

# 顶夸克和 TeV能区新物理

曹庆宏

理论物理研究所

本报告内容基于以下合作：

Ed Berger, Chuan-Ren Chen, Jiang-Hao Yu, Hao Zhang

Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 072002

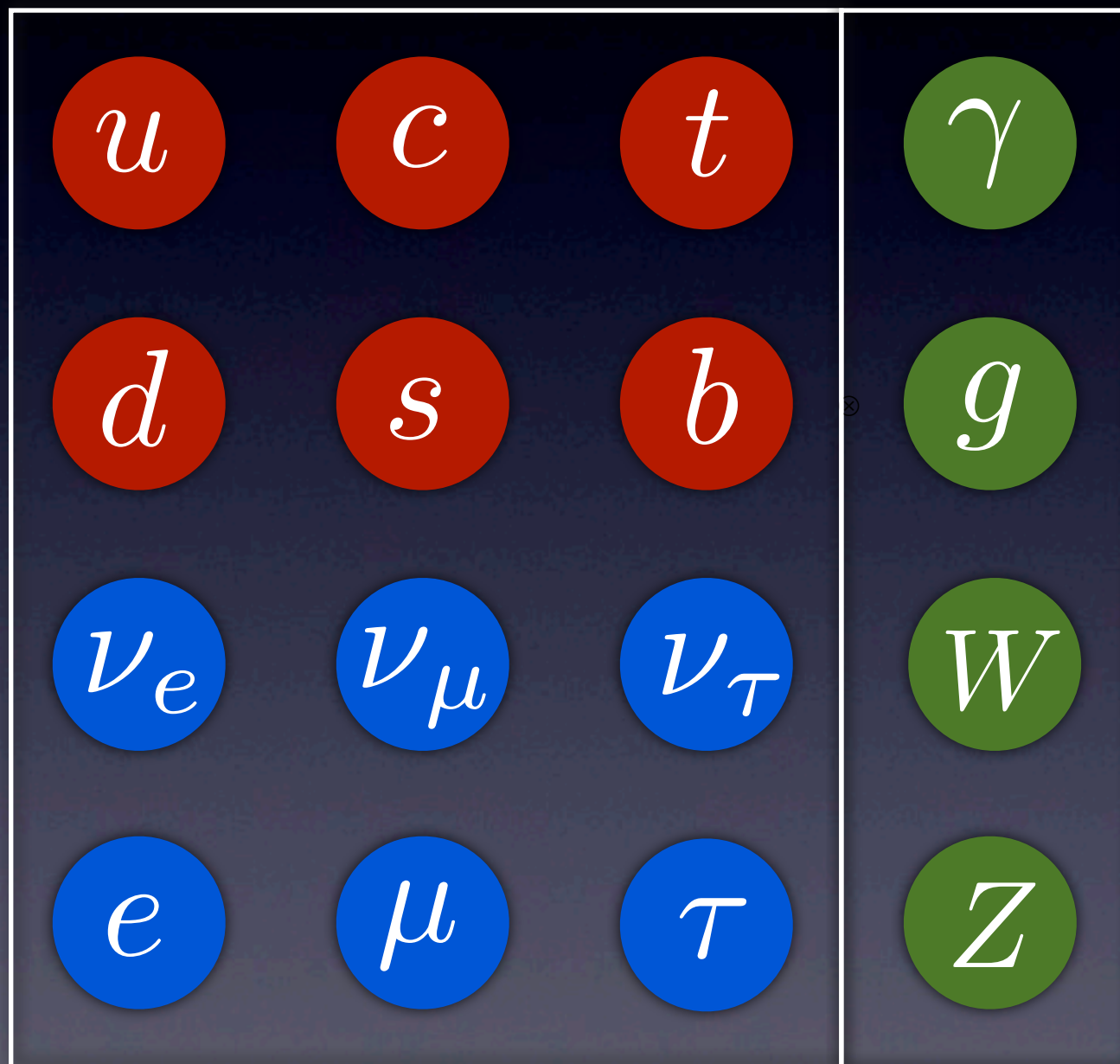
Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 152004

# 粒子物理的标准模型

已知基本粒子谱

夸克

轻子



自旋1/2

自旋1

电磁

强

弱

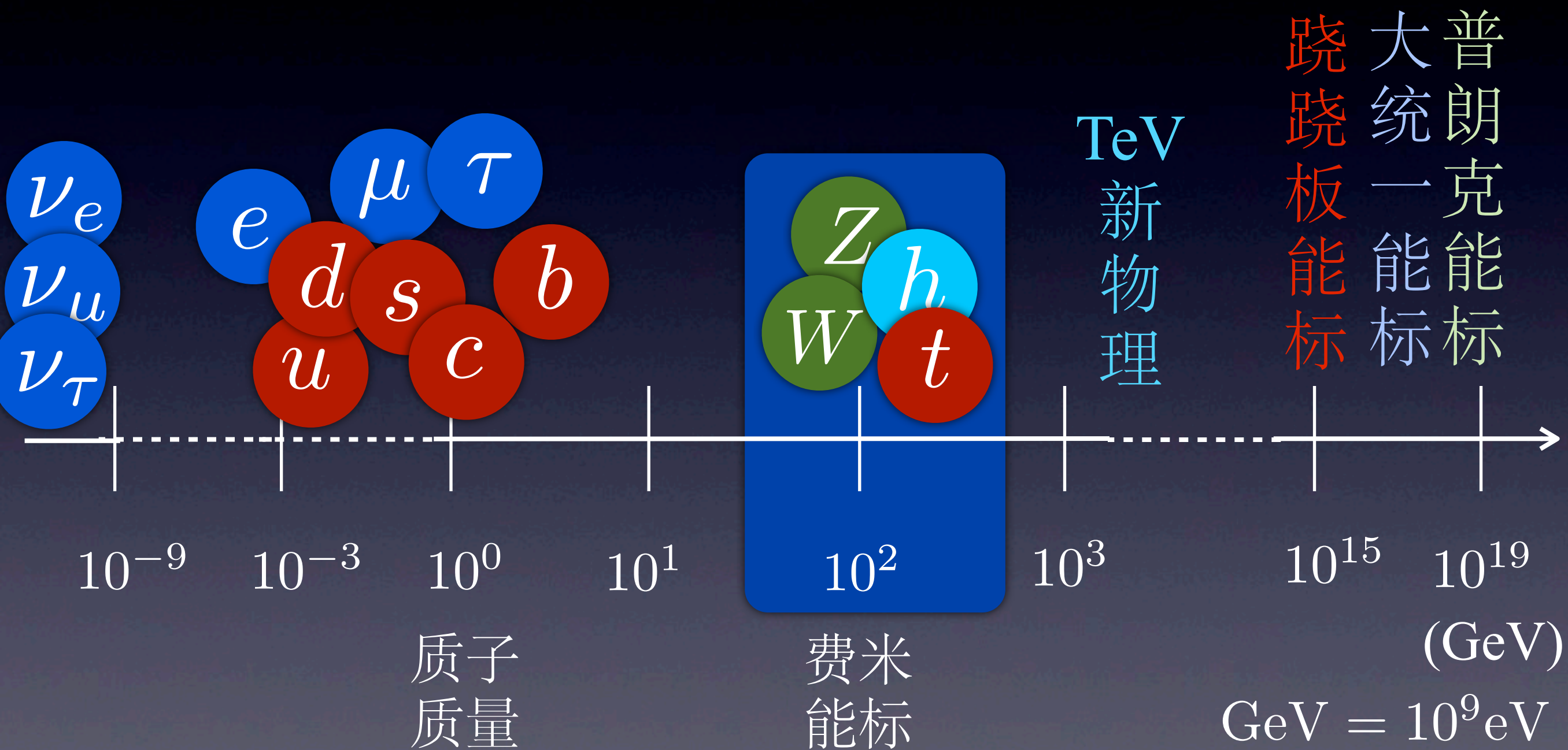
希格斯粒子

自旋0

$SU(3) \times SU(2) \times U(1)$   
规范对称性

# 标准模型的两难

电弱对称性破缺起源 和 味对称性破缺起源  
( $W$  和  $Z$  质量) (费米子质量)

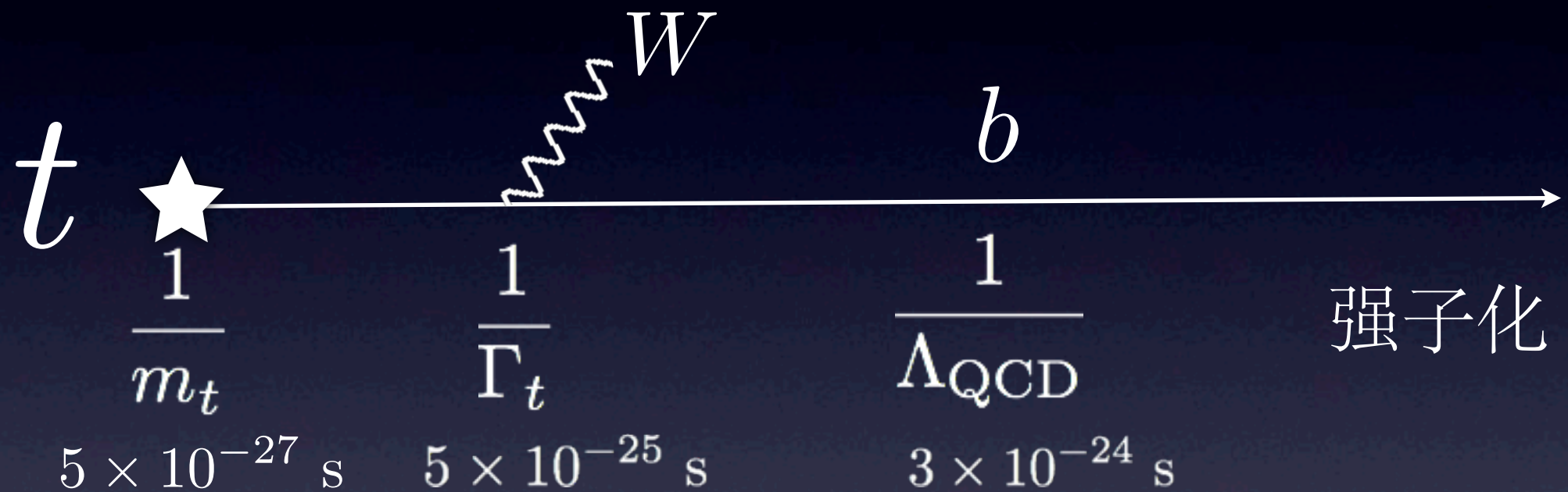


顶夸克或许是我们和新物理间的唯一联系

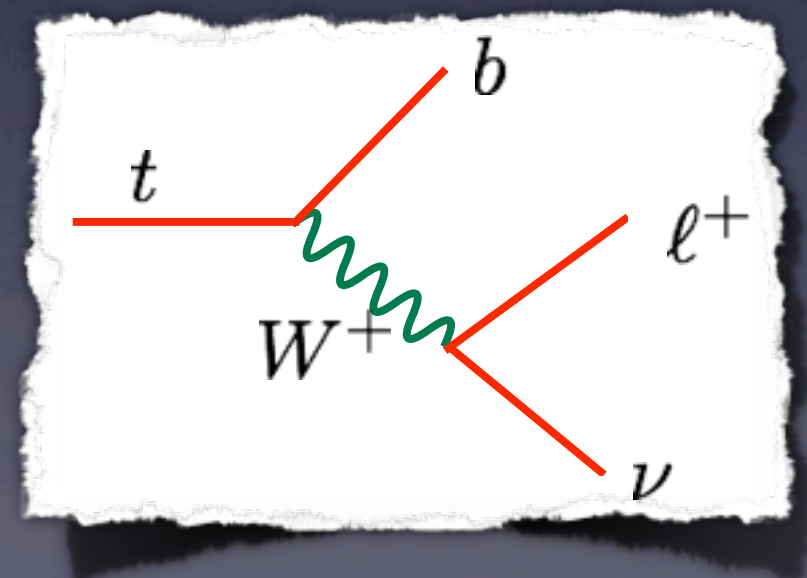


# 顶夸克：标准模型中唯一裸夸克

顶夸克寿命非常短



顶夸克的自旋信息完好地保存在顶夸克衰变产物中



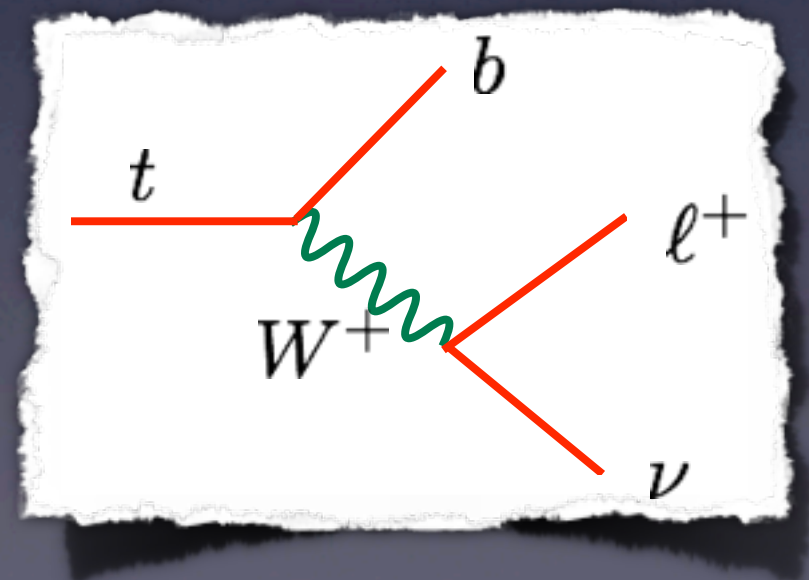
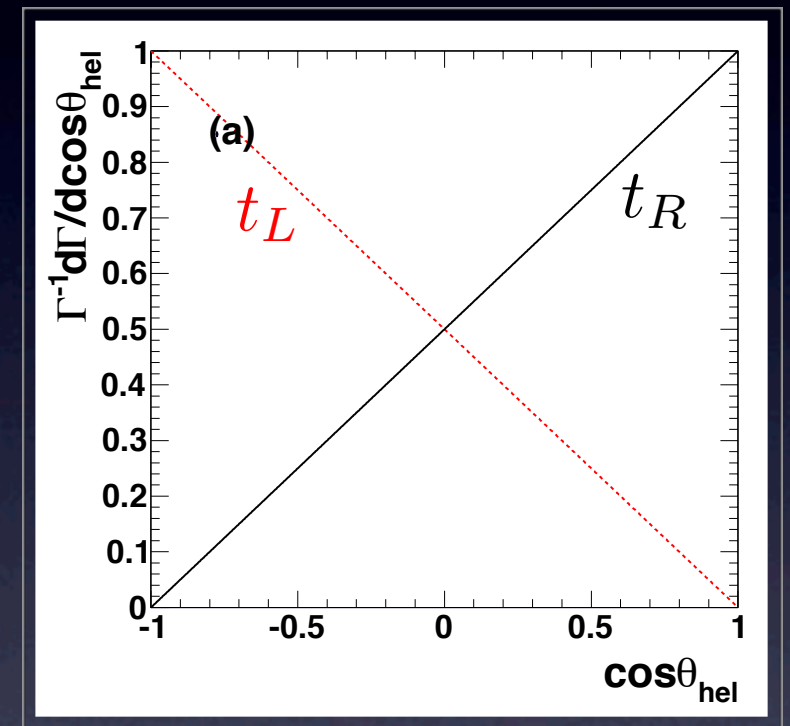
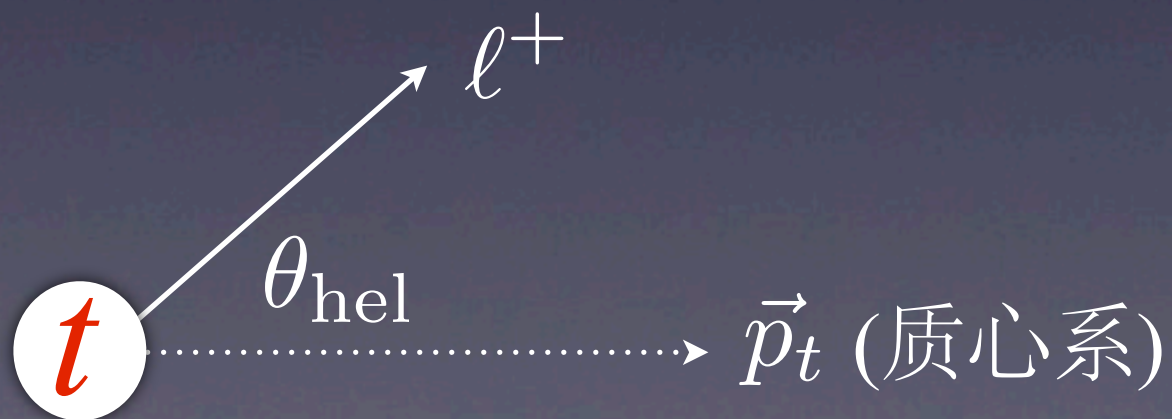
# 带电轻子：顶夸克自旋分析师

带电轻子倾向于沿着顶夸克自旋方向出射

在顶夸克静止系中

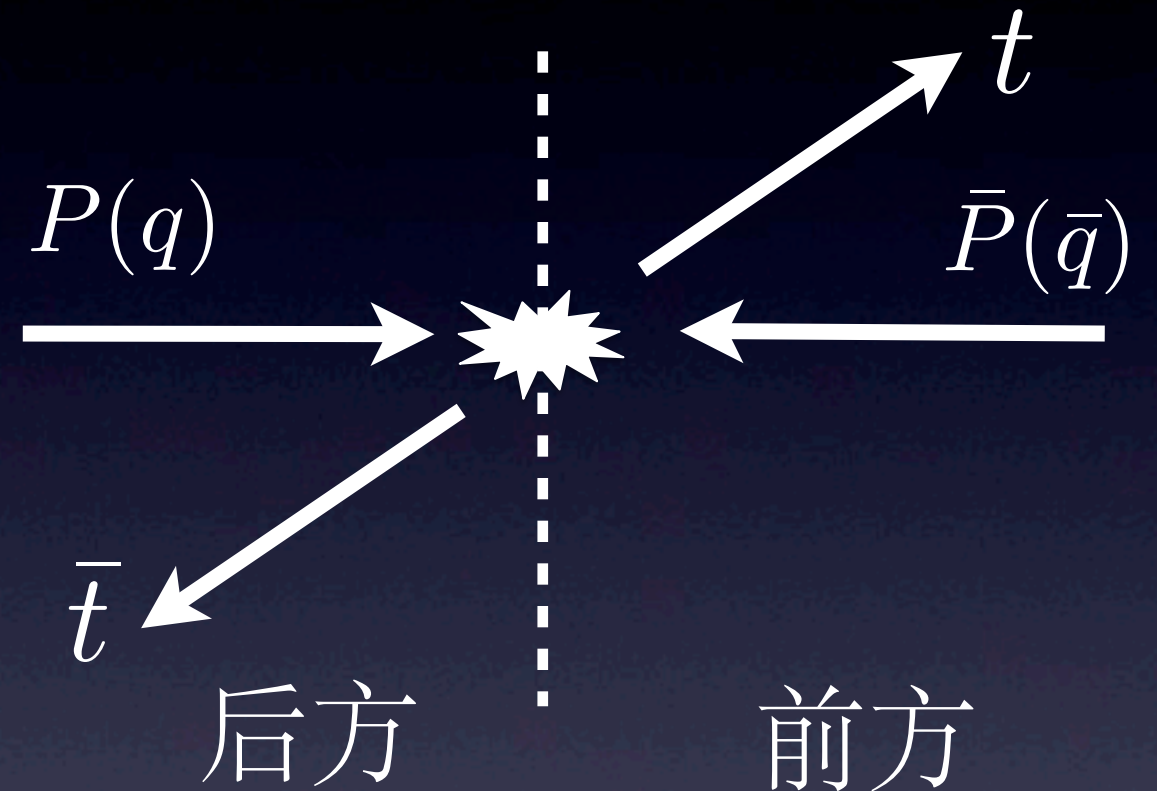
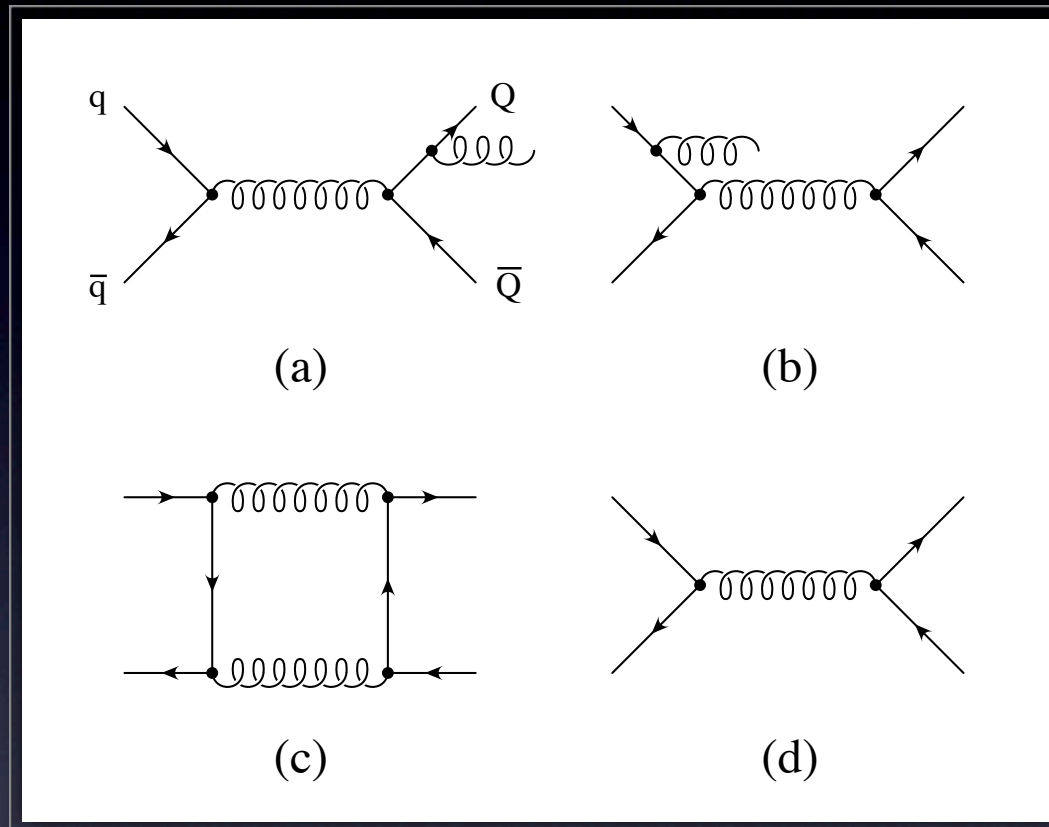
$$\frac{1}{\Gamma} \frac{d\Gamma}{d \cos \theta_{\text{hel}}} = \frac{1 + \lambda_t \cos \theta_{\text{hel}}}{2}$$

$\lambda_t = +$  右手顶夸克  
 $\lambda_t = -$  左手顶夸克



# Tevatron的顶夸克前后不对称性

在标准模型中仅在量子辐射修正水平上出现



$$A^{p\bar{p}} = \frac{N_t(y > 0) - N_{\bar{t}}(y > 0)}{N_t(y > 0) + N_{\bar{t}}(y > 0)} = 0.051(6)$$

$$A^{t\bar{t}} = \frac{N(\Delta y > 0) - N(\Delta y < 0)}{N(\Delta y > 0) + N(\Delta y < 0)} = 0.078(9) \quad \Delta y = y_t - y_{\bar{t}}$$

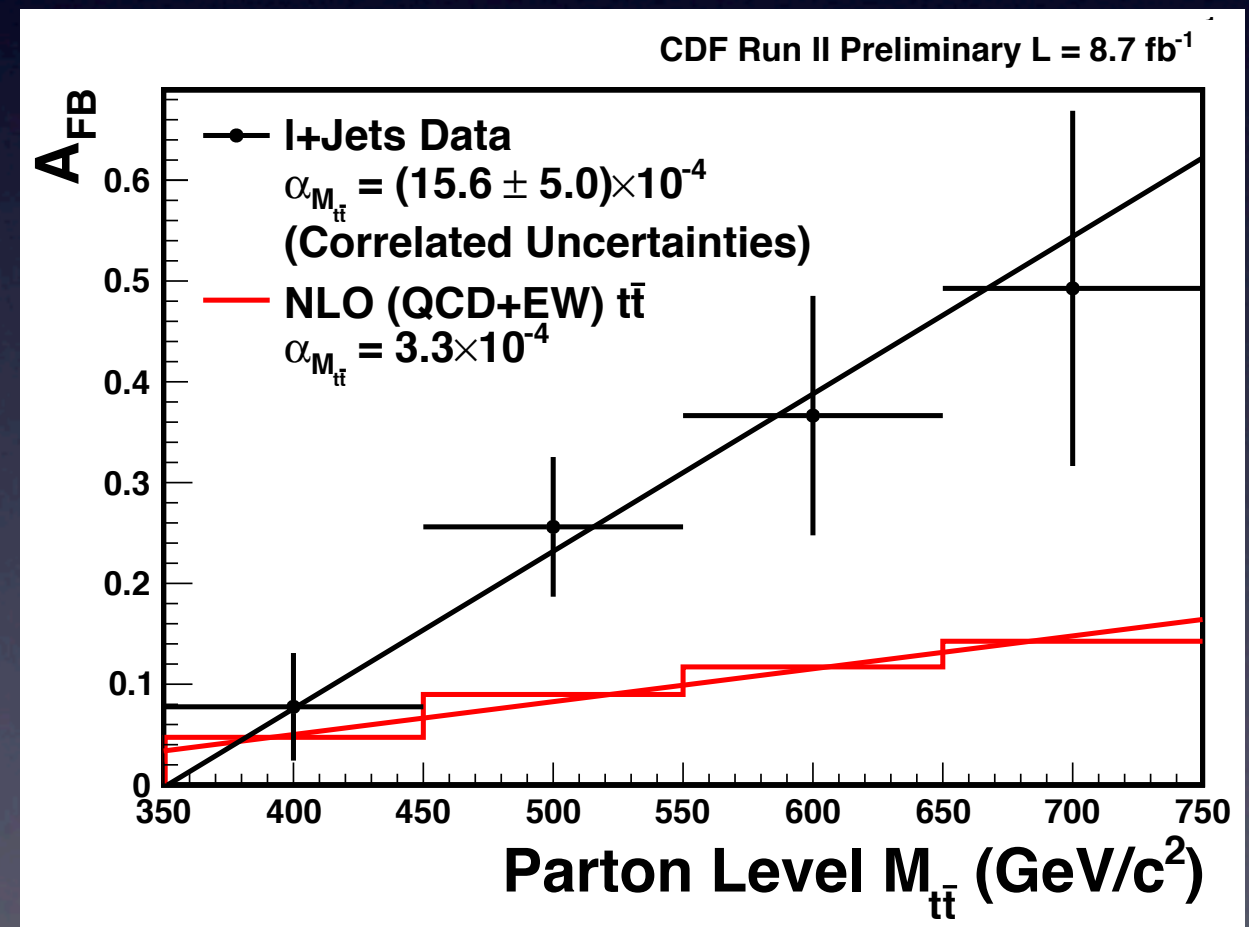
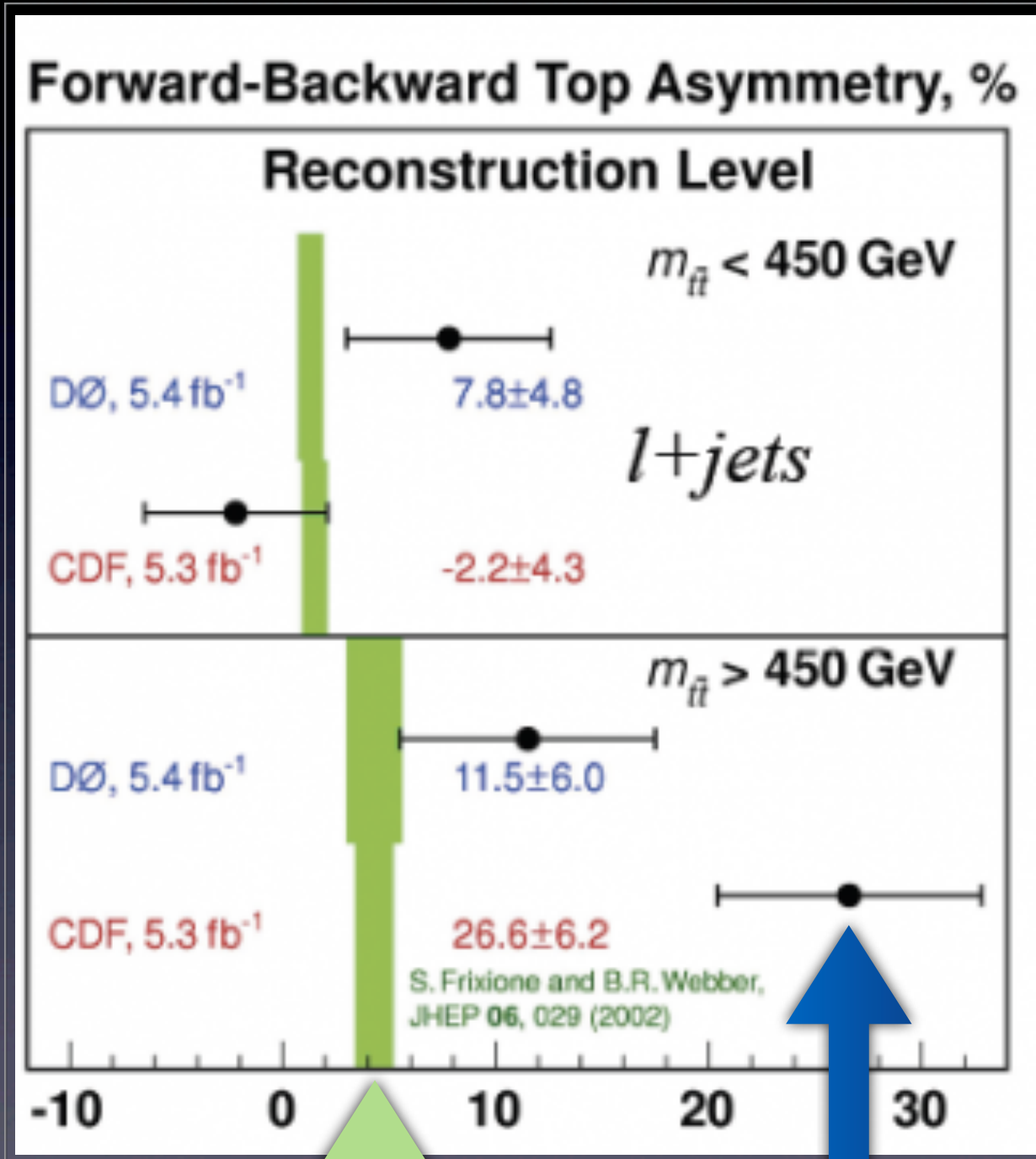


# Tevatron的顶夸克前后不对称性

CDF (8.7fb<sup>-1</sup>):

$$A_{FB}^{\text{inclusive}} = 0.162 \pm 0.041 \pm 0.022$$

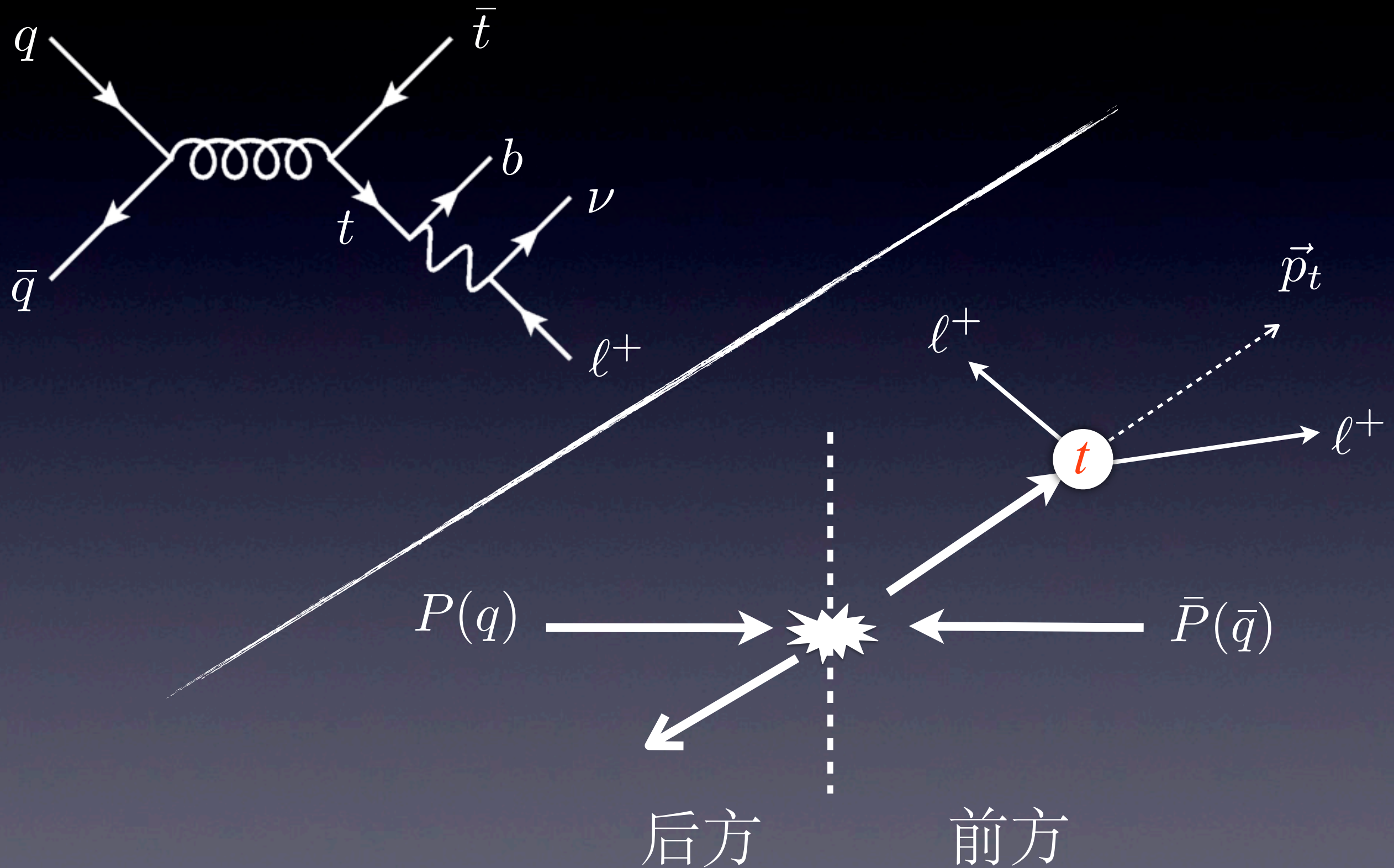
$$A_{FB}^{\text{NLO+EW}} = 0.066$$



标准模型  
预言值

CDF: 1101.0034

# 带电轻子的前后不对称性 $A_{FB}^{\ell}$





# $A_{FB}^{\ell}$ 和 $A_{FB}^t$ 间的关联

D0:  $A_{FB}^t = 0.196 \pm 0.065$   
 $A_{FB}^{\ell} = 0.152 \pm 0.040$

CDF:  $A_{FB}^t = 0.085 \pm 0.025$   
 (8.7fb<sup>-1</sup>)  $A_{FB}^{\ell} = 0.066 \pm 0.025$

$$\left. \frac{A_{FB}^{\ell}}{A_{FB}^t} \right|_{D0} \sim \frac{3}{4}$$

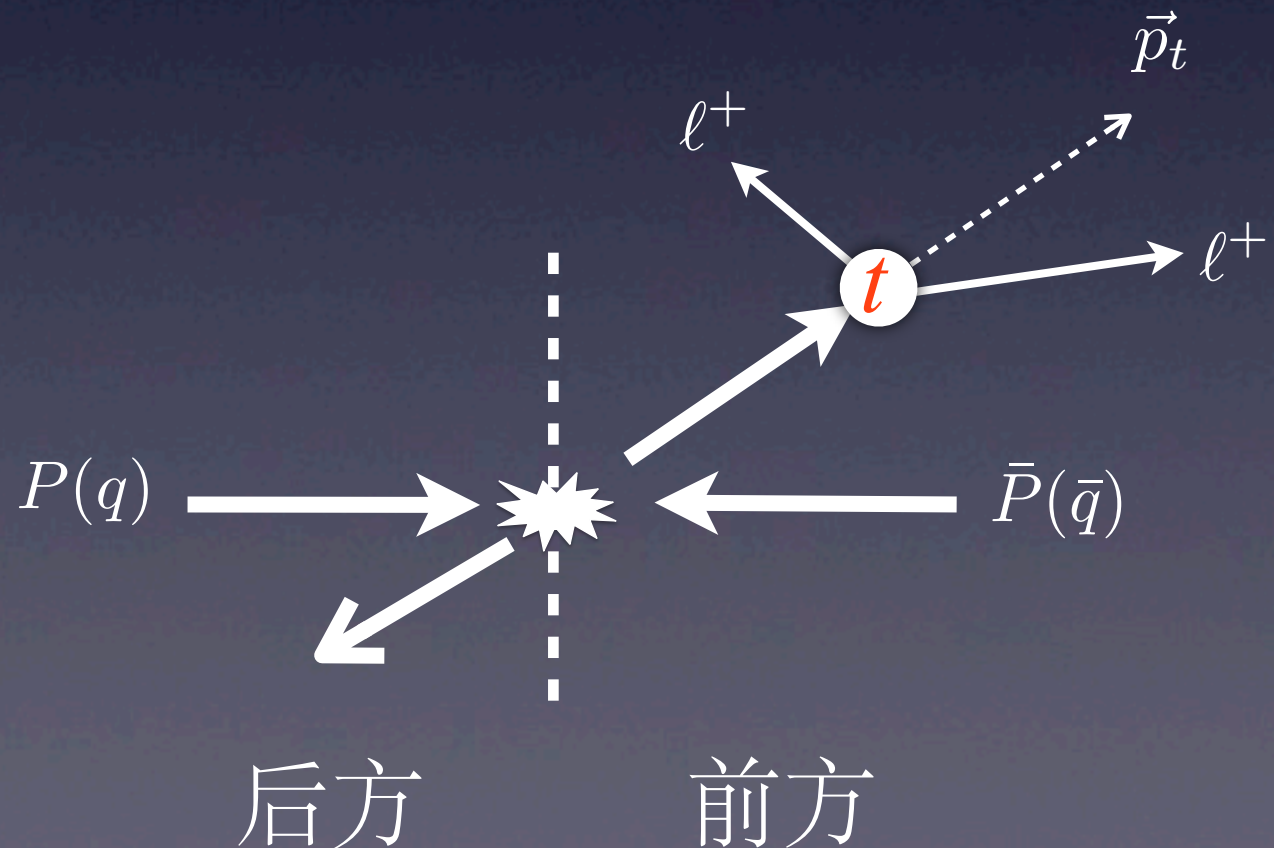
$$\left. \frac{A_{FB}^{\ell}}{A_{FB}^t} \right|_{inc} \sim \frac{3}{4} \quad \left. \frac{A_{FB}^{\ell}}{A_{FB}^t} \right|_{>450} \sim \frac{3}{5}$$

标准模型理论预言:

$$A_{FB}^t = 0.051 \pm 0.001$$

$$A_{FB}^{\ell} = 0.021 \pm 0.001$$

$$\left. \frac{A_{FB}^{\ell}}{A_{FB}^t} \right|_{SM} \sim \frac{1}{2}$$



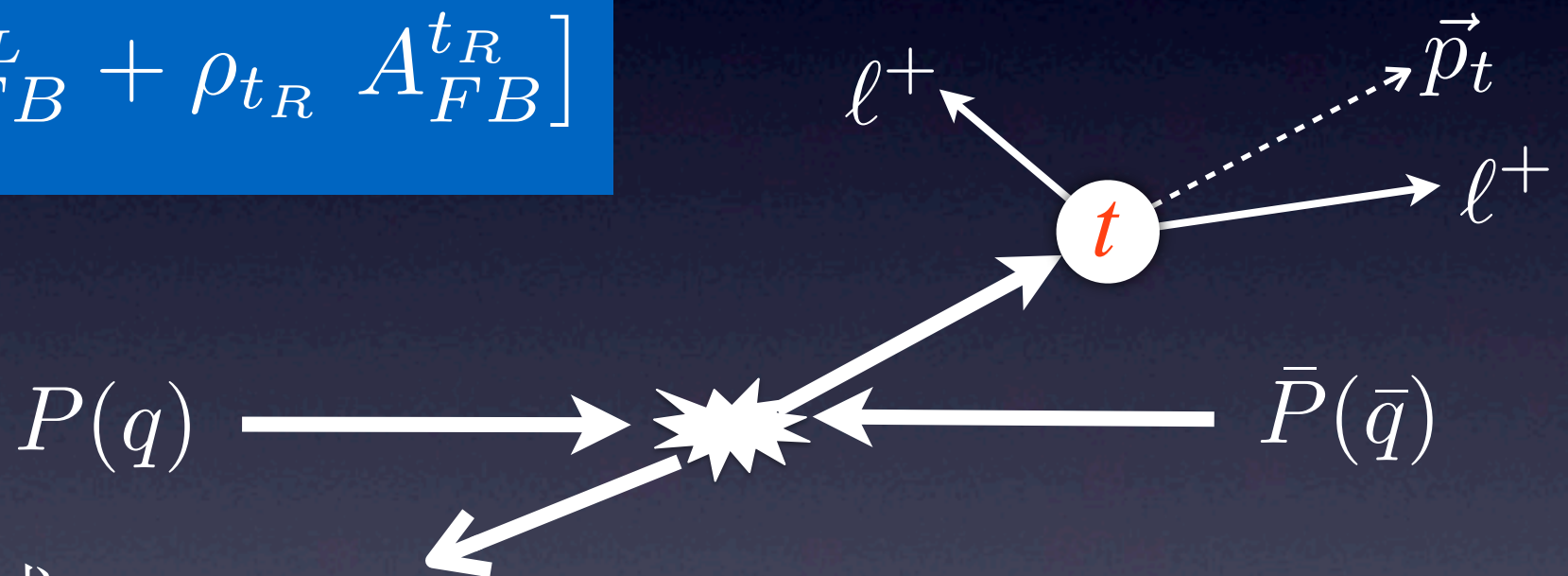
# $A_{FB}^t$ 和 $A_{FB}^\ell$ 间的关联

源于顶夸克极化和带电轻子的自旋关联效应

Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 072002

$$A_{FB}^\ell \approx \rho_{t_L} A_{FB}^{t_L} \times (2\mathcal{R}_C^{t_L} - 1) + \rho_{t_R} A_{FB}^{t_R} \times (2\mathcal{R}_C^{t_R} - 1)$$

$$A_{FB}^t \approx [\rho_{t_L} A_{FB}^{t_L} + \rho_{t_R} A_{FB}^{t_R}]$$

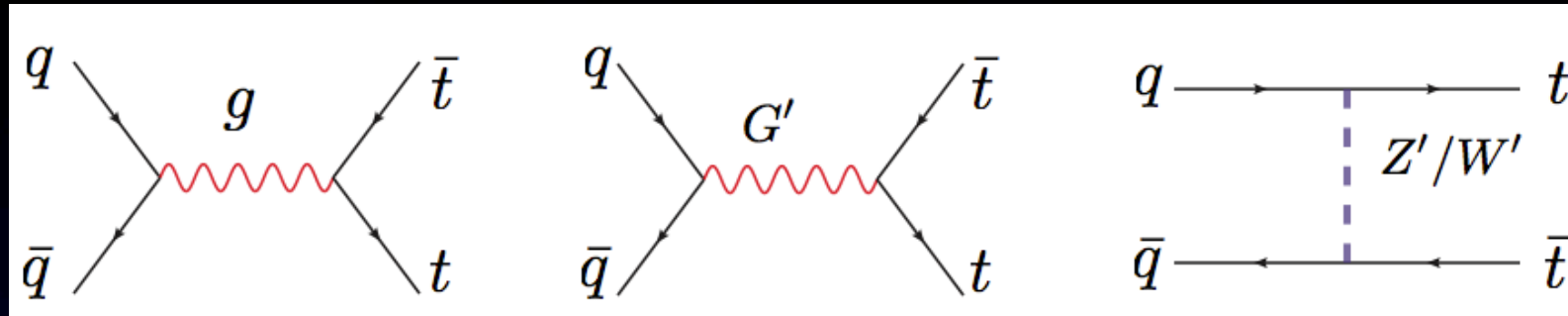


简单的解析表达式

$$R_F^{\lambda_t}(\beta, y_t) = \begin{cases} \frac{1}{2} + \frac{1}{2(1 + \gamma^{-2} \coth^2 y_t)^{1/2}} + \frac{\lambda_t \coth^2 y_t}{4\beta\gamma^2 (1 + \gamma^{-2} \coth^2 y_t)^{3/2}}, & (y_t > 0) \\ \frac{1}{2} - \frac{1}{2(1 + \gamma^{-2} \coth^2 y_t)^{1/2}} - \frac{\lambda_t \coth^2 y_t}{4\beta\gamma^2 (1 + \gamma^{-2} \coth^2 y_t)^{3/2}}, & (y_t < 0) \end{cases}$$

# 顶夸克 $A_{FB}$ 的新物理解释

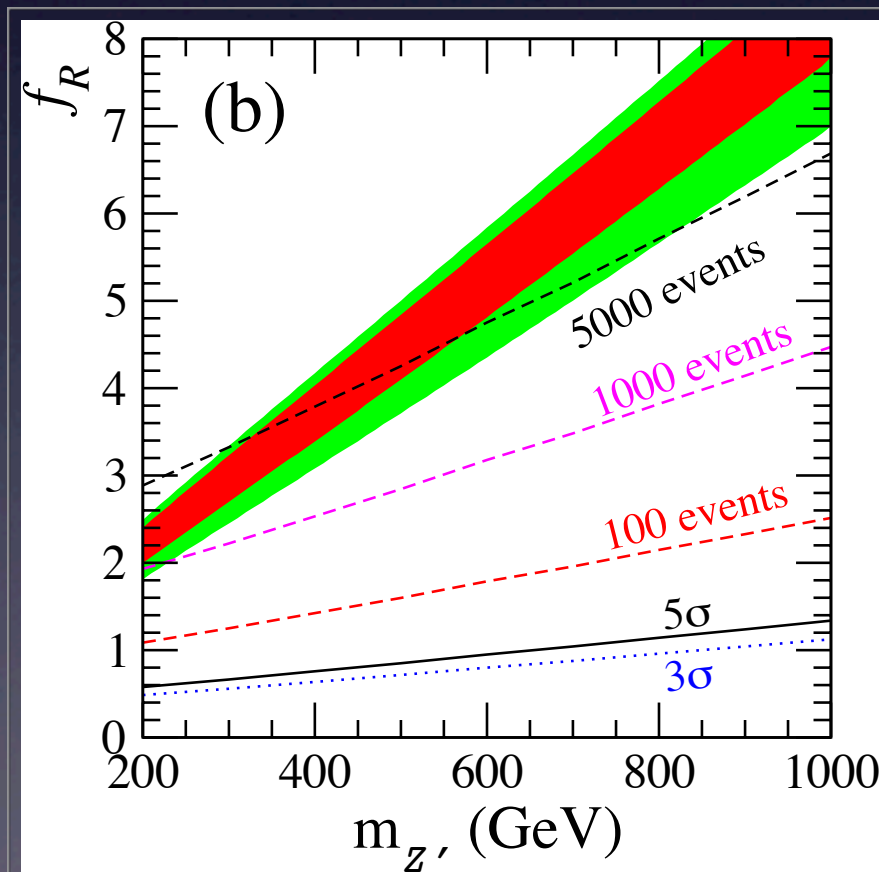
新矢量规范玻色子或新标量场粒子



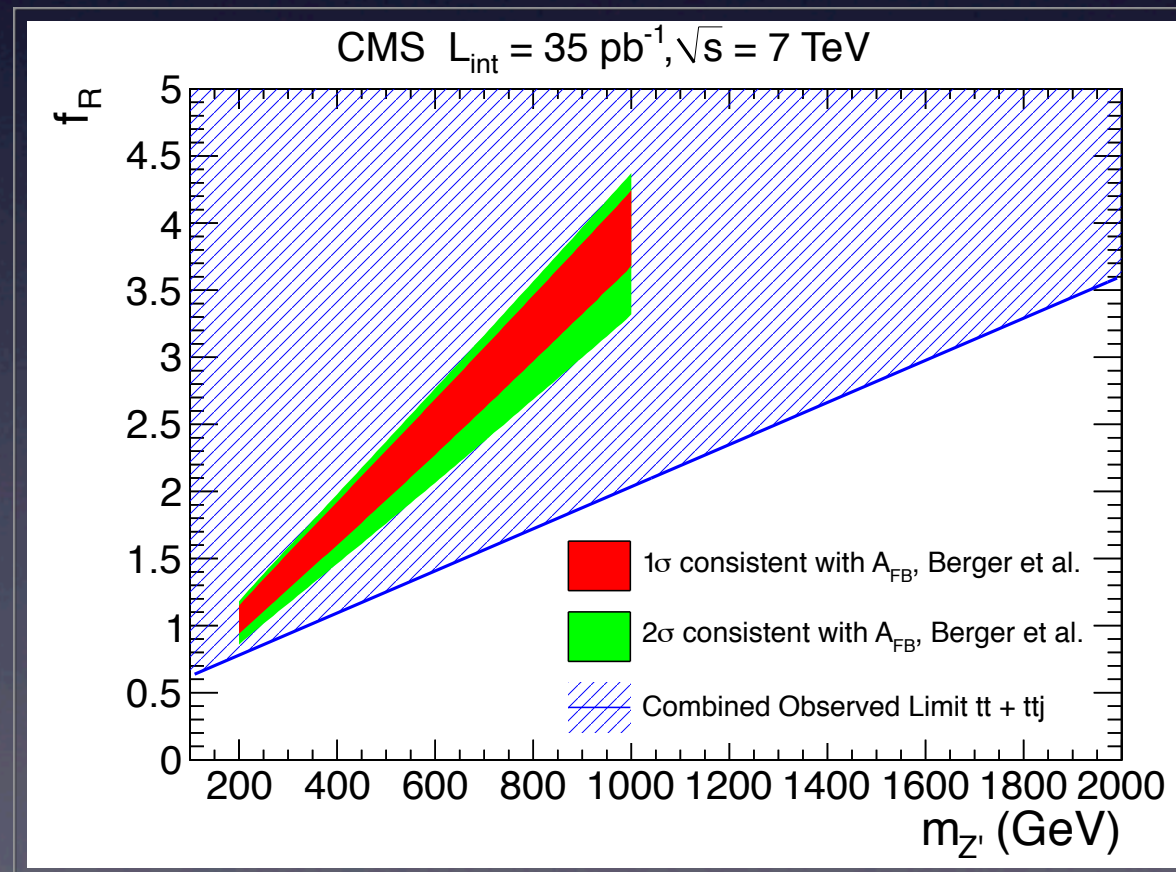
标准模型  
胶子

味守恒的  
新轴矢胶子

味改变的  
新玻色子



Berger, QHC, Chen, Li, Zhang,  
PRL 106 (2011) 201801



CMS实验组  
JHEP 1108 (2011) 005

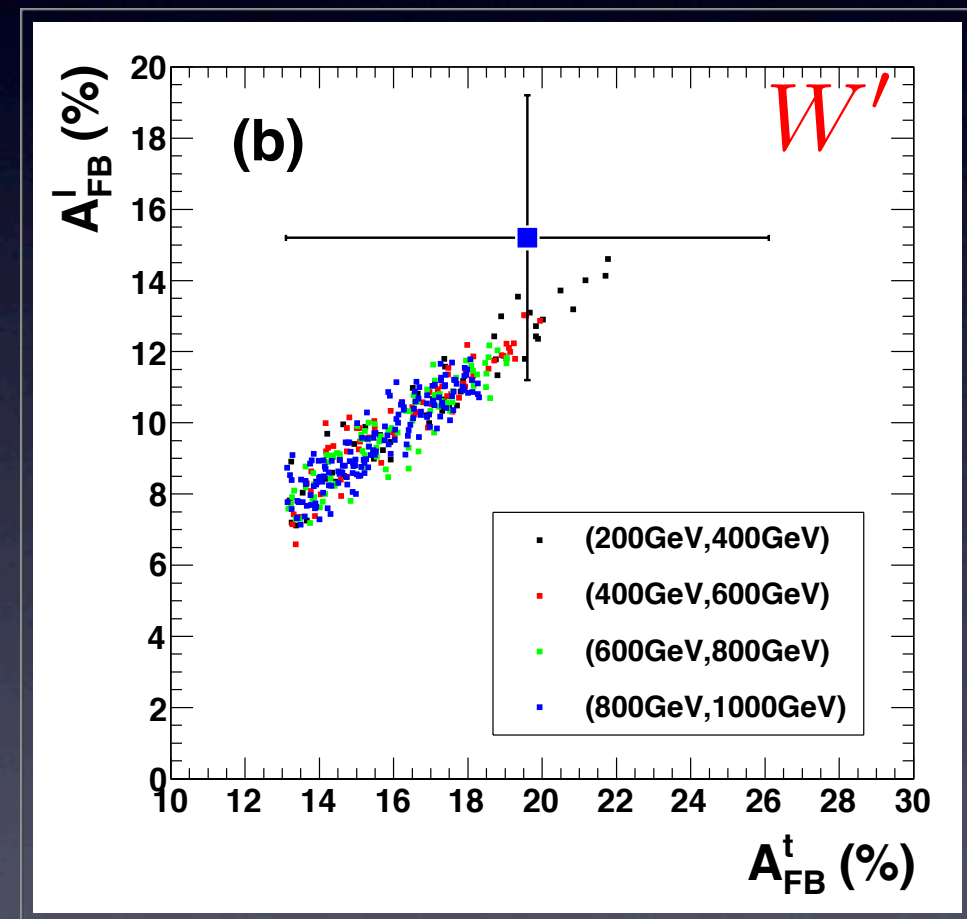
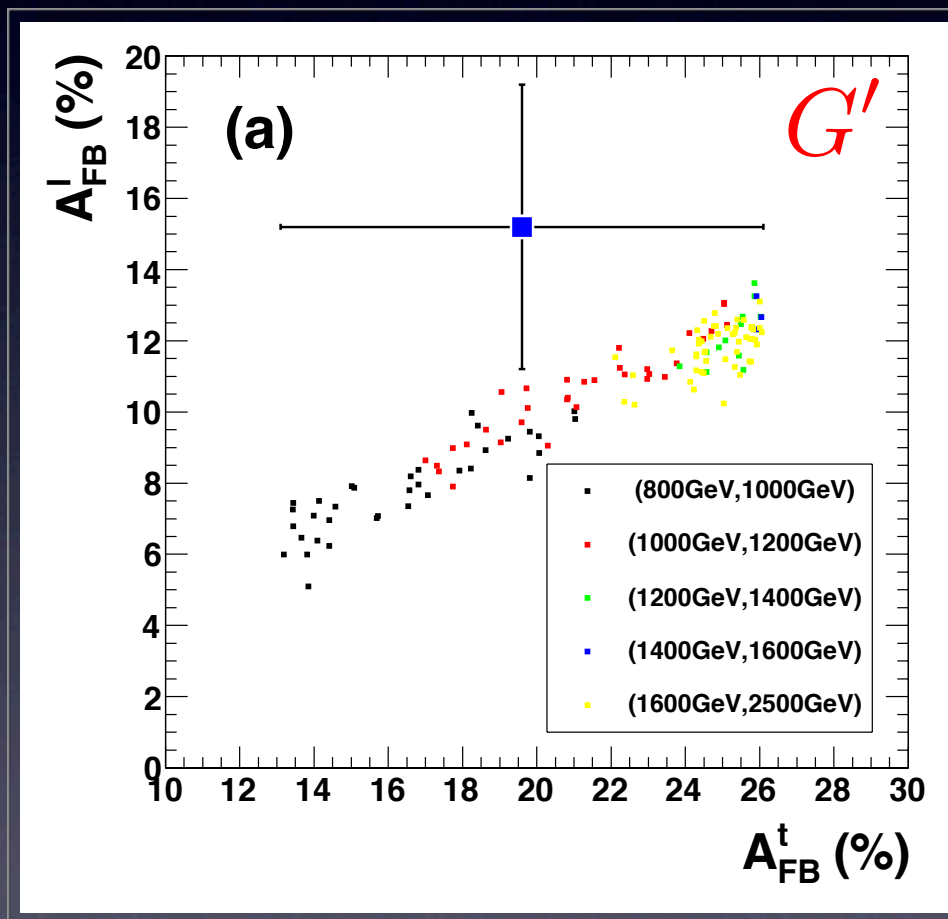
味改变中性流  
Z-prime  
已被CMS实  
验排除



# $A_{FB}^t$ 和 $A_{FB}^\ell$ 间的强关联

源于顶夸克和带电轻子的自旋关联效应

Phys. Rev. Lett. 108 (2012) 072002



$$A_{FB}^\ell \simeq 0.47 \times A_{FB}^t + 0.25\%$$

$$A_{FB}^\ell \simeq 0.75 \times A_{FB}^t - 2.1\%$$

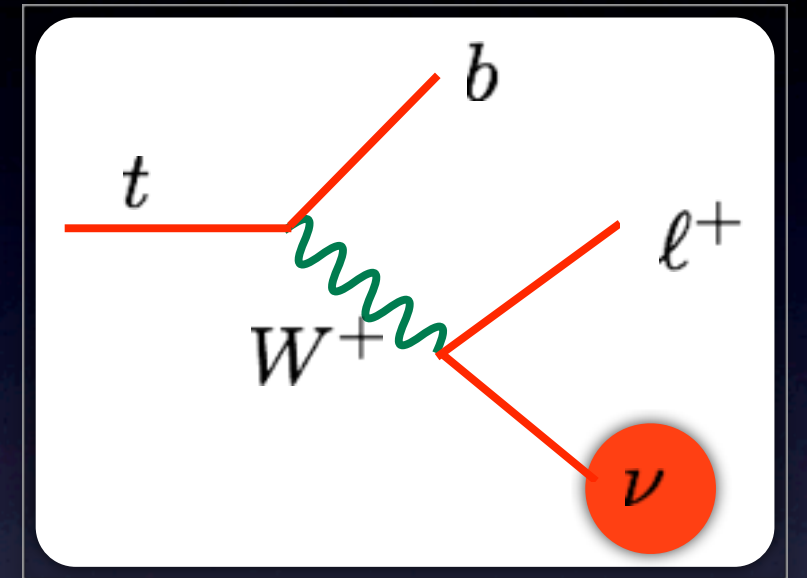
# 顶夸克事例重构

顶夸克衰变产物中，带电轻子永远和不可观测的中微子结伴而行。

$$m_\nu = 0$$

$$p_x^\nu = \cancel{E}_T(x) \quad p_y^\nu = \cancel{E}_T(y)$$

$$p_z^\nu \text{ 未知}$$



利用已知的W玻色子质量可以求解出中微子质量

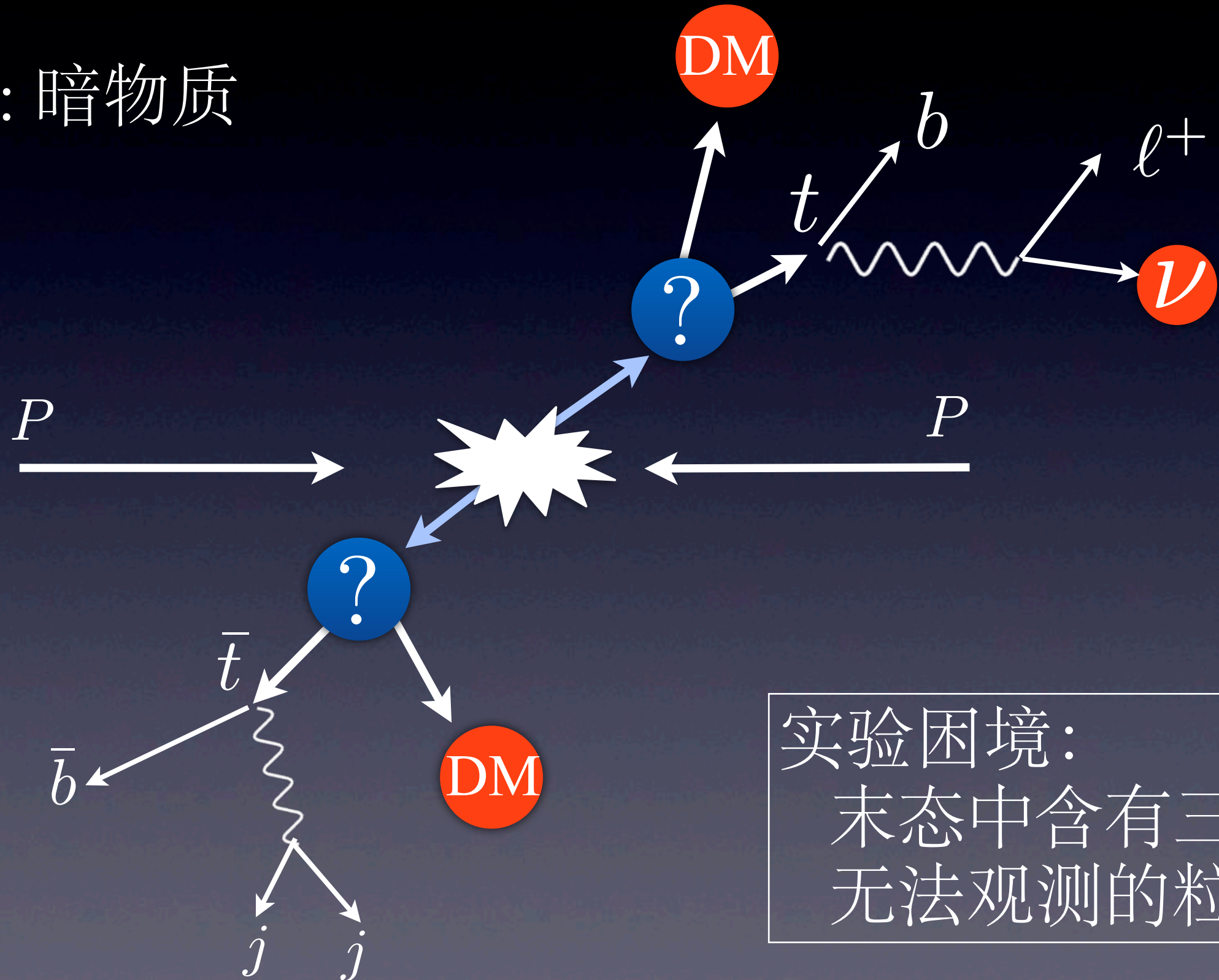
$$m_W^2 = (p_\ell + p_\nu)^2$$

$$\rightarrow p_z^\nu = \frac{1}{2(p_T^e)^2} \left[ A p_z^e \pm E_e \sqrt{A^2 - 4(p_T^e)^2 \cancel{E}_T^2} \right]$$

$$A = m_W^2 + 2\vec{p}_T^e \cdot \vec{\cancel{E}}_T$$

# 顶夸克对和暗物质联合产生

DM: 暗物质

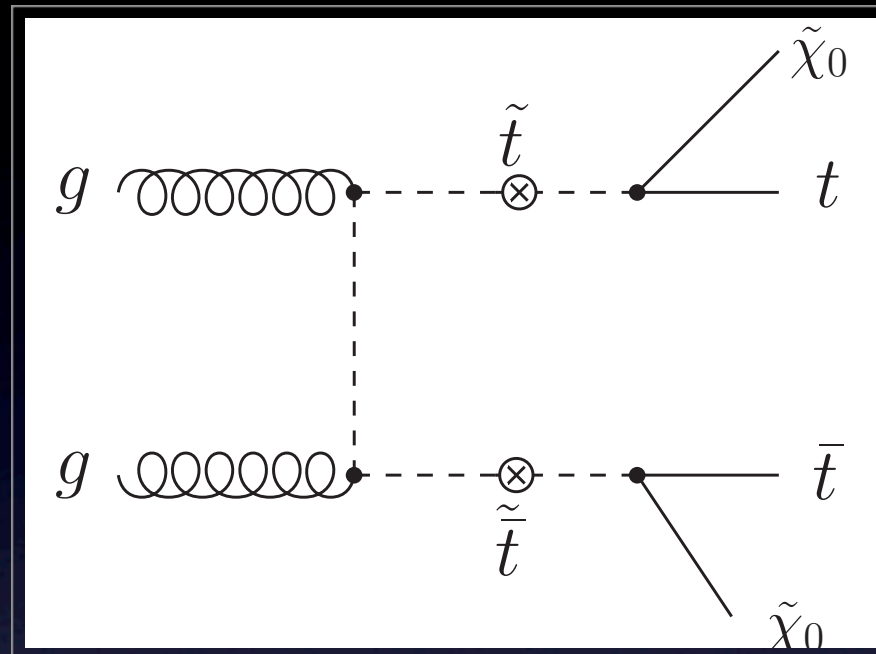


实验困境：  
末态中含有三个  
无法观测的粒子



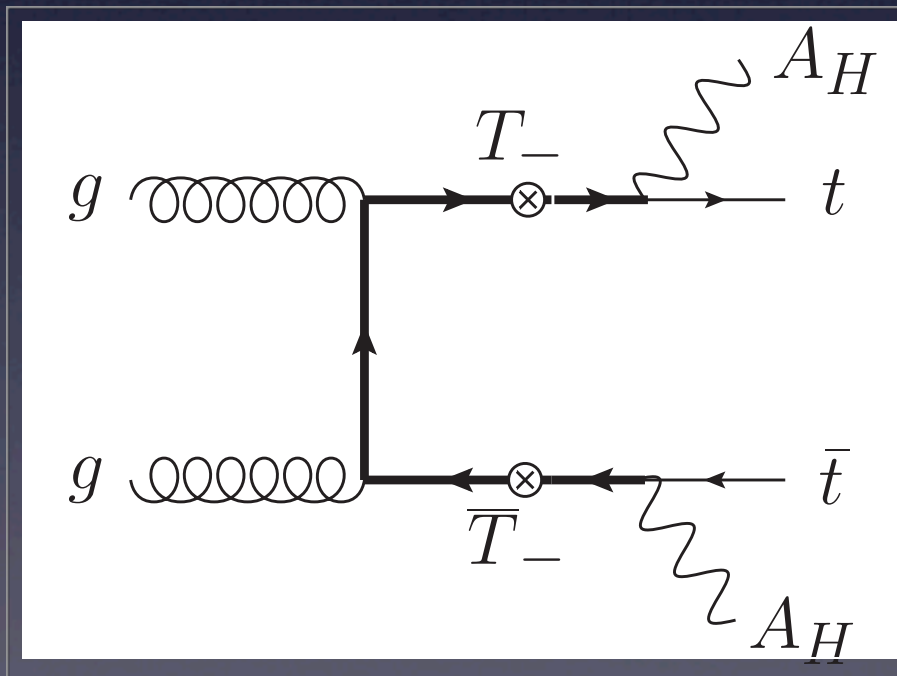
# 三种流行的新物理模型

- ▶ 标准模型的最小超对称扩充模型



新粒子  
自旋为0

- ▶ T-宇称守恒的小希格斯模型
- ▶ 普适性的额外维时空模型



新粒子  
自旋为1/2

# 带电轻子的能量和空间角分布

在顶夸克静止系中

$$\frac{d\Gamma}{dx d\cos\theta} = \frac{\alpha_W^2 m_t}{32\pi AB} x(1-x) \text{Arctan} \left[ \frac{Ax}{B-x} \right] \frac{1 + s_t \cos\theta}{2}$$

能量 ( $x \equiv E_\ell/E_t$ )

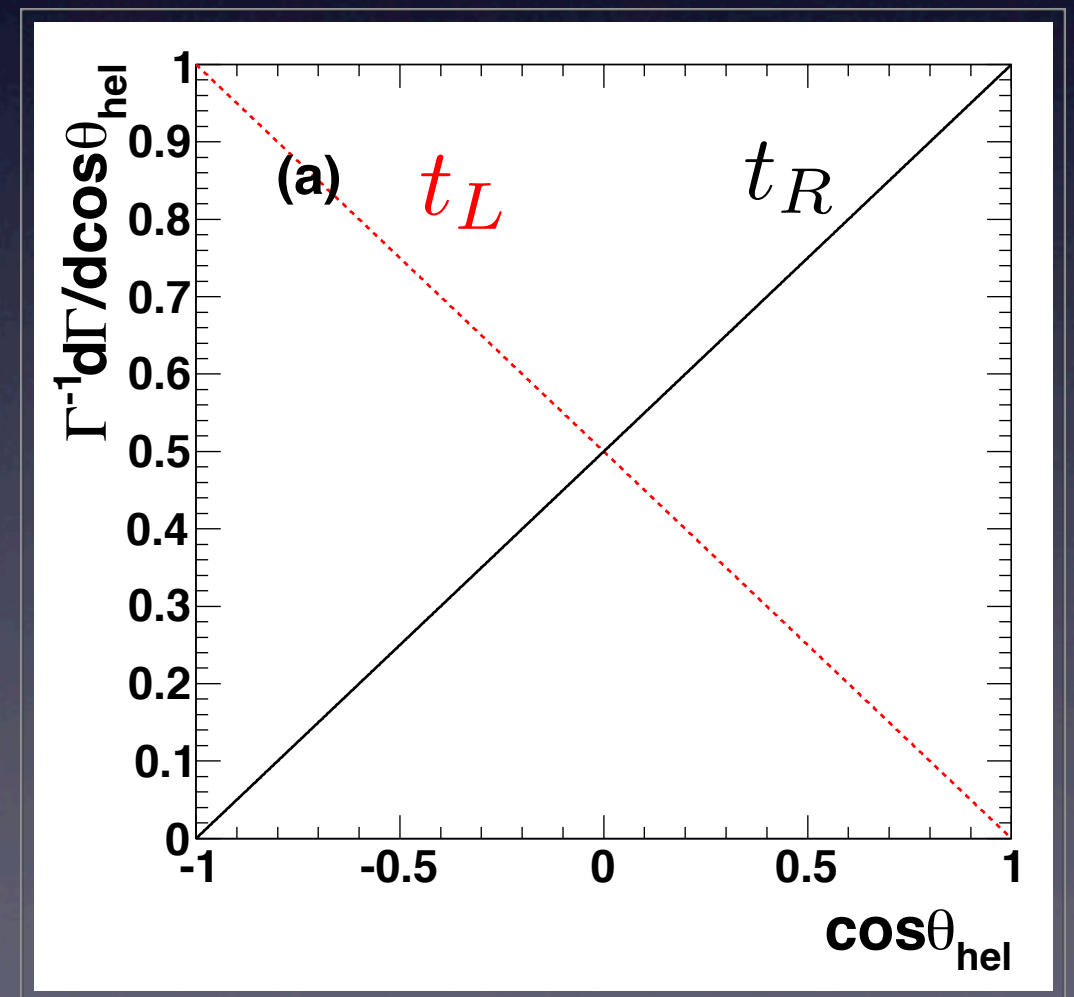
极化角



$\lambda_t = +$  右手顶夸克

$\lambda_t = -$  左手顶夸克

当顶夸克运动时，带电轻子的能量和空间角纠缠起来。



# 带电轻子的能量敏感依赖于 顶夸克极化性质

Phys. Rev. Lett. 109 (2012) 152004

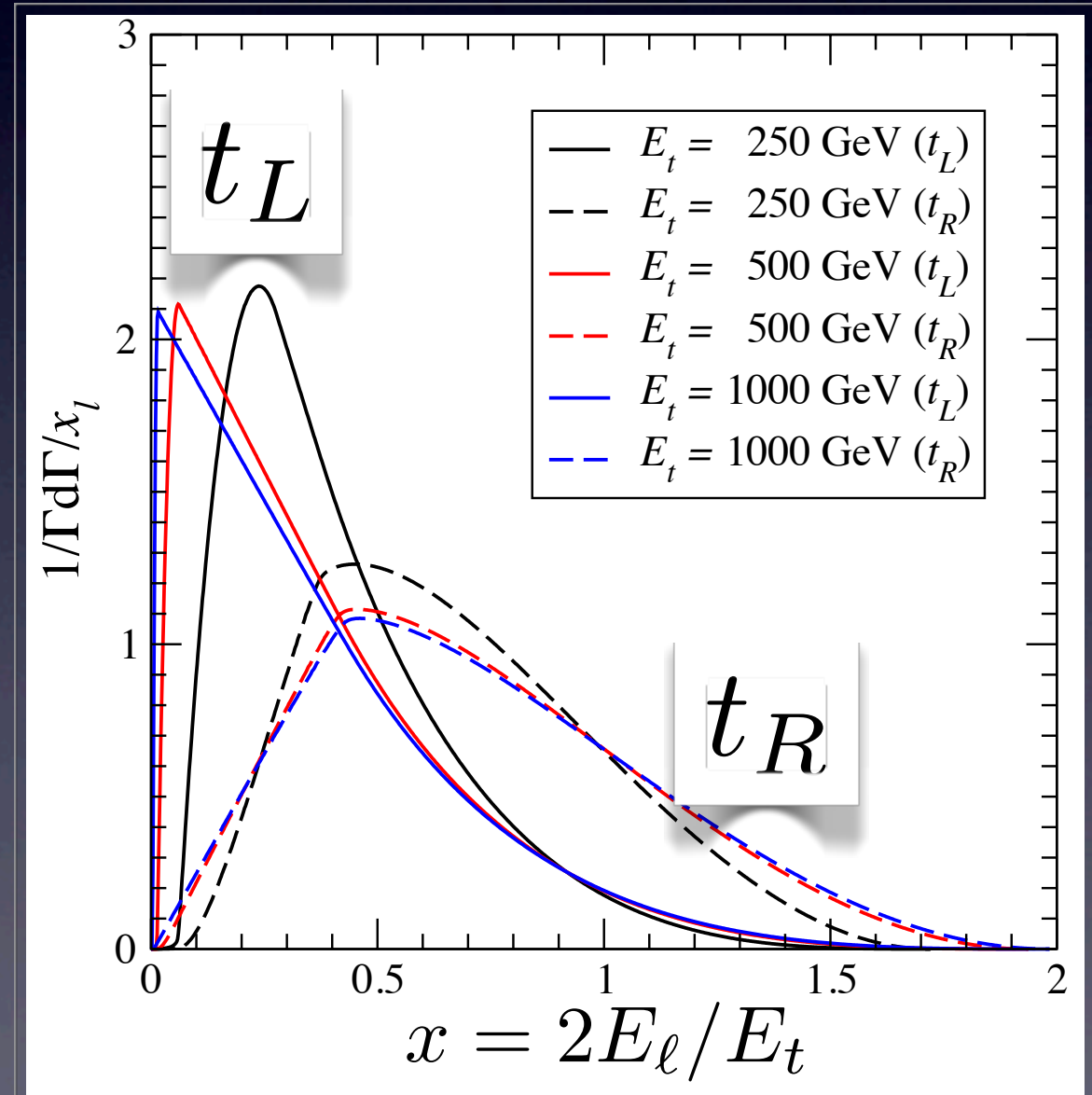
$$\frac{d\Gamma(\hat{s}_t)}{dx} = \frac{\alpha_W^2 m_t}{64\pi AB} \int_{z_{\min}}^{z_{\max}} x\gamma^2 [1 - x\gamma^2(1 - z\beta)] \times \left(1 + \hat{s}_t \frac{z - \beta}{1 - z\beta}\right) \text{Arctan} \left[ \frac{Ax\gamma^2(1 - z\beta)}{B - x\gamma^2(1 - z\beta)} \right] dz$$

$$A = \frac{\Gamma_W}{m_W} \quad B = \frac{m_W^2}{m_t^2} \approx 0.216$$

$$\gamma = \frac{E_t}{m_t} \quad \beta = \sqrt{1 - 1/\gamma^2}$$

$$z_{\min} = \max[(1 - 1/\gamma^2 x)/\beta, -1]$$

$$z_{\max} = \min[(1 - B/\gamma^2 x)/\beta, 1]$$

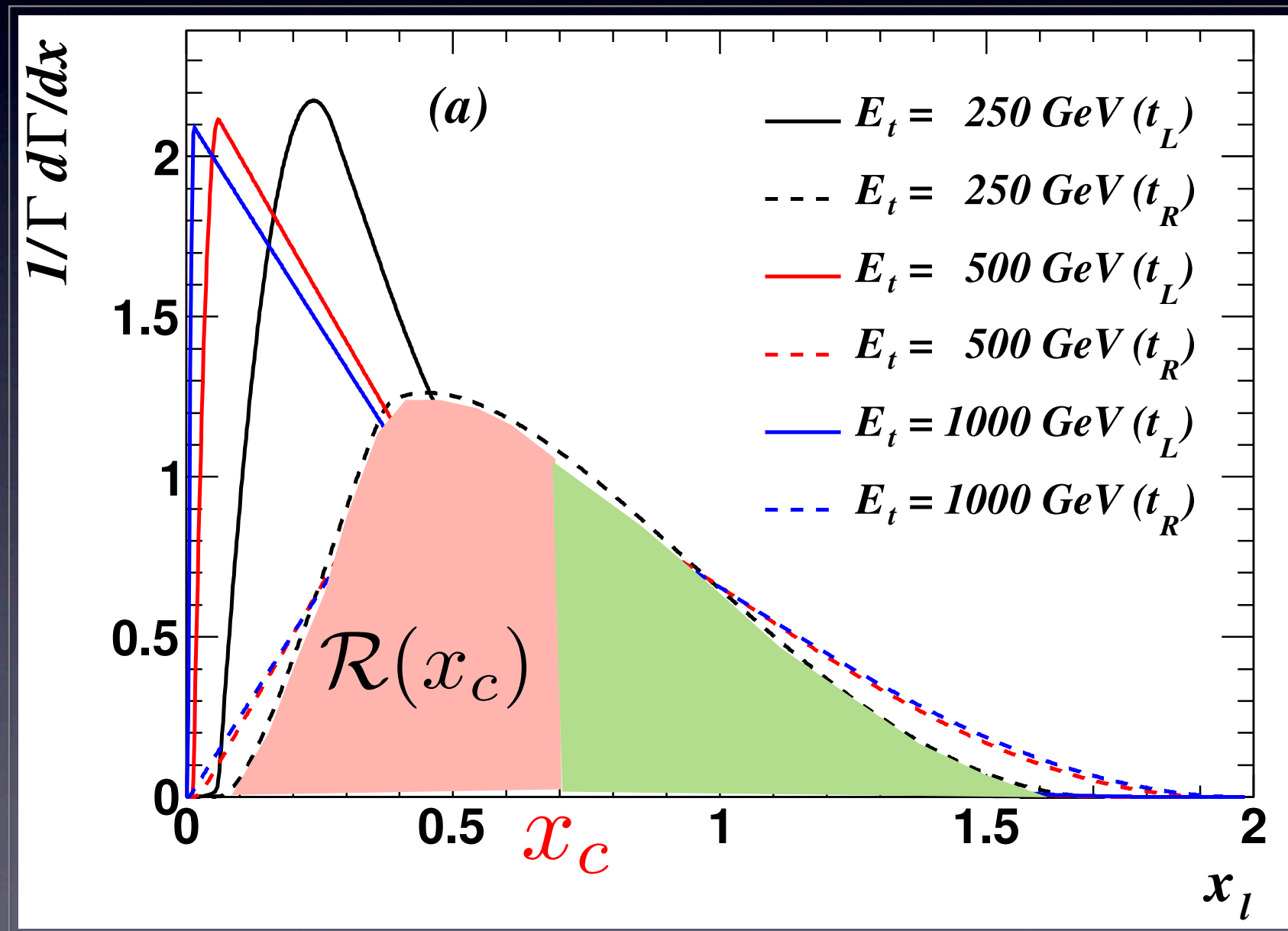




# 新物理变量 $R$

更好地区分左手极化和右手极化的顶夸克

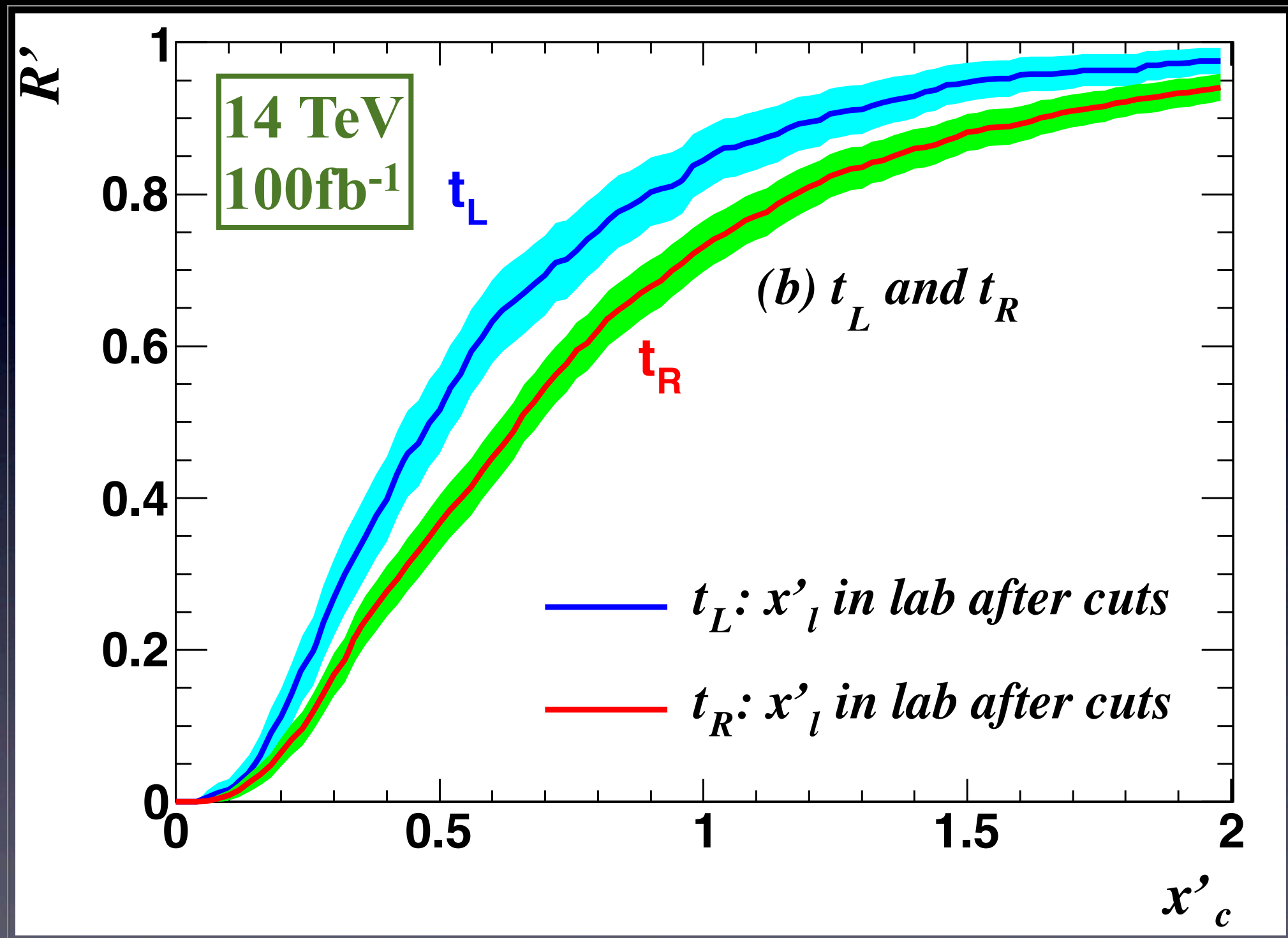
$$\mathcal{R}(x_c) \equiv \frac{\text{Area}(x_\ell < x_c)}{\text{Area}(\text{tot})} = \text{Area}(x_\ell < x_c)$$



$t_L$  左手

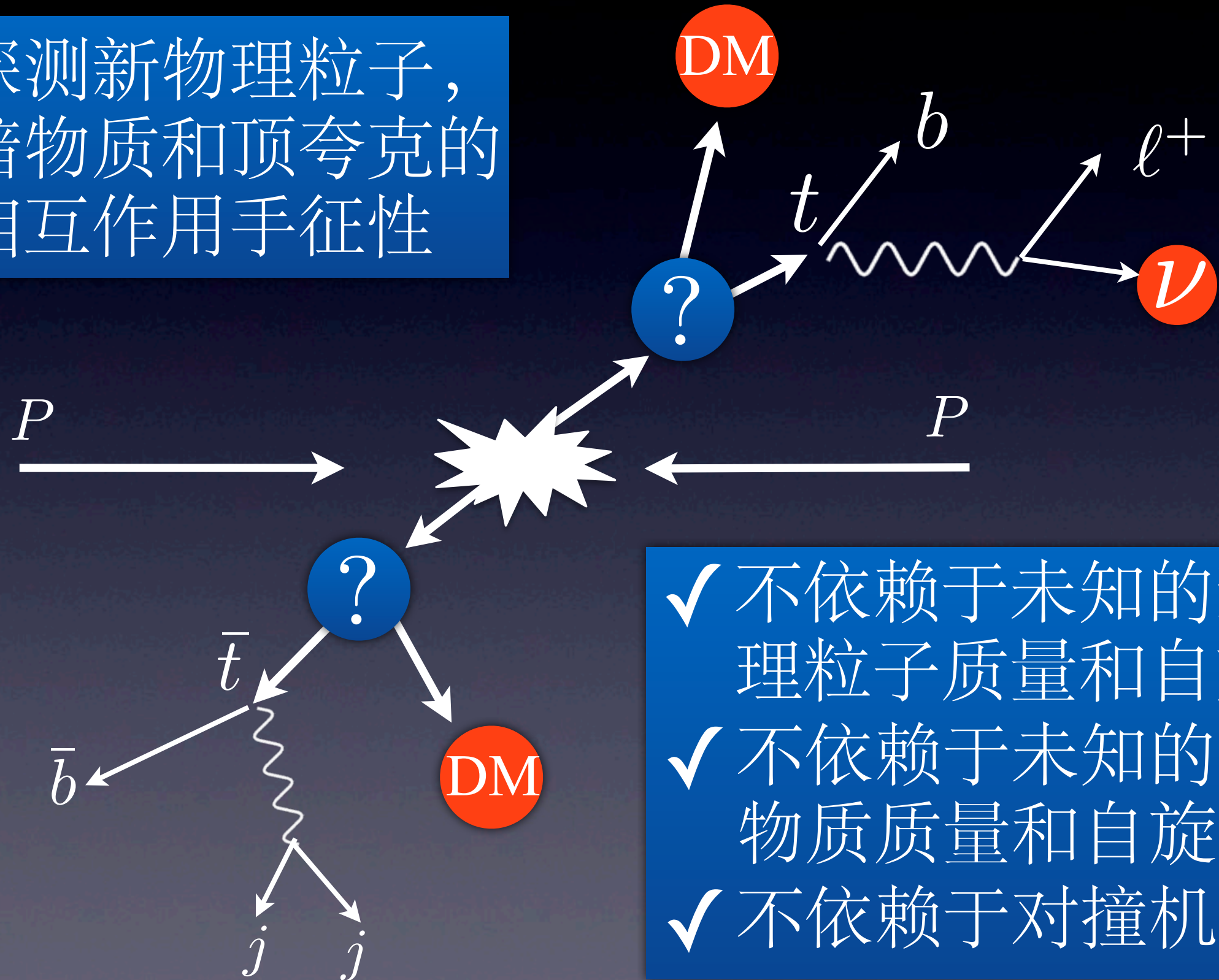
$t_R$  右手

# $\mathcal{R}'$ 分布可以区分 $t_L$ 和 $t_R$



# 顶夸克对和暗物质联合产生

探测新物理粒子，  
暗物质和顶夸克的  
相互作用手征性



- ✓ 不依赖于未知的新物理粒子质量和自旋
- ✓ 不依赖于未知的暗物质质量和自旋
- ✓ 不依赖于对撞机能量



谢谢！！