

STCF实验中 $e^+e^- \rightarrow h_1 h_2 X$ 过程的Collins不对称度测量

Measurement of Collins Asymmetry in the $e^+e^- \rightarrow h_1 h_2 X$ Process at the STCF Experiment



报告人：翟云聪

Speaker: Yuncong Zhai



时间：2025/07/04

Time: 07/04/2025

目录

CONTENTS

1. 简介

Introduction

2. MC 模拟数据集

MC Simulation Data Set

3. 事例选择

Event Selection

4. 本底分析

Background Analysis

5. Collins 不对称度测量

Collins Asymmetry Measurement

6. 总结 & 展望

Summary & Outlook

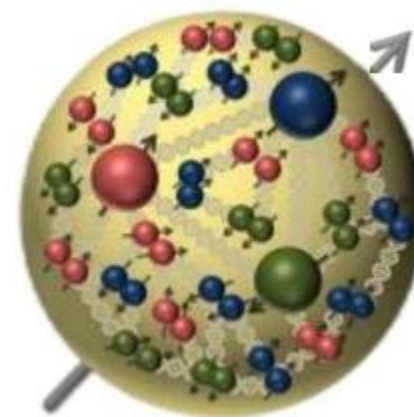


简介

Introduction



1. 核子结构是原子核物理与强子物理研究中的核心议题之一。部分子模型框架通过部分子分布函数 (Parton Distribution Functions, PDFs) 和碎裂函数 (Fragmentation Functions, FFs) 对强子结构与碎裂过程进行有效刻画, 成为研究核子内部结构与强子化机制的核心工具。
2. PDFs 给出强子内部分子 (夸克或胶子) 的动量分布概率。
 - 非极化分布函数 (f_1): 描述非极化强子中非极化部分子的分布。
 - 纵向极化分布函数 (g_1): 描述部分子的螺旋度分布。
 - 横向极化分布函数 (h_1): 提供强子横向自旋结构的信息。
3. FFs 描述了有色部分子在非微扰 QCD 阶段中碎裂成无色强子的过程。
 - 非极化碎裂函数 (D_1): 非极化部分子 $\rightarrow$ 非极化强子的动量分布, 与自旋或极化无关。
 - 极化碎裂函数 (H_1): 考虑碎裂过程中的自旋依赖效应。



Parton quark model

非极化的碎裂函数

Collins 碎裂函数

z : 强子带走的夸克能量分数

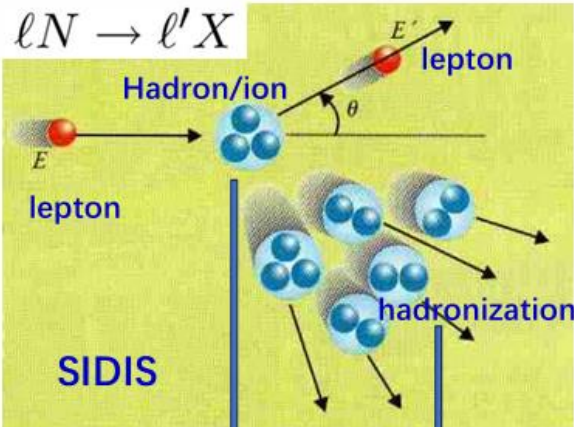
$$D_{h,q\uparrow} = \underbrace{D_1^q(z, P_{h\perp}^2)}_{\text{非极化的碎裂函数}} + \underbrace{H_1^{\perp q}(z, P_{h\perp}^2)}_{\text{Collins 碎裂函数}} \frac{(\hat{k} \times P_{h\perp}) \cdot S_q}{zM_h}$$

1. Collins碎裂函数(Collins Fragmentation Function)是一种横向极化碎裂函数：

- 夸克自旋方向与强子横向动量的关联→描述横向极化的夸克在强子化过程中生成强子的角分布呈现不对称性

2. 实验观测：

- 半单举深度非弹性散射(Semi-inclusive deep inelastic scattering, SIDIS)：部分子分布函数（PDF）和碎裂函数（FF）的卷积。
- 电子-正电子湮灭(e^-e^+ annihilation)：通过全局拟合提取横向极化夸克分布成为可能。



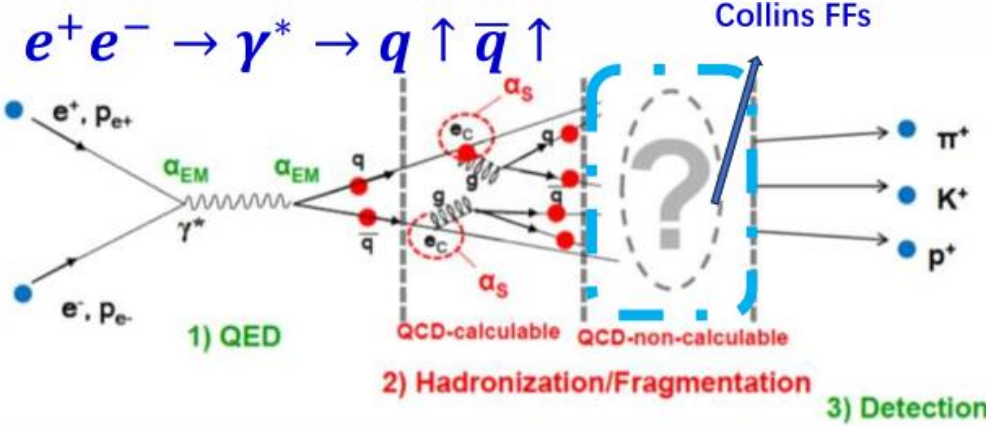
3. 多个对撞机实验都对Collins函数的测量精度提出要求：

- EicC：~2%。
- Belle，BARBAR 和 BESIII等实验都给出了非零的 Collins 不对称度。

4. 在STCF上开展Collins 测量：

- 填补低能区的测量。
- 提高部分子分布函数测量的精度，帮助理解自旋危机。
- 重点：电子对产生带电 π/K 介子对的 Collins 不对称度的测量，测量系统误差受本底水平与 $K-\pi$ 误鉴别影响很大。

对OSCAR软件框架和
GlobalPID软件包的检验



1. 在STCF实验中, Collins不对称度可以从双强子过程 $e^+e^- \rightarrow h_1 h_2 X$ 过程中提取。

- 非极化束流与自旋平均将导致 Collins 不对称度显著削弱
- 同时考虑夸克与反夸克的自旋依赖碎裂行为, 末态强子对 (例如 $e^+e^- \rightarrow \pi\pi X$) 在横向动量空间中的方位角分布差异
- $e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow h_1 h_2 X$ 的截面
$$\sigma \sim 1 + \frac{\sin^2 \theta_2}{1 + \cos^2 \theta_2} \cos(2\phi_0) F\left[\frac{H_1^\perp(z_1)H_1^\perp(z_2)}{D_1(z_1)\bar{D}(z_2)}\right]$$

2. Favored&Disfavored碎裂函数: 强子 h_1 和 h_2 源自碎裂过程中特定夸克和反夸克类型的概率。

- Favored 碎裂函数: $\pi^+ \leftarrow u(\bar{d})$, $\pi^- \leftarrow \bar{u}(d)$
- Disfavored 碎裂函数: $\pi^- \leftarrow u(\bar{d})$, $\pi^+ \leftarrow \bar{u}(d)$

3. 两类碎裂函数之间的差异反映不同初始态夸克-反夸克组合对末态强子形成的贡献差异, 在 Collins 不对称度的实验测量中具有关键作用:

• Like-sign (L): $e^+e^- \rightarrow \pi^\pm \pi^\pm X$

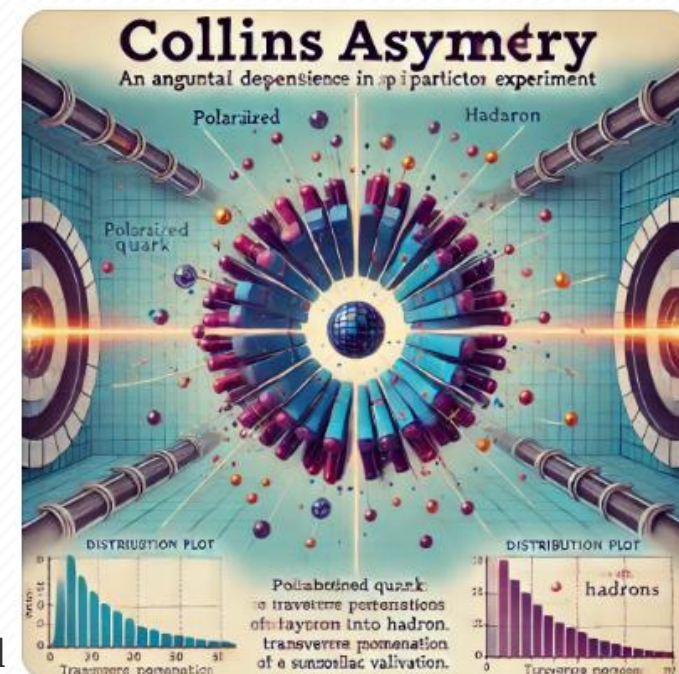
$\pi^+ \leftarrow u(\bar{d})$ favored, $\pi^+ \leftarrow \bar{u}(d)$ disfavored

$\pi^- \leftarrow \bar{u}(d)$ favored, $\pi^- \leftarrow u(\bar{d})$ disfavored

• Unlike-sign (U): $e^+e^- \rightarrow \pi^\pm \pi^\mp X$

$\pi^+ \leftarrow u(\bar{d})$ favored, $\pi^- \leftarrow \bar{u}(d)$ favored

$\pi^+ \leftarrow \bar{u}(d)$ disfavored, $\pi^- \leftarrow u(\bar{d})$ disfavored



1. 定义末态强子组合的 $\pi\pi$ (KK/K π) unlike-sign 和 like-sign的 $2\phi_0$ 分布满足分布(拟合函数: $F = a \cdot \cos 2\phi_0 + b$)。

$$A_{\pi\pi}^{\text{U or L}} = 1 + M_{\pi\pi}^{\text{U or L}} \cdot \cos 2\phi_0$$

- 根据第二强子框架, 方位角 ϕ_0 : 参考平面与第一强子沿 P_2 方向的横向动量 P_{t0} 之间的夹角 ($[-\pi/2, \pi/2]$)

$$\phi_0 = \text{sign}[P_{h2} \cdot (\hat{z} \times P_{h2}) \times (P_{h2}) \times P_{h1}] \times \arccos\left(\frac{\hat{z} \times P_{h2}}{|\hat{z} \times P_{h2}| \cdot \frac{P_{h2} \times P_{h1}}{P_{h2} \times P_{h1}}}\right)$$

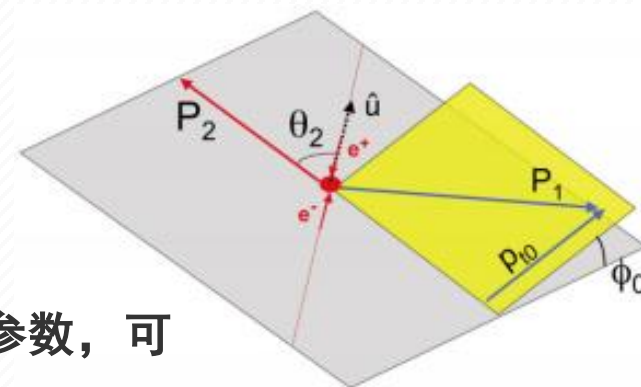
- 参考平面: 光束轴和第二强子的动量方向 P_2 组成

2. 引入 unlike-sign 与 like-sign 分布的归一化比值 (即 “双比值”, Double ratio (DR)) 作为测量值: 通过 $A_{\pi\pi}^{\text{UL}} = A_{\pi\pi}^{\text{U}} / A_{\pi\pi}^{\text{L}}$ (归一化)来抽取角不对称度。

$$\frac{A^{\text{U}}}{A^{\text{L}}} = \frac{1 + \frac{\sin^2 \theta}{1 + \cos^2 \theta} \cos(2\phi_0) G^{\text{U}}}{1 + \frac{\sin^2 \theta}{1 + \cos^2 \theta} \cos(2\phi_0) G^{\text{L}}} \cong 1 + \frac{\sin^2 \theta}{1 + \cos^2 \theta} \cos(2\phi_0) (G^{\text{U}} - G^{\text{L}})$$



$\cos(2\phi_0)$ 的系数表示Collins不对称度



3. $A_{\pi\pi}^{\text{UL}}$ 满足余弦函数 $p_0 + p_1 \cdot \cos 2\phi_0$ 拟合, 分析实验数据中的角分布特征, 提取 p_1 参数, 可实现对不同强子化过程中 Collins 效应强度及其自旋对称性破缺机制的定量研究。
4. 同样的策略可以应用在测量 $e^-e^+ \rightarrow K\pi X$ and $e^-e^+ \rightarrow KKX$ 的Collins不对称度上。



MC模拟数据集

MC Simulation Data Set



1. MC样本

- $e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow \text{anything}$
- KKMC模拟

2. 基于STCF软件框架OSCAR 2.6.2

KKMC Settings	Value
Energy	7.0 GeV
Beam Energy Spread	0.0011
Number of Events	10
Generate Resonance States	✓
Generate Down Quarks	✓
Generate Up Quarks	✓
Generate Strange Quarks	✓
Generate ρ Mesons	✓
Generate ω Mesons	✓
Generate ϕ Mesons	✓
Generate J/ψ Mesons	✓
Generate ψ' Mesons	✓
Generate $\psi(3770)$ Mesons	✓
Generate $\psi(4030)$ Mesons	✓
Generate $\psi(4160)$ Mesons	✓
Generate $\psi(4415)$ Mesons	✓
Generate $\psi(4260)$ Mesons	✓

研究 Collins 不对称度的 KKMC 设置。

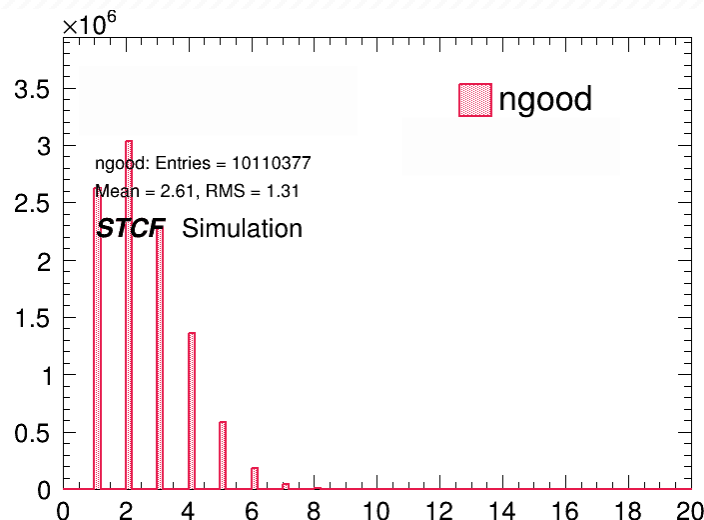


事例选择

Event Selection



经过事例选择后总径迹数分布



事例中径迹数多分布在两条

3. $N_{\text{good track (charge + neutral)}} \geq 3$

4. Global PID

- 带电径迹判断为 π : $\text{Prob}(\pi) > \text{Prob}(K) \& \text{Prob}(\pi) > \text{Prob}(P)$
- 带电径迹判断为 k : $\text{Prob}(K) > \text{Prob}(\pi) \& \text{Prob}(K) > \text{Prob}(P)$
- 带电径迹判断为 P : $\text{Prob}(P) > \text{Prob}(\pi) \& \text{Prob}(P) > \text{Prob}(K)$
- 带电径迹判断为
e: $\text{Prob}(e) > \text{Prob}(\mu) \& \text{Prob}(e) > \text{Prob}(\pi) \& \text{Prob}(e) > \text{Prob}(K) \& \text{Prob}(e) > \text{Prob}(P)$

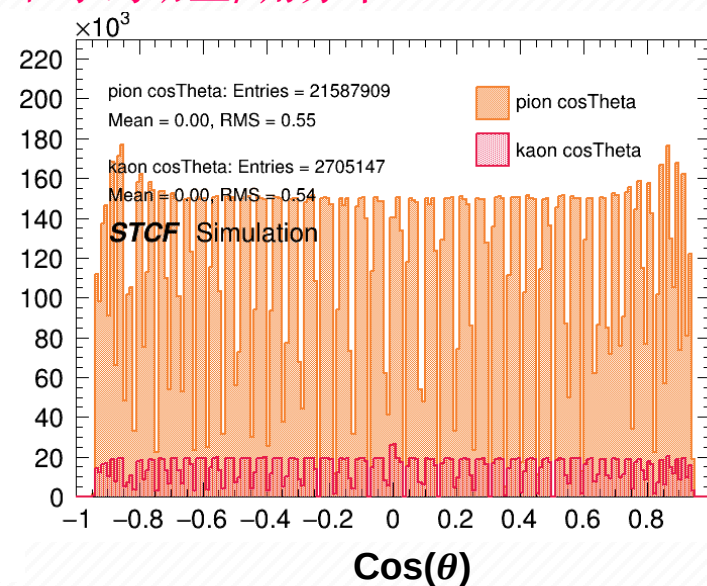
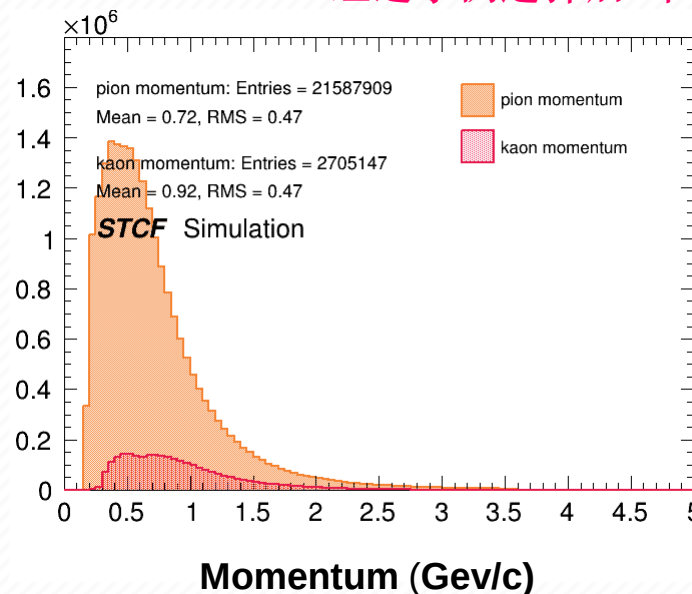
1. 带电径迹的选择

- $|dz| < 10.0 \text{ cm}$
- $|R_{xy}| < 1.0 \text{ cm}$
- $|\cos\theta| < 0.93$
- $1 \leq N_{\text{good charged track}} \leq 20$

2. 中性径迹的判断

- 桶部光子 $E_\gamma > 25 \text{ MeV}$ ($|\cos\theta| < 0.8$)
- 端盖光子 $E_\gamma > 50 \text{ MeV}$ ($0.84 < |\cos\theta| < 0.92$)
- $\Delta\theta$ (重建径迹与truth之间theta差值) < 20
- $-10 \text{ ns} < t < 10 \text{ ns}$
- $N_{\text{good neutral track}} < 30$

经过事例选择后 π 和 K 粒子的动量/角分布



1. 选择效率

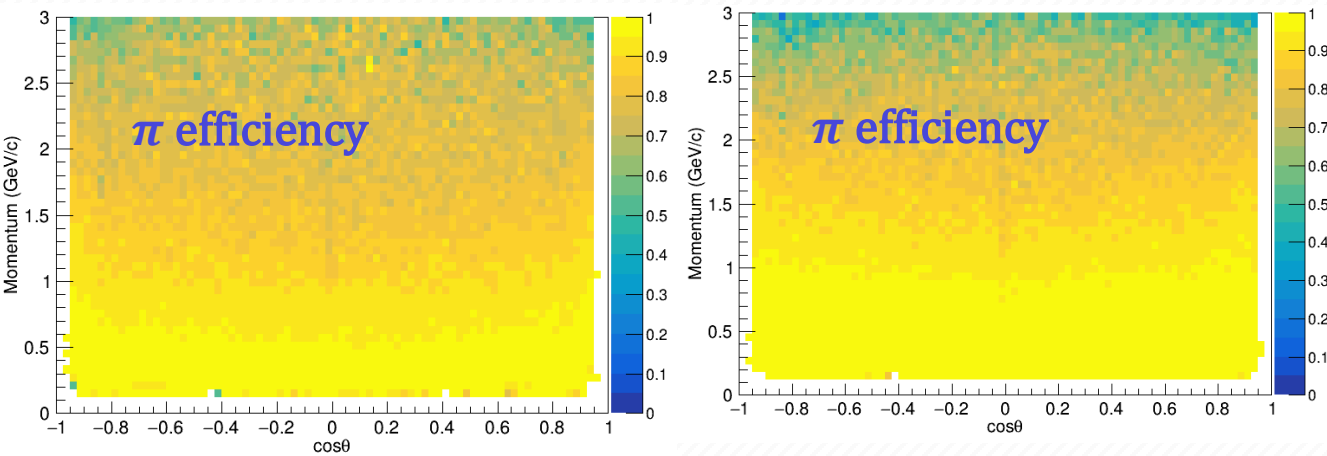
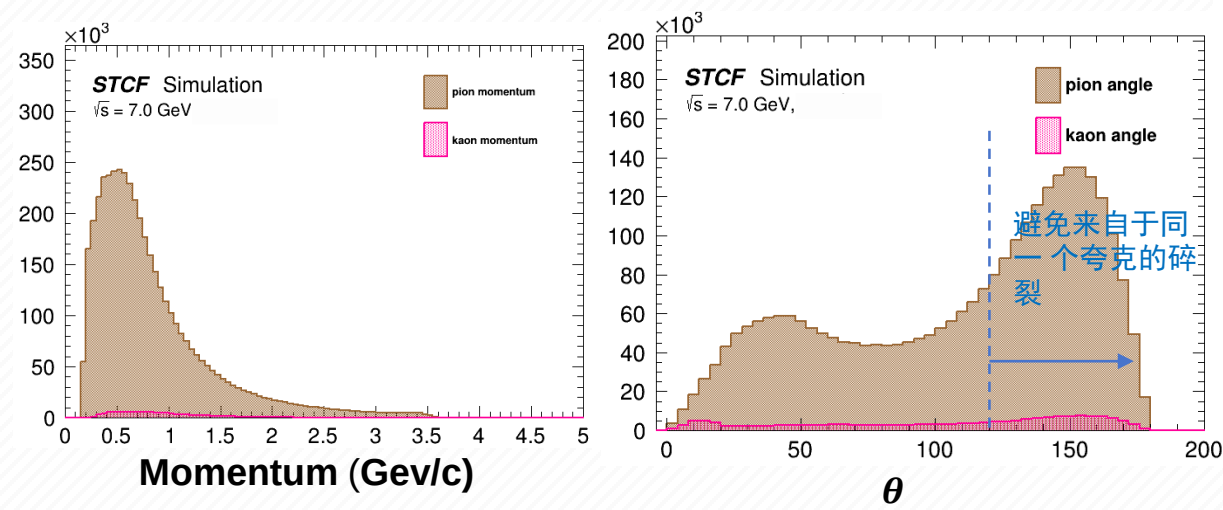
Selection Criteria	Event Number	Select Efficiency	
		(Absolute)	(Relative)
No cut	60000	-	-
$N_{\text{good charged track}} \leq 20$	55666	92.78%	92.78%
$1 \leq N_{\text{good charged track}}$	44472	74.12%	79.89%
$N_{\text{good neutral track}} < 30$	44472	74.12%	100.00%
$N_{\text{good neutral track}} \geq 2$	29146	48.58%	65.54%
$N_{\text{identified as pion}} \geq 1$ or $N_{\text{identified as kaon}} \geq 1$	27967	46.61%	95.95%

2. 正确选择 π/K 的PID效率

$$\text{PID Efficiency} = \frac{\text{Number of Correctly Identified Particles}}{\text{Total Number of Particles}} \times 100\%$$

π efficiency (挑选两条 π 径迹): 88.67%
K efficiency (挑选两条K径迹): 93.76%

挑选 π 和K径迹数均为两条的粒子动量、夹角分布



挑选一条 π 径迹

挑选两条 π 径迹



肆

本底分析

Background Analysis

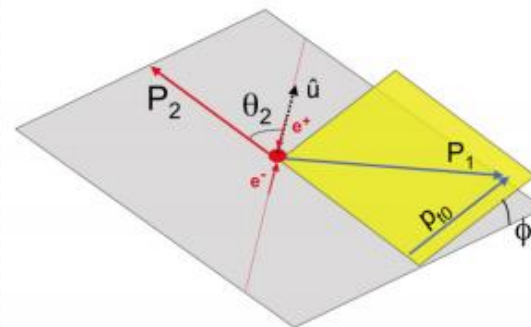


1. 能量分数 z 是理解碎裂函数和本底分析的一个关键变量, 定义为产生的强子能量与最初碎裂的夸克 (或部分子) 能量的比率。

$$z_h = \frac{2E_h}{\sqrt{s}} = \frac{E_h}{E_{\text{beam}}} = z + \frac{P_{\perp}^2}{z_s} \approx z$$

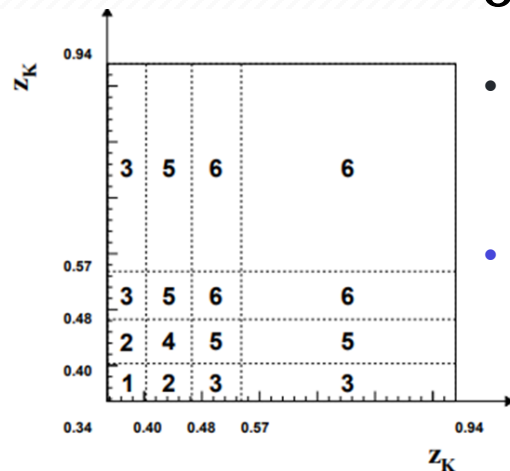
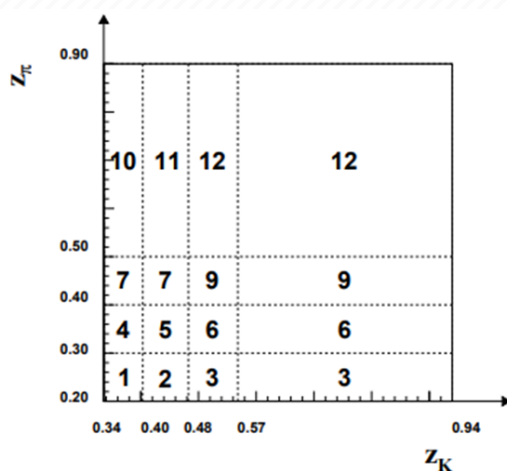
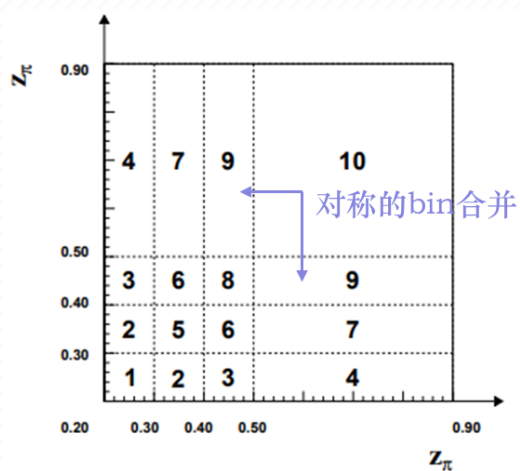
- $2E_h$ 是产生的强子能量, $\sqrt{s}$ 是质心能量的平方

2. 末态 π 和 K 粒子能量分数 z_{π} 和 z_K 在 bin 中执行的分析 id 具有相同的横动量 P_T 范围。



- 参考平面: 光束轴和第二强子的动量方向 P_2 组成
- 方位角 ϕ_0 : 参考平面与第一强子沿 P_2 方向的横向动量 P_{t0} 之间的夹角 ($[-\pi/2, \pi/2]$)

$p(\text{GeV}/c)$	0.3221	0.5076	0.6880	0.8663	1.5733
z_{π}	0.2	0.3	0.4	0.5	0.9
z_K	0.3359	0.4035	0.4825	0.5682	0.9396



3. z -bin 被定义为与两个强子的分数能量相关:

- 为提高统计结果的稳定性, 在样本数较少的情形下对部分 z -bin 进行合并处理
- $\pi\pi X$ 中有 10 个 z -bin, $K\pi X$ 中有 12 个 z -bin, KKX 中有 6 个 z -bin

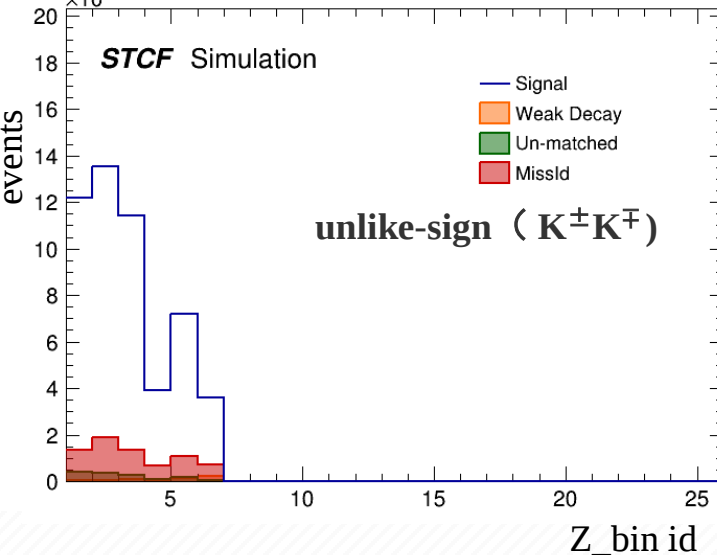
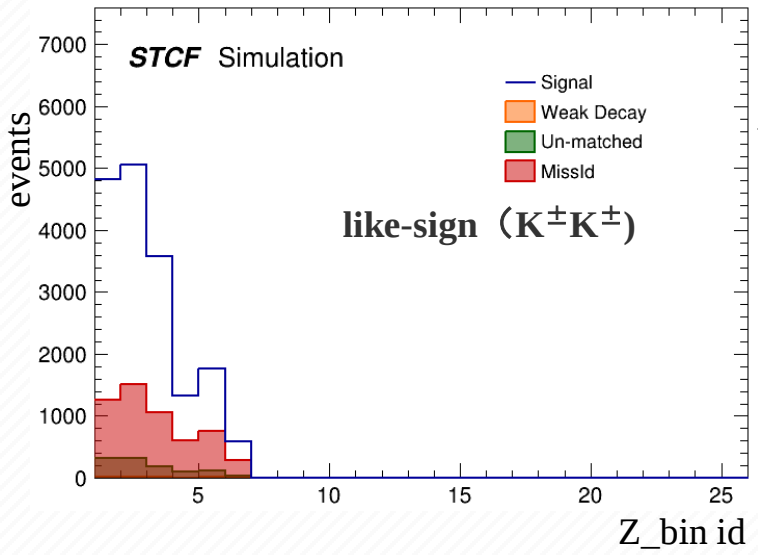
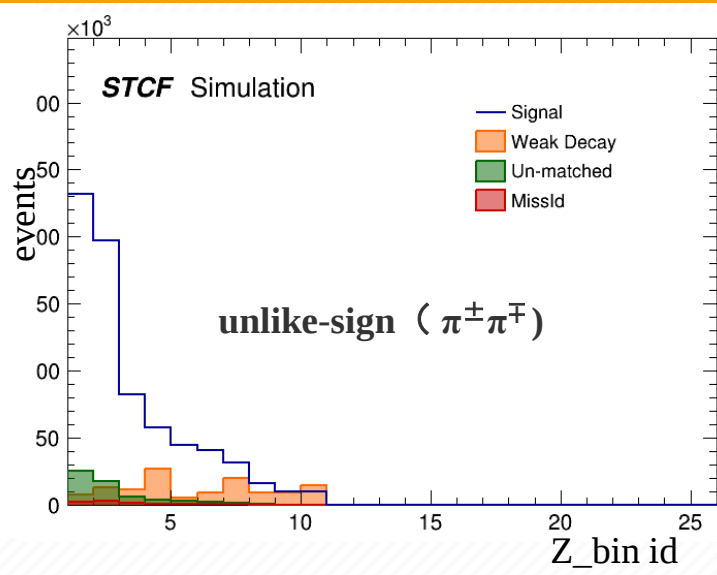
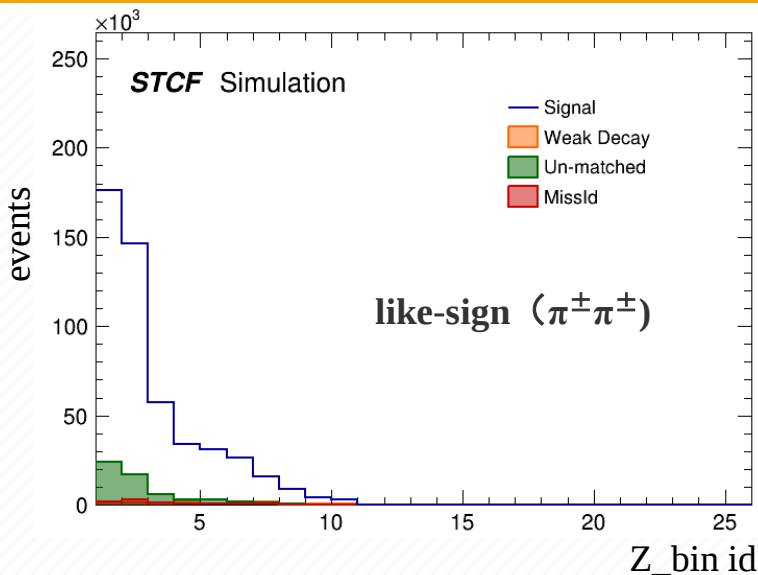
1.排除 QED 本底过程

- 无鉴别为电子的径迹

2.重建粒子与Truth值做匹配：通过 EventAssembler成功获取MC Truth信息

3.本底类型：

- 弱衰变本底（橙色）：在 $\pi\pi(KK)$ 组合中，存在某一粒子来自弱衰变过程的情形
- 假径迹本底（绿色）：在 $\pi\pi(KK)$ 组合中，存在某一条径迹未能正确匹配到MC Truth信息的情况
- K- π 误鉴别本底（红色）：非弱衰变来源的其中一条真实径迹 $\pi(K)$ 被重建为K(π)



使用GlobalPID软件包做粒子鉴别时的本底分析

伍

Collins 不对称度测量

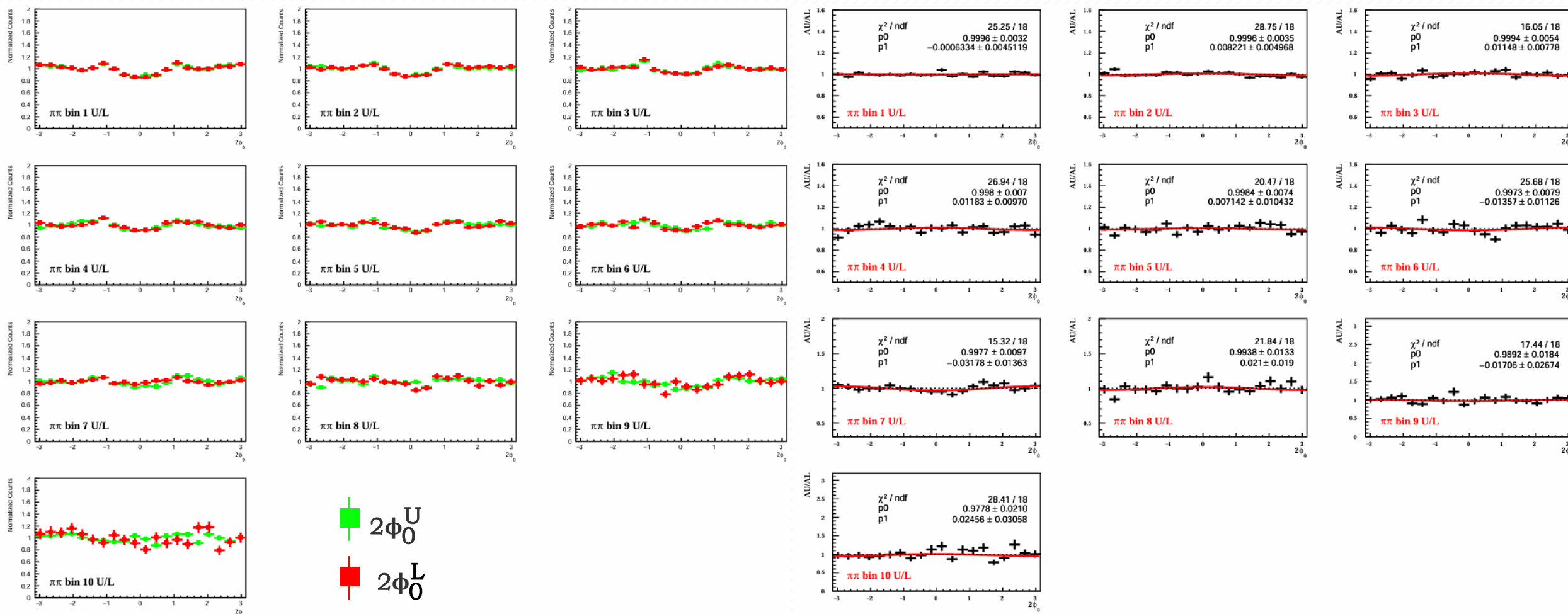
Collins Asymmetry Measurement



Collins不对称度的测量精度

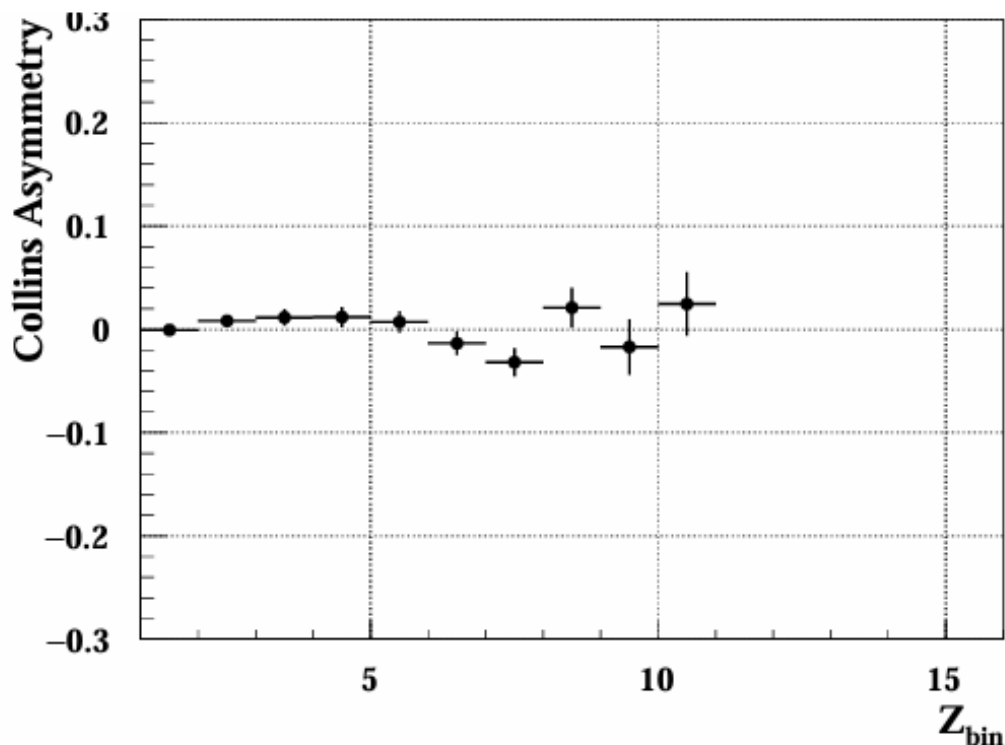


- 将来自于强衰变的 $\pi\pi$ unlike-sign 和 like-sign $2\phi_0$ 满足 $A_{\pi\pi}^{U \text{ or } L} = 1 + M_{\pi\pi}^{U \text{ or } L} \cdot \cos 2\phi_0$ 分布
- 测量值: $A_{\pi\pi}^{UL} = A_{\pi\pi}^U / A_{\pi\pi}^L$ (归一化), $A_{\pi\pi}^{UL}$ 满足余弦函数 $p^0 + p^1 \cdot \cos 2\phi_0$ 拟合
- ✓ $2\phi_0$ 分别在 Like-sign 组合(红色)和Unlike-sign 组合(绿色)下的原始分布比较
- ✓ 测量值 $A_{\pi\pi}^U / A_{\pi\pi}^L$ 在不同bin内随 $2\phi_0$ 的分布



- 测量值: $A_{\pi\pi}^{UL} = A_{\pi\pi}^U / A_{\pi\pi}^L$ (归一化), $A_{\pi\pi}^{UL}$ 满足余弦函数 $p^0 + p^1 \cdot \cos 2\phi_0$ 拟合

✓ $A_{\pi\pi}^{UL}$ 转化为拟合分布后 p^1 的观测 (初步结果)



Z-Bin	Value(p^0)	Error(p^0)	Value(Collins Asymmetry)	Error (Collins Asymmetry(%))	σ
0	0.999582	0.003162	-0.000633	0.004512	0.140
1	0.999648	0.003451	0.008221	0.004968	1.655
2	0.999368	0.005434	0.011477	0.007778	1.476
3	0.998025	0.006840	0.011834	0.009697	1.220
4	0.998361	0.007382	0.007142	0.010432	0.685
5	0.997346	0.007922	-0.013573	0.011262	1.205
6	0.997707	0.009713	-0.031779	0.013627	2.333
7	0.993762	0.013290	0.020997	0.019039	1.103
8	0.989243	0.018351	-0.017060	0.026745	0.638
9	0.977801	0.021018	0.024559	0.030581	0.803

$\pi\pi$ 过程 Collins 不对称度的测量结果。

$$\sigma = \frac{|\text{Value (Collins Asymmetry)} - 0|}{\text{Error (Collins Asymmetry)}}$$

$\chi^2 = 16.05$, 相对于零假设的偏离程度约为 1.65σ



陆

总结 & 展望

Summary & Outlook



1. 基于STCF软件框架OSCAR2.6.2的模拟重建，产生了末态包含双强子过程的事例。即

$$e^+e^- \rightarrow q\bar{q} \rightarrow h_1 h_2 X。$$

2. 在事例选择过程中，应用GlobalPID软件包进行PID效率检查和本底分析。初步分析结果表明，GlobalPID软件包能够有效区分 π 和K介子，具有良好的 π/K 鉴别能力。

3. 测量Collins碎裂函数在包含过程 $e^+e^- \rightarrow \pi\pi X$ 中引起的方位角不对称性，给出了Collins不对称性的显著度计算。

4. 展望：

- 增加统计量，给出在 $e^+e^- \rightarrow KKX, K\pi X$ 过程中Collins不对称性的测量结果。



感谢各位老师聆听

Thank you for listening

Backup

- MC模拟样本 $e^+e^- \rightarrow q\bar{q}$:

- 利用产生子 Lundarlw
- 质心能量7 GeV, 亮度为 2.5 fb^{-1}
- QED 本底过程(各100万个):
 1. Bhabha 事例($e^+e^- \rightarrow e^+e^-$)
 2. $e^+e^- \rightarrow \gamma\gamma, \mu^+\mu^-, e^+e^-X$ 等 MC 模拟样本

- 事例选择:

- 好径迹的判选条件:

1. $|dz| < 10.0 \text{ cm}$
2. $|R_{xy}| < 1.0 \text{ cm}$
3. $|\cos\theta| < 0.93$

- 好光子选择条件:

1. 桶部光子 $E_\gamma > 25 \text{ MeV}$ ($|\cos\theta| < 0.8$)
2. 端盖光子 $E_\gamma > 50 \text{ MeV}$ ($0.86 < |\cos\theta| < 0.92$)
3. 簇射电子学时间: $0 < t < 700 \text{ ns}$

- $K\pi$ 粒子鉴别:

1. $N_{\text{good track}} \geq 3$
2. $N_{\text{pass PID}} \geq 2$ (至少两条径迹被鉴别为 $\pi(K)$)

- 2 个强子的张角大于 120° (避免来自于同一个夸克的碎裂)

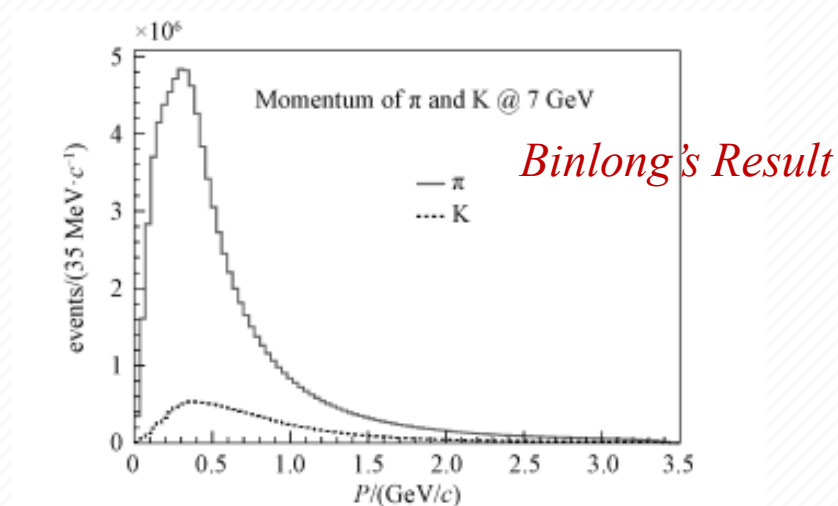


图2 在 2.5 fb^{-1} $q\bar{q}$ 样本中 πK 粒子的动量分布

Backup

- 排除 QED 本底过程
 - 无鉴别为电子的径迹
 - 观测总能量 $E_{\text{vis}} > 1.5\text{GeV}$
- 重建粒子的四动量与truth值做匹配：成功的条件为动量夹角 $< 10^\circ$
- 本底类型：
 - 弱衰变本底： $\pi\pi(\text{KK})$ 组合中有1条是来自于弱衰变
 - 假径迹本底： $\pi\pi(\text{KK})$ 组合中有1条径迹- truth值匹配失败
 - K- π 误鉴别本底：非弱衰变来源的其中一条真实径迹 $\pi(\text{K})$ 被重建为K(π)

横坐标：两条 $\pi(\text{K})$ 粒子能量占束流能量分数 z_1, z_2 的组合

Id	$z_1 z_2$ 范围	Id	$z_1 z_2$ 范围
1	$[0.15, 0.2), [0.15, 0.2)$	6	$[0.2, 0.3), [0.3, 0.5)$
2	$[0.15, 0.2), [0.2, 0.3)$	7	$[0.2, 0.3), [0.5, 0.9]$
3	$[0.15, 0.2), [0.3, 0.5)$	8	$[0.3, 0.5), [0.3, 0.5)$
4	$[0.15, 0.2), [0.5, 0.9]$	9	$[0.3, 0.5), [0.5, 0.9]$
5	$[0.2, 0.3), [0.2, 0.3)$	10	$[0.5, 0.9], [0.5, 0.9]$

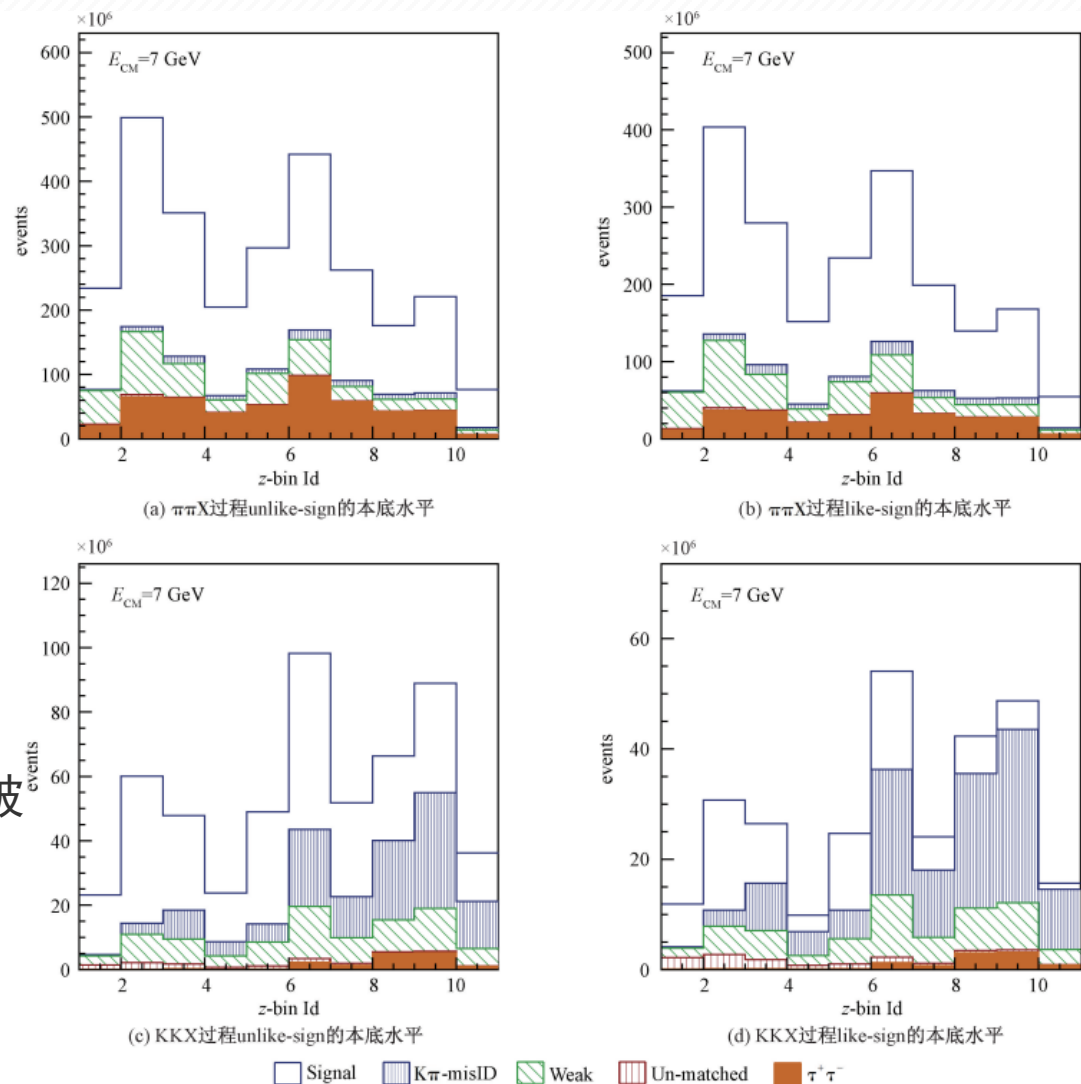
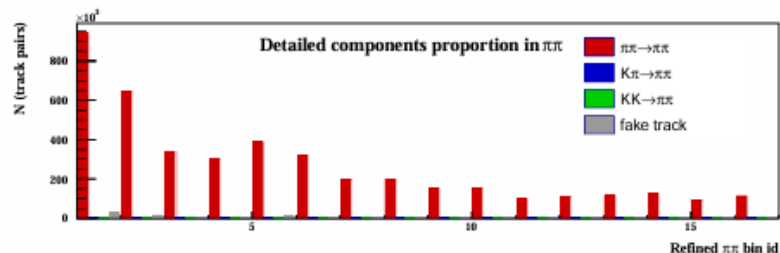


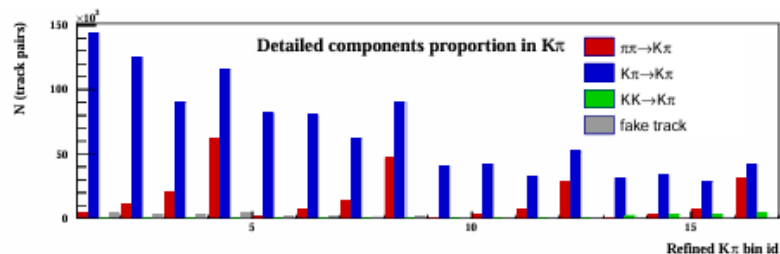
图3 用 dE/dx 与 TOF 作粒子鉴别时样本的本底水平 (亮度归一到 1ab^{-1})

Backup

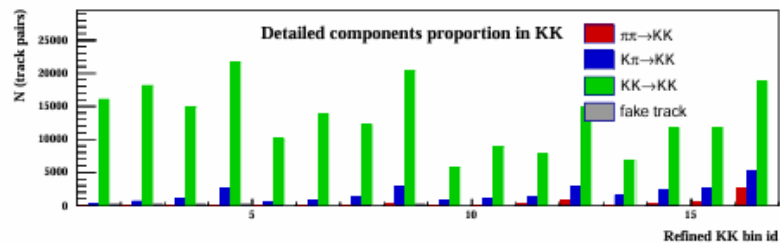
- 排除 QED 本底过程
 - 无鉴别为电子的径迹
 - 观测总能量 $E_{\text{vis}} > 1.5\text{Gev}$
- 重建粒子的四动量与truth值做匹配：成功的条件为动量夹角 $< 10^\circ$
- 本底类型：
 - 弱衰变本底： $\pi\pi(KK)$ 组合中有1条是来自于弱衰变
 - 假径迹本底： $\pi\pi(KK)$ 组合中有1条径迹- truth值匹配失败
 - K- π 误鉴别本底：非弱衰变来源的其中一条真实径迹 $\pi(K)$ 被重建为K(π)



(a)



(b)



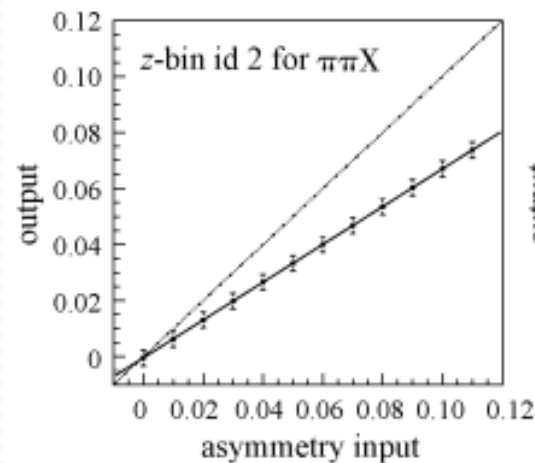
(c)

Figure 21: Hadron pair yields obtained in weighted MC. (a) for $\pi\pi X$ process, (b) for $K\pi X$ process, and (c) for KKX process.

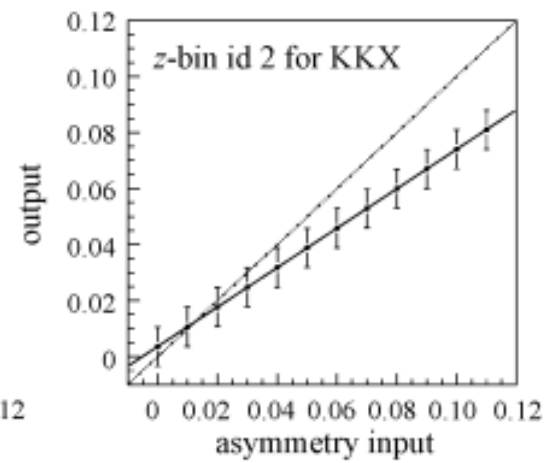
Backup

- 研究 Collins不对称度的测量精度

- 用舍选法将来自于强衰变的 $\pi\pi$ (KK)的 unlike-sign 和 like-sign 组合分别按照 $1 + A_{\text{input}}^{\text{UL}} \cos 2\phi_0$ 进行抽样
- Unlike-sign 组合的不对称度 $A_{\text{input}}^{\text{U}}$: 0.000, 0.005, 0.010, ..., 0.055 ($A_{\text{input}}^{\text{L}} = -A_{\text{input}}^{\text{U}}$)
- 放入的研究测量值: $A_{\text{input}}^{\text{UL}} = A_{\text{input}}^{\text{U}} - A_{\text{input}}^{\text{L}}$ 分别为 0.00, 0.01, 0.02, ..., 0.11
- 用 $1 + A \cos(2\phi_0)$ 进行最小二乘拟合 (拟合结果 $A_{\text{output}}^{\text{UL}}$ 对应不同 $A_{\text{input}}^{\text{UL}}$ 的测量输出值)
- {z1 ,z2 } 区间用 $A_{\text{output}}^{\text{UL}} = b + k A_{\text{input}}^{\text{UL}}$ 进行线性拟合



(a) $\pi\pi X$ 过程



(b) KKX 过程

Backup

- STCFastSimAlg 采用 BESIII实验上的径迹重建以及粒子鉴别的效率曲线,并将 K- π 误鉴别水平设为 1% 。
 - $\pi\pi X$: $A_{\text{input}}^{\text{UL}} = 0.03$, 输出值 $A_{\text{output}}^{\text{UL}}$ 在10个 $\{z_1, z_2\}$ 区间中最小的统计误差为 2.8×10^{-3} , 最大的统计误差是 8.4×10^{-3}
 - K πX : $A_{\text{input}}^{\text{UL}} = 0.03$, 输出值 $A_{\text{output}}^{\text{UL}}$ 在10个 $\{z_1, z_2\}$ 区间中最小的统计误差为 7×10^{-3} , 最大的统计误差是 8.4×10^{-3}
 - 1ab^{-1} 的亮度足以使得对 Collins 效应 >0.07 的测量精度优于 2% 。

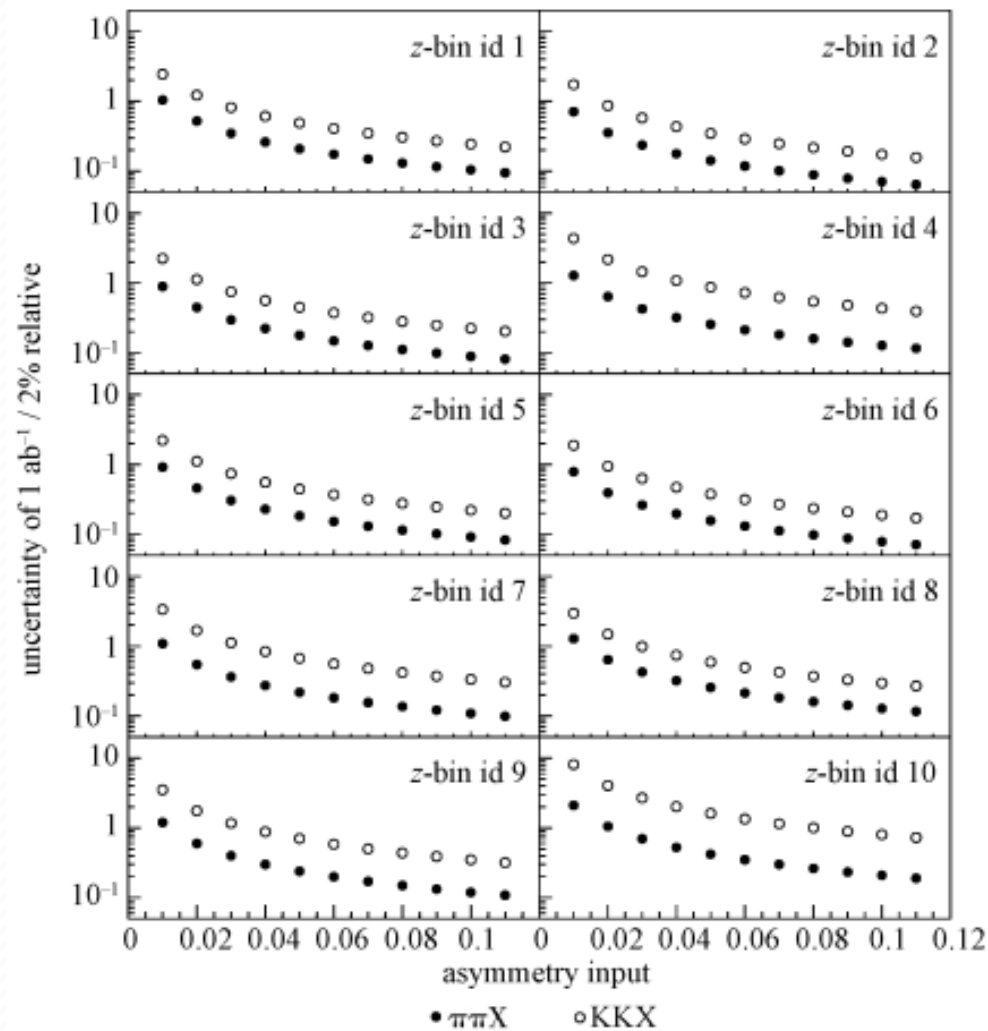
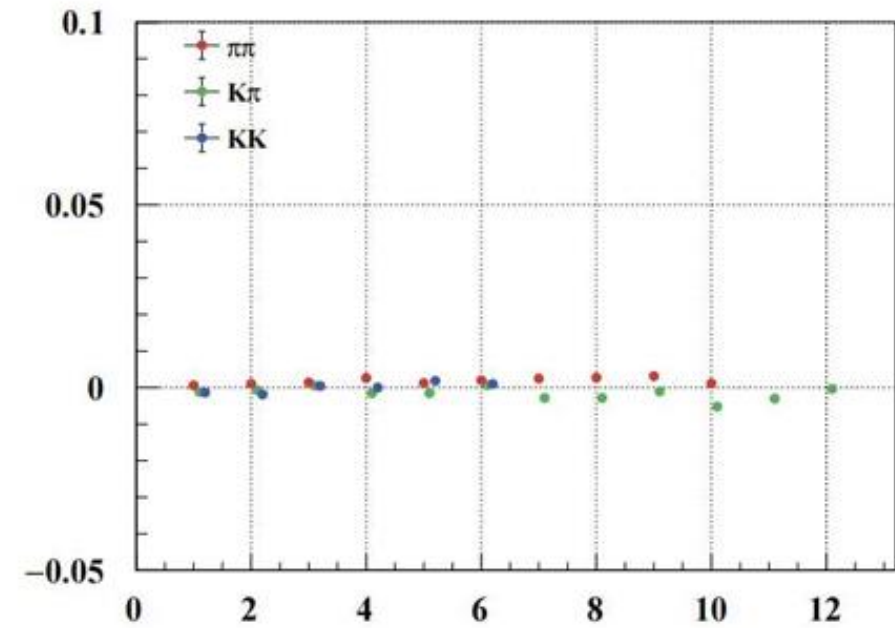
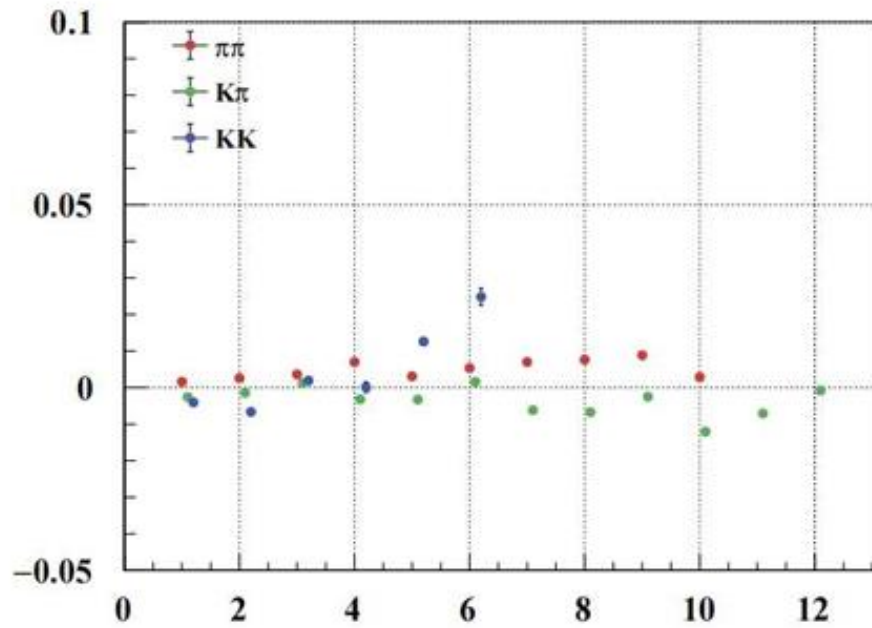


图 6 每个 $\{z_1, z_2\}$ 区间里,对应不同的 Collins 不对称度, 1ab^{-1} 的误差与 EicC 要求的 2% 精度的比例

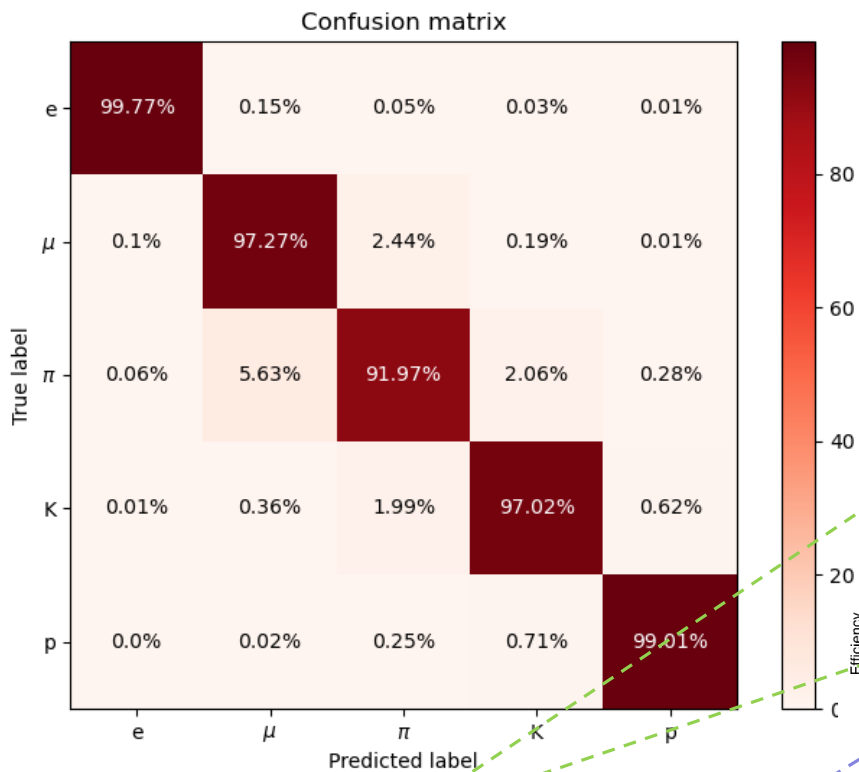
Backup

- Intrinsic Asymmetry in uds MC
 - Fit the double ratio of MC total truth
 - Considered as systematic from MC generator



Backup

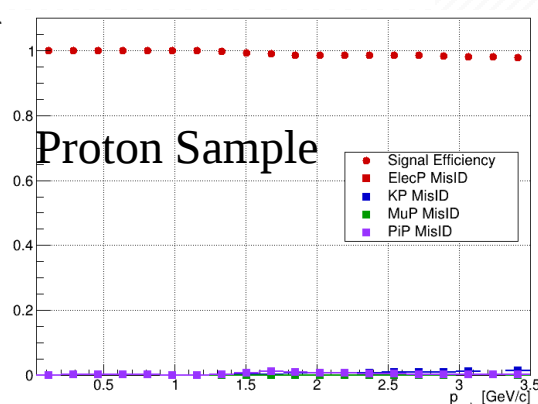
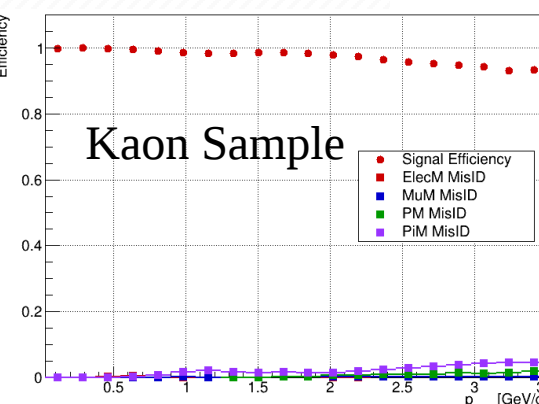
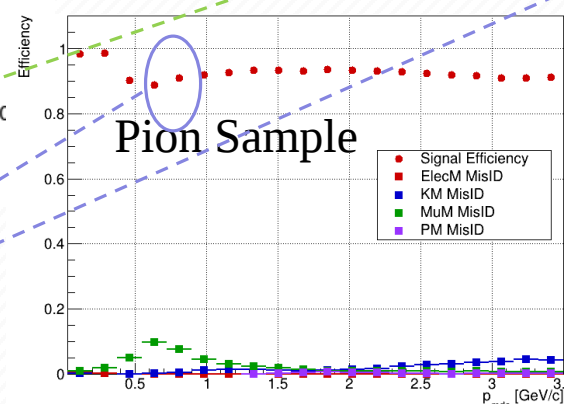
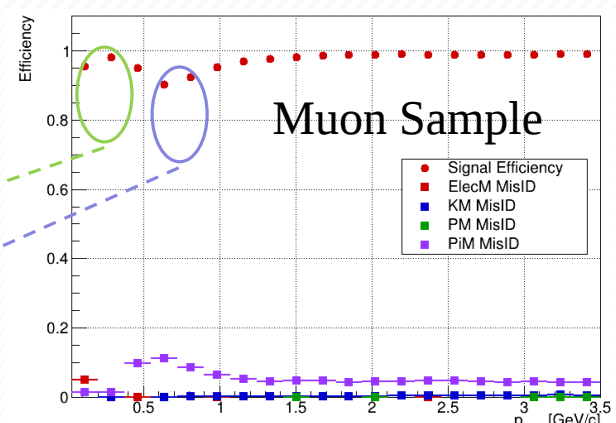
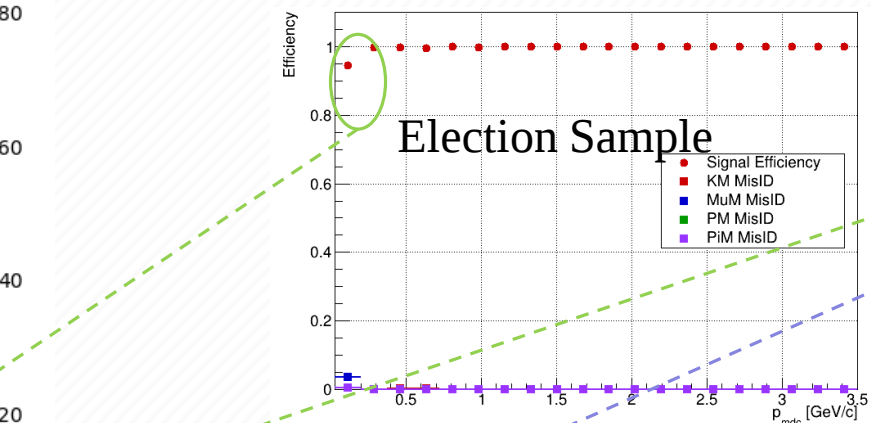
* 在GlobalPID中带电粒子鉴别性能



仅有dE/dx在动量低于100MeV时有效，但是在区分e/ μ 方面性能较差

PID 效率: 彌禱閑澤嚟宝节耨
宝节耨耨

- 对于轻子具有出色的区分性能, PID 效率 > 97%
- 目前对强子的鉴别性能超过90%



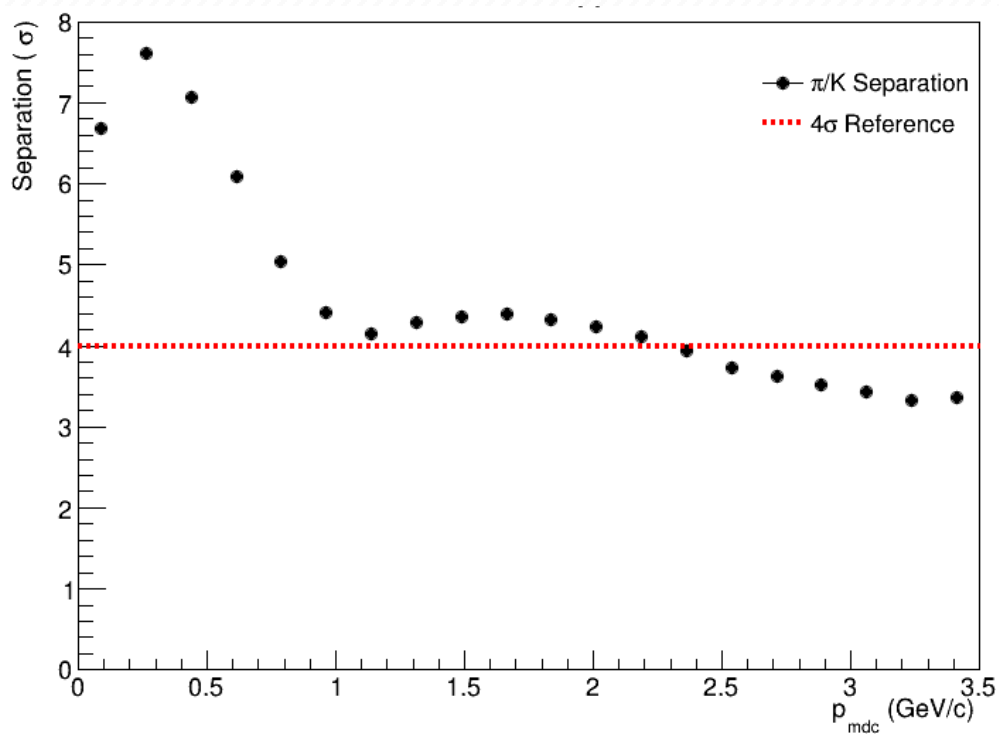
Backup

* 不同PID模式下的分离能力: $\pi/K, \mu/\pi$

- $h_m = \log(p_m(x_1)) - \log(p_m(x_2))$ y $p_m(x_i)$ 伦m嶋憐覲 x_i 嶋憐床滯交嚟趨匡
- 归一化概率密度函数: $\text{Scale}(h_m)$

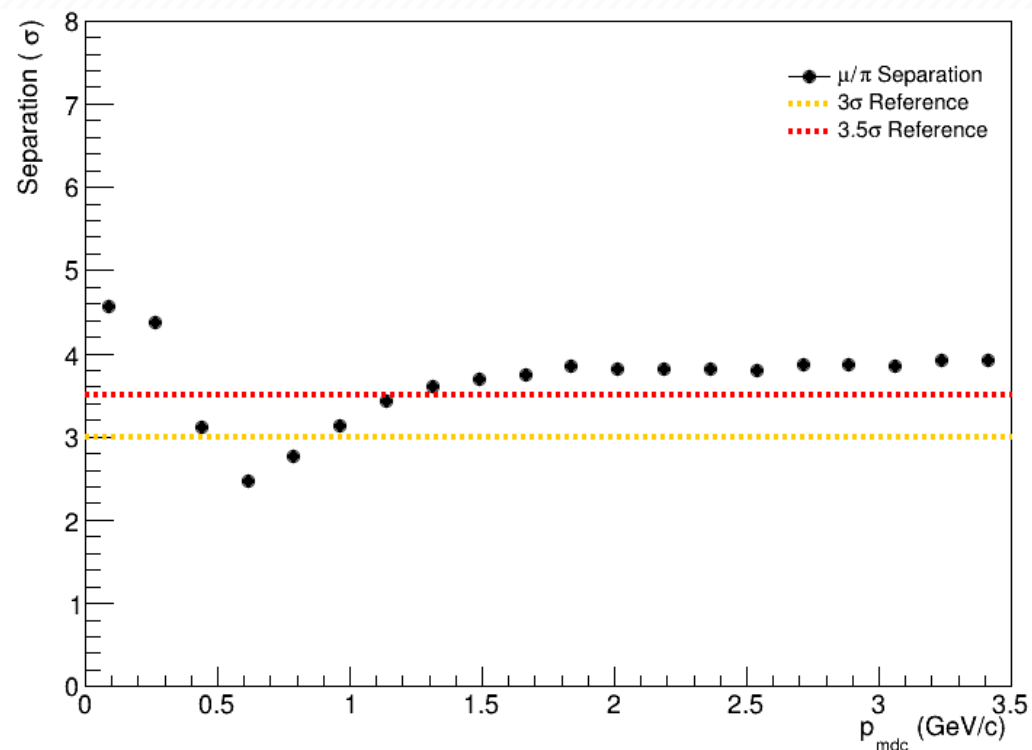
- 计算两分布重叠面积: $C = \int \min[\text{Scale}(h_1), \text{Scale}(h_2)] dx$
- Separation计算: $\sqrt{2} \cdot \text{erf}^{-1}(1 - C)$, $\text{erf}(x) = \frac{2}{\sqrt{\pi}} \int_0^x e^{-t^2} dt$

π/K Separation



- $P < 2 \text{ GeV/c}$: 分离能力超过 **4 σ**
- 全动量空间: 分离能力超过 **3 σ**

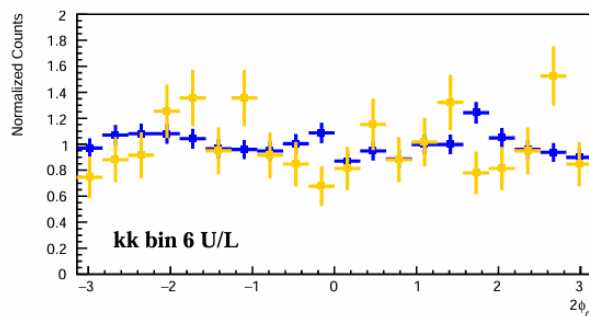
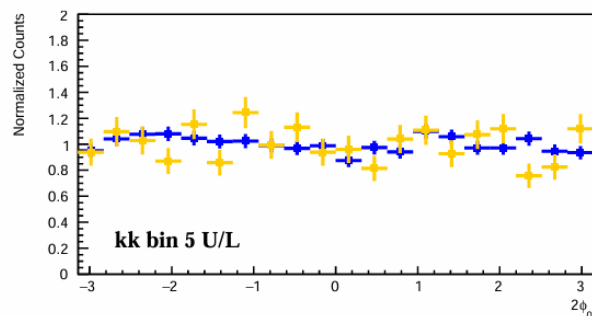
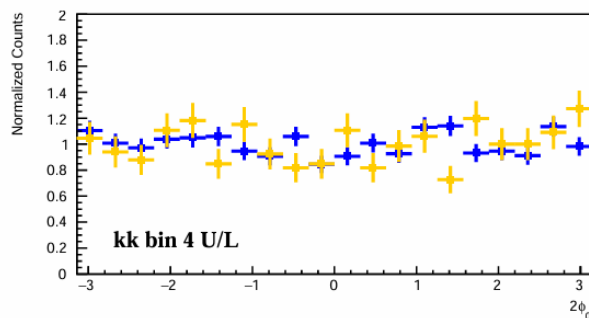
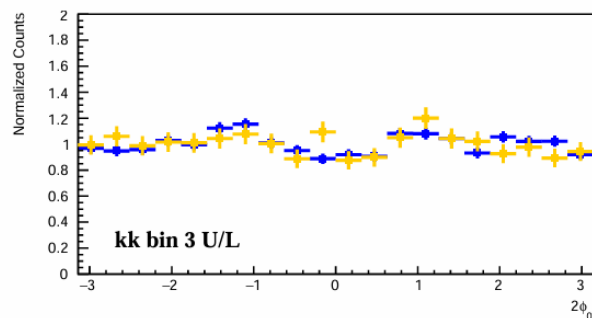
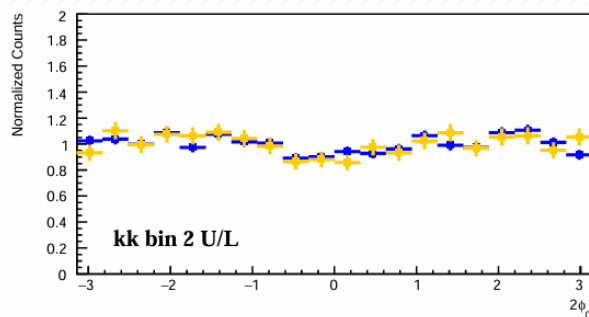
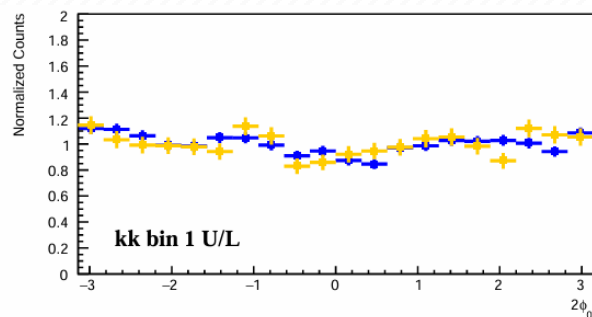
π/μ Separation



- $P > 1 \text{ GeV/c}$: 分离能力超过 **3 σ**
- $P > 1.5 \text{ GeV/c}$: 分离能力超过 **3.5 σ**

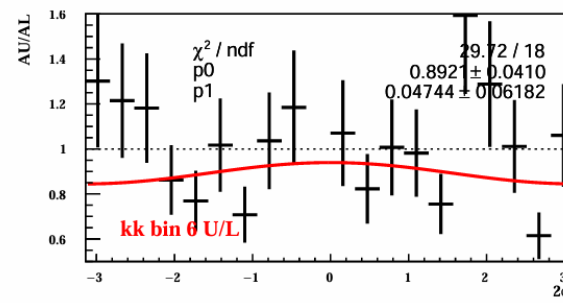
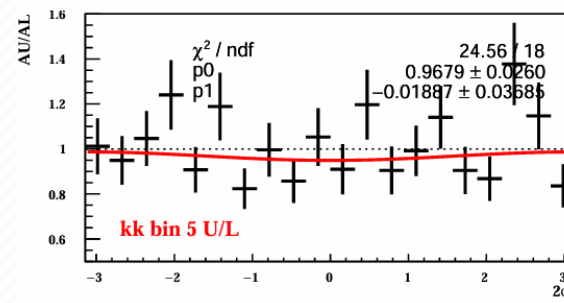
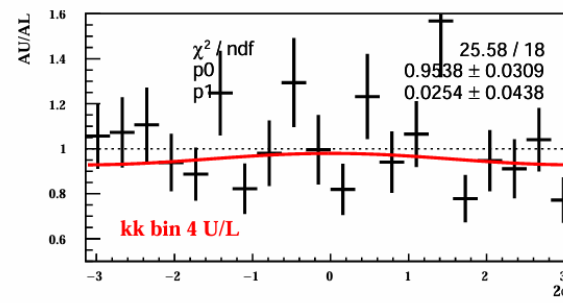
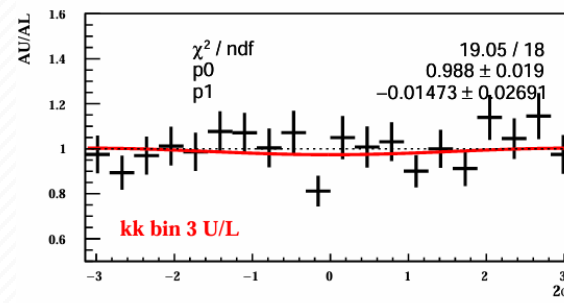
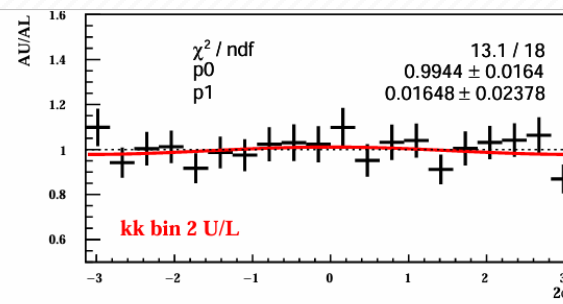
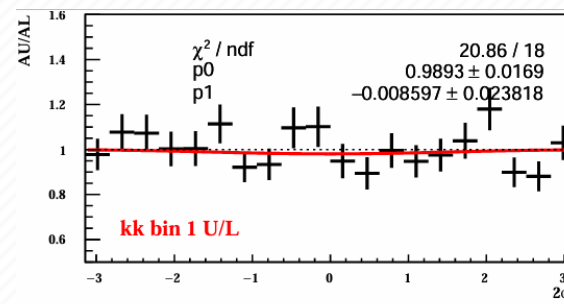
Backup

- 将来自于强衰变的 KK unlike-sign 和 like-sign $2\phi_0$ 满足 $A_{KK}^{U \text{ or } L} = 1 + M_{KK}^{U \text{ or } L} \cdot \cos 2\phi_0$ 分布
- ✓ $2\phi_0$ 分别在 Like-sign 组合(红色)和 Unlike-sign 组合(绿色)下的原始分布比较
- ✓ 测量值 A_{KK}^U / A_{KK}^L 在不同 bin 内随 $2\phi_0$ 的分布



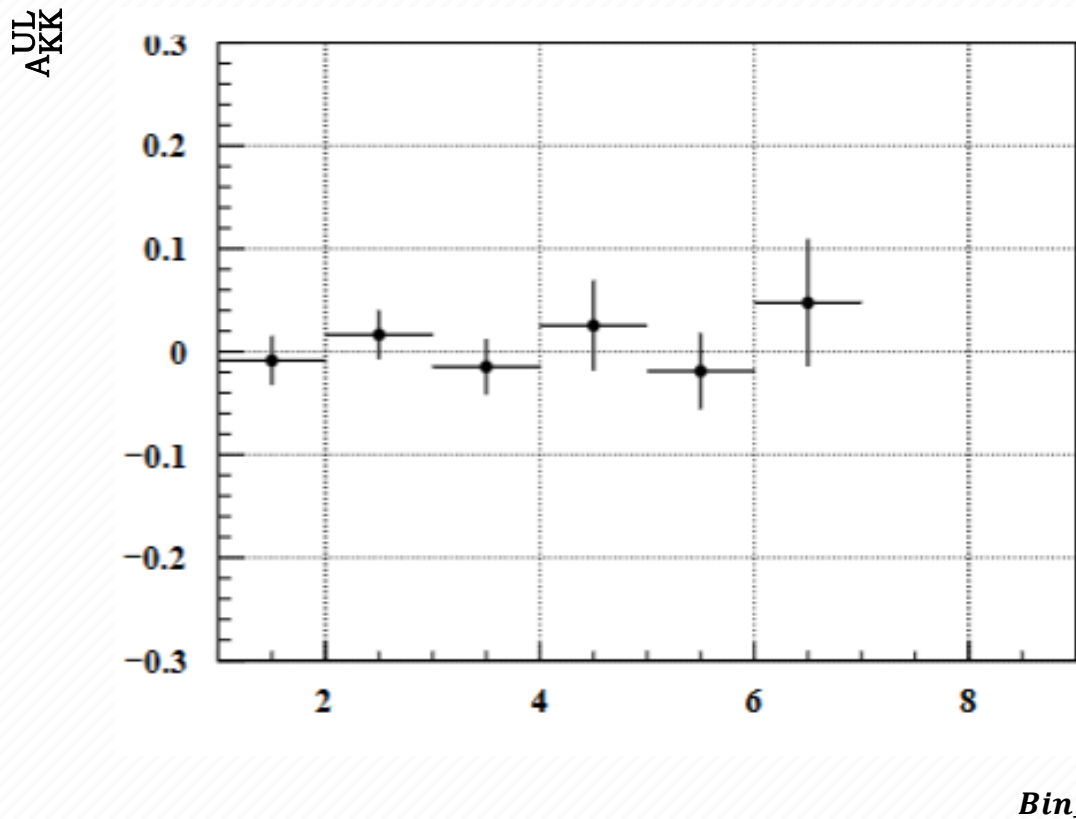
■ $2\phi_0^U$

■ $2\phi_0^L$



Backup

- 测量值: $A_{KK}^{UL} = A_{KK}^U / A_{KK}^L$ (归一化), A_{KK}^{UL} 满足余弦函数 $p^0 + p^1 \cdot \cos 2\phi_0$ 拟合
- ✓ A_{KK}^{UL} 转化为拟合分布后 p^1 的观测



Z_K -Bin	Value(p^0)	Error(p^0)	Value(Collins Asymmetry)	Error (Collins Asymmetry(%))	σ
0	0.989299	0.016903	-0.008597	0.023818	0.3610
1	0.994388	0.016433	0.016484	0.023784	0.6931
2	0.988037	0.018993	-0.014728	0.026907	0.5474
3	0.953830	0.030914	0.025404	0.043777	0.5804
4	0.967887	0.025955	-0.018872	0.036850	0.5123
5	0.892059	0.041038	0.047440	0.061820	0.7673

表 5.6: KKX 过程 Collins 不对称度的测量结果。

$$\sigma = \frac{|\text{Value (Collins Asymmetry)} - 0|}{\text{Error (Collins Asymmetry)}}$$