



LHC上top夸克衰变到Bc的研究

中国科学院研究生院

孙立平

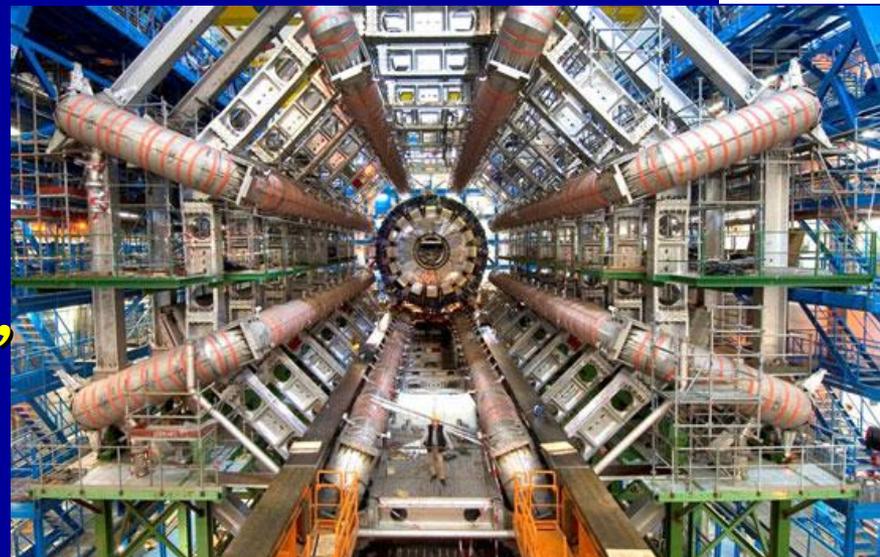
LHC上顶夸克衰变到双重味介子研究

1. 研究背景
2. LHC上top夸克到 B_c, η_b, Υ 介子衰变
 - a) L0阶的计算
 - b) NLO阶的计算
3. 数值结果
4. 总结

物理背景1 ——LHC

1. LHC的亮度为 $10^{32} \sim 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$,
能量为10~14TeV

2. LHC为双重味介子的研究提
供了一个理想的实验平台





LHC上 top 夸克的产生

物理背景2

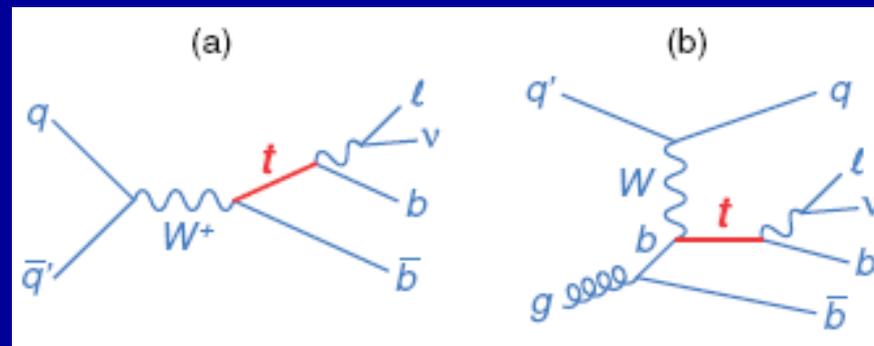
——top 夸克

- top夸克是标准模型中最重的夸克($m \approx 176\text{GeV}$)
- 由于top夸克的寿命很短，不同于其它夸克，无法形成介子或重子
- top夸克的衰变以弱衰变为主，通过测量 top 衰变，可检验标准模型，得到CKM矩阵元 V_{tb} ，以及获取其它丰富的物理信息
- top夸克的产生过程是Higgs粒子产生的重要背景

强子对撞机上 top 夸克的产生

- 目前D0已经成功提取到单top夸克产生信号，并第一次直接在实验上测量 V_{tb}

Phys.Rev.Lett.103:092001,2009



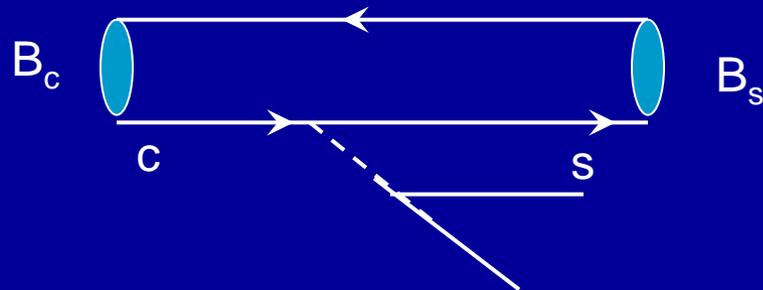
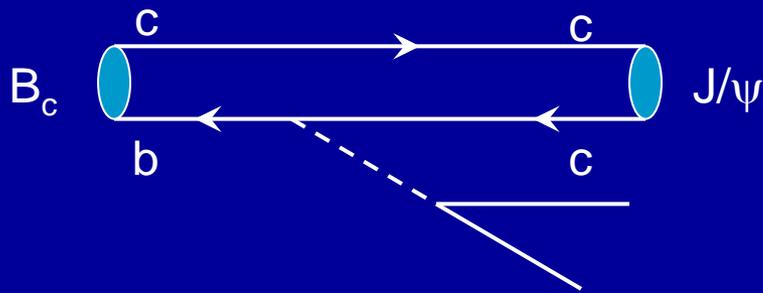
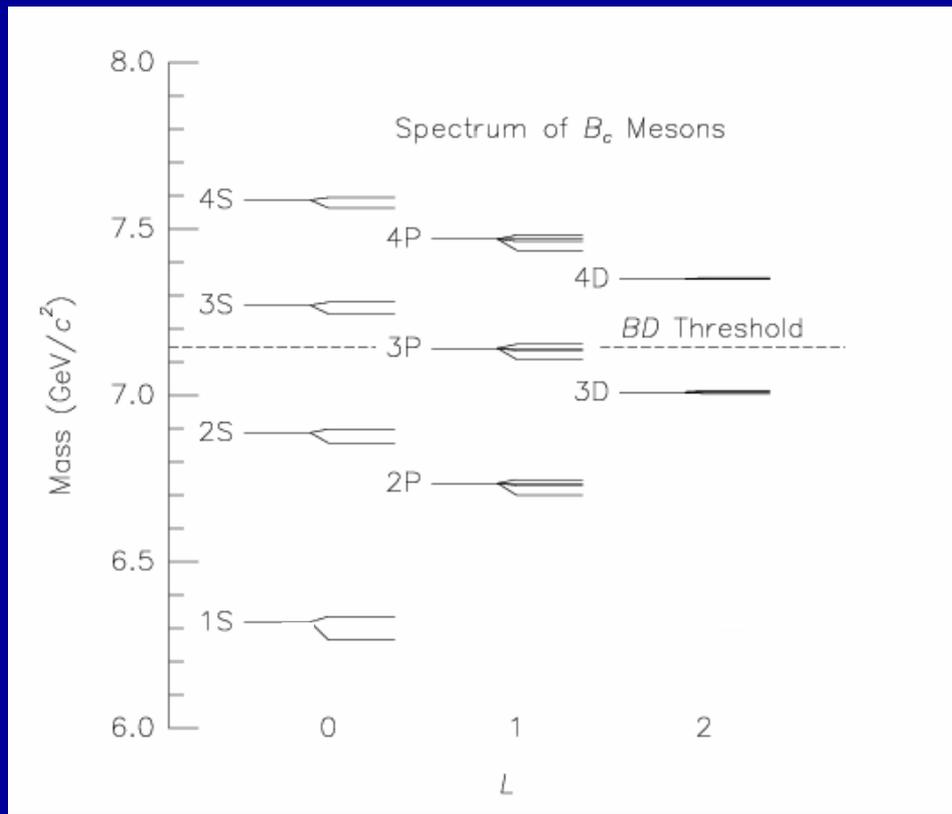
- LHC 也即将对top+anti-top 的产生进行观测

LHC上 B_c 的产生

物理背景3

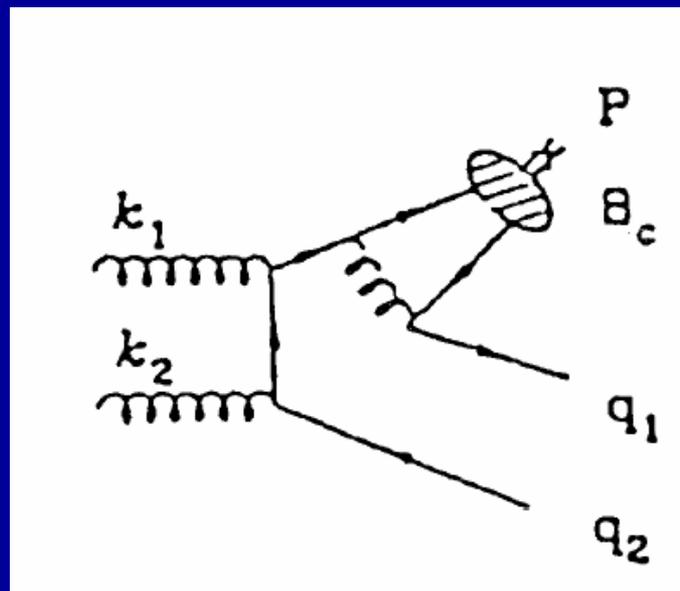
—— B_c 介子的特性

- B_c 介子是唯一一个由两个味道不同的重味夸克($\bar{b}c$)组成的介子.
- B_c 介子有着丰富的衰变道,其中的 \bar{b} 和 c 都能独立衰变.



LHC上 B_c 的产生

- B_c 最早是CDF探测组在Tevatron上发现的
- B_c 由于由两个重夸克组成，也可以认为是一种重夸克偶素态，他的非微扰性质可以用NRQCD有效理论来描述
- B_c 是一个以弱衰变为主的介子，对研究CP破坏，CKM矩阵元均有重要的意义



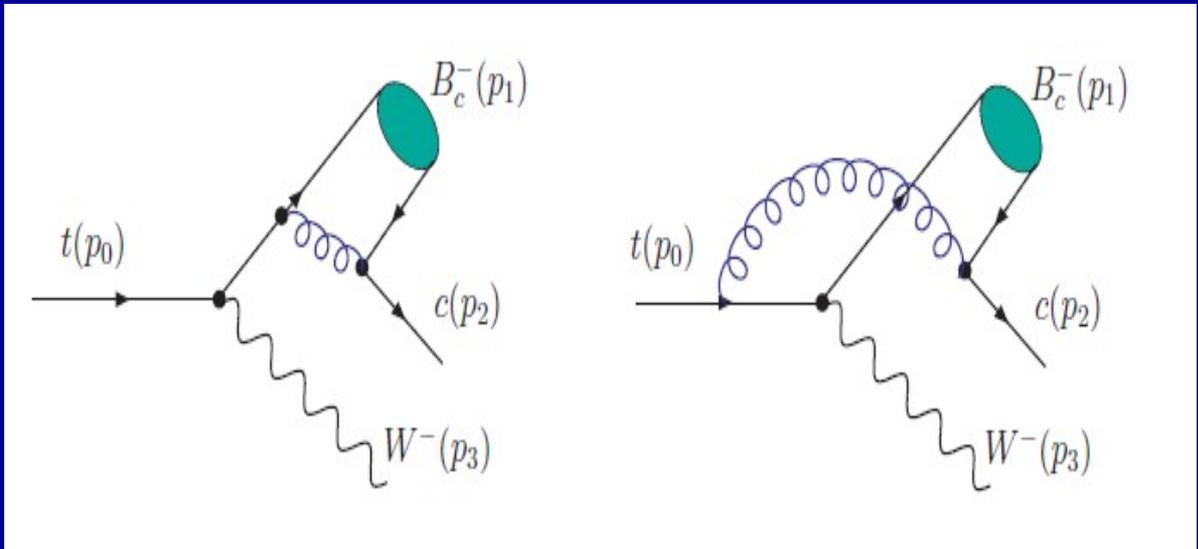


LHC上top到Bc介子, b夸克偶素的衰变

- 综上所述: 研究top到Bc, ηb , Υ 的衰变有相当的物理意义
- 由于LHC每年可以产生大量的正反top夸克, 大约 10^8 个, 所以通过top夸克衰变, 可以产生大量的Bc, 这将十分有利于Bc的研究

LHC上 top到Bc, b夸克偶素的衰变LO贡献

- 通过top夸克衰变产生 Bc, b夸克偶素的LO过程, 已经研究过
【Phys.Rev.D54:5606-5610,1996, Phys.Rev.D77:014022,2008.】



- $t \rightarrow Bc^* + c + W^+$
- $t \rightarrow Bc + c + W^+$
- $t \rightarrow Y + b + W^+$
- $t \rightarrow \eta_b + b + W^+$

对于赝标Bc的强子化过程，有以下的投影算符：



$$v(p_{\bar{c}})\bar{u}(p_b) \rightarrow \frac{1}{2\sqrt{2}} i\gamma_5 \times (p_{B_c} + m_b + m_c) \times \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{m_b + m_c}{2}}} \psi_{B_c}(0) \right) \otimes \left(\frac{1_c}{\sqrt{N_c}} \right)$$

对于矢量Bc的强子化过程，有以下的投影算符：

$$v(p_{\bar{c}})\bar{u}(p_b) \rightarrow \frac{1}{2\sqrt{2}} \not{\epsilon}_{B_c}^* (p_{B_c} + m_b + m_c) \times \left(\frac{1}{\sqrt{\frac{m_b + m_c}{2}}} \psi_{B_c}^*(0) \right) \otimes \left(\frac{1_c}{\sqrt{N_c}} \right)$$

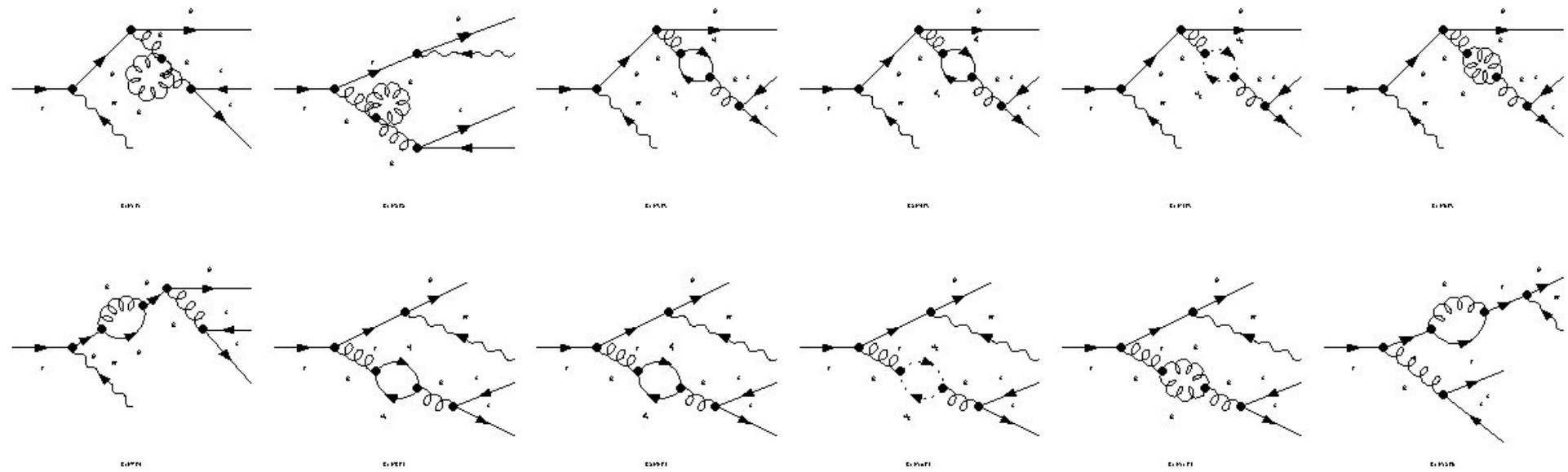
其中， $\epsilon_{B_c}^*$ 为Bc的极化矢量， $\psi_{B_c}(0)$ ， $\psi_{B_c}^*(0)$ 为赝标Bc和矢量Bc的零点波函数



- LHC上 top夸克到Bc , Upsilon的NLO衰变这中强耦合常数的能标理论上可以从 $2 \times m_c = 3\text{GeV}$ 到 $m_t = 176\text{GeV}$
 $\alpha_s(3\text{GeV}) = 0.26 \sim \alpha_s(176\text{GeV}) = 0.12$
- 可见LO反映宽度不确定度很大,上限和下限差距有4倍,因而对其进行NLO的计算以减小结果对能标的依赖是十分必要的

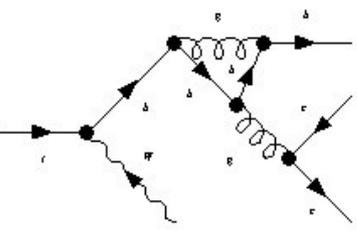
● 虚修正自能图

$\Gamma \rightarrow \delta \Gamma \Gamma^2 \Gamma^3 \Gamma^4 \Gamma^5$

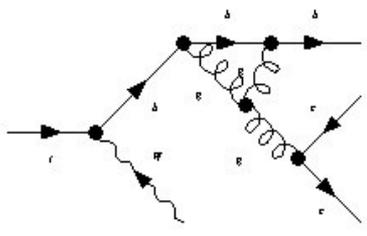


虚修正三点图

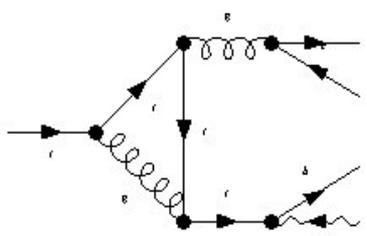
L → D C C B'



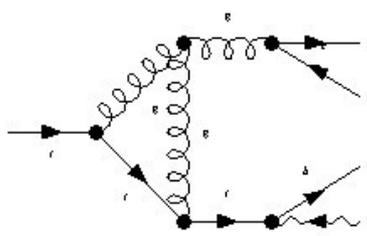
DP11



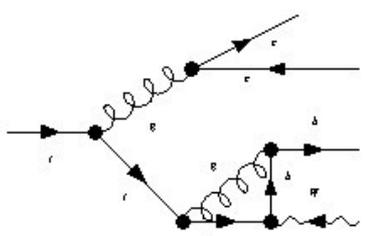
DP12



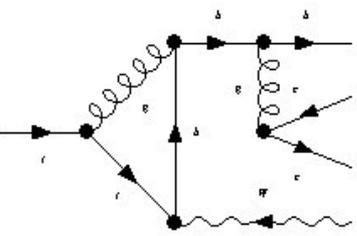
DP13



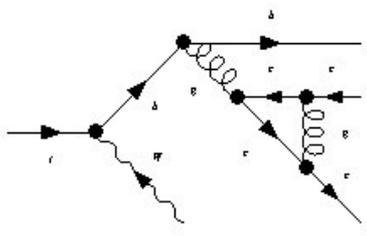
DP14



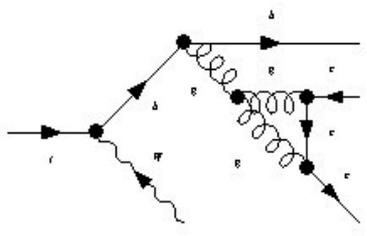
DP15



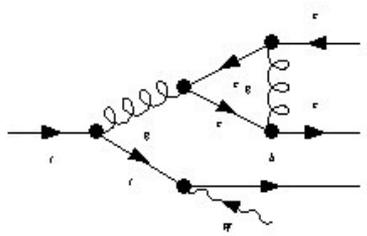
DP16



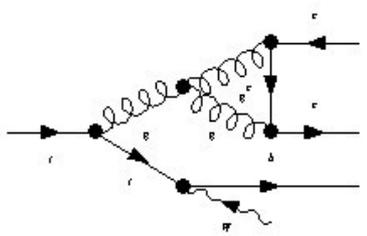
DP17



DP18



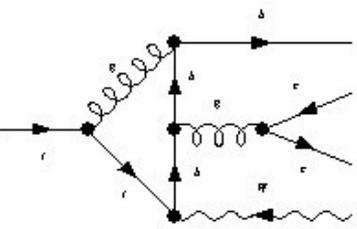
DP19



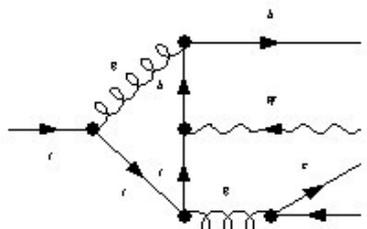
DP20

虚修正四点图和五点图

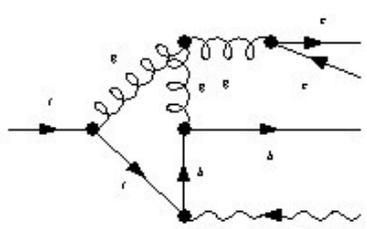
$\mathcal{L} \rightarrow \mathcal{D} \mathcal{L} \mathcal{L} \mathcal{D}'$



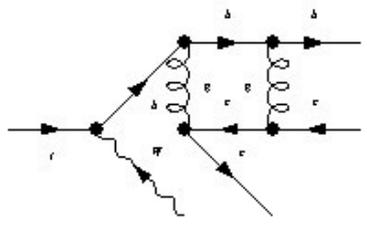
O(M11)



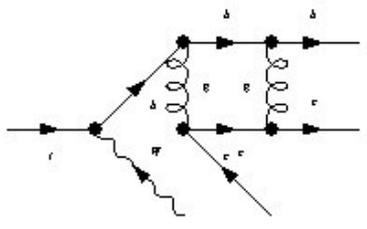
O(M12)



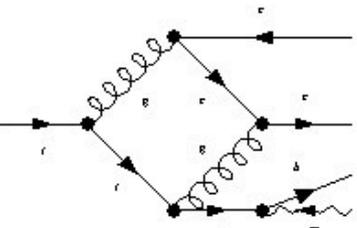
O(M13)



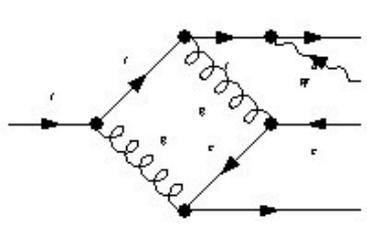
O(M14)



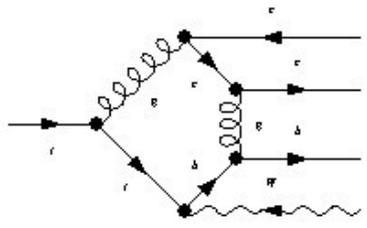
O(M15)



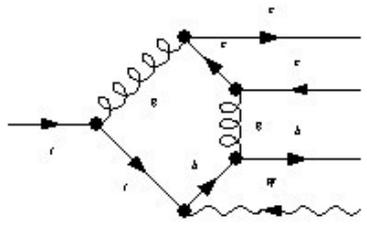
O(M16)



O(M17)



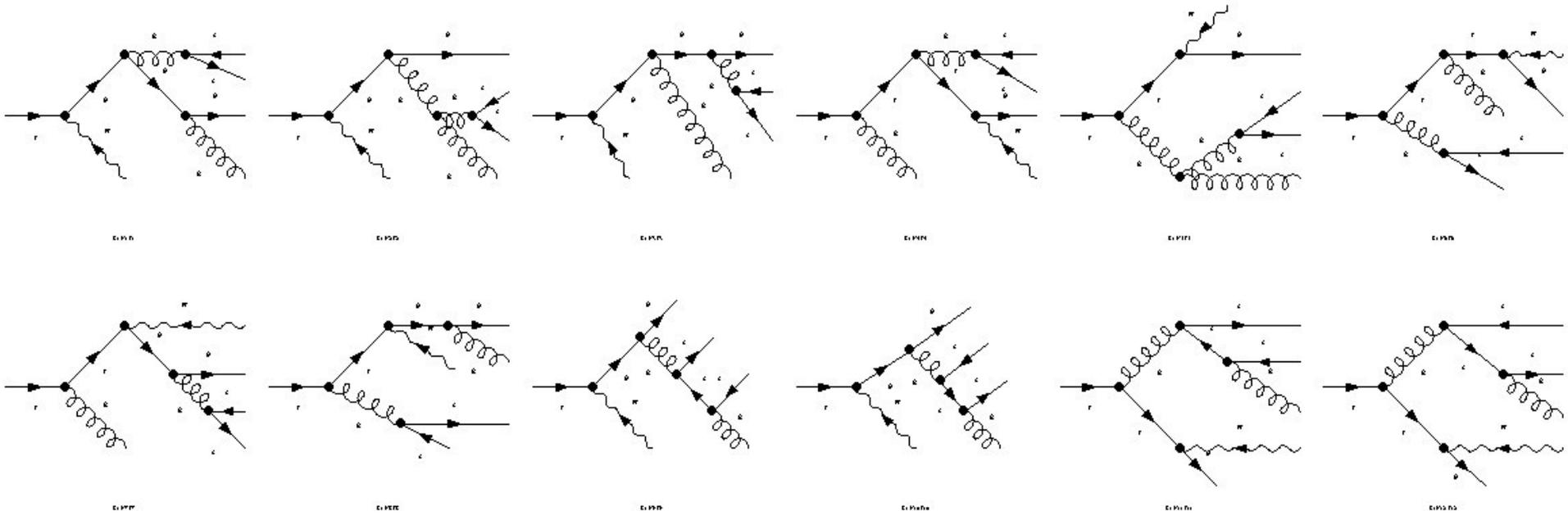
O(M18)



O(M19)

● 实修正费曼图

(c) (d) (e) (f) (g) (h)





发散抵消

- 抵消发散的方法:

紫外发散:

来自自能图, 三点图, 通过引入抵消项来抵消.

红外发散: 1) 来自top 和 c_{jet} 或者 b_{jet} 之间交换软胶子三点图, 四点和五点图, 实修正内部可互相抵消

2) 库伦发散, 来自末态介子内部交换软胶子, 通过对波函数的重整化来消除

■ 抵消项

$$\delta Z_2^{\text{OS}} = -C_F \frac{\alpha_s}{4\pi} \left[\frac{1}{\epsilon_{\text{UV}}} + \frac{2}{\epsilon_{\text{IR}}} - 3\gamma_E + 3 \ln \frac{4\pi\mu^2}{m^2} + 4 \right]$$

$$\delta Z_m^{\text{OS}} = -3C_F \frac{\alpha_s}{4\pi} \left[\frac{1}{\epsilon_{\text{UV}}} - \gamma_E + 3 \ln \frac{4\pi\mu^2}{m^2} + \frac{4}{3} \right]$$

$$\delta Z_3^{\overline{\text{MS}}} = \frac{\alpha_s}{4\pi} (\beta_0 - 2C_A) \left[\frac{1}{\epsilon_{\text{UV}}} - \gamma_E + \ln 4\pi \right]$$

$$\delta Z_3^{\overline{\text{MS}}} = -\frac{\beta_0}{2} \frac{\alpha_s}{4\pi} \left[\frac{1}{\epsilon_{\text{UV}}} - \gamma_E + \ln 4\pi \right]$$

$$d\Gamma_{\text{virtual}}^{IR, \text{Coulomb}} = d\Gamma_{\text{Born}} \frac{4\alpha_s}{3\pi} \left[\frac{\pi^2}{\nu} - \frac{1}{\varepsilon} - \frac{p_t \cdot p_c}{m_c m_t} \frac{x_s \ln(x_s)}{(1-x_s^2)\varepsilon} \right]$$

$$x_s = \frac{1 - \sqrt{1 - 2m_c m_t / (m_c m_t - p_t \cdot p_c)}}{1 + \sqrt{1 - 2m_c m_t / (m_c m_t - p_t \cdot p_c)}}$$

$$d\Gamma_{\text{Real}}^{\text{IR}} = d\Gamma_{\text{Born}} \frac{4\alpha_s}{3\pi} \frac{1}{\varepsilon} \left[1 + \frac{p_t \cdot p_c}{m_c m_t} \frac{x_s \ln(x_s)}{(1-x_s^2)} \right]$$

$$m_b = 4.9\text{GeV}, m_c = 1.5\text{GeV}, m_t = 174\text{GeV}, m_w = 80\text{GeV}$$

$t \rightarrow Bc^* + c + W$

- $\Gamma_{L0}(t \rightarrow Bc^* + c + W) = 0.793 \sim 0.151 \text{ MeV}$
- **NLO Correction** = $-0.174 \sim 0.156 \text{ MeV}$
- $\Gamma_{NLO}(t \rightarrow Bc^* + c + W) = 0.619 \sim 0.307 \text{ MeV}$

$t \rightarrow Bc + c + W$

- $\Gamma_{L0}(t \rightarrow Bc + c + W) = 0.572 \sim 0.109 \text{ MeV}$
- **NLO Correction** = $-0.058 \sim 0.118 \text{ MeV}$
- $\Gamma_{NLO}(t \rightarrow Bc + c + W) = 0.514 \sim 0.227 \text{ MeV}$

不确定度来自重整化标度 $\mu = 2m_c \sim m_t$ 对于Bc产生

$$t \rightarrow \eta_b + b + W$$

- $\Gamma_{L0}(t \rightarrow \eta_b + b + W) = 27.1 \sim 9.67 \text{keV}$
- **NLO Correction** = 7.2 ~ 14.83 keV
- $\Gamma_{NLO}(t \rightarrow \eta_b + b + W) = 34.3 \sim 24.5 \text{keV}$

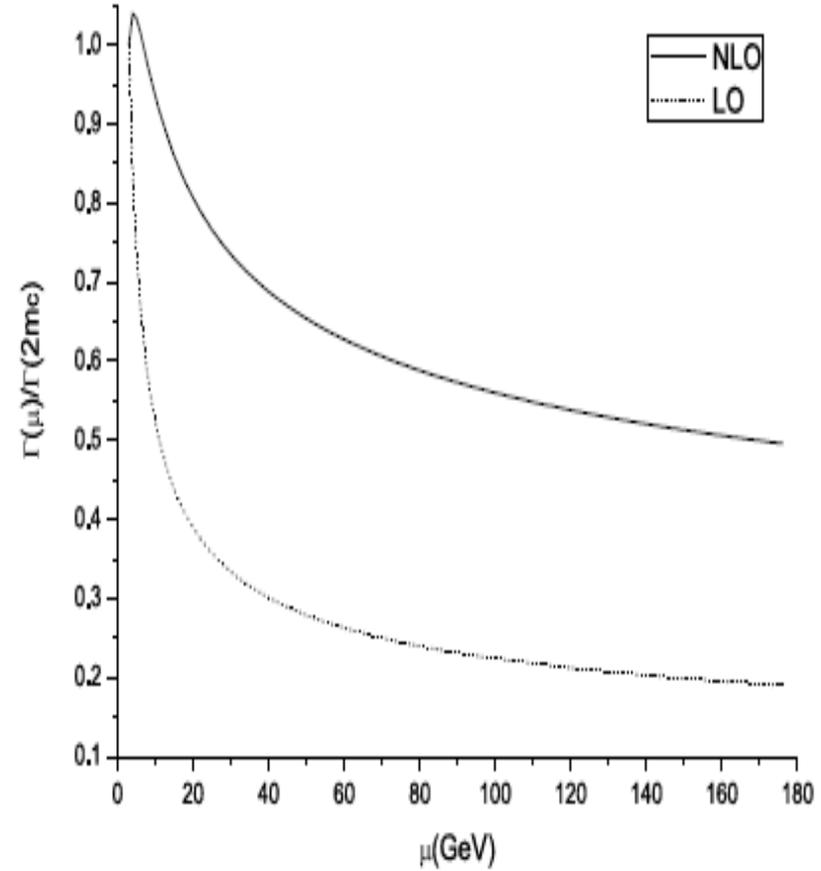
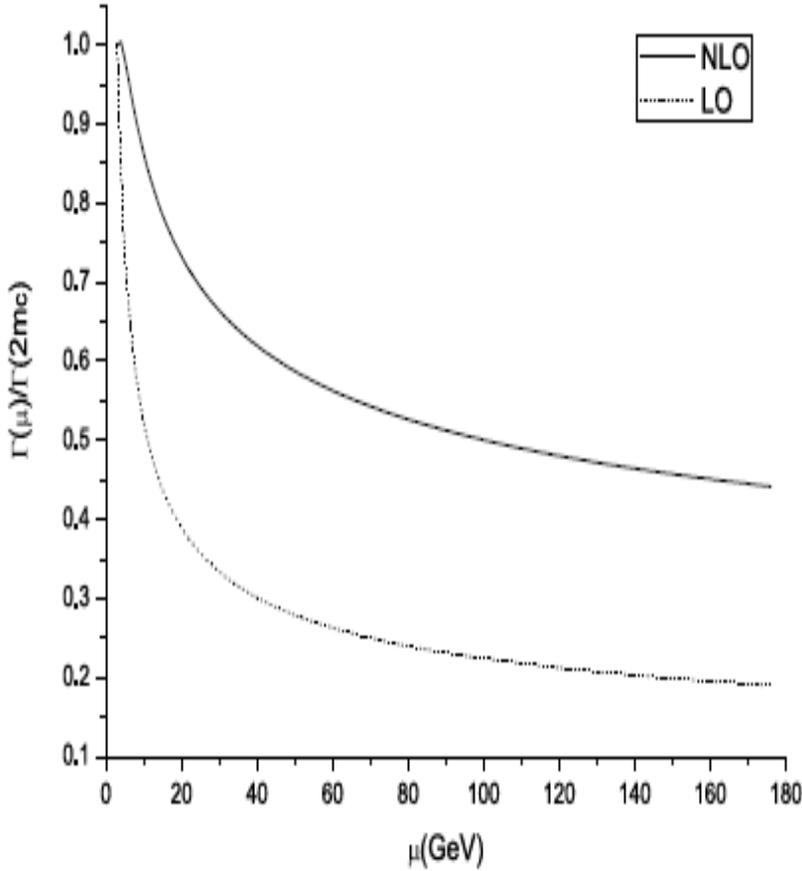
$$t \rightarrow \Upsilon + b + W$$

- $\Gamma_{L0}(t \rightarrow \Upsilon + b + W) = 26.8 \sim 9.54 \text{keV}$
- **NLO Correction** = 25.5 ~ 18.66 keV
- $\Gamma_{NLO}(t \rightarrow \Upsilon + b + W) = 52.3 \sim 28.2 \text{keV}$

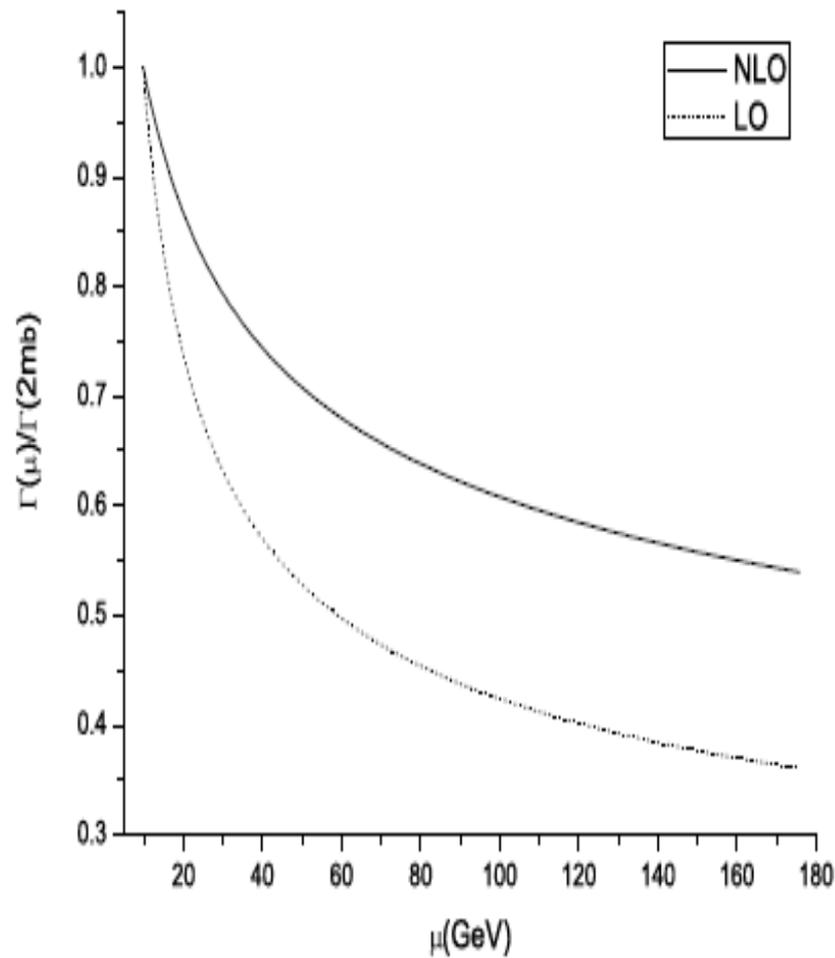
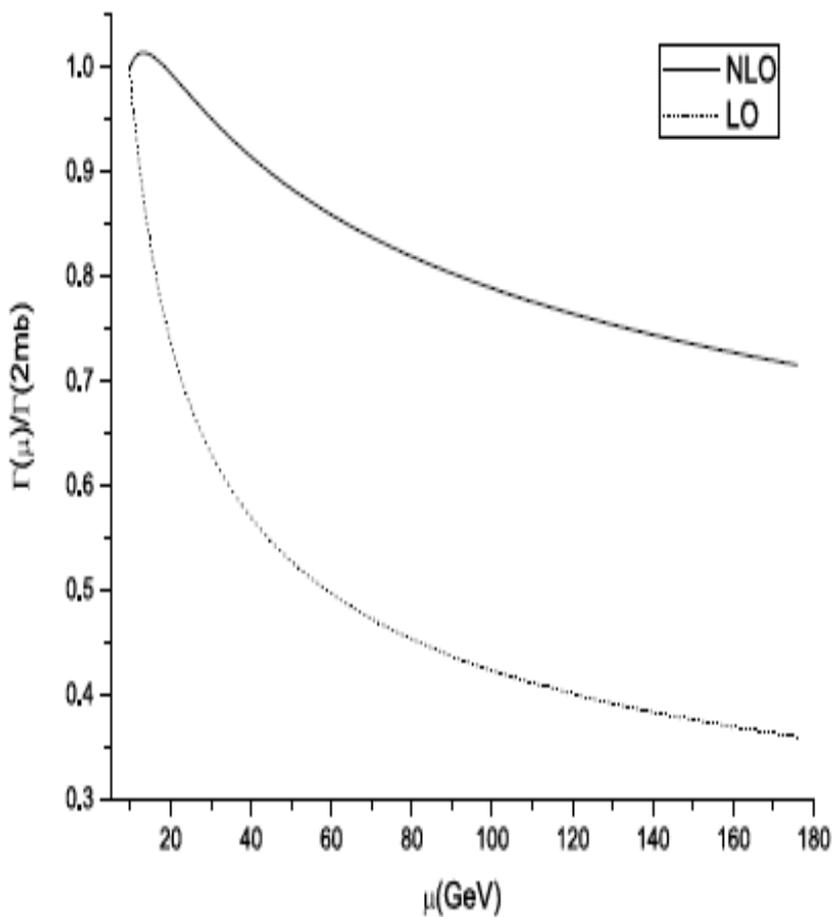
不确定度来自 $\mu = 2m_b \sim m_t$ 对于 b 夸克偶素产生



B_c 和 B_c^* 宽度随重整能标的跑动



η_b 和 Γ 宽度随重整能标的跑动



结论:

- 研究 top 夸克的产生和衰变对于检验标准模型以及寻找新物理，是极其重要的
- B_c 介子作为唯一一个由两个不同重味夸克组成的 B 介子，人们对理解介子中的非微扰效有着特殊的意义

- 因而研究 top 夸克到 B_c 介子的衰变是一项有意义的工作
- 对于 top 到 B_c 介子或 $Upsilon$ 的衰变过程，由于有较大的能标跑动范围，显然仅计算LO是不理想的
- 强相互作用NLO的修正结果，对于更精确地作出理论预言、降低理论结果对重整化能标的依赖，甚至由此获得NLO的夸克到双中夸克介子的碎裂函数也许是有益的



Thanks !