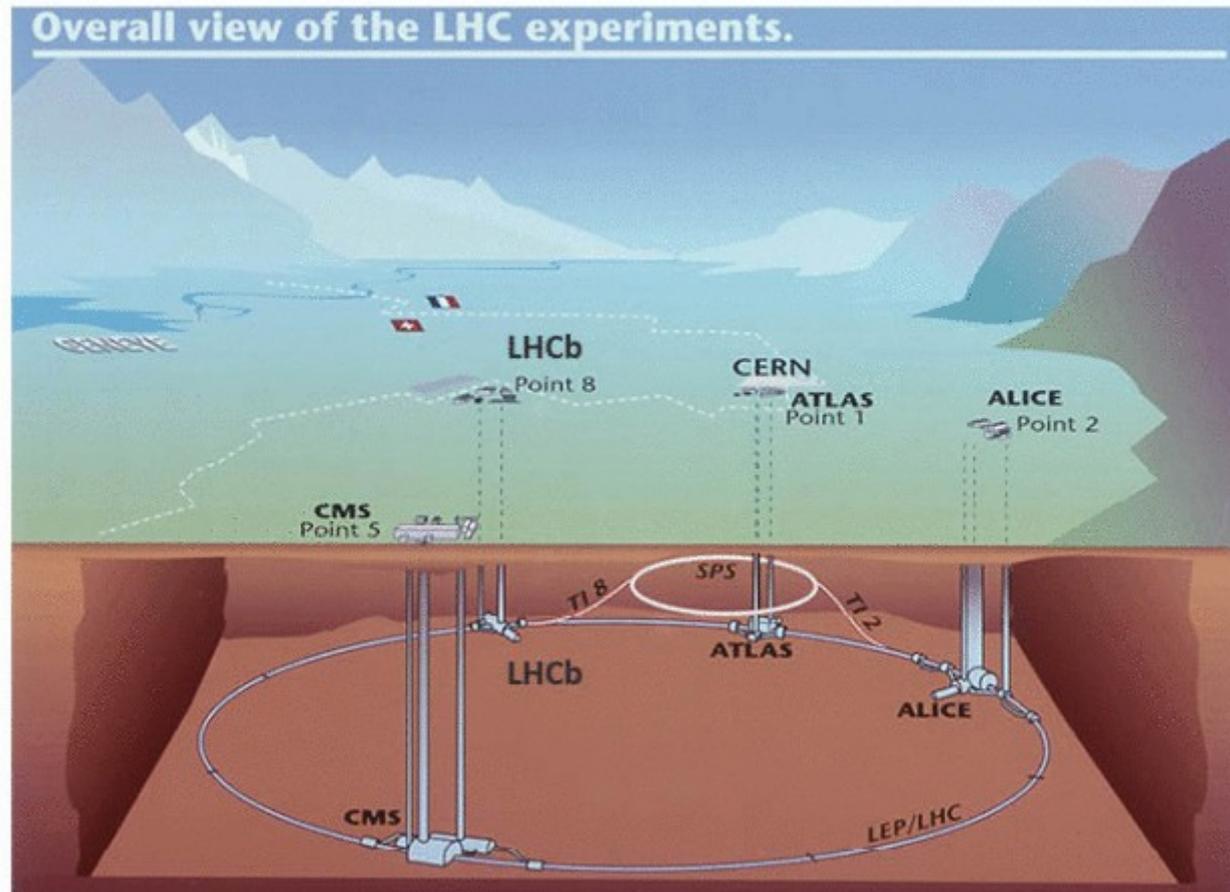


Основные результаты эксперимента LHCb

Дзюба Алексей

(семинар ОФВЭ, 30 октября 2012 г.)

Большой Адронный Коллайдер



План доклада

- I. Стандартная Модель (СМ или SM) и Новая Физика (НФ или NP).
- II. Эксперимент LHCb на Большом Адронном Коллайдере (БАК).
- III. Поиск НФ в редких распадах B -мезонов.
- IV. Изучение нарушения CP -инвариантности на LHCb.
- V. Несколько слов о других научных результатах LHCb.
- VI. Заключение. Чего можно достичь после upgrade'a.

**Будут рассматриваться в основном
опубликованные работы LHCb**

План доклада

- I. Стандартная Модель (СМ или SM) и Новая Физика (НФ или NP).
- II. Эксперимент LHCb на Большом Адронном Коллайдере (БАК).
- III. Поиск НФ в редких распадах *B*-мезонов.
- IV. Изучение нарушения *CP*-инвариантности на LHCb.
- V. Несколько слов о других научных результатах LHCb.
- VI. Заключение. Чего можно достичь после upgrade'a.

Будут рассматриваться в основном
опубликованные работы LHCb

I. Стандартная Модель (СМ) и Новая Физика (НФ)

СМ, её триумф и трудности

С.В. Троицкий, *УФН 182 (2012) 77*

Нерешённые проблемы физики элементарных частиц.

1. Введение: статус и параметры Стандартной модели (77).
2. Наблюдаемое отклонение от Стандартной модели: осциллирующие нейтрино (79).
 - 2.1. Теоретическое описание.
 - 2.2. Экспериментальные результаты: стандартные осцилляции трёх ароматов.
 - 2.3. Экспериментальные результаты: нестандартные осцилляции.
 - 2.4. Масса нейтрино.
3. Указания на новую физику из астрофизики и космологии (84).
 - 3.1. Барийонная асимметрия.
 - 3.2. Тёмная материя.
 - 3.3. Ускоренное расширение Вселенной.
4. Эстетические трудности: происхождение параметров (89).
 - 4.1. Электрослабое нарушение и хиггсовский бозон.
 - 4.2. Калибровочная иерархия.
 - 4.3. Иерархия фермионных масс.
5. Теоретические трудности в описании адронов (98).
 - 5.1. Проблемы пертурбативной квантовой хромодинамики.
 - 5.2. Решёточные результаты.
 - 5.3. Дуальные теории: суперсимметричная дуальность и голография.

Параметр	Значение
$\alpha_s(M_Z)$	$0,114 \pm 0,0007$
$1/\alpha(M_Z)$	$127,916 \pm 0,015$
$\sin^2 \theta_W(M_Z)$	$0,23108 \pm 0,00005$
θ	$\lesssim 10^{-10}$
m_u (2 ГэВ)	$2,5^{+0,8}_{-1,0}$ МэВ
m_d (2 ГэВ)	$5,0^{+1,0}_{-1,5}$ МэВ
m_s (2 ГэВ)	105^{+25}_{-35} МэВ
$m_c(m_c)$	$1,266^{+0,031}_{-0,036}$ ГэВ
$m_b(m_b)$	$4,198 \pm 0,023$ ГэВ
$m_t(m_t)$	$173,10 \pm 1,35$ ГэВ
m_e	$510,998910 \pm 0,000013$ кэВ
m_μ	$105,658367 \pm 0,000004$ МэВ
m_τ	$1,77682 \pm 0,00016$ ГэВ
θ_{12}	$13,02^\circ \pm 0,05^\circ$
θ_{23}	$2,35^\circ \pm 0,06^\circ$
θ_{13}	$0,199^\circ \pm 0,011^\circ$
δ	$1,20 \pm 0,08$
$v(m_\mu)$	$246,221 \pm 0,002$ ГэВ
$M_{\text{П}}$	115,5– 127,0 ГэВ (уровень достоверности 95 %)

СМ, её триумф и трудности

С.В. Троицкий, УФН 182 (2012) 77

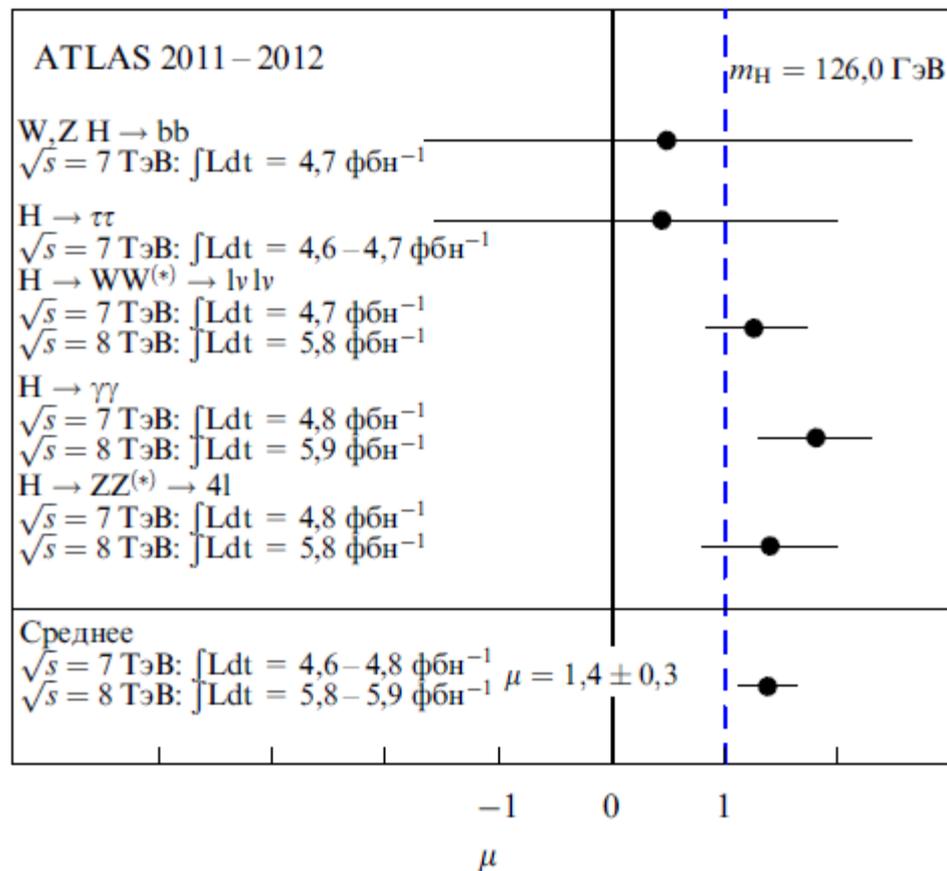
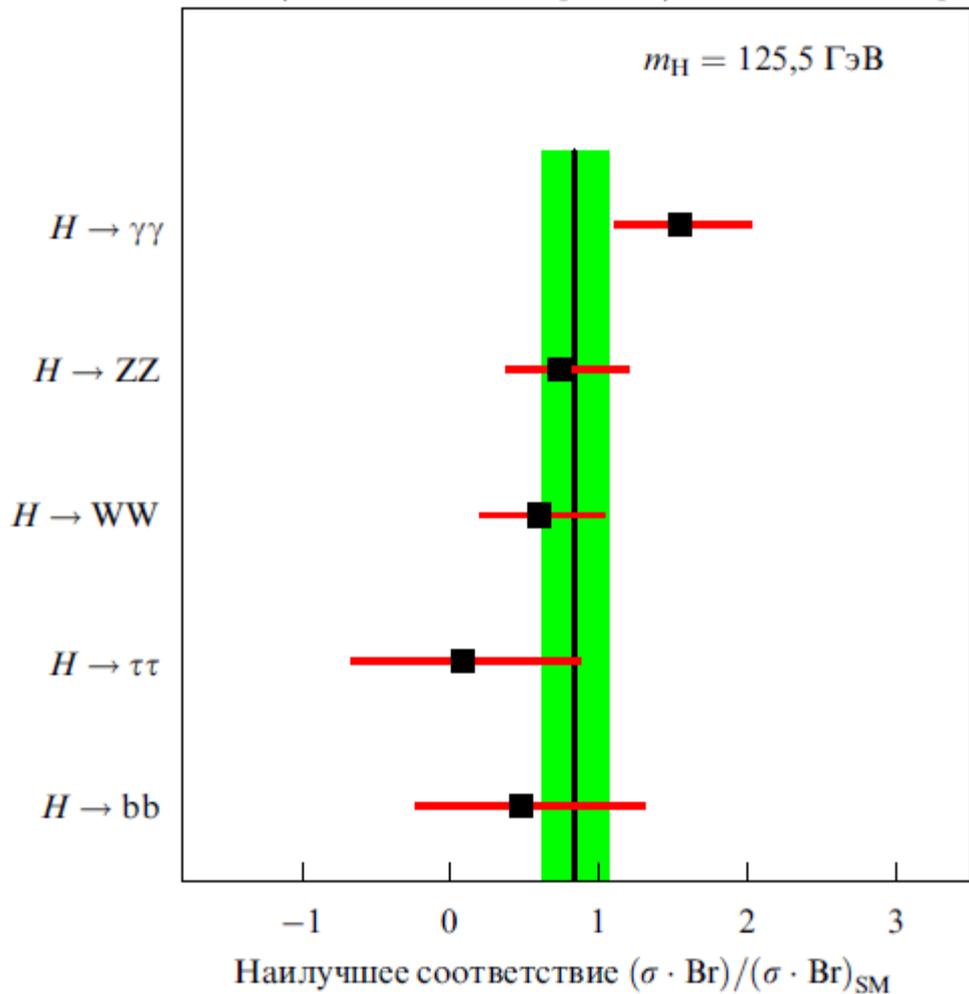
Нерешённые проблемы физики элементарных частиц.

1. Введение: статус и параметры Стандартной модели (77).
2. Наблюдаемое отклонение от Стандартной модели: осцилляции нейтрино (79).
 - 2.1. Теоретическое описание. 2.2. Экспериментальные результаты: стандартные осцилляции трёх ароматов. 2.3. Экспериментальные результаты: нестандартные осцилляции. 2.4. Масса нейтрино.
3. Указания на новую физику из астрофизики и космологии (84).
 - 3.1. Барийонная асимметрия. 3.2. Тёмная материя. 3.3. Ускоренное расширение Вселенной.
4. Эстетические трудности: происхождение параметров (89).
 - 4.1. Электрослабое нарушение и хиггсовский бозон. 4.2. Калибровочная иерархия. 4.3. Иерархия фермионных масс.
5. Теоретические трудности в описании адронов (98).
 - 5.1. Проблемы пертурбативной квантовой хромодинамики. 5.2. Решёточные результаты. 5.3. Дуальные теории: суперсимметричная дуальность и голография.

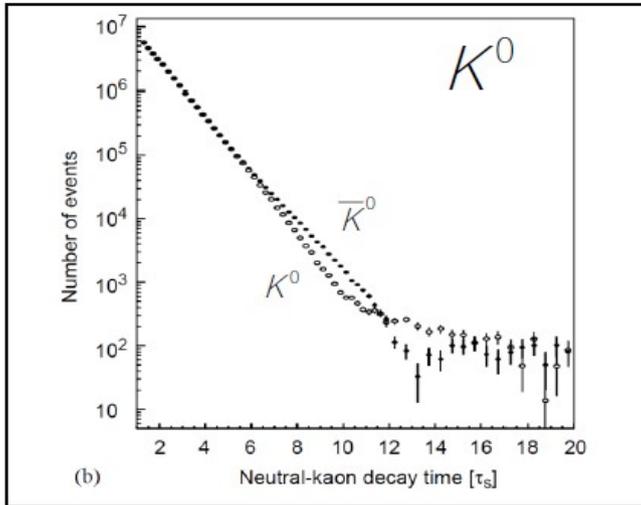
Параметр	Значение
$\alpha_s(M_Z)$	$0,114 \pm 0,0007$
$1/\alpha(M_Z)$	$127,916 \pm 0,015$
$\sin^2 \theta_W(M_Z)$	$0,23108 \pm 0,00005$
θ	$\lesssim 10^{-10}$
m_u (2 ГэВ)	$2,5^{+0,8}_{-1,0}$ МэВ
m_d (2 ГэВ)	$5,0^{+1,0}_{-1,5}$ МэВ
m_s (2 ГэВ)	105^{+25}_{-35} МэВ
$m_c(m_c)$	$1,266^{+0,031}_{-0,036}$ ГэВ
$m_b(m_b)$	$4,198 \pm 0,023$ ГэВ
$m_t(m_t)$	$173,10 \pm 1,35$ ГэВ
m_e	$510,998910 \pm 0,000013$ кэВ
m_μ	$105,658367 \pm 0,000004$ МэВ
m_τ	$1,77682 \pm 0,00016$ ГэВ
θ_{12}	$13,02^\circ \pm 0,05^\circ$
θ_{23}	$2,35^\circ \pm 0,06^\circ$
θ_{13}	$0,199^\circ \pm 0,011^\circ$
δ	$1,20 \pm 0,08$
$v(m_\mu)$	$246,221 \pm 0,002$ ГэВ
M_H	$115,5 - 127,0$ ГэВ (уровень достоверности 95 %)

Обнаружение частицы похожей на бозон Хиггса

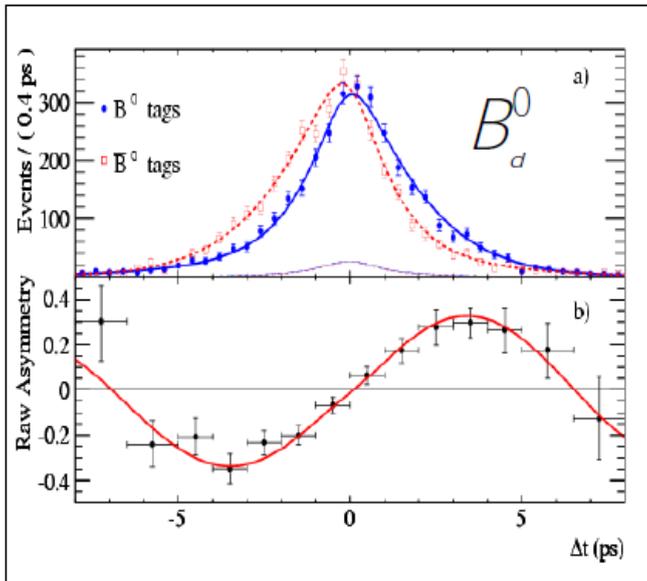
CMS $\sqrt{s} = 7 \text{ ТэВ}, L = 5,1 \text{ фбн}^{-1}, \sqrt{s} = 8 \text{ ТэВ}, L = 5,3 \text{ фбн}^{-1}$



Осцилляции нейтральных мезонов



(CDFI)



(BABAR)

Кварки и лептоны — состояния с определенной массой
однако с калибровочными бозонами взаимодействуют
суперпозиции данных состояний.

$$\begin{pmatrix} u \\ d' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s' \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b' \end{pmatrix},$$

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

Эти состояния связаны через матрицу

Кабиббо-Кобаяши-Маскавы (СКМ)

Почему же в 1972 году (когда были известны 3 кварка)

уже рассматривалась 6 кварковая модель?

Нарушение CP -инвариантности

1964 год: Фитч, Кронин и др. открывают запрещенный CP распад K^0_L на два пиона

1970-е начало: Глэшоу-Илиополоус-Маиани — предсказывают с кварк.

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} \\ V_{cd} & V_{cs} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \exp(i\phi_u) & 0 \\ 0 & \exp(i\phi_c) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} \\ V_{cd} & V_{cs} \end{pmatrix} \times \\ \times \begin{pmatrix} \exp(-i\phi_d) & 0 \\ 0 & \exp(-i\phi_s) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix}.$$

1972: Кабаяши-Маскава 6 кварковая модель.

$$V = \begin{pmatrix} c_{12}c_{23} & s_{12}c_{13} & s_{13}\exp(-i\delta) \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{23}s_{13}\exp(i\delta) & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{23}s_{13}\exp(i\delta) & s_{23}c_{13} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}c_{23}s_{13}\exp(i\delta) & -c_{12}s_{23} - s_{12}c_{23}s_{13}\exp(i\delta) & c_{23}c_{13} \end{pmatrix}$$

Наблюдения на масштабе < 1 ГэВ \Rightarrow «Старая НФ» = «Сегодня СМ» $M_{\text{СМ}} \sim 100$ ГэВ

Унитарный Треугольник

Параметризация

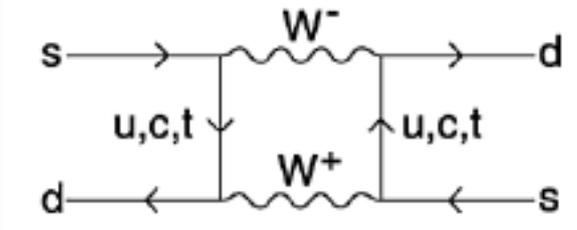
Вольфенштейна:

($\lambda = 0.22$)

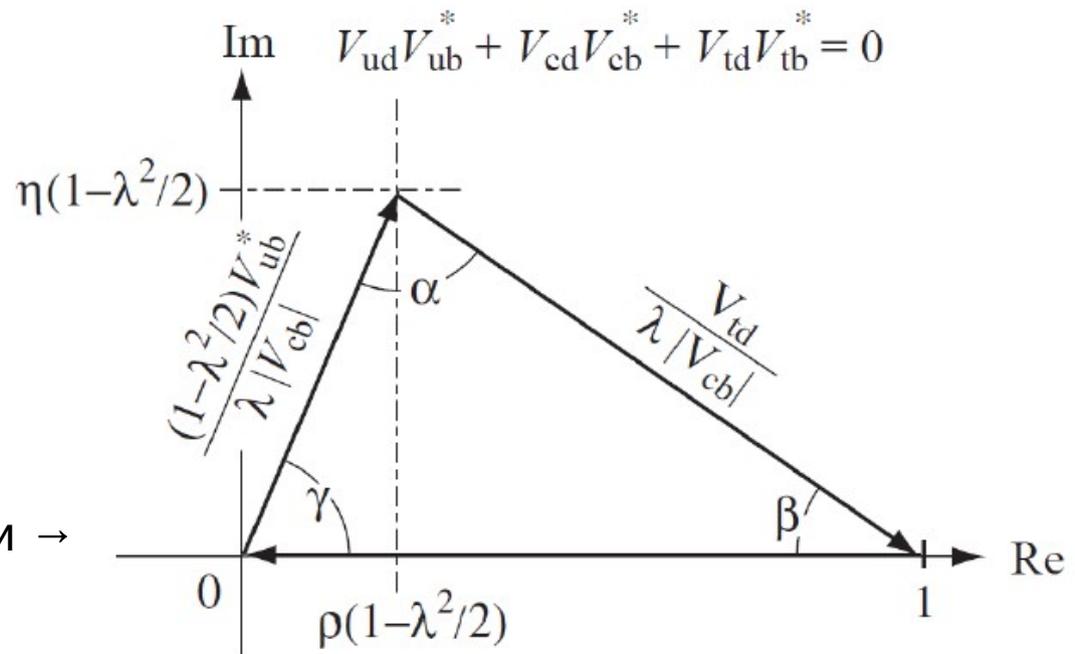
Нарушение CP подвлено λ^3 !

$$V \approx \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4).$$

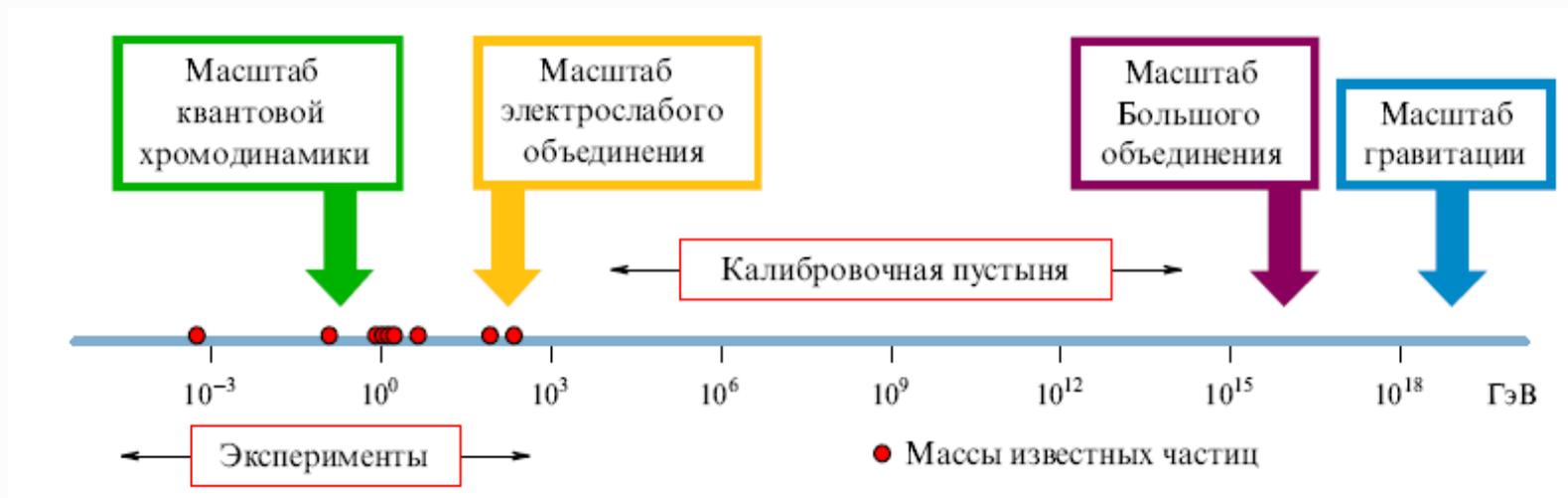
Диаграмма для смешивания:



Треугольник унитарности →



Калибровочная пустыня



Почему M_{SM} так далек от M_{GUT} и M_{Pl} ? [СМ самосогласована]

Рад.поправки к массе Хиггса огромны

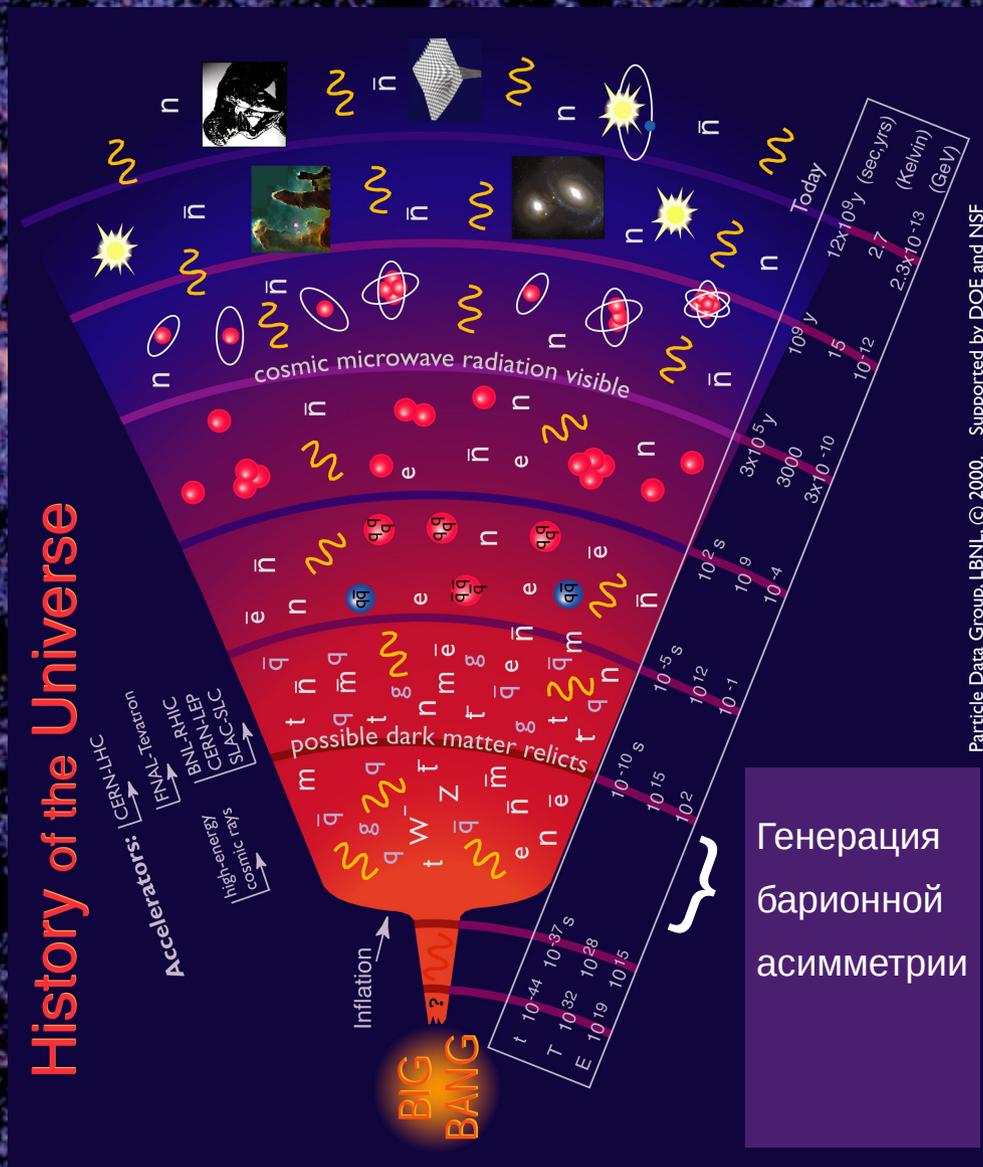
=> нужна точность подбора параметров СМ $\sim M_{SM}^2 / M_{Pl}^2 = 10^{-34}$!

Антропный принцип или НФ?

Точность подбора параметров СМ $\sim M_{SM}^2 / M_{NP}^2 =>$

=> если НФ @ 1-2 ТэВ, то подгонка не нужна

Барионная асимметрия Вселенной



- Реликтовое изучение
- Космические лучи
- Первичный нуклеосинтез

$$\eta_B \equiv \frac{n_B}{n_\gamma} = 6,1 \cdot 10^{-10}$$

$$\frac{n_q - n_{\bar{q}}}{n_q + n_{\bar{q}}} \sim \eta_B \sim 10^{-10};$$

Условия Сахарова:

1. Несохранение В числа,
2. **Нарушение С- и CP-симм,**
3. Нарушение термодинам. равновесия

Нарушение CP - симметрии

- CPT-теорема → Нарушение CP- равносильно нарушению T-
- CP-симметрия нарушена в распадах K^0 и B мезонов

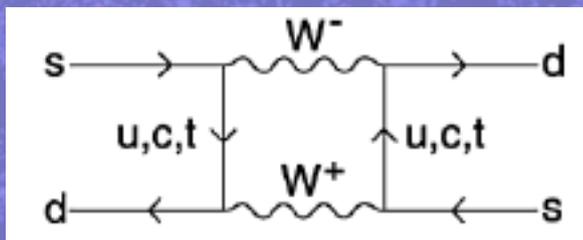
Wolfenstein parametrization (1983)

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4)$$

$$\lambda \equiv |V_{us}| \simeq 0.22$$

A, ρ , η are real.

Нарушение CP в η



CP-violating effects need not be *small*

η can be (and is!) $\mathcal{O}(1)$!

- Стандартная модель: $\eta_B < 10^{-18} \ll$ космологич. наблюдения

[PRL 70, 2833 (1993); Mod. Phys. Lett. A9, 795 (1994); PRD51, 379 (1995).]

Нарушение CP - симметрии

- CPT-теорема → Нарушение CP- равносильно нарушению T-
- CP-симметрия нарушена в распадах K^0 и B мезонов

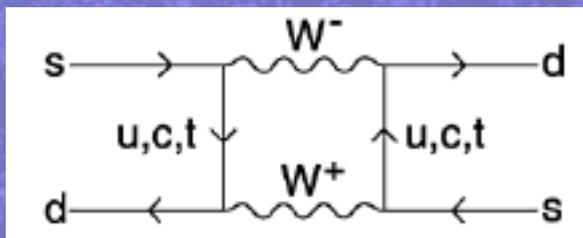
Wolfenstein parametrization (1983)

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4)$$

$$\lambda \equiv |V_{us}| \simeq 0.22$$

A, ρ , η are real.

Нарушение CP в η



CP-violating effects need not be *small*

η can be (and is!) $\mathcal{O}(1)$!

- Стандартная модель: $\eta_B < 10^{-18} \ll$ космологич. наблюдения

[PRL 70, 2833 (1993); Mod. Phys. Lett. A9, 795 (1994); PRD51, 379 (1995).]

Темная материя во Вселенной

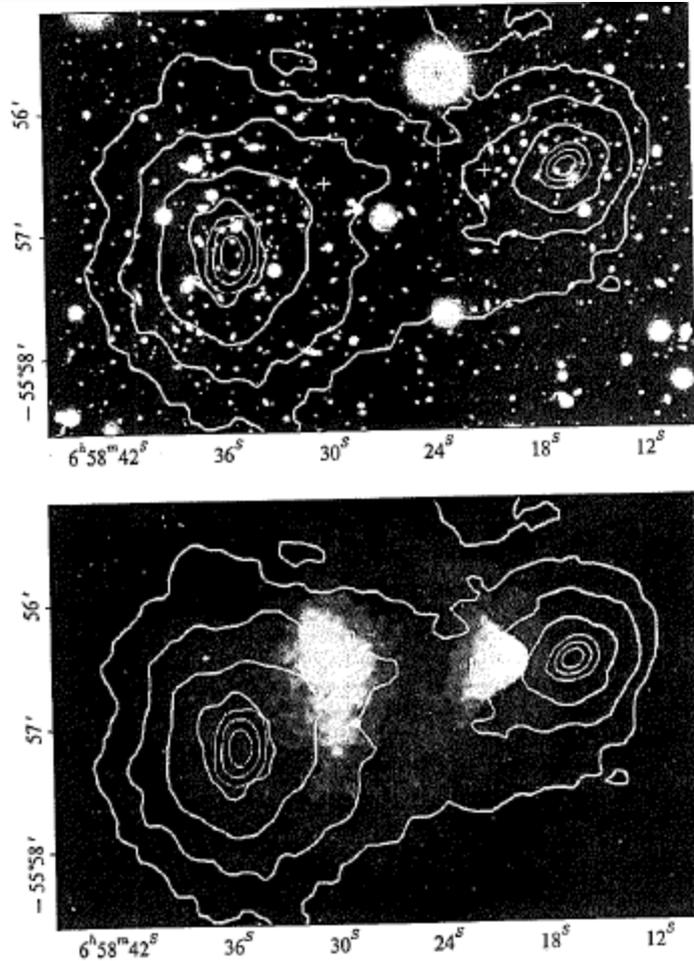


Рис. 1.8. Результат наблюдения [12] сталкивающихся скоплений 1E0657-558: замкнутыми линиями показан гравитационный потенциал, в основном создаваемый темной материей. Светлые области на нижней диаграмме показывают распределение горячей плазмы, белым отрезком показан масштаб 200 кпк в сопутствующей системе ($z = 0,296$)

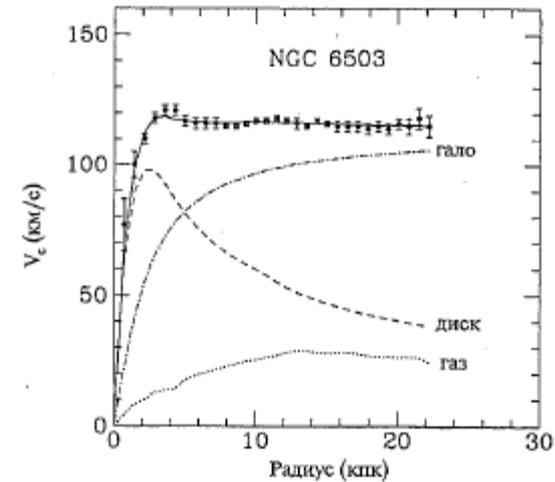


Рис. 1.9. Распределение скоростей облаков водорода в галактике NGC 6503 [13]. Разными линиями показаны вклады трех основных компонент, формирующих гравитационный потенциал галактики

Гипотеза о WIMP'ах —

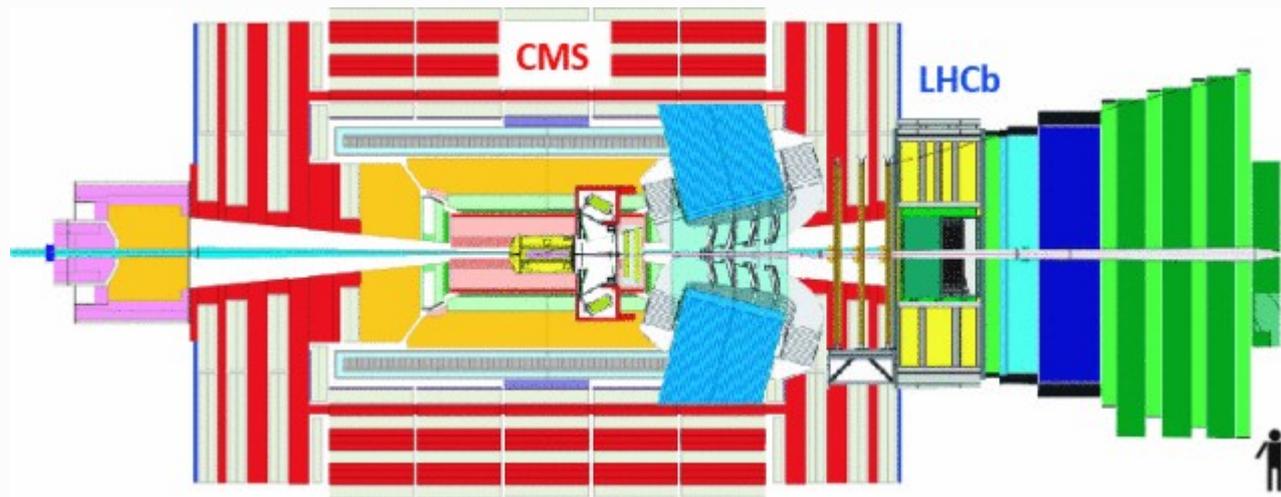
Мотивировка для SUSY

Горбунов Дмитрий Сергеевич, Рубаков Валерий Анатольевич
Введение в теорию ранней Вселенной: Теория горячего Большого взрыва. — М.:
Издательство ЛКИ, 2008. — 552 с., цв. вкл.

Подходы к поиску НФ

ATLAS и **CMS**: Большие p_T ; малые η ;

поиск проявлений реальных частиц НФ (on-shell).



LHCb: Малые p_T ; большие η ; => высокое сечение рождения b и c .
эффекты НФ в процессах точно предсказанных СМ;
поиск проявлений виртуальных частиц НФ (off-shell).

Ключевые точки поиска НФ на LHCb

Редкие распады:

- Лептонные распады
- Полулептонные распады B мезонов
- Нарушение сохранения лептонного заряда

Смешивание / осцилляции в B -секторе:

- Угол смешивания, $\Delta\Gamma$ и полулептонная асимметрия для B_s
- γ СКМ

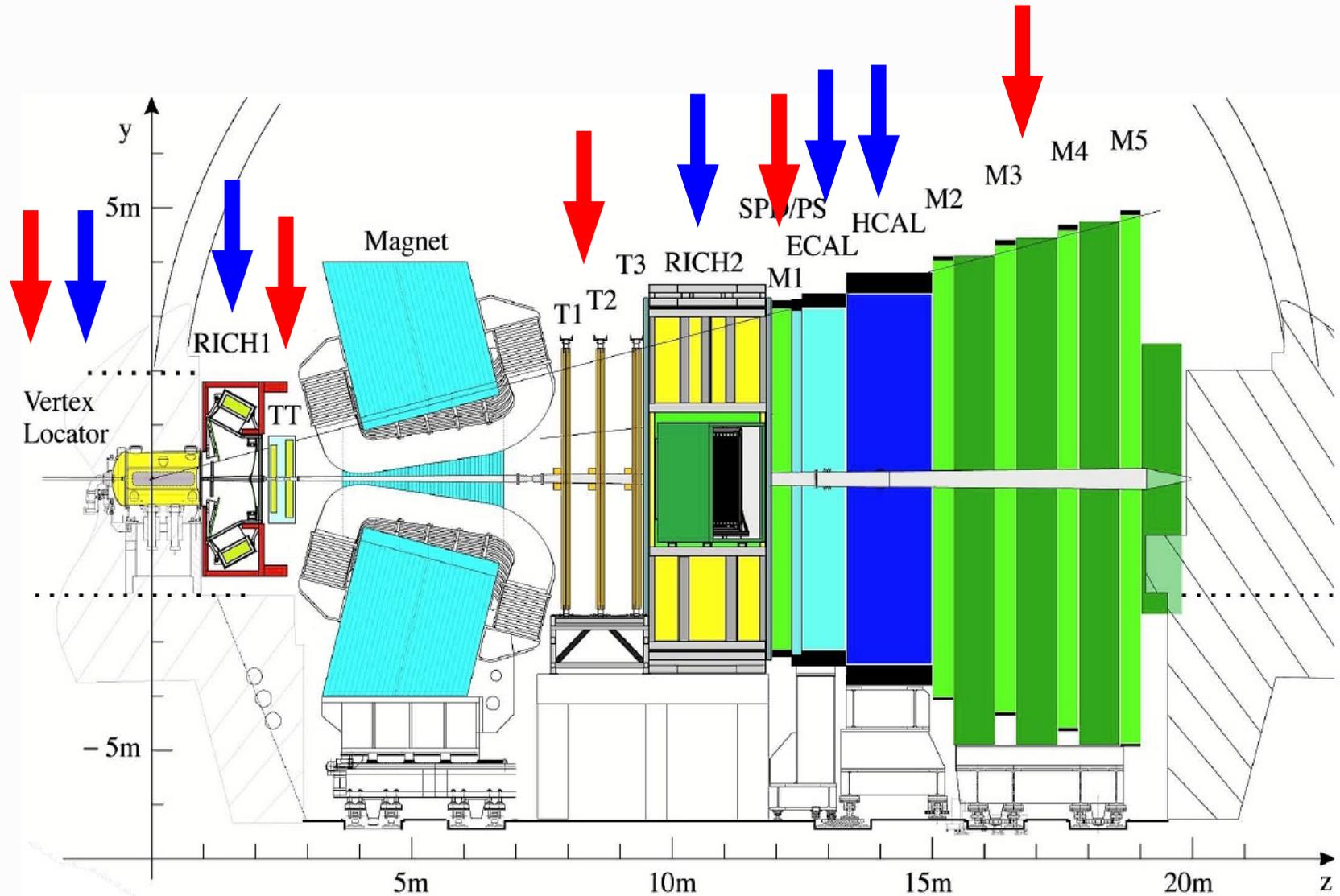
Нарушение CP :

- Прямое нарушение CP инвариантности
в распадах нейтральной D мезонов
- Прямое нарушение CP инвариантности в распадах B_s

II. Эксперимент LHCb

(и некоторые результаты)

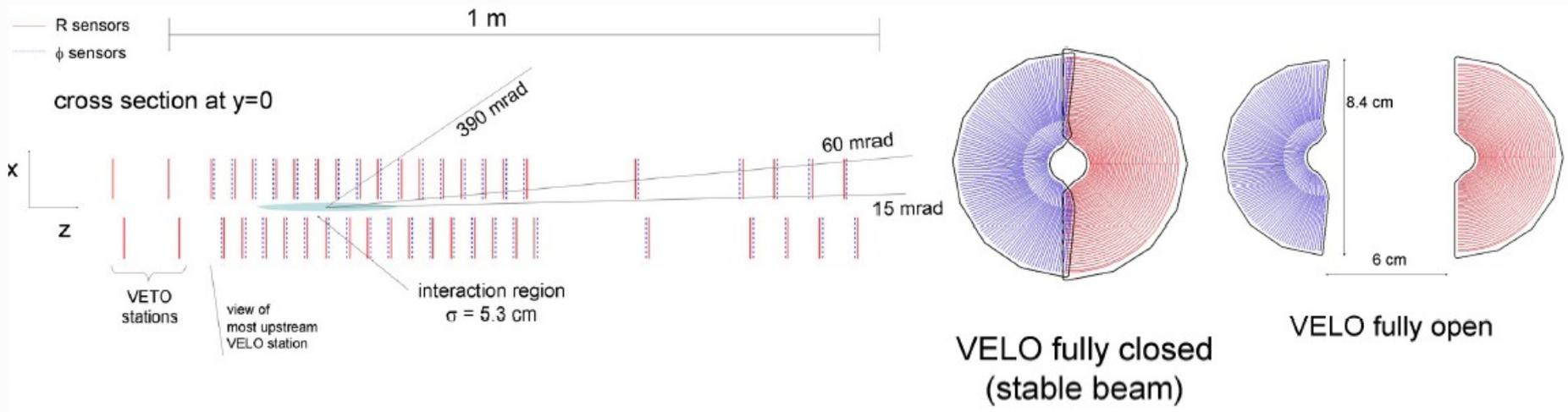
LHCb: трекинг и идентификация



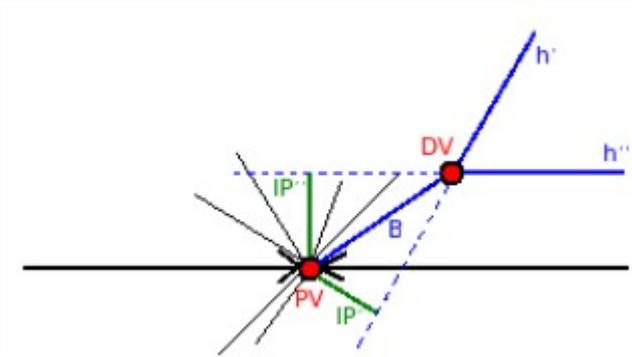
Вершинный детектор (VELO)



- 21 — Si-strip станция (r+φ) + 2 ®
- 8 мм от зоны столкновения
- Треккинг + информация для триггера
- Восстановление первичной и вторичной вершин
- $1.5 < \eta < 5.0$ и $-4 < \eta < 1.5$



VELO и измерение времени жизни



- Дочерняя вершина (DV) в 1-2 см от первичной (PV)
- Комбинаторный фон из PV + малые импульсы
- IP используется в триггере
- $\sigma(t)$ порядка 40-50 фс (ничтожно для измерений τ)
- необходимо для быстро смешивающихся систем (B_s)

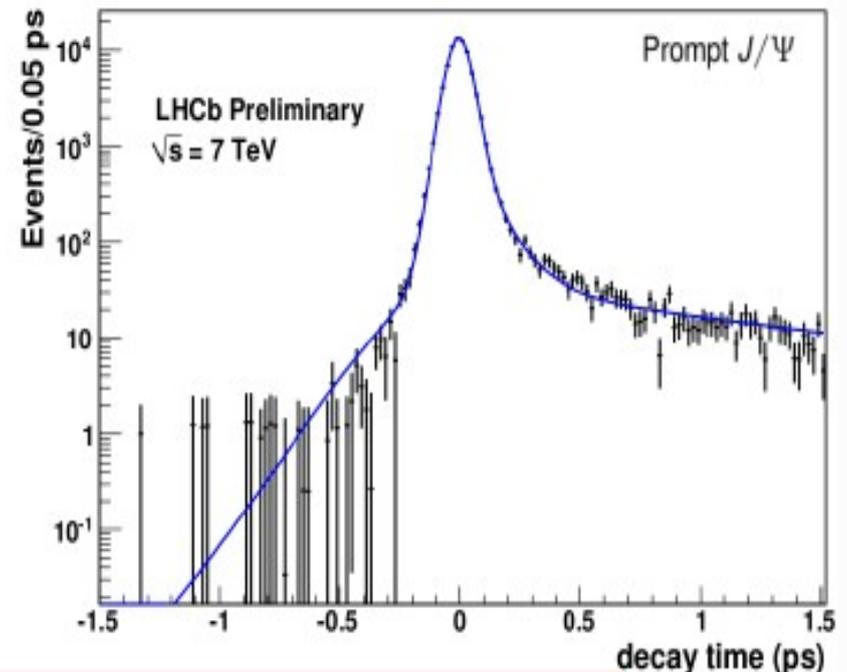
Пример №1:

EPJC 71 (2011) 1645

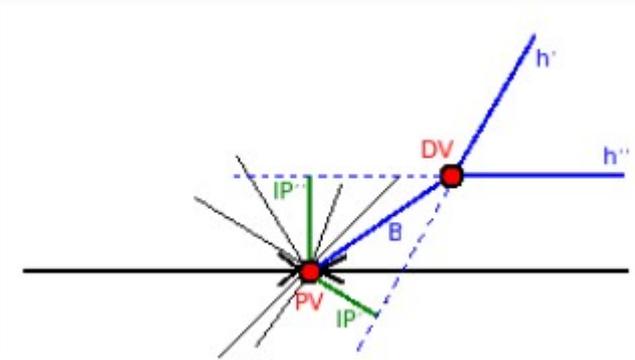
$d^2\sigma(J/\psi) / dp_T * dy$

J/ψ из PV и из распадов b

Согласие с QCD расчетами



VELO и измерение времени жизни



- Дочерняя вершина (DV) в 1-2 см от первичной (PV)
- Комбинаторный фон из PV + малые импульсы
- IP используется в триггере
- $\sigma(t)$ порядка 40-50 фс (ничтожно для измерений τ)
- необходимо для быстро смешивающихся систем (B_s)

Пример №2:

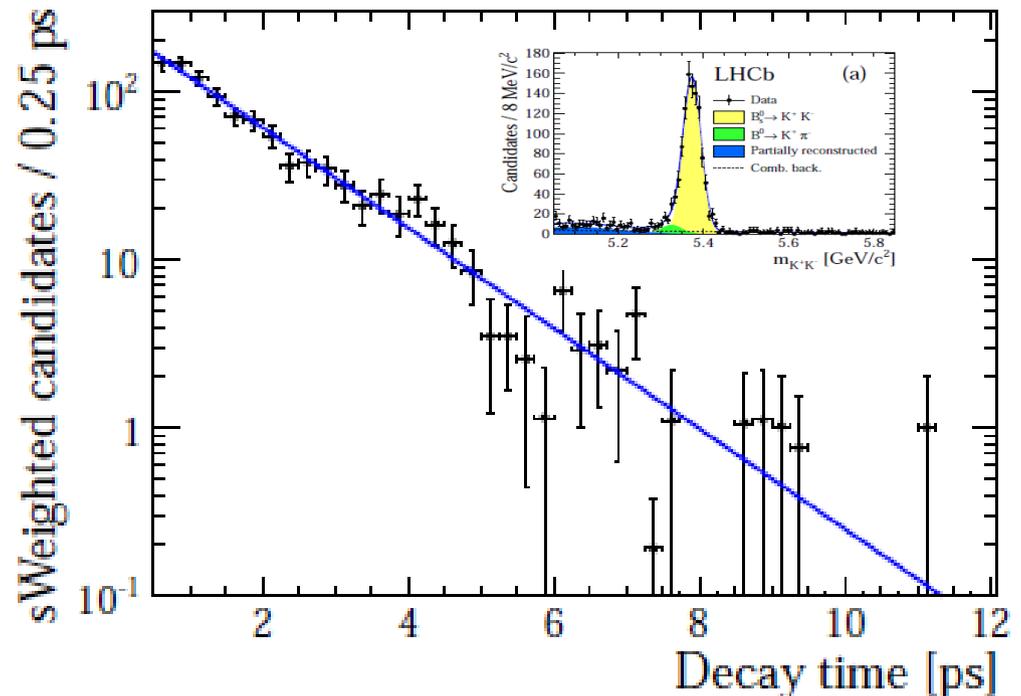
PLB 716 (2012) 393 :

$$\tau_{KK} = 1.455 \pm 0.046 \text{ (stat)} \pm 0.006 \text{ (syst)} \text{ ps}$$

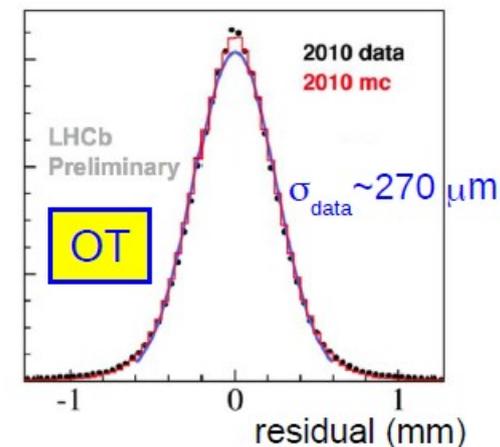
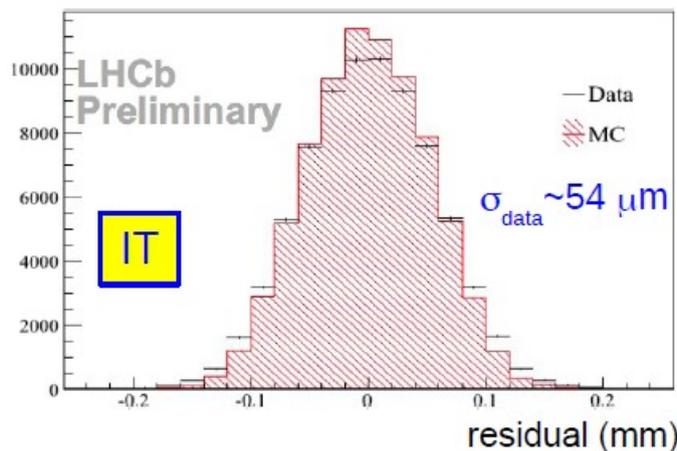
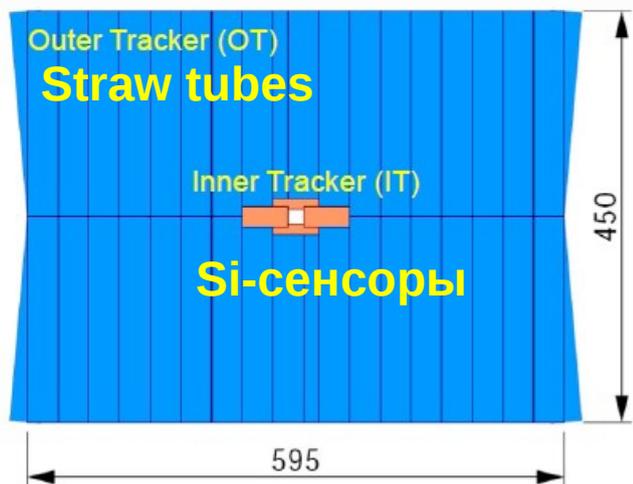
Предсказания СМ:

$$\tau_{KK}^{SM} = 1.40 \pm 0.02 \text{ ps}$$

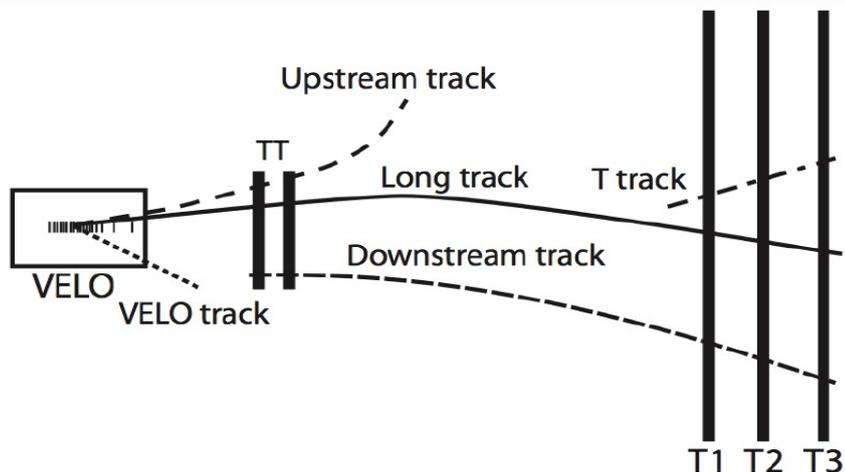
Fleischer, Kneijens [Eur.Phys.J.C71:1532,2011]



Трекинг (TT, T1-3, M1-5)



IT: 1.3% общей площади, но 25% статистики!



Long: физика

VELO: Восстановление PV

Upstream: Малые импульсы

Downstream: K^0 , Λ ...

T-tracks: Вторичное взаимодействие

Трекинг и разрешение

- $\delta p / p$ в диапазоне 0.35-0.55 % (зависит от p)
- Разрешение по инвариантной массе b -адронов 7 — 20 МэВ
- Хорошее подавление комбинаторики
- Track-finder: высокая ϵ и устойчивость к «клонам» и «призракам»

Пример №3:

Phys. Lett. B 708 (2012) 241-248

Quantity	LHCb measurement	Best previous measurement	PDG fit
$M(B^+)$	5279.38 ± 0.35	5279.10 ± 0.55	5279.17 ± 0.29
$M(B^0)$	5279.58 ± 0.32	5279.63 ± 0.62	5279.50 ± 0.30
$M(B_s^0)$	5366.90 ± 0.36	5366.01 ± 0.80	5366.3 ± 0.6
$M(\Lambda_b^0)$	5619.19 ± 0.76	5619.7 ± 1.7	—
$M(B^0) - M(B^+)$	0.20 ± 0.20	0.33 ± 0.06	0.33 ± 0.06
$M(B_s^0) - M(B^+)$	87.52 ± 0.32	<i>world's best measurements (done with just 2010 data!)</i>	
$M(\Lambda_b^0) - M(B^+)$	339.81 ± 0.72		

Трекинг и разрешение

- $\delta p / p$ в диапазоне 0.35-0.55 % (зависит от p)
- Разрешение по инвариантной массе b -адронов 7 — 20 МэВ
- Хорошее подавление комбинаторики
- Track-finder: высокая ϵ и устойчивость к «клонам» и «призракам»

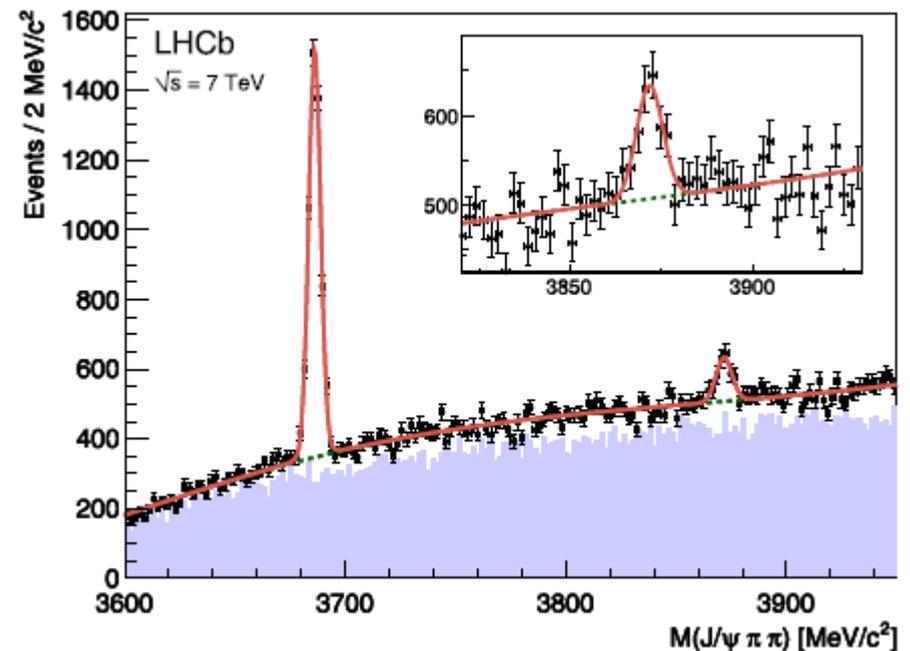
Пример №4:

EPJС 72 (2012) 1972

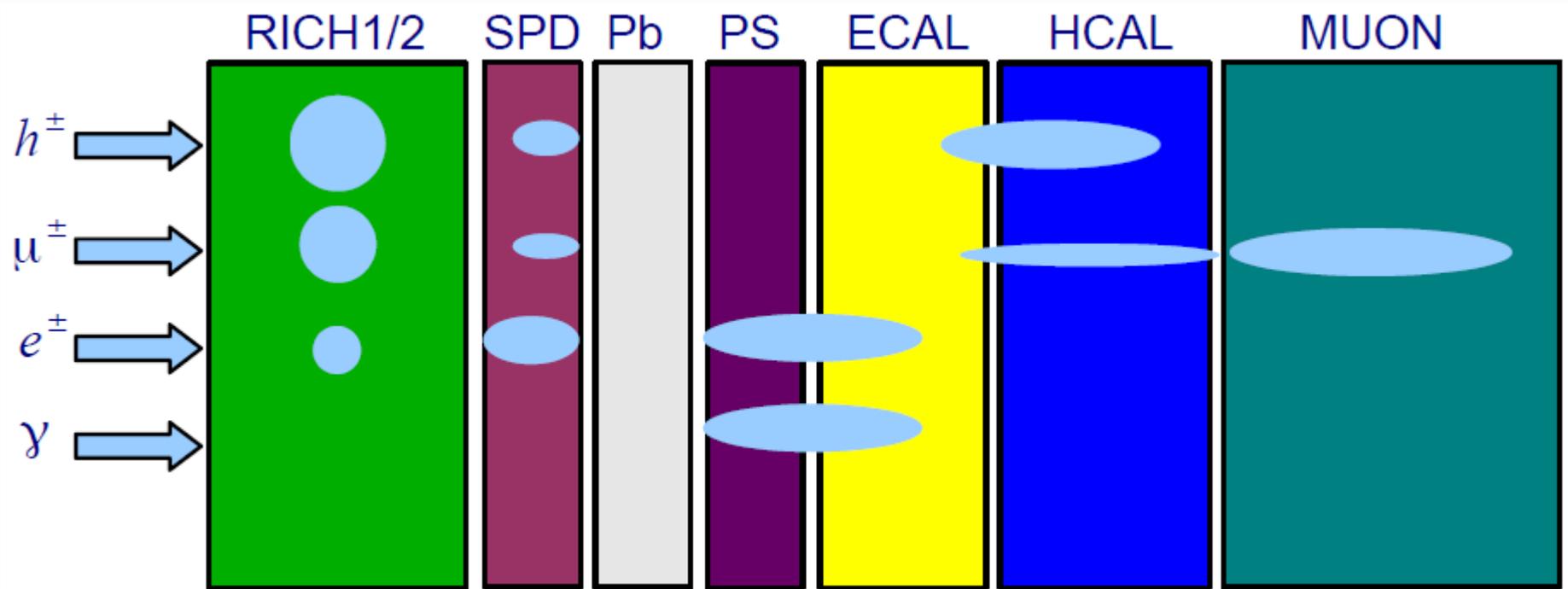
$$m_{X(3872)} = 3871.95 \pm 0.48 \text{ (stat)} \pm 0.12 \text{ (syst)} \text{ MeV}/c^2,$$

$$m_{\psi(2S)} = 3686.12 \pm 0.06 \text{ (stat)} \pm 0.10 \text{ (syst)} \text{ MeV}/c^2,$$

$$\text{sum of the } D^0 \text{ and } D^{*0} \text{ masses } 3871.79 \pm 0.29 \text{ MeV}/c^2$$

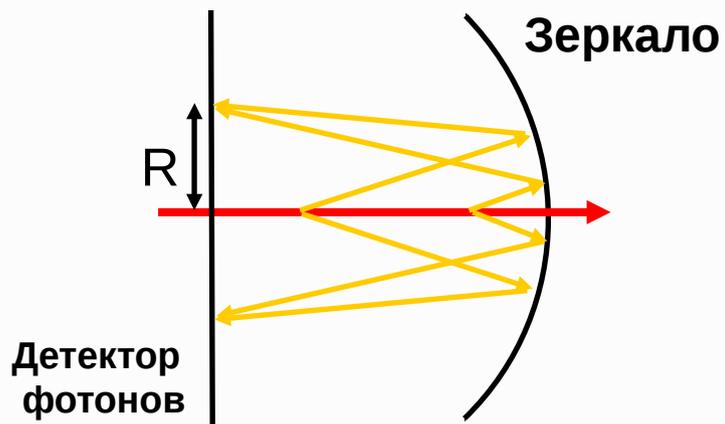


Идентификация частиц. Основной принцип.



Идентификация в RICH

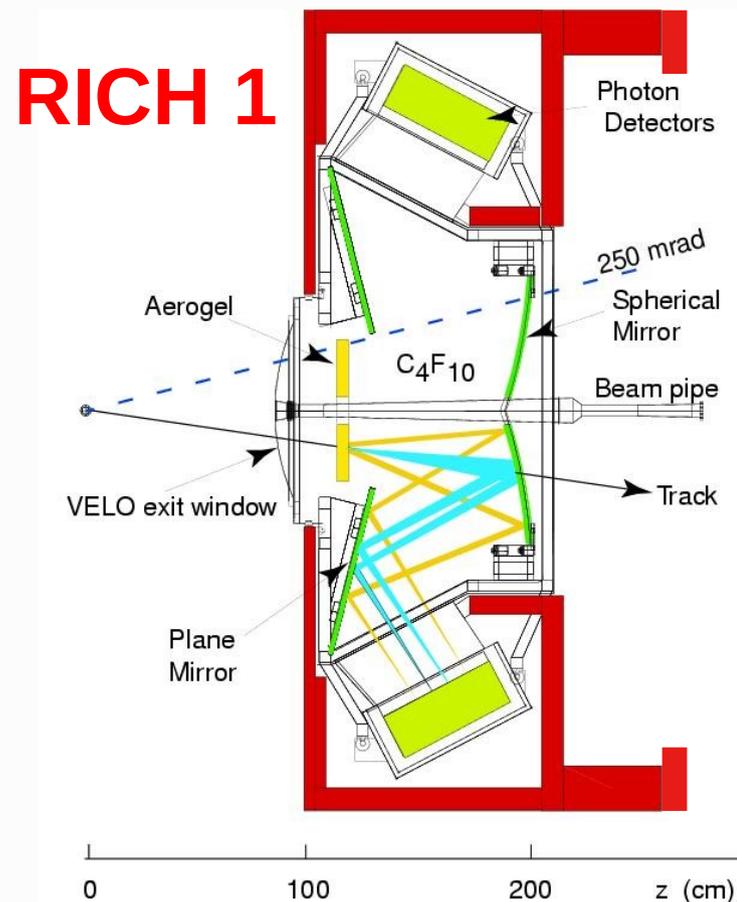
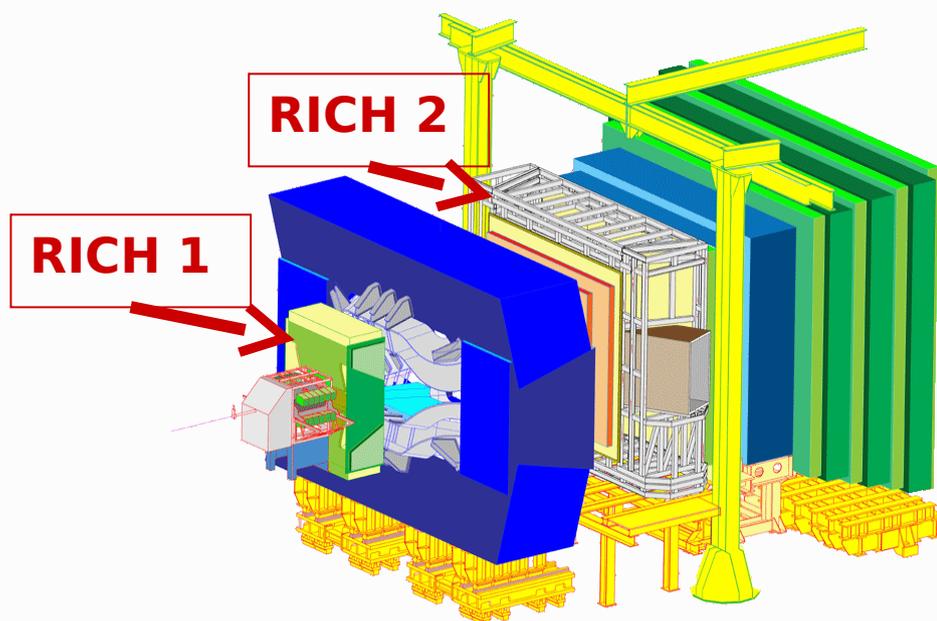
RICH = **R**ing **I**maging **C**herenkov



Радиус кольца: скорость

Трекер: импульс

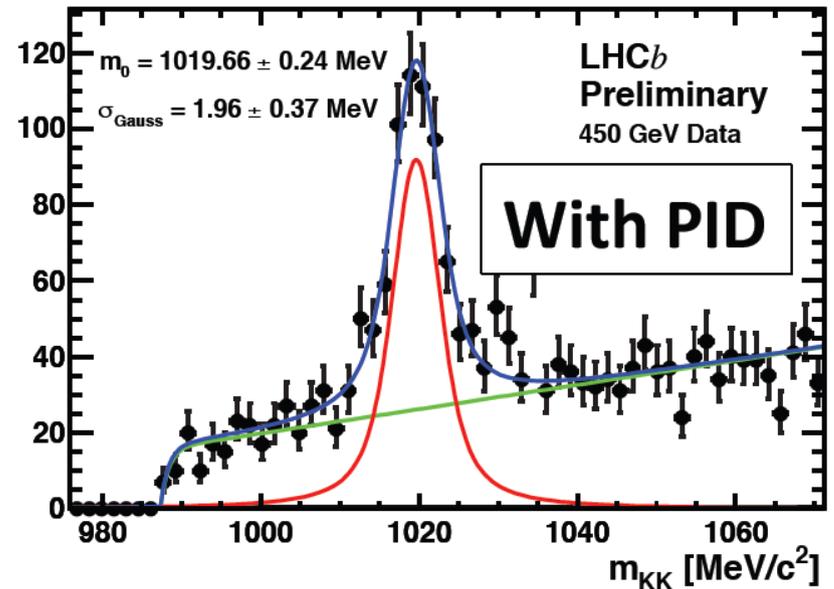
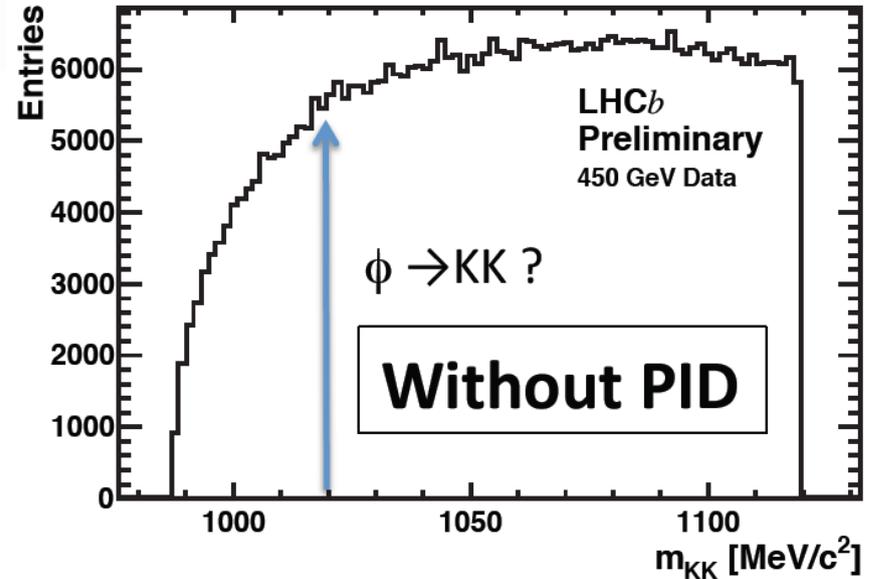
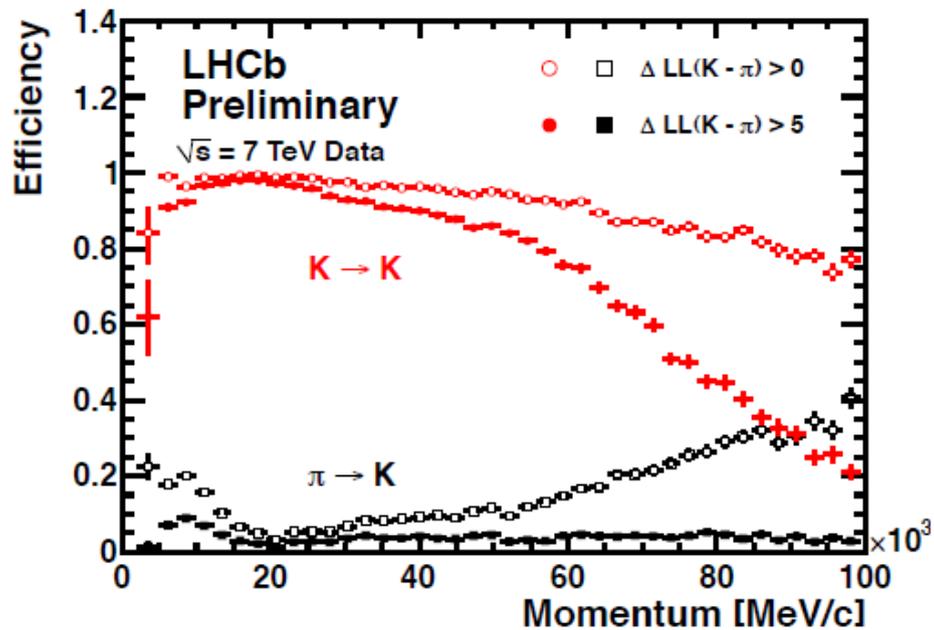
R+трекинг: масса частицы



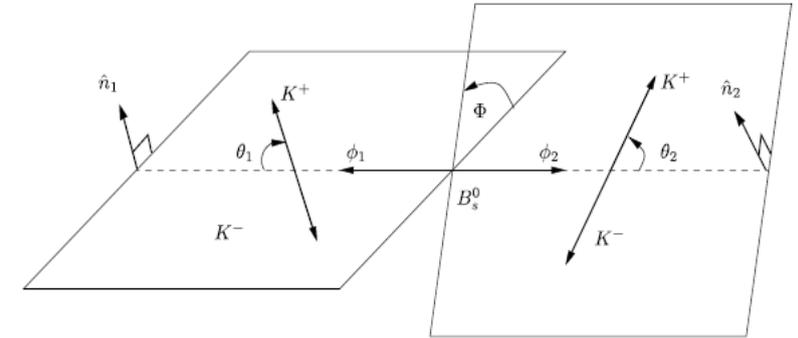
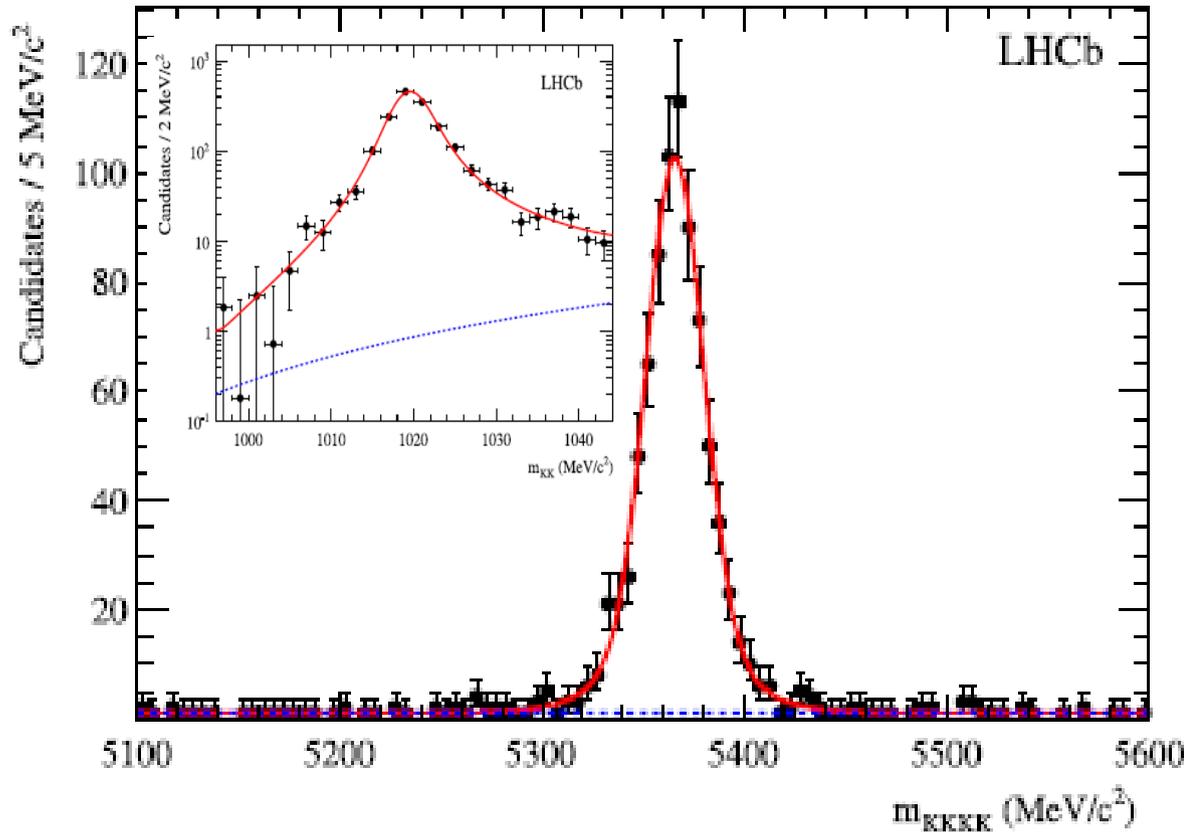
Идентификация в RICH

Метод максимального правдоподобия для
события целиком;
Учет фона для каждого пикселя;
Каждый трек — несколько гипотез о массе;

Такой метод оказывается лучше, чем просмотр
кольца для каждого отдельного трека



$B_s^0 \rightarrow \varphi\varphi$ (Пример № 5)



$$|A_0|^2 = 0.365 \pm 0.022 \text{ (stat)} \pm 0.012 \text{ (syst)},$$

$$|A_{\perp}|^2 = 0.291 \pm 0.024 \text{ (stat)} \pm 0.010 \text{ (syst)},$$

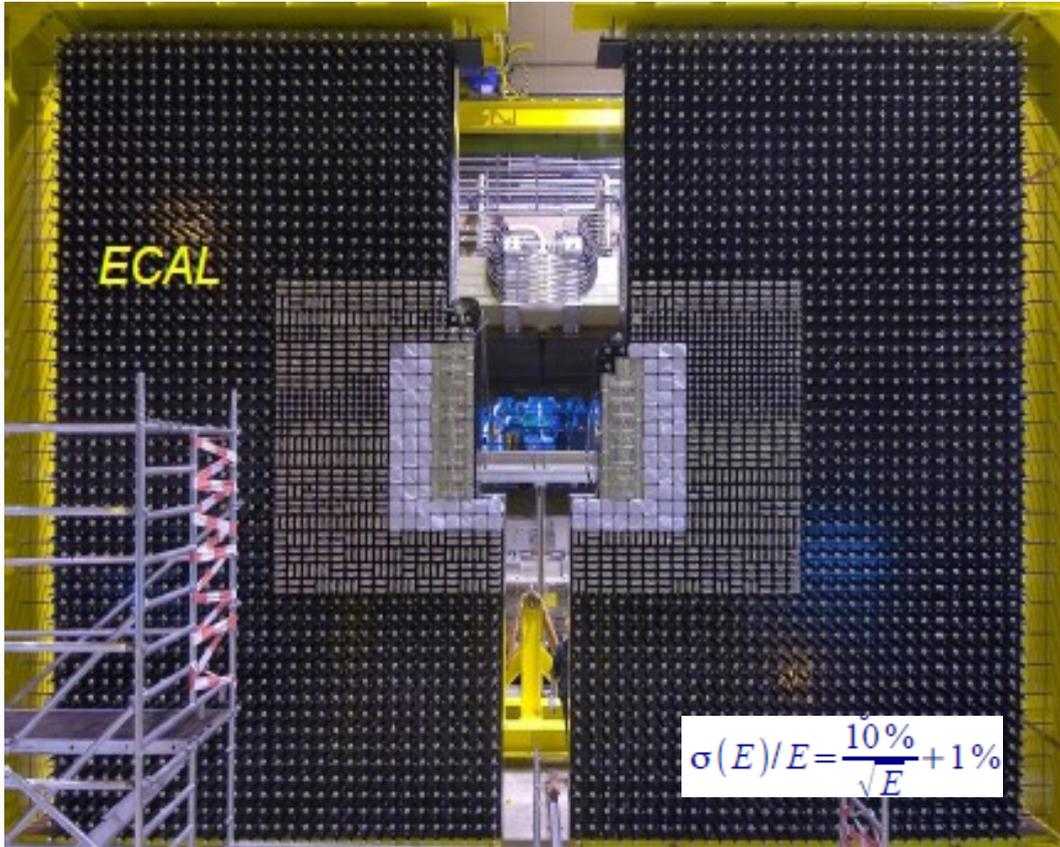
$$|A_{\parallel}|^2 = 0.344 \pm 0.024 \text{ (stat)} \pm 0.014 \text{ (syst)},$$

$$\cos(\delta_{\parallel}) = -0.844 \pm 0.068 \text{ (stat)} \pm 0.029 \text{ (syst)},$$

Измерены угловые распределения → Амплитуды и фаза

Согласие с результатами CDF и с предсказаниями «КХД-факторизации»

Калориметрия



Измерение энергий e и γ

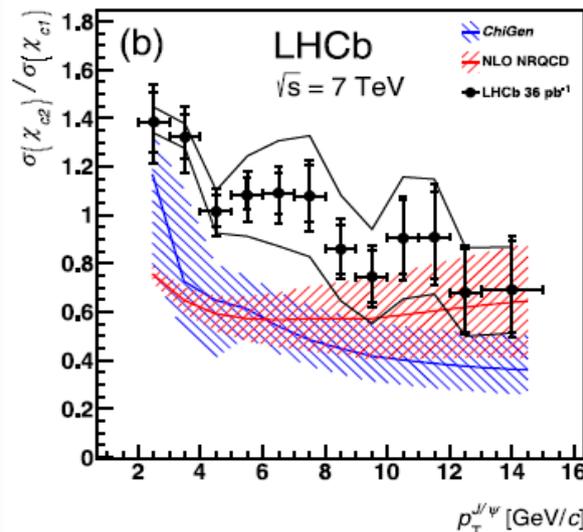
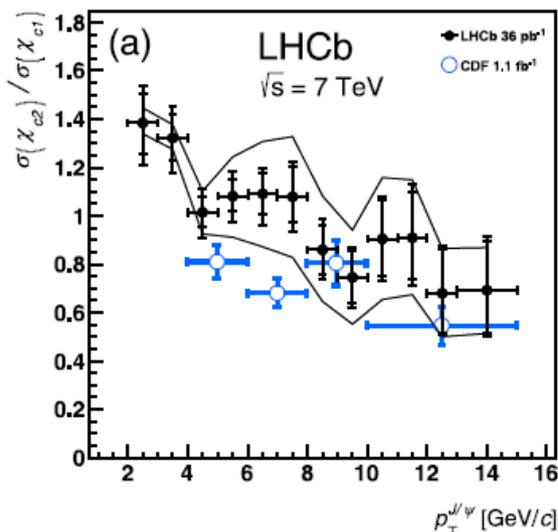
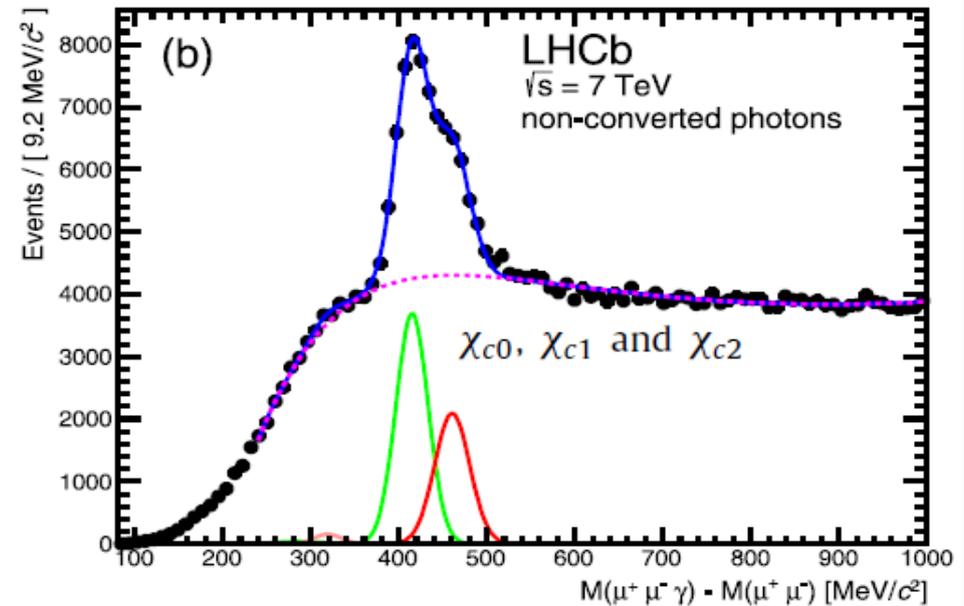
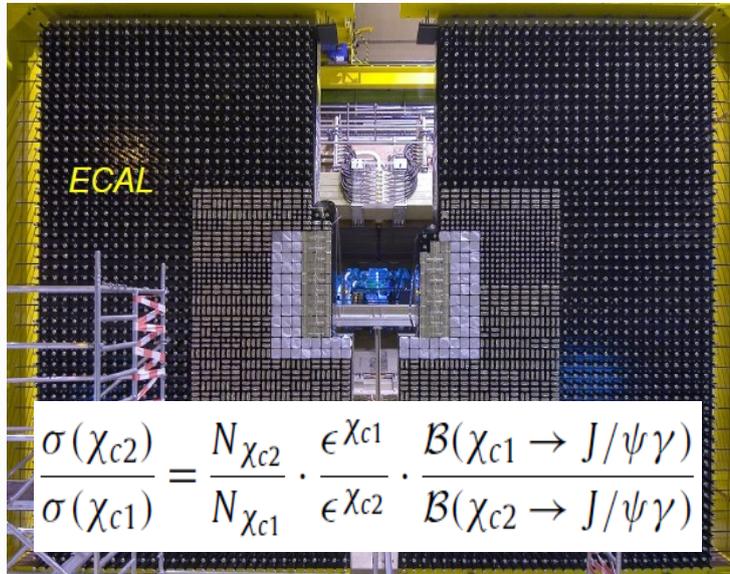
Триггер

Распады с фотонами!

Измерение энергий адронов

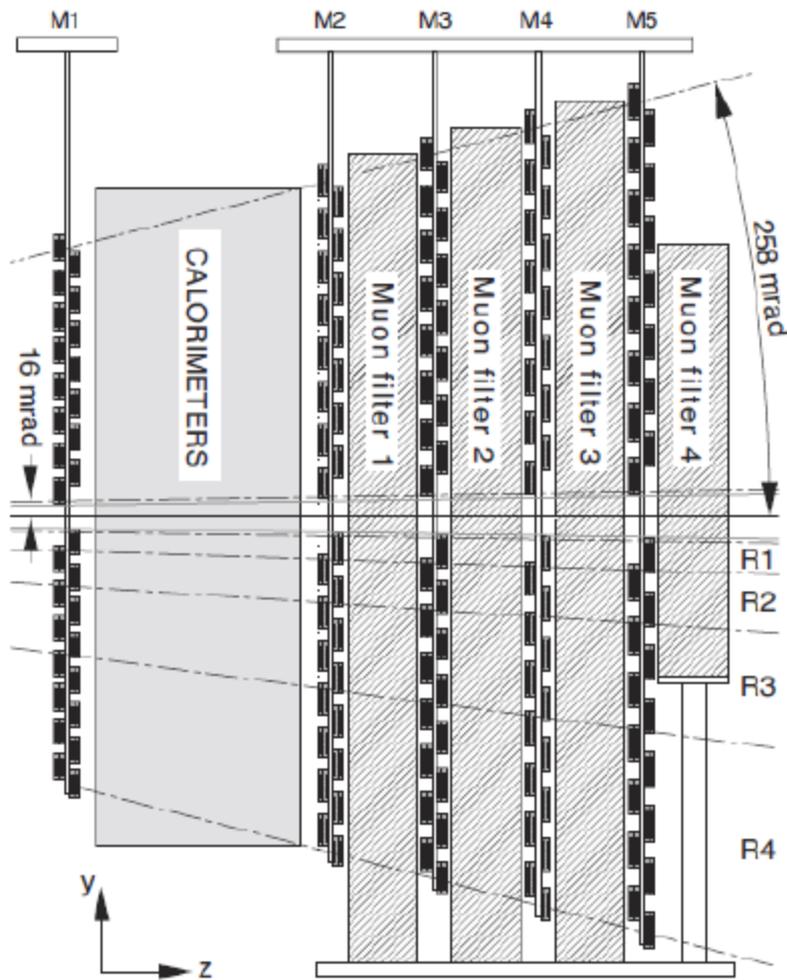
Триггер

Калориметрия (Пример № 6)



Phys. Lett. B 714, 215 (2012)

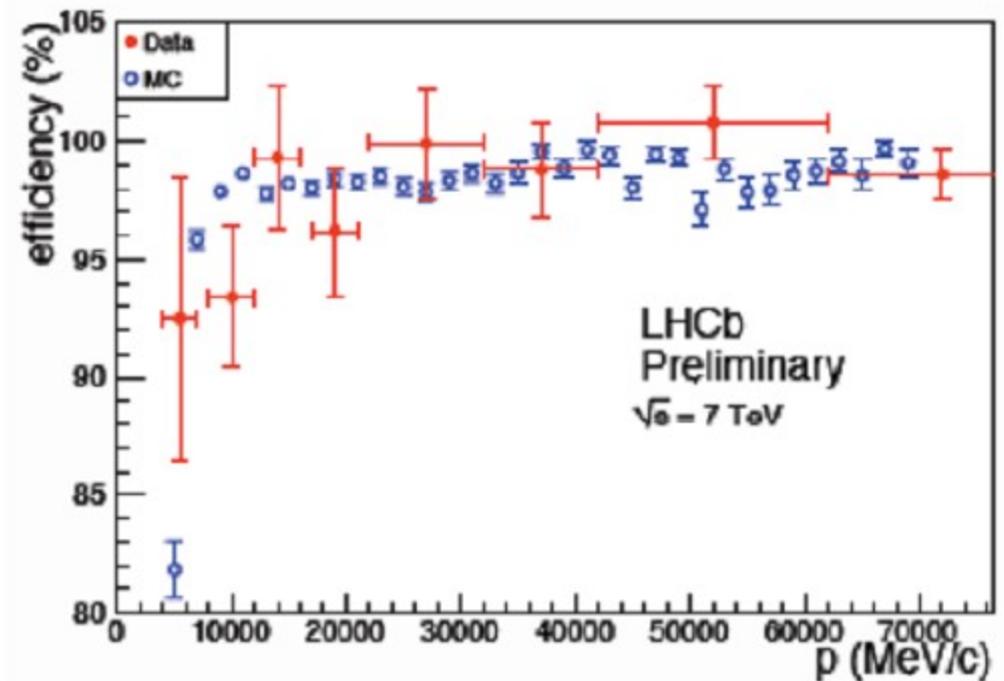
Мюонная система (существенный вклад физиков ПИЯФ)



Высокая эффективность и разрешение

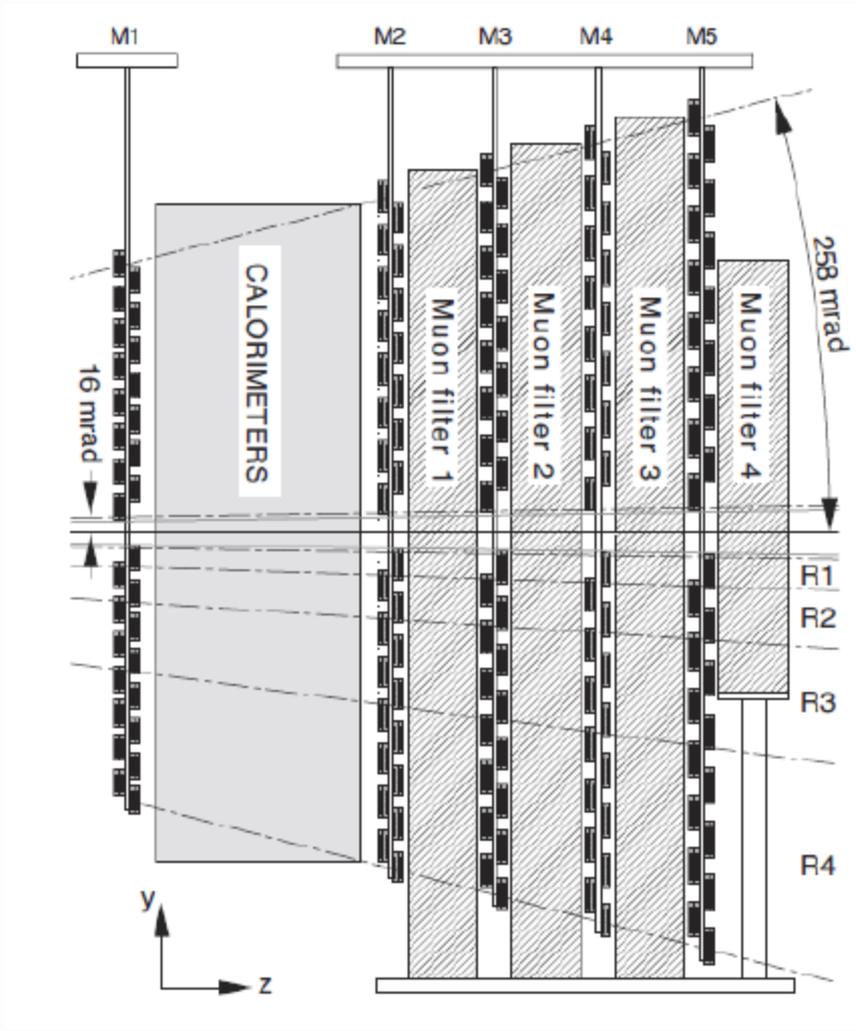
Большая доля работ LHCb

подразумевает регистрацию ди-мюона



Мюонная система (ПИЯФ)

Пример №7: EPJС 72 (2012) 2025



$$\sigma(pp \rightarrow \Upsilon(1S)X) \times \mathcal{B}(\Upsilon(1S) \rightarrow \mu^+\mu^-)$$

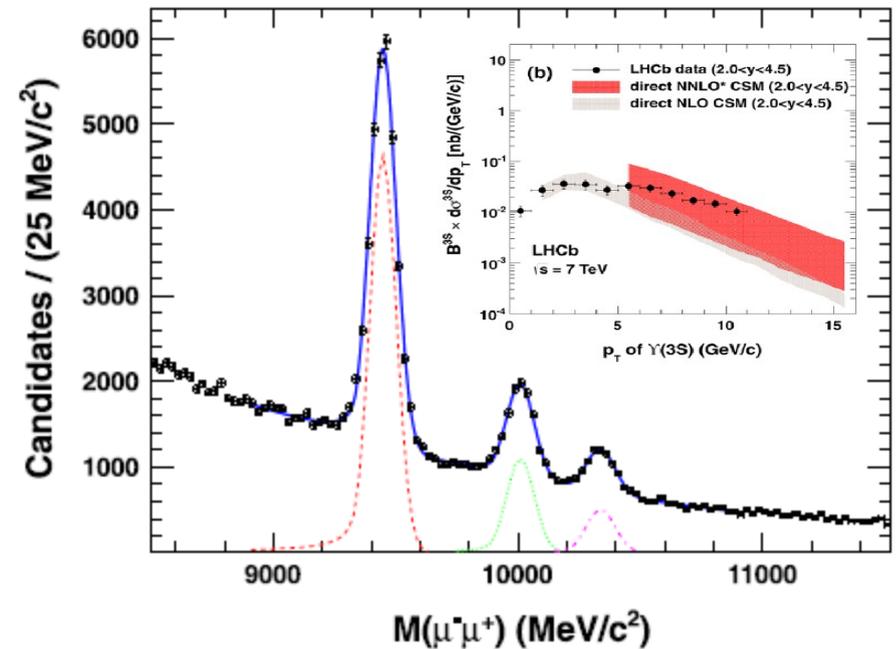
$$= 2.29 \pm 0.01 \pm 0.10^{+0.19}_{-0.37} \text{ nb},$$

$$\sigma(pp \rightarrow \Upsilon(2S)X) \times \mathcal{B}(\Upsilon(2S) \rightarrow \mu^+\mu^-)$$

$$= 0.562 \pm 0.007 \pm 0.023^{+0.048}_{-0.092} \text{ nb},$$

$$\sigma(pp \rightarrow \Upsilon(3S)X) \times \mathcal{B}(\Upsilon(3S) \rightarrow \mu^+\mu^-)$$

$$= 0.283 \pm 0.005 \pm 0.012^{+0.025}_{-0.048} \text{ nb},$$



Распады B мезонов **впервые** обнаруженные LHCb

$\bar{B}_s^0 \rightarrow D_{s2}^{*+} X \mu \nu$ — впервые D_{s2}^* в распадах B_s . Phys. Lett. B 698, 14 (2011).

$B_s^0 \rightarrow J/\psi f_0(980)$ — изучени CP нарушений (**далее подробно**)

$\bar{B}_s^0 \rightarrow D^0 K^{*0}$ — источник фона **для редкого распада** $\bar{B}^0 \rightarrow D^0 K^{*0}$ Phys. Lett. B 698, 115 (2011)

$\bar{B}_s^0 \rightarrow K^{*0} \bar{K}^{*0}$ — бренчинг и продольная поляризация хорошо
Phys. Lett. B 706, 32 (2011)
предсказываются СМ (**результаты LHCb согласуются**)
Phys. Lett. B 709, 50 (2012).

$\bar{B}_s^0 \rightarrow J/\psi f'_0(1525)$ — нарушение CP в «тензорных» распадах (**будущее**)
Phys. Rev. Lett. 108, 151801 (2012).

$\bar{B}^0 \rightarrow D^+ K^- \pi^+ \pi^-$ — определение γ для СКМ (**будущее**)
Phys. Rev. Lett. 108, 161801 (2012).

$B^0 \rightarrow \bar{D}^0 K^+ K^-$ — определение γ для СКМ (**будущее**)
Phys. Rev. Lett. 109, 131801 (2012).

$\bar{B}_s^0 \rightarrow \bar{D}^0 K^+ K^-$ — определение γ и ϕ_s (**будущее**)
Phys. Rev. Lett. 109, 131801 (2012).

III. Редкие распады

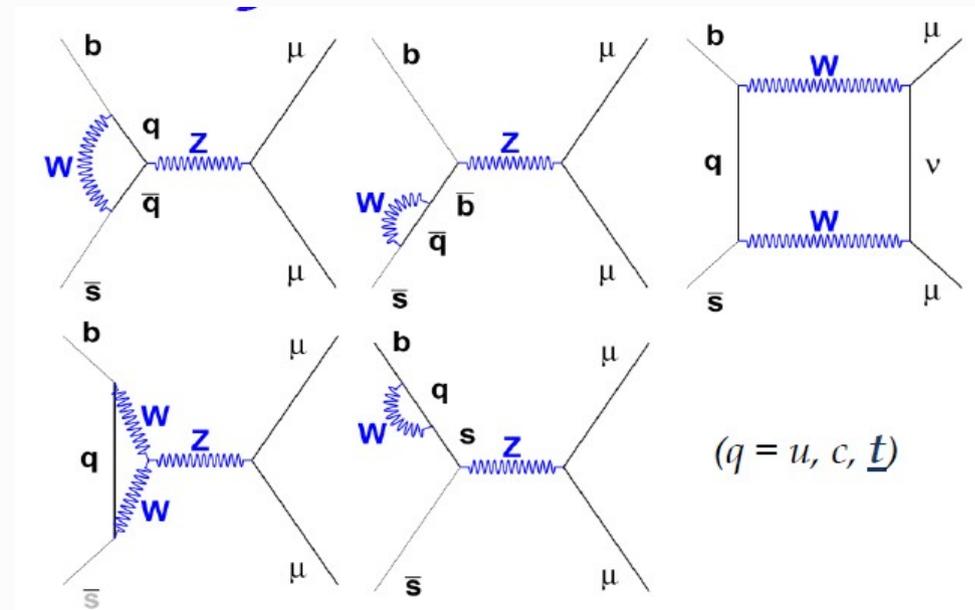
Редкие распады типа $B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$

Редкие распады типа $B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$

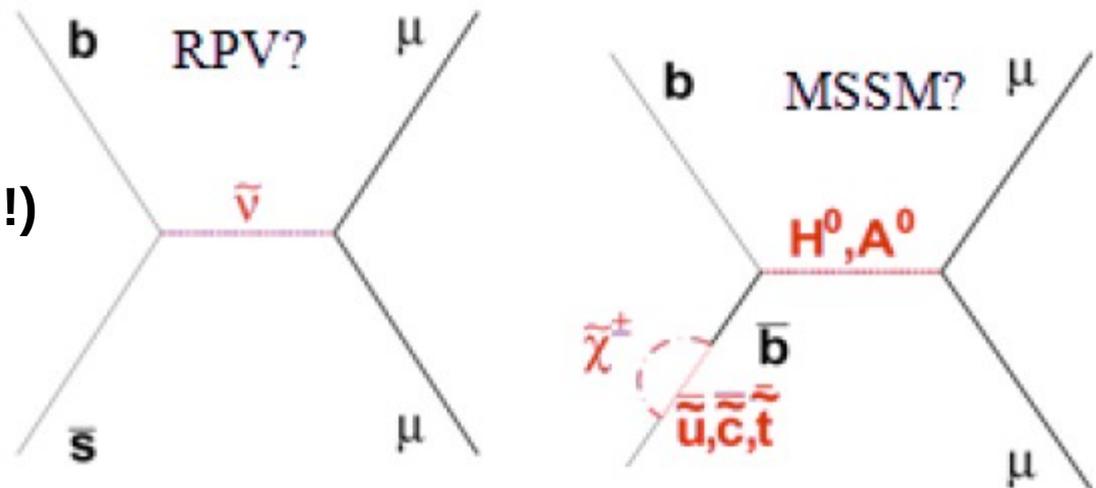
СМ предсказывает вероятности распада с высокой точностью

$$\text{BR}(B_s \rightarrow \mu\mu) = (3.2 \pm 0.2) \times 10^{-9}$$

$$\text{BR}(B_d \rightarrow \mu\mu) = (1.0 \pm 0.1) \times 10^{-10}$$



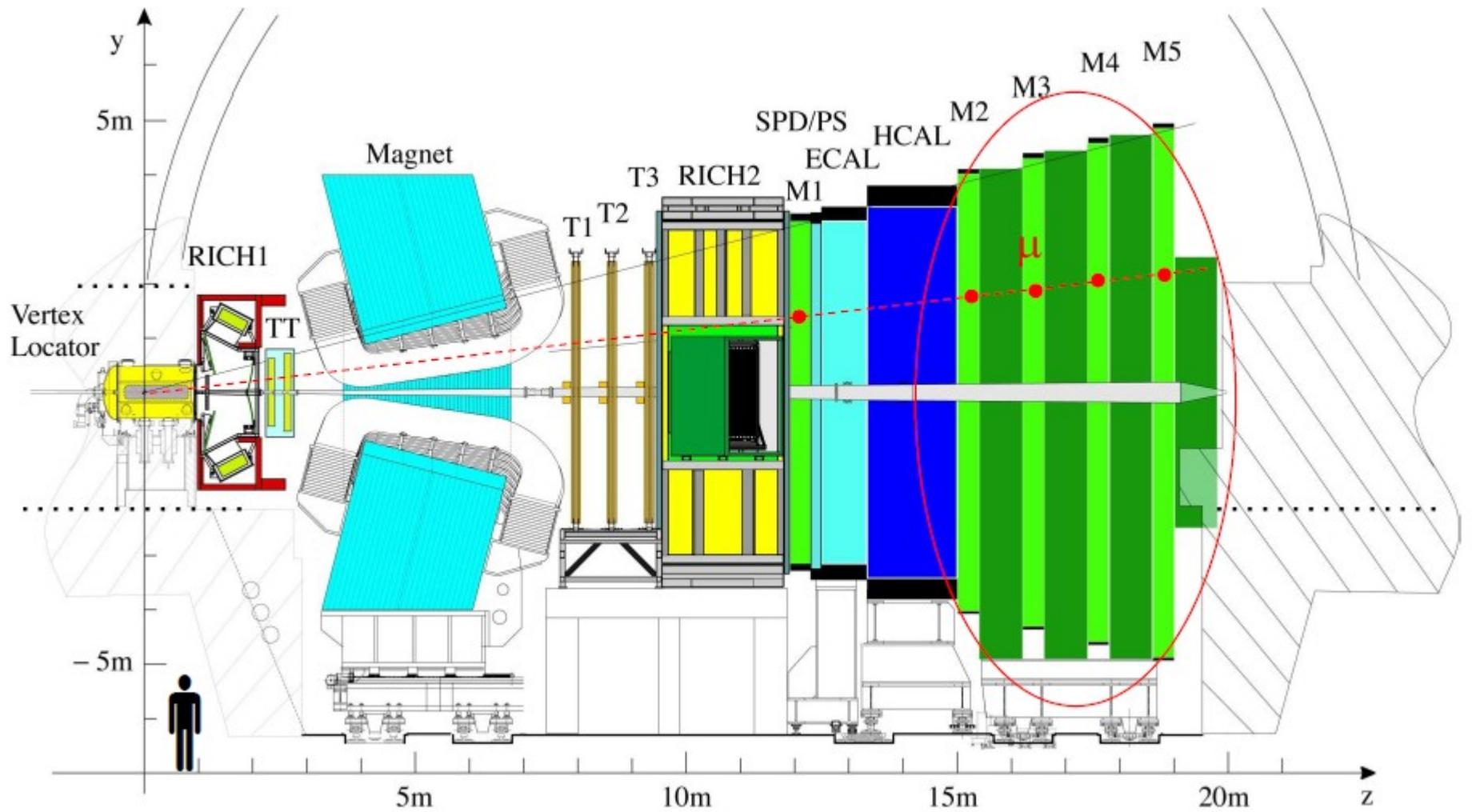
НФ (MSSM, ...) могут увеличивать (или уменьшать?!) эту вероятность!



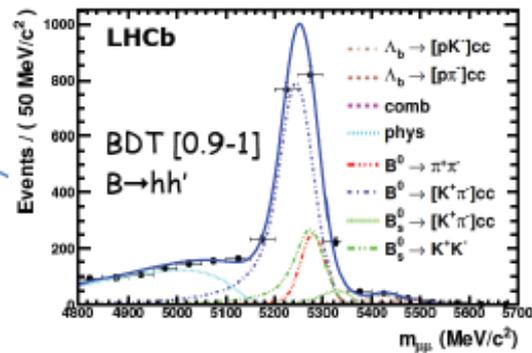
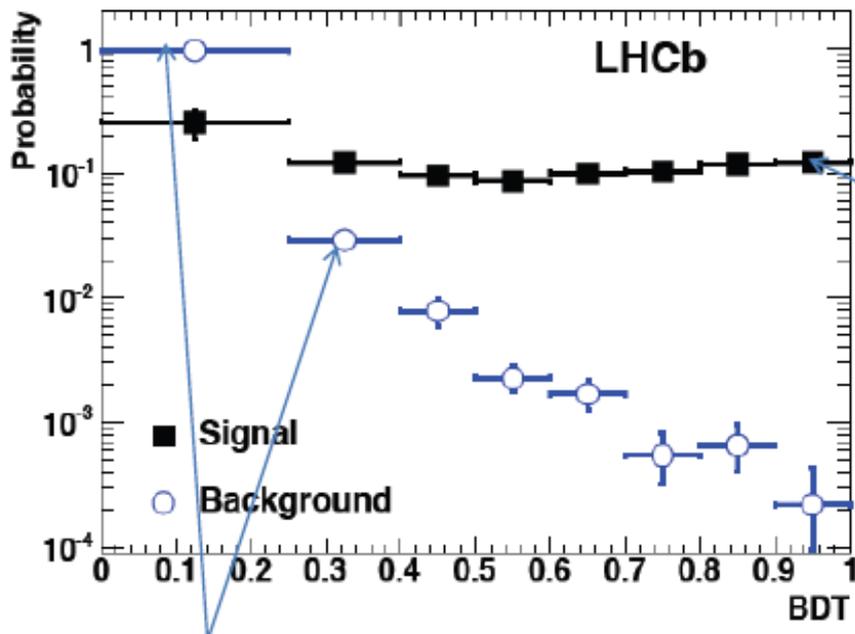
Сценарии развития событий

<i>Scenario</i>	<i>would point to ...</i>
$BR(\mathcal{B}_s \rightarrow \mu\mu) \gg SM$	<i>Big enhancement from NP in scalar sector, SUSY high $\tan\beta$</i>
$BR(\mathcal{B}_s \rightarrow \mu\mu) \neq SM$	<i>SUSY (C_S, C_P), ED's, LHT, TC2 (C_{10})...</i>
$BR(\mathcal{B}_s \rightarrow \mu\mu) \sim SM$	<i>Anything (\rightarrow rule out regions of parameter space that predict sizable departures from SM. Obviously)</i>
$BR(\mathcal{B}_s \rightarrow \mu\mu) \ll SM$	<i>NP in scalar sector, but full MSSM ruled out. NMSSM (Higgs singlet) good candidate</i>
$BR(\mathcal{B}_s \rightarrow \mu\mu) / BR(\mathcal{B}_d \rightarrow \mu\mu) \neq SM$	<i>CMFV ruled out. New FCNC sources fully independent of CKM matrix (RPV SUSY, ED's etc...)</i>

Отбор событий.

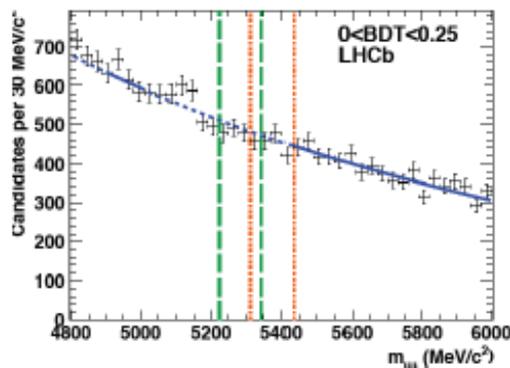


Дерево принятия решений [Boost Decision Tree (BDT)]



Тренировка BDT на Монте-Карло

Используется $BDT > 0.5$



BDT переменная не зависит от распределения по $M_{\mu\mu}$

Не может создать поддельных пиков.

(Проверка по распаду B в два адрона)

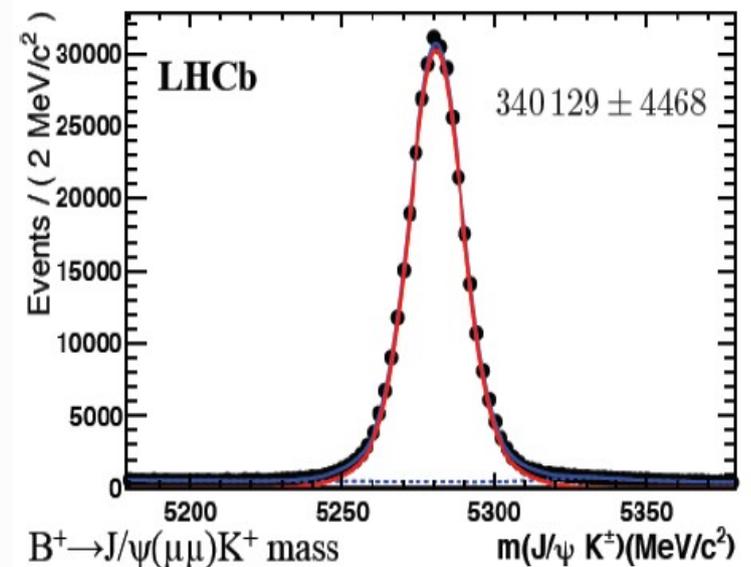
Нормировка

$$BR = BR_{cal} \times \frac{\epsilon_{cal}^{REC} \epsilon_{cal}^{SEL|REC} \epsilon_{cal}^{TRIG|SEL}}{\epsilon_{sig}^{REC} \epsilon_{sig}^{SEL|REC} \epsilon_{sig}^{TRIG|SEL}} \times \frac{f_{cal}}{f_{B_s^0}} \times \frac{N_{B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-}}{N_{cal}} = \alpha \times N_{B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-}$$

Эффективности — Отношение вероятностей адронизации b кварка в различные состояния
 $f_d/f_s = 3.75 \pm 0.29$ **Результат LHCb (PRD 85, 03008).**

Можно использовать в других экспериментах!

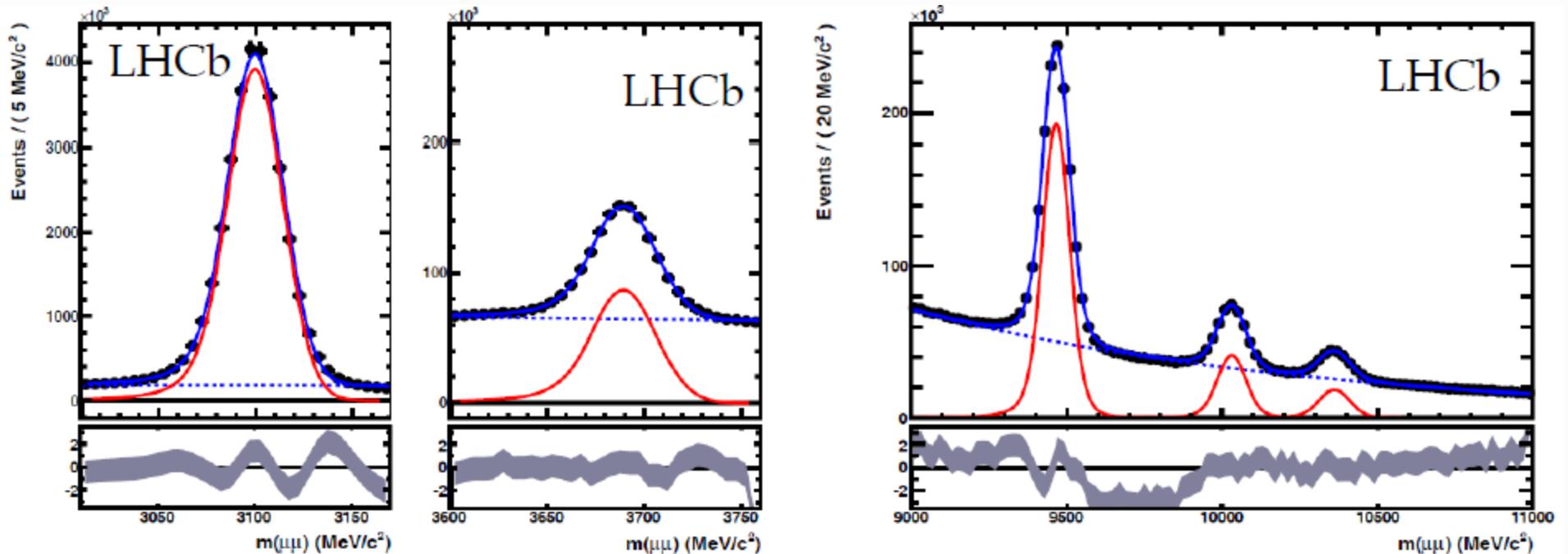
	Bd	Bs
	$\alpha_{B_d \rightarrow \mu^+ \mu^-}^{cal}$ ($\times 10^{-11}$)	$\alpha_{B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-}^{cal}$ ($\times 10^{-10}$)
$B^+ \rightarrow J/\psi K^+$	8.464 ± 0.433	3.170 ± 0.297
$B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi$	11.13 ± 3.124	4.169 ± 1.123
$B^0 \rightarrow K^+ \pi^-$	7.709 ± 0.957	2.887 ± 0.424



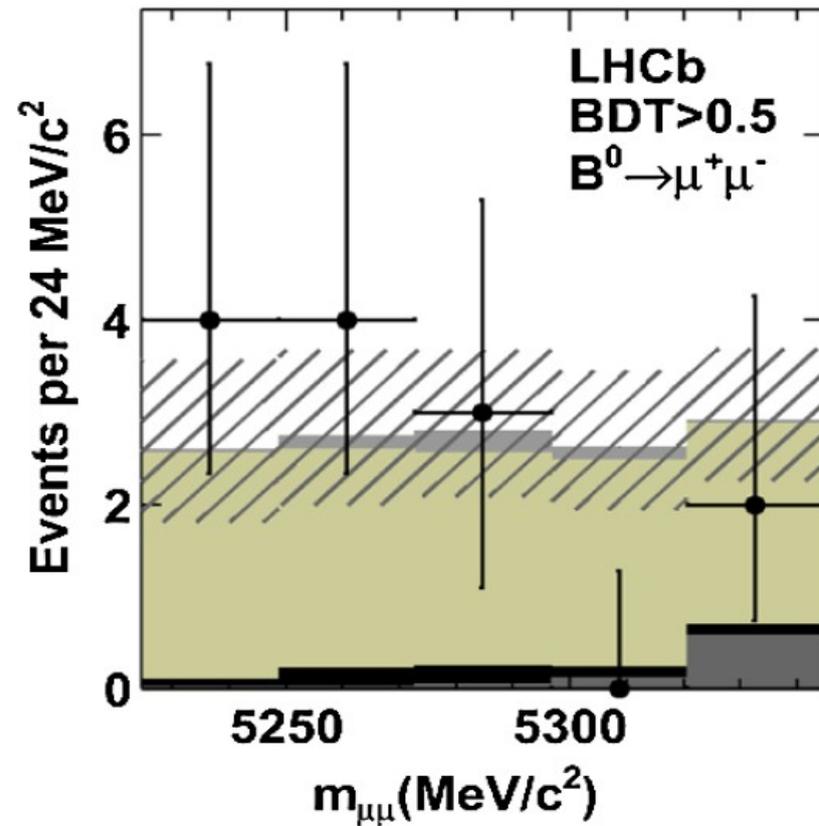
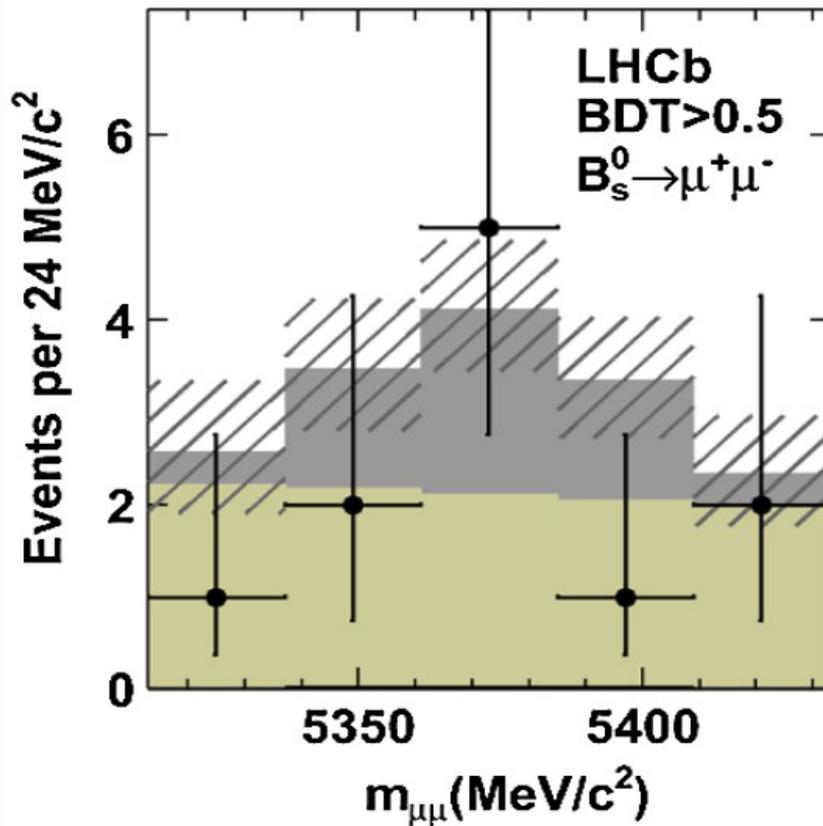
Разные каналы — разные преимущества / недостатки : триггера, число треков, точность BR-ов

Инвариантные массы.

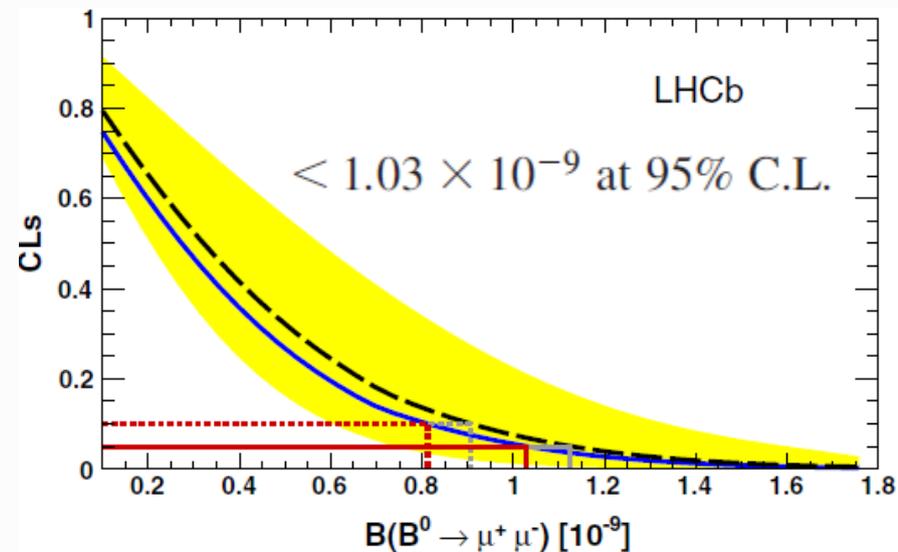
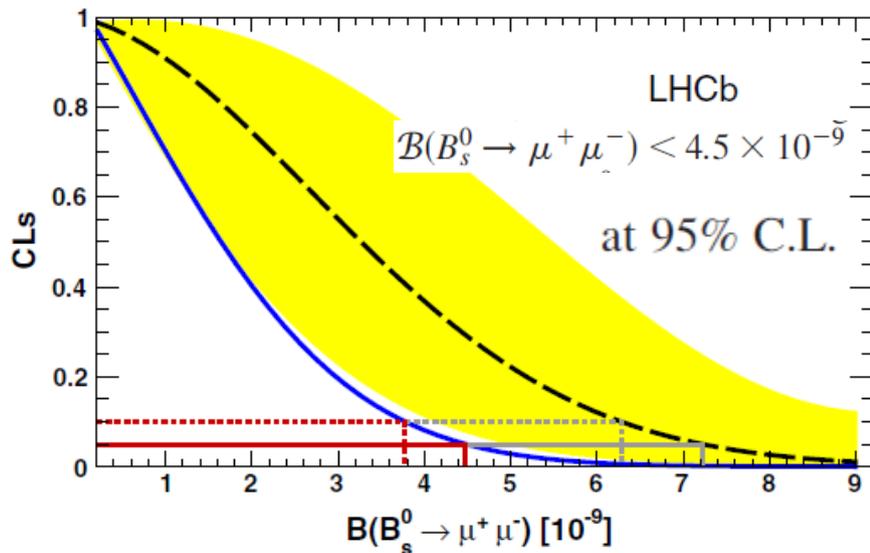
- Форма сигнала для $(B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ зависит от разрешения при $M_{\mu\mu} = m_B$
- Разрешение из распадов чармония и ботомия \rightarrow почти линейно от $M_{\mu\mu}$
- Вклад фона из \rightarrow интерполяция фона вблизи m_B



Инвариантные массы. Вклады СМ и фона.



CL-метод и «брэнчинги»



Статистика:

$$Q = \frac{e^{-(s+b)}(s+b)^d / d!}{e^{-b}(b)^d / d!}$$

$$CL_{s+b} = P_{\text{obs}}(Q < Q_{\text{obs}})$$

$$CL_b = P_{\text{obs}}(Q < Q_{\text{obs}})$$

$$CL_s = CL_{s+b} / CL_b$$

PRL 108 (2012) 231801

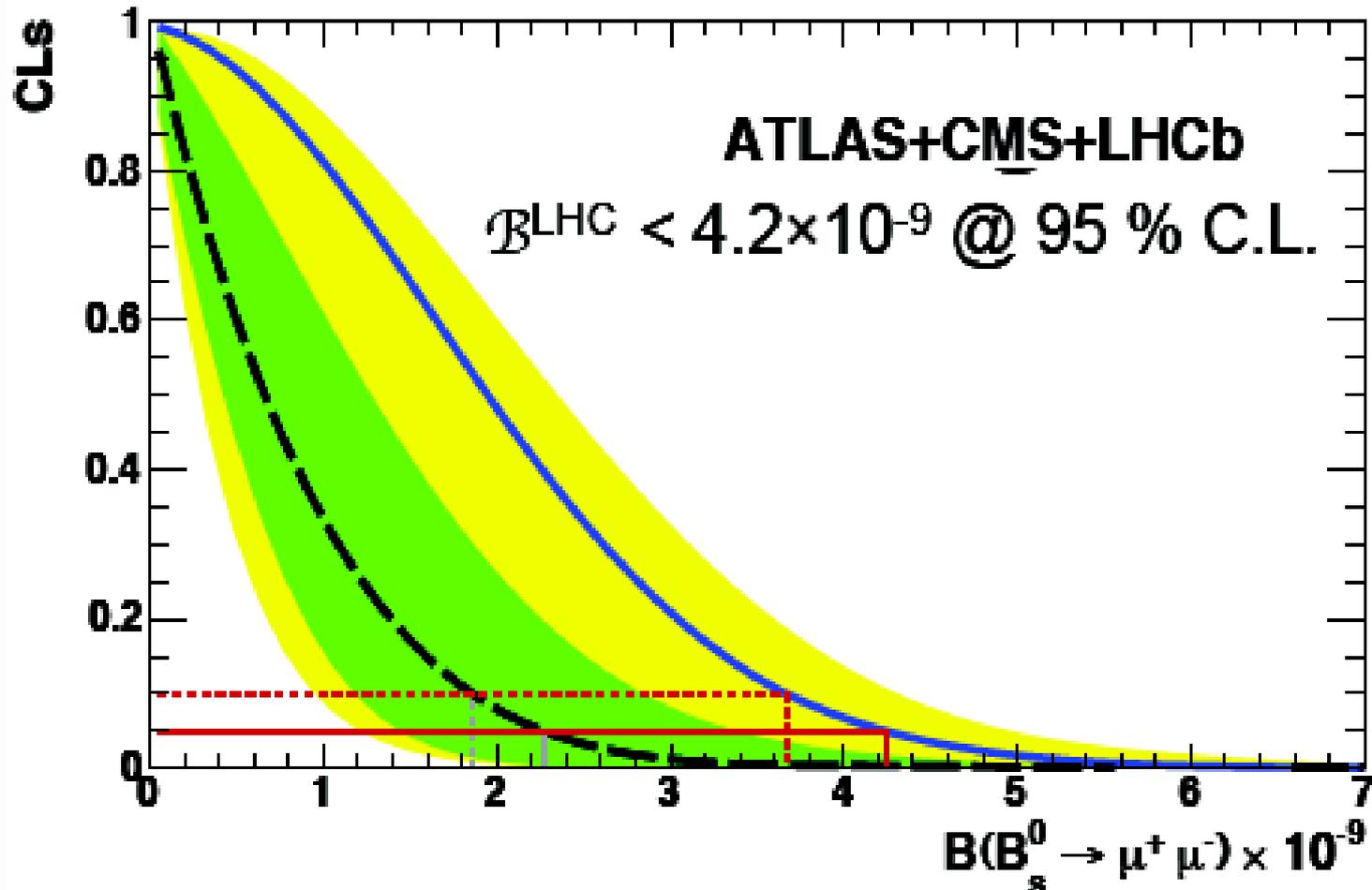
— — —

Ожидаемое $+1\sigma$

—

Наблюдаемое

Комбинированный результат БАК



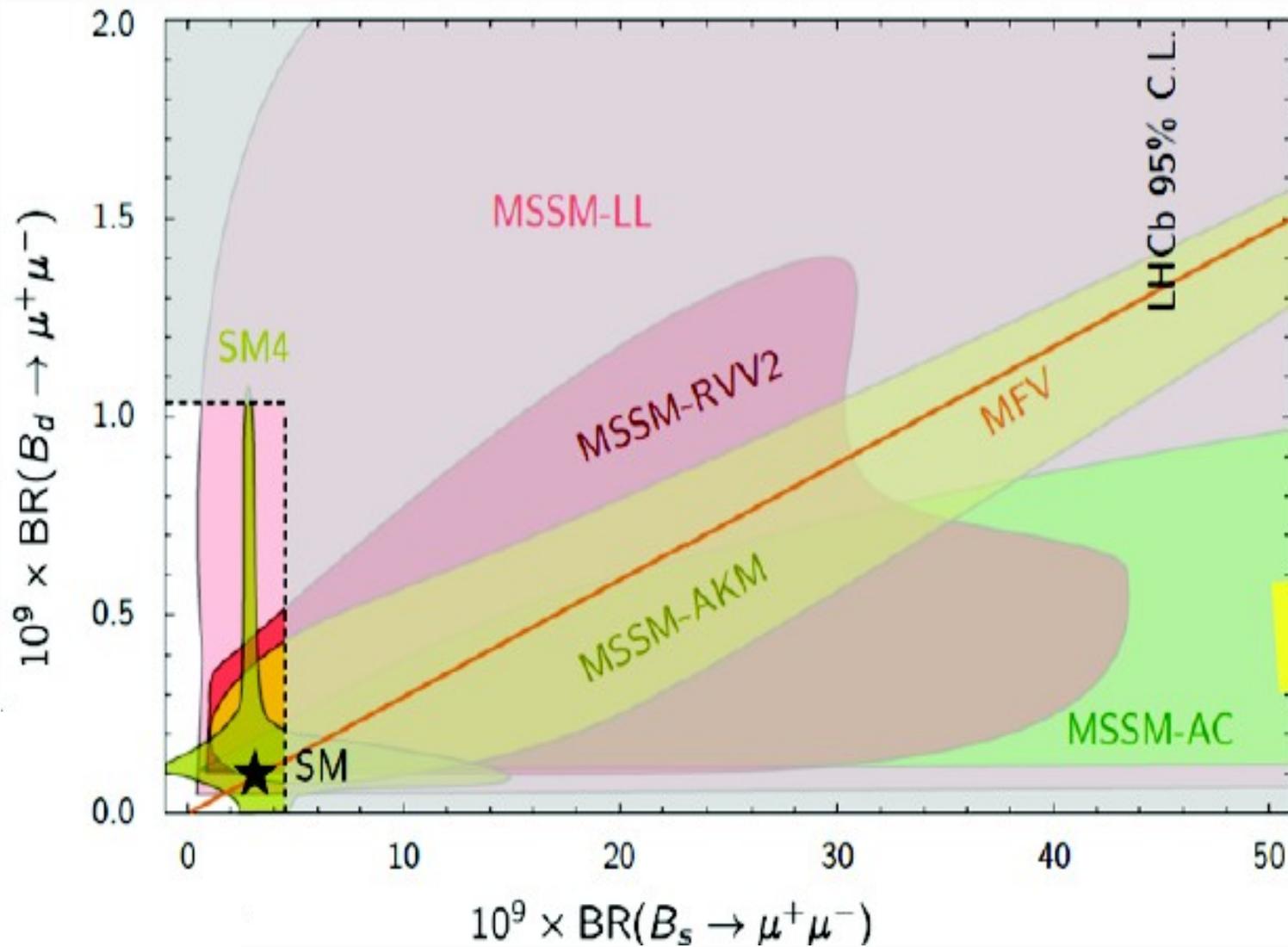
Сценарии развития событий

<i>Scenario</i>	<i>would point to ...</i>
$BR(\mathcal{B}_s \rightarrow \mu\mu) \gg SM$	<i>Big enhancement from NP in scalar sector, SUSY high $\tan\beta$</i>
$BR(\mathcal{B}_s \rightarrow \mu\mu) \neq SM$	<i>SUSY (C_S, C_P), ED's, LHT, TC2 (C_{10})...</i>
$BR(\mathcal{B}_s \rightarrow \mu\mu) \sim SM$	<i>Anything (\rightarrow rule out regions of parameter space that predict sizable departures from SM. Obviously)</i>
$BR(\mathcal{B}_s \rightarrow \mu\mu) \ll SM$	<i>NP in scalar sector, but full MSSM ruled out. NMSSM (Higgs singlet) good candidate</i>
$BR(\mathcal{B}_s \rightarrow \mu\mu) / BR(\mathcal{B}_d \rightarrow \mu\mu) \neq SM$	<i>CMFV ruled out. New FCNC sources fully independent of CKM matrix (RPV SUSY, ED's etc...)</i>

Сценарии развития событий

<i>Scenario</i>	<i>would point to ...</i>
$BR(B_s \rightarrow \mu\mu) \neq SM$	<i>SUSY (C_S, C_P), \mathcal{ED}'s, \mathcal{LHT}, \mathcal{TC}_2 (C_{10})...</i>
$BR(B_s \rightarrow \mu\mu) \sim SM$	<i>Anything (\rightarrow rule out regions of parameter space that predict sizable departures from SM. Obviously)</i>
$BR(B_s \rightarrow \mu\mu) \ll SM$	<i>\mathcal{NP} in scalar sector, but full MSSM ruled out. NMSSM (Higgs singlet) good candidate</i>
$BR(B_s \rightarrow \mu\mu) / BR(B_d \rightarrow \mu\mu) \neq SM$	<i>CMFV ruled out. New FCNC sources fully independent of CKM matrix (\mathcal{RPV} SUSY, \mathcal{ED}'s etc...)</i>

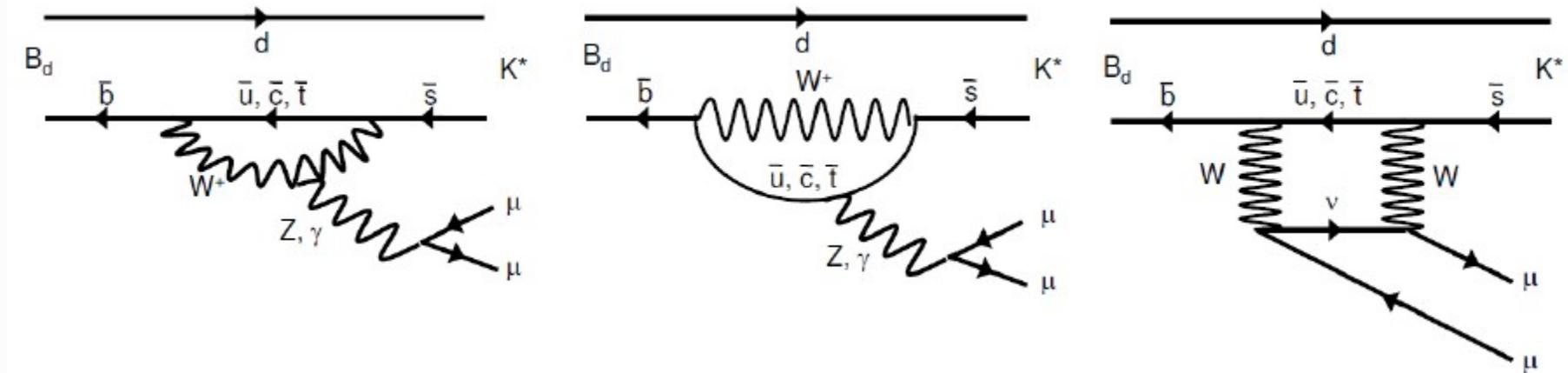
Влияние результата на модели



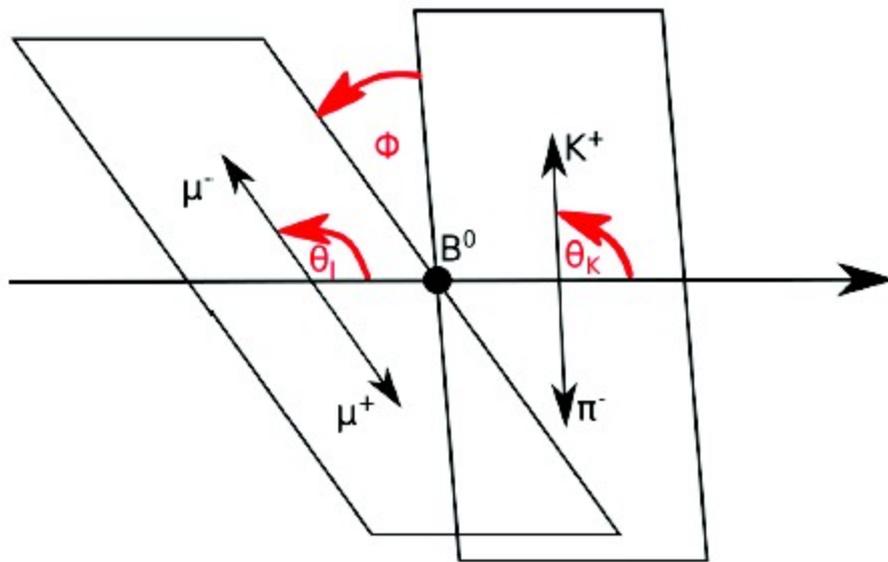
From D. Straub
@Moriond E.W.

Полулептонные распады
типа $B \rightarrow h \mu^+ \mu^-$ ($h = \pi, K, K^* \dots$)

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

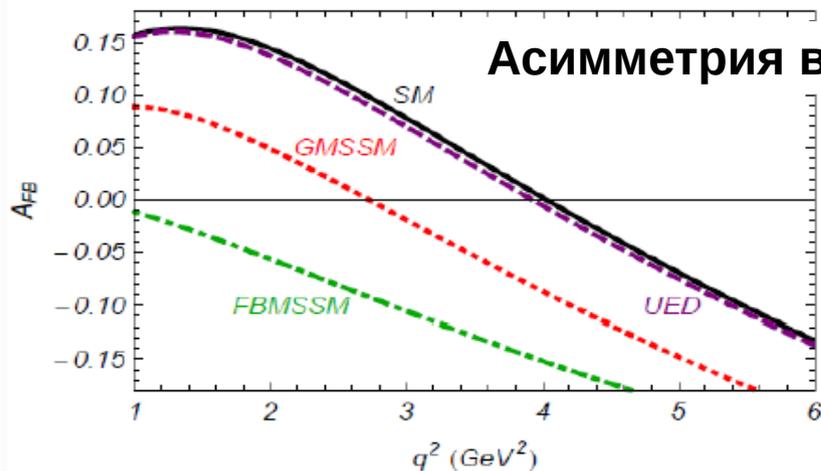


- I. Редкие распады (например, $\mathcal{B}[B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-] = 1.05 \cdot 10^{-6}$)
- II. НФ может иметь тот же порядок что СМ.
- III. Много наблюдаемых (4 частицы в конечном состоянии)
- IV. Сечение описывается 4 кинематическими переменными (3 угла + Инвариантная масс ди-мюна)



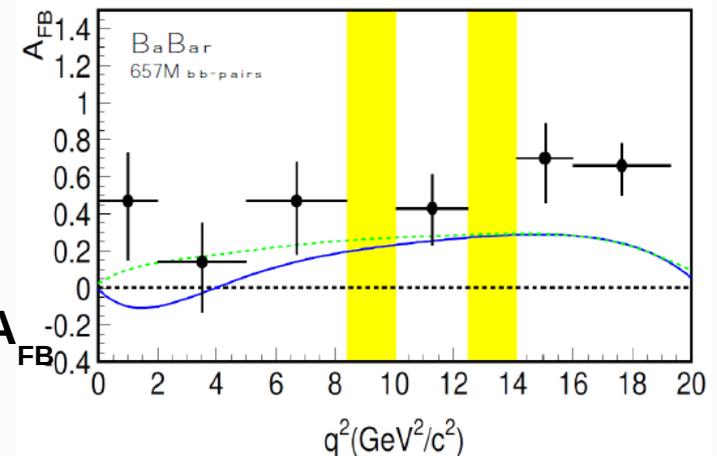
$$\frac{d^4(\Gamma + \bar{\Gamma})}{d \cos \theta_\ell d \cos \theta_K d\phi dq^2} \propto$$

$$\begin{aligned}
 & F_L \cos^2 \theta_K + \frac{3}{4}(1 - F_L)(1 - \cos^2 \theta_K) + \\
 & F_L \cos^2 \theta_K (2 \cos^2 \theta_\ell) + \\
 & \frac{1}{4}(1 - F_L)(1 - \cos^2 \theta_K)(2 \cos^2 \theta_\ell - 1) + \\
 & S_3(1 - \cos^2 \theta_K)(1 - \cos^2 \theta_\ell) \cos 2\phi + \\
 & \frac{4}{3} A_{FB}(1 - \cos^2 \theta_K) \cos \theta_\ell + \\
 & S_9(1 - \cos^2 \theta_K)(1 - \cos^2 \theta_\ell) \sin 2\phi
 \end{aligned}$$

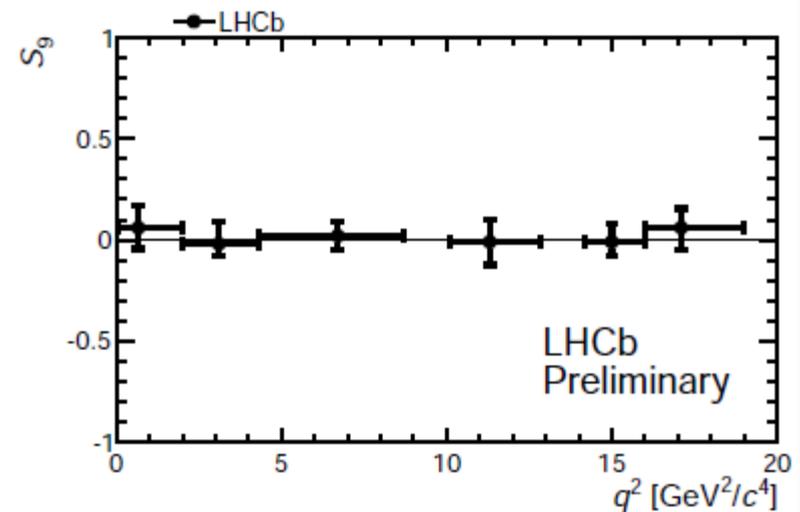
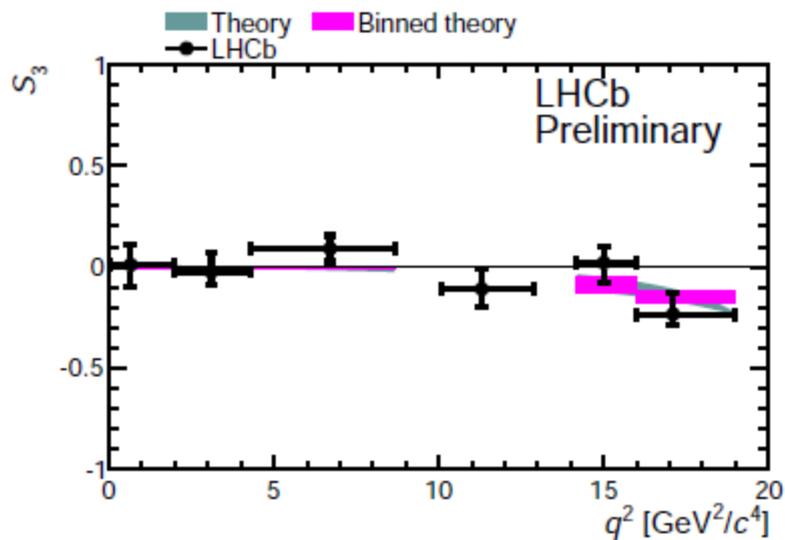
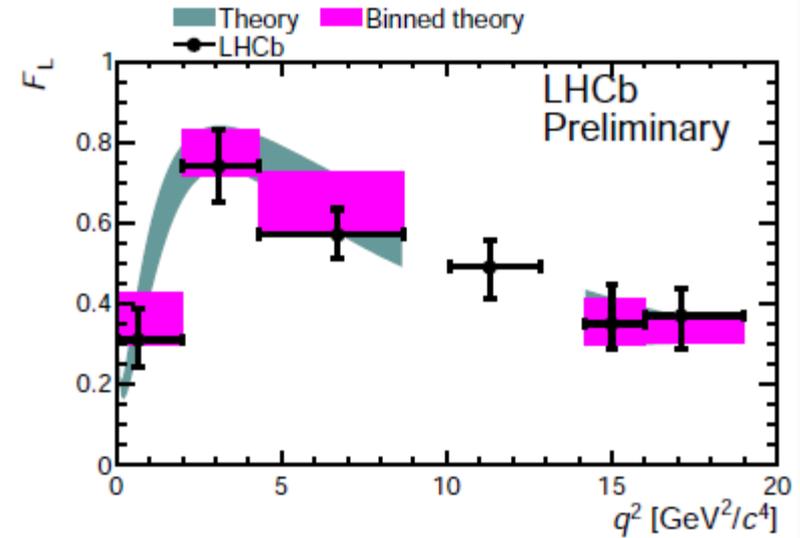
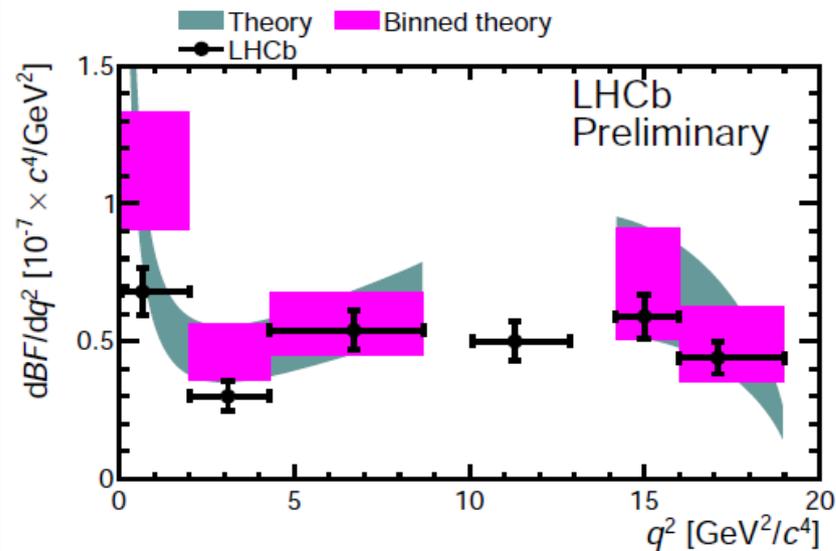


ВаBar:

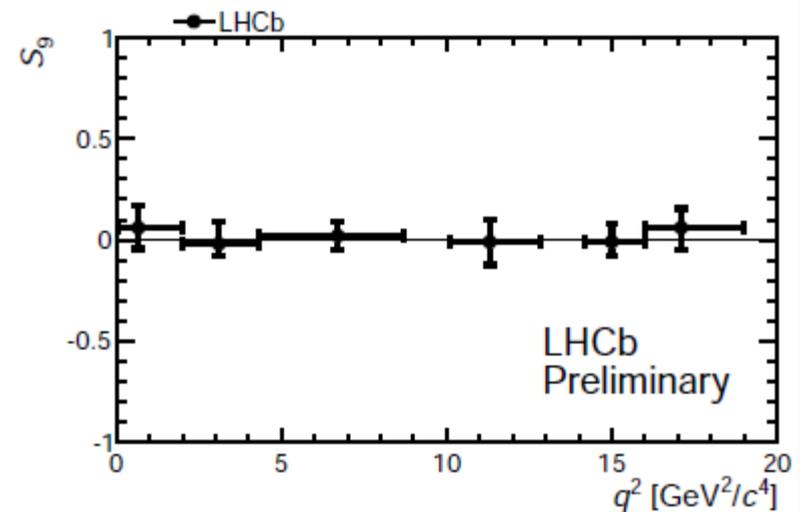
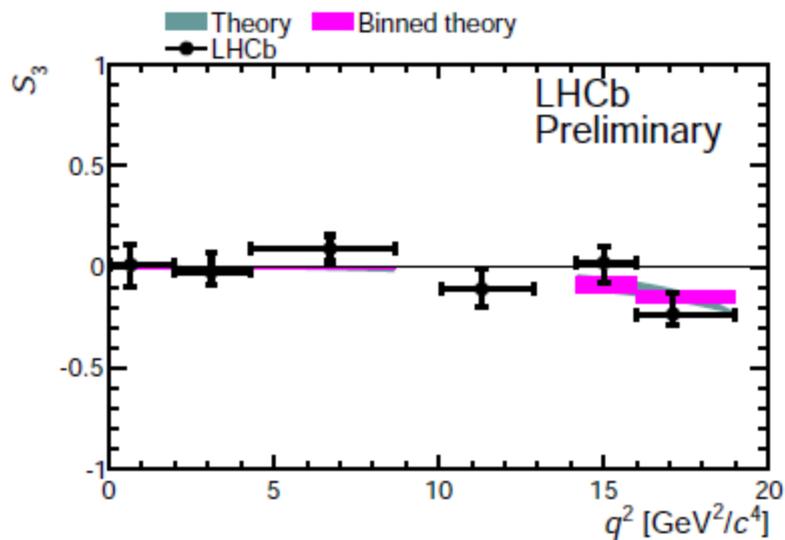
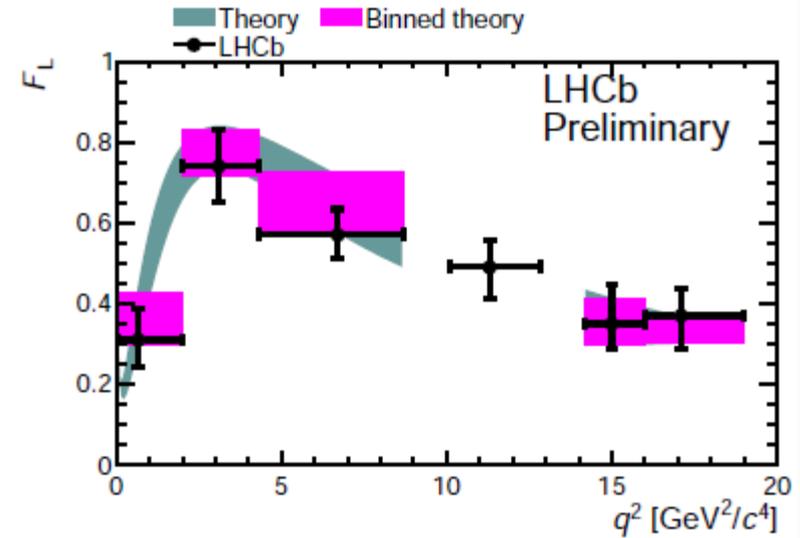
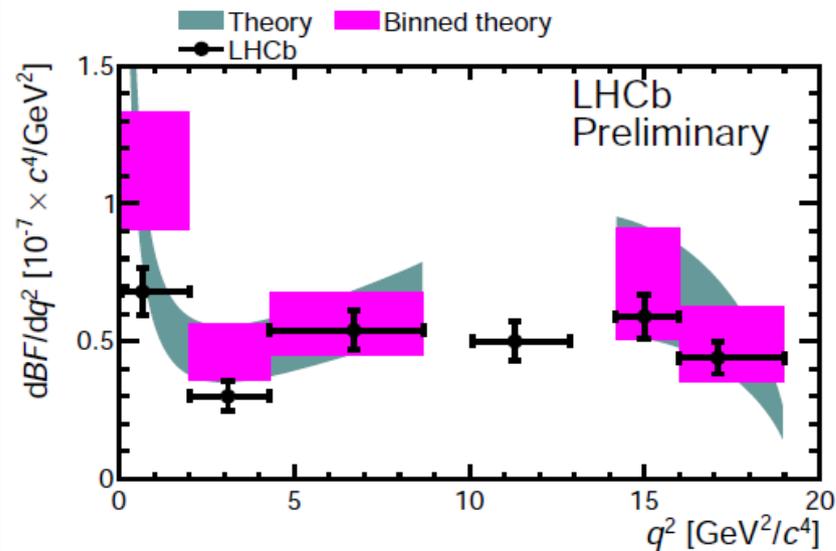
Странное поведение A_{FB}



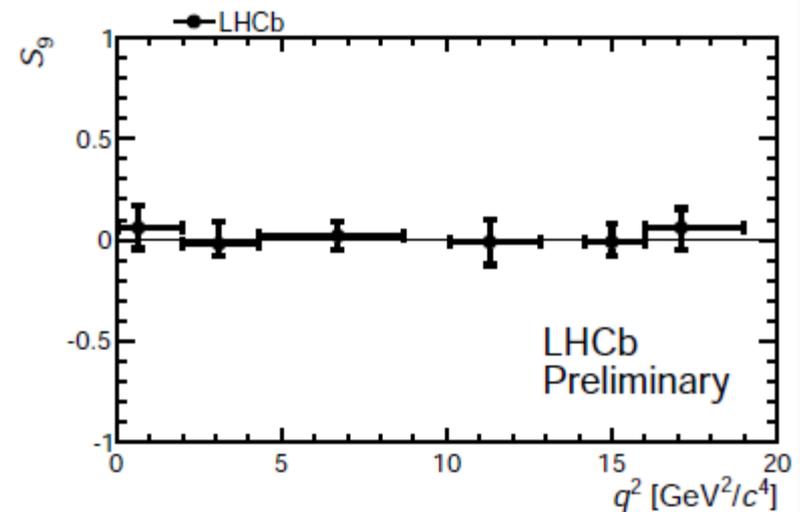
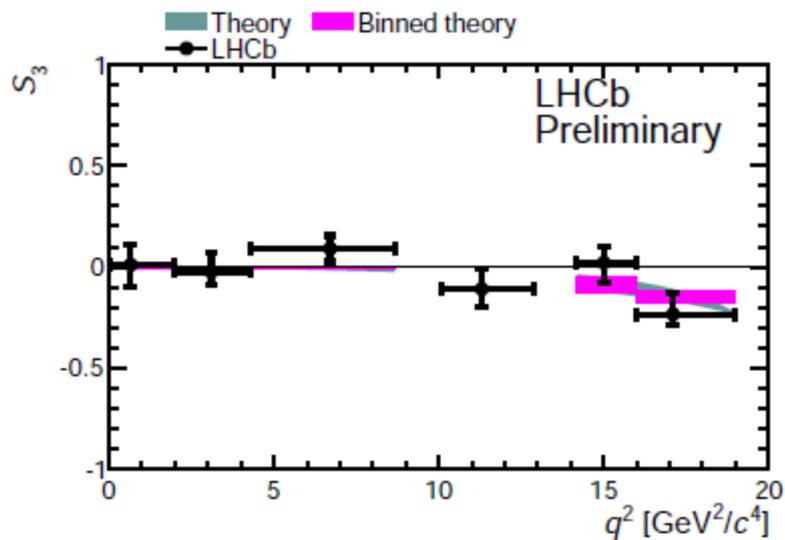
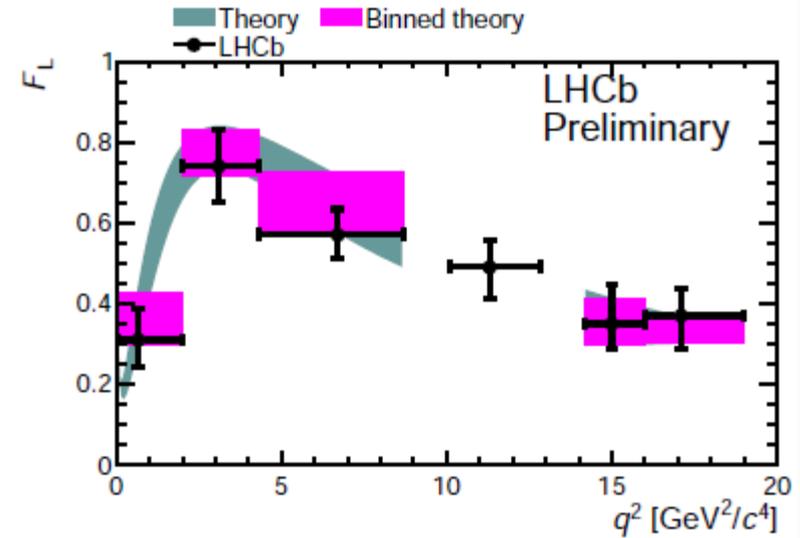
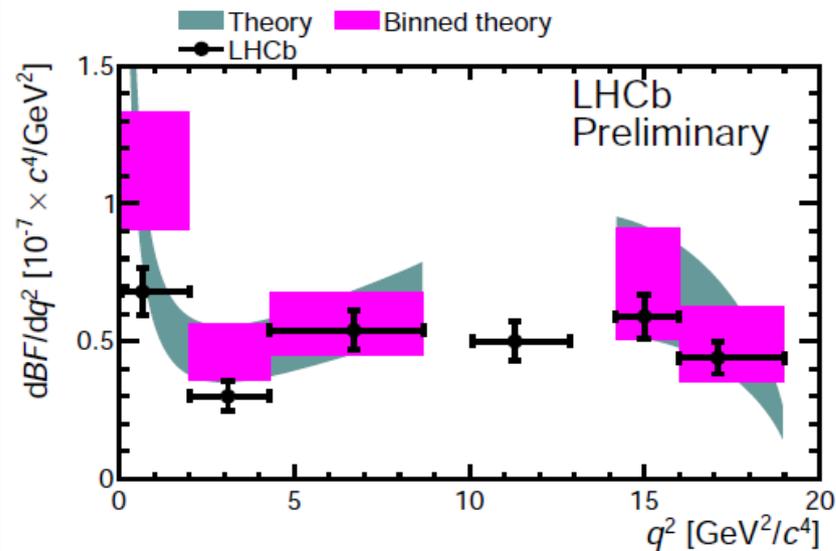
Наблюдаемые для $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$



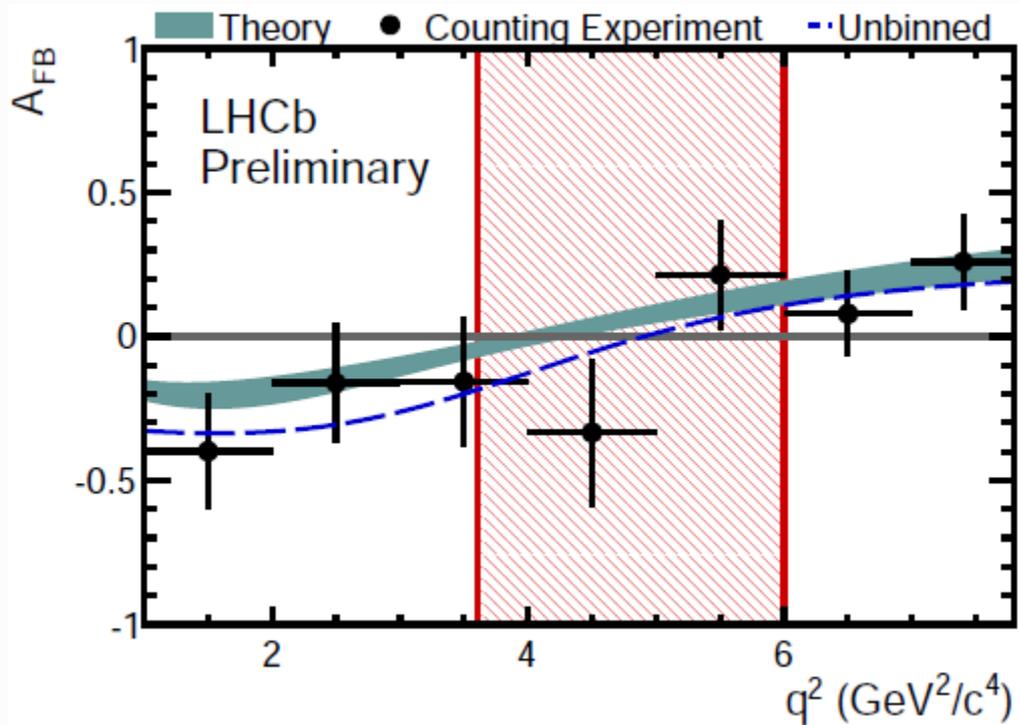
Наблюдаемые для $B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$



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



A_{FB} пересечение 0 ($B^0 \rightarrow K^{*0} \mu^+ \mu^-$)



СМ: Пересечение нуля

4.0 — 4.3 ГэВ/с²

[C. Bobeth et al., JHEP 1201 (2012) 107]

[M. Beneke et al., Eur. Phys. J. C41 (2005), 173]

[A. Ali et al., Eur. Phys. J. C47 (2006) 625]

$$A_{FB} = \frac{N_F \cdot PDF_F(q^2) - N_B \cdot PDF_B(q^2)}{N_F \cdot PDF_F(q^2) + N_B \cdot PDF_B(q^2)}$$

LHCb: $4.9^{+1.1}_{-1.3}$ GeV²/c⁴

Изоспиновая асимметрия

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

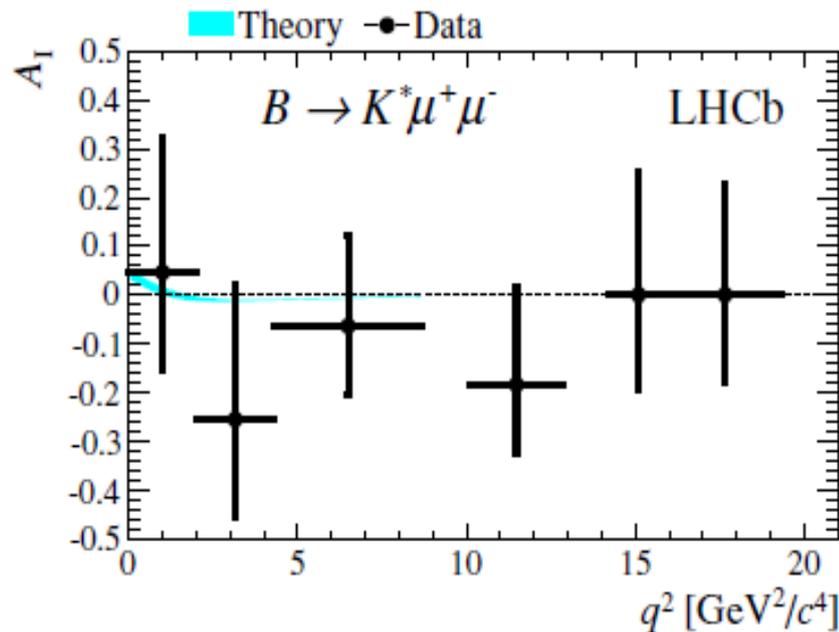
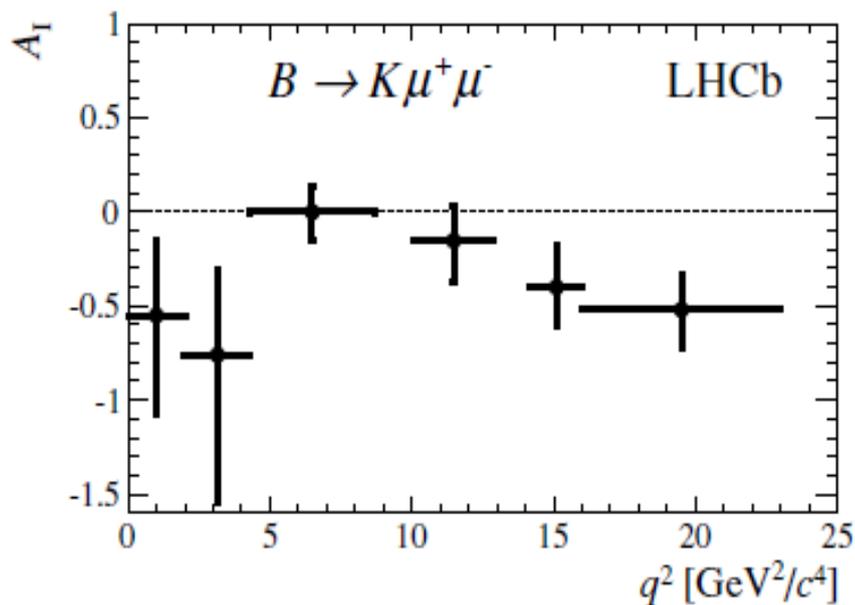
ЖНЕР 7, 133

$$A_I = \frac{\Gamma(B^0 \rightarrow K^{(*)0} \mu^+ \mu^-) - \Gamma(B^+ \rightarrow K^{(*)+} \mu^+ \mu^-)}{\Gamma(B^0 \rightarrow K^{(*)0} \mu^+ \mu^-) + \Gamma(B^+ \rightarrow K^{(*)+} \mu^+ \mu^-)}$$
$$= \frac{\mathcal{B}(B^0 \rightarrow K^{(*)0} \mu^+ \mu^-) - \frac{\tau_0}{\tau_+} \mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^{(*)+} \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{B}(B^0 \rightarrow K^{(*)0} \mu^+ \mu^-) + \frac{\tau_0}{\tau_+} \mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^{(*)+} \mu^+ \mu^-)}$$

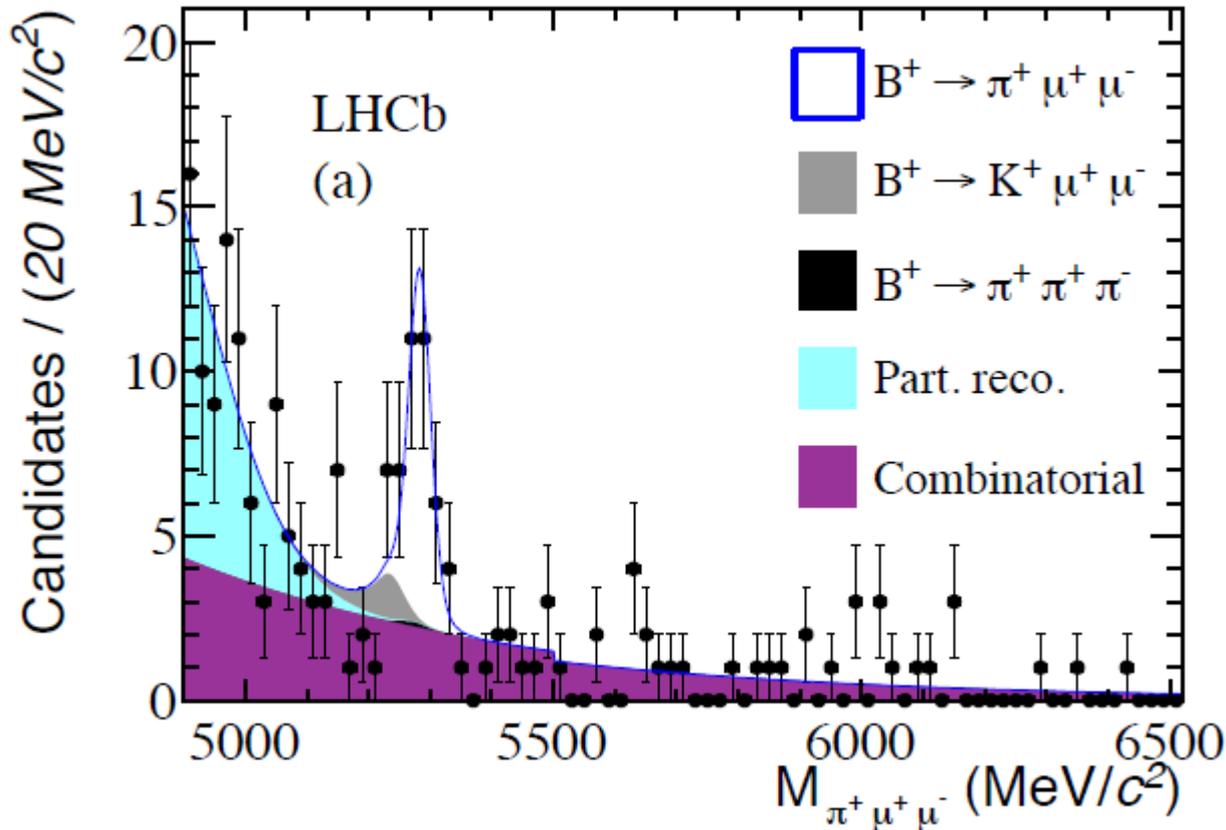
СМ: ожидает малую A_I

Предсказания для K^* точнее

Для K наблюдается сильный эффект



$$B \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-$$



— Самый редкий из когда-либо зарегистрированных

— $\mathcal{B} = (2.3 \pm 0.6(\text{stat}) \pm 0.1(\text{sys})) \times 10^{-8}$

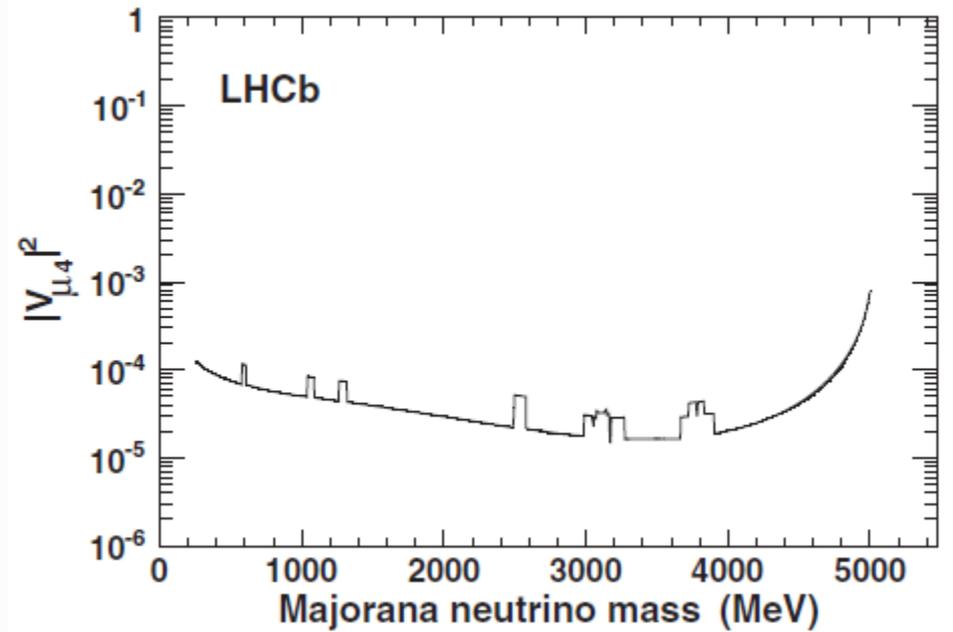
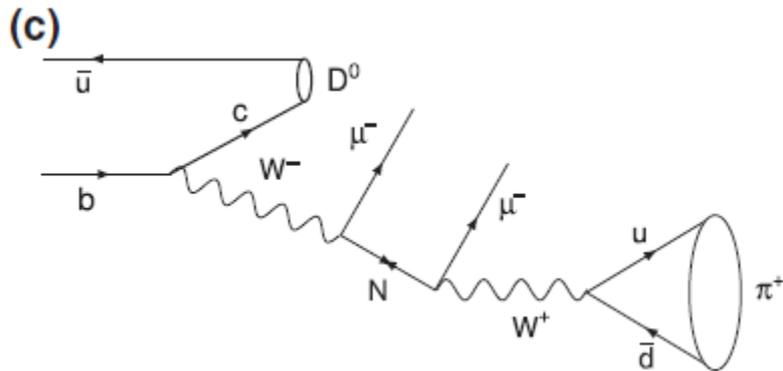
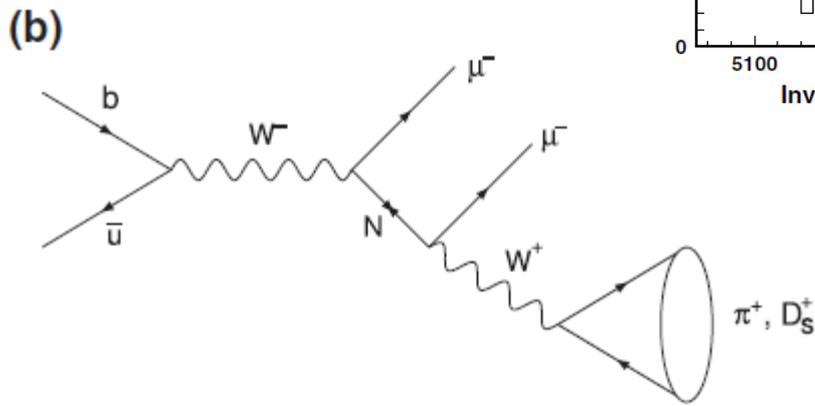
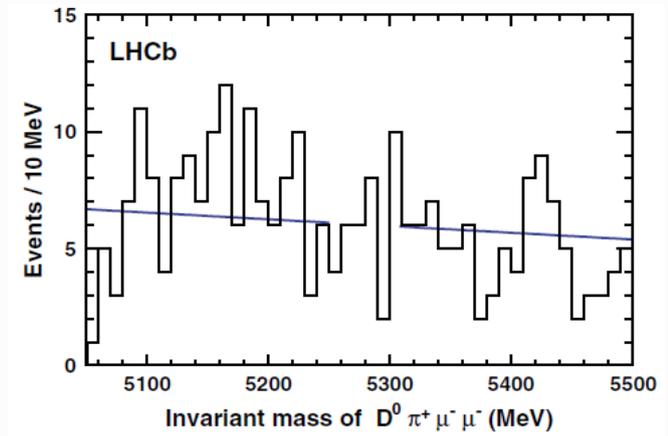
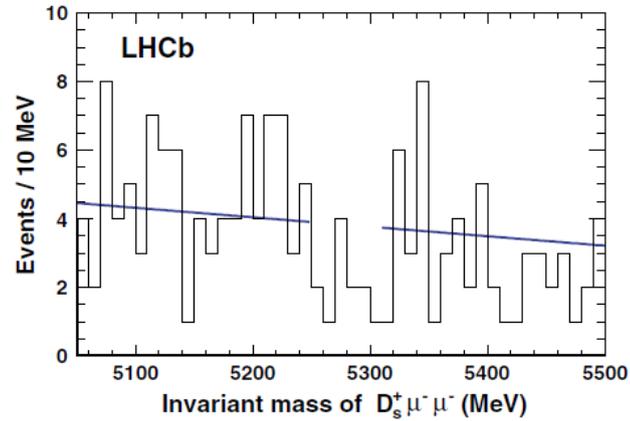
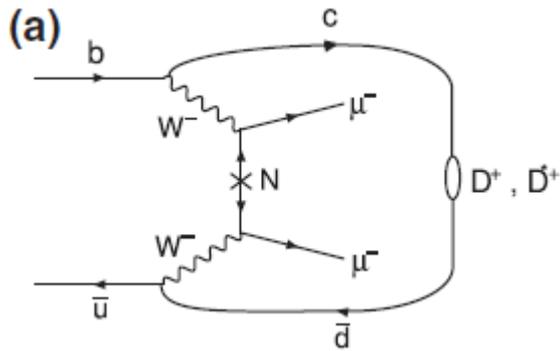
— SM: $(1.96 \pm 0.21) \times 10^{-8}$.

— $R = \frac{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow \pi^+ \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-)} = f^2 \frac{|V_{td}|^2}{|V_{ts}|^2}$

— $\frac{|V_{td}|}{|V_{ts}|} = 0.266 \pm 0.035(\text{stat}) \pm 0.007(\text{sys})$

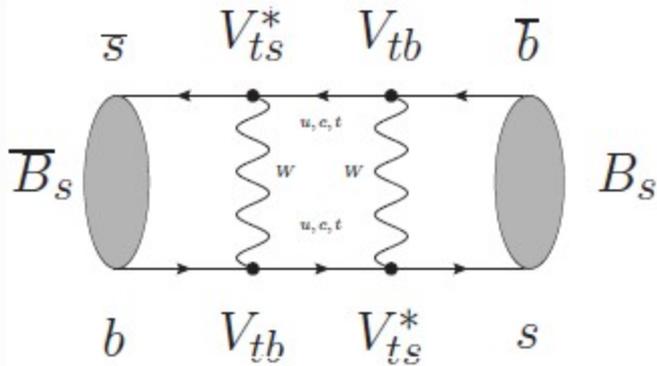
Поиск распадов с несохранением лептонного заряда

Поиск тяжелых ν



IV. Смешивание и нарушения *CP* инвариантности

Смешивание



Ароматные собственные состояния и ур. Шрёдингера:

$$i \frac{d}{dt} \begin{pmatrix} B_s^0 \\ \bar{B}_s^0 \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} M_{11} - i\Gamma_{11}/2 & M_{12} - i\Gamma_{12}/2 \\ M_{21} - i\Gamma_{21}/2 & M_{22} - i\Gamma_{22}/2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} B_s^0 \\ \bar{B}_s^0 \end{pmatrix}$$

Диагностируем и переходим к массовым собственным состояниям:

$$\begin{aligned} i \frac{d}{dt} (B_L) &= (M_L - \frac{i}{2}\Gamma_L) (B_L) \\ i \frac{d}{dt} (B_H) &= (M_H - \frac{i}{2}\Gamma_H) (B_H) \end{aligned}$$

$$|B_H\rangle = p|B_s^0\rangle + q|\bar{B}_s^0\rangle, |B_L\rangle = p|B_s^0\rangle - q|\bar{B}_s^0\rangle \quad |p|^2 + |q|^2 = 1$$

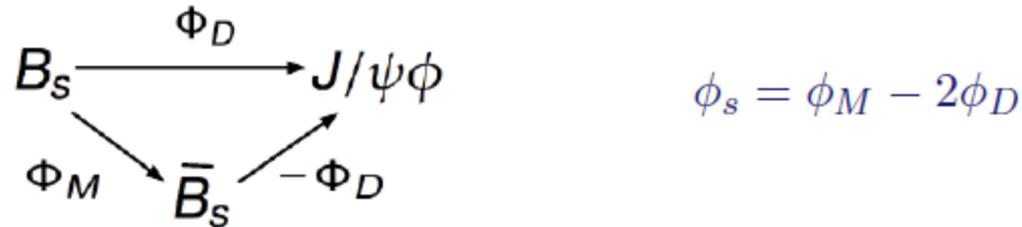
- with **separate masses**: m_H, m_L where $\Delta m_s = m_H - m_L$
and $m_s = (m_H + m_L)/2 = M_{11} = M_{22}$

- and **different lifetimes**: $\tau_H = 1/\Gamma_H, \tau_L = 1/\Gamma_L$ where $\Delta\Gamma_s = \Gamma_L - \Gamma_H$
and $\Gamma_s = (\Gamma_L + \Gamma_H)/2 = \Gamma_{11} = \Gamma_{22}$

Определение φ_s и $\Delta\Gamma_s$

Определение ϕ_s и $\Delta\Gamma_s$

- ▶ Measurement of CPV in interference between decay and mixing & decay



Two major players ($\phi_D \sim 0$ for both decays):

- ▶ golden mode $B_s \rightarrow J/\psi\phi$
clean mode, large statistics, angular analysis to separate CP even and CP odd contributions, access to Γ , $\Delta\Gamma$, ϕ_s
- ▶ $B_s \rightarrow J/\psi f_0$ + non resonant $B_s \rightarrow J/\psi\pi\pi$ (CP odd - LHCb-CONF-2012-002)
less statistics, no angular analysis, access to Γ_H and ϕ_s

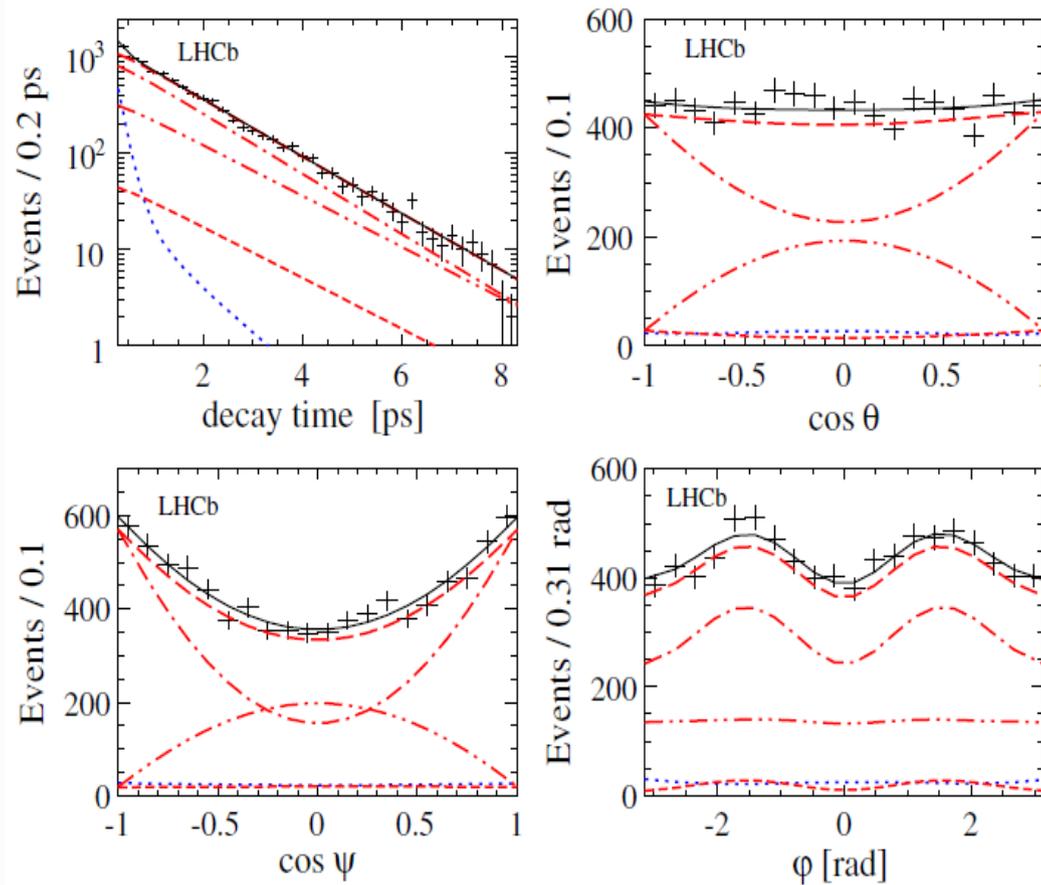
- ▶ Lifetime measurements in decays in CP eigenstates

ignoring small CPV: $B_H \equiv CP$ odd eigenstate $B_L \equiv CP$ even eigenstate

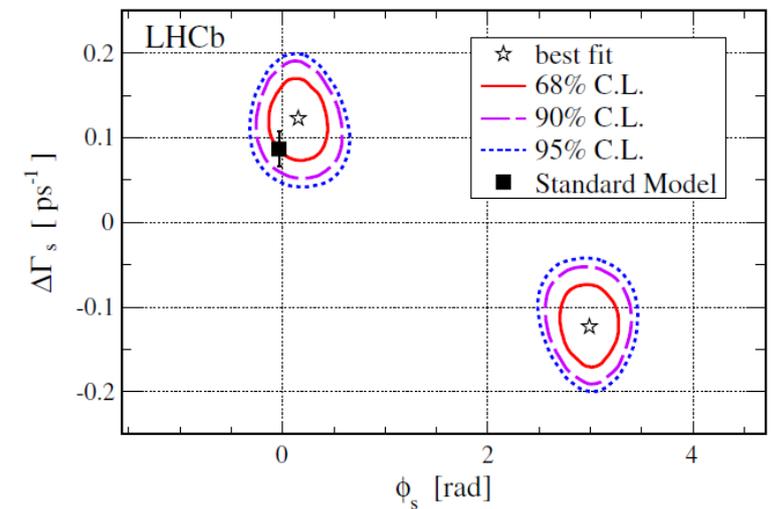
e.g. $B_s \rightarrow J/\psi f_0$ (CP odd); $B_s \rightarrow KK$ (CP even)

$$B_s^0 \rightarrow J/\psi \varphi$$

Simultaneous 4D fit for decay time and 3 decay angles.

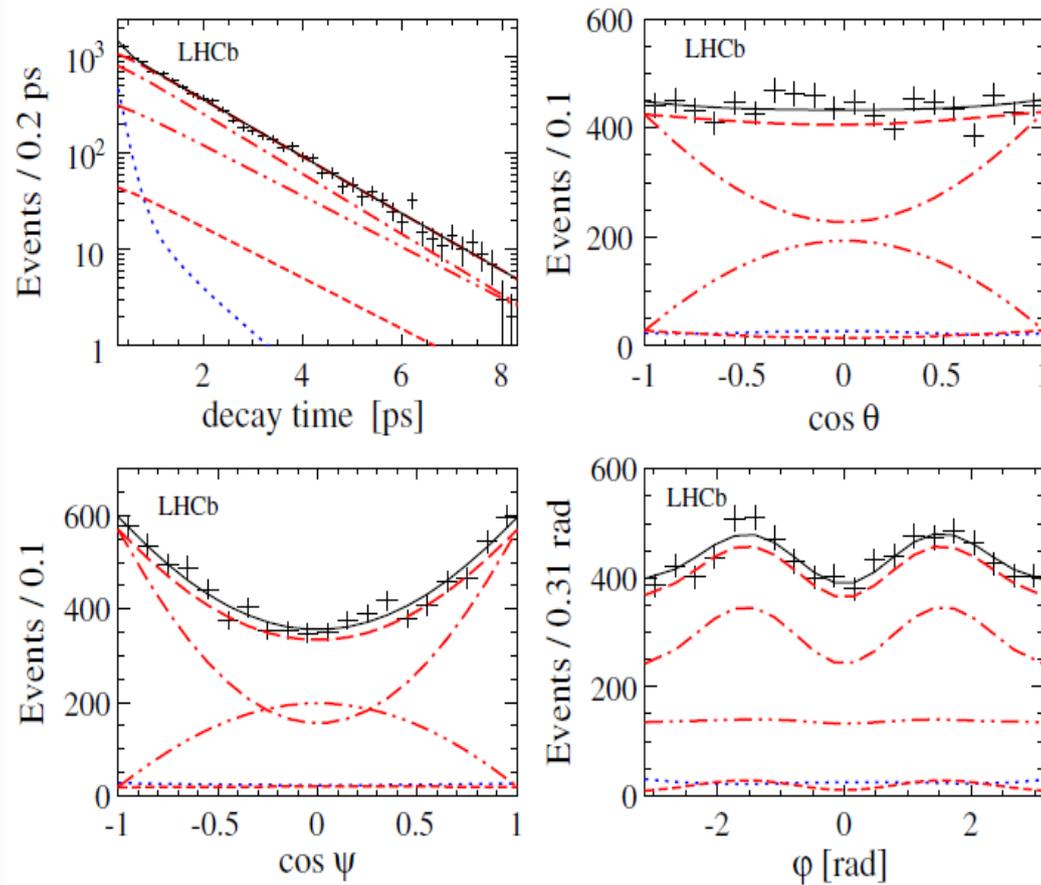


PRL 108, 101803 (2012)

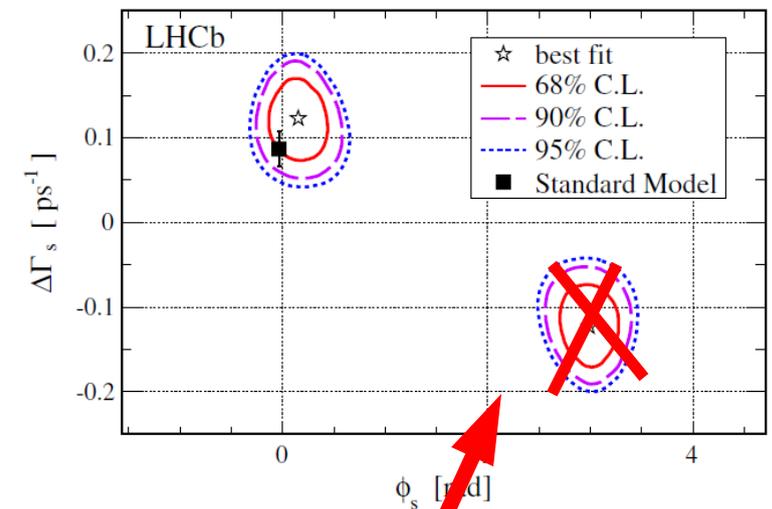


$$B_s^0 \rightarrow J/\psi \varphi$$

Simultaneous 4D fit for decay time and 3 decay angles.



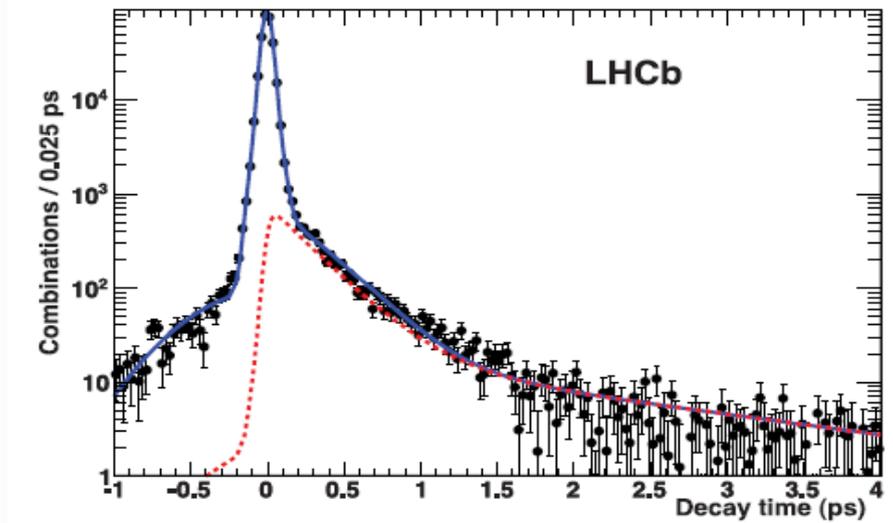
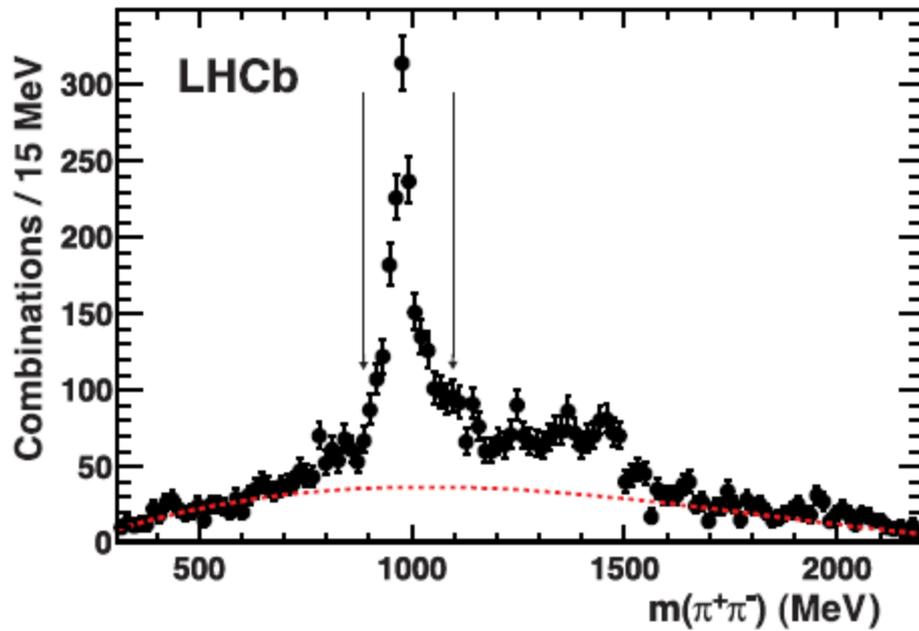
PRL 108, 101803 (2012)



PRL 108, 241801 (2012)

$B_s^0 \rightarrow J/\psi f_0(980)$

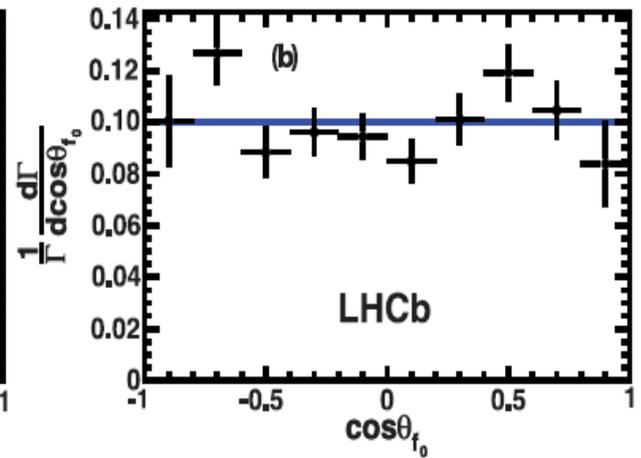
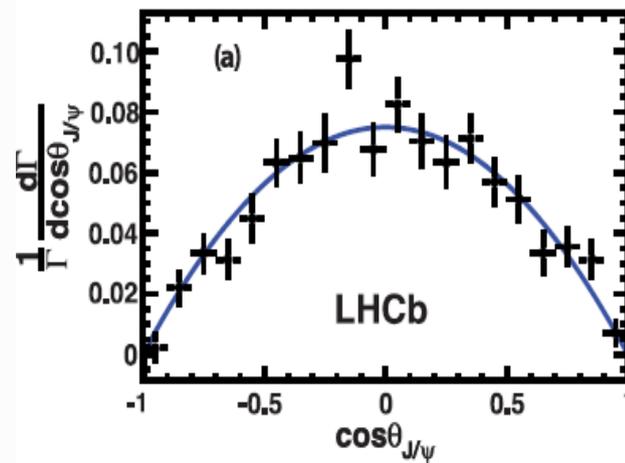
Physics Letters B 707 (2012) 497–505



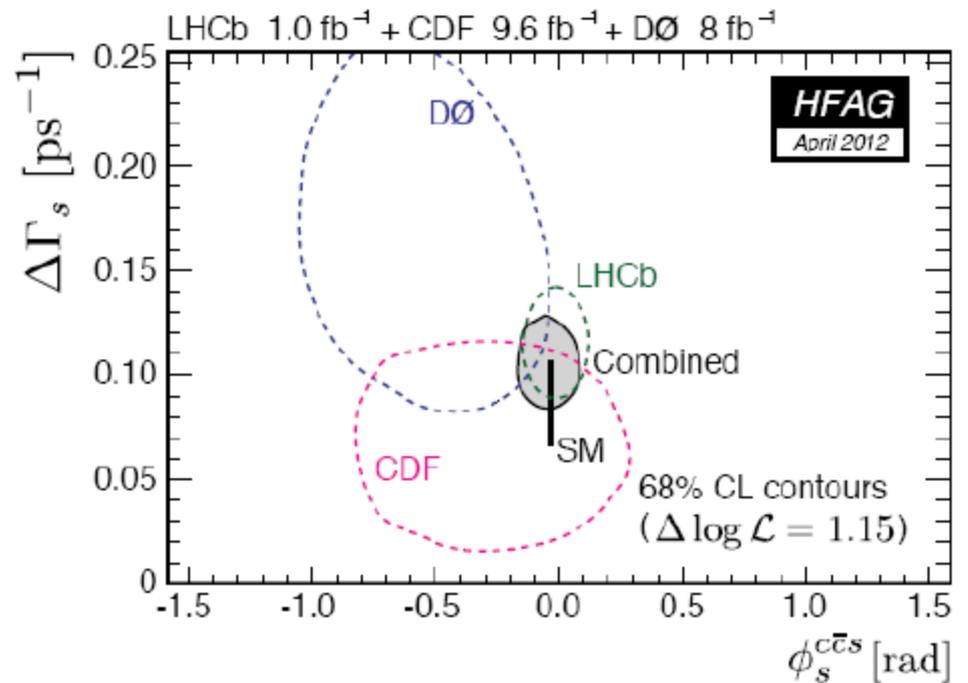
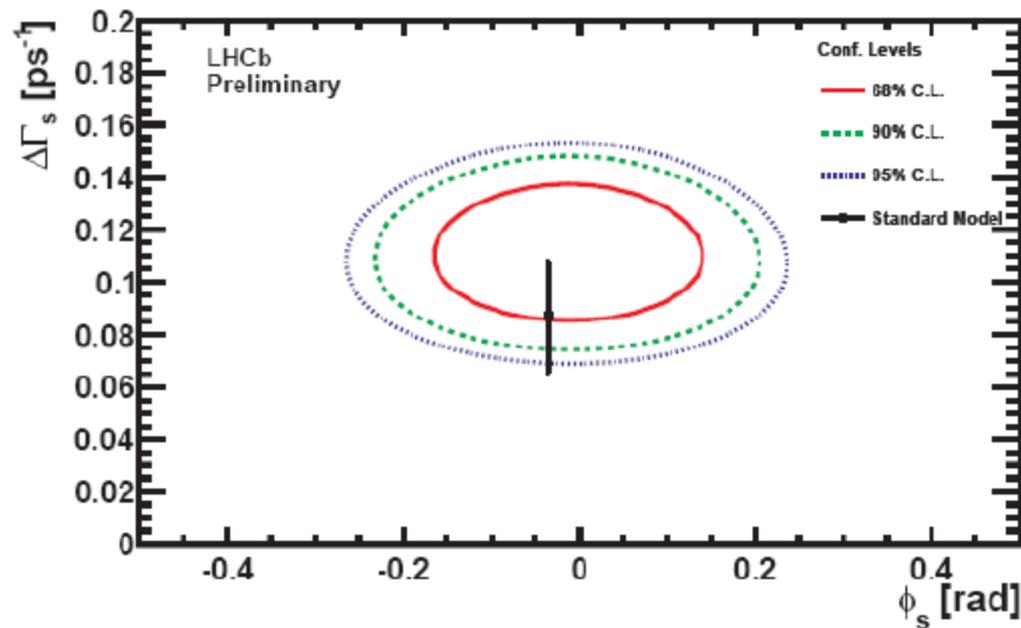
$$\phi_s = -0.02 \pm 0.17 \pm 0.02 \text{ rad}$$

+ $B_s \rightarrow J/\psi K K$:

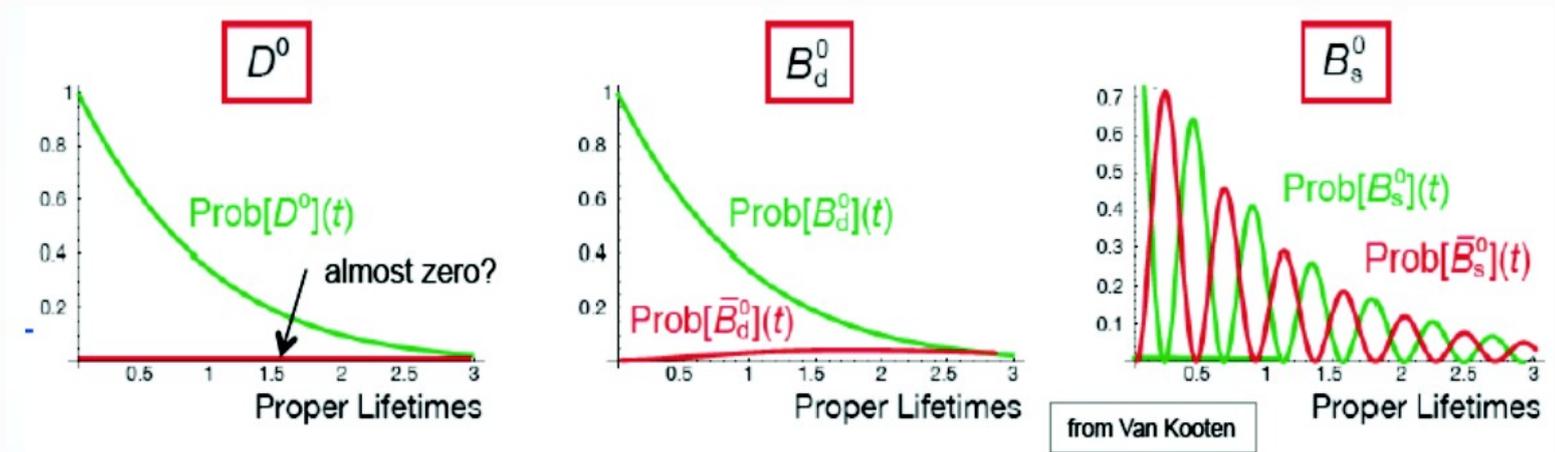
$$\phi_s = -0.002 \pm 0.083 \pm 0.027 \text{ rad}$$



Определение φ_s и $\Delta\Gamma_s$



Прямое наблюдение осцилляций для B_S^0 мезонов



Осцилляци B_S^0 мезонон

Рассматривалось 4 типа распадов:

$$B_S^0 \rightarrow D_S^- (\phi (K^+ K^-) \pi^-) \pi^+$$

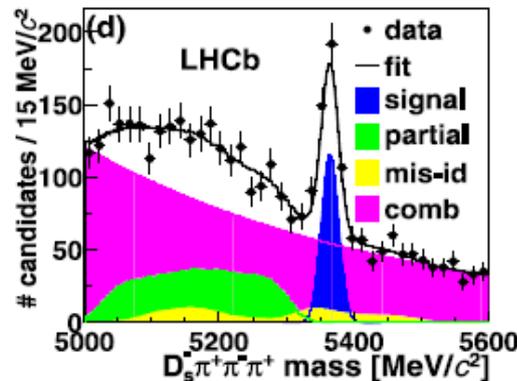
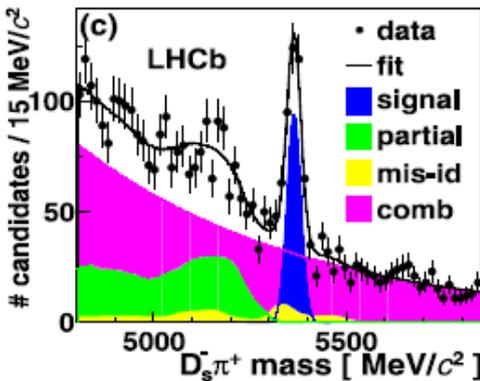
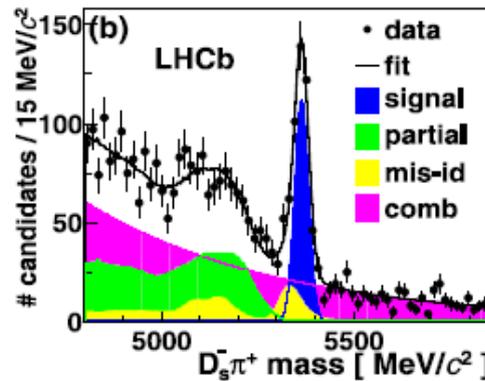
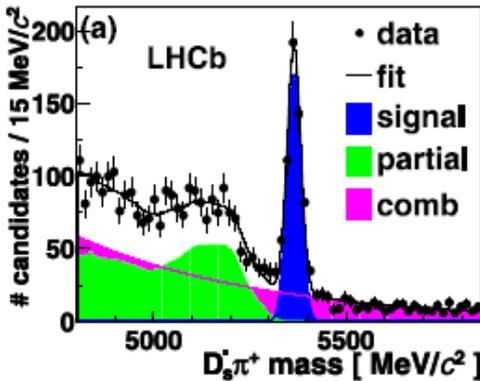
LHCb таггер ([EPJC 72, 2022](#))

определял аромат другого мезона B_S^\pm

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

$$D_S^- (K^+ K^- \pi^-) \pi^+$$

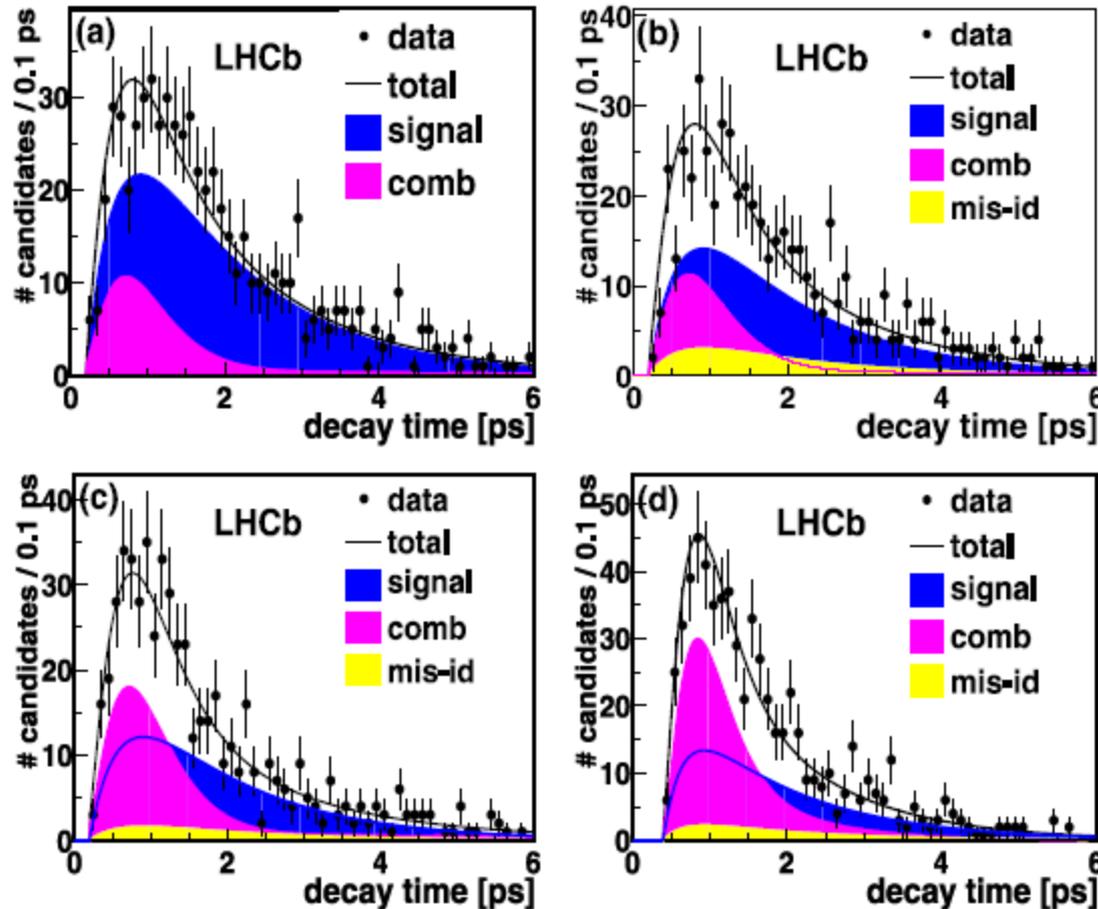
$$D_S^- (K^+ K^- \pi^-) \pi^+ \pi^- \pi^+$$



Decay mode	Signal yield
$B_S^0 \rightarrow D_S^- (\phi \pi^-) \pi^+$	515 ± 25
$B_S^0 \rightarrow D_S^- (K^{*0} K^-) \pi^+$	338 ± 27
$B_S^0 \rightarrow D_S^- (K^+ K^- \pi^-) \pi^+$	283 ± 27
$B_S^0 \rightarrow D_S^- \pi^+ \pi^- \pi^+$	245 ± 46
Total	1381 ± 65

Осцилляци B_S^0 мезонон

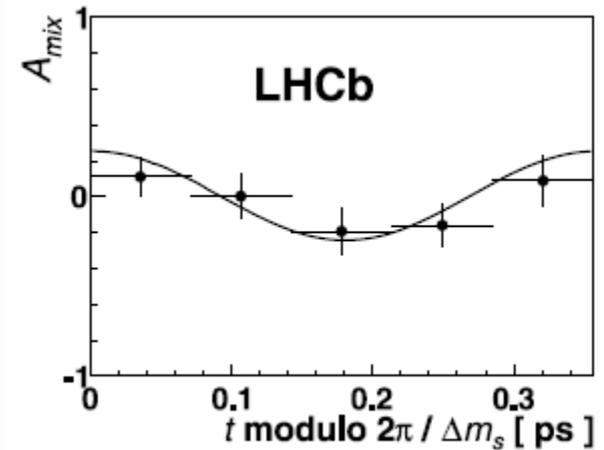
Измерение:



CDF Collaboration

$$\Delta m_S = 17.77 \pm 0.10 \text{ (stat)} \pm 0.07 \text{ (syst)} \text{ ps}^{-1}$$

$$A_{\text{mix}}(t) = \frac{N^+(t) - N^-(t)}{N^+(t) + N^-(t)}$$



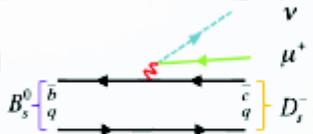
ЛНС наблюдение:

$$\Delta m_S = 17.63 \pm 0.11 \text{ (stat)} \pm 0.02 \text{ (syst)} \text{ ps}^{-1}$$

Измерение полулептонной асимметрии

Измерение полулептонной асимметрии

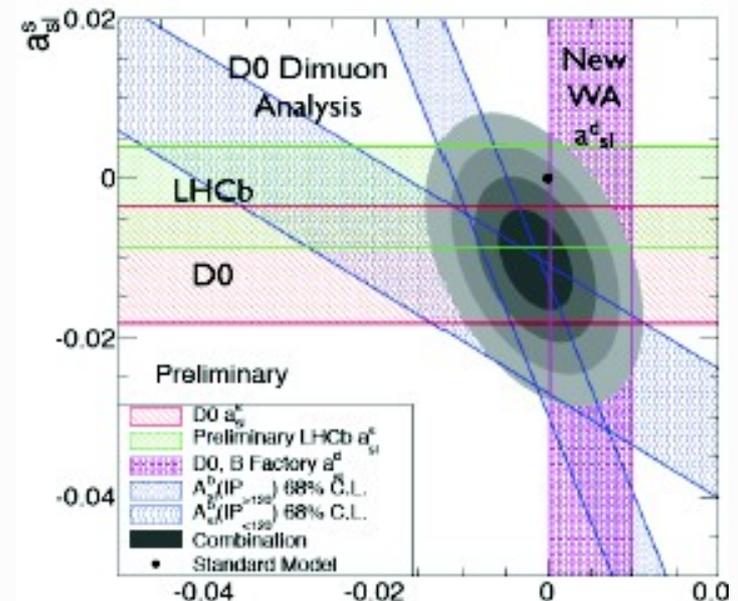
$B_q^0 \rightarrow D_q^- \mu^+ \nu_\mu$: Allowed
 $\bar{B}_q^0 \rightarrow D_q^- \mu^+ \nu_\mu$: Not allowed directly



$$a_{SL}^q = \frac{\Gamma(\bar{B}(t) \rightarrow f) - \Gamma(B(t) \rightarrow \bar{f})}{\Gamma(\bar{B}(t) \rightarrow f) + \Gamma(B(t) \rightarrow \bar{f})} = \frac{N_b^{++} - N_b^{--}}{N_b^{++} + N_b^{--}}$$

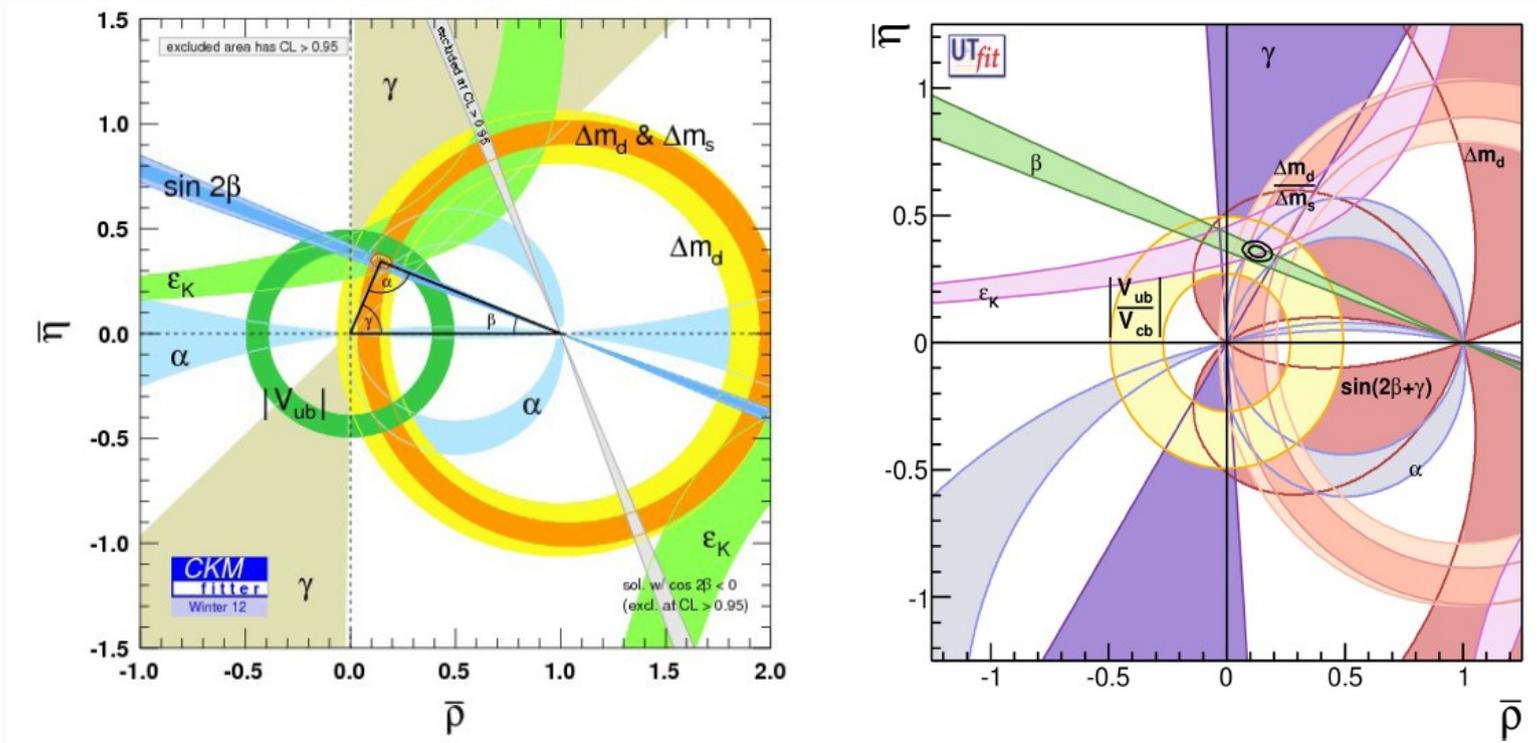
LHCb Collaboration, ICHEP-2012, LHCb-CONF-2012-022

D0 Dimuon:	arXiv:1106.6308	$a_{SL}(B_d) = (-0.12 \pm 0.52)\%$	$a_{SL}(B_s) = (-1.81 \pm 1.06)\%$
D0 exclusive:	arXiv:1208.5813	$a_{SL}(B_d) = (0.68 \pm 0.47)\%$	$a_{SL}(B_s) = (-1.08 \pm 0.74)\%$
LHCb exclusive ($B_s \rightarrow D_s[\Phi\pi]\mu\nu X$):	LHCb-2012-022	$a_{SL}(B_s) = (-0.24 \pm 0.63)\%$	
preliminary			
World average: $a_{SL}(B_d) = (-0.15 \pm 0.29)\%$, $a_{SL}(B_s) = (-1.02 \pm 0.42)\%$			
$a_{SL}(B_s)$ is 2.5σ from SM.			



Определение угла γ в унитарном треугольнике

Параметры унитарного Δ СКМ



1) Есть другие фитирующие группы и другие треугольники

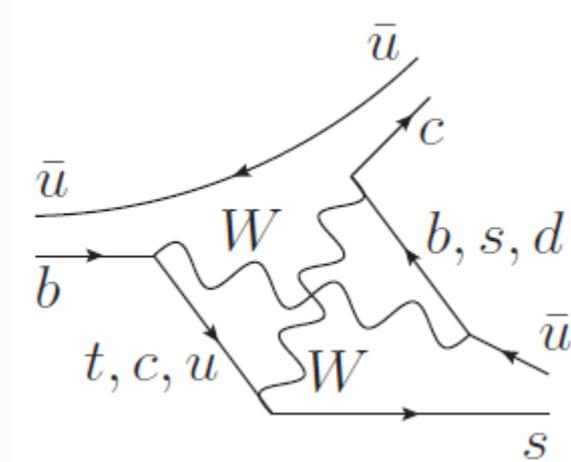
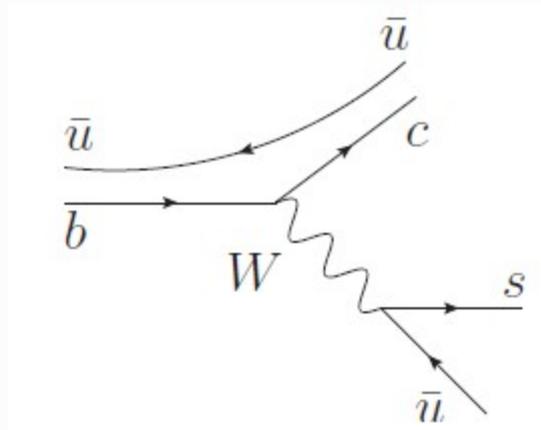
2) Угол γ измерен хуже всего!

$$\gamma = \arg \left[-V_{ud} V_{ub}^* / (V_{cd} V_{cb}^*) \right]$$

(но СМ - очень точные предсказания для этой наблюдаемой)

Чувствительность γ (из $B \rightarrow DK$) к НФ

Лидирующая диаграмма. Поправка с другой СКМ структурой

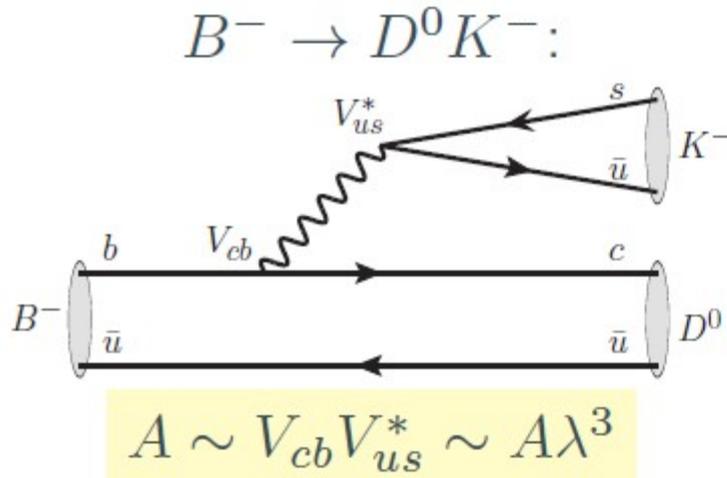


$$\delta\gamma/\gamma < \mathcal{O}(10^{-6})$$

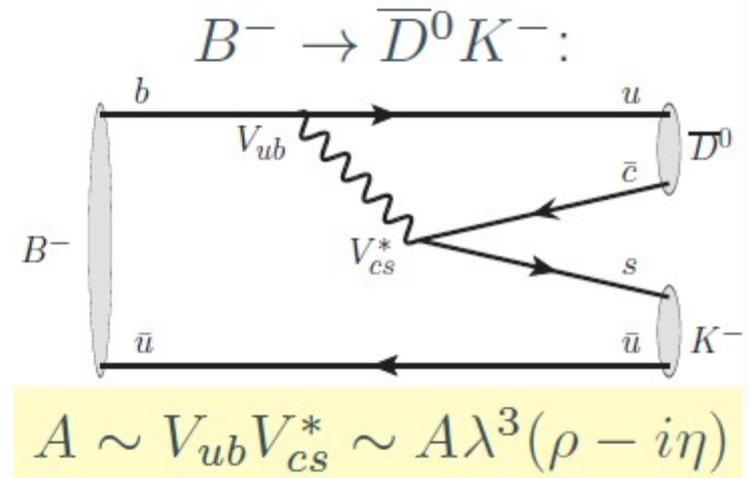
Probe	Λ_{NP} for (N)MFV NP	Λ_{NP} for gen. FV NP
γ from $B \rightarrow DK^{1)}$	$\Lambda \sim \mathcal{O}(10^2 \text{ TeV})$	$\Lambda \sim \mathcal{O}(10^3 \text{ TeV})$
$B \rightarrow \tau\nu^{2)}$	$\Lambda \sim \mathcal{O}(1 \text{ TeV})$	$\Lambda \sim \mathcal{O}(30 \text{ TeV})$
$b \rightarrow ssd^{3)}$	$\Lambda \sim \mathcal{O}(1 \text{ TeV})$	$\Lambda \sim \mathcal{O}(10^3 \text{ TeV})$
β from $B \rightarrow J/\psi K_S^{4)}$	$\Lambda \sim \mathcal{O}(50 \text{ TeV})$	$\Lambda \sim \mathcal{O}(200 \text{ TeV})$
$K - \bar{K}$ mixing ⁵⁾	$\Lambda > 0.4 \text{ TeV}$ (6 TeV)	$\Lambda > 10^{3(4)} \text{ TeV}$

Как измерить γ ?

$$\gamma = \arg \left[-V_{ud}V_{ub}^* / (V_{cd}V_{cb}^*) \right]$$



+



Пусть D и анти- D распадаются в одно и то же конечное состояние

$|\tilde{D}\rangle = |D^0\rangle + r_B e^{i\theta} |\bar{D}^0\rangle$, их относительные фазы: $B^+ \rightarrow DK^+$: $\theta = +\gamma + \delta$,
 $B^- \rightarrow DK^-$: $\theta = -\gamma + \delta$.

отношение амплитуд:

$$r_B = \left| \frac{A(B^- \rightarrow \bar{D}^0 K^-)}{A(B^- \rightarrow D^0 K^-)} \right| = \left| \frac{V_{ub}V_{cs}^*}{V_{cb}V_{us}^*} \right| \times [\text{Color supp}] \sim 0.1$$

Параметры δ и r_B точно не считаются в рамках СМ, но могут быть

точно измерены если рассматривать несколько типов распадов D !

Как измерить γ ?

Gronau-London-Wyler (GLW) D in \mathcal{CP} -eigenstate ($D \rightarrow K\bar{K}, \pi\pi$)

[PLB 265, 172 (1991)]

$$R_{CP\pm} = \frac{2[\Gamma(B^- \rightarrow D_{CP\pm}K^-) + \Gamma(B^+ \rightarrow D_{CP\pm}K^+)]}{\Gamma(B^- \rightarrow D^0K^-) + \Gamma(B^+ \rightarrow \bar{D}^0K^+)}$$
$$A_{CP\pm} = \frac{\Gamma(B^- \rightarrow D_{CP\pm}K^-) - \Gamma(B^+ \rightarrow D_{CP\pm}K^+)}{\Gamma(B^- \rightarrow D_{CP\pm}K^-) + \Gamma(B^+ \rightarrow D_{CP\pm}K^+)}$$

$$R_{CP\pm} = 1 + r_B^2 \pm 2r_B \cos \delta_B \cos \gamma$$
$$A_{CP\pm} = \frac{\pm 2r_B \sin \delta_B \sin \gamma}{R_{CP\pm}}$$

Atwood-Dunietz-Sony (ADS)

[PRL 78, 3257 (1997)]

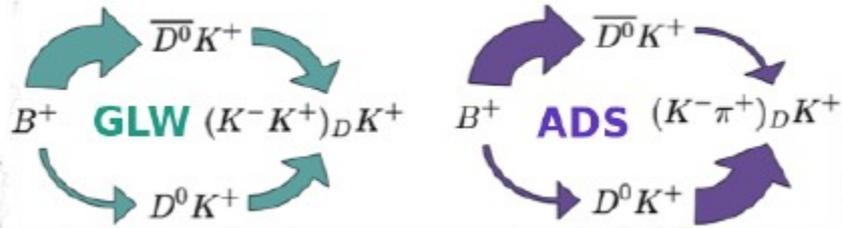
D Cabibbo-allowed ($D^0 \rightarrow K^- \pi^+$) and doubly Cabibbo-suppressed ($D^0 \rightarrow K^+ \pi^-$) states.

$$R_{ADS} = \frac{\Gamma(B^- \rightarrow D[\rightarrow \pi^- K^+]K^-) + \Gamma(B^+ \rightarrow D[\rightarrow \pi^+ K^-]K^+)}{\Gamma(B^- \rightarrow D[\rightarrow K^- \pi^+]K^-) + \Gamma(B^+ \rightarrow D[\rightarrow K^+ \pi^-]K^+)}$$
$$A_{ADS} = \frac{\Gamma(B^- \rightarrow D[\rightarrow \pi^- K^+]K^-) - \Gamma(B^+ \rightarrow D[\rightarrow \pi^+ K^-]K^+)}{\Gamma(B^- \rightarrow D[\rightarrow \pi^- K^+]K^-) + \Gamma(B^+ \rightarrow D[\rightarrow \pi^+ K^-]K^+)}$$

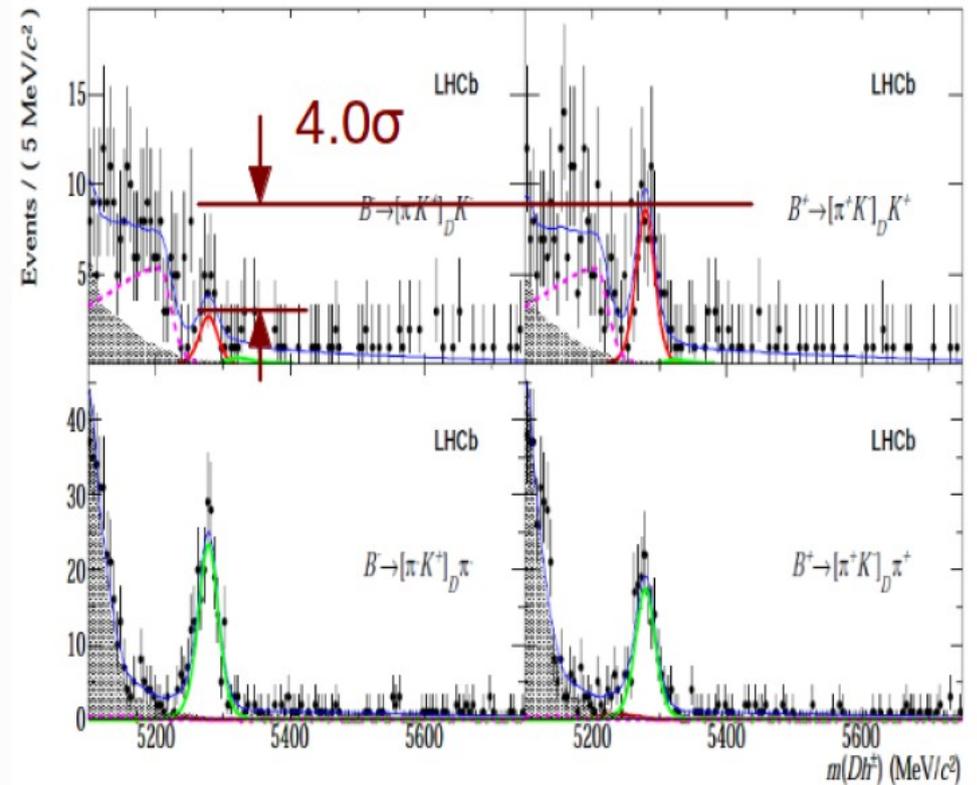
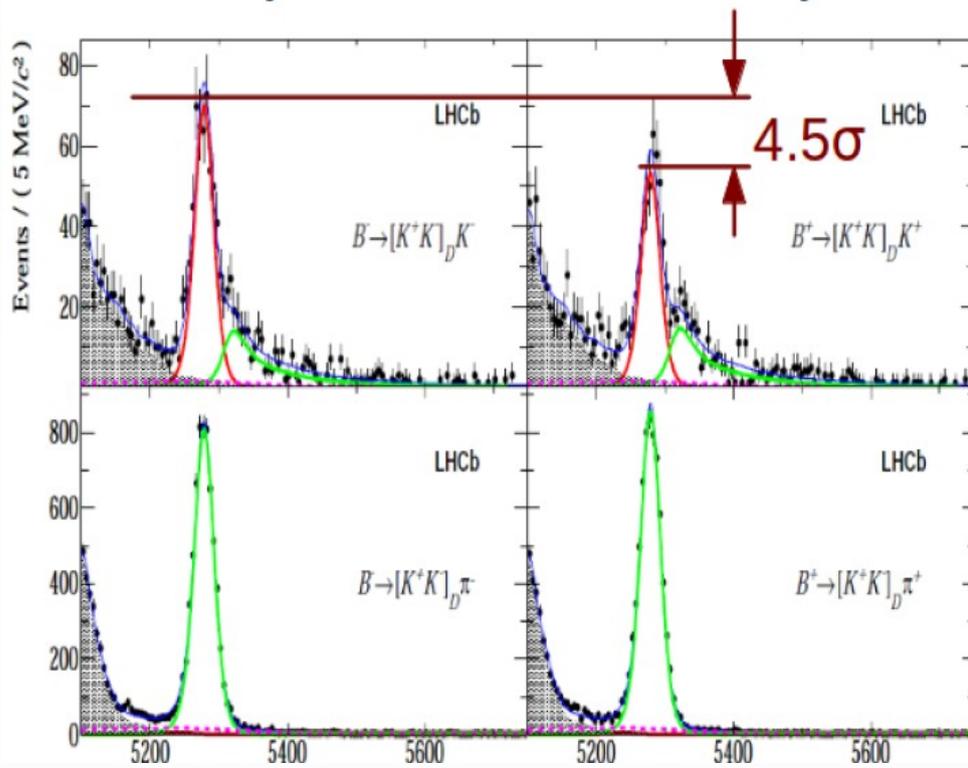
$$R_{ADS} = r_B^2 + r_D^2 + 2r_B r_D \cos \gamma \cos(\delta_B + \delta_D)$$
$$A_{ADS} = 2r_B r_D \sin \gamma \sin(\delta_B + \delta_D) / R_{ADS}$$

Есть и другие подходы, основанные на других распадах D мезонов!

Измерения LHCb



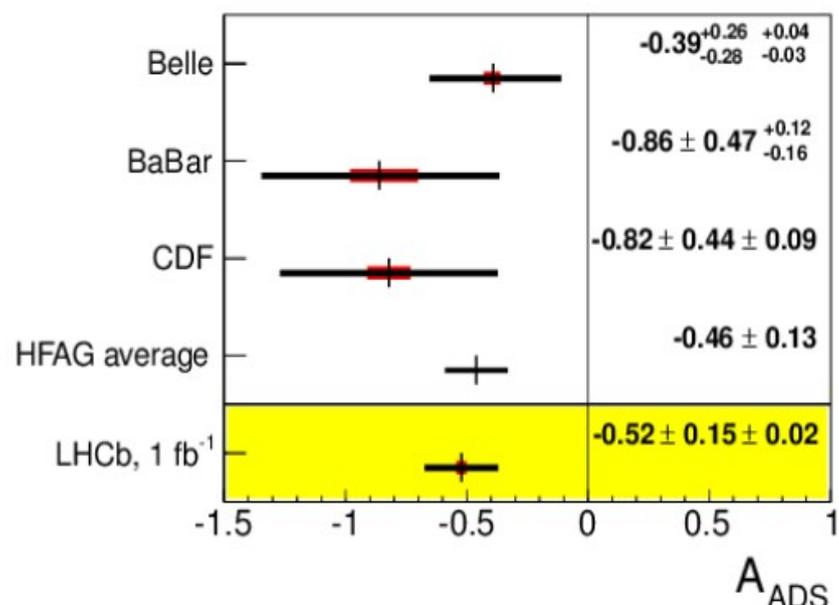
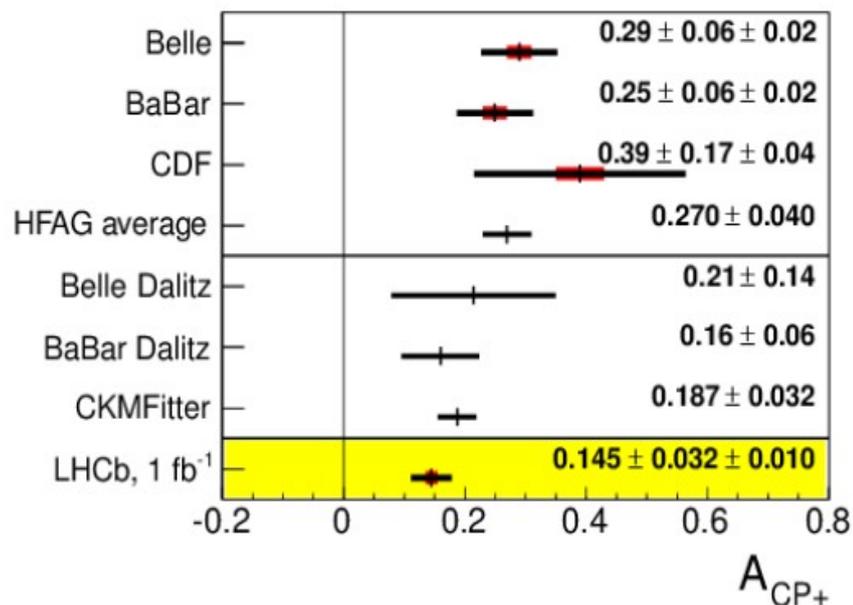
[Phys Lett B 712 (2012), 203]



Измерения LHCb vs Мировые данные

$$A_{CP} = \frac{2r_B \sin \delta_B \sin \gamma}{1+r_B^2+2r_B \cos \delta_B \cos \gamma}$$

$$A_{ADS} = \frac{2r_B r_D \sin(\delta_B + \delta_D) \sin \gamma}{r_B^2 + r_D^2 + 2r_B r_D \cos(\delta_B + \delta_D) \cos \gamma}$$



Это лишь первый шаг, но он уже сопоставим по точности со всеми предыдущими данными. Скоро будут доступны данные LHCb по 3-частичным распадам D .

Giri-Grossman-Soffer-Zupan, Bondar (GGSZ, Dalitz)

D in three-body final state ($K_S \pi^+ \pi^-$).

[PRD 68, 054018 (2003)]

CP асимметрия в распадах
нейтральных D и B_s мезонов

Что измерялось

Интерес представляет CP асимметрия (зависящая от t) [**СМ: < 0.1%**]

$$A_{CP}(f; t) \equiv \frac{\Gamma(D^0(t) \rightarrow f) - \Gamma(\bar{D}^0(t) \rightarrow f)}{\Gamma(D^0(t) \rightarrow f) + \Gamma(\bar{D}^0(t) \rightarrow f)}, \quad f = K^- K^+ \text{ and } \pi^- \pi^+$$

В первом приближении её можно разложить на прямую (амплитуды распада) и непрямую (из-за осцилляций D) составляющие.

$$A_{CP}(f; t) = a_{CP}^{\text{dir}}(f) + \frac{t}{\tau} a_{CP}^{\text{ind}},$$

Проинтегрировав по времени и учитывая, что для ЛНСб

$\Delta\langle t \rangle / \tau = (9.38 \pm 0.22 \pm 0.19)\%$, получим величину, зависящую

$$\Delta A_{CP} \equiv A_{CP}(K^- K^+) - A_{CP}(\pi^- \pi^+) \quad \text{амплитуд.}$$

$$= [a_{CP}^{\text{dir}}(K^- K^+) - a_{CP}^{\text{dir}}(\pi^- \pi^+)] + \frac{\Delta\langle t \rangle}{\tau} a_{CP}^{\text{ind}}.$$

Что измерялось

ЛHCb измеряла асимметрию распадов D^* [пион фиксировал аромат!]

$$A_{\text{raw}}(f) \equiv \frac{N(D^{*+} \rightarrow D^0(f)\pi_s^+) - N(D^{*-} \rightarrow \bar{D}^0(f)\pi_s^-)}{N(D^{*+} \rightarrow D^0(f)\pi_s^+) + N(D^{*-} \rightarrow \bar{D}^0(f)\pi_s^-)},$$

$$A_{\text{raw}}(f) = A_{CP}(f) + A_D(f) + A_D(\pi_s^+) + A_P(D^{*+}).$$

однако

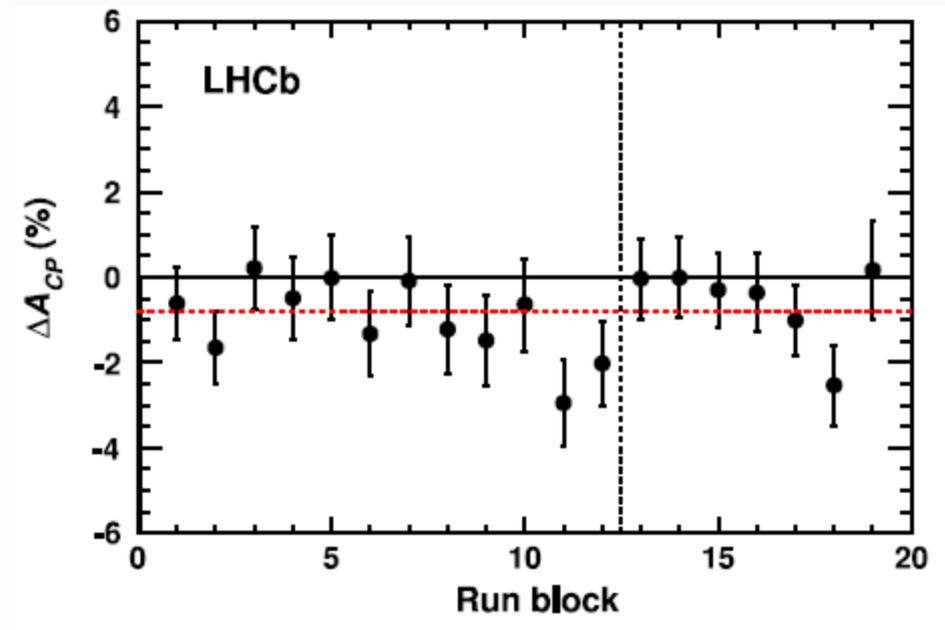
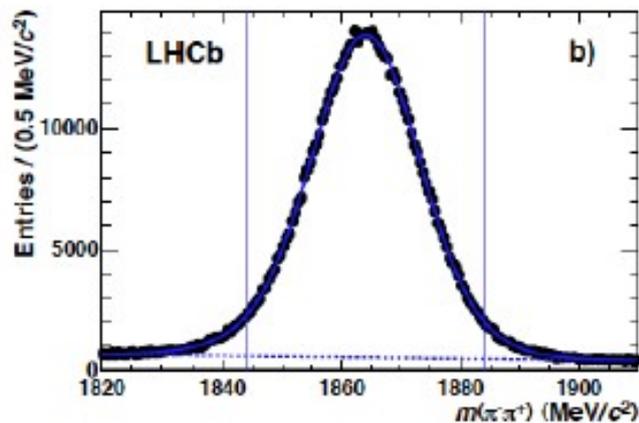
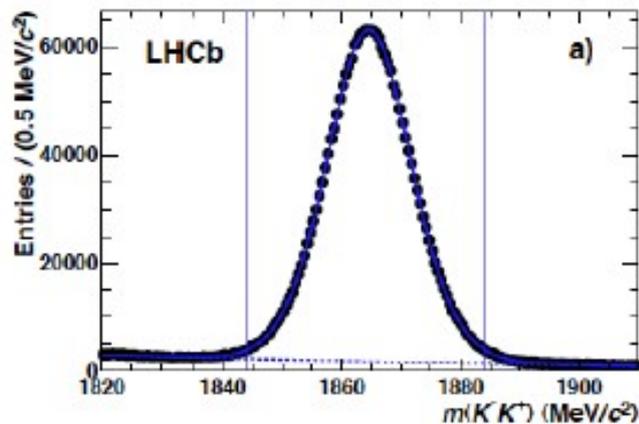
$$A_D(K^- K^+) = A_D(\pi^- \pi^+) = 0$$

$A_D(\pi_s^+)$ and $A_P(D^{*+})$ are independent of f

откуда следует $\Delta A_{CP} = A_{\text{raw}}(K^- K^+) - A_{\text{raw}}(\pi^- \pi^+)$.

Высокая статистика ($L_{\text{int}} = 620 \text{ pb}^{-1}$)

– 1.4M K^+K^- , 0.4M $\pi^+\pi^-$



Первое указание на нарушение CP в c секторе:

$$\Delta A_{CP} = [-0.82 \pm 0.21(\text{stat}) \pm 0.11(\text{syst})]\%$$

Позже проверено CDF и Belle:



$$\Delta A_{CP} = [-0.62 \pm 0.21(\text{stat}) \pm 0.10(\text{syst})]\%$$



$$\Delta A_{CP} = [-0.87 \pm 0.41(\text{stat}) \pm 0.06(\text{syst})]\%$$

Нарушение CP с точки зрения теории

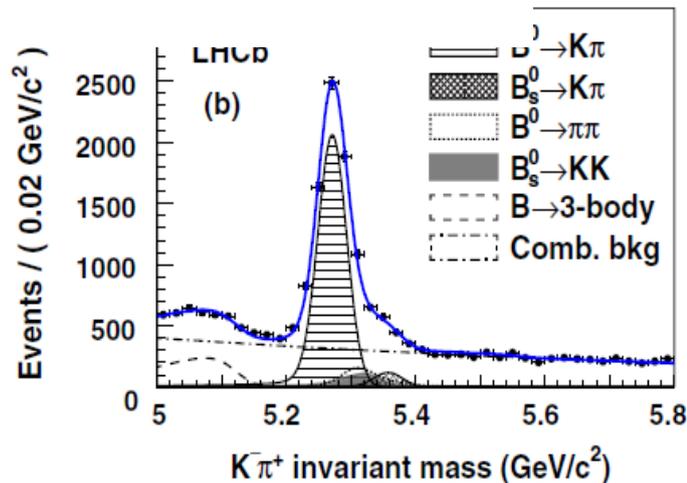
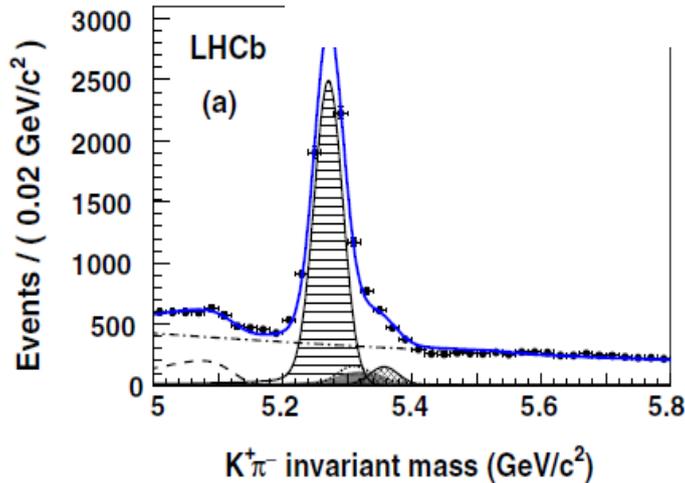
- Все теоретические вычисления предсказывают нарушение CP на уровне $< 0.1\%$, у j

— There are honourable exceptions e.g. "...There is no theorem, though, ruling out SM effects of 1%"
S. Bianco, F. L. Fabbri, D. Benson, and I. Bigi, A Cicerone for the physics of charm, Riv. Nuovo Cim. 26N7 (2003)

- На верхнем пределе SM ...
(**LHCb + CDF + Belle = отклонение 4.6σ от нуля**)
- Совместима с НФ ...
- Необходимо: обработка оставшейся статистики
теоретические изыскания

A_{CP} в $B_{(s)}$ секторе

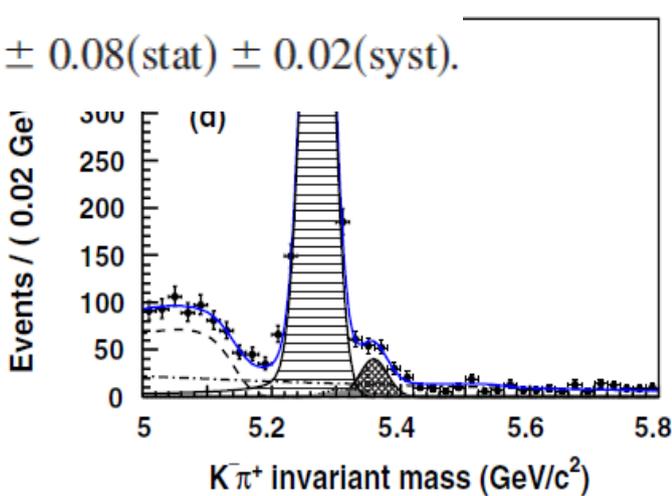
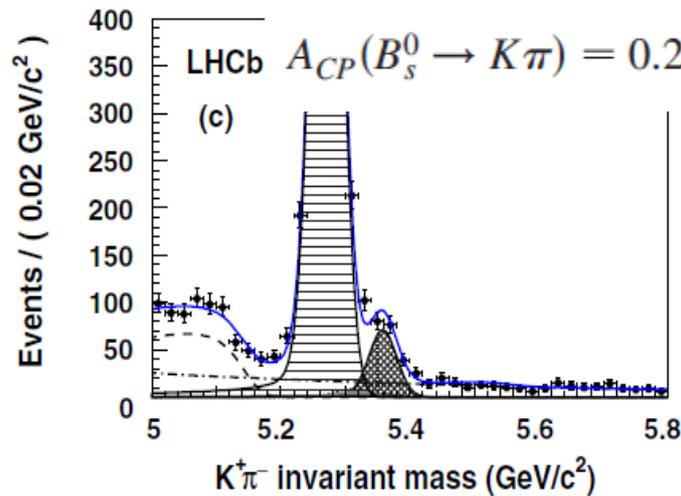
$$A_{CP}(B^0 \rightarrow K\pi) = -0.088 \pm 0.011(\text{stat}) \pm 0.008(\text{syst}),$$



5 σ

Наблюдение

World best



$$A_{CP}(B_s^0 \rightarrow K\pi) = 0.27 \pm 0.08(\text{stat}) \pm 0.02(\text{syst}).$$

3.3 σ

Указание

World first

Заключение

Взгляд в будущее. LHCb upgrade.

Type	Observable	Current precision	LHCb 2018	Upgrade (50 fb ⁻¹)	Theory uncertainty
B_s^0 mixing	$2\beta_s (B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi)$	0.10 [30]	0.025	0.008	~ 0.003
	$2\beta_s (B_s^0 \rightarrow J/\psi f_0(980))$	0.17 [32]	0.045	0.014	~ 0.01
	a_{sl}^s	6.4×10^{-3} [63]	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
	$2\beta_s^{\text{eff}}(B^0 \rightarrow \phi K_S^0)$	0.17 [63]	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	$S_3(B^0 \rightarrow K^{*0}\mu^+\mu^-; 1 < q^2 < 6 \text{ GeV}^2/c^4)$	0.08 [64]	0.025	0.008	0.02
	$s_0 A_{\text{FB}}(B^0 \rightarrow K^{*0}\mu^+\mu^-)$	25% [64]	6%	2%	7%
	$A_{\text{I}}(K\mu^+\mu^-; 1 < q^2 < 6 \text{ GeV}^2/c^4)$	0.25 [9]	0.08	0.025	~ 0.02
	$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow \pi^+\mu^+\mu^-)/\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+\mu^+\mu^-)$	25% [29]	8%	2.5%	$\sim 10\%$
Higgs penguins	$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)$	1.5×10^{-9} [4]	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	$\gamma (B \rightarrow D^{(*)}K^{(*)})$	$\sim 10\text{--}12^\circ$ [40, 41]	4°	0.9°	negligible
	$\gamma (B_s^0 \rightarrow D_s K)$	–	11°	2.0°	negligible
	$\beta (B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0)$	0.8° [63]	0.6°	0.2°	negligible
Charm CP violation	A_Γ	2.3×10^{-3} [63]	0.40×10^{-3}	0.07×10^{-3}	–
	ΔA_{CP}	2.1×10^{-3} [8]	0.65×10^{-3}	0.12×10^{-3}	–

Заключение

- LHCb потрясающий инструмент по поиску НФ в b и s секторах
- Редкие распады ($B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$) существенные ограничения на НФ
- Исследование CP -нарушения для B -мезонов;
- Открытие новых (ожидаемых) каналов распада B ;
- Намёк (evidence) на CP -нарушение в $D^0 \rightarrow h^+ h^-$ ($h = K, \pi$)
наиболее заметное отклонение от СМ;
- И многое другое...