Смешивание и CPT-теорема

- Эти матрицы нарушают CPT-симметрию по построению.
  - Они противоречат следствию из CPT-теоремы о том, что времена жизни (ширины) частиц и античастиц совпадают.
  - CPT-теорема утверждает, что любая лоренц-инвариантная квантово-полевая теория с локальными полями, эрмитовым гамильтонианом проквантованная по статистике Бозе-Эйнштейна или Ферми-Дирака сохраняет CPT.
    - Можно задаться вопросом: **Какое из условий CPT-теоремы нарушает введение W_R?**

$$\begin{pmatrix} M - i\frac{\Gamma_0 - \Delta\Gamma}{2} & 0 \\ 0 & M - i\frac{\Gamma_0 + \Delta\Gamma}{2} \end{pmatrix}$$

- Попытка объяснить существующий эффект CP-нарушения для нейтральных *K*-мезонов при помощи W_R, отменяет:
  - существующее самосогласованное его объяснение (ККМ-матрица в Стандартной модели),
  - фундамент любых квантово-полевых теорий.

$$\begin{pmatrix} M - i\frac{\Gamma_0 - \Delta\Gamma}{2} & \delta m - i\frac{\delta\Gamma}{2} \\ \delta m + i\frac{\delta\Gamma}{2} & M - i\frac{\Gamma_0 + \Delta\Gamma}{2} \end{pmatrix}$$

- Если интерпретировать эффекты CP-нарушения в нейтральных , которые уже интерпретированы в СМ, вы должны объяснить как, тогда везде (!) заменить ККМ-механизм

Ответ на комментарий 1

Смешивание W_1^L и W_2^R с CP-нарушением

$$\begin{pmatrix} M-i\frac{\Gamma_0-\delta\Gamma}{2} & 0 \\ 0 & M-i\frac{\Gamma_0+\delta\Gamma}{2} \end{pmatrix}$$

(CPT)

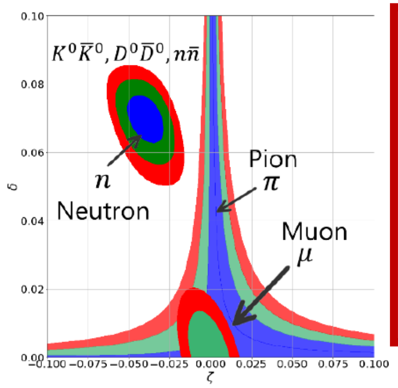
Стандартная модель с CP-нарушением

$$\begin{pmatrix} M-i\frac{\Gamma_0}{2} & \Delta m-i\frac{\Delta\Gamma}{2} \\ \Delta m-i\frac{\Delta\Gamma}{2} & M-i\frac{\Gamma_0}{2} \end{pmatrix}$$

(CPT?)

Лево-правая модель с CP-нарушением

$$\begin{pmatrix} M-i\frac{\Gamma_0-\delta\Gamma}{2} & \Delta m-i\frac{\Delta\Gamma}{2} \\ \Delta m-i\frac{\Delta\Gamma}{2} & M-i\frac{\Gamma_0+\delta\Gamma}{2} \end{pmatrix}$$



В связи с тем, что смешивание правых и левых W-бозонов происходит с разным знаком угла смешивания для W^+ и W^-, а W^+ является античастицей, а W^- является частицей, то следует ожидать, что в данной лево-правой модели с CP-нарушением **будет нарушено CPT также.**

Таким образом, ограничения для заряженных и нейтральных частиц **не пересекаются** как показано на рисунке..

Нет смысла начинать дискуссию, создавая необходимость повторять доклад сначала.

В докладе были чётко представлены причины выбора другой модели для описания осцилляций нейтральных мезонов. На данном слайде из доклада они выделены красным контуром. При этом не однократно подчёркивалось, что мы сознательно идём на CPT-нарушение для нейтральных систем, а график экспериментальных данных, приведённый слева является мотивацией для исследования этой лево-правой модели, где CP-нарушение вводится с указанием физической причины (разные знаки углов смешивания) в отличие CP-нарушения в СМ, где используется просто параметризация с помощью комплексной фазы, что является феноменологическим подходом, неудовлетворительным с точки зрения физики.

Ограничение CPLEAR на **ΔΓ**

- Корректно сравнивать не расчеты между собой, а параметры с известными опубликованными ограничениями.
- **ΔΓ=4δζ=0,01** на порядок превосходит ограничение **0,001** полученное экспериментом CPLEAR
  - Physics Letters B 471 (1999) 332–338

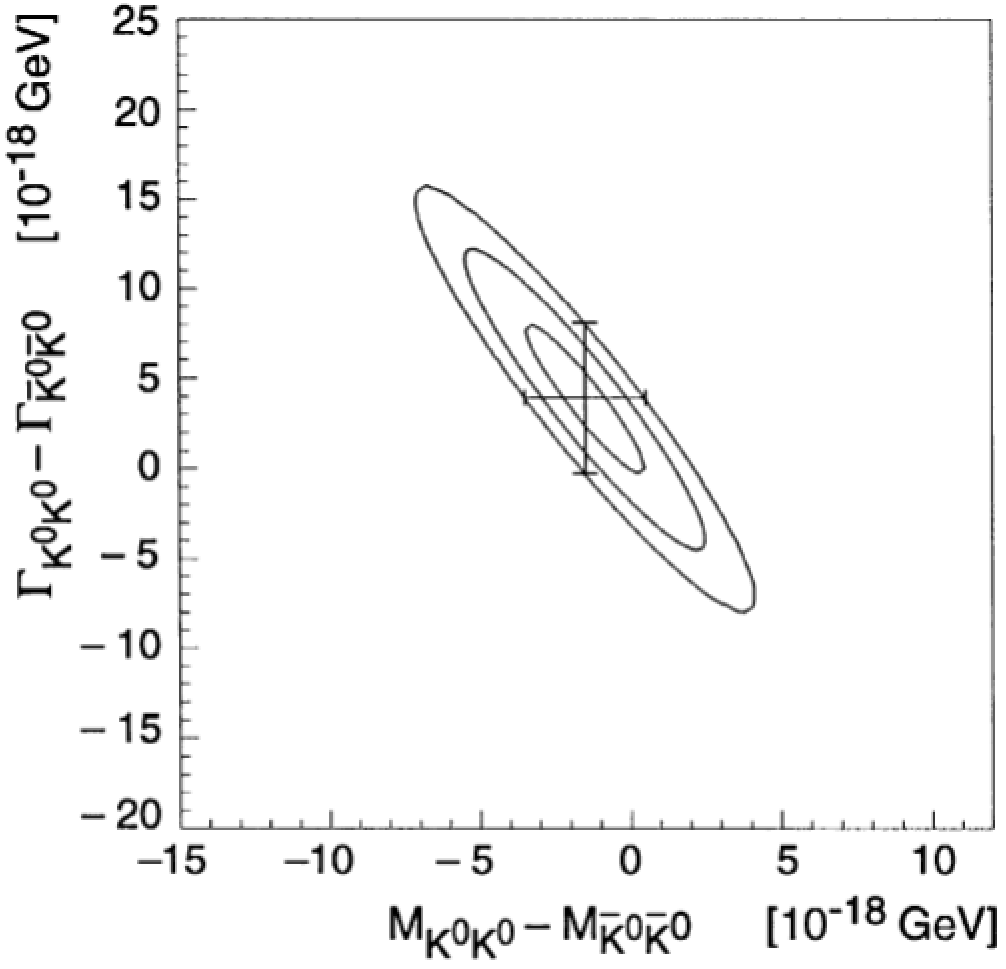


Fig. 1. The K^0–$\overline{K}^0$ decay-width versus mass difference. The 1σ, 2σ and 3σ ellipses are also shown.

Ответ на комментарий 2

В заключение следует отметить, что CP-асимметрии нейтральных мезонов, указанные в таблице 6 **совпадают с их CPT-асимметриями**, рассчитанными как асимметрии во времени жизни для частиц и античастиц в рамках представленной лево-правой модели. Оценка на **CPT-асимметрии** из таблицы 6 может быть представлена всё той же цифрой $\boxed{\delta\Gamma / \Gamma = (5.5 \pm 2.1) \times 10^{-3}}$. В тоже время как экспериментальный результат для CPT-асимметрий для нейтральных K-мезонов, составляет:

$$\boxed{\left(\Gamma_{K^0} - \Gamma_{\bar{K}^0}\right) / \Gamma_{\text{average}} = \left(0.54 \pm 0.54\right) \times 10^{-3}}$$

Однако, $\boxed{\left(\Gamma_{K^0} - \Gamma_{\bar{K}^0}\right) / \left(\Gamma_{K^0} + \Gamma_{\bar{K}^0}\right) = 2 \times \left(0.54 \pm 0.54\right) \times 10^{-3} = \left(1.1 \pm 1.1\right) \times 10^{-3}}$

Расхождение на уровне двух стандартных отклонений.

$$\boxed{\delta\Gamma / \Gamma - \left(\Gamma_{K^0} - \Gamma_{\bar{K}^0}\right) / \left(\Gamma_{K^0} + \Gamma_{\bar{K}^0}\right) = \left(4.4 \pm 2.4\right) \times 10^{-3} ......1.9\sigma}$$

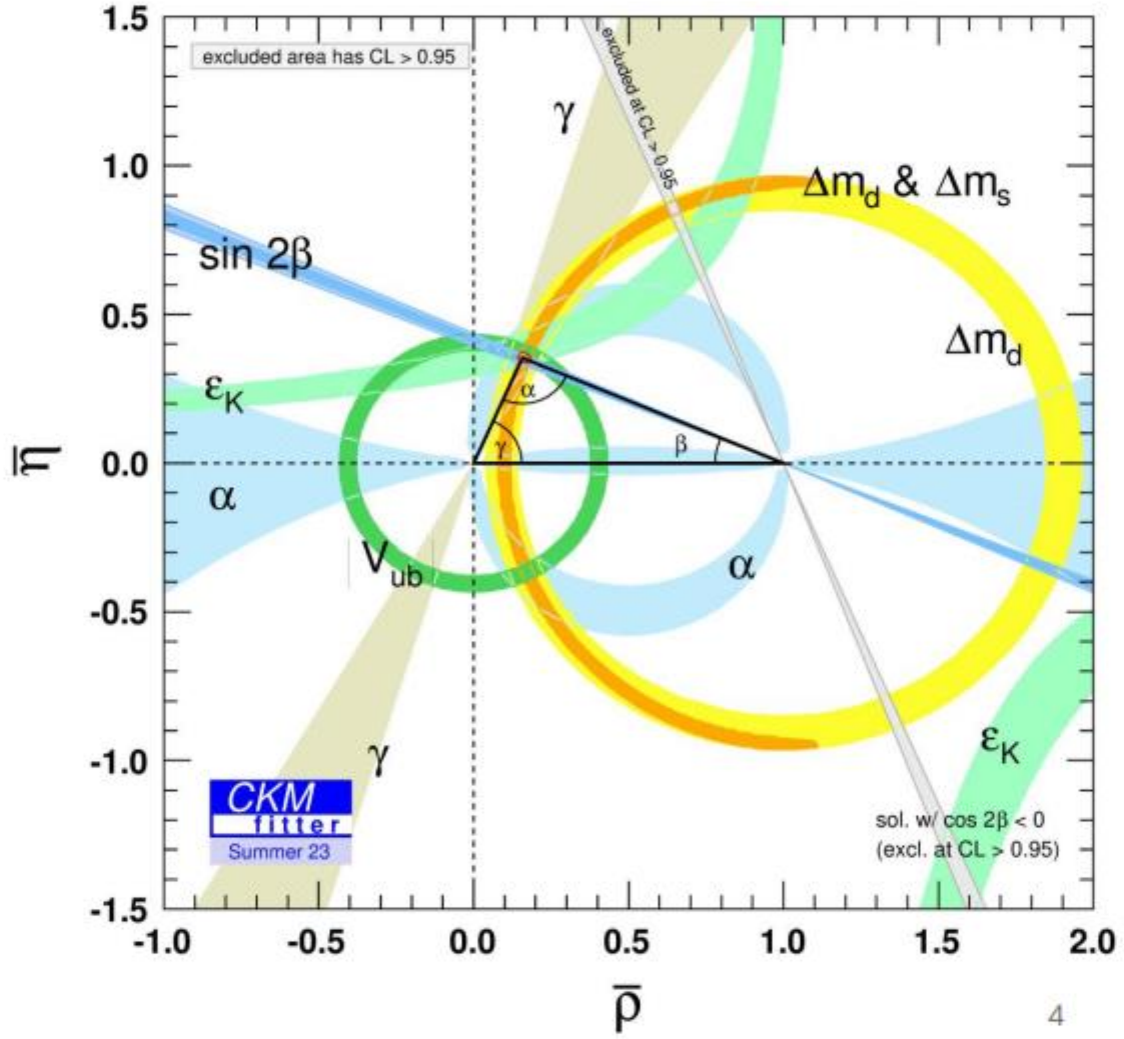
Но дело совсем в другом. Дело в том, что в работе Phys. Lett.B 471 (1999) 332-338 анализ возможного отклонения сделан следующим образом. CPT-нарушение вводится в диагональные элементы матрицы, а CP-нарушение в недиагональные элементы матрицы, как в СМ. Потом после учёта CP ищется остаток на CPT. Но в нашей модели с её основного подхода на уровне векторных бозонов закладывается одновременно нарушение CP и CPT для нейтральных систем как уже не раз объяснялось. Поэтому прямое сравнение не правомерно.

В докладе была сделана оценка того, на сколько отличаются экспериментальные результаты на CPT-нарушение: из нейтронного распада и из эксперимента по Ko-осцилляциям. См. слайд из доклада. Оценка расхождения в комментарии 2 содержит ряд последовательных ошибок. Во-первых, $\delta\Gamma = -2\delta\zeta = (5.5 \pm 2.1) \times 10^{-3}$ ***, а не*** $4\delta\zeta = 0.01$ ***без учёта ошибки, во-вторых, не учтён переход от точности к асимметрии (ещё одна двойка), в-третьих, я вынужден напомнить, что в сравнительном анализе нужно учитывать все ошибки. Так что, Алексей поторопился найти чужие ошибки и сделал свои. Так бывает.*** ***<u>Вывод:</u> пока разница между экспериментами 1.9 сигма.***

Новая интерпретация осцилляций (W_R)

- Если интерпретировать эффекты CP-нарушения в нейтральных , которые уже интерпретированы в СМ, необходимо объяснить как, тогда **везде (!)** заменить ККМ-механизм
- Например, «развалится» треугольник унитарности (**ε_K**).

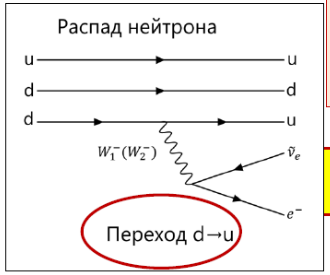
$$|\varepsilon| \propto \eta(1 - \rho + \text{constant}).$$



Ответ на комментарий 3

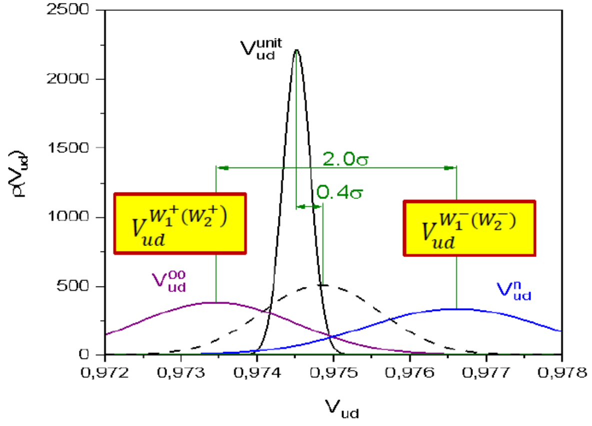
Нарушения CP-инвариантности в барионах

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



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

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

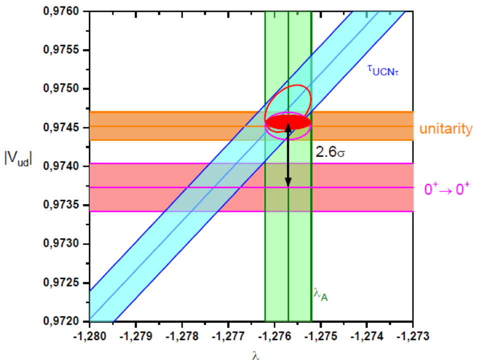


Что касается матрицы СКМ, то следует ожидать, что должно происходить расщепление элементов матрицы для взаимодействий через W⁺ и W⁻, как это показано на слайде 21 в докладе.

Треугольник унитарности это находка СМ с CP-нарушением через комплексную фазу.
Но как показывает эксперимент, унитарность не выполняется на 2.6 сигма, сравнивая V_{ud} ***из нейтронного распада и из 0+0+ переходов.***

Данные экспериментов с ядерными сверхразрешёнными переходами 0+ - 0+ позволяют нам независимо определить элемент матрицы СКМ

Разница Vud между совпадающими значениями из нейтронного распада и унитарности СКМ и значением Vud от переходов 0+-0+ составляет 2,6 сигма



Зависимость элемента матрицы смешивания кварков Vud 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 Vus измерений [18].

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

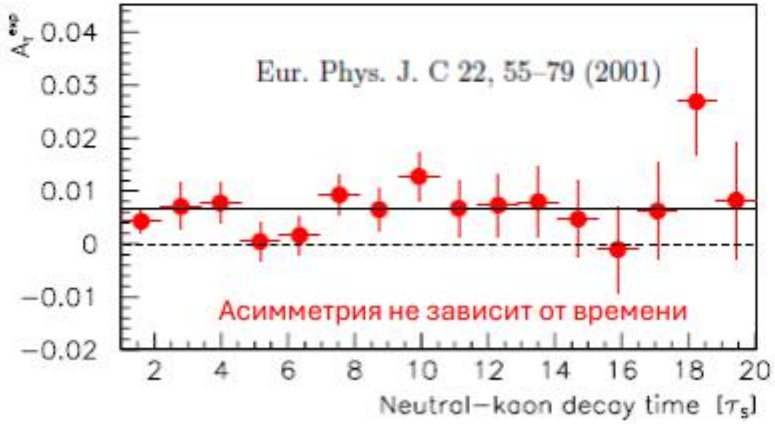
1

В нашей модели с разными знаками смешивания это приводит к CP-нарушению в барионах, что требуется для космологии.

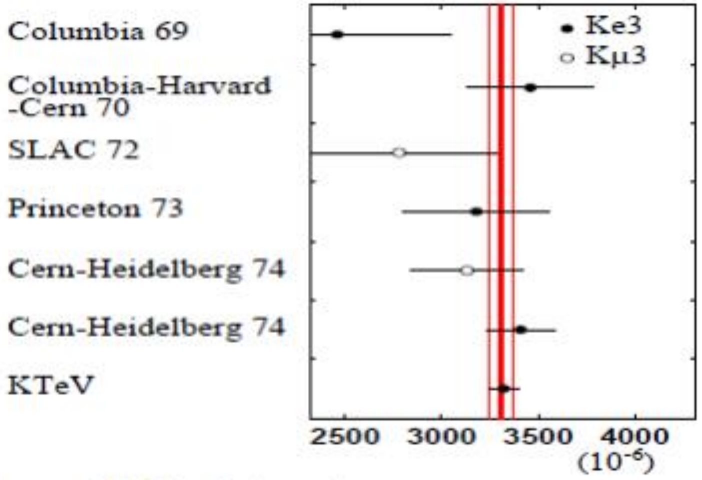
Косвенное CP-нарушение для K^0

- Критическим является из измерение CP-нарушение для K^0-мезонов.
- Общепринято, что природа этого нарушение косвенная
- Оно возникает из-за того, что
  - $|M_L> = p|K0> + q|K^0bar>$, $|M^H> = p|K^0> - q|K^0bar>$,
  - $|q/p| = (1- \varepsilon_K)/(1+ \varepsilon_K) \neq 1$
- Это приводит к небольшой CP-четной (K_2^0) примеси в волновую функцию $|K_L^0>$
  - $|K0L> = (|K_1^0> + \varepsilon_K |K_2^0>)/ \sqrt{(1+|\varepsilon_K|^2)}$
- С точки зрения флейворного состава $|K_L^0>$:
  - $|K_L^0> = [(1+ \varepsilon_K)|K^0>+(1-\varepsilon_K)|K^0bar>]/ \sqrt{(2+2|\varepsilon_K|^2)}$

- A_T – это не прямая, а косвенная T-нарушающая (или что тоже самое CP-нарушающая) асимметрия.
- Странность каона фиксируется только в момент его рождения (t=0), что приводит к $A_T = 4Re(\varepsilon_K)$



- Соотношение $A_T = 2A_L$ естественно для квантово-механичекого описания осцилляций



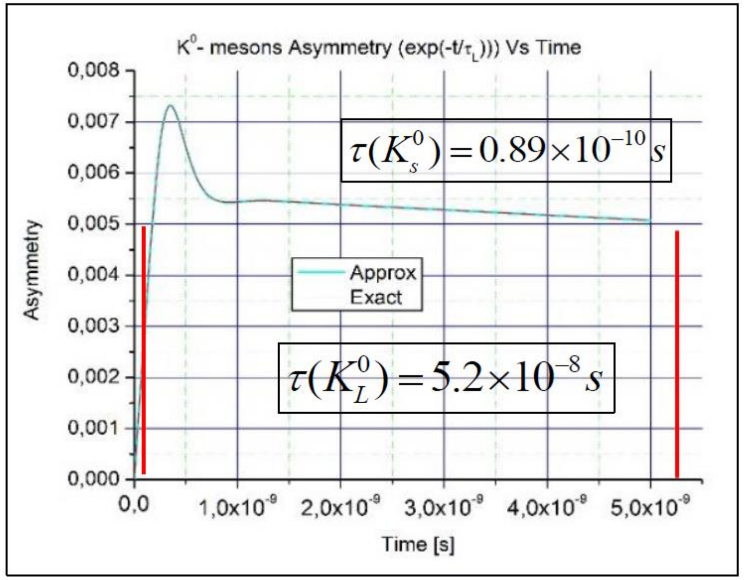
$$\delta_L = 2Re\ \epsilon_L - 2Re\ Y - Re(x - \bar{x}).$$

The terms Y and $Re(x - \bar{x})$ parameterize CPT violation

Ответ на комментарий 3

CP-нарушающие асимметрии для нейтральных мезонов в зависимости от времени распада.

K^0



$K^0\tilde{K}^0$ является суперпозицией смешивания и распада в конечном состоянии, поэтому имеется экспериментальный результат для смешивания:

смешивание

$$\boxed{A_T^{\exp} = (6.6\pm1.3\pm1.0)\times10^{-3}}$$

распад в конечном состоянии

$$\boxed{A_L^{\exp} = (3.32\pm0.06)\times10^{-3}}$$

Здесь не о чем спорить, нет противоречии, более того, что наши расчёты CP-асимметрии от момента распада объясняют наличие двух значений для CP-асимметрии.

Есть ли прямое CP-нарушение для K^0

- Да! Но оно мало!
- На три порядка меньше косвенного.
- Если ввести дополнительное прямое CP-нарушение, то в CP-четном канале (например, $K^0 \to \pi^- \pi^+$), то возникнет интерференция процессов смешивания и распадов
  - Этот эффект известен и наблюдается для прелестных мезонов **(*B*)** →
  - Амплитуда распада с $\boldsymbol{W_R}$ неизбежно должна интерферировать с процессами смешивания, а она большая **2δζ**

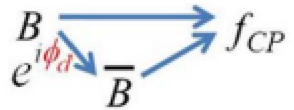
CP violation can also occur in the decay amplitudes

$$A(K^0 \to \pi\pi(I)) = A_I e^{i\delta_I} , \quad A(\overline{K}^0 \to \pi\pi(I)) = A_I^* e^{i\delta_I} , \tag{68.4}$$

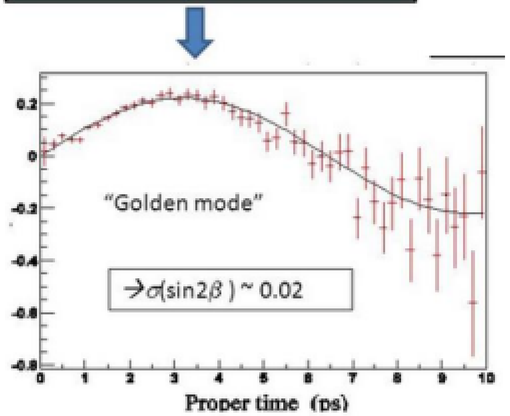
where I is the isospin of $\pi\pi$, δ_I is the final-state phase shift, and A_I would be real if *CP* invariance held. The *CP*-violating observables are usually expressed in terms of ϵ and ϵ' defined by

$$\eta_{+-} = \epsilon + \epsilon' , \quad \eta_{00} = \epsilon - 2\epsilon' . \tag{68.5a}$$

$$|\epsilon| = (2.228 \pm 0.011) \times 10^{-3},$$
$$\phi_\epsilon = (43.5 \pm 0.5)^\circ,$$
$$\boxed{\mathrm{Re}(\epsilon'/\epsilon) \approx \epsilon'/\epsilon = (1.66 \pm 0.23) \times 10^{-3},}$$
$$\phi_{+-} = (43.4 \pm 0.5)^\circ,$$
$$\phi_{00} - \phi_{+-} = (0.34 \pm 0.32)^\circ,$$
$$A_L = (3.32 \pm 0.06) \times 10^{-3}.$$

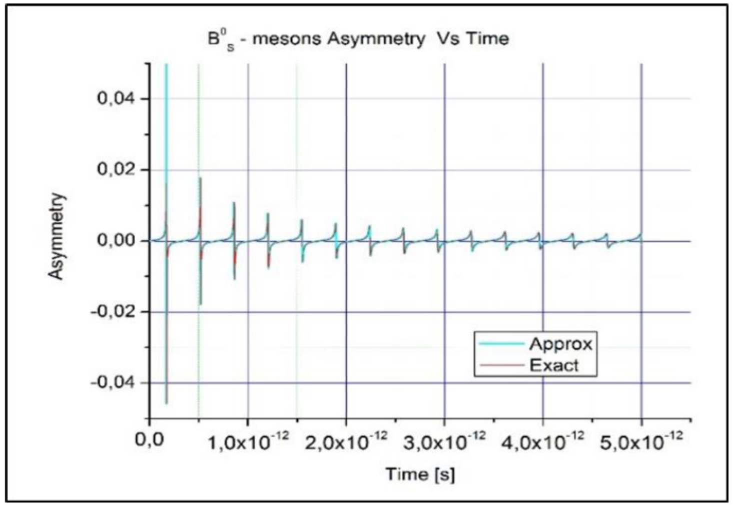


$$\boxed{B^0: \quad A_{CP}(t) = \eta_f \sin\phi_d \sin(\Delta m_d t)}$$



Ответ на комментарий 5

Обсуждение B_S^0-мезона



Для B_S^0-мезона нет эффекта CP-нарушения , т.к. расчёт - $\boxed{1.4\times10^{-5}}$

В процессе осцилляций **CP-асимметрия усредняется**.

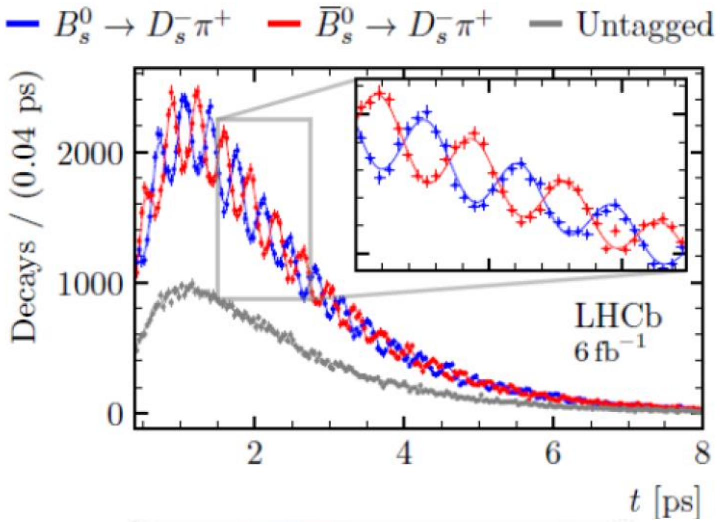
Экспериментальные наблюдения с большей статистикой в 2021 году подтвердили отсутствие асимметрии.

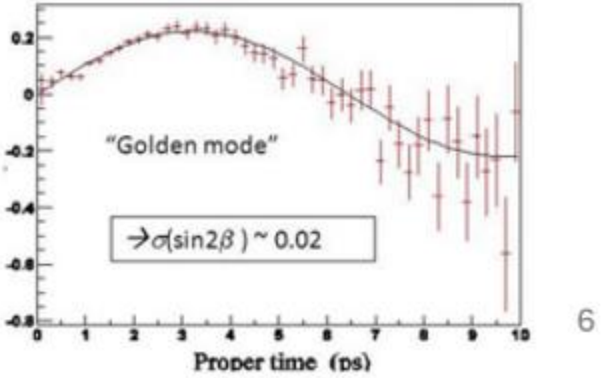
Дело в том, что знак CP-нарушающего воздействия изменялся в процессе каждого периода осцилляций, в соответствии с формулой:

$$\boxed{\varepsilon_{p\bar{p}} \approx e^{-\Gamma_0 t}\sin(2\Delta m t)\left(\frac{\delta\Gamma}{2\Delta m}\right)}$$

и поэтому компенсировался.

Важно отметить, что расчёт подтверждает эксперимент



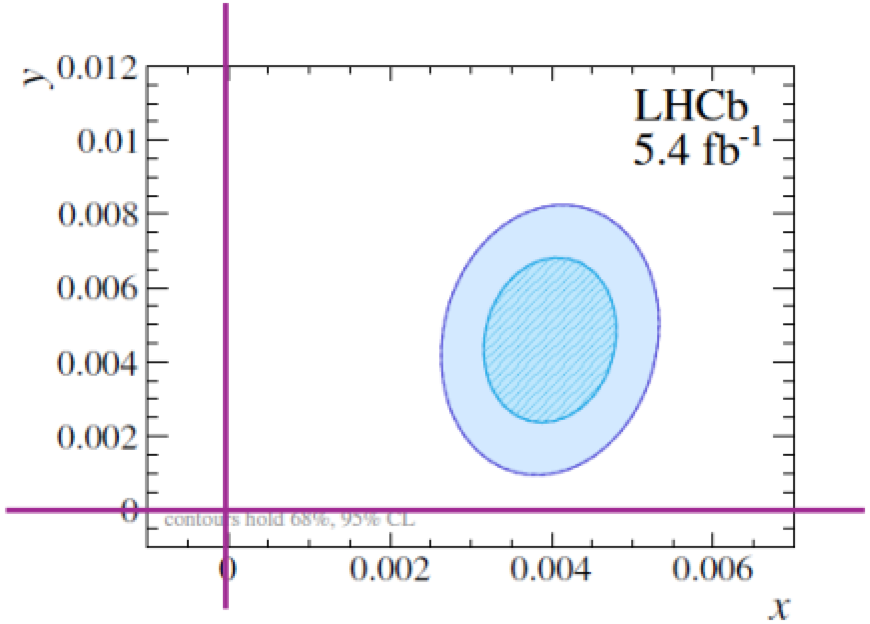


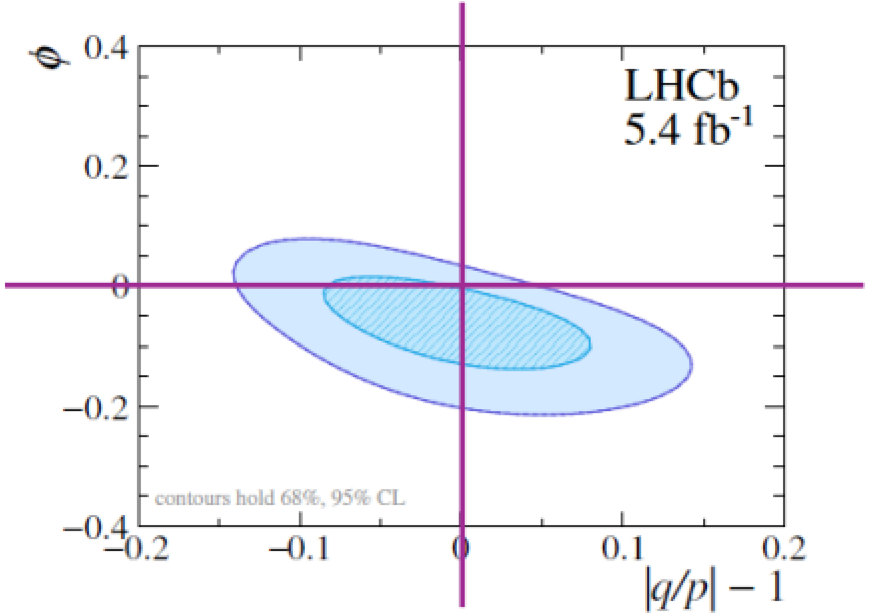
Здесь всё не правильно в комментарии 4 !
Расчёты по нашей модели как раз наоборот объясняют отсутствие CP- нарушения на каждой флейворной осцилляции, т.к. CP-нарушение хотя и присутствует, но носит знако-переменный характер и компенсируется. Это объясняет экспериментальные результаты в 2021 году.

Здесь просто просуммированы флейворные осцилляции.

CP-нарушение при смешивании D^0

- Параметры ***x*** и ***y*** – это параметры смешивания
- ***ϕ*** и **|q/p|** – параметры CP-нарушения при смешивании
- То, что величина ***y***, которая не является параметром CP-нарушения, численно близка с $\mathbf{A^{LR}=-2\delta\zeta}$ ни о чем не говорит.
- ***y*** – разница ширин массовых, а не ароматовых (очарованных) состояний.





Phys. Rev. Lett. 127, 111801 (2021)

Phys. Rev. Lett. 131, 079901 (2023)

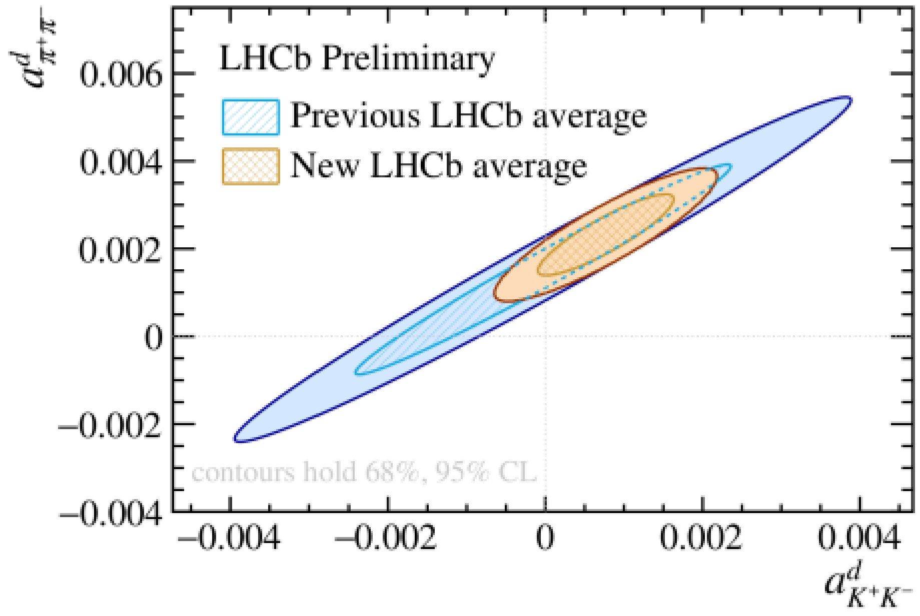
Для D^0 также измерено отличие от нуля параметра ***x***

Ответ на комментарий 6

Здесь нечего сказать, т.к. эта тема в докладе не обсуждалась. Это были наши старые ошибки, которые уже устранены.

Прямое CP-нарушение для D^0

- CP-нарушение установлено LHCb при измерении ненулевой разницы $A_{CP}(D^0 \to \pi^- \pi^+)$ и $A_{CP}(D^0 \to K^- K^+)$.
  - $\Delta A_{CP} = A_{CP}(K^+K^-) - A_{CP}(\pi^+\pi^-) = (-15.4 \pm 2.9)\times 10^{-4}$
  - $a_{CP}(K^+K^-) = (7.7 \pm 5.7)\times 10^{-4}$



- Из этих двух измерений следует, что скорее всего дело в $D^0 \to \pi^- \pi^+$ канале:
  - $a_{CP}(\pi^-\pi^+) = (23.2 \pm 6.1)\times 10^{-4}$

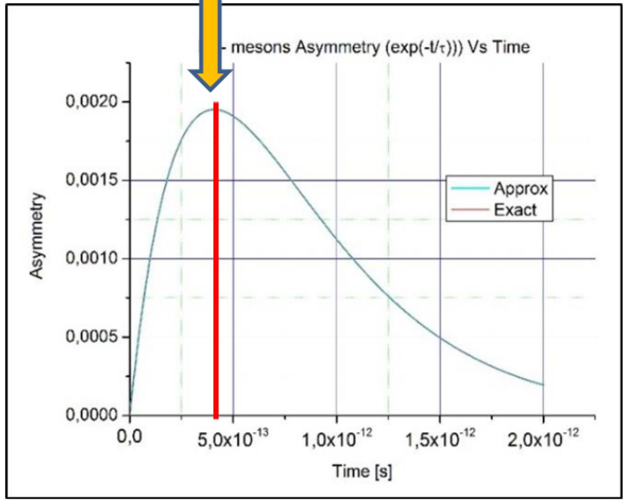
Phys. Rev. Lett. 122 (2019) 211803

Phys. Rev. Lett. 131 (2023) 091802

Ответ на комментарий 7

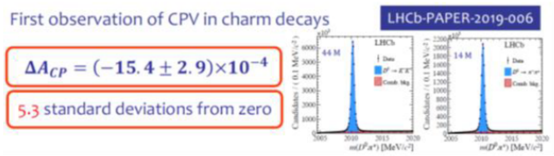
CP-нарушающие асимметрии для нейтральных мезонов в зависимости от времени распада.

D^0 $\boxed{\tau(D^0) = 4.1\times10^{-13}s}$



На максимуме

$\boxed{\approx 2\times10^{-3}}$



$\boxed{\Delta A_{CP} = (-15.4 \pm 2.9)\times10^{-4}}$

5.3 standard deviations from zero

Здесь нужно сказать спасибо Алексею, т.к. он прояснил для нас, что

Прямое CP-нарушение для D^0 • $a_{CP}(\pi^-\pi^+) = (23.2 \pm 6.1)\times10^{-4}$

Этот результат вполне вписывается в наши расчеты, как это следует из описания временной зависимости процесса CP-нарушения в нашей модели на картинке вверху.