

Исследование рождения каонов при
взаимодействиях нейтрино с ядрами в
области энергий около 1 ГэВ

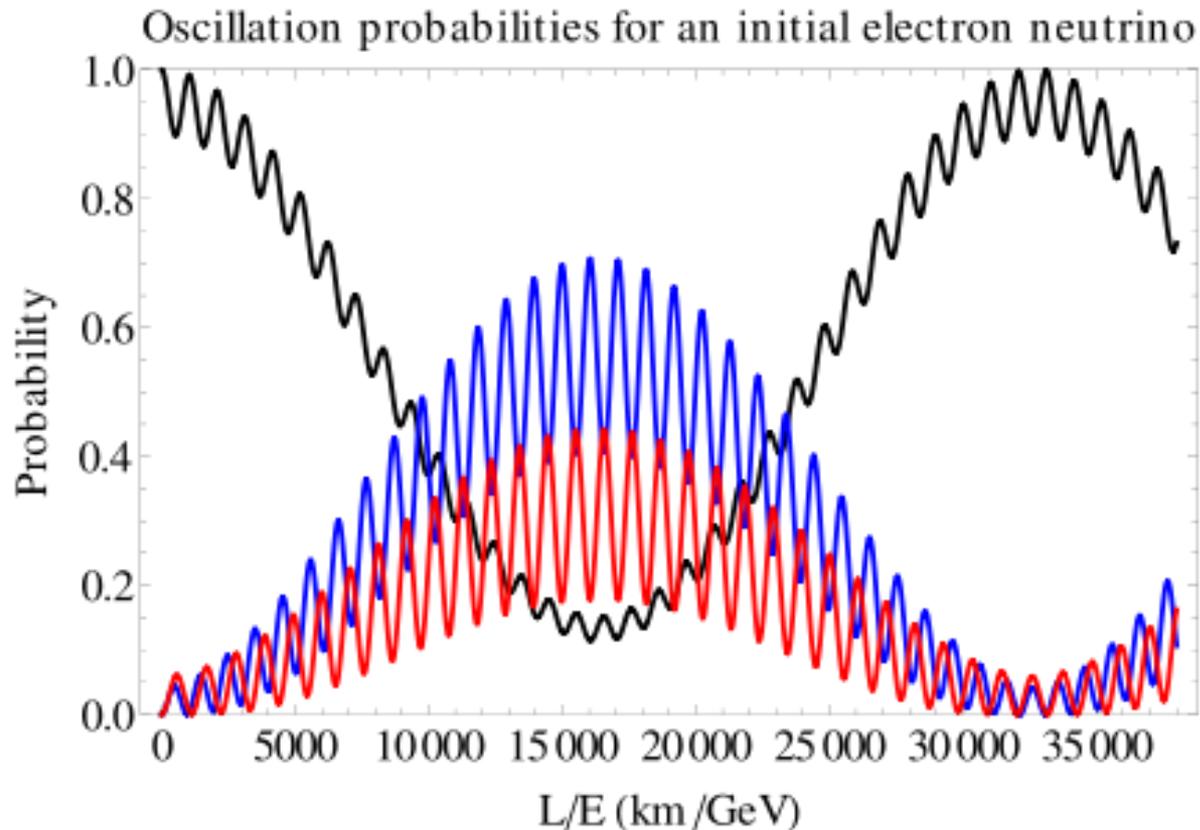
Зыкова А.Е.

Научный руководитель: д. ф.-м. н.,
профессор Куденко Ю.Г.

Троицк, 5 июля 2018 г.

Нейтринные осцилляции

Нобелевская премия 2015 г. «за обнаружение осцилляций нейтрино, которые показали, что нейтрино обладают массой».



Нейтринные осцилляции

Нобелевская премия 2015 г. «за обнаружение осцилляций нейтрино, которые показали, что нейтрино обладают массой».

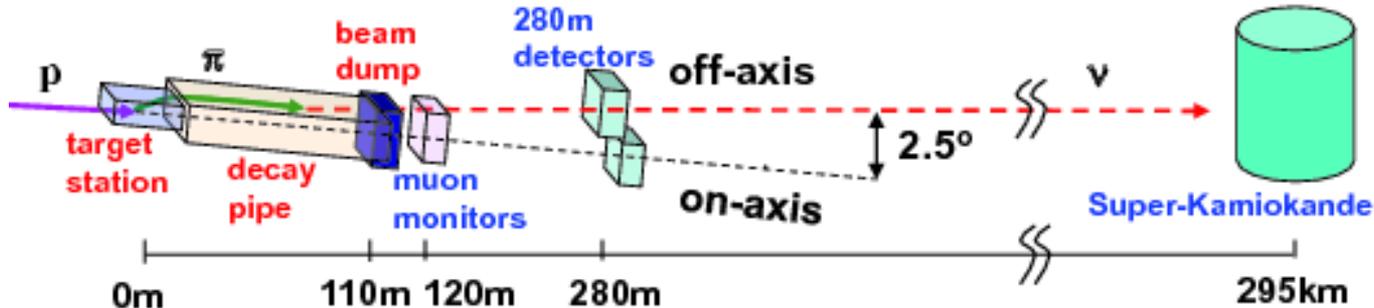
$$P_{\nu_{\mu}\nu_{\mu}} \approx 1 - \sin^2(2\theta_{23}) \cos^4(\theta_{13}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{13}^2 L}{4E}\right) - P_{\nu_{\mu}\nu_e},$$

$$P_{\nu_{\mu}\nu_e} \approx \sin^2(2\theta_{13}) \sin^2(\theta_{23}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{13}^2 L}{4E}\right),$$

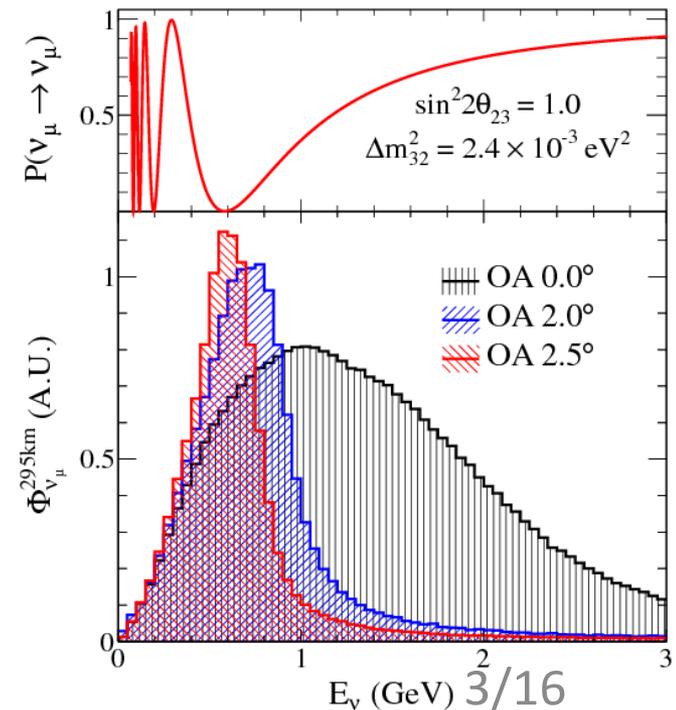
$$P_{\nu_{\mu}\nu_{\tau}} = 1 - P_{\nu_{\mu}\nu_e} - P_{\nu_{\mu}\nu_{\mu}}.$$

L -- пролетная база, θ_{ij} -- углы смешивания, E -- энергия нейтрино, Δm_{ij}^2 -- разность квадратов масс нейтрино

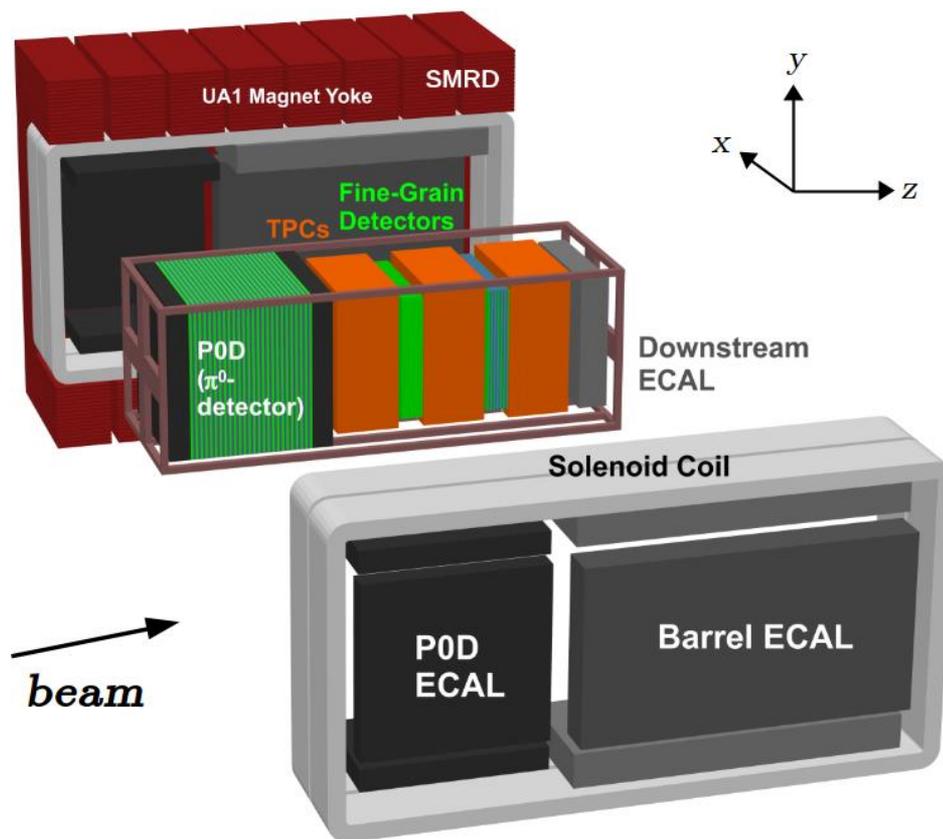
Эксперимент T2K (Токай-то-Камиока)



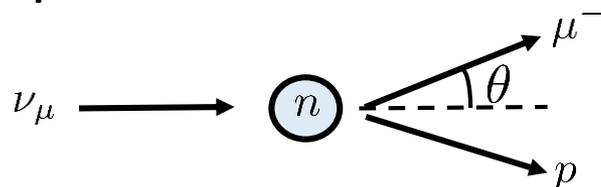
- J-PARC – протонный ускоритель 30 ГэВ;
- ND280 – ближний детектор (280 м от графитовой мишени);
- Super-Kamiokande – дальний детектор (295 км);
- 2.5° отклонение от направления пучка;



Ближний детектор – ND280 (off-axis)

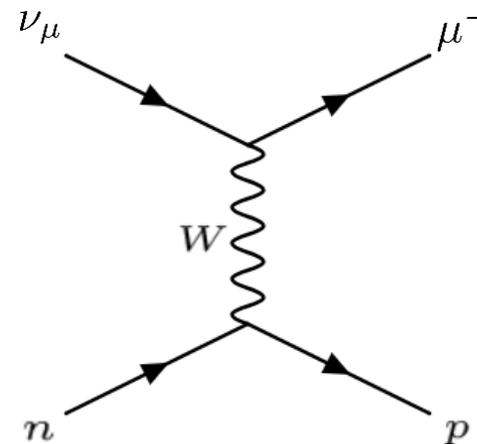


Реакция ССQE

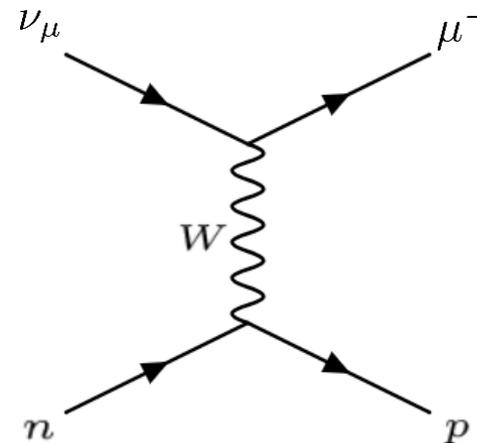
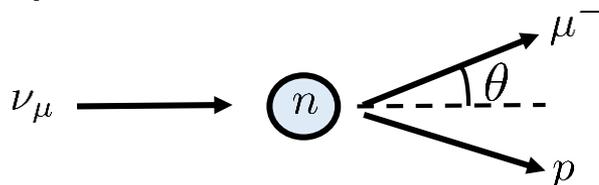


$$(E_\nu - E_\mu + m_n, \mathbf{p}_\nu - \mathbf{p}_\mu) = (E_p, \mathbf{p}_p)$$

$$E_\nu = \frac{m_p^2 - m_\mu^2 - m_n^2 + 2m_n E_\mu}{2(m_n + p_\mu \cos \theta - E_\mu)}$$

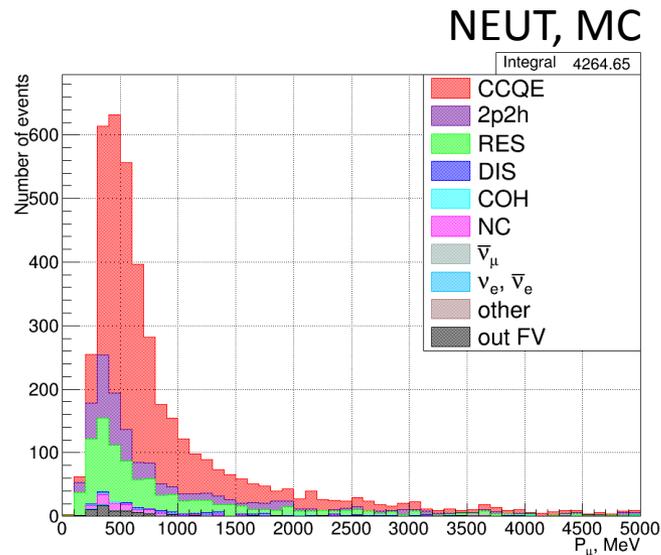
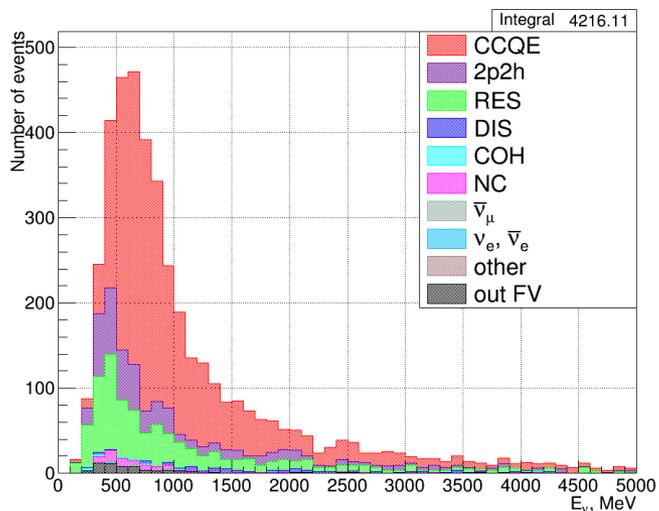


Реакция CCQE

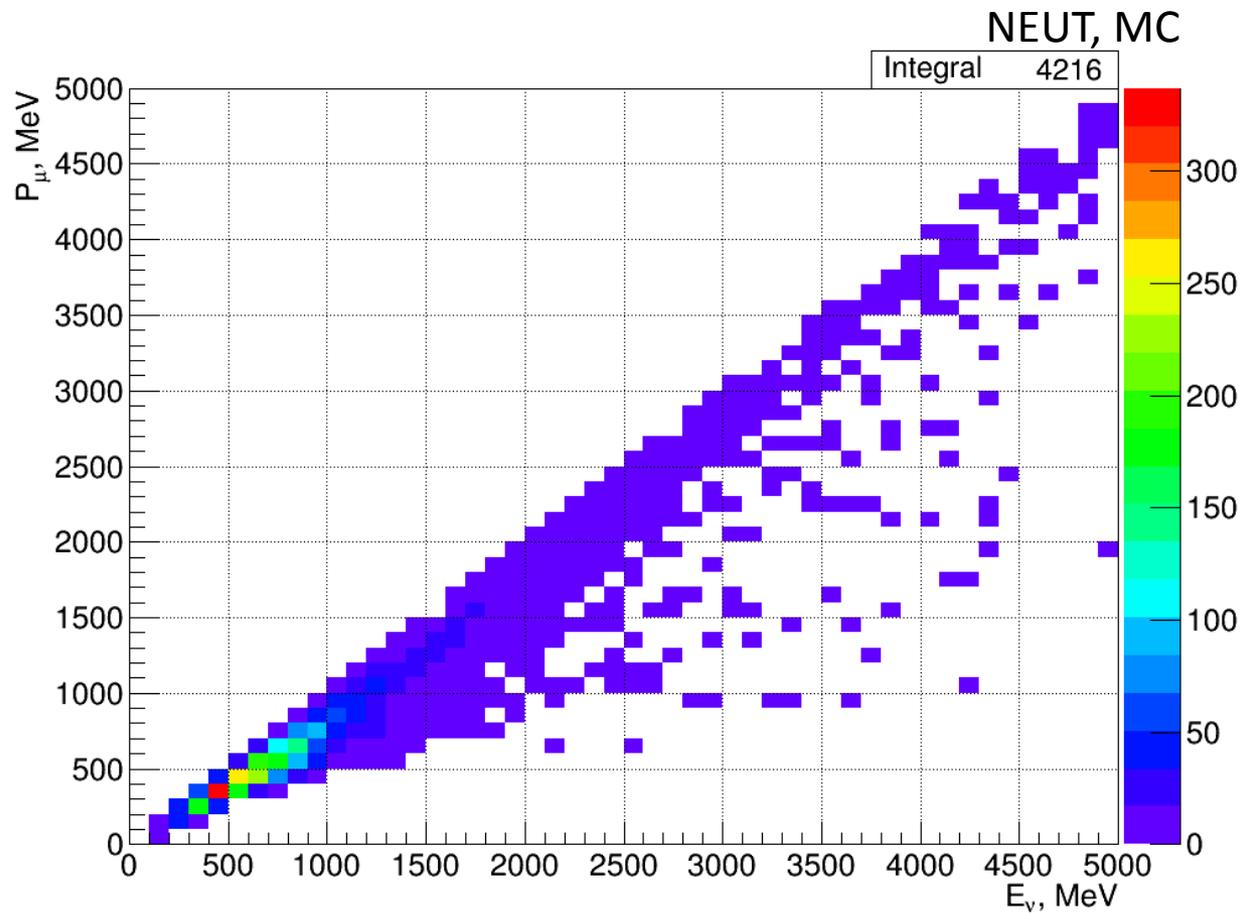


$$(E_\nu - E_\mu + m_n, \mathbf{p}_\nu - \mathbf{p}_\mu) = (E_p, \mathbf{p}_p)$$

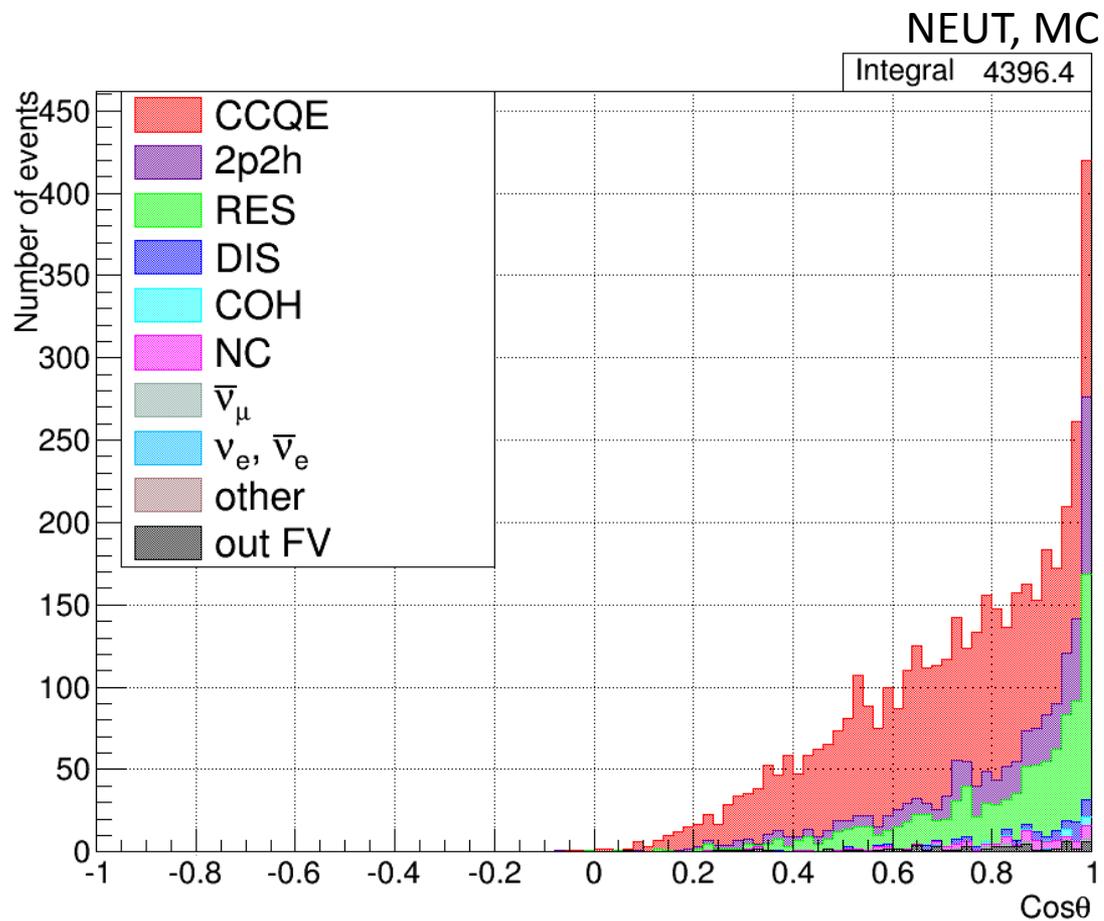
$$E_\nu = \frac{m_p^2 - m_\mu^2 - m_n^2 + 2m_n E_\mu}{2(m_n + p_\mu \cos \theta - E_\mu)}$$



Реакция ССQE



Реакция CCQE

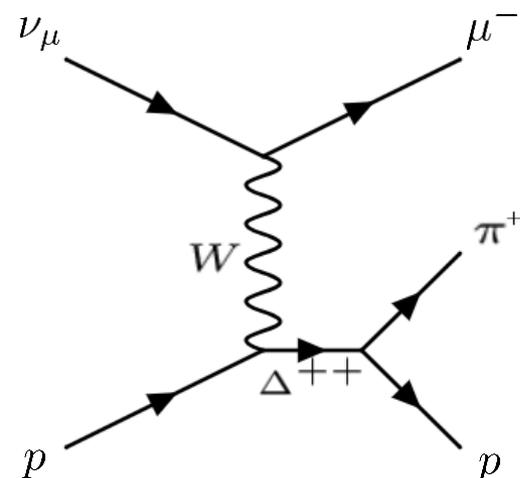


Реакция СС1Рі

$$(E_\nu + m_p - E_\mu, \mathbf{p}_\nu - \mathbf{p}_\mu) = (E_{\Delta^{++}}, \mathbf{p}_{\Delta^{++}})$$

$$E_\nu = \frac{m_{\Delta^{++}}^2 - m_p^2 - m_\mu^2 + 2m_p E_\mu}{2(m_p - E_\mu + p_\mu \cos \theta)}$$

Δ^{++} -- дельта-изобара, ее масса $m_{\Delta^{++}} = 1232$ МэВ

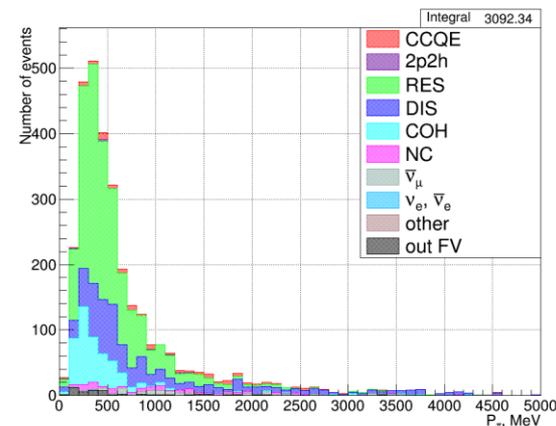
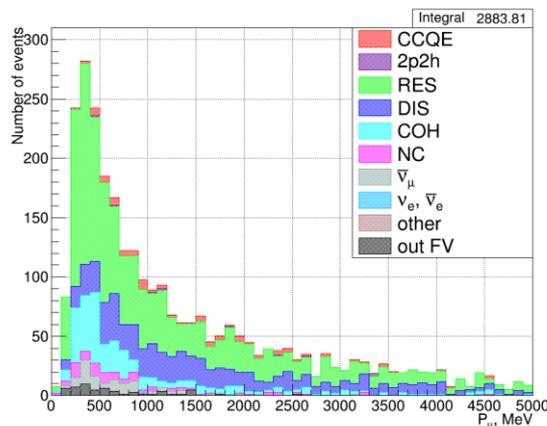
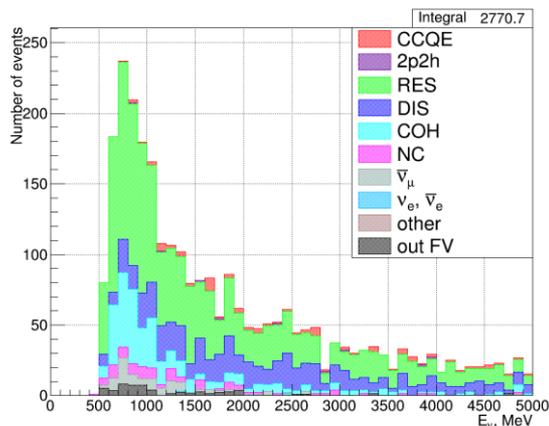
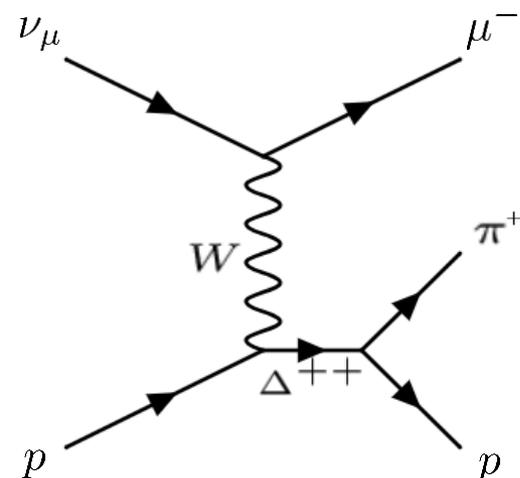


Реакция CC1P1

$$(E_\nu + m_p - E_\mu, \mathbf{p}_\nu - \mathbf{p}_\mu) = (E_{\Delta^{++}}, \mathbf{p}_{\Delta^{++}})$$

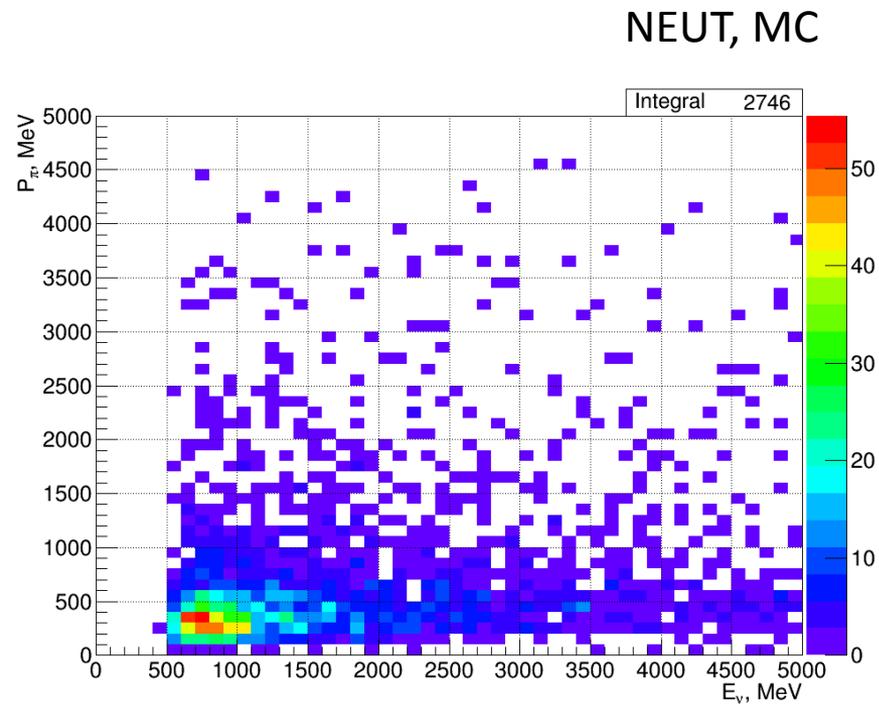
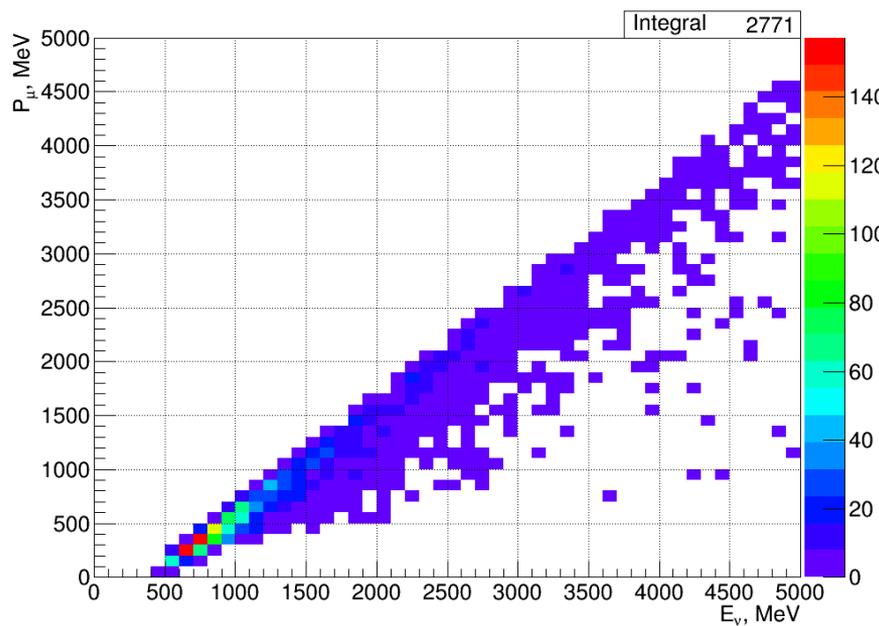
$$E_\nu = \frac{m_{\Delta^{++}}^2 - m_p^2 - m_\mu^2 + 2m_p E_\mu}{2(m_p - E_\mu + p_\mu \cos \theta)}$$

Δ^{++} -- дельта-изобара, ее масса $m_{\Delta^{++}} = 1232$ МэВ

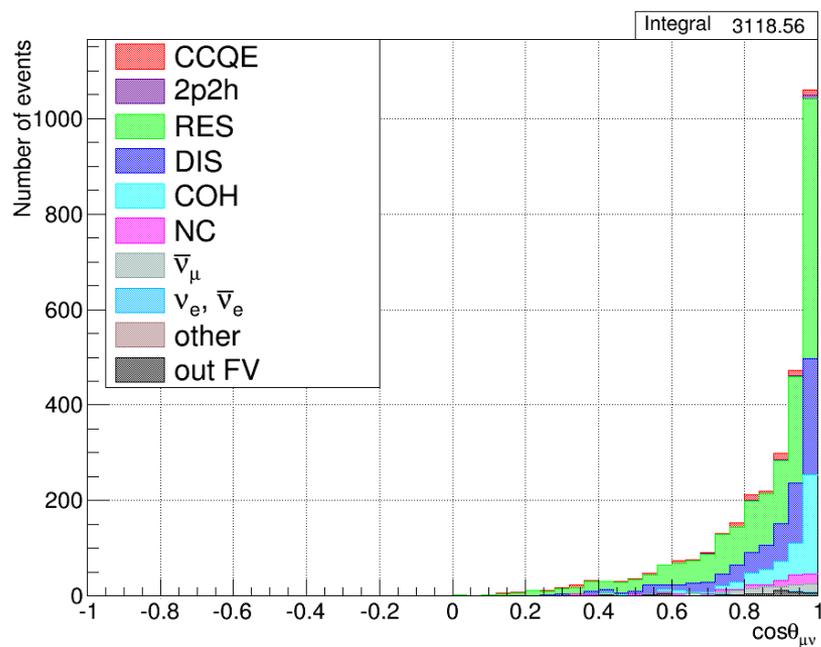


NEUT, MC

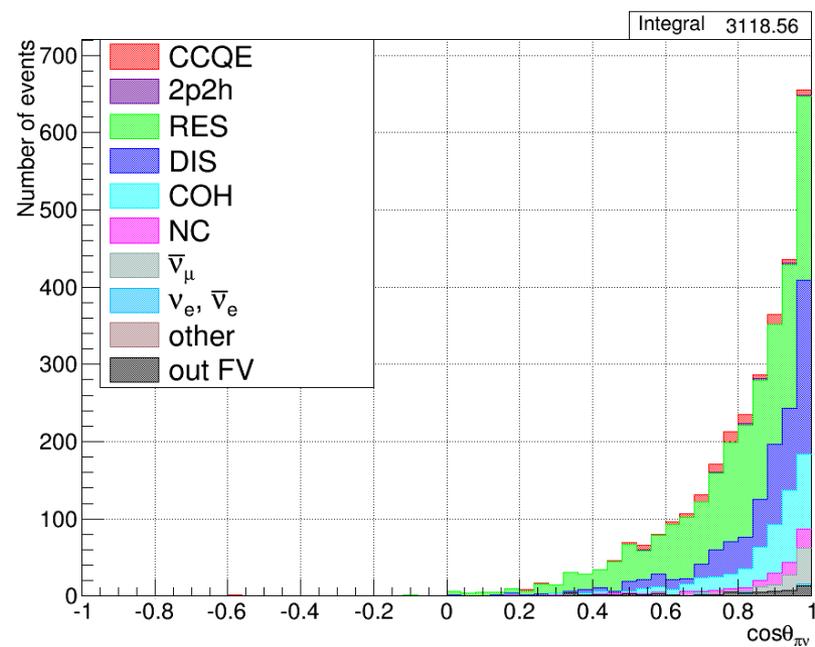
Реакция СС1Рi



Реакция CS1P_i



NEUT, MC



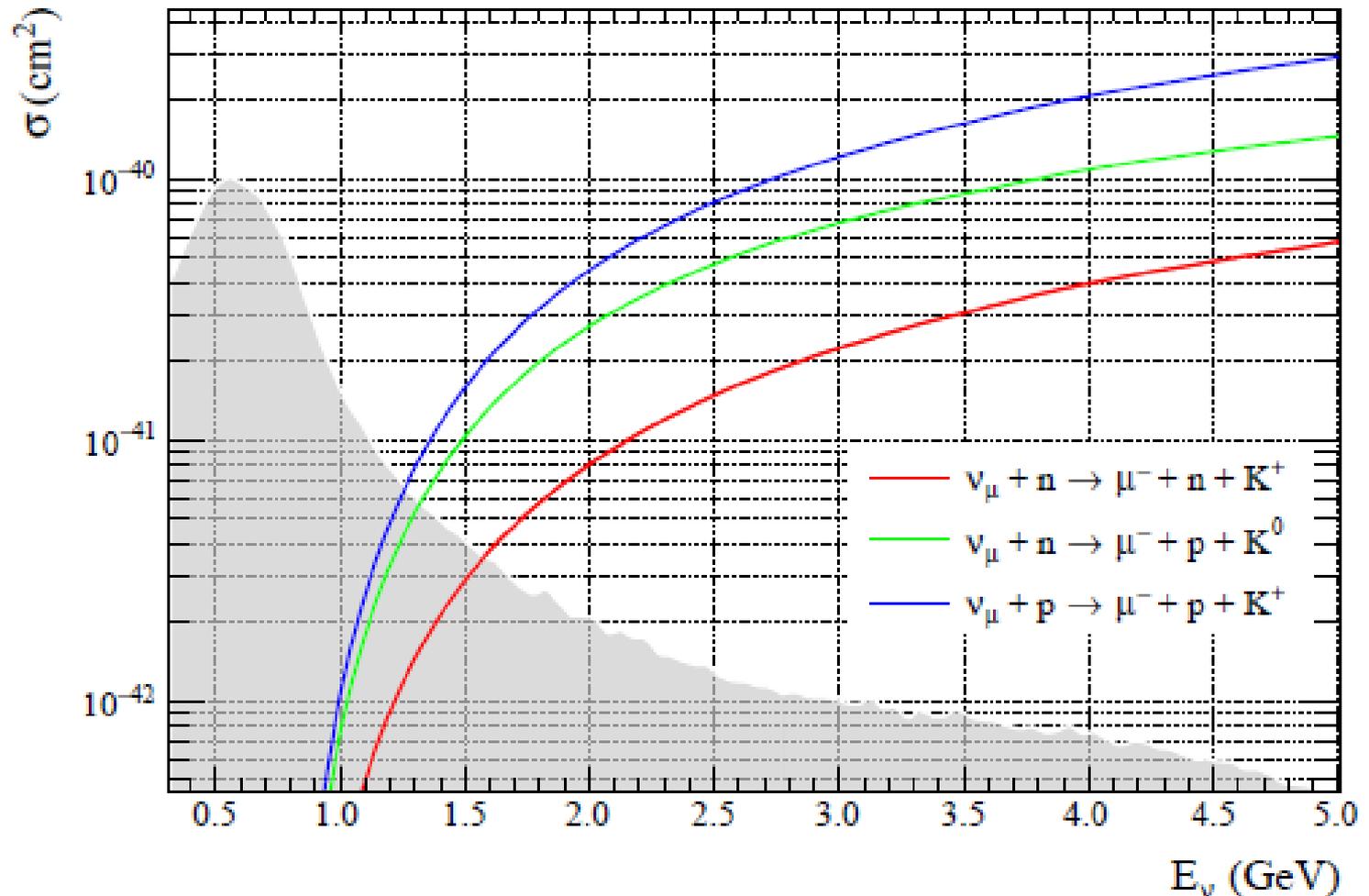
Рождение каонов через нейтринные взаимодействия (CC1K)

CC ($\Delta S = \pm 1$)	$\nu_l + n \rightarrow l^- + K^0 + p$ $\nu_l + n \rightarrow l^- + K^+ + n$ $\nu_l + p \rightarrow l^- + K^+ + p$
CC ($\Delta S = 0$)	$\nu_l + n \rightarrow l^- + K^+ + (\Lambda, \Sigma^0)$ $\nu_l + n \rightarrow l^- + K^0 + \Sigma^+$ $\nu_l + p \rightarrow l^- + K^+ + \Sigma^+$

Порог для реакции $\nu_l + N \rightarrow l + K + N'$:

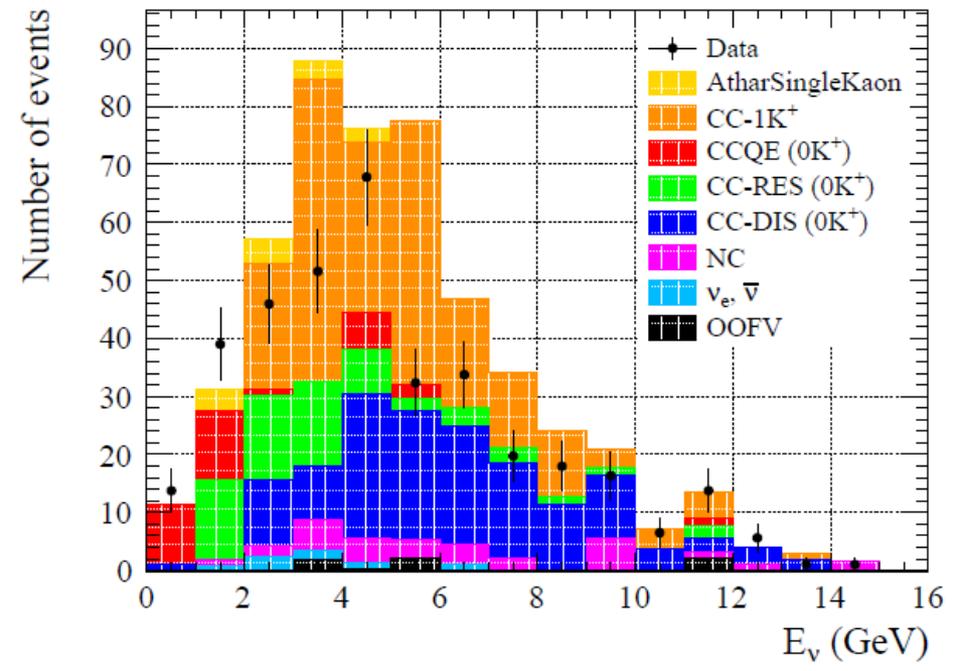
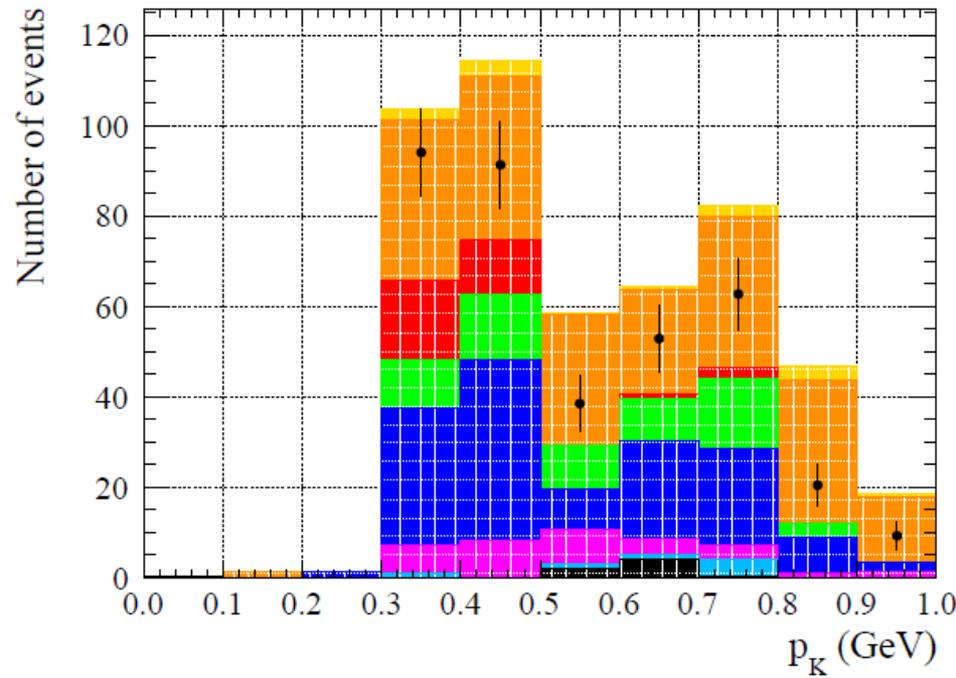
$$E_\nu \geq \frac{(m_l + m_K + m_{N'})^2 - m_N^2}{2m_N} \approx \begin{cases} 0.8 \text{ ГэВ для } \Delta S = \pm 1 \\ 1.2 \text{ ГэВ для } \Delta S = 0 \end{cases}$$

Рождение каонов через нейтринные взаимодействия (СС1К)



Рождение каонов через нейтринные взаимодействия (CC1K)

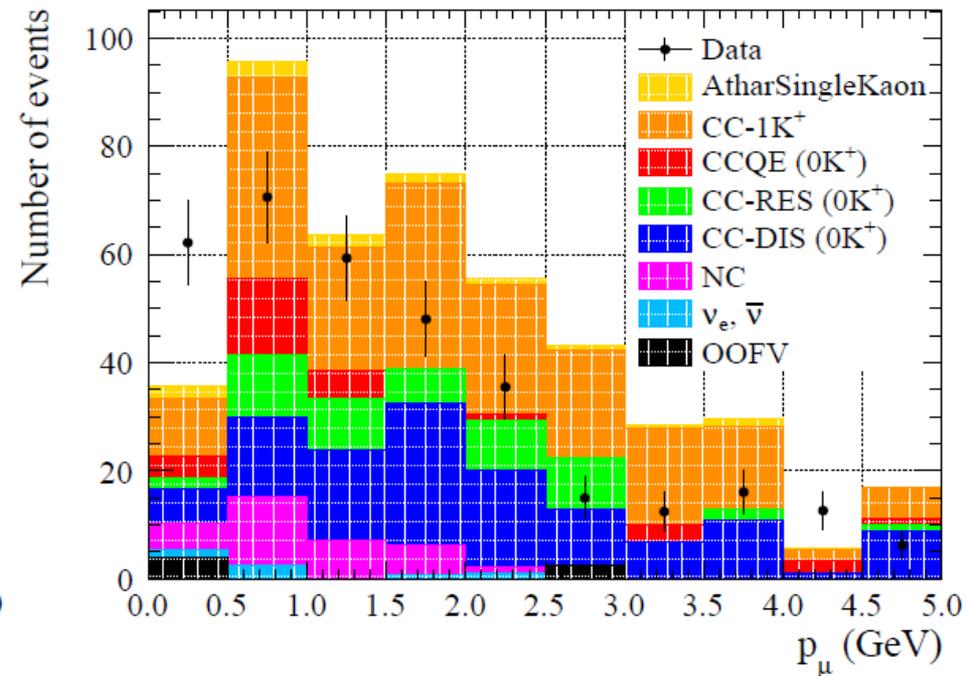
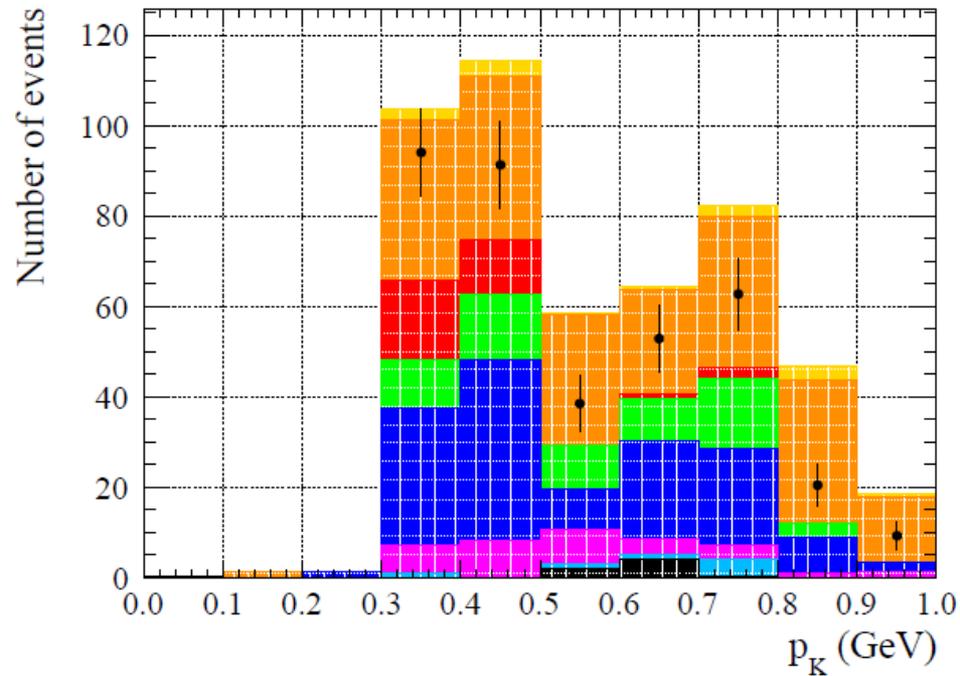
$7 \cdot 10^{21} POT$



MC: GENIE, NEUT

Рождение каонов через нейтринные взаимодействия (CC1K)

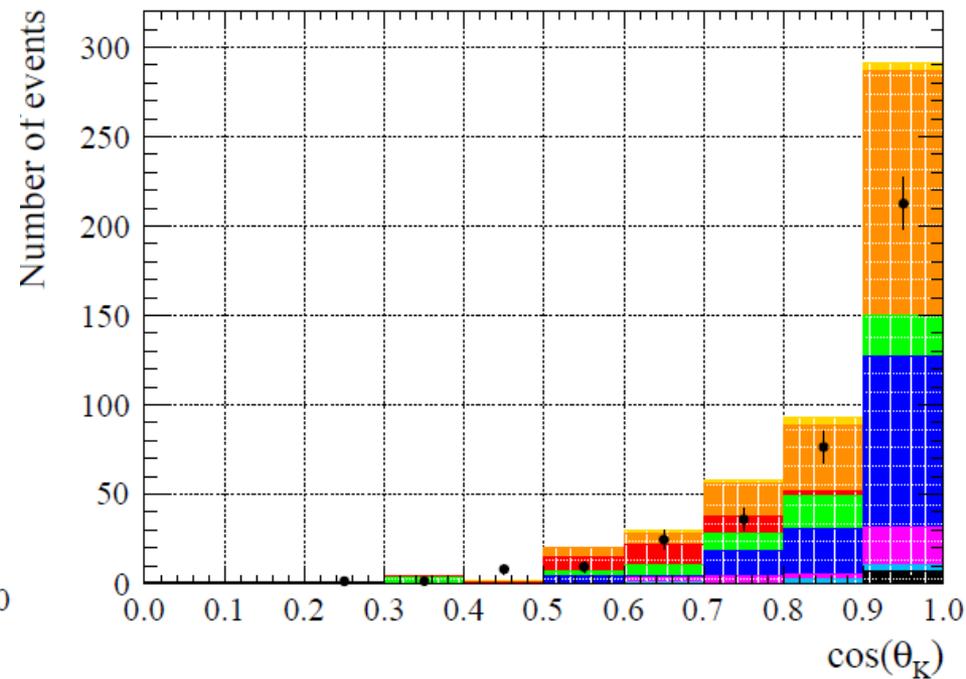
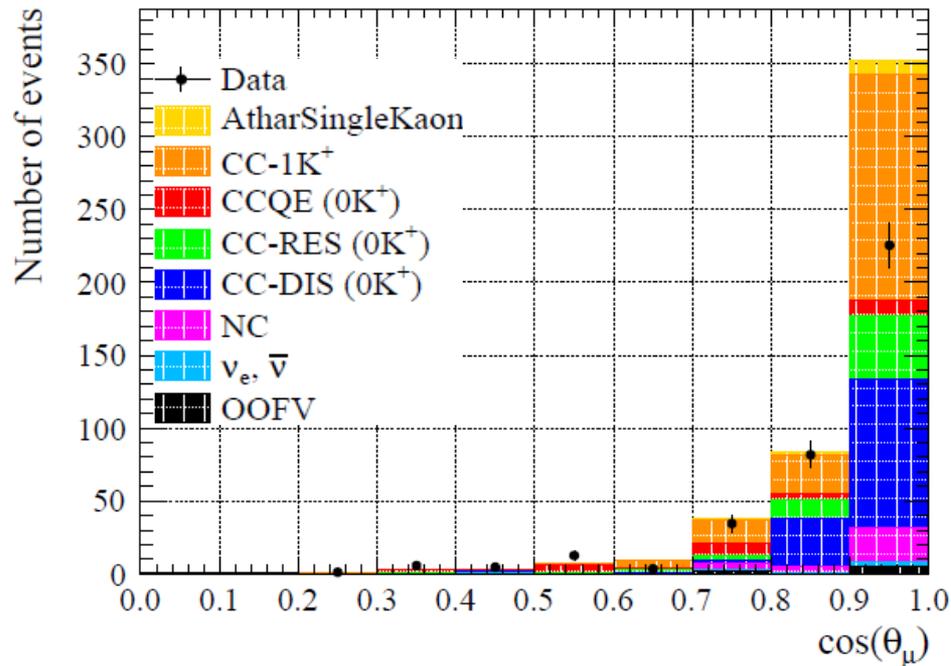
$7 \cdot 10^{21} POT$



MC: GENIE, NEUT

Рождение каонов через нейтринные взаимодействия (CC1K)

$7 \cdot 10^{21} POT$



MC: GENIE, NEUT

Заключение

- Получены спектры энергии нейтрино для CCQE и RES реакций на основе данных Монте-Карло, а также построены распределения импульсов и косинусов углов рассеяния для мюонов и пионов;
- Проанализированы реакции рассеяния нейтрино на ядре с рождением K^+ в области энергий около 1 ГэВ. На основе моделирования методом Монте-Карло получены спектры рождения K^+ ;
- Получен спектр энергии нейтрино и распределения импульсов и косинусов углов рассеяния для мюонов в реакции CC1K;
- Наблюдается расхождение реконструкции MC GENIE и MC NEUT. Результаты в стадии обсуждения.

Backup

Осцилляции нейтрино

$$|\nu_\alpha\rangle = \sum_i U_{\alpha i} |\nu_i\rangle,$$

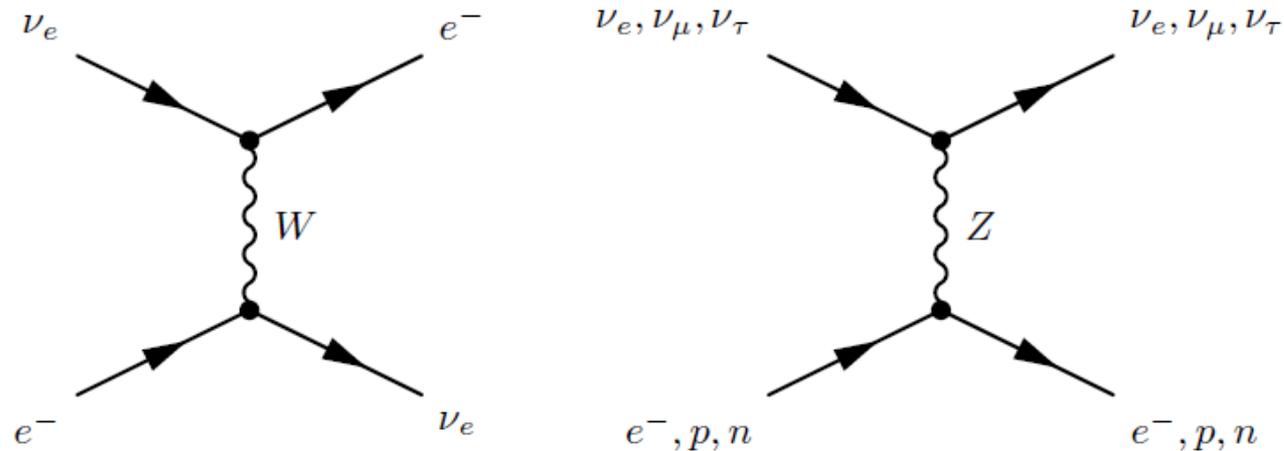
$$|\nu_i\rangle = \sum_\alpha U_{\alpha i}^* |\nu_\alpha\rangle,$$

$$UU^+ = 1, \quad U = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{bmatrix} =$$

$$= \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e^{i\alpha_1/2} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2/2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}, \quad c_{ij} = \cos \theta_{ij}, \quad \theta_{ij} \text{ — углы смешивания}$$

Осцилляции нейтрино в веществе:



Потенциальная энергия: $V_\alpha = V_{CC} \delta_{\alpha e} + V_{NC} = \sqrt{2} G_F \left(N_e \delta_{\alpha e} - \frac{1}{2} N_n \right)$
 концентрации электронов и нейтронов в среде

$$\sqrt{2} G_F \simeq 7.63 \times 10^{-14} \frac{\text{eV cm}^3}{N_A}$$

$$(E_\nu + m_n - E_\mu, \mathbf{p}_\nu - \mathbf{p}_\mu) = (E_{\Delta^+}, \mathbf{p}_{\Delta^+})$$

$$E_\nu = \frac{m_{\Delta^+}^2 - m_n^2 - m_\mu^2 + 2m_n E_\mu}{2(m_n - E_\mu + p_\mu \cos \theta)}$$

