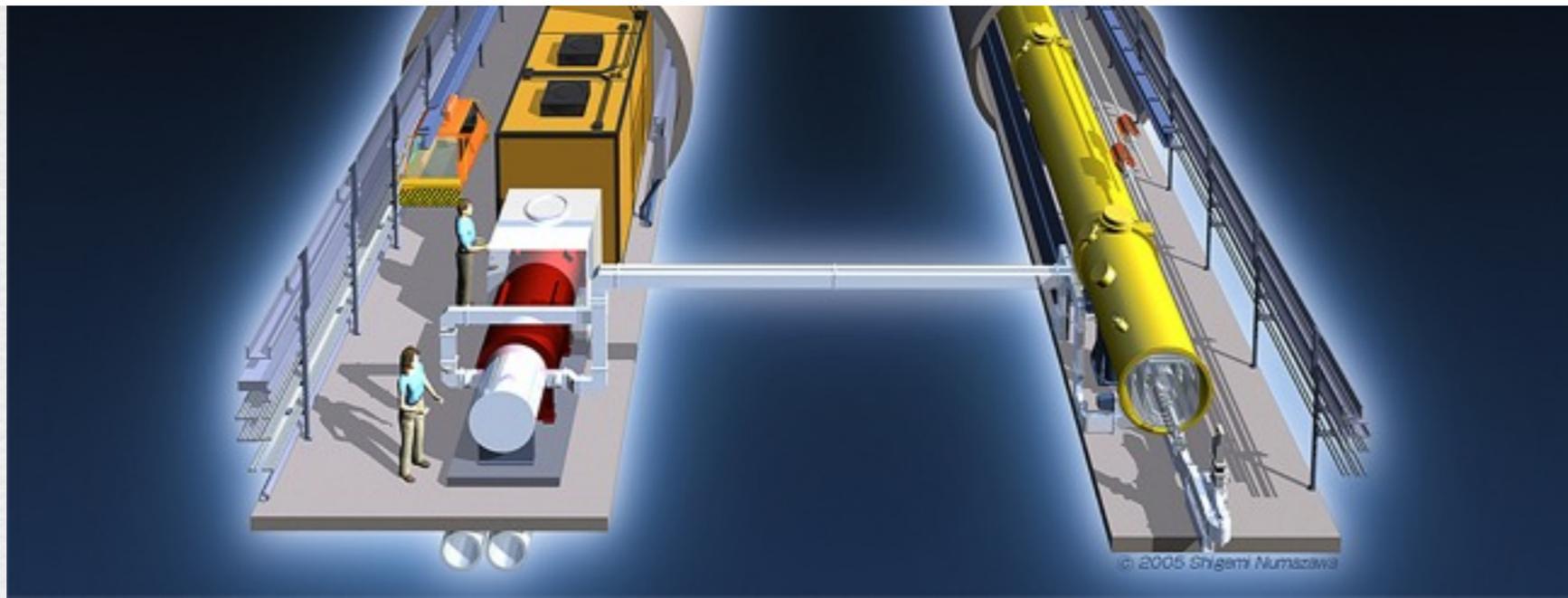
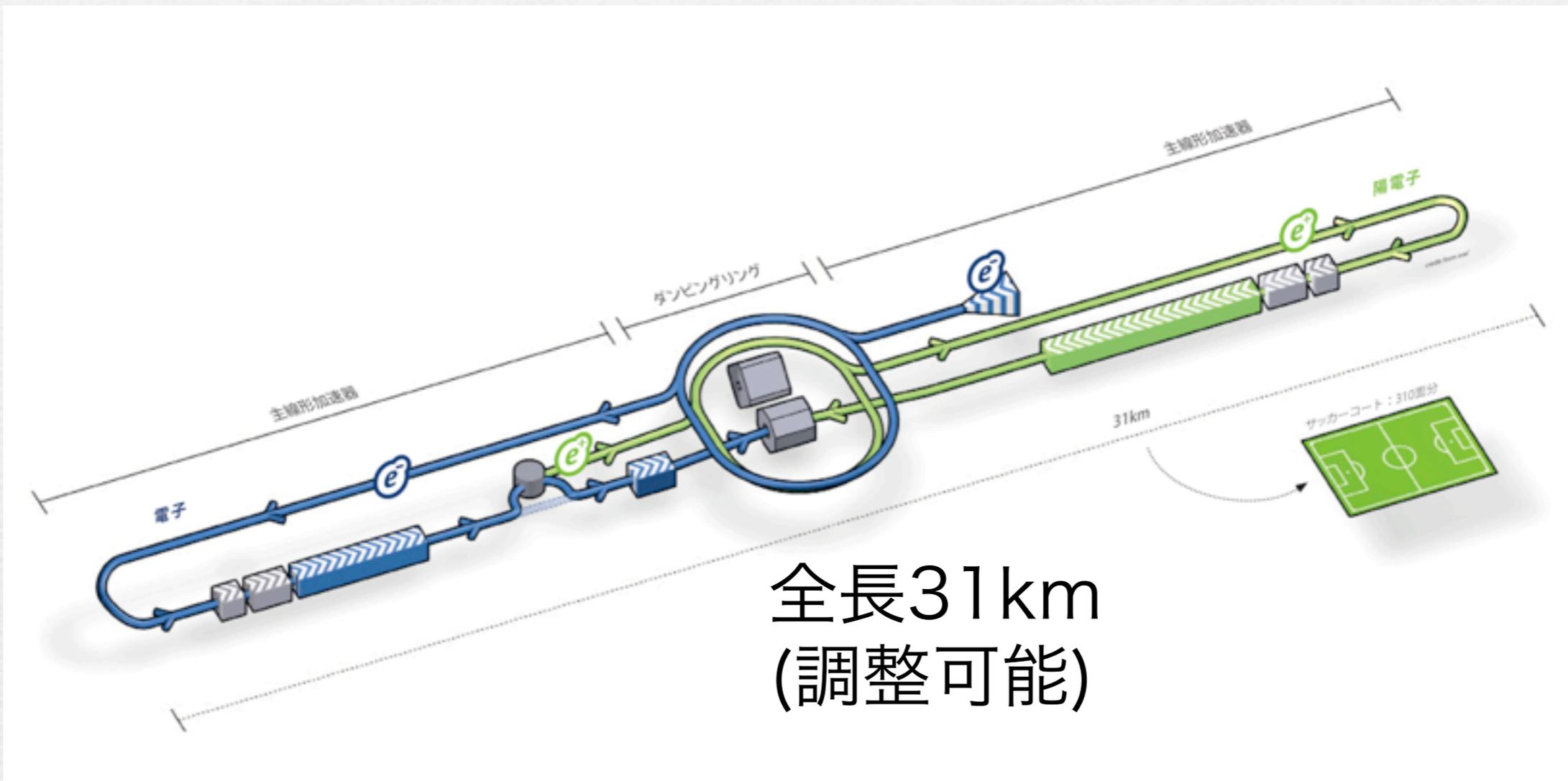
**HL-LHC**

目標: 2030年までに  
 $3000 \text{ fb}^{-1}$  を達成する。

# 国際リニアコライダー計画



# 国際リニアコライダー計画



# 結論

質量126GeV付近に新粒子を発見！！

ヒッグス粒子と矛盾しないが未確定

データ量を増やして、ヒッグス粒子の性質を確認する

もし、ヒッグス粒子なら？

その性質の精査により、素粒子物理学の方向性が決まる

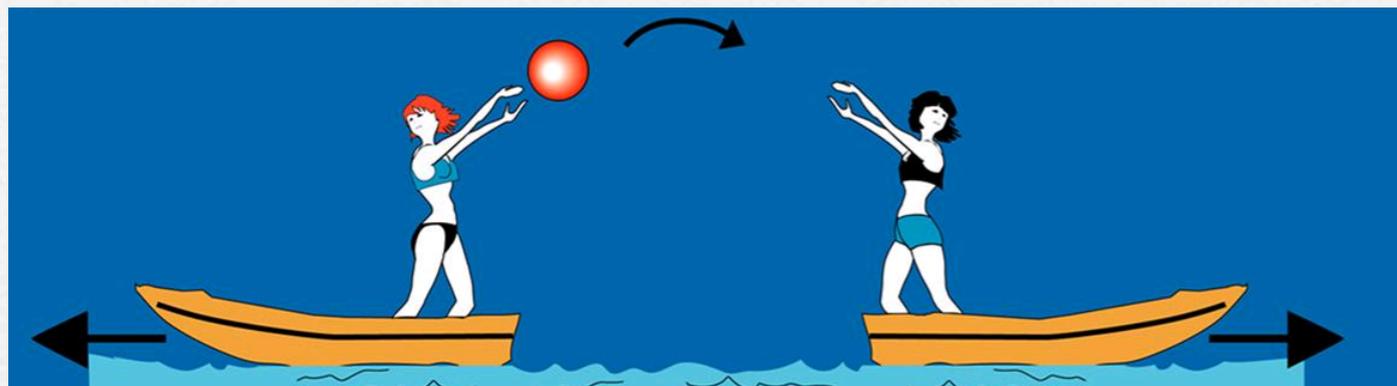
ヒッグス粒子の性質には理論的な裏付けがない

→ 実験による新たな知見が不可欠

これからの素粒子実験は面白い！

Backup

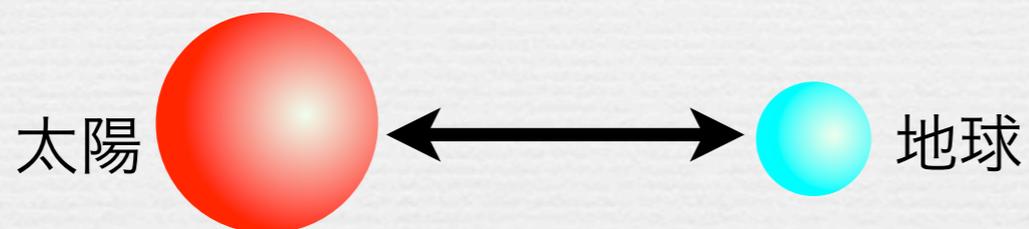
# 素粒子に働く力



電荷を感じて

力を媒介する粒子の交換

重力



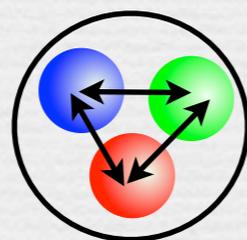
質量を感じて グラビトン を交換

電磁気力



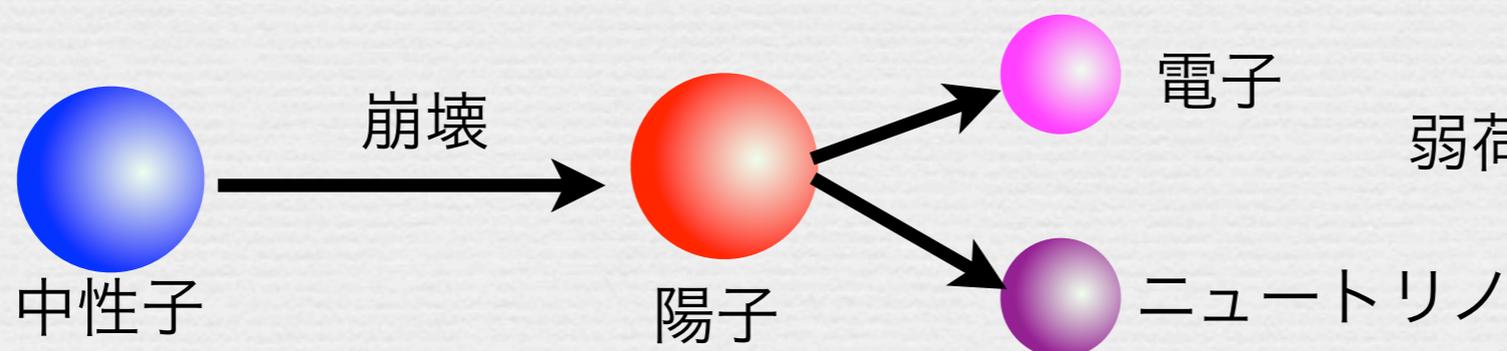
電荷を感じて フォトン (光子) を交換

強い力



色荷を感じて グルーオン を交換

弱い力



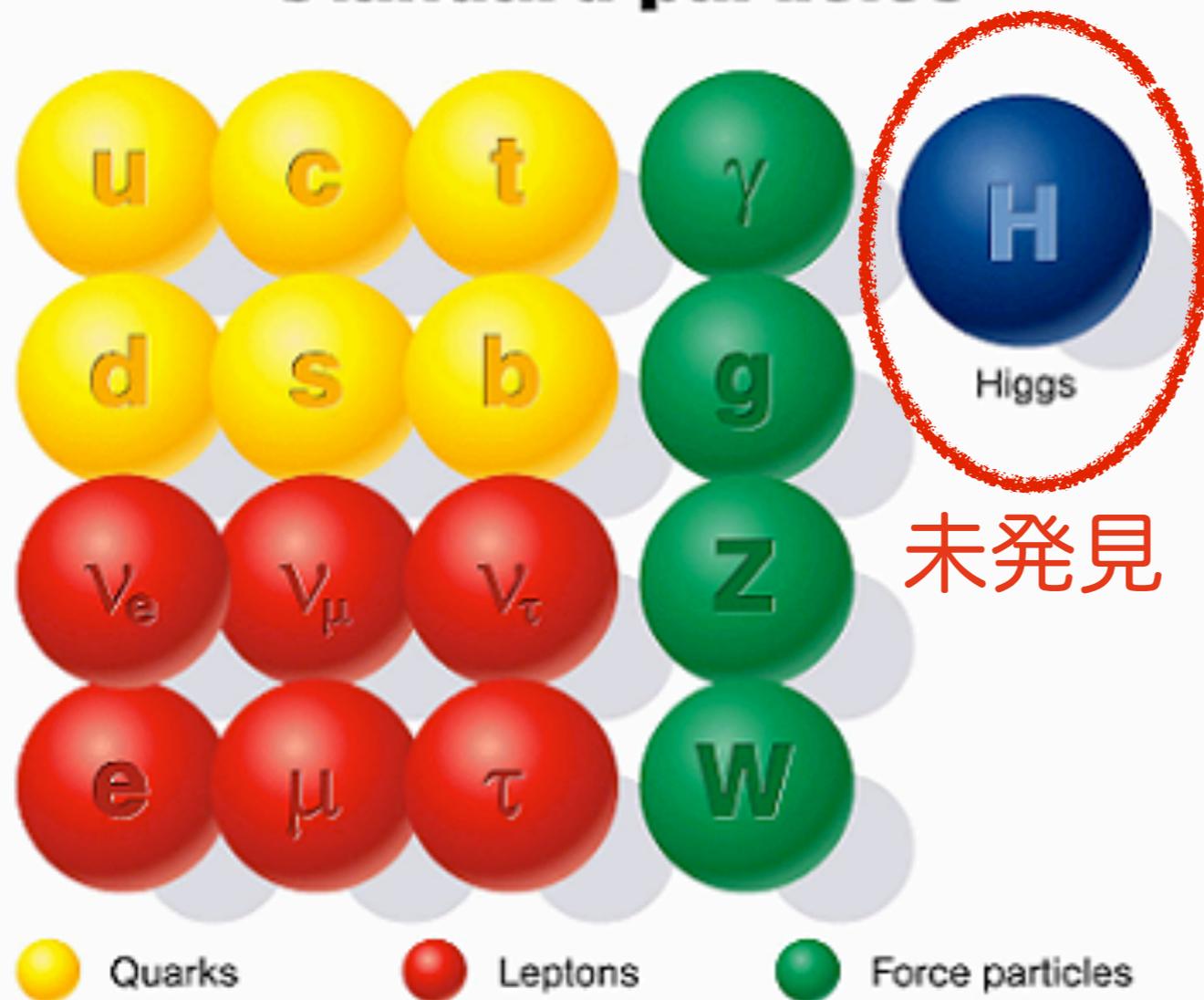
弱荷を感じて W、Z粒子 を交換

# 宇宙カレンダー

137億年前	1月 1日	ビッグバン
100億年前	4月 7日	銀河系誕生
46億年前	8月30日	太陽系誕生
45億年前	9月 2日	月誕生
39億年前	9月18日	原始生命誕生
2億5千万年前	12月23日	恐竜出現
2億年前	12月26日	哺乳類出現
6500万年前	12月29日	恐竜絶滅
	12月31日	
400万年前	21時24分	猿人出現
50万年前	23時40分	原人出現 (ジャワ原人・北京原人)
20万年前	23時52分	旧人出現 (ネアンデルタール人)
4万年前	23時58分	新人出現 (クロマニヨン人)
2500年前	23時59分54秒	釈迦誕生
200年前	23時59分59.5秒	近代科学の開幕
	24時00分00秒	現在

# 素粒子の標準模型

## Standard particles



1897年：電子

1900年： $\gamma$ 線

1932年：陽電子

1937年： $\mu$ 粒子

1956年：ニュートリノ

1962年： $\nu_e$ と $\nu_\mu$ 別物

1969年：u,d,sクォーク (パートン模型)

1974年：cクォーク

1975年： $\tau$ 粒子

1977年：bクォーク

1979年：グルーオン

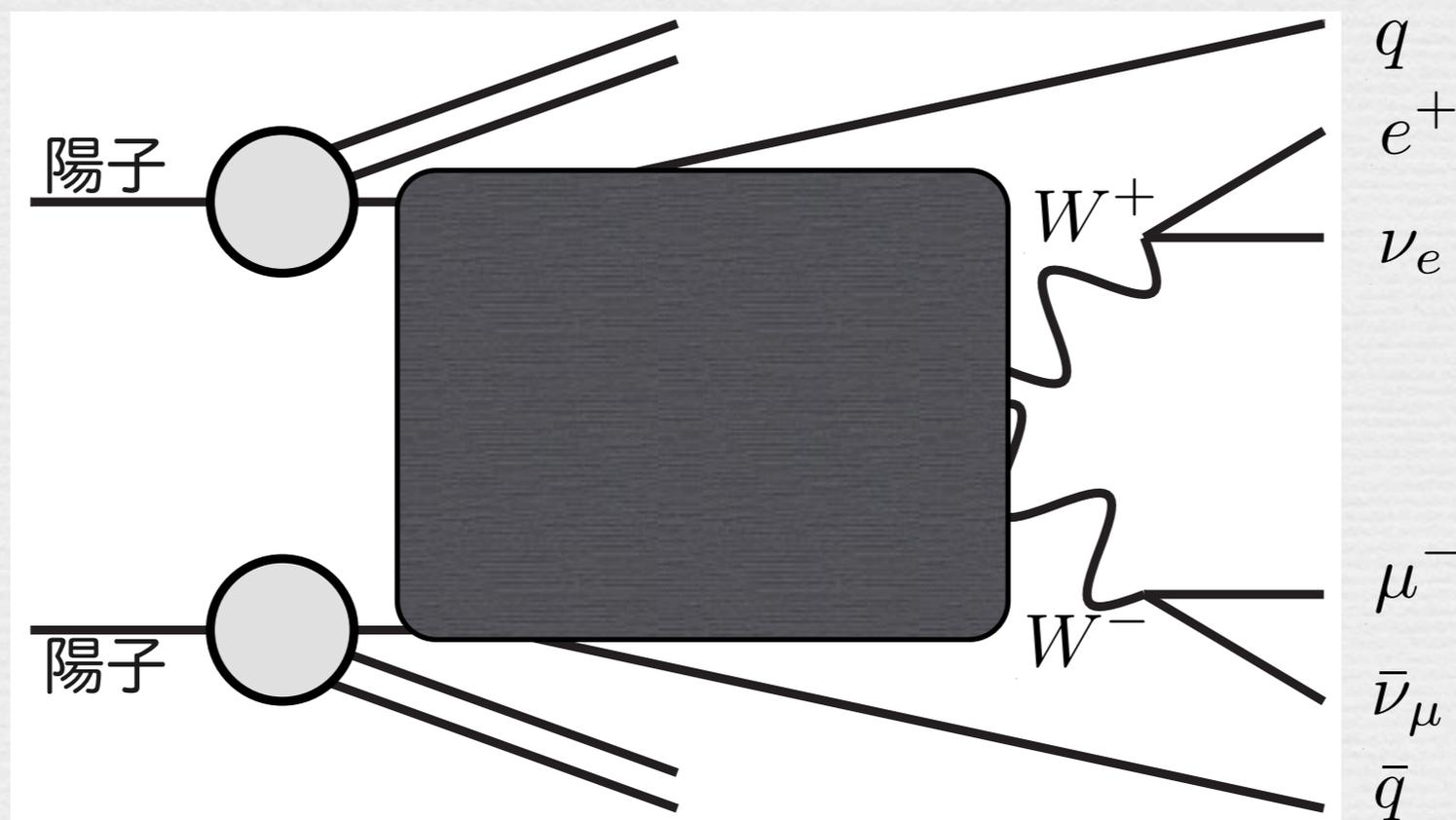
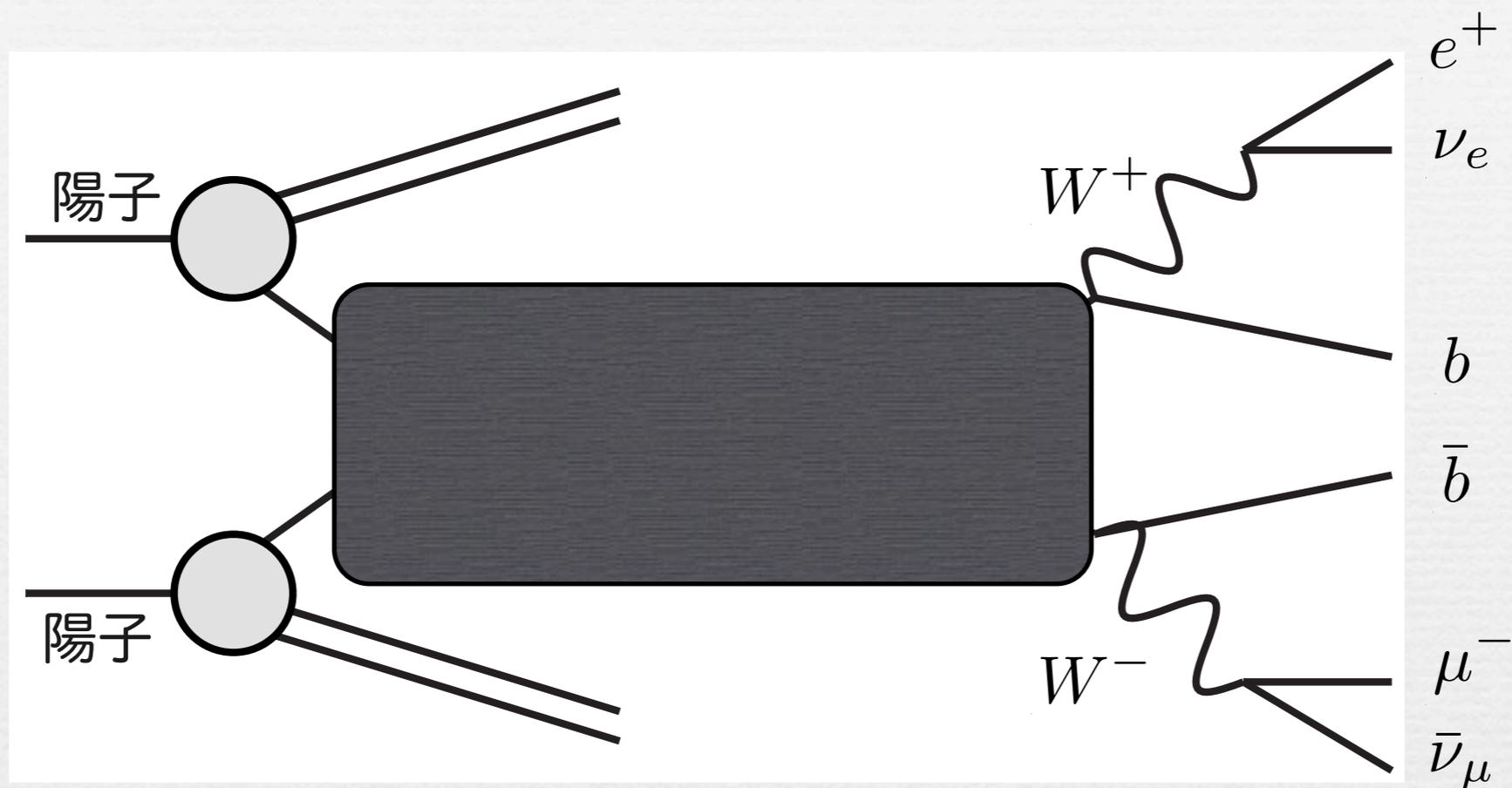
1983年：W/Zボゾン

1995年：tクォーク

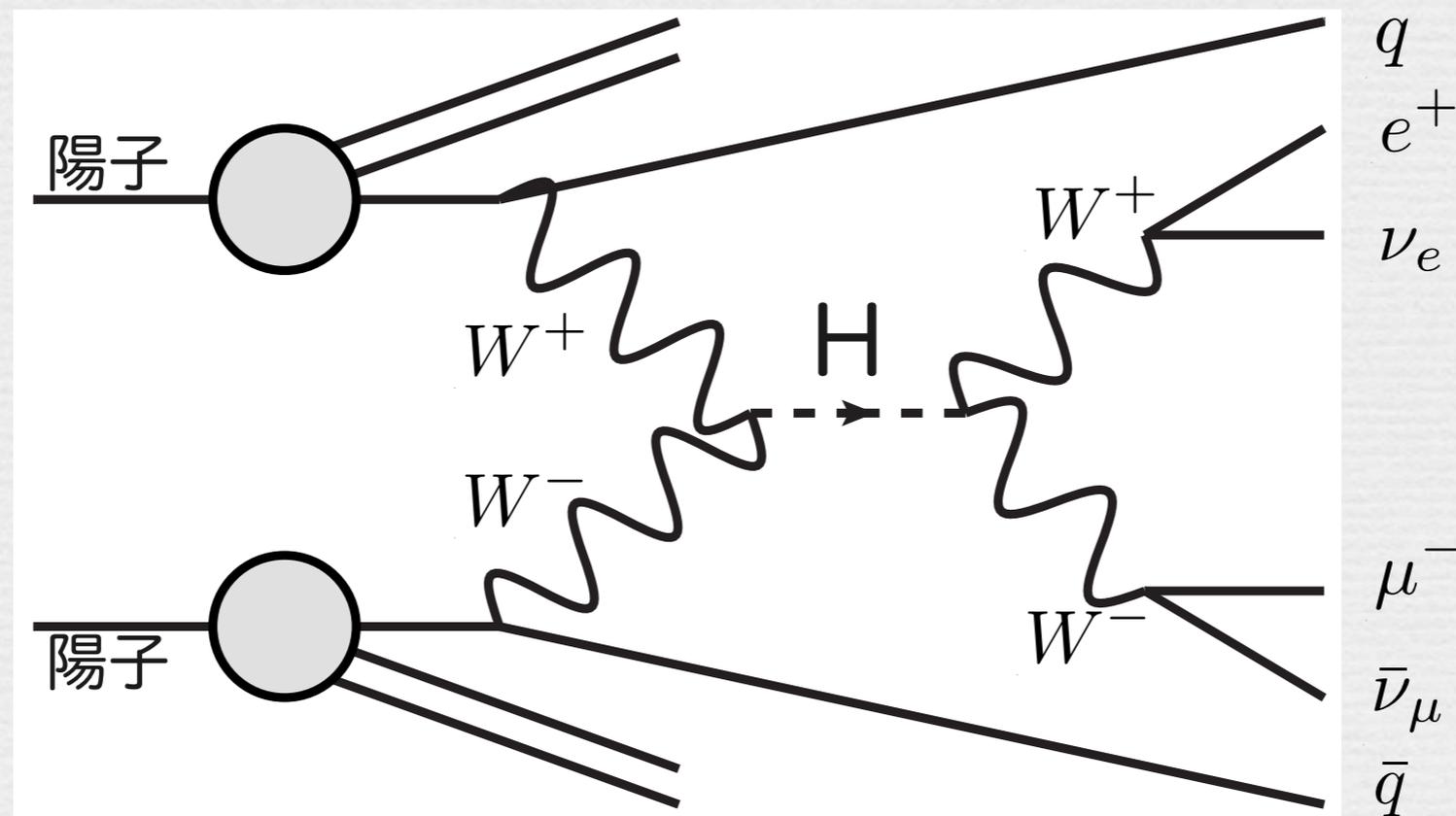
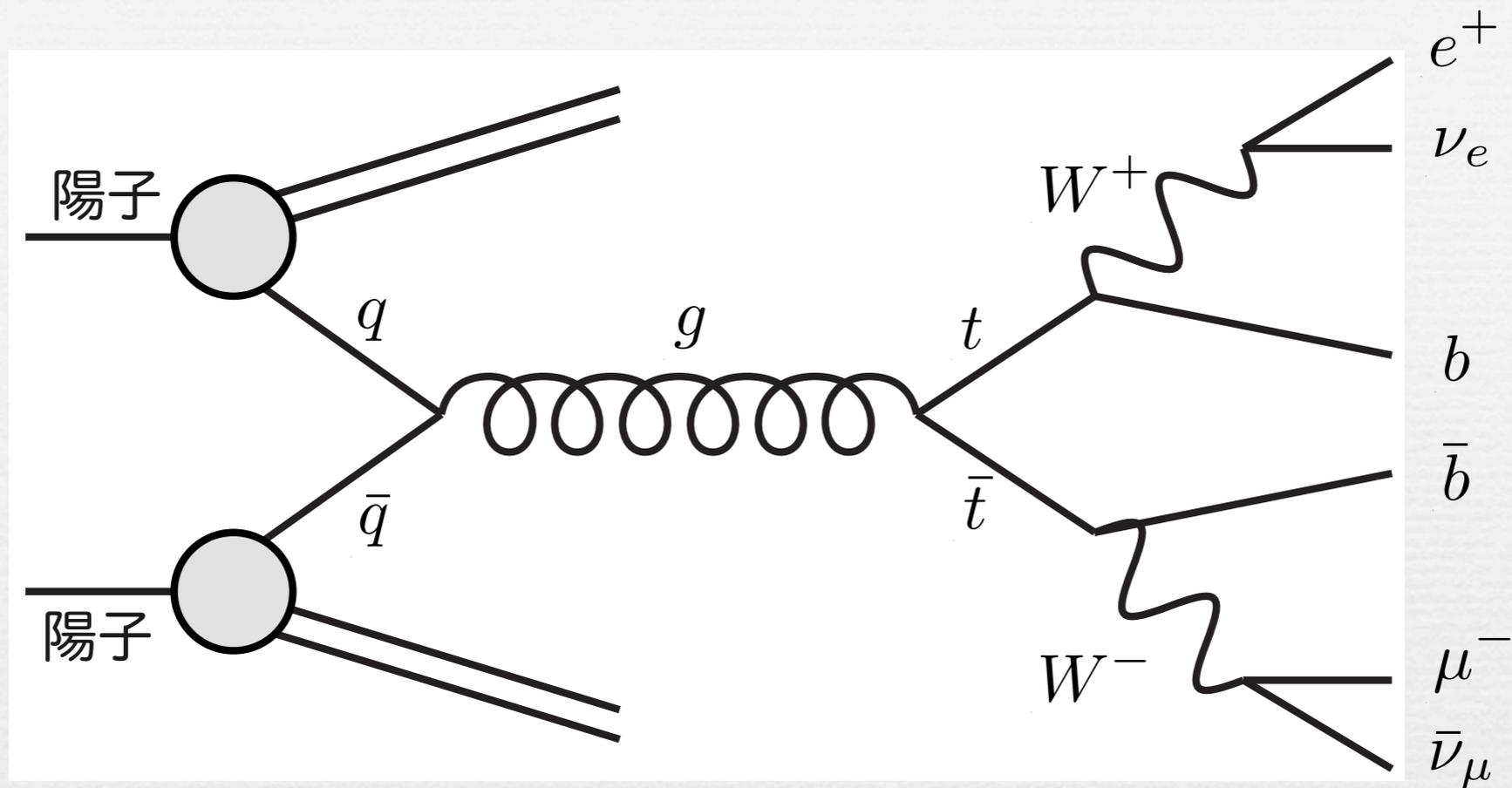
2000年： $\tau$ ニュートリノ

2012年(?)：ヒッグス粒子!!

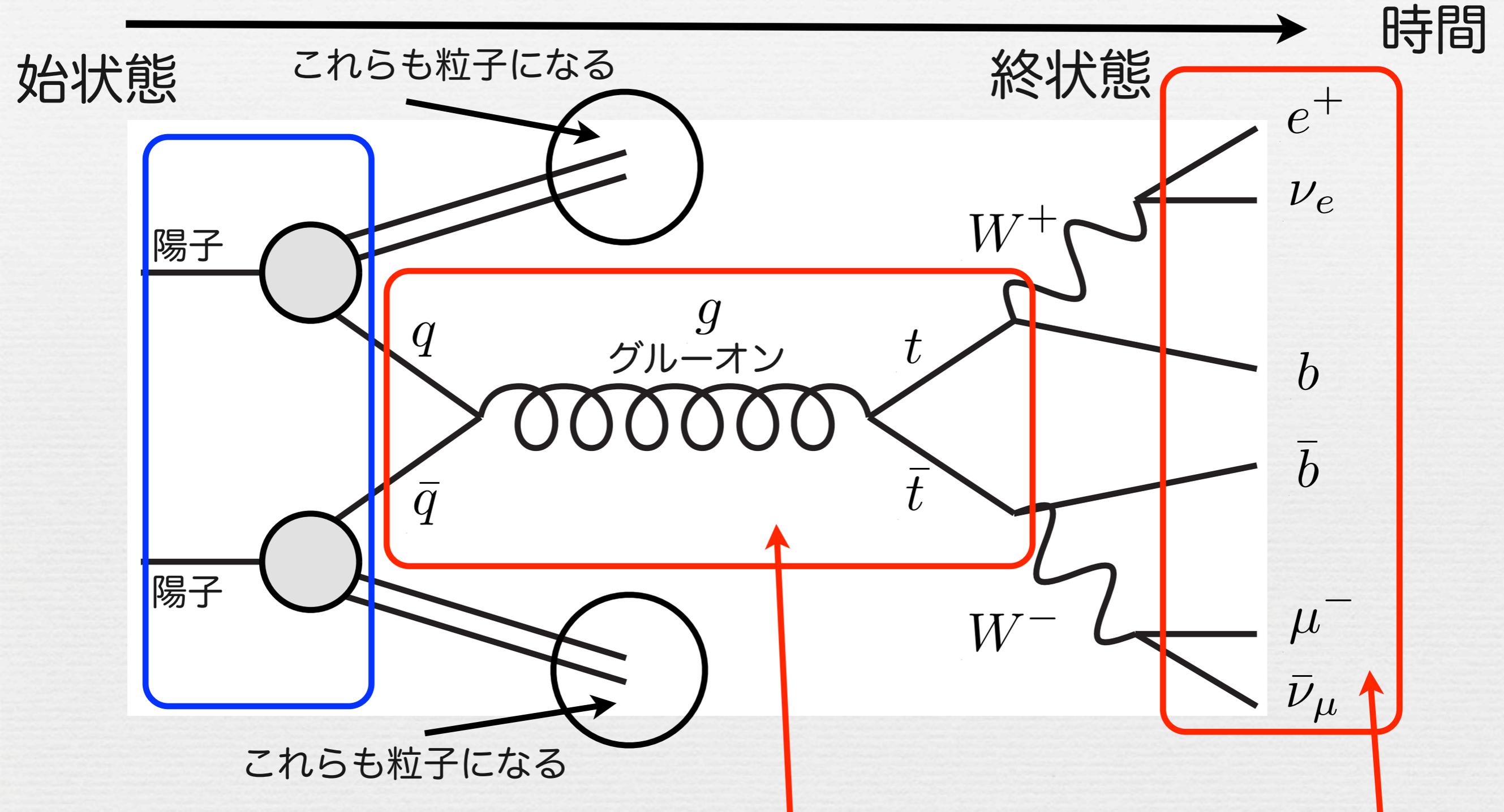
# 人間が観測しているもの



# 人間が観測しているもの



# 陽子・陽子衝突



何ができるか、”誰にも”わからない、見えない

人間が観測するのは「安定粒子」たち

# ヒッグス粒子をどうやって測定しているか？

- ① ヒッグス粒子の特徴（崩壊過程）を知る
- ② ヒッグス粒子の崩壊っぽいイベントを集める  
本物といっしょに偽物は混じっていることに注意
- ③ 安定粒子からヒッグス粒子を再構成する

# 親粒子の復元

出典:IPA「教育用画像素材集サイト」<http://www2.edu.ipa.go.jp/gz/>



# 親粒子の復元

出典:IPA「教育用画像素材集サイト」<http://www2.edu.ipa.go.jp/gz/>



# 親粒子の復元

出典:IPA「教育用画像素材集サイト」<http://www2.edu.ipa.go.jp/gz/>



# 親粒子の復元

出典:IPA「教育用画像素材集サイト」<http://www2.edu.ipa.go.jp/gz/>



# 親粒子の復元

出典:IPA「教育用画像素材集サイト」<http://www2.edu.ipa.go.jp/gz/>



# 親粒子の復元

出典:IPA「教育用画像素材集サイト」<http://www2.edu.ipa.go.jp/gz/>



# 親粒子の復元

出典:IPA「教育用画像素材集サイト」<http://www2.edu.ipa.go.jp/gz/>



# 親粒子の復元

出典:IPA「教育用画像素材集サイト」<http://www2.edu.ipa.go.jp/gz/>

重さを測れば



いつも同じ！



# 親粒子の復元

出典:IPA「教育用画像素材集サイト」<http://www2.edu.ipa.go.jp/gz/>



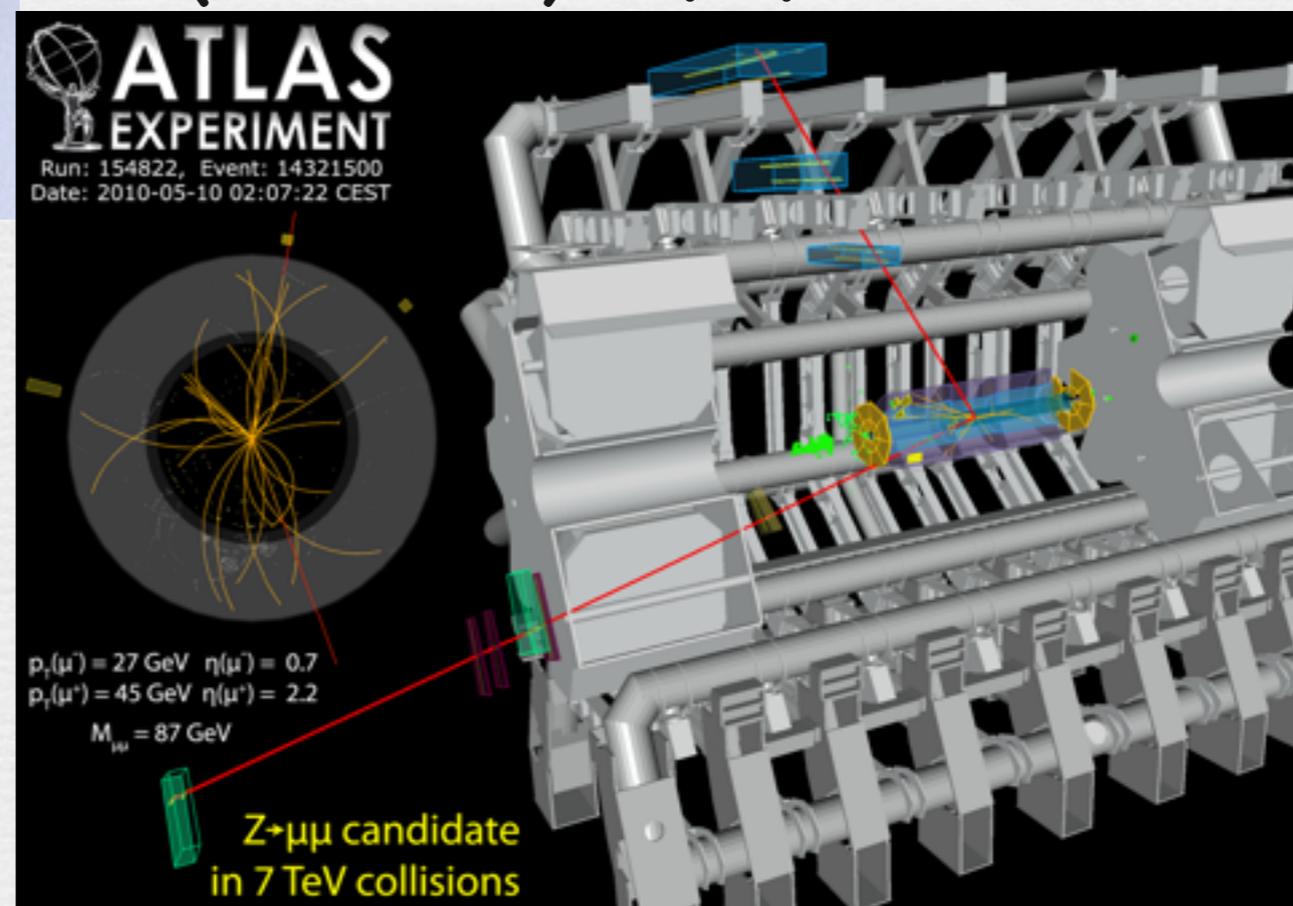
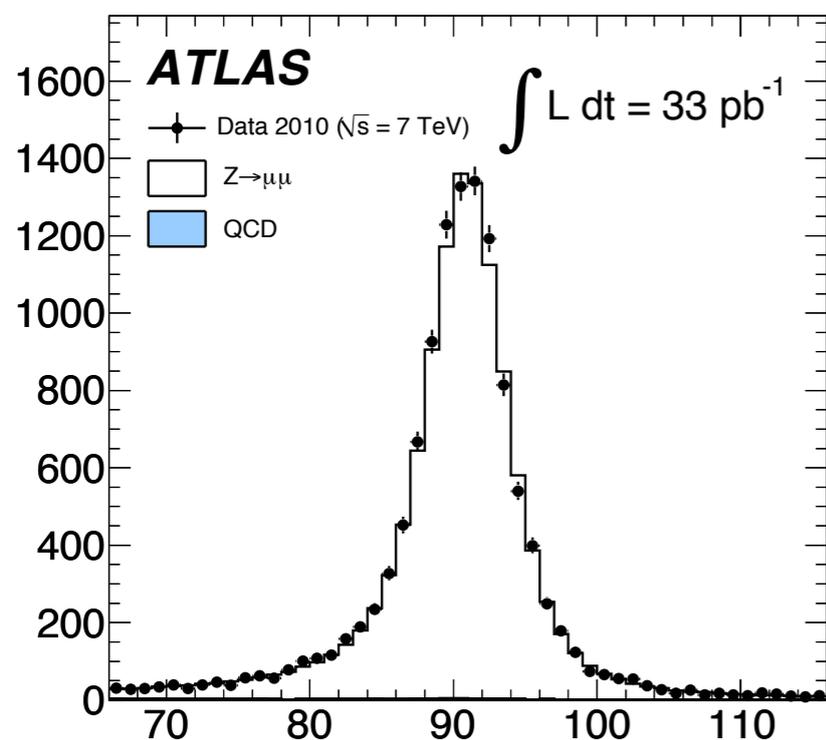
重さを測れば



いつも同じ!

$Z (90\text{GeV}) \rightarrow \mu\mu$

観測数



2つの粒子から組み上げた質量

# 親粒子の復元

出典:IPA「教育用画像素材集サイト」<http://www2.edu.ipa.go.jp/gz/>



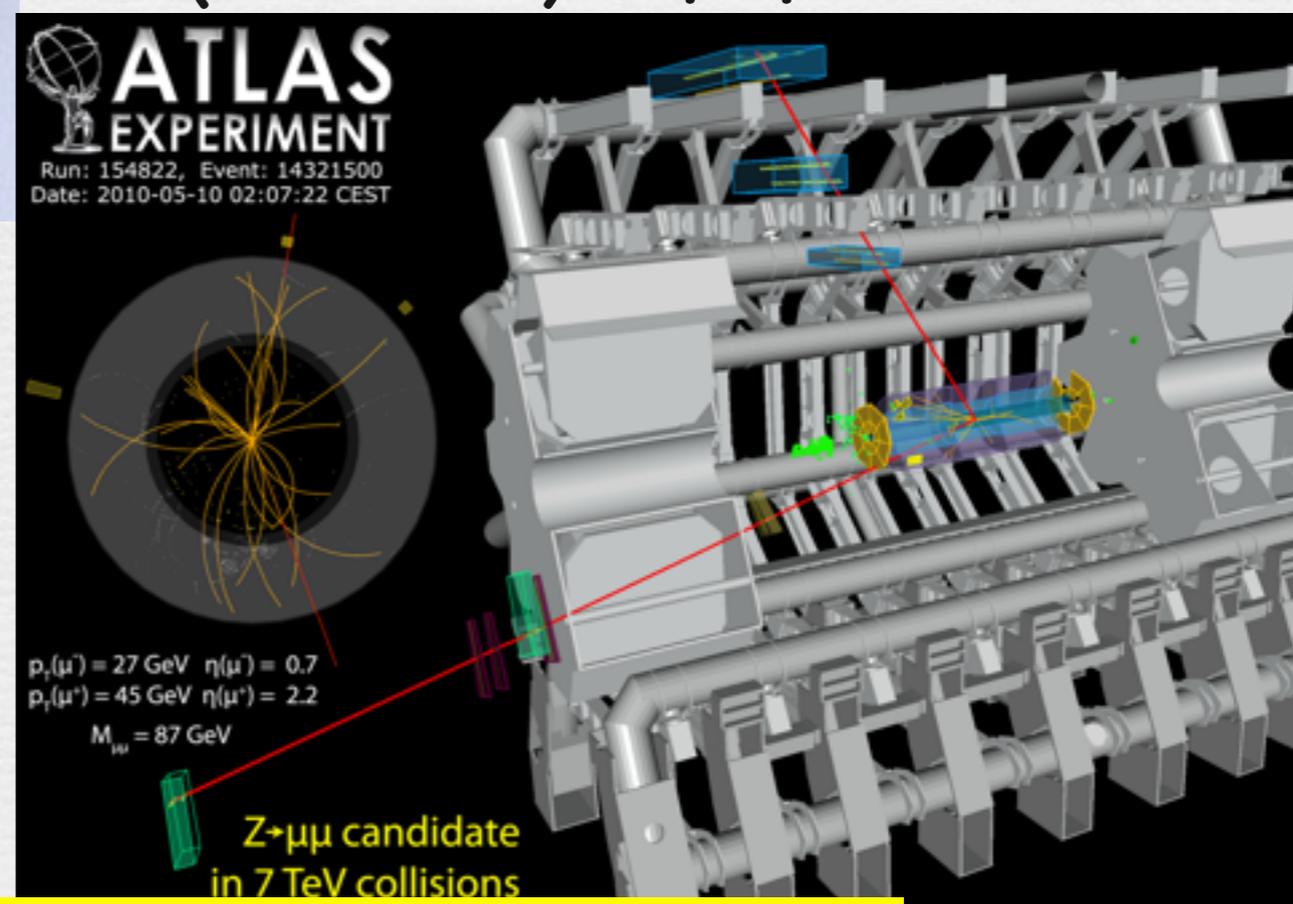
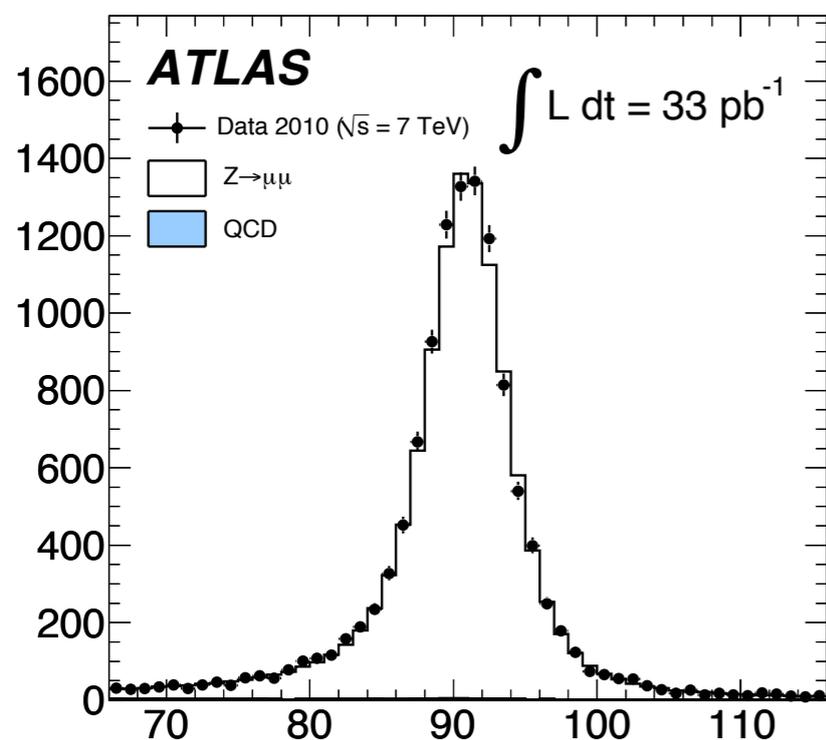
重さを測れば



いつも同じ!

$Z (90\text{GeV}) \rightarrow \mu \mu$

観測数



2つの粒子から組み上げた質量

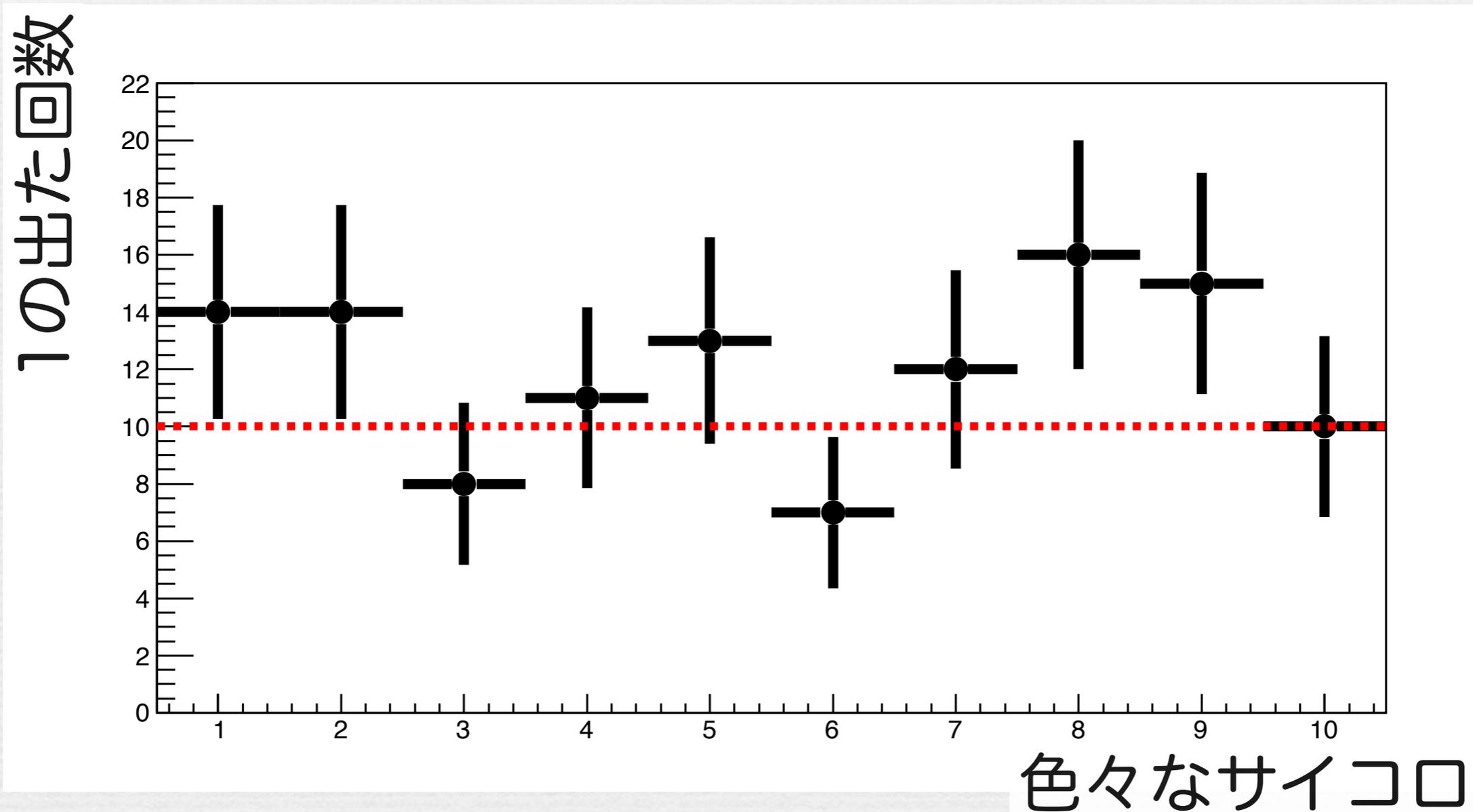
⇒親粒子の質量にピーク

# いかさまサイコロを探せ！

1の目が出る確率  $1/6$

10個のサイコロをそれぞれ60回ずつ振ってみる

9個は普通 1個は1/5で1の目が出るいかさまサイコロ

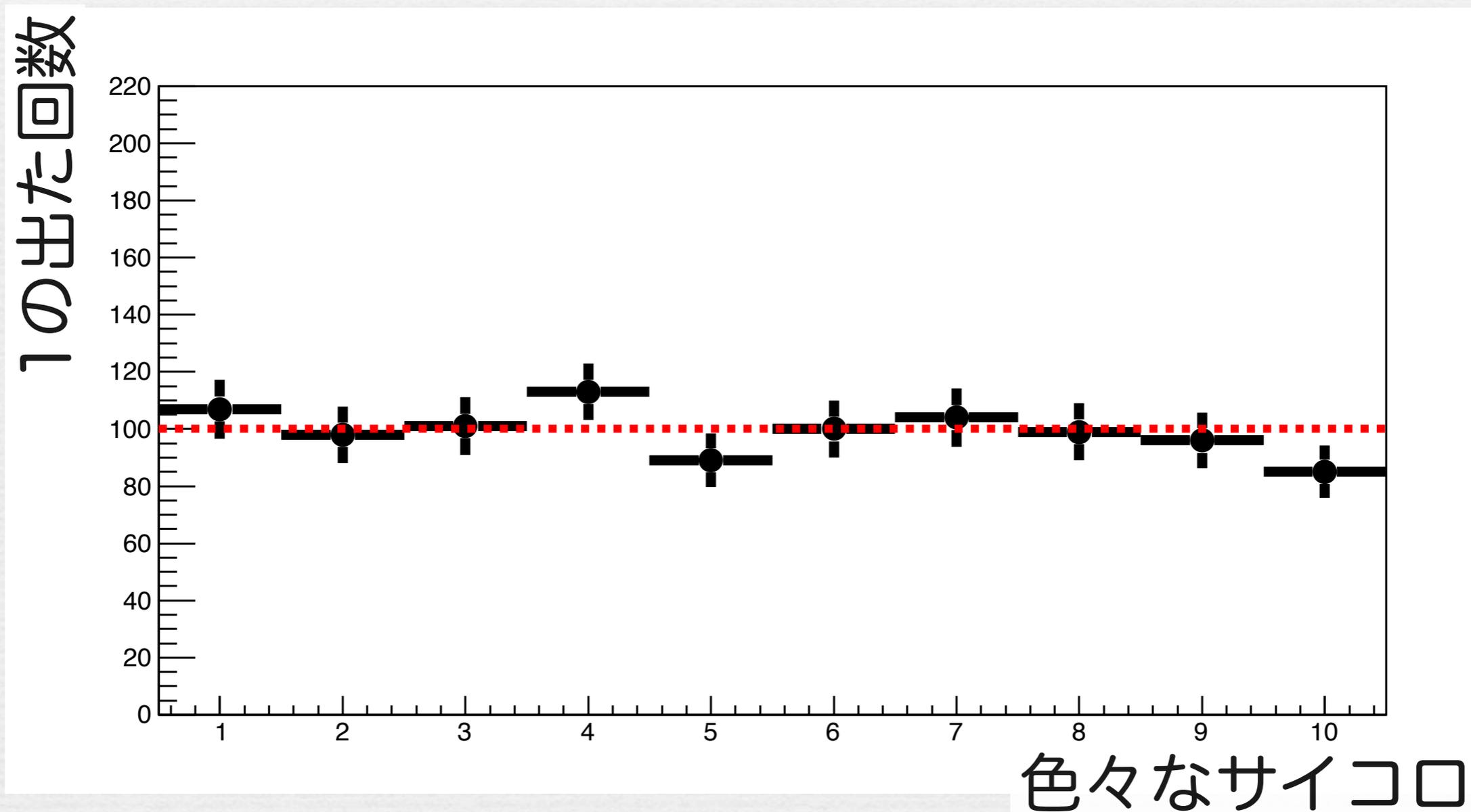


# いかさまサイコロを探せ！

1の目が出る確率  $1/6$

10個のサイコロをそれぞれ600回ずつ振ってみる

9個は普通 1個は1/5で1の目が出るいかさまサイコロ

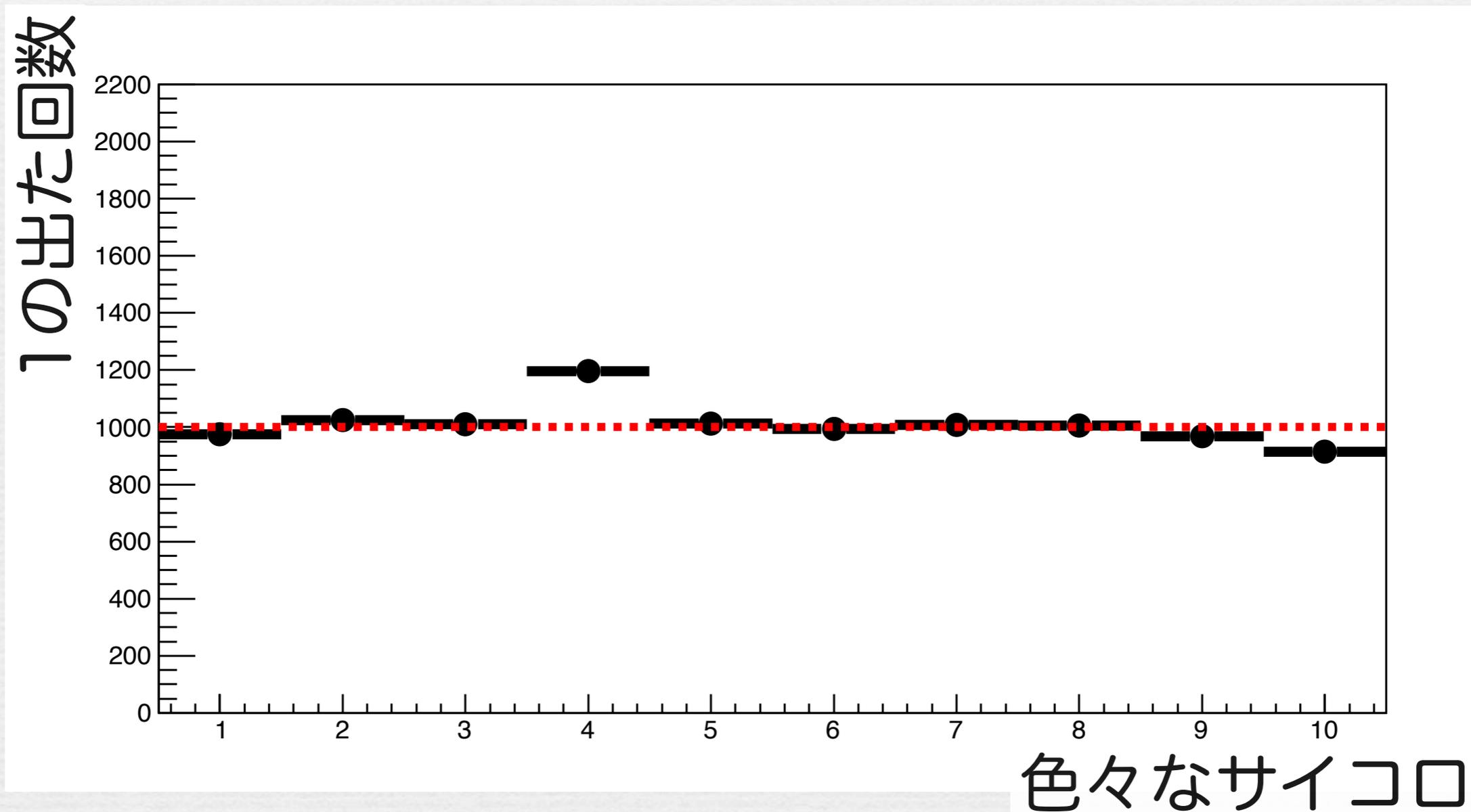


# いかさまサイコロを探せ！

1の目が出る確率  $1/6$

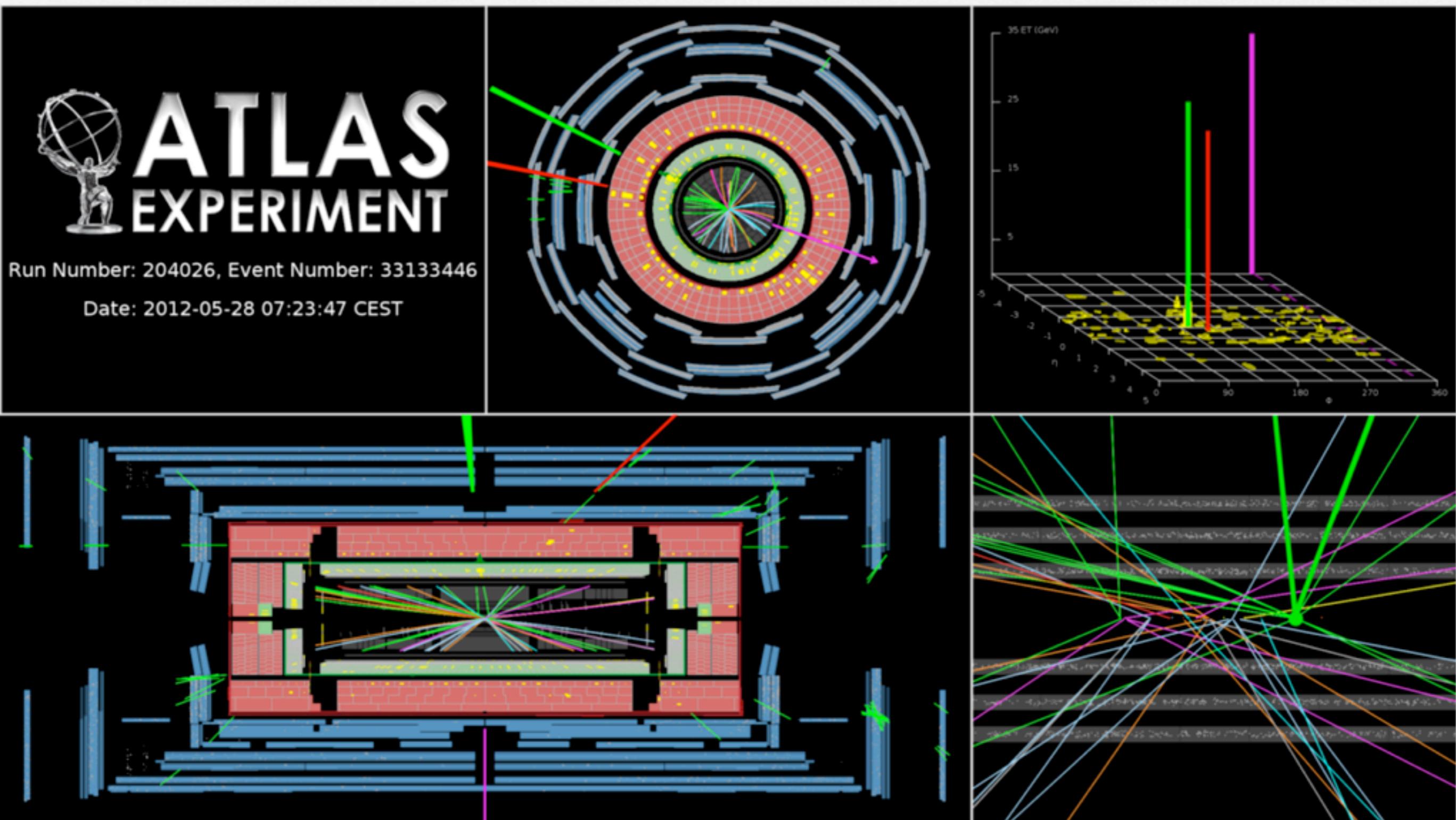
10個のサイコロをそれぞれ6000回ずつ振ってみる

9個は普通 1個は1/5で1の目が出るいかさまサイコロ

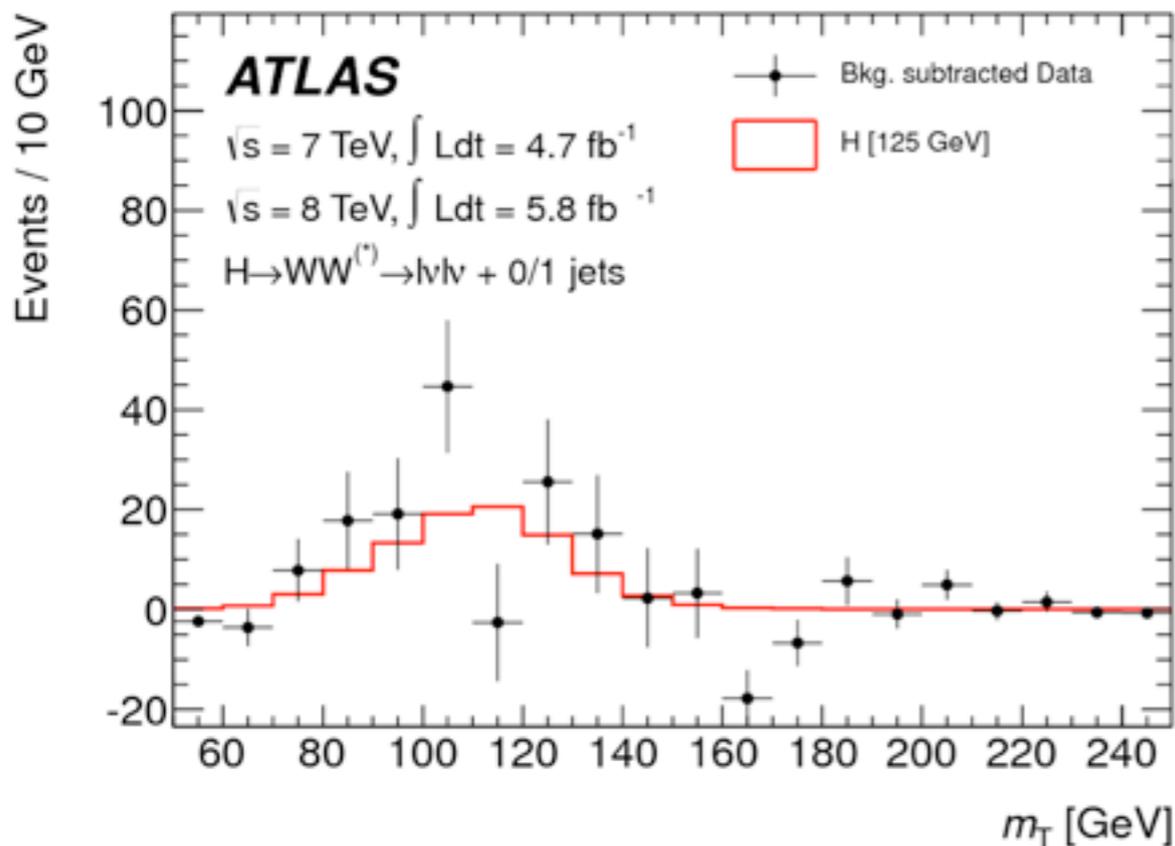
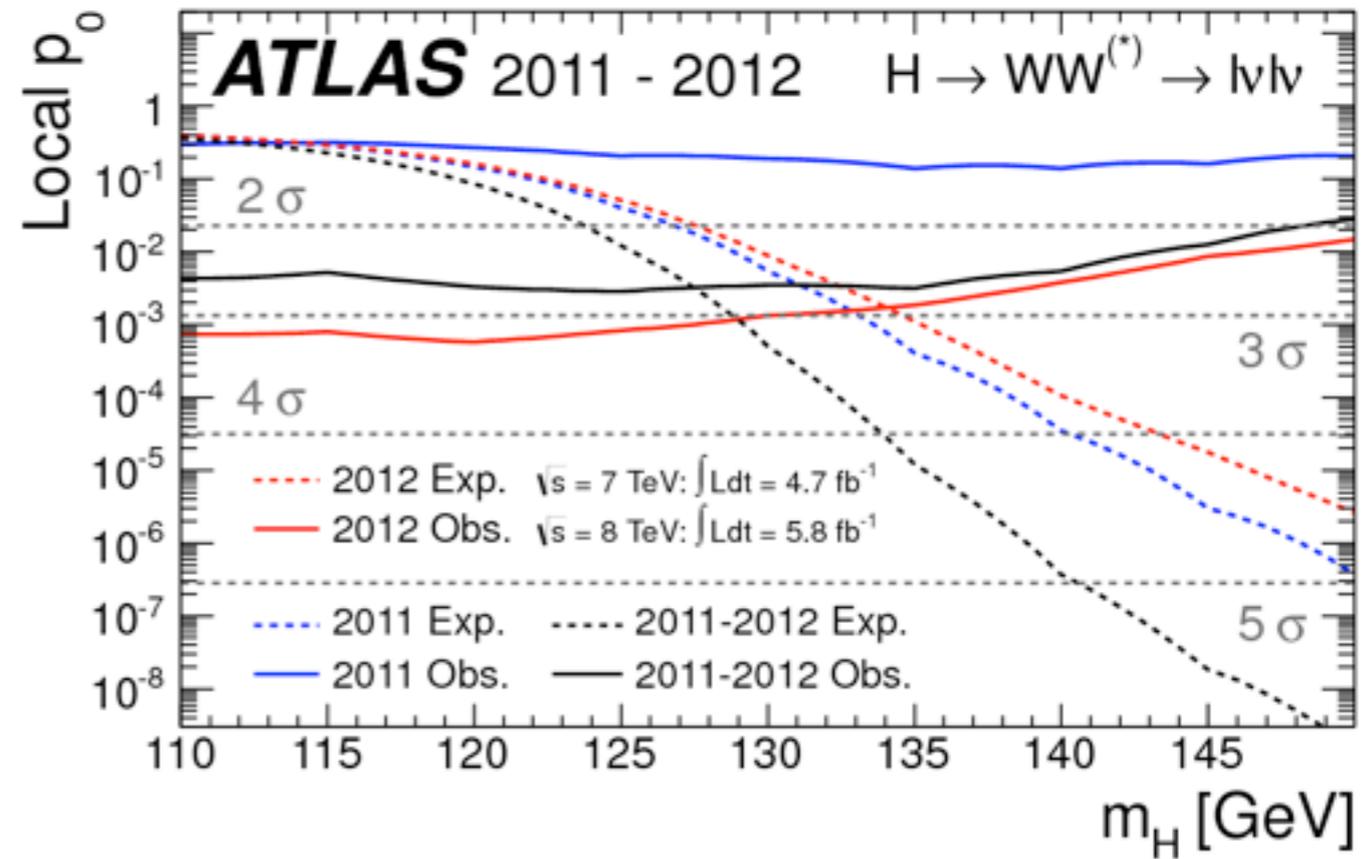
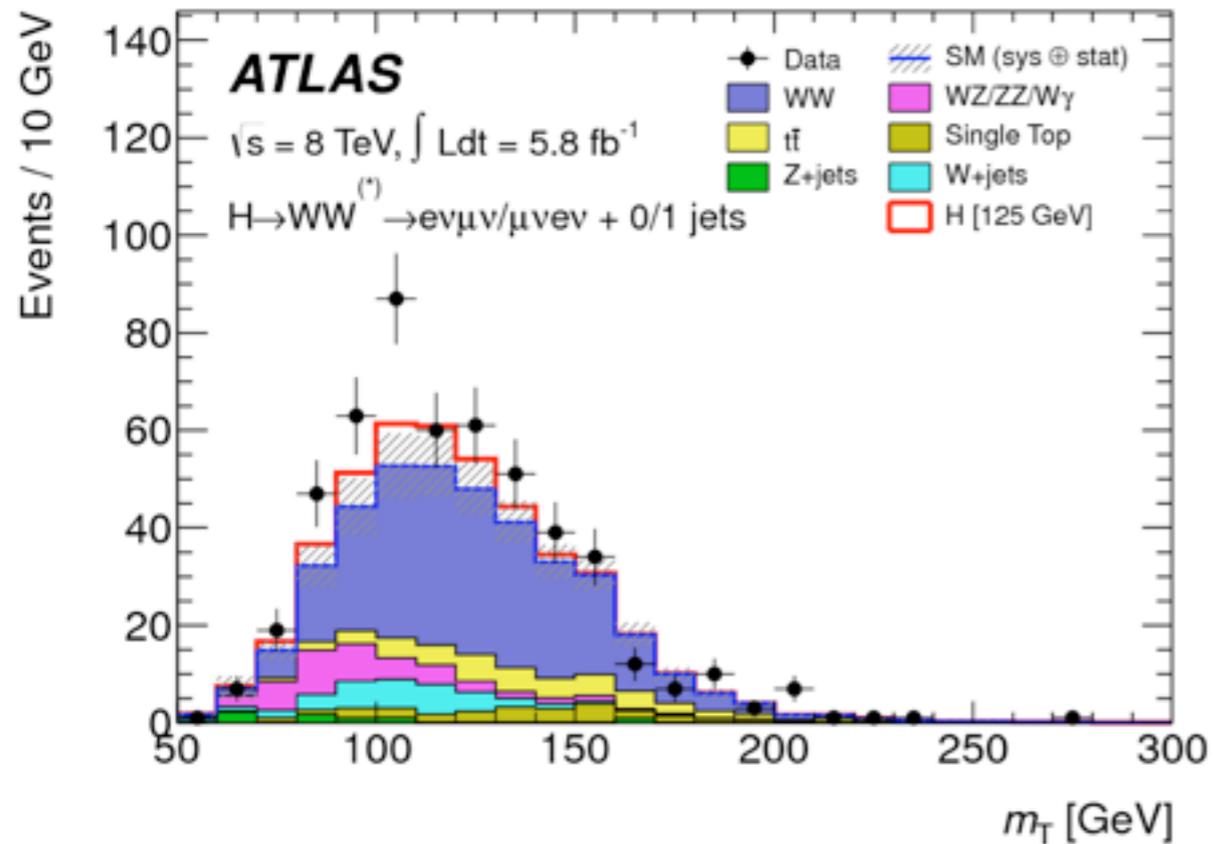


陽子 + 陽子  $\rightarrow$  H  $\rightarrow$  WW  $\rightarrow$   $l \nu$   $l \nu$

候補事象



陽子 + 陽子  $\rightarrow$  H  $\rightarrow$  WW  $\rightarrow$   $l\nu l\nu$

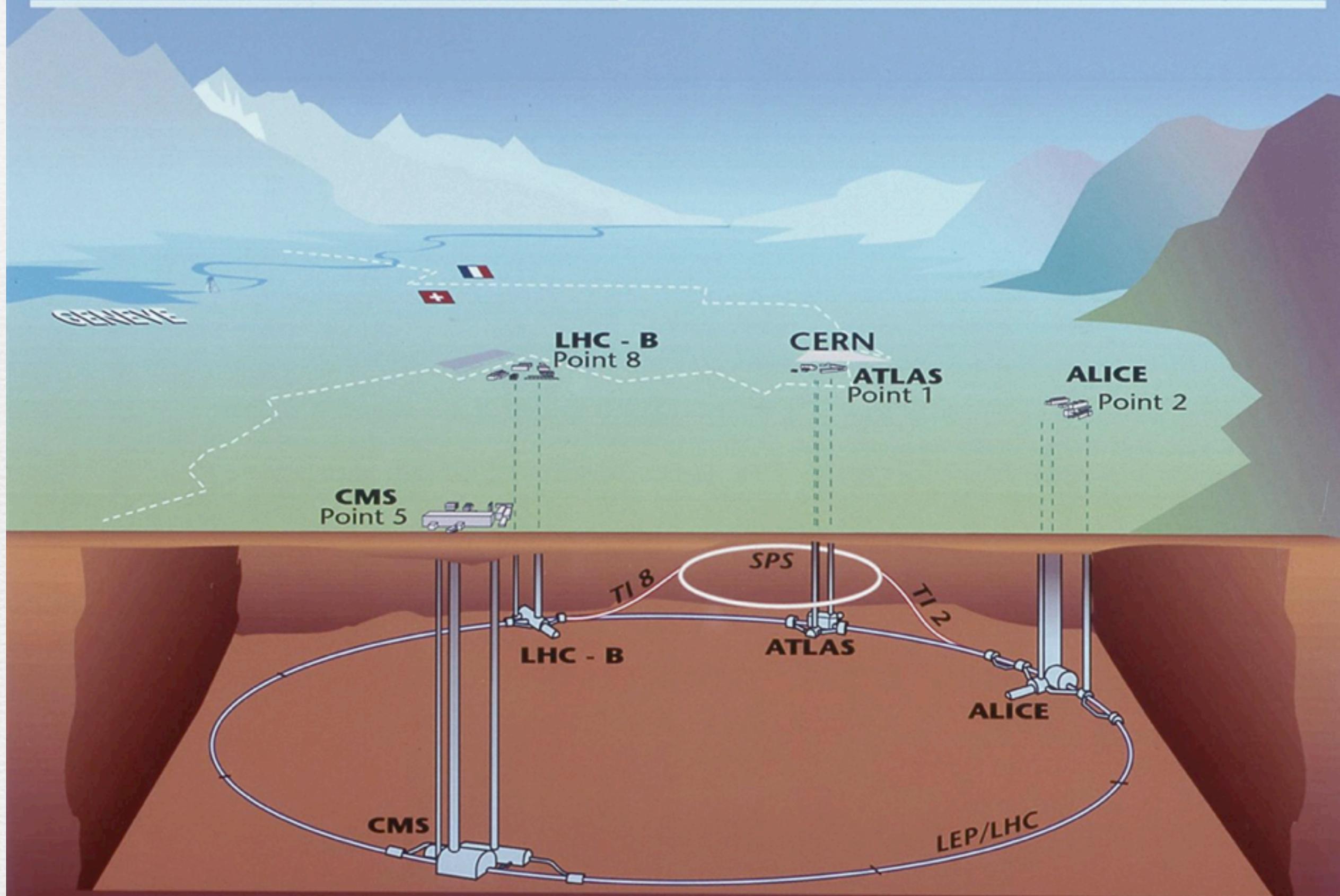


偽物が統計的にふらついて本物  
と間違える確率

$p = 4$  百分の 1

# ヒッグス粒子を作るマシン

Overall view of the LHC experiments.



# 物質を構成する

# 力を伝える

クォーク

レプトン

電荷 :  $+2/3e$

電荷 :  $-1/3e$

電荷 :  $0$

電荷 :  $-e$

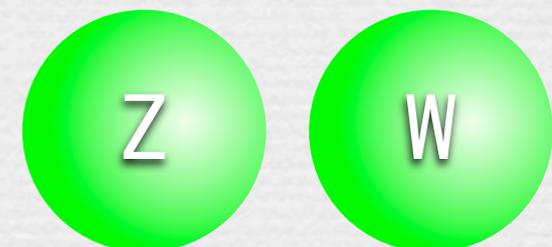
電磁気力 : 光子



強い力 : グルーオン



弱い力 : Z、W粒子



第1世代  
アップ(u)



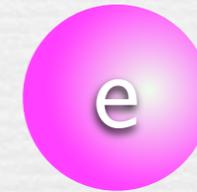
ダウン(d)



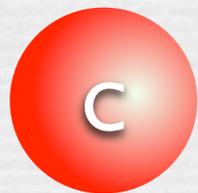
電子ニュートリノ



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

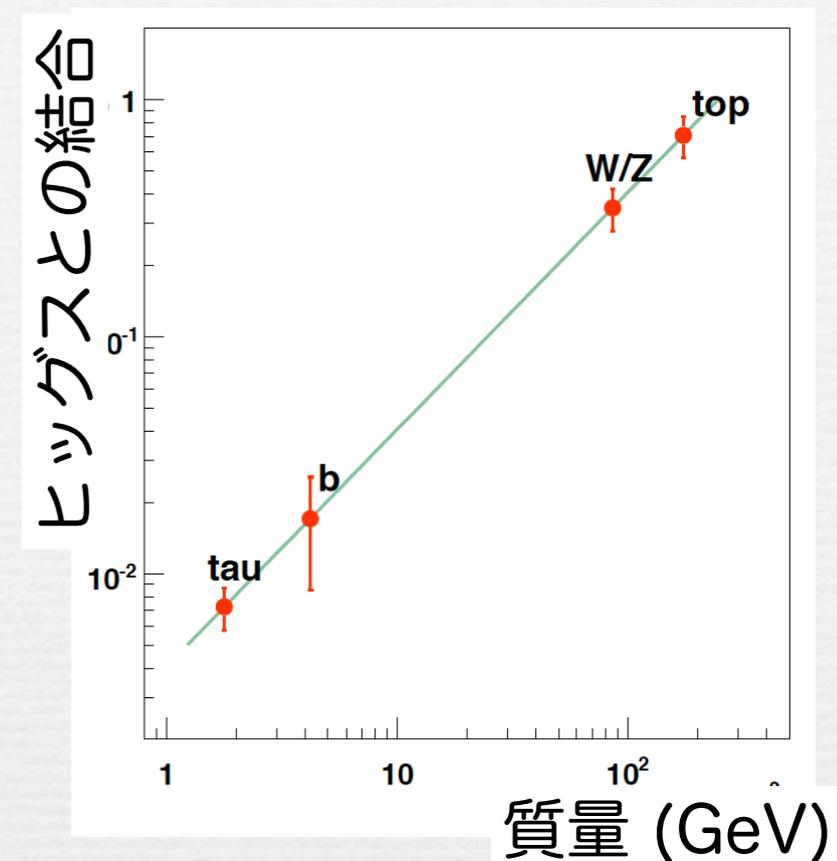


タウ粒子

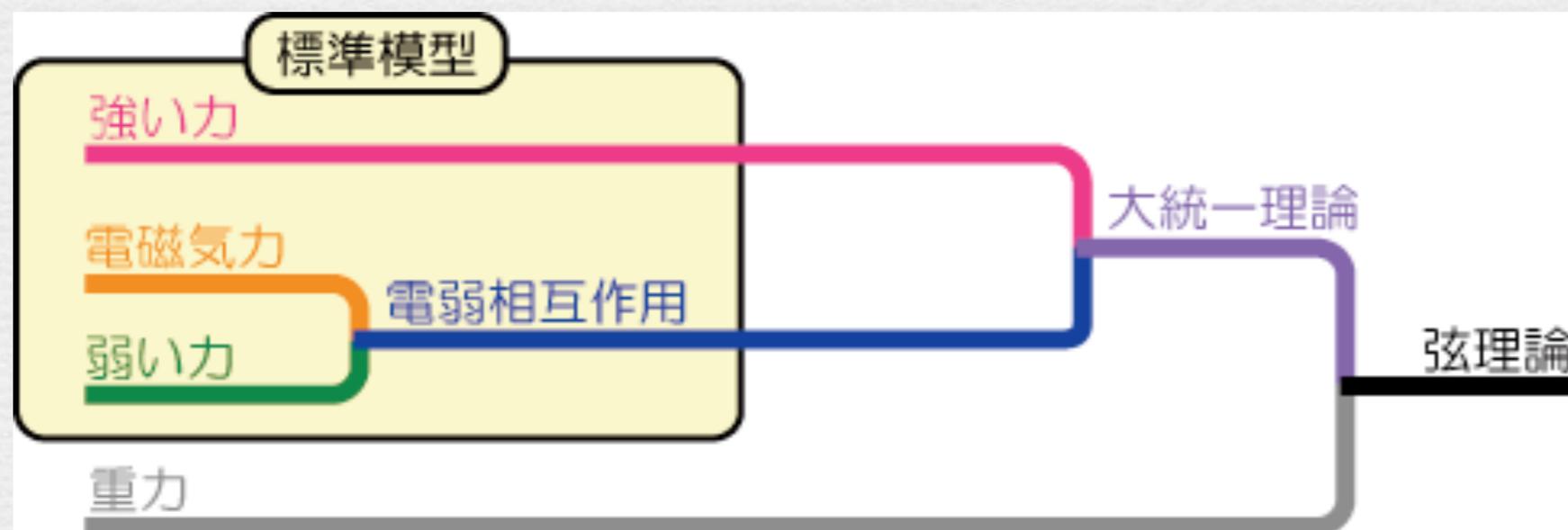


# ヒッグス粒子が発見されると

- 標準模型の登場人物が出そろおう
- 「質量起源の謎」 解明の挑戦権

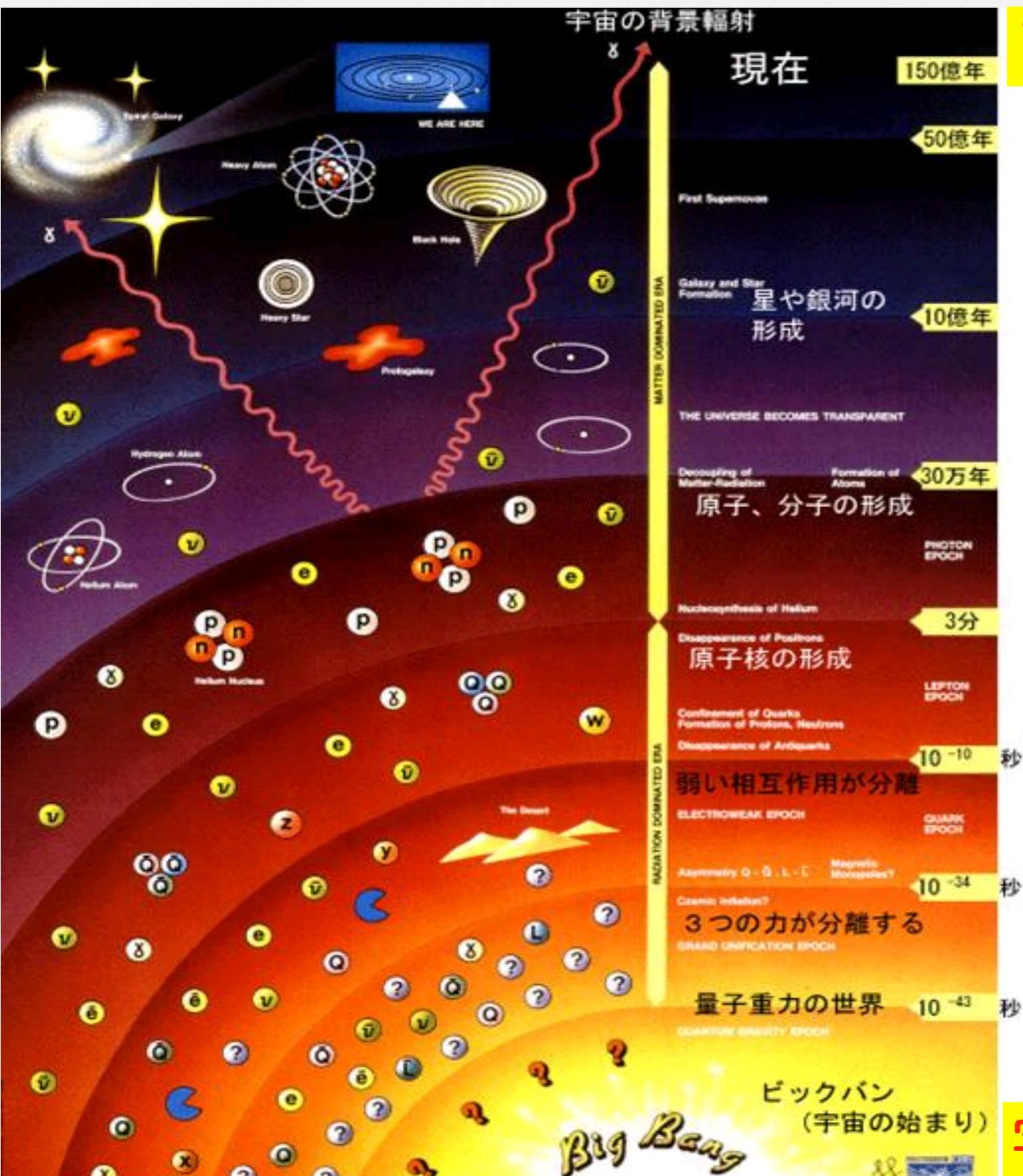


- もっと高エネルギーの世界  
よりビッグバン直後の世界
- の記述が標準模型では困難

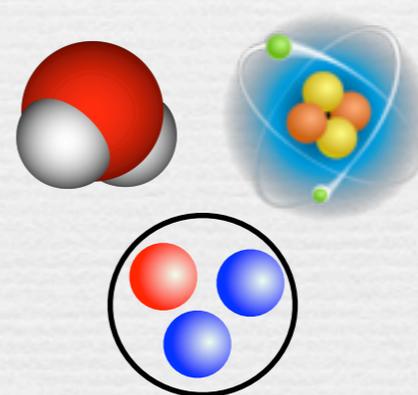
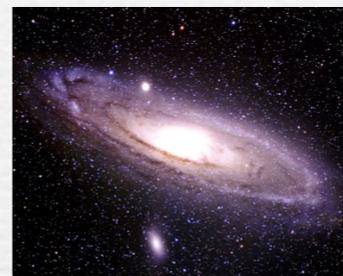


超対称性  
余剰次元  
驚きの何か？

# LHCで宇宙創成を探る

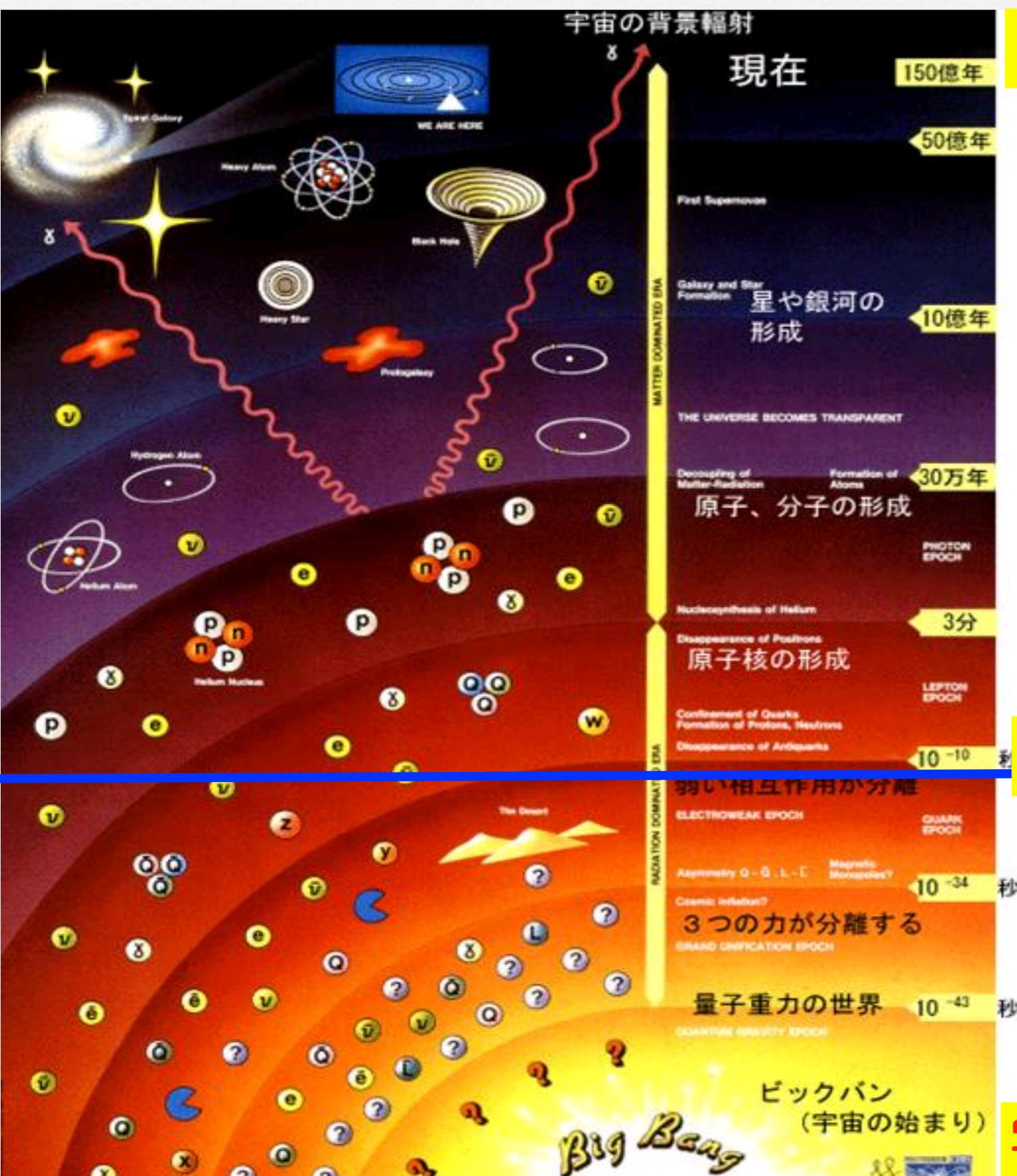


137億年

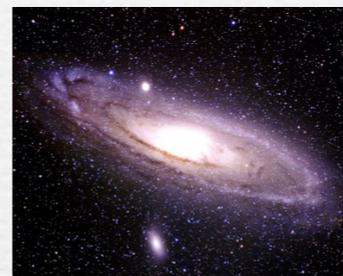


宇宙誕生

# LHCで宇宙創成を探る



137億年



これまでの加速器

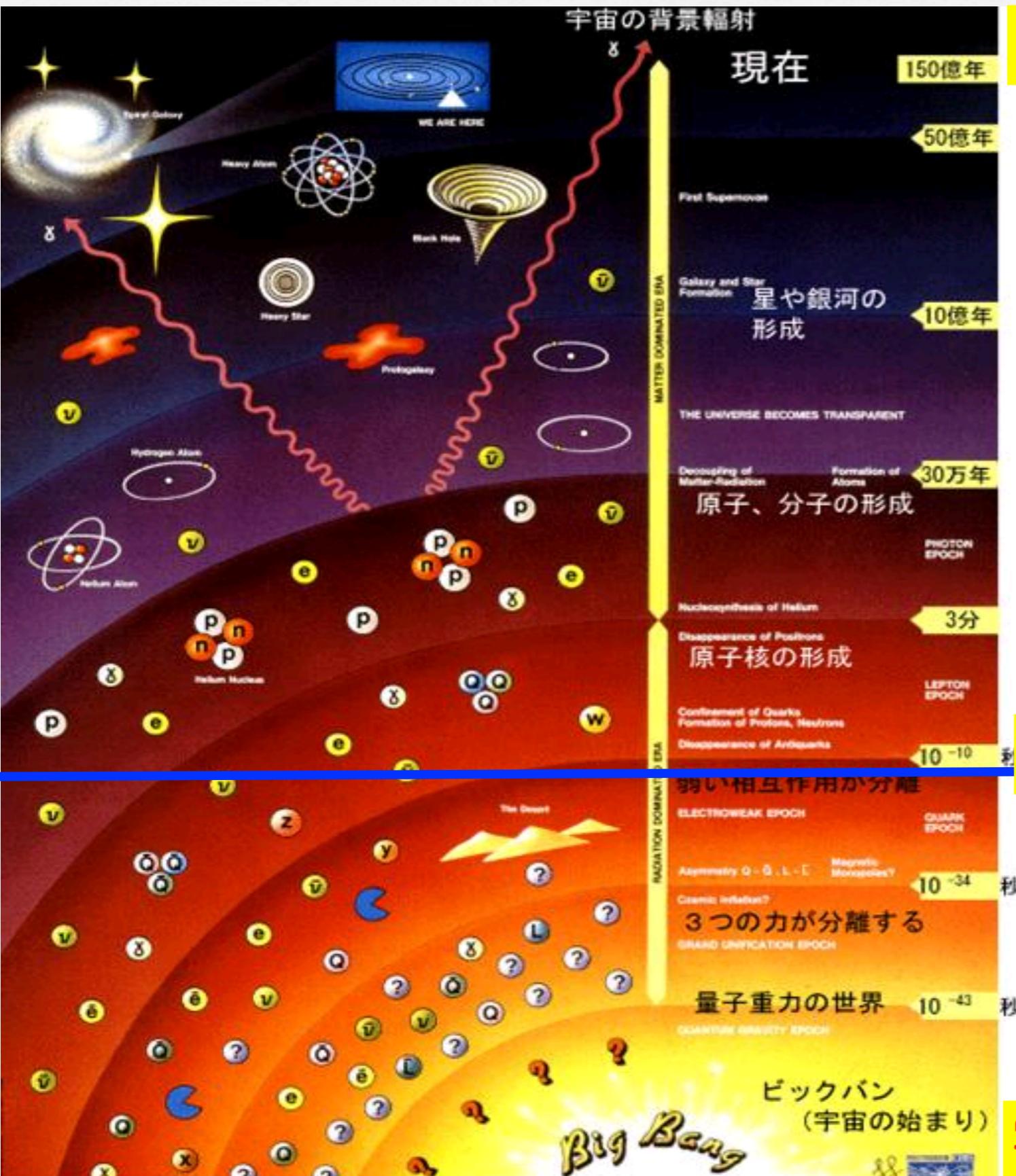


10<sup>-12</sup>秒後

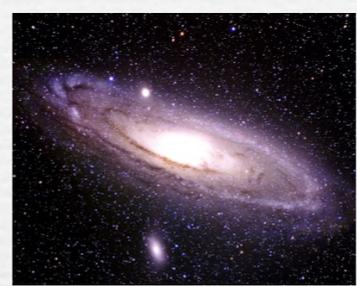
標準模型

宇宙誕生

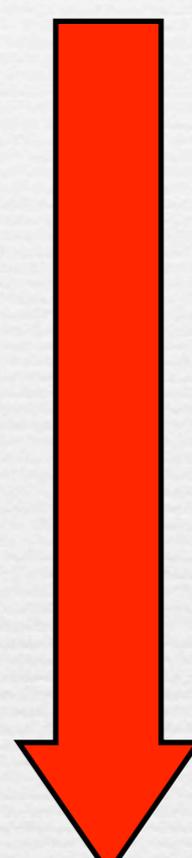
# LHCで宇宙創成を探る



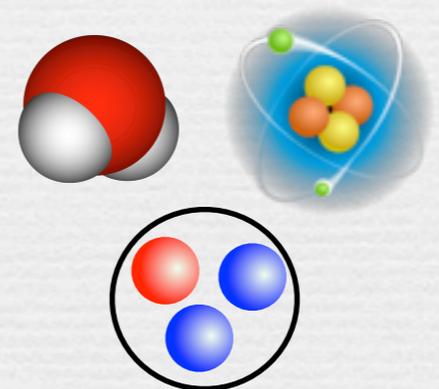
137億年



これまでの加速器



10<sup>-12</sup>秒後

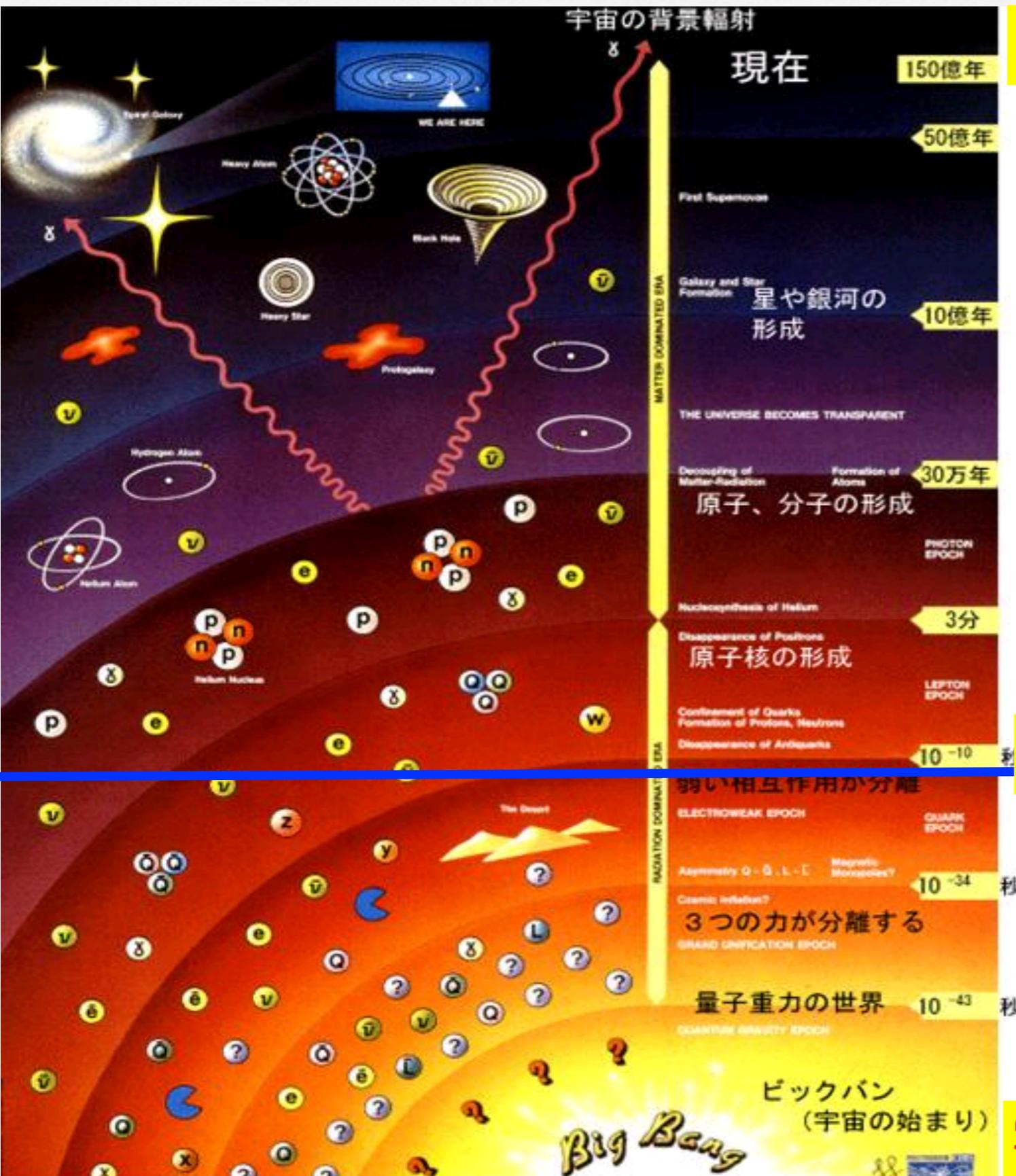


標準模型

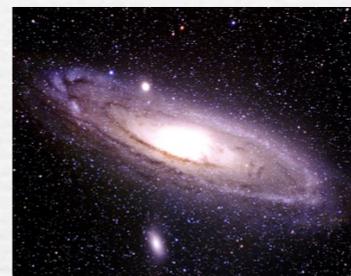
4つの力の統一的理解

宇宙誕生 宇宙誕生の秘密

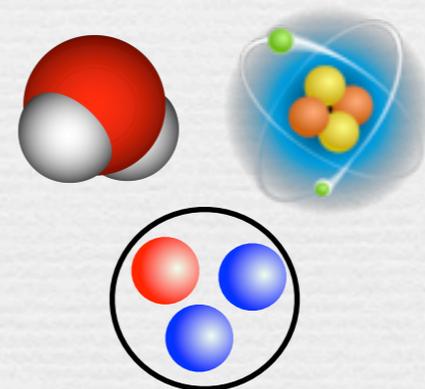
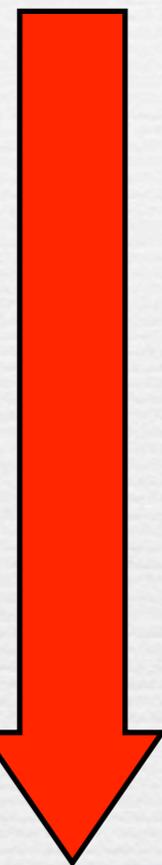
# LHCで宇宙創成を探る



137億年



これまでの加速器



10<sup>-12</sup>秒後

LHC

未来の加速器

標準模型

ヒッグス  
質量の起源  
新しい物理

4つの力の統一的理解

宇宙誕生

宇宙誕生の秘密

# 課外活動

モンブラン



モンブラン



夏はハイキング、冬はスキー  
良い所です。