



河南师范大学
HENAN NORMAL UNIVERSITY

北京谱仪III上 $\eta' \rightarrow 4\pi$ 的实验研究

学科、专业：物理学、粒子物理与原子核物理

答辩人：赵子涵

指导老师：常钦教授

房双世研究员

刘芳副研究员

2023 年 5 月 7 日



① 论文选题的背景和意义

② 数据分析

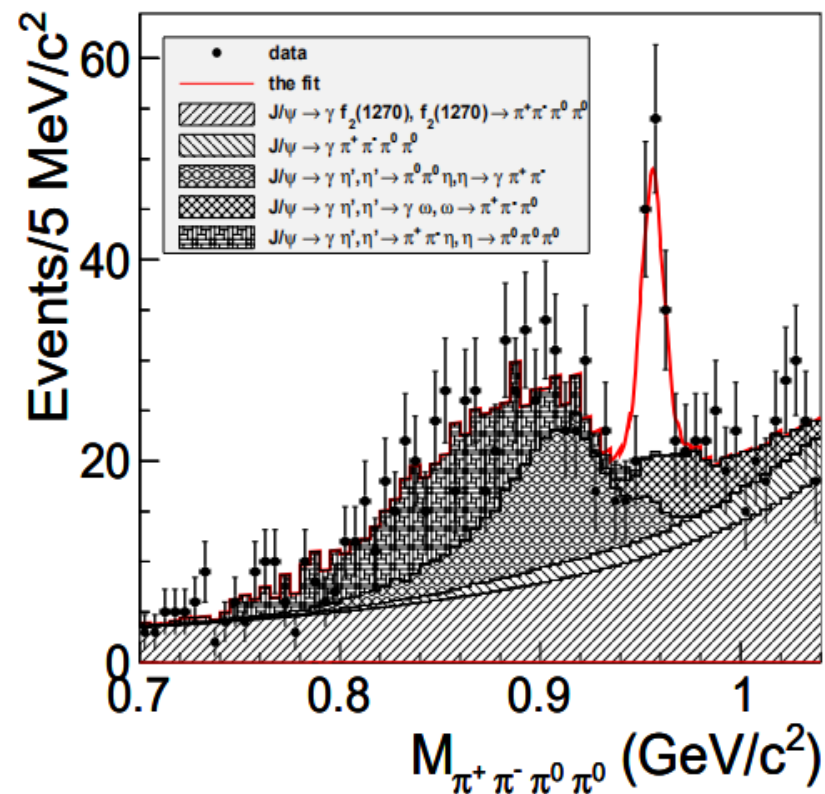
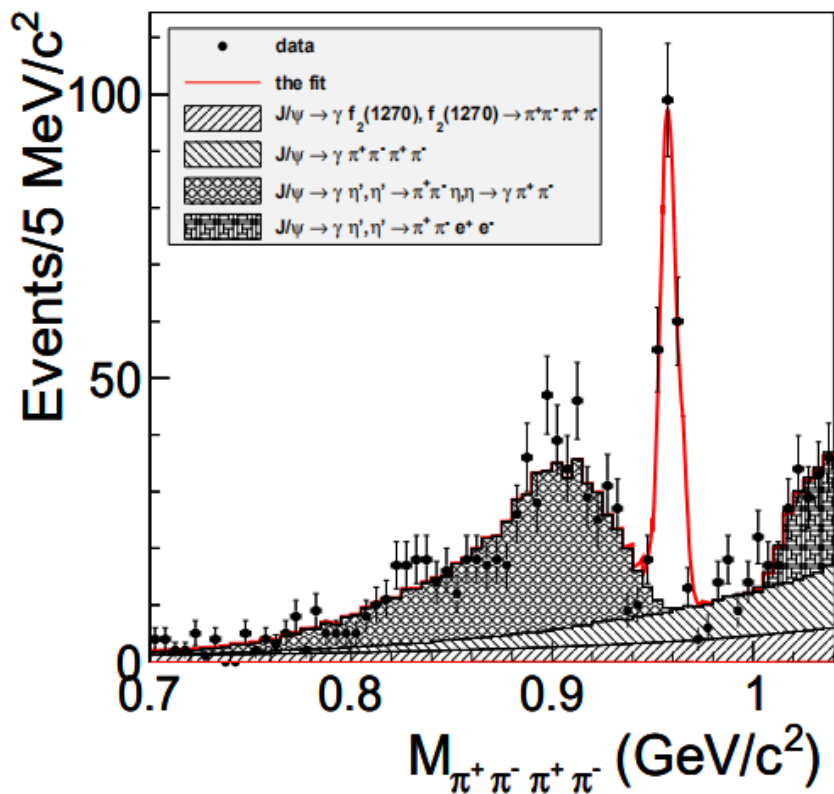
- $\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$
- $\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$
- $\eta' \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0 \pi^0$

③ 系统误差

④ 总结与展望

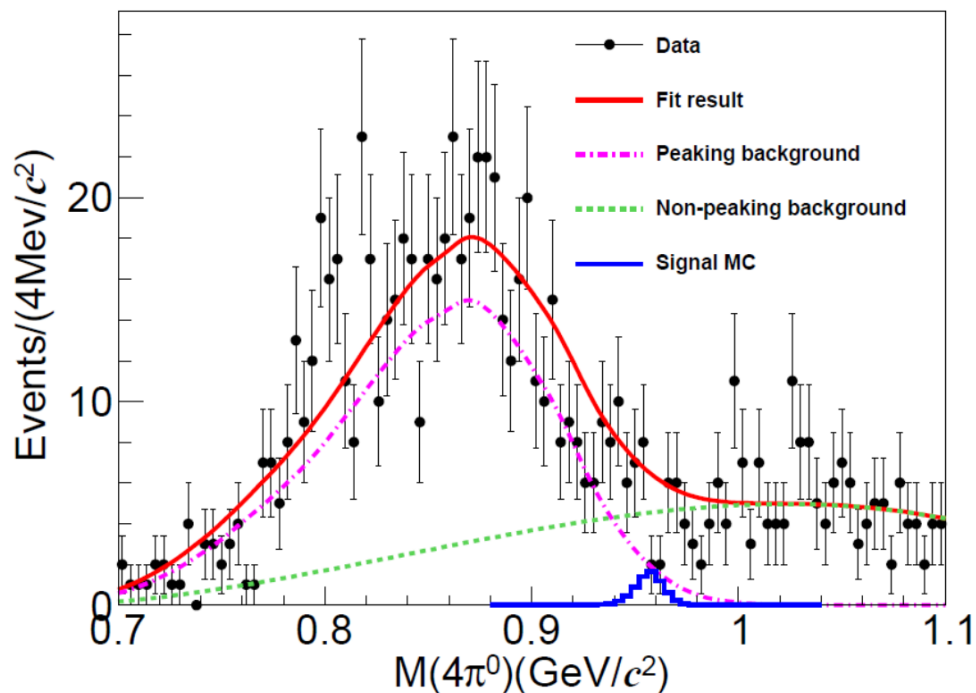
论文选题的背景和意义(I)

- η' 介子在标准模型中除了可以发生电磁衰变，还可以参与强相互作用衰变，在验证低能区QCD理论—手征微扰理论方面具有重要意义。
- 2014年，BESIII合作组使用 1.3×10^9 个 J/ψ 事例，寻找衰变道 $\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$ 和 $\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$ 并在 4π 质量谱上发现了明显的 η' 信号[1]，如下图所示。

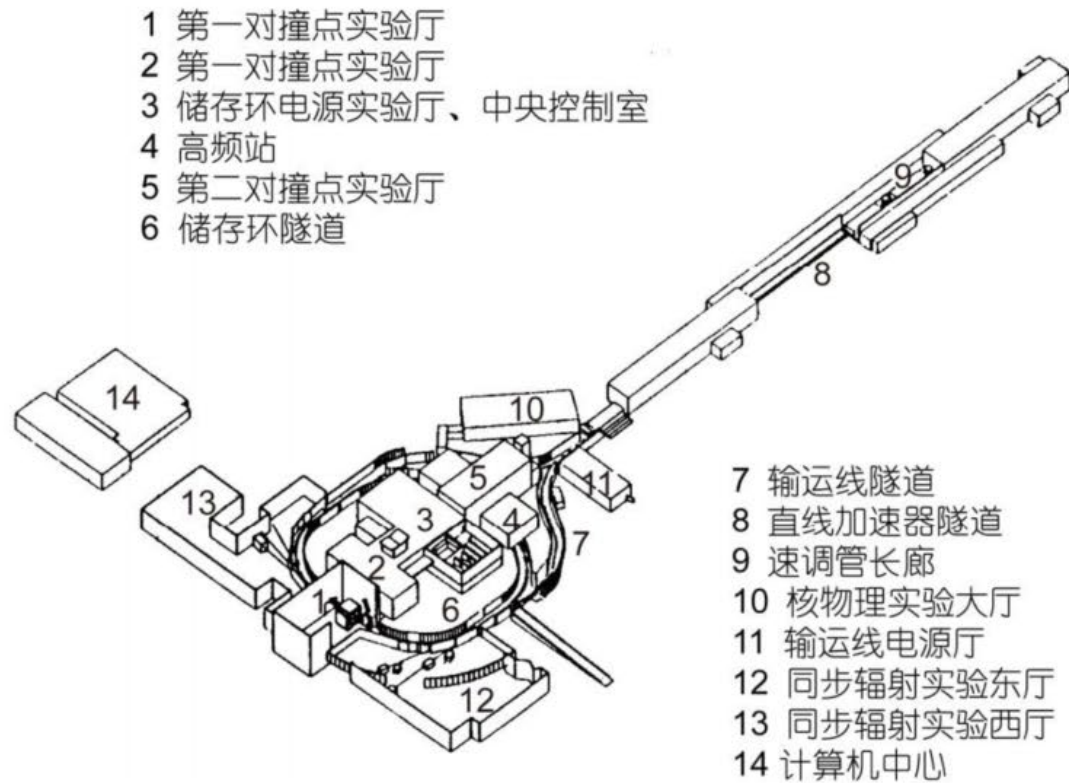


论文选题的背景和意义(II)

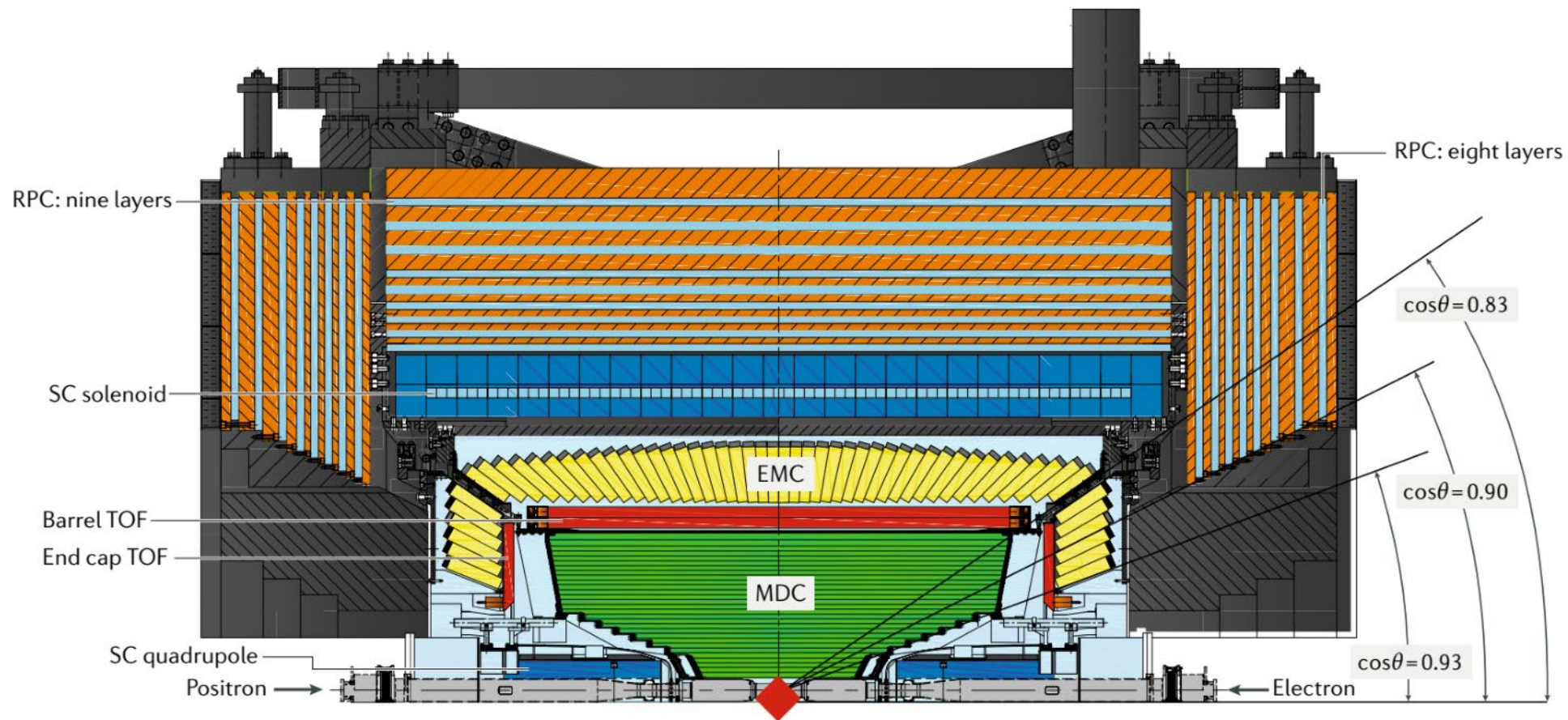
- 寻找稀有衰变 $\eta' \rightarrow 4\pi^0$, 可以为理解基本对称性和检验低能区手征微扰理论提供重要依据。BESIII 合作组尝试寻找这条稀有衰变道, **未在 $4\pi^0$ 的质量谱上观测到明显的 η' 信号[2]**, 如下图所示。
- 北京谱仪III 实验上拥有**世界上最大的 J/ψ 事例**, 又由于 $J/\psi \rightarrow \gamma\eta'$ 的分支比很大, 可以**利用 J/ψ 的辐射衰变为研究 η' 衰变提供干净的 η' 事例**。



北京正负电子对撞机



北京谱仪III(BESIII)



数据样本

Data set	Number of events		BOSS version
J/ψ data	10^{10}		7.0.8
J/ψ inclusive MC	10^{10}		
Signal MC	225×10^4 for each channel	Mode I: $J/\psi \rightarrow \gamma\eta',\eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ (DIY)	
		Mode II: $J/\psi \rightarrow \gamma\eta',\eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ (DIY)	
	900×10^4	Mode III: $J/\psi \rightarrow \gamma\eta',\eta' \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0\pi^0$ (DIY)	

01

$J/\psi \rightarrow \gamma\eta', \eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ 的研究

事例初选条件

- 好带电径迹的挑选

- $|V_r| < 1.0\text{cm}, |V_z| < 10.0\text{cm}, |\cos\theta| < 0.93$

- $N=4, N_p = N_m = 2$

- 好光子的挑选

- 桶部: $E_{\text{barrel}} > 25\text{MeV}, |\cos\theta| < 0.8$

- 端盖: $E_{\text{endcap}} > 50\text{MeV}, |\cos\theta| \in (0.86, 0.92)$

- $0 \leq \text{TDC} \leq 14 (\times 50\text{ns})$

- $N_\gamma \geq 1$

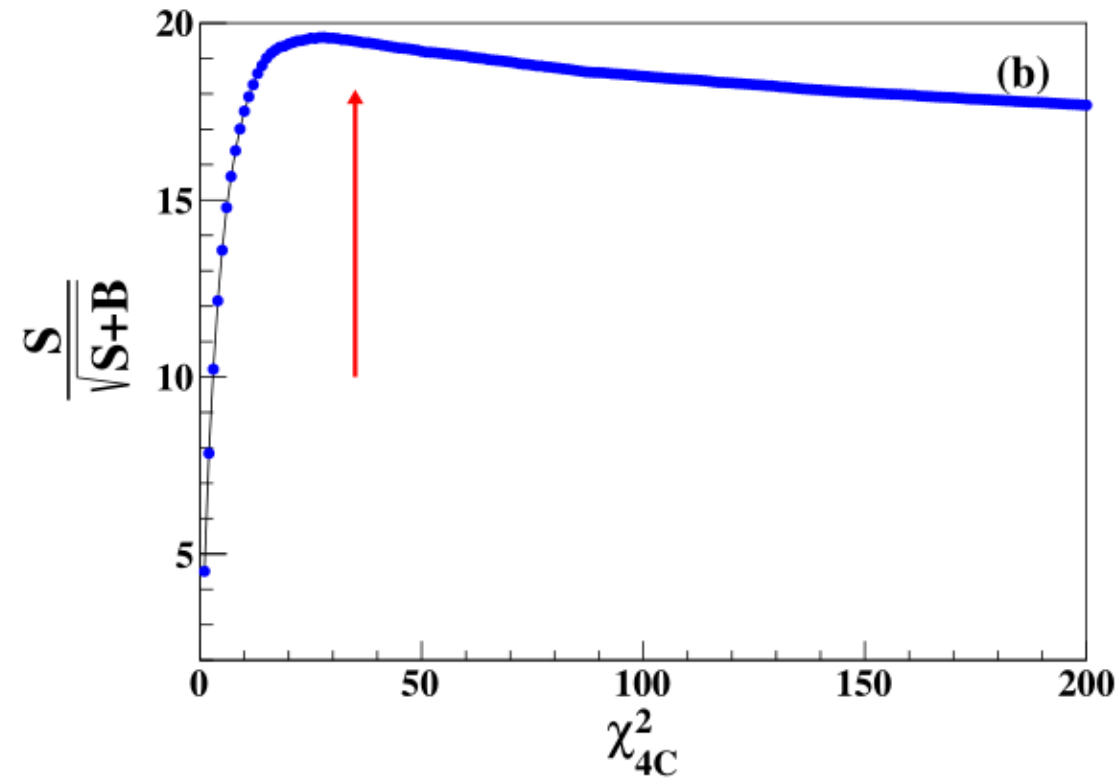
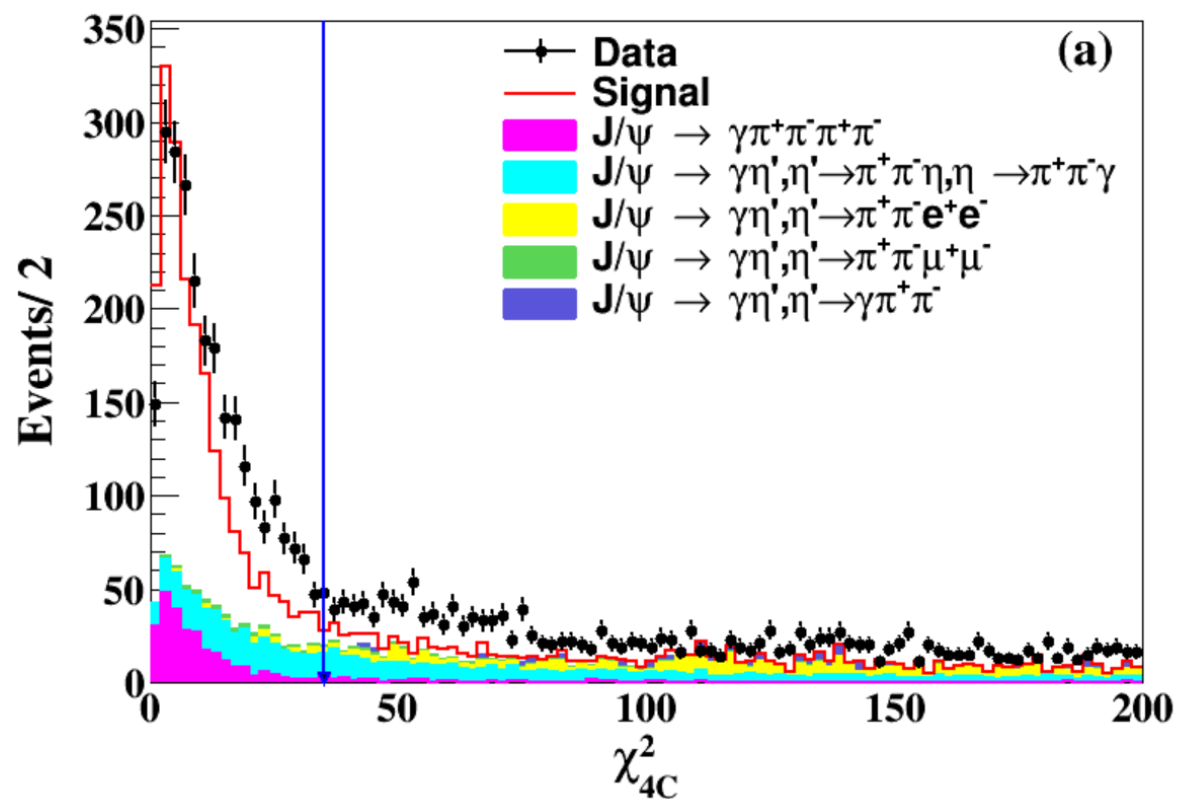
- 顶点拟合

- 对挑选出的带电径迹做顶点拟合

- 4C 运动学拟合

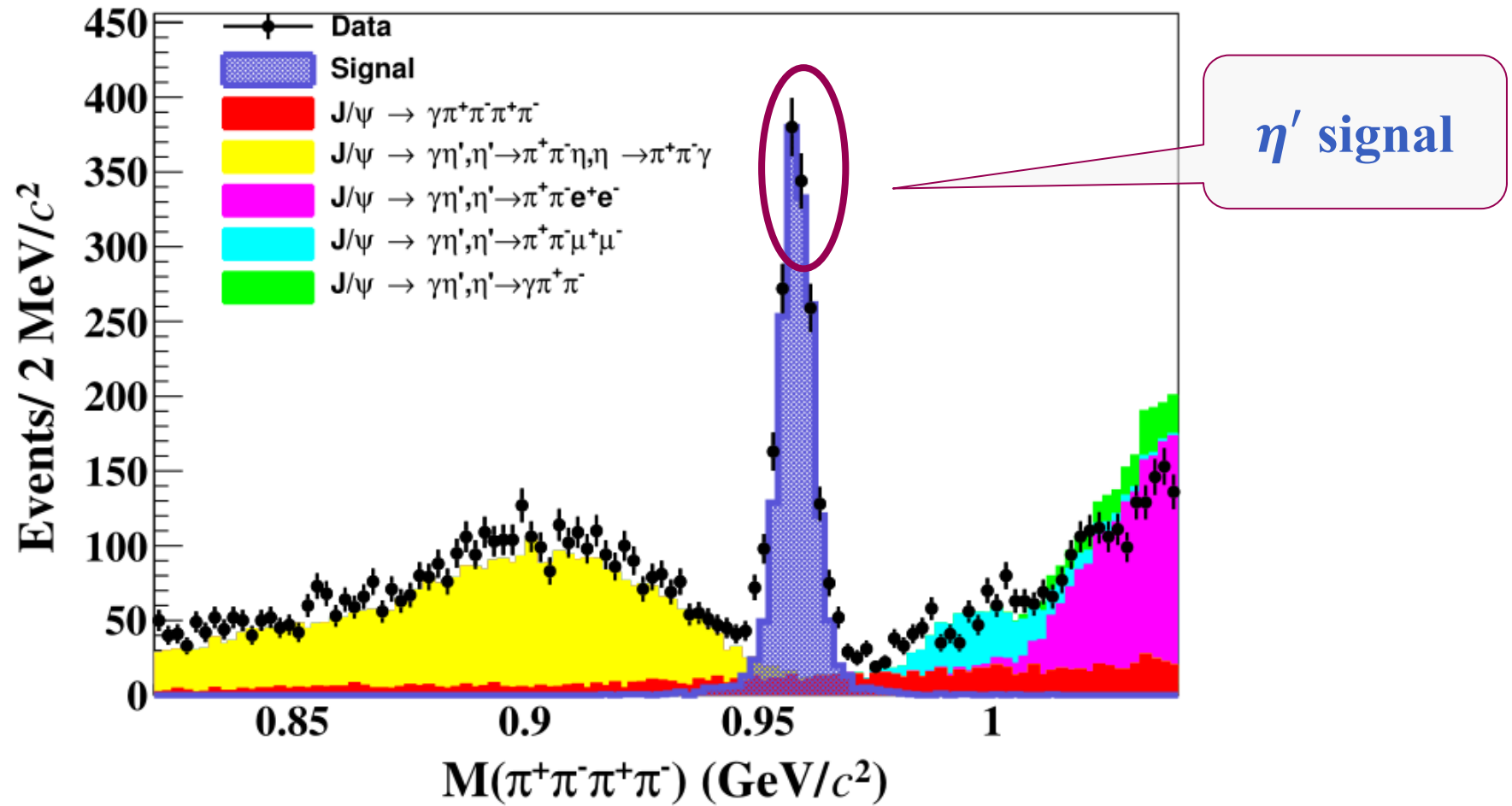
- 对通过挑选要求的带电径迹和光子进行四动量守恒约束

事例终选条件(I)



- $\chi^2_{4C} < 35$
- $\chi^2_{4C}(\gamma\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-) < \chi^2_{4C}(\gamma\gamma\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-)$

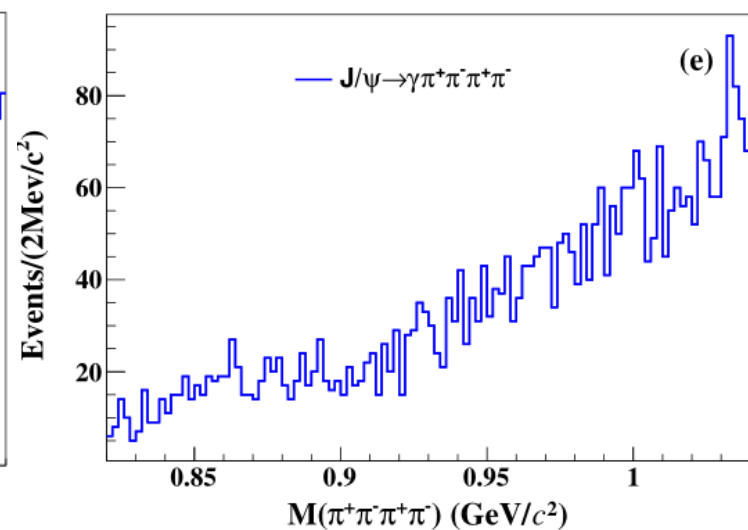
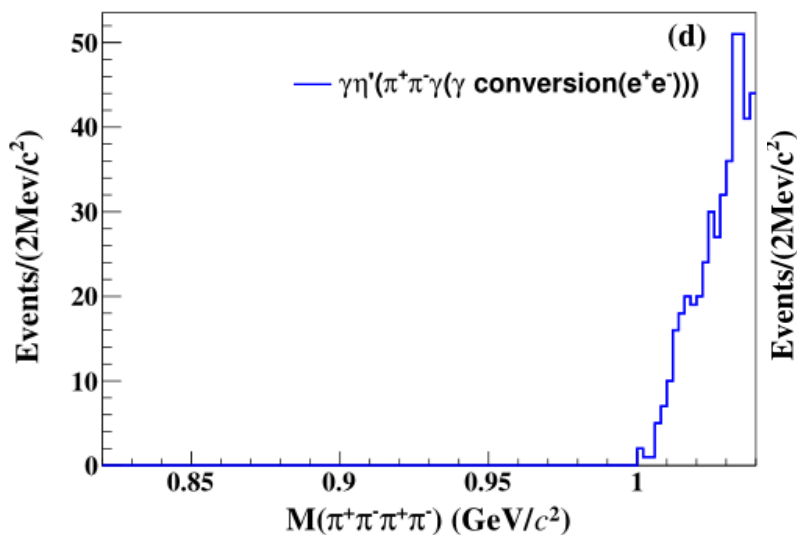
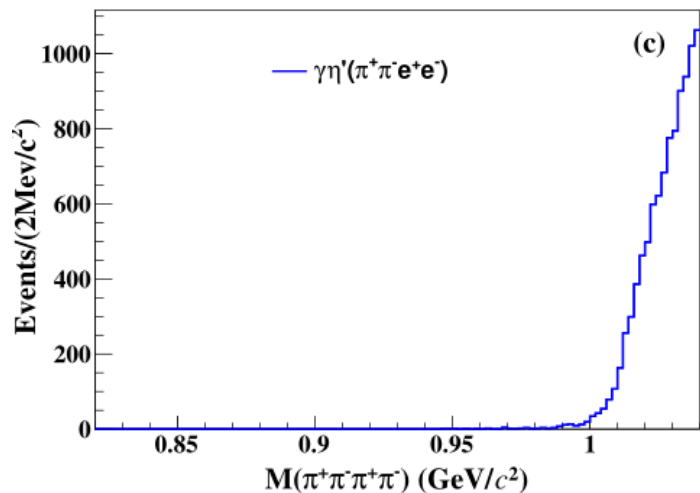
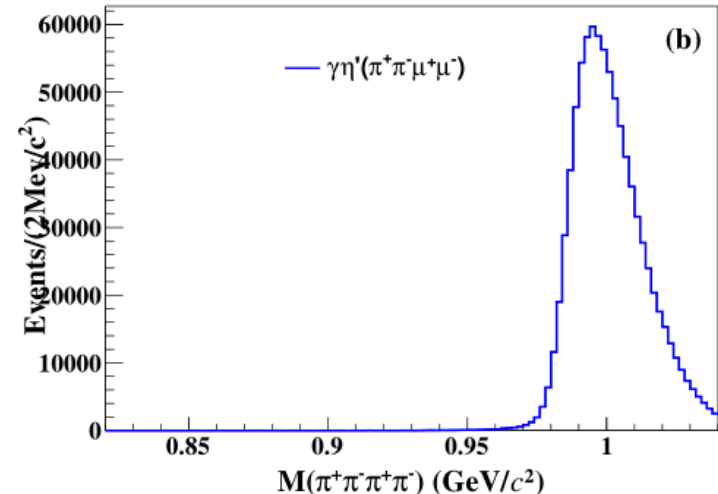
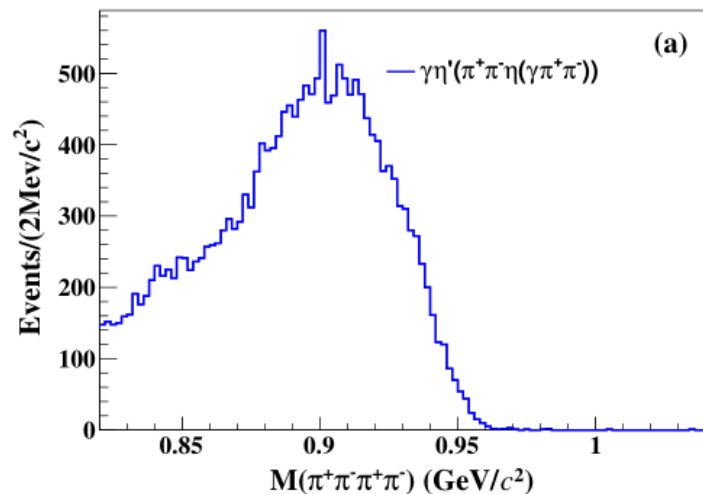
事例终选条件(II)



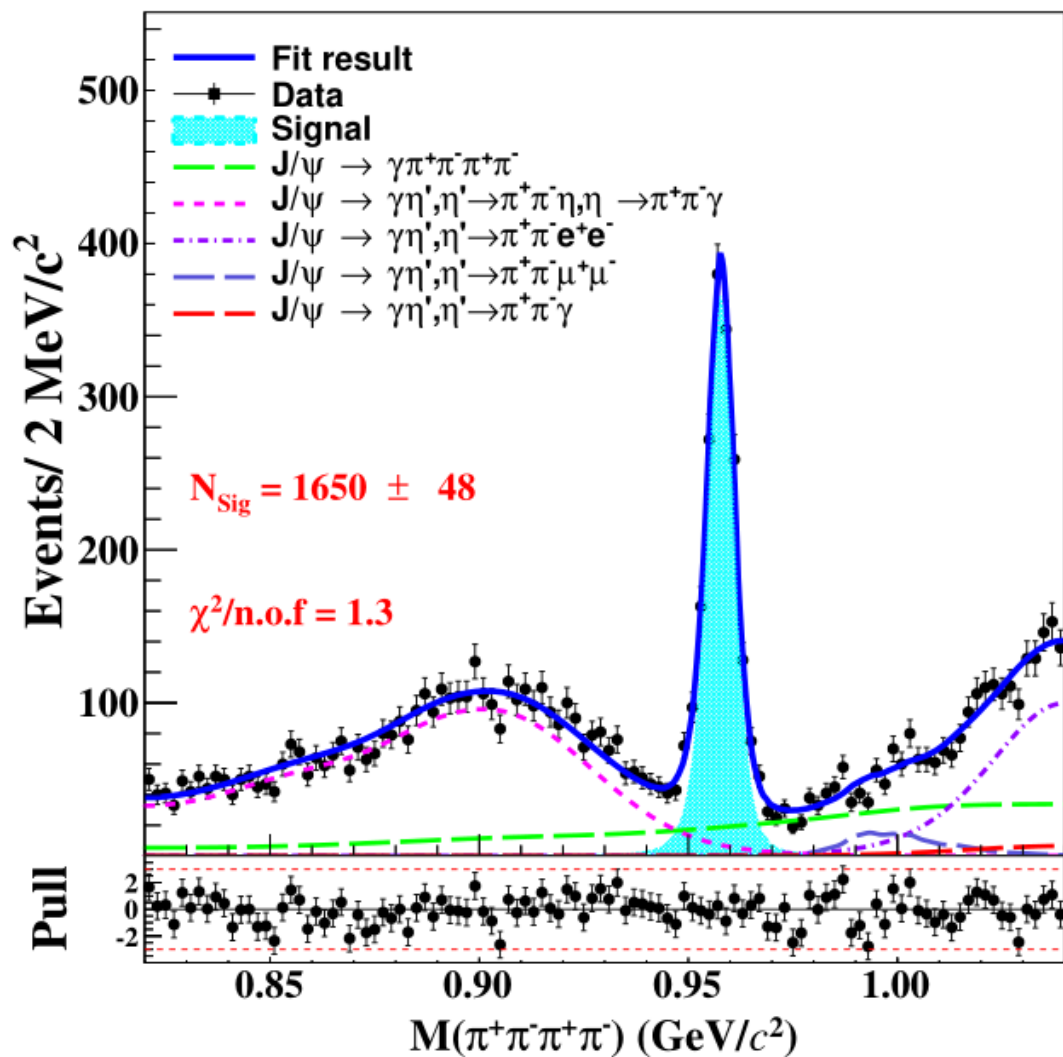
本底研究

● 峰状本底和相空间本底贡献:

- (a) $J/\psi \rightarrow \gamma\eta', \eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\eta, \eta \rightarrow \gamma\pi^+\pi^-$
- (b) $J/\psi \rightarrow \gamma\eta', \eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\mu^+\mu^-$
- (c) $J/\psi \rightarrow \gamma\eta', \eta' \rightarrow \pi^+\pi^-e^+e^-$
- (d) $J/\psi \rightarrow \gamma\eta', \eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\gamma(\gamma \text{ conversion} \rightarrow e^+e^-)$
- (e) $J/\psi \rightarrow \gamma\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$



拟合结果



$$\blacksquare \mathcal{B}(\eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-) = \frac{N_{sig}}{N_{J/\psi} \cdot \mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \gamma\eta') \cdot \epsilon}$$

Mode	N_{sig}	$\epsilon(\%)$	$\mathcal{B}(\times 10^{-5})$
$\eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$	1650 ± 48	36.4	$8.56 \pm 0.25(stat)$

形状因子研究

- $\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$ 的衰变振幅公式表示为:

$$\mathcal{A}(\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-) \approx \frac{N_c \epsilon_{\mu\nu\alpha\beta}}{16\sqrt{3}\pi^2 F_\pi^5} p_1^\mu p_2^\nu p_3^\alpha p_4^\beta \left((c_1 - c_2) \left[\frac{s_{12}}{D_\rho(s_{12})} + \frac{s_{34}}{D_\rho(s_{34})} - \frac{s_{14}}{D_\rho(s_{14})} - \frac{s_{23}}{D_\rho(s_{23})} \right] \right. \\ \left. + c_3 \left[\frac{m_\rho^2(s_{12} + s_{34})}{D_\rho(s_{12})D_\rho(s_{34})} - \frac{m_\rho^2(s_{14} + s_{23})}{D_\rho(s_{14})D_\rho(s_{23})} \right] \right)$$

- 形状因子 $F(s_{12}, s_{34})$ 表示为:

$$F(s_{12}, s_{34}) = \left[\frac{s_{12}}{D_\rho(s_{12})} + \frac{s_{34}}{D_\rho(s_{34})} - \frac{s_{14}}{D_\rho(s_{14})} - \frac{s_{23}}{D_\rho(s_{23})} \right] + \frac{c_3}{c_1 - c_2} \left[\frac{m_\rho^2(s_{12} + s_{34})}{D_\rho(s_{12})D_\rho(s_{34})} - \frac{m_\rho^2(s_{14} + s_{23})}{D_\rho(s_{14})D_\rho(s_{23})} \right]$$



在拟合中, 只有 $\frac{c_3}{c_1 - c_2}$ 的值在归一化后才有意义, 因此在后续的振幅分析中我们定义一个量 $\alpha = \frac{c_3}{c_1 - c_2}$ 。

形状因子拟合方法

- 在拟合中, S 被定义为:

$$S = - \sum_{i=1}^N \ln \left(\frac{\left(\frac{d\sigma}{d\phi} \right)_i}{\sigma'} \right) = - \sum_{i=1}^N \ln \left(\frac{d\sigma}{d\phi} \right)_i + N \ln \sigma'.$$

- 通过 MINUIT 优化自由参数, 使用蒙特卡洛技术对测量的总横截面 σ' 进行评估。MC 样本生成信号事例, 这些信号事例均匀分布在相空间中。最终, 归一化积分的计算公式表示为:

$$\int d\xi \omega(\xi) \epsilon(\xi) = \sigma' \rightarrow \frac{1}{N_{gen}} \sum_{k=1}^{N_{acc}} \left(\frac{d\sigma}{d\phi} \right)_k.$$

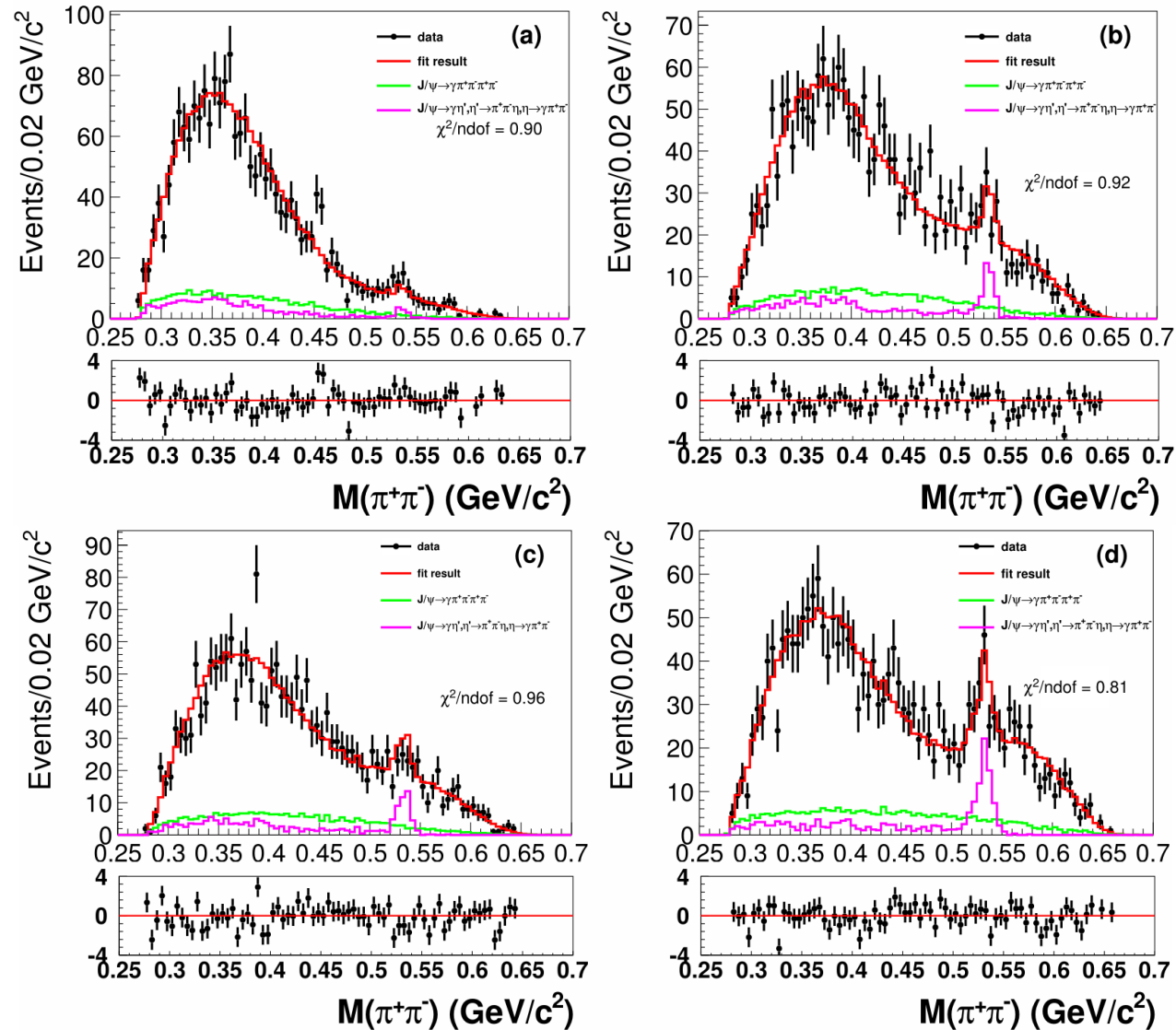
- 背景处理

- 在对数似然计算中, 由于数据的对数似然值是信号事例和背景事例的对数似然值之和, 因此背景事例数的似然值被赋予负权重:

$$S = - \left(\ln \mathcal{L}_{data} - \sum \ln \mathcal{L}_{background} \right).$$

形状因子拟合结果(I)

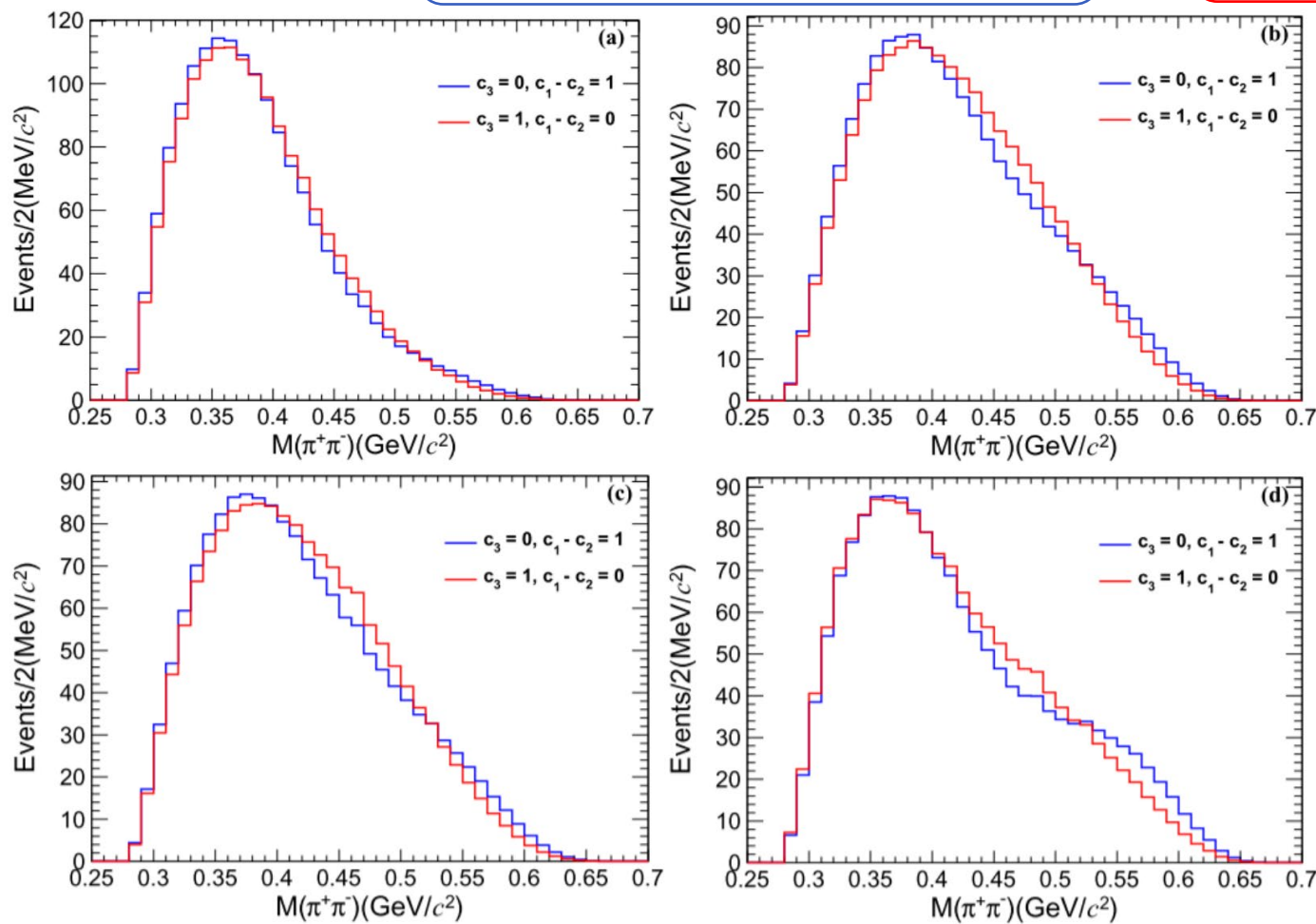
(i). 将 ρ 的质量和宽度固定为PDG中的值进行拟合, 拟合得到: $\alpha = \frac{c_3}{c_1 - c_2} = 1.220 \pm 0.29(\text{stat.})$



形状因子拟合结果(II)

(ii). 将 ρ 的质量和宽度作为自由参数进行拟合:

$$\mathcal{A}(\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-) \approx \frac{N_c \epsilon_{\mu\nu\alpha\beta}}{16\sqrt{3}\pi^2 F_\pi^5} p_1^\mu p_2^\nu p_3^\alpha p_4^\beta \left((c_1 - c_2) \left[\frac{s_{12}}{D_\rho(s_{12})} + \frac{s_{34}}{D_\rho(s_{34})} - \frac{s_{14}}{D_\rho(s_{14})} - \frac{s_{23}}{D_\rho(s_{23})} \right] + c_3 \left[\frac{m_\rho^2(s_{12} + s_{34})}{D_\rho(s_{12})D_\rho(s_{34})} - \frac{m_\rho^2(s_{14} + s_{23})}{D_\rho(s_{14})D_\rho(s_{23})} \right] \right)$$



02

$J/\psi \rightarrow \gamma\eta', \eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ 的研究

事例初选条件

- 好带电径迹的挑选

- $|V_r| < 1.0\text{cm}, |V_z| < 10.0\text{cm}, |\cos\theta| < 0.93$

- $N=2, N_p = N_m = 1$

- 好光子的挑选

- 桶部: $E_{\text{barrel}} > 25\text{MeV}, |\cos\theta| < 0.8$

- 端盖: $E_{\text{endcap}} > 50\text{MeV}, |\cos\theta| \in (0.86, 0.92)$

- $0 \leq \text{TDC} \leq 14(\times 50\text{ns})$

- $N_\gamma \geq 5$

- 顶点拟合

- 对挑选出的带电径迹做顶点拟合

- 1C π^0 运动学拟合

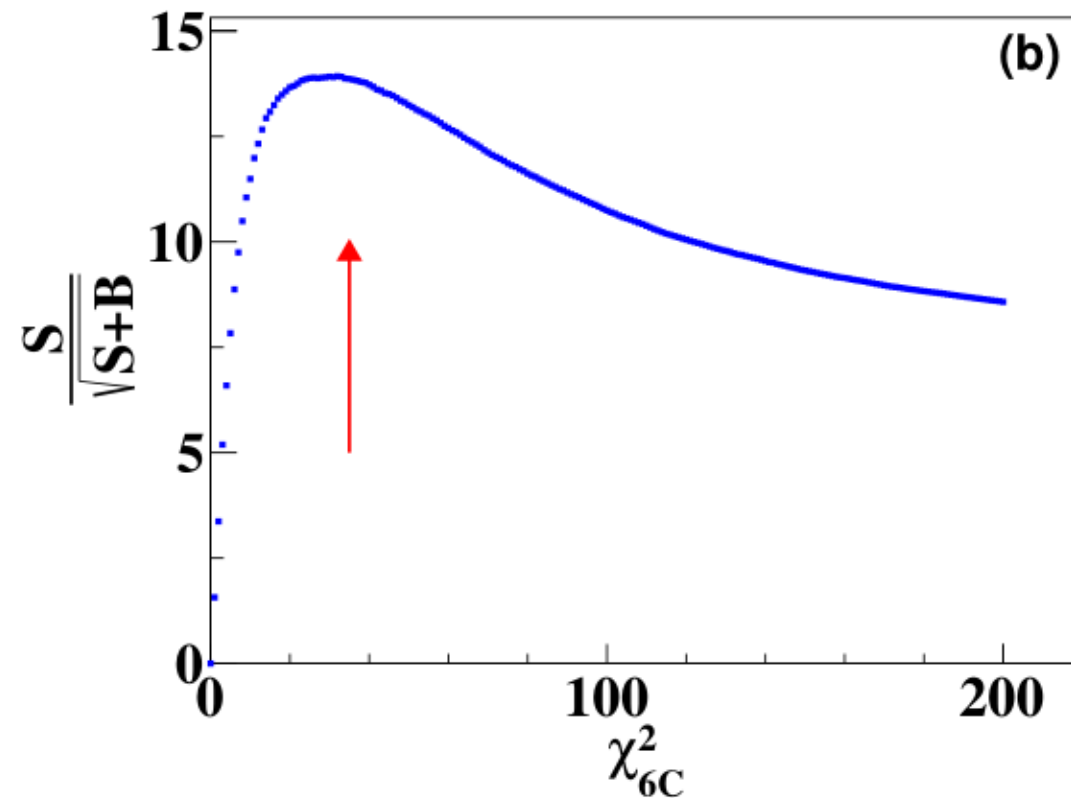
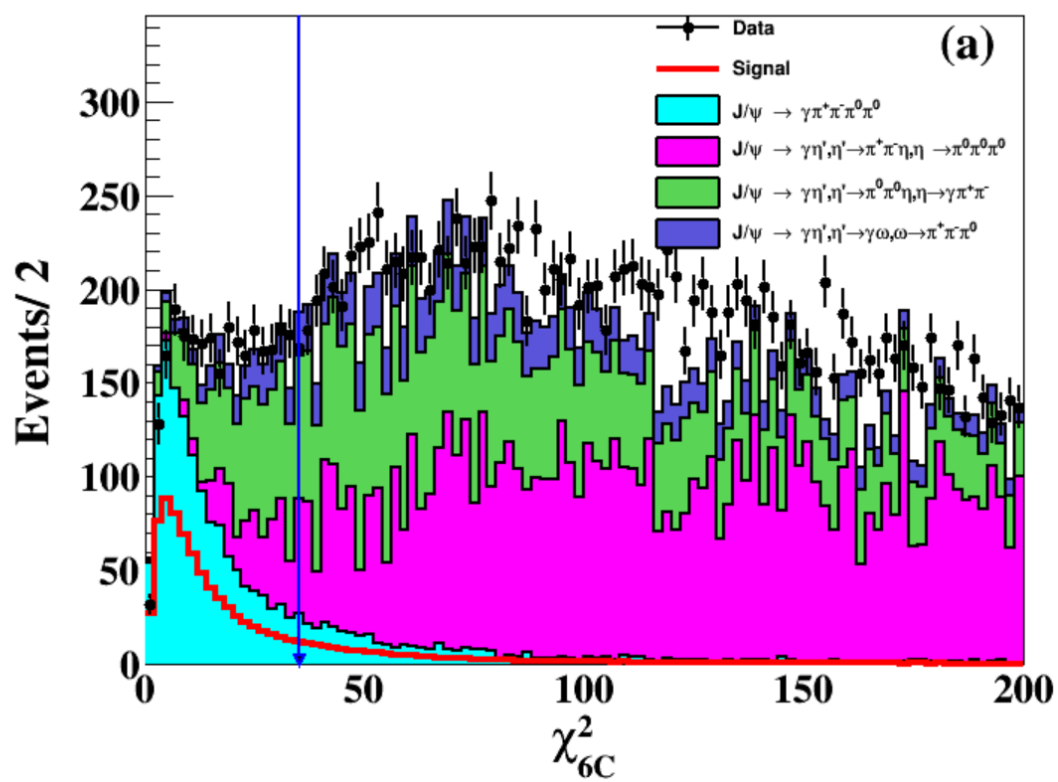
- 将任意两个光子的不变质量约束在 π^0 的不变质量上

- $\chi^2_{1c} < 50$

- 6C (4C+2C)运动学拟合

- 对通过挑选要求的带电径迹和光子做6C 运动学拟合

事例终选条件(I)

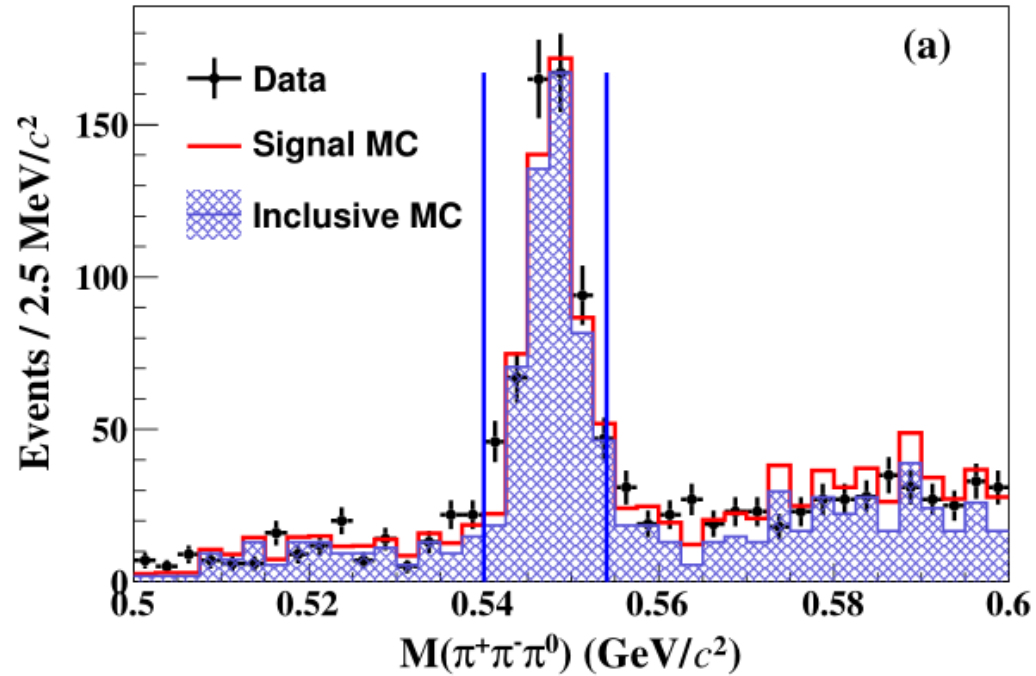


■ $\chi^2_{6C} < 35$

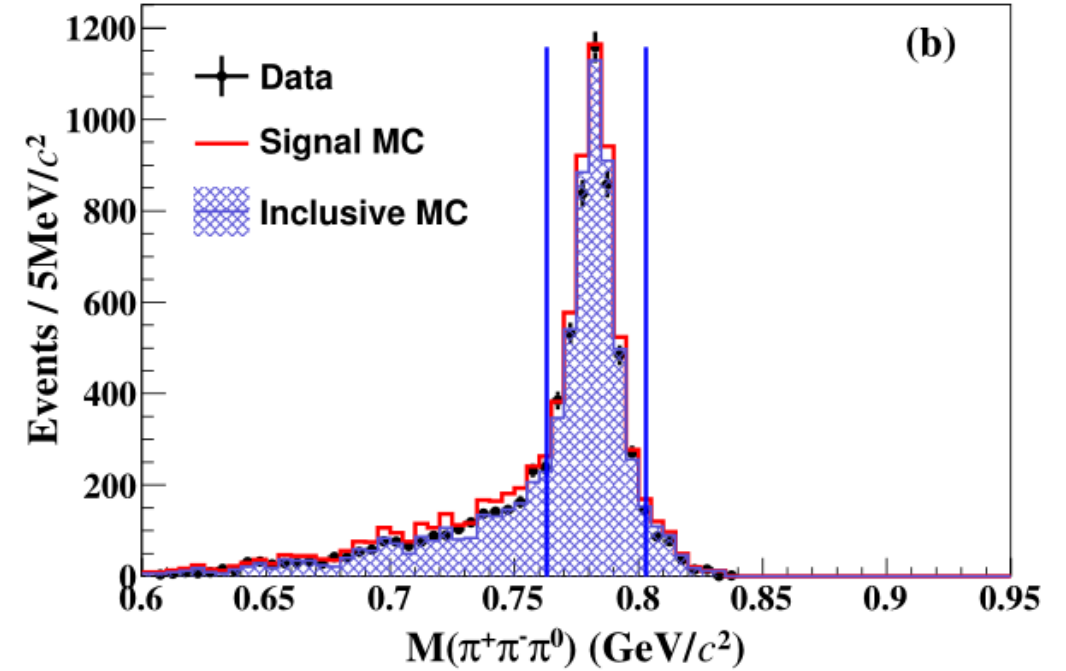
■ $\chi^2_{6C}(\gamma\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0) < \chi^2_{6C}(\gamma\gamma\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0)$

事例终选条件(II)

- Veto on $\eta/\omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$:

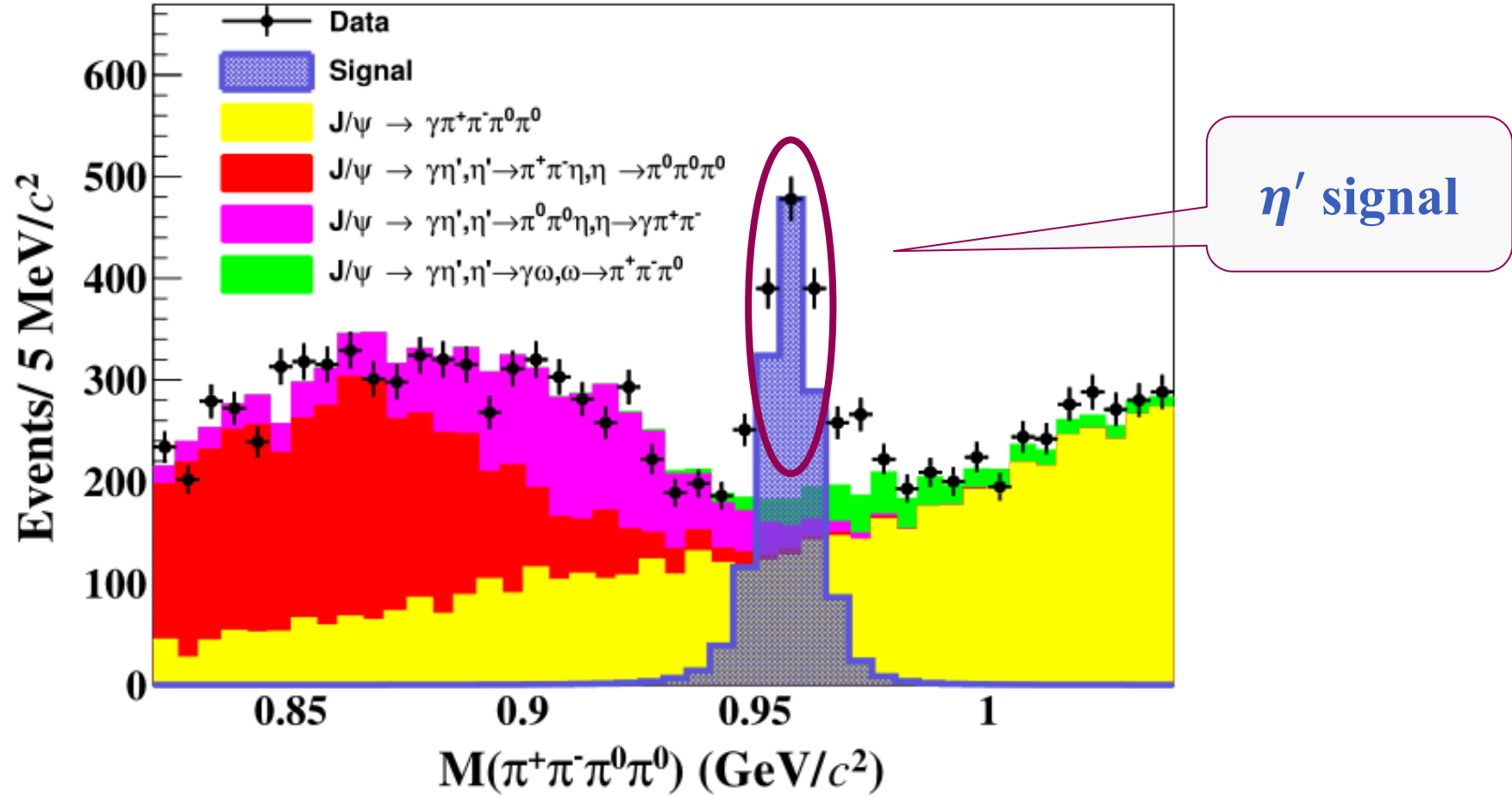


$$\blacksquare |M(\pi^+\pi^-\pi^0) - m_\eta| > 0.007 \text{ GeV}/c^2$$



$$\blacksquare |M(\pi^+\pi^-\pi^0) - m_\omega| > 0.02 \text{ GeV}/c^2$$

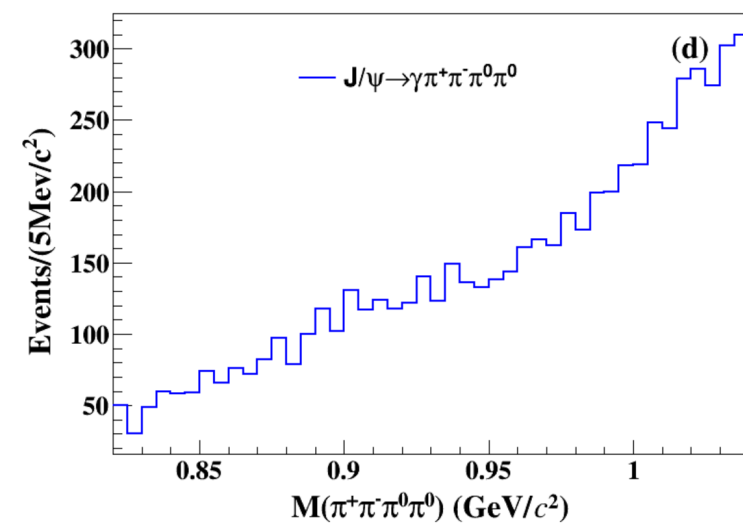
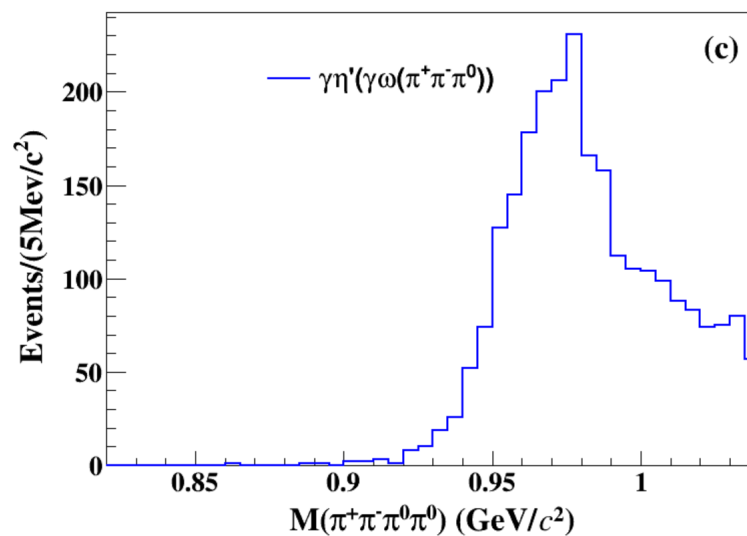
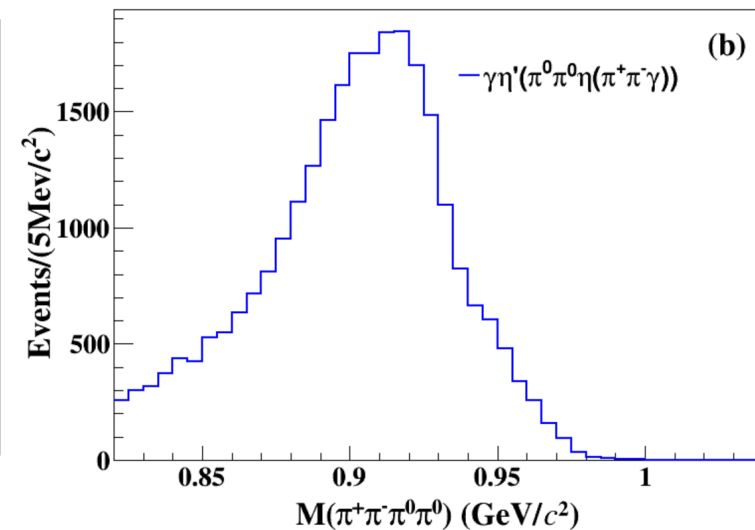
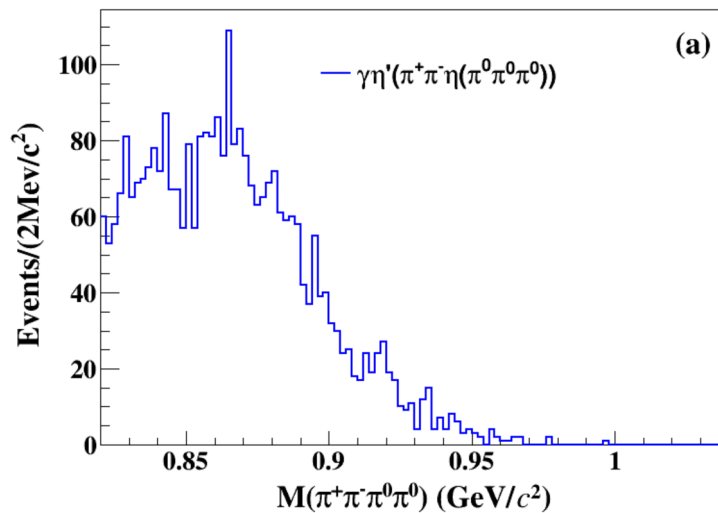
事例终选条件(III)



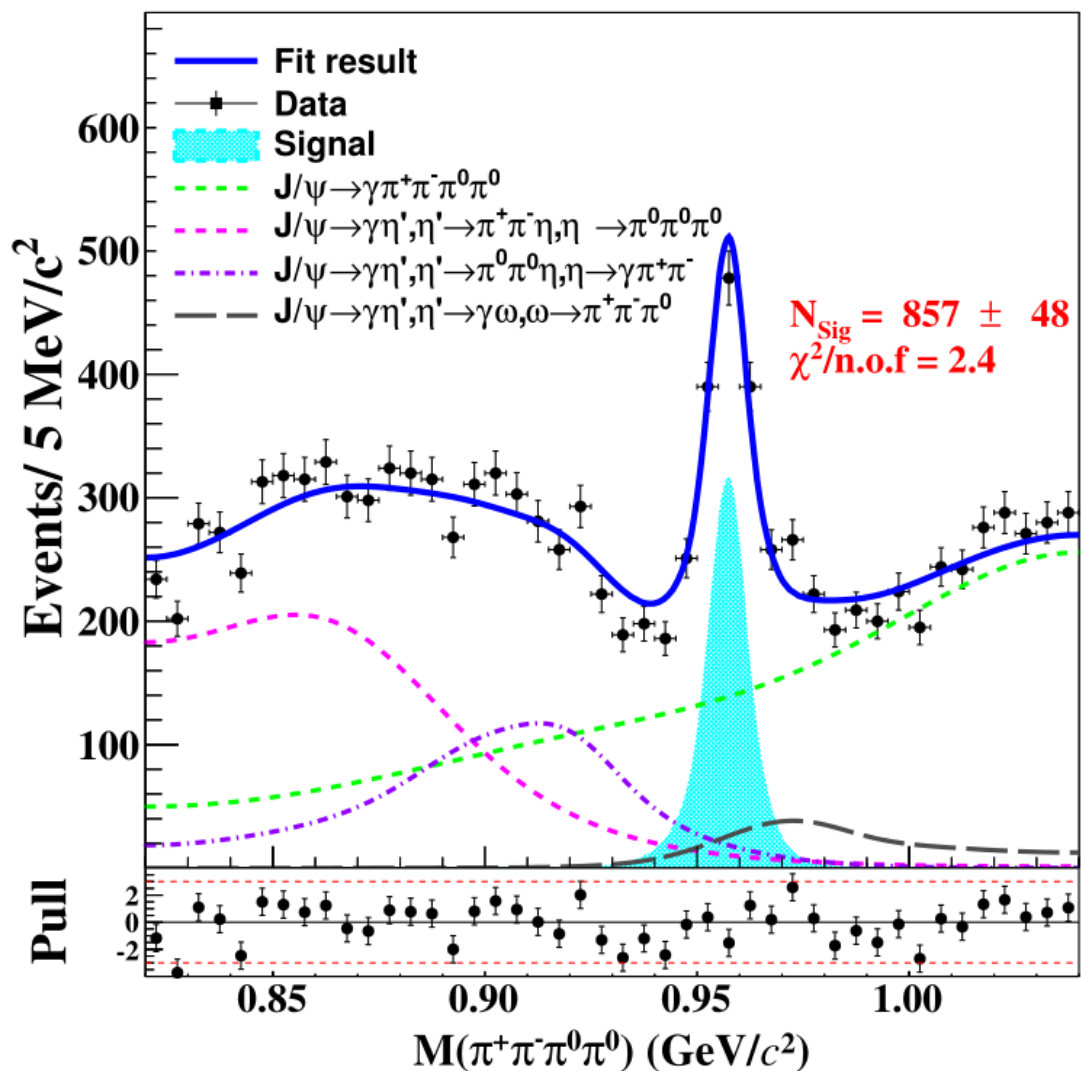
本底研究

● 峰状本底和相空间本底贡献:

- (a) $J/\psi \rightarrow \gamma\eta', \eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\eta, \eta \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$
- (b) $J/\psi \rightarrow \gamma\eta', \eta' \rightarrow \pi^0\pi^0\eta, \eta \rightarrow \gamma\pi^+\pi^-$
- (c) $J/\psi \rightarrow \gamma\eta', \eta' \rightarrow \gamma\omega, \omega \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$
- (d) $J/\psi \rightarrow \gamma\pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$



拟合结果



$$\blacksquare \mathcal{B}(\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0) = \frac{N_{sig}}{N_{J/\psi} \cdot \mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \gamma \eta') \cdot \epsilon \cdot \mathcal{B}(\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma) \mathcal{B}(\pi^0 \rightarrow \gamma \gamma)}$$

Mode	N_{sig}	$\epsilon(\%)$	$\mathcal{B}(\times 10^{-5})$
$\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^0 \pi^0$	857 ± 48	7.8	$2.16 \pm 0.12(stat)$

03

$J/\psi \rightarrow \gamma\eta', \eta' \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0\pi^0$ 的研究

事例初选条件

● 好带电径迹的挑选

■ $|V_r| < 1.0\text{cm}, |V_z| < 10.0\text{cm}, |\cos\theta| < 0.93$

■ $N=0$

● 好光子的挑选

■ 桶部: $E_{\text{barrel}} > 25\text{MeV}, |\cos\theta| < 0.8$

■ 端盖: $E_{\text{endcap}} > 50\text{MeV}, |\cos\theta| \in (0.86, 0.92)$

■ $-10 \leq \text{TDC} \leq 10 (\times 50\text{ns})$

■ $N_\gamma \geq 9$

● 1C π^0 运动学拟合

■ 将任意两个光子的不变质量约束在 π^0 的不变质量上

■ $\chi_{1C}^2 < 10$

■ $N_{\pi^0} \geq 4$

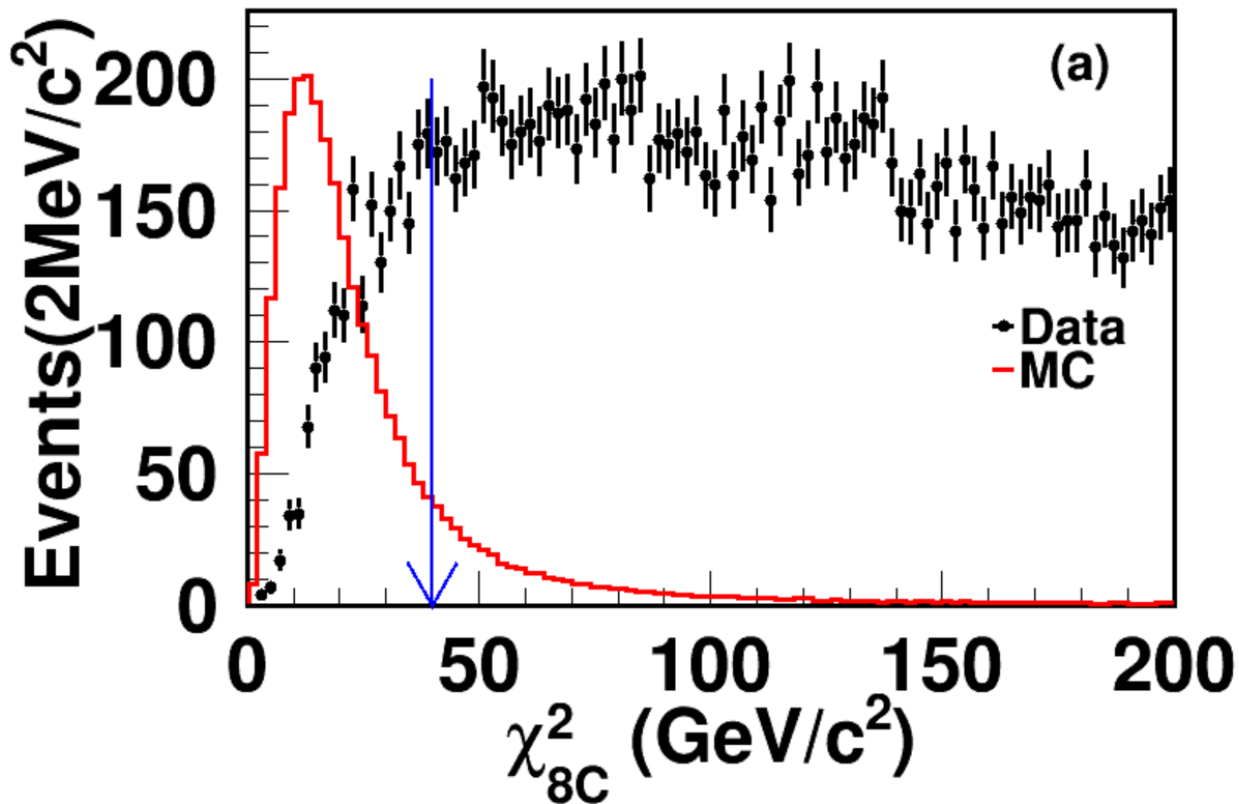
● 4C 运动学拟合

■ 对末态粒子为 $\gamma\gamma\pi^0\pi^0\pi^0\pi^0$ 、 $\gamma\gamma\gamma\pi^0\pi^0\pi^0\pi^0$ 做4C 运动学拟合

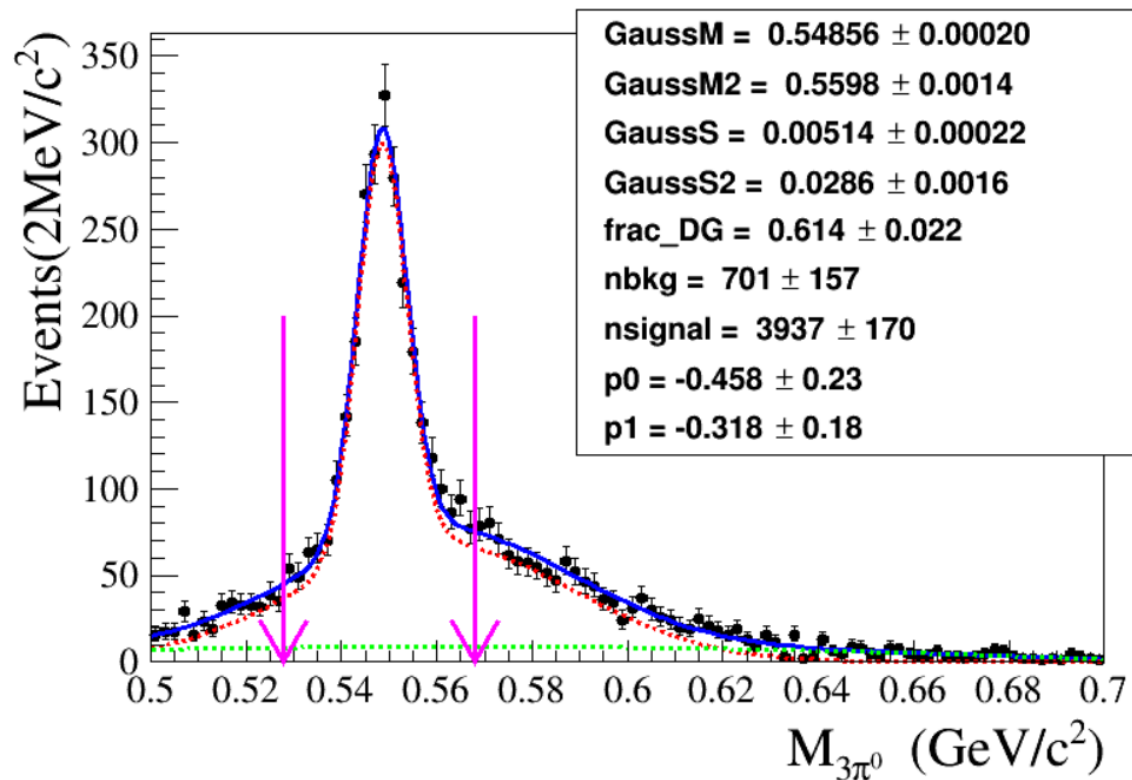
● 8C (4C+4C) 运动学拟合

■ 对共振态 J/ψ 能量动量守恒和四个 π^0 的不变质量进行8C 运动学约束，取运动学拟合结果 χ_{8C}^2 最小的一组作为候选事例

事例终选条件



- $\chi^2_{8c} < 40$
- $\chi^2_{4c}(\gamma\pi^0\pi^0\pi^0\pi^0) < \chi^2_{4c}(\gamma\gamma\pi^0\pi^0\pi^0\pi^0)$
- $\chi^2_{4c}(\gamma\pi^0\pi^0\pi^0\pi^0) < \chi^2_{4c}(\gamma\gamma\gamma\pi^0\pi^0\pi^0\pi^0)$

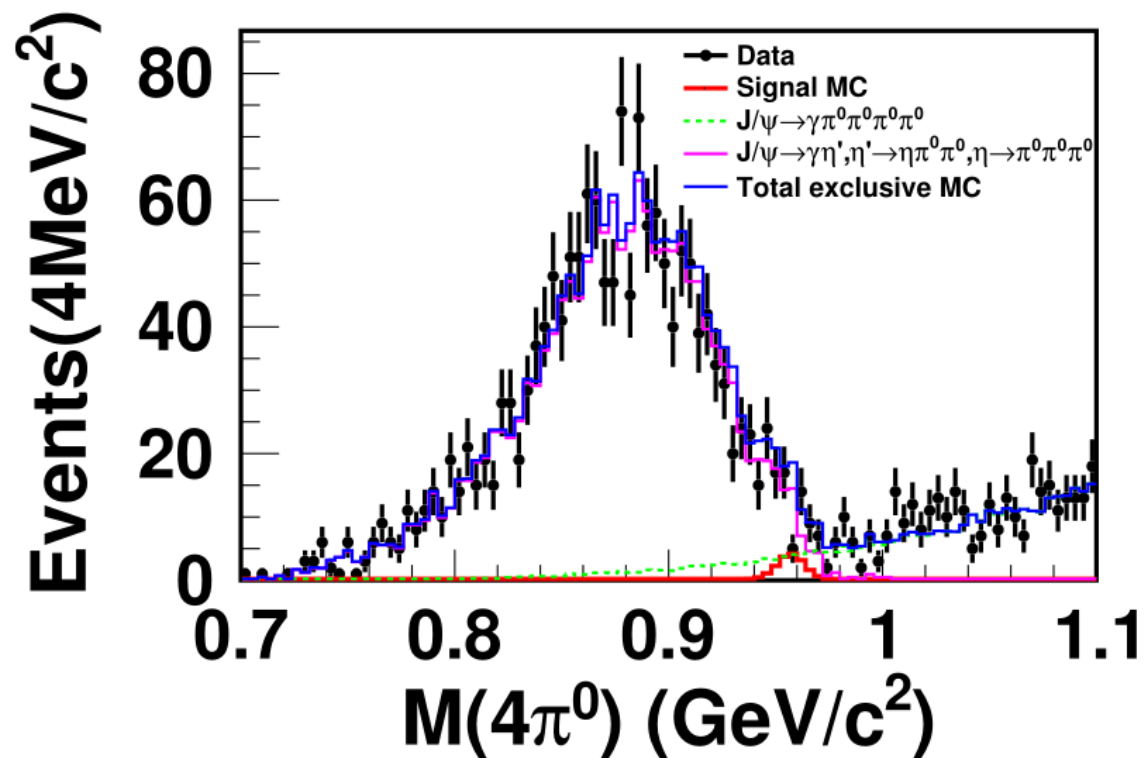


- Veto $\eta \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$:

$$|M_{3\pi^0_i} - M_{\eta}^{\text{PDG}}| > 0.02 \text{ GeV}/c^2 \quad (i = 1, 2, 3, 4)$$

本底研究

- 在 $4\pi^0$ 的不变质量谱上主要本底道的贡献:



* Red histogram is the expected shape of the signal contribution, with arbitrary normalisation.

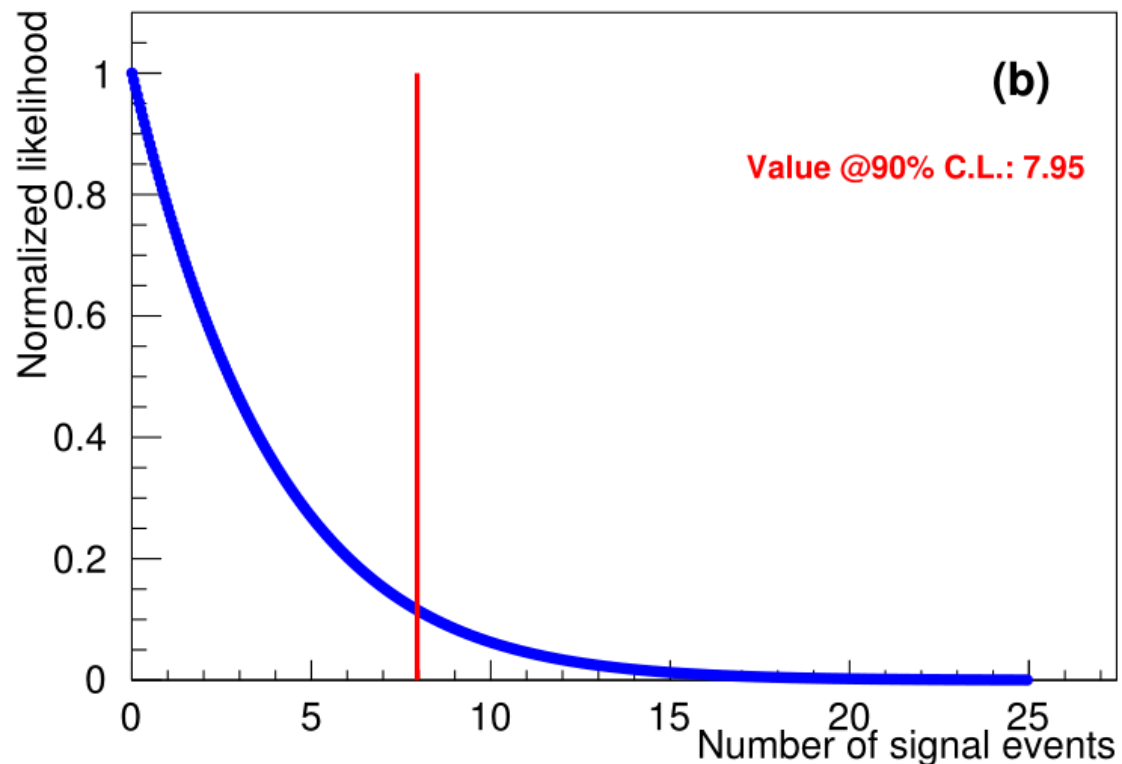
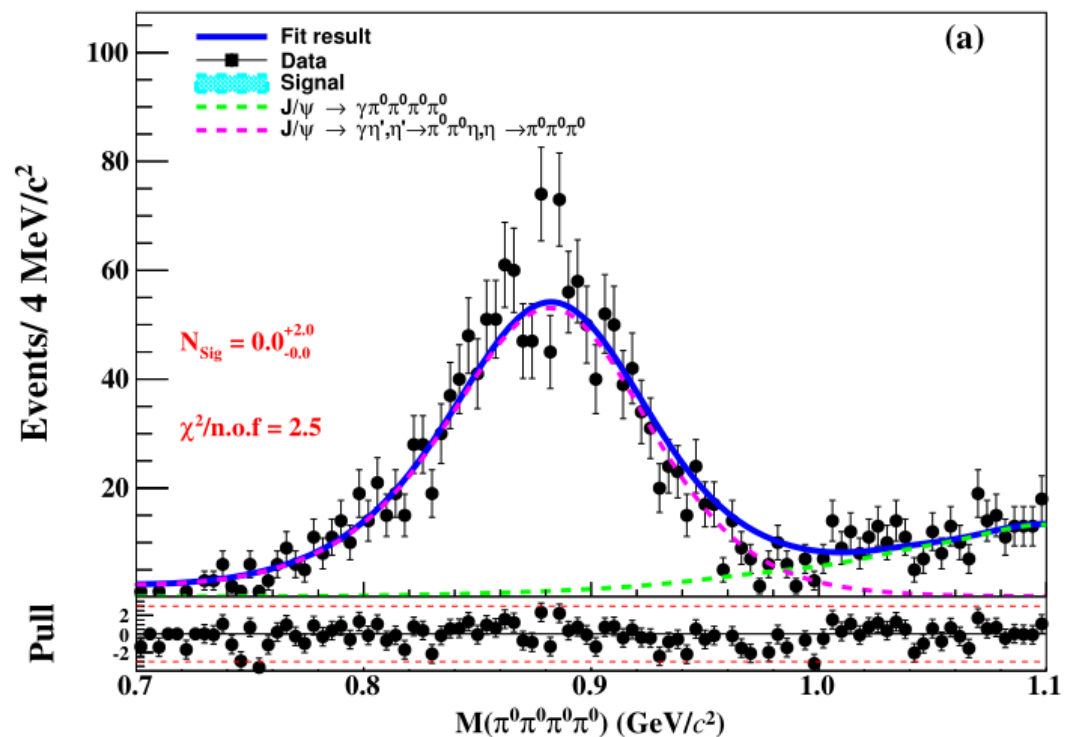
- **峰状**本底的贡献来自于:

$$J/\psi \rightarrow \gamma\eta', \eta' \rightarrow \pi^0\pi^0\eta, \eta \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0$$

- **相空间**本底的贡献来自于:

$$J/\psi \rightarrow \gamma\pi^0\pi^0\pi^0\pi^0$$

拟合结果



➤ 信号事例数上限:

- 采用贝叶斯方法来计算在90%置信度下的信号事例数上限结果.
- 利用信号事例数上限值 $N_{UL} = 7.95$, 来计算分支比上限.

分支比结果测量的系统误差(I)

◎ I. J/ψ 数据总事例^[1]: 系统误差为0.44%

◎ II. 带电径迹的重建^[2]: 每条带电径迹的系统误差为0.5%

◎ III. 光子的探测效率^[3]: 每条光子的系统误差为0.5%

◎ IV. 运动学拟合

- Mode I和Mode II: 以螺旋径迹参数修正前后效率的差异(0.6%和0.2%)作为该项系统误差^[4]
- Mode III: 将运动学拟合过程中的光子误差矩阵改变前后效率的差异(5.6%)作为该项系统误差^{[5] [6]}

◎ V. 质量窗: 主要来自 $\eta(\omega)$ 质量窗的影响

- Mode II和Mode III: 以上质量窗的系统误差(2.8%和3.0%)我们是通过改变质量窗区间对比得到的

◎ VI. 中间态衰变的分支比

- 计算分支比时, $J/\psi \rightarrow \gamma\eta'$ 、 $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ 的分支比都是引用自PDG, 系统误差分别为1.3%和0.03%

VII. 产生子模型

- Mode I和Mode II: 通过改变VMD模型中的参数值($c_1 - c_2$ 和 c_3 的值), 产生一系列的蒙特卡洛样本, 并比较前后探测效率的差异(0.8%和0.6%), 以此作为系统误差
- Mode III: 用相空间产生子模型代替DIY产生子模型, 并比较前后探测效率的差异(0.1%), 以此作为系统误差

Mode I: $J/\psi \rightarrow \gamma\eta', \eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$
Mode II: $J/\psi \rightarrow \gamma\eta', \eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$
Mode III: $J/\psi \rightarrow \gamma\eta', \eta' \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0\pi^0$

[1] H. X. Yang *et al.*, Chin. Phys. C 46, 074001 (2022).
[2] Fang Liu *et al.*, BESIII. Analysis. Memo-00504.
[3] V. Prasad, M. Ablikim, BESIII DocDB. 765 (2020).

[4] M. Ablikim *et al.* [BESIII Collaboration], Phys. Rev. D 87(1): 012002 (2013).
[5] M. Ablikim *et al.* [BESIII Collaboration], Phys. Rev. D 94 072005 (2016).
[6] M. Ablikim *et al.* [BESIII Collaboration], Phys. Rev. Lett. 104, 132002 (2010).

分支比结果测量的系统误差(II)

◎ VIII. 拟合

● 信号形状

- Mode I和Mode II: 通过将信号蒙卡形状卷积高斯函数替换为信号蒙卡形状来描述信号, 并以前后的差异(0.6%和0.1%)作为系统误差
- Mode III: 通过将信号蒙卡形状替换为信号蒙卡形状卷积高斯函数来描述信号, 得到新的分支比上限值为 1.02×10^{-5}

● 相空间本底形状

- Mode I和Mode II: 利用三阶切比雪夫多项式代替蒙特卡洛形状来描述相空间本底道, 并以和原结果的差异(0.2%和1.6%)作为系统误差
- Mode III: 用二阶切比雪夫多项式代替蒙特卡洛形状来描述相空间本底道, 得到新的分支比上限值为 1.0×10^{-5}

- 拟合区间: 通过改变拟合区间, 得到一组新的分支比上限值

- 峰状本底形状: 信号过程 $\eta' \rightarrow 4\pi^0$, 利用蒙卡形状卷积高斯函数代替蒙卡形状来描述峰状本底道, 得到新的分支比上限值为 1.26×10^{-5}

● 峰状本底事例数

- Mode I和Mode II: 通过将峰状本底的事例数固定得到新的拟合结果, 并以和原结果的差异(0.4%和0.09%)作为系统误差
- Mode III: 通过将峰状本底衰变道中各个子衰变道的分支比变化一倍的标准差, 得到新的分支比上限值为 1.15×10^{-5}

分支比结果测量的系统误差(III)

误差来源	$\eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ (%)	$\eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ (%)
带电径迹的重建	2	1
光子的探测效率	0.5	2.5
运动学拟合	0.6	0.2
峰状本底事例数	0.4	0.09
连续性本底形状	0.2	1.6
信号形状	0.6	0.1
$\eta(\omega)$ 质量窗	—	2.8
$\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \gamma\eta')$	1.3	1.3
$\mathcal{B}(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)$	—	0.06
J/ψ 事例数	0.44	0.44
信号产生子模型	0.8	0.6
总计	2.8	4.5

□ Mode I和 Mode II的系统误差总结

可加性系统误差：

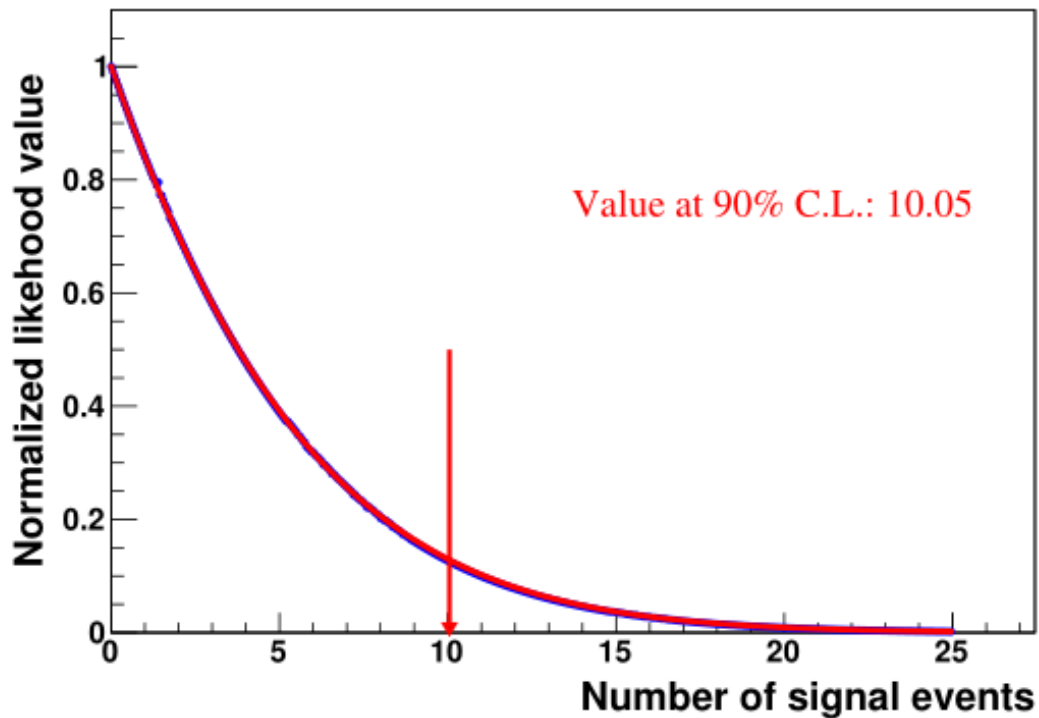
拟合范围/(GeV/ c^2)	$\mathcal{B}^{UL} \times 10^{-5}$
0.7 - 1.095	1.01
0.7 - 1.105	1.02
0.705 - 1.1	1.01
0.705 - 1.095	1.01
0.705 - 1.105	1.02
信号形状	
MC 形状卷积高斯函数	1.02
连续性本底形状	
二阶多项式	1.0
峰状本底形状	
MC 形状卷积高斯函数	1.26
峰状本底的数目	
1465	1.15

□ Mode III的系统误差总结

可乘性系统误差：

误差来源	$\eta' \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0\pi^0$ (%)
光子探测效率	4.5
运动学拟合	5.6
η 质量窗	3.0
$\mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \gamma\eta')$	1.3
$\mathcal{B}(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma)$	0.12
J/ψ 事例数	0.44
信号产生子模型	0.1
总计	8.0

信号/分支比上限



*Normalized likelihood distribution before (blue dots) and after (red dots) convolution.

- 为了保守地估计 $\eta' \rightarrow 4\pi^0$ 的分支比上限，利用高斯函数卷积似然分布，其中高斯函数的参数与总的可乘性系统误差相关联：

$$L'(N) = \int_0^1 L\left(\frac{S}{\hat{S}}N\right) \exp\left[-\frac{(S-\hat{S})^2}{2\sigma_S^2}\right] dS$$

$$\mathcal{B}^{UL} < \frac{N_{UL}}{N_{J/\psi} \cdot \mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \gamma\eta') \cdot \varepsilon \cdot (\mathcal{B}(\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma))^4}$$

Mode	N_{UL}	$\varepsilon(\%)$	$\mathcal{B}(\times 10^{-5})$
$\eta' \rightarrow 4\pi^0$	10.05	1.6	<1.28

形状因子测量的系统误差

- ◎ **I. 带电径迹的重建:** 将蒙特卡洛样本中的每个事例都按权重因子进行加权, 加权后的蒙特卡洛样本用于MC 积分, 并比较前后拟合结果的差异(0.08%), 以此作为系统误差
- ◎ **II. ρ 的宽度:** 将固定的 ρ 的宽度值变化一倍的标准差进行拟合, 并比较前后拟合结果的差异(0.2%), 以此作为系统误差
- ◎ **III. ρ 的质量:** 将固定的 ρ 的质量变化一倍的标准差进行拟合, 并比较前后拟合结果的差异(0.7%), 以此作为系统误差
- ◎ **IV. 运动学拟合:** 以螺旋径迹参数修正后的蒙特卡洛样本进行MC 积分, 并比较前后拟合结果的差异(0.5%), 以此作为系统误差

◎ V. 相空间本底

- 利用三阶切比雪夫多项式代替蒙特卡洛形状进行MC 积分, 前后拟合结果的差异(2.0%)作为系统误差

◎ VI. 峰状本底

- 通过固定峰状本底的事例数进行MC 积分, 并比较前后拟合结果的差异(2.9%), 以此作为系统误差

◎ VII. 系统误差的总结

来源	$\eta' \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ \pi^-$ (%)
带电径迹的重建	0.08
ρ 的宽度	0.2
ρ 的质量	0.7
4C-运动学拟合	0.5
连续性本底	2.0
峰状本底	2.9
总计	3.6

总结与展望

总结与展望

使用BESIII探测器上采集的100亿 J/ψ 事例, 对 $\eta' \rightarrow 4\pi$ 开展了深入研究:

- ✓ 精确测量 $\eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ 和 $\eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$ 的分支比结果, 与先前BESIII测量的结果一致, 并且**精度显著提高**。
- ✓ 利用挑选后的干净的 $\pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ 数据样本, **首次提取了 $\eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$ 中的类时形状因子**。通过将 ρ 的质量和宽度固定为PDG中的值, 测量参数 $\frac{c_3}{c_1-c_2}$ 的比值为: $1.220 \pm 0.29(stat.) \pm 0.04(sys.)$, 这项结果与理论计算中使用的值一致。
- ✓ 由于未观测到 $\eta' \rightarrow 4\pi^0$ 过程的信号, 我们给出了 **90% 置信度下的分支比上限**, 这项结果比之前BESIII实验测量精度提高了3倍。
- ✓ BESIII实验能够从不同的方面研究 η' 衰变, 从而更深入理解 η' 衰变机制、基本对称性以及检验手征微扰理论等。

Mode	N_{sig}	$\varepsilon(\%)$	$Br(\eta' \rightarrow X)(\text{this work})$	$Br(\eta' \rightarrow X)(\text{pre.result})$ [1] [2]
$\eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^+\pi^-$	1650 ± 48	36.4	$(8.56 \pm 0.25(stat.) \pm 0.24(sys.)) \times 10^{-5}$	$(8.53 \pm 0.69(stat.) \pm 0.64(sys.)) \times 10^{-5}$
$\eta' \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0\pi^0$	857 ± 48	7.8	$(2.16 \pm 0.12(stat.) \pm 0.10(sys.)) \times 10^{-4}$	$(1.82 \pm 0.35(stat.) \pm 0.18(sys.)) \times 10^{-4}$
$\eta' \rightarrow \pi^0\pi^0\pi^0\pi^0$	< 10.05	1.6	$< 1.28 \times 10^{-5}$	$< 4.94 \times 10^{-5}$

[1] M. Ablikim *et al.* [BESIII Collaboration], Phys. Rev. Lett. 113, 039903 (2014).

[2] M. Ablikim *et al.* [BESIII Collaboration], Phys. Rev. D 101, 032001 (2020).



恳请各位老师批评指正！

THANKS!😊