

# Hunting for possible Higgs-like boson

朱剑文

合作者：郭星导, 李学潜, 马文淦, 张仁友, 赵树民

June 20, 2020

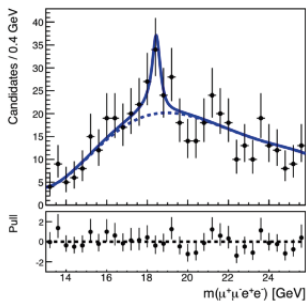
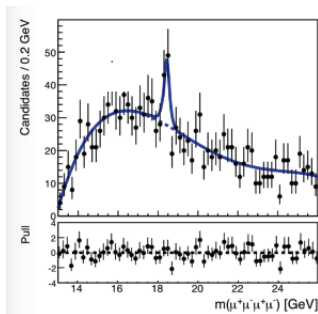
# Contents(arXiv: 2005.04822)

- 1 实验背景简介
- 2 计算方法
- 3 有效顶点
  - 赝标粒子假设
  - 标量粒子假设
- 4 数值结果
  - 输入参数
  - 总截面结果
  - 微分分布
- 5 结论与展望

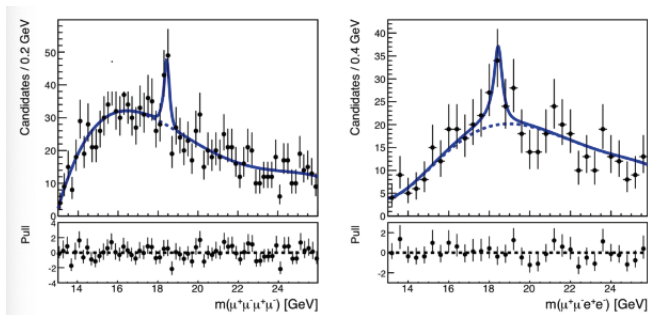
# 实验背景简介

基于CMS实验数据的分析:

- S. Durgut, "Search for exotic mesons at CMS", APS April Meeting 2018, <http://meetings.aps.org/Meeting/APR18/Session/U09.6>.
- S. Durgut, "Evidence of a narrow structure in  $\Upsilon(1S)l^+l^-$  mass spectrum and CMS Phase I and II silicon detector upgrade studies", PhD dissertation (2018).



## 实验背景简介



研究过程： $pp \rightarrow \Upsilon(1S)l^+l^- \rightarrow \mu^+\mu^-l^+l^-$ , ( $l = e, \mu$ )  
 综合 $\Upsilon\mu^+\mu^-$ 与 $\Upsilon e^+e^-$ 两个产生道，有结论

- 峰值位置： $18.4 \pm 0.1(stat.) \pm 0.2(syst.)$  GeV
- 宽度： $35$  MeV
- 事例数： $44 \pm 13(\Upsilon\mu^+\mu^-)$ ,  $35 \pm 13(\Upsilon e^+e^-)$
- 显著性： $3.6\sigma$

## 是否可能是四夸克态

18.4 GeV的质量接近 $4m_b$   
PLB **773** 247 (2017)

PRD **95**, 034011 (2017)

EPJC **78**, 782 (2018)

**Table 1**  
Masses of the doubly hidden-charm  $cccc$  and doubly hidden-bottom  $bbbb$  tetraquarks with various quantum numbers.

$J^{PC}$	Currents	$m_{\mathcal{M}_c}$ (GeV)	$m_{\mathcal{M}_b}$ (GeV)
$0^{++}$	$J_1$	$6.44 \pm 0.15$	$18.45 \pm 0.15$
	$J_2$	$6.50 \pm 0.17$	$18.59 \pm 0.17$
	$J_3$	$6.47 \pm 0.16$	$18.49 \pm 0.16$
	$J_4$	$6.46 \pm 0.16$	$18.46 \pm 0.14$
	$J_5$	$6.82 \pm 0.18$	$19.64 \pm 0.14$
$0^{-+}$	$J_1^+$	$6.84 \pm 0.18$	$18.77 \pm 0.18$
	$J_2^+$	$6.85 \pm 0.18$	$18.79 \pm 0.18$
$0^{--}$	$J_1^-$	$6.84 \pm 0.18$	$18.77 \pm 0.18$
$1^{++}$	$J_{1\mu}^+$	$6.40 \pm 0.19$	$18.33 \pm 0.17$
	$J_{2\mu}^+$	$6.34 \pm 0.19$	$18.32 \pm 0.18$
$1^{+-}$	$J_{1\mu}^-$	$6.37 \pm 0.18$	$18.32 \pm 0.17$
	$J_{2\mu}^-$	$6.51 \pm 0.15$	$18.54 \pm 0.15$
$1^{-+}$	$J_{1\mu}^+$	$6.84 \pm 0.18$	$18.80 \pm 0.18$
	$J_{2\mu}^+$	$6.88 \pm 0.18$	$18.83 \pm 0.18$
$1^{--}$	$J_{1\mu}^-$	$6.84 \pm 0.18$	$18.77 \pm 0.18$
	$J_{2\mu}^-$	$6.83 \pm 0.18$	$18.77 \pm 0.16$
$2^{++}$	$J_{1\mu\nu}$	$6.51 \pm 0.15$	$18.53 \pm 0.15$
	$J_{2\mu\nu}$	$6.37 \pm 0.19$	$18.32 \pm 0.17$

$$\sigma(pp \rightarrow X_{bb\bar{b}\bar{b}}[0^{++}] \rightarrow \ell^+ \ell^- \ell_1^+ \ell_2^-) \leq 4 \text{ fb} \quad (30)$$

(LHC, 13 TeV).

where the upper limit is attained only if there is not significant competition from the decay mode

$$X_{bb\bar{b}\bar{b}}[0^{++}] \rightarrow \ell^+ \ell^- B\bar{B}X. \quad (31)$$

At 7 or 8 TeV, one would expect about half this, or 2 fb.

This picture allows to predict the mass of the di-bottomonium state  $bb\bar{b}\bar{b}$ , currently under experimental scrutiny [1,2]. Our model predicts a state approximately 100 MeV below threshold, but whose decay into  $\Upsilon\mu\mu$  is unlikely to be observed at the LHC, as suggested by recent LHCb results [1]. This dynamical picture also determines the effective coupling presented in [10,17].

arXiv:2002.11077 [hep-ph]

the way to the observation of the  $bb\bar{b}\bar{b}$  tetraquark in the future LHCb upgrade. The  $4\mu$  signal for the ground state,  $J^{PC} = 0^{++}$ , is likely to be too small even for the upgraded LHCb, but it may not be hopeless for the  $J^{PC} = 2^{++}$  fully-bottom state.

18.4是否可能是一个基本粒子?

## 对 $pp \rightarrow \Upsilon l^+ l^-$ 的计算

对  $\phi(18.4)$  主要考虑胶子胶子聚合产生机制

$$\sigma[pp \rightarrow \Upsilon l^+ l^-] = \int dx_1 dx_2 f_{g/p}(x_1, \mu_f) f_{g/p}(x_2, \mu_f) \hat{\sigma}[gg \rightarrow \Upsilon l^+ l^-]$$

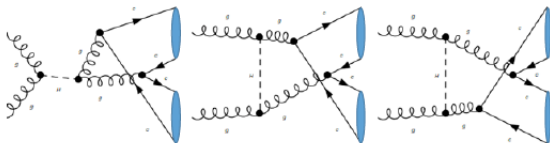
考虑到

$$\Gamma_\Upsilon \sim 50 \text{ KeV} \ll \Gamma_\phi$$

部分子截面

$$\hat{\sigma}[gg \rightarrow \Upsilon l^+ l^-] \simeq \hat{\sigma}[gg \rightarrow \Upsilon \Upsilon] \times 2Br(\Upsilon \rightarrow l^+ l^-)$$

$gg \rightarrow \Upsilon \Upsilon$  via  $\phi(18.4)$  的费曼图



# 信号过程的费曼幅度

在部分子层面上

$$\widetilde{\mathcal{M}}_\phi = -\frac{4\pi\alpha_s(\mu_R)}{(p_1 + q_1)^2(p_2 + q_2)^2} \epsilon_\mu(k_1) \epsilon_\nu(k_2) \text{Tr} \left[ v(p_2) \bar{u}(p_1) \gamma_\alpha v(q_1) \bar{u}(q_2) \gamma_\beta \right] \left( \mathcal{S} + \frac{\mathcal{T} + \mathcal{U}}{8} \right)$$

其中的

$$\mathcal{S} = \mathcal{C}(k_1, k_2; \mu, \nu) \mathcal{C}(p_1 + q_1, p_2 + q_2; \alpha, \beta) \left/ \left[ (k_1 + k_2)^2 - m_\phi^2 + im_\phi \Gamma_\phi \right] \right.$$

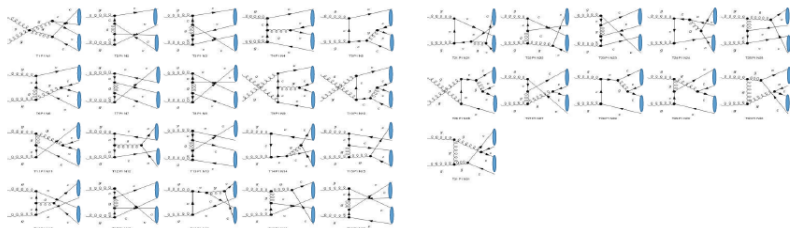
$$\mathcal{T} = \mathcal{C}(k_1, p_1 + q_1; \mu, \alpha) \mathcal{C}(k_2, p_2 + q_2; \nu, \beta) \left/ \left[ (p_1 + q_1 - k_1)^2 - m_\phi^2 + im_\phi \Gamma_\phi \right] \right.$$

$$\mathcal{U} = \mathcal{T} \Big|_{k_1 \leftrightarrow k_2, \mu \leftrightarrow \nu}$$

其中出现的 $\mathcal{C}(k_1, k_2; \mu, \nu)$ 即为 $gg\phi$ 有效顶点。

# 标准模型背景与强子层面的幅度

标准模型背景  $gg \rightarrow \Upsilon\Upsilon$ , 共有31张费曼图



从部分子幅度到强子幅度, 根据NRQCD理论

$$v(p_2)\bar{u}(p_1) \longrightarrow \frac{1}{2\sqrt{2}} \not{\epsilon}_\Upsilon^*(\not{p} + m_\Upsilon) \frac{1}{\sqrt{m_b}} \Psi_\Upsilon(0) \frac{1}{\sqrt{N_c}}$$

$$v(q_2)\bar{u}(q_1) \longrightarrow \frac{1}{2\sqrt{2}} \not{\epsilon}_\Upsilon^*(\not{q} + m_\Upsilon) \frac{1}{\sqrt{m_b}} \Psi_\Upsilon(0) \frac{1}{\sqrt{N_c}}$$

$$p_1 = p_2 = \frac{p}{2}$$

$$q_1 = q_2 = \frac{q}{2}$$



# 赝标粒子假设

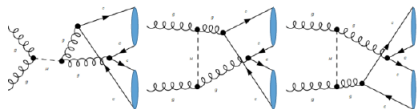
以THDM模型中的赝标粒子 $A^0$ 为例，其 $ggA^0$ 的有效拉氏量可以写成

$$\mathcal{L}_{eff} \supset C \cdot F^{\mu\nu} \tilde{F}_{\mu\nu} A^0$$

其中 $\tilde{F}_{\mu\nu} = \frac{1}{2}\epsilon_{\mu\nu\rho\sigma}F^{\rho\sigma}$ ，由此导出的有效顶点为

$$C_{ggA^0}^{\mu\nu}(k_1, k_2; \mu, \nu) = C' \cdot (\epsilon^{\mu\nu\rho\sigma} k_{1\rho} k_{2\sigma})$$

该洛伦兹结构导致 $s$ -channel的信号过程在幅度层面上没有贡献



对 $s$ -channel图中第二个 $gg\phi$ 顶点， $k_1 = k_2 = (p_{\Upsilon 1} + p_{\Upsilon 2})/2$

## 标量粒子假设

以标准模型Higgs作为参考，其 $ggH$ 的有效拉氏量可以写成

$$\mathcal{L}_{eff} \supset C \cdot F^{\mu\nu} F_{\mu\nu} H$$

由此导出的有效顶点为

$$C_{ggH}^{\mu\nu}(k_1, k_2; \mu, \nu) = C' \cdot \left[ 4(k_1 \cdot k_2) \left( g^{\mu\nu} - \frac{k_1^\nu k_2^\mu}{k_1 \cdot k_2} \right) \right]$$

保留该洛伦兹结构，写出 $gg\phi$ 的有效顶点

$$C_{gg\phi}^{\mu\nu}(k_1, k_2; \mu, \nu) = -i \frac{g_{gg\phi}(\mu_r)}{m_\phi} \left[ 4(k_1 \cdot k_2) \left( g^{\mu\nu} - \frac{k_1^\nu k_2^\mu}{k_1 \cdot k_2} \right) \right]$$

其中 $g_{gg\phi}(\mu_r)$ 为跑动耦合常数，跑动行为与 $\alpha_s(\mu_r)$ 一致，即

$$\frac{g_{gg\phi}(\mu_r)}{\alpha_s(\mu_r)} \equiv const$$

# 一些输入参数

限制条件

$$\Gamma[\phi(18.4) \rightarrow gg] < \Gamma[\phi(18.4) \rightarrow all] \simeq 35 \text{ MeV}$$

给出

$$g_{gg\phi}(m_Z) \leq 0.0414$$

其他输入参数

- 粒子质量:  $m_b = 4.73 \text{ GeV}$ ,  $m_\Upsilon = 9.46 \text{ GeV}$
- 标度选择:  $\mu_f = \mu_r = \sqrt{m_\Upsilon^2 + p_{T,\Upsilon}^2}$
- 零点波函数:  $\Psi_\Upsilon^2(0) = 0.391 \text{ GeV}^3$
- 衰变分支比:  $Br(\Upsilon \rightarrow \mu^+ \mu^-) = 2.48\%$ ,  $Br(\Upsilon \rightarrow e^+ e^-) = 2.38\%$
- 胶子PDF: 取自CT14LO

## 总截面

$$pp \rightarrow \Upsilon \mu^+ \mu^-$$

$\sqrt{s}$ [TeV]	$\sigma_{\hat{S}}$ [fb]	$\sigma_S$ [fb]	$\sigma_B$ [pb]
8	0.283	-0.316	1.041
13	0.487	-0.519	1.811

$$pp \rightarrow \Upsilon e^+ e^-$$

$\sqrt{s}$ [TeV]	$\sigma_{\hat{S}}$ [fb]	$\sigma_S$ [fb]	$\sigma_B$ [pb]
8	0.272	-0.303	0.999
13	0.467	-0.498	1.738

其中

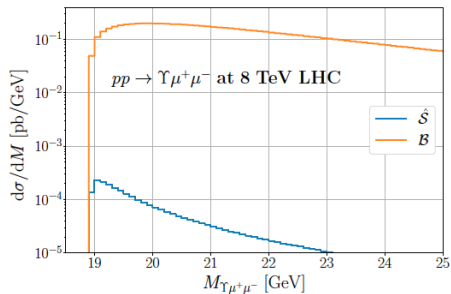
$$\mathcal{M}_\phi = \sum (3 \text{ signal diagrams}), \quad \mathcal{M}_{SM} = \sum (31 \text{ background diagrams})$$

表格中

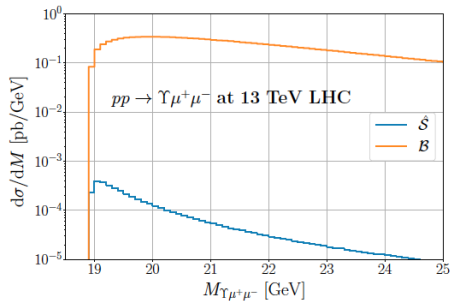
$$\begin{aligned} |\mathcal{M}_\phi|^2 &\implies \sigma_{\hat{S}} \\ |\mathcal{M}_{SM}|^2 &\implies \sigma_B \\ |\mathcal{M}_\phi|^2 + 2\text{Re}(\mathcal{M}_{SM}^\dagger \mathcal{M}_\phi) &\implies \sigma_S \end{aligned}$$

# $\Upsilon\mu^+\mu^-$ 不变质量分布

8 TeV LHC



13 TeV LHC



## 结论与展望

- 对于赝标粒子假设，其洛伦兹结构中的 $\epsilon^{\mu\nu\rho\sigma}$ 决定了最主要的 $s$ -channel的贡献为零，故而被排除；
- 对于标量粒子假设，宽度限制条件

$$\Gamma[\phi(18.4) \rightarrow gg] < \Gamma[\phi(18.4) \rightarrow all] \simeq 35 \text{ MeV}$$

决定了其在实验上很难被观测到；

- 鉴于 $b$ 夸克与 $c$ 夸克的相似性，或许在更轻的末态上会有更多发现，例如 $J/\psi$  pair.