



Проверка лептонной универсальности в распадах прелестных частиц

Дзюба Алексей

Семинар ОФВЭ, 28 июня 2022

В качестве вступления

- Этот семинар меня попросил провести Алексей Алексеевич Воробьев
- Доклад основан на информации, которую я подчеркнул из лекций ЦЕРН (Джино Исидори и Моника Пепе-Альтарелли)
 - **Mysteries in Flavour Physics \ апрель 2022**
 - Рассматривалась как теоретическая часть так и экспериментальные аспекты
 - <https://indico.cern.ch/event/1088351/>
- Группа ЛНСб-ПИЯФ соавторы работ ЛНСб, посвященных нарушению ЛУ, поэтому критиковать экспериментальную часть я не буду



План доклада

- Ароматы в Стандартной Модели физики частиц (СМ)
 - Роль хиггсовского поля
 - Примеры (из прошлого) силы косвенных измерений для поиска нового
 - Загадка ароматов (*flavor puzzles*).
 - Лептонная универсальность
- Эксперимент LHCb
- Проверка принципа лептонной универсальности на LHCb
 - Заряженные токи ($b \rightarrow c\tau\nu$)
 - Нейтральные токи ($b \rightarrow s\ell^+\ell^-$)
- Как интерпретировать аномалии с точки зрения теории?

Фундаментальная структура материи

Рассказ о новейших достижениях физики элементарных частиц и перспективах ее развития на будущее

Таблица 4.1. Частицы и силы

Сила	КЭД Электромагнитная, или сила электромагнетизма		Слабая	КХД Цветная сила	Теория гравитации Гравитация
	Занесена в Стандартную модель	Слабая			
Промежуточные кварки, лептоны, нейтрино, глюоны, фотоны	Да	Да	Да	Да	Да
Элементарные частицы (исключая нейтрино) и силы, действующие на них	Да	Нет	Да	Да	Да

THE NATURE OF MATTER

College Lectures 1980

Edited by
H. Mulvey

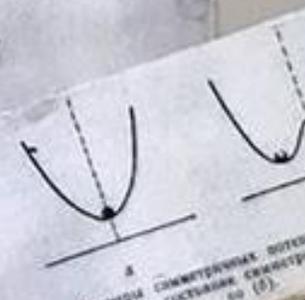


Рис. 4.4. Примеры симметричных потенциалов, в которых устойчивое состояние симметрично по (0).

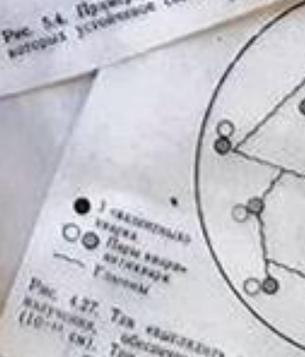


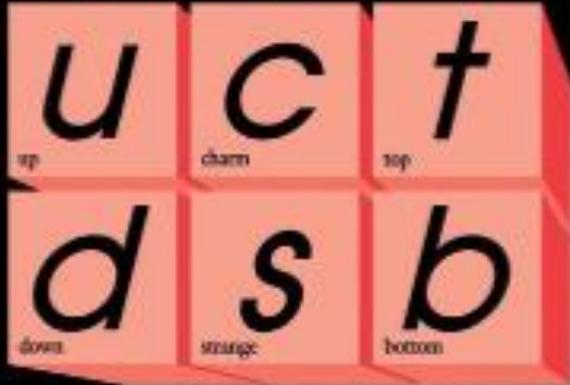
Рис. 4.27. Тип «каспового» протона, образующегося при распаде глюонного конденсата. Тип «каспового» протона, образующегося при распаде глюонного конденсата.

К 1980 году основы Стандартной Модели были уже сформулированы и оставалось найти недостающие частицы и явления.

~40 лет ушло на проверку СМ → 2012 г – открытие бозона Хиггса

Есть ли у СМ расширения?

Quarks



Forces



Leptons

$$\mathcal{L}_{\text{Standard Model}} = \mathcal{L}_{\text{gauge}}(\Psi_i, A_a) + \mathcal{L}_{\text{Higgs}}(H, A_a, \Psi_i)$$

Сильное и электрослабое взаимодействия

- Нетривиальная структура физического вакуума
- Спонтанное нарушение симметрии

Стандартная Модель

СМ – теория, описывающая микромир

The Universe is Made of...

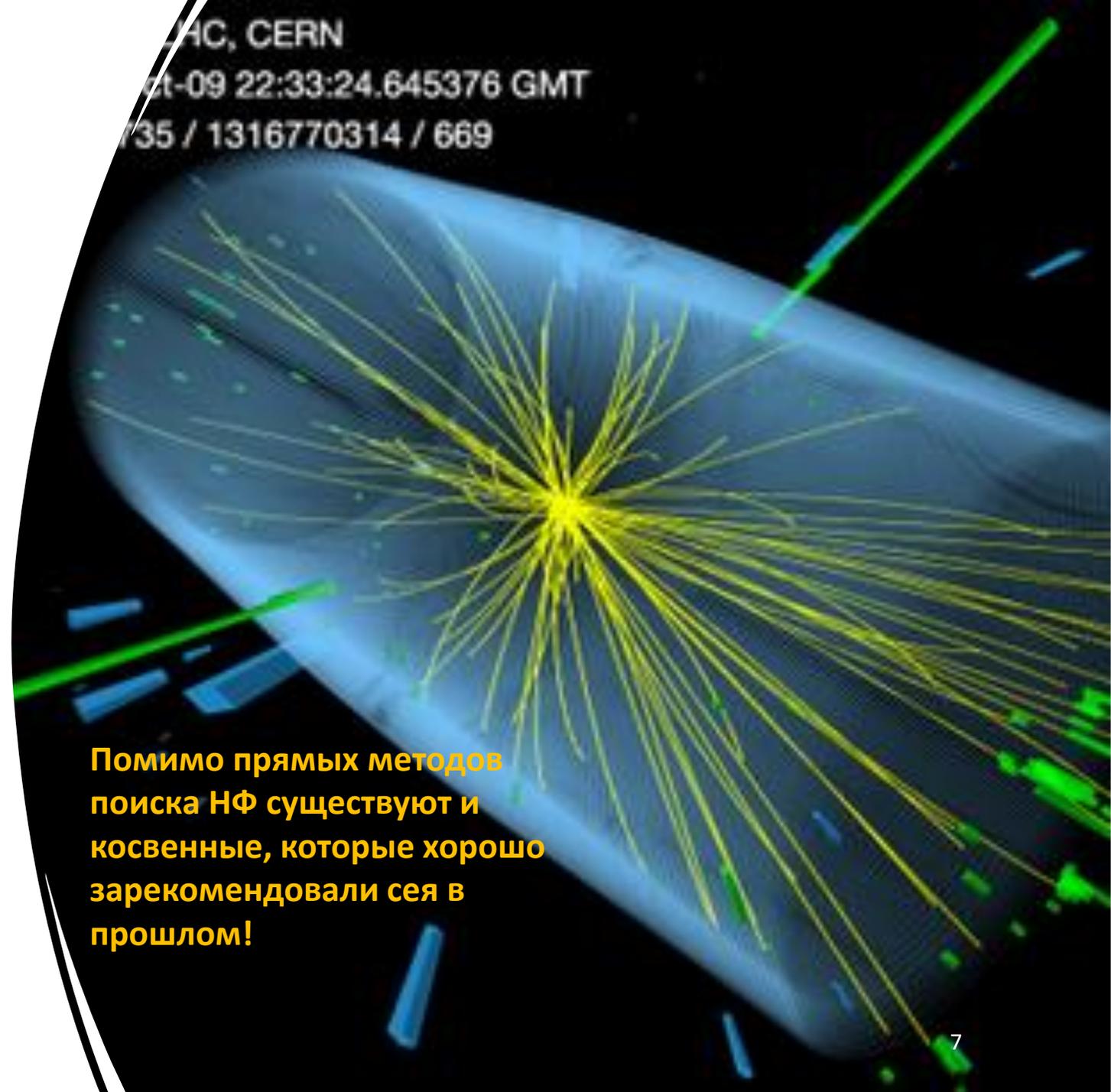
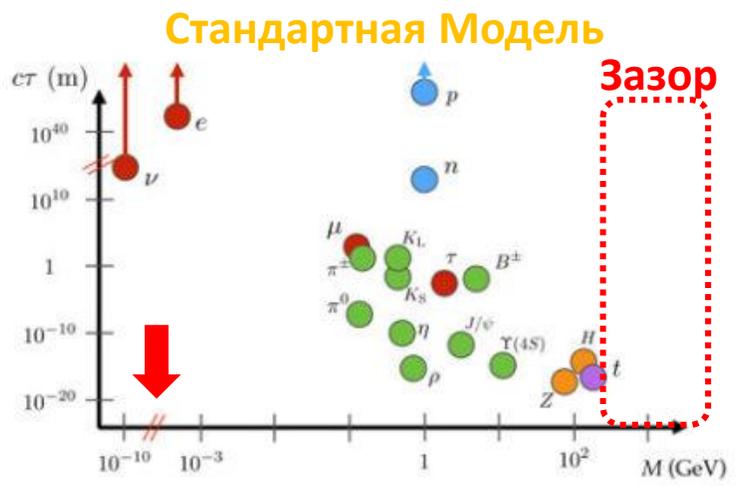
Проблемы СМ

- Проблема иерархии в электрослабом секторе СМ
- Загадка ароматов
- Массы нейтрино
- Темная материя
- Темная энергия
- Инфляция
- Квантовая гравитация

Все эти проблемы заставляют предполагать, что **СМ** – **всего лишь эффективная теория** (действующая на доступных нам энергиях и), которая является некоторым **пределом для более фундаментальной теории с новыми степенями свободы.**

Два основных результата LHC

- Открытие бозона Хиггса
- Зазор по массе (mass gap) между спектром частиц СМ и частицами Новой физики (НФ)



Помимо прямых методов поиска НФ существуют и косвенные, которые хорошо зарекомендовали себя в прошлом!

Структура сектора ароматов СМ

$$\mathcal{L}_{\text{Standard Model}} = \mathcal{L}_{\text{gauge}}(\psi_i, A_a) + \mathcal{L}_{\text{Higgs}}(H, A_a, \psi_i)$$

- В калибровочном секторе СМ имеется три идентичные копии – семейства фермионов. Пять независимых полей :
 - $\psi = Q_L, u_R, d_R, L_L, e_R;$ $Q_L = \begin{bmatrix} u_L \\ d_L \end{bmatrix}, L_L = \begin{bmatrix} \nu_L \\ e_L \end{bmatrix}$
- Калибровочная часть лагранжиана инвариантна относительно пяти U(3) поворотов в пространстве ароматов
- Эта симметрия нарушена **юкавовским взаимодействием** (взаимодействие между скалярным полем и дираковским полями)
 - В СМ симметрия по аромату нарушена взаимодействием фермионных полей с полем Хиггса

СКМ матрица в СМ

$$\left[\begin{array}{l} \bar{Q}_L^i Y_D^{ik} d_R^k H + h.c. \rightarrow \bar{d}_L^i M_D^{ik} d_R^k + \dots \\ \bar{Q}_L^i Y_U^{ik} u_R^k H_c + h.c. \rightarrow \bar{u}_L^i M_U^{ik} u_R^k + \dots \end{array} \right.$$

- Из-за того, что левые компоненты верхних и нижних кварковых полей образуют дублеты, нельзя одновременно сделать диагональными матрицы юкавовских констант Y_U^{ik} и Y_D^{ik}

$$\begin{array}{l}
 Y_D = \text{diag}(y_d, y_s, y_b) \\
 Y_U = V^+ \times \text{diag}(y_u, y_c, y_t)
 \end{array}
 \quad \text{или} \quad
 \begin{array}{l}
 Y_D = V \times \text{diag}(y_d, y_s, y_b) \\
 Y_U = \text{diag}(y_u, y_c, y_t)
 \end{array}
 \quad
 \begin{array}{l}
 M_D = \text{diag}(m_d, m_s, m_b) \\
 M_U = V^+ \times \text{diag}(m_u, m_c, m_t)
 \end{array}$$

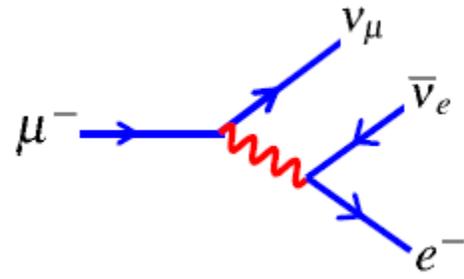
- Собственные состояния по массе не совпадают с собственными состояниями по слабому взаимодействию
- Хиггсовский сектор источник возникновения масс кварков и матрицы кваркового смешивания

$$J_W^\mu = \bar{u}_L \gamma^\mu d_L \rightarrow \bar{u}_L V \gamma^\mu d_L$$

Угол Кабиббо

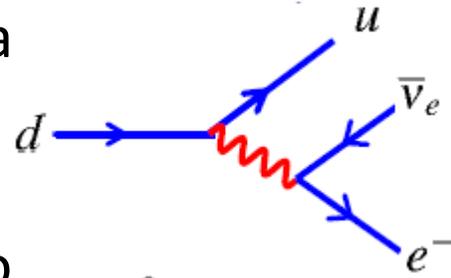
Константа Ферми измеренная для бета-распада оказывается меньше, чем в измерениях мюонного распада

Распад каона идет менее интенсивно (в ~ 20 раз), чем ожидается из универсальности слабого взаимодействия для кварков

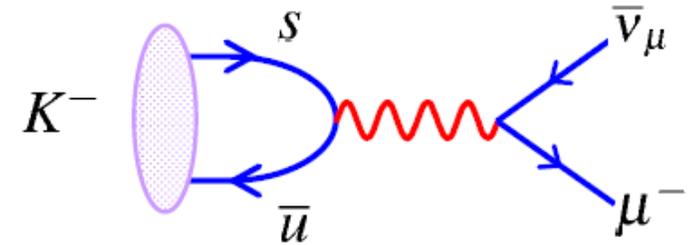
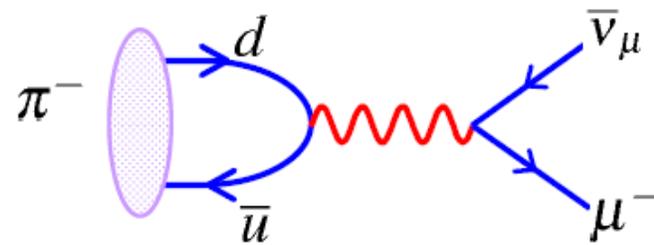


$$G_F^\mu = (1.16632 \pm 0.00002) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$

2,6%



$$G_F^\beta = (1.136 \pm 0.003) \times 10^{-5} \text{ GeV}^{-2}$$



1963 год, Николо Кабиббо, Гипотеза: Собственные состояния по слабому взаимодействию не совпадают с собственными состояниями по массе, т.е. сила взаимодействия такая же как для лептонов, но u -кварк взаимодействует с суперпозицией d - и s -кварков.

Матрица кваркового смешивания (2x2)

Собственные состояния по слабому взаимодействию

Собственные состояния по массе

Матрица должна быть унитарна.

Матрица смешивания

Требования унитарности:

$$\begin{bmatrix} d' \\ s' \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ud} & V_{us} \\ V_{cd} & V_{cs} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d \\ s \end{bmatrix}$$

$$\sum_k |V_{ik}|^2 = \sum_i |V_{ik}|^2 = 1$$

$$\sum_k V_{ik} V_{jk}^* = 0.$$

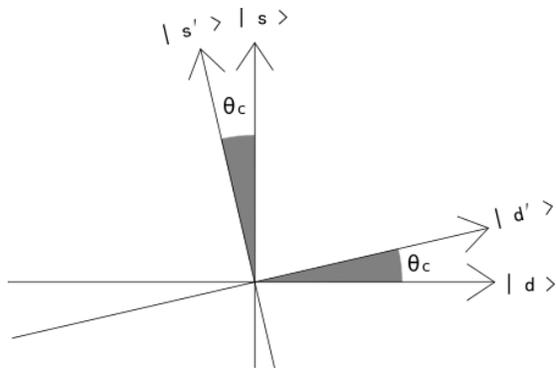
$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_c & \sin \theta_c \\ -\sin \theta_c & \cos \theta_c \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix}$$

Для матрицы 2x2 можно остаться только один параметр (угол Кабиббо), а комплексная фаза отсутствует!

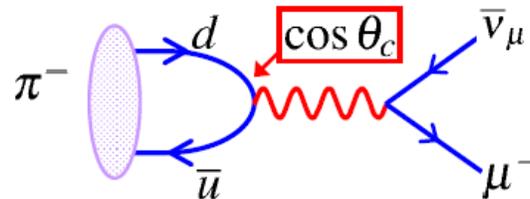
$$\begin{array}{c} \bar{u} \\ \swarrow \text{wavy} \\ \searrow \frac{gW}{\sqrt{2}} \\ d' \end{array} \equiv \begin{array}{c} \bar{u} \\ \swarrow \text{wavy} \\ \searrow \cos \theta_c \frac{gW}{\sqrt{2}} \\ d \end{array} + \begin{array}{c} \bar{u} \\ \swarrow \text{wavy} \\ \searrow \sin \theta_c \frac{gW}{\sqrt{2}} \\ s \end{array}$$

$$\tan \theta_c = \frac{|V_{us}|}{|V_{ud}|} = \frac{0.22534}{0.97427} \rightarrow \theta_c = 13.02^\circ.$$

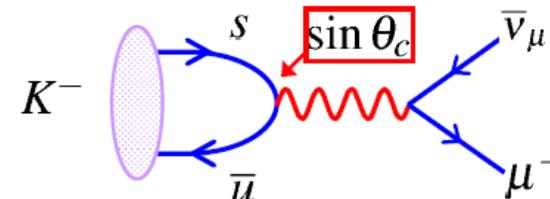
Подавление как квадрат тангенса угла Кабиббо



$$\tan^2 \theta_c \approx 0.05$$



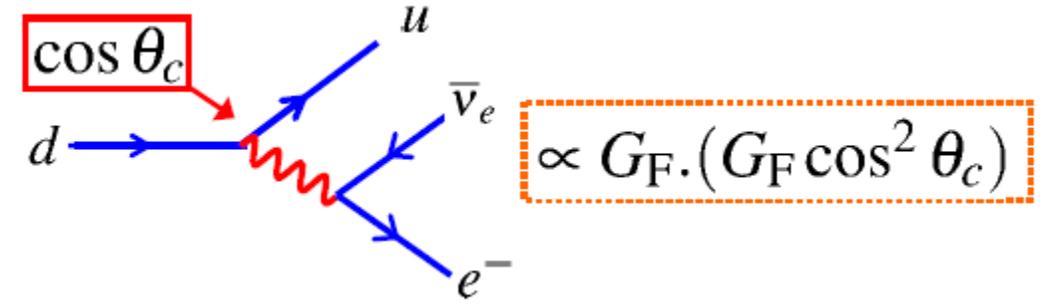
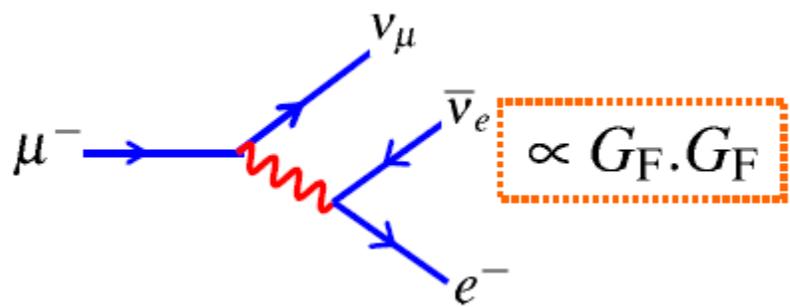
$$\Gamma(\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu) \propto |M|^2 \propto \cos^2 \theta_c$$



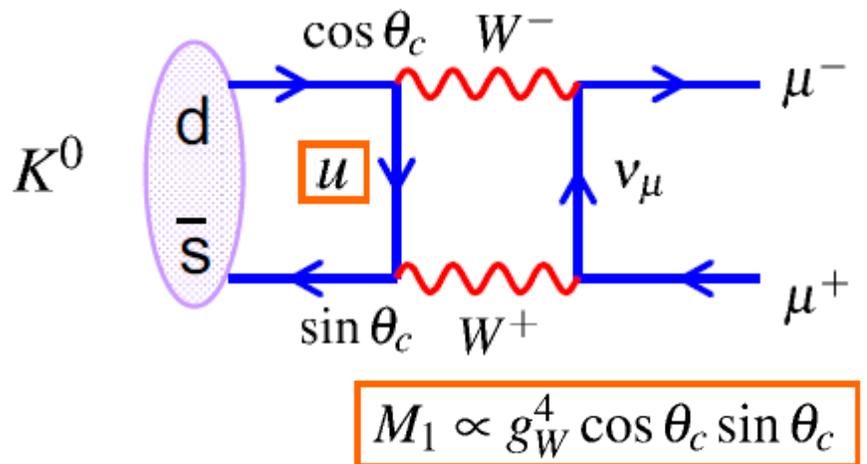
$$\Gamma(K^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu) \propto |M|^2 \propto \sin^2 \theta_c$$

Объяснения, но и новые загадки

$$G_F^\beta = G_F^\mu \cos \theta_c$$



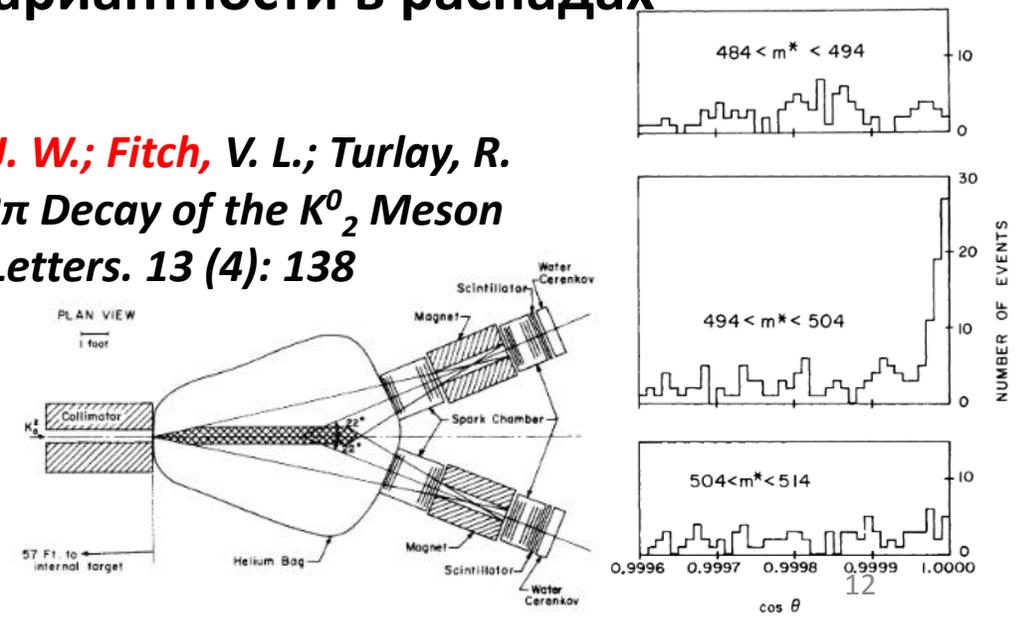
Подавленность распада на ди-мюонную пару!



Нарушение CP-инвариантности в распадах К-мезонов

Christenson, J. H.; Cronin, J. W.; Fitch, V. L.; Turlay, R. (1964). "Evidence for the 2π Decay of the K^0_2 Meson System". *Physical Review Letters*. 13 (4): 138

(см. далее)



Матрица кваркового смешивания \ ККМ \ СКМ

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

Выбор нижних состояний - соглашение

Собственные состояния по отношению к слабому взаимодействию

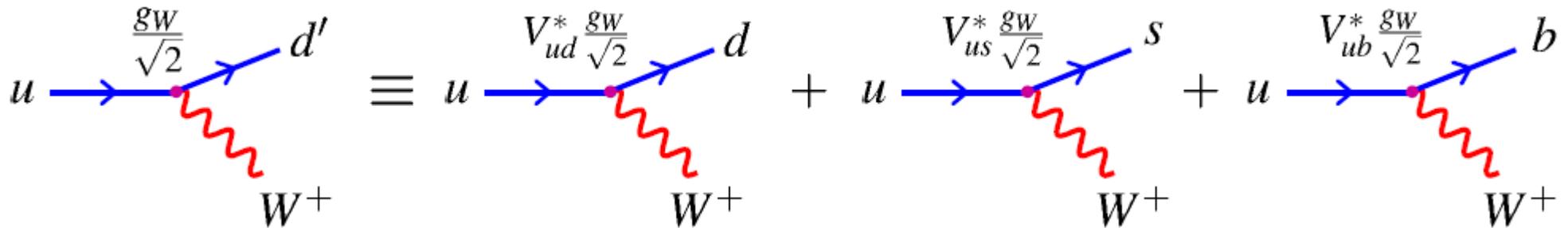
СКМ Matrix

Массовые собственные состояния

(Cabibbo, Kobayashi, Maskawa)

Расширение GIM механизма на третье поколение (Кобаяши, Маскава, 1973)

Фейнмановские вершины



Комплексные элементы \ Унитарная матрица \ Элементы матрицы – константы Стандартной Модели (устанавливаются экспериментально) \ Неустраняемая комплексная фаза → CP-нарушение в кварковом секторе СМ

Параметризации ККМ-матрицы $s_{ij} = \sin \phi_{ij}, c_{ij} = \cos \phi_{ij}$

Три угла смешивания

и комплексная фаза:

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}c_{13} & s_{13}e^{-i\delta} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}e^{i\delta} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}e^{i\delta} & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}e^{i\delta} & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

Иерархия элементов \ матрица
близка к диагональной:

$$V_{\text{CKM}} \sim \begin{pmatrix} |V_{ud}| & |V_{us}| & |V_{ub}| \\ |V_{cd}| & |V_{cs}| & |V_{cb}| \\ |V_{td}| & |V_{ts}| & |V_{tb}| \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 0.974 & 0.226 & 0.004 \\ 0.23 & 0.96 & 0.04 \\ 0.01 & 0.04 & 0.999 \end{pmatrix}$$

Пр-я Вольфенштейна:

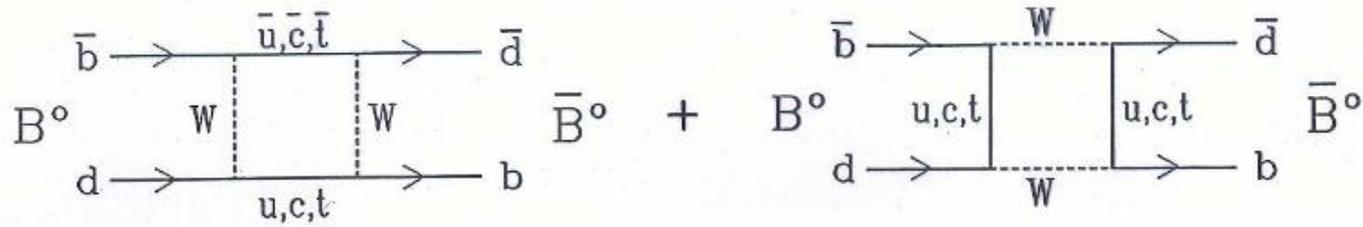
$$\sin \phi_{12} \equiv \lambda, \quad \sin \phi_{23} \equiv A\lambda^2, \quad \sin \phi_{13}e^{-i\delta} \equiv A\lambda^3(\rho - i\eta)$$

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4)$$

$$\lambda = 0.2257^{+0.0009}_{-0.0010}, A = 0.814^{+0.021}_{-0.022}, \rho = 0.135^{+0.031}_{-0.016}, \text{ and } \eta = 0.349^{+0.015}_{-0.017}.$$

$$e^+e^- \rightarrow \bar{b}b \rightarrow \bar{b}d \bar{d}b \text{ or } \bar{b}u \bar{u}b$$

Смешивание и масса t



Частота осцилляций:

$$\Delta M = \langle B | j_\mu j^\mu | B \rangle \times \int_0^\infty \frac{k^4}{8\pi^2} \left(\frac{V_{bu}^* V_{ud}}{k^2 - m_u^2} + \frac{V_{bc}^* V_{cd}}{k^2 - m_c^2} + \frac{V_{bt}^* V_{td}}{k^2 - m_t^2} \right)^2 \left(\frac{g^2}{k^2 - m_W^2} \right)^2 dk^2.$$

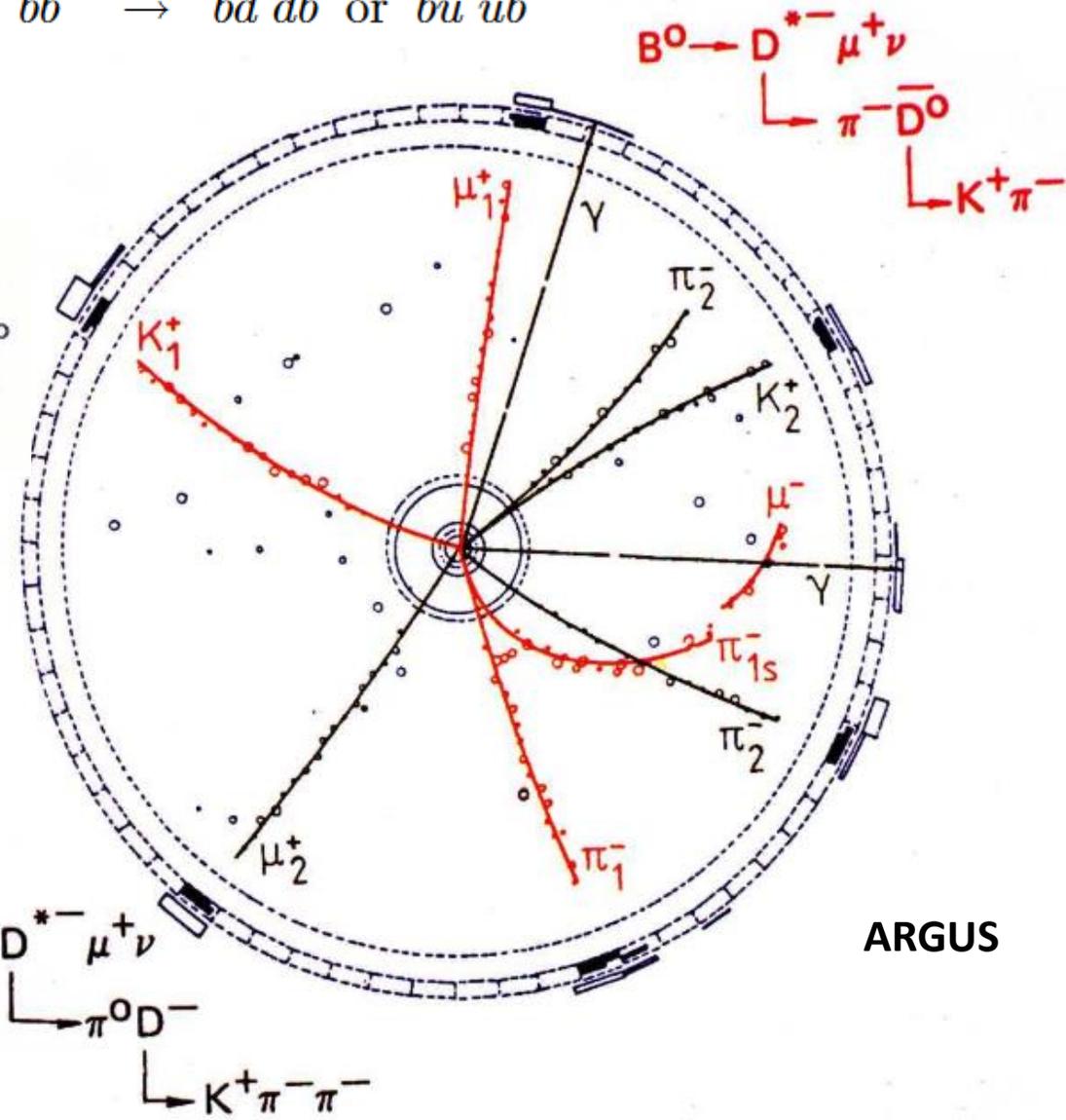
$$\Delta M = \frac{G_F^2}{6\pi^2} m_b B_B f_B^2 |V_{bt}^* V_{td}|^2 m_t^2 A \left(\frac{m_t^2}{m_W^2} \right) \eta_{QCD}.$$

Скорость счета для событий с осцилляциями:

$$r \approx \frac{1}{2} \left(\frac{\Delta M}{\Gamma} \right)^2$$

Ограничение на массу топ-кварка:

$$m_t > 50 \text{ GeV.}$$

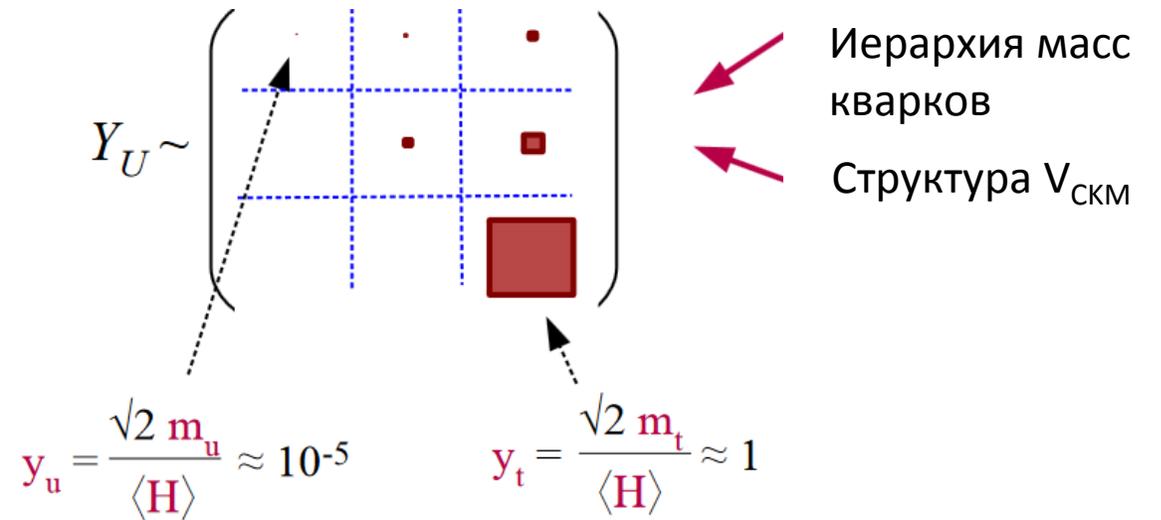


ARGUS

https://argus-fest.desy.de/e301/e305/wsp_arg_new.pdf

Проблема ароматов (flavor puzzle) для СМ и НФ

- Параметрами СМ для кварков:
 - массы кварков (6 параметров)
 - параметры V_{CKM} (4 параметра)
- Как объяснить эту своеобразную структуру юкавовских констант СМ?



- Если СМ является эффективной теорией, то почему мы до последнего времени не видели никаких проявлений для подавленных процессов с изменением аромата (осцилляции мезонов, редкие распады)?
- Какова структура ароматов для НФ?

Как будет проявлять себя НФ?

$$\mathcal{L}_{\text{SM-EFT}} = \mathcal{L}_{\text{gauge}} + \mathcal{L}_{\text{Higgs}} + \sum_{d,i} \frac{c_i^{[d]}}{\Lambda^{d-4}} \mathcal{O}_i^{d \geq 5}$$

Локальное контактное взаимодействие

d – размерность оператора
 Λ – энергетический масштаб
 c – эффективная «сила» взаимодействия

Пример

$$M(B_d - \bar{B}_d) \sim \frac{(y_t^2 V_{tb}^* V_{td})^2}{16\pi^2 m_t^2} + \text{c}_{\text{NP}} \frac{1}{\Lambda^2}$$

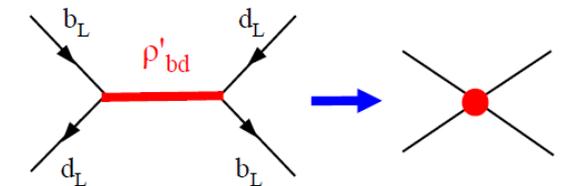
Эксперимент находится в согласии с предсказаниями СМ на уровне 5-30%

Многие эффективные модели НФ «отодвинуты» на гигантские энергетические масштабы

Однако, следует быть аккуратным с таким поиском масштаба НФ

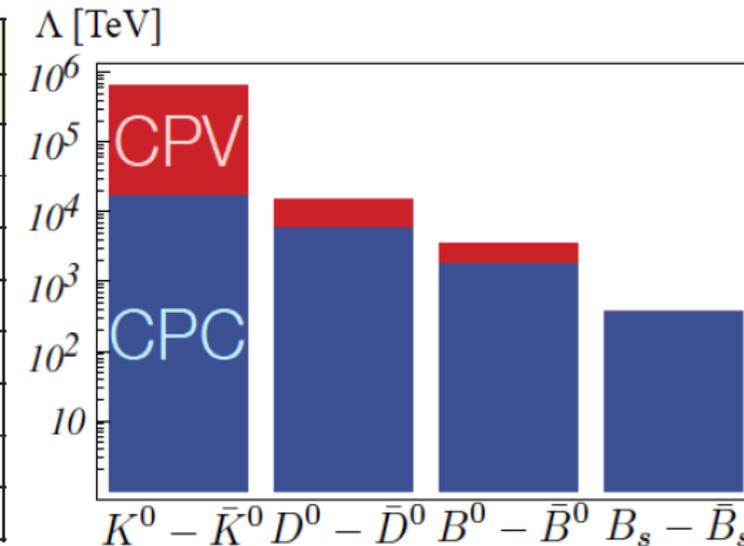
Суперслабое взаимодействие, Вольфенштейн, CP нарушение в модели с двумя поколениями кварков

$$\frac{e^{i\delta}}{\Lambda^2} (\bar{s} \Gamma d)^2 \quad \frac{1}{\Lambda^2} \sim (10^4 \text{ TeV})^{-2} \sim \frac{(G_F m_t V_{ts} V_{td})^2}{4\pi^2}$$



$d = 6$ оператор

Operator	Bounds on Λ (TeV)	
	Re	Im
$(\bar{s}_L \gamma^\mu d_L)^2$	9.8×10^2	1.6×10^4
$(\bar{s}_R d_L)(\bar{s}_L d_R)$	1.8×10^4	3.2×10^5
$(\bar{c}_L \gamma^\mu u_L)^2$	1.2×10^3	2.9×10^3
$(\bar{c}_R u_L)(\bar{c}_L u_R)$	6.2×10^3	1.5×10^4
$(\bar{b}_L \gamma^\mu d_L)^2$	5.1×10^2	9.3×10^2
$(\bar{b}_R d_L)(\bar{b}_L d_R)$	1.9×10^3	3.6×10^3
$(\bar{b}_L \gamma^\mu s_L)^2$	1.1×10^2	1.1×10^2
$(\bar{b}_R s_L)(\bar{b}_L s_R)$	3.7×10^2	3.7×10^2



Пример, когда реальная физика оказалась богаче простой модели 17

Лептонная универсальность (ЛУ)

- Под лептонной универсальностью понимают различное (помимо отличия в массах) проявление лептонов в процессах под действием
 - Заряженных токи ($b \rightarrow c\ell\nu$)
 - Нейтральных токи ($b \rightarrow s\ell^+\ell^-$)
- Лептонная универсальность – «случайное» свойство СМ в пределе, когда пренебрегается юкавовским взаимодействием в лептонном секторе
- Она сильно нарушена в юкавовском секторе
- Однако юкавовские константы малы по сравнению с константами взаимодействий СМ

$$y_e \sim 3 \times 10^{-6}, \quad y_\mu \sim 3 \times 10^{-4}, \quad y_\tau \sim 10^{-2}$$

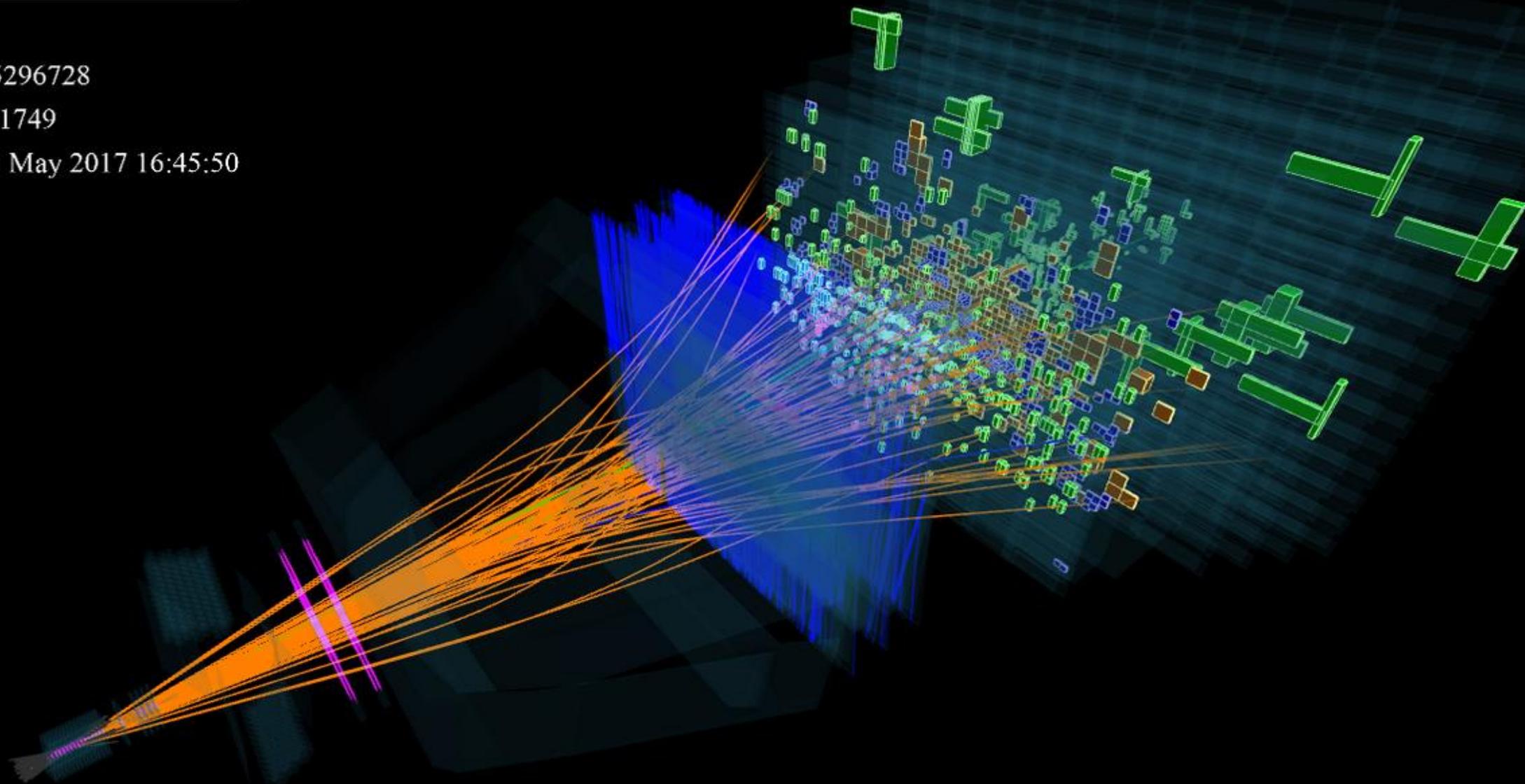
- Поэтому ожидается, что на адронных масштабах энергии лептонная универсальность работает



Event 5296728

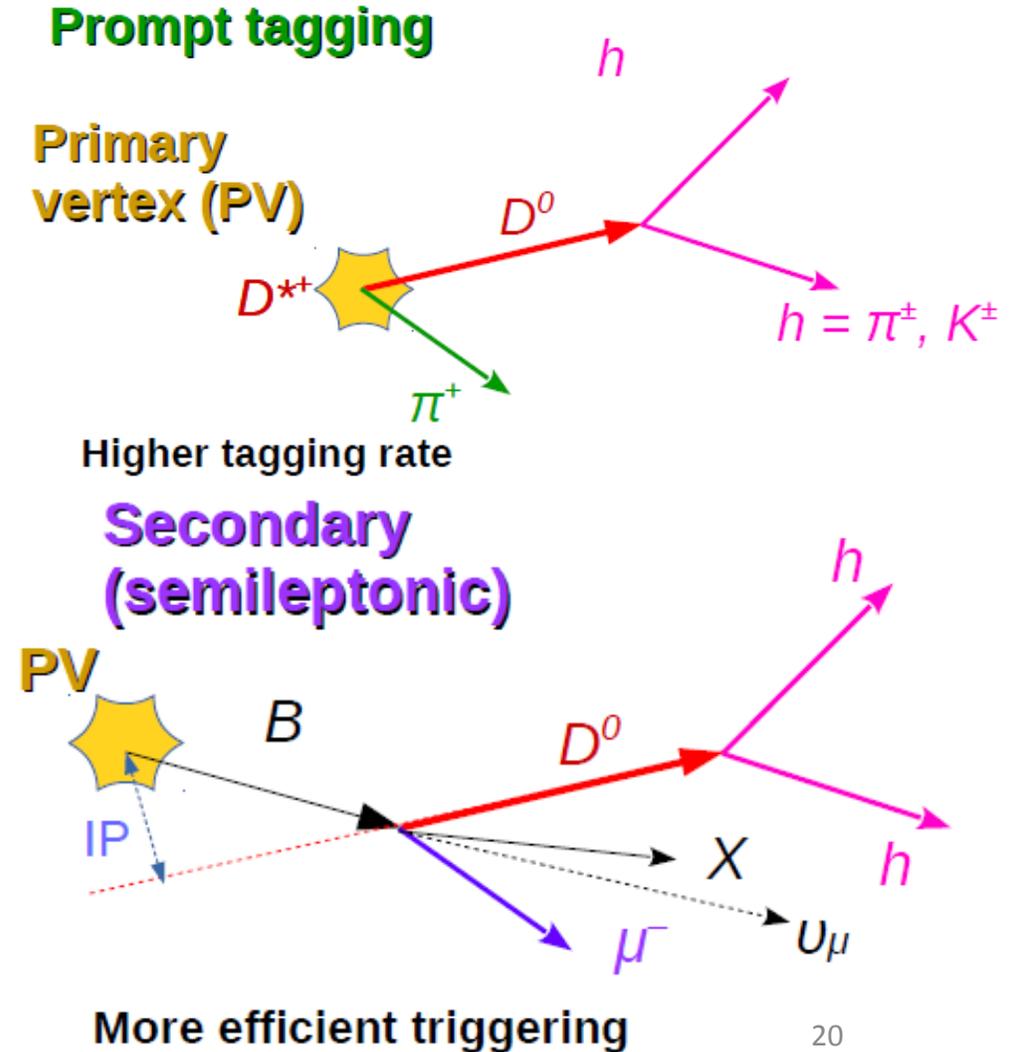
Run 191749

Tue, 23 May 2017 16:45:50



Рождение прелестных и очарованных кварков во взаимодействии ультрарелятивистских адронов

- Основным механизмом рождения пар тяжелых (c & b) кварков является *глюонный синтез*
- Адроны вылетят преимущественно вперед (LHCb имеет акспетанс $2 < \eta < 5$)
- СТО (лоренцовский буст) обеспечивает возможность выделения c - & b -адронов
- Помечивание (tagging) аромата адрона (на примере c кварков)



LHCb: Find \ Identify \ Measure

Excellent vertexing allows efficient heavy quark hadrons selection / gives access to decay time distribution / prompt-secondary separation for charm

Protons collision point

Excellent PID allows to suppress background dramatically and explore many decay modes

Excellent tracking

Muon system – nice tagging & great potential to search for rare decays with di-muons

$$\epsilon_{PID}(K) \approx 95\%$$

$$MisID(K \rightarrow \pi) \approx 5\%$$

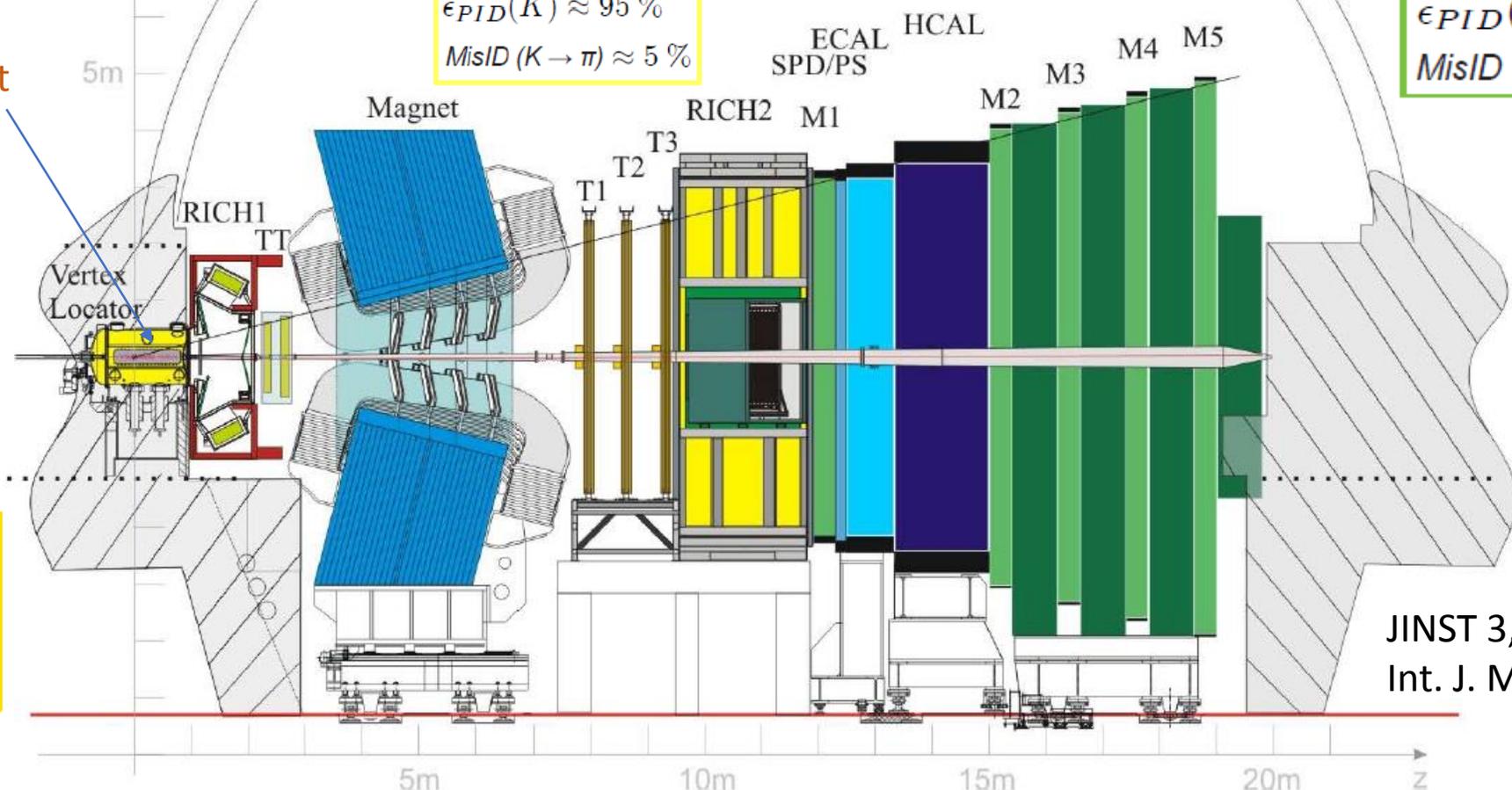
$$\epsilon_{PID}(\mu) \approx 97\%$$

$$MisID(\pi \rightarrow \mu) \approx 3\%$$

$$\sigma(IP) \approx 20\mu m$$

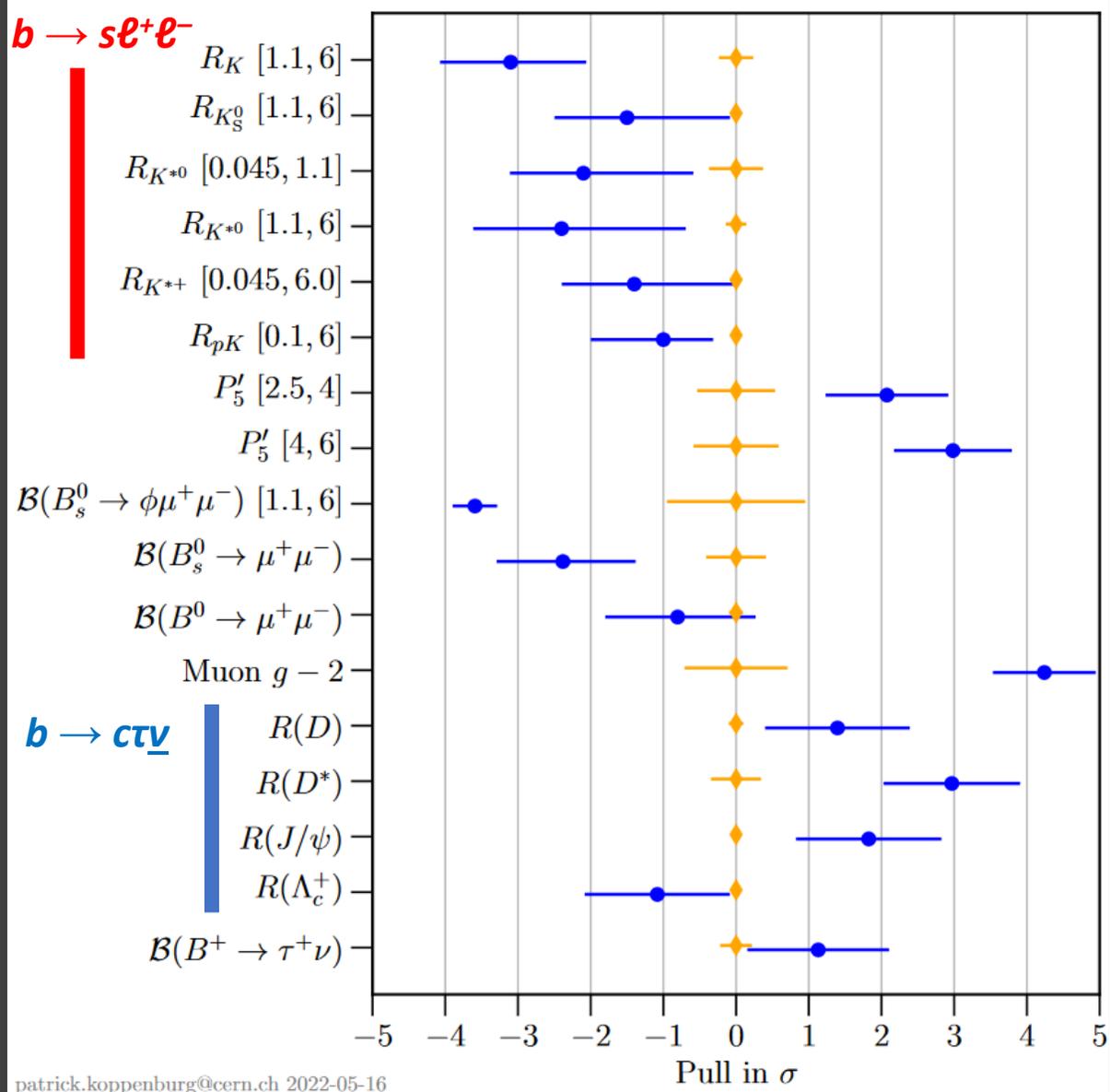
$$\delta p/p = 0.4 - 0.6\%$$

$$\epsilon_{track} > 96\%$$



JINST 3, (2008) S08005;
Int. J. Mod. Phys. A 30,
(2015) 153022

Лептонная универсальность



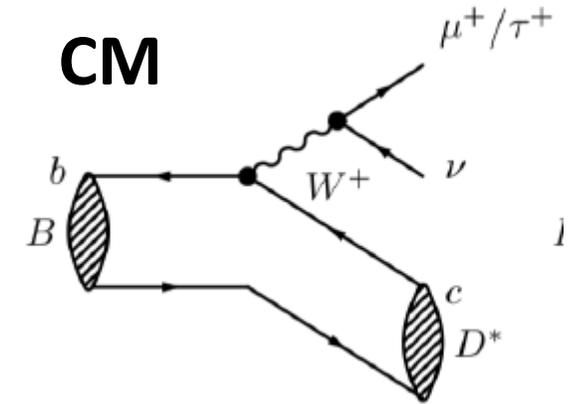
Аномалии

Ограничимся лишь рассмотрением аномалий, связанных с нарушением лептонной универсальности

Заряженные токи ($b \rightarrow c\tau\nu$)

Заряженные токи (распады $B \rightarrow D\tau\nu$)

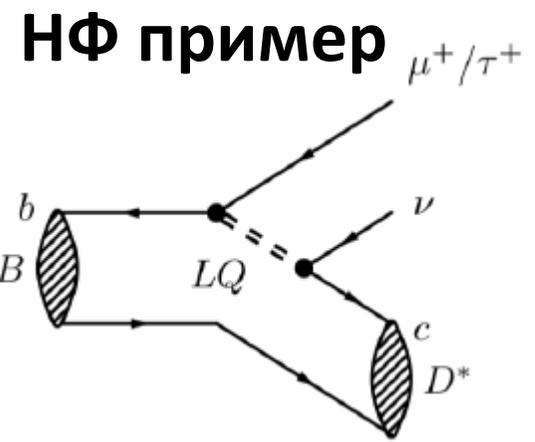
- Древесные диаграммы с подавлением по V_{cb}
- Плохие фоновые условия



$$R(D^*) = \frac{B(B^0 \rightarrow D^{*-}\tau^+\nu_\tau)}{B(B^0 \rightarrow D^{*-}\mu^+\nu_\mu)}$$

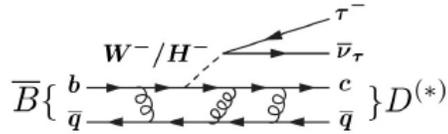
$$R(D)_{SM} = 0.299 \pm 0.003$$

$$R(D^*)_{SM} = 0.258 \pm 0.005$$



- Чувствительно к любым проявлениям НФ, которые связаны с третьим поколением лептонов
- Поиск на Belle, BaBar и LHCb

Распад $\bar{B}^0 \rightarrow D^* \tau \bar{\nu}$



– Измерение отношения:

$$\mathcal{R}(D^*) = \frac{\mathcal{B}(B \rightarrow D^* \tau \nu)}{\mathcal{B}(B \rightarrow D^* \mu \nu)}$$

– Нет особых теоретических трудностей

– Чувствительно к моделям с заряженными бозонами хиггса и к поп-MFV моделям с “сильной” связью с τ .

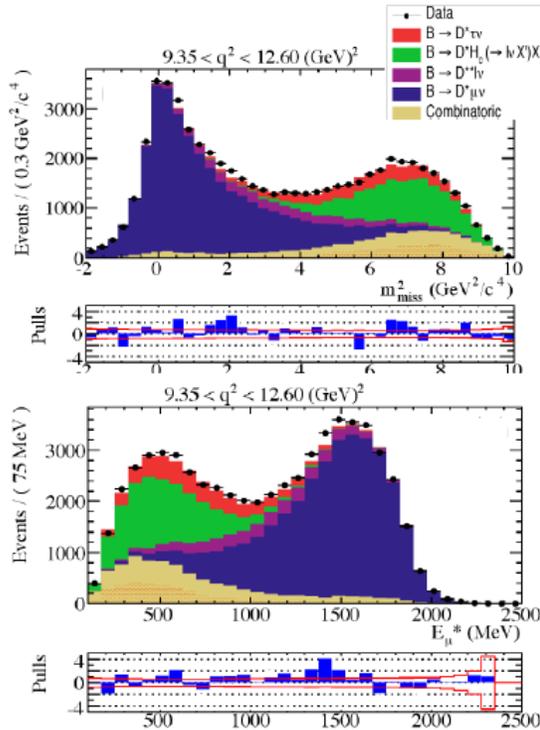
– Сигнал не пикуется, высокий фон

– Формы спектров и МК-моделирования, проверено на данных

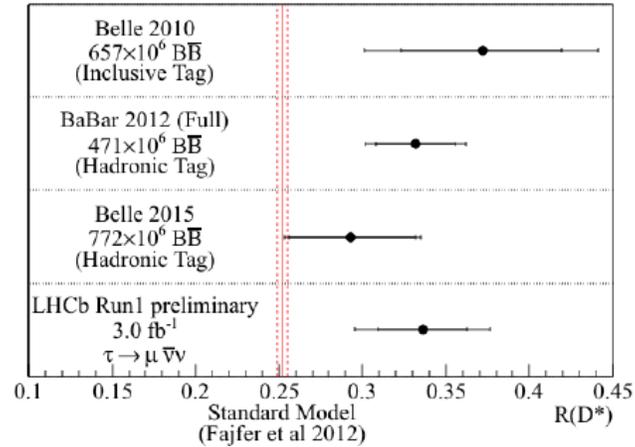
$$\mathcal{R}(D^*) = 0.336 \pm 0.027 \pm 0.030$$

– Отклонение от предсказаний СМ на уровне 2.1σ

– Основная систематики из МК-моделирования



Phys. Rev. Lett. 115 (2015) 112001



Экспериментальные трудности

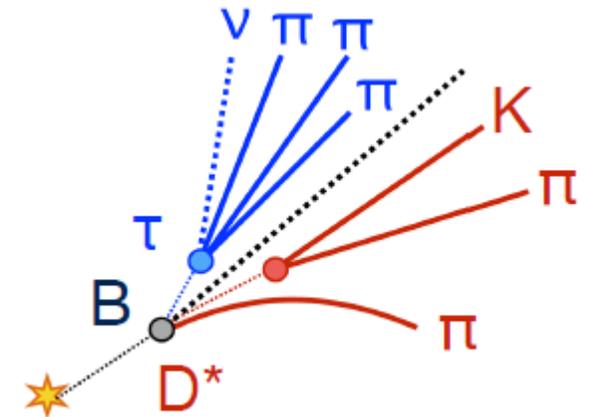
- Как минимум два нейтрино в конечном состоянии
 - Три, если рассматривать лептонный распад τ
- В экспериментах на LHC: сложно полагаться на остальную часть события.
- Хорошее выделение вторичных вершин
- Плохое соотношение сигнал-фон
 - 100 x сигнал: $B \rightarrow D^{*-} 3\pi X$
 - 10 x сигнал: $B \rightarrow D^{*-} \bar{D}_S^+(X)$

Схожая топология сигнала



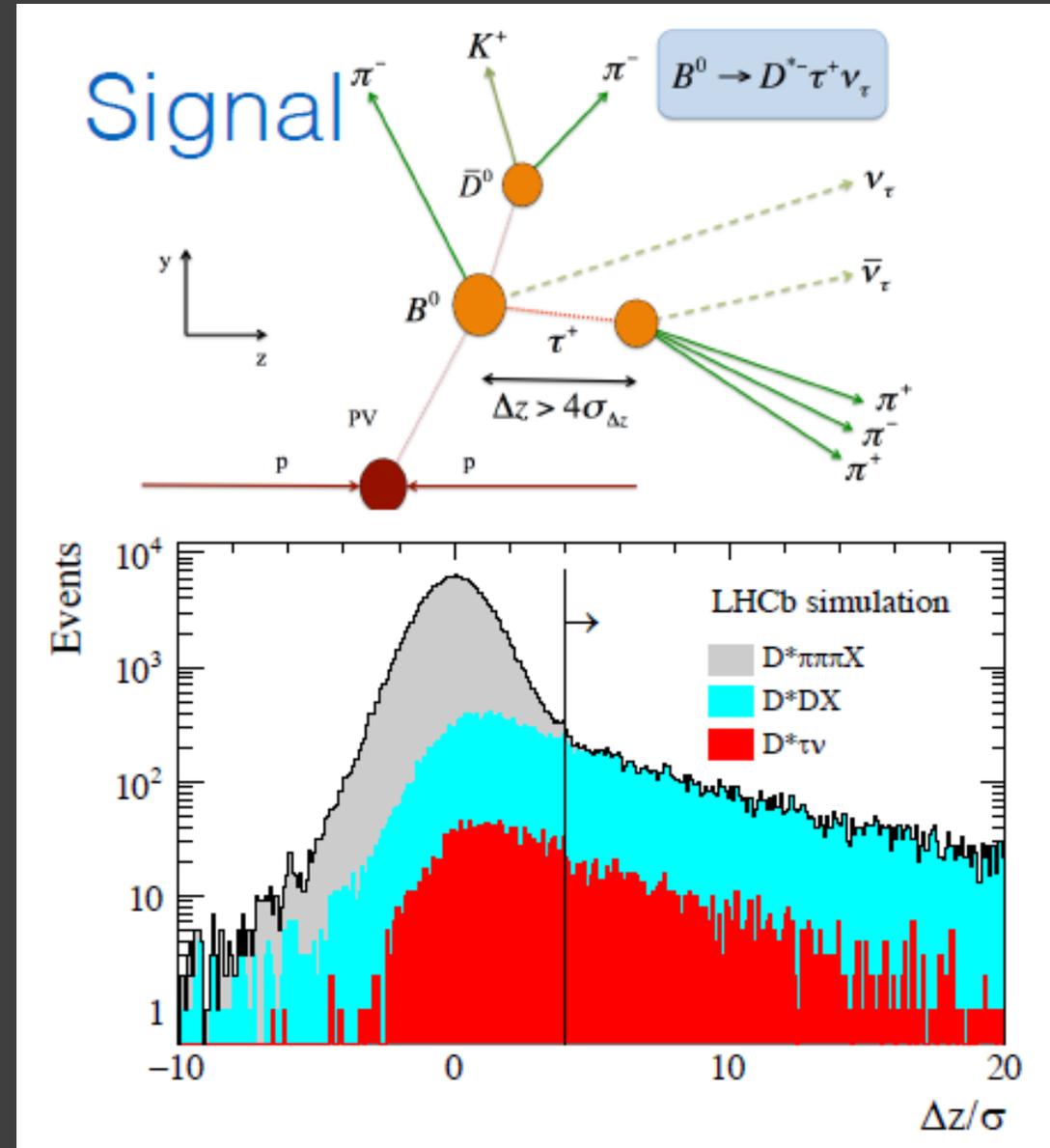
PRL 120 (2018) 171802
PRD 97 (2018) 072013

$$\begin{cases} \tau^+ & \rightarrow \pi^+ \pi^- \pi^+ (\pi^0) \bar{\nu}_\tau \\ D^{*-} & \rightarrow \bar{D}^0 (\rightarrow K^+ \pi^-) \pi^- \end{cases}$$



Пример выделения сигнала

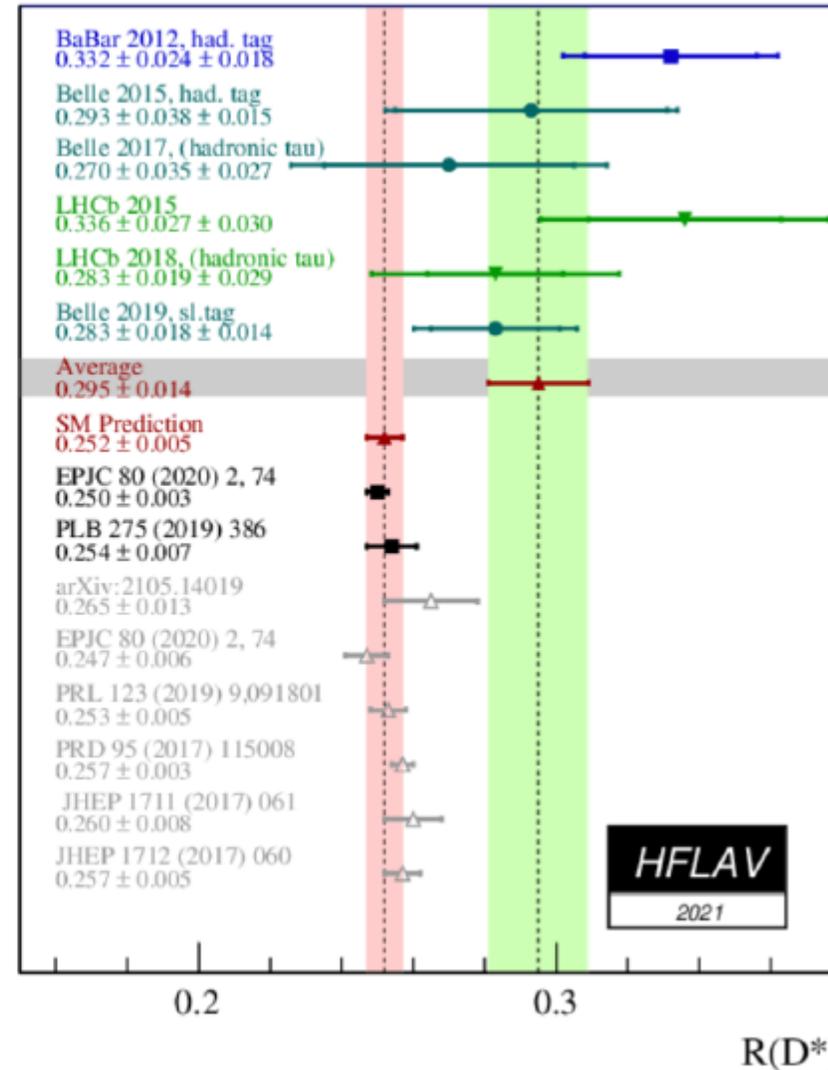
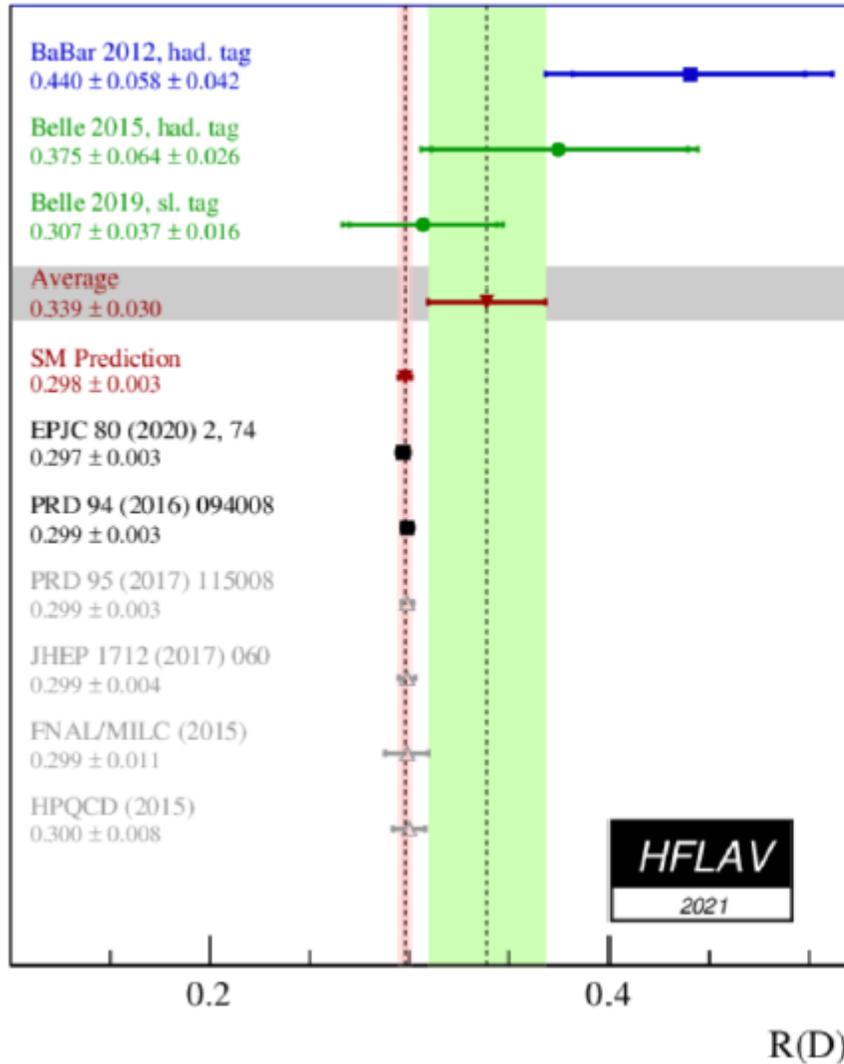
Подавление адронных каналов, используя топологию события



R(D) vs R(D*)

- All experiments see an excess wrt SM predictions: $\sim 3.4\sigma$ tension
- intriguing as it occurs in a tree-level SM process ($\Lambda_{\text{NP}} \lesssim 3 \text{ TeV}$)
- 2.9σ effect on $R(D^*)$

38



Нейтральные токи ($b \rightarrow s\ell^+\ell^-$)

Основная наблюдаемая

$$R_H [q_{\min}^2, q_{\max}^2] = \frac{\int_{q_{\min}^2}^{q_{\max}^2} dq^2 \frac{d\Gamma(B \rightarrow H \mu^+ \mu^-)}{dq^2}}{\int_{q_{\min}^2}^{q_{\max}^2} dq^2 \frac{d\Gamma(B \rightarrow H e^+ e^-)}{dq^2}}, \quad q^2 = m^2(\ell\ell)$$

$B: B^+, B^0, B_s^0, \Lambda_b^0$
 $H: K^+, K^{*0}, \rho K, \phi, \dots$

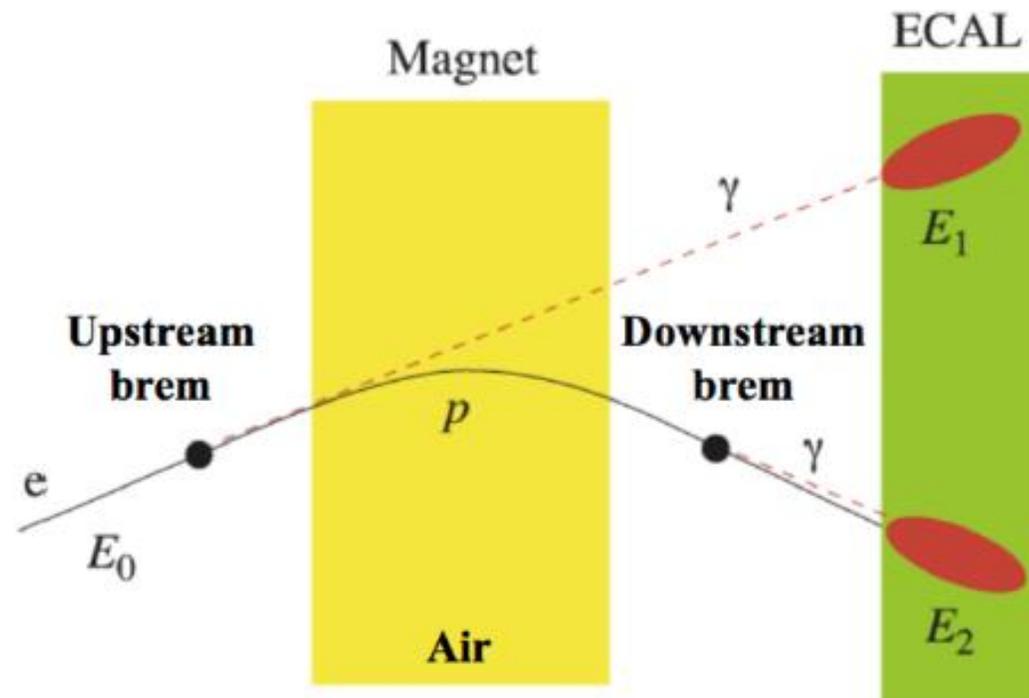
- Чувствительно к моделям НФ, в которых частица медиатор связаны с электронами и мюонами неуниверсальным образом
- В СМ $R_H = 1$, если пренебречь массами лептонов
- При этом КЭД поправки из-за отбора по q^2 имеют %-й характер и хорошо контролируются.
- Аномалия = $R_H < 1 \rightarrow$



Экспериментальные вызовы

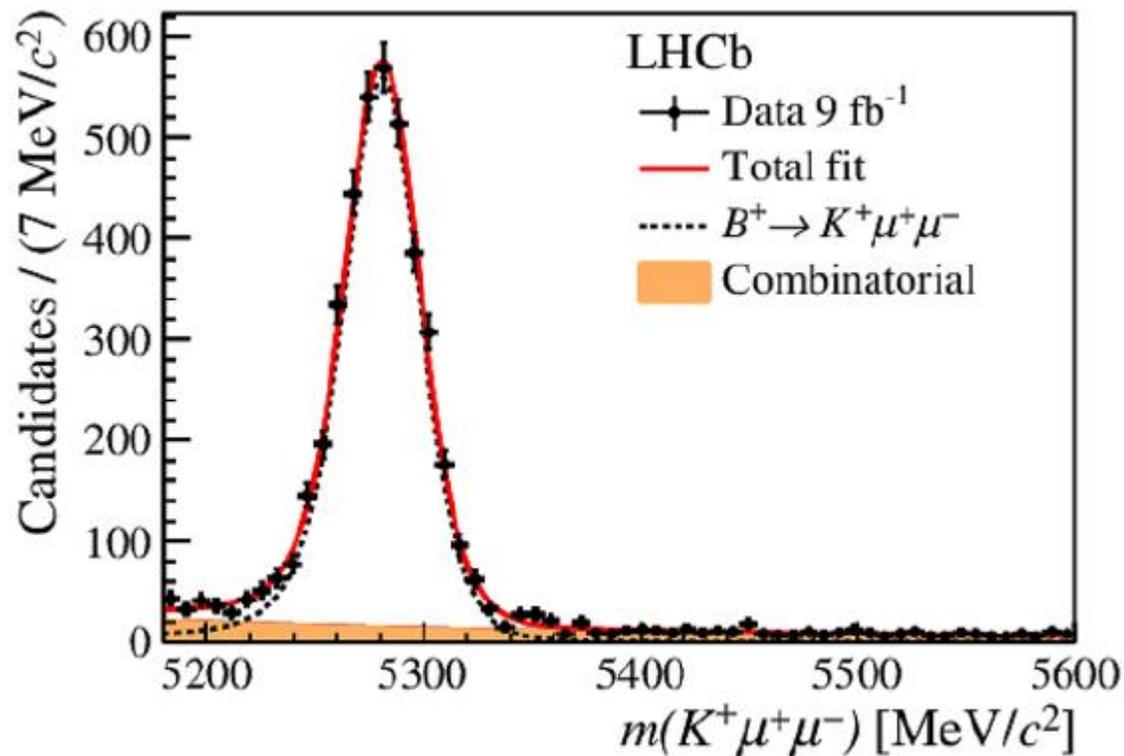
- Большая загрузка EM-калориметра вынуждает задирать пороги для электронов (2.5 – 3 ГэВ), а в случае мюонов пороги (1,5 – 1.8 ГэВ)
- Излучение электронами фотонов тормозного излучения
 - Если излучение поле магнита – фотон и e в одной ячейке ECAL
 - Если до, то в разных
- Поиск кластеров соответствующих тормозным фотонам и добавление их в энергию электрона

JHEP 08 (2017) 055



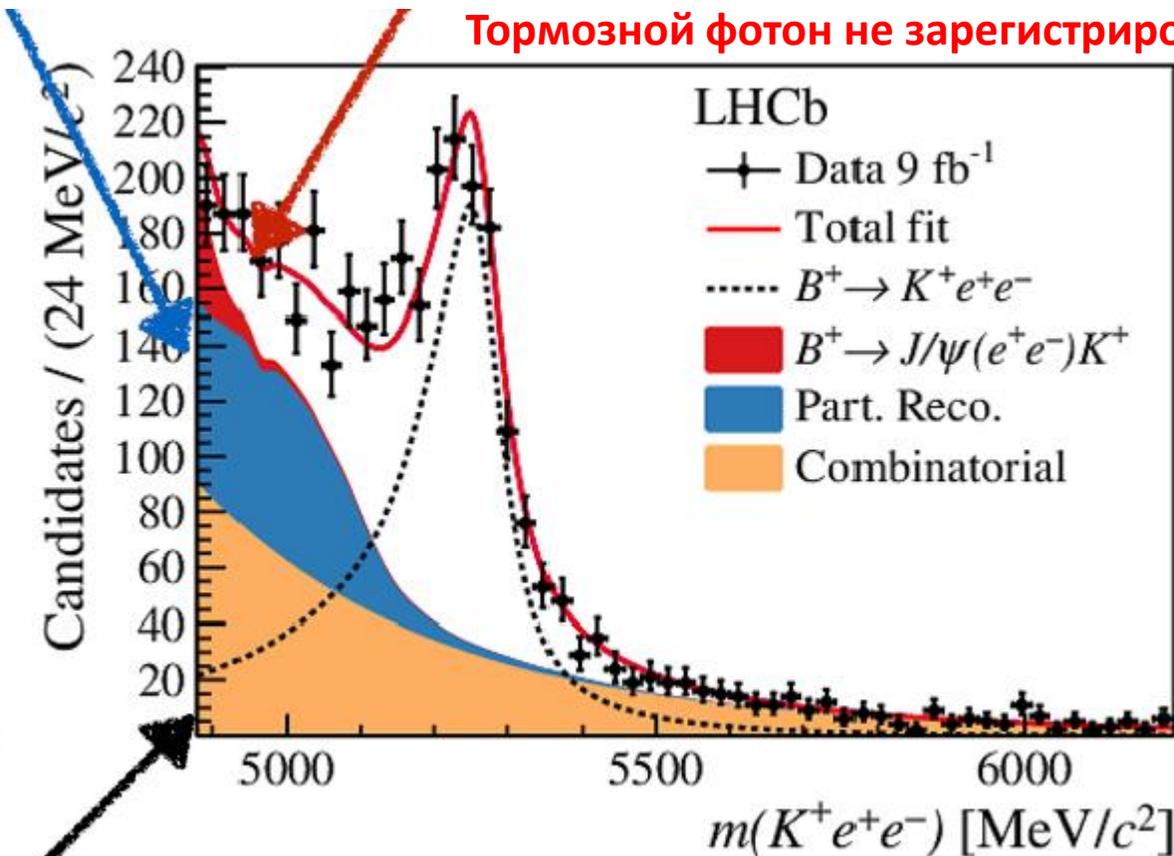
Сравнение мюонного и электронного каналов

Пион не зарегистрирован
 $B^{0,+} \rightarrow K^{*0,+} e^+ e^-$



$B^+ \rightarrow K^+ J/\psi(e^+ e^-)$

Тормозной фотон не зарегистрирован



Хвост, связанный с тормозным излучением

Метод контроля – двойное отношение

$$R_H = \frac{\mathcal{B}(B^0 \rightarrow H\mu^+\mu^-)}{\mathcal{B}(B^0 \rightarrow HJ/\psi(\rightarrow \mu^+\mu^-))} \bigg/ \frac{\mathcal{B}(B^0 \rightarrow He^+e^-)}{\mathcal{B}(B^0 \rightarrow HJ/\psi(\rightarrow e^+e^-))}$$

← Основные сложности и неопределенности тут

$$R_H = \frac{N(B \rightarrow H\mu^+\mu^-)}{\varepsilon(B \rightarrow H\mu^+\mu^-)} \times \frac{\varepsilon(B \rightarrow He^+e^-)}{N(B \rightarrow He^+e^-)} \times \frac{N(B \rightarrow HJ/\psi(e^+e^-))}{\varepsilon(B \rightarrow HJ/\psi(e^+e^-))} \times \frac{\varepsilon(B \rightarrow HJ/\psi(\mu^+\mu^-))}{N(B \rightarrow HJ/\psi(\mu^+\mu^-))}$$

$$r_{J/\psi} = \frac{B(B \rightarrow HJ/\psi(\mu^+\mu^-))}{B(B \rightarrow HJ/\psi(e^+e^-))}$$

Экспериментально измерена с погрешностью 0,4%

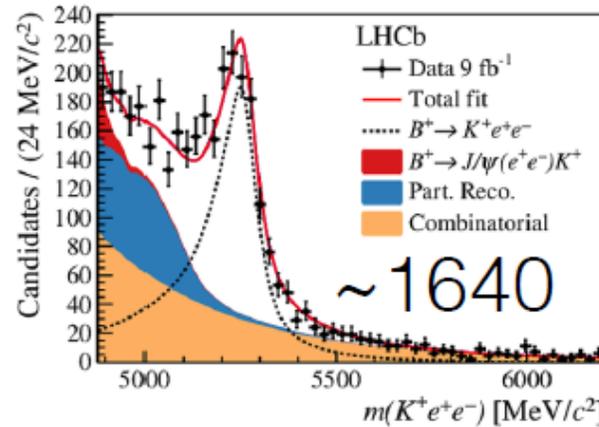
- Эффективности для основного и контрольного канала ведут себя схожим образом
- Отношение эффективностей всегда лучше контролируется, чем их абсолютные значения
- Гигантская статистика в контрольном (чармониевом) канале
- Слепой анализ (стандарт LHCb для этого типа измерений)

• Performed in q^2 interval $1.1 < q^2 < 6.0 \text{ GeV}^2$

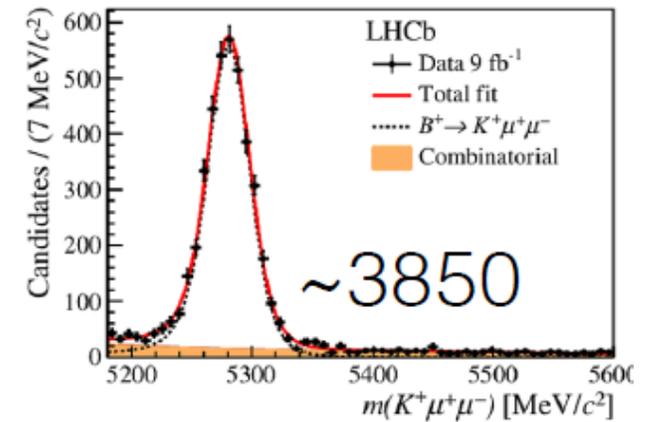
$$R_K = \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ J/\psi(\rightarrow \mu^+ \mu^-))} \bigg/ \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ J/\psi(\rightarrow e^+ e^-))}$$

Измерение R_{K^+}

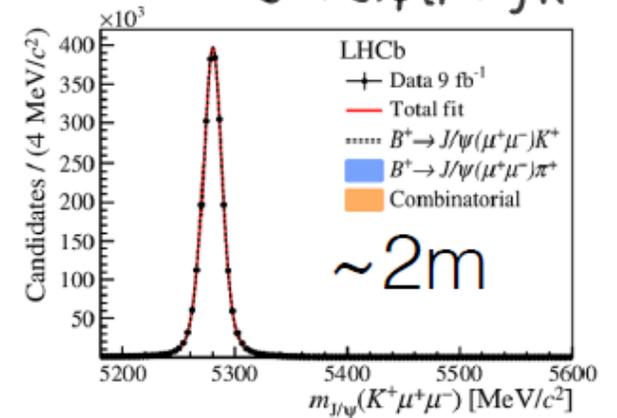
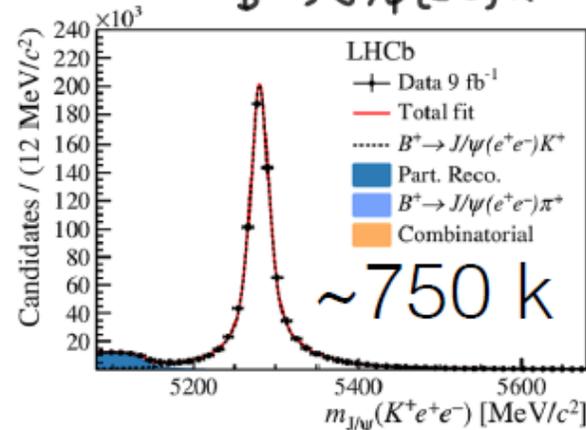
- Одинаковые отборы (за исключением требования по q^2)
- Поправки на эффективность составляют всего 3%
- arXiv:2103.11769
Nature Physics



$B^+ \rightarrow J/\psi(e^+e^-)K^+$



$B^+ \rightarrow J/\psi(\mu^+\mu^-)K^+$

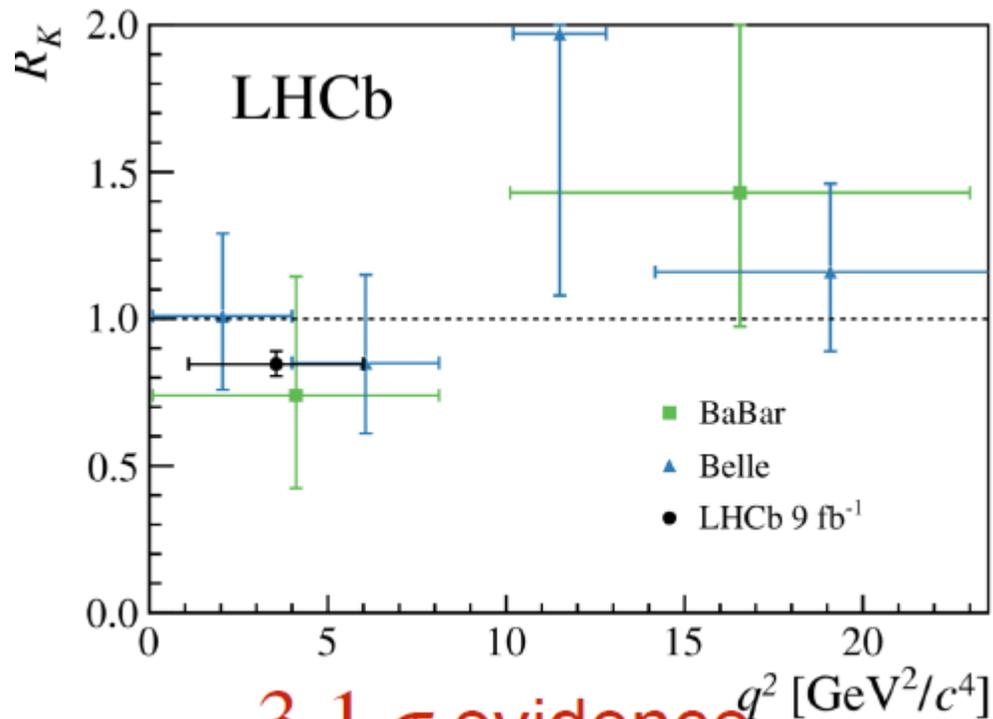


$$R_{\psi(2S)} = \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \psi(2S)(\mu^+ \mu^-))}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ J/\psi(\mu^+ \mu^-))} \bigg/ \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \psi(2S)(e^+ e^-))}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ J/\psi(e^+ e^-))} = 0.997 \pm 0.011$$

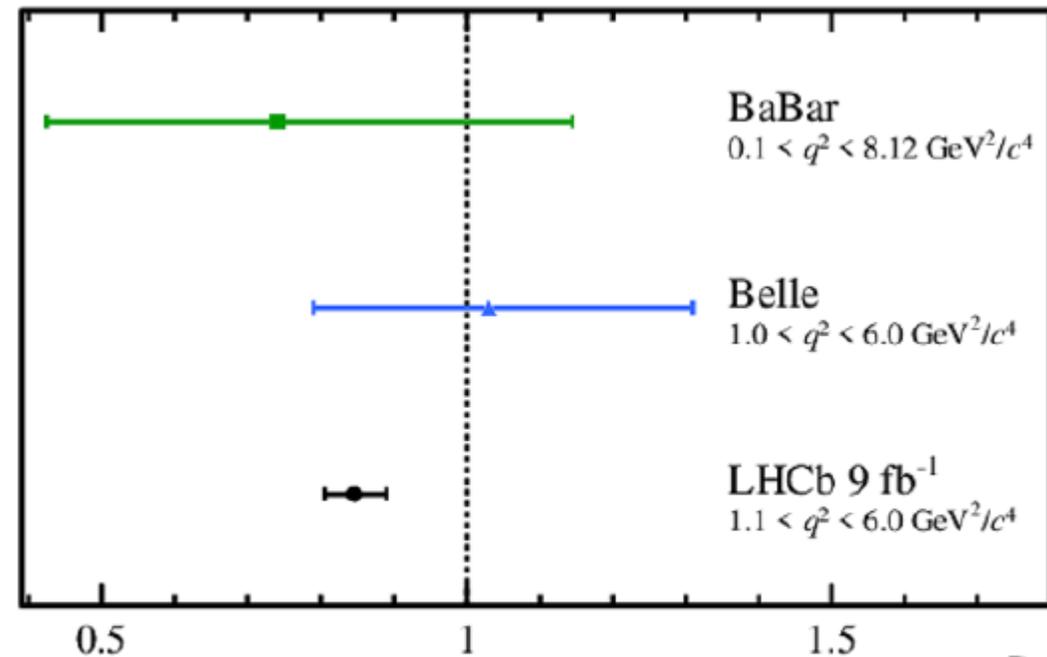
$R_K (B^+ \rightarrow K^+ \ell^+ \ell^-)$

- $R_K(1.1 < q^2 < 6.0 \text{ GeV}^2) = 0.846^{+0.042}_{-0.039} (\text{stat})^{+0.013}_{-0.012} (\text{syst})$

Доминирующая систематическая неопределенность (порядка 1%) связана с неопределенностью формы сигнала и формы фона, используемых при аппроксимации спектров



3.1 σ evidence



[arXiv:2103.11769](https://arxiv.org/abs/2103.11769)

$$R_{K^*} = \frac{\mathcal{B}(B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{B}(B^0 \rightarrow K^{*0} J/\psi(\rightarrow \mu^+ \mu^-))} \bigg/ \frac{\mathcal{B}(B^0 \rightarrow K^{*0} e^+ e^-)}{\mathcal{B}(B^0 \rightarrow K^{*0} J/\psi(\rightarrow e^+ e^-))}$$

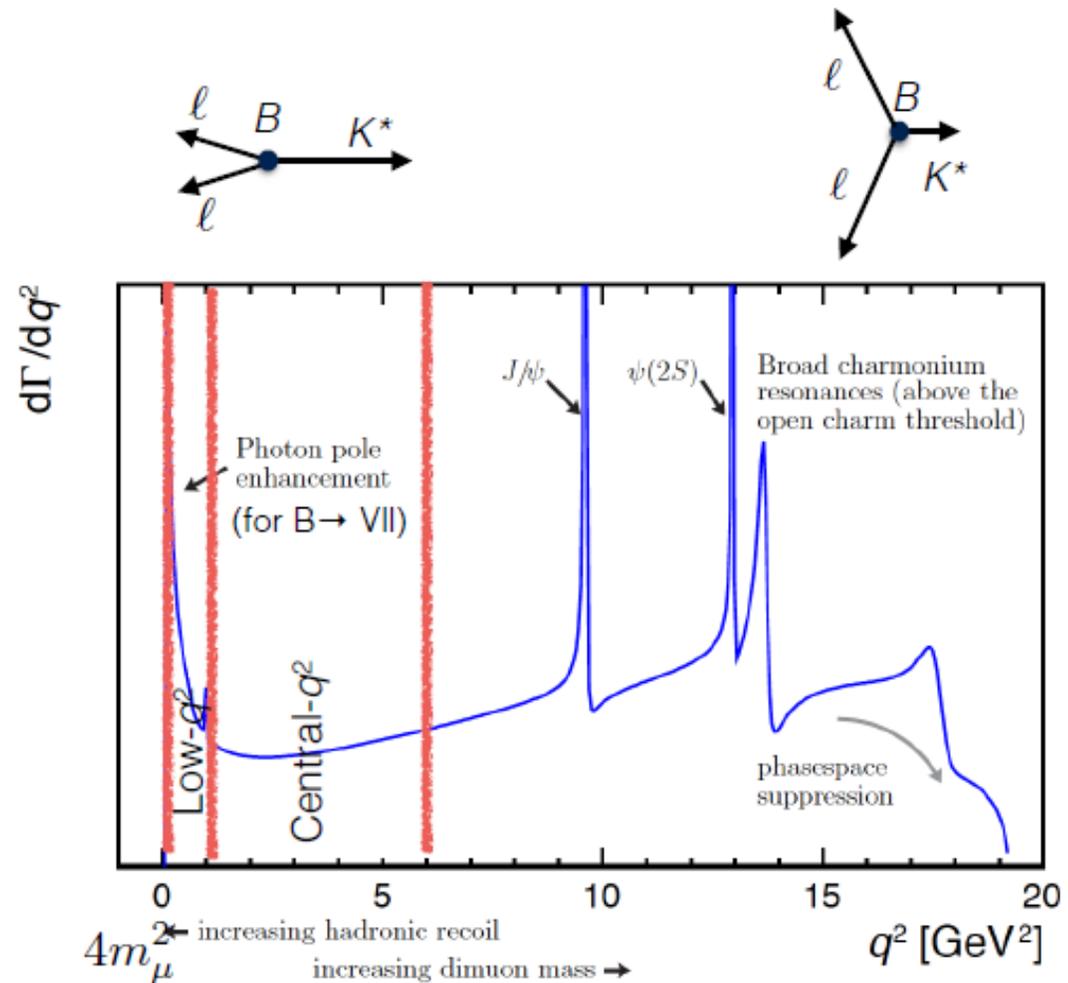
$$K^{*0}(892) \rightarrow K^+ \pi^-$$

Пока проанализированы
только данные Run-1

data, 3 fb⁻¹):

- Low- q^2 bin: [0.045, 1.1] GeV²
- Central- q^2 bin: [1.1, 6.0] GeV²

JHEP 08 (2017) 055

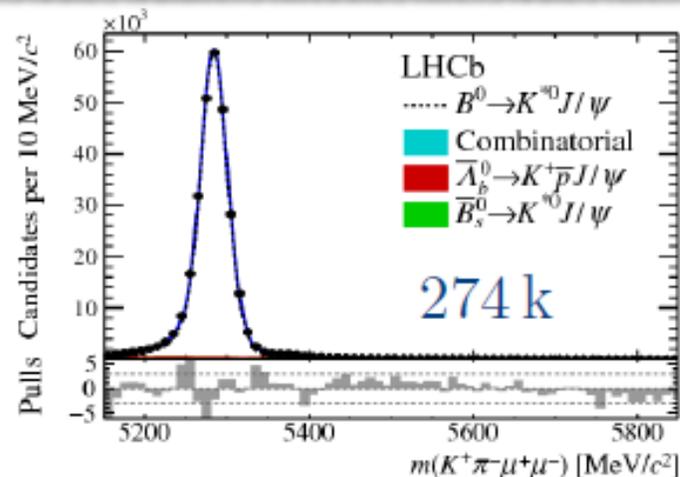
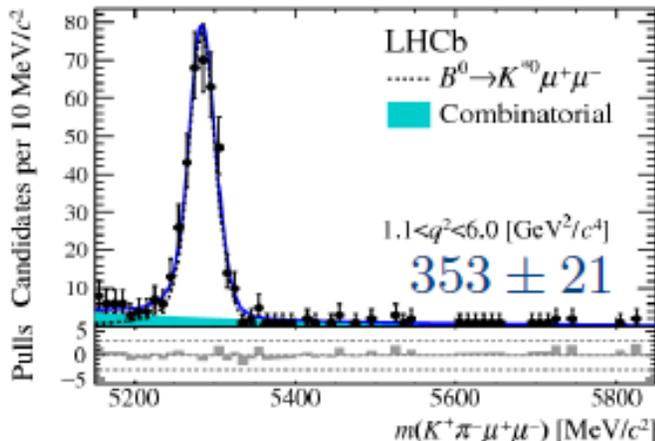
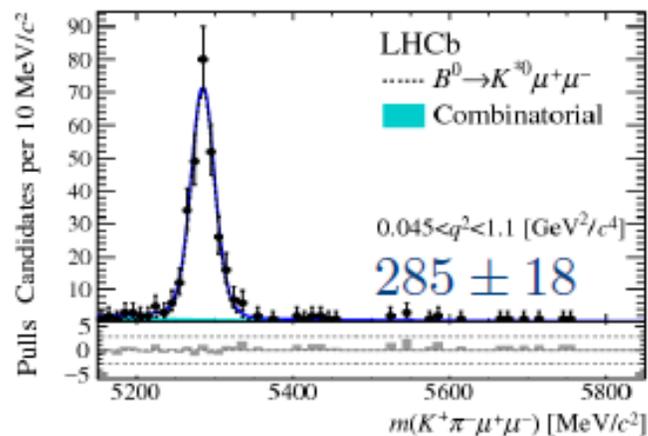


Low- q^2

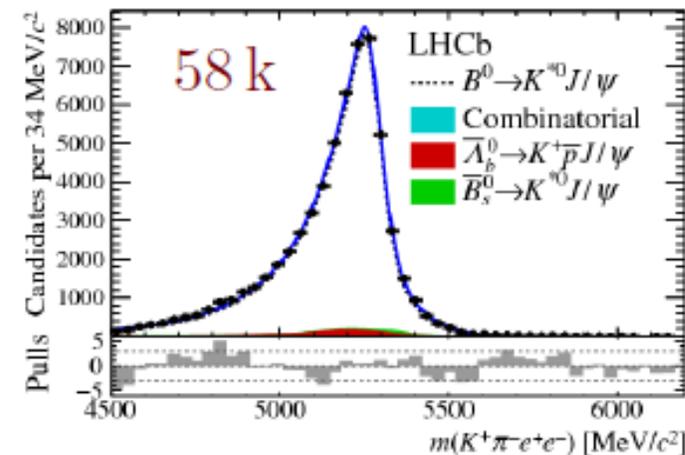
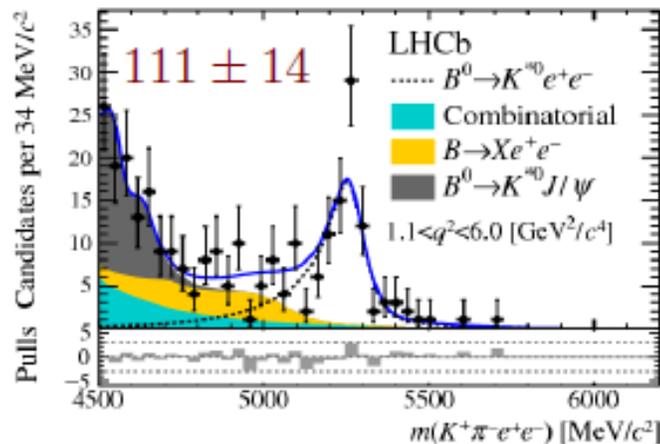
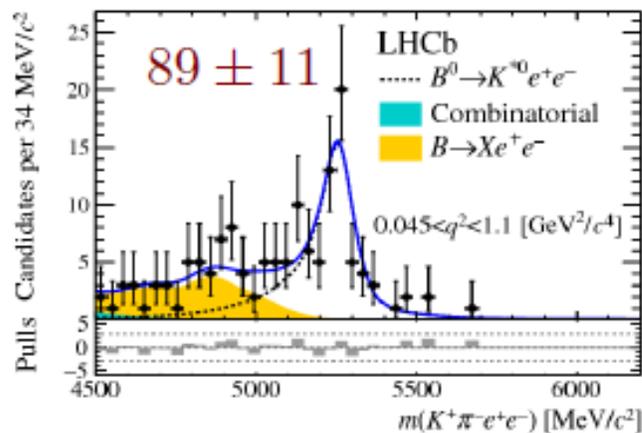
Central- q^2

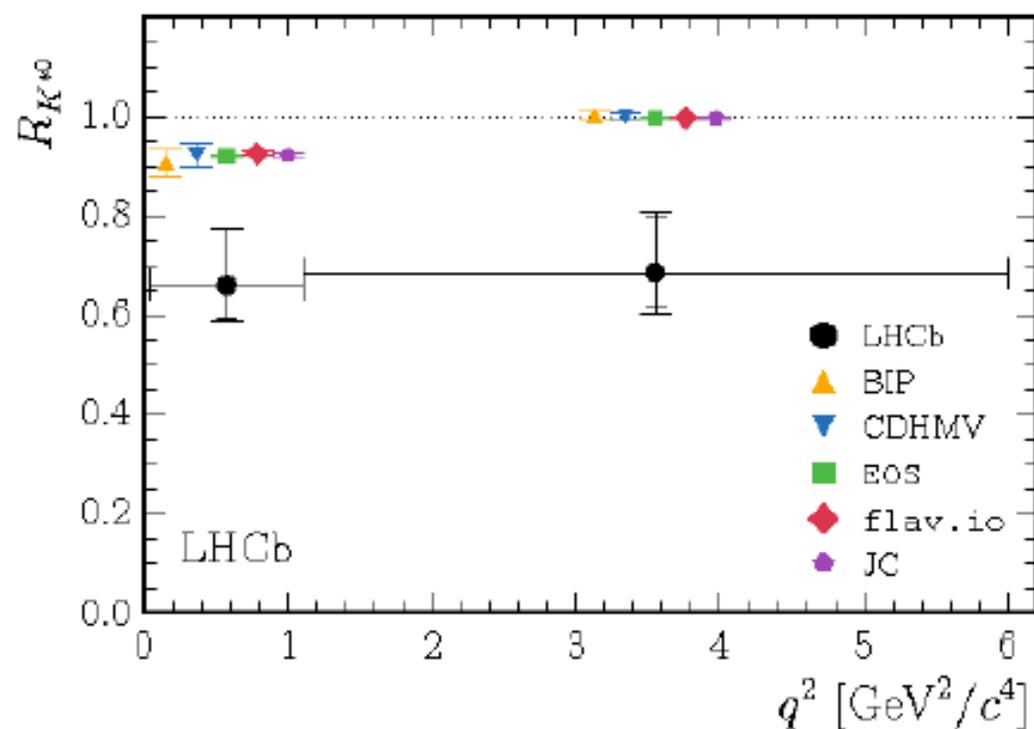
$B^0 \rightarrow K^* J/\psi (\rightarrow \ell^+ \ell^-)$

$B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$

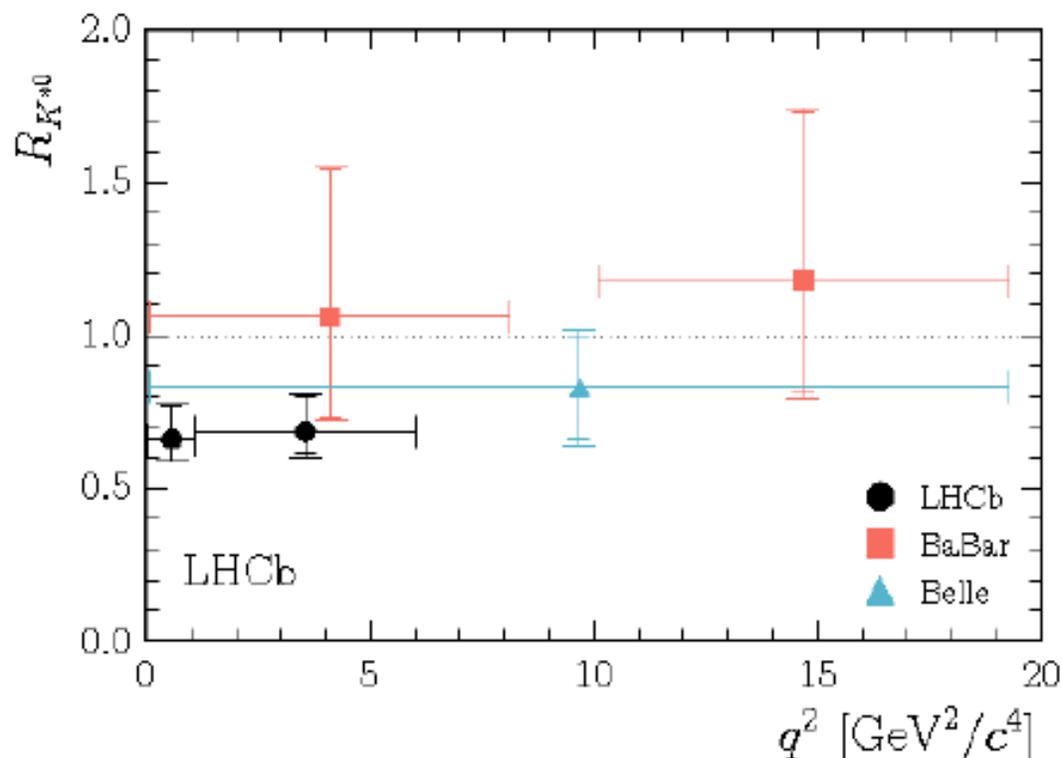


$B^0 \rightarrow K^{*0} e^+ e^-$





BIP: [arXiv:1605.07633](https://arxiv.org/abs/1605.07633)
 CDHMV: [arXiv:1510.04239](https://arxiv.org/abs/1510.04239), [1605.03156](https://arxiv.org/abs/1605.03156), [1701.08672](https://arxiv.org/abs/1701.08672)
 EOS: [arXiv:1610.08761](https://arxiv.org/abs/1610.08761), <https://eos.github.io>
 flav.io: [arXiv:1503.05534](https://arxiv.org/abs/1503.05534), [1703.09189](https://arxiv.org/abs/1703.09189), [flav-io/flavio](https://flav-io.github.io/flavio)
 JC: [arXiv:1412.3183](https://arxiv.org/abs/1412.3183)



BaBar: [PRD 86 \(2012\) 032012](https://arxiv.org/abs/1203.0321)
 Belle: [PRL 103 \(2009\) 171801](https://arxiv.org/abs/0907.1718)

LHCb: [JHEP 08 \(2017\) 055](https://arxiv.org/abs/1708.05840)

$$R_{K^*} = \begin{cases} 0.66_{-0.07}^{+0.11} \text{ (stat)} \pm 0.03 \text{ (syst)} & \text{for } 0.045 < q^2 < 1.1 \text{ GeV}^2 & 2.1 - 2.3 \sigma \\ 0.69_{-0.07}^{+0.11} \text{ (stat)} \pm 0.05 \text{ (syst)} & \text{for } 1.1 < q^2 < 6.0 \text{ GeV}^2 & 2.4 - 2.5 \sigma \end{cases}$$

Tests of LFU with $B^0 \rightarrow K_S^0 \ell^+ \ell^-$ and $B^+ \rightarrow K^{*+} \ell^+ \ell^-$

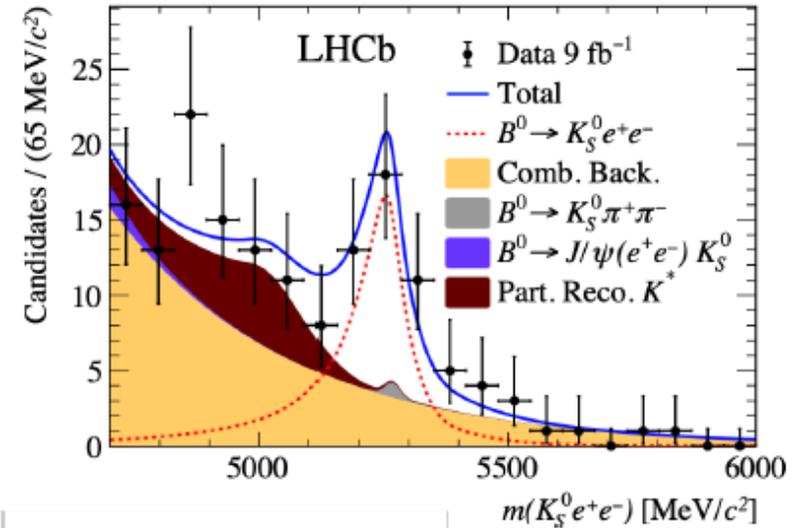
- e^+e^- modes observed for first time:

$$\frac{d\mathcal{B}(B^0 \rightarrow K^0 e^+ e^-)}{dq^2} = (2.6 \pm 0.6 \pm 0.1) \times 10^{-8} \text{ GeV}^{-2}$$

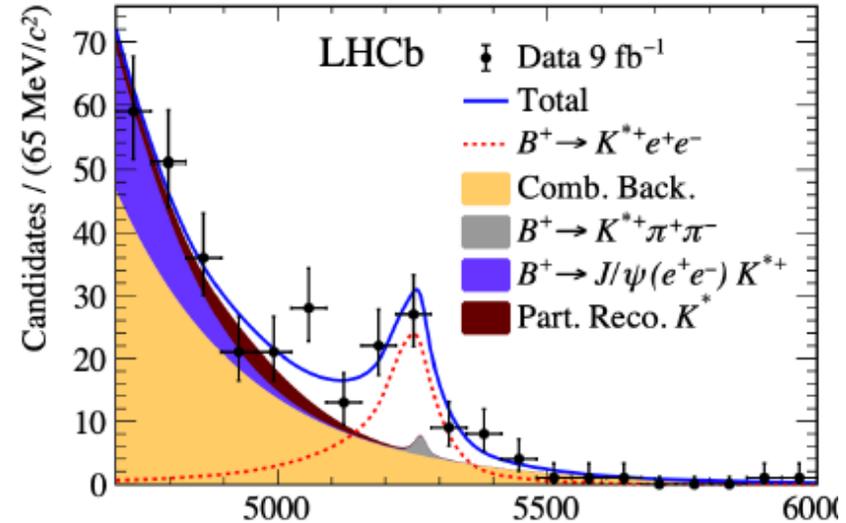
$$q^2 \in [1.1, 6.0] \text{ GeV}^2 \quad 5.3\sigma$$

$$\frac{d\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^{*+} e^+ e^-)}{dq^2} = (9.2^{+1.9+0.8}_{-1.8-0.6}) \times 10^{-8} \text{ GeV}^{-2}$$

$$q^2 \in [0.045, 6.0] \text{ GeV}^2 \quad 6.0\sigma$$

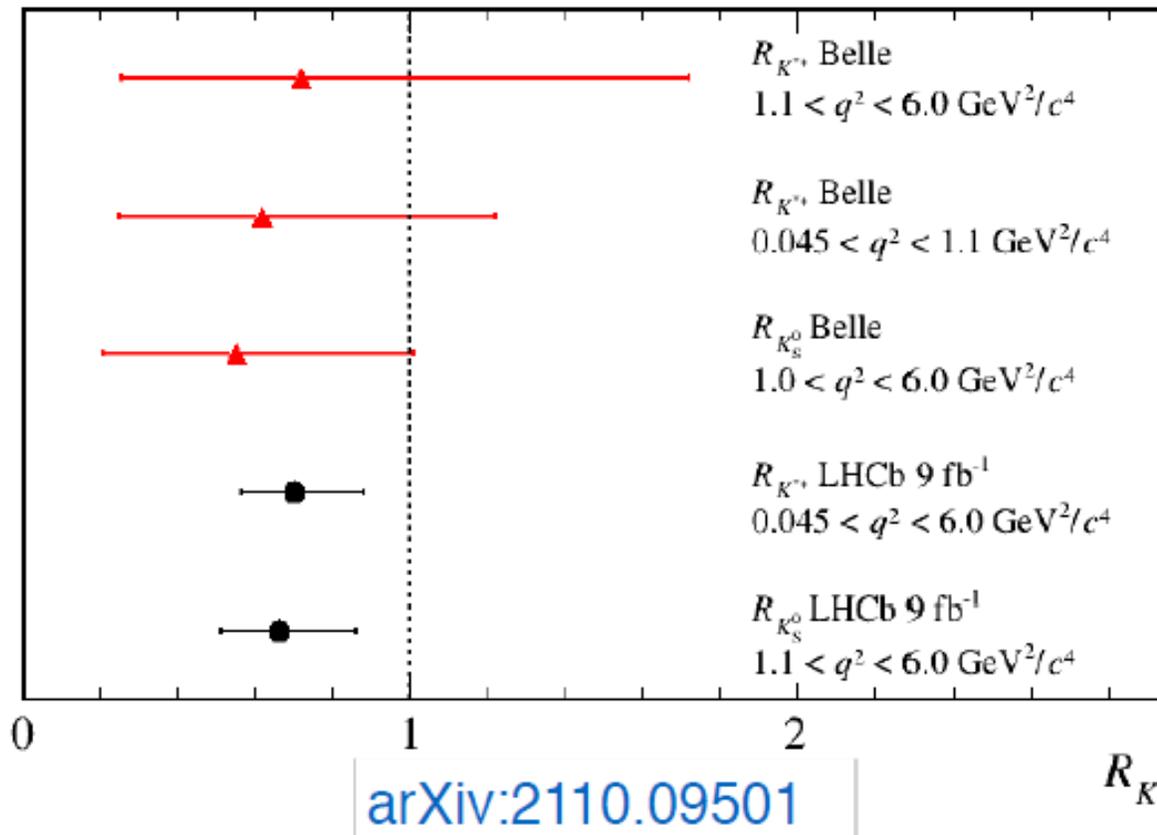


[arXiv:2110.09501](https://arxiv.org/abs/2110.09501)



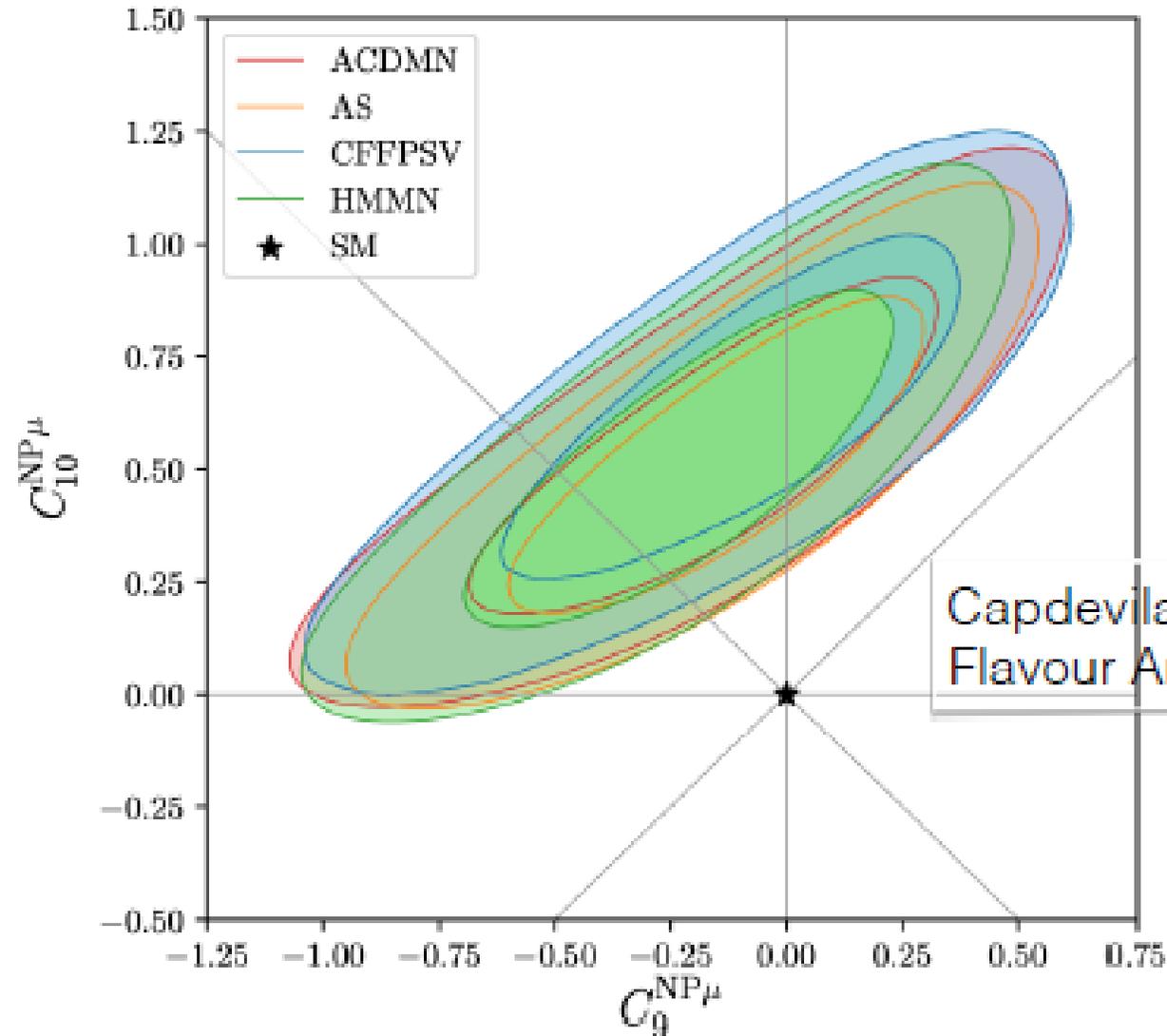
$$R_{K_S^0} = 0.66_{-0.14}^{+0.20}(\text{stat.})_{-0.04}^{+0.02}(\text{syst})$$

$$R_{K^{*+}} = 0.70_{-0.13}^{+0.18}(\text{stat.})_{-0.04}^{+0.03}(\text{syst})$$



- С одной стороны измерения находятся в согласии с предсказаниями СМ
- С другой стороны они (как и измерения Belle) отклоняются от 1 в сторону меньших значений R

Fit of LFU observables & $B \rightarrow \mu^+ \mu^-$



C_9 (Vector) and
 C_{10} (Axial-vector) couplings

Capdevila, Fedele, Neshatpour, Stangl
Flavour Anomaly Workshop, 20 October 2021

$B_{(s)} \rightarrow \mu^+ \mu^-$ combination

- **LHCb**, PRL 118 (2017) 191801

$$B(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (3.0 \pm 0.6_{-0.2}^{+0.3}) \times 10^{-9} \quad 7.8\sigma$$

$$B(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 3.4 \times 10^{-10} \text{ @95 \% CL}$$

- **CMS**, JHEP 04 (2020) 188

$$B(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (2.9 \pm 0.7 \text{ (exp)} \pm 0.2 \text{ (frag)}) \times 10^{-9} \quad 5.6\sigma$$

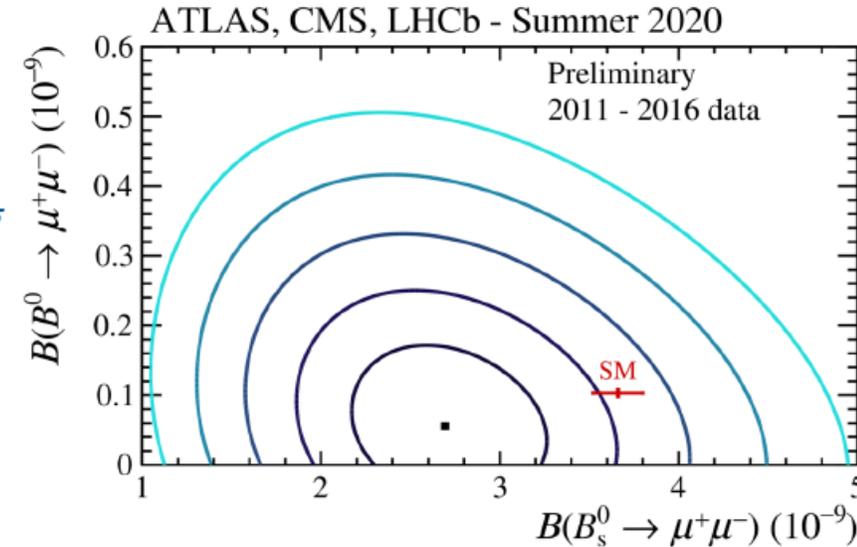
$$B(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 3.6 \times 10^{-10} \text{ @95 \% CL}$$

- **ATLAS**, JHEP 04 (2019) 098

$$B(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (2.8_{-0.7}^{+0.8}) \times 10^{-9} \quad 4.6\sigma$$

$$B(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 2.1 \times 10^{-10} \text{ @95 \% CL}$$

LHCb-CONF-2020-002
CMS PAS BPH-20-003
ATLAS-CONF-2020-049

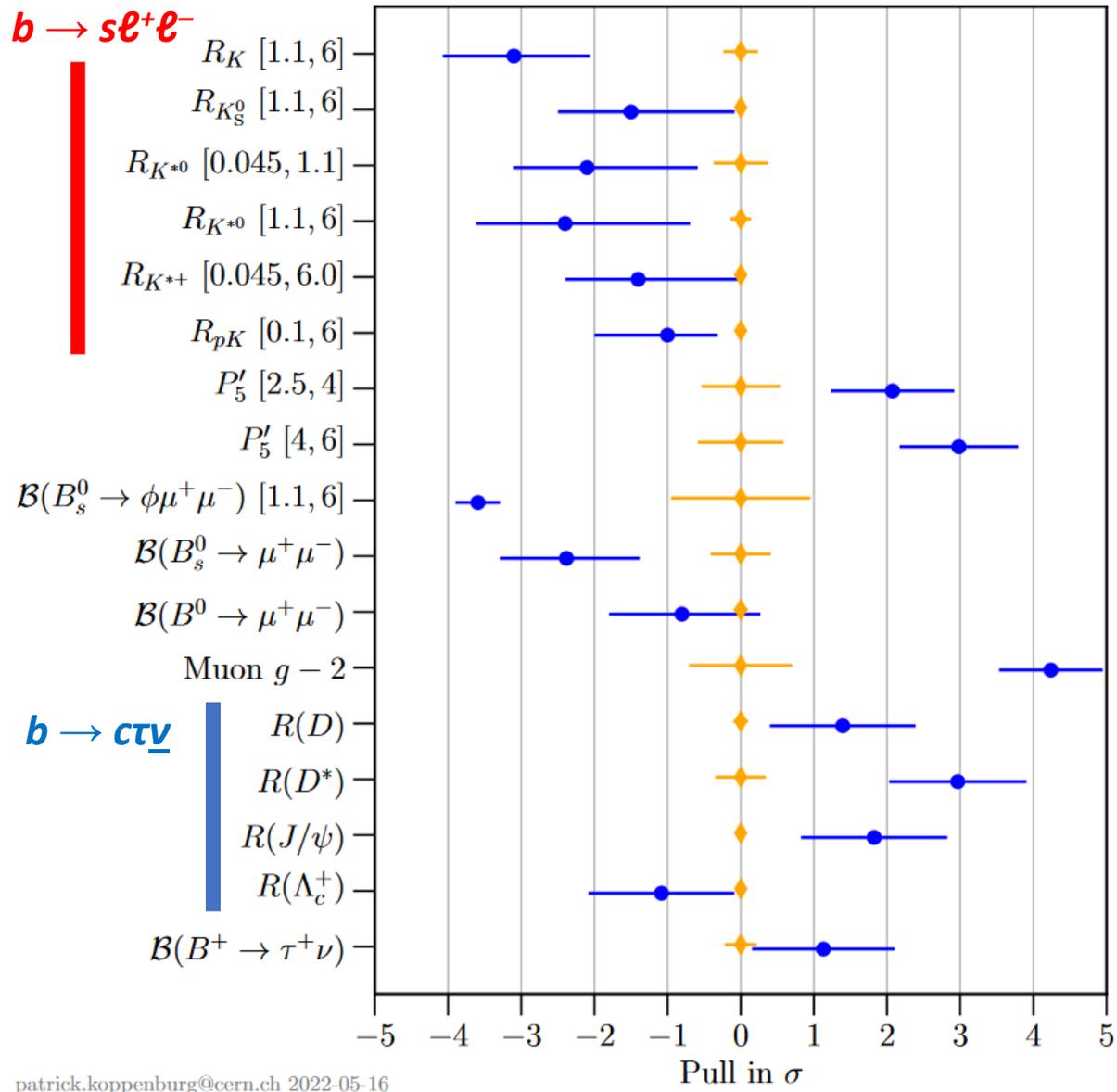


Era of precision measurements of $B_{(s)} \rightarrow \mu^+ \mu^-$ has started

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (2.69_{-0.35}^{+0.37}) \times 10^{-9}$$

$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 1.9 \times 10^{-10} \text{ @95 \% CL}$$

2.1 σ below SM
prediction (2D
compatibility)



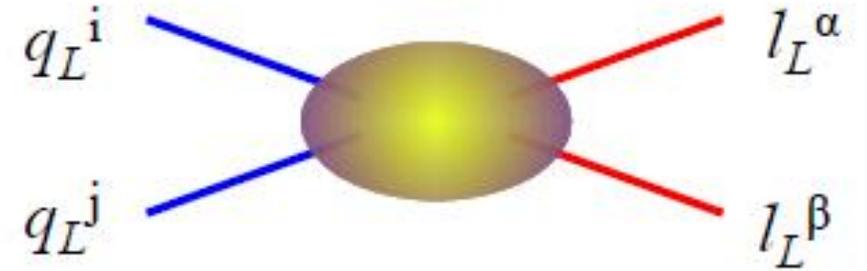
Что аномалии
говорят про
Новую физику?

Только сценарий, при котором реализуются обе аномалии

Что аномалии говорят про Новую физику?

Только сценарий, при котором реализуются обе аномалии

Какой оператор нужен?

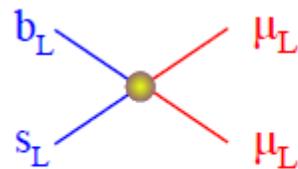


Bhattacharya *et al.* '14
 Alonso, Grinstein, Camalich '15
 Greljo, GI, Marzocca '15
 (+many others...)

- Аномалии проявляют себя через полулептонные операторы вида (кварк×лептон)
- Левое контактное взаимодействие ток-ток
- $b(3^{\text{rd}}), c(2^{\text{nd}}) \rightarrow \tau(3^{\text{rd}}) \nu_\tau(3^{\text{rd}})$ большой (конкурирует с древесными диаграммами СМ)
- $b(3^{\text{rd}}), s(2^{\text{nd}}) \rightarrow \mu(2^{\text{nd}}) \mu(2^{\text{nd}})$ небольшой (конкурирует с петлевыми диаграммами СМ)
- Подавление $O(10^{-1})$ на каждый лептон 2го поколения в конечном состоянии

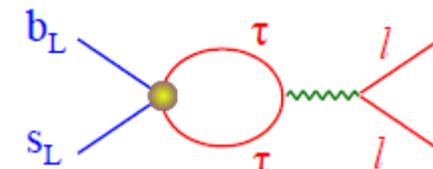
Связь с заряженными токами

$$\mathcal{O}_{LL}^{ij\alpha\beta} = (\bar{q}_L^i \gamma_\mu \ell_L^\alpha)(\bar{\ell}_L^\beta \gamma_\mu q_L^j)$$



$\sim 4 \times 10^{-5} G_{\text{Fermi}}$

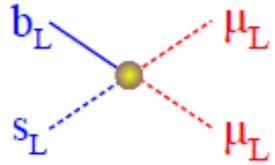
super-weak interaction!



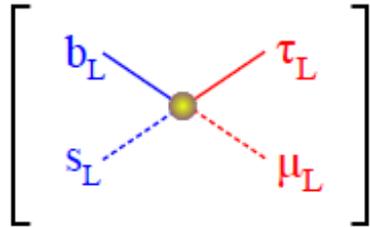
Bobeth & Haisch '11
 Crivellin *et al.* '18
 Alguero *et al.* '18

Что еще должно быть в таком подходе?

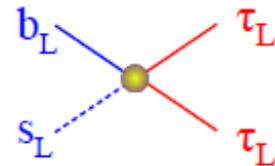
$$\frac{10^{-3}}{\Lambda^2}$$



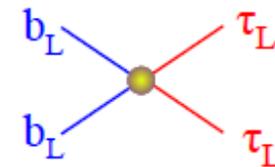
$$\frac{10^{-2}}{\Lambda^2}$$



$$\frac{10^{-1}}{\Lambda^2}$$



$$\frac{1}{\Lambda^2}$$



- Нарушение ЛУ в ди-лептонных распадах

- Пока не наблюдается

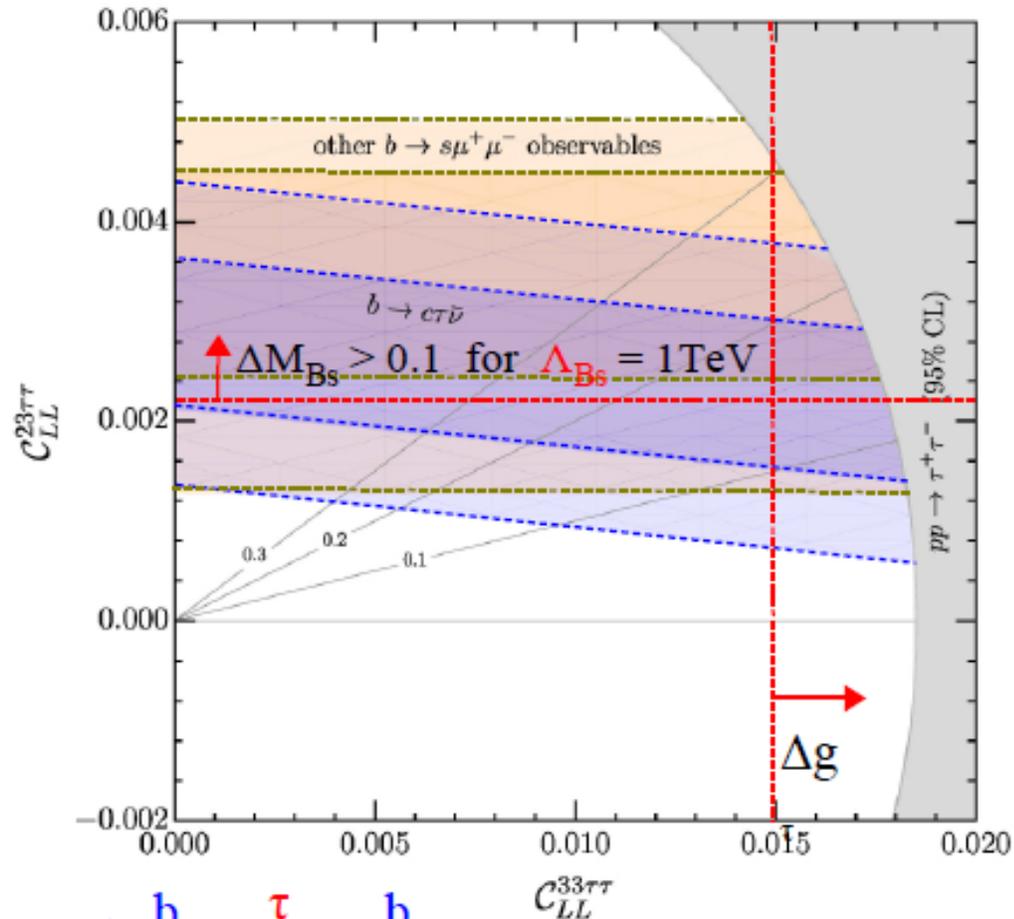
- $R(D) \setminus R(D^*)$

- $pp \rightarrow \tau\tau$ (прямой поиск на ATLAS / CMS)

$$\Lambda \approx 1.5 \text{ TeV}$$

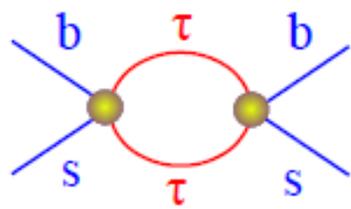
Пространства для манёвра не очень много

[CERN Lectures](#)

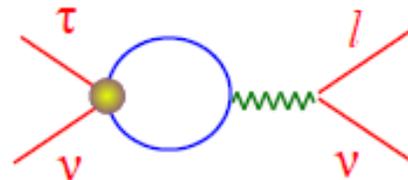


Что мы не видим?!

- * Four-quarks ($\Delta F=2$)
- * Four-leptons ($\tau \rightarrow \mu\nu\nu$)



$$\Delta M_{B_s} \sim (C_{LL}^{23\tau\tau})^2 \Lambda_{B_s}^2$$

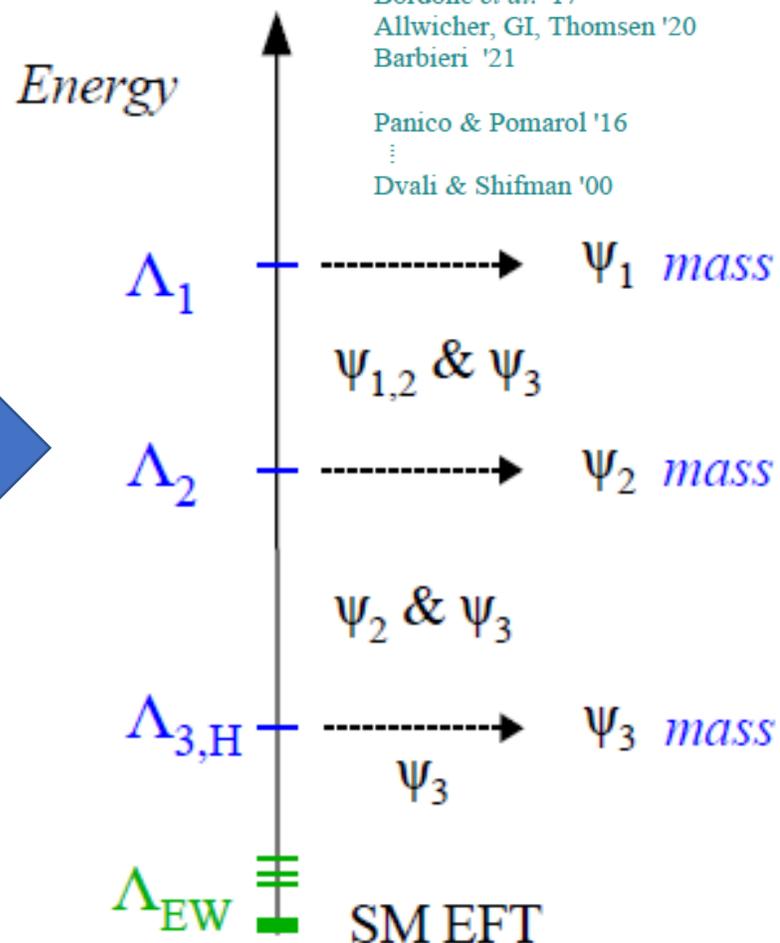
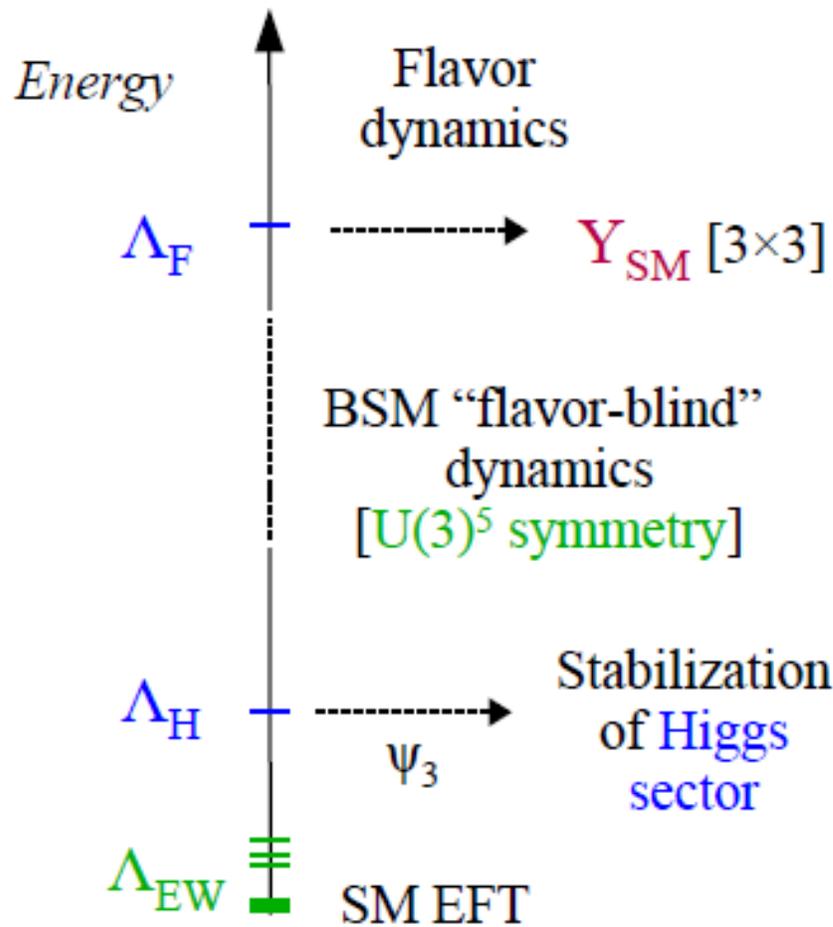


$$\Delta g_\tau \sim (C_{LL}^{33\tau\tau}) \log(\Lambda/m_\tau)$$

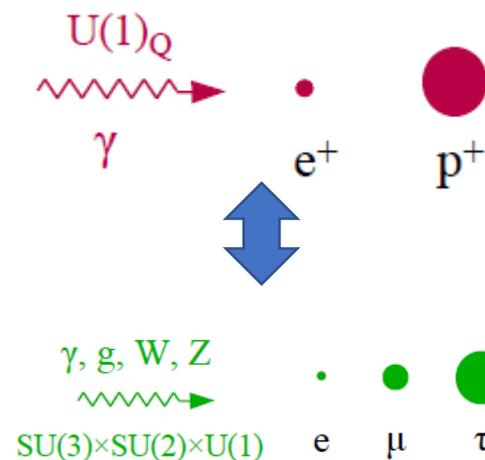
Энергетические шкалы Новой физики

Minimal Flavor Violation

Multi-scale picture @ origin of flavor



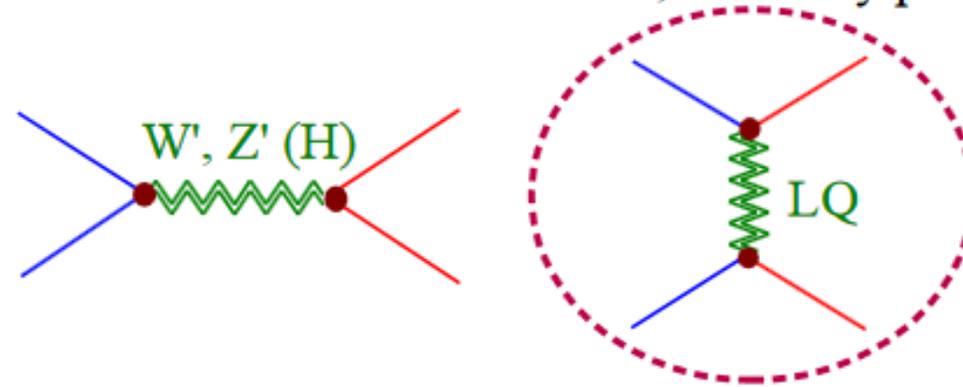
Аналогия



Разное поведение для фермионов 1, 2 и 3 поколений при высоких энергиях?! 49

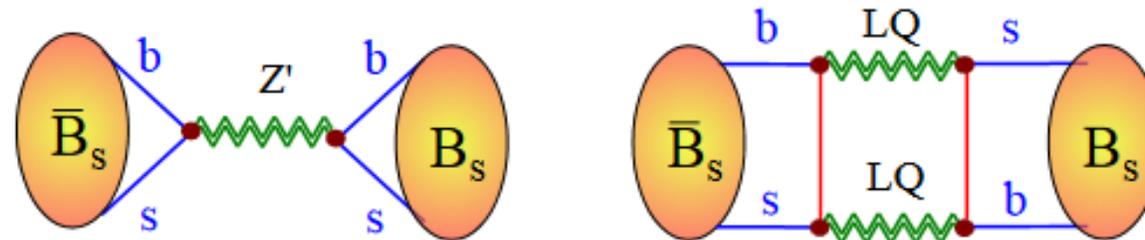
Частица-медиатор?

Which mediators can generate the effective operators required for by the EFT fit?
If we restrict the attention to tree-level mediators, not many possibilities...



LQ (both scalar and vectors) have two general strong advantages with respect to the other mediators:

I. $\Delta F=2$ &
 $\tau \rightarrow lv$



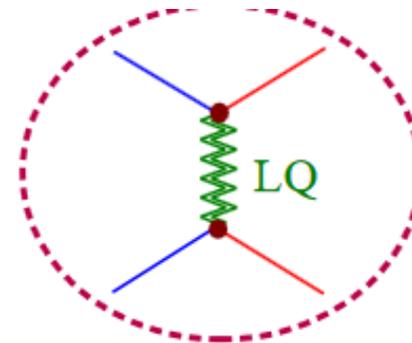
II. Direct searches:

3rd gen. LQ are also in better shape as far as direct searches are concerned (*contrary to Z'...*).

Лептокварки

Leptoquarks suffered of an (*undeserved*) “bad reputation” for two main reasons:

- Could mediate proton decay → **not a general feature of the LQ: it depends on the model...!** [*e.g. not the case in the Pati-Salam model*]
- Severe bounds from processes involving μ & e (such as $K_L \rightarrow \mu e$) → **avoided with non-trivial flavor structure** [*e.g. non-univ. interactions*]



On the other hand, they are a “natural” feature in many SM extensions → “Renaissance” of LQ models (*to explain the anomalies, but not only...*):

- **Scalar LQ as PNG**
Gripaios, '10
Gripaios, Nardecchia, Renner, '14
Marzocca '18
- **Scalar LQ from GUTs & SUSY**
Hiller & Schmaltz, '14; Becirevic *et al.* '16, Fajfer *et al.* '15-'17; Dorsner *et al.* '17; Crivellin *et al.* '17; Altmannshofer *et al.* '17 Trifinopoulos '18, Becirevic *et al.* '18 + ...
- **Vector LQ as techni-fermion resonances**
Barbieri *et al.* '15; Buttazzo *et al.* '16, Barbieri, Murphy, Senia, '17 + ...
- **LQ as Kaluza-Klein excit.**
Megias, Quiros, Salas '17
Megias, Panico, Pujolas, Quiros '17
Blanke, Crivellin, '18 + ...
- **Vector LQ in GUT gauge models**
Assad *et al.* '17
Di Luzio *et al.* '17
Bordone *et al.* '17
Heeck & Teresi '18 + ...

Which LQ explains which anomaly?

	Model	$R_{K^{(*)}}$	$R_{D^{(*)}}$	$R_{K^{(*)}}$ & $R_{D^{(*)}}$
Scalars	$S_1 = (3, 1)_{-1/3}$	✗	✓	✗
	$R_2 = (3, 2)_{7/6}$	✗	✓	✗
	$\tilde{R}_2 = (3, 2)_{1/6}$	✗	✗	✗
	$S_3 = (3, 3)_{-1/3}$	✓	✗	✗
Vector	$U_1 = (3, 1)_{2/3}$	✓	✓	✓
	$U_3 = (3, 3)_{2/3}$	✓	✗	✗

Angelescu, Becirevic, DAF, Sumensari [1808.08179]

Только определенные виды лептокварков способны одновременно описать обе ЛУ-аномалии (триплет по цвету, синглет по слабому изоспину, слабый гиперзаряд 2/3)

Заключение

- Для понимания структуры СМ необходимо решить проблему ароматов (объяснить иерархию юкавовских констант)
- Косвенный метод поиска НФ хорошо зарекомендовал себя в прошлом
- Экспериментальные указания на два типа аномалий, связанных с нарушением лептонной универсальности
- Если рассматривать эти аномалии вместе (а также факт отсутствия расхождений с предсказаниями СМ для других наблюдаемых), то они накладывают жесткие ограничения на тип НФ:
 - Конкретные типы операторов
 - Multiscale подход
 - Лептокварки определенного типа
- Такой подход пока не входит в противоречия с данными, полученными при низких и высоких энергиях, но шкала НФ находится достаточно близко!