

Λ 超子CP破坏和电偶极矩模拟研究

张剑宇¹ 于明玉² 傅金林¹ 黄性涛²

中国科学院大学¹
山东大学²

STCF物理探测器联合会议，合肥，9/20/2025

目录

Contents

01

介绍

02

数据产生、挑选与对比

03

研究进展

04

总结

01

介绍

part one

➤宇宙中存在物质与反物质不对称现象----物质主导

为解释这一不对称现象Sakharov 提出了必须满足的三个条件:

- 重子数守恒破坏
- **C和CP对称性破坏**
- 热平衡的破坏

深入理解CP破坏机制，对于理解宇宙中物质反物质不对称现象有着重要的意义。

➤标准模型通过CKM矩阵中的复相位对CP破坏进行描述

- 实验上观测到K,B,D介子的CP破坏现象，并于理论结果预测一致---标准模型准确性
- 由标准模型预测的CP破坏量级不足以解释当前宇宙中物质反物质不对称的现象。

CP破坏存在其它来源

解释物质反物质不对称性

寻找超出标准模型的新物理

➤ 在STCF上基于 $J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$ 过程对CP破坏不对称参数 A_{cp} 以及超子电偶极矩进行测量

该过程为重子CP破坏的研究提供了独特的场所

- $J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$ 过程具有很大的分支比
- $\Lambda \bar{\Lambda}$ 量子纠缠可以显著增加参数测量的灵敏度
- 本底较少

➤ 使用可观测量 A_{cp} 对CP破坏进行描述，如果CP守恒， $A_{cp} = 0$.

$$A_{cp} = \frac{\alpha_{\Lambda} + \alpha_{\bar{\Lambda}}}{\alpha_{\Lambda} - \alpha_{\bar{\Lambda}}}$$

α_{Λ} : 衰变参数 $\Lambda \rightarrow p \pi^-$

$\alpha_{\bar{\Lambda}}$: 衰变参数 $\bar{\Lambda} \rightarrow \bar{p} \pi^+$

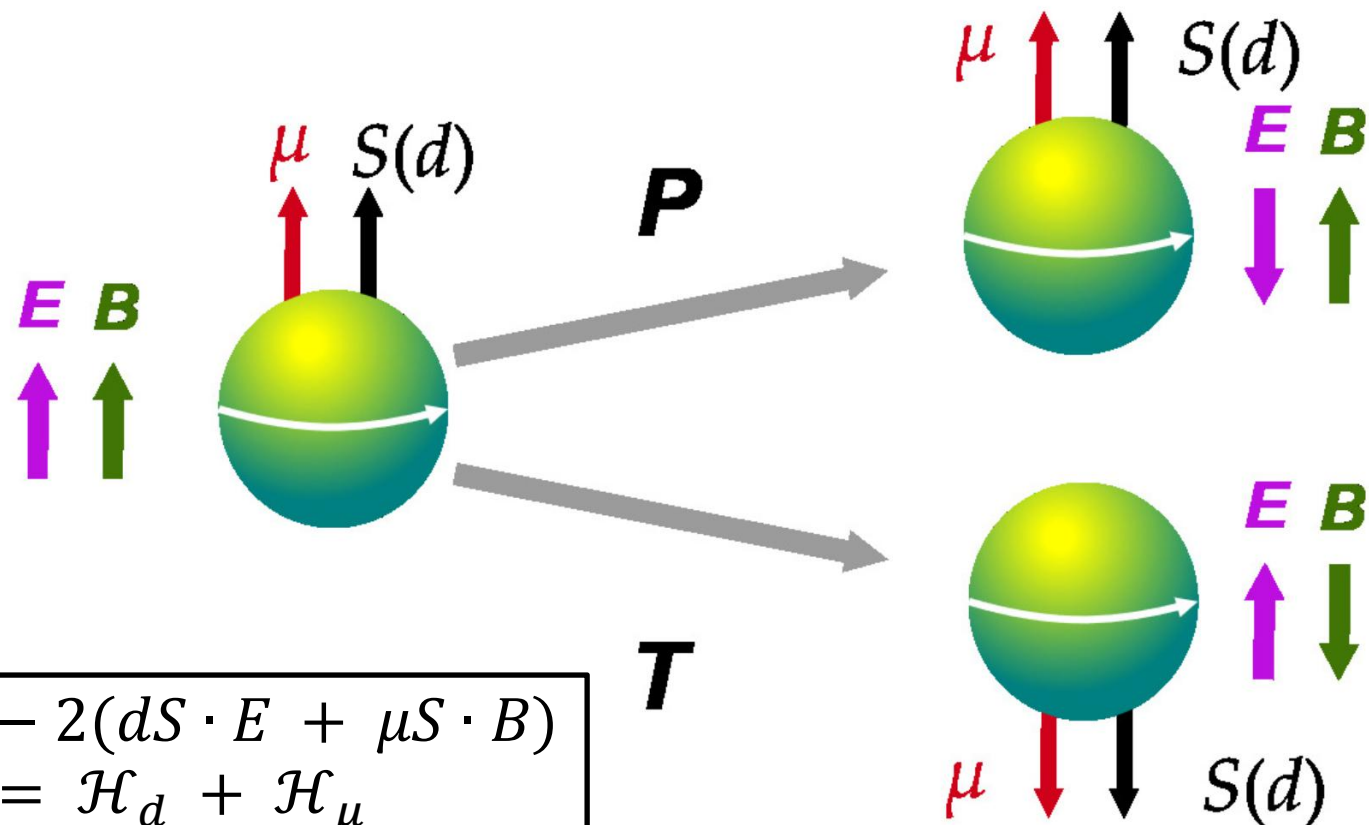
Phys. Rev. Lett. 129, 192002 (2022)

目前，BESIII根据10billion J/ψ 数据得到 A_{cp} 测量结果为： $A_{cp} = -0.0025 \pm 0.0046 \pm 0.0012$

(标准模型预测 $O(10^{-5})$)

STCF预计提供 10^{12} J/ψ 数据，预期将
 A_{cp} 测量精度提高一倍

$$\mathcal{H} = -2(dS \cdot (-E) + \mu S \cdot B) \\ = -\mathcal{H}_d + \mathcal{H}_\mu$$



$$\mathcal{H} = -2(dS \cdot E + \mu S \cdot B) \\ = \mathcal{H}_d + \mathcal{H}_\mu$$

$$\mathcal{H} = -2(d(-S) \cdot E + \mu(-S) \cdot (-B)) \\ = -\mathcal{H}_d + \mathcal{H}_\mu$$

μ : 磁偶极矩 B : 磁场
 d : 电偶极矩 E : 电场

- 非0的电偶极矩会破坏P和T的守恒:
- 根据CPT守恒定理, T破坏 $\leftrightarrow$ CP破坏
EDM对于研究CP破坏有重要意义

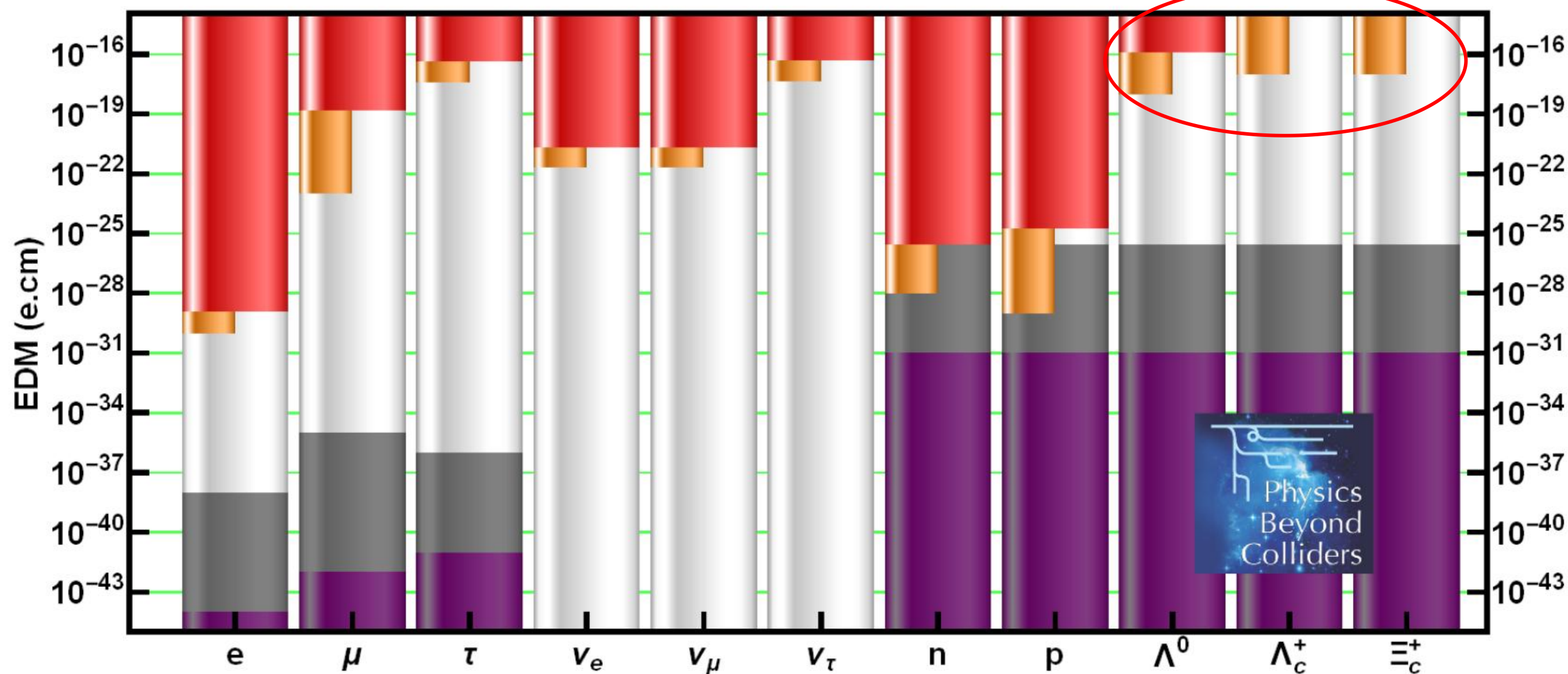
➤标准模型对EDM贡献很小

EDM 对新物理具有高度敏感性，为新物理的寻找提供了广阔的可能空间。

J.Phys.G 47 (2020) 1, 010501

- 超子家族中只有 Λ 的EDM有测量结果(精度较低)
- 使用全角度分析法，STCF预期 Λ 的EDM测量精度 $\sim 10^{-20}$

■ 标准模型 (CKM) ■ 标准模型 (θ) ■ $< d$ (未来预期) ■ $< d$ (当前测量)



BESIII测量精度 $\sim 10^{-19}$
arXiv:2506.19180

➤ 基于螺旋度振幅表示的全角度分布公式

PhysRevD.108.L091301

$$\frac{d\sigma}{d\Omega_k d\Omega_p d\Omega_{\bar{p}}} = N \sum_{[\lambda]} R(\lambda_1, \lambda_2; \lambda'_1, \lambda'_2) \times$$

$$D_{\lambda_1, \lambda_p}^{j=1/2}(\theta_1, \phi_1) D_{\lambda'_1, \lambda_p}^{*j=1/2}(\theta_1, \phi_1) |h_{\lambda_p}|^2 D_{\lambda_2, \lambda_{\bar{p}}}^{j=1/2}(\theta_2, \phi_2) D_{\lambda'_2, \lambda_{\bar{p}}}^{*j=1/2}(\theta_2, \phi_2) |h_{\lambda_{\bar{p}}}|^2$$

- 超子对自旋密度矩阵:

$$R(\lambda_1, \lambda_2; \lambda'_1, \lambda'_2) \propto \sum_{m, m'} \rho_{m, m'} d_{m, \lambda_1 - \lambda_2}^{j=1}(\theta) d_{m', \lambda'_1 - \lambda'_2}^{j=1}(\theta) \mathcal{M}_{\lambda_1, \lambda_2} \mathcal{M}_{\lambda'_1, \lambda'_2}^* \delta_{m, m'}$$

Phys.Lett.B 839 (2023) 137834

$$J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda} \text{螺旋度振幅: } \mathcal{M}(\lambda_1, \lambda_2) = \epsilon_\mu(\lambda) \bar{u}(\lambda_1) \left(F_V \gamma^\mu + \frac{i}{2M_\Lambda} \sigma^{\mu\nu} q_\nu H_\sigma + \gamma^\mu \gamma^5 F_A + \sigma^{\mu\nu} \gamma^5 q_\nu H_T \right) v(\lambda_2)$$

主要贡献项

 F_V (Pauli形状因子) H_σ (Dirac形状因子)

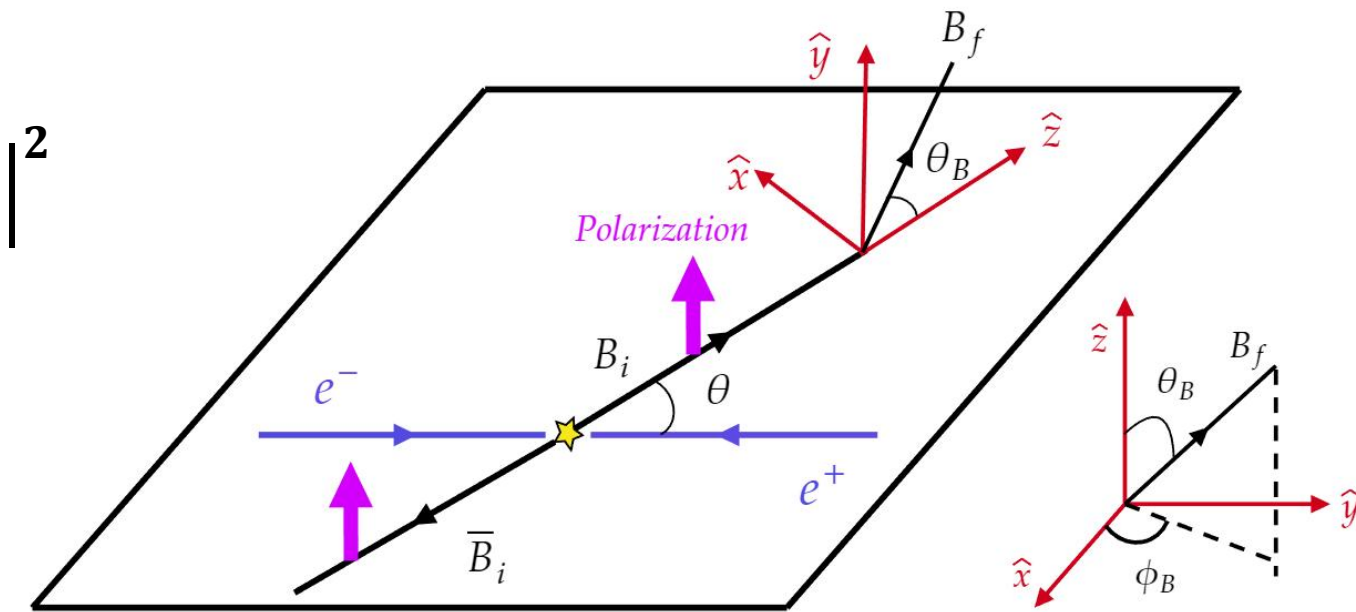
可以被表示成类电磁形状因子

 G_1 和 G_2 的形式 F_A : P 破坏形状因子 $F_A \neq 0$ 意味着 P 破坏 H_T : CP 破坏形状因子

$$H_T(q^2) = \frac{2e}{3m_{J/\psi}^2} g_V d_B(q^2)$$

假设 $d_B(q^2) \equiv d_B(0)$ $d_B(q^2)$: 电偶极形状因子 $d_B(0)$: 电偶极矩

- 螺旋度角: $\xi(\theta, \theta_1, \phi_1, \theta_2, \phi_2)$
- 参数:
 $\vec{\lambda} = (Re(G_2), Im(G_2), P_L, Re(F_A), Im(F_A), Re(H_T), Im(H_T), \alpha_\Lambda, \alpha_{\bar{\Lambda}})$



02 数据产生、挑选与对比

part two

➤ Oskar版本: 2.6.2

➤ Signal MC(FullSim):

- 1M mdiyMC of $J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda} \rightarrow (p\pi^-)(\bar{p}\pi^+)$ @ $\sqrt{s} = 3.097$ GeV
- 10M PHSPMC of $J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda} \rightarrow (p\pi^-)(\bar{p}\pi^+)$ @ $\sqrt{s} = 3.097$ GeV

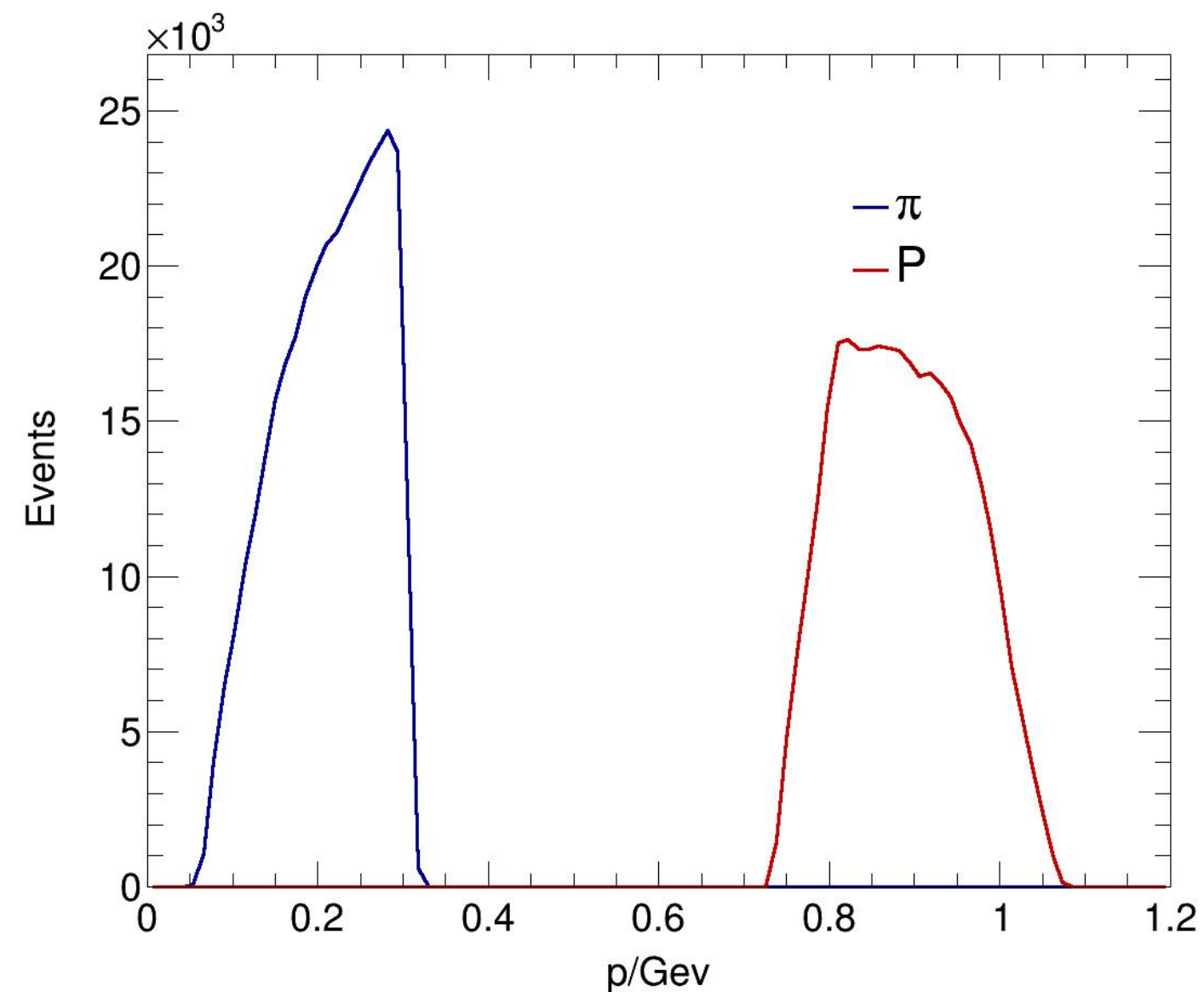
计算最大似然法归一化因子

➤ Signal MC(FastSim):

- 10M mdiyMC of $J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda} \rightarrow (p\pi^-)(\bar{p}\pi^+)$ @ $\sqrt{s} = 3.097$ GeV
- 100M PHSPMC of $J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda} \rightarrow (p\pi^-)(\bar{p}\pi^+)$ @ $\sqrt{s} = 3.097$ GeV

➤ 带电粒子挑选

- Good charred tracks selection1
 - $|R_z| < 30.0\text{cm}, R_{xy} < 10.0\text{cm}$
 - $|\cos\theta| < 0.93$
 - $N_{\text{good charged track}} \geq 4,$
 $N_{\text{positive charged track}} \geq 2,$
 $N_{\text{negative charged track}} \geq 2$
- Good charred tracks selection2
 - $p(\bar{p}): |mom| > 0.5\text{GeV},$
 $\pi^+(\pi^-): |mom| < 0.5\text{GeV}$
 - $N_{p^+} \geq 1, N_{p^-} \geq 1, N_{\pi^+} \geq 1, N_{\pi^-} \geq 1$

Figure. p(红色)和 π (蓝色)的动量分布--FullSim

➤ $\Lambda\bar{\Lambda}$ 重建

通过顶点拟合次级顶点拟合算法，对所有可能的 $p\pi^-\bar{p}\pi^+$ 组合进行遍历。选出满足质量条件下 χ^2 最小的一组组合，作为 $\Lambda\bar{\Lambda}$ 候选

- 初级顶点拟合 $\chi^2 < 200$
- $1.1107 < |M_{p\pi^-(\bar{p}\pi^+)}| < 1.1207 \text{ GeV}/c^2$

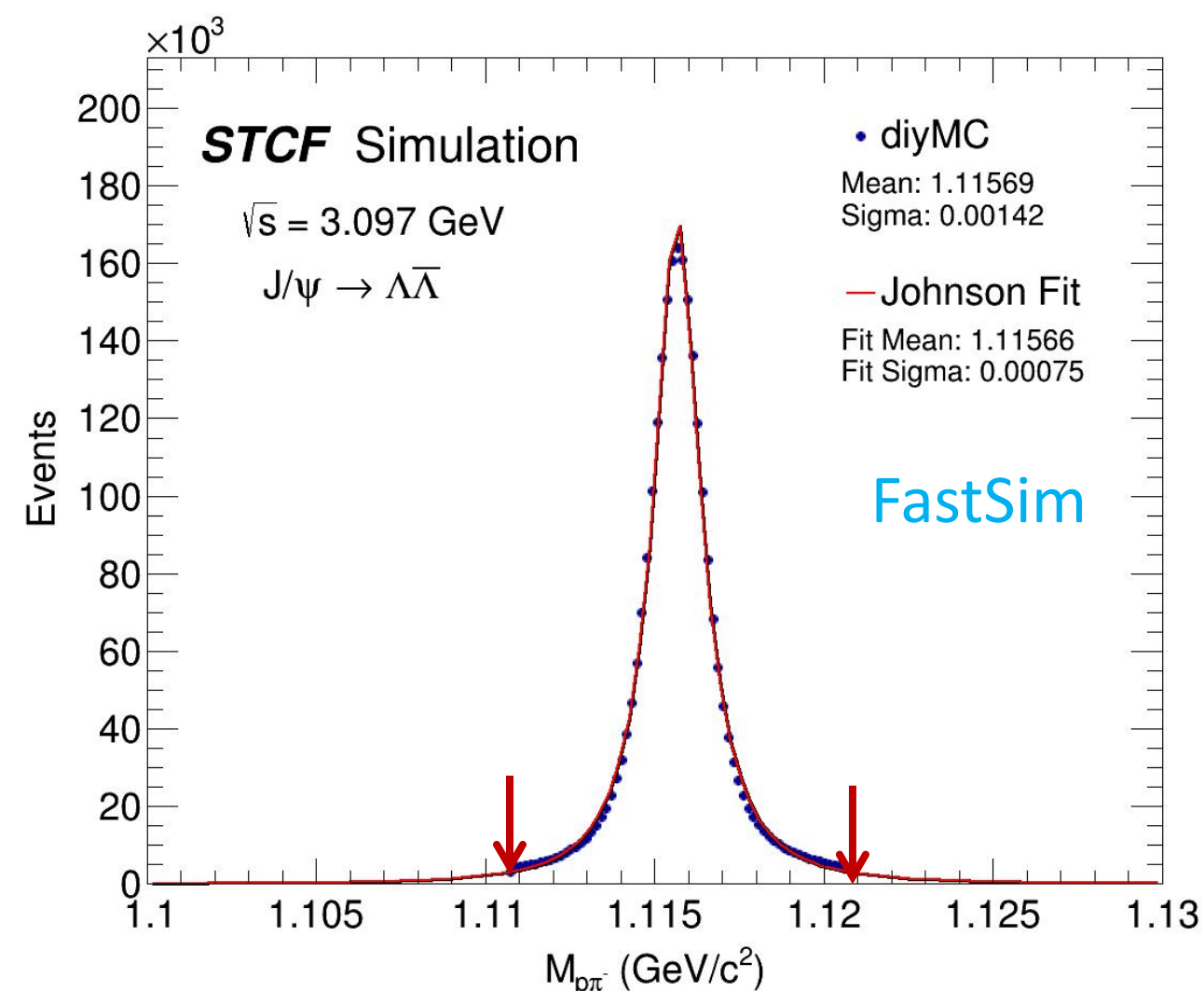
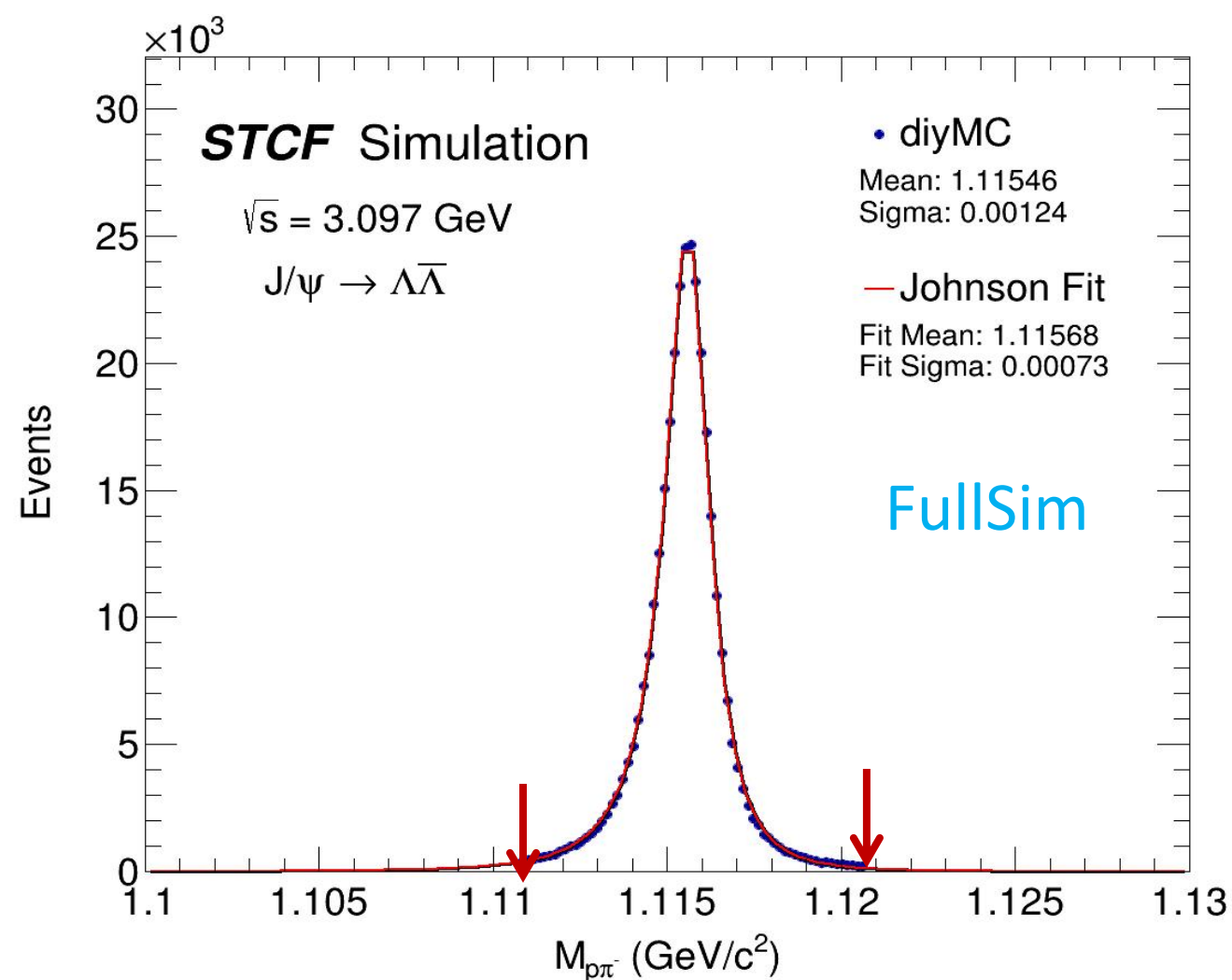


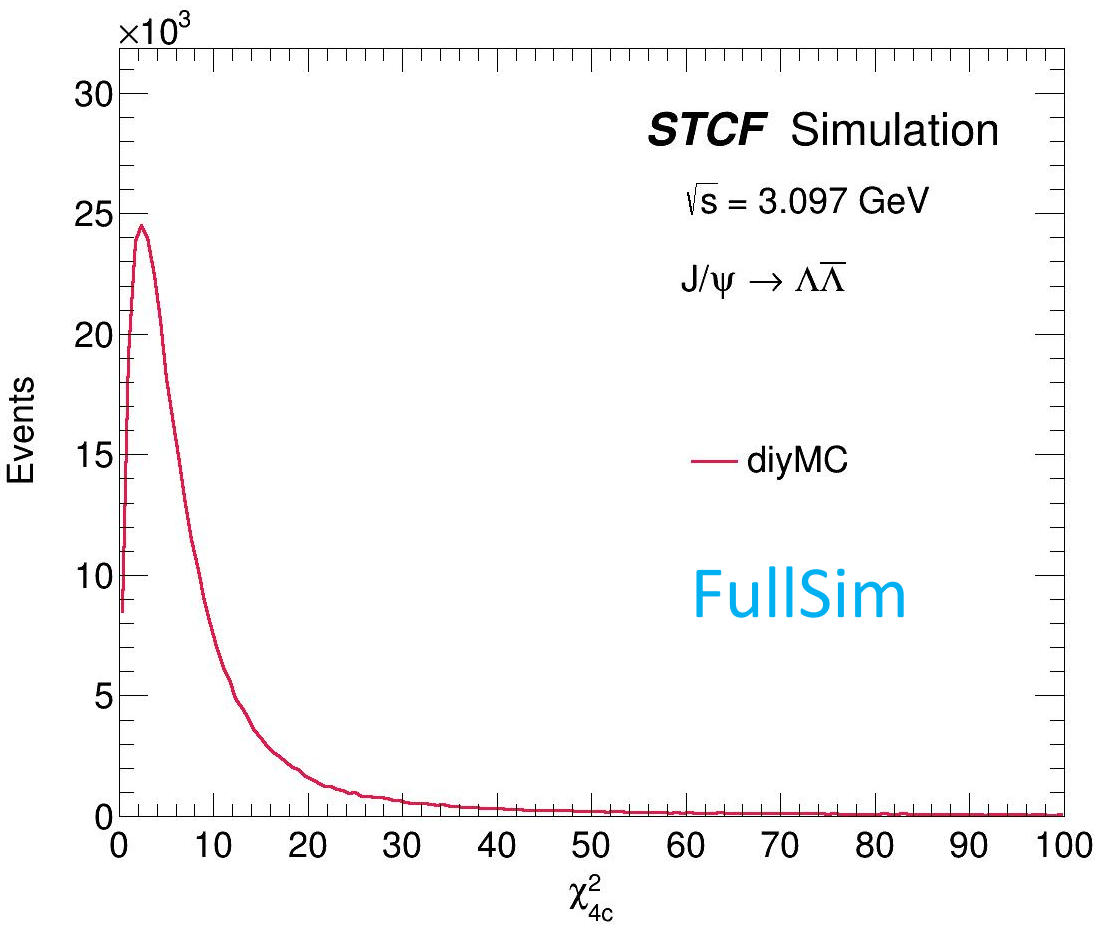
Figure. 次级顶点拟合 Λ 不变质量谱，全模拟(左)，快模拟(右)

➤ 次级顶点拟合

对 $\Lambda(\bar{\Lambda})$ 衰变长度进行cut: $L_{\Lambda\bar{\Lambda}}/\sigma_L > 2$

➤ 4C运动学拟合

对末态径迹添加4C运动学约束，并要求 $\chi^2 < 200$



➤ 事例挑选效率

↓ 下降的相对效率

Figure. 4C运动学拟合之后的 χ^2 分布

	Efficiency(FastSim)	Efficiency(FullSim)	Efficiency(BESIII)
Good chared tracks selection1	54.63%	58.93%	52.79%
Good chared tracks selection2	53.67%	57.20%	51.55%
$\Lambda\bar{\Lambda}$ 重建	30.24%	38.28%	37.15%
次级顶点拟合	26.91%	34.63%	32.38%
运动学拟合	26.01%	33.82%	31.71%

➤ FullSim、FastSim性能对比

NoCut + NoKmfit

NoCut: 不添加质量cut 以及衰变长度cut

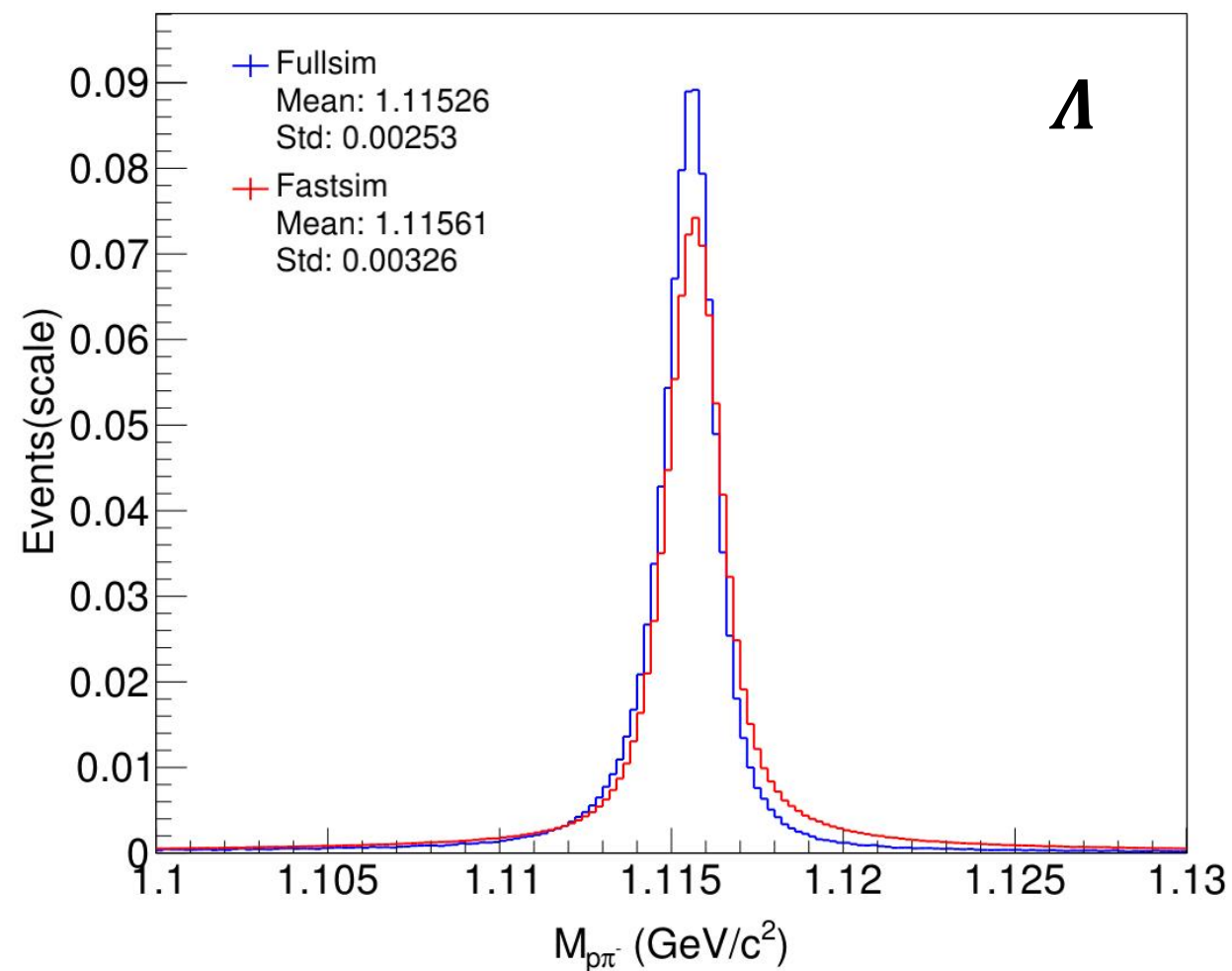


Figure. Λ 不变质量谱对比

FullSim:46.55% vs FastSim:44.91%

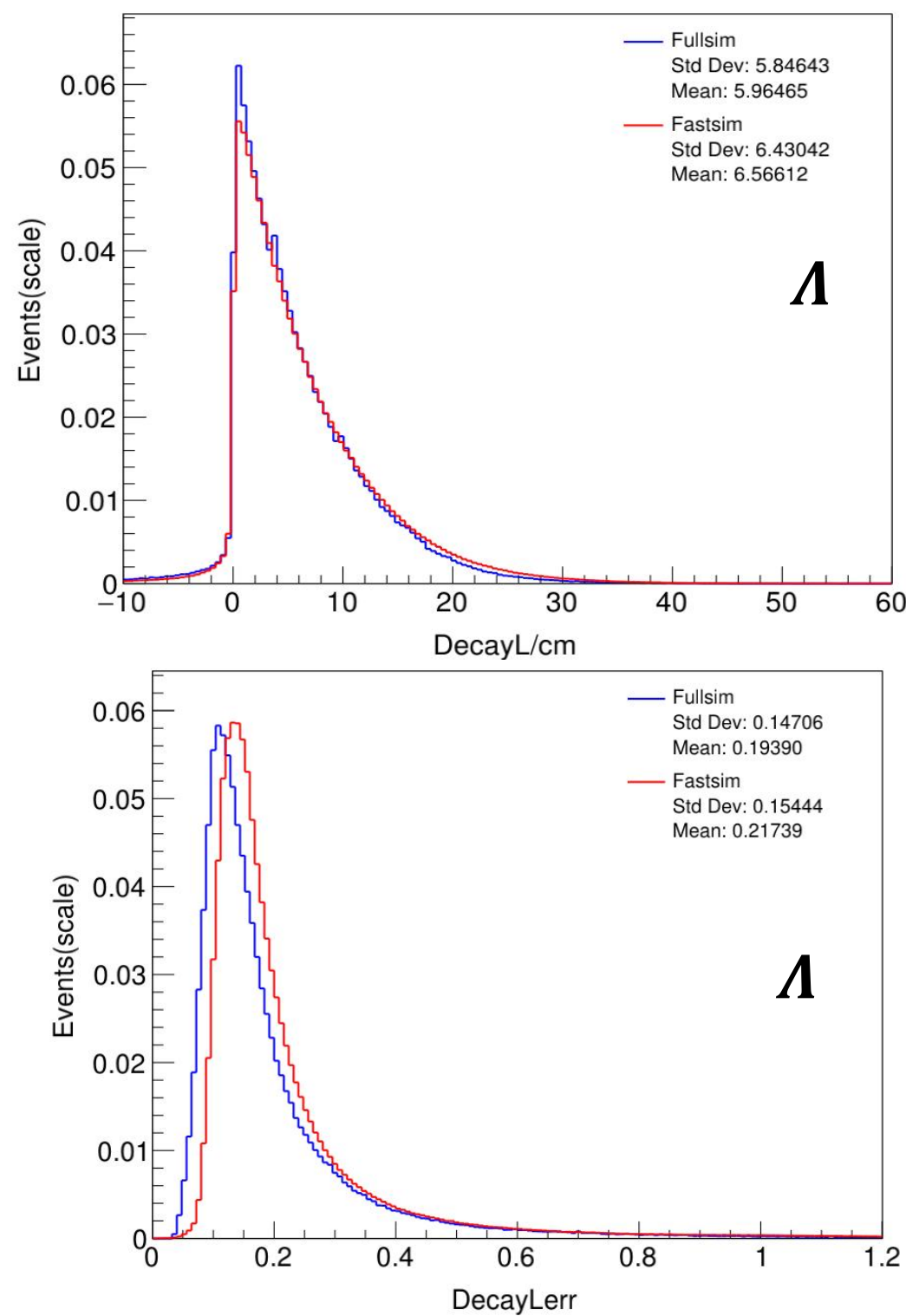


Figure. Λ 衰变长度(上)及其误差 (下) 对比

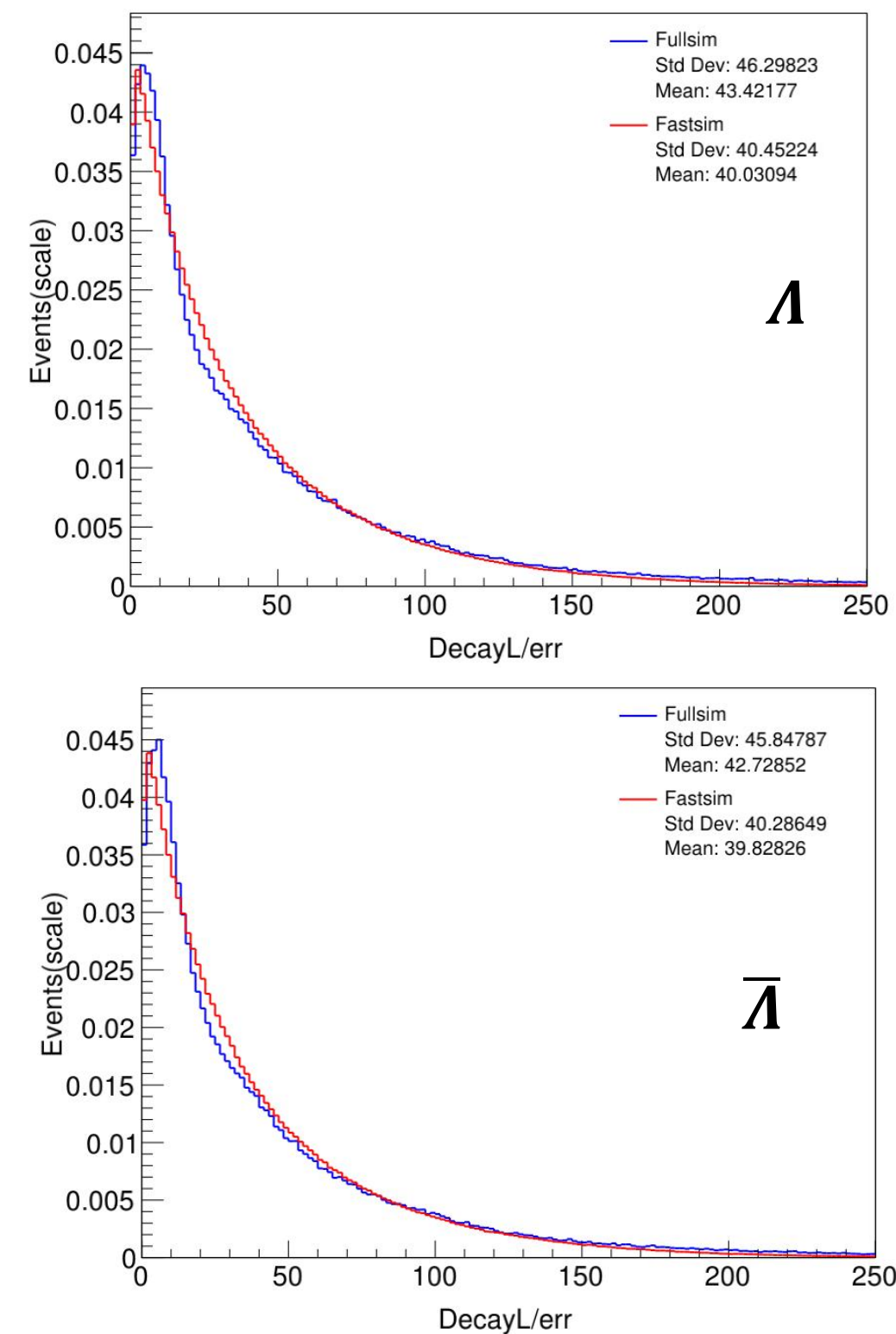


Figure. Λ (上) $\bar{\Lambda}$ (下)衰变长度与误差比值对比

➤ Λ 不变质量残差随 $Decay Point$ 变化

NoCut + NoKmfitt

使用双guass拟合之后的平均值和标准差

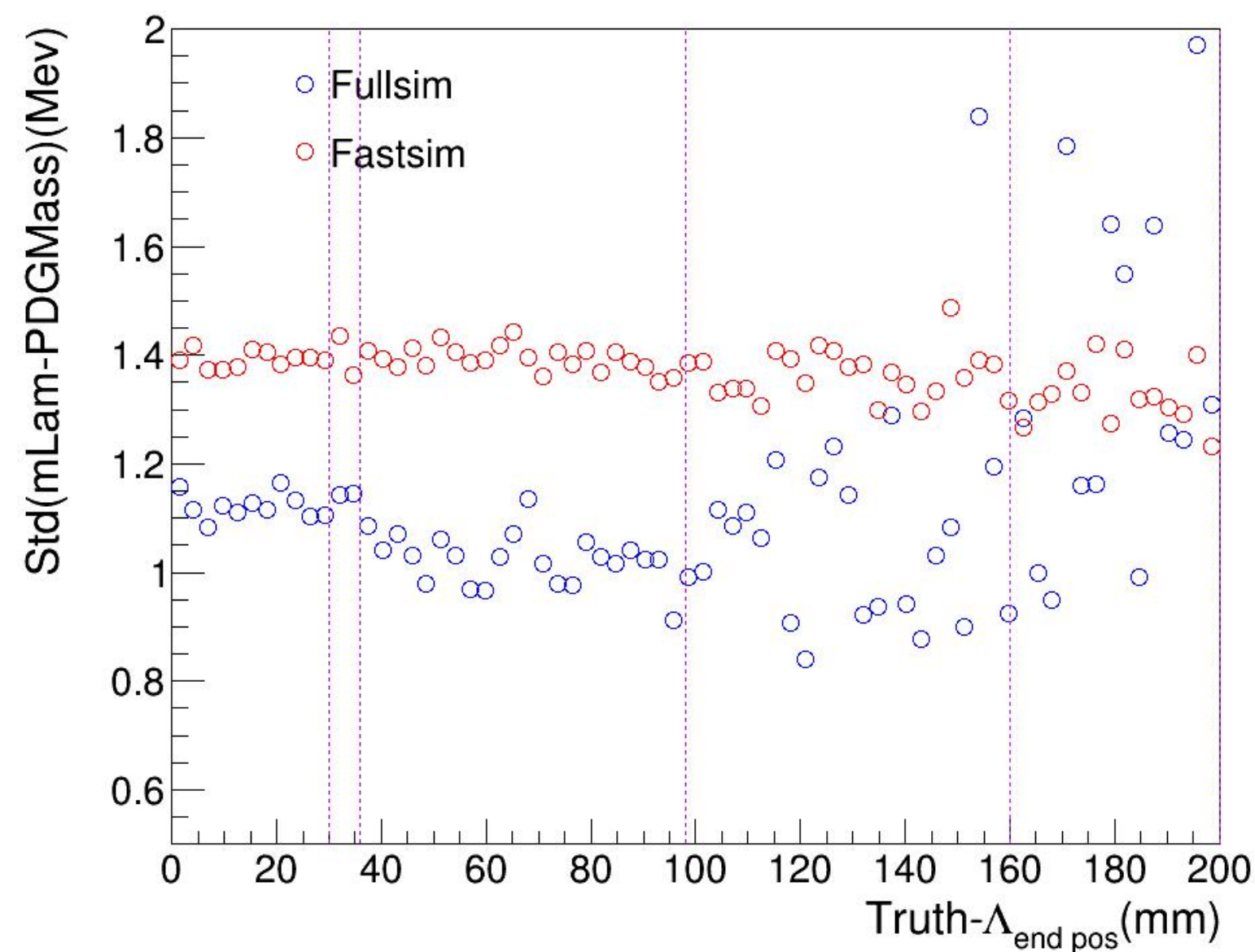
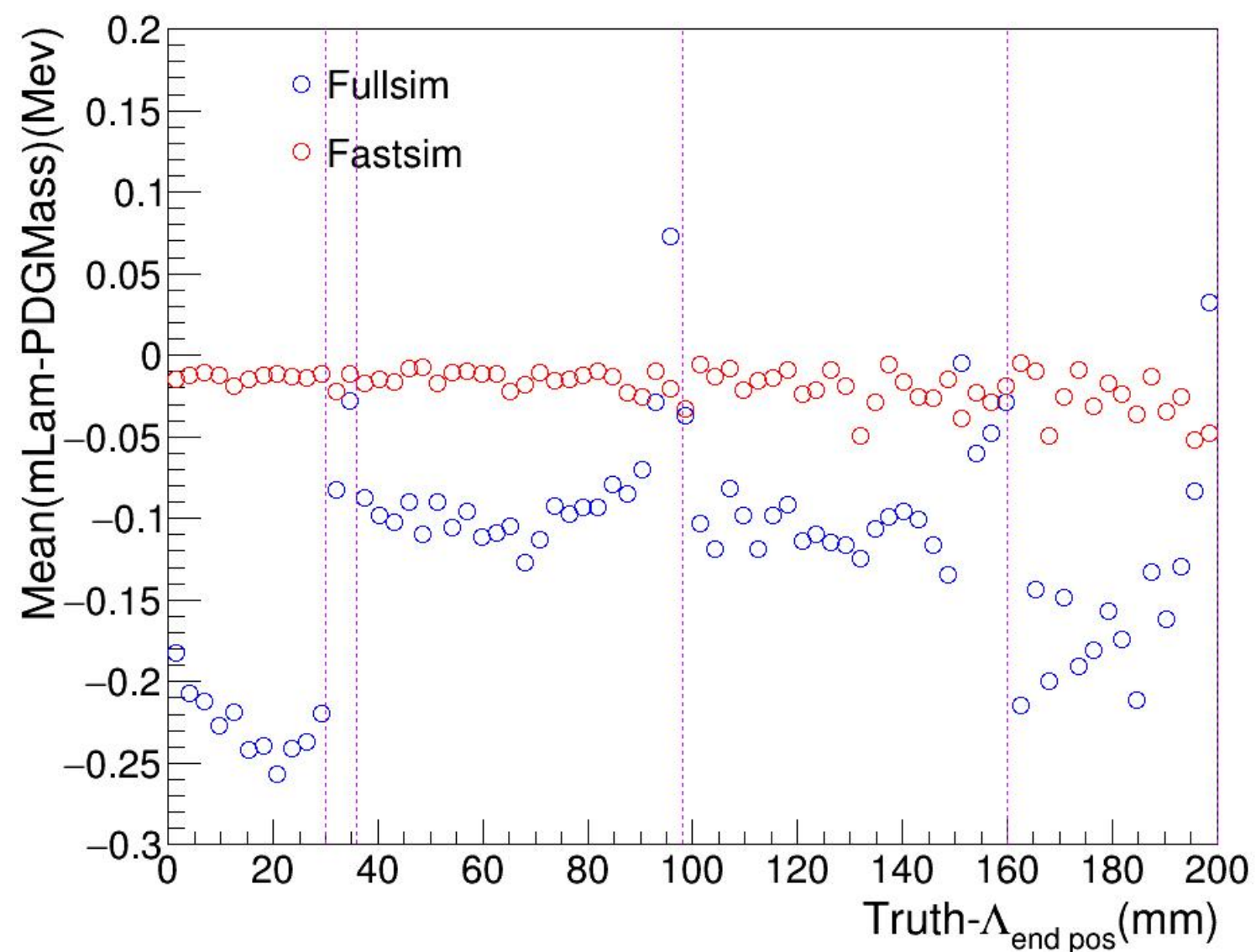


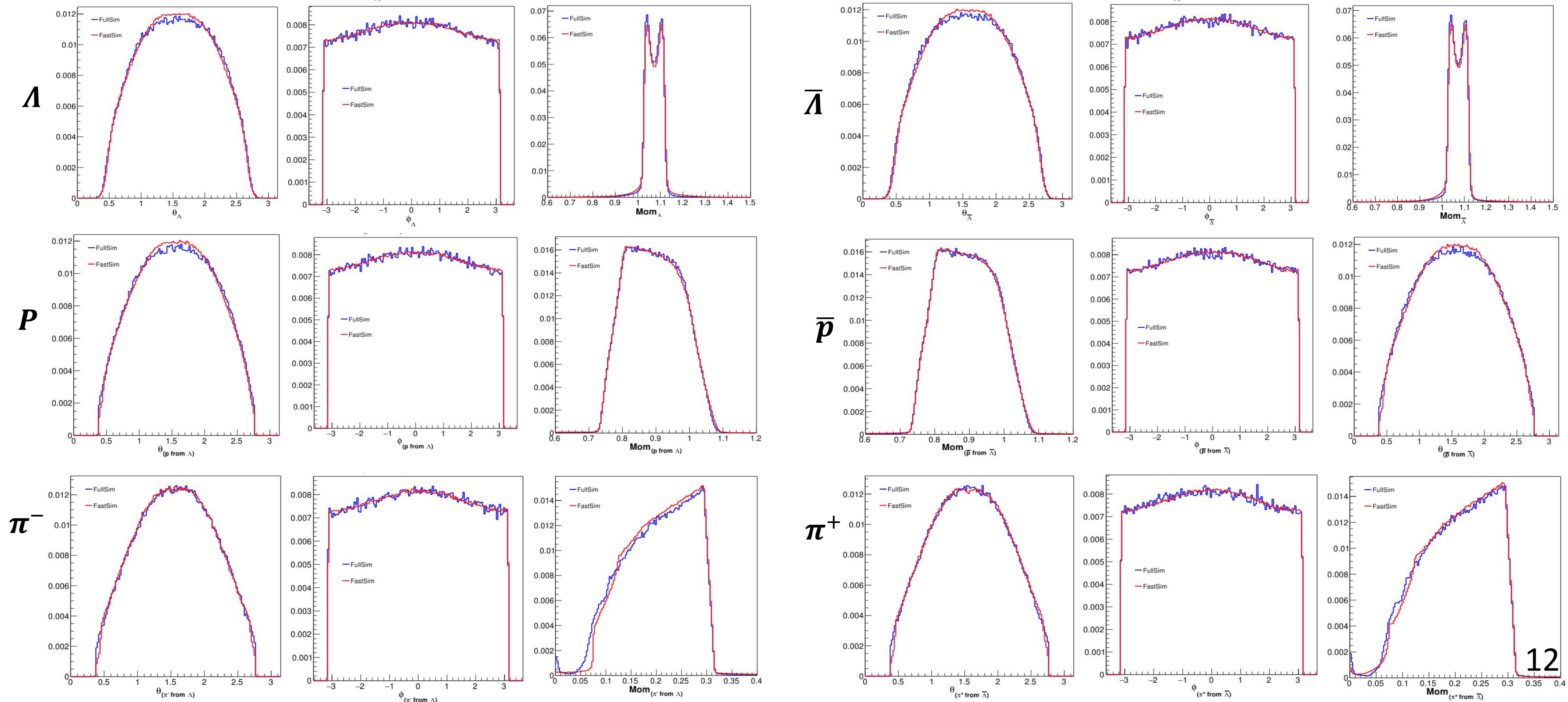
Figure. Λ 不变质量随 Λ 衰变顶点(x-y平面)分布, 平均值 (左), 标准差 (右)

02

FullSim VS FastSim

➤ 对比重建的 θ, ϕ, Mom

NoCut + NoKmfit

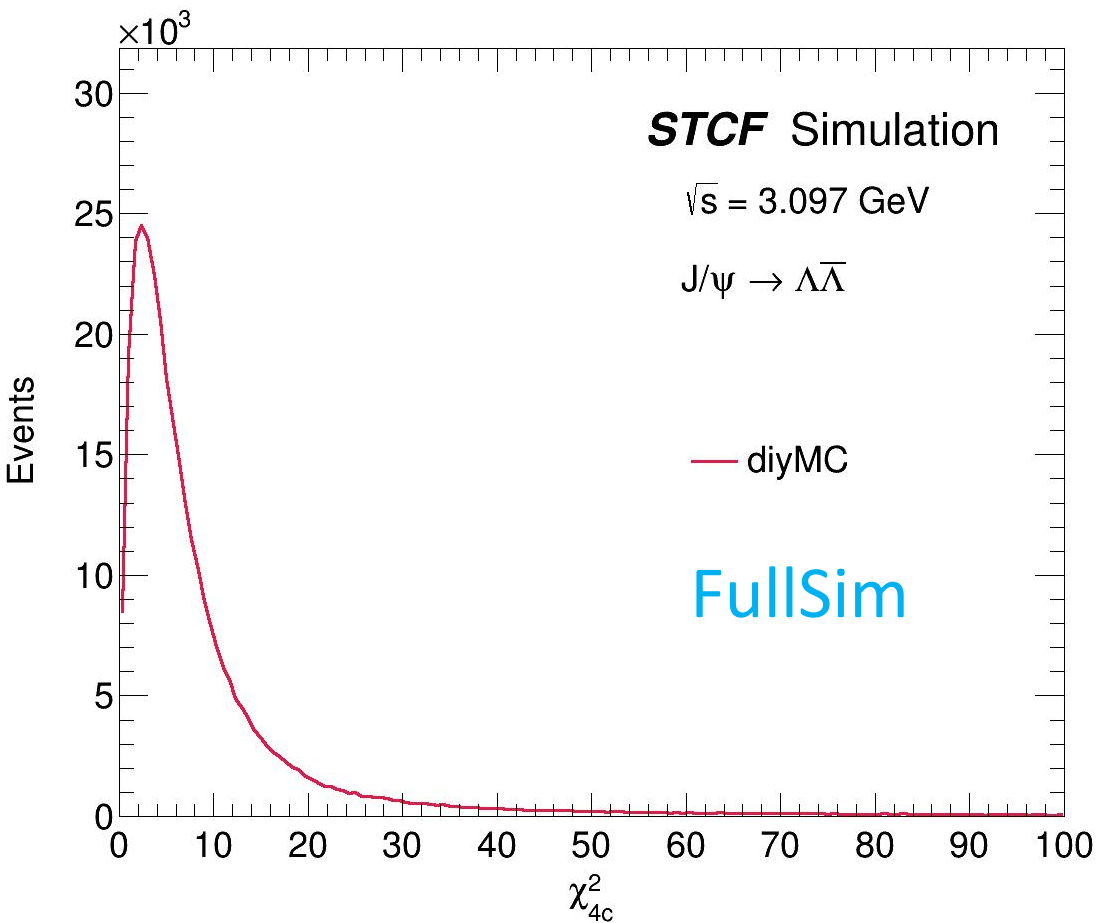


➤ 次级顶点拟合

对 $\Lambda(\bar{\Lambda})$ 衰变长度进行cut: $L_{\Lambda\bar{\Lambda}}/\sigma_L > 2$

➤ 4C运动学拟合

对末态径迹添加4C运动学约束，并要求 $\chi^2 < 200$



➤ 事例挑选效率

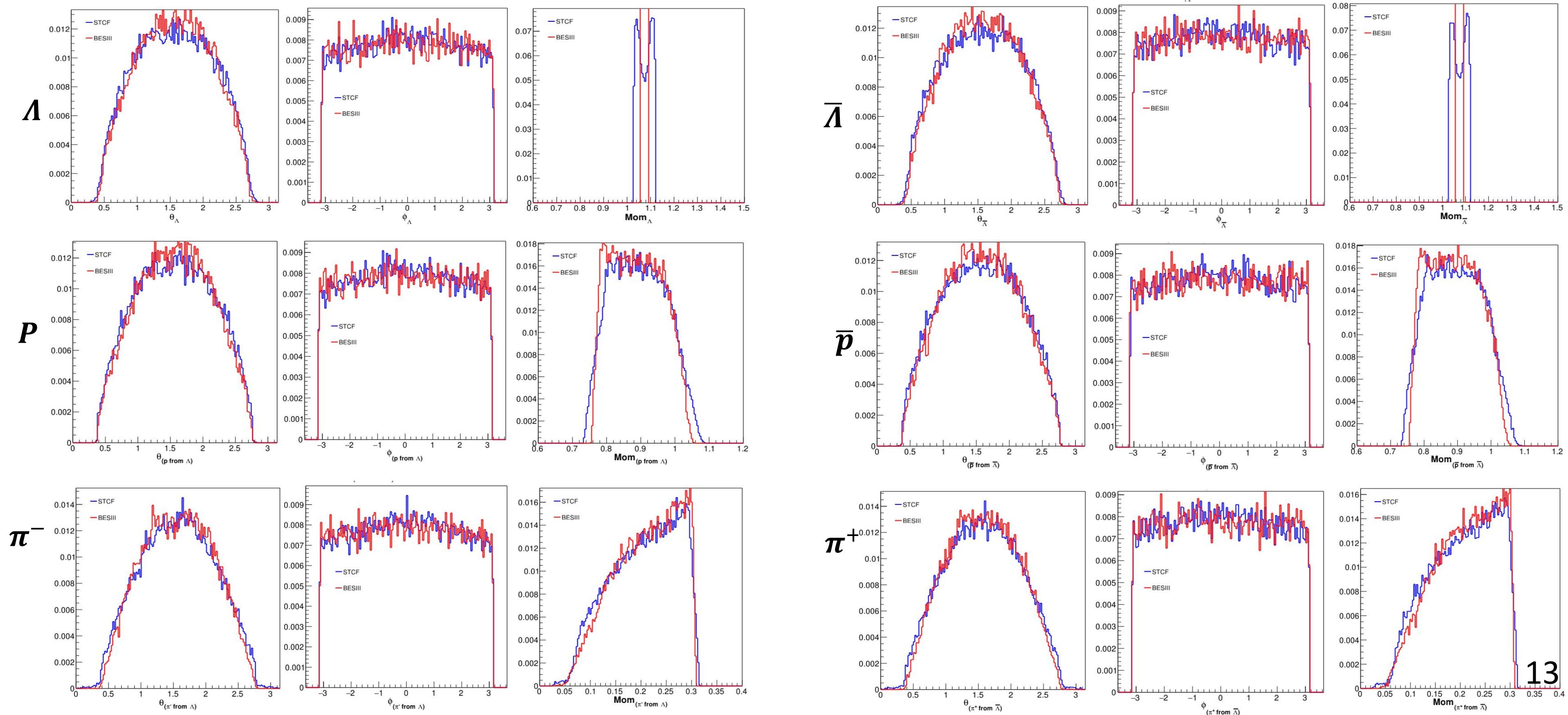
↓ 下降的相对效率

Figure. 4C运动学拟合之后的 χ^2 分布

	Efficiency(FastSim)	Efficiency(FullSim)	Efficiency(BESIII)
Good chared tracks selection1	54.63%	58.93%	52.79%
Good chared tracks selection2	53.67%	57.20%	51.55%
$\Lambda\bar{\Lambda}$ 重建	30.24%	38.28%	37.15%
次级顶点拟合	26.91%	34.63%	32.38%
运动学拟合	26.01%	33.82%	31.71%

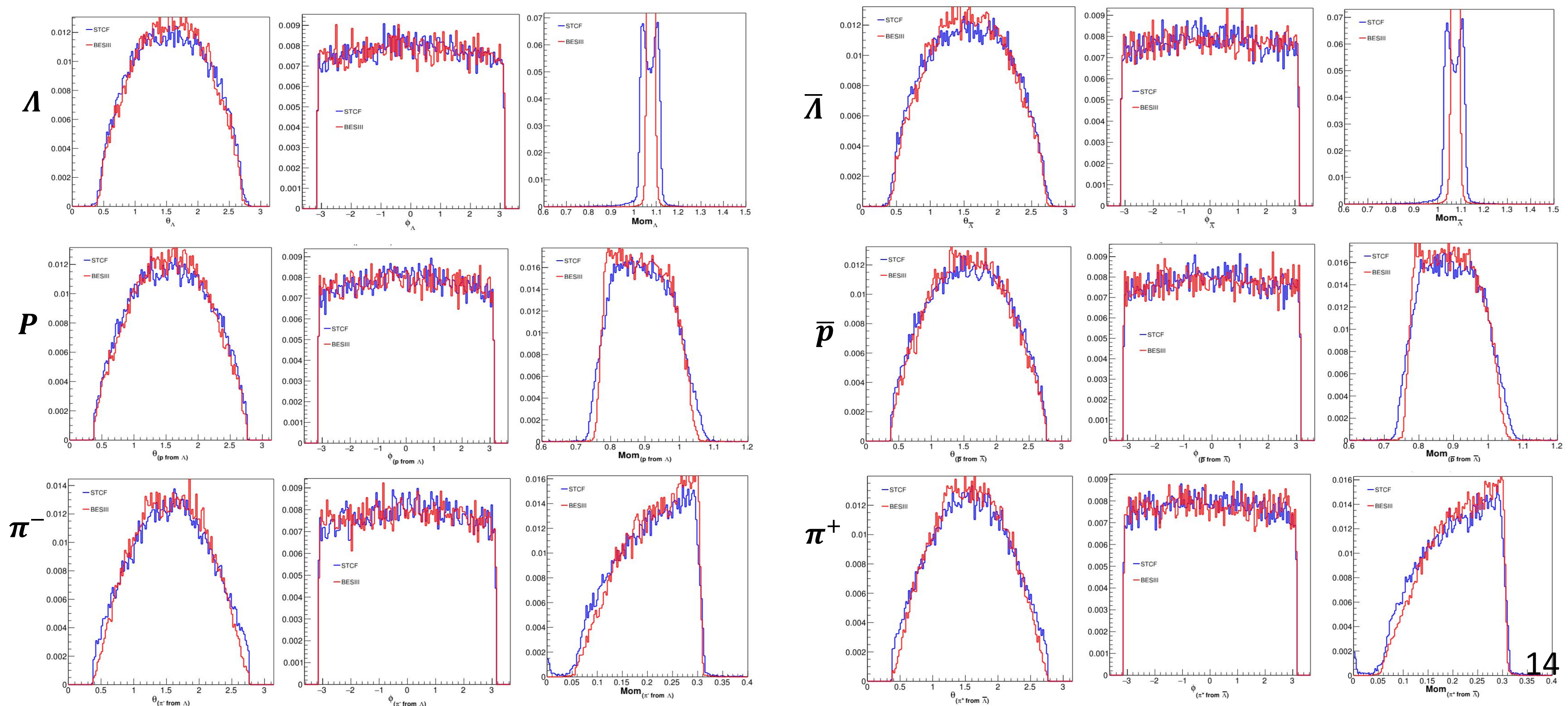
➤ 对比Truth的 θ, ϕ, Mom

NoCut + NoKmfit



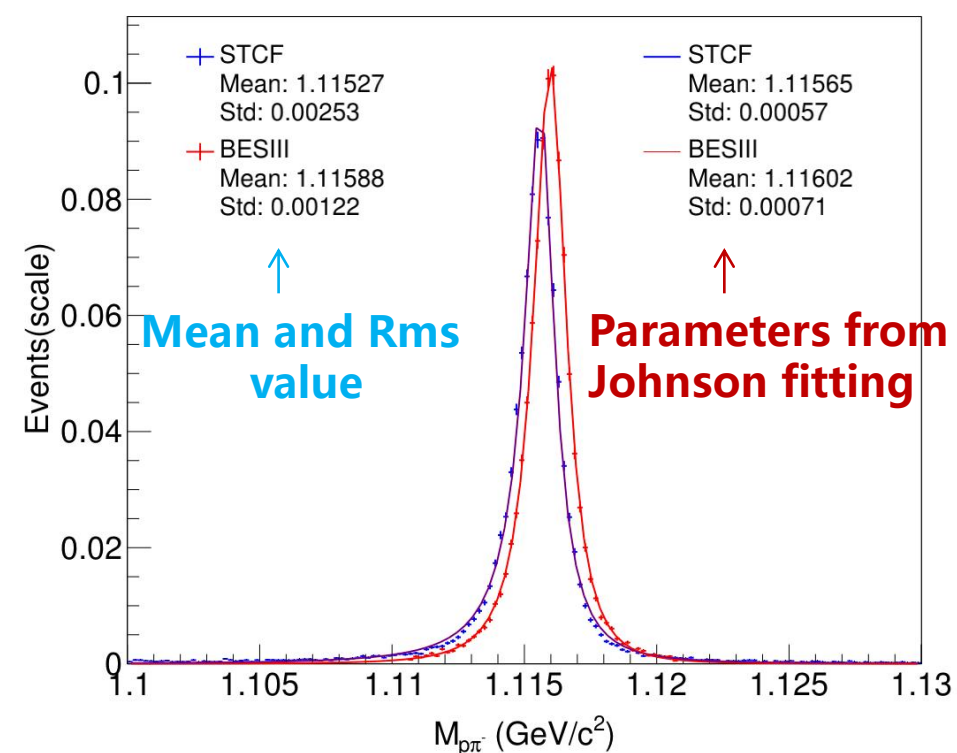
➤ 对比重建的 θ, ϕ, Mom

NoCut + NoKmfit



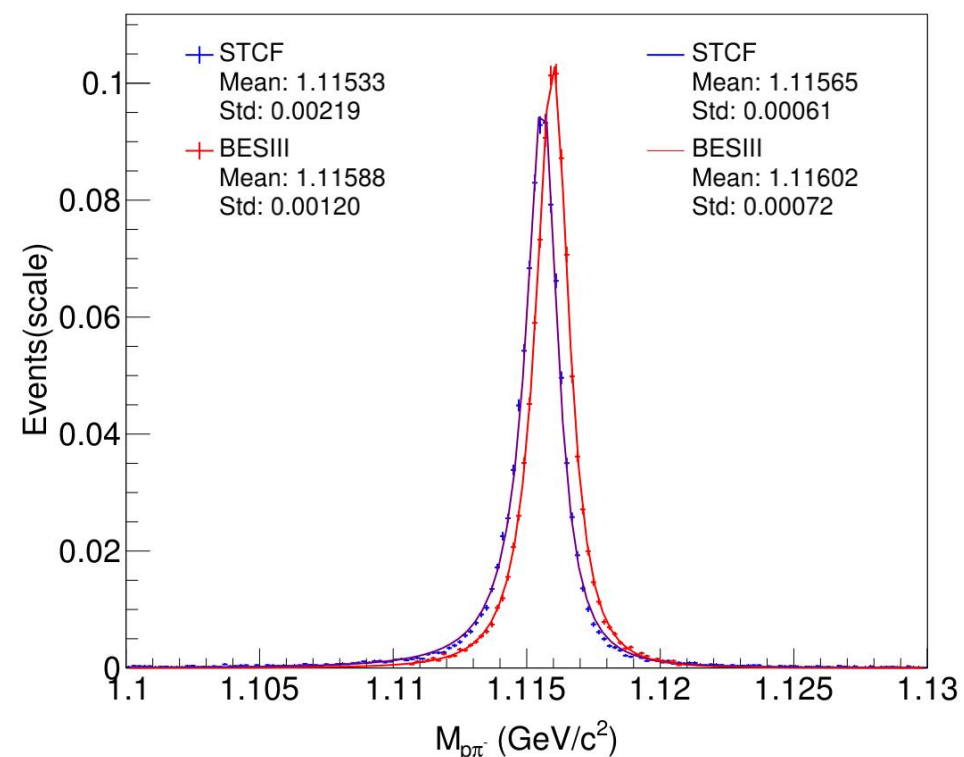
NoCut + NoKmfit

STCF:46.55% vs BESIII:37.15%



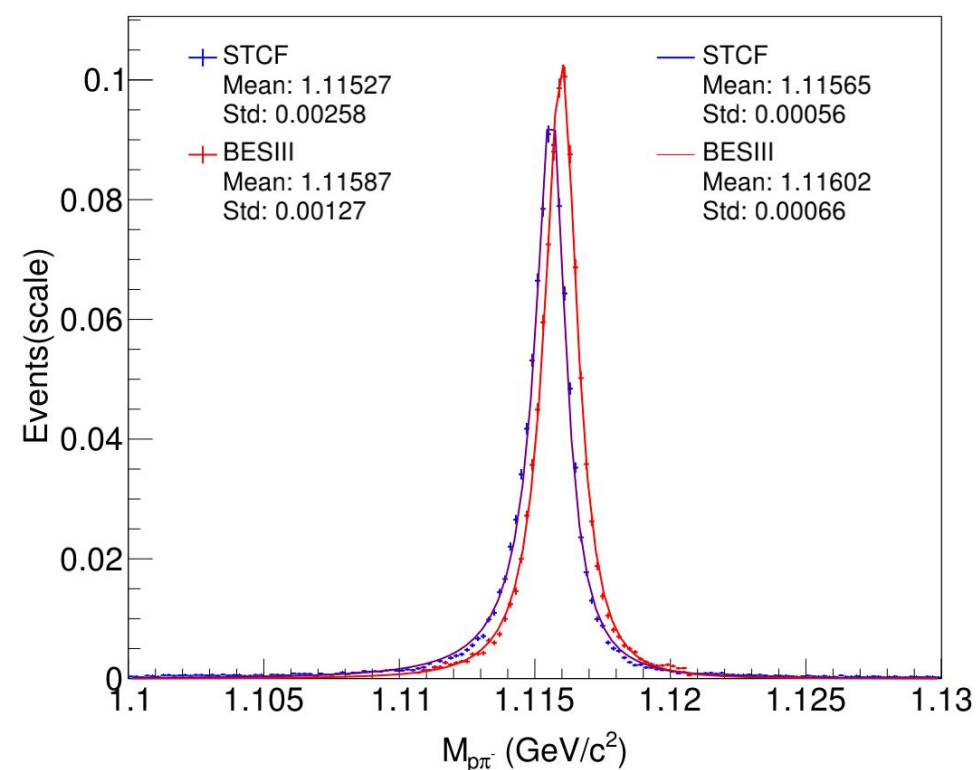
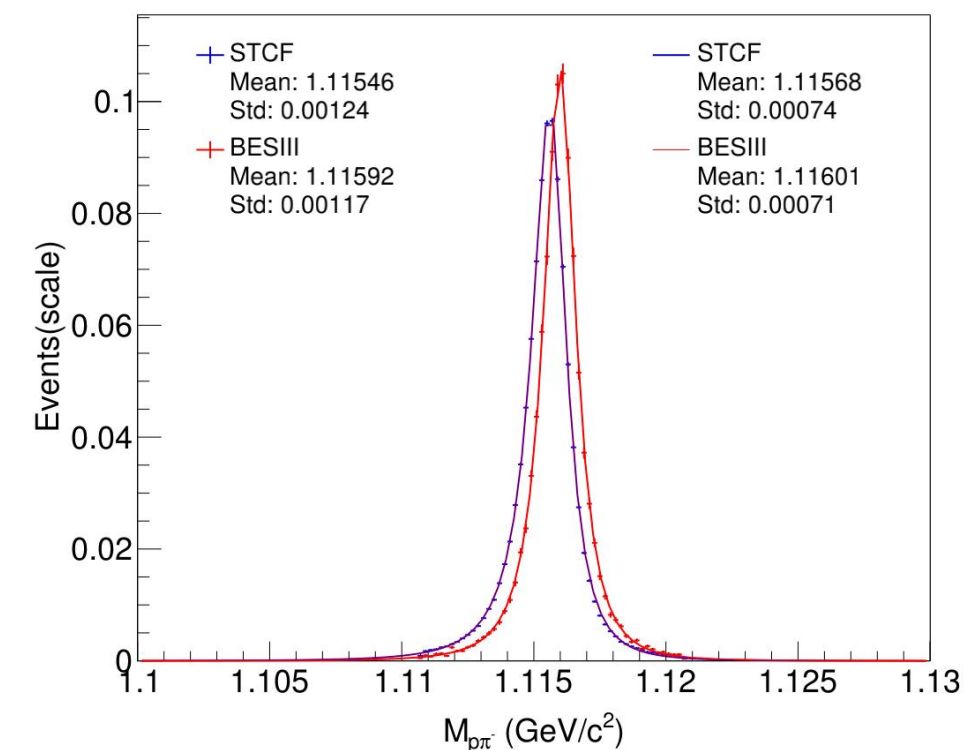
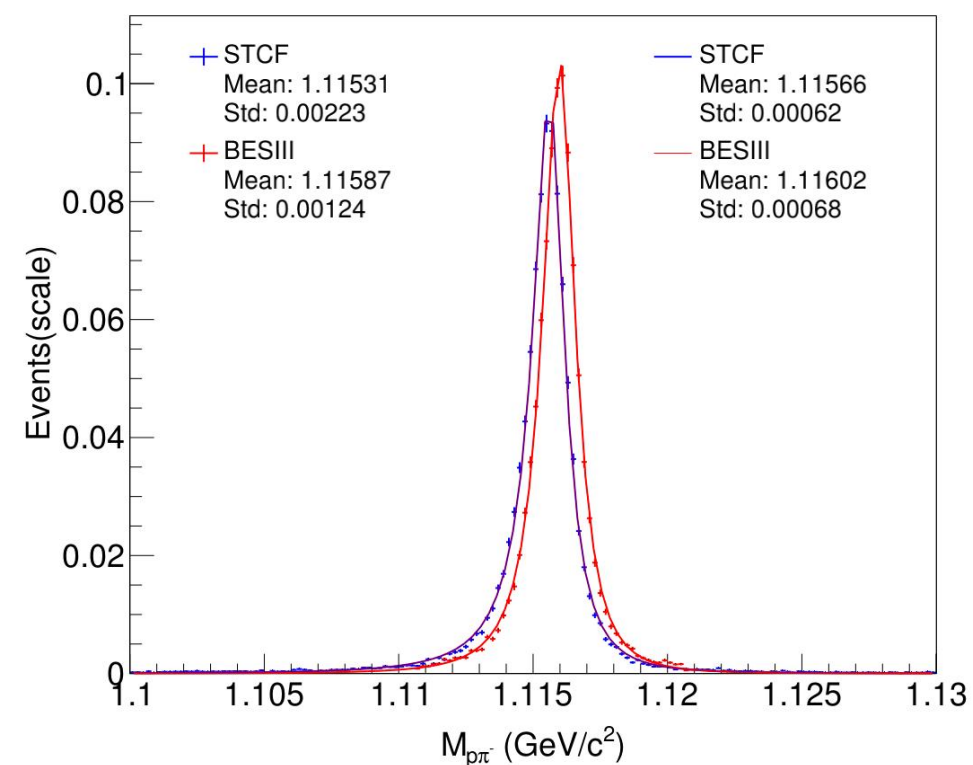
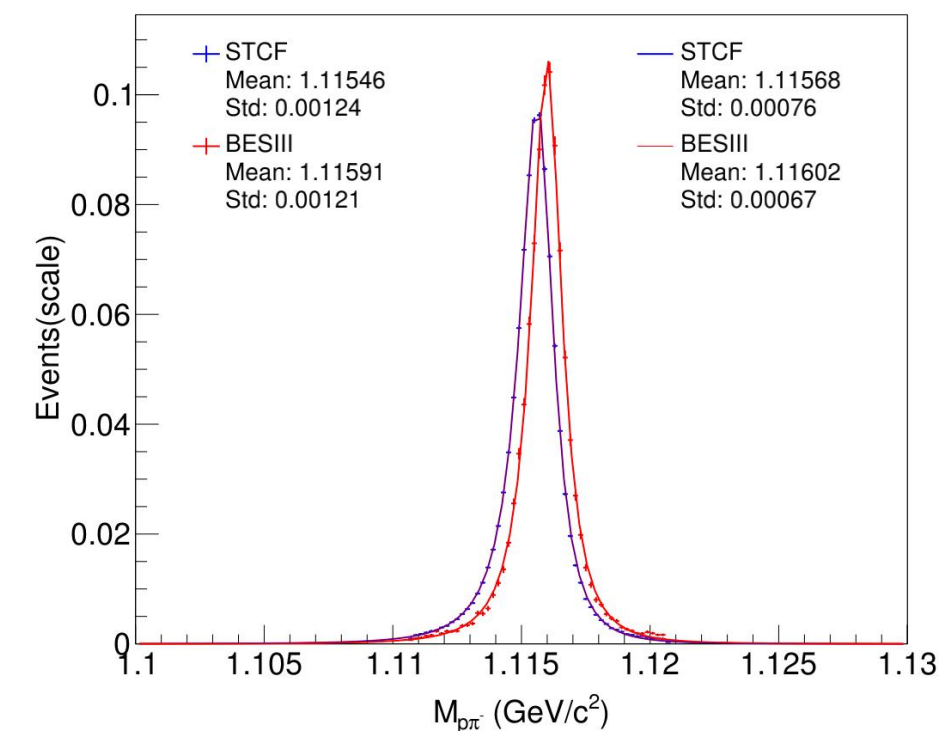
NoCut + Kmfit

STCF:41.65% vs BESIII:36.40%



All Selections

STCF:33.82% vs BESIII:31.71%

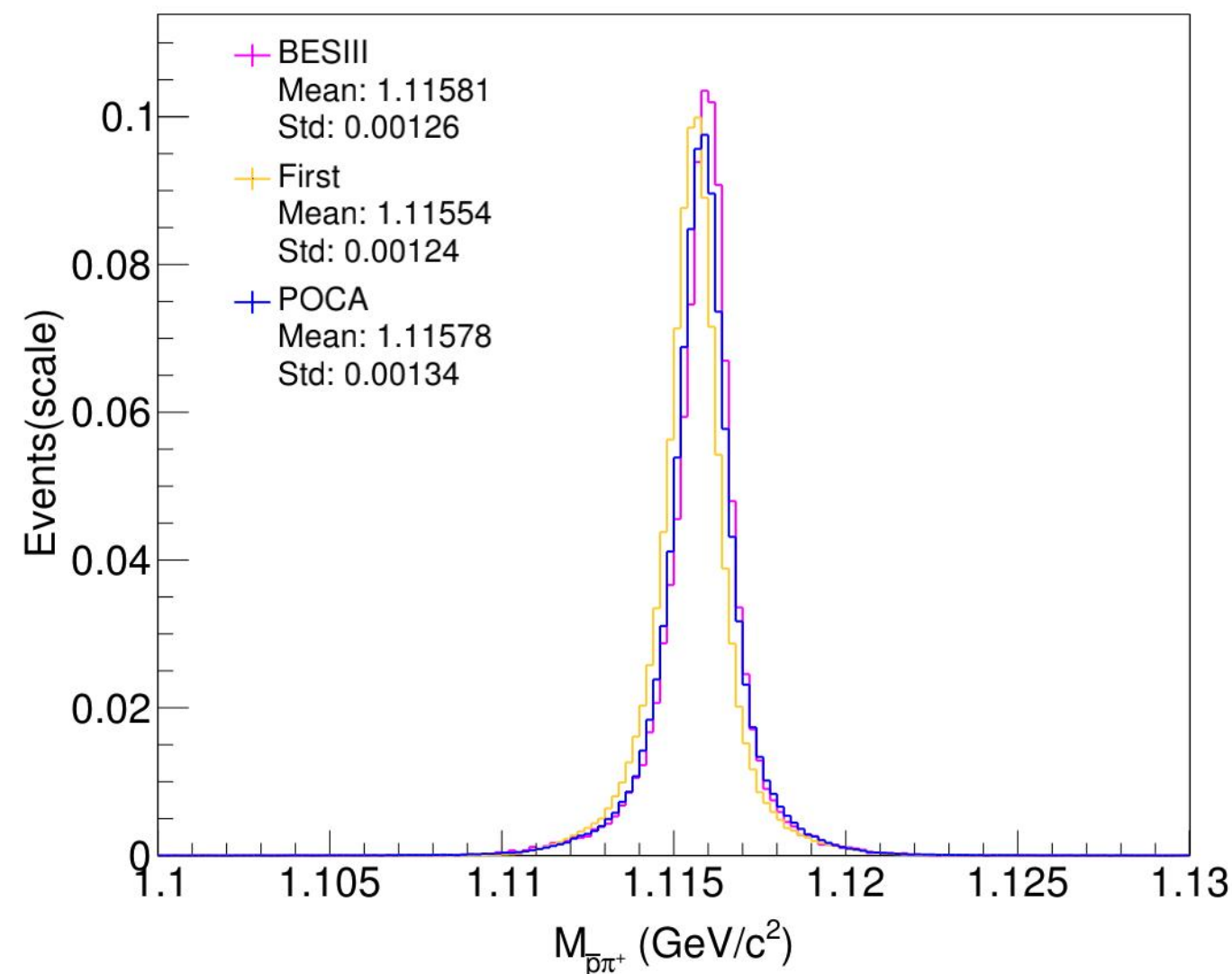
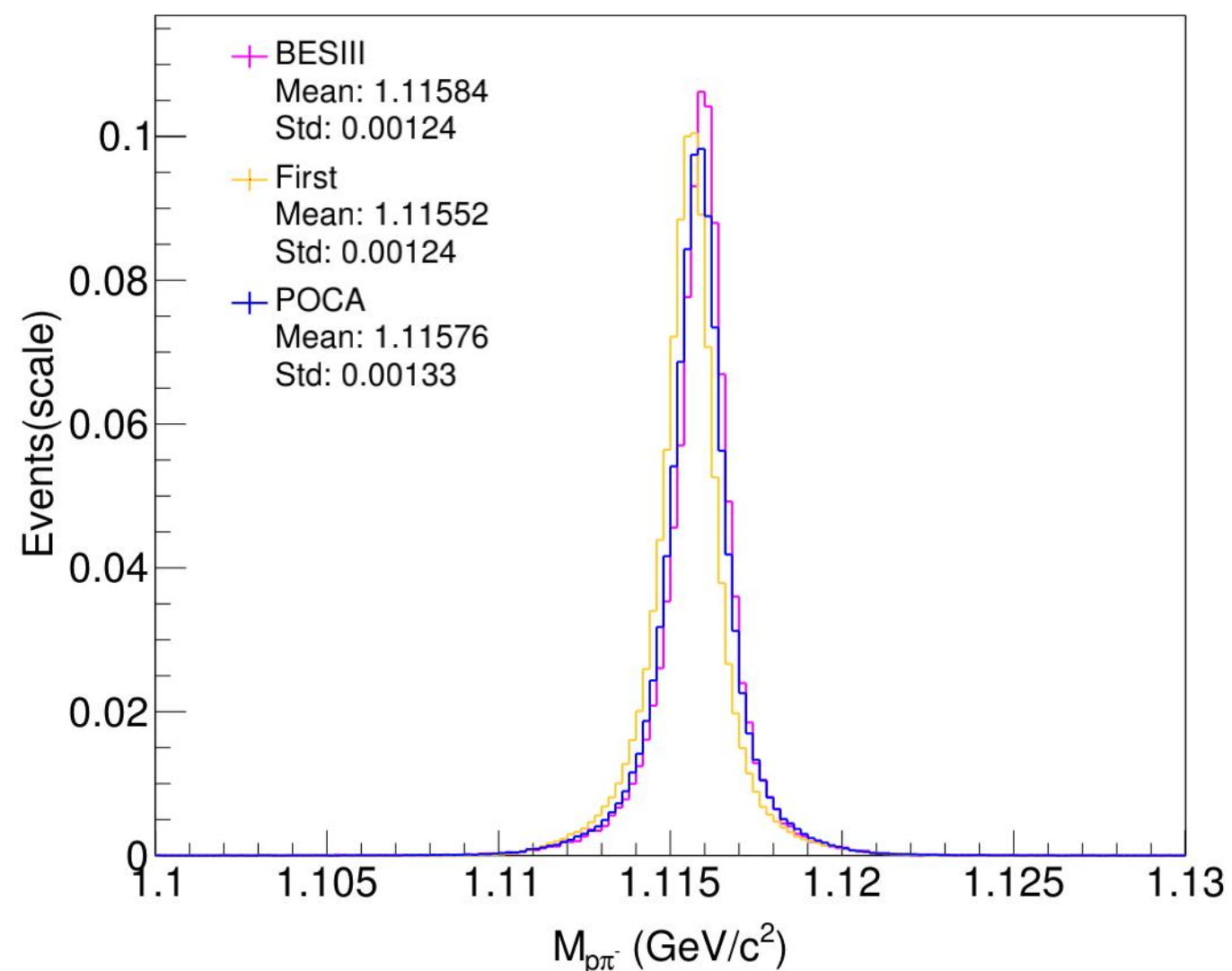
Figure. Λ (上) $\bar{\Lambda}$ (下)不变质量谱对比Figure. Λ (上) $\bar{\Lambda}$ (下)不变质量谱对比Figure. Λ (上) $\bar{\Lambda}$ (下)不变质量谱对比

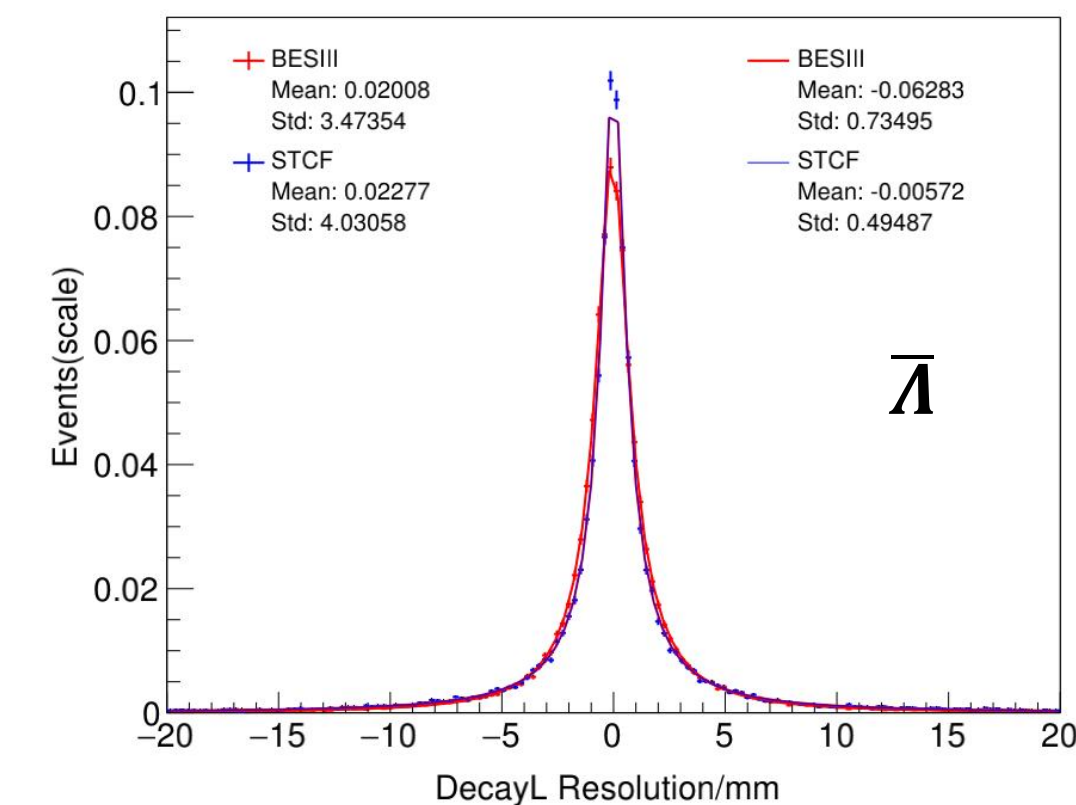
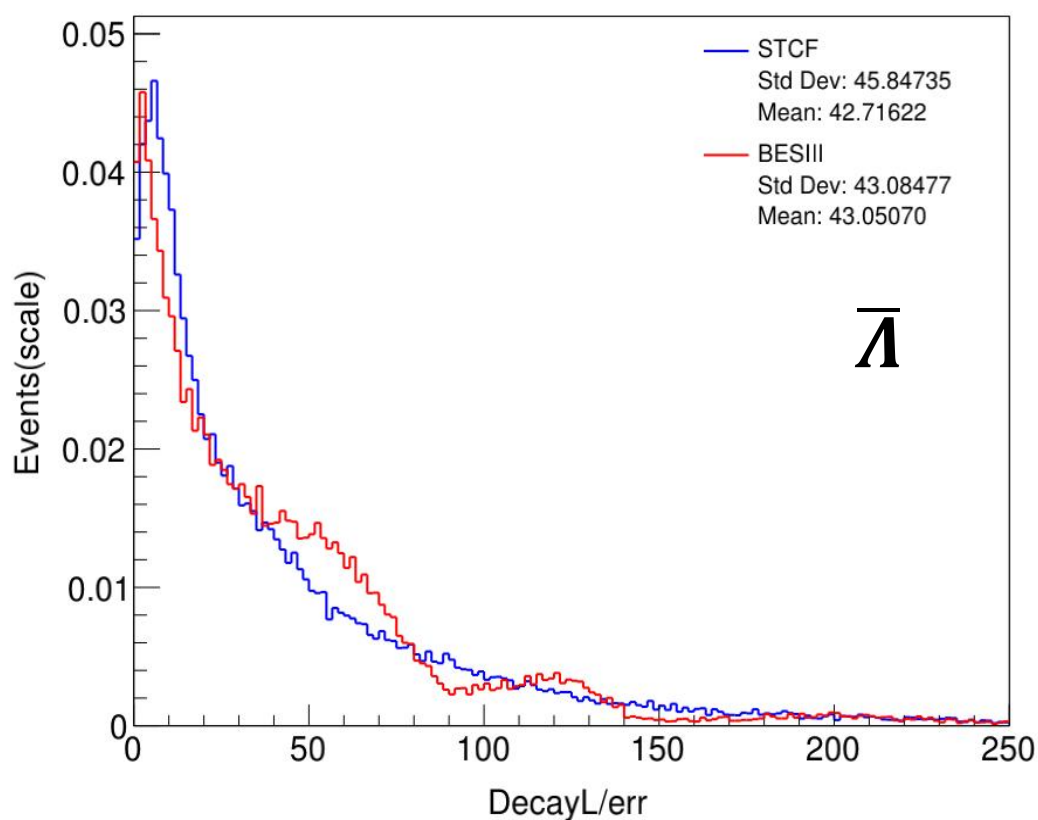
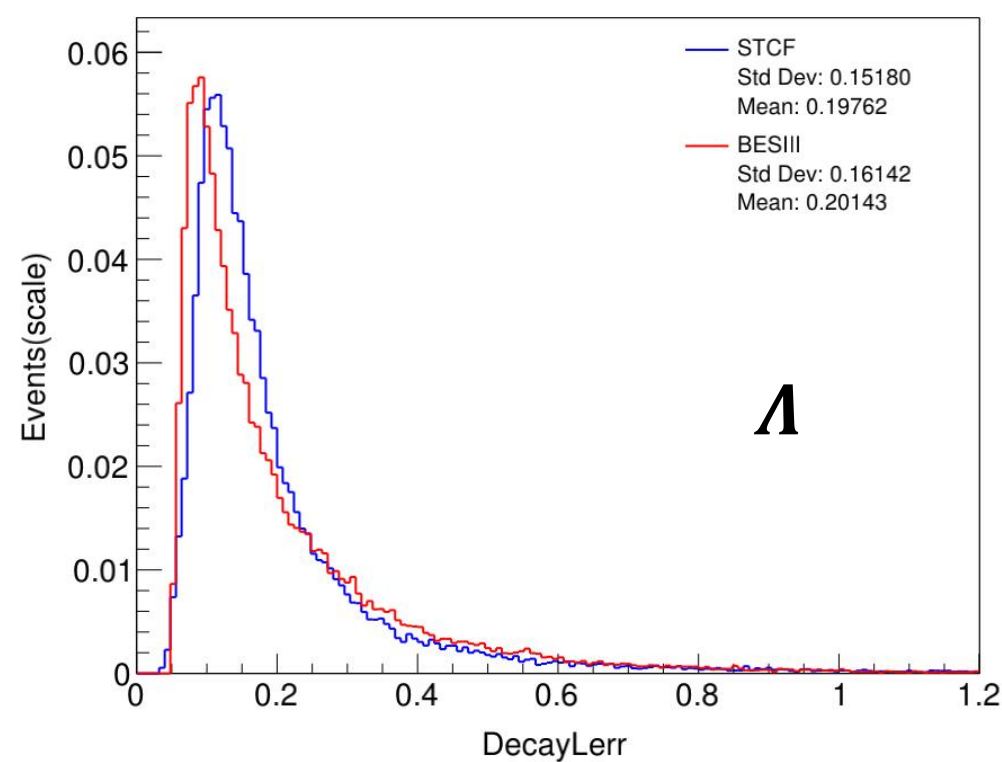
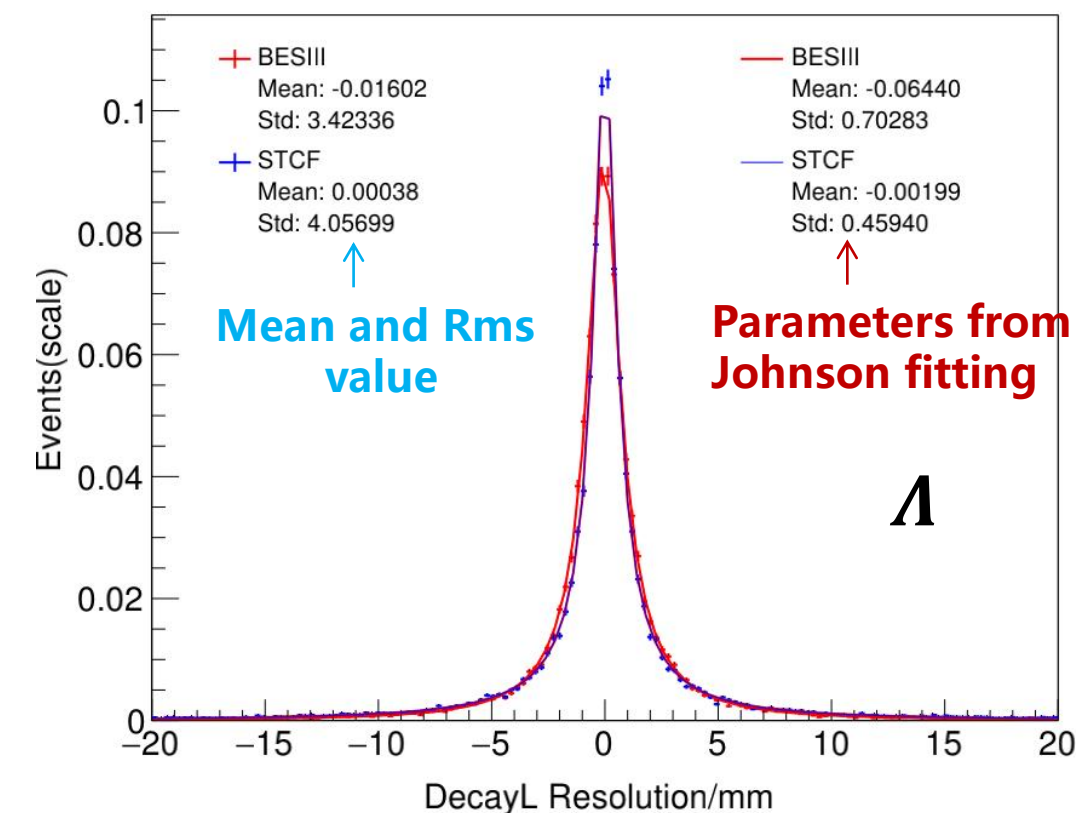
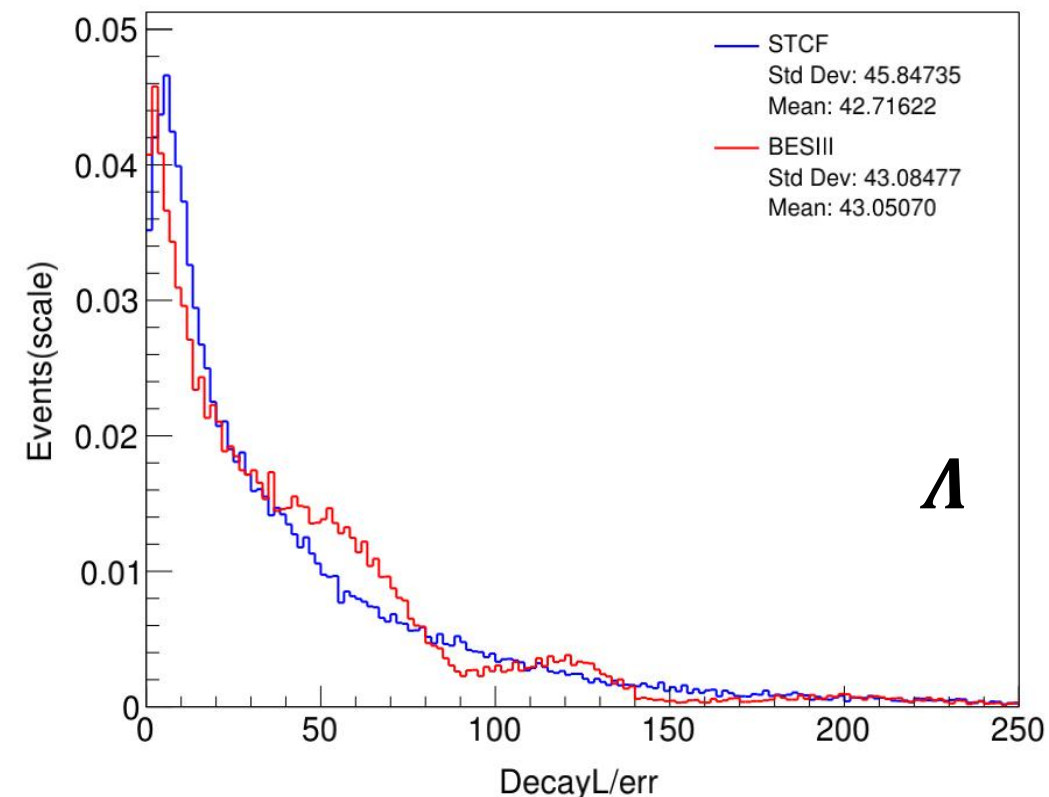
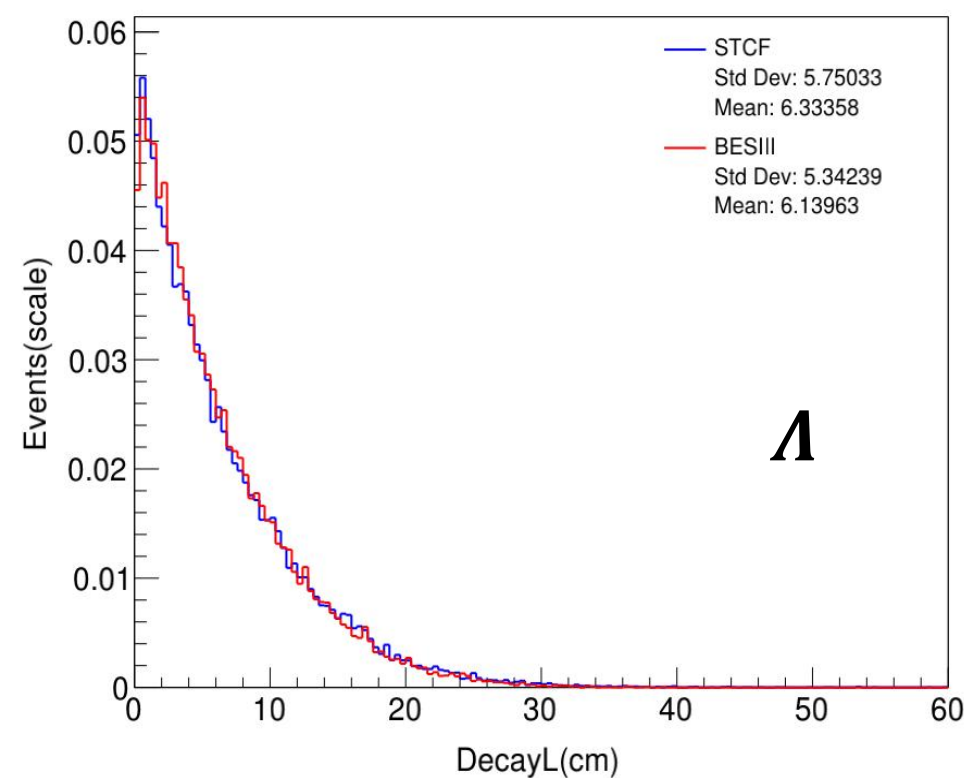
➤ 对比不变质量谱

All Selections

- **First:**径迹重建的第一个测量点信息(默认)
- **POCA:** 径迹内推到距离参考点最近的点的信息

First:33.82% vs Poca:34.45% vs BESIII:31.71%

Figure. Λ (左) $\bar{\Lambda}$ (右)不变质量谱对比

Figure. Λ 衰变长度(上)及其误差(下)对比Figure. Λ (上) $\bar{\Lambda}$ (下)衰变长度/误差对比Figure. Λ (上) $\bar{\Lambda}$ (下)衰变长度分辨对比

03

研究进展

part four

➤ 似然函数

$$\mathcal{L} = \prod_{i=1}^N \mathcal{P}(\xi^i; \vec{\lambda}) = \prod_{i=1}^N C \mathcal{W}(\xi^i; \vec{\lambda}) \epsilon(\xi^i),$$


 全角度分布公式

Helicity angles: $\xi(\theta, \theta_1, \phi_1, \theta_2, \phi_2)$
 Fitted parameters: $\vec{\lambda} = (Re(G_2), Im(G_2), P_L, Re(F_A), Im(F_A), Re(H_T), Im(H_T), \alpha_\Lambda, \alpha_{\bar{\Lambda}})$

- 归一化因子:

$$C^{-1} = \frac{1}{N_{MC}} \sum_{j=1}^{N_{MC}} \mathcal{W}(\xi^j; \vec{\lambda}) \epsilon(\xi^j)$$

基于pshpMC计算

- 目标函数: $\mathcal{S} = -\ln \mathcal{L}_{\text{data}}$

通过RooFit提取参数及其误差矩阵:

- MIGRAD: 用于寻找极大似然函数对应的最优参数值;
- HESSE: 用于计算协方差矩阵和参数的不确定度, 提供参数之间的相关性信息。

➤全模拟基于1M统计量对参数统计误差进行估计

STCF预计提供 3.4×10^{12} J/ψ 数据----- $2.6181632 \times 10^9 J/\psi \rightarrow \Lambda(p\pi^-)\bar{\Lambda}(\bar{p}\pi^+)$
数据 ($J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$ 分支比: 1.88×10^{-3} ; $\Lambda \rightarrow (p\pi^-)$ 以及 $\bar{\Lambda} \rightarrow (\bar{p}\pi^+)$ 分支比: 0.64)

- 全模拟scale因子 = $\sqrt{1M/2.6181632 \times 10^9} \approx 0.0195$

Parameter	InitialValue	FinalValue +/-	Error (1M)	Statistical Error
IFA	-7.9000e-06	-9.39e-07 +/-	1.14e-05	2.23e-07
IHT	1.3000e-06	6.19e-06 +/-	3.41e-06	6.66e-08
Ig2	9.1400e-04	9.27e-04 +/-	1.21e-05	2.36e-07
PL	-1.8000e-03	-1.459e-03 +/-	3.62e-03	7.07e-05
RFA	-2.4000e-06	-4.04e-06 +/-	4.76e-06	9.30e-08
RHT	-1.4000e-06	-4.17e-07 +/-	4.32e-06	8.44e-08
Rg2	9.7100e-04	9.92e-04 +/-	1.62e-05	3.17e-07
a1	7.5190e-01	7.57e-01 +/-	1.09e-02	2.13e-04
a2	-7.5590e-01	-7.50e-01 +/-	1.08e-02	2.11e-04

1sigma 统计误差范围内保持一致

➤快模拟基于10M统计量对参数统计误差进行估计

STCF预计提供 3.4×10^{12} J/ψ 数据----- $2.6181632 \times 10^9 J/\psi \rightarrow \Lambda(p\pi^-)\bar{\Lambda}(\bar{p}\pi^+)$

数据 ($J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$ 分支比: 1.88×10^{-3} ; $\Lambda \rightarrow (p\pi^-)$ 以及 $\bar{\Lambda} \rightarrow (\bar{p}\pi^+)$ 分支比: 0.64)

- 快模拟scale因子 = $\sqrt{10M/2.6181632 \times 10^9} \approx 0.0618$

Parameter	InitialValue	FinalValue +/-	Statistical Error	Statistical Error
IFA	-7.9000e-06	-8.02e-06 +/-	4.08e-06	2.52e-07
IHT	1.3000e-06	1.96e-06 +/-	1.23e-06	7.60e-08
Ig2	9.1400e-04	9.04e-04 +/-	4.41e-06	2.72e-07
PL	-1.8000e-03	-5.01e-03 +/-	1.32e-03	8.15e-05
RFA	-2.4000e-06	-4.25e-06 +/-	1.78e-06	1.1e-07
RHT	-1.4000e-06	-3.09e-07 +/-	1.61e-06	9.95e-08
Rg2	9.7100e-04	9.87e-04 +/-	5.87e-06	3.63e-07
a1	7.5190e-01	7.53e-01 +/-	4.04e-03	2.50e-04
a2	-7.5590e-01	-7.51e-01 +/-	4.02e-03	2.48e-04

FullSim
Statistical Error
2.23e-07
6.66e-08
2.36e-07
7.07e-05
9.30e-08
8.44e-08
3.17e-07
2.13e-04
2.11e-04

➤ 参数统计误差

- $\alpha_{J/\psi}$: 角度分布参数
- $\Delta\phi$: 螺旋度振幅相对相位
- A_{cp} : 描述cp破坏的可观测量 $A_{cp} = \frac{\alpha_{\Lambda} + \alpha_{\bar{\Lambda}}}{\alpha_{\Lambda} - \alpha_{\bar{\Lambda}}}$
- Redm and Iedm: 电偶极形状因子的实部和虚部

(1M/10M)

Parameter	FinalValue Fullsim/Fastsim	Error (Fullsim/Fastsim)	Statistical Error(Fullsim/Fastsim)
$\alpha_{J/\psi}$	0.46 /0.47	6.56e-03/2.42e-03	1.28e-04/1.5e-04
$\Delta\Phi$	0.75/0.74	1.23e-02/4.52e-03	2.41e-04/2.80e-04
A_{cp}	0.00494/0.00163	1.38e-02/5.16e-03	2.71e-04/3.2e-04
Redm	-1.80e-19/-7.01e-19	9.80e-19/3.80e-19	1.91e-20/2.26e-20
Iedm	1.52e-18/4.45e-18	7.73e-19/2.80e-19	1.51e-20/1.72e-20

04

总结

part five

➤在STCF基于 $J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda}$ 对CP破坏不对称参数和超子EDM进行研究

采用全角度分析法对参数 A_{cp} 和EDM进行提取

- $A_{cp} \sim 10^{-4}$, 和BESIII相比测量精度预计提高一个数量级
- $EDM \sim 10^{-20}$, 和BESIII相比预计提高一个数量级

arXiv:2506.19180



山东大学

SHANDONG UNIVERSITY

感谢观看

汇报人

于明玉

张剑宇

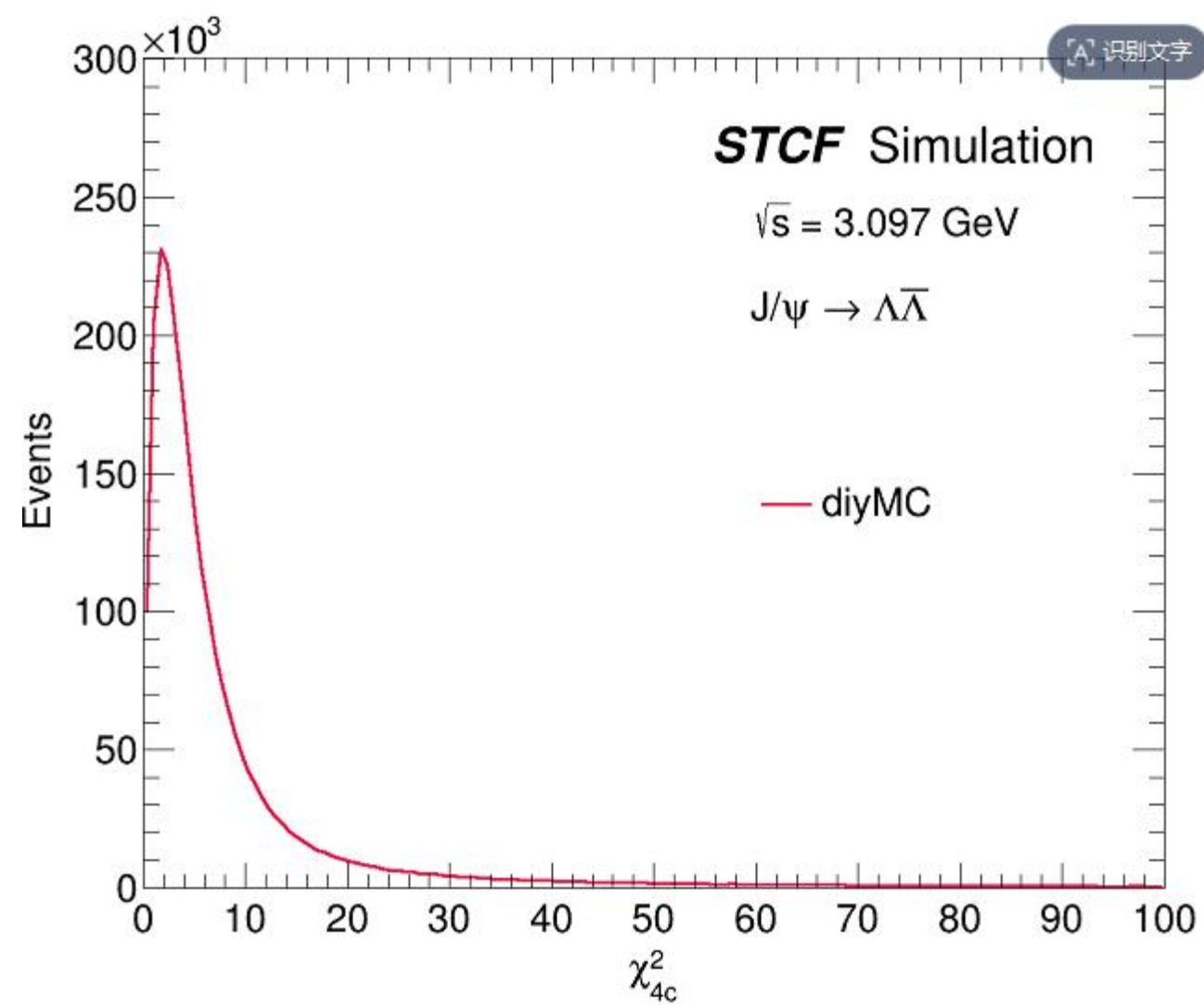
➤ 相关系数矩阵

Parameter	IFA	IHT	Ig2	PL	RFA	RHT	Rg2	a1	a2
IFA	1	0.001	0.030	-0.003	-0.092	0.005	0.058	0.007	-0.009
IHT	-0.001	1	-0.001	0.004	0.000	0.346	-0.004	-0.010	-0.009
Ig2	0.030	-0.001	1	0.001	-0.063	-0.013	-0.412	-0.047	0.032
PL	-0.003	0.004	0.001	1	-0.000	0.005	-0.002	-0.007	-0.009
RFA	-0.092	0.000	-0.063	-0.000	1	-0.008	-0.135	0.026	0.006
RHT	0.005	0.346	-0.013	0.005	-0.008	1	0.016	-0.057	-0.059
Rg2	0.058	-0.004	-0.412	-0.002	-0.135	0.016	1	0.090	-0.078
a1	0.007	-0.010	-0.047	-0.007	0.026	-0.057	0.090	1	0.853
a2	-0.009	-0.009	0.032	-0.009	0.006	-0.059	-0.078	0.853	1

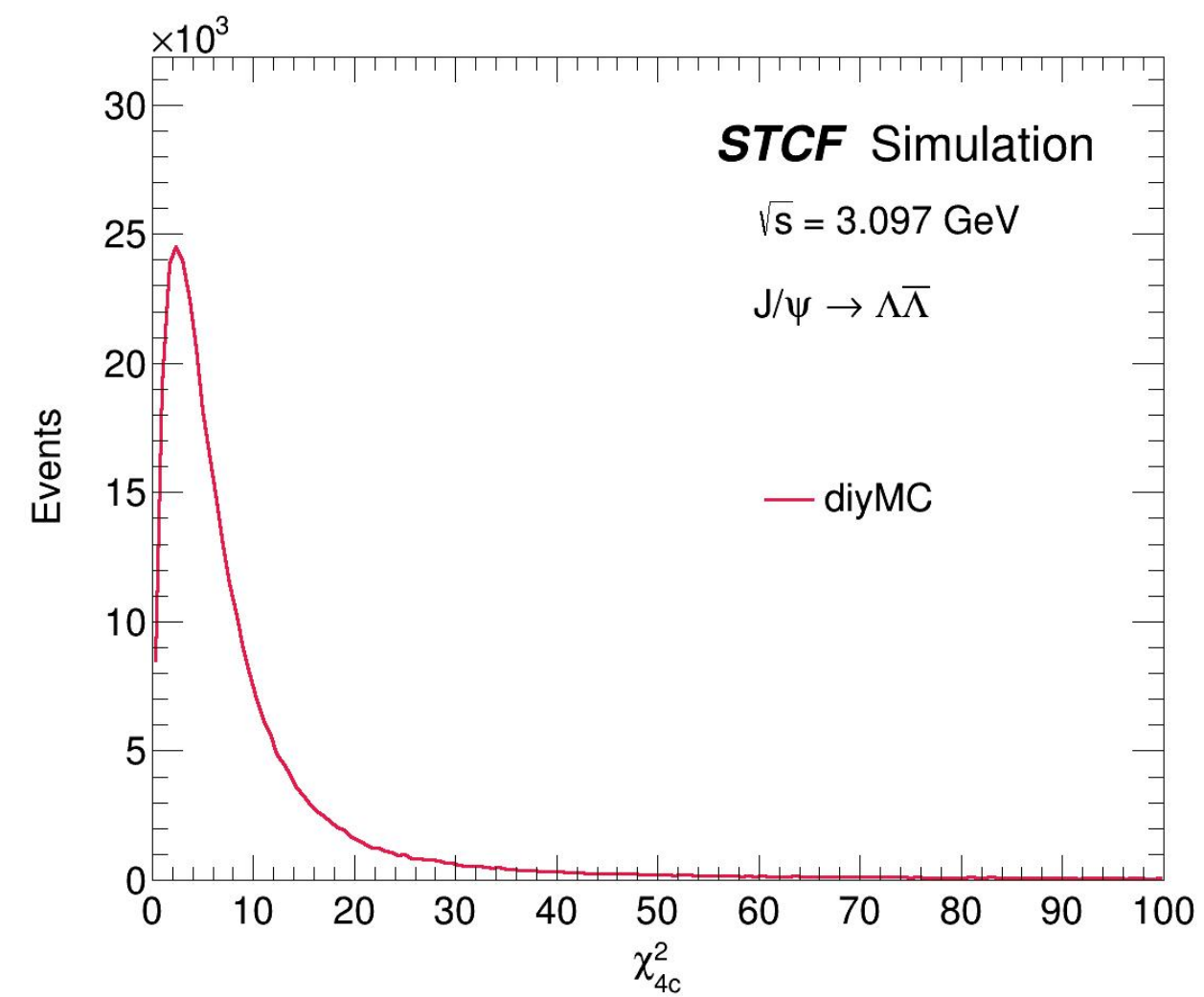
- RG2 和 IG2： 电场形状因子 **G2**的实部和虚部
- RFA 和 IFA ： **P**宇称破坏的形状因子的实部和虚部
- RHT 和 IHT ： **CP**宇称破坏的形状因子的实部和虚部
- a1和a2： Λ 和 $\bar{\Lambda}$ 的衰变参数

backup

➤ 运动学拟合卡方对比



fastsim



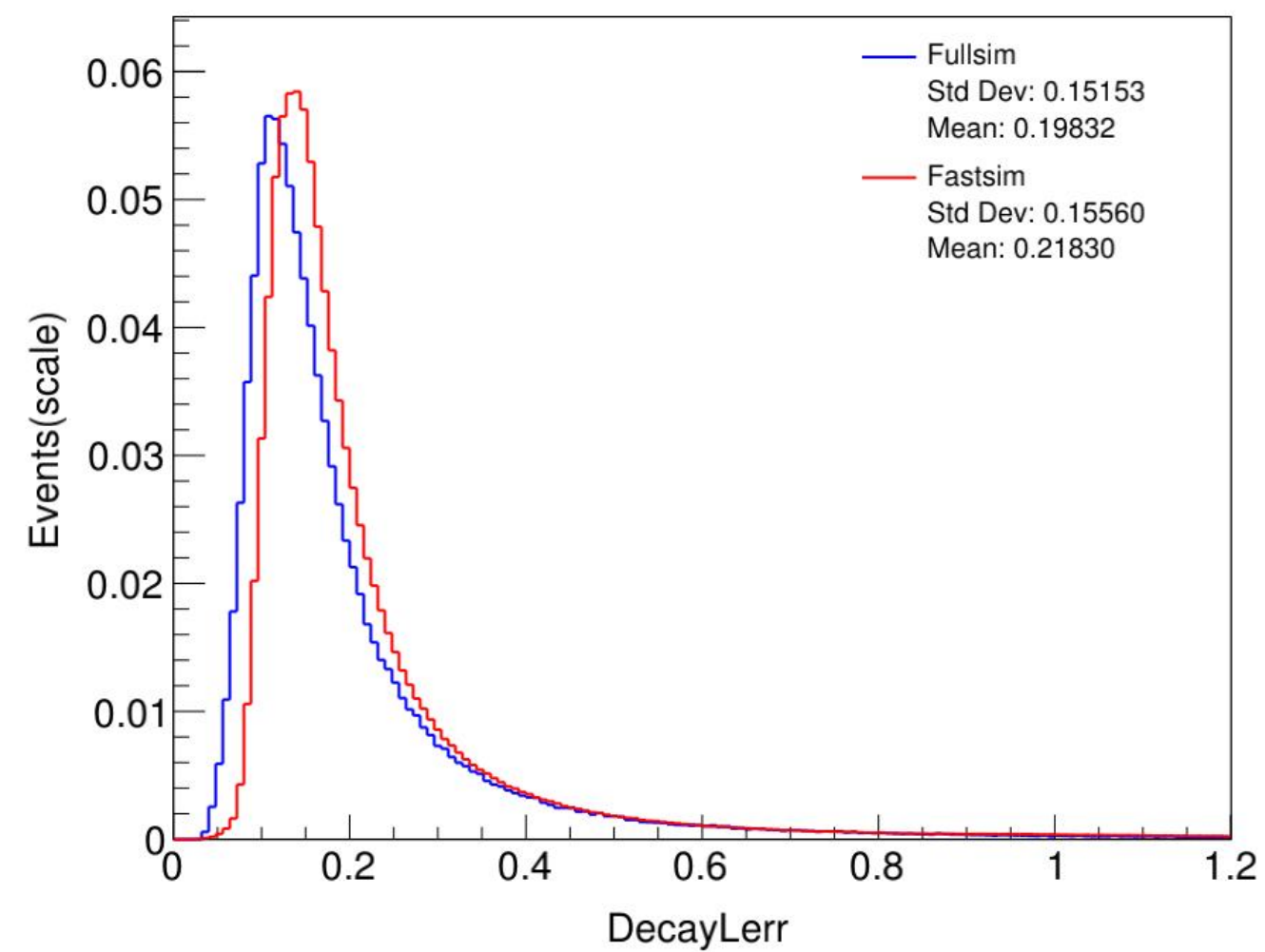
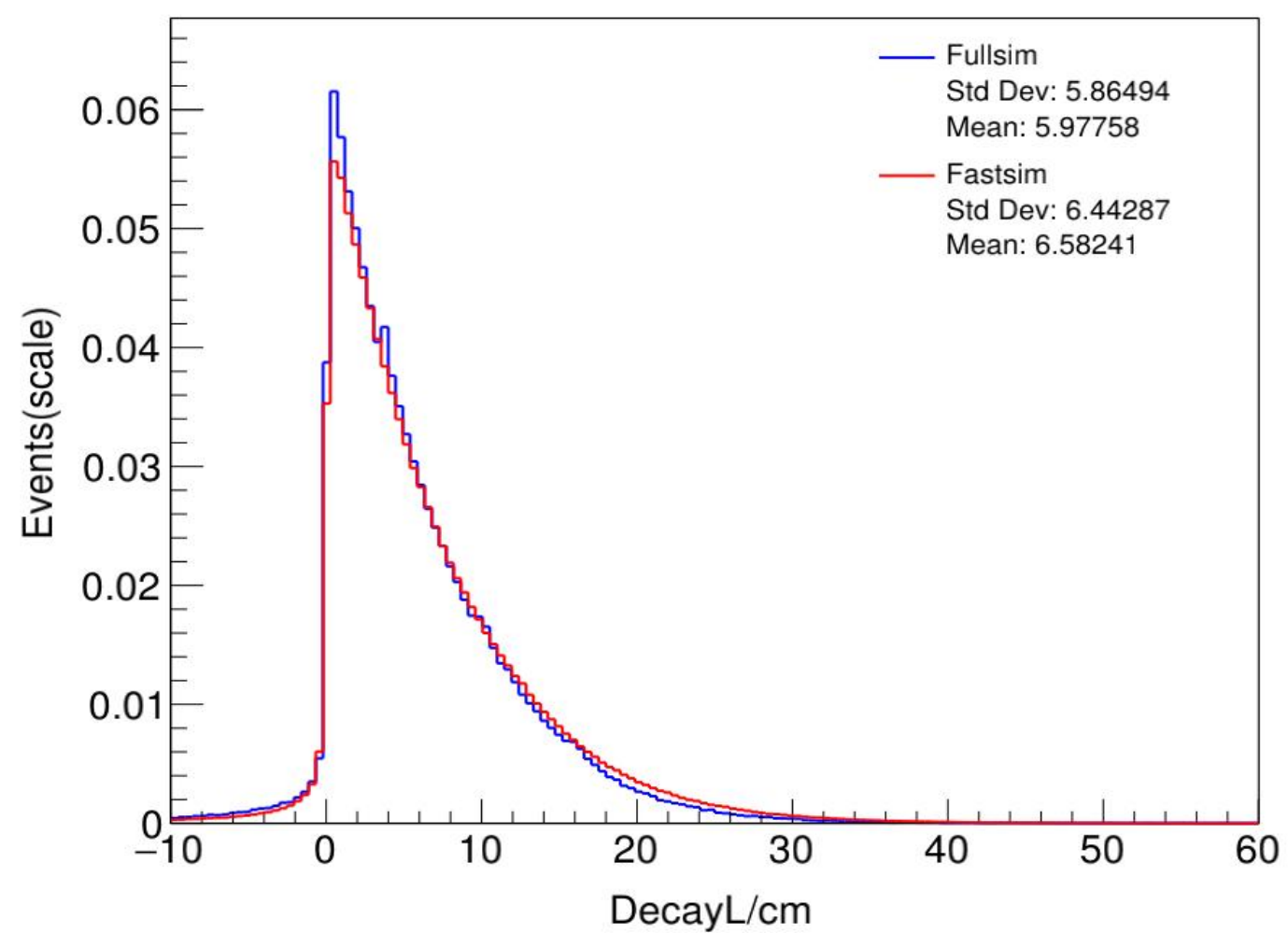
fullsim

➤ 不添加本底时的选择效率

	Efficiency(FullSim)	Efficiency(Fullsim-nobkg)
Good chared tracks selection1	58.93%	58.75%
Good chared tracks selection2	57.20%	57.53%
$\Lambda\bar{\Lambda}$ 重建	38.28%	44.06%
次级顶点拟合	34.63%	40.11%
运动学拟合	33.82%	39.58%

backup

➤ Lambar粒子的衰变长度和衰变长度误差



backup

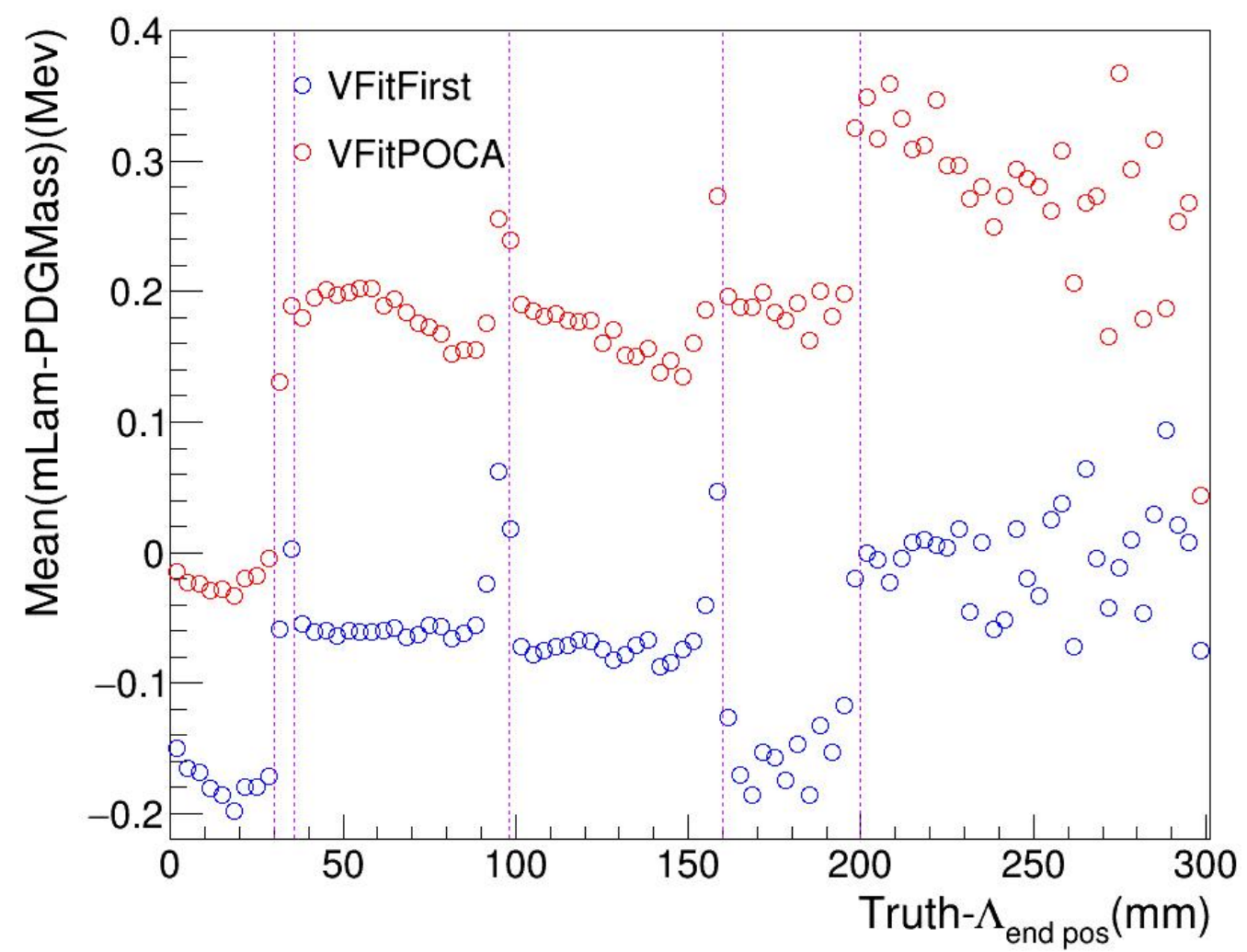


Figure. Lam不变质量残差随着lam粒子衰变顶点的分布

backup



backup



backup



backup

