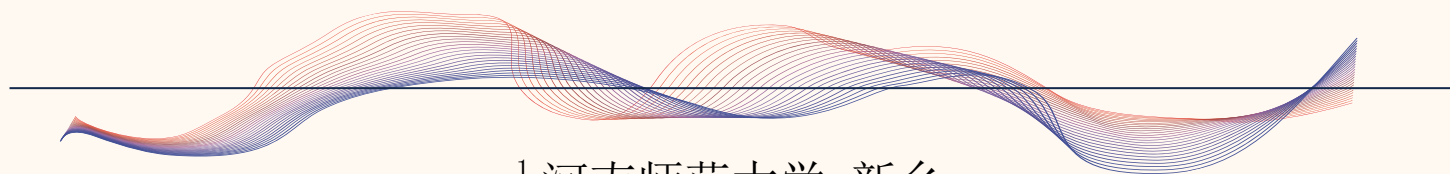


北京谱仪上 $h_c \rightarrow p \bar{p} X (X = \pi^+ \pi^- \pi^0, \eta, \pi^0)$ 的 首次测量

申请人：朱 林¹

指导老师：姬清平¹，王至勇²



¹ 河南师范大学, 新乡

² 中国科学院高能物理研究所, 北京

2022年4月

目录

- 论文选题的背景和意义
- 数据分析
 - $h_c \rightarrow p\bar{p}\pi^+\pi^-\pi^0$
 - $h_c \rightarrow p\bar{p}\eta$
 - $h_c \rightarrow p\bar{p}\pi^0$
- 系统误差
- 总结与展望

论文选题的背景和意义

a) P-波自旋单态, $h_c(^1P_1)$, 无法由 e^+e^- 对撞直接产生; 2005年, 费米实验室E835实验通过 $p\bar{p} \rightarrow h_c \rightarrow \gamma\eta_c$ 首次发现了 h_c [1], 随后CLEO-c通过 $\psi(3686) \rightarrow \pi^0 h_c, h_c \rightarrow \gamma\eta_c$ 过程给出了证实[2]。对 h_c 的研究可以帮助我们理解低能区的量子色动力学的表现, 以及进一步理解 h_c 的性质。

b) 如表所示, 在实验上 h_c 仍有接近一半的衰变模式是未知的。并且这些已知衰变模式的末态大都是轻强子 π, K 等, 含有重子末态的过程相对罕见。

c) 通过 $p\bar{p}$ 对撞得到 h_c 事例的方法存在截面小, 本底高的缺点; 故而在粲阈下只能通过 $\psi(3686) \rightarrow \pi^0 h_c$ 的强跃迁衰变来得到 h_c , 然而这种模式的相空间非常小, 因此 π^0 的动量很小, 衰变的光子很软, 会使得探测效率很低, 且本底较高。

衰变模式	分支比($h_c \rightarrow X$)	参考文献
$\gamma\eta_c$	$\sim 50\%$	PRD 72. 032001(2005)
$\gamma\eta$	$(4.7 \pm 2.1) \cdot 10^{-4}$	PRL 116. 251802 (2016)
$\gamma\eta'$	$(1.5 \pm 0.4) \cdot 10^{-3}$	
$\pi^+\pi^-\pi^0$	$(1.6 \pm 0.4 \pm 0.2) \cdot 10^{-3}$	PRD 99. 072008 (2019)
$2(\pi^+\pi^-\pi^0)$	$(7.44 \pm 0.94 \pm 1.52) \cdot 10^{-3}$	
$3(\pi^+\pi^-\pi^0)$	$(4.7 \pm 2.2 \pm 1.1) \cdot 10^{-3}$	
$p\bar{p}\pi^+\pi^-$	$(2.9 \pm 0.3 \pm 0.3) \cdot 10^{-3}$	
$p\bar{p}$	$< 1.5 \cdot 10^{-4}$	PRD 88. 112001 (2013)
$K^+K^-\pi^+\pi^-\pi^0$	$(3.33 \pm 0.6 \pm 0.6) \cdot 10^{-3}$	PRD 102. 112007 (2020)
$K_S^0 K^\pm \pi^\mp \pi^+ \pi^-$	$(2.8 \pm 0.9 \pm 0.6) \cdot 10^{-3}$	
$\pi^+\pi^-\pi^0\eta$	$(7.2 \pm 1.8 \pm 1.4) \cdot 10^{-3}$	
$K^+K^-\eta$	$< 5.8 \cdot 10^{-4}$	
...	...	

Red: Sig. $> 5\sigma$ (6 channels $\sim 52.8\%$) Blue: $3\sigma < \text{Sig.} < 5\sigma$ (3 channels $\sim 1.05\%$)

d) BESIII在09、12年共采集了448 M的 $\psi(3686)$ 数据样本,且 $B(\psi(3686) \rightarrow \pi^0 h_c) = (8.4 \pm 1.3) \times 10^{-4}$, 这意味其中有约40万的 h_c 事例。本分析中我们通过该强跃迁衰变过程得到 h_c 事例, 对含重子末态的 $h_c \rightarrow p\bar{p}X(X = \pi^+\pi^-\pi^0, \eta, \pi^0)$ 进行了寻找。

[1] M. Andreotti et al., [E-835 Collaboration], Phys. Rev. D 72, 032001(2005).
[2] S. Dobbs et al., [CLEO Collaboration], Phys. Rev. Lett. 101, 182003(2008)

数据样本

Data set	Number of events		BOSS version
(09+12) $\psi(3686)$ data	4.48×10^8		6.6.4.p03
(09+12) $\psi(3686)$ inclusive MC	5.06×10^8		6.6.4.p03
PHSP MC	5×10^5 for each channel	$h_c \rightarrow p\bar{p}\pi^+\pi^-\pi^0(\text{I})$	6.6.4.p03
		$h_c \rightarrow p\bar{p}\eta(\text{II})$	
		$h_c \rightarrow p\bar{p}\pi^0(\text{III})$	

$$h_c \rightarrow p \bar{p} \pi^+ \pi^- \pi^0$$

事例初选条件

好带电径迹挑选

- $|R_{xy}| < 1\text{cm}, |R_z| < 10\text{cm}$
- $|\cos\theta| < 0.93$
- $N = 4, N_m = N_p = 2$

粒子鉴别

- $\text{Prob}(p) > \text{Prob}(\pi), \text{Prob}(p) > \text{Prob}(K)$
- $\text{Prob}(\pi) > \text{Prob}(p), \text{Prob}(\pi) > \text{Prob}(K)$
- $N_p = N_{\bar{p}} = N_{\pi^+} = N_{\pi^-} = 1$

顶点拟合

- 对挑选出的带电径迹做顶点拟合。

好光子挑选

- $0 \leq \text{TDC} \leq 14$
- 桶部: $E > 0.025 \text{ GeV}, |\cos\theta| < 0.8$
- 端盖: $E > 0.050 \text{ GeV}, 0.86 < |\cos\theta| < 0.92$
- $N_\gamma \geq 4$

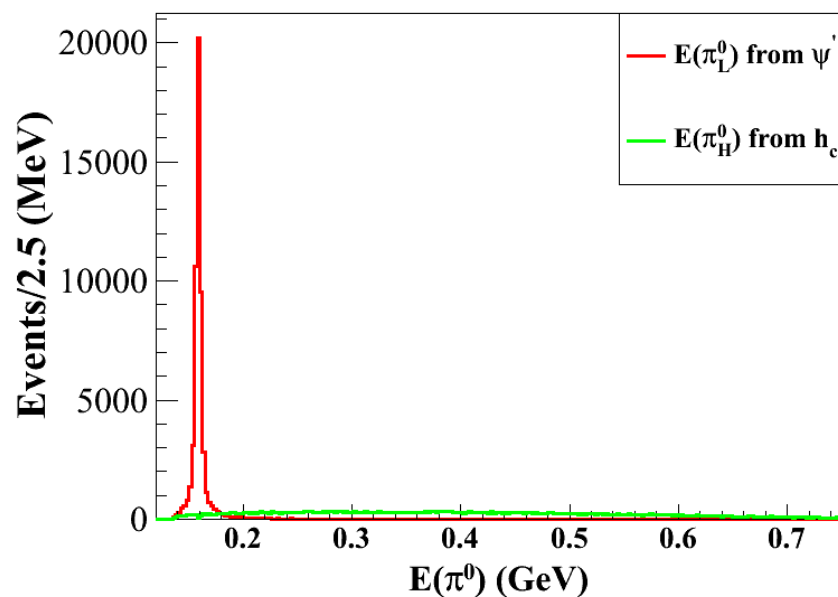
1-C π^0 运动学拟合

- 循环光子数并取其中的任意两个光子的四动量使他们的不变质量约束在 π^0 质量上

6-C 运动学拟合

- 在 $\psi(3686) \rightarrow p\bar{p}\pi^+\pi^-\gamma\gamma\gamma$ 假设下,对通过挑选要求的带电径迹和光子做运动学拟合,要求共振态 $\psi(3686)$ 能动量守恒和两个 π^0 的不变质量做了约束。

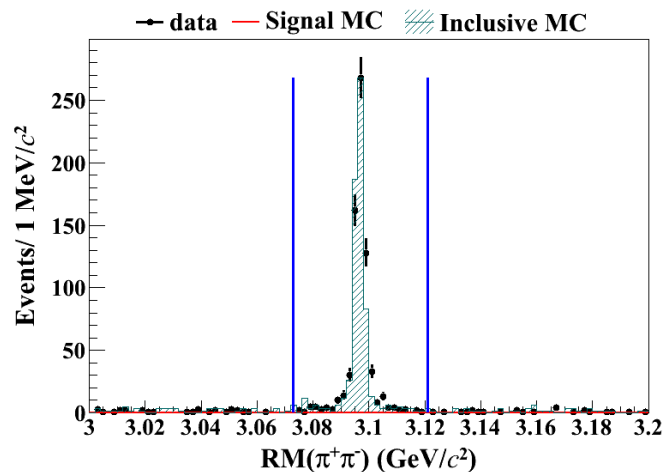
π^0 能量的分布



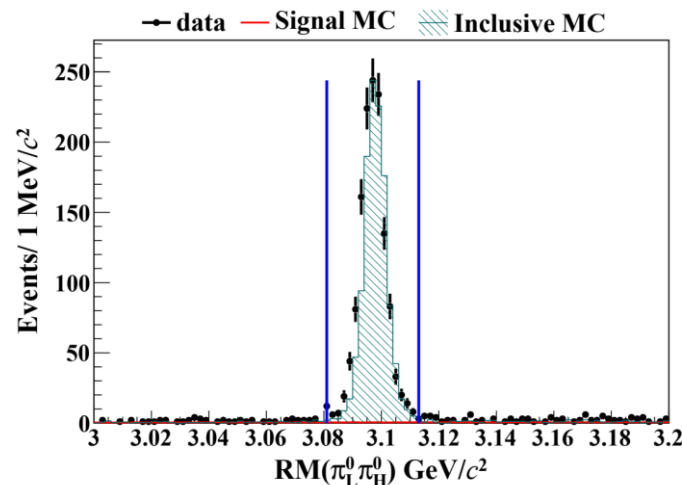
- 可以发现 $\psi(3686)$ 产生的 π^0 的能量要小于来自 h_c 的。
- 我们根据能量的高低分别将能量低的标记为 π_L^0 ，能量高的标记为 π_H^0 。

本底研究I: $\psi(3686) \rightarrow \pi\pi J/\psi$ & $\eta/\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0_L$ 的压低

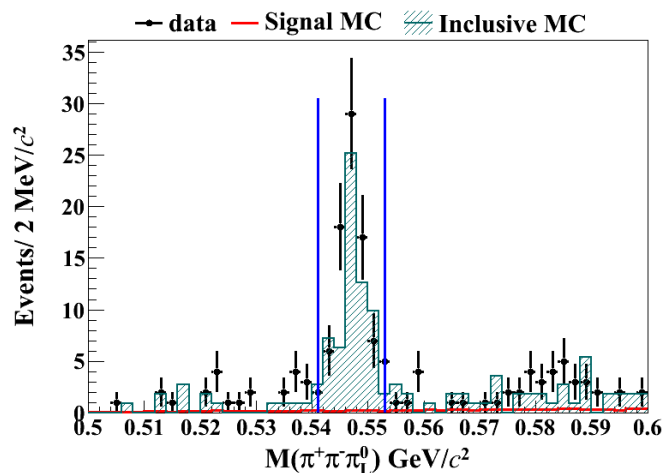
□ $|\text{RM}(\pi^+\pi^-) - m(J/\psi)| > 15 \text{ MeV}/c^2$



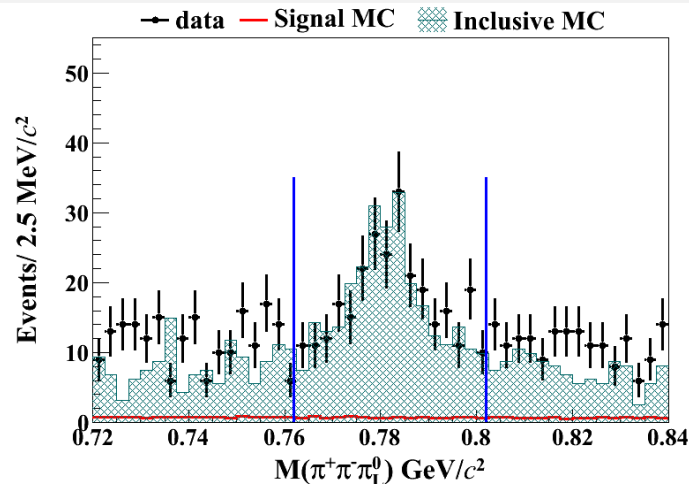
□ $|\text{RM}(\pi_L^0\pi_H^0) - m(J/\psi)| > 16 \text{ MeV}/c^2$



□ $|\text{M}(\pi^+\pi^-\pi_L^0) - m(\eta)| > 6 \text{ MeV}/c^2$



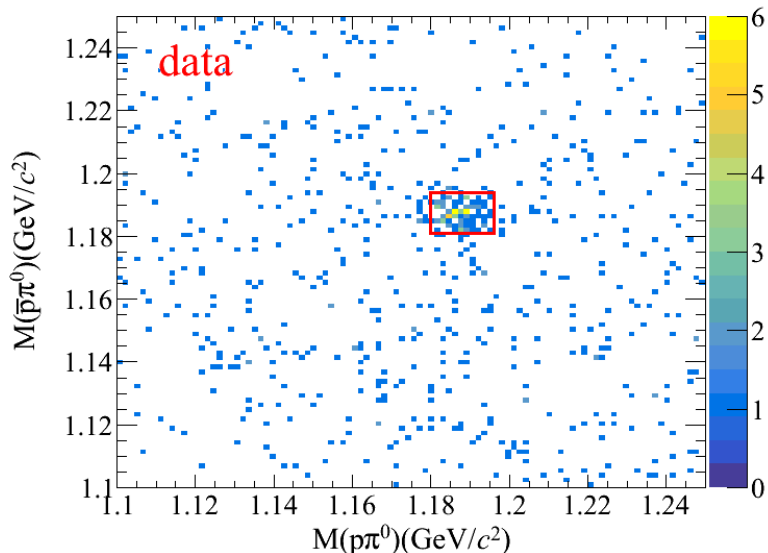
□ $|\text{M}(\pi^+\pi^-\pi_L^0) \notin (786, 802) \text{ MeV}/c^2$



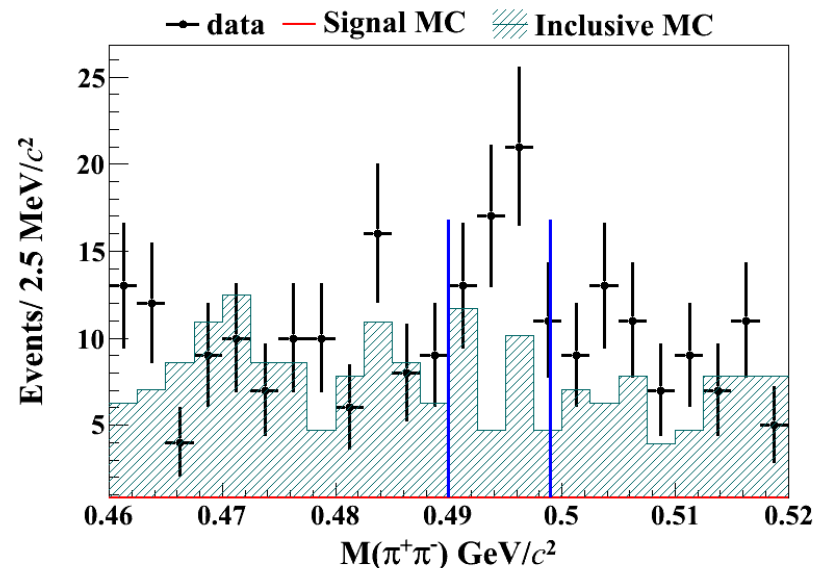
*绿色阴影的直方图代表单举MC样本(已去除信号道过程)。在后面的图中, 如无特殊声明, 都代表同样的类型。

本底研究II: $\Sigma^+\bar{\Sigma}^-$ 重子对等本底的压低

□ $!(M_{p\pi^0} \in (1180, 1196) \&\& M_{\bar{p}\pi^0} \in (1.181, 1.194)) \text{ MeV}/c^2$



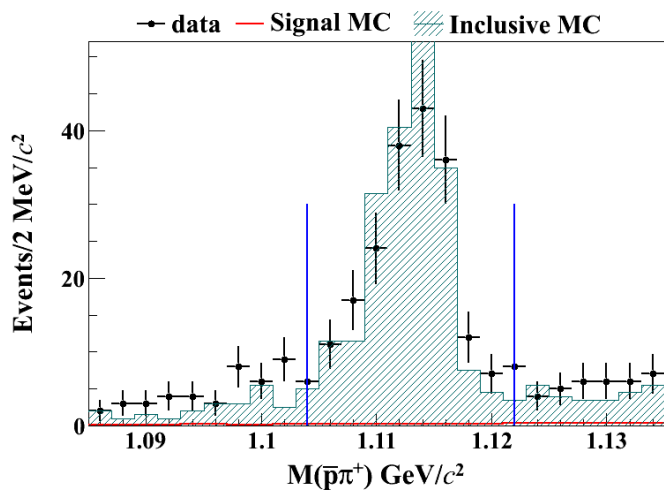
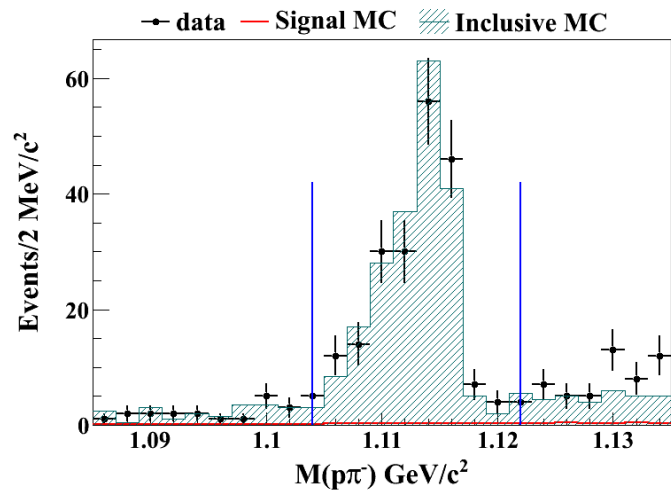
□ $M_{\pi^+\pi^-} \notin (490, 499) \text{ MeV}/c^2$



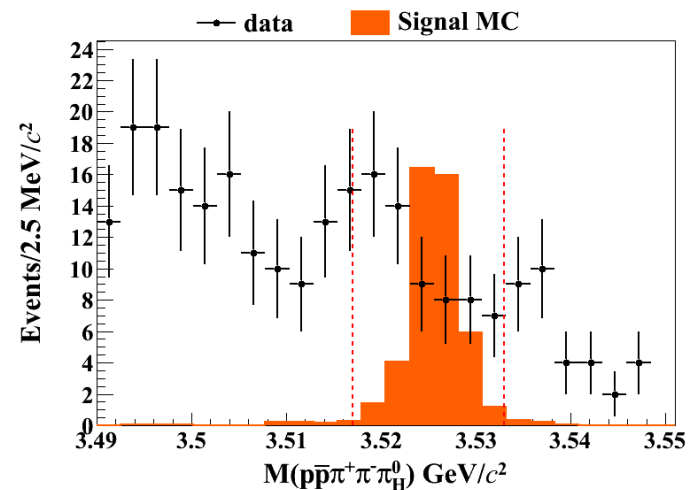
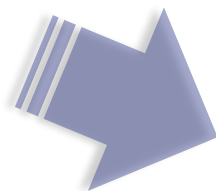
- 本分析中末态有两种可能的 $p\pi^0/\bar{p}\pi^0$ 组合, 即:
 $p\pi_L^0/\bar{p}\pi_H^0$ 或 $p\pi_H^0/\bar{p}\pi_L^0$ 。我们通过循环候选事例, 找出满足下式, 即最接近 Σ 中心质量 m_Σ 的
 $p\pi^0/\bar{p}\pi^0$ 组合并保存下来供进一步分析使用:

$$\Delta = \sqrt{(M_{p\pi^0} - m_{\Sigma^+})^2 + (M_{\bar{p}\pi^0} - m_{\bar{\Sigma}^-})^2}$$

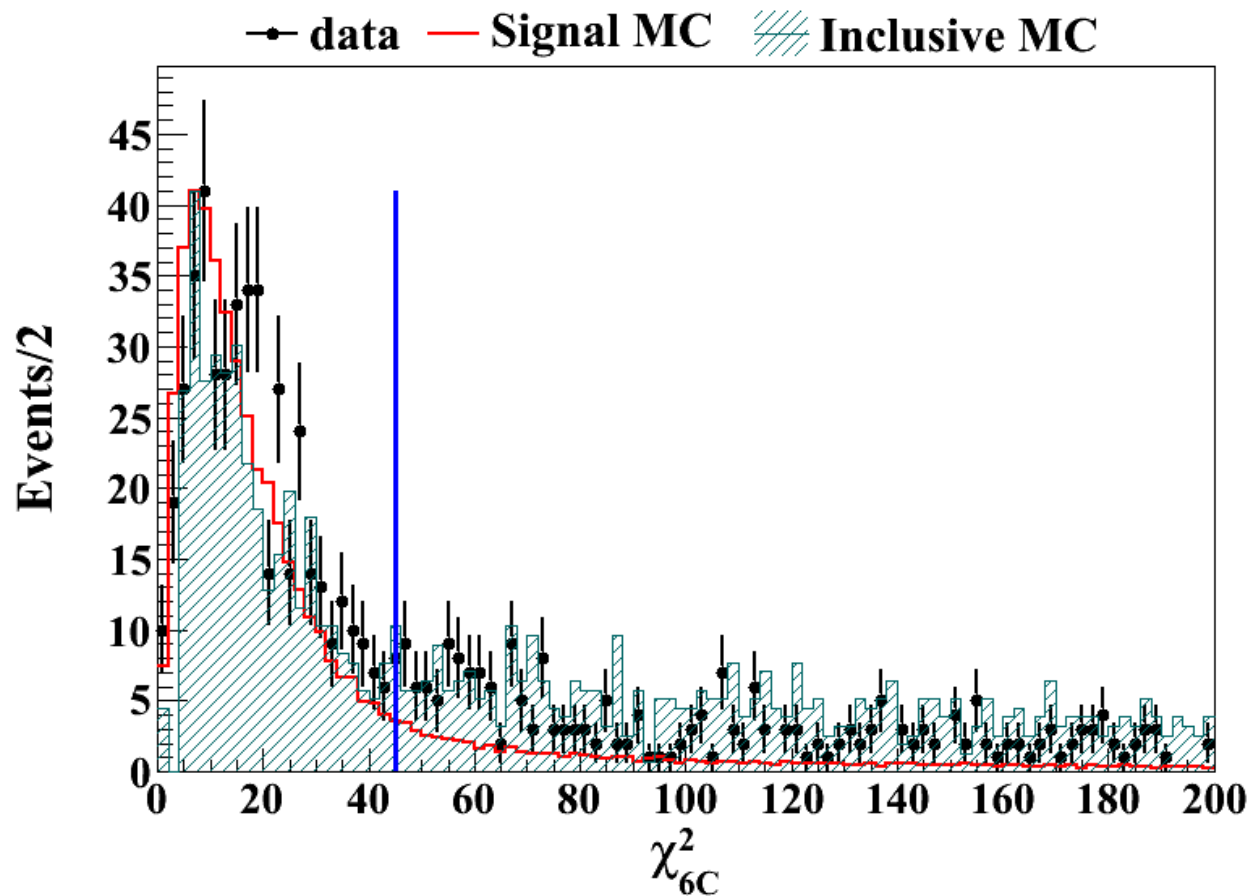
本底研究III: $\Lambda(\bar{\Lambda})$ 本底



- $(\Lambda + \bar{\Lambda})$ 信号区内事例在 $M(p\bar{p}\pi^+\pi^-\pi^0)$ 上的分布
- 数据中并无 h_c 的信号, 可知这些事例并非来自 h_c 相应的中间态过程



本底研究IV：运动学拟合的 χ^2 的限制

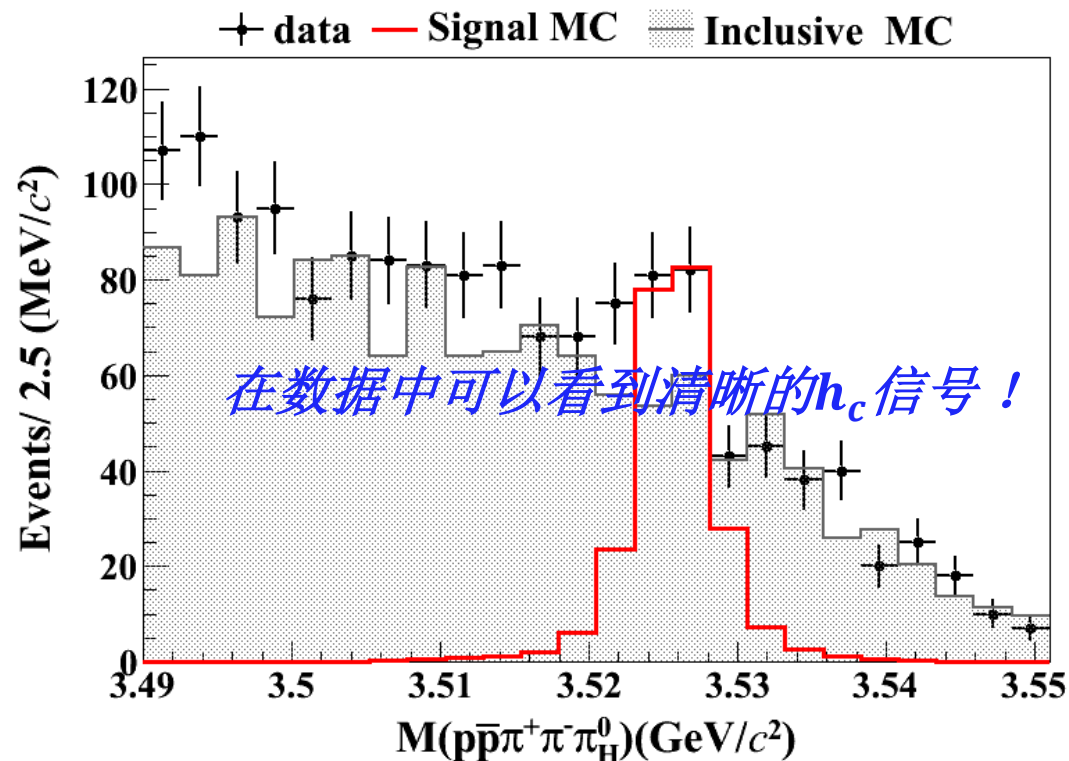
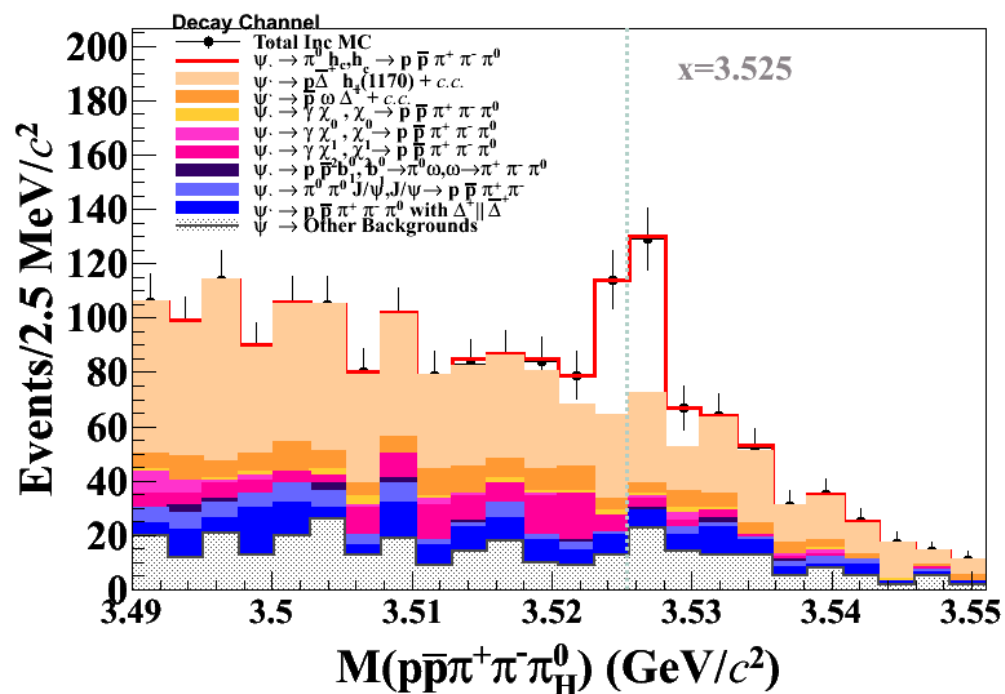


- $\chi^2 < 45$
- 为了压低来自多光子末态组合的可能背景，要求满足：
 - ✓ $\chi^2_{4C}(4\gamma p\bar{p} \pi^+\pi^-) < \chi^2_{4C}(3\gamma p\bar{p} \pi^+\pi^-)$
 - ✓ $\chi^2_{4C}(4\gamma p\bar{p} \pi^+\pi^-) < \chi^2_{4C}(5\gamma p\bar{p} \pi^+\pi^-)$

$M(p\bar{p}\pi^+\pi^-\pi_H^0)$ 的分布

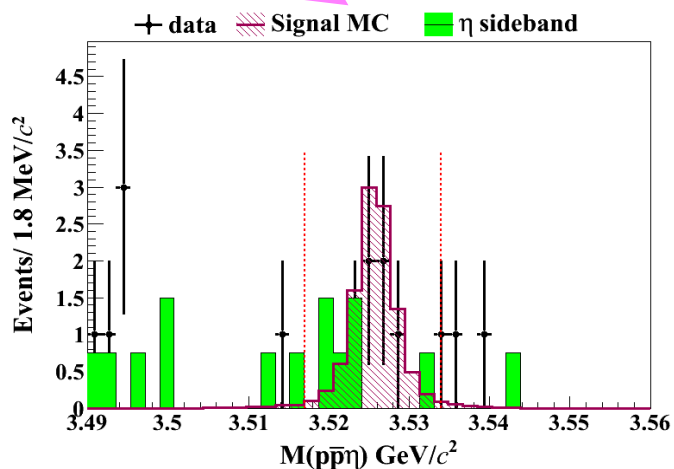
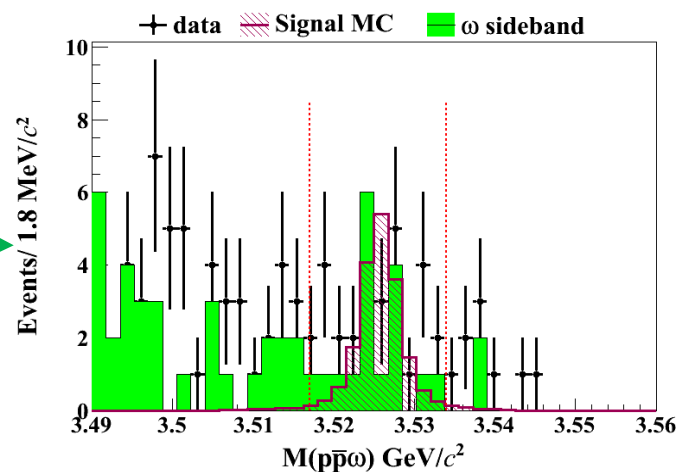
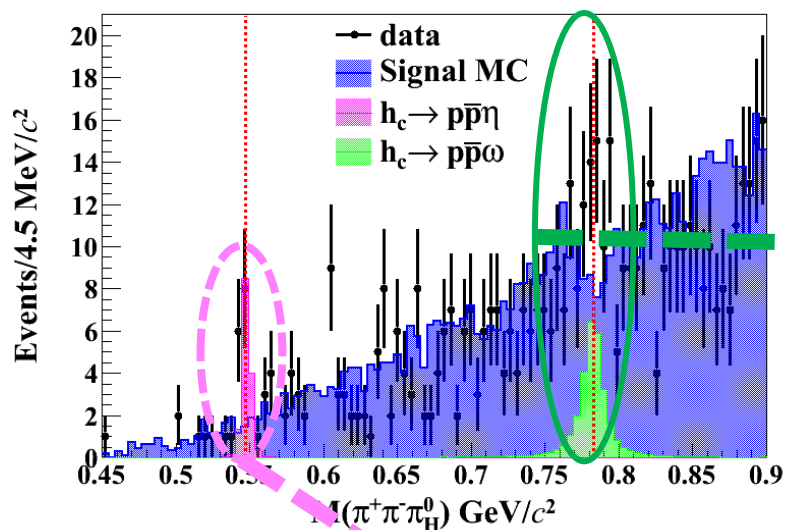
■ 如图示：单举MC经过终选条件后剩余事例的 $M(p\bar{p}\pi^+\pi^-\pi^0)$ 分布.

- 主要的背景道末态和信号道一致且难以再压低
- 无峰状背景贡献



中间态过程的研究(I)

η 、 ω 信号区内事例在 $M(p\bar{p}\pi^+\pi^-\pi^0)$ 上的分布:



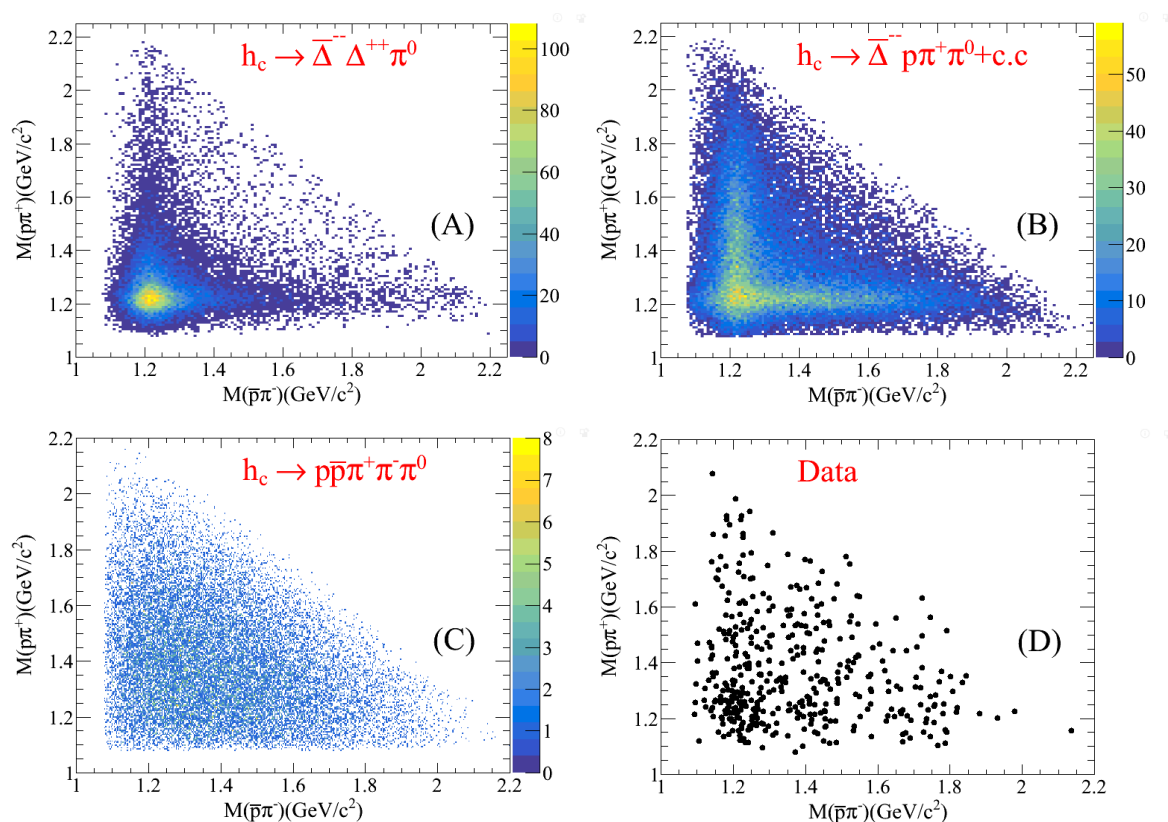
以上可能的中间态过程:

- $h_c \rightarrow p\bar{p}\eta$, $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi_H^0$
- $h_c \rightarrow p\bar{p}\omega$, $\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi_H^0$

数据中所含以上过程的事例非常少!

中间态过程的研究(II)

- 如图为三种可能的含单- Δ 或双- Δ 中间态过程的MC样本以及数据的 $M(p\pi^+)v.s.M(\bar{p}\pi^-)$ 散点图分布：



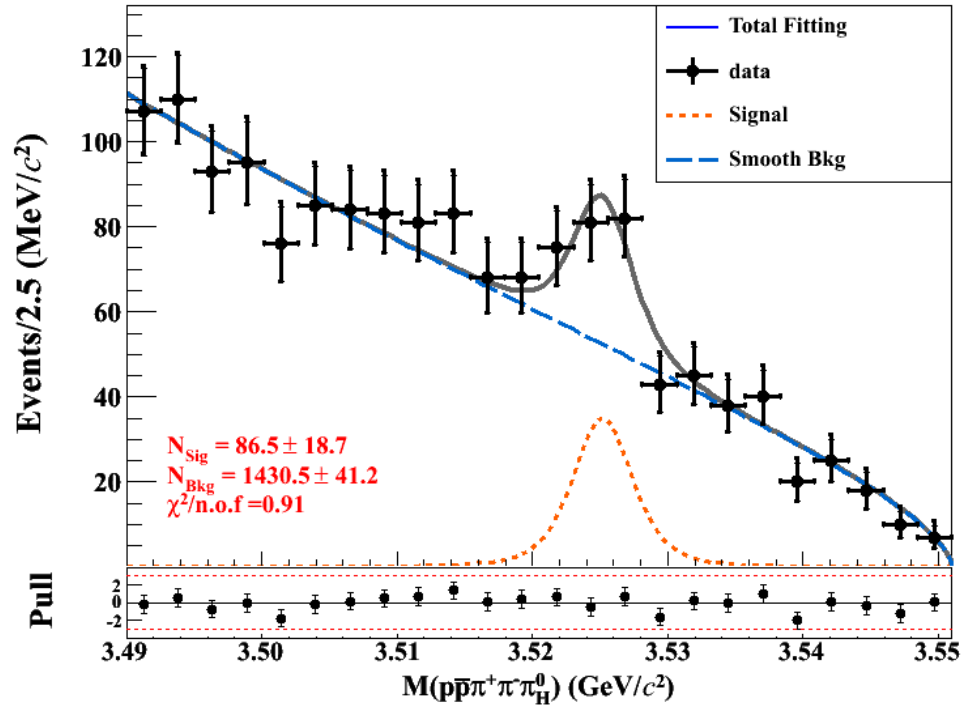
- 不同中间态过程及信号道（PHSP）的探测效率。

Mode	$\varepsilon(\%)$
$h_c \rightarrow p\bar{p}\pi^+\pi^-\pi^0$	6.0
$h_c \rightarrow \Delta^{++}\Delta^{--}\pi^0$	6.1
$h_c \rightarrow \Delta^{--}p\pi^+\pi^0$	5.9
$h_c \rightarrow \Delta^{++}\bar{p}\pi^-\pi^0$	6.0

根据以上研究，可以发现：

- 数据中的 h_c 事例可能不是纯粹的来自五体末态过程： $h_c \rightarrow p\bar{p}\pi^+\pi^-\pi^0$ ，还有可能来自含单- Δ 或双- Δ 的中间态过程的贡献。
- 以上这些可能中间态过程同五体相空间MC样本间探测效率差异非常小。

拟合数据 $M(p\bar{p}\pi^+\pi^-\pi^0)$



□ 拟合方程如下:

$$N_{\text{sig}} \cdot (\text{MCShape} \otimes \text{Gaussian}(m, \sigma)) + N_{\text{bkg}} \cdot \text{Argus}(r, s, p)$$

□ *通过控制样本 $\psi(3686) \rightarrow \eta J/\psi, J/\psi \rightarrow p\bar{p}\pi^+\pi^-\pi^0$ 得到数据和MC间分辨的差。根据拟合结果，我们得到该分辨差异为 $\sigma = 0.8 \text{ MeV}$.

$$\square B(h_c \rightarrow p\bar{p}\pi^+\pi^-\pi^0) = \frac{N^{\text{obs}}}{N_{\text{tot}} \cdot B(\psi(3686) \rightarrow \pi^0 h_c) \cdot B(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)^2 \cdot \varepsilon}$$

Mode	N^{obs}	$\varepsilon(\%)$	$B(\times 10^{-3})$
$h_c \rightarrow p\bar{p}\pi^+\pi^-\pi^0$	86.5 ± 18.7	6.0	3.84 ± 0.83

$$h_c \rightarrow p \bar{p} \eta$$

事例初选条件

好带电径迹挑选

- $|R_{xy}| < 1\text{cm}, |R_z| < 10\text{cm}$
- $|\cos\theta| < 0.93$
- $N = 2, N_m = N_p = 1$

粒子鉴别

- $\text{Prob}(p) > \text{Prob}(\pi), \text{Prob}(p) > \text{Prob}(K)$
- $\text{Prob}(\pi) > \text{Prob}(p), \text{Prob}(\pi) > \text{Prob}(K)$
- $N_p = N_{\bar{p}} = 1$

顶点拟合

- 对挑选出的带电径迹做顶点拟合。

好光子挑选

- $0 \leq TDC \leq 14$
- 桶部: $E > 0.025\text{ GeV}, |\cos\theta| < 0.8$
- 端盖: $E > 0.050\text{ GeV}, 0.86 < |\cos\theta| < 0.92$
- $N_\gamma \geq 4$

1-C $\pi^0(\eta)$ 运动学拟合

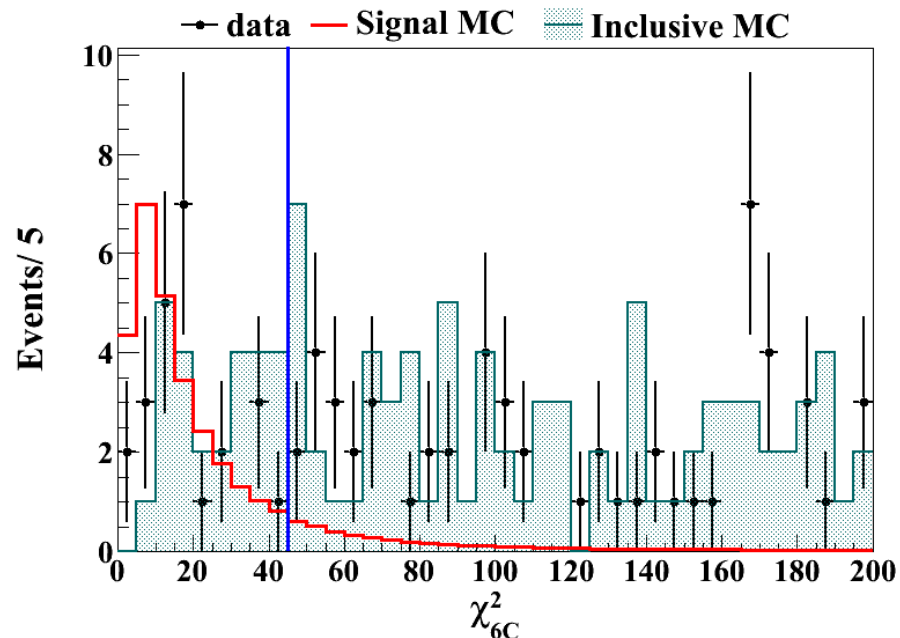
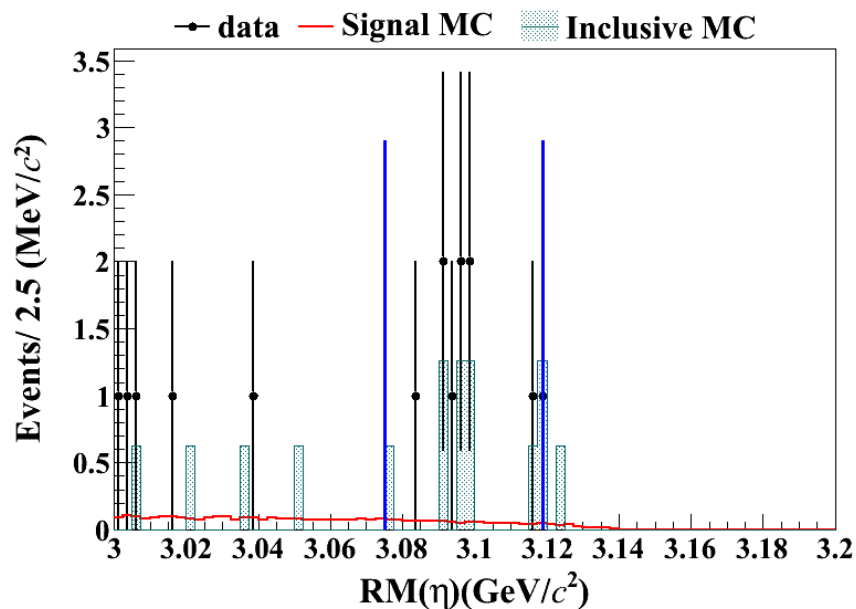
- 循环光子数并取其中的任意两个光子的四动量使它们的不变质量约束在 $\pi^0(\eta)$ 质量上

6-C 运动学拟合

- 在 $\psi(3686) \rightarrow p\bar{p}\gamma\gamma\gamma\gamma$ 假设下,对通过挑选要求的带电径迹和光子做运动学拟合,要求共振态 $\psi(3686)$ 能动量守恒和 π^0 、 η 的不变质量做了约束。

事例终选条件I: $\eta J/\psi$ 背景的压低&&运动学拟合 χ^2 的限制

□ $|\text{RM}(\eta) - m(J/\psi)| > 22 \text{ MeV}/c^2$

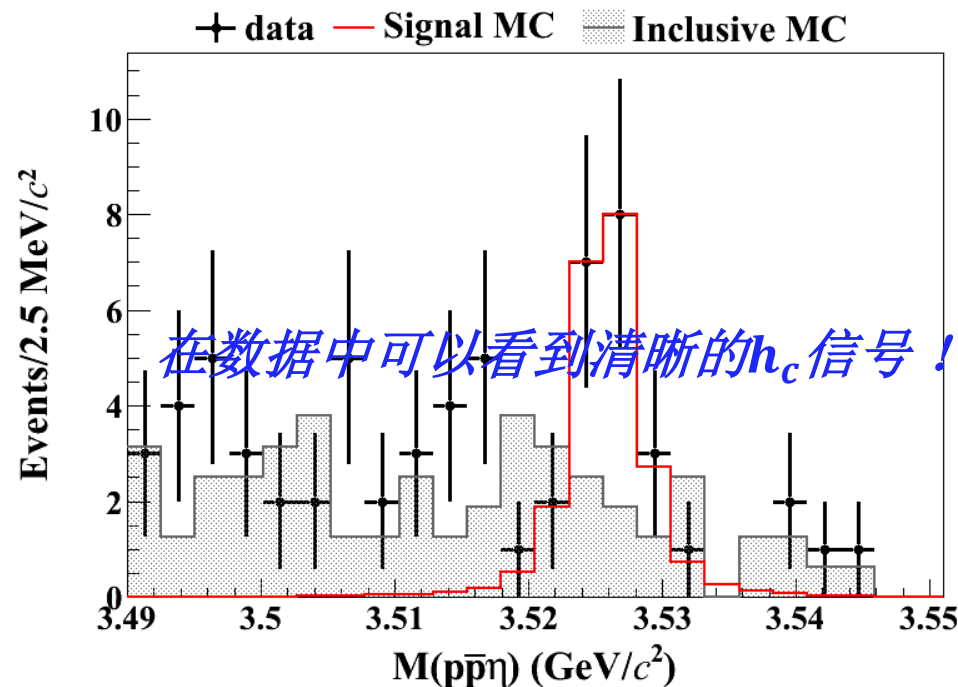
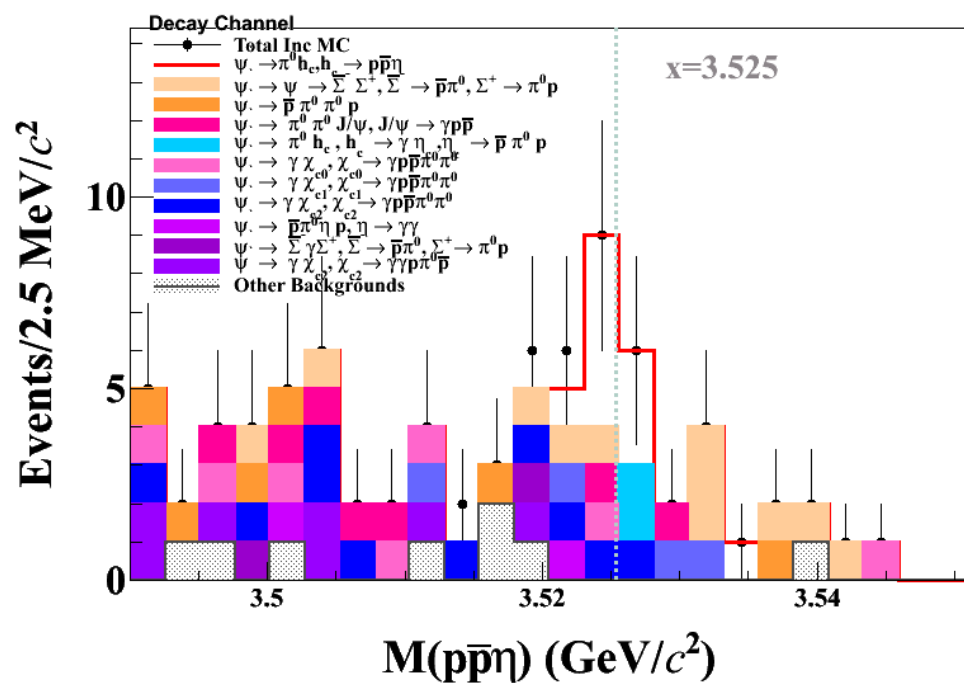


- $\chi^2 < 45$
- 为了压低可能来自 $\psi(3686) \rightarrow \pi^0 \pi^0 J/\psi$ 过程的背景
 - ✓ $\chi^2_{6C}(\pi^0 \eta p \bar{p}) < \chi^2_{6C}(\pi^0 \pi^0 p \bar{p})$
- 为了压低来自多光子末态组合的可能背景, 要求满足:
 - ✓ $\chi^2_{4C}(4\gamma p \bar{p}) < \chi^2_{4C}(3\gamma p \bar{p})$
 - ✓ $\chi^2_{4C}(4\gamma p \bar{p}) < \chi^2_{4C}(5\gamma p \bar{p})$

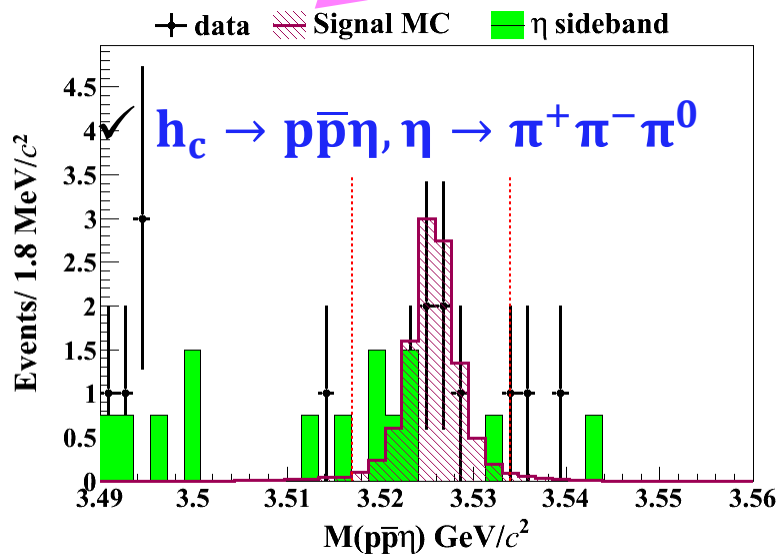
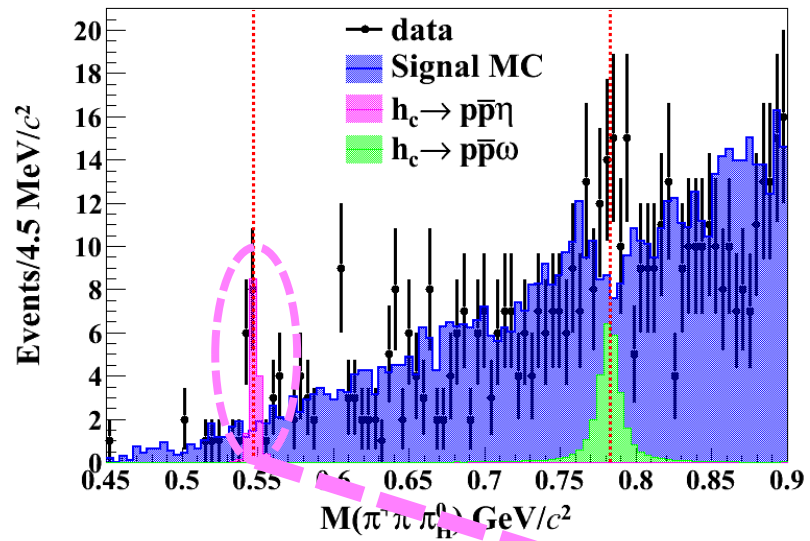
M(p $\bar{p}$ η)的分布

□ 如图示：单举MC经过终选条件后剩余事例的M(p $\bar{p}$ η)分布。

- 主要的背景道末态和信号道一致且难以再压低。
- 有来自 $\psi(3686) \rightarrow \pi^0 h_c, h_c \rightarrow \gamma \eta_c, \eta_c \rightarrow p \bar{p} \pi^0$ 过程的峰状背景贡献。



合并 $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ 和 $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$



为了合并两个衰变道 $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ 和 $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ ，
我们使用了联合拟合的方法去拟合 $M(p\bar{p}\eta)$ 。

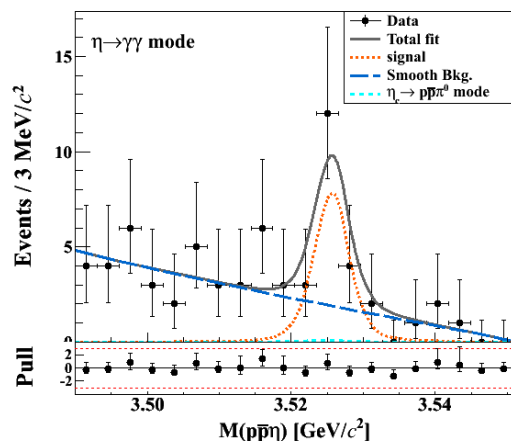
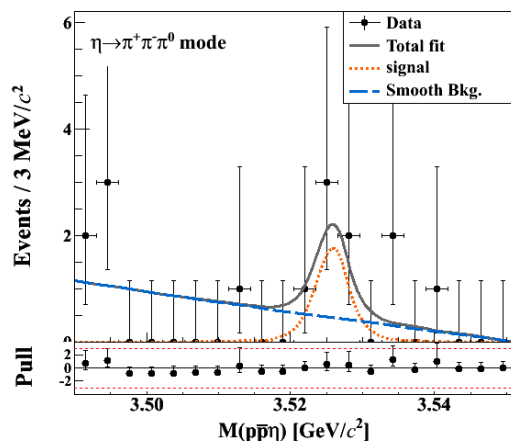
拟合M(p $\bar{p}$ η)

□ 在拟合时,分支比 $B(h_c \rightarrow p\bar{p}\eta)$ 是一个浮动放开的参数,而 η 不同衰变模式观测到的信号事例数 ($N_{\eta \rightarrow \gamma\gamma}^{obs}, N_{\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0}^{obs}$)表示为:

- $N_{h_c \rightarrow p\bar{p}\eta(\eta \rightarrow X)}^{obs} = N_{\psi(3686)} \cdot B(\psi(3686) \rightarrow \pi^0 h_c) \cdot B(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma) \cdot B(h_c \rightarrow p\bar{p}\eta) \cdot B(\eta \rightarrow X) \cdot \varepsilon$

(其中X 代表 $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ 或 $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ 末态过程)

• Significance: 5.1 σ



• 对于 $\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ (Mode I) 末态过程,使用的拟合方程为:

$$N_I^{obs} \cdot \left(\text{SigMCShape}^I \otimes \text{Gaussian}(m^I, \sigma^I) \right) + N_{bkg}^I \cdot \text{Argus}(r^I, s^I, p^I)$$

• 对于 $\eta \rightarrow \gamma\gamma$ (Mode II) 末态过程,使用的拟合方程为:

$$N_{II}^{obs} \cdot \left(\text{SigMCShape}^{II} \otimes \text{Gaussian}(m^{II}, \sigma^{II}) \right) + N_{bkg}^{II} \cdot \text{Argus}(r^{II}, s^{II}, p^{II}) + N_{peakBKG} \cdot \text{ExcMCShape}^{II}$$

Mode	$\varepsilon(\%)(\eta \rightarrow \gamma\gamma)$	$\varepsilon(\%)(\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0)$	$B(\times 10^{-3})$
$h_c \rightarrow p\bar{p}\eta$	18.1	6.0	6.41 ± 1.74

$$h_c \rightarrow p \bar{p} \pi^0$$

事例初选条件

好带电径迹挑选

- $|R_{xy}| < 1\text{cm}, |R_z| < 10\text{cm}$
- $|\cos\theta| < 0.93$
- $N = 2, N_m = N_p = 1$

粒子鉴别

- $\text{Prob}(p) > \text{Prob}(\pi), \text{Prob}(p) > \text{Prob}(K)$
- $\text{Prob}(\pi) > \text{Prob}(p), \text{Prob}(\pi) > \text{Prob}(K)$
- $N_p = N_{\bar{p}} = 1$

顶点拟合

- 对挑选出的带电径迹做顶点拟合

好光子挑选

- $0 \leq \text{TDC} \leq 14$
- 桶部: $E > 0.025 \text{ GeV}, |\cos\theta| < 0.8$
- 端盖: $E > 0.050 \text{ GeV}, 0.86 < |\cos\theta| < 0.92$
- $N_\gamma \geq 4$

1-C π^0 运动学拟合

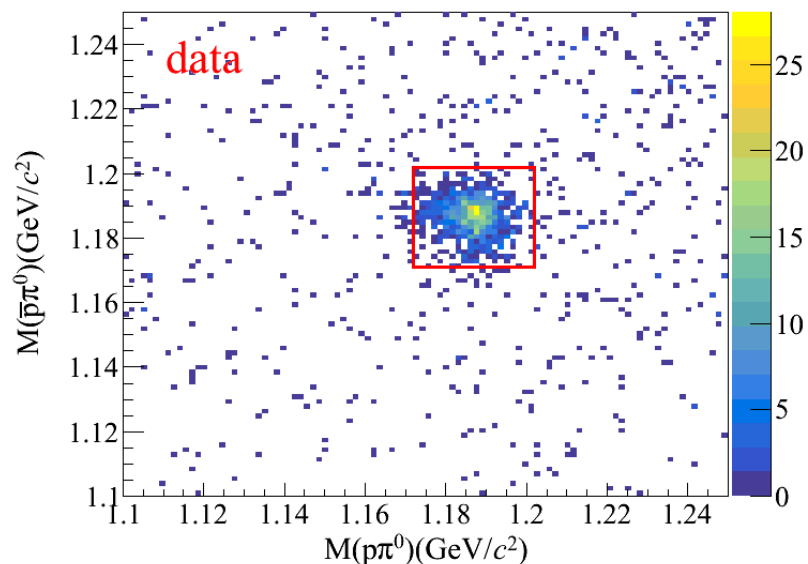
- 循环光子数并取其中的任意两个光子的四动量使它们的不变质量约束在 π^0 质量上

6-C 运动学拟合

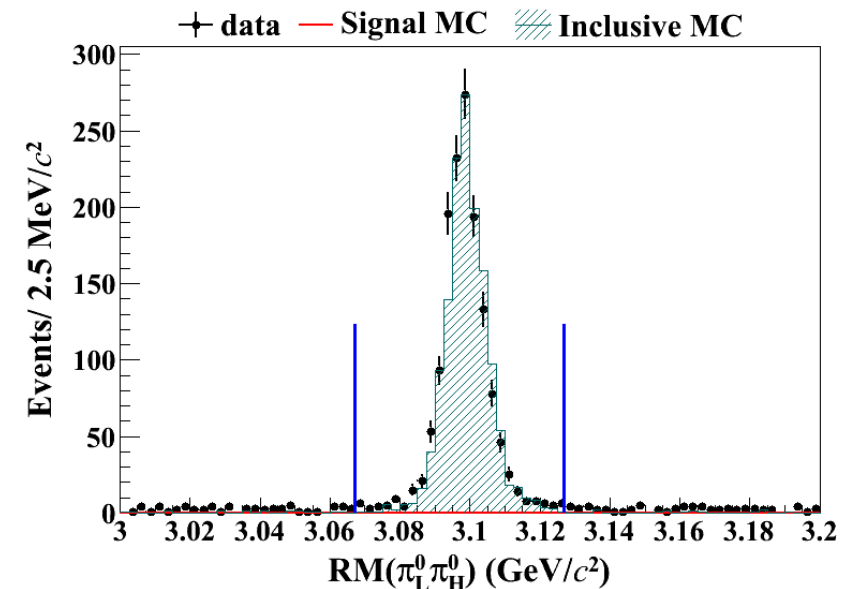
- 在 $\psi(3686) \rightarrow p\bar{p}\gamma\gamma\gamma\gamma$ 假设下, 对通过挑选要求的带电径迹和光子做运动学拟合, 要求共振态 $\psi(3686)$ 能动量守恒和两个 π^0 的不变质量做了约束

本底研究I: $\Sigma^+\bar{\Sigma}^-$ 重子对 & $\pi^0\pi^0$ J/ ψ 的压低

□ $!(M_{p\pi^0} \in (1172, 1202) \&\& M_{\bar{p}\pi^0} \in (1.171, 1.1202)) \text{ MeV}/c^2$



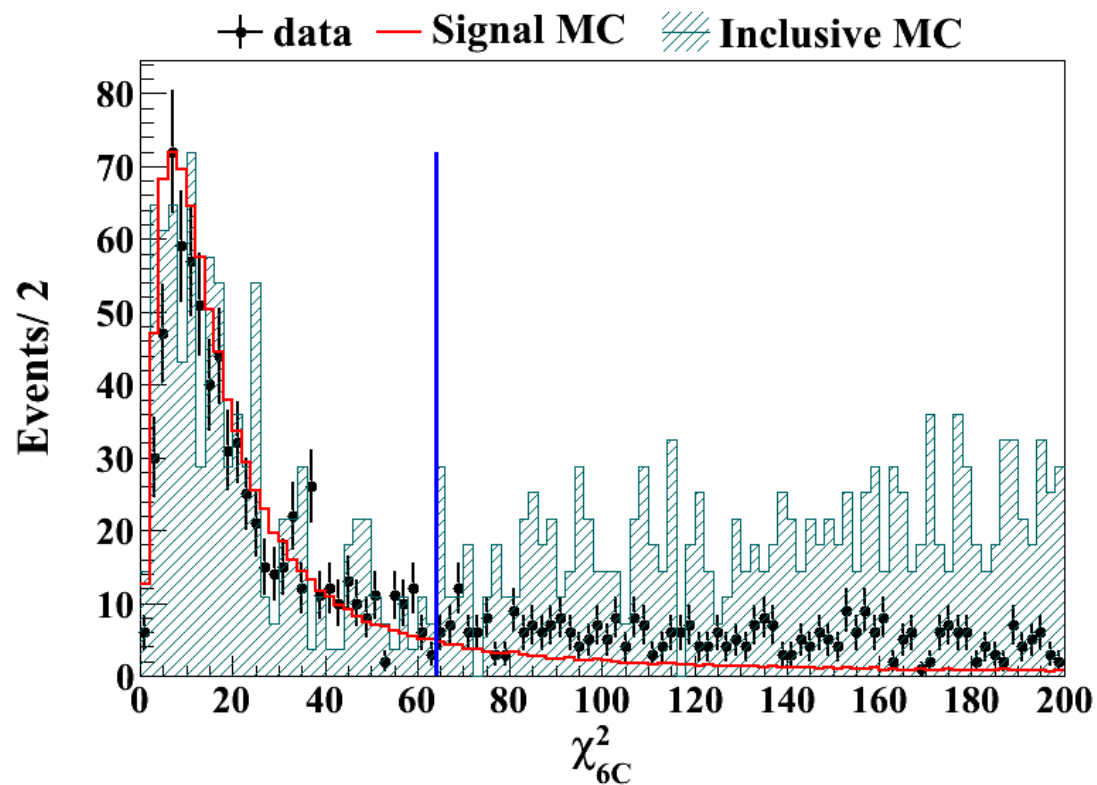
□ $|\text{RM}(\pi_L^0\pi_H^0) - m(J/\psi)| > 25 \text{ MeV}/c^2$



- 本分析中末态有两种可能的 $p\pi^0/\bar{p}\pi^0$ 组合, 即: $p\pi_L^0/\bar{p}\pi_H^0$ 或 $p\pi_H^0/\bar{p}\pi_L^0$ 。我们通过循环候选事例, 找出满足下式, 即最接近 Σ 中心质量 m_Σ 的 $p\pi^0/\bar{p}\pi^0$ 组合并保存下来供进一步分析使用:

$$\Delta = \sqrt{(M_{p\pi^0} - M_{\Sigma^+})^2 + (M_{\bar{p}\pi^0} - M_{\bar{\Sigma}^-})^2}$$

本底研究II：运动学拟合的 χ^2 的限制



- $\chi^2 < 66$
- 为了压低来自多光子末态组合的可能背景，要求满足：
 - ✓ $\chi^2_{4C}(4\gamma p\bar{p}) < \chi^2_{4C}(3\gamma p\bar{p})$
 - ✓ $\chi^2_{4C}(4\gamma p\bar{p}) < \chi^2_{4C}(5\gamma p\bar{p})$

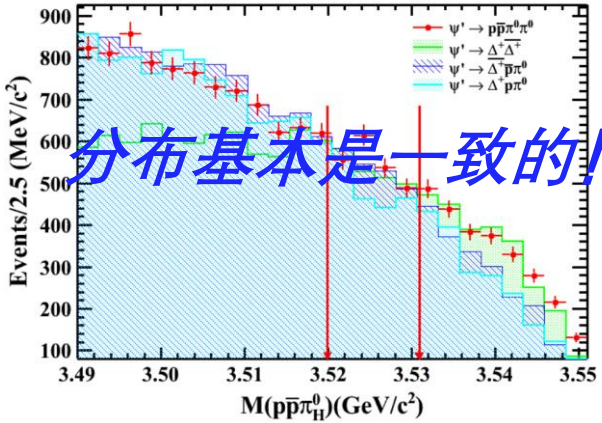
本底研究 (III)

No.	decay chain	final states	iTopo	nEvt	nTot
0	$\psi' \rightarrow \bar{p}\pi^0\pi^0p$	$\psi' \rightarrow p\pi^0\pi^0\bar{p}$	1	198	198
1	$\psi' \rightarrow \pi^0 h_c, h_c \rightarrow \bar{p}\pi^0p$	$\psi' \rightarrow p\pi^0\pi^0\bar{p}$	4	136	334
2	$\psi' \rightarrow \bar{\Delta}^+\Delta^+, \bar{\Delta}^+ \rightarrow \bar{p}\pi^0, \Delta^+ \rightarrow \pi^0p$	$\psi' \rightarrow p\pi^0\pi^0\bar{p}$	0	122	456
3	$\psi' \rightarrow \bar{\Delta}^+\pi^0p, \bar{\Delta}^+ \rightarrow \bar{p}\pi^0$	$\psi' \rightarrow p\pi^0\pi^0\bar{p}$	3	50	506
4	$\psi' \rightarrow \bar{p}\pi^0\Delta^+, \Delta^+ \rightarrow \pi^0p$	$\psi' \rightarrow p\pi^0\pi^0\bar{p}$	2	40	546
5	$\psi' \rightarrow \bar{\Sigma}^-\Sigma^+, \bar{\Sigma}^- \rightarrow \bar{p}\pi^0, \Sigma^+ \rightarrow \pi^0p$	$\psi' \rightarrow p\pi^0\pi^0\bar{p}$	6	10	556
6	$\psi' \rightarrow \gamma\chi_{c2}, \chi_{c2} \rightarrow \bar{p}\pi^0p$	$\psi' \rightarrow \gamma p\pi^0\bar{p}$	5	8	564
7	$\psi' \rightarrow \gamma\chi_{c1}, \chi_{c1} \rightarrow \bar{p}\pi^0\Delta^+, \Delta^+ \rightarrow \pi^0p$	$\psi' \rightarrow \gamma p\pi^0\pi^0\bar{p}$	7	1	565
8	$\psi' \rightarrow \pi^0 J/\psi, J/\psi \rightarrow \bar{\Delta}^+p, \bar{\Delta}^+ \rightarrow \bar{p}\pi^0$	$\psi' \rightarrow p\pi^0\pi^0\bar{p}$	8	1	566
9	$\psi' \rightarrow \gamma\chi_{c2}, \chi_{c2} \rightarrow \gamma J/\psi, J/\psi \rightarrow \bar{p}\pi^0p$	$\psi' \rightarrow \gamma\gamma p\pi^0\bar{p}$	9	1	567
10	$\psi' \rightarrow \bar{p}\gamma\Delta^+, \Delta^+ \rightarrow \pi^0p$	$\psi' \rightarrow \gamma p\pi^0\bar{p}$	10	1	568
11	$\psi' \rightarrow \pi^0 J/\psi, J/\psi \rightarrow \bar{p}\pi^0p$	$\psi' \rightarrow p\pi^0\pi^0\bar{p}$	11	1	569
12	$\psi' \rightarrow \gamma\chi_{c2}, \chi_{c2} \rightarrow \bar{\Delta}^+\pi^0p, \bar{\Delta}^+ \rightarrow \bar{p}\pi^0$	$\psi' \rightarrow \gamma p\pi^0\pi^0\bar{p}$	12	1	570
13	$\psi' \rightarrow \bar{\Sigma}^-\gamma\Sigma^+, \bar{\Sigma}^- \rightarrow \bar{p}\pi^0, \Sigma^+ \rightarrow \pi^0p$	$\psi' \rightarrow \gamma p\pi^0\pi^0\bar{p}$	13	1	571
14	$\psi' \rightarrow \gamma\chi_{c1}, \chi_{c1} \rightarrow \gamma J/\psi, J/\psi \rightarrow \bar{p}\pi^0p$	$\psi' \rightarrow \gamma\gamma p\pi^0\bar{p}$	14	1	572
15	$\psi' \rightarrow \bar{p}\pi^0p$	$\psi' \rightarrow p\pi^0\bar{p}$	15	1	573
16	$\psi' \rightarrow \gamma\chi_{c0}, \chi_{c0} \rightarrow \bar{p}\pi^0\Delta^+, \Delta^+ \rightarrow \pi^0p$	$\psi' \rightarrow \gamma p\pi^0\pi^0\bar{p}$	16	1	574

Table 1:

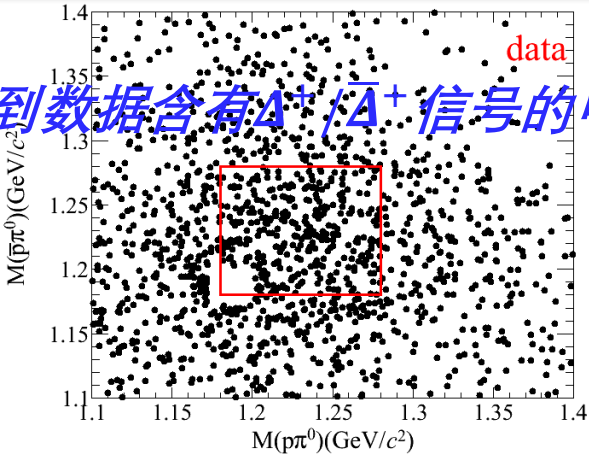
信号道

主要的背景道



分布基本是一致的!

并未看到数据含有 $\Delta^+/\bar{\Delta}^+$ 信号的中间态过程

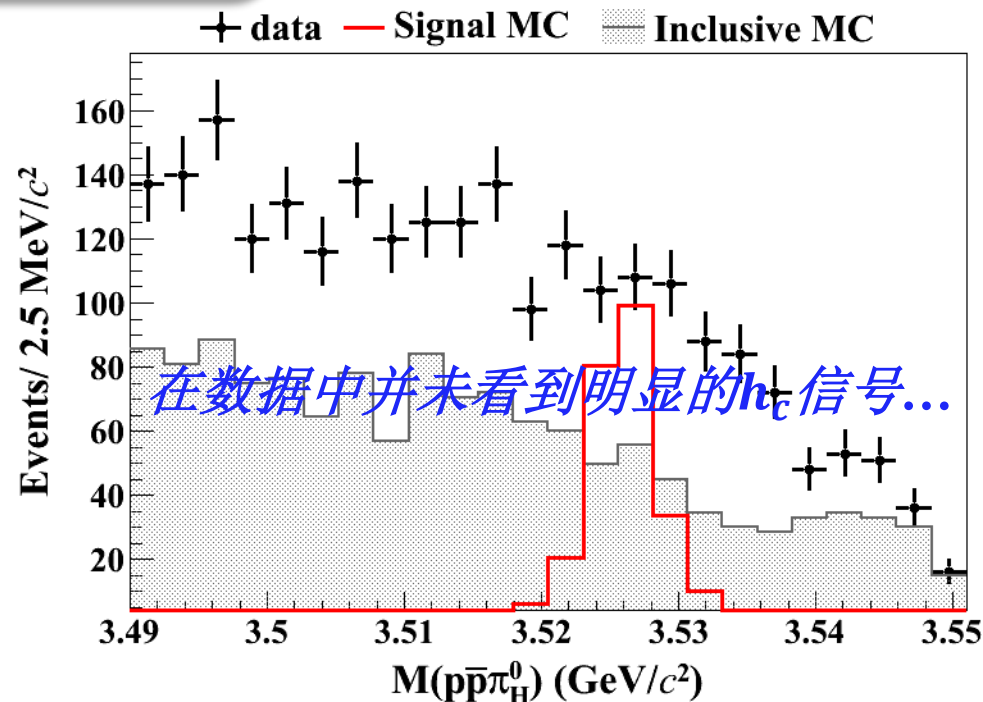
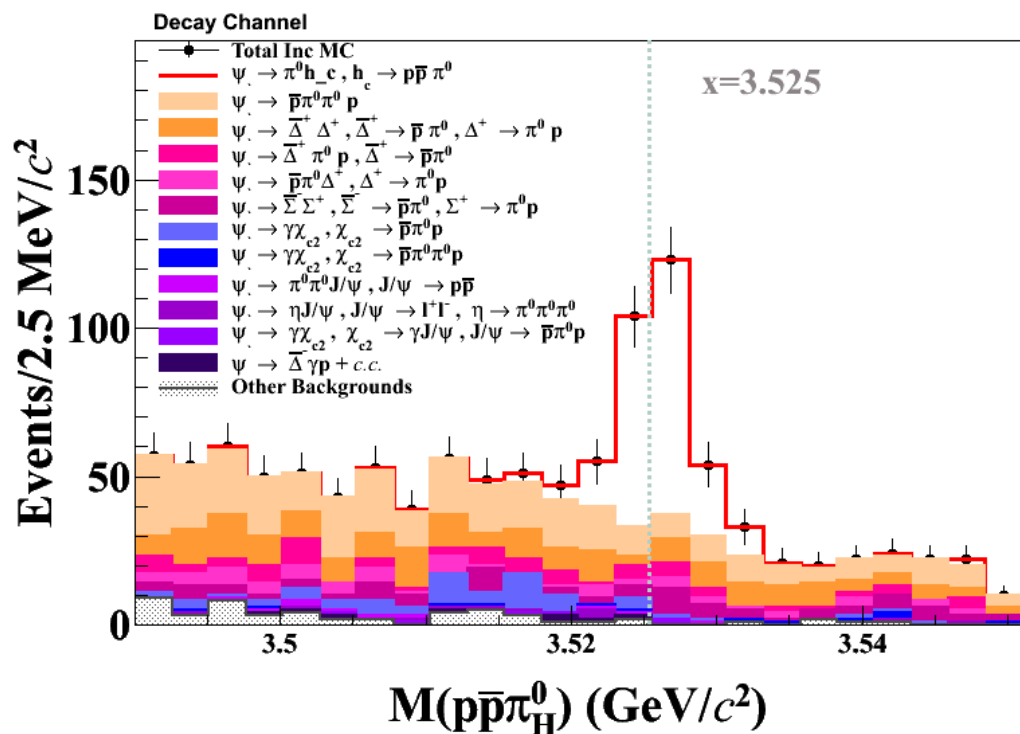


- 可以看到，主要的背景道是 $\psi(3686) \rightarrow p\bar{p}\pi^0\pi^0$;
- 我们使用产生的背景道 $\psi(3686) \rightarrow p\bar{p}\pi^0\pi^0$ MC模拟的形状去描述背景：这是通过使用Argus函数参数化其形状得到的。

$M(p\bar{p}\pi^0)$ 的分布

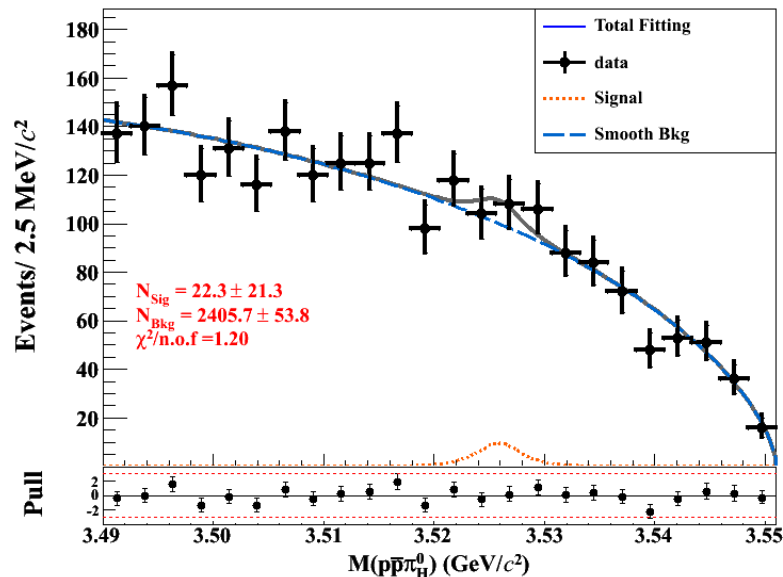
□ 如图示：单举MC经过终选条件后剩余事例的 $M(p\bar{p}\eta)$ 分布。

- 主要的背景道末态和信号道一致且难以再压低。
- 有来自 $\psi(3686) \rightarrow \pi^0 h_c, h_c \rightarrow \gamma \eta_c, \eta_c \rightarrow p\bar{p}\pi^0$ 过程的峰状背景贡献。



拟合 $M(p\bar{p}\pi^0)$

□ Significance: 1.0σ



□ 拟合方程如下

$$N_{\text{sig}} \cdot (\text{MCShape} \otimes \text{Gaussian}(m, \sigma)) + N_{\text{bkg}} \cdot \text{Argus}(r, s, p)$$

□ * 在拟合时, 高斯函数的参数 σ 也固定为 $\sigma = 0.1 \text{ MeV}$, 这也是根据控制样本 $\psi(3686) \rightarrow \eta J/\psi, J/\psi \rightarrow p\bar{p}\pi^0$ 对 $M(J/\psi \rightarrow p\bar{p}\pi^0)$ 的拟合结果得到的。

$$B(h_c \rightarrow p\bar{p}\pi^0) = \frac{N^{\text{obs}}}{N_{\psi(3686)} \times B(\psi(3686) \rightarrow \pi^0 h_c) \times B(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)^2 \times \varepsilon}$$

Mode	N^{obs}	$\varepsilon(\%)$	$B(\times 10^{-3})$
$h_c \rightarrow p\bar{p}\pi^0$	22.3 ± 21.4	23.77	2.48 ± 2.39

系统误差(I)

◎ I. $\psi(3686)$ 数据总事例^[1]

◎ II. MDC中寻迹效率和光子的探测效率^[2]

◎ III. 粒子鉴别^[3,4]

◎ IV. π^0 和 η 重建效率

- 对于衰变模式 $h_c \rightarrow p\bar{p}\pi^+\pi^-\pi^0$ 和 $h_c \rightarrow p\bar{p}\pi^0$ 这样含有两个 π^0 的过程, 我们考虑来自 $\psi(3686)$ 和来自 h_c 的是不同的, 所以我们根据它们的动量分布权重来估计系统误差^[5]
- η 的重建效率为1%^[2]

◎ V. 运动学拟合

- 以螺旋经济参数修正前后效率的差异作为该项系统误差^[6]

◎ VI. 质量窗: 主要的背景来自 $\psi(3686) \rightarrow J/\psi + X$

($X=\pi^0\pi^0, \pi^+\pi^-, \eta$)以及包含重子的背景道等

- 以上质量窗的系统误差我们是通过改变质量窗区间对比得到的
- 其中 $\Sigma^+/\bar{\Sigma}^-$ 和 $\Lambda/\bar{\Lambda}$ 的质量窗系统误差是分别通过控制样本 $\psi(3686) \rightarrow \Sigma^+\bar{\Sigma}^-\pi^+\pi^-$ 和 $\psi(3686) \rightarrow \pi^0\pi^0 J/\psi (J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda})$ 研究得到的

Totally, 7.4%~12.5% for 3 different decay channels.

[1] M. Ablikim *et al.* [BESIII Collaboration], Chin. Phys. C 42, 023001 (2018).

[2] M. Ablikim *et al.* [BESIII Collaboration], Phys. Rev. D 81, 052005 (2010).

[3] M. Ablikim *et al.* [BESIII Collaboration], Phys. Rev. D 86, 092009 (2012).

[4] M. Ablikim *et al.* [BESIII Collaboration], Phys. Rev. D 99, 072008 (2019).

[5] Martin Ripka *et al.*, π^0 reconstruction efficiency, [Online] BESIII Analysis Memo.

[6] M. Ablikim *et al.* [BESIII Collaboration], Phys. Rev. D 87, 012002 (2013).

系统误差(II)

◎ VII. 拟合

- **信号形状:** 我们通过将信号蒙卡形状卷积高斯函数替换为只抽取蒙卡形状来描述信号的概率密度函数, 并以前后的差异作为系统误差
- **背景形状**
 - **Mode I:** 用 $\psi(3686) \rightarrow p h_1(1170) \Delta$ 和 $\psi(3686) \rightarrow \Delta^{++} \Delta^{--} \pi^0 \pi^0$ 两个主要背景道混合后的MC形状通过Argus函数参数化后描述背景的概率密度函数, 并以和原结果的差异作为系统误差.
 - **Mode II:** 用二阶切比雪夫多项式代替Argus函数描述背景, 并以前后差异作为系统误差.
 - **Mode III:** 通过用Argus函数代替背景道MC抽取的形状参数化后的Argus函数, 并以前后差异作为系统误差.

- **拟合区间:** 通过改变拟合区间, 并以和原结果差异最大的作为系统误差.
- **峰状背景:** 在 $h_c \rightarrow p \bar{p} \eta (\eta \rightarrow \gamma \gamma)$ 拟合时, 来自 $\psi(3686) \rightarrow \pi^0 h_c, h_c \rightarrow \gamma \eta_c, \eta_c \rightarrow p \bar{p} \pi^0$ 的峰状背景的系统误差主要是来自引用的分支比造成的, 通过估计其引用分支比的误差作为该项系统误差.

◎ VIII. 中间态衰变的分支比

计算分支比时, 式中所有中间态过程的分支比都是引用自PDG. 特别的, 来自重建衰变过程 $B(\psi(3686) \rightarrow \pi^0 h_c)$ 过大, 是15.1%. 因此我们将其作为单独一项误差进行考虑.

系统误差(III)

◎ IX. 物理模型

来自该项的误差分为两项:一个是 $h_c \rightarrow \text{hadrons}$ 所含中间态的影响; 一个是 $\psi(3686) \rightarrow \pi^0 h_c$ 所用的物理模型.

- $h_c \rightarrow \text{hadrons}$ 所含中间态的影响:通过产生可能的中间态过程MC样本并比较事例筛选效率间差异大小, 取最大差异作为误差.

衰变道衰变链	数据量($\times 10^5$)	效率 ϵ (%)	效率差异(%)
$h_c \rightarrow p\bar{p}\pi^+\pi^-\pi^0$	5	6.0	-
$h_c \rightarrow \Delta^{++}\Delta^{--}\pi^0$	5	6.1	1.7
$h_c \rightarrow \Delta^{++}\bar{p}\pi^-\pi^0$	5	6.0	0
$h_c \rightarrow \Delta^{--}p\pi^+\pi^0$	5	5.9	1.7

- 对于 $\psi(3686) \rightarrow \pi^0 h_c$ 所用的物理模型:用HELAMP(101010)产生子模型代替相空间模型, 并比较前后探测效率的差异, 以此作为误差.

系统误差 (IV)

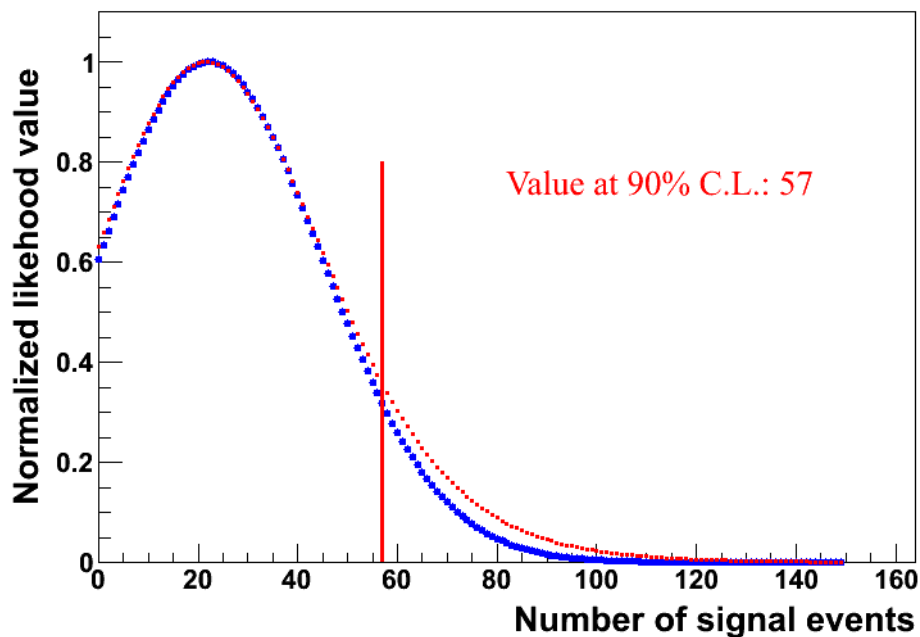
Mode I和 Mode III的系统误差总结

来源	$h_c \rightarrow p\bar{p}\pi^+\pi^-\pi^0(\%)$	$h_c \rightarrow p\bar{p}\pi^0(\%)$
数据总数	0.7	0.7
寻迹效率	5	3
光子探测效率	4	4
π^0 重建效率	0.6	1.8
粒子鉴别	4.9	2.9
运动学拟合	1.0	0.4
质量窗	12.5	7.4
拟合范围	5.3	1.6
信号形状	4.4	3.6
背景形状	6.8	2.3
中间态衰变分支比	Negligible	Negligible
物理模型	2.4	0.7
总和	18.0	10.6

Mode II的系统误差总结

来源	$\eta \rightarrow \gamma\gamma(\%)$	$\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0(\%)$
寻迹效率	3	5
寻迹效率(加权平均后)	3.3	
光子效率	4	
π^0 重建效率	0.2	0.6
π^0 重建效率(加权平均后)	0.3	
η 重建效率	1	—
η 重建效率(加权平均后)	0.8	
粒子鉴别	2.9	4.9
粒子鉴别(加权平均后)	3.2	
运动学拟合	0.4	1.0
运动学拟合(加权平均后)	0.5	
η_c 峰状背景	1.5	—
η_c 峰状背景(加权平均后)	1.3	
$B(\eta \rightarrow \gamma\gamma)$	0.5	—
$B(\eta \rightarrow \gamma\gamma)$ (加权平均后)	0.4	
$B(\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0) \cdot B(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)$	—	1.2
$B(\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0) \cdot B(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)$ (加权平均后)	0.2	
veto $\psi(3686) \rightarrow \eta J/\psi$	4.5	—
veto $\psi(3686) \rightarrow \eta J/\psi$ (加权平均后)	3.8	
物理模型	0.2	1.7
物理模型(加权平均后)	0.4	
数据总数	0.7	
拟合范围	3.7	
信号形状	0.9	
背景形状	0.2	
总和	8.3	

信号/分支比上限



$$\square B(h_c \rightarrow p\bar{p}\pi^0) < \frac{N^{sig}}{N_{\psi(3686)} \times B(\psi' \rightarrow \pi^0 h_c) \times B(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)^2 \times \varepsilon}$$

□ 拟合方程仍为:

$$N_{sig} \cdot (\text{MCShape} \otimes \text{Gaussian}(m, \sigma)) + N_{bkg} \cdot \text{Argus}(r, s, p)$$

□ 我们通过Bayesian方法给出 $B(h_c \rightarrow p\bar{p}\pi^0)$ 的上限,其中通过卷积一个高斯函数的方式将系统误差考虑进去.

Mode	N_{obs}	$\varepsilon(\%)$	$B(\times 10^{-3})$
$h_c \rightarrow p\bar{p}\pi^0$	57	23.77	<6.37

总结与展望

总结

使用BESIII探测器上采集的448M $\psi(3686)$ 数据, 我们寻找了三种 h_c 的强子衰变模式: $h_c \rightarrow p\bar{p}X(X = \pi^+\pi^-\pi^0, \eta, \pi^0)$.

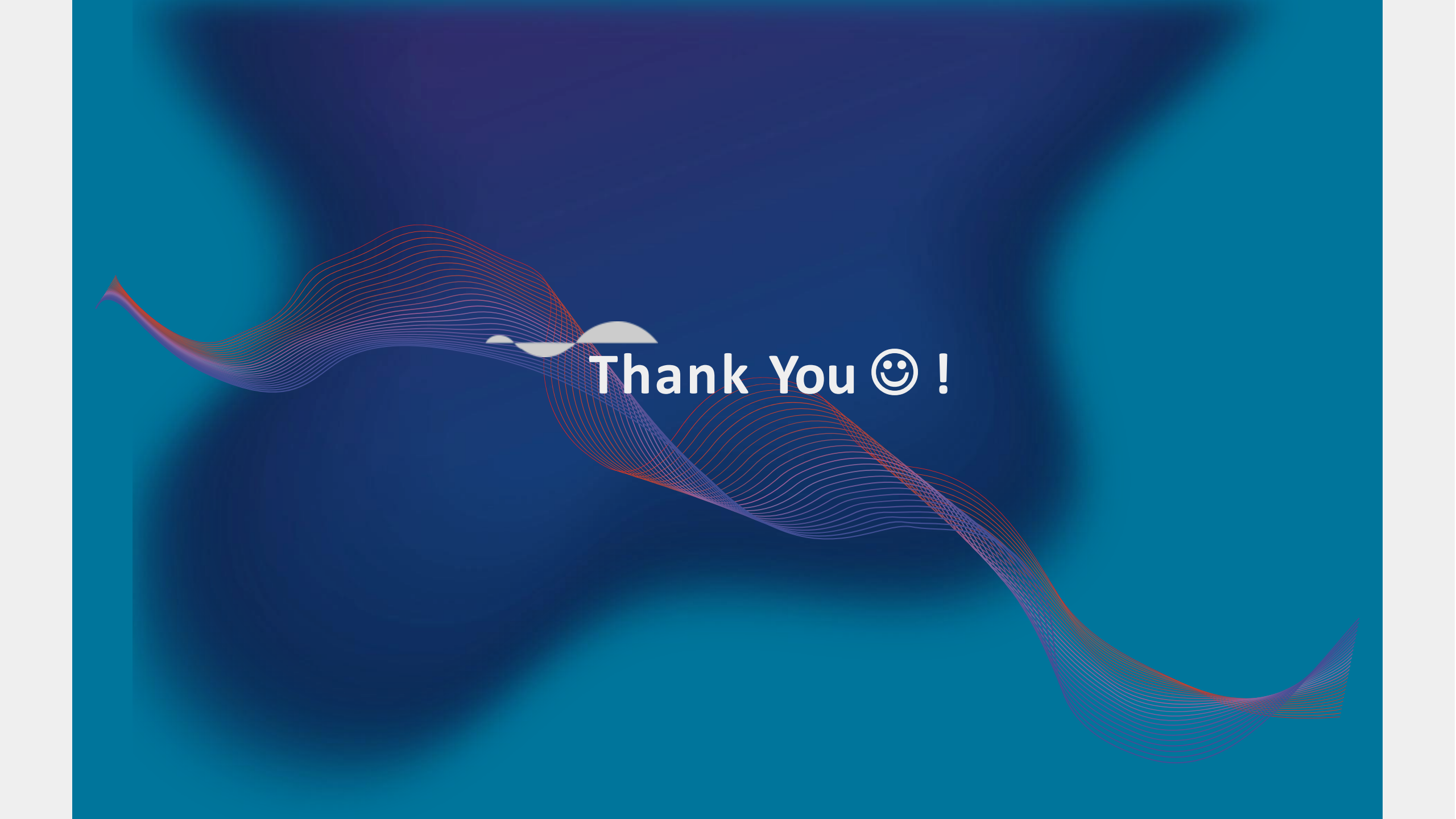
- ✓ 首次观测到 $h_c \rightarrow p\bar{p}\eta$ 过程的信号, 其信号统计显著性为 5.1σ ;
首次测量并发现了 $h_c \rightarrow p\bar{p}\pi^+\pi^-\pi^0$ 的强信号, 其统计显著性为 4.9σ ; 以上所报道的统计显著性都已包含了系统误差。由于未观测到 $h_c \rightarrow p\bar{p}\pi^0$ 过程的信号, 我们给出来在90%置信度下其分支比上限。
- ✓ 这些分支比结果与之前已发现的一些 h_c 强子衰变过程的分支比水平相一致, 填补了相关空白并对验证相关pQCD和NRQCD的相关衰变宽度理论预言有着重要的意义。

展望

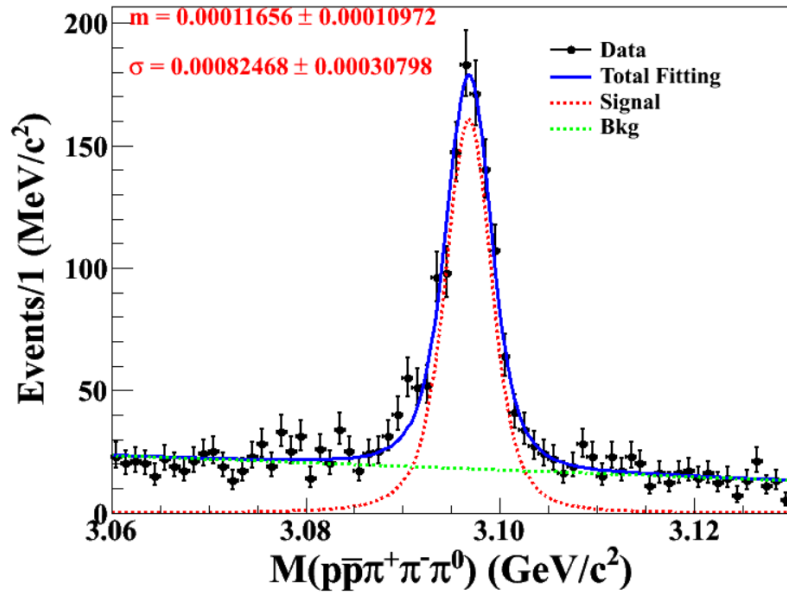
- 为实验上研究 h_c 和 $\eta_c(1S)$ 间强子衰变宽度比值 $\left(\frac{\Gamma_{h_c}^{\text{had}}}{\Gamma_{\eta_c}^{\text{had}}}\right)$ 、和验证pQCD和NRQCD的相关理论预言提供了基础。
- 2021年以来, BESIII新采集了约23亿 $\psi(3686)$ 大数据样本, 为我们进一步寻找和研究 h_c 的新衰变模式及其动力学机制提供了极佳的机会。
- 未来更多 h_c 相关理论和实验的发现, 将进一步解答我们的这些问题。

Mode	I	III
$p\bar{p}X$	$p\bar{p}\pi^+\pi^-\pi^0$	$p\bar{p}\pi^0$
N_{h_c}	86.5 ± 18.7	< 57
$B(h_c \rightarrow p\bar{p}X)$	$(3.84 \pm 0.83 \pm 0.69 \pm 0.58) \times 10^{-3}$	$< 6.59 \times 10^{-4}$
$B(\psi(3686) \rightarrow \pi^0 h_c) \times B(h_c \rightarrow p\bar{p}X)$	$(3.30 \pm 0.71 \pm 0.59) \times 10^{-6}$	$< 5.67 \times 10^{-7}$
Significance(σ)	4.9	-

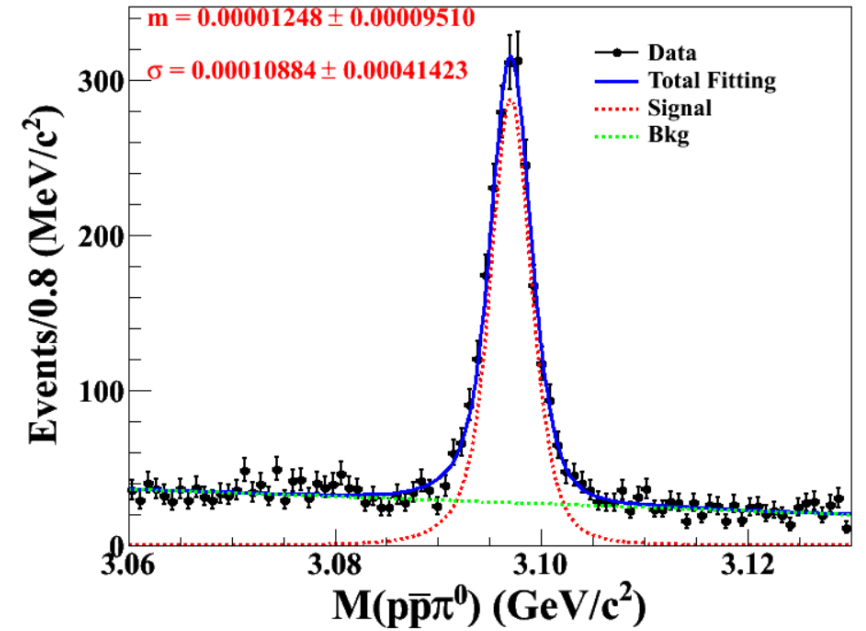
Mode	II
$p\bar{p}\eta$	$\eta \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$ $\eta \rightarrow \gamma\gamma$
N_{h_c}	3.4 ± 0.9 18.1 ± 4.9
$B(h_c \rightarrow p\bar{p}\eta)$	$(6.41 \pm 1.74 \pm 0.53 \pm 1.00) \times 10^{-4}$
$B(\psi(3686) \rightarrow \pi^0 h_c) \times B(h_c \rightarrow p\bar{p}\eta)$	$(5.51 \pm 1.50 \pm 0.46) \times 10^{-7}$
Significance(σ)	5.1



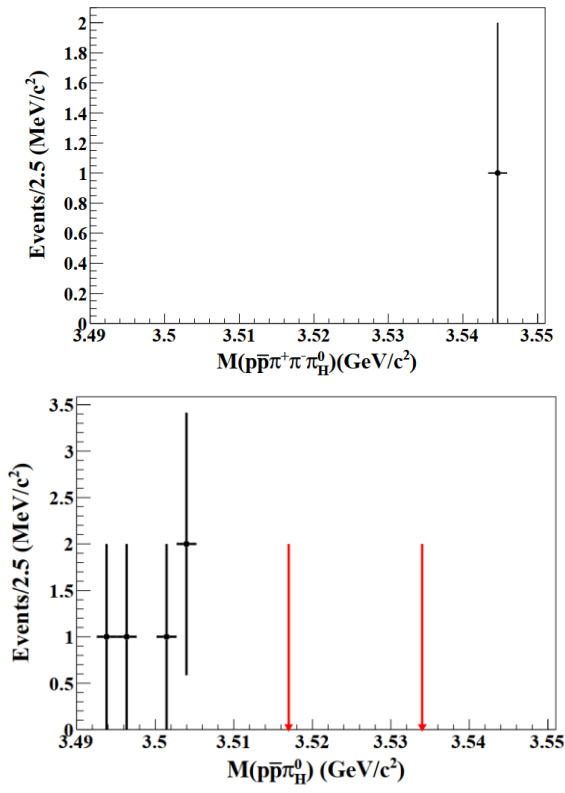
Thank You ☺ !



- *We use control sample $\psi(3686) \rightarrow \eta J/\psi, J/\psi \rightarrow p\bar{p}\pi^+\pi^-\pi^0$ to determined the resolution between data and MC. From the fit result, the resolution between data and MC is $\sigma = 0.8$ MeV.



- *We use control sample $\psi(3686) \rightarrow \eta J/\psi, J/\psi \rightarrow p\bar{p}\pi^0$ to determined the resolution between data and MC. From the fit result, the resolution between data and MC is $\sigma = 0.1$ MeV.



	ϕ_0		k		$tg\lambda$	
	$m^{data} - m^{MC}$	$\sigma^{data} - \sigma^{MC}$	$m^{data} - m^{MC}$	$\sigma^{data} - \sigma^{MC}$	$m^{data} - m^{MC}$	$\sigma^{data} - \sigma^{MC}$
π^+	-0.046 ± 0.021	1.071 ± 0.011	0.185 ± 0.022	1.065 ± 0.011	0.081 ± 0.022	1.036 ± 0.011
π^-	0.041 ± 0.021	1.083 ± 0.011	-0.184 ± 0.022	1.046 ± 0.011	0.013 ± 0.022	1.018 ± 0.011
p^+	-0.028 ± 0.020	1.074 ± 0.011	0.156 ± 0.022	1.060 ± 0.011	0.063 ± 0.022	1.021 ± 0.011
p^-	0.035 ± 0.020	1.074 ± 0.011	-0.159 ± 0.022	1.066 ± 0.011	0.010 ± 0.022	1.031 ± 0.011

	ϕ_0		k		$tg\lambda$	
	$\mu^{data} - \mu^{MC}$	$\sigma^{data} - \sigma^{MC}$	$\mu^{data} - \mu^{MC}$	$\sigma^{data} - \sigma^{MC}$	$\mu^{data} - \mu^{MC}$	$\sigma^{data} - \sigma^{MC}$
p^+	0.018 ± 0.004	1.058 ± 0.004	-0.003 ± 0.006	1.065 ± 0.004	0.170 ± 0.005	1.002 ± 0.004
p^-	0.045 ± 0.004	1.057 ± 0.004	-0.033 ± 0.005	1.055 ± 0.004	0.170 ± 0.005	1.000 ± 0.004

表 0-6 来自 $h_c \rightarrow p\bar{p}\pi^+\pi^-\pi^0$ 各质量窗的系统误差。

质量窗	系统误差值(%)	总和(%)
$ RM(\pi^+\pi^-) - m_{J/\psi} < 15 \text{ MeV}/c^2$	7.3	
$ RM(\pi^0\pi^0) - m_{J/\psi} < 16 \text{ MeV}/c^2$	5.7	
$ M(\pi^+\pi^-\pi^0) - m_\eta < 6 \text{ MeV}/c^2$	1.8	
$M(\pi^+\pi^-\pi^0) \in (762, 802) \text{ MeV}/c^2$	6.8	
$(M(p\pi^0) \in (1180, 1196) \& M(\bar{p}\pi^0) \in (1181, 1194)) \text{ MeV}/c^2$	2.3	12.5
$M(\pi^+\pi^-) \in (490, 499) \text{ MeV}/c^2$	3.9	
$M(p\pi^-) \in (1104, 1122) \text{ MeV}/c^2$		
$M(\bar{p}\pi^+) \in (1104, 1122) \text{ MeV}/c^2$	0.9	

表 0-7 来自 $h_c \rightarrow p\bar{p}\eta$ 各质量窗的系统误差。

质量窗	系统误差值(%)	总和(%)
$ RM(\eta) - m_{J/\psi} < 22 \text{ MeV}/c^2$	4.5	4.5

表 0-8 来自 $h_c \rightarrow p\bar{p}\pi^0$ 质量窗的系统误差。

质量窗	系统误差值(%)	总和(%)
$ RM(\pi^0\pi^0) - m_{J/\psi} < 30 \text{ MeV}/c^2$	5.0	
$(M(p\pi^0) \in (1172, 1202) \& M(\bar{p}\pi^0) \in (1171, 1202)) \text{ MeV}/c^2$	5.4	7.4

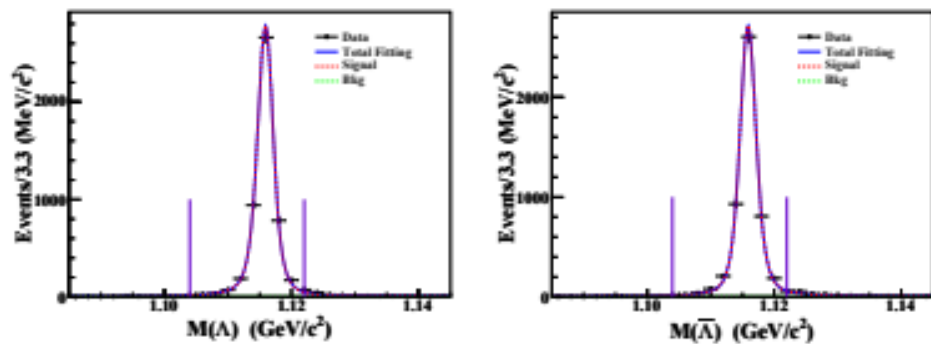


Fig. 10: The distribution of $M_{\bar{p}\pi^+}/M_{p\pi^-}$ from fitting (*left*) with $M_{p\pi^-}$ mass window and (*right*) with $M_{p\pi^-}$ mass window for $\psi(3686) \rightarrow \pi^0\pi^0 J/\psi(J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda})$.

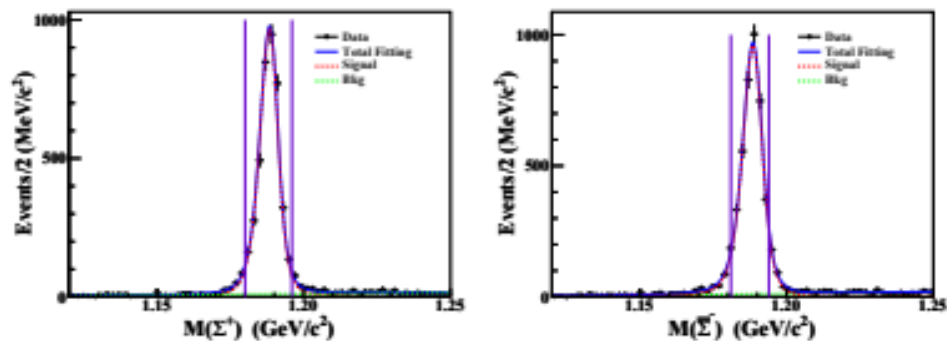


Fig. 11: The distribution of $M_{p\pi^0}/M_{\bar{p}\pi^0}$ from fitting (*left*) with $M_{\bar{p}\pi^0}$ mass window and (*right*) with $M_{p\pi^0}$ mass window for $\psi(3686) \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi(J/\psi \rightarrow \Sigma^+\bar{\Sigma}^-)$.

One control sample of $\psi(3686) \rightarrow \pi^0\pi^0 J/\psi(J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda})$ is employed to study the systematic uncertainty due to the background of $\psi(3686) \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}\pi^0\pi^0$. The detailed event selection for the control sample and the definition of veto efficiency can be found in Appendices A.3. Fig. 10 show the fitting result of data for control sample. The difference between data and MC is 0.9% which is taken as the systematic uncertainty due to the background of $\psi(3686) \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}\pi^0\pi^0$.

Similar to before, one control sample of $\psi(3686) \rightarrow \pi^+\pi^- J/\psi(J/\psi \rightarrow \Sigma^+\bar{\Sigma}^-)$ is employed to study the systematic uncertainty due to the background of $\psi(3686) \rightarrow \Sigma^+\bar{\Sigma}^-\pi^+\pi^-$. The detailed event selection for the control sample and the definition of veto efficiency of veto can be found in Appendices A.4. Fig. 11 show the fitting result of data for control sample. The difference between data and MC is 2.3% which is taken as the systematic uncertainty due to the background of $\psi(3686) \rightarrow \Sigma^+\bar{\Sigma}^-\pi^+\pi^-$.