

# Beyond the Standard Model Physics

ODA, Kin-ya (Osaka)

尾田 欣也 (大阪)

# Beyond the Standard Model Physics

ODA, Kin-ya (Osaka)

尾田 欣也 (大阪)

~~Beyond  
the Standard  
Model Physics~~

ODA, Kin-ya (Osaka)

尾田 欣也 (大阪)

**Beyond**

**the Standard**

**Model Physics**

**ODA, Kin-ya (Osaka)**

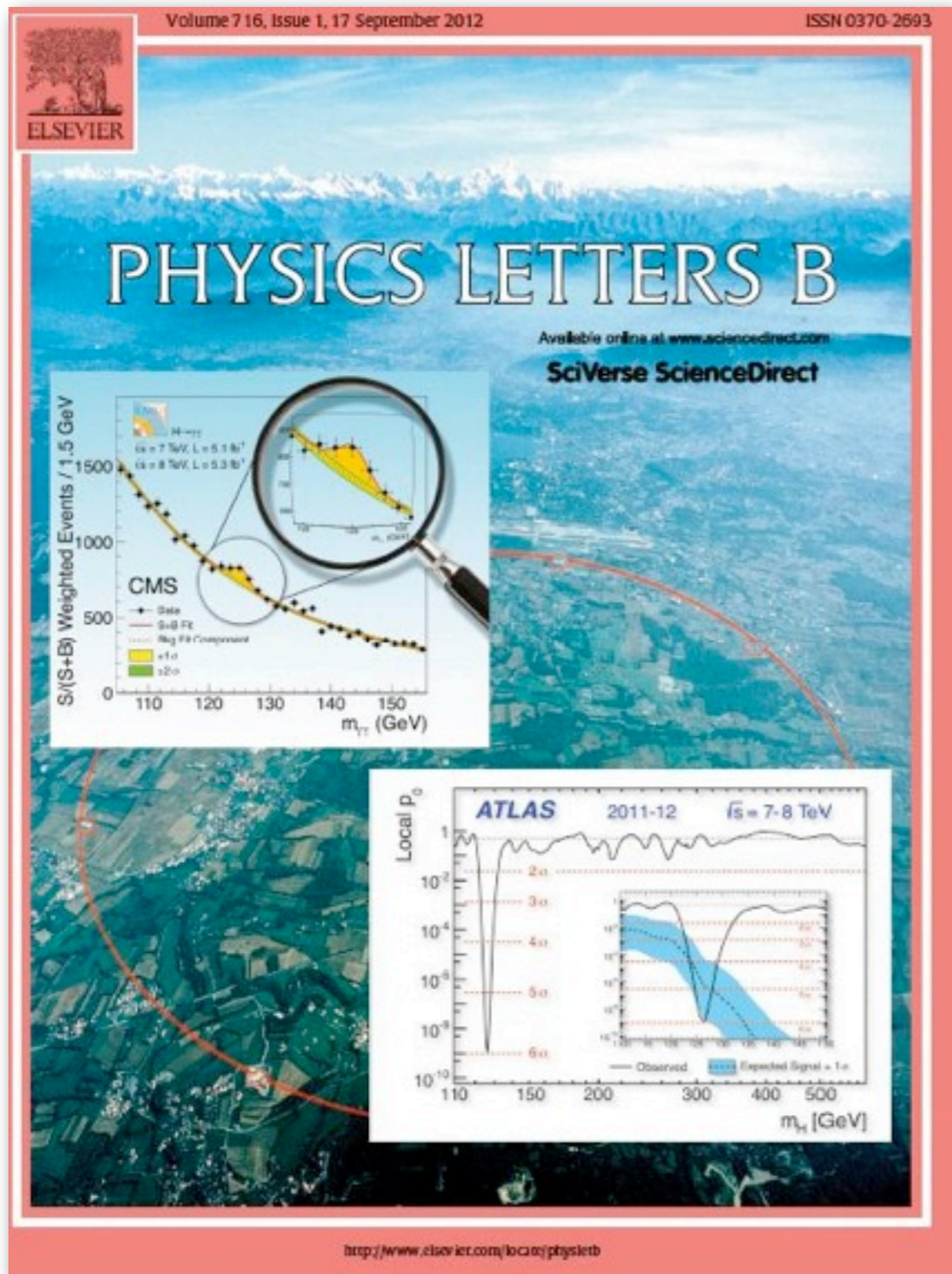
**尾田 欣也 (大阪)**

# ちなみにBSMの例

- 素粒子の**標準模型**は**場の量子論**で書かれている。
  - ★ 余分な**場**を入れる。
    - \* →余分な**粒子**。→余分な**相互作用**。
  - ★ 余分な**対称性**を入れる。
- 超対称性 (超対称粒子, 超対称性)
- 余剰次元 (KK粒子, 高次元ローレンツ対称性)

なにはともあれ

# ヒッグス粒子の発見!



# ヒッグス発見の重要性

- 標準模型の**全てのパラメタ**が決定された。
  - ★  $m_h = 126\text{GeV}$  により
  - ★ ポテンシャル:  $V = m^2|\phi|^2 + \lambda|\phi|^4$  の
  - ★ パラメタ:  $\lambda = 0.13$  &  $m^2 = -(89\text{GeV})^2$ 。
- ヒッグス(BEH)機構は標準模型の**全ての粒子の質量の源**。(カイラル相互作用)



# ヒッグス (BEH) 機構の必要性

- 標準模型の構成員（こんだけ）：

★ クォークとレプトン。

\* 左巻き  $\psi_L$  と右巻き  $\psi_R$  が別の粒子（カイラル）。  
（別のゲージ相互作用をする。）

\* 質量項  $m (\bar{\psi}_L \psi_R + \bar{\psi}_R \psi_L)$  を持てない。

★ ゲージボソン。

\* ゲージ対称性により質量が禁止されている。

- 標準模型の全ての粒子は無質量？！

# ヒッグス (BEH) 機構

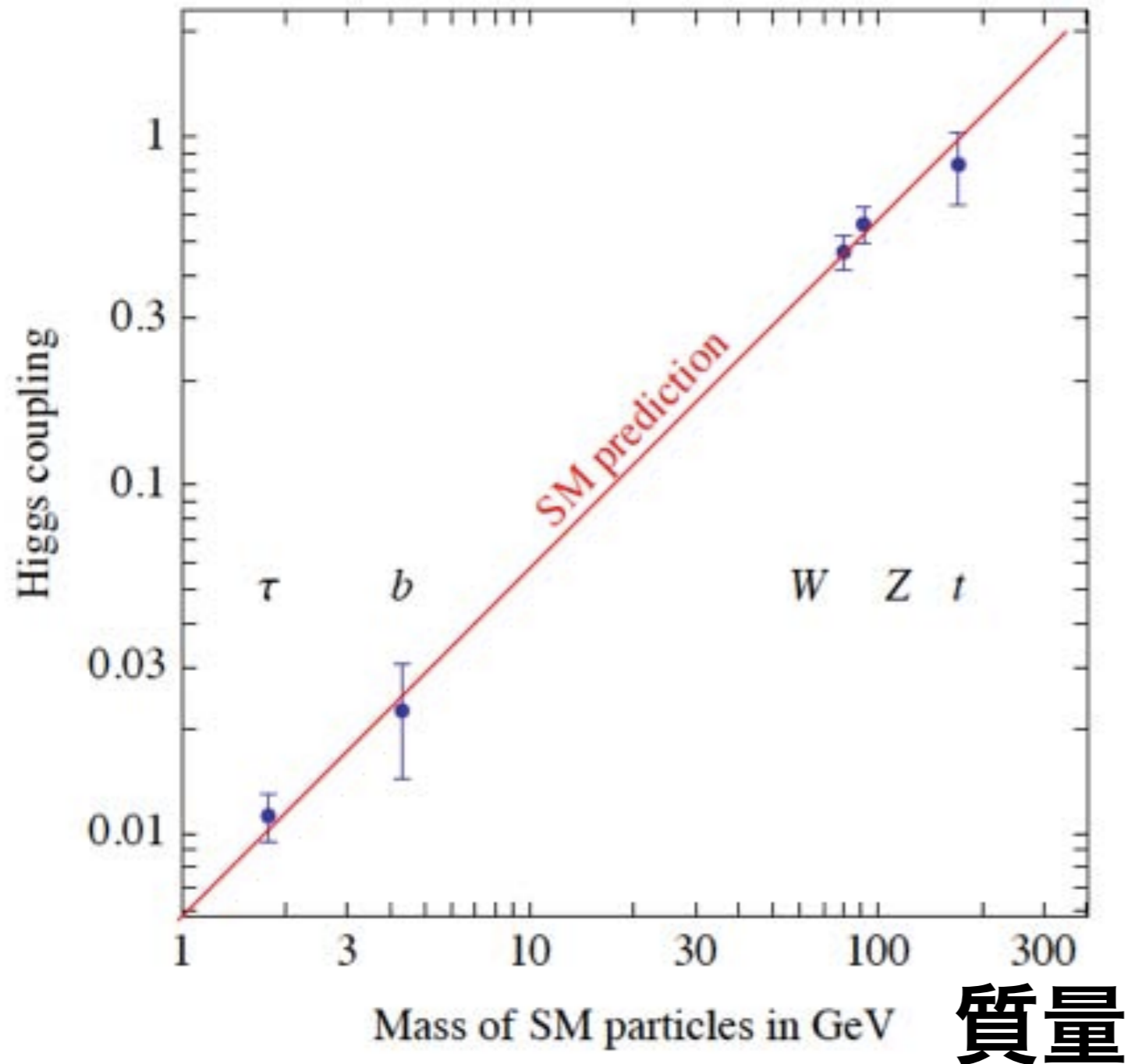
- ゲージ相互作用する スカラー場  $\phi$  を入れる。
- **運動項**  $|D_\mu\phi|^2$  に ゲージ場  $A_\mu$  が入る:
  - ★  $D_\mu = \partial_\mu + igA_\mu$
  - ★  $\phi$  が 真空期待値  $\langle\phi\rangle$  を持てば、**質量  $g\langle\phi\rangle$** 。
- クォーク・レプトンもゲージ不変な **湯川相互作用** なら書ける:
  - ★  $y(\phi\bar{\psi}_L\psi_R + \phi^\dagger\bar{\psi}_R\psi_L)$
  - ★  $\phi$  が 真空期待値  $\langle\phi\rangle$  を持てば、**質量  $y\langle\phi\rangle$** 。
- ヒッグス機構からくる質量の特徴:
  - ★ **質量 / (ヒッグスとの) 結合定数 = 真空期待値 (一定)**

# どれぐらいSMぽいか？

理論屋の不法combination

## 結合定数

Fit to Higgs couplings



[Giardino et al. 1303.3570]

- これぐらい。
- 確かに  
**質量/結合 = 一定。**
- ★  $W, Z$  ゲージ場のみならず、
- ★  $t, b$  クォークとも、
- ★  $\tau$  レプトンとも。
- 2ケタ違うところで全部  $1\sigma$  で一致。



標準模型型

大勝利

**その先はあるのか？**

# Messages

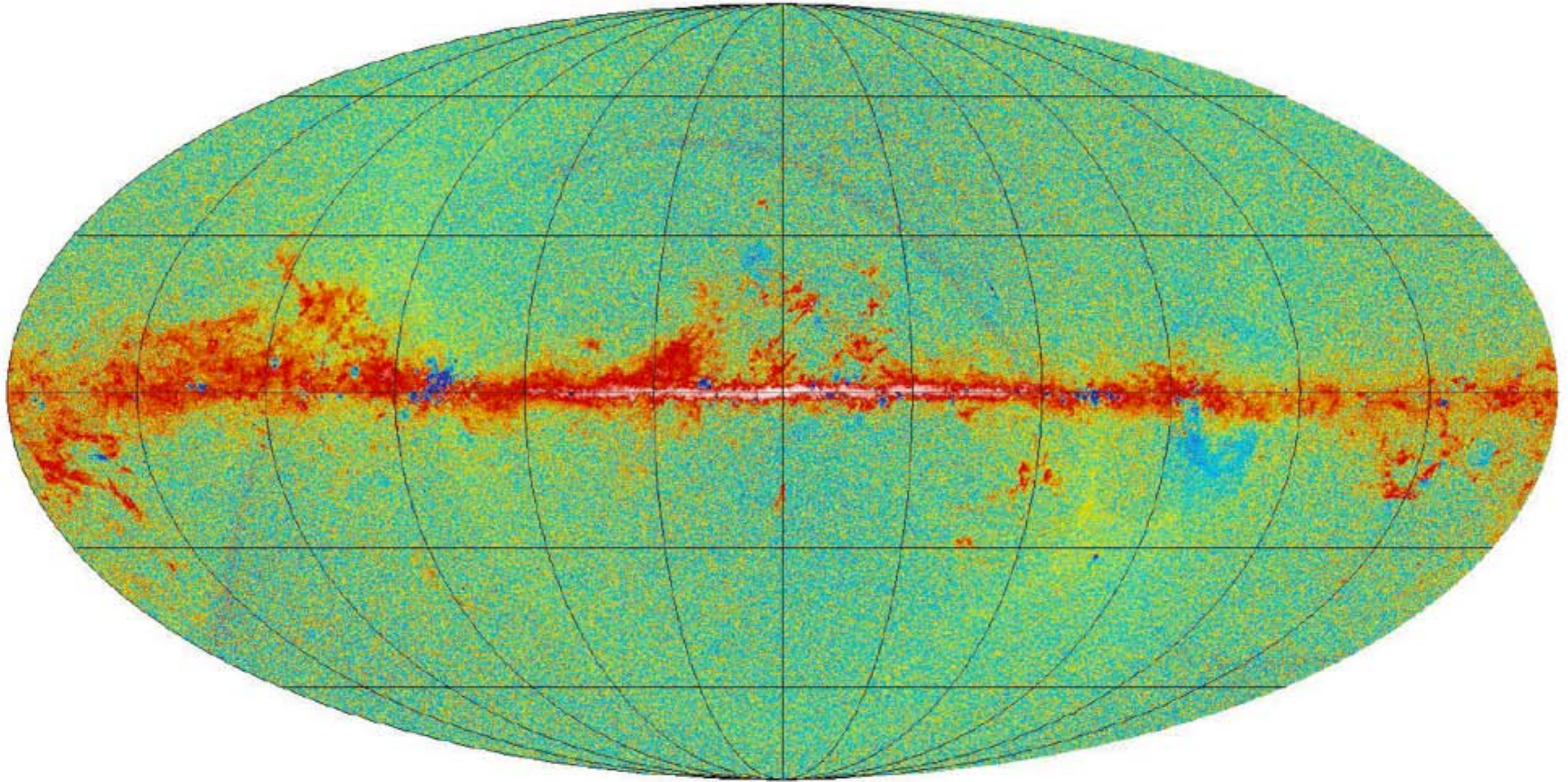
1. 標準模型を超える必然性は、ある。
2. でも **wishful thinking** はやめよう。
3. 最悪でも、**top** と **Higgs** の精査で  
高スケールが探れる。

# Plan

1. 標準模型を超える必然性は、ある。
2. でも wishful thinking はやめよう。
3. 最悪でも、top と Higgs の精査で  
高スケールが探れる。

# 宇宙ヤバイ

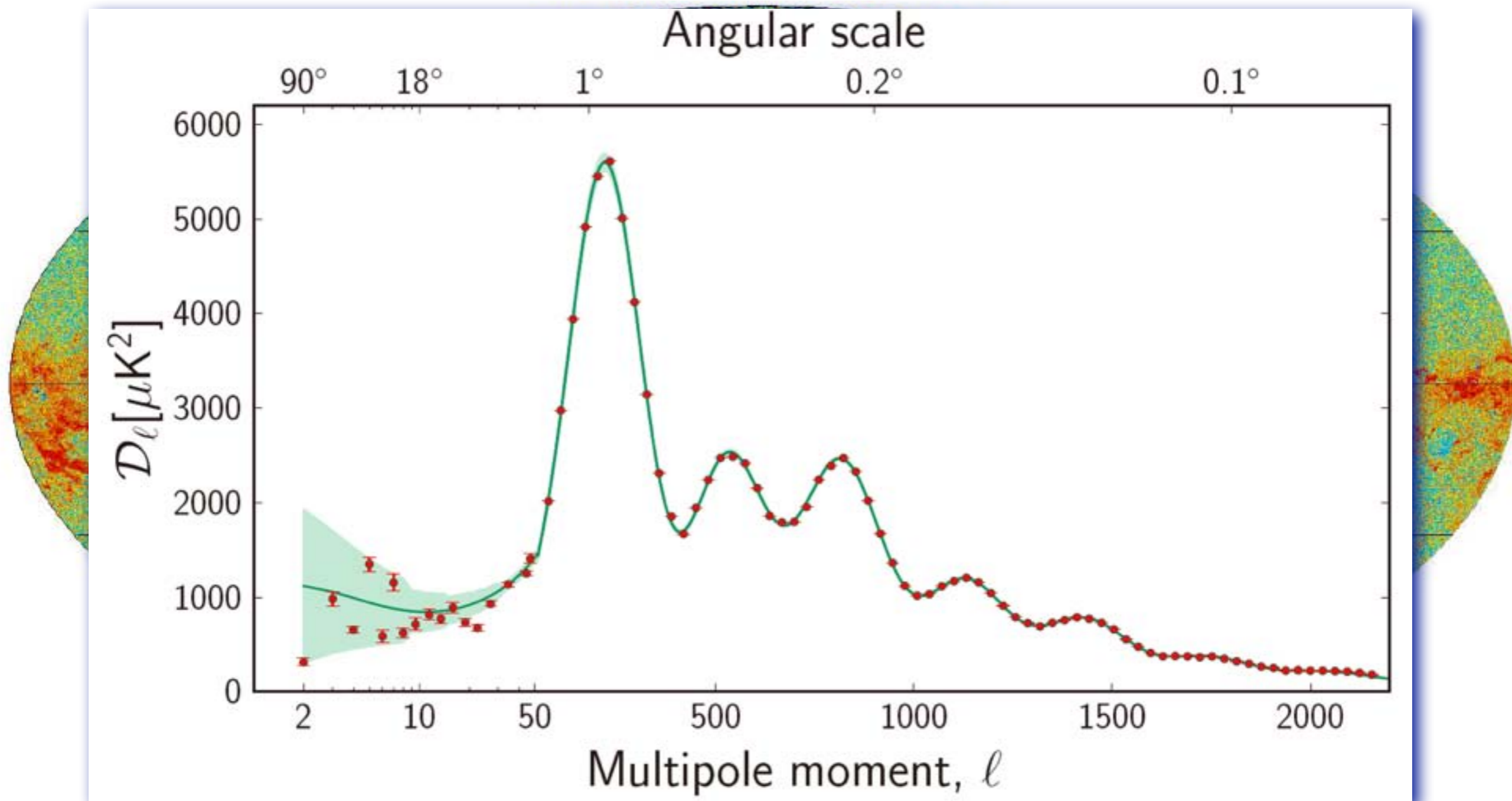
- 宇宙ですよ宇宙。宇宙論が精密科学になってしまった。





# 宇宙ヤバイ

- 宇宙ですよ宇宙。宇宙論が精密科学になってしまった。



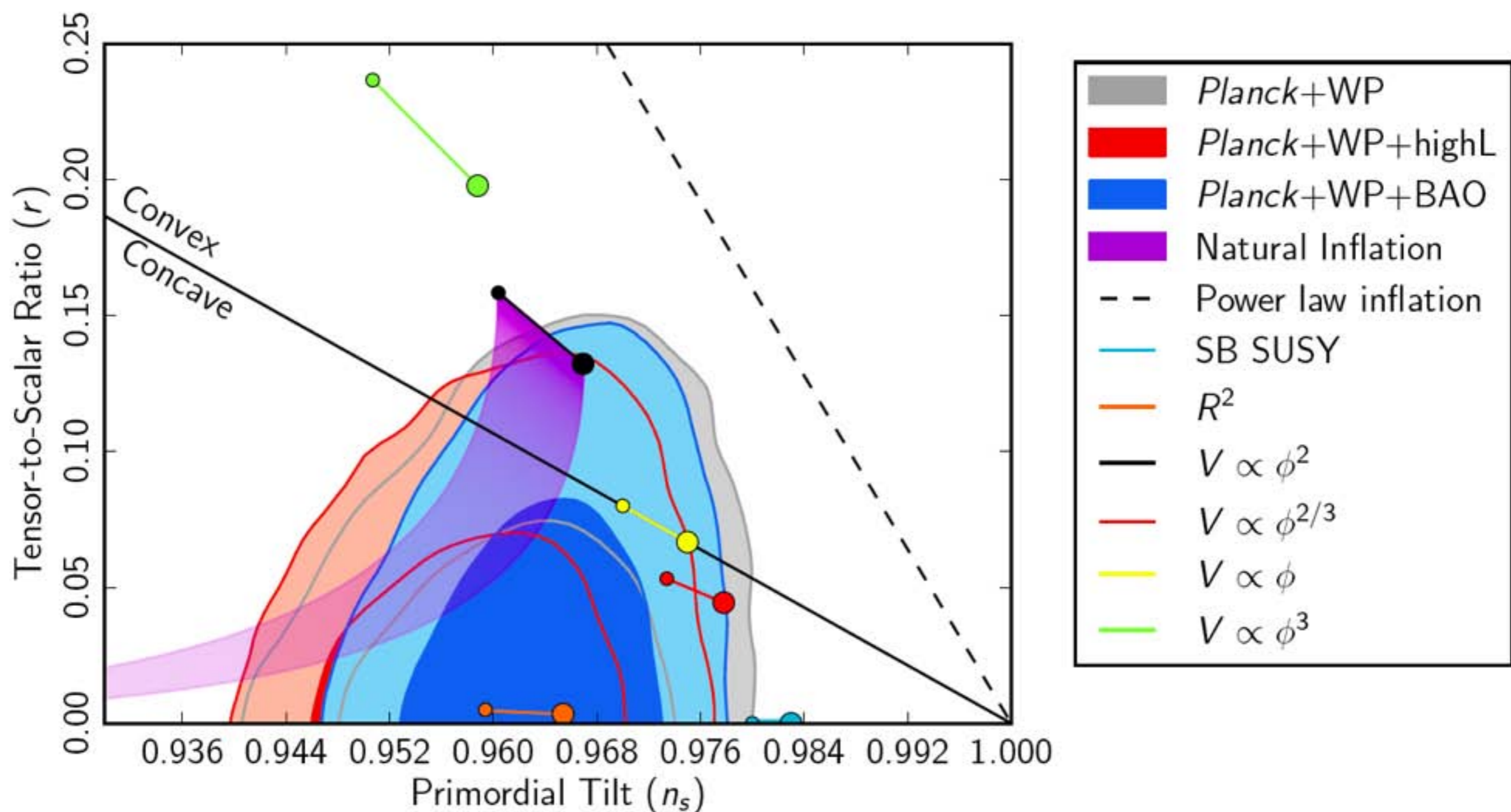
# 宇宙ヤバイ

- 宇宙ですよ宇宙。宇宙論が精密科学になってしまった。

Parameter	Planck (CMB+lensing)		Planck+WP+highL+BAO	
	Best fit	68 % limits	Best fit	68 % limits
$\Omega_b h^2$ . . . . .	0.022242	$0.02217 \pm 0.00033$	0.022161	$0.02214 \pm 0.00024$
$\Omega_c h^2$ . . . . .	0.11805	$0.1186 \pm 0.0031$	0.11889	$0.1187 \pm 0.0017$
$100\theta_{MC}$ . . . . .	1.04150	$1.04141 \pm 0.00067$	1.04148	$1.04147 \pm 0.00056$
$\tau$ . . . . .	0.0949	$0.089 \pm 0.032$	0.0952	$0.092 \pm 0.013$
$n_s$ . . . . .	0.9675	$0.9635 \pm 0.0094$	0.9611	$0.9608 \pm 0.0054$
$\ln(10^{10} A_s)$ . . . . .	3.098	$3.085 \pm 0.057$	3.0973	$3.091 \pm 0.025$
$\Omega_\Lambda$ . . . . .	0.6964	$0.693 \pm 0.019$	0.6914	$0.692 \pm 0.010$
$\sigma_8$ . . . . .	0.8285	$0.823 \pm 0.018$	0.8288	$0.826 \pm 0.012$
$z_{re}$ . . . . .	11.45	$10.8^{+3.1}_{-2.5}$	11.52	$11.3 \pm 1.1$
$H_0$ . . . . .	68.14	$67.9 \pm 1.5$	67.77	$67.80 \pm 0.77$
Age/Gyr . . . . .	13.784	$13.796 \pm 0.058$	13.7965	$13.798 \pm 0.037$
$100\theta_*$ . . . . .	1.04164	$1.04156 \pm 0.00066$	1.04163	$1.04162 \pm 0.00056$
$r_{drag}$ . . . . .	147.74	$147.70 \pm 0.63$	147.611	$147.68 \pm 0.45$
$r_{drag}/D_V(0.57)$ . . . . .	0.07207	$0.0719 \pm 0.0011$		

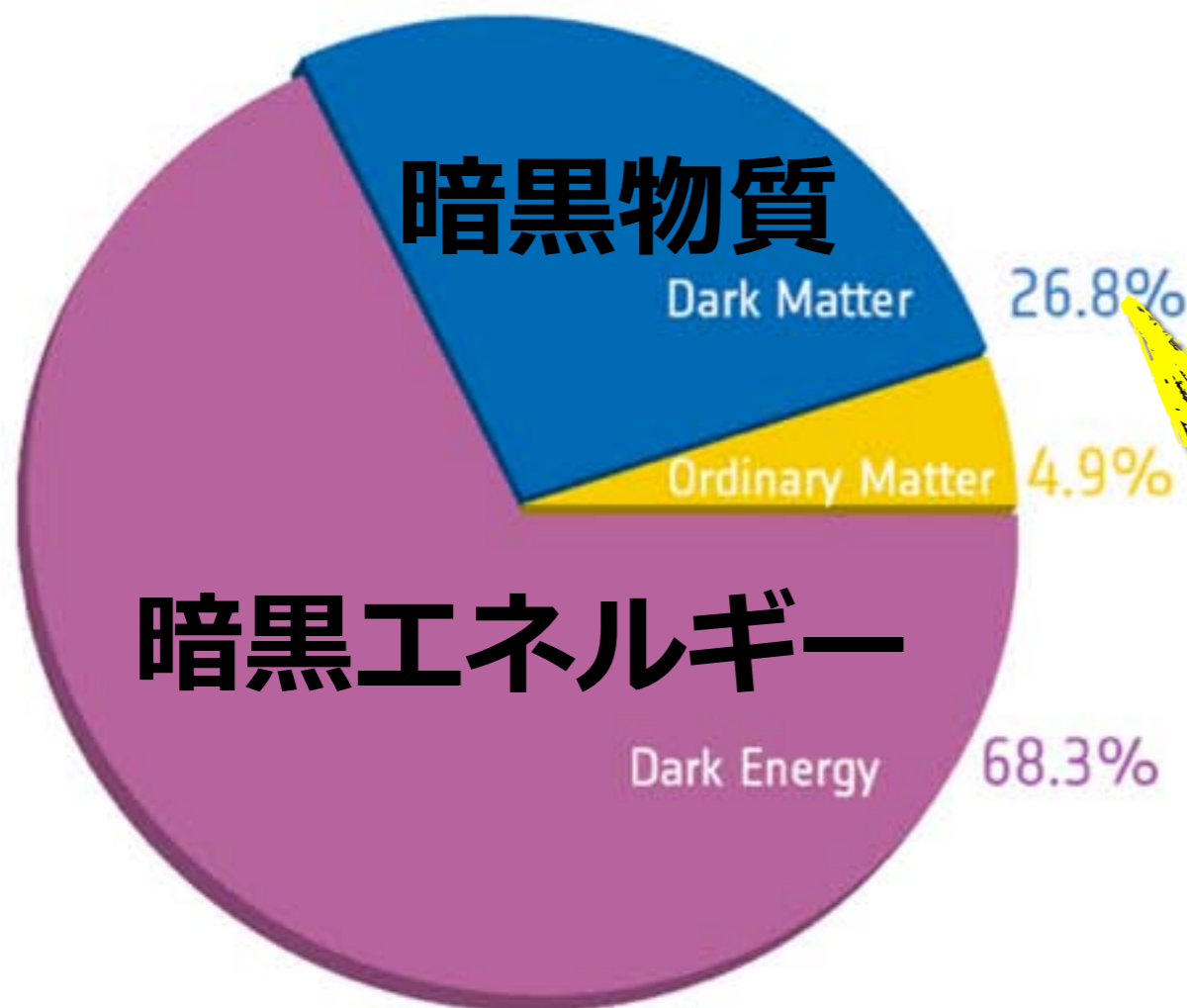
# 宇宙ヤバイ

- 宇宙ですよ宇宙。宇宙論が精密科学になってしまった。

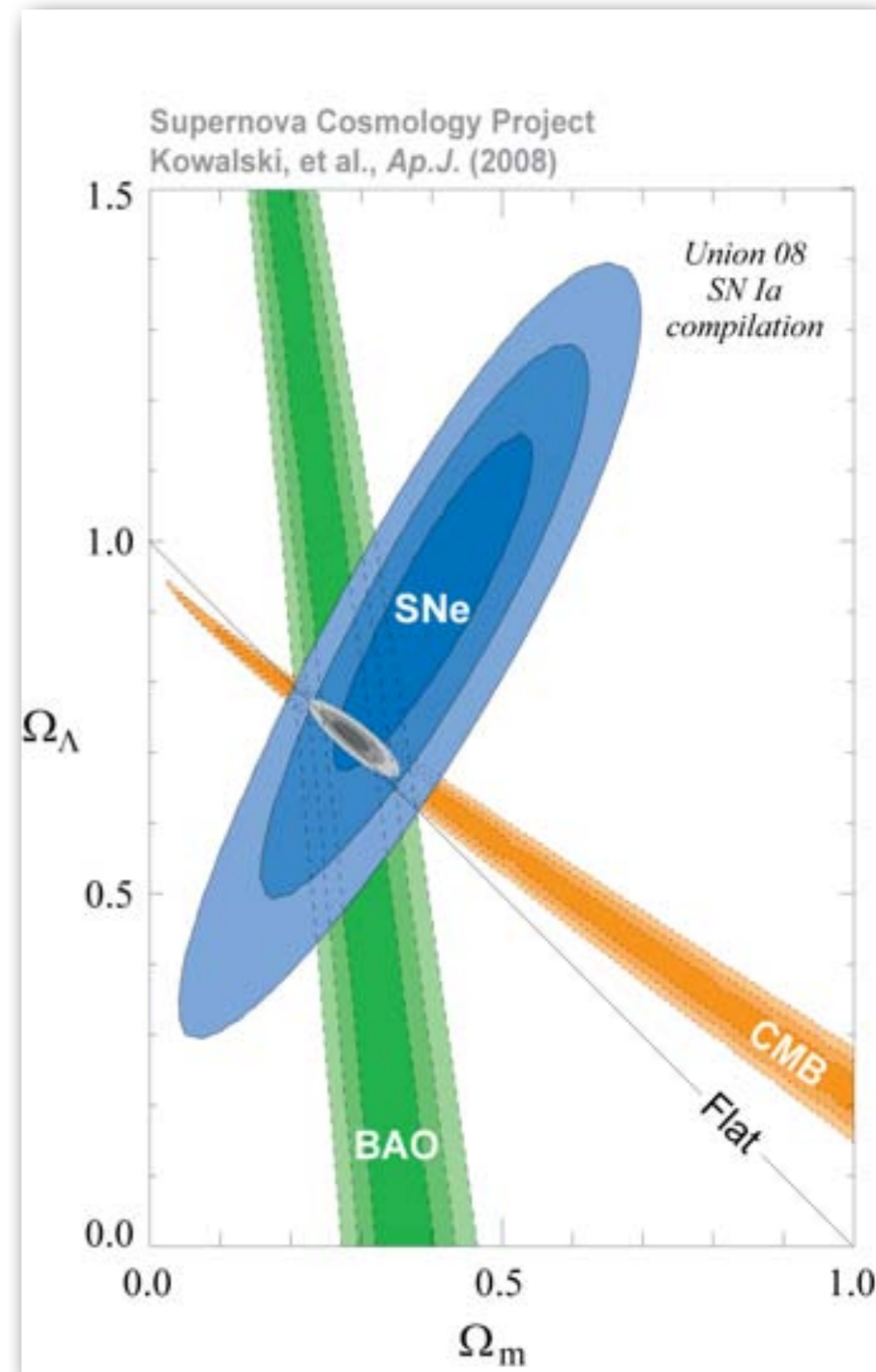


# なぜにBSM?

- 標準模型で説明づくのは  
**たったのこれっぽち。**



[Pictures from web]



# 他の動機

- インフレーション（これも宇宙）
- バリオン生成問題（これも宇宙）
- 階層性“問題”（後で触れる）
- ニュートリノ質量。
- $U(1)$ 荷電の離散化問題。→大統一を示唆？
- ていうか重力の量子論どうすんの？
- 実験からは？
  - ★  $g-2$  とかどうなの？
  - ★ 他にも色々 anomaly は出ては消えるが…

閑話休題

標準模型はどこまで正しいか

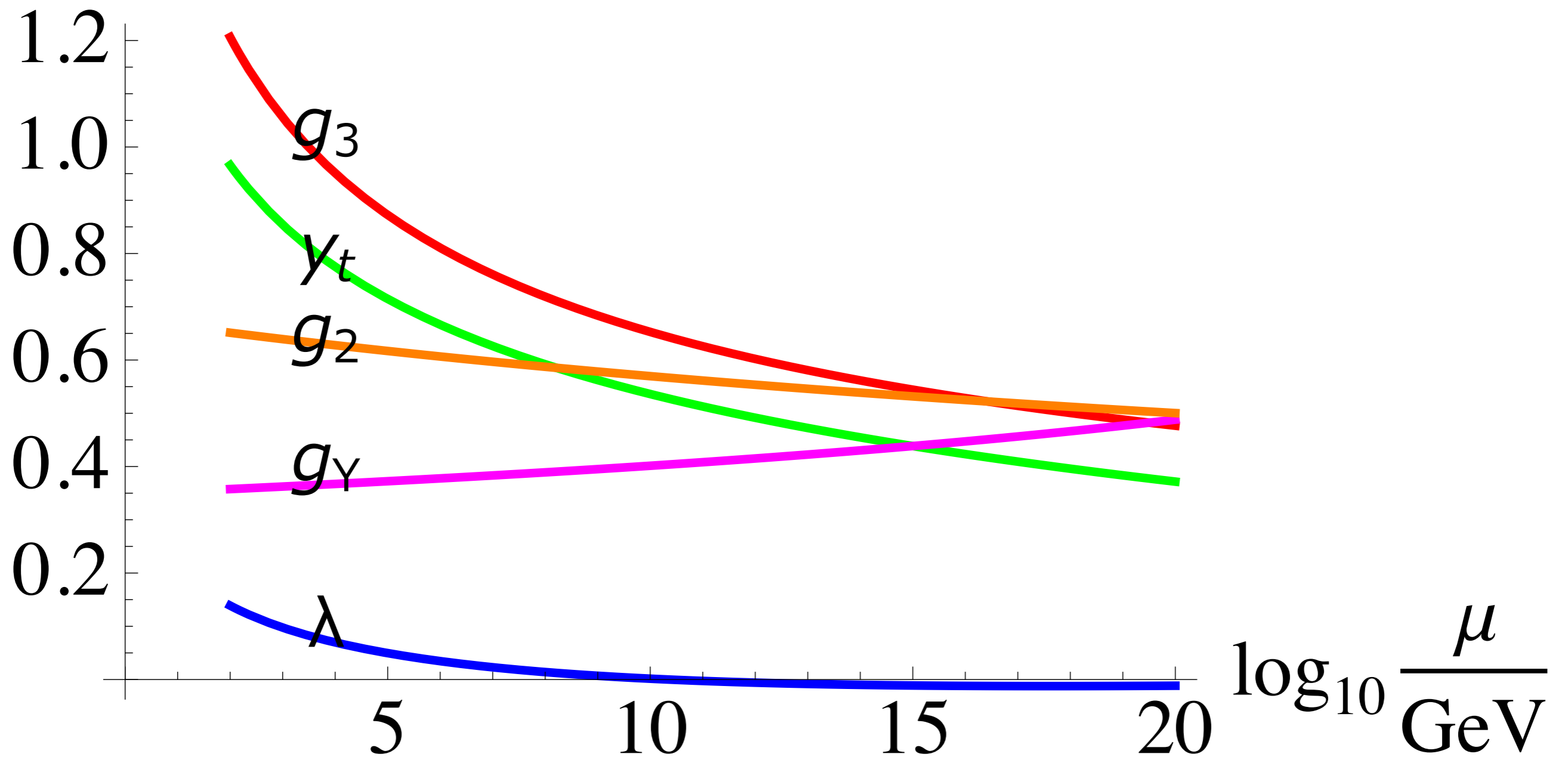
# 見るスケールを変える

- 量子力学の不確定性から
  - ★ 長さ  $\times$  運動量  $> 1$ 
    - \* (自然単位系  $\hbar = c = 1$  でエネルギー = 運動量)
- **短い距離の構造を探るには大きなエネルギーを用いる。**
- そうやって、どんどん短い距離を探ってきたのが、素粒子物理の歴史。



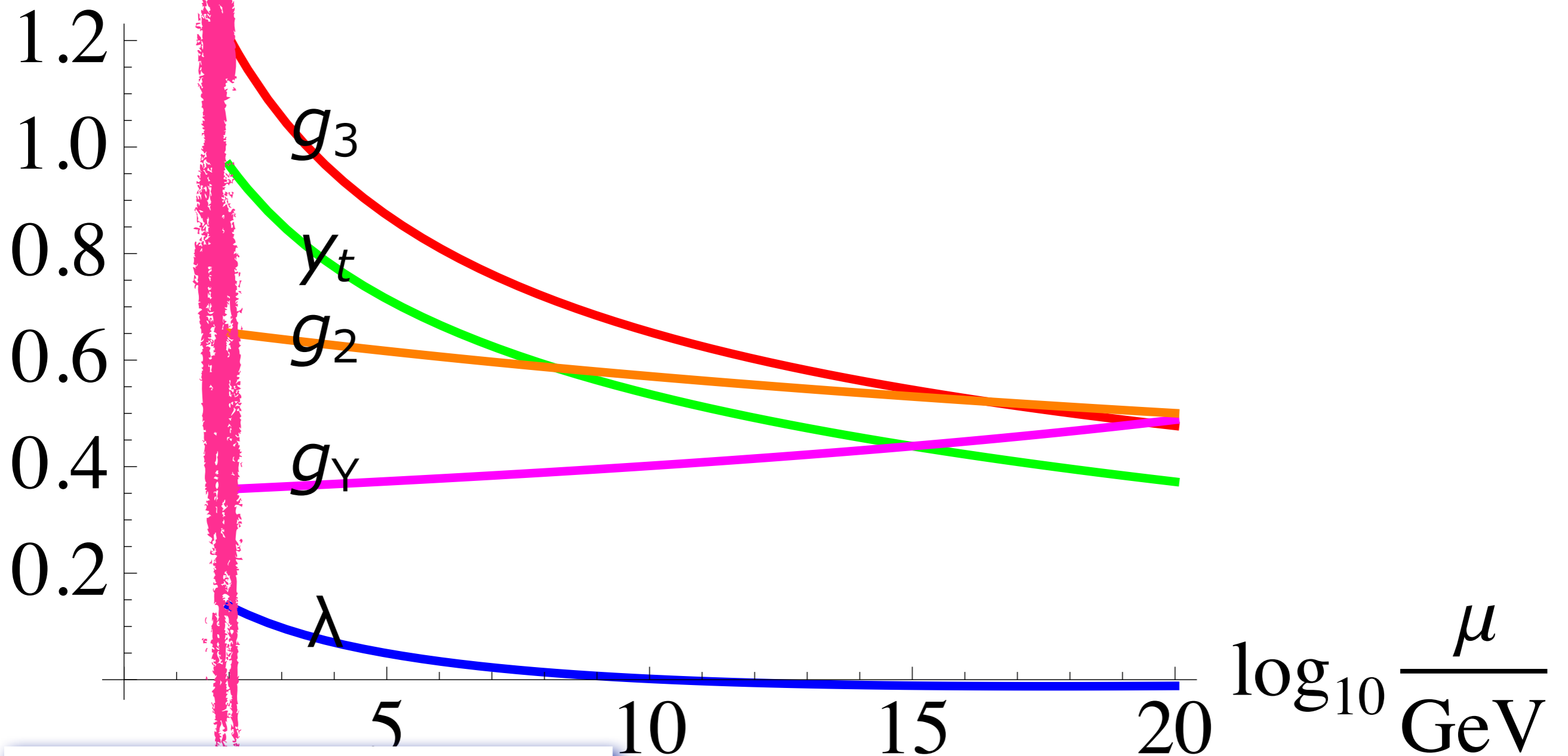
# 標準模型の結合“定”数

- エネルギースケールを上げていくと結合定数は走る。



# 標準模型の結合“定”数

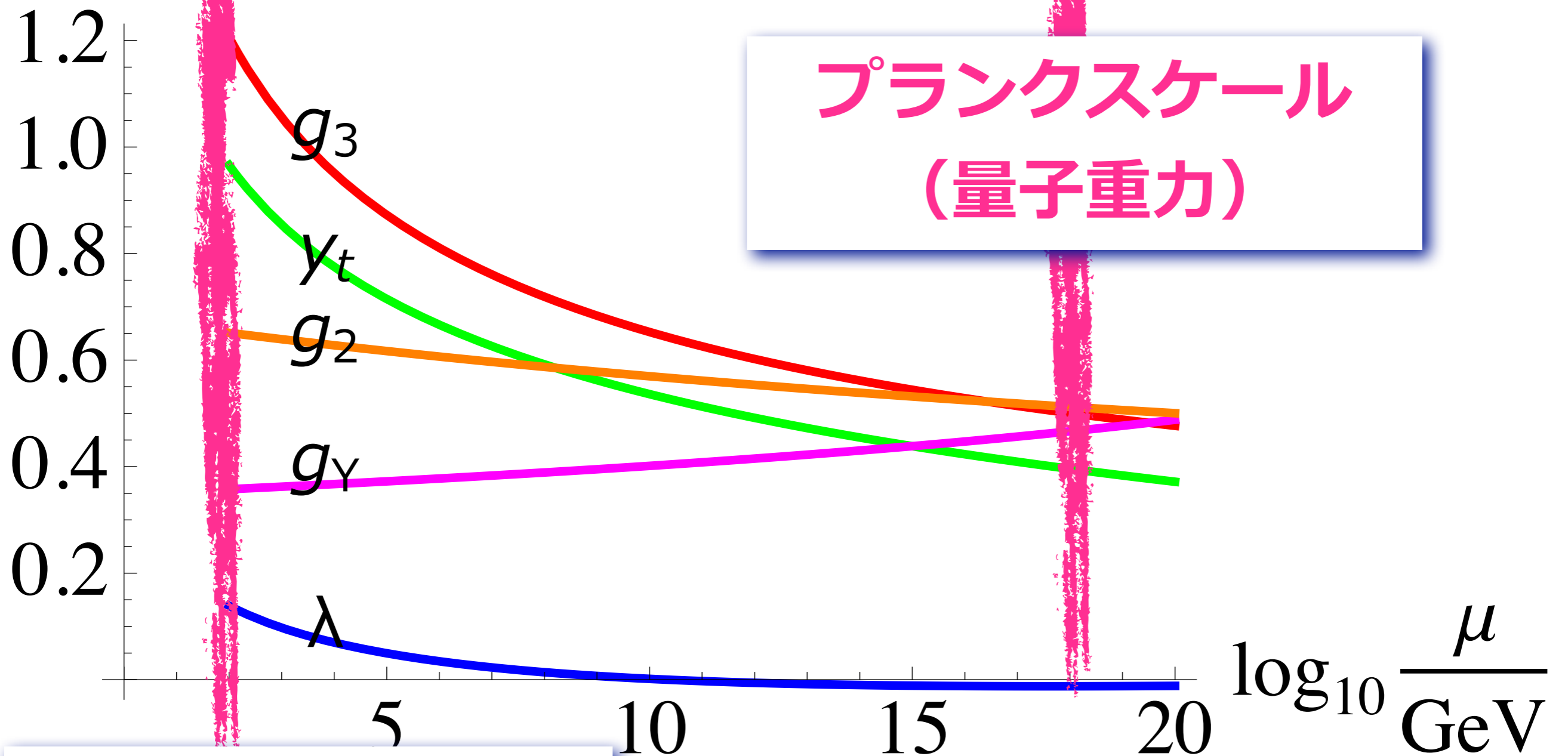
- エネルギースケールを上げていくと結合定数は走る。



LHCやILCでみる所

# 標準模型の結合“定”数

- エネルギースケールを上げていくと結合定数は走る。

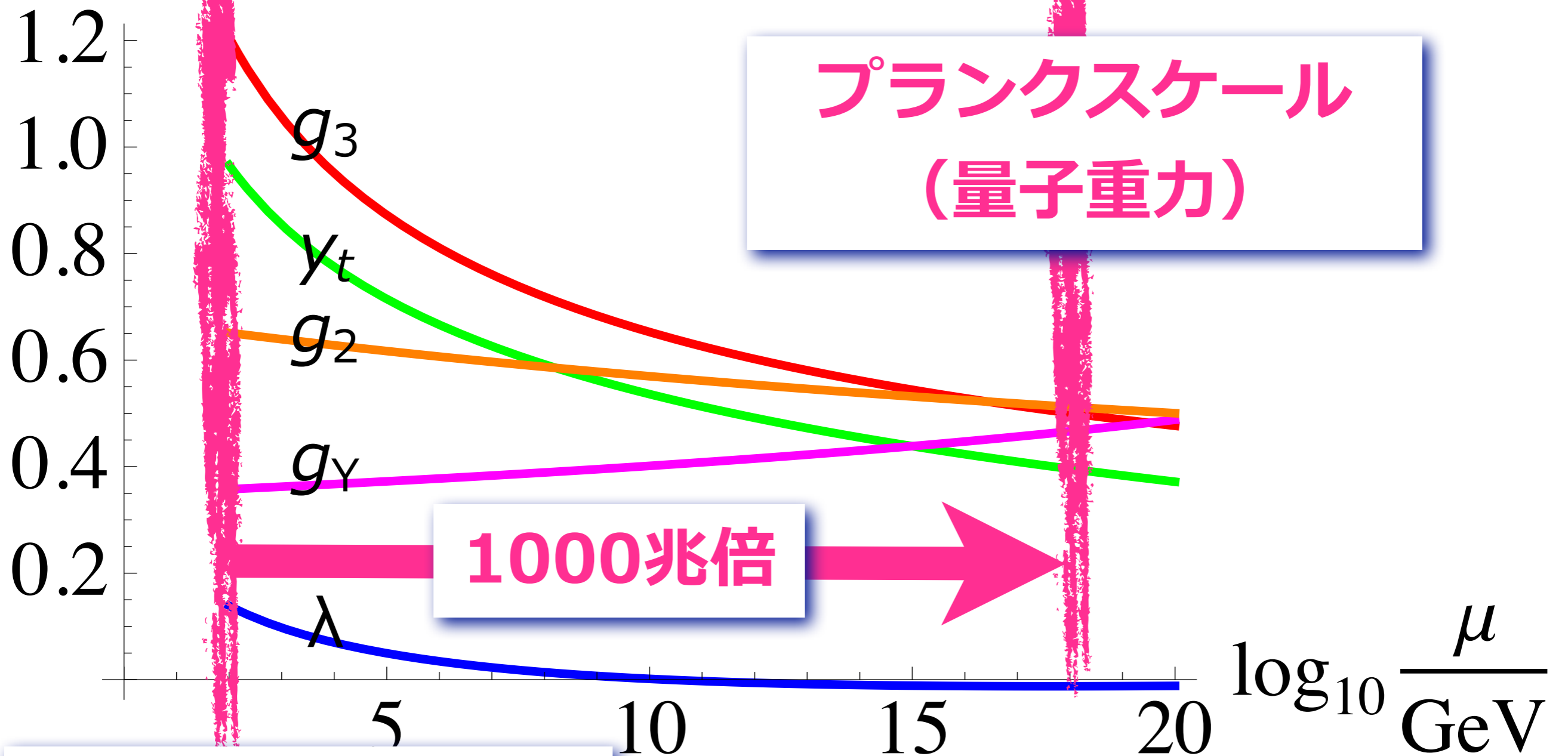


プランクスケール  
(量子重力)

LHCやILCでみる所

# 標準模型の結合“定”数

- エネルギースケールを上げていくと結合定数は走る。



LHCやILCでみる所

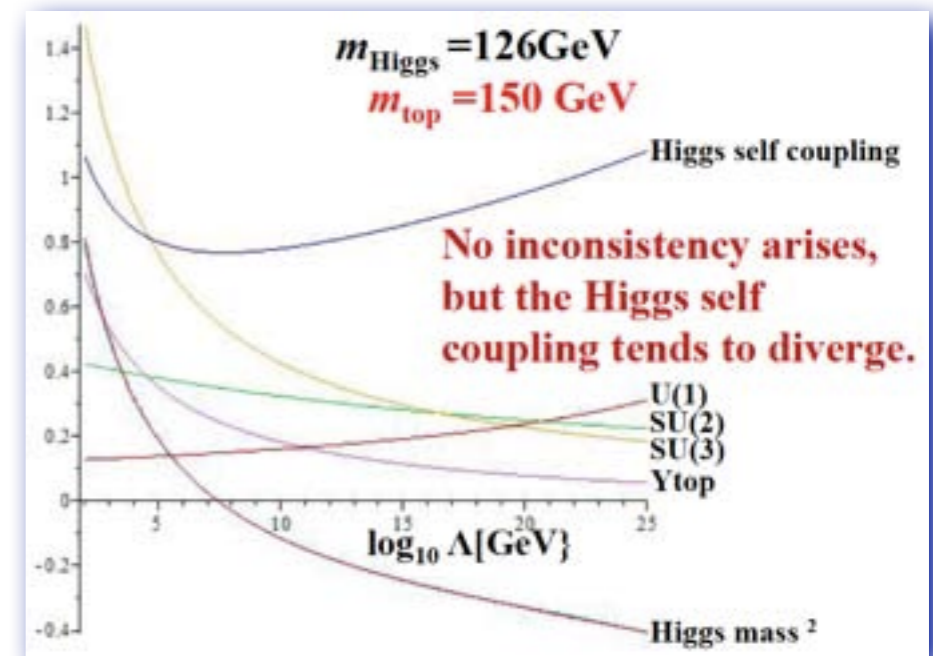
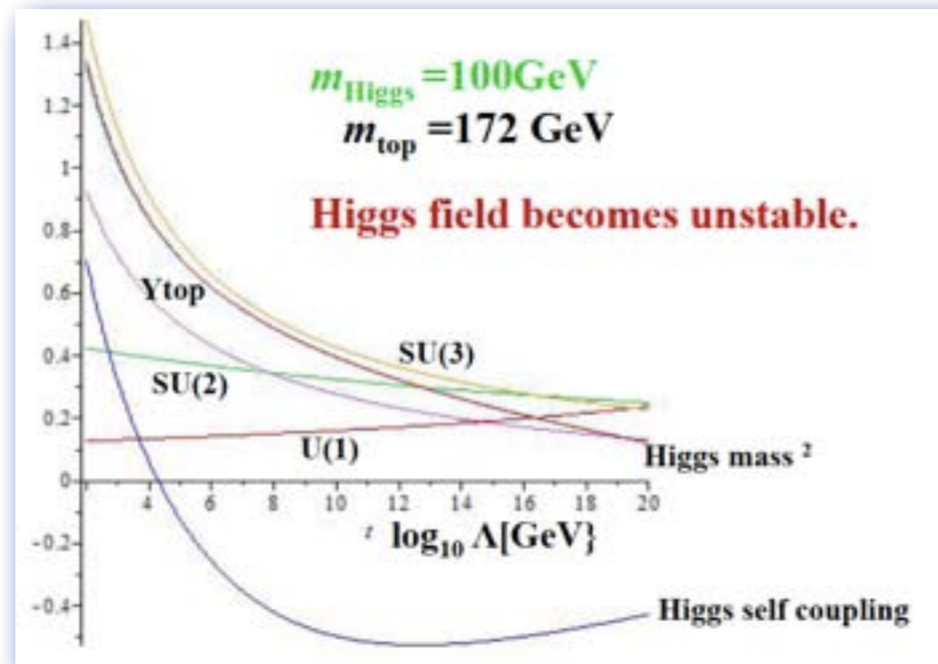
# 自然は非常にキワキワの所を

## 選んできている

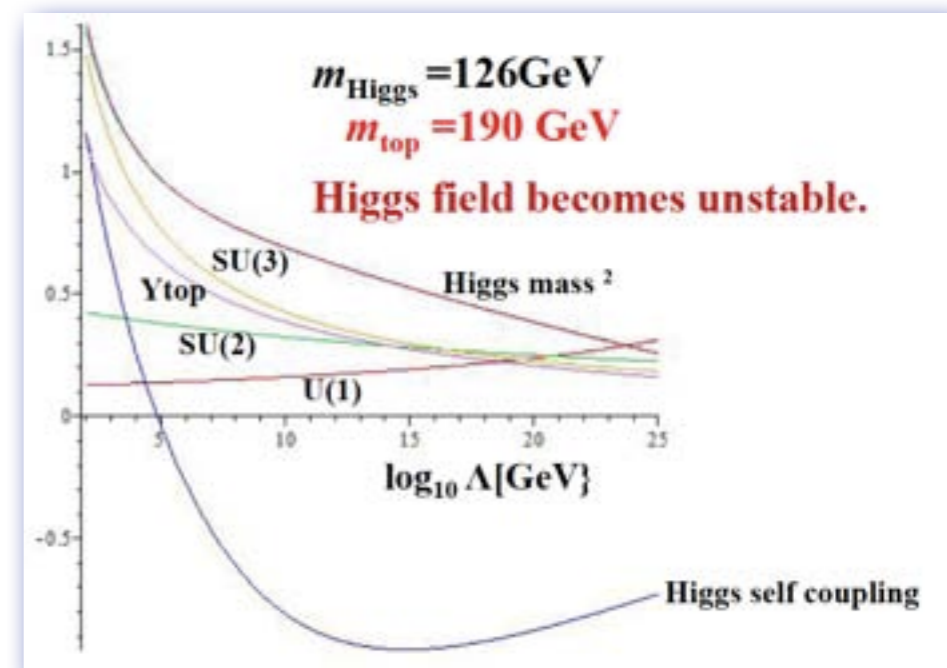
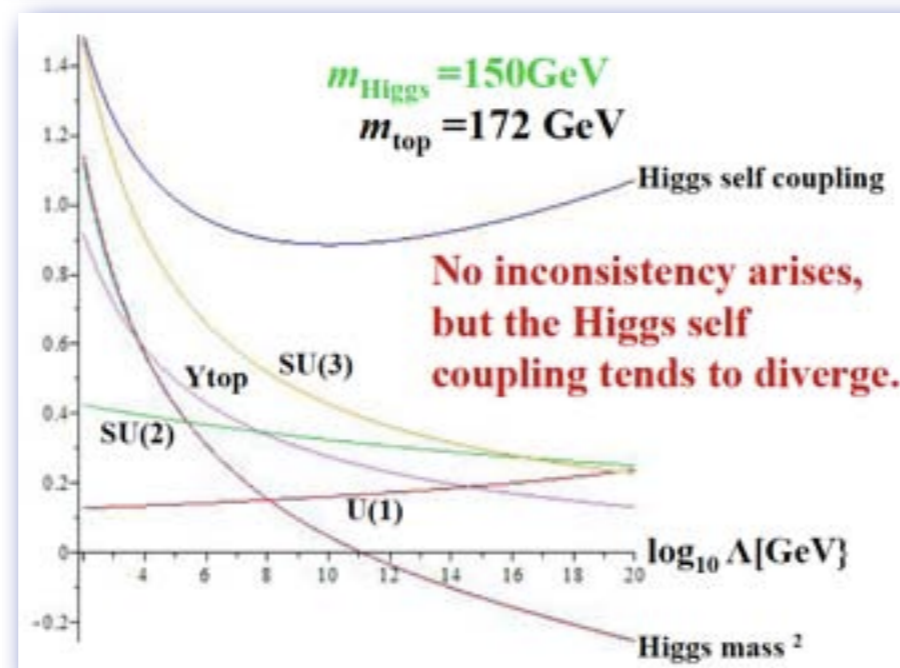
...Higgs

...top

lighter...



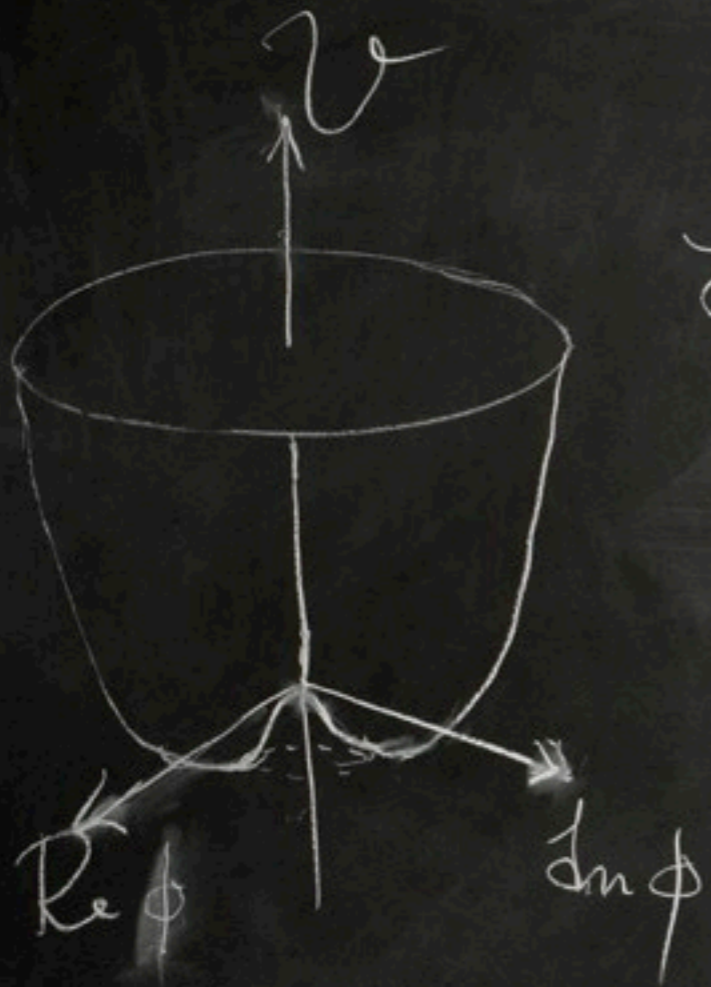
heavier...



# ヒッグスポテンシヤル

- ヒッグス先生直筆。

[Pictures from web]



$$\mathcal{L} = (D_\mu \phi)^* D^\mu \phi - V(\phi) - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

$$D_\mu \phi = \partial_\mu \phi - ie A_\mu \phi$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

$$V(\phi) = \alpha \phi^* \phi + \beta (\phi^* \phi)^2$$

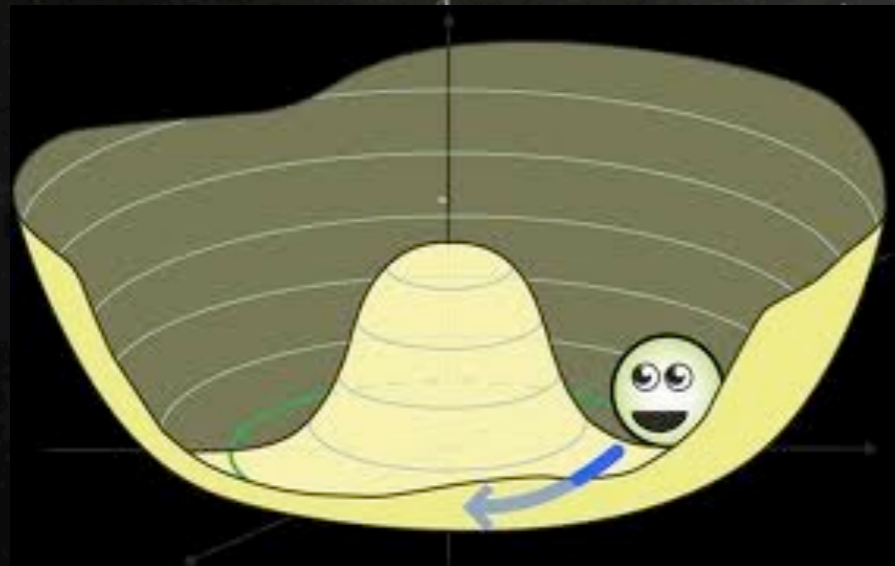
$$\alpha < 0, \beta \geq 0$$

Peter Higgs

# ヒッグスポテンシヤル

- ヒッグス先生直筆。

[Pictures from web]



$$\mathcal{L} = (D_\mu \phi)^\dagger D^\mu \phi - \mathcal{V}(\phi) - \frac{1}{4} F_{\mu\nu} F^{\mu\nu}$$

$$D_\mu \phi = \partial_\mu \phi - ie A_\mu \phi$$

$$F_{\mu\nu} = \partial_\mu A_\nu - \partial_\nu A_\mu$$

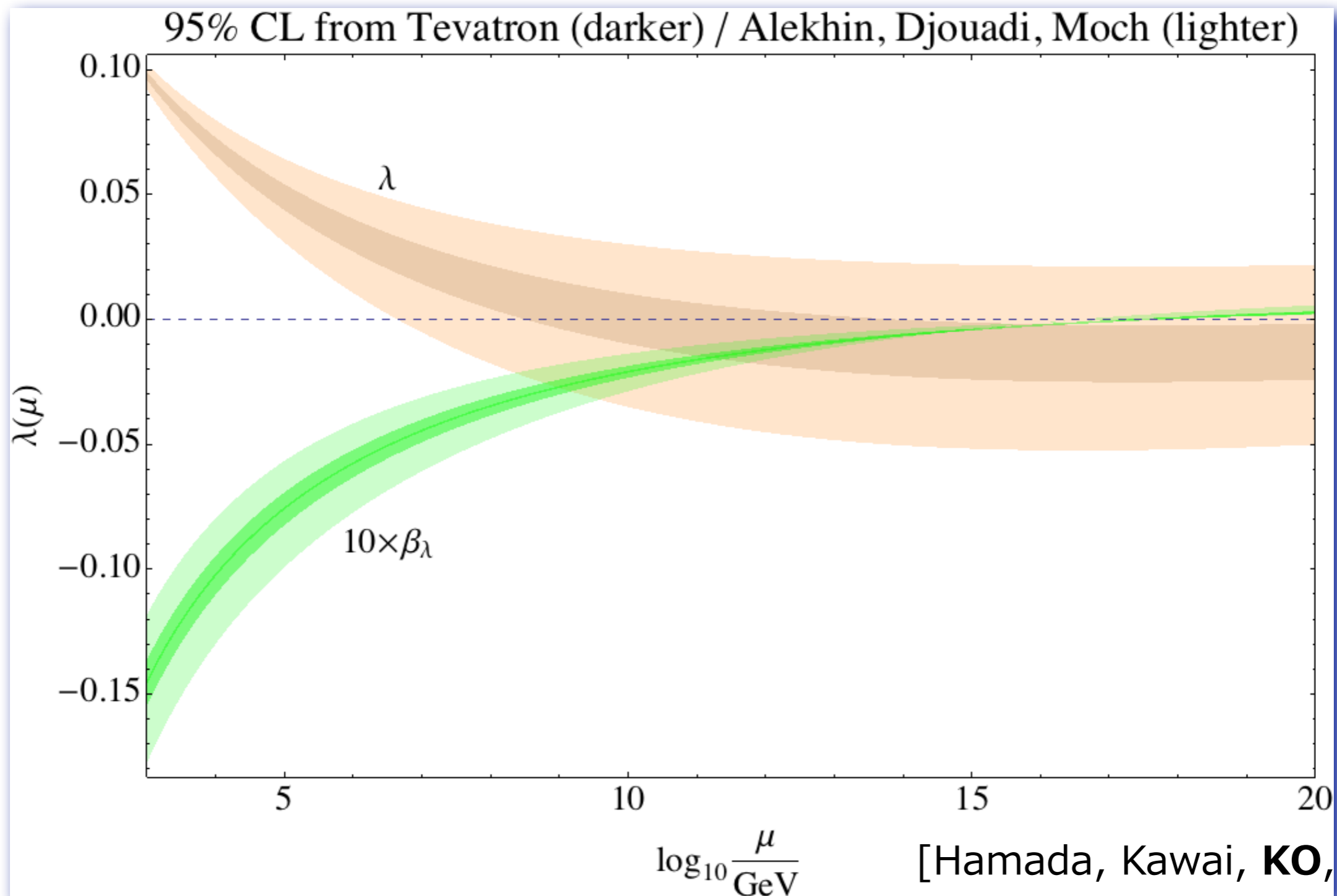
$$\mathcal{V}(\phi) = \alpha \phi^\dagger \phi + \beta (\phi^\dagger \phi)^2$$

$$\alpha < 0, \beta \geq 0$$

Peter Higgs

# 真空の不安定性

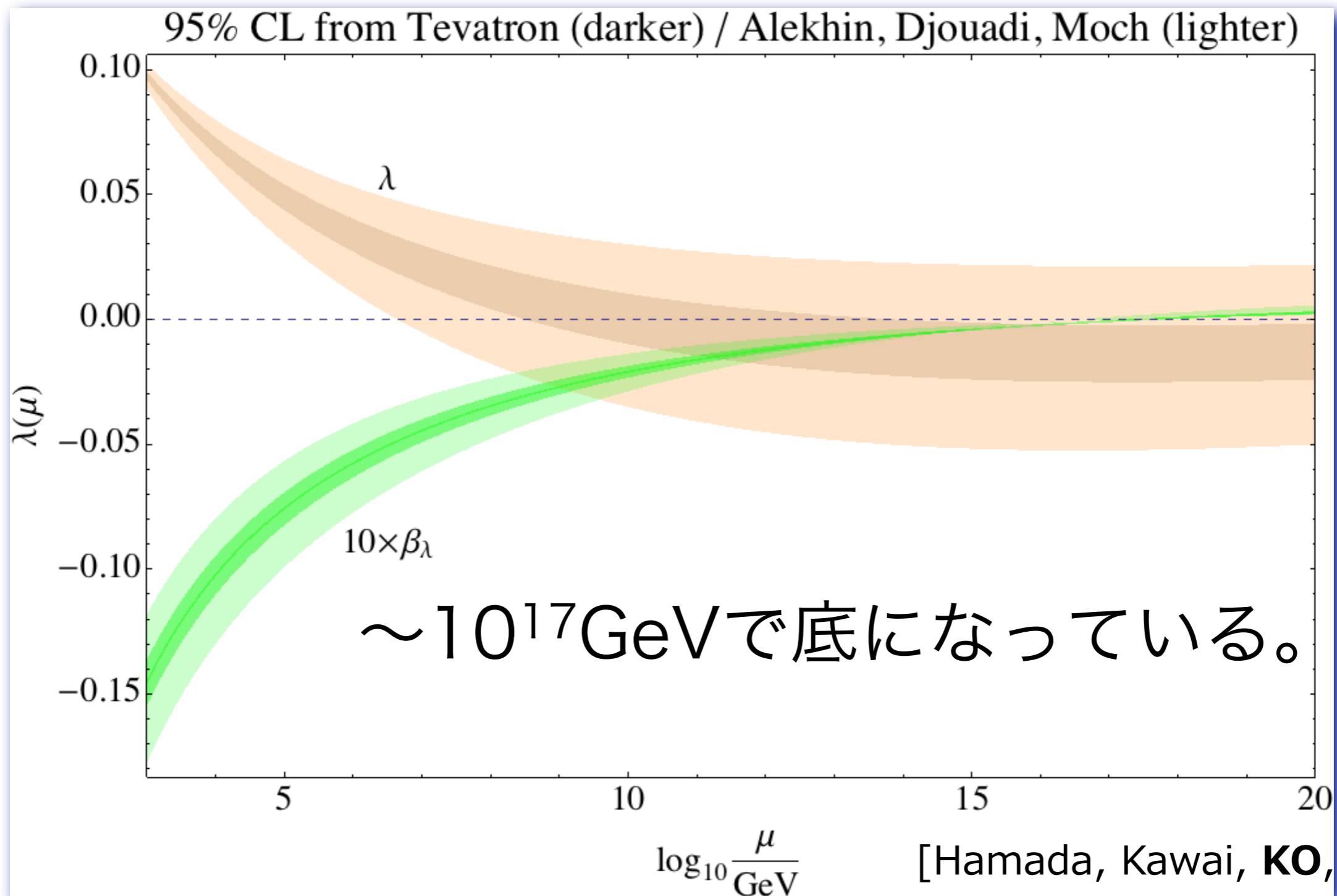
- $V = \lambda|\Phi|^4$  で  $\lambda < 0$  となると真空が不安定に。





# 真空の不安定性

- $V = \lambda|\Phi|^4$  で  $\lambda < 0$  となると真空が不安定に。



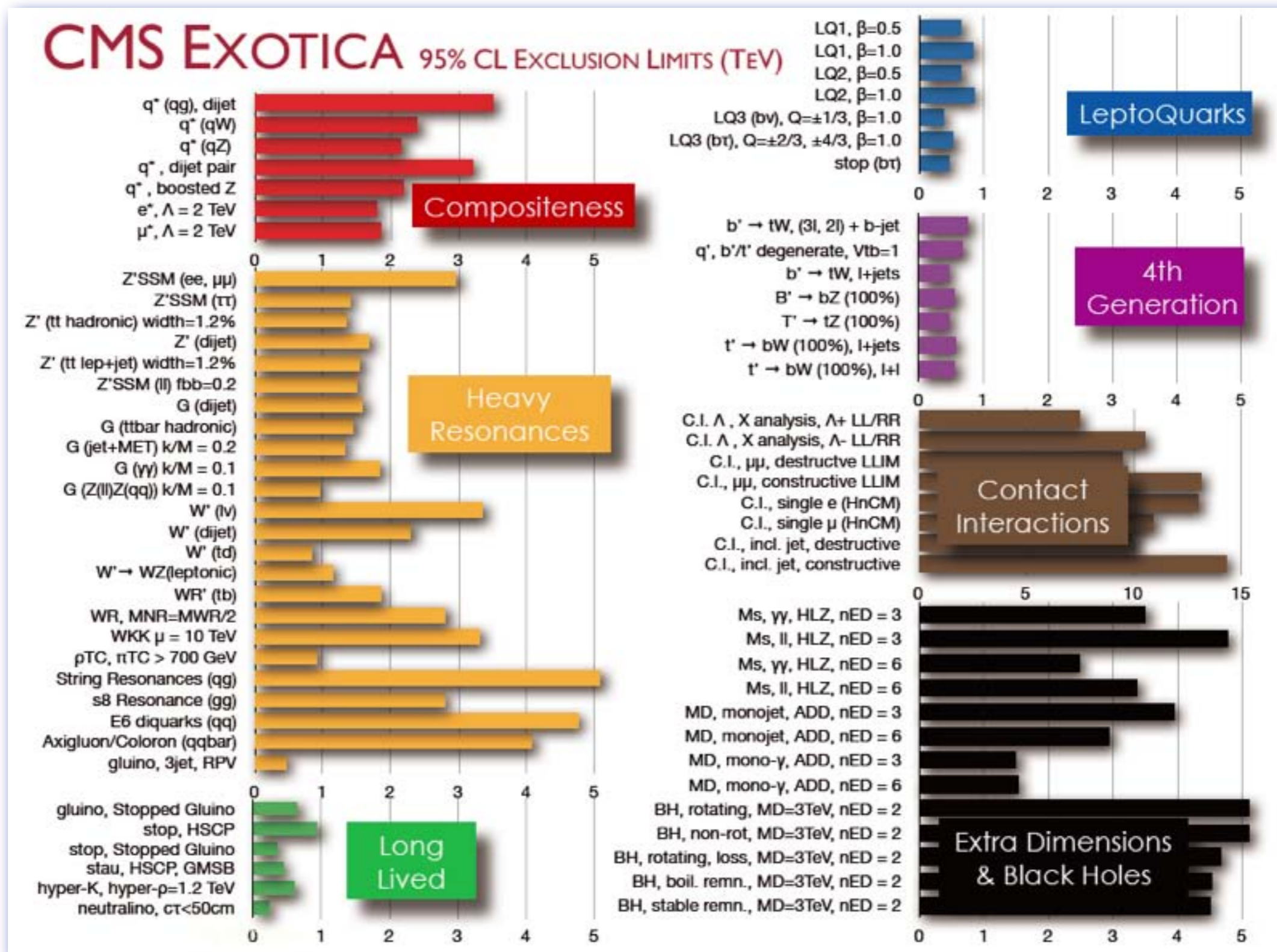
# Plan

1. 標準模型を超える必然性は、ある。
2. **でも wishful thinking はやめよう。**
3. 最悪でも、**top と Higgs の精査で**  
**高スケール**が探れる。

# LHCの教訓

- ないものは、ない。

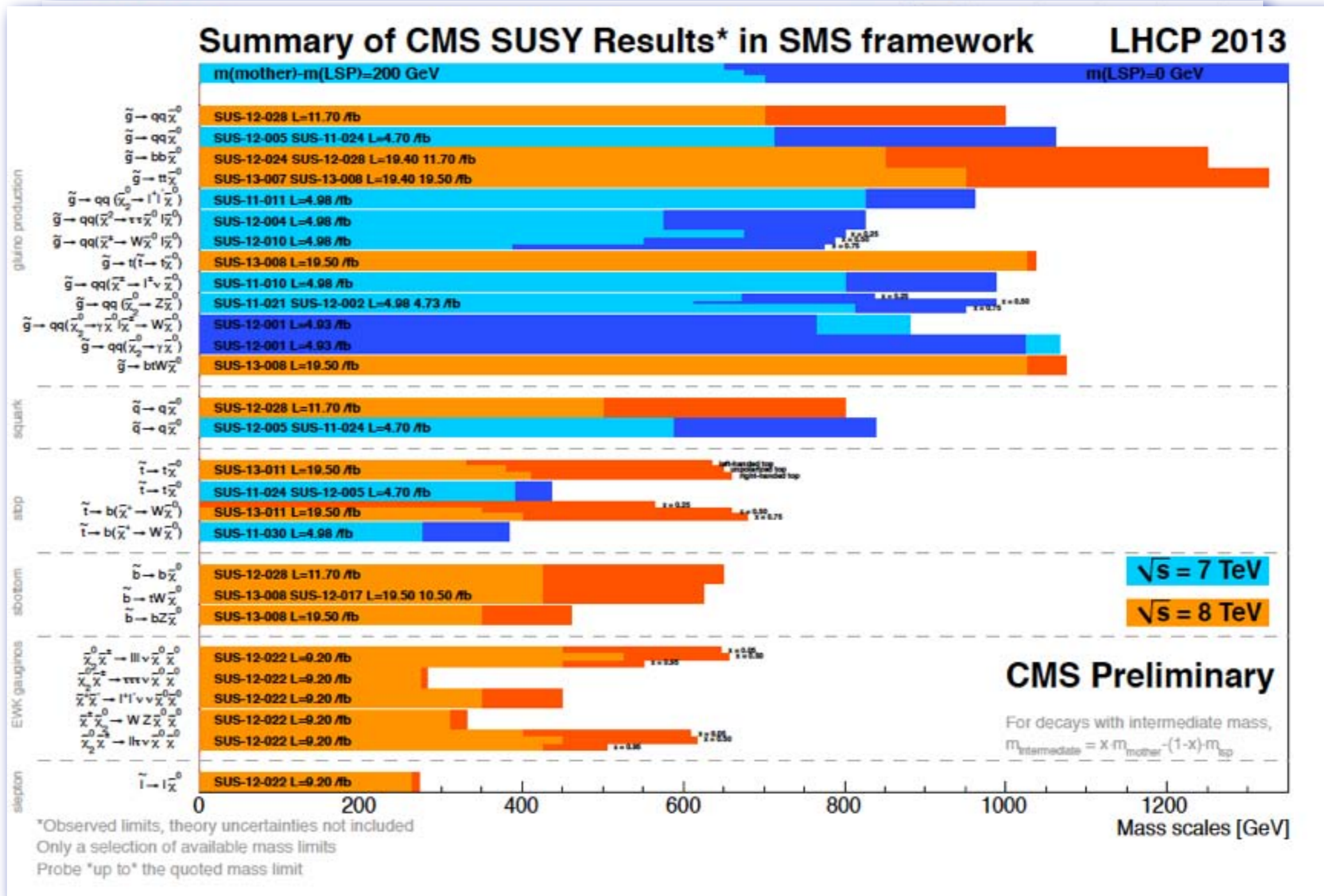
[J. P. Chou, Moriond 2013; CMS, LHCP2013]



# LHCの教訓

- ないものは、ない。

[J. P. Chou, Moriond 2013; CMS, LHCP2013]



# LHCの教訓

- ないものは、ない。

[J. P. Chou, Moriond 2013; CMS, LHCP2013]

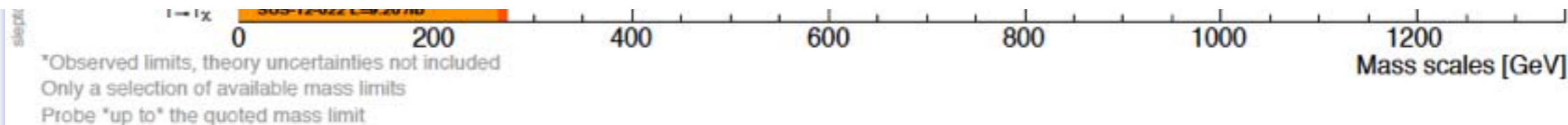
Summary of CMS SUSY Results\* in SMS framework

LHCP 2013

$m(\text{mother})-m(\text{LSP})=200 \text{ GeV}$

$m(\text{LSP})=0 \text{ GeV}$

- 私が駆け出しの頃は



# LHCの教訓

- ないものは、ない。

[J. P. Chou, Moriond 2013; CMS, LHCP2013]

Summary of CMS SUSY Results\* in SMS framework

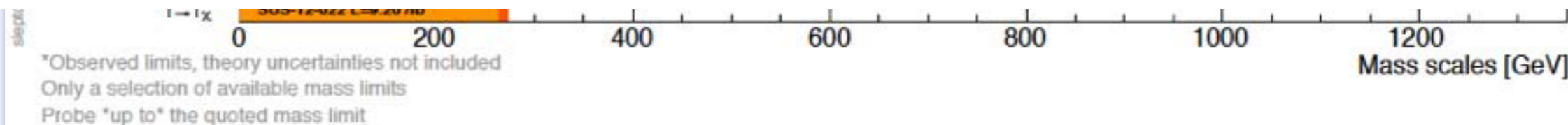
LHCP 2013

$m(\text{mother})-m(\text{LSP})=200 \text{ GeV}$

$m(\text{LSP})=0 \text{ GeV}$

- 私が駆け出しの頃は

★ SUSYやってない人 = ちょっとおかしい人。



# LHCの教訓

- ないものは、ない。

[J. P. Chou, Moriond 2013; CMS, LHCP2013]

Summary of CMS SUSY Results\* in SMS framework

LHCP 2013

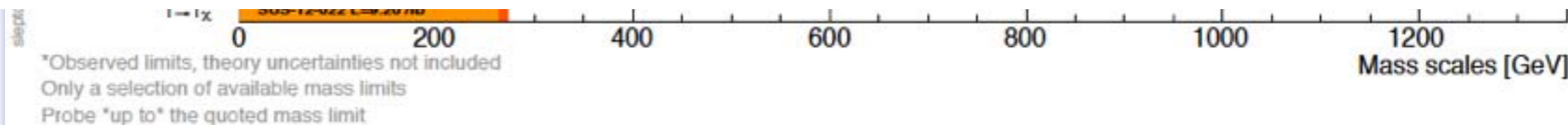
$m(\text{mother})-m(\text{LSP})=200 \text{ GeV}$

$m(\text{LSP})=0 \text{ GeV}$

- 私が駆け出しの頃は

★ SUSYやってない人 = ちょっとおかしい人。

★ 現象論の一番でかい国際会議の名前が SUSY。



# LHCの教訓

- ないものは、ない。

[J. P. Chou, Moriond 2013; CMS, LHCP2013]

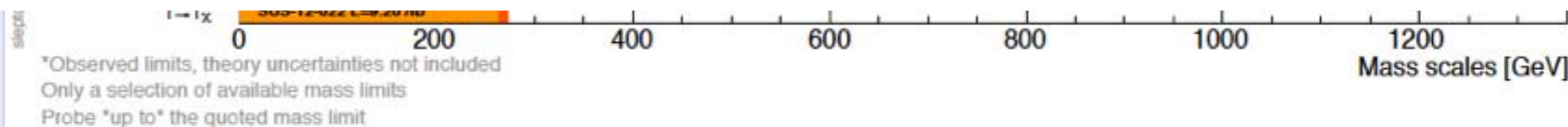
Summary of CMS SUSY Results\* in SMS framework

LHCP 2013

$m(\text{mother}) - m(\text{LSP}) = 200 \text{ GeV}$

$m(\text{LSP}) = 0 \text{ GeV}$

- 私が駆け出しの頃は
  - ★ SUSYやってない人 = ちょっとおかしい人。
  - ★ 現象論の一番でかい国際会議の名前が SUSY。
- 今や SUSY 会議で non-SUSY session が。





# LHCの教訓

- ないものは、ない。

[J. P. Chou, Moriond 2013; CMS, LHCP2013]

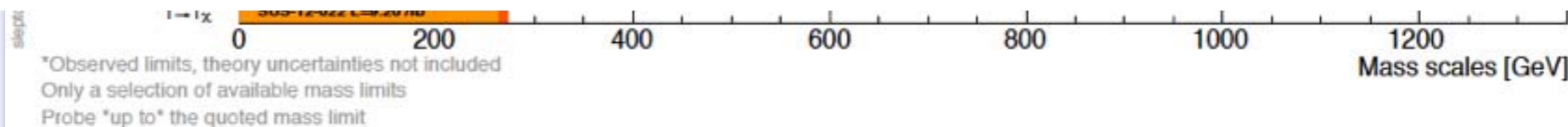
Summary of CMS SUSY Results\* in SMS framework

LHCP 2013

$m(\text{mother})-m(\text{LSP})=200 \text{ GeV}$

$m(\text{LSP})=0 \text{ GeV}$

- 私が駆け出しの頃は
  - ★ SUSYやってない人 = ちょっとおかしい人。
  - ★ 現象論の一番でかい国際会議の名前が SUSY。
- 今や SUSY 会議で non-SUSY session が。
- ていうか、SUSY のみならず BSM の示唆が、LHCから一切、出てきていない。



# Motivation?

- その模型の動機は？
  - ★ 「今まで考えられていたのとこういう点で違う現象が出ます」
- 別に自然は我々に面白い現象をみせてくれようとして、在るわけではない。
- 理論屋が現象のためだけに模型を作っても、**どうせすぐ死ぬ**時代。
- **必然性**を前より真剣に考えたほうが。

# Plan

1. 標準模型を超える必然性は、ある。
2. でも wishful thinking はやめよう。
3. 最悪でも、**top** と **Higgs** の精査で  
**高スケール**が探れる。

そもそもそもそも何故  
SUSY がある  
と想っていたのか？

# 階層性“問題”

- $m_R^2 = m_B^2 + (\lambda + \dots) \Lambda^2 / 16\pi^2.$

繰込質量

裸質量

輻射補正



- $(100\text{GeV})^2 = (10^{18}\text{GeV})^2 - (10^{18}\text{GeV})^2?$

- 超対称性があると:

- ★ トップの輪をスカラー・トップが、等々、ぜんぶ相棒が相殺。

- ★  $\Lambda^2$  が **SUSY の破れのスケール** に置き換わる。

- TeVまでになかったので、**引き算問題が再浮上**。

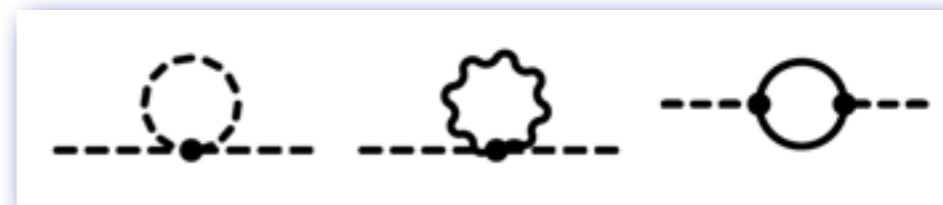
# 二次発散おさらい

- $m_R^2 = m_B^2 + (\lambda + \dots) \Lambda^2 / 16\pi^2.$

繰込質量

裸質量

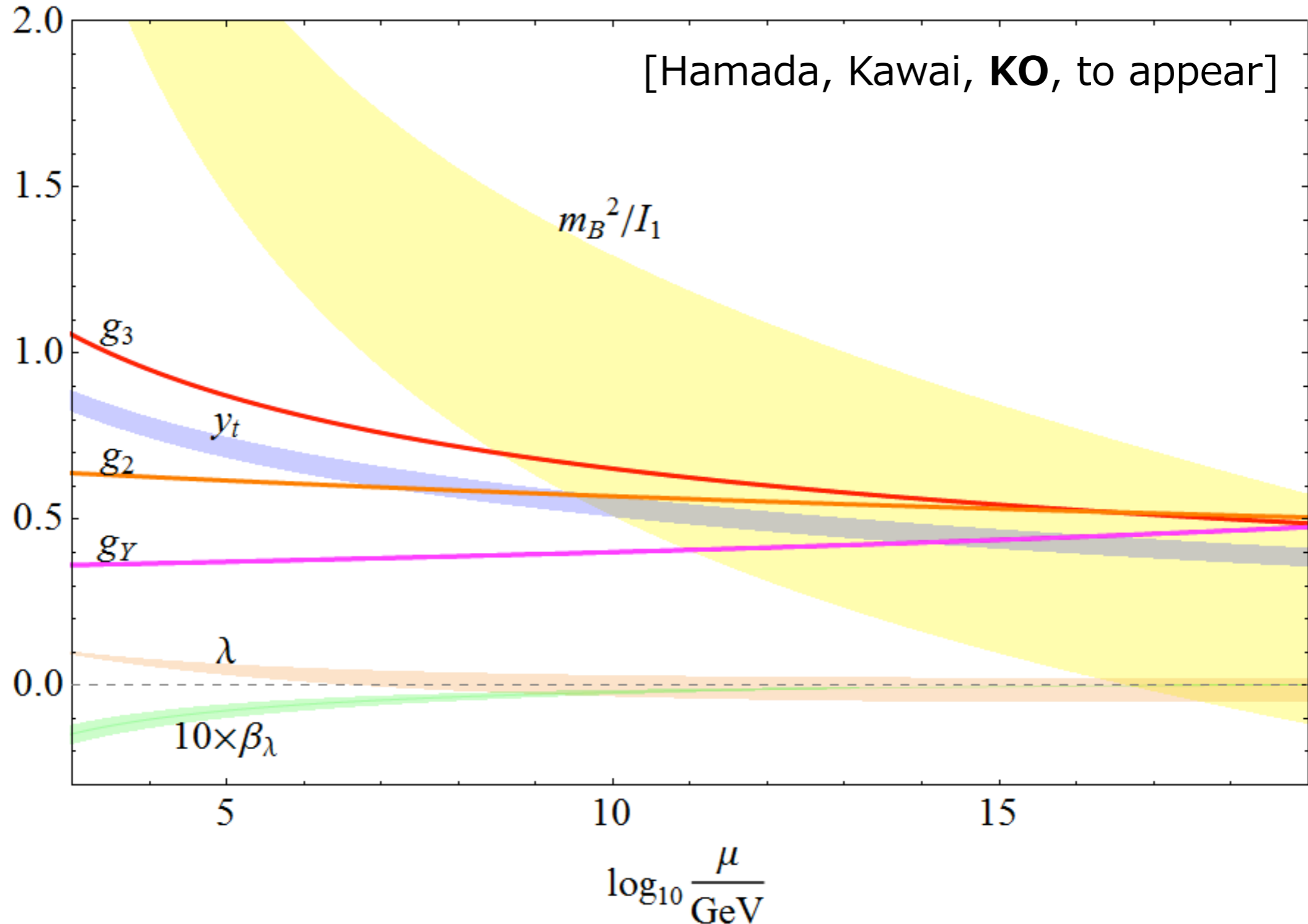
輻射補正



この係数が大事。

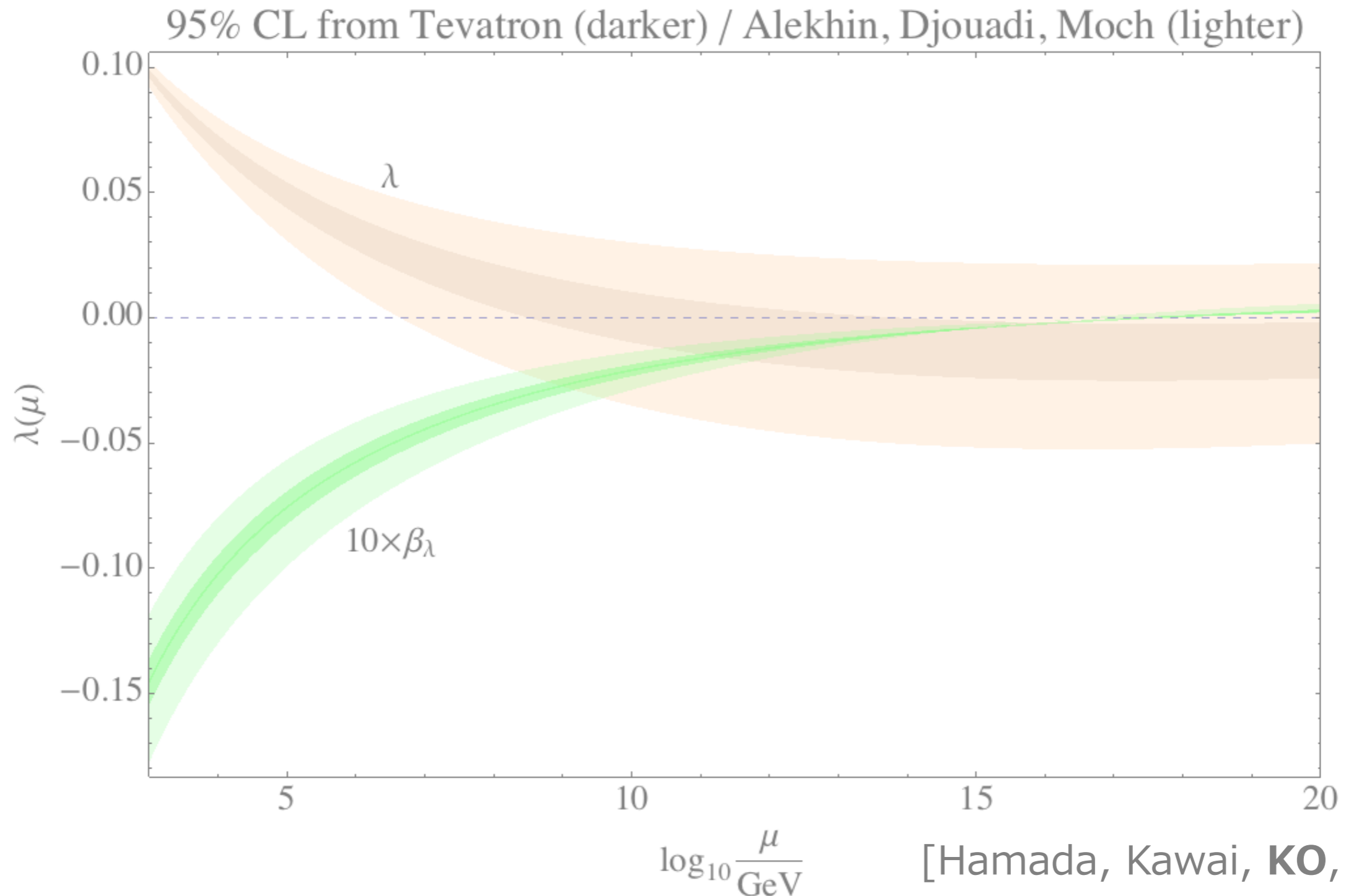
# 裸の質量

- 裸の質量も  $> \sim 10^{17} \text{ GeV}$  で消えているようにみえる。



# トップとヒッグスが窓

- $V = \lambda|\Phi|^4$  で  $\lambda < 0$  となると真空が不安定に。

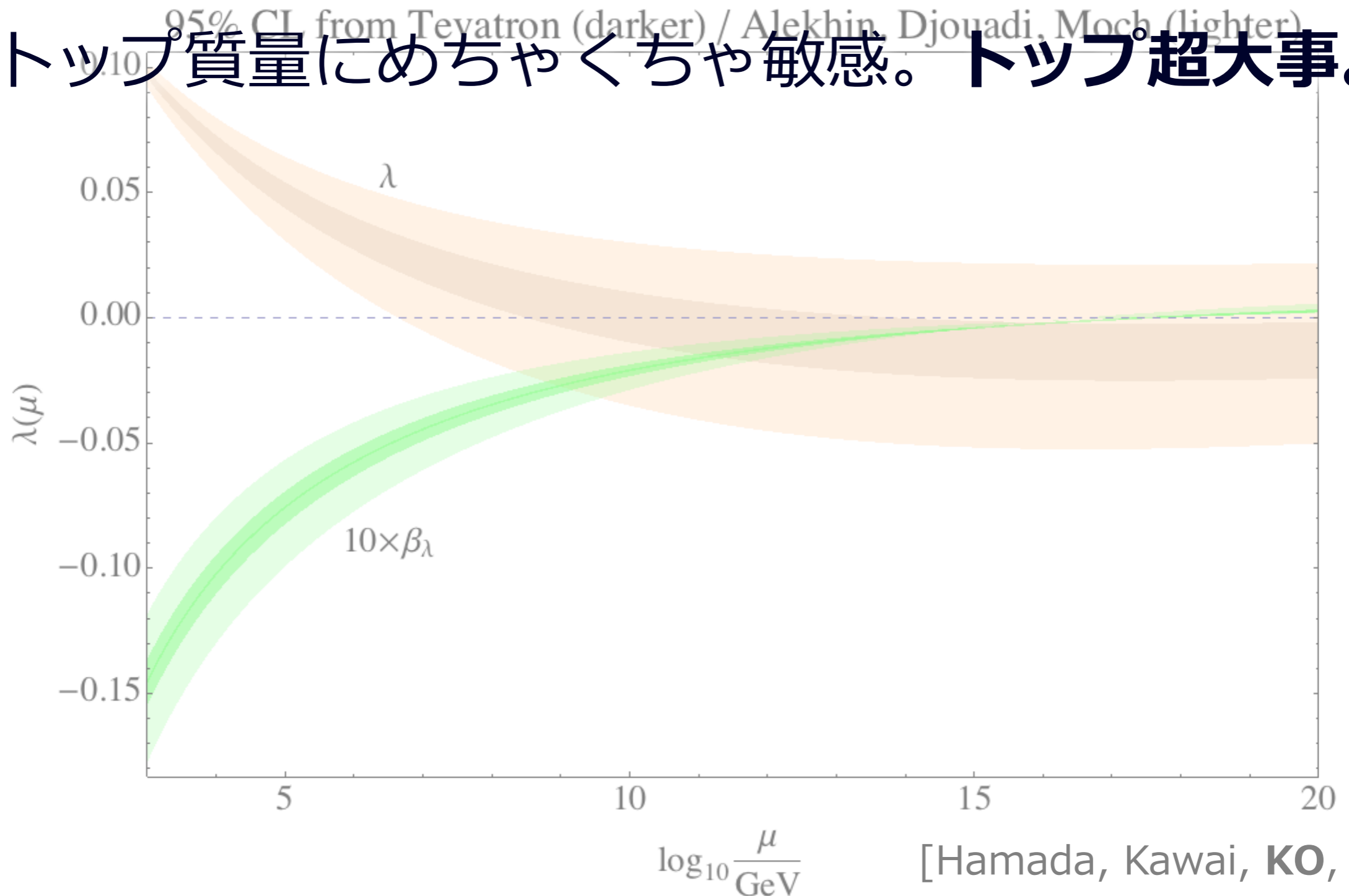




# トップとヒッグスが窓

- $V = \lambda|\Phi|^4$  で  $\lambda < 0$  となると真空が不安定に。

- 95% CL from Tevatron (darker) / Alekhin, Djouadi, Moch (lighter)  
トップ質量にめちゃくちゃ敏感。トップ超大事。

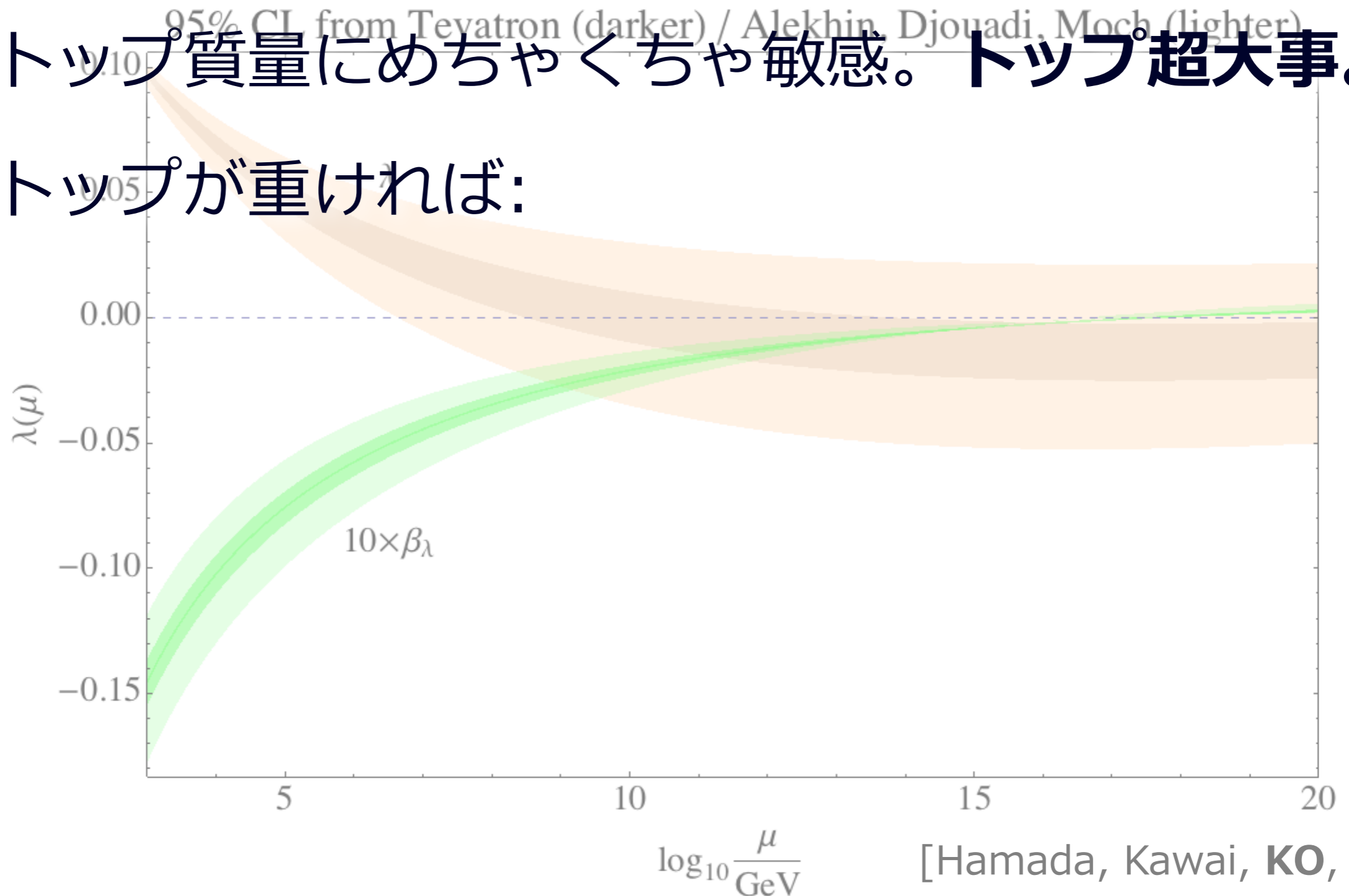


# トップとヒッグスが窓

- $V = \lambda|\Phi|^4$  で  $\lambda < 0$  となると真空が不安定に。

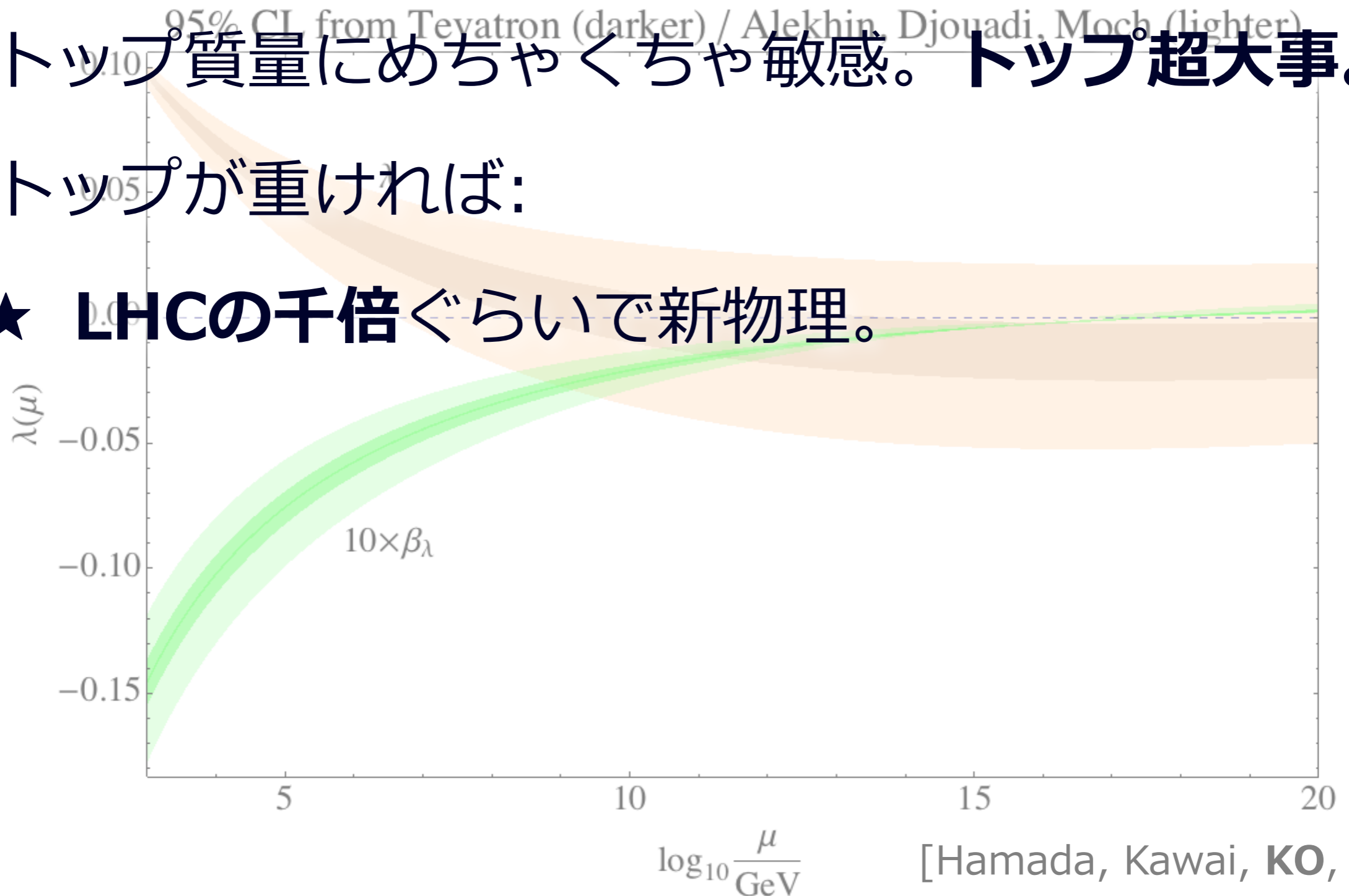
- トップ質量にめちゃくちゃ敏感。トップ超大事。

- トップが重ければ:



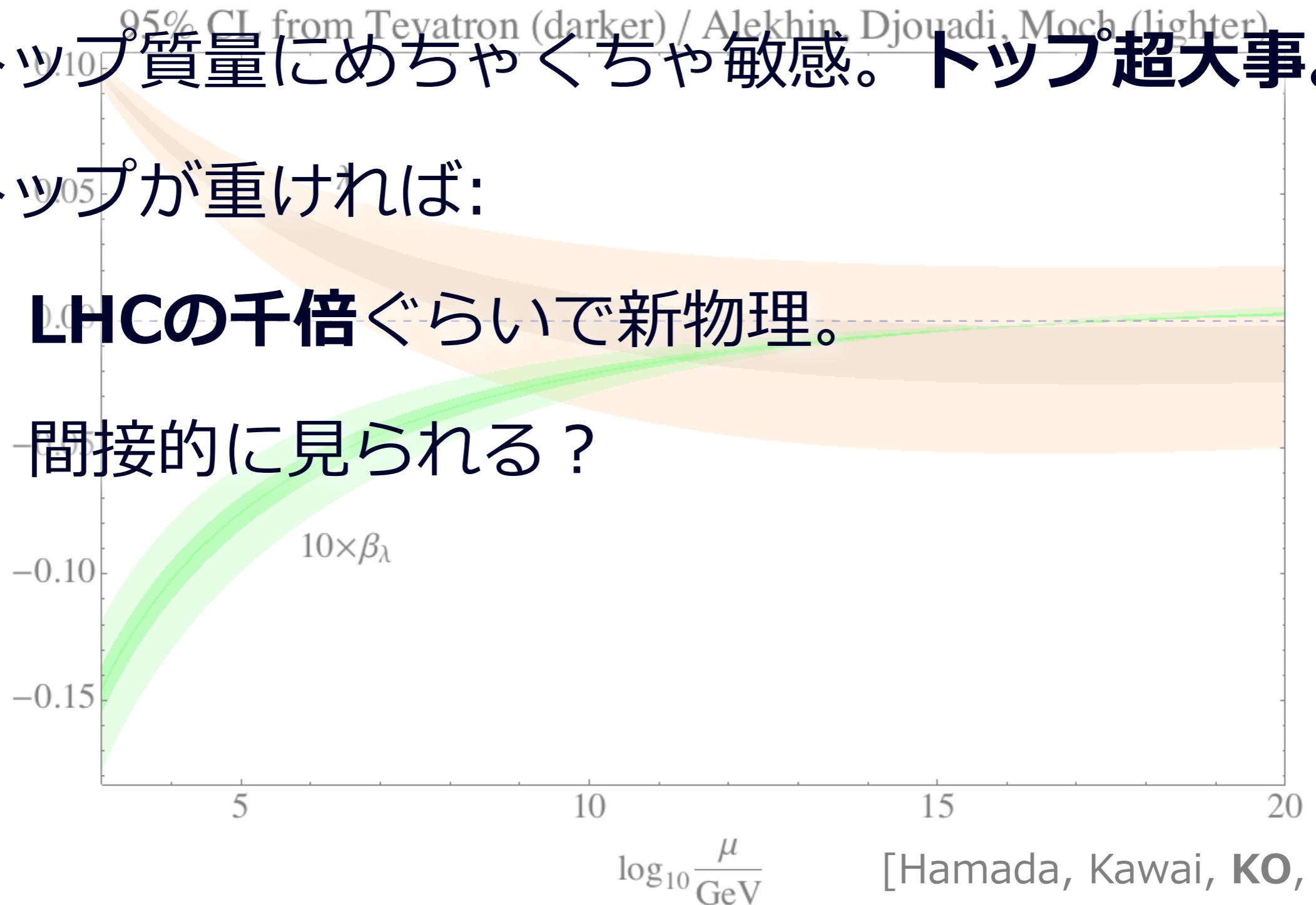
# トップとヒッグスが窓

- $V = \lambda|\Phi|^4$  で  $\lambda < 0$  となると真空が不安定に。
- トップ質量にめちゃくちゃ敏感。トップ超大事。
- トップが重ければ:
  - ★ **LHCの千倍ぐらいいで新物理。**



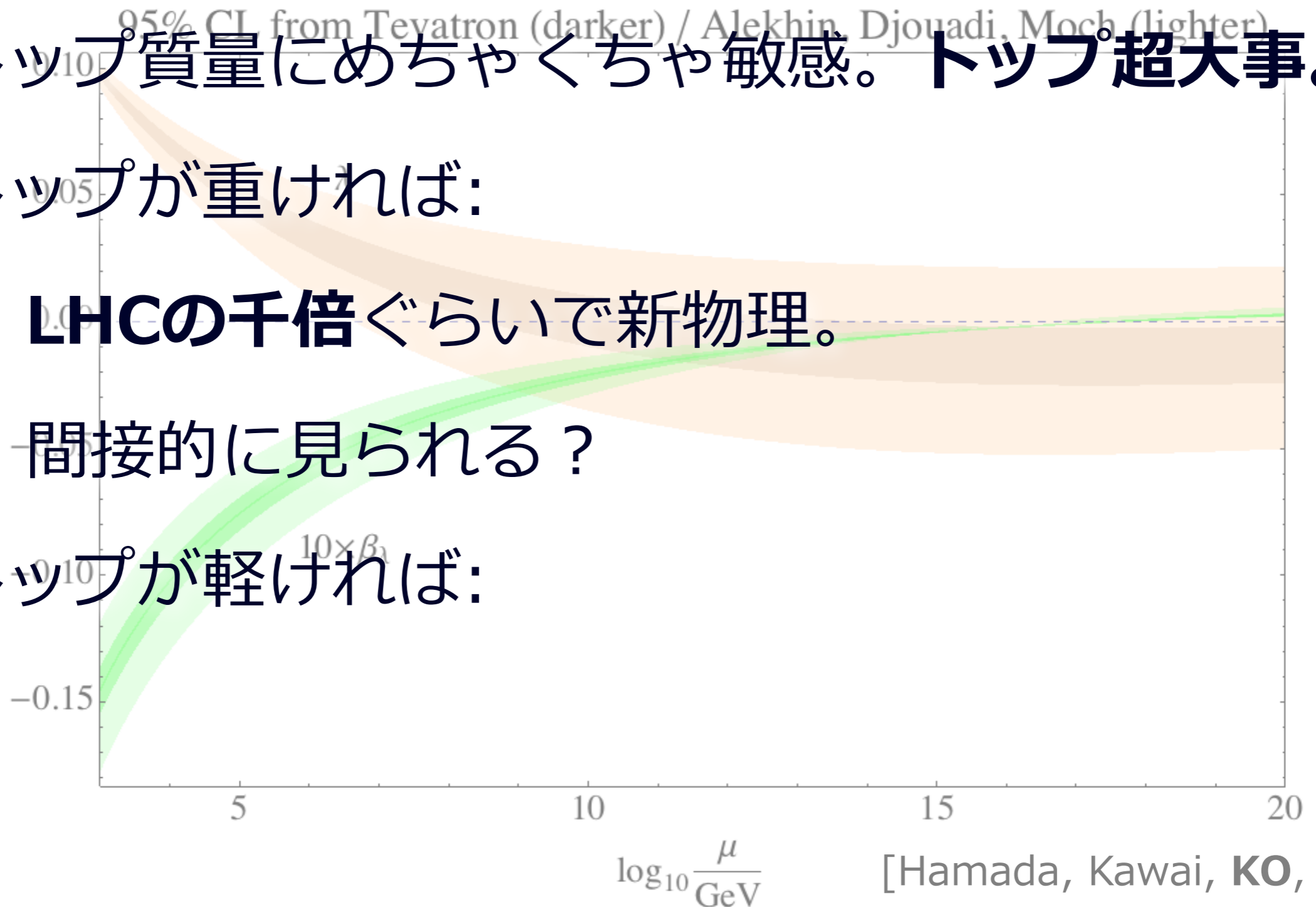
# トップとヒッグスが窓

- $V = \lambda|\Phi|^4$  で  $\lambda < 0$  となると真空が不安定に。
- トップ質量にめちゃくちゃ敏感。トップ超大事。
- トップが重ければ:
  - ★ LHCの千倍ぐらいで新物理。
  - ★ 間接的に見られる？



# トップとヒッグスが窓

- $V = \lambda|\Phi|^4$  で  $\lambda < 0$  となると真空が不安定に。
- トップ質量にめちゃくちゃ敏感。トップ超大事。
- トップが重ければ:
  - ★ LHCの千倍ぐらいで新物理。
  - ★ 間接的に見られる？
- トップが軽ければ:



# トップとヒッグスが窓

- $V = \lambda|\Phi|^4$  で  $\lambda < 0$  となると真空が不安定に。

- トップ質量にめちゃくちゃ敏感。トップ超大事。

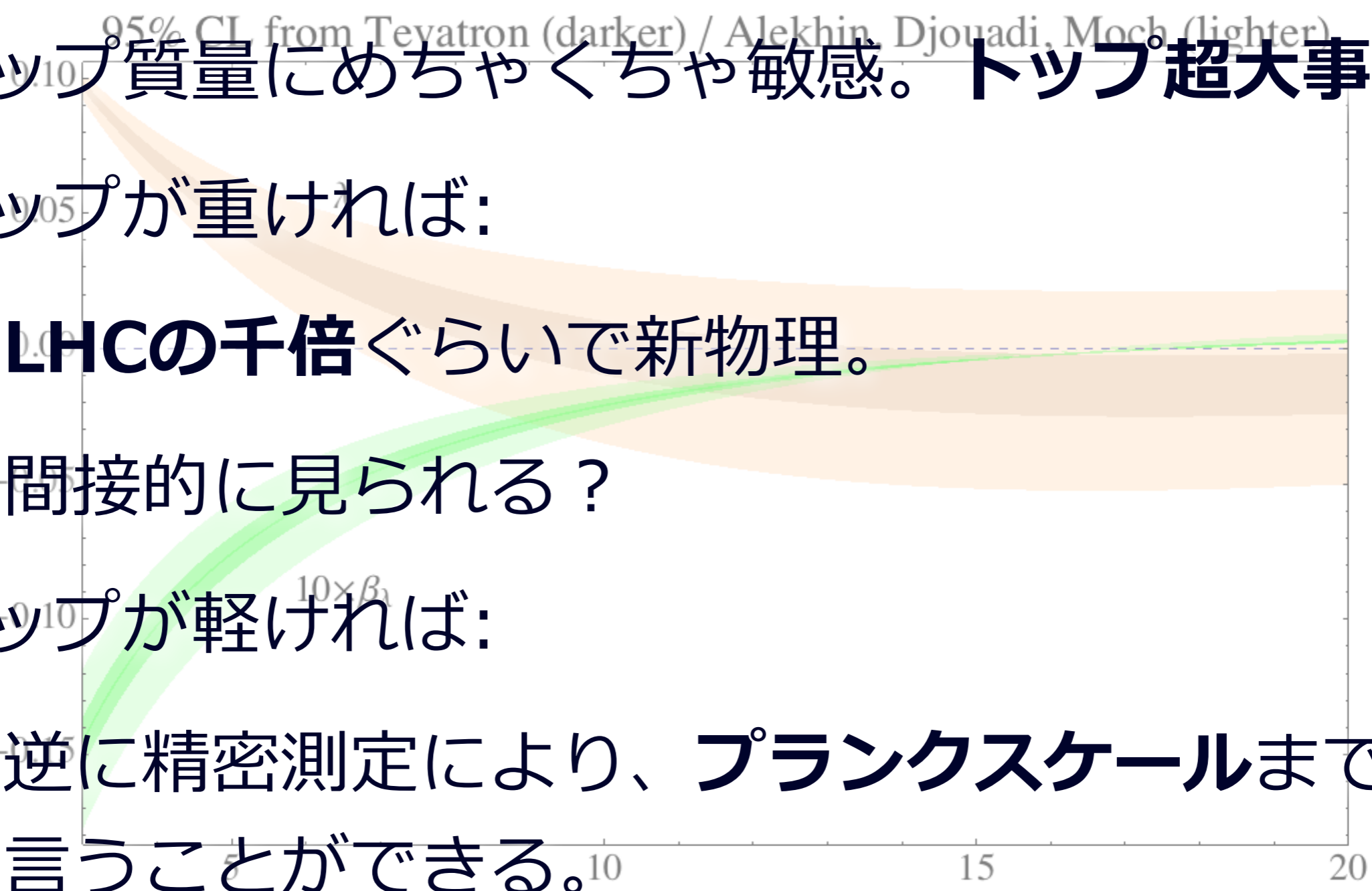
- トップが重ければ:

★ LHCの千倍ぐらいで新物理。

★ 間接的に見られる?

- トップが軽ければ:

★ 逆に精密測定により、プランクスケールまで物言いうことができる。



# まとめ

1. 標準模型を超える必然性は、ある。
2. でも **wishful thinking** はやめよう。
3. 最悪でも、**top** と **Higgs** の精査で  
高スケールが探れる。

# Thank you!

