

LHCB上粲强子混合 与CP破坏研究

陈缮真

中国科学院高能物理研究所

味物理讲座

2021年12月2日

LHCB上粲物理简单

背景介绍

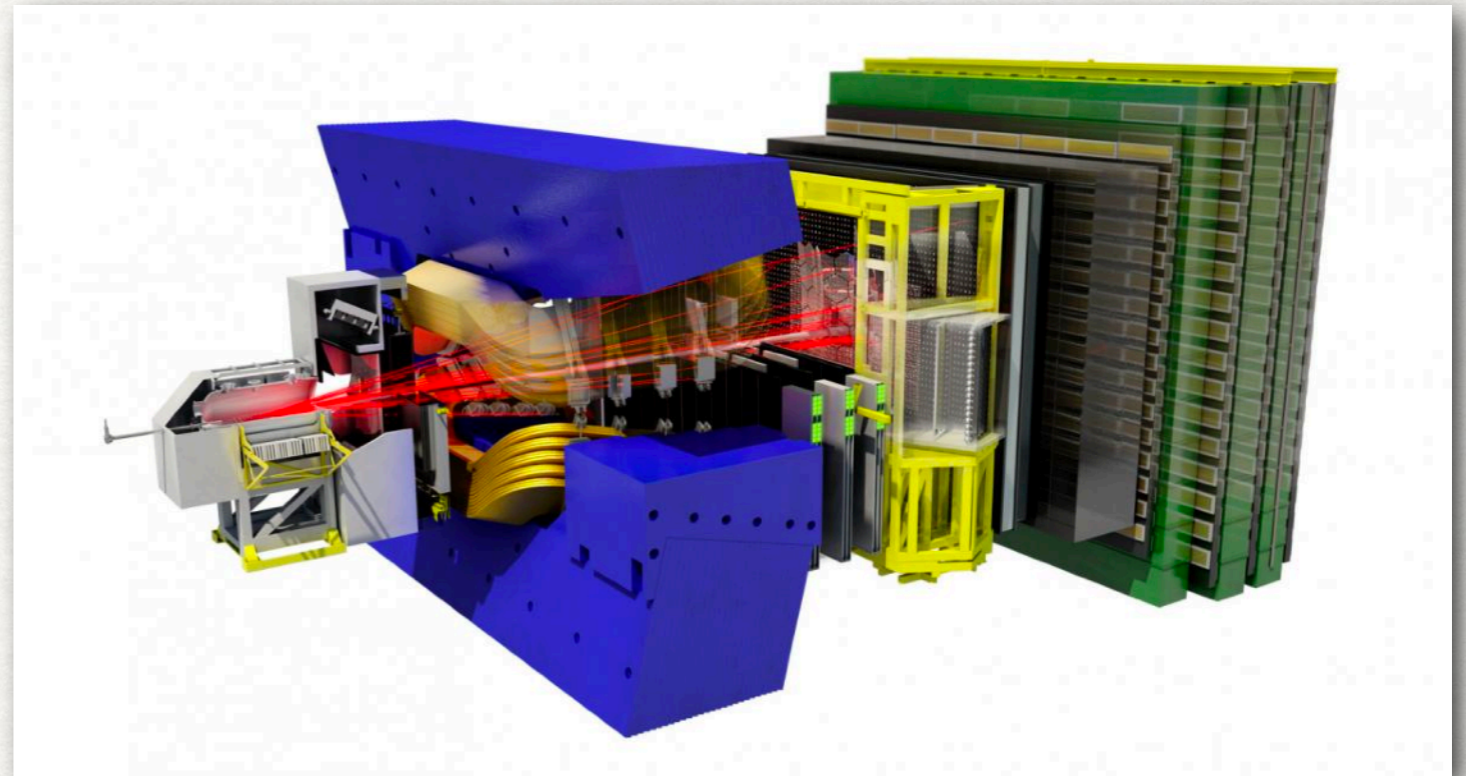
粲强子衰变

- charm quark:
 - 唯一束缚系统中可以弱衰变的up-type quark
 - 唯一可以产生混合效应的up-type quark
 - 束缚态重味系统中CP破坏效应最小的quark
- 新物理可以增强CP破坏效应
- 研究粲物理可以增强对标准模型的理解，也可以寻找新物理

LHCb上的粲味粒子样本

- LHCb获得了海量粲强子衰变数据

$$\begin{aligned}\sigma(pp \rightarrow D^0 X) &= 2072 \pm 2 \pm 124 \mu\text{b} \\ \sigma(pp \rightarrow D^+ X) &= 834 \pm 2 \pm 78 \mu\text{b} \\ \sigma(pp \rightarrow D_s^+ X) &= 353 \pm 9 \pm 76 \mu\text{b} \\ \sigma(pp \rightarrow D^{*+} X) &= 784 \pm 4 \pm 87 \mu\text{b}\end{aligned}$$

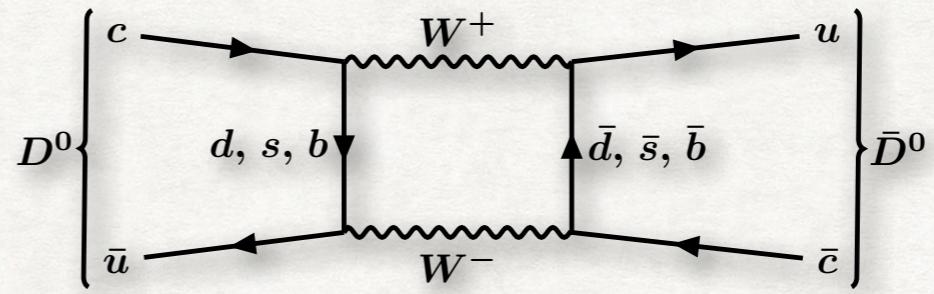
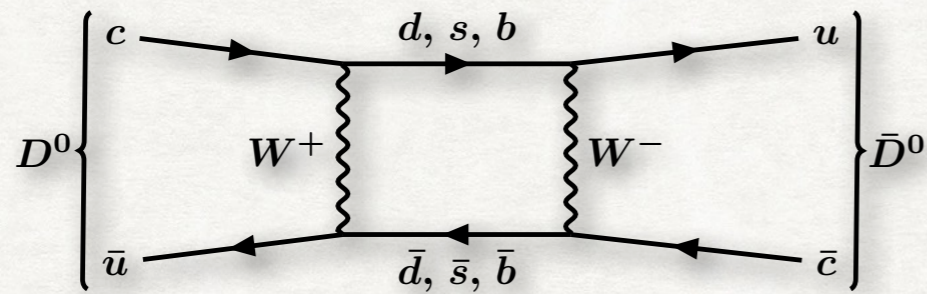


- 在LHCb接受范围内粲强子 LHCb硬件触发系统限制 存入磁盘的数据
~2MHz ~1MHz ~15kHz

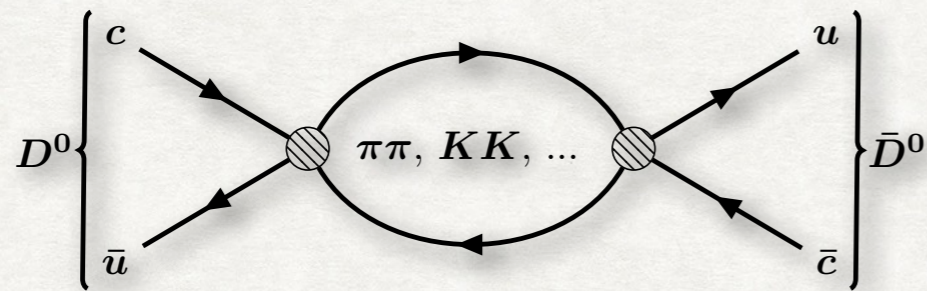
中性粲介子混合研究

中性粲介子混合

- 混合途径：短程（通过交换两个W粒子）



- or 长程（通过re-scattering）

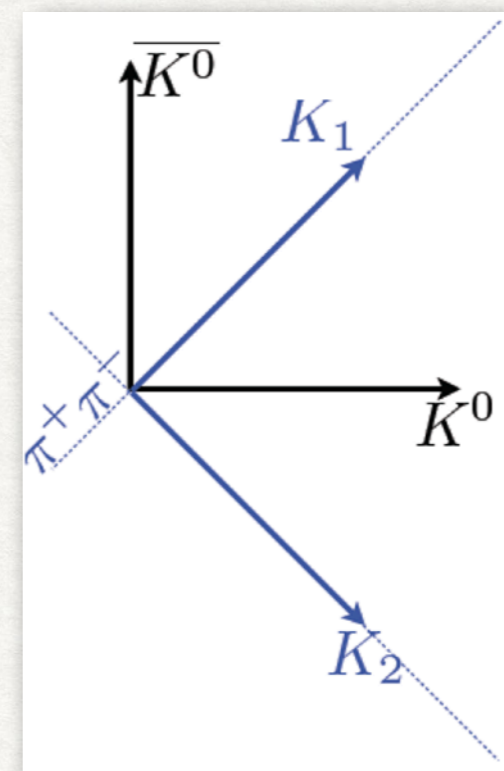


中性介子的味本征态、质量本征态、CP本征态

- 对于反粒子不是自身的中性介子 (K^0 、 D^0 、 B^0 、 B_s^0)，以**味本征态**（或称**弱相互作用本征态**）形式产生，但以**质量本征态**形式衰变
- 质量本征态定义了粒子的质量、寿命
- 最常见的，在K系统中，有 K_S 和 K_L 两种质量本征态
- 1956年利昂·莱德曼等人实验发现：
 - 一部分中性K介子衰变成**两个 π 介子**，另一部分衰变成**三个 π 介子**
 - 因一个中性K介子的质量非常接近三个 π 介子质量之和，所以衰变成三个 π 介子的中性K介子寿命远超另一种中性K介子，因此被称为长寿命K介子 K_L ，另一种则被称为短寿命K粒子 K_S
- 1964年詹姆斯·克罗宁和瓦尔·菲奇实验发现
 - 并不是所有 K_L 都衰变成三个 π 介子，也并不是所有 K_S 都衰变成两个 π 介子
- 为什么？

中性介子的味本征态、质量本征态、CP本征态

- $K^0 = \bar{s}d, \bar{K}^0 = s\bar{d}$
- $CP|K^0\rangle = +1|\bar{K}^0\rangle, CP|\bar{K}^0\rangle = +1|K^0\rangle, K^0$ 和 \bar{K}^0 不是CP本征态
- 已知: $\pi^+\pi^-$ CP量子数为偶, $\pi^+\pi^-\pi^0$ CP量子数为奇
- 若衰变到特定CP量子数状态, 需构建CP本征态:
 - $|K_1\rangle = 1/\sqrt{2}(|K^0\rangle + |\bar{K}^0\rangle)$
 - $|K_2\rangle = 1/\sqrt{2}(|K^0\rangle - |\bar{K}^0\rangle)$
- 则有
 - $CP|K_1\rangle = +1|K_1\rangle$
 - $CP|K_2\rangle = -1|K_2\rangle$
- 即 K_1 的CP量子数为偶, K_2 的CP量子数为奇
- 若CP量子数守恒, 则 K_1 只能衰变成两个 π 介子 (预期短寿命), K_2 只能衰变成三个 π 介子 (预期长寿命)



中性介子的味本征态、质量本征态、CP本征态

- 克罗宁-菲奇实验发现，99.99%的 K_L 衰变成三个 π 介子，但是有0.01%的 K_L 衰变成两个 π 介子！
- 说明质量本征态 (K_S 、 K_L) \neq CP本征态 (K_1 、 K_2) \rightarrow CP violation!

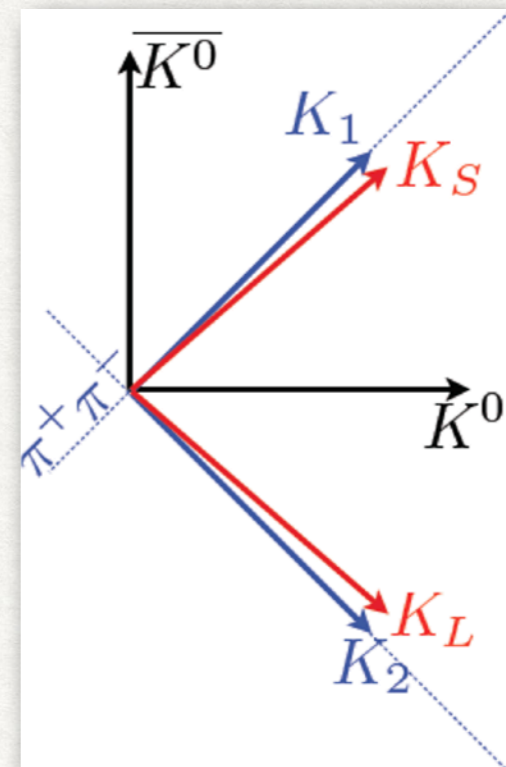
- 构建质量本征态

- $|K_S\rangle = p|K^0\rangle + q|\bar{K}^0\rangle$

- $|K_L\rangle = p|K^0\rangle - q|\bar{K}^0\rangle$

- 其中 $|q|^2 + |p|^2 = 1$,

且若在混合中存在CP破坏，则 $|q/p| \neq 1$



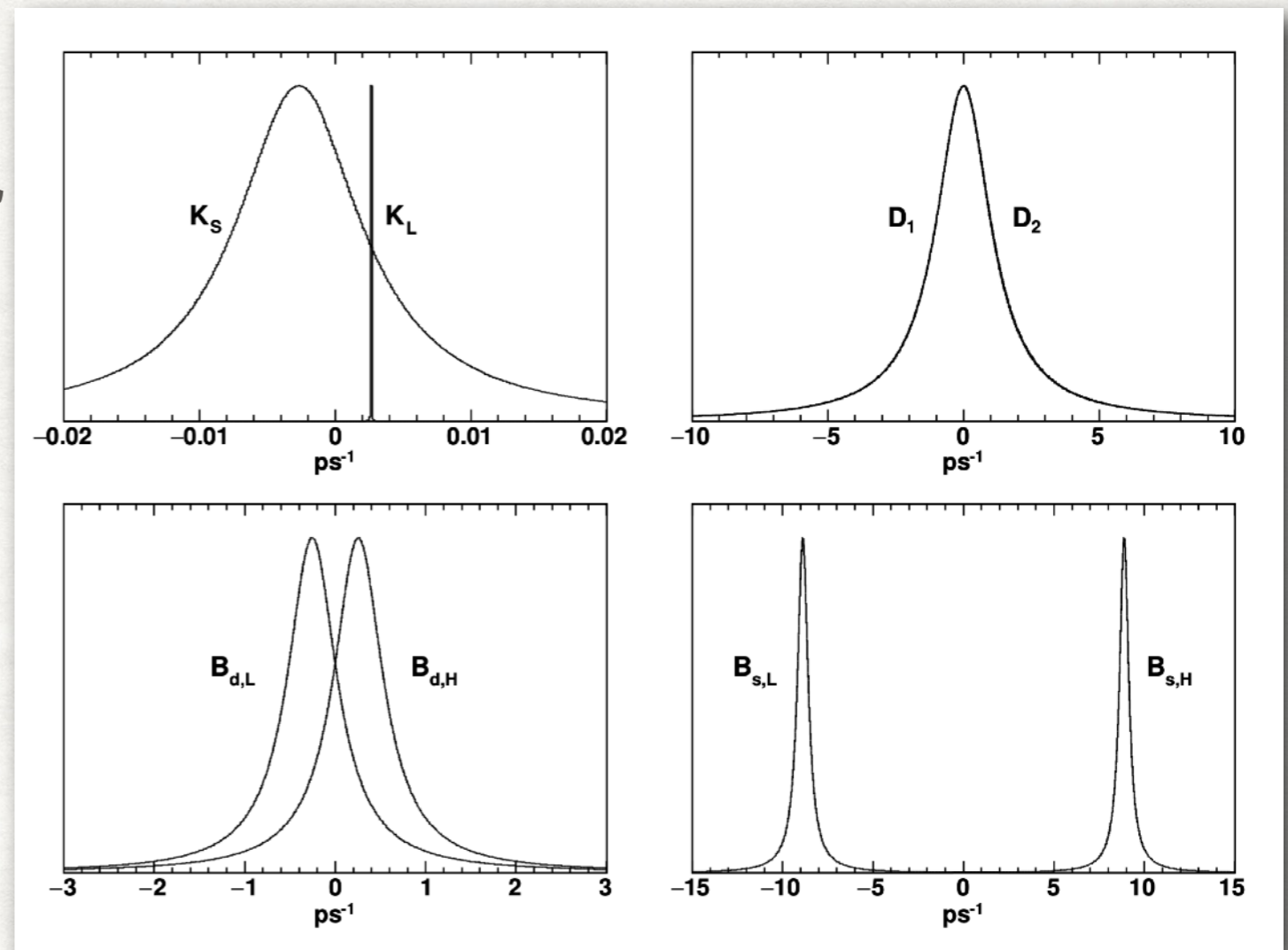
- $(K^0, \bar{K}^0) \neq (K_1, K_2) \neq (K_S, K_L)$

中性介子混合

- 四种中性介子系统中都应有mixing，并产生相应的质量本征态
- K介子系统：两个本征态间有巨大的寿命差异，也有明显的质量差异
- B、 B_s 介子系统：两个本征态间有明显的质量差异

- D介子系统：差异几乎不可见且尚不知**质量本征态**是否与**CP本征态**有差异，即是否存在混合中存在CP破坏

- 暂用 (D_1, D_2) 表示质量本征态



中性D介子混合

- D介子衰变满足含时的薛定谔方程

$$\bullet \quad i \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} D^0(t) \\ \bar{D}^0(t) \end{pmatrix} = (\mathbf{M} - \frac{\mathbf{i}}{2} \mathbf{\Gamma}) \begin{pmatrix} D^0(t) \\ \bar{D}^0(t) \end{pmatrix}$$

- 两个质量本征态 $|D_{1,2}\rangle = p|D^0\rangle \pm q|\bar{D}^0\rangle$

- 代入薛定谔方程

$$\bullet \quad |D^0(t)\rangle = g_+(t)|D^0\rangle + \frac{q}{p}g_-(t)|\bar{D}^0\rangle$$

$$\bullet \quad |\bar{D}^0(t)\rangle = g_+(t)|\bar{D}^0\rangle + \frac{p}{q}g_-(t)|D^0\rangle$$

$$\bullet \quad \text{其中 } g_{\pm}(t) = \frac{1}{2}(e^{-iM_1t}e^{-\Gamma_1t/2} \pm e^{-iM_2t}e^{-\Gamma_2t/2})$$

$$\bullet \quad \langle D^0 | D^0(t) \rangle = |g_+(t)|^2 = \frac{1}{4}[e^{-\Gamma_1t} + e^{-\Gamma_2t} + 2e^{-\bar{\Gamma}t} \cos(\Delta Mt)]$$

$$\bullet \quad \langle \bar{D}^0 | D^0(t) \rangle = \left|\frac{q}{p}\right|^2 |g_-(t)|^2 = \frac{1}{4} \left|\frac{q}{p}\right|^2 [e^{-\Gamma_1t} + e^{-\Gamma_2t} - 2e^{-\bar{\Gamma}t} \cos(\Delta Mt)]$$

混合参数 x, y

- 已知CP破坏非常小, (q/p) 几乎等于1

- $|g_{\pm}(t)|^2 = \frac{1}{4} [e^{-\Gamma_1 t} + e^{-\Gamma_2 t} \pm 2e^{-\bar{\Gamma} t} \cos(\Delta M t)]$
 衰减项 振荡项

- 其中 $\Delta M = M_1 - M_2$, $\bar{\Gamma} = \frac{\Gamma_1 + \Gamma_2}{2}$

- 定义“混合参数”

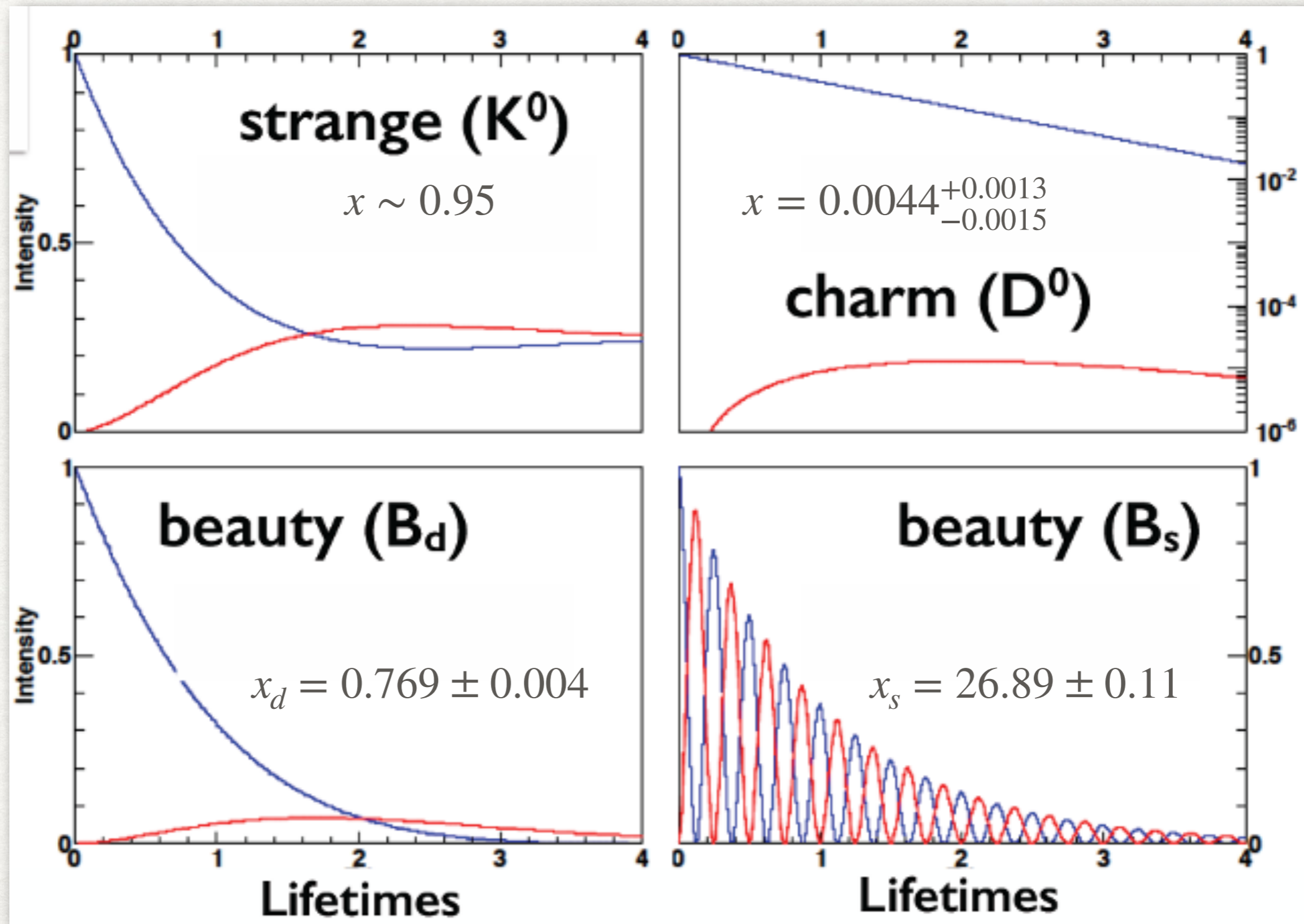
- $x = \frac{\Delta M}{\bar{\Gamma}}$, $y = \frac{\Delta\Gamma}{2\bar{\Gamma}}$

- x 代表 (无量纲的) 质量差异, y 代表 (无量纲的) 衰变宽度差异

- $|g_{\pm}(t)|^2 = \frac{1}{2} e^{-\bar{\Gamma} t} [\cosh(y\bar{\Gamma} t) \pm \cos(x\bar{\Gamma} t)]$

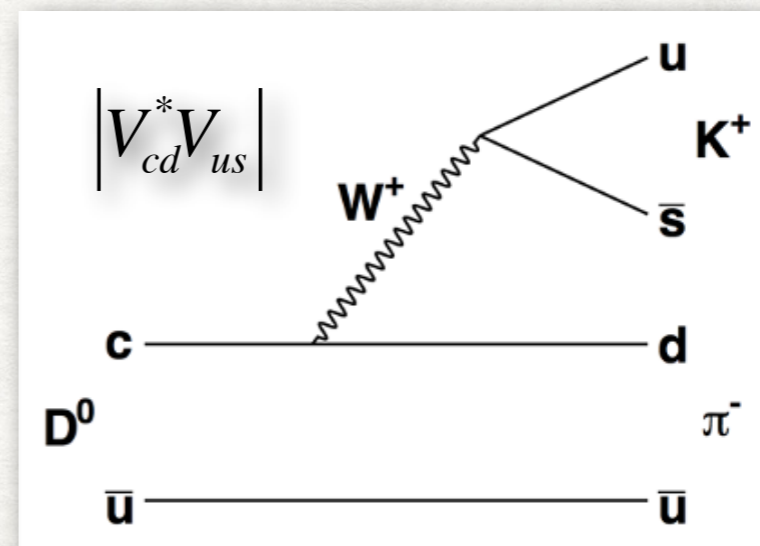
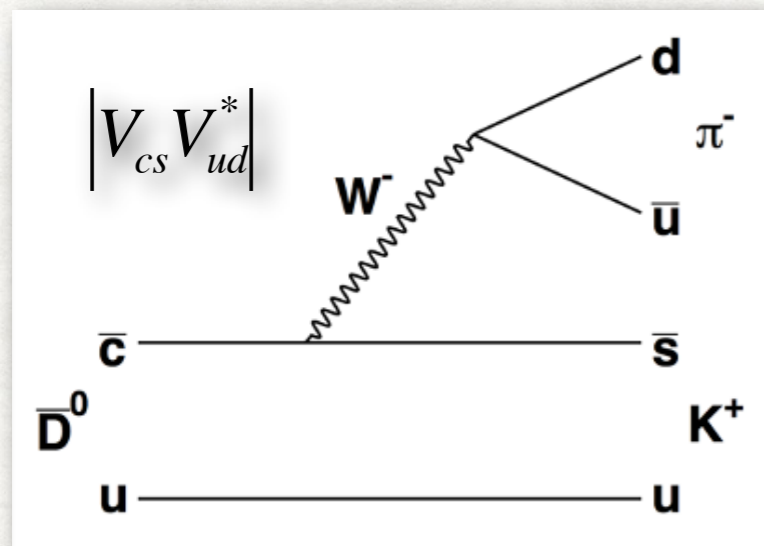
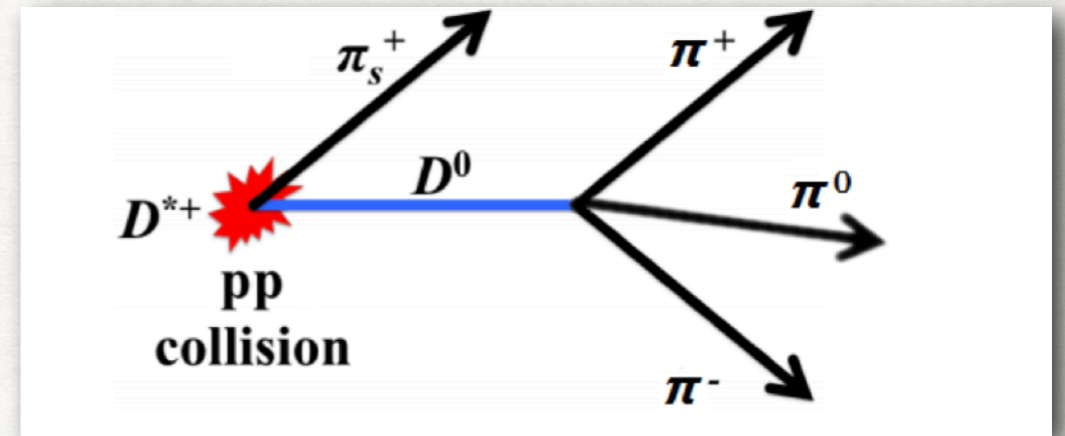
- 当且仅当 x 或 $y \neq 0$ 时, $|D^0(t)\rangle$ 和 $|\bar{D}^0(t)\rangle$ 衰变成分才能出现随时间变化的差异, 才能“振荡”

比较四种系统的 x



D⁰的味道标记和RS、WS衰变

- D* tag:
- 利用 $D^{*+} \rightarrow D^0 \pi_s^+$ 衰变过程中 D^{*+} 与 D^0 间质量差异仅比一个 π^+ 介子的质量高出一一点, 所以 π^+ 介子动量很低特征, 利用该低动量介子 π_s^+ 的电荷做标记
- Right sign (RS) 与 Wrong sign (WS) 衰变
- Cabibbo-favoured (CF) doubly-Cabibbo-suppressed (DCS)



混合现象的发现和混合参数 x, y 的测量

- 考虑WS decay $D^0 \rightarrow K^+\pi^-$ 与RS decay $D^0 \rightarrow K^-\pi^+$ 之间的比值随时间的变化

- 应符合公式

$$R(t) = \frac{N_{WS}(t)}{N_{RS}(t)} \approx R_D + \sqrt{R_D} y' \frac{t}{\tau} + \frac{x'^2 + y'^2}{4} \left(\frac{t}{\tau}\right)^2$$

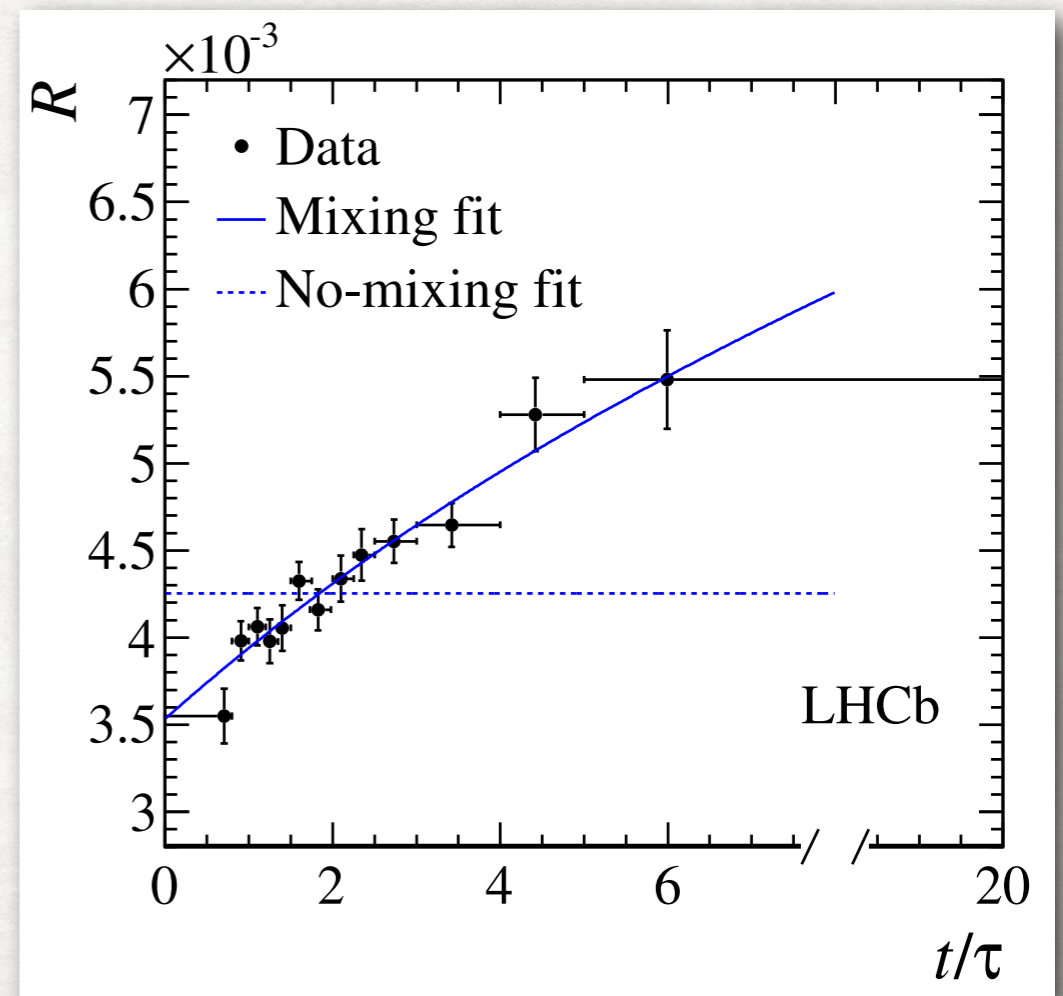
- 对数据拟合, 可得到 y' 与 x'^2
- y' 和 x' 是通过将 y 和 x “旋转”了DCS与CF间强相角差异 δ 后得到的

- $x' = x \cos \delta + y \sin \delta$

- $y' = y \cos \delta - x \sin \delta$

- 2012年首次单一实验发现混合现象

- 缺点: δ 未知, x' 符号未知



LHCb相关分析总结

Table 1: Summary of LHCb charm mixing parameter measurements using $D^0 \rightarrow K^+\pi^-$ decay

Data sample	no CPV		allow CPV	
	$x'^2 (\times 10^{-3})$	$y' (\times 10^{-3})$	$x'^2 (\times 10^{-3})$	$y' (\times 10^{-3})$
1.0 fb^{-1} , D^* tag [1]	-0.09 ± 0.13	7.2 ± 2.4	-	-
3.0 fb^{-1} , D^* tag [2]	0.055 ± 0.049	2.8 ± 1.0	$D^0: 0.049 \pm 0.070$ $\bar{D}^0: 0.060 \pm 0.068$	5.1 ± 1.4 4.5 ± 1.4
3.0 fb^{-1} , B tag [3]	0.028 ± 0.310	4.6 ± 3.7	$D^0: -0.019 \pm 0.447$ $\bar{D}^0: 0.079 \pm 0.433$	5.81 ± 5.26 3.32 ± 5.23
5.0 fb^{-1} , D^* tag [4]	0.039 ± 0.027	5.28 ± 0.52	$D^0: 0.061 \pm 0.037$ $\bar{D}^0: 0.016 \pm 0.039$	5.01 ± 0.74 5.54 ± 0.74

[1] [Phys. Rev. Lett. 110 \(2013\) 101802](#)

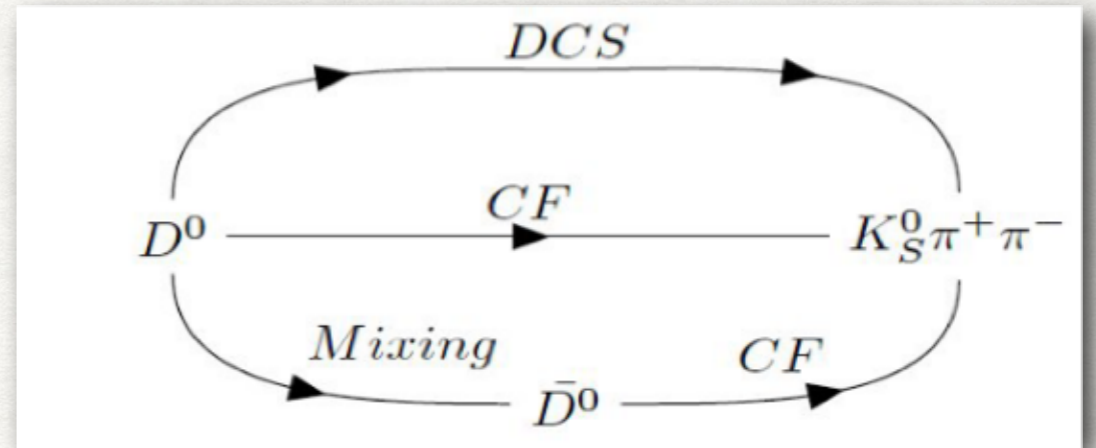
[2] [Phys. Rev. Lett. 111 \(2013\) 251801](#)

[3] [Phys. Rev. D95 \(2017\) 052004](#)

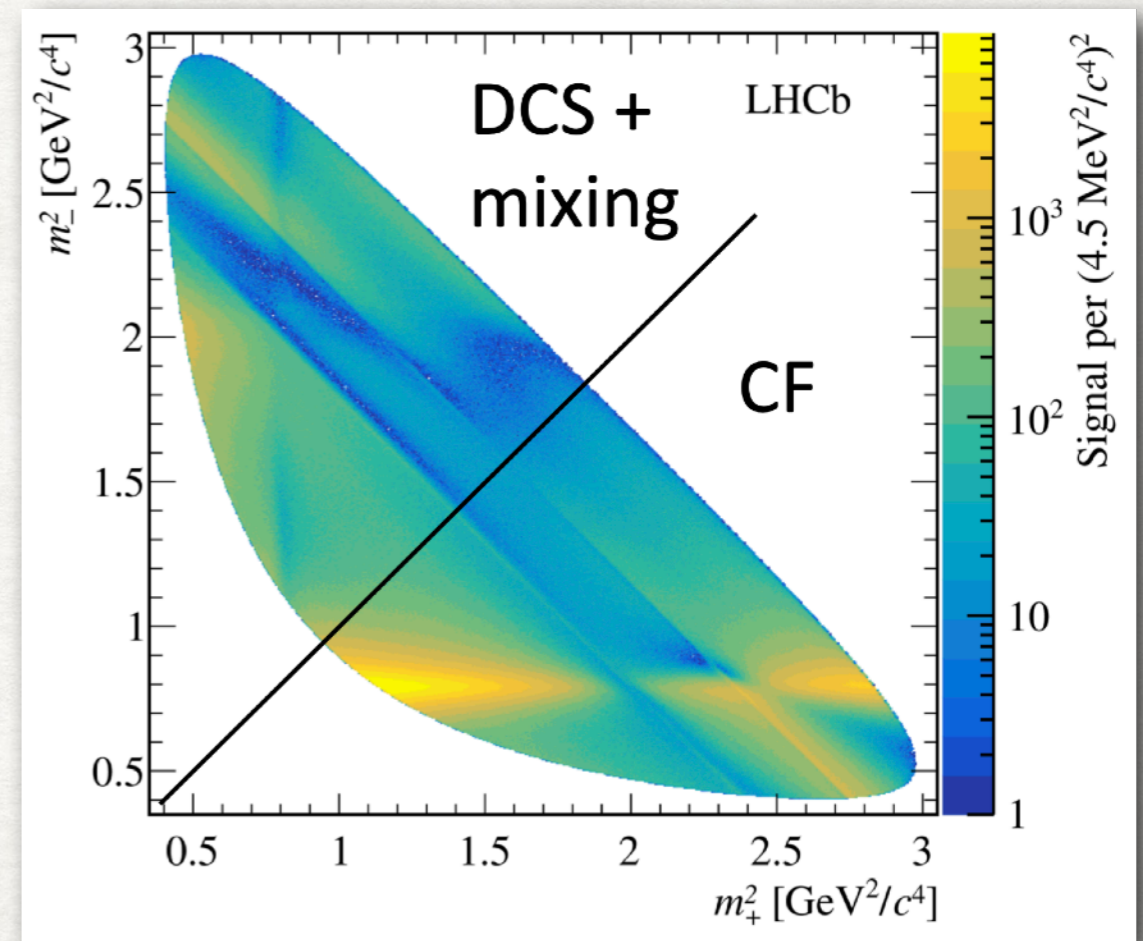
[4] [Phys. Rev. D97 \(2018\) 031101](#)

利用 $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ 衰变测量混合参数

- $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$
- 测量混合参数的“Golden Channel”
- 有许多可能的interfering amplitudes
- 衰变末态在同一个相空间内

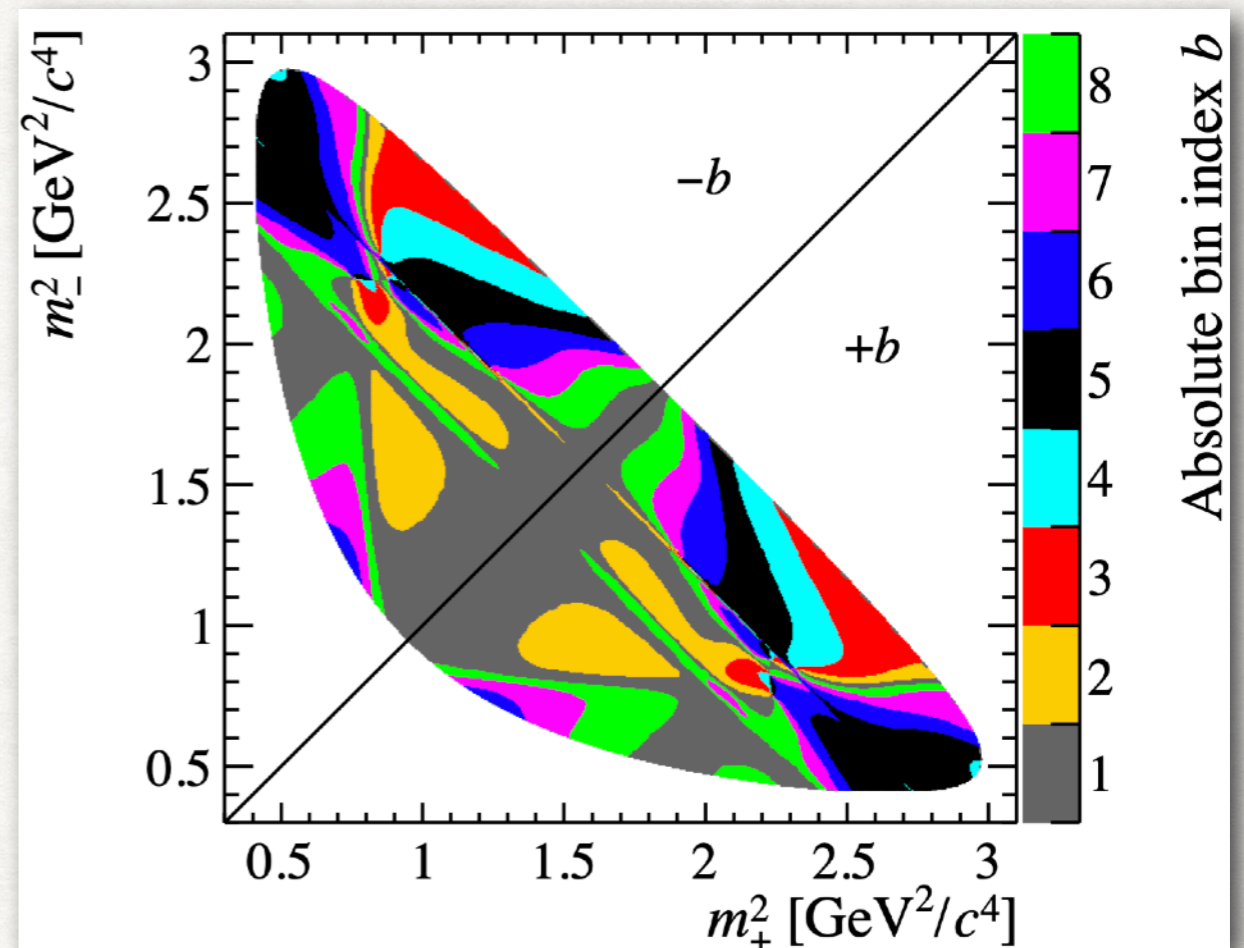


- 'bin-flip'方法
- 振荡贡献主要在Dalitz图的上半部分
→ 上下部分比值对混合参数敏感



利用 $D^0 \rightarrow K_s^0 \pi^+ \pi^-$ 衰变测量混合参数

- 分bin依据：
CLEO和BESIII测得的强相角
以此减少不同强相角对结果的抵消
- 分析思路：
- 对8（强相角bin）x2（上下区域）
个bin分别做对时间依赖的拟合，
得到对时间依赖的产额，进而得到
对时间依赖的比值
- 对 D^0 与 \bar{D}^0 取平均值 或 分开分析
- 对 比值随时间的变化 进行拟合，拟合方程中含有x、y参数



利用 $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ 衰变测量混合参数

- 结果:

- $x = (3.98^{+0.56}_{-0.54}) \times 10^{-3}$

- $y = (4.6^{+1.5}_{-1.4}) \times 10^{-3}$

- 首次x测量距0超过 7σ

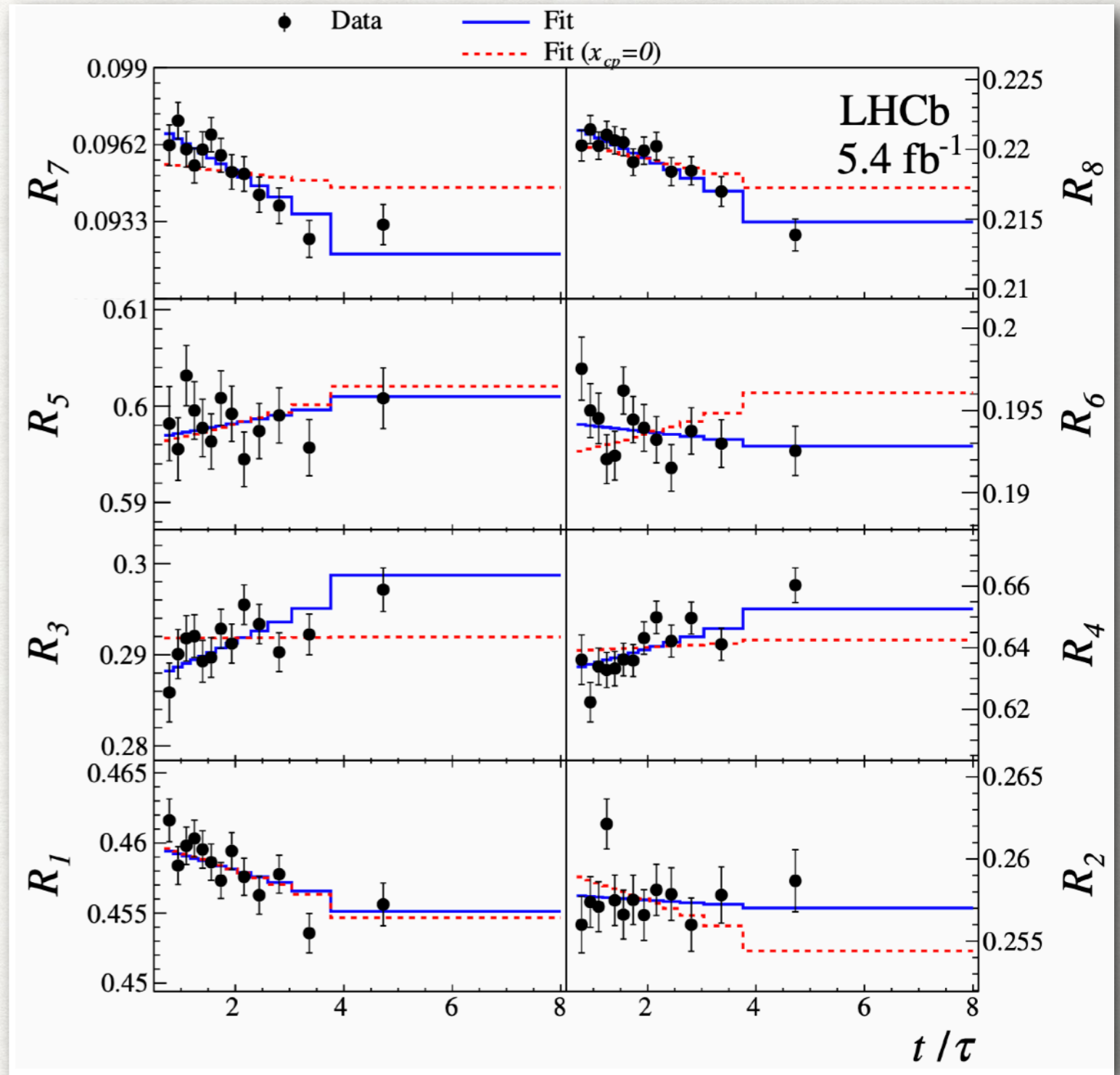
- 即首次观测到非0的质量本征态之间的差异

- 同时测量了 $|q/p|$ 和 $\phi = \arg(q\bar{A}/pA)$:

- $|q/p| = 0.996 \pm 0.052$

- $\phi = 0.056^{+0.047}_{-0.051}$

- 没有混合中的CP破坏迹象



LHCb相关分析总结

Table 2: Summary of LHCb charm mixing parameter measurements using $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$ decay

Data sample	CP-averaged parameters	
	$x (\times 10^{-3})$	$y (\times 10^{-3})$
1.0 fb^{-1} , D^* tag [5]	$-8.6 \pm 5.3 \pm 1.7$	$0.3 \pm 4.6 \pm 1.3$
3.0 fb^{-1} , B tag [6]	$2.7 \pm 1.6 \pm 0.4$	$7.4 \pm 3.6 \pm 1.1$
5.4 fb^{-1} , D^* tag [7]	$3.97 \pm 0.46 \pm 0.29$	$4.59 \pm 1.20 \pm 0.85$
Data sample	CP-violating parameters	
	$\Delta x (\times 10^{-3})$	$\Delta y (\times 10^{-3})$
3.0 fb^{-1} , B tag [6]	$-0.53 \pm 0.70 \pm 0.22$	$0.6 \pm 1.6 \pm 0.3$
5.4 fb^{-1} , D^* tag [7]	$-0.27 \pm 0.18 \pm 0.01$	$0.20 \pm 0.36 \pm 0.13$

[5] [JHEP 04 \(2016\) 033](#)

[6] [Phys. Rev. Lett. 122 \(2019\) 231802](#)

[7] [Phys. Rev. Lett. 127 \(2021\) 111801](#)

粲强子CP破坏研究

粲强子CP破坏研究分类

	全局CPV	相空间局部的CPV
对时间积分	$A_{CP}, \Delta A_{CP}$	Dalitz分析, binned χ^2 , energy test
对时间依赖	y_{CP}, A_{Γ}	$K_{shh}: q/p , \varphi$

A_{CP}

- 以 $D^0 \rightarrow K^- K^+$ (D^{*+} tagged) 分析为例

- $$A_{raw}(D \rightarrow f) = \frac{N(D \rightarrow f) - N(\bar{D} \rightarrow \bar{f})}{N(D \rightarrow f) + N(\bar{D} \rightarrow \bar{f})}$$

- $$A_{CP}(D \rightarrow K^- K^+) = A_{raw}(D \rightarrow K^- K^+) - A_{prod}(D^{*+}) - A_{det}(\pi_s^+)$$

- 利用参考衰变道抵消产生与探测不对称性

- $D^{*+} \rightarrow D^0(\rightarrow K^- K^+) \pi_s^+$

- $D^{*+} \rightarrow D^0(\rightarrow K^- \pi^+) \pi_s^+$

- $D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+$

- $D^+ \rightarrow \bar{K}^0 \pi^+$

- \bar{K}^0 探测对称性已知

$$\begin{aligned} & A_{CP}(D^0 \rightarrow K^- K^+) \\ &= A_{raw}(D^0 \rightarrow K^- K^+) - A_{raw}(D^0 \rightarrow K^- \pi^+) \\ & \quad + A_{raw}(D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+) - A_{raw}(D^+ \rightarrow \bar{K}^0 \pi^+) \\ & \quad + A_{det}(\bar{K}^0) \end{aligned}$$

$$\Delta A_{CP}$$

$$A_{CP}(KK) = A_{raw}(KK) - A_{det}(\pi_s^+) - A_{prod}(D^{*+})$$

- $A_{CP}(\pi\pi) = A_{raw}(\pi\pi) - A_{det}(\pi_s^+) - A_{prod}(D^{*+})$

- ΔA_{CP} 即测量二者 A_{CP} 之差

- 优势1:

- 测量两个 A_{CP} 的差异可以抵消掉探测与产生不对称性

- $A_{CP}(KK) - A_{CP}(\pi\pi) \approx A_{raw}(KK) - A_{raw}(\pi\pi)$

- 优势2:

- $A_{CP}(KK)$ 与 $A_{CP}(\pi\pi)$ 大小相似，**方向相反**

- $A_{CP}(KK) - A_{CP}(\pi\pi) \approx 2|A_{CP}(KK)| \approx 2|A_{CP}(\pi\pi)|$

- 2019年LHCb发现粲粒子衰变CP破坏即使用 ΔA_{CP} 方法

LHCb相关分析总结

Table 3: Summary of LHCb charm $\Delta\mathcal{A}_{CP}$ analyses

Data sample	$\Delta\mathcal{A}_{CP} (\times 10^{-3})$
0.62 fb^{-1} , D^* tag [8]	$-8.2 \pm 4.1 \pm 0.6$
1.0 fb^{-1} , B tag [9]	$4.9 \pm 3.0 \pm 1.4$
3.0 fb^{-1} , B tag [10]	$1.4 \pm 1.6 \pm 0.8$
3.0 fb^{-1} , D^* tag [11]	$-1.0 \pm 0.8 \pm 0.3$
5.9 fb^{-1} , B or D^* tag [12]	-1.54 ± 0.29

[8] [Phys. Rev. Lett. 108 \(2012\) 111602](#)

[9] [Phys. Lett. B723 \(2013\) 33](#)

[10] [JHEP 07 \(2014\) 041](#)

[11] [Phys. Rev. Lett. 116 \(2016\) 191601](#)

[12] [Phys. Rev. Lett. 122 \(2019\) 211803](#)

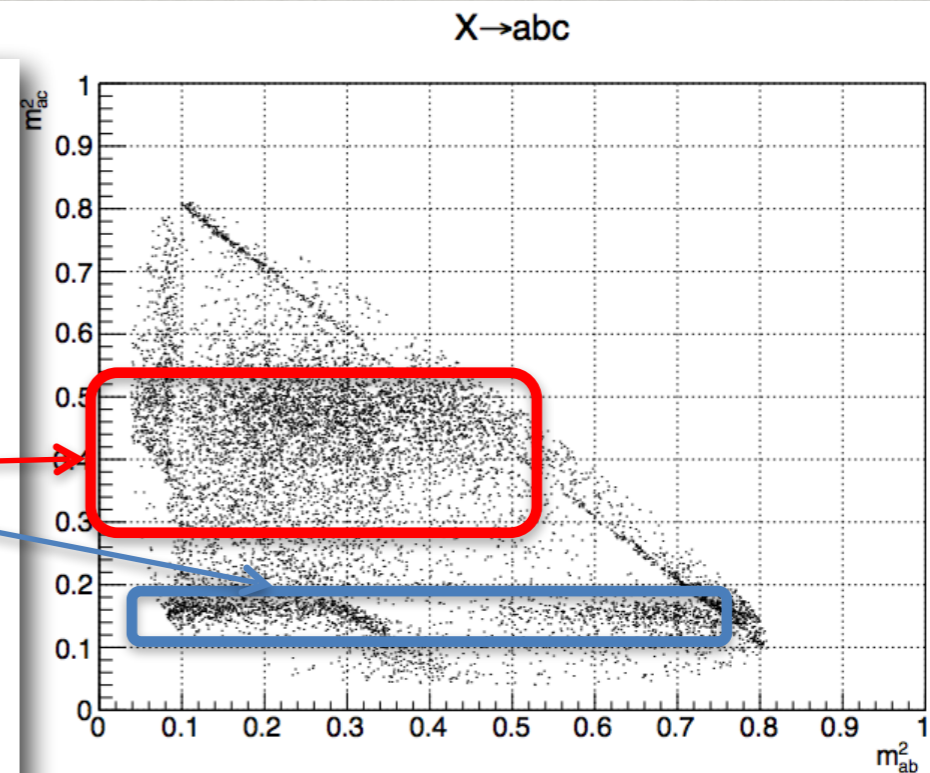
两体与多体衰变中的CPV

- 两体衰变：
 - pros: 统计量大
 - cons: 不对称程度仅通过一个数字表征
需要处理产生/探测不对称性
- 多体衰变：
 - pros: 可在Dalitz图上研究
相空间结构丰富
可研究共振态CPV效应，对理解CPV更有意义
局部CPV效应可能大于整体CPV效应
 - cons: 统计量相对小
四体及以上衰变相空间维度过高

DALITZ分析

- 对于三体pseudo-scaler衰变，Dalitz图分析可以显示衰变共振态
- 若无共振态：在可以允许的相空间内完全平均分布
- 若有共振态：相空间内结构可以表征其是scaler、vector、tensor
- 在Dalitz相空间内寻找CP破坏：找正反粒子衰变的相空间分布不同
- 方法：binned χ^2 ，energy test，对正反衰变分别的分波分析

Daughters	J^P	Mass	Width	Fit Fraction
a, b	0^+	0.3	0.025	6%
a, b	2^+	0.6	0.05	2%
a, c	1^-	0.4	0.04	18%
a, c	0^+	0.7	0.1	43%
b, c	1^-	0.35	0.01	10%
b, c	0^+	0.75	0.02	17%
a, b, c	non-resonant			1%

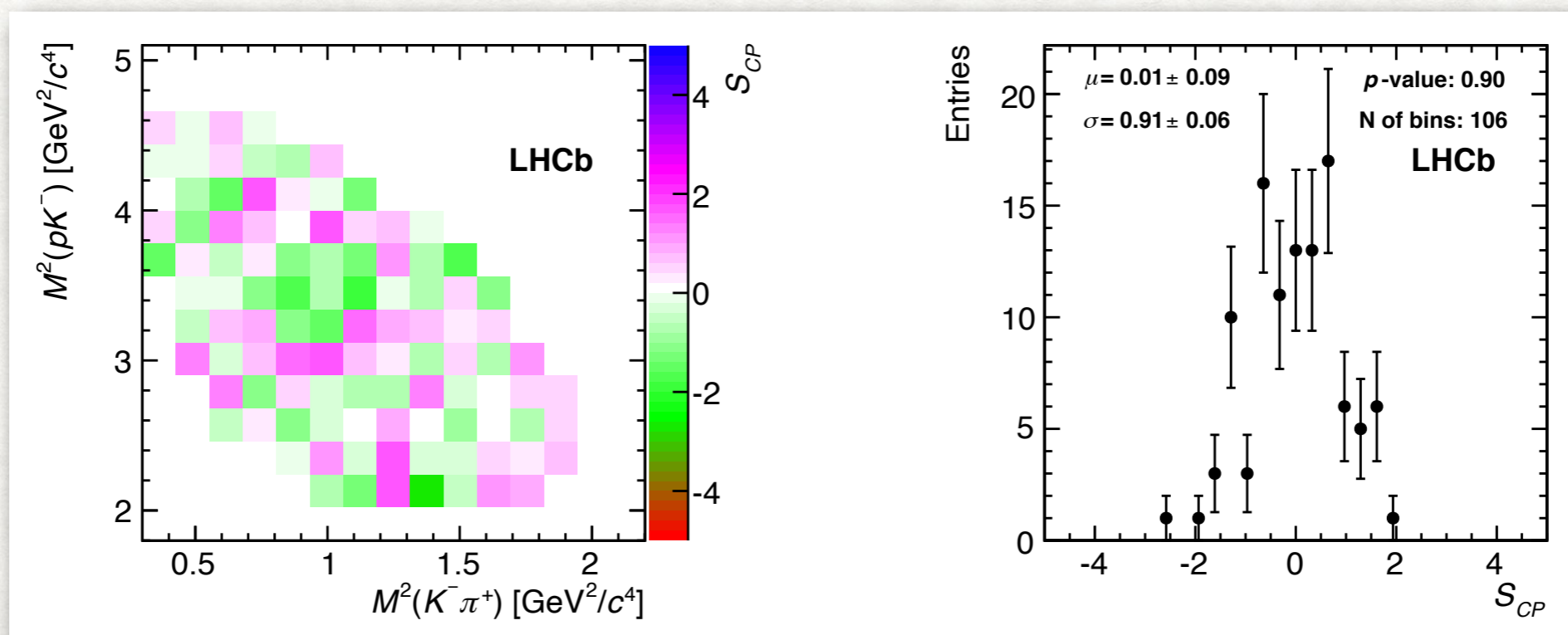


BINNED χ^2 方法

- 简单且最常用的在多体衰变中寻找CP破坏的方法
- 将相空间（常用Dalitz图）分bin，计算每个bin中 S_{CP}^i

- $$S_{CP}^i = \frac{N^i(X) - \alpha N^i(\bar{X})}{\sqrt{N^i(X) - \alpha^2 N^i(\bar{X})}}$$

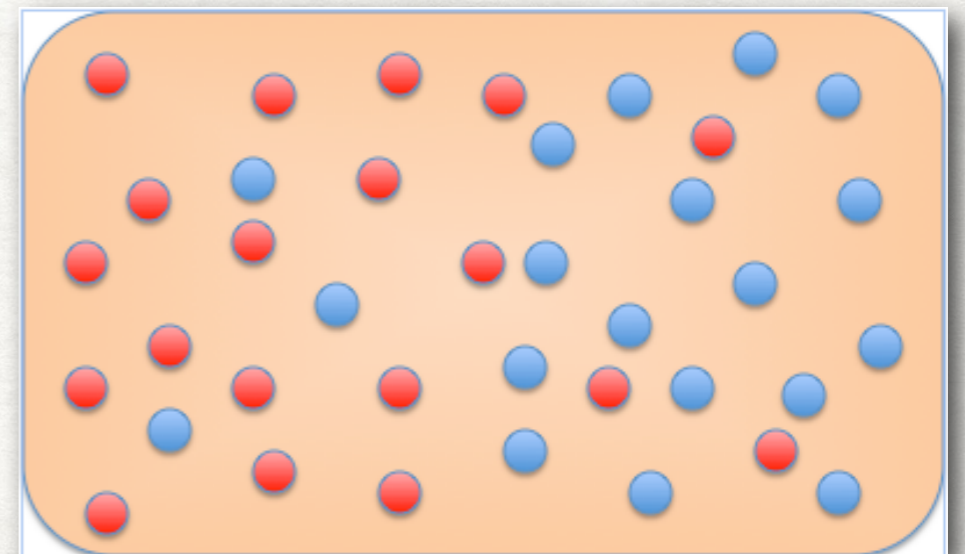
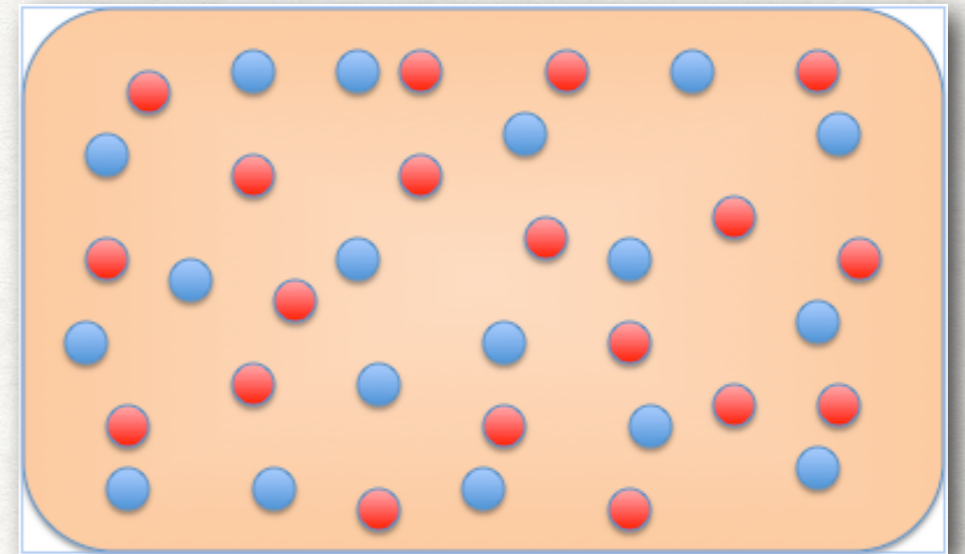
- 其中 α 是全局不对称性 $\alpha = \frac{N_{tot}(X)}{N_{tot}(\bar{X})}$ ，比较 S_{CP}^i 分布与正态分布差异



ENERGY TEST方法

- 在相空间内比较正反粒子衰变分布
- 方法来源于**静电势能**计算方法
- 在电中性物体中，静电势能最低时正电荷+q与反电荷-q分布应完全相同
- 当正电荷+q与反电荷-q分布不同时静电势能上升
- 相空间→电中性物体
- 正反粒子衰变→正反电荷
- 利用静电势能计算公式，构建 T值

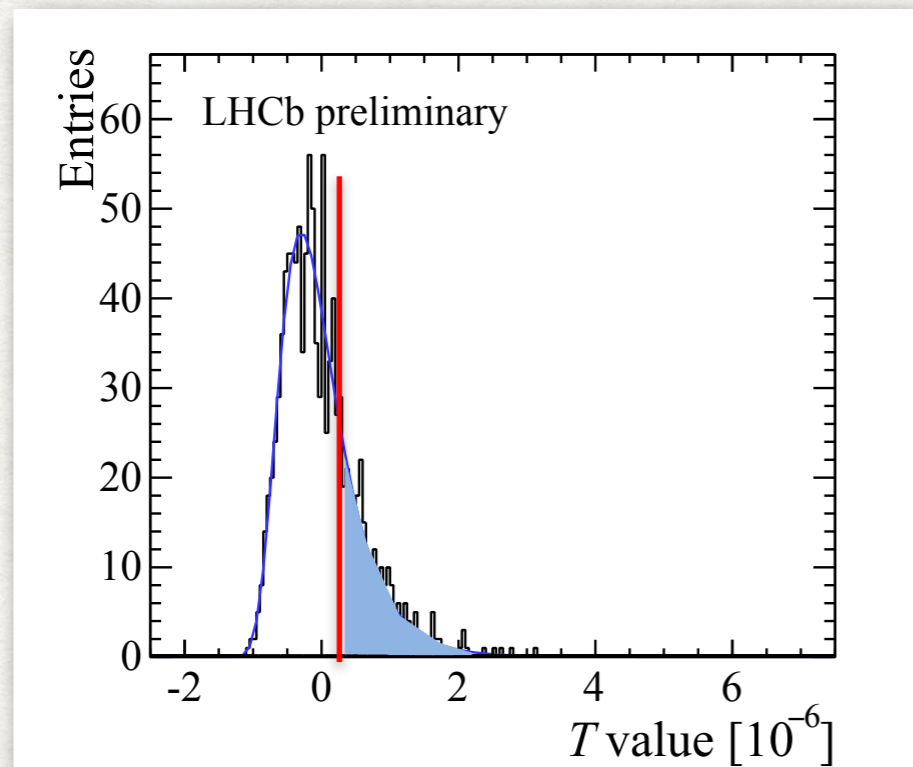
$$T = \frac{1}{n(n-1)} \sum_{i,j>i}^n \psi(d_{ij}) + \frac{1}{\bar{n}(\bar{n}-1)} \sum_{i,j>i}^{\bar{n}} \psi(d_{ij}) - \frac{1}{n\bar{n}} \sum_{i,j}^{n,\bar{n}} \psi(d_{ij})$$



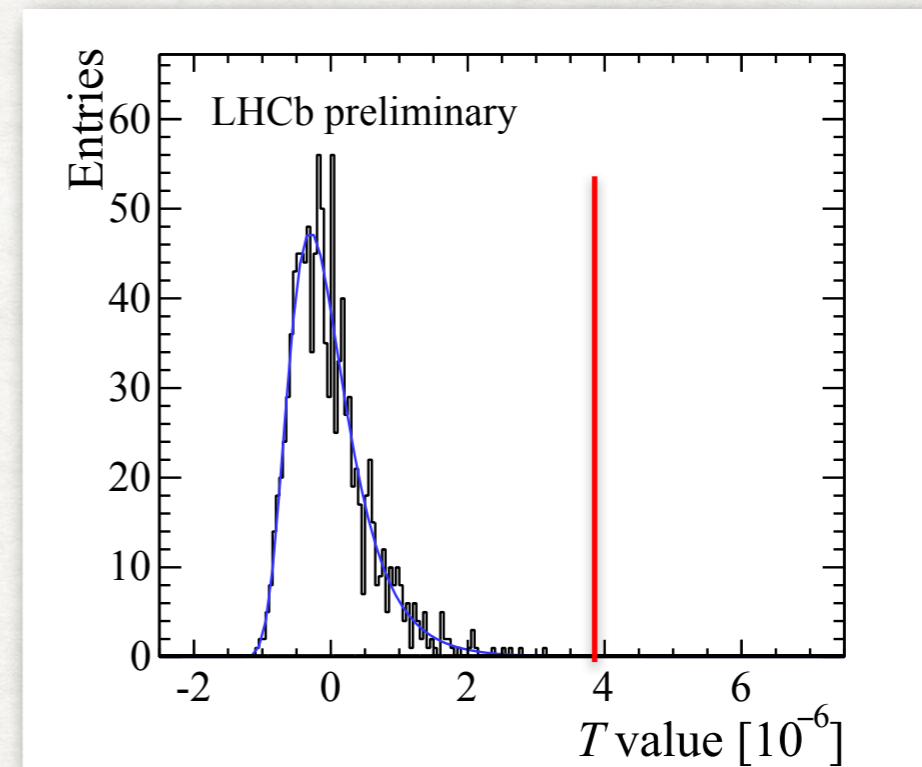
J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 44 085001

ENERGY TEST方法

- 得到T值后，如何判断是否有asymmetry?
- 与无asymmetry的分布做比较。如何得到无asymmetry的分布?
- 将原样本中电荷随机标记——permutation
- p值： permutation T值中高于原T值的比例



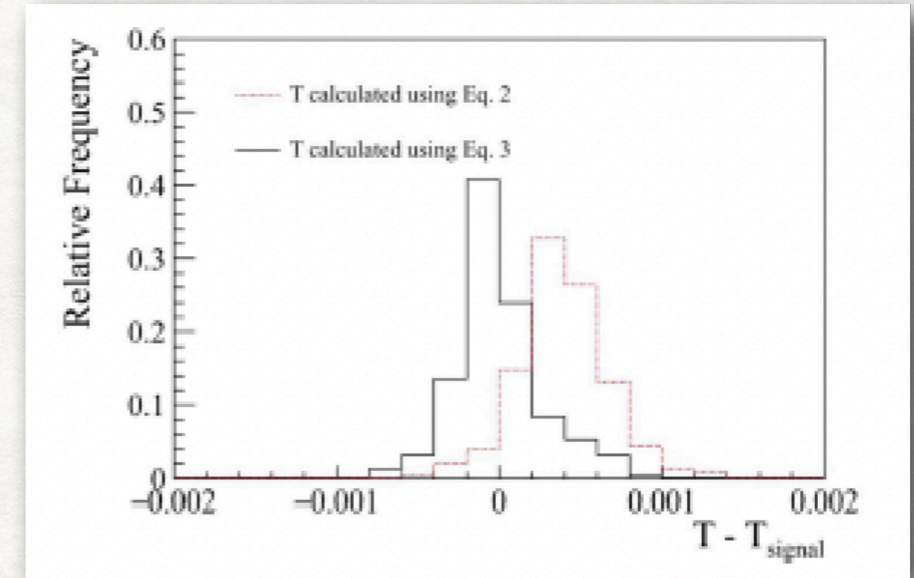
高p值——无CPV



小p值——有CPV

背景噪声控制

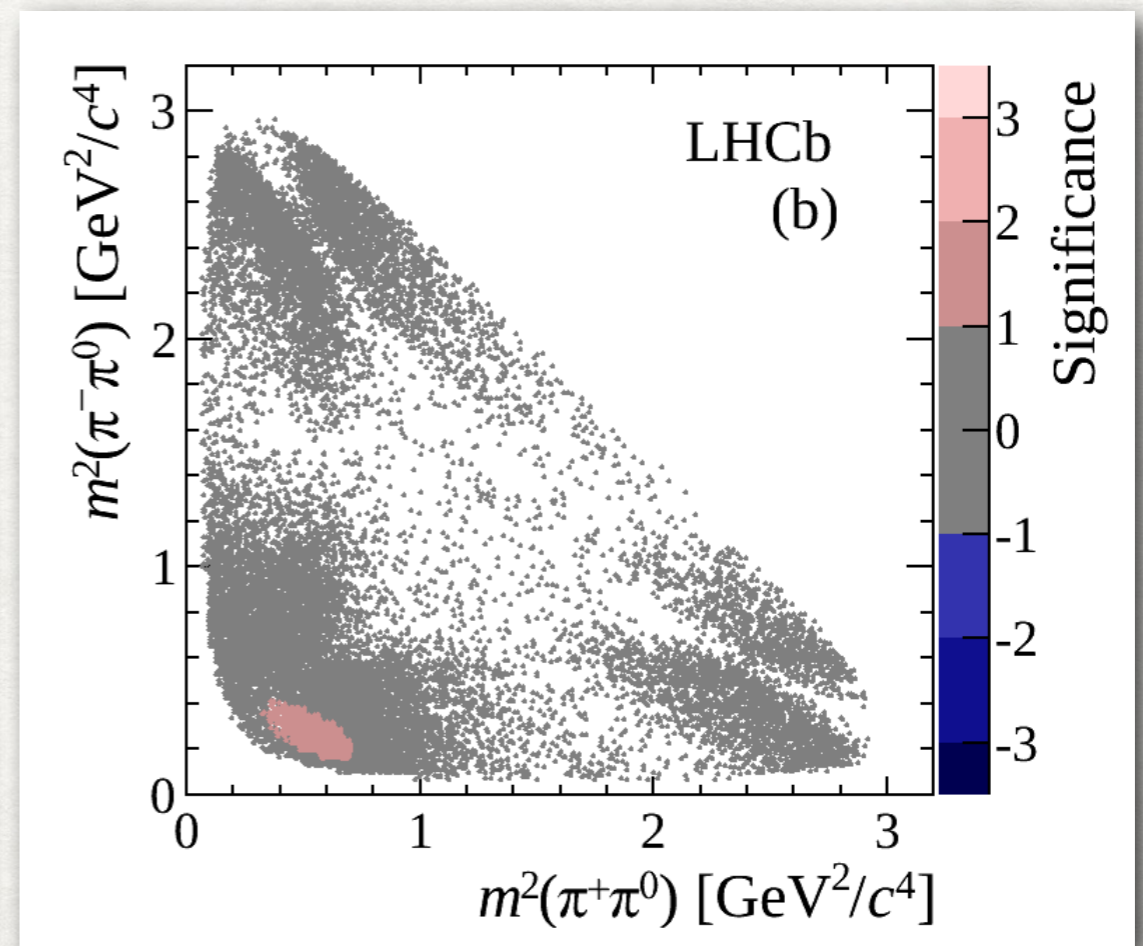
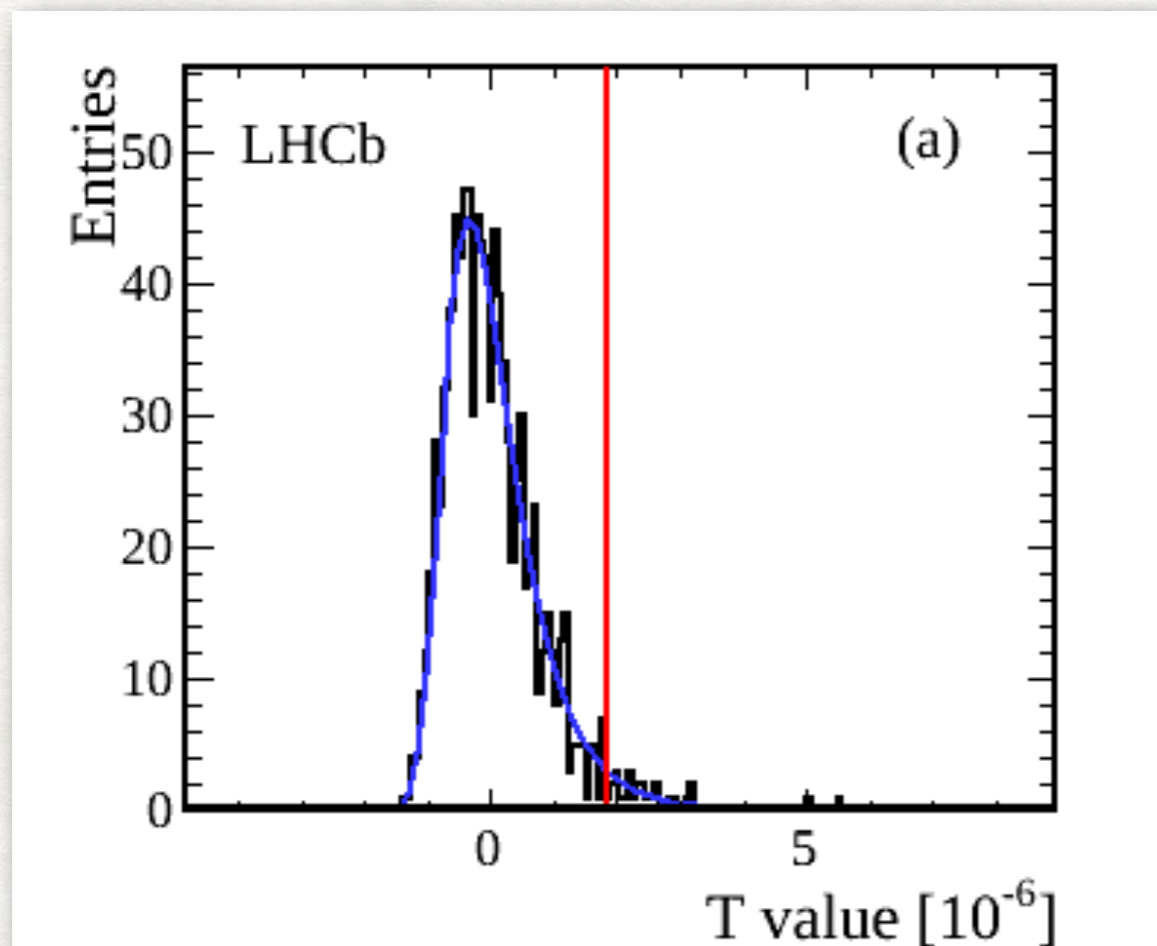
- 利用额外bkg样本，增加bkg项，抵消bkg对signal的相互作用
- bkg项可以来自于sideband
- 模拟结果可见bkg中的bias被抵消掉了



$$\begin{aligned}
 T = & \frac{1}{2w(w-1)} \left(\sum_i^n \sum_{j \neq i}^n \psi_{ij} - \frac{2b}{b_s} \sum_i^n \sum_j^{b_s} \psi_{ij} + \frac{b(b+1)}{b_s(b_s-1)} \sum_i^{b_s} \sum_{j \neq i}^{b_s} \psi_{ij} \right) \\
 & + \frac{1}{2\bar{w}(\bar{w}-1)} \left(\sum_i^{\bar{n}} \sum_{j \neq i}^{\bar{n}} \psi_{ij} - \frac{2\bar{b}}{\bar{b}_s} \sum_i^{\bar{n}} \sum_j^{\bar{b}_s} \psi_{ij} + \frac{\bar{b}(\bar{b}+1)}{\bar{b}_s(\bar{b}_s-1)} \sum_i^{\bar{b}_s} \sum_{j \neq i}^{\bar{b}_s} \psi_{ij} \right) \\
 & - \frac{1}{w\bar{w}} \left(\sum_i^n \sum_j^{\bar{n}} \psi_{ij} - \frac{\bar{b}}{\bar{b}_s} \sum_i^n \sum_j^{\bar{b}_s} \psi_{ij} - \frac{b}{b_s} \sum_i^{b_s} \sum_j^{\bar{n}} \psi_{ij} + \frac{b\bar{b}}{b_s\bar{b}_s} \sum_i^{b_s} \sum_j^{\bar{b}_s} \psi_{ij} \right),
 \end{aligned}$$

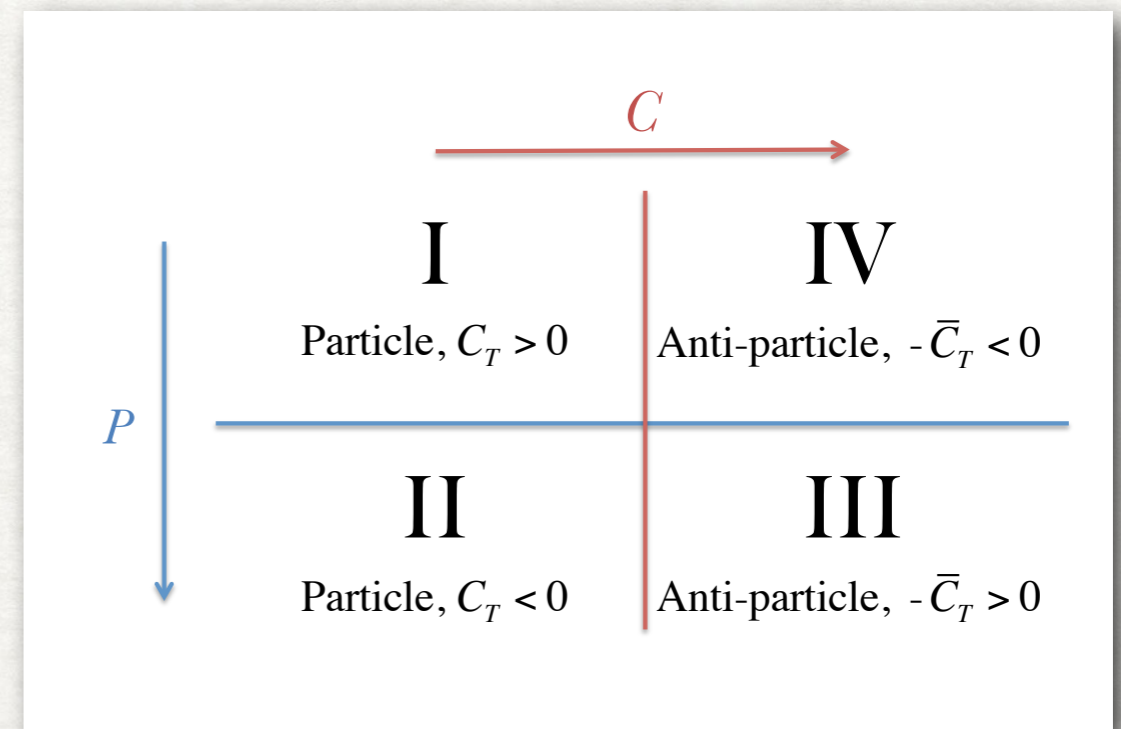
$D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^0$ 衰变

- Energy test的首次应用： $D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^0$ 衰变
- 利用每个衰变事件对T值贡献可画出相空间内主导Asymmetry的区域
- p值： $(2.6 \pm 0.5) \%$



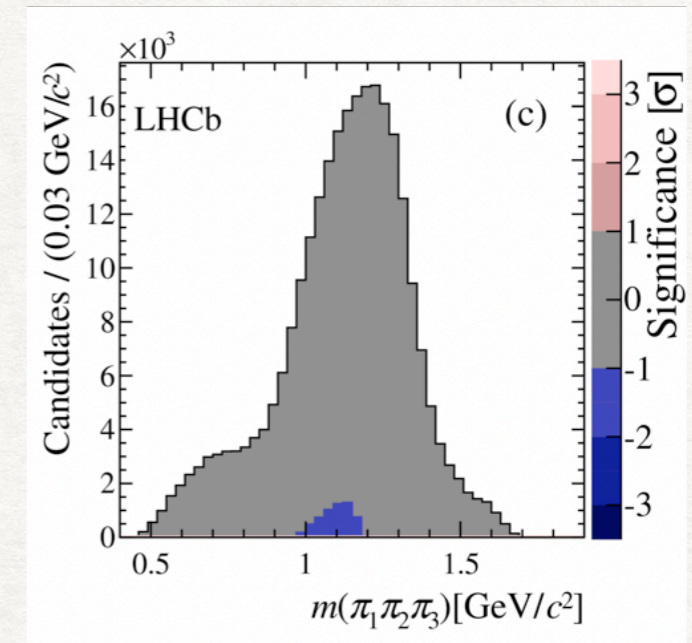
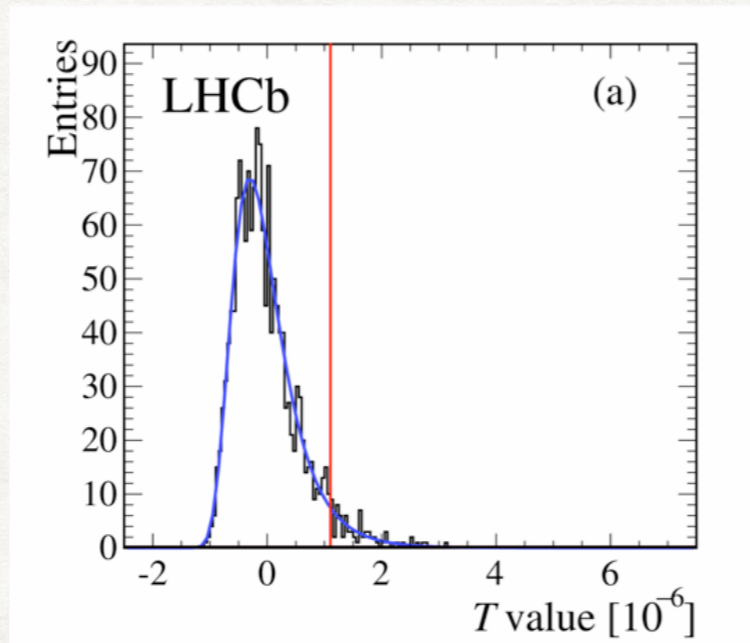
三体衰变与四体衰变

- 多体衰变中独立变量与末态粒子数关系： $3n-7$
- 三体衰变→自由度2，可以在Dalitz图上分析
- 四体衰变→自由度5，构建相空间方法很多，质量组合、Helicity角等
- 分bin方法：每个维度可分的bin数很有限
- 四体衰变：可利用Triple p product的符号测量P-odd情况下的CP破坏
- $C_T = \vec{p}_3 \cdot (\vec{p}_1 \times \vec{p}_2)$ ，满足 $CP(C_T) = -C(C_T) = -\bar{C}_T$
- P-even: I+II vs. III+IV
- P-odd: I+IV vs. II+III

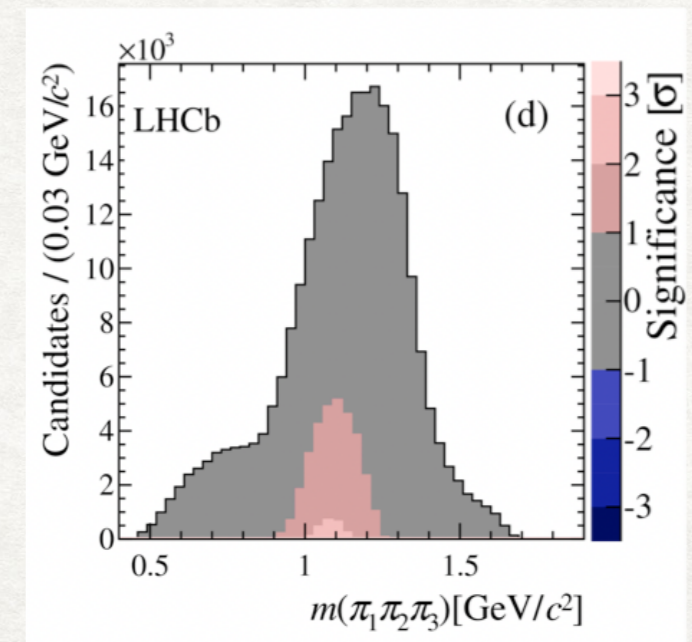
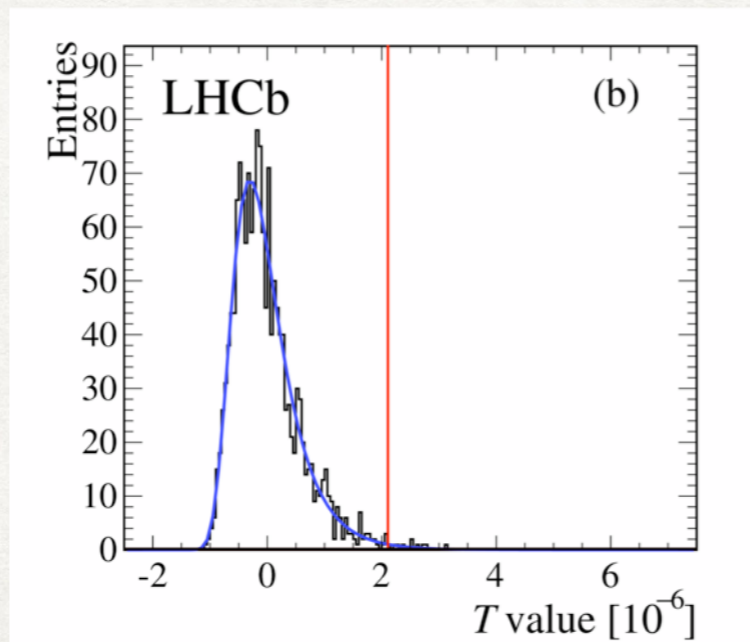


$D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^- \pi^+$ 衰变

- p值:
- P-even: $(4.6 \pm 0.5) \%$
- 无CP破坏迹象



- P-odd: $(0.6 \pm 0.2) \%$
- 2.7σ , 在无迹象边缘



- (Run 2分析进行中)

LHCb相关分析总结

Table 4: Summary of LHCb direct CP violation searches in phase space of charm decays.

Decay channel	Data sample	Method
$D^+ \rightarrow K^- K^+ \pi^+$ [13]	35 pb ⁻¹	binned χ^2
$D^0 \rightarrow K^- K^+ \pi^- \pi^+$ [14]	1.0 fb ⁻¹ , D^* tag	binned χ^2
$D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^- \pi^+$ [14]	1.0 fb ⁻¹ , D^* tag	binned χ^2
$D^+ \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^+$ [15]	1.0 fb ⁻¹	binned χ^2
$D^0 \rightarrow K^- K^+ \pi^- \pi^+$ [16]	3.0 fb ⁻¹ , B tag	binned χ^2
$D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^0$ [17]	2.0 fb ⁻¹ , D^* tag	energy test
$D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^- \pi^+$ [18]	3.0 fb ⁻¹ , D^* tag	energy test
$D^0 \rightarrow K^- K^+ \pi^- \pi^+$ [19]	3.0 fb ⁻¹ , B tag	amplitude analysis
$\Xi_c^+ \rightarrow p K^- \pi^+$ [20]	3.0 fb ⁻¹	binned χ^2

[13] [Phys. Rev. D84 \(2011\) 112008](#)

[14] [Phys. Lett. B726 \(2013\) 623](#)

[15] [Phys. Lett. B728 \(2014\) 585](#)

[16] [JHEP 10 \(2014\) 005](#)

[17] [Phys. Lett. B740 \(2015\) 158](#)

[18] [Phys. Lett. B769 \(2017\) 345](#)

[19] [JHEP 02 \(2019\) 126](#)

[20] [Eur. Phys. J. C80 \(2020\) 986](#)

y_{CP}

- 由于混合的存在, D^0 衰变到CP本征态末态 (KK 或 $\pi\pi$) 的衰变宽度 Γ_{CP+} 与衰变到其他末态 (如CF衰变的 $K\pi$) 的衰变宽度 Γ 会有不同
- 定义 $y_{CP} = \Gamma_{CP+}/\Gamma - 1$
- y_{CP} 满足:
- $$y_{CP} \approx \frac{1}{2} \left(\left| \frac{q}{p} \right| + \left| \frac{p}{q} \right| \right) y \cos \phi - \frac{1}{2} \left(\left| \frac{q}{p} \right| - \left| \frac{p}{q} \right| \right) x \sin \phi$$
- 与 x 、 y 、 $|q/p|$ 、 ϕ 都有关, 且若无CP破坏, $y_{CP}=y$
- 实验测量:
$$y_{CP} = \frac{2\tau(D^0 \rightarrow f_{CP})}{\tau(\bar{D}^0 \rightarrow f_{CP}) + \tau(D^0 \rightarrow f_{CP})} - 1$$
- $f_{CP}=K\pi$ 末态, $f_{CP}=KK$ 或 $\pi\pi$ 末态

A_Γ

- D^0 与其反粒子衰变到CP本征态末态 (KK 或 $\pi\pi$) 的寿命的不对称性
- $A_\Gamma = -A_{CP}^{indirect}$, 且满足
- $A_\Gamma \approx \frac{1}{2} \left(\left| \frac{q}{p} \right| - \left| \frac{p}{q} \right| \right) y \cos \phi - \frac{1}{2} \left(\left| \frac{q}{p} \right| + \left| \frac{p}{q} \right| \right) x \sin \phi$
- 实验测量: $A_\Gamma = \frac{\tau(\bar{D}^0 \rightarrow f_{CP}) - \tau(D^0 \rightarrow f_{CP})}{\tau(\bar{D}^0 \rightarrow f_{CP}) + \tau(D^0 \rightarrow f_{CP})}$
- 到目前为止的 y_{CP} 与 A_Γ 测量都没有找到混合中CP破坏的证据

LHCb相关分析总结

Table 5: Summary of LHCb y_{CP} and A_{Γ} measurements.

Data sample	Final state(s)	y_{CP} (%)	A_{Γ} ($\times 10^{-3}$)
29 pb $^{-1}$, D^* tag [21]	$K^+ K^-$	$0.55 \pm 0.63 \pm 0.41$	$-5.9 \pm 5.9 \pm 2.1$
1.0 fb $^{-1}$, D^* tag [22]	$\pi^+ \pi^-$	-	$0.33 \pm 1.06 \pm 0.14$
1.0 fb $^{-1}$, D^* tag [22]	$K^+ K^-$	-	$-0.35 \pm 0.62 \pm 0.12$
3.0 fb $^{-1}$, B tag [23]	$\pi^+ \pi^-$	-	$-0.92 \pm 2.6^{+0.25}_{-0.33}$
3.0 fb $^{-1}$, B tag [23]	$K^+ K^-$	-	$-1.34 \pm 0.77^{+0.26}_{-0.34}$
3.0 fb $^{-1}$, B tag [23]	$\pi^+ \pi^-$ & $K^+ K^-$	-	-1.25 ± 0.73
3.0 fb $^{-1}$, B tag [24]	$\pi^+ \pi^-$ & $K^+ K^-$	$0.57 \pm 0.13 \pm 0.09$	-
3.0 fb $^{-1}$, D^* tag [25]	$\pi^+ \pi^-$	-	$0.46 \pm 0, 58 \pm 0.12$
3.0 fb $^{-1}$, D^* tag [25]	$K^+ K^-$	-	$-0.30 \pm 0.32 \pm 0.10$
3.0 fb $^{-1}$, D^* tag [25]	$\pi^+ \pi^-$ & $K^+ K^-$	-	$-0.13 \pm 2.0 \pm 0.7$
5.4 fb $^{-1}$, B tag [26]	$\pi^+ \pi^-$	-	$0.22 \pm 0.70 \pm 0.08$
5.4 fb $^{-1}$, B tag [26]	$K^+ K^-$	-	$-0.43 \pm 0.36 \pm 0.05$

[21] [JHEP 04 \(2012\) 129](#)

[22] [Phys. Rev. Lett. 112 \(2014\) 041801](#)

[23] [JHEP 04 \(2015\) 043](#)

[24] [Phys. Rev. Lett. 122 \(2019\) 011802](#)

[25] [Phys. Rev. Lett. 118 \(2017\) 261803](#)

[26] [Phys. Rev. D101 \(2020\) 012005](#)

总结

总结

- LHCb对粲物理研究取得了**很多关键突破**
 - 单一实验发现混合现象
 - 发现粲介子两个质量本征态间质量差异
 - 发现粲强子衰变的CP破坏
- 仍有很多**关键问题没有解决**
 - 混合中是否存在CP破坏?
 - 多体衰变中CP破坏在相空间内如何分布?
 -
- 在未来LHCb升级之后，将会有更庞大的粲粒子数据，将有助于解决**这些关键问题**

END

BACKUP

MAGNET SIDE STATION

