

名古屋市立高等学校物理化学研修講座

ヒッグス粒子の発見

戸本 誠

名古屋大学 大学院理学研究科
タウ・レプトン物理研究センター

～7月革命～ ヒッグス粒子の発見

7月4日：ヒッグス粒子と思われる新粒子の発見！！！！

～7月革命～ ヒッグス粒子の発見

7月4日：ヒッグス粒子と思われる新粒子の発見！！！！



イングレルさん

ヒッグスさん

～7月革命～ ヒッグス粒子の発見

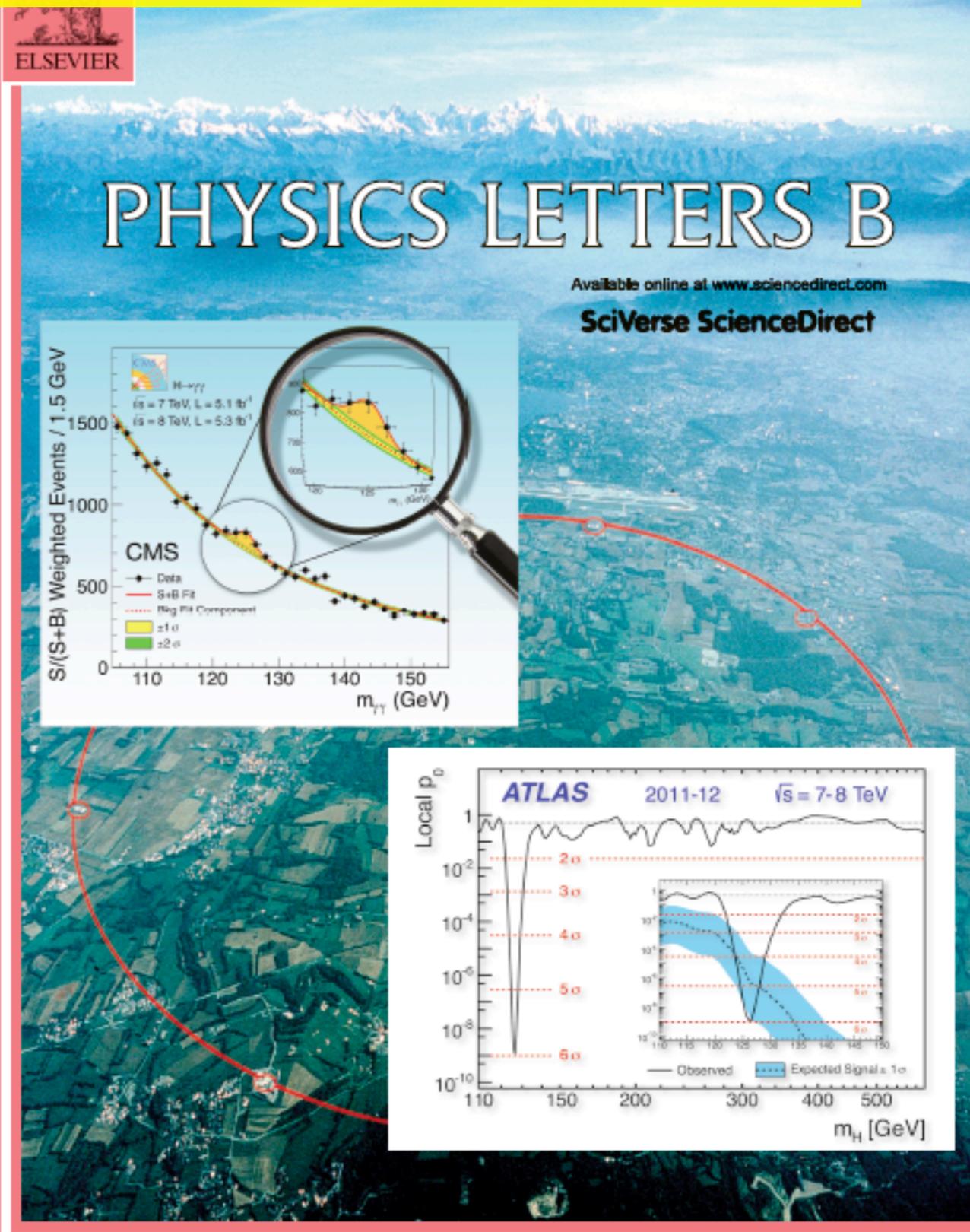
7月4日：ヒッグス粒子と思われる新粒子の発見！！！！

ISSN 0370-2693



イングラールさん

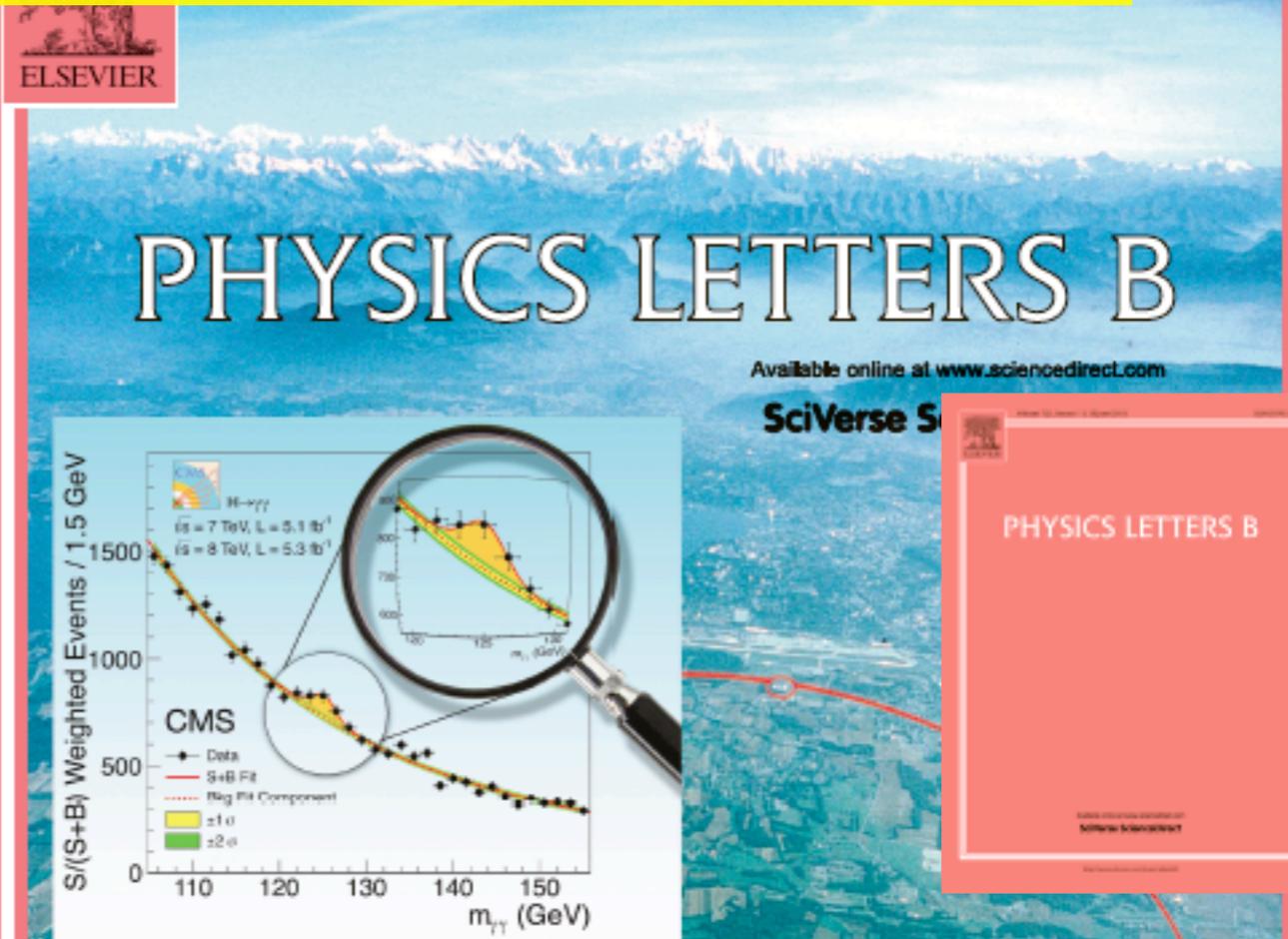
ヒッグスさん



～7月革命～ ヒッグス粒子の発見

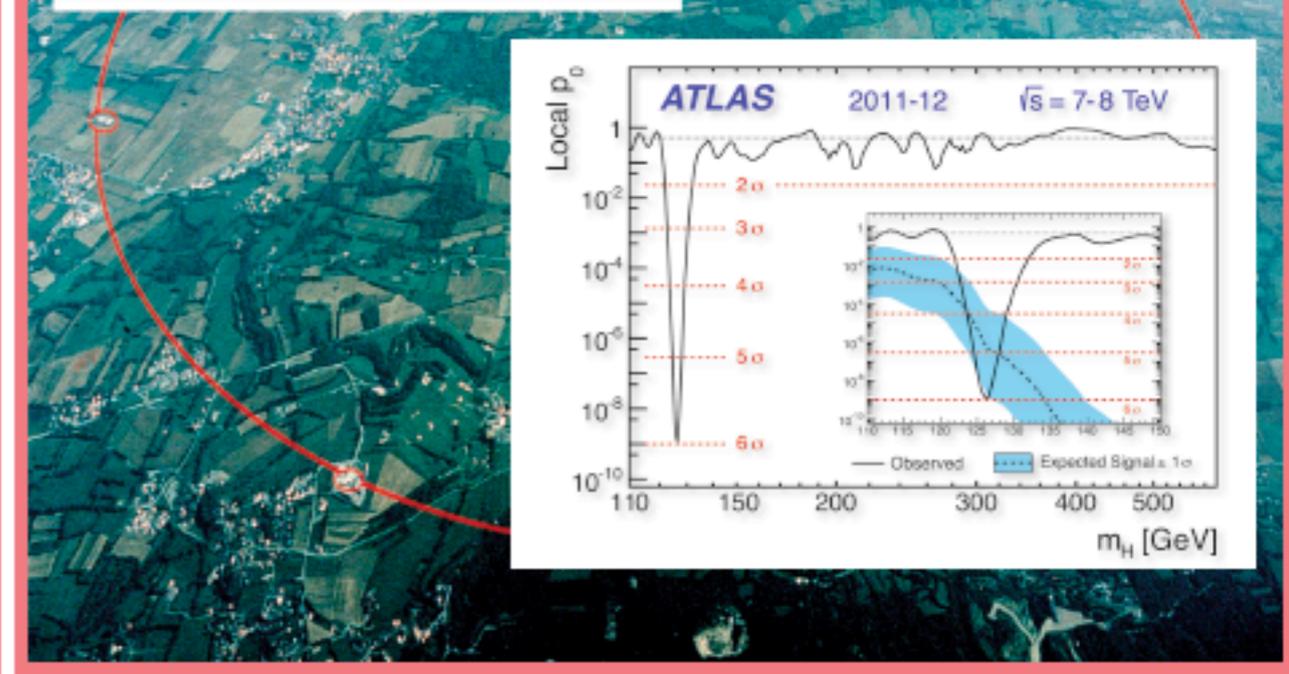
7月4日：ヒッグス粒子と思われる新粒子の発見！！！！

ISSN 0370-2693



イングラールさん

ヒッグスさん



名古屋では、、、



内容

素粒子物理学について

ヒッグス粒子とは？

ヒッグス粒子を作る加速器

ヒッグス粒子を捕まえる検出器

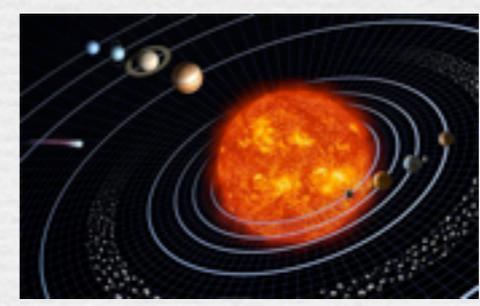
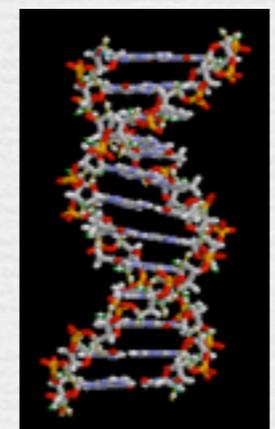
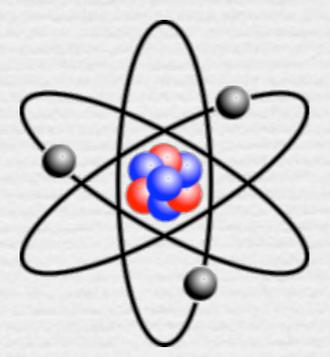
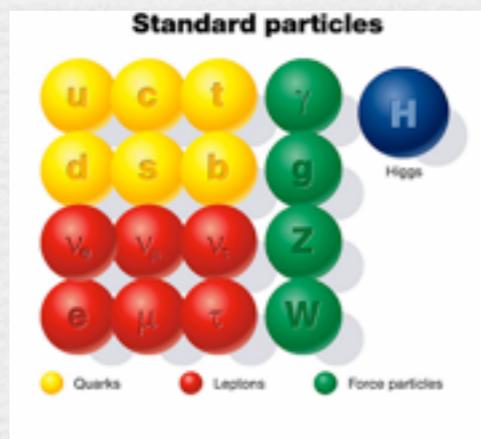
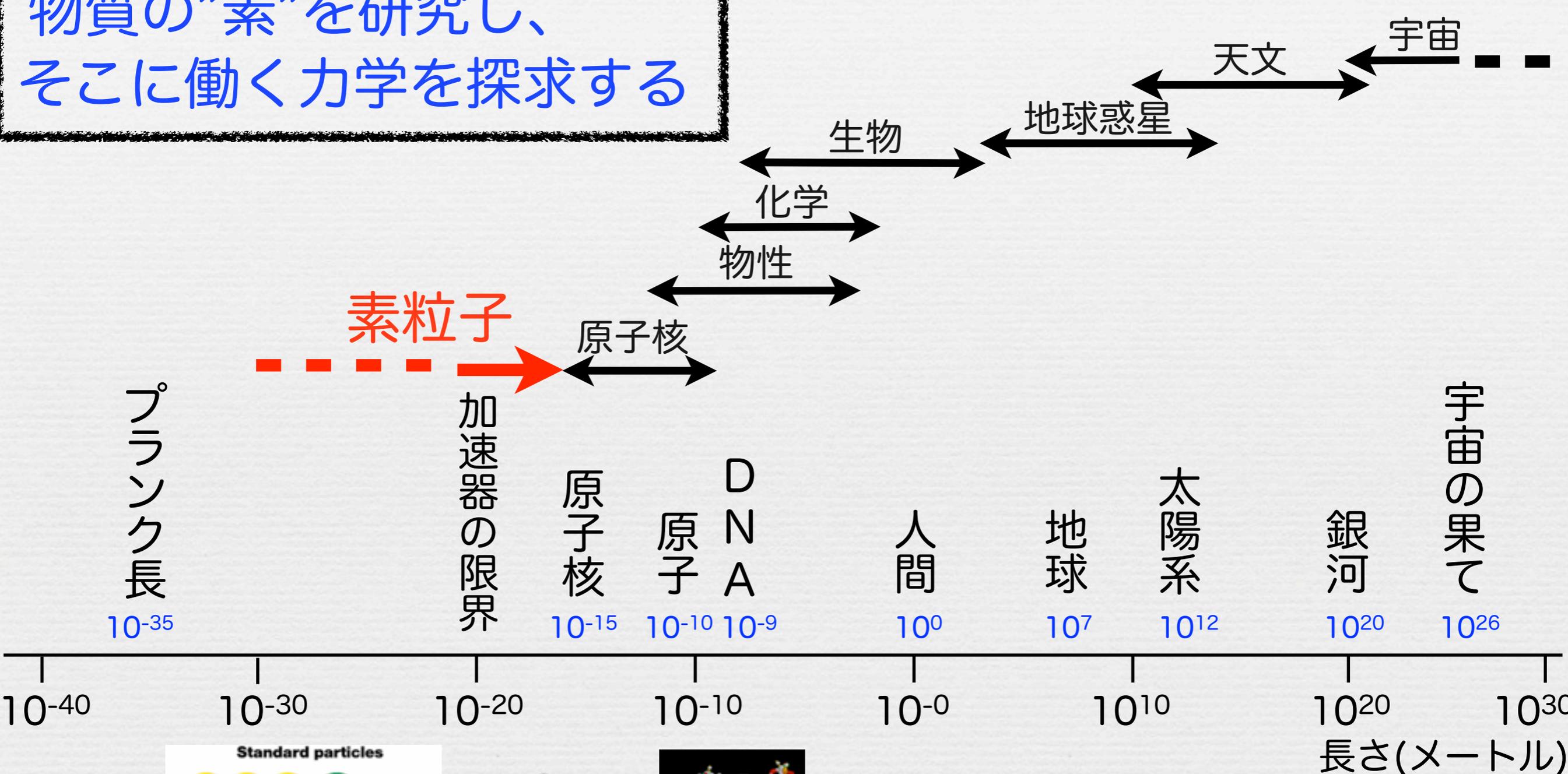
ヒッグス粒子の見つけかた

新粒子発見の意義とこれから

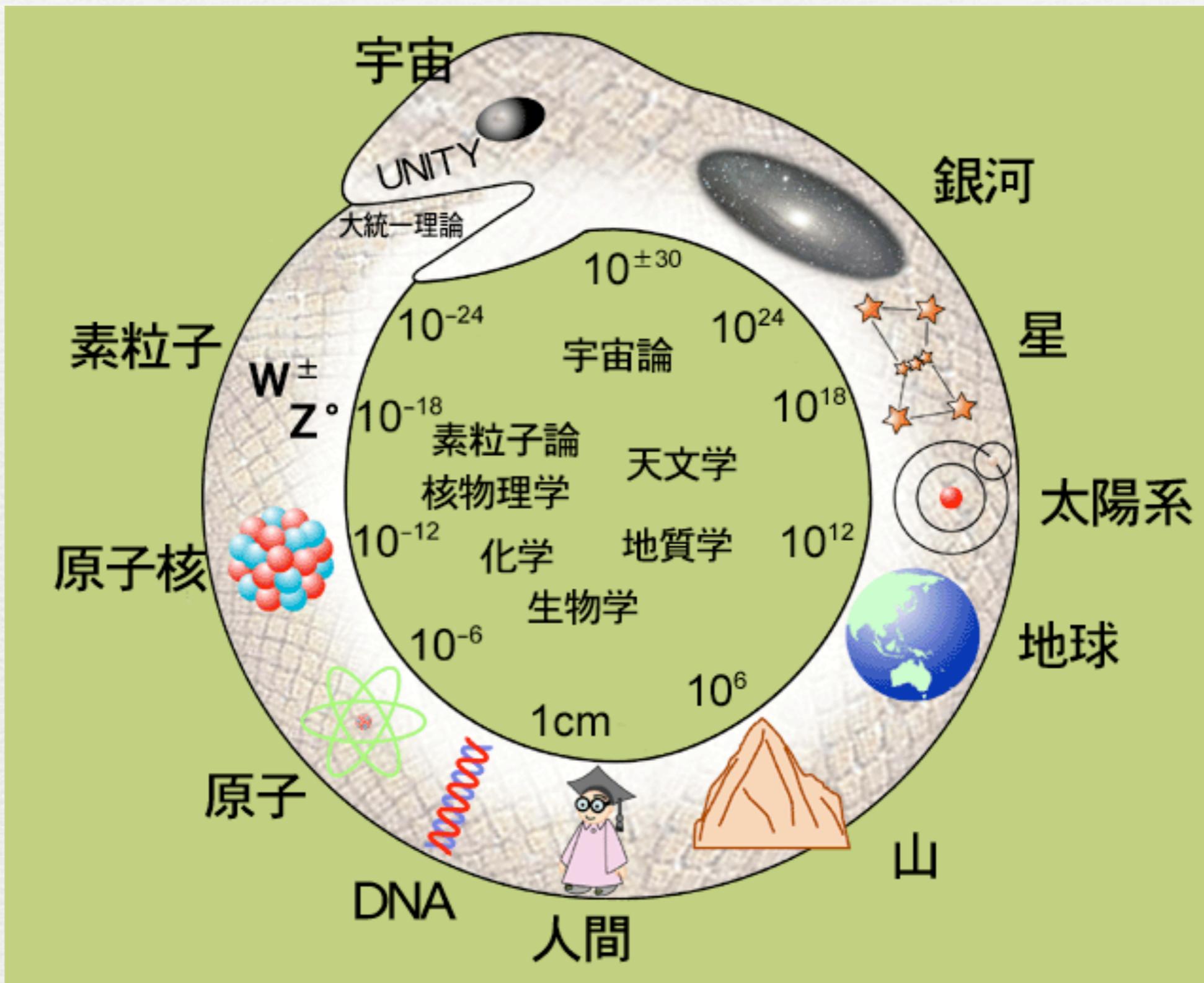
素粒子物理学について

素粒子物理学で扱うスケール

物質の”素”を研究し、そこに働く力学を探求する

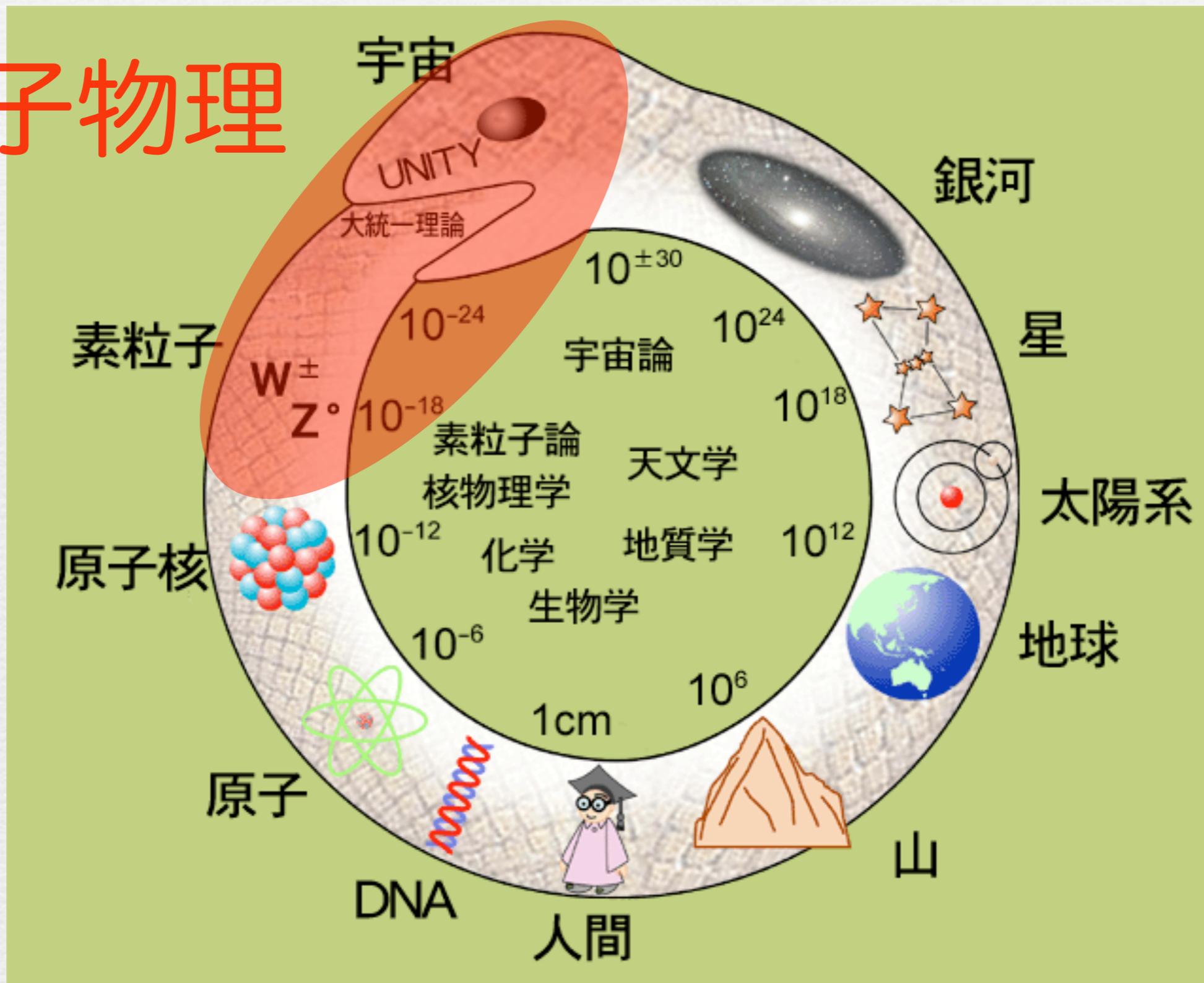


素粒子物理とは、



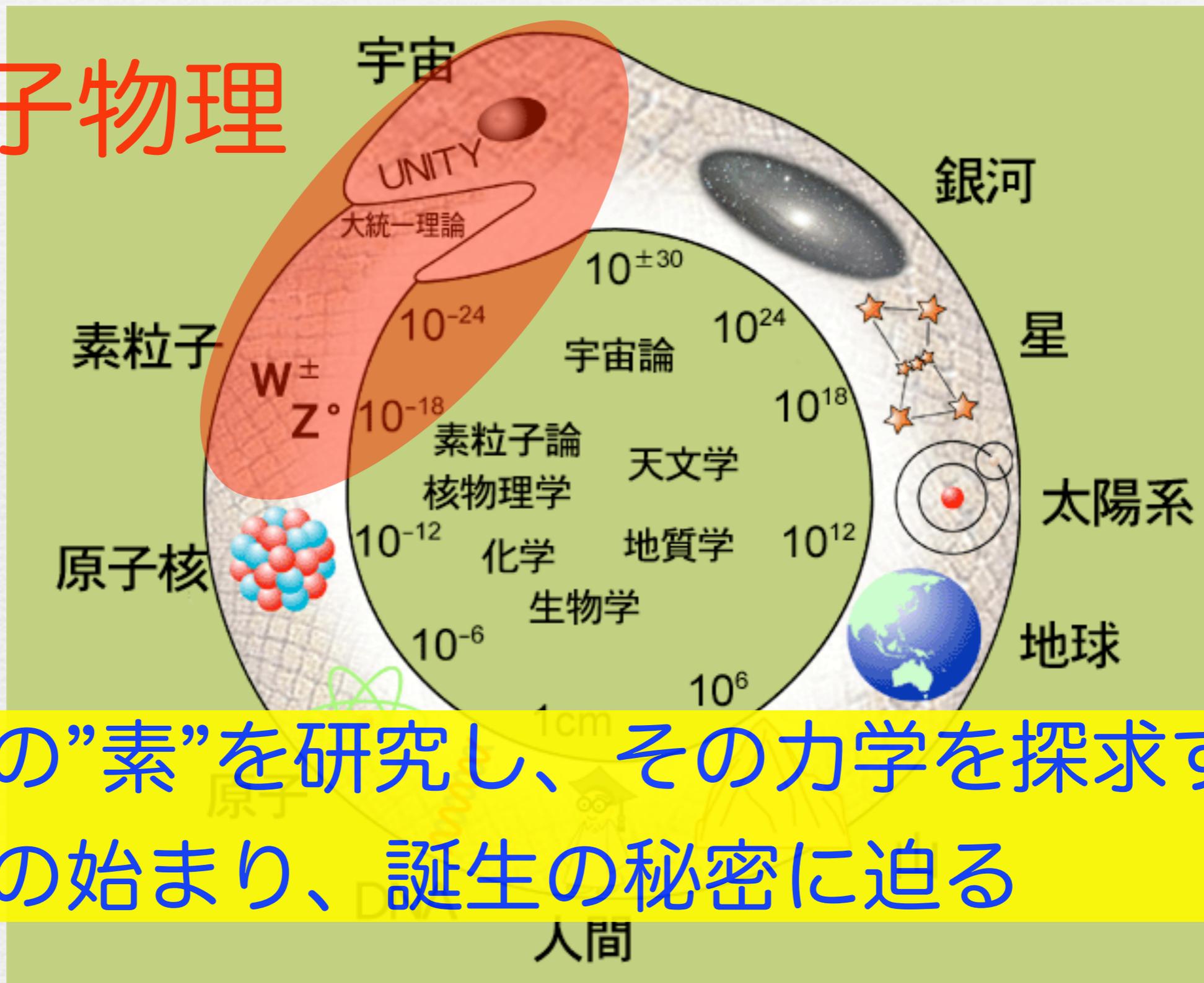
素粒子物理とは、

素粒子物理



素粒子物理とは、

素粒子物理



物質の”素”を研究し、その力学を探求する
宇宙の始まり、誕生の秘密に迫る

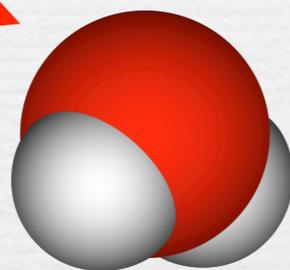
物を構成している素粒子



物を構成している素粒子



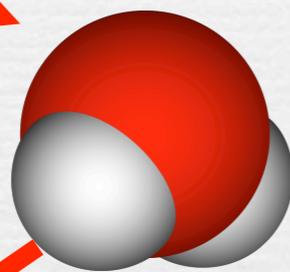
分子
 10^{-9}m



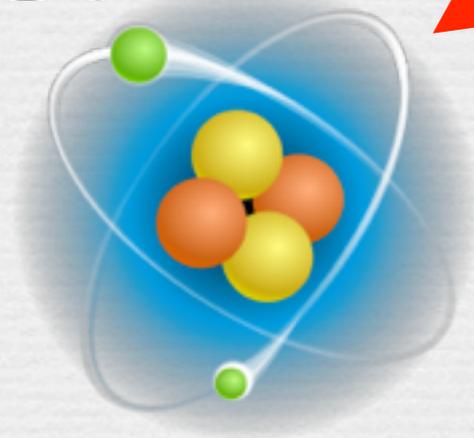
物を構成している素粒子



分子
 10^{-9}m



電子



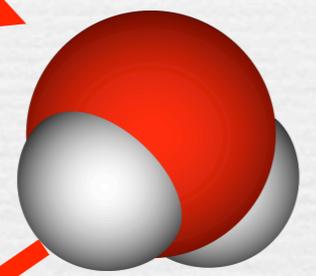
原子
 10^{-10}m

原子核
 10^{-14}m

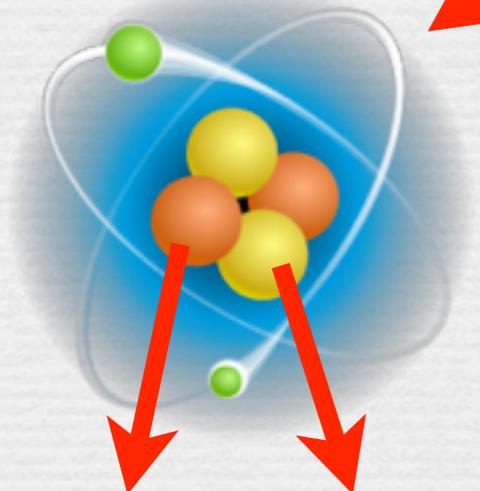
物を構成している素粒子



分子
 $10^{-9}m$

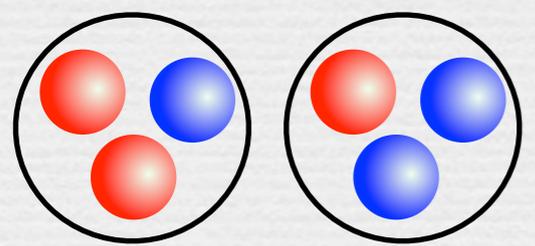


電子



原子
 $10^{-10}m$

原子核
 $10^{-14}m$

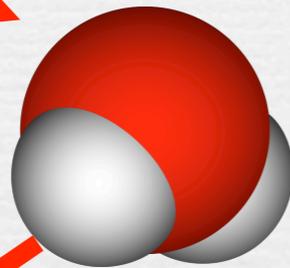


陽子 中性子 $10^{-15}m$

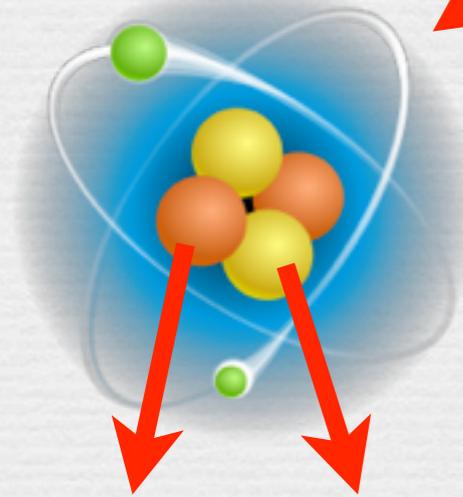
物を構成している素粒子



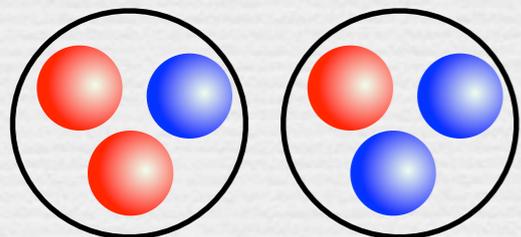
分子
10⁻⁹m



電子



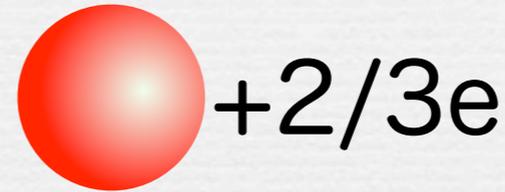
原子
10⁻¹⁰m
原子核
10⁻¹⁴m



陽子 中性子 10⁻¹⁵m

クォーク

アップ(u)

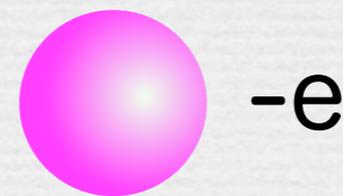


ダウン(d)

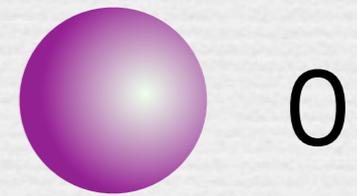


レプトン

電子

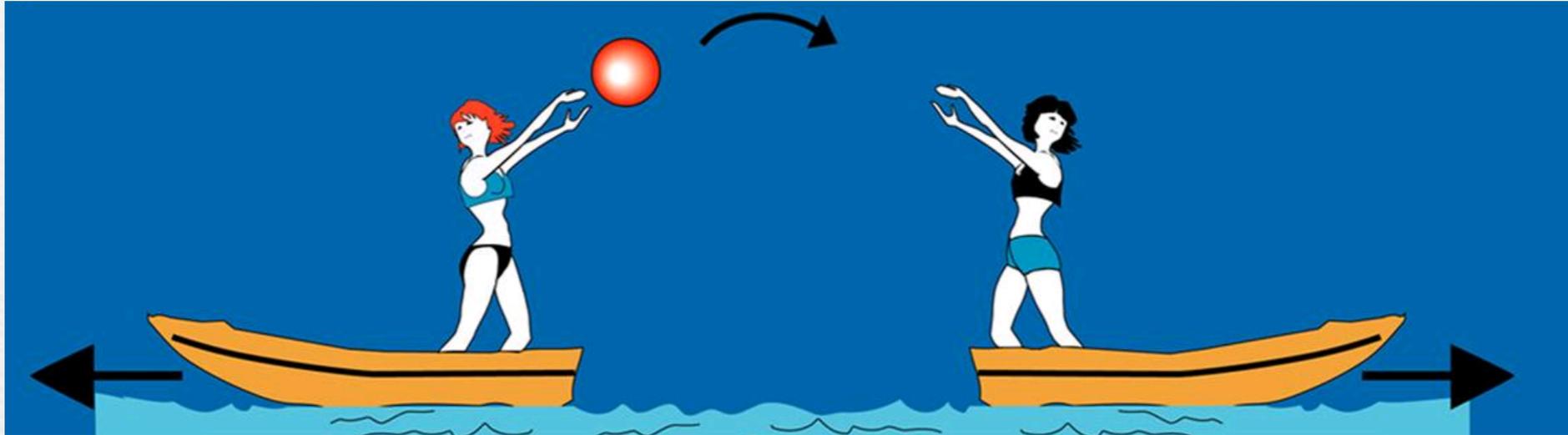


ニュートリノ



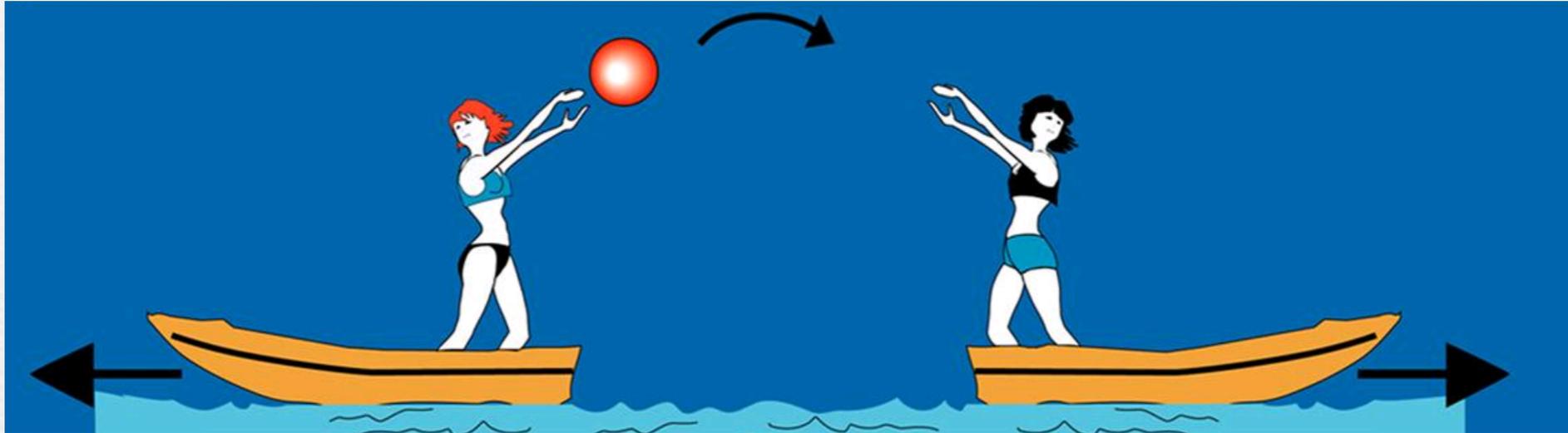
素粒子に働く力

力 = 力を伝える粒子の交換



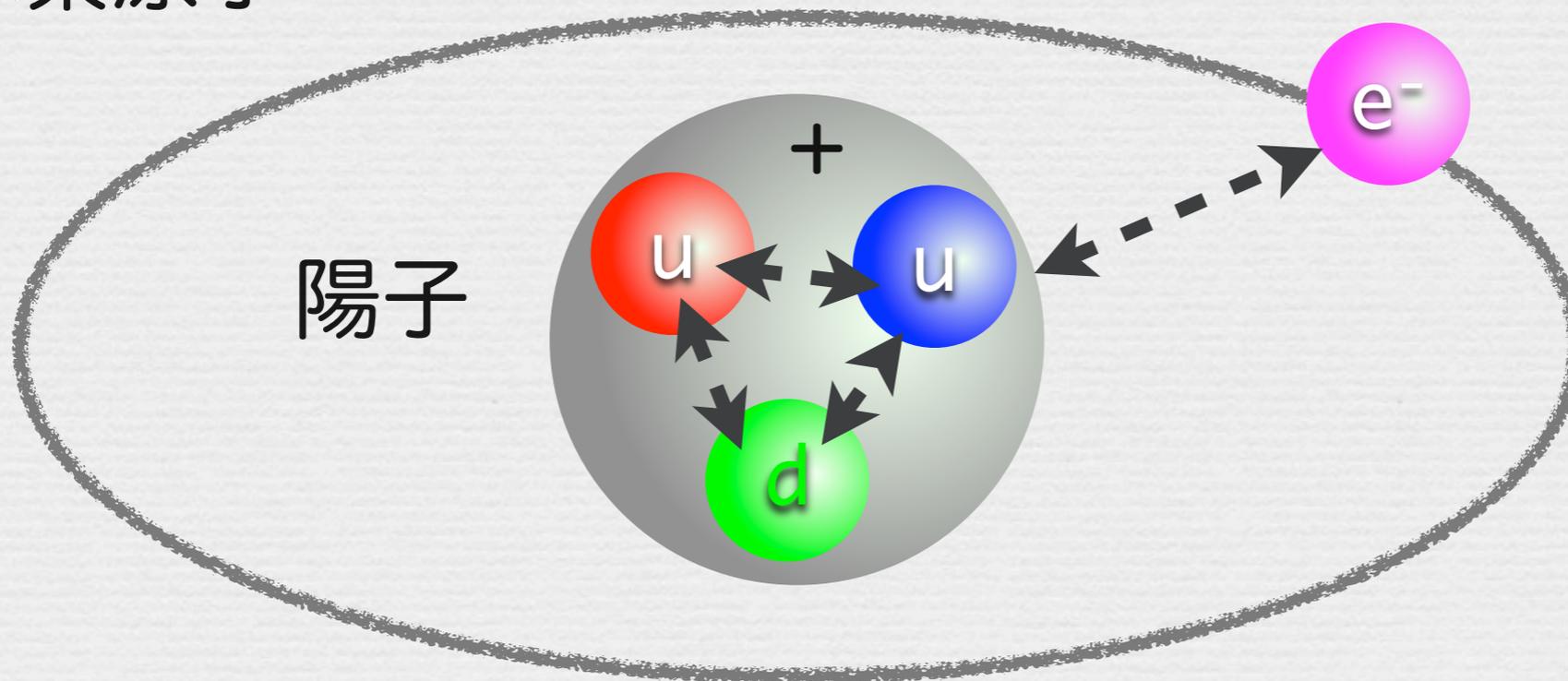
素粒子に働く力

力 = 力を伝える粒子の交換



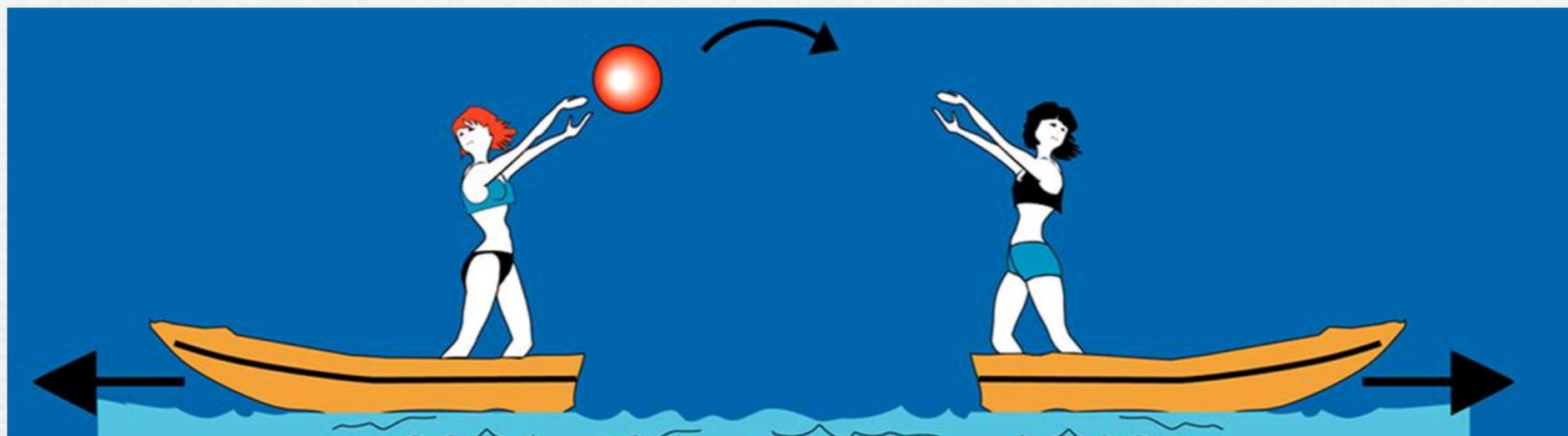
水素原子

電子



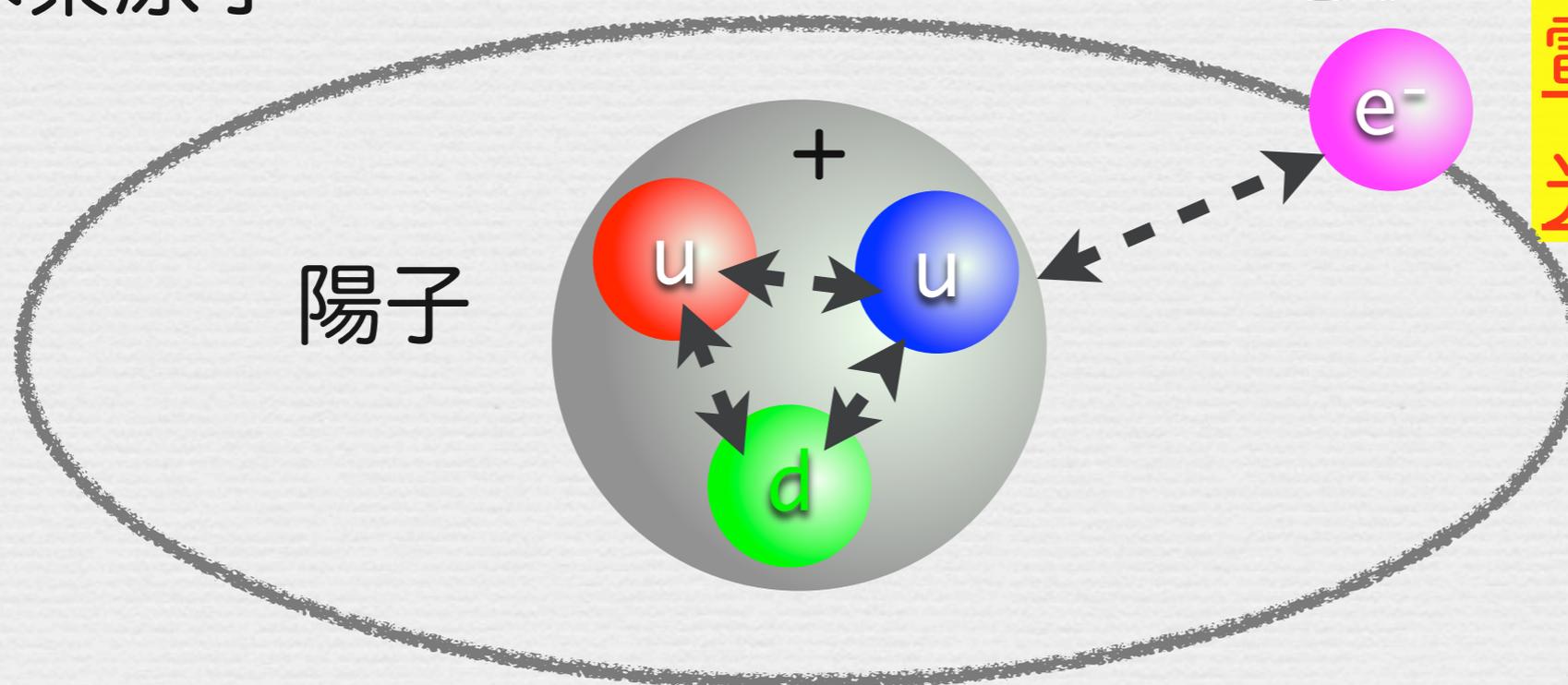
素粒子に働く力

力 = 力を伝える粒子の交換



水素原子

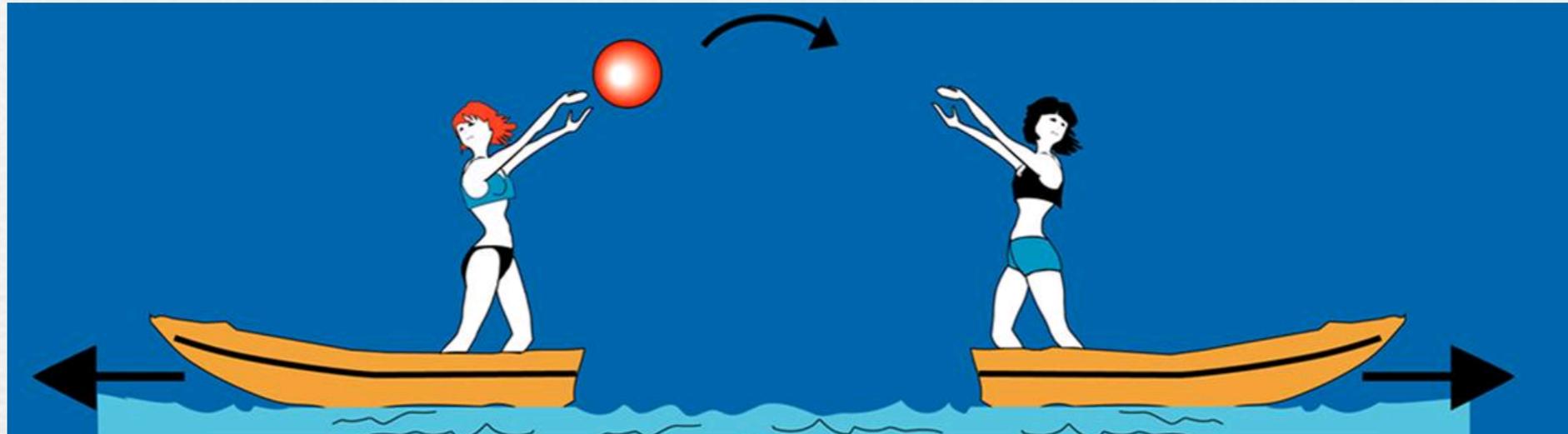
電子



電磁気力
電荷を感じて
光子を交換

素粒子に働く力

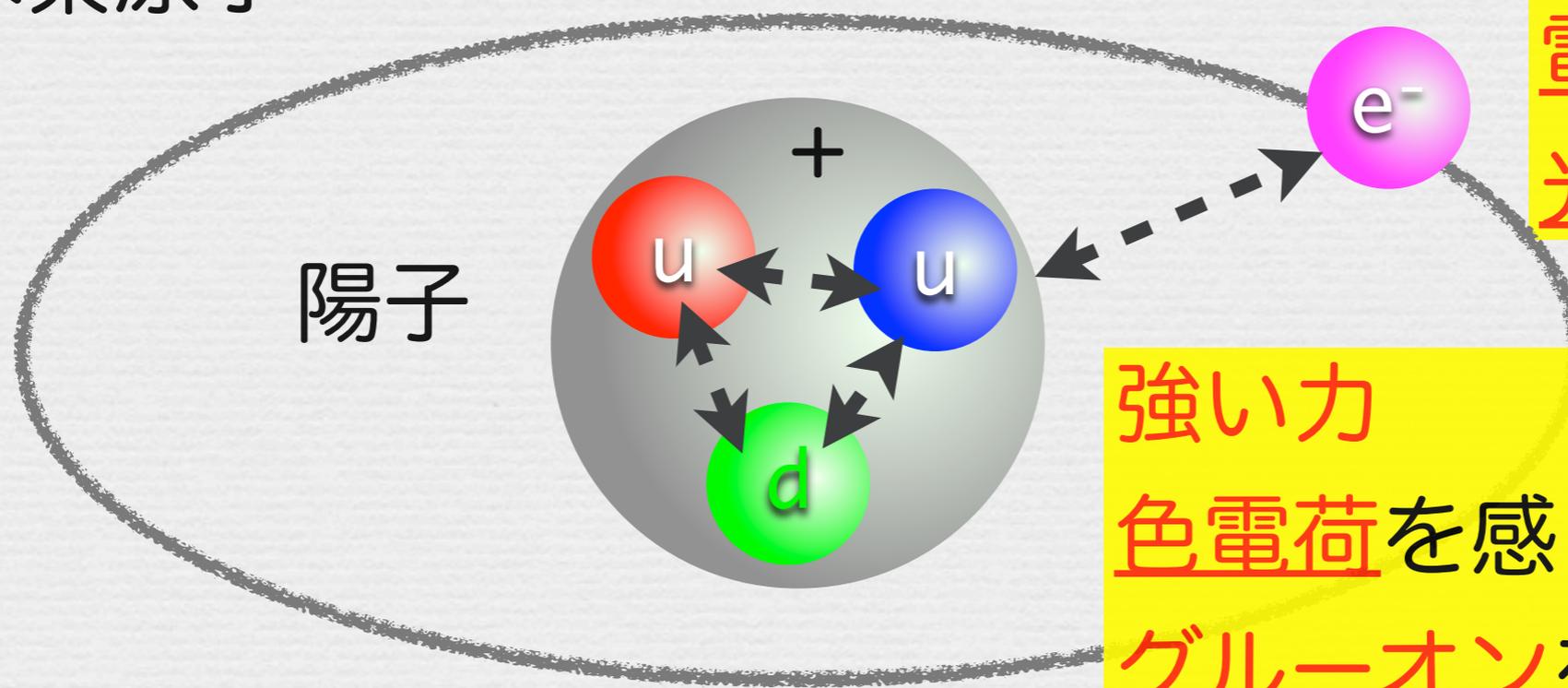
力=力を伝える粒子の交換



水素原子

電子

電磁気力
電荷を感じて
光子を交換

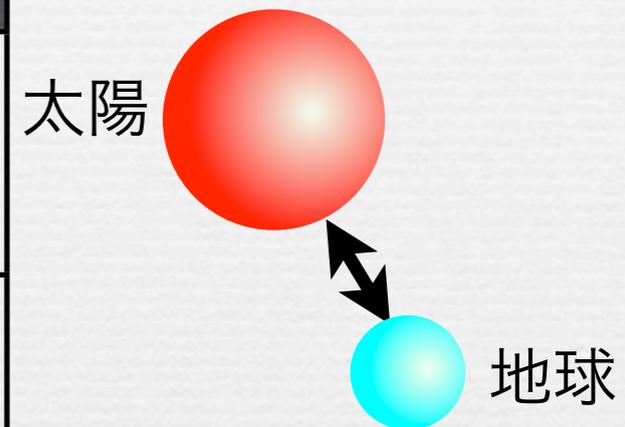


強い力
色電荷を感じて
グルーオンを交換

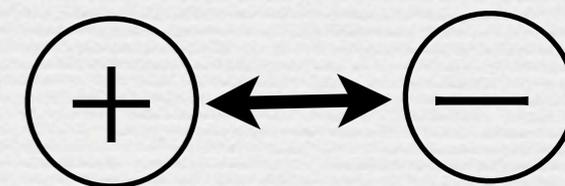
4種のカ

種類	強さ	到達距離	ポテンシャル	電荷	伝える粒子
重力	10^{-38}	無限	$\frac{1}{r}$	質量	グラビトン
電磁気力	$1/137$	無限	$\frac{1}{r}$	電荷 (+/-)	光子 (フォトン)
強い力	~ 0.1	10^{-15}m	$k_1 \frac{1}{r} + k_2 r$	色電荷 (3種)	グルーオン
弱い力	10^{-5}	10^{-18}m	$\frac{\exp\left(\frac{-M_W \cdot c}{\hbar} r\right)}{r}$	弱電荷	W^\pm 、Z粒子

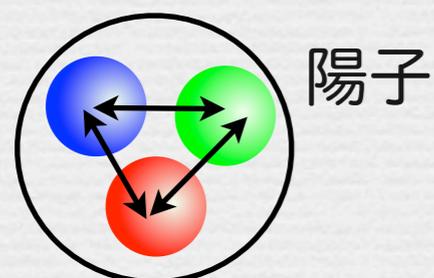
重力



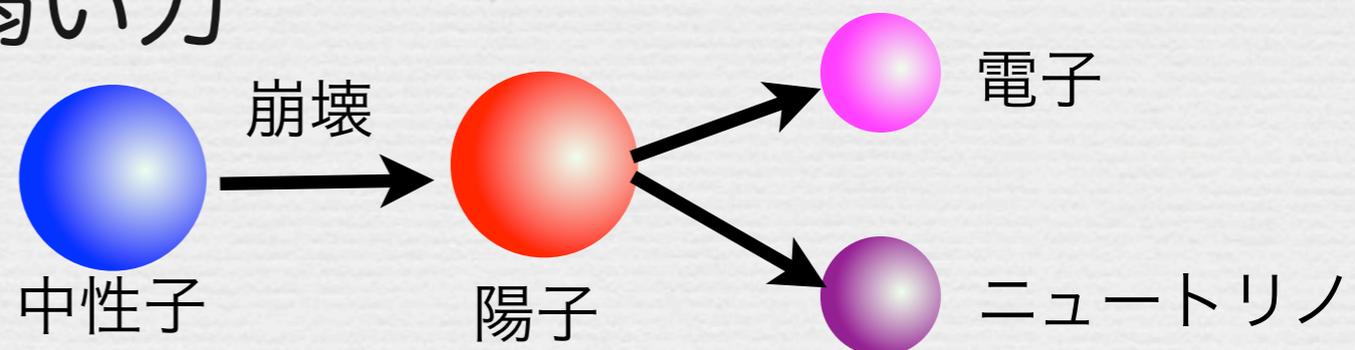
電磁気力



強い力



弱い力



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： $-e$

電磁気力：光子

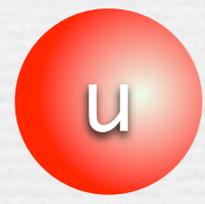
アップ(u)

ダウン(d)

電子ニュートリノ

電子

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



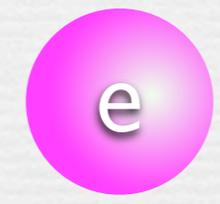
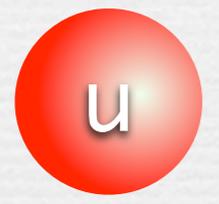
強い力：グルーオン



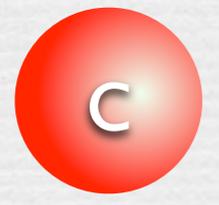
弱い力：Z、W粒子



第1世代



第2世代



アップ(u)

ダウン(d)

電子ニュートリノ

電子

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

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

第1世代

アップ(u)

電荷： $+2/3e$



ダウン(d)

電荷： $-1/3e$



電子ニュートリノ

電荷： 0



電子

電荷： $-e$




第2世代

チャーム(c)

電荷： $+2/3e$



ストレンジ(s)

電荷： $-1/3e$



ミューニュートリノ

電荷： 0



ミュー粒子

電荷： $-e$



強い力：グルーオン



第3世代

トップ(t)

電荷： $+2/3e$



ボトム(b)

電荷： $-1/3e$



タウニュートリノ

電荷： 0



タウ粒子

電荷： $-e$



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

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)

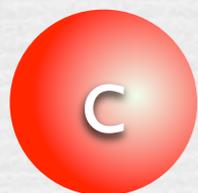
ストレンジ(s)

ミューニュートリノ

ミュー粒子

強い力：グルーオン

第2世代



トップ(t)

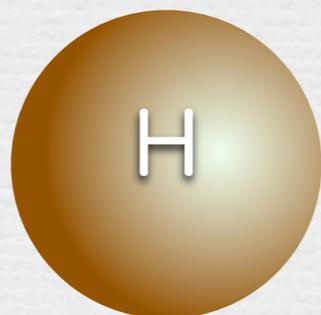
ボトム(b)

タウニュートリノ

タウ粒子

弱い力：Z、W粒子

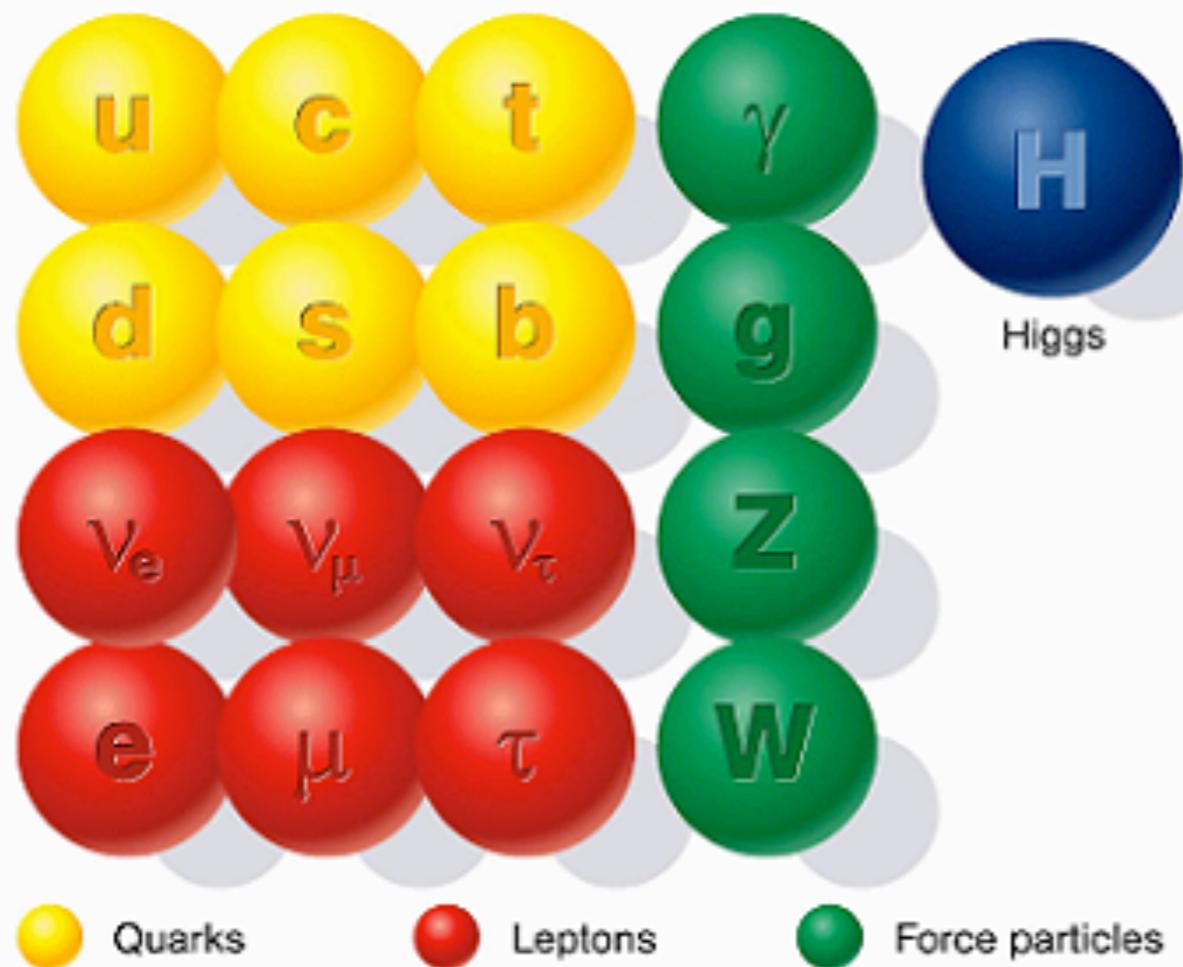
第3世代



ヒッグス粒子：素粒子に質量を与える

標準模型の歴史

Standard particles



1897年：電子

1900年： γ 線

1932年：陽電子

1937年： μ 粒子

1956年：ニュートリノ

1962年： ν_e と ν_μ 別物

1969年：u,d,sクォーク

1974年：cクォーク ←11月革命

1975年： τ 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： τ ニュートリノ

2012年：ヒッグス粒子

”らしき”新粒子

⋮
↓
標準模型

ヒッグス粒子とは？

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)

$$F = G \frac{m_1 m_2}{r^2}$$

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)

← ヒッグス粒子と関連があるのはこれ

$$F = ma$$

動かしにくさ、止めにくさ。

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)

$$E = \sqrt{m^2c^4 + p^2c^2} = \frac{mc^2}{\sqrt{1 - \left(\frac{v}{c}\right)^2}}$$

(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
(エネルギー) = (運動量)

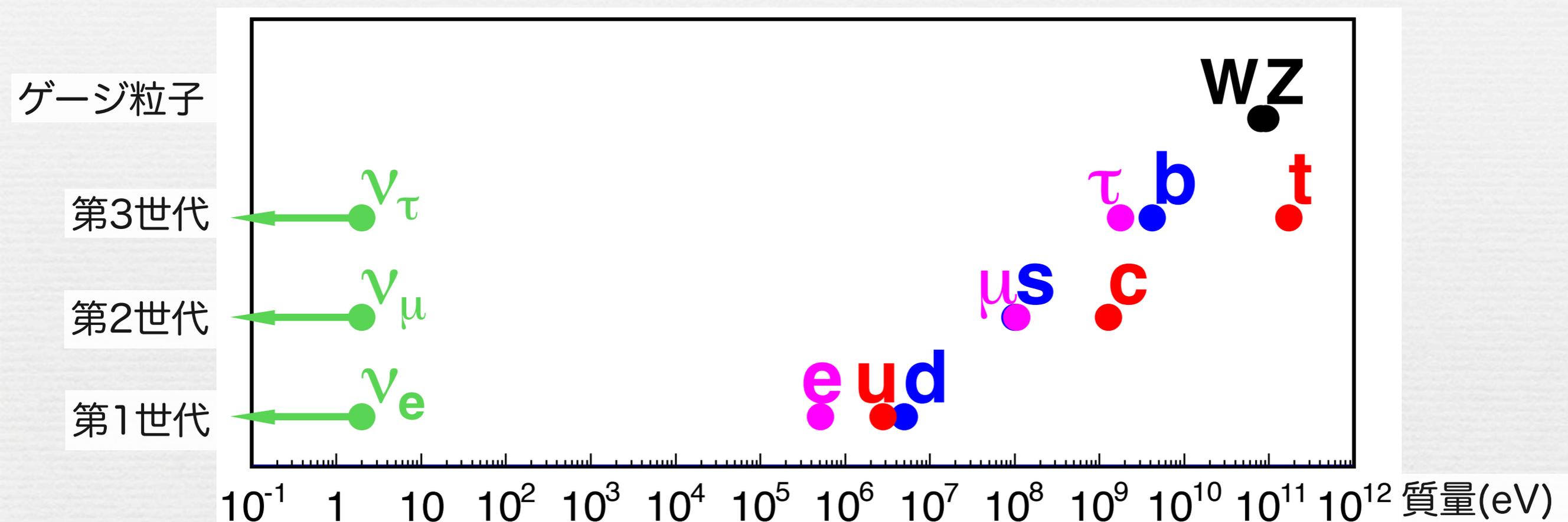
質量を持つ粒子 ... 光速では進めない。静止できる

慣性質量 = 静止エネルギー

素粒子の質量起源

電荷のように質量を与えて理論を作れないか？

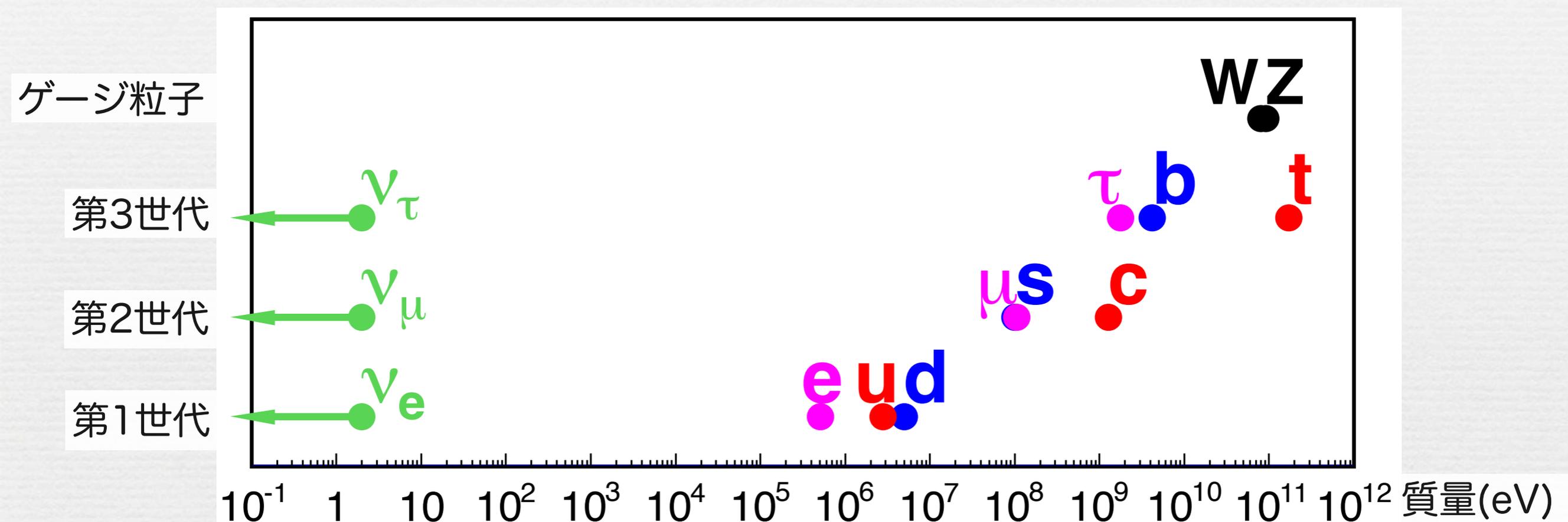
現在の素粒子の「標準模型」では、**質量=0**であるべき



素粒子の質量起源

電荷のように質量を与えて理論を作れないか？

現在の素粒子の「標準模型」では、**質量=0**であるべき



1/1000mg



1000kg



素粒子の質量起源

電荷のように質量を与えて理論を作れないか？

現在の素粒子の「標準模型」では、**質量=0**であるべき
標準模型では、

ゲージ粒子

宇宙初期

素粒子は質量ゼロ、光速で動いていた。

宇宙が冷えて、

ヒッグスの場の相転移によって、

ヒッグス場との反応によって素粒子は質量を獲得した。

(光速よりも遅く動く)



1/1000mg

1000kg



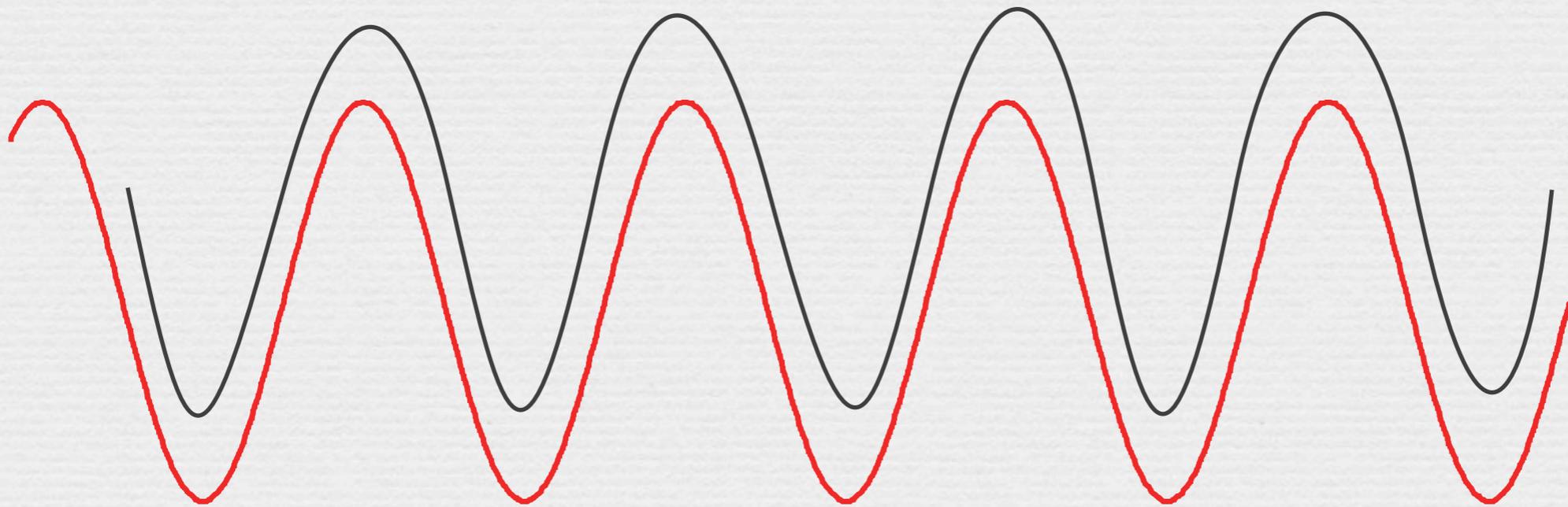
どう質量を与えるか？

十分なエネルギーがある時

障害物のない所では、、、光速で進む



障害物のあるところを粒子が通ると、、、遅くなる



ヒッグスの場による障害物

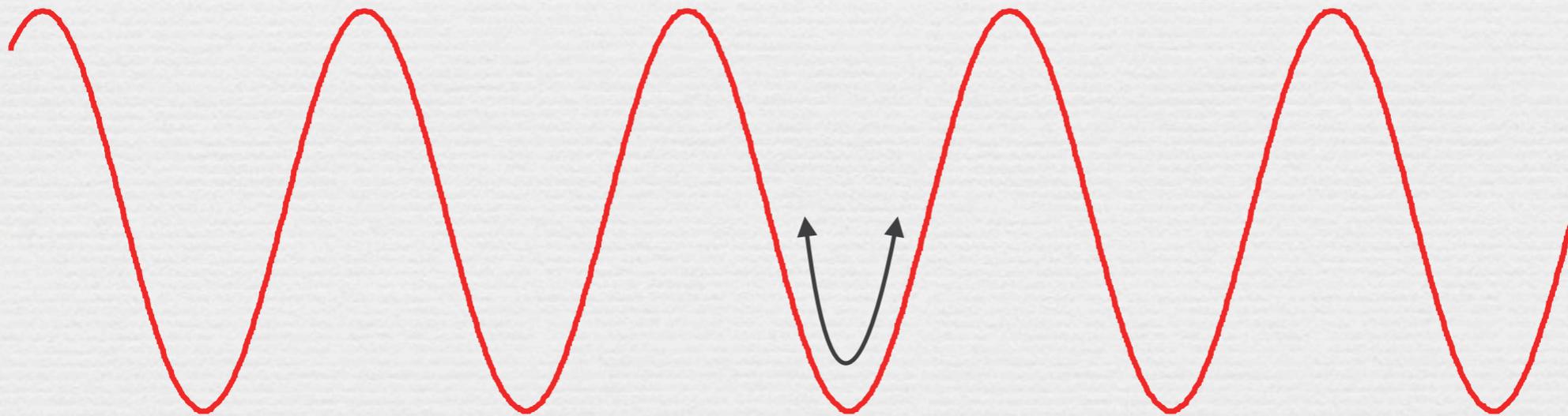
どう質量を与えるか？

エネルギーが小さい時

障害物のない所では、、、光速で進む



障害物のあるところを粒子が通ると、、、止まり、振動する



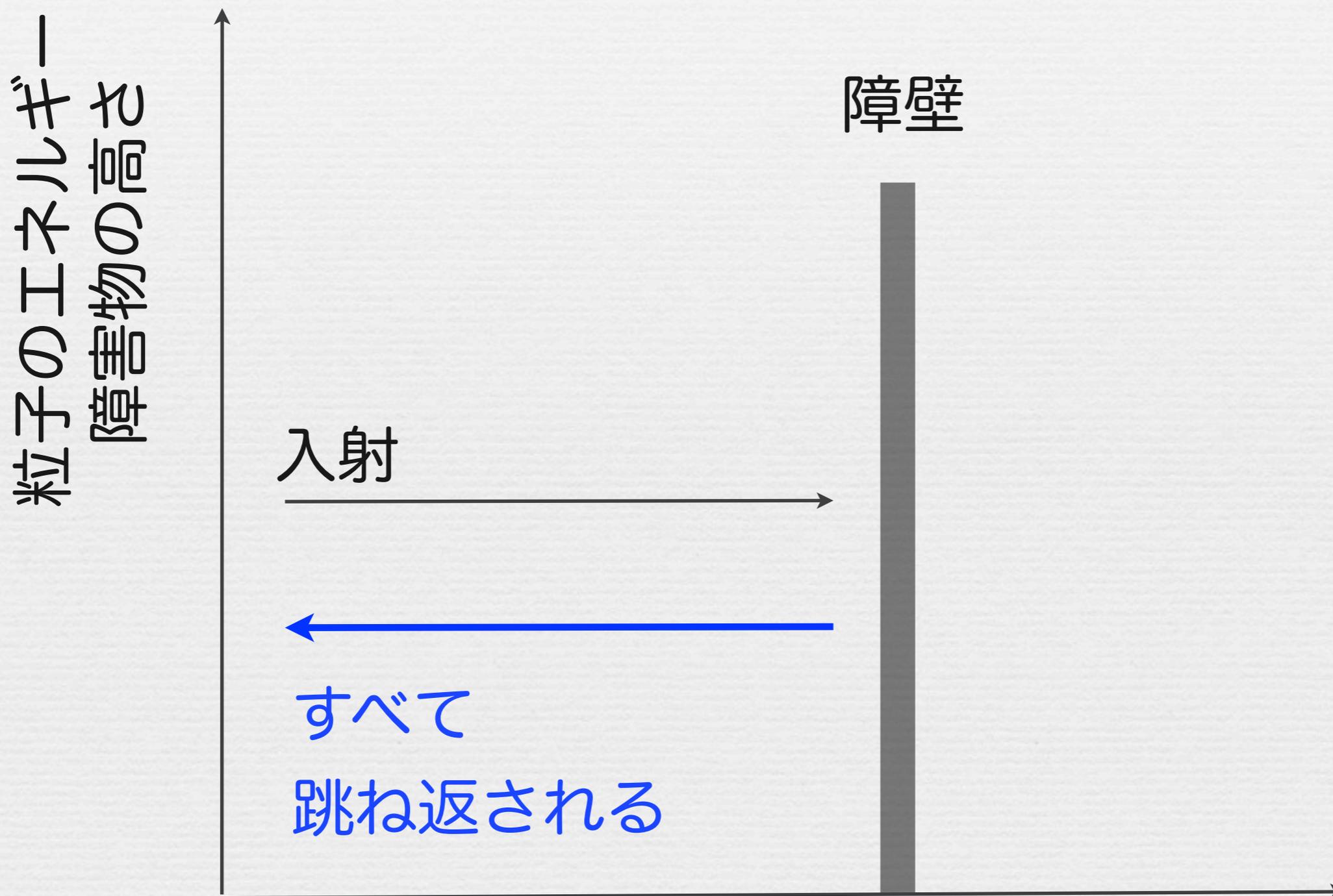
ヒッグスの場による障害物

エネルギーが振動に使われる

遠くからみると静止して見える = 静止エネルギー

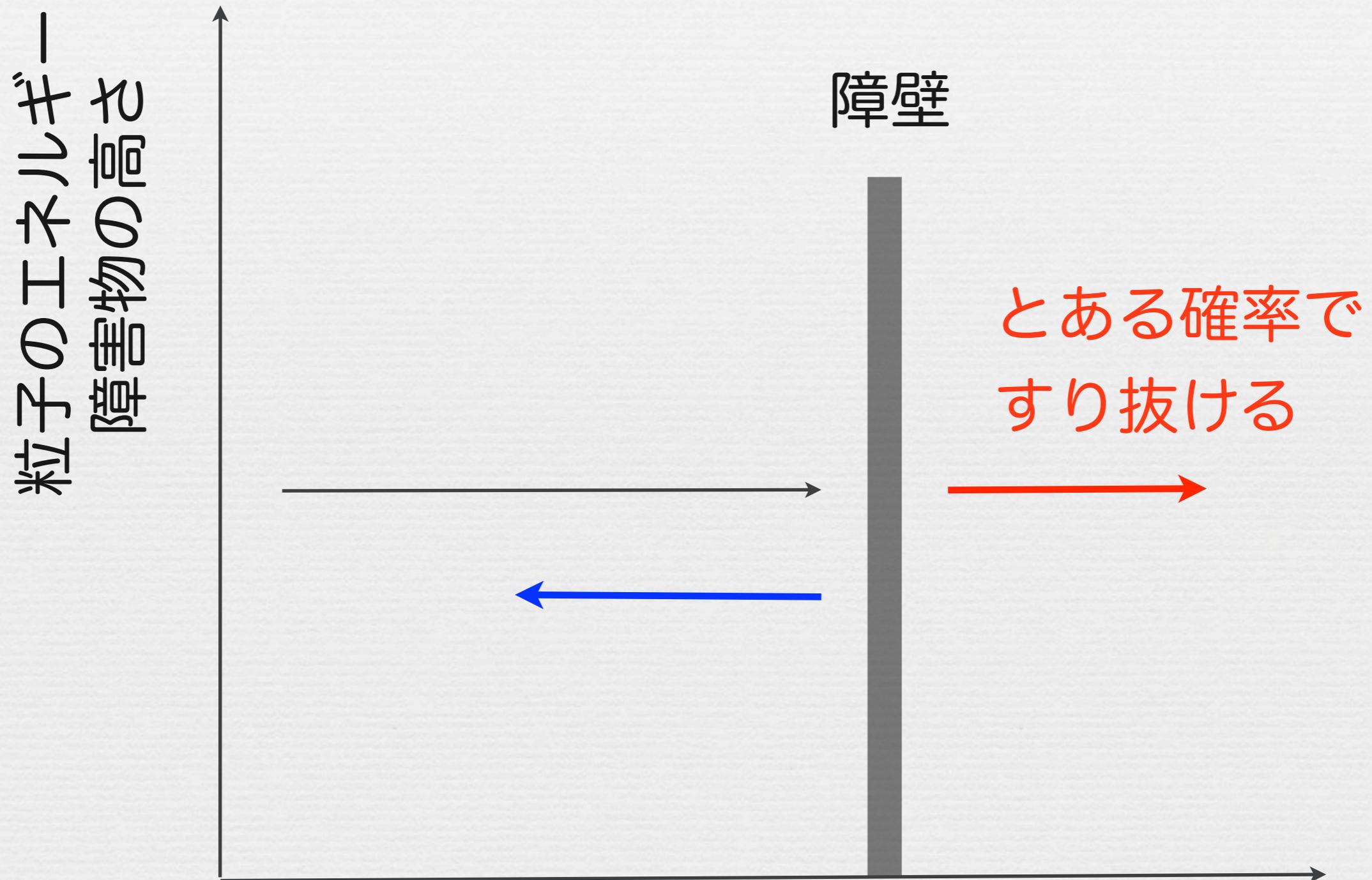
ミクロな世界の障害物

古典的な考え方では、



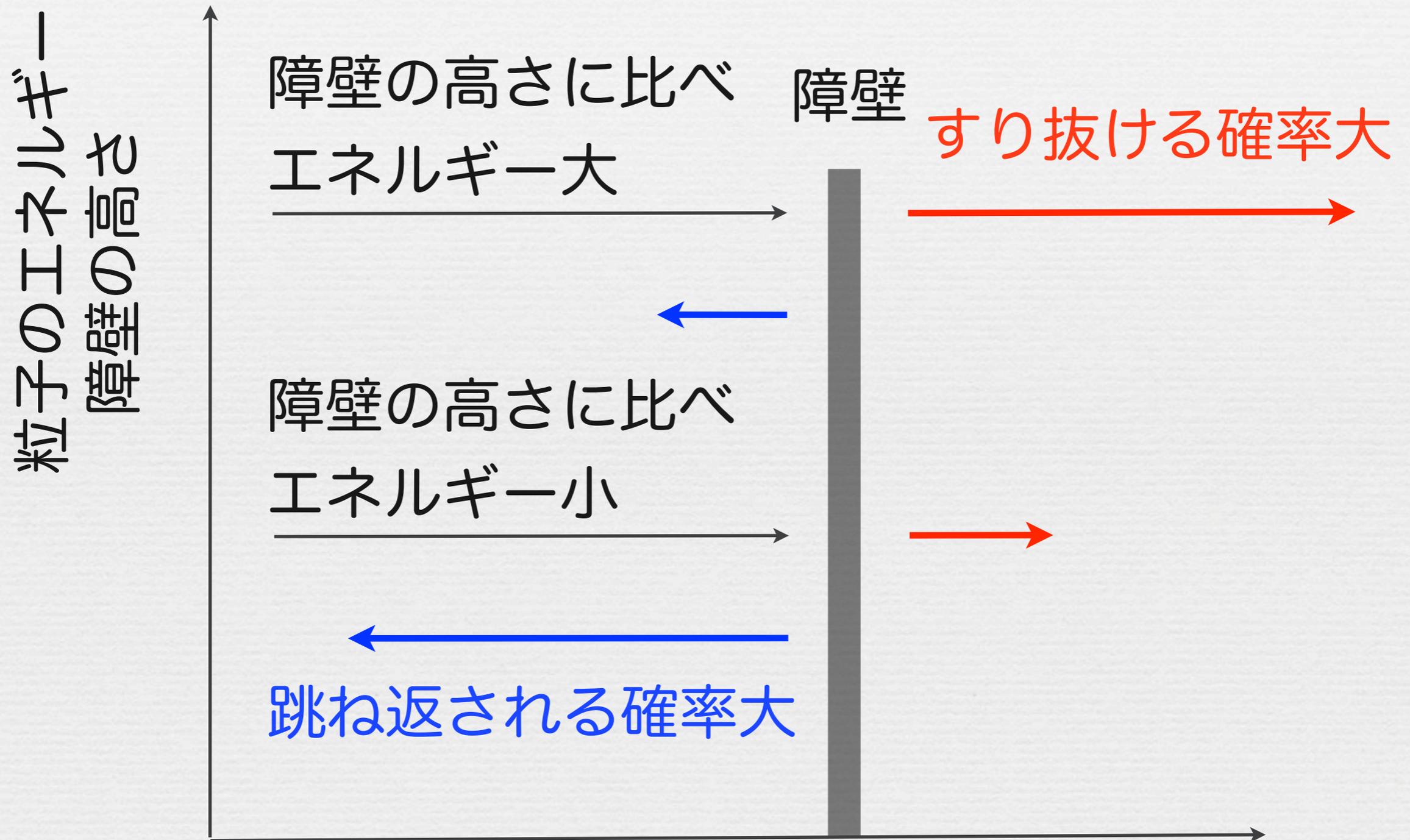
ミクロな世界の障害物

量子力学では (トンネル効果)



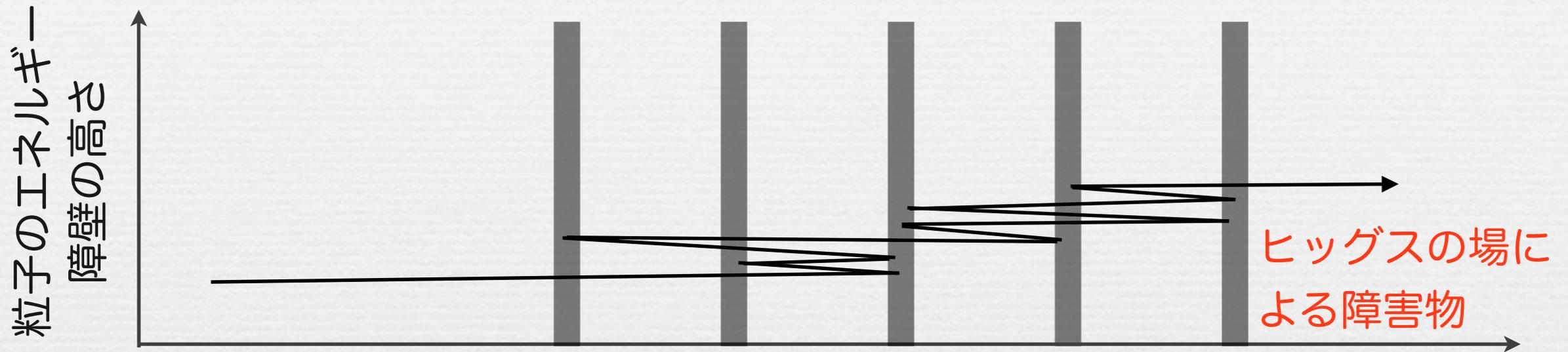
ミクロな世界の障害物

量子力学では (トンネル効果)

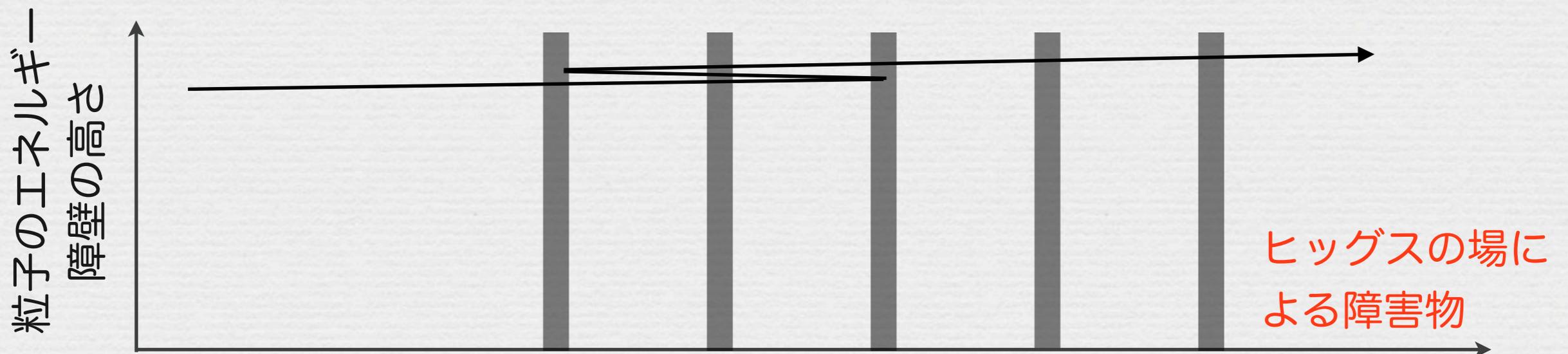


ミクロな世界の障害物

粒子のエネルギーに比べて障壁が高い：遅く進む



粒子のエネルギーに比べて障壁が低い：速く進む



障壁の高さ = (ヒッグス場の強さ) × (粒子の質量に比例する係数)

ヒッグス場の性質

重い粒子ほど、ヒッグス場による障壁が高い



ヒッグス場は素粒子の種類に応じて障壁の高さを変える

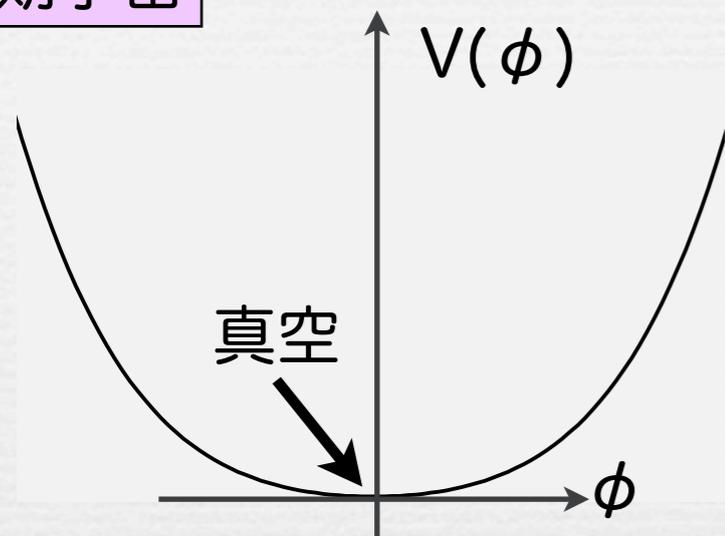
	クォーク		レプトン	
	電荷: $+2/3e$	電荷: $-1/3e$	電荷: 0	電荷: $-e$
軽い				
第1世代	アップ(u) 	ダウン(d) 	電子ニュートリノ 	電子 
第2世代	チャーム(c) 	ストレンジ(s) 	ミューニュートリノ 	ミュー粒子 
重い	トップ(t) 	ボトム(b) 	タウニュートリノ 	タウ粒子 

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
ヒッグス場が粒子を区別する

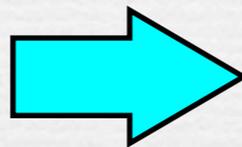
ヒッグス機構

ヒッグスポテンシャル $V(\phi) = \mu^2 |\phi|^2 + \lambda |\phi|^4 \quad \lambda > 0$

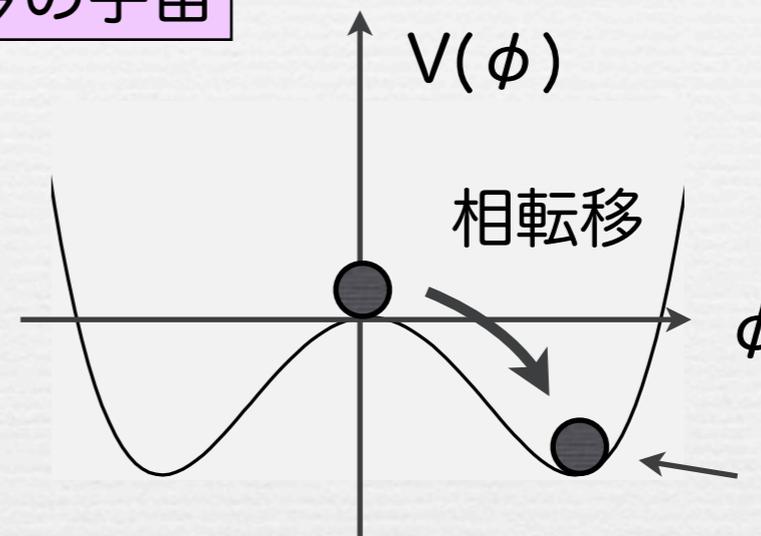
初期宇宙



宇宙が
冷える



今の宇宙

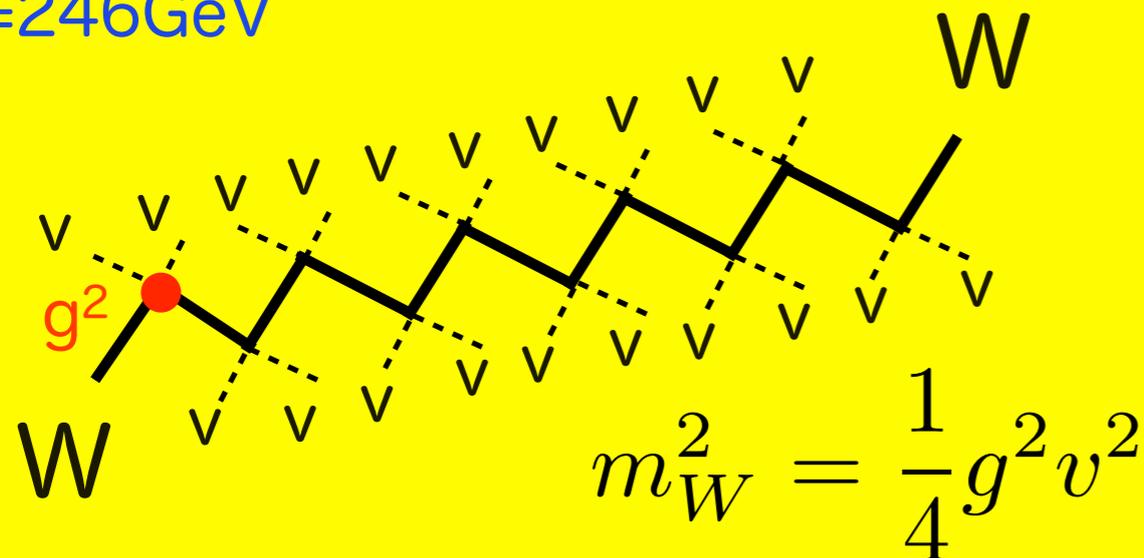


有限の真空
真空期待値
 $v=246\text{GeV}$

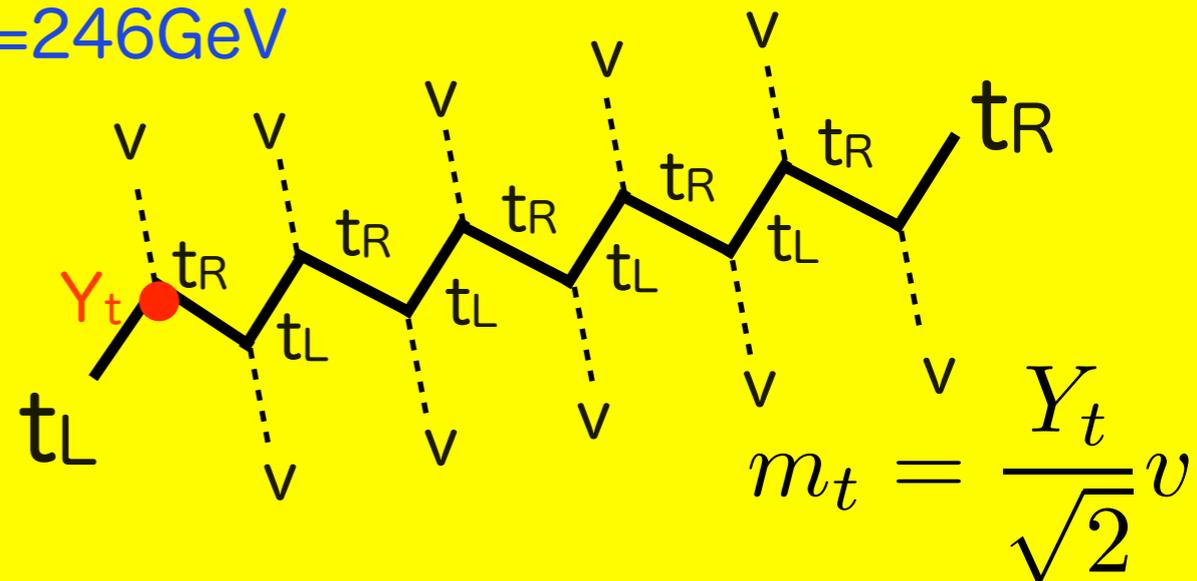
ゲージ粒子の質量(ゲージ結合)

フェルミオンの質量(湯川結合)

$v=246\text{GeV}$



$v=246\text{GeV}$



質量は、ヒッグス場との結合定数に比例する

ヒッグスを見るには？

ヒッグス場は、空間にうまっています、
ヒッグス場そのものは見る事ができません

ヒッグス場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**

加速器でヒッグス場をたたけば見える
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**

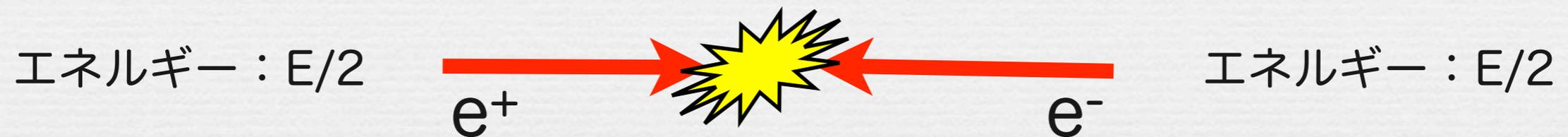


ヒッグス粒子を作る 加速器

素粒子実験の考え方

未知粒子であるヒッグス粒子を作り出し、それを観測する

未知粒子 = これまでの実験では作り出せない → 重い



$$E = Mc^2$$

質量 M の未知なる素粒子を生成する能力

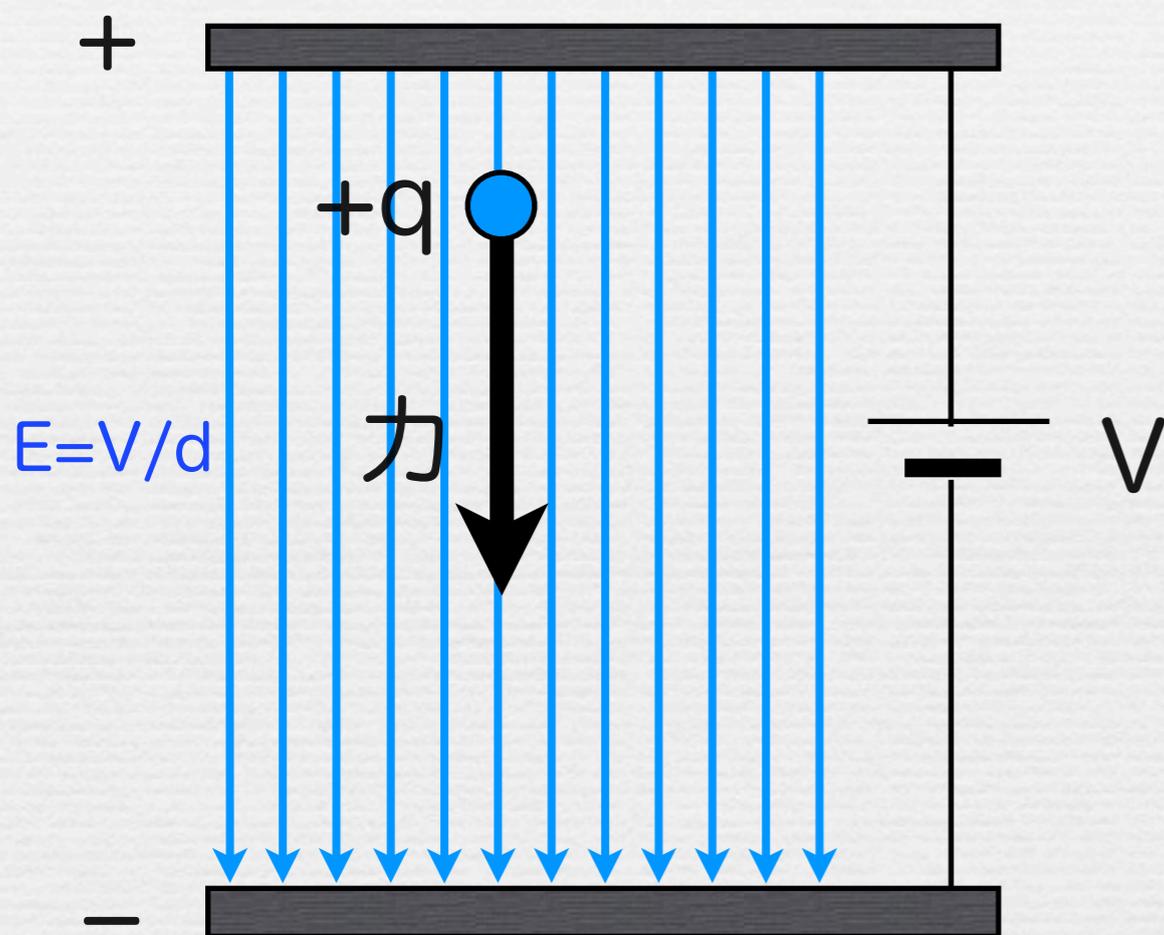
加速した粒子を衝突させる

高エネルギー！

粒子を加速する

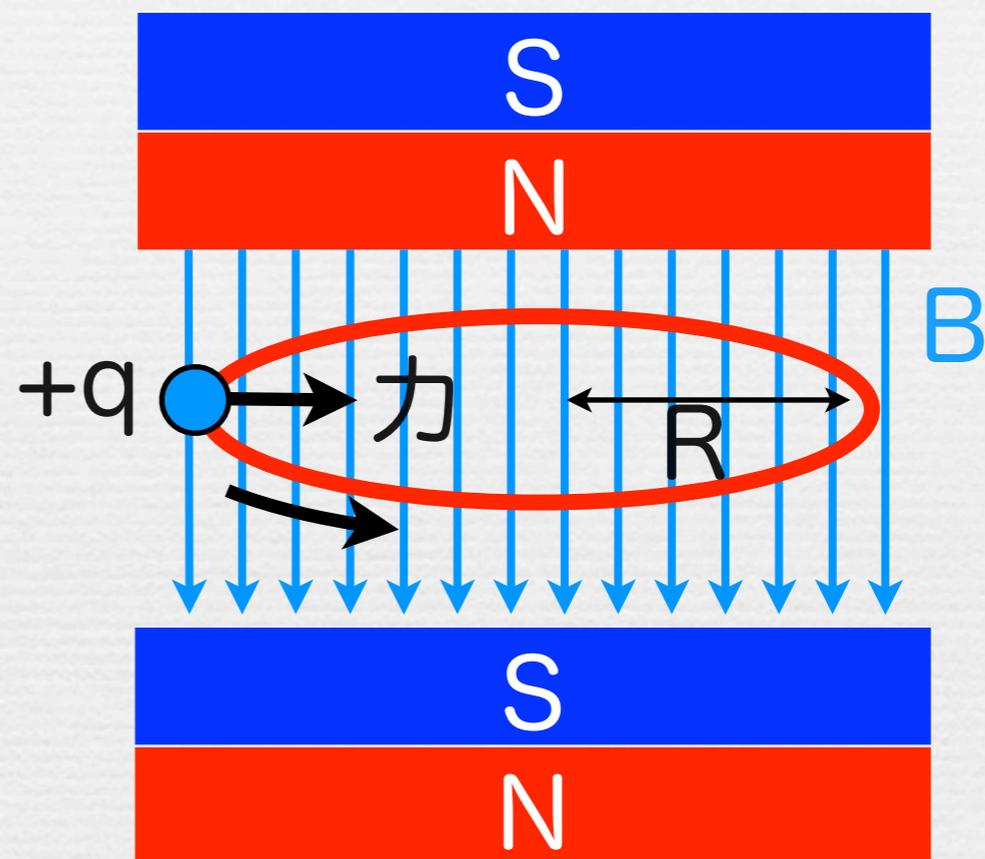
電荷を持った粒子を電場や磁場の中で運動させる

$$F = q\mathbf{E} + q\mathbf{v} \times \mathbf{B} \quad \text{ローレンツ力}$$



電場が大きいと
荷電粒子の加速大

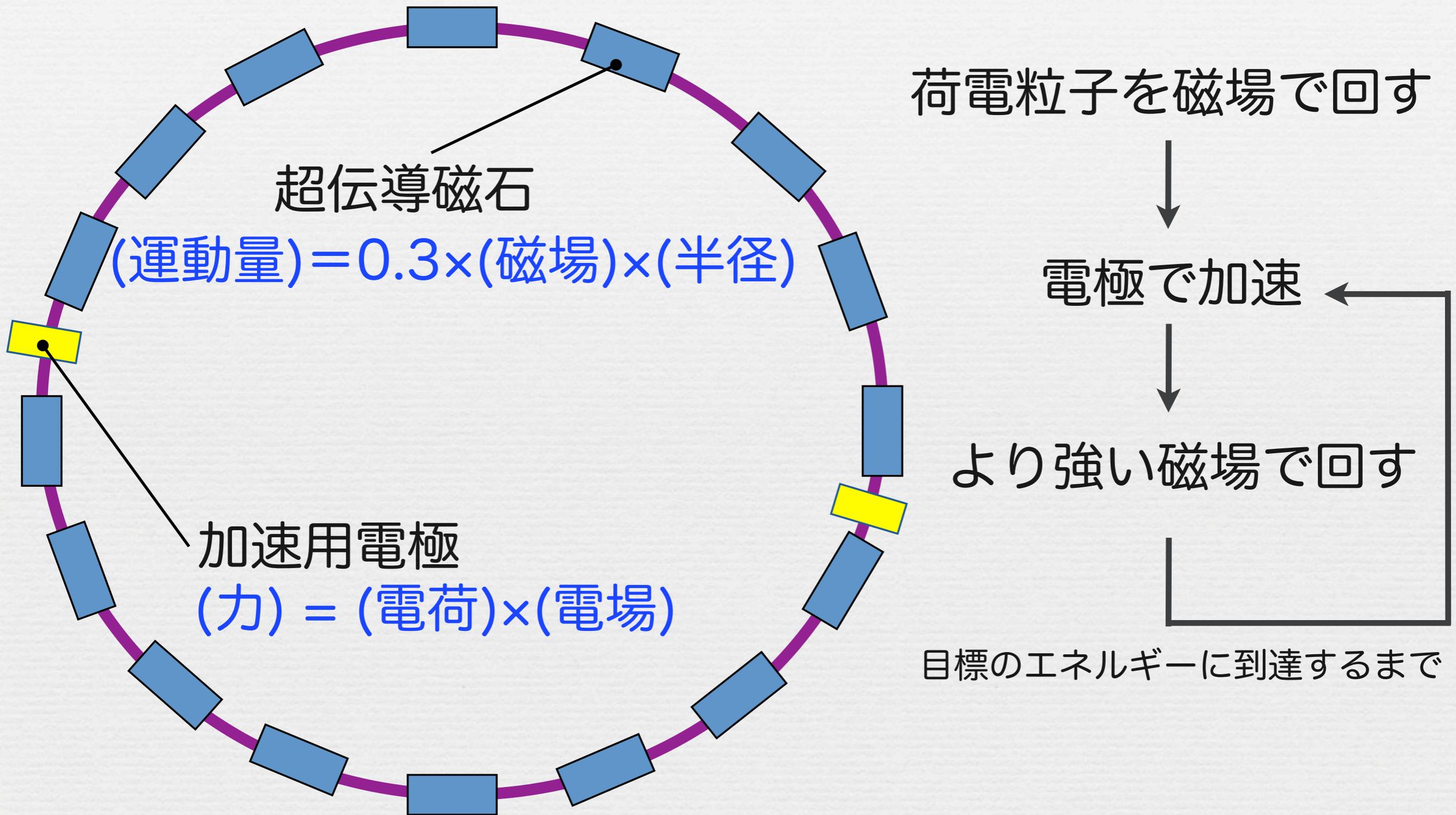
$$F = qE$$



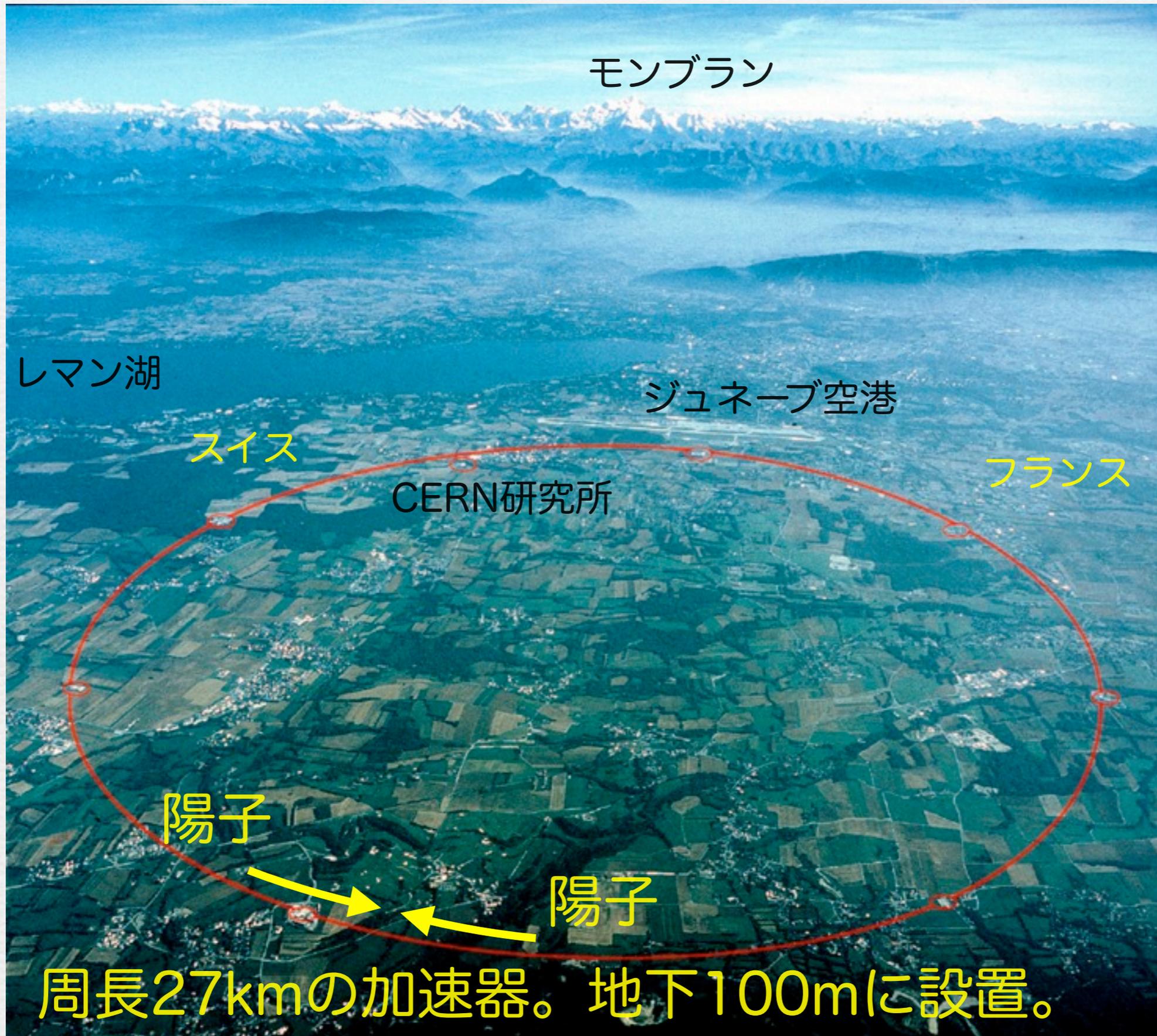
磁場
回転半径を大きくして
より加速した荷電粒子を回す

$$p = 0.3BR$$

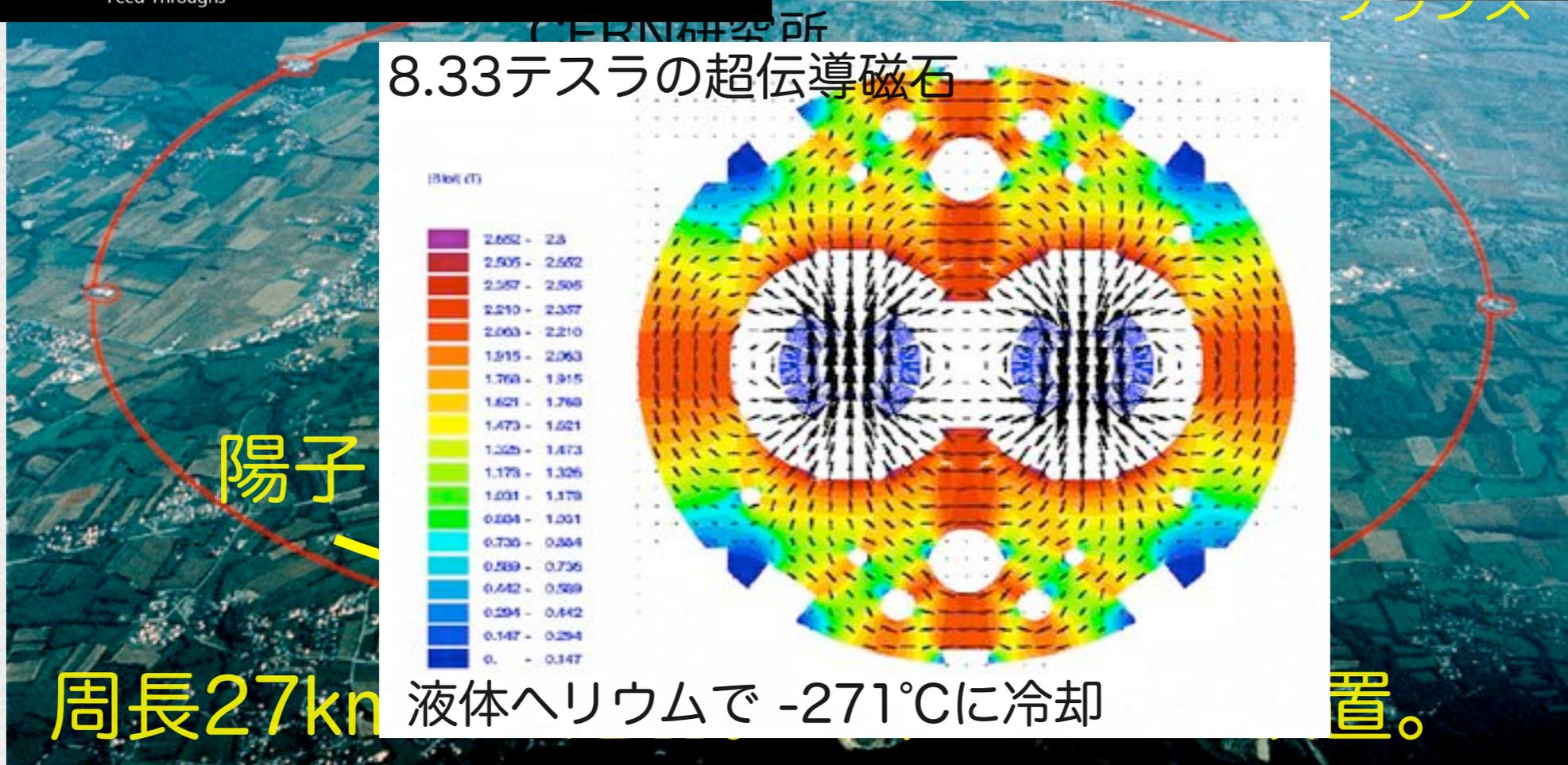
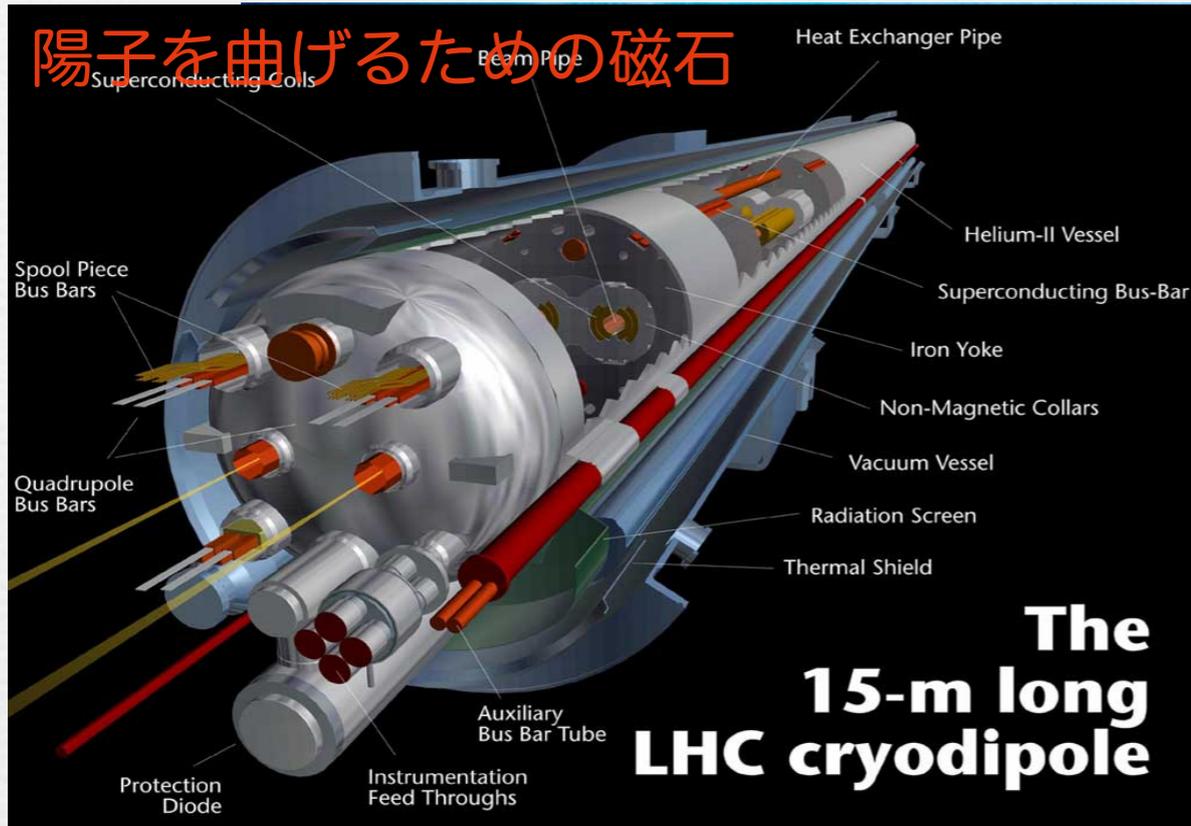
加速器の原理



最先端加速器 Large Hadron Collider



最先端加速器 Large Hadron Collider



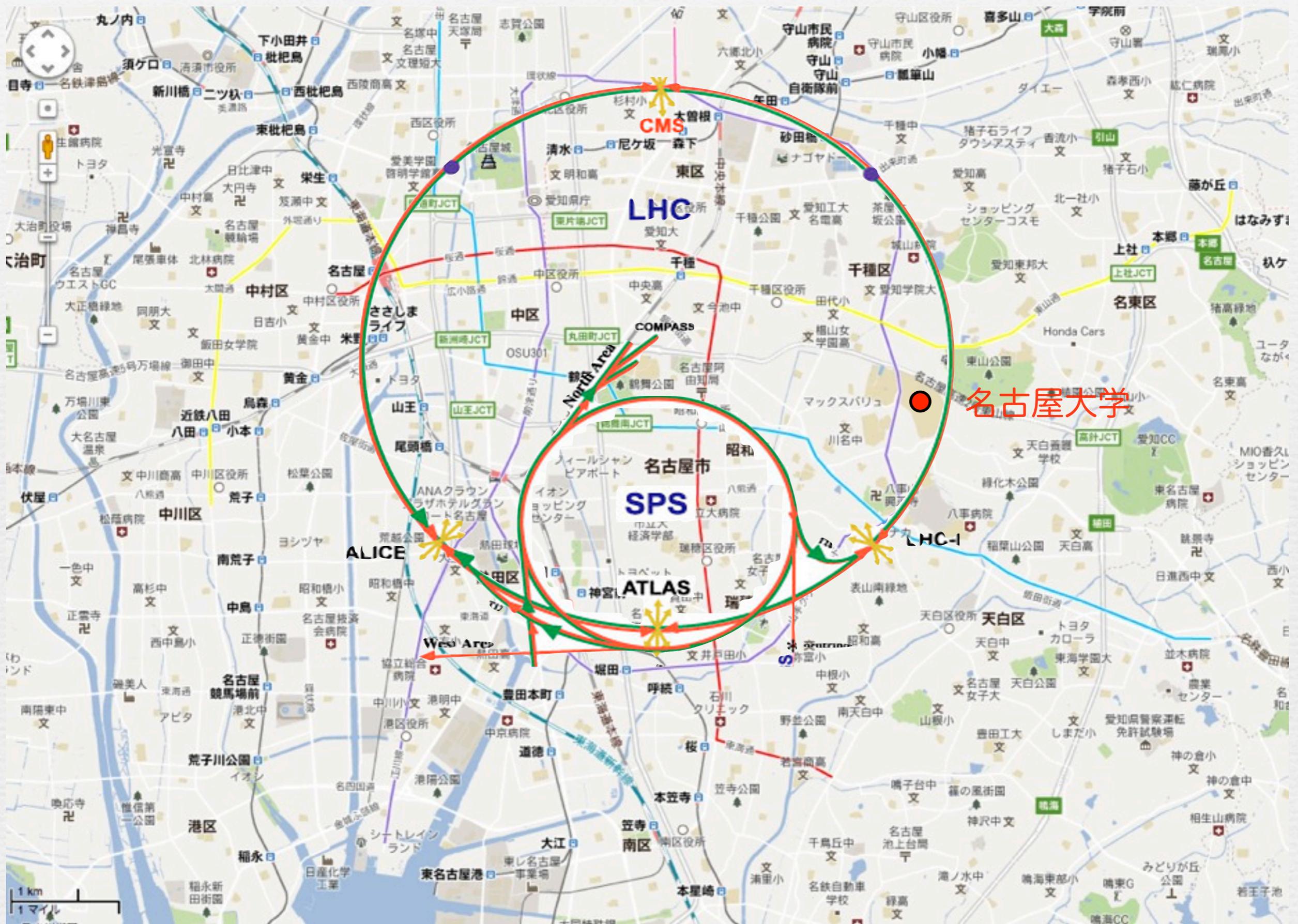
LHC加速器の大きさ



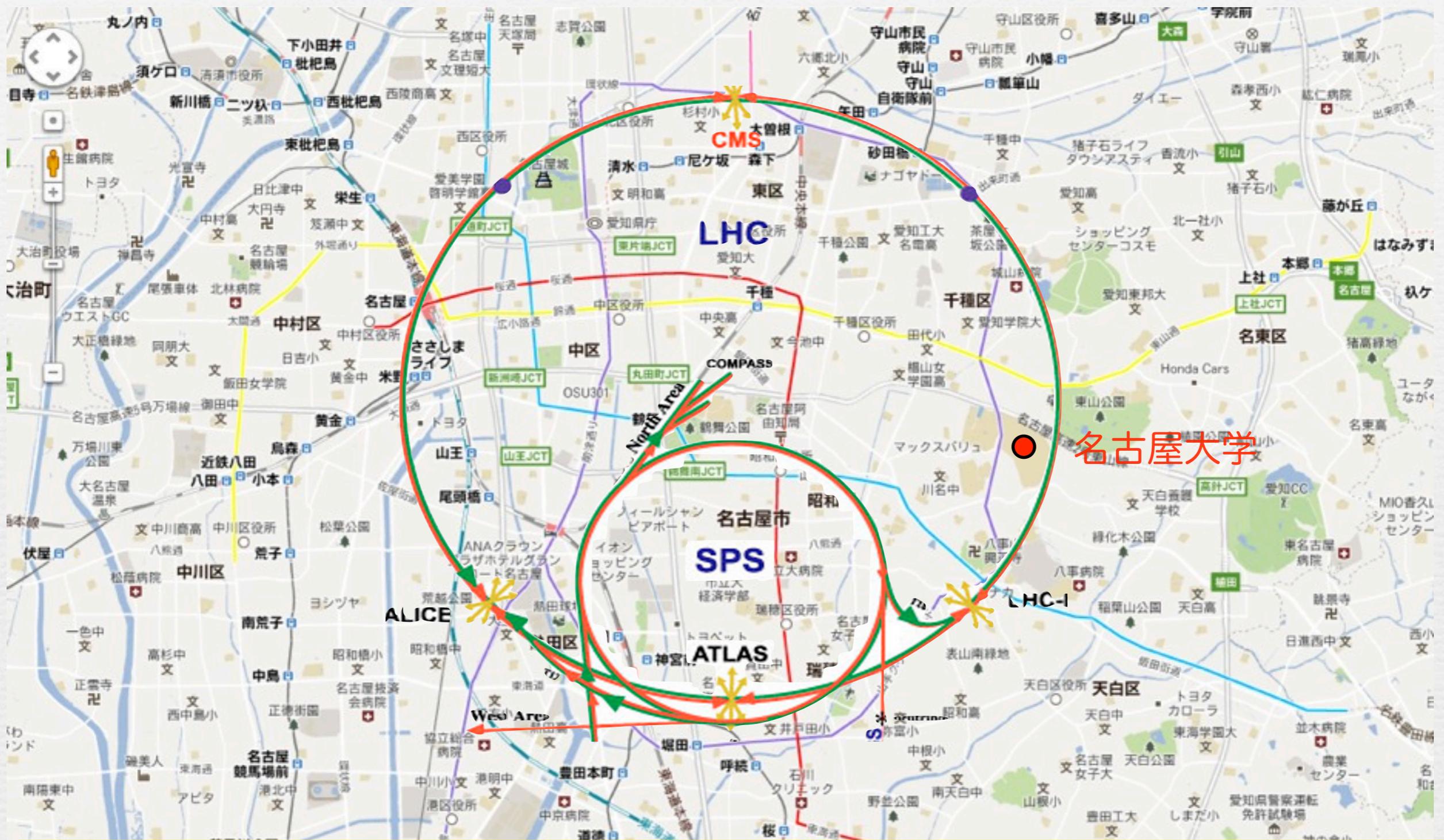
LHC加速器の大きさ



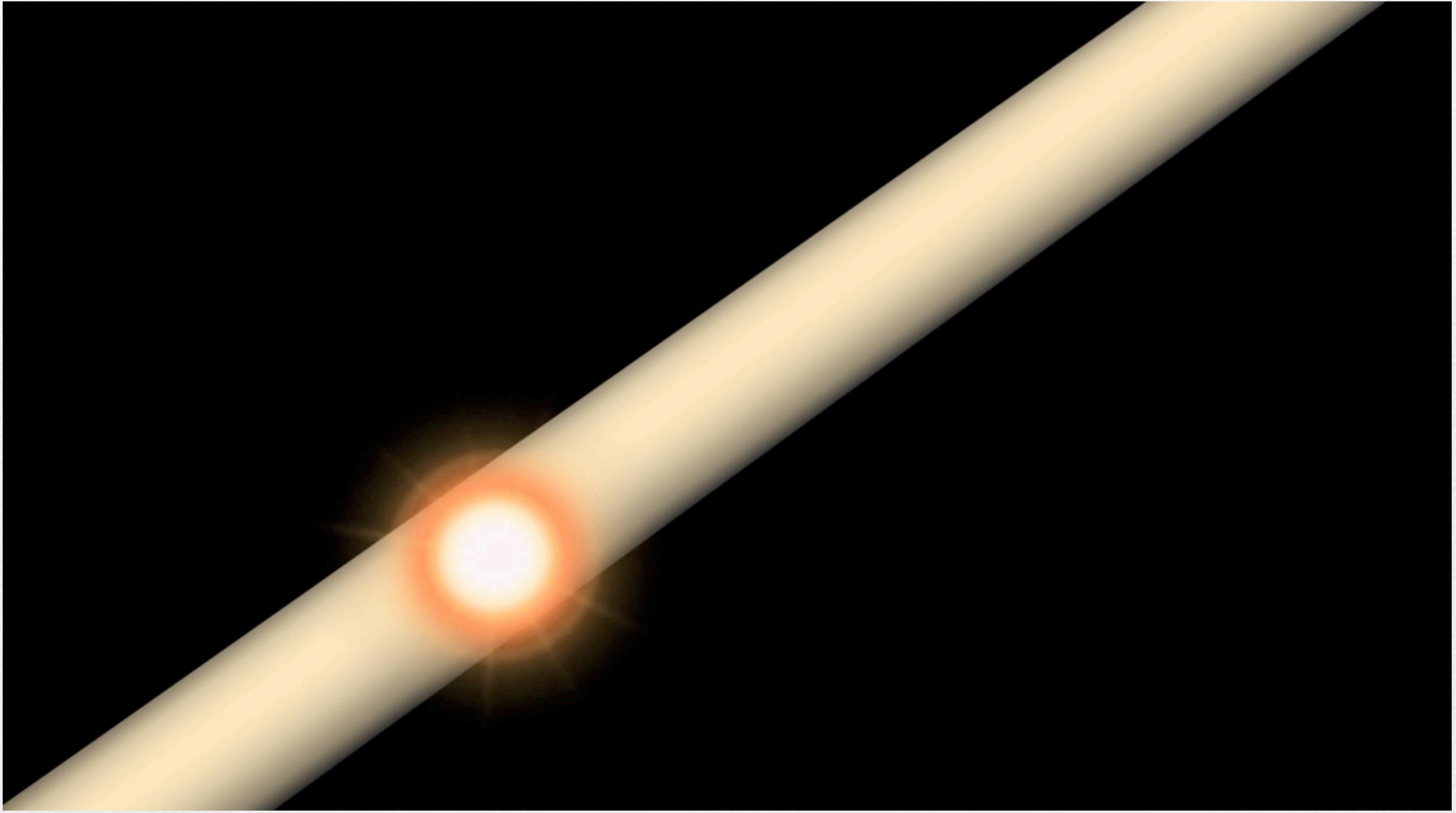
LHC加速器の大きさ



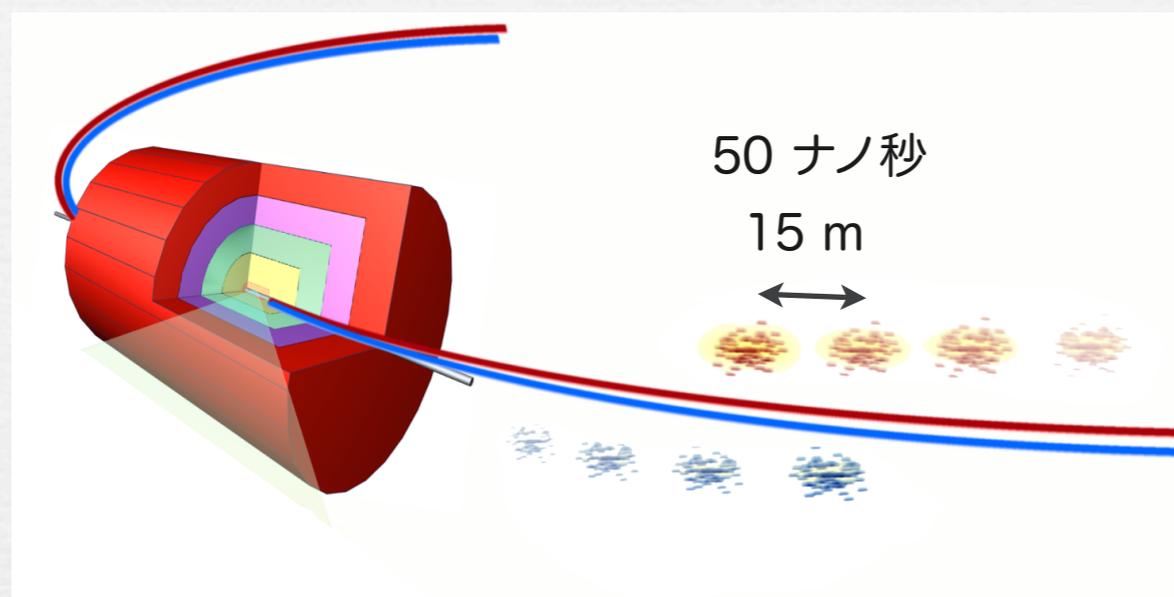
LHC加速器の大きさ



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



LHC加速器の性能



加速粒子	陽子×陽子
ビーム塊あたりの陽子数	千億 個
陽子ビーム塊の数	1380
ビーム塊の間隔	15メートル
衝突点でのビーム半径	~0.020 mm
エネルギー	4TeV+4TeV

○ 4TeVに加速した陽子の速度

光の速度の99.9999997%の速度 **光速 - 30km/時**

○ 4TeVに加速した陽子のエネルギー

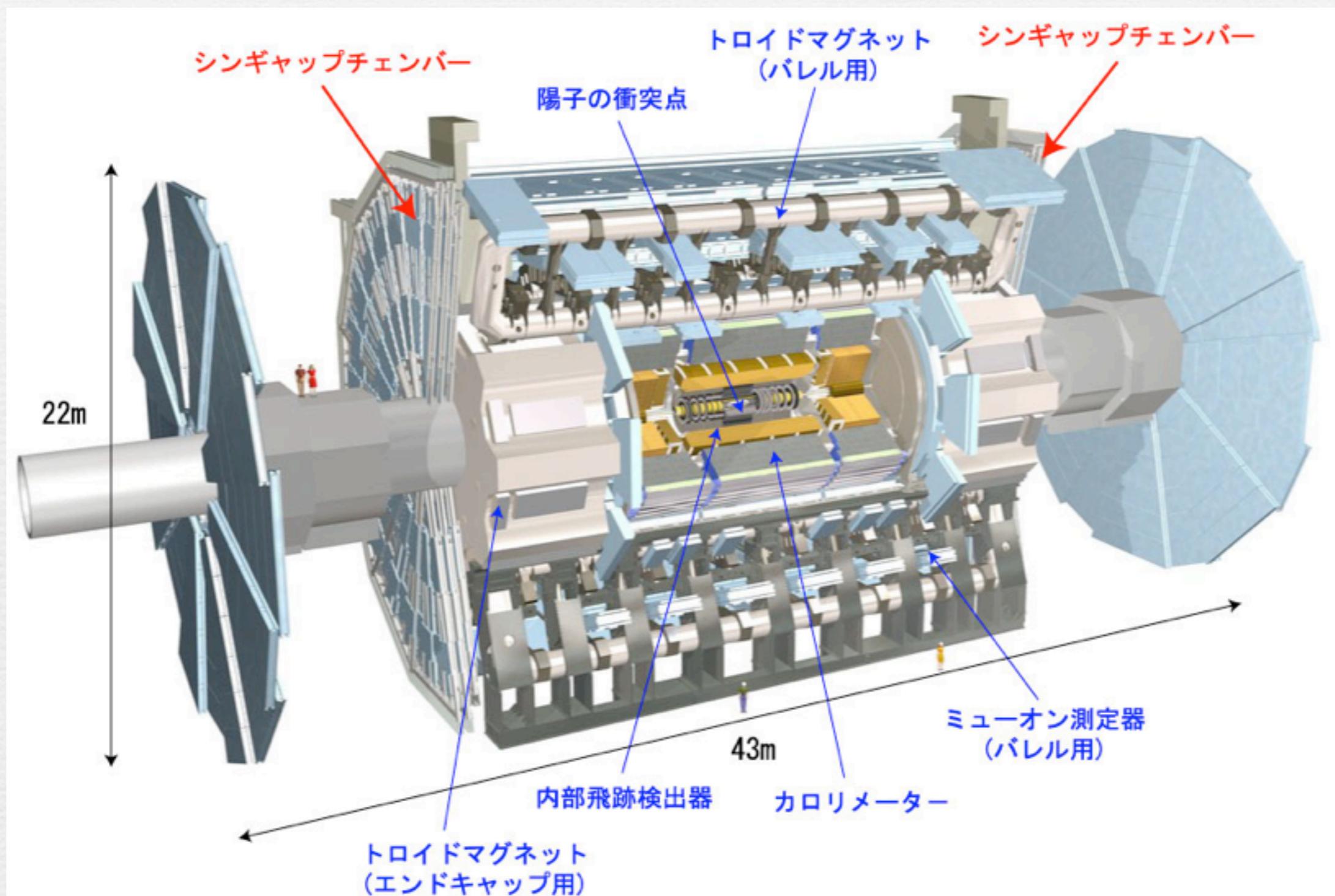
陽子1個 ... コバエの運動エネルギー程度

加速器内の全陽子 ...



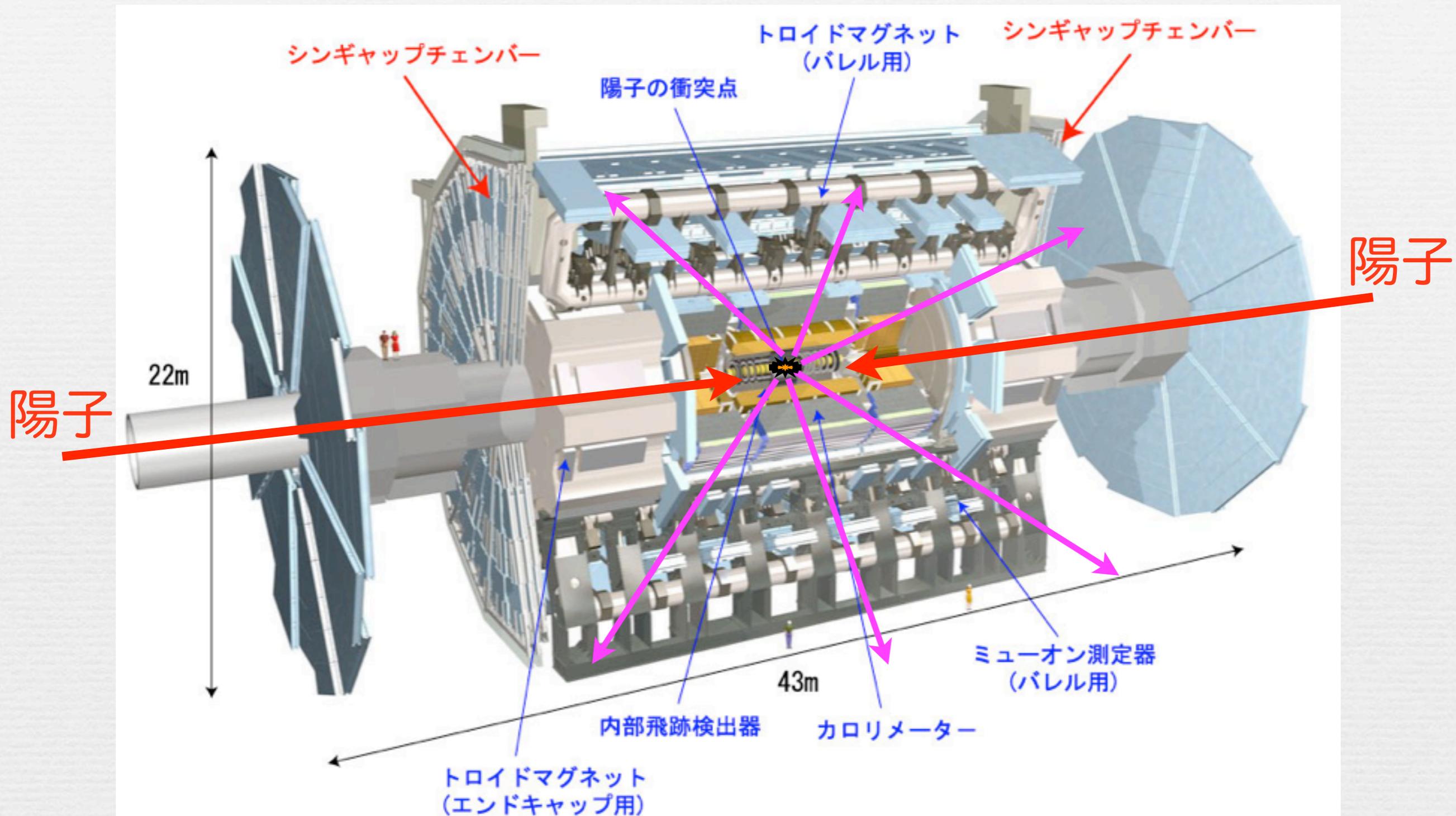
ヒッグス粒子を捕まえる 検出器

粒子検出器 アトラス検出器



総重量：7000トン

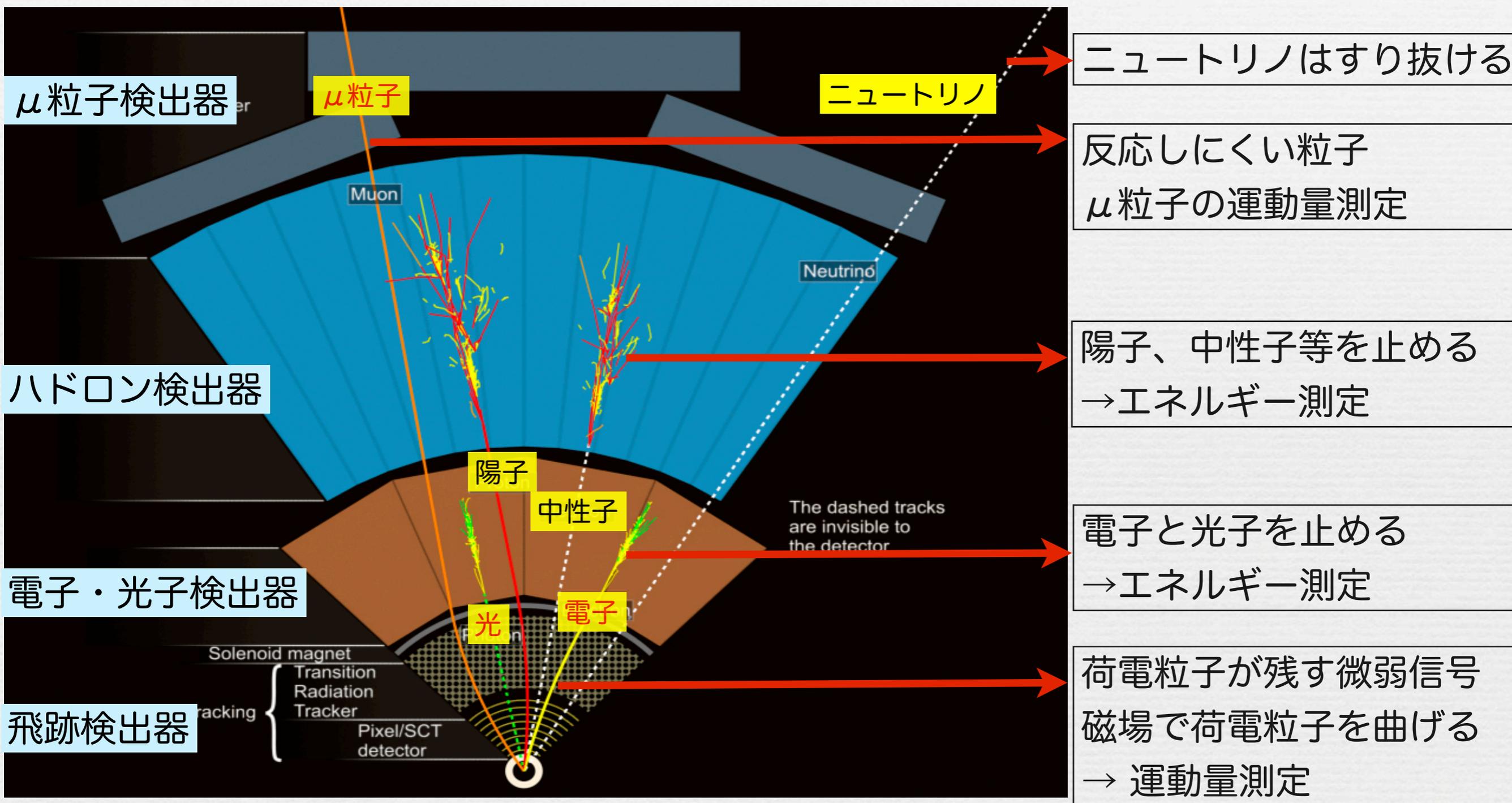
粒子検出器 アトラス検出器



ヒッグス粒子は不安定 → 軽い安定粒子に化ける (崩壊)
 衝突点で起きたイベントの写真を安定粒子を使って撮影
 読み出し数：1億6千万チャンネル (1億6千万画素デジカメ)

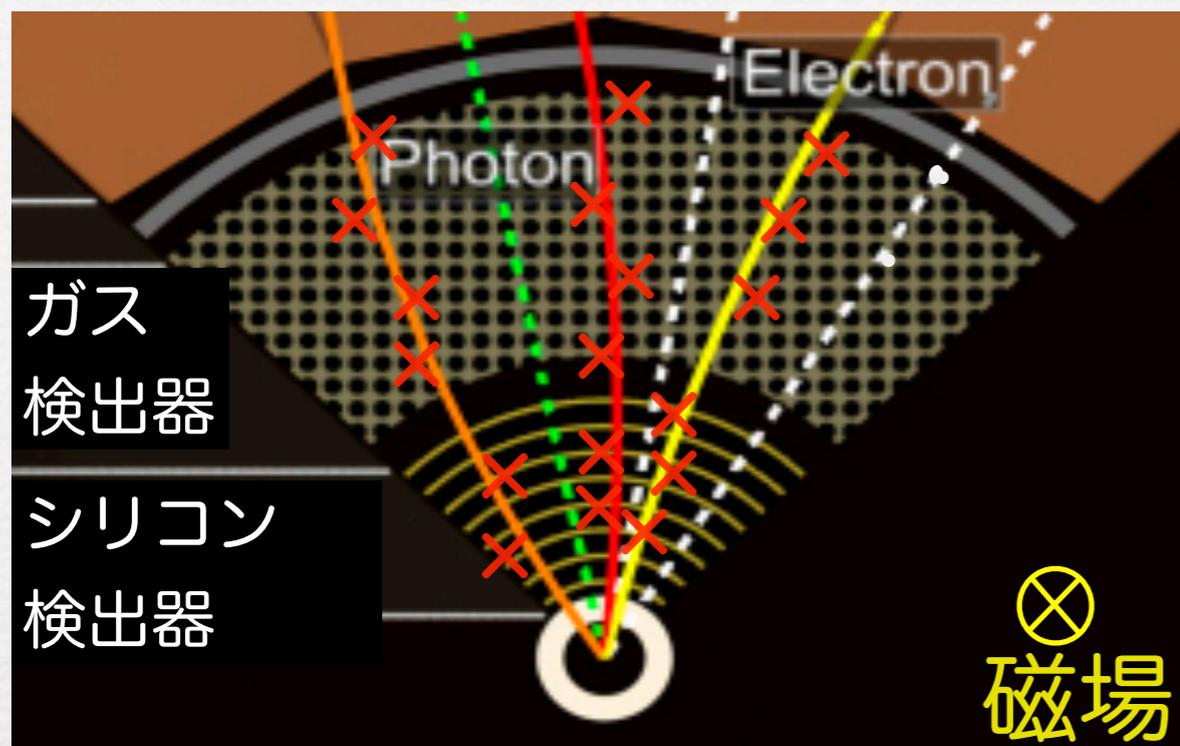
検出器の原理

検出器の物質と粒子との相互作用を利用する

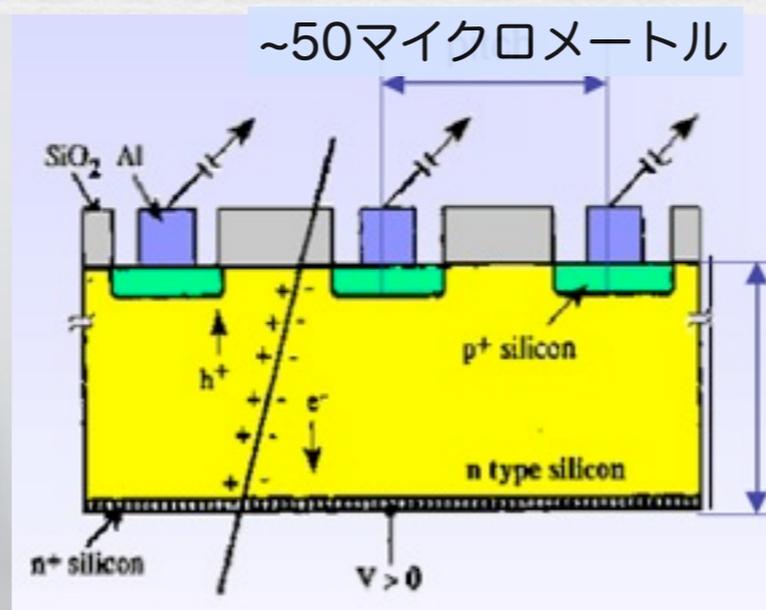
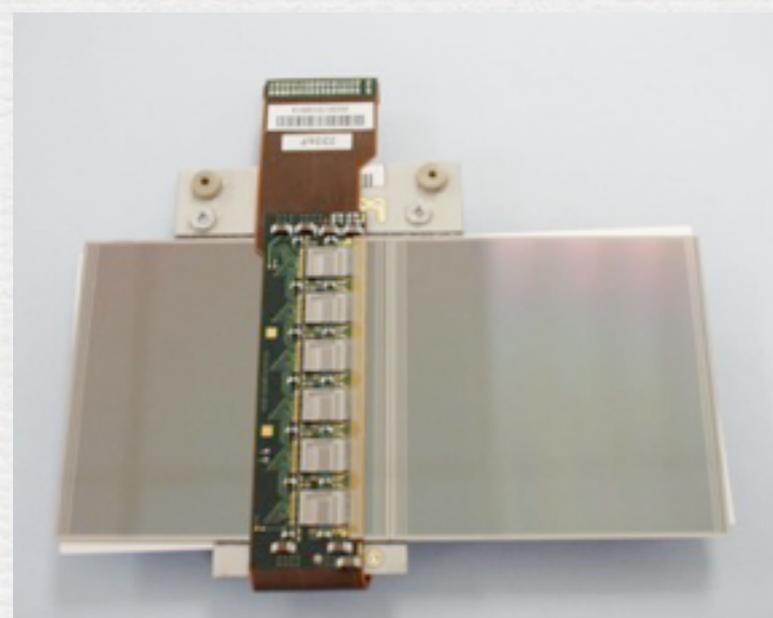
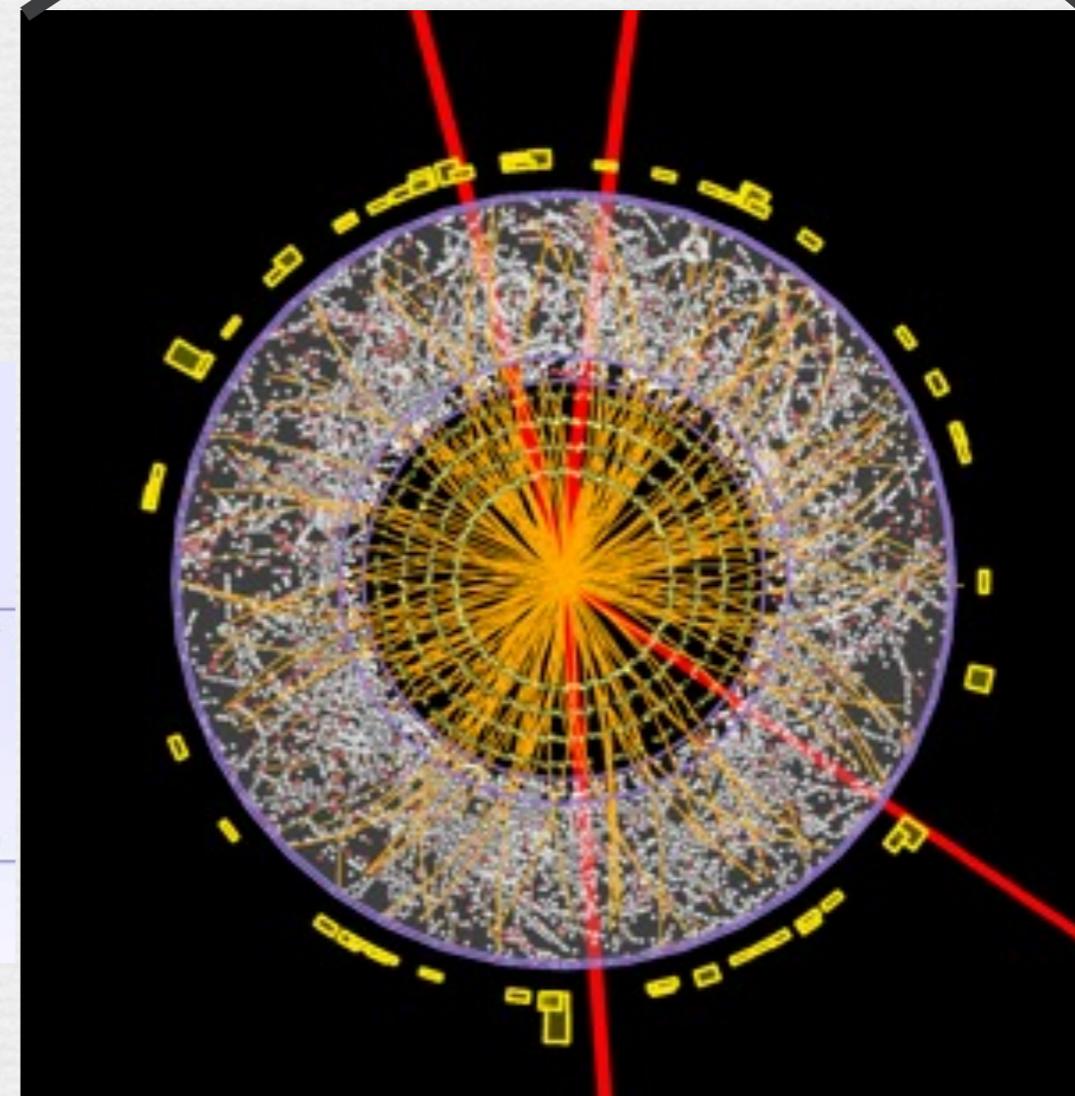
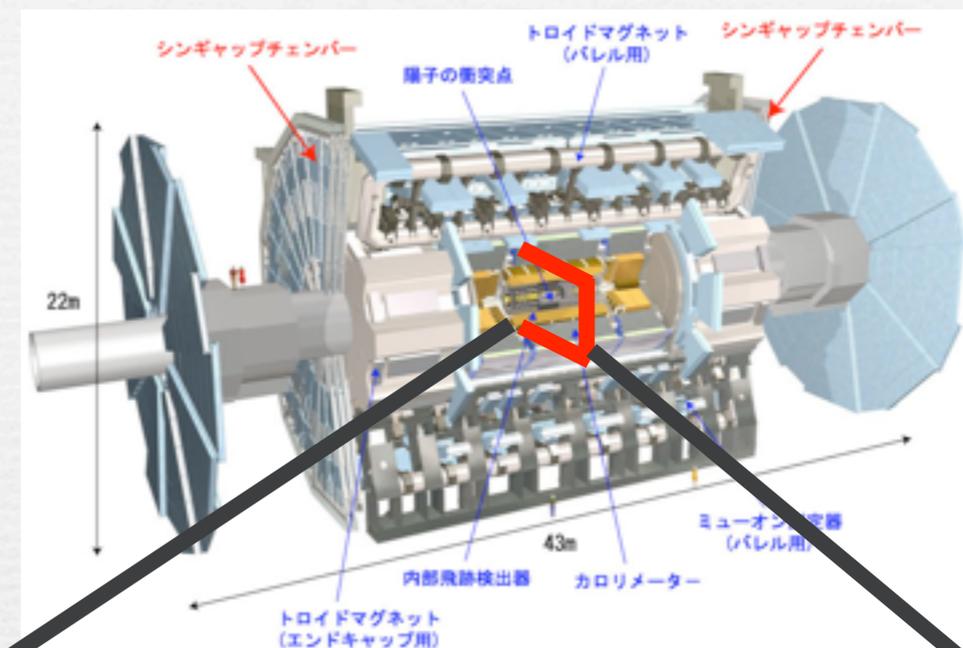


粒子の種類、エネルギー、運動量を測定

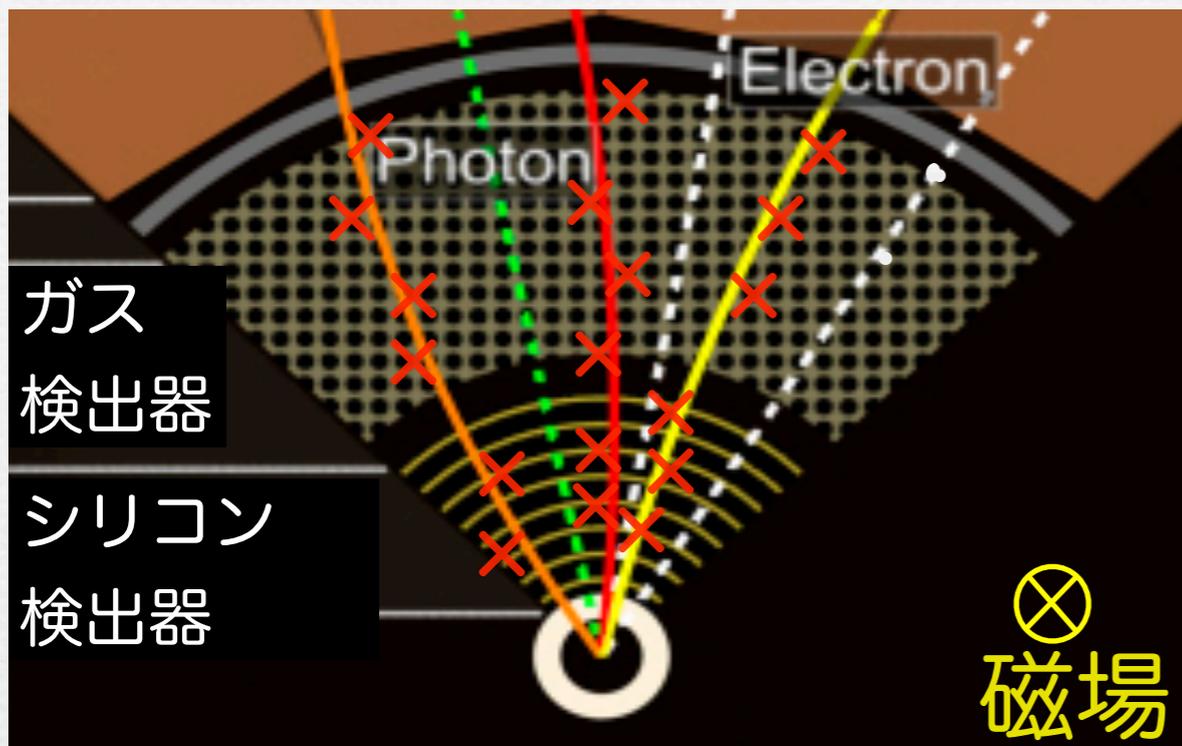
運動量測定 (飛跡検出器)



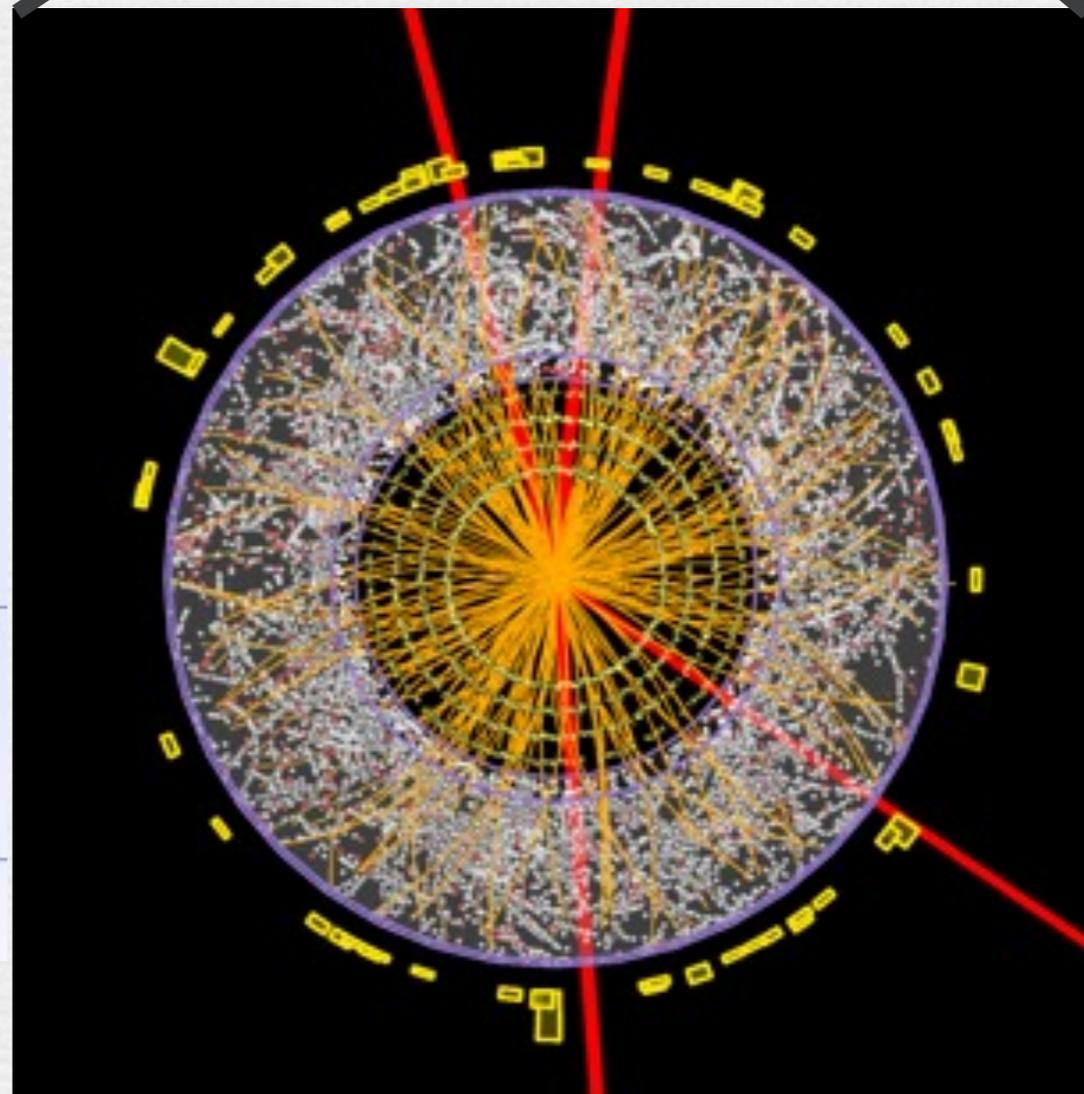
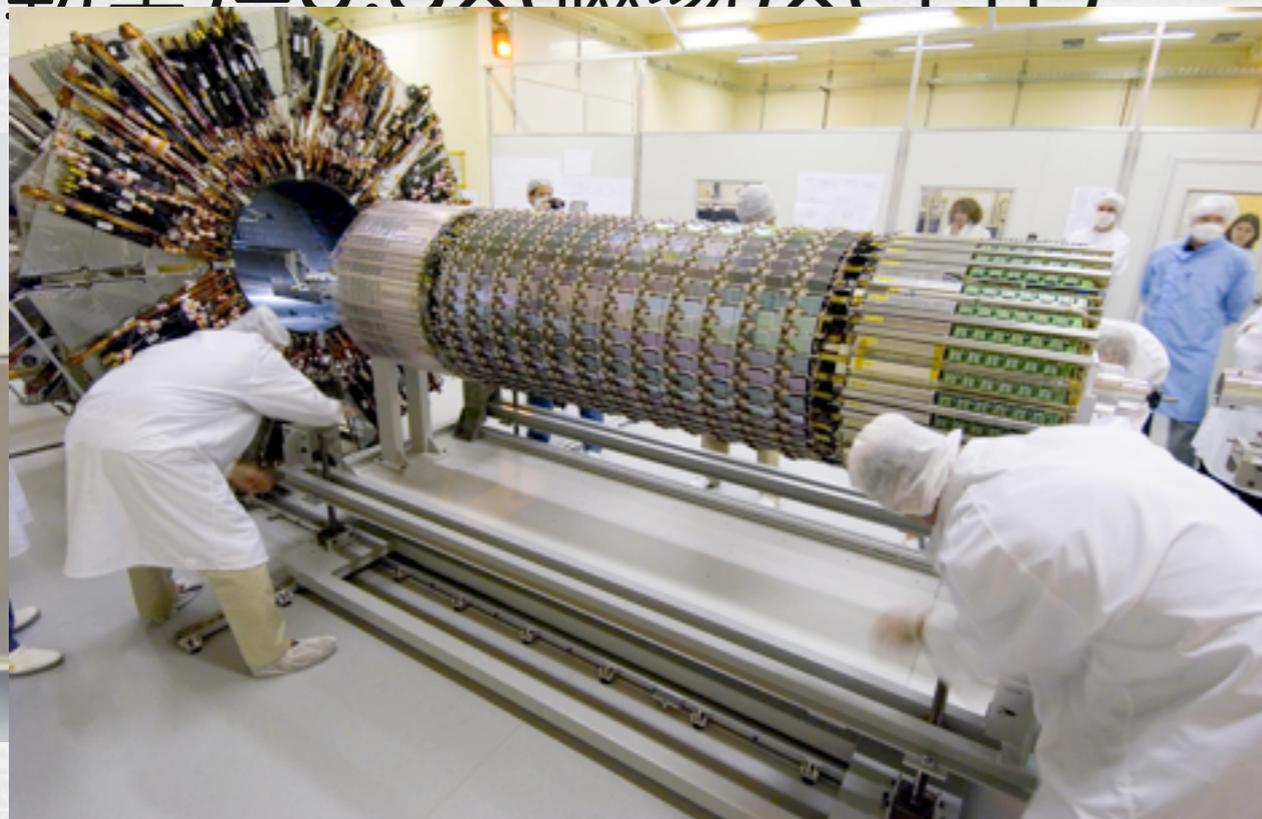
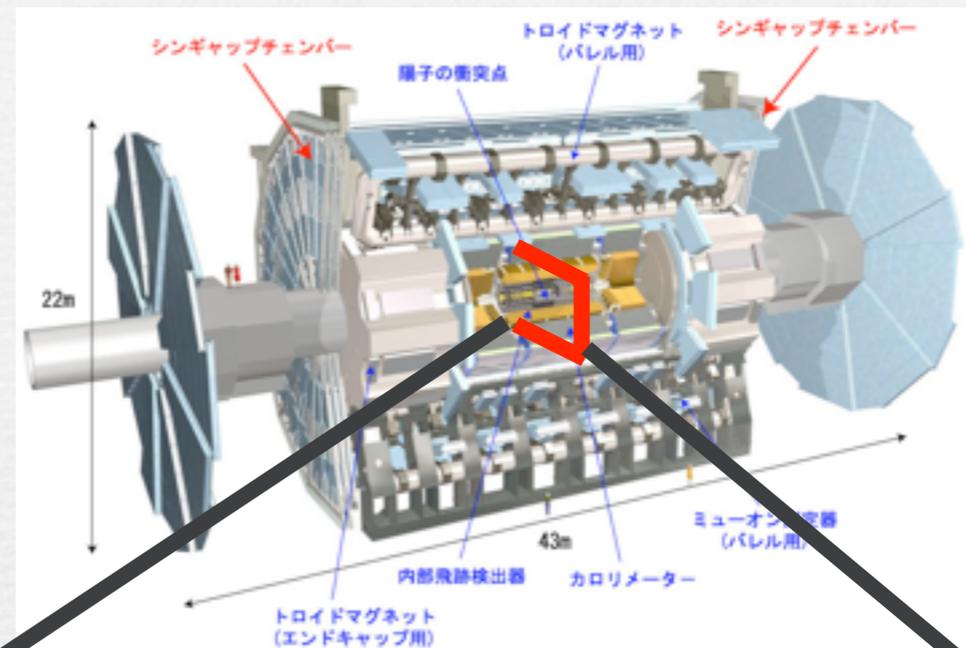
$$(\text{運動量}) = 0.3 \times (\text{磁場}) \times (\text{半径})$$



運動量測定 (飛跡検出器)

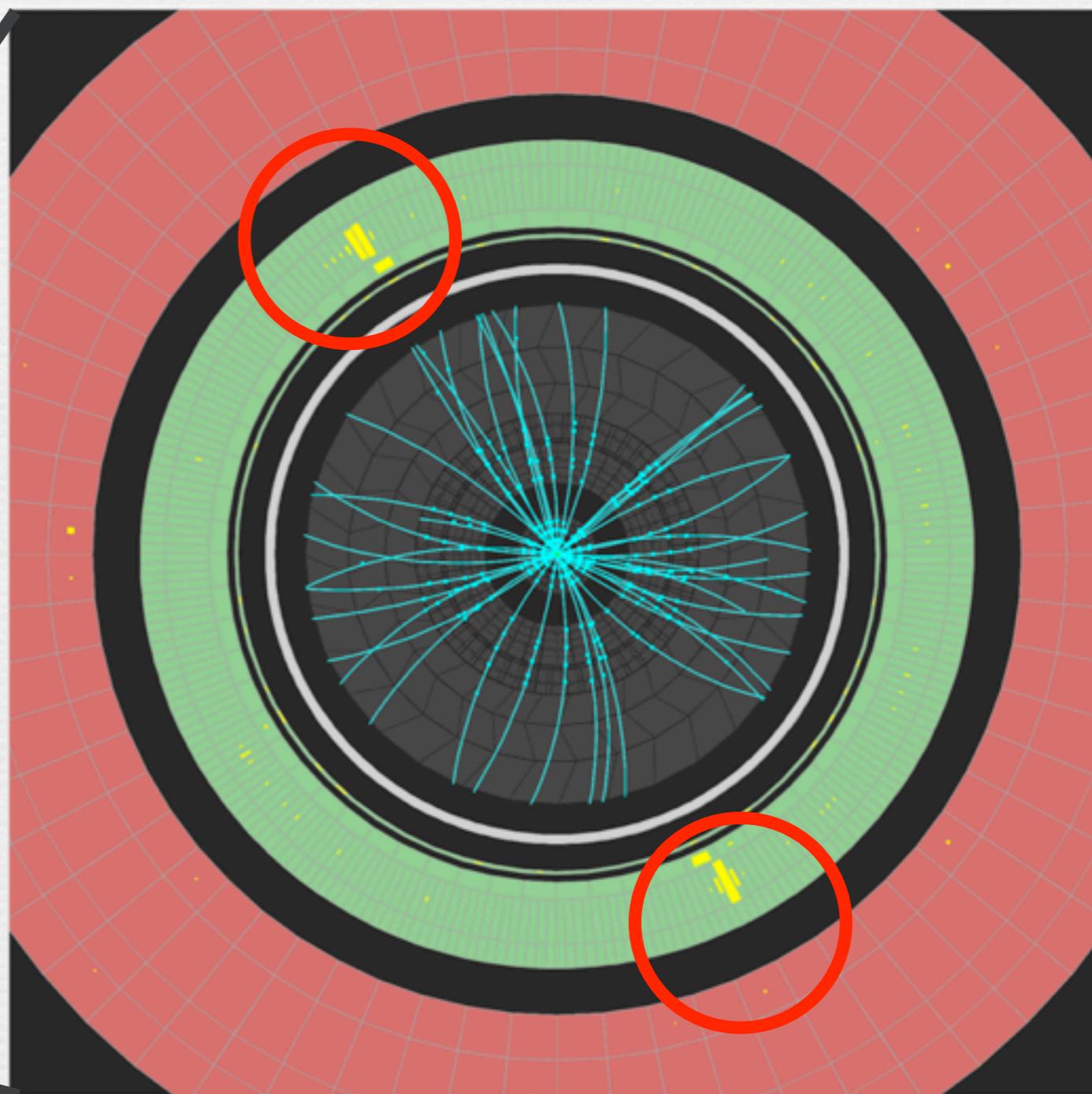
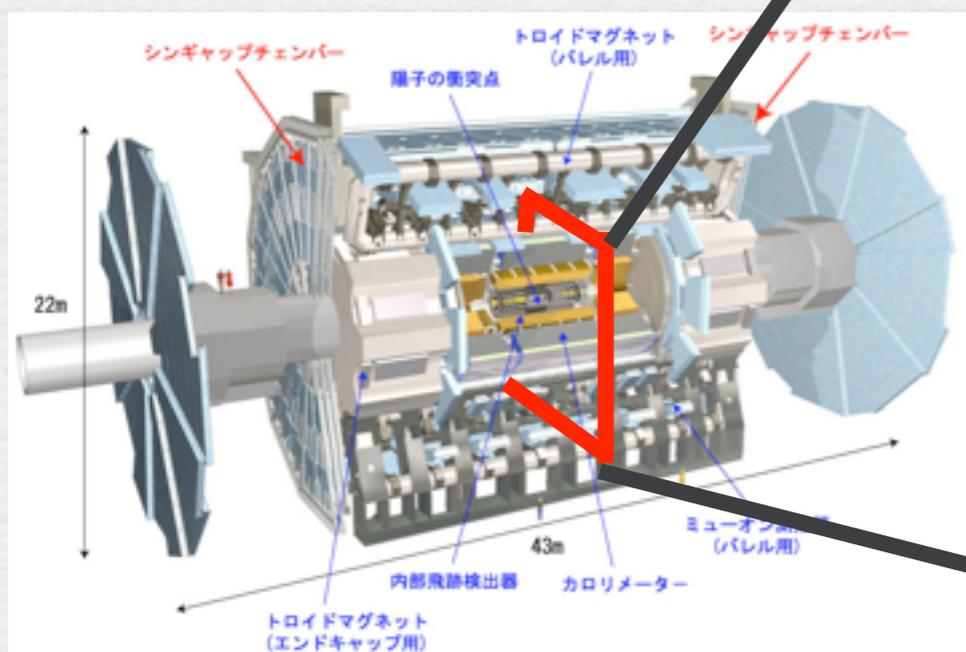
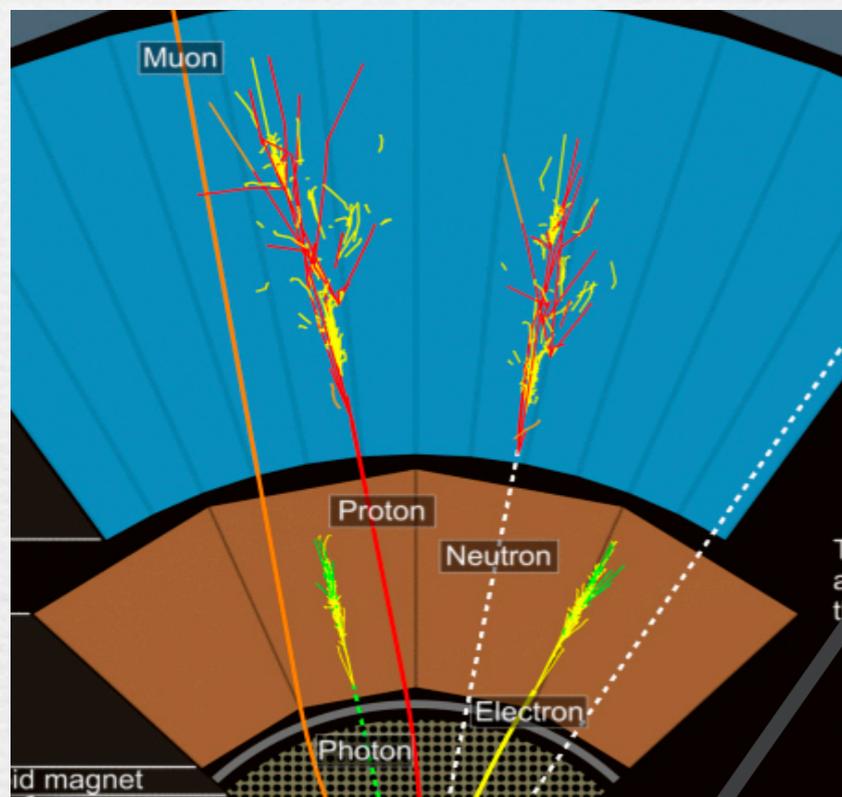


$(運動量) = 0.3 \times (磁場) \times (半径)$

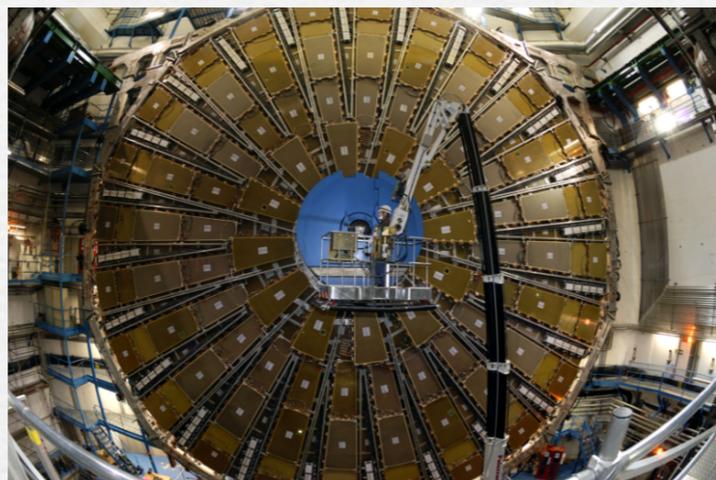
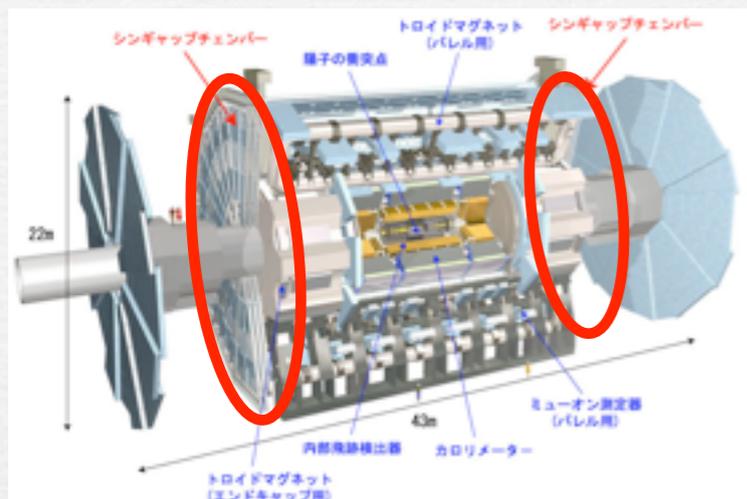


エネルギー測定器（カロリメータ）

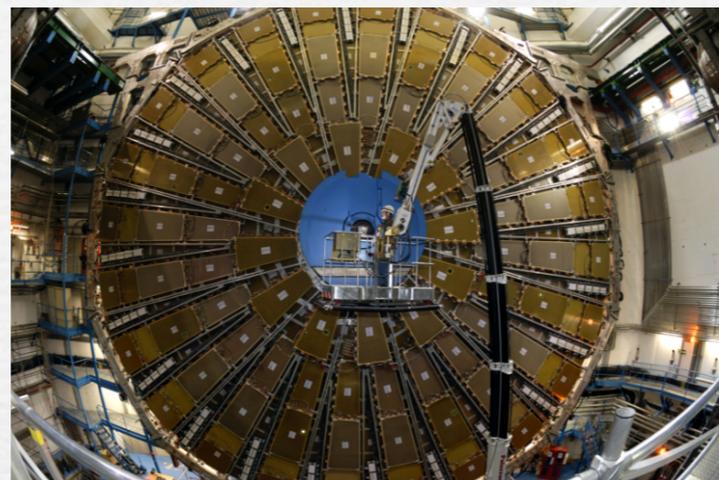
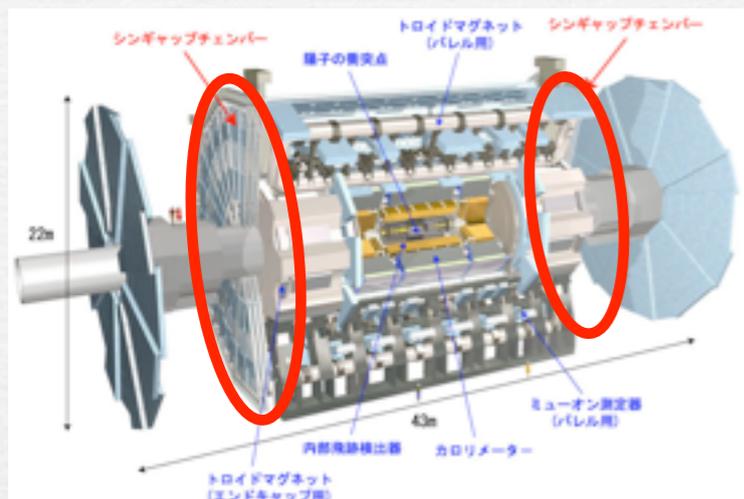
粒子（光子、電子、陽子、中性子など）を物質で止める
そのとき出る光や熱を電気信号として捉える



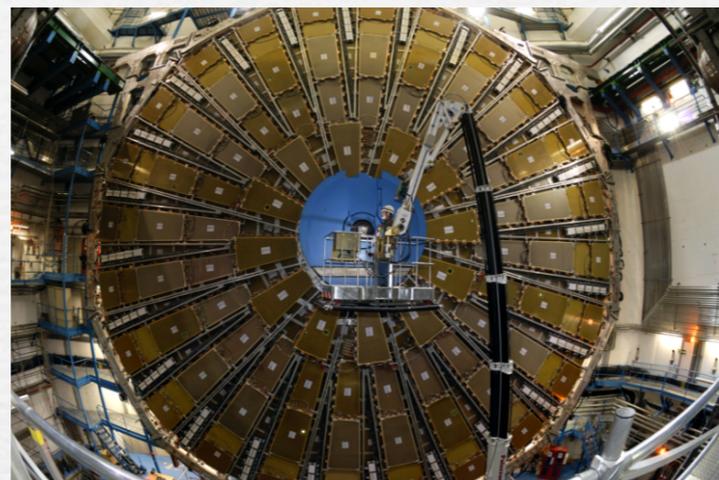
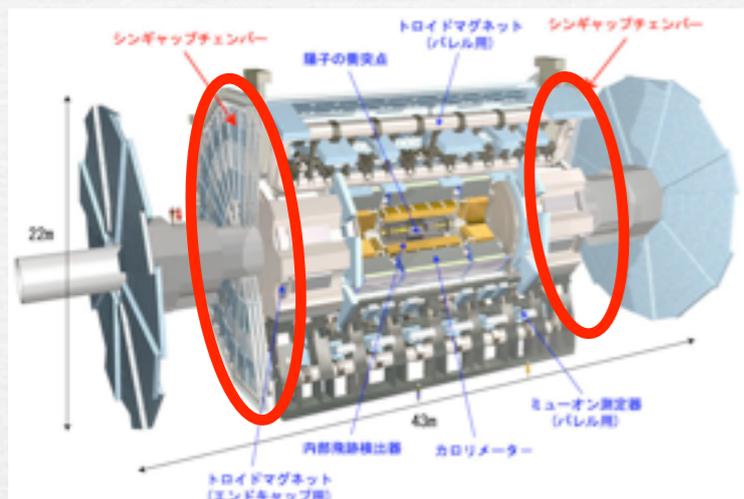
μ 粒子検出器の組み立て



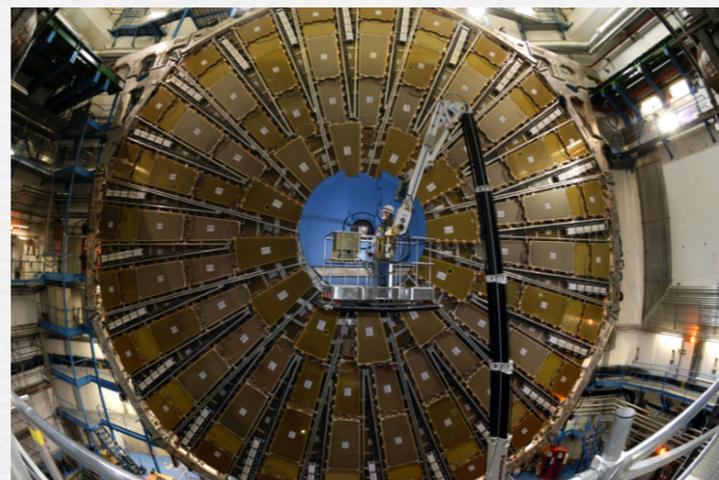
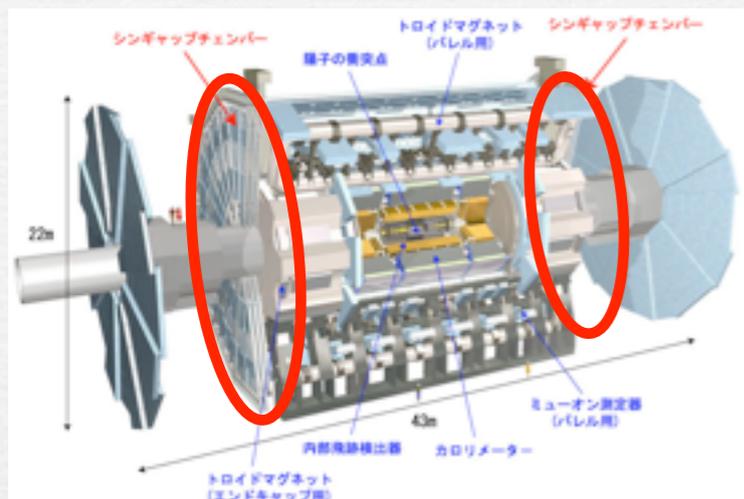
μ 粒子検出器の組み立て



μ 粒子検出器の組み立て



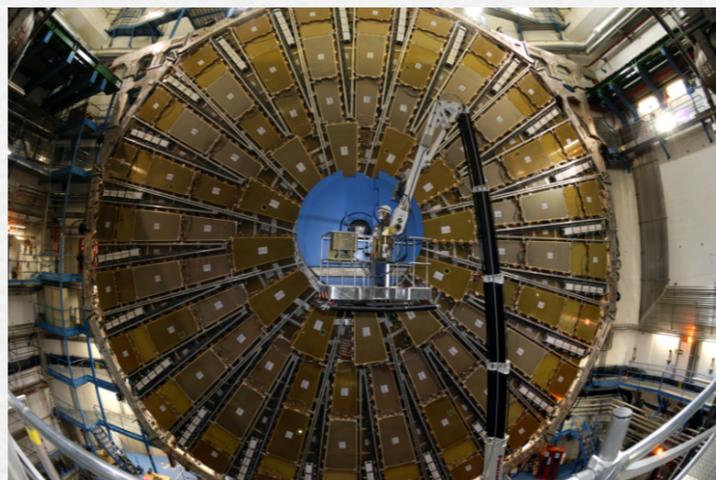
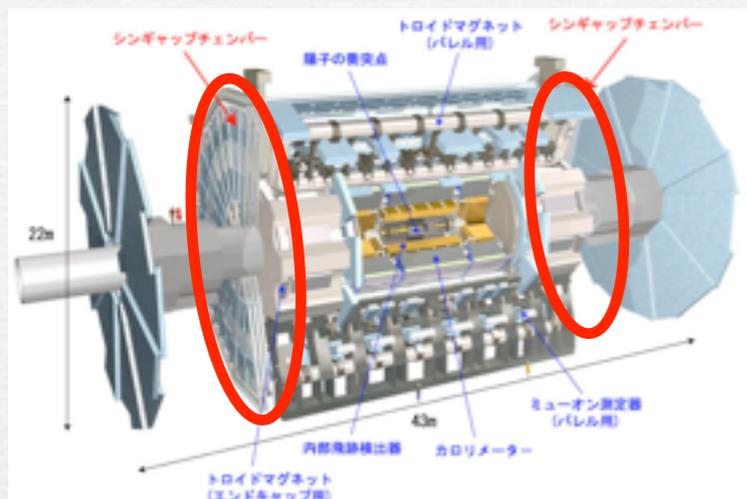
μ 粒子検出器の組み立て



3



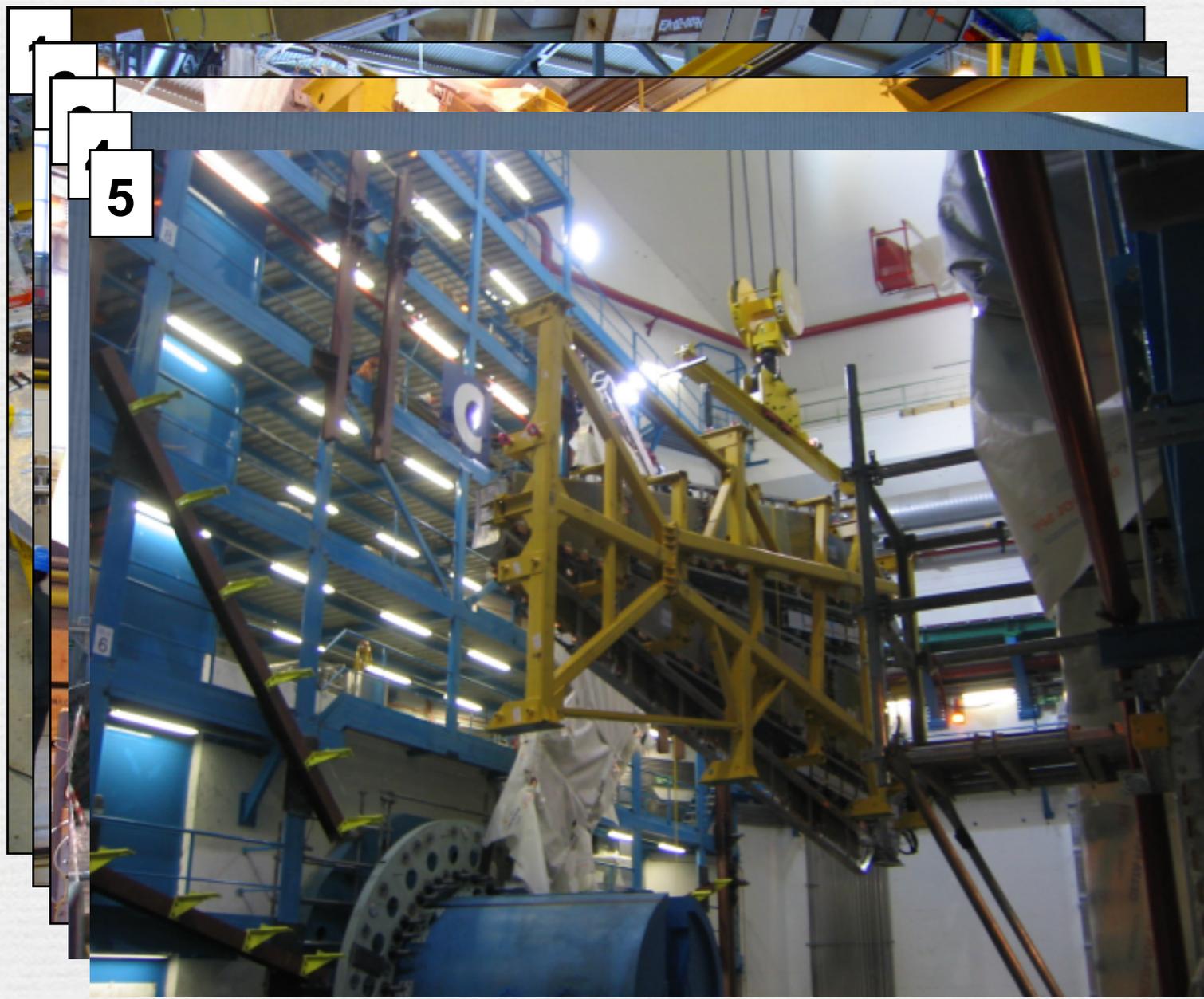
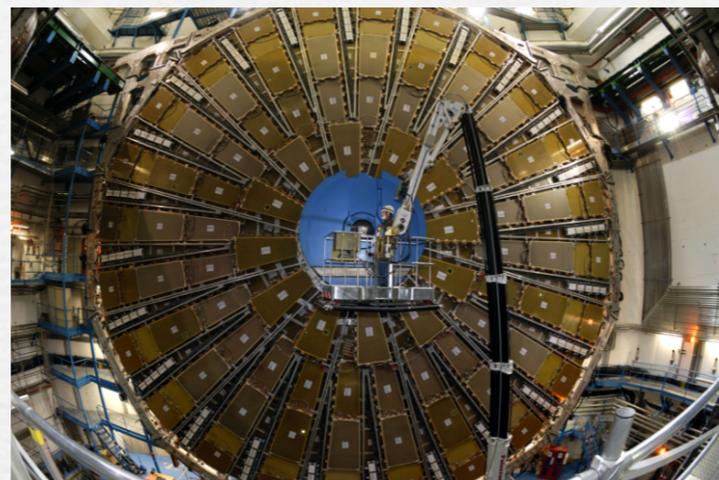
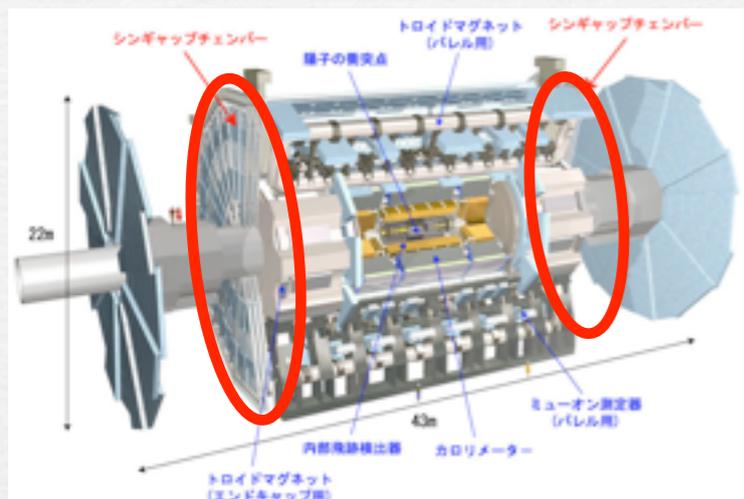
μ 粒子検出器の組み立て



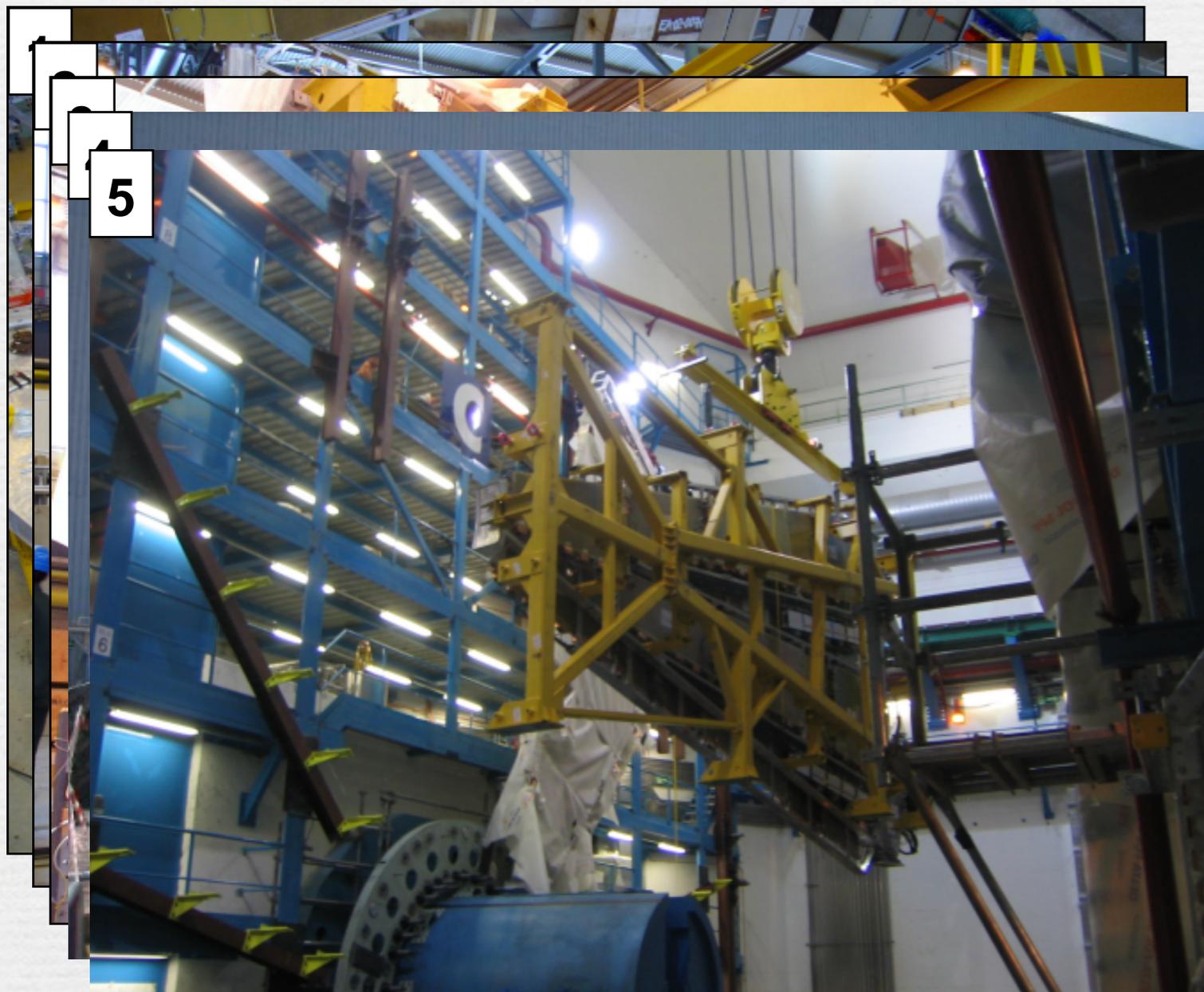
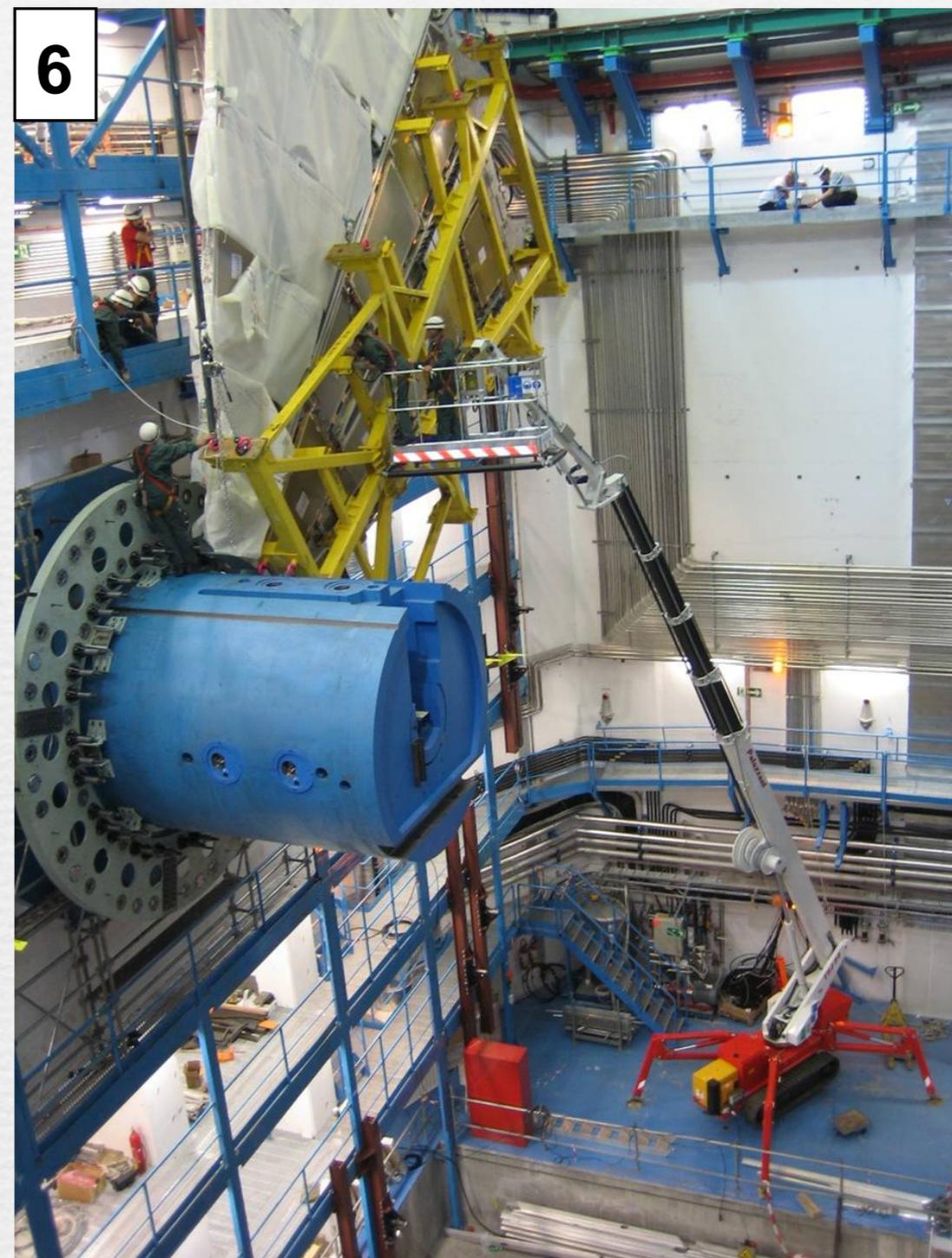
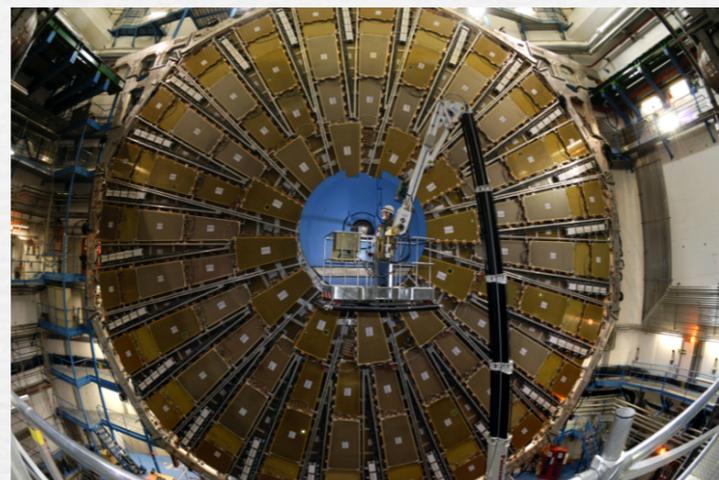
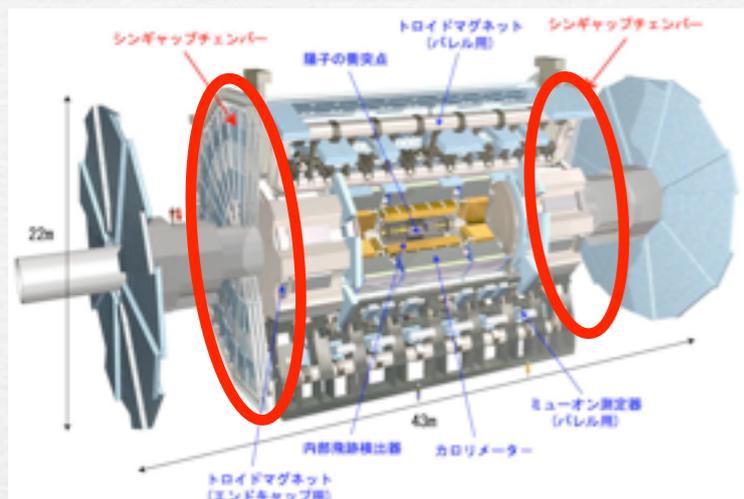
4



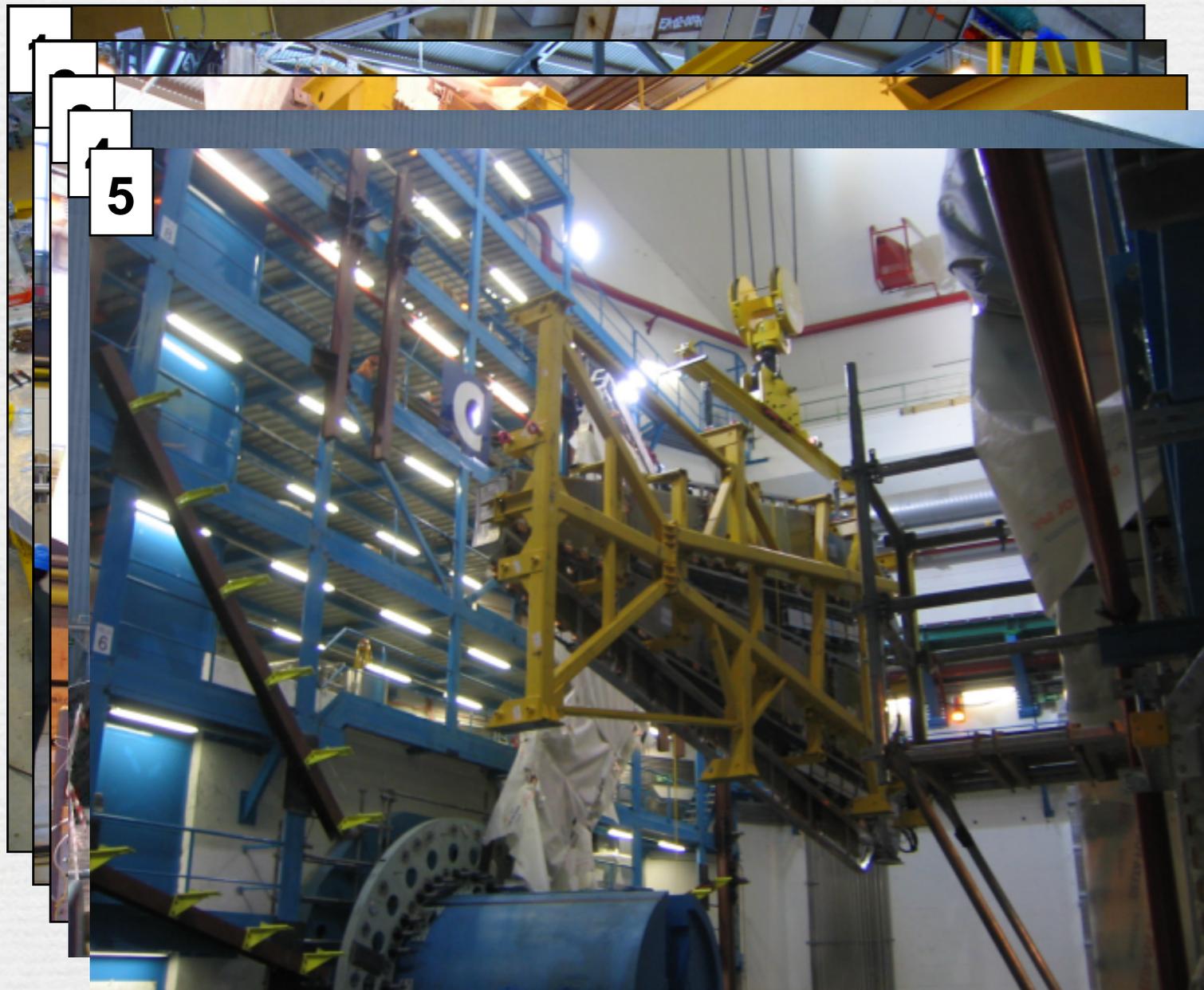
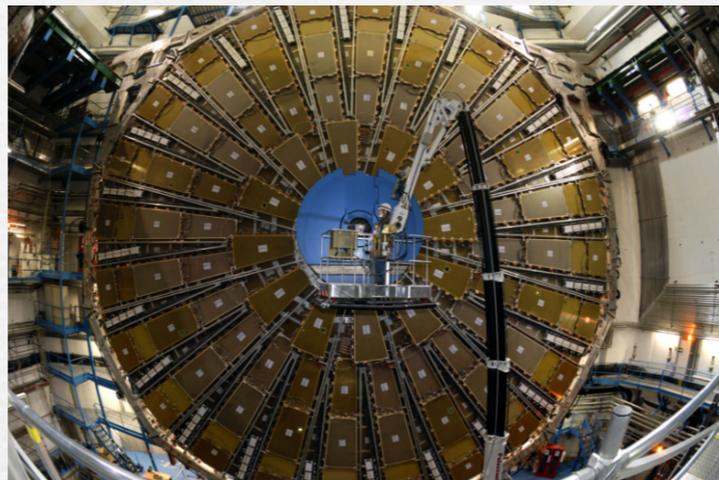
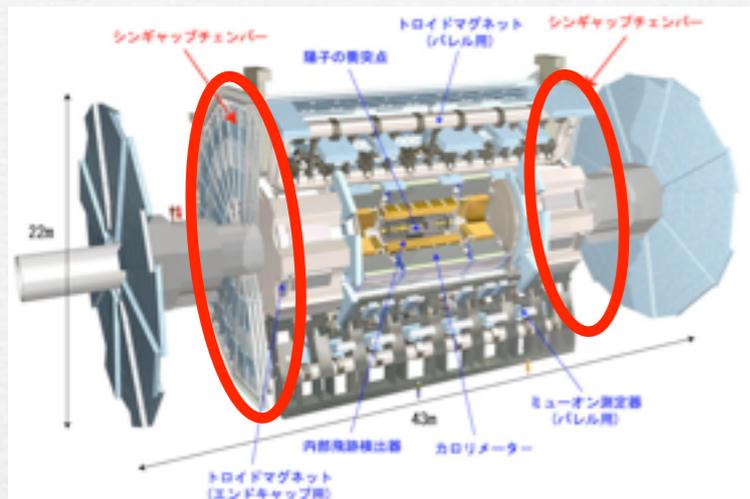
μ 粒子検出器の組み立て



μ 粒子検出器の組み立て



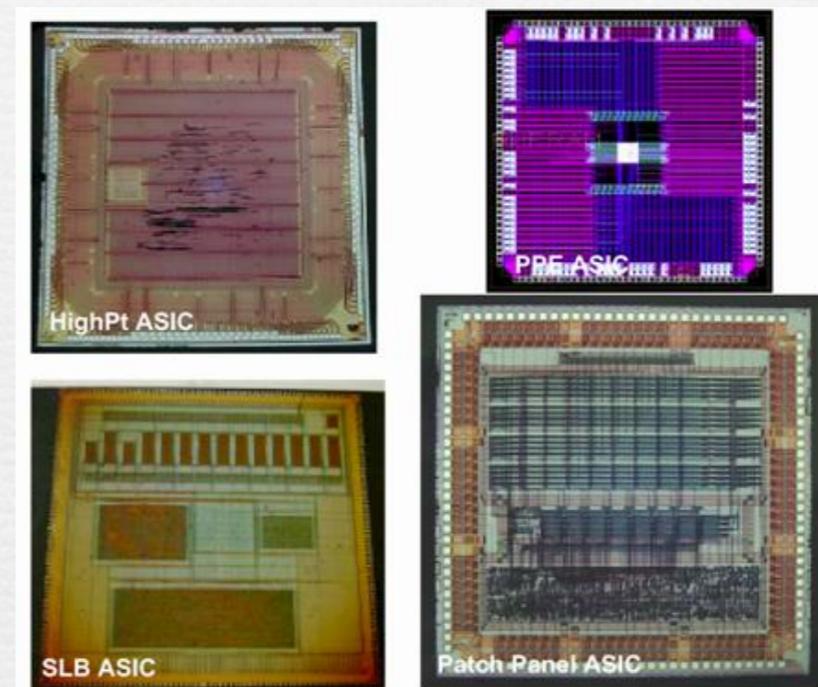
μ 粒子検出器の組み立て



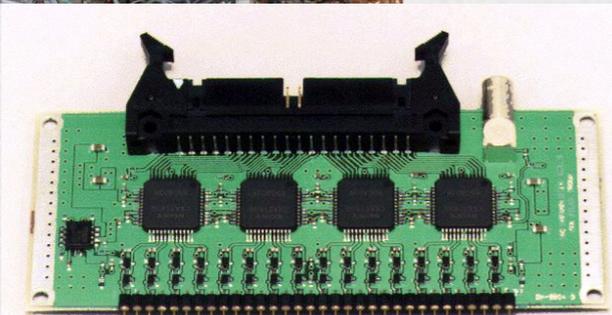
検出器の建設



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！！！！



ヒッグス粒子の見つけ方

陽子・陽子衝突

陽子・陽子衝突

陽子・陽子衝突

ボール同士の衝突：次の反応が予測可能

陽子・陽子衝突

ボール同士の衝突：次の反応が予測可能



陽子同士の衝突：次の反応は予測不可能
反応の起こる確率は解る

陽子・陽子衝突

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

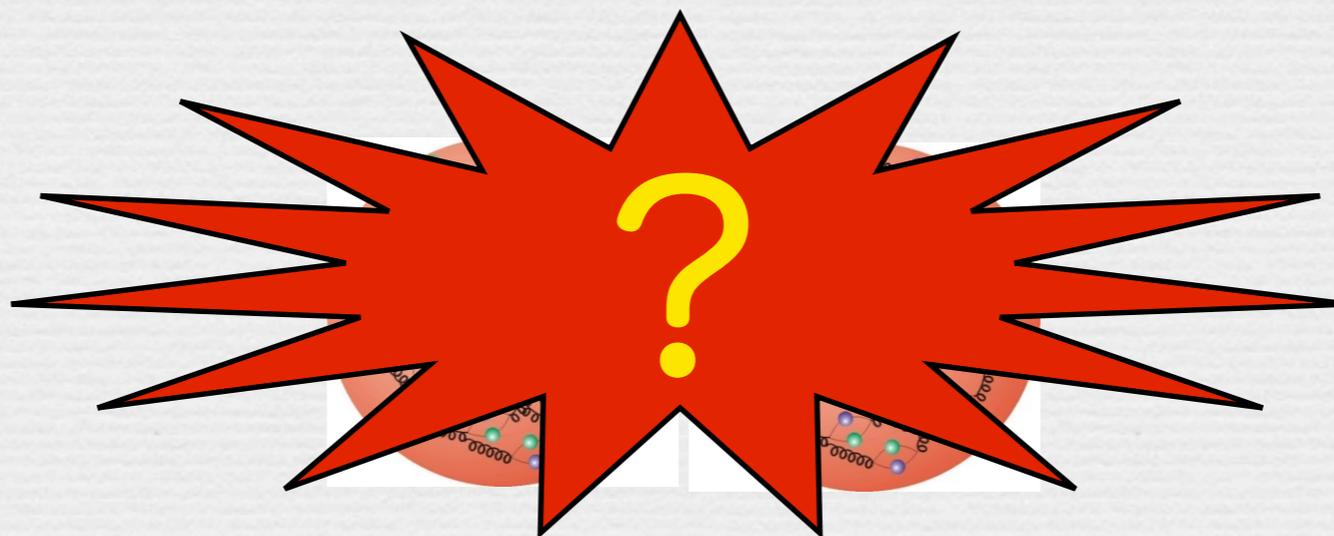


陽子同士の衝突：次の反応は予測不可能
反応の起こる確率は解る

陽子・陽子衝突

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

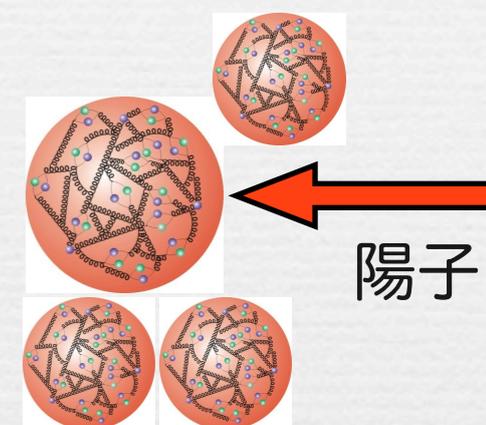
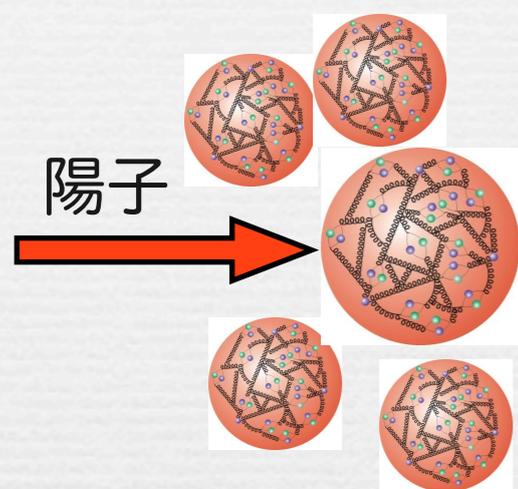
ヒッグス粒子は、
5,000,000,000(五十億)回に1回程度しか生成しない！



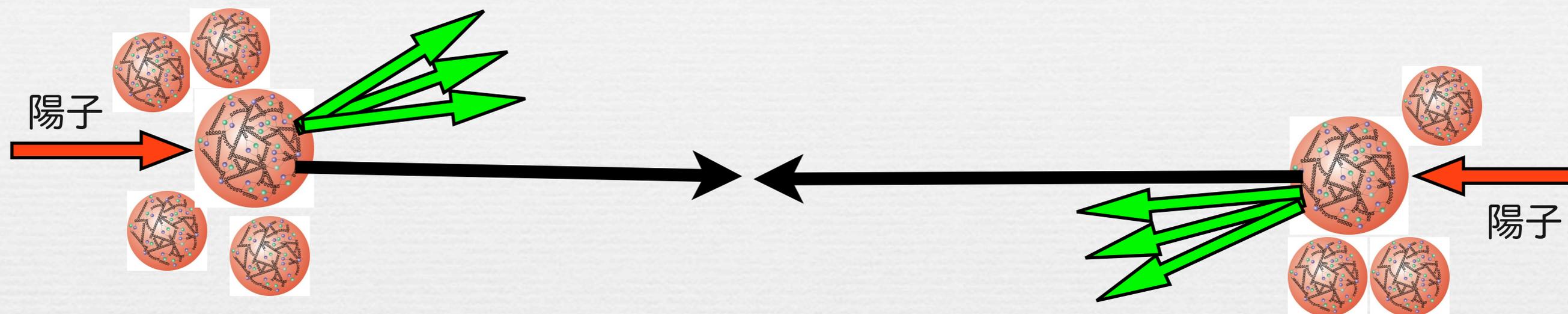
陽子同士の衝突：次の反応は予測不可能
反応の起こる確率は解る

陽子・陽子衝突

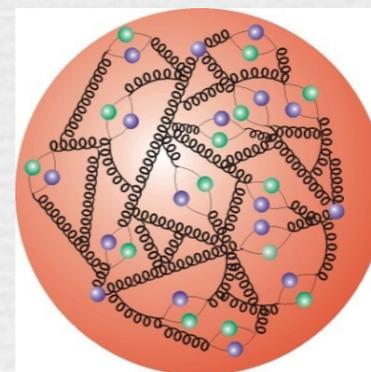
陽子・陽子衝突



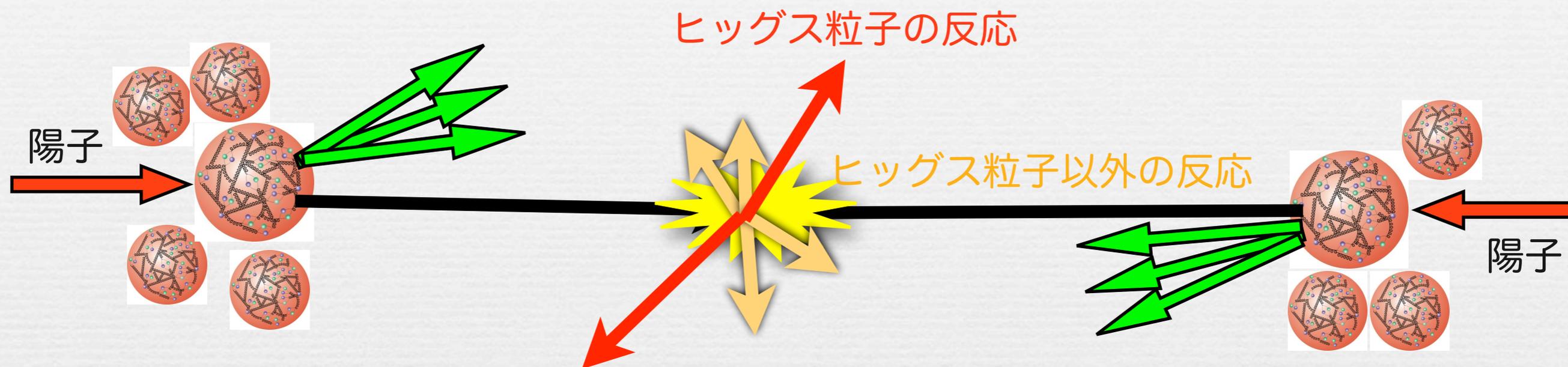
陽子・陽子衝突



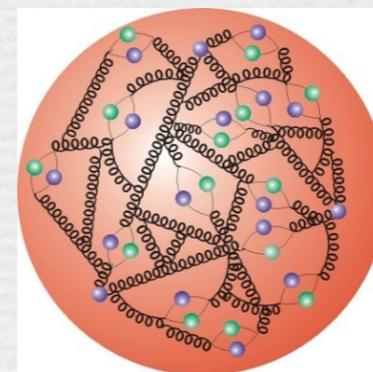
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン
一部だけが衝突による反応に関与



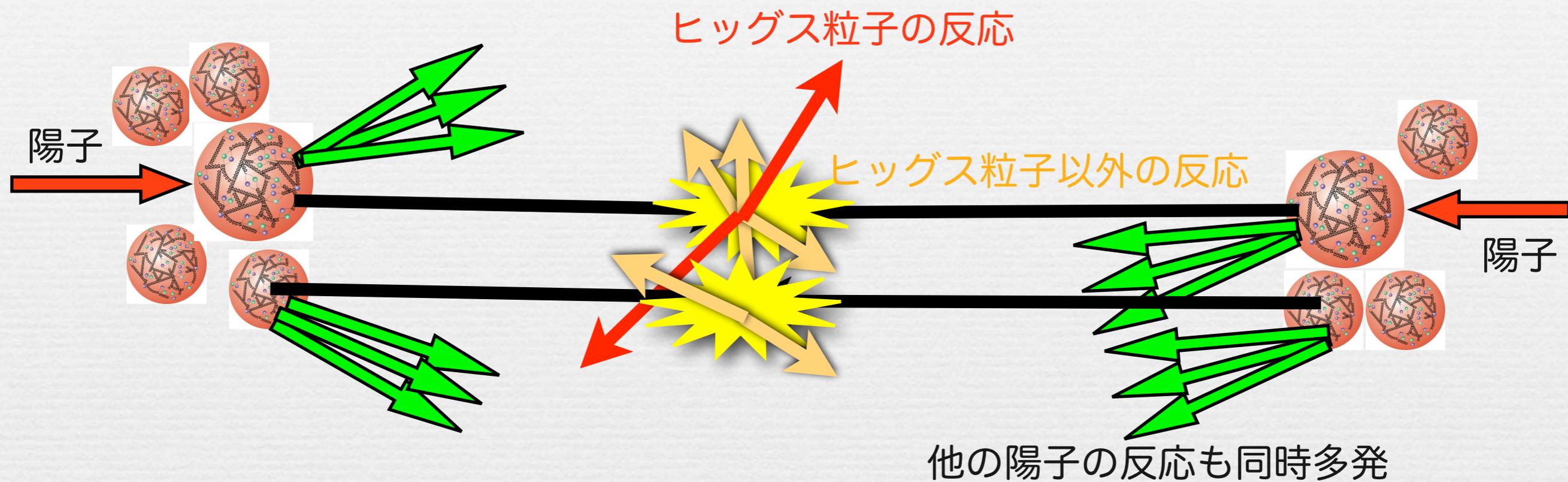
陽子・陽子衝突



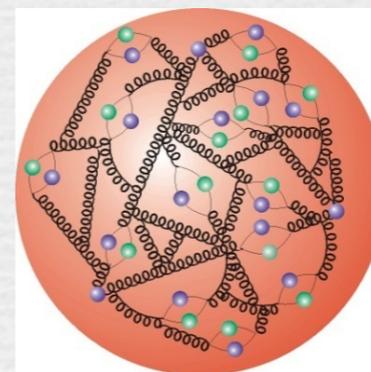
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン
一部だけが衝突による反応に関与



陽子・陽子衝突



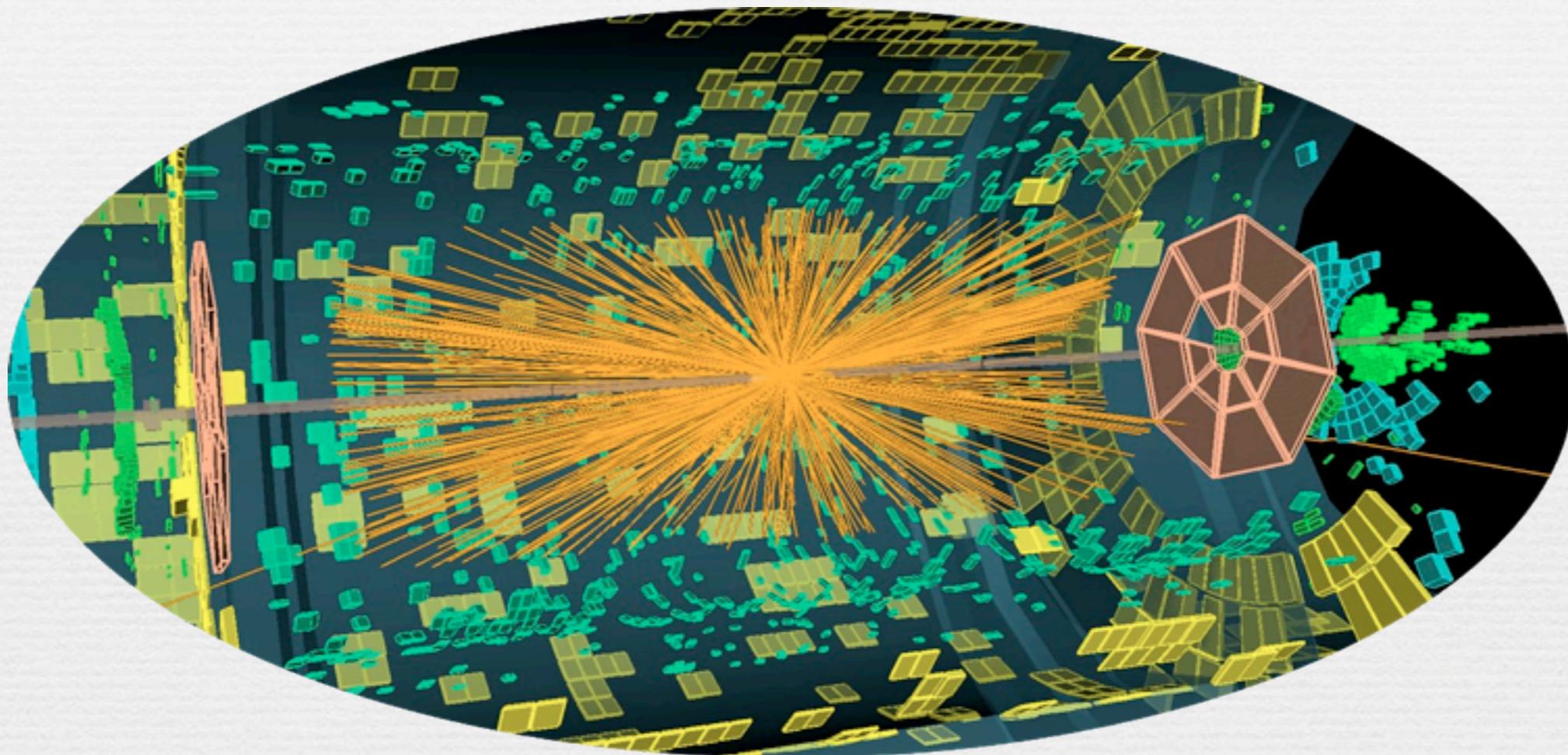
陽子の中は沢山のクォーク、グルーオン
一部だけが衝突による反応に関与



実際の陽子陽子衝突反応

ヒッグス粒子があってもなくても

全ての反応は、無数の安定粒子になる



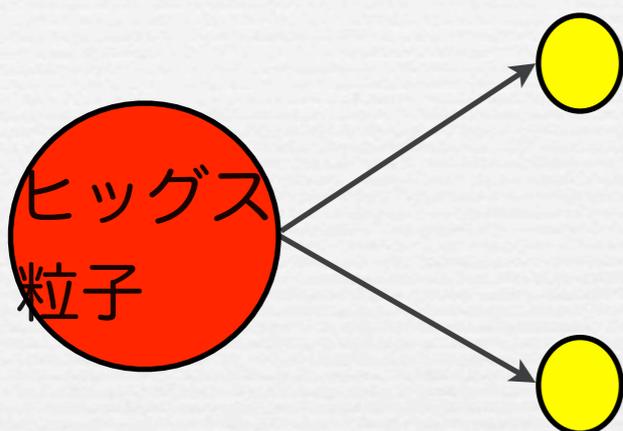
ヒッグス粒子がどんな安定粒子に化けるか知えう

ヒッグス粒子を含む事象(50億分の1)を選ぶ

ヒッグス粒子から化けた安定粒子を選ぶ

安定粒子を使ってヒッグス粒子を復元する

ヒッグス粒子が何に化けるか？



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

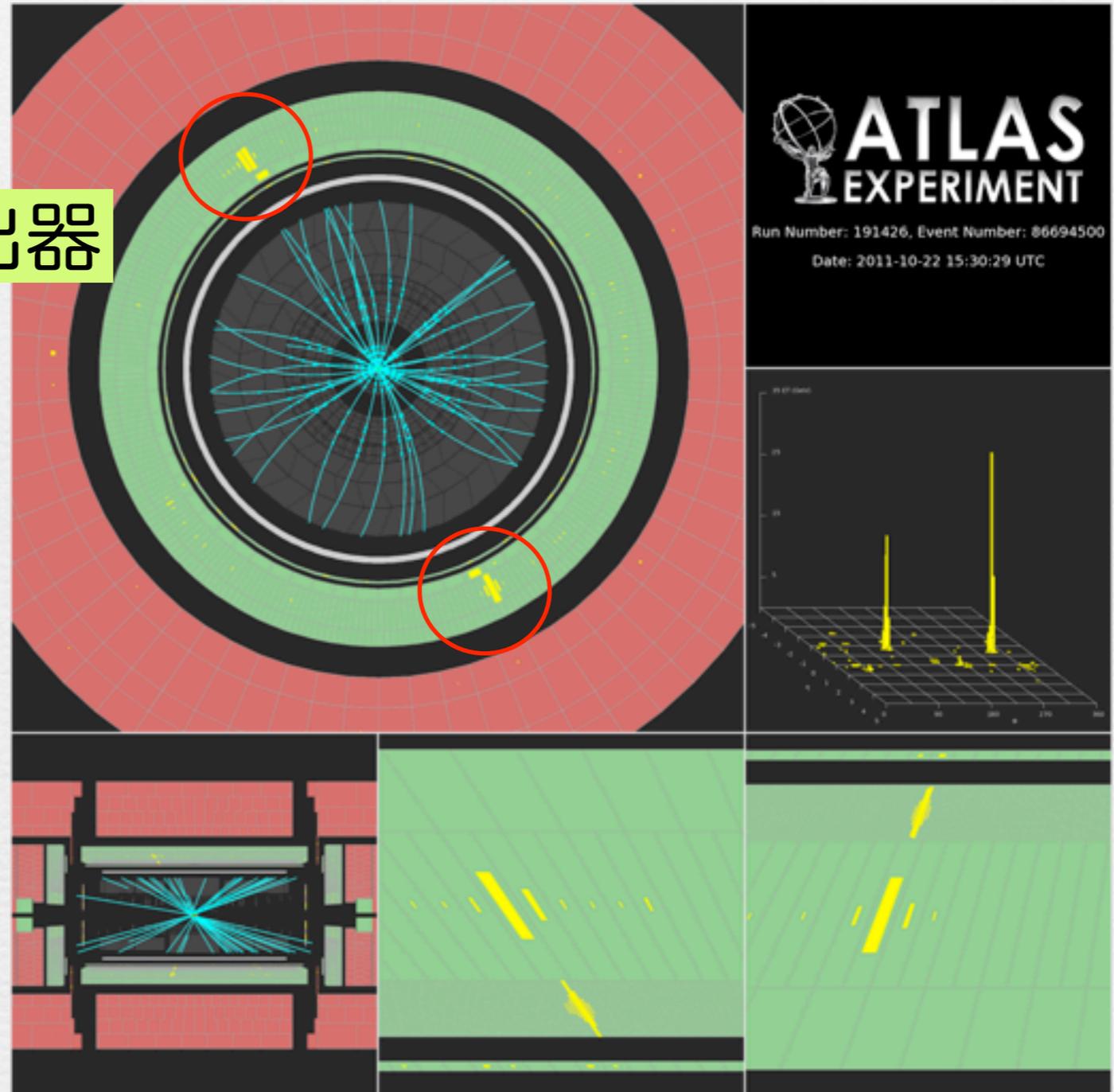
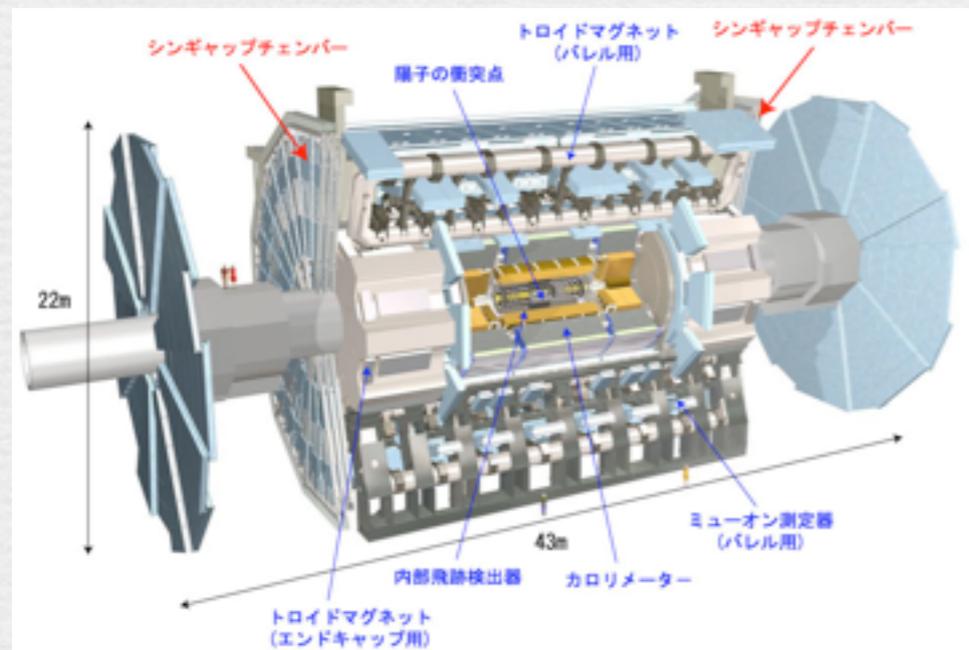
化ける確率はわかるが、何に化けるかは予想できない

$H \rightarrow ZZ$	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

電子・光子検出器



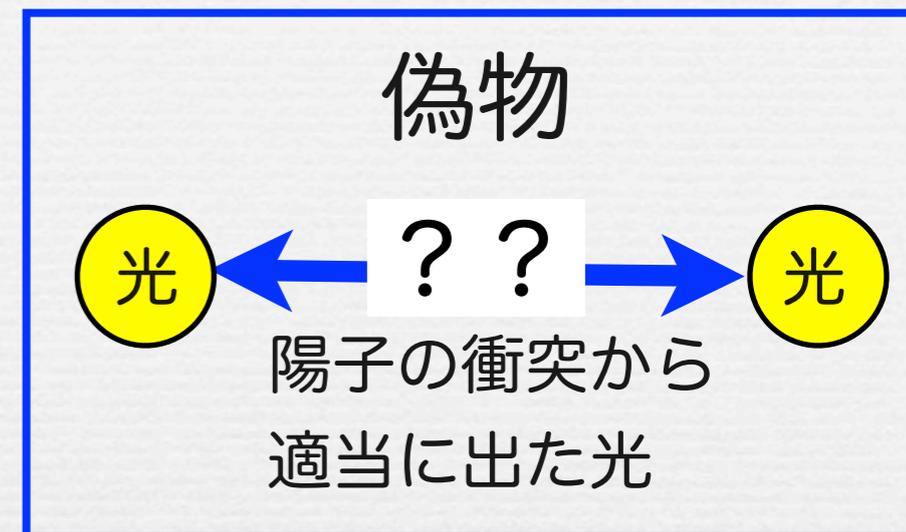
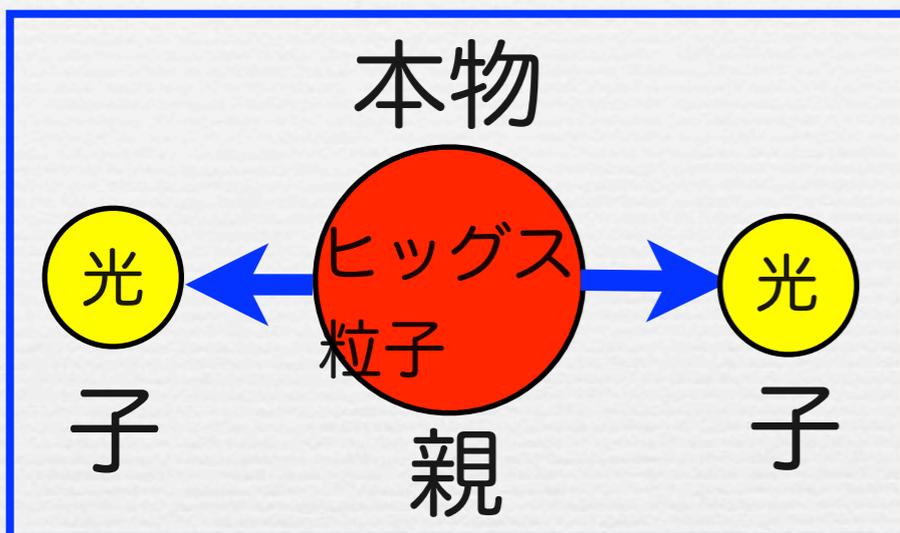
偽物：

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

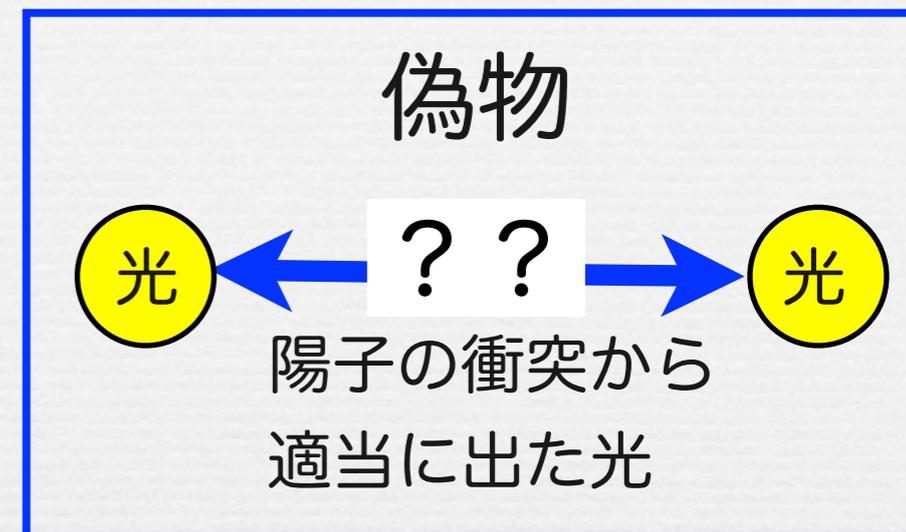
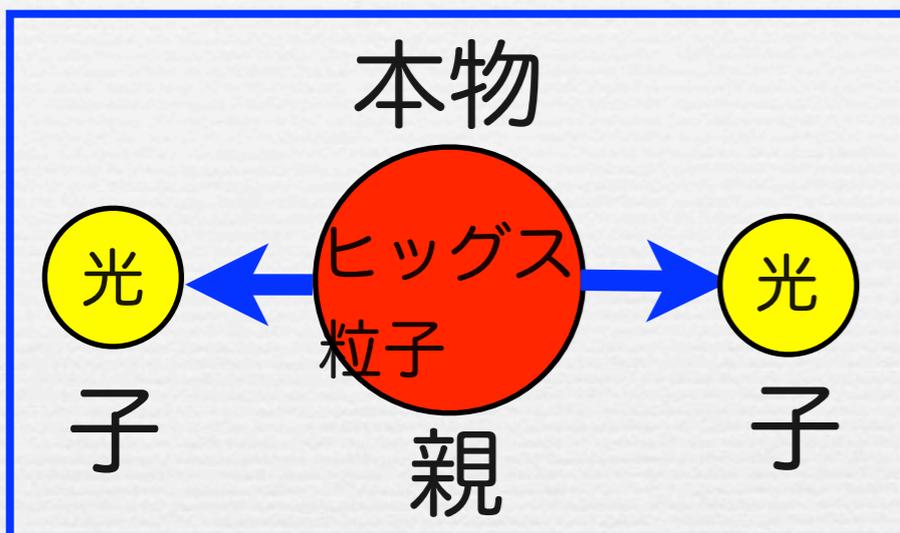
質量の復元

2本の光子のあるイベントは2種類に大別される



質量の復元

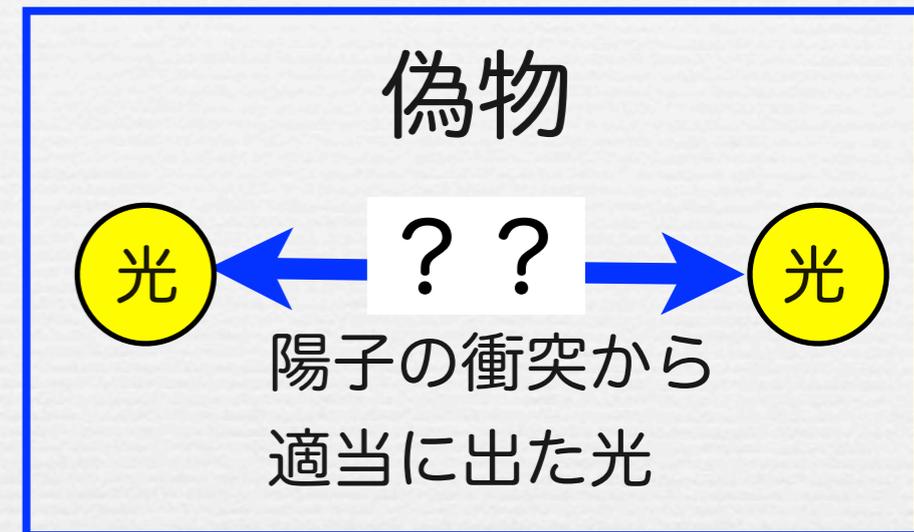
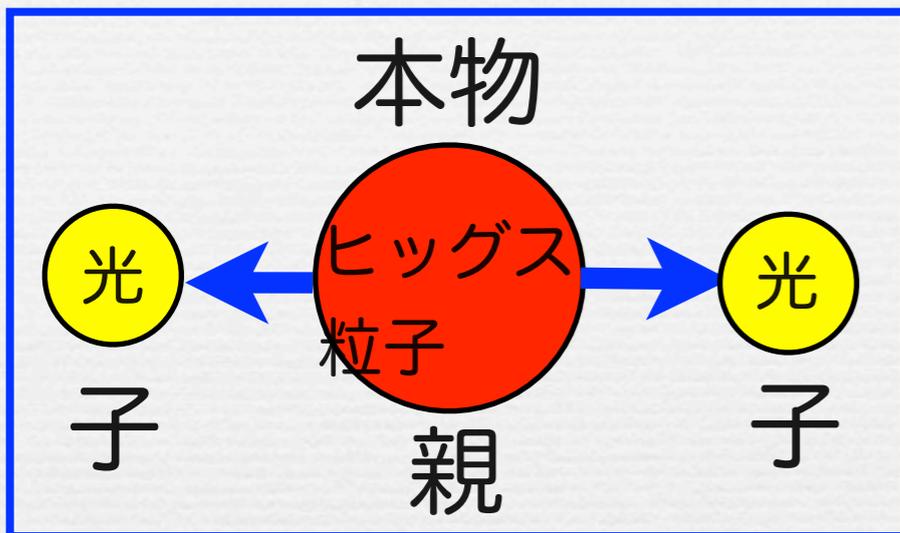
2本の光子のあるイベントは2種類に大別される



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

質量の復元

2本の光子のあるイベントは2種類に大別される



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

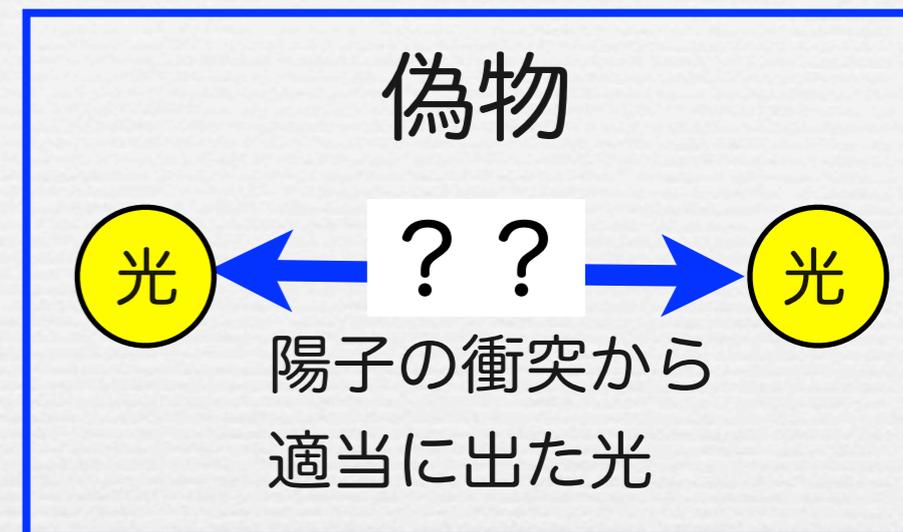
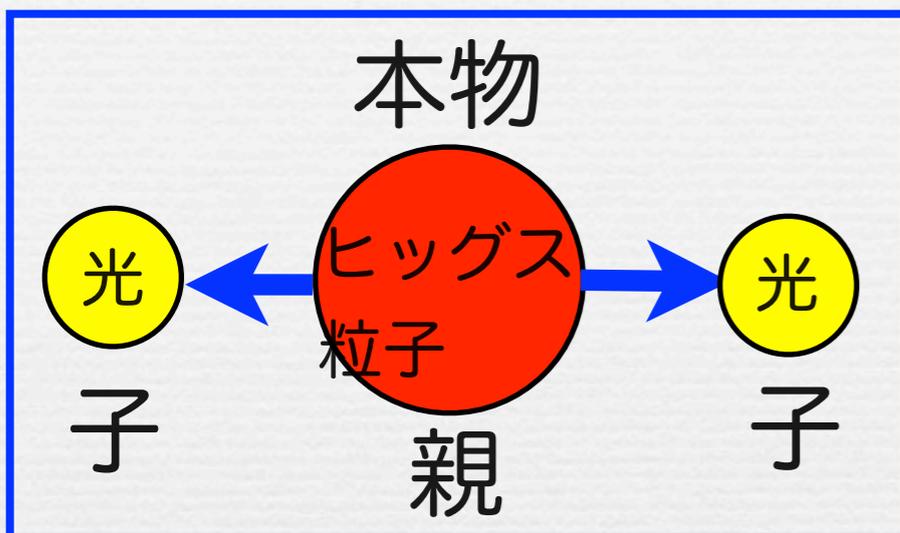
ヒッグス
粒子

||
の質量

||
適当な質量

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

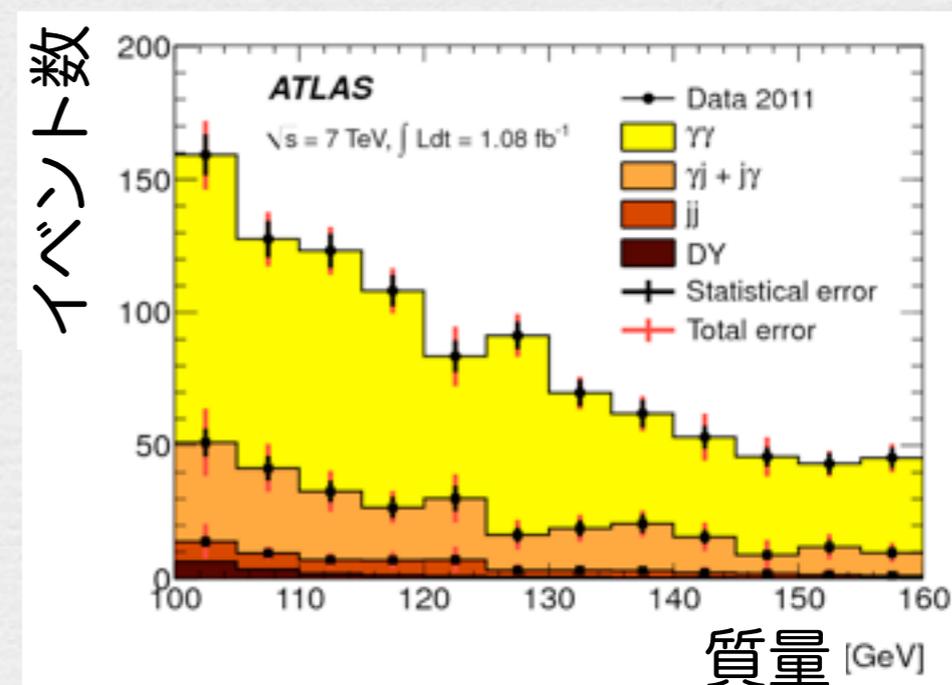
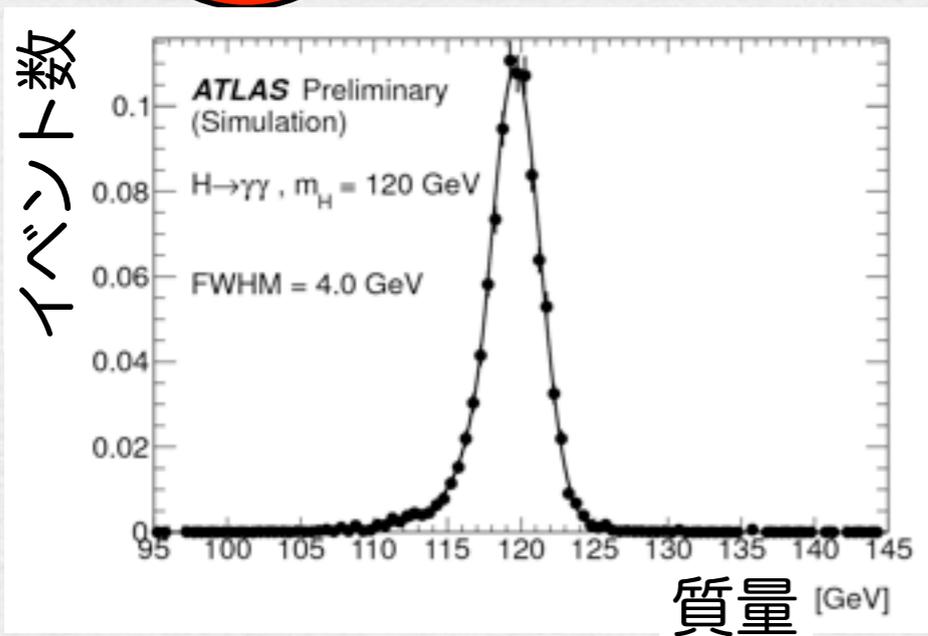


$$(\text{親の質量})^2 = (\text{子のエネルギー和})^2 - (\text{子の運動量和})^2$$

ヒッグス
粒子

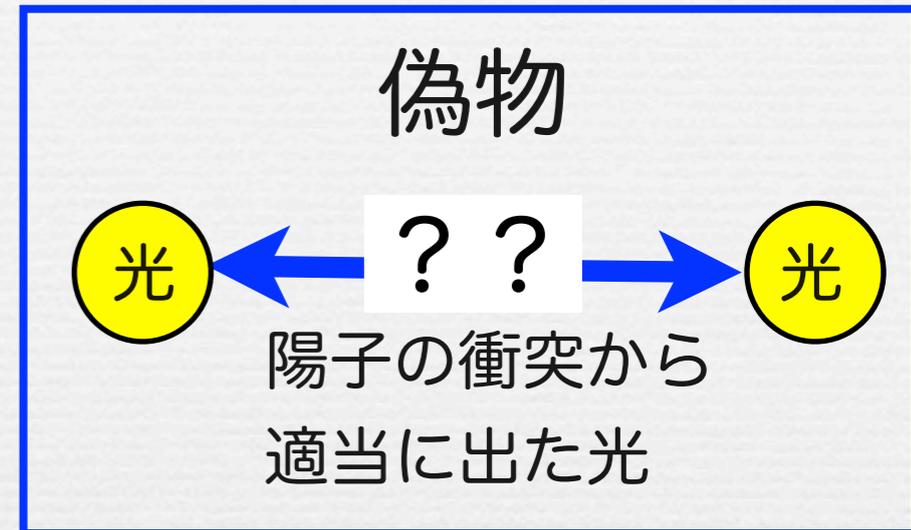
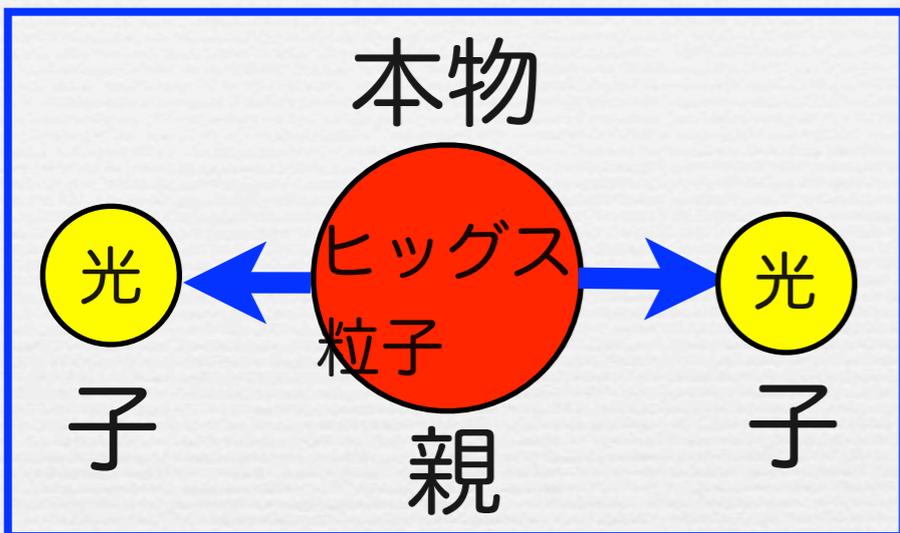
||
の質量

||
適当な質量



質量の復元

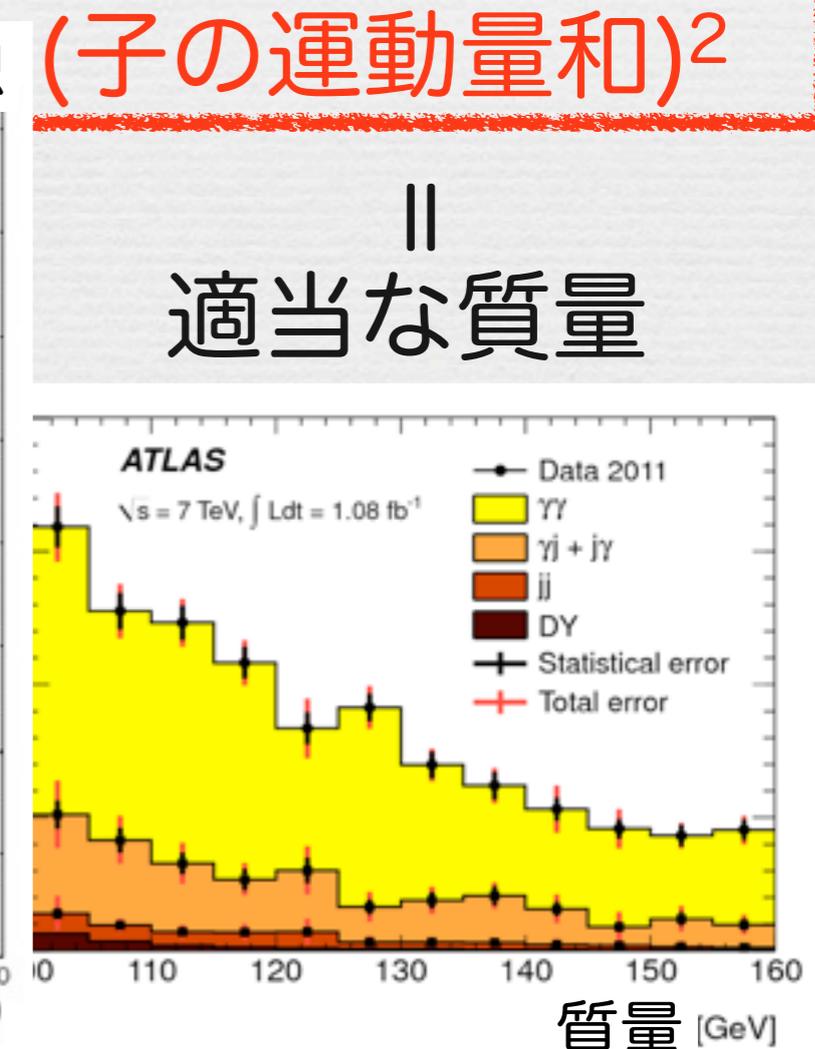
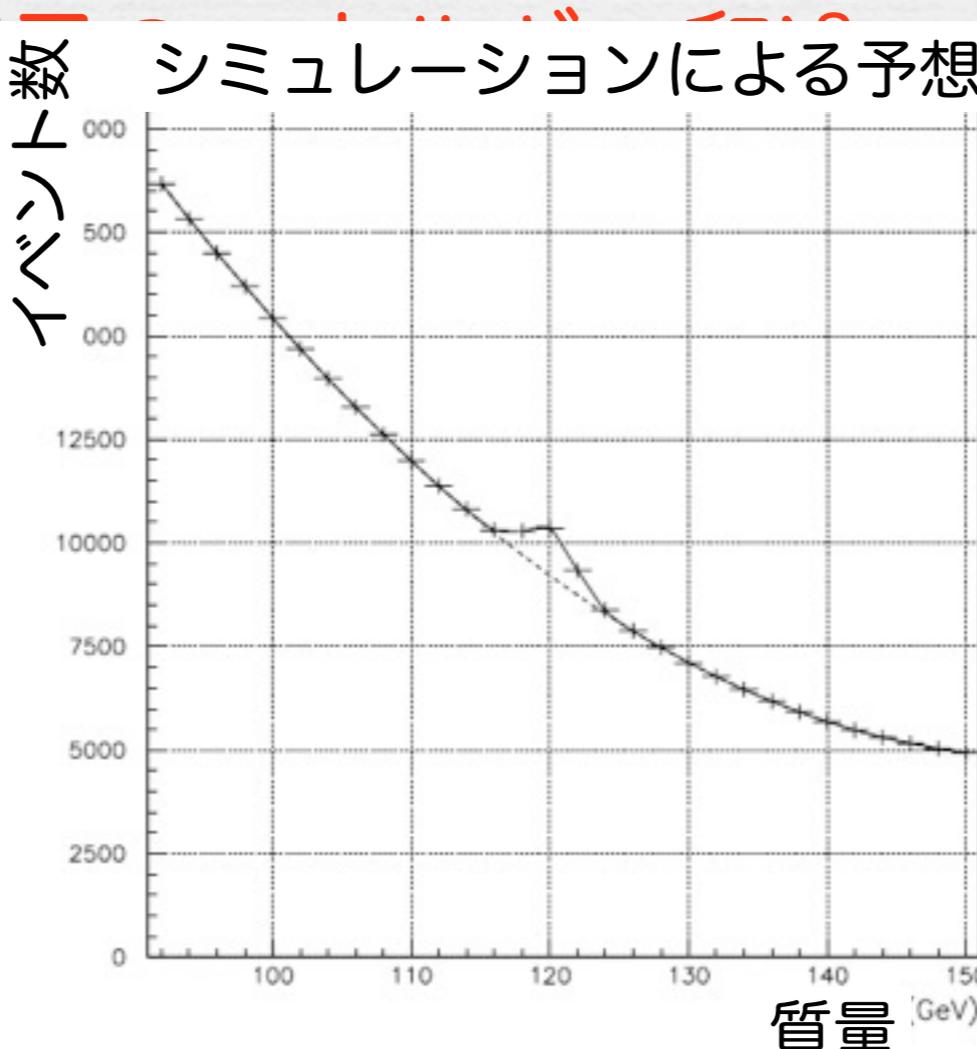
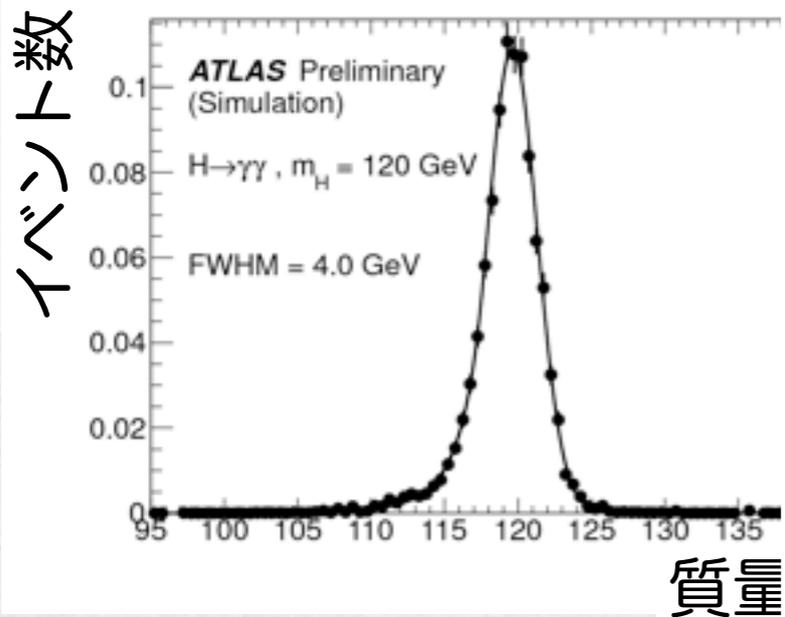
2本の光子のあるイベントは2種類に大別される



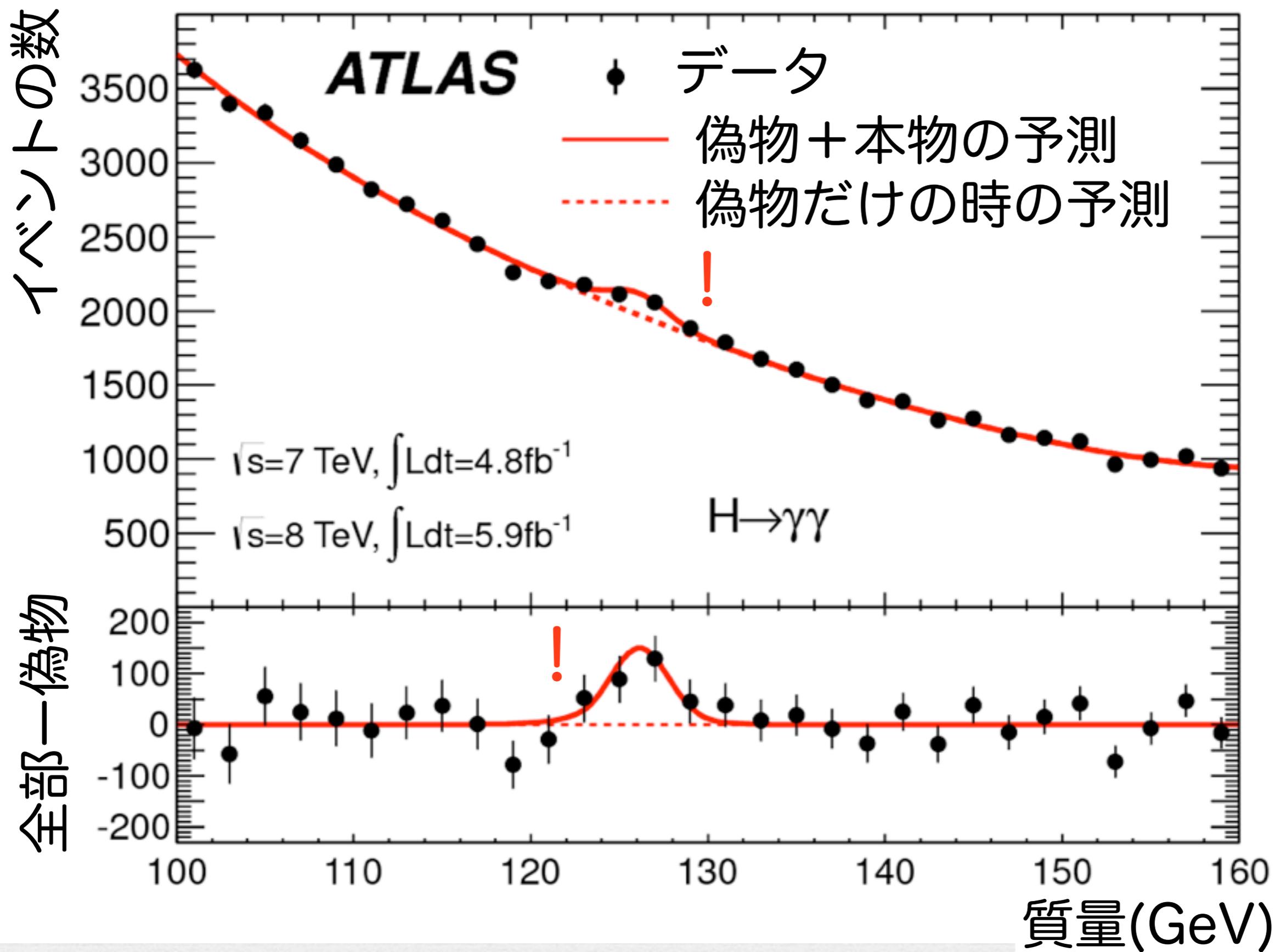
$(\text{親の質量})^2 = (\text{光子の運動量和})^2$ シミュレーションによる予想 $(\text{子の運動量和})^2$

ヒッグス
粒子
||
の質量

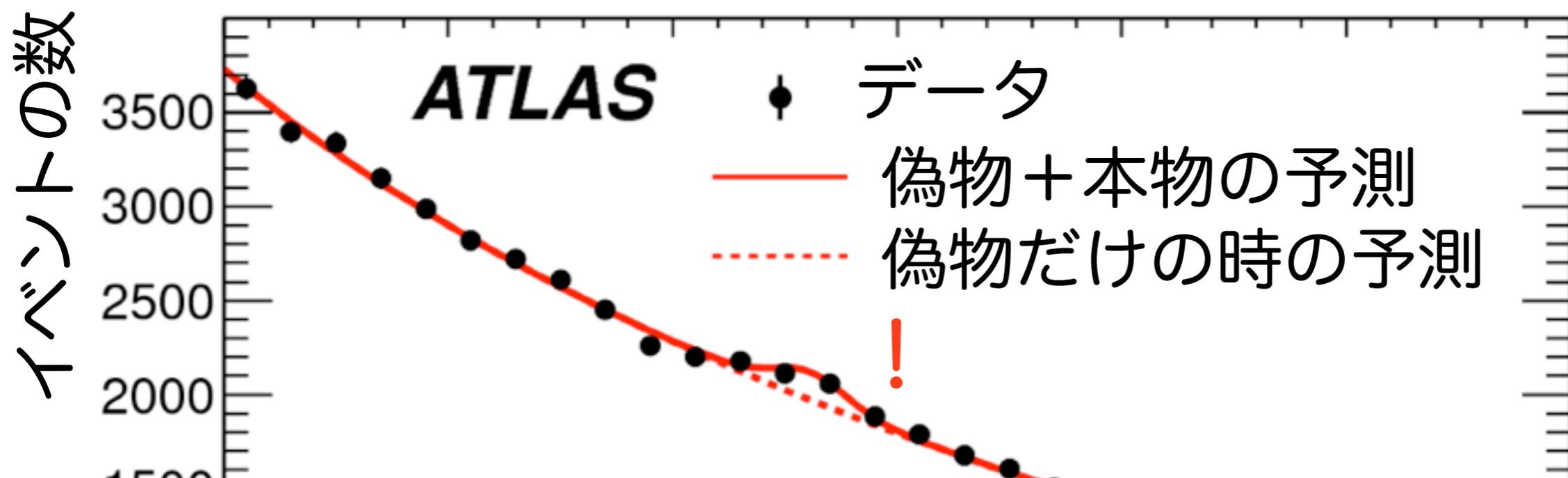
||
適当な質量



実際のデータ



実際のデータ

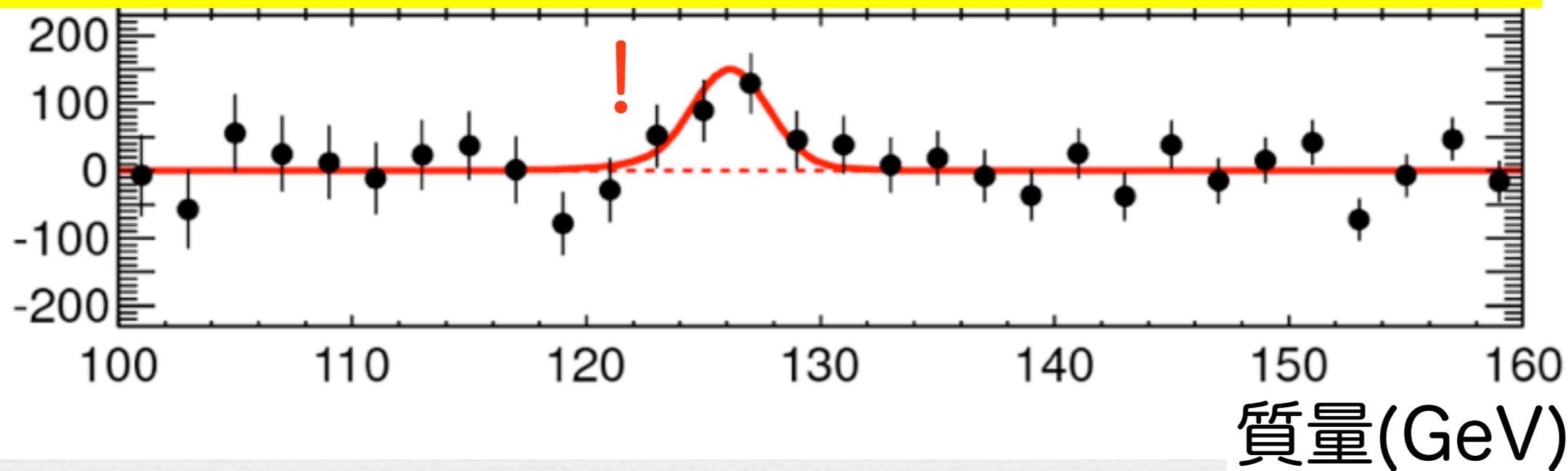


他の実験との比較

現在・過去・未来の比較

→統計学にもとづいた指標が必要 (有意度)

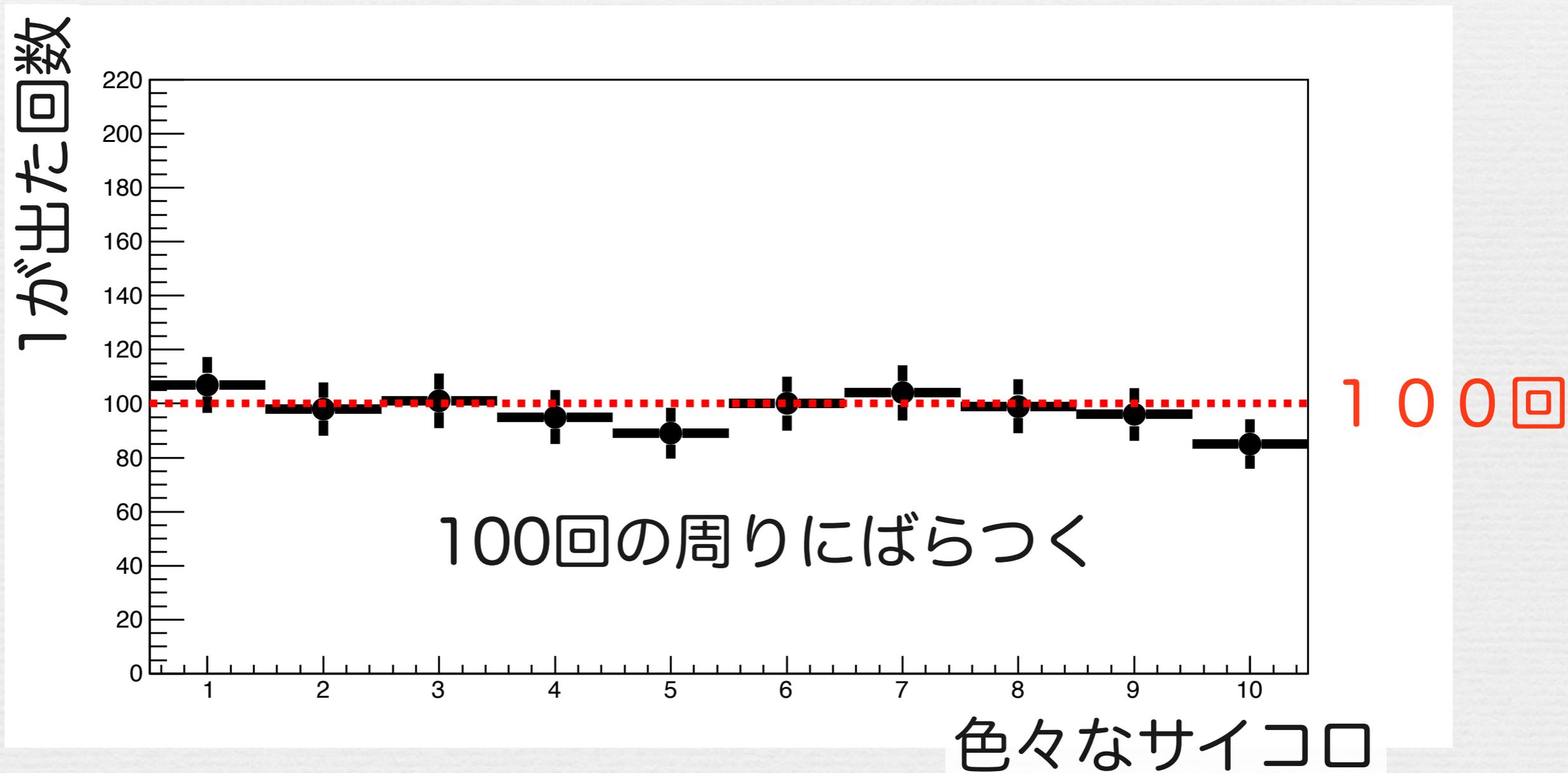
全部—偽物



いかさまサイコロを探す

普通のさいころの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



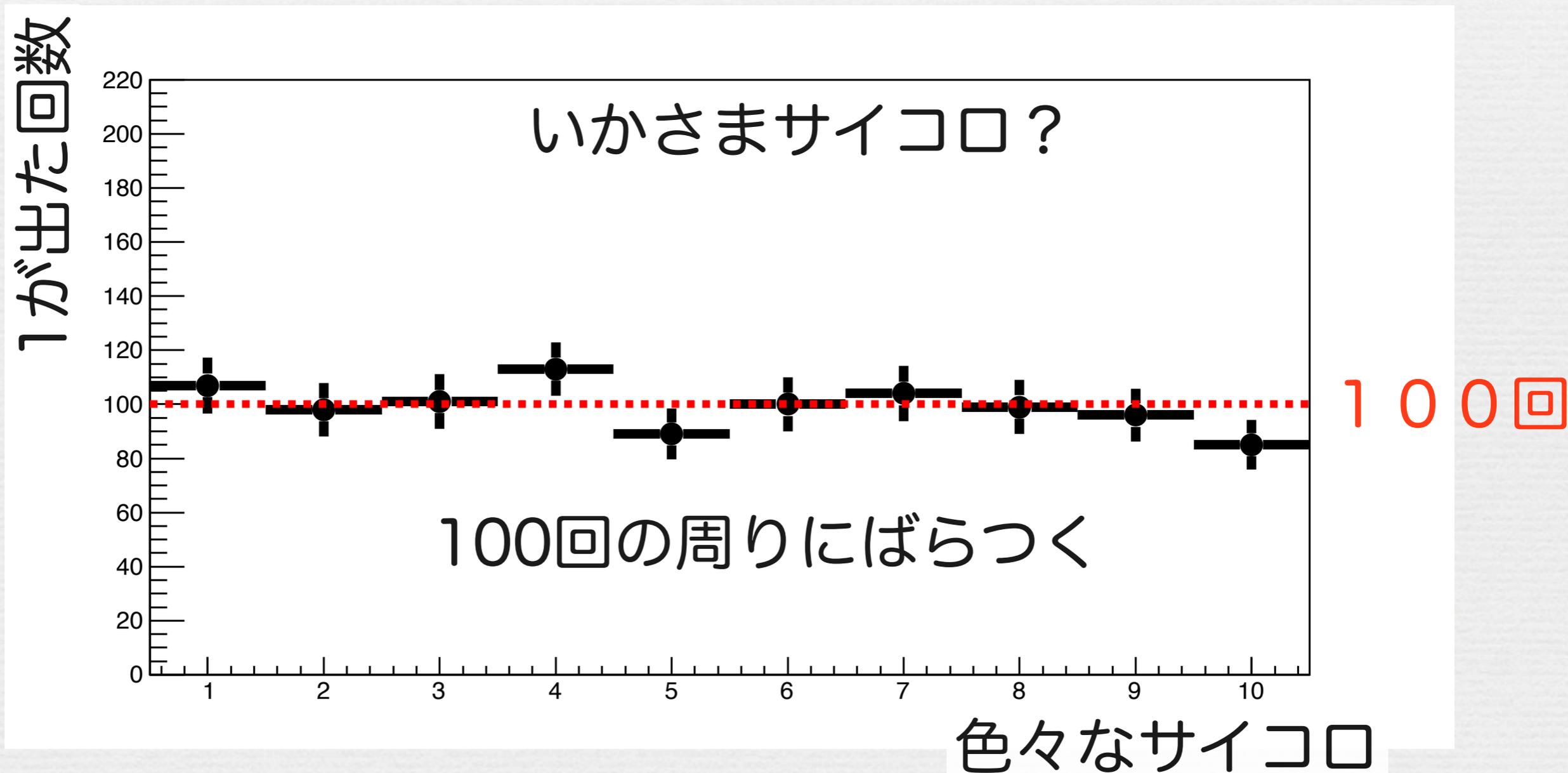
いかさまサイコロを探す

普通のさいころの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



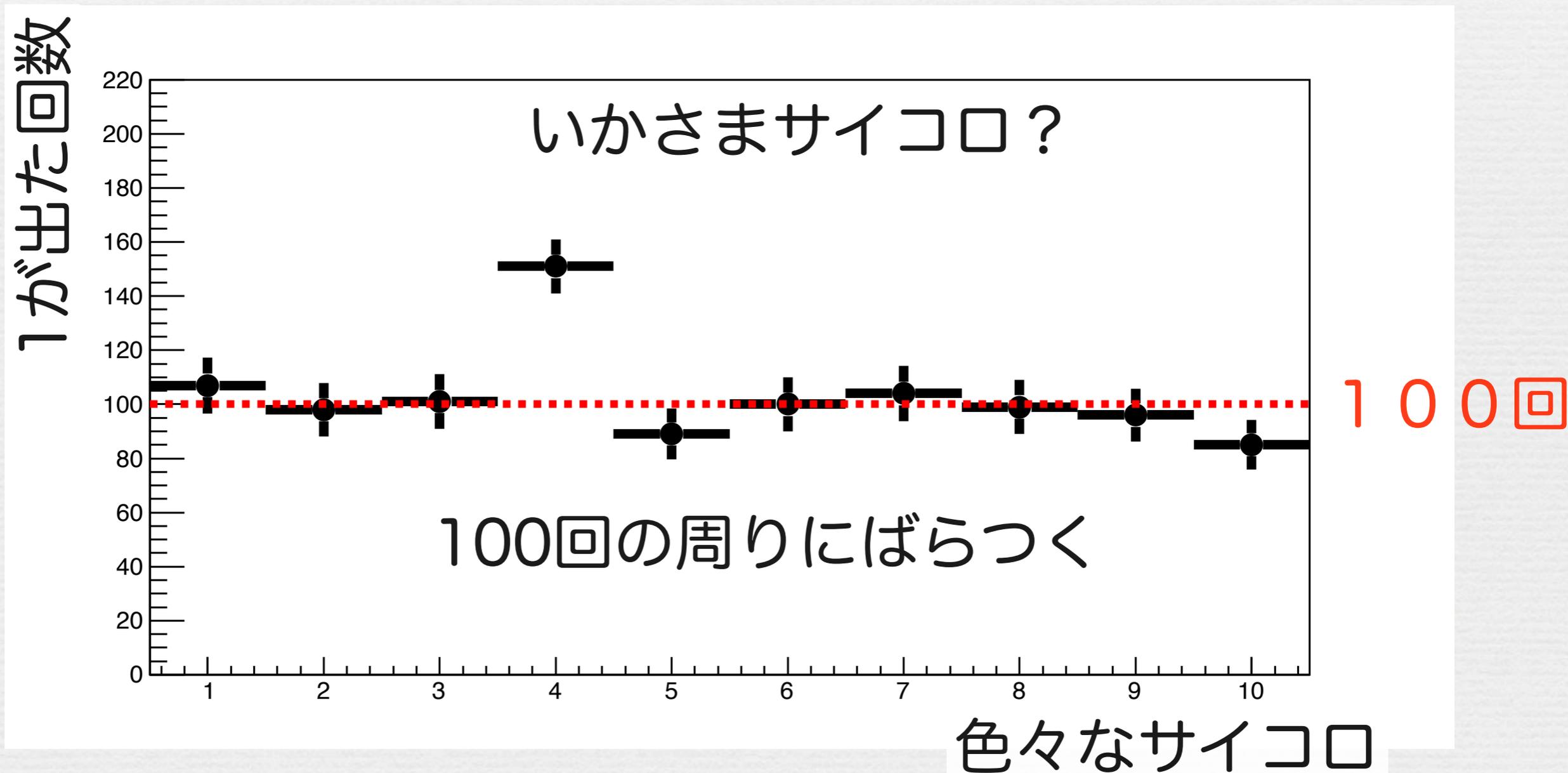
いかさまサイコロを探す

普通のさいころの1の目が出る確率 $1/6$

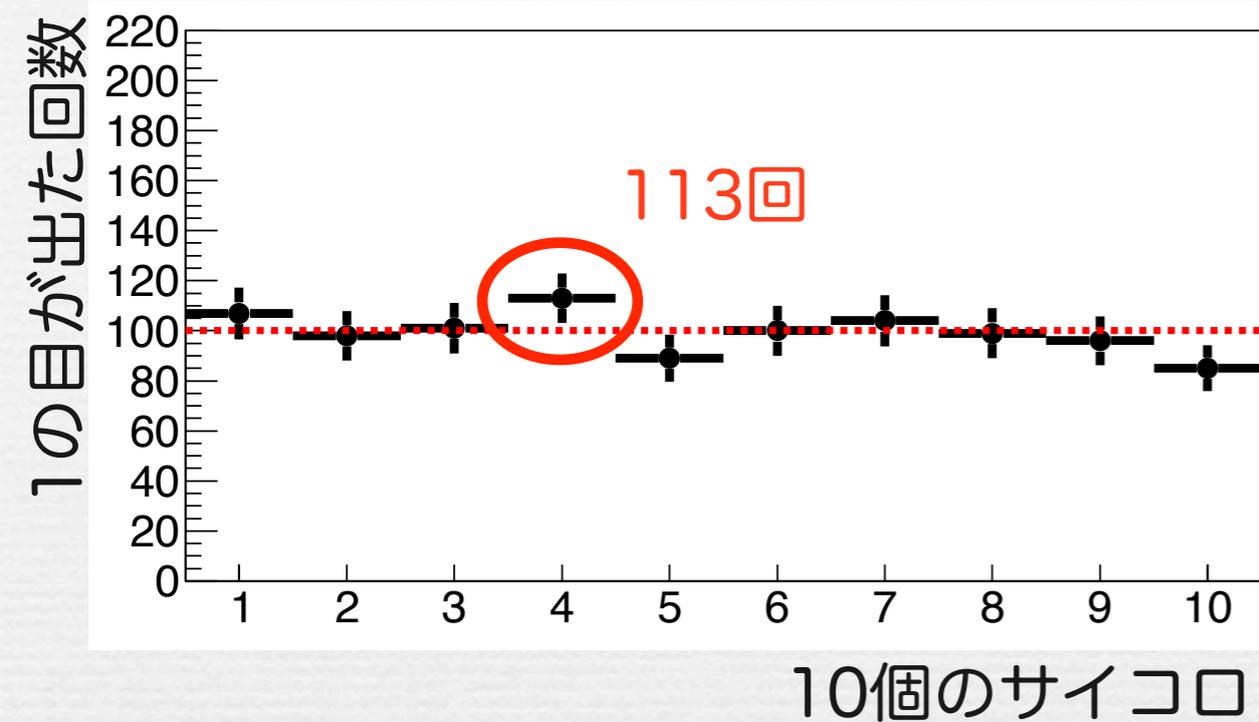
10個のサイコロをそれぞれ600回ずつ振ってみる

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

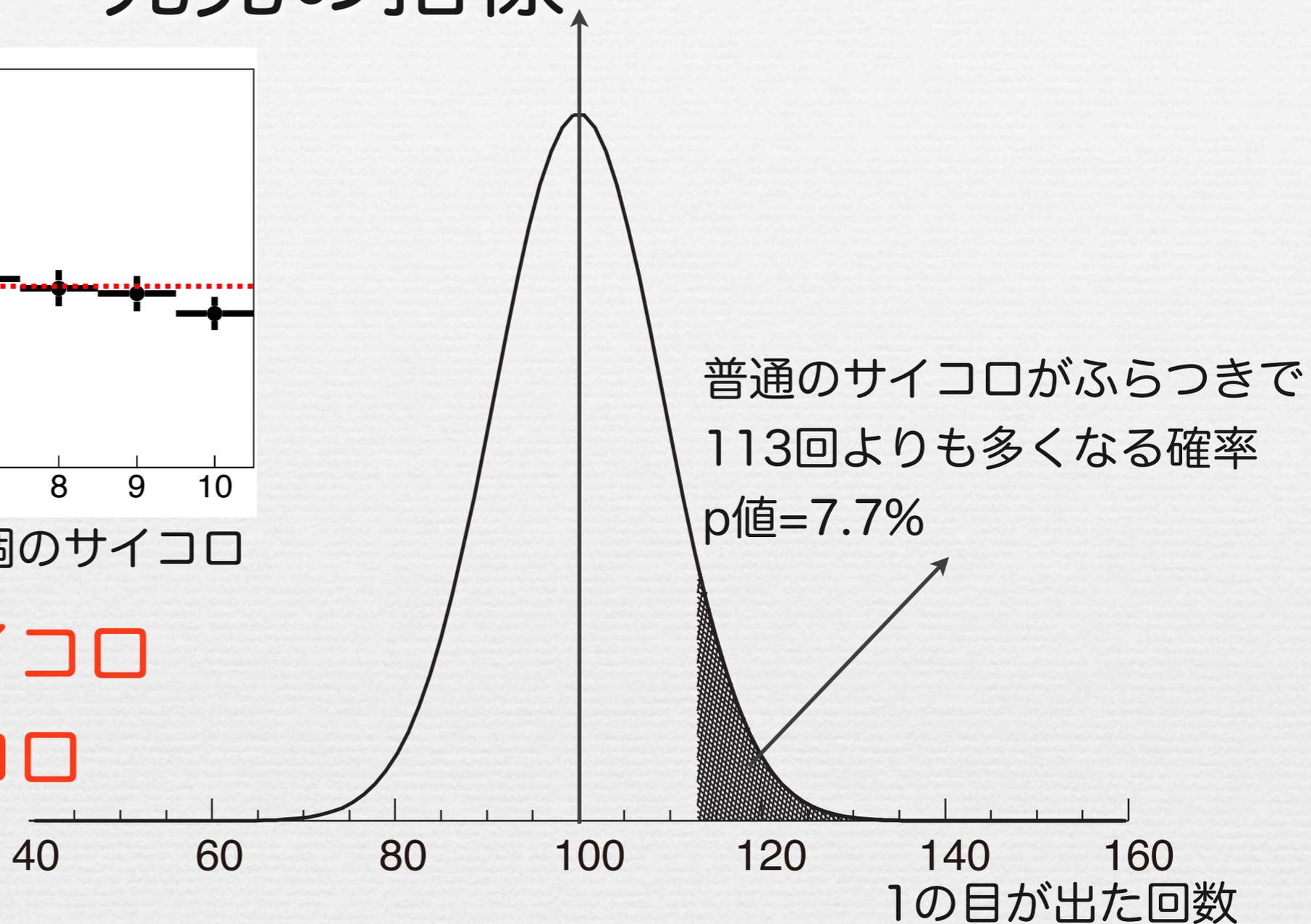


発見の指標



本物 = いかさまサイコロ

偽物 = 普通のサイコロ



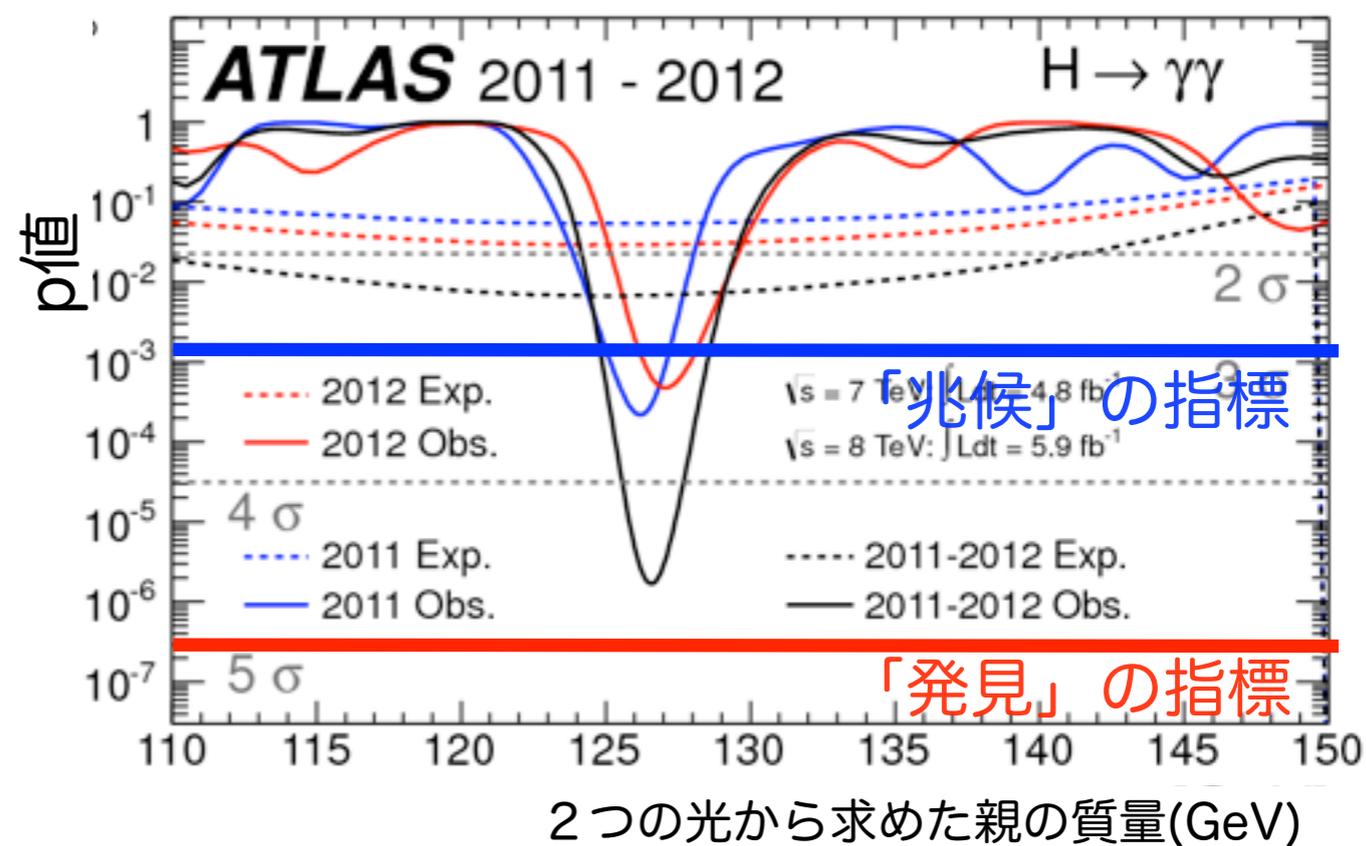
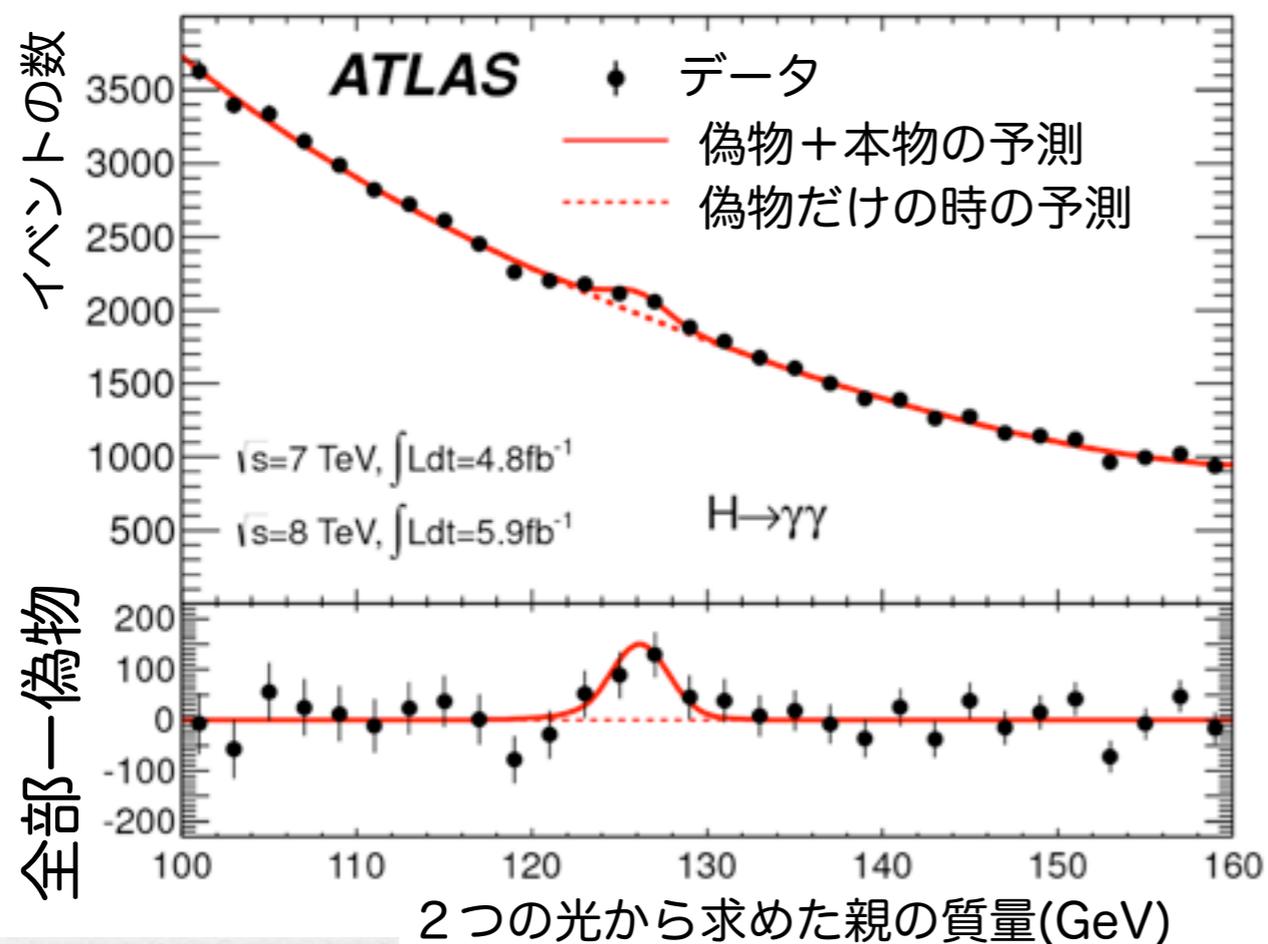
素粒子実験研究者が良く用いる指標

p値 = 740分の1 兆候

p値 = 350万分の1 発見

陽子陽子 \rightarrow H \rightarrow 光子 光子

7月4日の発表時

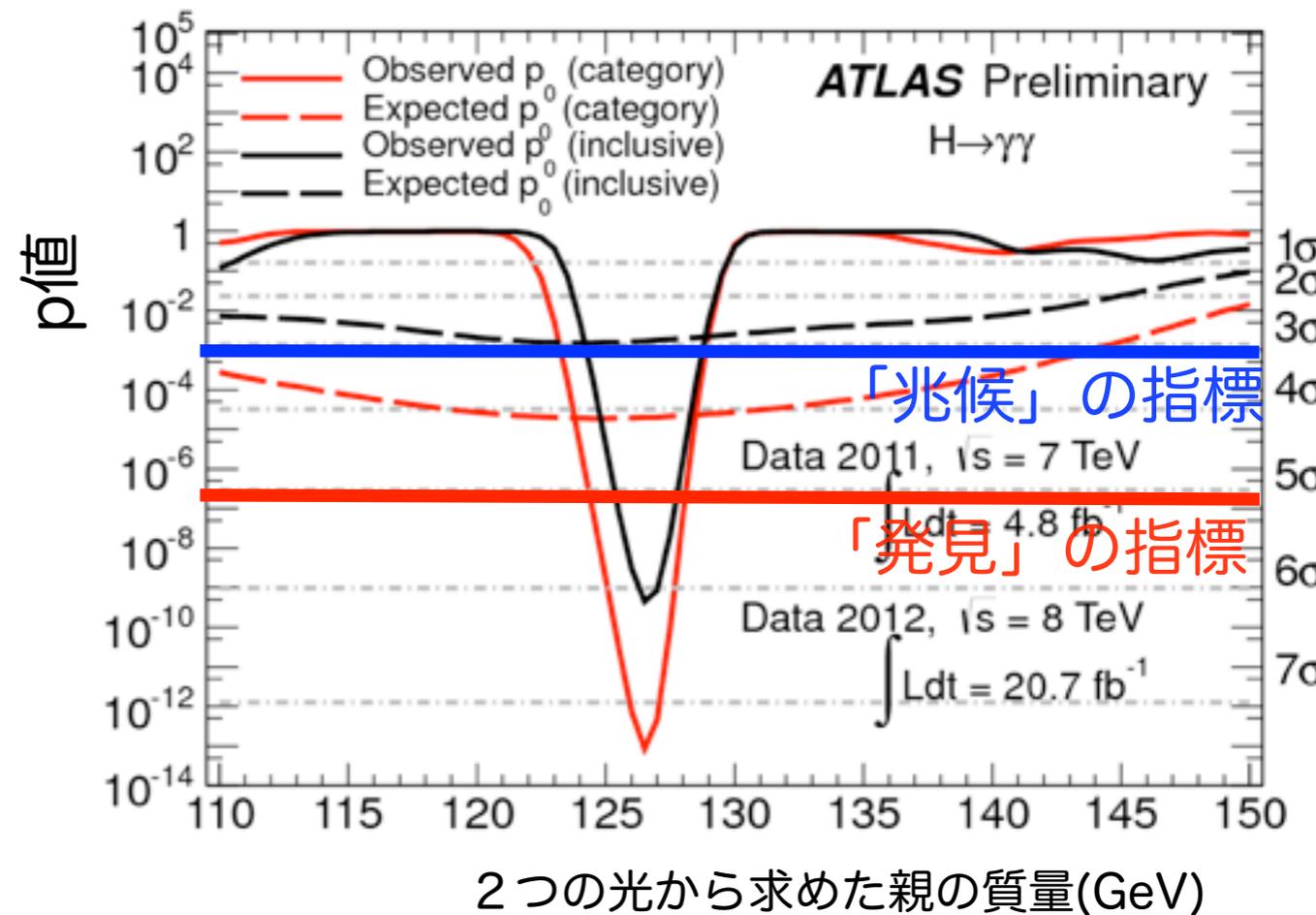
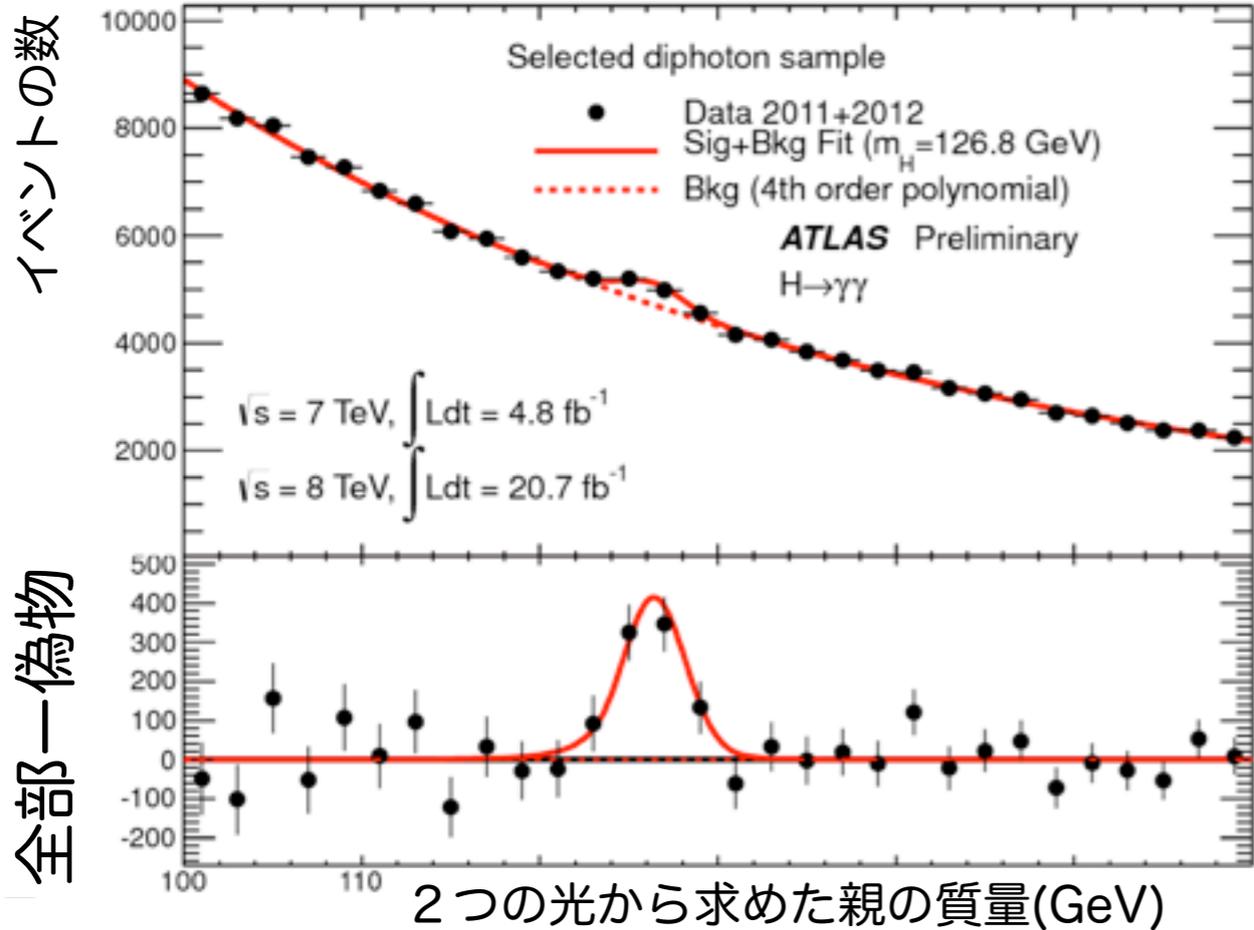


偽物が統計的にふらついて本物と間違える確率

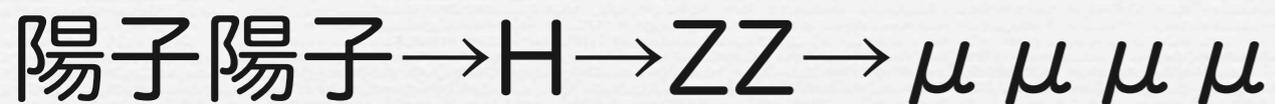
p値 = 30万分の1

陽子陽子 \rightarrow H \rightarrow 光子 光子

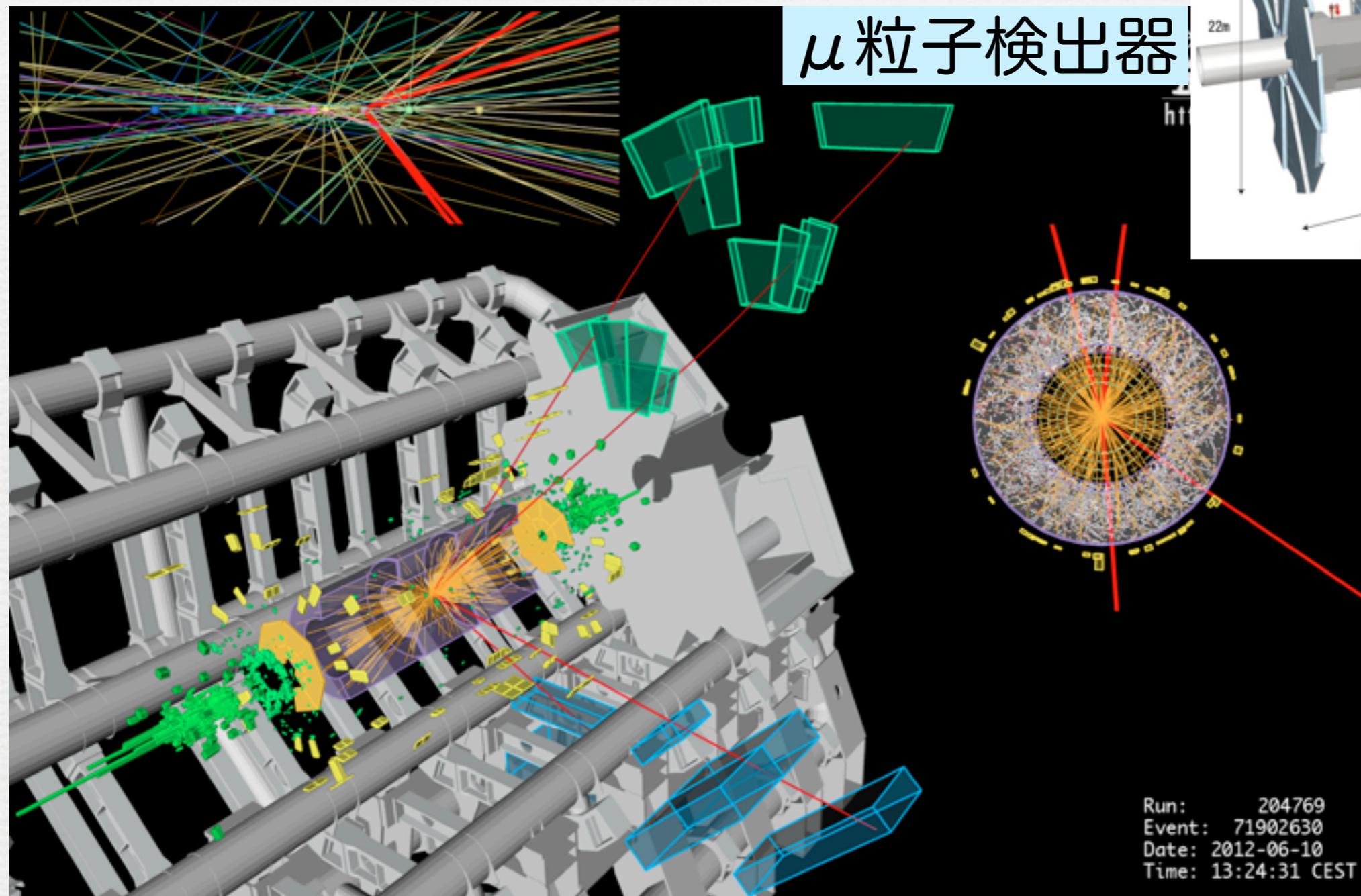
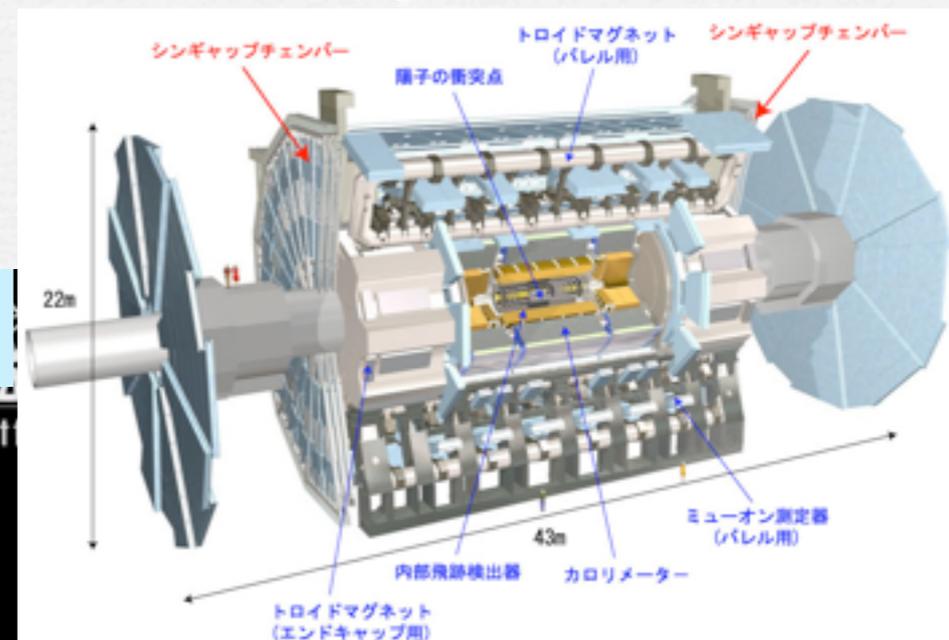
これまでの全データ (7月から倍のデータ)



p値 < 1兆分1以下 発見！！



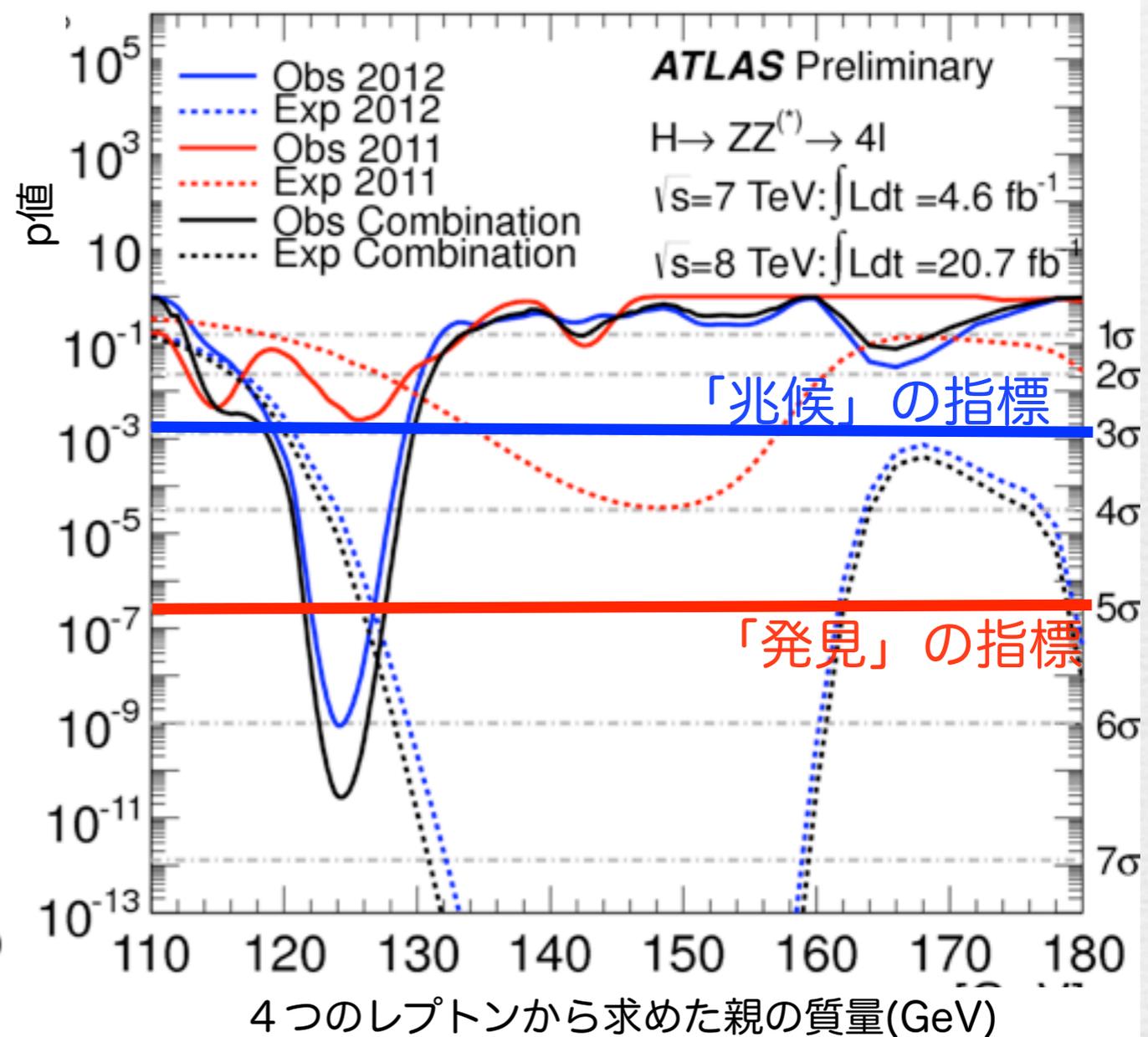
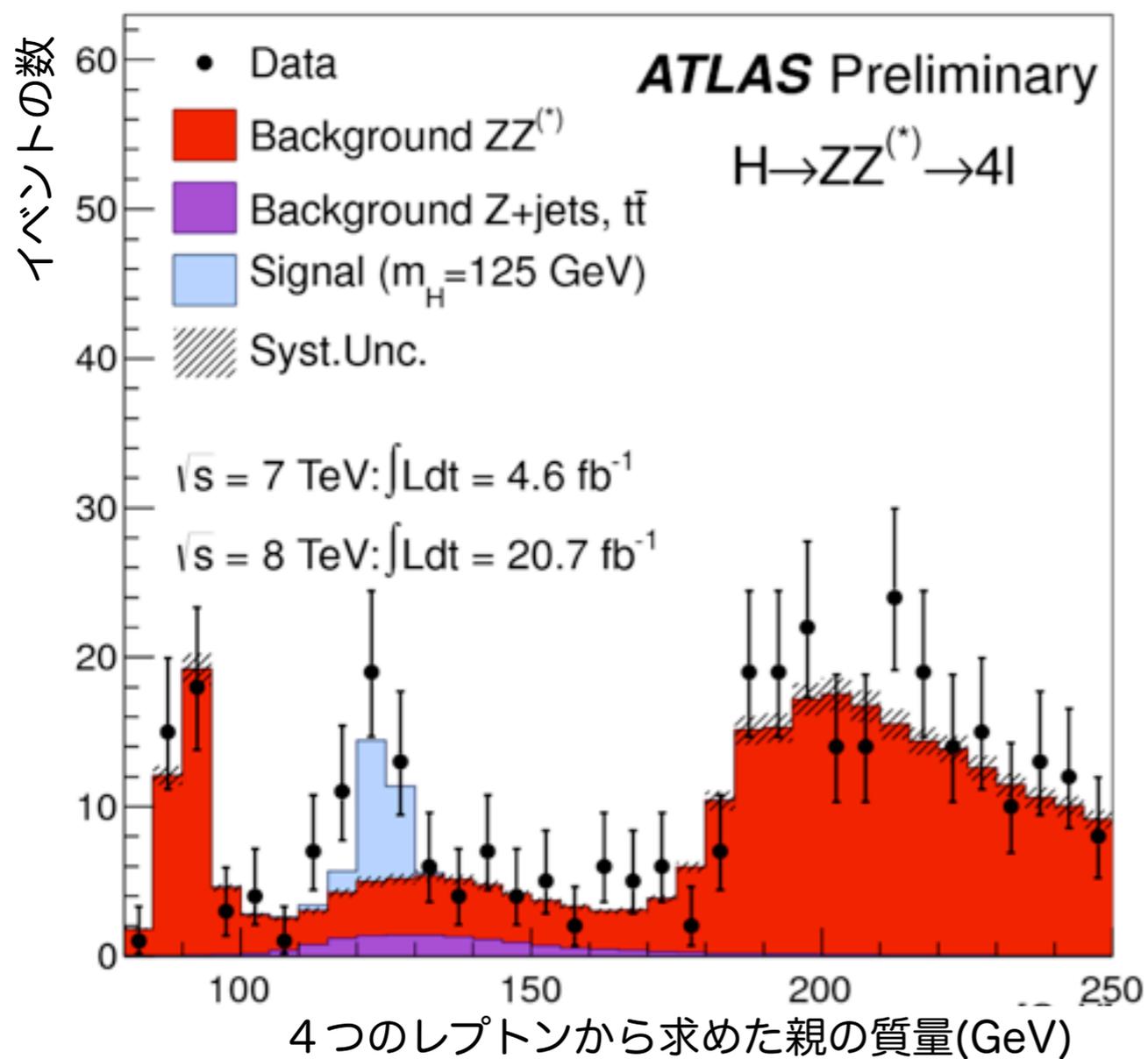
μ 粒子検出器



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

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

これまでの全データ

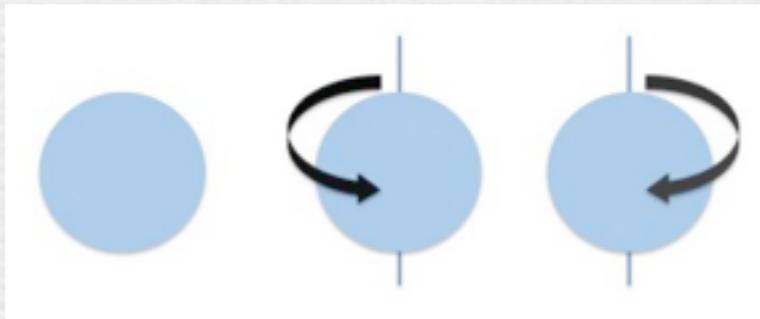


p値 < 百億分1以下 **発見！！**

新粒子発見の意義とこれから

発見した粒子の解釈（現在）

- 光子 光子、 ZZ 、 WW に化ける粒子
- 質量は、 126GeV
- スピンがゼロ(向きなし)である可能性が高い
→ スピンがある可能性を棄却

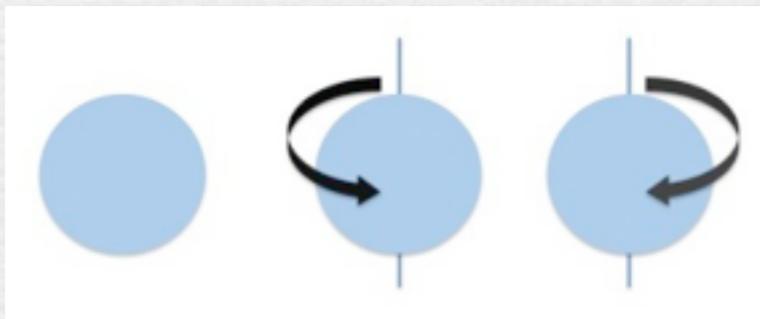


素粒子には固有のスピン

- 2つの実験で独立に確認

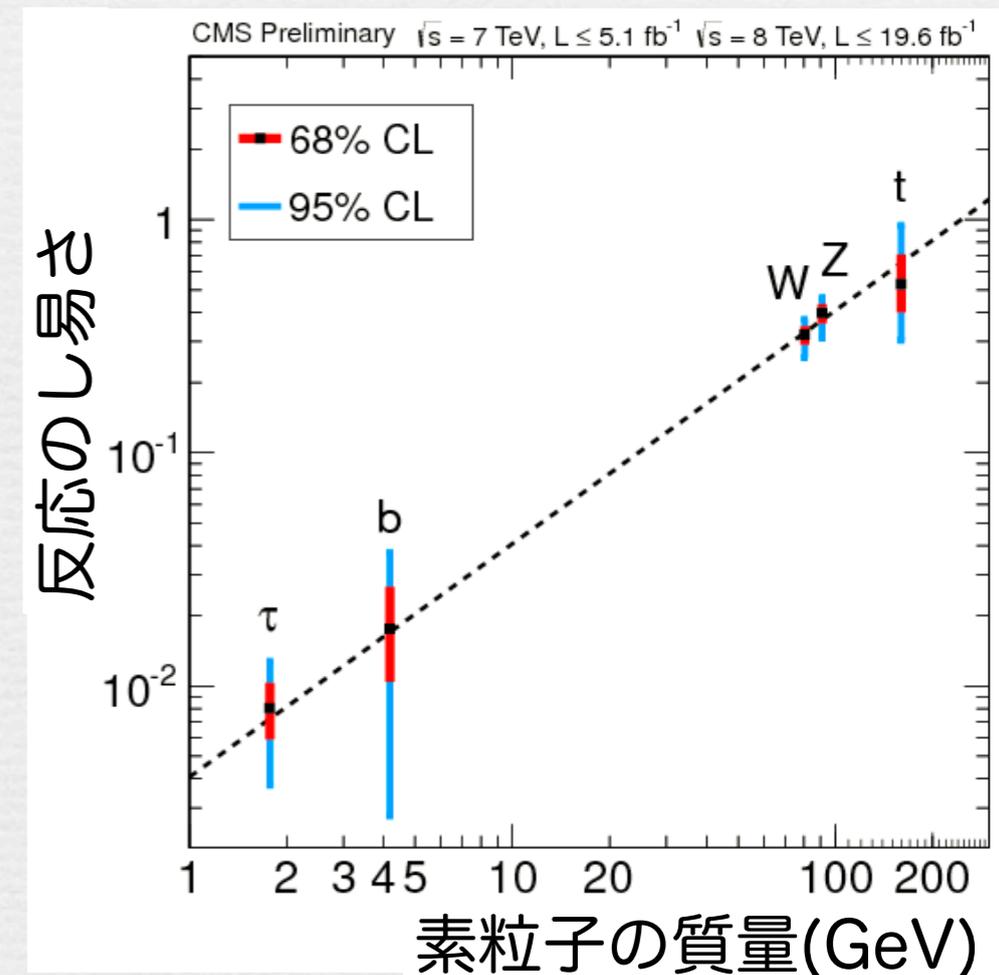
発見した粒子の解釈（現在）

- 光子 光子、ZZ、**WW** に化ける粒子
- 質量は、126GeV
- スピンがゼロ(向きなし)である可能性が高い
→ スピンがある可能性を棄却



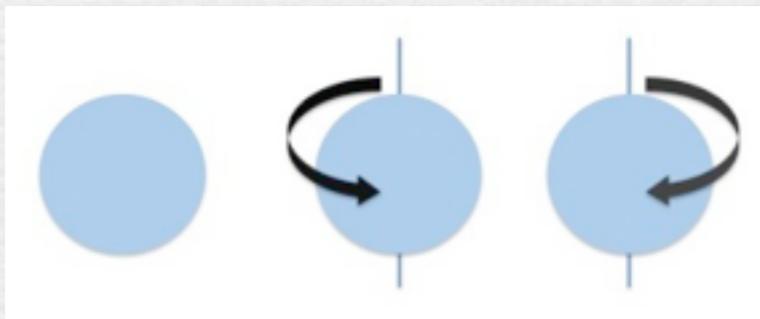
素粒子には固有のスピン

- 重い粒子ほど反応しやすい
- 2つの実験で独立に確認



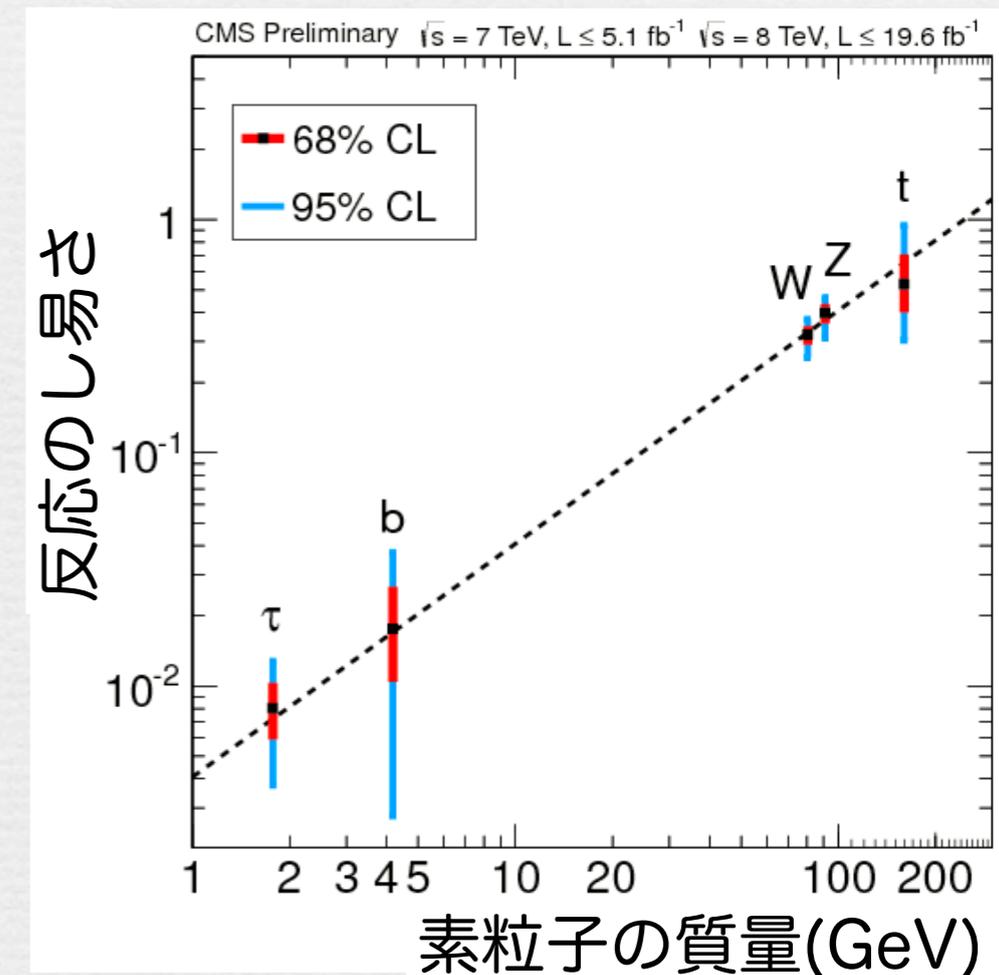
発見した粒子の解釈（現在）

- 光子 光子、ZZ、**WW** に化ける粒子
- 質量は、126GeV
- スピンがゼロ(向きなし)である可能性が高い
→ スピンがある可能性を棄却



素粒子には固有のスピン

- 重い粒子ほど反応しやすい
- 2つの実験で独立に確認



素粒子の質量と関係する粒子 → **ヒッグス粒子発見!**

どんなヒッグスなのか？

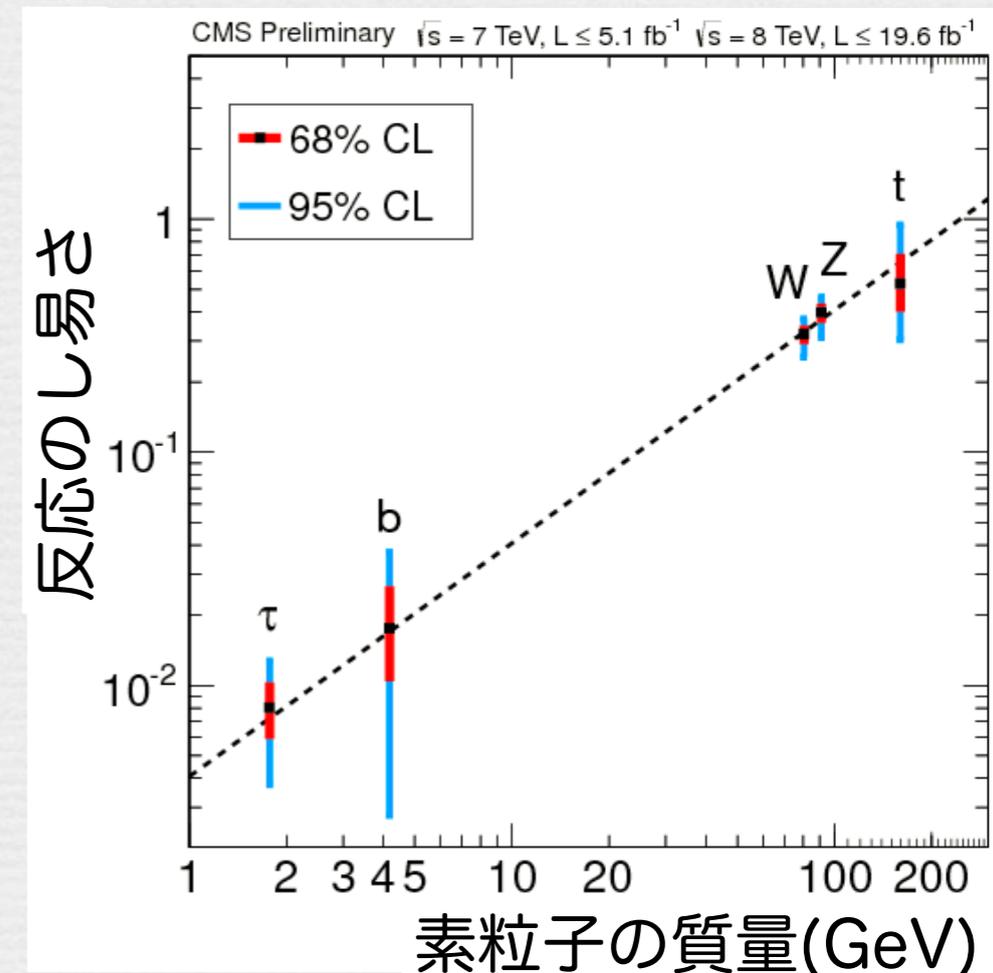
標準模型が予言するヒッグス粒子かどうかはわからない

ヒッグス粒子の性質には理論的な裏付けがない

実験による新しい知見が不可欠！

- スピンなどのヒッグス粒子固有の精密に測定する
- tクォーク、bクォーク、 τ 粒子との反応を精密に測定
- 仲間を探す
-

ヒッグス粒子を使った
新たな物理探索が始まった！！！！



ヒッグス粒子の発見で終わりか？

標準模型の大成功

ゲージ理論による電磁気力、強い力、弱い力

ヒッグス機構

3世代のクォークとレプトン、湯川相互作用

これまでの現象($\sim 100\text{GeV}$)を説明することに成功

標準模型の問題点

なぜ、3つの力、世代構造、沢山の湯川相互作用

重力が入っていない

ヒッグス場の真空期待値の大きさはどこから？

統一されたより基本的な理論が存在するはず

統一理論

- 電弱力 と 強い力の統一
- 万物の理論への可能性
- 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

電弱統一

弱い力

強い力

重力

惑星

ニュートン

りんご

重力

アインシュタイン

ヒッグス粒子

10^2 GeV

10^{16} GeV?

電弱統一

力の大統一?

超弦理論?

ヒッグス粒子発見はさらなる新発見の序章

微調整問題

$$(\text{実際の質量})^2 = (\text{裸の質量})^2 + (\text{補正量})^2$$

$$126^2 = 1000000000000000000126^2 - \underline{10000000000000000000000^2}$$

大きな補正量

→ ヒッグス粒子固有の問題

ヒッグス粒子発見はさらなる新発見の序章

微調整問題

$$(\text{実際の質量})^2 = (\text{裸の質量})^2 + (\text{補正量})^2$$

$$126^2 = 1000000000000000000126^2 - \underline{10000000000000000000000^2}$$

大きな補正量

→ ヒッグス粒子固有の問題

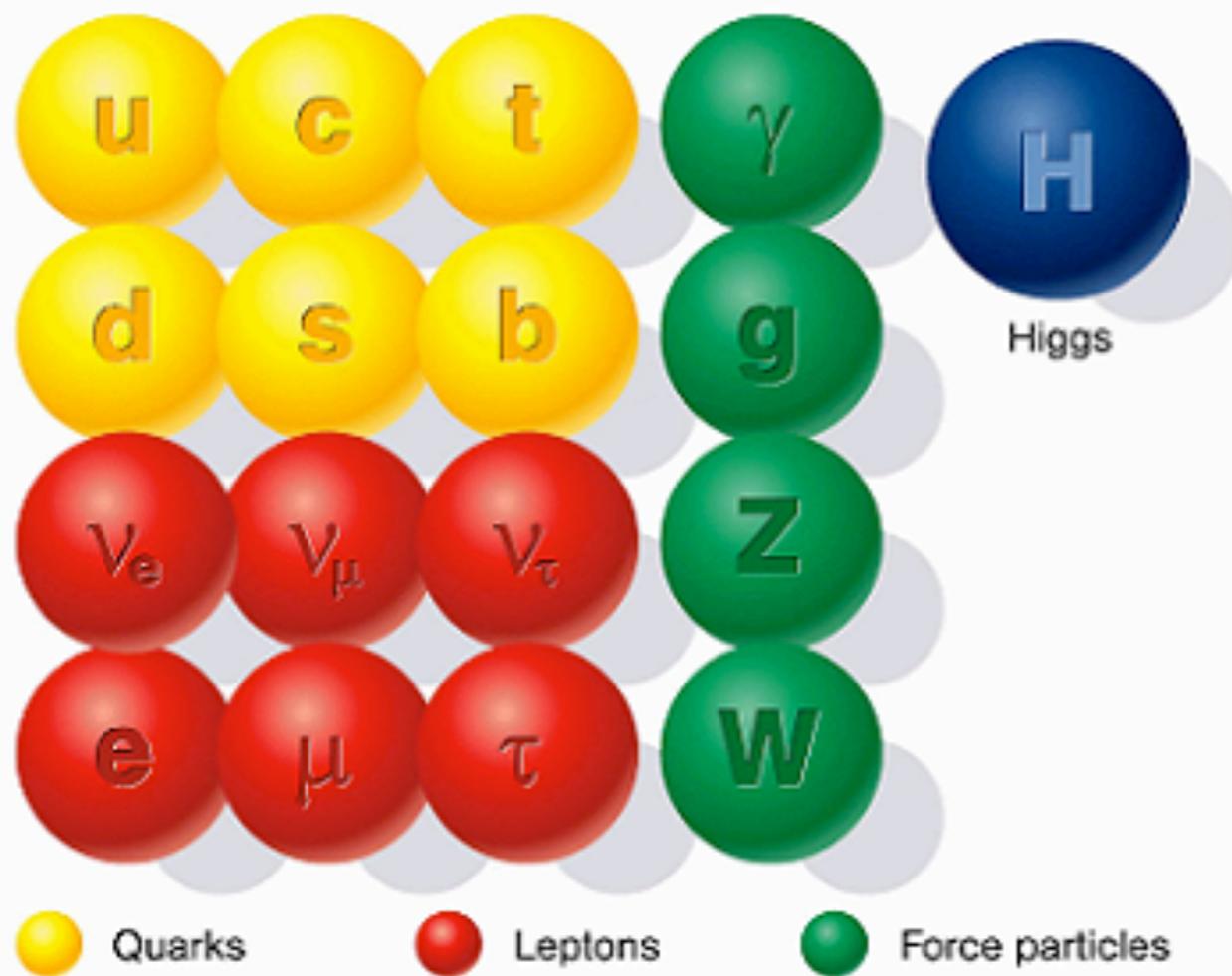
この解決には、さらに、“超対称性”などの新物理が必要

超対称性：Supersymmetry (SUSY)

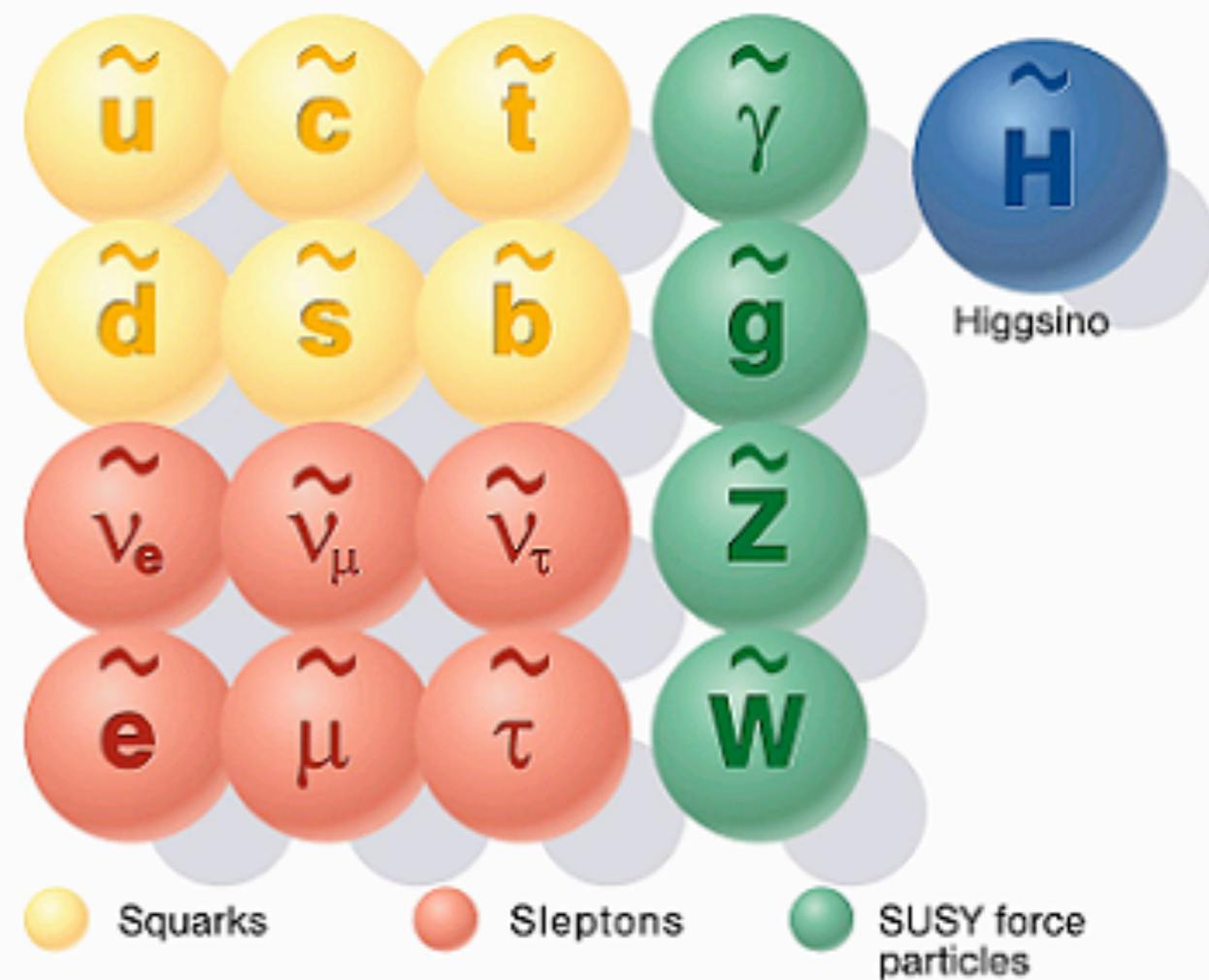
→ LHC実験にて探索中

超对称性 (SUSY) 粒子

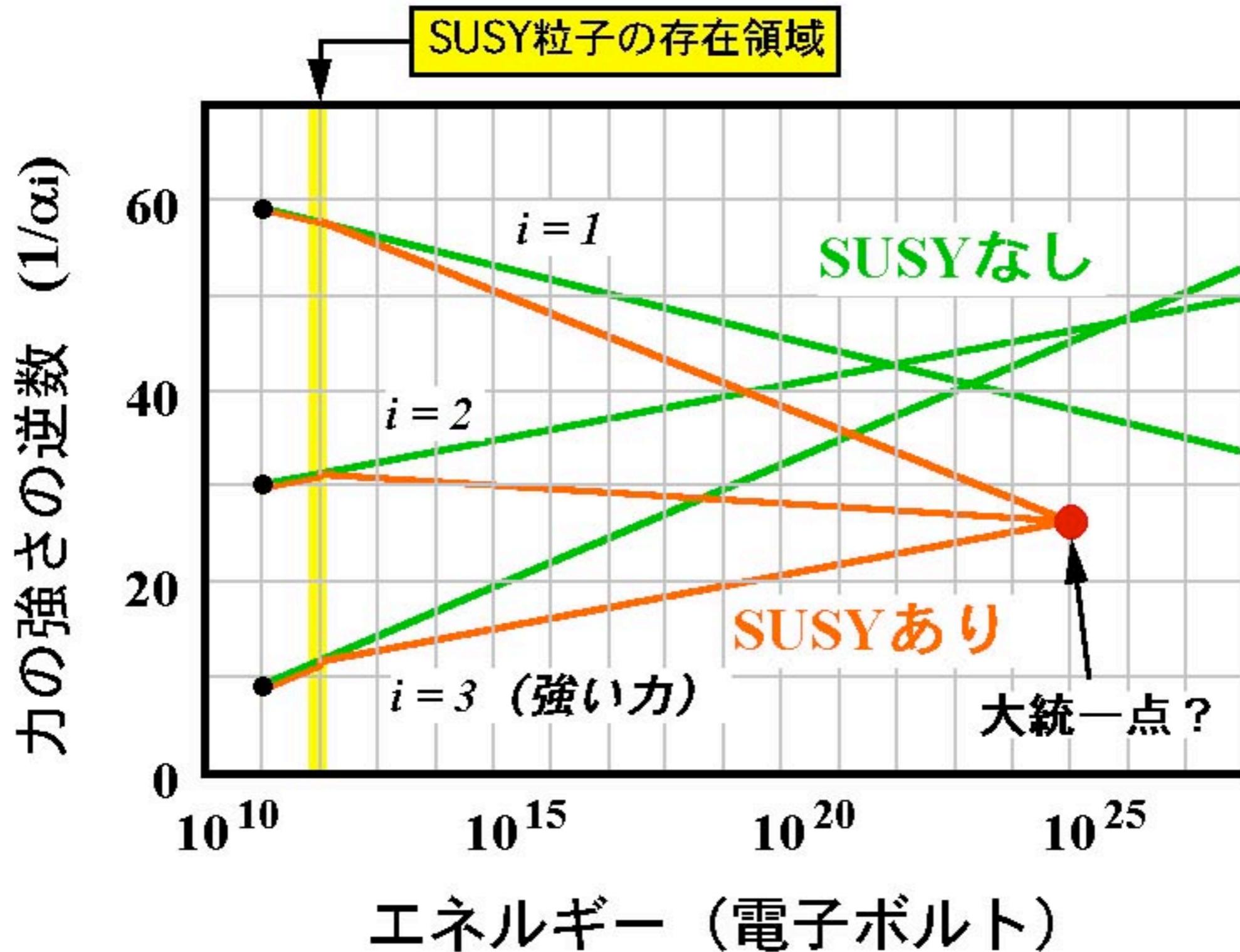
Standard particles



SUSY particles

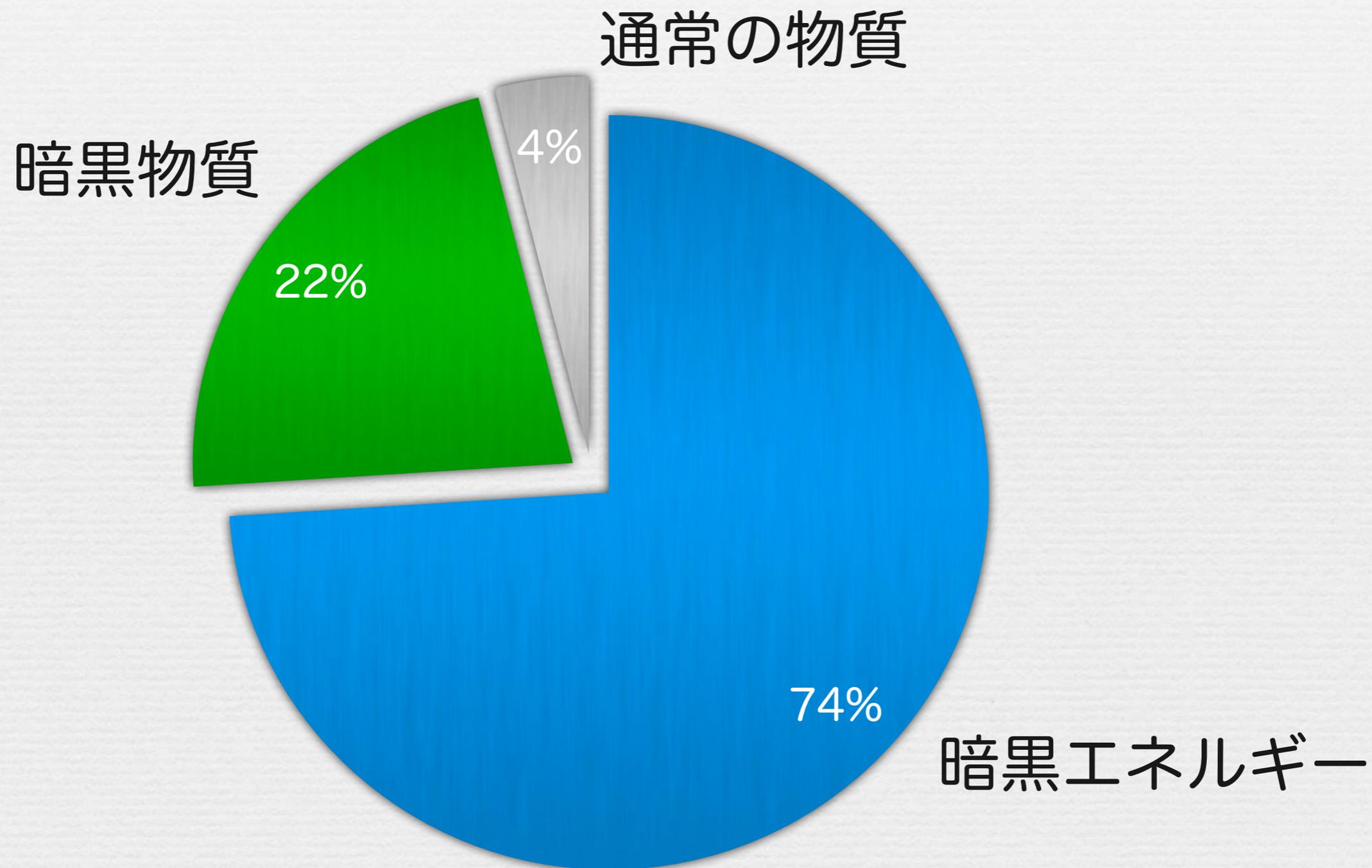


力の統一の可能性



SUSYがあると

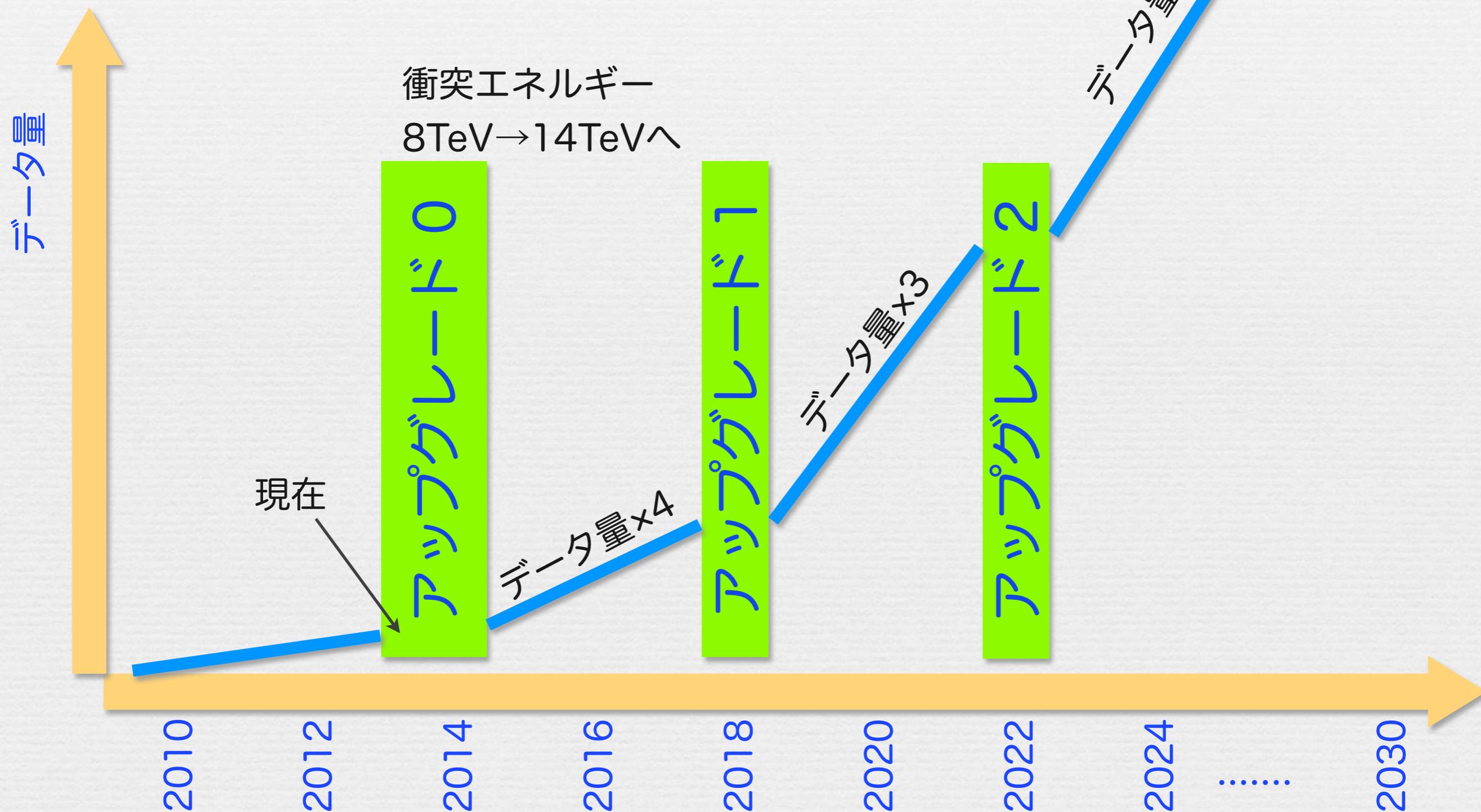
- 暗黒物質の有力候補



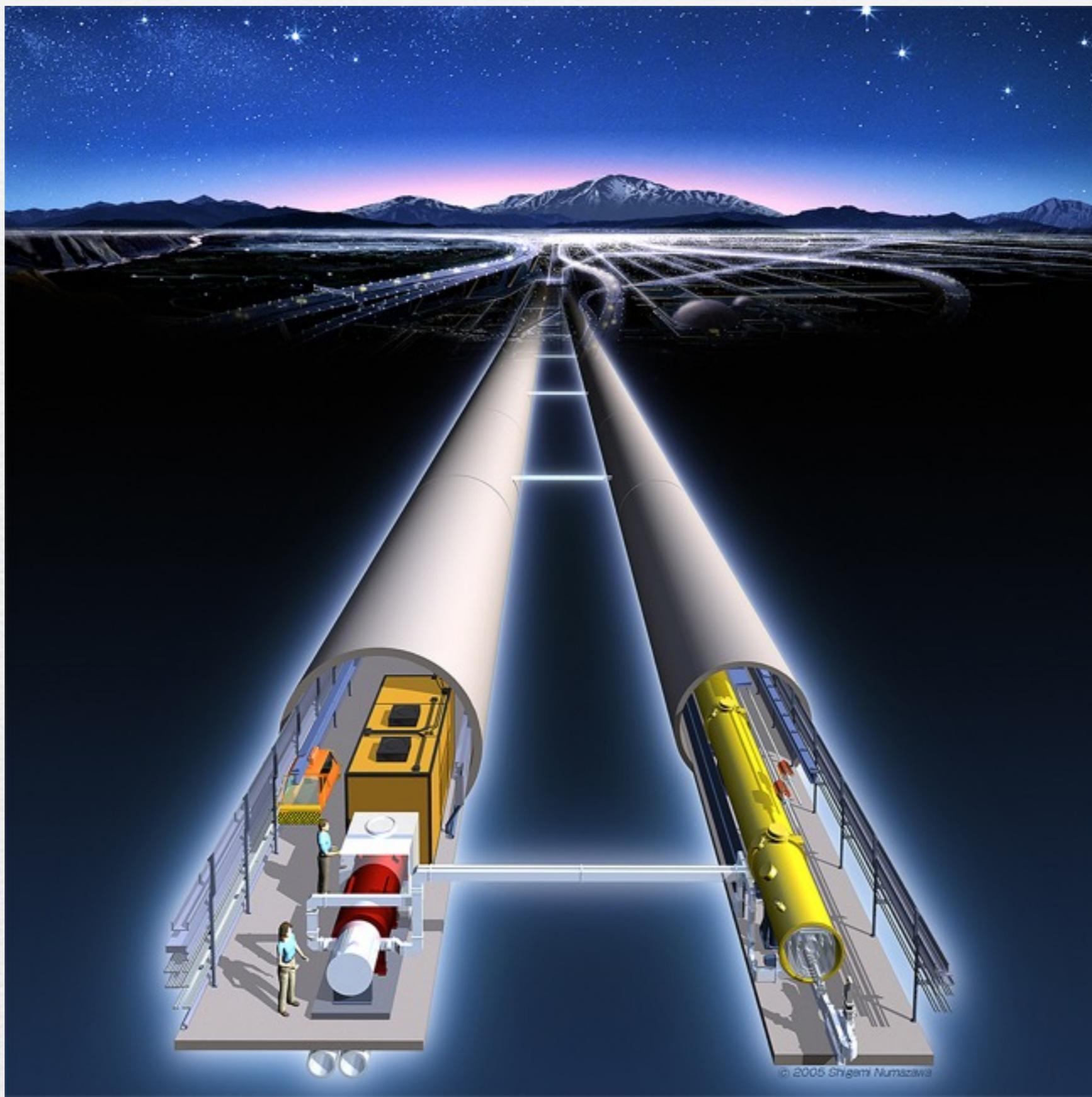
LHC実験はまだまだ続く

加速器と検出器をアップグレード

ヒッグス粒子の性質を理解とさらなる新粒子の発見を目指す

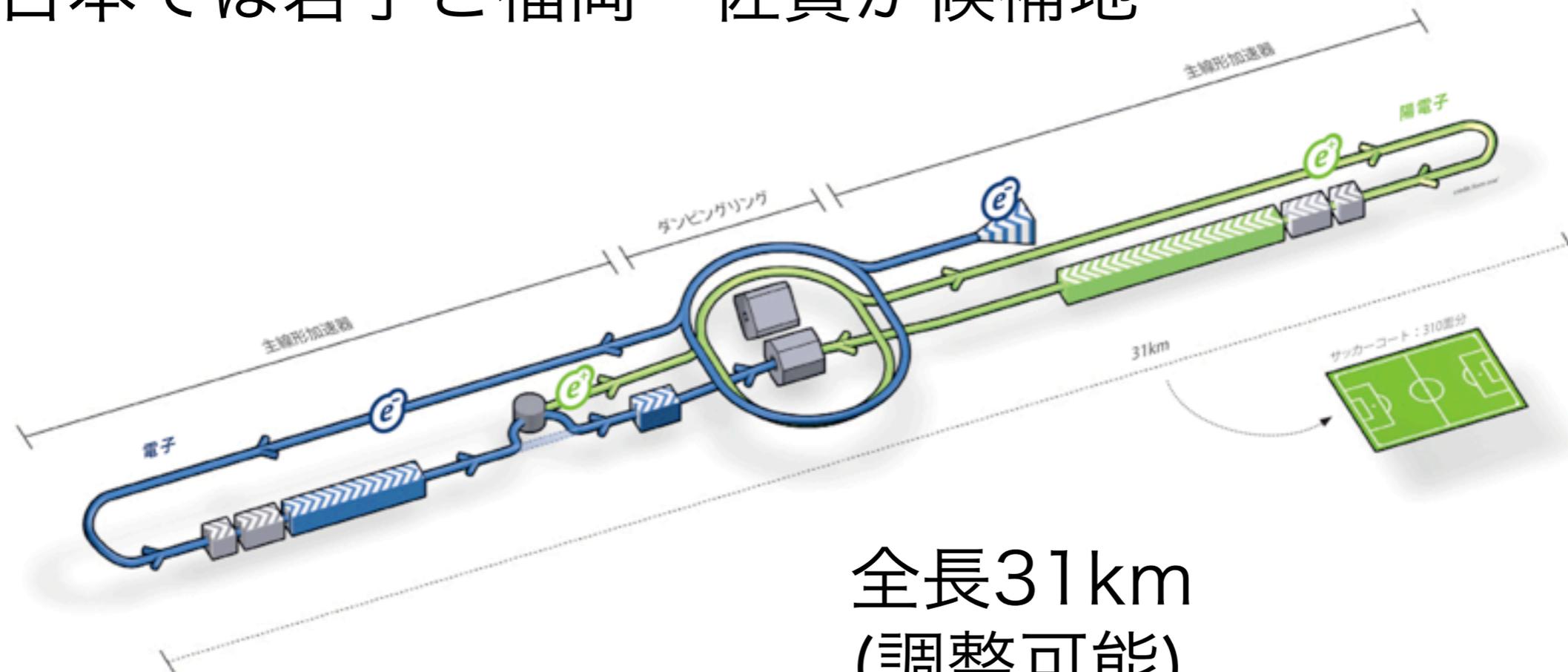


国際リニアコライダー計画

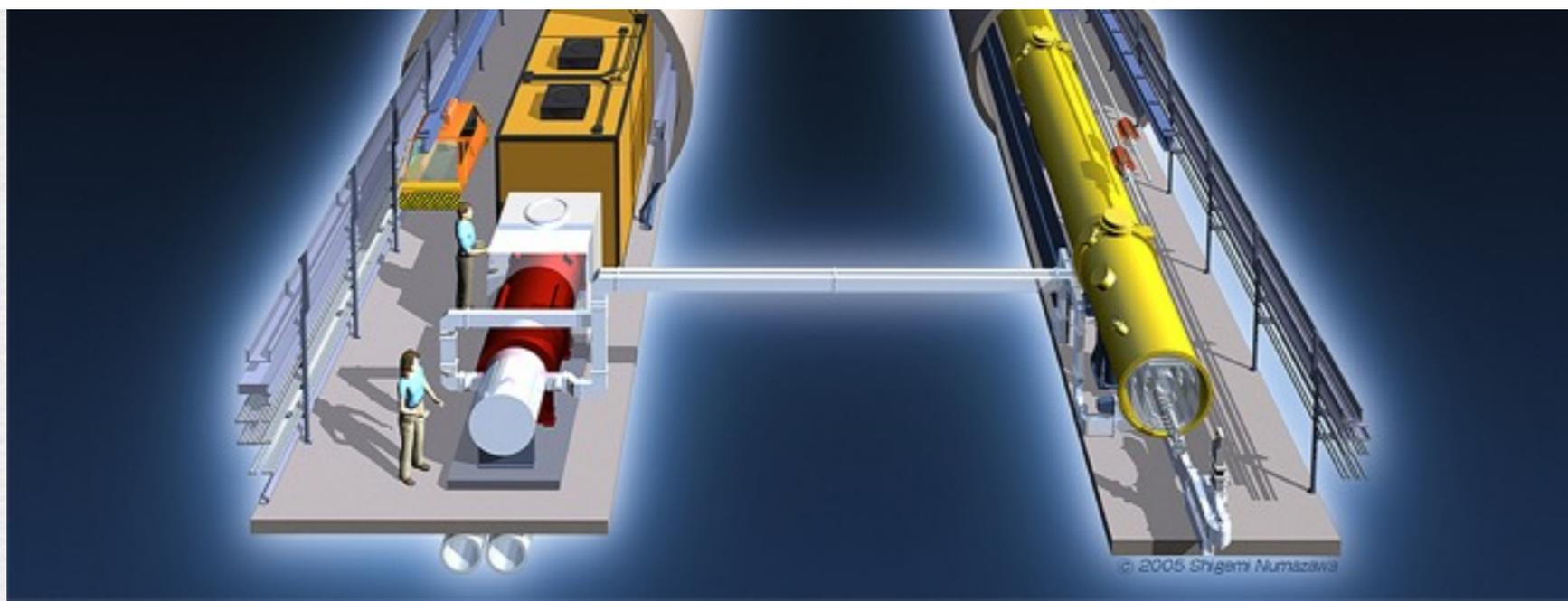


国際リニアコライダー計画

日本では岩手と福岡・佐賀が候補地



全長31km
(調整可能)



まとめ

LHC実験は、

2009年から物理データを収集開始、順調に動いている

2012年7月4日

質量126GeV付近にヒッグス粒子と思われる新粒子を発見

2013年3月14日

発見した新粒子はヒッグス粒子であることを示唆

実験主導の時代の幕開け

ヒッグス粒子の性質に関する新たな知見がえられる

さらなる新しい粒子が発見される可能性が高い

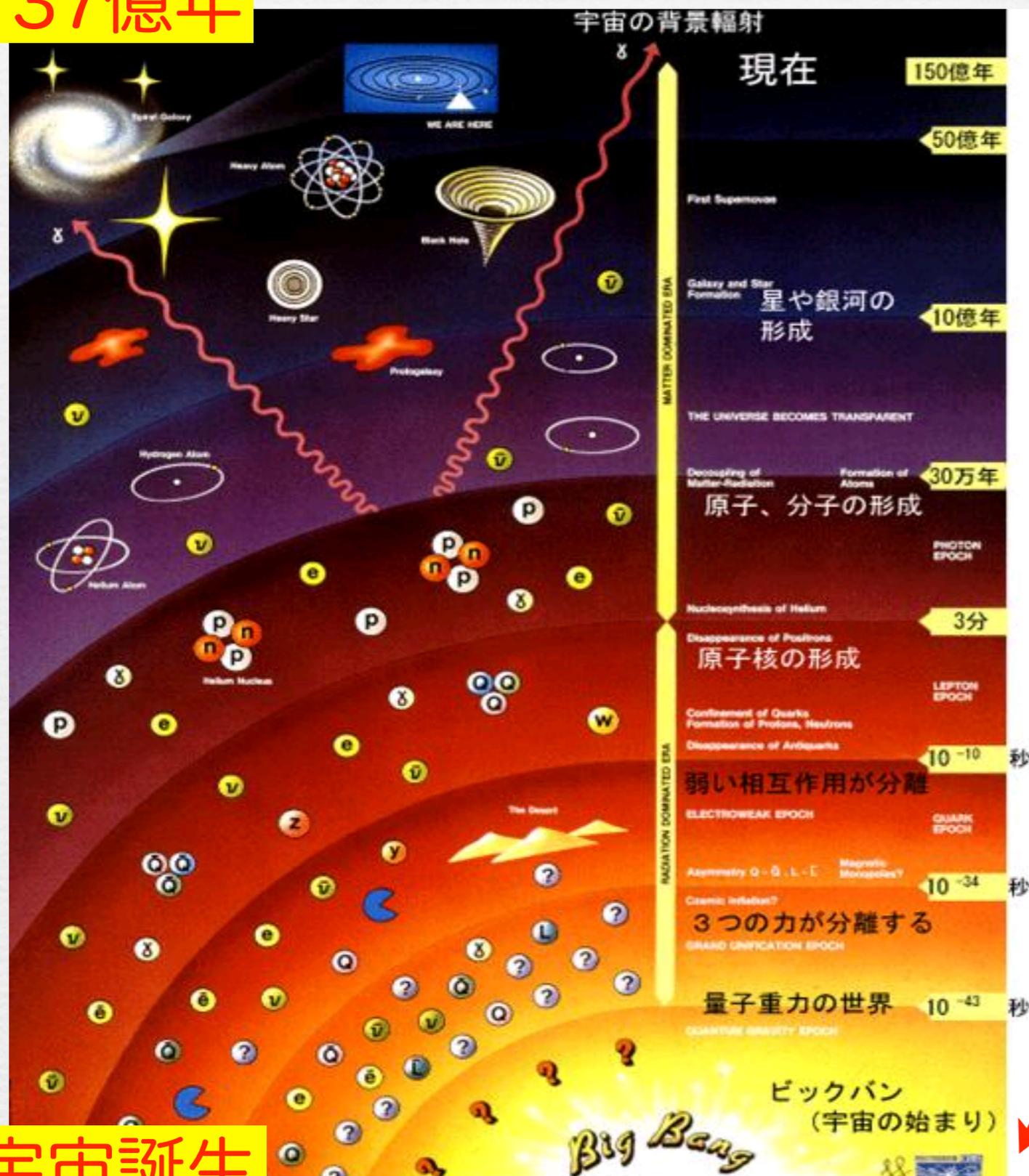
→様々な次期計画

これからの素粒子は面白い！

終わり

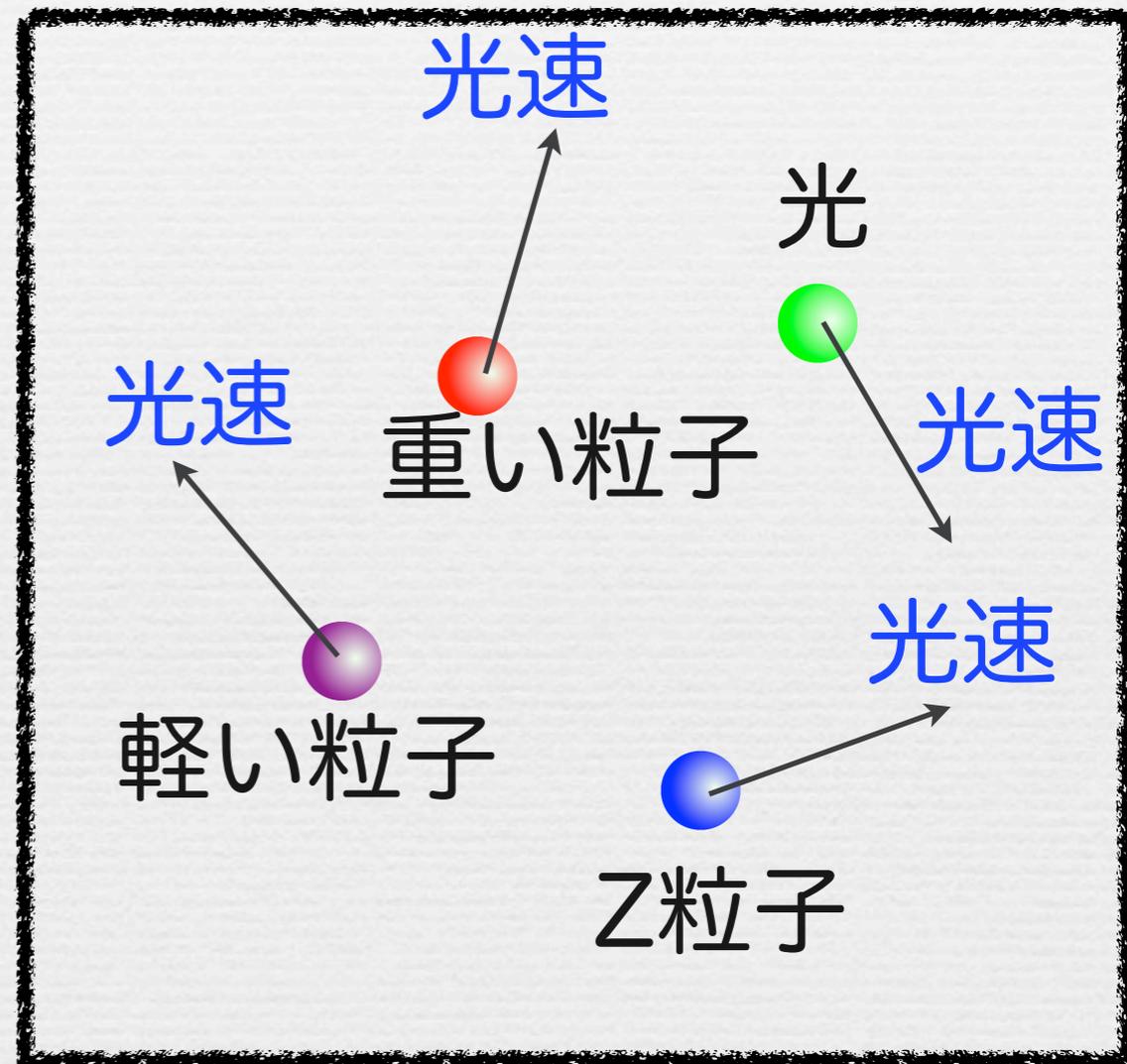
ヒッグス機構

137億年



宇宙誕生

宇宙はヒッグスの海で満たされている

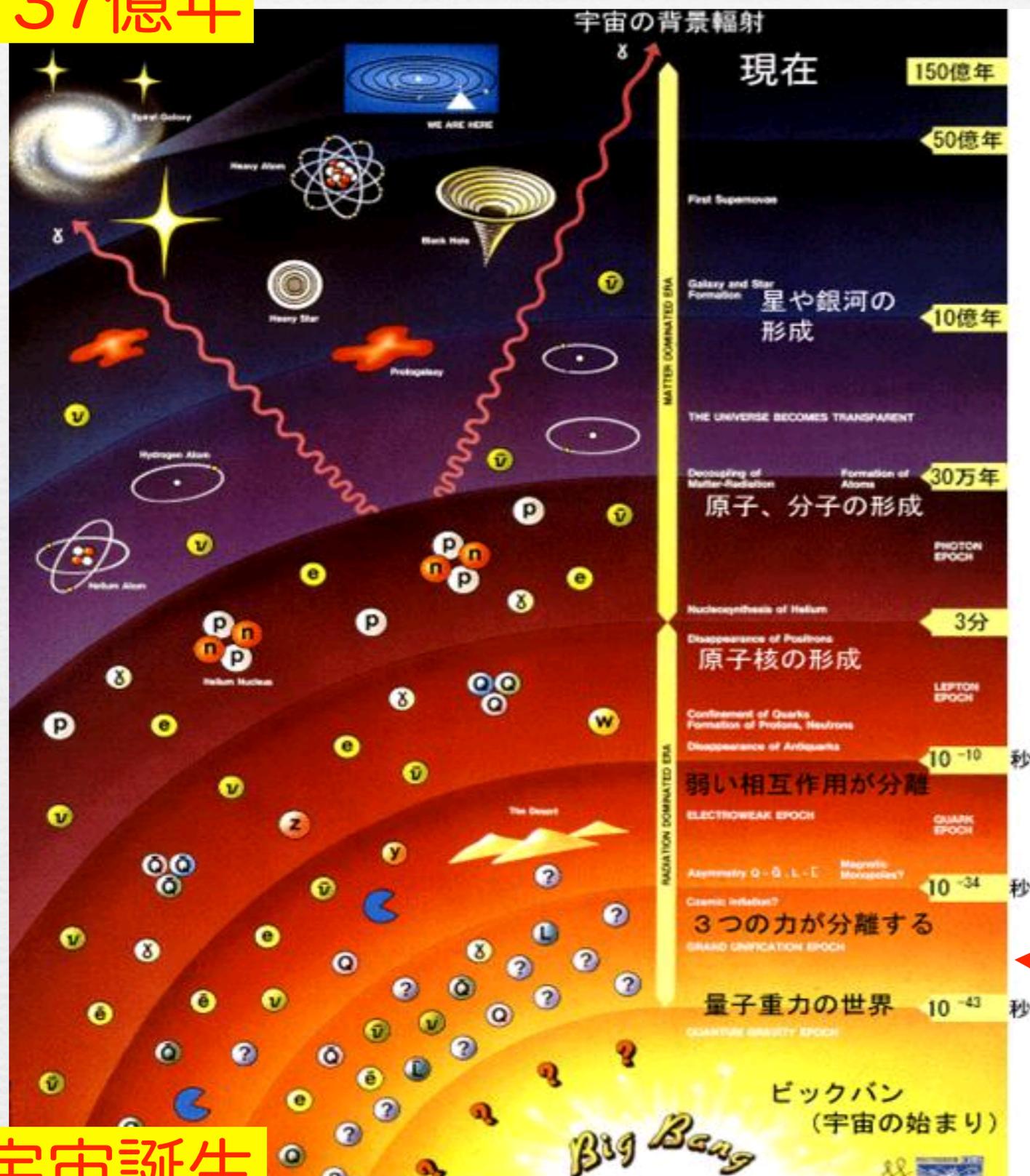


ビッグバン直後

ヒッグスの海はサラサラ

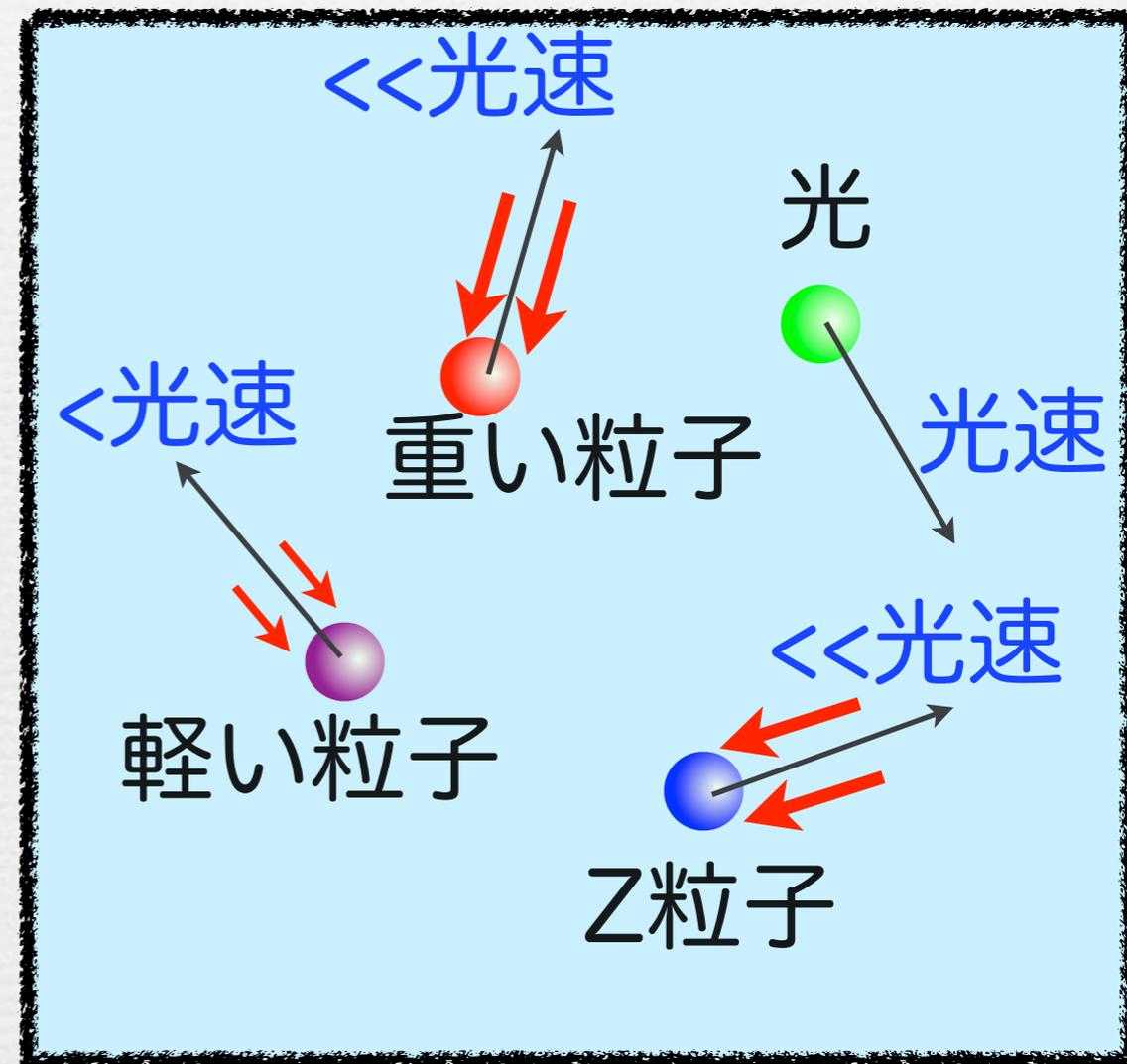
ヒッグス機構

137億年



宇宙誕生

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