Search for CPV in $\psi(3770) \to D^0\bar{D}^0$ via $D \to K^0_S\pi^0$

李晓宇 (Xiao-Yu Li)[1,2,†]
(On behalf of BESIII Collaboration)

[1] 中国科学院高能物理研究所 (IHEP)
[2] 中国高等科学技术中心 (CCAST)

[†] *xiaoyuli@ihep.ac.cn*

BESIII 粲强子物理研讨会，兰州，2025 年 8 月

报告提纲

1. 研究背景
2. 数据集与实验方法
3. 事例选择
4. 数据分析与误差研究
   - 挑选条件优化与效率研究
   - 系统误差研究
5. 似然度扫描与 90% 置信度上限
6. 总结

报告提纲

1. 研究背景
2. 数据集与实验方法
3. 事例选择
4. 数据分析与误差研究
   - 挑选条件优化与效率研究
   - 系统误差研究
5. 似然度扫描与 90% 置信度上限
6. 总结

研究背景：中性显味介子与 CP 破坏

- **中性显味介子（Neutral Flavored Meson）**指不带电荷，味量子数不为零的介子。这类粒子在对 **CP 破坏**的研究中发挥了重要作用，是 CP 破坏研究的理想环境
- 首次 CP 破坏观测：在中性 K_L^0 束流中观测到不符合其 CP 量子数的衰变模式，首次实验观测到 CP 破坏（Cronin and Fitch，1964）
- 底介子 CP 破坏：BaBar 与 Belle 在中性 B 介子中观测到 CP 破坏（BaBar 合作组与 Belle 合作组，2001）
- 粲介子 CP 破坏：LHCb 在中性 D 介子中观测到 CP 破坏（LHCb 合作组，2019）
- 独特的物理机制：**味振荡/混合（Flavour oscillation）与双混合（Double-mixing）**机制，即正反中性显味介子之间可能发生相互振荡与混合，且可能与**次级**中性显味介子的振荡发生干涉

研究背景：CP 守恒与量子关联

- 在 BEPCII 上，正负电子阈值对撞产生的 $D^0\bar{D}^0$ 对具有 CP 奇的量子 **EPR 关联**。这是因为正负电子湮灭产生的虚光子具有 $J^{PC} = 1^{--}$ 的量子数，且末态 D 介子对形成 P 波。在不考虑 CP 破坏的情况下，这样的两个中性 D 介子将具备**相反**的 $C \times P$。这为研究 CP 破坏提供了**独特**的方法
- BESIII 积累的 $\psi(3770)$ 样本中包含约 7×10^7 对中性 D 介子，允许我们对 D 介子对特定过程的**截面或其量子关联分支比**展开精细研究

$$\sigma_{\text{obs}} = \frac{N_{\text{obs}}}{L \times \epsilon_{\text{exp}} \times \mathcal{B}_{\text{sub}}} \tag{1}$$

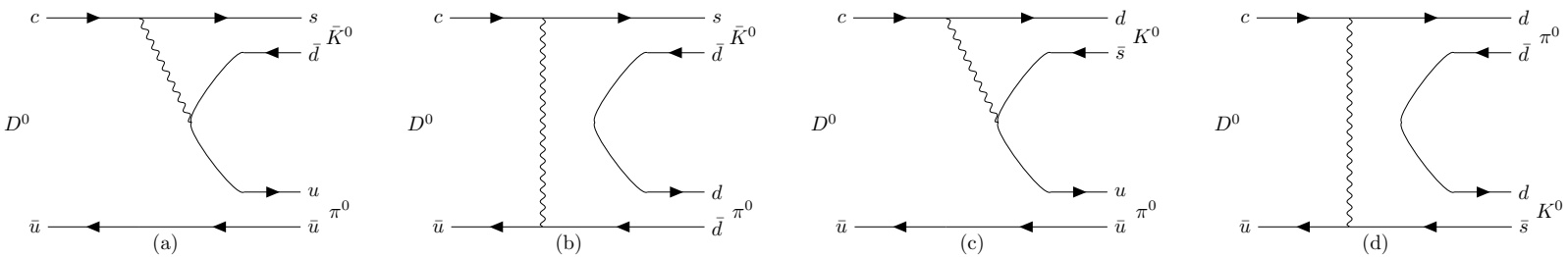
$$\mathcal{B}_{\text{EPR}} = \frac{N_{\text{obs}}}{N_{D^0\bar{D}^0} \times \epsilon_{\text{exp}} \times \mathcal{B}_{\text{sub}}} \tag{2}$$

研究背景：$D \to K^0_S\pi^0$ 过程的物理与 CP 破坏

- 在标准模型下，$D \to K^0_S\pi^0$ 可通过卡比伯允许与双压低的**树图**发生，它们之间的**干涉**是重要的研究对象
- 此外，中性 D 介子与次级中性 K 介子之间的**双混合**机制会是 CP 破坏的重要来源
- 当 CP 完全破坏（或 EPR 量子关联破坏）时，**经典**图像会给出

$$N_{\text{classical}} = N_{D^0\bar{D}^0}\mathcal{B}_{D^0}\mathcal{B}_{\bar{D}^0} \tag{3}$$

- 约有 10^4 个信号事例，但由于 CP 守恒导致的 EPR 禁戒，该过程会被严重压低，我们可通过搜寻该过程来寻找可能的 **CP 破坏**乃至 **EPR 破坏**来源



报告提纲

1. 研究背景
2. 数据集与实验方法
3. 事例选择
4. 数据分析与误差研究
   - 挑选条件优化与效率研究
   - 系统误差研究
5. 似然度扫描与 90% 置信度上限
6. 总结

数据集与实验方法

- BESIII 数据：BESIII 于 $\sqrt{s}$=3.773 GeV 质心能量收集、积分亮度为 20.28 fb^{-1} 的正负电子对撞数据
- 信号蒙特卡洛样本（Signal MC）：用于研究信号事例挑选效率，共计 1M 事例数，事例拓扑 $\psi(3770) \to D^0\bar{D}^0 \to (K^0_S\pi^0)(K^0_S\pi^0)$
- 调和蒙特卡洛样本（Inclusive MC）：用于进行本底评估、误差分析与输入输出检查，约为 40 倍真实数据的事例数
- **半盲分析**：在进行正式分析之前，我们先于一组较小的数据集（2.93 fb^{-1}）上进行分析，确定具体的实验方法。之后将该方法应用于全数据样本，以避免人为偏差。本报告介绍全数据上的最终结果

Table 3. Numerical results for DATA I, DATA II, and DATA III along with the data collected from 2010 to 2011 (DATA 2010) [27], number of observed events ($N_{\rm obs}$), integrated luminosity ($\mathcal{L}$), and numbers of $D^0\bar{D}^0$ ($N_{D^0\bar{D}^0}$) and D^+D^- ($N_{D^+D^-}$).

Sample	$N_{\rm obs}$ (10^6)	$\mathcal{L}$ /fb^{-1}	$N_{D^0\bar{D}^0}$ (10^6)	$N_{D^+D^-}$ (10^6)
DATA I	450.97	4.995 ± 0.019	18.06 ± 0.21	14.14 ± 0.16
DATA II	736.88	8.157 ± 0.031	29.49 ± 0.34	23.08 ± 0.25
DATA III	379.45	4.191 ± 0.016	15.15 ± 0.18	11.86 ± 0.13
DATA 2010 [27]	283.95	2.932 ± 0.014	10.60 ± 0.13	8.30 ± 0.09
TOTAL	1851.25	20.275 ± 0.077	73.29 ± 0.84	57.38 ± 0.61

报告提纲

1. 研究背景
2. 数据集与实验方法
3. 事例选择
4. 数据分析与误差研究
   - 挑选条件优化与效率研究
   - 系统误差研究
5. 似然度扫描与 90% 置信度上限
6. 总结

事例选择

- 好带电径迹挑选
  - MDC 击中点重建
  - $|R_z| < 20.0$cm;
- 好光子挑选 (γ)
  - EMC 中沉积能量重建
  - θ>10°;
  - $E > 0.025$GeV, $|\cos\theta|$ <0.8 (Barrel);
  - $E > 0.05$GeV, 0.86< $|\cos\theta|$ <0.92 (Endcap);
  - 飞行时间 $0 < t_{\mathrm{TDC}} < 700$ns;
- K^0_S 介子重建
  - 通过一对相反电荷的径迹重建
  - 顶点拟合: $\chi^2 < 100$;
  - 衰变长度: $L/\sigma L > 2$;
  - 0.45< $M_{\pi\pi}$ <0.55 GeV/c^2;
- π^0 介子重建
  - 通过两个好光子 γ 重建且至少一个光子来自 MDC 桶部;
  - 1C 运动学拟合: $\chi^2 < 30$;
  - 0.115< $M_{\gamma\gamma}$ <0.150 GeV/c^2;

报告提纲

1. 研究背景
2. 数据集与实验方法
3. 事例选择
4. 数据分析与误差研究
   - 挑选条件优化与效率研究
   - 系统误差研究
5. 似然度扫描与 90% 置信度上限
6. 总结

报告提纲

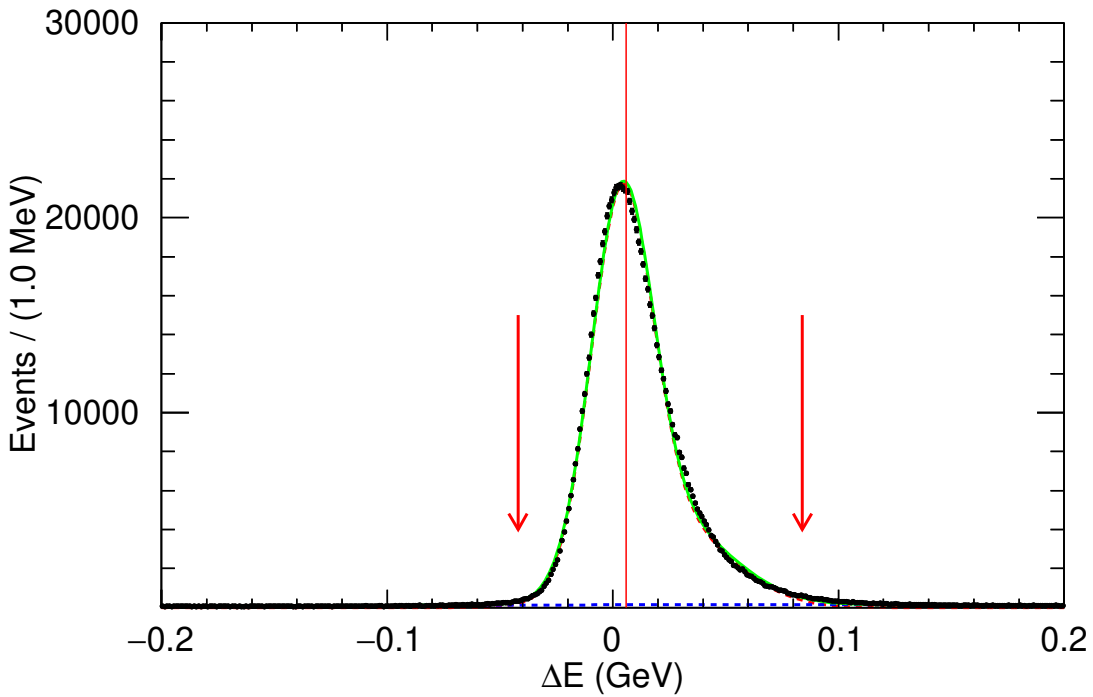
1. 研究背景
2. 数据集与实验方法
3. 事例选择
4. 数据分析与误差研究
   - 挑选条件优化与效率研究
   - 系统误差研究
5. 似然度扫描与 90% 置信度上限
6. 总结

数据分析：ΔE 观测量研究

- 由于在阈值处成对产生，信号 D 介子的能量应为束流能量的一半
- 定义观测量 ΔE

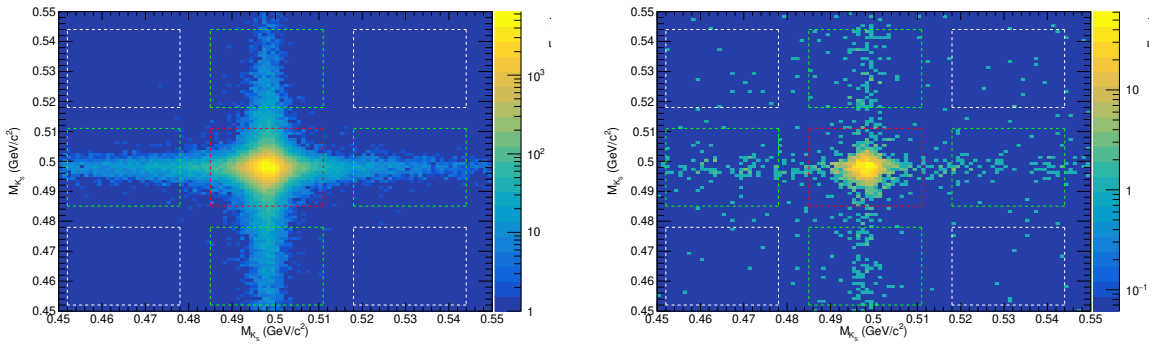
$$\Delta E = E_D - E_{\text{beam}} \tag{4}$$

- 信号事例中，重建的 D 介子 ΔE 应在零附近，信号 MC 研究发现 ΔE 形状不对称



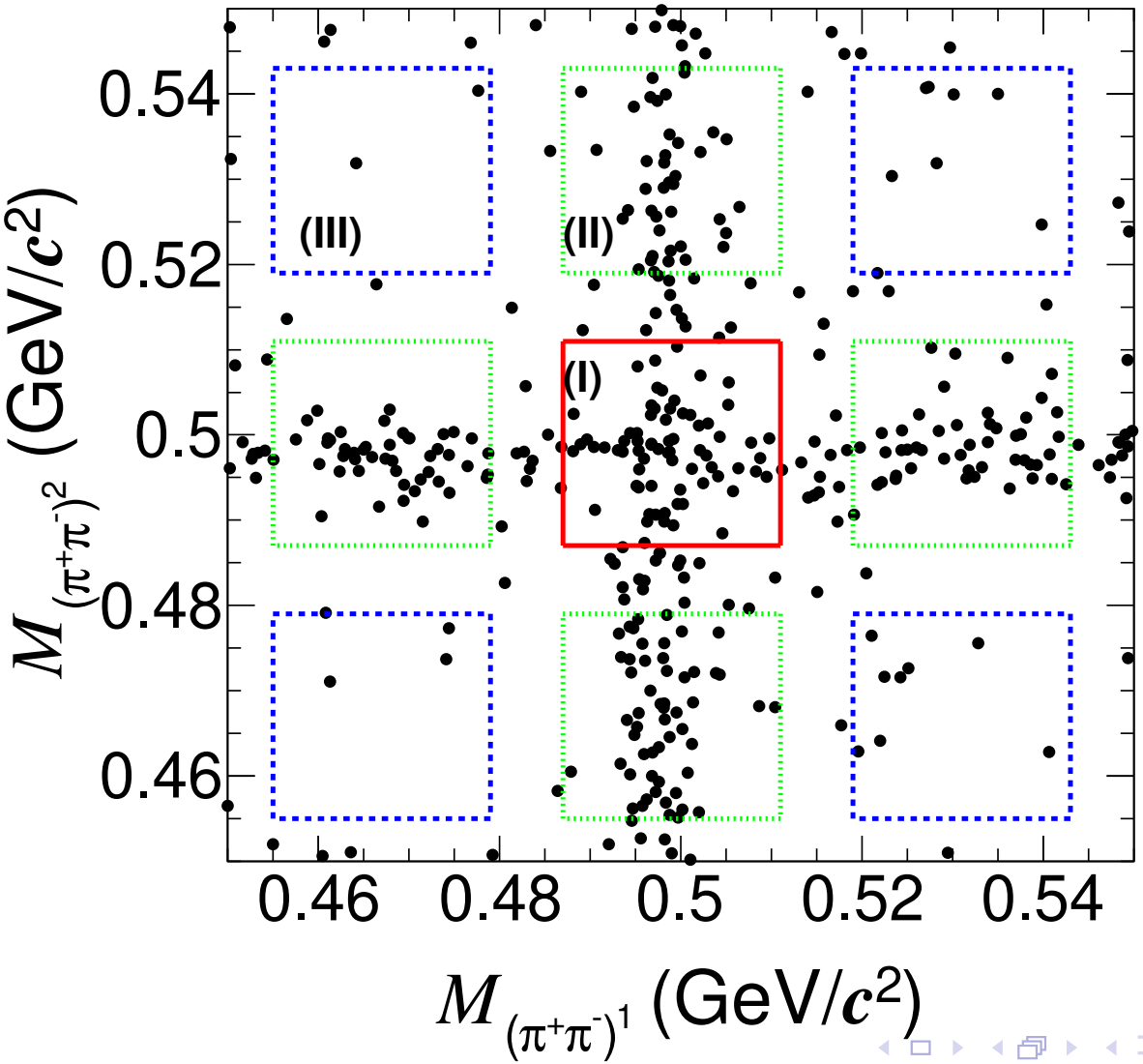
数据分析：二维 $M_{K_S^0}$ 分布

- 信号事例中，两侧 D 介子各自衰变至一个 K_S^0 介子，二维 K_S^0 介子不变质量分布可以帮助我们选出信号过程
- 信号区间选定为 (0.487,0.511) GeV/c^2
- 边带区间选定为 (0.455,0.479) 与 (0.519,0.543) GeV/c^2，用于评估来自非 K_S^0 的本底
- 二维 $M_{K_S^0}$ 分布上，可以定义**三个区域**（I、II、III），若区间内重建产额分别为 N_I, N_{II} 和 N_{III}，则信号产额为 $N_{\mathbf{obs}} = N_I - \frac{1}{2}N_{II} + \frac{1}{4}N_{III}$
- 下图为**信号 MC**（左）与**调和 MC**（右，包含信号过程）的结果，可以看到若信号过程存在，中心区域会有明显的事例累积



数据分析：二维 $M_{K_S^0}$ 分布

- 下图为**数据**中的分布，中心区域**没有**明显事例积累

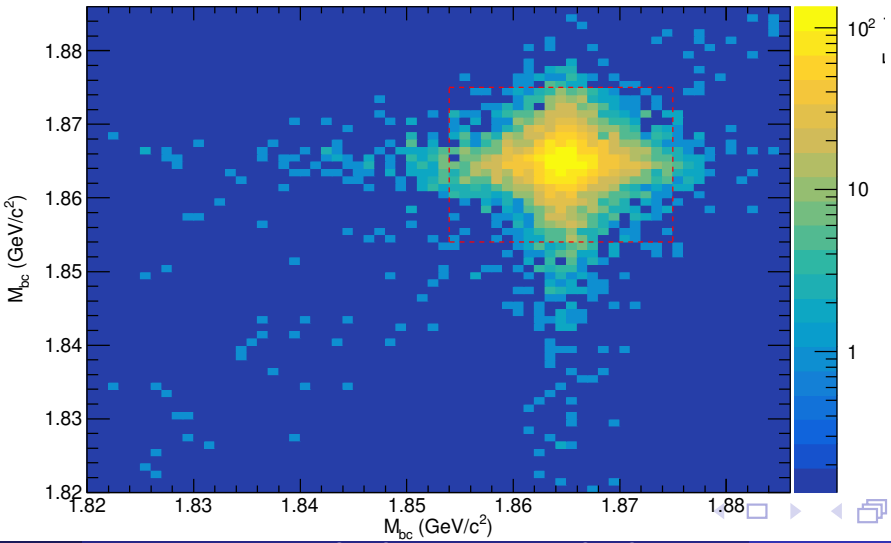


数据分析：二维 $M_{\rm bc}$ 分布

- 为进一步确定信号产额，我们对三个区域内的事例分别进行了**双侧** D 介子的 $M_{\rm bc}$ 观测量分析，定义如下

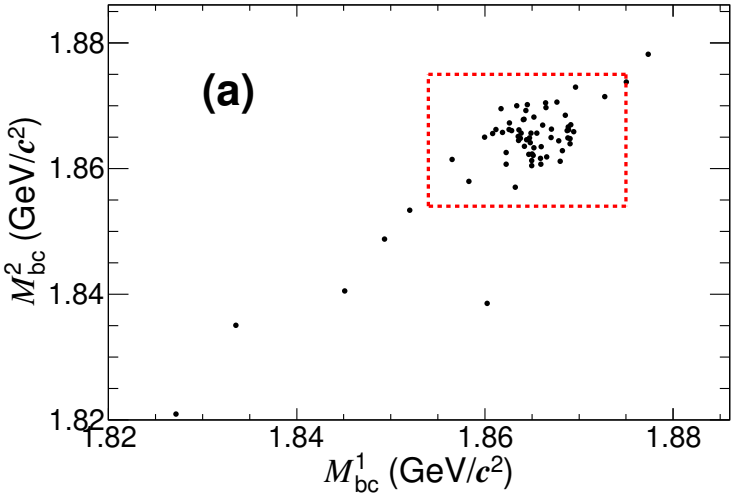
$$M_{\rm bc} = \sqrt{E_{\rm beam}^2 - |\vec{p}_D|^2 c^2} \tag{5}$$

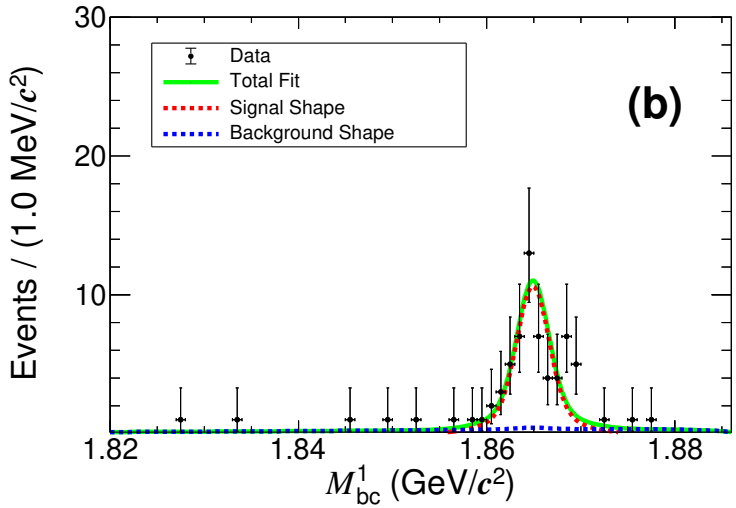
- 对调和 MC 的研究发现，该二维分布由**四类**事例贡献：
  Signal: 信号事例，分布于信号区域（图中方框）
  BKGI: 单侧 D 介子事例，分布呈横向条带
  BKGII: 另一侧 D 介子事例，分布呈纵向条带
  BKGIII: 辐射强子过程与其他，分布呈斜向条带

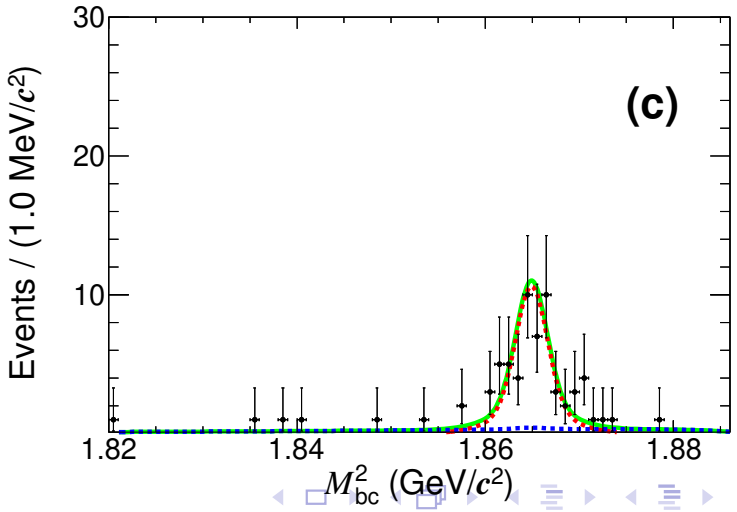


数据分析：二维 $M_{\rm bc}$ 拟合

- 数据中**区域 I** 内的 $M_{\rm bc}$ 分布以及拟合结果的投影图如下所示
- 数据中拟合可得 $N_{\rm I} = 53 \pm 8$

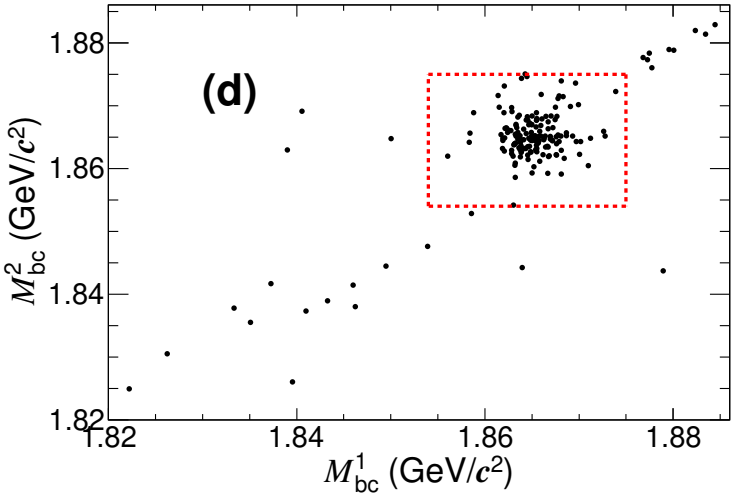


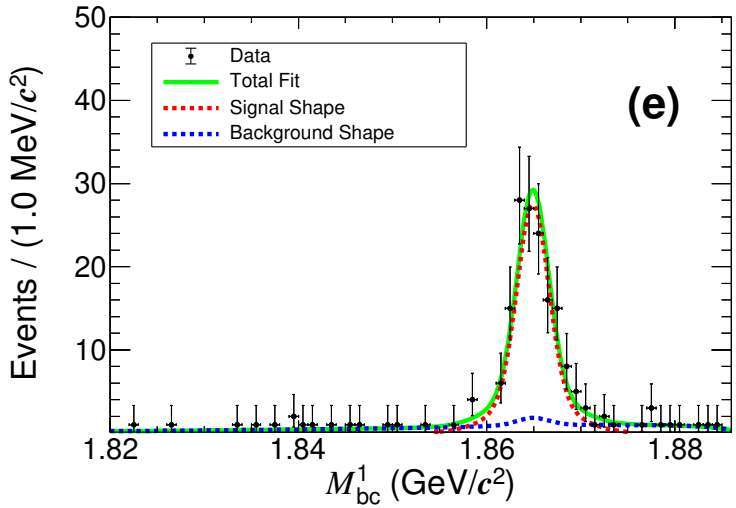


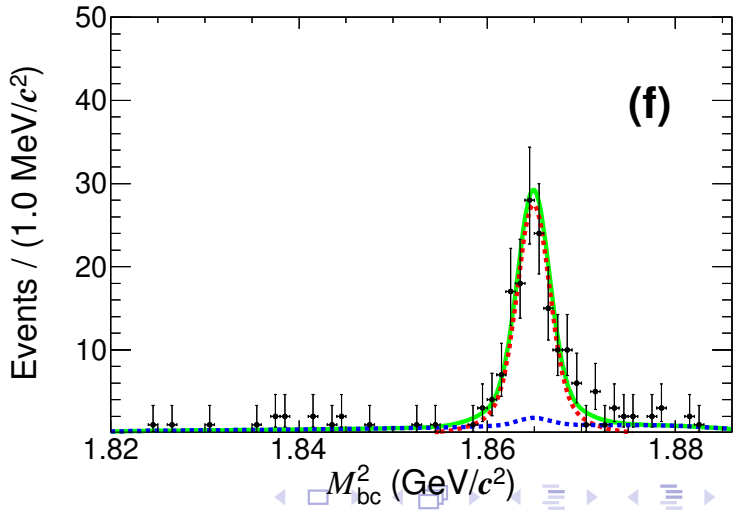


数据分析：二维 $M_{\rm bc}$ 拟合

- 数据中**区域 II** 内的 $M_{\rm bc}$ 分布以及拟合结果的投影图如下所示
- 数据中拟合可得 $N_{\rm II} = 144 \pm 12$

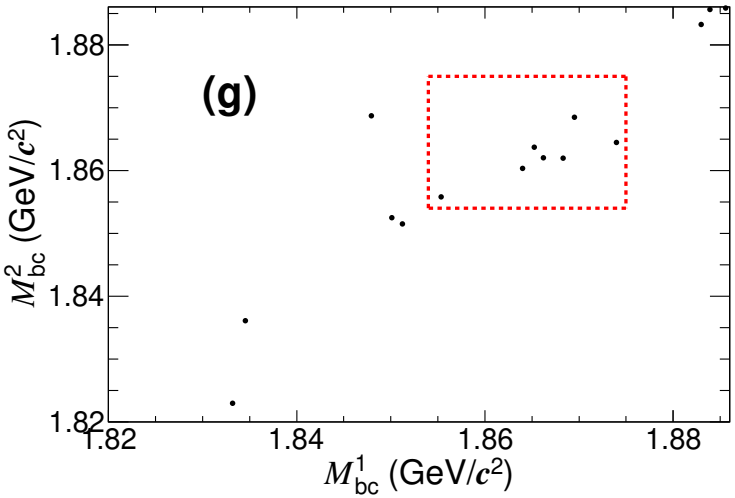


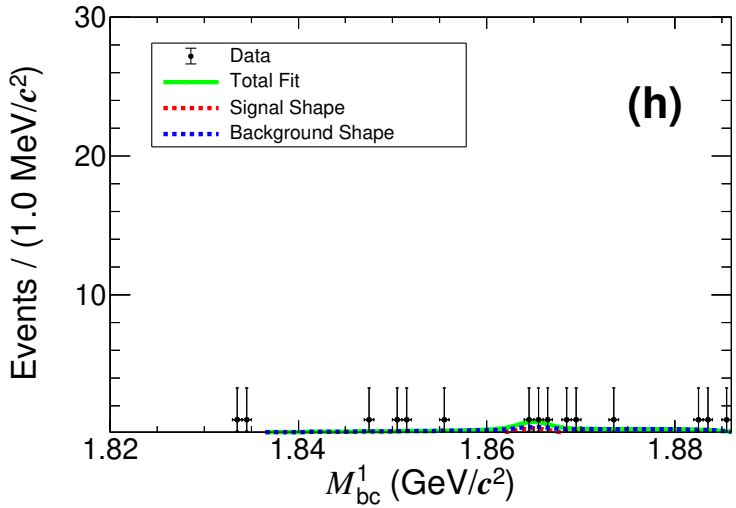


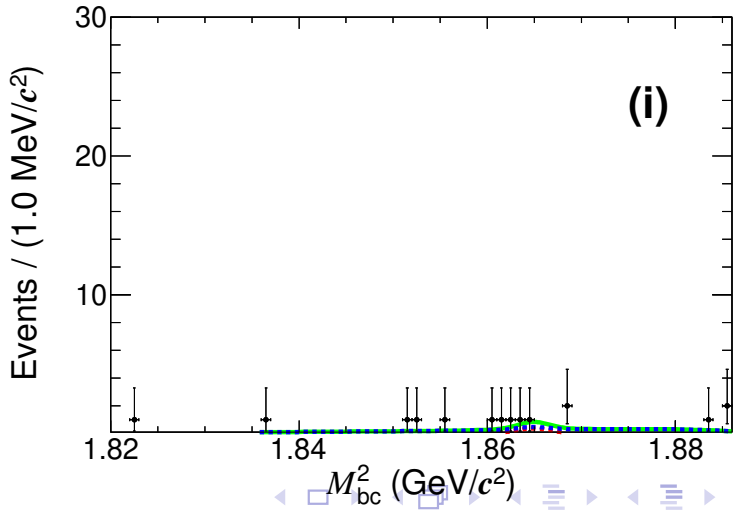


数据分析：二维 $M_{\rm bc}$ 拟合

- 数据中**区域 III** 内的 $M_{\rm bc}$ 分布以及拟合结果的投影图如下所示
- 数据中拟合可得 $N_{\rm III} = 2 \pm 2$







报告提纲

1. 研究背景
2. 数据集与实验方法
3. 事例选择
4. 数据分析与误差研究
   - 挑选条件优化与效率研究
   - 系统误差研究
5. 似然度扫描与 90% 置信度上限
6. 总结

系统误差研究：相乘性系统误差

- 对于上限研究，系统误差需要区分为**相乘性**与**相加性**误差，以更加真实地反映这些误差对结果的影响
- 相乘性误差主要影响信号的**挑选效率**，对结果产生的是乘积影响
- 本分析采用卷积修正的方式来考虑相乘性误差对似然度（Likelihood）曲线的影响

$$L\left(N_{\text{obs}}\right) \propto \int_0^1 L\left(N_{\text{obs}}\frac{\epsilon'}{\epsilon}\right) \exp\left[\frac{-\left(\epsilon'/\epsilon-1\right)^2}{2(\sigma_\epsilon)^2}\right] d\epsilon' \tag{6}$$

- 主要误差来源与评估方法为：

1 K^0_S 与 π^0 介子重建：该项误差主要通过研究 $D^0 \to K^0_S\pi^0$、$D^0 \to K^0_S\pi^0\pi^0$、$D^0 \to K^0_S\pi^0\pi^+\pi^-$ 与 $D^0 \to K^-\pi^+\pi^0$ 控制样本中分动量区间的数据 MC 重建效率差异来评估

系统误差研究：相乘性系统误差

2 ΔE 信号区间：该项误差通过变动信号区间对结果的影响来评估
3 蒙特卡洛统计：该项误差通过蒙特卡洛样本的统计误差估计
4 亮度与引用分支比误差：通过引用数值给出的误差估计

- 最终相乘性误差评估总结如下

来源	误差影响 (%)
K^0_S 重建	1.5
π^0 重建	1.7
ΔE 信号区间	1.3
蒙特卡洛统计	0.2
亮度误差	0.5
次级分支比引用	0.2
相乘性误差	2.7

系统误差研究：相加性系统误差

- 相加性误差直接影响**信号产额**，通常会对最终结果起到主导影响
- 主要误差来源与评估方法为：

1. 信号形状：该项误差通过将信号形状变更为双高斯后结果的变化来评估
2. 本底形状：该项误差通过变动本底函数的截断点对结果的影响来评估
3. N_{obs} 估计方法：通过对 40 组不带信号的调和 MC 样本进行与数据相同的分析，对结果进行 pull 分布拟合进行评估

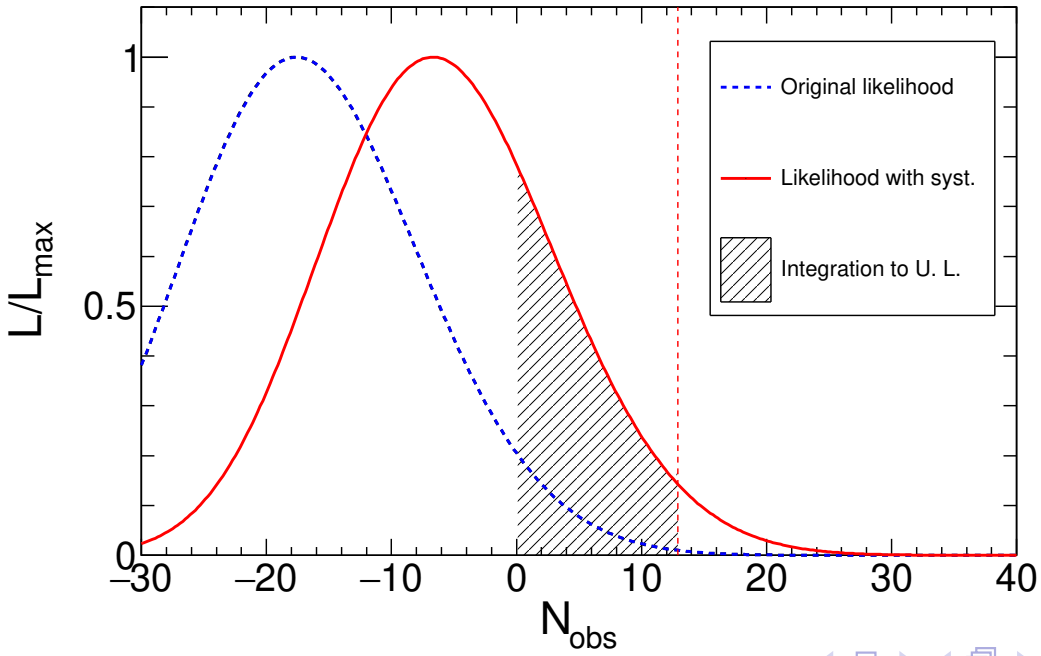
来源	误差影响 (事例数)
信号形状	3.5
本底形状	0
N_{obs} 估计方法	10.3
相加性误差	10.9

报告提纲

1. 研究背景
2. 数据集与实验方法
3. 事例选择
4. 数据分析与误差研究
   - 挑选条件优化与效率研究
   - 系统误差研究
5. 似然度扫描与 90% 置信度上限
6. 总结

似然度扫描与 90% 置信度上限

- 根据 $N_{\rm obs} = N_{\rm I} - \frac{1}{2}N_{\rm II} + \frac{1}{4}N_{\rm III}$，据测量结果**扫描**得到似然度曲线
- 结合评估得到的相乘性与相加性误差，最终得到修正后的似然度曲线，对该曲线从 0 开始积分 90% 面积对应的 $N_{\rm obs}$ 即为 90% 置信度的事例数上限为 12.9
- 计算可得对应的截面与联合分支比上限分别为
  $\sigma_{\rm obs}[e^+e^- \to D^0\bar{D}^0 \to (K^0_S\pi^0)(K^0_S\pi^0)] < 7.37$ fb
- $\mathcal{B}[(D^0\bar{D}^0)_- \to (K^0_S\pi^0)(K^0_S\pi^0)] < 2.04 \times 10^{-6}$



报告提纲

1. 研究背景
2. 数据集与实验方法
3. 事例选择
4. 数据分析与误差研究
   - 挑选条件优化与效率研究
   - 系统误差研究
5. 似然度扫描与 90% 置信度上限
6. 总结

总结

- 基于 BESIII 探测器在 $D^0\bar{D}^0$ 阈值 $\sqrt{s} = 3.773$ GeV 处收集的，积分亮度约 20.28 fb^{-1} 的数据，我们对 $e^+e^- \to \psi(3770) \to D^0\bar{D}^0 \to (K^0_S\pi^0)(K^0_S\pi^0)$ 过程进行了**首次**搜寻并给出了其**截面与 CP 关联** D 介子对联合分支比的上限，在**小于** 10^{-2} 的水平上检验了该过程中的 CP 破坏
- 这是首次通过 D 介子 CP 量子关联对 CP 破坏的研究，该方法在未来可能**推广应用**至其他过程，可能为未来 CP 破坏的研究打开新的窗口
- $\sigma_{\text{obs}}[e^+e^- \to D^0\bar{D}^0 \to (K^0_S\pi^0)(K^0_S\pi^0)] < 7.37$ fb
- $\mathcal{B}[(D^0\bar{D}^0)_- \to (K^0_S\pi^0)(K^0_S\pi^0)] < 2.04 \times 10^{-6}$
- 分析结果目前已提交申请 BESIII 合作组**发言人审核（REV-761）**

感谢各位老师和同学!!!

备用

PDG 分支比信息和 DD 产额

- $D^0\bar{D}^0$ yields in Round03-17 data is $(7.33 \pm 0.08) \times 10^7$
- BF$(D^0 \to K^0_S\pi^0) = (1.240 \pm 0.022)\%$
- BF$(K^0_S \to \pi^+\pi^-) = (69.20 \pm 0.05)\%$
- BF$((\pi^0 \to \gamma\gamma) = (98.823 \pm 0.034)\%$

报告人简介

- 李晓宇，男，身份证号 530324199610030015
- 自 2023 年 9 月起为中国科学院高能物理研究所与中国高等科学技术中心的博士后研究助理
- 2014-2018 年在中国科学院大学攻读本科
- 2018-2023 年在中国科学院高能物理研究所攻读博士学位
- 2019 年正式加入 BESIII 合作组，2020 年成为列名作者