



НАЦИОНАЛЬНЫЙ ИССЛЕДОВАТЕЛЬСКИЙ
УНИВЕРСИТЕТ

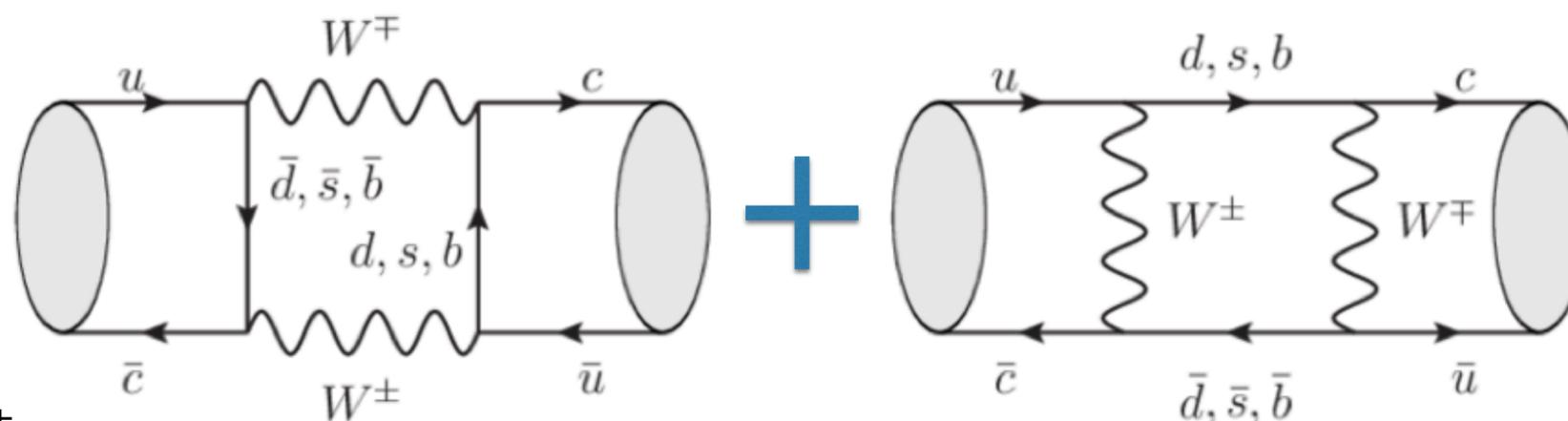
Лаборатория Физики Высоких Энергий ВШЭ
Лаборатория Тяжелых Кварков и Лептонов ФИАН

ИЗМЕРЕНИЕ СИЛЬНОЙ ФАЗЫ В РАСПАДАХ ОЧАРОВАННЫХ АДРОНОВ В ЭКСПЕРИМЕНТАХ VELLE II И C-TAU - ФАБРИКЕ

Попов Виталий

Новосибирск, 2020

МОТИВАЦИЯ: D-СМЕШИВАНИЕ



$$x = \frac{\Delta M}{\Gamma}, \quad y = \frac{\Delta \Gamma}{2\Gamma}$$

$$D^{*\pm} \rightarrow D^0 (\rightarrow K^\mp \pi^\pm) \pi_s^\pm$$

Вероятности распада для тагированного D0

$$|D_{phys}^0(t)\rangle = g_+(t)|D^0\rangle - \left(\frac{q}{p}\right)_D g_-(t)|\bar{D}^0\rangle,$$

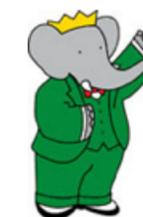
$$|\bar{D}_{phys}^0(t)\rangle = g_+(t)|\bar{D}^0\rangle - \left(\frac{p}{q}\right)_D g_-(t)|D^0\rangle,$$

$$R^+(t) = \left(r_D + \left|\frac{q}{p}\right| \sqrt{r_D} (y' \cos \phi_D - x' \sin \phi_D) \Gamma t + \left|\frac{q}{p}\right|^2 \frac{(\Gamma t)^2}{4} (x^2 + y^2) \right) e^{-\Gamma t},$$

$$R^-(t) = \left(\bar{r}_D + \left|\frac{p}{q}\right| \sqrt{\bar{r}_D} (y' \cos \phi_D + x' \sin \phi_D) \Gamma t + \left|\frac{p}{q}\right|^2 \frac{(\Gamma t)^2}{4} (x^2 + y^2) \right) e^{-\Gamma t},$$

$$x' \equiv x \cos(\delta_{K\pi}) + y \sin(\delta_{K\pi});$$

$$y' \equiv y \cos(\delta_{K\pi}) - x \sin(\delta_{K\pi});$$



МОТИВАЦИЯ: D-СМЕШИВАНИЕ

Phys. Rev. D **86**,112001(2012)

Mode	Correlated	Uncorrelated
$K^- \pi^+$	$1 + R_{WS}$	$1 + R_{WS}$
S_+	2	2
S_-	2	2
Y_k	$1 + Q_k$	$1 + Q_k$
$K^- \pi^+, K^- \pi^+$	$R_M[(1 + R_{WS})^2 - 4r \cos \delta(r \cos \delta + y)]$	R_{WS}
$K^- \pi^+, K^+ \pi^-$	$(1 + R_{WS})^2 - 4r \cos \delta(r \cos \delta + y)$	$1 + R_{WS}^2$
$K^- \pi^+, S_+$	$1 + R_{WS} + 2r \cos \delta + y$	$1 + R_{WS}$
$K^- \pi^+, S_-$	$1 + R_{WS} - 2r \cos \delta - y$	$1 + R_{WS}$
$K^- \pi^+, \ell^-$	$1 - ry \cos \delta - rx \sin \delta$	1
$K^- \pi^+, \ell^+$	$r^2(1 - ry \cos \delta - rx \sin \delta)$	R_{WS}
$K^- \pi^+, \bar{Y}_i$	$(1 + R_{WS})(1 + Q_i) - r^2 - \rho_i^2$ $-2(r \cos \delta + y)(\rho_i c_i + y) + 2r \sin \delta \rho_i s_i$	$1 + R_{WS} Q_i$
$K^- \pi^+, Y_i$	$(1 + R_{WS})(1 + Q_i) - 1 - r^2 \rho_i^2$ $-2(r \cos \delta + y)(\rho_i c_i + y) - 2r \sin \delta \rho_i s_i$	$R_{WS} + Q_i$

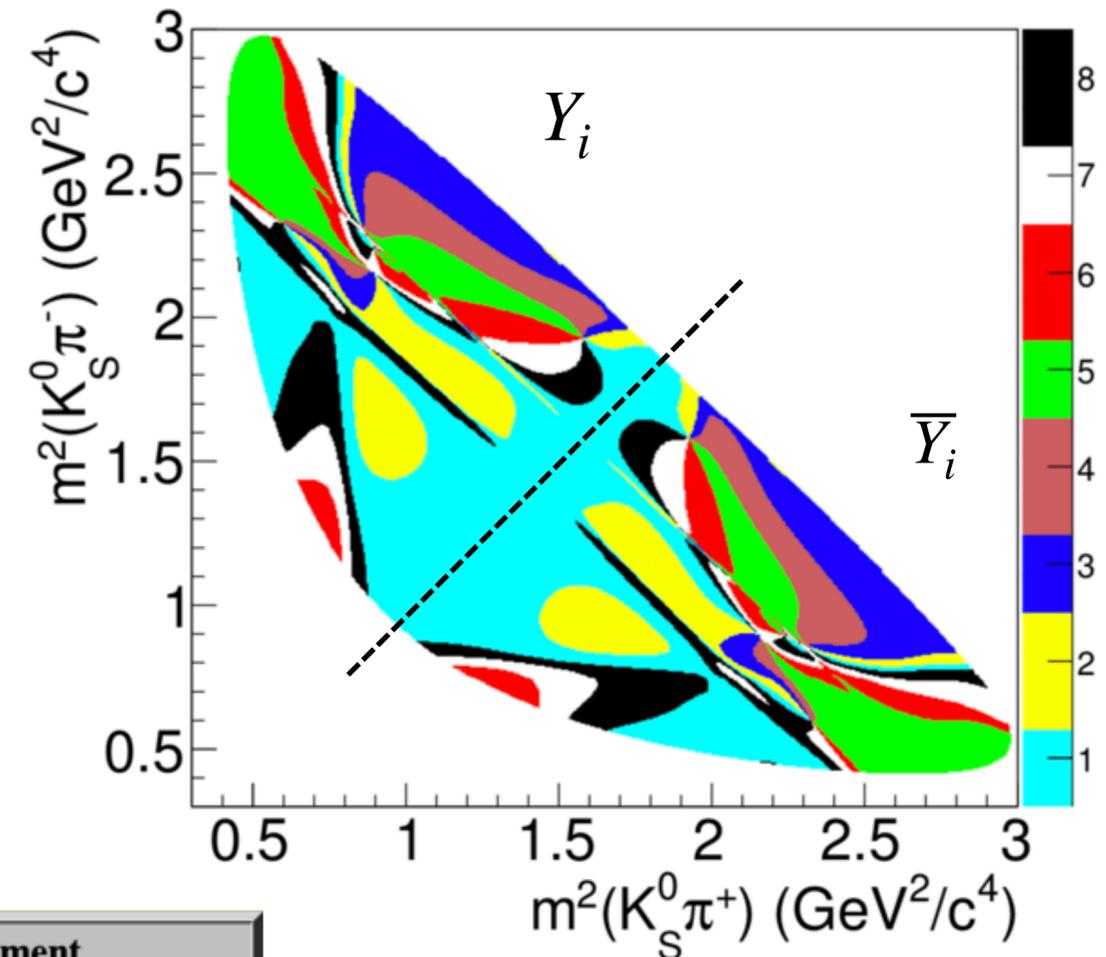
$\cos \delta$

$\sin \delta$



Статус измерений HFLAV

Year	Experiment	Parameter	Fit Result	Comment
2012	CLEO-c	R_D	$(0.533 \pm 0.107 \pm 0.045)\%$	0.82 fb^{-1} at $\Psi(3770)$ resonance
		x^2	$(0.06 \pm 0.23 \pm 0.11)\%$	
		y	$(4.2 \pm 2.0 \pm 1.0)\%$	
		$\cos \delta$	$0.81^{+0.22}_{-0.18} \text{ }^{+0.07}_{-0.05}$	
		$\sin \delta$	$-0.01 \pm 0.41 \pm 0.04$	
2014	BESIII	$\cos \delta$	$1.02 \pm 0.11 \pm 0.06 \pm 0.01$	2.92 fb^{-1} at $\Psi(3770)$ resonance



МОТИВАЦИЯ: SU(3) В РАСПАДАХ D-МЕЗОНА

Заменяем $K^- \pi^+$ на $\bar{K}^0 \pi^0$, тогда $Arg(A_{D^0 \rightarrow \bar{K}^0 \pi^0}) \stackrel{?}{=} Arg(A_{D^0 \rightarrow K^- \pi^+})$

$$[D_3]^i = \begin{pmatrix} D^0 \\ D^+ \\ D_s^+ \end{pmatrix}, \quad [P_8]_j^i = \begin{pmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}}\pi_0 + \frac{1}{\sqrt{6}}\eta_8 & \pi^+ & K^+ \\ \pi^- & -\frac{1}{\sqrt{2}}\pi_0 + \frac{1}{\sqrt{6}}\eta_8 & K^0 \\ K^- & \bar{K}^0 & -\sqrt{\frac{2}{3}}\eta_8 \end{pmatrix}$$

Правила сумм:

$$\sqrt{2}A_{D^0 \rightarrow \bar{K}^0 \pi^0} + A_{D^0 \rightarrow K^- \pi^+} - A_{D^+ \rightarrow \bar{K}^0 \pi^+} = 0$$

$$\sqrt{2}A_{D^0 \rightarrow K^0 \pi^0} + A_{D^0 \rightarrow K^+ \pi^-} + \sqrt{2}A_{D^+ \rightarrow K^+ \pi^0} - A_{D^+ \rightarrow K^0 \pi^+} = 0$$

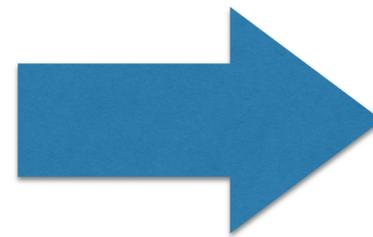
SU(2)

$$\varepsilon = \frac{m_u - m_d}{\Lambda_{QCD}} \sim 1\%$$

ЭВОЛЮЦИЯ КАОНОВ

$$i \frac{\partial}{\partial t} \begin{pmatrix} K^0(t) \\ \bar{K}^0(t) \end{pmatrix} = \left(\mathbf{M} - \frac{i}{2} \mathbf{\Gamma} \right) \begin{pmatrix} K^0(t) \\ \bar{K}^0(t) \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} |K^0(t)\rangle &= \frac{1-\varepsilon}{\sqrt{2}} e^{-i\lambda_S t} |K_S\rangle + \frac{1-\varepsilon}{\sqrt{2}} e^{-i\lambda_L t} |K_L\rangle \\ |\bar{K}^0(t)\rangle &= \frac{1+\varepsilon}{\sqrt{2}} e^{-i\lambda_S t} |K_S\rangle - \frac{1+\varepsilon}{\sqrt{2}} e^{-i\lambda_L t} |K_L\rangle \end{aligned}$$



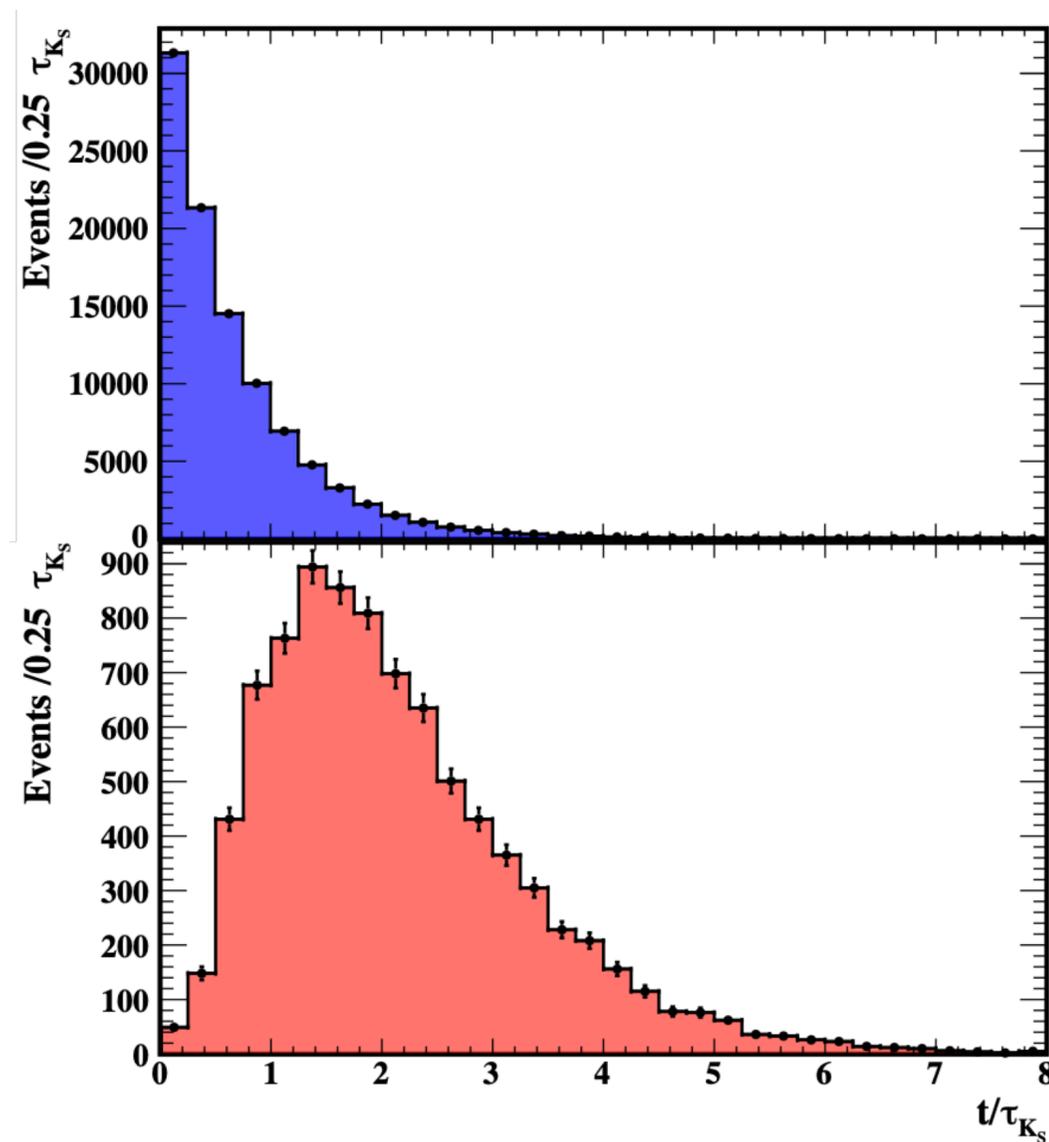
$$\begin{aligned} |K^0(t)\rangle &= g_+(t) |K^0\rangle + \left(\frac{q}{p}\right) g_-(t) |\bar{K}^0\rangle \\ |\bar{K}^0(t)\rangle &= g_+(t) |\bar{K}^0\rangle - \left(\frac{p}{q}\right) g_-(t) |K^0\rangle \end{aligned}$$

$$g_{\pm} = \frac{1}{2} \left(e^{-i(m_1 - \frac{i}{2}\Gamma_1)t} \pm e^{-i(m_2 - \frac{i}{2}\Gamma_2)t} \right)$$

Тогда для зависимой от времени вероятности распада .. рожденной смеси

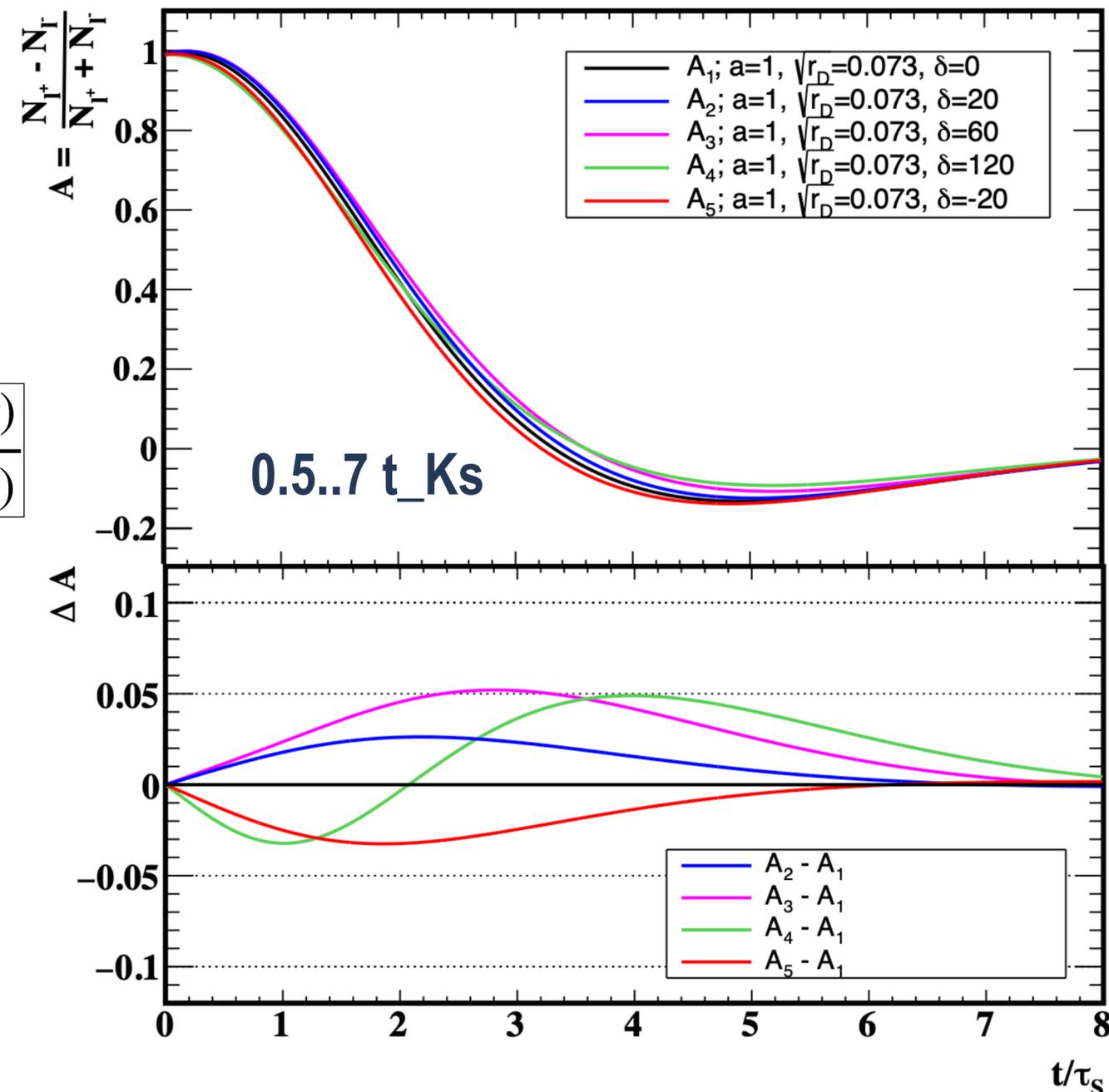
$$\begin{aligned} R(t) &= \frac{1}{4} e^{-\Gamma t} |A_{l^+}|^2 \left[|a|^2 K_+ + \left| b \frac{p}{q} \right|^2 K_- + 2 \operatorname{Re} \left\{ ab \frac{p}{q} (1 - e^{\Delta\Gamma t} + 2i \sin(\Delta m t) e^{\frac{1}{2}\Delta\Gamma t}) \right\} \right] \\ \bar{R}(t) &= \frac{1}{4} e^{-\Gamma t} |A_{l^-}|^2 \left[|a|^2 K_- + \left| b \frac{q}{p} \right|^2 K_+ + 2 \operatorname{Re} \left\{ ab \frac{q}{p} (1 - e^{\Delta\Gamma t} + 2i \sin(\Delta m t) e^{\frac{1}{2}\Delta\Gamma t}) \right\} \right] \end{aligned}$$

ЭВОЛЮЦИЯ КАОНОВ

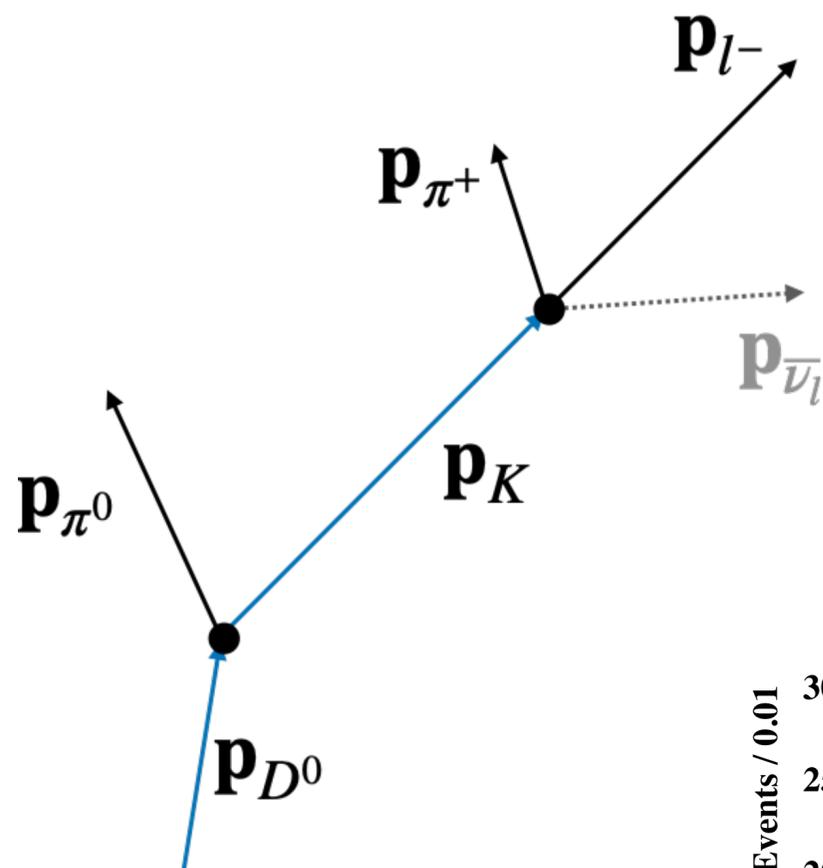


$$A \equiv \frac{N_l^{RS}(t) - N_l^{WS}(t)}{N_l^{RS}(t) + N_l^{WS}(t)}$$

Асимметрия распадов D



РЕКОНСТРУКЦИЯ



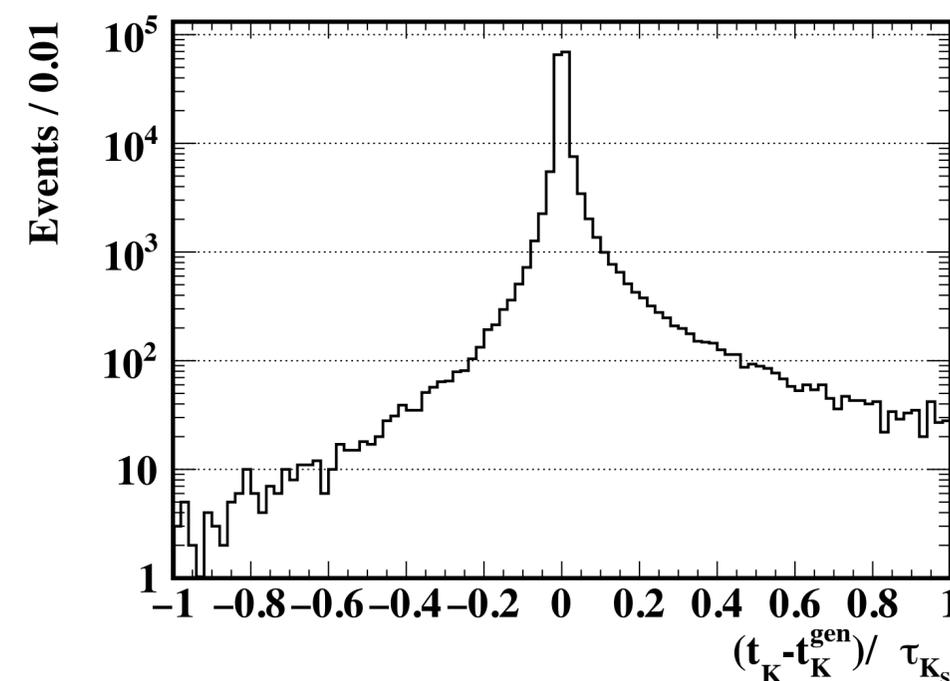
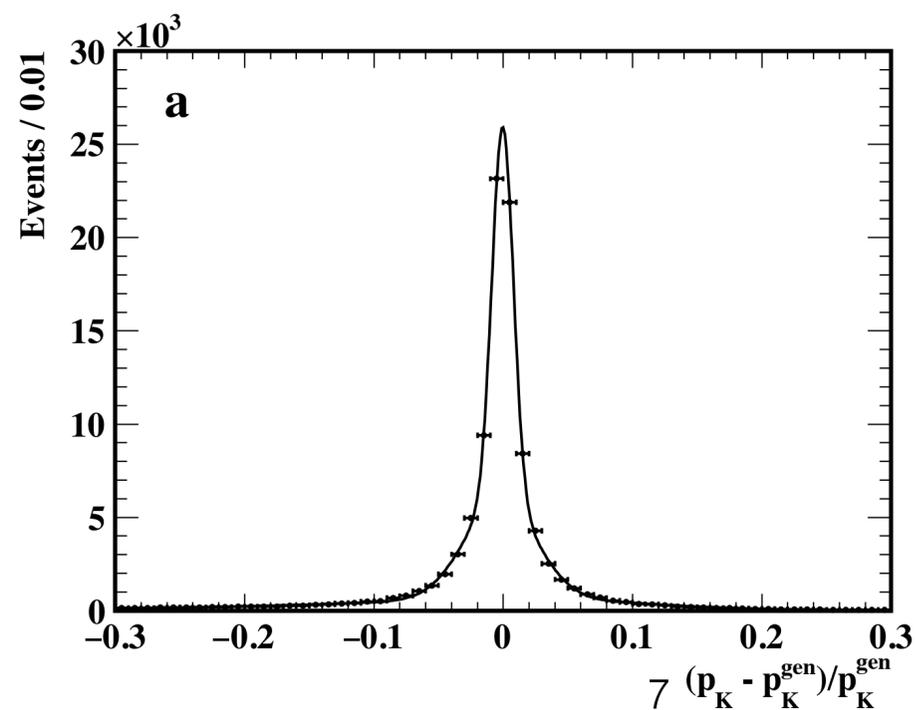
Закон сохранения 4-импульса:

$$(P_{K^0} - P_{\pi l})^2 = P_{\nu}^2$$

Выбор из двух решений для импульса каона

$$|\mathbf{p}_K|_{(1,2)} = - \frac{p_{\pi l} \cos \theta (m_K^2 + m_{\pi l}^2) \pm \sqrt{t}}{2(p_{\pi l}^2 \cos^2 \theta - E_{\pi l}^2)},$$

$$t = E_{\pi l}^2 (4m_K^2 p_{\pi l}^2 \cos^2 \theta - 4E_{\pi l}^2 m_K^2 + m_{\pi l}^2 (m_K^2 + m_{\pi l}^2))$$



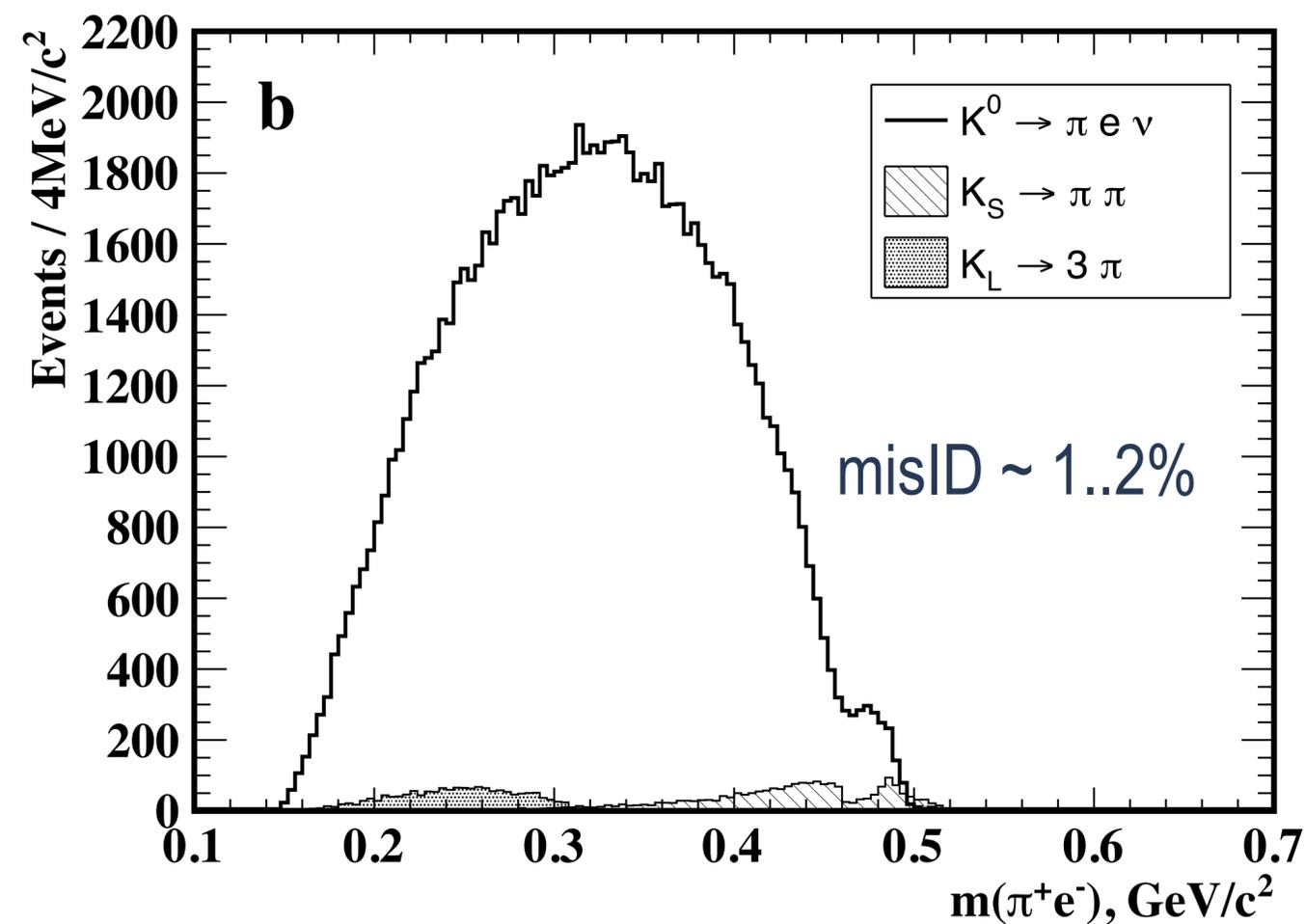
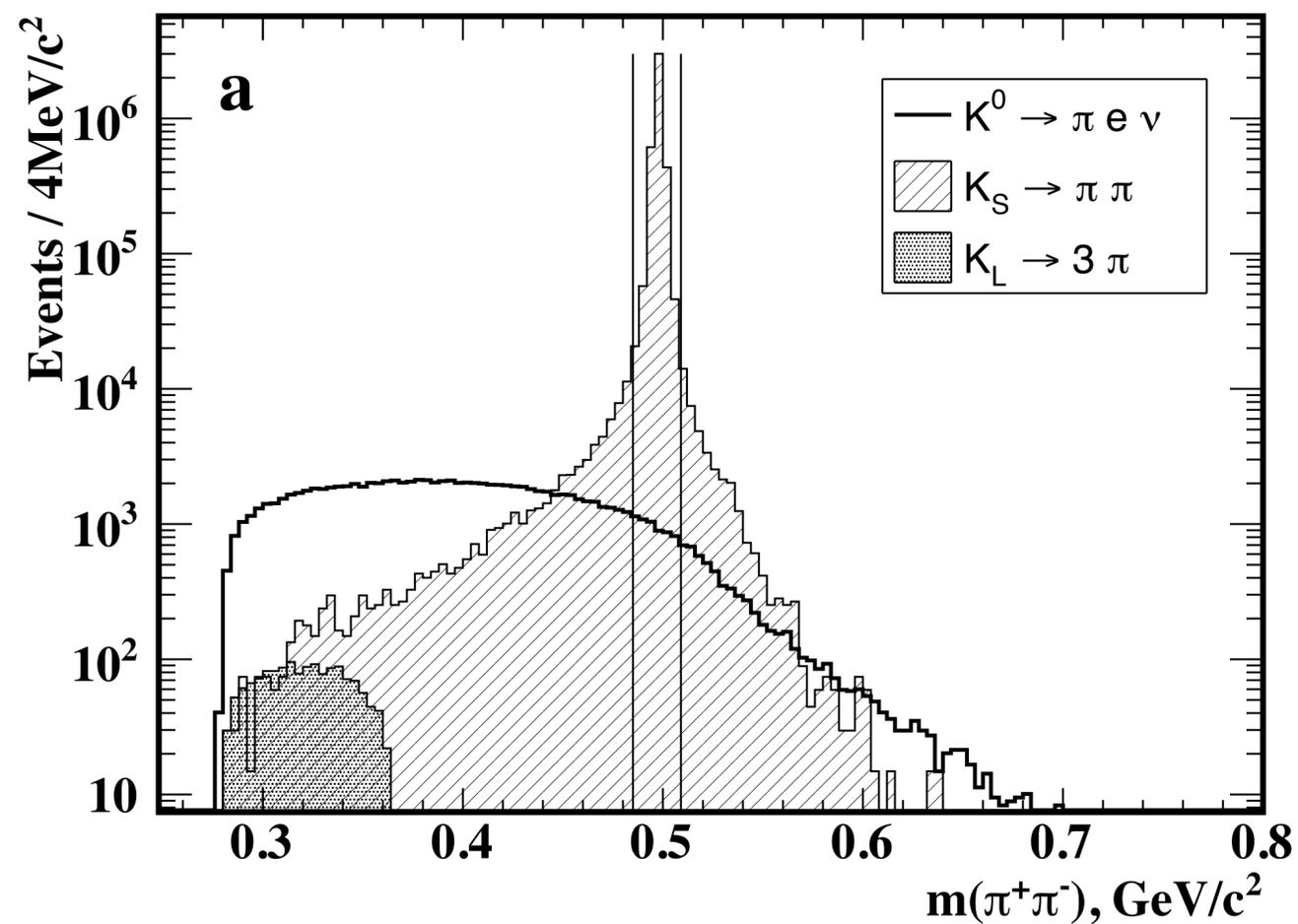
ИСТОЧНИКИ ФОНА

- Фон из первичной вершины;

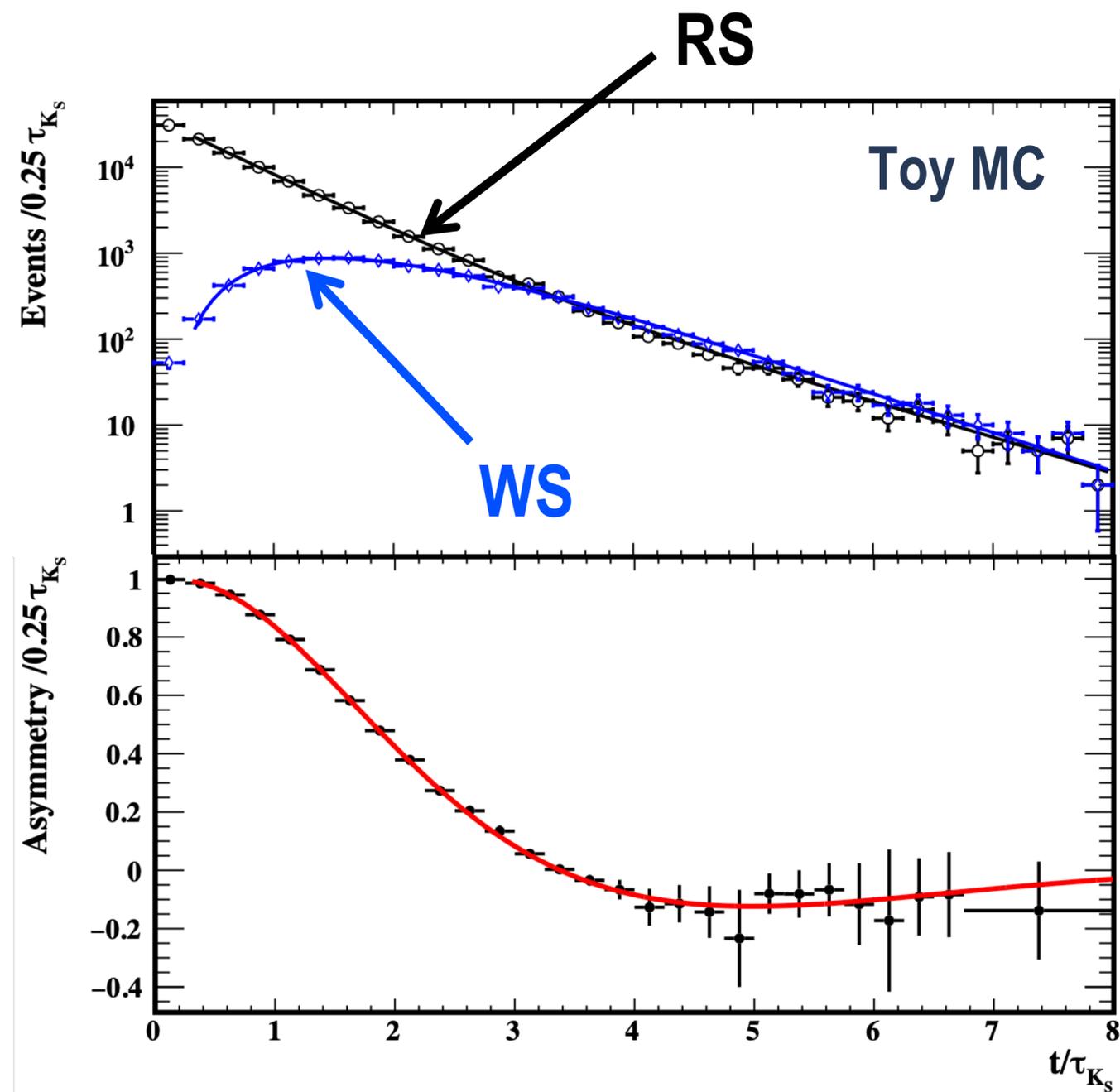
Малый вклад фазы на малых временах жизни K^0 .

- Истинные вторичные вершины;

K_S вето + eID

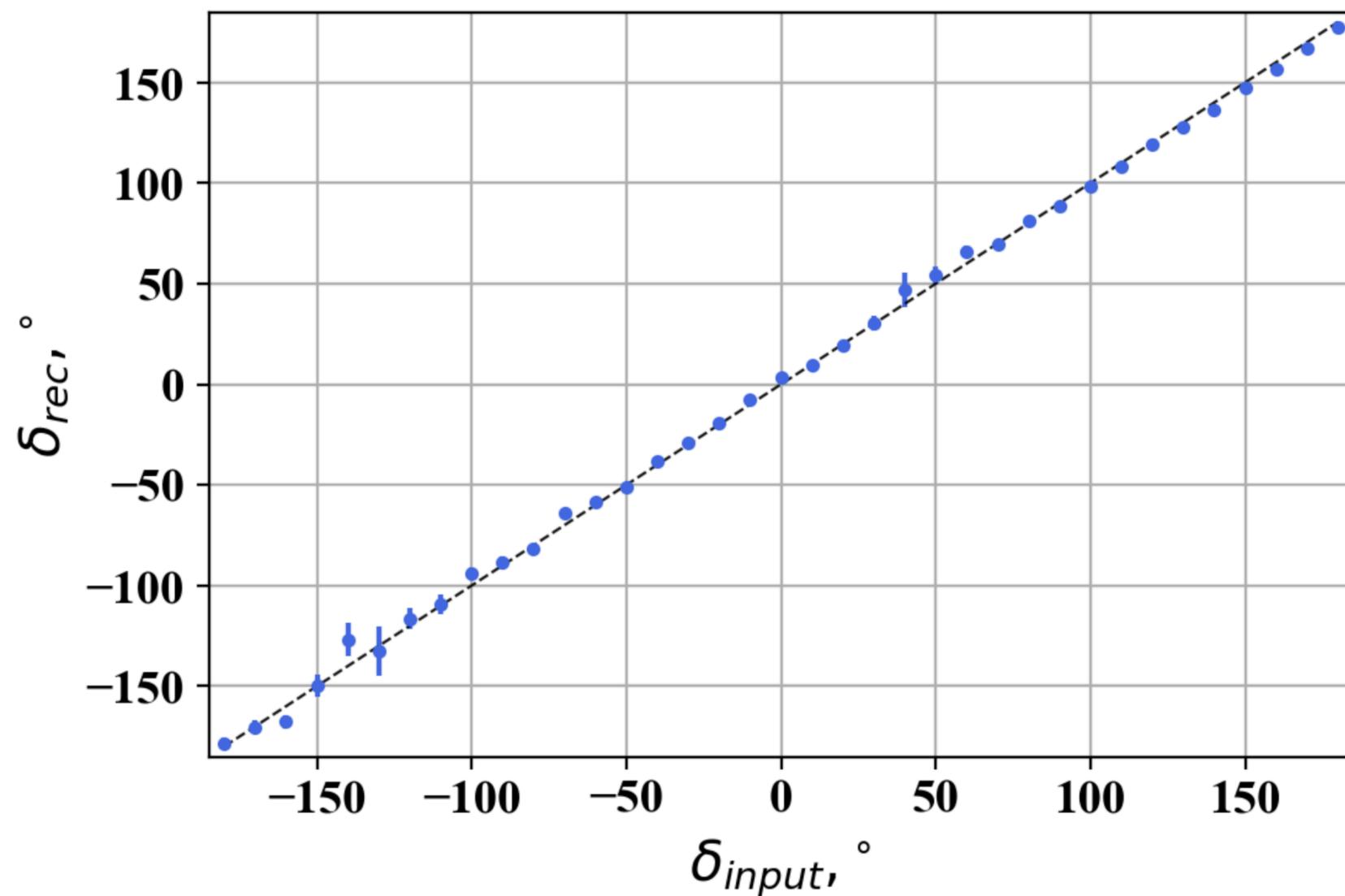


ОЦЕНКА ПОТЕНЦИАЛЬНОЙ ТОЧНОСТИ



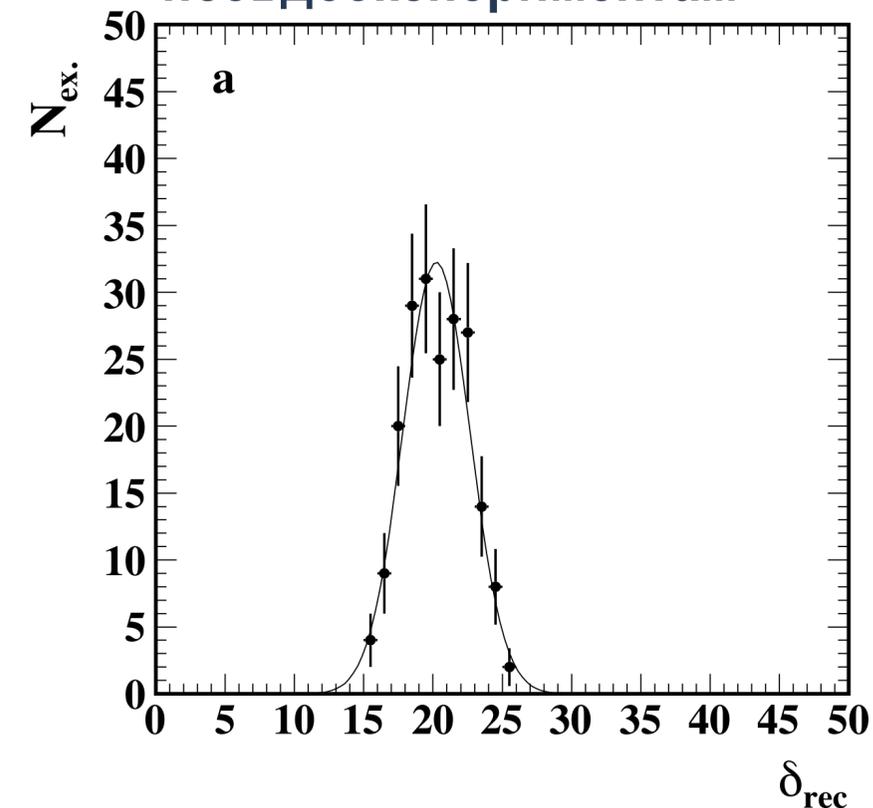
- Значения сильной фазы в интервале $[-180, 180]$;
- 200 псевдоэкспериментов для каждого значения сильной фазы;
- Каждый образец данных 100k событий (50 аб^{-1});

РЕЗУЛЬТАТЫ ПОДГОНКИ



- Результаты подгонки показали, что извлечь сильную фазу на полной статистике эксперимента Belle II возможно;
- В восстановлении delta отсутствует bias.

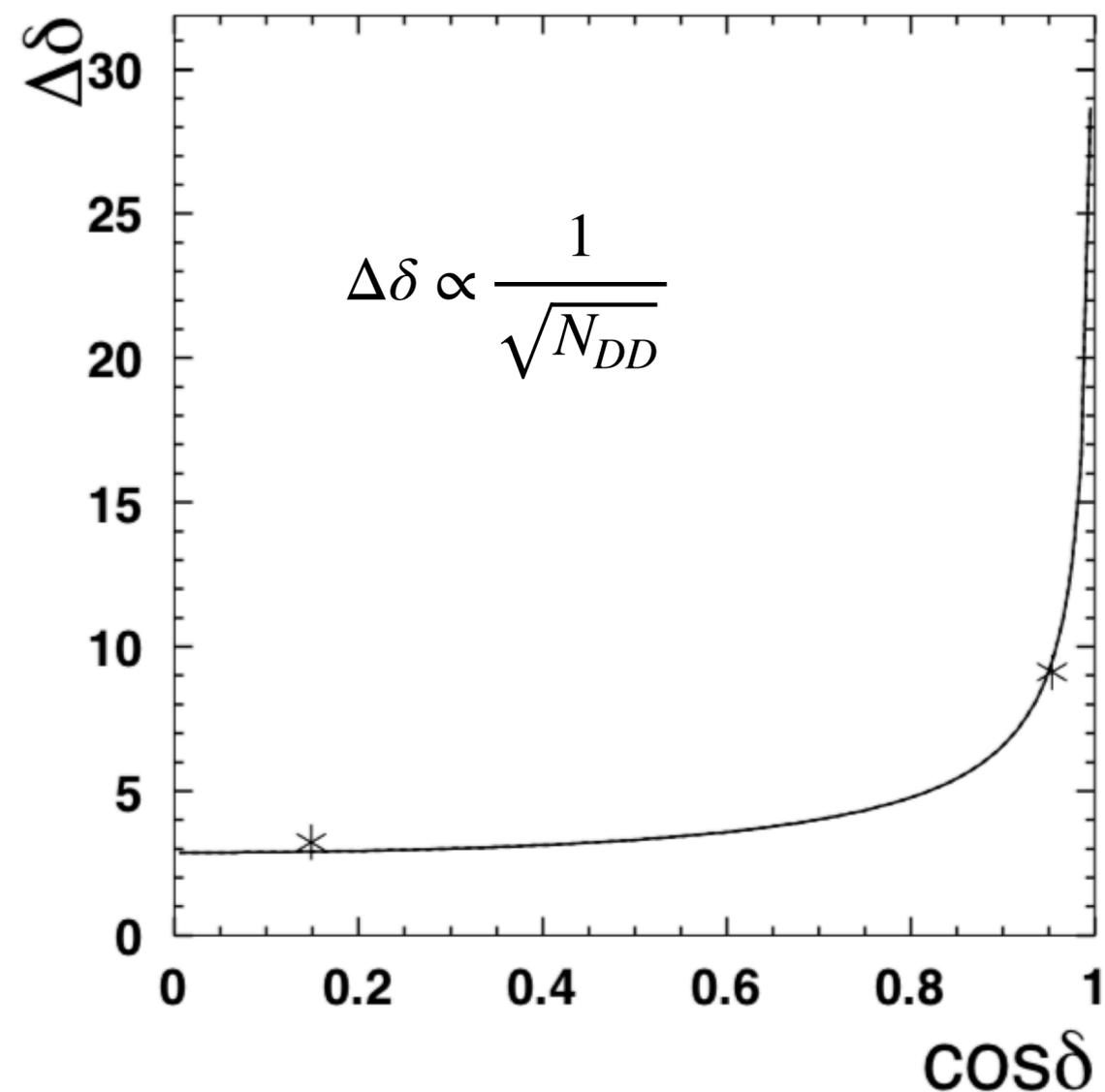
Пример для 20deg по 200 псевдоэкспериментам



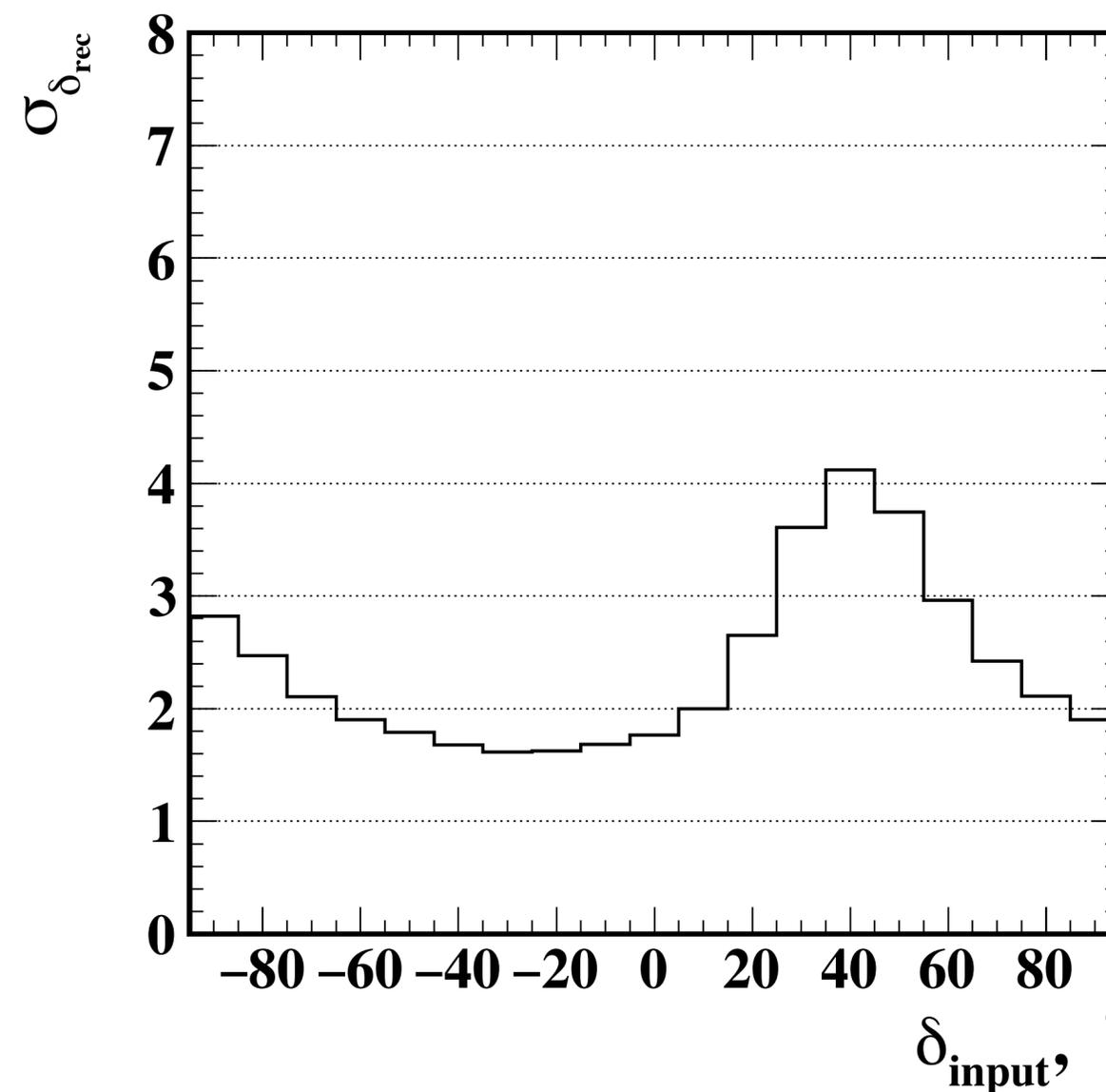


СРАВНЕНИЕ РЕЗУЛЬТАТОВ

BES III (72x10⁶ DD)

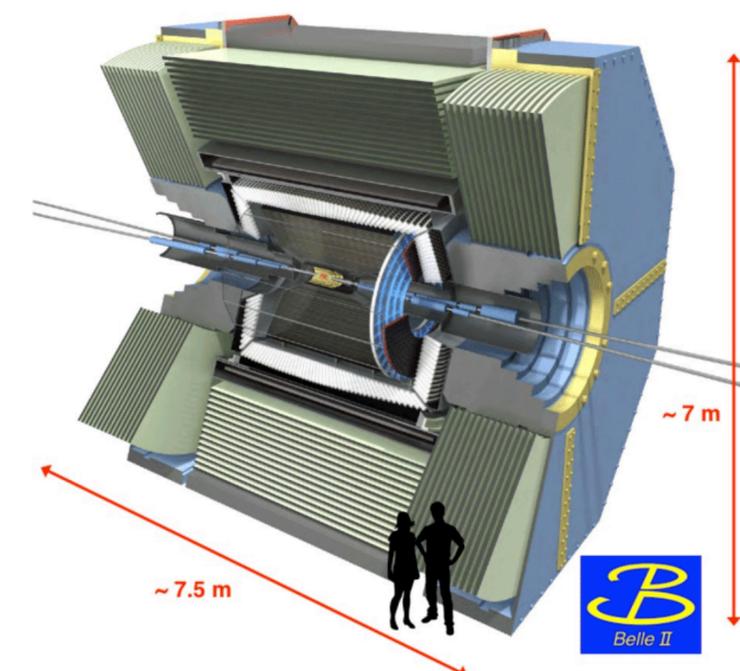
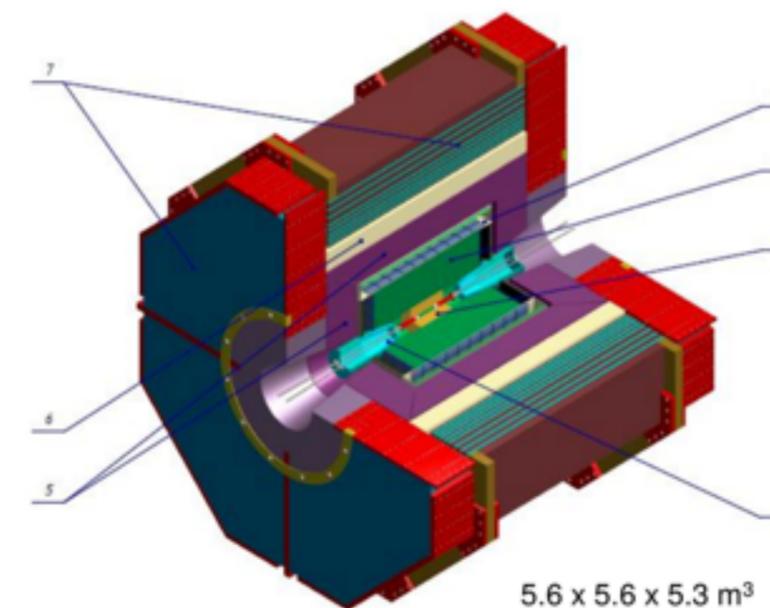


BELLE II (50 ab⁻¹)



ИЗМЕРЕНИЯ НА С-ТАУ ФАБРИКЕ

Требование	Super Charm-tau factory	Belle II
Хорошее пространственное разрешение, ~100мкм	✓	✓
Большая дрейфовая камера/ Мягкие K0	✓	±
Хорошее импульсное разрешение, $\sigma_p/p < 0.01$	✓	✓
Работа с D+	✓	-



$$\sqrt{2}A_{D^0 \rightarrow \bar{K}^0 \pi^0} + A_{D^0 \rightarrow K^- \pi^+} - A_{D^+ \rightarrow \bar{K}^0 \pi^+} = 0$$

$$\sqrt{2}A_{D^0 \rightarrow K^0 \pi^0} + A_{D^0 \rightarrow K^+ \pi^-} + A_{D^+ \rightarrow K^+ \pi^0} - A_{D^+ \rightarrow K^0 \pi^+} = 0$$

СЛУЧАЙ СКОРРЕЛИРОВАННОЙ ПАРЫ D-МЕЗОНОВ

$$\psi(3770) \rightarrow D\bar{D} : \quad \Psi_{D\bar{D}} = \frac{1}{\sqrt{2}} [|D_{phys}^0(t)\rangle |\bar{D}_{phys}^0(t)\rangle - |\bar{D}_{phys}^0(t)\rangle |D_{phys}^0(t)\rangle]$$

	J/ψ	$\psi(2S)$	$\psi(3770)$	$\psi(4040)$	$\psi(4160)$	$\psi(4415)$
$M, \text{ GeV}$	3.097	3.686	3.773	4.039	4.191	4.421
$\Gamma, \text{ MeV}$	0.093	0.286	27.2	80	70	62
$\sigma, \text{ nb}$	~ 3400	~ 640	~ 6	~ 10	~ 6	~ 4
$L, \text{ fb}^{-1}$	300	150	300	10	100	25
N	10^{12}	10^{11}	2×10^9	10^8	6×10^8	10^8

$$R(f_1, t_1, f_2, t_2) \propto |A_{f_1}|^2 |A_{f_2}|^2 e^{-\Gamma(t_1+t_2)} \left[\frac{1}{2} |\xi + \zeta|^2 e^{-\Delta\Gamma/2(t_2-t_1)} + \frac{1}{2} |\xi - \zeta|^2 e^{\Delta\Gamma/2(t_2-t_1)} - (|\xi|^2 - |\zeta|^2) \cos(\Delta m(t_2 - t_1)) + 2\text{Im}(\xi^* \zeta) \sin(\Delta m(t_2 - t_1)) \right]$$

$$\xi = \left(\frac{p}{q} \right)_D - \left(\frac{q}{p} \right)_D \frac{\bar{A}_{f_1} \bar{A}_{f_2}}{A_{f_1} A_{f_2}} \quad \zeta = \frac{\bar{A}_{f_2}}{A_{f_2}} - \frac{\bar{A}_{f_1}}{A_{f_1}}$$

$$R(t_1, t_2) \propto 2 |A_{K^-\pi^+}|^2 |A_{\bar{K}^0\pi^0}|^2 e^{-\Gamma(t_1+t_2)} \left[\left(r^0 + r^+ - 2\sqrt{r^0 r^+} \cos(\delta^0 - \delta^+) \right) + \left(\left| \frac{p}{q} \right|_D^2 + \left| \frac{q}{p} \right|_D^2 r^0 r^+ - 2\sqrt{r^0} \sqrt{r^+} \cos(\delta^0 + \delta^+) \right) \frac{(\Gamma\Delta t)^2}{4} (x^2 + y^2) + \Gamma\Delta t \Delta_{12} \right]$$

$$\Delta_{12} = \sqrt{r^+} \left(\frac{p}{q_D} x' + \frac{q}{p_D} r^0 y' \right) - \sqrt{r^0} \left(\frac{p}{q_D} x'' + \frac{q}{p_D} r^+ y'' \right)$$



ЗАКЛЮЧЕНИЕ

- Использование полупертоновых распадов K^0 -мезонов позволяет повысить чувствительность к параметрам рождения смеси K^0 -anti K^0 ;
- Метод частичной реконструкции позволяет с достаточным разрешением восстановить импульс и время жизни каона в современных экспериментах – Belle II, Super c-tau;
- Статистики Belle II достаточно для того, чтобы промерить сильную фазу в нейтральной моде с точностью < 4 deg;
- Дополнительные возможности измерений для Super c-tau.



BACKUP SLIDES

МОТИВАЦИЯ: D-СМЕШИВАНИЕ СТАТУС

