

Моделирование потоков атмосферных нейтрино в эксперименте BAIKAL-GVD

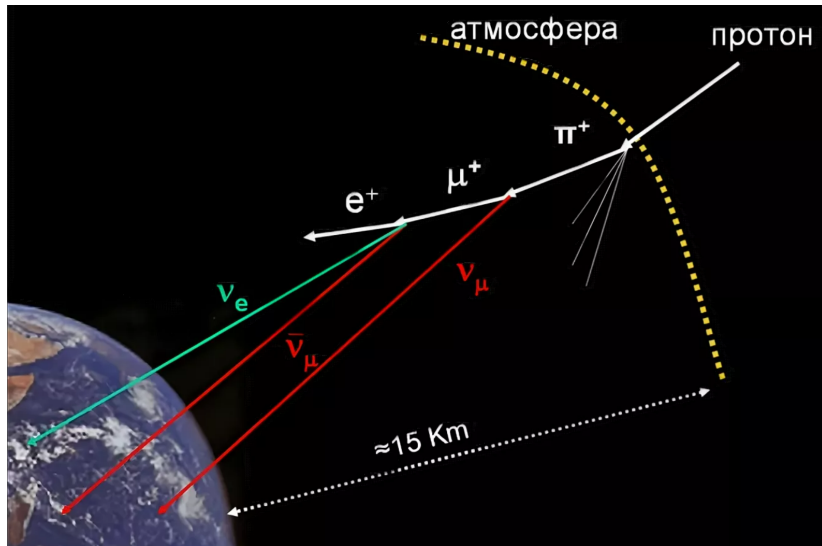
Докладчик: Сергей Завьялов, 409 группа

Научный руководитель: Дмитрий Вадимович Наумов

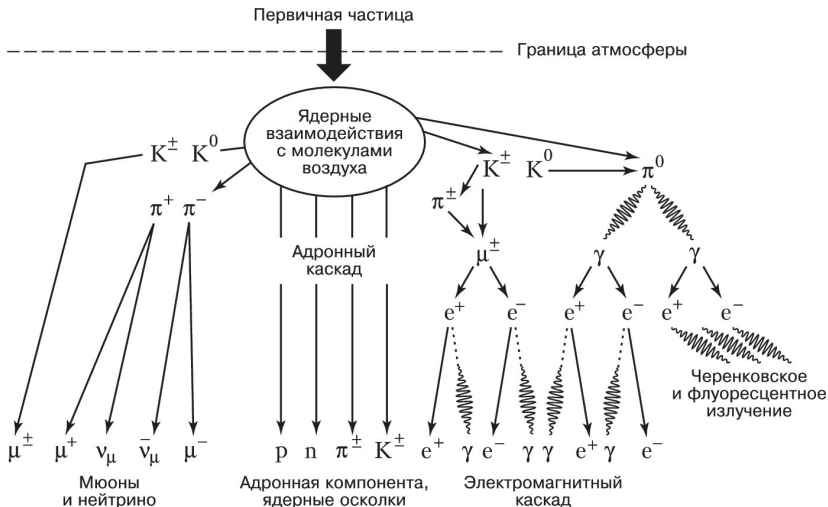
Научный консультант: Владимир Артурович Аллахвердян

3 июня 2022 г.

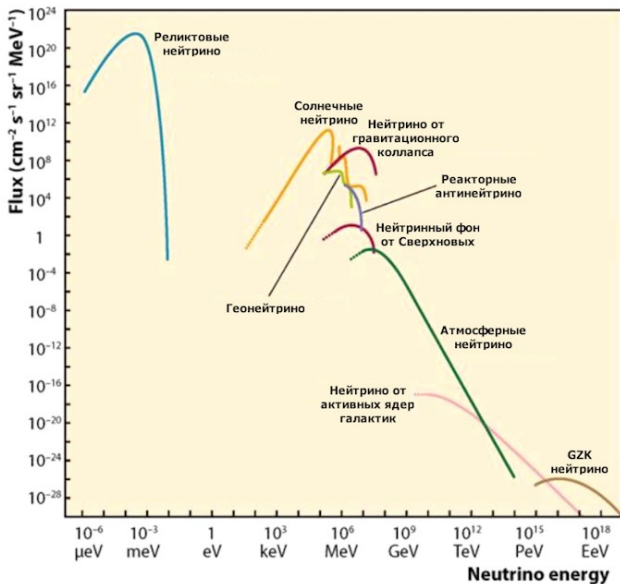
Атмосферные нейтрино



Атмосферные нейтрино



Атмосферные нейтрино



Уравнение переноса

Изменение количества частиц = прибыль частиц – убыль частиц

$$\frac{\partial F_\nu(E, x)}{\partial x} = \frac{1}{\lambda_\nu(E)} \left[\int_0^1 \Phi_\nu(y, E) F_\nu(E_y, x) \frac{dy}{1-y} - F_\nu(E, x) \right], \quad (1)$$

- $F_\nu(E, 0) = F_\nu^0(E)$
- $\frac{1}{\lambda_\nu(E)} = \sum_T N_T \sigma_{\nu T}^{\text{tot}}(E)$
- $\sum_T N_T \frac{d\sigma_{\nu T \rightarrow \nu X}(y, E_y)}{dy} = \Phi_\nu(y, E) \sum_T N_T \sigma_{\nu T}^{\text{tot}}(E)$

Уравнение на "Z – фактор"

Определим эффективную длину поглощения $\Lambda_\nu(E, x)$ как

$$F_\nu(E, x) = F_\nu^0(E) \exp \left\{ -\frac{x}{\Lambda_\nu(E, x)} \right\}, \quad (2)$$

$$\Lambda_\nu(E, x) = \frac{\lambda_\nu(E)}{1 - \mathcal{Z}_\nu(E, x)} \quad (3)$$

Подставляя (2) и (3) в (1), получаем удобное для последующего решения уравнение на "Z – фактор"

$$\mathcal{Z}_\nu(E, x) = \frac{1}{x} \int_0^x \int_0^1 \eta_\nu(y, E) \Phi_\nu(y, E) e^{-x' \mathcal{D}_\nu(E, E_y, x')} dx' dy, \quad (4)$$

где

$$\mathcal{D}_\nu(E, E_y, x) = \frac{1 - \mathcal{Z}_\nu(E_y, x)}{\lambda_\nu(E_y)} - \frac{1 - \mathcal{Z}_\nu(E, x)}{\lambda_\nu(E)}, \quad (5)$$

Метод "Z – фактора"

Для тонкого поглотителя выражение для "Z – фактора":

$$Z_\nu(E, 0) = \int_0^1 \eta_\nu(y, E) \Phi_\nu(y, E) dy \equiv Z_\nu^0(E) \quad (6)$$

Решаем получившиеся уравнение (4) с помощью итерационного алгоритма. Определим

$$D_\nu^{(n)}(E, E_y, x) = \frac{1 - Z_\nu^{(n)}(E_y, x)}{\lambda_\nu(E_y)} - \frac{1 - Z_\nu^{(n)}(E, x)}{\lambda_\nu(E)}, \quad (7)$$

$$Z_\nu^{(n+1)}(E, x) = \frac{1}{x} \int_0^x \int_0^1 \eta_\nu(y, E) \Phi_\nu(y, E) e^{-x' D_\nu^{(n)}(E, E_y, x')} dx' dy \quad (8)$$

Метод "Z – фактора"

Пусть нулевое приближение: $Z_\nu^{(0)}(E, x) = 0$. Тогда первое приближение будет иметь следующий вид:

$$D_\nu^{(0)}(E, E_y, x) = \frac{1}{\lambda_\nu(E_y)} - \frac{1}{\lambda_\nu(E)} \equiv \mathcal{D}_\nu(E, E_y), \quad (9)$$

$$Z_\nu^{(1)}(E, x) = \int_0^1 \eta_\nu(y, E) \Phi_\nu(y, E) \left[\frac{1 - e^{-x\mathcal{D}_\nu(E, E_y)}}{x\mathcal{D}_\nu(E, E_y)} \right] dy \quad (10)$$

Метод "Z – фактора"

Рассмотрим теперь случай вклада нейтрино с фиксированными энергией E и телесным углом Ω в суммарный поток

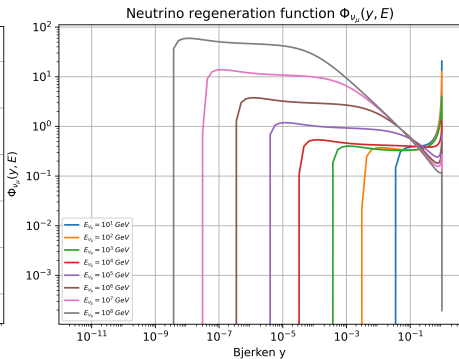
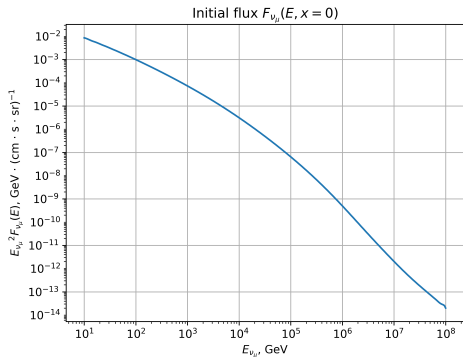
$$\frac{\partial F_\nu(E, \Omega, x)}{\partial x} = \int_0^E \int_{4\pi} F_\nu(E', \Omega', x) \sum_T N_T \frac{d^2 \sigma_{\nu T \rightarrow \nu} \chi(E', \Omega')}{dE d\Omega} dE' d\Omega' - \frac{F_\nu(E, \Omega, x)}{\lambda_\nu(E)} \quad (11)$$

Сведём это уравнение к (1), которое мы уже умеем решать с помощью метода "Z – фактора"

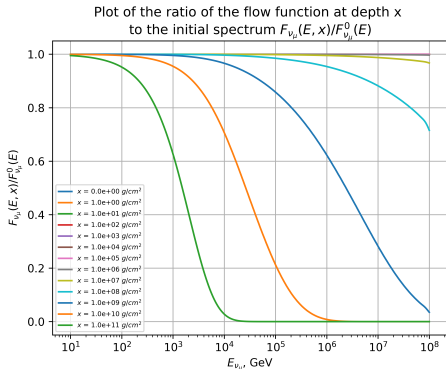
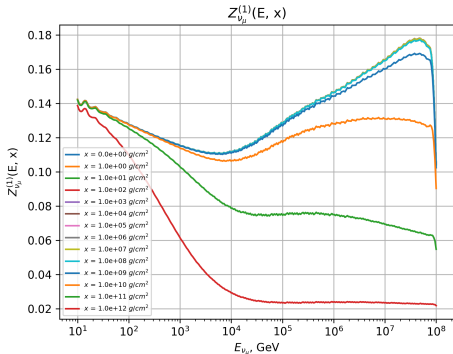
$$\frac{\partial F_n(E, x)}{\partial x} = \frac{1}{\lambda_\nu(E)} \left[\int_0^1 \zeta_n(y, E) F_n(E_y, x) \frac{dy}{1-y} - F_n(E, x) \right], \quad (12)$$

где $F_n(E, x)$ и $\zeta_n(y, E)$ отнормированные коэффициенты разложения функции потока и дифференциального сечения по сферическим функциям и полиномам Лежандра соответственно.

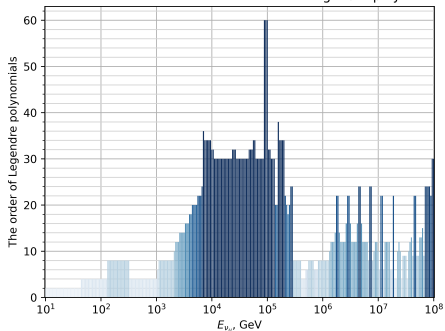
Результаты



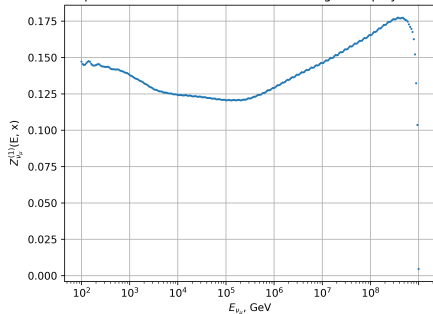
Результаты



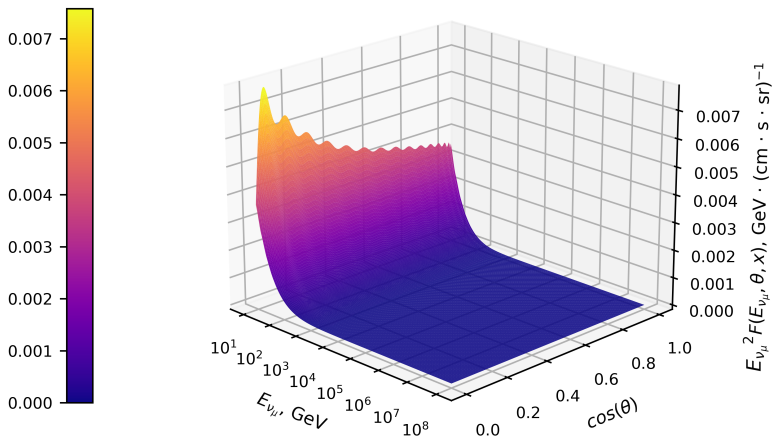
Maximum order of expansion of the differential cross section for the interaction of neutrinos with matter in Legendre polynomials

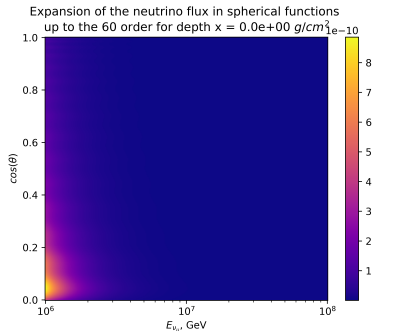
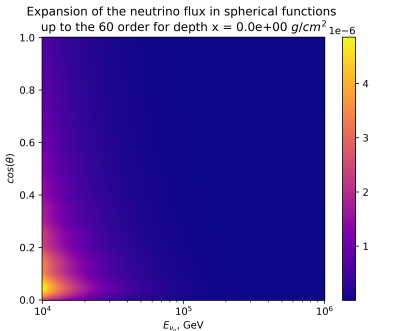
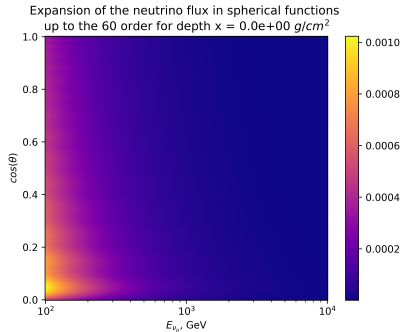
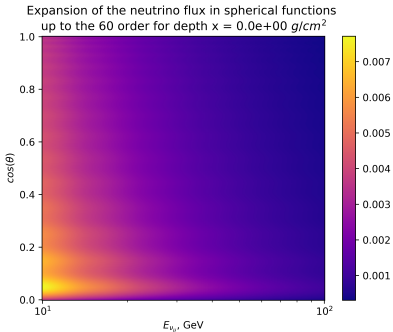


The maximum value of the $Z_{\nu_e}^{(1)}(E, x)$ function corresponding to the order of expansion of the differential section in Legendre polynomials

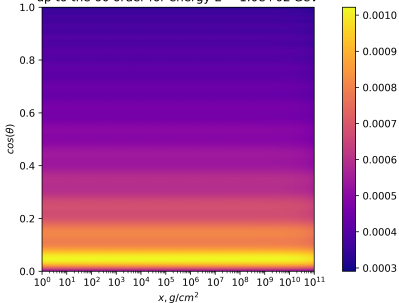


Expansion of the neutrino flux in spherical functions up to 60 order for depth $x = 0.0e+00 \text{ g/cm}^2$

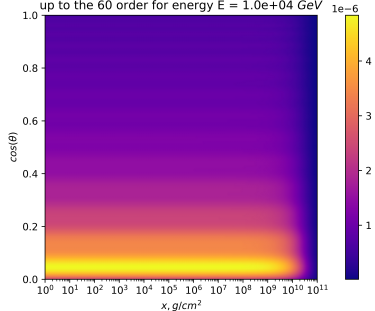




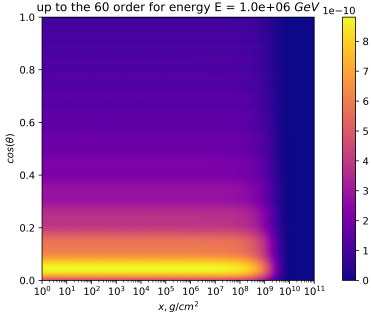
Expansion of the neutrino flux in spherical functions up to the 60 order for energy $E = 1.0e+02$ GeV



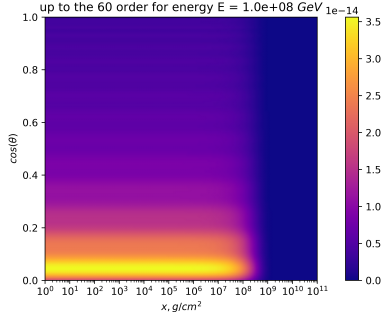
Expansion of the neutrino flux in spherical functions up to the 60 order for energy $E = 1.0e+04$ GeV



Expansion of the neutrino flux in spherical functions up to the 60 order for energy $E = 1.0e+06$ GeV



Expansion of the neutrino flux in spherical functions up to the 60 order for energy $E = 1.0e+08$ GeV



В качестве результатов работы было получено:

- развит метод " Z – фактора" на случай зависимости исходного потока от телесного угла;
- построено уравнение переноса нейтрино с фиксированной энергией и телесным углом прилёта, получено его решение методом " Z – фактора";
- написан пакет, производящий вычисление потоков атмосферных нейтрино и легко масштабирующийся в зависимости от начальных данных;
- произведён численный расчёт " Z – фактора" в нулевом и первом приближении;
- получен явный вид потока атмосферных нейтрино в зависимости от глубины, энергии и зенитного угла прилёта.

Спасибо за внимание!

BAIKAL-GVD

