

# 現代物理学

第6回目

# 量子力学

★ ミクロな世界の物理法則

★ 発見のきっかけは次の3つ

★ 黒体輻射問題

★ 光電効果

★ 水素原子の安定性

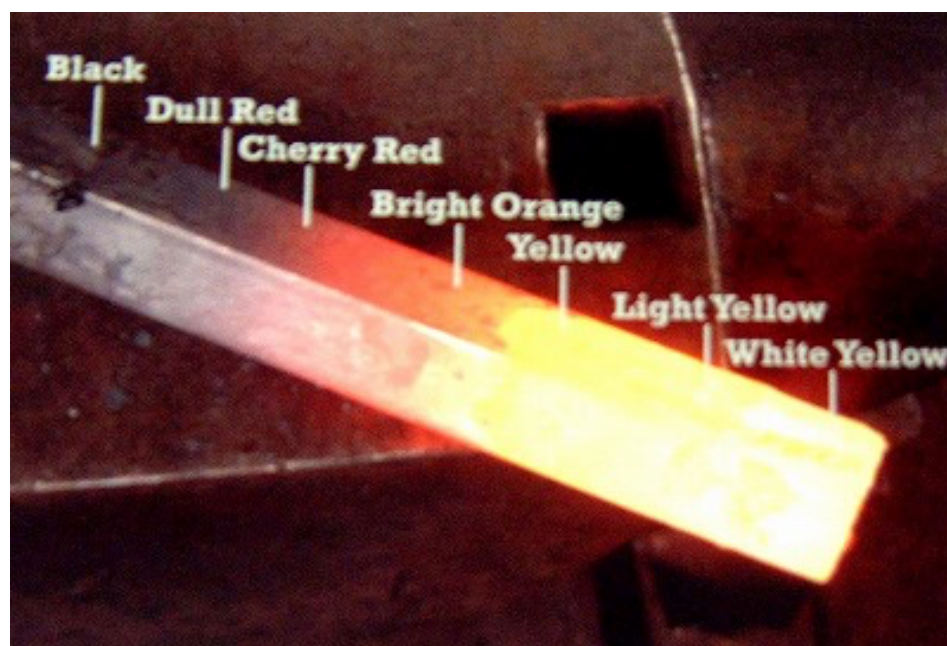
# 第1の問題：黒体輻射

物体を構成する原子や分子は温度に応じて熱的に振動

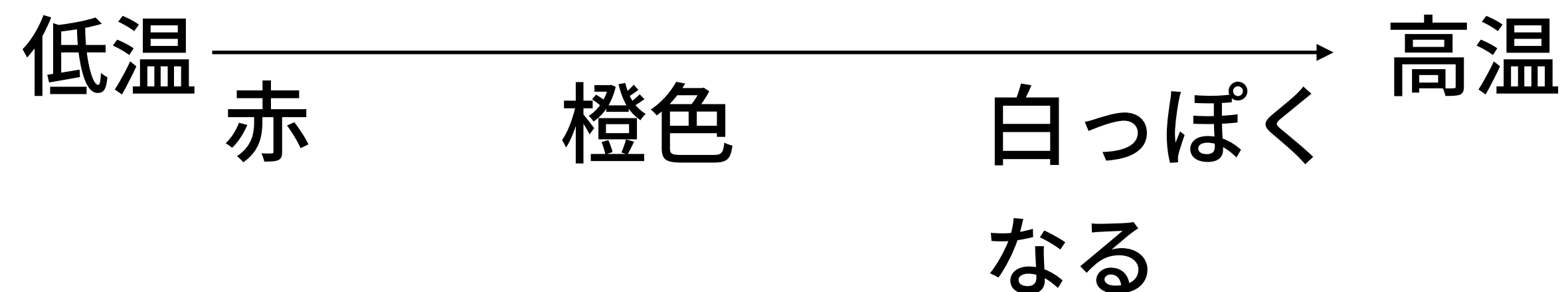


物体は温度で決まる**特有の電磁波を放射**

例: 鉄を熱する



阿蘇ものづくり学校のサイトより



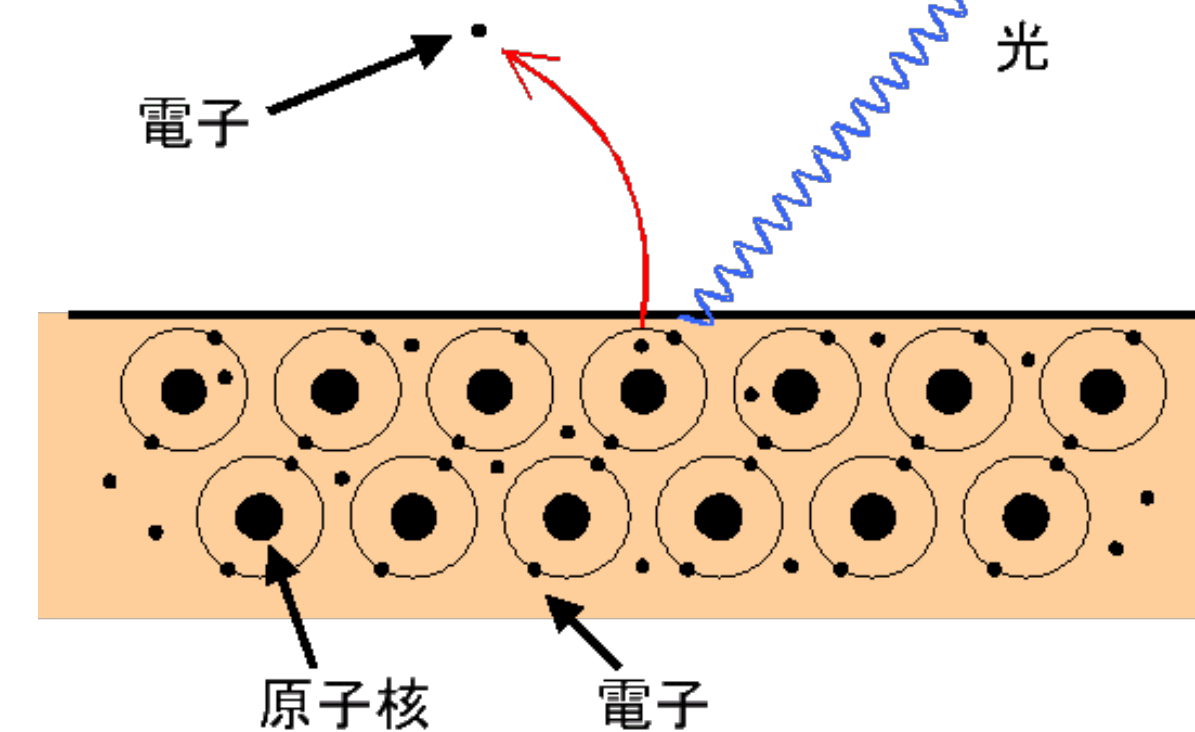
壁が**温度T**の黒体できている箱（空洞）を考える

空洞内の光のスペクトルは、 $T$ のみに依存し、壁の物質、空洞の形、大きさと全く無関係に決まる（キルヒホッフの法則）。

# 第2の問題：光電効果

## 光電効果とは？

金属のような物質の表面に，紫外線やX線を当てると，電子が飛び出してく

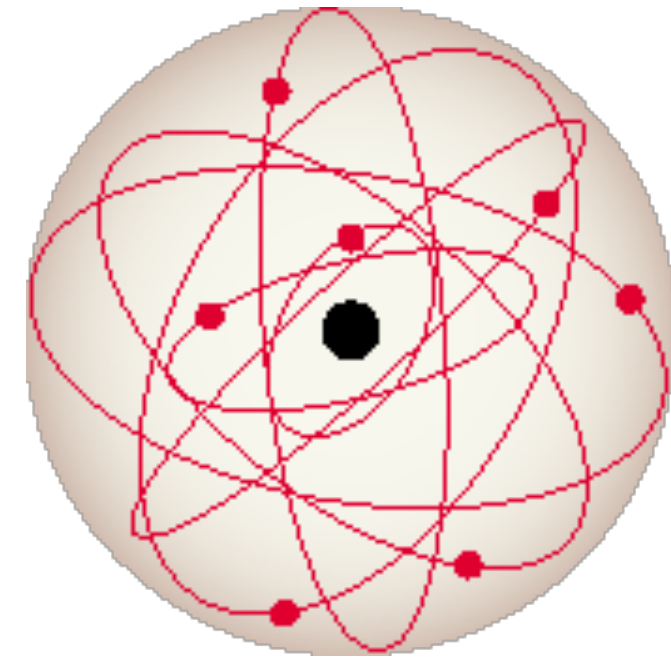


次のような性質をもつ

<http://www.phys.u-ryukyu.ac.jp/WYP2005/koudenpamph.html>

- ★ 光電子ひとつひとつのエネルギーは，照射する光の強さによらず，振動数  $\nu$  による
- ★ 単位時間あたりの光電子の **個数** は照射する光の強さに比例する

# 第3の問題：水素原子



<http://ne.phys.kyushu-u.ac.jp/seminar/MicroWorld/>

原子核の周りを電子が回っているという描像



電子は常に加速度を生じる（円軌道を描くため）



電磁気学によると，短時間( $10^{-11}$ 秒)で電磁波を放射して，原子核に落ち込んで行く。

# 量子力学

★ これらの問題を解決する方法

★ 光は波動であると同時に粒子でもある

★ 電子は粒子であると同時に波動でもある

★ 状態を記述する波動関数 
$$i\hbar \frac{\partial \psi(t, \vec{r})}{\partial t} = -\frac{\hbar^2}{2m} \nabla^2 \psi(t, \vec{r})$$

波動関数の意味：  $|\Psi(t, \vec{r})|^2 dV$  が  $\vec{r}$  まわりの微小空間  $dV$  における存在確率に比例

# 相対論的量子力学

★ 量子力学を相対論的（ローレンツ変換に対して不変）に表す必要がある

★ Dirac方程式  $i\gamma^\mu \partial_\mu \psi - m\psi = 0$

★ マイナスのエネルギー状態→ディラックの海

★ 第2量子化（場の量子論）  $|\psi\rangle = \psi^\dagger |0\rangle$

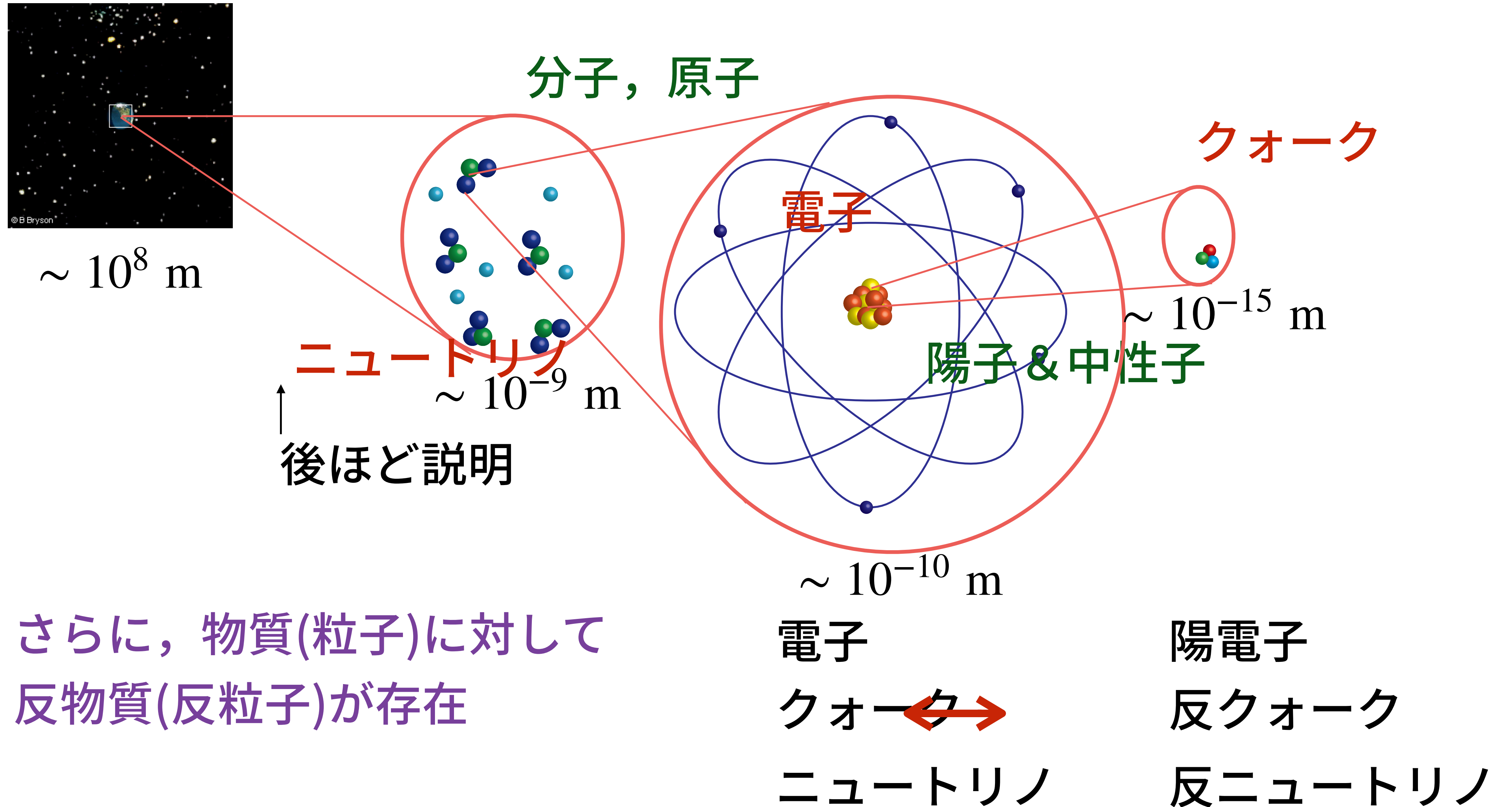
★ 反粒子の存在が予言→発見

素粒子現象は，場の量子論を用いて記述される

# 素粒子と宇宙



# 我々は何でできているか？



# 素粒子標準模型

The Nobel Prize in Physics  
1979



Sheldon Lee Glashow



Abdus Salam



Steven Weinberg

## 物質粒子 matter (fermions)

クォーク  
quarks

レプトン  
leptons

	I	II	III
クォーク (quarks)	 up	 charm	 top
	 down	 strange	 bottom
レプトン (leptons)	 electron	 muon	 tau
	 electron neutrino	 muon neutrino	 tau neutrino

## ゲージ粒子 gauge bosons

電磁気力  
electromagnetic

強い力  
strong

弱い力  
weak

photon

gluon

Z boson

W<sup>+</sup> boson

W<sup>-</sup> boson

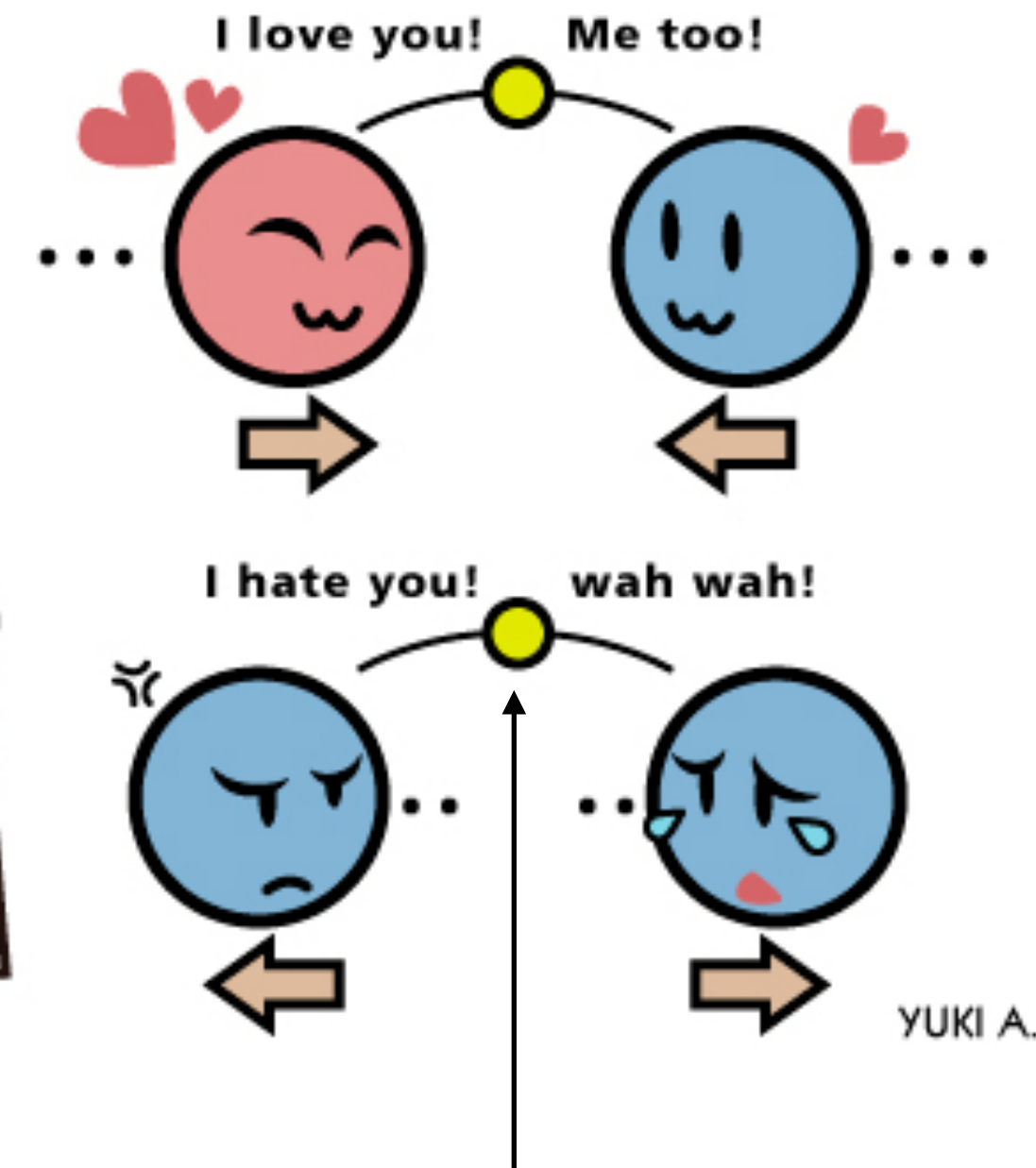
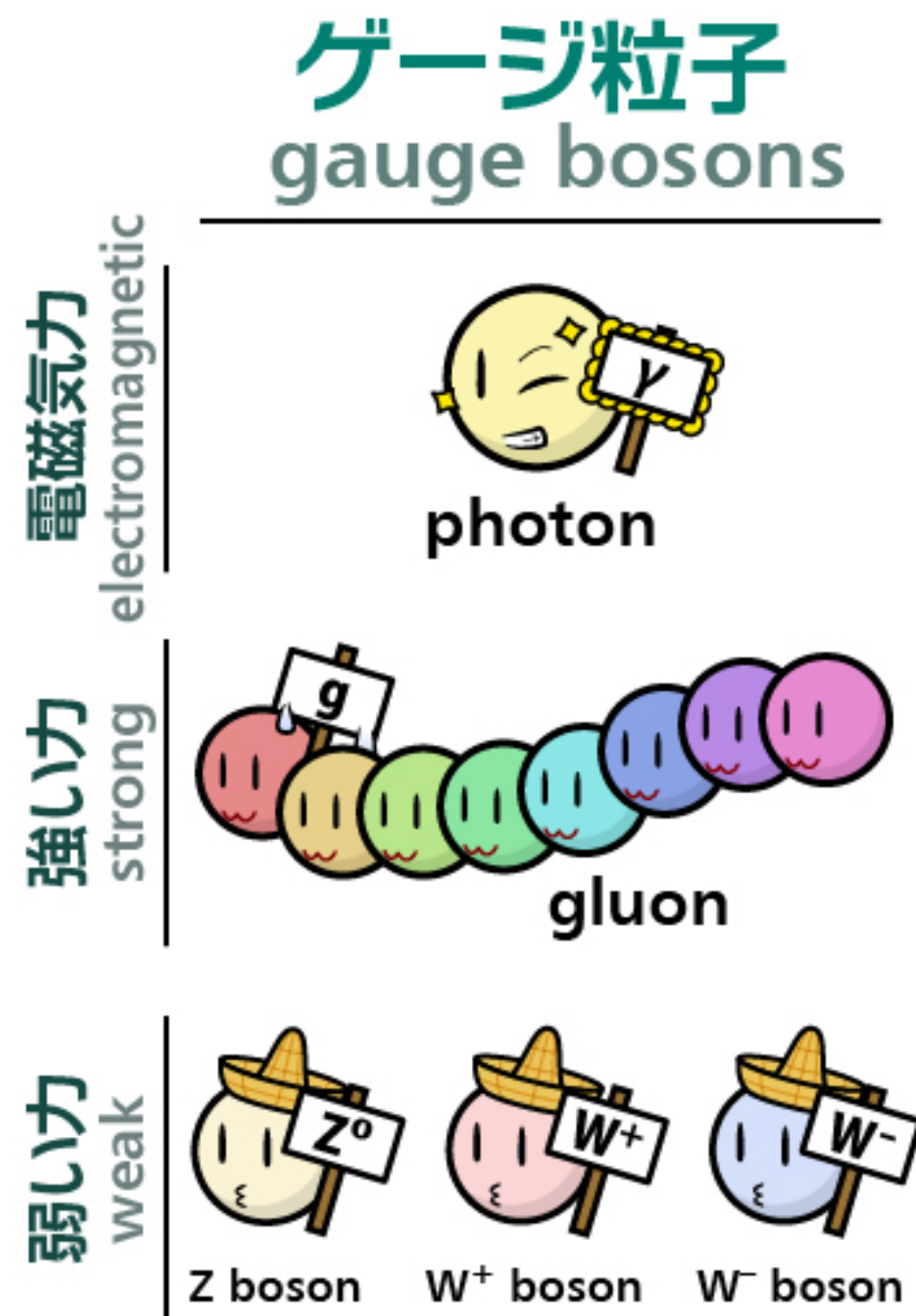
## ヒッグス粒子 Higgs bosons

Higgs boson

# ゲージ粒子たち

相互作用を媒介するのがゲージ粒子

©higgstan.com



ゲージ粒子

YUKI A.

# ヒッグス粒子

ヒッグス粒子  
Higgs bosons



標準模型の主要

標準模型 = 電弱相互作用の理論

自発的対称性の破れ

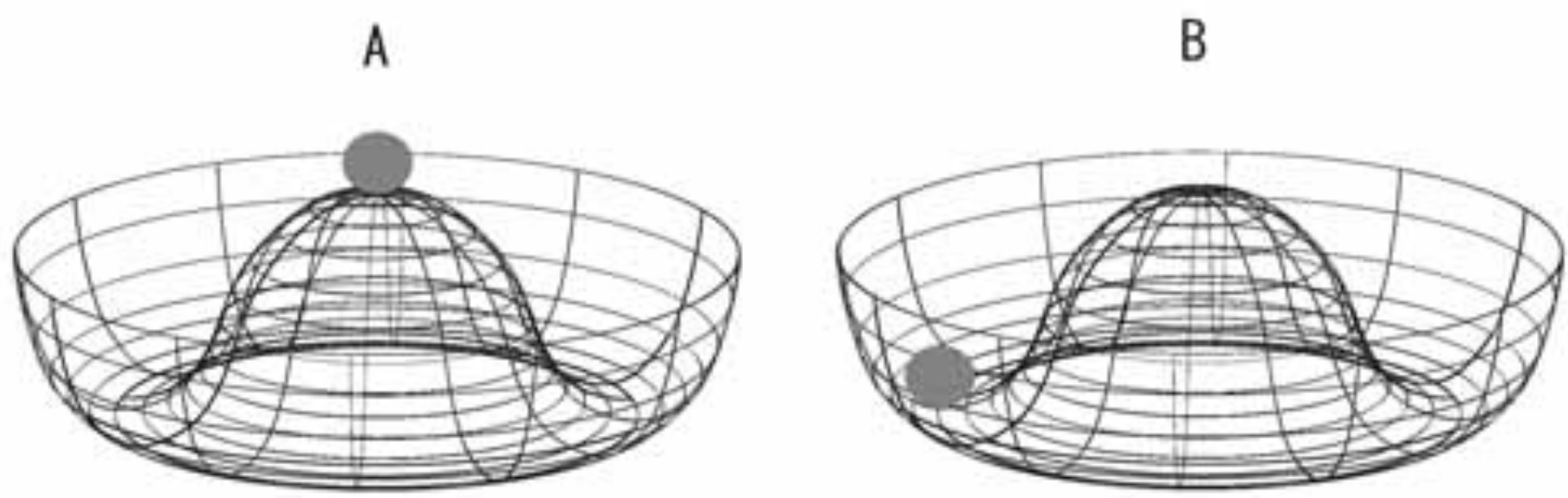
$$SU(2)_L \times U(1)_Y \rightarrow U(1)_{em}$$

電磁相互作用

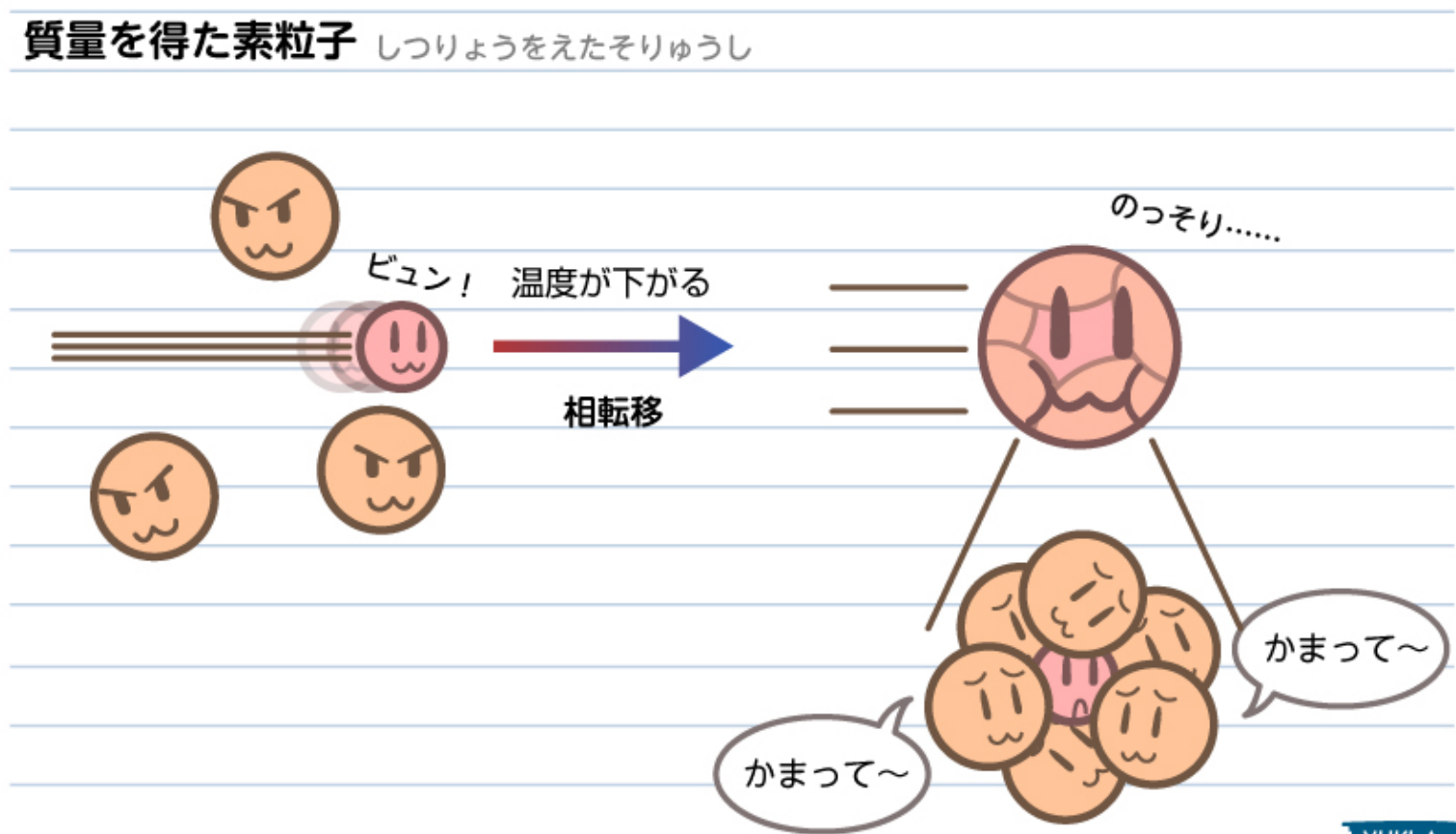


[www.asahi.com](http://www.asahi.com)より

弱い相互作用



[rescue.s.u-tokyo.ac.jp](http://rescue.s.u-tokyo.ac.jp)より



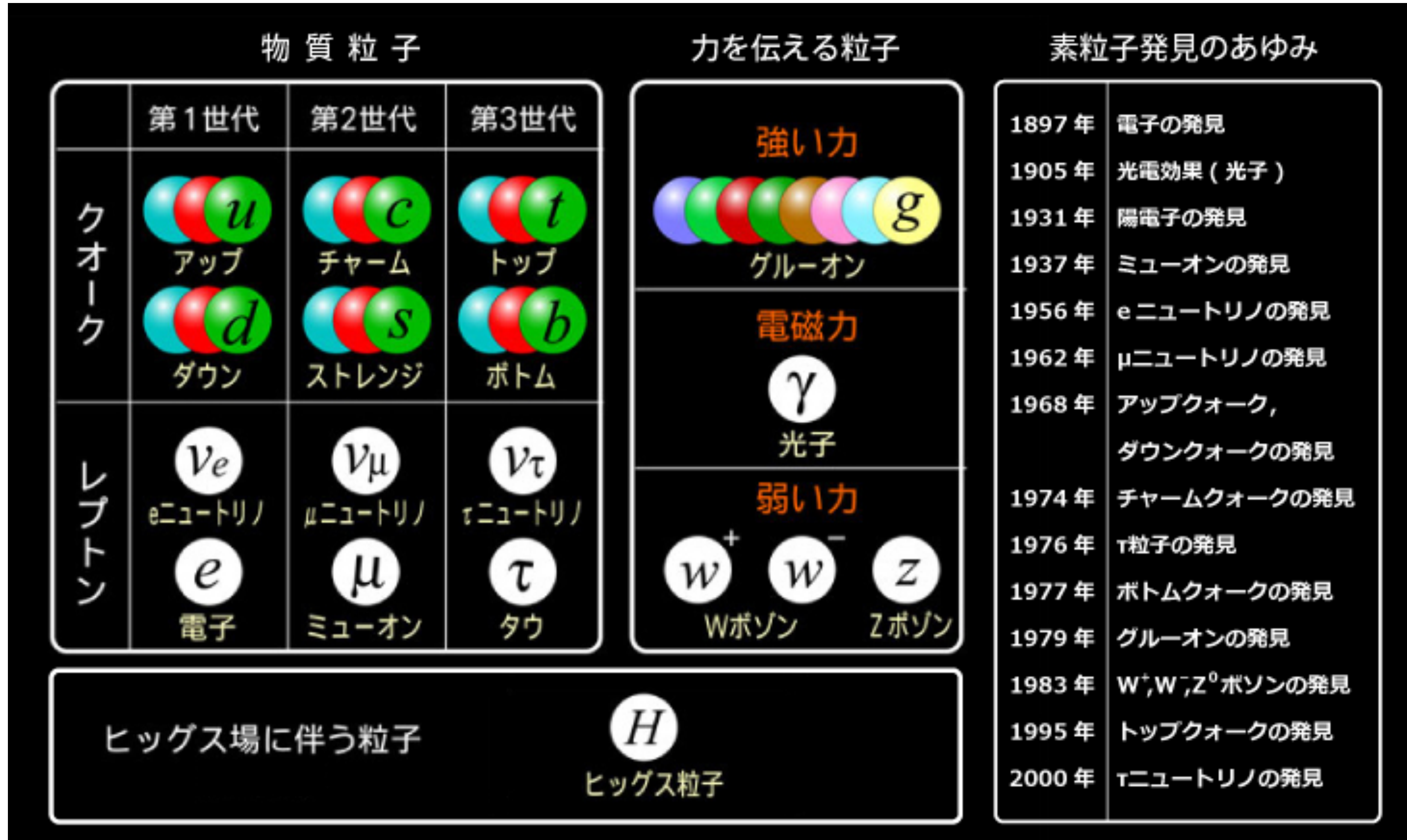
フェルミオン, Zボソン, Wボソン,  
ヒッグス粒子の質量が生成

例:  $\mathcal{L} = -y_t \bar{t}_R H \cdot q_L \rightarrow -m \bar{t}_R t_L$

ヒッグス機構

# 標準模型の歴史

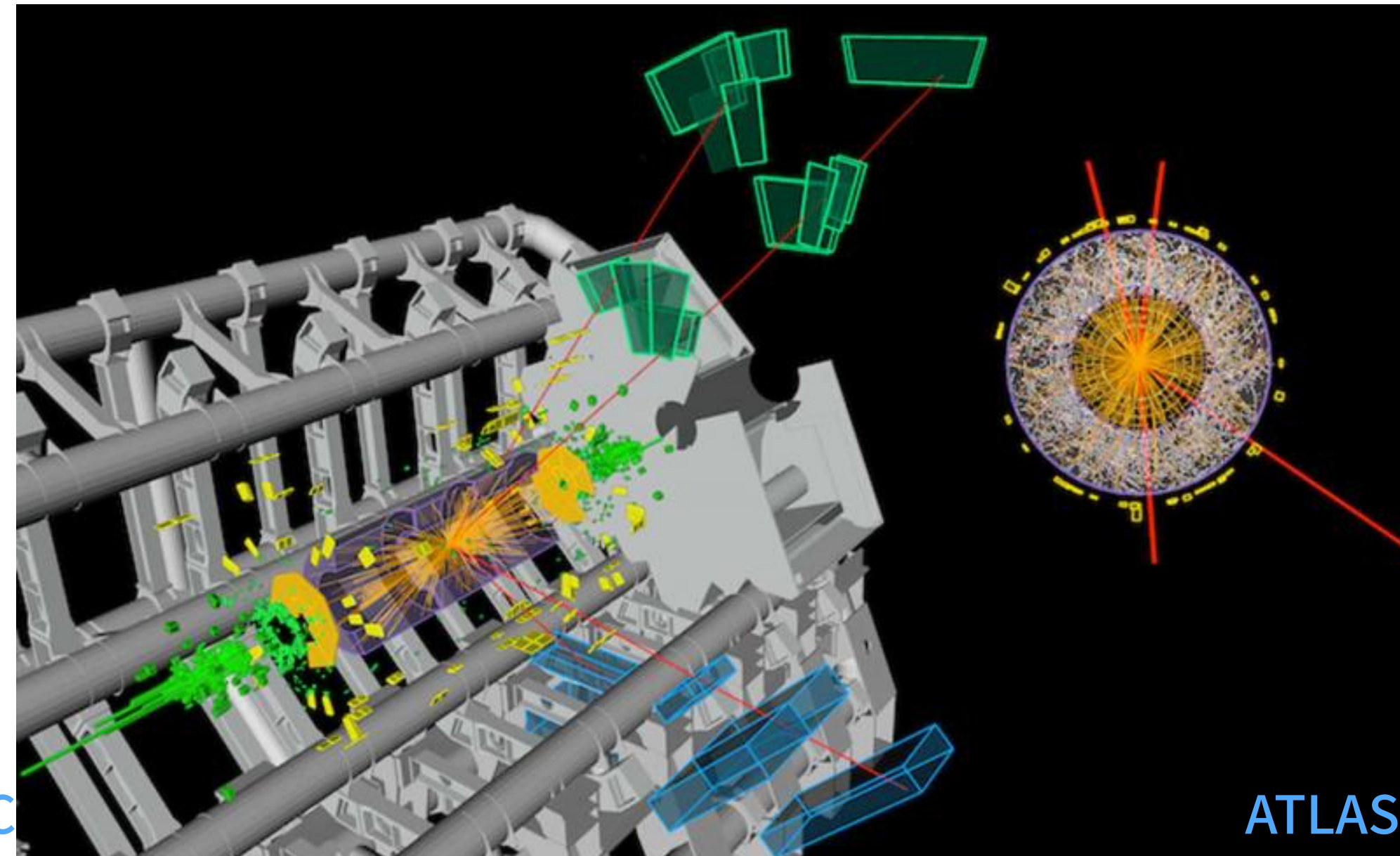
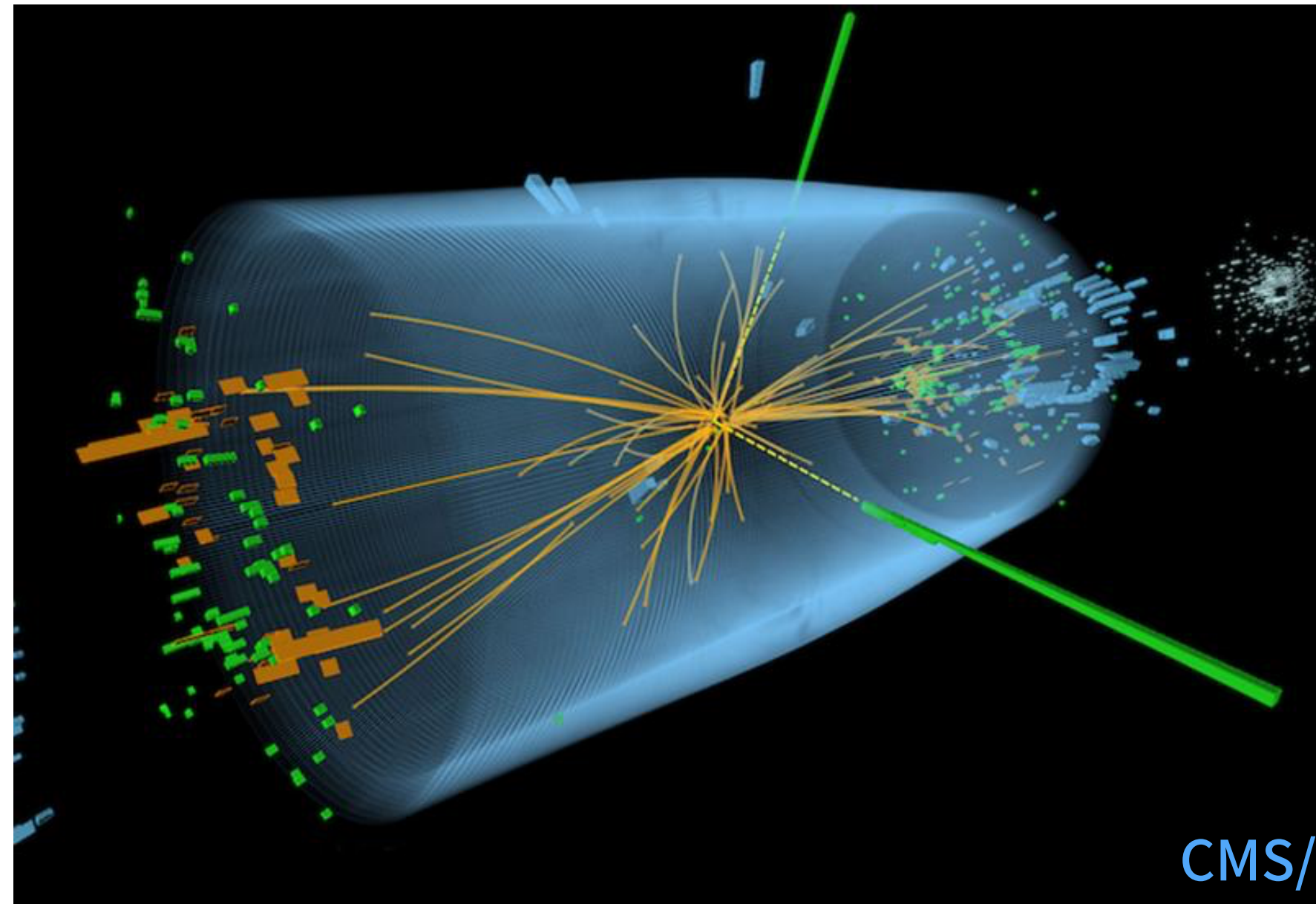
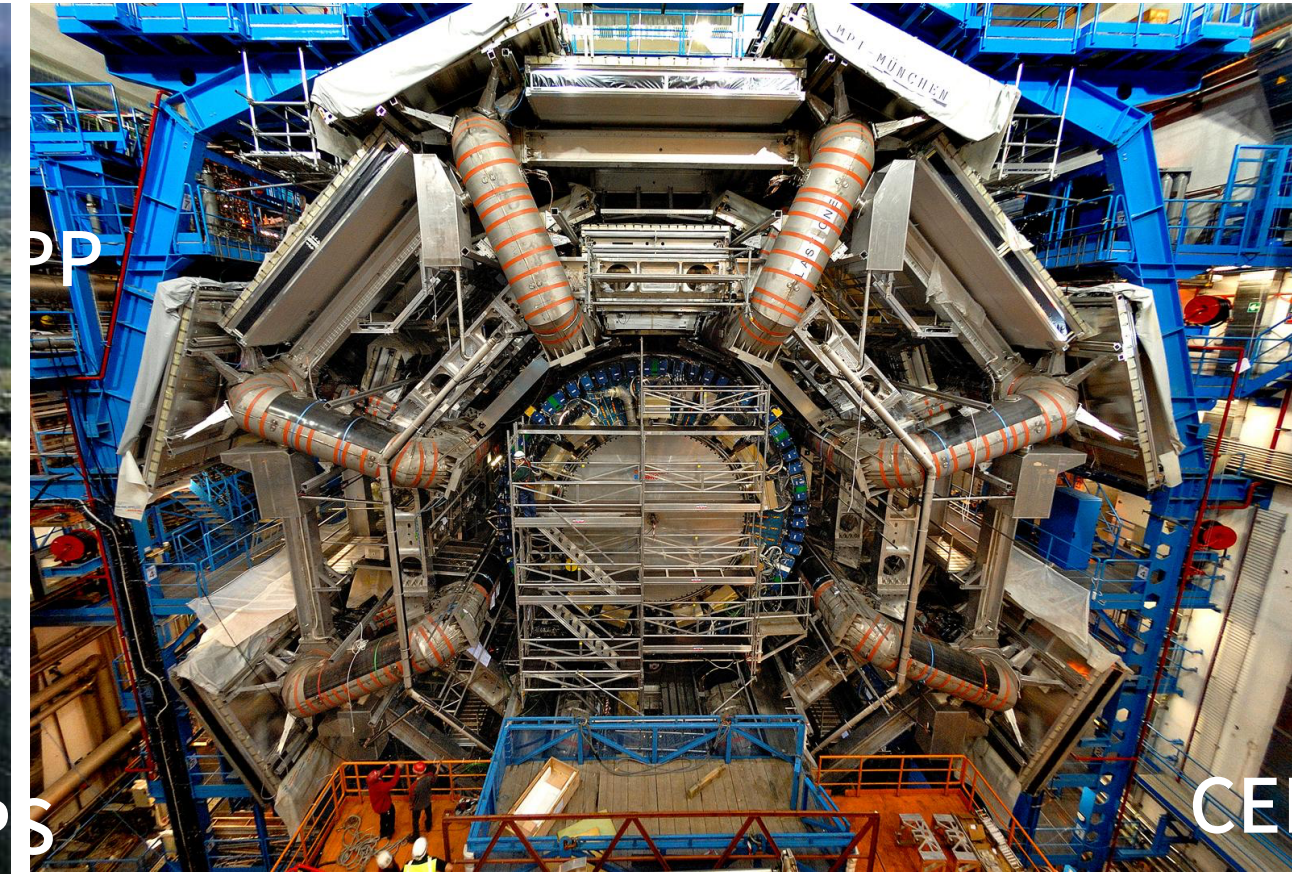
[www.kek.jp](http://www.kek.jp)より



2000年にはヒッグス粒子以外の全ての登場人物が揃っていた！

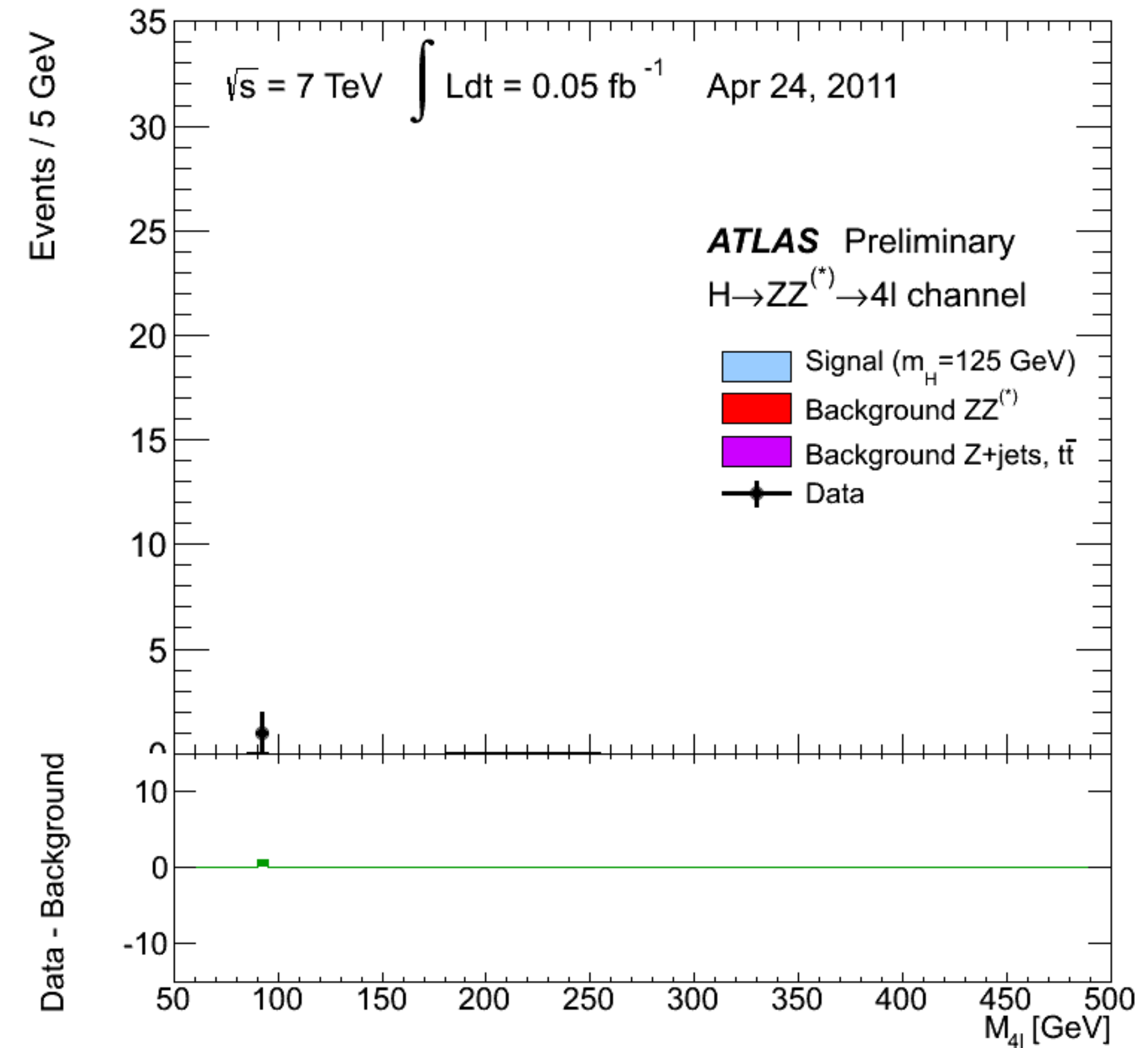
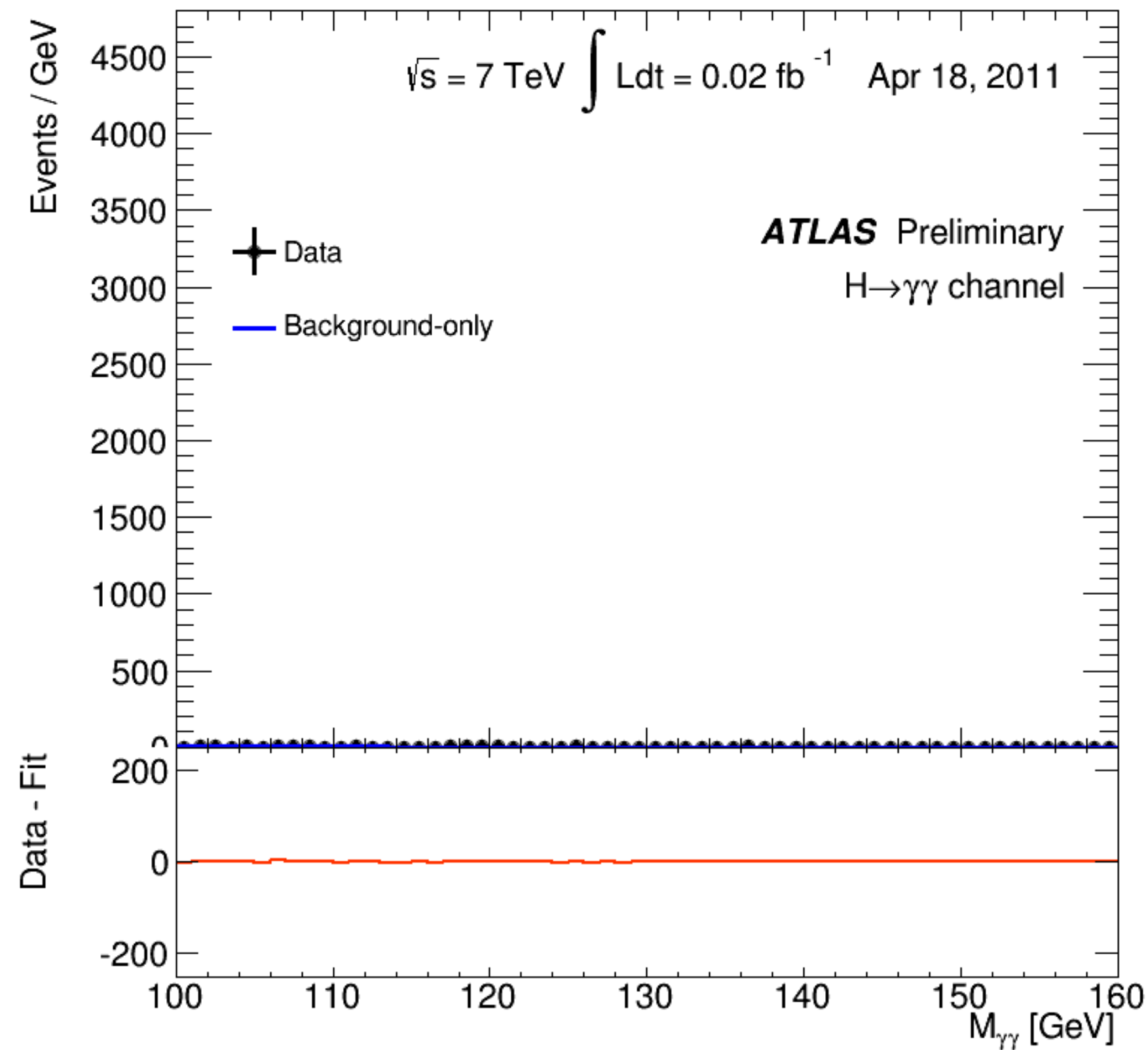
# ヒッグス粒子の発見

2012年7月4日 ヒッグス粒子発見



# ヒッグス粒子の発見

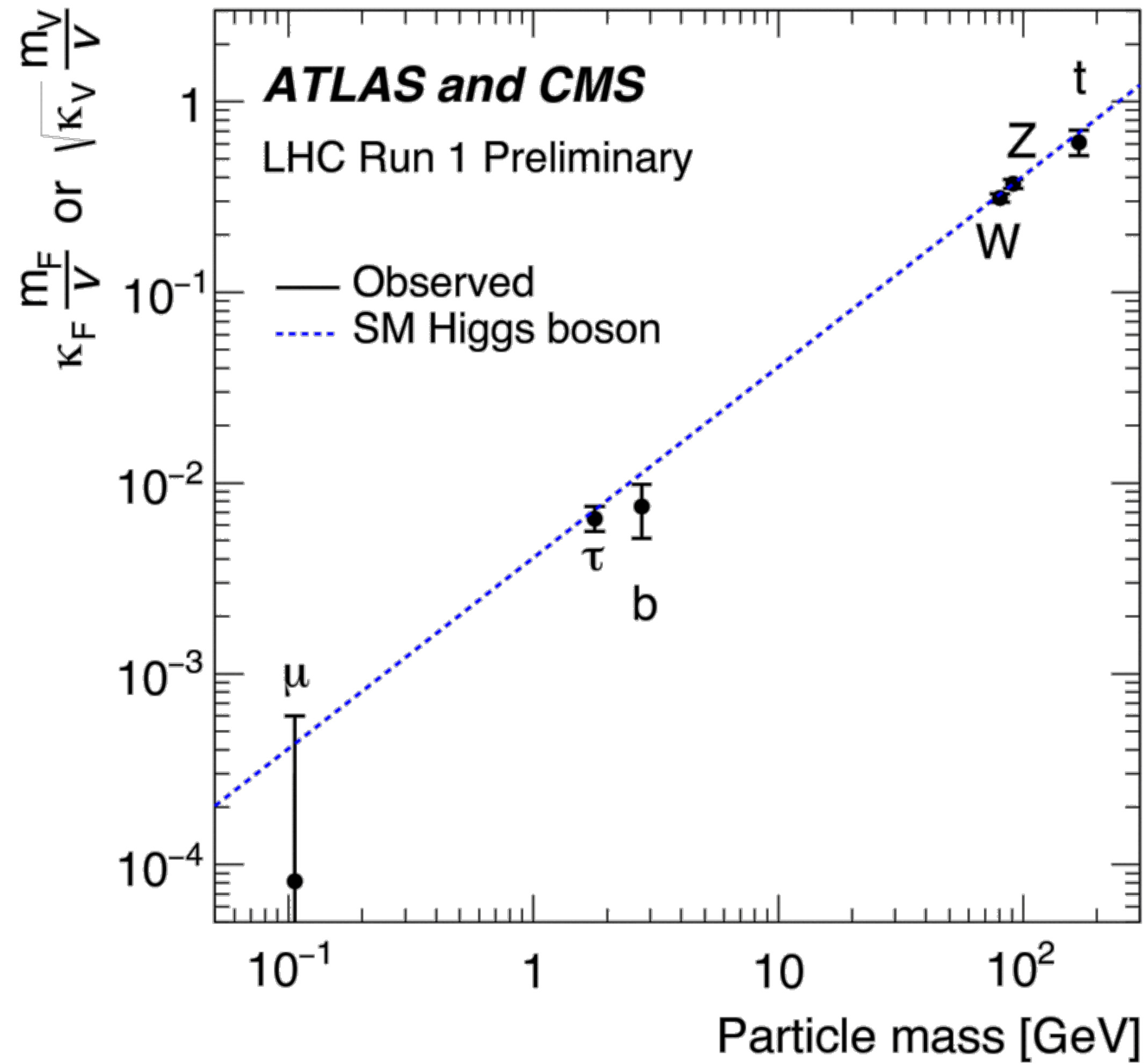
実際は，大量のデータを用いて解析された結果の発見



ヒッグス粒子の発見によって，標準模型は確立した！

# ヒッグス機構と質量

ヒッグス粒子との結合の強さ

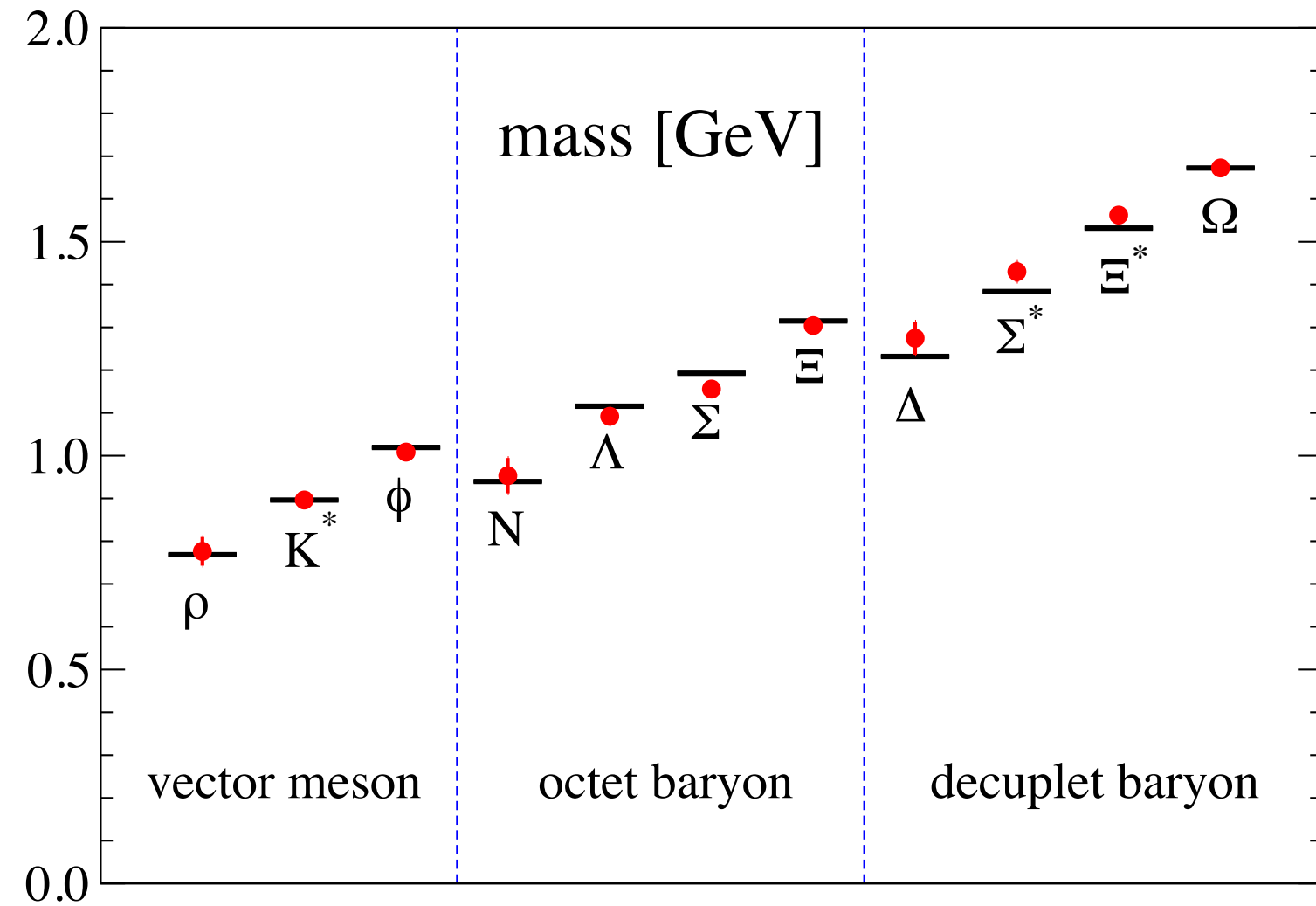


粒子の質量



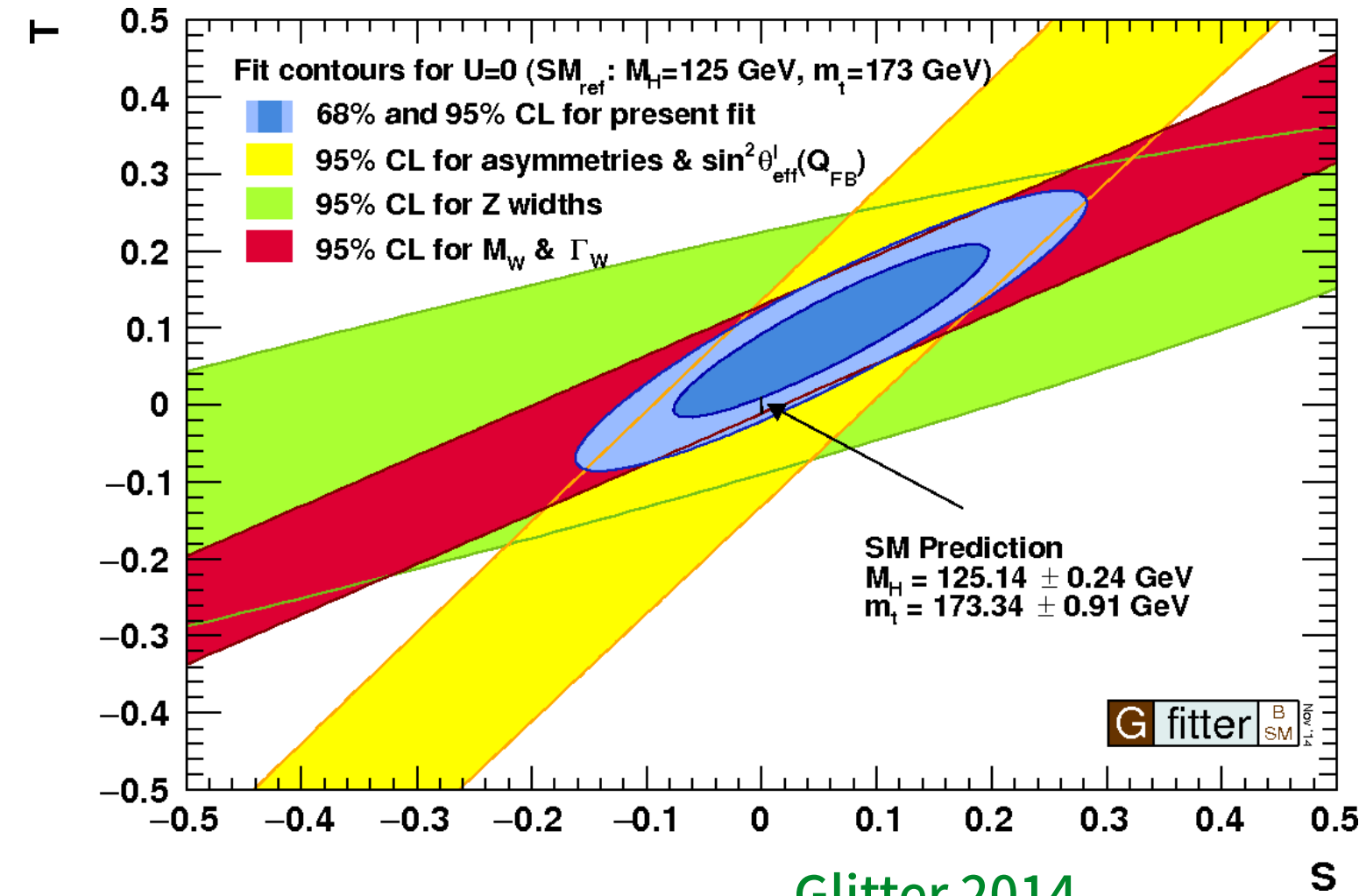
# 標準模型の成功

## Particle Zooの解消



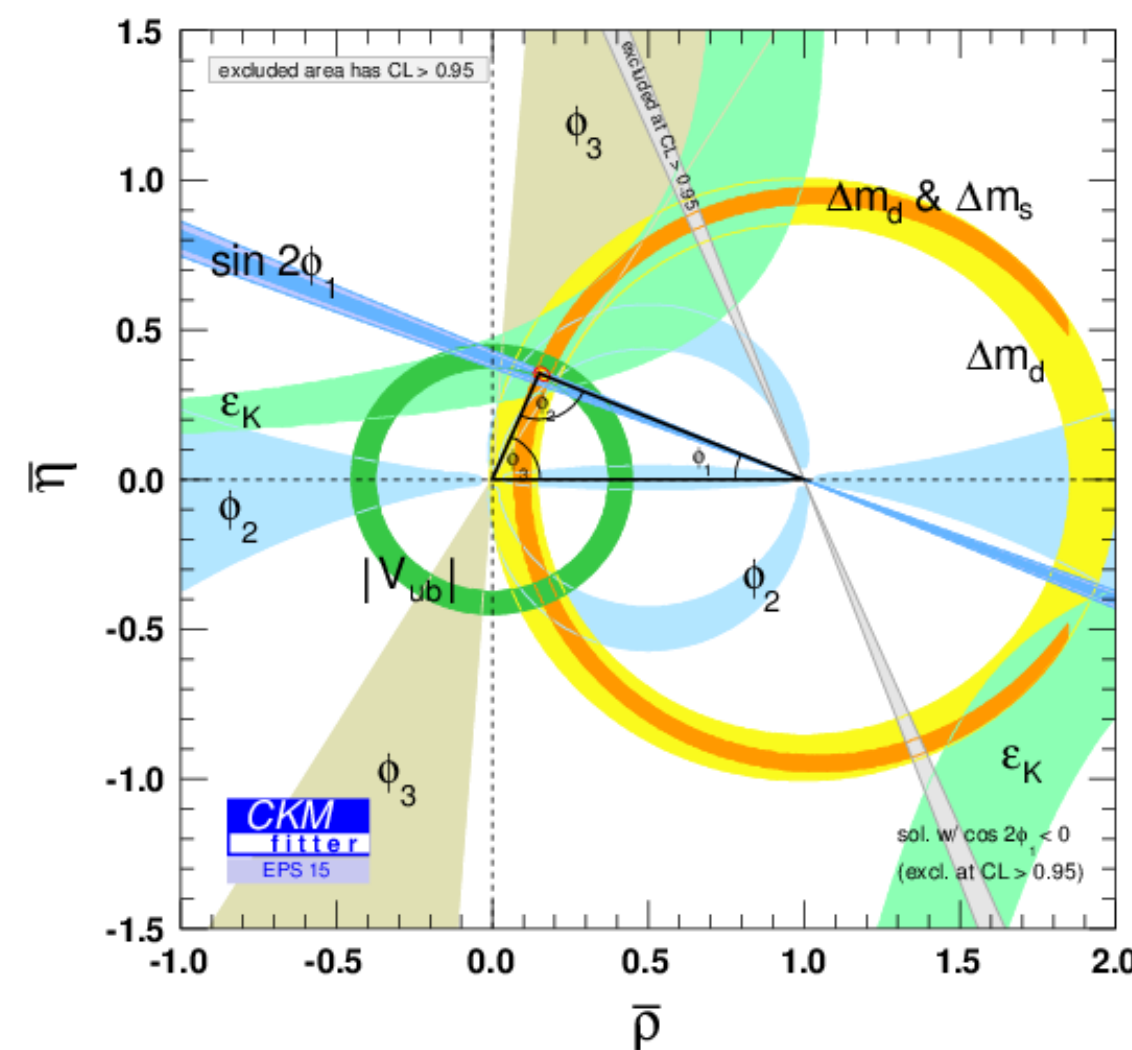
Fodor and Hoelbling, 2012

## 電弱パラメータ



Glitter 2014

## ユニタリティ三角形



CKMfitter 2015

## 電子の磁気能率

予言値： $g/2=1.00115955218178 \pm 0.000000000000077$

実験値： $g/2=1.00115955218073 \pm 0.000000000000028$

Aoyama, Hayakawa, Kinoshita, Nio, 2012

実に多くのデータが説明されている！

我々は物質の根源を記述する究極の物理法則を手に入れた？

ほぼ全ての素粒子物理学者はそう思っていない

実際、標準模型では解決できない問題が存在する！

# 標準模型の欠点

- ★ ニュートリノ質量が入っていない
- ★ フェルミオンの質量にやたら大きなヒエラルキーがあるのは何故か？
- ★ 何故同じような物質フェルミオンの組が3つあるのか？
- ★ 陽子(uudクォーク)と電子の電荷の絶対値が何故等しいのかわからない
- ★ 電弱相互作用と強い相互作用，重力相互作用の統一は？
- ★ ヒッグス粒子とは何者なのかが全く不明

などなど

# 膨張する宇宙

アインシュタイン方程式

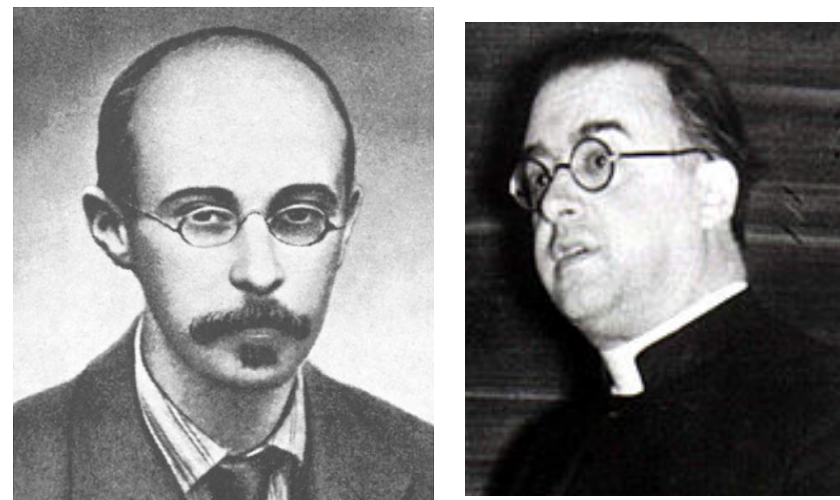
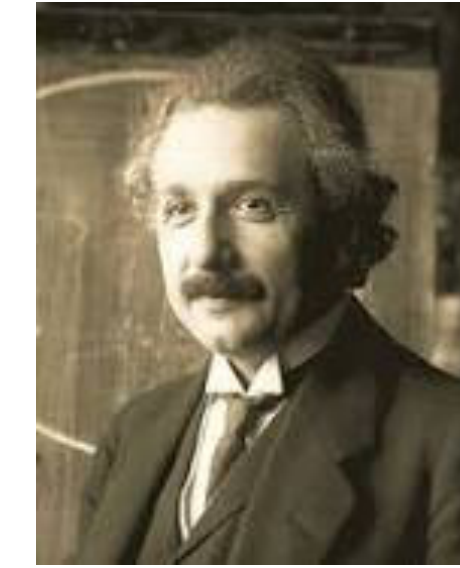
時空の曲率

$$G_{\mu\nu} + \Lambda g_{\mu\nu}$$

宇宙項

$$= \frac{8\pi G}{c^4} T_{\mu\nu}$$

物質の分布

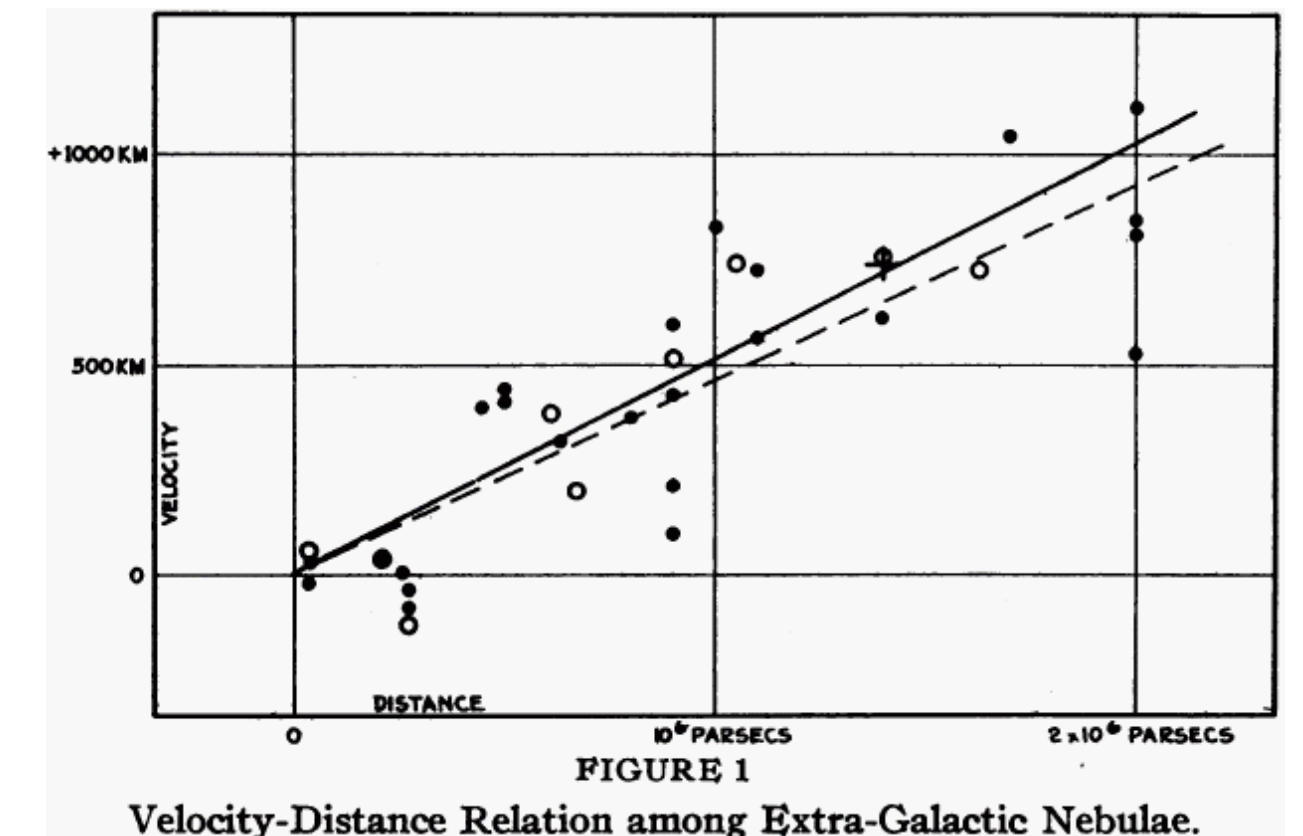


宇宙は膨張している



$$\frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{kc^2}{a^2} - \frac{\Lambda c^2}{3} = \frac{8\pi G}{3} \rho$$

$$\frac{2\ddot{a}}{a} + \frac{\dot{a}^2}{a^2} + \frac{kc^2}{a^2} - \Lambda c^2 = -\frac{8\pi G}{c^2} p$$



「宇宙は原始的原子の爆発から始まった」



# ビッグバン元素合成

宇宙の初期は非常に高温

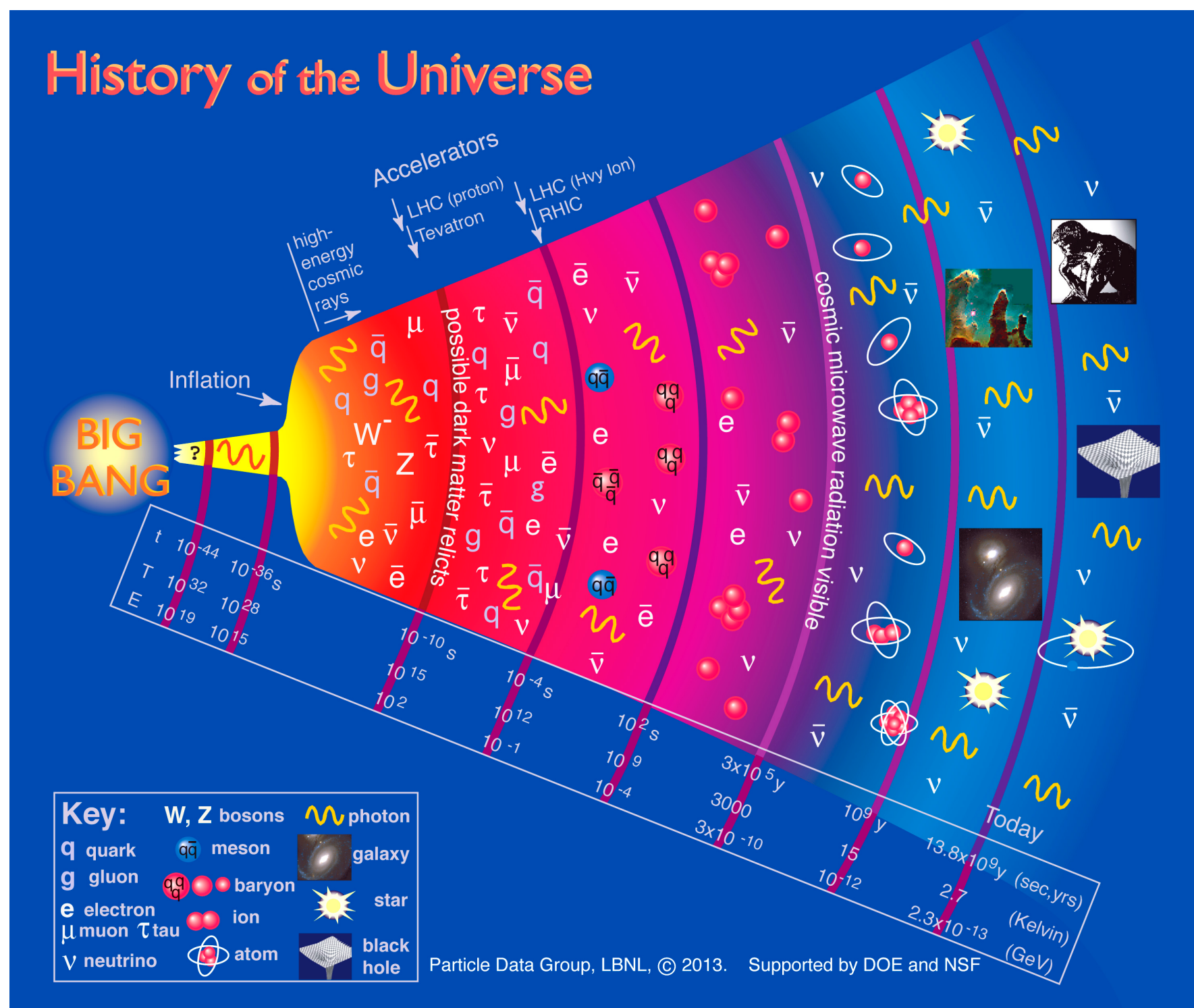


素粒子たちはバラバラで存在



宇宙が冷えていくと水素原子ができたり，核反応を起こして重い元素ができたりする

元素の存在比がうまく説明できる

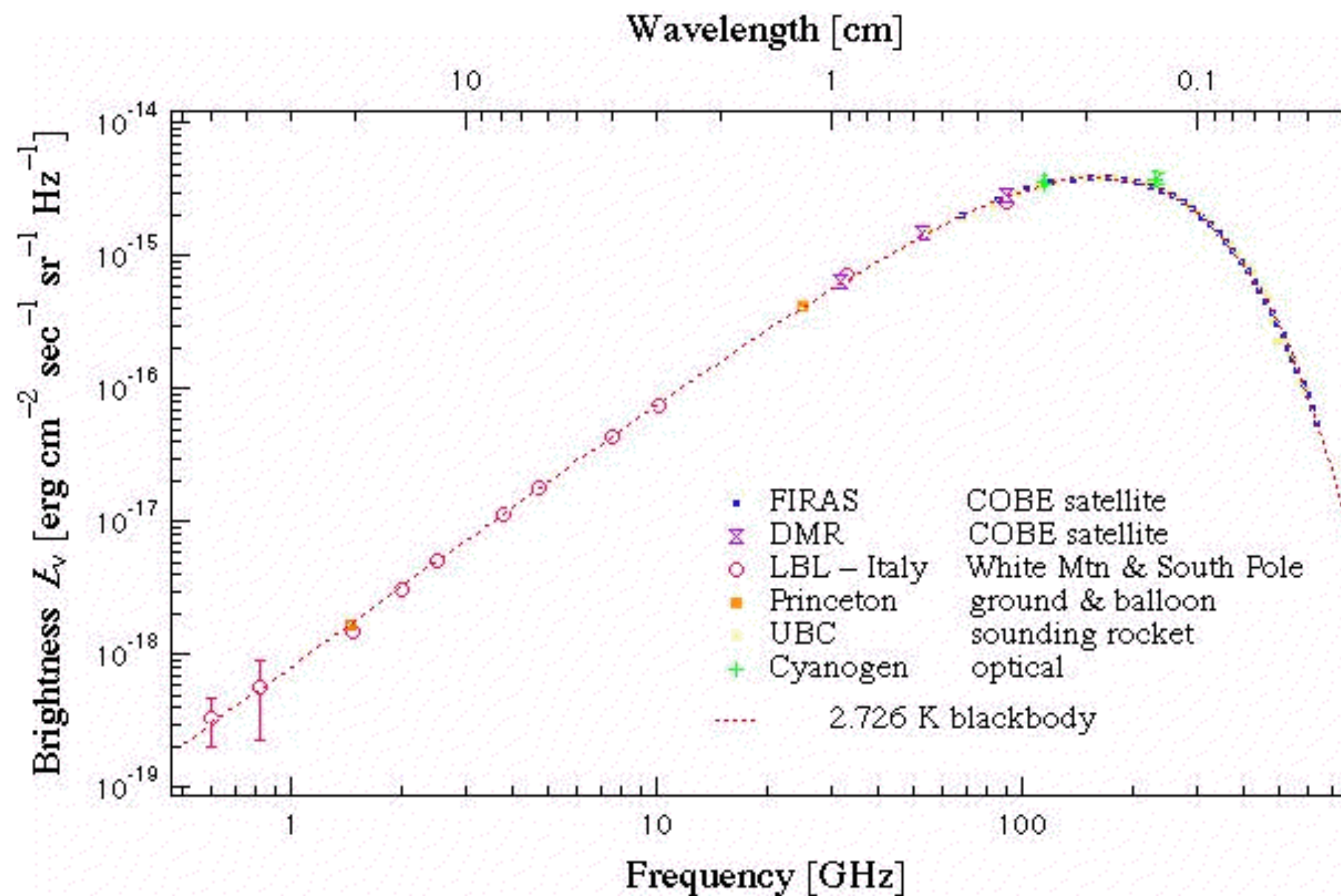
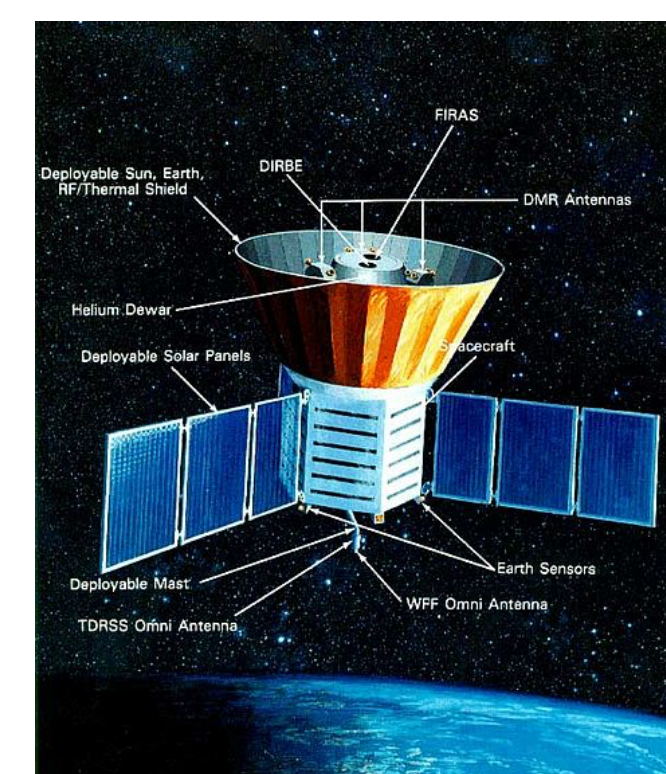


宇宙の温度が3000Kくらいのときに,水素原子が合成

→ 宇宙の晴れ上がり → 3Kの輻射

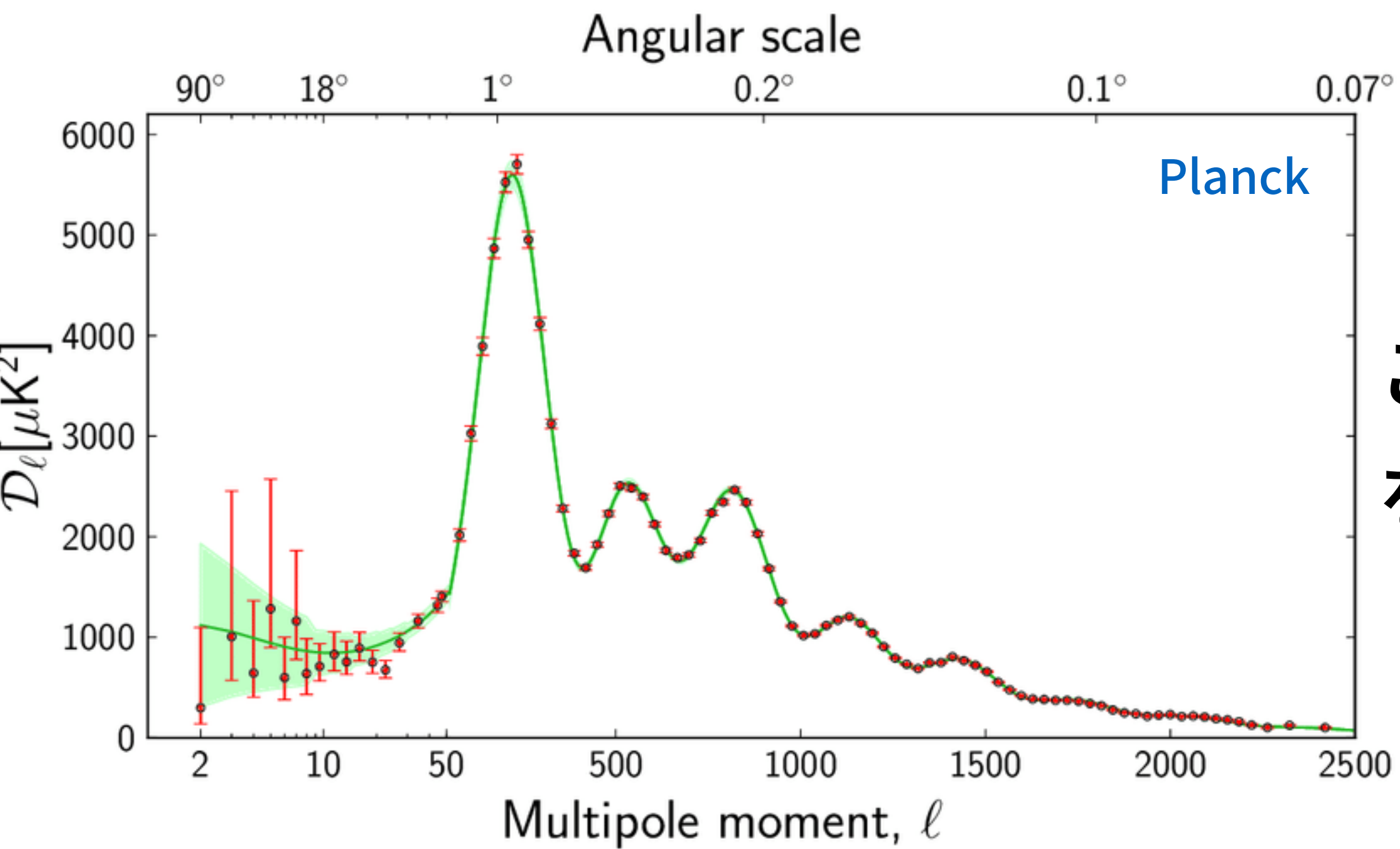
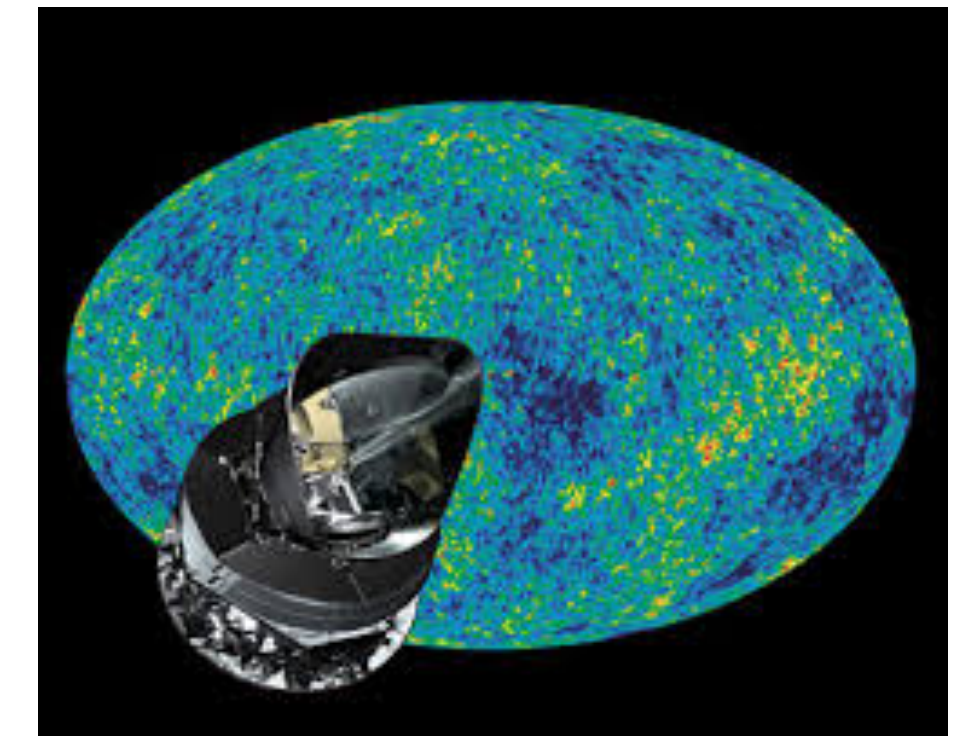
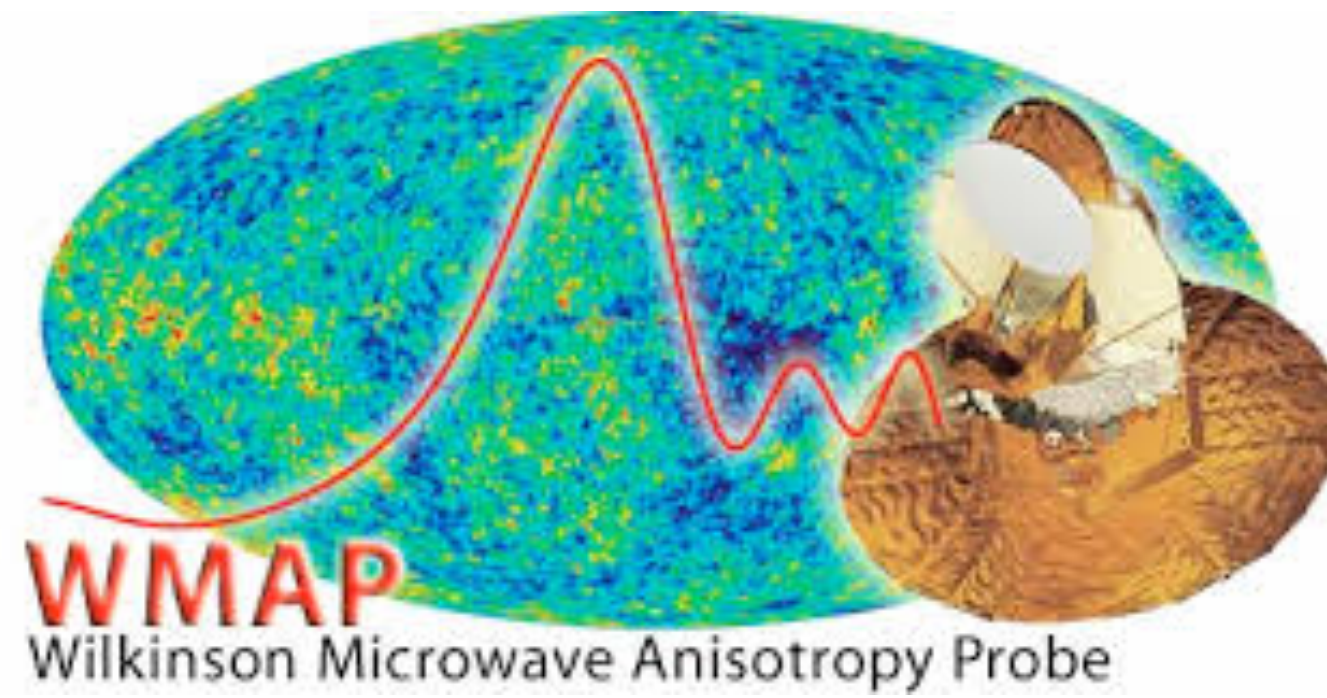
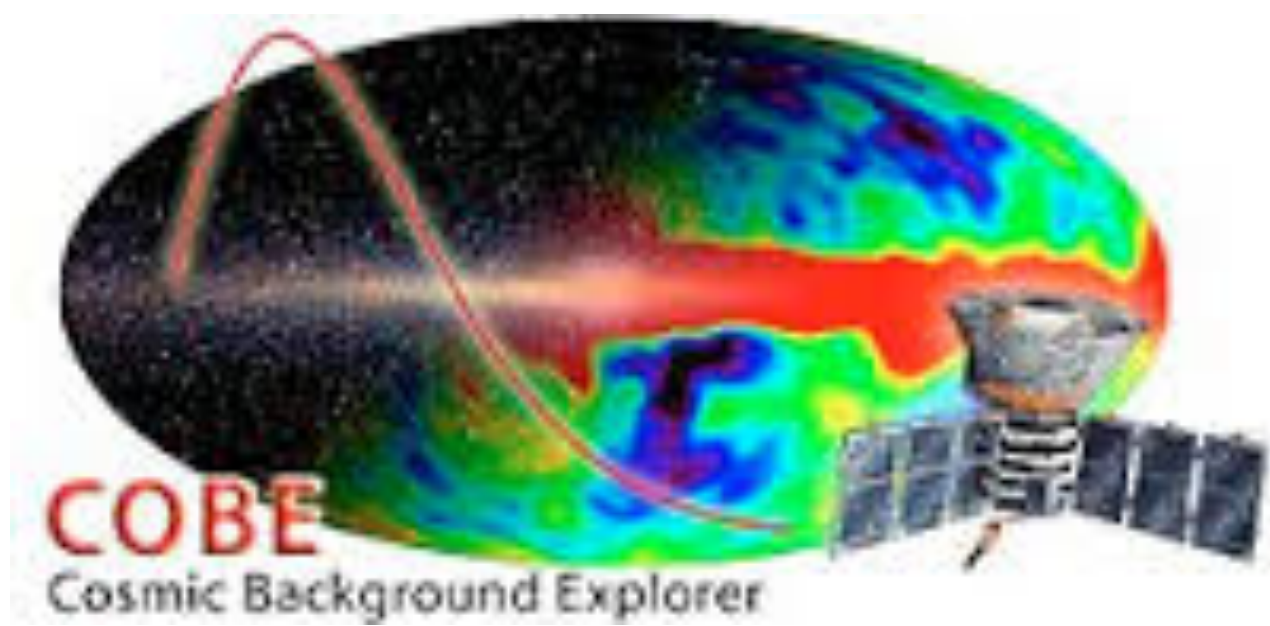


# 3 Kの輻射

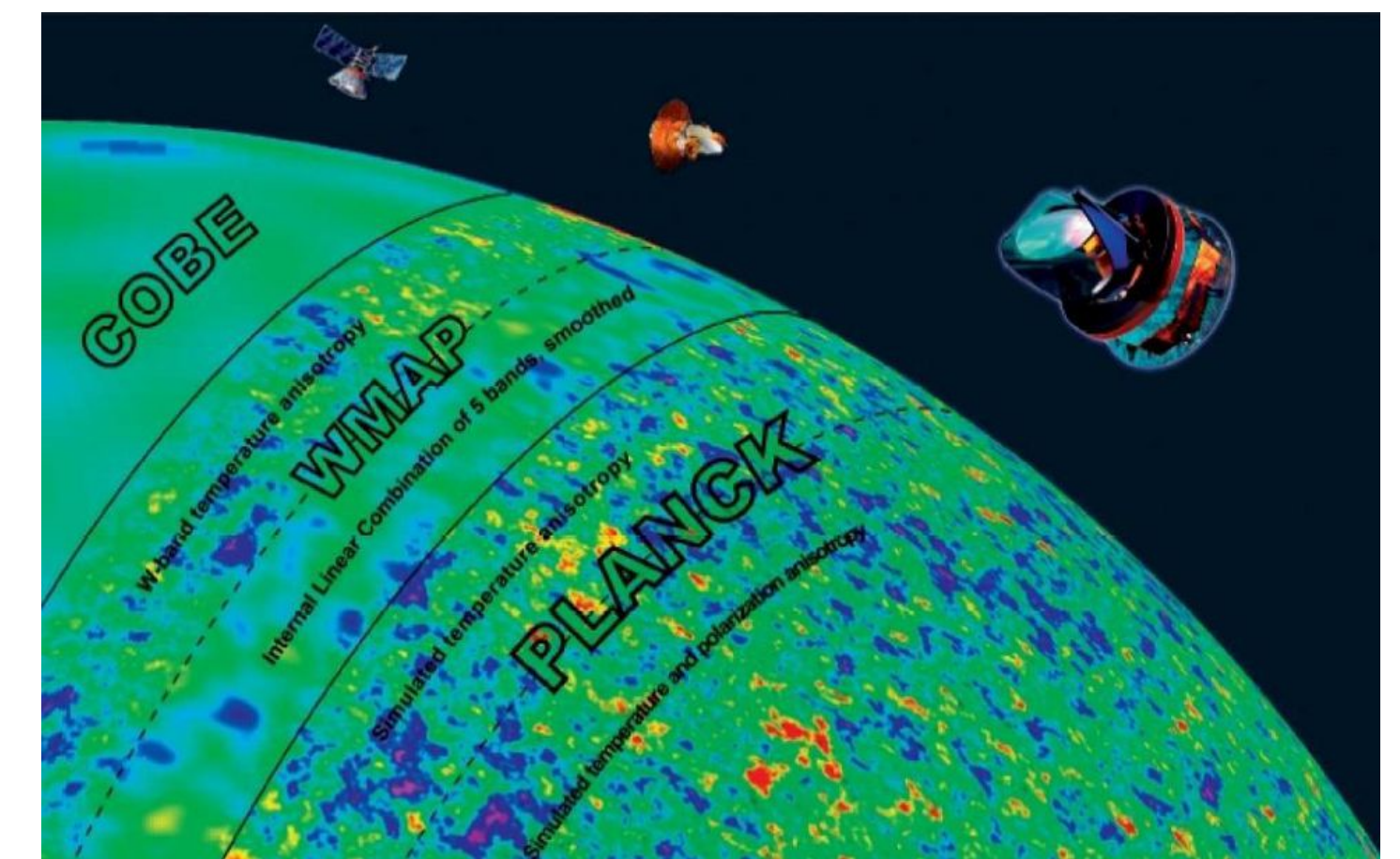


2.726Kの輻射を観測！ → ビッグバンの証拠

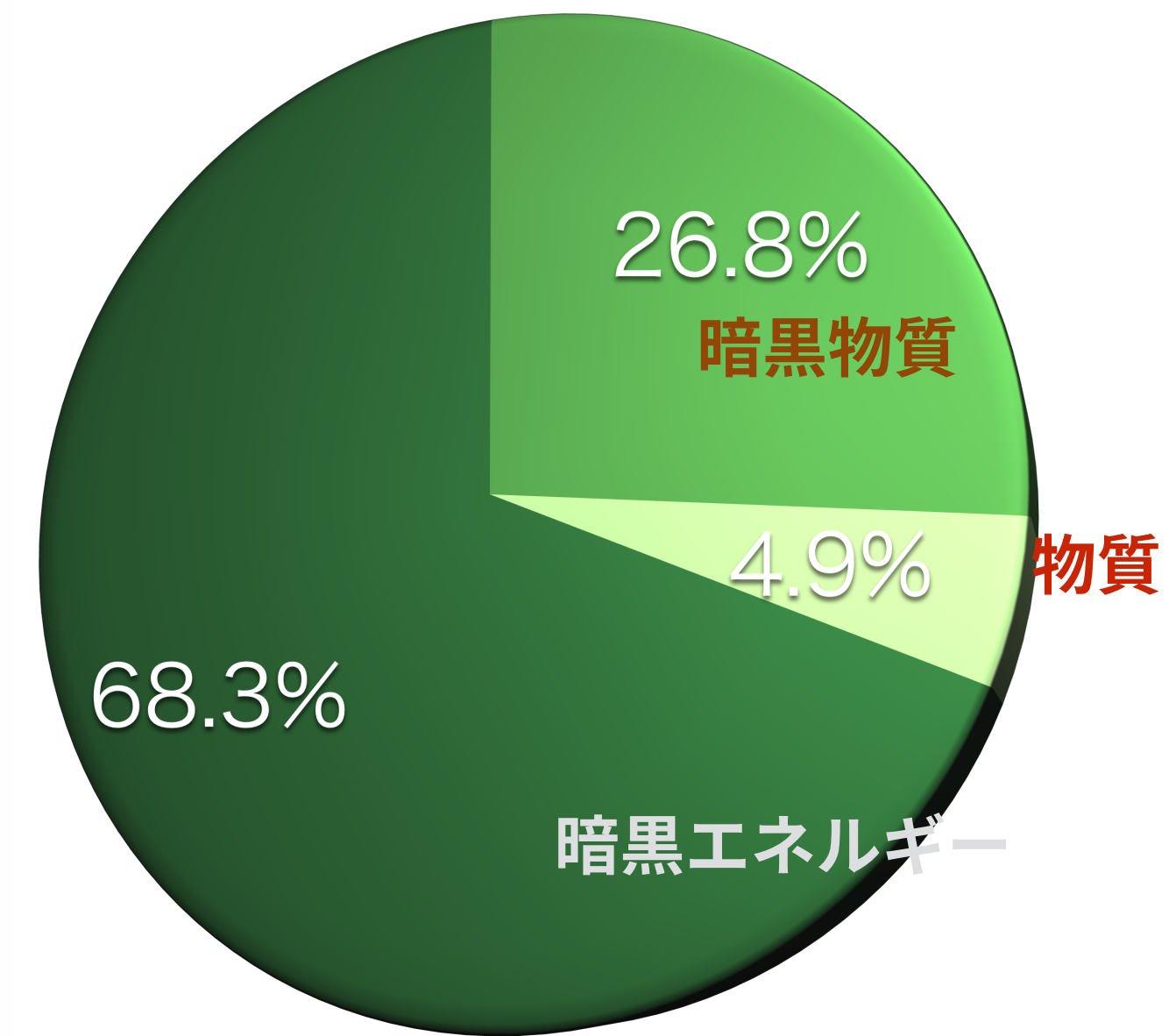
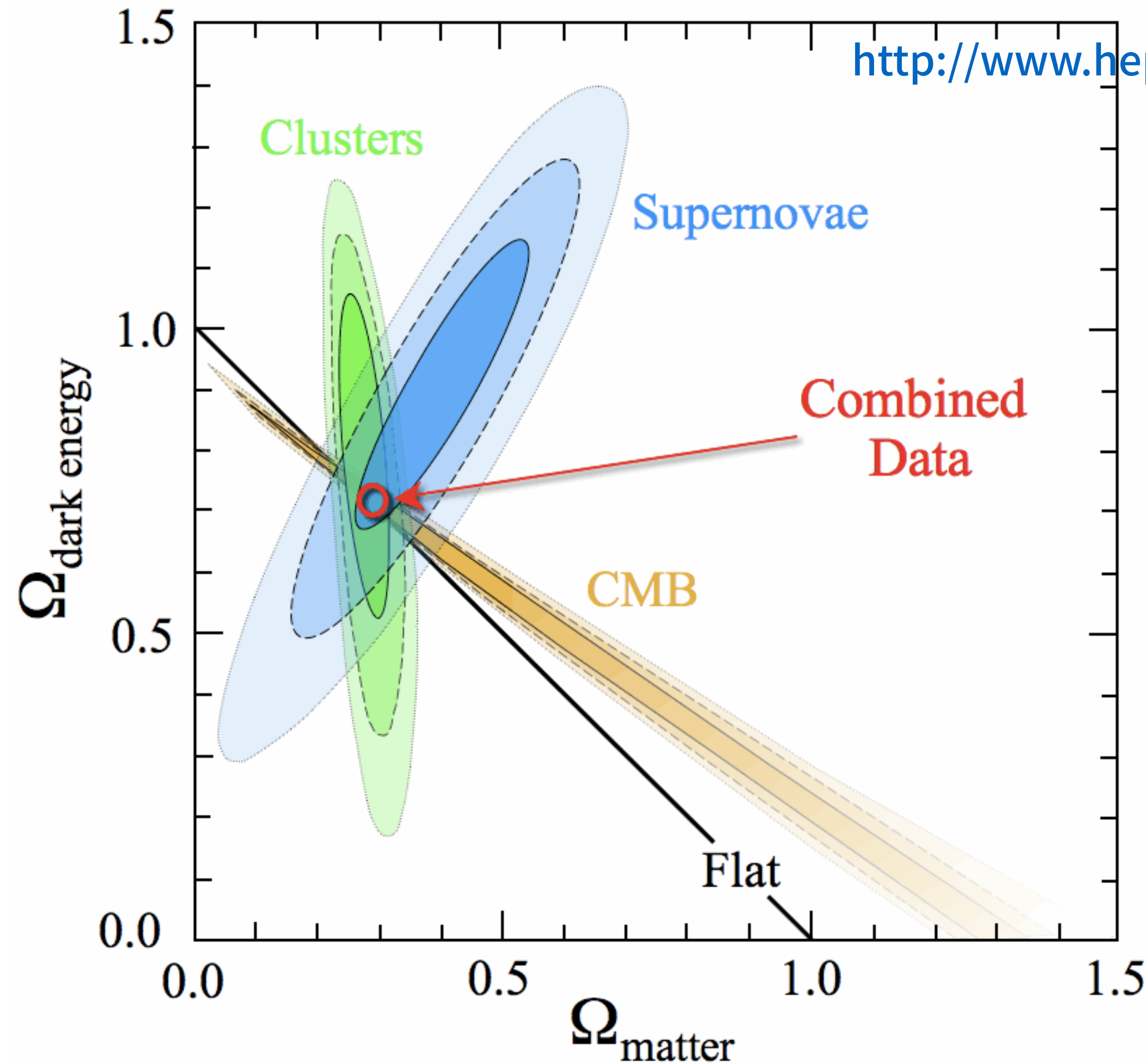
# COBIからWMAP, Planckへ



ここから色々な情報を引き出せる



# 暗黒物質と暗黒エネルギー



宇宙の大部分は  
よくわかっていない

我々が理解できている  
のはたった5%