

プリンキピア特別講演会 2014年10月18日



ヒッグス粒子発見のインパクト

戸本 誠

名古屋大学大学院理学研究科

内容

素粒子物理と素粒子の質量

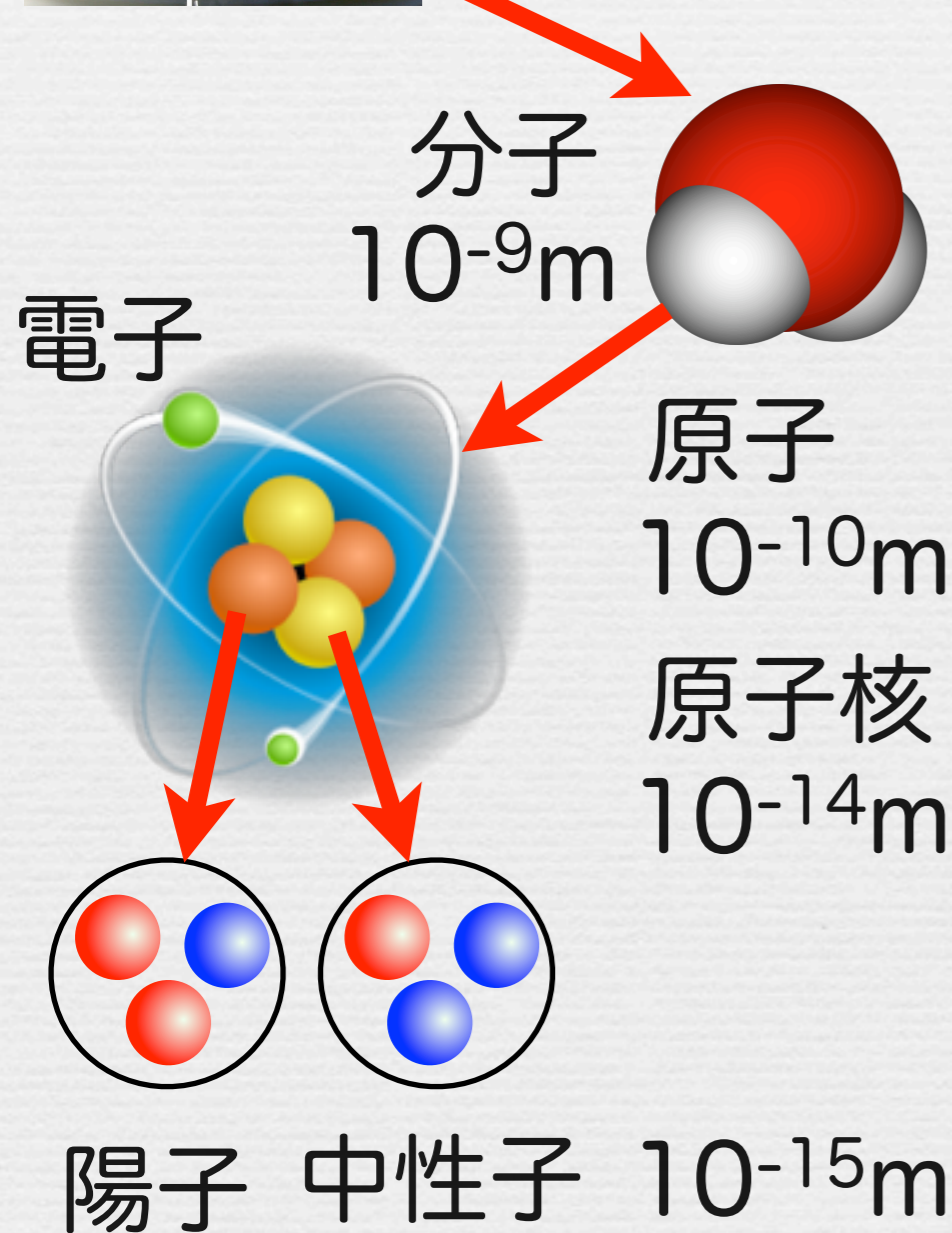
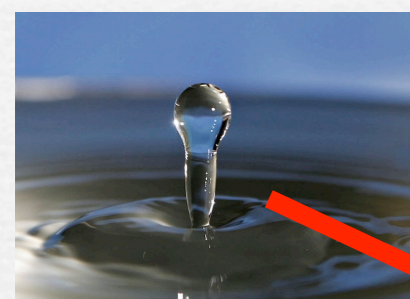
ヒッグス粒子の発見

ヒッグス粒子発見のインパクト

素粒子物理と素粒子の質量

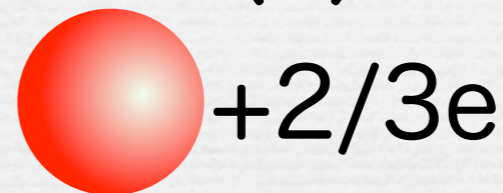
素粒子物理 1

全ての物は何からできているのか？

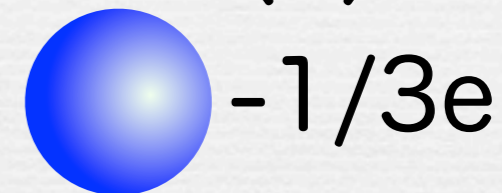


クォーク

アップ(u)



ダウン(d)

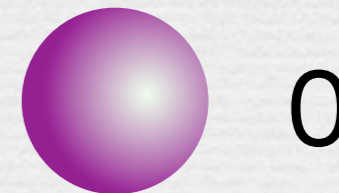


レプトン

電子



ニュートリノ



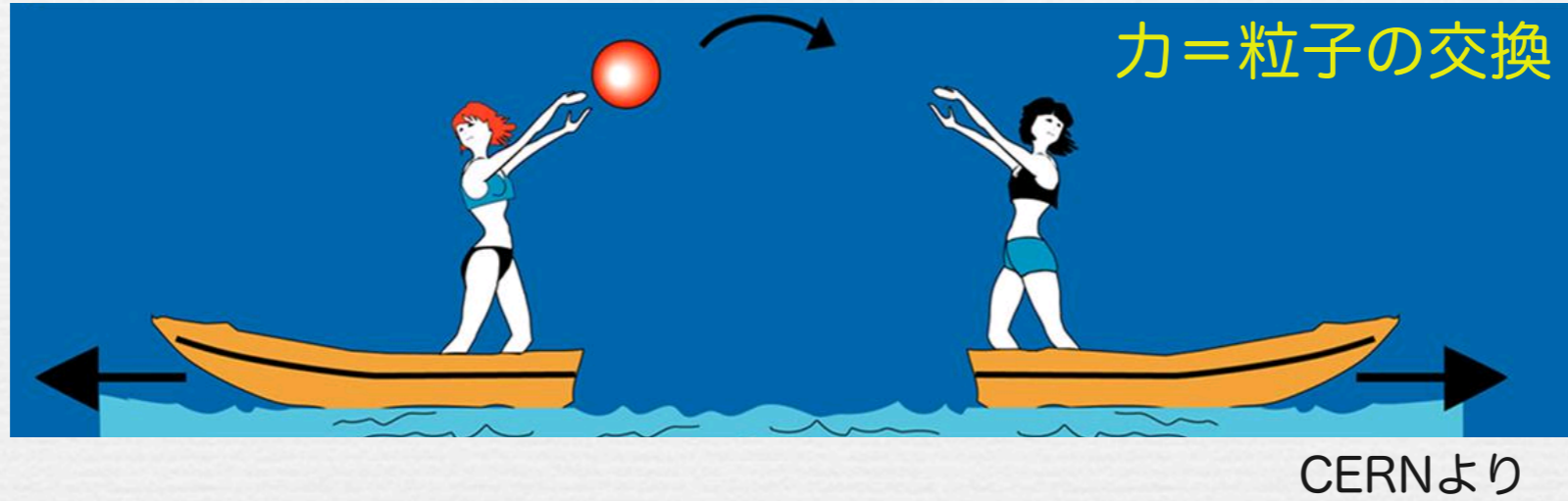
$10^{-18}m =$

0.000000000000000000000000001m

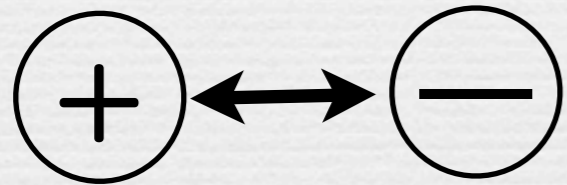
10億分の1 m の 10億分の1

素粒子物理 2

素粒子が従う力学法則は？

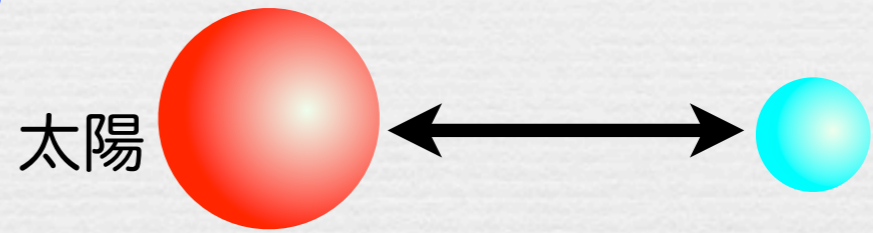


電磁気力



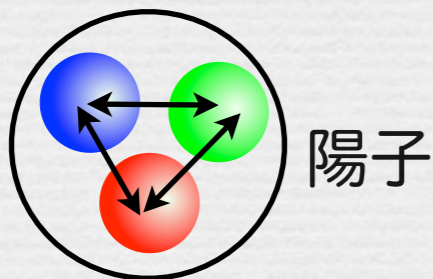
電荷：光子を交換

重力



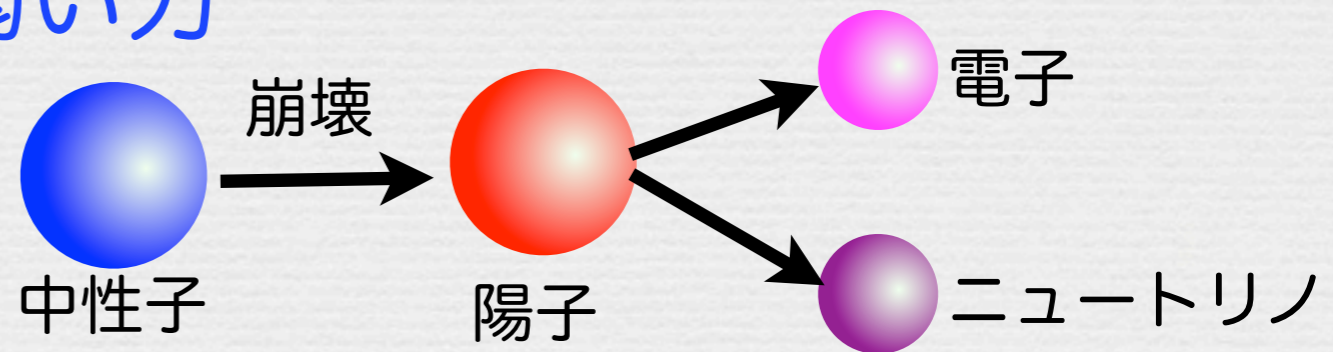
質量：グラビトン(未発見)を交換

強い力



色電荷：グルーオンを交換

弱い力

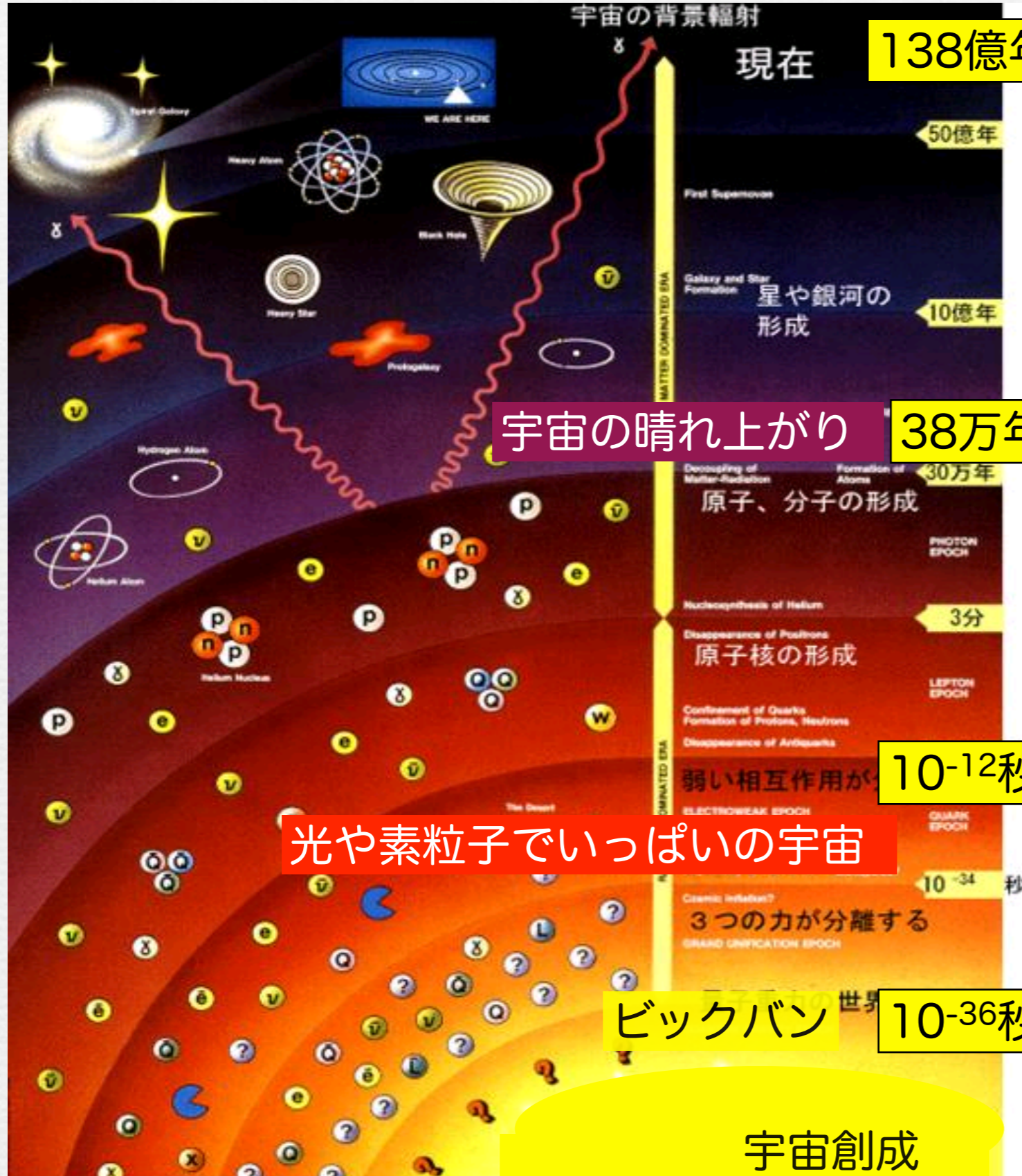


弱電荷：W、Z粒子を交換

素粒子物理 3

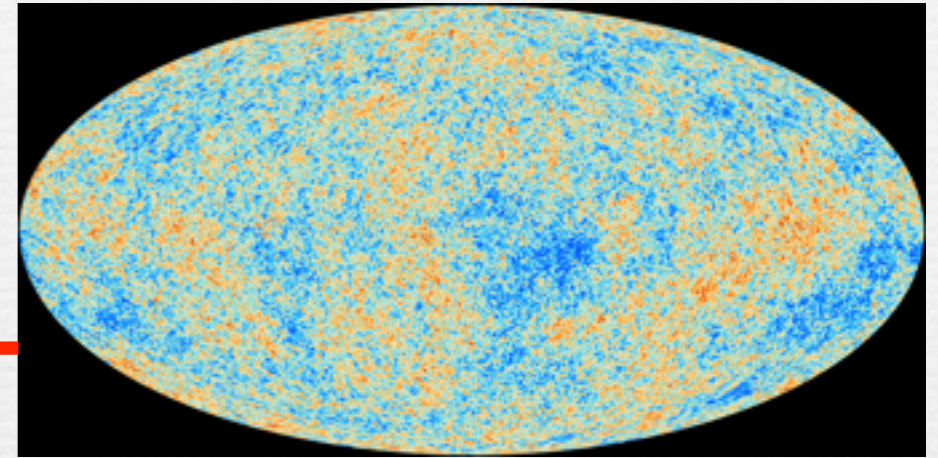
宇宙誕生の謎に迫る

CERNより



← 現在の宇宙の姿

望遠鏡で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10⁻¹²秒後まで遡る
素粒子で宇宙誕生の謎に迫る




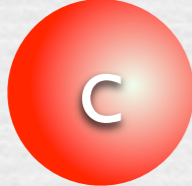







りんごで天体の運行を理解？

これまでに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  

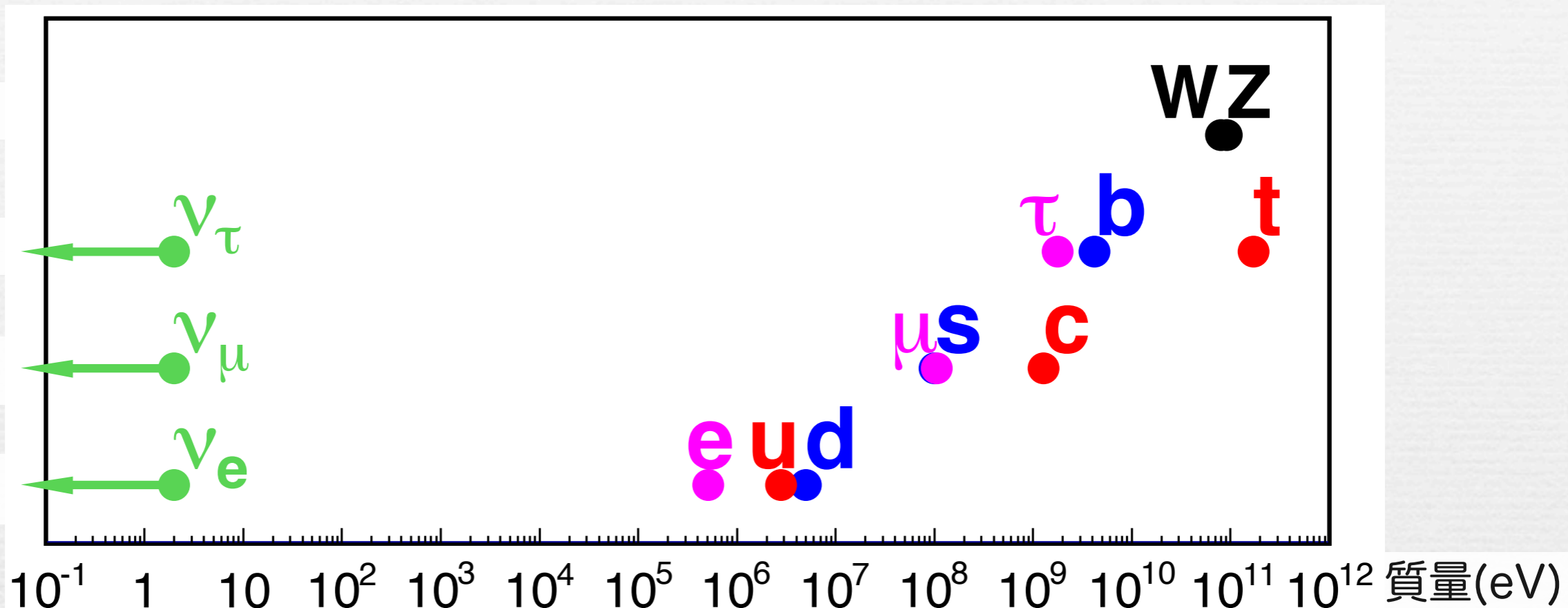
素粒子の質量

ゲージ粒子

第3世代

第2世代

第1世代



1/1000mg



1000kg





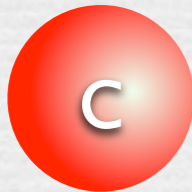



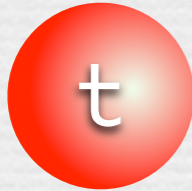





「質量」を入れると物理法則が破綻する！

これまでに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
 

これまでにわかっている素粒子

素粒子標準模型

物質を構成する

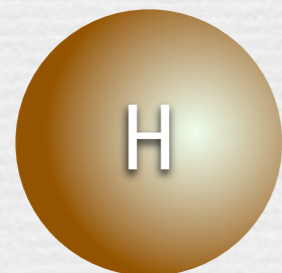
	クォーク		レプトン	
	電荷： $+2/3e$	電荷： $-1/3e$	電荷： 0	電荷： $-e$
第1世代	アップ(u) 	ダウン(d) 	電子ニュートリノ 	電子 
第2世代	チャーム(c) 	ストレンジ(s) 	ミューニュートリノ 	ミュー粒子 
第3世代	トップ(t) 	ボトム(b) 	タウニュートリノ 	タウ粒子 

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

質量とは？

1. 重力のもと (重力質量)

2. 動きにくさ (慣性質量)

← ヒッグス粒子はこれを説明

重力質量 = 慣性質量 (等価原理) : 実験事実

質量ゼロの粒子 (光) ... 光速でしか進めない。静止できない

質量0の素粒子



質量を持つ粒子

... 光速では進めない。静止できる

軽い素粒子



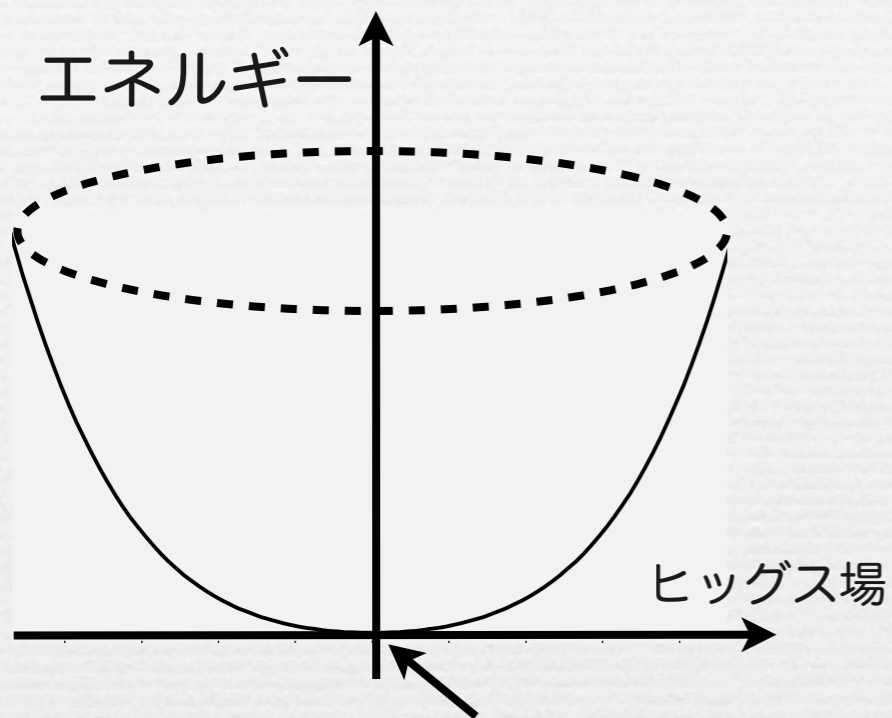
重い素粒子



運動の妨げのパラメータ : 質量

素粒子の質量起源

誕生直後の高温の宇宙

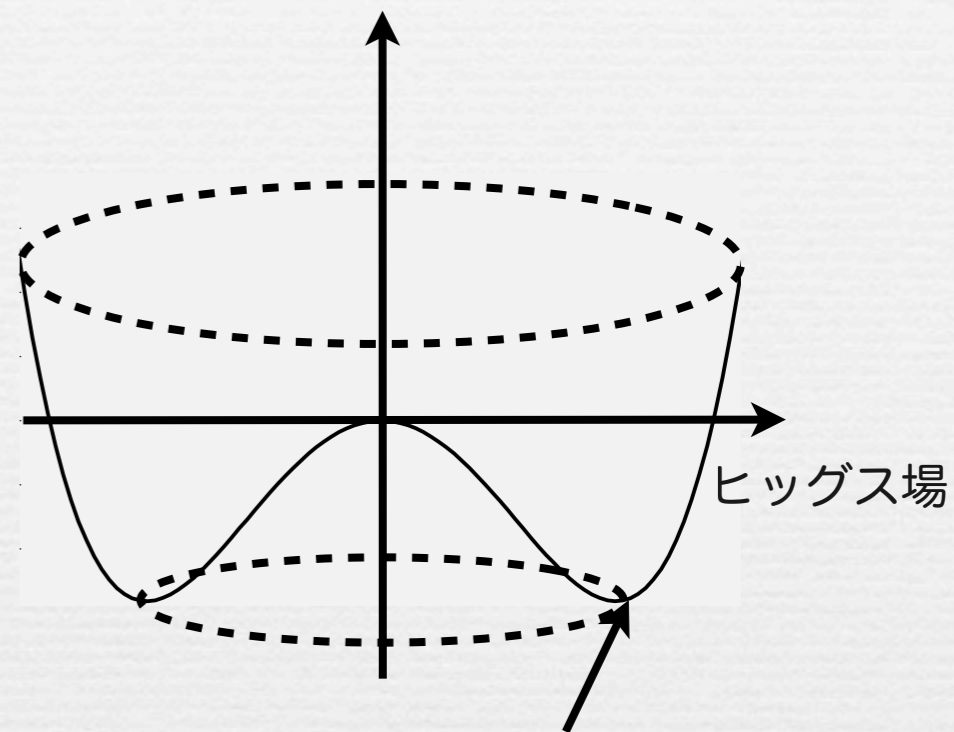


ヒッグス場がない状態
エネルギーが一番低い(安定)

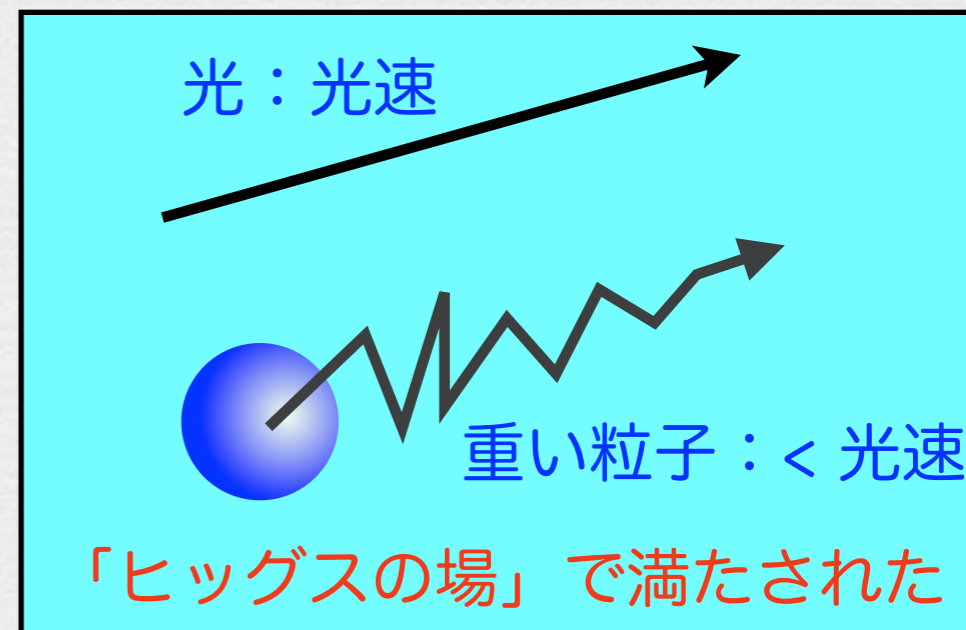
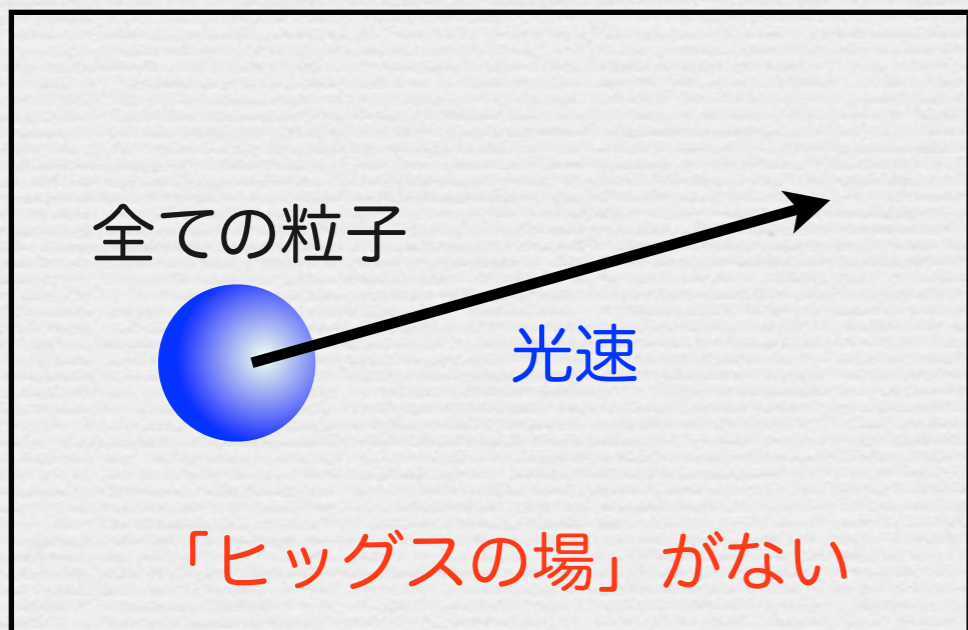
真空(環境)が変化
法則はそのまま



10⁻¹⁰秒後の冷えた宇宙



「ヒッグス場」がある状態
エネルギーが一番低い



ヒッグスの場を見るには？

ヒッグス場を直接見ることはできない。

真空中にエネルギーをつぎ込むと粒子として現れる

加速器で高エネルギー状態を作る

→ ヒッグス粒子が出てくる

電荷が0の粒子

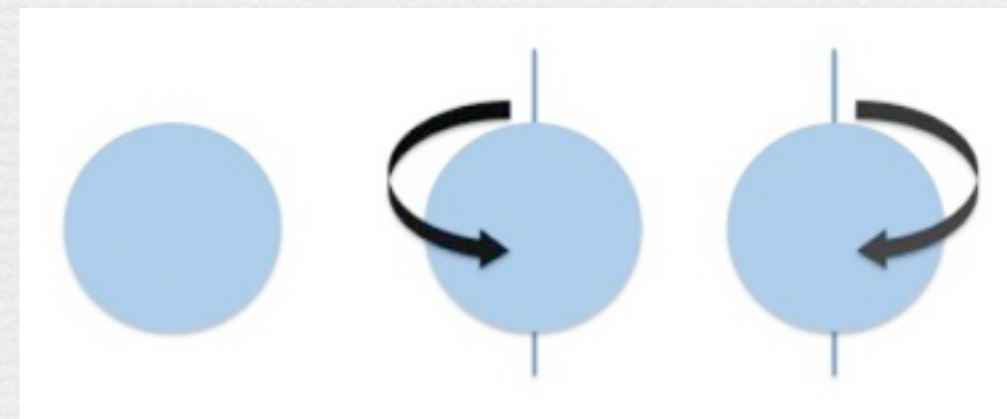
スピンの0の粒子(向きなし粒子)

クォーク、レプトンのスピン： $1/2$

力を伝える粒子のスピン： 1

質量の大きい素粒子と反応しやすい

不安定ですぐにより安定な粒子に化ける (崩壊する)



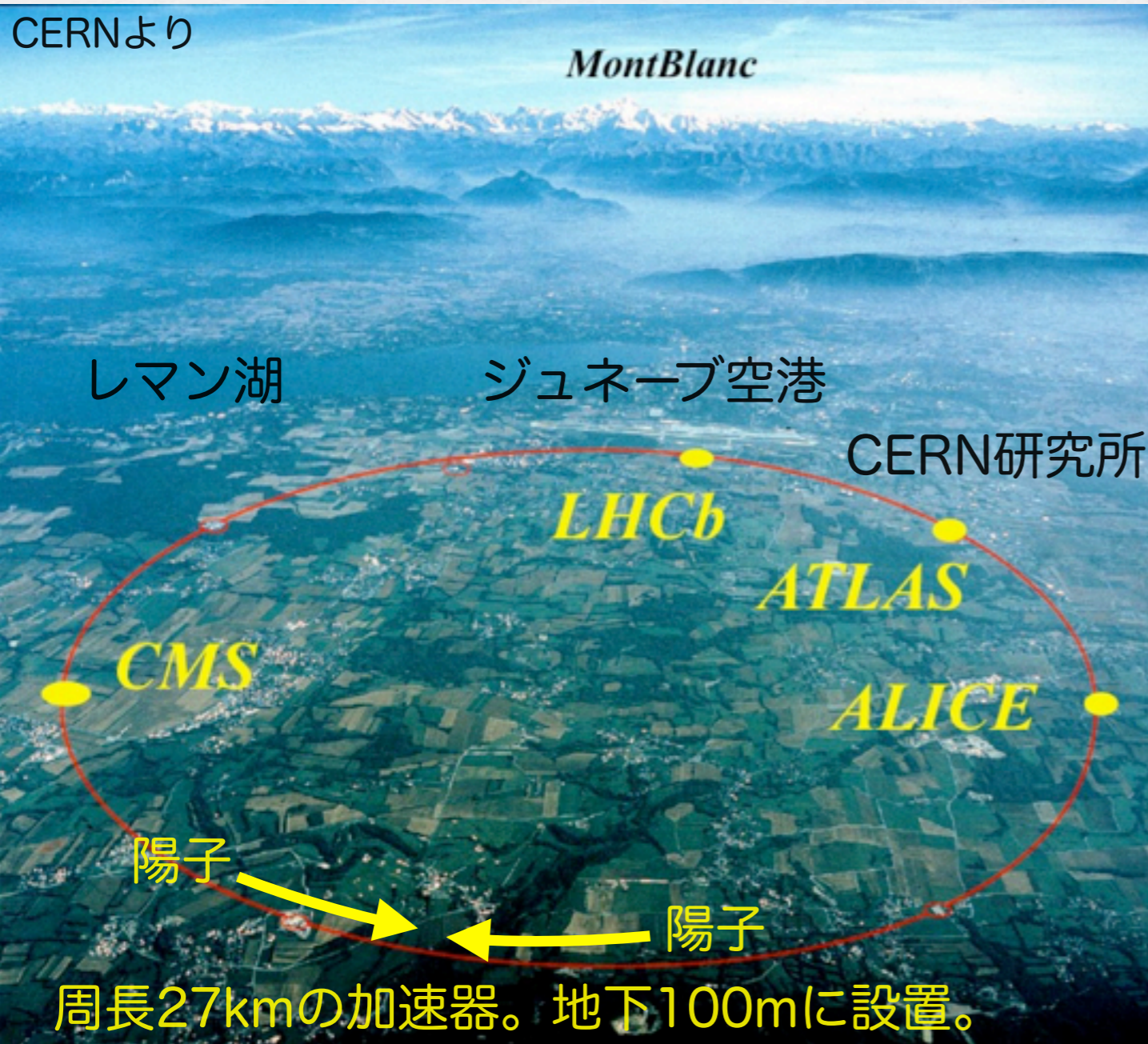
素粒子には固有のスピン

そういう粒子を実験的にさがしてみる→**素粒子実験**

ヒッグス粒子の発見

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。ヒッグス粒子や未知の素粒子を作る。



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



毎秒 1 億回の陽子・陽子衝突
(1年 = 31,536,000秒 → 千万秒)
年間で1000兆回の陽子・陽子衝突
2011年と2012年に第1実験
2000兆回の陽子・陽子衝突！！

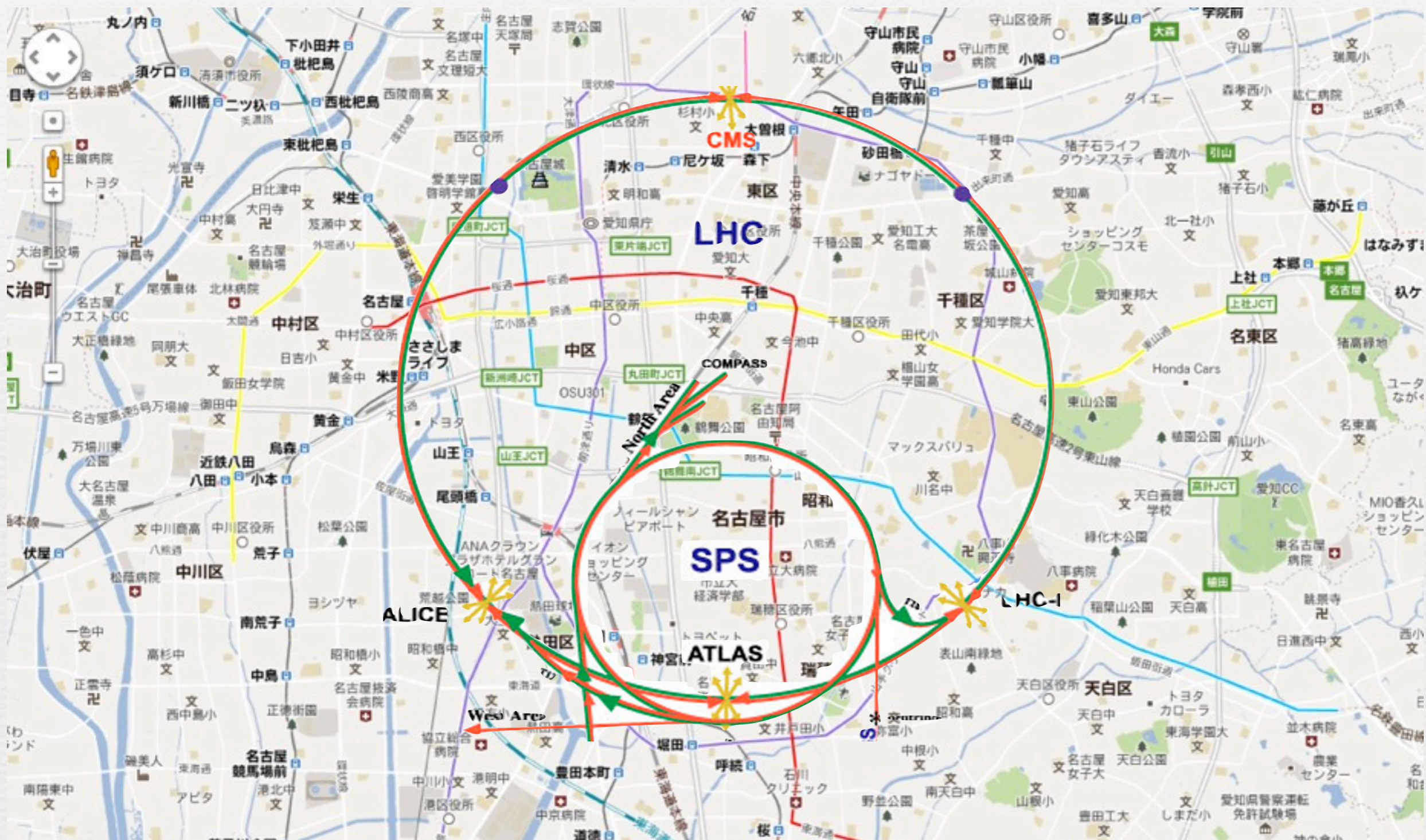
LHC加速器の大きさ



LHC加速器の大きさ

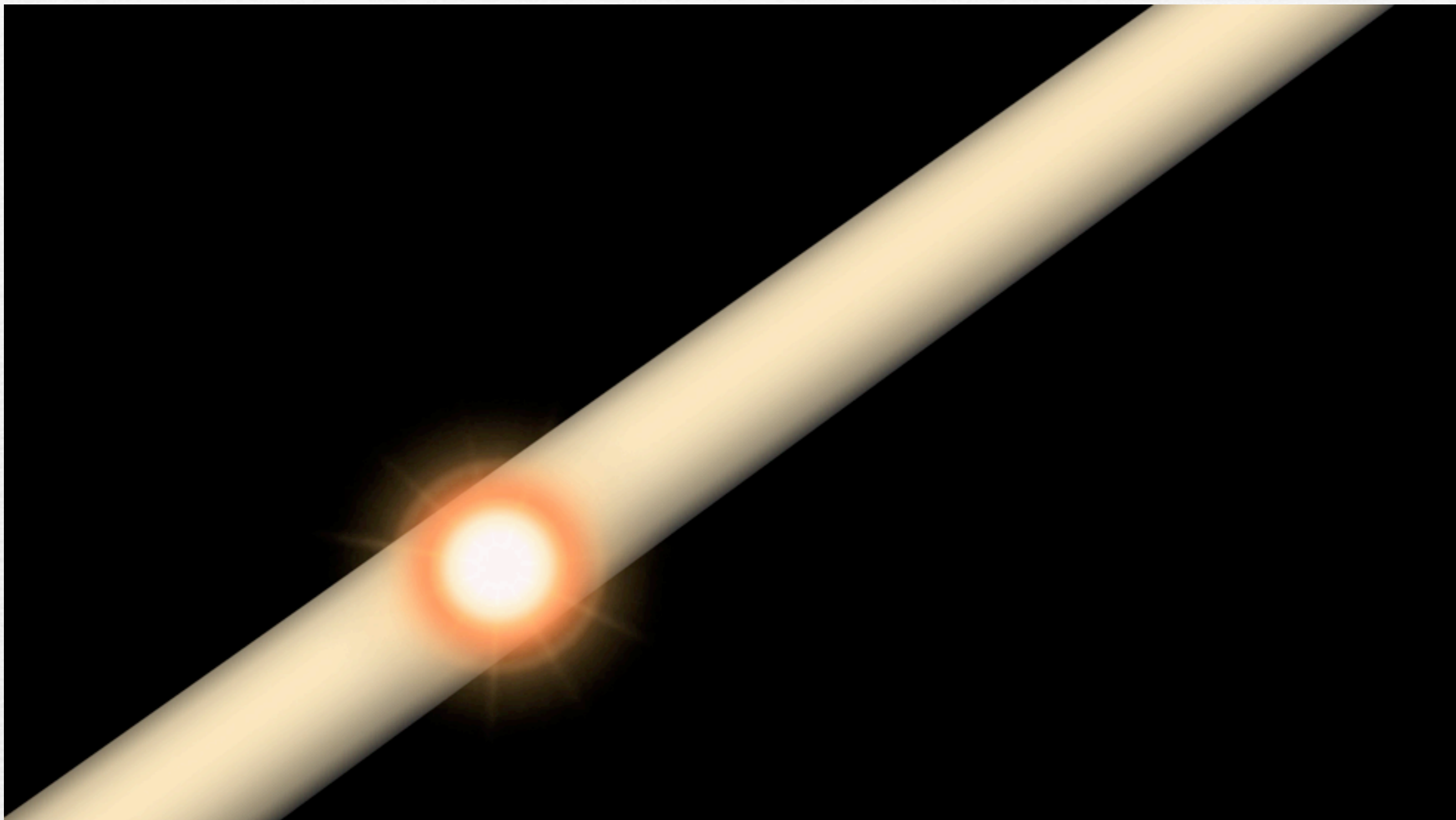


LHC加速器の大きさ



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

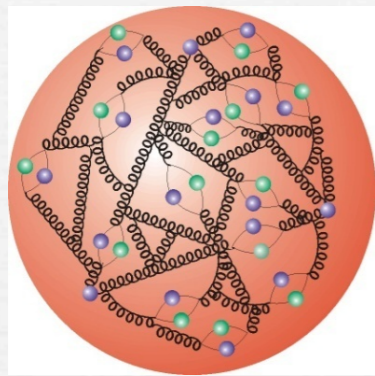
陽子・陽子衝突



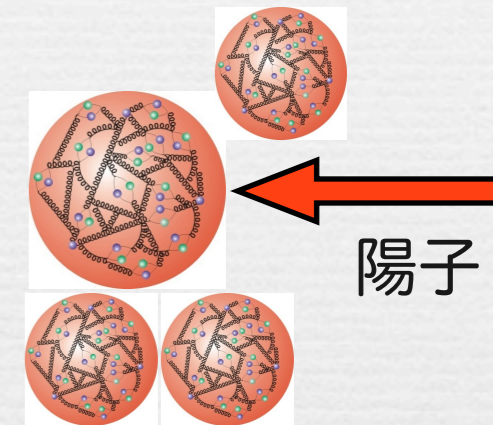
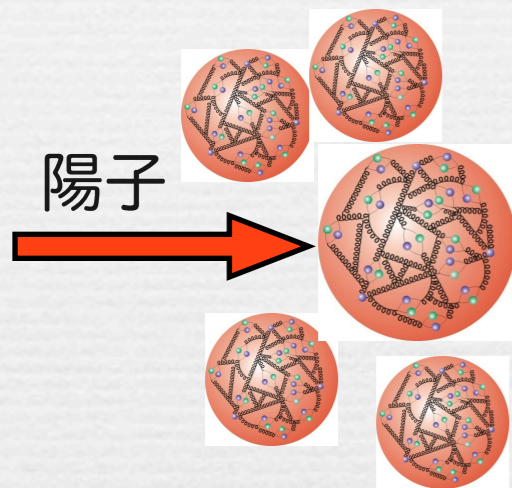
CERN ATLAS Experiment

陽子・陽子衝突

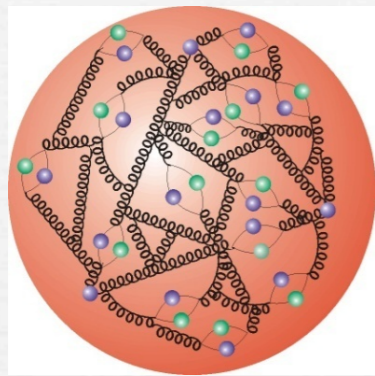
陽子・陽子衝突



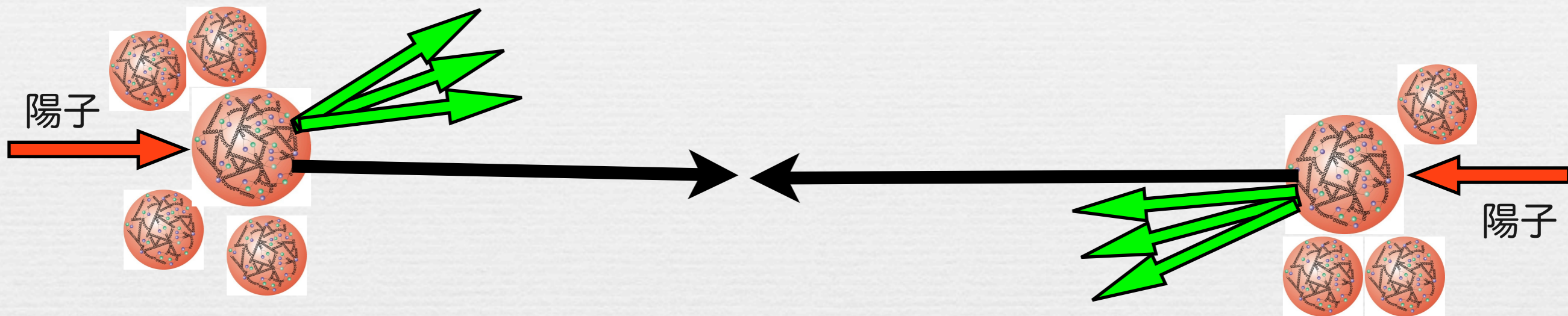
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン
一部だけが衝突による反応に関与



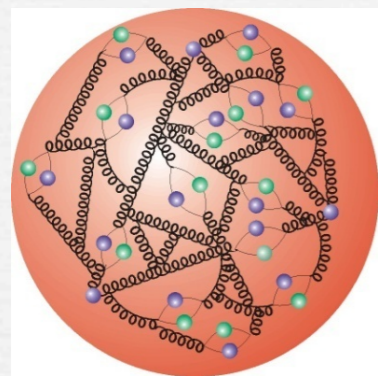
陽子・陽子衝突



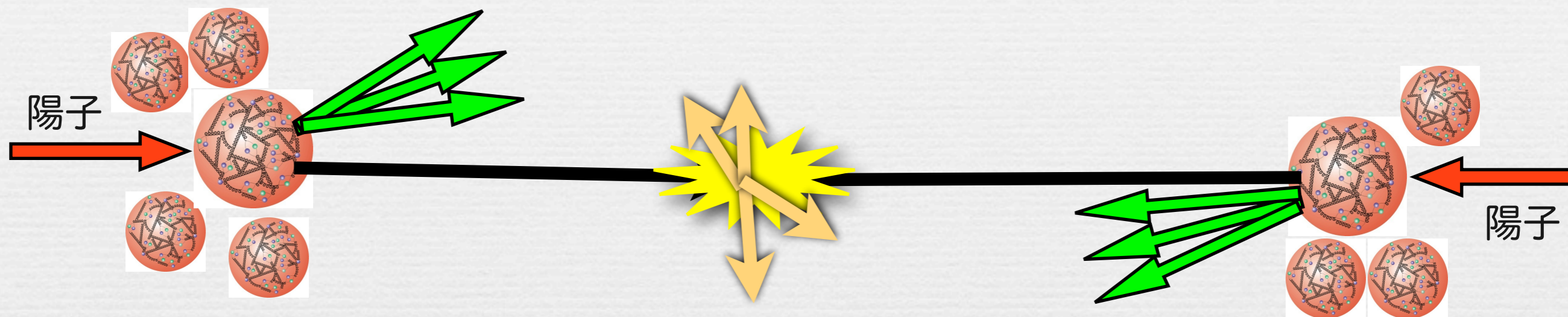
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン
一部だけが衝突による反応に関与



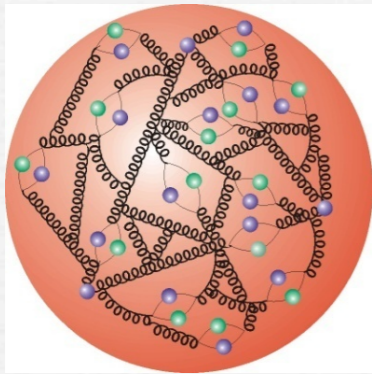
陽子・陽子衝突



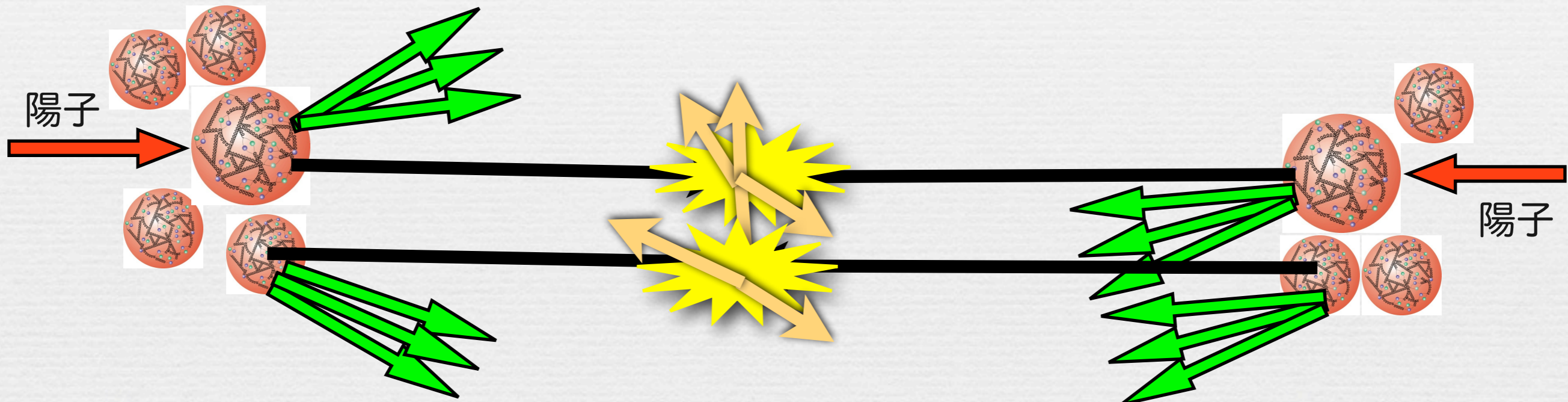
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン
一部だけが衝突による反応に関与



陽子・陽子衝突

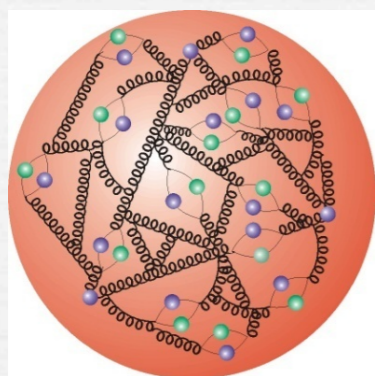


陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン
一部だけが衝突による反応に関与

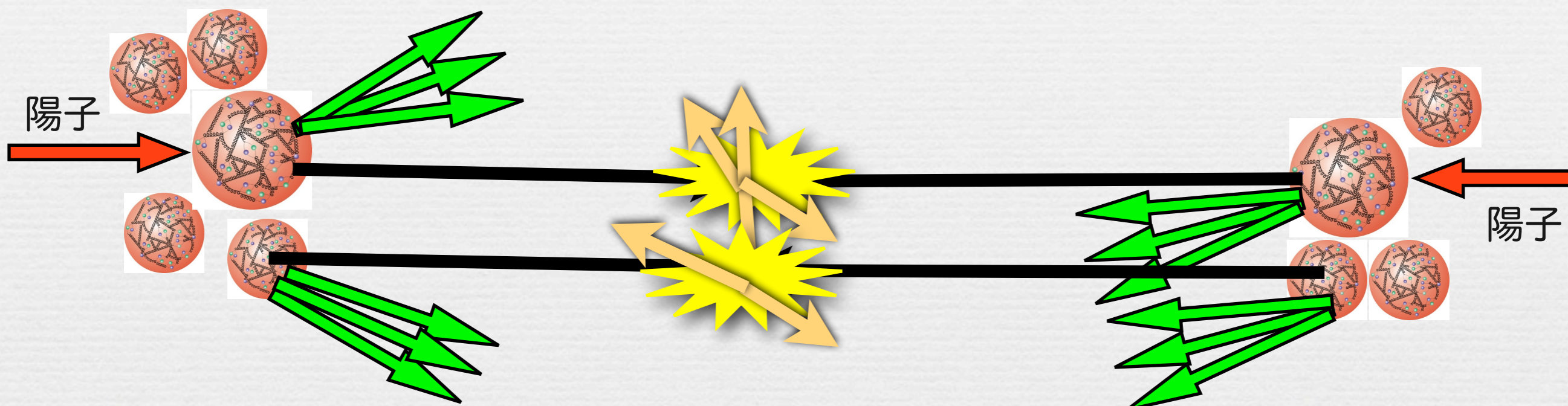


他の陽子の反応も同時多発

陽子・陽子衝突



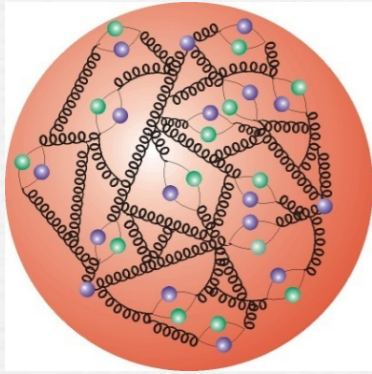
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン
一部だけが衝突による反応に関与



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



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

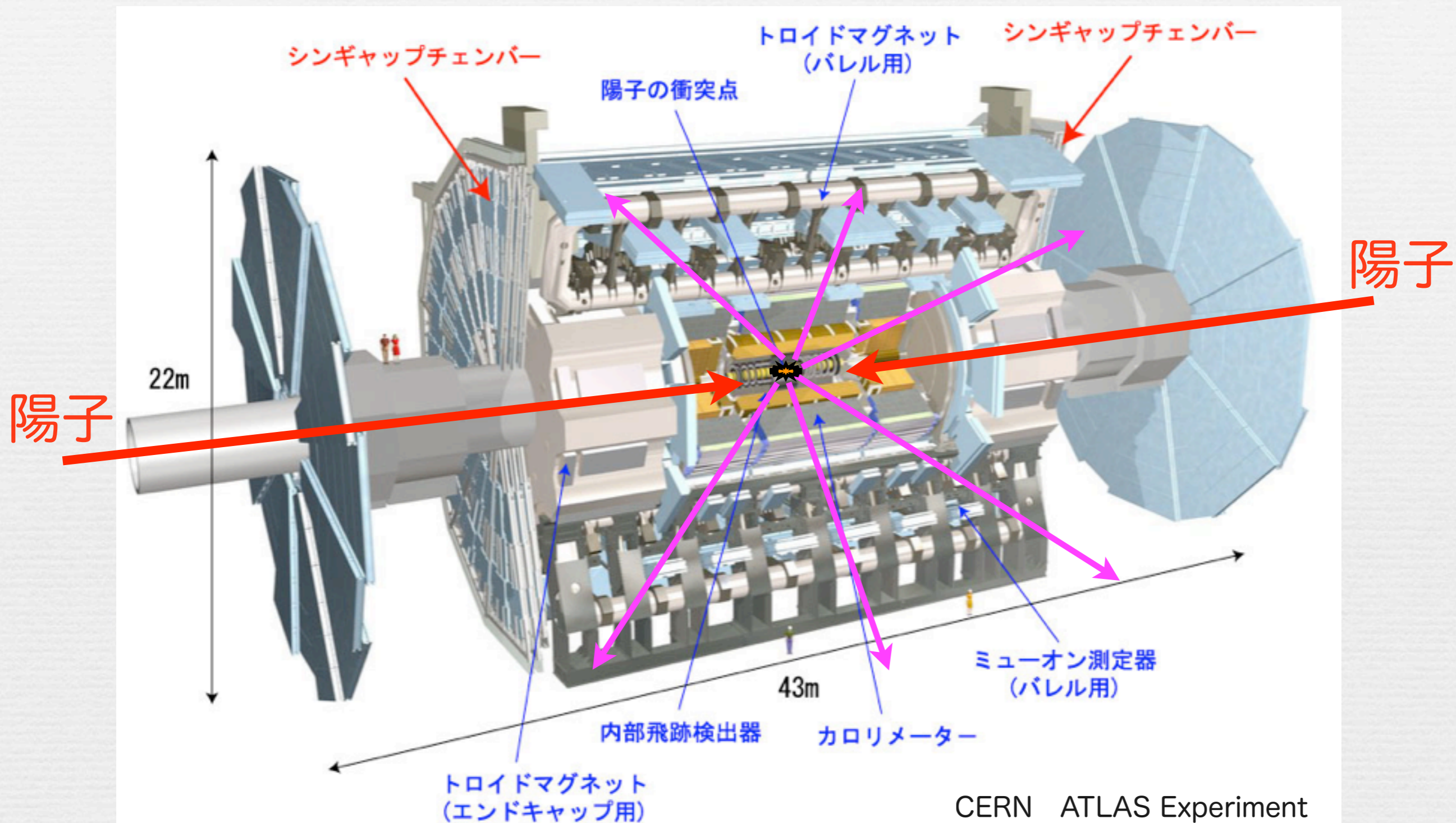
ヒッグス粒子は、
5,000,000,000(五十億)回に1回程度しか生成しない！

2,000兆回の陽子衝突では、40万個のヒッグス粒子が生成

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

検出器 アトラス検出器

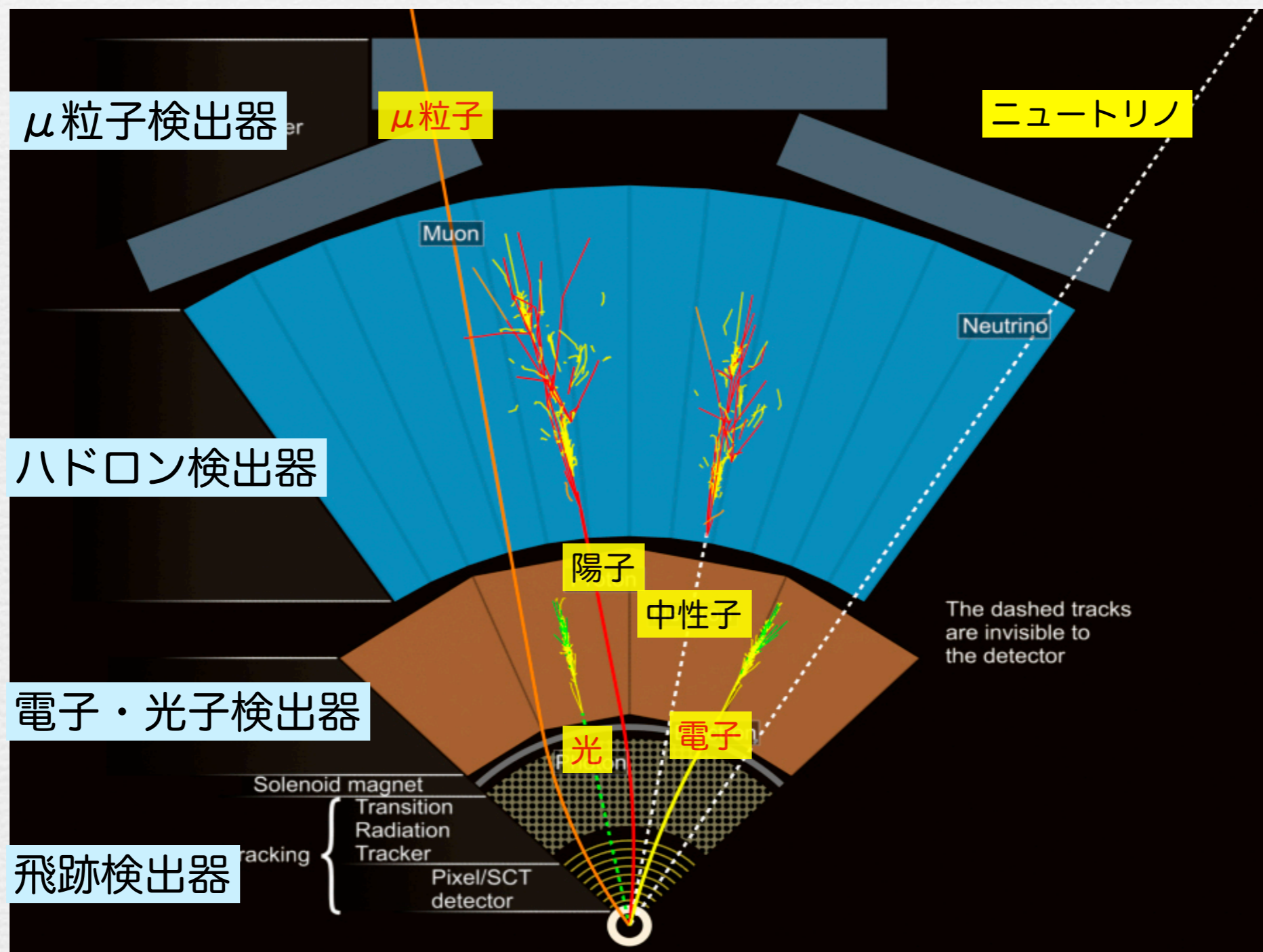


重い粒子は不安定 → 軽い安定粒子に化ける (崩壊)

光、電子、 μ 粒子、ハドロン(クォークの複合粒子)、ニュートリノ

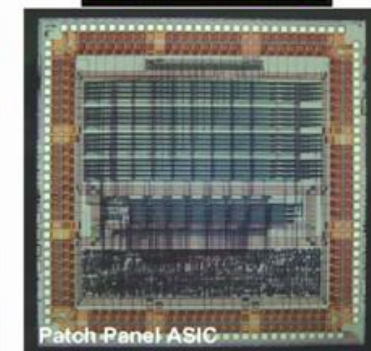
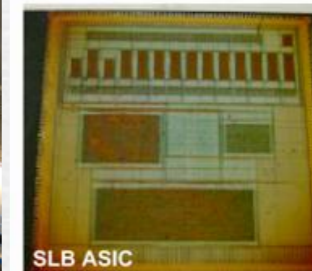
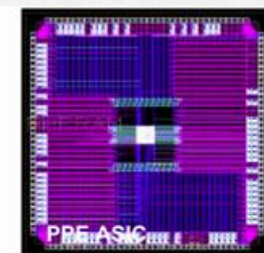
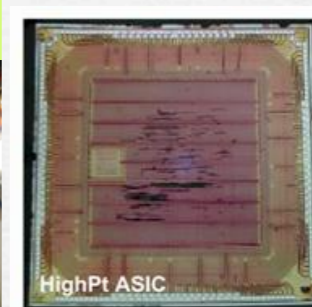
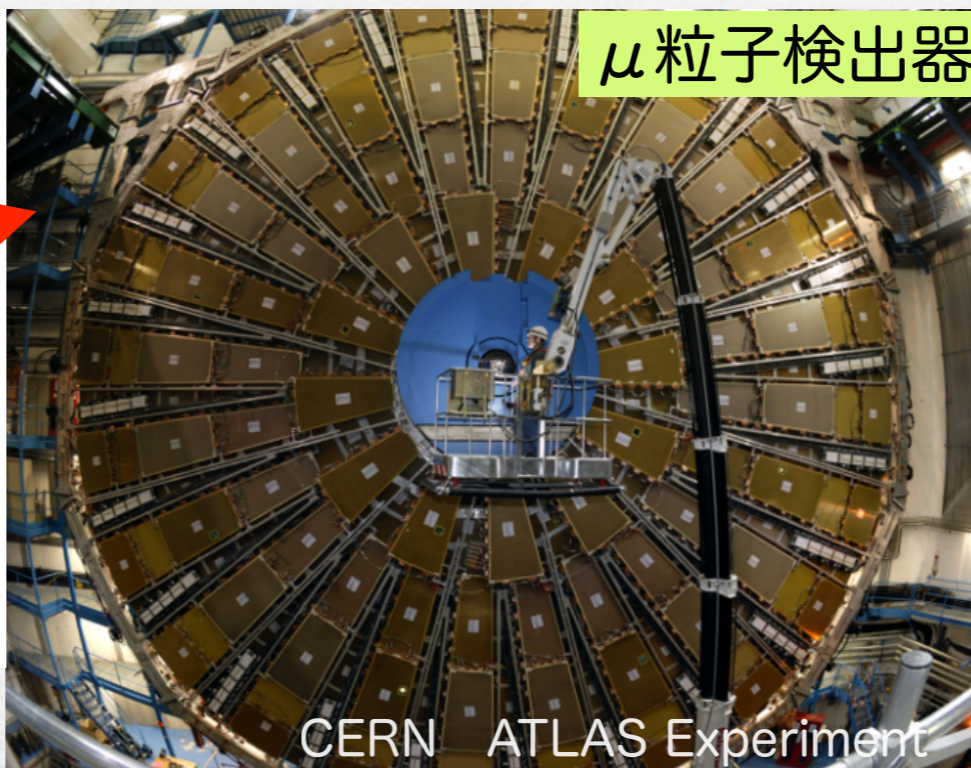
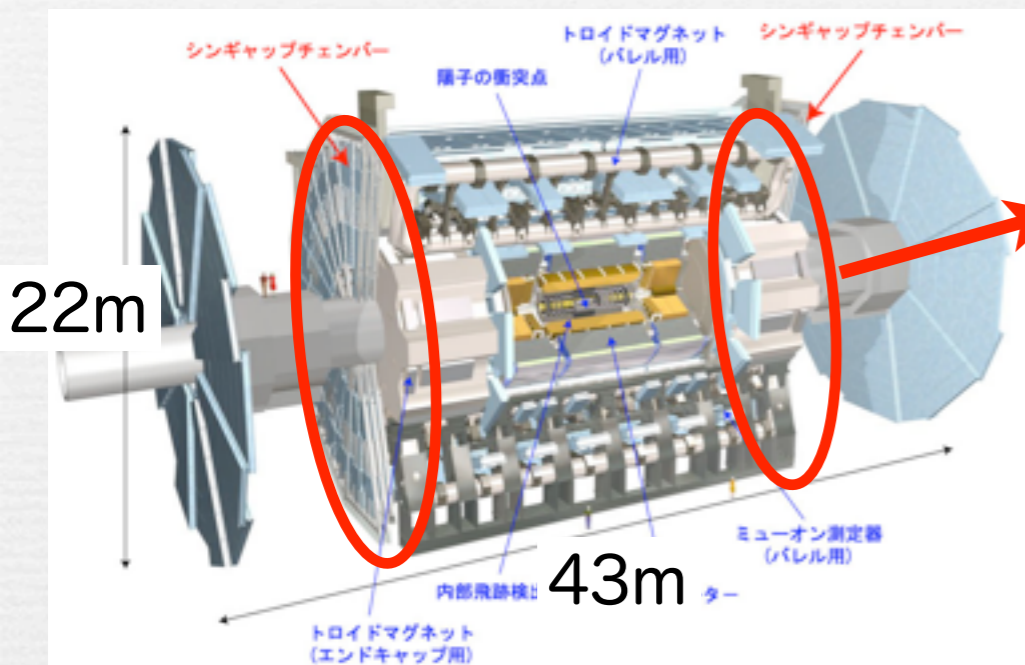
検出器 アトラス検出器

沢山の種類の検出器で、いろいろな種類の粒子の運動量やエネルギーを検出する



検出器の建設

検出器も、32万チャンネルの回路も研究者の手作り

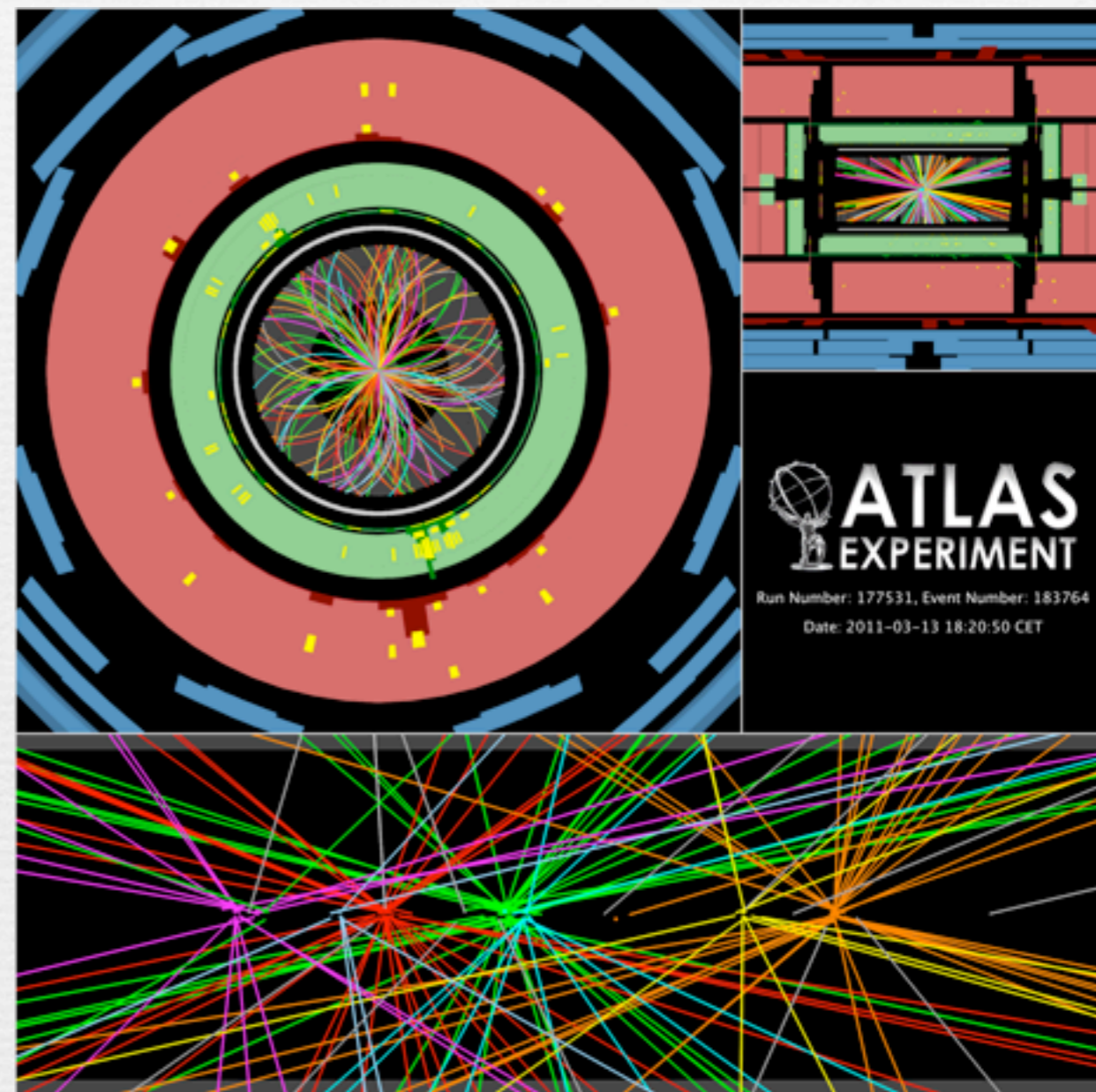
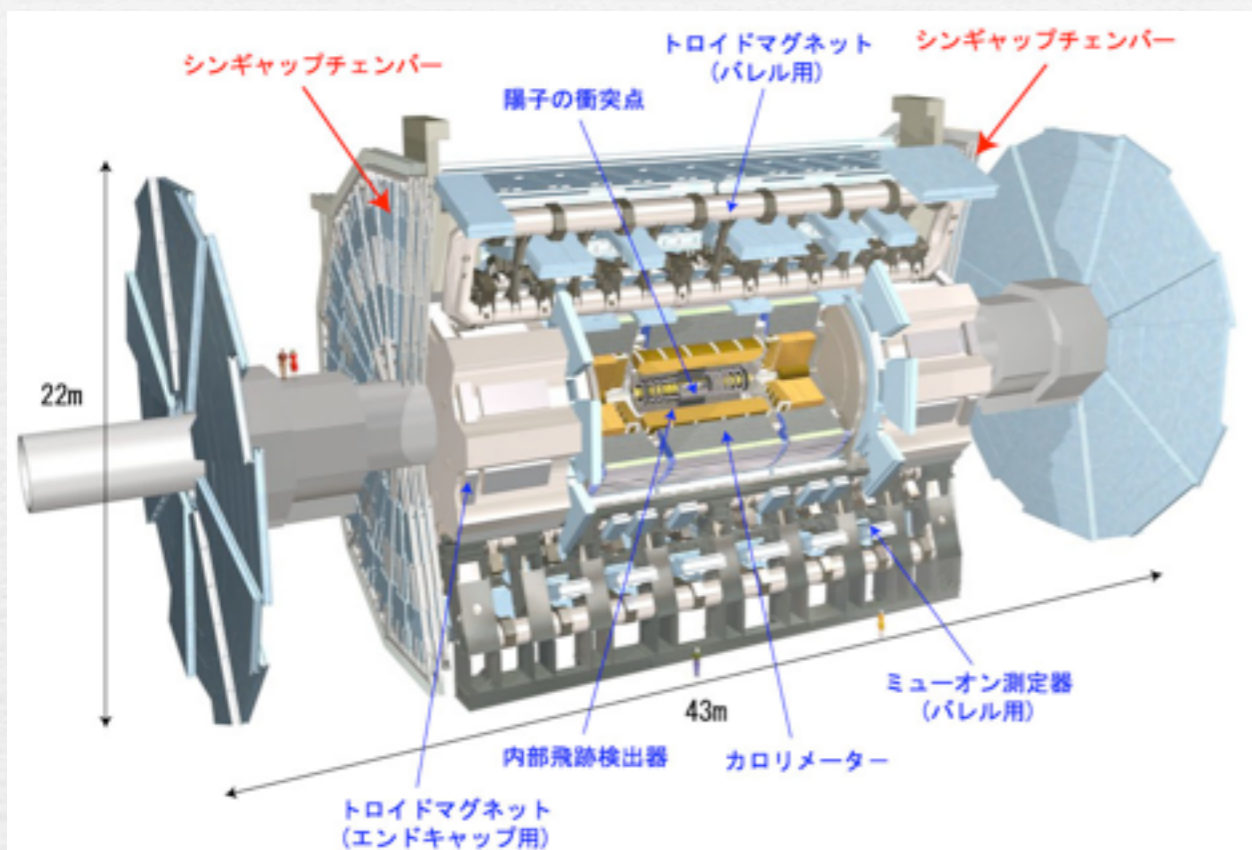


若い学生達が頑張っています！！！！



実際の陽子陽子衝突反応

全ての反応は、無数の安定粒子になる



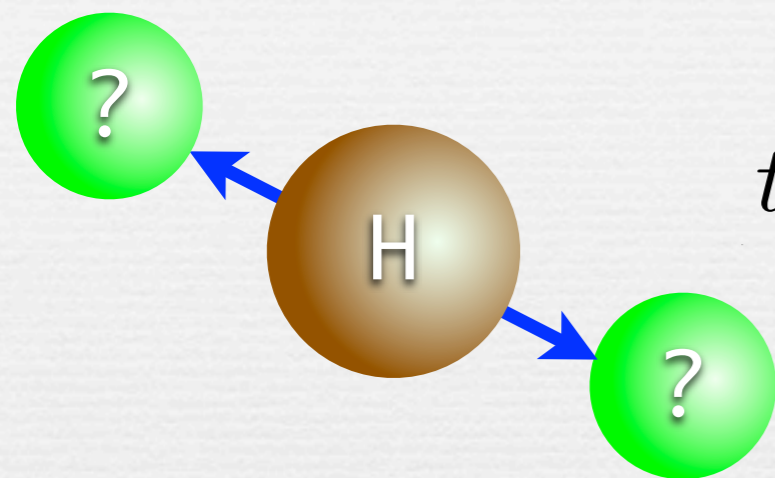
ヒッグス粒子の見つけ方：

2000兆回の陽子衝突から、

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

ヒッグス粒子は何に崩壊するか？

ヒッグス粒子は、質量の大きな素粒子ほど反応しやすい



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

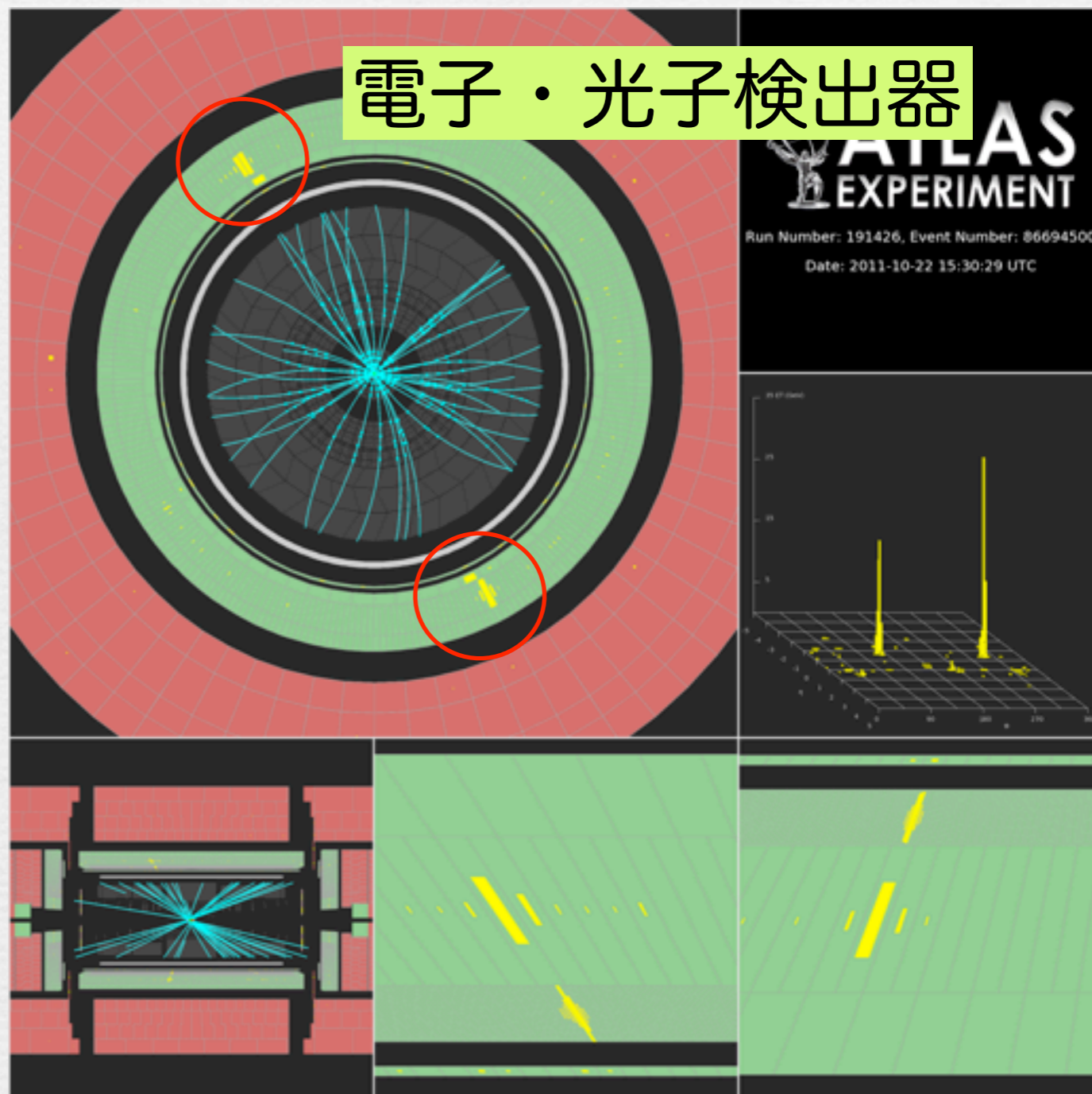
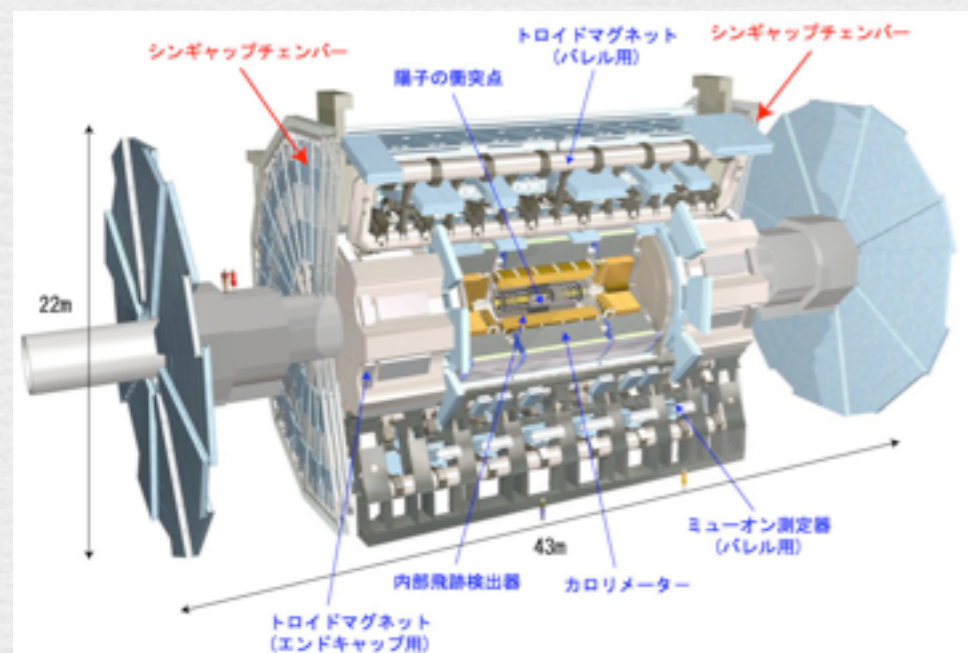
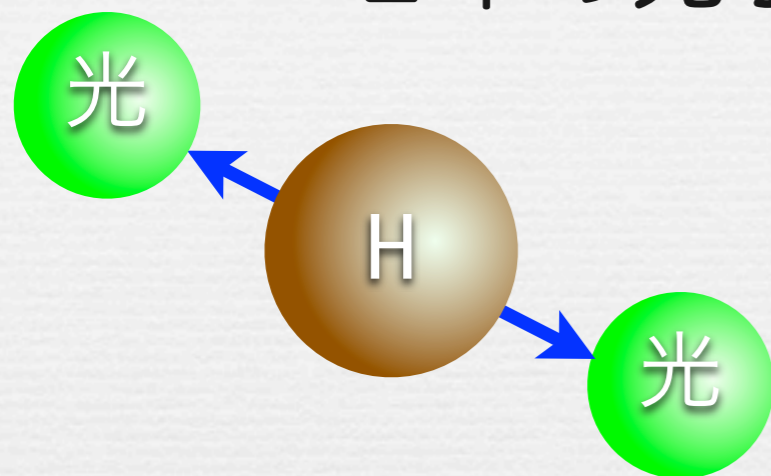
化ける確率はわかるが、何に化けるかは予想できない

$H \rightarrow ZZ$	2.9%
$H \rightarrow W^+W^-$	23%
$H \rightarrow b\bar{b}$	56%
$H \rightarrow \tau^+\tau^-$	6.2%
$H \rightarrow \text{光子 光子}$	0.23%

ヒッグス粒子らしきイベントを集める

陽子 + 陽子 → ヒッグス粒子 → 光子 光子を探す

→ 2本の光子のあるイベントを沢山集める



偽物：

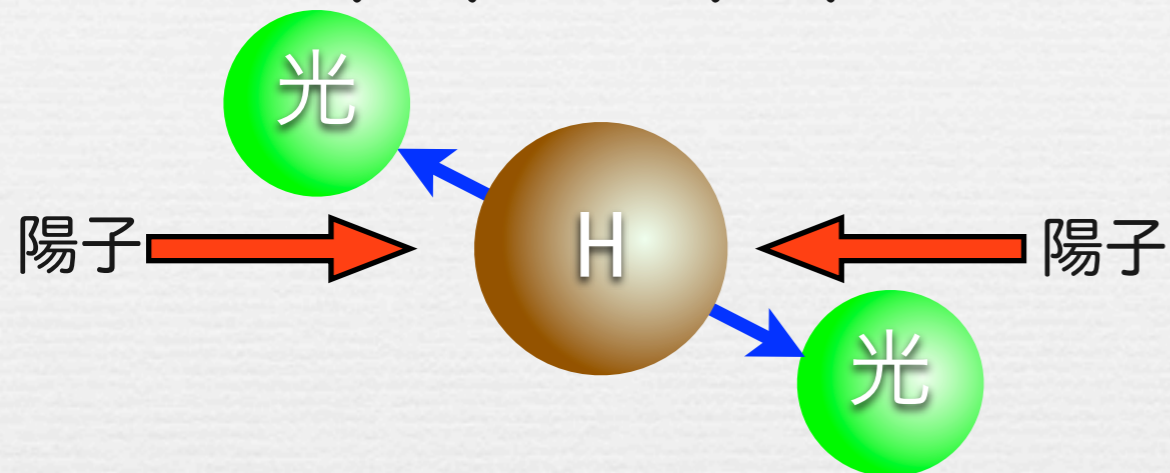
陽子 + 陽子 → 光子 光子

光のエネルギー、運動量を検出器で測定

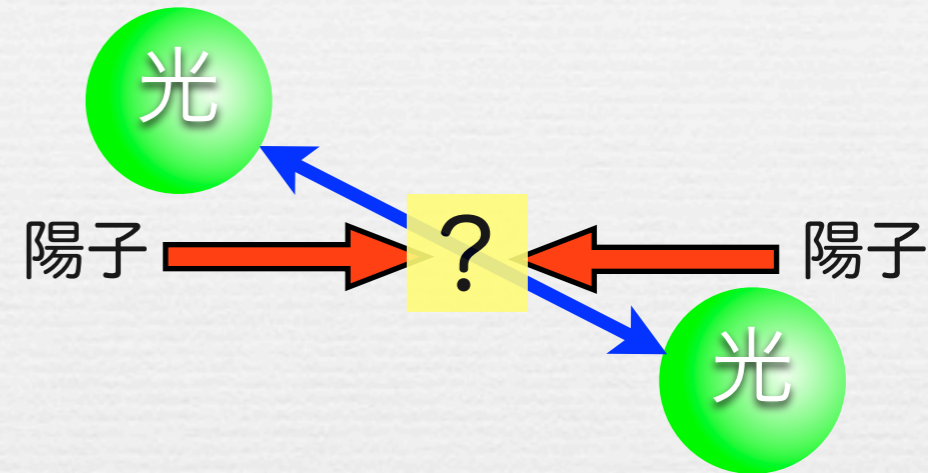
質量の復元

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

本物：H(親)→光(子)が2つ



偽物：陽子陽子衝突→光が2つ



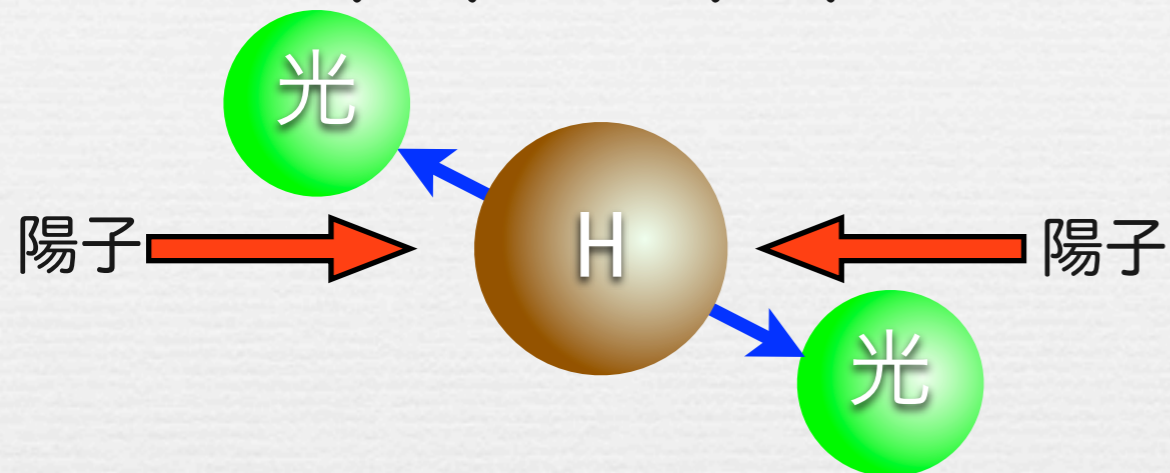
親子の関係= H の質量²

親子の関係式=適当な値

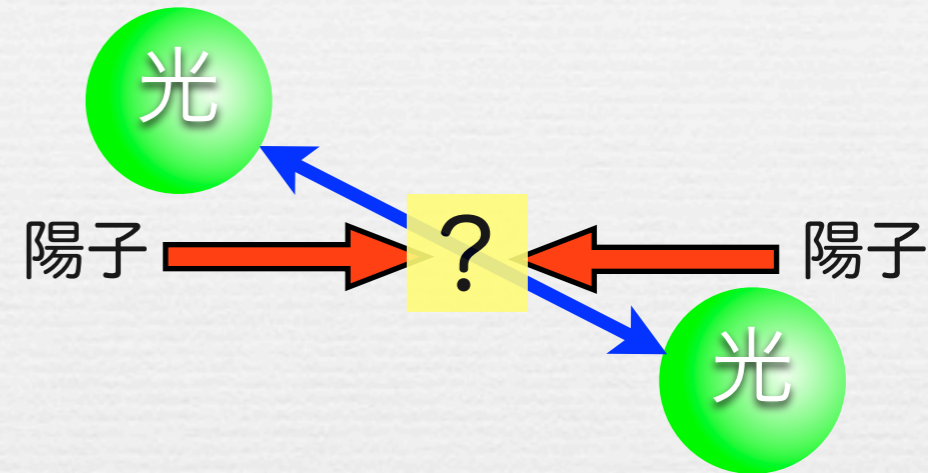
質量の復元

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

本物：H(親)→光(子)が2つ

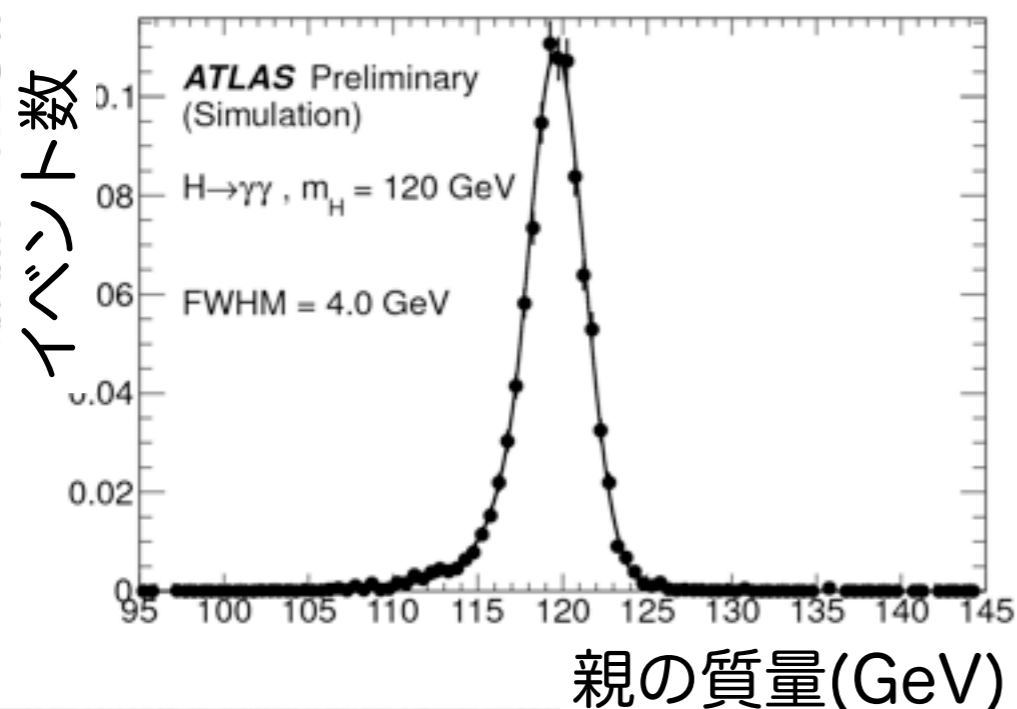


偽物：陽子陽子衝突→光が2つ



親子の関係=  の質量²

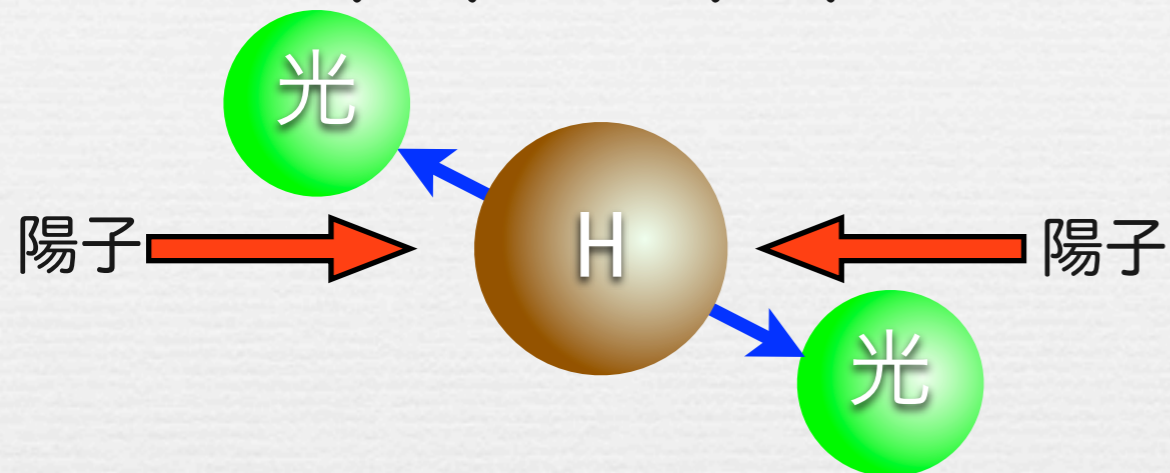
親子の関係式=適当な値



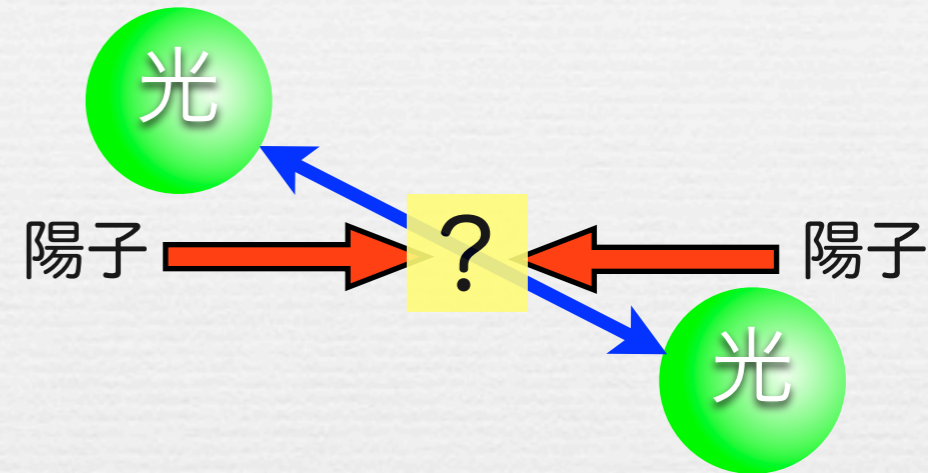
質量の復元

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

本物：H(親)→光(子)が2つ

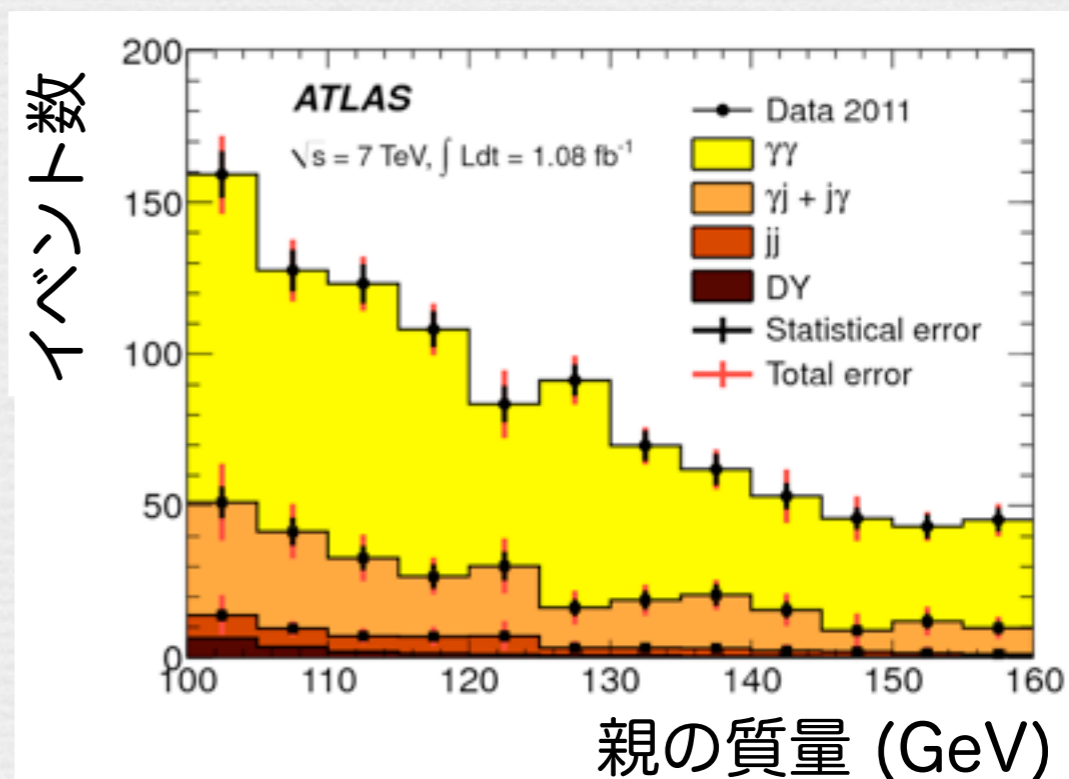
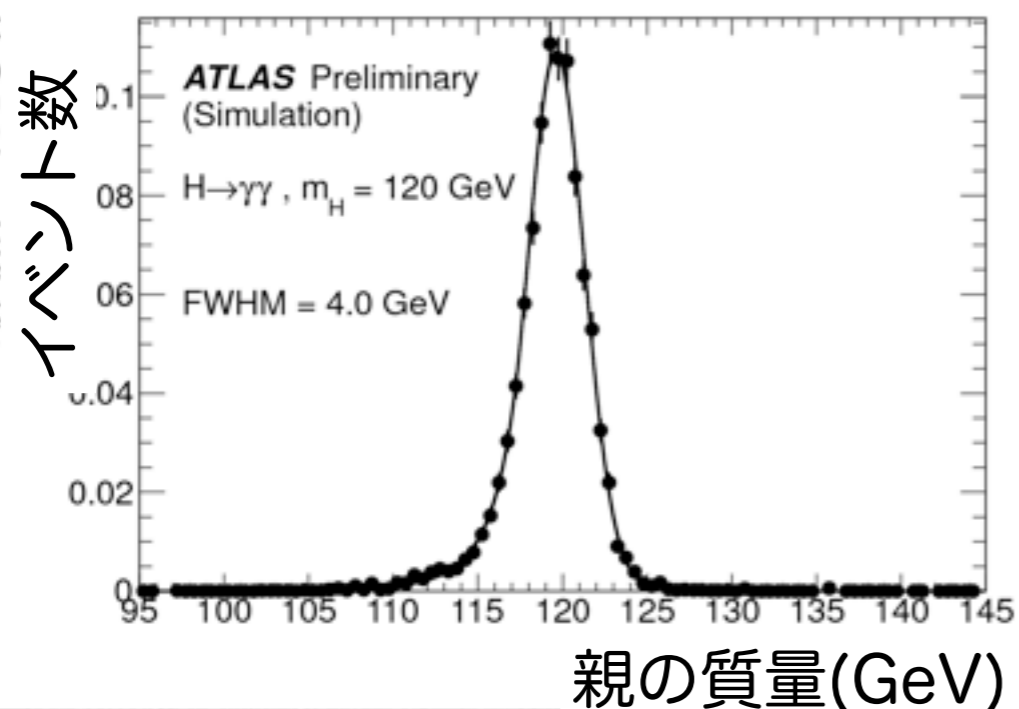


偽物：陽子陽子衝突→光が2つ



親子の関係= H の質量²

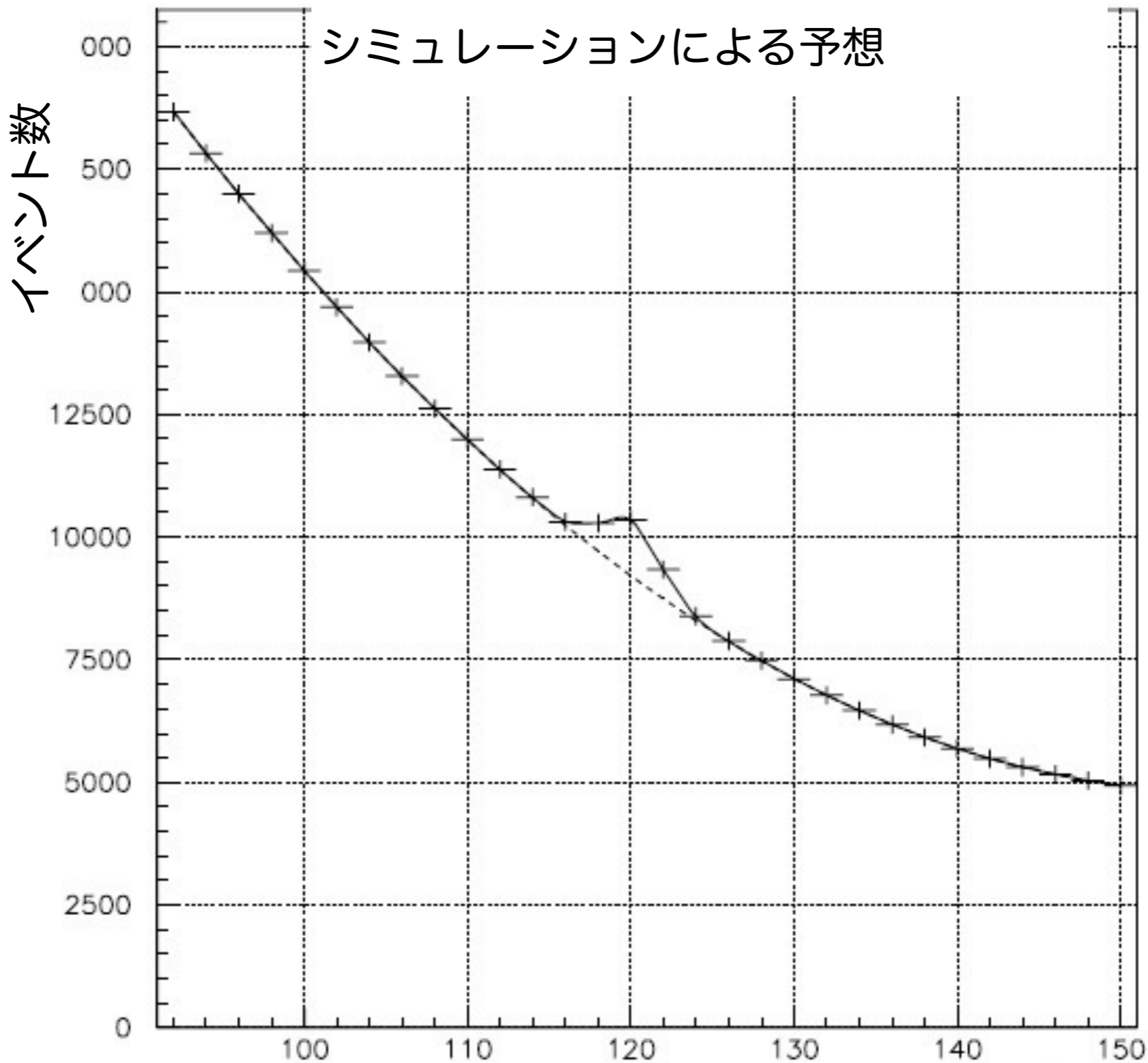
親子の関係式=適当な値



質量の復元

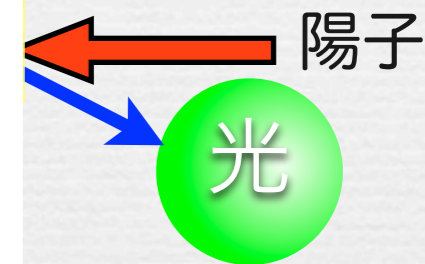
$M_H = 120 \text{ GeV}$

シミュレーションによる予想

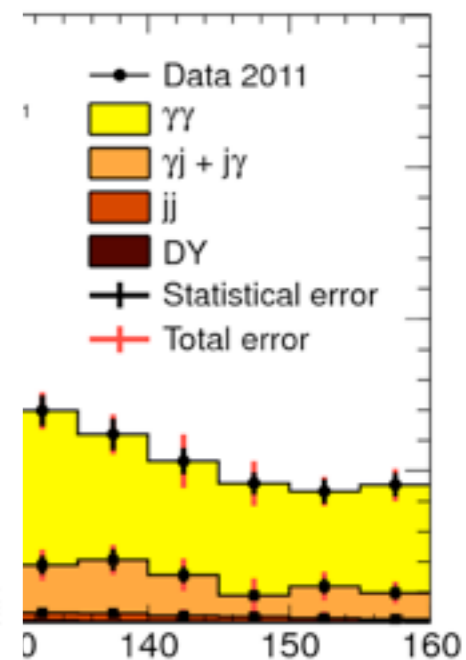


動量和)²

突 → 光が2つ



= 適当な値



親の質量 (GeV)

見の質量 (GeV)

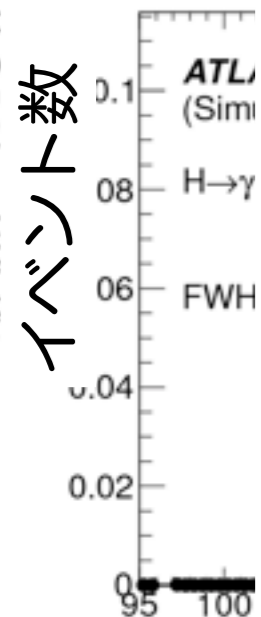
親子を知

本物: H(

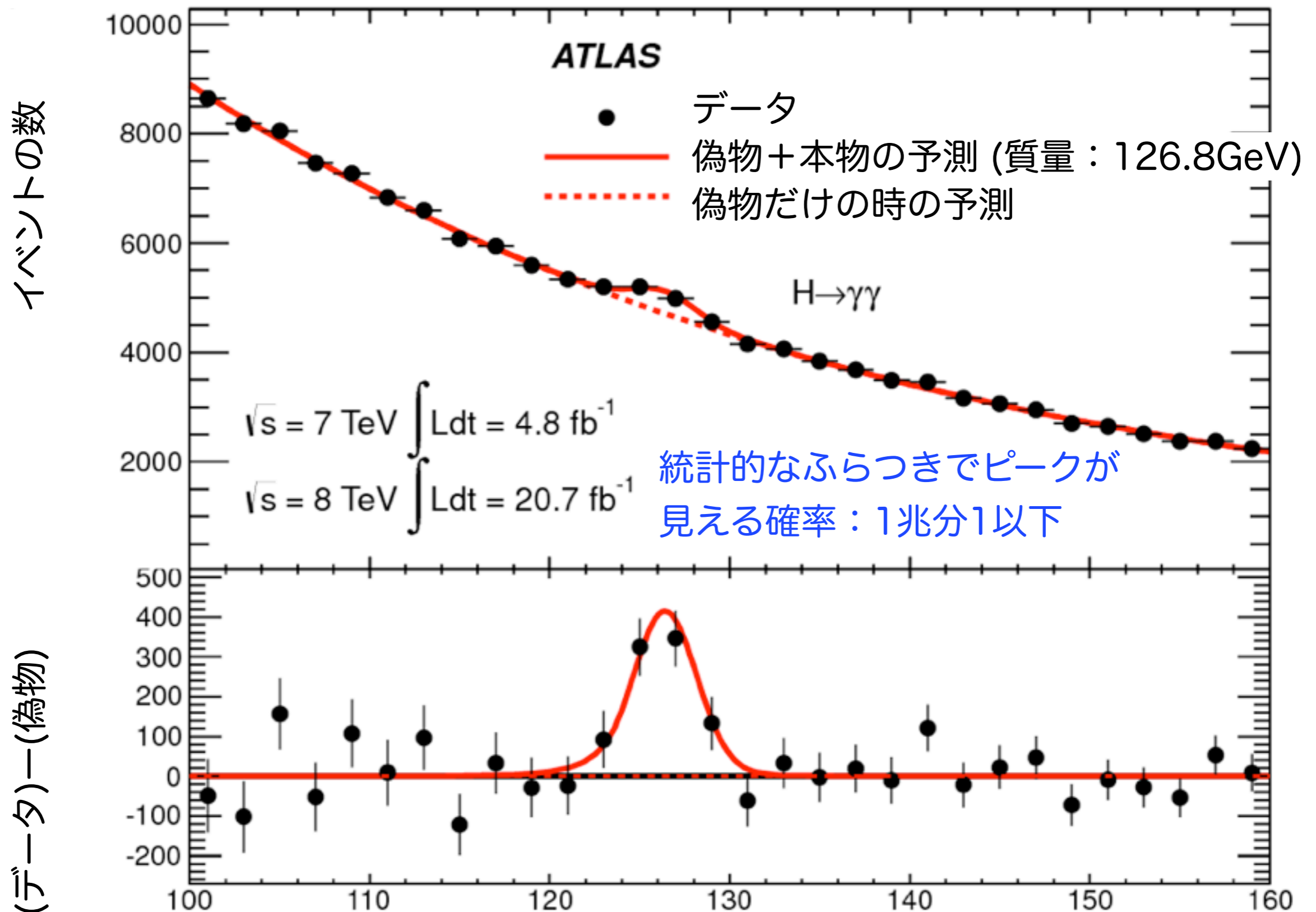


陽子 →

親子の関



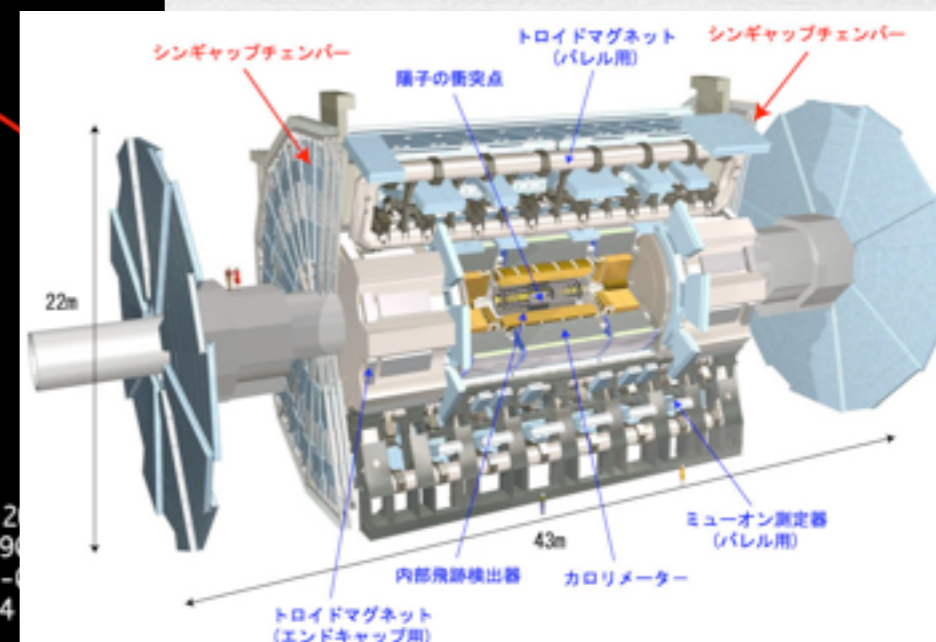
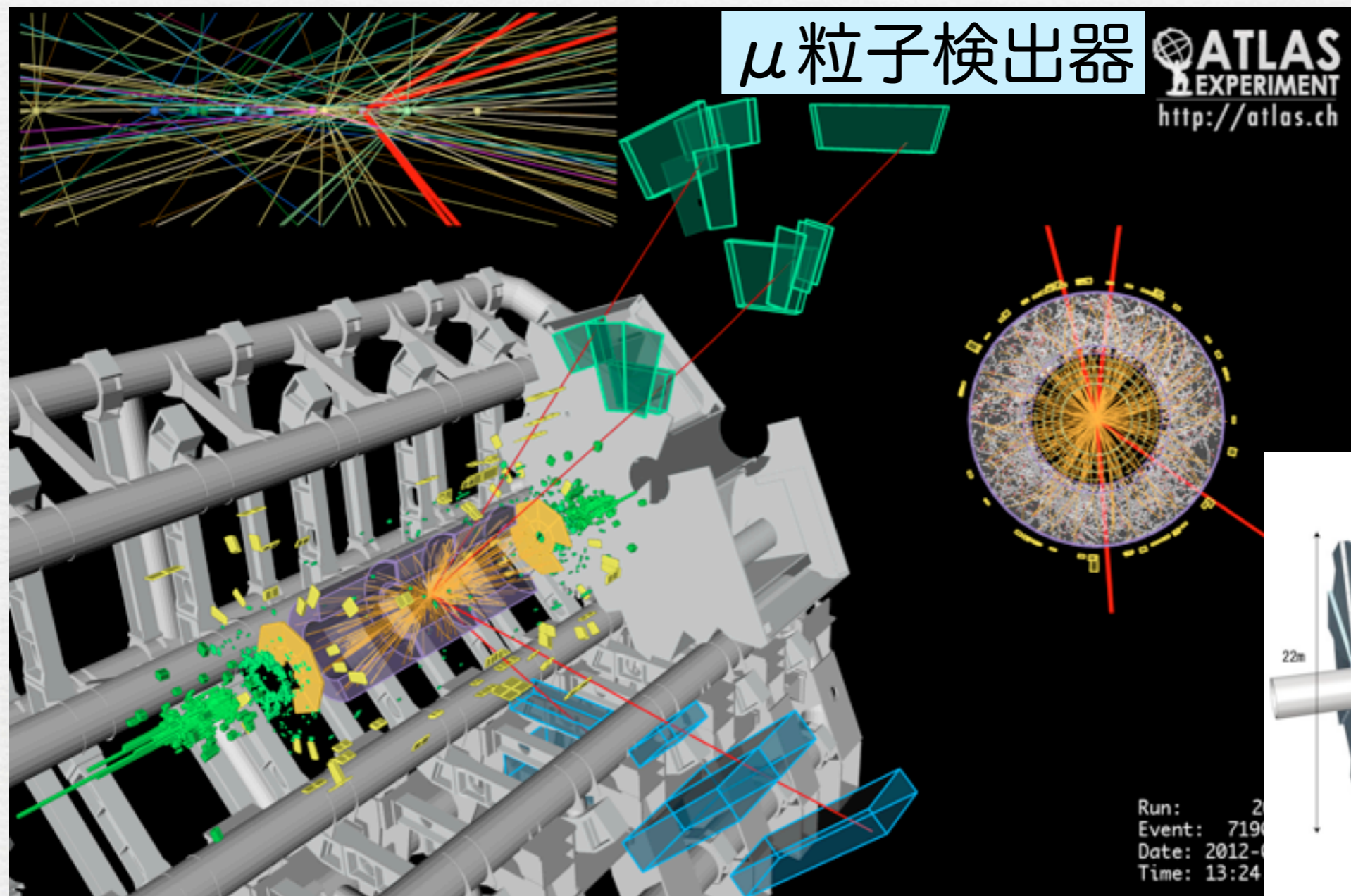
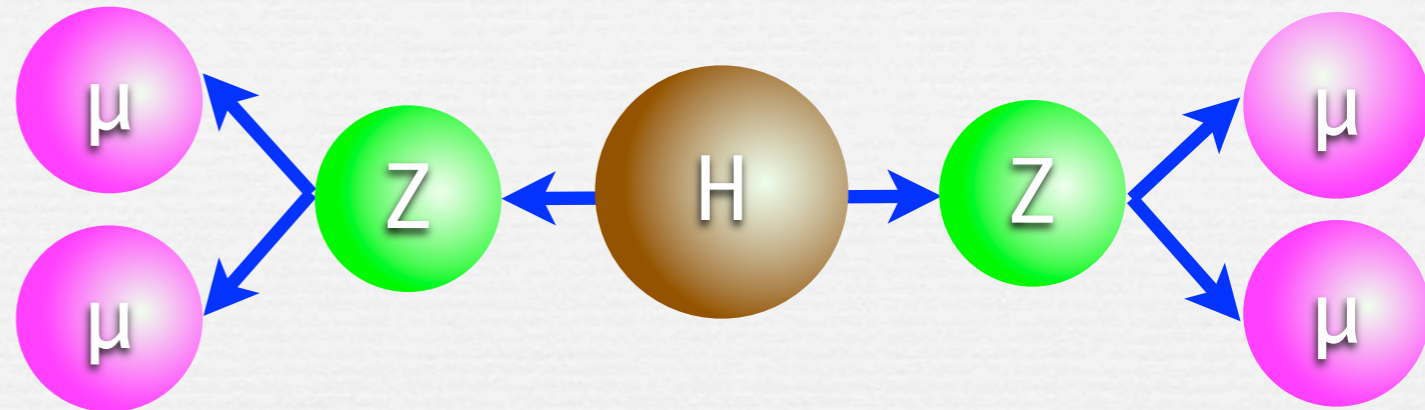
実際のデータ(H \rightarrow 光子光子)



2つの光子から計算した親の質量(GeV)

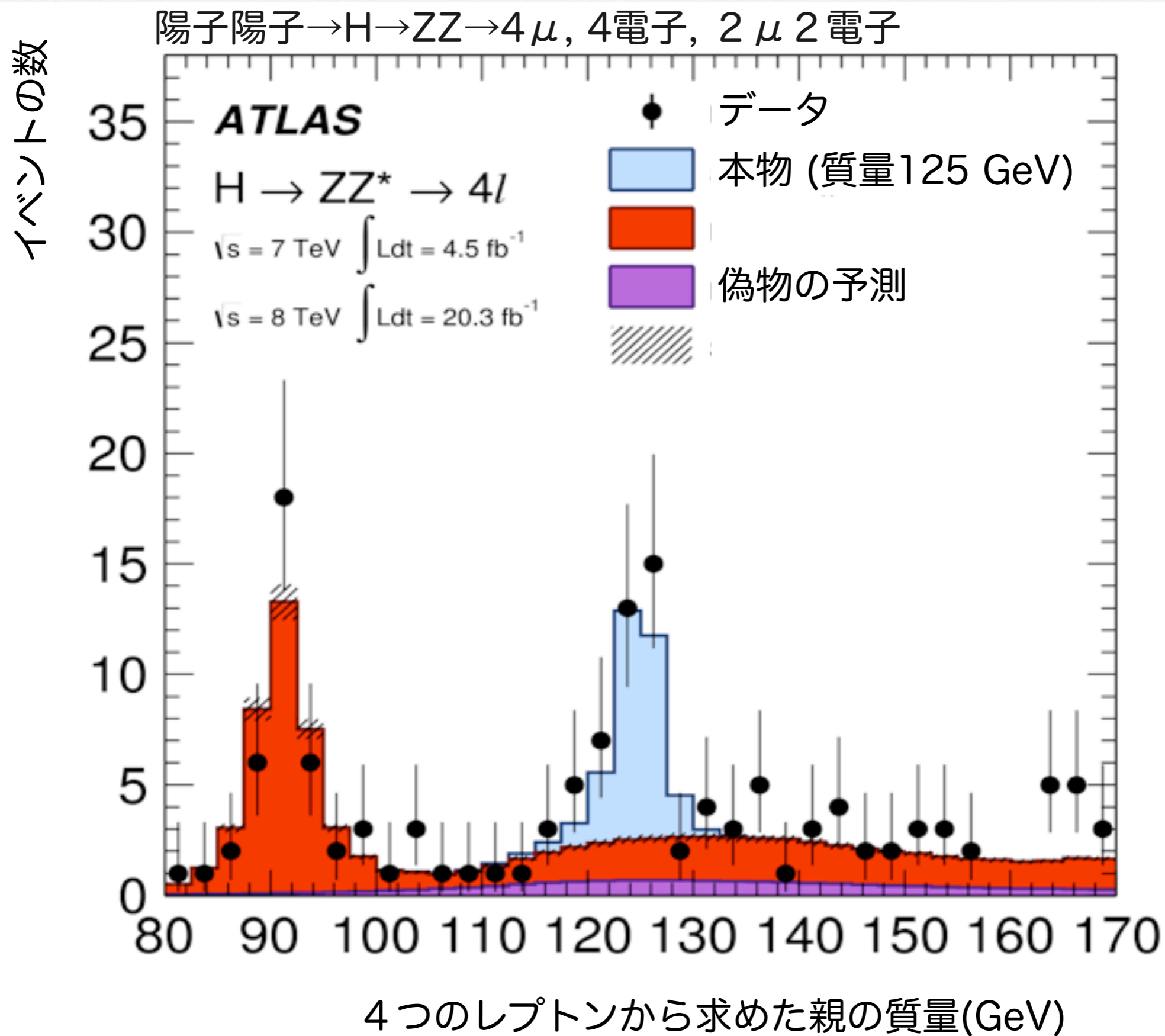
陽子 + 陽子 \rightarrow H \rightarrow ZZ

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



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

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

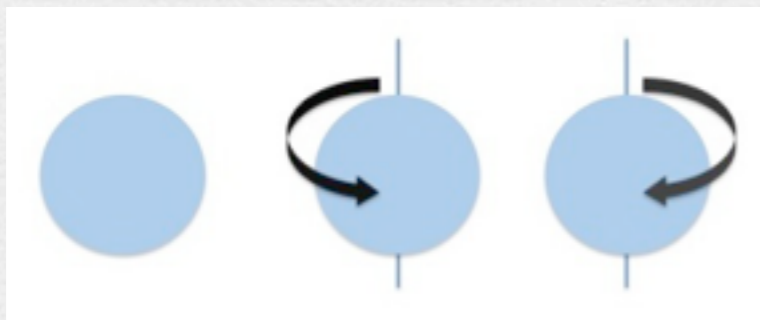


発見された粒子に関してわかったこと

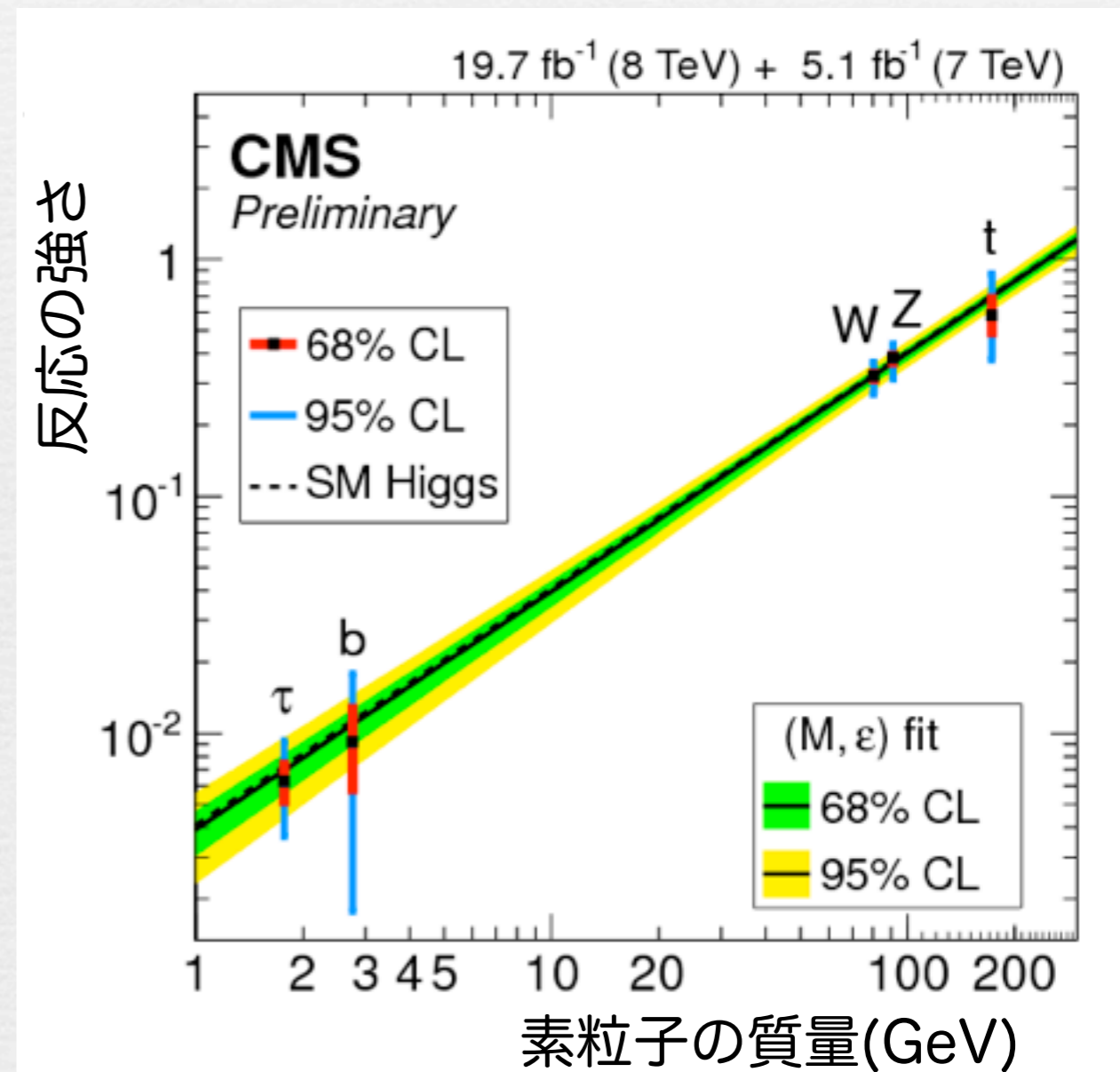
- 光子 光子、 ZZ 、 WW 、 $\tau\tau$,, に崩壊する粒子
→ 質量と反応の強さに関連

- 質量は、125GeV位

- スピンが0 (向きなし)
→ スピンがある可能性を棄却



素粒子には固有のスピン



ヒッグス粒子発見！

ヒッグス粒子発見のインパクト

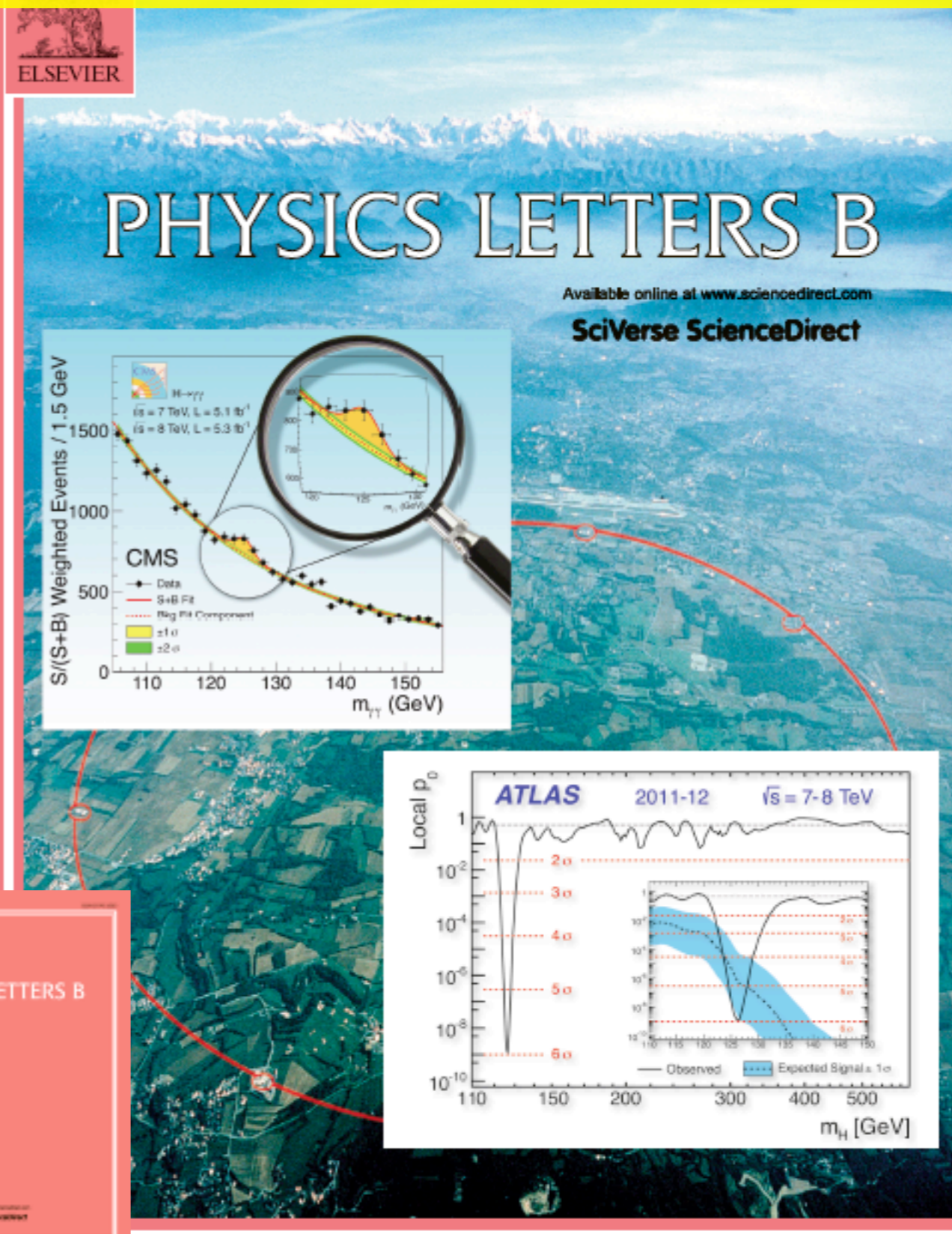
ヒッグス粒子発見のインパクト

2012年7月4日：ヒッグス粒子と思われる新粒子発見！！！！

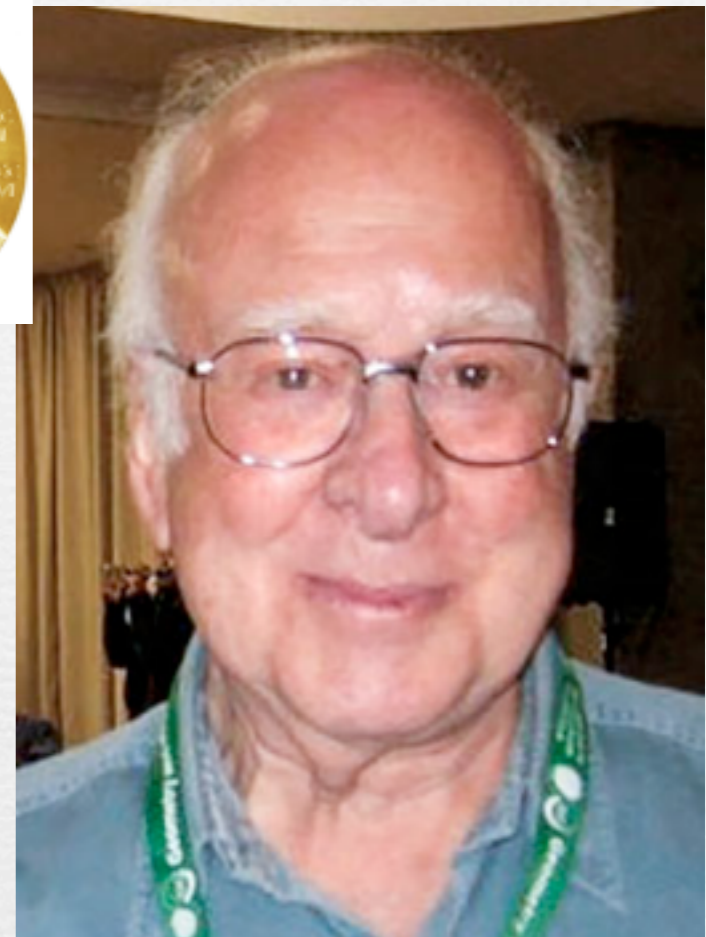
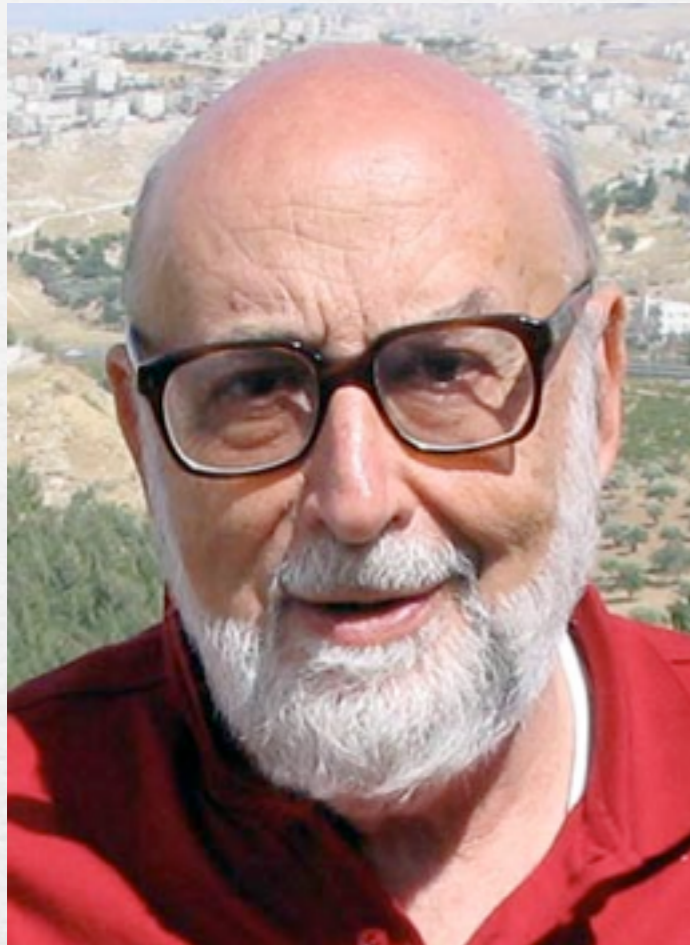


アングレールさん

ヒッグスさん



2013年 ノーベル物理学賞

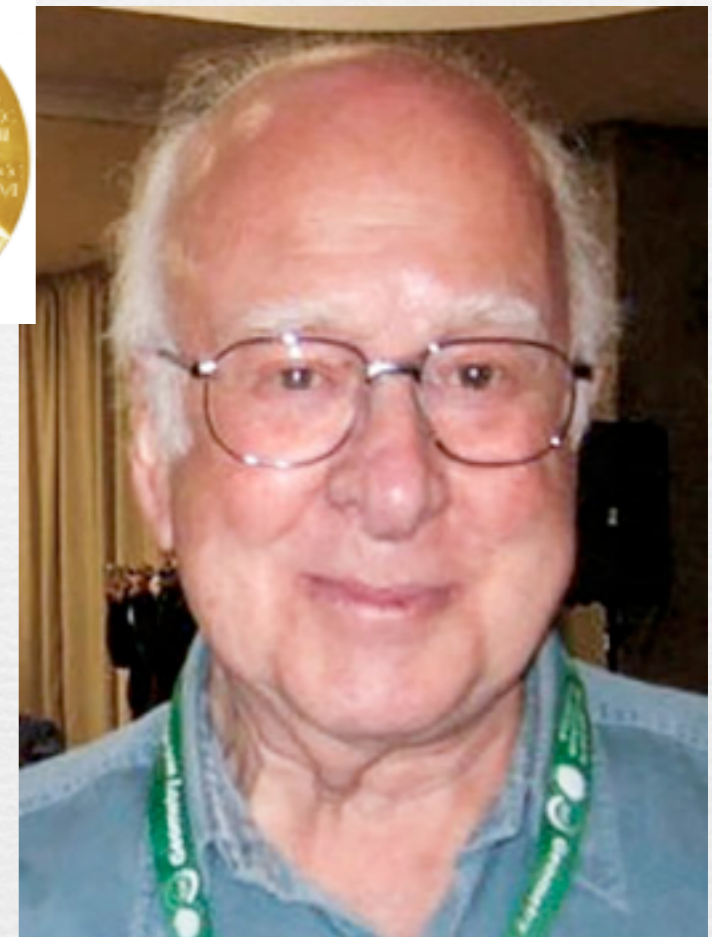
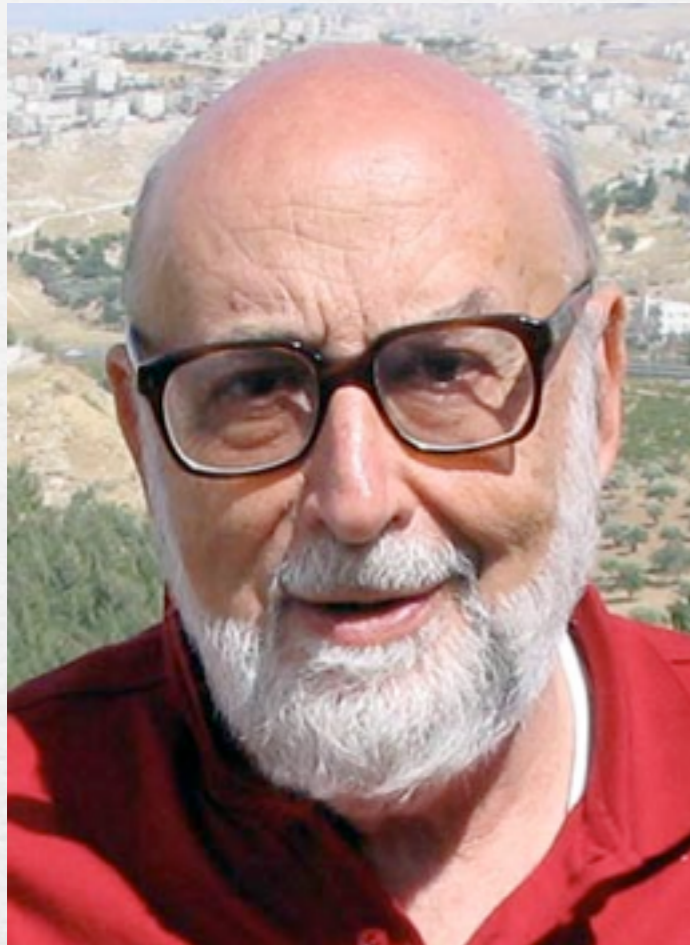


フランソワ・アングレール氏

ピーター・ヒッグス氏

The Nobel Prize in Physics 2013 was awarded jointly to François Englert and Peter W. Higgs *"for the theoretical discovery of a mechanism that contributes to our understanding of the origin of mass of subatomic particles, and which recently was confirmed through the discovery of the predicted fundamental particle, by the ATLAS and CMS experiments at CERN's Large Hadron Collider"*

2013年 ノーベル物理学賞



フランソワ・アングレール氏

ピーター・ヒッグス氏

2013年のノーベル物理学賞は、**フランソワ・アングレール氏**と**ピーター・ヒッグス氏**に、「素粒子の**質量起源の理解を与える仕組みを理論的に発見し、理論によって予言される基本粒子をCERN LHCのATLAS実験とCMS実験が発見したことによって理論の正しさが確認された」**

日本の実験チームが貢献！！

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



ノーベル賞
物理学賞
質量の起源解明
ヒッグス粒子予言の2氏

「ストックホルム」共同】スウェーデンの王立科学アカデミーは八日、二〇一三年のノーベル物理学賞を、物質に重さを与える「ヒッグス粒子」の存在を半世紀前に予言した英エディンバラ大のピーター・ヒッグス名誉教授(ハセ)と、ベルギーのブリュッセル自由大のフランソワ・アングレール名誉教授(ハセ)の二人に授与すると発表した。「神の粒子」実験誇り①面、関連②面、社説⑦面

ヒッグス粒子の発見には日本が重要な役割を果たした。ヒッグス粒子を探す実験は二〇〇九年に始まり、名古屋大や東京大など十六機関の約百十人が参加した。欧州合同原子核研究所の世界最大の加速器LHCの建設費は三千八百億円で、うち日本は約百四十億円を拠出した。陽子同士を衝突させる加

速器の鍵と、古河電用いられて、粒子の生成を調べる検出器の開発には東芝や川崎重工業などが参加した。素粒子が飛んだ軌跡を調べる装置には光検出器で高い技術誇る浜松ホトニクス(浜松市)の製品が採用されている。

【日本の技術が貢献】
【名大など16機関参加】

10月9日中日新聞朝刊

KEK, 筑波大, 東大, 早稲田大, 東工大, 名大, 京大, 阪大, 神戸大, 九大など16研究機関

中日新聞社
名古屋市中区三の丸一丁目6番1号
〒460-8511 電話 052(201)8811

就職率ランキング
文系大学日本一
東京福祉大学
名古屋キャンパス
オープン
キャンパス
11/30(土)
12/21(土)

スマホで便利

神の粒子 実験誇り

ノーベル物理学賞

参加の名大 歓喜 「必ずある信じていた」

決まったヒューター・ヒッグス博士らが半世紀前に存在を予言したヒッグス粒子。「神の粒子」とも呼ばれた存在を裏付けたのは欧州合同原子核研究所（CERN）の実験だった。実験に参加した研究者や、検出器を製作したメーカーの担当者らは八日、受賞決定を誇らしげに喜び合った。〇面参照



ノーベル物理学賞に「ヒッグス粒子」が決まり、笑顔を見せる戸本誠准教授（前列中央）と学生ら＝8日夜、名古屋市千種区の名古屋大で

名古屋市千種区の名古屋大東山キャンパス。大学院理学研究科の戸本誠准教授（四）と研究室の学生ら十人は、会議室で発表を待った。受賞者が発表される「おー」と歓声。拍手が起こり、「やったー」「乾杯や！」と笑顔があふれた。同じ研究室の飯嶋徹教授はとっておきのワインも用意。全員で「ヒッグス粒子に乾杯」と祝杯をあげた。

戸本さんは〇六〇九年、実験チームの一人として、衝突時に生じる粒子を観測する検出器の製作を担当した。検出器とコンピュータをつなぐ三十二万本の回線の一本一本がきちんと作動するかを確認。気の遠くなるような、ミスの許されない作業の積み重ねが偉業につながった。「ヒッグス粒子は、

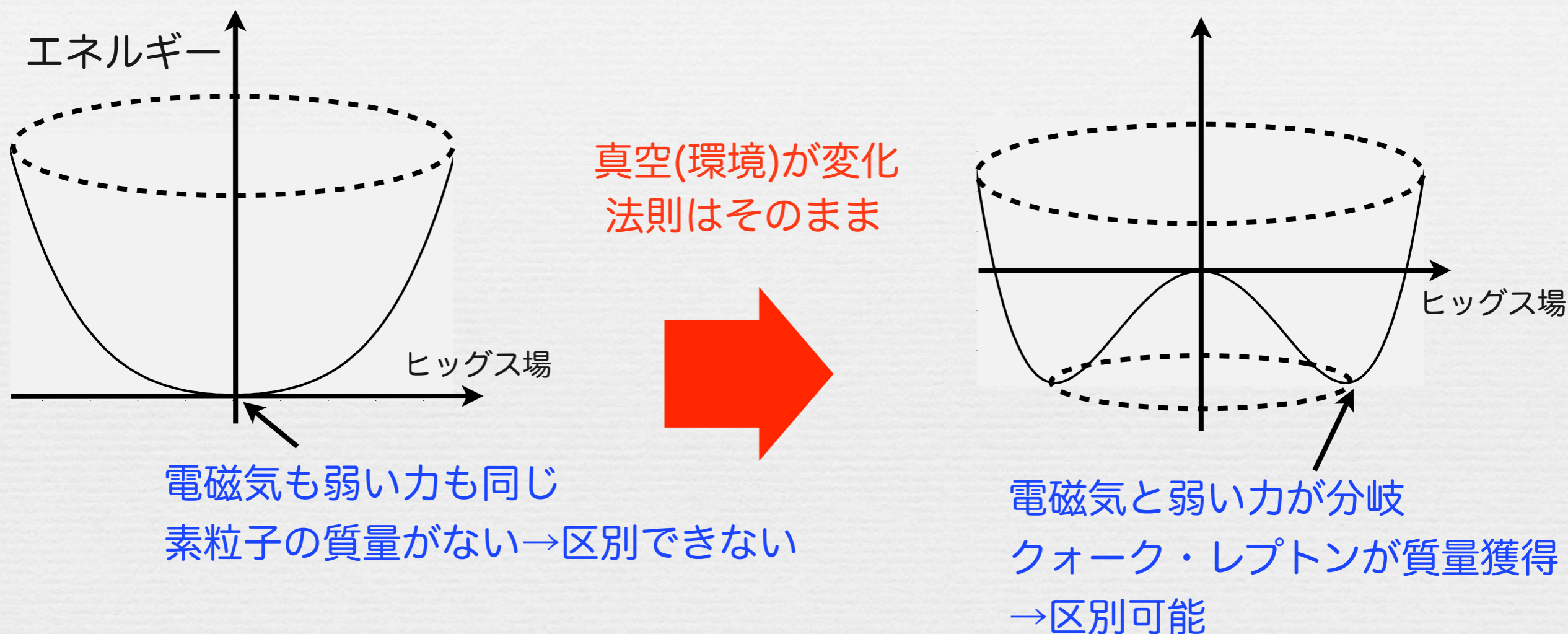
必ずあると信じていた。五十年に一度の発見。その実験に関われたことを誇りに思う」

CERNはフランスとスイスの国境に世界最大の円形加速器を持つ研究機関。加速器は地下百メートルに設置されたトンネル型の実験装置で、全長二十七キロは名古屋市の地下鉄名城線の一周分とほぼ同じ。〇八年から秒速三十万キロまで加速した陽子を一秒間に二千万回衝突させる実験を重ね、データを集めていた。

ヒッグス粒子は存在が予言されていた十七の素粒子のうち、未発見だった「最後のピース」。戸本さんは「理論に実験が追いついた。これからヒッグス粒子の解析が進み、同時に新しい素粒子の探索という段階に入る。わくわくしますね」と声を弾ませた。

ヒッグス粒子発見のインパクト

17番目の粒子を発見したこと以上に、
真空がヒッグス場に満たされている現象を捉えたことが重要



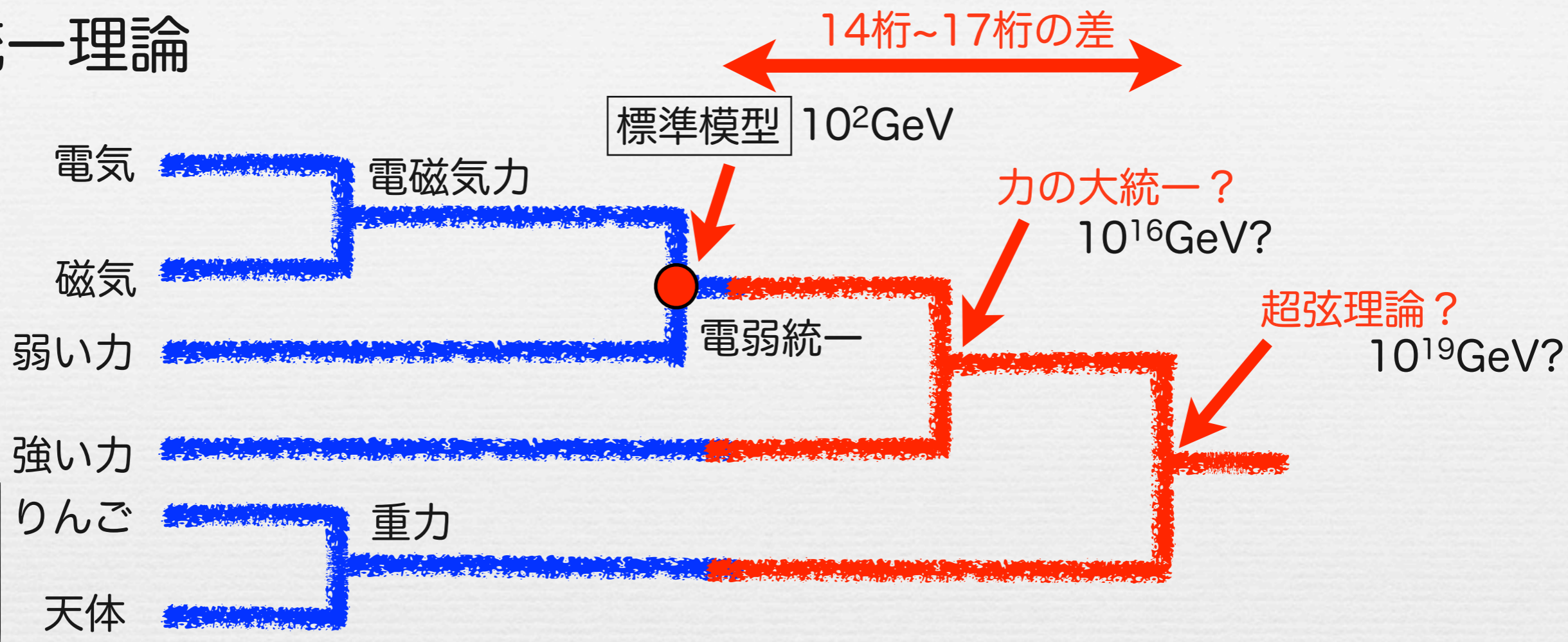
真空が変化することで、多彩な世界を作り上げた！

もっと宇宙初期(高エネルギー)では？

→ヒッグス粒子を使ったヒッグス場の説明が不可欠

ヒッグス粒子の発見の向こうに

大統一理論



ヒッグス場をなんら原理なく導入している

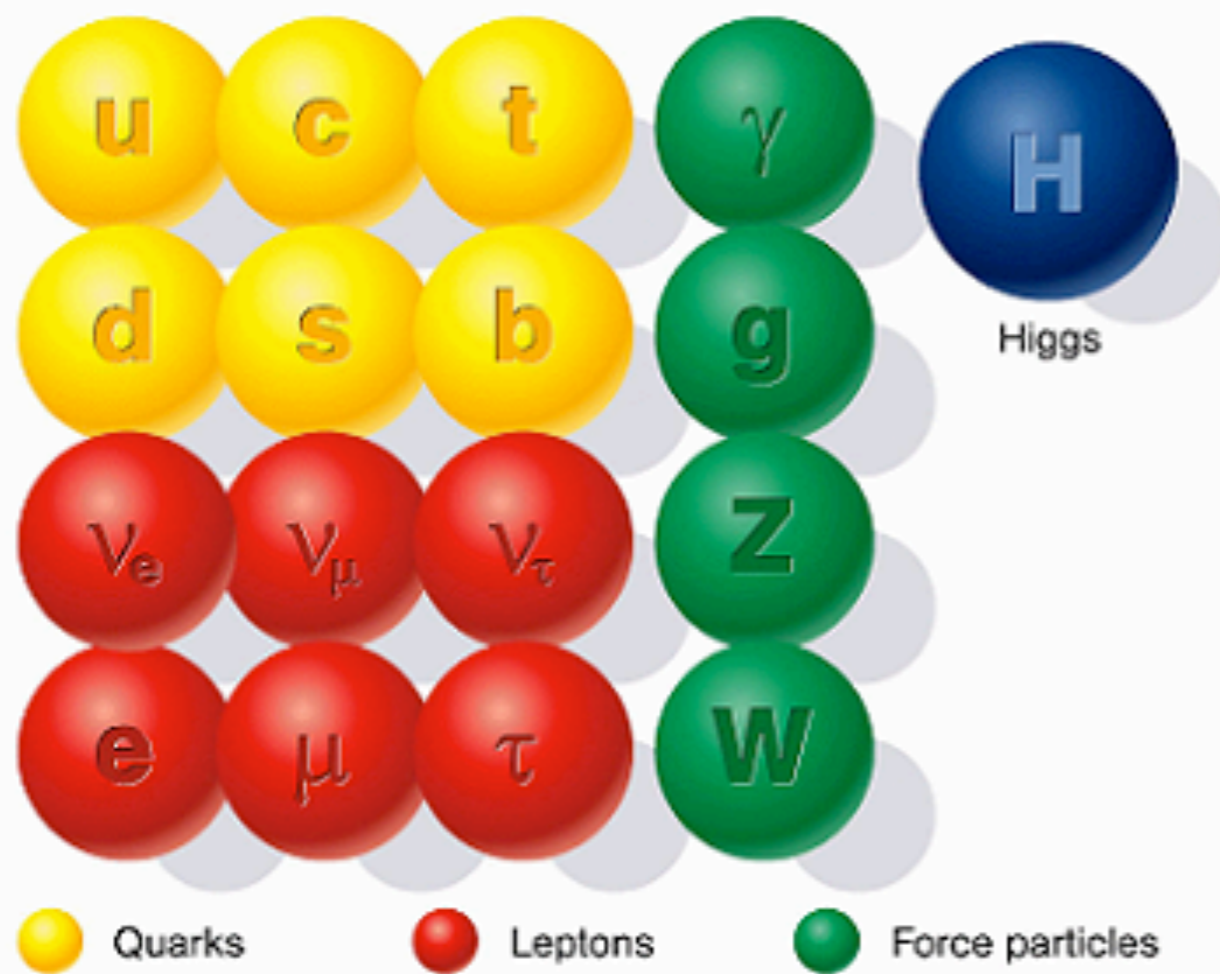
ヒッグス粒子質量の不自然さ

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

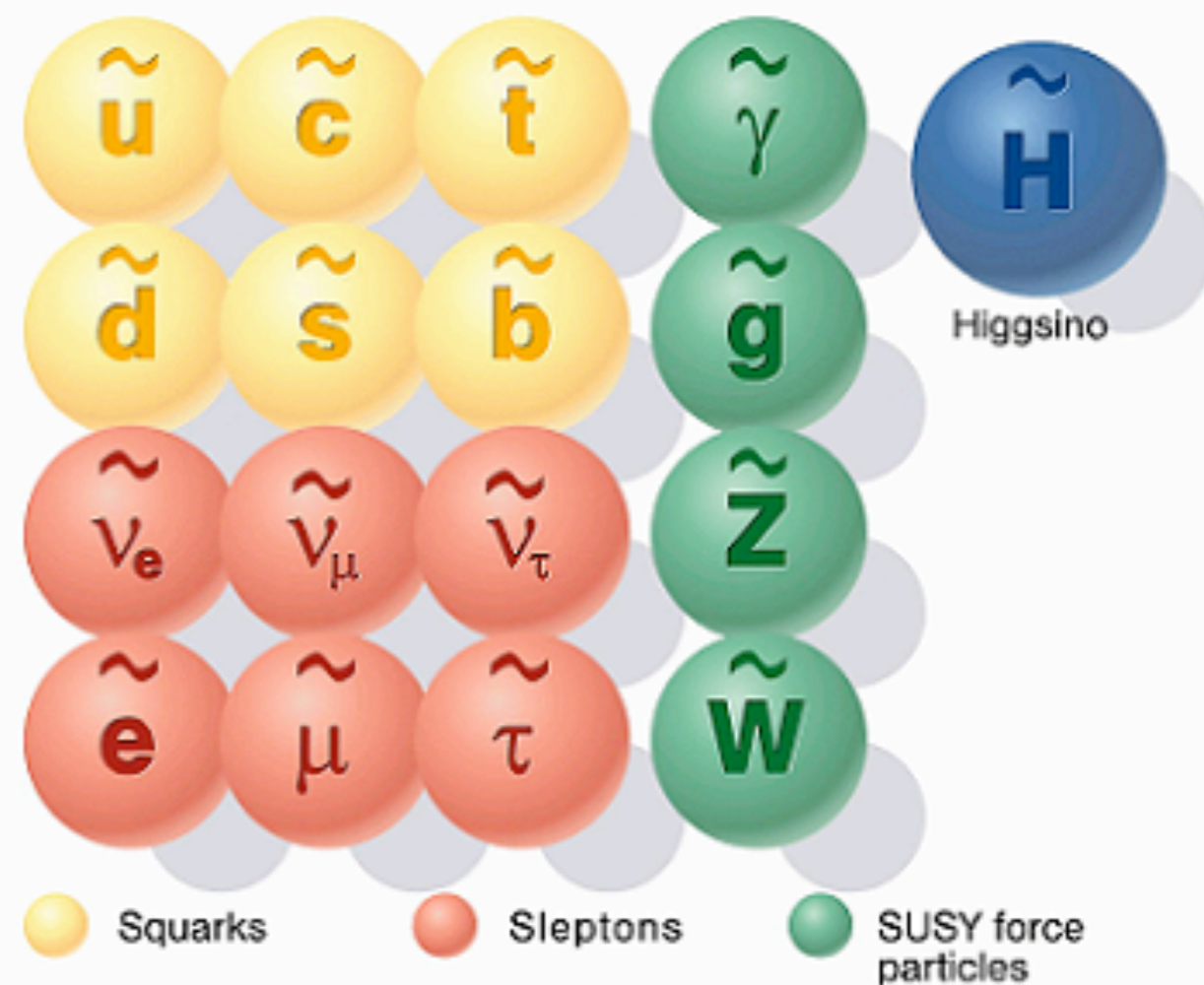
この解決には、“超対称性”や“余剰次元”などの新物理が必要

超対称性粒子

Standard particles



SUSY particles

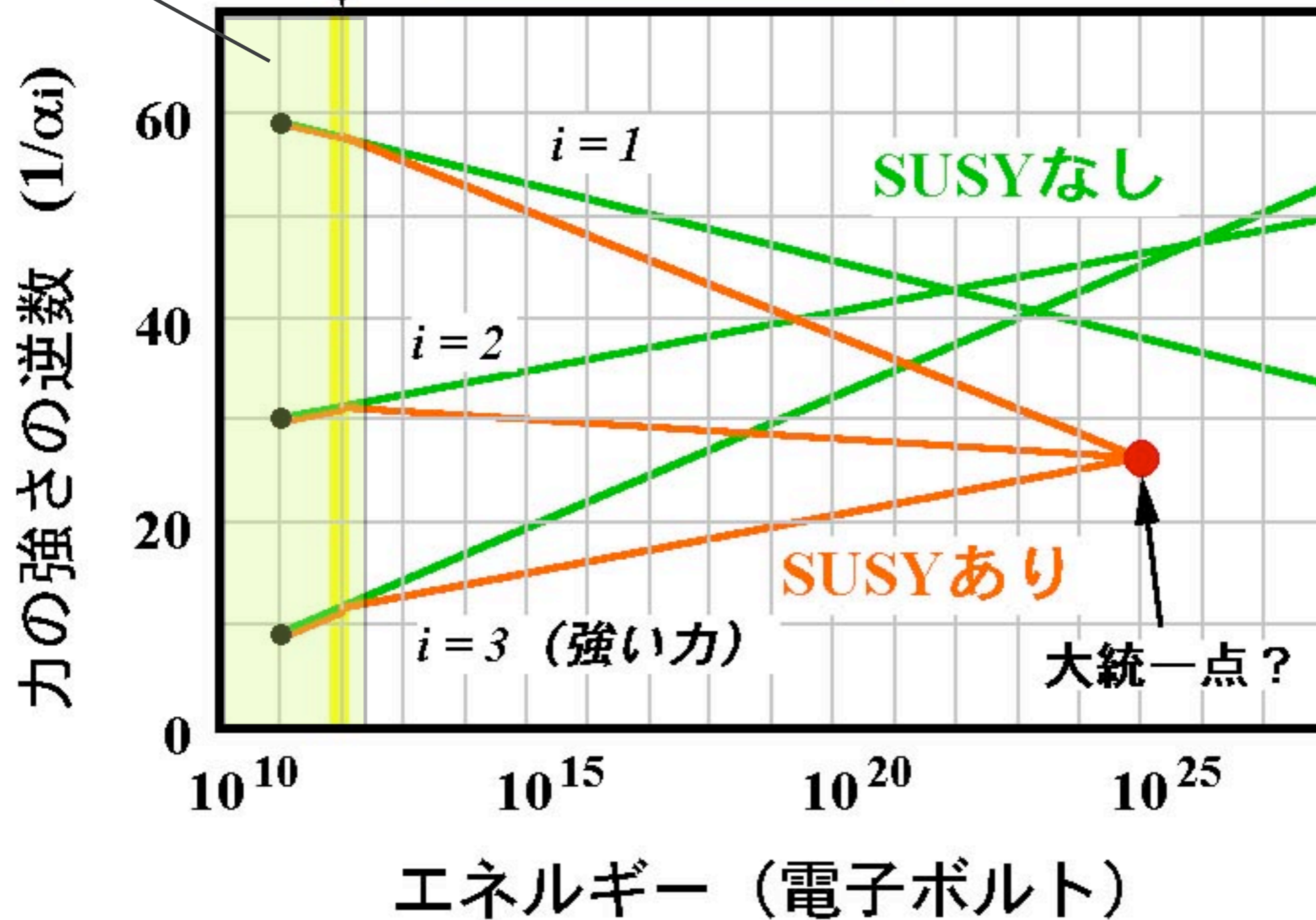


→ LHC実験で探索！！

超対称性粒子があると：力の統一

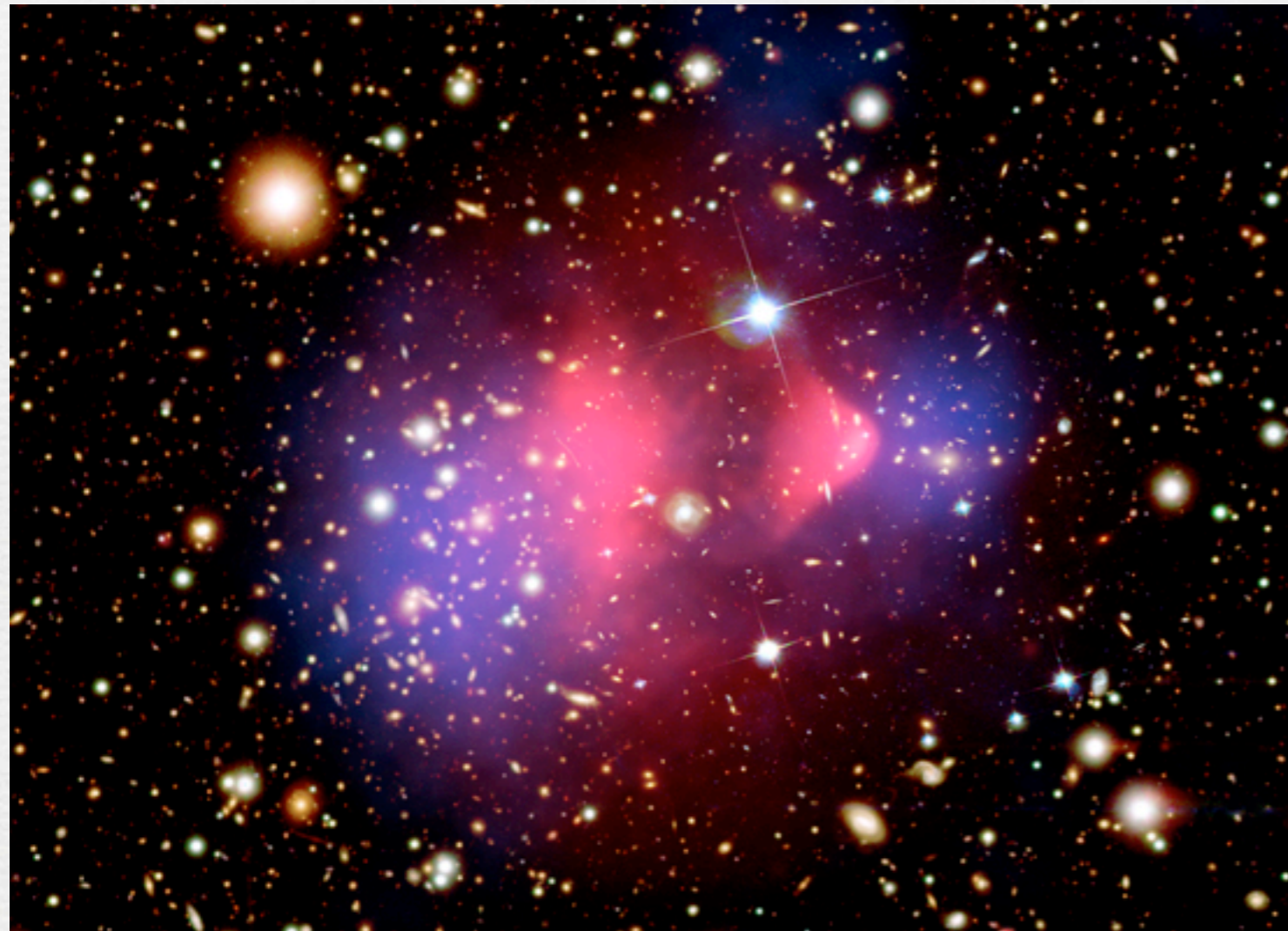
LHCが探索する領域

SUSY粒子の存在領域

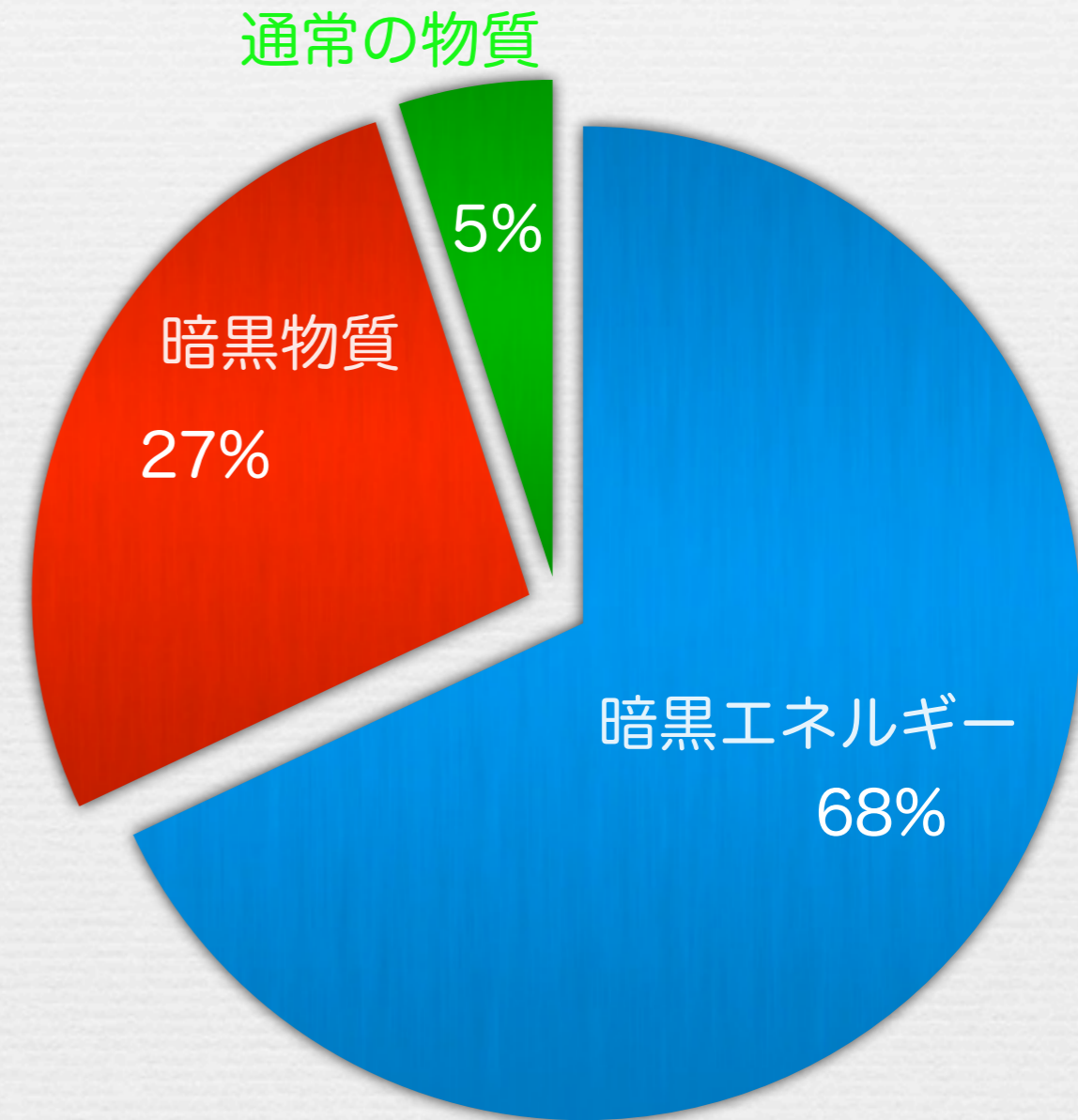


超対称性粒子があると：暗黒物質

暗黒物質 (ダークマター)が素粒子として理解できる



NASAのサイトから

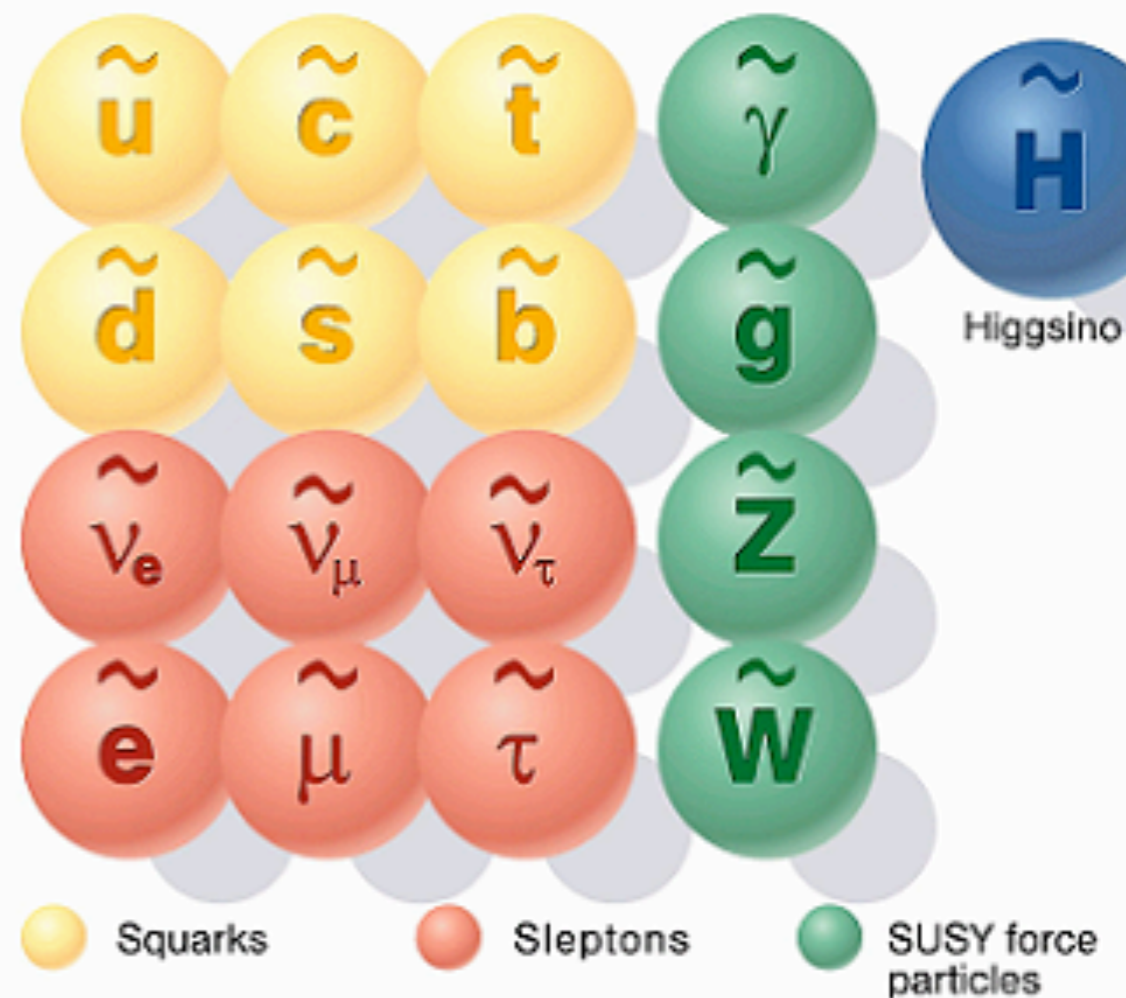


今後の展開

標準模型の素粒子 **全て発見!**



超対称性粒子 **未発見**



- ヒッグス粒子の性質の理解

沢山のヒッグス粒子を作る→沢山の陽子衝突

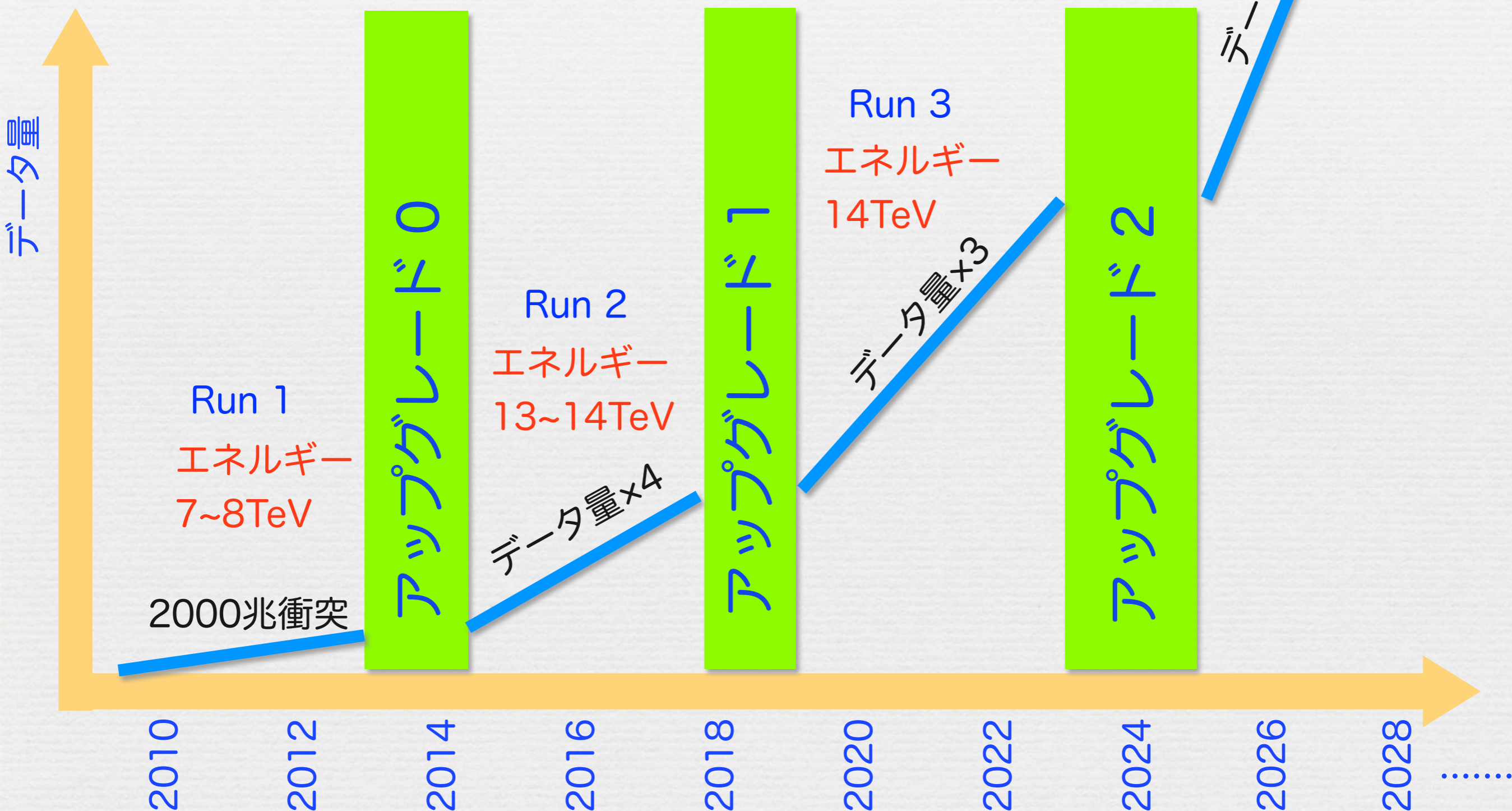
- 新しい素粒子(超対称性粒子など)の発見

重い素粒子を作る: 衝突エネルギーを8TeV から 13~14TeVに

LHCアップグレード計画

加速器と検出器のアップグレード

高いエネルギーとより多くの陽子衝突のデータ収集を目指す



まとめ

LHC実験は、

2009年から物理データを収集開始、順調に動いている

2012年7月4日 ヒッグス粒子発見

新しい素粒子研究の幕開け

真空の性質に関する新たな知見が得られる
さらなる新粒子が発見される可能性が高い

LHC実験は、

2015年からエネルギーとビーム強度を増強する。

これからの素粒子は面白い！

宣伝

素粒子、

ヒッグス粒子、

宇宙誕生、

素粒子実験

などなど

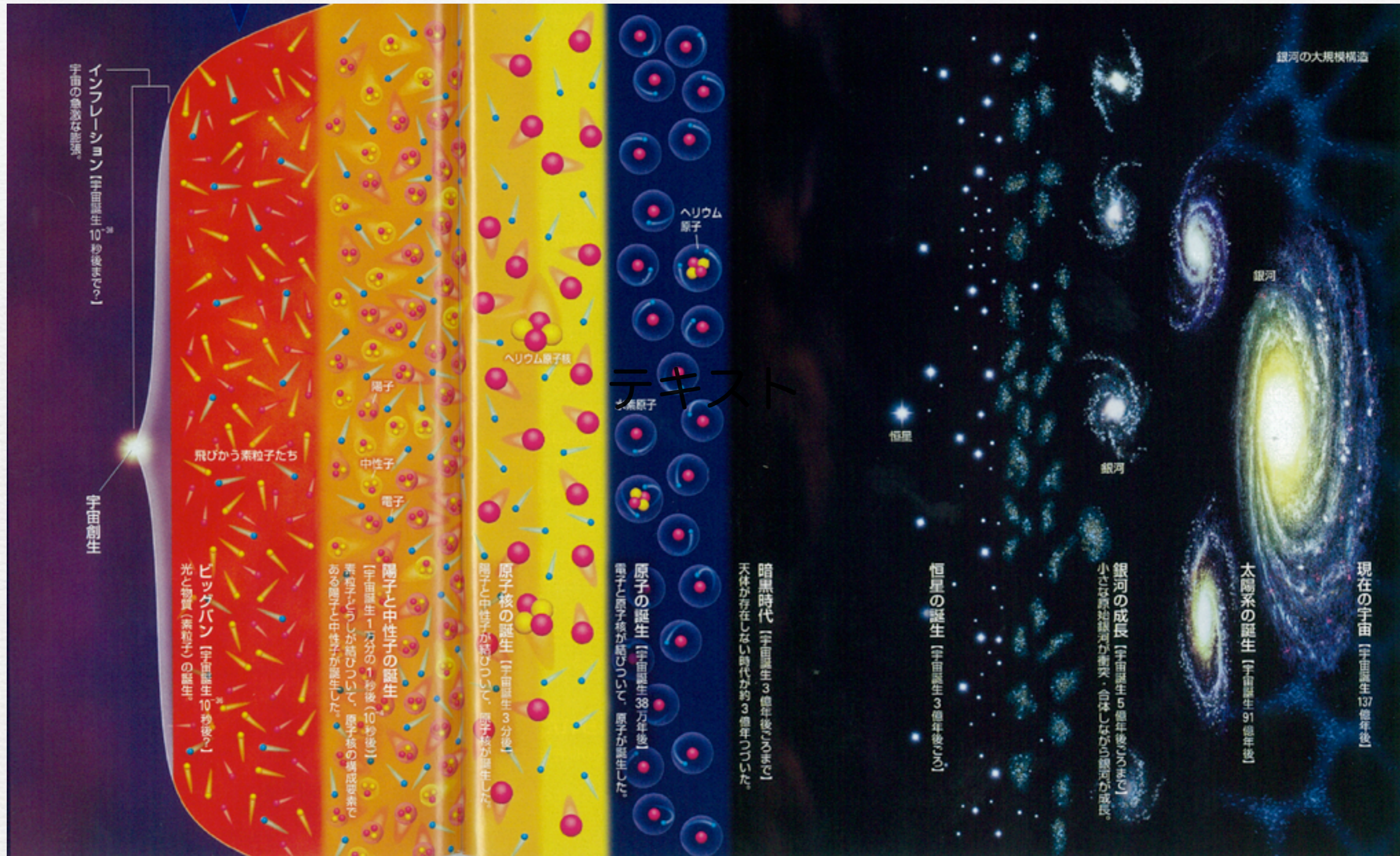
についてもっと知りたい人へ、

高エネルギー素粒子物理学研究室 (N研) 紹介

この会場から、研究室まで案内します

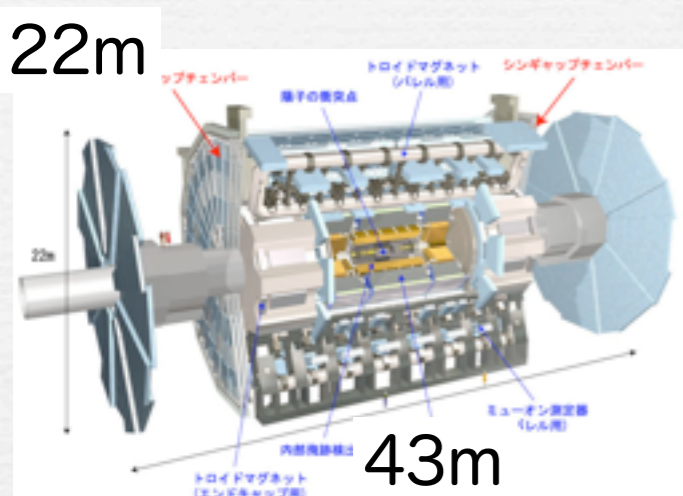
Backup slides

宇宙誕生の歴史



テキスト

検出器の建設の歴史を1分で



大きさ：22m x 43m

総重量：7000トン

読み出し：1億6千

2003年検出器建設開始

2008年に完成

ATLAS Detector Assembly

LHC計画

Large Hadron Collider(大型ハドロン衝突型加速器)

目的

- ・質量の起源のヒッグス粒子や超対称性粒子などの新粒子を発見し、物質の究極の内部構造を探索する。

LHC加速器

- ・7兆電子ボルト(7 TeV)の陽子同士を衝突させる。
- ・周長27kmの地下トンネル内に設置される。
- ・8.33テスラの超伝導双極磁石1,232台などからなる。
- ・総重量35,000トン、液体He120トン、液体N₂ 10,000トン。
- ・運転のための消費電力は約120MW(CERN全体で約230MW)。
- ・総建設費費は 約5000億円、建設期間は14年。
- ・2008年9月:450GeV陽子ビームの周回に成功。

大量のヘリウム漏れ事故が発生し修理開始。

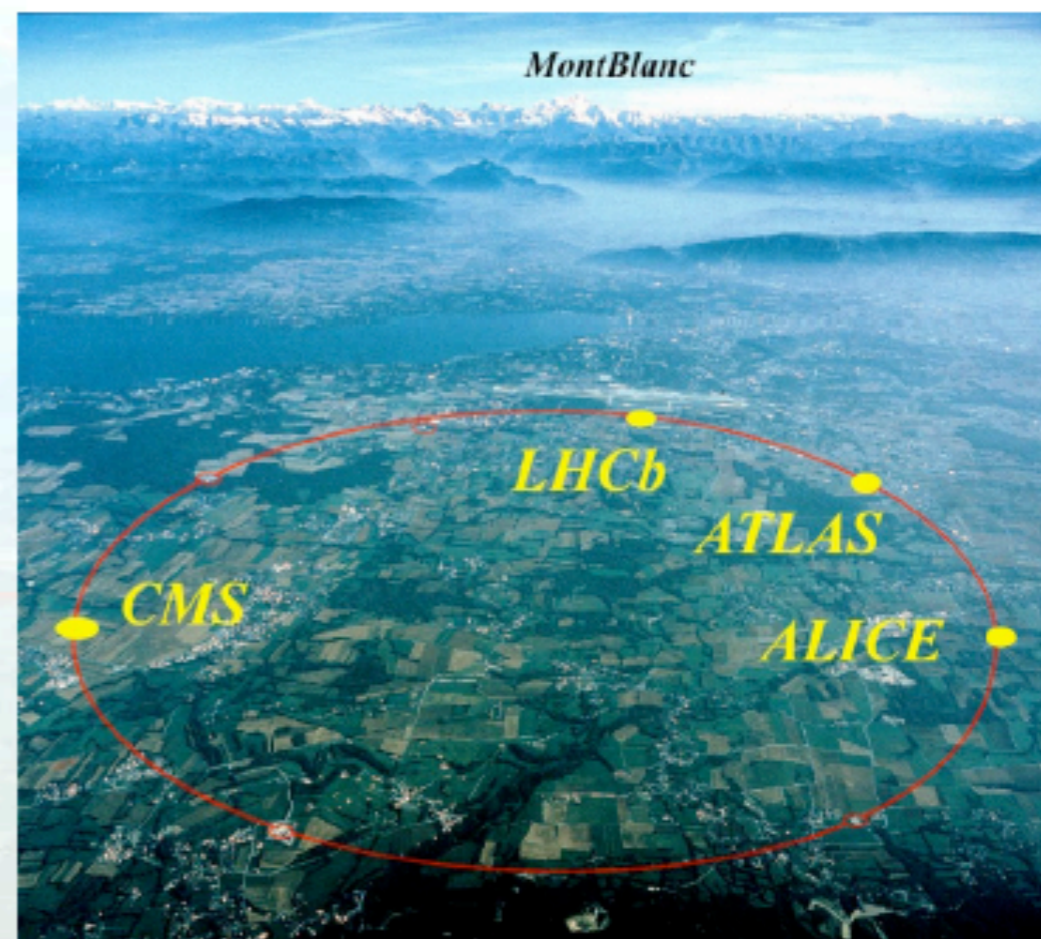
- ・2009年11月:世界最高の陽子衝突エネルギー2.36TeV達成。
- ・2010年3月より $3.5+3.5=7\text{TeV}$ の陽子衝突実験を開始した。
- ・2010年11月より鉛の重イオン衝突実験を開始した。

国際協力

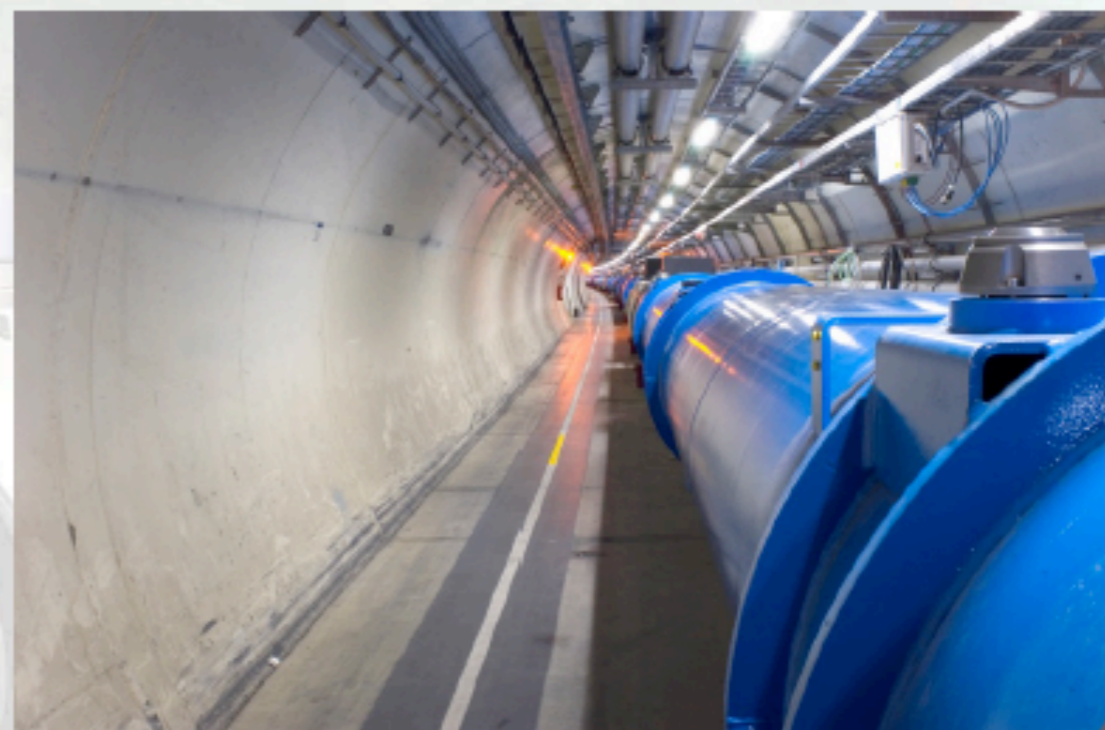
- ・CERN加盟国に日・米・露・カナダ・インドなどが協力。
- ・日本は計138.5億円の加速器建設協力を行っている。
- ・KEKはLHC衝突点の超伝導四極磁石を開発製造した。

実験装置

- ・国際共同実験: **アトラス(ATLAS)**と**CMS**(ヒッグス・超対称性粒子などの探索)、**アリス(ALICE)**(重イオン衝突物理)、**LHCb**(B物理)の他に小実験として**TOTEM**、**LHCf**がある。



円形の赤線の地下約100メートルに周長27kmのLHC加速器トンネルがある。4つの実験装置の場所が黄色丸で示してある。



2007年4月26日 全ての超伝導磁石約1700台が設置された。
2007年11月7日 全ての超伝導磁石の接続が完了した。

LHC建設に貢献した主な日本企業

推定規模
億円(註)

古河電気工業	LHC加速器	超伝導ケーブル	~20*
新日本製鐵	LHC加速器	双極電磁石の特殊ステンレス材	~50*
東芝	LHC加速器	収束用超伝導四極電磁石	~15*
JFEスチール	LHC加速器	電磁石用非磁性鋼材	~5*
カネカ	LHC加速器	電磁石用ポリイミド絶縁テープ	~10*
IHI (+Linde)	LHC加速器	低温ヘリウムコンプレッサー	~20*
東芝	アトラス	超伝導ソレノイド	~10
浜松ホトニクス	アトラス, CMS, LHCb	シリコン検出器, 光電子増倍管, 光検出ダイオード	~10
川崎重工業	アトラス, CMS	LArカロリメーター容器, 鉄構造体	~10
林栄精器	アトラス	ワイヤーチェンバー	~5
東芝	アトラス	信号読み出し集積回路	~2
ソニー	アトラス	検出器信号アンプ	~1
ジーエヌディー	アトラス	トリガー用電子回路	~1
フジクラ	アトラス	耐放射線性光ファイバー	~1
クラレ	アトラス	シンチレーションファイバー	~1
有沢製作所	アトラス	銅箔ポリイミド電極シート	~1



古河電気工業



新日本製鐵



東芝



浜松ホトニクス

(註) 推定規模は、部分的な情報から推定しており、実際の契約額と相当にずれている可能性があります。あくまでも企業の貢献の規模の目安にすぎません。*印は日本による建設協力資金が使用された事を示す。

ATLAS日本グループ

16大学研究機関、110名程の研究者



高エネルギー加速器研究機構



筑波大学



東京大学



東京工業大学



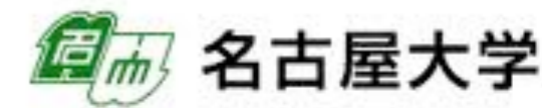
首都大学東京



早稲田大学



信州大学



名古屋大学



京都大学



京都教育大学



大阪大学



神戸大学



岡山大学
岡山大学



広島工業大学



長崎総合科学大学



九州大学