

**Basics of Theoretical Astronomy and Astrophysics – 4**  
**Nov. 21, 2016**

# **The Early Universe**

## **Particle Cosmology & Astronomy**

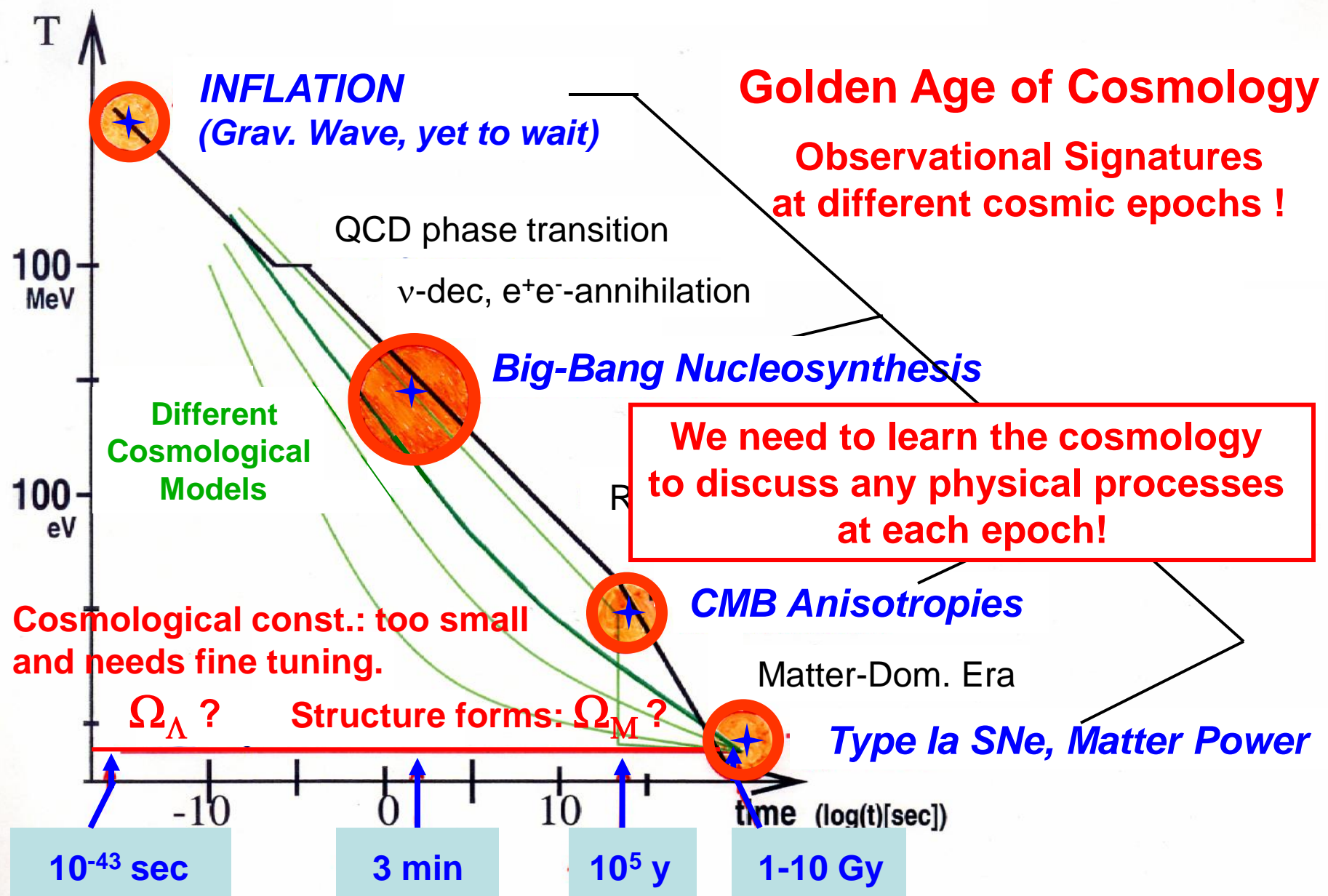
**Taka KAJINO**

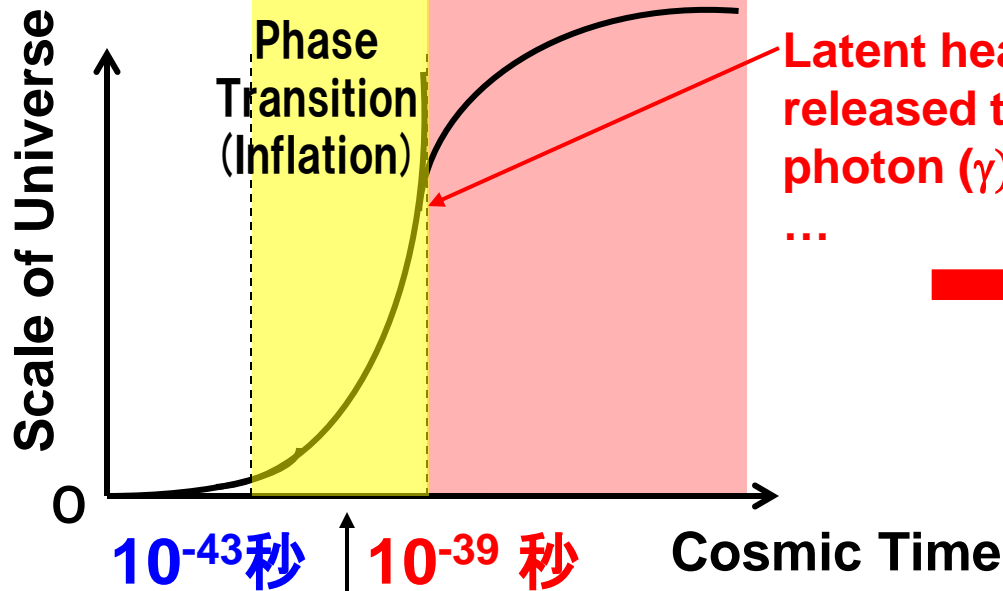
**National Astronomical Observatory of Japan, GUAS**  
**The University of Tokyo**

**Beihang University, Center for Big-Bang Cosmology & Element Genesis**

**[kajino@nao.ac.jp](mailto:kajino@nao.ac.jp), <http://th.nao.ac.jp/MEMBER/kajino/>**

# Thermal History of the Universe





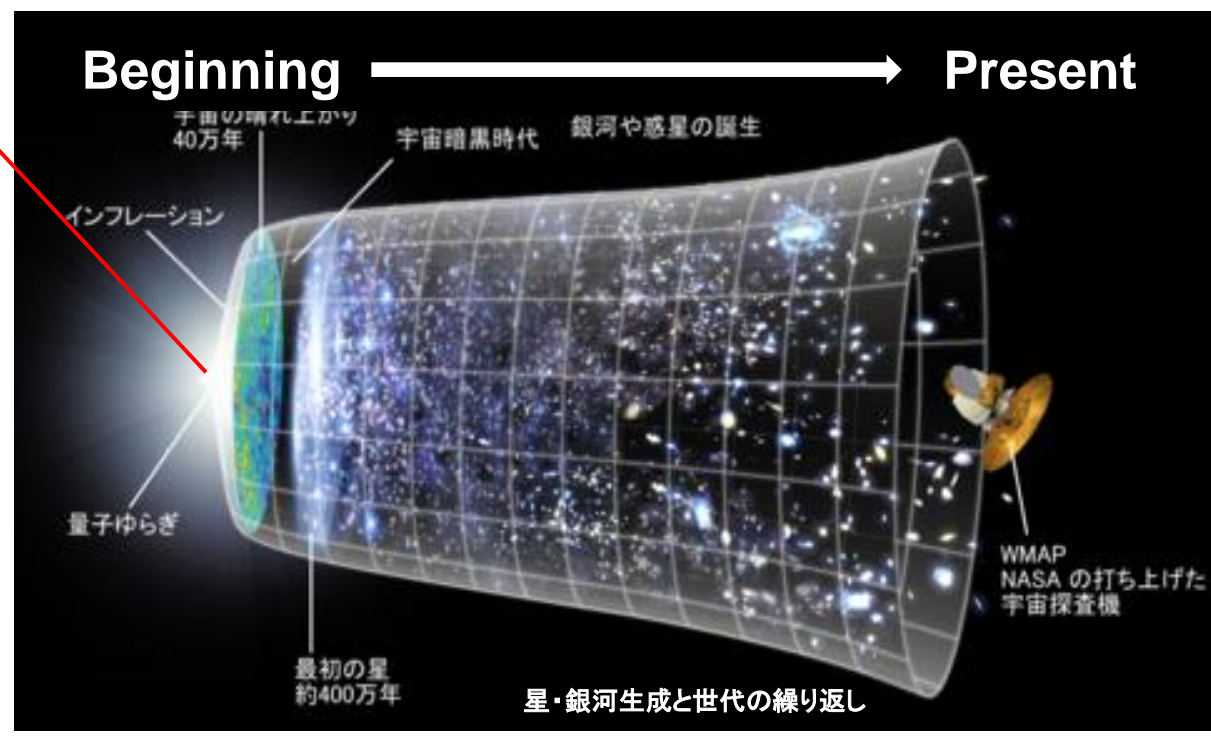
Latent heat of the phase transition was released to create elementary particles, i.e. photon ( $\gamma$ ), neutrino ( $\nu$ ), electron ( $e$ ), quarks ( $q$ ) ...

➔ Hot Big-Bang Fireball

Vacuum is not empty (P. M. Dirac) after  $10^{-39}$  秒!

Symmetry was broken dynamically.

Before  $10^{-43}$ , space-time was born out of the quantum fluctuations.



Beginning

Present

量子ゆらぎ

インフレーション

宇宙暗黒時代

銀河や惑星の誕生

最初の星  
約400万年

WMAP  
NASAの打ち上げた  
宇宙探査機

星・銀河生成と世代の繰り返し

# § 1. Spontaneous Symmetry Breaking

Higgs, A God Particle

Theory of the Higgs Mechanism

Peter W. Higgs

Broken Symmetries, Massless Particles and Gauge Fields,

*Physics Letters* 12, 132 (1964);

Broken Symmetries and the Masses of Gauge Bosons,

*Phys. Rev. Letters.* 13, 508 (1964).

# Ultimate Challenge of Modern Science !

:- is to construct Unified Theory of Fundamental Forces, and to resolve the mystery of the beginning and evolution of the Universe!

- Electromagnetism  
Maxwell (1864)

- Electroweak Unification  
Weinberg and Salam (1973)

- Grand Unification !  
Gauge Theory, unfinished !

- Unification of Gravity ???  
Superstring, SUSY, Supergravity

Need EXTRA DIMENSION ?



# Standard Theory of Elementary Particles and Fields

## Matter Particles

	1967	1974	1995
Quark			
	1967	1964	1977
Lepton			

3 generation

## Gauge Particles

$\gamma$   $Z^0$   $W^\pm$   $g$  +  $G$  ?

Unification ?

$U(1) \times SU(2) \times SU(3)$

## Higgs Particles

~~To be found ?~~

Found in 2012-2013!



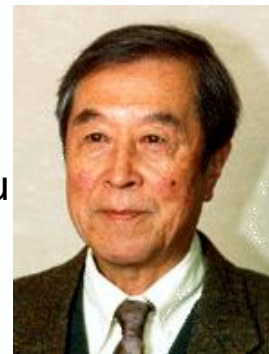
F. Englert (1964) P. Higgs

**Why massless? Why massive?**

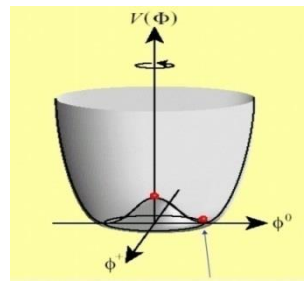
M. Kobayashi  
H. Masukawa  
(1973)



Y. Nambu  
(1961)



Spontaneous Symmetry Breaking



# Nobel Prize in Physics in 2013 for François Englert & Peter W. Higgs



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"

# How was the beginning of the Universe?

Quantum gravity or brane world cosmology (extra dimension) predicts “quantum fluctuations” of the space-time in bubbly baby Universe.

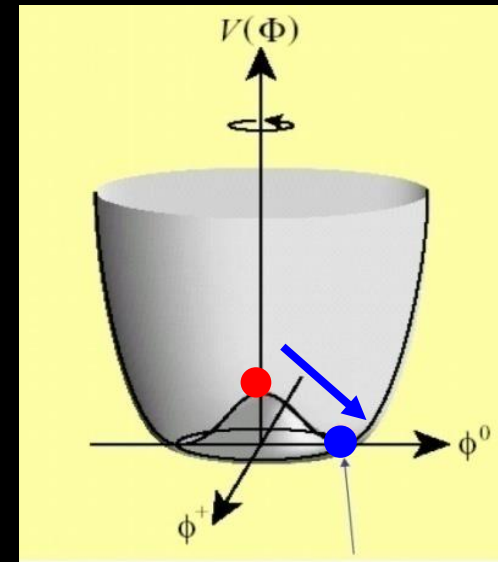
Creation and Annihilation  
of the Baby Universe

Quantum Uncertainty Principle

$$\Delta x \Delta p > \hbar/2$$

Universe could not be created without  $\hbar$  !

Symmetry was dynamically broken,  
and the Universe underwent  
cosmic phase transition.

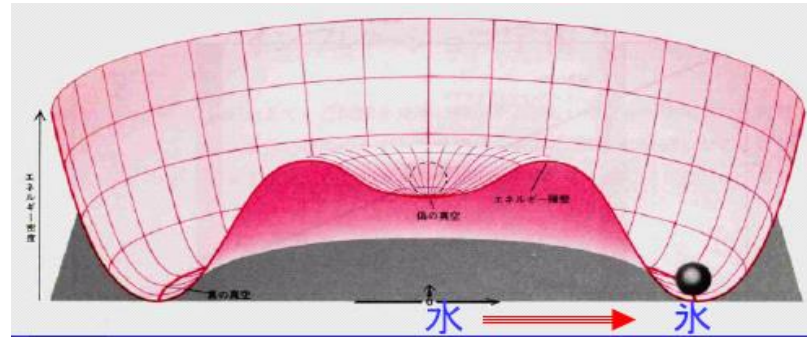
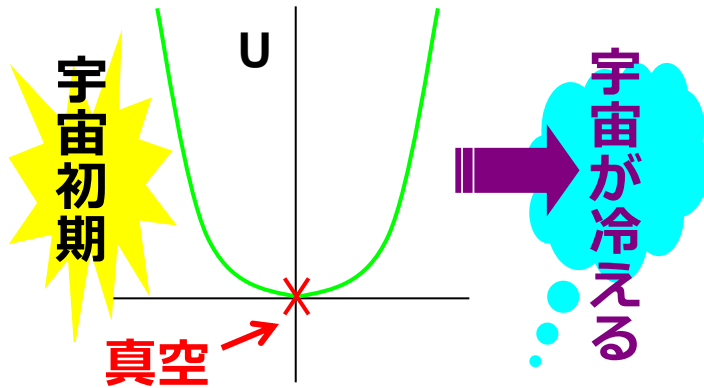


Higgs mechanism:  
Spontaneous Symmetry Breaking  
Y. Nambu (1961)



# ヒッグス粒子の基本的なアイデアは 南部先生(2008年ノーベル物理学賞)の 自発的対称性の破れ

## ヒッグスポテンシャル $U(\phi)$



南部先生

温度が高いとき、ヒッグス場は+にも-にも存在していて、効果を相殺し質量をあたえていなかった。

ビッグバンから宇宙が膨張して冷えて(千兆度)

自然は、水と同じで低きに流れます(エネルギーが一番低くなる安定な状態落ち着く)  
自発的に対称性を破った状態

「水が氷になる様に」状態が変わる(相転移) +に偏った状態に落ち着く。

-> 質量が生じる

素粒子や性質や振る舞いに多様性がうまれた。

宇宙の相転移が起きると  
ヒッグス粒子が真空を満たす。

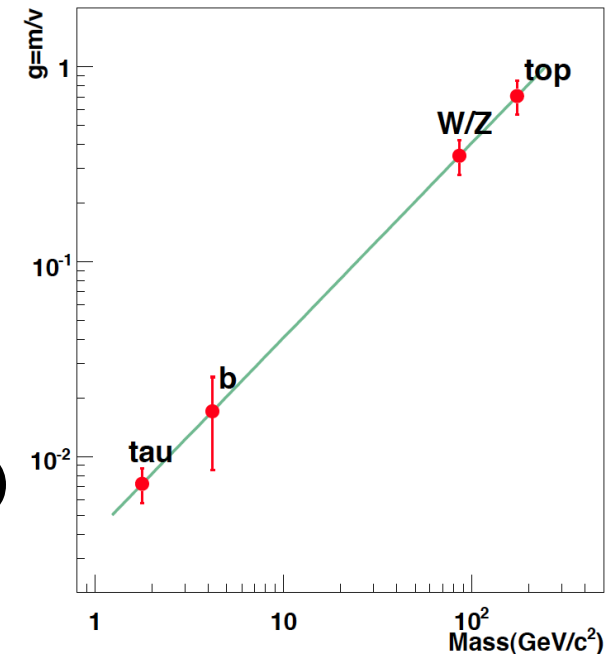
クォークなどの新たな  
素粒子が登場。

クォークはヒッグス粒子と相互作用  
して動きずらくなる。→ 質量の誕生。



部屋にごった返している群衆(青色)：ヒッグス粒子  
部屋に人(素粒子)が入ってきます。  
この人が人気ものだと、「わー」とサインを求める人が回りに  
あつまり歩けなく→遅くなる：質量が生じる

質量の違い：  
上の絵では「人気度」  
(人気者ほど歩けなくなる：重くなる)  
ヒッグス粒子との結合の強さが重さに比例

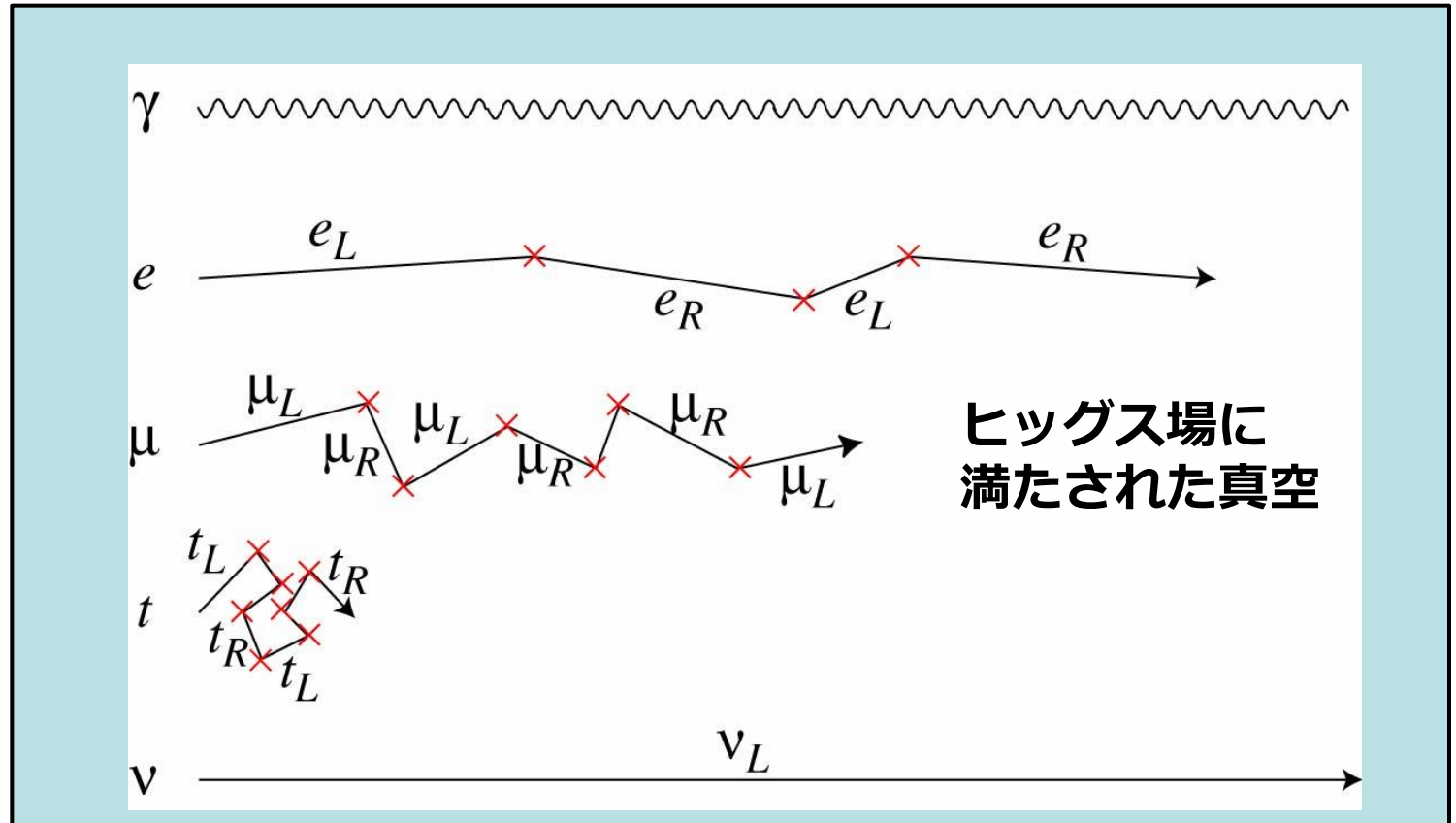
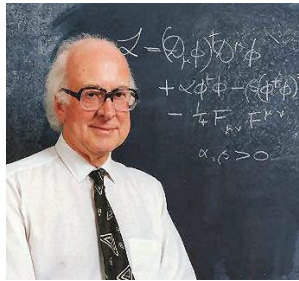


# 水中だと水の抵抗受けと遅くなる。



このアイデア 使えないか？

何もないはずの「真空」を  
水のような働きをするもので  
埋められないか？



設立 2 発行 4 創刊 7  
山崎 25 経済 8 9 小沢 19  
丸山 37 政治 11 文化 21  
渡辺 39 社会 15 教育 26  
中野 38 スポーツ 23 24 25  
4面 38 読者 14 15

# 読賣新聞

2012年(平成24年)  
7月5日 木曜日

発行所 読売新聞東京本社 〒104-8245 東京都中央区銀座6-17-1 電話(03)3242-1111(代) www.yomiuri.co.jp

# 「ヒッグス粒子」発見



Peter Higgs



ヒッグス粒子の働き  
宇宙の誕生から、物質が形成されていく過程で、ヒッグス粒子が重要な役割を果たしている。ヒッグス粒子は、他の粒子と相互作用し、質量を生み出す。この発見は、素粒子物理学の大きな進歩である。

## 欧州原子核機関 質量与える役割 現代物理の枠組み証明

欧州合同原子核機関(CERN)の大型ハドロン加速器(LHC)で発見されたヒッグス粒子は、現代物理学の枠組みを証明する重要な役割を果たしている。この発見は、素粒子物理学の大きな進歩である。

欧州合同原子核研究機関・大ハドン加速器(LHC)を用いた国際共同研究による成果

ALICE実験装置：小林富雄(東大教授)

### 素粒子17種類最後の一つ

ヒッグス粒子の発見は、素粒子物理学の大きな進歩である。この発見は、素粒子物理学の大きな進歩である。

### 大学の実力調査 27・30面

大学の実力調査の結果、27・30面。この調査は、大学の教育水準を評価するための重要な指標である。

# 読賣新聞

2013年(平成25年)  
4月4日 木曜日



# 「暗黒物質」の痕跡か

## 宇宙の謎 国際チームが観測

宇宙に大量に存在しなが、観測することができない暗黒物質(DARK MATTER)の痕跡を、国際共同観測チームが3日、スイス・ジュネーブ郊外の欧州合同原子核研究機関(CERN)で開いた研究報告会で、暗黒物質が崩壊した時に生じる陽電子の発生可能性があると発表された。星や銀河で構成される現在の宇宙の姿が、どのように形作られてきたかを解き明かす手がかりとなる成果だ。その質量による重力の働きで、銀河が渦を巻いたり、遠く

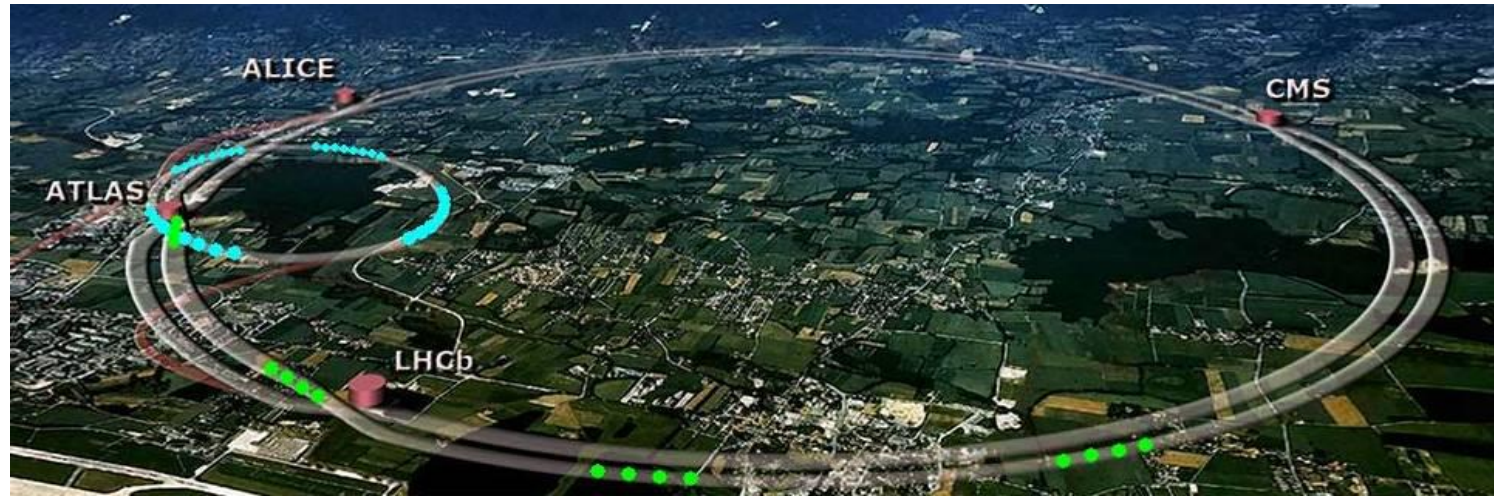


### 未知の粒子か 正体解明期待

暗黒物質は現在の宇宙の謎を解く鍵とされている。この物質は、星や銀河の形成に重要な役割を果たしている。国際共同観測チームは、この物質の正体を解明することを目標としている。

電子はパルサー(中性子星)など遠くから飛来している可能性も否定できない。研究チームではさらに観測を進めたいとしている。

# スイス・ジュネーブ郊外のセルン原子核研究所



## 大ハドロン衝突加速器 LHC

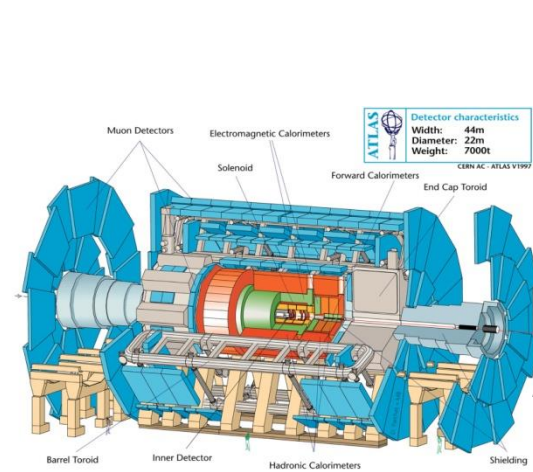
素粒子 (SUSY, Higgs) 探索 ⇒ **ヒッグス粒子の発見を目指す!**  
高次元時空の検証 **暗黒物質の発見も!**  
ミニ・ブラックホール生成

**宇宙での元素の起源と進化を解明することに繋がる!**

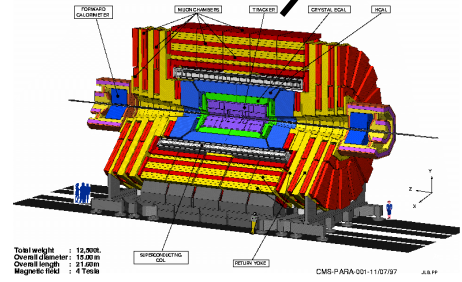
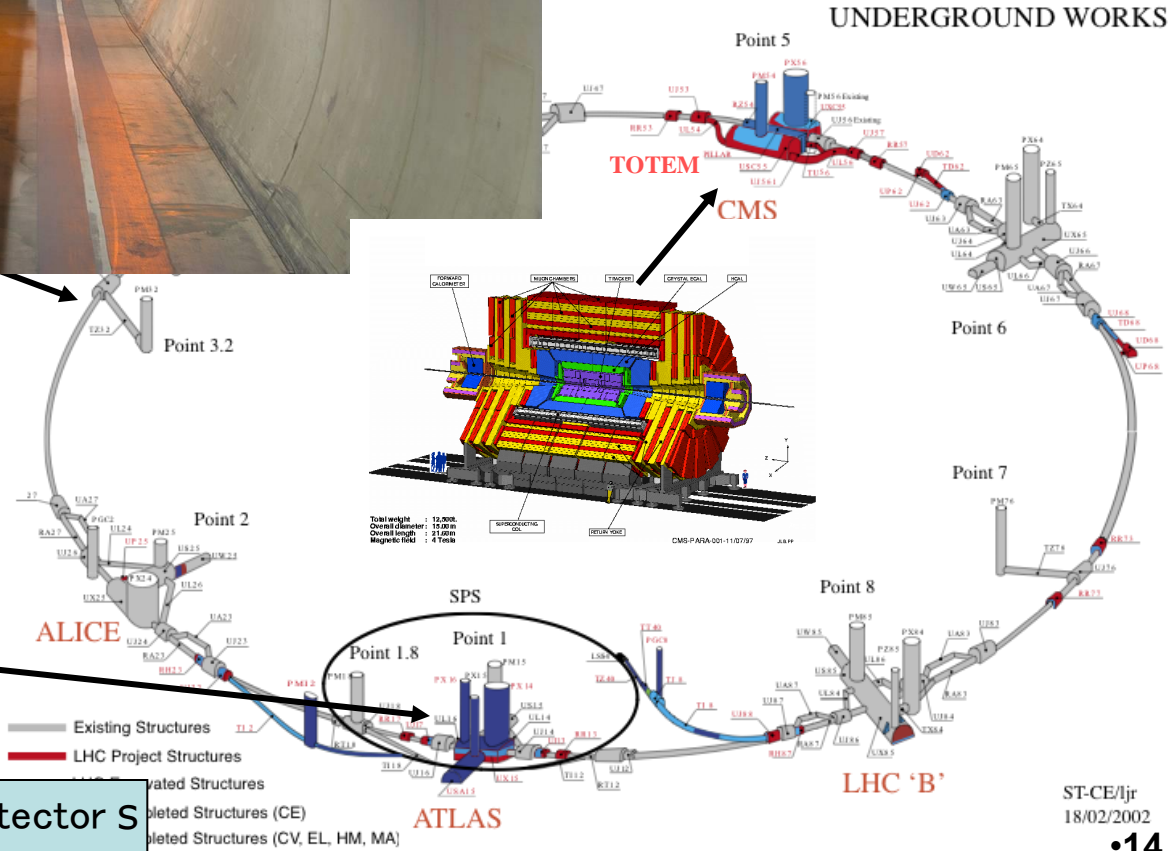
# Large Hadron Collider @ CERN



光の速度の99.999996%まで  
陽子を加速  
陽子のエネルギー 3.5TeV  
重心系エネルギー 7TeV

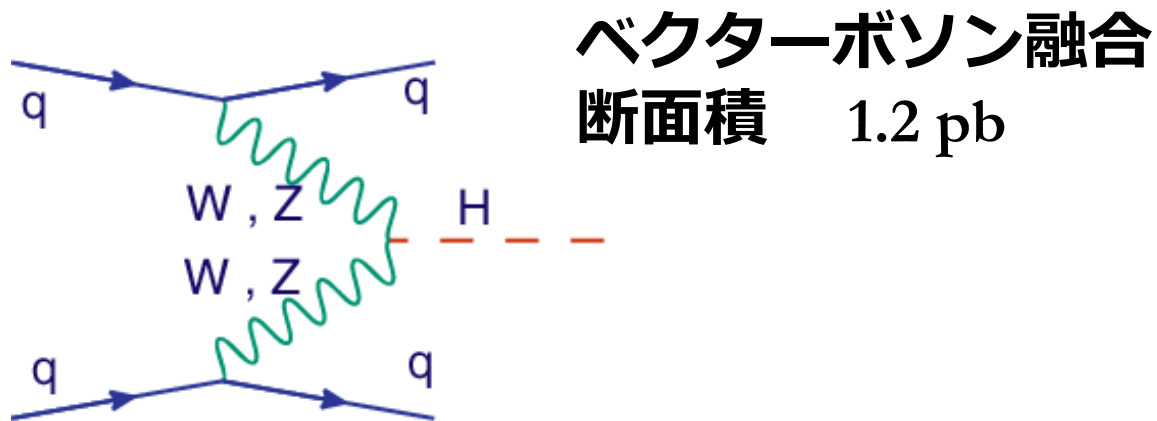
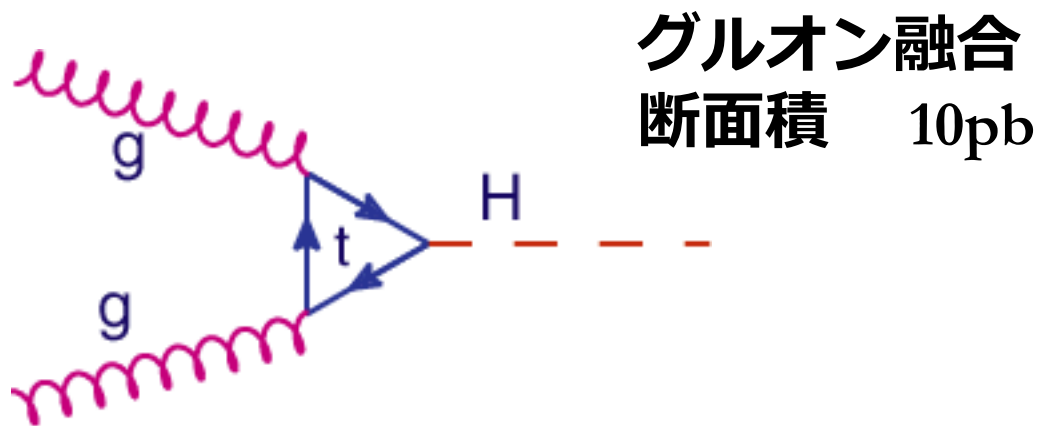
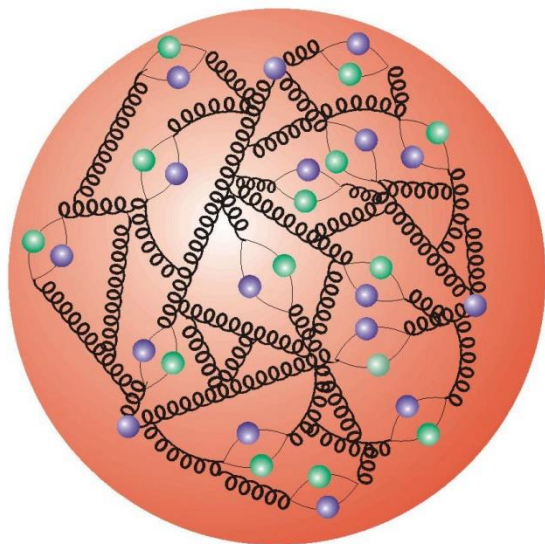


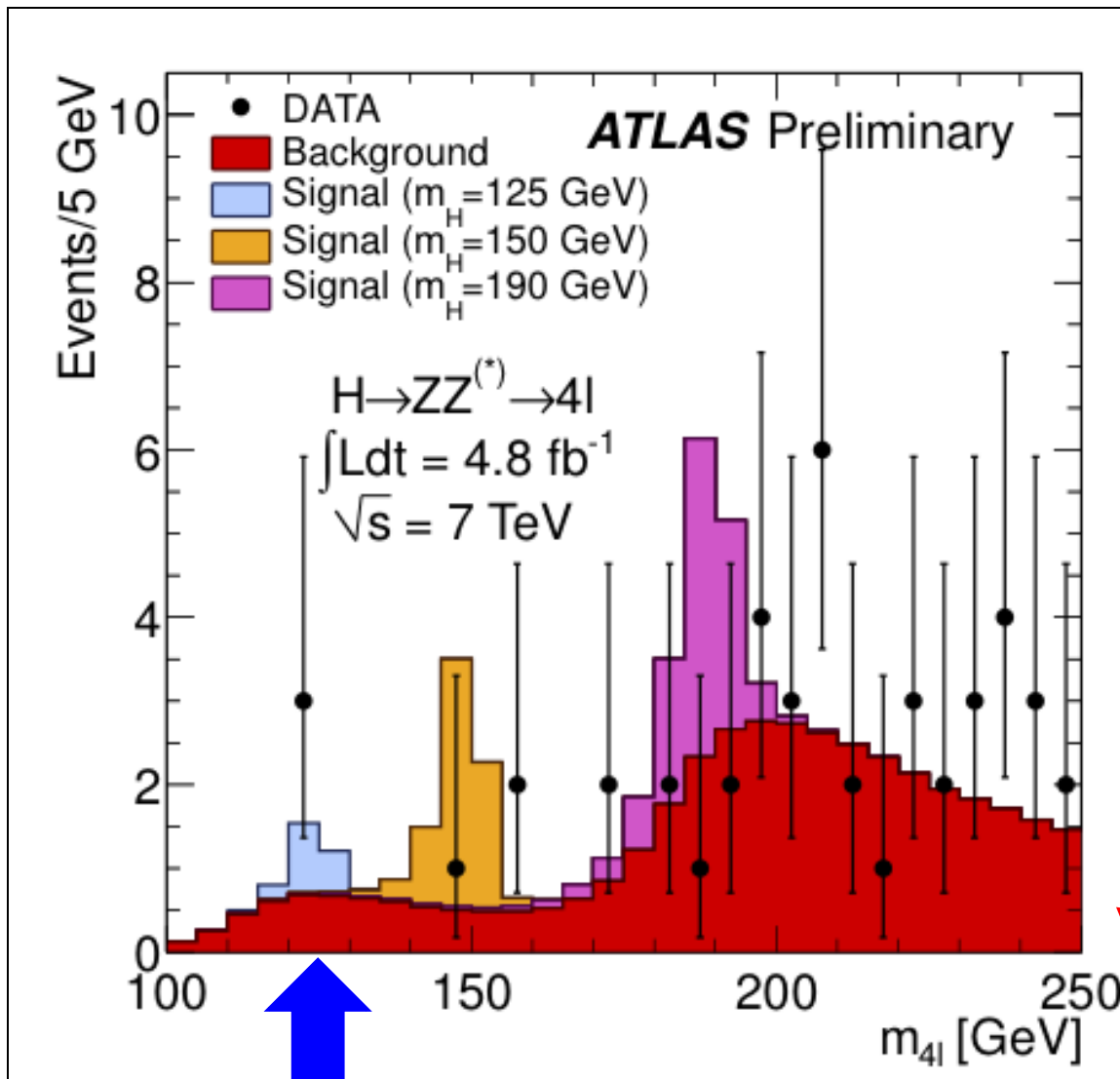
**ATLAS** Detector characteristics  
Width: 44m  
Diameter: 22m  
Weight: 7000t  
CERN AC ATLAS V1997



2つの General purpose Detector S  
ATLAS and CMS

陽子が反応するのではなく、陽子を構成する素粒子が反応  
クォークだけでなく、グルオン、反クォークで構成





色付きの分布は、ヒッグス  
 粒子の質量が、それぞれ  
 125 GeV(青)、  
 150 GeV(オレンジ)、  
 190 GeV(ピンク)  
 であると仮定したときの  
 理論的予測。

2013年10月までの  
 実験の分析で、125 GeV  
 を突き止めた！

バックグラウンド

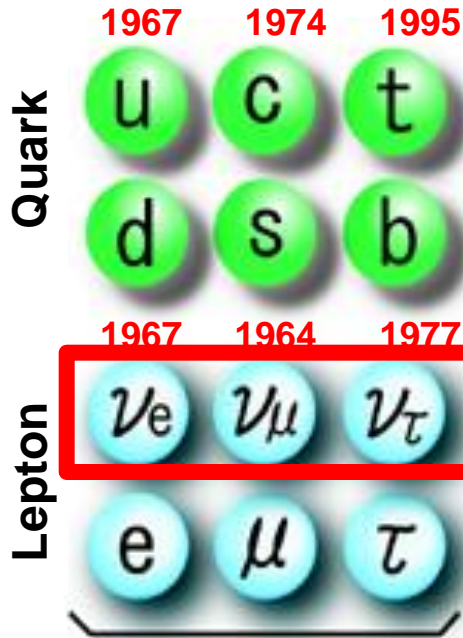
~125GeV

日本の研究者を含むアトラス実験で、4つのレプトン( $e, \mu$ )のエネルギー  
 や運動量から $m^2 = E^2 - p^2$ で実験的にもとめた質量 (2012年7月)



# Standard Theory of Elementary Particles and Fields

## We must go beyond the standard !



3 generation

### Nobel Prize on Dr. Kajita

物理学賞 ニュートリノ質量発見

宇宙の謎解明に期待

スーパーカーミオンコンプレックスで観測

ニュートリノの質量の観測は、素粒子物理学の大きな進展を示す。ニュートリノは、物質の大部分を構成する。ニュートリノの質量の観測は、素粒子物理学の大きな進展を示す。

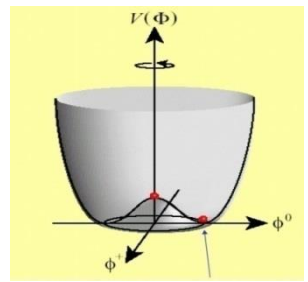
~~To be found?~~

Found in 2012-2013!

**$\nu$ 's, massive and oscillate!**

Higgs (1964) P. Higgs

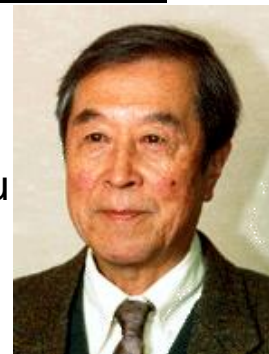
Spontaneous Symmetry Breaking



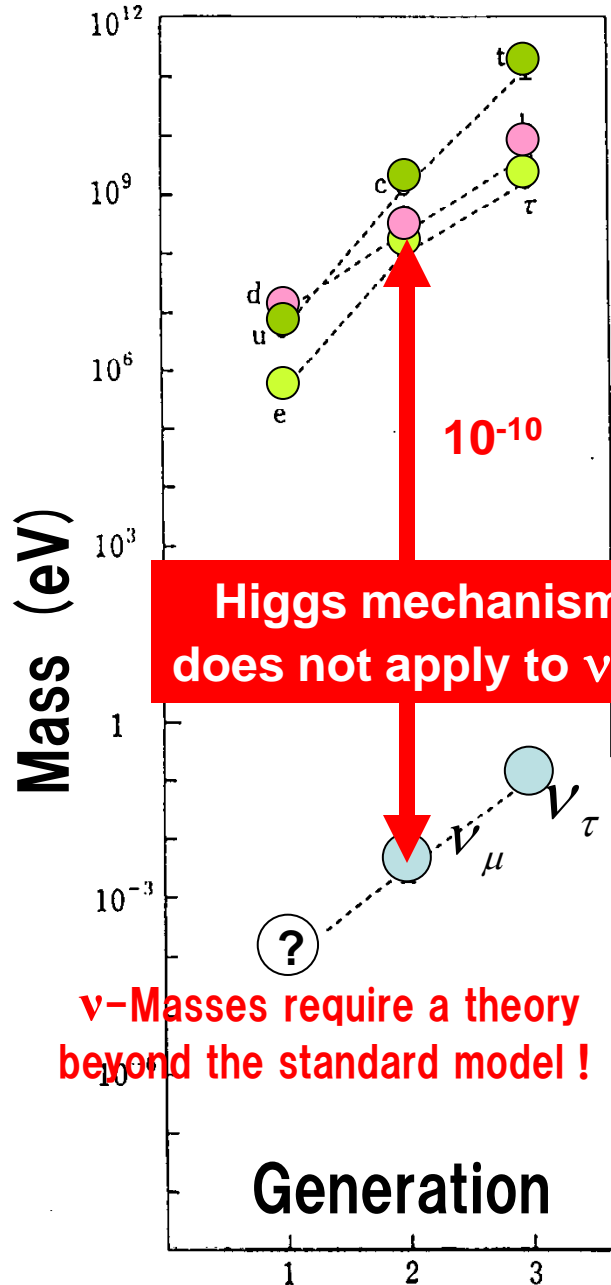
M. Kobayashi  
H. Masukawa  
(1973)



Y. Nambu  
(1961)



Higgs (standard model) produces  
1% of Quark Masses.

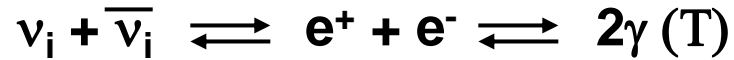


# Standard Model breaks down !

$$\frac{\text{Neutrino Masses}}{\text{Quark \& Lepton Masses}} = \frac{1}{10,000,000,000} \quad \text{Why } 10^{-10} ?$$

$$E = mc^2$$

This could be a signature of new physics at  $10^{10}$  times higher energy scale than the ordinary scale.



Key Physics suggested by FINITE  $\nu$ -mass:

- Unification of elementary forces?
- CP violation for Lepto- & Baryo-genesis?
- What are dark matter or dark energy ?
- Why left-handed neutrinos, Majorana or Dirac?
- Explosion Mechanism of Supernovae?

**Purpose of the next decade:**

We must elucidate the roles of Neutrinos  
in the studies of Cosmic/Galactic Evolution and  
Element Genesis.