

素粒子物理のこれから

岡田安弘 (KEK)

仁科加速器研究センターコロキウム

国際リニアコライダー計画 ～設計から実現へ～

2014年11月10日(月)

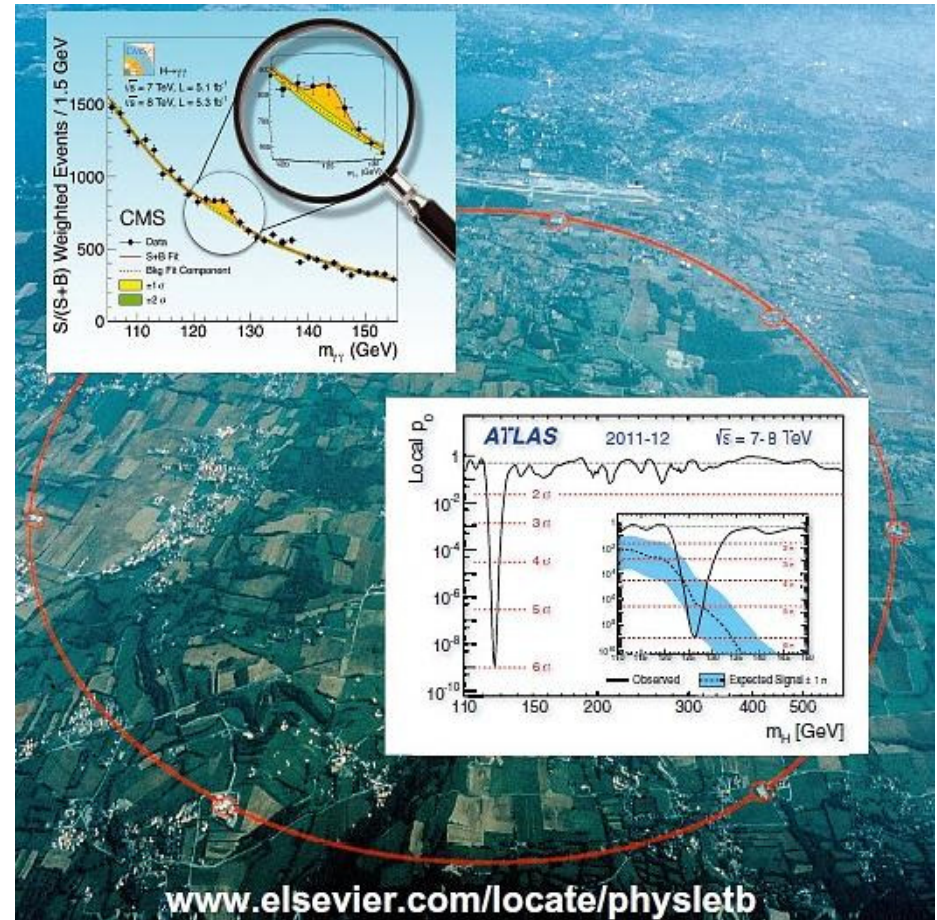
理化学研究所 仁科ホール

ヒッグス粒子の発見

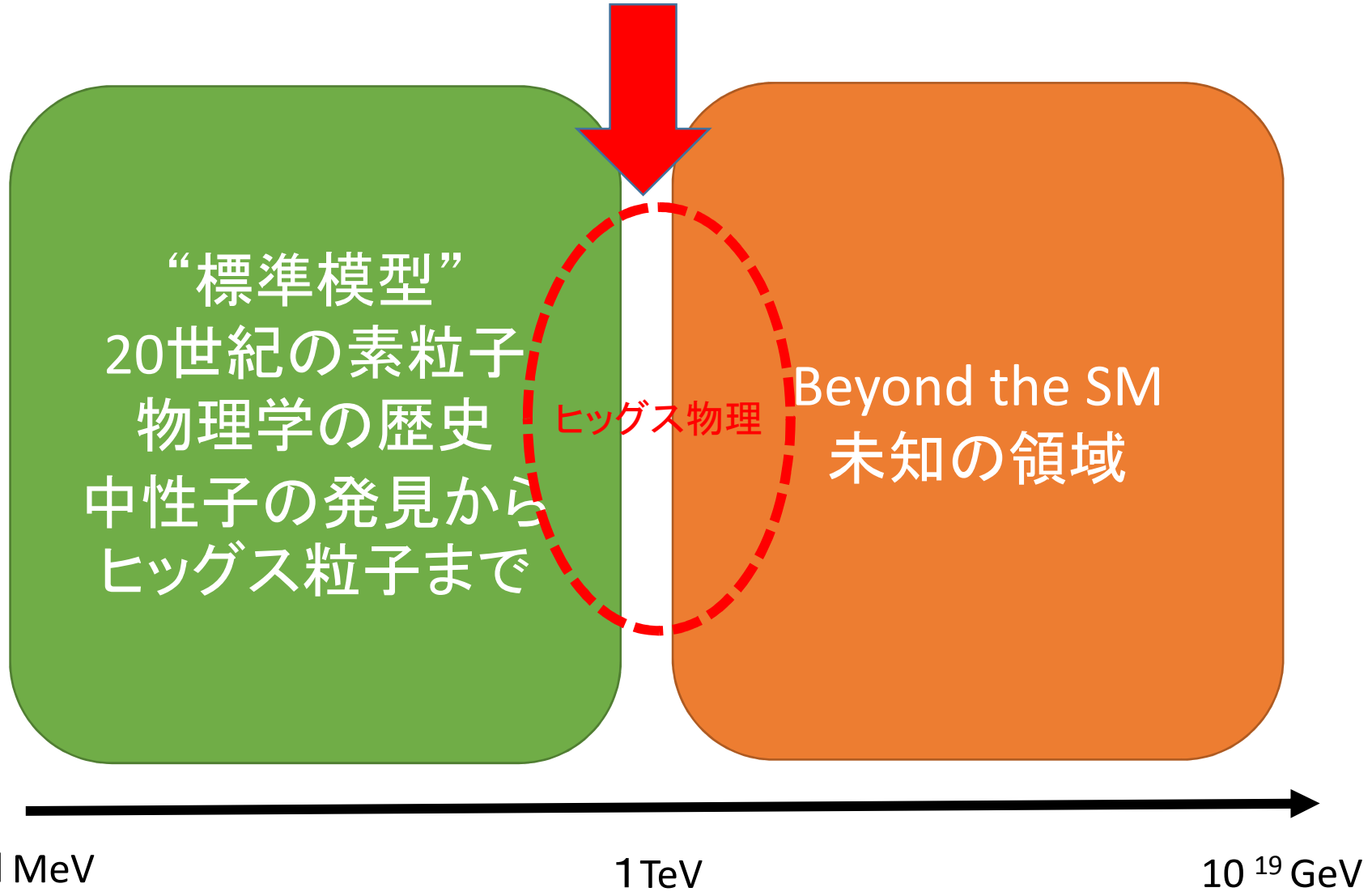
2012年7月4日
CERNから新粒子発見の報告
素粒子物理の画期的発見

20年に及ぶ準備、
事実上の世界プロジェクトの成果

125GeV 付近に新粒子

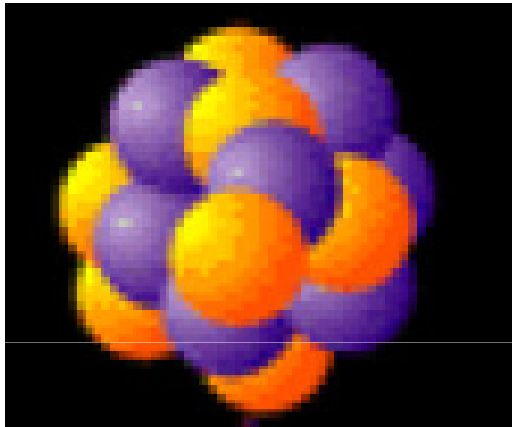


ヒッグス粒子の発見



1930年代:二つの相互作用の導入

MeV スケールの世界



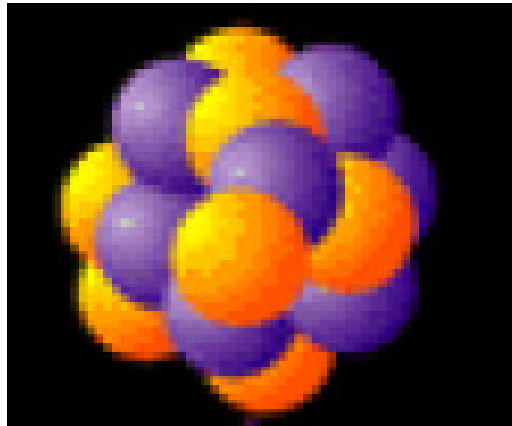
中性子の発見 (1932年)

強い相互作用(核力)と
弱い相互作用の導入

中性子と陽子を結び付け原子核を作る力が必要
原子核のbeta崩壊は原子核中にもともと入っていた電子が出てきたのではない

=>20世紀の素粒子物理学はこの二つの新しい力をどのように理解するかを中心に発展した

強い相互作用

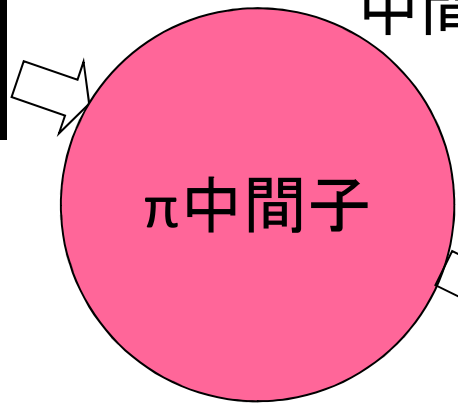


中性子の発見

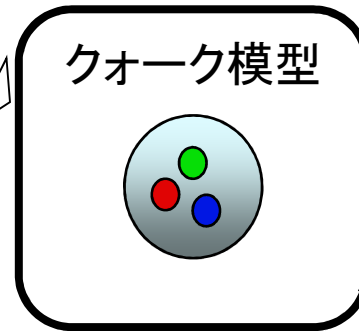
湯川中間子論(1934年)

核力

中間子発見(1947年)

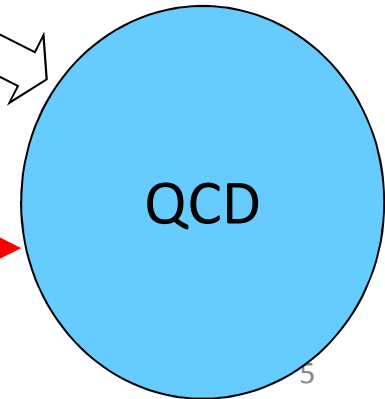


1960年代



ゲージ理論

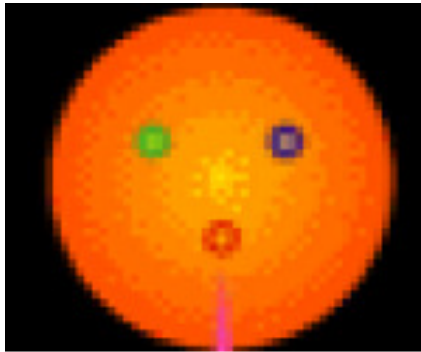
自発的対称性の破れ



南部陽一郎

1970年代: 標準模型の提唱

GeVスケールの世界



クォークとレプトンを同じレベルの基本粒子と考えると、強い相互作用も弱い相互作用も電磁相互作用と本質的な違いはない。(ゲージ理論)

The Fermi constant The Higgs VEV

$$G_F = \frac{1}{\sqrt{2}v^2}$$

Nambu's Symmetry Breaking

Elementary Particles

Quarks	<i>u</i> up	<i>c</i> charm	<i>t</i> top	<i>g</i> gluon	Force Carriers
	<i>d</i> down	<i>s</i> strange	<i>b</i> bottom		
Leptons	<i>ν_e</i> <i>e</i> neutrino	<i>ν_μ</i> <i>μ</i> neutrino	<i>ν_τ</i> <i>τ</i> neutrino	<i>W</i> <i>W</i> boson	
	<i>e</i> electron	<i>μ</i> muon	<i>τ</i> tau	<i>Z</i> <i>Z</i> boson	
3 →	I	II	III	← Generations	

ただし、電弱理論には一つだけ新しい要素を導入することが必要

弱い相互作用が近距離力にするためには、弱い相互作用の媒介粒子(W,Zボソン)に質量を与える必要がある。

ヒッグスセクターの導入
(3つの基本相互作用とは別物)

それ以降の基本的な質問

(1) このストーリーは本当なのか

ゲージ原理 + 自発的対称性の破れ \Rightarrow 素粒子の質量生成

(2) 自発的対称性の破れの背後の新物理は何か

新しい強い力？
新しい対称性？
重力との統一理論？

最初に見えるシグナルは何か？

スカラー粒子 (600 GeV 以下)
高エネルギー WW 散乱振幅の上昇
ベクターレゾナンス

ヒッグス粒子の発見

No-lose theorem (1970年代末から)

- TeVスケールには必ず、ヒッグス粒子が見つかるか、電弱対称性破れに関する別のシグナルが見つかる。
- LHC では電弱対称性の破れに関する手掛かりが必ず何か得られる。

⇒ 125GeV 付近 に A Higgs boson を発見

(1) の質問を解明する手法を確立

⇒ ヒッグス粒子は重い素粒子に強く結合する

(2) の質問を探る手がかり

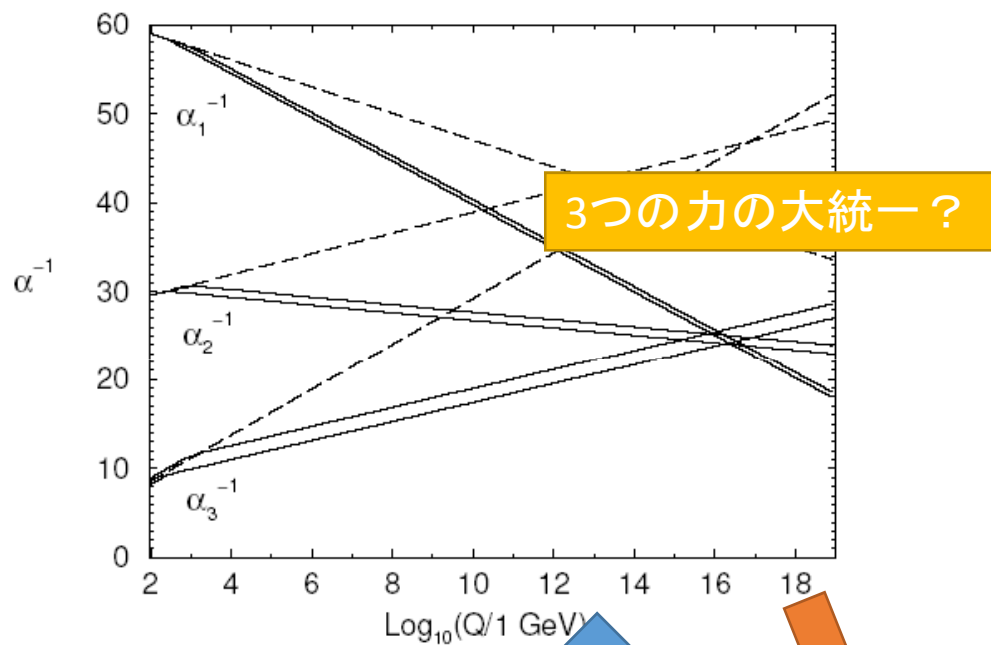
ヒッグス粒子は TeV 物理を探る道具

- 全く異なる考え方に基づくモデルでも、最初に見つかる粒子はいわゆる標準模型的なヒッグス粒子であることが多くある。
- TeV 物理を探るには、まずヒッグス粒子という道具について良く知らなければならぬ。

ヒッグス粒子は弱い相互作用にとっての“湯川中間子”のような存在ではないか

高いエネルギーへの外挿からの手がかり

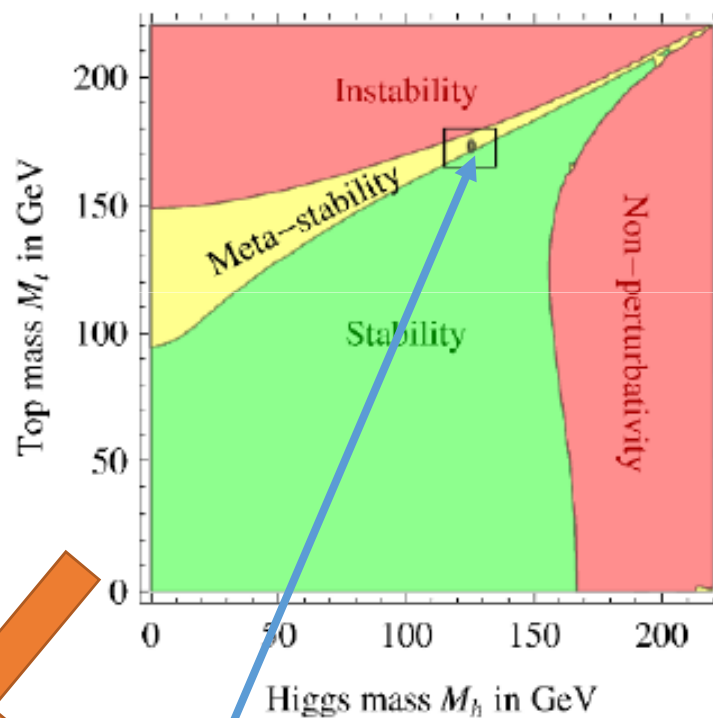
もし、超対称性があれば



シーソーニュートリノ?
=> leptogenesis?

超弦理論

もし、Planck scale まで標準模型の
粒子しか出てこなければ

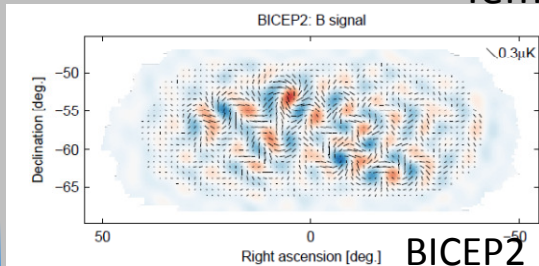


宇宙はmeta-stable 状態にある?

G.Degrassi, et al. arXiv : 1205.6497

宇宙論からの手がかり

CMB B mode



Temperature

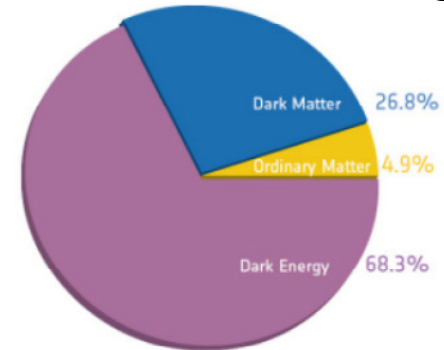
Big bang

インフレーション

重力とスカラー場の世界

Not yet well understood

Dark matter, Dark energy



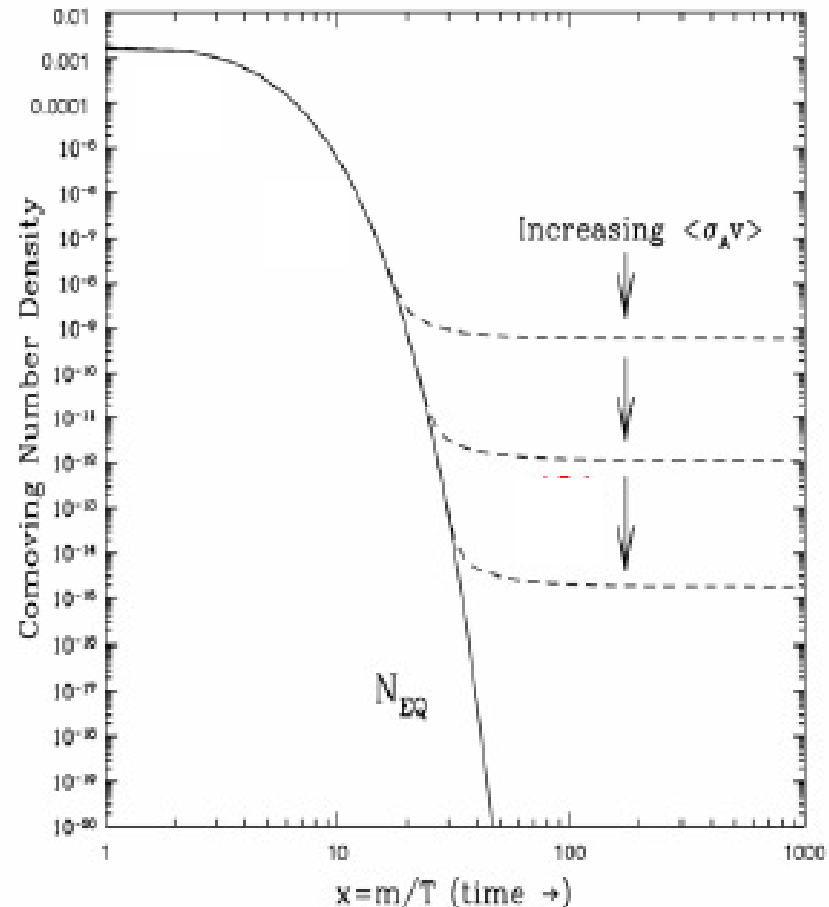
After Planck Planck HP

宇宙のバリオン数生成

Time

WIMP Dark Matter

- 高温で熱平衡にあったWIMPは、宇宙が冷えるとともに対消滅。ある温度で対消滅の相互作用が凍結する。
- 対消滅の断面積が大きいほどWIMPの残存量は少ない。
- WIMPの候補
 - SUSY 模型のneutralino
 - Kaluza-Klein 模型のKK-photon
 - Little Higgs 模型のheavy photonなど。
- TeV ぐらいの質量だと大体残存量があう。
- ただし、Axion 等別の可能性もあり



宇宙のバリオン数生成

現在の宇宙のバリオン数とエントロピーの比 (10^{-10})を説明することは、素粒子物理と宇宙論に課せられた大きな課題のひとつ。

(1) バリオン数生成のための Sakharov の三条件 (1967)

バリオン数の破れ

C および CP 対称性の破れ

平衡過程からのずれ

(2) 大統一理論におけるバリオン数生成 (M.Yoshimura, 1978)

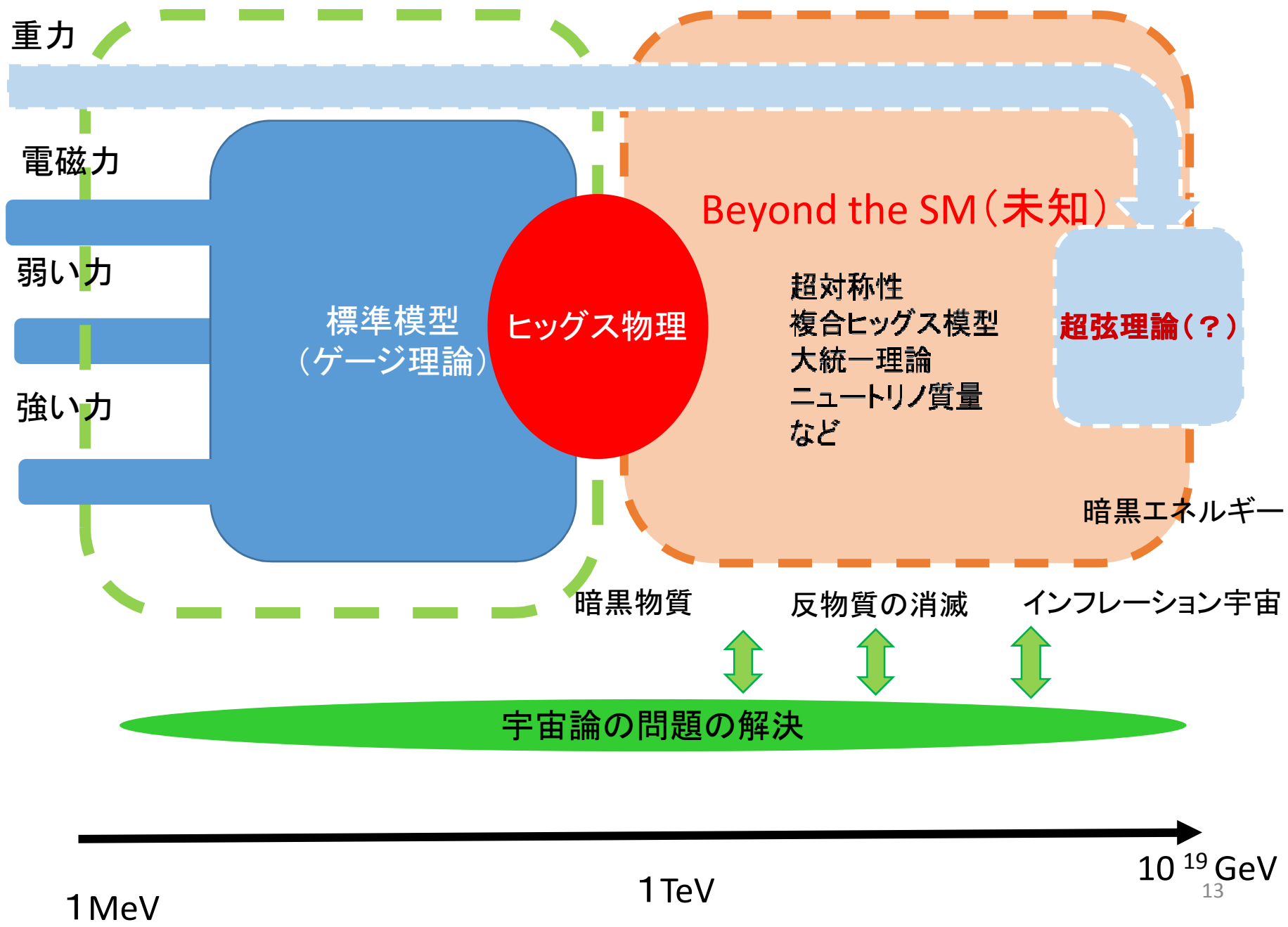
GUTにおけるバリオン数を破る相互作用を利用して宇宙のバリオン数生成を行うシナリオを提案。

(3) 高温での標準模型のバリオン数の破れ (V.A.Kuzmin, V.A.Rubakov, and M.E.Shaposhnikov, 1985)

量子異常によるバリオン数の破れの効果は電弱相転移温度(T_c)ぐらいに高温になると無視できなくなる。それによって 高温ではいつもバリオン数保存は破れている。ただし、バリオン数とレプトン数の差(B-L)は保存している。

2つの系統のシナリオ

1. 高温($T > T_c$)で B-L を作ってそれをバリオン数に転換する。
たとえば、Leptogenesis。
2. 電弱相転移でバリオン数を生成する。(Electroweak Baryogenesis)



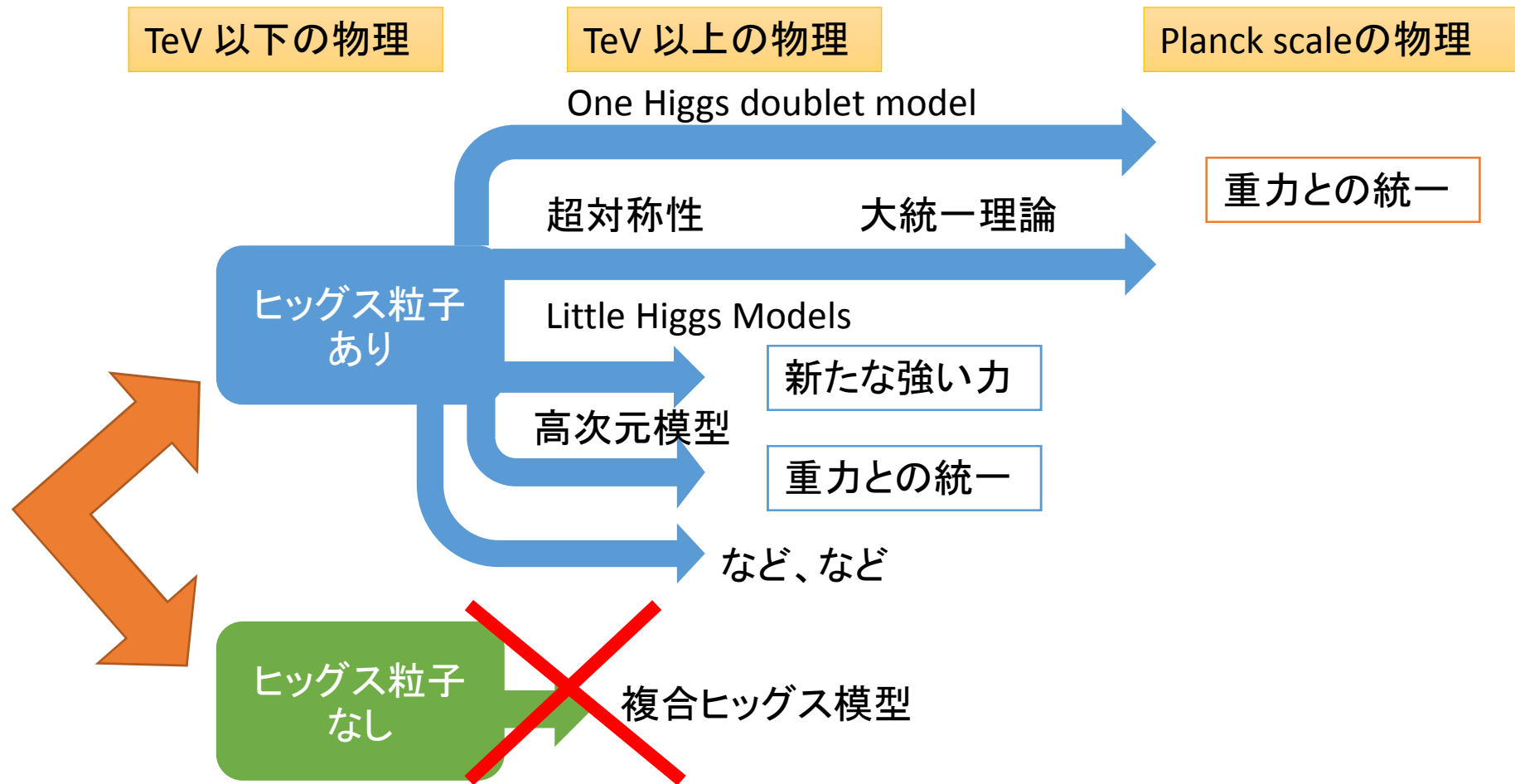
Beyond the SM の説明

- ヒッグス粒子の性質の精密測定
- エネルギーフロンティア実験 (LHC, ILC) における新粒子、新現象の観測
- フレーバー物理 (B, K, τ , μ など) や基本対称性の破れ (EDM、陽子崩壊など) によるBSMの効果の探索
- 暗黒物質探索
- ニュートリノ物理でマヨラナ性や3世代混合からのずれの探索

を組み合わせて探求

繰り込み可能なone Higgs doublet model では、Higgs boson の性質は、質量が決まれば完全に決まる。

ヒッグス粒子と Beyond the SM



ヒッグス場がどのような素粒子模型に組み込まれるかにより、ヒッグス粒子の性質に特徴が現れる。(質量、分岐比、高エネルギー散乱の振舞など)

超対称理論

少なくとも2ヒッグスダブルレット模型
MSSMの場合は125GeVを実現するには、ストップが重いか大きな混合を持つ

WIMPへの崩壊

暗黒物質

Higgs boson invisible decay

強い一次相転移

電弱相転移でのバリオン生成

ヒッグスポテンシャルの変更



Hはpseudo Nambu-Goldstone bosons の一部

Little Higgs Models

Non-renormalizable interaction
余分な表現のヒッグス場

様々なニュートリノの質量生成模型

様々なヒッグス場の表現
Triplet Higgs
Radiative neutrino mass generation
Left-right model

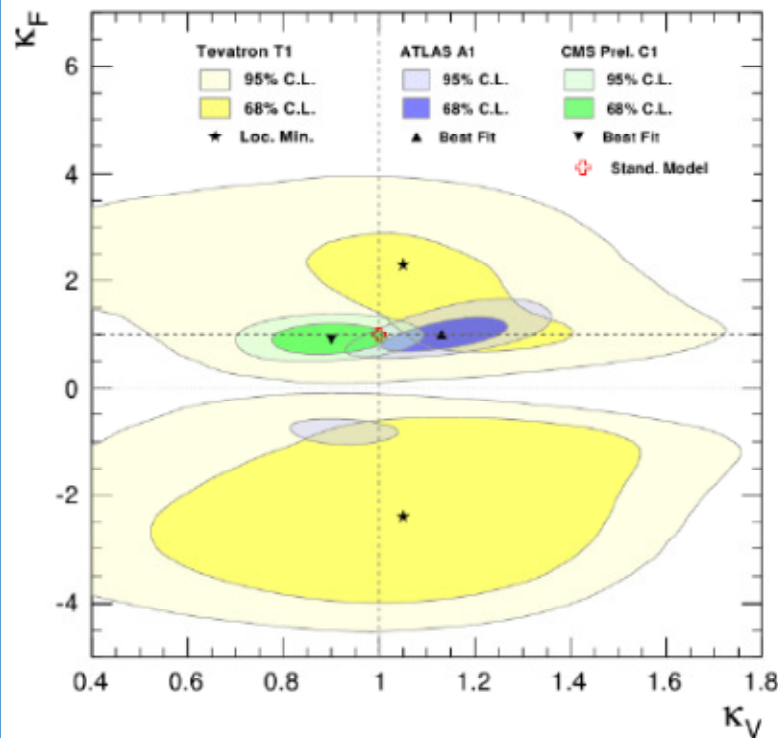
Higgs inflation model

Higgs 場と重力の特殊な結合
低エネルギーでは標準模型的なヒッグス粒子

ヒッグス結合の測定

ヒッグス粒子が発見以降、すでにHiggs coupling のずれからnew physics 効果を探る手段となっている。

Coupling measurements from LHC and Tevatron.



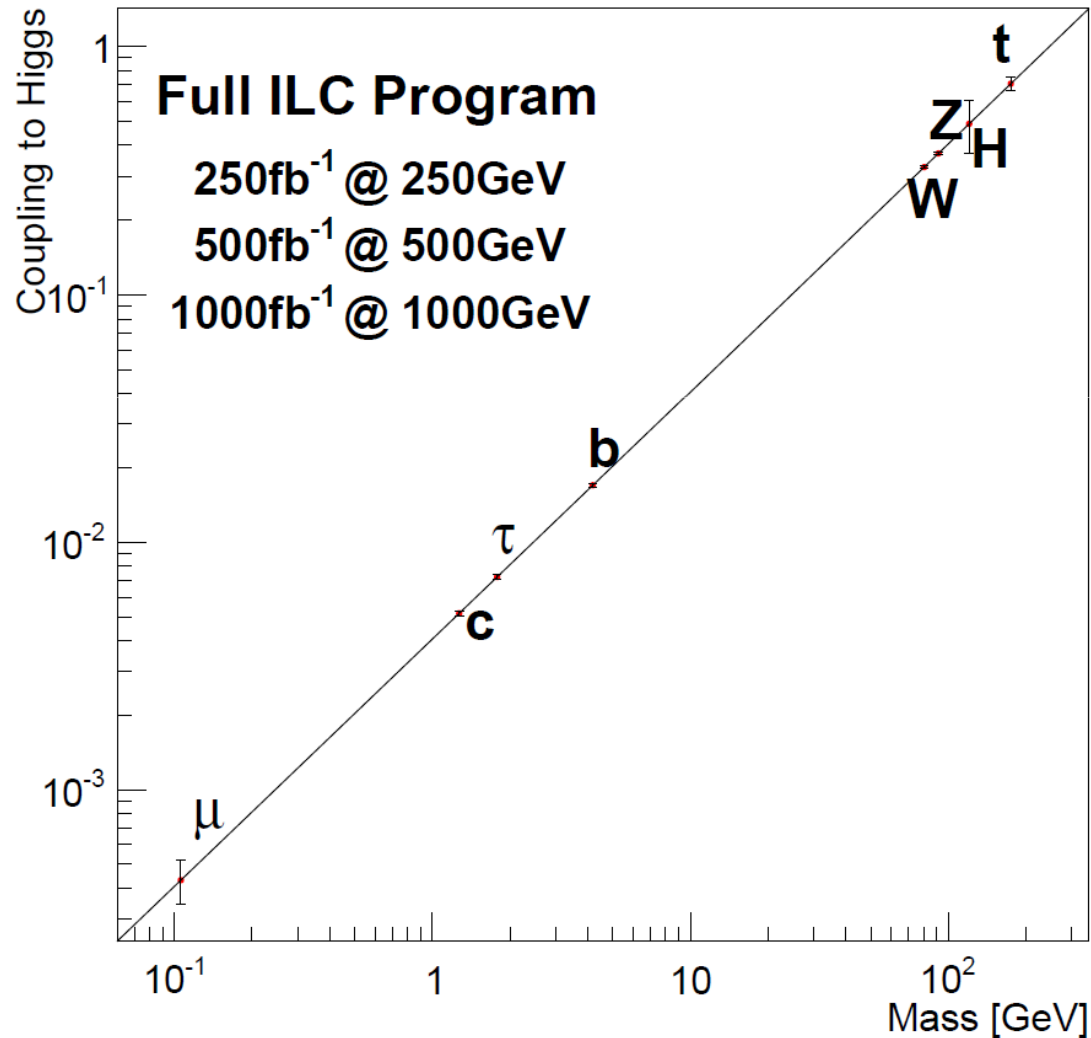
Common couplings scaling factor for all vector bosons (κ_V) and all fermions (κ_f)

Fair agreement with SM predictions

$H \rightarrow \gamma\gamma$ has sensitivity to relative sign of κ_V and κ_f through interference of W and t in the loop

Measurements from ATLAS and CMS have been superseded by updated measurements

ILCにおける結合定数と質量の関係



直線に乗るのが標準模型
(1Higgs doublet model)
の予言。これからの
ずれは、新物理の証拠

TeV とPlanck の関係

- 素粒子標準模型が不十分な理論と考える原理的な動機
標準模型には重力が含まれていない。

重力とゲージ相互作用は統一されるか。

Planck スケールと電弱スケールの関係は？

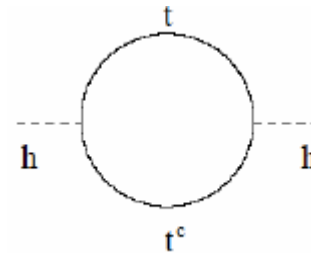
理論的には 二つのスケールが非常に離れていることが大きな問題。

標準模型を超える物理を考える最も大きな動機。

(階層性の問題)

ヒッグス場が電磁場と同じような基本的な場だと思えば二つのスケールが同じ程度なのが自然。

$$\delta m_h^2 \sim M_{pl}^2$$



いろいろな解決法

(1) 新しい対称性＝超対称性 ヒッグス粒子は超対称フェルミオンのパートナー

$$(H, \tilde{H})$$

(2) 新しい強い力 ヒッグス粒子は複合粒子 $H \sim \bar{Q}Q$

(3) 重力理論が変わる。余分な空間次元が存在するために TeV スケール
重力とゲージ理論の統一がおこる。

(4) 量子重力の隠れた対称性。

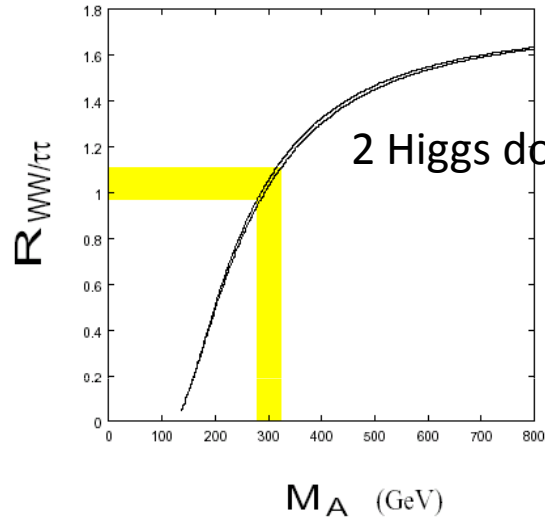
(5) 量子重力が膨大な数の真空を許すことの帰結。

(6) その他の可能性。

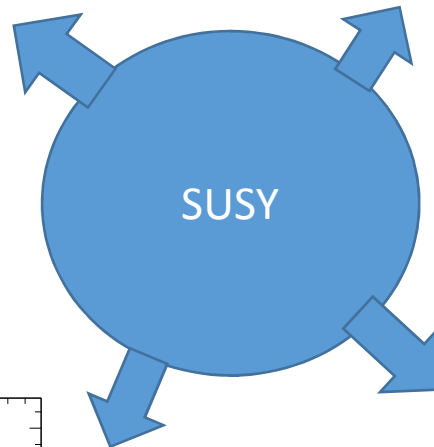
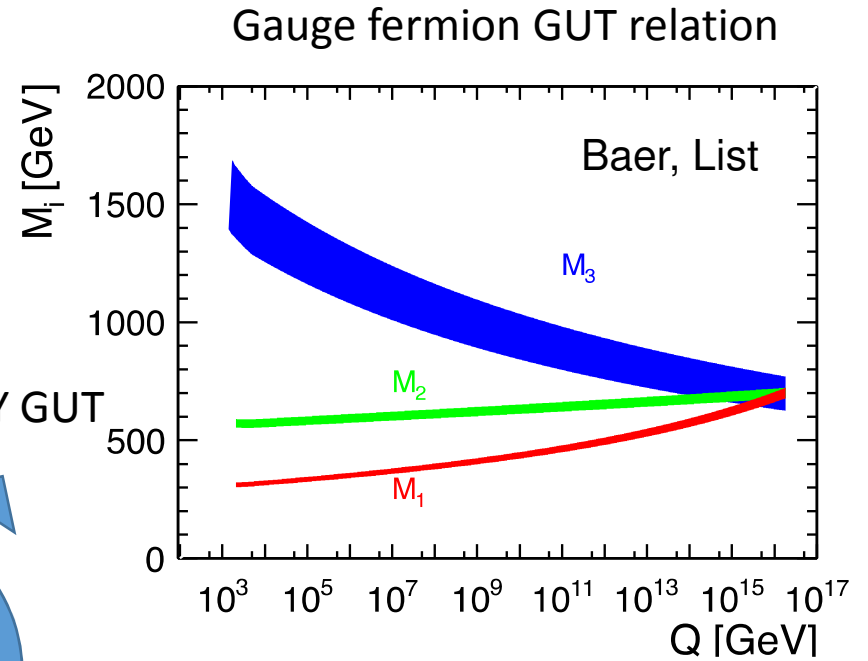
(1)、(2)、(3)の場合 TeV付近でヒッグスセクターは大きく変わる

超対称性の場合

Higgs branching ratio

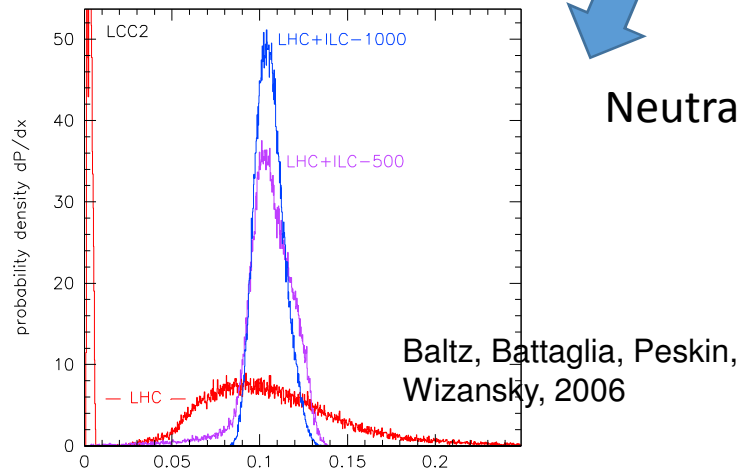


SUSY GUT

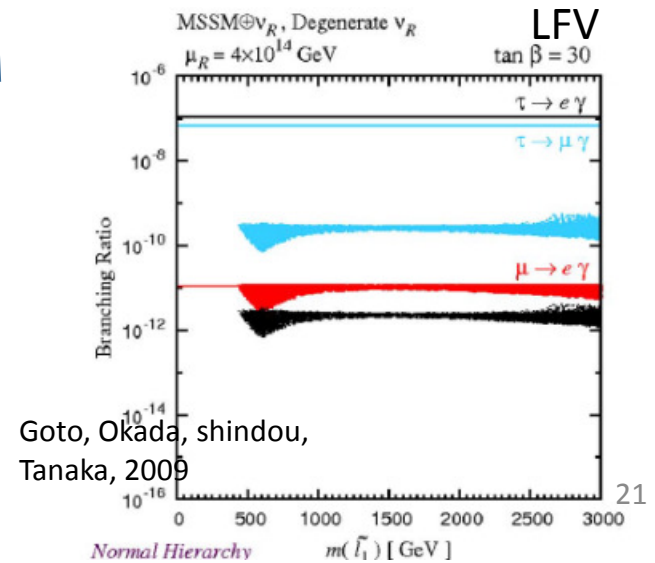


Neutralino LSP

SUSY Dark matter



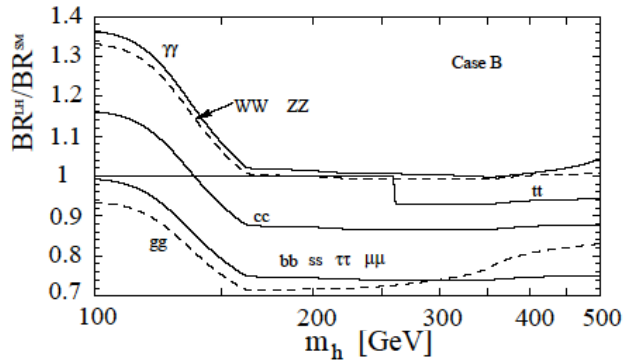
SUSY Seesaw model



Little Higgs Model with T-Parity の場合

Doublet Higgs 場自身が擬 NG-boson

Higgs branching ratio



Chen, Tobe, Yuan 2006

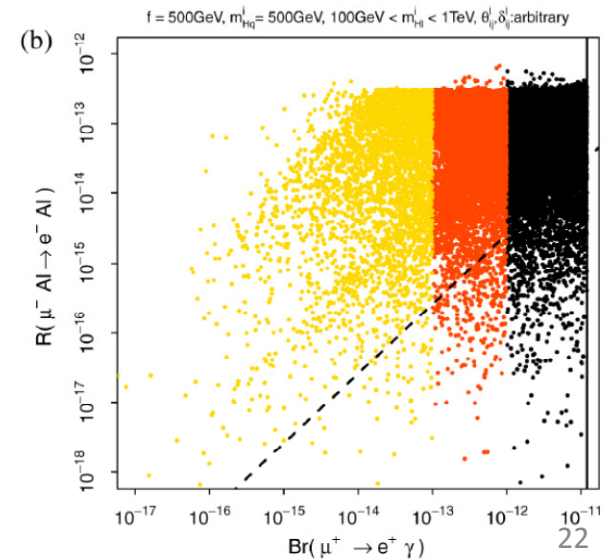
重いフェルミオンの
ループ効果

Top quark , W boson, Z boson
の重いパートナー粒子



Heavy photon が暗黒物質粒子
の候補

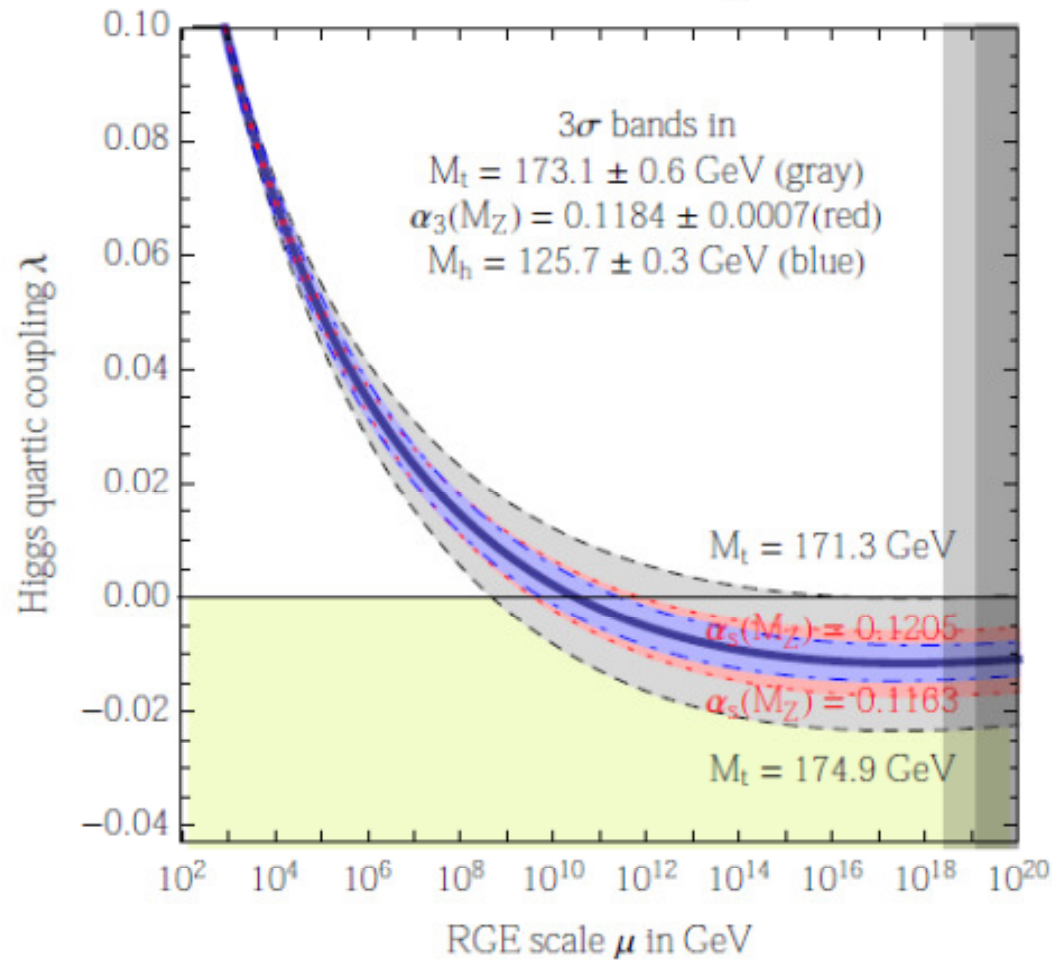
Quark and lepton flavor
physics signals



Goto, Okada, Yamamoto 2011

Planck scale でフラットポテンシャルで、それ以下は標準模型のみ

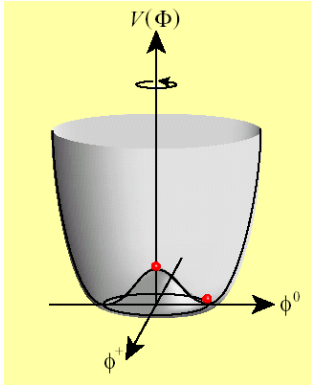
$$V_0 = -\frac{m_0^2}{2}|H_0|^2 + \lambda_0|H_0|^4$$



D. Buttazzo, et al
 arXiv:1307.3536

Top mass と
 強い相互作用の
 精密な決定が重要

電弱スケールのヒッグスポテンシャル



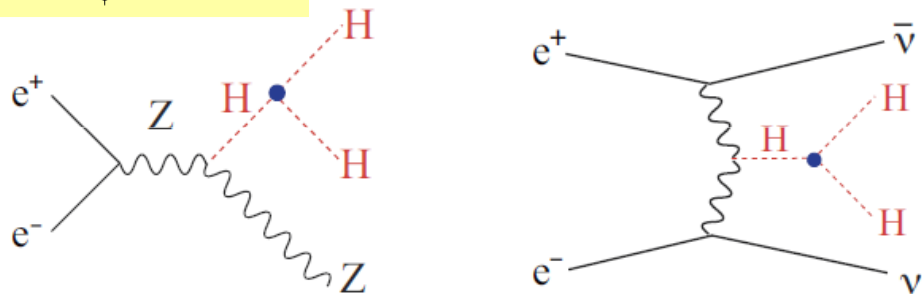
$$V(\phi)$$

本来ヒッグスポテンシャルは
実験で決めるべきもの(繰り込み可能性
以外にあまり指針がない)

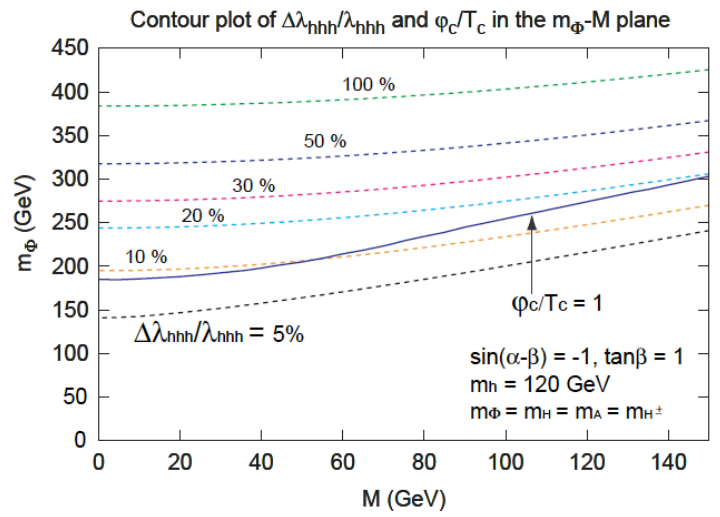
$$V = -\mu^2 \Phi^\dagger \Phi + \lambda (\Phi^\dagger \Phi)^2$$

の場合はヒッグス3点結合は

$$g_{HHH} = 6\lambda v = \frac{3m_H^2}{v}$$



となる。ヒッグスポテンシャルに関する
最初の情報



2HDMで、電弱相転移でバリオン数生成が
おこる場合はdouble Higgs production は
標準模型から10%以上ずれる。

S.Kanamura, Y.Okada.E.Senaha 2005

まとめ

- これからの素粒子物理の目標は、TeVからPlanckにわたる自然法則の全体像をつかむこと
- そのためのカギは、電弱対称性の破れの背後にある物理を明らかにすること
- そのためには、エネルギーフロンティア実験でヒッグス粒子の性質を詳しく調べることと、新粒子、新現象を探索することが基本
- 暗黒物質の正体、宇宙のバリオン数生成機構、ニュートリノ質量生成機構などの問題解決は、電弱対称性の破れのシナリオに深く依存していると考えられる