



BESIII

BESIII上粲介子DCS衰变研究

上官剑锋
苏州大学

BESIII粲强子物理研讨会

2023.04.08 安徽·合肥

目录

➤ 物理意义

➤ $D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$

■ 强子道标记 $D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$

■ 半轻道标记 $D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$

➤ $D^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \pi^0$ 和 $D^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \eta$

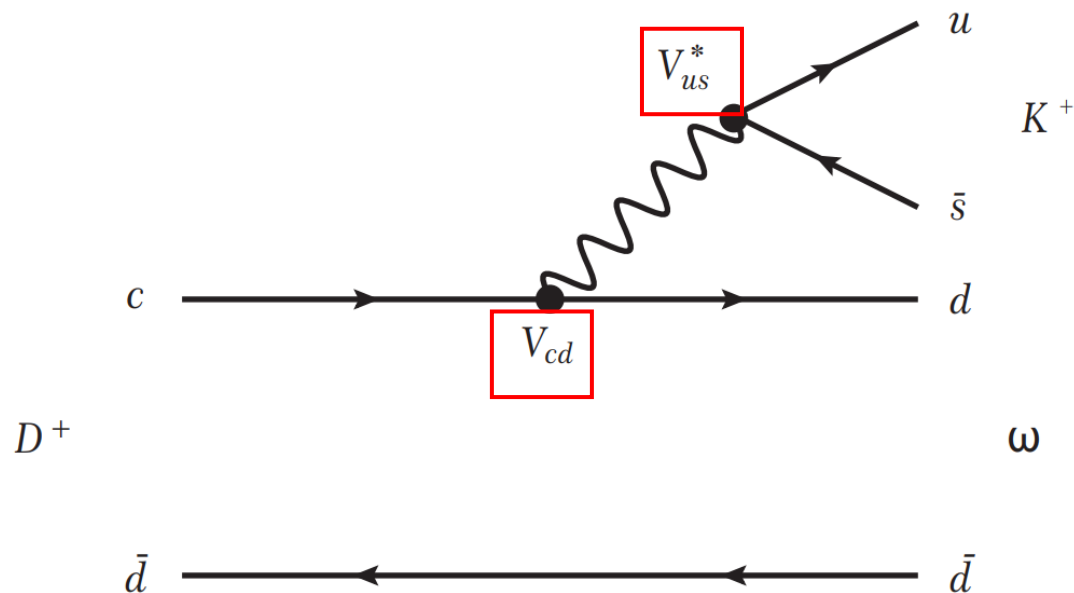
➤ $D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^0$ 和 $D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$ (半轻道标记)

➤ 总结与展望

物理意义

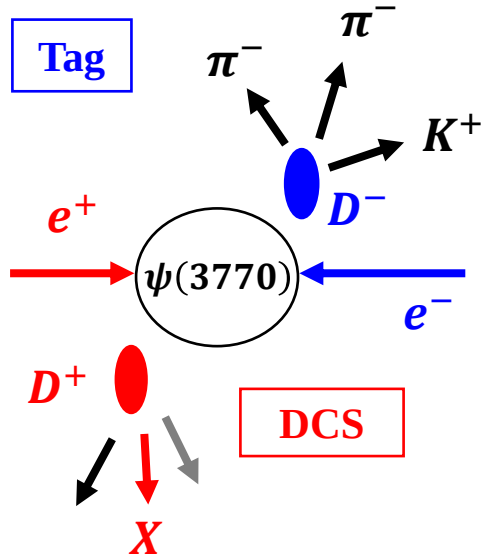
Doubly Cabibbo-suppressed (DCS)双卡比玻压制过程在粲介子中分支比很低，理论预期的分支比仅 10^{-4} 的量级。理论上DCS与CF分支比的比值大约为 $\tan^4\theta_c(0.29\%)$ ， θ_c 是卡比玻混合角。目前已经观测到的比值几乎都支持这一理论预期。

利用BESIII上 $\psi(3770)$ 数据样本，寻找更多的双卡比玻制过程对于我们理解SU(3)味对称性破缺，理论预测粲能区的CP破坏提供了重要的实验依据。



数据样本

数据: 2.93 fb^{-1} @ $\sqrt{s} = 3.773 \text{ GeV}$
BOSS 版本: 6.6.4.p02



衰变链

$$e^+e^- \rightarrow \psi(3770) \rightarrow D^0\bar{D}^0$$

$$e^+e^- \rightarrow \psi(3770) \rightarrow D^+D^-$$

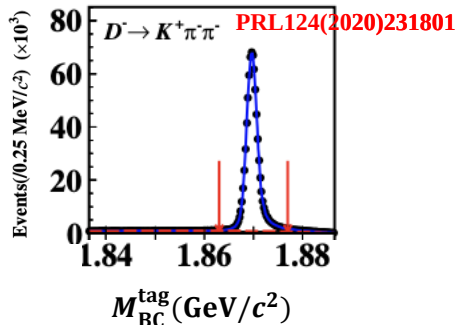
单举蒙特卡洛模拟

Processes	N^{produced}
non- DD	1.50×10^7
$D^0\bar{D}^0$	1.16×10^8
D^+D^-	9.11×10^7
$q\bar{q}$	3.66×10^8
$\mu^+\mu^-$	9.19×10^7
$\tau^+\tau^-$	9.00×10^7
$\gamma_{\text{ISR}} J/\psi$	3.30×10^7
$\gamma_{\text{ISR}} \psi(3686)$	1.02×10^8
Bhabha scattering	4.00×10^8

- 单标记
- 完整重建一个D介子

$$\Delta E = E_{D^-} - E_{\text{beam}}$$

$$M_{\text{BC}} = \sqrt{E_{\text{beam}}^2 - |\vec{p}_{D^-}|^2}$$



□ 另一侧寻找信号过程,
定义一些特征物理量

$$M^2 = E_{\text{miss}}^2 - |\vec{p}_{\text{miss}}|^2$$

$$E_{\text{miss}} = E_{\text{cm}} - \sqrt{|\vec{p}_{D(s)}|^2 + M_{D(s)}^2} - E_X$$

$$\vec{p}_{\text{miss}} = -\vec{p}_{D(s)} - \vec{p}_X$$

$$U_{\text{miss}} = E_{\text{miss}} - |\vec{p}_{\text{miss}}|$$

强子标记测量 $D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$

$$\Delta E = E_{D^-} - E_{\text{beam}}$$

$$M_{\text{BC}} = \sqrt{E_{\text{beam}}^2 - |\vec{p}_{D^-}|^2}$$

$$N_{\text{sig}} = 2N_{D^+D^-} \mathcal{B}_{\text{tag}} \mathcal{B}_{\text{sig}} \epsilon_{\text{tag,sig}}$$

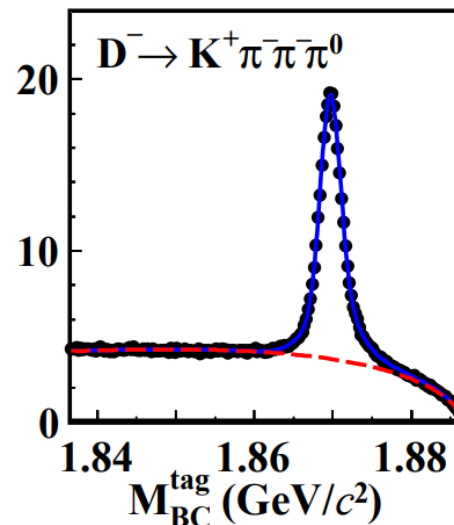
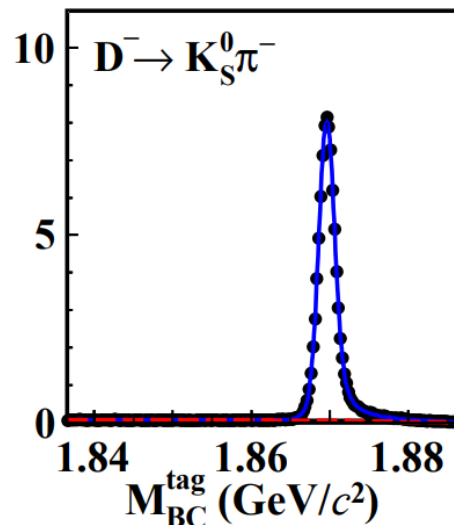
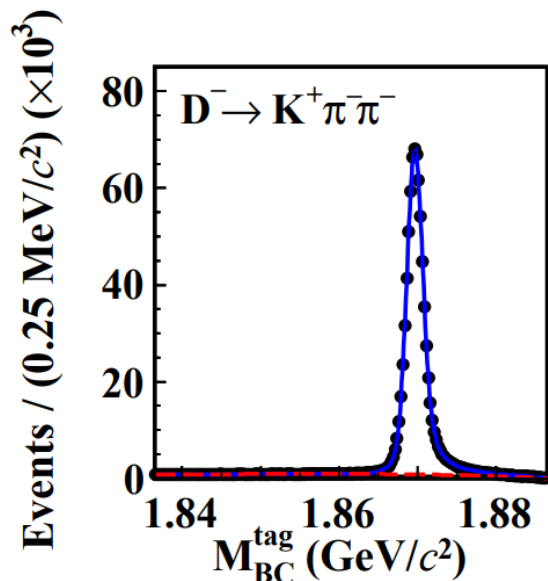


$$\mathcal{B}_{\text{sig}} = \frac{N_{\text{sig}}}{N_{\text{tag}} \epsilon_{\text{sig}}}$$

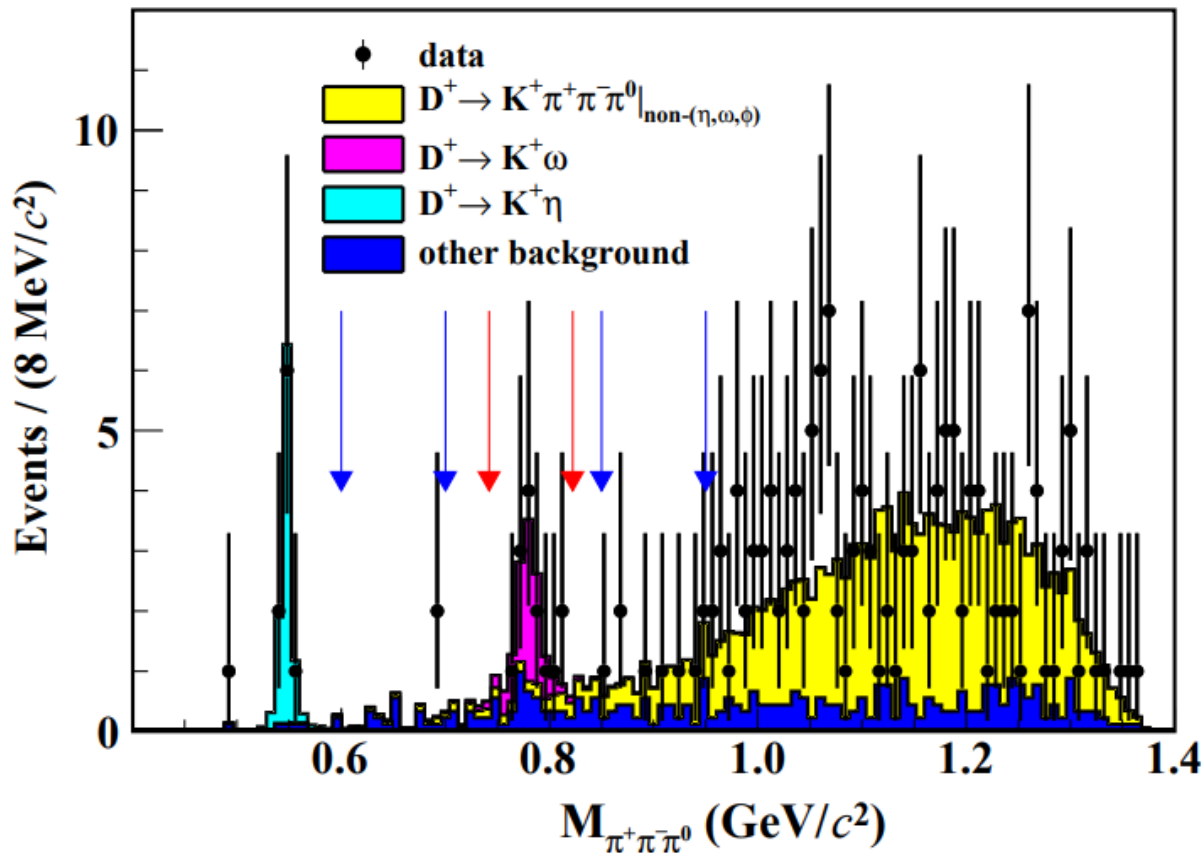
信号：蒙卡形状卷积双高斯函数

背景：ARGUS 函数

$$\epsilon_{\text{tag}} = \frac{N_{\text{tag}}}{N_{\text{total}}} \quad \epsilon_{\text{sig}} = \frac{\epsilon_{\text{tag,sig}}}{\epsilon_{\text{tag}}}$$

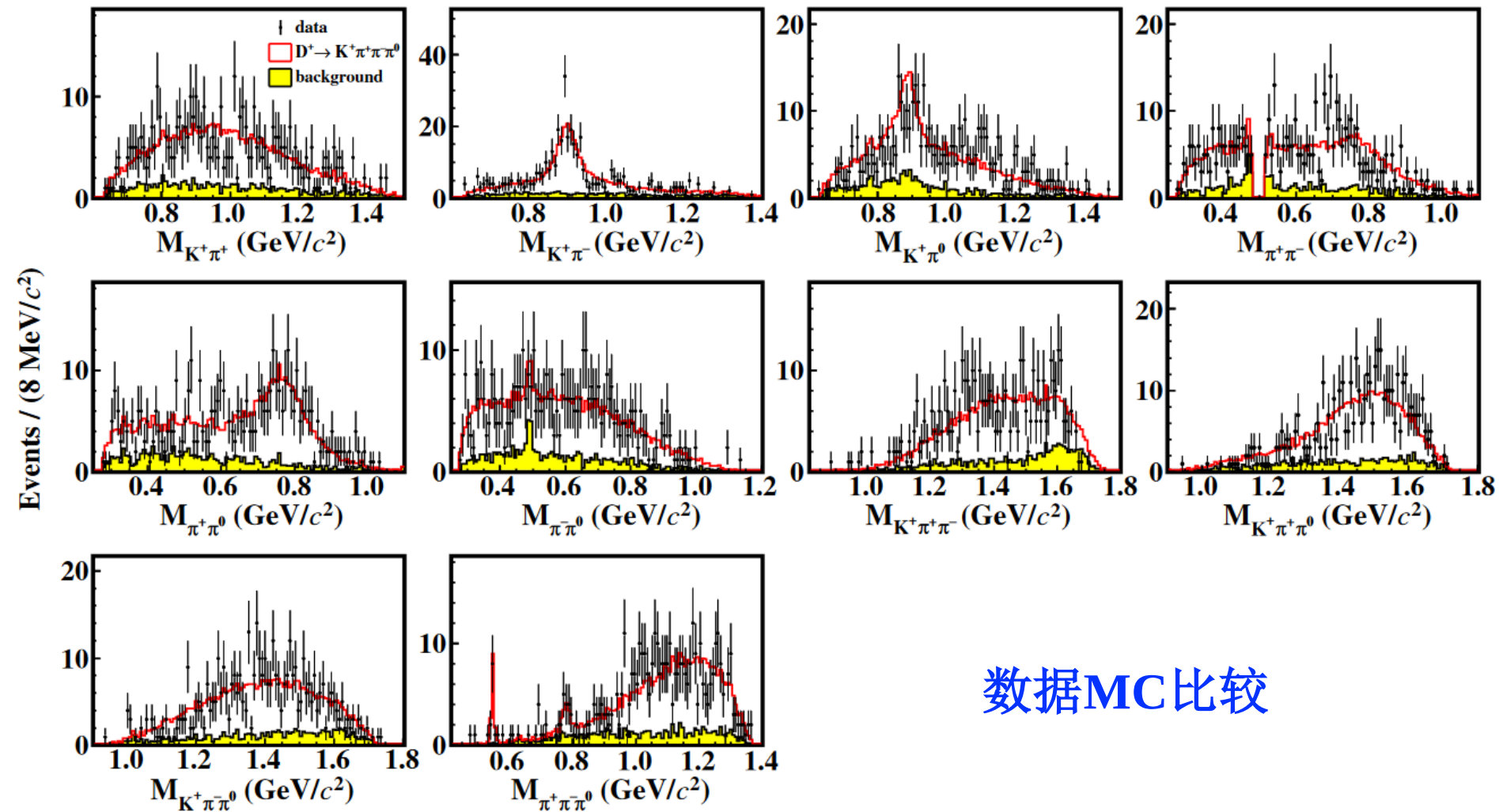


强子标记测量 $D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$



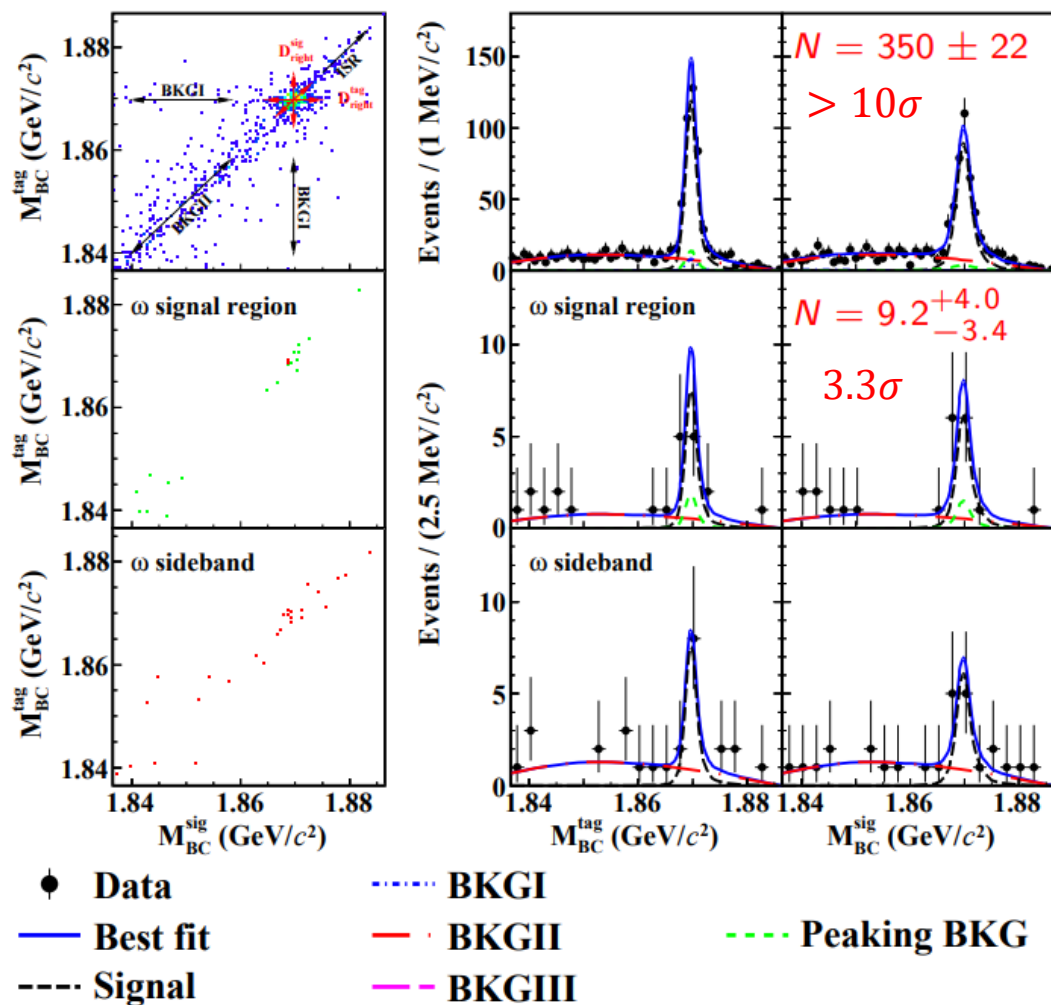
1. 存在 ω 和 η 态
2. $D^+ \rightarrow K^+ \eta$ 由单标记方法测量过 (BESIII: PRD 97, 072004)
3. $D^+ \rightarrow K^+ \omega$ 首次测量

强子标记测量 $D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$



数据MC比较

强子标记测量 $D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$



- ➡ 信号产额通过二维拟合 M_{BC}^{tag} vs. M_{BC}^{sig} 分布
- ➡ 背景 BKGI 形状来自于错误的 D_{tag} 或 D_{sig}
- ➡ BKGI背景 来自 $q\bar{q}$ 过程
- ➡ BKGI背景 空间均匀分布其他本底

$K^+ \omega$ 通过二维联合拟合 ω 的信号区和边带区
 ω 窗口为质量中心值 $\pm 40 \text{ MeV}/c^2$

强子标记测量 $D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$

Decay mode	$N_{\text{ST}} (\times 10^3)$	N_{DT}	$\epsilon_{\text{sig}} (\%)$	$\mathcal{B}_{\text{sig}} (\times 10^{-3})$	$\mathcal{B}_{\text{sig}}^* (\times 10^{-3})$
$D^\pm \rightarrow K^\pm \pi^\pm \pi^\mp \pi^0$	1150.3 ± 1.5	350 ± 22	25.03 ± 0.13	1.21 ± 0.08	1.13 ± 0.08
$D^\pm \rightarrow K^\pm \omega$	1150.3 ± 1.5	$9.2^{+4.0}_{-3.4}$	14.14 ± 0.09	$(5.7^{+2.5}_{-2.1}) \times 10^{-2}$	-
$D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$	573.5 ± 1.0	181 ± 15	25.20 ± 0.18	1.25 ± 0.11	1.17 ± 0.11
$D^- \rightarrow K^- \pi^- \pi^+ \pi^0$	572.7 ± 1.0	165 ± 15	24.95 ± 0.18	1.16 ± 0.11	1.08 ± 0.11

$\mathcal{B}_{\text{sig}}^*$ 表示去除 $D^\pm \rightarrow K^\pm \eta$, $D^\pm \rightarrow K^\pm \omega$, $D^\pm \rightarrow K^\pm \phi$ 过程

$$\mathcal{B}_{D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0}^* / \mathcal{B}_{D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+ \pi^0} = (1.81 \pm 0.15)\% = (6.28 \pm 0.52) \tan^4 \theta_C$$

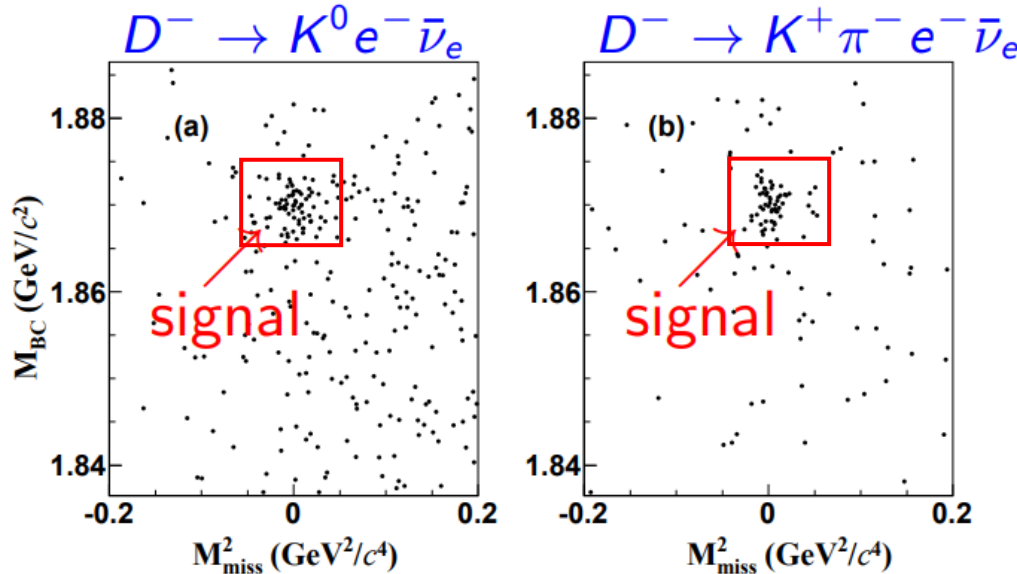
与其它DCS过程(0.21-0.58)%相比, 存在明显的差异。

$$\begin{aligned}
 A_{\text{CP}} &= \frac{B_{D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0} - B_{D^- \rightarrow K^- \pi^- \pi^+ \pi^0}}{B_{D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0} + B_{D^- \rightarrow K^- \pi^- \pi^+ \pi^0}} \\
 &= -0.04 \pm 0.06 \pm 0.01
 \end{aligned}$$

无CP破坏的迹象

半轻标记测量 $D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$

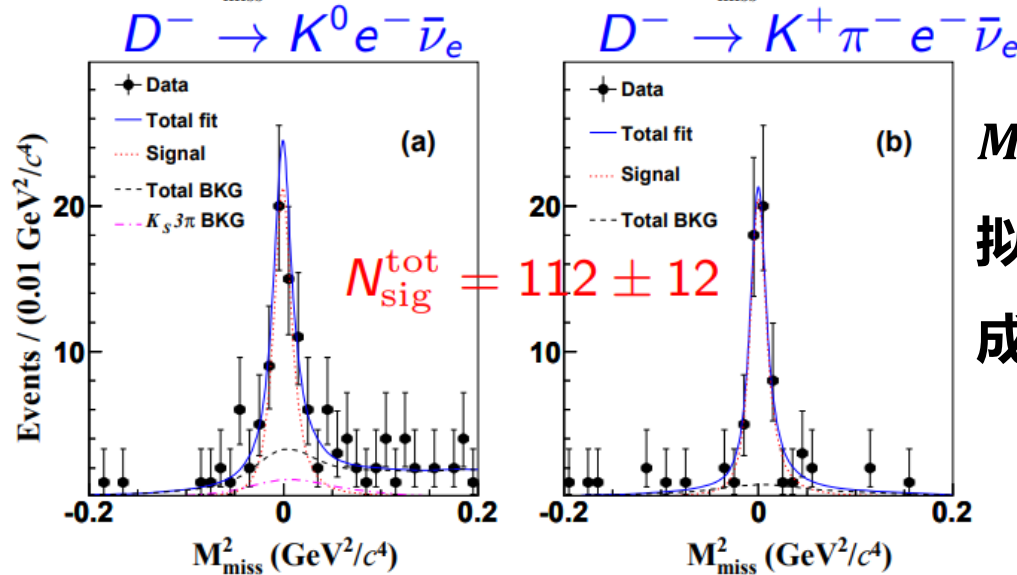
$D^- \rightarrow K^0(\rightarrow \pi^+ \pi^-) e^- \bar{\nu}_e$ 和 $D^- \rightarrow K^+ \pi^- e^- \bar{\nu}_e$ vs. $D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$



$$E_{\text{miss}} = E_{\text{beam}} - E_h - E_{e^-}$$

$$\vec{P}_{\text{miss}} = |\vec{P}_{D^-} - \vec{P}_h - \vec{P}_{e^-}|$$

$$M_{\text{miss}}^2 = E_{\text{miss}}^2 - \vec{P}_{\text{miss}}^2$$



$M_{\text{BC}} \in (1.864, 1.874) \text{ GeV}/c^2$, 联合拟合 M_{miss}^2 分布, 拟合中去除了共振态成分

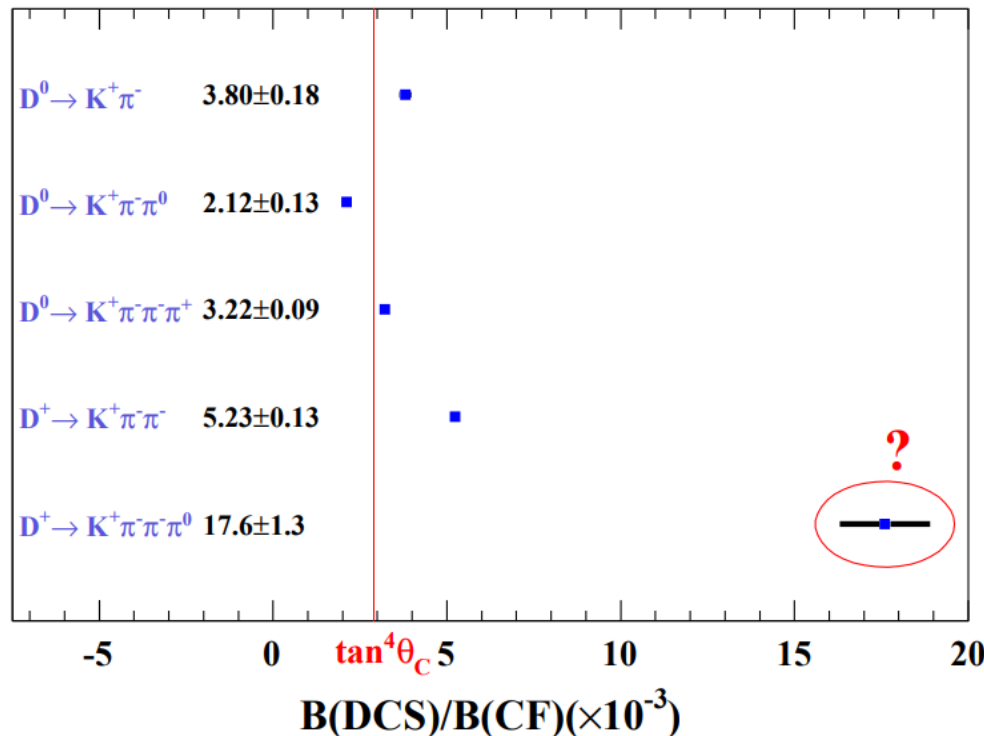
$$\mathcal{B}^*(D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0) = (1.03 \pm 0.12 \pm 0.06) \times 10^{-3}$$

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

BESIII联合测量结果

标记	分支比 ($\times 10^{-3}$)	精度 (%)
强子道 (PRL 125 (2020) 141802)	$1.13 \pm 0.08 \pm 0.03$	7.56
半轻道 (PRD 104 (2021) 072005)	$1.03 \pm 0.12 \pm 0.06$	13.03
加权	$1.10 \pm 0.07 \pm 0.03$	6.92

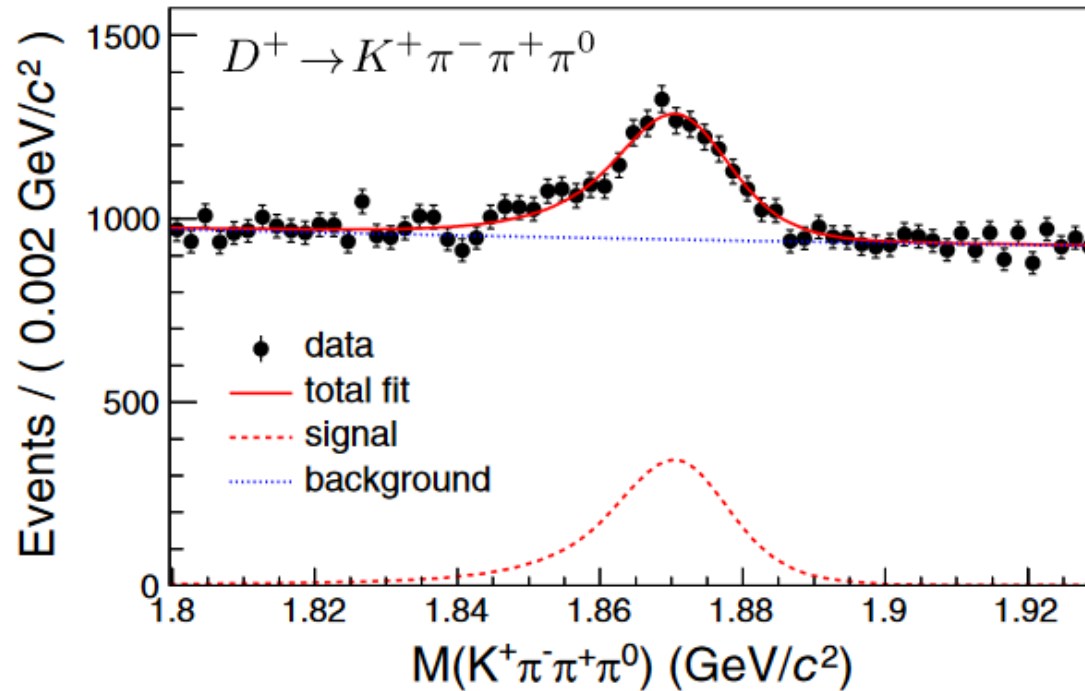
$$R = \frac{DCS}{CF} = (1.76 \pm 0.13)\% = (6.11 \pm 0.52) \tan^4 \theta_c$$



不包含 $D^\pm \rightarrow K^\pm \eta$, $D^\pm \rightarrow K^\pm \omega$, $D^\pm \rightarrow K^\pm \phi$ 成分

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

Belle合作组



$$B_{D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0} = (1.05 \pm 0.07 \pm 0.02 \pm 0.03) \times 10^{-3} \quad \text{PRD 107 (2023) 033003}$$

Belle与BESIII结果一致

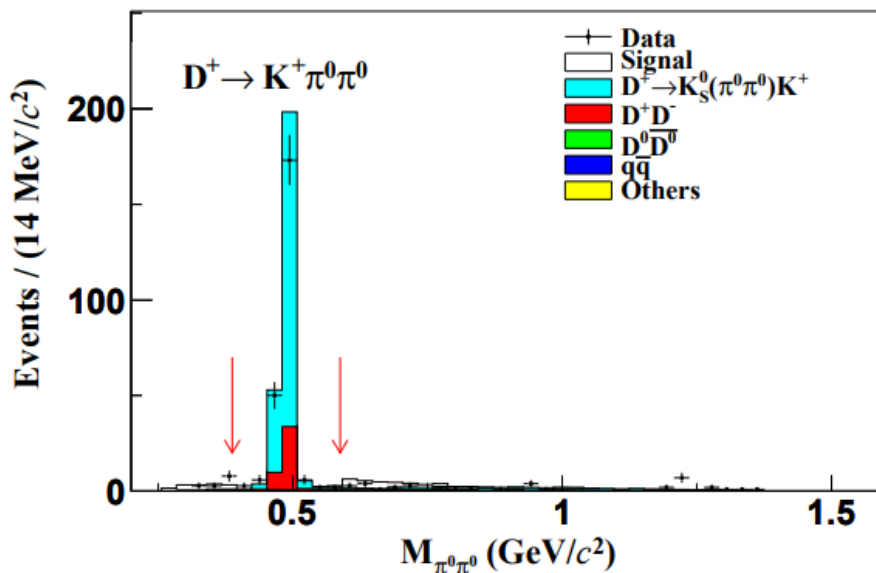
$D^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \pi^0$ 和 $D^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \eta$

采用双标记方法寻找 $D^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \pi^0$ 和 $D^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \eta$ 过程

常用六个强子道 $D^- \rightarrow K^+ \pi^- \pi^-$, $D^- \rightarrow K_S^0 \pi^-$, $D^- \rightarrow K_S^0 \pi^- \pi^0$, $D^- \rightarrow K^+ \pi^- \pi^- \pi^0$, $D^- \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^- \pi^-$, $D^- \rightarrow K^+ K^- \pi^-$

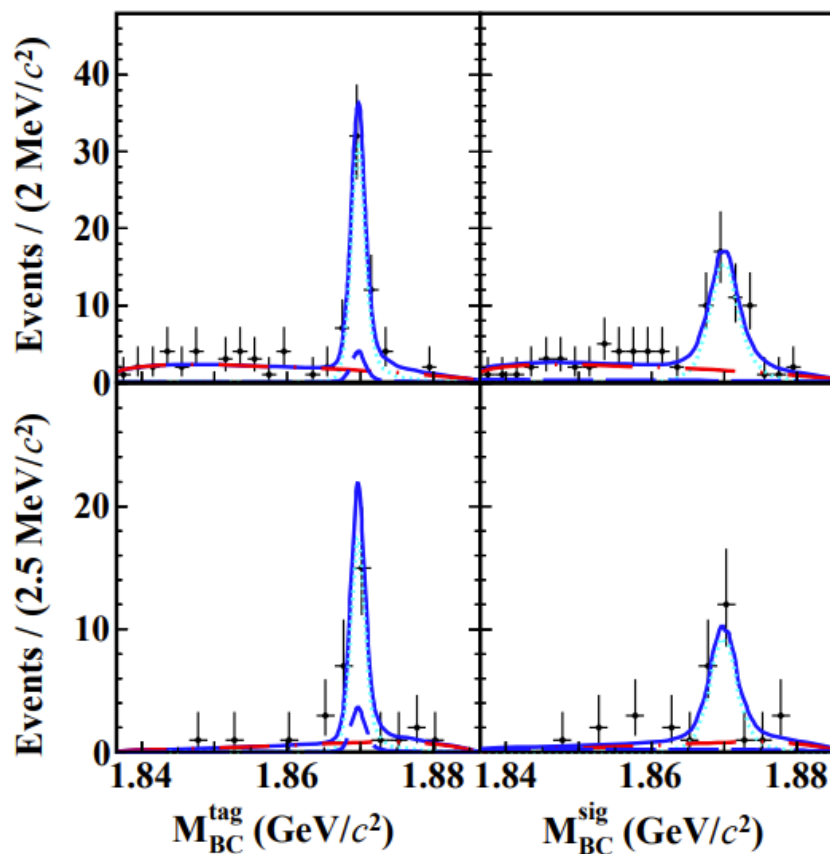
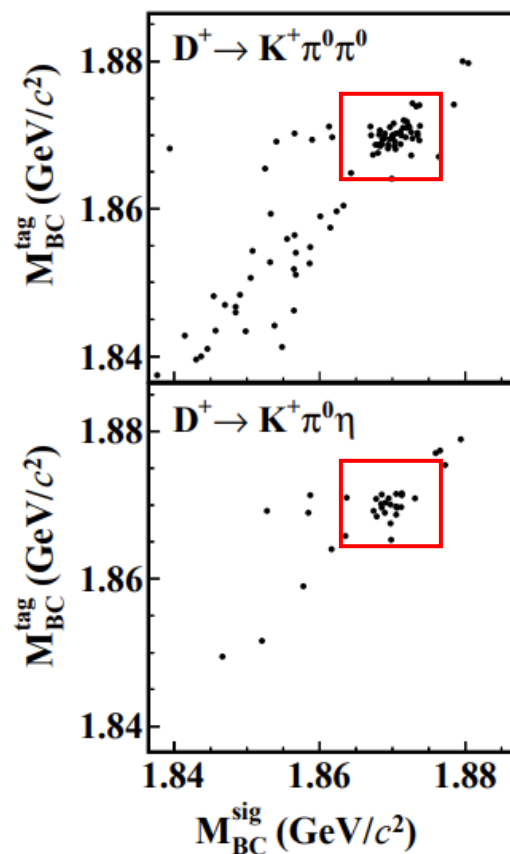
对信号道的选择通过优化公式 $S/\sqrt{S+B}$ 确定, 两个DCS衰变最优单标记组合均为 $D^- \rightarrow K^+ \pi^- \pi^-$, $D^- \rightarrow K_S^0 \pi^-$ 和 $D^- \rightarrow K^+ \pi^- \pi^- \pi^0$

去除单卡比玻过程 $D^+ \rightarrow K^+ K_S^0 (\rightarrow \pi^0 \pi^0)$



$D^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \pi^0$ 和 $D^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \eta$

二维拟合两侧的束流约束质量 M_{BC}^{tag} vs. M_{BC}^{sig}

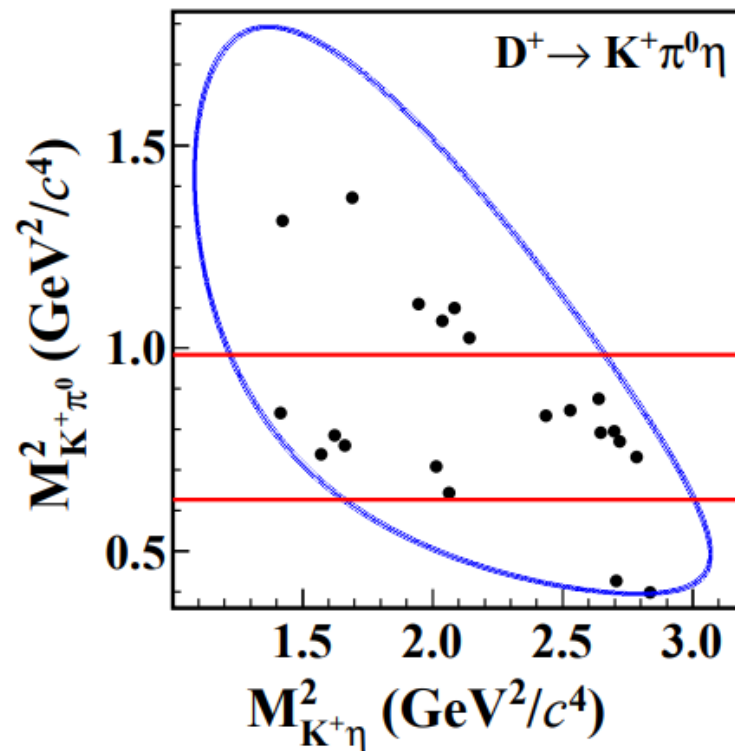
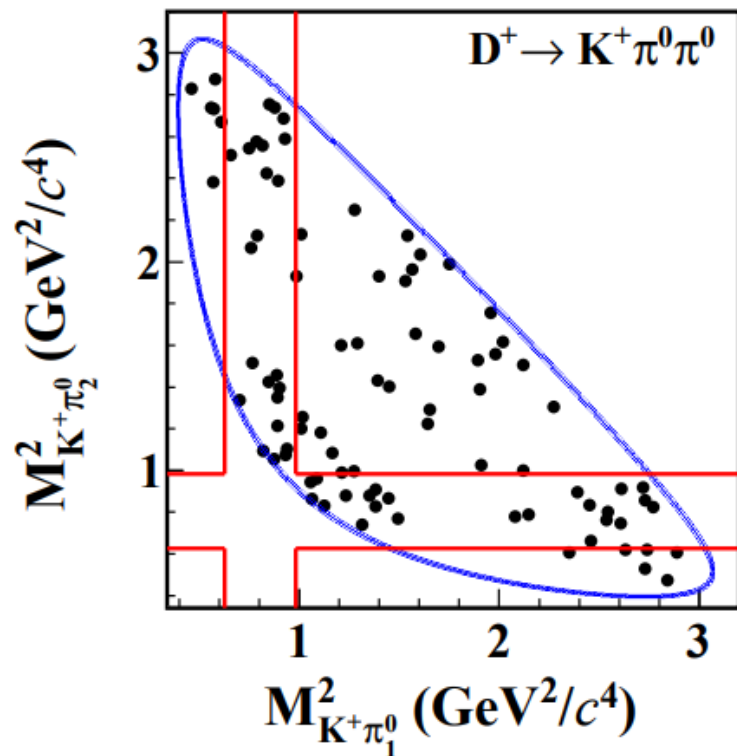


42.8 ± 7.2
显著性: 8.8σ

19.2 ± 5.0
显著性: 5.5σ

$D^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \pi^0$ 和 $D^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \eta$

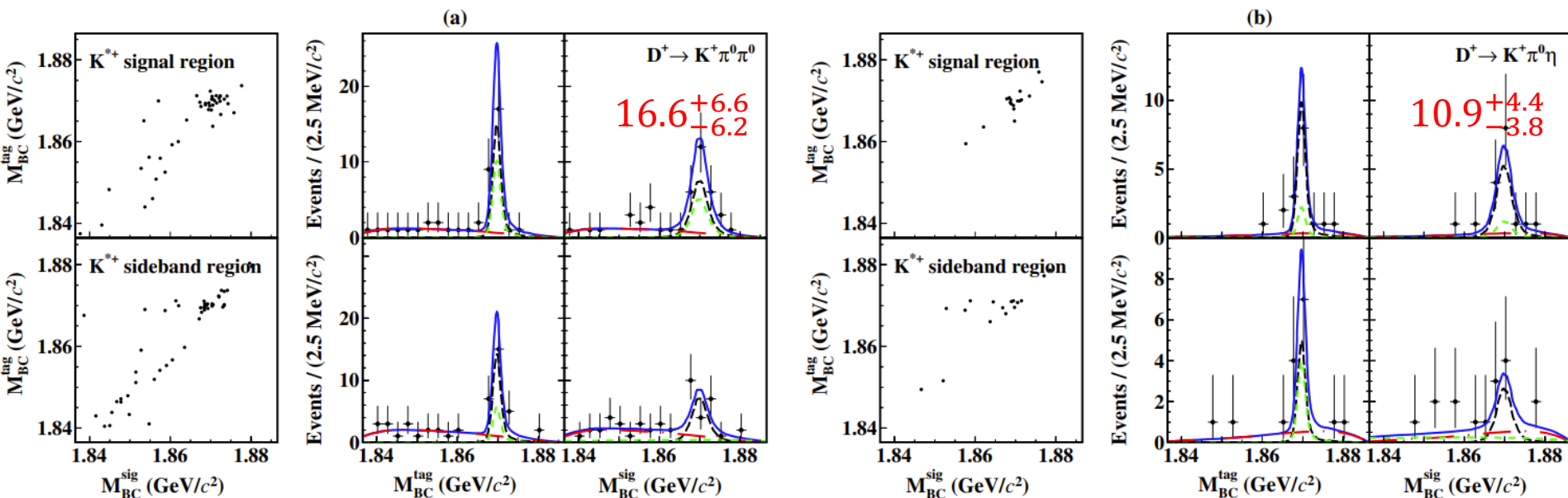
尝试找寻 $D^+ \rightarrow K^{*+} \pi^0$ 和 $D^+ \rightarrow K^{*+} \eta$



蓝色区域内为运动学范围，红色带子为 K^{*+} 的信号区

选取 K^{*+} 质量窗口 $\pm 0.1 \text{ GeV}/c^2$ 作为信号区；
信号区和边带区归一因子由对应的相空间MC决定：
 $f_{K^{*+} \pi^0} = 1.40 \pm 0.02$, $f_{K^{*+} \eta} = 2.25 \pm 0.05$

$D^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \pi^0$ 和 $D^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \eta$

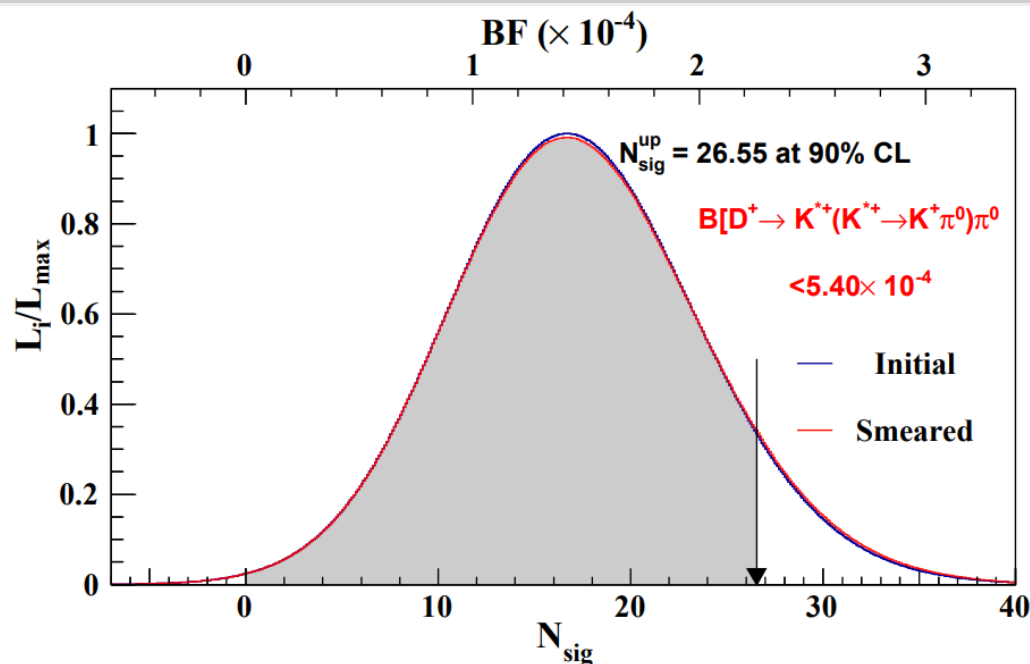


$D^+ \rightarrow K^{*+} \pi^0$ 显著性为 2.7σ , 有迹象表明 $D^+ \rightarrow K^{*+} \eta$ 的存在其显著性 3.2σ

Decay mode	N_{DT}	$\epsilon_{\text{sig}} (\%)$	$\mathcal{B}_{\text{sig}} (\times 10^{-4})$
$D^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \pi^0$	42.8 ± 7.2	18.08 ± 0.03	$2.1 \pm 0.4 \pm 0.1$
$D^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \eta$	19.2 ± 5.0	20.50 ± 0.03	$2.1 \pm 0.5 \pm 0.1$
$D^+ \rightarrow K^{*+} \pi^0$	$16.6^{+6.6}_{-6.2}$	13.02 ± 0.03	$3.4^{+1.4}_{-1.3} \pm 0.1$
$D^+ \rightarrow K^{*+} \eta$	$10.9^{+4.4}_{-3.8}$	16.60 ± 0.04	$4.4^{+1.8}_{-1.5} \pm 0.2$

$D^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \pi^0$ 和 $D^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \eta$

$D^+ \rightarrow K^{*+} \pi^0$ 在90%置信度下的分支比上限:



$$\mathcal{B}(D^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \pi^0) / \mathcal{B}(D^+ \rightarrow K^- \pi^+ \pi^+) = (2.26 \pm 0.40) \times 10^{-3} = (0.78 \pm 0.14) \tan^4 \theta_C,$$

$$\mathcal{B}(D^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \pi^0) / \mathcal{B}(D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^-) = 0.43 \pm 0.08,$$

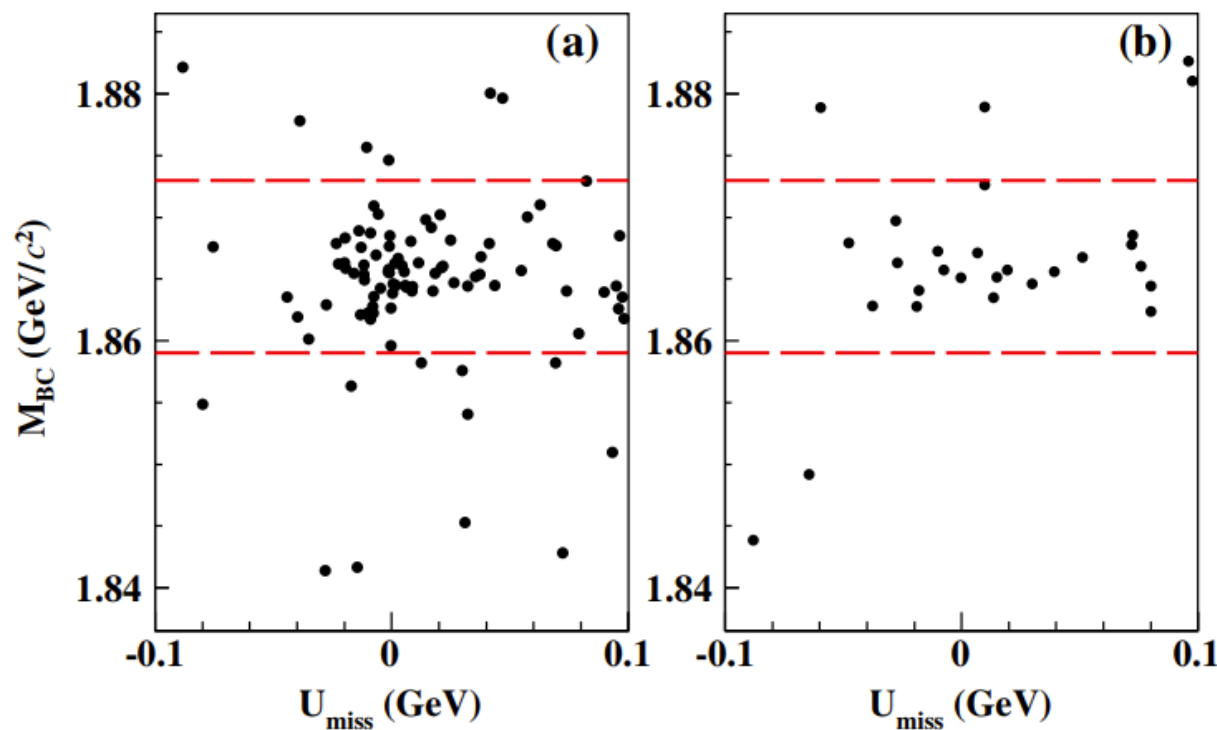
$$\mathcal{B}(D^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \eta) / \mathcal{B}(D^+ \rightarrow \bar{K}^0 \pi^+ \eta) = (8.09 \pm 2.13) \times 10^{-3} = (2.79 \pm 0.74) \tan^4 \theta_C,$$

第一项与理论预期值一致, 第二项支持同位旋对称性预期,
第三项与理论值有 2.4σ 偏离。

JHEP09(2022)107

$D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^0$ 和 $D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$ (半轻道标记)

用分支比大, 本底干净的半轻道 $\bar{D}^0 \rightarrow K^+ e^- \bar{\nu}_e$ 标记



$$E_{miss} = E_{beam} - E_h - E_{e^-}$$

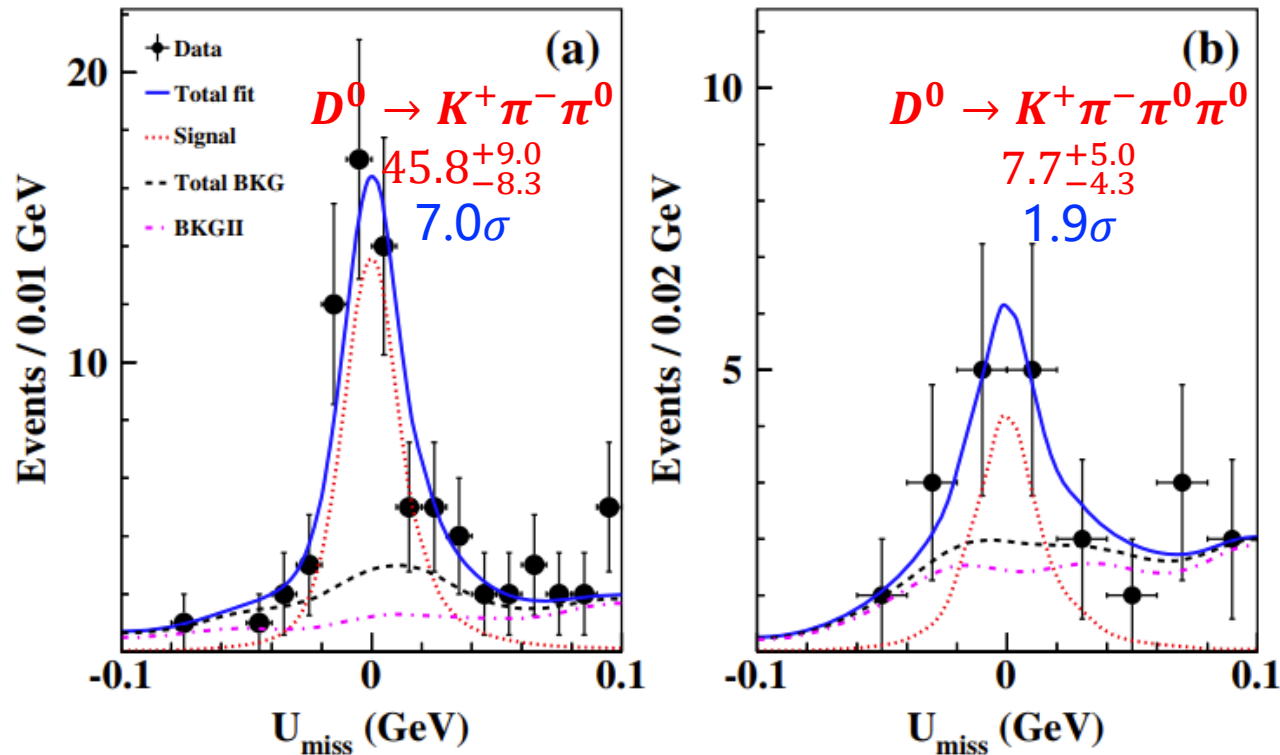
$$P_{miss} = |\vec{P}_D - \vec{P}_h - \vec{P}_{e^-}|$$

$$U_{miss} = E_{miss} - P_{miss}$$

$$\mathcal{B}_{DCS} = \frac{N_{DT}}{2 \cdot N_{D^0 \bar{D}^0} \cdot \epsilon_{DT} \cdot \mathcal{B}_{SL}}$$

强子道 $M_{BC} \in (1.859, 1.873) \text{ GeV}/c^2$

$D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^0$ 和 $D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$ (半轻道标记)



$$B(D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^0) = (3.13^{+0.60}_{-0.56} \pm 0.15) \cdot 10^{-4}$$

分支比上限: $B(D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^0 \pi^0) < 3.6 \cdot 10^{-4}$

$$\frac{D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^0}{D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^0} = (0.22 \pm 0.04)\% = (0.75 \pm 0.14) \tan^4 \theta_C$$

$$\frac{D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^0 \pi^0}{D^0 \rightarrow K^- \pi^+ \pi^0 \pi^0} < 0.4\% = 1.37 \tan^4 \theta_C \quad \text{PRD 105 (2022) 112001}$$

总结

- 利用BESIII上积分亮度为 2.93 fb^{-1} 的 $\psi(3770)$ 数据，对D介子的双卡比玻压低衰变进行了广泛的研究。

➤ 首次发现

✓ $D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$

✓ $D^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \pi^0$

✓ $D^+ \rightarrow K^+ \pi^0 \eta$

➤ 半轻标记独立测量

✓ $D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$

✓ $D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^0$

✓ $D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$

Evidence: $D^+ \rightarrow K^+ \omega$, $D^+ \rightarrow K^{*+} \eta$

Upper limit: $D^+ \rightarrow K^{*+} \pi^0$, $D^0 \rightarrow K^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$

展望

Under Review: D 介子多过程DCS寻找 BAM-673

$D_s^+ \rightarrow K^+ K^+ \pi^-$ 和 $D_s^+ \rightarrow K^+ K^+ \pi^- \pi^0$ BAM-695

$D^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^- \pi^0$ 分波分析 BAM-703

- 目前BESIII实验拥有约 8 fb^{-1} 的 $\psi(3770)$ 数据样本。这有助于我们寻找更多的粲介子DCS衰变，检验标准模型的理论值，为寻找CP破坏及新物理过程提供了良好的平台。

Thanks!