

**Лево-правая модель слабого взаимодействия
с CP-нарушением,
CP-нарушение в барионах и мезонах,
барионная и лептонная асимметрия Вселенной**

А.П. Серебров

Петербургский институт ядерной физики, им. Б.П. Константинова

НИЦ «Курчатовский институт»

Гатчина, Россия

**Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ ПИЯФ
27 марта 2025**

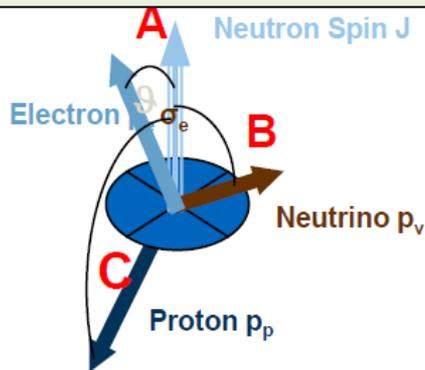
**Лево-правая модель слабого взаимодействия с CP-нарушением,
CP-нарушение в барионах и мезонах,
барионная и лептонная асимметрия Вселенной**

- 1. В связи с анализом экспериментальной ситуации с распадом нейтрона продолжено рассмотрение лево-правой модели слабого взаимодействия учётом CP-нарушения.**
- 2. Обнаружено, CP-нарушение в барионах на уровне 2 сигма.**
- 3. Показано, что возможно описание эффектов CP-нарушения в распадах нейтральных K-мезонов и D-мезонов, используя параметрами лево-правой модели, которые извлечены из нейтронного распада.**
- 4. Разные знаки барионной и лептонной CP-нарушающей асимметрии связаны с разными знаками барионной и лептонной асимметрией Вселенной. В-Лсохраняется.**
- 5. Барионная асимметрия Вселенной зарождается при температурах 10^2 – 10^4 Гэв благодаря смешиванию W_L, W_R с CP-нарушающей асимметрией.**

Прецизионные исследования распада нейтрона и поиск отклонений от Стандартной модели

$$\frac{d^3\Gamma}{dE_e d\Omega_e d\Omega_\nu} = \frac{1}{2(2\pi)^5} G_F^2 |V_{ud}|^2 (1+3|\lambda|^2) p_e E_e (E_0 - E_e)^2 \quad \text{Jackson, Treiman, Wyld, Nucl. Phys. 4, 1957}$$

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



$$A = -2 \frac{\lambda^2 + \lambda}{1 + 3\lambda^2} \quad \mathbf{-0.11958(21) \quad 0.17\%}$$

Neutron lifetime

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

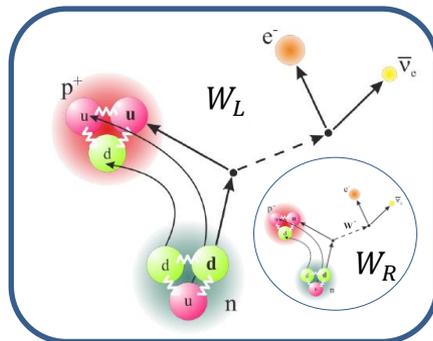
$$\mathbf{877.75 \pm 0.35s \quad 0.04\%}$$

$$B = 2 \frac{\lambda^2 - \lambda}{1 + 3\lambda^2} \quad \mathbf{0.9807(30) \quad 0.3\%}$$

Unitarity CKM

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

$$\lambda = g_A/g_V \quad \mathbf{-1.2757(5) \quad 0.04\%}$$



$$a = \frac{(1 - \lambda^2)}{(1 + 3\lambda^2)} \quad \mathbf{-0.1049(13) \quad 1.3\%}$$

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

$$D = 2 \cdot \frac{\text{Im}(\lambda)}{1 + 3|\lambda|^2} \quad \mathbf{-1.2 (2.0) \times 10^{-4}}$$

Повышение точности измерений и тенденции изменения времени жизни нейтрона

Время жизни нейтрона

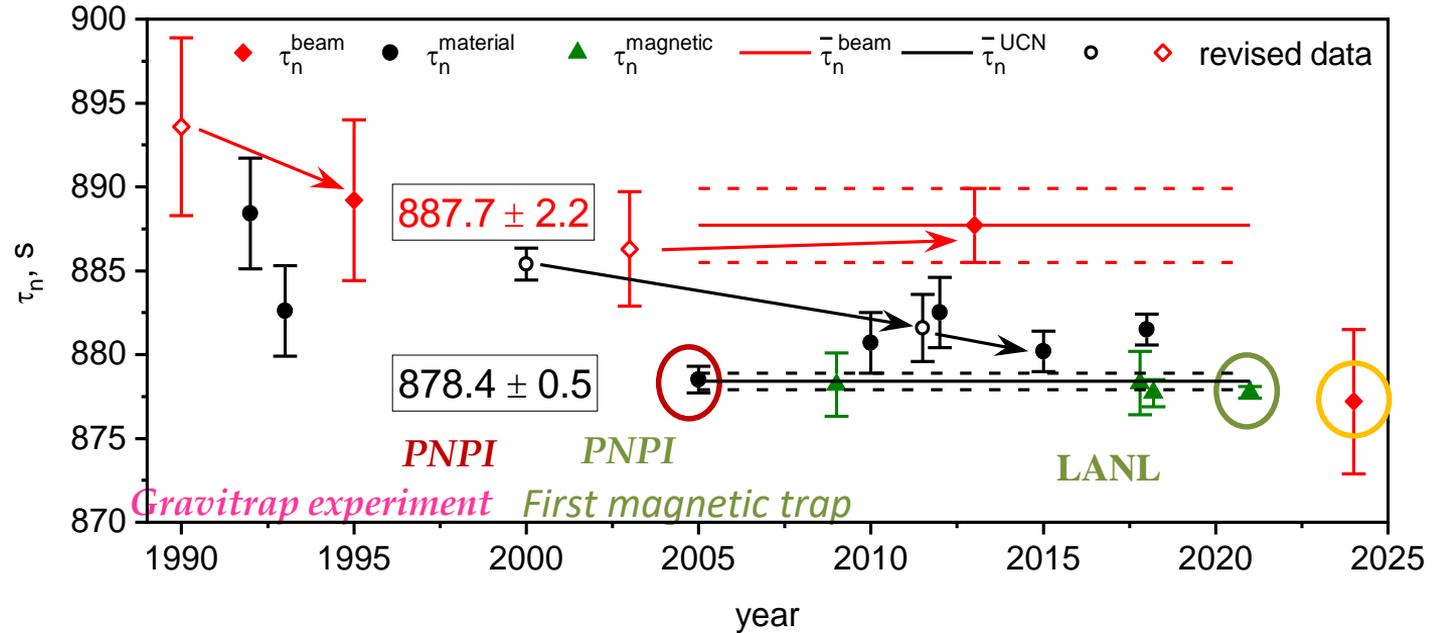


Рис. 1. Данные экспериментальных результатов для времени жизни нейтрона, начиная с 1990 г. из [8], расхождение данных в 2005 году [9] с данными 2000 года [10], новые результаты с магнитной ловушкой (отмеченные зеленым), которые являются определяющими [11-14]. **Новый пучковый эксперимент [15].**

Описание экспериментальных результатов в рамках V-A варианта теории

оказывается неудовлетворительным,

т.к. не может быть представлено одним значением параметра $\lambda = G_A / G_V$

$$\tau_{\text{exp}} = \frac{4905,7}{V_{ud}^2 (1 + 3\lambda^2)}$$

$$a_{\text{exp}} = \frac{(1 - \lambda^2)}{(1 + 3\lambda^2)}$$

$$A_{\text{exp}} = -\frac{2\lambda(\lambda + 1)}{1 + 3\lambda^2}$$

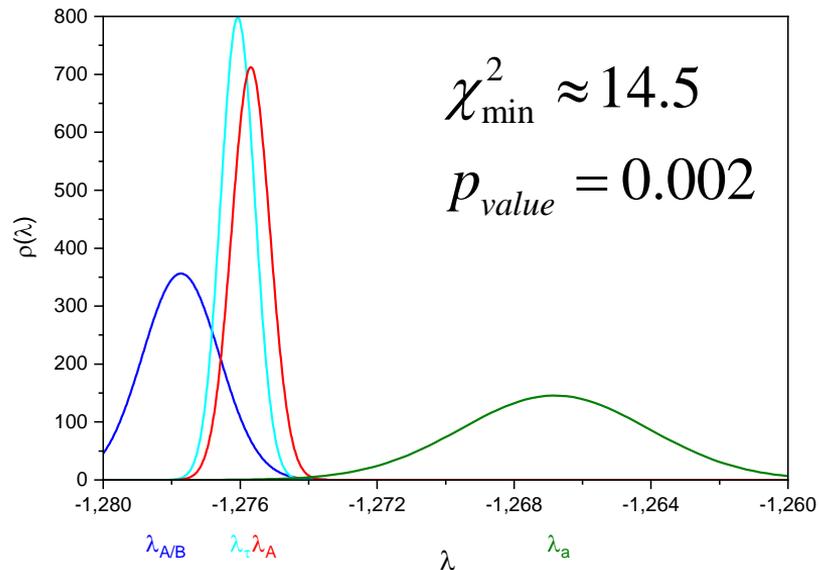
$$B_{\text{exp}} = \frac{2\lambda(\lambda - 1)}{1 + 3\lambda^2}$$

$$\tau_{\text{exp}} = 877.75(35)$$

$$a_{\text{exp}} = -0.10402(82)$$

$$A_{\text{exp}} = -0.11958(21)$$

$$B_{\text{exp}} = 0.9807(30)$$



**Отклонение от
Стандартной
Модели
больше
3 сигма**

Результаты вычисления значения параметра $\lambda = G_A / G_V$ в рамках V-A варианта теории слабого взаимодействия из экспериментов для a , A , B и τ не могут быть представлены одним значением.

Анализ наблюдаемого расхождения можно провести в рамках модели с учетом правых токов. В простейшем лево-правом манифест модели рассматривается смешивание левых и правых векторных бозонов, а для флейверных состояний W_L , W_R и массовых состояний W_1 , W_2 можно записать:

$$\begin{pmatrix} W_L^\pm \\ W_R^\pm \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \zeta & +\sin \zeta \\ -\sin \zeta & \cos \zeta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_1^\pm \\ W_2^\pm \end{pmatrix}$$

где ζ – **угол смешивания** токовых состояний W_L и W_R , а δ – отношение квадратов масс состояний W_1 и W_2 .

$$\delta = (M_1/M_2)^2$$

- [3] M. A. B. Beg, R. V. Budny, R.N. Mohapatra, and A. Sirlin, Phys. Rev. Lett. 38, 1252 (1977),
 [4] B. R. Holstein and S. B. Treiman, Phys. Rev. D **16**, 2369 (1977),
 [5] P. Herczeg, Phys. Rev. D **34**, 3449 (1986),
 [6] P. Herczeg, Prog. Part. Nucl. Phys. **46**, 413 (2001)

V-A вариант теории

$$\tau_{\text{exp}} = \frac{4905,7}{V_{ud}^2 (1 + 3\lambda^2)}$$

$$a_{\text{exp}} = \frac{(1 - \lambda^2)}{(1 + 3\lambda^2)}$$

$$A_{\text{exp}} = -\frac{2\lambda(\lambda + 1)}{1 + 3\lambda^2}$$

$$B_{\text{exp}} = \frac{2\lambda(\lambda - 1)}{1 + 3\lambda^2}$$

лево-правая модель

$$\tau_{\text{exp}} \pm \Delta\tau_{\text{exp}} = \frac{4905,7}{V_{ud}^2 [1 + x^2 + 3\lambda^2 (1 + y^2)]}$$

$$a_{\text{exp}} \pm \Delta a_{\text{exp}} = \frac{(1 - \lambda^2)[1 + (\delta + \zeta)^2] - 4\delta\zeta}{(1 + 3\lambda^2)[1 + (\delta + \zeta)^2] - 4\delta\zeta}$$

$$A_{\text{exp}} \pm \Delta A_{\text{exp}} = -\frac{2\lambda[\lambda(1 - y^2) + (1 - xy)]}{1 + x^2 + 3\lambda^2(1 + y^2)}$$

$$B_{\text{exp}} \pm \Delta B_{\text{exp}} = \frac{2\lambda[\lambda(1 - y^2) - (1 - xy)]}{1 + x^2 + 3\lambda^2(1 + y^2)}$$

где $x = \delta - \zeta$, $y = \delta + \zeta$.

Разложения по δ и ζ не выше второго порядка может быть представлено следующими выражениями

$$\tau_{\text{exp}} \pm \Delta\tau_{\text{exp}} = \frac{4905,7}{V_{ud}^2 [1 + x^2 + 3\lambda^2(1 + y^2)]}$$

$$a_{\text{exp}} \pm \Delta a_{\text{exp}} = \frac{(1 - \lambda^2)[1 + (\delta + \zeta)^2] - 4\delta\zeta}{(1 + 3\lambda^2)[1 + (\delta + \zeta)^2] - 4\delta\zeta}$$

$$A_{\text{exp}} \pm \Delta A_{\text{exp}} = -\frac{2\lambda[\lambda(1 - y^2) + (1 - xy)]}{1 + x^2 + 3\lambda^2(1 + y^2)}$$

$$B_{\text{exp}} \pm \Delta B_{\text{exp}} = \frac{2\lambda[\lambda(1 - y^2) - (1 - xy)]}{1 + x^2 + 3\lambda^2(1 + y^2)}$$

$$\frac{\tau_{\text{exp}} \pm \Delta\tau_{\text{exp}} - \tau_{V-A}}{\tau_{V-A}} \simeq - \left[\delta^2 + \zeta^2 + 2 \frac{(3\lambda^2 - 1)}{(3\lambda^2 + 1)} \delta\zeta \right]$$

$$\frac{a_{\text{exp}} \pm \Delta a_{\text{exp}} - a_{V-A}}{a_{V-A}} \simeq - \frac{16}{(1 - \lambda^2)(1 + 3\lambda^2)} \delta\zeta$$

$$\frac{A_{\text{exp}} \pm \Delta A_{\text{exp}} - A_{V-A}}{A_{V-A}} \simeq -2\delta^2 - 2\delta\zeta \frac{[6\lambda^3 + 3\lambda^2 - 1]}{(\lambda + 1)(1 + 3\lambda^2)} - 2\frac{\lambda}{\lambda + 1} \zeta^2$$

$$\frac{B_{\text{exp}} \pm \Delta B_{\text{exp}} - B_{V-A}}{B_{V-A}} \simeq -2\delta^2 - 2\delta\zeta \frac{[6\lambda^3 - 3\lambda^2 + 1]}{(\lambda - 1)(1 + 3\lambda^2)} - 2\frac{\lambda}{\lambda - 1} \zeta^2$$

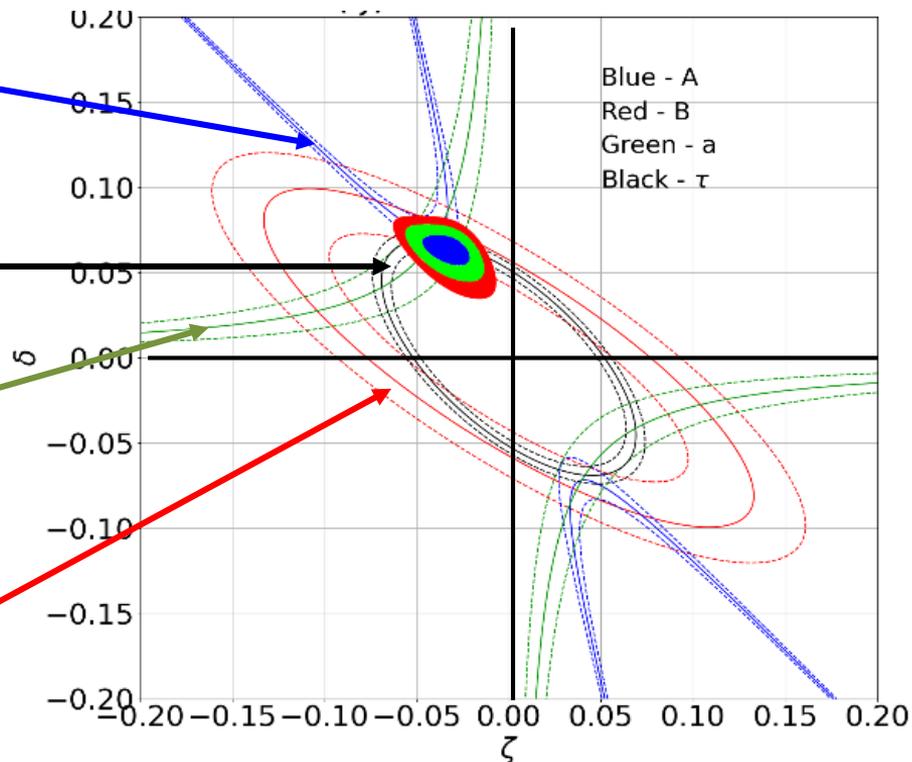
Распад нейтрона в рамках лево-правой модели смешивания левых и правых векторных бозонов **может быть успешно описан**

$$\frac{A_{\text{exp}} \pm \Delta A_{\text{exp}} - A_{V-A}}{A_{V-A}} \simeq -2\delta^2 - 2\delta\zeta \frac{[6\lambda^3 + 3\lambda^2 - 1]}{(\lambda+1)(1+3\lambda^2)} - 2\frac{\lambda}{\lambda+1}\zeta^2$$

$$\frac{\tau_{\text{exp}} \pm \Delta\tau_{\text{exp}} - \tau_{V-A}}{\tau_{V-A}} \simeq - \left[\delta^2 + \zeta^2 + 2\frac{(3\lambda^2 - 1)}{(3\lambda^2 + 1)}\delta\zeta \right]$$

$$\frac{a_{\text{exp}} \pm \Delta a_{\text{exp}} - a_{V-A}}{a_{V-A}} \simeq - \frac{16}{(1-\lambda^2)(1+3\lambda^2)}\delta\zeta$$

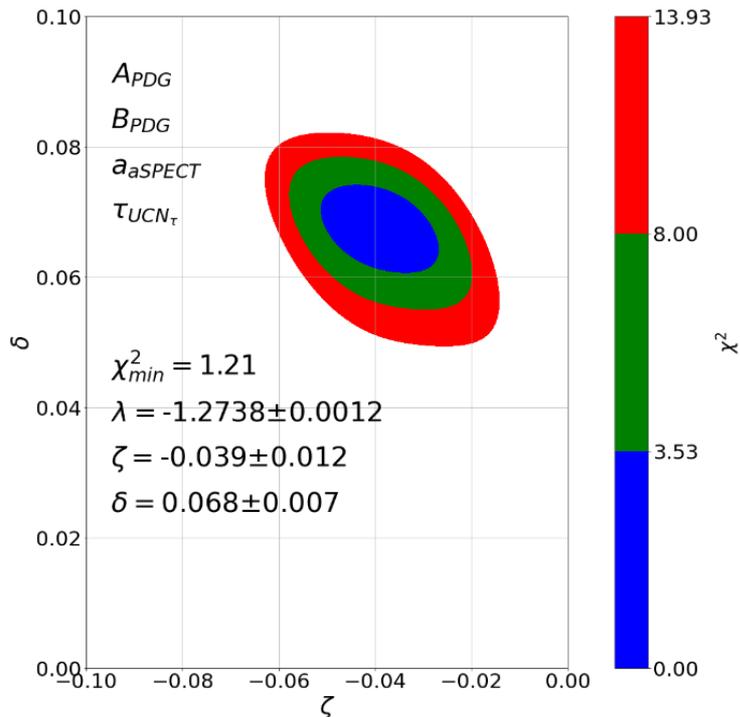
$$\frac{B_{\text{exp}} \pm \Delta B_{\text{exp}} - B_{V-A}}{B_{V-A}} \simeq -2\delta^2 - 2\delta\zeta \frac{[6\lambda^3 - 3\lambda^2 + 1]}{(\lambda-1)(1+3\lambda^2)} - 2\frac{\lambda}{\lambda-1}\zeta^2$$



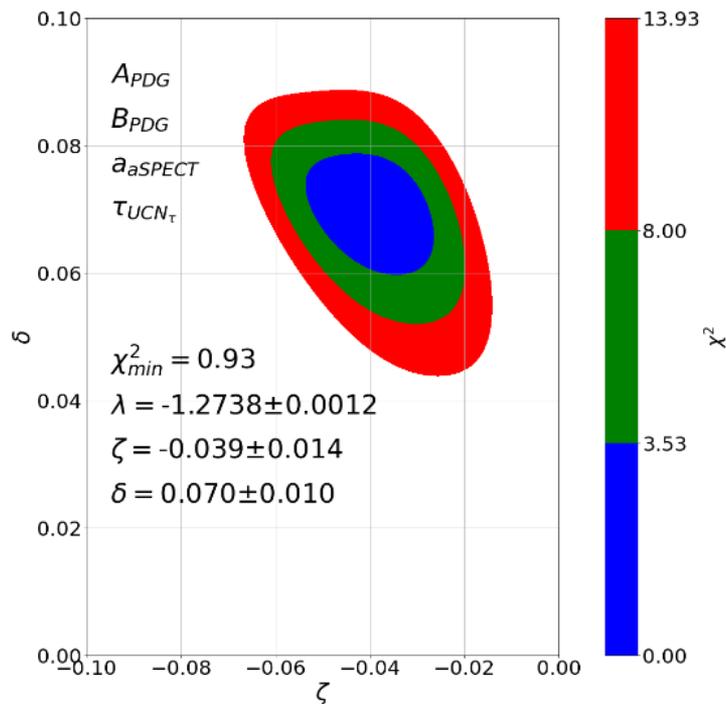
Оптимальные значения параметров δ и ζ , полученные методом χ^2 с использованием экспериментальных данных распада нейтрона для a, A, B и τ

для наиболее точных
экспериментальных данных

$$\chi^2_{\min} = 1.21$$



для наиболее точных
экспериментальных данных
с учётом радиационных поправок



Окончательный результат анализа

В результате анализа было установлено, что имеются указания на существование правого векторного бозона с массой и углом смешивания

Письма в ЭЧАЯ. 2024.
Т. 22, № 1(258). С.
134–145

$$M_{W_R} = 304_{-20}^{+24} \text{ GeV}$$

$$\zeta = -0.039 \pm 0.014$$

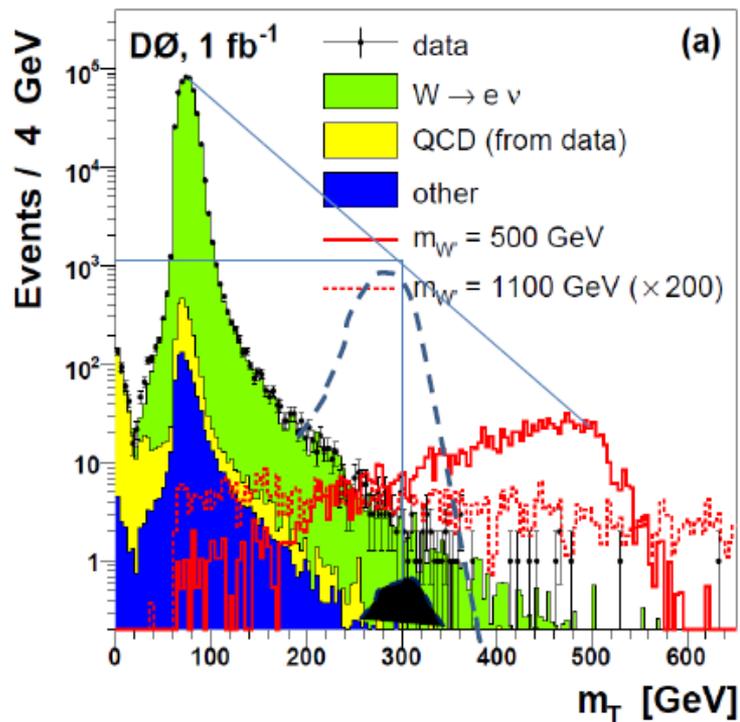
$$\delta = 0.070 \pm 0.010$$

АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ РАСПАДА НЕЙТРОНА НА ВОЗМОЖНОСТЬ СУЩЕСТВОВАНИЯ ПРАВОГО ВЕКТОРНОГО БОЗОНА W_R

*А. П. Серебров¹, О. М. Жеребцов, А. К. Фомин,
Р. М. Самойлов, Н. С. Буданов*

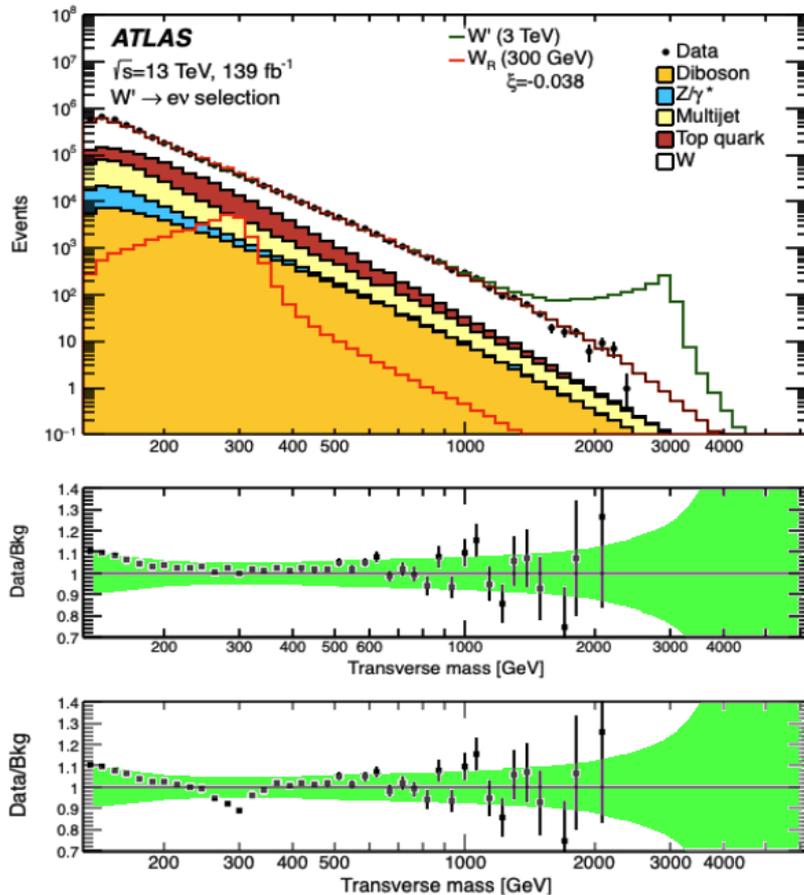
Петербургский институт ядерной физики им. Б. П. Константинова
Национального исследовательского центра «Курчатовский институт», Гатчина, Россия

Проведен анализ последних наиболее точных экспериментальных данных распада нейтрона на возможность существования правого векторного бозона W_R . В результате анализа обнаружено, что имеется указание на существование правого векторного бозона W_R с массой $M_{W_R} \approx 319_{-20}^{+26}$ ГэВ и углом смешивания с W_L : $\zeta = -0,034 \pm 0,013$. Этот результат, с одной стороны, следует рассматривать как вызов к экспериментальной физике на коллайдерах, где верхний предел на массу правого векторного бозона W_R значительно выше, а с другой — он указывает на необходимость проведения еще более точных измерений распада нейтрона и его теоретического анализа.



Давайте рассмотрим процесс регистрации левого векторного бозона на теватроне в Фермилаб из публикации [44], где на том же рисунке приведён пример расчётного сигнала для резонанса W' с массой 500 ГэВ. Легко интерполировать картинку для полномасштабного резонанса с массой 300 ГэВ и затем учесть фактор подавления из-за малого угла смешивания. Этот фактор подавления оказывается весьма значительным $1.4 \cdot 10^{-3}$, т.к. пропорционален квадрату угла смешивания. Таким образом, ожидаемый эффект изображён на рис. чёрным резонансом с амплитудой, размер которой ниже статистической точности эксперимента. Таким образом, правый векторный бозон с массой 300 ГэВ и углом смешивания -0.038 не мог быть обнаружен в этом эксперименте.

Эксперименты на коллайдерах

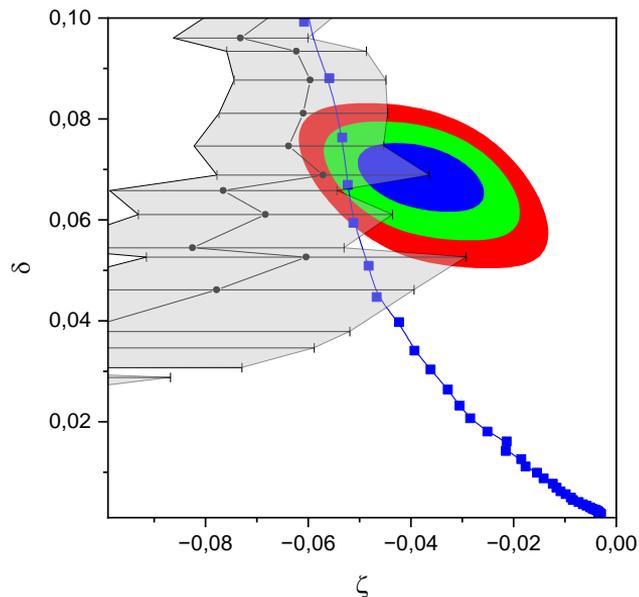


ЦЕРН

[45]G. Aad et al (ATLAS Collaboration),
Phys. Rev. D **100**, 052013 (2019)

Теперь давайте рассмотрим результаты эксперимента ATLAS [45], где статистическая точность должна быть выше. На рис. представлены опубликованные результаты эксперимента, которые дополнены анализом, учитывающим вклад резонанса с массой 300 ГэВ и с учётом фактора подавления $1.4 \cdot 10^{-3}$. Это красная линия на рис. В данном случае статистика могла бы позволить выделить резонанс, если бы не систематические ошибки эксперимента, которые на порядок превышают статистические. Систематические ошибки указаны на нижней панели зелёным цветом. В области резонанса имеются только три точки, которые превышают систематические ошибки в 1.1, в 1.6 и в 2.2 раза. Этого недостаточно для надёжного наблюдения резонанса. Таким образом, в эксперименте ATLAS уровень систематических ошибок не позволил выделить обсуждаемый резонанс.

В целом можно заключить, что на сегодняшний день чувствительность нейтронного эксперимента оказалась выше.



Пределы (CL.95%) чувствительности экспериментов к правому W_R в экспериментах: чёрный цвет - на теватроне в Фермилаб, синий цвет – в эксперименте ATLAS в ЦЕРНе.

**Лево-правая модель слабого взаимодействия
с CP-нарушением,
CP-нарушение в барионах и мезонах,
барионная и лептонная асимметрия Вселенной**

А.П. Серебров

Петербургский институт ядерной физики, им. Б.П. Константинова

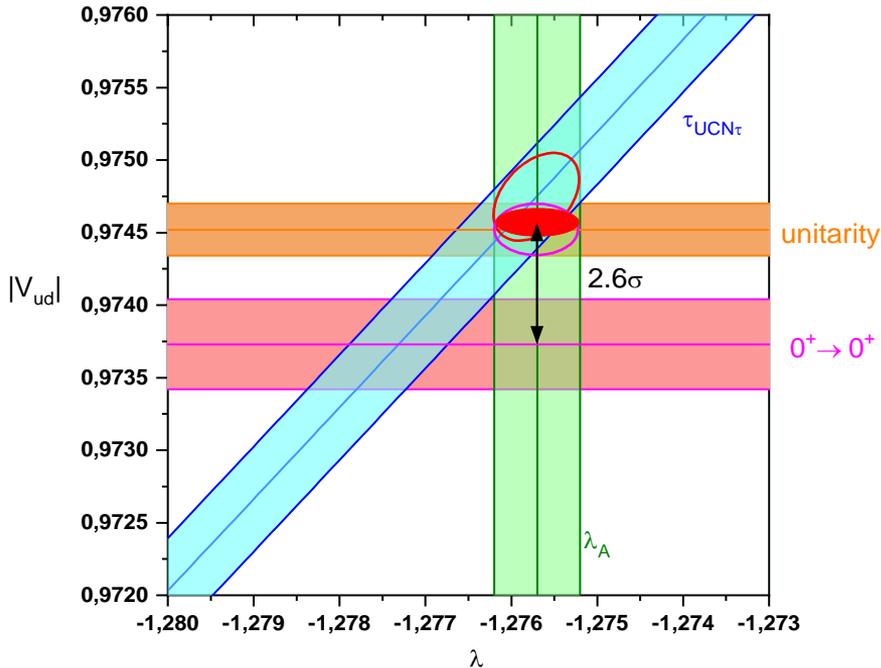
НИЦ «Курчатовский институт»

Гатчина, Россия

**Объединенный семинар ОФВЭ и ОТФ ПИЯФ
27 марта 2025**

ПРОБЛЕМА УНИТАРНОСТИ матрицы СКМ

Разница V_{ud} между совпадающими значениями из нейтронного распада и унитарности СКМ и значением V_{ud} от переходов 0^+-0^+ составляет **2,6 сигма**

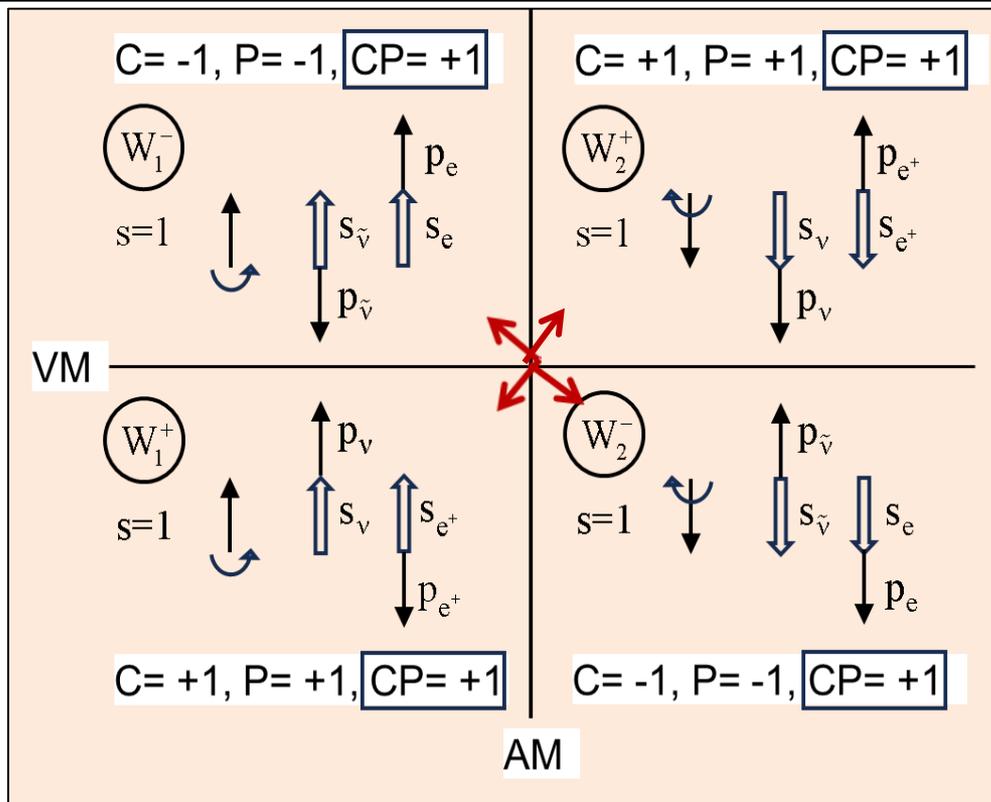


Зависимость элемента матрицы смешивания кварков V_{ud} от λ , рассчитанная с использованием формул СМ из распада нейтрона, из экспериментов с ферми-сверхразрешенными ядерными переходами $0^+ - 0^+$ и из унитарности матрицы СКМ с использованием V_{us} измерений [18].

$$\frac{\Delta V_{ud}}{V_{ud}} = 8.6 * 10^{-4} (2.6 \sigma)$$

- 1. Расширенная лево-правая модель слабого взаимодействия.**
- 2. CP-нарушение в барионах и мезонах.**
- 3. Барионная и лептонная асимметрия Вселенной**
- 4. Заключение**

Схема смешивание между левыми и правыми частицами W_1^- и W_2^- ,
и между левыми и правыми античастицами W_1^+ и W_2^+



W_1^- — левая частица ($C = -1, P = -1$),

$CP = +1$

W_1^+ — левая античастица ($C = +1, P = +1$),

$CP = +1$

W_2^- — правая частица ($C = -1, P = -1$),

$CP = +1$

W_2^+ — правая античастица ($C = +1, P = +1$),

$CP = +1$

$$\begin{pmatrix} W_L^\pm \\ W_R^\pm \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \zeta & \mp \sin \zeta \\ \pm \sin \zeta & \cos \zeta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_1^\pm \\ W_2^\pm \end{pmatrix}$$

VM – зеркало векторов, AM – зеркало аксиальных векторов.

Анализ наблюдаемого расхождения можно провести в рамках модели с учетом правых токов. В простейшем лево-правом манифест модели рассматривается смешивание левых и правых векторных бозонов, а для флейверных состояний W_L , W_R и массовых состояний W_1 , W_2 можно записать:

$$\begin{pmatrix} W_L^\pm \\ W_R^\pm \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \zeta & \mp \sin \zeta \\ \pm \sin \zeta & \cos \zeta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} W_1^\pm \\ W_2^\pm \end{pmatrix}$$

где ζ – угол смешивания токовых состояний W_L и W_R , а δ – отношение квадратов масс состояний W_1 и W_2 .

$$\delta = (M_1/M_2)^2$$

В этой модели, мы рассматриваем W^- и W^+ в качестве частицы и античастицы соответственно, и как следствие, матрицы смешивания для отрицательно и положительно заряженных бозонов являются эрмитово-сопряженными, что объясняет изменение знаков у синусов.

Расширенный вариант лево-правой модели

$$H_{V,A}^N = \bar{e} \gamma_\mu (C_V + C'_V \gamma_5) \nu \cdot \bar{p} \gamma_\mu n - \bar{e} \gamma_\mu \gamma_5 (C_A + C'_A \gamma_5) \nu \cdot \bar{p} \gamma_\mu \gamma_5 n + h.c.$$

$$C_V = g_V \frac{G_F V_{ud}}{\sqrt{2}} (1 - 2\zeta + \delta), \quad C'_V = g_V \frac{G_F V_{ud}}{\sqrt{2}} (1 - \delta)$$

$$C_A = g_A \frac{G_F V_{ud}}{\sqrt{2}} (1 + 2\zeta + \delta), \quad C'_A = g_A \frac{G_F V_{ud}}{\sqrt{2}} (1 - \delta)$$

$$\tilde{V}_{ud}^+ = V_{ud}^+ (1 + \zeta) = V_{ud}^{+(V)} \equiv V_{ud}^{00(V)}$$

$$\tilde{V}_{ud}^- = V_{ud}^- (1 - \zeta) = V_{ud}^{-(V-A)} \equiv V_{ud}^{n(V-A)}$$

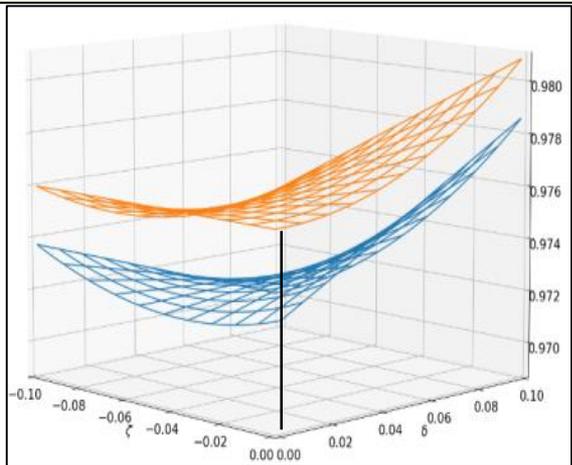
$$V_{ud}^{00LR} = V_{ud}^{00(V)} \sqrt{\frac{[1 + (\delta + \zeta)^2]}{1 + \zeta^2}}$$

$$V_{ud}^{nLR} = V_{ud}^{n(V-A)} \times \sqrt{\frac{1 + 3\lambda_{n,V-A}^2}{1 + 3\lambda_{\text{exp},LR}^2} \frac{[1 + (\delta^2 + \zeta^2) + 2 \frac{(3\lambda_{n,V-A}^2 - 1)}{(3\lambda_{n,V-A}^2 + 1)} \delta\zeta]}{(1 + \zeta^2)}}$$

$$V_{ud}^{00LR} \equiv V_{ud}^{W_1^+(W_2^+)}$$

$$V_{ud}^{nLR} \equiv V_{ud}^{W_1^-(W_2^-)}$$

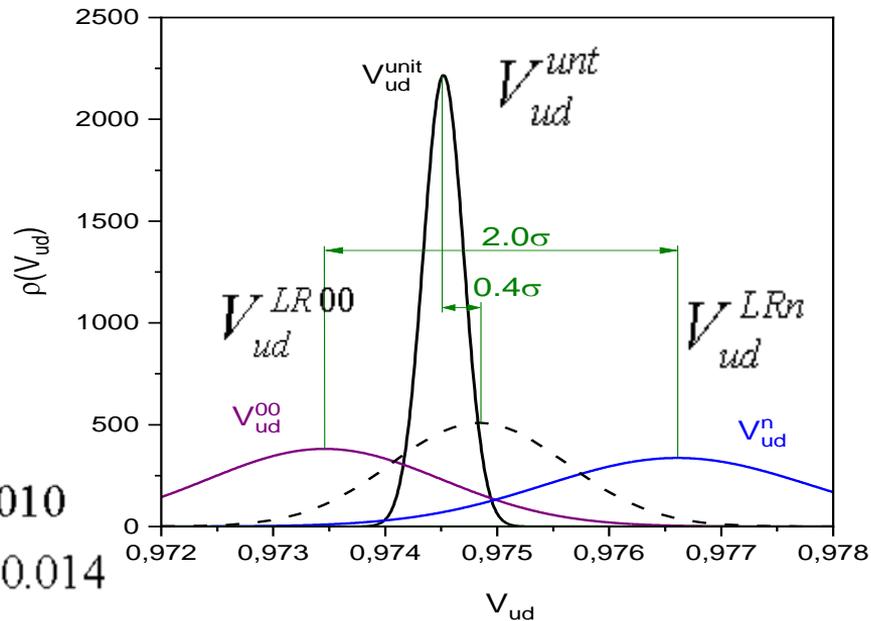
**Схема смешивание между левыми частицами W_1^- и W_2^- ,
и между правыми античастицами W_1^+ и W_2^+**



$$V_{ud}^{00LR} = V_{ud}^{00(V)} \sqrt{\frac{[1 + (\delta + \zeta)^2]}{1 + \zeta^2}}$$

$$\delta = 0.070 \pm 0.010$$

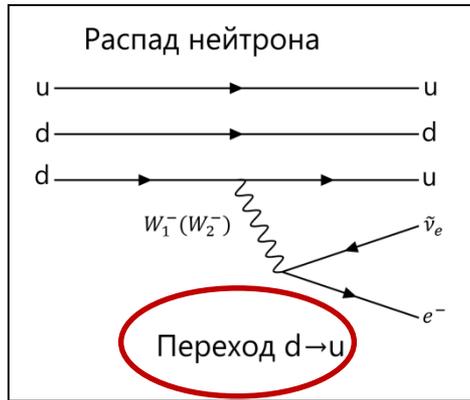
$$\zeta = -0.039 \pm 0.014$$



$$V_{ud}^{nLR} = V_{ud}^{n(V-A)} \times \sqrt{\frac{1 + 3\lambda_{n,V-A}^2}{1 + 3\lambda_{exp,LR}^2} \frac{[1 + (\delta^2 + \zeta^2) + 2 \frac{(3\lambda_{n,V-A}^2 - 1)}{(3\lambda_{n,V-A}^2 + 1)} \delta\zeta]}{(1 + \zeta^2)}}$$

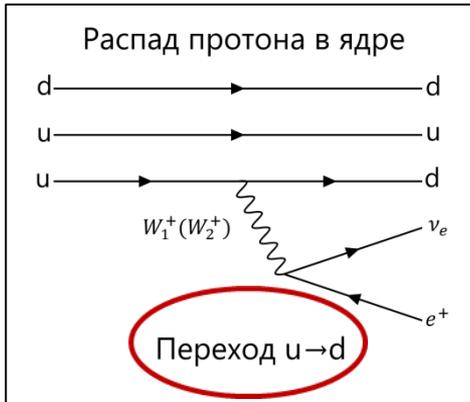
$$(V_{ud}^{LR})^2 = \frac{1}{2} [(V_{ud}^{LR} W^+)^2 + (V_{ud}^{LR} W^-)^2]$$

Нарушения CP-инвариантности в барионах

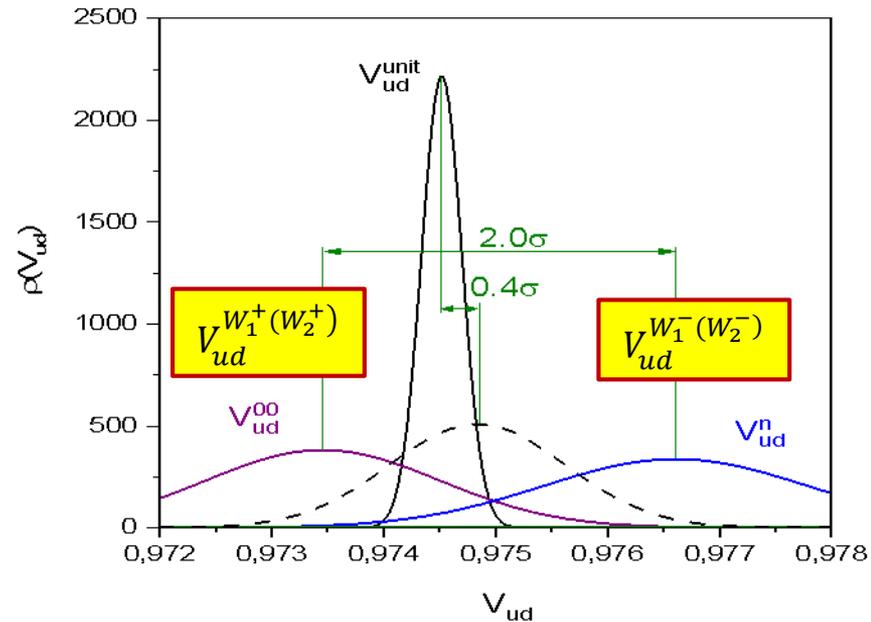


$$A_{p-n} = \frac{(V_{ud}^{00LR})^2 - (V_{ud}^{nLR})^2}{(V_{ud}^{00LR})^2 + (V_{ud}^{nLR})^2} = (-3.2 \pm 1.6) \cdot 10^{-3} (2.0\sigma)$$

$$V_{ud}^{nLR} \equiv V_{ud}^{W_1^-(W_2^-)}$$



$$V_{ud}^{00LR} \equiv V_{ud}^{W_1^+(W_2^+)}$$



Нарушение CP-инвариантности в барионах пока не обнаружено в лабораторных условиях. Однако оно необходимо для объяснения барионной асимметрии Вселенной, то есть избытка в ней материи.

В 1967 году А. Д. Сахаров показал, что для появления барионной асимметрии во Вселенной должны выполняться три условия:

1. Нарушение C-инвариантности (наличие асимметрии в свойствах частиц и античастиц на микроскопическом уровне) и нарушение CP-инвариантности (асимметрия физических законов при одновременной замене «левого» на «правое» и замене всех частиц на античастицы).
2. Несохранение барионного (кваркового) числа. Барионное число — это величина, определяемая количеством барионов в системе. В случае его несохранения наблюдался бы либо распад протона, самой лёгкой частицы, имеющей барионное число, либо осцилляции нейтрон — антинейтрон (гипотетические превращения нейтрона в антинейтрон и обратно).
3. Нарушение термодинамического равновесия в ранней Вселенной. Если это условие выполняется, то оно означает, что две вселенные, время в которых течёт в противоположных направлениях, различны.
4. Механизм нарушения CP-инвариантности до сих пор не установлен.

Нарушения CP-инвариантности в барионах

Параметр CP-нарушение можно определить в соответствии со схемой Стандартной Модели, где для вычисления асимметрии из вероятности процесса происходящего через положительный векторный бозон вычитается вероятность процесса, происходящего через отрицательный векторный бозон:

$$A_{p-n} = \frac{(V_{ud}^{00LR})^2 - (V_{ud}^{nLR})^2}{(V_{ud}^{00LR})^2 + (V_{ud}^{nLR})^2} = (-3.2 \pm 1.6) \cdot 10^{-3} (2.0\sigma) \quad 95\% \text{ CL}$$

К сожалению, точность определения этого параметра пока недостаточна, но удивительно, что значение напоминает по порядку величины значения параметров CP-нарушения в распадах K-мезонов. **Однако, знак асимметрии противоположный.**

Расхождение между значениями V_{ud}^{00LR} и V_{ud}^{nLR} в рамках лево-правой модели, составляет 2.0σ .
 А отклонение их среднего значения от унитарности составляет 0.4σ .

Таким образом, унитарность матрицы СКМ в рамках лево-правой модели выполняется для среднего значения векторных и аксиально-векторных переходов.

Важным следствием в рамках лево-правой модели является различие в силе векторного и аксиально-векторного взаимодействия из-за CP-нарушения

$$A_{p-n} = \frac{(V_{ud}^{00LR})^2 - (V_{ud}^{nLR})^2}{(V_{ud}^{00LR})^2 + (V_{ud}^{nLR})^2} = (-3.2 \pm 1.6) \cdot 10^{-3} (2.0\sigma)$$

$$p + \bar{\nu}_e \rightarrow n + e^+ \quad \neq \quad n + \nu_e \rightarrow p + e^-$$

Причина возникновения барионной и лептонной асимметрии в космологии.

Violation of CP invariance, C asymmetry, and baryon asymmetry of the universe

A. D. Sakharov

(Submitted 23 September 1966)

Pis'ma Zh. Eksp. Teor. Fiz. **5**, 32–35 (1967) [JETP Lett. **5**, 24–27 (1967)].

Also S7, pp. 85–88]

Usp. Fiz. Nauk **161**, 61–64 (May 1991)

Из эссе С. Окубо
при большой температуре
для Вселенной смена муда
по ее кривой форме

Барионная и лептонная асимметрия Вселенной

*Из эффекта С.Окубо
При большой температуре
Для Вселенной сшита шуба
По ее кривой фигуре.*

*Из-за эффекта CP-нарушения
При большой температуре
Возникла барионная
Асимметрия Вселенной*

А.Д. Сахаров

Анализ процессов CP-нарушения в распадах K-мезонов в рамках расширенной лево-правой модели, используя параметры δ и ζ

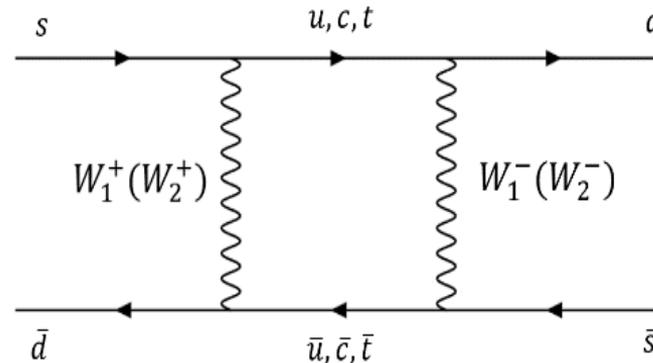
В связи с этим обстоятельством целесообразно провести анализ процессов CP-нарушения в распадах K-мезонов в рамках расширенной лево-правой модели, используя параметры δ и ζ .

В процесс осцилляций системы $K^0 \bar{K}^0$ может произойти распад в состояние

$$e^- \pi^+ \bar{\nu}$$

или в состояние

$$e^+ \pi^- \nu$$



Гамильтониан слабого взаимодействия в случае, когда присутствуют только векторные токи, может быть представлен в той же общей форме, как и для $0^+ \leftrightarrow 0^+$ переходов.

Однако, K-мезоны это псевдоскалярные частицы со спином и чётностью 0^- , поэтому переходы $K^0 \tilde{K}^0$ это переходы $0^- \leftrightarrow 0^-$,

Поэтому происходит изменение знака перед ζ по сравнению с $0^+ \leftrightarrow 0^+$ переходами.

$$H_V^N = \bar{e} \gamma_\mu (C_A + C'_A \gamma_5) \nu \cdot \bar{\pi} \gamma_\mu K^0$$

где с распадом $W_1^+ (W_2^+)$ связано соотношение

$$|C_A|^2 + |C'_A|^2 = G_F^2 |V_{us}|^2 (1 + (\delta - \zeta)^2)$$

с распадом $W_1^- (W_2^-)$ связано соотношение

$$|C_A|^2 + |C'_A|^2 = G_F^2 |V_{us}|^2 (1 + (\delta + \zeta)^2)$$

Амплитуду можно записать как:

$$M \simeq f_+ \left(\bar{u}(3) \gamma_\mu (C_A + C'_A \gamma_5) \nu(2) \right) \cdot p^\mu$$

где f_+ - формфактор, p - суммарный импульс пиона и каона,

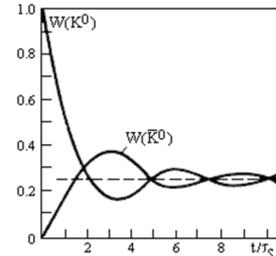
u - позитрон (электрон), ν - нейтрино (антинейтрино)

$$M^* M \simeq |f_+|^2 \left[u(3) \bar{u}(3) \gamma_\mu (C_A + C'_A \gamma_5) \times \nu(2) \bar{\nu}(2) \gamma^\sigma (C_A^* + C_A'^* \gamma_5) \right] p^\mu p_\sigma$$

$$\Gamma^{W^+} \propto |V_{us}|^2 |f_+|^2 \left[1 + (\delta + \zeta)^2 \right] \quad \Gamma^{W^-} \propto |V_{us}|^2 |f_+|^2 \left[1 + (\delta - \zeta)^2 \right]$$

Таким образом, получаем формулу для T-нарушающей асимметрии:

$$A_T = \frac{\Gamma(\bar{K}^0 \rightarrow e^+ \pi^- \nu) - \Gamma(K^0 \rightarrow e^- \pi^+ \bar{\nu})}{\Gamma(\bar{K}^0 \rightarrow e^+ \pi^- \nu) + \Gamma(K^0 \rightarrow e^- \pi^+ \bar{\nu})}$$



Прямая CP-нарушающая асимметрия в распадах K⁰-мезонов

$$A_T^{LR} = \frac{1 + (\delta - \zeta)^2 - (1 + (\delta + \zeta)^2)}{2(1 + \delta^2 + \zeta^2)} \approx -2\delta\zeta$$

Используя полученные ранее значения $\delta = 0.070(10)$ и $\zeta = -0.039(14)$

получаем для величины A_T значение:

$$A_T^{LR} = (5.5 \pm 2.1) \times 10^{-3} (2.6\sigma)$$

CL 99.1 %

**Предсказание
лево-правой модели**

$$A_T^{\text{exp}} = (6.6 \pm 1.3 \pm 1.0) \times 10^{-3} (4\sigma)$$

Эксперимент

Это значение находится в рамках имеющейся точности в согласии с экспериментально измеренной асимметрией.

Прямая CP-нарушающая асимметрия в распаде нейтральных D-мезонов

Интересно отметить, что экспериментальное значение CP-нарушающей асимметрии в распаде нейтральных **D-мезонов** имеет значение достаточно близкое к значению CP-нарушающей асимметрии в распаде нейтральных K-мезонов.

$$A_{D_0} = \frac{\Gamma(D_0 \rightarrow K^- K^+, \pi^- \pi^+) - \Gamma(\tilde{D}_0 \rightarrow K^- K^+, \pi^- \pi^+)}{2\Gamma}$$

$$A_{D_0}^{\text{exp}} = (6.30 \pm 0.33) \times 10^{-3}$$

Таблица 2. Сравнение экспериментальных результатов прямых CP-нарушающих асимметрий для $K_0 \tilde{K}_0$ $D_0 \tilde{D}_0$ и оценок в рамках лево-правой модели **в единицах 10^{-3}** .

A^{exp}	6.6 ± 1.6	6.30 ± 0.33
A^{LR}	5.5 ± 2.1	5.5 ± 2.1

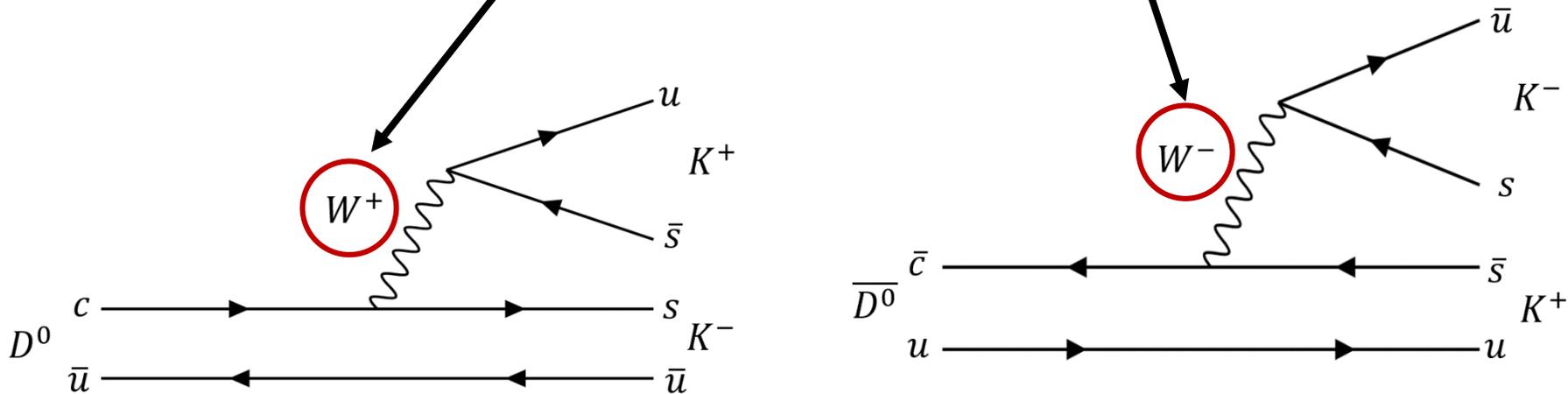
$$A_T^{LR} = -2\delta\zeta = (5.5 \pm 2.1) \times 10^{-3} (2.6\sigma)$$



В обоих случаях эффект прямого CP-нарушения описывается одинаковой формулой и даёт одинаковый результат. Конечно, уровень достоверности не даёт полной уверенности, но он, по крайней мере, выше 99%.

Аргументация выбора порядка вычитания в выражении:

$$A_{D_0} = \frac{\Gamma(D_0 \rightarrow K^- K^+, \pi^- \pi^+) - \Gamma(\tilde{D}_0 \rightarrow K^- K^+, \pi^- \pi^+)}{2\Gamma}$$

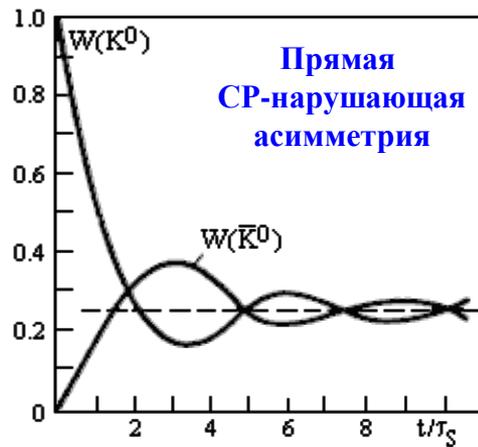


По аналогии с другими асимметриями мы рассматриваем асимметрию распада как разность ширин распада через W^+ и W^-

В распадах нейтральных К-мезонов измерена достаточно точно СР-нарушающая лептонная асимметрия с регистрацией продуктов распада в конечном состоянии

$$A_L = \frac{\Gamma(K_L \rightarrow e^+ \pi^- \nu) - \Gamma(K_L \rightarrow e^- \pi^+ \bar{\nu})}{\Gamma(K_L \rightarrow e^+ \pi^- \nu) + \Gamma(K_L \rightarrow e^- \pi^+ \bar{\nu})}$$

$$A_L^{\text{exp}} = (3.32 \pm 0.06) \times 10^{-3}$$



Эта асимметрия A_T^{exp} в два раза меньше, чем A_L^{exp}

- Дело в том, что эффект прямого СР-нарушения измеряется в ходе развития процесса осцилляций $K^0 \bar{K}^0$ на протяжении 10 периодов времени жизни K_S -состояния, которое составляет $0.86 \cdot 10^{-10}$ с.

- А эффект СР-нарушения в конечном состоянии измеряется при временах жизни K_L -состояния, которое $5.4 \cdot 10^{-8}$ с. К этому моменту эффект связанный с K_S -состоянием вымирает.

Следовательно, $A_T/A_L = 2$, как показано в работе [47]

Конечно, в своем стремление понять природу CP-нарушения мы должны ориентироваться на эффект прямого CP-нарушения.

Он определяет существо начального процесса. Дальнейшее его развитие зависит от конкретной цепочки распадов. Поэтому в рамках модели мы должны объяснить только основной стартовый эффект. Это удивительно, что это удаётся сделать, используя одно простое соотношение

$$A_T^{LR} \approx -2\delta\zeta = (5.5 \pm 2.1) \times 10^{-3} (2.6\sigma) \quad 99.1 \% \text{ CL}$$

Конечно, уровень достоверности не даёт полной уверенности,
но он, по крайней мере, 99%

CP-нарушающая асимметрия в конечном состоянии в распадах нейтральных K-мезонов

$$A_L = \frac{\Gamma(K_L \rightarrow e^+ \pi^- \nu) - \Gamma(K_L \rightarrow e^- \pi^+ \bar{\nu})}{\Gamma(K_L \rightarrow e^+ \pi^- \nu) + \Gamma(K_L \rightarrow e^- \pi^+ \bar{\nu})}$$

$$A_L^{\text{exp}} = (3.32 \pm 0.06) \times 10^{-3}$$

Лептонная асимметрия

В то время как CP-нарушающая асимметрия из нашего сравнительного анализа

$$V_{ud}^{nLR} \quad \text{и} \quad V_{ud}^{00LR}$$

$$A_{p-n} = \frac{(V_{ud}^{00LR})^2 - (V_{ud}^{nLR})^2}{(V_{ud}^{00LR})^2 + (V_{ud}^{nLR})^2} = (-3.2 \pm 1.6) \cdot 10^{-3} (2.0\sigma)$$

Другой знак у барионной асимметрии

Другой знак барионной асимметрии указывает на то, что, по-видимому, выполняется условие сохранения В-Л, которое указано в знаменитой работе А.Д. Сахарова [49, 50].

Экспериментальные результаты для CP-нарушающих асимметрий в конечном состоянии в единицах 10^{-3} .

	$p - n$	K_L^0
A^{exp}	-3.2 ± 1.6	3.32 ± 0.06

$$A^{exp} < 0 \quad \longrightarrow \quad B > 0$$

$$A^{exp} > 0 \quad \longrightarrow \quad L < 0$$

БАРИОННАЯ АСИММЕТРИЯ ВСЕЛЕННОЙ

А.Д. Сахаров

(Физический институт им. П.Н. Лебедева АН СССР)

(Обзорный доклад на конференции, посвященной 100-летию
А.А. Фридмана. Ленинград, 22 — 26 июня 1988 г.⁽¹⁾)

Область
возникновения
барионно-
лептонной
асимметрии
 10^2 - 10^4 ГэВ,
которая
соответствует
массам
 W_L и W_R

Если при температурах, превышающих низкотемпературную область $T = 10^2 - 10^4$ ГэВ, возникает барионно-лептонная асимметрия с $B \neq L$

— то в низкотемпературной области с высокой точностью установится состояние, соответствующее максимальному значению энтропии при заданной постоянной величине $B - L = \text{const}$ (и при выполнении условия электронейтральности) (рис. 12). Движение вдоль линии $B - L = C = \text{const}$. ● — точка равновесия, в которой $S = \text{max}$. При этом

$$\Delta S \sim - \{ 2 \sum (q - \bar{q})^2 + 2 \sum (l - \bar{l})^2 + \sum (b - \bar{b})^2 \}.$$

В состоянии максимальной энтропии B и L имеют разные знаки. В стандартной модели ($n = 3$) $B = (12/37)C$, $L = (-25/37)C$.

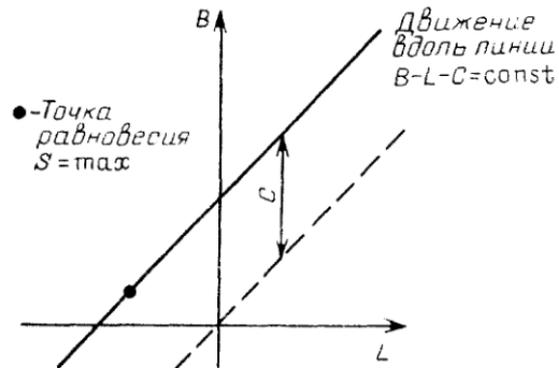


Рис. 12

**В состоянии максимальной энтропии B и L имеют разные знаки. В стандартной модели ($n=3$)
 $B = (12/37)C$,
 $L = (-25/37)C$.**

Механизм возникновения барионной асимметрии

Низкотемпературный процесс происходит с одновременным уменьшением барионного и лептонного числа на одну и ту же величину

$$\Delta B = \Delta L,$$

$$B - L = \text{const.}$$

А.Д. Сахаров (6)

Если возникшая при высокой температуре асимметрия одинакова для B и L , то она уменьшается в огромное число раз (10^6 и более) и практически исчезает.

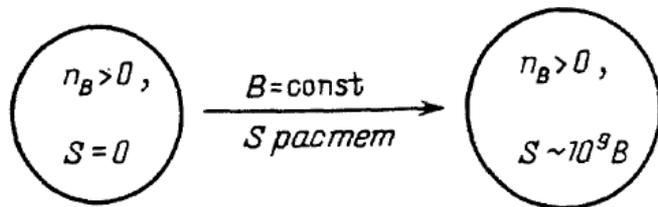


Рис. 3

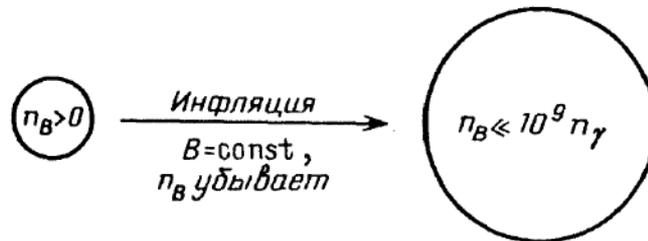


Рис. 4

Таким образом, в пределах имеющейся точности:

1. наблюдается согласие между экспериментально измеренной в распадах нейтральных К-мезонов Т-нарушающей асимметрией A_T^{LR} и Т-нарушающей асимметрией A_T^{exp} рассчитанной с параметрами расширенной лево-правой модели, которые извлечены из нейтронного распада.

$$A_T^{LR} = (5.5 \pm 2.1) \times 10^{-3} (2.6\sigma)$$

$$A_T^{\text{exp}} = (6.6 \pm 1.3 \pm 1.0) \times 10^{-3} (4\sigma)$$

2. наблюдается согласие (с точностью до знака) между экспериментально измеренной в распадах нейтральных К-мезонов CP-нарушающей асимметрии A_L^{exp} анализа V_{ud}^{nLR} и V_{ud}^{00LR}

$$A_L^{\text{exp}} = (3.32 \pm 0.06) \times 10^{-3}$$

$$A_{p-n} = \frac{(V_{ud}^{00LR})^2 - (V_{ud}^{nLR})^2}{(V_{ud}^{00LR})^2 + (V_{ud}^{nLR})^2} = (-3.2 \pm 1.6) \cdot 10^{-3} (2.0\sigma)$$

Лептонная
асимметрии

$$0^- \leftrightarrow 0^-$$

Причина разных знаков

$$0^+ \leftrightarrow 0^+$$

Барионная
асимметрии

Барионная и лептонная асимметрия Вселенной

*Из эффекта С.Окубо
При большой температуре
Для Вселенной сшита шуба
По ее кривой фигуре.*

*Из-за эффекта CP-нарушения
При большой температуре
Возникла барионная
Асимметрия Вселенной*

А.Д. Сахаров

B-L сохраняется $\Delta B = \Delta L$

Эксперимент TWIST.

[36] J. F. Bueno, R. Bayes, Yu. I. Davydov, et al,
Phys. Rev. D **84**, 032005 (2011) **TWIST**

$$M_{W_R} > 592 \text{ GeV (90\% CL).}$$

$$-0.020 < \zeta < +0.017 \text{ (90\% CL)}$$

Сравнение с ограничениями на массу W_R и угол смешивания, которые были получены ранее в 2012 году в работе [36] коллаборацией **TWIST**.

Прежде всего необходимо отметить, что **распад пиона это тоже аксиально-векторный переход**, как и распад нейтрона. Поэтому результат эксперимента TWIST представляет интерес поиска эффекта в рамках лево-правой модели.

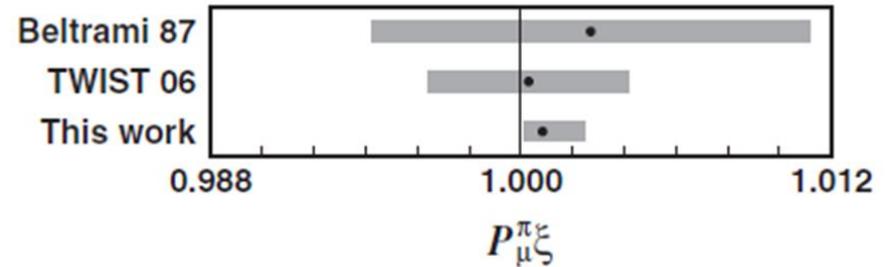
CP-нарушение для заряженных мезонов невозможно из-за сохранения CPT.

[36] J. F. Bueno, R. Bayes, Yu. I. Davydov, et al,
Phys. Rev. D **84**, 032005 (2011) **TWIST**

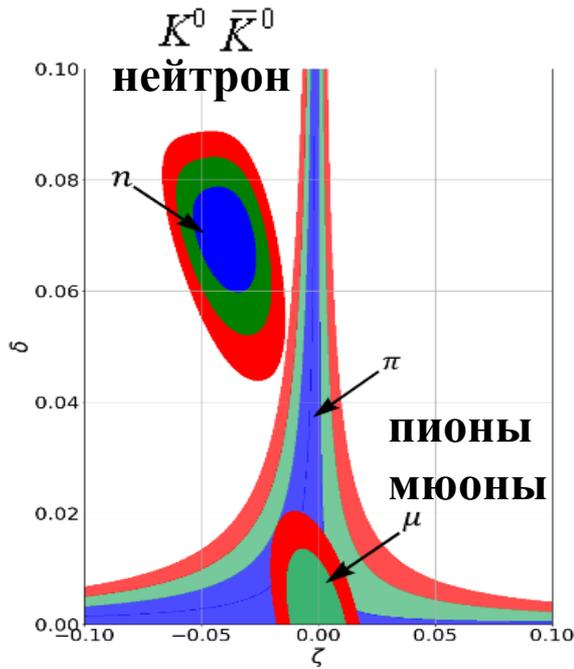
Более точные ограничения на массу W_R и угол смешивания были получены в распаде мюона:

$$M_{W_R} > 592 \text{ GeV (90\% CL).}$$

$$-0.020 < \zeta < +0.017 \text{ (90\% CL)}$$



Сравнение анализа распада нейтрона и пионов в рамках лево-правой модели



$$M_{\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} \nu} \approx \left(\bar{\mu} \gamma_{\rho} \frac{(C_A^{\pm} + C_A^{\prime \pm} \gamma_5)}{2} \nu \right)$$

$$\frac{\tau_{\pi^+} - \tau_{\pi^-}}{\tau_{\pi^+} + \tau_{\pi^-}} = 4\delta\zeta$$

$$C_A^{\pm} = 1 \mp 2\zeta + \delta \quad C_A^{\prime \pm} = 1 - \delta$$

CPT- теорема

$$\frac{(\tau_{\pi^+} - \tau_{\pi^-})}{\tau_{average}} = (5.5 \pm 7.1) \times 10^{-4}$$

из распадов $K^0 \quad \bar{K}^0$

$$\frac{(\Gamma_{K^0} - \Gamma_{\bar{K}^0})}{m_{average}} = (7.8 \pm 8.4) \times 10^{-18}$$

$(\tau_{\pi^+} - \tau_{\pi^-}) / \tau_{average}$

A test of CPT invariance.

VALUE (units 10^{-4})	DOCUMENT ID	TECN.
5.5 ± 7.1	AYRES	71 CNTR
••• We do not use the following data for averages, fits, limits, etc.		
-14 ± 29	PETRUKHIN	68 CNTR
40 ± 70	BARDON	66 CNTR
23 ± 40	¹ LOBKOWICZ	66 CNTR

Вывод: Описание распадов заряженных пи и мю мезонов, в рамках расширенной лево-правой модели показывает, что из-за сохранения CPT проявление правых токов невозможно.

ЗАКЛЮЧЕНИЕ

1. Представлены результаты последних наиболее точных экспериментальных данных распада нейтрона. Показано, что точность измерений увеличилась за последние 30 лет более чем на порядок, что позволяет делать анализ на отклонения от Стандартной Модели.

2. Проведён анализ на возможность существования правого векторного бозона W_R . В результате анализа в рамках расширенной лево-правой модели обнаружено, что имеется указание на существование правого векторного бозона W_R с массой $M_{W_R} = 304_{-20}^{+24}$ ГэВ, и углом смешивания с W_L : $\zeta = -0.039 \pm 0.014$.

3. Показано, что этот результат не противоречит экспериментам на коллайдерах по поиску гипотетического векторного бозона.

4. Обнаружено CP-нарушение в барионах на уровне 2 сигма

$$A_{p-n} = \frac{(V_{ud}^{00LR})^2 - (V_{ud}^{nLR})^2}{(V_{ud}^{00LR})^2 + (V_{ud}^{nLR})^2} = (-3.2 \pm 1.6) \cdot 10^{-3} (2.0\sigma)$$

5. Показано, что возможно описание эффектов CP-нарушения в распадах нейтральных K-мезонов, используя параметрами расширенной лево-правой модели, которые извлечены из нейтронного распада.

Таким образом, расширенная лево-правая модель слабого взаимодействия позволяет в пределах имеющейся точности описать эффекты CP-нарушения в барионах и мезонах .

6. Разные знаки барионной и лептонной CP-нарушающей асимметрии связаны с разными знаками барионной и лептонной асимметрией Вселенной.

B-L сохраняется.

7. Наконец, можно провести рассмотрение возможных следствий, полагая, что результат, представленный в этой работе, будет подтверждён. Во-первых, требуется расширение SM введением правых векторных бозонов W_R^\pm, Z_R и правых нейтрино. Во-вторых, правые нейтрино могут рассматриваться кандидатами на тёмную материю.

В целом нужно подчеркнуть принципиально новый момент.

**Предложена другая модель CP-нарушения,
которая возможно объясняет природу CP-нарушения.**

**Имеется указание, что CP-нарушающие асимметрии определяются параметрами
лево-правой модели смешивания левых и правых векторных бозонов**

где ζ – угол смешивания флейворных состояний W_L и W_R , а δ – отношение квадратов
масс состояний W_1 и W_2 . $M_{W_R} = 304_{-20}^{+24}$ ГэВ, $\zeta = -0.039 \pm 0.014$. $\delta = 0.070 \pm 0.010$

$$A_T^{LR} = -2\delta\zeta = (5.5 \pm 2.1) \times 10^{-3} (2.6\sigma)$$

**Предсказание
лево-правой модели для K_0 и D_0 -мезонов**

$$A_T^{\text{exp}} = (6.6 \pm 1.3 \pm 1.0) \times 10^{-3} (4\sigma)$$

Асимметрии для K_0 и D_0 -мезоны

$$A_{D_0}^{\text{exp}} = (6.30 \pm 0.33) \times 10^{-3}$$

Предсказание

лево-правой модели для барионов

$$A_{p-n} = \frac{(V_{ud}^{00LR})^2 - (V_{ud}^{nLR})^2}{(V_{ud}^{00LR})^2 + (V_{ud}^{nLR})^2} = (-3.2 \pm 1.6) \cdot 10^{-3} (2.0\sigma)$$

$$A_L^{\text{exp}} = (3.32 \pm 0.06) \times 10^{-3}$$

Эксперимент K_0 -мезоны

B-L сохраняется

$$\Delta B = \Delta L$$

**Барионная асимметрия Вселенной
зарождается при температурах $10^2 - 10^4$ Гэв
благодаря смешиванию W_L и W_R
с CP-нарушающей асимметрией**

$$A_T^{LR} \approx -2\delta\zeta = (5.5 \pm 2.1) \times 10^{-3} (2.6\sigma)$$

где ζ – угол смешивания,
 δ – отношение квадратов масс $W1$ и $W2$,

$$\delta = (M_1 / M_2)^2 = 0.070 \pm 0.010$$

$$\zeta = -0.039 \pm 0.014$$

Что произойдет дальше, покажут эксперименты.

*Спасибо за Ваше
внимание*