

# 李模型中的轻Higgs粒子与自发CP破坏

毛英男

*CFHEP, IHEP*

(Dated: August 24, 2016)

- Y.-N. Mao and S.-H. Zhu, arXiv: 1602.00209 (Accepted by Phys. Rev. D)
- G. Li, Y.-N. Mao, C. Zhang, and S.-H. Zhu, in preparation.

maoyn@ihep.ac.cn

## Motivation & Introduction

- 研究可能的新的CP破坏来源—BSM、重子物质不对称性
- 研究标量粒子谱与CP破坏之间潜在的关联—真空
- 李模型—SCPV，典型的新的CP破坏来源，且密切关联真空
- 与之前的工作[Y.-N. Mao and S.-H. Zhu, Phys. Rev. D 90, 115024 (2014)]对比，研究可能的隐藏在电弱标度以下的新物理
- 唯象学限制与未来检验(Updated after ICHEP2016)

## 关于“轻”的粒子：

- 电弱理论中存在固有的标度 $v = 246\text{GeV}$
- 在弱耦合的2HDM中，典型的标量粒子质量 $m \sim \mathcal{O}(v)$ (例如， $125\text{GeV}$ )
- 李模型的特定参数区域内，我们可以自然地预言一个轻( $m \ll v$ )的标量粒子，这基于之前的工作[Y.-N. Mao and S.-H. Zhu, Phys. Rev. D 90, 115024 (2014)]中提出的轻标量粒子与小CP破坏之间可能存在的关联机制
- 这个工作中不假设 $125\text{GeV}$ 的Higgs粒子为最轻

## Lee Model (by T. D. Lee)

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

带有自发CP破坏的2HDM，假设整个拉氏量都是CP不变的

$$\mathcal{L} = (D_\mu \phi_1)^\dagger (D^\mu \phi_1) + (D_\mu \phi_2)^\dagger (D^\mu \phi_2) - V(\phi_1, \phi_2);$$

$$\begin{aligned} V(\phi_1, \phi_2) = & \mu_1^2 R_{11} + \mu_2^2 R_{22} + \lambda_1 R_{11}^2 + \lambda_2 R_{11} R_{12} + \lambda_3 R_{11} R_{22} \\ & + \lambda_4 R_{12}^2 + \lambda_5 R_{12} R_{22} + \lambda_6 R_{22}^2 + \lambda_7 I_{12}^2. \end{aligned}$$

其中  $R_{ij} = \text{Re}(\phi_i^\dagger \phi_j)$ ,  $I_{ij} = \text{Im}(\phi_i^\dagger \phi_j)$ , 共9个参数。标量场

$$\phi_1 = \left( \phi_1^+, (v_1 + R_1 + iI_1)/\sqrt{2} \right)^T, \quad \phi_2 = \left( \phi_2^+, (v_2 \exp(i\xi) + R_2 + iI_2)/\sqrt{2} \right)^T.$$

## 真空条件

$$\mu_1^2 = -\lambda_1 v_1^2 - \frac{\lambda_3 + \lambda_7}{2} v_2^2 - \frac{\lambda_2}{2} v_1 v_2 c_\xi; \quad \mu_2^2 = -\lambda_6 v_2^2 - \frac{\lambda_3 + \lambda_7}{2} v_2^1 - \frac{\lambda_5}{2} v_1 v_2 c_\xi;$$

$$0 = s_\xi \left( \frac{\lambda_2}{2} v_1^2 + \frac{\lambda_5}{2} v_2^2 + (\lambda_4 - \lambda_7) v_1 v_2 c_\xi \right) \xrightarrow{\text{if } |\lambda_2 v_1^2 + \lambda_5 v_2^2| < 2|\lambda_4 - \lambda_7| v_1 v_2} \text{SCPV}.$$

- 
- $\tan \beta \equiv v_2/v_1, v \equiv \sqrt{v_1^2 + v_2^2}$
  - $\xi$  是  $v_1$  与  $v_2$  之间的一个物理的相位差
  - $\xi \neq 0$  意味着自发CP破坏出现了

## 物理参数(Higgs Sector, 共9个)

- 标量粒子质量(4)—— $m_1, m_2, m_3, m_{\pm}$
- 真空期待值(3)—— $v_1, v_2, \xi$  (or equivalently  $v, \beta, \xi$ )
- $h_i VV$ 耦合强度(2)—— $c_1, c_2$

定义 $c_i \equiv g_{h_i VV}/g_{h_i VV, \text{SM}}$ ,  $c_1^2 + c_2^2 + c_3^2 = 1$ 。

## Yukawa Sector:

- CP守恒 $\Rightarrow$ Yukawa耦合都是实数， CKM矩阵中的CP破坏相角来源于复真空
- 没有额外的分立对称性—最一般的Yukawa耦合形式(Type III)
- 产生正确的夸克质量矩阵和CKM矩阵， 例如W. Liao, (2014)  
Flavor (non)diagonal CP phase and the Higgs physics
- e.g. 与第三代的相互作用(按质量顺序标记第*i*个中性Higgs粒子)

$$\sum \frac{1}{v} (c_{i,t} m_t \bar{t}_L t_R + c_{i,b} m_b \bar{b}_L b_R) h_i + \frac{\sqrt{2}}{v} (\bar{t}_L m_b \xi_{bb} b_R + \bar{t}_R m_t \xi_{tt} b_L) H^+ + \text{h.c.}$$

其中 $c_{1,t/b} = \mp i \xi_{tt/bb} + \mathcal{O}(t_\beta s_\xi)$

对CP破坏大小的表征:

- Scalar sector:  $K \equiv c_{1,V}c_{2,V}c_{3,V}(m_1^2 - m_2^2)(m_2^2 - m_3^2)(m_3^2 - m_1^2)/v^6$   
A. Méndez and A. Pomaral, Phys. Lett. B 272, 313 (1991).
- Yukawa sector: Jarlskog不变量 $J$ , 定义为

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

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

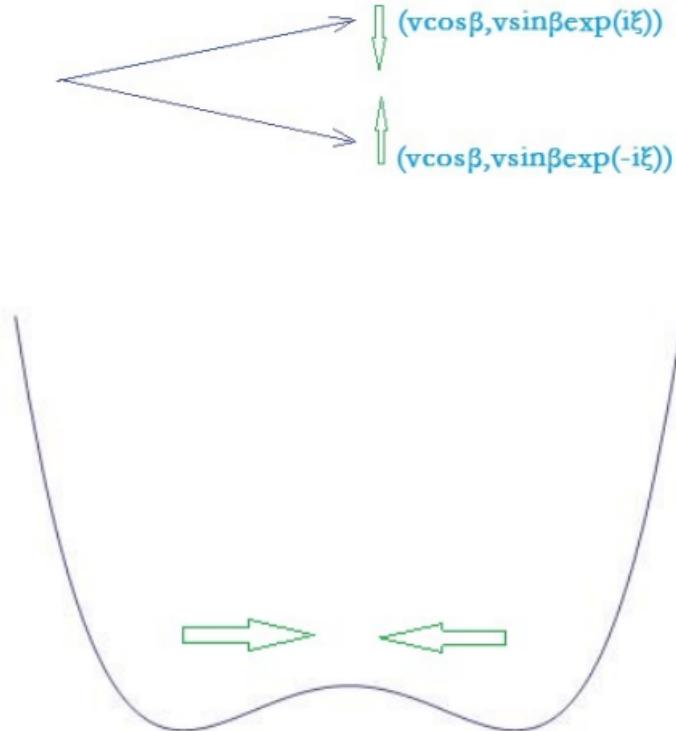
## 轻Higgs粒子与小CP破坏的关联

质量矩阵 $\tilde{m}$ (对称矩阵, 以为 $v^2/2$ 单位):

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

$$\begin{aligned}
m_1^2 &= \frac{v^2 t_\beta^2 s_\xi^2}{2} \left( (\tilde{m}_2)_{11} - \frac{(\tilde{m}_1)_{12}^2}{(\tilde{m}_0)_{22}} - \frac{(\tilde{m}_1)_{13}^2}{(\tilde{m}_0)_{33}} \right) \\
&= \frac{v^2 t_\beta^2 s_\xi^2}{2} \left[ 4\lambda_6 + 2\lambda_5(\lambda_3 + \lambda_7)s_{2\theta} \left( \frac{1}{(\tilde{m}_0)_{22}} - \frac{1}{(\tilde{m}_0)_{33}} \right) \right. \\
&\quad \left. - 4(\lambda_3 + \lambda_7)^2 \left( \frac{c_\theta^2}{(\tilde{m}_0)_{22}} + \frac{s_\theta^2}{(\tilde{m}_0)_{33}} \right) - \lambda_5^2 \left( \frac{s_\theta^2}{(\tilde{m}_0)_{22}} + \frac{c_\theta^2}{(\tilde{m}_0)_{33}} \right) \right]; \\
h_1 &= I_2 - t_\beta s_\xi \left( \frac{(\tilde{m}_1)_{12}}{(\tilde{m}_0)_{22}} (c_\theta R_1 + s_\theta R_2) + \frac{(\tilde{m}_1)_{13}}{(\tilde{m}_0)_{33}} (c_\theta R_2 - s_\theta R_1) + \frac{I_1}{t_\xi} \right) \\
&= I_2 - t_\beta s_\xi \left[ \left( 2(\lambda_3 + \lambda_7) \left( \frac{c_\theta^2}{(\tilde{m}_0)_{22}} + \frac{s_\theta^2}{(\tilde{m}_0)_{33}} \right) + \frac{\lambda_5 s_{2\theta}}{2} \left( \frac{1}{(\tilde{m}_0)_{22}} - \frac{1}{(\tilde{m}_0)_{33}} \right) \right) R_1 \right. \\
&\quad \left. + \left( (\lambda_3 + \lambda_7) s_{2\theta} \left( \frac{1}{(\tilde{m}_0)_{22}} - \frac{1}{(\tilde{m}_0)_{33}} \right) + \lambda_5 \left( \frac{s_\theta^2}{(\tilde{m}_0)_{22}} + \frac{c_\theta^2}{(\tilde{m}_0)_{33}} \right) \right) R_2 + \frac{I_1}{t_\xi} \right].
\end{aligned}$$

其中  $(\tilde{m}_0)_{22(33)}$  是两个重本征值，且  $\theta \equiv (1/2) \arctan(2\lambda_2/(4\lambda_1 - \lambda_4 + \lambda_7))$



- 按照 $t_\beta s_\xi$ 的幂次微扰展开， $\tilde{m} = \tilde{m}_0 + (t_\beta s_\xi) \tilde{m}_1 + (t_\beta s_\xi)^2 \tilde{m}_2 + \dots$
- $\lim_{t_\beta s_\xi \rightarrow 0} (\tilde{m}) = \tilde{m}_0, \det(\tilde{m}_0) = 0 \Rightarrow$ 一个轻的标量粒子
- 对到 $t_\beta s_\xi$ 的领头阶，得到(上一页)关于最轻标量粒子的解析表达式
- 几何上的理解—简并真空趋于合并的行为

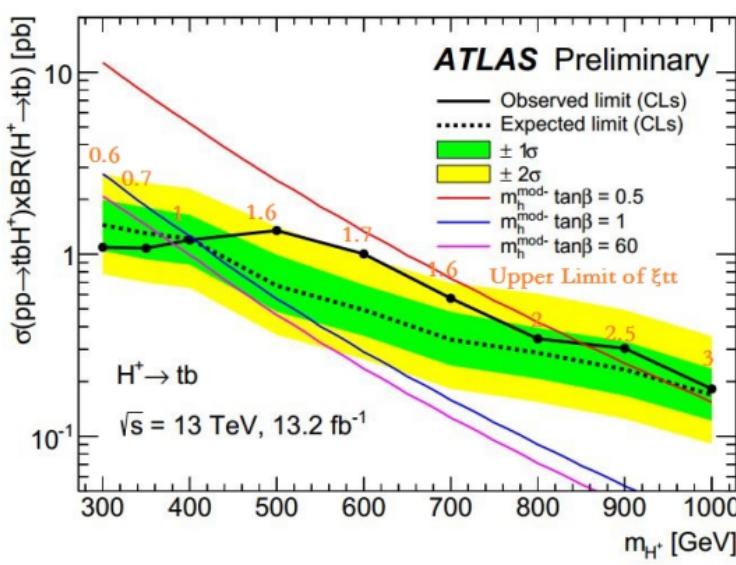
关联：在小 $t_\beta s_\xi$ 极限下，四个物理量 $m_1, c_{1,V}, K, J \propto t_\beta s_\xi$

- 四个物理量以相同的行为 $\rightarrow 0$ ，给出轻Higgs粒子与小CP破坏的关联
- 最轻的Higgs粒子是以赝标成分为主的CP混合态，非SM-like
- $c_{1,V}^2 \ll 1$  (作为对比， $c_{V,\text{SM}}^2 = 1$ )
- 弱耦合假设自然地预言一个更轻的粒子 $h_1$ ，例如 $m \sim \mathcal{O}(10\text{GeV})$

## 实验限制

### A1. LHC直接寻找(Charged Higgs, Updated after ICHEP2016)

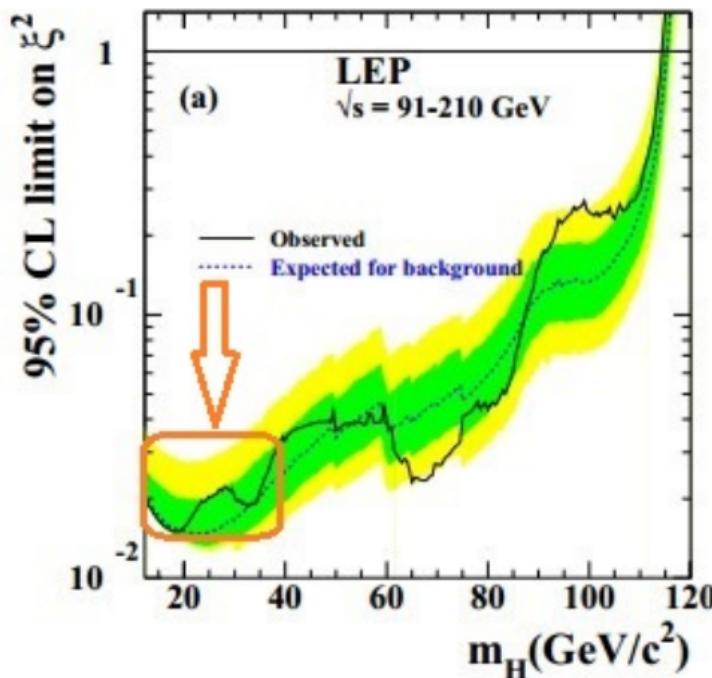
ATLAS-CONF-2016-089,  $bg \rightarrow tH^-$



- $(0.3 - 1)\text{TeV}, |\xi_{tt}| \lesssim (0.6 - 3.0) \sim \mathcal{O}(1) @ 95\%\text{C.L.}$ , 其中低质量区如(300-350)GeV的限制在(0.6-0.7)，与8TeV结果相比缺乏(200-300)GeV的测量
- 限制比8TeV结果严格很多(重叠的质量区域上限达到原来的一半左右)
- 暂时没有charged Higgs粒子的迹象

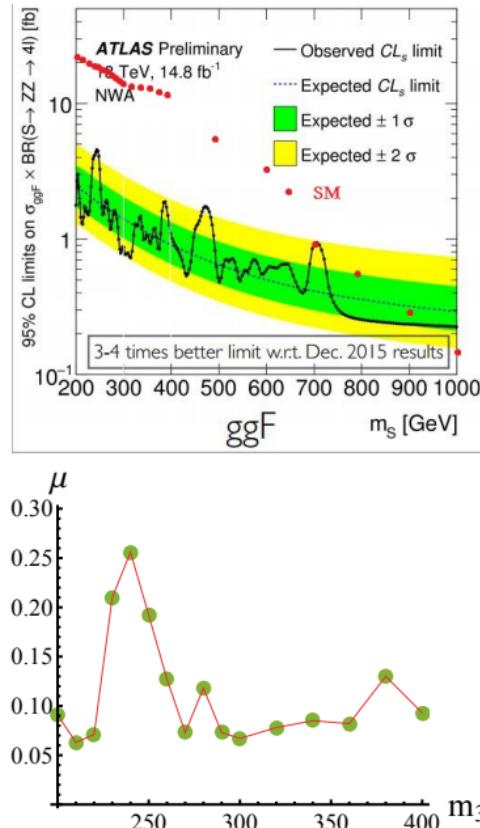
## A2. LEP&LHC直接寻找(Neutral Higgses, Updated after ICHEP2016)

轻: LEP Higgs Working Group, Phys. Lett. B 565, 61 (2003)



- $\mu \lesssim (1.5 - 4) \times 10^{-2} \Rightarrow c_{1,V} \lesssim (0.12 - 0.2)$
- $t_\beta s_\xi \sim \mathcal{O}(0.1)$
- 这里不讨论更低质量区的Higgs粒子, 因为根据前面所介绍的关联, 质量在 $\mathcal{O}(\text{GeV})$ 的粒子对应的 $c_{1,V} \sim \mathcal{O}(10^{-2})$ 左右, 且这一质量区要面临复杂的重夸克偶素衰变的限制

重: CMS-CR-2015-045, CMS-PAS-HIG-16-033, ATLAS-CONF-2016-082,  
ATLAS ICHEP talk, ATLAS-CONF-2016-074, ATLAS-CONF-2016-062



- 高/低质量区最强的限制分别来自过程  $gg \rightarrow h_3 \rightarrow ZZ \rightarrow 2\ell 2\nu / 4\ell$  (上图示低质量区)
- (200-400)GeV 质量区域信号强度  $\mu < (0.06 - 0.26)$  @ 95% C.L.
- 此结果与 8TeV 结果相当
- 对应的限制  $c_{3,V} \lesssim (0.3 - 0.4)$
- $c_{2,V} \gtrsim (0.9 - 0.95) \Rightarrow h_2(125)$  couplings to gauge bosons must be SM-like

## B. Higgs精确测量(Updated after ICHEP2016)

	ggF & $t\bar{t}h$	VBF & $Vh$
$\gamma\gamma$	$0.59^{+0.29}_{-0.28}$	$1.64^{+0.68}_{-0.59}$
$ZZ^*$	$1.37^{+0.38}_{-0.35}$	$3.7^{+2.8}_{-2.1}$
$WW^*$	$1.02^{+0.29}_{-0.26}$	$1.27^{+0.53}_{-0.45}$
$\tau^+\tau^-$	$2.0^{+1.5}_{-1.2}$	$1.24^{+0.59}_{-0.54}$

	ggF & $t\bar{t}h$	VBF & $Vh$
$\gamma\gamma$	$0.80^{+0.14}_{-0.18}$	$1.59^{+0.73}_{-0.45}$
$ZZ^*$	$1.00^{+0.39}_{-0.32}$	$0.91^{+1.56}_{-0.91}$
$WW^*$	$0.74^{+0.22}_{-0.20}$	$0.60^{+0.57}_{-0.46}$
$\tau^+\tau^-$	-	$0.94 \pm 0.41$

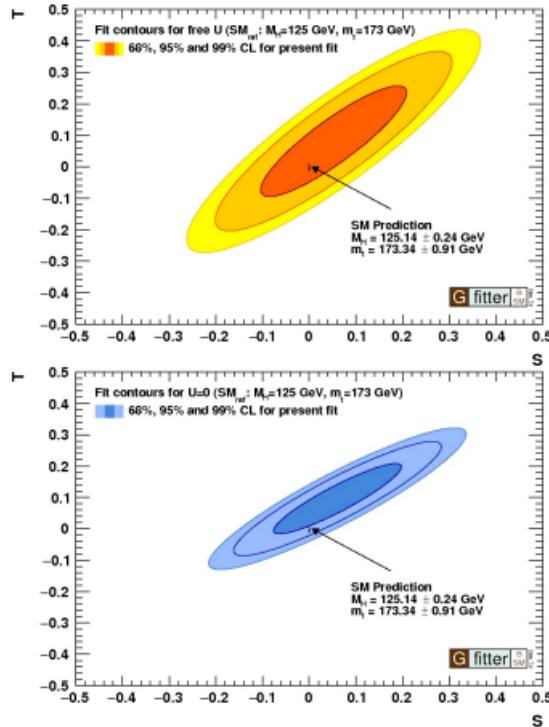
信号强度：左ATLAS，右CMS。新结果标蓝。

ATLAS-CONF-2016-081, CMS-PAS-HIG-16-020, CMS-PAS-HIG-16-033

- Global-Fit  $\chi^2 \equiv \sum (\mu_{i,f,\text{obs.}} - \mu_{i,f,\text{SM}})^2 / \sigma_{i,f}^2$
- ATLAS disfavor exotic decay; CMS best-fit point at  $\Gamma_{\text{exo}} \sim 0.6 \text{ MeV}$
- 按照CMS的拟合，当  $m_1 < 34 \text{ GeV}$  时， $c_{3,V} \sim 0.05$  仍然被允许，两组BM point

Case	$m_1$	$m_2$	$m_3$	$c_{2,f}$	$c_{1,V}$	$c_{2,V}$	$c_{3,V}$	$t_\beta s_\xi$
I ?	20 GeV	125 GeV	$\sim v$	$\sim 1$	0.1	0.994	0.05	$\sim 0.1$
II ✓	40 GeV	125 GeV	$\sim v$	$\sim 1$	0.1	0.95	0.3	$\sim 0.1$

## C. 电弱精确测量



M. Baak et. al. (The GFitter Group),

Eur. Phys. J. C 74, 3046 (2014)

- 结果 (上, 自由) :

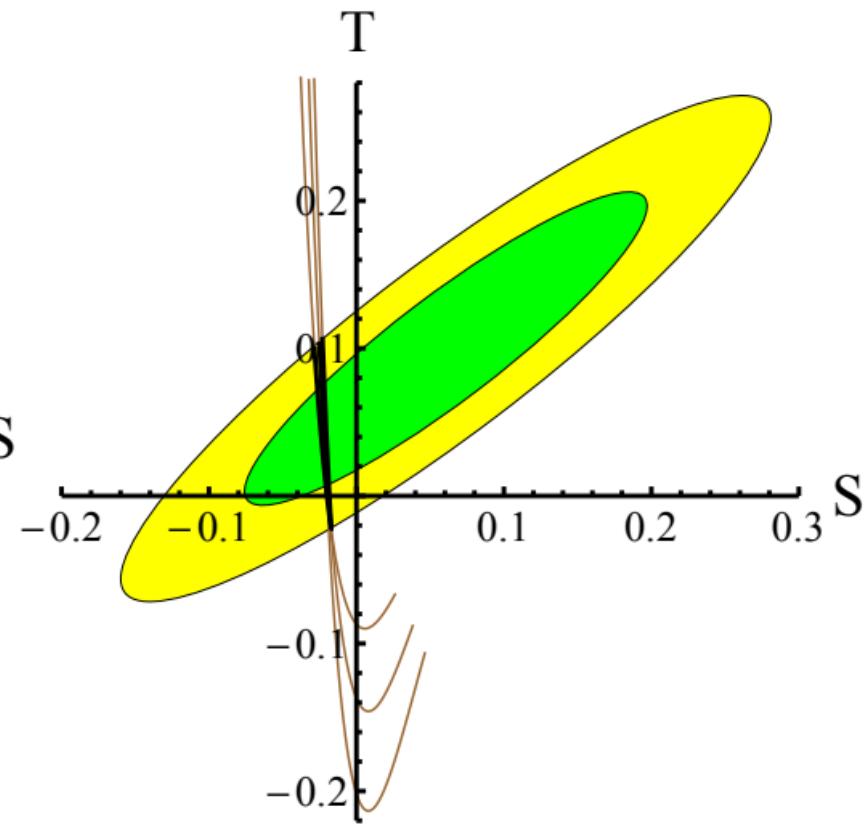
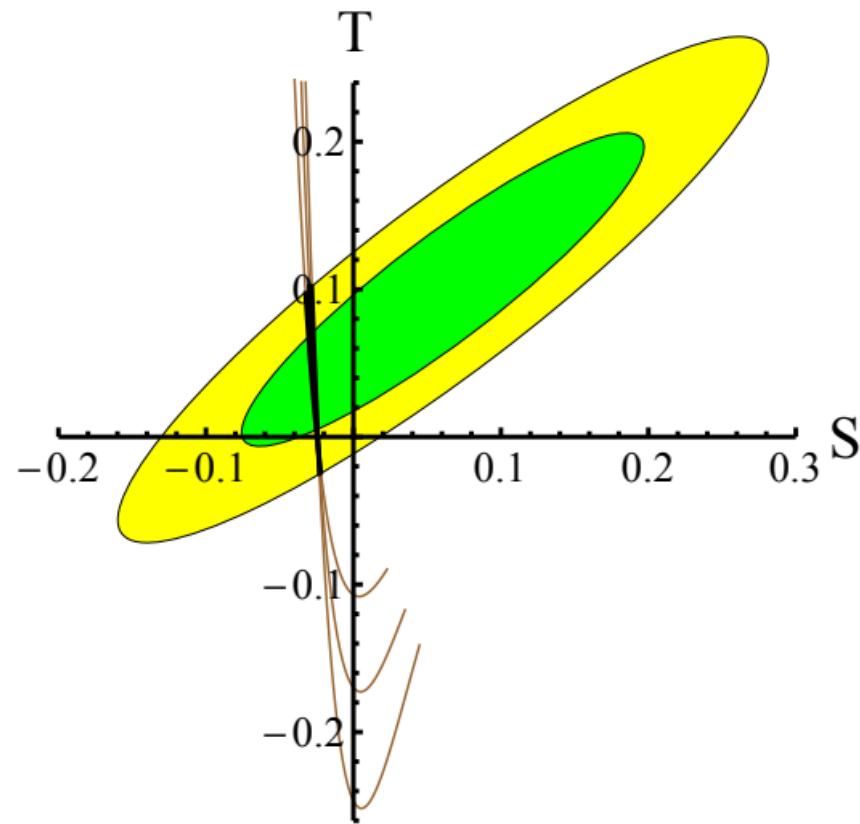
$$S = 0.05 \pm 0.11, T = 0.09 \pm 0.13, U = 0.01 \pm 0.11, R_{ST} = +0.90, R_{SU} = -0.59, R_{TU} = -0.83$$

- 结果 (下, 固定  $U = 0$ ) :

$$S = 0.06 \pm 0.09, T = 0.10 \pm 0.07, R = +0.91$$

<http://people.bridgewater.edu/~doneil/STellipseModule.nb>

Y.-N. Mao and S.-H. Zhu, arXiv: 1602.00209,  $m_{\pm} \sim m_3$

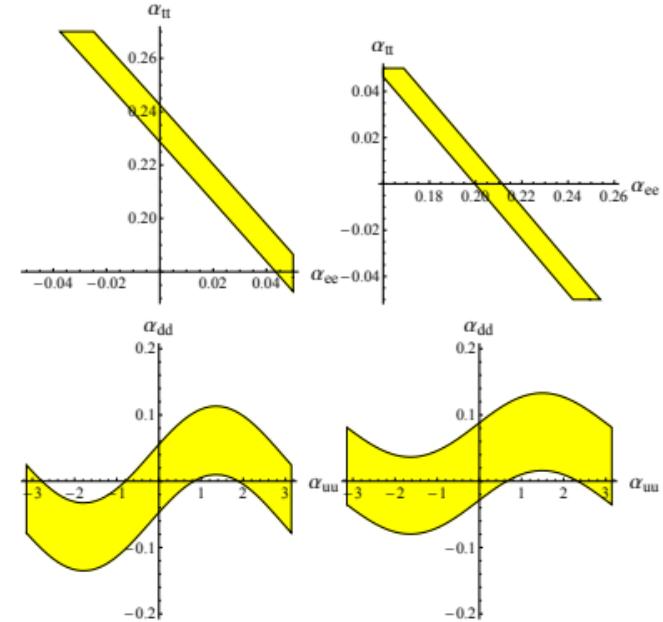
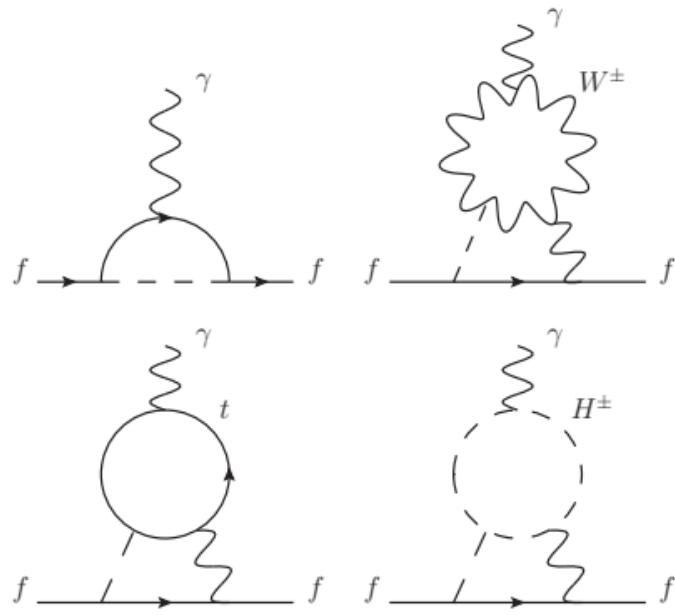


## D. 低能实验限制

- 大部分味破坏过程独立于高能过程，篇幅所限这里不详细讨论
- B介子混合和全轻衰变给出 $|\xi_{tt}| \lesssim (0.6 - 0.8)$ ，与 $H^\pm$ 直接寻找的限制接近
- $\xi_{bb} \sim \mathcal{O}(1)$ 仍然被B介子辐射衰变的结果允许
- 电偶极矩(EDM)有重要的限制——对新的CP破坏敏感

$$-i(d/2)\bar{f}\sigma^{\mu\nu}\gamma^5 f F_{\mu\nu} \longrightarrow d(\vec{\mathbf{S}} \cdot \vec{\mathbf{E}})$$

- 破坏P与CP且无经典对应，对新的CP破坏来源非常敏感
- SM Prediction:  $d_{e,\text{SM}} \sim 10^{-38} e \cdot \text{cm}$ ,  $d_{n,\text{SM}} \sim 10^{-32} e \cdot \text{cm}$   
M. Pospelov and A. Ritz, Ann. Phys. 318, 169 (2005)
- Experiments:  $|d_e| < 8.7 \times 10^{-29} e \cdot \text{cm}$ ,  $|d_n| < 2.9 \times 10^{-26} e \cdot \text{cm}$  (@90% C.L.)  
ACME Collaboration, Science 343 6168, 269 (2014)  
C. A. Baker et. al., Phys. Rev. Lett. 97, 131801 (2006)



需要不同部分振幅之间的较大相消 $\Leftrightarrow$ 不同参数之间的关联

Y.-N. Mao and S.-H. Zhu, Phys. Rev. D 90, 115024 (2014)

L. Bian, T. Liu, and J. Shu, Phys. Rev. Lett. 115, 201801 (2015)

## 未来检验：大量未竟工作，仅举几例

### A. CPV in Scalar Sector: a Model-Independent Searching

G. Li, Y.-N. Mao, C. Zhang, and S.-H. Zhu, in preparation (即将完成)

Tree level vertices:

$$\begin{array}{ccc} \textcolor{blue}{?} h_1 ZZ, & \checkmark h_2 ZZ, & \textcolor{blue}{?} h_1 h_2 Z \\ + & + & \begin{array}{c} + -? \\ -? + \end{array} \end{array}$$

主要寻找的过程(CEPC):

$$e^+ e^- \rightarrow \begin{array}{cccc} Z h_1, & Z h_2, & h_1 h_2 \\ + & + & \begin{array}{c} + -? \\ -? + \end{array} \end{array}$$

$$\mathcal{L} = \frac{g^2 v}{4c_W^2} Z^\mu Z_\mu (c_1 h_1 + c_2 h_2) + \frac{c_{12} g}{2c_W} Z_\mu (h_1 \partial^\mu h_2 - h_2 \partial^\mu h_1).$$

- Inclusive cross section measurement  $\rightarrow K \equiv c_{1,V} c_{2,V} c_{12} = ?$
- In 2HDM,  $c_{12} \equiv c_3$  and  $K$  is just the quantity on P. 8.
- Recoil mass technique: Define

$$m_{\text{rec}} \equiv \sqrt{s + m_{f\bar{f}}^2 - 2\sqrt{s}(E_f + E_{\bar{f}})}$$

where  $f\bar{f} = \ell^+ \ell^-$ . For  $e^+ e^- \rightarrow Z h_1, Z h_2$ ,  $f\bar{f} = \ell^+ \ell^-$  from  $Z$ ; for  $e^+ e^- \rightarrow h_1 h_2$ ,  $f\bar{f} = b\bar{b}$  from  $h_2$ . A peak occurs around another particle's mass.

## B. 其他涉及轻自由度的过程

- $h_3 \rightarrow 2h_1, Zh_1$  @ LHC (in preparation)
- $h_2 \rightarrow 2h_1, Zh_1$  @  $e^+e^-$  or  $ep$  (in preparation)

## C. 更多过程

重中性、带电Higgs粒子的直接寻找； Higgs精确测量对exotic decay的约束；  
低能过程中的味破坏与CP破坏；更精确的中子EDM； top EDM @ ILC etc.

## Conclusions and Discussions

### A. Conclusions

- 我们之前的工作中提出了一种轻Higgs粒子与小CP破坏之间可能的新关联机制
- 基于这个机制，我们在弱耦合李模型中小 $t_\beta s_\xi$ 区域预言了一个轻的标量粒子
- 对于质量 $\mathcal{O}(10\text{GeV})$ 的轻标量粒子情形讨论了这个模型的唯象学限制与检验
- 目前所有高能和低能实验都不能排除，ICHEP2016发布的新结果压缩了部分参数的存活区间，但模型仍然存活，原有基准点仍有继续研究的价值。
- 讨论了未来检验的方法，尤其是利用标量粒子CP性质分析为依据，提出一种模型无关的寻找标量部分的CP破坏的方法—inclusive cross section measurements for  $e^+e^- \rightarrow Zh_1, Zh_2, h_1h_2$  with recoil mass technique.

## B. Discussions etc.

- 对电弱标度以下的新物理研究不充分(具体表现为文章写作过程中无法找到很多需要的结果), 李模型作为一个例子证明这种可能性需要认真考虑
- 自发CP破坏与宇宙物质-反物质不对称性的定量关联
- 构造观测量区分明显与自发CP破坏的方法(百思不得其解)
- 上面模型无关的寻找标量部分CP破坏的方法作为充分条件可用, 但并非标量部分CP破坏的必要条件, 在出现消极结果时如何利用必要条件限制CP破坏的程度
- 其他; 欢迎对本页内容有兴趣和想法的合作者, [maoyn@ihep.ac.cn](mailto:maoyn@ihep.ac.cn)

(The end, Thank you!)