

Lightness of Higgs Boson and Spontaneous CP Violation in Lee Model

毛英男(北京大学)

2014年11月9日

Y.-N. Mao and S.-H. Zhu, arXiv:1409.6844

<http://arxiv.org/abs/1409.6844>

本次报告的目录

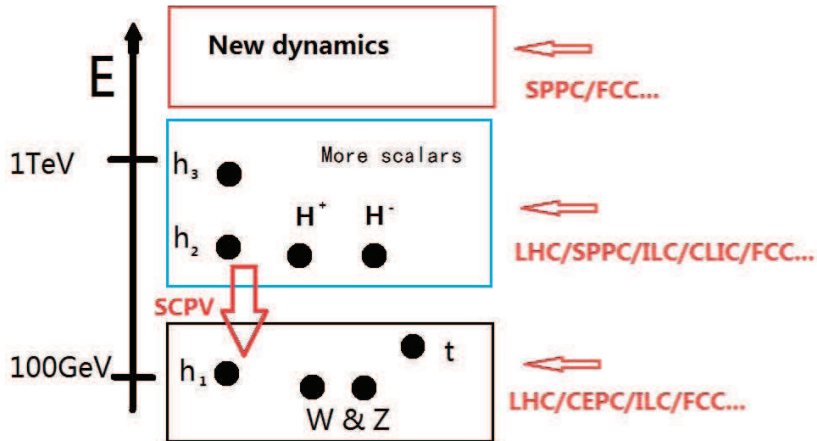
- 我们为什么要讨论这个问题
- 基于2HDM提出轻Higgs与小CP破坏的关联
- 讨论现有的实验对参数区间的限制
- 简要讨论未来实验的排除能力
- 主要结论与讨论

进行这一项工作的动机

- 自发的CP破坏，一种K-M机制以外的CP破坏来源
- Lee Model是可以实现自发CP破坏的简单方式
- 试图理解轻Higgs粒子与小CP破坏的关联

什么叫做轻？为什么把125GeV的Higgs粒子叫做轻？

- SM: $m_h = \sqrt{2\lambda}v = 125\text{GeV} \Rightarrow \lambda = 0.13 \ll 1$
- BSM: $m_h \ll \Lambda$ (可能的新的物理的标度 $\Lambda \sim \mathcal{O}(\text{TeV})$ 或更高)



S.-H. Zhu, arXiv:1410.2042

<http://arxiv.org/abs/1410.2042>

The Lee Model

T. D. Lee, Phys. Rev. D 8, 1226 (1973)

A Theory of Spontaneous T Violation

$$\mathcal{L} = \sum_{i=1,2} (D_\mu \phi_i)(D^\mu \phi_i) - V(\phi_1, \phi_2);$$

$$V = V_2 + V_4$$

$$= \mu_1^2 R_{11} + \mu_2^2 R_{22} + \lambda_1 R_{11}^2 + \lambda_2 R_{11} R_{12} + \lambda_3 R_{11} R_{22} \\ + \lambda_4 R_{12}^2 + \lambda_5 R_{12} R_{22} + \lambda_6 R_{22}^2 + \lambda_7 I_{12}^2;$$

其中 $R_{ij} = \text{Re}(\phi_i^\dagger \phi_j)$, $I_{ij} = \text{Im}(\phi_i^\dagger \phi_j)$.

标量场

$$\phi_1 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \phi_1^+ \\ v_1 + R_1 + iI_1 \end{pmatrix}, \quad \phi_2 = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} \phi_2^+ \\ v_2 e^{i\xi} + R_2 + iI_2 \end{pmatrix}.$$

如何实现自发CP破坏——真空期待值

$$\langle \phi_1 \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v_1 \end{pmatrix}, \quad \langle \phi_2 \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \begin{pmatrix} 0 \\ v_2 e^{i\xi} \end{pmatrix}.$$

两个真空期待值之间可以存在一个无法消去的相位差 ξ

标量场部分的模型参数(9=2+7):

- (4)标量粒子的质量——带电 m_{\pm} , 中性 $m_i, (i = 1, 2, 3)$
- (3)真空期待值—— v_1, v_2, ξ 同上一頁
- (2) $h_i VV$ 耦合顶点与标准模型之比—— $c_i = g_{h_i VV} / g_{h VV}^{\text{SM}}$

- SM: $m_W = gv/2$, hW^+W^- 顶点 $g_{hWW}^{\text{SM}} = 2m_W^2/v = g^2v/2$
- 2HDM; $m_W = g\sqrt{v_1^2 + v_2^2}/2$, $h_iW^+W^-$ 顶点 $g_{h_iWW} = g^2v_i/2$
- 其平方和是一个不变量 $g^2v/2$ — 电弱对称性破缺
- 这导致 $c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 = 1$, 三个 c_i 中只有两个独立。

关于Yukawa耦合:

- 所有耦合是实数, 此外没有其他的限制(Type III)
- 可以产生正确的质量和CKM矩阵, 例如W. Liao, (2014)
Flavor (non)diagonal CP phase and the Higgs physics
- FCNC问题由实验来限制(后面讨论)

轻Higgs与小CP破坏的关联

记号: $s_\alpha \equiv \sin \alpha, c_\alpha \equiv \cos \alpha, t_\alpha \equiv \tan \alpha$

此外定义 $\tan \beta \equiv v_2/v_1$ 作为两个真空期待值之比

首先得到Goldstone场

$$G^\pm = c_\beta \phi_1^\pm + e^{\mp i\xi} \phi_2^\pm$$

$$G^0 = c_\beta I_1 + s_\beta c_\xi I_2 - s_\beta s_\xi R_2$$

中性Higgs质量矩阵 \tilde{m} (对称矩阵, 以 $v^2/2$ 为单位)

$$\left(\begin{array}{cc} (\lambda_4 - \lambda_7)s_\xi^2 & -((\lambda_4 - \lambda_7)s_\beta c_\xi \\ & + \lambda_2 c_\beta)s_\xi \\ & -((\lambda_4 - \lambda_7)c_\beta c_\xi \\ & + \lambda_5 s_\beta)s_\xi \\ \\ 4\lambda_1 c_\beta^2 + 2\lambda_2 c_\beta s_\beta c_\xi & (2(\lambda_3 + \lambda_7) + (\lambda_4 - \lambda_7)c_\xi^2)s_\beta c_\beta \\ + (\lambda_4 - \lambda_7)s_\beta^2 c_\xi^2 & + \lambda_2 c_\beta^2 c_\xi + \lambda_5 s_\beta^2 c_\xi \\ \\ & (\lambda_4 - \lambda_7)c_\beta^2 c_\xi^2 \\ & + 2\lambda_5 s_\beta c_\beta c_\xi + 4\lambda_6 s_\beta^2 \end{array} \right)$$

- 按照 $(t_\beta s_\xi)$ 做展开

$$\tilde{m} = \tilde{m}_0 + (t_\beta s_\xi)\tilde{m}_1 + (t_\beta s_\xi)^2\tilde{m}_2 + \dots$$

- 在 $t_\beta s_\xi \rightarrow 0$ 的极限下, $\tilde{m} \rightarrow \tilde{m}_0$, $\det(\tilde{m}_0) = 0$
- 求解本征值方程, 关于最轻的中性Higgs的结果
(到 $t_\beta s_\xi$ 的领头阶近似)

$$\begin{aligned}
m_h^2 &= \frac{v^2 t_\beta^2 s_\xi^2}{2} \left(\frac{(\tilde{m}_1)_{12}^2}{(\tilde{m}_0)_{22}} + \frac{(\tilde{m}_1)_{13}^2}{(\tilde{m}_0)_{33}} + (\tilde{m}_2)_{11} \right) \\
&= \frac{v^2 t_\beta^2 s_\xi^2}{2} \left[4(\lambda_3 + \lambda_7)^2 \left(\frac{c_\theta^2}{(\tilde{m}_0)_{22}} + \frac{s_\theta^2}{(\tilde{m}_0)_{33}} \right) + \lambda_5^2 \left(\frac{s_\theta^2}{(\tilde{m}_0)_{22}} \right. \right. \\
&\quad \left. \left. + \frac{c_\theta^2}{(\tilde{m}_0)_{33}} \right) - 2\lambda_5(\lambda_3 + \lambda_7)s_{2\theta} \left(\frac{1}{(\tilde{m}_0)_{22}} - \frac{1}{(\tilde{m}_0)_{33}} \right) + 4\lambda_6 \right]; \\
h &= I_2 + t_\beta s_\xi \left(\frac{(\tilde{m}_1)_{12}}{(\tilde{m}_0)_{22}} (c_\theta R_1 + s_\theta R_2) + \frac{(\tilde{m}_1)_{13}}{(\tilde{m}_0)_{33}} (c_\theta R_2 - s_\theta R_1) - \frac{I_1}{t_\xi} \right) \\
&= I_2 + t_\beta s_\xi \left[\left(2(\lambda_3 + \lambda_7) \left(\frac{c_\theta^2}{(\tilde{m}_0)_{22}} + \frac{s_\theta^2}{(\tilde{m}_0)_{33}} \right) + \frac{\lambda_5 s_{2\theta}}{2} \left(\frac{1}{(\tilde{m}_0)_{22}} \right. \right. \right. \\
&\quad \left. \left. - \frac{1}{(\tilde{m}_0)_{33}} \right) \right) R_1 + \left((\lambda_3 + \lambda_7) s_{2\theta} \left(\frac{1}{(\tilde{m}_0)_{22}} - \frac{1}{(\tilde{m}_0)_{33}} \right) \right. \\
&\quad \left. \left. + \lambda_5 \left(\frac{s_\theta^2}{(\tilde{m}_0)_{22}} + \frac{c_\theta^2}{(\tilde{m}_0)_{33}} \right) \right) R_2 - \frac{I_1}{t_\xi} \right].
\end{aligned}$$

这里 $(\tilde{m}_0)_{22(33)}$ 是矩阵 \tilde{m}_0 除了0以外的两个本征值

$$m_h \propto t_\beta s_\xi, \quad h \propto I_2 + \mathcal{O}(t_\beta s_\xi) R_i$$

同时可以得到

$$c_1 = t_\beta s_\xi (1 + \eta_1) \propto t_\beta s_\xi$$

其中

$$\begin{aligned} \eta_1 &= c_\theta \frac{(\tilde{m}_1)_{12}}{(\tilde{m}_0)_{22}} - s_\theta \frac{(\tilde{m}_1)_{13}}{(\tilde{m}_0)_{33}} \\ &= 2(\lambda_3 + \lambda_7) \left(\frac{c_\theta^2}{(\tilde{m}_0)_{22}} + \frac{s_\theta^2}{(\tilde{m}_0)_{33}} \right) + \frac{\lambda_5 s_{2\theta}}{2} \left(\frac{1}{(\tilde{m}_0)_{22}} - \frac{1}{(\tilde{m}_0)_{33}} \right) \end{aligned}$$

量度CP破坏大小的量:

- 标量部分, 中性Higgs部分 $K = c_1 c_2 c_3$

A. Méndez and A. Pomaral, *Phys. Lett. B* 272, 313 (1991)

- Yukawa部分Jarlskog量, 定义为

$$\det(i[M_U M_U^\dagger, M_D M_D^\dagger]) = 2J \prod_{i < j} (m_{U_i}^2 - m_{U_j}^2)(m_{D_i}^2 - m_{D_j}^2)$$

C. Jarlskog, *Phys. Rev. Lett.* 55, 1039 (1985)

$J_{\text{SM}} = (3.06_{-0.20}^{+0.21}) \times 10^{-5}$, K. A. Olive et al. (Particle Data Group), *Chin. Phys. C* 38, 090001 (2014) Download

在 $t_\beta s_\xi \rightarrow 0$ 的极限下, $m_h, K, J, c_1 \propto t_\beta s_\xi$

- 这四个量以同样的方式随着 $t_\beta s_\xi \rightarrow 0$ 趋近0
- 给出轻Higgs与小CP破坏的关联
- 最轻Higgs粒子趋近赝标量
- 现实世界中混进一些标量成分

没有标准模型极限, $c_1^2 \sim \mathcal{O}(0.1)$ (如0.2, 0.3, 0.4, ..., $c_1^{\text{SM}} = 1$)

实验限制(包括高能与低能部分)

高能部分——

- $h \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$
- 重的中性Higgs的寻找
- 电弱精确测量(S-T参数)限制
- LHC信号强度的限制(χ^2 拟合)
- 关于顶夸克的FCNC过程(稀有衰变, 同号对产生)

低能部分——

- 对电子、中子的EDM测量
- 介子混合及其中的CP破坏
- B介子的稀有衰变($\bar{B} \rightarrow X_s \gamma, B_{d,s}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$)

结果是仍然存活。

主要结果

A. $h \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ 过程CP性质的测量

$$\mathcal{L}_{hZZ} = \frac{h}{v} \left(a_1 m_Z^2 Z^\mu Z_\mu + \frac{1}{2} a_2 Z_{\mu\nu} Z^{\mu\nu} + \frac{1}{2} a_3 Z_{\mu\nu} \tilde{Z}^{\mu\nu} \right)$$

- 实验在 $> 3\sigma$ 排除纯赝标态(对应 $a_1 = a_2 = 0$ 但 $a_3 \neq 0$)
CMS Collaboration, Phys. Rev. D 89, 092007 (2014)
<http://arxiv.org/abs/1312.5353>
- 但不排斥混合态

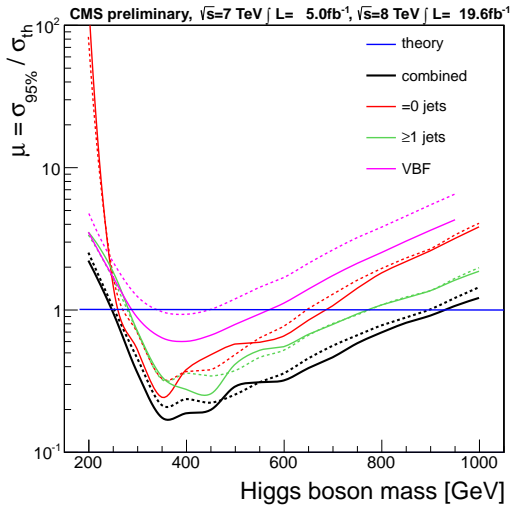
- 利用物理量 $f_{a3} = (a_3/a_1)^2 / ((a_3/a_1)^2 + \sigma_1/\sigma_3)$,
其中 $\sigma_{1(3)}$ 指只有 $a_{1(3)} = 1$ 且其余 $a_i = 0$ 时对应的分宽度。
- 现在的测量 $f_{a3} < 0.47 \Leftrightarrow |a_3/a_1| < 2.4$
CMS Collaboration, Phys. Rev. D 89, 092007 (2014)
<http://arxiv.org/abs/1312.5353>
- 但是可重整模型中 a_3 来自圈诱导, $a_3 \ll a_1 \Rightarrow$ 限制很松

B. 重中性Higgs的寻找

CMS Collaboration, CMS-PAS-HIG-13-014

- 按照标准模型的 hVV 耦合, 248 ~ 950 GeV已排除
- 本文讨论的情况($c_i < 1$)直接读图,
重Higgs倾向于出现在 $\lesssim 300$ GeV或 $\gtrsim 700$ GeV
- 这是取基准的参考, 并非严格的限制
如果某个重Higgs与 ZZ 耦合非常弱, 仍然可出现在中间

从CMS-PAS-HIG-13-014摘取的图



C. 电弱精确测量(S-T参数)

取参考值 $m_h = 126\text{GeV}$, $m_t = 173\text{GeV}$, 固定 $U = 0$, 有

$S = 0.05 \pm 0.09$, $T = 0.08 \pm 0.07$, $R = +0.91$,

The GFitter Group, Eur. Phys. J. C72, 2205 (2012),

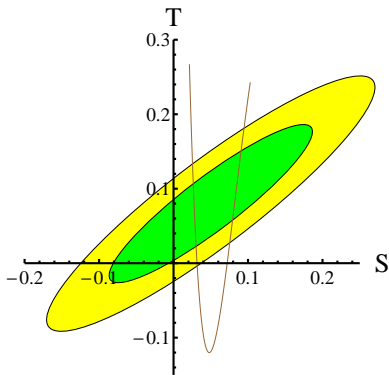
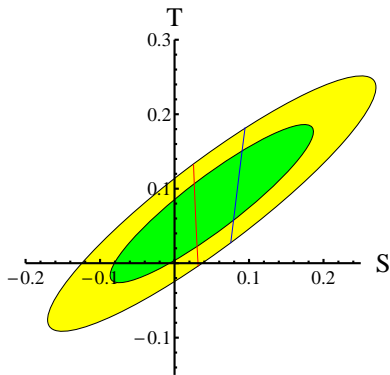
<http://arxiv.org/abs/1209.2716>

根据上一小节取三类基准点, 带电Higgs质量的限制:

- S参数变动较小，T参数变动较大
- 带电Higgs倾向于质量接近某个中性Higgs，尤其当两个中性Higgs的质量比较接近时，行为更明显
 - T参数对同位旋的破坏比较敏感
- 下一页看几张示意图

例如：取 $c_1^2 = 0.25$, $c_2^2 = 0.4$, $c_3^2 = 0.35$, $m_2 = 280\text{GeV}$, $m_3 = 300\text{GeV}$

- m_{\pm} 的允许区是(94 ~ 136)GeV(左蓝)和(312 ~ 351)GeV(左红)
- 右图棕色曲线是 $80\text{GeV} < m_{\pm} < 380\text{GeV}$ 对应的点(S, T)示意图



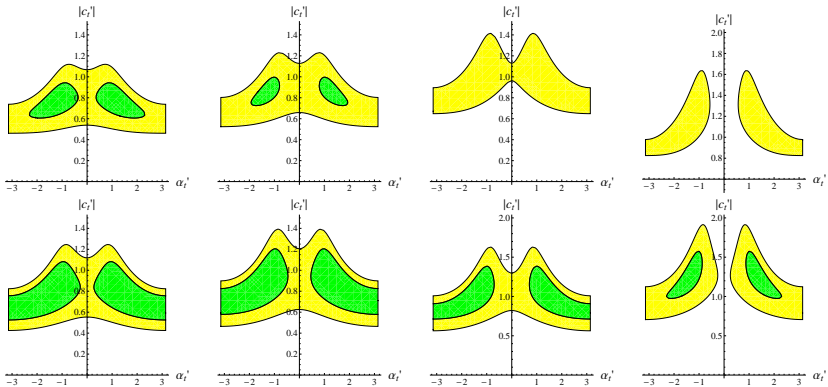
D. LHC直接测量——信号强度拟合

- LHC结果与标准模型符合很好
- 是否支持一个CP混合态，尤其可能有较大赝标成分
- Global Fit

结果是不排除，即使 hVV 的耦合偏小。

$$\mu = (\sigma \cdot \Gamma / \Gamma_{\text{tot}}) / (\sigma \cdot \Gamma / \Gamma_{\text{tot}})_{\text{SM}}$$

最新的实验结果出现后CMS与ATLAS的拟合行为相似。一些示意图



图片取自<http://arxiv.org/abs/1409.6844>, 修改的 htt 顶点允许区:

$$\text{Re}(c_t) \rightarrow \text{Re}(c_t), \quad \text{Im}(c_t) \rightarrow 1.52\text{Im}(c_t)$$

- 第一排是ATLAS结果, 固定 $c_V = 0.6, c_{\pm} = 0.4, c_{\tau} = 0.8$;
- 第二排是CMS结果, 固定 $c_V = 0.5, c_{\pm} = 0.2, c_{\tau} = 1$;
- 从左到右 $c_b = 0.1, 0.3, 0.5, 0.7$
- 拟合对 c_b 敏感, 且ATLAS与CMS数据的行为类似

E. 对顶夸克FCNC顶点的限制

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{\sqrt{2}} \sum_{q=c,u} \bar{t}(\xi_{1tq} + \xi_{2tq}\gamma^5)qh + \text{h.c.}$$

- $t \rightarrow qh$ 和 $uu \rightarrow tt$ 过程 $\Rightarrow \xi_{tq} \lesssim \mathcal{O}(0.1)$
- $D^0 - \bar{D}^0$ 混合, 交换 t, h 的Box图 $\Rightarrow |\xi_{tu}\xi_{tc}| \lesssim \mathcal{O}(10^{-3})$

F. 对其余夸克FCNC顶点的限制

- 介子混合过程 $\Rightarrow \xi_{ij}v/\sqrt{2m_i m_j} \lesssim \mathcal{O}(10^{-2} \sim 10^{-1})$

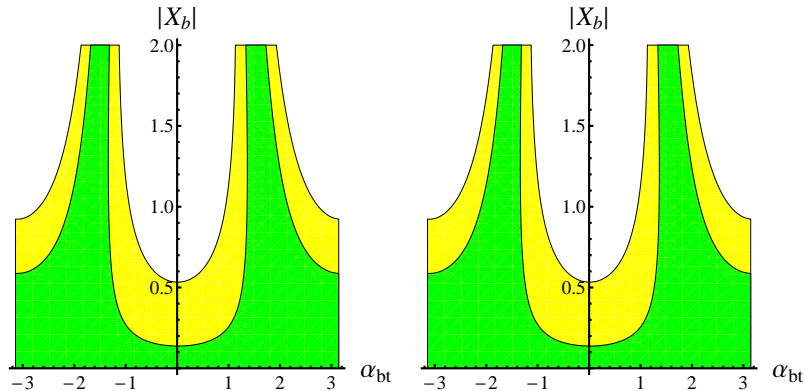
G. 对 tbH^+ 顶点的限制

$$\mathcal{L} = -\bar{t}(X_t m_t P_L + X_b m_b P_R)b/v + \text{h.c.}$$

- $t \rightarrow bH^+$ 稀有衰变, 对于 $m_{\pm} < m_t$, $X_t \lesssim \mathcal{O}(0.1 \sim 1)$
- B介子混合对重的带电Higgs给出 $X_t \lesssim (0.5 \sim 1)$
- 中性B介子全轻衰变给出的限制与前两过程大致相当

H. B介子的辐射衰变

按之前的限制选择基准点，辐射衰变给出的信息较少，示意图



左 $X_t = 0.5, m_{\pm} = 150\text{GeV}$; 右 $X_t = 0.8, m_{\pm} = 500\text{GeV}$ 。

I. 电子/中子电偶极矩(EDM)测量给出的限制

$$-(id/2)\bar{\psi}\sigma^{\mu\nu}\gamma^5\psi F_{\mu\nu} \rightarrow d(\vec{\mathbf{S}}/S) \cdot \vec{\mathbf{E}}$$

- 正是电偶极矩与电场相互作用的形式
- 破坏P和CP的相互作用，无经典对应
- 电子和中子的电偶极矩测量常用于限制有CP破坏的模型

EDM实验结果—

$$d_e = (-2.1 \pm 4.5) \times 10^{-29} e \cdot \text{cm} \quad (|d_e| < 8.7 \times 10^{-29} e \cdot \text{cm} \quad 90\% \text{C.L.})$$

$$d_n = (0.2 \pm 1.7) \times 10^{-26} e \cdot \text{cm} \quad (|d_n| < 2.9 \times 10^{-26} e \cdot \text{cm} \quad 90\% \text{C.L.})$$

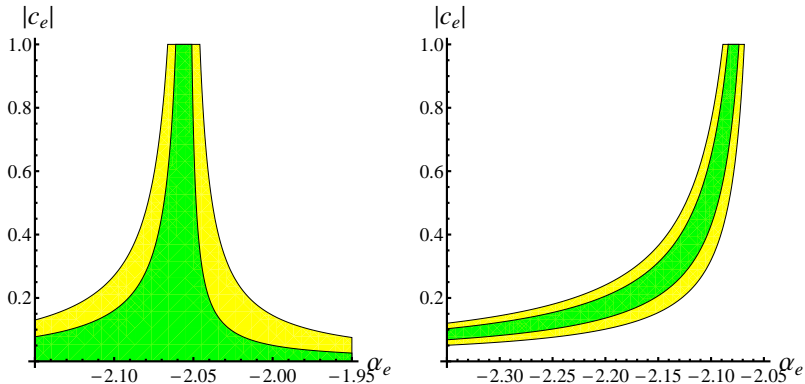
C. Baker et. al. Phys. Rev. Lett. 97, 131801 (2006)

<http://arxiv.org/abs/hep-ex/0602020>

The ACME Collaboration, Science 343 6168, 269 (2014)

<http://arxiv.org/abs/1310.7534>

电子EDM限制非常强，表现为参数之间的较强关联，示意图



取的基准点接近最佳拟合位置, $c_V = 0.5, c_t = e^{1.2i}$

左图忽略重Higgs的贡献, 右图将重Higgs的贡献也考虑进去

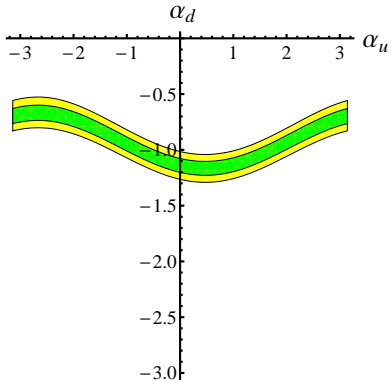
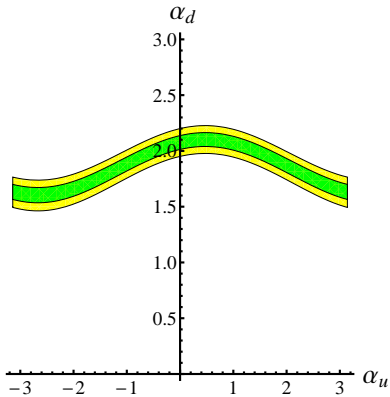
中子EDM由四部分贡献——

夸克EDM、夸克CEDM、Weinberg算符、强CP相角

M. Pospelov and A. Ritz, Ann. Phys. 318, 169 (2005)

<http://arxiv.org/abs/hep-ph/0504231>

下页示意图，基准点同电子选取，此外固定 $|c_d| = |c_u| = 1$



限制也比较强，但比起电子一般弱一些，且对 $hd\bar{d}$ 耦合更敏感。

未来的实验检验

LHC上VBF/V+H过程以及 $h \rightarrow b\bar{b}$ 衰变道的测量

- 是否VBF/VH产生或 $b\bar{b}$ 衰变显著偏离标准模型
- 如果在 $1(2)\sigma$ 与标准模型符合很好, LHC的排除能力

Excluded level	2σ	3σ
300fb^{-1}	0.62	0.55
3000fb^{-1}	0.77	0.72

Excluded level	2σ	3σ
300fb^{-1}	0.53	0.45
3000fb^{-1}	0.7	0.65

LHC上 $h \rightarrow ZZ^* \rightarrow 4\ell$ 过程 CP 性质的测量

- 300fb^{-1} : $f_{a3} < 0.14 \Leftrightarrow |a_3/a_1| < 1$
- 3000fb^{-1} : $f_{a3} < 0.04 \Leftrightarrow |a_3/a_1| < 0.5$

H. Okawa (on behalf of ATLAS and CMS Collaborations, 2014)

Studies of Higgs Boson Properties in Future LHC Runs

- 结论: 限制仍然很松。

电子对撞机上 $Z+H$ 产生截面的直接测量

$\sigma \propto c_1^2$, 几个 fb^{-1} 足够与标准模型区分。

主要结论与讨论

结论

- 我们提出一种理解小CP破坏与轻Higgs关联的机制
- 模型特征——没有标准模型极限
- 讨论现有的实验限制，结果是仍然存活
- 简要讨论未来实验的排除能力

需要继续进行的工作

- 如何自动产生小的FCNC和强CP相角?
- 宇宙学问题(Domain Wall, EW Baryogenesis)?
- 背后的物理——新的动力学?
- 与其他有CP破坏效应的模型之间如何区分?
- 其他预言(尤其关于CP破坏)...

(完, 谢谢!)