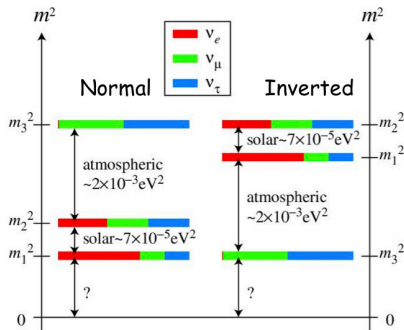


残された課題

- * ニュートリノ質量
- * いくつかの測定結果の標準理論予言との食い違い
- * 宇宙暗黒物質の正体
- * 宇宙バリオン・反バリオン非対称の起源
- * 初期宇宙におけるインフレーションダイナミクス
- * 多すぎるパラメータ
 - ** なぜ3世代のクォーク・レプトンが必要か
 - ** クォーク・レプトンとヒッグス場との湯川結合はどのように決まっているのか
 - ** なぜゲージ群は $SU(3) \times SU(2) \times U(1)$ なのか
- * パラメータの微調整
 - ** 電弱スケール
 - ** Strong CP
 - ** 宇宙暗黒エネルギー
- * 重力まで含めた量子論

残された課題 (ニュートリノ)

ニュートリノに質量と Maki-Nakagawa-Sakata 混合があることは確定



Majorana or Dirac?

Normal or Inverted?

CP violation?

残された課題 (ミューオン異常磁気能率)

ミューオン異常磁気能率の高精度測定

$$a_{\mu}^{\text{Exp}} = (11\,659\,208.9 \pm 6.3) \times 10^{-10}$$

標準理論の予言 (Hagiwara et al.) とのずれ

$$a_{\mu}^{\text{Exp}} - a_{\mu}^{\text{SM}} = (26.1 \pm 8.0) \times 10^{-10}$$

EW ゲージボソンの寄与と同じくらいのサイズのズレがある！

$$a_{\mu}^{\text{EW}} = (15.4 \pm 0.2) \times 10^{-10}$$

理論の不定性

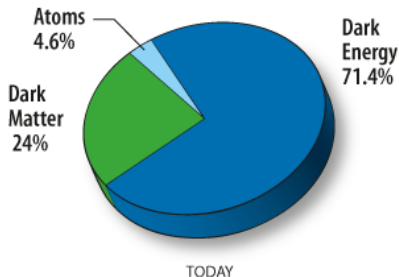
ハドロンによる真空偏極効果 (Belle II で improve する予定)

light-by-light scattering

残された課題 (宇宙暗黒物質の起源)



NASA webpage



WMAP webpage

DM は素粒子起源だとすると、標準模型を超える粒子が必要
WIMP or SuperWIMP?
熱的 or 非熱的?

残された課題 (宇宙バリオン非対称の起源)

BAU (Baryon Asymmetry of the Universe)

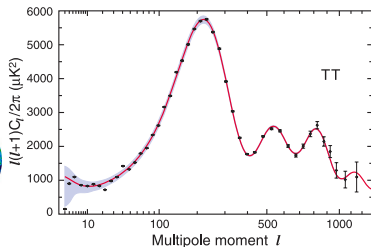
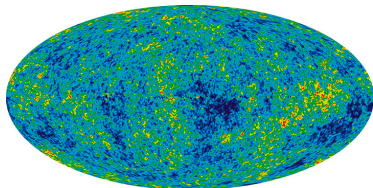
$$\frac{n_B}{n_\gamma} = \frac{n_b - n_{\bar{b}}}{n_\gamma} = (6.19 \pm 0.14) \times 10^{-10}$$

サハロフの3条件

- * バリオン数の破れ
- * C と CP 対称性の破れ
- * 平衡からの逸脱

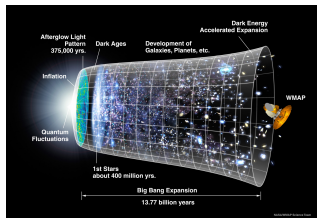
標準理論を超える物理が必要

残された課題 (インフレーションダイナミクス)



CMB の精密測定でインフレーションが検証された。いつ、どのようにしてインフレーションがおきたかが今後の課題。

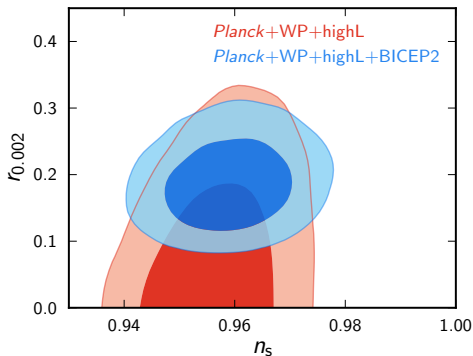
WMAP arXiv:1212.5225



WMAP

残された課題 (インフレーションダイナミクス)

BICEP2 のインパクト



BICEP2 arXiv:1403.3985

重力波起源の B モード偏極!!

残された課題 (インフレーションダイナミクス)

BICEP2 の結果

$$r = 0.20^{+0.07}_{-0.05}$$

GUT scale inflation! (F. Takahashi's talk at Nagoya U.)

$$V_{\text{inf}} \simeq (2.1 \times 10^{16} \text{ GeV})^4 \left(\frac{r}{0.16} \right)$$

高い再加熱温度

$$T_R \gtrsim 10^9 \text{ GeV}$$

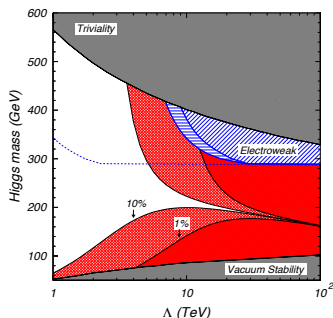
BAU や SuperWIMP シナリオに大きな影響

残された課題 (パラメータの微調整問題)

階層性問題: ヒッグスポテンシャルの二次項に大きな輻射補正が存在

$$M_{\text{bare}}^2 + \delta M_H^2, \quad \delta M_H^2 \propto \frac{1}{(4\pi)^2} \Lambda^2$$

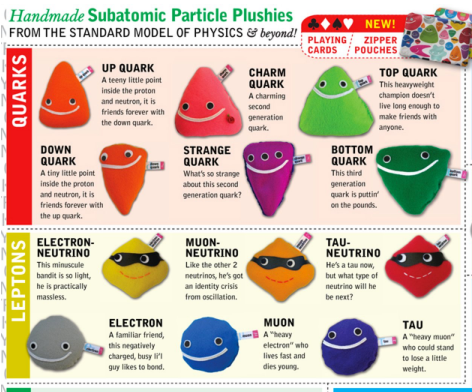
Λ に比べて十分小さい電弱対称性の破れのスケール: M_{bare}^2 の微調整
Kolda-村山 による定量化



arXiv:hep-ph/0003170

残された課題 (多すぎるパラメータ)

現代の Particle Zoo



Particle Zoo

ゲージ結合以外のパラメータ数:

クォーク質量 (6) + クォーク混合 (3) + KM 位相 (1) +

荷電レプトン質量 (3) + ヒッグスポテンシヤル (2) + ニュートリノ

標準模型を超える模型



村山 齊

標準模型を超える模型 (BSM)

どの BSM もまだ直接の証拠はない！

階層性問題を解決するためのいくつかのアイデアを紹介する

TeV Scale SUSY

フェルミオンとボソンの間の対称性 (超対称性) の導入
良い点

- * SUSY の破れまで含めて、具体的な模型を書き下すことができる。
- * R パリティを課すことによって、DM も説明できる可能性がある。
- * 大統一理論との相性がよい。
- * 電弱精密測定の結果と矛盾しない。

チャレンジ

- * パラメータの数が激増する。
- * ヒッグス質量 (126GeV) を説明するためには、トップクォークの超対称パートナーの質量が比較的大きい必要があり、その場合かなりの微調整が必要となる。

Composite Higgs (pNGB)

ヒッグス場を、近似的なグローバル対称性の pseudo Nambu-Goldstone 場だと考える。(Little Higgs 模型等)

良い点

- * なんらかのパリティを課すことによって、DM も説明できる可能性がある。
- * 電弱精密測定の結果と矛盾しないようにパラメータが選べる。

チャレンジ

- * くりこみ可能な具体的な模型がまだ書き下されておらず、低エネルギー有効理論を用いた解析にならざるを得ない。

Composite Higgs (ウォーキングテクニカラー)

ヒッグス粒子をテクニクォークの束縛状態だと考える。

良い点

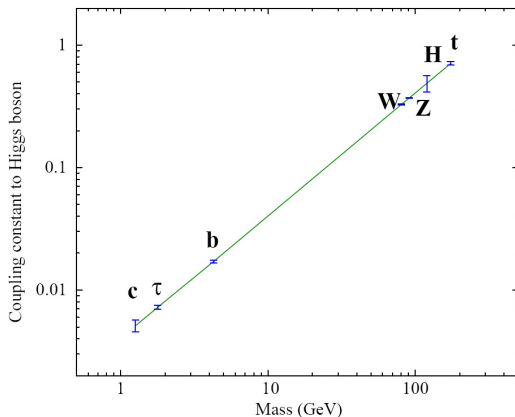
- * テクニバリオン等によって、DM を説明できる可能性がある。
- * 電弱対称性の破れまで含めて、すべてをゲージ相互作用で記述する枠組みであり、予言能力は原理的には高い
- * ゲージダイナミクスのコンフォーマル相を使った模型となっていて、理論的に面白い

チャレンジ

- * 非摂動論的ダイナミクスがまだ解かれておらず、具体的な模型を作るのが困難
- * トップ対凝縮のアイデアはあるものの、大きなトップクォーク質量を説明するのが一般的に困難
- * 電弱精密測定との整合性を説明するのが困難
- * ヒッグス質量 126GeV を得るのが困難。

拡張ヒッグス

どの場合も、標準模型のヒッグスセクターは拡張される。ヒッグスの相互作用の測定が重要に。



実験的に解明する手段

- * 理論が予言する新粒子の直接探索
エネルギーフロンティア
LHC, ILC, CLIC(Compact Linear Collider), FCC(Future Circular Collider)
- * 稀現象の探索・中間子、荷電レプトン等の精密測定核子崩壊:
HyperKamiokande (大統一理論等)
荷電レプトン数非保存: MEG、COMET, Belle II (タウ)
B 中間子崩壊: Belle II、LHC-B
ミューオン $g-2$ 、EDM
- * ニュートリノ物理
混合、CP、ヒエラルキー: T2K, Daya Bay, ...
 $0\nu\beta\beta$: KamLand, ...
- * ダークマター直接・間接探索: XMASS 等
- * ヒッグス質量・結合、トップクォーク質量、 W 質量・TGV 結合等の精密測定: LHC, ILC 等

まとめ

- * ヒッグス粒子の発見によって、素粒子標準理論の予言する素粒子はすべて発見された
- * 現在までに知られている実験事実は、少数の例外を除いて標準理論の予言と一致している
- * 標準理論は「くりこみ可能」なため、高エネルギーの物理に insensitive になっている
- * 標準理論が内包するパラメータの微調整問題は、TeV スケールに新物理が存在することを示唆している
- * TeV スケールの新物理は、DM や BAU をも説明できる可能性がある
- * 新物理の実験的探索には、新粒子の直接探索に加えて、既知の素粒子 (μ , B , ν , W , Z , t , h) の精密測定が重要