



超级陶粲装置
Super Tau-Charm Facility

$J/\psi \rightarrow K_S K \pi$ 过程中的中性K介子混合与CP破坏研究

张慧斌

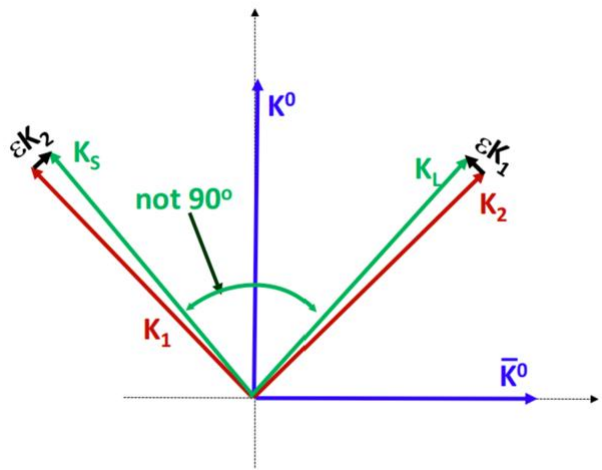
2026年超级陶粲装置研讨会

2026年7月2日



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

三种中性 K 介子表象



$K^0 - \bar{K}^0$
味道本征态

有确定的夸克组分和奇异数

$K_1 - K_2$
 CP 本征态

有确定的 CP

$K_S - K_L$
质量本征态

有确定的寿命和质量

如果 $\varepsilon \neq 0$, K_S 和 K_L 不是 CP 本征态
 ε : 表征由于 K 介子混合引起的间接 CP 破坏



K_L 衰变中的两种 CP 破坏参数

K_S 和 K_L 分别为 K_1 和 K_2 的叠加态: $|K_S\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+|\epsilon_S|^2}}(|K_1\rangle + \epsilon_S|K_2\rangle)$

$$|K_L\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+|\epsilon_L|^2}}(|K_2\rangle - \epsilon_L|K_1\rangle)$$

$$\epsilon_S = \epsilon + \delta$$

$$\epsilon_L = \epsilon - \delta$$

ϵ_S $\downarrow$ CP 破坏
 ϵ_L $\downarrow$ CPT 破坏

直接 CP 破坏 ϵ' $\swarrow$ $\searrow$ ϵ 混合 CP 破坏
 $\pi\pi$ (CP even)

CP 破坏参数:

$$\eta_{+-} = \frac{A(K_L \rightarrow \pi^+\pi^-)}{A(K_S \rightarrow \pi^+\pi^-)} = |\eta_{+-}|e^{i\phi_{+-}} = \epsilon + \epsilon'$$

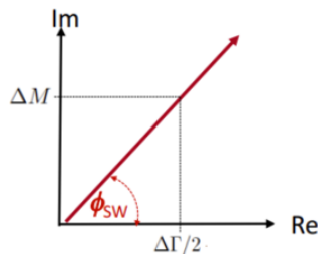
$$\eta_{00} = \frac{A(K_L \rightarrow \pi^0\pi^0)}{A(K_S \rightarrow \pi^0\pi^0)} = |\eta_{00}|e^{i\phi_{00}} = \epsilon + \epsilon'$$

$$\epsilon \equiv \frac{i\text{Im}M_{12}}{\Delta M - \frac{i}{2}\Delta\Gamma}$$



Phase of ϵ : $\phi_{SW} \equiv \tan^{-1} \frac{2\Delta M}{\Delta\Gamma}$

super weak phase



测量 $|\eta_{+-}|$ 和 $|\phi_{+-}|$

Phys. Rept., 2003, 374: 165-270

衰变率 $K^0/\bar{K}^0 \rightarrow \pi\pi$:

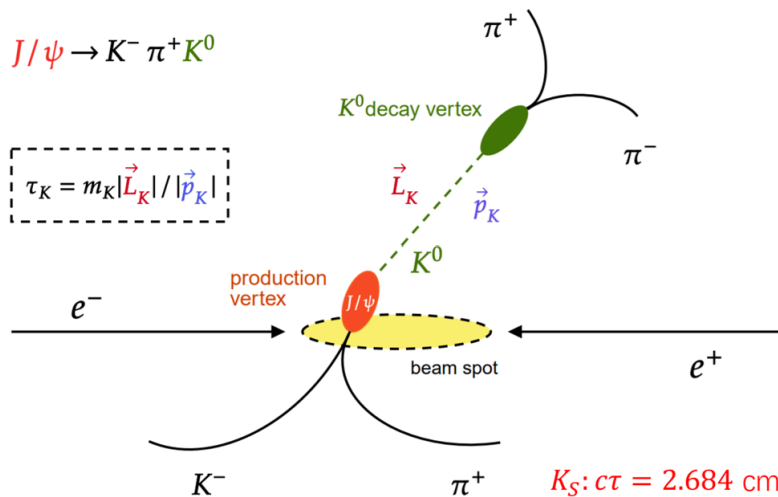
$$R_f(\tau)/\bar{R}_f(\tau) = \frac{[1 \mp 2 \operatorname{Re}(\epsilon - \delta)]}{2} \Gamma_S^f \times \left[e^{-\Gamma_S \tau} + |\eta_f|^2 e^{-\Gamma_L \tau} \pm 2 |\eta_f| e^{-(1/2)(\Gamma_S + \Gamma_L)\tau} \cos(\Delta m \tau - \phi_f) \right]$$

$f = \pi^+\pi^-, \pi^0\pi^0$

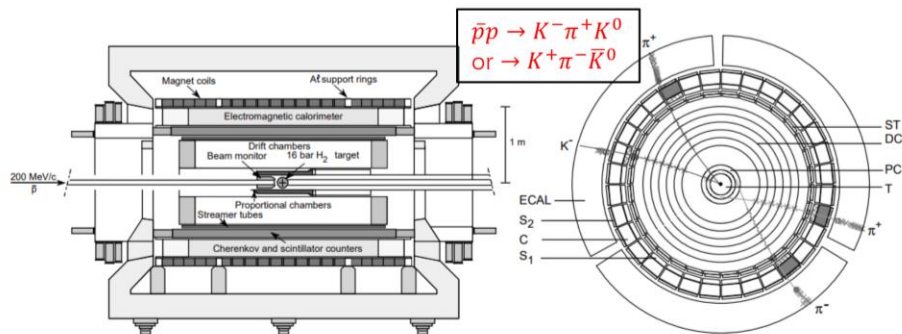
衰变率不对称量 A_{CP}^f :

$$A_{CP}^f = \frac{\bar{R}_f(\tau) - R_f(\tau)}{\bar{R}_f(\tau) + R_f(\tau)} = 2\operatorname{Re}(\epsilon - \delta) - 2 \cdot \frac{|\eta_f| \cdot e^{\frac{1}{2}(\Gamma_{K_S} - \Gamma_{K_L})\tau} \cdot \cos(\Delta m \cdot \tau - \phi_f)}{1 + |\eta_f|^2 \cdot e^{(\Gamma_{K_S} - \Gamma_{K_L})\tau}}$$

待测量



CLEAR 测量结果



flavor-tag 初态 $K^0/\bar{K}^0$
CP-tag 末态 K_1/K_2

$$A_{\text{CP}}^f(\tau) = \frac{\bar{R}_f(\tau) - R_f(\tau)}{\bar{R}_f(\tau) + R_f(\tau)}$$

$$= 2\text{Re}(\epsilon - \delta) - 2 \frac{|\eta_f| e^{(1/2)(\Gamma_S - \Gamma_L)\tau} \cos(\Delta m\tau - \phi_f)}{1 + |\eta_f|^2 e^{(\Gamma_S - \Gamma_L)\tau}}$$

$$|\eta_{+-}| = (2.264 \pm 0.023_{\text{stat}} \pm 0.026_{\text{syst}} \pm 0.007_{\tau_S}) \times 10^{-3}$$

$$\phi_{+-} = 43.19^\circ \pm 0.53^\circ_{\text{stat}} \pm 0.28^\circ_{\text{syst}} \pm 0.42^\circ_{\Delta m}$$

CLEAR

Physics Letters B 458 1999 545–552

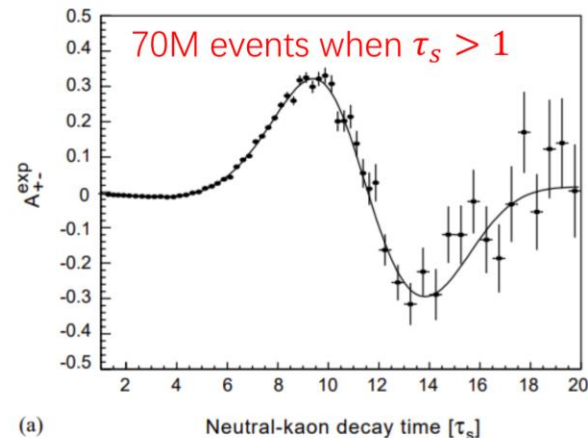
$$|\eta_{+-}| = (2.232 \pm 0.011) \times 10^{-3}$$

$$\phi_{+-} = 43.4^\circ \pm 0.5^\circ$$

PDG average

$$\text{Super weak phase } \phi_{\text{sw}} \equiv \tan^{-1} \frac{2\Delta M}{\Delta \Gamma} = 43.30^\circ \pm 0.16^\circ$$

$$\text{CPT test: } \phi_{\text{sw}} - \phi_{+-}$$



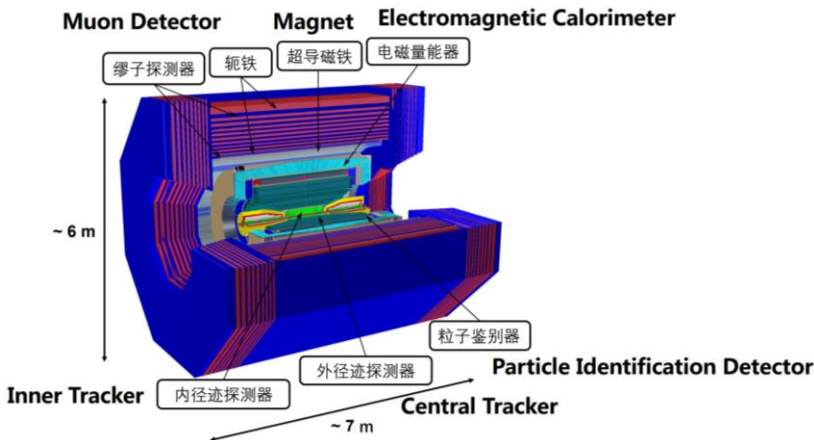
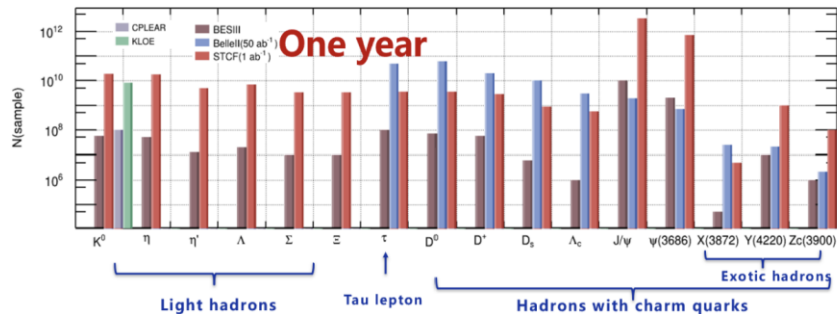
(a)



中国科学院大学
University of Chinese Academy of Sciences

超级陶粲装置介绍

- STCF上每年将产生万亿级的 J/ψ 事例
- 进而每年产生约 1.8×10^{10} 的 $J/\psi \rightarrow K^- \pi^+ K^0 + c.c$ 事例
- 比CPLLEAR的事例数 (7×10^7) 高两个量级以上



质心能量 (GeV)	积分亮度 (ab ⁻¹)	样本类型	截面 (nb)	事例数
3.097	1	J/ψ	3400	3.4×10^{12}
3.670	1	$\tau^+ \tau^-$	2.4	2.4×10^9
3.686	1	$\psi(3686)$	640	6.4×10^{11}
		$\tau^+ \tau^-$	2.5	2.5×10^9
		$\psi(3686) \rightarrow \tau^+ \tau^-$	2.0	2.0×10^9
3.770	1	$D^0 \bar{D}^0$	3.6	3.6×10^9
		$D^0 \bar{D}^0$ 单标记	7.9	7.9×10^8
		$D^+ \bar{D}^-$	2.8	2.8×10^9
		$D^+ \bar{D}^-$ 单标记	5.5	5.5×10^8
		$\tau^+ \tau^-$	2.9	2.9×10^9



在STCF上测量 $|\eta_{+-}|$ 和 ϕ_{+-}

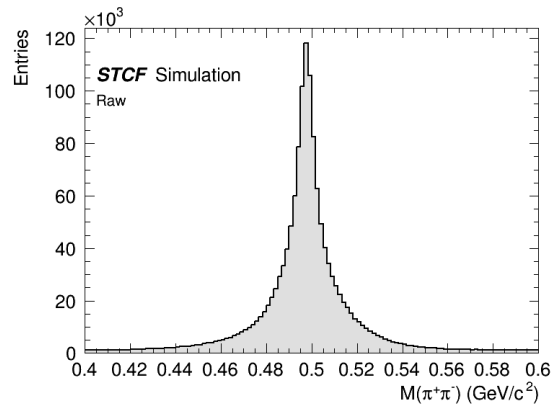
- 目标：
 - 分别测量 K^0 和 $\overline{K}^0$ 的衰变时间分布
 - 即需要获取 K^0 和 $\overline{K}^0$ 的动量和衰变长度
- 方法：
 - 通过Inclusive MC 确定和优化Cut条件，提取本底分布 ($\sim 6 \times 10^8 J/\psi$ 事例)
 - 在相同 Cut 下，利用全模拟的 Signal MC 提取重建效率及动量、衰变长度的分辨率
 - 将上述效率与分辨率施加于一个 Toy MC，并混入本底

Oscar 2.6.2

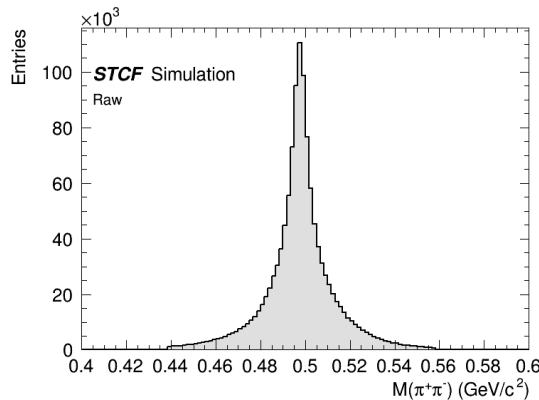
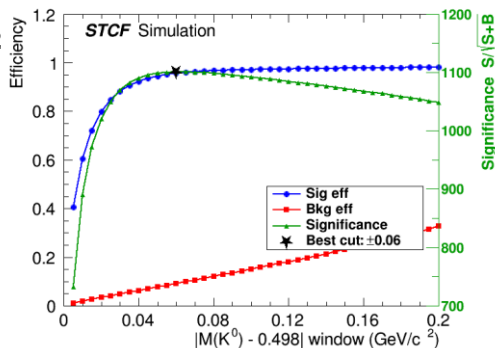


事例挑选

- 带电径迹 ≥ 4
- $K\pi$ 候选挑选：
 - PID: 使用基于BDT模型训练的GlobalPID包
 - 要求存在一对电荷相反的K和 π 径迹
 - 均要求: $D_0 < 0.1\text{cm}, z_0 < 0.5\text{cm}, \cos\theta < 0.94$
- K^0 挑选:
 - $|m_{\pi^+\pi^-} - 0.498| < 0.06\text{MeV}/c^2$
 - $L/\sigma_L > 2$

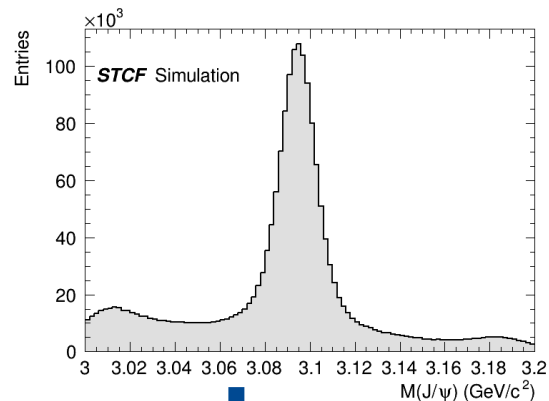
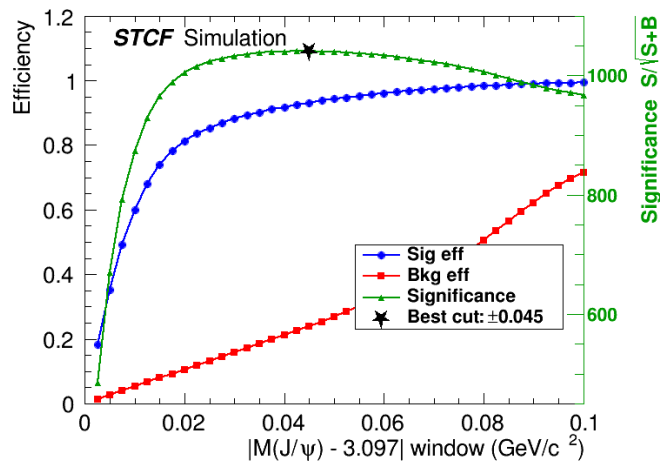


$$|m_{K_S} - 0.498| < 0.06$$

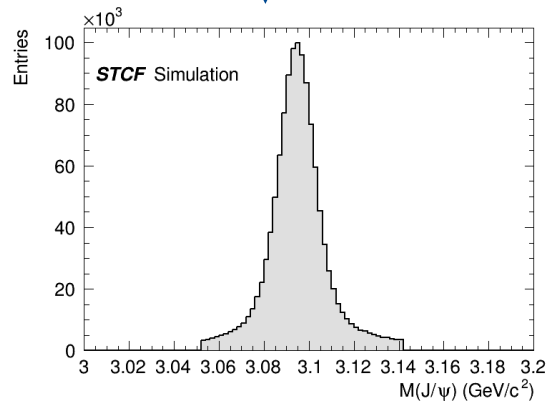


事例挑选

- J/ψ 挑选:
 - $|m_{J/\psi} - 0.498| < 0.045 \text{ MeV}/c^2$



$$|m_{J/\psi} - 3.097| < 0.045$$



本底分析

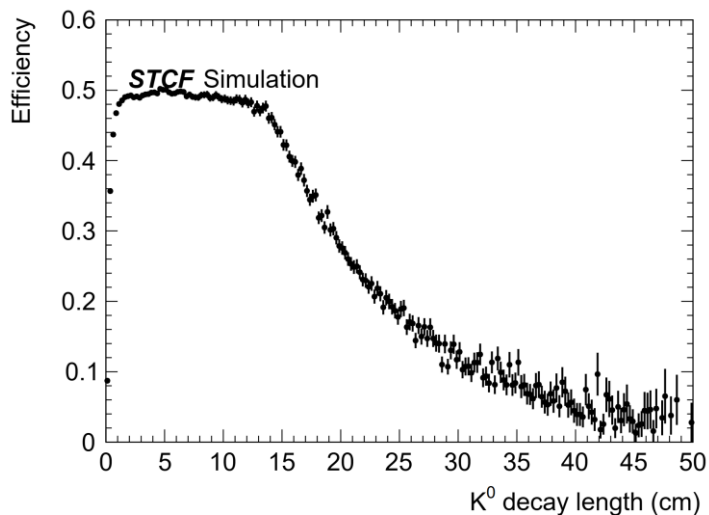
	Cut前		Cut后
事例数	2 121 994		1 132 922
		$ m_{K_S} - 0.498 < 0.06$	
		$ m_{J/\psi} - 3.097 < 0.045$	
信号数	1 338 188		1 128 309
		$L / \sigma_L > 2$	
本底率	36.93%		0.41%

- 1 $J/\psi \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^- K^+$
- 2 $J/\psi \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- K^-$
- 3 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \pi^+ \pi^+ \pi^- K^-$
- 4 $J/\psi \rightarrow \mu^+ \nu_\mu \pi^+ \pi^- \pi^- K^+$
- 5 $J/\psi \rightarrow \pi^+ \pi^- K^+ K^-$
- 6 $J/\psi \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \pi^+ \pi^- \pi^- K^+$
- 7 $J/\psi \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \pi^+ \pi^+ \pi^- K^-$
- 8 $J/\psi \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \pi^+ \pi^+ \pi^- K^-$
- 9 $J/\psi \rightarrow \pi^0 \pi^+ \pi^+ \pi^- K^-$
- 10 $J/\psi \rightarrow \pi^0 \pi^+ \pi^- \pi^- K^+$
- 11 $J/\psi \rightarrow \pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^-$
- 12 $J/\psi \rightarrow e^+ \nu_e \bar{\nu}_\mu \pi^+ \pi^- \pi^- K^+$

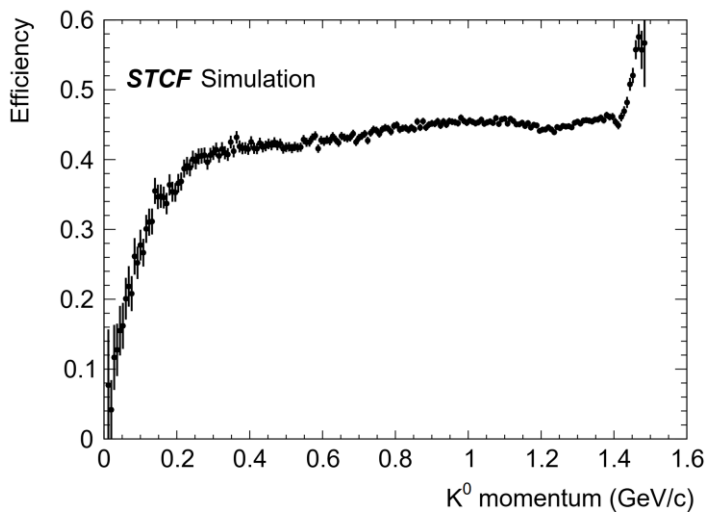


提取 Smeared 参数

- 使用Signal MC 生成 4×10^6 个 K_S 事例
- 计算cut过后不同参数区间内的探测效率。



不同衰变长度下的效率分布

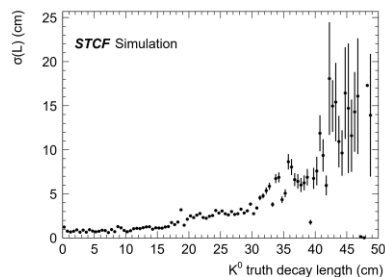


不同动量下的效率分布

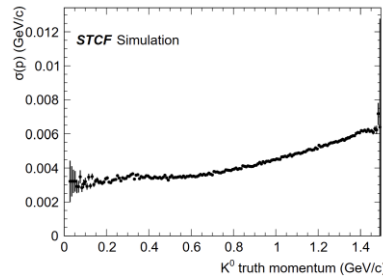


测量误差

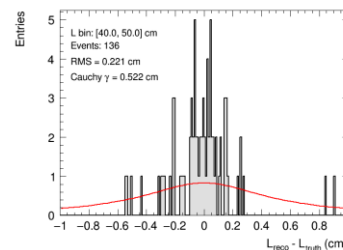
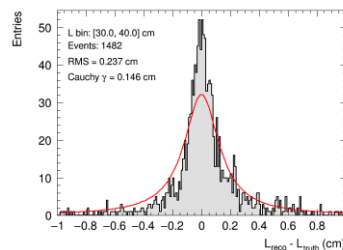
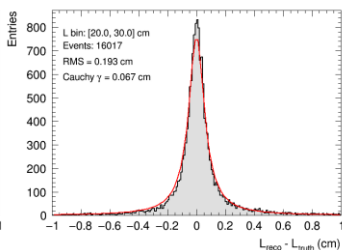
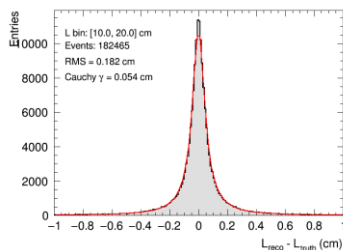
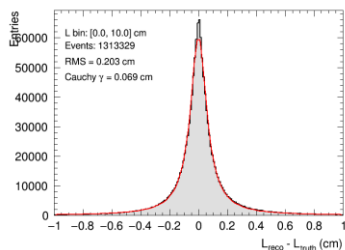
- 拟合不同参数区间内 测量值 - truth值 的分布
- 衰变长度的测量误差为Cauchy分布



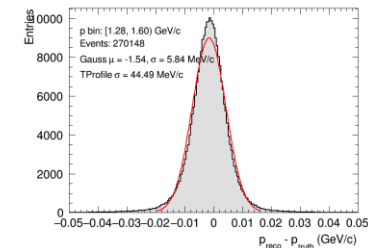
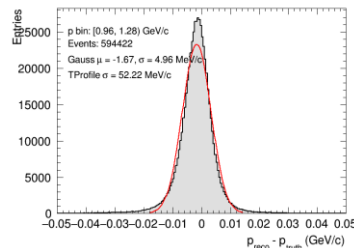
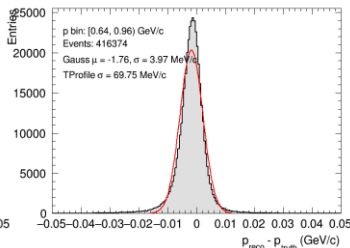
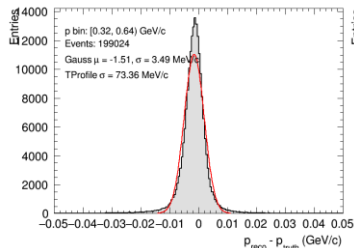
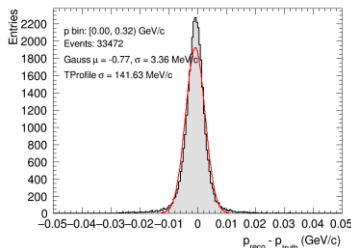
不同衰变长度下的误差rms值分布



不同动量下的误差rms值分布



不同衰变长度下的衰变长度误差分布

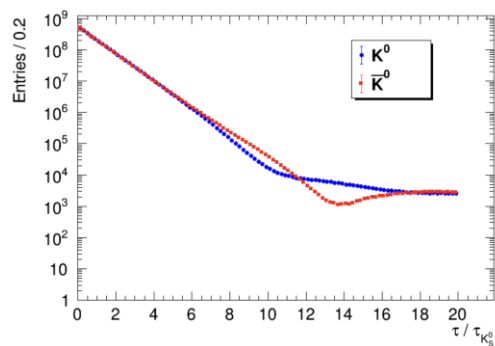


不同动量下的动量误差分布

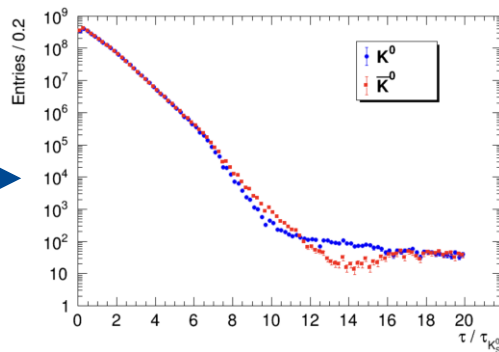


Toy mc 模拟

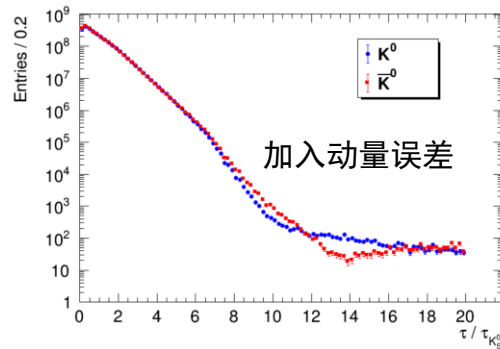
- 总事例数 5.6×10^9 的 $J/\psi \rightarrow K^0 K^- \pi^+ + c.c.$
- 画出 K^0 和 $\bar{K}^0$ 的衰变时间分布



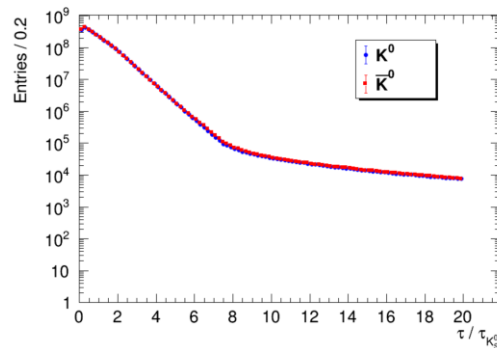
纯信号



加入效率



加入动量误差

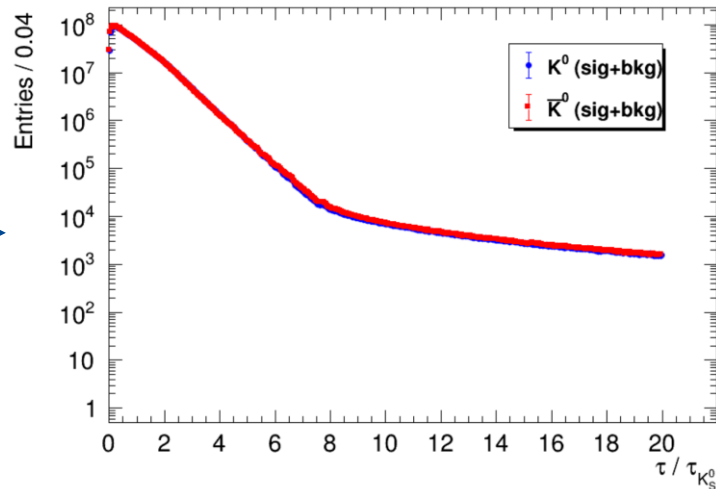
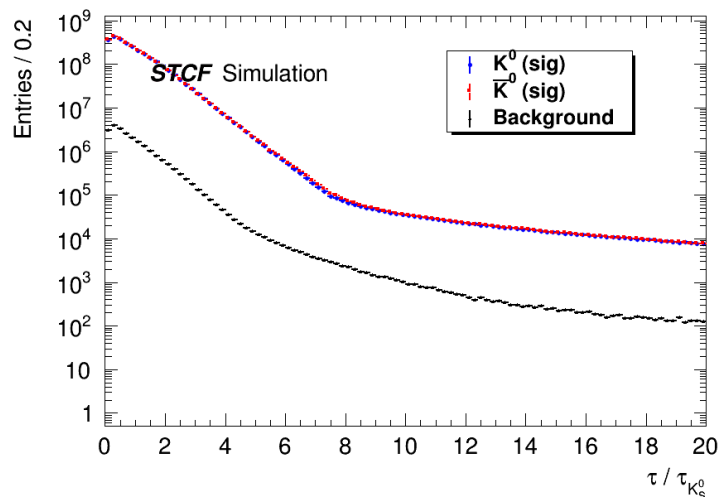


加入衰变长度误差



混入本底

- 使用 Inclusive MC 过cut的本底生成本底的pdf模板
- 按比例混入 toy mc 信号中



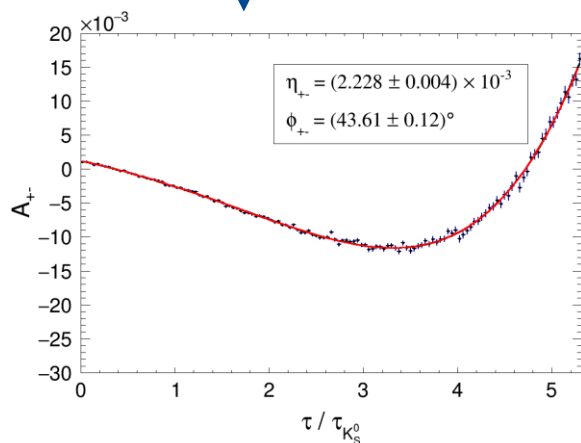
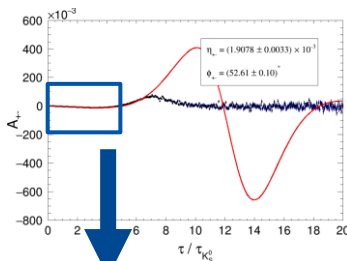
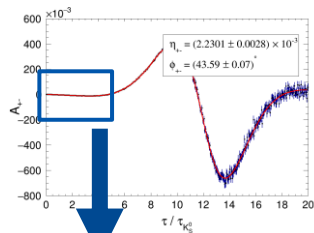
拟合结果

$$|\eta_{+-}| = (2.232 \pm 0.011) \times 10^{-3}$$

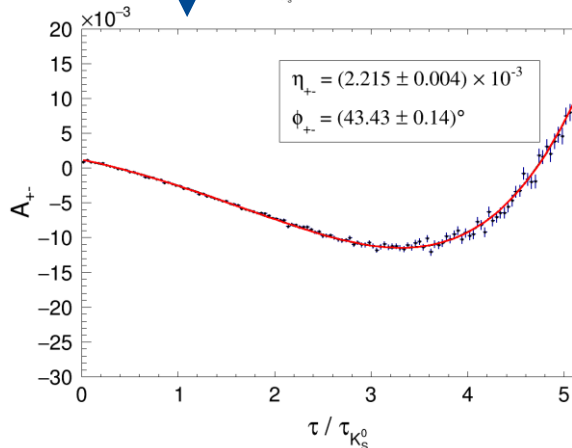
$$\phi_{+-} = 43.51^\circ \pm 0.5^\circ \quad \text{PDG average}$$

$$A_{\text{CP}}^{+-} = \frac{\bar{R}_{+-}(\tau) - R_{+-}(\tau)}{\bar{R}_{+-}(\tau) + R_{+-}(\tau)}$$

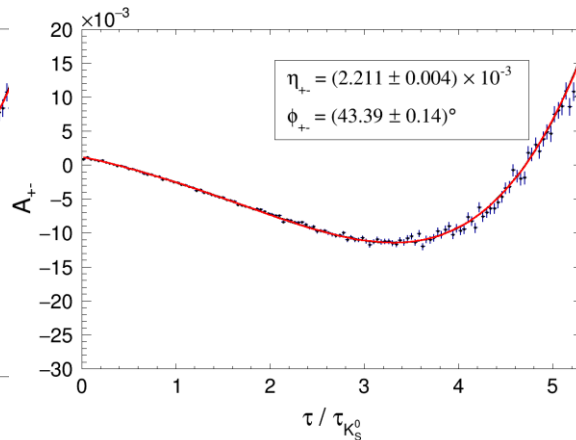
$$= 2\text{Re}(\epsilon - \delta) - 2 \cdot \frac{|\eta_{+-}| \cdot e^{\frac{1}{2}(\Gamma_{K_S} - \Gamma_{K_L}) \cdot \tau} \cdot \cos(\Delta m \cdot \tau - \phi_{+-})}{1 + |\eta_{+-}|^2 \cdot e^{(\Gamma_{K_S} - \Gamma_{K_L}) \cdot \tau}}$$



纯信号



加入测量误差与效率



考虑本底



总结

- 对在STCF 上测量 $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-$ 中CP破坏参数 $|\eta_{+-}|$ 及其相位 ϕ_{+-} 的测量做了预研。
- 统计误差上预期会有相比PDG更高的精度，但是衰变长度的测量误差导致了 $|\eta_{\pm}|$ 的测量存在较大的系统误差，可能需要考虑修正方案

谢谢！

