

Higgs Boson の発見のもたされたもの

Takemasa Yavazida

2014年. 8月 23日(土)

第1回 新学術・研究会
(大研大等)

Higgs Boson Mass

$$M_H \simeq 125.5 \text{ GeV}$$

$$\text{Coupling } \lambda \simeq 0.1 \dots \ll 1$$

$$V = -\mu^2 \varphi^\dagger \varphi + \lambda (\varphi^\dagger \varphi)^2$$



Elementary Higgs !!!

~~Composite Higgs Boson~~

~~(in Technicolor, ...)~~

Weak Boson の発見 (1983年 1月 21日)

$$M_W \simeq 80 \sim 90 \text{ GeV}$$

Small gauge Coupling $g \simeq 0.7 \dots \ll 1$

$$M_W \simeq \frac{g}{2} \cdot v$$



Elementary Gauge Boson !!!

~~Composite Weak Bosons~~

22. 1. 1983.

昨日の CERN からの電話によれば
W[±] boson が発見されたようだ。 ついに発見されたか... という
感じだ。 やはり Gauge 理論か... Fermi 理論から約 50 年...
少しの check を覚える。

次は TC である。

Supersymmetry の予想:

$$m_H \simeq 120 \pm 5 \text{ GeV}$$

Okada, Yamaguchi, Yanagida (1992年)

① Pure Gravity Mediation

$$m_{3/2} \sim 100 \text{ TeV} \quad : \text{松本 zh の Talk}$$

② Focus Point Gaugino Mediation

$$m_{3/2} \sim 10 \text{ TeV} \quad : \text{横崎 zh の Talk}$$

"Higgsino DM"

⇒ 標準理論 からの考え始めです!

方法論

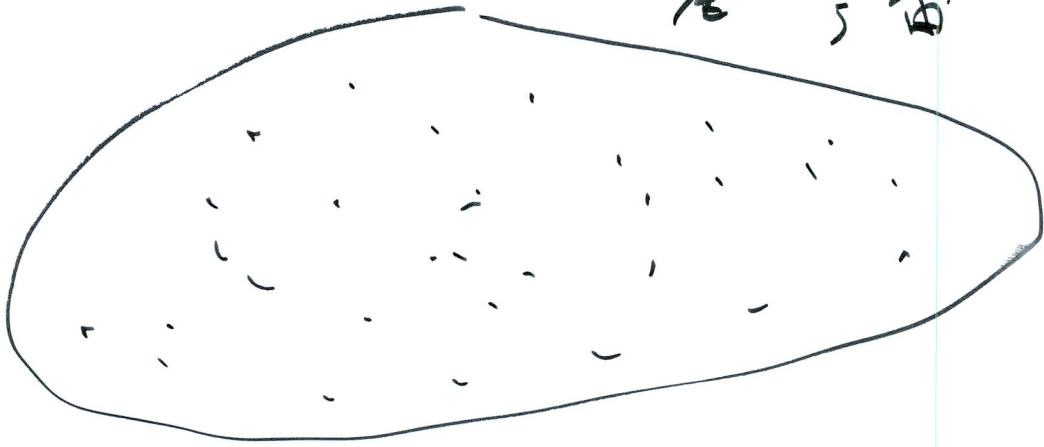
○ 人間原理 . 古く新しい考え!



何故 距離 L . や R_{\odot} が我々が
生存するのにちょうどいい値か?

解答!!!

宇宙



無数の星がある。

その中に、我々が生存できる星系があるだろう。我々の星にどこに住んで"いる"だけだ。

Now $\Lambda_{\text{cos}} \approx 10^{-20} M_{\text{pl}}^4$?

全宇宙の中には無数の宇宙があり
こゝの Λ_{cos} をもっている。

我々が生存できるのは $\Lambda_{\text{cos}} \approx 10^{-120} M_{\text{pl}}^4$
の宇宙である。我々の星にどこに住んで"いる"だけだ。

String 理論 $\Rightarrow N_{\text{宇宙}} \approx 10^{500}$!!!

① Occam's Razor この世に必要なら

必要最小限の要素で現象を説明する。

危険な道具であるか

特に

強力な考えであるか。

人間学

⊕

Occam's Razor

を使う

標準理論

何が問題か？

宇宙論:

1. Horizon Problem
2. Flatness Problem.
3. Origin of $\delta\rho$
4. Baryon-number Asymmetry
5. Dark Matter.

素粒子物理学.

6. Origin of Neutrino Masses.
7. Strong CP Problem
8. Why three families ?

◎ 宇宙項問題 $\Lambda \simeq (10^{-3} \text{eV})^4$
 $\simeq 10^{-120} (M_{\text{pl}})^4$

9. $m_H^2 \ll M_{\text{pl}}^2$
 $\sim 10^{-32} (M_{\text{pl}})^2$

宇宙項問題.
Higgs Mass 問題 Fine Tuning Problems.

人間原理 の解決 (何の解決?)

宇宙の Landscape の存在 (何の解決?)

1. 2. 3. は Cosmic Inflation の解決.

A. Guth (1981)

D. Kazanas (1980)

最も簡単な Inflation Model は Linde の Chaotic Inflation

$$V = \frac{1}{2} m^2 \phi^2 \quad m \sim 10^{13} \text{ GeV}$$

$$r \equiv \frac{\text{tensor}}{\text{scalar}} \approx 0.13$$

BICEP2 とは Planck とは consistent.

但し BICEP2 の ELL などは High scale Inflation $S_m \approx (10^{16} \text{ GeV})^4$:

Reheating Temperature $T_R \sim 10^{10} \text{ GeV}$

is Easy.

2) Mass : Dirac 型 か Majorana 型 か ?

Seesaw Mechanism \rightarrow Majorana 型

Dirac 型 だと何がまずいのか ?

$$\mathcal{L} = y \bar{\nu}_R l_L \langle H \rangle$$

$$m_\nu (\text{Dirac}) = y \cdot v$$

$$\approx 10 \text{eV} \quad \text{for } y \approx 10^{-10}$$

$y \ll 1$ は不自然だが, 何が悪いのか ?

Occam's Razor で切られる。

標準理論

必要最少限の要素から作られている。

宇宙項と Higgs Mass 問題は

人間原理で解決される。

Occam's Razor が働いているように思える。

Chaotic Inflation Linde (1983)

$$V = \frac{1}{2} m^2 \varphi^2$$

最少限の Model である。

→ BICEP2 が否定されたこと
と関係あるか？

現在, BICEP2 と Planck と consistent である。

Neutrino は唯一の DM の Candidate.

この ν を DM と考えるのが必要最少限の考え。

$$\rho_{DM} \longrightarrow m_\nu \approx 10 \text{ eV}$$

しかし $m_\nu \approx 10\text{eV}$ の Dirac ν DM は

~~Direct Detection Experiment~~ 否定されている。⇒ 直接的な制限 (?)
銀河ハズ ($\sum m_\nu < 0.8\text{eV}$)

必要最小限仮説 (Occam's Razor) は敗れたのか?

NO !!

$\ell\ell$ ν Majorana 型 ν の問題

$$\mathcal{L} = \frac{1}{M} \ell_L \ell_L \nu \nu$$

$$m_\nu (\text{Majorana}) \approx 10\text{eV} \leftarrow \text{DM Density}$$



$$M \approx 10^{12} \text{GeV} \quad \therefore \langle \nu \rangle \approx 100\text{GeV}$$

$\Delta L = 2$ Processes



$$\Gamma_{\Delta L=2} \approx \frac{T_R^3}{M^2}$$

$$\text{Expansion rate } H_{\text{exp.}} \approx \frac{T_R^2}{M_{\text{pl}}}$$

$$\text{For } T_R > \frac{M^2}{M_{\text{pl}}} \approx 10^6 \text{ GeV}$$

$$\Gamma_{\Delta L=2} \gtrsim H_{\text{exp.}}$$

レプトン数が完全に破れる。

$$\text{sphaleron effects } \Delta B \neq 0 \quad T > 100 \text{ GeV}$$

バリオン数、レプトン数の両方が $T_R > 10^6 \text{ GeV}$ では完全に破れている。

宇宙のバリオン数が消されてしまう。

宇宙のバリオン数の起源によらず、もし ν が Majorana Fermion で DM になっていれば、宇宙のバリオン数は全部消えてしまう。我々はそんな宇宙には住めない。

ν の DM 仮説は 人間原理より否定される。



観測と矛盾した!!

ν が Dirac 粒子だと $\nu = \text{DM}$ の仮説は人間原理で否定された!!!

Dirac の仮説は Occam's Razor で
排除された。

何が DM か？

標準理論の中に他に DM の Candidate
がいないのか？

Seesaw Mechanism

$$L_{\text{mass}} = y \bar{\nu}_R \ell_L \langle H \rangle + \frac{1}{2} M (\nu_R)^2$$

$$(\nu_L \ \nu_R) \begin{pmatrix} 0 & m \\ m & M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_L \\ \nu_R \end{pmatrix} \quad m = y \langle H \rangle$$

$$\begin{cases} m_\nu \simeq m^2/M & \rightarrow \text{small } \nu \text{ mass} \\ m_N \simeq M \end{cases} \quad \text{の説明ができる.}$$

- Yamagida (1979, Feb)
- Gell-Mann, Ramond, Slansky (1979, Sept)
- Glashow (1979, July)
- Minkowski (1977)

Minkowski は $M \simeq 100 \text{ GeV} - 1 \text{ TeV}$ を考えていた。そのため ν の small mass を説明していた。 M が小さくとも、 $m_\nu \ll \text{MeV}$ を考えていた。

1979年代の論文は、 ν mass の小ささを説明するために GUT scale M を考えた。 Seesaw mechanism の提案

Inflation model の歴史に記している。

- 1965年ごろに $\square \propto e^{2t}$ exponential expanding universe が考えられた。
- 1980年ごろに Guth & Kazanas (および) Horizon, Flatness 問題を解決するために exponential expanding universe が提案された。

Three families of quarks and leptons.



Three right-handed $\nu_R = N_i$ ($i=1 \sim 3$)

N の崩壊で lepton asymmetry を作る。

$$N \rightarrow l + H^+ : \bar{l} + H$$

$$P(N \rightarrow l) \neq P(N \rightarrow \bar{l}) \quad \Delta L \text{ is generated.}$$

Sphaleron 過程で

$$\Delta L \rightarrow \Delta B \text{ になる。}$$

宇宙のバリオン数を説明できる。

Fukugita, Yanagida
(1986)

Heavy Majorana N は、2つの事実を説明できる!!!

1. Small ν Mass.
2. Universe's Baryon Asymmetry
Leptogenesis !!!

しかし

Two N_i で充分宇宙のバリエーション
を生成できる。

Arampka, Glashow, Yanagida
Taniuchi et al

Why Three N_i ?

Occam's Razor は 破れたか ?

標準理論以外の問題

0. 宇宙項問題 ✓
1. Higgs Mass 問題 ✓
2. Horizon Problem ✓
3. Flatness Problem ✓
4. Origin of $\delta\rho/\rho$ ✓
5. 宇宙のバリオン数生成 ✓
6. Dark Matter ✓
7. Origin of ν mass ✓
8. Strong CP Problem
9. Why three families are needed? ✓

What is the DM ?

残されている中性粒子は N しかない。

第3番目の N_1 が唯一の Candidate.

$$m_{N_1} \simeq 10 \text{ keV 程度}$$

DM density を説明できる。

DM がなければ我々が住める宇宙ができてない。

人間原理より、第3 Family が要求された。

$N_1 \rightarrow \nu + \gamma$ 崩壊が起きる。

最近発見された ν の上限は 2.5 keV

X ray はとても興味深い。 Bulbul et al. (2014)
Boyarshky et al (2014).

この崩壊は N_i と ν_j の mixing より起きる。

$$\mathcal{L} = y_i \bar{\nu}_i \ell_i \langle H \rangle + \frac{1}{2} M_i (\nu_i)^2$$

$$(\nu_i, N_i) \begin{pmatrix} 0 & m_i \\ m_i & M_i \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu \\ N_i \end{pmatrix}$$

$$\theta_{N_i-\nu_i} \simeq \left(\frac{m_i}{M_i} \right) \quad M_i \simeq 7 \text{ keV}$$

$\theta \simeq 10^{-5}$ 程度は 5 3.5 keV Xray

を説明できる。しかしこれでは $\theta \lesssim 10^{-5}$ 程度

が必要。

$$\delta m_\nu = \theta^2 M_i \simeq 10^{-10} \cdot 10 \text{ keV} = 10^{-6} \text{ eV}$$

M_i の ν mass matrix への寄与は無視
できる!!!

Neutrino Mass Matrix は Two N_i の
Seesaw Model で記述できる。

Frampton, Glashow, Yanagida
(2002)

Hanigaya, Ibe, Yanagida
(2012)

Yukawa Matrix は 2×3 matrix

$$\begin{pmatrix} \bar{N}_2, \bar{N}_3 \end{pmatrix}_R \begin{pmatrix} * & * & * \\ * & * & * \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}_L \langle H \rangle$$

必要最小限の Yukawa Coupling を仮定する。

この仮定は 各々の mass matrices では成立しない。
[21]

$$\begin{pmatrix} \bar{d} & \bar{s} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & \delta \\ \delta & M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

$$\theta_c \approx \sqrt{\frac{m_d}{m_s}}$$

Weinberg (1977)

Two Zeros 仮定 in Y_{ij}



or double β decay!!!
KamLAND-Zen

$$\left\{ \begin{array}{l} M_{ee} \approx 50 \text{ meV} \\ \delta_{CP} \approx \frac{\pi}{2} \text{ or } \frac{3}{2}\pi \end{array} \right.$$

Good Prediction! CP Violation can be seen!!!

131

$$Y_{ij} = \begin{pmatrix} 0.12 \times e^{-0.049i} & , & 0.02 \times e^{-1.6i} & , & 0 \\ 0 & , & 0.28 \times e^{3.0i} & , & 0.29 \times e^{-0.11i} \end{pmatrix}$$

Inverted Mass hierarchy is also Prediction.

$$\sum_i m_{\nu_i} \approx 9.75^{+0.20}_{-0.19} \times 10^{-2} \text{ eV}$$

Testable in Cosmology!!!

私の提案としては

必要最少の標準理論

標準理論 ⊕ Three Right-Handed Neutrinos
⊕ One Inflaton

この理論は、10の問題のうち

9つの問題を解く。

残された問題は Strong CP問題
のみである。

まとめ

標準理論 以上のものが必要か？

人間原理と Occam's Razor
を使う。

我々が住める宇宙を作るためには DM が必要!!!

なぜ SM は観測値に近付く必要がある。

この DM こそが Beyond the SM の証拠。

本当か？

「 ν 」は Dirac 型と考えてみよう.

$m_\nu \simeq 10 \text{ eV}$ とすれば $\sum_{DM} \simeq$ 現在値

を説明できる。理論的 (人間的) 原理 + Occam's razor 的) には何れも内題はたしか。

しかし、²⁰ DM ~~の候補として~~ ~~は~~ ~~理論的~~ ~~に~~ ~~は~~ ~~排除~~ ~~され~~ ~~る~~。 $\sum m_\nu < 0.8 \text{ eV}$



ν は Dirac 型とあるはずがない!!!

{この論理はここで初めて発表}

では何故 ν が Majorana 粒子なるこの内題を解決できるのか?

{我がの新学術の最初の成果 (理論的)!!!

~~これは~~
~~理論的~~
~~成果~~

$m_\nu \approx 10 \text{ eV}$ とあると宇宙の1/10の量を
満たします。そのほか宇宙には我々の住みません。
(人間原理より非排除。)

↳ が Majorana ν DM にたどり着いた。

何か DM か？

Seesaw Mechanism $\rightarrow N_R$ の存在。

2つの N_R は leptogenesis に必要。

第3番目の N_R は DM と考へることができ。

$m_{N_3} \approx 10 \text{ keV}$ 程度です。

$\rho_{DM} \approx$ 現在値を説明できる。

$M_{1,2} \approx 10^{10} \text{ GeV} \gg m_{N_3} \approx 10 \text{ keV}$

Why not ?

OCCAM'S RAZOR 自ずから OK.

$\nu_2 \longrightarrow \nu + \gamma$ 崩壊が起る。

$M_{\nu_2} \approx 7 \text{ keV}$ だと 3.5 keV X-ray line

を説明できる。

3.5 keV X-ray line

が本当なら、とても Interesting

でも、寿命が長くていい。

3.5 keV X-ray line のデータは
系統的

$M_{\nu_1} \approx 2 \text{ PeV}$ $N, DM //$

$N_1 \rightarrow l + W ; \dots$

は Ice Cube ν を説明する。

Feldstein et al

Hayashi et al