

素粒子分野の展望

市川温子
京都大学

(素粒子) 物理を軸に話を進めます。
無知や誤解による間違い、変な主観が
混じていたら、遠慮せず (優しく) 指
摘してください。

わけのわからなさ？

用例
期待される描像 直接証拠
状況証拠

マルチバース

量子重力

$\Omega_M \sim \Omega_{DE}$
暗黒エネルギー

ステライルν 複合ヒッグス, 余剰次元他もろもろ

インフレーション

暗黒物質

B lepton universality

ヒッグズ場と真空の安定性

素粒子と相互作用の起源

$\mu g-2$

TeV SUSY

$\Omega_{baryon} \sim \Omega_{DM}$

強い相互作用のCP

大統一

ヒッグス粒子質量の微調整

running coupling constant

Yukawa結合の起源

バリオジェネシス/レプトジェネシス

$SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

重い右巻きν



qとνの混合行列とCPの破れ

νの極小質量

質量のパターン 物質優勢宇宙

クォークとレプトンのパターン

10⁰ 10³ 10⁶ 10⁹ 10¹² 10¹⁵ 10¹⁸

TeV

エネルギースケール(GeV)

Plank

わけのわからなさ？

用例

マルチバース

ヒッグス

待される描像

直接証拠
状況証拠

量子重力

Ω_{DM}
暗黒エネルギー

ステライルニュートリノ

複合ヒッグス, 余剰次元他もろもろ

インフレーション

暗黒物質

B lepton universality

ヒッグズ場と真空の安定性

素粒子と相互作用の起源

$\mu g-2$

TeV SUSY

$\Omega_{baryon} \sim \Omega_{DM}$

強い相互作用のCP

大統一

ヒッグス粒子質量の微調整

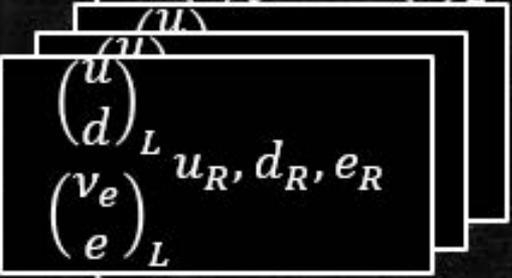
running coupling constant

Yukawa結合の起源

バリオジェネシス/レプトジェネシス

$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

重い右巻き ν



qと ν の混合行列とCPの破れ

ν の極小質量

質量のパターン 物質優勢宇宙

クォークとレプトンのパターン

10⁰ 10³ 10⁶ 10⁹ 10¹² 10¹⁵ 10¹⁸

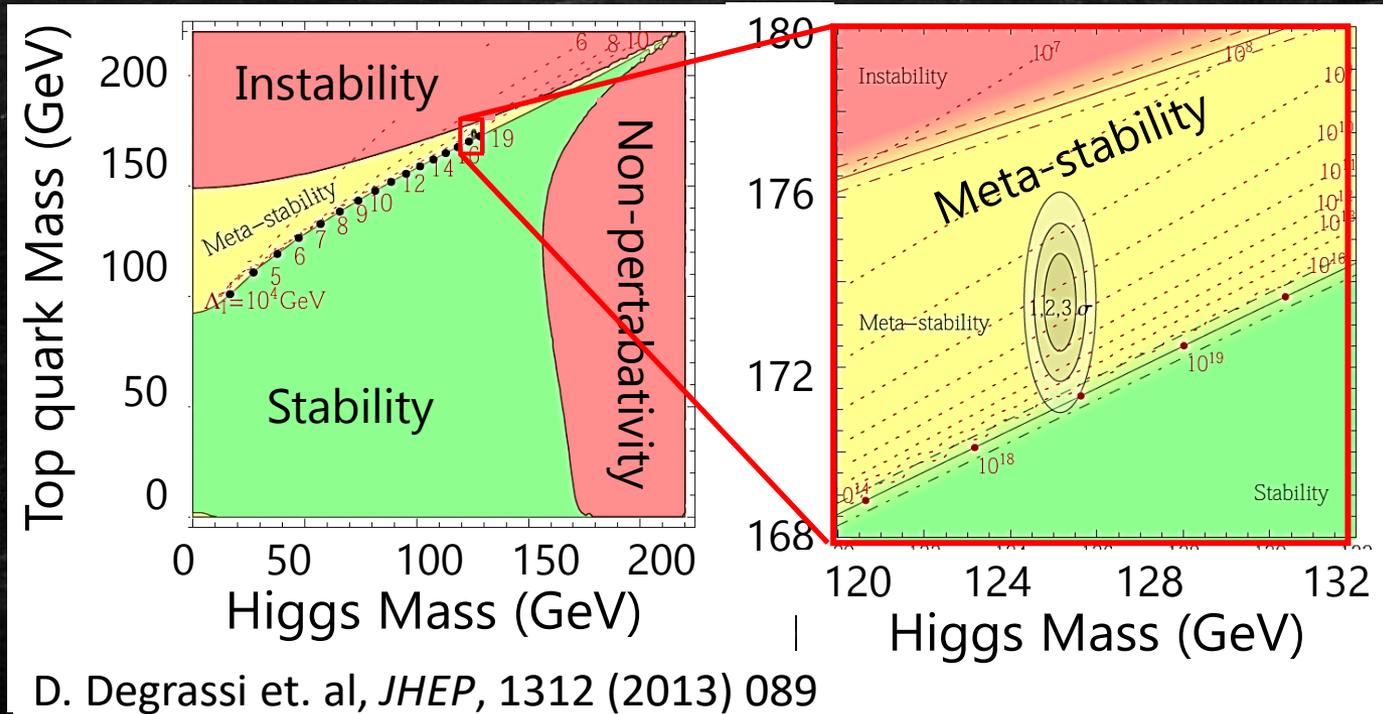
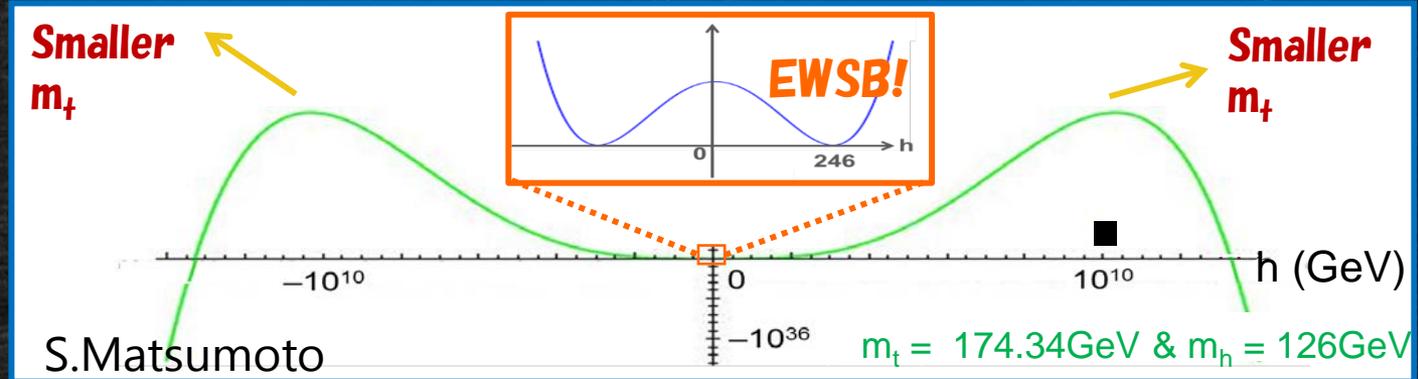
TeV

エネルギースケール(GeV)

Plank

ヒッグス粒子

- 質量125 GeV
- 自己相互作用するスカラー粒子 → 真空中に凝縮して自分とゲージボソン、フェルミオンに質量を与える。
- 真空は、新物理がなくてもプランクスケールまで準安定



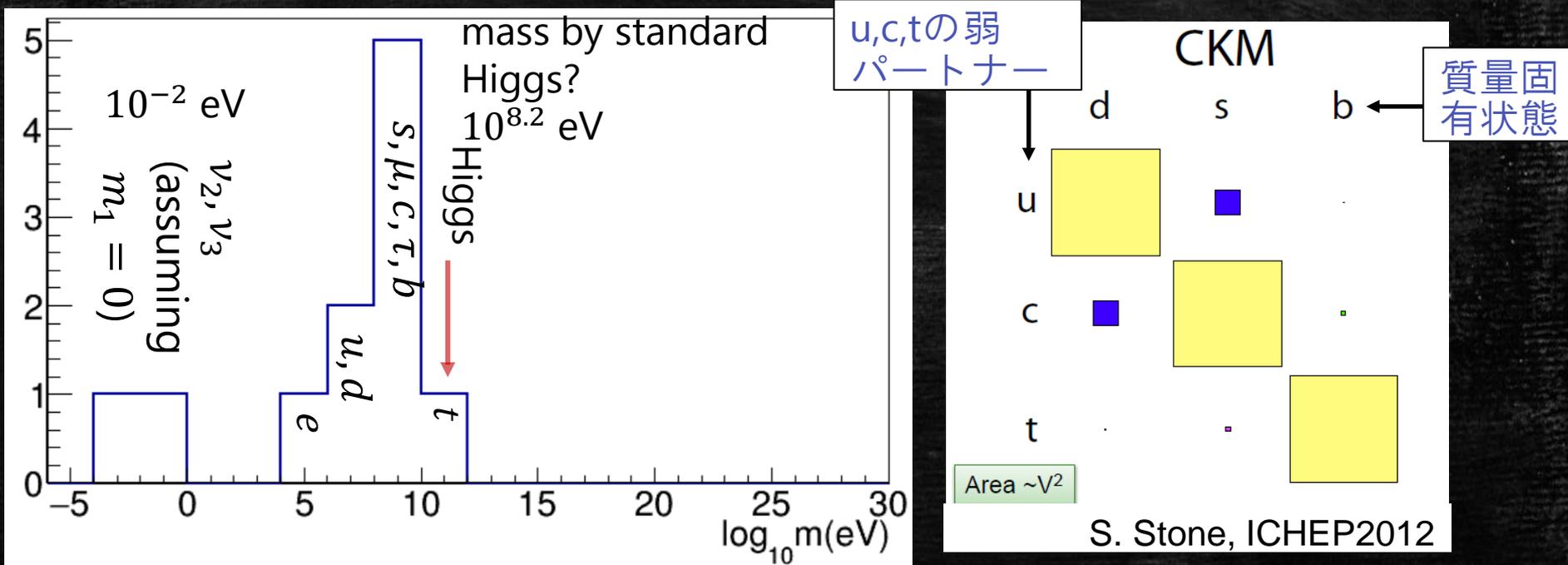
ヒッグス粒子の問題

自己相互作用するスカラー粒子 → 真空中に凝縮して自分とゲージボソン、フェルミオンに質量を与える。

✓自己相互作用の起源は？（他の相互作用はゲージ変換）

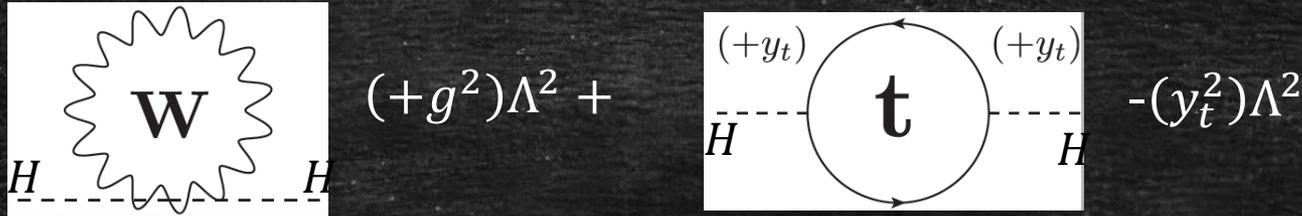
✓どうしてフェルミオンと適当に結合する？

✓適当な割に、フレーバーと質量の混合行列は、まあまあ規則的



ヒッグス粒子の問題

- ✓ 質量を125 GeVにするには輻射補正の超微調整が必要



Λ は新物理によるカットオフ。プランクスケールと考えると30桁の調整

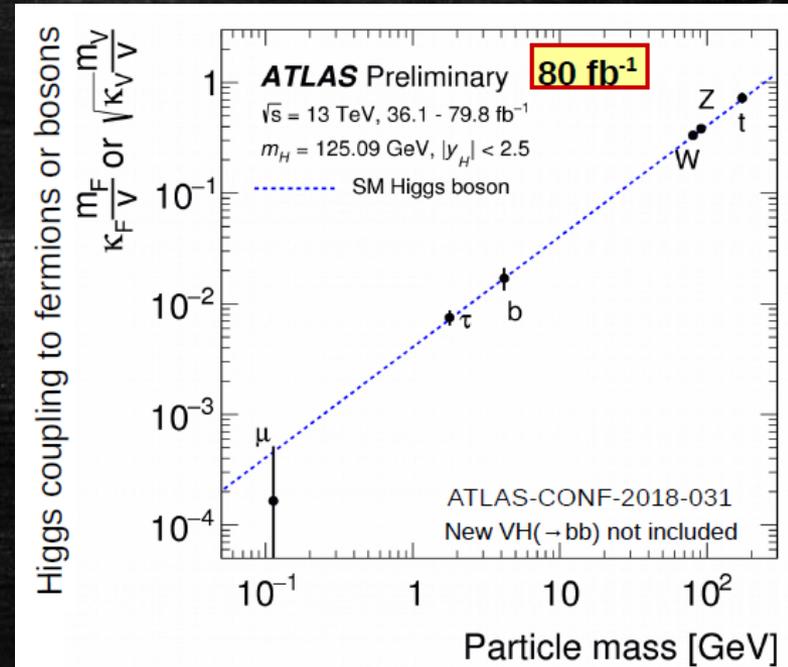
- ✓ フェルミオン（ニュートリノは別として）に質量を与えるのは125 GeVのヒッグス粒子だけなのか？

- ✓ 単独の素粒子なのか？

W, Z とのゲージ結合、 q, l との湯川結合を測定して標準理論との整合性を検証

LHC 20~30% → HL-LHC 5-10%

→ ILC 1%



わけのわからなさ？

用例

直接証拠

マルチバース

$\lesssim 0(10) \text{TeV}$ スケール

量子重力

ステライルニュートリノ 複合ヒッグス, 余剰次元他もろもろ

インフレーション

暗黒物質

素粒子と相互作用の起源

B lepton universality

ヒッグズ場と真空の安定性

$\Omega_{\text{baryon}} \sim \Omega_{\text{DM}}$

大統一

$\mu g-2$

TeV SUSY

強い相互作用のCP

ヒッグス粒子質量の微調整

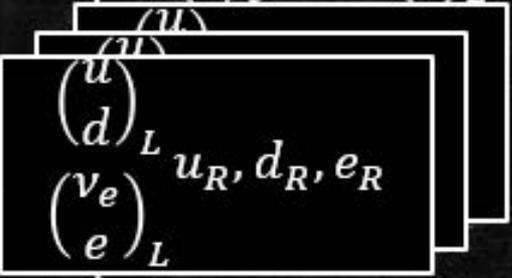
running coupling constant

Yukawa結合の起源

バリオジェネシス/レプトジェネシス

$SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

重い右巻き ν



q と ν の混合行列とCPの破れ

ν の極小質量

質量のパターン 物質優勢宇宙

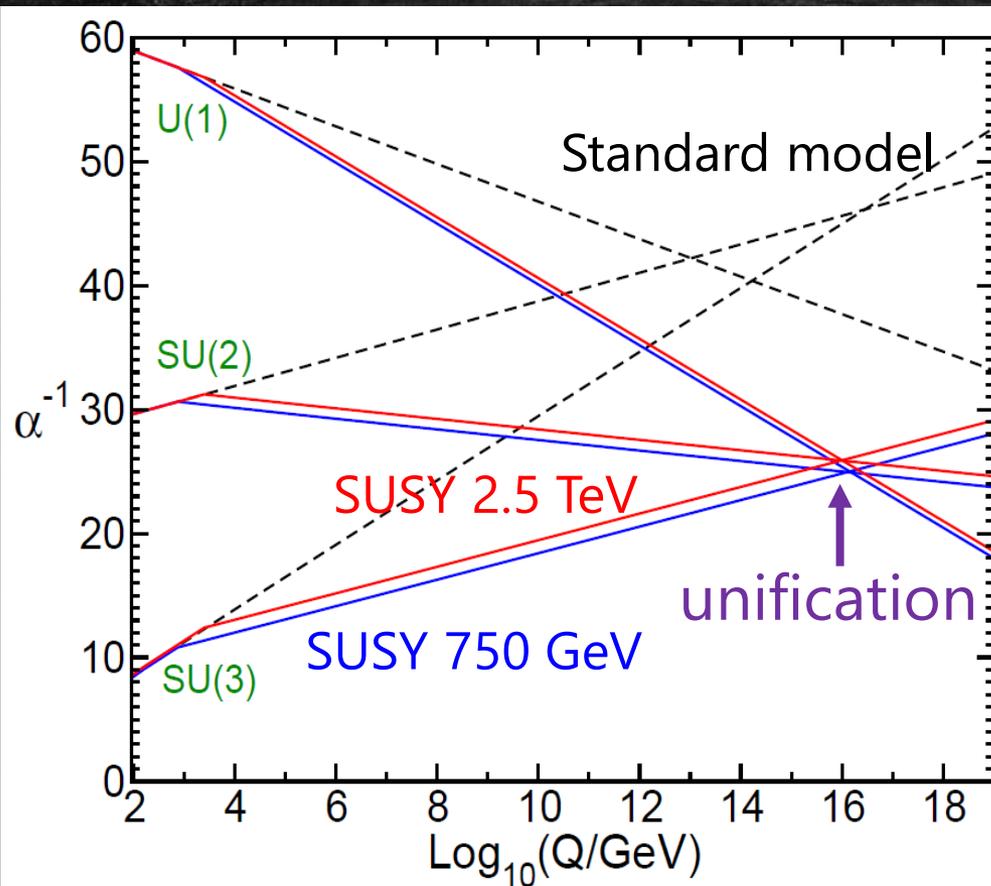
クォークとレプトンのパターン

エネルギースケール(GeV) $10^0 \quad 10^3 \quad 10^6 \quad 10^9 \quad 10^{12} \quad 10^{15} \quad 10^{18}$

TeV

Plank

$\approx 0(10)$ TeVスケールに新物理？



S. Martin, hep-ph/9709356

- ✓ 結合定数の統合
- ✓ ヒッグスの質量の超微調整
- ✓ Bレプトンユニバーサリティ
 $\frac{B \rightarrow D^{(*)} \tau \nu}{B \rightarrow D^{(*)} l \nu}$ で 4.1σ のずれ
- ✓ B^0/B^+ CP Violation
 $A_{CP}(K^+ \pi^-)$ と $A_{CP}(K^+ \pi^0)$ で 5.3σ のずれ
- ✓ $\mu g-2$ 3.7σ のずれ

しかし、

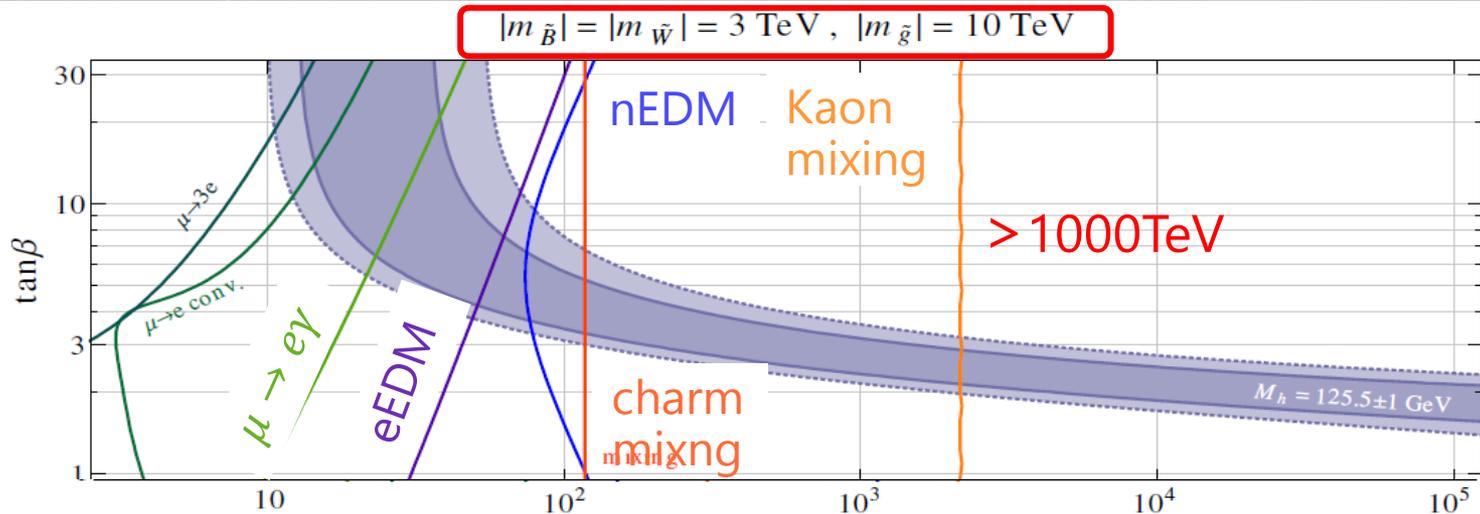
単純な超対称模型(MSS)では、ヒッグスの質量を125 GeVに押し上げるには、stopは重くないといけない。

フレーバー問題

新物理があると、大きなFCNC(フレーバーを変える中性カレント)過程、cLFV (荷電レプトンのフレーバー非保存)過程を引き起こす

→ 新物理のエネルギースケールは $O(100) \sim O(1000)$ TeV

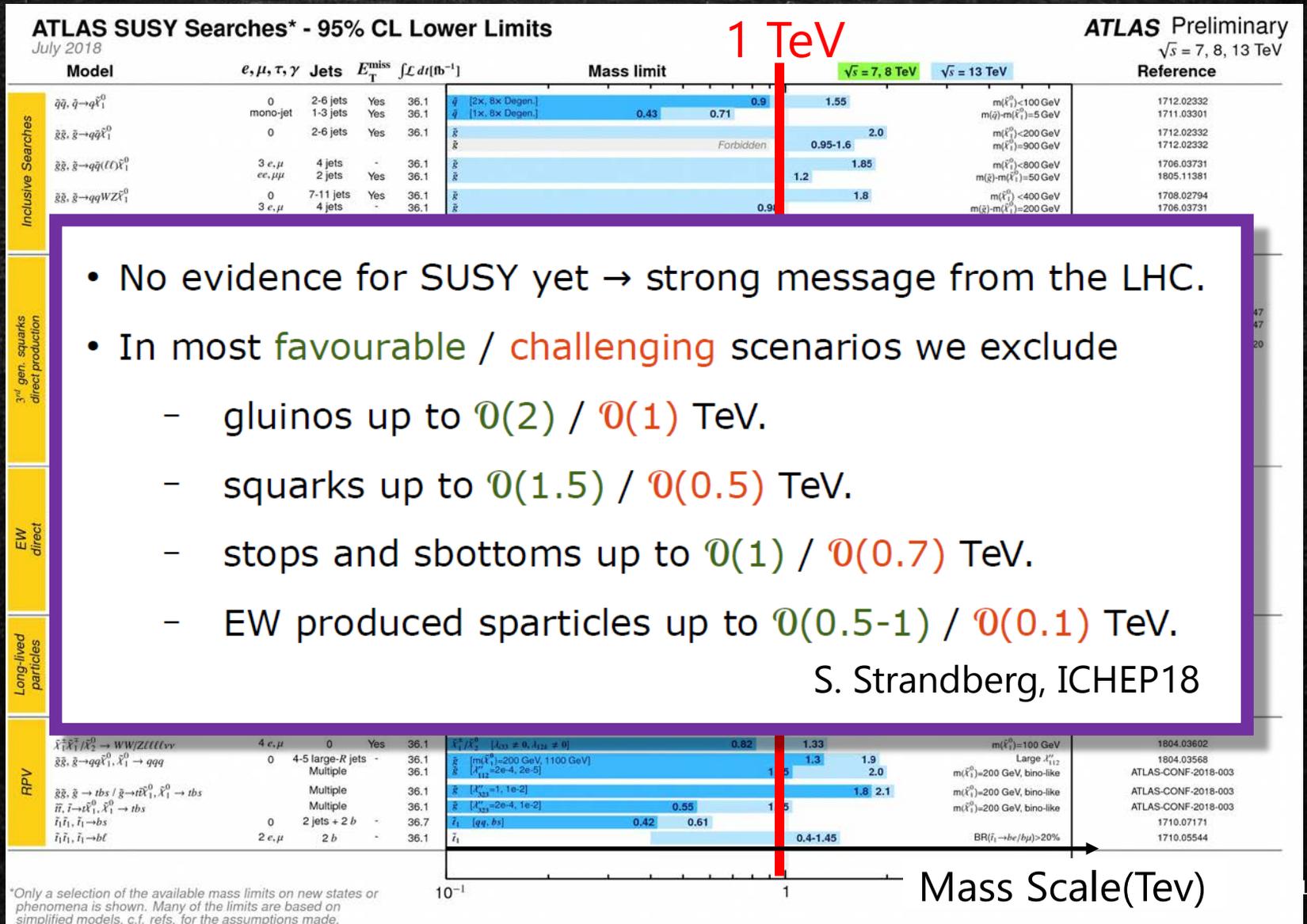
または、標準模型のように抑制あるいは部分的にエネルギースケールを高くする、など



* $\tan \beta = \frac{v_2}{v_1}$, $v = 246 \text{ GeV} = \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$

$m_{\tilde{q}} = m_{\tilde{l}} = |\mu| \text{ (TeV)}$

LHC results so far



47
47
20

$\lesssim 0(10)$ TeVスケールに新物理？

直接測定

- **HL-LHC**

ルミノシティが上がる → パarton分布の高いxの反応が見れる → 高いエネルギーカラーを持った粒子に感度大
~3 TeVまで探索

- **ILC**

カラーを持っていなくても感度がある
エネルギーは、HL-LHCに比べて限られている

間接測定

- **ILC**

ヒッグス~1%精密測定で、1.5-3 TeV領域探索

エネルギースケール感度は、モデルのパラメータ空間の場所による。

(次ページに続く)

$\lesssim 0(10)$ TeVスケールに新物理？

間接測定つづき

- **Belle II** ~10 TeVまでを探索
 - CKM行列 ~1%の精度
 - B崩壊でのレプトンユニバーサルティ
 - $b \rightarrow s\gamma$
 - τ 崩壊 レプトン数非保存崩壊探索
- μ g-2 Fermilab, J-PARC
- **K稀崩壊** @ J-PARC, CERN
 - ~1000 TeVまで感度
- **ミューオン**のレプトン数非保存過程
 - μ 崩壊 MEG-II
 - $\mu - e$ 転換 FNAL Mu2E, J-PARC COMET
- **中性子電気双極子モーメント**
- **暗黒物質探索**

小林益川(CKM)行列
(最小桁が精度に対応)

$$\begin{pmatrix} 0.9742 & 0.2243 & 0.0039 \\ 0.218 & 0.997 & 0.0042 \\ 0.0081 & 0.004 & 1.02 \end{pmatrix}$$

エネルギースケール感度は、モデルによる。

(SMのように特殊な抑制があると、感度は下がる)

わけのわからなさ？

用例
期待される描像 直接証拠
状況証拠

マルチバース

量子重力

$\Omega_M \sim \Omega_{DE}$
暗黒エネルギー

ステライル 複合ヒッグス 余剰次元他もろもろ インフレーション

ニュートリノの 質量とCPの破れ

と相互作用の起源

統一

統一

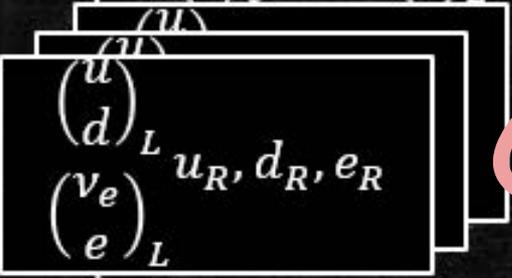
running coupling constant

Yukawa結合の起源

バリオジェネシス/レプトジェネシス

$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

重い右巻き ν



q と ν の混合行列とCPの破れ ν の極小質量
 質量のパターン 物質優勢宇宙
 クォークとレプトンのパターン

10^0 10^3 10^6 10^9 10^{12} 10^{15} 10^{18}

TeV

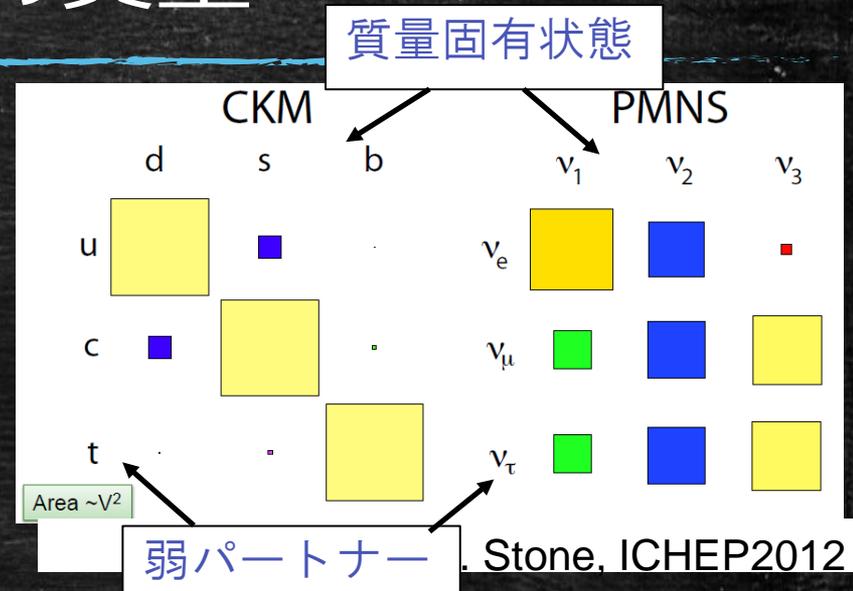
エネルギースケール(GeV)

Plank

ニュートリノの質量

他のフェルミオンに比べて飛びぬけて小さい。

フレーバーと質量の混合が、とても大きい。



混合行列実測値 (最小桁が精度に対応)
小林-益川(CKM)行列

$$\begin{pmatrix} 0.9742 & 0.2243 & 0.0039 \\ 0.218 & 0.997 & 0.042 \\ 0.0081 & 0.04 & 1.02 \end{pmatrix}$$

牧-中川-坂田(PMNS)行列

$$\begin{pmatrix} 0.82 & 0.55 & 0.146 \\ -0.469 & 0.51 & 0.71 \\ 0.32 & -0.66 & 0.70 \end{pmatrix}$$

ある種の対称性を仮定するとこんな値が予言されたりする

$$U_{CKM} \approx \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$U_{MNS} = \begin{pmatrix} \sqrt{2/3} & \sqrt{1/3} & 0 \\ -\sqrt{1/6} & \sqrt{1/3} & \sqrt{1/2} \\ \sqrt{1/6} & -\sqrt{1/3} & \sqrt{1/2} \end{pmatrix}$$

$$= \begin{pmatrix} 0.816 & 0.577 & 0 \\ -0.408 & 0.577 & 0.707 \\ 0.408 & -0.577 & 0.707 \end{pmatrix}$$

三世代混合行列とCPの破れ

クォーク： $J_{CP}^{CKM} \approx 3 \times 10^{-5}$

レプトン： $J_{CP}^{PMNS} \approx 0.03 \sin \delta_{CP}$ (δ_{CP} はディラック位相)

- 3桁大きい可能性 (T2Kが最大を示唆?)
- 物質優勢宇宙を創るのに十分に大きい可能性
- $\sin \delta_{CP} \sim 1$ であれば、T2K, スーパーカミオカンデ, NOvA (米国)で $>3\sigma$ で見える。
- ハイパーカミオカンデ 位相角が 0° ないし 180° から 40° 以上ずれていけば 5σ 以上で確立。確実に成果を出すことができる物理。ただしDUNE(米国)と競争。

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & +c_{23} & +s_{23} \\ 0 & -s_{23} & +c_{23} \end{pmatrix}
 \begin{pmatrix} +c_{13} & 0 & +s_{13} e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} e^{i\delta} & 0 & +c_{13} \end{pmatrix}
 \begin{pmatrix} +c_{12} & +s_{12} & 0 \\ -s_{12} & +c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$(c_{ij} = \cos \theta_{ij}, s_{ij} = \sin \theta_{ij})$

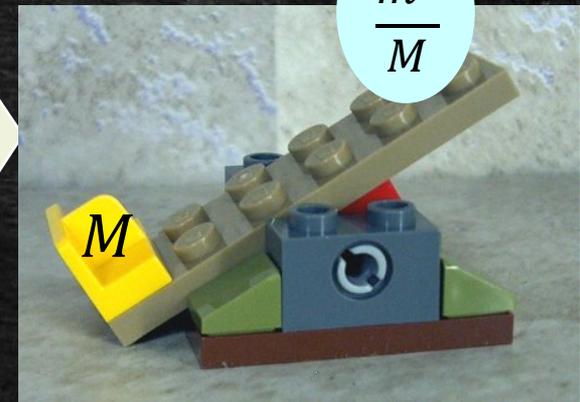
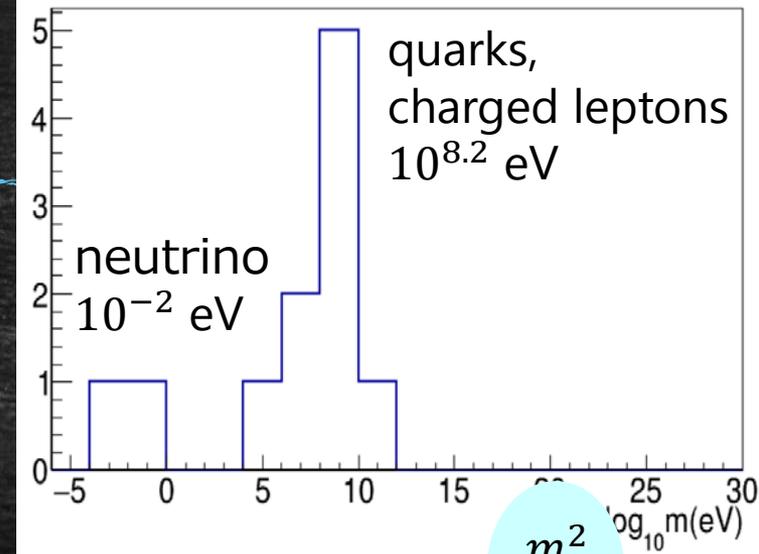
シーソー機構？

- ニュートリノがマヨラナ粒子(粒子=反粒子)で、重い右巻きマヨラナ質量を持つと

$$\begin{pmatrix} \overline{\nu_L}, \overline{(\nu_R)^c} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 0 & m \\ m & M \end{pmatrix} \begin{pmatrix} (\nu_L)^c \\ \nu_R \end{pmatrix}$$

Dirac mass $\sim 1\text{MeV}$ Majorana mass

観測されるのは
対角化された質量



クォークの混合行列との違いもこれに起因？

$10^8 \sim 10^{15} \text{ GeV}$ の N_R が存在

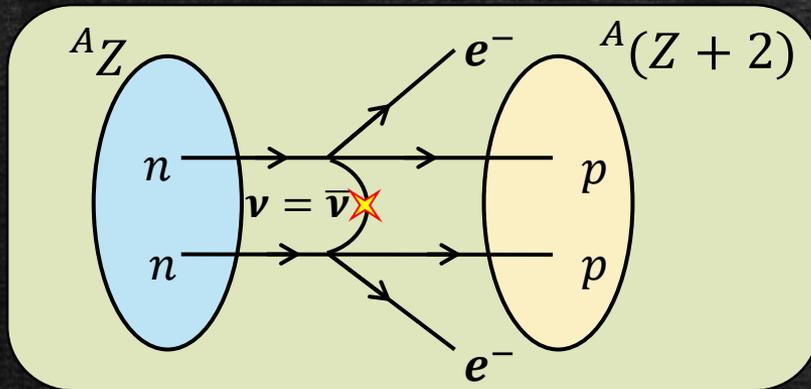
混合行列

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & +c_{23} & +s_{23} \\ 0 & -s_{23} & +c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} +c_{13} & 0 & +s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & +c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} +c_{12} & +s_{12} & 0 \\ -s_{12} & +c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} e^{i\alpha_1} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$(c_{ij} = \cos \theta_{ij}, s_{ij} = \sin \theta_{ij})$

マヨラナ位相

マヨラナ性の検証 - ニュートリノを伴わない二重ベータ崩壊 -



寿命は、

**質量、混合角、ディラック位相、
マヨラナ位相**

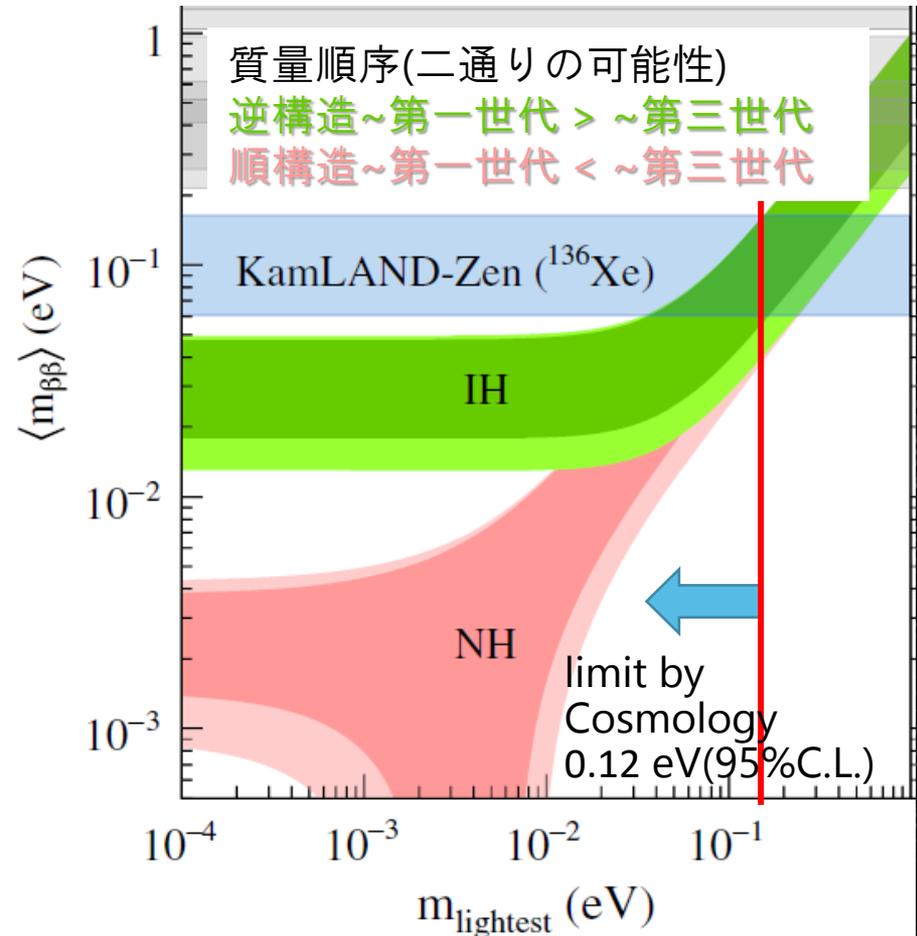
で決まる。

→ マヨラナ性の決定、そして質量の絶対値、マヨラナ位相の情報

次世代実験は、逆構造をカバー

最近のニュートリノ振動の結果は9:1くらいで順構造を支持

濃い広がり、マヨラナ位相の不定性による。
薄い領域は、さらにニュートリノ振動で決められた混合角の不定性を加えている。



PRL 117, 082503 (2016)

わけのわからなさ？

用例

期待される描像

直接証拠
状況証拠

マルチバース

量子重力

インフレーション

粒子と相互作用 の大統一

素粒子と相互作用の起源

μg^{-2}

TeV SUSY

$\Omega_{\text{dark matter}} \sim \Omega_{DM}$

強い相互作用のCP

大統一

ヒッグス粒子質量の微調整

running coupling constant

Yukawa結合の起源

バリオジェネシス/レプトジェネシス

$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

重い右巻き ν

q と ν の混合行列とCPの破れ

ν の極小質量

質量のパターン 物質優勢宇宙

クォークとレプトンのパターン



10^0

10^3

TeV

10^6

10^9

10^{12}

10^{15}

10^{18}

Plank

エネルギースケール(GeV)

大統一理論 GUT

- 電弱強相互作用の統合
- クォークとレプトンを多重項として統合 → 陽子崩壊
- 電荷の量子化 → 素電荷
- 湯川結合定数を統合 (するかも)
 - フレーバー構造を理解できる？
ニュートリノ質量が順構造か逆構造か決めるのも大事 (だと思う)
T2K, Super-K, NOvA, JUNO(中国、原子炉)で2020年代中に決まりそう
- 右巻きニュートリノを自然に導入 (するかも) → シーソー機構

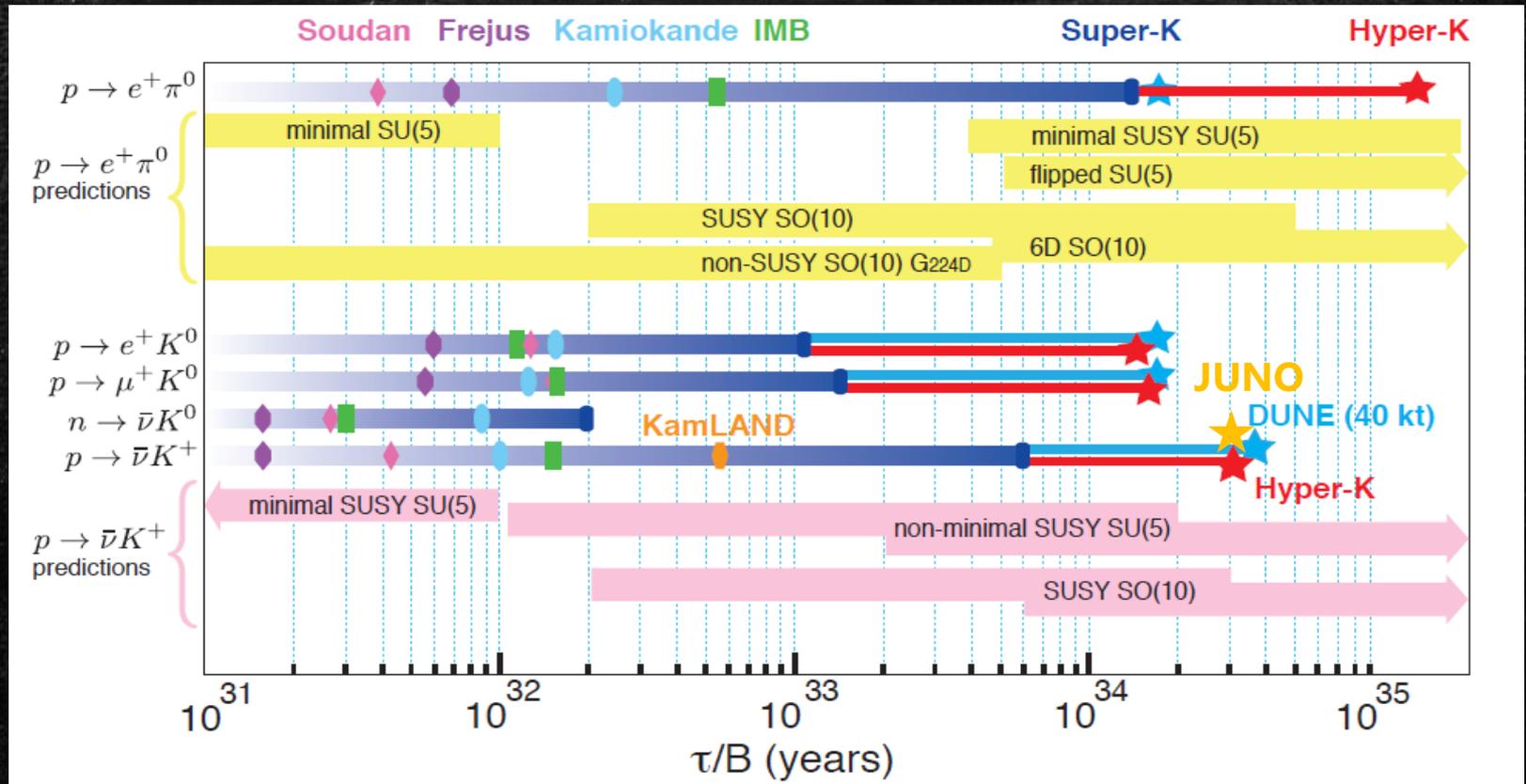
質量順序

逆構造 ~ 第一世代 > ~ 第三世代

順構造 ~ 第一世代 < ~ 第三世代

大統一理論 GUTの検証 - 陽子崩壊 -

- Xゲージボソンの交換で $p \rightarrow \pi^0 e^+$
- 超対称性GUTでは $p \rightarrow K^+ \bar{\nu}$ が起きやすい
SUSYのエネルギースケールによる：SUSY探索実験の情報が重要



わけのわからなさ？

用例
期待される描像 直接証拠
状況証拠

マルチバース

量子重力

インフレーション

$\Omega_M \sim \Omega_{DE}$
暗黒エネルギー

ステライルν 複合ヒッグス, 余剰次元他もろもろ

相互作用の起源

物質優勢宇宙

running coupling constant
ヒッグス粒子質量の微調整

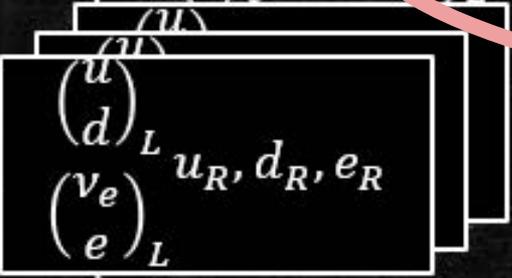
強い相互作用のCP 入統一

YUKAWA結合の起源

バリオジェネシス/レプトジェネシス

$SU(3)_c \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

重い右巻きν



qとνの混合行列とCPの破れ vの極小質量
質量のパターン 物質優勢宇宙

クォークとレプトンのパターン

10⁰ 10³ 10⁶ 10⁹ 10¹² 10¹⁵ 10¹⁸

TeV

エネルギースケール(GeV)

Plank

物質優勢宇宙の起源

インフレーションからビッグバン元素合成までのどこかでクオーク数と反クオーク数に 10^{-9} の割合で差

・ 電弱バリオジェネシス

標準理論では7桁足りない。(非平衡状態にできない。CPの破れが小さい。)

電弱バリオジェネシスで現在の宇宙を作るには、拡張が必要
ヒッグスでCPを破る、とか ← ILCで検証？

・ TeVスケールよりももっと高いエネルギースケールの新物理

- レプトジェネシス → 次ページ
- 未知のCPの破れをまず見つける

・ Belle II, K崩壊(J-PARC, CERN)、中性子EDM(TRIUMF, PSI, J-PARC)

物質優勢宇宙の起源

レプトジェネシス

- N_R (重い右巻きニュートリノ)の崩壊でCPを破りながら、軽い ν とHiggsを生成 = レプトン数の生成 (重いので非平衡。混合角が大きい可能性大)
- 標準模型のスファレロン過程でレプトン数 \rightarrow バリオン数
- シーソー模型の N_R ($\sim 10^{14}$ GeV)はまあまあいい重さらしい

検証

- ニュートリノでCPの破れを測る (レプトジェネシスに直接、関係するかどうかはわからないが、破れの大きさは十分の可能性。)
- ニュートリノがマヨラナ粒子であることを示す。

わけのわからなさ？

用例
期待される描像 直接証拠
状況証拠

マルチバース

量子重力

インフレーション

$\Omega_M \sim \Omega_{DE}$
暗黒エネルギー

ステアイルν 複合ヒッグス, 余剰次元他もるもる

暗黒物質

ヒッグズ場と真空の安定性

素粒子と相互作用の起源

B lepton universality

$\mu g-2$

TeV SUSY

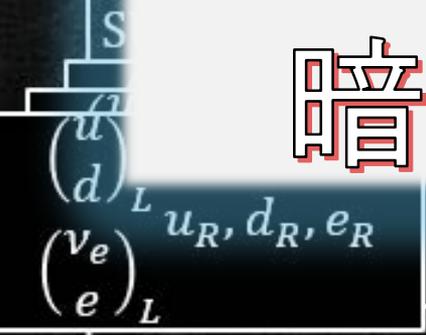
$\Omega_{baryon} \sim \Omega_{DM}$

強い相互作用のCP

大統一

ヒッグス粒子質量の微調整

暗黒物質と 暗黒エネルギー



質量のパターン 物質優勢宇宙

クォークとレプトンのパターン

10⁰ 10³ 10⁶ 10⁹ 10¹² 10¹⁵ 10¹⁸

TeV

エネルギースケール(GeV)

Plank

暗黒物質と暗黒エネルギー

暗黒物質

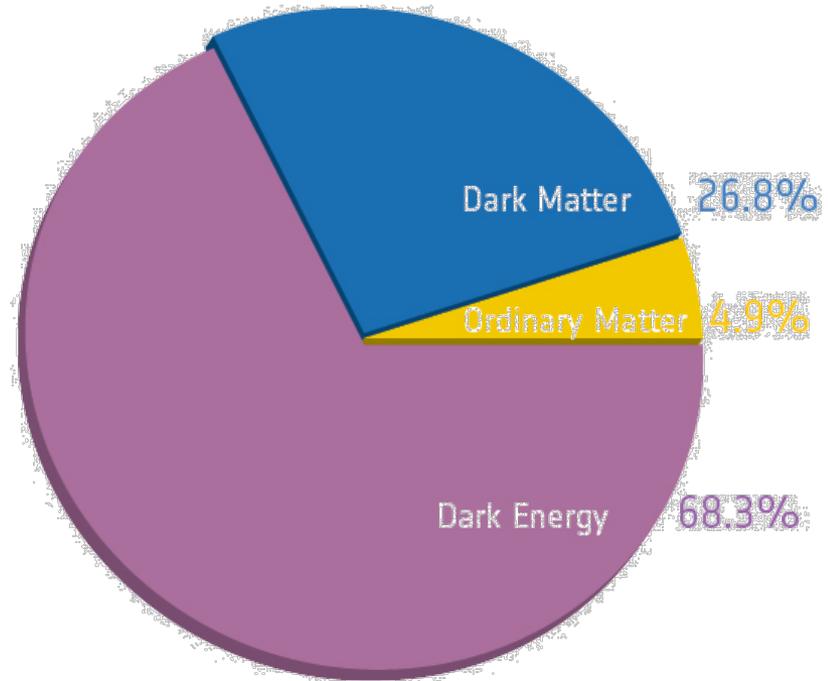
- ✓ cold(非相対論的) でなければいけない
- ✓ 引力として働いている

暗黒エネルギー

- ✓ 斥力

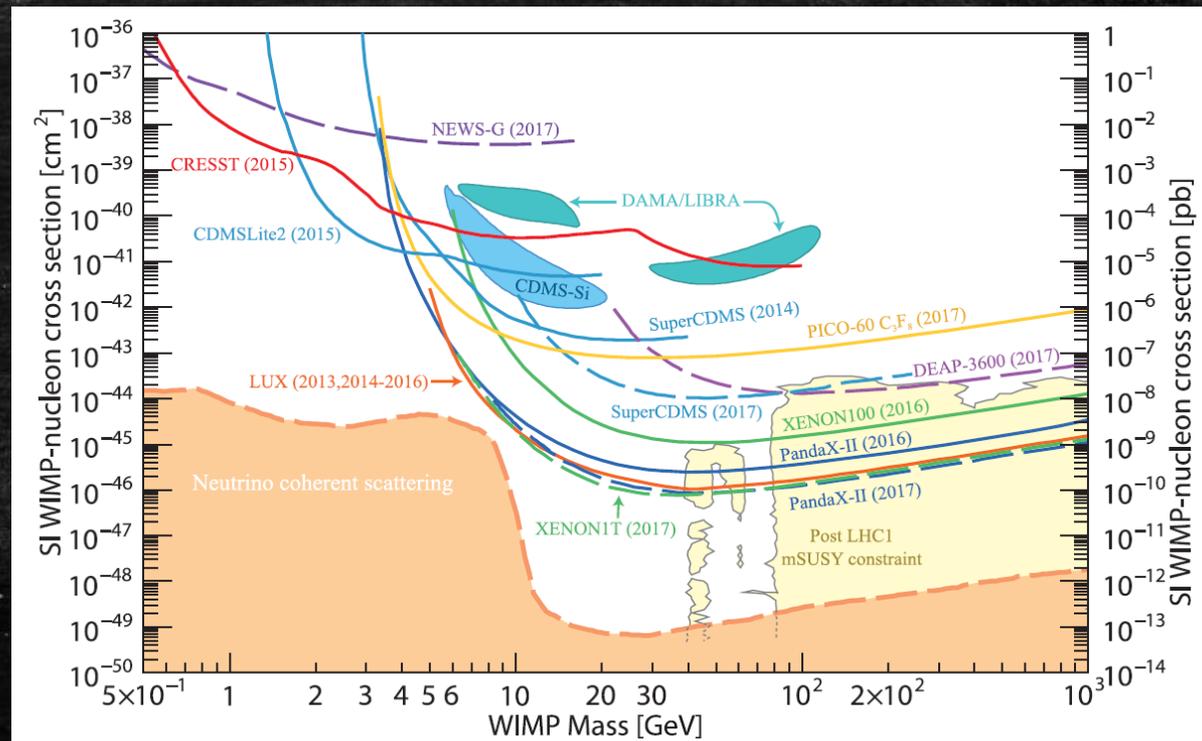
$\Omega_{baryon} \sim \Omega_{DM} \sim \Omega_{DE}$ 問題

宇宙観測より



暗黒物質

- **WIMP** (Weakly Interacting Massive Particle)
 - 100 GeV~10 TeVのSUSY粒子(ニュートリノ)と整合
 - <10 GeVの軽いWIMPの可能性も残っている
 - **XENONnT, LZ 2019~2020開始** → 超対称模型領域を探
 - LHC 横運動量欠損
 - ILC ヒッグス→WIMP
へ崩壊を分岐比で
0.3%まで探索
- **アクシオン**
 - 強いCP問題を解決
 - 非熱的に生成
- 原始ブラックホール、keV
ステイルニュートリノ、グ
ラビティーノ、隠れたセク
ター、アクシーノ...



暗黒エネルギー

宇宙定数？ (Λ CDMモデル)

スカラー場のポテンシャル？

一般相対性理論の拡張？

今のところ、観測を説明できる
モデルはなし

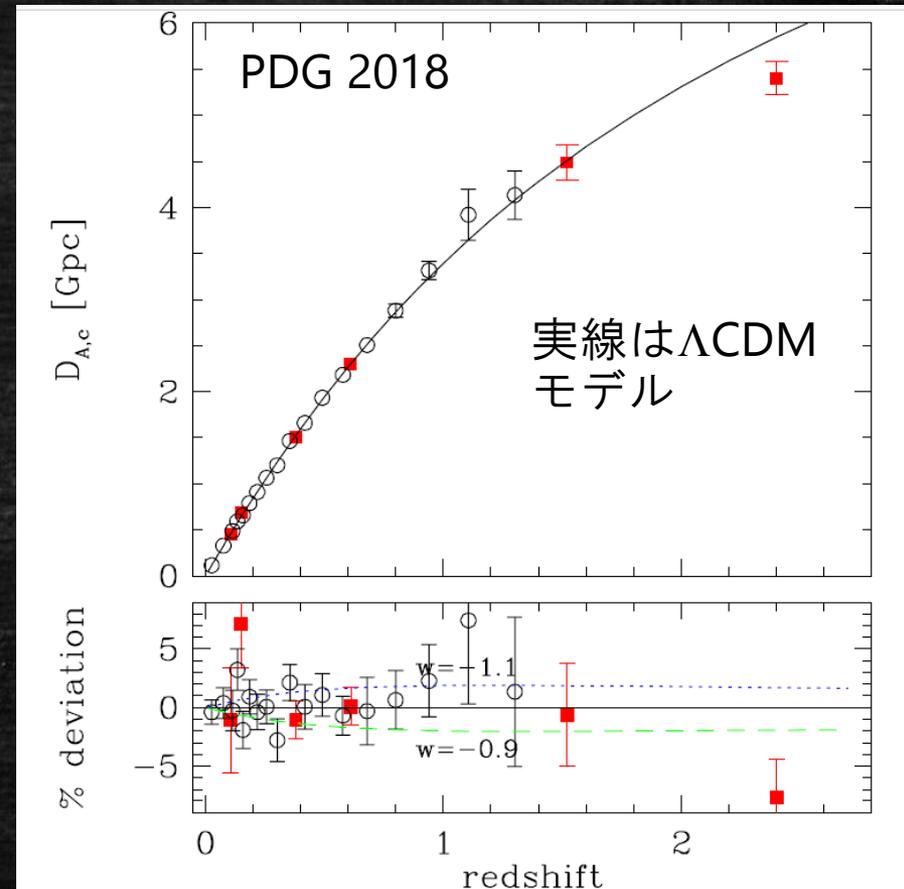
密度 $(2.2 \text{ meV})^4$

プランクスケールに比べて**123**
桁小さい

TeVスケールの真空エネルギー
に比べて**15**桁小さい。

(重力は弱いので超高エネルギースケール
なのに、暗黒エネルギーは小さいと、超低
エネルギースケール??)

$\Omega_{DE} \sim \Omega_{Matter}$ 問題



わけのわからなさ？

用例
期待される描像 直接証拠
状況証拠

マルチバース

量子重力

インフレーション

$\Omega_M \sim \Omega_{DE}$
暗黒エネルギー

ステライルν 複合ヒッグス, 余剰次元他もろもろ

暗黒物質

素粒子と相互作用の起源

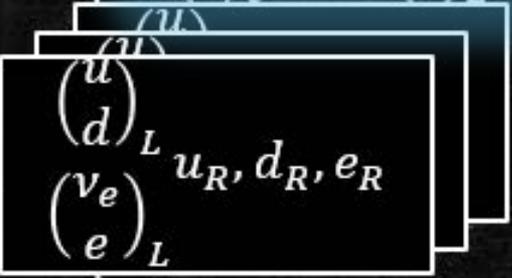
B lepton universality

ヒッグズ場と真空の安定性

インフレーションの起源

$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

重い右巻きν



q と ν の混合行列とCPの破れ ν の極小質量
 質量のパターン 物質優勢宇宙
 クォークとレプトンのパターン

10⁰ 10³ 10⁶ 10⁹ 10¹² 10¹⁵ 10¹⁸

TeV

エネルギースケール(GeV)

Plank

インフレーションの起源

標準インフレーションモデルでは

$$V = (3.2 \times 10^{16} \text{ GeV})^4 r$$

r = テンソル(重力波)/スカラー(凹凸)

- CMBによる原子重力波観測でインフレーションの直接証拠→エネルギースケール決定

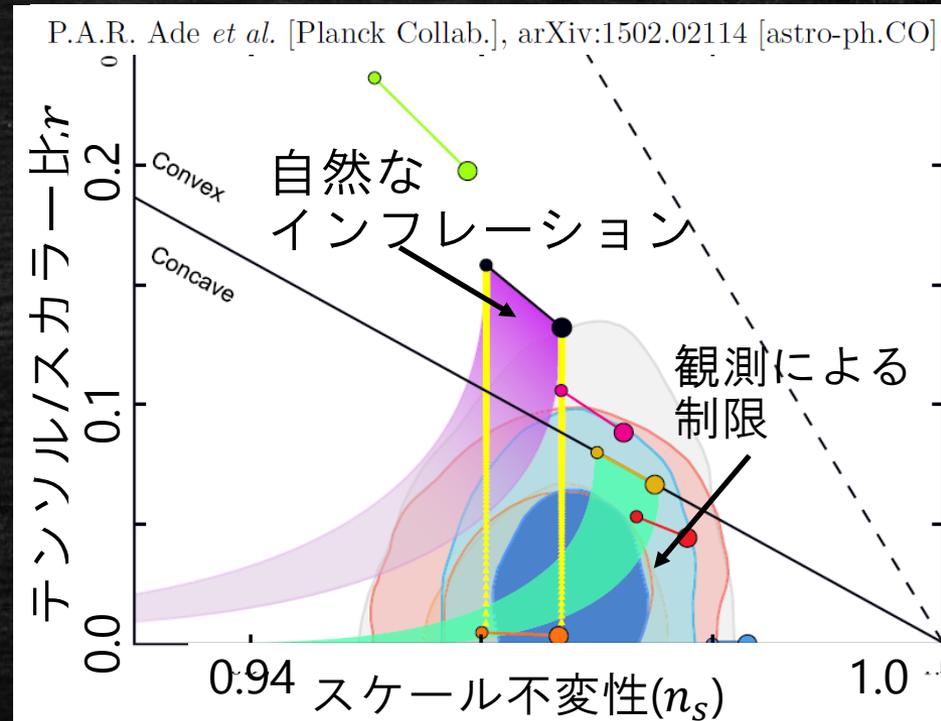
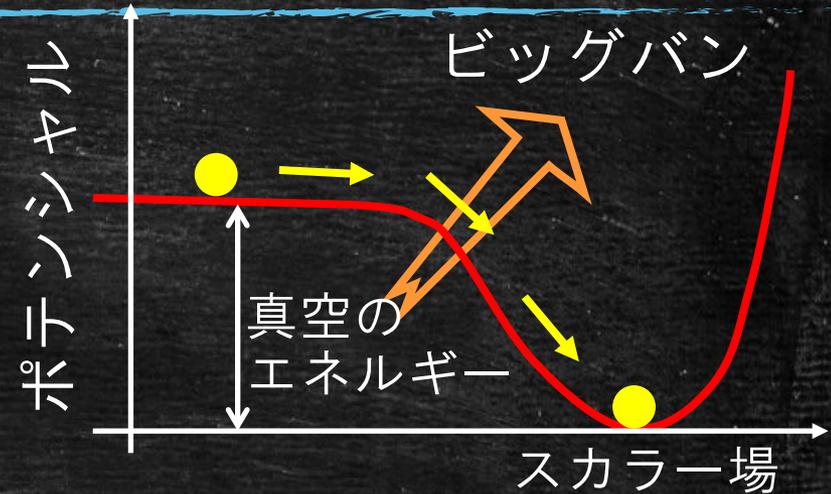
地上

- gruondBIRD
- SimonsArray $r > 0.03$
- Simons Observatory
- CMB stage-4 $r > 0.001$

衛星

- LiteBIRD $r > 0.001$

- ヒッグス・インフレーション？
ILCでヒッグスの精密測定



わけのわからなさ？

用例

期待される描像 直接証拠
 状況証拠

マルチバース

量子重力

$\Omega_M \sim \Omega_{DE}$
 暗黒エネルギー

複合ヒッグス, 余剰次元他もろもろ
 暗黒物質

インフレーション

XENONnT,
 LZ

ヒッグズ場と真空の安定性

C
 M
 B

素粒子と相互作用の起源

$\Omega_{baryon} \sim \Omega_{DM}$

n EDM,
 AXION

強い相互作用のCP

大統一

LHC
 ILC

coupling constant

Yukawa結合

陽子
 崩壊

バリオジェネシス/レプトジェネシス

現在の我々の知識

重い右巻 $\nu_{\beta\beta}$

振動

CMB
 質量

qとvの混合行列とCPの破れ

質量のパターン 物質優勢宇宙

クォークとレプトンのパターン

10^0

10^3

10^6

10^9

10^{12}

10^{15}

10^{18}

TeV

Plank

エネルギースケール(GeV)



おわり
