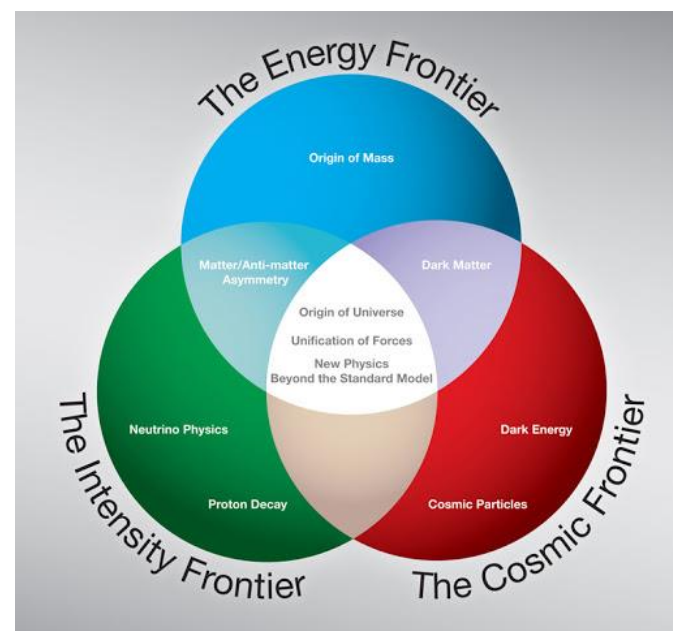
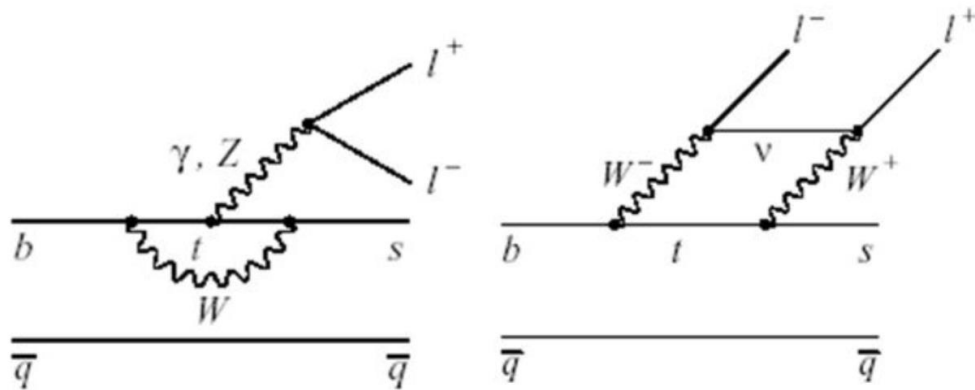


粒子物理中亟待解决的重要问题

- 味物理方面主要关注**两个**基本问题：
 - 是否存在**新的电荷宇称（CP）破坏机制**
 - 是否存在**对味结构敏感的新粒子或新相互作用**
- 两种回答方式：**直接寻找**和**间接寻找**，互为补充；历史上很多发现都由**间接寻找**给出
- 利用**大统计量数据**，通过**精确测量**，可以**间接寻找**高能标的新物理



味结构敏感的新物理

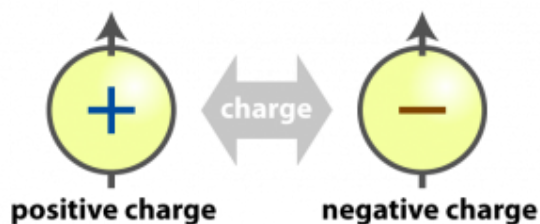


- 高阶图中的高能标新粒子将：
 - 破坏轻子普适性
 - 改变衰变分支比及衰变角分布等
 - 改变CP破坏的大小

近几年多个味物理结果与标准模型预言存在偏差，
可能成为新物理寻找的突破口

CP破坏

C:物质—反物质变换



CP: 电荷共轭和宇称变换



标准模型所给出的宇宙中正反物质的不对称性远小于观测值，
需要新的CP破坏源：重味物理中CP破坏精确测量是理想途径

CP破坏的精确检验

对**新物理敏感**的一些重要衰变道的CP破坏的测量：

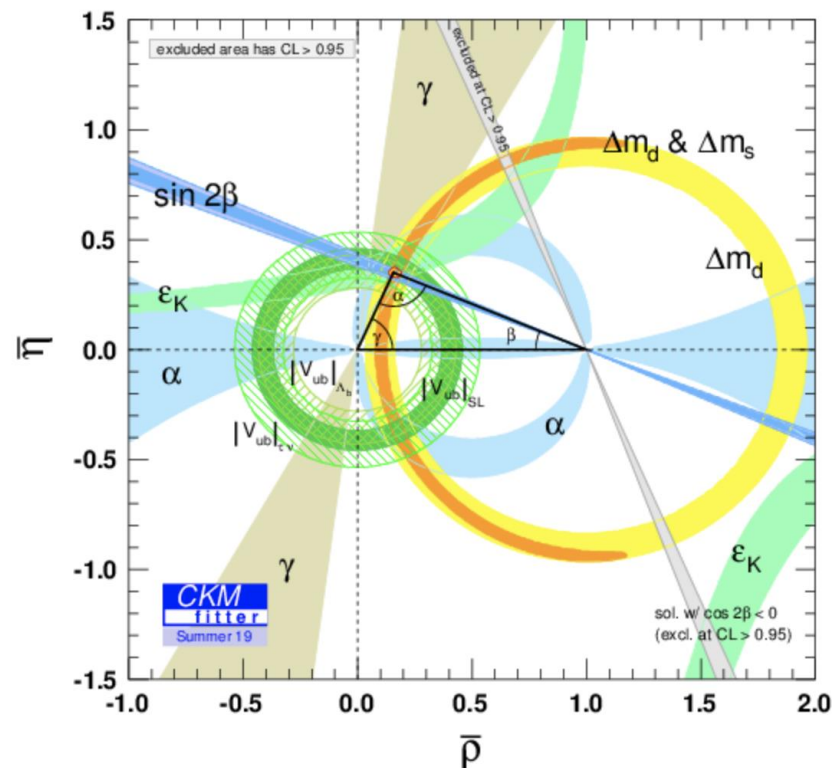
- 两体非粲衰变，如
 - $\delta A_{K\pi} = A_{CP}^{K^+\pi^0} - A_{CP}^{K^+\pi^-}$
 - 实验测量的世界平均值： $\delta A_{K\pi} = (12.2 \pm 2.2)\%$ 远大于理论预期
 - 理论和实验之间有**2-3 σ** 的差别
- 三体非粲衰变，如
 - $B^+ \rightarrow h^+ h^- h'^+$ 中发现了复杂的CP破坏结构，引起广泛兴趣，对其细致分析将加深对CP破坏的理解

CKM矩阵幺正性的精确检验：

- CKM矩阵中的复相角（或CKM三角面积）给出了标准模型中CP破坏的来源
- 对CKM矩阵元及相角的测量并对其进行综合分析为检验CKM机制和寻找新的CP源的主要方法

CKM矩阵的精确测量

- 实验测量主要关注对CKM相角 α, β, γ 及 $|V_{ub}|, |V_{cb}|$ 矩阵元等的测量，进一步提升其测量精度
- 理论上亟需提高相应的形状因子、衰变常数等低能输入量的预言或格点计算精度
- 标准模型CKM矩阵能很好描述现有实验结果，但仍有~20%可能的新物理空间，亟需实验数据对其进行精确检验，寻找新的CP破坏源



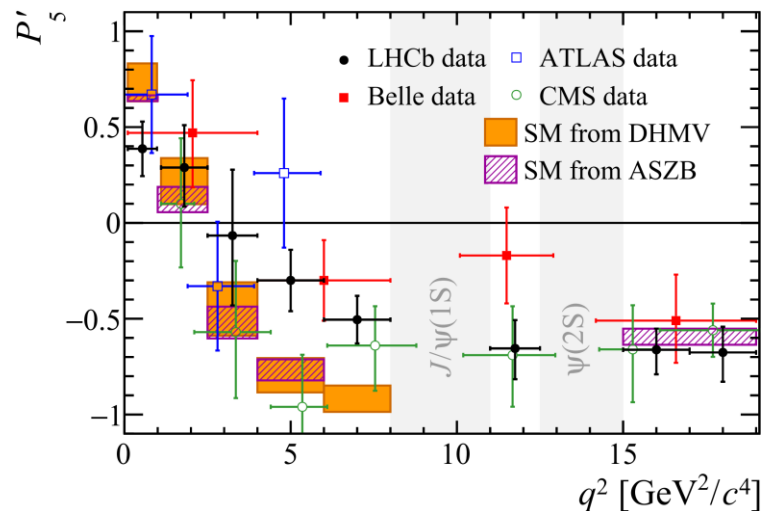
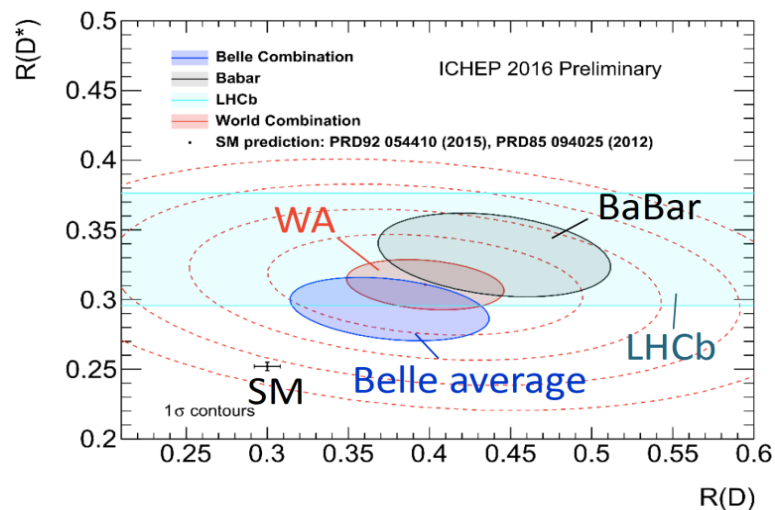
理论实验偏差

近年来，味物理实验在多个衰变道中发现较大的理论—实验偏差，这些实验结果在特定新物理框架中存在内在联系，有必要对这些偏差进行进一步确认

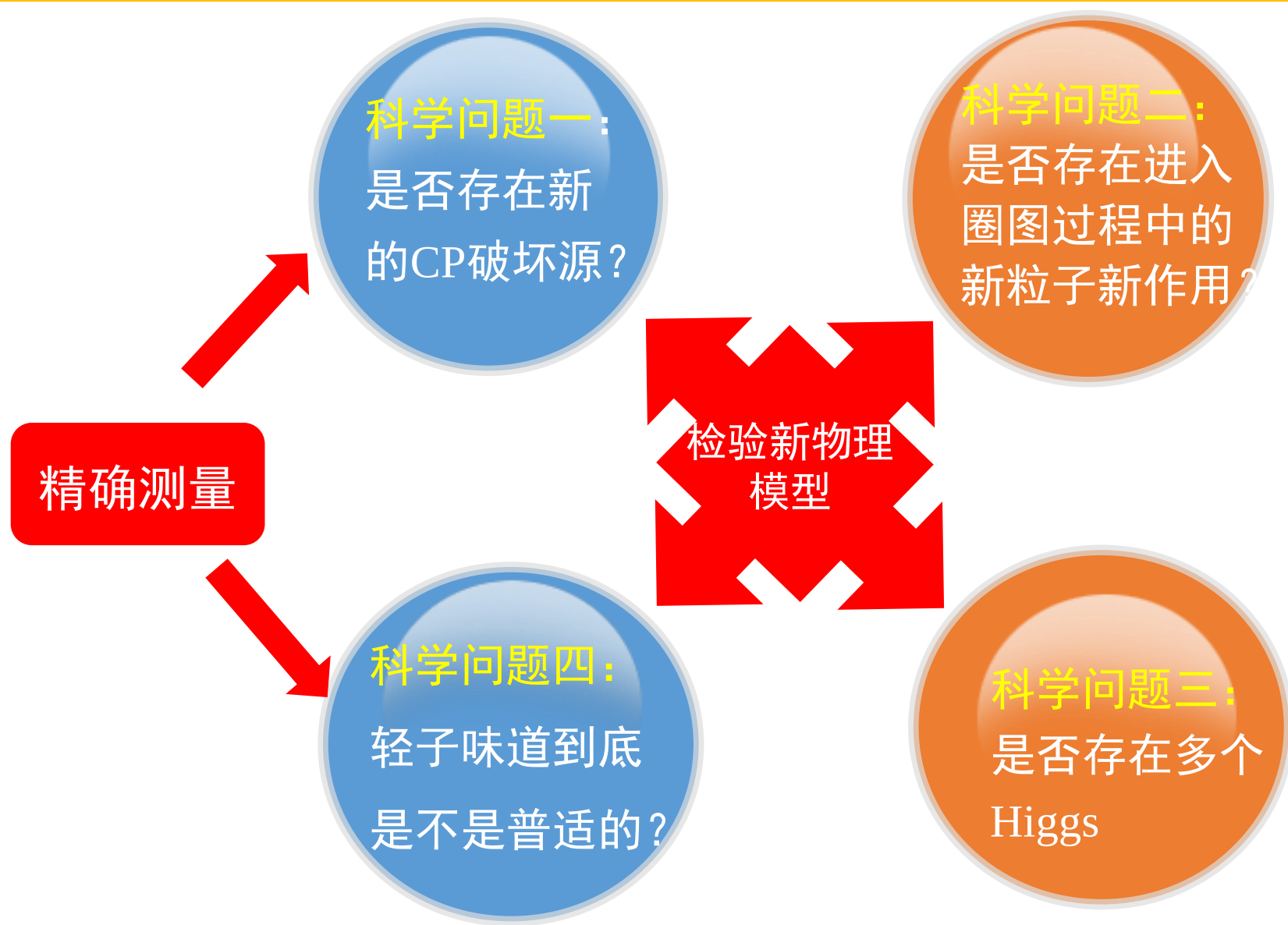
- 轻子普适性检验如： $R(D^{(*)}) \equiv B(\bar{B} \rightarrow D^{(*)} \tau^- \bar{\nu}_\tau) / B(\bar{B} \rightarrow D^{(*)} \ell^- \bar{\nu}_\ell)$

理论实验偏差高达 $\sim 4\sigma$

- 味改变中性流（FCNC）过程 $b \rightarrow s$ 和 $b \rightarrow d$: 如 $B \rightarrow K^{(*)} l^+ l^-$ 过程中微分分支比及角分布参数测量等



关键科学问题及内在联系



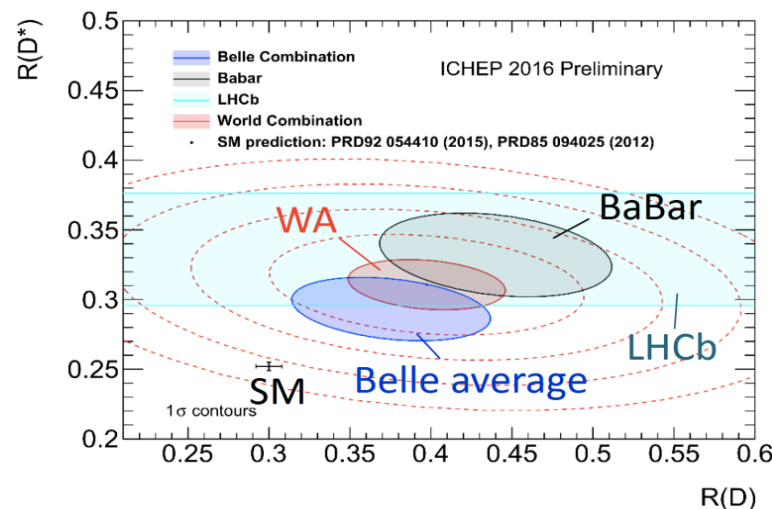
备份

轻子普适性检验

- B 介子的半轻衰变:

$$R(D^{(*)}) \equiv B(\bar{B} \rightarrow D^{(*)} \tau^- \bar{\nu}_\tau) / B(\bar{B} \rightarrow D^{(*)} \ell^- \bar{\nu}_\ell)$$

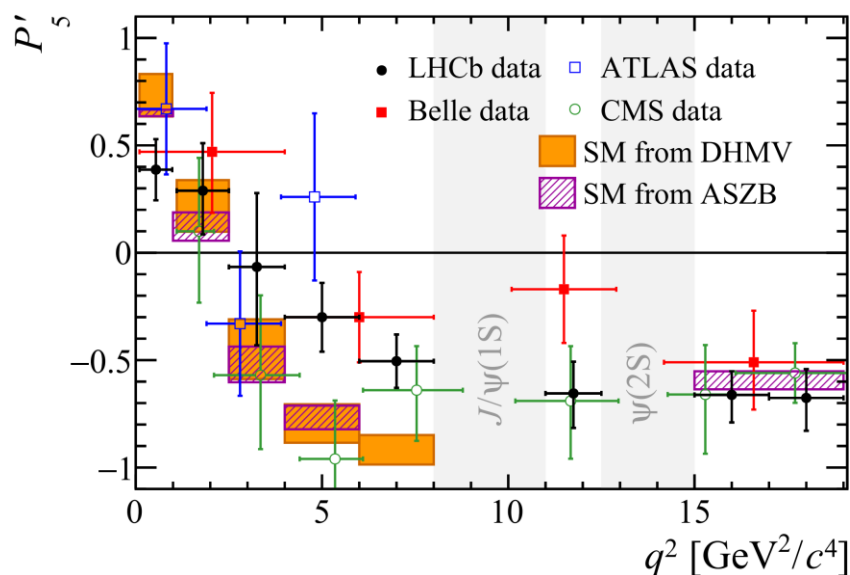
- 标准模型: $R(D)_{\text{SM}} = 0.299 \pm 0.003$, $R(D^*)_{\text{SM}} = 0.258 \pm 0.005$
- 对新物理非常敏感: 双希格斯模型、leptoquarks 模型、手征U(1)模型、R-宇称破缺模型、惰性中微子模型等
- BaBar、Belle、LHCb实验进行了大量的测量:
平均值 $R(D) = 0.397 \pm 0.049$, $R(D^*) = 0.316 \pm 0.019$, $\sim 4\sigma$ SM预言, 新物理作用? [PRL109, 101802 (2012); PRD88, 072012 (2013); PRD 92, 072014 (2015); PRL 115, 111803 (2015)等]



目前为止和标准模型预言相差最大的实验测量, 因此在实验上必须弄清楚原因

味改变中性流中新物理的寻找

- 味改变中性流 (FCNC) 过程 $b \rightarrow s$ 和 $b \rightarrow d$ 对新物理非常敏感, B 介子辐射衰变和电弱衰变 FCNC 过程是寻找新物理的理想场所
 - 遍举衰变 $B \rightarrow K^{(*)} l^+ l^-$ 和 R_K/R_{K^*} 疑难
 - 单举衰变测量: $B \rightarrow X_{s,d} \gamma$ 和 $B \rightarrow X_{s,d} l^+ l^-$
 - 稀有衰变寻找: $B_{d,s} \rightarrow \gamma \gamma$ 、 $B \rightarrow K^{(*)} \nu \bar{\nu}$ 、 $B_{d,s} \rightarrow \tau^+ \tau^-$ 和 $B \rightarrow K^{(*)} \tau^+ \tau^-$



arXiv: 1805.05073

$$R_{K^{(*)}} = \frac{\text{Br}(B^{+0} \rightarrow K^{+0} \mu^+ \mu^-)}{\text{Br}(B^{+0} \rightarrow K^{+0} e^+ e^-)}$$

$$R_K = 0.846^{+0.060}_{-0.054}(\text{stat})^{+0.016}_{-0.014}(\text{syst.})$$

LHCb 2.5σ

$$R_{K^*} = 0.660^{+0.110}_{-0.070}(\text{stat}) \pm 0.024(\text{syst.})$$

$$0.045 \leq q^2 \leq 1.1 \text{ GeV}^2$$

$$0.685^{+0.113}_{-0.069}(\text{stat}) \pm 0.047(\text{syst.})$$

$$\text{LHCb } 2.4\text{-}2.5\sigma \quad 1.1 \leq q^2 \leq 6.0 \text{ GeV}^2$$

重味介子中其他CP破坏的测量

• B介子两体衰变疑难问题

A_{CP} : 直接CP不对称性

- 仅考虑树图贡献: $\delta A_{K\pi} = A_{CP}^{K^+\pi^0} - A_{CP}^{K^+\pi^-} = 0$
- 考虑NNLO修正和长程部分的贡献, 可以得到: $\delta A_{K\pi} = (2.07^{+0.39+2.76}_{-0.39-4.55})\%$ 【M. Beneke and M. Neubert, Nucl. Phys. B 675, 333 (2003)】
- 实验测量的世界平均值: $\delta A_{K\pi} = (12.2 \pm 2.2)\%$ 【Y. Amhis et al., Eur. Phys. J. C 77, 895 (2017)】
- 理论和实验之间有2-3 σ 的差别

• B介子三体衰变疑难问题

- LHCb对带电三体非粲衰变 $B^+ \rightarrow h^+ h^- h'^+$ 进行模型无关的分析, 发现了复杂的CP破坏图案, 引起广泛兴趣, 对其细致分析将加深对CP破坏的理解
- LHCb对 $B^+ \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^-, K^+ K^- \pi^+$ 进行了Dalitz分析, 发现了多种新的CP破坏行为
- 对三体非粲衰变精确测量将进一步提升CP破坏的理解并对CKM矩阵相角进行限制

对这些衰变道的CP破坏的研究将有助于寻找新物理, 理解宇宙中物质与反物质不对称性的来源

B介子的纯轻衰变

- B介子的纯轻衰变:

$$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau)_{\text{SM}} = \frac{G_F^2 m_B m_\tau^2}{8\pi} \left(1 - \frac{m_\tau^2}{m_B^2}\right)^2 f_B^2 |V_{ub}|^2 \tau_B$$

G_F 是费米耦合常数, V_{ub} 是CKM矩阵元, m_B 和 m_τ 分别是B介子和 τ 介子的质量, τ_B 是B介子的寿命, f_B 为B介子的衰变常数

- 标准模型: $(7.71 \pm 0.62) \times 10^{-5}$
- 对新物理非常敏感: 带电的Higgs玻色子和SM中的弱衰变过程发生干涉作用, 从而影响 $B^+ \rightarrow \tau^+ \nu_\tau$ 过程的衰变率。
- BaBar和Belle实验进行了大量的测量: 平均值 $(1.67 \pm 0.30) \times 10^{-4}$, $>3 \sigma$ SM预言, 新物理作用? [PRLett. 97, 251802 (2006); PRD82, 071101(R) (2010); PRD81, 051101(2010); PRL 110, 131801(2013) 等]
- 精确分支比, 和标准模型比较, 寻找新物理: $\sim 20\%$ 误差 $\rightarrow \sim 5\%$ 误差 [Belle II 50ab $^{-1}$ 数据样本]