

階層性問題と

126GeV ヒッグス (真空の安定性) が
示唆するプランクスケールの物理

磯 暁 (KEK, 総研大)

based on collaborations with

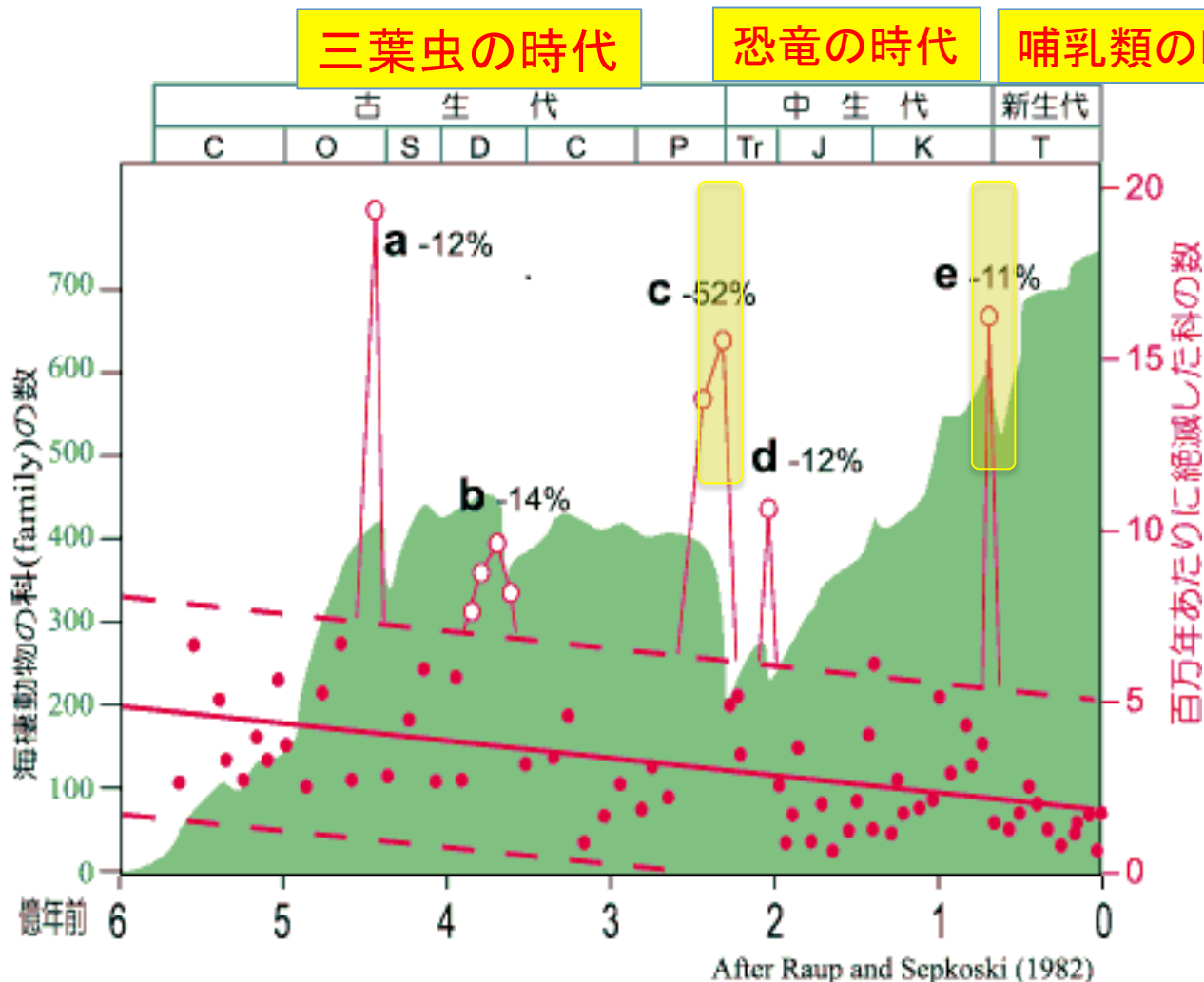
Y. Orikasa (Osaka) PTEP 2013, 023B08, arXiv:1304.0293

N. Okada (Alabama), Y. Orikasa (Osaka)

Phy. Lett. B276(2009)81, Phys. Rev. D80 (2009) 115007

Phys. Rev. D83 (2011) 093011

地球上で起こった「生命の大絶滅」



大絶滅の後は
適応放散が
起こり
種が増大する

Mass Extinctions in the Marine Fossil Record

David M. Raup; J. John Sepkoski

Science, Vol. 215, No. 4539. (1982), pp. 1501-1503

素粒子物理の発展

古生代(三葉虫の時代)



u,d,s e,μ,ν photon

標準模型の提唱

1970

漸近自由性 繰込みOK 小林益川

c 1974 中性カレント 73
τ 75

GUT SUSY

1980

1978 Tokyo conf (標準模型の確立)

b 78 gluon 79
83 W, Z bosons

STRING I

中生代 (恐竜の時代)

1990

プロトン崩壊
LEP精密測定
フレーバ物理

top 94 ゲージ相互作用

STRING II

2000

暗黒物質
暗黒エネルギー

ニュートリノ振動

CKM & CP LEP SLC
超精密測定

2010

2012 LHC
2013 Planck

Higgs

新生代?

高エネルギー加速器セミナー(磯 暁)



3 major hints towards the physics beyond SM

(1) Higgs mass at “126 GeV”

(2) No CP violation

自然は思っているより単純

Higgs decay

Flavor physics: LHCb, B-factory, MEG

e.g.

which

真実を惑わす異常性の消滅

(3) But we also know that SM is not sufficient to explain

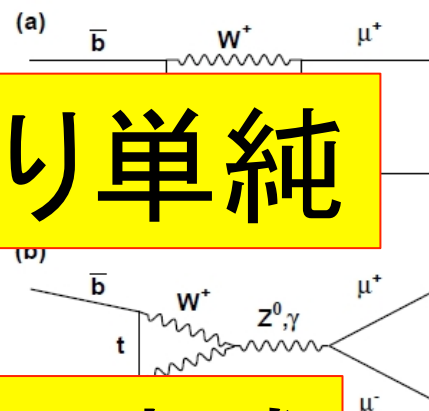
neutrino

Baryon

dark matter

謎の所在が確定

(also a big hint from Cosmology)



これから何を拠り所にしたらよいのか？

これまでは何を拠り所にしてきたのか？

Most investigations of physics beyond the SM
have been based on

“the central dogma” of particle physics
GUT → hierarchy problem → TeV SUSY etc.

i.e. Unification below the Planck scale requires
large symmetry enhancement at TeV scale.

見直すべき事項

- GUTとプランクスケールの関係
- 階層性問題
- 弦のコンパクト化の問題

今後への手がかり その1 階層性問題

Hierarchy problem

よく言われることは

「スカラー場は2次発散 → 階層性問題」
この言い方は正確か？

Naturalness (Hierarchy problem)

$$\begin{aligned}\delta V(\phi) &= \frac{1}{2} \int \frac{d^4 k}{(2\pi)^4} \text{Str} \log(k^2 + M^2(\phi)) \\ &= \frac{\Lambda^2}{32\pi^2} \text{STr} M^2(\phi) + \text{STr} \frac{M^4(\phi)}{64\pi^2} (\ln(M^2/\Lambda^2) - 1/2)\end{aligned}$$

$$\text{STr} M^2(\phi) \neq 0$$

Quadratic divergence in Higgs mass term

$$\text{STr} M^2(\phi) = 0$$

Cancellation of Quadratic divergence
(**supersymmetry** etc.)

Bardeen (1995 @ Ontake summer school)

(最初に) 2次発散に疑問を呈したのは
Bardeen (SMの古典的スケール不変性に注目)

ここで問題にしたいこと

2次発散や4次発散は、
どのような意味で実体を持つのか？

→ 階層性問題をより正確に定式化する必要性

Are power divergences physically meaningful?

1の発散は場の理論的に意味がないのではないか。

div

1と3は混同しやすいが、
厳然と区別する必要あり

1. Power divergences Λ^2, Λ^4
2. Logarithmic divergences $m^2 \log \Lambda, m^4 \log \Lambda$
3. Logarithmic but looks like quadratic $M^2 \log \Lambda, M^4 \log \Lambda$

m	<<	M
Scale in		“physical scale” in
Low energy physics		High energy physics

Power発散に物理的実体がないと考える理由

1. 単に subtract 可能
multiplicative に処理する対数発散とは全く意味が異なる

2. ウィルソン流の繰り込み H.Aoki, SI (2012)
意味があるのは臨界面からの距離(対数発散)であり、

臨界面そのものの位置

Λ^4 項は $w=1/3$

(一般座標不変でありえない)

3. 曲がった時空でのEMテンソル
power 発散は一般座標 $m^4 \log \Lambda$ 項が $w=-1$ になり共変な $g^{\mu\nu}$ に比例するEMテンソルを与える

例: エネルギー密度 $\sim dk \omega k^2$ $\omega^2=(k^2+m^2)$

圧力密度 $\sim dk k^4/3\omega$

これを展開して $m^4 \log \Lambda$ を求めると確かに、 $w=-1$

(1) Quadratic divergence can be simply subtracted, so it gives a **boundary condition** at UV cut off Λ .

→ If massless at Λ , it continues to be so in the IR theory.

(2) Logarithmic divergence gives a multiplicative renormalization. **No Higgs mass term is generated** if it is absent at UV scale.

$$\frac{dm^2}{dt} = \frac{m^2}{16\pi^2} \left(12\lambda + 6Y_t^2 - \frac{9}{2}g^2 - \frac{3}{2}g_1^2 \right) + \frac{M^2}{8\pi^2} \lambda_{mix}$$

(3) If SM is coupled with a massive particle with mass M , **logarithmic divergences give a correction to m** as

$$\delta m^2 = \frac{\lambda_{mix} M^2}{16\pi^2} \log(\Lambda^2 / M^2)$$

In order to solve the “hierarchy problem” without a special cancellation like supersymmetry, we need to control

(a) “quadratic divergence” → correct **boundary condition** at Planck
The most natural b.c. is **NO MASS TERMS at Planck**
(= classical conformal invariance)

(b) “large logarithmic divergence” by mixing with a large mass M
No intermediate scales between EW (or TeV) and Planck

“Classical conformal theory with no intermediate scale”
can be an alternative solution to hierarchy problem.

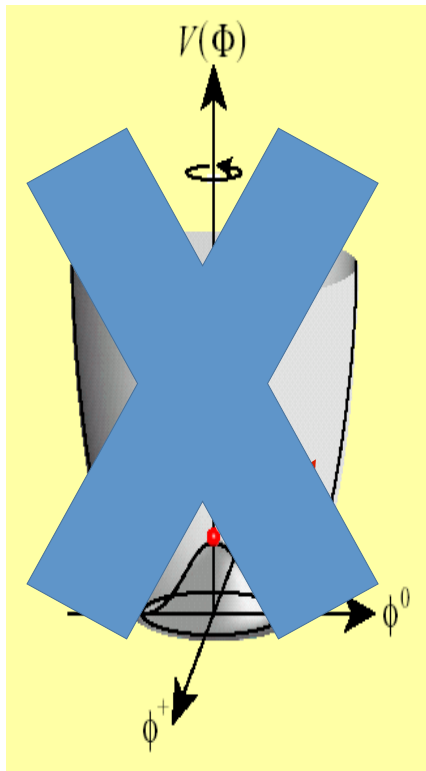
Bardeen (95)
Shaposhnikov (07)
Meissner Nicolai (07)
SI, Okada, Orikasa (09)¹³

今後への手がかかり その2 真空の安定性

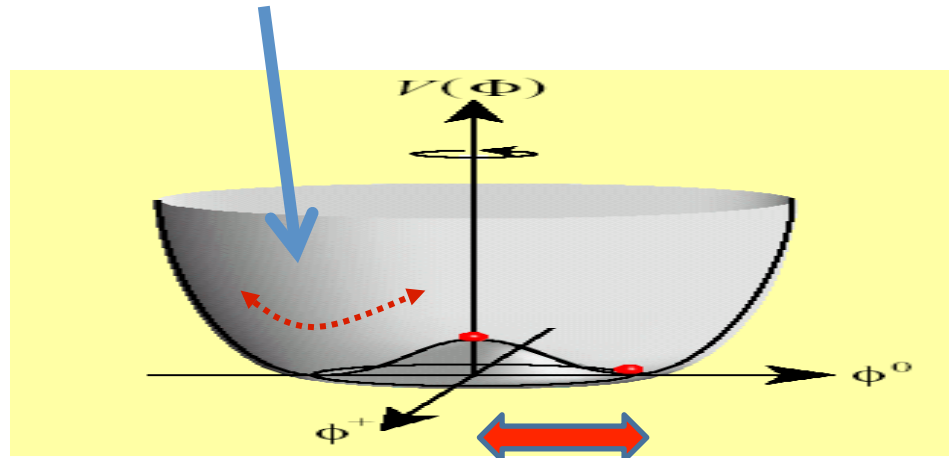
Stability of Vacuum

126 GeV から得られる大きな手がかかり

Another Hint of 126 GeV Higgs mass is
Stability bound of the Higgs quartic coupling



$$m_H = 126 \text{ GeV}$$



$$v = 246 \text{ GeV}$$

RGE improved effective potential for large field ($h \gg v$) $V_{\text{eff}}(h) = \frac{\lambda_{\text{eff}}(h)}{4} h^4$

$$\text{RGE @1-loop} \quad \frac{d\lambda_H}{dt} = \frac{1}{16\pi} \left(24\lambda^2 \left[-6Y_t^4 + \frac{9}{8}g^4 + \frac{3}{8}g_1^4 + \dots \right] \right)$$

↓
Already known

It is related to Higgs mass as $M_h^2 = 2\lambda v^2$

Higgs mass controls the behavior of Higgs potential at large values of h .

This gives two bounds for Higgs mass

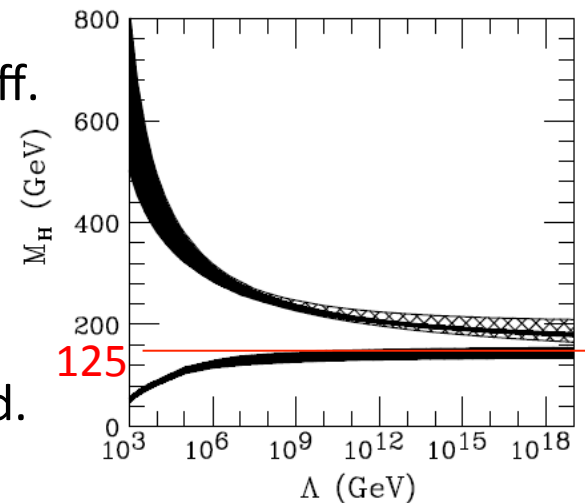
(1) The quartic coupling does not blow up until UV cut-off.

$M < 180 \text{ GeV}$ (**triviality bound**)

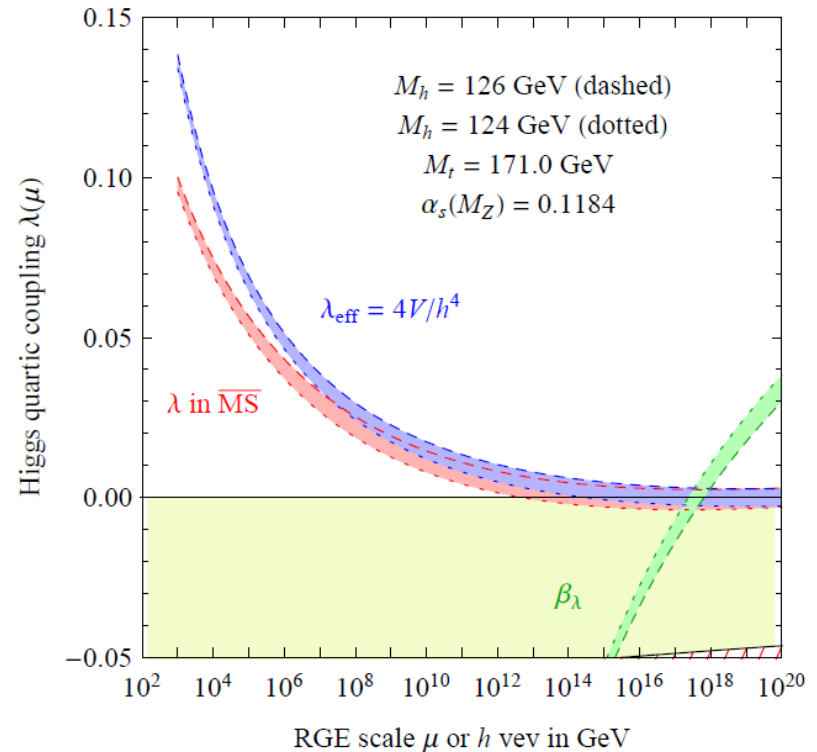
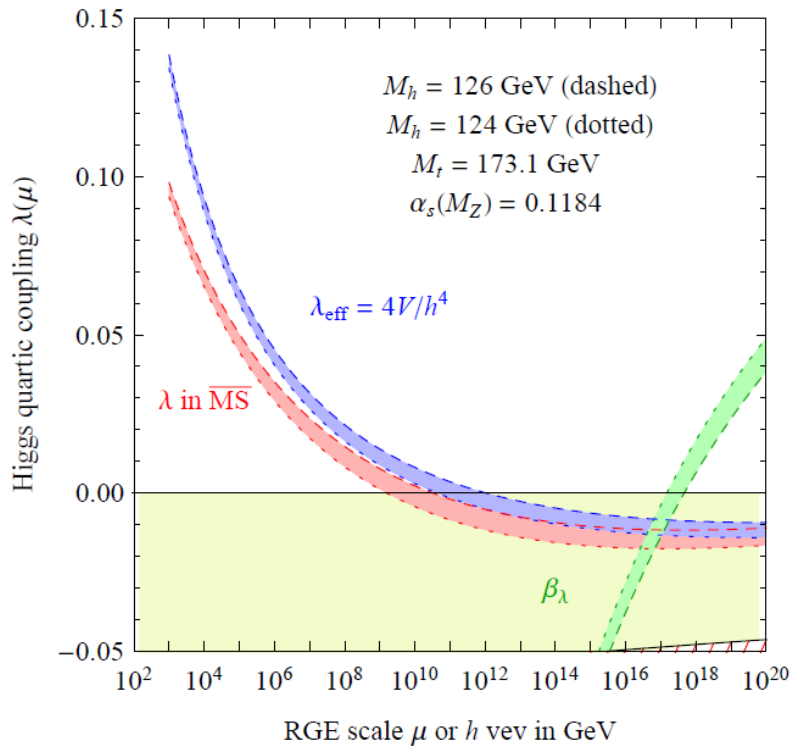
(2) The quartic coupling does not become negative

until UV cut-off. (**Stability bound**)

$M = 125 \text{ GeV}$ Higgs is very close to the stability bound.



Why stability bound is important for Planck scale physics?



New physics at 10^{12} GeV
 is necessary to stabilize the vacuum

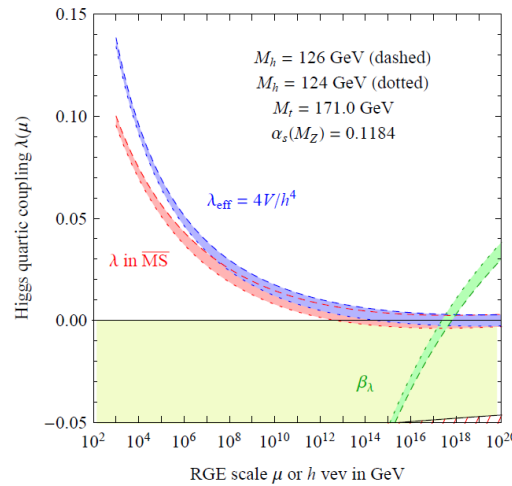
Flat Higgs potential
 at Planck scale

$$M_H \geq 129.2 + 1.8 \times \left(\frac{m_t^{\text{pole}} - 173.2 \text{ GeV}}{0.9 \text{ GeV}} \right) - 0.5 \times \left(\frac{\alpha_s(M_Z) - 0.1184}{0.0007} \right) \pm 1.0 \text{ GeV.}$$

very sensitive to top quark mass

Elias-Miro et.al.(12)
 Alkhin, Djouadi, Moch (12)

If this



is the case ?

$$\lambda(\Lambda_0) = \beta_\lambda(\Lambda_0) = 0$$

Direct window to Planck scale

Froggatt Nielsen (96)
M.Shaposhnikov (07)

Emergence of Higgs potential

at the Planck scale

Indication on the Higgs potential

$$V = -\mu^2 |H|^2 + \lambda (|H|^2)^2$$

Hierarchy
(classical conformality)

Stability
vanish at Planck

LHC data implies that

Higgs has a **flat potential** $V(H)=0$ at Planck.

LHCの結果が示唆すること
プランクスケールでヒッグスポテンシャルは平坦

How can we achieve **EW symmetry breaking**
from $V(H)=0$ potential at Planck?

Everything should be
radiatively generated.

電弱理論のダイナミクスは全てが輻射補正

Two mechanisms of symmetry breaking

(1) SSB by negative mass term

$$V = \frac{\lambda}{4}h^4 + \frac{\mu^2}{2}h^2 \quad (\mu^2 < 0) \longrightarrow m_h^2 = 2|\mu^2| = \boxed{2\lambda\langle h \rangle^2}$$

(2) Coleman-Weinberg mechanism (radiative breaking)

$$V_{eff} = \underbrace{\frac{\lambda h^4}{4}}_{\text{tree}} + \underbrace{Bh^4 \left(\ln \left(\frac{h^2}{\langle h \rangle^2} \right) - \frac{25}{6} \right)}_{\text{1-loop}} \quad B = \frac{3}{64\pi^2} \left(3\lambda^2 + \frac{3g^4 + 2g^2g'^2 + g'^4}{16} - Y_t^4 \right)$$

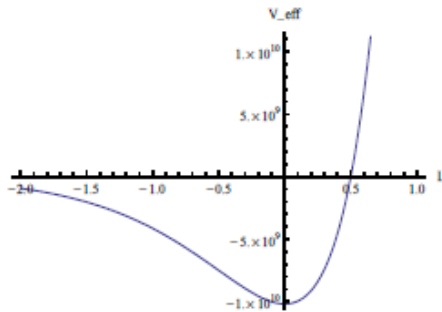


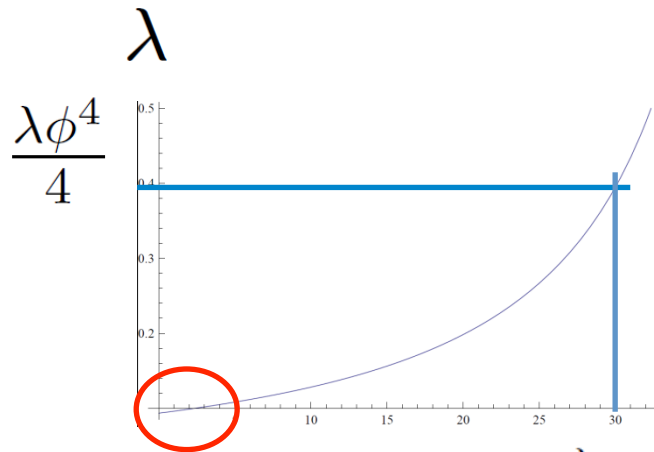
図 2.1 improve されていない有数ポテンシャル

Higgs mass is given by

$$V''|_{\langle h \rangle} = m_h^2 = \underline{8B\langle h \rangle^2} = \boxed{\frac{6}{11}\lambda\langle h \rangle^2}$$

(2') RG improved CW mechanisms

Coleman-Weinberg radiative breaking



Symmetry is broken near the scale where the running coupling crosses zero.

$$M_{CW} = M_{UV} \exp\left(-\frac{\lambda_{UV}}{b} - \frac{1}{4}\right) \quad \text{Positive beta function}$$

Dimensional transmutation

cf. Dimensional transmutation in QCD

$$\Lambda_{QCD} = M_{UV} \exp\left(-\frac{2\pi}{b_0\alpha_s(M_{UV})}\right)$$

But CW does not work in SM.

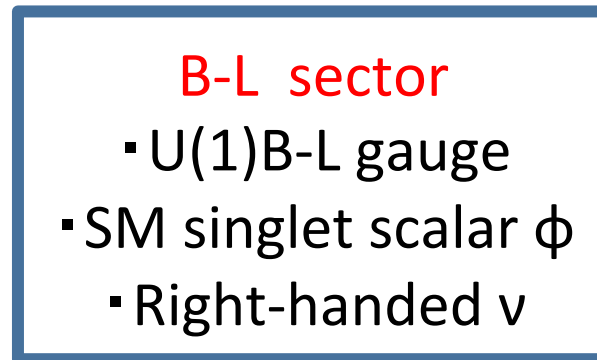
the large top Yukawa coupling invalidates the CW mechanism



Extension of SM is necessary !

Meissner Nicolai (07)

(B-L) extension of SM with flat Higgs potential at Planck



N Okada, Y Orikasa,
& SI

0902.4050 (PLB)

0909.0128 (PRD)

1011.4769 (PRD)

1210.2848(PTEP)

“Occam’s razor” scenario

that can explain

- 126 GeV Higgs
- hierarchy problem
- ν oscillation, baryon asymmetry

How about EWSB ?

Interesting proposal by
E.J.Chun,S.Jung, H.M.Lee

$$\cancel{m_H^2 H^2} + \cancel{\lambda_H H^4} + \cancel{\lambda_{H\Phi} H^2 \Phi^2} + \cancel{\Phi^4}$$

classically conformal 126 GeV \downarrow key to relate EW and TeV

Can the small scalar mixing be realized naturally?



YES

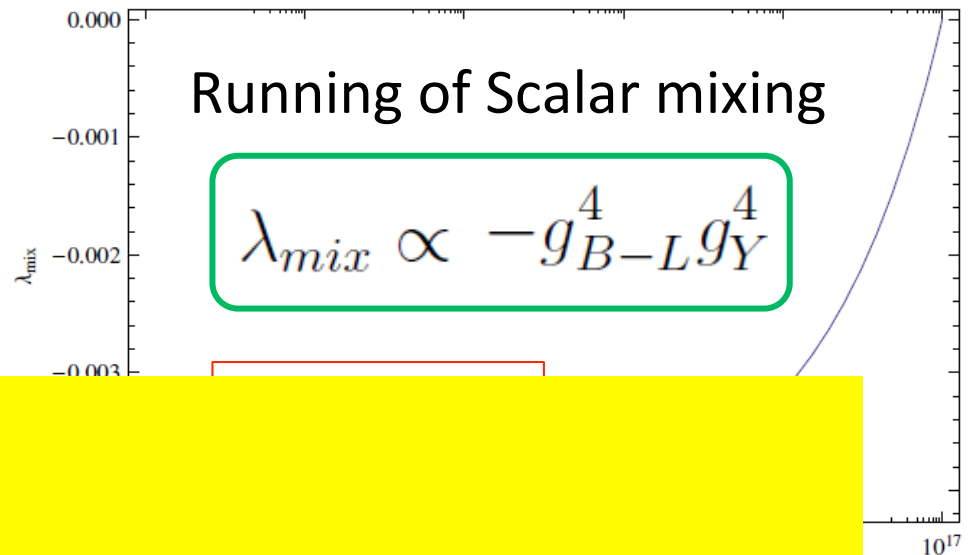
Radiatively generated scalar mixing λ_{mix} in $V(H)$

$$V(H) = \lambda_H H^4 + \lambda_{mix} \Phi^2 H^2 \rightarrow \text{EWSB}$$

$$V(H) = \lambda_H H^4 + \lambda_{mix} \Phi^2 H^2$$

$$\langle H \rangle = \sqrt{\frac{-\lambda_{mix}}{\lambda_H}} M_{B-L}$$

$$\sim c \frac{\alpha_{B-L} \alpha_Y}{\sqrt{\lambda_H}} M_{B-L}$$



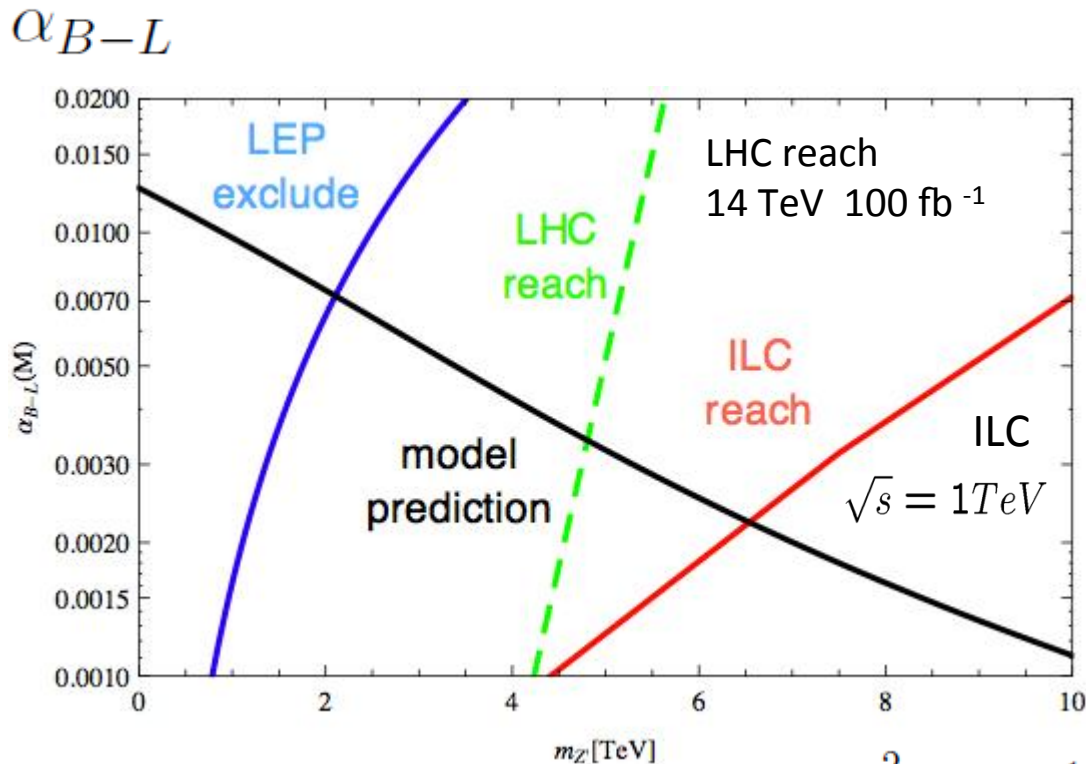
この模型の面白い点

B-L の破れのスケールが、電弱破れのスケールとダイナミカルに関係している

(VEVの比がB-L ゲージ相互作用の強さで決まる)

Prediction of the model

In order to realize **EWSB at 246 GeV**,
 B-L scale must be around TeV (for a typical value of α_{B-L}).



$$M_{B-L} \sim \frac{1}{\alpha_{B-L}} \times 35 \text{ GeV.}$$

$$m_{Z'} \sim \frac{1}{\sqrt{\alpha_{B-L}}} \times 250 \text{ GeV}$$

$$m_\phi \sim 0.1 m_{Z'}$$

$$m_{Z'}^2 = 16\pi\alpha_{B-L}(0)M_{B-L}^2$$

まとめ

- ・ プランクスケールの物理 → 階層性問題 → 低エネルギー有効理論
これから考えられるシナリオとして、古典的スケール不変理論
- ・ 126 GeV Higgs = 真空の安定性 → 平坦ポテンシャル。
これら二つを手がかりに

“Classically conformal B-L model”

+ プランクスケールで平坦なポテンシャル

この模型の面白い点

- ・ B-L スケールがダイナミクスの要請から TeV に決まってしまう。
- ・ 右巻きニュートリノは軽い → レプトン生成の新たな可能性
- ・ 予言能力が高い (パラメータ自由度がほとんどない)
 - (1) Z' 新しいゲージ粒子
 - (2) $M_\phi < M_{Z'}$ 軽いスカラー粒子
 - (3) Leptogenesis at TeV or below 軽い右巻きニュートリノ

Issues to be solved

- **Origin of flat Higgs potential at Planck**

Hierarchy problem & $M_H = 126 \text{ GeV}$

→ PNGB ? Moduli ? Gauge/Higgs ? Shift sym?

Non-susy vacua of superstring with flat $V(H)$

- **Resonant leptogenesis**

Garny, Kartavsev, Hohenegger (11)

Kadanoff-Baym equation (quantum Boltzmann)

- **Non-susy GUT at Planck scale**

$SO(10)$ or E_6 type

Gravity or string threshold correction to RGE

「**大統一のスケール**はどこにあるべきか？」

ゲージ相互作用の統一には本当に超対称性が必要なのか？

プランク物理はプランクスケール直上か？

「**超弦理論の真空**に超対称性は必要？」

弦スケールから decouple した古典スケールのない有効理論とは？

「**Sea-sawスケール**は本当に 10^9 GeV ほど高くないとだめなのか？」

レプトン生成機構の見直し cf. Asaka Shaposhnikov

→ K.Shimada, M.Yamanaka, SI (to appear)

「**宇宙項問題**の再検討」

暗黒エネルギーは宇宙誕生時の量子効果と関係するか？

非平衡場の量子論をもっとまじめに考えるべきではないか。

→ H.Aoki, Y.Sekino, SI (to appear)

STRING I



STRING II
弦の構成的
定式化



弦理論の回帰

暗黒物質
暗黒Energy
初期宇宙

BSMを目指して

プロトン崩壊
フレーバ物理



2012 LHC
2013 Planck

ニュートリノ振動
(Kamiokande)

世代の起源？

CKM & CP
KEKB, PEP-II
フレーバ物理

Higgsの意味づけ

いよいよ新生代？

この先に何があるのか。
これまでの30年とは明らかに違う時代に来ている！

弦理論、宇宙論、素粒子論が渾然一体となって
非常に面白い時代になってきた。

Feynmann (ノーベル賞講演) 「物理学はいかに発見されたか」(江沢洋訳) の最後のパラグラフの要約

『問題は発見にいたる“最良の”あるいはもっとも能率的な方法を見つけることでなくて、なんでもいいから一つ道を探し当てることです。

みなが同じ流行の考え方をするのでは、仮説のバラエティが限られてしまう。一人一人が、同じ考え方をするのではなく、自分を犠牲にして、道を探し当てることが大事ではないでしょうか。

犠牲と言ったのは、真理が流行の方向にあって、何も探りあてることができない可能性が高いからです。

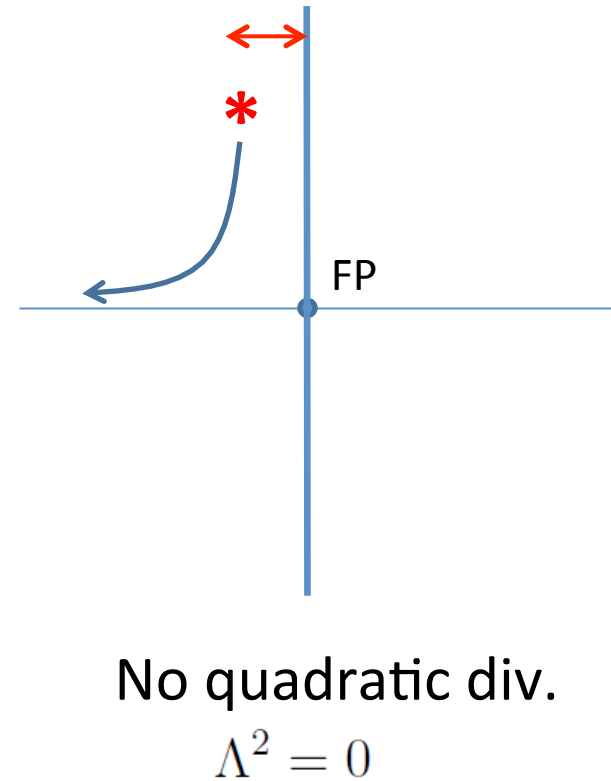
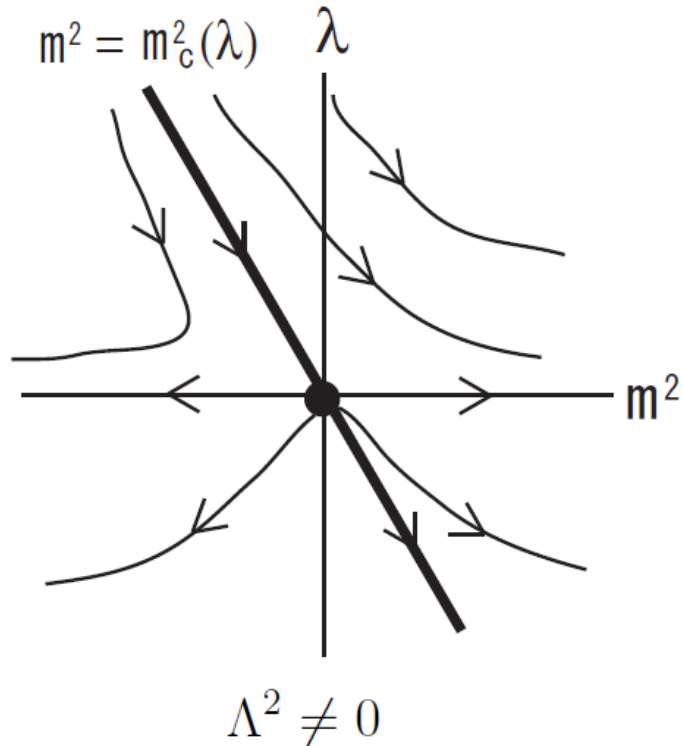
しかし、私の経験では、犠牲はそんなに大きくない。

なぜなら、必ずその方法が適用できる範囲があるし、新しい法則を探し求める際には、常に今考えている面白い可能性には、他の誰も気づいてはいないだろう、という心理的興奮を味わうことができるからです。』

Hierarchy problem in Wilsonian RG

H Aoki, SI PRD(2012)]

Critical line



Fine - tuning of the **distance from the critical line** = **Low energy mass scale**

The difference is the **choice of the coordinates** of the parameter space.

Model: (B-L) extension of SM with Right Handed Neutrinos

	SU(3) _c	SU(2) _L	U(1) _Y	U(1) _{B-L}
q_L^i	3	2	+1/6	+1/3
u_R^i	3	1	+2/3	+1/3
d_R^i	3	1	-1/3	+1/3
ℓ_L^i	1	2	-1/2	-1
ν_R^i	1	1	0	-1
e_R^i	1	1	-1	-1
H	1	2	-1/2	0
Φ	1	1	0	+2

N Okada, Y Orikasa, SI
 PLB676(09)81,
 PRD80(09)115007
 PRD83(11)093011

H Higgs doublet
 Φ B-L sector scalar field

- **B-L** is the only anomaly free global symmetry in SM.
- $[U(1)_{B-L}]^3$ is anomaly free if we have **right handed fermion**.
- B-L gauge symmetry is broken by vev of an **additional scalar**.

See-saw mechanism

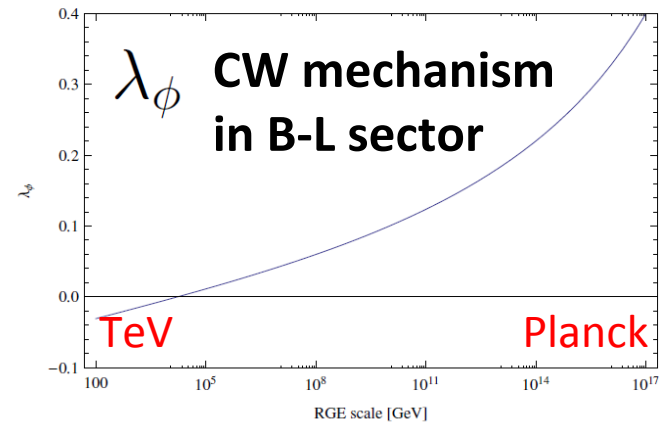
$$\mathcal{L} \supset -Y_D^{ij} \overline{\nu_R^i} H^\dagger \ell_L^j - \frac{1}{2} Y_N^i \Phi \overline{\nu_R^{ic}} \nu_R^i + \text{h.c.}, \quad \begin{pmatrix} 0 & m \\ m & M_N \end{pmatrix} \longrightarrow m_\nu = \frac{m^2}{M_N}$$

$$m = Y_D \langle H \rangle \quad M_N = Y_N \langle \phi \rangle$$

B-L can be broken by CW mechanism at TeV.

$$V(\Phi, H)|_{UV} = \lambda_{\Phi} (\Phi^{\dagger} \Phi)^2$$

$$M_{B-L} \sim M_{Planck} \exp\left(-\frac{\lambda_{\Phi}}{b}\right)$$



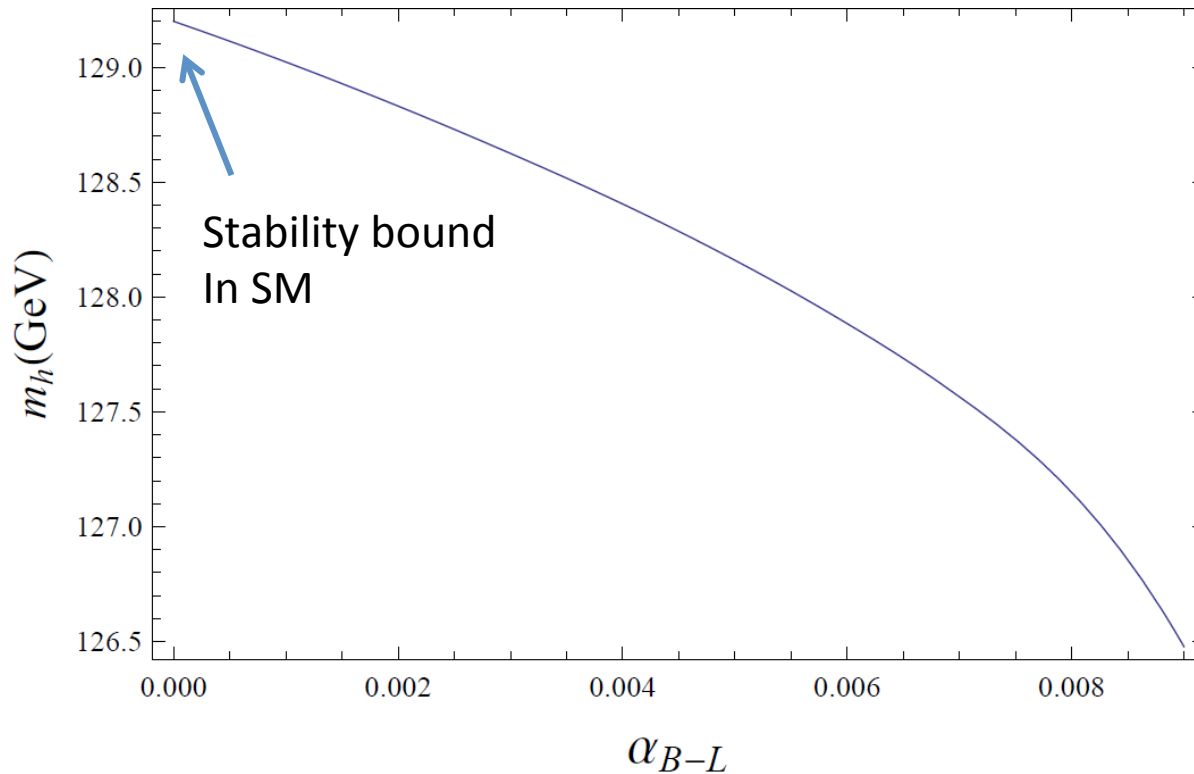
Stability bound in TeV scale B-L model

$$\frac{d\lambda_H}{dt} = \frac{1}{16\pi} \left(24\lambda^2 - 6Y_t^4 + \frac{9}{8}g^4 + \frac{3}{8}g_1^4 + \frac{3}{4}g^2g_1^2 + \boxed{\frac{3}{4}(g^2 + g_1^2)g_{mix}^2} + \dots \right)$$

An extra positive term is added



Lower the
stability bound



標準模型の提唱

SMの
理論的基礎

各種
素粒子発見

1978 (標準模型の確立)

GUT SUSY

STRING I

BSMを目指して
プロトン崩壊
フレーバ物理

W, Z bosons

top

LEP
精密測定

CKM & CP
KEKB, PEP-II

Higgs

STRING II
D brane
AdS/CFT

暗黒物質
CMB
暗黒Energy

ニュートリノ振動
(Kamiokande)

(T2K, 原子炉)

2012 LHC
2013 Planck

数学への
大貢献