

2017年度3年後期
素粒子物理学 1
第1回 2017年10月6日

戸本 誠

高エネルギー物理学研究室 (N研)

自己紹介と講義概要

自己紹介

氏名：戸本 誠

研究室：高エネルギー素粒子物理学研究室 (N研)

居室：C501、

電話：052-789-5505 (内線 5505)

e-mail：makoto@hepl.phys.nagoya-u.ac.jp

研究：世界最高エネルギー加速器を使った素粒子実験

LHC-ATLAS実験

- 新粒子の探索
- ヒッグス粒子の性質の理解
- トップクォークを用いた新物理現象の探索
- アップグレードLHC-ATLAS実験のための回路開発

本講義の狙い

- 素粒子物理の基礎を (比較的) まじめに
 - 電磁量子力学 ← $e^+e^- \rightarrow \mu^+\mu^-$ 断面積の計算(全ての基本)
 - 弱い相互作用
 - 電弱統一理論と標準模型 ← これまでの素粒子物理
 - 標準模型を超える物理の紹介 ← これからの課題
- どうやって新しい素粒子を発見するのか? ← 実験的基礎
 - 加速器、検出器、実験テクニック
- 講義資料は以下に置いておきます

http://www.hepl.phys.nagoya-u.ac.jp/~makoto.nagoya/lectures/ParticlePhysics_3_2017/

参考書

- 決まった教科書は使用しません。
- 参考書（基礎、実験家向け）
 - QUARKS & LEPTONS by F. Halzen & A. Martin
 - 長島順清著の朝永物理学大系3, 4, 5, 6
 - ✓ 素粒子物理学の基礎I・II
 - ✓ 素粒子標準模型と実験的基礎
 - ✓ 高エネルギー物理学の発展
 - ゲージ理論入門 by I. J. R Aitchison & A. J.G. Hey

本屋、図書館などで、自分に合った参考書を探して下さい

授業予定

2017/10/6 : 第1回

2017/10/13 : 第2回

2017/10/20 : 第3回

2017/10/27 : 第4回

2017/11/10 : 第5回

2017/11/17 : 第6回

2017/11/24 : 第7回

2017/12/1 : 第8回

2017/12/8 : 第9回

2017/12/15 : 第10回

2017/12/22 : 第11回

2017/12/29 : 冬季休業

2018/1/5 : 冬季休業

2018/1/13 : 休講(センター試験)

2018/1/20 : 第12回

2018/1/27 : 第13回

講義のOverview

素粒子物理とは？

1. 全ての物質を構成する基本粒子を知りたい

粒子の個性：質量、スピン、電荷 ...

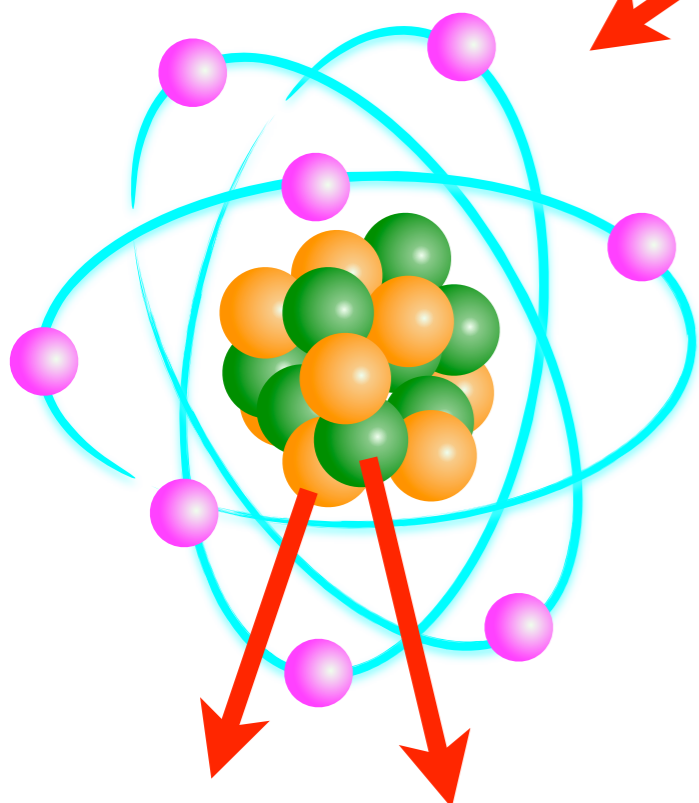
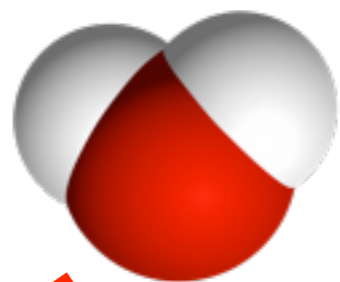
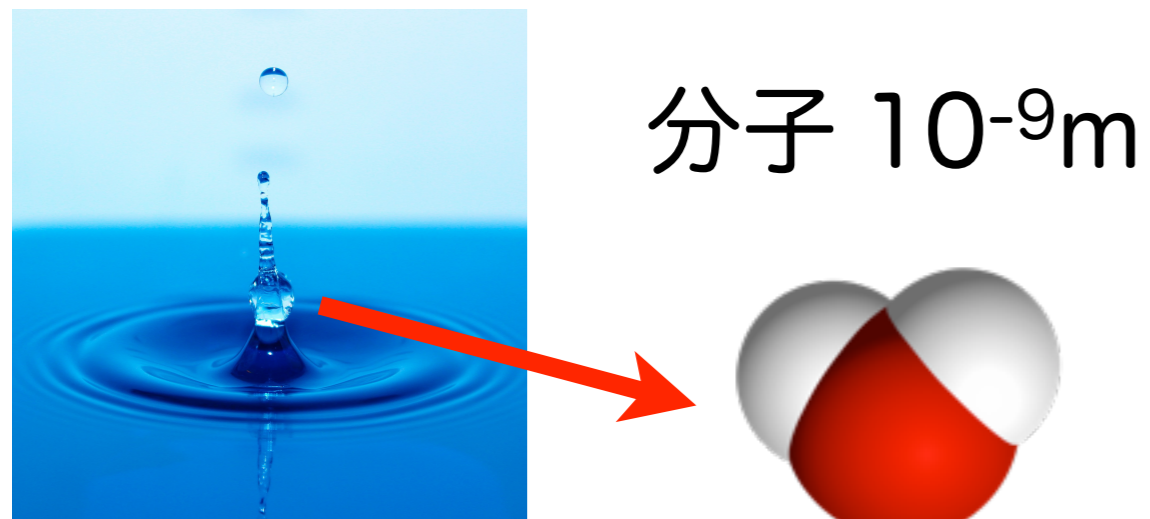
2. それらがどういう規則で結びついているか理解したい

相互作用の種類、それぞれの強さ ...

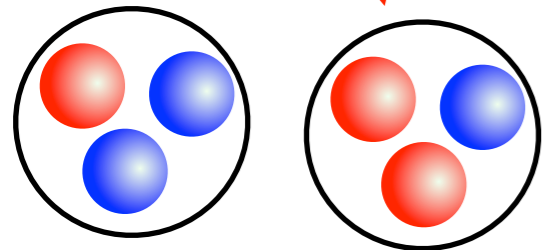
→Lagrangianで記述する

3. 宇宙誕生の謎、時空や真空の構造の謎に迫りたい

全ての物は何からできているのか？



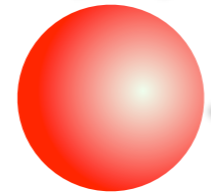
原子
 10^{-10}m
原子核
 10^{-14}m



中性子 陽子 10^{-15}m

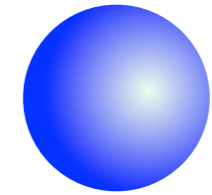
クォーク

アップ(u)



$+2/3e$

ダウン(d)



$-1/3e$

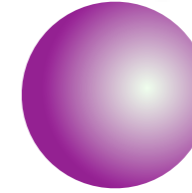
レプトン

電子



$-e$

ニュートリノ



0

$10^{-18}\text{m} =$

0.0000000000000000000000000000000001m

10億分の1 m の 10億分の1

レプトンの分類

	電荷	色	電子数	μ 数	τ 数	質量	世代
ν_e	0	0	1	0	0	$<225\text{eV}$	1
e	$-e$	0	1	0	0	0.5MeV	1
ν_μ	0	0	0	1	0	$<0.19\text{MeV}$	2
μ	$-e$	0	0	1	0	106MeV	2
ν_τ	0	0	0	0	1	$<18.2\text{MeV}$	3
τ	$-e$	0	0	0	1	1.78GeV	3

電磁
相互作用

強い
相互作用
しない

レプトン数
実験的に保存
保存する理由はない→レプトン数の破れ？

クォークの分類

	電荷	色	量子数	バリオン数	質量	世代
u	$+2/3e$	3	$I_3=1/2$	$1/3$	1.7~3.3MeV	1
d	$-1/3e$	3	$I_3=1/2$	$1/3$	4.1~5.8MeV	1
c	$+2/3e$	3	C=1	$1/3$	1.3GeV	2
s	$-1/3e$	3	S=1	$1/3$	101MeV	2
t	$+2/3e$	3	T=1	$1/3$	172GeV	3
b	$-1/3e$	3	B=1	$1/3$	4.5GeV	3

電磁
相互作用

強い
相互作用
する

弱い
相互作用
で非保存

実験的に保存
保存する理由なし→バリオン数の破れ？

ハドロン

我々はクォーク単体ではなく複合粒子ハドロンを捉えている
バリオンとメソンの総称

→強い相互作用によって、クォークを束縛

バリオン(クォーク3つ)

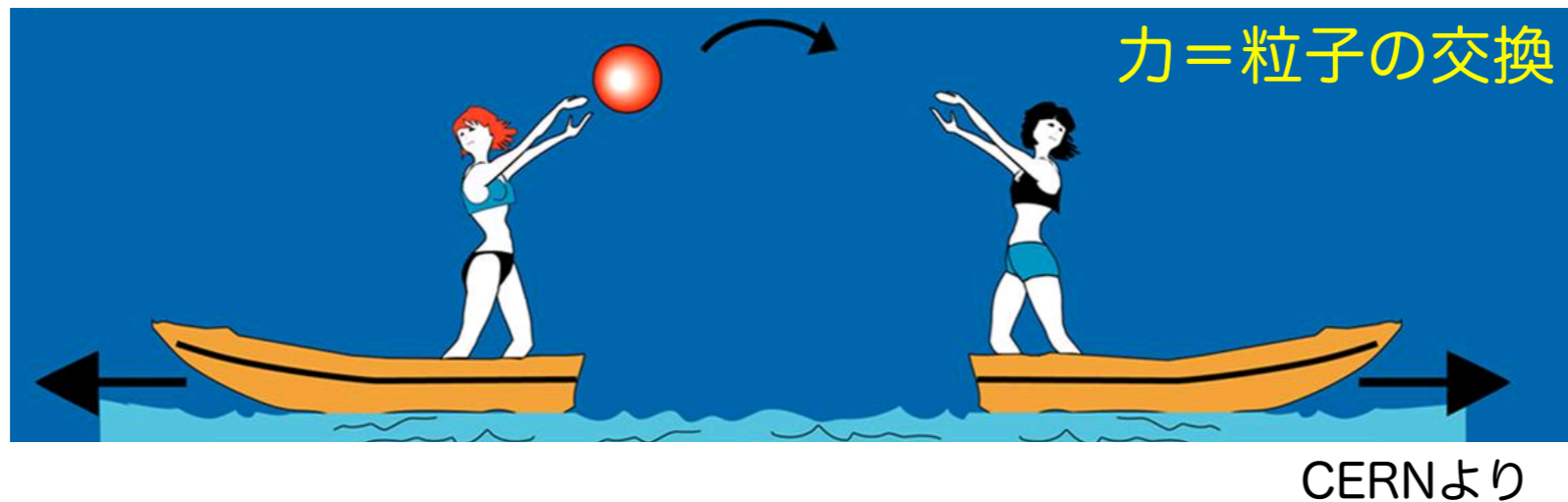
メソン (クォーク対)

Baryons qqq and Antibaryons $\bar{q}\bar{q}\bar{q}$					
Baryons are fermionic hadrons. There are about 120 types of baryons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
p	proton	uud	1	0.938	1/2
\bar{p}	anti-proton	$\bar{u}\bar{u}\bar{d}$	-1	0.938	1/2
n	neutron	udd	0	0.940	1/2
Λ	lambda	uds	0	1.116	1/2
Ω^-	omega	sss	-1	1.672	3/2

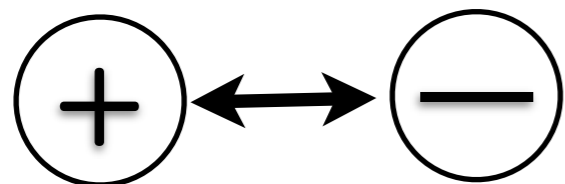
Mesons $q\bar{q}$					
Mesons are bosonic hadrons. There are about 140 types of mesons.					
Symbol	Name	Quark content	Electric charge	Mass GeV/c^2	Spin
π^+	pion	$u\bar{d}$	+1	0.140	0
K^-	kaon	$s\bar{u}$	-1	0.494	0
ρ^+	rho	$u\bar{d}$	+1	0.770	1
B^0	B-zero	$d\bar{b}$	0	5.279	0
η_c	eta-c	$c\bar{c}$	0	2.980	0

最近は、テトラクォーク、ペンタクォークなども

素粒子が従う力学法則は？

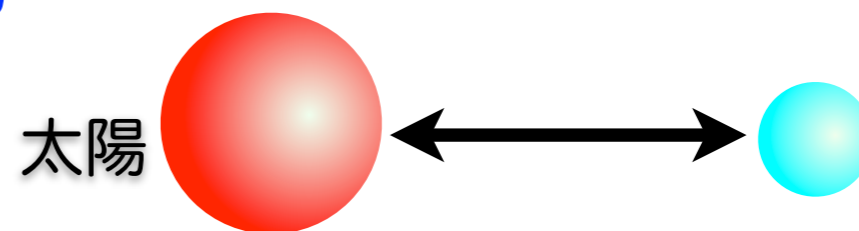


電磁気力



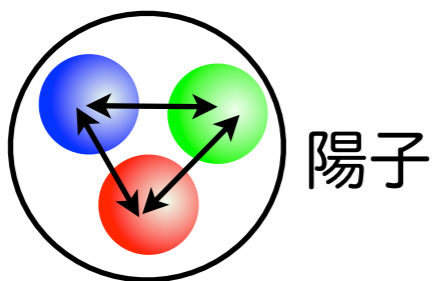
電荷：光子を交換

重力



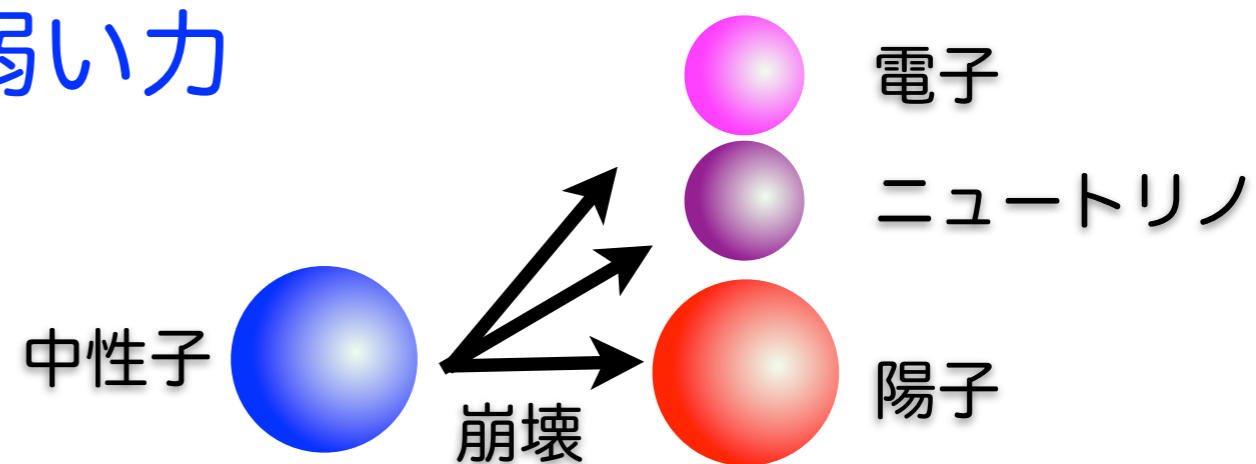
質量：グラビトン(未発見)を交換

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

力のまとめ

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

Lagrangian

量子力学 + 特殊相対論 → 素粒子の運動方程式

$$E = i\hbar \frac{\partial}{\partial t} \quad + \quad E^2 = m^2 c^4 + p^2 c^2 \quad \Rightarrow \quad -\frac{\partial^2 \phi}{\partial t^2} + \nabla^2 \phi = m^2 \phi$$

Klein-Gordon方程式

$$\vec{p} = -i\hbar \vec{\nabla} \quad \Rightarrow \quad (i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

Dirac方程式

Euler Lagrange方程式 → 運動方程式

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{\partial L(q_i, \dot{q}_i)}{\partial \dot{q}_i} \right) - \frac{\partial L(q_i, \dot{q}_i)}{\partial q_i} = 0 \quad \Rightarrow \quad \frac{d}{dt} \left(\frac{\partial \mathcal{L}(\phi, \frac{\partial \phi}{\partial x_\mu}, t)}{\partial (\partial \phi / \partial x_\mu)} \right) - \frac{\partial \mathcal{L}(\phi, \frac{\partial \phi}{\partial x_\mu}, t)}{\partial \phi} = 0$$

電磁場中を運動する素粒子のLagrangian

$$\mathcal{L} = \underbrace{\bar{\psi}(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi}_{\text{質量}m\text{の粒子の運動}} - \underbrace{\frac{1}{4}F^{\mu\nu}F_{\mu\nu}}_{\text{電磁場の運動}} - \underbrace{e\bar{\psi}\gamma^\mu\psi A_\mu}_{\text{相互作用}}$$

素粒子と相互作用を理解から究極のLagrangianを導出したい

標準模型のLagrangian

$$\begin{aligned}
 \mathcal{L} = & \boxed{-\frac{1}{4} \mathbf{W}_{\mu\nu} \cdot \mathbf{W}^{\mu\nu} - \frac{1}{4} B_{\mu\nu} B^{\mu\nu} - \frac{1}{4} \mathbf{G}_{\mu\nu} \cdot \mathbf{G}^{\mu\nu}} \\
 & + (\bar{\nu}_L, \bar{e}_L) \gamma^\mu \left(i\partial_\mu - g \frac{1}{2} \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu - g' \frac{Y}{2} B_\mu \right) \begin{pmatrix} \nu_L \\ e_L \end{pmatrix} + \bar{e}_R \gamma^\mu \left(i\partial_\mu - g' \frac{Y}{2} B_\mu \right) e_R \\
 & + (\bar{u}_L, \bar{d}_L) \gamma^\mu \left(i\partial_\mu - g \frac{1}{2} \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu - g' \frac{Y}{2} B_\mu - g_s \frac{1}{2} \boldsymbol{\lambda} \cdot \mathbf{G}_\mu \right) \begin{pmatrix} u_L \\ d_L \end{pmatrix} \\
 & + \bar{u}_R \gamma^\mu \left(i\partial_\mu - g' \frac{Y}{2} B_\mu - g_s \frac{1}{2} \boldsymbol{\lambda} \cdot \mathbf{G}_\mu \right) u_R + \bar{d}_R \gamma^\mu \left(i\partial_\mu - g' \frac{Y}{2} B_\mu - g_s \frac{1}{2} \boldsymbol{\lambda} \cdot \mathbf{G}_\mu \right) d_R \\
 & + \left| \left(i\partial_\mu - g \frac{1}{2} \boldsymbol{\tau} \cdot \mathbf{W}_\mu - g' \frac{Y}{2} B_\mu \right) \phi \right|^2 - (\mu^2 \phi^\dagger \phi + \lambda (\phi^\dagger \phi)^2) \\
 & - G_e ((\bar{\nu}_L, \bar{e}_L) \phi e_R + (\text{h.c.})) \\
 & - G_d ((\bar{u}_L, \bar{d}_L) \phi d_R + (\text{h.c.})) \\
 & - G_u ((\bar{u}_L, \bar{d}_L) \phi_c u_R + (\text{h.c.}))
 \end{aligned}$$

$W^\pm, Z, \text{光子}, \text{グルーオンの運動エネルギーと自己相互作用}$

$W^\pm, Z, \text{光子}, \text{ヒッグスの質量と結合}$





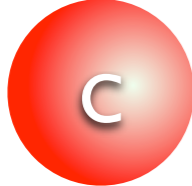



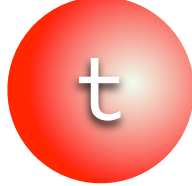



$レプトン、クォークの運動エネルギーと相互作用 (粒子の数だけ)$

$レプトン、クォークの質量 (粒子の数だけ)$

これまでの素粒子物理学

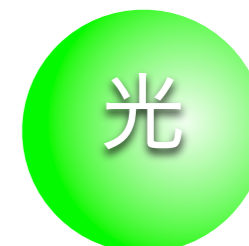
素粒子標準模型

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

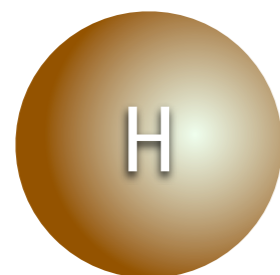
電磁気力：光子



強い力：グルーオン

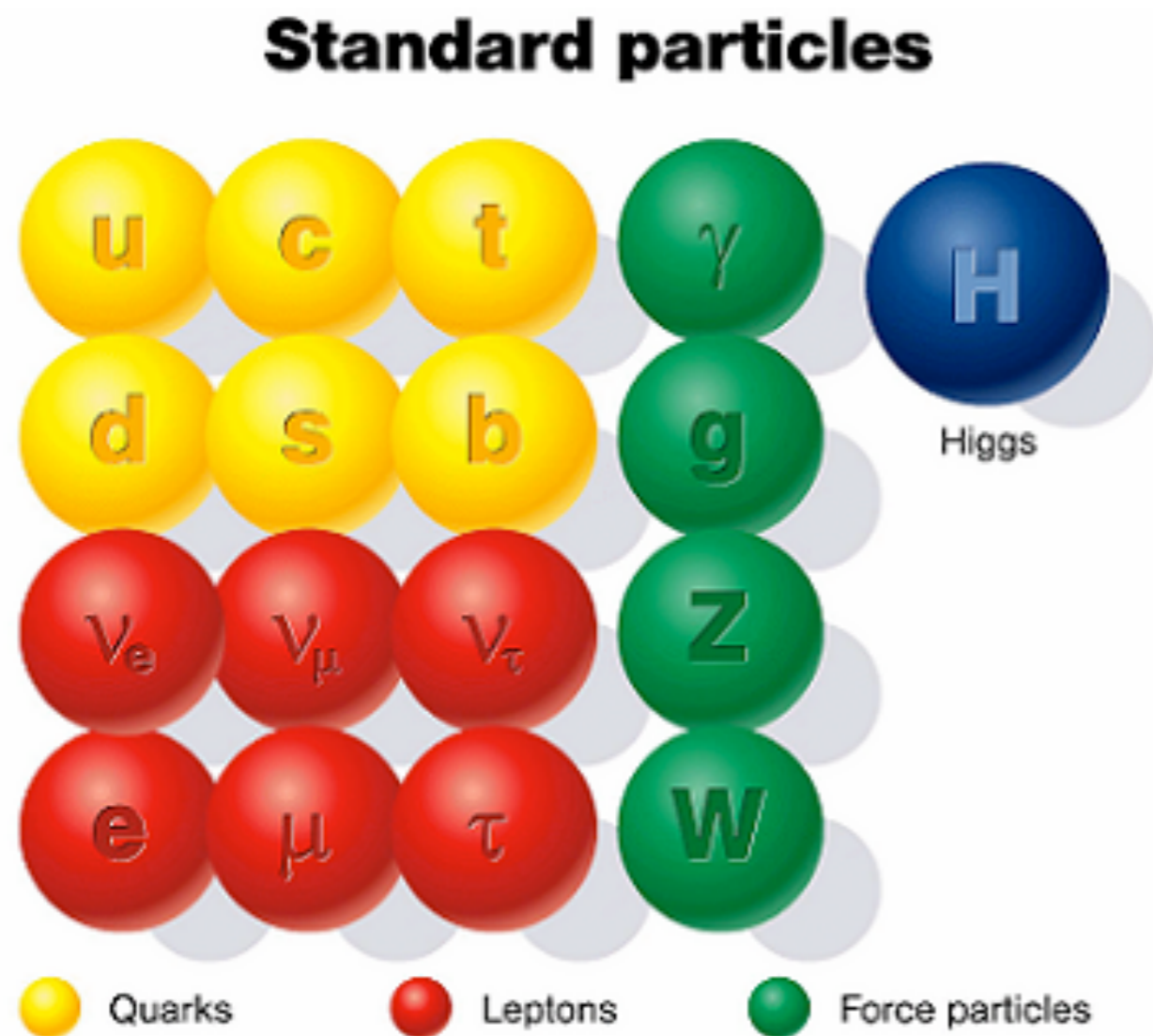


弱い力：Z、W粒子



ヒッグス粒子：素粒子に質量を与える

標準模型の歴史



1897年：電子

1900年： γ 線

1932年：陽電子

1936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

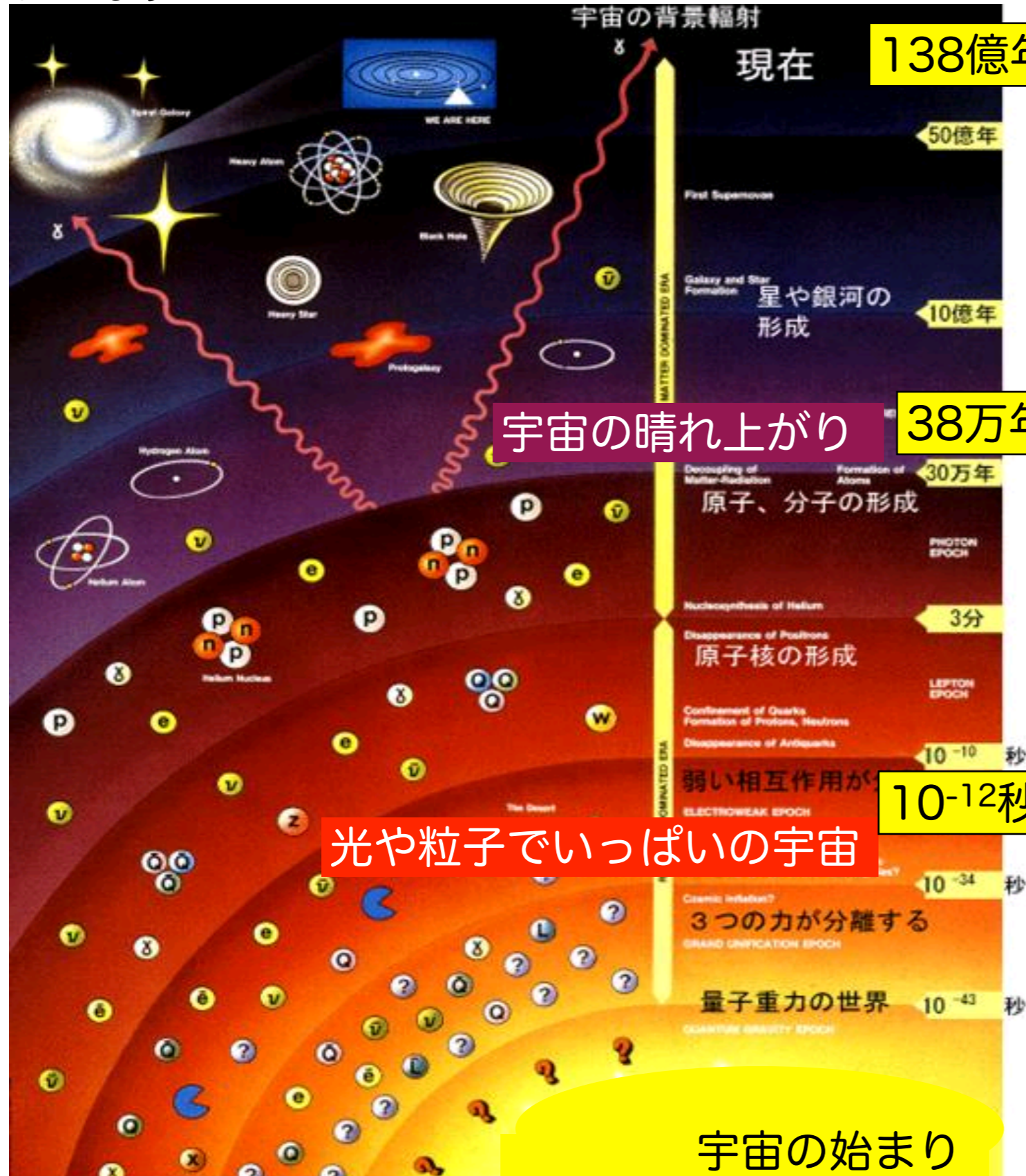
2012年：ヒッグス

20XX年：?????

⋮
↓
標準模型

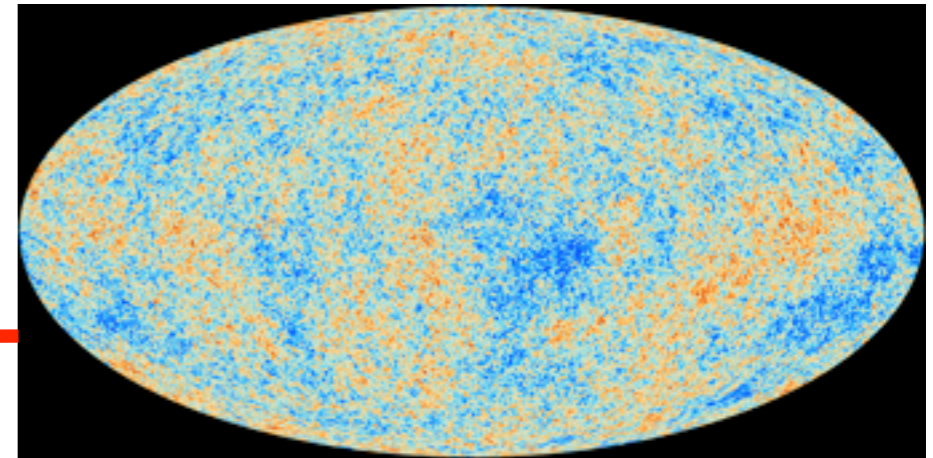
宇宙誕生の謎に迫る

CERNより



← 現在の宇宙の姿

光で38万年後の宇宙を観測



プランク <http://www.esa.int>

光による

それ以前の宇宙の観測は無理

← 加速器で初期宇宙を再現

LHCで10⁻¹²秒後までさかのぼる

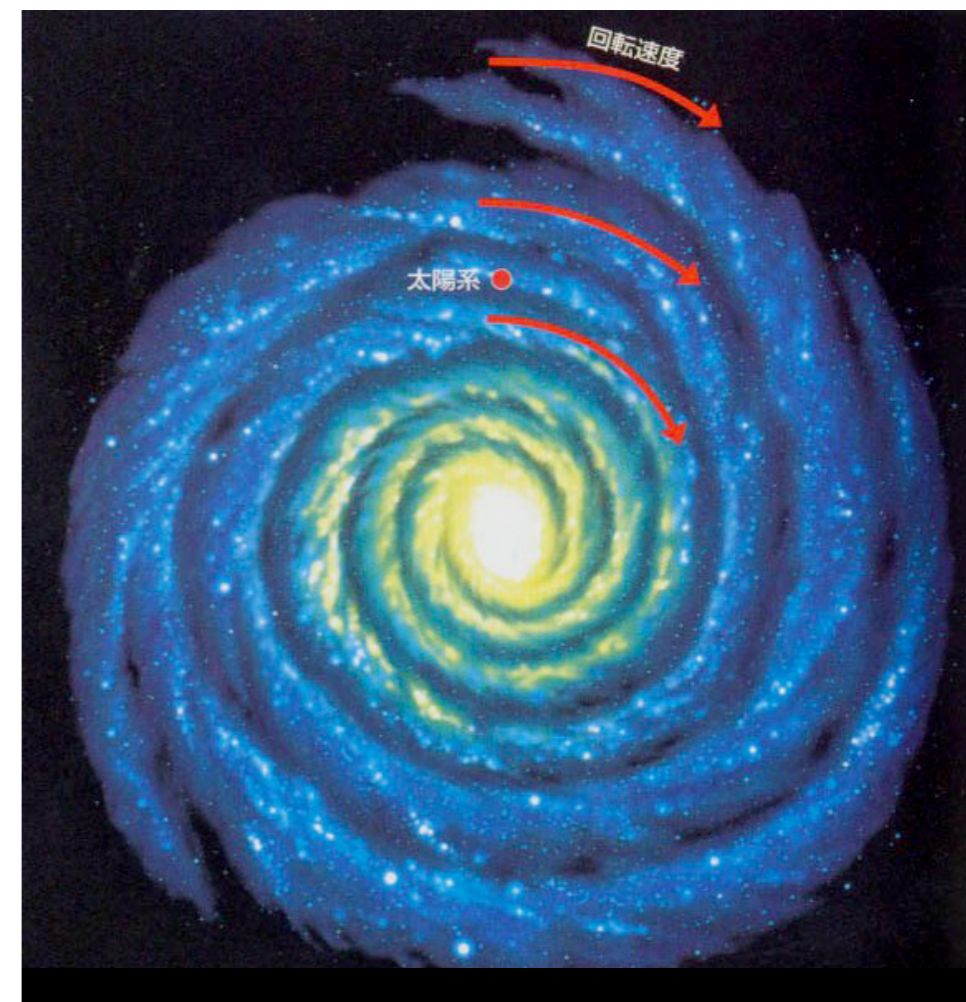
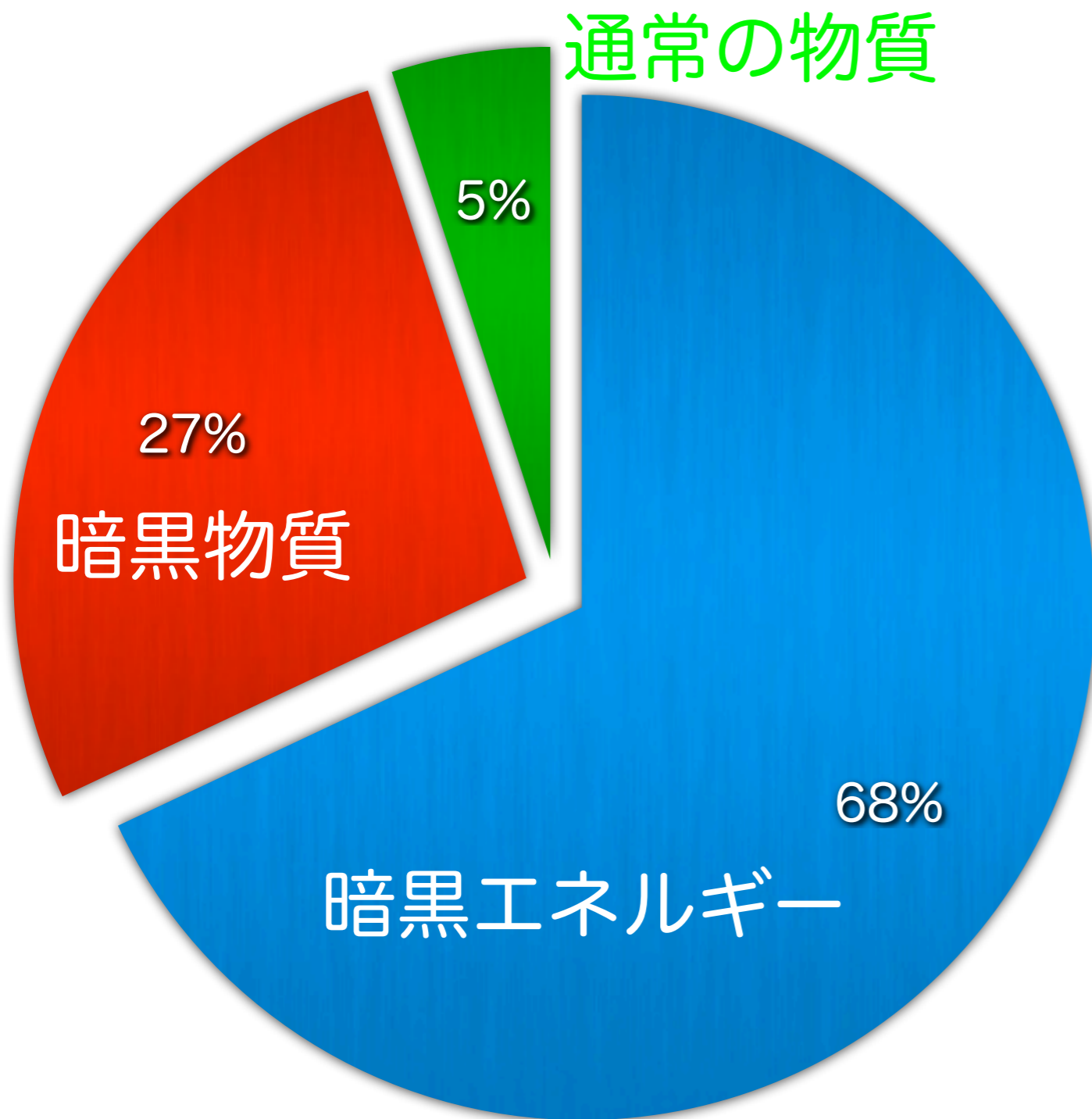
標準模型まではOK

超対称性粒子は存在する？

余剰次元はあるのか？

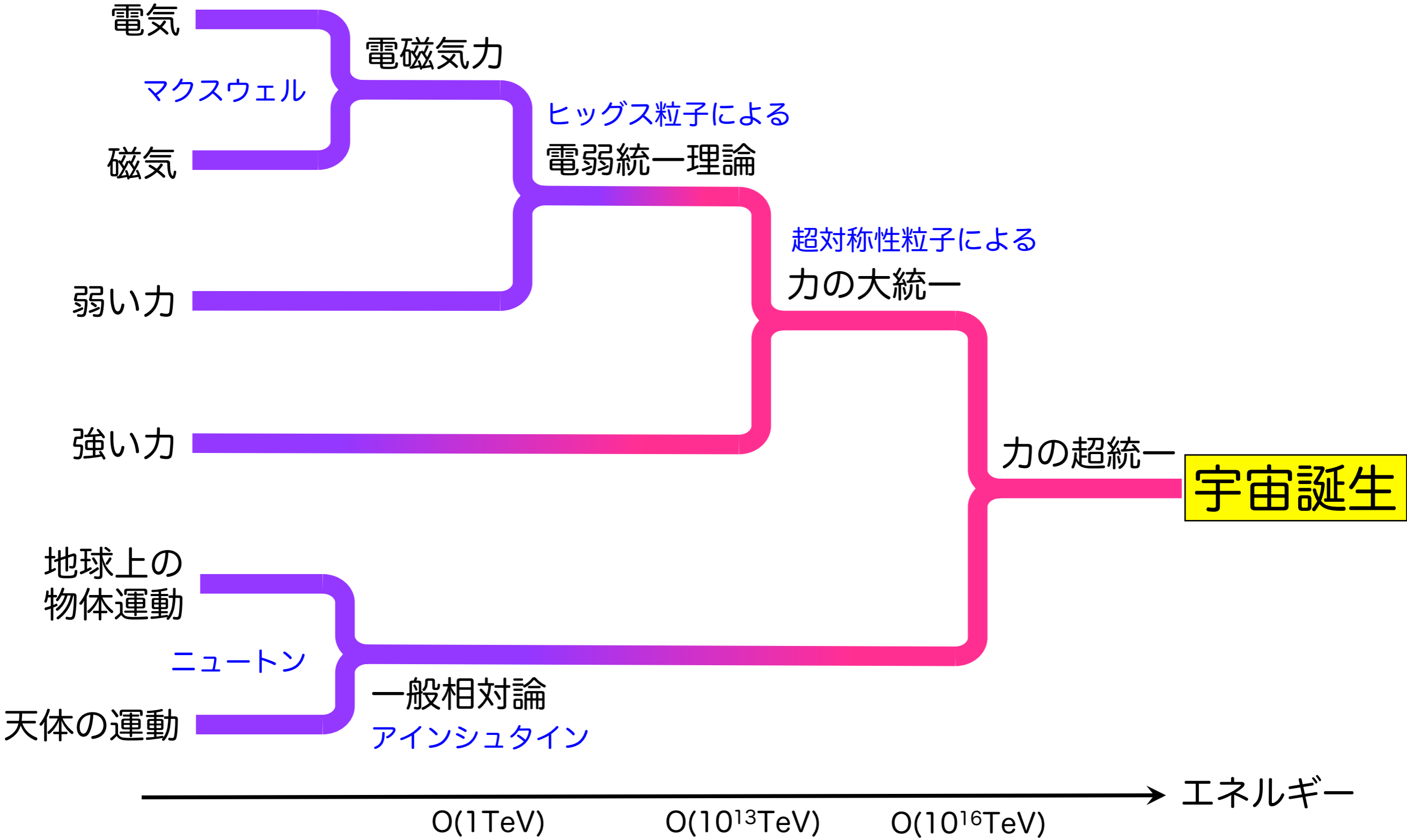
力の大(超)統一？

暗黒物質の謎



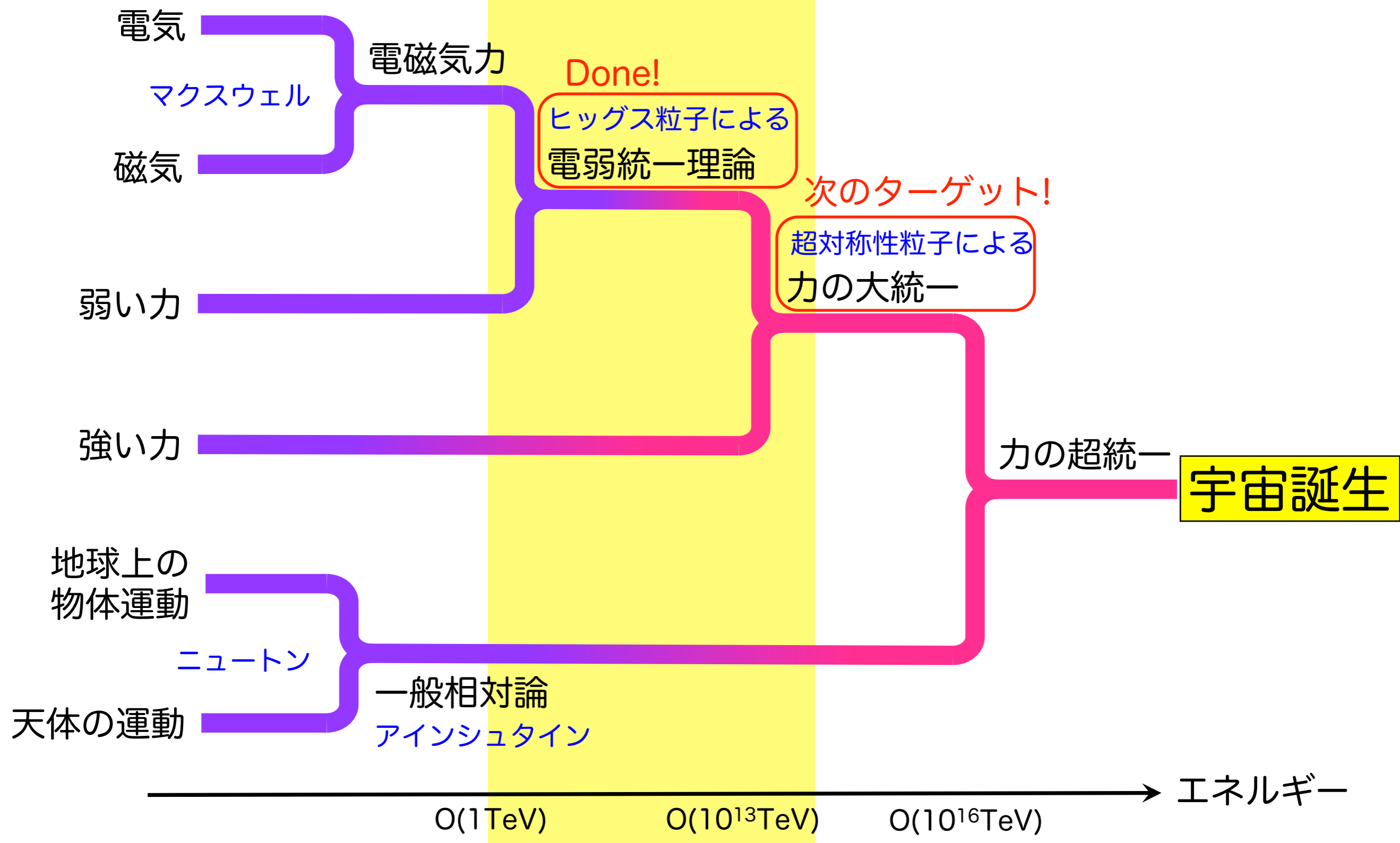
新しい素粒子の存在？

力の統一



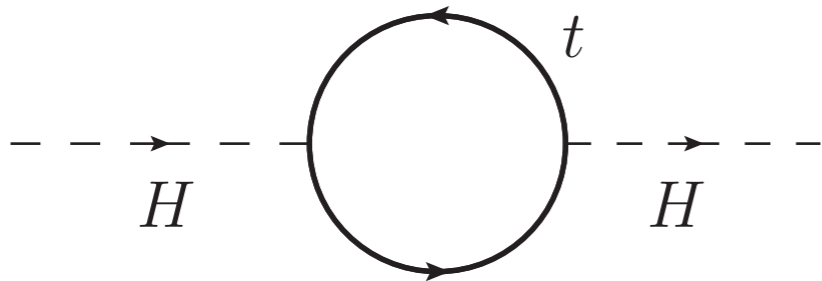
力の統一

LHC実験の探索領域



ヒッグス粒子の質量の不自然さ

ヒッグス粒子の質量： $m_H^2 = (m_H^0)^2 + \delta m_H^2 \sim 125^2 \text{ GeV}^2$



$$\delta m_H^2 \sim -m_t^2 \Lambda^2$$

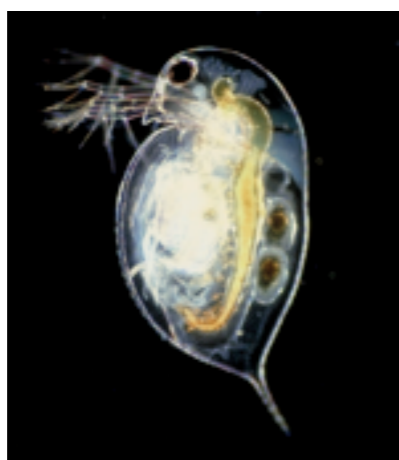
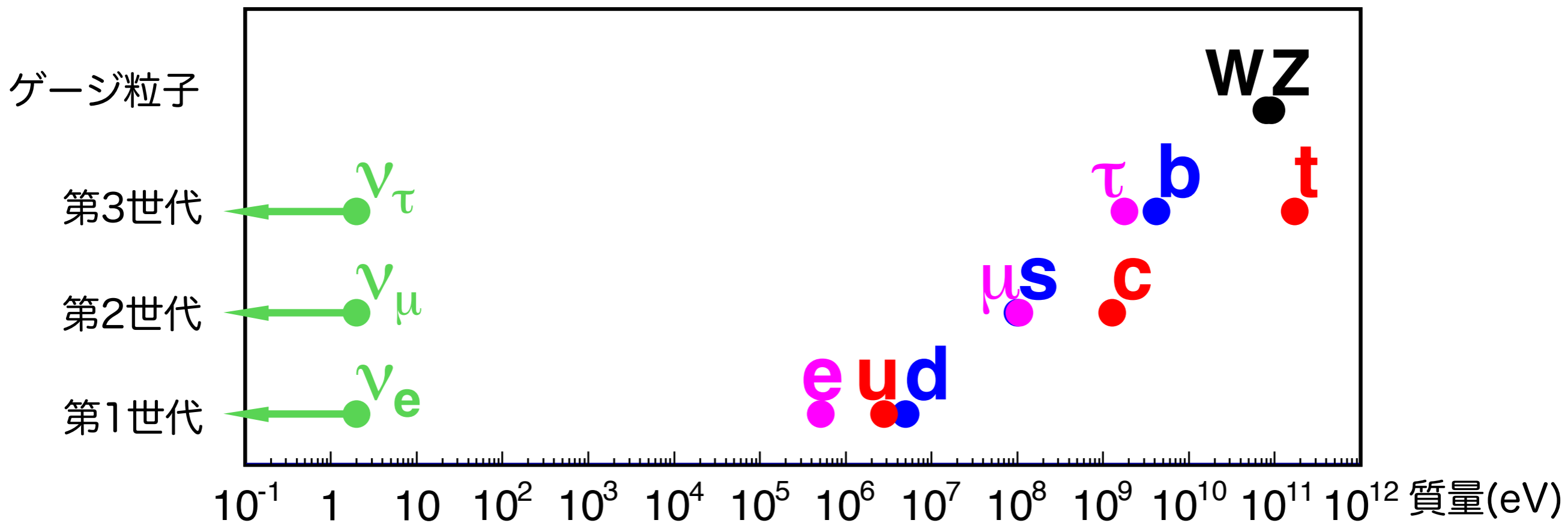
Λ : 理論の適用限界

標準模型が大統一のエネルギースケールまで適用

$$\delta m_H^2 = 10^{32} \text{ GeV}^2$$

125GeVを導出するのに, $O(10^{32})-O(10^{32})$ の計算??

素粒子の質量起源、世代の謎



1/1000mg

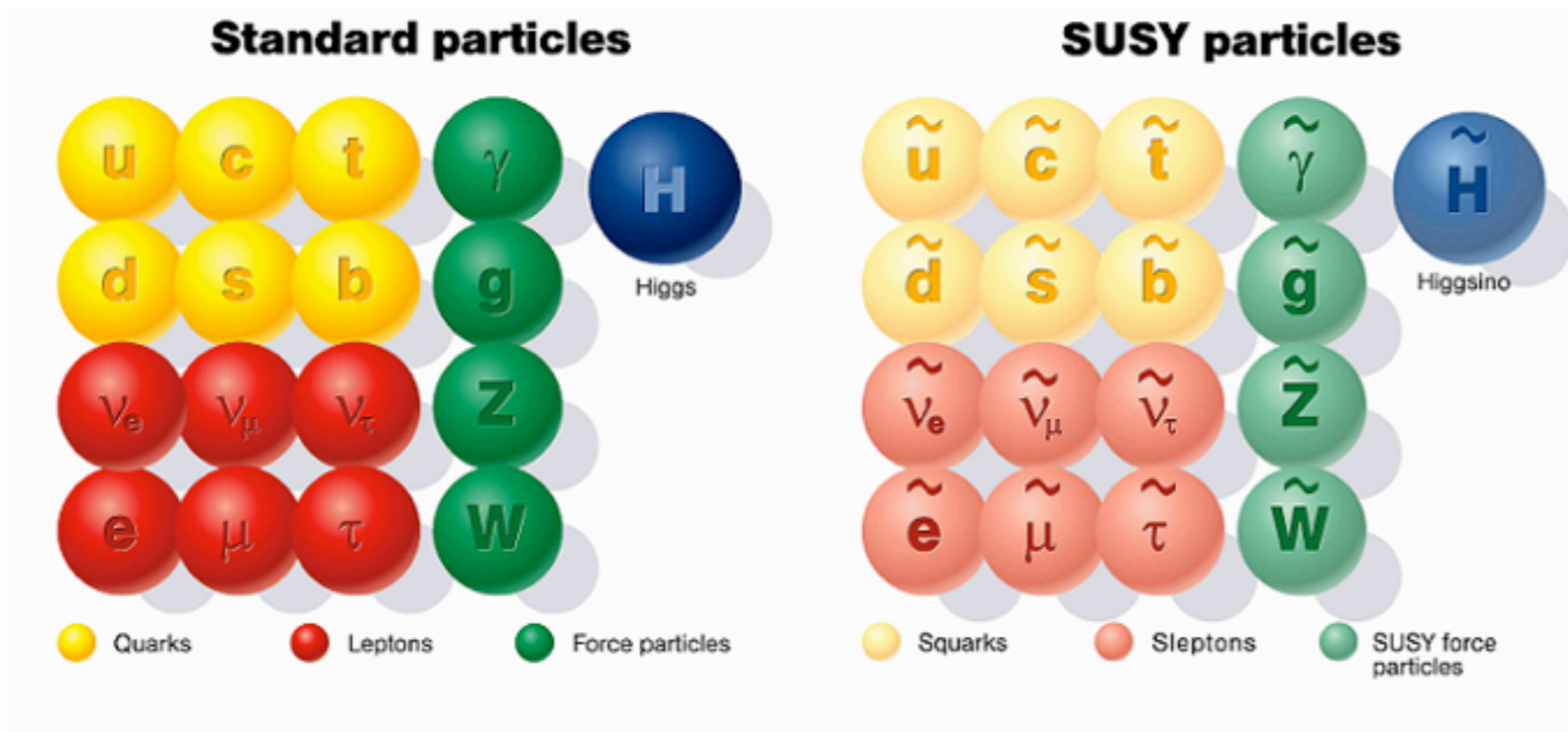


1000kg



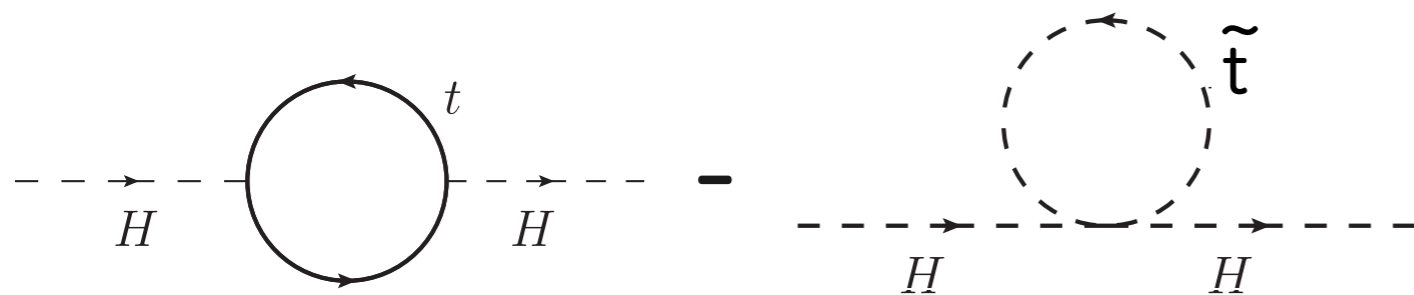
ヒッグス粒子が鍵を握る

超対称性粒子

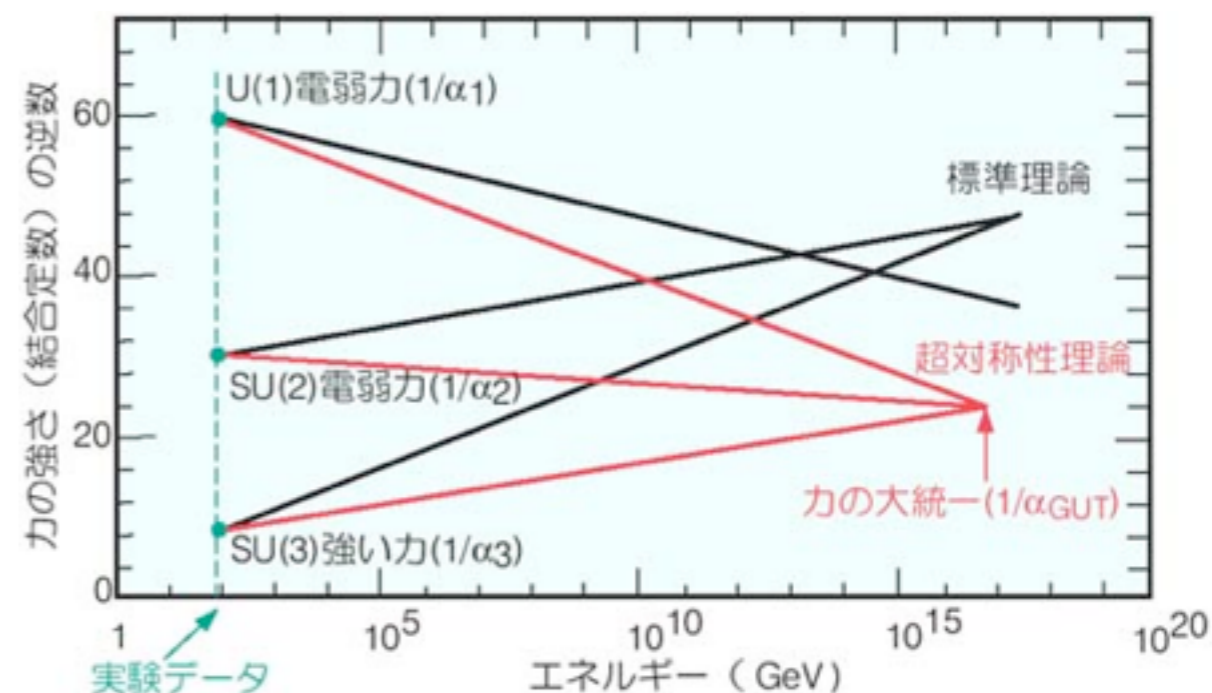


“スピン”が1/2だけ違う

1. ヒッグス粒子の質量の不自然さが解決
2. 力の大統一の実現
3. 暗黒物質の候補



$$\delta m_H^2 \sim -m_t^2 \Lambda^2 + m_{\tilde{t}}^2 \Lambda^2$$



素粒子実験の基本

細部構造の探求

水素原子 10^{-10}m

粒子 (エネルギー小)



粒子 (エネルギー大)



電子



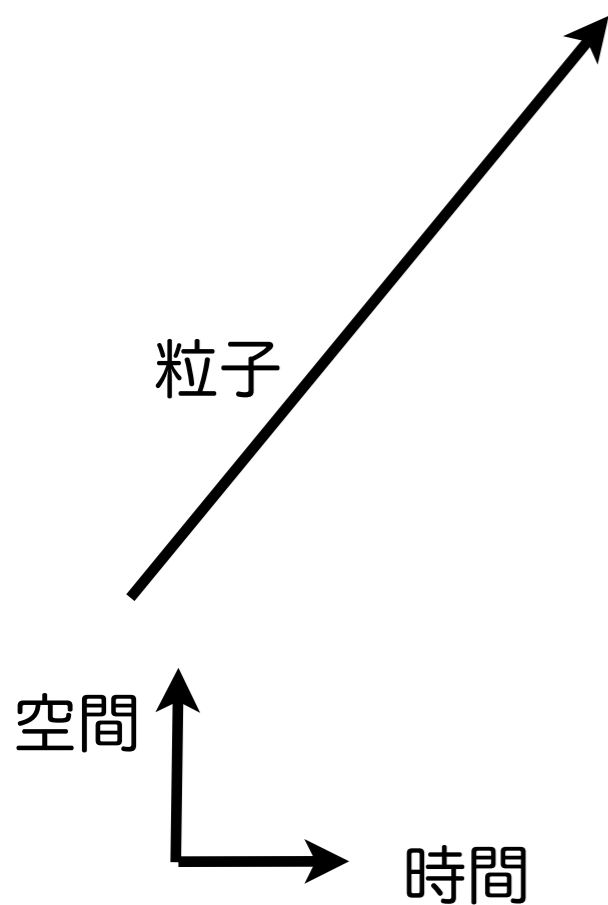
原子核 10^{-15}m

大きさとエネルギーの関連

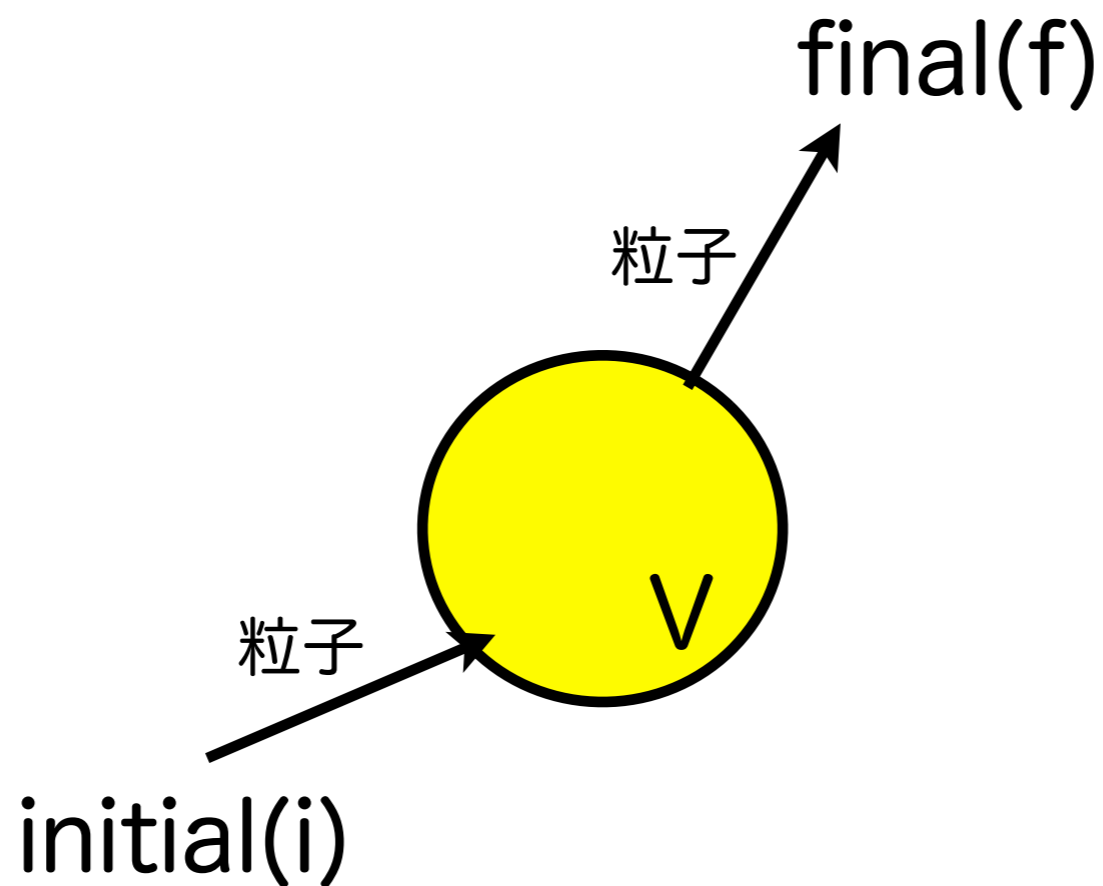
$$\hbar c \sim 200 \text{ MeV} \cdot \text{fm}$$

素粒子の運動の理解

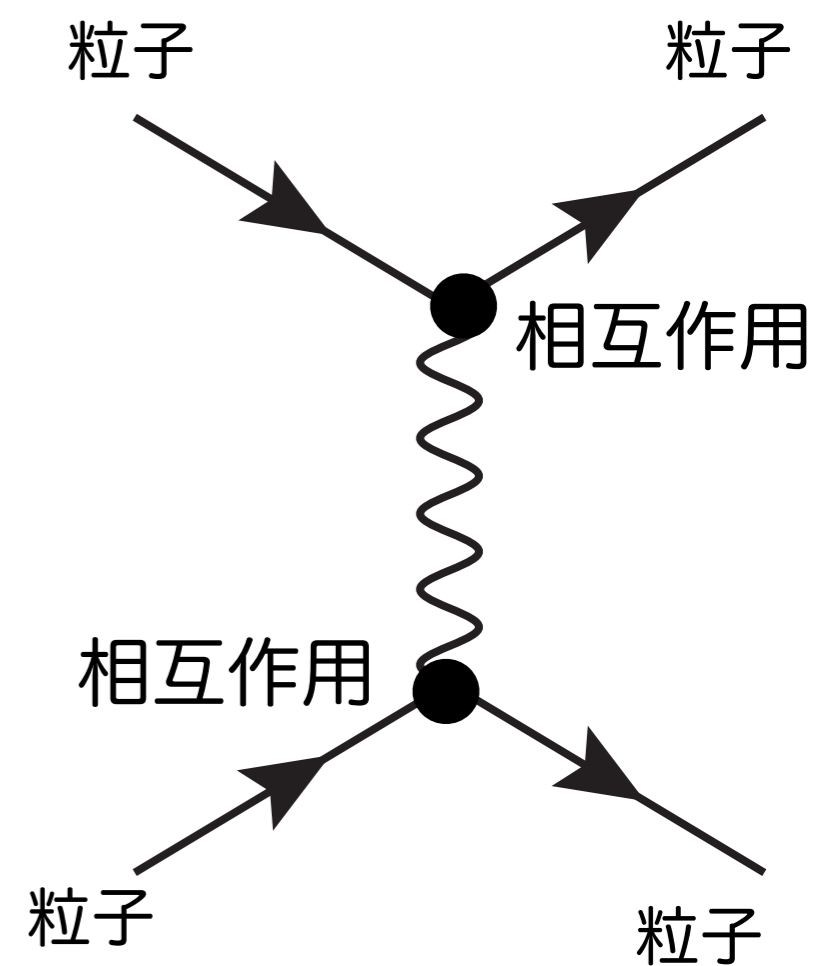
自由粒子



外場の中を運動する粒子



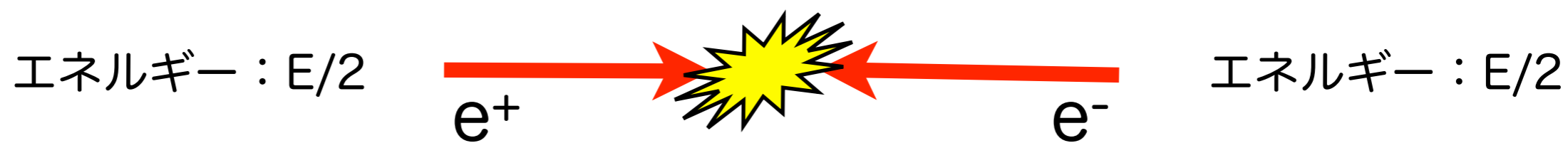
素粒子の散乱



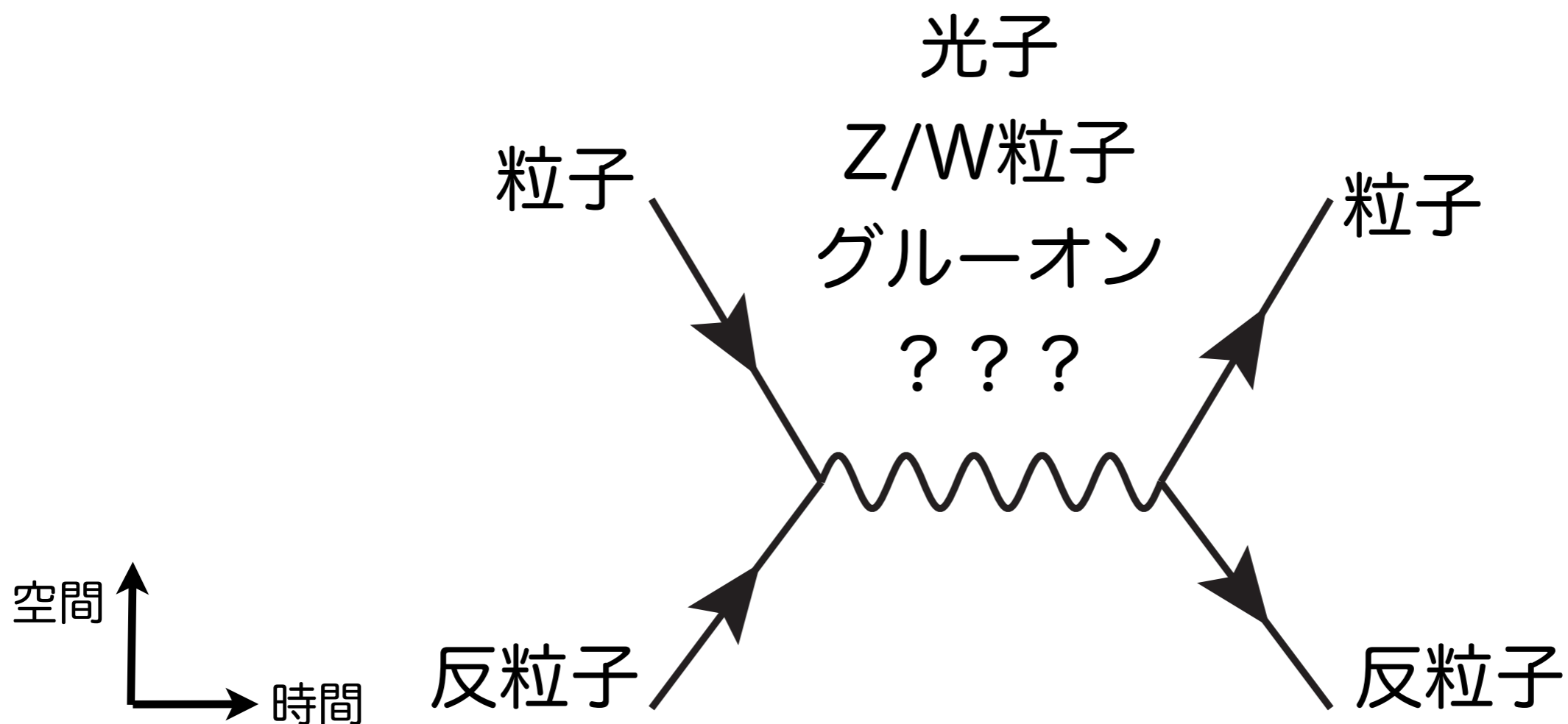
粒子の電荷、スピンなど性質によって運動がどう変化するか？

相互作用の種類が変わる

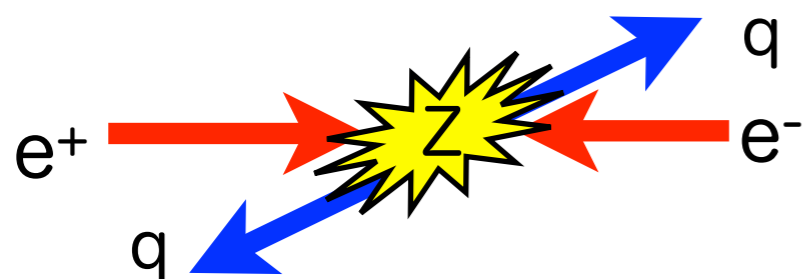
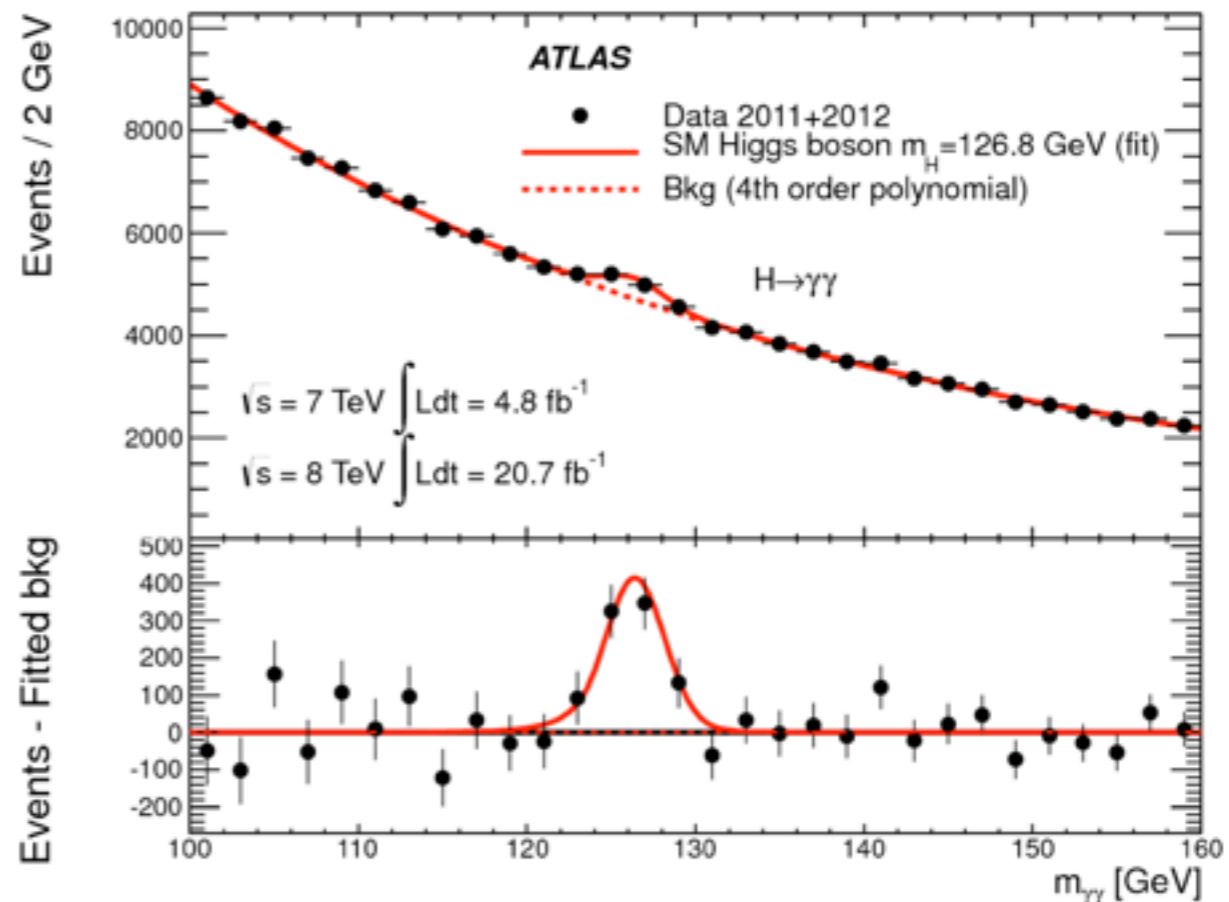
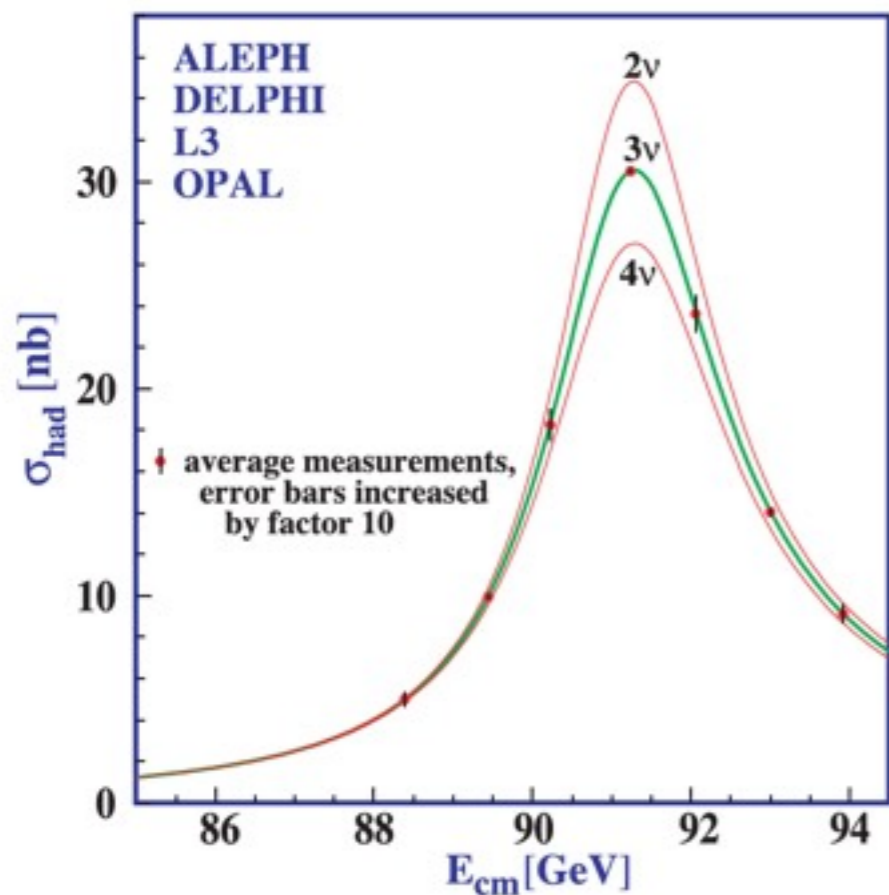
新粒子の探求



$$E = Mc^2$$

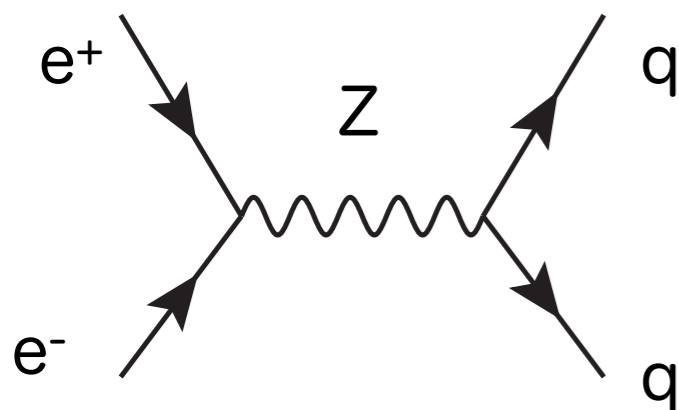
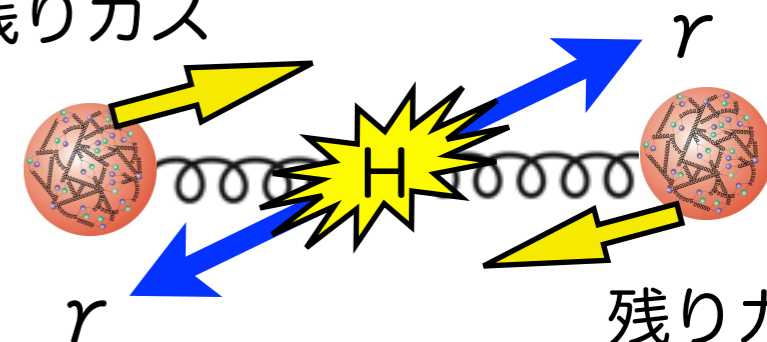


Z粒子、ヒッグス粒子

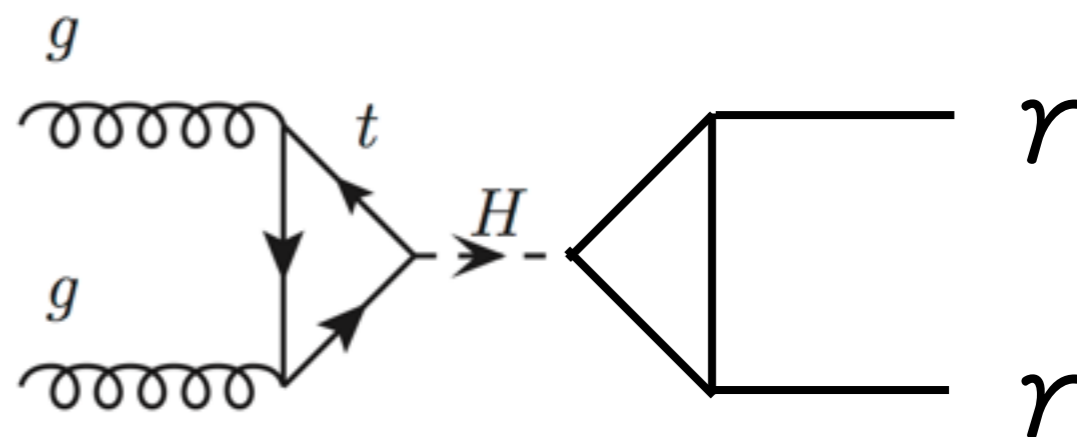


陽子の構造物の一つ
グルーオンの反応

残りカス

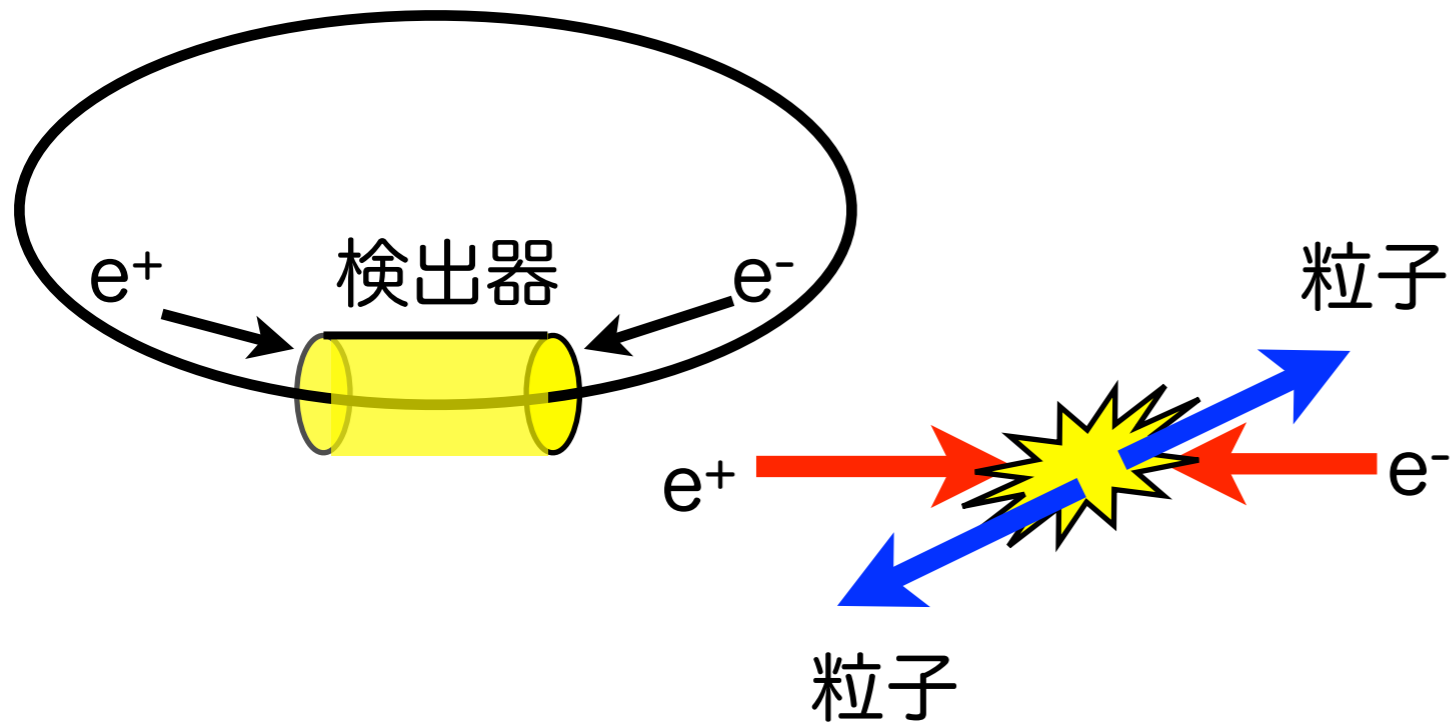


空間 ↑
時間 →

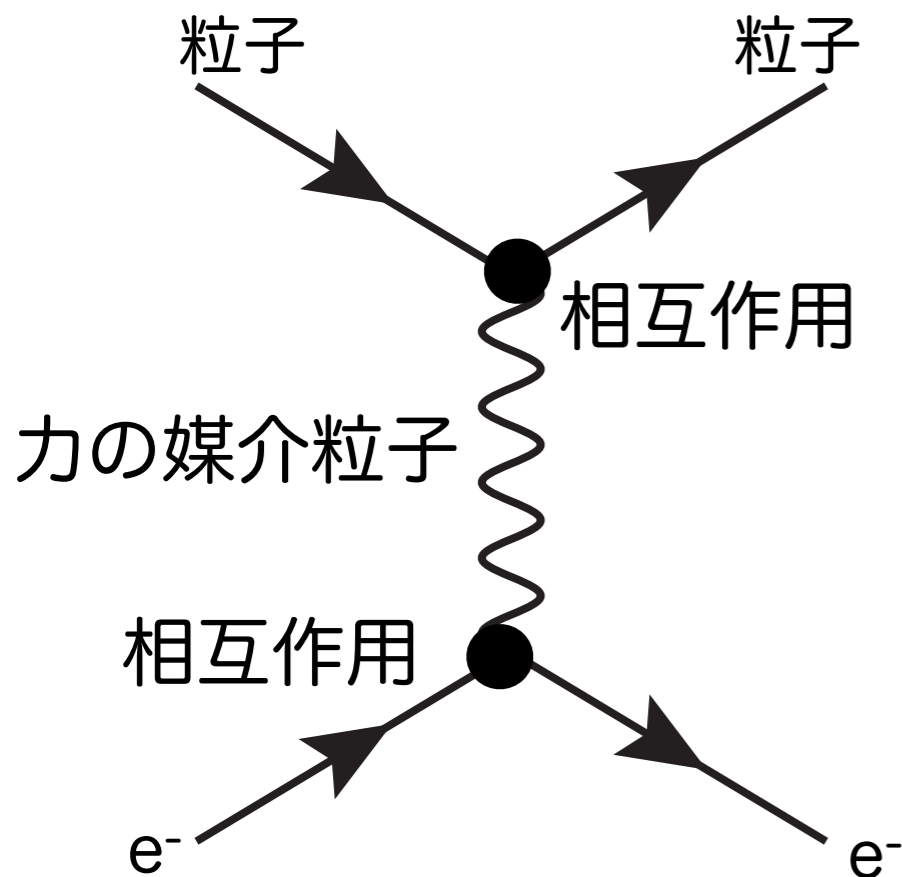
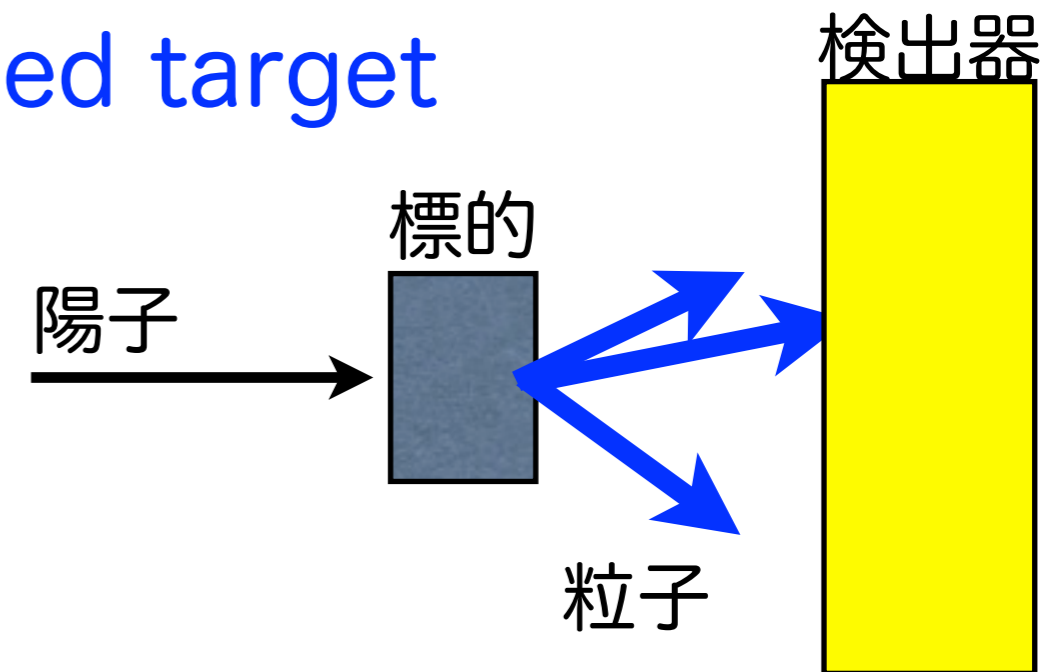


模型と実験との比較

collider



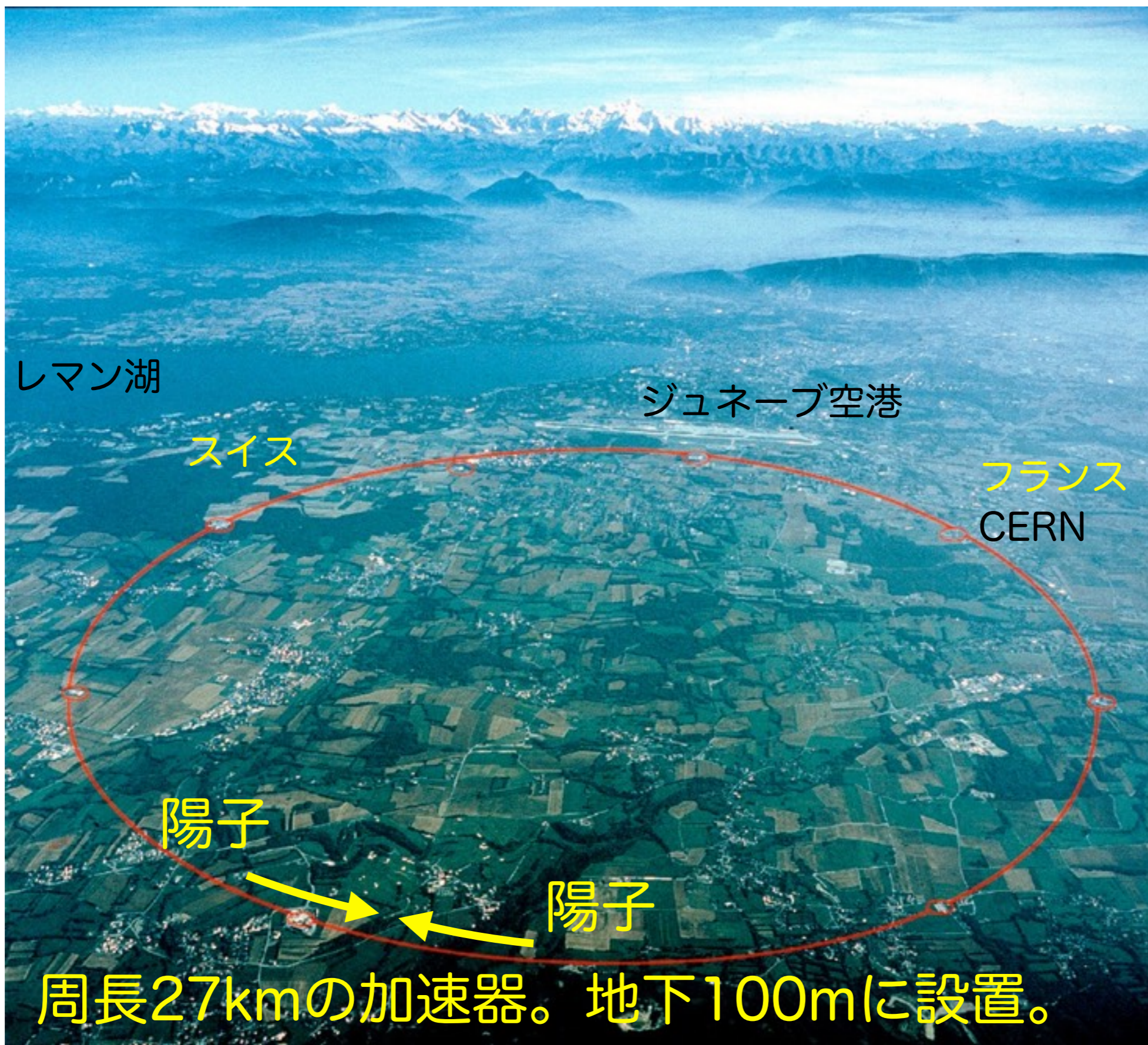
Fixed target

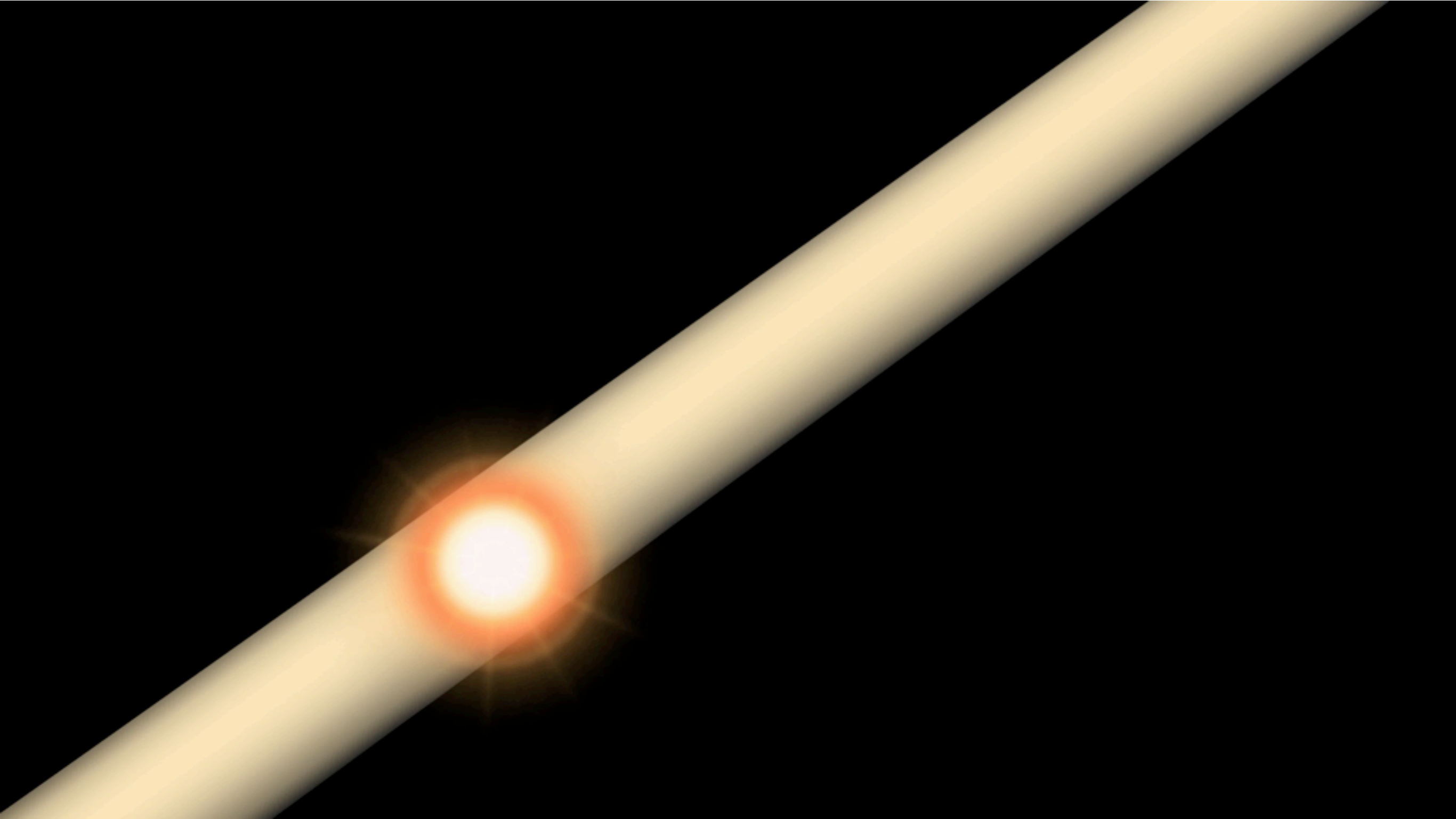


様々な粒子の断面積と崩壊率を測定
模型の検証

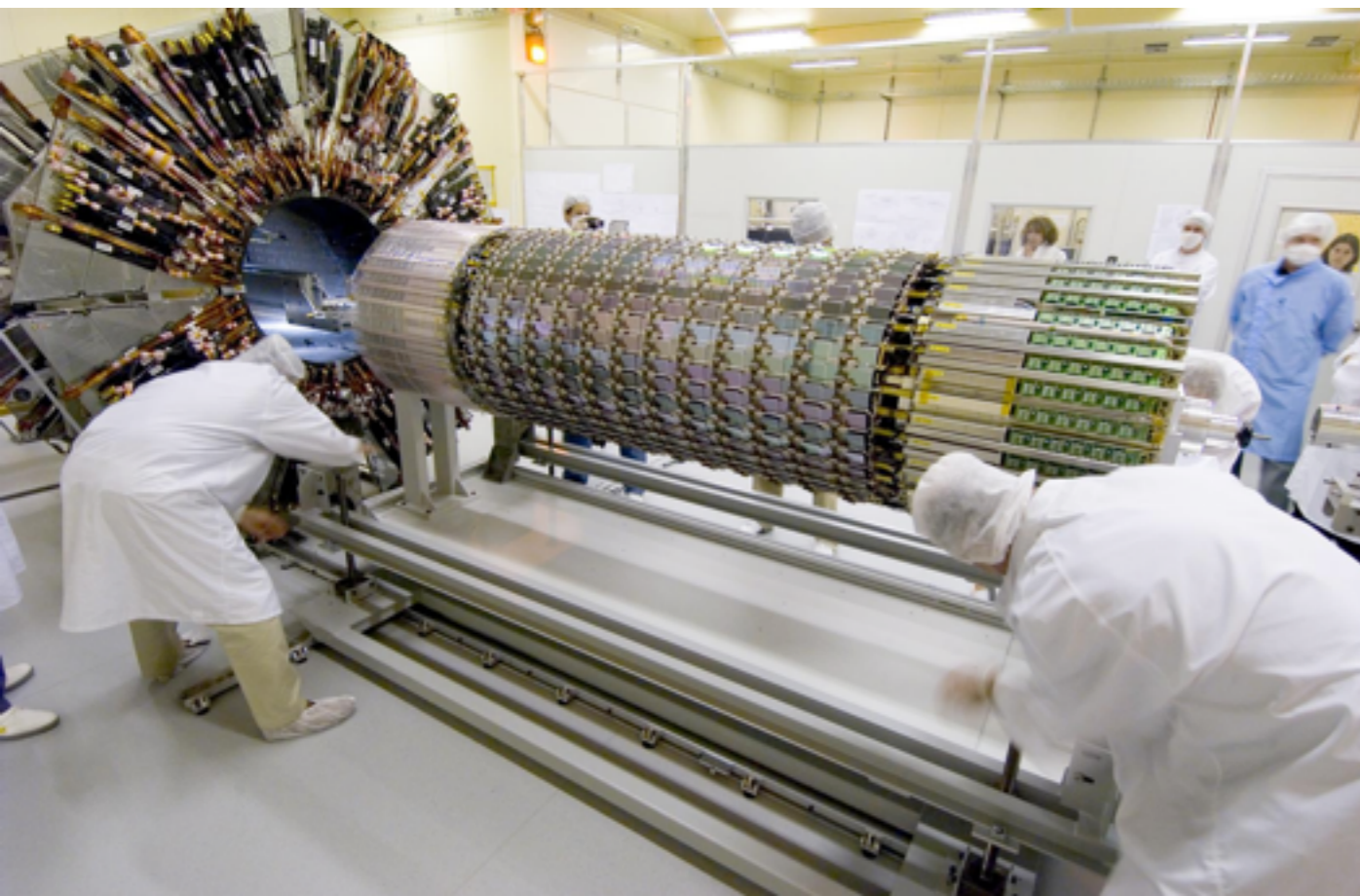
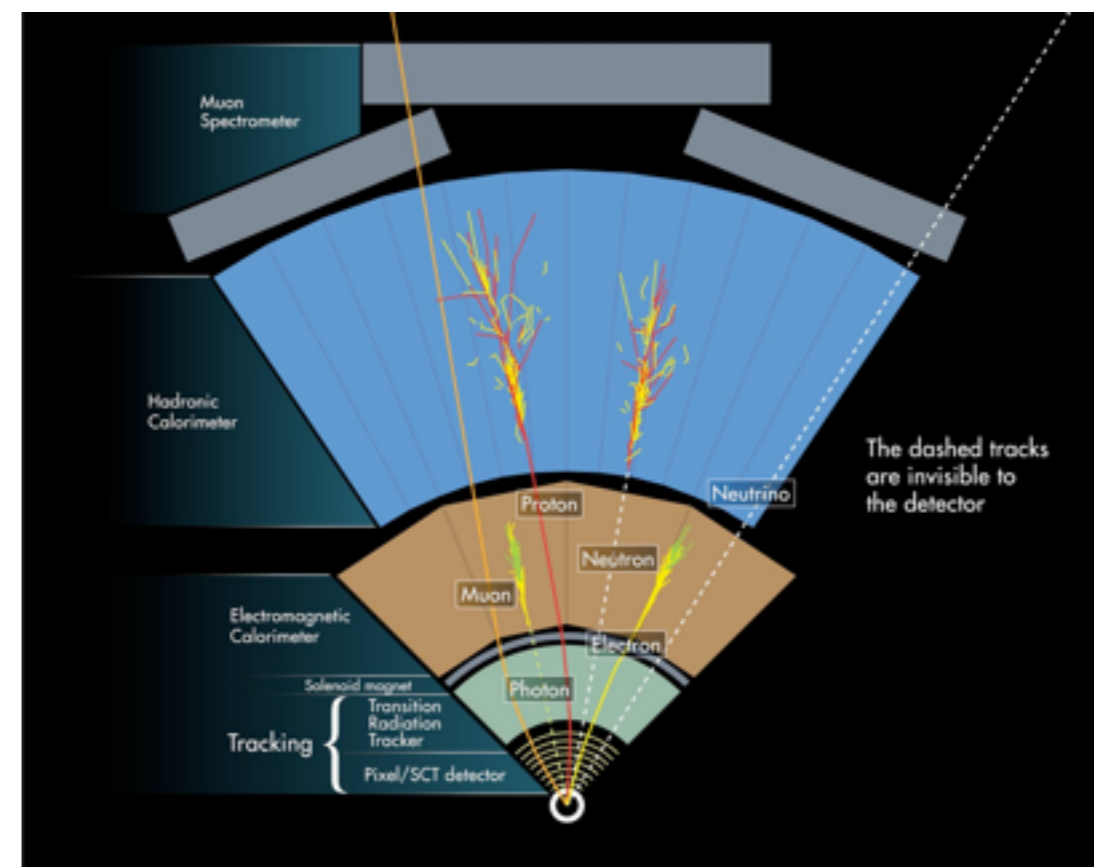
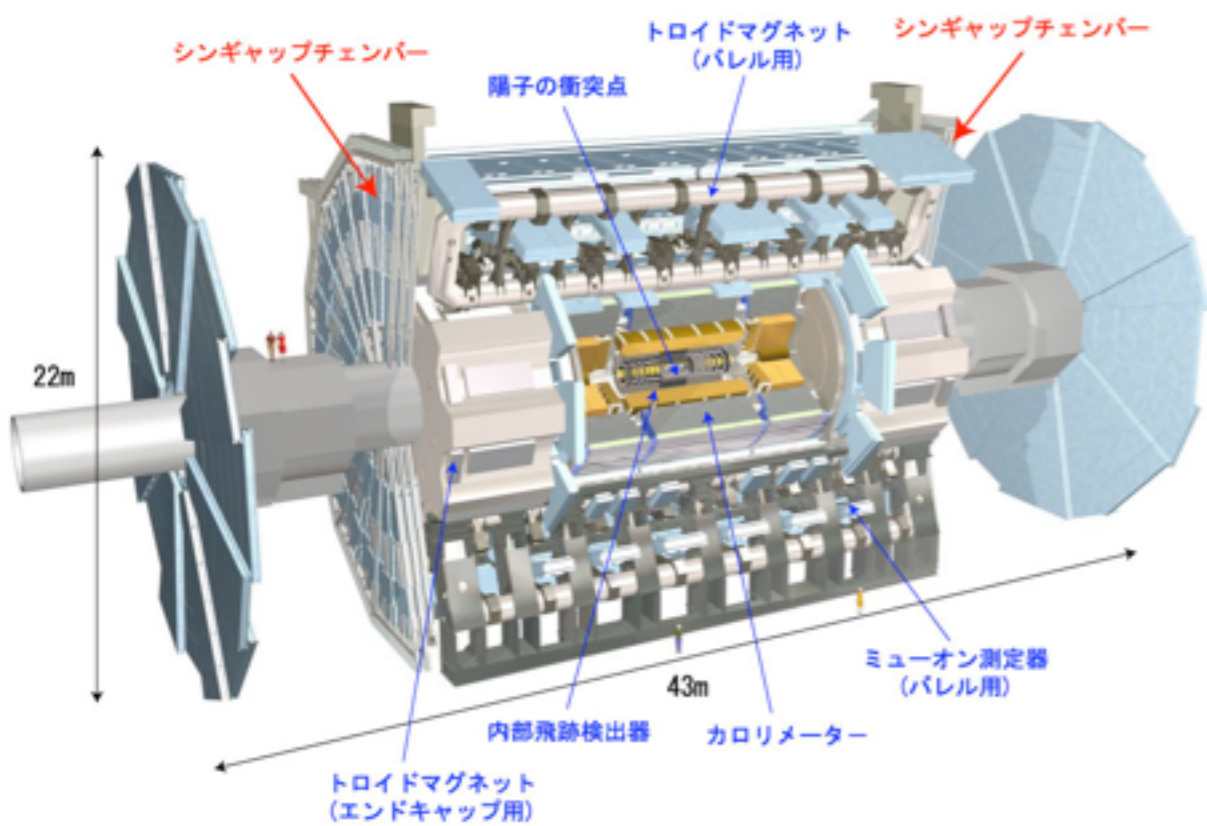
模型にない粒子, 反応を探索する
加速器、検出器、測定テクニック

加速器





検出器



今日のまとめ

- 現代素粒子物理学では「標準模型」が大成功
 - 6種のクォーク、6種のレプトンで物質構成
 - 電磁気力、重力、弱い力、強い力
 - ヒッグス機構による素粒子の質量獲得
 - 標準模型で大統一，暗黒物質など説明できない
 - 標準模型は低エネルギーでの有効理論
 - 高エネルギーには超対称性、余剰次元などの新物理がある
- これまでの実験結果（=標準模型）を再現し、
宇宙誕生直後の世界も記述する新しい原理の構築が重要

標準模型とそれを検証する実験手法をしっかりと理解する

← 本講義のねらい