

Открытие сверхредкого распада $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ на установках LHCb и CMS в CERN



к.ф.-м.н. Н. В. Никитин

Кафедра физики атомного ядра и квантовой теории столкновений,

Физический факультет МГУ имени М.В.Ломоносова;

Отдел экспериментальной физики высоких энергий

НИИЯФ МГУ имени Д.В.Скобельцына, МГУ имени М.В.Ломоносова

2015 г.

Содержание

- а) Введение: Стандартная модель;
- б) Распады $B_{s,d} \rightarrow \mu^+ \mu^-$ с теоретической точки зрения;
- в) Установки LHCb и CMS;
- г) История изучения распадов $B_{s,d} \rightarrow \mu^+ \mu^-$ в CERN;
- д) Открытие распада $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ и наблюдение распада $B_d \rightarrow \mu^+ \mu^-$;
- е) Что дальше? Распад $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$.

Введение. Стандартная модель

Стандартная модель (СМ) – это модель, которая включает в себя **Минимальную электрослабую модель** (электромагнитизм + слабое взаимодействие) и калибровочную теорию сильных взаимодействий – квантовую хромодинамику (**КХД**).

СМ содержит около **20 свободных параметров** (массы частиц, константы взаимодействий, элементы матриц смешивания, вакуумные средние), которые требуют экспериментального измерения.

СМ **описывает всю совокупность экспериментальных результатов**, которые получены на современных ускорителях, и почти все неускорительные эксперименты.

Что СМ НЕ описывает? Гравитацию, объединение электрослабой модели и КХД (теории великого объединения), темную материю и темную энергию, иерархию масс частиц, барионную асимметрию Вселенной, осцилляции нейтрино.

Введение. Частицы Стандартной модели. b-кварки

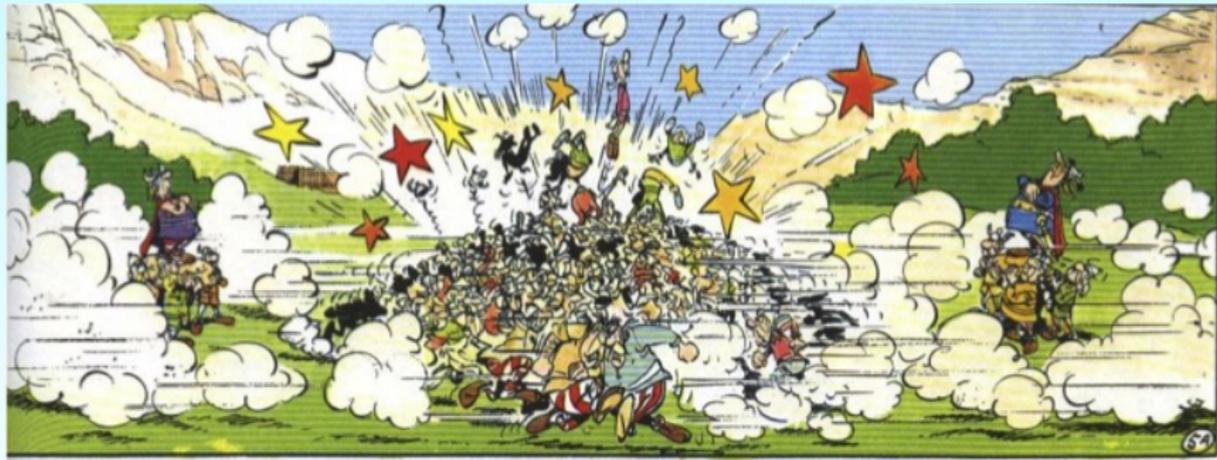
Quarks		Leptons		Bosons
 up	 down	 electron	 neutrino e	 photon
 charm	 strange	 muon	 neutrino μ	 gluon
 top	 beauty	 tau	 neutrino τ	 $Z^0 W^+$
				 Higgs



После открытия бозона Хиггса основной задачей физиков-экспериментаторов стал поиск явлений, не описываемых СМ ("физика за пределами СМ"). Имеется большое число расширений СМ. Суперсимметрия (SUSY) – одно из самых красивых. До недавнего времени считалось, что SUSY придет на смену СМ.

Введение. Стратегия поиска физики вне рамок СМ

Все расширения СМ предсказывают новые частицы. Имеются две стратегии поиска таких частиц.



1) **Прямое рождение** новых частиц в столкновениях пучков (протонов) на коллайдерах. Естественное **ограничение**:

$$M_{\text{new}} \leq E_{\text{СМ}}$$

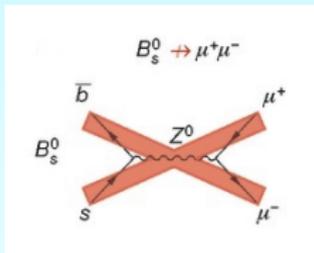
2) Исследование **вклада** новых частиц в распады, которые имеют экстремально **малую вероятность в рамках СМ** (идут в высших порядках ТВ). Тогда относительный вклад "новой физики" в такие распады может оказаться сравнительно большим.



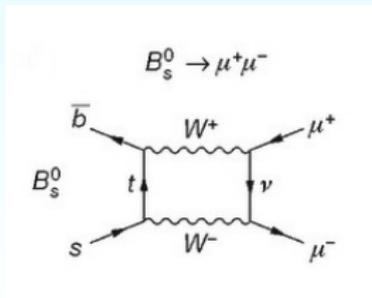
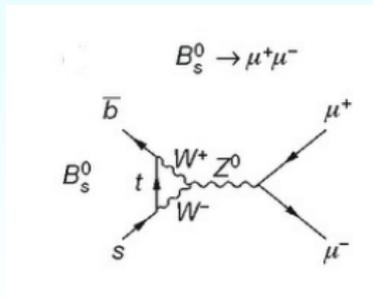
"Нормальные герои всегда идут в обход". **Плата:** для открытия подобных распадов требуется **очень большая статистика**, которая может набираться многие годы, и сложные методы анализа.

Распады $B_{s,d} \rightarrow \mu^+ \mu^-$. Теория

Редкие распады $B_{d,s} \rightarrow \mu^+ \mu^-$ на кварковом уровне обусловлены переходами $b \rightarrow d$ и $b \rightarrow s$. Это так называемые "нейтральные токи, нарушающие аромат". В рамках СМ такие переходы запрещены в древесном приближении (например за счет процесса $\bar{b}s \rightarrow Z^0*$)



и в низшем порядке ТВ идут за счет петлевых диаграмм типа "пингвин" ("penguin") и "квадратик" ("box"):



Описание переходов $b \rightarrow q$, где $q = \{d, s\}$ проводится с помощью эффективного гамильтониана $H^{\text{eff}}(b \rightarrow q)$, где $q = \{d, s\}$, записанного в форме вильсоновского разложения:

$$H^{\text{eff}}(b \rightarrow q) = \frac{G_F}{\sqrt{2}} V_{tb} V_{tq}^* \sum_i C_i(\mu) O_i(\mu),$$

где G_F - постоянная Ферми, $C_i(\mu)$ – набор вильсоновских коэффициентов, $O_i(\mu)$ – набор базисных операторов. Масштабный параметр $\mu \sim m_b$ разделяет вклады пертурбативной и непертурбативной КХД. Для СМ значения коэффициентов Вильсона в NLO-приближении можно найти в работе [A. Buras and M. Manz, Phys. Rev. D 52, 186 \(1995\)](#).

Непертурбативный (мягкий) вклад содержится в матричных элементах от базисных операторов $O_i(\mu)$ между начальным и конечным адронными состояниями $\langle \text{fin} | O_i(\mu) | \text{in} \rangle$. Как правило эти матричные элементы вычисляются с точностью 15% и хуже. Но для распадов $B_{s,d} \rightarrow \mu^+ \mu^-$ точность учета мягкого вклада составляет $\sim 5\%$, что открывает возможность весьма точной проверки СМ в высших порядках ТВ и поиска эффектов "новой физики".

В распадах $B_{d,s} \rightarrow \ell^+ \ell^-$. ненулевым оказывается только матричный элемент $\langle 0 | \bar{q} \gamma_\mu b | \bar{B}_q(p, M) \rangle = i f_{B_q} p_\mu$. Тогда для парциальной ширины таких распадов можно получить следующее выражение:

$$Br(B_q \rightarrow \mu^+ \mu^-) = \tau_{B_q} \frac{(G_F \alpha_{em})^2}{16\pi^3} |V_{tq}^* V_{tb}|^2 \left(m_\ell f_{B_q} C_{10A}(\mu) \right)^2 \sqrt{M^2 - 4m^2},$$

где τ_{B_q} – время жизни B_q -мезона, M – масса B_q -мезона, m – масса мюона, $\alpha_{em} \approx 1/137$ – постоянная тонкой структуры.

Вильсоновский коэффициент C_{10A} не зависит от масштабного параметра μ . Таким образом, неопределенность в предсказаниях парциальных ширин для редких лептонных распадов зависит только от неопределенности в предсказании f_{B_q} ($\sim 5\%$) и неопределенности в значениях величин элементов матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскава.

Отношение парциальных ширин, в основном, определяется отношением элементов матрицы Кабиббо-Кобаяши-Маскава:

$$\frac{Br(B_d \rightarrow \mu^+ \mu^-)}{Br(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-)} = \frac{|V_{td}^* V_{tb}|^2 f_{B_d}^2}{|V_{ts}^* V_{tb}|^2 f_{B_s}^2} \sim \frac{|V_{td}|^2}{|V_{ts}|^2} = \left| \frac{8,4 \times 10^{-3}}{40 \times 10^{-3}} \right|^2 \sim 0,04.$$

Распады $B_{s,d} \rightarrow \mu^+ \mu^-$. Теоретические предсказания в рамках СМ

Самые последние теоретические предсказания в рамках СМ с учетом всех неопределенностей даны в работе **Bobeth, C. et al. " $B_{s,d} \rightarrow \ell^+ \ell^-$ in the Standard Model with reduced theoretical uncertainty", Phys. Rev. Lett. 112, 101801 (2014):**

$$Br(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{\text{Theor}} = (3,66 \pm 0,23) \times 10^{-9}$$

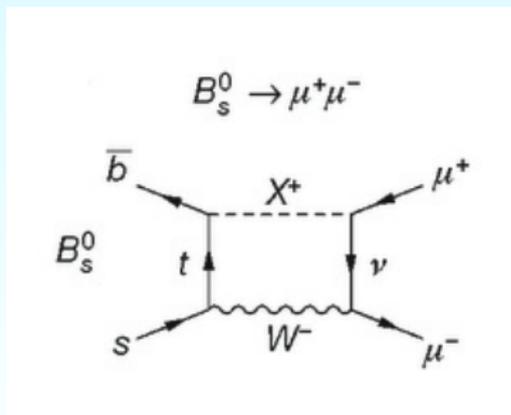
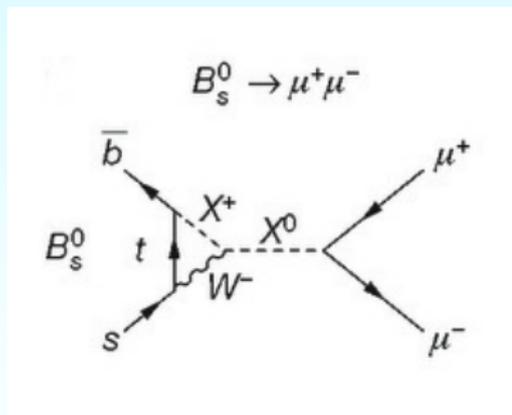
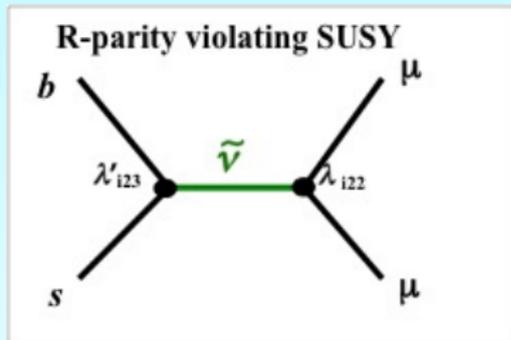
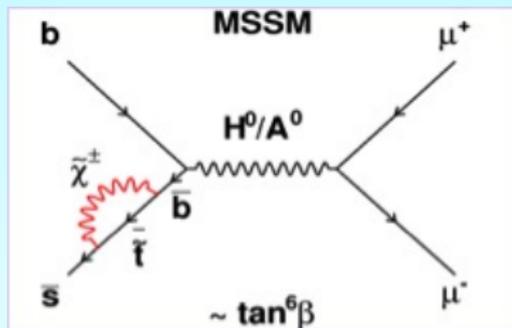
и

$$Br(B_d \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{\text{Theor}} = (1,06 \pm 0,09) \times 10^{-10}.$$

Отношение парциальных ширин

$$R_{\text{Theor}} = \frac{Br(B_d \rightarrow \mu^+ \mu^-)}{Br(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-)} = 0,0295_{-0,0025}^{+0,0028}.$$

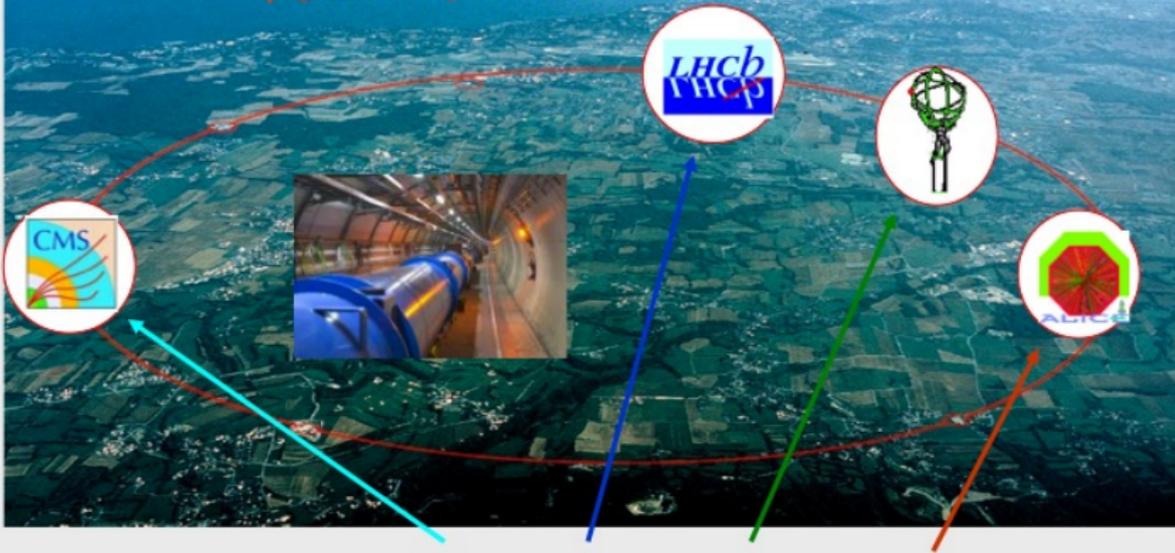
Распады $B_{s,d} \rightarrow \mu^+ \mu^-$ за пределами СМ





Проект LHC

Длина окружности тоннели 27 км;
LHC: Больше 1700 сверхпроводящих магнитов;
Средняя глубина тоннели 100 м.



4 детектора: **CMS**, **LHCb**, **ATLAS** и **ALICE**

Детектор CMS – Compact Muon Solenoid

СВЕРХПРОВОДЯЩИЙ СОЛЕНОИД

диаметр 15 м
длина 21.6 м
поле 4 Тесла

ЭЛЕКТРОМАГНИТНЫЙ КАЛОРИМЕТР

сцинтиллирующие кристаллы $PbWO_4$
76 тыс.каналов
кремниевый стриповый предливневый детектор
18 кв.метров, 144 тыс. каналов

АДРОННЫЙ КАЛОРИМЕТР

пластический сцинтиллятор/латунь
8 тыс. каналов

ВОЗВРАТНОЕ ЯРМО

ТРЕКЕР

Кремниевые микростриповые
и пиксельные детекторы
223 кв. метров
10 млн. каналов

МЮОННАЯ СИСТЕМА: ЦИЛИНДРИЧЕСКАЯ

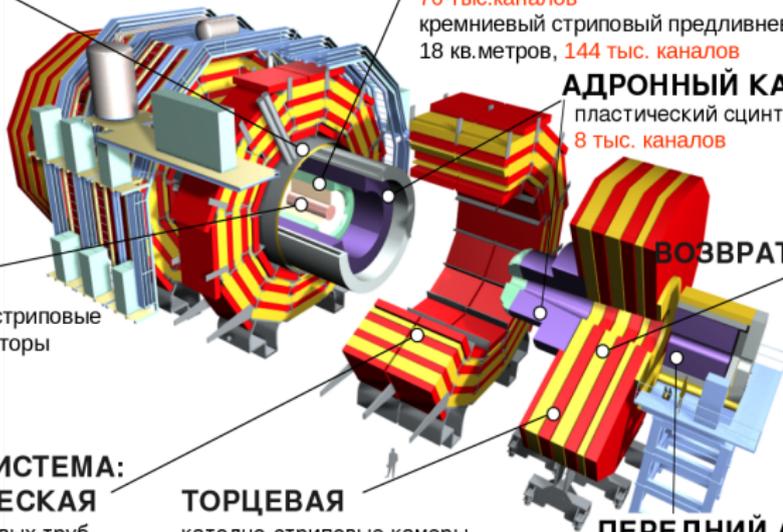
камеры из дрейфовых труб
250 камер
192 тыс. каналов
Резистивные планарные камеры для триггера - RPC - 760 камер

ТОРЦЕВАЯ

катодно-стриповые камеры
540 камер
310 тыс. каналов

ПЕРЕДНИЙ АДРОННЫЙ КАЛОРИМЕТР

кварцевое волокно/железо
2 тыс. каналов



Установка LHCb



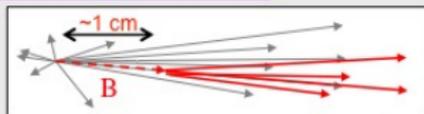
Длина: 20 м.
Диаметр: 10 м.
Вес: 2000 т

Черенковские счетчики;
идентификация частиц,
разделение K и π - мезонов

VELO: первичная
и вторичная
вершины,
прицельные
параметры

Область pp -
взаимодействия

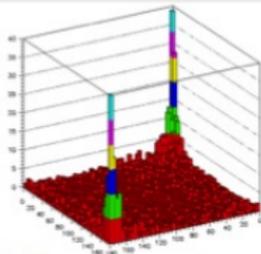
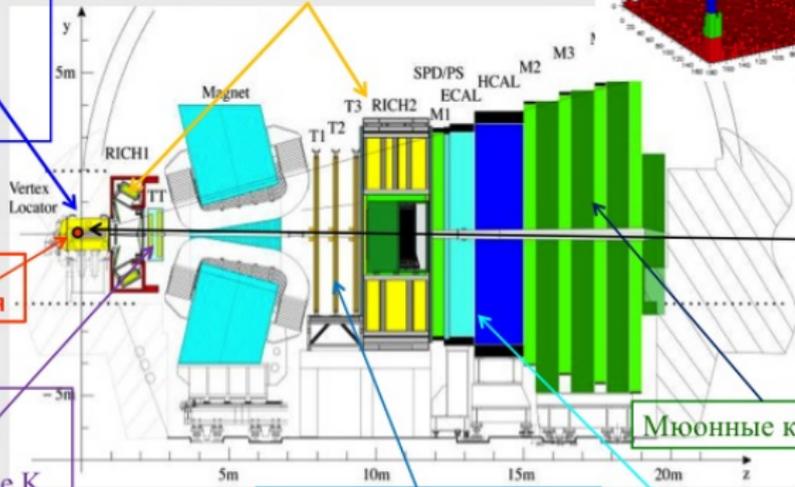
Триггер на
импульс и
восстановление K_S



Трековые плоскости для
измерения импульсов
заряженных частиц.

Калориметры
разделение e, γ, π^0

Мюонные камеры

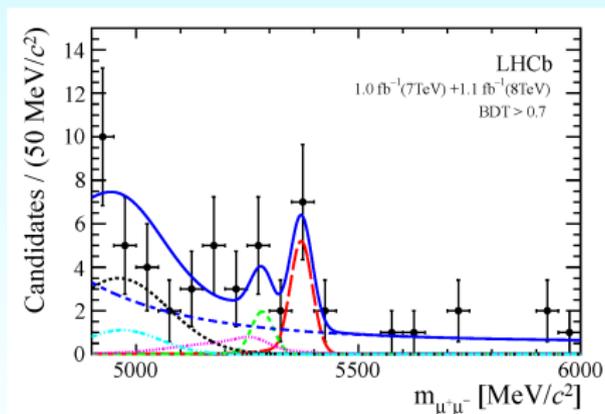


Поиски распадов $B_{S,d} \rightarrow \mu^+ \mu^-$ на LHC. 2012 год

Первое наблюдение распада $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ было представлено коллаборацией LHCb на "Hadron Collider Particle Symposium" в Киото (Япония) 12 ноября 2012 года. Результат

$$Br(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{\text{Exp LHCb 2012}} = (3, 2^{+1,5}_{-1,2}) \times 10^{-9}$$

на уровне $3,2\sigma$ и согласовался с предсказаниями СМ. Величина Br была получена на данных 2011 года (интегральная светимость 1 фб^{-1}) и на части данных 2012 года (интегральная светимость $1,1 \text{ фб}^{-1}$).



Распад $B_d \rightarrow \mu^+ \mu^-$ обнаружить не удалось (LHCb Collaboration, "First evidence for the decay $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ ", Phys. Rev. Lett. 110, 021801 (2013)).

Поиски распадов $B_{s,d} \rightarrow \mu^+ \mu^-$ на LHC. 2013 год

На следующий год появились две публикации LHCb и CMS, которые на полной статистике 2011 и 2012 годов исследовали распад $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$. Результаты LHCb:

$$Br(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{\text{Exp LHCb 2013}} = (2,9_{-1,0}^{+1,1}) \times 10^{-9}$$

на уровне $4,0\sigma$ и

$$Br(B_d \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{\text{Exp LHCb 2013}} < 7,4 \times 10^{-10}$$

на **95% CL**. LHCb Collaboration, Measurement of the $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ branching fraction and search for $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ decays at the LHCb experiment. **Phys. Rev. Lett. 111, 101805 (2013)**.

Результаты CMS:

$$Br(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{\text{Exp CMS 2013}} = (3,0_{-0,9}^{+1,0}) \times 10^{-9}$$

на уровне $4,3\sigma$ и

$$Br(B_d \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{\text{Exp CMS 2013}} < 1,1 \times 10^{-9}$$

на **95% CL**. CMS Collaboration, Chatrchyan, S. et al., "Measurement of the $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ branching fraction and search for $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ with the CMS experiment", **Phys. Rev. Lett. 111, 101804 (2013)**.

2015 год. Совместная публикация в Nature

13 мая 2015 года в журнале **"Nature"** была опубликована совместная работа коллабораций LHCb и CMS под названием **"Observation of the rare $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ decay from the combined analysis of CMS and LHCb data"** в которой сообщалось об окончательном открытии распада $B_d^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ и о первом измерении парциальной ширины распада $B_d^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ на объединенных данных двух коллабораций.



От **МГУ (НИИЯФ МГУ)** в авторский лист работы вошли:

CMS: A. Belyaev, E. Boos, M. Dubinin, L. Dudko, A. Ershov, A. Gribushin, I. Katkov, V. Klyukhin, O. Kodolova, I. Lokhtin, S. Obraztsov, S. Petrushanko, V. Savrin, A. Snigirev, A. Popov, V. Zhukov.

LHCb: A. Berezhnoy, M. Korolev, A. Leflat, N. Nikitin, D. Savrina.

Фоновые процессы

Распады $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ появляются с частотой примерно **4 штуки на МИЛЛИАРД** распадов B_s^0 -мезонов. Кроме того, B_s^0 -мезоны рождаются и распадаются в сопровождении нескольких сотен сопутствующих частиц. Поэтому важнейшей задачей является выделение сигнала из фона.

Какой бывает фон?

- а) Комбинаторный: $B \rightarrow \mu^+ \dots$ и $\bar{B} \rightarrow \mu^- \dots$ от полулептонных распадов;
- б) Редкие полулептонные $B^{0\pm} \rightarrow \pi^{0\pm} \mu^+ \mu^-$;
- в) Ошибочная идентификация p как μ в распаде $\Lambda_b^0 \rightarrow p \mu^- \bar{\nu}_\mu$;
- г) Пикующие: $B_{d,s}^0 \rightarrow h^+ h'^-$, где $\{h, h'\} = \{\pi, K\}$.

Для выделения сигнала из фона использовался метод "дерева принятия решений" – **BDT** – boosted decision trees.



Итоговый результат

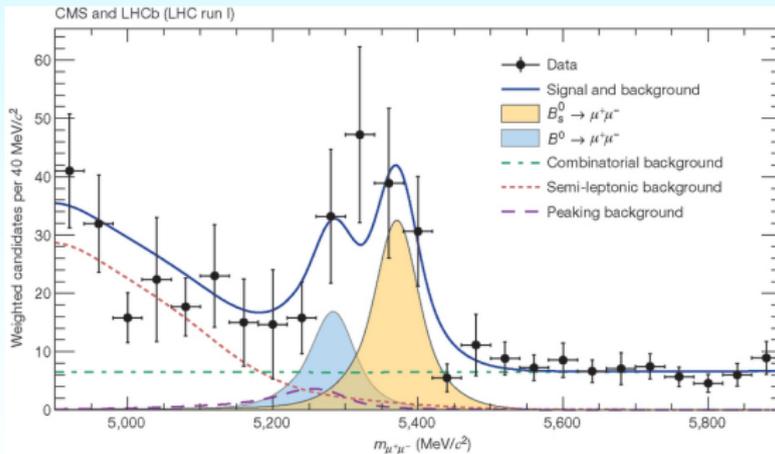
Нормировка на $Br(B^+ \rightarrow J/\psi K^+) \sim 10^{-5}$. Совместный результат LHCb и CMS:

$$Br(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{\text{Exp LHCb\&CMS 2015}} = (2, 8^{+0,7}_{-0,6}) \times 10^{-9}$$

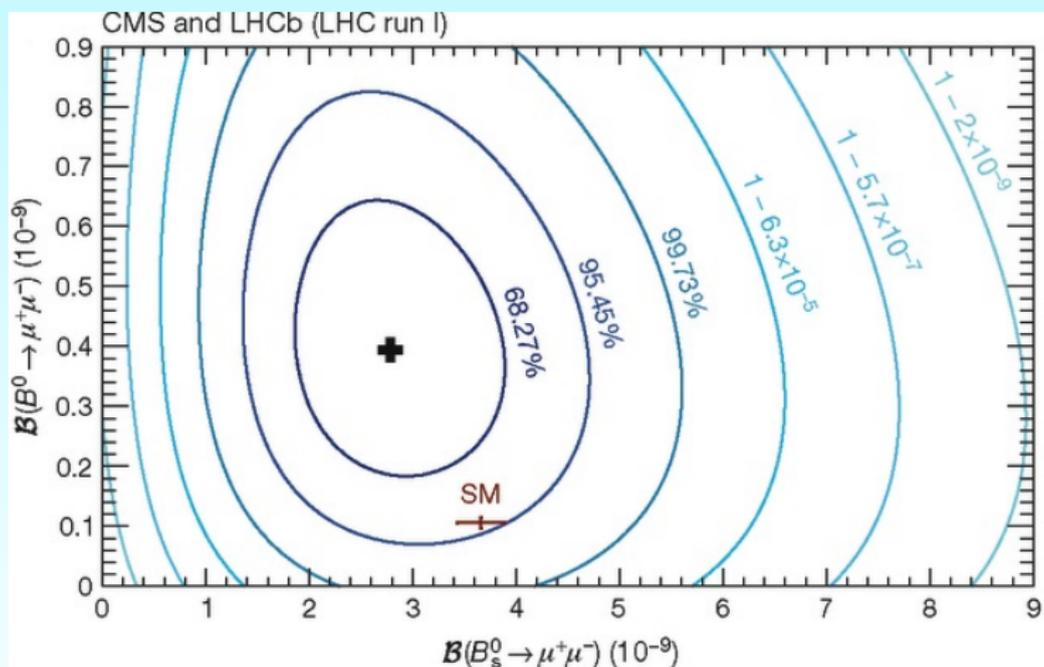
на уровне $6,2\sigma$ и

$$Br(B_d \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{\text{Exp LHCb\&CMS 2015}} = (3, 9^{+1,6}_{-1,4}) \times 10^{-10}$$

на уровне $3,2\sigma$.

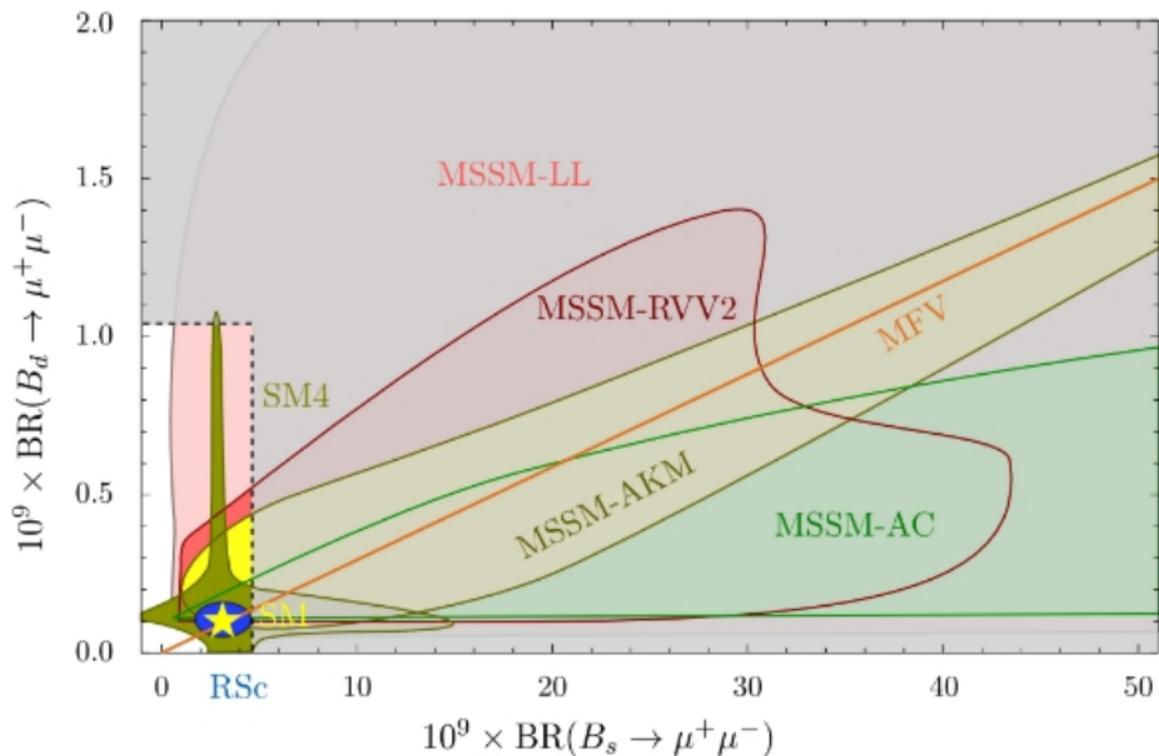


Сравнение с предсказаниями СМ



Предсказания СМ с учетом всех теоретических неопределенностей показаны **красным крестом**. Черный крест отмечает положение среднего экспериментального значения. Каждый контур на рисунке соответствует области отклонения $+1\sigma$ от центрального экспериментального значения.

Ограничения на физику вне рамок СМ



Что дальше? Распад $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$

Данные распады относятся к классу **сверхредких распадов**. В СМ при учете эффектов КЭД парциальная ширина

$$Br(B_s \rightarrow \gamma^+ * \gamma^* \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-)_{\text{Theor}} \sim 10^{-11}.$$

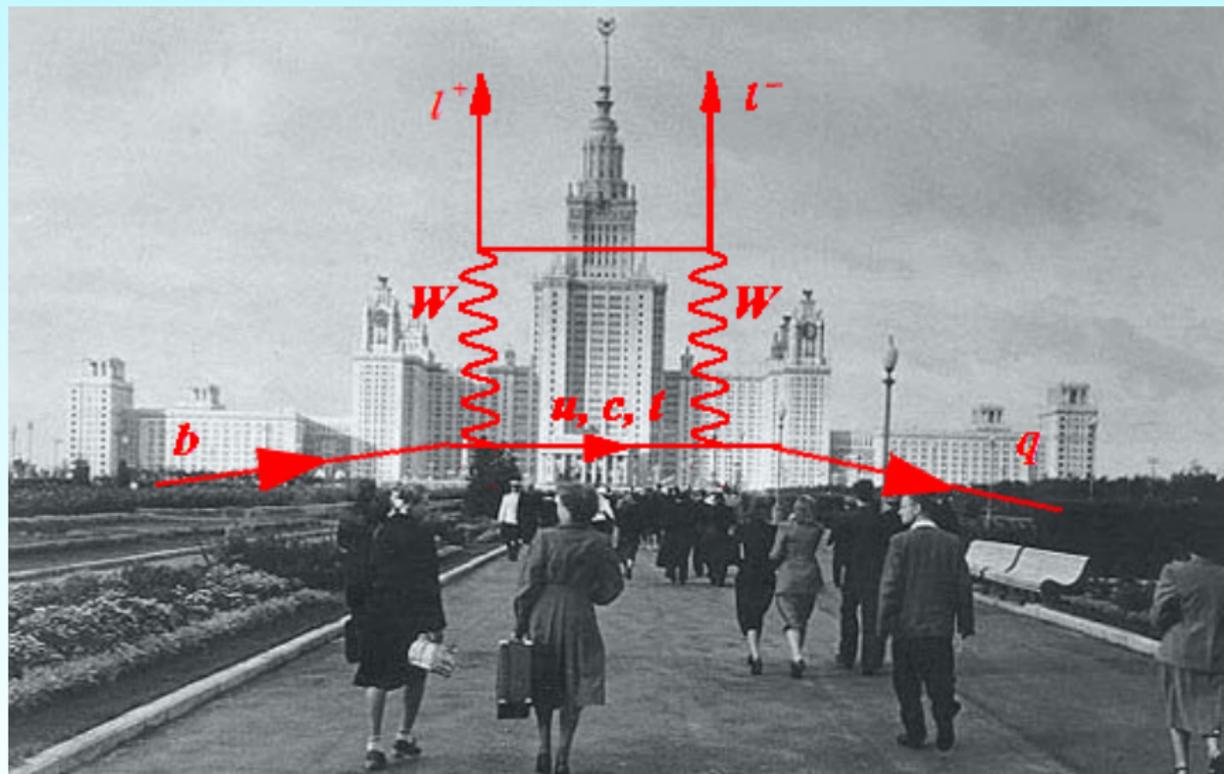
В работе **LHCb Collaboration, Phys. Rev. Lett. 110, 211801 (2013)** установлены лучшие верхние пределы на 4-мюонные распады В-мезонов на статистике, соответствующей интегральной светимости **1 фб⁻¹** (данные 2011 года):

$$Br(B_d \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-)_{\text{Exp LHCb 2013}} < 6,6 (5,3) \times 10^{-9} \text{ на } \mathbf{95\% (90\%) CL};$$

$$Br(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-)_{\text{Exp LHCb 2013}} < 1,6 (1,2) \times 10^{-8} \text{ на } \mathbf{95\% (90\%) CL};$$

В настоящее время **МГУ**, Яндекс при участии Imperial College завершает исследования на статистике в **3 фб⁻¹** (объединенные данные **2011** и **2012** годов). Эти исследования позволят проверить СМ в еще более высоких порядках теории возмущений.

"Новая физика" ждет нас?



Спасибо за внимание!