

Проверка предсказаний Стандартной Модели в эксперименте LHCb

15 марта 2016 г.

Алексей Дзюба / ФГБУ ПИЯФ НИЦ КИ



О чем я хочу рассказать:

Цель доклада: Показать как (непрямые) измерения эксперимента LHCb соотносятся с предсказаниями Стандартной модели физики элементарных частиц (СМ)

- Стандартная модель (СМ) и Новая физика:
 - Трудности СМ.
 - Масштабы Новой физики (НФ).
 - Модели НФ с минимальным нарушением симметрии ароматов.
 - Непрямые измерения.
- Эксперимент LHCb (детектор, набор и анализ данных *etc.*)
- Самые интригующие результаты LHCb
 - Редкие распады
 - Результаты расходящиеся с предсказаниями СМ
 - Изучение лептонной универсальности
 - Измерение элементов матрицы кваркового смешивания (ККМ-матрицы)
- Заключение и взгляд в будущее (на что можно будет рассчитывать после апгрейда?)

Доклады ЛНСб на Семинарах в ЦЕРНе

- 30 Jun 2015 Brian Hamilton**, "Measurement of the semitauonic decay $B^0 \rightarrow D^* \tau \nu$ at LHCb"
<https://cds.cern.ch>
- 26 May 2015 Victor Coco**, "Observation of top-quark production in the forward region with LHCb"
<https://cds.cern.ch/record/2018487?ln=en>
- 24 Mar 2015 Patrick Owen**, "First determination of V_{ub} using the exclusive decay $\Lambda_b \rightarrow p \mu \nu$ with the LHCb detector"
<https://cds.cern.ch/record/2004374?ln=en>
- 10 Feb 2015 Marco Pappagallo**, "Latest results on b-hadron spectroscopy at LHCb"
<https://cds.cern.ch/record/1988103?ln=en>
- 18 Nov 2014 Sevda Esen**, "Measurement of the B_s mixing phase at LHCb"
<https://cds.cern.ch/record/1971320?ln=en>
- 30 Sep 2014 Mika Anton Vesterinen**, "Measurement of semileptonic asymmetries at LHCb"
<https://cds.cern.ch/record/1951445?ln=en>
- 12 Aug 2014 Manuel Tobias Schiller**, "Gamma measurements in $B_s \rightarrow D_s K$ and other tree-level decays"
<https://cds.cern.ch/record/1749146?ln=en>
- 3 Jun 2014 Greig Cowan**, "Confirmation of the Z(4430)- resonance and other exotic meson results from the LHCb experiment"
<https://cds.cern.ch/record/1706201?ln=en>
- 18 Mar 2014 Albert Puig Navarro**, "Observation of photon polarization in the $b \rightarrow s \gamma$ transition at LHCb"
<https://cds.cern.ch/record/1706201?ln=en>

Стандартная Модель (СМ)

Теория, которая прекрасно работает на масштабе энергий < 1 ТэВ

(нет сильных конфликтов с экспериментами, несколько измерений всё же расходятся с СМ)

Новая физика:

1) Нейтринный сектор

(массы, осцилляции нейтрино)

2) Иерархия масс фермионов

3) Проблема радиационных поправок к m_H

- тонкая подстройка

- калибровочная пустыня между M_{EW} и M_{GUT}

4) Астрофизические наблюдения

- темная материя

- барионная асимметрия Вселенной

Суперсимметрия?, Неминимальный хиггсовский механизм?

Элементарные частицы

Масса	Заряд	Спин	Частица	Масса	Заряд	Спин	Частица	Масса	Заряд	Спин	Частица	Масса	Заряд	Спин	Частица						
$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$2/3$	$1/2$	u	up	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	c	charm	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$	$2/3$	t	top	0	0	g	gluon	$\approx 126 \text{ GeV}/c^2$	0	H	Higgs boson	
$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	$1/2$	d	down	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$-1/3$	s	strange	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$	$-1/3$	b	bottom	0	0	γ	photon					
$0.511 \text{ MeV}/c^2$	-1	$1/2$	e	electron	$105.7 \text{ MeV}/c^2$	-1	μ	muon	$1.777 \text{ GeV}/c^2$	-1	τ	tau	0	0	Z	Z boson					
$< 2.2 \text{ eV}/c^2$	0	$1/2$	ν_e	electron neutrino	$< 0.17 \text{ MeV}/c^2$	0	ν_μ	muon neutrino	$< 15.5 \text{ MeV}/c^2$	0	ν_τ	tau neutrino	$80.4 \text{ GeV}/c^2$	± 1	1	W	W boson				

КВАРКИ

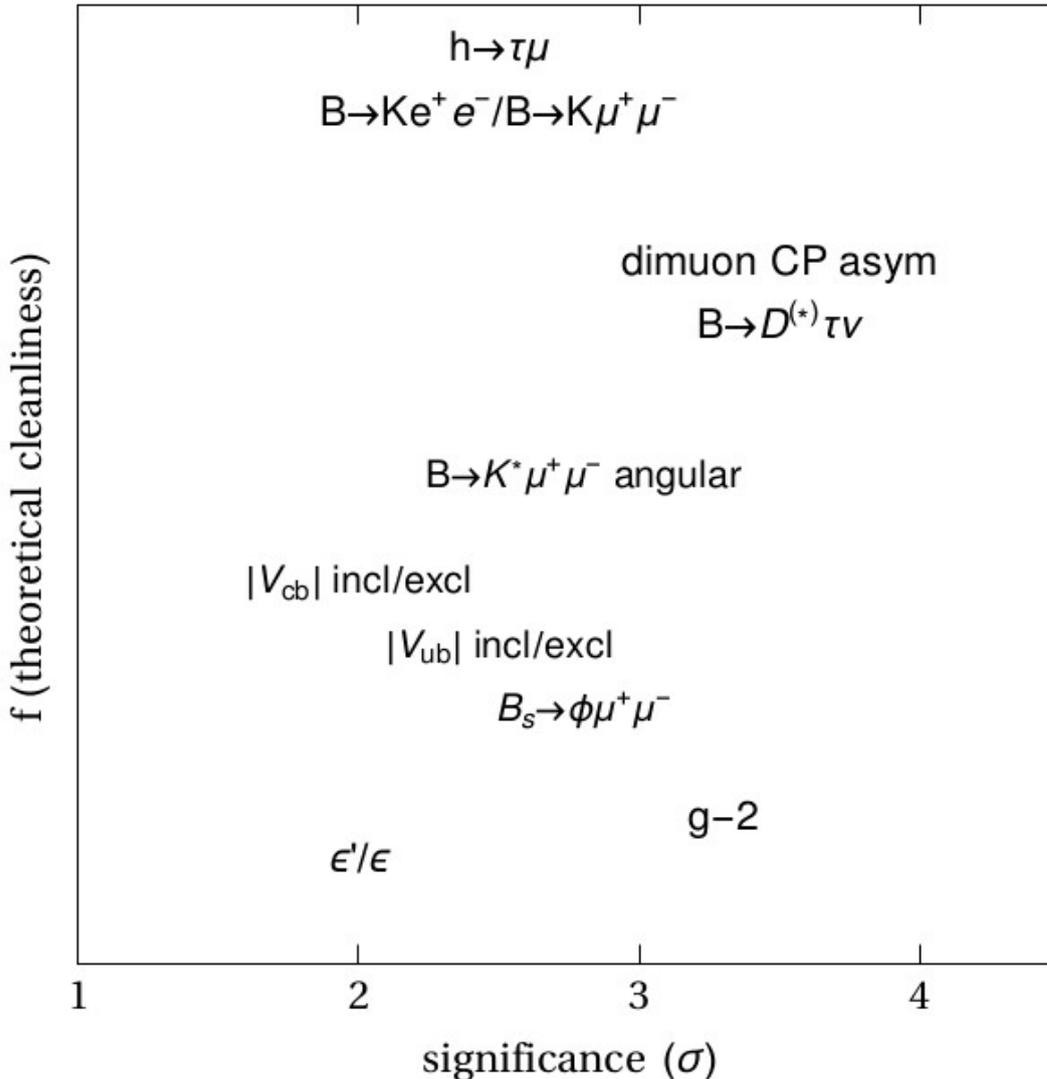
ЛЕПТОНЫ

БОЗОНЫ – переносчики взаимодействия

Адроны – частицы, участвующие в сильном взаимодействии

Непрямые измерения

Zoltan Ligetti, Lepton-Photon 2015:



– НФ начинает проявляться еще до того как её частицы могут быть зарегистрированы напрямую:

Нейтральные токи \rightarrow Z-бозоны

CP-нарушение \rightarrow 3-е поколение кварков

– На сегодняшний день около 10 отклонений

– 5 из них результат LHCb

НФ и симметрия ароматов; Коэффициенты Вильсона

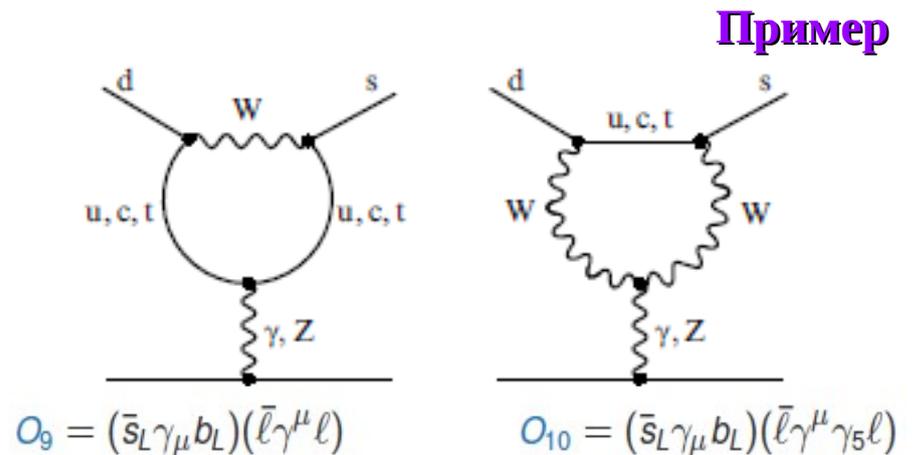
- Вычисление КХД-поправок критически необходимо для рассмотрения $\Delta F=1$ процессов (Вычисления C_i в рамках СМ, высокая предсказательная сила)
- \mathcal{H}_{eff} – эффективный способтеста различных моделей НФ, т.к. C_i зависит от её ароматовой структуры.
- **Minimal Flavour Violation (MFV)** подход: НФ имеет такую же ароматовую структуру как СМ

=> такие же эффекты СР-нарушения как в СМ, соотношения типа:

$$\frac{\text{BR}(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-)}{\text{BR}(B_d \rightarrow \mu^+ \mu^-)} = \frac{\tau_{B_s} f_{B_s}^2 m_{B_s} |V_{ts}|^2}{\tau_{B_d} f_{B_d}^2 m_{B_d} |V_{td}|^2}$$

- $\Delta F=1$ операторы в СМ и MFV:

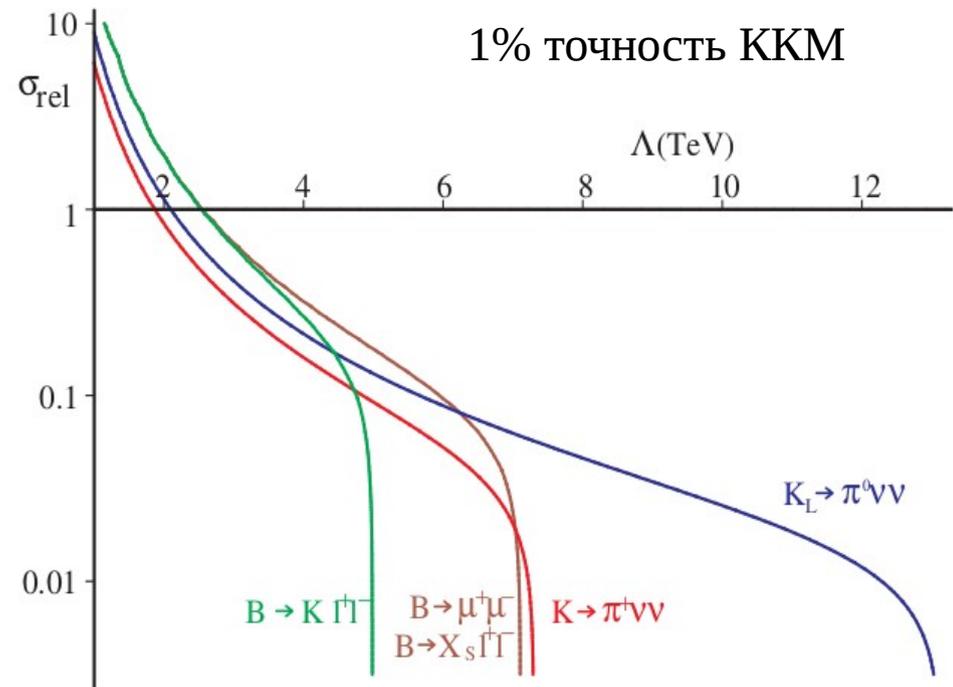
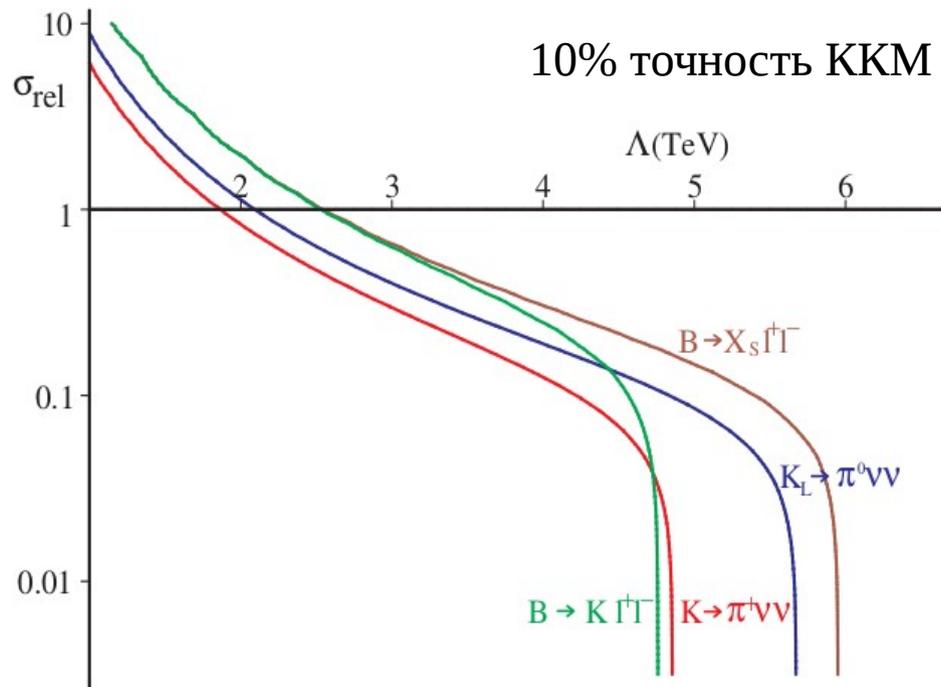
$$\mathcal{H}_{\text{eff}} = -\frac{4 G_F}{\sqrt{2}} \frac{e^2}{16\pi^2} V_{tb} V_{ts}^* \sum_i C_i O_i + \text{h.c.}$$



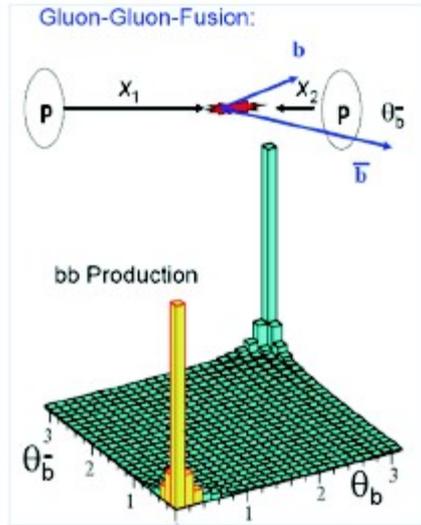
- Если НФ содержит дополнительные источники нарушения симметрии ароматов, то C_i становятся комплексными и могут появиться дополнительные источники СР-нарушения.

MFV-подход и масштаб энергии НФ

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{\text{SM}} + \sum_i \frac{c_i}{\Lambda^{D-4}} \mathcal{O}_i^{(D)}$$

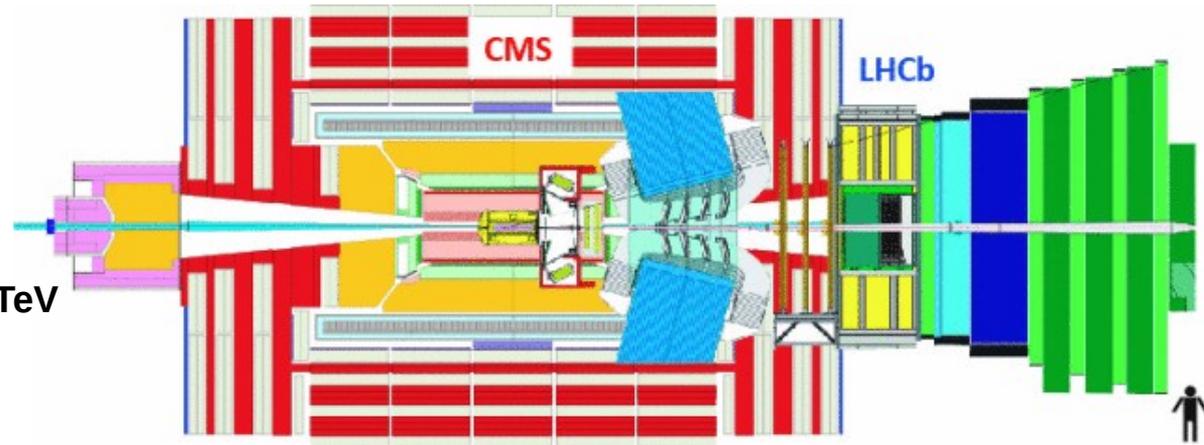


Рождение b - и c -кварков

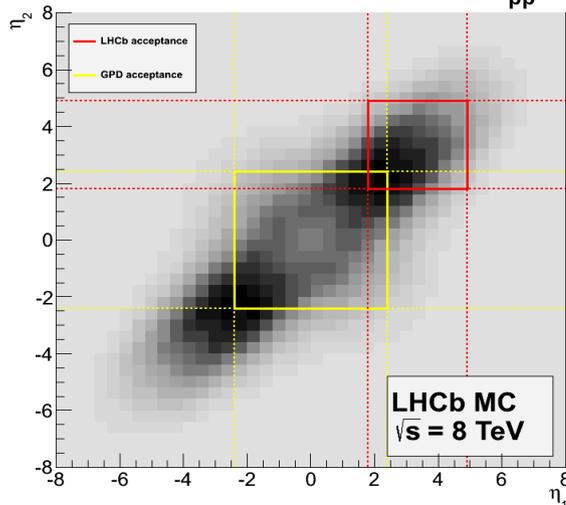


- **LHCb: спектрометр частиц, вылетающих вперед** $2 < \eta < 5$

(ATLAS & CMS: $|\eta| < 2.5$)



$\sqrt{s}_{pp} = 8\text{TeV}$



- В акцептансе LHCb (pp -столкновения $\sqrt{s} = 7\text{TeV}$)

$$\sigma(b\bar{b}) = 75.3 \pm 5.4 \pm 13.0 \mu\text{b}$$

Phys.Lett.B694 (2010) 209-216

$$\sigma(c\bar{c}) = 1419 \pm 12 \pm 116 \mu\text{b} \sim 20 \times \sigma(b\bar{b})$$

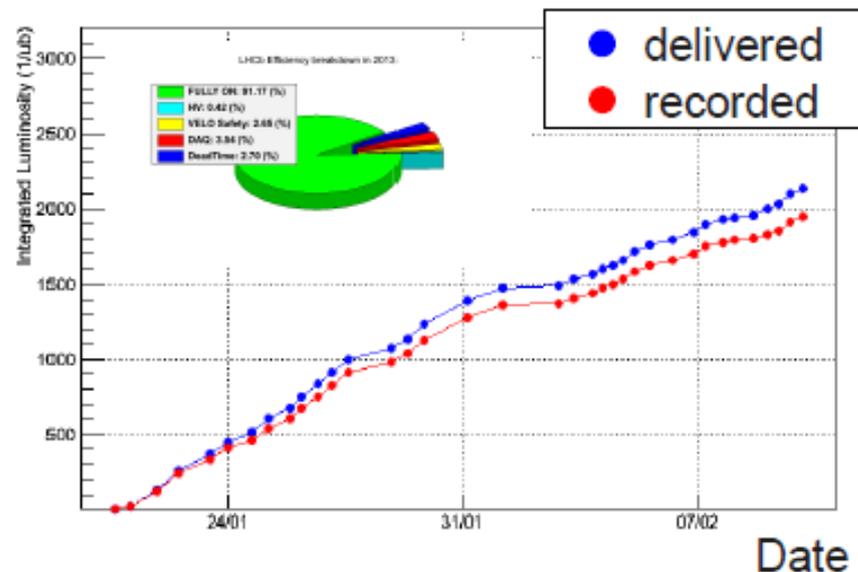
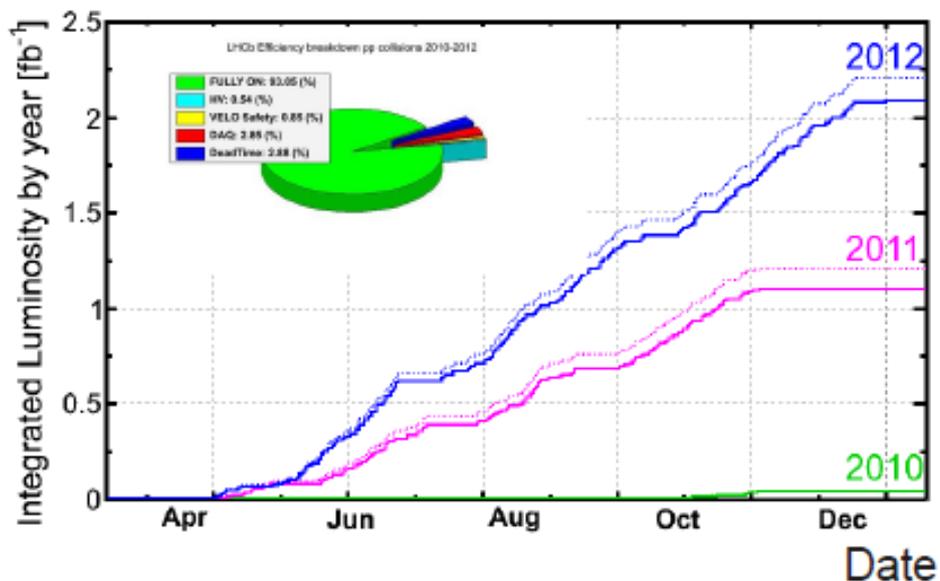
Largest charm samples in the world

Nucl.Phys.B871 (2013) 1

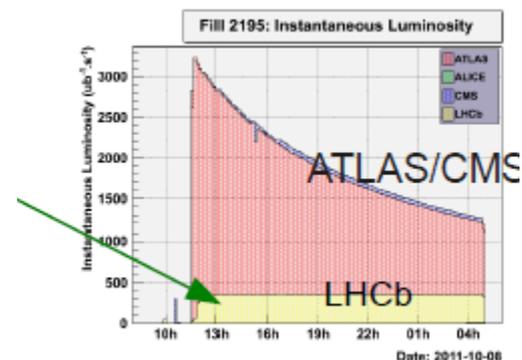
Данные 2010-12гг.

pp-столкновения at $\sqrt{s} = 7 \text{ \& } 8 \text{ TeV}$ (2011-12)

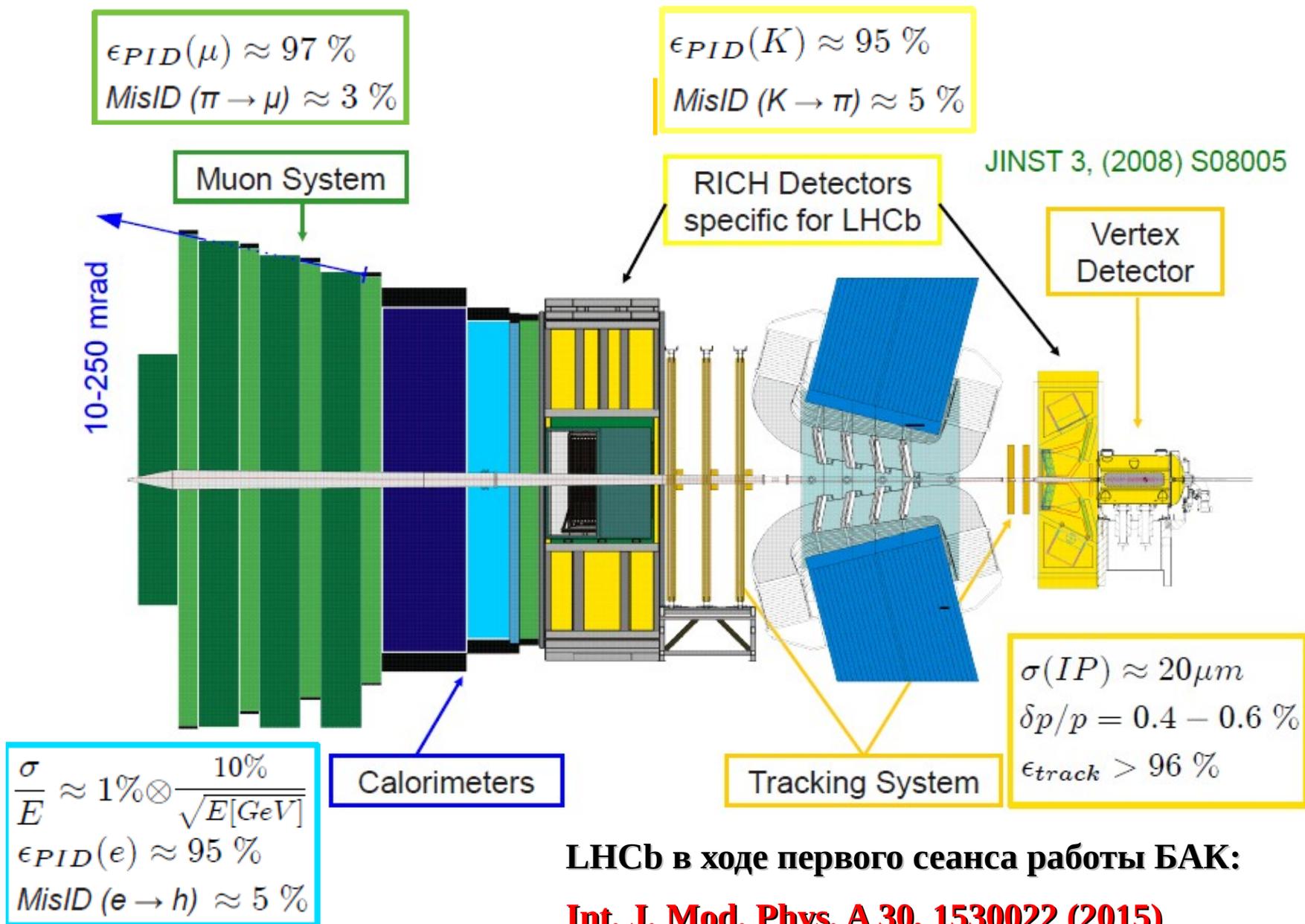
pPb-столкновения at $\sqrt{s}_{NN} = 5 \text{ TeV}$ in 2013



- Высокая эффективность записи
- 50 ns между столкновениями
(25 ns в 2015 году)
- Постоянная светимость $\sim 4 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
(в два раза выше номинальной)
- 1.7 первичных вершин на пересечение пучков



Экспериментальная установка



LHCb в ходе первого сеанса работы БАК:

Int. J. Mod. Phys. A 30, 1530022 (2015)

Анализ данных в LHCb

Эффективный триггер (L0/HLT1/HLT2):

40 MHz → 5 kHz

Таггинг ароматов

Отбо событий

Кинематическая и топологическая инф.
(p_T , p , IP, vertex and track quality)

Идентификация сорта частиц

“Каты”, мультвариантный анализ
BDT, Neurobays, etc.

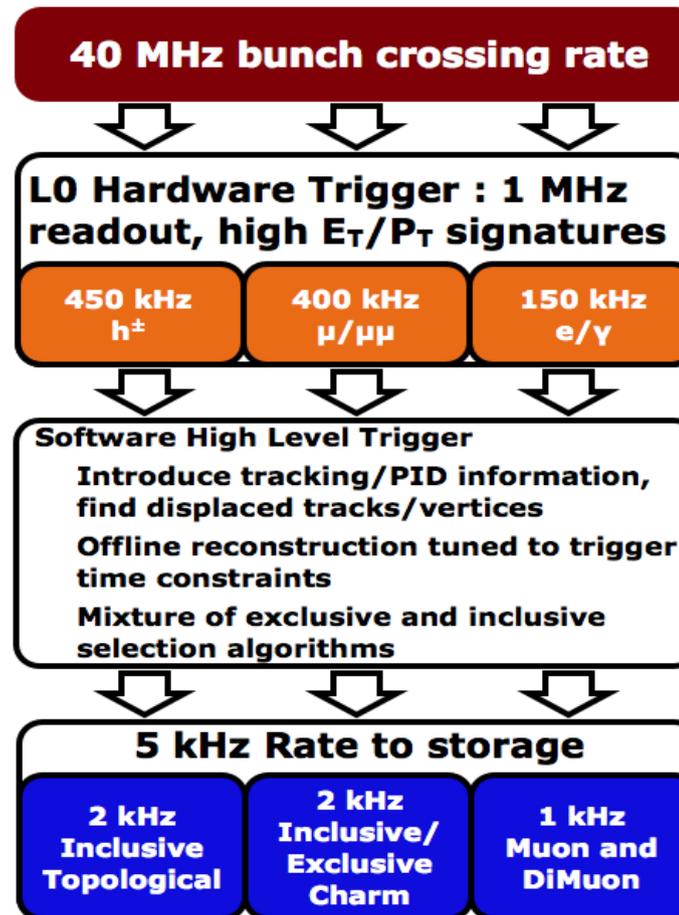
Оптимизация критериев отбора
Используя Монте-Карло
Небольшие наборы данных

Угловый анализ++

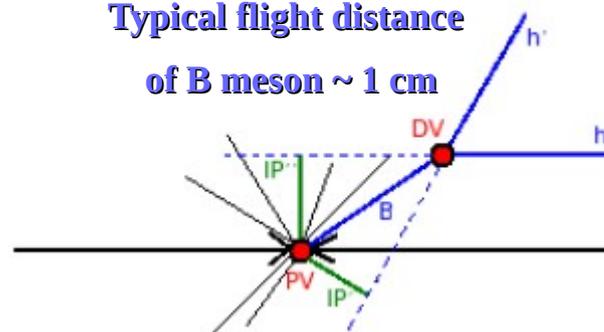
Систематика

Множество проверок!

Триггер



Typical flight distance
of B meson ~ 1 cm



Разделение SV/PV:

PV = Первичная вершина

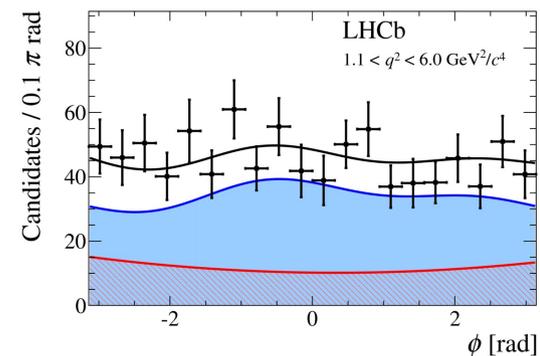
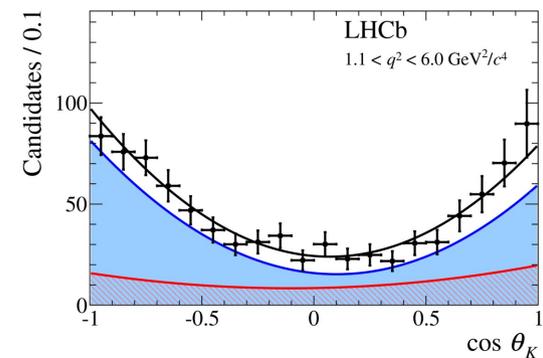
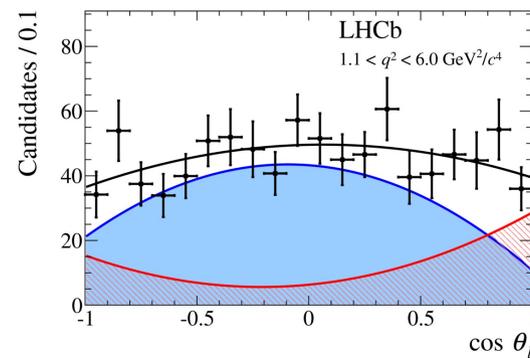
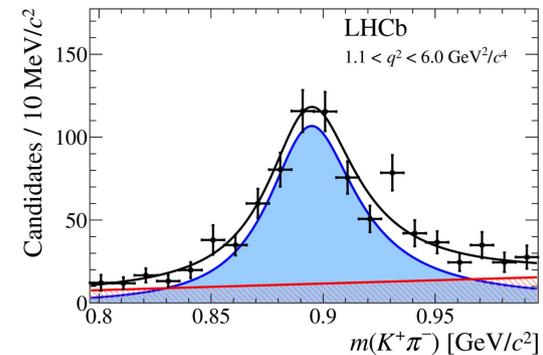
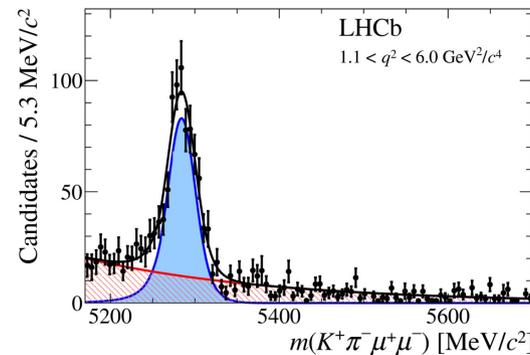
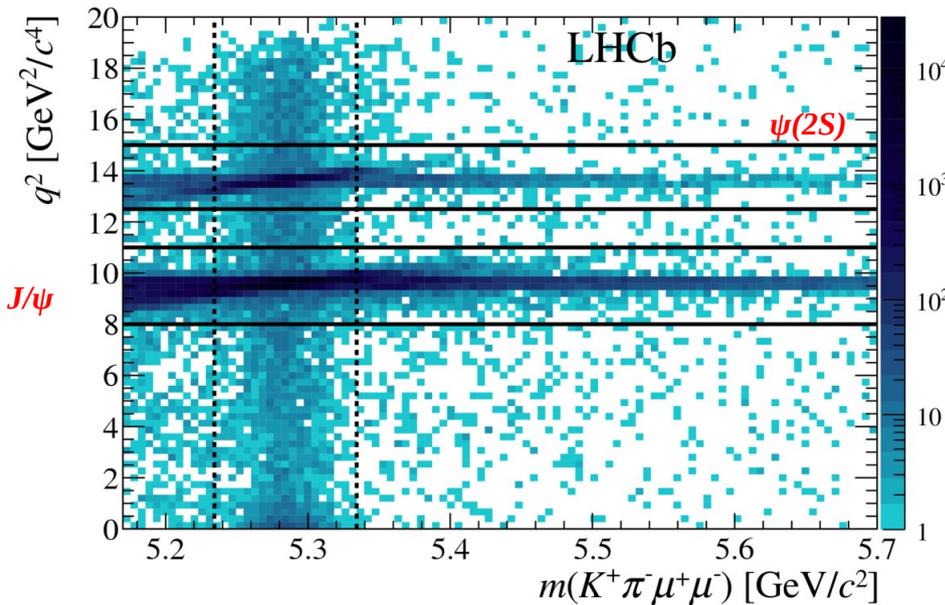
DV = Дочерняя вершина

(вторичная вершина SV)

Анализ распада $B^0 \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$

Результат для $1 < q^2 < 6 \text{ GeV}^2/c^4$

B^0



- “Мягкие” начальные критерии отбора
- Тренировка BDT-метода на $B \rightarrow K^* J/\psi$
- Оценка фона из сомбытий с массой $> m(B)$
- Переменные не скоррелированы с углами и $q^2 = m^2(\mu\mu)$
- Набор для BDT: время жизни, направление вылета, качество треков и восстановления вершин, p_T , идентификационные переменные

Амплитудный анализ $B^0 \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$

$$\frac{1}{d(\Gamma + \bar{\Gamma})/dq^2} \frac{d^3(\Gamma + \bar{\Gamma})}{d\vec{\Omega}} \Big|_P = \frac{9}{32\pi} \left[\frac{3}{4}(1 - F_L) \sin^2 \theta_K + F_L \cos^2 \theta_K \right. \\ \left. + \frac{1}{4}(1 - F_L) \sin^2 \theta_K \cos 2\theta_l \right. \\ \left. - F_L \cos^2 \theta_K \cos 2\theta_l + S_3 \sin^2 \theta_K \sin^2 \theta_l \cos 2\phi \right. \\ \left. + S_4 \sin 2\theta_K \sin 2\theta_l \cos \phi + S_5 \sin 2\theta_K \sin \theta_l \cos \phi \right. \\ \left. + \frac{4}{3} A_{FB} \sin^2 \theta_K \cos \theta_l + S_7 \sin 2\theta_K \sin \theta_l \sin \phi \right. \\ \left. + S_8 \sin 2\theta_K \sin 2\theta_l \sin \phi + S_9 \sin^2 \theta_K \sin^2 \theta_l \sin 2\phi \right]$$

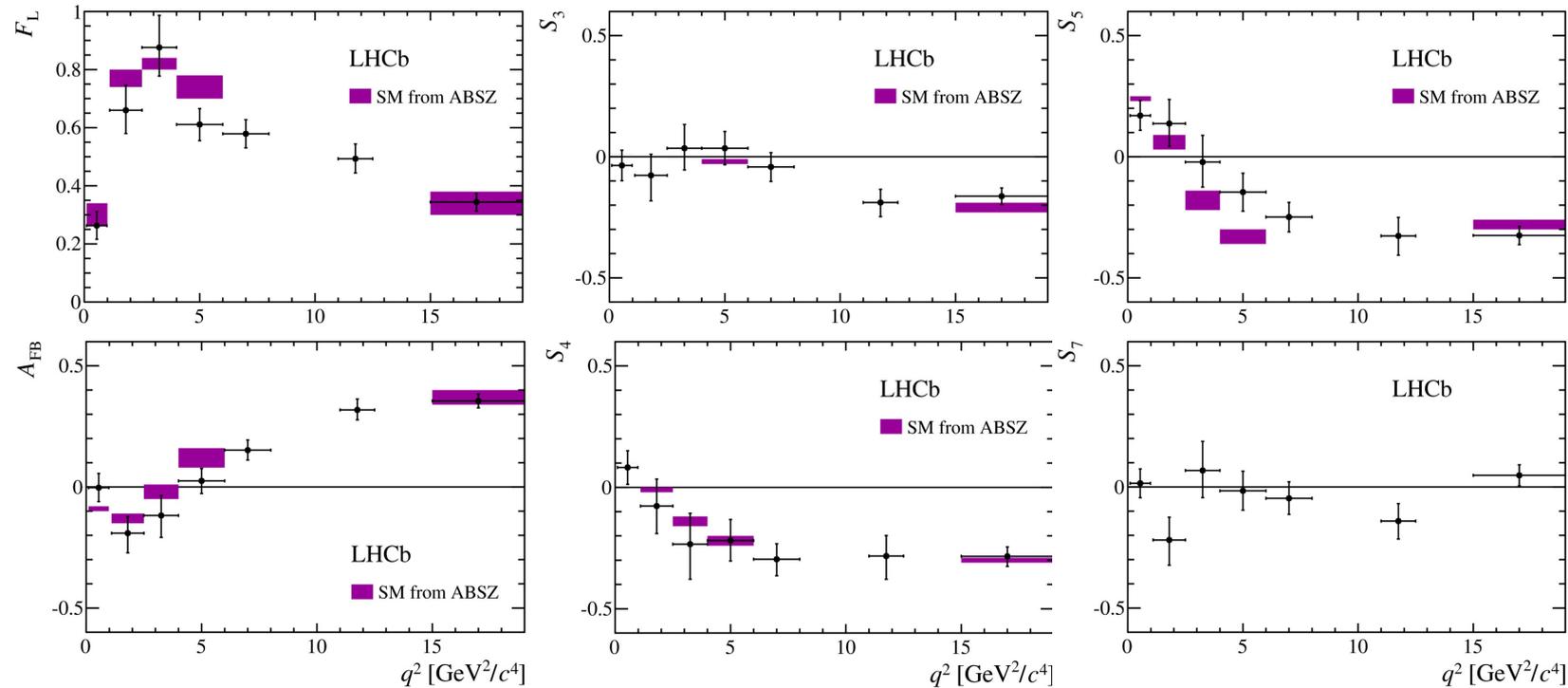
– три угла + q^2 для описания данных

– F_L , A_{FB} & S_i билинейные комбинации амплитуд

(КТП на малых расстояниях + адронные форм-факторы)

– Точные теоретические предсказания

Altmannhofer, Bharucha, Straub, Zwicky [1503.05534][1411.3161]



Другие комбинации амплитуд также представлены в работе LHCb.

Амплитудный анализ $B^0 \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$

– $P'_{4,5} = S_{4,5} \cdot [F_L \cdot (1-F_L)]^{-1/2}$

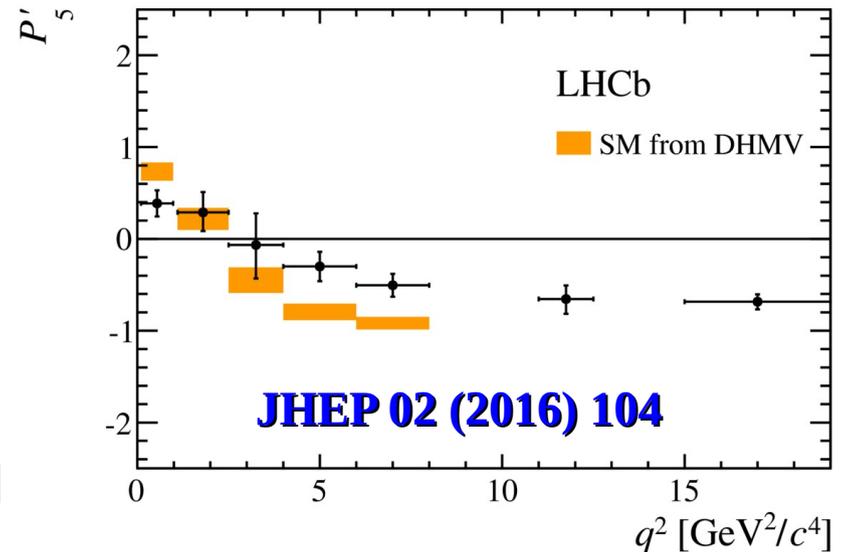
– Меньшая зависимость от форм-факторов

– Согласуется с [PRL 111, 191802](#)

– 2.9σ отклонение для [4,6] & [6,8] GeV^2/c^4

– 3.7σ локальная значимость

■ SM from Descotes-Genon, Hofer, Matias, Virto [1407.8526]



Объяснение теории для $B^0 \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$

– Совместный анализ процессов: $b \rightarrow sy$ & $b \rightarrow sll$

– $C_9^{NP} = -1.5$, 4.5σ отклонение от SM

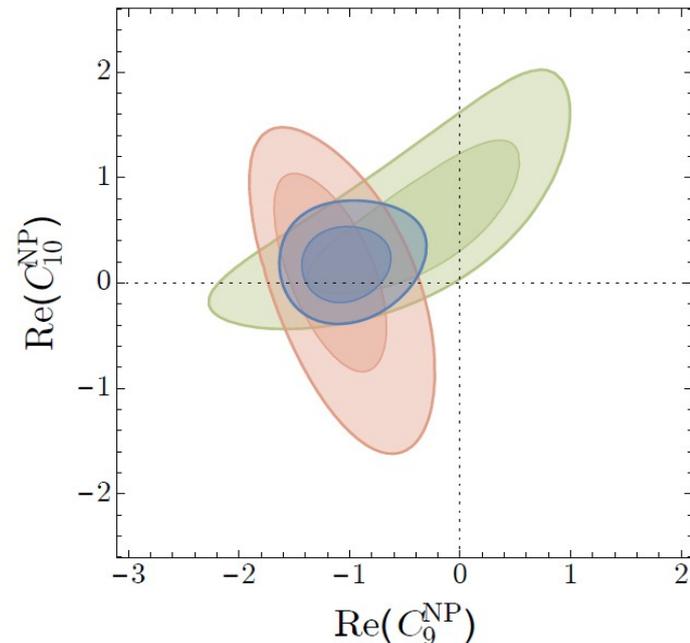
– Matias, Descotes-Genon, Vitro: [PRD 88, 074002](#)

– Straub, Altmannshofer: [EPJC 73, 2646](#),

– [arXiv:1503.06199](#)

– 3σ отклонение, Необходимо изменение C_9

– Пример модели: Z' , изменяющий аромат



arXiv:1503.06199

Test of lepton flavour universality

– Предсказание Стандартной Модели

$$R_K = \frac{\int_{q^2=1 \text{ GeV}^2/c^4}^{q^2=6 \text{ GeV}^2/c^4} (dB[B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-]/dq^2) dq^2}{\int_{q^2=1 \text{ GeV}^2/c^4}^{q^2=6 \text{ GeV}^2/c^4} (dB[B^+ \rightarrow K^+ e^+ e^-]/dq^2) dq^2} = 1 \pm \mathcal{O}(10^{-3})$$

– Важность учета миграции событий (Монте-Карло)

– Тормозное излучение

– Двойное отношение к $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$ для уменьшения

систематики, – 3/fb результат:

$$R_K = 0.745^{+0.090}_{-0.074} (stat.)^{+0.036}_{-0.036} (syst.)$$

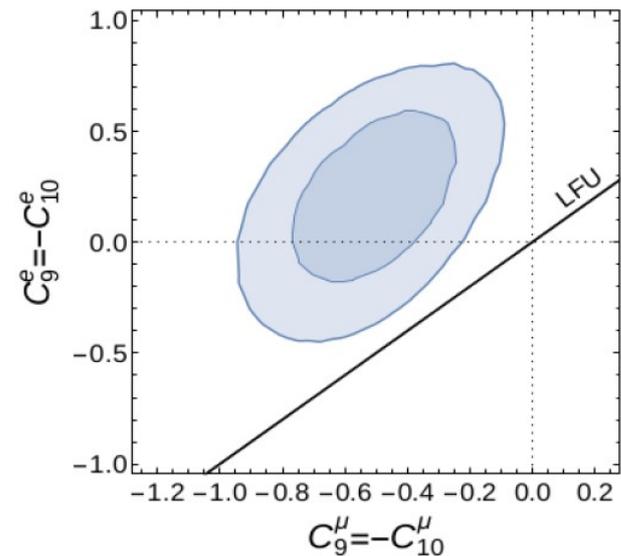
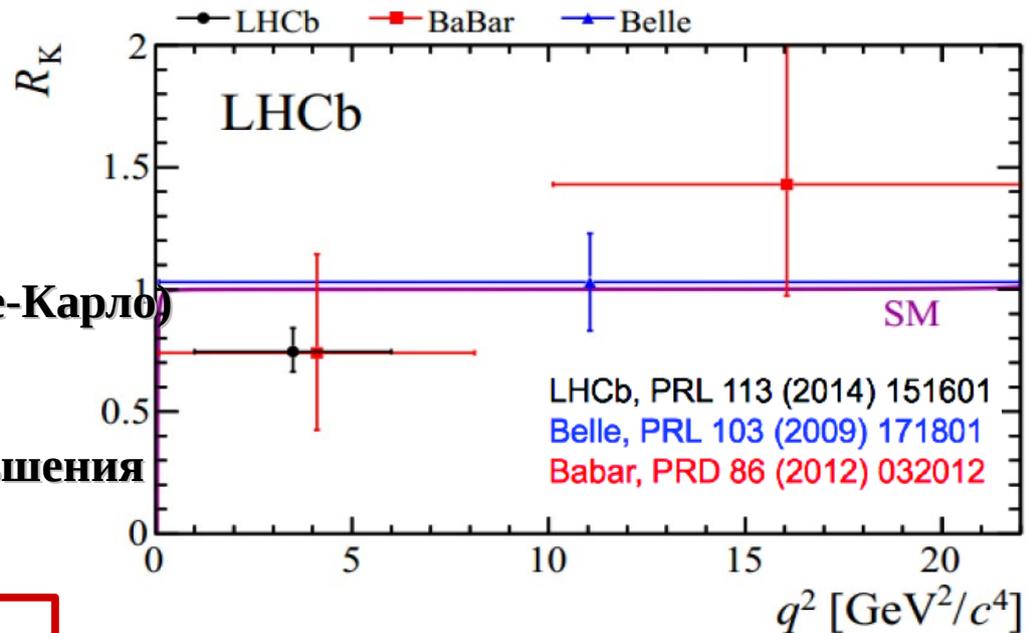
– Отклонение от предсказаний СМ на уровне 2.9σ

– КХД не может это объяснить

– а, например Z' , может

– Ghosh et al. arXiv:1408.4097

– Такое объяснение согласуется с аномалией в P_5'



Распад $B_s^0 \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$

– Процедура похожа на анализ

$$B^0 \rightarrow K^* \mu \mu$$

– Нечувствительно к P'_5

– Амплитудный анализ

– SM: [arXiv:1411.3161](#), [1503.05534](#)

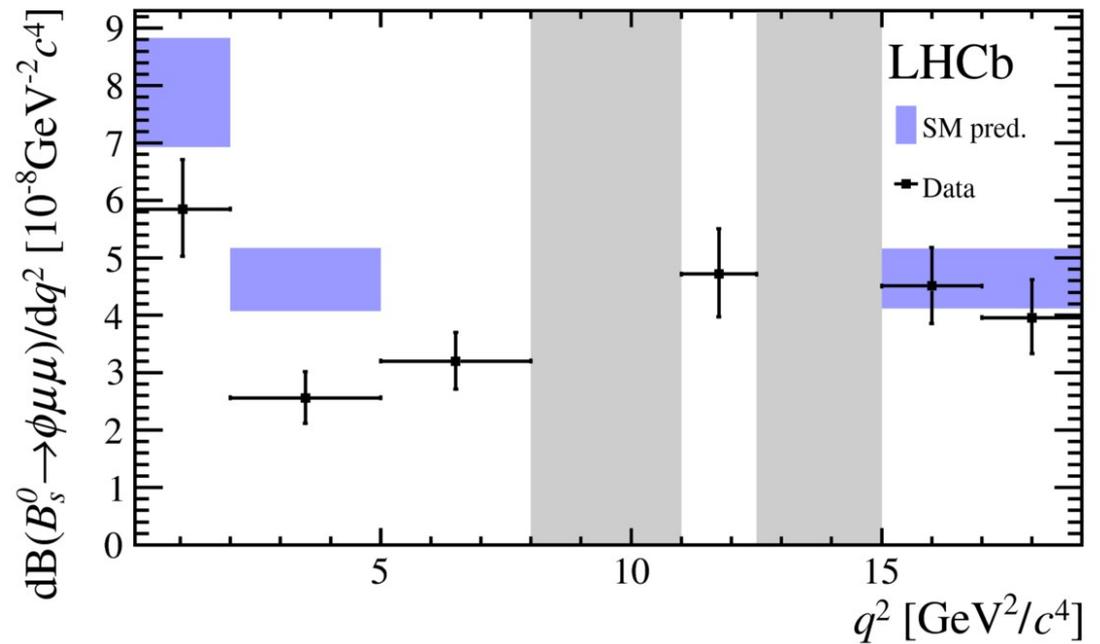
– Аномалия наблюдалась и ранее на 1fb^{-1} наборе данных [JHEP 07](#)

[\(2013\) 084](#)

– Экстраполяция на весь ФО (q^2)

(используя [PRD 66, 034002](#) &

[PRD 71, 014029](#))

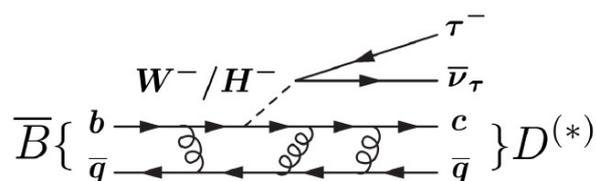


[JHEP 09 \(2015\) 179](#)

$$\frac{\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \phi \mu \mu)}{\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \phi J/\psi)} = (7.40^{+0.42}_{-0.40} \pm 0.20 \pm 0.21) \times 10^{-4}$$

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \phi \mu \mu) = (7.97^{+0.45}_{-0.43} \pm 0.22 \pm 0.23 \pm 0.60) \times 10^{-7}$$

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 .

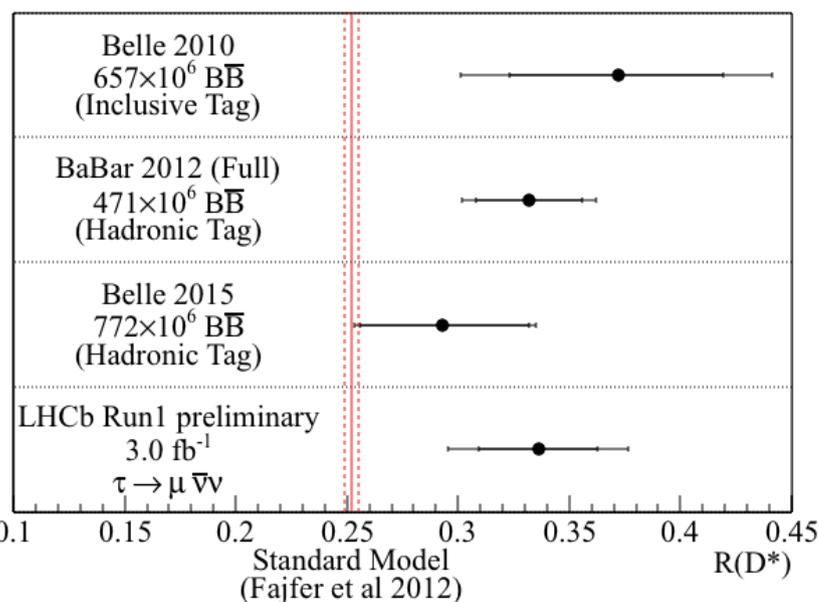
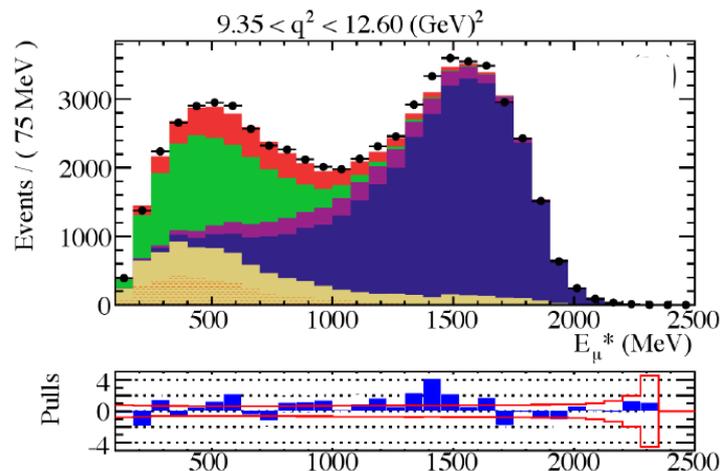
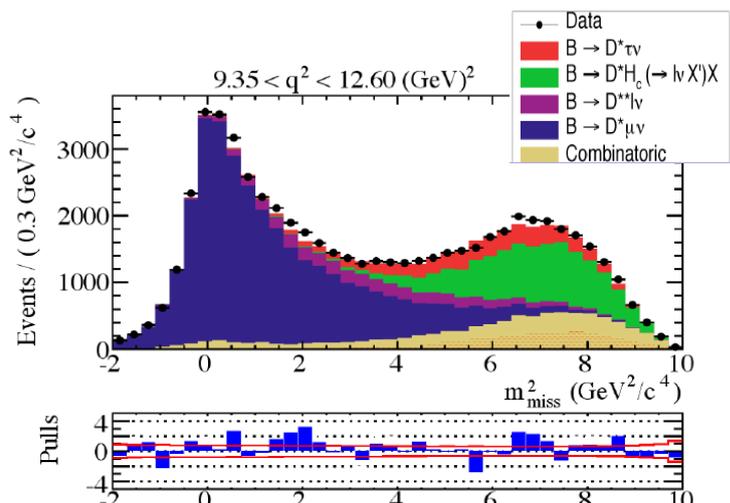
– Сигнал не пикуются, высокий фон

– Формы спектров и МК-моделирования, проверено на данных

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

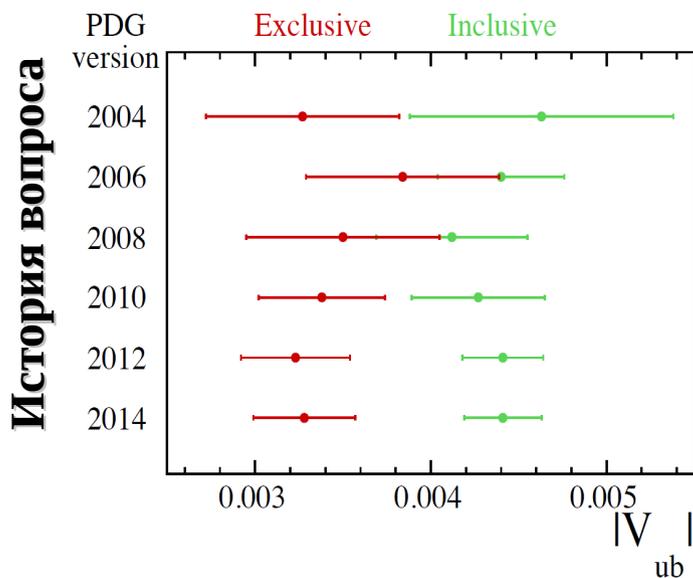
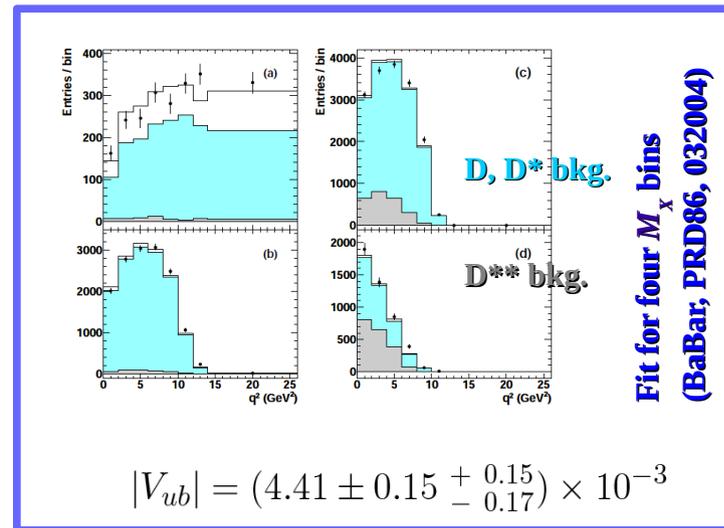
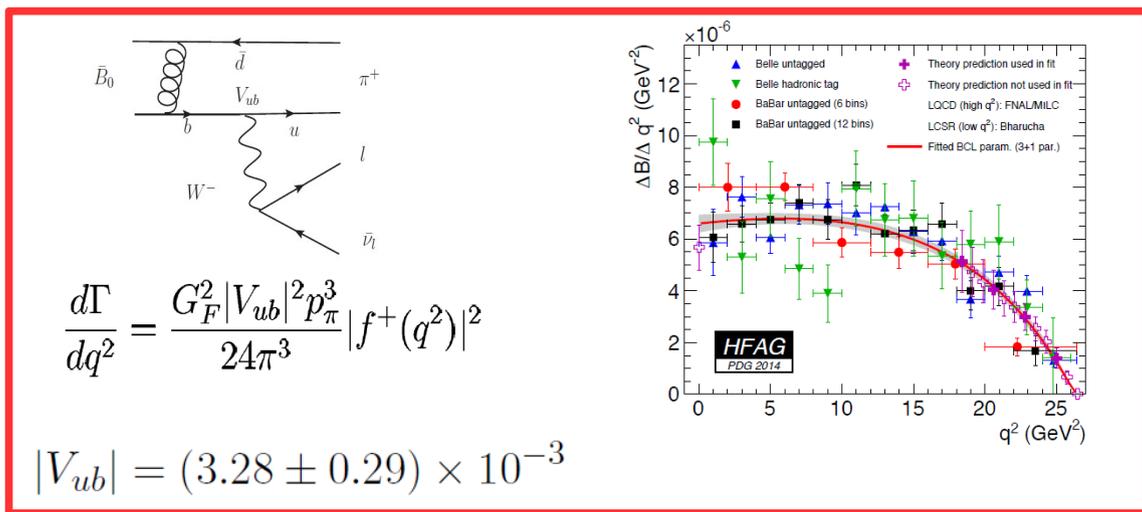
– Отклонение от предсказаний СМ на уровне 2.1σ

– Основная систематика из МК-моделирования



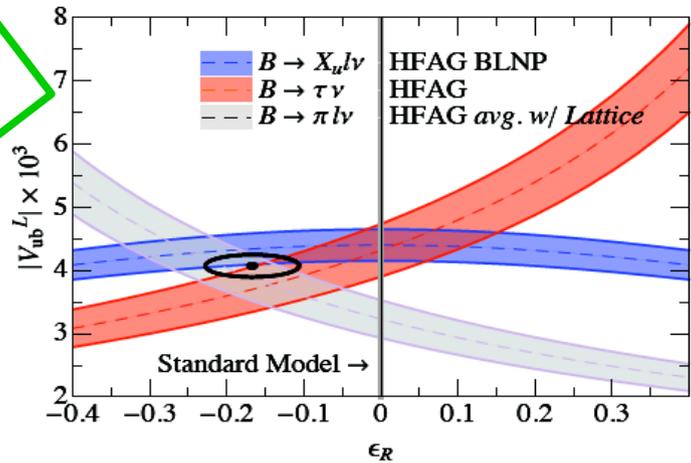
Измерение $|V_{ub}|$

- $|V_{ub}|$ измерен хуже всех остальных элементов ККМ-матрицы
- Расхождение результатов **эксклюзивных** ($B \rightarrow \pi lv$) и **инклюзивных** (any $b \rightarrow ulv$) методов измерения $|V_{ub}|$



Модели с отрицательными правыми V+A токами

Phys. Rev. D 90, 094003 (2014)

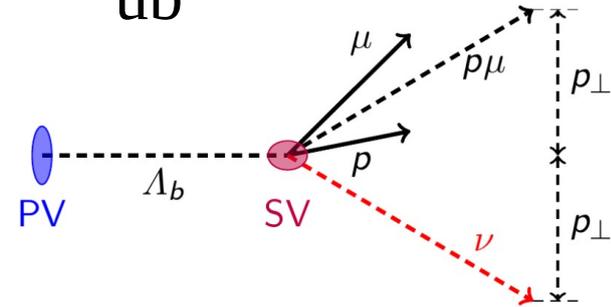


Измерение $|V_{ub}|$

Nature Physics 11
(2015) 743

– LHCb измерило отношение:

$$\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow p\mu\nu) / \mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c(\rightarrow pK\pi)\mu\nu)$$



– Чувствительно к $|V_{ub}| / |V_{cb}|$

– Расчеты КХД на решетках для больших q^2

[arXiv:1503.01421]

– Спектр скорректированной массы

$$M_{corr} = \sqrt{p_{\perp}^2 + M_{p\mu}^2 + p_{\perp}}$$

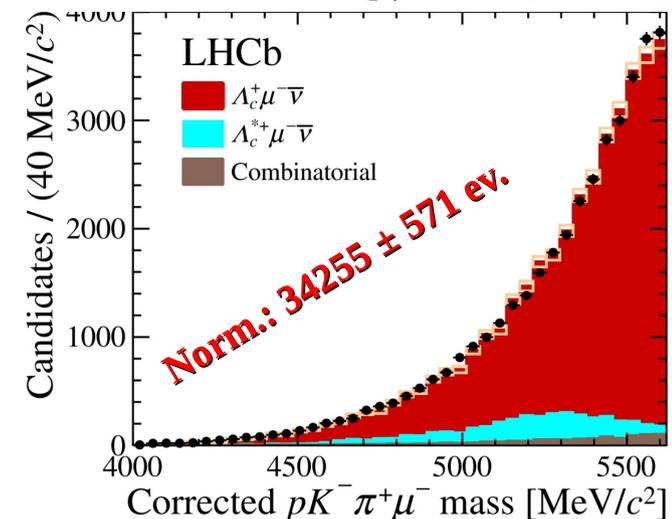
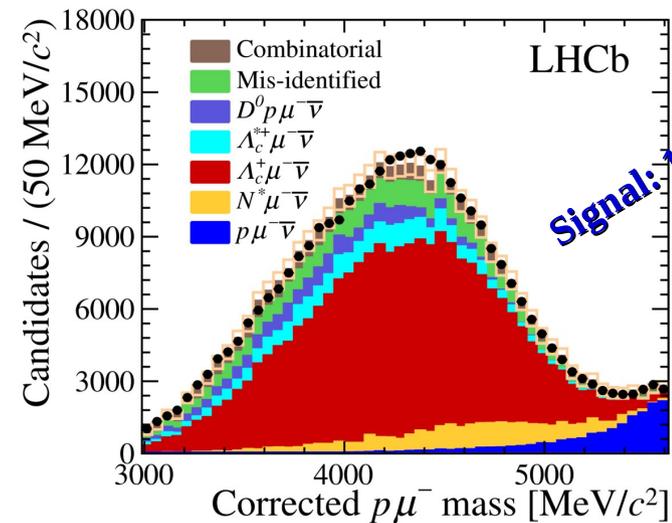
– Выбор между двумя q^2 , миграция событий

Решение $q^2 > 15 \text{ GeV}^2/c^4$

– Запрет на дополнительные треки близкие ко вторичной вершине для уменьшения фона

– Систематика: $\Lambda_c \rightarrow pK\pi$ BF, модель распада,

триггерная и трекинговая эффективности



Измерение $|V_{ub}|$

Nature Physics 11
(2015) 743

– **Результат:**

$$\frac{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow p\mu\nu)_{q^2 > 15 \text{ GeV}^2}}{\mathcal{B}(\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda_c\mu\nu)_{q^2 > 7 \text{ GeV}^2}} = (1.00 \pm 0.04 \pm 0.08) \times 10^{-2}$$

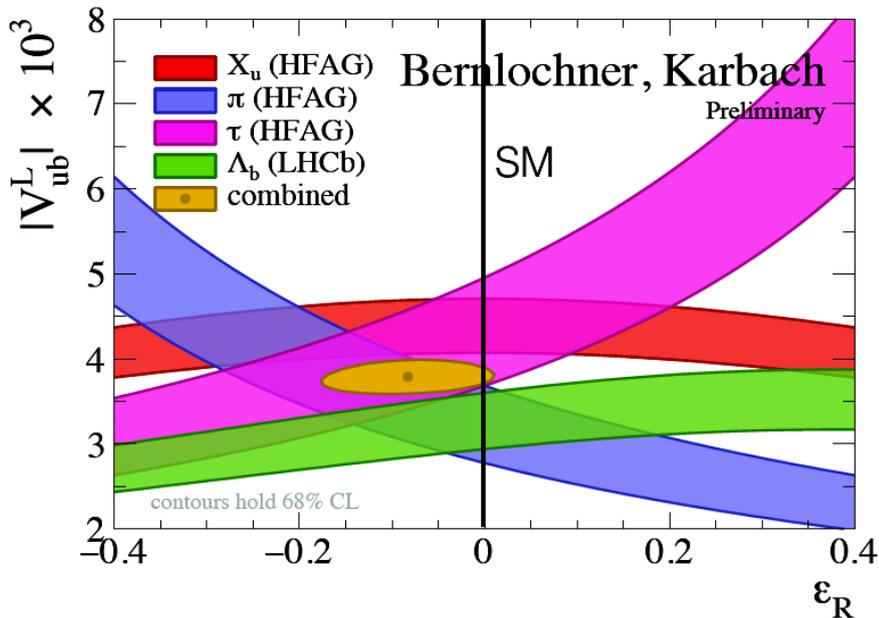
– **Используя эксклюзивные измерения $|V_{cb}|$:**

$$|V_{ub}| = (3.27 \pm 0.15(\text{exp}) \pm 0.17(\text{theory}) \pm 0.06(|V_{cb}|)) \times 10^{-3}$$

– **3.5 σ расхождение с инклюзивным методом**

– **Гипотеза правых токов под вопросом**

$$\chi^2/\text{ndf} = 2.8 / 1, \text{ p-value} = 9\% \rightarrow 16.0/2, 0.03\%$$



Inclusive

PDG 2014

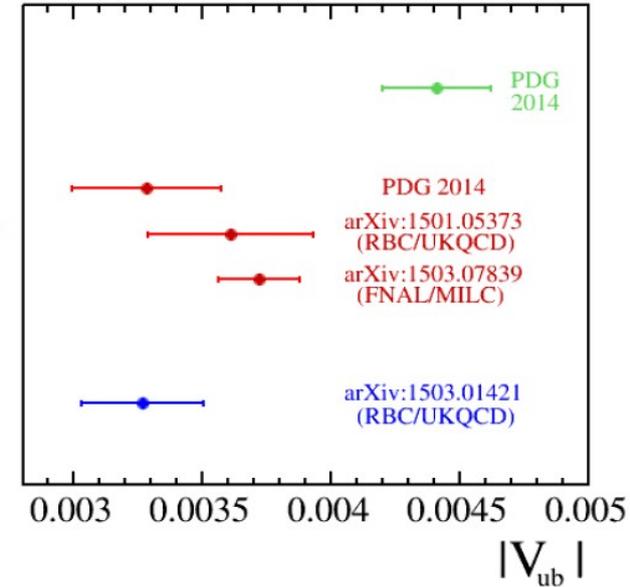
Exclusive
($B \rightarrow \pi l \nu$)

PDG 2014

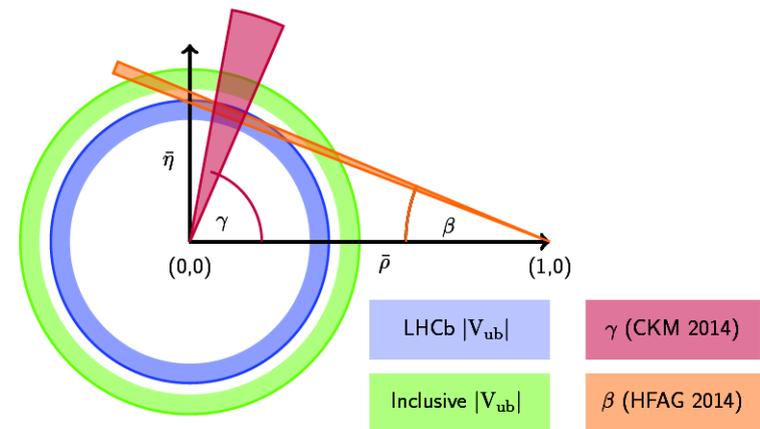
arXiv:1501.05373
(RBC/UKQCD)
arXiv:1503.07839
(FNAL/MILC)

LHCb
($\Lambda_b^0 \rightarrow p\mu\nu$)

arXiv:1503.01421
(RBC/UKQCD)



Другие параметры ККМ-матрицы:



Заключение

LHCb спектрометр частиц, вылетающих вперед,

- Проверка Стандартной Модели**
- Поиск эффектов Новой физики в непрямых изменениях**
- Также: исследование CP-нарушения в *b*- и *c*-секторах СМ**

На сегодняшний момент LHCb – лучшее место для изучения *b*- и *c*-физики

Большинство измерений подтверждает предсказания СМ, но есть и расхождения

Обработка результатов первого сеакса (3 fb^{-1}) близка к завершению

Взгляд в будущее:

- 1) Планируется $\sim 5 \text{ fb}^{-1}$ при $\sqrt{s} = 13\text{-}14 \text{ TeV}$ во втором сеансе работы LHC (2015-18)
- 2) Критически необходима проверка другими экспериментами **Belle-II, CMS, ATLAS**
- 3) Программа модернизации (**upgrade**) LHCb

Теория vs. 50 fb^{-1}

Type	Observable	LHCb 2018	Upgrade (50 fb^{-1})	Theory uncertainty
B_s^0 mixing	$2\beta_s(B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi)$	0.025	0.008	~ 0.003
	$2\beta_s(B_s^0 \rightarrow J/\psi f_0(980))$	0.045	0.014	~ 0.01
	α_{sl}^s	0.6×10^{-3}	0.2×10^{-3}	0.03×10^{-3}
Gluonic penguins	$2\beta_s^{\text{eff}}(B_s^0 \rightarrow \phi\phi)$	0.17	0.03	0.02
	$2\beta_s^{\text{eff}}(B_s^0 \rightarrow K^{*0}\bar{K}^{*0})$	0.13	0.02	< 0.02
	$2\beta_s^{\text{eff}}(B^0 \rightarrow \phi K_S^0)$	0.30	0.05	0.02
Right-handed currents	$2\beta_s^{\text{eff}}(B_s^0 \rightarrow \phi\gamma)$	0.09	0.02	< 0.01
	$\tau^{\text{eff}}(B_s^0 \rightarrow \phi\gamma)/\tau_{B_s^0}$	5 %	1 %	0.2 %
Electroweak penguins	$S_3(B^0 \rightarrow K^{*0}\mu^+\mu^-; 1 < q^2 < 6 \text{ GeV}^2/c^4)$	0.025	0.008	0.02
	$s_0 A_{\text{FB}}(B^0 \rightarrow K^{*0}\mu^+\mu^-)$	6 %	2 %	7 %
	$A_1(K\mu^+\mu^-; 1 < q^2 < 6 \text{ GeV}^2/c^4)$	0.08	0.025	~ 0.02
	$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow \pi^+\mu^+\mu^-)/\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+\mu^+\mu^-)$	8 %	2.5 %	$\sim 10 \%$
Higgs penguins	$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)$	0.5×10^{-9}	0.15×10^{-9}	0.3×10^{-9}
	$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)/\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)$	$\sim 100 \%$	$\sim 35 \%$	$\sim 5 \%$
Unitarity triangle angles	$\gamma(B \rightarrow D^{(*)}K^{(*)})$	4°	0.9°	negligible
	$\gamma(B_s^0 \rightarrow D_s K)$	11°	2.0°	negligible
	$\beta(B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0)$	0.6°	0.2°	negligible
Charm CP violation	A_Γ	0.40×10^{-3}	0.07×10^{-3}	–
	ΔA_{CP}	0.65×10^{-3}	0.12×10^{-3}	–