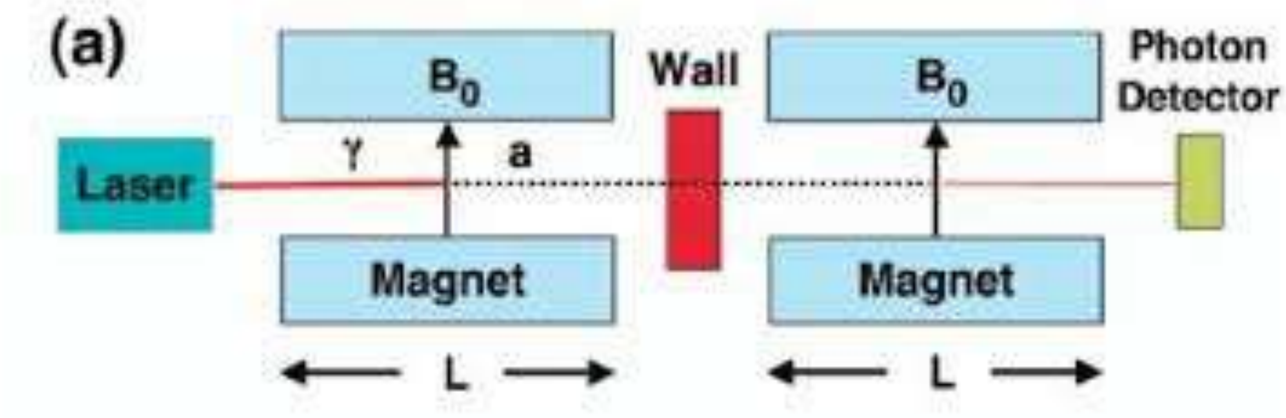
АКСИОН-АКСИОННОЕ СМЕШИВАНИЕ

Выполнил: Горенков К.О.
Научный руководитель: Троицкий С.В.

МГУ им. М.В. Ломоносова

Введение



Аксион:

- Гипотетическая частица
- очень легкая
- под действием внешнего магнитного поля фотон может превратиться в аксион и обратно

$$\mathcal{L} = -\frac{1}{4}F_{\mu\nu}^2 + \frac{(\partial_\mu a_1)^2}{2} - \frac{m_{11}^2 a_1^2}{2} - m_{12}^2 a_1 a_2 + \frac{(\partial_\mu a_2)^2}{2} - \frac{m_{22}^2 a_2^2}{2} + \\ + \frac{1}{8} g_1 \tilde{F}^{\mu\nu} F_{\mu\nu} a_1 + \frac{1}{8} g_2 \tilde{F}^{\mu\nu} F_{\mu\nu} a_2$$

Уравнения движения

$$\partial_{\mathrm{\mu}}\left(\frac{\partial\mathcal{L}}{\partial\left(\partial_{\mathrm{\mu}}a_{\mathrm{i}}\right)}\right)-\frac{\partial\mathcal{L}}{\partial a_{\mathrm{i}}}=0$$

$$\partial_{\mu}\left(\frac{\partial\mathcal{L}}{\partial\left(\partial_{\mu}A_{\nu}\right)}\right)-\frac{\partial\mathcal{L}}{\partial_{\mu}A_{\nu}}=0$$

$$\begin{pmatrix}\omega^2+\partial_z^2 & 0 & 0 & 0\\ 0 & \omega^2+\partial_z^2 & -i\omega g_1B_\perp & -i\omega g_2B_\perp\\ 0 & i\omega B_\perp g_1 & \omega^2+\partial_z^2-m_{11}^2 & m_{12}^2\\ 0 & i\omega B_\perp g_2 & m_{12}^2 & \omega^2+\partial_z^2-m_{22}^2\end{pmatrix}\begin{pmatrix}A_\perp\\ A_\parallel\\ a_1\\ a_2\end{pmatrix}=0$$

$$a_i=\ a_i(k)\mathrm{e}^{i(\omega t-\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r})},\qquad A=A(k)\mathrm{e}^{i(\omega t-\boldsymbol{k}\cdot\boldsymbol{r})}$$

$$\omega^2+\partial_z^2=(\omega+i\partial_z)(\omega-i\partial_z)\approx(\omega+k)(\omega-i\partial_z)$$

уравнения стационарной волны для частиц, распространяющихся вдоль оси **z**:

$$\begin{cases}(\omega^2+\partial_z^2+m_{11}^2)a_1(k)+m_{12}^2a_2(k)-ig_1B_\nu(\omega+k)A_\parallel(k)=0\\ (\omega^2+\partial_z^2+m_{22}^2)a_2(k)+m_{12}^2a_1(k)-ig_2B_\nu(\omega+k)A_\parallel(k)=0\\ (\omega^2+\partial_z^2)A_\parallel(k)+ig_1B_\nu\omega a_1(k)+ig_2B_\nu\omega a_2(k)=0\end{cases}$$

$$\left(\omega-i\partial_Z+\begin{pmatrix}0 & \Delta_{M_1} & \Delta_{M_2}\\ \Delta_{M_1} & \Delta_{a_1} & \Delta_m\\ \Delta_{M_2} & \Delta_m & \Delta_{a_2}\end{pmatrix}\right)\begin{pmatrix}A_\parallel\\ a_1\\ a_2\end{pmatrix}=0$$

Диагонализируем матрицу смешивания путем поворота исходных полей

$$\begin{pmatrix} \cos\theta_3 & -\sin\theta_3 & 0 \\ \sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} a_{11} & a_{12} & a_{13} \\ a_{12} & a_{22} & a_{23} \\ a_{31} & a_{23} & a_{33} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos\theta_3 & \sin\theta_3 & 0 \\ -\sin\theta_3 & \cos\theta_3 & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} a'_{11} & 0 & a'_{13} \\ 0 & a'_{22} & a'_{23} \\ a'_{13} & a'_{23} & a'_{33} \end{pmatrix}$$

$$\mathrm{tg}(2\theta_3) \quad = \quad \frac{2a_{12}}{a_{11} - a_{22}} \qquad \mathrm{tg}(2\theta_2) \quad = \quad \frac{2a'_{13}}{a'_{11} - a'_{33}} \qquad \mathrm{tg}(2\theta_1) \quad = \quad \frac{2a''_{23}}{a''_{22} - a''_{33}}$$

$$\begin{pmatrix} A_\parallel(z) \\ a_1(z) \\ a_2(z) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} e^{-i\lambda_1 z} & 0 & 0 \\ 0 & e^{-i\lambda_2 z} & 0 \\ 0 & 0 & e^{-i\lambda_3 z} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} A'_\parallel(0) \\ a'_1(0) \\ a'_2(0) \end{pmatrix} \qquad \begin{pmatrix} A_\parallel(z) \\ a_1(z) \\ a_2(z) \end{pmatrix} = \mathcal{M}(z) \begin{pmatrix} A_\parallel(0) \\ a_1(0) \\ a_2(0) \end{pmatrix}$$

Подсчёт вероятностей переходов

$$\begin{pmatrix} A_{\parallel}(z) \\ a_1(z) \\ a_2(z) \end{pmatrix} = \mathcal{M}(z) \begin{pmatrix} A_{\parallel}(0) \\ a_1(0) \\ a_2(0) \end{pmatrix}$$

$$P_{\gamma\to\gamma}(z) = | M_{11} |^2$$

$$P_{\gamma\to a_1}(z) = | M_{12} |^2$$

$$P_{\gamma\to a_2}(z) = | M_{13} |^2$$

$$P_{\gamma\to\gamma}(z) + P_{\gamma\to a_1}(z) + P_{\gamma\to a_2}(z) = 1$$

Программная проверка

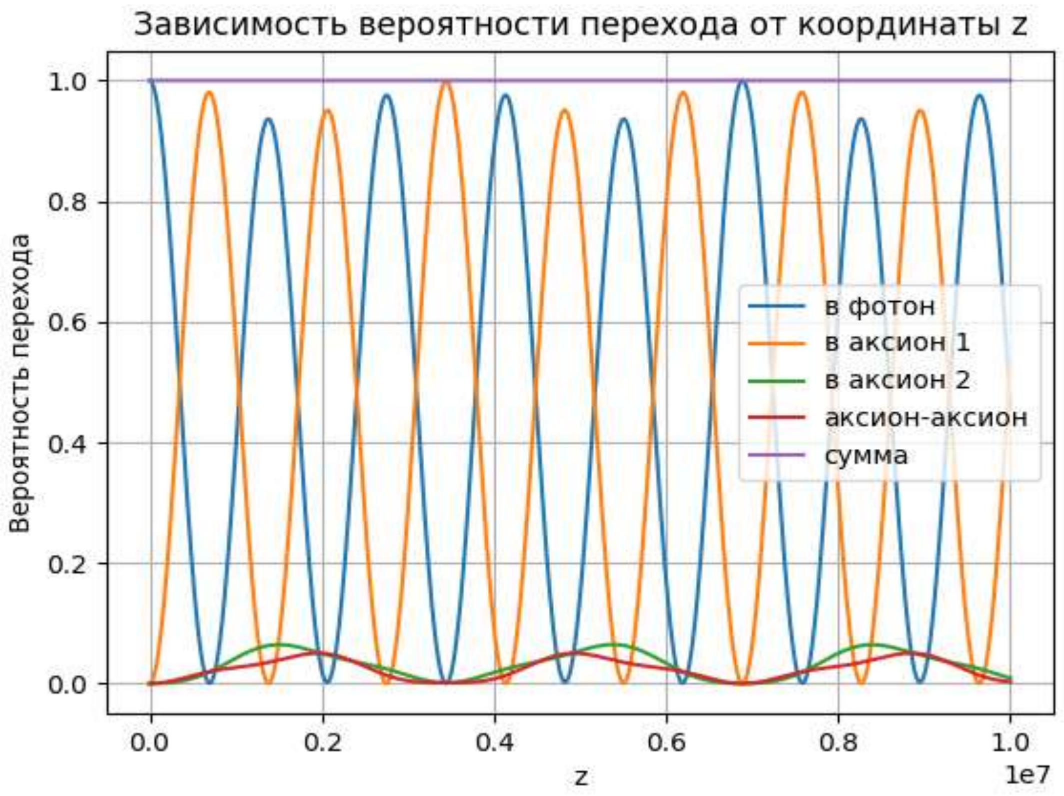


Рисунок 1.1 — *График зависимости вероятностей, от расстояния до источника. Константы соответствуют следующим величинам, обеспечивая сильный поток аксионов:* $g_1 = 6 \times 10^{-12}$ ГэВ$^{-1}$, $g_2 = 10^{-12}$ ГэВ$^{-1}$, $m_{11} = 10^{-2}$эВ, $m_{22} = 5 \times 10^{-3}$эВ, $m_{12} = 10^{-3}$эВ.

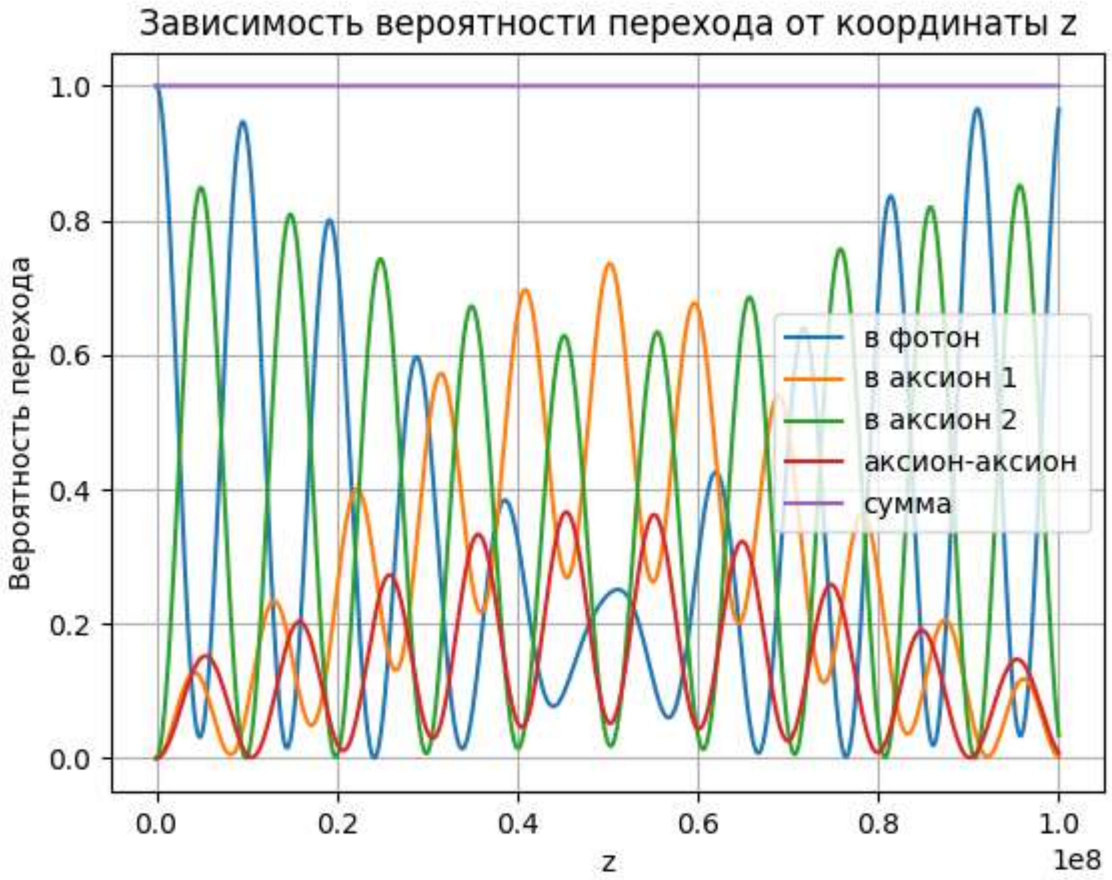


Рисунок 1.2 — *График зависимости вероятностей, от расстояния до источника. Константы соответствуют следующим величинам:* $g_1 = 4.2 \times 10^{-13}$ ГэВ$^{-1}$, $g_2 = 10^{-12}$ ГэВ$^{-1}$, $m_{11} = 10^{-3}$эВ, $m_{22} = 3 \times 10^{-3}$эВ, $m_{12} = 0.5 \times 10^{-3}$эВ.

Программная проверка

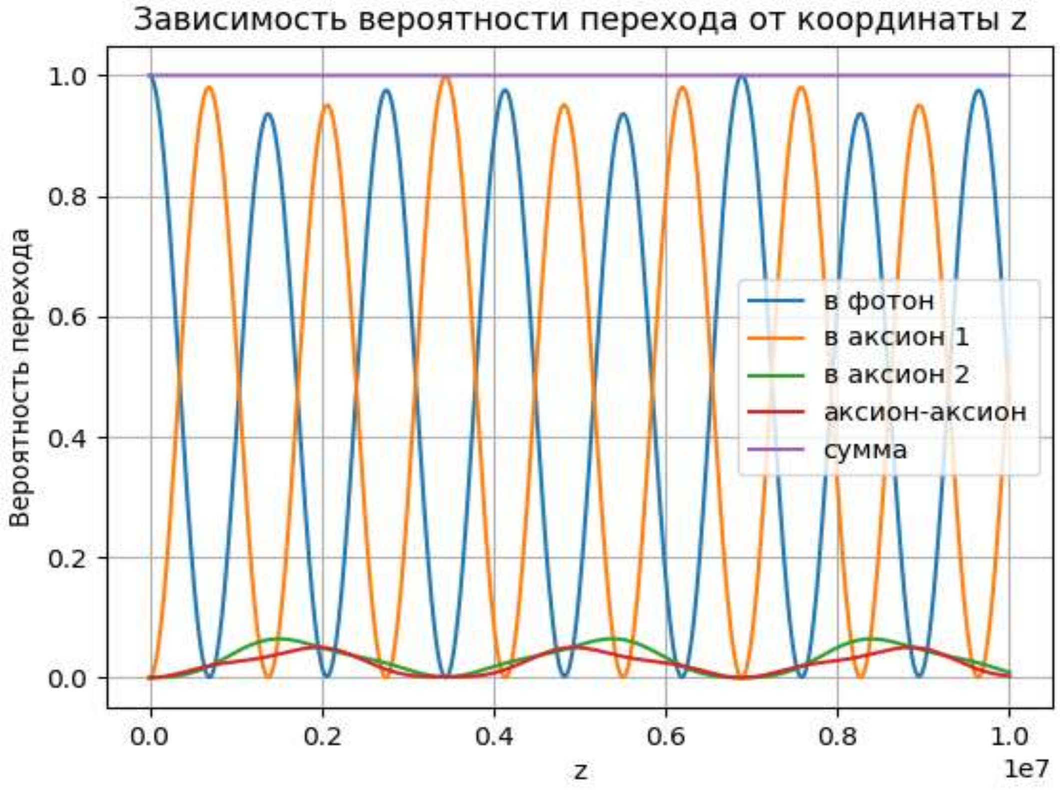


Рисунок 1.1 — *График зависимости вероятностей, от расстояния до источника. Константы соответствуют следующим величинам, обеспечивая сильный поток аксионов:* $g_1 = 6 \times 10^{-12}$ ГэВ$^{-1}$, $g_2 = 10^{-12}$ ГэВ$^{-1}$, $m_{11} = 10^{-2}$эВ, $m_{22} = 5 \times 10^{-3}$эВ, $m_{12} = 10^{-3}$эВ.

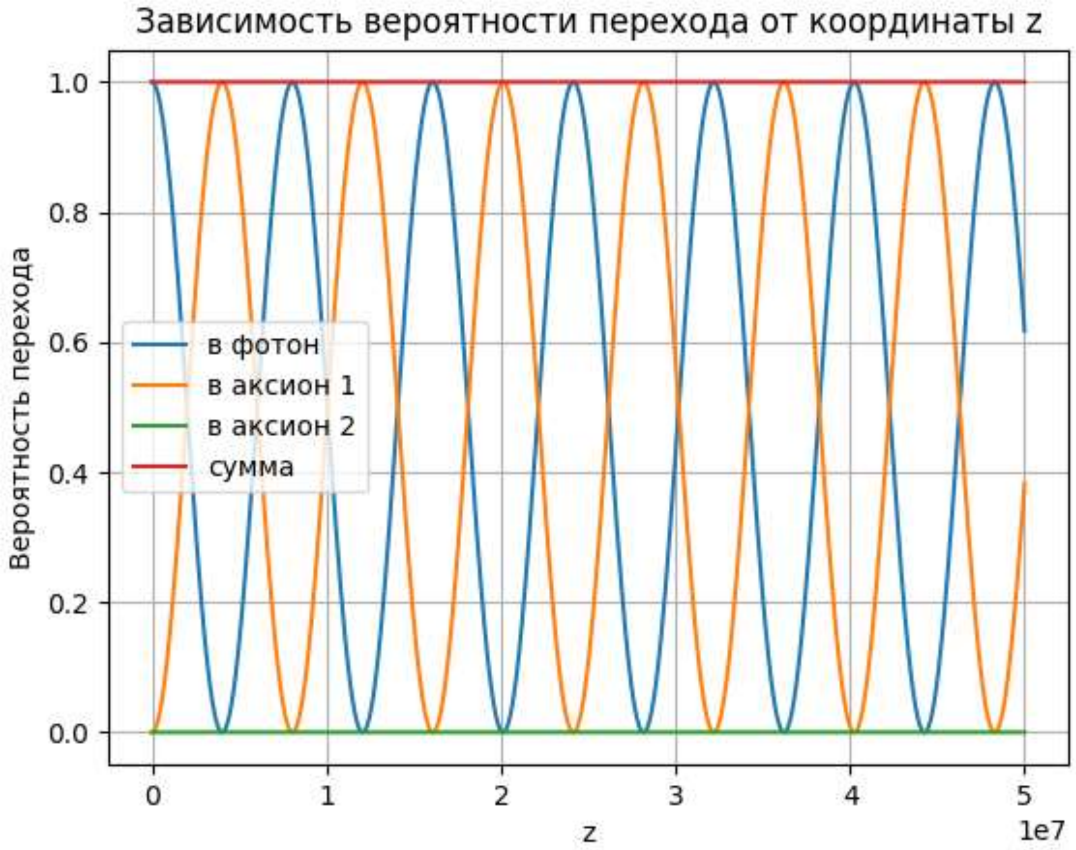


Рисунок 1.4 — *График зависимости вероятностей, от расстояния до источника, при отсутствии второго аксиона*

Программная проверка

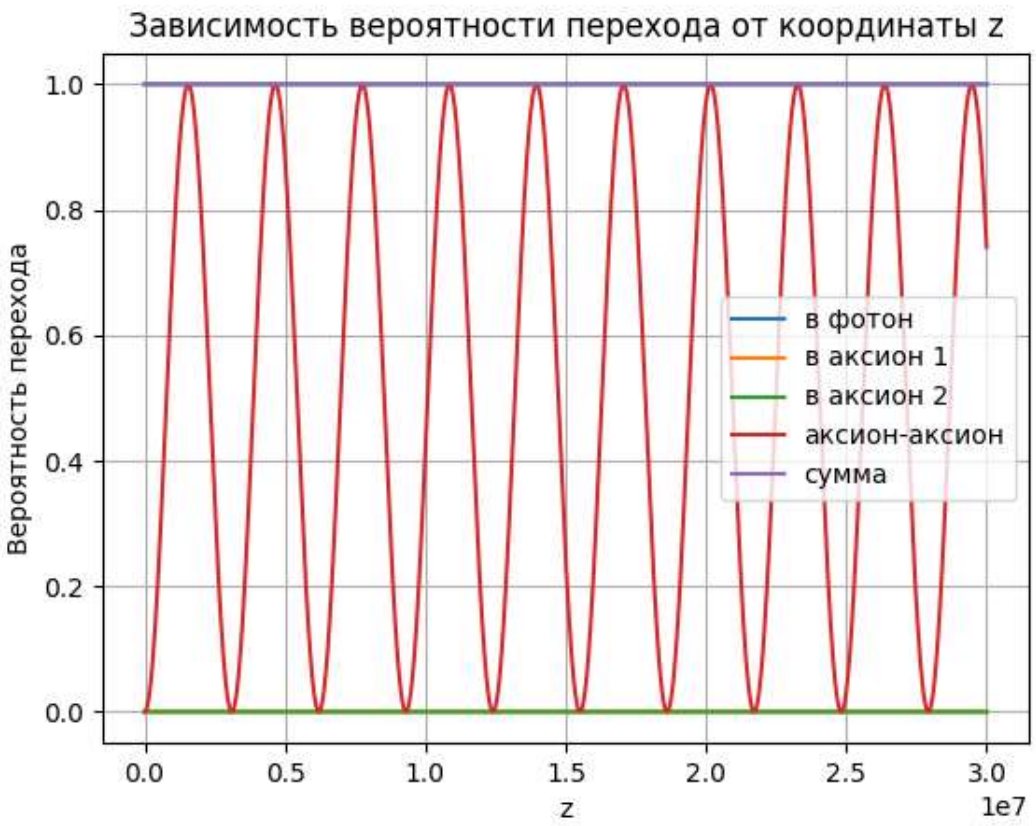


Рисунок 1.3 — *График зависимости вероятностей, от расстояния до источника, при отсутствии внешнего магнитного поля. Константы соответствуют следующим величинам:* $m_{11} = 10^{-3}$эВ, $m_{22} = 1.4 \times 10^{-2}$эВ, $m_{12} = 10^{-3}$эВ

Результаты

В данной работе

- была исследована система с фотоном и двумя аксионами
- были получены уравнения движения для каждого поля
- получена матрица смешивания, по которой после процедуры диагонализации были рассчитаны вероятности переходов фотона в аксионы и обратно в фотон, учитывая аксион-аксионное смешивание
- была выполнена проверка выведенных формул

Выводы:

- Вероятность "выживания" фотона в системе с двумя аксионами отлична по сравнению со случаем одного аксиона, что указывает на важность учета множественных аксионов в системе
- Один аксион оказывается подавленным по вероятностям перехода
- Обнаружено, что вероятности перехода одного аксиона в другой при отсутствии внешнего поля не являются нулевыми. Можно "забыть" о фотоне и диагонализировать две квадратичные формы - В результате появляются новые состояния, которые не переходят друг в друга.