



超级陶粲装置上 $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$ 衰变的预研

宋勇

中国科学技术大学

2025超级陶粲装置研讨会
湖南湘潭 2025.07.04



- 研究背景简介
- 进展介绍
 - 单、双标效率
 - 主要物理本底简要分析
- 总结

- 研究背景简介
- 进展介绍
 - 单、双标效率
 - 主要物理本底简要分析
- 总结

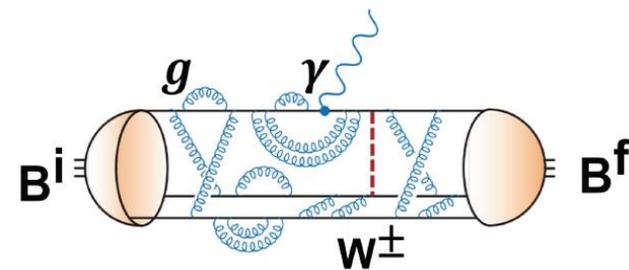
超子弱辐射衰变的研究动机

● 超子弱辐射衰变是研究超子内部结构和衰变性质的重要过程

- 通过同时测量衰变宽度 Γ 和衰变不对称参数 α_γ ，可以得到超子弱辐射衰变的两个形状因子的几乎全部信息

$$\Gamma = \frac{e^2 G_F^2}{\pi} (|a|^2 + |b|^2) |\vec{k}|^3 \quad \alpha_\gamma = \frac{2\text{Re}(ab^*)}{|a|^2 + |b|^2}$$

a和b两个复数是宇称守恒和宇称破缺的形状因子，它们既反映超子内部结构的信息，也描述其衰变的性质



超子弱辐射衰变的费曼示意图

● 超子弱辐射衰变中的CP破缺寻找

● 超子弱辐射衰变的高精度测量结果有助于超子半轻子衰变中寻找新物理

STCF上超子弱辐射衰变研究的优势与挑战

●优势

- ◆ 除了BESIII实验,过去六十多年来关于超子弱辐射衰变的实验测量结果均来自固定靶实验
 - 利用双标记方法,能够进行绝对分支比的测量,抵消多项系统误差
 - 超子通过 J/ψ 的衰变成对产生,其独特的运动学性质和物理机制能够极大提升超子衰变不对称参数的测量精度
- ◆ 超子弱辐射的分支比比强子末态低三个量级左右,相较于BES,STCF提升>50倍亮度,有利于统计误差的减小

●挑战

- ◆ 超子弱辐射衰变的末态光子是重要的测量对象,STCF中的束流本底对光子的测量带来挑战,影响到超子弱辐射衰变的高精度测量

利用 $J/\psi \rightarrow \Sigma^+ \bar{\Sigma}^-$ 过程进行 $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$ 衰变的研究

● 绝对分支比的测量

- ◆ 单标记(ST)事例: 重建 $\bar{\Sigma}^- \rightarrow \bar{p}\pi^0$ 事例来标记 $J/\psi \rightarrow \Sigma^+ \bar{\Sigma}^-$, 得到ST产额

$$N_{\text{ST}} = N_{J/\psi \rightarrow \Sigma^+ \bar{\Sigma}^-} \times \mathcal{B}_{\bar{\Sigma}^- \rightarrow \bar{p}\pi^0} \times \epsilon_{\text{ST}}$$

- ◆ 双标记(DT)事例: 在ST事例的反冲端去重建 $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$, 得到DT产额

$$N_{\text{DT}} = N_{J/\psi \rightarrow \Sigma^+ \bar{\Sigma}^-} \times \mathcal{B}_{\bar{\Sigma}^- \rightarrow \bar{p}\pi^0} \times \mathcal{B}_{\Sigma^+ \rightarrow p\gamma} \times \epsilon_{\text{DT}}$$

- ◆ 绝对分支比:

$$\mathcal{B}_{\Sigma^+ \rightarrow p\gamma} = \frac{N_{\text{DT}}}{N_{\text{ST}}} \times \frac{\epsilon_{\text{ST}}}{\epsilon_{\text{DT}}}$$

● CP破缺研究

- ◆ $\Delta_{\text{CP}} = \frac{\mathcal{B}_+ - \mathcal{B}_-}{\mathcal{B}_+ + \mathcal{B}_-}$, \mathcal{B}_+ (\mathcal{B}_-) 表示 $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$ ($\bar{\Sigma}^- \rightarrow \bar{p}\gamma$) 的分支比

- ◆ $A_{\text{CP}} = \frac{\alpha_\gamma - \bar{\alpha}_\gamma}{\alpha_\gamma + \bar{\alpha}_\gamma}$, α_γ ($\bar{\alpha}_\gamma$) 表示 $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$ ($\bar{\Sigma}^- \rightarrow \bar{p}\gamma$) 的衰变不对称参数

利用 $J/\psi \rightarrow \Sigma^+ \bar{\Sigma}^-$ 过程进行 $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$ 衰变的研究

衰变不对称参数的测量

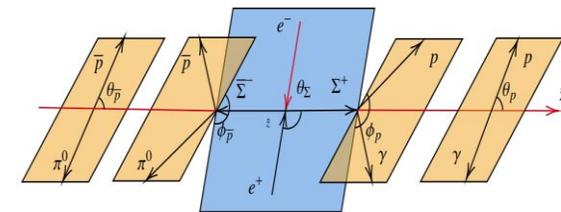
◆ 信号过程中输入参数为 $\xi = (\theta_\Sigma, \theta_p, \phi_p, \theta_{\bar{p}}, \phi_{\bar{p}})$:

◆ $d\sigma \propto W(\xi)d\xi$ 由4个角分布参数进行描述: $\alpha_\psi, \Delta\Phi, \alpha_\gamma, \bar{\alpha}_0$

$$\begin{aligned} W(\xi) = & \mathcal{F}_0(\xi) + \alpha_\psi \mathcal{F}_5(\xi) + \alpha_\gamma \bar{\alpha}_0 \\ & \times \left[\mathcal{F}_1(\xi) + \sqrt{1 - \alpha_\psi^2} \cos(\Delta\Phi) \mathcal{F}_2(\xi) + \alpha_\psi \mathcal{F}_6(\xi) \right] \\ & + \sqrt{1 - \alpha_\psi^2} \sin(\Delta\Phi) [\alpha_\gamma \mathcal{F}_3(\xi) + \bar{\alpha}_0 \mathcal{F}_4(\xi)] \end{aligned}$$

◆ 构造似然函数定义为 $\mathcal{L} = \prod_{i=1}^N \frac{W_i(\xi, H)}{\mathcal{N}}$, 其中 $H = (\alpha_\psi, \Delta\Phi, \alpha_\gamma, \bar{\alpha}_0)$

◆ 最终处理的目标函数为: $S = -\ln \mathcal{L}_{\text{data}} + \ln \mathcal{L}_{\text{bkg}}$, 固定三个参数 $\alpha_\psi, \Delta\Phi, \bar{\alpha}_0$, 最小化似然函数 S 得到目标参数 α_γ



信号过程中的Helicity角的定义

- 研究背景简介
- 进展介绍
 - 单、双标效率
 - 主要物理本底简要分析
- 总结

单标记选择条件

● 径迹挑选条件:

➤ 带电径迹:

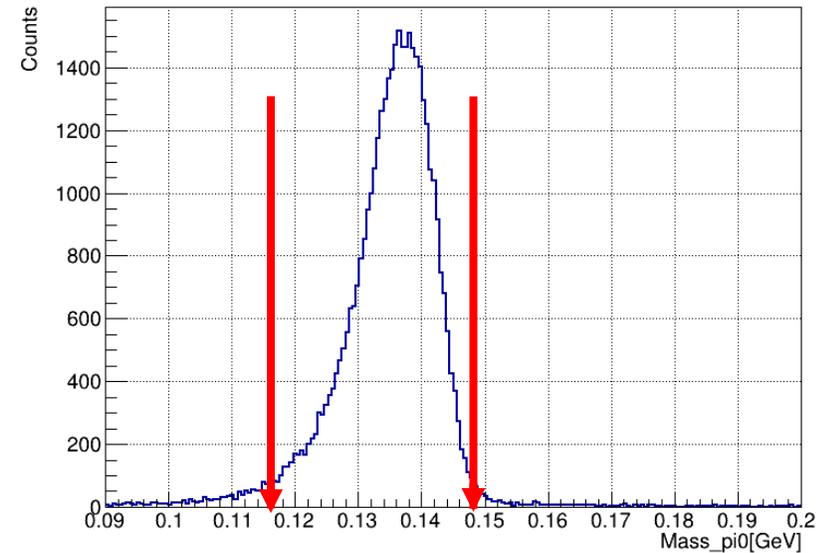
1. $|\cos\theta| < 0.93$
2. $V_r \leq 2 \text{ cm}, V_z \leq 10 \text{ cm}$
3. PID: $\text{Prob}(p) > \text{Prob}(\pi), \text{Prob}(p) > \text{Prob}(k)$

➤ 光子:

1. 桶部: $|\cos\theta| < 0.8325, E > 25 \text{ MeV};$
端盖: $0.8325 < |\cos\theta| < 0.9445, E > 50 \text{ MeV}$
2. 与反质子夹角 $> 20^\circ$, 与其他带电粒子夹角 $> 10^\circ$

● ST事例挑选条件:

1. 好带电径迹数量不超过两条
2. 至少有一个动量大 $0.5 \text{ GeV}/c$ 的反质子/质子
3. 至少两个好光子来重建 π^0
4. $116 < m_{\gamma\gamma} < 148 \text{ MeV}/c^2$



Truth-Matched π^0 质量重建

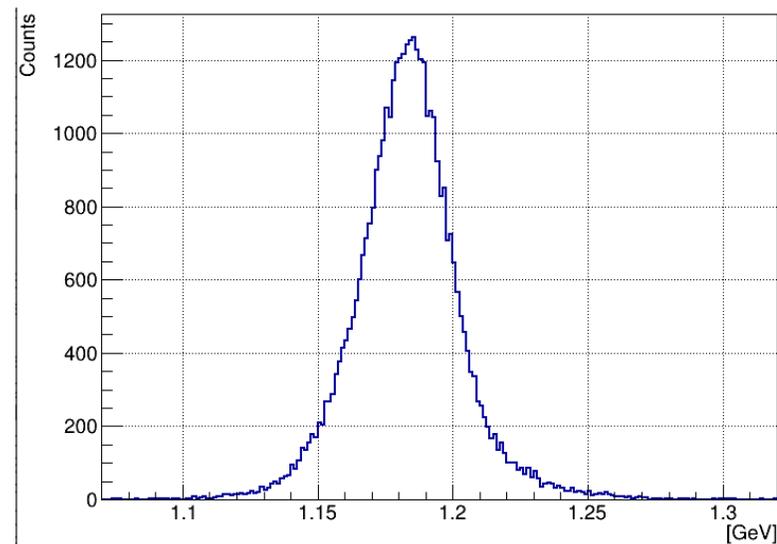
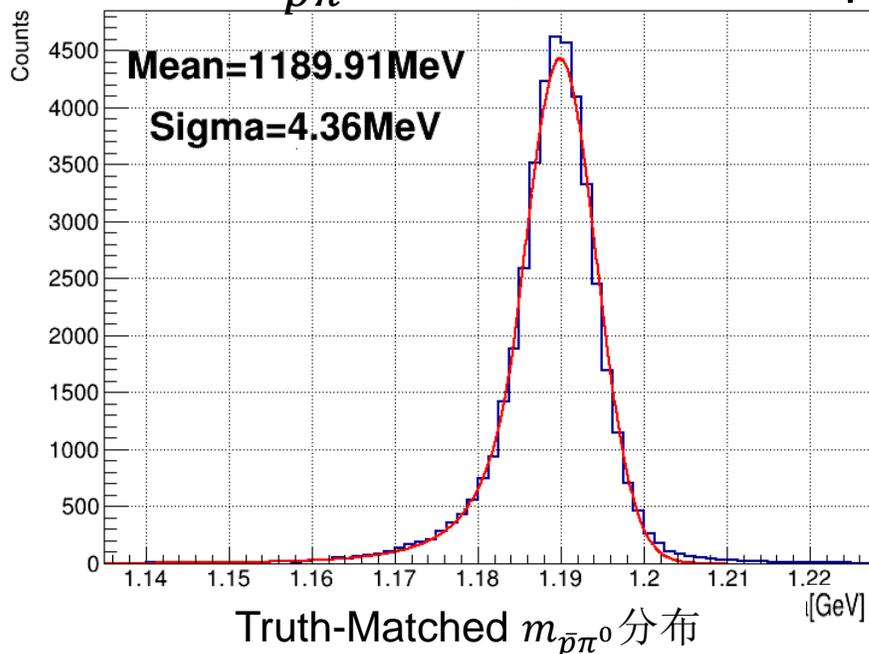
ST事例重建

- ST候选事件由两个变量进行识别，不变质量 $m_{\bar{p}\pi^0}$ 和反冲质量 M_{rec} :

$$m_{\bar{p}\pi^0} = \sqrt{(E_{\bar{p}} + E_{\pi^0})^2 - (\mathbf{p}_{\bar{p}} + \mathbf{p}_{\pi^0})^2}$$

$$M_{rec} = \sqrt{(E_{cms} - E_{\bar{p}} - E_{\pi^0})^2 - (\mathbf{p}_{\bar{p}} + \mathbf{p}_{\pi^0})^2}$$

- 对于多个 π^0 候选者的事例， $m_{\bar{p}\pi^0}$ 与 Σ^+ 质量最接近的候选者被选为信号
- 不变质量 $m_{\bar{p}\pi^0}$ 进一步要求满足 $|m_{\bar{p}\pi^0} - m_{\Sigma^+}| < 13.5 \text{ MeV}/c^2$ (3倍质量分辨)

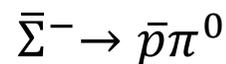


满足条件事例的反冲质量 M_{rec} 分布

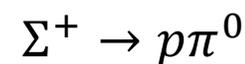
ST效率

● 两个电荷共轭过程的ST效率与BES的结果吻合

Cut条件	效率	单步效率
总事例数	100000 (100%)	—
NGoodChargeTrack<3	94981 (94.98%)	94.98%
找到反质子径迹	85992 (85.99%)	90.54%
NGoodPhoton>=2	82351 (82.35%)	95.77%
NGoodPi0>=1	50902 (50.90%)	61.81%
Good $\bar{\Sigma}^-$	39579 (39.58%)	77.76%



Cut条件	效率	单步效率
总事例数	100000 (100%)	—
NGoodChargeTrack<3	94949 (94.95%)	94.95%
找到质子径迹	85175 (85.18%)	89.71%
NGoodPhoton>=2	82496 (82.50%)	96.85%
NGoodPi0>=1	53922 (53.92%)	65.36%
Good Σ^+	44615 (44.62%)	82.74%



➤ BES结果: $\bar{\Sigma}^- \rightarrow \bar{p}\pi^0$ 的ST效率39.02%; $\Sigma^+ \rightarrow p\pi^0$ 的ST效率44.31%

双标记选择条件

● 在ST事例选择条件的基础上，DT事例挑选条件为：

1. 除ST端的反质子外，有且只有一个质子候选者
2. 至少3个好光子，信号光子的能量小于0.5GeV
3. 进行5C拟合(输入为ST端的反质子及 π^0 衰变的两个光子，DT端的质子及信号光子的四动量)，选择最小卡方组合
4. 根据DT分析中的本底组成，其主要本底是两个过程，在后续以其为主的本底分析中加入相应的cut条件去排除本底

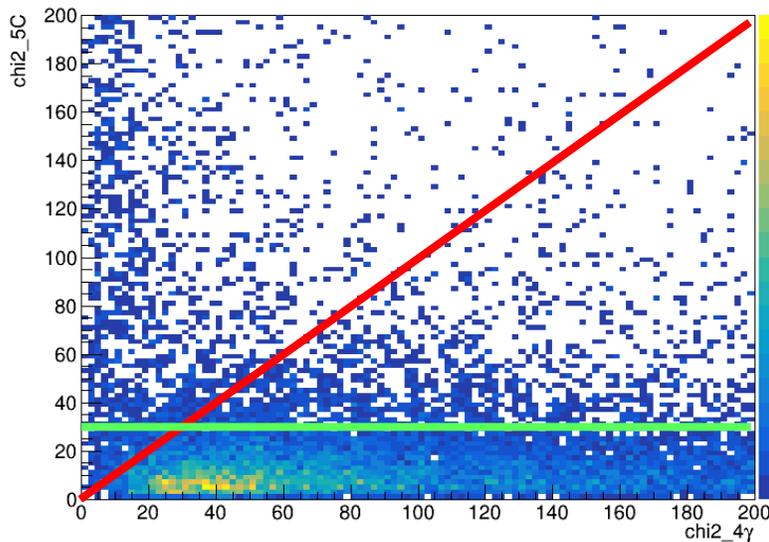
- $J/\psi \rightarrow \Sigma^+ \bar{\Sigma}^-, \Sigma^+ \rightarrow p\pi^0, \bar{\Sigma}^- \rightarrow \bar{p}\pi^0$
- $J/\psi \rightarrow \Delta^+ \bar{\Delta}^-, \Delta^+ \rightarrow p\pi^0, \bar{\Delta}^- \rightarrow \bar{p}\pi^0$

No.	衰变链	nEtr	nCEtr
1	$J/\psi \rightarrow \Sigma^+ \bar{\Sigma}^-, \Sigma^+ \rightarrow p\pi^0, \bar{\Sigma}^- \rightarrow \bar{p}\pi^0$	348332	348332
2	$J/\psi \rightarrow \Delta^+ \bar{\Delta}^-, \Delta^+ \rightarrow p\pi^0, \bar{\Delta}^- \rightarrow \bar{p}\pi^0$	128855	477187
3	$J/\psi \rightarrow \eta p \bar{p}, \eta \rightarrow \gamma\gamma$	7760	484947
4	$J/\psi \rightarrow p \bar{p} \pi^0 \pi^0$	6361	491308
5	$J/\psi \rightarrow \eta_c \gamma, \eta_c \rightarrow p \bar{p} \pi^0$	4580	495888
6	$J/\psi \rightarrow \Sigma^+ \bar{\Sigma}^-, \Sigma^+ \rightarrow p\gamma, \bar{\Sigma}^- \rightarrow \bar{p}\pi^0$	1881	497769
7	$J/\psi \rightarrow \omega p \bar{p}, \omega \rightarrow \pi^0 \gamma$	1741	499510
8	$J/\psi \rightarrow p \bar{p} \pi^0$	1727	501237
9	$J/\psi \rightarrow p\pi^0 \bar{\Delta}^-, \bar{\Delta}^- \rightarrow \bar{p}\pi^0$	1384	502621
10	$J/\psi \rightarrow \bar{p}\pi^0 \Delta^+, \Delta^+ \rightarrow p\pi^0$	1312	503933

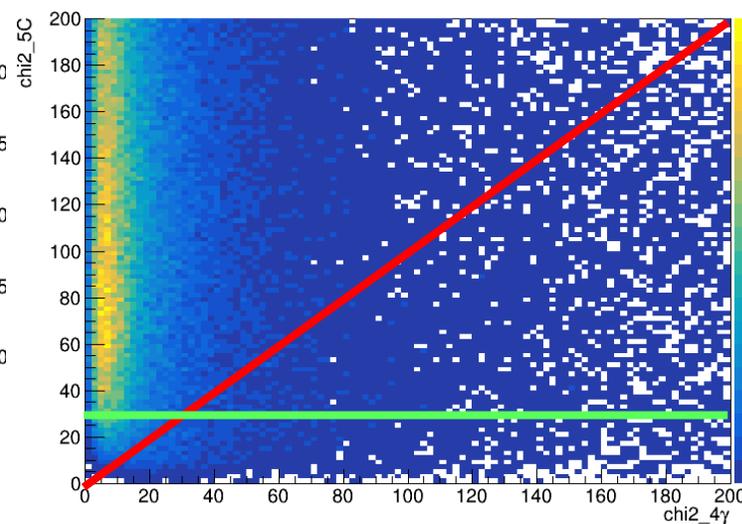
DT分析中的本底组成

主要本底分析

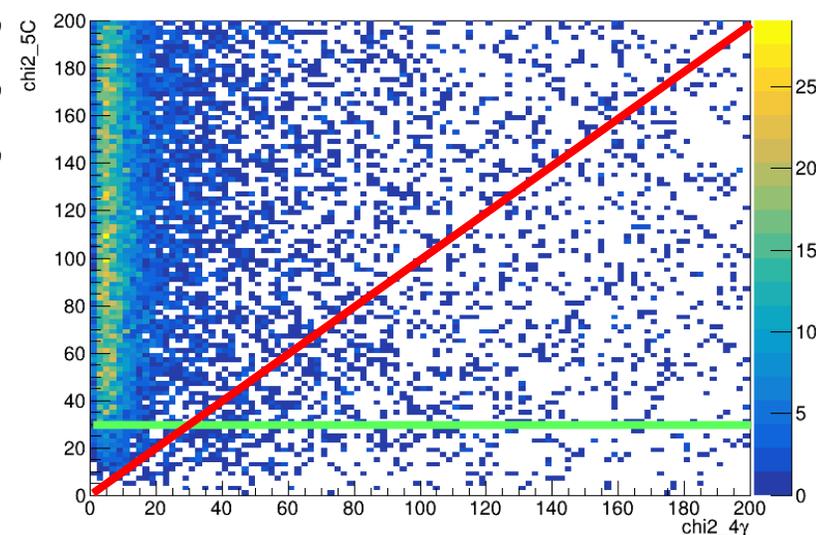
- 由于数据量的限制，目前只产生了两种主要本底过程，进行简要分析：
 - 末态包含两个 π^0 ，以 $p\bar{p} + 4\gamma$ 为末态假设的运动学拟合来进行排除，信号和两种主要本底的 $\chi_{4\gamma}^2 - \chi_{5C}^2$ 二维关系图可以看到显著差异



信号



$J/\psi \rightarrow \Sigma^+ \bar{\Sigma}^-$, $\Sigma^+ \rightarrow p\pi^0$, $\bar{\Sigma}^- \rightarrow \bar{p}\pi^0$

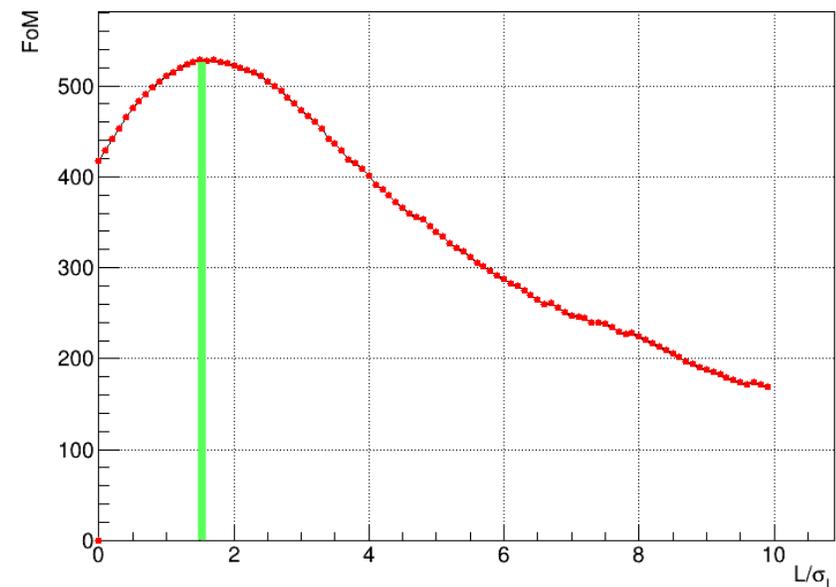
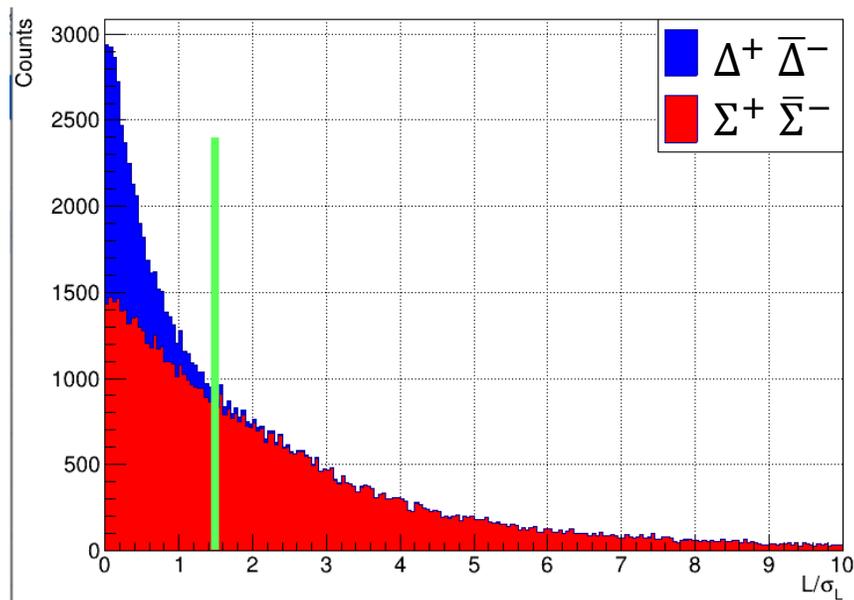


$J/\psi \rightarrow \Delta^+ \bar{\Delta}^-$, $\Delta^+ \rightarrow p\pi^0$, $\bar{\Delta}^- \rightarrow \bar{p}\pi^0$

- 要求 $p\bar{p} + 4\gamma$ 的拟合优度 $\chi_{4\gamma}^2$ 大于5C拟合优度 χ_{5C}^2 ，即图中红线下方的事例
- 同时要求 $\chi_{5C}^2 < 30$ ，即图中绿线下方的事例

主要本底分析

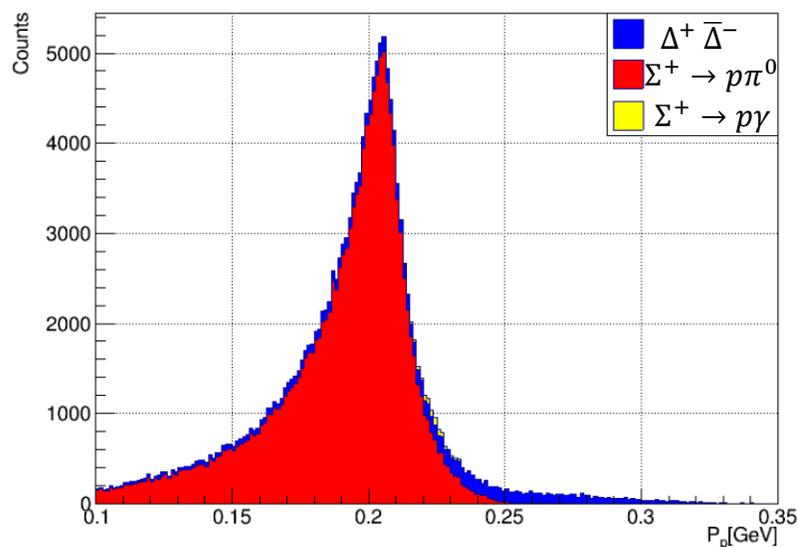
- 考虑到 Δ^+ 比 Σ^+ 的寿命短，在IP发生衰变，对末态的质子和反质子进行次级顶点拟合区分信号和本底事例



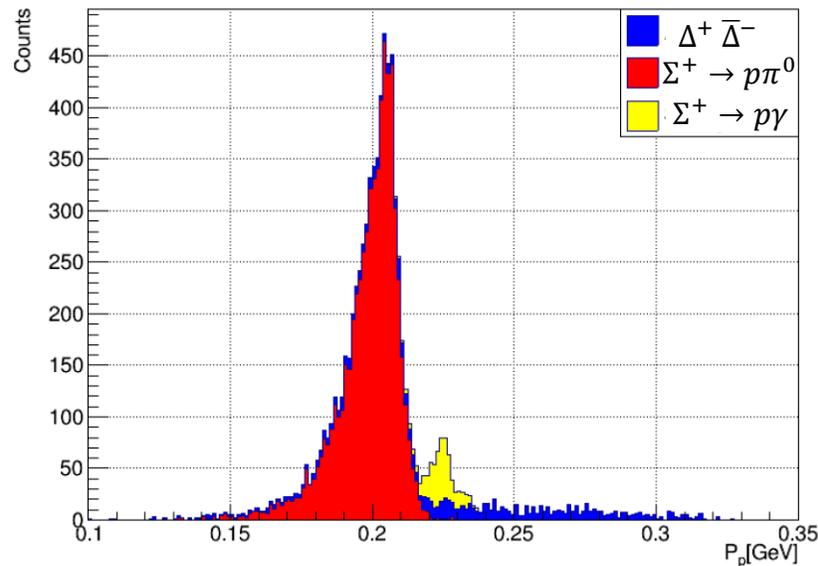
- 用 L/σ_L 区分本底与信号，并对其进行显著度(FoM)优化，要求 $L/\sigma_L > 1.5$

DT事例的信号提取

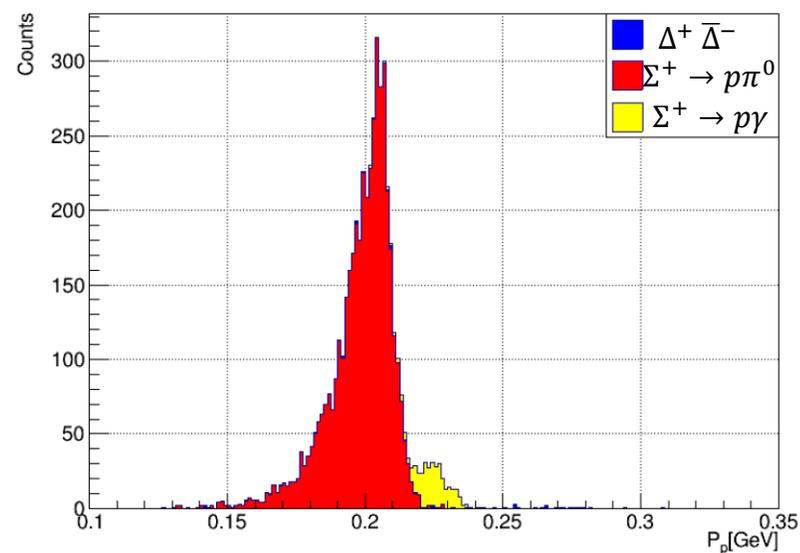
- 信号过程的质子在 Σ^+ 质心系中的动量 p_p 是约为0.224GeV/c的常数，信号提取利用该变量进行



未进行cut



进行拟合优度cut



再进行衰变长度cut

- 利用拟合优度及衰变长度选择条件可以显著排除本底，但是信号显著度仍然受到目前探测器重建性能影响，应主要是光子的重建占主要贡献

● 两个电荷共轭过程的ST效率与BES的结果基本吻合

Cut条件	效率	单步效率	Cut条件	效率	单步效率
ST效率	39.58%		ST效率	44.62%	
DT事例挑选	33.77%	85.32%	DT事例挑选	36.99%	82.90%
$\chi_{5C}^2 < \chi_{4\gamma}^2$	32.15%	95.20%	$\chi_{5C}^2 < \chi_{4\gamma}^2$	35.11%	94.92%
$\chi_{5C}^2 < 30$	26.19%	81.46%	$\chi_{5C}^2 < 30$	28.65%	81.60%
衰变长度要求	18.00%	68.73%	衰变长度要求	19.56%	68.27%
光子匹配	17.96%	99.78%	光子匹配	19.52%	99.80%

$\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$

	$\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$		$\bar{\Sigma}^+ \rightarrow \bar{p}\gamma$	
	总效率 (%)	单步效率 (%)	总效率 (%)	单步效率 (%)
ST 分析	39.02		44.31	
DT 事例挑选	32.04	82.11	35.17	79.37
$\chi_{5C}^2 < \chi_{4\gamma}^2$	31.46	98.19	34.50	98.09
$\chi^2 < 30$	27.09	86.11	29.88	86.61
衰变长度要求	21.18	78.18	23.22	77.71
光子匹配	21.16	99.90	23.20	99.91

$\bar{\Sigma}^- \rightarrow \bar{p}\gamma$

DT分析中效率表(BES结果)

- 研究背景简介
- 进展介绍
 - 单、双标效率
 - 主要物理本底简要分析
- 总结

Summary

- 在**STCF**的软件框架**OSCAR**下进行了 $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$ 衰变的初步研究
 - 单标记的效率与**BES**的结果基本相当
 - 双标记的效率略低于**BES**,主要原因是次级顶点拟合与**BES**的差异
 - 对主要的本底进行了简要分析,能够显著的进行本底排除
 - **DT**信号显著度差于**BES**,光子的重建性能需要进一步检查
- 更进一步的工作等待完成
 - 本底及信号的形状描述
 - 包括绝对分支比、衰变不对称参数等物理量的测量

Summary

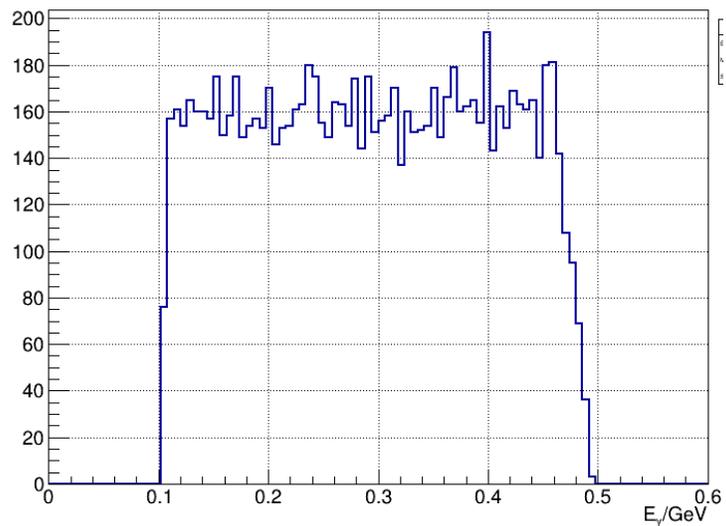
- 在STCF的软件框架OSCAR下进行了 $\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$ 衰变的初步研究
 - 单标记的效率与BES的结果基本相当
 - 双标记的效率略低于BES,主要原因是次级顶点拟合与BES的差异
 - 对主要的本底进行了简要分析,能够显著的进行本底排除
 - DT信号显著度差于BES,光子的重建性能需要进一步检查
- 更进一步的工作等待完成
 - 本底及信号的形状描述
 - 包括绝对分支比、衰变不对称参数等物理量的测量

Thanks!

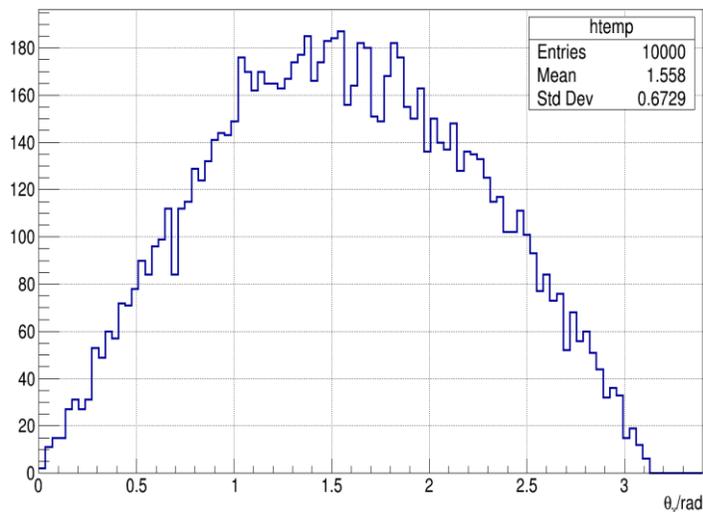


Back Up

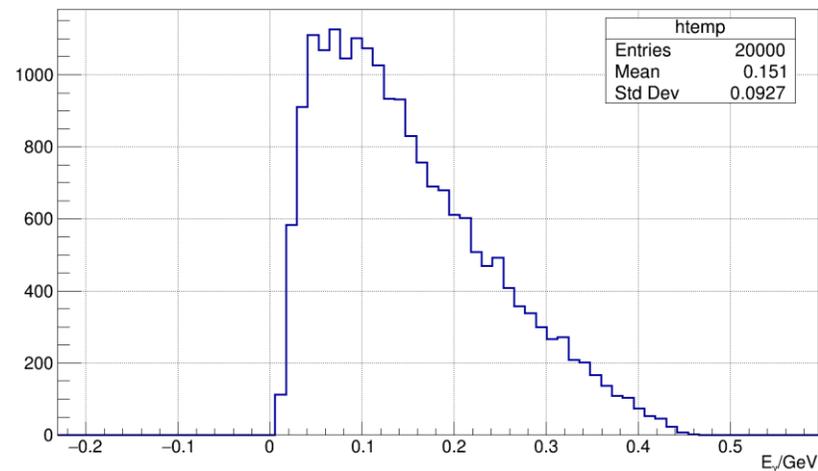
末态粒子能动量分布



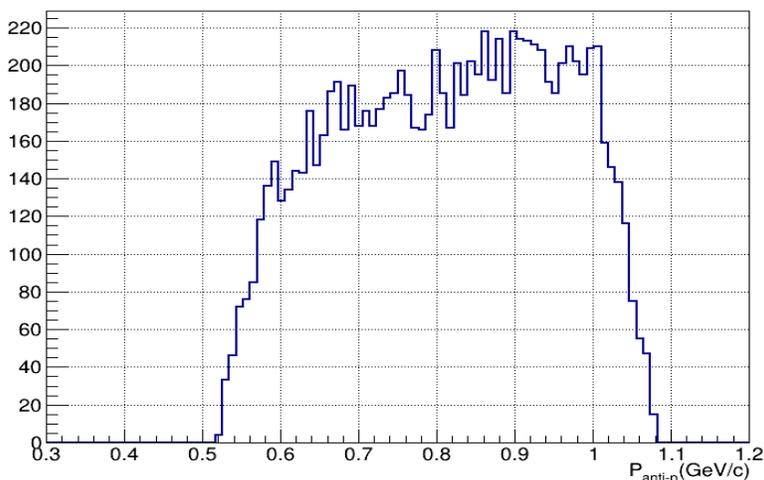
光子能量分布($\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$)



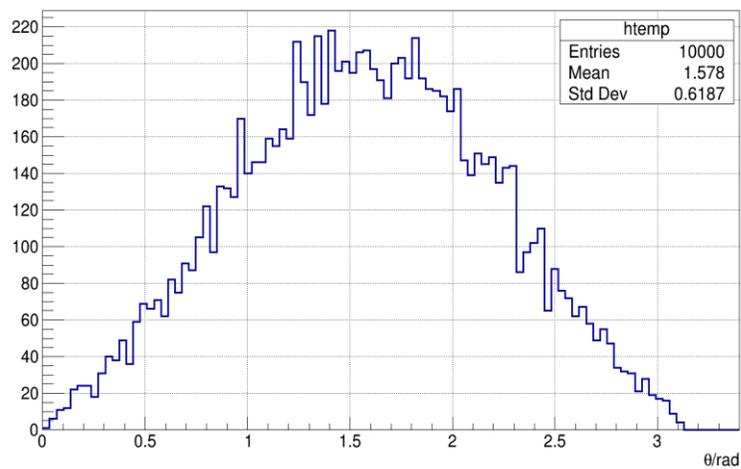
光子角分布($\Sigma^+ \rightarrow p\gamma$)



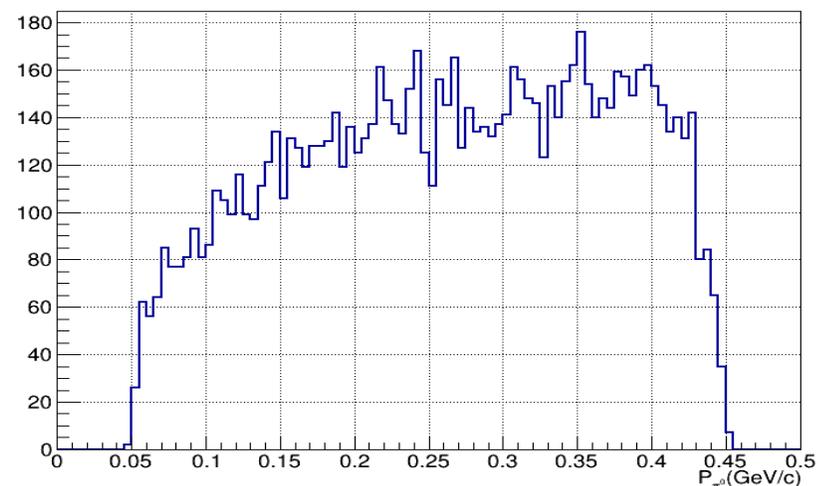
光子能量分布($\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$)



反质子动量分布



反质子角分布



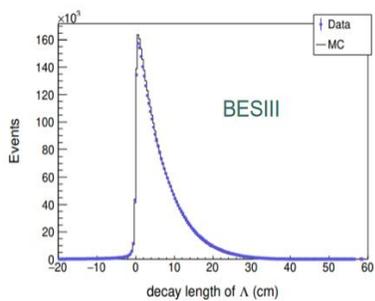
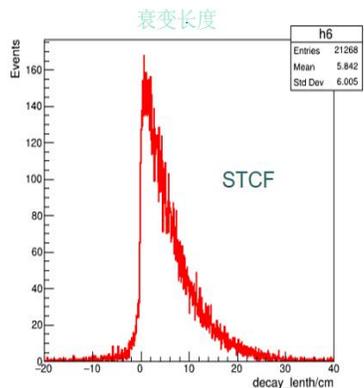
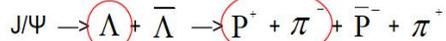
π^0 动量分布

次级顶点拟合

- 次级顶点拟合差别主要体现在误差更大

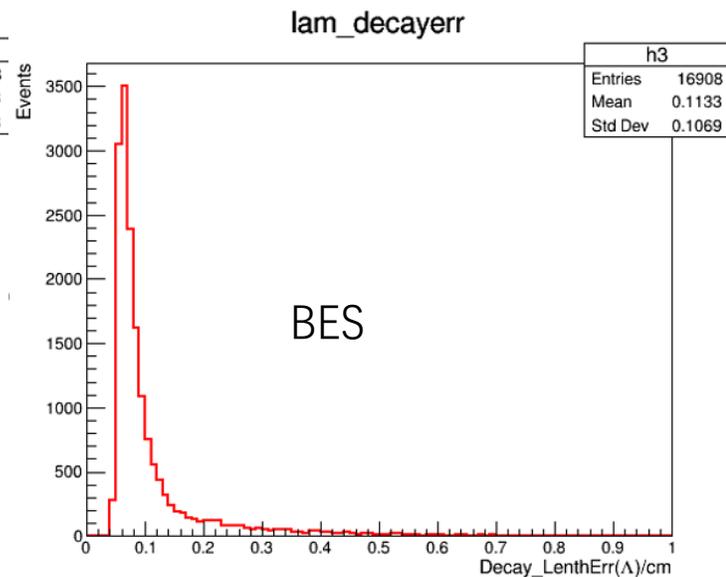
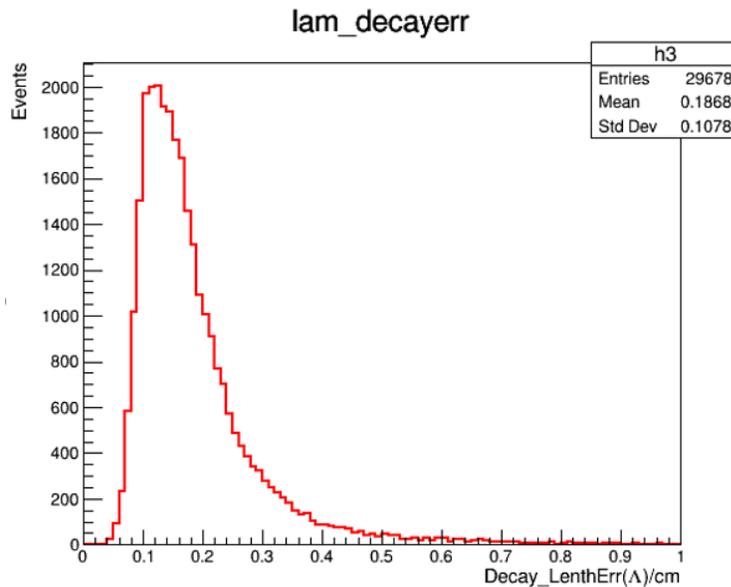
□ 检验

✓ 顶点拟合



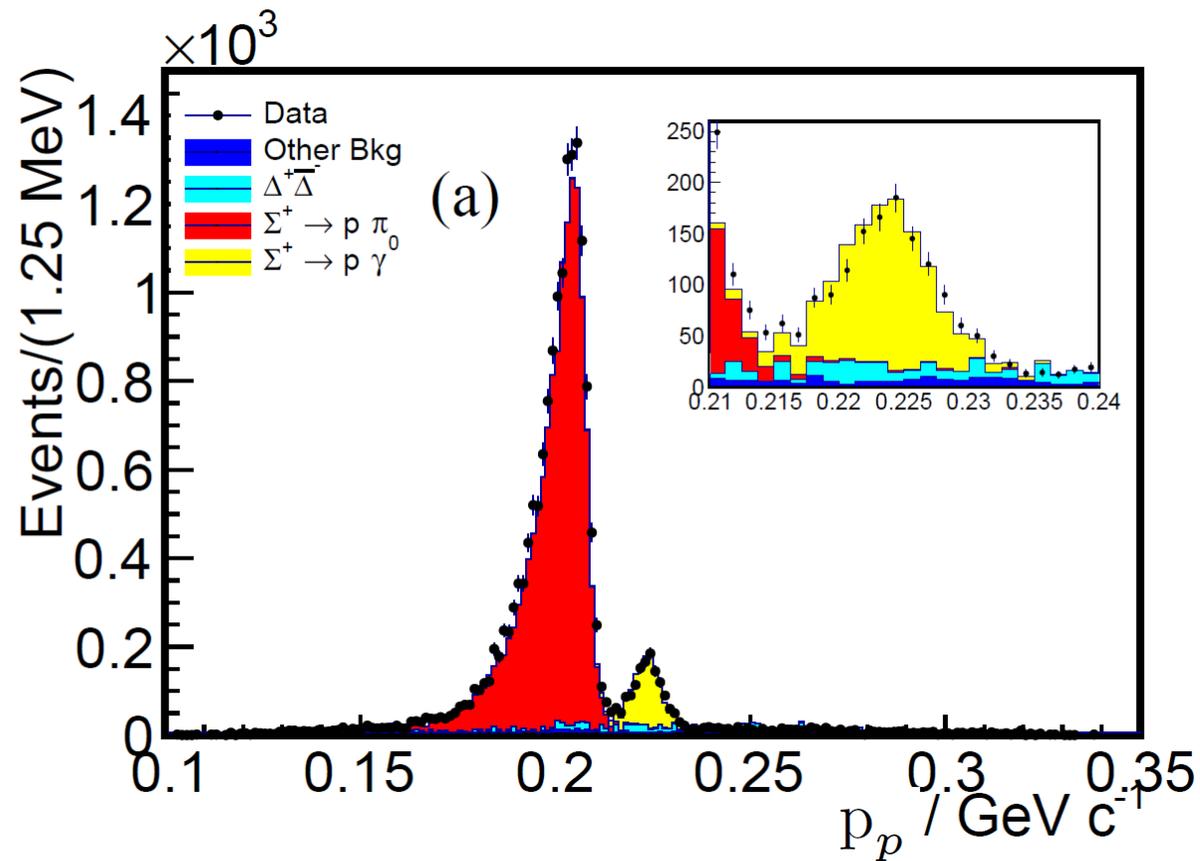
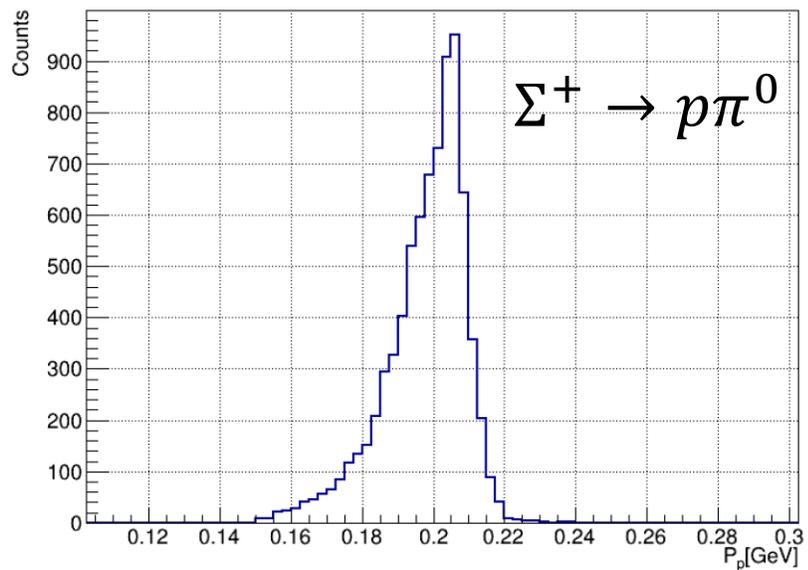
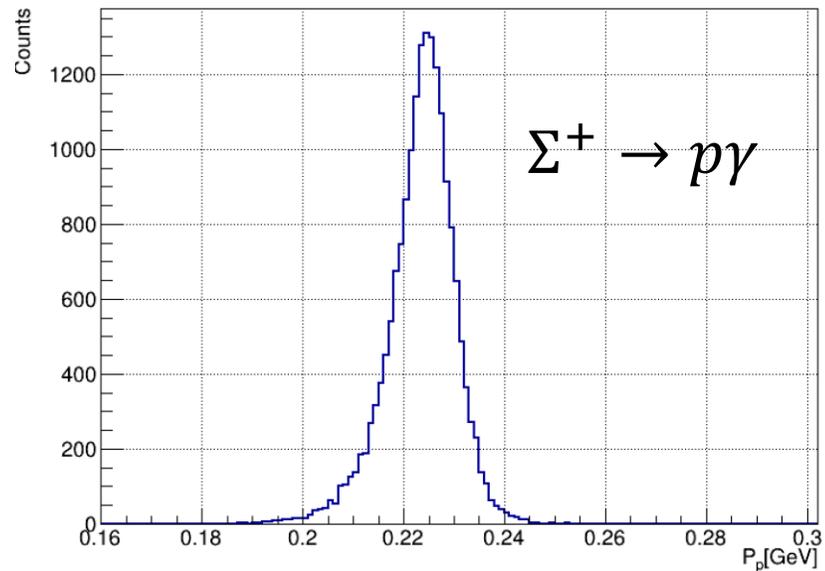
(a) Λ decay length

衰变长度



衰变长度的误差

DT信号显著度



BES结果