



**Петербургский институт ядерной физики
Национальный исследовательский центр «Курчатовский институт»**



Барионная и лептонная асимметрия Вселенной в лево-правой асимметричной модели слабого взаимодействия

А.П. Серебров

А.П. Серебров, О.Л. Федин, О.М. Жеребцов, А.К. Фомин, Р.М. Самойлов, Н.С. Буданов, В.А. Каяйкин.

Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ 22 октября 2026

Итоги предыдущего семинара «Прецизионные исследования распада нейтрона, лево-правая асимметричная модель слабого взаимодействия»

1. Из анализа экспериментальных данных распада нейтрона следует:
V-A вариант теории не выполняется.
2. Расхождение $V_{ud}^{00} \neq V_{ud}^n$
3. D-асимметрия $< 3 \times 10^{-4}$ указывает на выполнение T-инвариантности на этом уровне.
4. ЭДМ n $d_n < 2 \times 10^{-26} \rightarrow D_{ac} < 2 \times 10^{-6}$ указывает на выполнение T-инвариантности на ещё более низком уровне.
5. Противоречие с CPT-теоремой: $CP \approx 6 \times 10^{-3}$, но $T < 2 \times 10^{-6}$??
Нет смысла продолжать измерение ЭДМ. Тупиковое направление исследований.

Проблема: как сохранить CPT при CP-нарушение, но при T-инвариантности?

Найдено решение противоречия с CPT-теоремой в рамках асимметричной модели LRAM:

CP изменяет знак синхронно при изменении знака T.

В рамках асимметричной модели LRAM удаётся:

1. Согласовать экспериментальные данные по распаду нейтрона и $0+ 0+$.
Устранить расхождение $V_{ud}^{00} \neq V_{ud}^n$.
2. Описать осцилляции нейтральных мезонов, т.к. природа CP-нарушения в смешивании бозонов, а не на кварковом уровне.
3. Получить экспериментальное подтверждение LRAM, т.к. экспериментально уже обнаружено различие во временах жизни D_0 и $\text{анти}D_0$.
4. Как следствие следует ожидать разницу во временах жизни нейтрона и антинейтрона.

Теперь можно переходить к объяснению барионной асимметрии Вселенной.

Барионная асимметрия Вселенной

Основная идея, предлагающая объяснение барионной асимметрии Вселенной, принадлежит

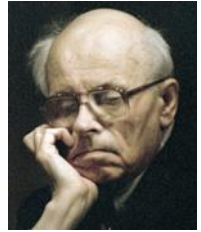
А.Д. Сахарову. Точнее им сформулированы три необходимых условия для возникновения барионной асимметрии в знаменитой статье А.Д. Сахарова. В этой статье сформулированы: (цитата)

«Три основные предпосылки космологического образования барионной асимметрии (БА).

I. Отсутствие закона сохранения барионного заряда.

II. Отличие частиц от античастиц, проявляющееся в нарушении CP-инвариантности.

III. Нестационарность. Образование БА возможно лишь в нестационарных условиях при отсутствии локального термодинамического равновесия.»



$$(f\tau_n)^{-1} \approx G_F^2 |V_{ud}^{LRAM}|^2 (1+3\lambda_n^2) \left[1 + \delta^2 \ominus (1-\delta^2) \frac{(1-3\lambda_n^2)}{(1+3\lambda_n^2)} \sin 2\zeta \right]$$

**Время жизни нейтрона
в LRAM**

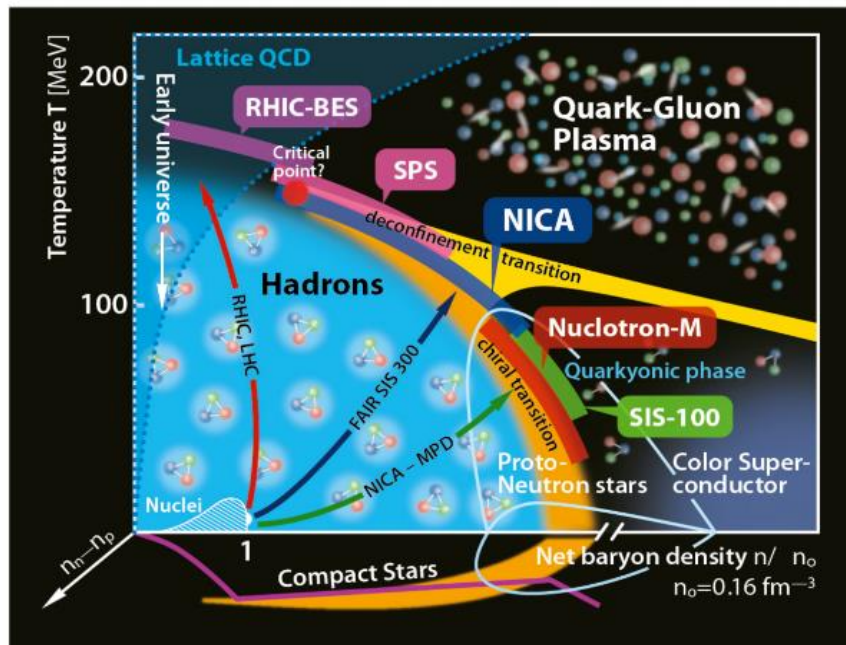
$$(f\tilde{\tau}_n)^{-1} \approx G_F^2 |V_{ud}^{LRAM}|^2 (1+3\lambda_n^2) \left[1 + \delta^2 \oplus (1-\delta^2) \frac{(1-3\lambda_n^2)}{(1+3\lambda_n^2)} \sin 2\zeta \right]$$

**Время жизни антинейтрона
в LRAM**

$$(\tau_n - \tilde{\tau}_n) / \tau_n \approx 2 \times \left[(1-\delta^2) \frac{(1-3\lambda_n^2)}{(1+3\lambda_n^2)} \sin 2\zeta \right] \approx (7.1 \pm 2.3) \times 10^{-3}$$

**Разность времён жизни
нейтрона и антинейтрона
в LRAM**

Процесс адронизации кварк-глюонной плазмы при образовании барионов



Отсутствию локального термодинамического равновесия может быть выполнено, т.к. скорость распада нейтронов и антинейтронов много меньше, чем скорость расширения Вселенной в процессе адронизации кварк-глюонной плазмы. Действительно, скорость распада нейтронов и антинейтронов имеет порядок величины 10^{-3} с^{-1} , а скорость расширения Вселенной в процессе адронизации кварк-глюонной плазмы 10^3 с^{-1} .

Разница во времени жизни нейтрона и антинейтрона приводит к возникновению барионной асимметрии в процессе адронизации кварк-глюонной плазмы при образовании барионов.

Барионная асимметрия Вселенной в модели лево-правой асимметрии (LRAM)

$$\frac{dn(t)}{dt} + 3H(t)n(t) = -\frac{n(t)}{\tau}$$

$$H(t) = \frac{0.53}{t[s]}$$

$$\frac{dn(t)}{dt} + 1.6 \frac{n(t)}{t} = -\frac{n(t)}{\tau}$$

$$n(t) = n_0 \left(\frac{t}{t_0} \right)^{-1.6} e^{-\left(\frac{t-t_0}{\tau} \right)}$$

$$A(t) = \frac{n(t) - \bar{n}(t)}{n(t) + \bar{n}(t)} = \frac{1 - e^{-\left(\frac{t-t_0}{\tau} \right) \left(\frac{1}{\tau_2} - \frac{1}{\tau_1} \right)}}{1 + e^{-\left(\frac{t-t_0}{\tau} \right) \left(\frac{1}{\tau_2} - \frac{1}{\tau_1} \right)}}$$

$$A(t) = \frac{(t-t_0)}{\tau} \frac{\Delta\tau}{\tau}$$

$$(\tau_n - \tilde{\tau}_n) / \tau_n \approx 2 \times \left[\left(1 - \delta^2 \right) \frac{(1 - 3\lambda_n^2)}{(1 + 3\lambda_n^2)} \sin 2\zeta \right] \approx (7.1 \pm 2.3) \times 10^{-3}$$

Нарушение CP-инвариантности в системе барион-антибарионе

$$A(t = 10^{-3} \text{ c}) = -\frac{t}{2\tau} \frac{\tau_n - \tilde{\tau}_n}{\tau_n} = (3.55 \pm 1.15) \times 10^{-9}$$

$$\frac{t-t_0}{\tau} = \frac{\text{Time of hadronization}}{\text{Neutron lifetime}} \approx 10^{-6}$$

$$t - t_0 \approx 10^{-3} \text{ s} \quad \tau \approx 10^3 \text{ s}$$

$$\eta^{LR} \approx \frac{1}{3} A_B(t = 10^{-3} \text{ s}) \approx (1.2 \pm 0.4) \times 10^{-9}$$



$$\eta = \frac{n_B - n_{\bar{B}}}{n_\gamma} = 6.1 \times 10^{-10}$$

На один выживший нейтрон будет приходится в 3 раз больше гамма квантов, чем на число нейтронов и антинейтронов

Генерация лептонной асимметрии Вселенной

Процесс формирования тёмной материи стерильными нейтрино

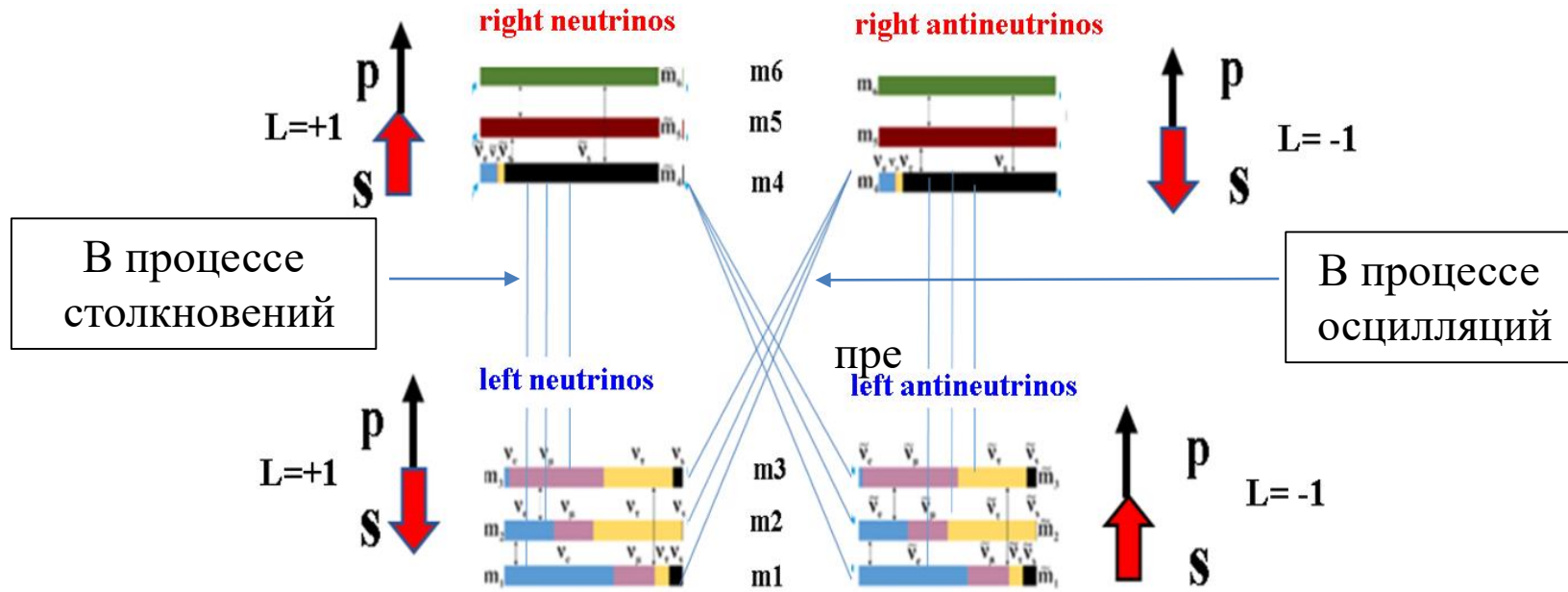
Письма ЖЭТФ т.116, вып 10, с 644-658 (2022)

Результат эксперимента Нейтрино-4 и космологические ограничения на стерильные нейтрино (Миниобзор)

А.П.Серебров1), Р.М.Самойлов, М.Е.Чайковский, О.М.Жеребцов

AP Serebrov, RM Samoilov, ME Tchaikovsky, and OM Zhrebtsov, JETP Letters, 116:10 (2022), 669–682

Oscillations of **left neutrinos** into **right antineutrinos** and **left antineutrinos** into **right neutrinos**



Стерильные нейтрино могут смешиваться с активными нейтрино, предпочтительно с сохранением киральности, но при этом лептонное число изменяется на две единицы:

$$\Delta L = 2$$

Нейтринный потенциал формируется из вкладов первого и второго порядка константой G_F .

$$T[\text{eV}] \sim \frac{887734}{\sqrt{t[\text{s}]}}$$

$$V = \pm C_1 \eta G_F T^3 - C_2 \frac{G_F^2 T^4 E}{\alpha} \quad E = 3.15T$$

Знак первого слагаемого различается для частиц и античастиц, при этом он зависит от параметра η , который определяет различие между ними. В условиях Солнца этот вклад является доминирующим и приводит к резонансному эффекту Михеева — Смирнова — Вольфенштейна (МСВ). Однако в первичной плазме концентрации частиц и античастиц примерно одинаковы, поэтому в рассматриваемой нами области **можно ограничиться вкладом второго порядка.**

Отрицательный потенциал подавляет осцилляции в той области, где он существенно превышает вклад от массовой матрицы: $V \gg (\Delta m^2)/E$.

Эффект МСВ отсутствует

Общие положения

Мы начинаем изучение этого процесса со случая двух нейтрино.

$$|v_e(t)\rangle = \exp(-iE_it)|v_e(0)\rangle = \exp(-iE_1t) \cos \theta |v_1\rangle + \exp(-iE_2t) \sin \theta |v_2\rangle,$$

$$\begin{pmatrix} |v_e\rangle \\ |v_s\rangle \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta_m & \sin\theta_m \\ -\sin\theta_m & \cos\theta_m \end{pmatrix} \begin{pmatrix} |v_1\rangle \\ |v_4\rangle \end{pmatrix}$$

$$P(v_e \leftrightarrow v_e) = |\langle v_e | v_e \rangle|^2 = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2 \left[\frac{1}{2} (E_2 - E_1) t \right]$$

$$E_2 - E_1 = \left(\left(\frac{\Delta m^2 \cos(2\theta)}{2E} - V \right)^2 + \left(\frac{\Delta m^2 \sin(2\theta)}{2E} \right)^2 \right)^{1/2}$$

in the matter

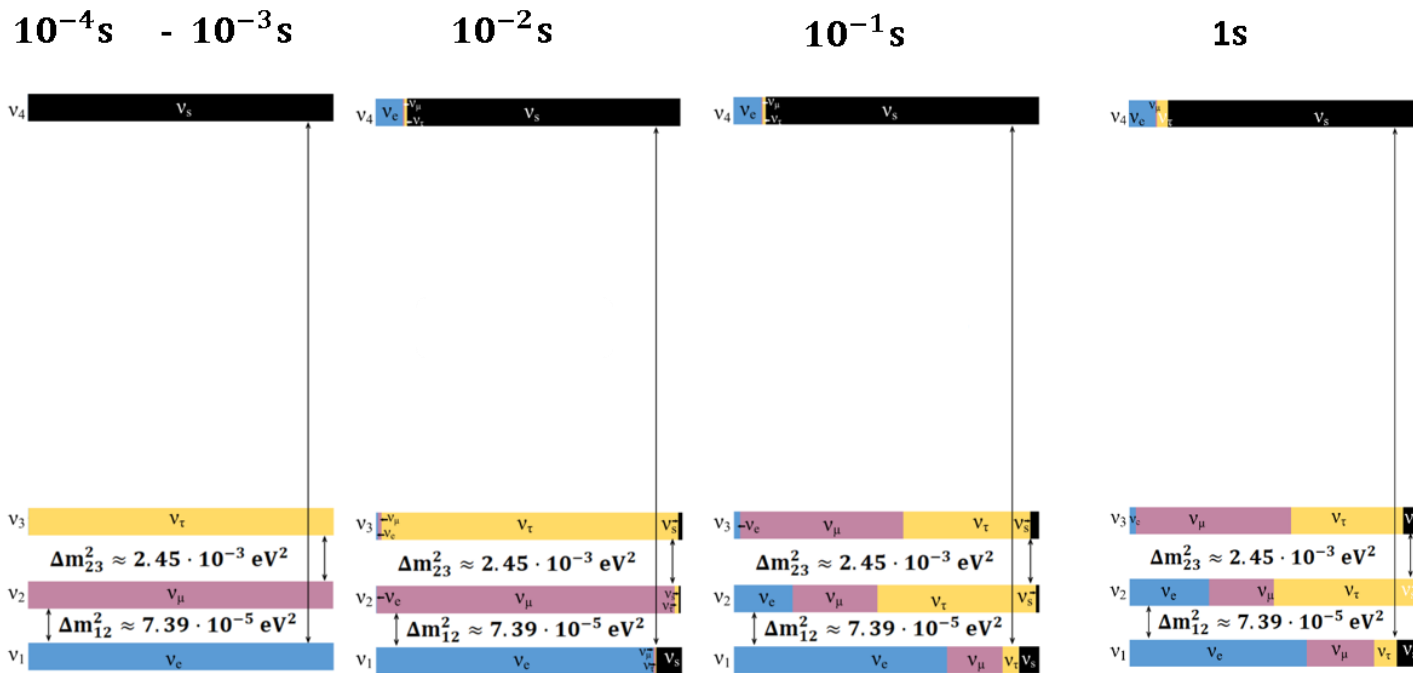
$$\frac{\Delta m^2 \cos(2\theta)}{2E} \ll V$$

$$E_2 - E_1 = \frac{m_2^2 - m_1^2}{2E_v} = \pm \frac{\Delta m^2}{2E_v},$$

in a vacuum

Изменения в процессе осцилляций в космической плазме

$$T[eV] \sim \frac{887734}{\sqrt{t[s]}}$$



$$U_{\text{ef}}(10^{-4}\text{s}) = \begin{pmatrix} 1. & 0. & 0. & 0. \\ 0. & 1. & 0. & 0. \\ 0. & 0. & 1. & 0. \\ 0. & 0. & 0. & 1. \end{pmatrix}$$

$$U_{\text{ef}}(10^{-3}\text{s}) = \begin{pmatrix} 0.999 & 0.007 & 0.005 & 0.044 \\ 0.008 & 1. & 0.003 & 0.017 \\ 0.006 & 0.004 & 0.999 & 0.038 \\ 0.044 & 0.017 & 0.038 & 0.998 \end{pmatrix}$$

$$U_{\text{ef}}(10^{-2}\text{s}) = \begin{pmatrix} 0.953 & 0.048 & 0.024 & 0.299 \\ 0.075 & 0.988 & 0.11 & 0.073 \\ 0.05 & 0.121 & 0.986 & 0.1 \\ 0.29 & 0.079 & 0.12 & 0.946 \end{pmatrix}$$

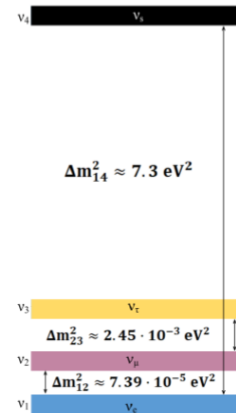
$$U_{\text{ef}}(10^{-1}\text{s}) = \begin{pmatrix} 0.835 & 0.438 & 0.142 & 0.301 \\ 0.427 & 0.527 & 0.731 & 0.073 \\ 0.233 & 0.721 & 0.645 & 0.1 \\ 0.257 & 0.104 & 0.17 & 0.946 \end{pmatrix}$$

Взаимодействие нейтрино с космической плазмой радикально подавляет процесс осцилляций, особенно на ранних этапах.

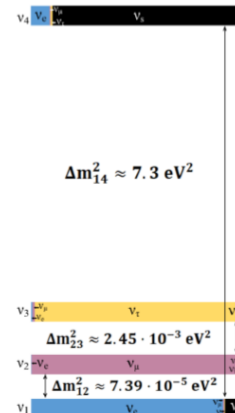
Эффективная матрица смешивания постепенно изменяется от диагональной матрицы при $t=10^{-5}$ с до формы, которая почти совпадает с матрицей смешивания в вакууме при $t=1$ с:

Схема смешивания активных и стерильных нейтрино в процессе расширения Вселенной

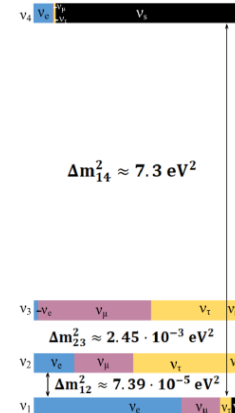
$10^{-4}\text{s} - 10^{-3}\text{s}$



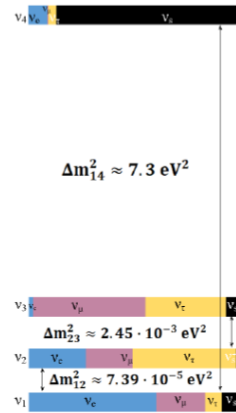
10^{-2}s



10^{-1}s



1s



Уравнение рождения и аннигиляции стерильных нейтрино

$$\frac{dn_{\nu_s}}{dt} + 3Hn_{\nu_s} = \frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2 2\theta_{14} n_{\nu_e}}{\tau_{\nu_e}} + \frac{\sin^2 2\theta_{24} n_{\nu_\mu}}{\tau_{\nu_\mu}} + \frac{\sin^2 2\theta_{34} n_{\nu_\tau}}{\tau_{\nu_\tau}} \right) -$$

$$H(T) = \frac{T^2}{M_{Pl}^*}$$

$$E = 3.15T$$

$$\frac{1}{\tau_{\nu_e}} = \Gamma_{\nu_e} = \frac{13}{9} \frac{7\pi}{24} G_f^2 T^4 E$$

$$\frac{1}{2} \left(\frac{\sin^2 2\theta_{14}}{\tau_{\nu_e}} + \frac{\sin^2 2\theta_{24}}{\tau_{\nu_\mu}} + \frac{\sin^2 2\theta_{34}}{\tau_{\nu_\tau}} \right) n_{\nu_s}$$

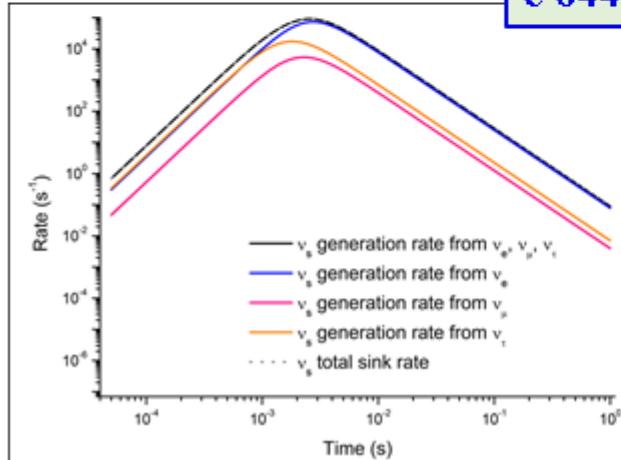
$$T[eV] \sim \frac{887734}{\sqrt{t[s]}}$$

$$\frac{1}{\tau_{\nu_\mu}} = \frac{1}{\tau_{\nu_\tau}} = \Gamma_{\nu_\mu} = \frac{7\pi}{24} G_f^2 T^4 E$$

Генерация стерильных нейтрино

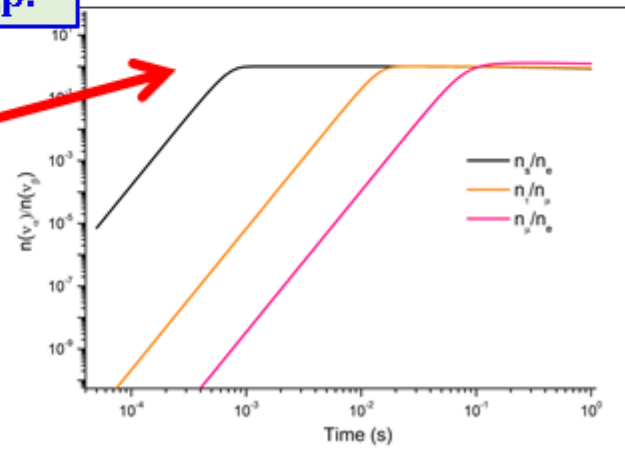
Письма ЖЭТФ т.116, вып 10,
с 644-658 А.П. Серебров и др.

Плотность различных нейтрино

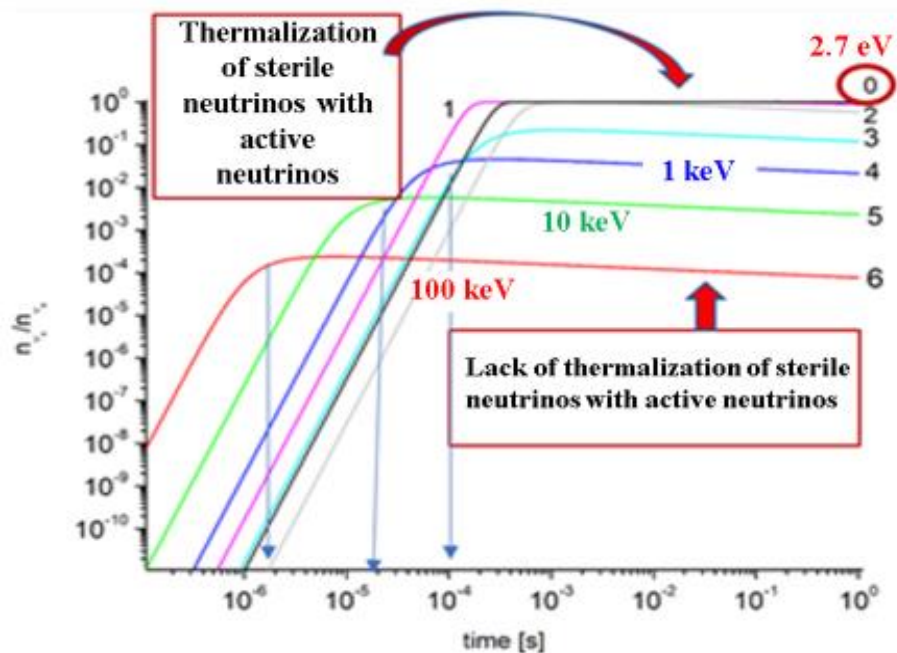
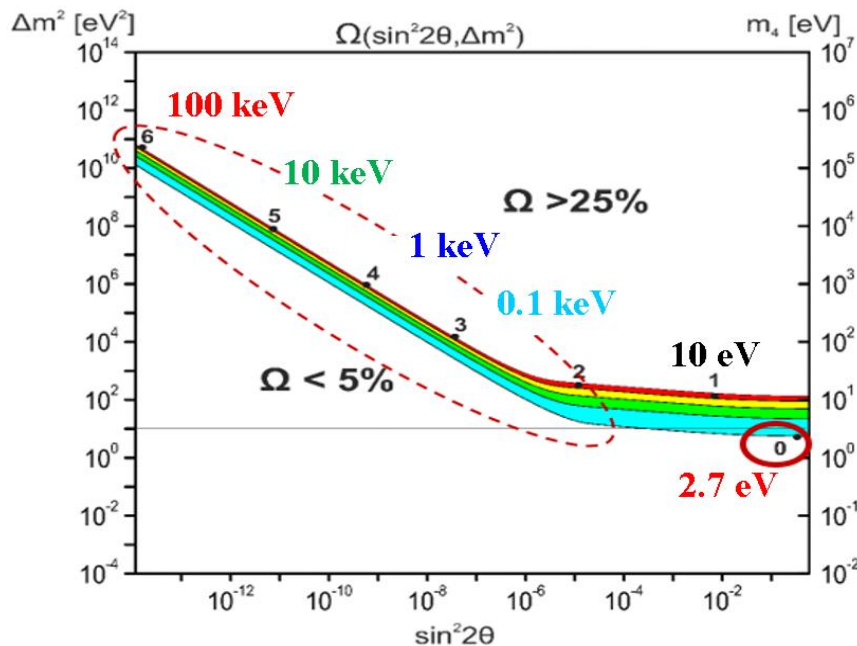


$$n_{\nu_s} / n_{\nu_e} = 1$$

Термализация
стерильных нейтрино
 $\Delta m_{14}^2 = 7.3 \text{ eV}^2$,
 $\sin^2 2\theta_{14} = 0.36$

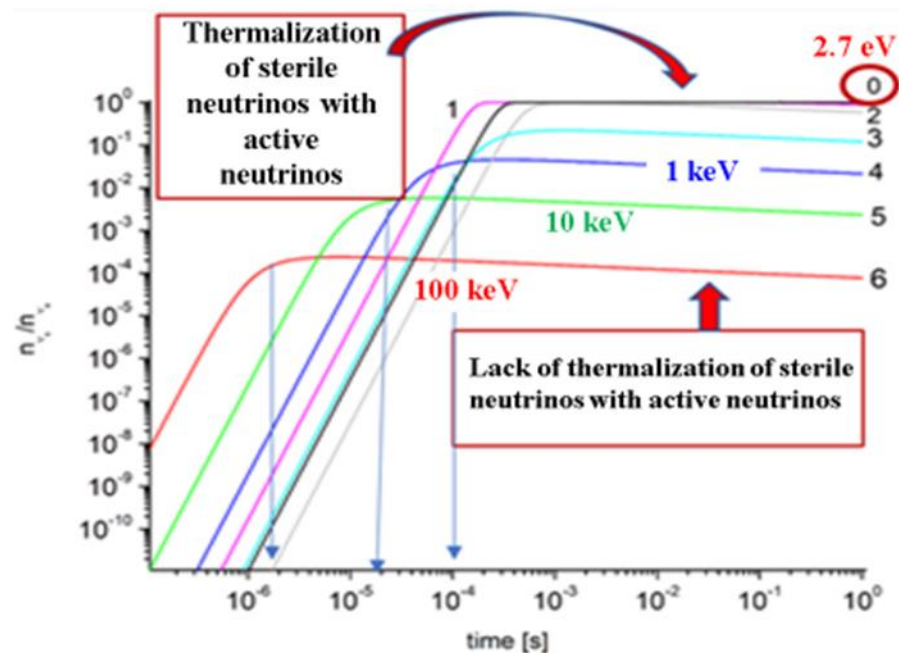
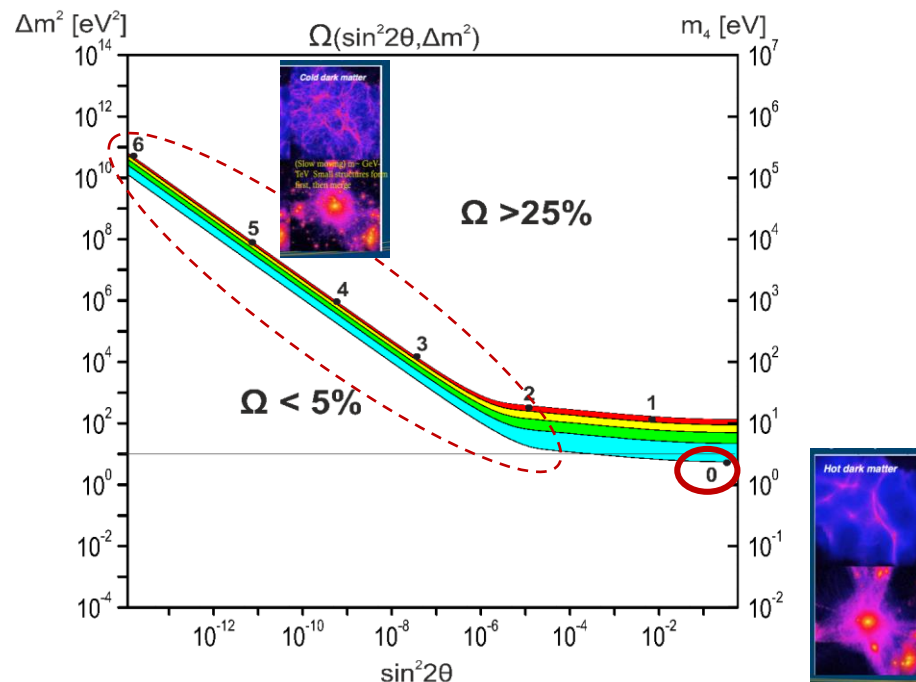


Тяжелые стерильные нейтрино с очень малыми углами смешивания



Электронные, мюонные и тау-стерильные нейтрино – m_4 , m_5 и m_6 .
Какая иерархия масс?

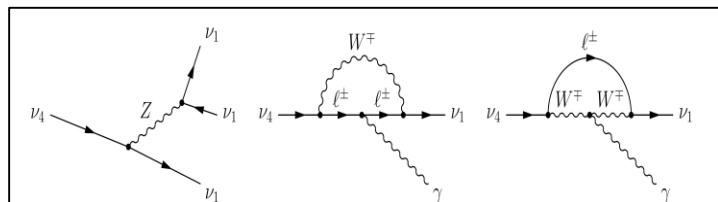
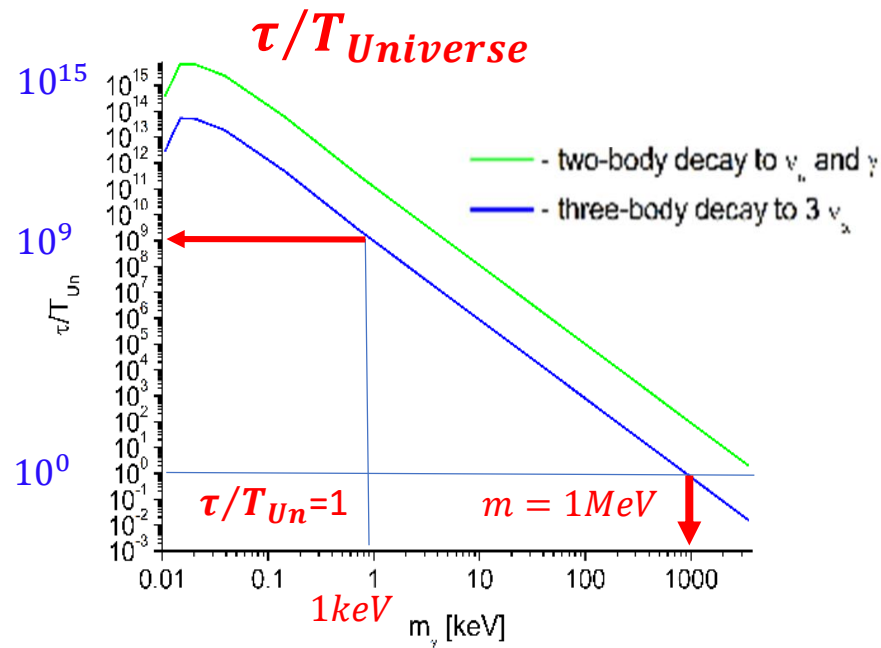
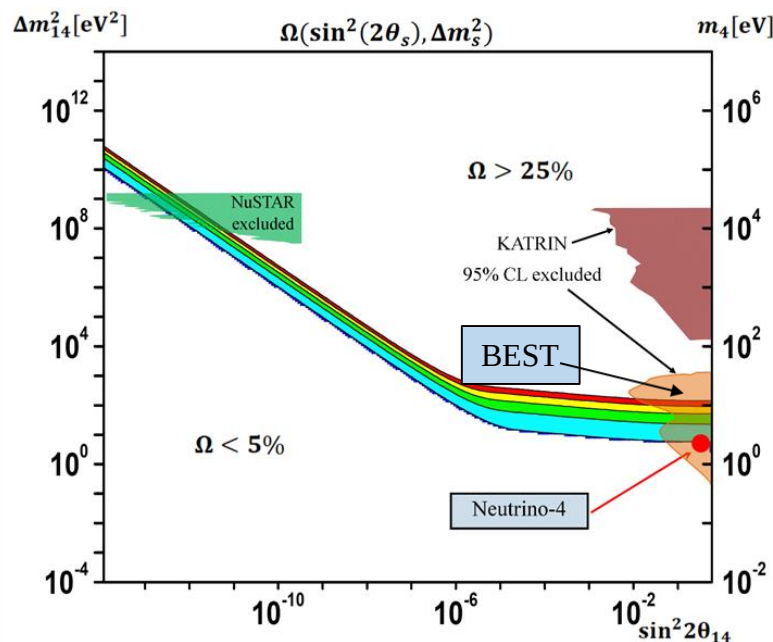
Тяжелые стерильные нейтрино с очень малыми углами смешивания



Тяжелые стерильные нейтрино с очень малыми углами смешивания можно рассматривать как темную материю и они объясняют структуру Вселенной!

Предел продолжительности жизни тяжелых стерильных нейтрино

Время распада правосторонних нейтрино в двухчастичном и трехчастичном каналах распада

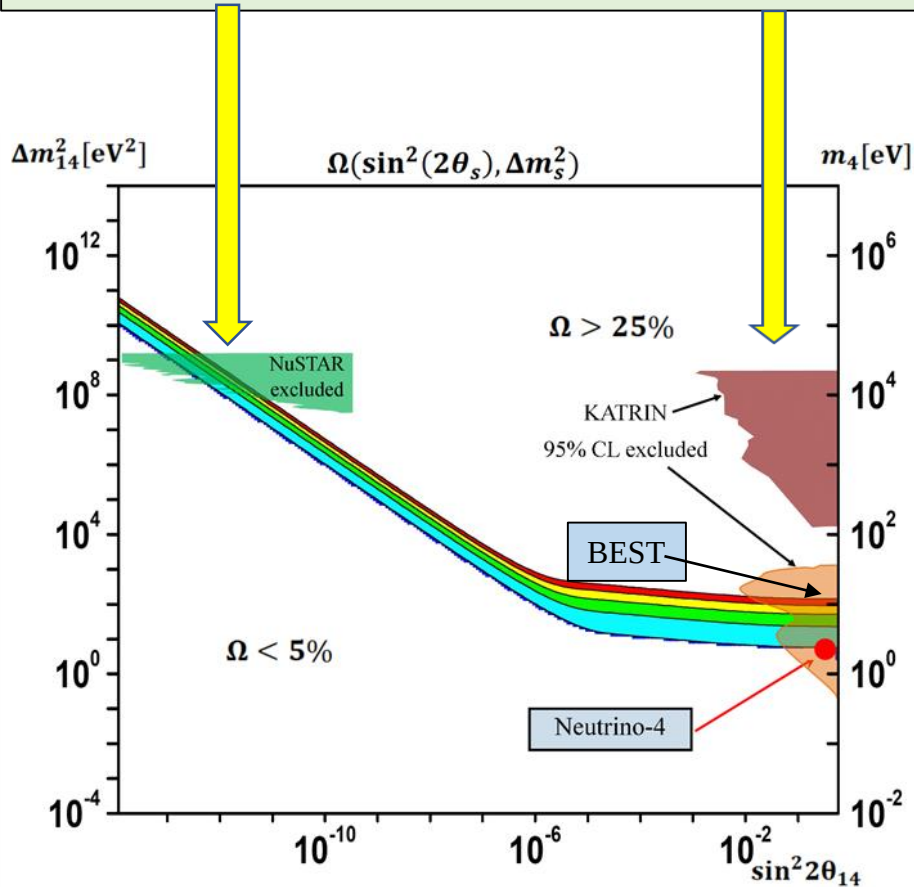


Время жизни тяжелого нейтрино как функция его массы.
Время жизни нормировано на время существования Вселенной.

Dasgupta and J. Kopp, Phys.
Rept. **928** (2021) 1-63,
[arXiv:2106.05913v1](https://arxiv.org/abs/2106.05913v1)

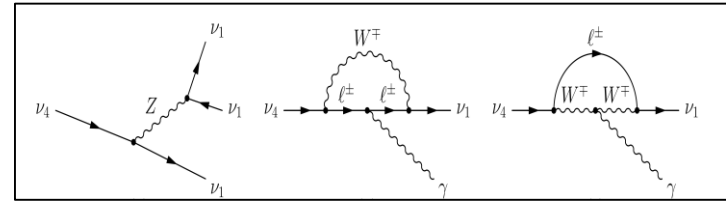
arxiv.2306.09962
The result of the Neutrino-4 experiment, sterile neutrinos, dark
matter and the Standard Model [A. P. Serebrov](#), [R. M. Samoilov](#), [O. M. Zharebtsov](#)

Астрофизические ограничения на массу тяжелых стерильных нейтрино и лабораторные ограничения на массу тяжелых и легких стерильных нейтрино



Dasgupta and J. Kopp,
Phys. Rept. **928** (2021) :
63, [arXiv:2106.05913v1](https://arxiv.org/abs/2106.05913)

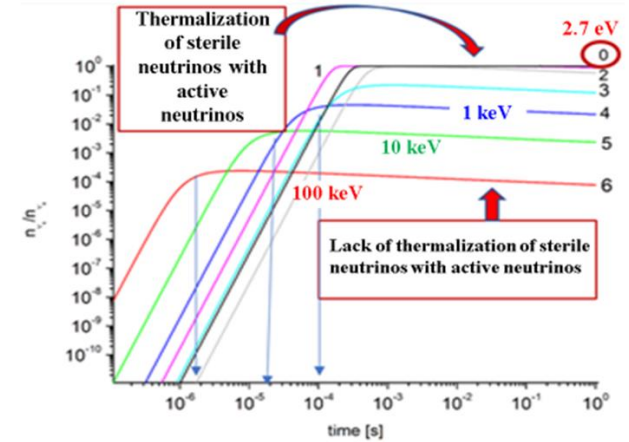
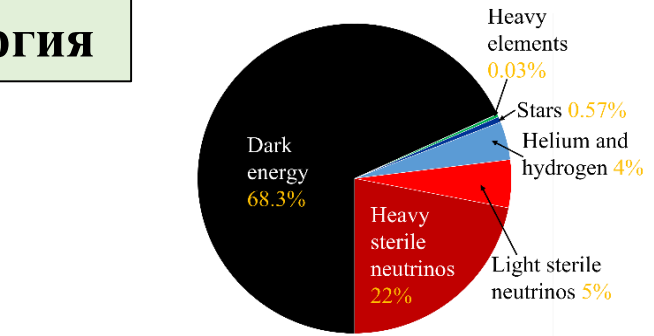
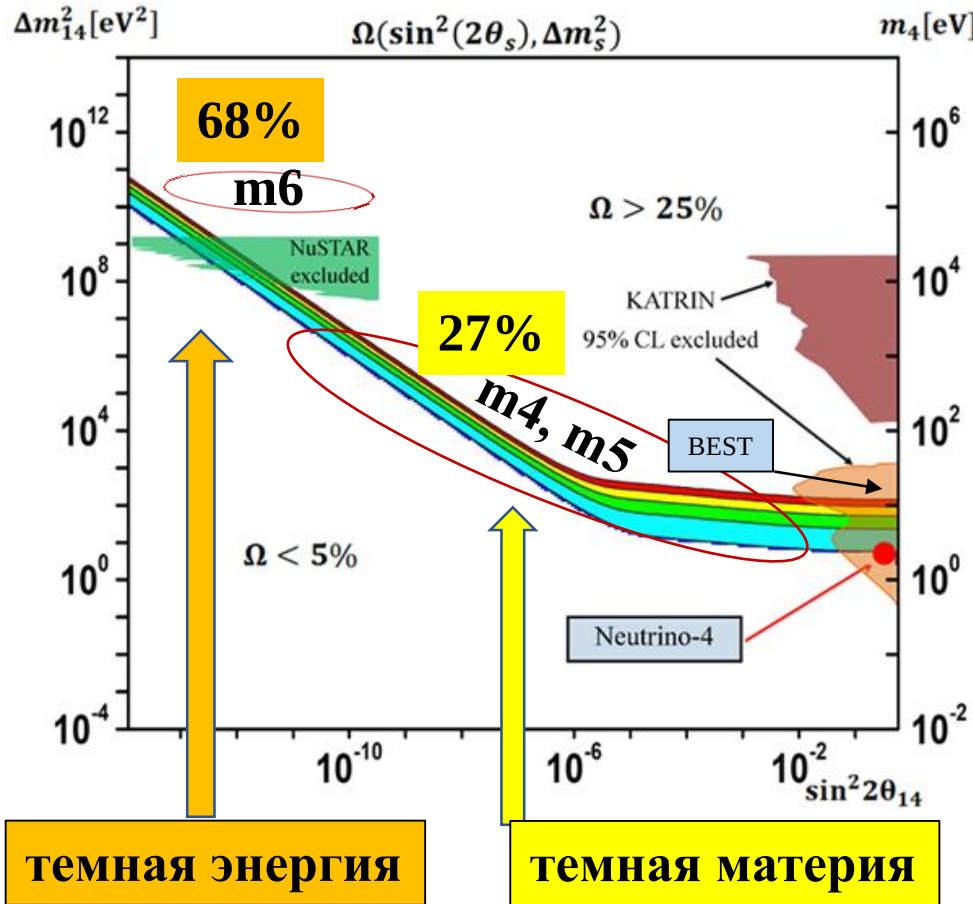
— two-body decay to ν_α and γ
— three-body decay to $3 \nu_\alpha$



Когда тяжёлый стерильный нейтрино распадается на активный лёгкий нейтрино и гамма-квант, энергия гамма-кванта равна половине массы стерильного нейтрино.

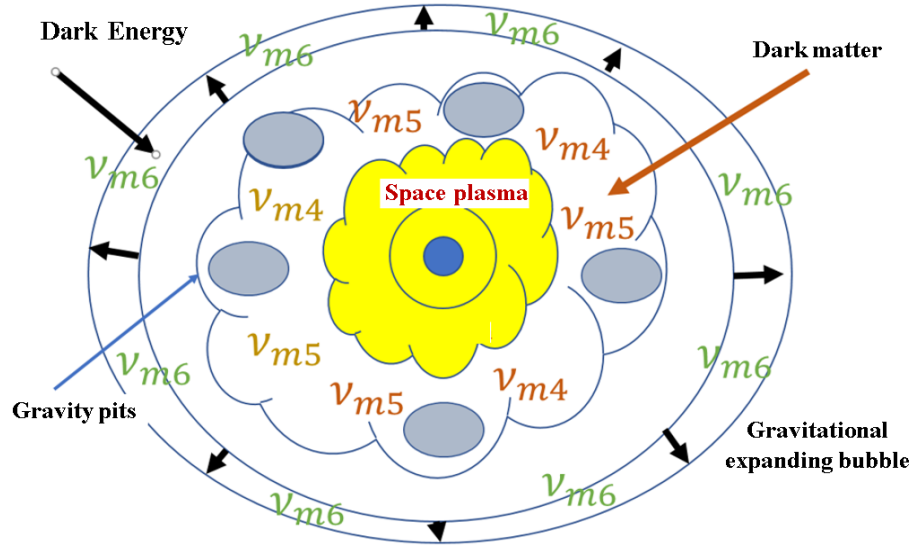
$$E_\gamma = m_{\nu_s}/2$$

Тёмная материя и тёмная энергия

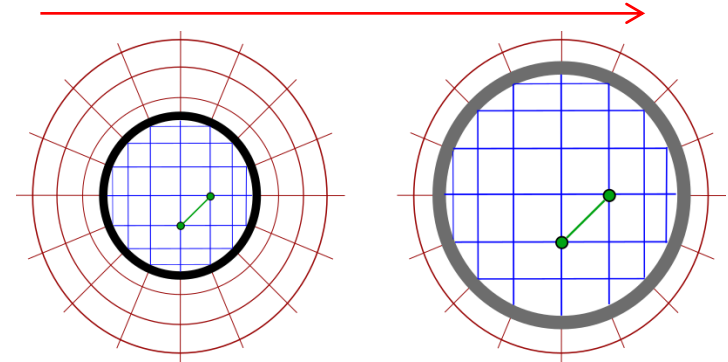


Стерильные нейтрино электрона, мюона и тау-частицы – m_4 , m_5 и m_6 . Какова иерархия масс?

Иллюстративная диаграмма эволюции Вселенной в модели стерильных нейтрино.



Динамика расширения Вселенной



Схематическое и наглядное изображение динамического процесса генерации темной энергии и темной материи на основе трех стерильных нейтрино m_4 , m_5 , m_6 (электрон, мюон и тау).

Генерация лептонной асимметрии Вселенной

Основная идея механизма возникновения лептонной асимметрии состоит в том, что за счёт вылета стерильных нейтрино из космической плазмы замораживается лептонная асимметрия существовавшая на тот момент времени. Причём лептонная асимметрия замораживается в той доли сколько стерильных нейтрино вылетело из плазмы по отношению к активным нейтрино, продолжающим участвовать в термодинамическом процессе. Таким образом, лептонная асимметрия равна:

$$L_\nu = \frac{n_\nu - n_{\bar{\nu}}}{n_\nu + n_{\bar{\nu}}} = \frac{n_{\nu_s}}{n_\nu} \times A^{LRAM}$$

где n_{ν_s} - плотность стерильных нейтрино, покинувших плазму,

n_ν - плотность активных нейтрино, участвующих в термодинамическом процессе,

A_{LR} - асимметрия CP-нарушения в распадах нейтральных мезонов равная

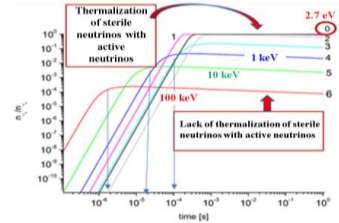
$$A^{LRAM} \approx -(1 - 2\delta^2) \times 2\zeta = (5.4 \pm 1.8) \times 10^{-3}$$

Генерация лептонной асимметрии Вселенной

$$L_\nu = \frac{n_\nu - n_{\bar{\nu}}}{n_\nu + n_{\bar{\nu}}} = -\frac{n_{\nu_s}}{n_\nu} \times A_{LR}$$

$$A^{LRAM} \approx -(1 - 2\delta^2) \times 2\zeta = (5.4 \pm 1.8) \times 10^{-3}$$

$$\frac{n_{\nu_s}}{n_\nu}$$



$$L_\nu = \frac{n_{\nu_s}}{n_\nu} \times A^{LRAM} = (5.4 \pm 1.8) \times (10^{-5} \div 10^{-8})$$

Основная идея, объясняющая барионную асимметрию Вселенной, принадлежит А. Д. Сахарову.

«Три основных предпосылки для космологического формирования барионной асимметрии (БА):

- I. Отсутствие закона сохранения барионного заряда. $\Delta L = 2$
- II. II. Различие между частицами и античастицами, проявляющееся в нарушении СР-инвариантности.
- III. III. Нестационарность. Формирование БА возможно только в нестационарных условиях при отсутствии локального термодинамического равновесия».

лептонная асимметрия

$$L_\nu^{cor} = \frac{n_{\nu_s}}{n_\nu^{cor}} \times A_{LR} = (1.08 \pm 0.36) \times 10^{-8}$$

барионная асимметрия

$$\eta^{LR} \approx \frac{1}{12} A_B(t = 10^{-3} \text{ s}) \approx (6.0 \pm 2.3) \times 10^{-10}$$

Лептонная асимметрия Вселенной
для нейтральных мезонов

Потенциал слабого взаимодействия в космической плазме

Потенциал слабого взаимодействия подробно рассматривается в работе [69], а также был использован в работе [70] и может быть представлен следующим уравнением:

$$U = \eta \frac{11\zeta(3)}{\pi^2 \sqrt{2}} G_F T^3 - \frac{14}{45} \frac{\pi(3 - \sin^2 \theta_W) \sin^2 \theta_W}{\alpha} G_F^2 T^4 E$$

[69] D. Notzold and G. Raffelt, Nucl.Phys. A B307, 924 (1988)

[70] A. P. Serebrov, R. M. Samoilov, M. E. Tchaikovsky, and O. M. Zhrebtssov, JETP Letters, 116:10 (2022), 669–682

или в численном выражение:

$$U = \eta \times 1.1 \times 10^{-23} \left[\frac{1}{\text{eV}^2} \right] T^3 - 1.1 \times 10^{-44} \left[\frac{1}{\text{eV}^4} \right] T^4 E$$

где G_F - постоянная Ферми, T - температура плазмы, E - энергия частицы

$\eta = \frac{N_f - N_{\bar{f}}}{N_f + N_{\bar{f}}}$ - лептонная асимметрия $\frac{11\zeta(3)}{\pi^2 \sqrt{2}} T^3$ - плотность космической плазмы.

Лептонная асимметрия Вселенной для нейтральных мезонов

В ранней Вселенной лептонная асимметрия η была равна нулю. Но нейтральные мезоны, находясь в состоянии частицы и античастицы будут иметь разный потенциал взаимодействия со средой даже в случае, когда в среде нет асимметрии в числе частиц и античастиц, т.е. $\eta = 0$

Тогда разность потенциалов для нейтральных мезонов и антимезонов будет равна:

$$\Delta U \approx \pm A^{LR} \frac{11\zeta(3)}{\pi^2 \sqrt{2}} G_F T^3$$

$$A^{LRAM} \approx -(1 - 2\delta^2) \times 2\zeta = (5.4 \pm 1.8) \times 10^{-3}$$

или в численном выражении

$$\Delta U \approx \pm 6 \cdot 10^{-23} [\text{eV}^{-2}] \cdot T^3 [\text{eV}^3]$$

Эволюция Вселенной в лево-правой модели с СР-нарушением

В этом разделе мы рассмотрим роль потенциала слабого взаимодействия в эволюции Вселенной. Для этого необходимо воспользоваться следующей матрицей:

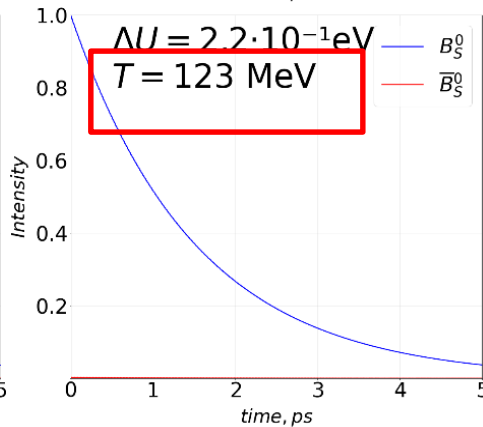
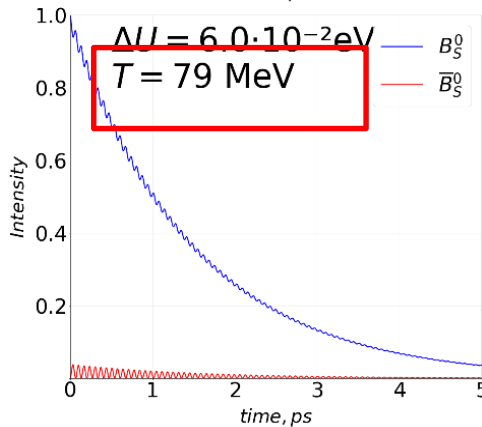
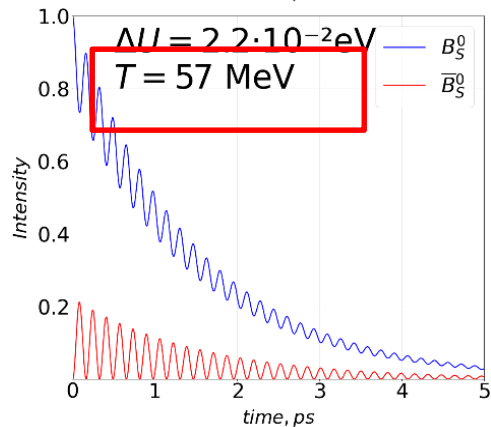
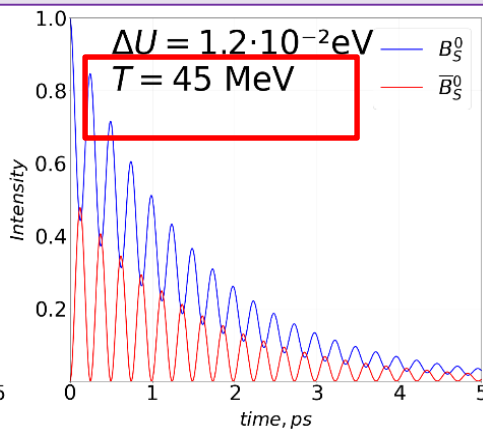
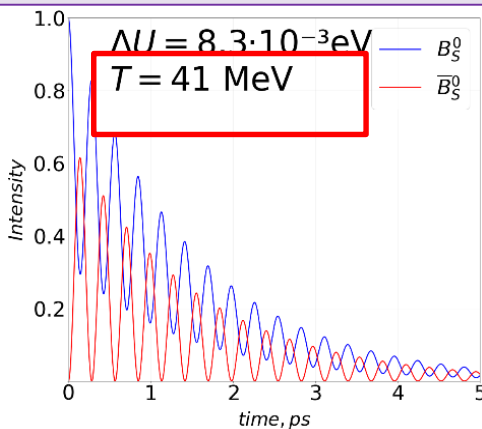
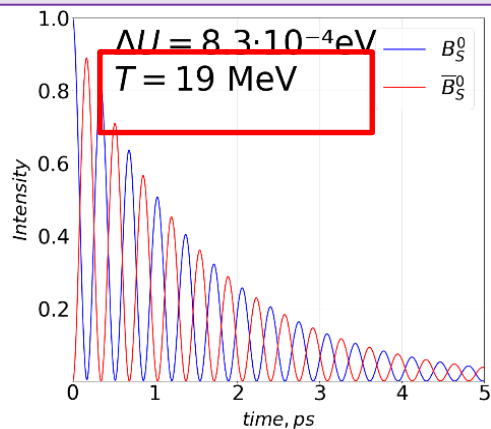
$$\begin{pmatrix} M - \Delta U - i \frac{\Gamma - \delta\Gamma}{2} & \Delta m - i \frac{\Delta\Gamma}{2} \\ \Delta m - i \frac{\Delta\Gamma}{2} & M + \Delta U - i \frac{\Gamma + \delta\Gamma}{2} \end{pmatrix}$$

В ранней Вселенной не было асимметрии в числе частиц и античастиц и **причина возникновения асимметрии не известна**. В лево-правой модели с СР-нарушением возникает асимметрия в потенциале взаимодействия для частиц и античастиц, которая ранее была оценена через параметры модели

$$A^{LRAM} \approx -(1 - 2\delta^2) \times 2\zeta = (5.4 \pm 1.8) \times 10^{-3}$$

$$\Delta U \approx \pm 6 \cdot 10^{-23} [\text{eV}^{-2}] \cdot T^3 [\text{eV}^3]$$

Влияние разности потенциалов на процесс подавления осцилляций



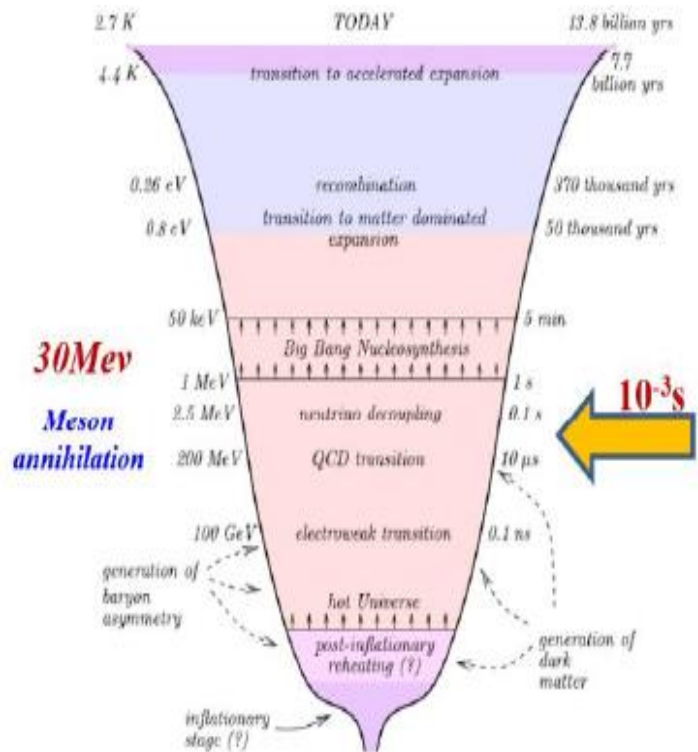
Как можно
видеть, при
увеличение
расстояния
между
уровнями для
частиц и
античастиц
подавляется
процесс
осцилляций.

Температура плазмы (плотность космической плазмы - T^3)

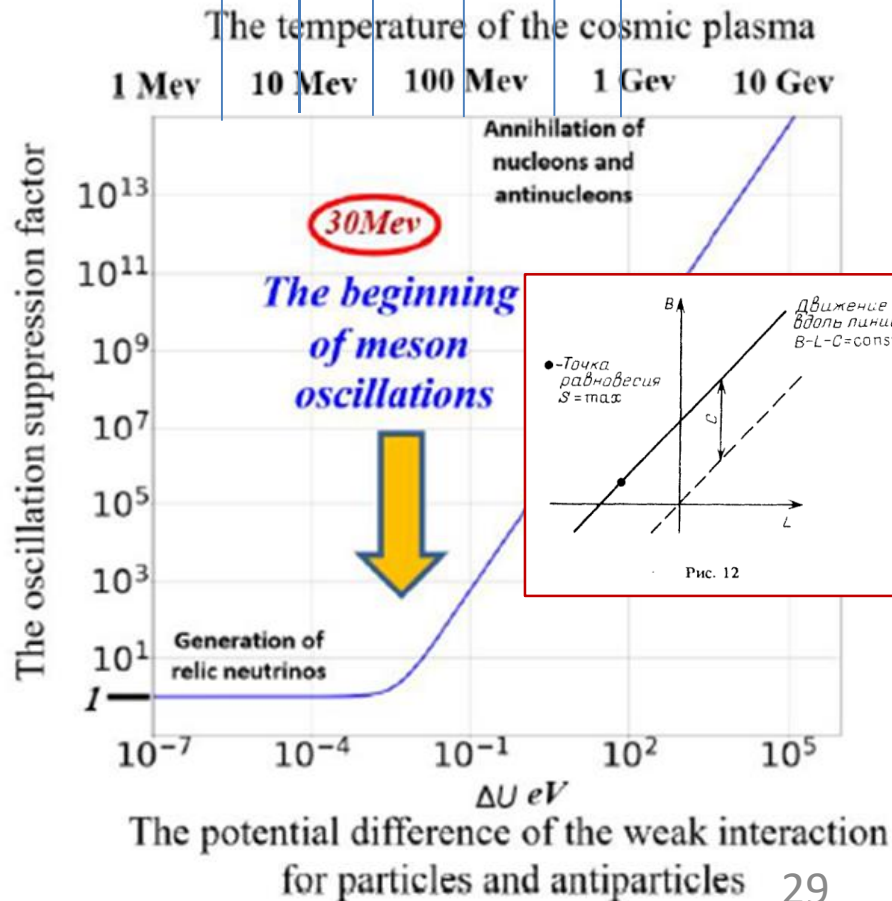
Процесс формирования лептонной асимметрии

1. Как показывают расчёты, при температуре космической плазмы **выше 100 МэВ** процесс осцилляций нейтральных мезонов **подавляется разностью потенциалов слабого взаимодействия.**
2. При этом **подавляется и процесс их взаимной анигиляции**, именно **на этом этапе** возникает лептонная асимметрия, т.к. из-за процесса CP-нарушения **происходит преимущественный распад антимезонов.**
3. На следующем этапе при температуре ниже 50 МэВ происходит **анигиляция** оставшихся мезонов и антимезонов, **увеличивая степень лептонной асимметрии.**

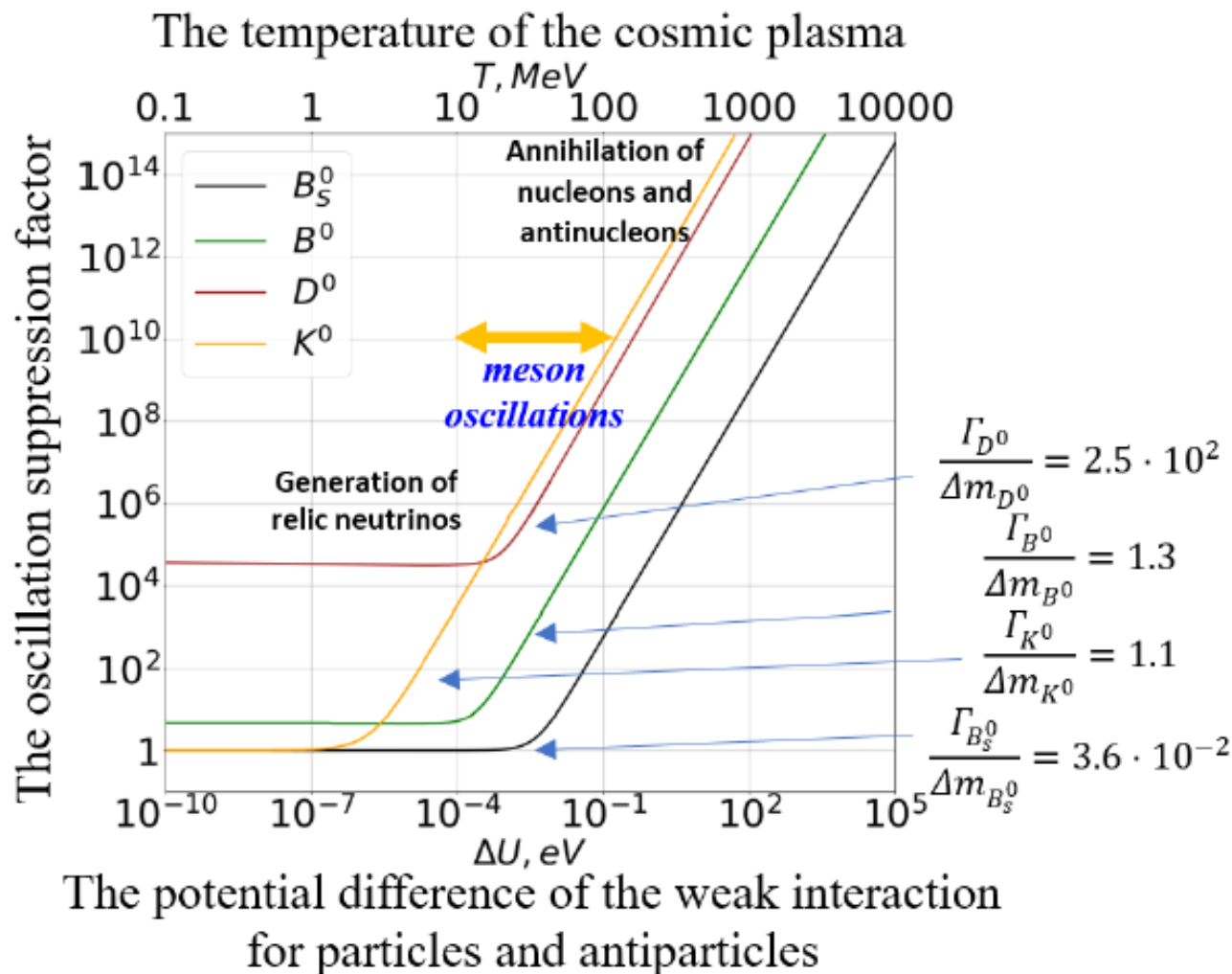
Эволюция Вселенной



t 10⁻¹ 10⁻² 10⁻³ 10⁻⁴ 10⁻⁵ 10⁻⁶ s



Эры	Время	Этап эволюции	Температура, К	Плотность, г/см³	Энергия, ГэВ
Планковская		Неизвестные законы физики, квантовые свойства пространства-времени			
Адронная	10 ⁻⁴³ с	Граница применимости релятивистской теории тяготения	10 ³²	10 ⁹⁴	8.6·10 ¹⁹
	10 ⁻³⁵ с	Возникновение зарядовой асимметрии	10 ²⁸	10 ⁷⁸	8.6·10 ¹⁵
	10 ⁻⁵ с	Аннигиляция нуклонов и антинуклонов	3·10 ¹²	10 ¹⁶	2.58·10 ⁻¹
Лептонная	10 ⁻⁴ с	Граница применимости экспериментально проверенных законов физики	10 ¹²	10 ¹⁴	8.6·10 ⁻¹
	10 ⁻³ с	Аннигиляция мезонов	3·10 ¹¹	10 ¹²	2.58·10 ⁻²
	0.2 с	Образование реликтовых нейтрино	2·10 ¹⁰	10 ⁷	1.72·10 ⁻³
Излучения	10 с	Аннигиляция электронов и позитронов	10 ¹⁰	10 ⁴	0.8.6·10 ⁻³
	100 с	Образование первичного гелия	10 ⁸	10 ²	8.6·10 ⁻⁵
Вещества	10 ⁶ лет	Отрыв реликтового излучения от вещества	4·10 ³	10 ⁻²⁰	3.44·10 ⁻¹⁰
	10 ⁹ лет	Начало возникновения звёзд и галактик	30	10 ⁻²⁶	2.58·10 ⁻¹²
	1-2·10 ¹⁰ лет	Современная эпоха	2-7	10 ⁻²⁹ -10 ⁻³⁰	2-22·10 ⁻¹³



Аннигиляция нейтральных мезонов

Процесс аннигиляции происходит при температуре приблизительно:

30 МэВ для B_s^0 - мезонов

20 МэВ для D^0 - мезонов

10 МэВ для B^0 - мезонов

2 МэВ для K^0 - мезонов

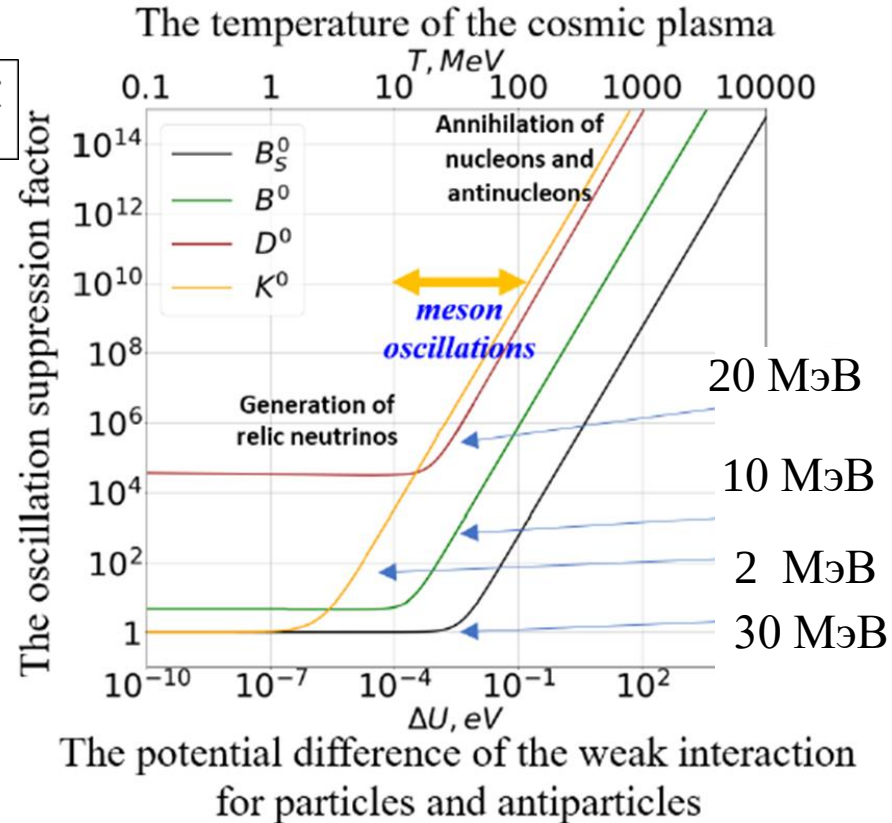
$$T[\text{eV}] \sim \frac{887734}{\sqrt{t[\text{s}]}}$$

0.9 ms

2.0 ms

7.9 ms

200 ms



Стерильные нейтрино могут объяснить наличие темной материи во Вселенной и формирование лептонной асимметрии.

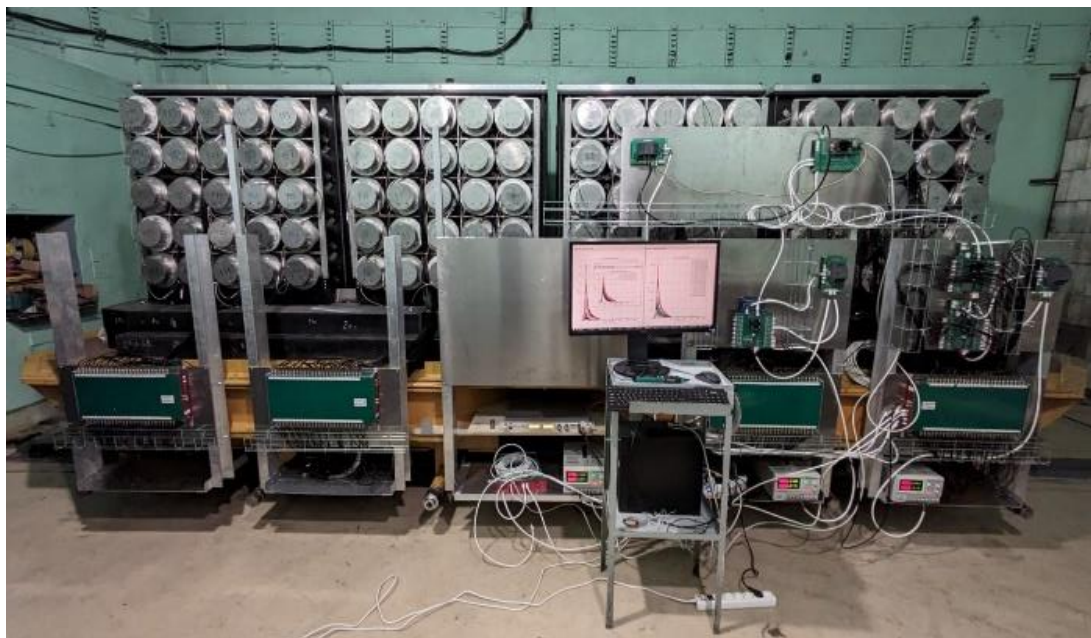
Легкие стерильные нейтрино можно обнаружить в лабораторных экспериментах, поэтому эксперименты следует продолжать.

Эксперименты по поиску легких стерильных нейтрино на реакторе СМ-3

*Первая нейтринная
лаборатория на реакторе
СМ-3*



*Завершена установка детектора
нейтрино во второй лаборатории.*



Результаты прямых экспериментов по поиску стерильных нейтрино - **Нейтрино-4 и BEST с GA** свидетельствуют о существовании стерильного нейтрино с параметрами осцилляций:

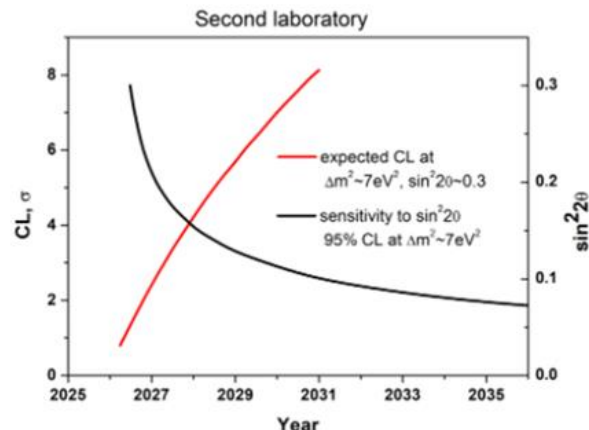
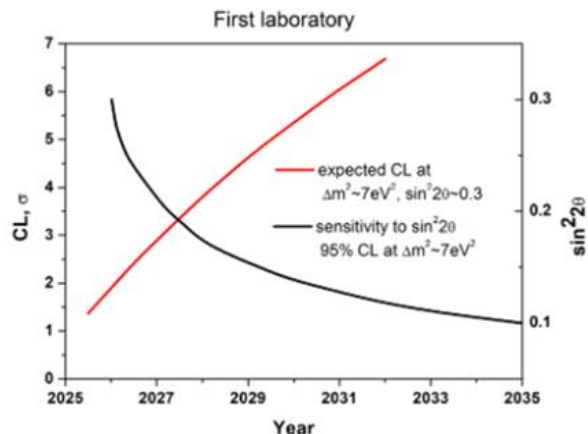
$$\Delta m_{14}^2 = 7.3 \text{ eV}^2, \sin^2 2\theta_{14} = 0.36$$

Противоречие с результатами Нейтрино-4 и BEST+ГА (KATRIN, PROSPECT)

Эксперименты Нейтрино-4 и BEST должны быть продолжены

Эксперименты по поиску легких стерильных нейтрино на реакторе СМ-3

С целью проверки результата эксперимента НЕЙТРИНО-4 планируется увеличение точности измерений в 3 раза в течение 5 лет



**Расширение Стандартной модели должно быть
подтверждено повышением экспериментальной
точности в экспериментах по распаду нейтрона**

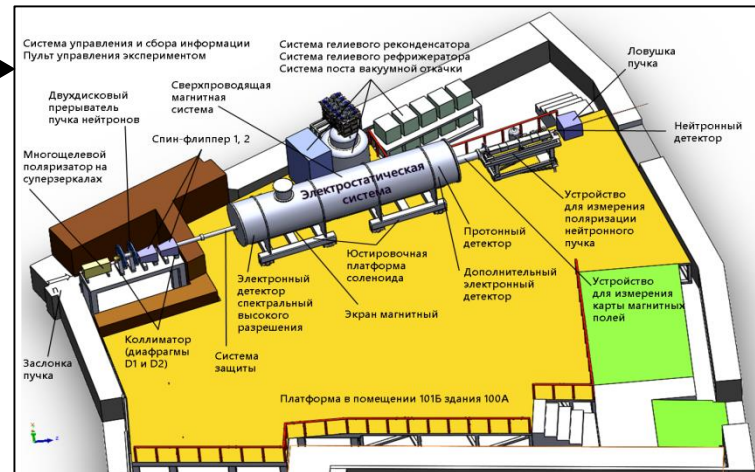
**Это можно сделать на установке «Нейтронный бета-распад»
на реакторе ПИК**

Проект установки для измерения асимметрии распада нейтронов на ПИК-реакторе

Изготовление установки «РАСПАД НЕЙТРОНА»

Сверхпроводящий соленоид

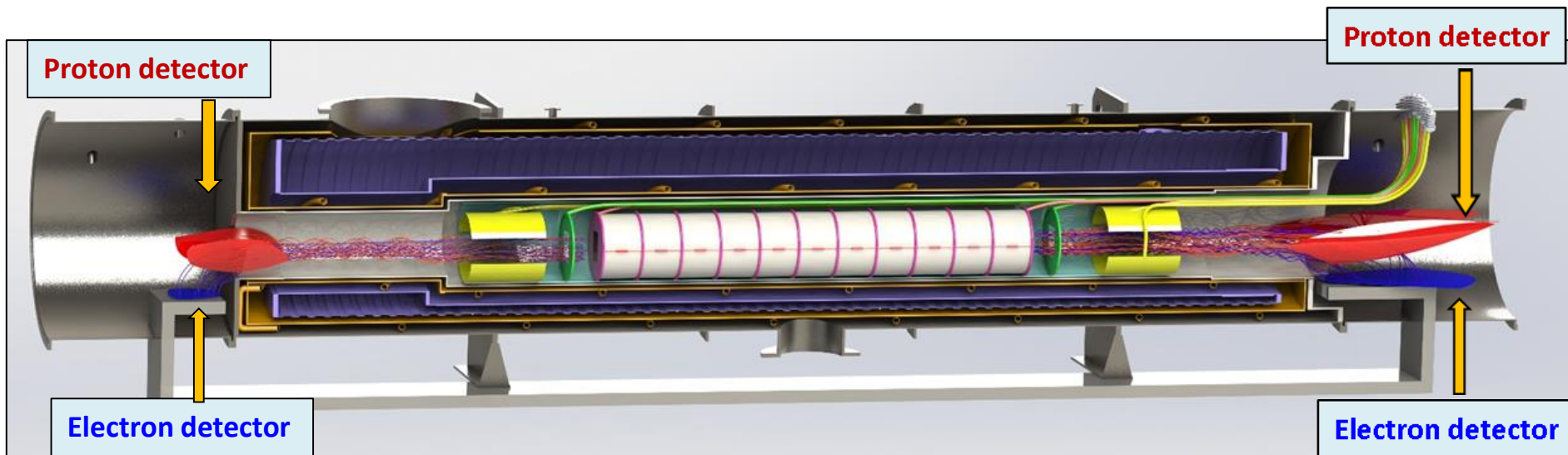
Криостат



**Испытания установки на НИИЭФА 31.05.24.
В сверхпроводящий соленоид был подан ток 1050 А.**



Проект установки для измерения всех трех асимметрий распада нейтронов (a , A и B) на реакторе ПИК



Планируемое повышение точности измерений в 3 раза позволит ответить на принципиально важный вопрос о несоответствии между точными измерениями распада нейтронов и Стандартной моделью.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ по двум семинарам: «Прецизионные исследования распада нейтрона, лево-правая асимметричная модель слабого взаимодействия» и «Барионная и лептонная асимметрия Вселенной в лево-правой асимметричной модели слабого взаимодействия»

1. Прецизионные исследования распада нейтрона указывают на наличие примесного состояния правого векторного бозона W_R к левому векторному бозону W_L , причём знак угла смешивания W_R и W_L изменяется на противоположный при переходе от W^- к W^+ , что приводит к CP-нарушению.
2. Предложена лево-правая асимметричная модель слабого взаимодействия, объясняющая природу CP-нарушения. В рамках асимметричной модели возникает 100-процентное CP-нарушение, т.к. знак CP-нарушения изменяется на противоположный при переходе от частиц к античастицам или, другими словами, фаза CP-нарушения равна $\pm \pi/2$.
3. Параметр модели: угол смешивания $\zeta = -(2.7 \pm 0.9) \cdot 10^{-3}$. Оценка на массу W_R $M_{W_R} = (340 \pm 60) \text{ ГэВ}$ даётся из параметра $\delta = (5.5 \pm 1.8) \times 10^{-2}$, который есть отношение квадратов массовых состояний векторных бозонов.
4. В рамках асимметричной модели могут быть успешно описаны эффекты CP-нарушения в распадах K^0 -мезонов, D^0 -мезонов, B^0 -мезонов и B_s^0 -мезонов.
5. В рамках асимметричной модели удаётся объяснить барионную и лептонную асимметрию Вселенной.

Вопрос о С-инвариантности, Р-инвариантности, Т-инвариантности и СРТ-инвариантности

Первым было нарушено положение о пространственной **инверсии Р** (опыт мадам Ву был выполнен в 1956 году). Но тогда было сказано, что сохраняется **комбинированная чётность (Лев Ландау 1957 год)**. Однако, это положение было затем опровергнуто экспериментально в 1964 году Крониным и Фитчем в распаде каонов. Тогда было сказано, что, **если нарушается СР, тогда нарушается и Т-инвариантность**, потому что нарушать **СРТ-инвариантность** ни в коем случае нельзя из-за Лоренц инвариантности и теоремы Людерса - Паули.

Как мы видим происходит пересмотр теоретических положений по мере развития эксперимента. В настоящее время мы имеем следующий этап развития эксперимента, который требует пересмотра теоретических положений. Но дело в том, что анализ экспериментальных данных показывает, что ситуация другая – **нарушается С-инвариантность и СР-инвариантность, но сохраняется Т-инвариантность.**

**СРТ не нарушается, т.к. при смене знака времени изменяется знак СР-нарушения.
Всё восстанавливается!**

**Новое теоретическое обобщение данной ситуации – задача теоретиков.
Хотя, надо заметить, что асимметричная лево-правая модель вполне успешно
работает.**

Вывод 1

СКМ-подход «не работает» потому, что

- не даёт фундаментальной причины CP-нарушения,
- смешивает осцилляции и CP-нарушение, усложняя интерпретацию данных,
- конфликтует с экспериментальными ограничениями на T-нарушение.

LRAM предлагает последовательную альтернативу:

CP-нарушение возникает из асимметрии вакуума (примеси правого бозона, проявляется в диагональных элементах матрицы смешивания) и согласуется с экспериментами по распаду нейтрона и мезонов.

Это не просто «другая формула» — это другая физическая логика, которая лучше соответствует наблюдаемым фактам.

Вывод 2

LRAM подтверждена экспериментом и утверждает, что античастицы распадаются быстрее чем частицы.

D^0 -мезон — прямой экспериментальный факт: анти D^0 -мезон распадаются быстрее D^0 -мезона, точность 5%.

Тот же механизм работает для нейтрона.

**D^0 -мезон — это «пробный шар», который уже прилетел в мишень.
И он показывает: модель работает не на бумаге, а на эксперименте.**

D-коэффициент в распаде нейтрона — T-инвариантность сохранена с точностью 2×10^{-4} .

ЭДМ нейтрона подтверждает

Верхние пределы на EDM нейтрона на два порядка жёстче, чем пределы из D-асимметрию

Вывод 3

Наша аргументация выстраивается в последовательную цепочку:

1. Эксперимент: D-коэффициент в распаде нейтрона — T сохранена с точностью 2×10^{-4} .

2. Эксперимент: CP-нарушение в K-мезонах — эффект на уровне 5×10^{-3} .

Вывод: T-нарушение в 25 раз меньше, чем CP-нарушение. Стандартная логика «CP $\leftrightarrow$ T через CPT» не работает на этом масштабе.

Решение: CP-нарушение идёт через C-асимметрию вакуума (разный знак ζ для W^- и W^+), а не через T- нарушение.

T-инвариантность сохранена как фундаментальное свойство изотропного пространства-времени.

Эксперимент D-коэффициента — это прямой, честный тест, и он говорит: T сохранена.

Теория, которая предсказывает T-нарушение на уровне CP-нарушения, противоречит эксперименту.

Вывод 4

Четырёхмерное пространство-время симметрично, включая направление времени.

Стрела времени — термодинамическое явление, не фундаментальное. Поэтому нарушение СР должно идти через С-асимметрию вакуума, а не через Т-нарушение.

Это не просто альтернативная подгонка параметров — это другой философский подход к тому, где «живёт» нарушение симметрии: в динамике времени или в свойствах вакуума.

С точки зрения логики изотропии пространства-времени наш вариант выглядит более последовательным, чем стандартный.

Вывод 5

**В рамках лево-правой
асимметричной модели удаётся
объяснить барионную и
лептонную асимметрию
Вселенной**

*Эксперименты покажут,
что произойдет дальше.*

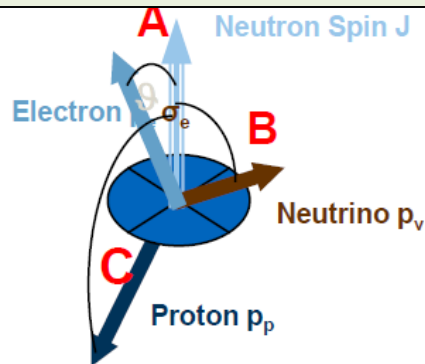
*Спасибо за Ваше
внимание*

Прецизионные исследования распада нейтронов и поиск отклонений от Стандартной модели

$$\frac{d^3\Gamma}{dE_e d\Omega_e d\Omega_\nu} = \frac{1}{2(2\pi)^5} G_F^2 |V_{ud}|^2 (1 + 3|\lambda|^2) p_e E_e (E_0 - E_e)^2$$

Jackson, Treiman, Wyld, Nucl. Phys. 4, 1957

$$\times \left[1 + a \frac{\vec{p}_e \cdot \vec{p}_\nu}{E_e E_\nu} + b \frac{m_e}{E_e} + \frac{\langle \vec{\sigma}_n \rangle}{\vec{\sigma}_n} \cdot \left(A \frac{\vec{p}_e}{E_e} + B \frac{\vec{p}_\nu}{E_\nu} + D \frac{\vec{p}_e \times \vec{p}_\nu}{E_e E_\nu} \right) \right]$$



$$A = -2 \frac{\lambda^2 + \lambda}{1 + 3\lambda^2}$$

$$\mathbf{-0.11958(21) \quad 0.17\%}$$

$$B = 2 \frac{\lambda^2 - \lambda}{1 + 3\lambda^2}$$

$$\mathbf{0.9807(30) \quad 0.3\%}$$

$$\lambda = g_A/g_V$$

$$\mathbf{-1.2757(5) \quad 0.04\%}$$

$$a = \frac{(1 - \lambda^2)}{(1 + 3\lambda^2)}$$

$$\mathbf{-0.10402(82) \quad 1.3\%}$$

$$D = 2 \cdot \frac{\text{Im}(\lambda)}{1 + 3|\lambda|^2}$$

$$\mathbf{-1.2 (2.0) \times 10^{-4}}$$

Neutron lifetime

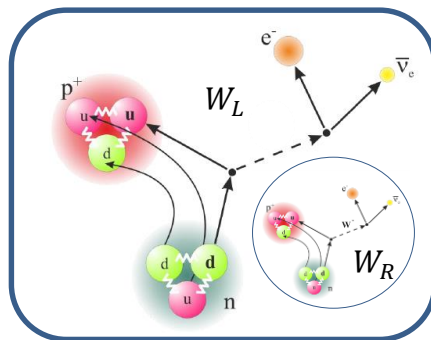
$$\tau^{-1} = G_F^2 |V_{ud}|^2 (1 + 3\lambda^2) \frac{f^R m_e^5 c^4}{2\pi^3 \hbar^7}$$

$$\mathbf{877.75 \pm 0.35s \quad 0.04\%}$$

Unitarity CKM

$$\begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{bmatrix}$$

$$V_{ud}^{unit} = \sqrt{1 - V_{us}^2 - V_{ub}^2} = 0.97452(18).$$



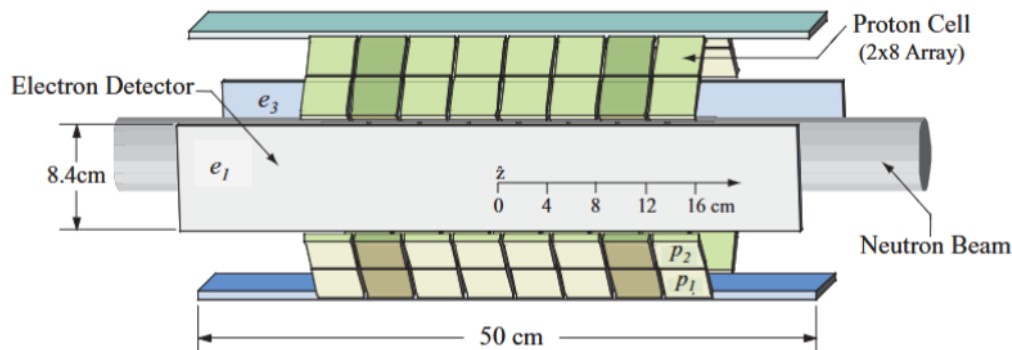
T-нечётная асимметрия распада нейтрона - D

Search for a *T*-odd, *P*-even triple correlation in neutron decay

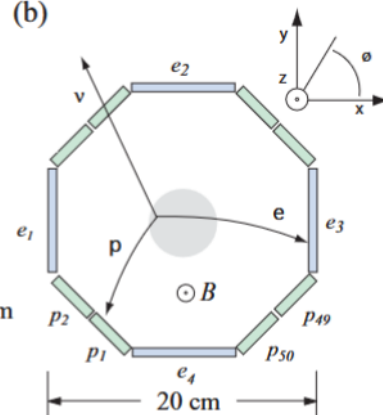
T. E. Chupp,¹ R. L. Cooper,¹ K. P. Coulter,¹ S. J. Freedman,² B. K. Fujikawa,² A. García,^{3,4} G. L. Jones,⁵ H. P. Mumm,⁶
J. S. Nico,⁶ A. K. Thompson,⁶ C. A. Trull,⁷ F. E. Wietfeldt,⁷ and J. F. Wilkerson^{3,8,9}

PHYSICAL REVIEW C **86**, 035505 (2012)

(a)



(b)



PDG

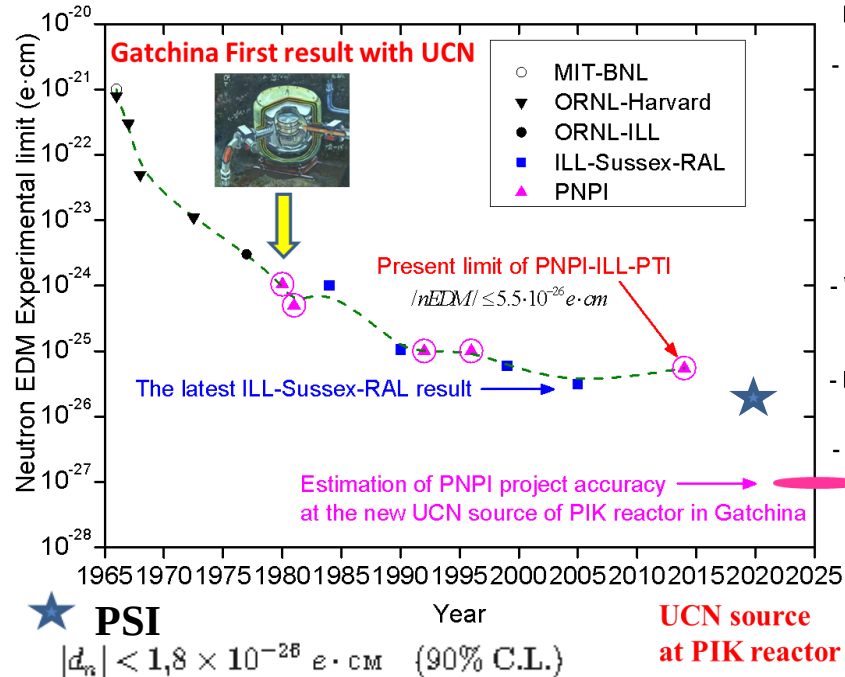
$$D = -1.2 (2.0) \times 10^{-4}$$

Results: We find $D = [-0.94 \pm 1.89(\text{stat}) \pm 0.97(\text{sys})] \times 10^{-4}$.

Это указание на сохранение T-инвариантности

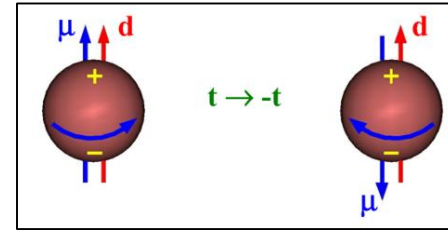
Верхние пределы на EDM нейтрона на два порядка жёстче, чем пределы на D-асимметрию Это тоже указание на сохранение Т-инвариантности

CP-violation and search for neutron EDM



Theoretical Prediction:

- Electromagnetic



VOLUME 68, NUMBER 22

PHYSICAL REVIEW LETTERS

1 JUNE 1992

Ю.Хриплович

New Limits on *T*-Odd, *P*-Even Interactions

- Weinberg Multi-Higgs

- Minimal SUSY
Cosmology

- Left-Right Symm.

$10^{-27} \text{ e} \cdot \text{cm}$

Это позволяет использовать экспериментальные верхние пределы на EDM нейтрона, для получения ограничений на ТОРЕ-взаимодействия — и, следовательно, на коэффициент *D* — на два порядка жёстче, чем прямые пределы на ТОРЕ.

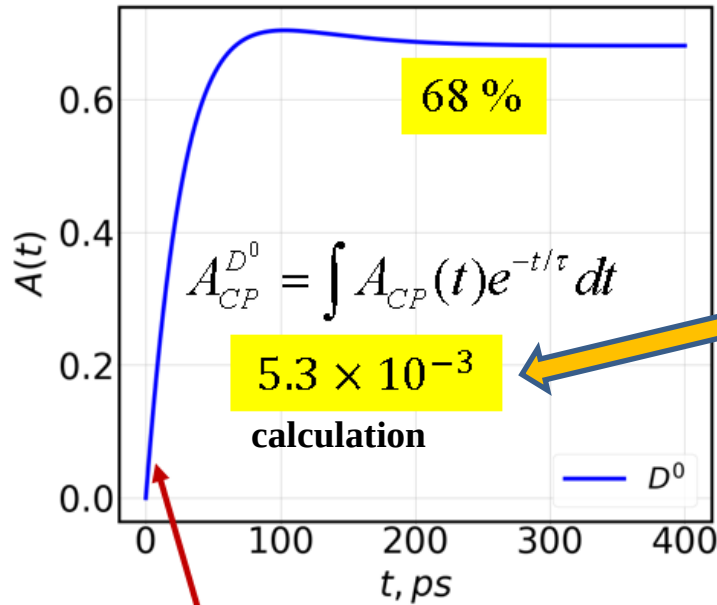
Left-right symmetry and electric dipole moments. A global analysis

Michael J. Ramsey-Musolf^{1,2,3,*} and Juan Carlos Vasquez^{2,†}

arXiv:2012.02799v1 [hep-ph] 4 Dec 2020

Результаты измерений ЭДМ нейтрона на реакторе ВВР-М, на реакторе ILL и планы на реакторе ПИК.

$$d_n < 2 \cdot 10^{-26} \rightarrow D < 2 \cdot 10^{-6}$$



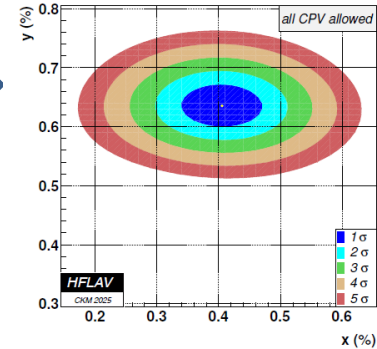
Для D^0 мезона отношение скорости распада к частоте осцилляций равно: 2.5×10^2

$$A = (6.36 \pm 0.24) \cdot 10^{-3}$$

experiment

$$y = \frac{\Delta\Gamma}{2\Gamma} = 0.636 \pm 0.024 (\%)$$

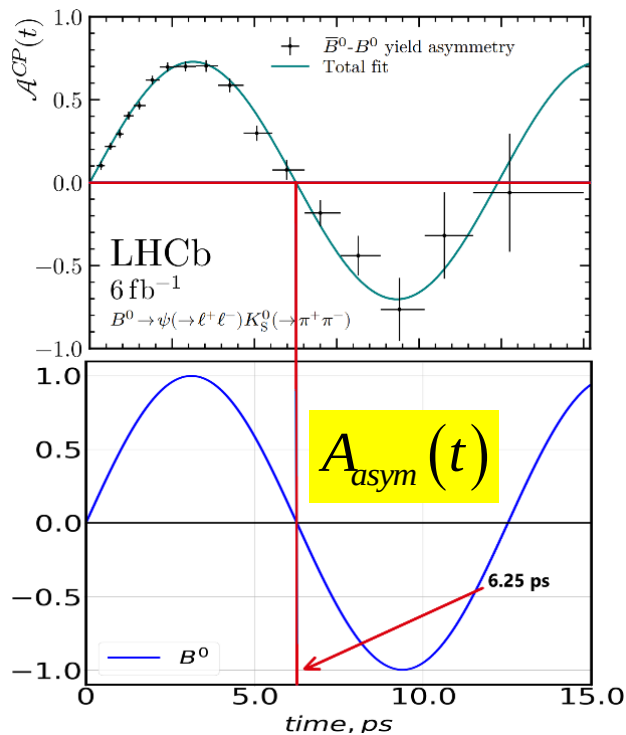
PDG 2026



Можно сделать вывод, что экспериментальные результаты для D^0 мезона могут быть описаны моделью LRAM.

В данном случае для D^0 -мезона выполняется критерий № 2 с хорошей точностью (Интегральный эффект СР-нарушения проявляется, когда период осцилляций значительно больше, чем времена распада).

**Время жизни D^0 -мезона и анти D^0 -мезона отличается из-за СР-нарушения.
Следствие для нейтрона и антинейтрона!**

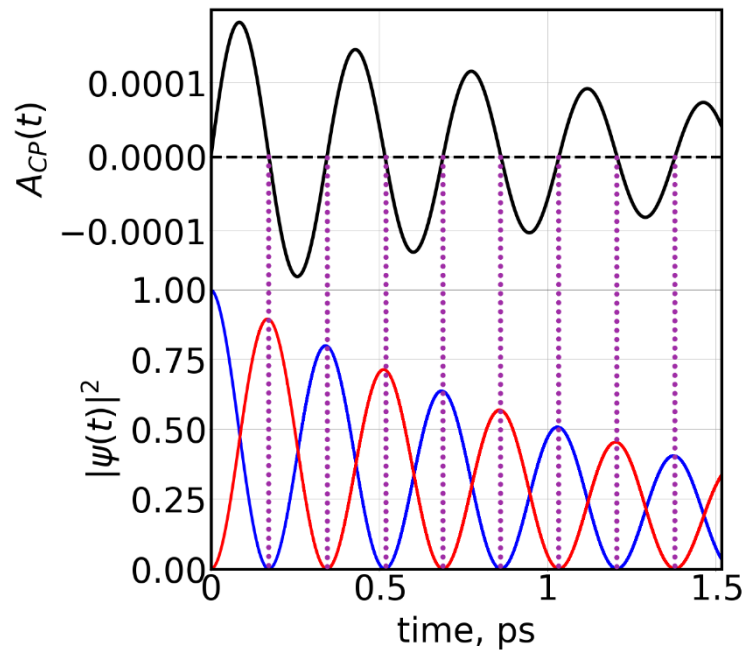


Сравнение результатов измерения временной зависимости асимметрии распада $B^0 \rightarrow \psi K_S^0$ и расчета зависящей от времени компоненты асимметрии: $A_{\text{asym}}(t)$

Для B^0 мезона у нас есть достаточно четкое экспериментальное подтверждение того, что критерий №3 выполняется, т.е. изменение знака нарушения CP-симметрии происходит при переходе от B^0 к $\bar{B}^0$.

Экспериментальный результат зависимости CP-асимметрии от времени представлен амплитудой 75% для моды распада, что составляет всего 5×10^{-5} от общей вероятности распада, а среднее интегральное значение CP-нарушающей асимметрии для B^0 мезона в данных PDG равно:

$$0.005 \pm 0.012 \pm 0.014.$$



Асимметрия, нарушающая CP-симметрию B_s^0 мезона, и вероятности состояний во время осцилляций для частицы (синяя кривая) и античастицы (красная кривая).

Наконец, для B_s^0 мезона отношение скорости распада к частоте колебаний, 3.6×10^{-2}

Чёткая синхронизация в изменении знака нарушения CP-симметрии для B_s^0 мезона

В этом и заключается суть процесса нарушения CP-симметрии, поскольку **знак нарушения CP-симметрии** зависит от **знака зарядового сопряжения** (частица – античастица).

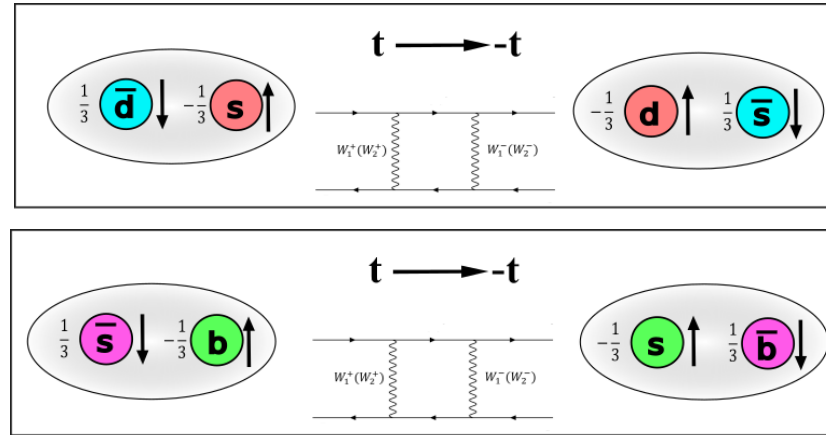
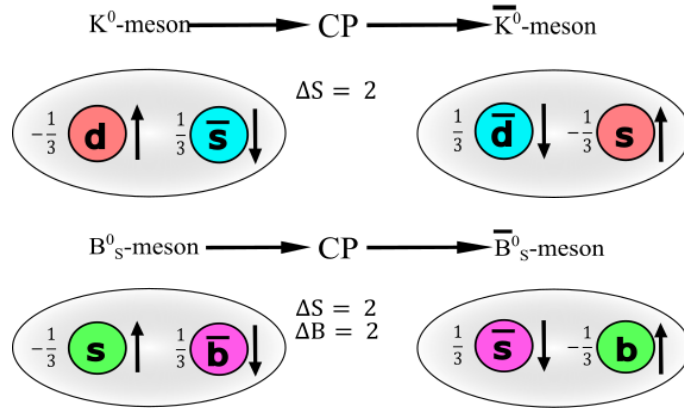
**CP нарушение при сохранение
Т-инвариантности**

~~C~~ ~~P~~ ~~CP~~ T CPT

Вопрос о С-инвариантности, Р-инвариантности, Т-инвариантности и СРТ-инвариантности

Прежде всего, напомним, что СРТ-инвариантность должна строго выполняться для истинно элементарных и заряженных частиц – таких как электрон, позитрон и мюон, антимюон, что является следствием их элементарности и закона сохранения заряда, запрещающего взаимные переходы.

Совсем другая ситуация с нейтральными и составными частицами – такими как нейтрон - антинейтрон и мезон - антимезон.



Схемы иллюстрирующие СР-переход для систем мезон-антимезон и переход $t \longrightarrow -t$ с сохранением Т-инвариантности в процессе осцилляций антимезон-мезон.

Вопрос о С-инвариантности, Р-инвариантности, Т-инвариантности и СРТ-инвариантности

Первым было нарушено положение о пространственной **инверсии Р** (опыт мадам Бу был выполнен в 1956 году). Но тогда было сказано, что сохраняется **комбинированная чётность** (Лев Ландау 1957 год). Однако, это положение было затем опровергнуто экспериментально в 1964 году Крониным и Фитчем в распаде каонов. Тогда было сказано, что, **если нарушается СР, тогда нарушается и Т-инвариантность**, потому что нарушать **СРТ-инвариантность** ни в коем случае нельзя из-за Лоренц инвариантности и теоремы Людерса - Паули.

Как мы видим происходит пересмотр теоретических положений по мере развития эксперимента. В настоящее время мы имеем следующий этап развития эксперимента, который требует пересмотра теоретических положений. Но дело в том, что анализ экспериментальных данных показывает, что ситуация другая – **нарушается С-инвариантность и СР-инвариантность, но сохраняется Т-инвариантность.**

**СРТ не нарушается, т.к. при смене знака времени изменяется знак СР-нарушения.
Всё восстанавливается!**

**Новое теоретическое обобщение данной ситуации – задача теоретиков.
Хотя, надо заметить, что асимметричная лево-правая модель вполне успешно
работает.**