

Прецизионных исследования распада нейтрона и физика фундаментальных взаимодействий

А.П. Серебров

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

НИЦ «Курчатовский институт»

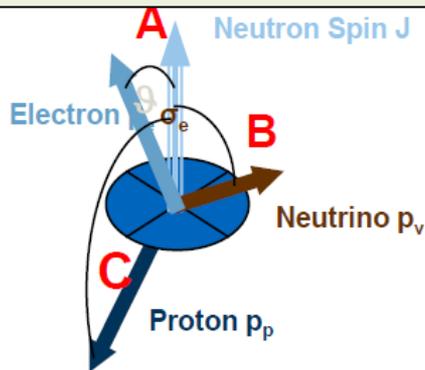
Гатчина, Россия

Сессия-конференция секции ядерной физики ОФН РАН,
посвященная 70-летию В.А. Рубакова

Прецизионные исследования распада нейтрона и поиск отклонений от Стандартной модели

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

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



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

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

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

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

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

Neutron lifetime

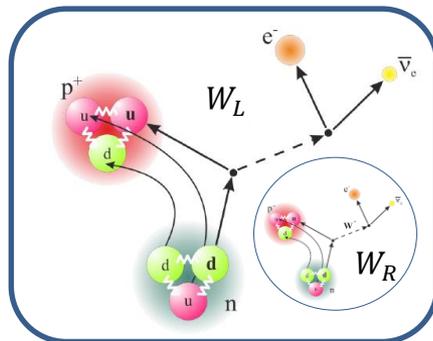
$$\tau^{-1} = G_F^2 |V_{ud}|^2 (1 + 3\lambda^2) \frac{f^R m_e^5 c^4}{2\pi^3 \hbar^7}$$

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

Unitarity CKM

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

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



Повышение точности измерений и тенденции изменения времени жизни нейтрона

Время жизни нейтрона

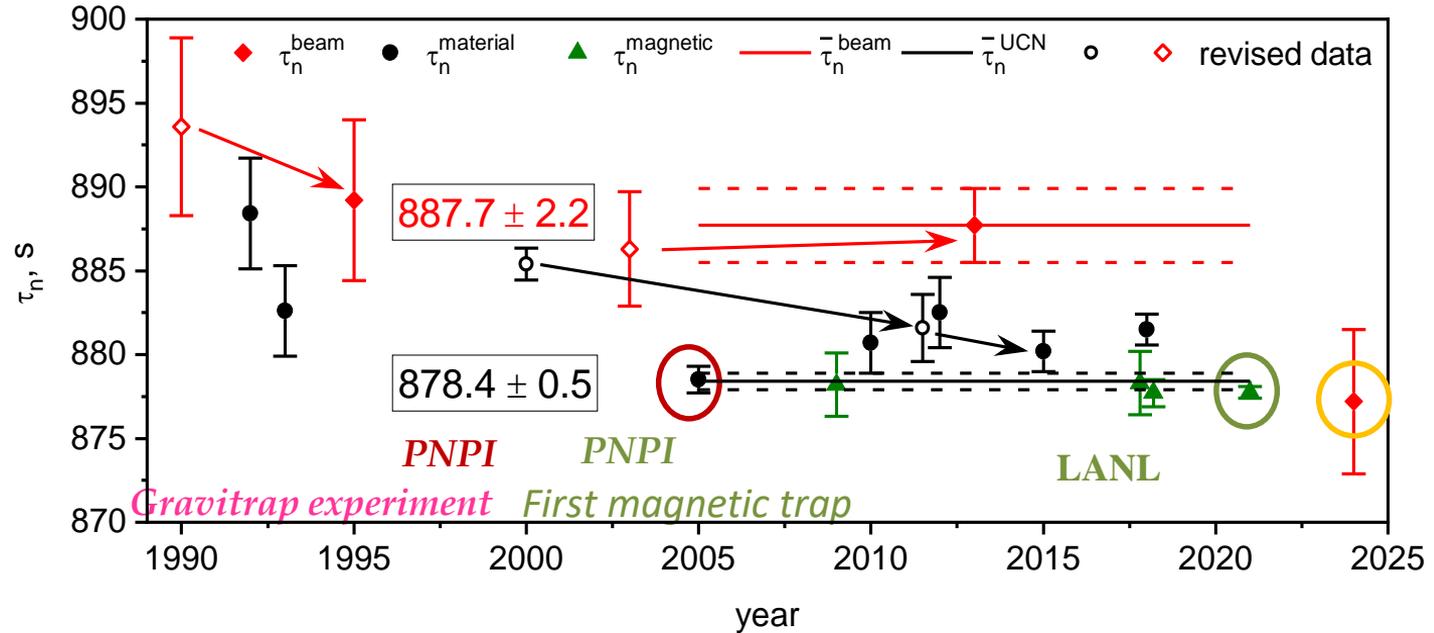
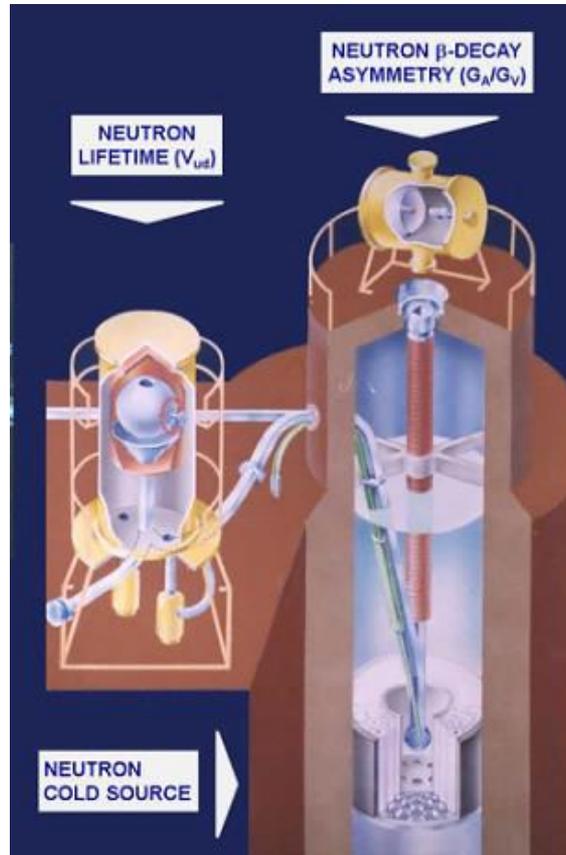


Рис. 1. Данные экспериментальных результатов для времени жизни нейтрона, начиная с 1990 г. из [8], расхождение данных в 2005 году [9] с данными 2000 года [10], новые результаты с магнитной ловушкой (отмеченные зеленым), которые являются определяющими [11-14]. **Новый пучковый эксперимент [15].**

Реактор ВВР-М 1986-1996
ПИАФ-ОИЯИ, Гатчина



Gravitrap experiment

A.Serebrov et al. , Phys Lett B 605,
(2005) 72-78 : **878.5 ± 0.8 s**

2002-2004 (PNPI-JINR-ILL), ILL reactor, Grenoble



First trap of permanent magnets

Technical Physics Letters.
2001. T. 27. C. 1055.

V. F. Ezhov

$$\tau_n = 878.3 \pm 1.9 \text{ s}$$

2001 ПИЯФ РАН

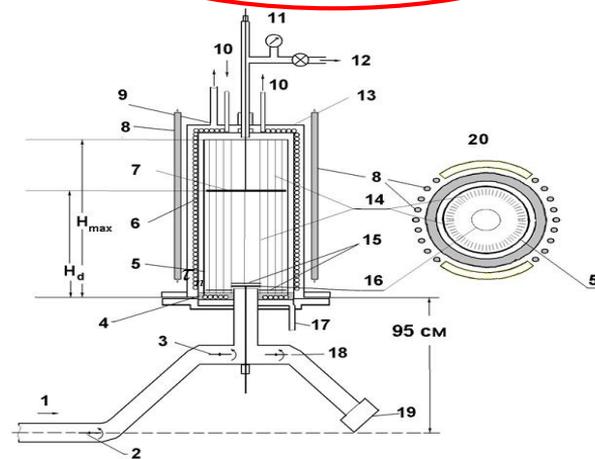
arXiv:1412.7434 [nucl-ex]

2014

JETP 107 (11)

2018

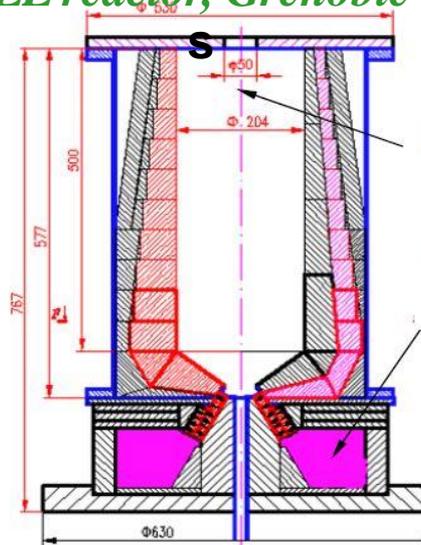
The result of experiment:
 $\tau = (880.2 \pm 1.2) \text{ s}$
Phys. Lett. B. 745 (2015) 79-89
V.I. Morozov 2015



Первый успешный эксперимент
с магнитным хранением УХН



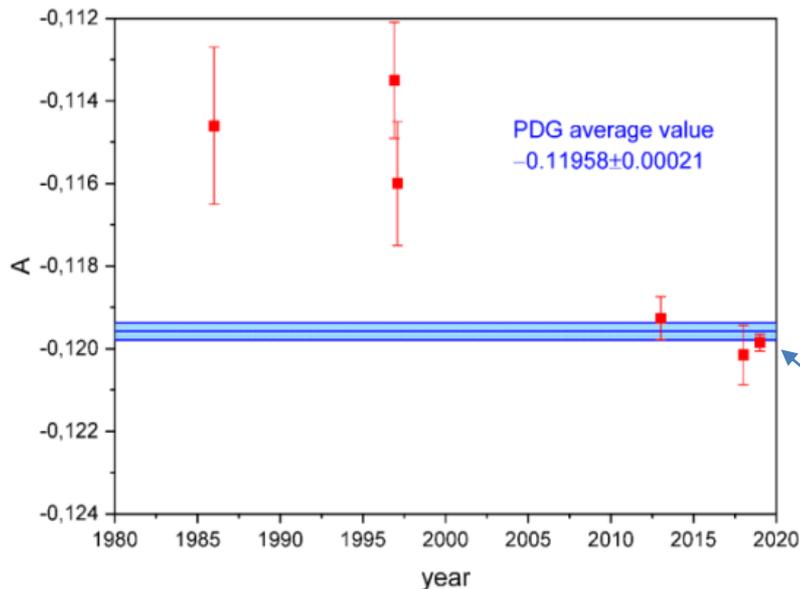
ILL reactor, Grenoble



ILL reactor, Grenoble



Измерение электронной асимметрии распада нейтрона - A



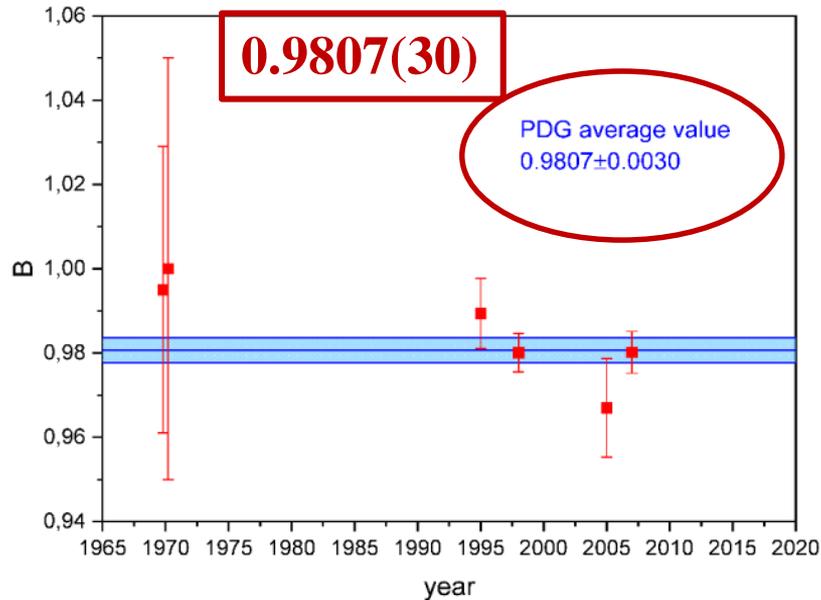
Измерения электронной асимметрии распада нейтрона (A) и усредненный результат PDG [18].

В измерениях электронной асимметрии распада нейтрона существенные изменения точности произошли на установках **PERKEO II [16]** и **PERKEO III [17]**. Точность измерений асимметрии распада сначала увеличилась в 3 раза, затем еще в 2,5 раза и в конечном итоге составила 0,17%. При этом абсолютная величина асимметрии распада электронов увеличилась на 2%.

$$\lambda = -1.2757(5)$$

Определяющий результат

Экспериментальные результаты нейтринной асимметрии распада нейтрона B и усредненный результат из PDG



<u>VALUE</u>	<u>DOCUMENT ID</u>
0.9807±0.0030 OUR AVERAGE	See the ideogram below
0.9802±0.0034 ±0.0036	SCHUMANN 07
0.967 ±0.006 ±0.010	KREUZ 05
0.9801±0.0046	SEREBROV 98
0.9894±0.0083	KUZNETSOV 95
1.00 ±0.05	CHRISTENSEN70
0.995 ±0.034	EROZOLIM... 70c

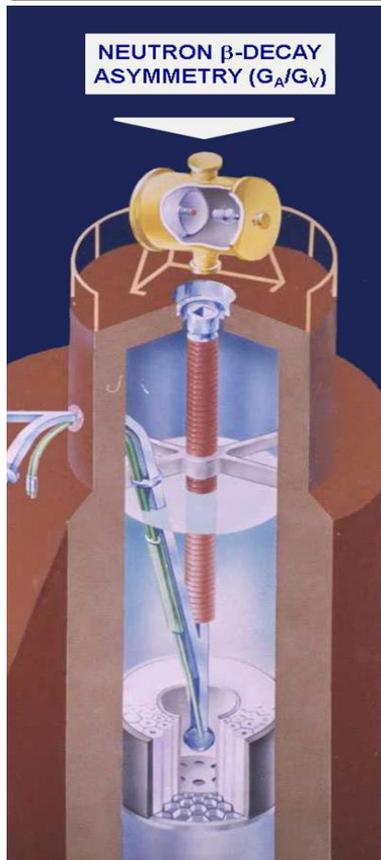


Эксперименты ПИЯФ РАН на реакторе ВВР-М и реакторе ИЛЛ

Наконец, и это самое важное для нашего анализа правых токов, мы должны использовать результаты измерений нейтринной асимметрии распада нейтрона, где точность измерений была существенно повышена в 1998 году экспериментом [19]. Результат был позже подтвержден экспериментом [20] с той же точностью. В результате было определено значение нейтринной асимметрии, представленное в PDG [18].

Установка Борис
Григорьевича
Ерозолимского,
привезённая из
Курчатовского Института

NEUTRON β -DECAY
ASYMMETRY (G_A/G_V)



Measurement of the antineutrino escape asymmetry with respect to the spin of the decaying neutron

A. P. Serebrov, I. A. Kuznetsov,*) I. V. Stepanenko, A. V. Aldushchenkov, and M. S. Lasakov
B. P. Konstantinov St. Petersburg Nuclear Physics Institute, Russian Academy of Sciences, 188350
Gatchina, Russia

$$B = 0.9821 \pm 0.0040$$

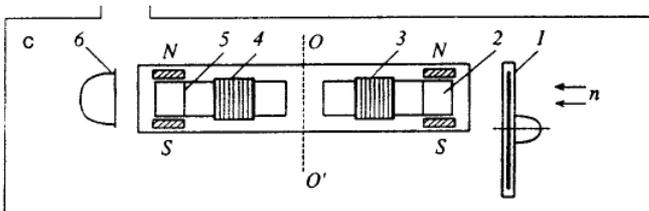
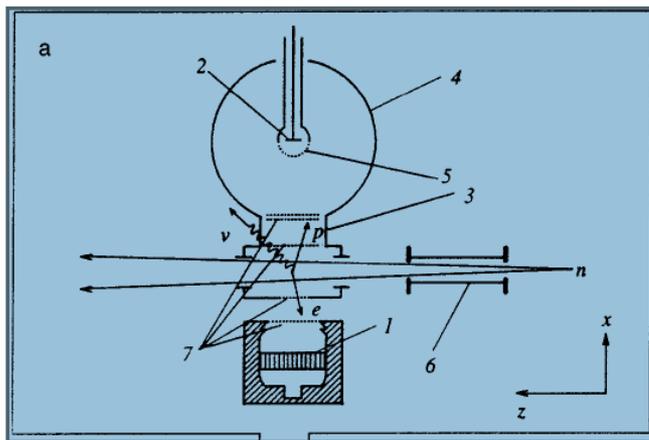
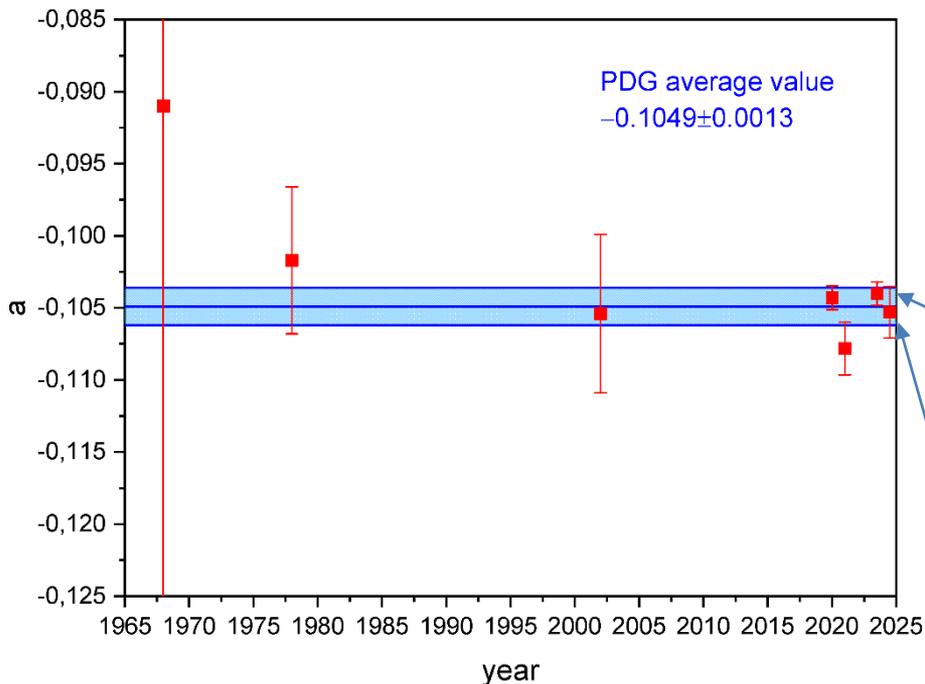


FIG. 1. Overall diagram of the experimental devices and their arrangement in the beam (viewed from above). a) Experimental apparatus for measuring asymmetry: 1 — electron detector, 2 — proton detector, 3 — time-of-flight electrode, 4 — spherical electrode, 5 — spherical grid, σ — exit neutron guide, 7 — shielding grid. b) Setup of the in-beam experimental equipment: 1 — additional neutron guide section, 2 — polarizer, 3 — neutron guide with nonmagnetic coating, 4 — flipper F_1 , 5 — flipper F_1' , σ — experimental apparatus for measuring asymmetry, 7 — apparatus for measuring polarization. c) Apparatus for measuring polarization: 1 — beam shutter, 2 — analyzer A_1 , 3 — flipper F_2 , 4 — flipper F_2' , 5 — analyzer A_2 , 6 — neutron detector.



Электронно-нейтринная асимметрия распада нейтрона - а



Экспериментальные результаты электронно-нейтринной асимметрии распада нейтрона и усредненный результат из PDG [18].

<u>VAUIF</u>	<u>DOCUMENT ID</u>
-0.1049 ± 0.0013 OUR AVERAGE	Error includes scale
-0.10782 ± 0.00124 ± 0.00133	¹ HASSAN 21
-0.10430 ± 0.00084	BECK 20
-0.1054 ± 0.0055	BYRNE 02
-0.1017 ± 0.0051	STRATOWA 78
-0.091 ± 0.039	GRIGOREV 68

Reanalysis of the $\beta - \bar{\nu}_e$ Angular Correlation Measurement from the aSPECT Experiment with New Constraints on Fierz Interference

M. Beck,¹ W. Heil^{1,*}, Ch. Schmidt^{1,*}, S. Baeßler², F. Glück³, G. Konrad⁴, and U. Schmidt⁵

¹Institut für Physik, Johannes Gutenberg-Universität, 55128 Mainz, Germany

²Department of Physics, University of Virginia, Charlottesville, Virginia 22904, USA and Oak Ridge National Lab, Bethel Valley Road, Oak Ridge, Tennessee 37831, USA

³Institut für Astroteilchenphysik (IAP), Karlsruhe Institute of Technology (KIT), 76344 Eggenstein-Leopoldshafen, Germany

⁴Technische Universität Wien, Atominstitut, 1020 Wien, Austria

⁵Physikalisches Institut, Ruprecht-Karls-Universität, 69120 Heidelberg, Germany

(Received 31 August 2023; revised 17 January 2024; accepted 1 February 2024; published 7 March 2024)

Recoil-Order and Radiative Corrections to the aCORN Experiment

F. E. Wietfeldt,¹ W. A. Byron,^{1,*} B. Collett,² M. S. Dewey,³ T. R. Gentile,³ F. Glück,⁴

M. T. Hassan,¹ G. L. Jones,² A. Komives,⁵ J. S. Nico,³ and E. J. Stephenson⁶

¹Department of Physics and Engineering Physics, Tulane University, New Orleans, LA 70118

²Physics Department, Hamilton College, Clinton, NY 13323

³National Institute of Standards and Technology, Gaithersburg, MD 20899, USA

⁴Karlsruhe Institute of Technology, IAP, 76021 Karlsruhe, POB 3640, Germany

⁵Department of Physics and Astronomy, DePauw University, Greencastle, IN 46135

⁶CEEM, Indiana University, Bloomington, IN 47408

(Dated: March 1, 2024)

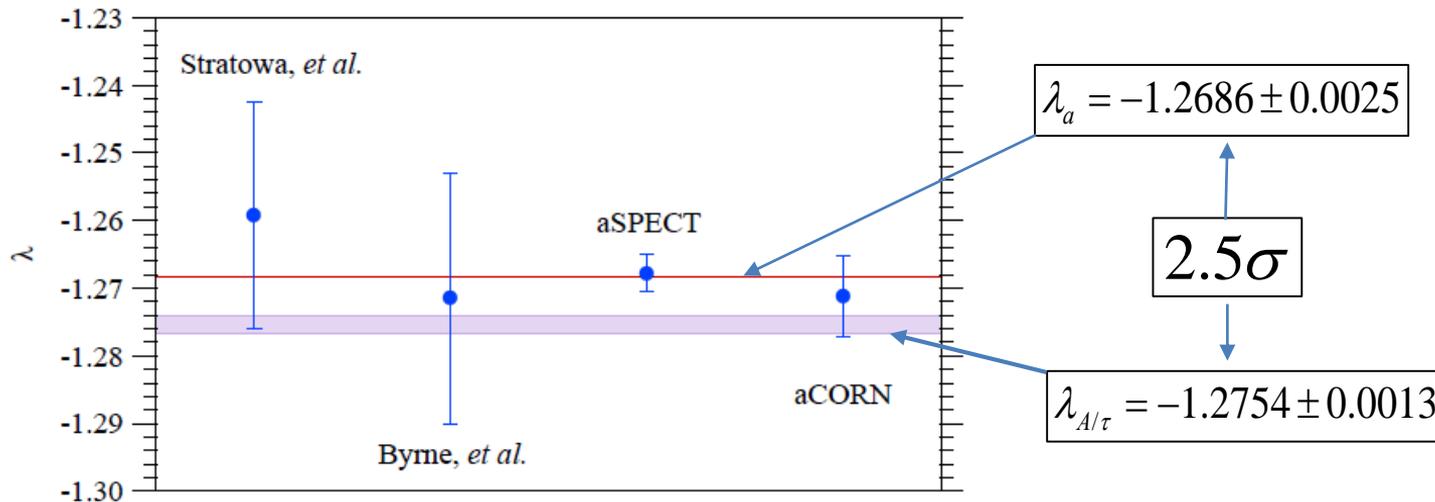


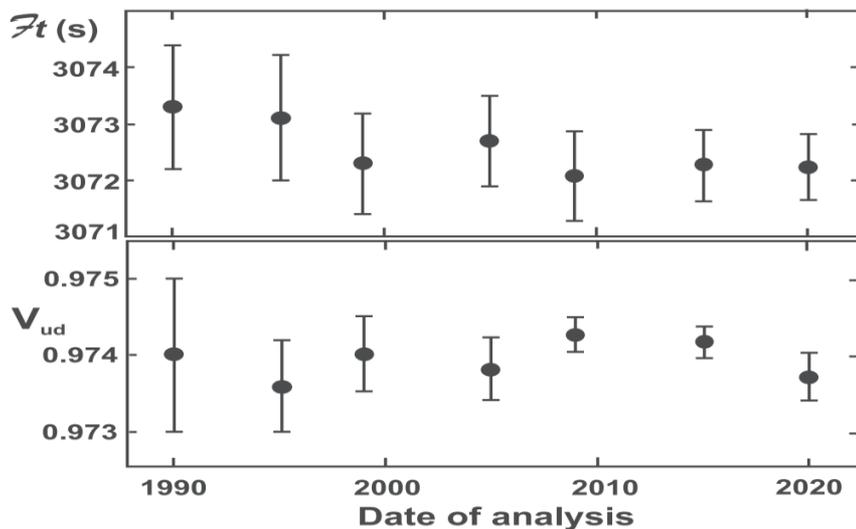
FIG. 10. A summary of the results for $\lambda = G_A / G_V$ from neutron a -coefficient experiments. The horizontal line is the weighted average: $\lambda = -1.2686 \pm 0.0025$. The shaded region shows the 2022 PDG recommended value $\lambda = -1.2754 \pm 0.0013$.

**Данные экспериментов с ядерными
сверхразрешенными $0^+ - 0^+$ переходами и
унитарность матрицы СКМ**

Для дальнейшего анализа следует использовать условие унитарности матрицы СКМ [18] и экспериментальные данные с фермиевскими сверхразрешенными ядерными переходами 0^+-0^+ [18].

Все основные данные взяты из J. C. Hardy и I. S. Towner, Phys. Rev. C 102, 045501.

Статья J. C. Hardy 2020 года содержит таблицу с историческими тенденциями в определении F_t и V_{ud} :



Из полученных данных
получено значение

$$|V_{ud}| = 0.97373 \pm 0.00031$$

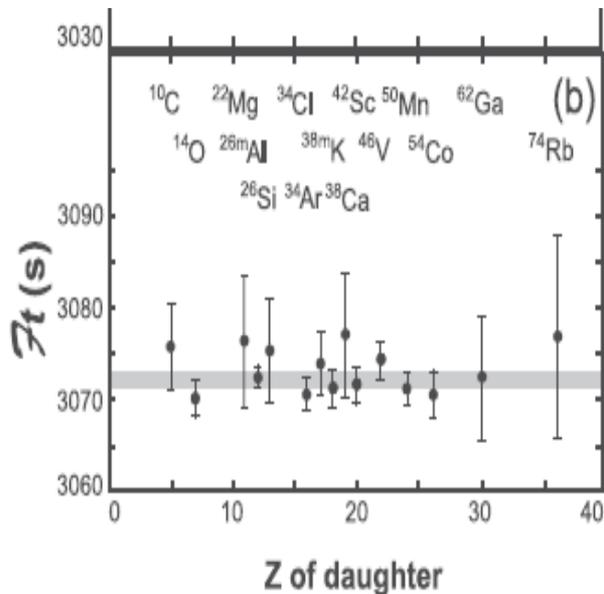
Третий элемент верхней строки, $|V_{ub}|$, очень мал и почти не влияет на тест унитарности. Его значение из оценки Particle Data Group (PDG) равно

$$|V_{ub}| = (3.94 \pm 0.36) \times 10^{-3}$$

Superaligned $0^+ \rightarrow 0^+$ nuclear β decays: 2020 critical survey, with implications for V_{ud} and CKM unitarity

J. C. Hardy * and I. S. Towner

Cyclotron Institute, Texas A&M University, College Station, Texas 77843, USA

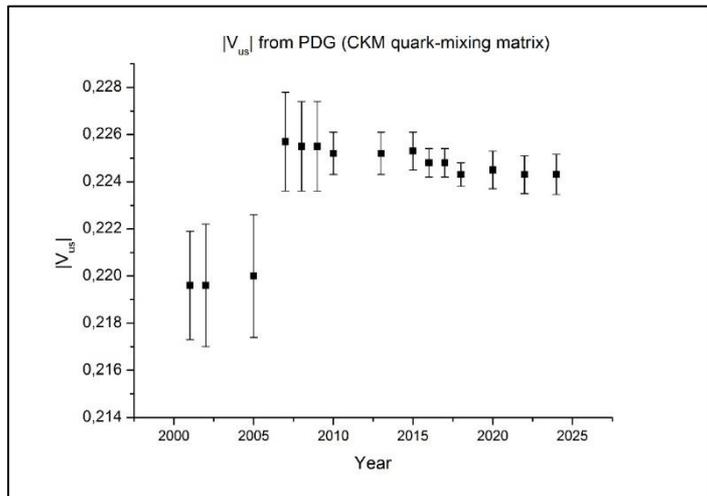


Представлен новый критический обзор всех измерений периода полураспада, энергии распада и отношения ветвления, связанных с 23 сверхразрешенными $0^+ \rightarrow 0^+$. Их среднее значение Ft в сочетании со временем жизни мюона дает элемент смешивания кварков вверх-вниз матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскавы, **$V_{ud} = 0,97373 \pm 0,00031$** . Это на одно стандартное отклонение ниже нашего результата 2015 года, и его неопределенность увеличилась на 50%. Это не следствие каких-либо сдвигов в экспериментальных данных, а новых расчетов радиационных поправок. **Более низкое значение V_{ud} теперь приводит к более высокому напряжению в тесте унитарности верхней строки в матрице СКМ.**

Этот результат приведен в последней строке Таблицы XVII: где сумма унитарности равна **$|V_{u1}|^2 = 0,9985(6)$** , что указывает на **нарушение унитарности $2,4\sigma$** .

Data $|V_{us}|$ from PDG

$$V_{us} = 0.2243(8)$$



Третий элемент верхней строки, $|V_{ub}|$, очень мал и почти не влияет на тест унитарности. Его значение из оценки Particle Data Group (PDG) равно:

$$|V_{ub}| = (3.94 \pm 0.36) \times 10^{-3}$$

V_{ud}^{unit} from the unitarity of the CKM matrix

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

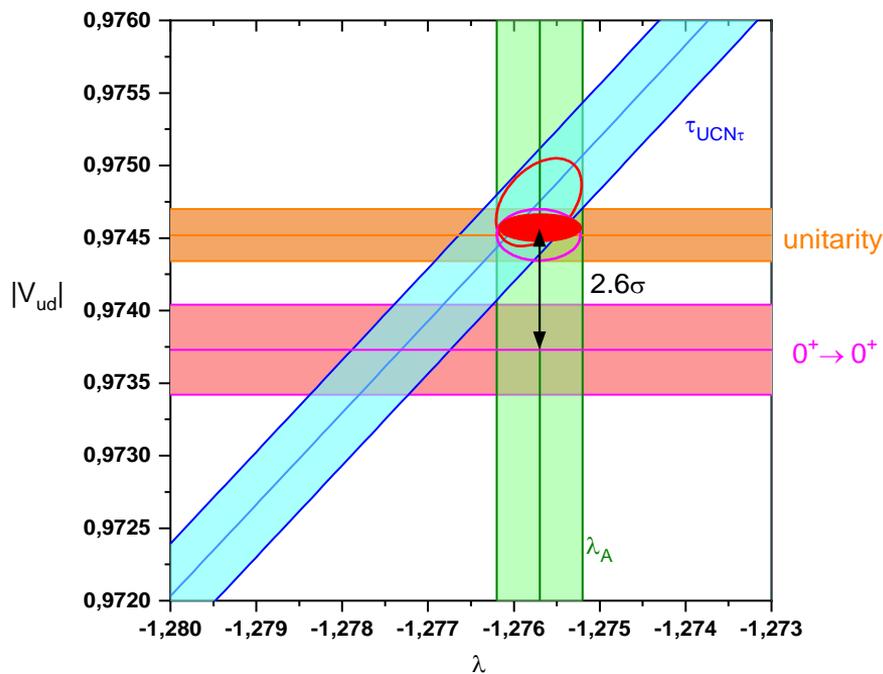
Однако матричный элемент V_{ud}^{00} из $0^+ - 0^+$ бета-распадов отличается

$$V_{ud}^{00} = 0.97367(32)$$

$$\frac{V_{ud}^{unit} - V_{ud}^{00}}{V_{ud}^{00}} = 8.6 * 10^{-4} (2.4 \sigma)$$

**Несоответствия экспериментальных
результатов
с $V-A$ теорией
слабого взаимодействия**

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

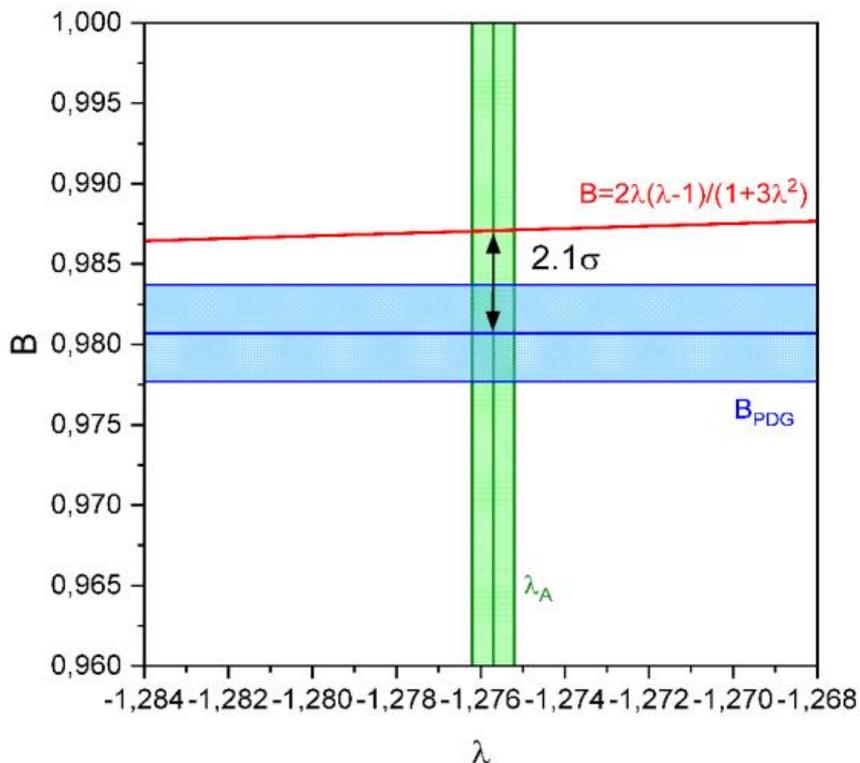


Зависимость элемента матрицы смешивания кварков V_{ud} от λ , рассчитанная с использованием формул СКМ из распада нейтрона, из экспериментов с ферми-сверхразрешенными ядерными переходами $0^+ - 0^+$ и из унитарности матрицы СКМ с использованием V_{us} измерений [18].

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

Существует расхождение между экспериментальным значением нейтринной асимметрии и предсказанием СМ.

Разница между этими значениями составляет 2,1 сигма



Сравнение экспериментальной нейтринной асимметрии распада нейтрона и рассчитанной в рамках СМ в зависимости от соотношения аксиальной и векторной констант слабого взаимодействия λ .

$$\frac{\Delta B}{B} = 6.5 * 10^{-3} (2.1 \sigma)$$

$$\frac{\Delta B}{B} = \frac{B_{\text{exp}} - B_{SM}}{B_{SM}}$$

$$B_{SM} = \frac{2\lambda_n(\lambda_n - 1)}{(1 + 3\lambda_n^2)}$$

Описание экспериментальных результатов в рамках V-A варианта теории

оказывается неудовлетворительным,

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

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

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

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

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

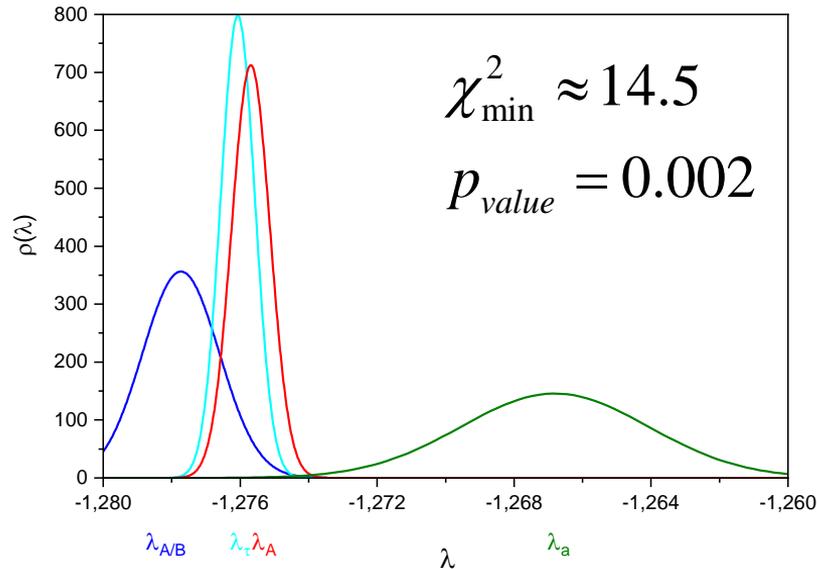
$$\tau_{\text{exp}} = 877.75(35)$$

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

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

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

$$V_{ud}^{\text{unit}} = 0,97452(18)$$



**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 .

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

ω - CP-нарушающая фаза

ω - CP-нарушающая фаза. Полное нарушение CP при $\omega = \pi/2$ и отсутствие CP-нарушения при $\omega = 0$.

- [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

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

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

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

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

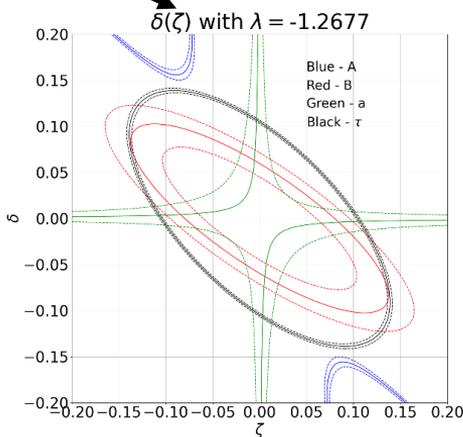
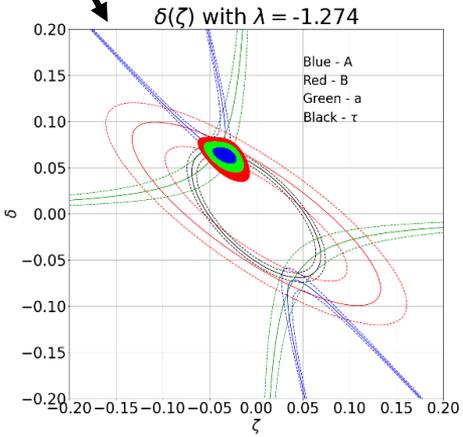
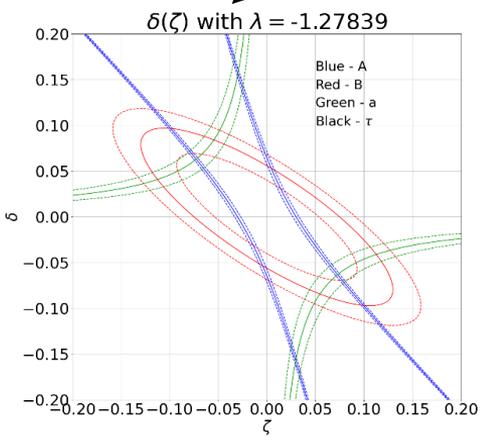
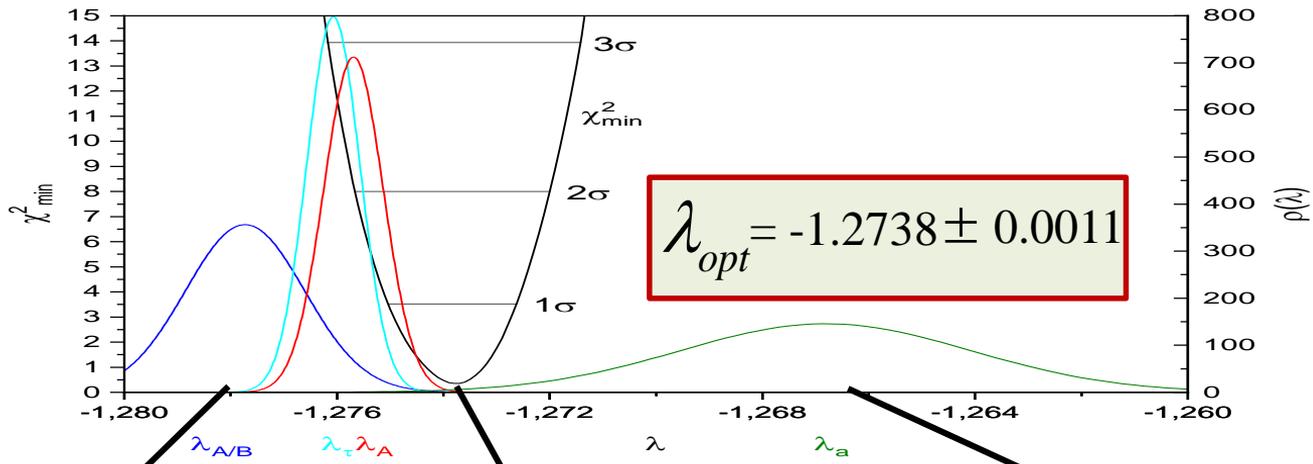
$$\frac{\tau_{\text{exp}} \pm \Delta\tau_{\text{exp}} - \tau_{V-A}}{\tau_{V-A}} \simeq - \left[\delta^2 + \zeta^2 + 2 \frac{(3\lambda^2 - 1)}{(3\lambda^2 + 1)} \delta\zeta \right]$$

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

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

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

Поиск оптимальных значений был сделан с использованием метода χ^2



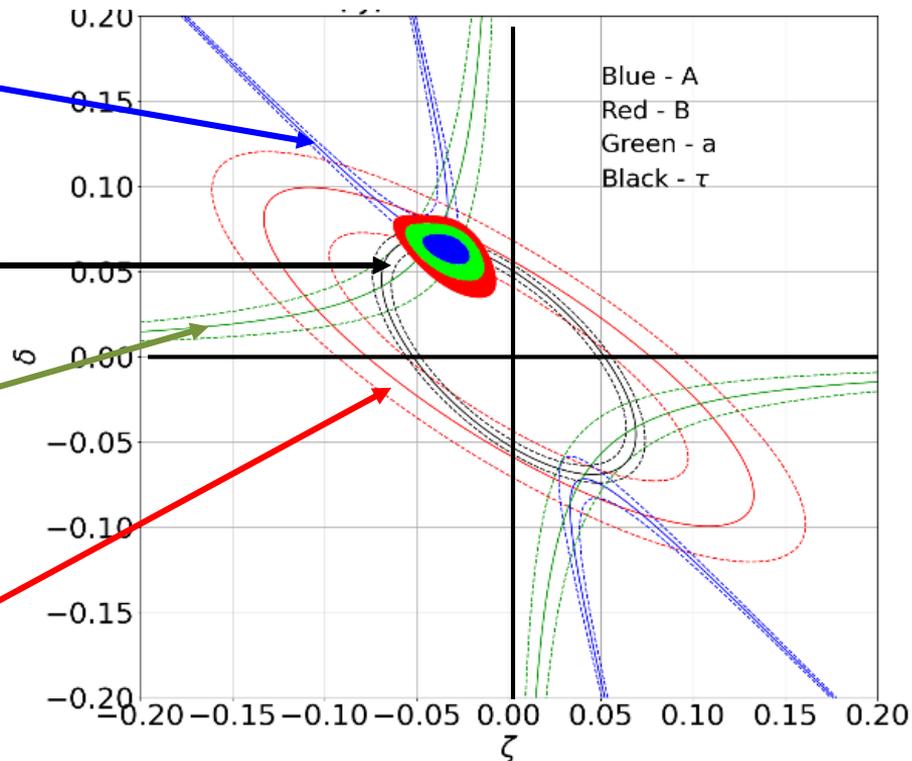
Распад нейтрона в рамках лево-правой модели смешивания левых и правых векторных бозонов **может быть успешно описан**

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

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

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

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

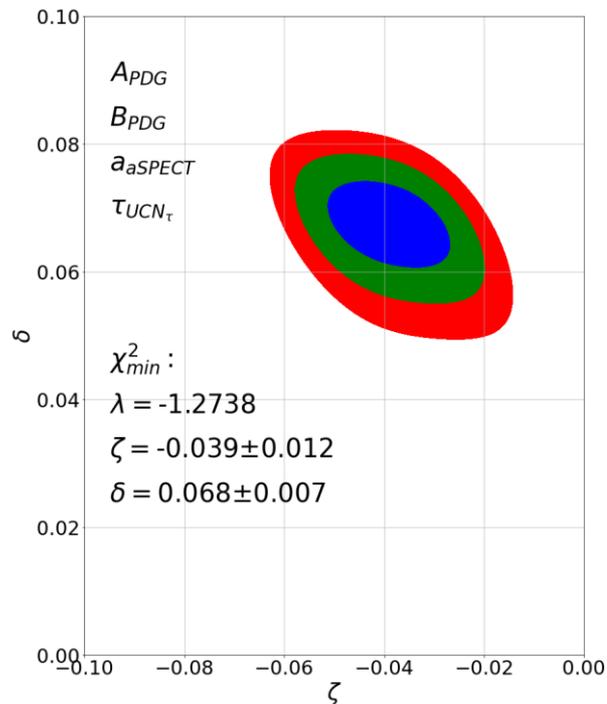


Оптимальные значения параметров δ и ζ , полученные методом χ^2 с использованием экспериментальных данных распада нейтрона для a , A , B и τ

для наиболее точных
экспериментальных данных

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

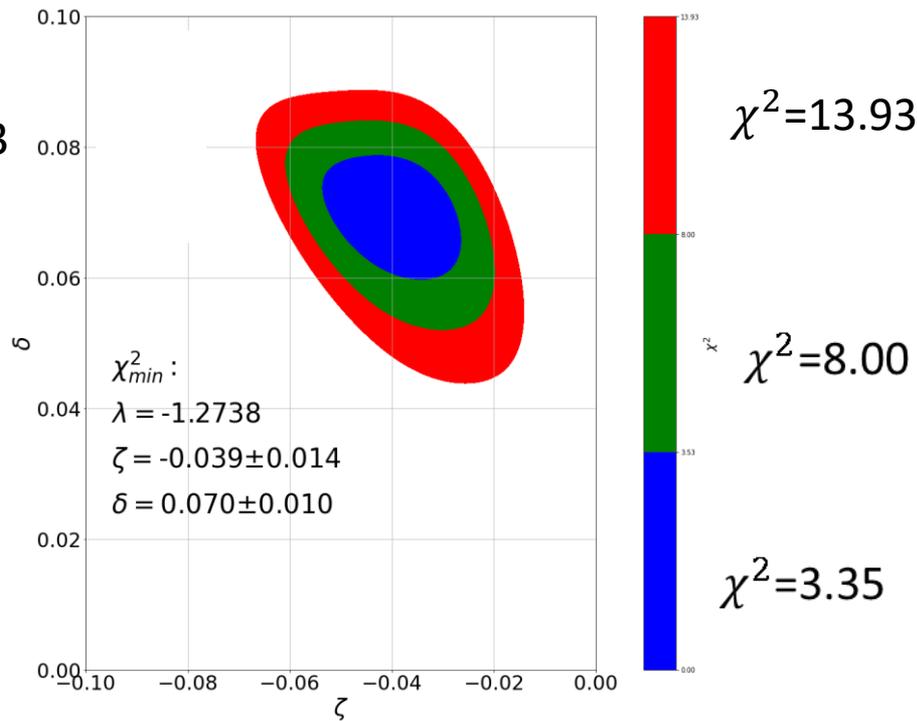
для экспериментальных данных PDG



$$\chi^2 = 13.93$$

$$\chi^2 = 8.00$$

$$\chi^2 = 3.35$$



$$\chi^2 = 13.93$$

$$\chi^2 = 8.00$$

$$\chi^2 = 3.35$$

3 степени свободы

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

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

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

$$\delta = 0.070 \pm 0.010$$

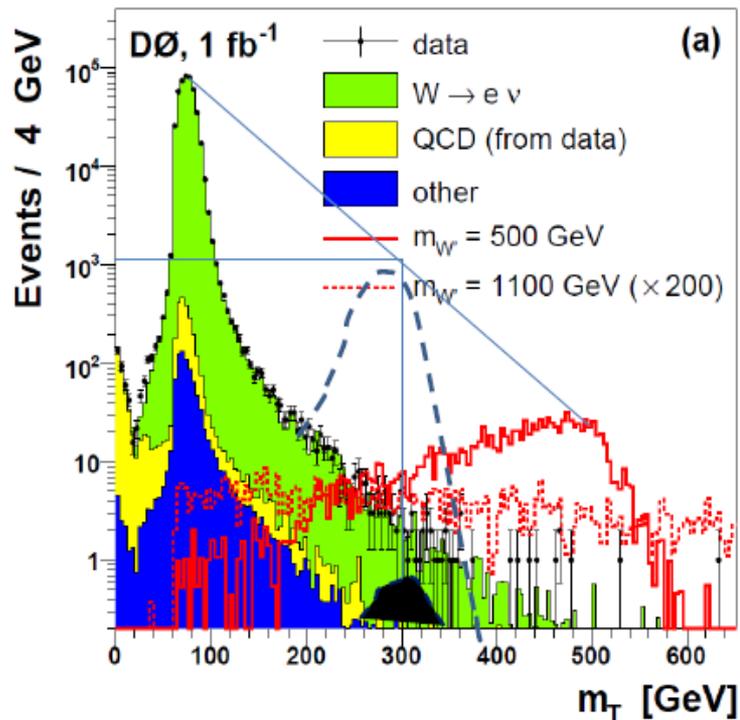
АНАЛИЗ ЭКСПЕРИМЕНТАЛЬНЫХ ДАННЫХ РАСПАДА НЕЙТРОНА НА ВОЗМОЖНОСТЬ СУЩЕСТВОВАНИЯ ПРАВОГО ВЕКТОРНОГО БОЗОНА W_R

*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

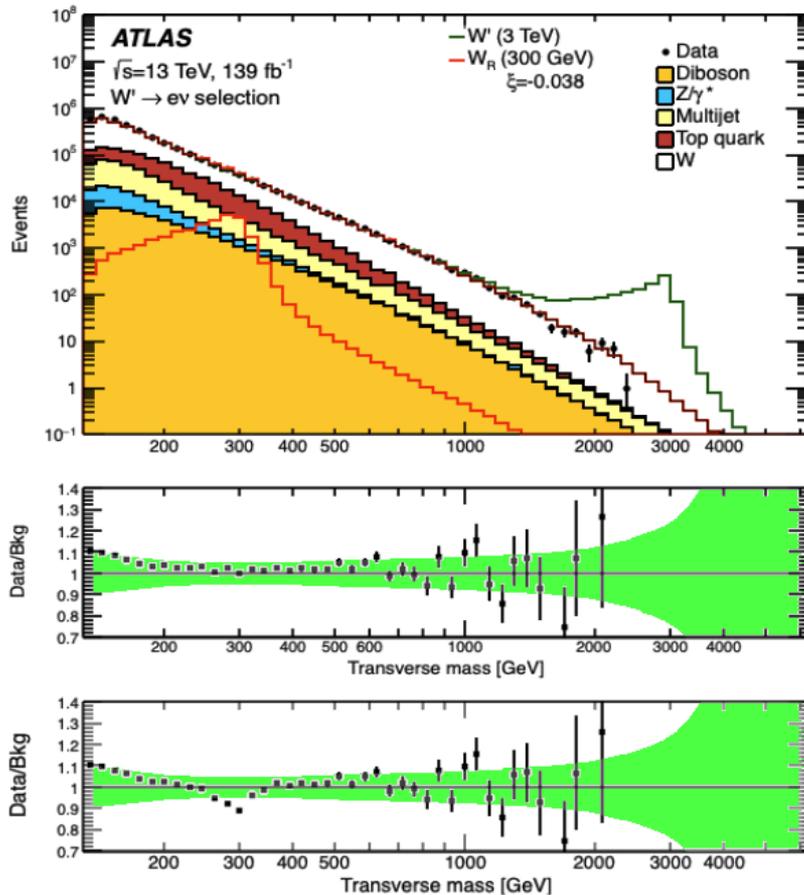
Проведен анализ последних наиболее точных экспериментальных данных распада нейтрона на возможность существования правого векторного бозона W_R . В результате анализа обнаружено, что имеется указание на существование правого векторного бозона W_R с массой $M_{W_R} \approx 319_{-20}^{+26}$ ГэВ и углом 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.

**Сравнение с ограничениями на массу W_R и
угол смешивания,
которые были получены ранее из других
экспериментов**



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.

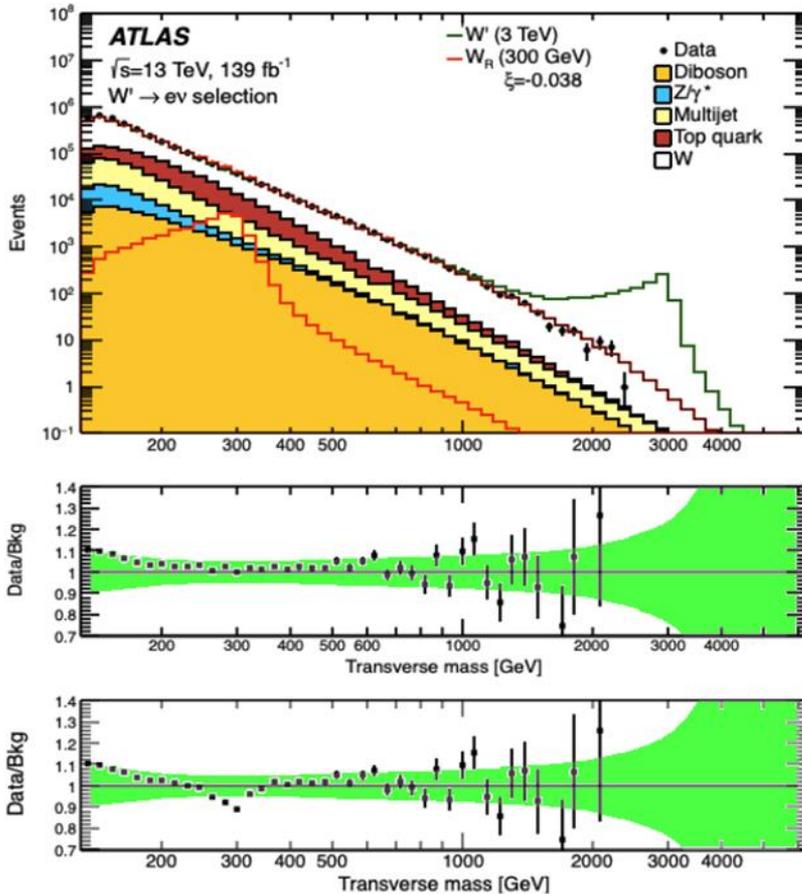
Эксперименты на коллайдерах



ЦЕРН

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

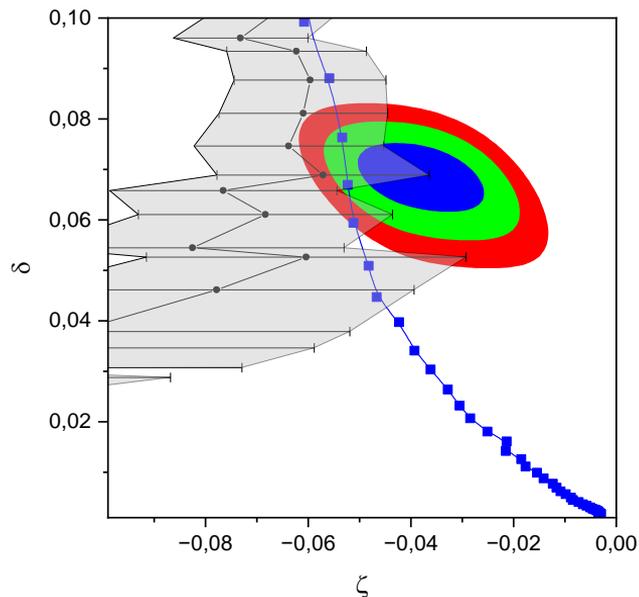
Теперь давайте рассмотрим результаты эксперимента ATLAS [45], где статистическая точность должна быть выше. На рис. представлены опубликованные результаты эксперимента, которые дополнены анализом, учитывающим вклад резонанса с массой 300 ГэВ и с учётом фактора подавления $1.4 \cdot 10^{-3}$. Это красная 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.

Однако, есть основания надеяться, что более детальный анализ систематических ошибок и увеличение статистической точности эксперимента позволял ответить на поставленный вопрос. Наконец, следует заметить, что представленный здесь анализ данных эксперимента ATLAS был сделан без учёта возможной интерференции резонансов и с обычной зависимостью ширины резонанса от его массы. На самом деле из-за эффекта интерференции возможны искажение формы резонанса, как в области массы левого векторного бозона, так и в области массы правого векторного бозона. **В частности, нужно выяснить чем определяется заметный систематический эффект в области от 100 ГэВ до 200 ГэВ, который присутствует в данных эксперимента ATLAS.**

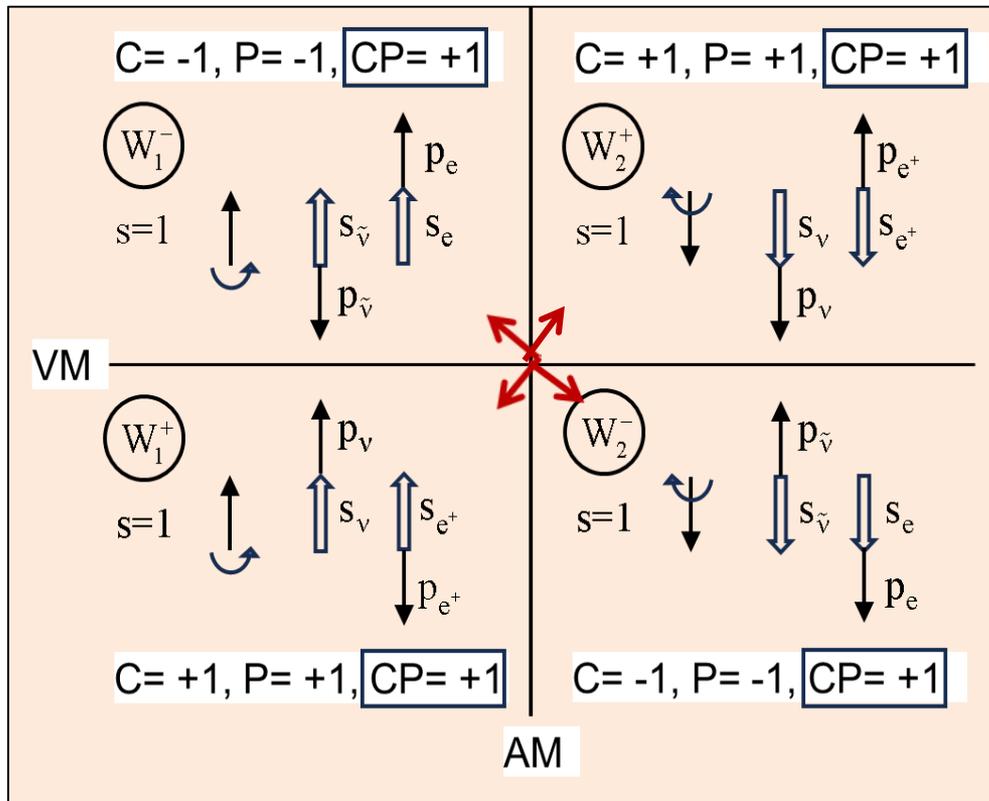
В целом можно заключить, что на сегодняшний день чувствительность нейтронного эксперимента оказалась выше.



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

Анализ лево-правой модели слабого взаимодействия

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 .

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

ω - CP-нарушающая фаза

ω - CP-нарушающая фаза. Полное нарушение CP при $\omega = \pi/2$ и отсутствие CP-нарушения при $\omega = 0$.

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

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

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

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

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

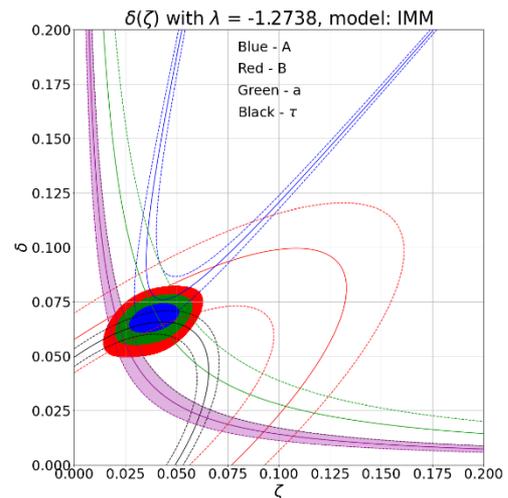
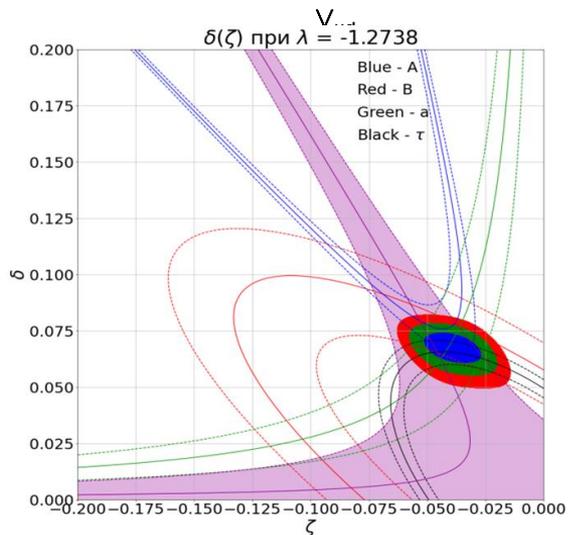
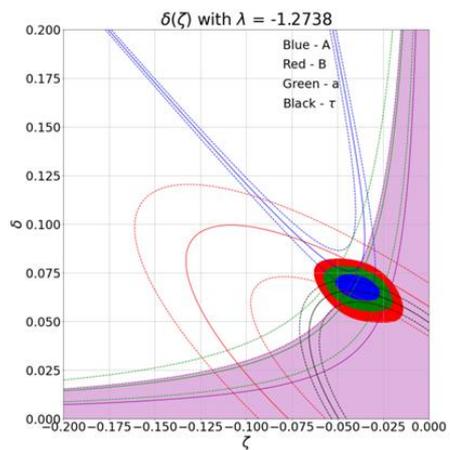
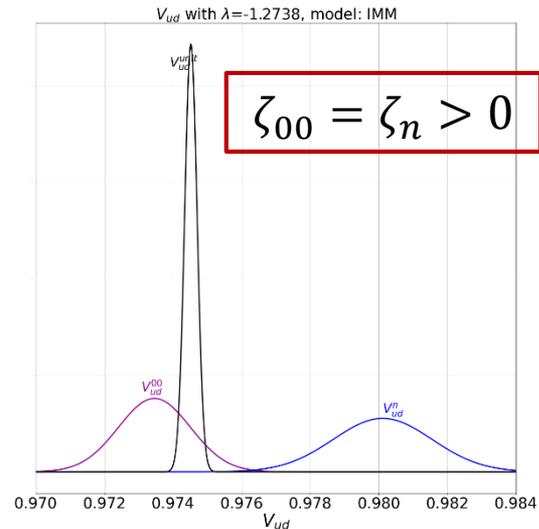
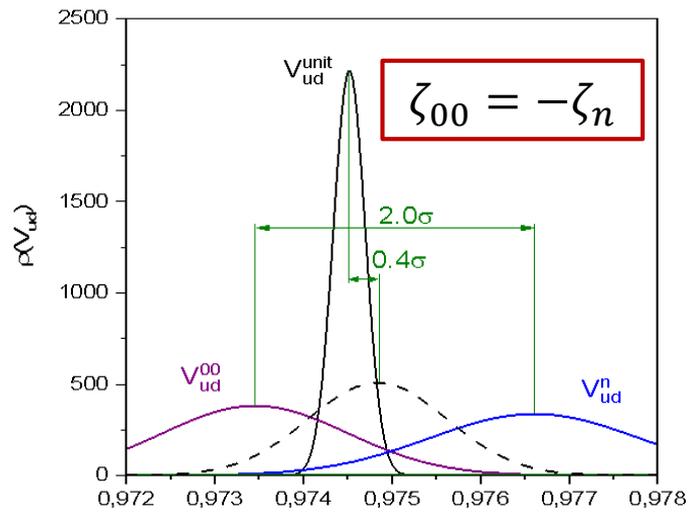
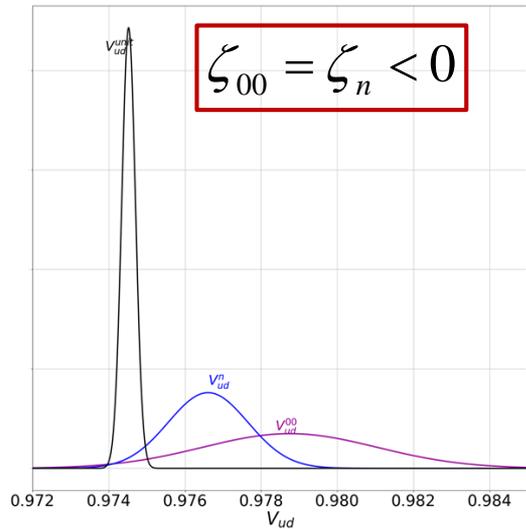
$$\tilde{V}_{ud}^- = V_{ud}^- (1 - \zeta) = V_{ud}^{-(V-A)} \equiv V_{ud}^{n(V-A)}$$

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

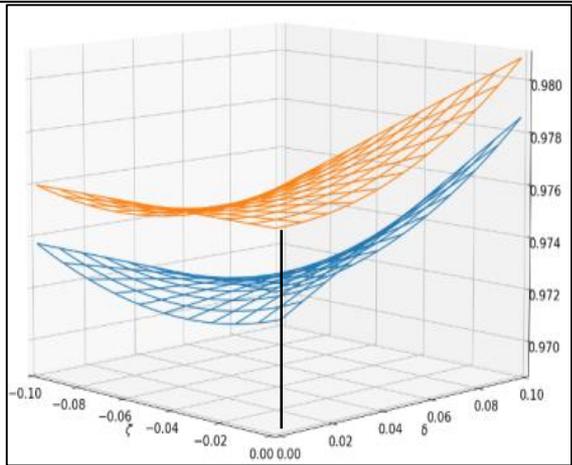
$$V_{ud}^{nLR} = V_{ud}^{n(V-A)} \times \sqrt{\frac{1 + 3\lambda_{n,V-A}^2}{1 + 3\lambda_{\text{exp},LR}^2} \frac{[1 + (\delta^2 + \zeta^2) \mp 2 \frac{(3\lambda_{n,V-A}^2 - 1)}{(3\lambda_{n,V-A}^2 + 1)} \delta\zeta]}{(1 + \zeta^2)}}$$

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

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



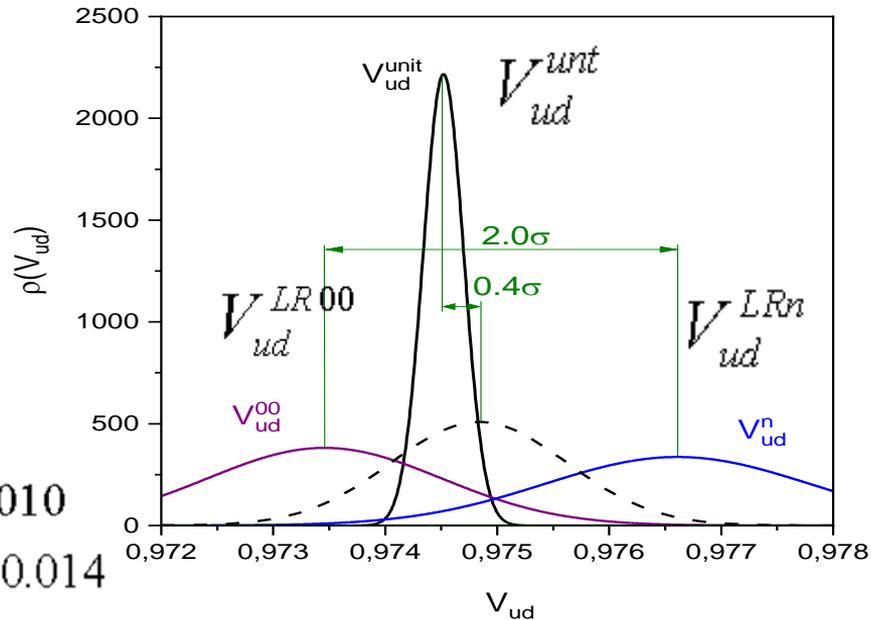
**Схема смешивание между левыми частицами W_1^- и W_2^- ,
и между правыми античастицами W_1^+ и W_2^+**



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

$$\delta = 0.070 \pm 0.010$$

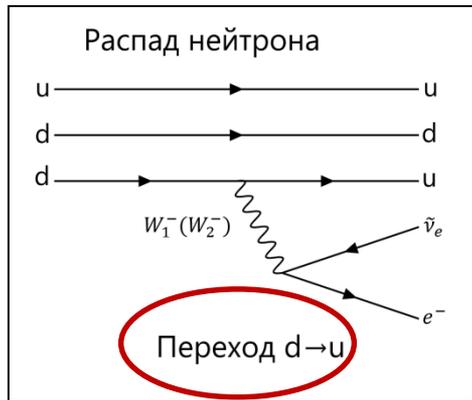
$$\zeta = -0.039 \pm 0.014$$



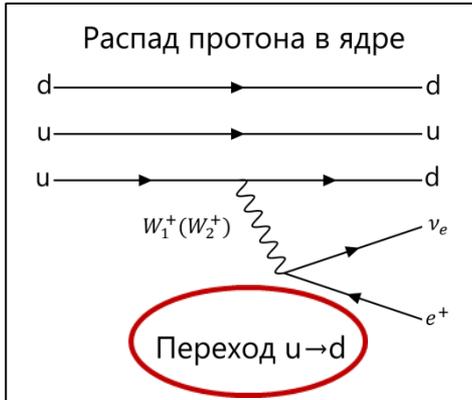
$$V_{ud}^{nLR} = V_{ud}^{n(V-A)} \times \sqrt{\frac{1 + 3\lambda_{n,V-A}^2}{1 + 3\lambda_{exp,LR}^2} \frac{[1 + (\delta^2 + \zeta^2) + 2 \frac{(3\lambda_{n,V-A}^2 - 1)}{(3\lambda_{n,V-A}^2 + 1)} \delta\zeta]}{(1 + \zeta^2)}}$$

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

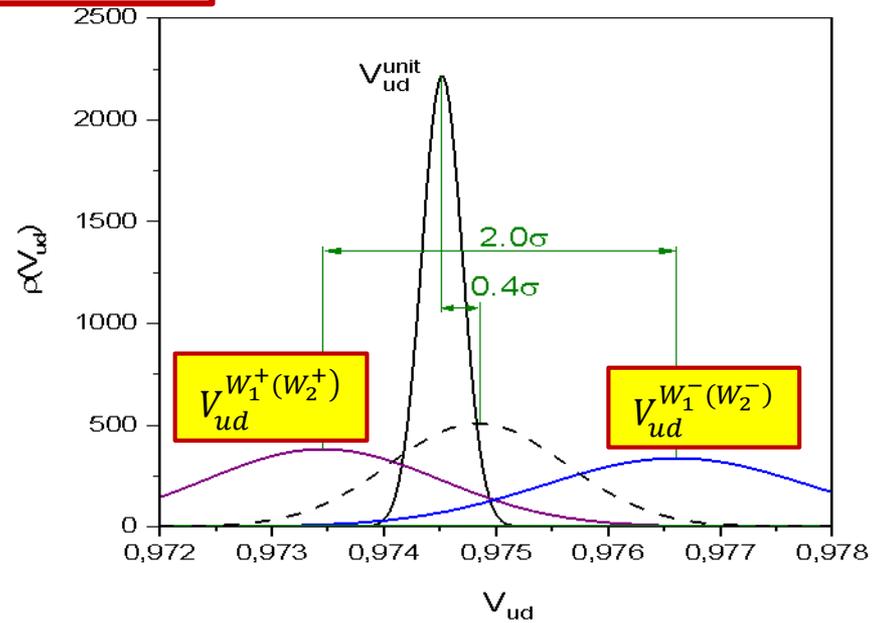
$$\frac{(V_{ud}^n)^2 - (V_{ud}^{00})^2}{(V_{ud}^{00})^2} = 2.1 \cdot 10^{-3} (1.99\sigma)$$



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



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



нарушения CP-инвариантности ?

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 CKM 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

$$\frac{(V_{ud}^n)^2 - (V_{ud}^{00})^2}{(V_{ud}^{00})^2} = 2.1 \cdot 10^{-3} (1.99\sigma)$$

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

Причина возникновения лептонной асимметрии в космологии.

Эксперимент TWIST.

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

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

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

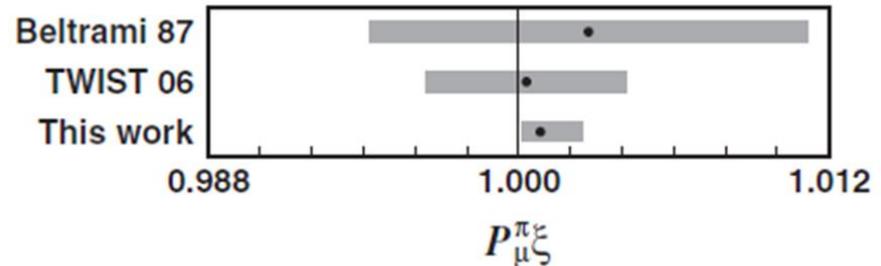
Сравнение с ограничениями на массу W_R и угол смешивания, которые были получены ранее в 2012 году в работе [36] коллаборацией **TWIST**.

[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:

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

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



Прежде всего необходимо отметить, что **распад пиона это векторный переход**, поэтому из-за сохранения векторного тока правые токи не могут примешиваться. Поэтому результат эксперимента **TWIST** не противоречит анализу распада нейтрона, т.к. **распад нейтрона это аксиально-векторный переход**.

Но эту оценку можно сделать по другой теоретической формуле.

Эксперимент TWIST.

$$P_{\mu^-}^{\pi^- \xi} = 1 - 4\delta^2 - 4\zeta^2 - 4\delta\zeta \quad (1)$$

$$\xi = 1$$

$$P_{\mu}^{\pi} = 1 - 2\delta^2 - 2\zeta^2 - 4\delta\zeta \quad (2)$$

другая формула

**Распад мюона –
чисто лептонный процесс
без участия кварков**

$$P_{\mu}^{\pi} = 1 - 2\delta^2 - 2\zeta^2 - 4\delta\zeta = 1$$

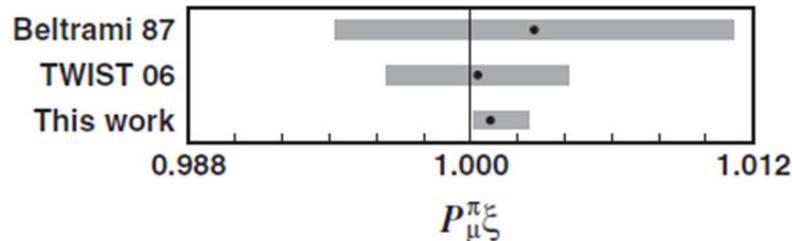
Можно видеть, что в случае, когда

$$\delta = |\zeta| \quad \zeta < 0$$

анализ по другой формуле становится нечувствителен к определению параметров δ и ζ .

Кроме того, в этом эксперименте имеется систематическая ошибка

$$P_{\mu}^{\pi \xi} = 1.00084 \pm 0.00029(stat) \pm \frac{0.00165}{0.00063}(syst)$$



Эксперимент TWIST не закрывает результат нашего анализа распада нейтрона в рамках лево-правой модели.

Из проведённого анализа можно заключить, что результат эксперимента коллаборации TWIST при обработке по правильной формуле даёт совсем другой результат.

(1)

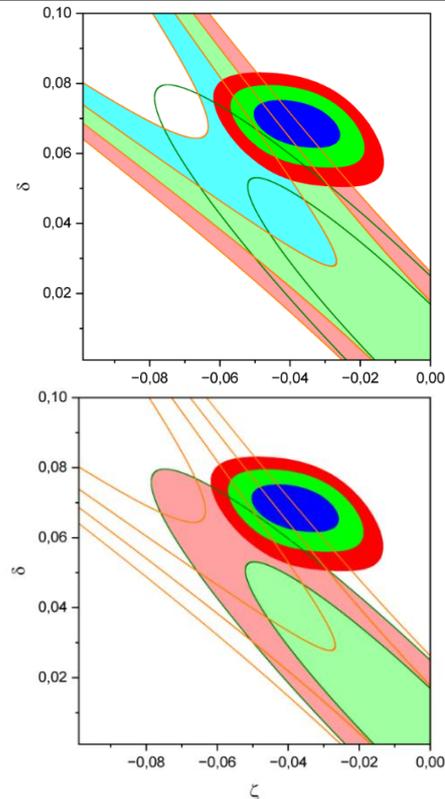
$$P_{\mu}^{\pi} = 1 - 1.9\delta^2 - 1.9\zeta^2 - 4\delta\zeta$$

(2)

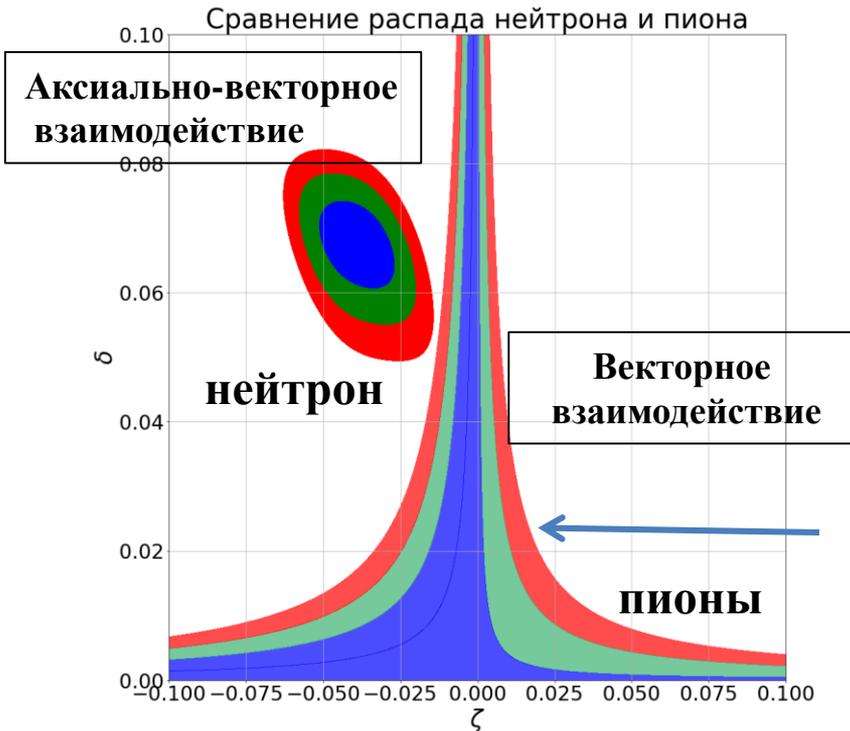
$$P_{\mu}^{\pi} = 1 - 2.1\delta^2 - 2.1\zeta^2 - 4\delta\zeta$$

На рис а область 1σ уравнения (1) пересекается с областью 1σ для анализа распада нейтрона, что можно рассматривать как возможное согласование.

На рис. б область 3σ уравнения (2) соприкасается с областью 1σ для результата анализа распада нейтрона, что можно рассматривать как рассогласование на 3σ .



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



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

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

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

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

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

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: Имеет место быть разница для векторного тока (пионы, 0-0 переходы) и аксиально векторного тока (нейтрон). Правые токи не примешиваются к векторному току, который сохраняется.

Вывод из обзора экспериментальной ситуации

1. Описание экспериментальных результатов распада нейтрона в рамках V-A варианта теории **оказывается неудовлетворительным**, т.к. не может быть представлено одним значением параметра лямда.
Отклонение от Стандартной Модели больше 3 сигма
2. Матричные элементы V_{ud} , извлекаемые из с ядерных сверхразрешенных $0^+ - 0^+$ переходов и распада нейтрона **различаются на 2.6 сигма**.
3. Условие унитарности матрицы СКМ для $0^+ - 0^+$ переходов **нарушено на 2.4 сигма**

Вывод из анализа данных в рамках лево-правой модели

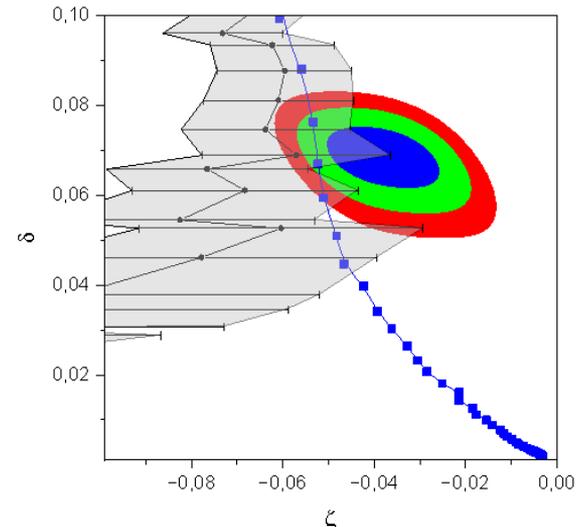
1. В результате анализа было установлено, что имеются указания на существование правого векторного бозона с массой и углом смешивания

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

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

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

$$\delta = 0.070 \pm 0.010$$



Вывод из анализа данных в рамках лево-правой модели

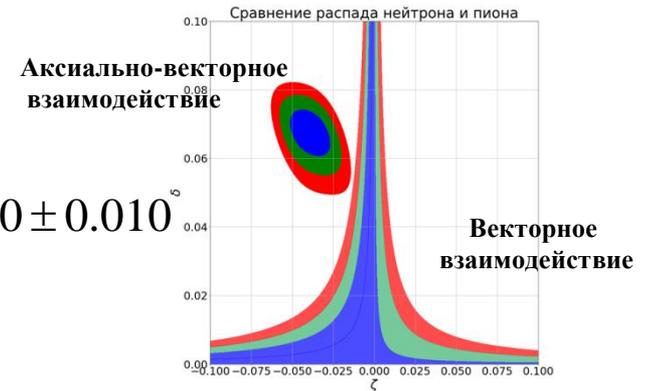
1. Правые токи за счёт тяжёлых правых векторных бозонов W_R не примешиваются к векторному току, который сохраняется.
2. Правые токи за счёт тяжёлых правых векторных бозонов W_R примешиваются к аксиально-векторному току, который не сохраняется.
3. Таким образом, возможность примесного состояния W_R не удалось исключить.

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

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

$$\delta = 0.070 \pm 0.010$$

4. Однако, требуется более детальный анализ теоретической модели.



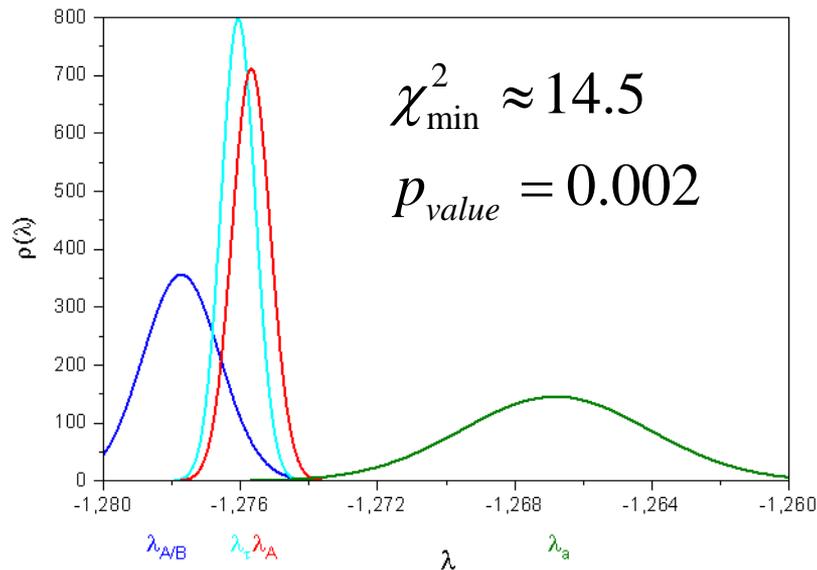
Возможные следствия лево-правой модели слабого взаимодействия

В заключении можно провести рассмотрение возможных следствий, полагая что результат, представленный в этой работе, будет подтверждён.

Во-первых, потребуются расширение СМ введением правых векторных бозонов W_R^\pm, Z_R и правых нейтрино.

Во-вторых, правые нейтрино могут рассматриваться кандидатами на тёмную материю.

Теперь необходимо обратиться к эксперименту с целью изучения возможности устранения (подтверждения) экспериментальной проблемы за счёт увеличения точности эксперимента.



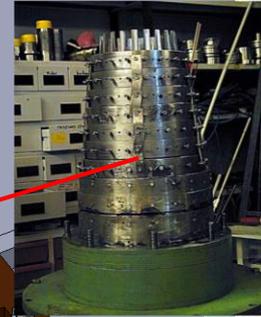
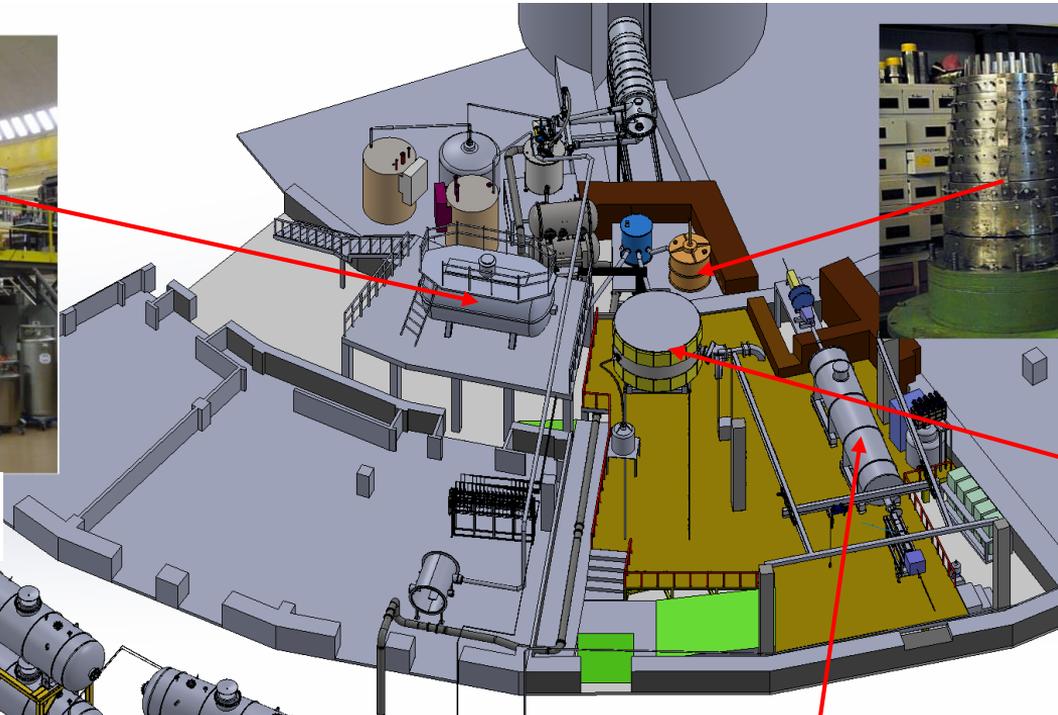
**Отклонение от
Стандартной
Модели
больше
3 сигма**

**Перспективы экспериментов
по распаду нейтронов**

НАУЧНАЯ ПРОГРАММА ИССЛЕДОВАНИЙ РАСПАДА НЕЙТРОНА НА РЕАКТОРЕ ПИК



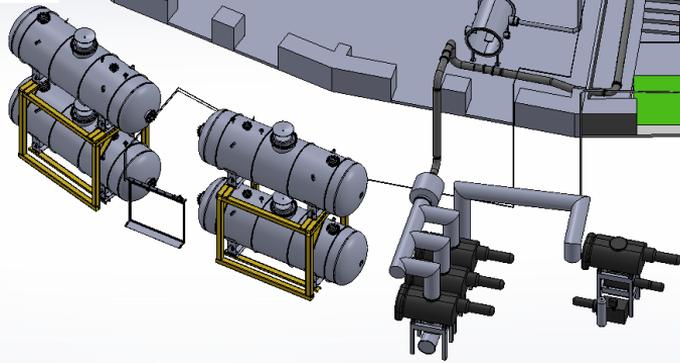
Гравитационная
ловушка УХН



Магнитная
ловушка УХН



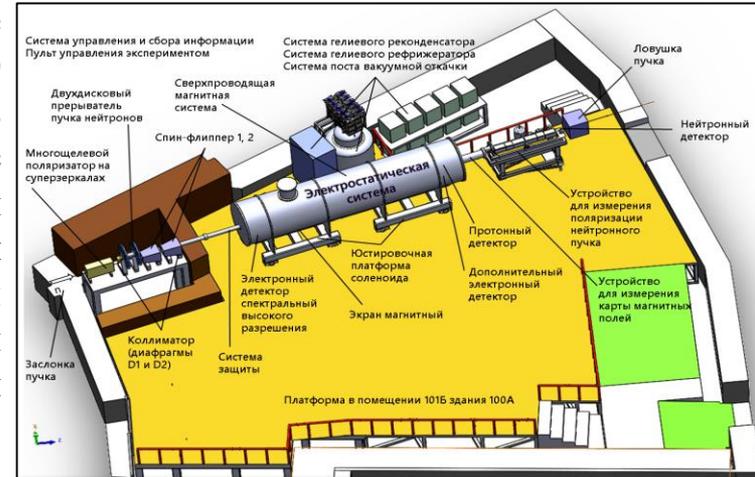
ЭДМ нейтрона



Асимметрия
распада нейтрона

Проект установки для измерения нейтринной асимметрии на реакторе ПИК

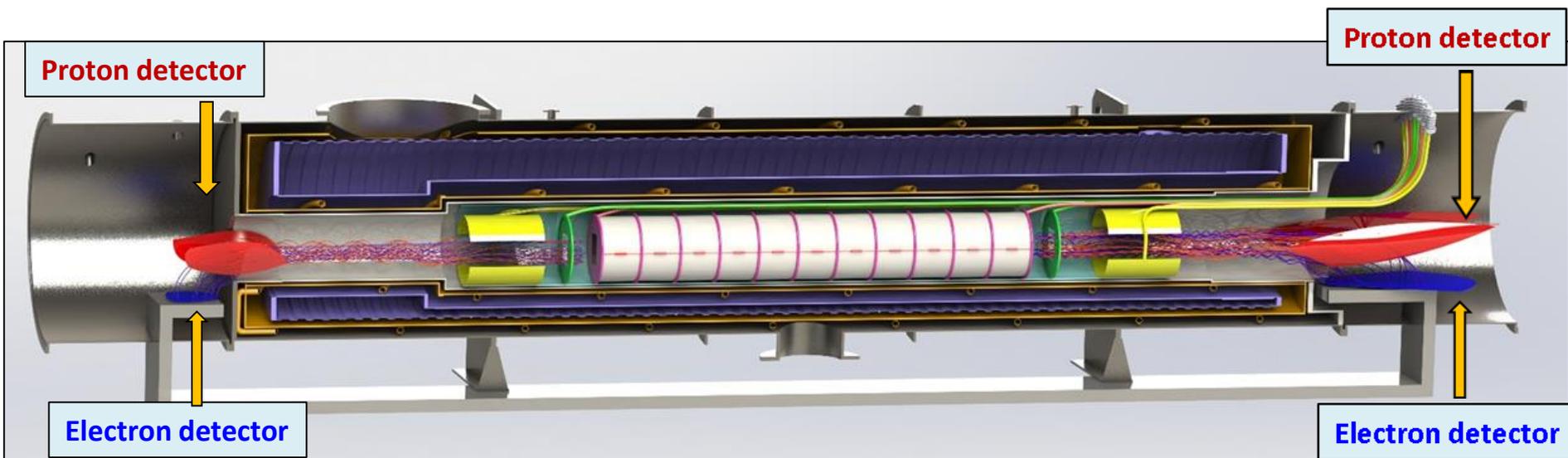
Возможность дальнейшего увеличения точности измерений в распаде нейтрона существует. На это направлен, например, проект ПИЯФ НИЦ КИ «Бета распад нейтрона» для реактора ПИК [44-46] в котором планируется использовать сверхпроводящий соленоид с длинной пролётной базой для распада нейтрона с целью увеличения статистики событий распада и с магнитной пробкой-коллиматором для выделения направления вылета электрона. Он является развитием эксперимента ПИЯФ РАН 1998 года [19], в нем планируется достижение относительной точности измерений 10^{-3} для нейтринной и электронной асимметрий распада.



**Испытания установки в НИИЭФА 31. 05. 24.
В сверхпроводящий соленоид заведён ток 1050 А.**



Проект установки для измерения всех трёх асимметрии распада нейтрона (a , A и B) на реакторе ПИК



Повышение точности измерения в 3 раза уже может дать ответ на поставленный вопрос

*В целом можно заключить, что на
сегодняшний день чувствительность
нейтронного эксперимента к новой
физике фундаментальных
взаимодействий оказалась
достаточно высокой
за счёт прецизионной точности
измерений.*

*Однако, нужны новые, более точные
измерения .*

Что произойдет дальше, покажут эксперименты.

*Спасибо за Ваше
внимание*