

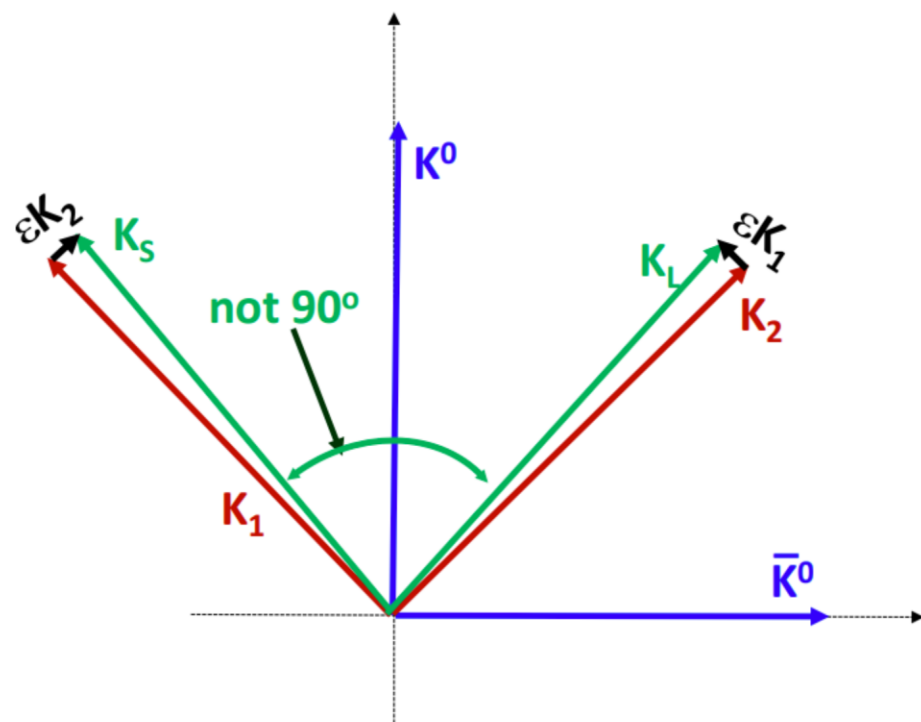
$J/\psi \rightarrow K_S K \pi$ 过程中的中性K介子CP 破坏研究

张慧斌 张剑宇

2025年超级陶粲装置研讨会

2025年7月4日

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： $|K_S\rangle = \frac{1}{\sqrt{1+|\epsilon_S|^2}} (|K_1\rangle + \epsilon_S |K_2\rangle)$

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

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

$$\begin{aligned}\epsilon_S &= \epsilon + \delta \\ \epsilon_L &= \epsilon - \delta\end{aligned}$$

CP 破坏 CPT 破坏

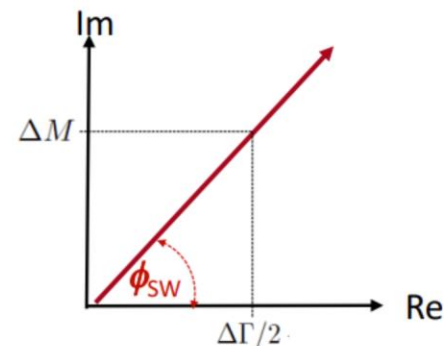
CP 破坏参数：

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

$$\eta_{00} = \frac{A(K_L \rightarrow \pi^0\pi^0)}{A(K_S \rightarrow \pi^0\pi^0)} = |\eta_{00}| e^{i\phi_{00}} \cong \epsilon - 2\epsilon',$$

$$\epsilon \equiv \frac{i\text{Im}M_{12}}{\Delta M - \frac{i}{2}\Delta\Gamma} \longrightarrow \text{Phase of } \epsilon: \phi_{sw} \equiv \tan^{-1} \frac{2\Delta M}{\Delta\Gamma}$$

super weak phase



测量 $|\eta_{+-}|$ 和 ϕ_{+-}

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

衰变率 $K^0/\bar{K}^0 \rightarrow \pi\pi$:
$$R_f(\tau)/\bar{R}_f(\tau) = \frac{[1 \mp 2 \operatorname{Re}(\epsilon - \delta)]}{2} \Gamma_S^f$$

$$\times \left[e^{-\Gamma_S \tau} + |\eta_f|^2 e^{-\Gamma_L \tau} \pm 2 |\eta_f| e^{-(1/2)(\Gamma_S + \Gamma_L)\tau} \cos(\Delta m \tau - \phi_f) \right]$$

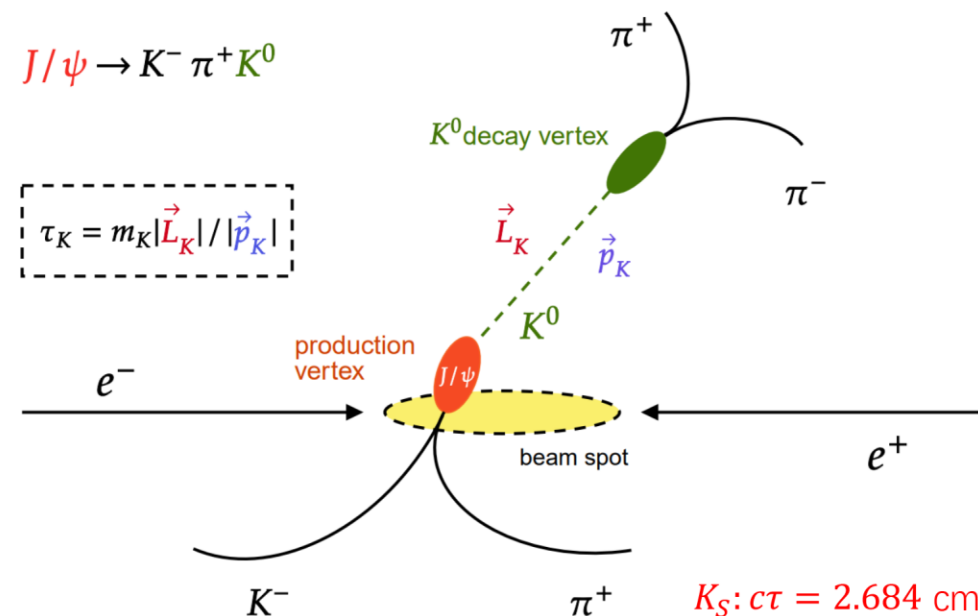
$$f = \pi^+ \pi^-, \pi^0 \pi^0$$

衰变率不对称量 A_{CP}^f :

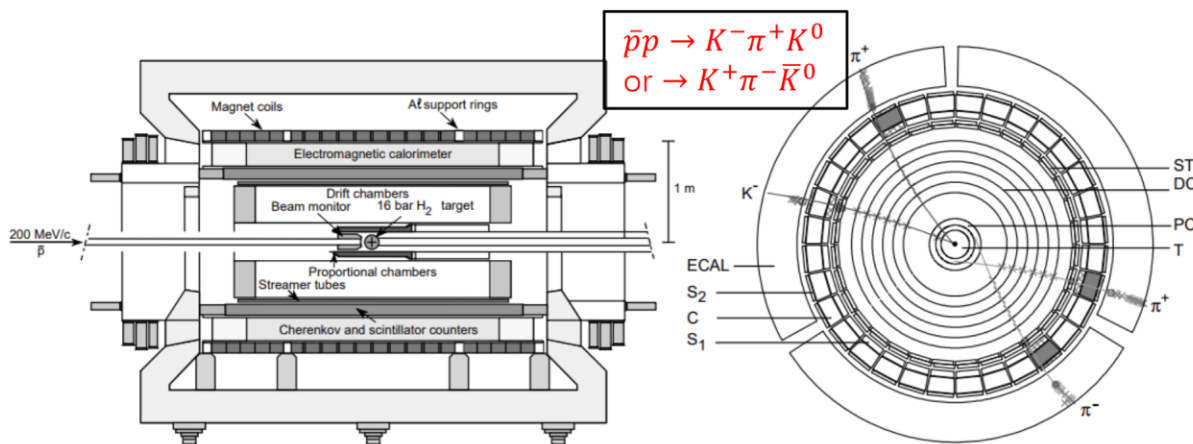
$$A_{CP}^f(\tau) = \frac{\bar{R}_f(\tau) - R_f(\tau)}{\bar{R}_f(\tau) + R_f(\tau)}$$

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

待测量



CPLEAR 测量结果



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

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

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

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

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

CPLEAR

Physics Letters B 458 1999 545–552

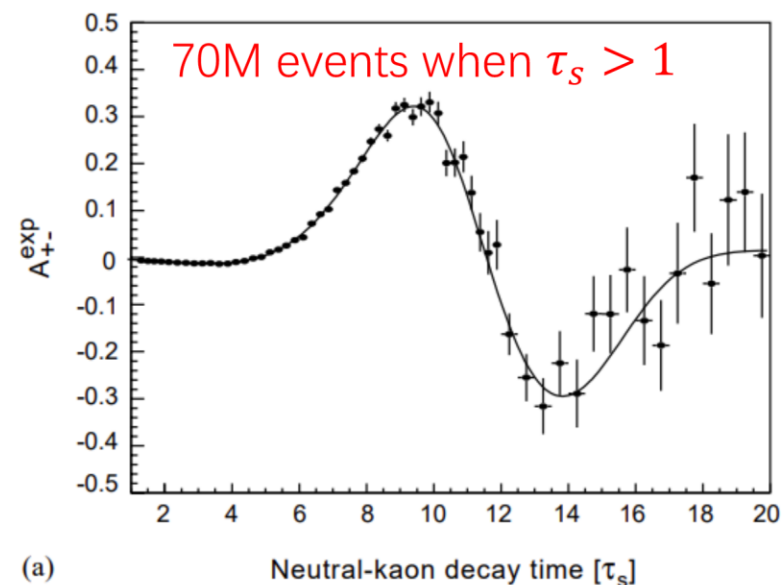
$$|\eta_{+-}| = (2.232 \pm 0.011) \times 10^{-3}$$

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

PDG average

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

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



(a)

超级陶粲工厂简介

BESIII 已经收集
100 亿 J/ψ

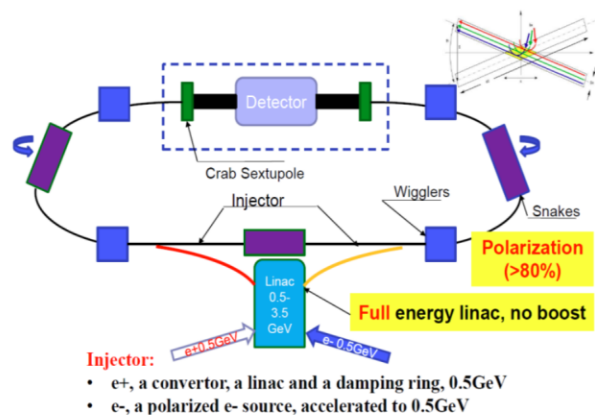
采用“Topup”模式 $\times 2$ +
未来可能实现的“单色对撞”模式 $\times 10$ +
对撞机亮度(super J/ψ factory) $\times 100$

在STCF 上每年收集 $10^{12} \sim 10^{13} J/\psi$

$10^{12} J/\psi$

约为CPLEAR事例数的100倍！

$5.6 \times 10^9 K^- \pi^+ K^0 + c. c.$



1 ab^{-1} data expected per year

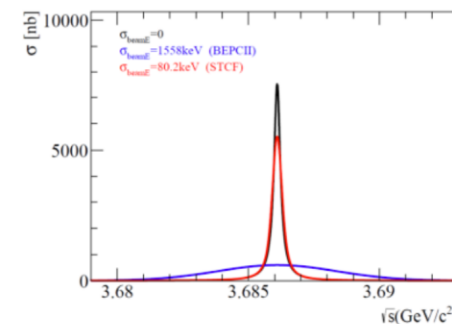
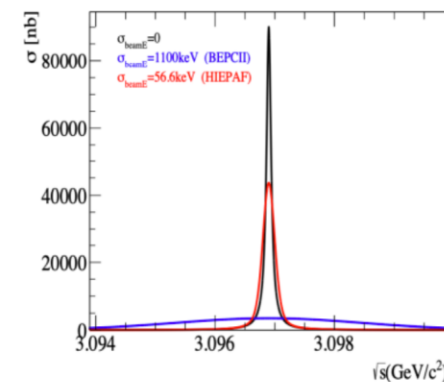
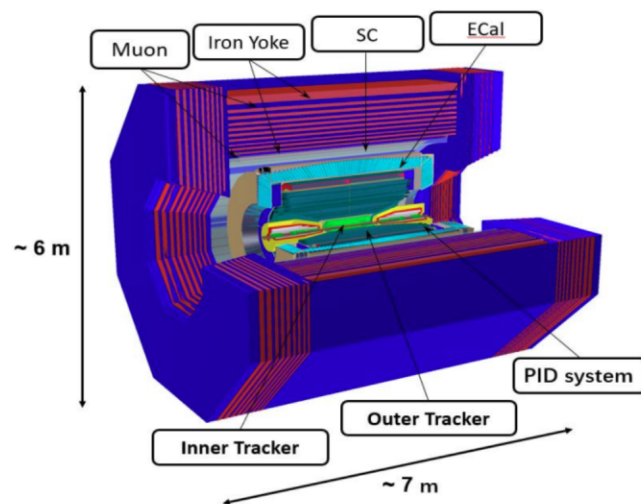
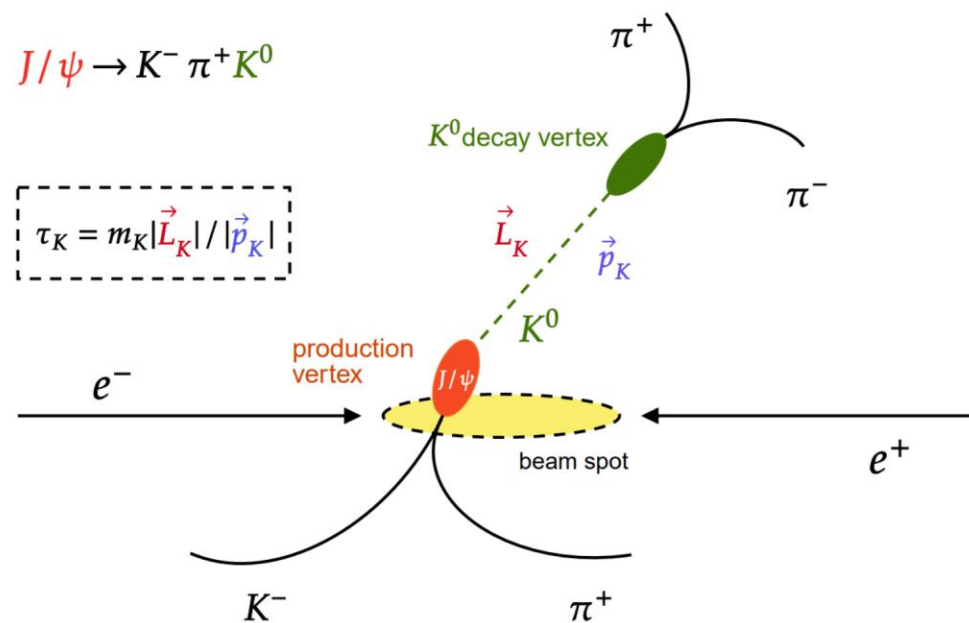
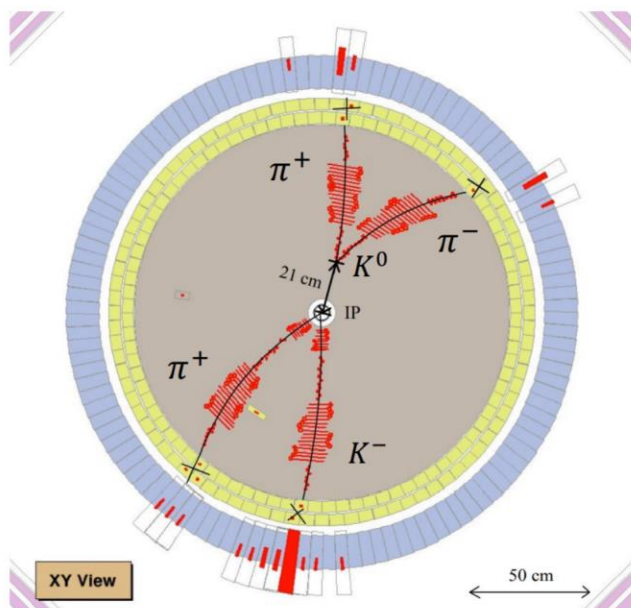


图 6.9 BEPCII 以及 STCF 采用单色对撞模式下 J/ψ 和 $\psi(2S)$ 的产生截面。

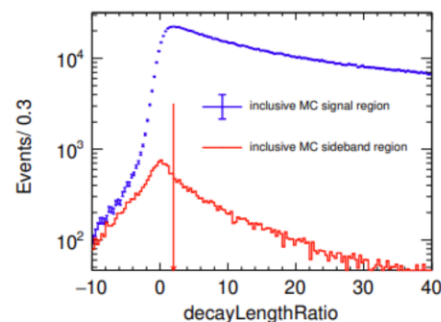
在超级陶粲工厂上测量 $|\eta_{+-}|$ 和 ϕ_{+-}

- 在BESIII上调研分析方法与相应的本底水平。
- 通过 MC fast simulation 预估在超级陶粲工厂（STCF）上测量的精度。

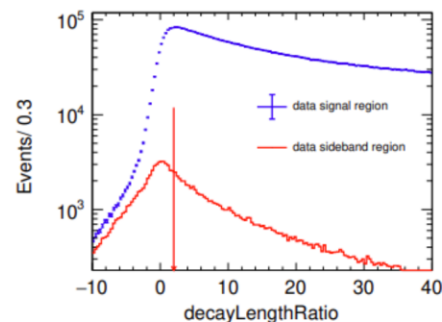


事例挑选

- 好带电径迹挑选：
 - 极角 $|\cos\theta| < 0.93$
 - 对于非中性 K 介子衰变而来的带电径迹，要求：
 - $R_{xy} < 1 \text{ cm}$, $R_z < 10 \text{ cm}$
 - 好带电径迹数等于四条，且电荷之和为0
- $K^-\pi^+$ 候选者挑选
 - 联合 dE/dx 信息以及 TOF 时间信息进行 PID。
 - $Prob(K) > 0.001$, $Prob(K) > Prob(p)$, $Prob(K) > Prob(\pi)$
 - $Prob(\pi) > 0.001$, $Prob(\pi) > Prob(K)$
- K^0 候选者挑选：
 - 初级顶点拟合 $\chi^2_{vtx} < 100$ ，次级顶点拟合 $\chi^2_{svtx} < 100$
 - $m_{\pi^+\pi^-} \in (0.482, 0.514) \text{ GeV}/c^2$
 - $L/\sigma_L > 2$



(a) L/σ_L 在 inclusive MC 中的分布

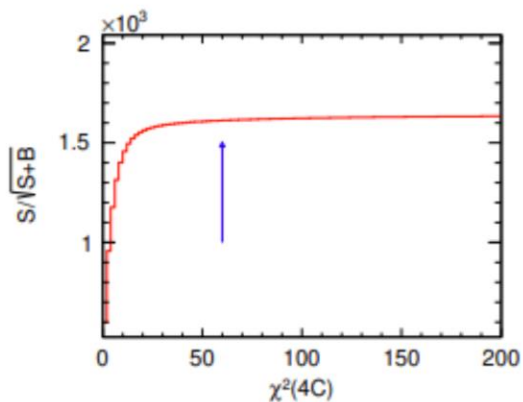


(b) L/σ_L 在数据中的分布

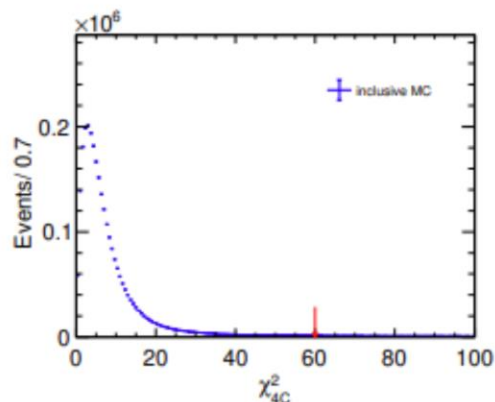
事例挑选

- J/ψ 候选者挑选

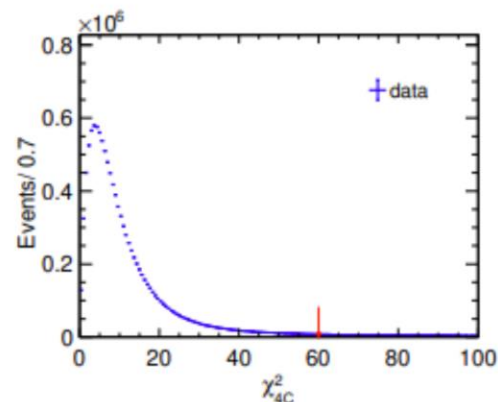
- 对挑选出来的 $K^-\pi^+\pi^+\pi^-$ 组合做 4C 运动学拟合, 且 $\chi_{4C}^2 < 60$



(a) 优化 χ_{4C}^2 选择条件



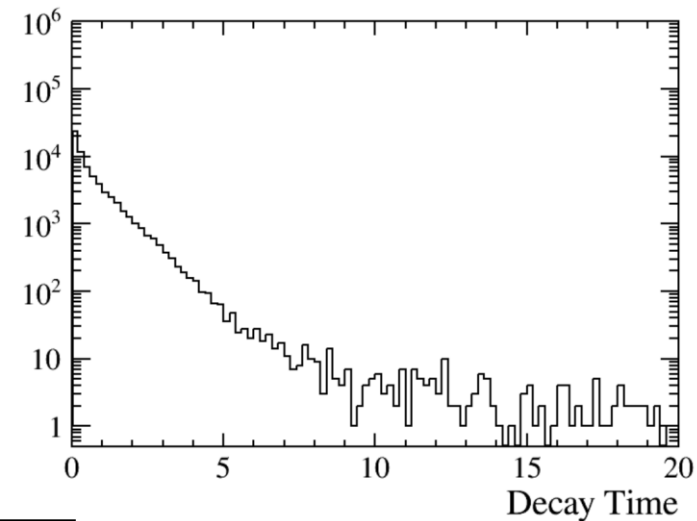
(b) χ_{4C}^2 在 inclusive MC 的分布图



(c) χ_{4C}^2 在数据样本中的分布图

本底分析

- 由inclusive MC 知，相应的本底水平为0.37%



编号	衰变模式	衰变末态	存活事例数
1	$J/\psi \rightarrow \pi^- K_S^0 K^+, K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-$	$\pi^+ \pi^- \pi^- K^+$	8943985
2	$J/\psi \rightarrow \pi^+ K_S^0 K^-, K_S \rightarrow \pi^+ \pi^-$	$\pi^+ \pi^+ \pi^- K^-$	8769287
3		$\pi^+ \pi^- \pi^- K^+ + \gamma$	16631
4		$\pi^+ \pi^- K^+ K^-$	16416
5		$\pi^+ \pi^+ \pi^- K^- + \gamma$	16223
6		$\pi^+ \pi^+ \pi^- \pi^-$	12403
其他本底过程			5415

MC 快速模拟

- 事例总数 5.6×10^9 的 $J/\psi \rightarrow K^0 K^- \pi^+ + c.c.$ 。
- 束流对撞点坐标不确定性： $\sigma_x = 13.6 \mu\text{m}$, $\sigma_y = 1.4 \mu\text{m}$, $\sigma_z = 50 \mu\text{m}$
- 带电粒子动量重建不确定性： $\sigma_p = 0.5\%$
- $\pi^+ \pi^-$ 重建的中性 K 介子的衰变顶点的不确定性以及探测效率如图所示

Beam Size

Vertex Constrain

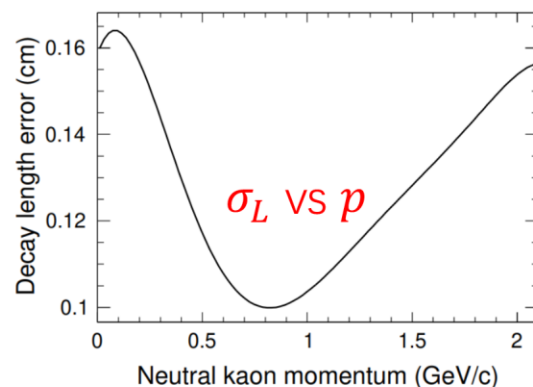
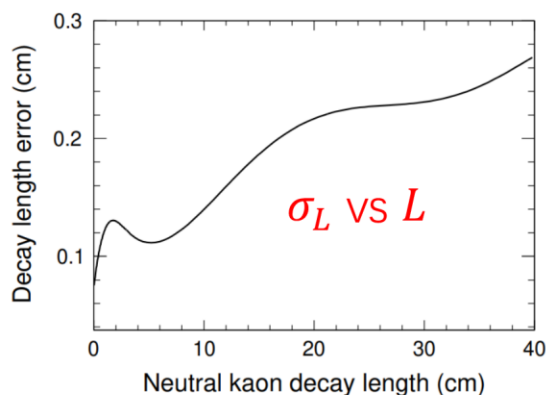


FIG. 5. The detector resolution of K^0 decay vertex versus (a) decay length l_K and (b) momentum p_K .

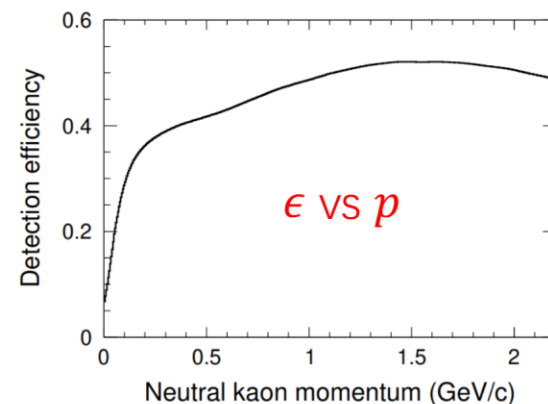
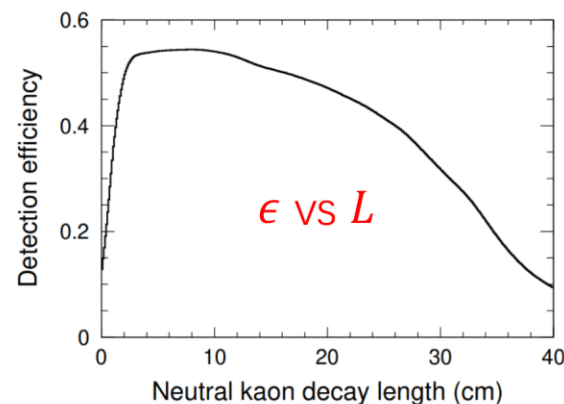
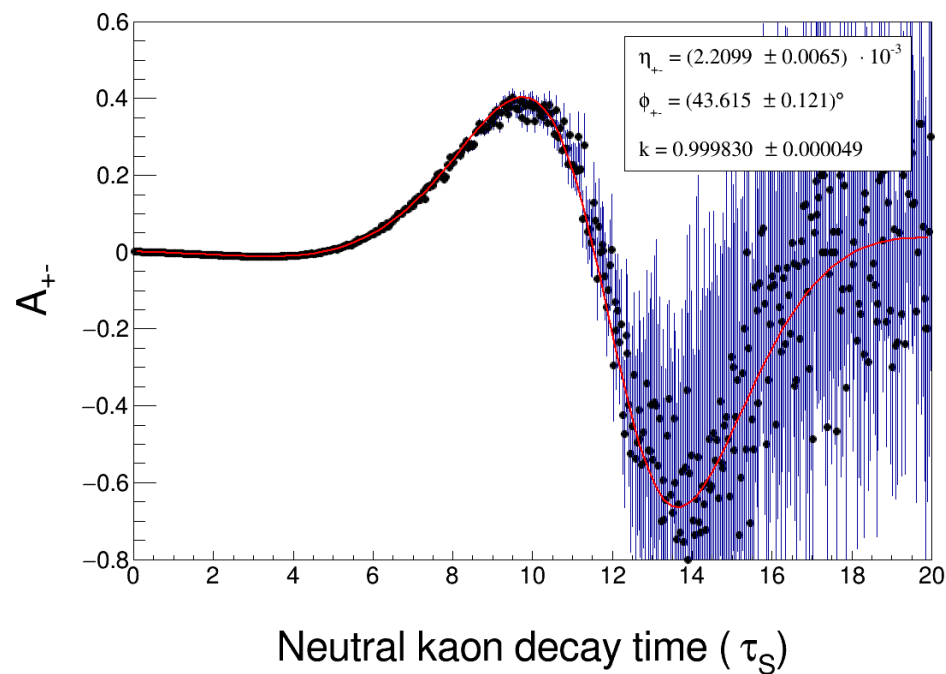
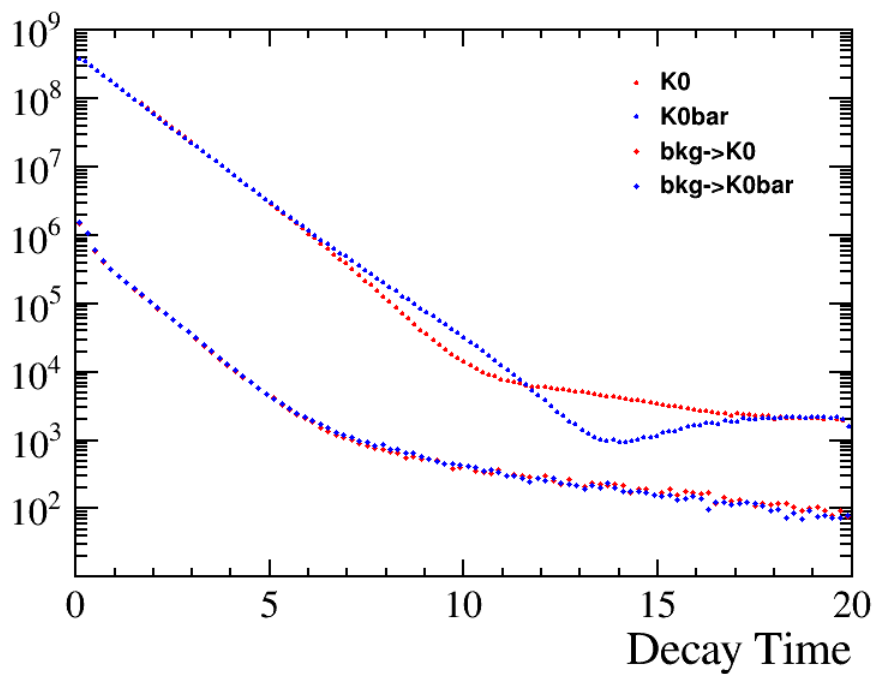


FIG. 6. The detection efficiency of K^0 decay vertex versus (a) decay length l_K and (b) momentum p_K .

MC 快速模拟结果

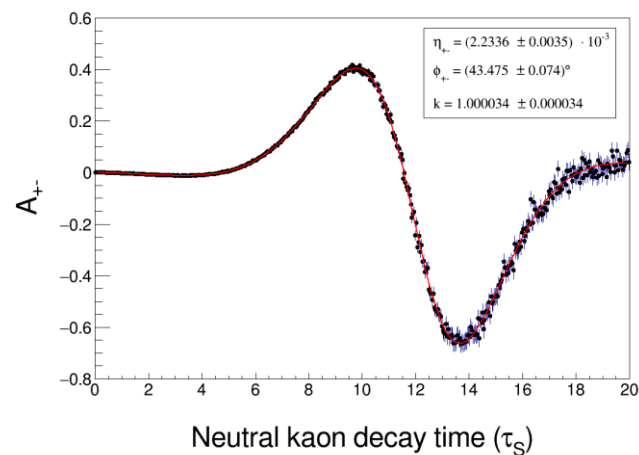
- 使用toyMC生成信号
- 根据inclusive MC给出的本底水平与分布混入本底
- 根据预估的本底分布将本底扣除



输入输出检查

$$|\eta_{+-}| = (2.232 \pm 0.011) \times 10^{-3}$$
$$\phi_{+-} = 43.4^\circ \pm 0.5^\circ \quad \text{PDG average}$$

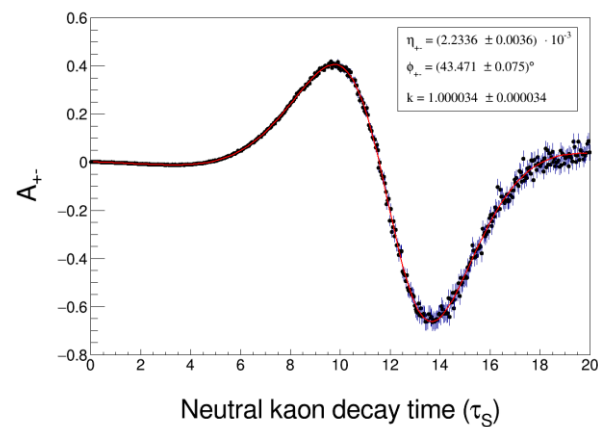
纯信号



$$\eta_{\pm} = (2.2336 \pm 0.0035) \times 10^{-3}$$
$$\phi_{\pm} = (43.475 \pm 0.074)^\circ$$

无偏MC

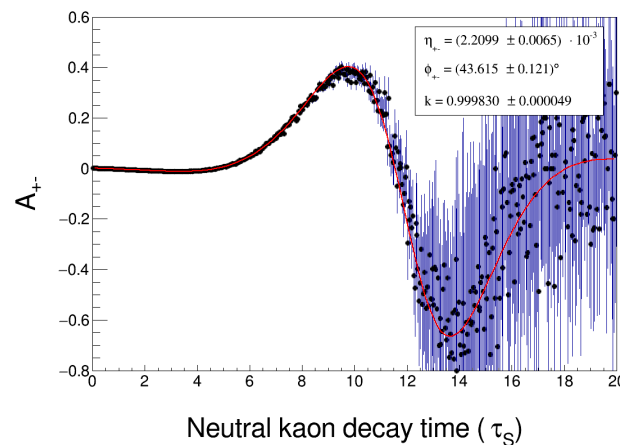
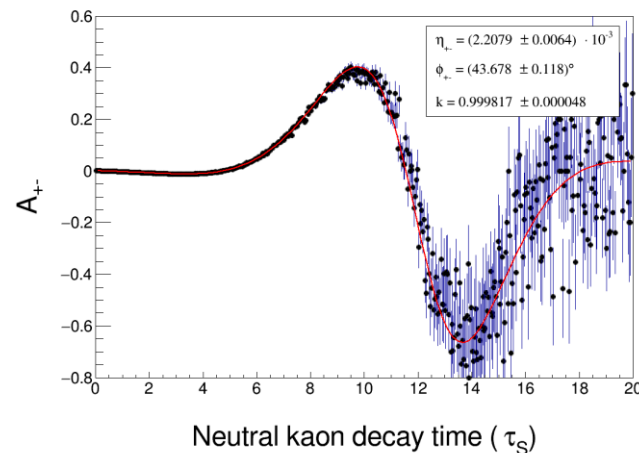
考虑本底



$$\eta_{\pm} = (2.2336 \pm 0.0036) \times 10^{-3}$$
$$\phi_{\pm} = (43.471 \pm 0.075)^\circ$$

$$\eta_{\pm} = (2.2079 \pm 0.0064) \times 10^{-3}$$
$$\phi_{\pm} = (43.678 \pm 0.118)^\circ$$

加入测量误差与效率



$$\eta_{\pm} = (2.2099 \pm 0.0065) \times 10^{-3}$$
$$\phi_{\pm} = (43.615 \pm 0.121)^\circ$$

Summary

- 对在STCF 上测量 $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-$ 中CP破坏参数 $|\eta_{\pm}|$ 及其相位 $\phi_{\pm}$ 做了预研。预期精度相比PDG 现有平均值大幅提高。
- 正在转入OSCAR框架以对STCF的测量性能进行进一步的研究。

谢谢!