



山东大学(青岛)  
SHANDONG UNIVERSITY, QINGDAO



# STCF

# 全局顶点拟合算法

于明玉 黄性涛 李腾



# CONTENTS

1

研究背景与意义

2

研究方法

3

研究进展

4

总结与展望



## PART 01

# 研究背景与意义



## 研究背景 与意义

### 研究方法

### 研究进展

### 总结与展望

# 研究背景

## ➤ 新一代超高亮度正负电子对撞机—超级陶粲装置的提出

- BEPCII/BESIII 将继续运行10 年左右

在XYZ粒子、轻味奇特强子、粲物理等方面取得系列重要研究成果，使得中国粒子物理进入国际领先行列

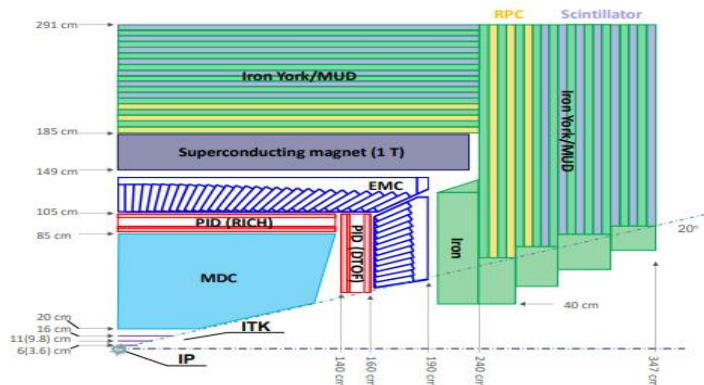
- 尚需深入研究强子内部结构和非微扰强相互作用本质，寻找超出标准模型的新物理现象

STCF

对撞亮度：  
 $0.5 \times 10^{35} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$   
对撞质心能量范围：  
 $2 \sim 7 \text{ GeV}$

BesIII

对撞亮度：  
 $1 \times 10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$   
对撞质心能量范围：  
 $2 \sim 4.6 \text{ GeV}$



超级陶粲装置(SuperTau-Charm Facility, STCF)

## ➤ STCF数据产生特点

- 高统计量、高本底、高精度等特点



## 研究背景 与意义

### 研究方法

### 研究进展

### 总结与展望

# 研究背景

## ➤ 目前STCF的物理分析工具：VertexFit

顶点拟合和运动学拟合是高能物理实验中进行数据分析的重要工具，是进行物理分析的前提条件

- 顶点拟合工具VertexFit:

要求衰变产生的末态径迹共同通过三维空间中同一点（顶点约束）

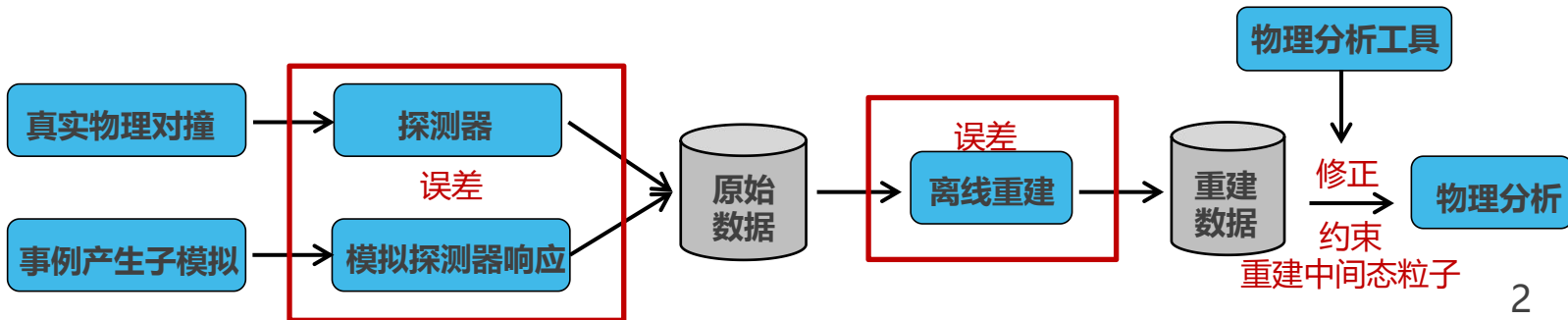
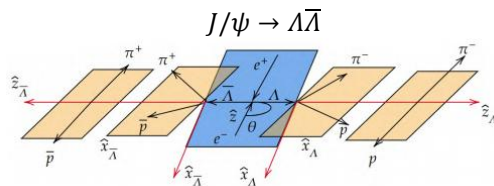
- 次级顶点拟合工具SecondVertexFit:

结合对撞点信息获取中间态粒子产生顶点处信息

- 运动学拟合分析工具（KinematicFit）

添加运动学约束，如四动量约束(确保能动量守恒)

(通过拟合提高径迹参数分辨、压低本底、提高信噪比和物理测量的精度)





## 研究背景 与意义

### 研究方法

### 研究进展

### 总结与展望

# 研究意义

## ➤ VertexFit包的局限性

- 顶点拟合和运动学拟合相对独立，顶点拟合分开拟合每个衰变顶点
- 没有对重建中性粒子信息进行充分利用
  - ①无法对中性粒子进行顶点拟合
  - ②默认中性粒子从对撞点产生

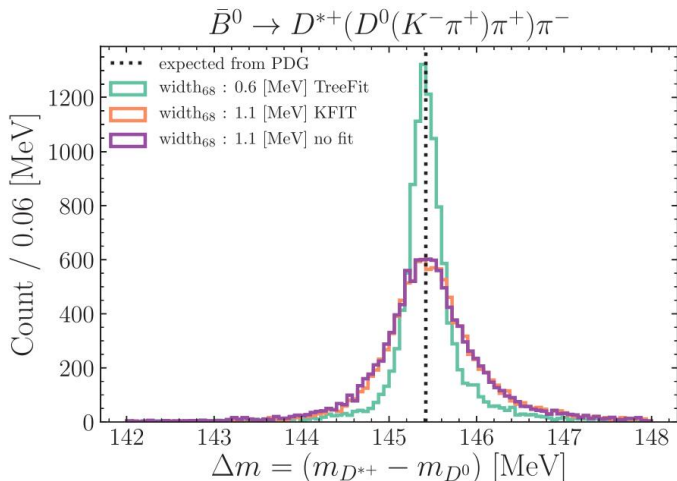
$$\Sigma^+ \text{ (长寿命粒子)} \rightarrow P\gamma$$

## ➤ BelleII全局顶点拟合算法

基于kalman滤波法设计开发。

- KFit: 分开拟合每个衰变顶点的算法
- TreeFit: 应用全局顶点拟合的算法

计划在STCF实现全局顶点拟合算法!!!





## PART 02

# 研究方法



# 研究方法

## ➤ BelleII全局顶点拟合算法——基于卡尔曼滤波法设计

目标：寻找一组物理参数的最优解

- 通过最小二乘法，对物理参数进行最优估计

通过最小化测量值与理论预期值之间差的平方和，获得对物理参数的最优估计

$$\chi^2 = (X - X_0)^T V^{-1} (X - X_0) = \min$$

(X - 最优参数值)  
(X<sub>0</sub> - 理论值)

不适用于求解状态向量  
维度较大的问题

- 卡尔曼滤波法（优化的最小二乘法）

在存在测量误差与物理约束的情况下，对粒子状态（如动量、顶点位置）进行递推式估计，获得参数最优解以及参数误差矩阵。

$$\chi^2 = (X_\alpha - X_{\alpha-1})^T C_{\alpha-1}^{-1} (X_\alpha - X_{\alpha-1}) + (m - h(X_\alpha))^T V_m^{-1} (m - h(X_\alpha)) = \min$$

(C<sub>α-1</sub><sup>-1</sup>: 参数误差矩阵)

(V<sup>-1</sup>: 测量误差矩阵)

(m - h(X<sub>α</sub>): 残差)

(h(x): 约束方程)

矩阵求逆的维度=当前约束方程维度，降低计算难度

研究背景与意义

研究方法

研究进展

总结与展望



# 研究方法

## ➤ 卡尔曼滤波法对状态向量的求解

$$\chi^2 = (X_\alpha - X_{\alpha-1})^T C_{\alpha-1}^{-1} (X_\alpha - X_{\alpha-1}) + (m - h(X_\alpha))^T V_m^{-1} (m - h(X_\alpha)) = \min$$

- 对卡方求极值:

$$\frac{d\chi^2}{dX} = 0, \quad X_0 \text{ (初始参数)} \rightarrow X \text{ (最优参数解)}$$

- 约束方程的非线性会导致方程的求解变得困难, 对约束方程进行泰勒展开

$$h(X) = h(X_{\alpha-1}) + H(X - X_{\alpha-1}), \quad H = -\frac{\partial h(X)}{\partial X} \quad \text{迭代}$$

↓ 代入

$$\frac{d\chi^2}{dX} = (X_\alpha - X_{\alpha-1})^T C_{\alpha-1}^{-1} (X_\alpha - X_{\alpha-1}) + (m - h(X_\alpha))^T V_m^{-1} (m - h(X_\alpha)) = 0$$

- 方程的解

( $K_\alpha = C_{\alpha-1} H R_\alpha^{-1}$  - 卡尔曼增益矩阵)

$$X_\alpha = X_{\alpha-1} - K_\alpha r_\alpha$$

( $r_\alpha = m - h(X_\alpha)$  - 残差)

( $R_\alpha = V + H_\alpha^{\alpha-1} C_{\alpha-1} (H_\alpha^{\alpha-1})^T$  - 残差协方差矩阵)

研究背景与意义

研究方法

研究进展

总结与展望



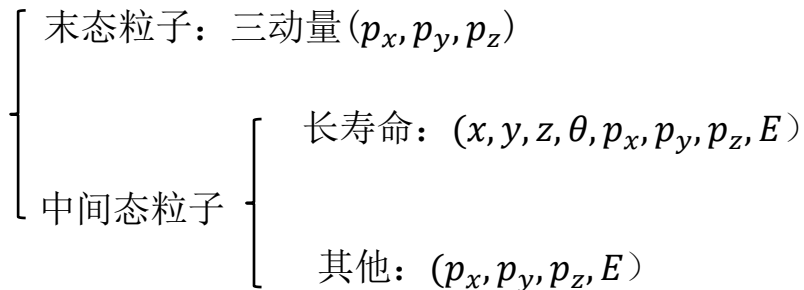
# 研究方法

## ➤ 全局顶点拟合的卡尔曼滤波法

- 全局状态向量:

包含该物理过程中所有粒子的信息

改善因某粒子测量精度较低而导致的拟合效果变差的问题



- $\chi^2$ 的构造

约束按序依次作用于状态向量上, 每次结果的更新均建立在前一约束结果基础上

$$\chi_\alpha^2 = \sum_k \chi_k^2, \quad (\alpha: \text{某次迭代}, k: \text{约束的个数})$$

$$\chi_k^2 = (X_k - X_{k-1})^T C_{k-1}^{-1} (X_k - X_{k-1}) + (m_k - h_k(X_k))^T V_k^{-1} (m_k - h_k(X_k))$$



$$X_k^\alpha = X_{k-1}^\alpha - K_{k-1}^\alpha r_{k-1}^\alpha$$

改善顶点拟合运动学拟合相对独立问题

研究背景与意义

研究方法

研究进展

总结与展望



# 研究方法

## ➤ BelleII全局顶点拟合算法

基于kalman滤波法设计开发。

联合所有粒子的信息，在每一次迭代中按序逐步引入物理约束，对粒子参数进行更新与优化，提高参数分辨，同时对中间态粒子信息进行精确重建。



综合上述两点全局顶点拟合对中性粒子的动量有较好的处理！

研究背景与意义

研究方法

研究进展

总结与展望



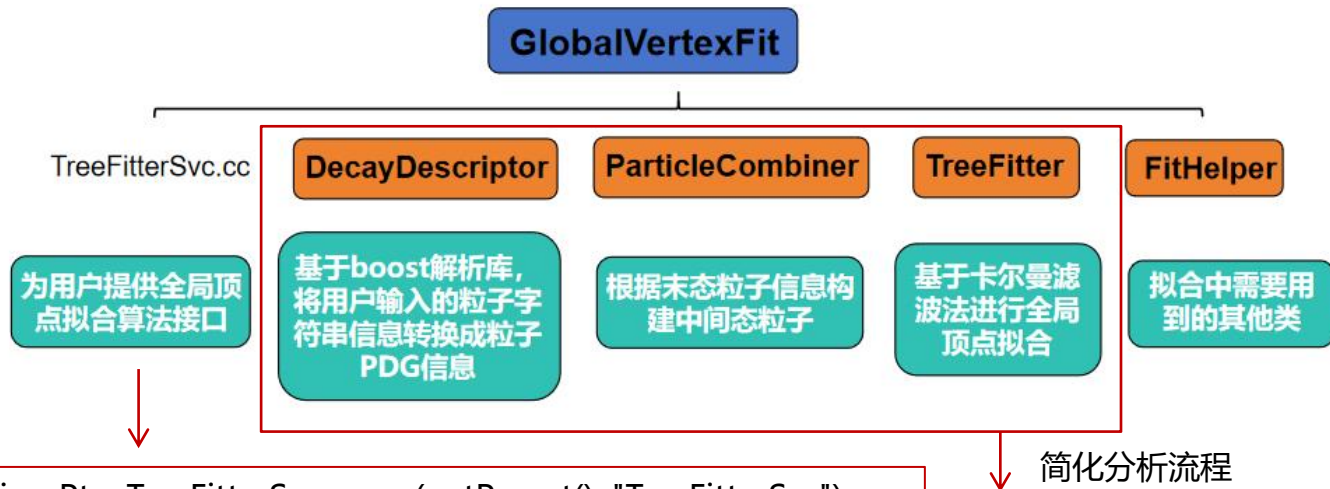
## PART 03

# 研究进展



# 研究进展

- 目前基于BelleII全局顶点拟合算法设计实现了GlobalVertexFit包
- GlobalVertexFit包的基本结构如下：



`SniperPtr<TreeFitterSvc> _svc(getParent(), "TreeFitterSvc");`

简化分析流程

- 1.通过用户输入字符串信息, 构建衰变链, 无需手动构建
- 2.调用treeFit函数完成全局顶点拟合, 无需分开进行顶点拟合和运动学拟合

研究背景与意义

研究方法

研究进展

总结与展望



# 研究进展

- 基于不同物理过程对全局顶点拟合算法性能进行检验：

$$J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda} \rightarrow (p\pi^-)(\bar{p}\pi^+)$$

VertexFit: 42.922% vs GlobalVertexFit 44.079%

全局顶点拟合之后 $\Lambda(\bar{\Lambda})$ 不变质量普分辨率高于VertexFit，且经过相同事例挑选程序之后，效率提升~1%

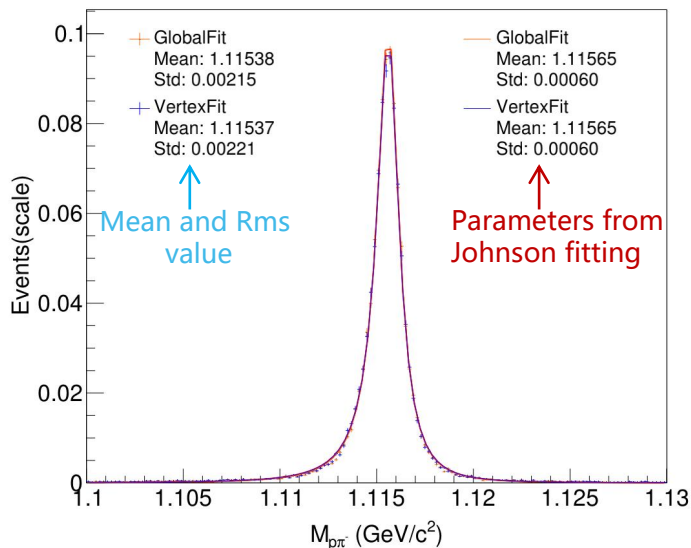
研究背景与意义

研究方法

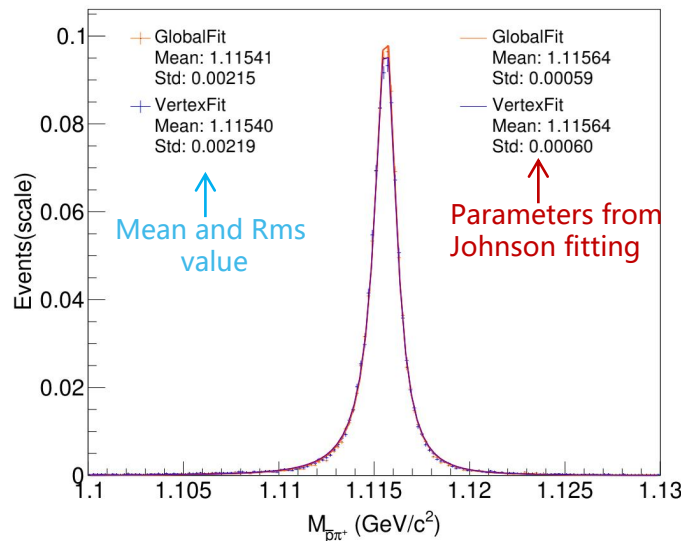
研究进展

总结与展望

- $\Lambda$  拟合之后不变质量



- $\bar{\Lambda}$  拟合之后不变质量





# 研究进展

- 基于不同物理过程对全局顶点拟合算法性能进行检验：

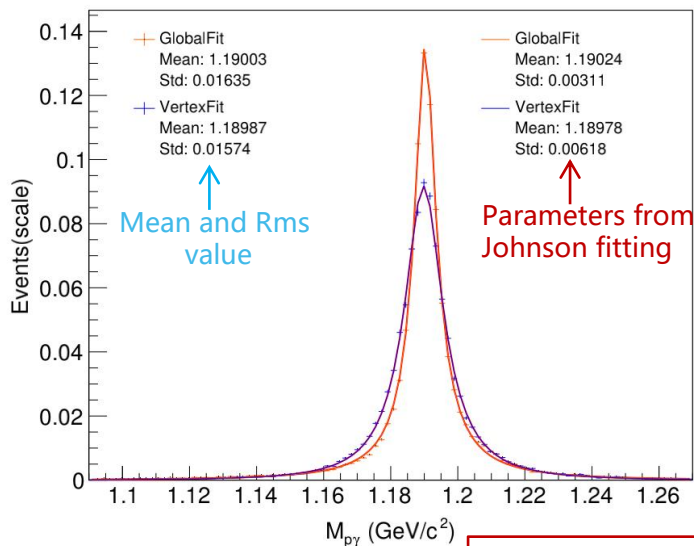
$$J/\psi \rightarrow \Sigma^+(Pr)\bar{\Sigma}(\pi_0(rr)\bar{P})$$

VertexFit: 66.64% vs GlobalVertexFit 69.44%

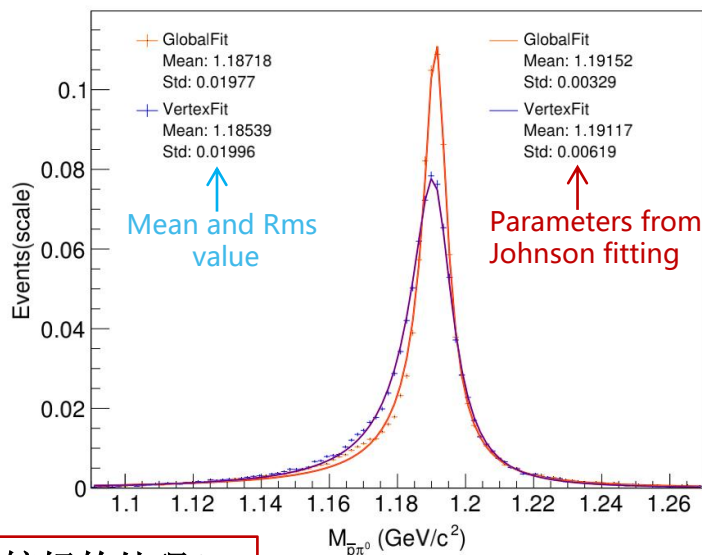
全局顶点拟合之后 $\Sigma^+$  ( $\bar{\Sigma}$ )不变质量普分辨显著提升, 且经过相同事例挑选程序之后, 效率提升~3%

研究背景与意义

- $\Sigma^+$  不变质量



- $\bar{\Sigma}$  不变质量



研究方法

研究进展

总结与展望

对中性粒子的动量有更好的处理！



# 研究进展

- 基于不同物理过程对全局顶点拟合算法性能进行检验:

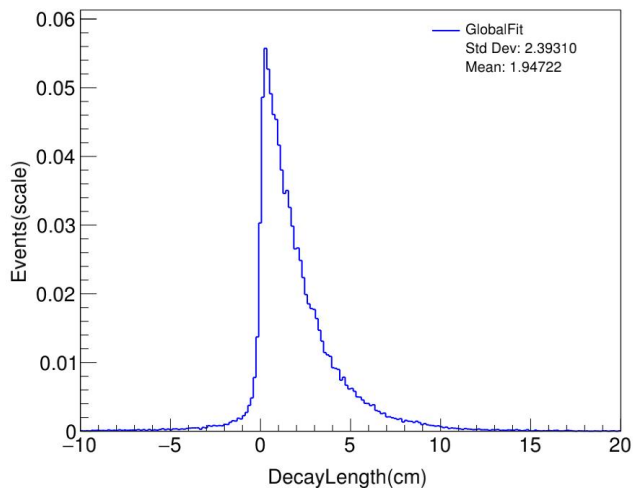
$$J/\psi \rightarrow \Sigma^+(Pr)\bar{\Sigma}(\pi_0(rr)\bar{P})$$

对 $\Sigma^+$  ( $\bar{\Sigma}$ ) 的衰变长度进行提取, 并与MC信息进行对比

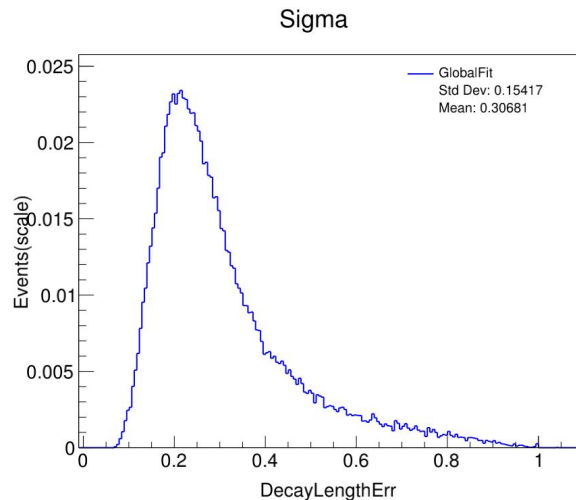
传统VertexFit无法直接对  
衰变长度进行提取

研究背景与意义

- $\Sigma^+$  衰变长度



- $\Sigma^+$  衰变长度误差



研究方法

研究进展

总结与展望



# 研究进展

- 基于不同物理过程对全局顶点拟合算法性能进行检验:

$$J/\psi \rightarrow \Sigma^+(P\gamma)\bar{\Sigma}(\pi_0(\gamma\gamma)\bar{P})$$

对 $\Sigma^+$  ( $\bar{\Sigma}$ ) 的衰变长度进行提取, 并与MC信息进行对比

全局顶点拟合算法在STCF上具有良好性能, 解决VertexFit包中的不足

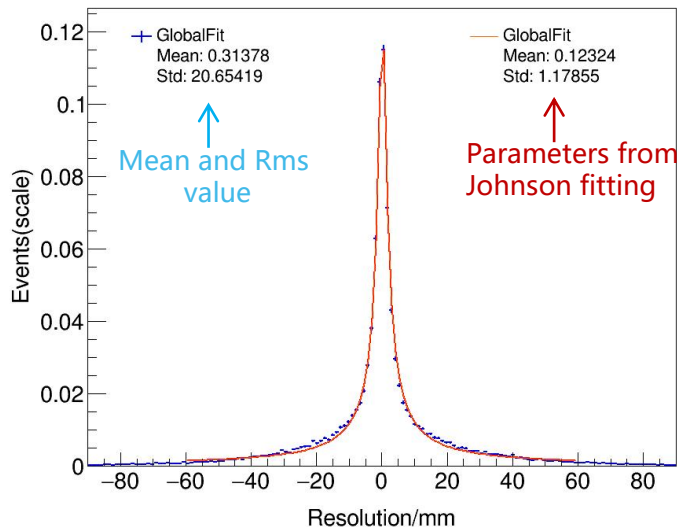
研究背景与意义

研究方法

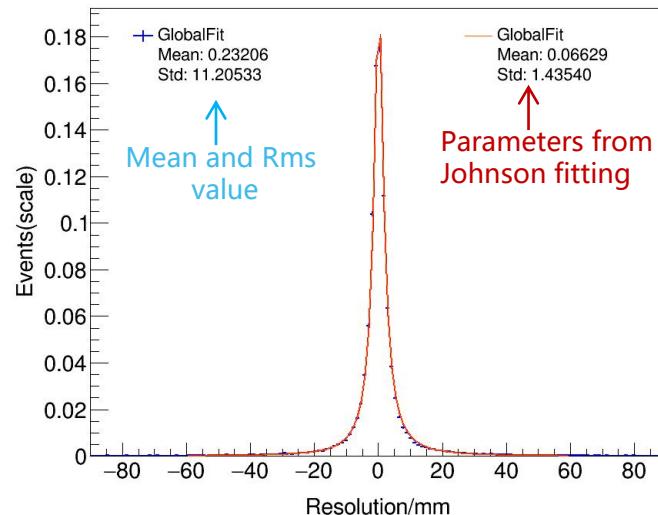
研究进展

总结与展望

- $\Sigma^+$  衰变长度分辨



- $\bar{\Sigma}$  衰变长度分辨





## PART 04

# 总结与展望



# 总结与展望

## ➤ 基于BelleII全局顶点拟合算法设计实现了GlobalVertexFit包

- 以 $J/\psi \rightarrow \Lambda\bar{\Lambda}$ 、 $J/\psi \rightarrow \Sigma^+\Sigma$ 两个物理过程进行检验，不变质量普分辨以及事例挑选效率都有所提升

研究背景与意义

研究方法

研究进展

|     | GlobalVertexFit                                    | VertexFit                                        |
|-----|----------------------------------------------------|--------------------------------------------------|
| 优点1 | 构建全局状态向量，所有粒子信息将会同一个状态空间中协同处理；每次结果的更新均建立在前一约束结果基础上 | 分开进行顶点拟合和运动学拟合                                   |
| 优点2 | 对由长寿命粒子产生的中性粒子有一个比较好的处理                            | 假设光子产生自对撞点                                       |
| 优点3 | 使用简单                                               | 需要依次调用VertexFit, secondVertexFit, KinematicFit算法 |

## 总结与展望

### ➤ 展望

- 继续完善GlobalVertexFit性能，并加入oscar新版本发布中
- 完善GlobalVertexFit用户使用手册



山东大学 (青岛)  
SHANDONG UNIVERSITY, QINGDAO



Thanks!

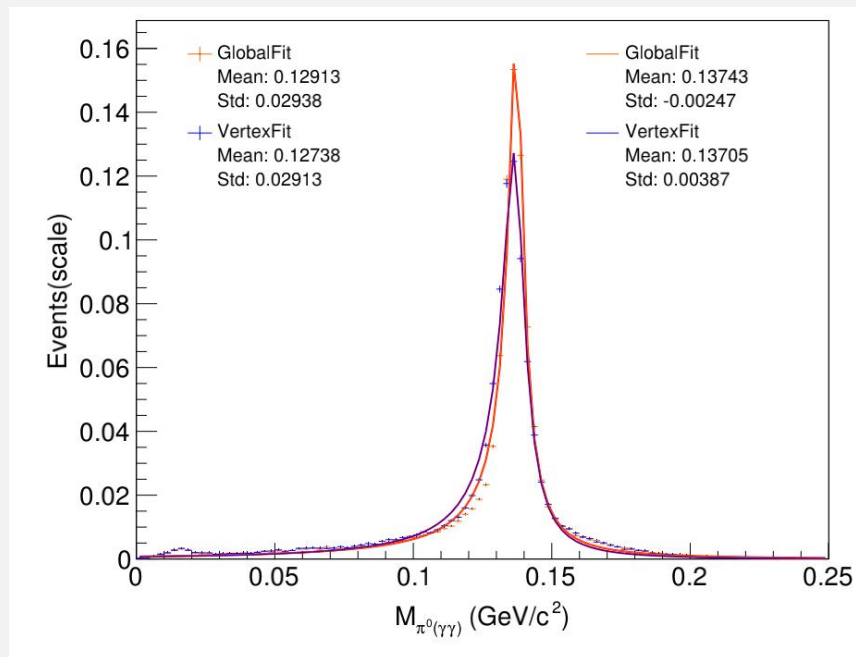


# backup

➤ 4c拟合结果

$$J/\psi \rightarrow \Sigma^+(Pr)\bar{\Sigma}(\pi_0(rr)\bar{P})$$

➤  $\pi_0$  拟合之后不变质量



研究背景与意义

研究方法

研究进展

总结与展望

backup



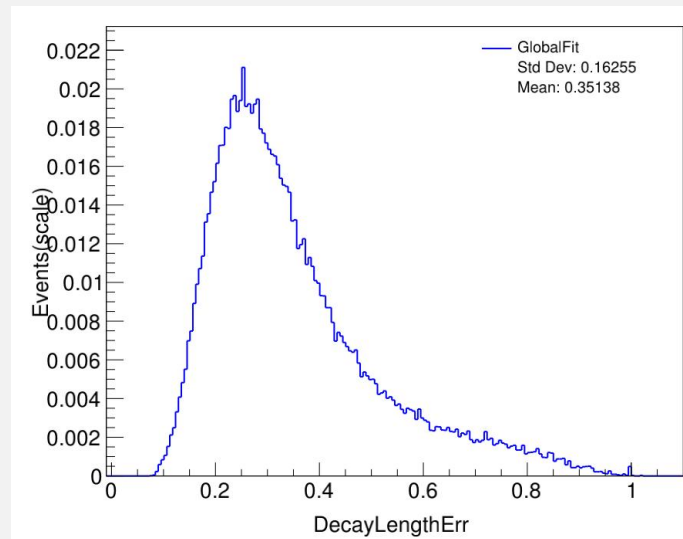
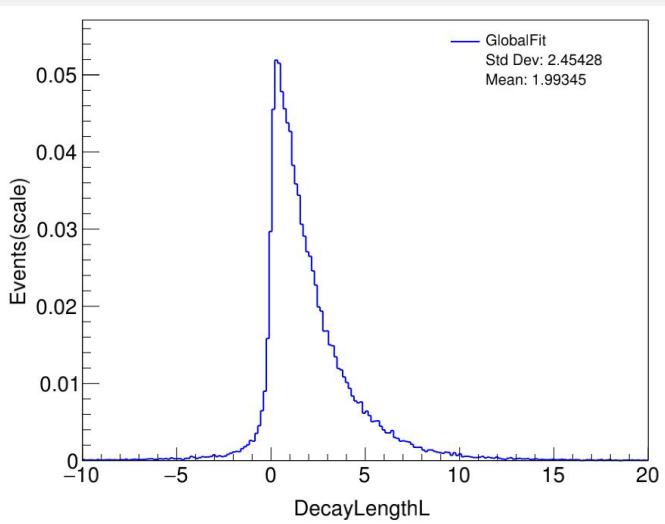
# backup

➤ 4c拟合结果

$$J/\psi \rightarrow \Sigma^+(Pr)\bar{\Sigma}(\pi_0(rr)\bar{P})$$

➤  $\Sigma$  衰变长度

➤  $\Sigma$  衰变长度误差



研究背景与意义

研究方法

研究进展

总结与展望

backup



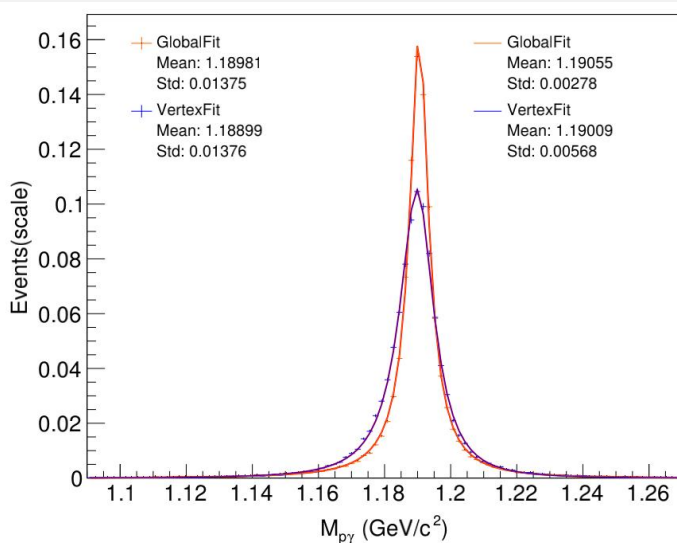
# backup

## ➤ 5c拟合结果

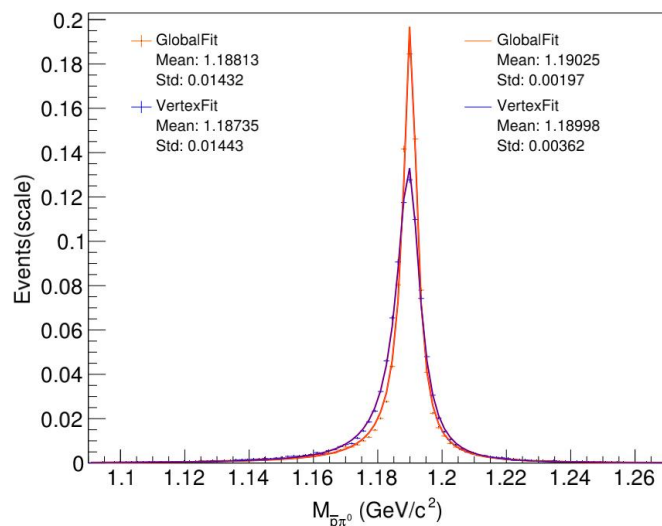
$$J/\psi \rightarrow \Sigma^+(Pr)\bar{\Sigma}(\pi_0(rr)\bar{P})$$

研究背景与意义

## ➤ $\Sigma^+$ 拟合之后不变质量



## ➤ $\bar{\Sigma}$ 拟合之后不变质量



研究方法

研究进展

总结与展望

backup



# backup

$$\Sigma^+ \rightarrow p \gamma$$

## ➤ 全局顶点拟合对中性粒子的处理

$$\underbrace{(p_x, p_y, p_z)}_p, \underbrace{(p_x, p_y, p_z)}_\gamma, \underbrace{(x, y, z, \theta, p_x, p_y, p_z, E)}_{\Sigma^+}$$

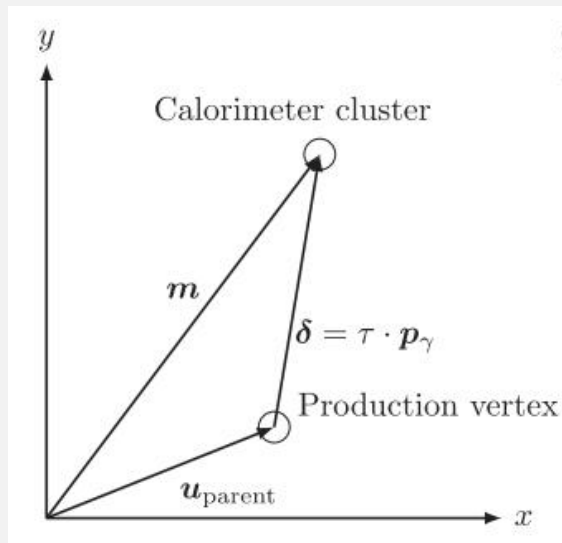
- 添加约束顺序

- ① track

- 根据重建track信息，对带电粒子的动量以及顶点位置进行更新

- ② photo

- 基于track更新的顶点信息对光子动量更新。



研究背景与意义

研究方法

研究进展

总结与展望

backup



# backup

$$J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda} \rightarrow (p\pi^-)(\bar{p}\pi^+)$$

## ➤ 全局顶点拟合使用简单

- 构建衰变过程

```
SniperPtr<TreeFitterSvc> _svc(getParent(), "TreeFitterSvc");
```

```
①m_TreeFitterSvc->fillParticleList("pi+:loose")
```

```
②m_TreeFitterSvc->fillParticleList("proton:loose")
```

```
③m_TreeFitterSvc->reconstructDecay(0,"Lambda0:ppi -> proton:loose pi-:loose",  
"0.9<M<1.32",true)
```

```
④m_TreeFitterSvc->reconstructDecay(1,"J/psi:lamantilam -> Lambda0:ppi Lambda0_bar:ppi",  
"2.9<M<3.3",false)
```

- 调用treefit函数进行拟合

```
①m_TreeFitterSvc->transtoParticle(m_RPar)
```

```
②m_TreeFitterSvc->constructParticle(i)
```

```
③m_TreeFitterSvc->treeFit()
```

研究背景与意义

研究方法

研究进展

总结与展望

backup



# backup

## ➤ Chisq分布

$$J/\psi \rightarrow \Lambda \bar{\Lambda} \rightarrow (p\pi^-)(\bar{p}\pi^+)$$

$$J/\psi \rightarrow \Sigma^+ (Pr) \bar{\Sigma}(\pi_0(rr)\bar{P})$$

研究背景与意义

研究方法

研究进展

总结与展望

backup

