

# Открытие распада $B_s \rightarrow 2\mu$ на Большом Адронном Коллайдере в экспериментах ЛHCб и CMS

Обсуждение публикации в журнале Nature:  
Observation of rare  $B_s \rightarrow \mu^+\mu^-$  decay from combined analysis of CMS and LHCb data. <http://dx.doi.org/10.1038/nature14474>

# Содержание

- Цель исследований
- Введение
- Диаграммы Фейнмана для распадов  $B_{s,d} \rightarrow \mu^+\mu^-$
- Результаты 30 лет исследований
- Детекторы LHCb и CMS
- Основные моменты анализа. BDT метод
- Поиск редкого распада  $B_{s,d} \rightarrow \mu^+\mu^-$  . Результаты для  $3 \text{ fb}^{-1}$ . Совместный результат LHCb и CMS.
- Влияние вероятности распада  $B_s \rightarrow \mu^+\mu^-$  на параметры SUSY моделей
- Заключение

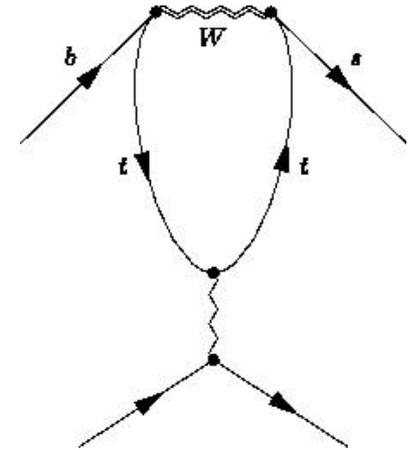
# Введение.

Observation of rare  $B_{s,d} \rightarrow \mu^+ \mu^-$  decay from combined analysis of CMS and LHCb data. <http://dx.doi.org/10.1038/nature14474>

Две коллаборации впервые опубликовали индивидуальные результаты о наблюдении распада  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  мезона в июле 2013 года. В то время как результаты были в отличном согласии, статистическая точность была ниже  $5 \sigma$ , статистической точности исторически необходимой чтобы претендовать на открытие. Совместный анализ CMS и LHCb легко превышает это требование, достигнув  $6.2 \sigma$ .

# Введение. Диаграммы пингвина для распадов В-мезонов

- Стандартная Модель запрещает изменяющие аромат кварков нейтральные токи (FCNC)
- FCNC могут быть введены диаграммами пингвина с одной петлёй
- Если распад В-мезонов может быть реализован только через диаграммы пингвина, эти распады могут быть чувствительны к новой физике
- Примеры таких распадов  $B_s \rightarrow \mu^+\mu^-$ ,  $B_d \rightarrow K^*\mu^+\mu^-$ ,  $B_d \rightarrow K^*\gamma$ ,  $B_s \rightarrow \phi\gamma$  и т.д. Многие из подобных распадов могут быть изучены с помощью ЛНСб детектора
- Одним из возможных распадов  $B_s$  мезона для которого можно с хорошей точностью предсказать его вероятность является распад  $B_s \rightarrow \mu^+\mu^-$



# Цель исследований

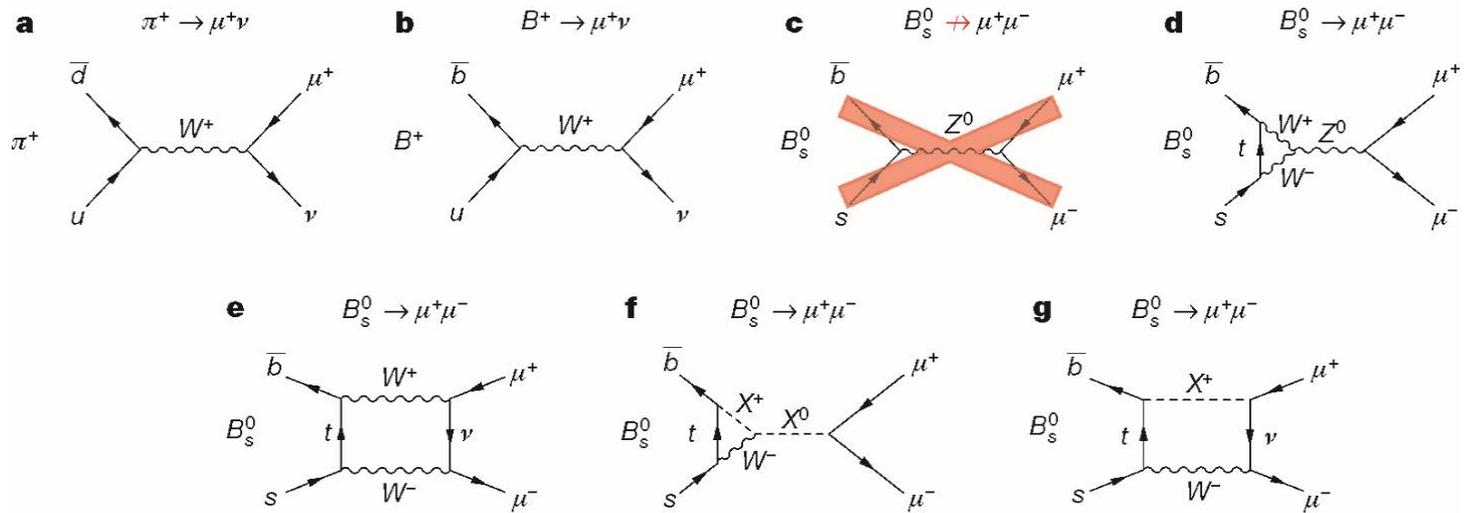
- Цель исследований – тест присутствия новой физики.
- В Стандартной модели нейтральные токи меняющие ароматы кварков сильно подавлены, так что диаграммы Стандартной Модели дают вероятность распадов :

$$B(B_s \rightarrow 2\mu)_{SM} = (3.66 \pm 0.23) \times 10^{-9} \text{ и } B(B_d \rightarrow 2\mu)_{SM} = (1.06 \pm 0.09) \times 10^{-10}$$

- SUSY (суперсимметричное расширение стандартной модели), может увеличить вероятность распада  $B_s \rightarrow 2\mu$ . Например, Two Higgs-Doublet model (2HDM)

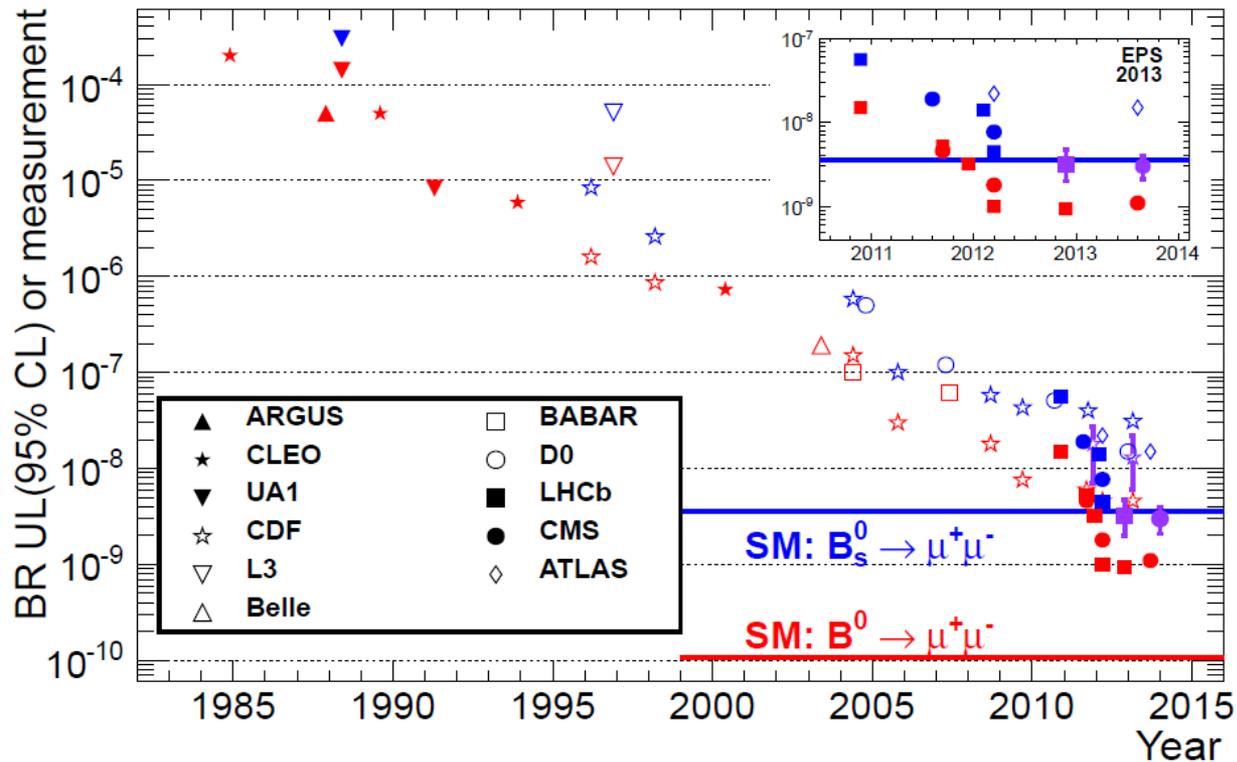
$$BR(SUSY) \propto BR(SM) \cdot \frac{m_b^4 \cdot (\tan \beta)^6}{m_{H^0}^4}$$

# Feynman diagrams related to the $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ decay



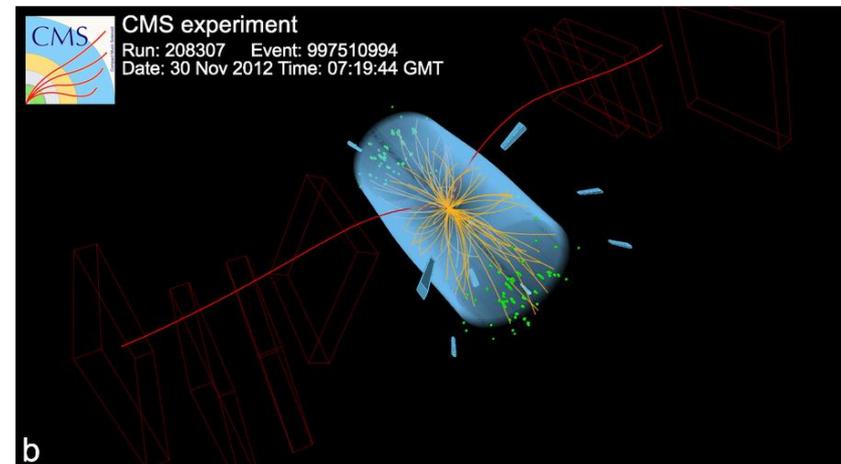
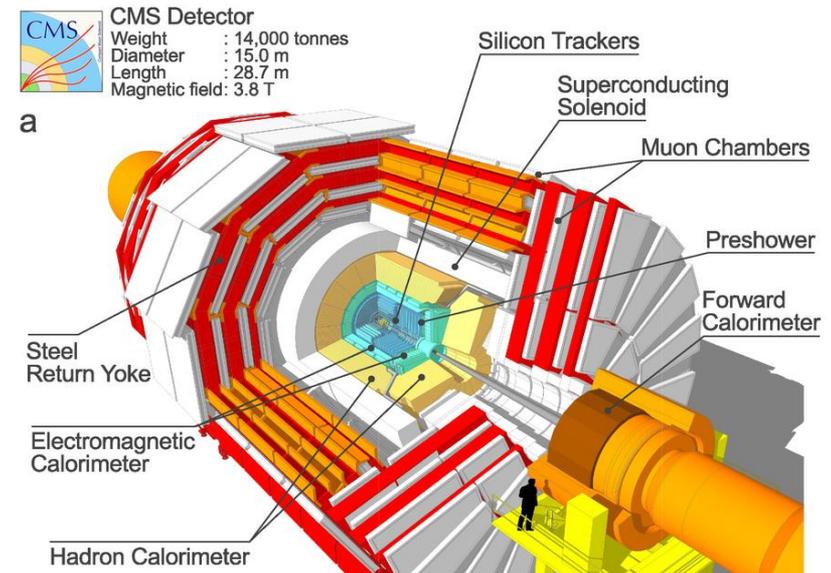
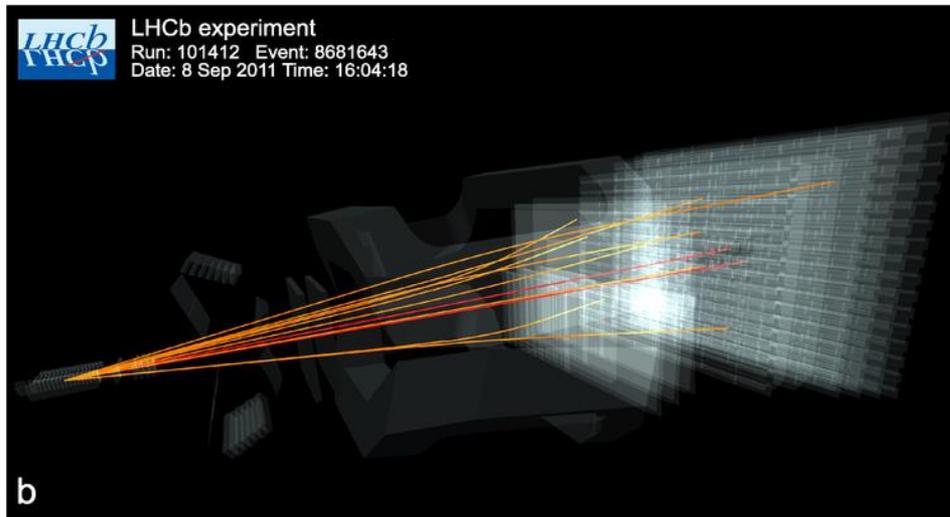
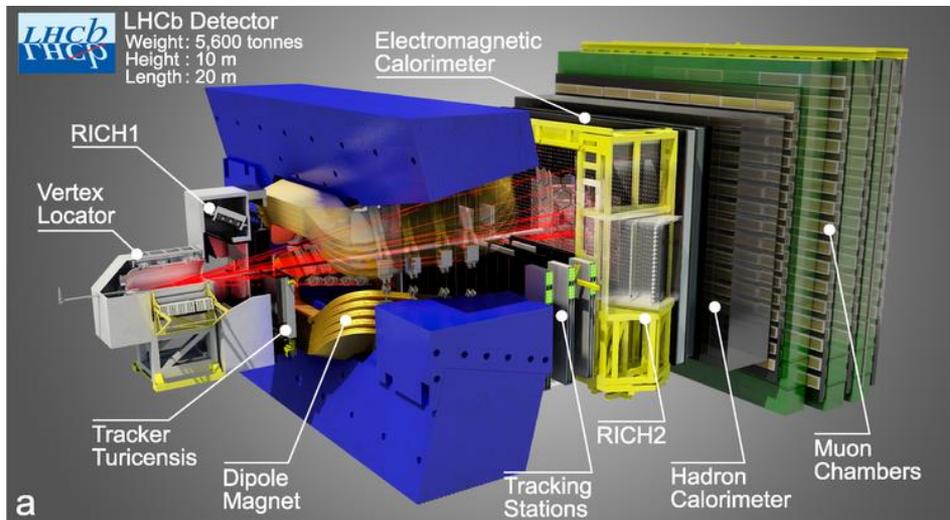
Nature **000**, 1-5 (2015) doi:10.1038/nature14474

# 30 лет исследований



- Поиск распада осуществлялся многими экспериментами в течение почти трех десятилетий
- В эпоху до ЛHC наиболее точные измерения ограничивающие вероятность распада сделаны в Фермилабе экспериментами **D0**:  $Br(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 5.1 \times 10^{-8}$  @95% CL и **CDF**:  $0.46 \times 10^{-8} < BR < 3.9 \times 10^{-8}$  @90% CL)

# Детекторы LHCb и CMS



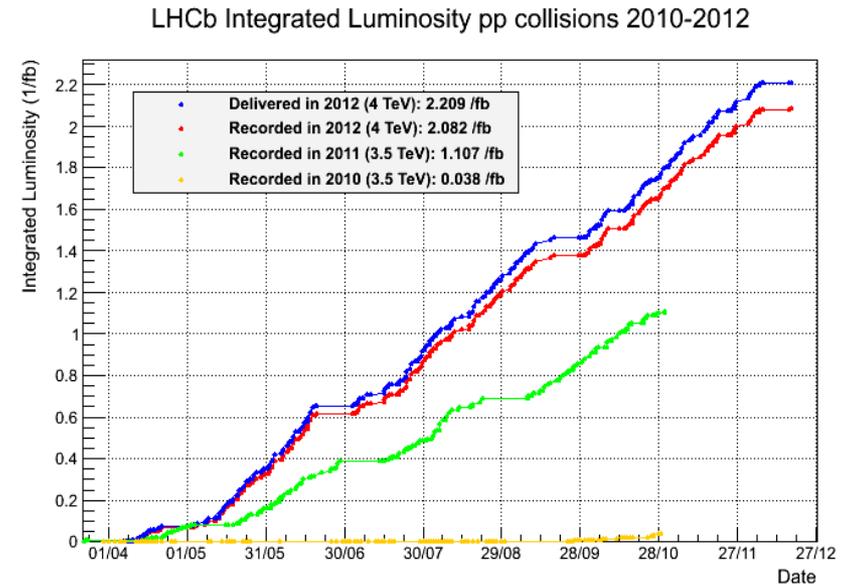
# Основные сведения для LHCb

□ 2011 год , накопленная интегральная светимость  $L = 1 \text{ fb}^{-1}$  при  $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$

□ 2012 год , , накопленная интегральная светимость  $L = 2 \text{ fb}^{-1}$  при  $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ , эффективность набора данных  $> 90\%$

□ Параметры имеющие отношение к регистрации мюонов:

- эффективность идентификации мюонов :  $\epsilon(\mu) \sim 97\%$
- эффективность димюонного триггера:  $\sim 90\%$
- вероятность неправильной идентификации  $\epsilon(h \rightarrow \mu) < 1\%$  for  $p > 10 \text{ GeV}/c$
- разрешение по импульсу:  $\Delta p / p = 0.4\%$  at  $5 \text{ GeV}/c$  to  $0.6\%$  at  $100 \text{ GeV}/c$
- $\sigma(M_{B_{s,d}} \rightarrow \mu^+ \mu^-) = 25 \text{ MeV}/c^2$
- точность измерения импакт-параметра для треков :  $\sigma(IP) = 25 \mu\text{m}$  at  $p_T = 2 \text{ GeV}/c$  и  $\sigma(IP) = 20 \mu\text{m}$  для треков с большими поперечными импульсами



# Мюонная система CMS

- The drift tube (DT), cathode strip chamber (CSC), and resistive plate chamber (RPC).
- The spatial resolution per chamber was 80-120  $\mu\text{m}$  in the DTs, 40-150  $\mu\text{m}$  in the CSCs, and 0.8-1.2 cm in the RPCs.
- The time resolution achievable was 3 ns or better per chamber for all 3 systems.
- The efficiency for reconstructing hits and track segments originating from muons traversing the muon chambers was in the range 95-98%.
- The CSC and DT systems provided muon track segments for the CMS trigger with over 96% efficiency, and identified the correct triggering bunch crossing in over 99.5% of such events
- The  $\mu^+\mu^-$  resolution from 32 MeV for  $|\eta_{\text{mu}}| \approx 0$  to 75 MeV for  $|\eta_{\text{mu}}| > 1.8$ .

# Экспериментальные данные использованные в совместном анализе

- The data correspond to total integrated luminosities of  $25\text{fb}^{-1}$  and  $3\text{fb}^{-1}$  for the CMS and LHCb experiments, respectively, equivalent to a total of approximately  $10^{12}$   $B_s$  and  $B^0$  mesons produced in the two experiments together
- Assuming the branching fractions given by the SM and accounting for the detection efficiencies, the predicted numbers of decays to be observed in the two experiments together are about 100 for  $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$  and 10 for  $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ .

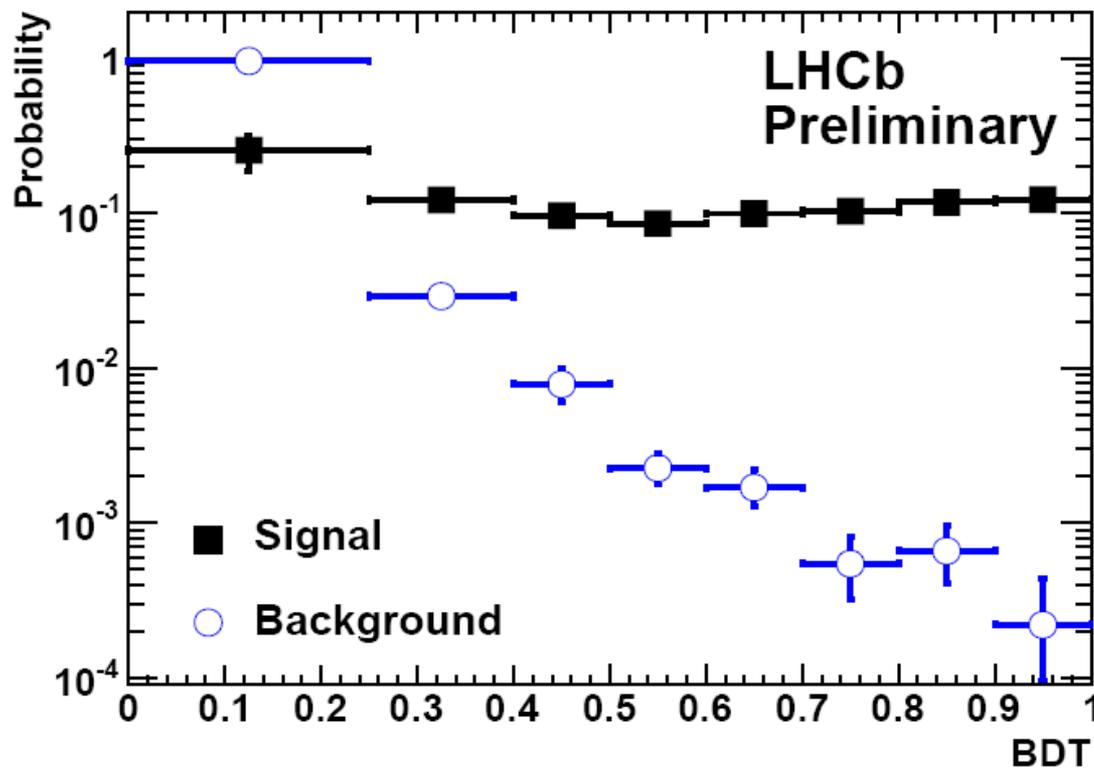
$$B(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = \frac{N_{B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-}}{N_{\text{norm.}}} \times \frac{f_d}{f_s} \times \frac{\epsilon_{\text{norm.}}}{\epsilon_{B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-}} \times B_{\text{norm.}} = \alpha_{\text{norm.}} \times N_{B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-}$$

- Norm. channels  $B^+ \rightarrow J/\psi K^+$ ,  $B^0 \rightarrow K^+ \pi^-$ ; fragmentation ratio  $f_s/f_d = 3.86 \pm 0.22$  is measured at LHCb with hadronic decays  $B_0 \rightarrow D^- K^+$  and  $B_s \rightarrow D_s^- \pi^+$  and  $B_0 \rightarrow D^- \pi^+$  and  $B_s \rightarrow D_s^- \pi^+$ ;

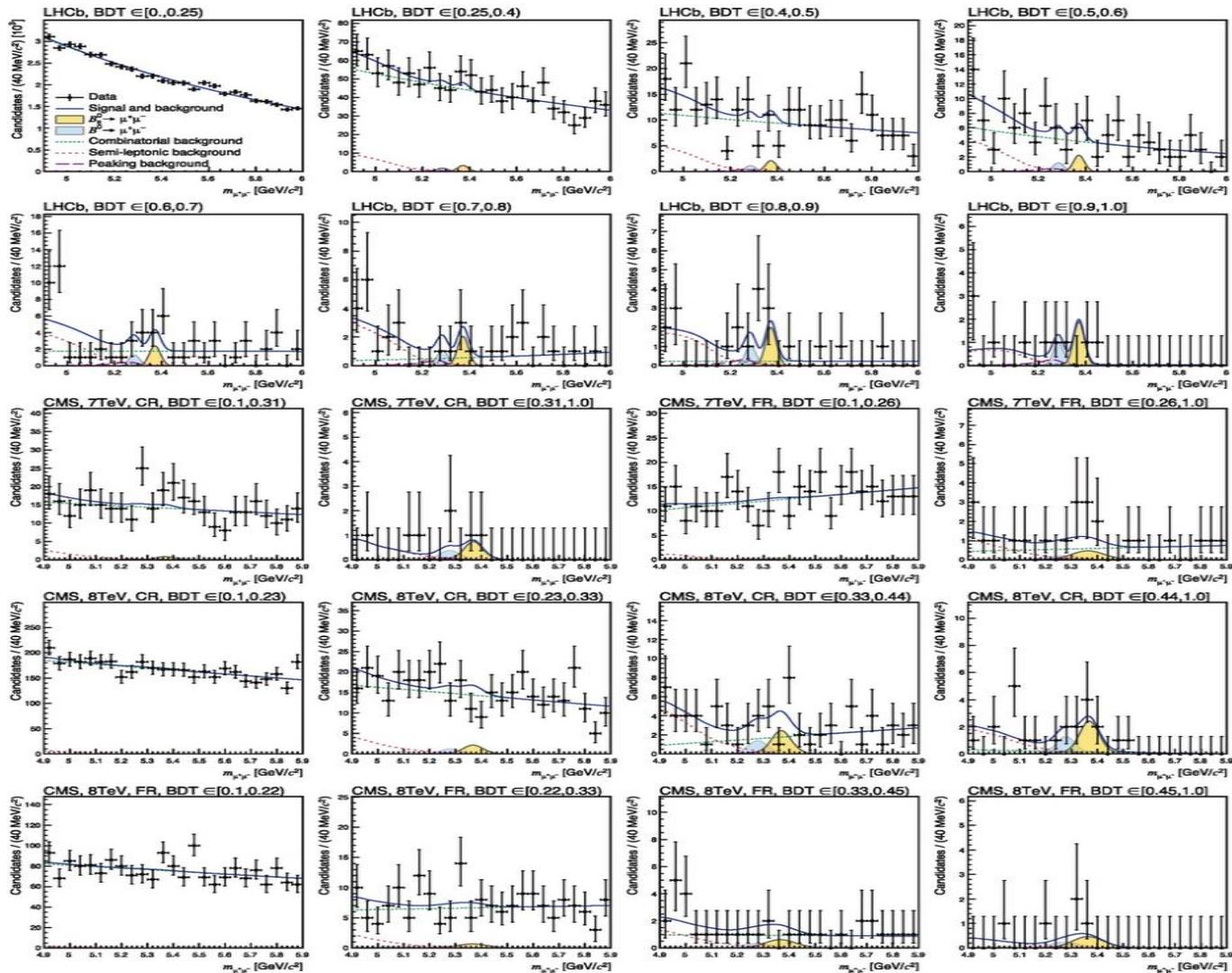
# Основные моменты анализа

- Предварительный отбор событий удовлетворивших димюонному триггеру, необходимому диапазону инвариантных масс , поперечных импульсов частиц, расстояния от первичной вершины до вторичной, импакт параметры для кандидата в  $B_s$  мезон и мюонов и т.д.
- Далее для отделения сигнала от фона использовался Boosted Decision Tree (BDT) метод. Для выделения сигнала использовалась информация о геометрии распада, времени жизни  $B_s$  мезона и о кинематике события. В результате работы BDT метода для каждого кандидата в  $B_s$  мезон вычислялась величина, которая связана с вероятностью кандидата быть фоном или сигналом.
- В итоге, в каждом бине отклика BDT метода фитировался спектр инвариантных масс димюонов для определения вкладов от возможных сигналов распадов  $B_s \rightarrow 2\mu$  и  $B_d \rightarrow 2\mu$ , от фонов -  $B^0 \rightarrow \pi^- \mu^+ \nu$ ,  $B^{0(+)} \rightarrow \mu^+ \mu^- \pi^{0(+)}$ ,  $B_{d/s} \rightarrow h^+ h^-$ , а также комбинаторного фона.

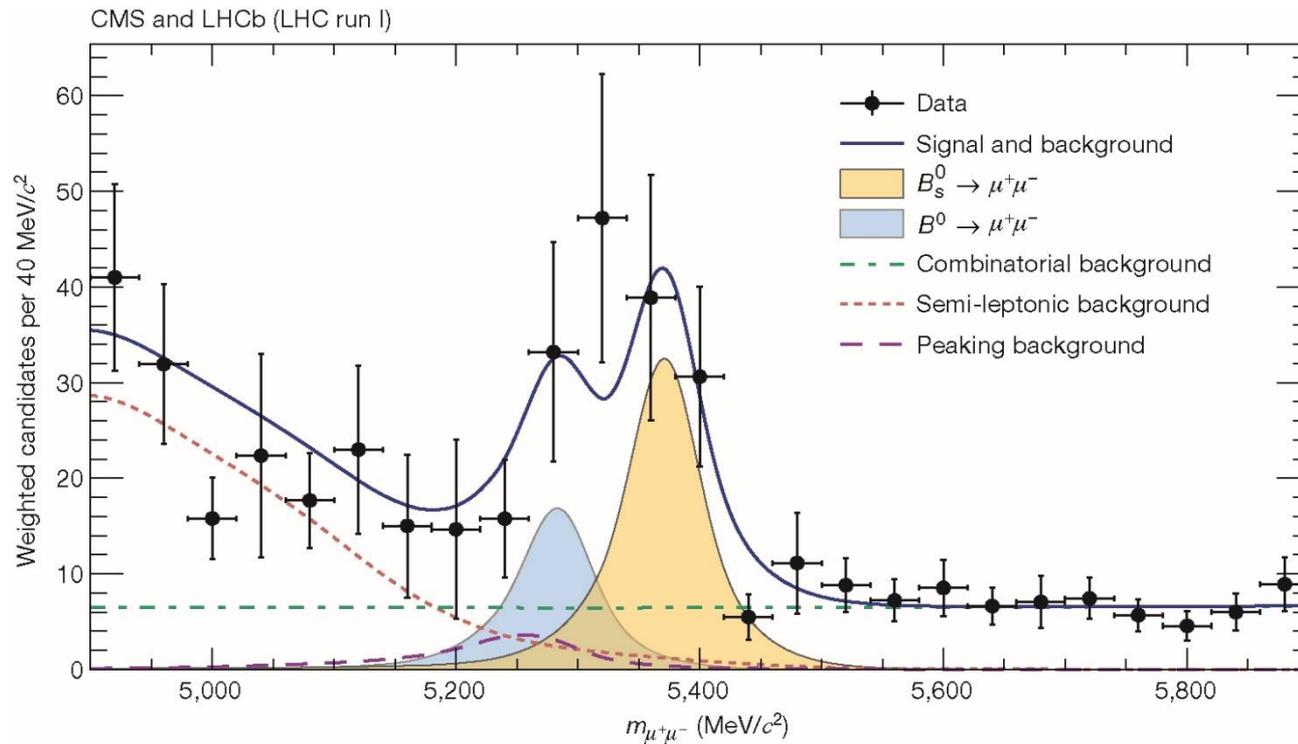
# Отклик BDT метода



# СПЕКТРЫ ИНВАРИАНТНОЙ МАССЫ 2-Х МЮОНОВ

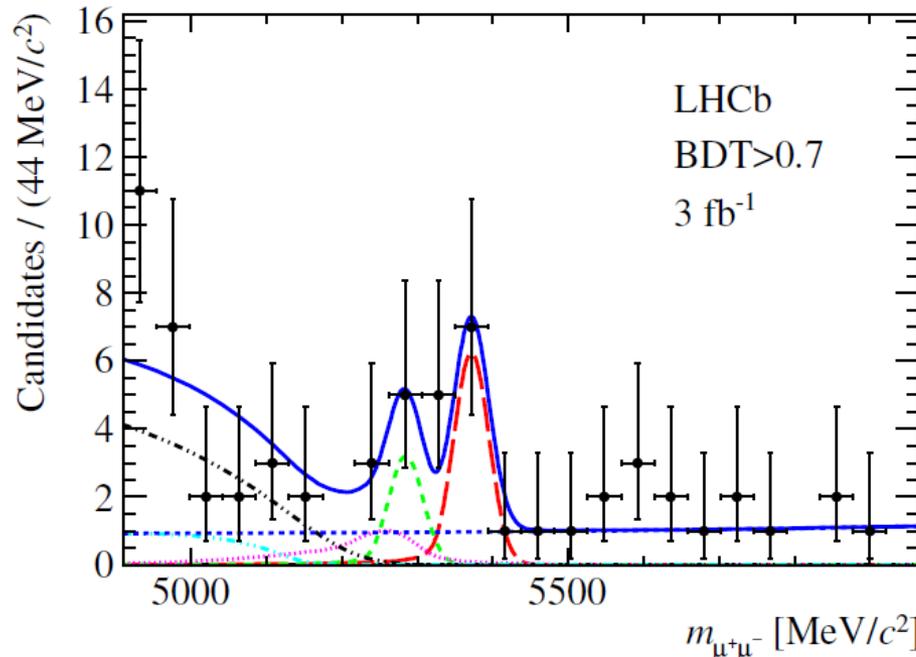


# Weighted (with $w = S_{MC}/(S_{MC} + B)$ ) distribution of the dimuon invariant mass, $m_{\mu^+\mu^-}$ , for all categories



Nature **000**, 1-5 (2015) doi:10.1038/nature14474

# Спектр масс $B_{(d)s} \rightarrow 2\mu$ для LHCb

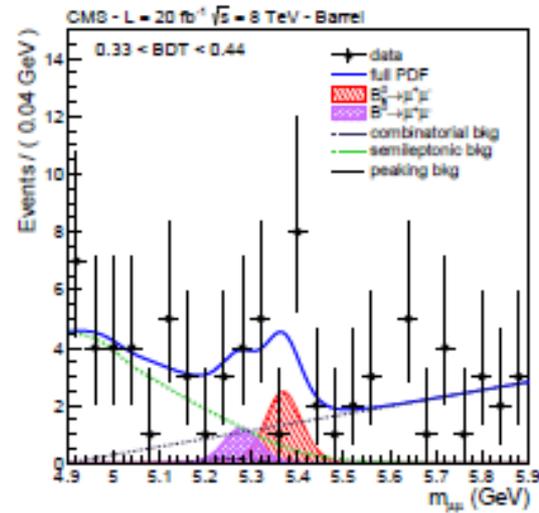
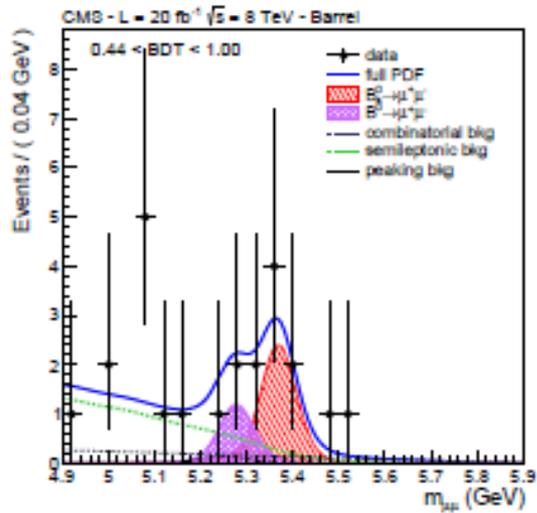


Экспериментальный спектр в районе масс  $B_s$  и  $B_d$  мезонов в эксперименте LHCb

- В итоге, результаты LHCb связанные с вероятностью распадов  $B_{s,d} \rightarrow 2\mu$ ,

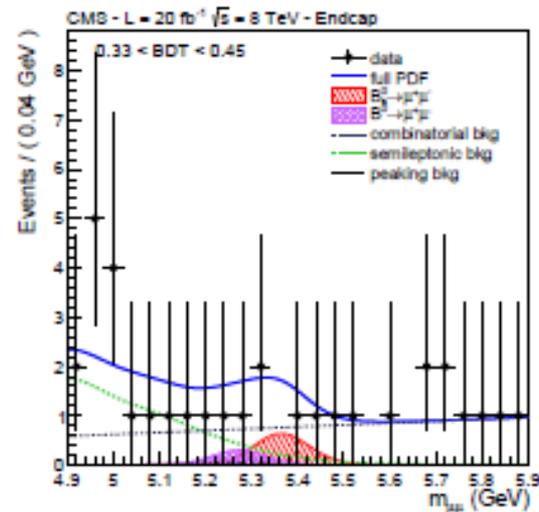
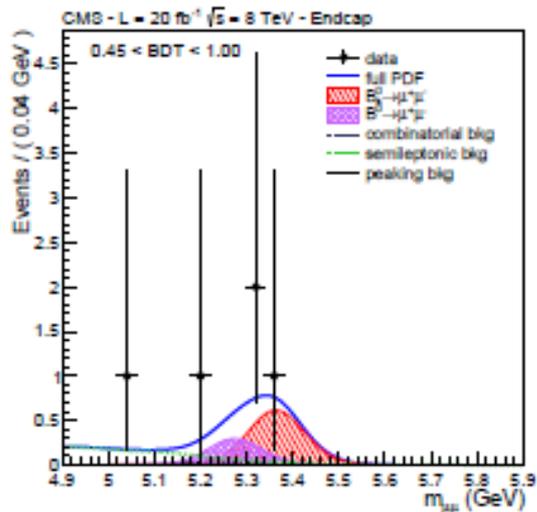
$$B(B_s \rightarrow 2\mu) = (2.9^{+1.1}_{-1.0}(\text{stat})) \times 10^{-9}, 4\sigma; B(B_d \rightarrow 2\mu) = (3.7^{+2.4}_{-2.1}(\text{stat})) \times 10^{-10} \quad \text{or} \\ B(B_d \rightarrow 2\mu) < 7.4 \times 10^{-10} \quad \text{at } 95\% \text{ CL.}$$

# Спектр масс $B_{(d)s} \rightarrow 2\mu$ для CMS



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

$L = 2 \text{ fb}^{-1}$

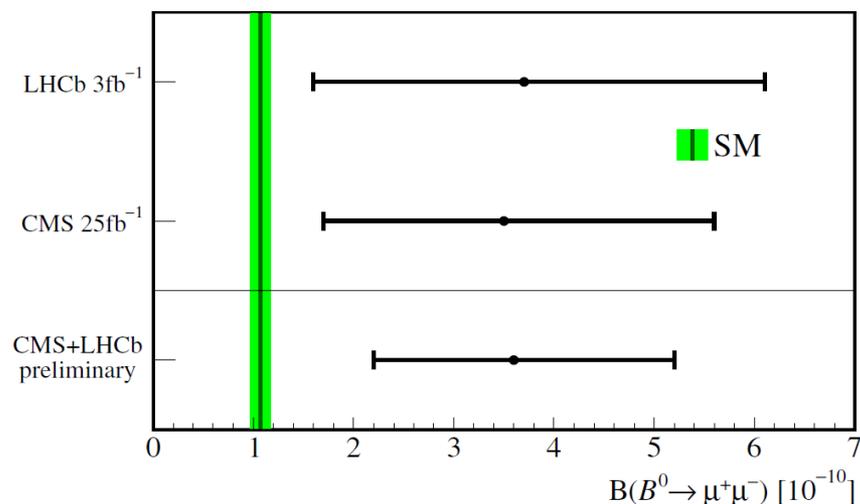
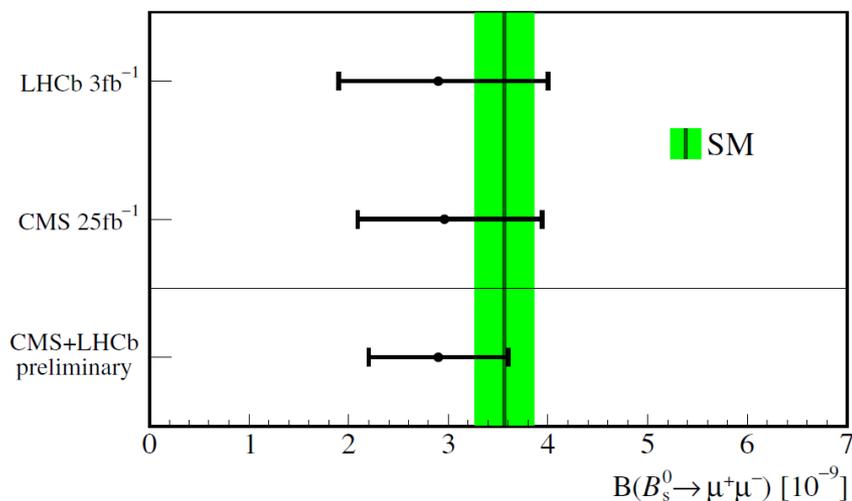


## Таблица выходов $B_s \rightarrow 2\mu$ событий для CMS

		$\epsilon_{\text{tot}} [10^{-2}]$	$N_{\text{signal}}^{\text{exp}}$	$N_{\text{total}}^{\text{exp}}$	$N_{\text{obs}}$
7 TeV	$B^0$ Barrel	$(0.33 \pm 0.03)$	$0.27 \pm 0.03$	$1.3 \pm 0.8$	3
	$B_s^0$ Barrel	$(0.30 \pm 0.04)$	$2.97 \pm 0.44$	$3.6 \pm 0.6$	4
	$B^0$ Endcap	$(0.20 \pm 0.02)$	$0.11 \pm 0.01$	$1.5 \pm 0.6$	1
	$B_s^0$ Endcap	$(0.20 \pm 0.02)$	$1.28 \pm 0.19$	$2.6 \pm 0.5$	4
8 TeV	$B^0$ Barrel	$(0.24 \pm 0.02)$	$1.00 \pm 0.10$	$7.9 \pm 3.0$	11
	$B_s^0$ Barrel	$(0.23 \pm 0.03)$	$11.46 \pm 1.72$	$17.9 \pm 2.8$	16
	$B^0$ Endcap	$(0.10 \pm 0.01)$	$0.30 \pm 0.03$	$2.2 \pm 0.8$	3
	$B_s^0$ Endcap	$(0.09 \pm 0.01)$	$3.56 \pm 0.53$	$5.1 \pm 0.7$	4

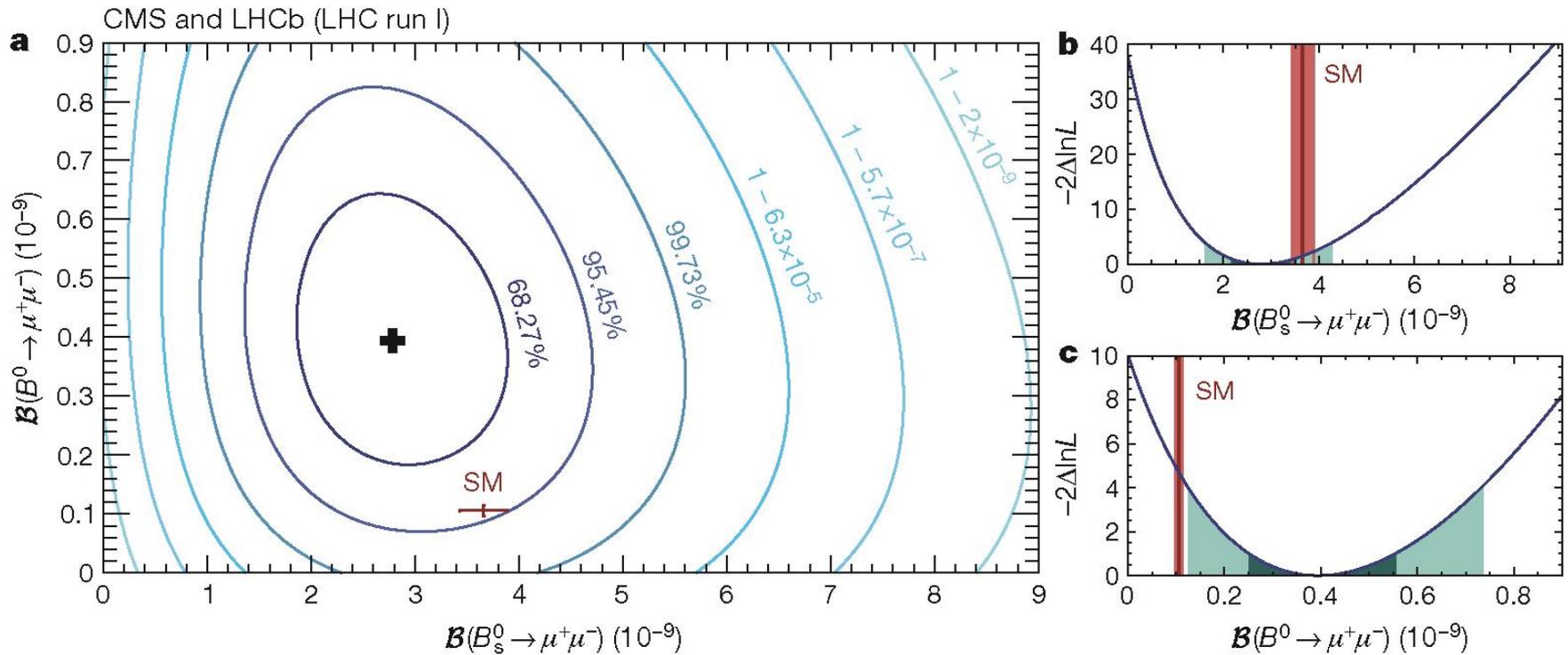
- В итоге, результаты CMS связанные с вероятностью распадов  $B_{s,d} \rightarrow 2\mu$ ,  
 $B(B_s \rightarrow 2\mu) = (3.0^{+1.0}_{-0.9}(\text{stat})) \times 10^{-9}$ ,  $4.3\sigma$ ;  $B(B_d \rightarrow 2\mu) < 1.1 \times 10^{-10}$  at 95% CL.

# Совместный результат коллабораций LHCb и CMS



- $B(B_s \rightarrow 2\mu) = (2.8 \pm 0.7) \times 10^{-9}$ ;       $B(B_d \rightarrow 2\mu) = (3.9^{+1.6}_{-1.4}) \times 10^{-10}$
- Систематическая неопределённость 0.35 и 0.18 от полной ошибки для  $B(B_s \rightarrow 2\mu)$  и  $B(B_d \rightarrow 2\mu)$  соответственно

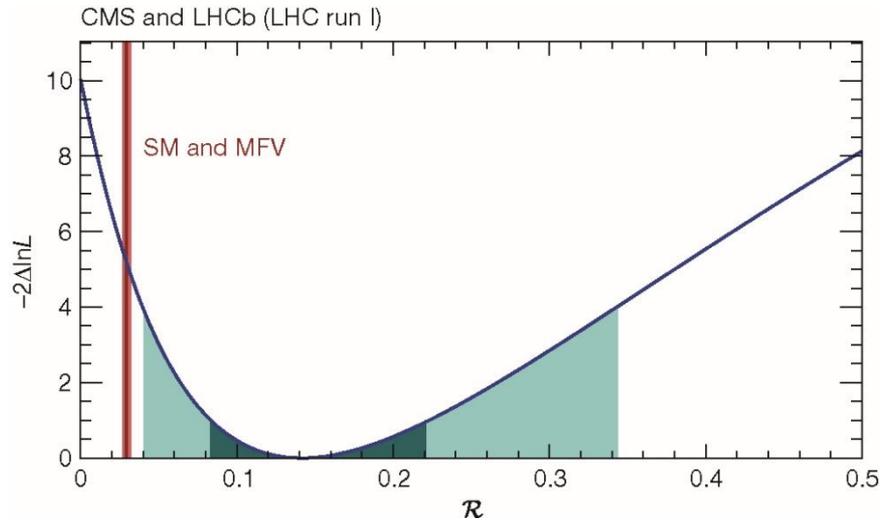
# Likelihood contours in the $B(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ versus $B(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ plane.



$B(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ , 1.2 $\sigma$  from SM,  $B(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ , 2.2 $\sigma$  from SM

**nature**

Variation of the test statistic  $-2\Delta\ln L$  as a function of the ratio of branching fractions  $R \equiv B(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) / B(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ .

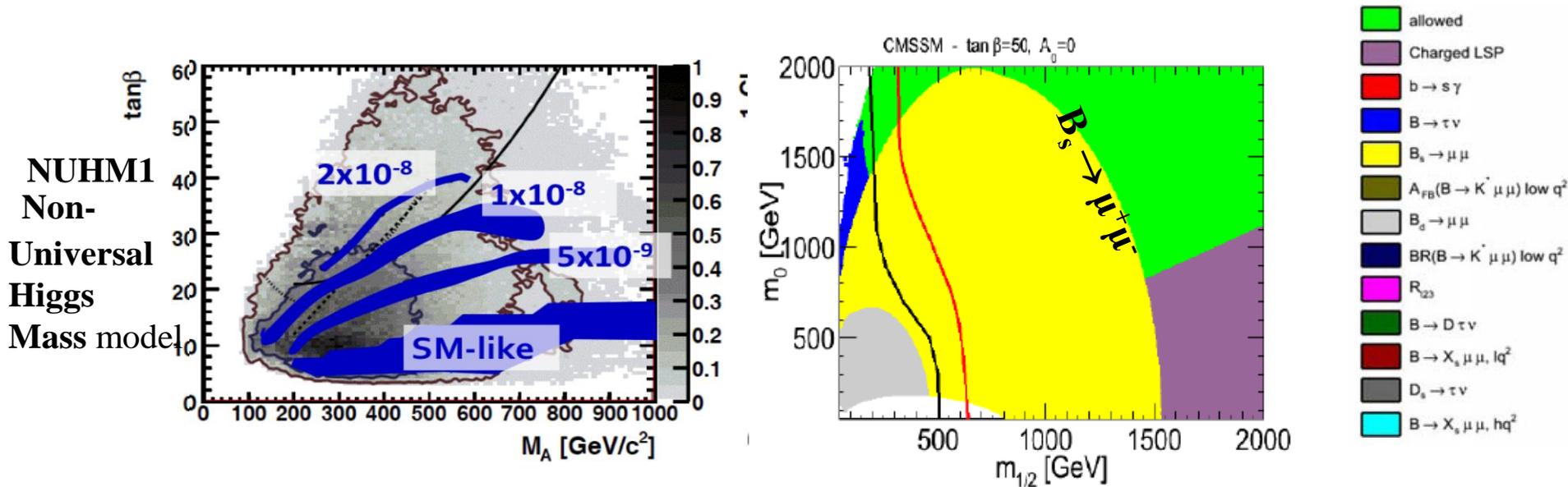


$$\mathcal{R} \equiv \mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{SM} / \mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{SM} = 0.0295^{+0.0028}_{-0.0025}$$

$$R = 0.14_{-0.06}^{+0.08}, \quad 2.3\sigma \text{ from SM}$$

# Влияние вероятности распада $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ на параметры SUSY моделей

- Открытие распада  $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$  приводит к достаточно жёстким ограничениям на параметры многих популярных SUSY моделей
- Области разрешённых значений параметров с учётом вероятности распада для  $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$  вычислялись, в частности, для NUHM1 и CMSSM моделей (области синего цвета на рисунке слева и зелёного на рисунке справа . Серый цвет слева— ограничения с различным уровнем достоверности , сделанные в прямых поисках SUSY)



# Заключение

- Десятилетия исследований завершились открытием распада  $B_s \rightarrow 2\mu$ . Измерена величина вероятности распада  $B = (2.8 \pm 0.7) \times 10^{-9}$
- Генеральный директор ЦЕРН Рольф Хойер: “Этот результат является прекрасным примером сотрудничества между различными экспериментами и иллюстрирует впечатляющую точность, которую можно достигнуть, когда эксперименты объединяют свои данные”
- “Это является свидетельством отличной работы БАК, и чувствительности наших экспериментах, что бы было возможным наблюдать этот чрезвычайно редкий, но важный распад”, spokesperson LHCb Гай Уилкинсон.
- Spokesperson CMS Tiziano Camporesi: “Поиск новых частиц и изучение редких распадов взаимодополняющие стратегии для обнаружения новой физики. Точность, с которой эксперименты могут измерить эти распады будет неуклонно улучшаться”,

# Backup slides

# mSUGRA model

➤ mSUGRA or constrained MSSM model, where the MSSM soft breaking parameters obey a set of universal boundary conditions at the has several special aspects that make its predictions clearer and hence more directly accessible to experimental study. mSUGRA is also low energy approximation of Superstring Theory.

➤ mSUGRA depends on only four additional parameters and one sign beyond those of the Standard Model (SM).

These are:

$m_0$  - the universal soft breaking mass at the GUT scale  $M_G$ ;

$m_{1/2}$  - the universal gaugino soft breaking mass at  $M_G$  ;

$A_0$  - the universal cubic soft breaking mass at  $M_G$ ;

$\tan \beta = \langle H_2 \rangle / \langle H_1 \rangle$  at the electroweak scale, where  $H_2$  gives rise to u quark masses and  $H_1$  to d quark and lepton masses ;

$\mu$  - the Higgs mixing parameter in the superpotential ( $W_\mu = \mu H_1 H_2$ );

➤ Lightest neutralino  $\nu_{01}$  and the gluino  $g$  are approximately related to  $m_{1/2}$  by  $m_{\nu_{01}} = 0.4 \cdot m_{1/2}$  and  $m_g = 2.8 \cdot m_{1/2}$  .

# Restrictions to SUSY parameters

<http://theor.jinr.ru/~diastp/summer11/lectures/Kazakov-4.pdf>

# Comparison of the experimental restriction to the $\text{Br}(B_s \rightarrow \mu^+\mu^-)$ and SM prediction

□ To compare the experiment and theory we need to take into account the  $B_s$  mixing : De Bruyn et al (arXiv:1204.1735)

✓ Theoretical  $\text{Br}(B_s \rightarrow \mu^+\mu^-)$  prediction: CP-average at time ,  $t=0$

✓ Experimental limit : need to integrate CP-average over  $t$

$$\text{BR}(B_s \rightarrow f)_{\text{theo}} = \left[ 2 - (1 - y_s^2) \frac{\tau_f}{\tau_{B_s}} \right] \text{BR}(B_s \rightarrow f)_{\text{exp}} \quad y_s \equiv \frac{\Delta\Gamma_s}{2\Gamma_s} \equiv \frac{\Gamma_L^{(s)} - \Gamma_H^{(s)}}{2\Gamma_s}$$

✓ as a result using  $y_s$  from *LHCb-CONF-2012-002* we need to compare with theory the *corrected experimental limit* :

$\text{BR}_{t=0}(B_s \rightarrow \mu^+\mu^-) < 0.91 \times 4.5 \times 10^{-9} = 4.1 \times 10^{-9}$  @ 95% CL ,  
which is close enough to the recent theoretical prediction

# Fragmentation ratio calculation

- Fragmentation ratio  $f_s/f_d$  is measured at LHCb with hadronic decays  $B_0 \rightarrow D^- K^+$  and  $B_s \rightarrow D_s^- \pi^+$  and  $B_0 \rightarrow D^- \pi^+$  and  $B_s \rightarrow D_s^- \pi^+$

*Phys. Rev. Lett. 107 21(2011)*

and semileptonic decays:  $B_s \rightarrow D_s X \mu$  and  $B \rightarrow D^+ X \mu$

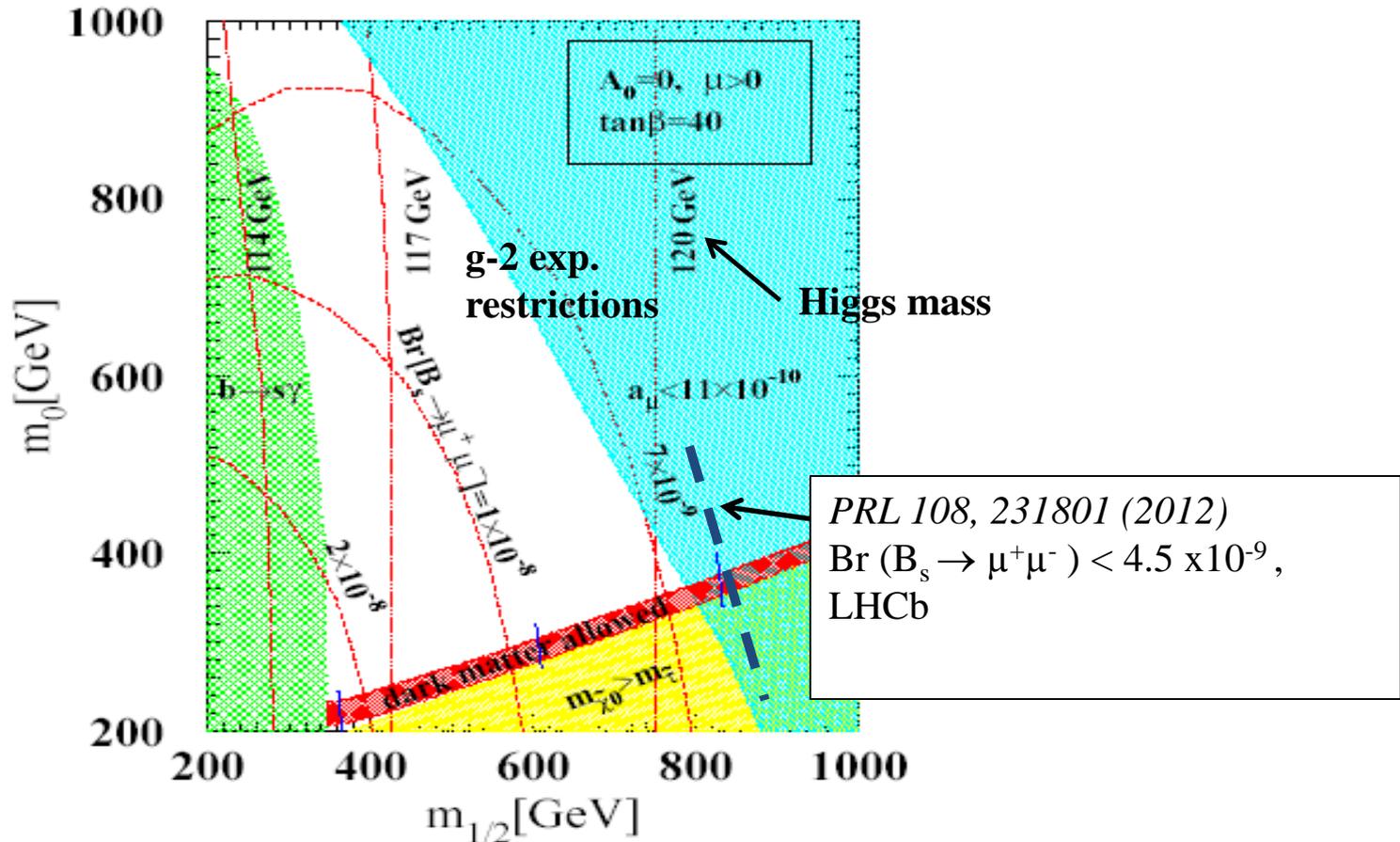
*Phys. Rev. D 85, 032008 (2011)*

- Computed average  $f_s/f_d = 0.267^{+0.021}_{-0.020}$  *lhcb-conf-2011-034*

- Dominant systematic error from form factors ratio. Need more precise lattice computation

# Physics motivation: mSUGRA model

- $\text{Br}(B_s \rightarrow \mu^+\mu^-)$  behavior restricts the possible region for the mSUGRA model parameters



- The last published  $B_s \rightarrow \mu^+\mu^-$  search LHCb result already provides restrictions better than the **g-2** (light blue color) experiment
- Higgs mass allows to restrict a possible parameters region too

# Main backgrounds

- ❑  $bb \rightarrow \mu^+\mu^- X$  events, dimuon combinatoric background
  - ✓ can be suppressed using different geometric and kinematic criteria
  
- ❑ **misidentified muons** from  $B^0 \rightarrow \pi^-\mu^+\nu$  -  $41.1 \pm 0.4$ ,  $B^{0(+)} \rightarrow \mu^+\mu^-\pi^{0(+)}$  -  $11.9 \pm 3.5$  events in full BDT response and mass range
  - ✓ it has a negligible influence to the background contributions under the peak;
  - ✓ allow to define better the shape of the combinatoric background
  
- ❑ **misidentified muons** from  $B_{d/s} \rightarrow h^+h^-$  decays
  - ✓ contribution from  $B_{d/s} \rightarrow h^+h^-$  can be calculated from  $B_{d/s} \rightarrow h^+h^-$  MC with a known misidentification probability was measured in data
  - ✓ The peaking background is  $0.76^{+0.26}_{-0.18}$  in  $\pm 60$  MeV/c<sup>2</sup> around the  $B_s$  mass and  $4.1^{+1.7}_{-0.8}$  in  $\pm 60$  MeV/c<sup>2</sup> region of the  $B_d$  mass

# Strategy of analysis

## □ Selection conditions

- ✓ Muon trigger
- ✓ Preliminary selections to reduce datasets size
- ✓ Blind signal region  $5306 < M_{B_s} < 5426$  MeV

## □ Signal and background training

- ✓ Use  $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$  and  $bb \rightarrow \mu \mu X$  Monte-Carlo to train the Boosted Decision Tree method

## □ $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$ signal calibration

- ✓ Use the control channel  $B \rightarrow hh$  decays with the similar geometry

## □ Upper limit calculation

- ✓ Use the signal channel and normalization channel efficiency to calculate the normalization factor
- ✓ Use the predicted background and number of observed events with the modified frequentist CLs method to estimate the upper limit for the given confidence level

# List of input parameters for the Boosted Decision Tree method

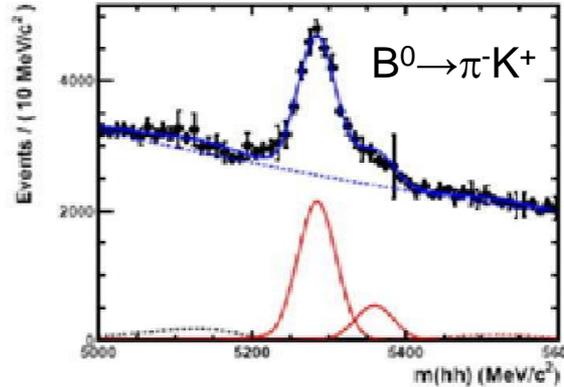
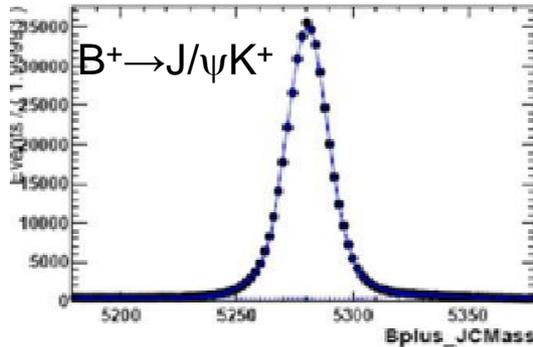
□ A decision tree is able to split the phase space into a large number of hypercubes, where each can be identified as “signal-like” or “background-like”

□ Output of a Boosted Decision Tree is combining a decay geometry,  $B_s$  meson life time and kinematical information. The phase space in the analysis is defined by input parameters:

- ✓ Transverse momentum of the  $B_s$  - meson
- ✓ Minimum muon transverse momentum
- ✓ Cosine of the  $B_s$  polarization angle
- ✓  $B_s$  meson impact parameter
- ✓ Minimum distance between muon tracks
- ✓ Muon track impact parameter significance
- ✓ Muon isolation
- ✓  $B_s$  meson isolation
- ✓  $B_s$  life time

# Normalization channels

- To calculate the  $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$  branching ratio we need to know the total number of  $B_s$  mesons and next to use this number for the normalization
- 2 normalization channels used



Normalization channel branching

Fragmentation ratio  $f_s/f_d = 0.256 \pm 0.02$

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

Calculated from MC

Measured from data

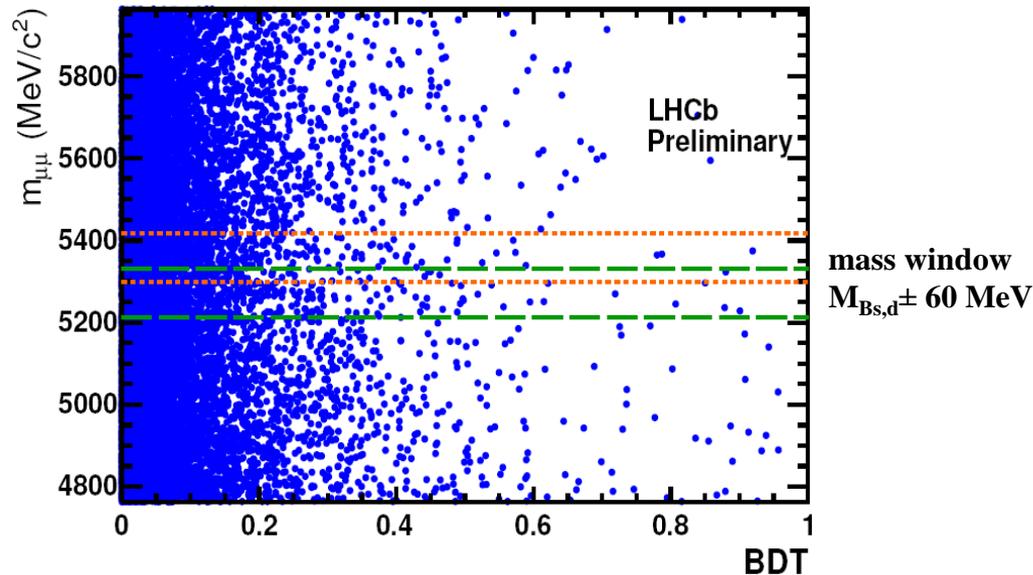
Number of events in normalization channel

- Averaging of the 2 normalization channels gives us for the  $1 \text{ fb}^{-1}$ :

$$\alpha(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-) = 2.52 \pm 0.28 \times 10^{-10}, \quad \alpha(B_d \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (6.45 \pm 0.30) \times 10^{-11}$$

# Extraction of the limit and branching ratio

$\mu\mu$  mass – BDT response plane



- ❑ The CLs analysis was performed in 2D space for the BDT response and dimuon invariant mass. The BDT response for the combinatorial background is extracted from a fit of the dimuon mass sidebands in each BDT bin
- ❑ For each observed event we calculated a probability to be compatible with the Signal + Background hypothesis or only Background hypothesis as a function of the branching ratio. To set a limit we excluded the assumed branching ratio value at a given confidence level
- ❑ The comparison of the distributions of observed events and expected background for the 2012 dataset gives a p-value (1-CLb) of  $9 \times 10^{-4}$ . We have observed an excess of  $B_s \rightarrow \mu^+\mu^-$  candidates with respect to the background expectation with a significance of 3.3 standard deviations.

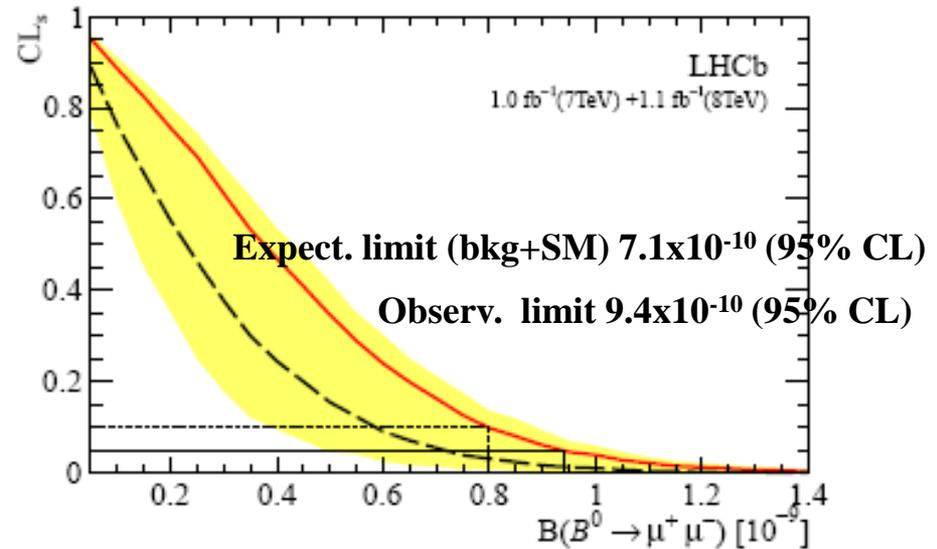
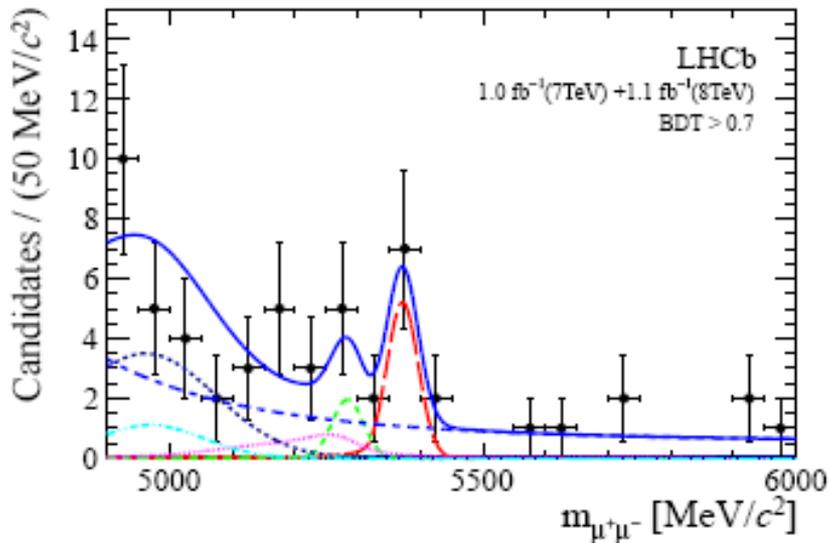
# LHCb upper limit with 2.1 fb<sup>-1</sup> 2011+2012 data

“First evidence for the decay  $B_s \rightarrow \mu^+\mu^-$  “

Accept. by PRL December, 6, 2012

hep-ex > arXiv:1211.2674

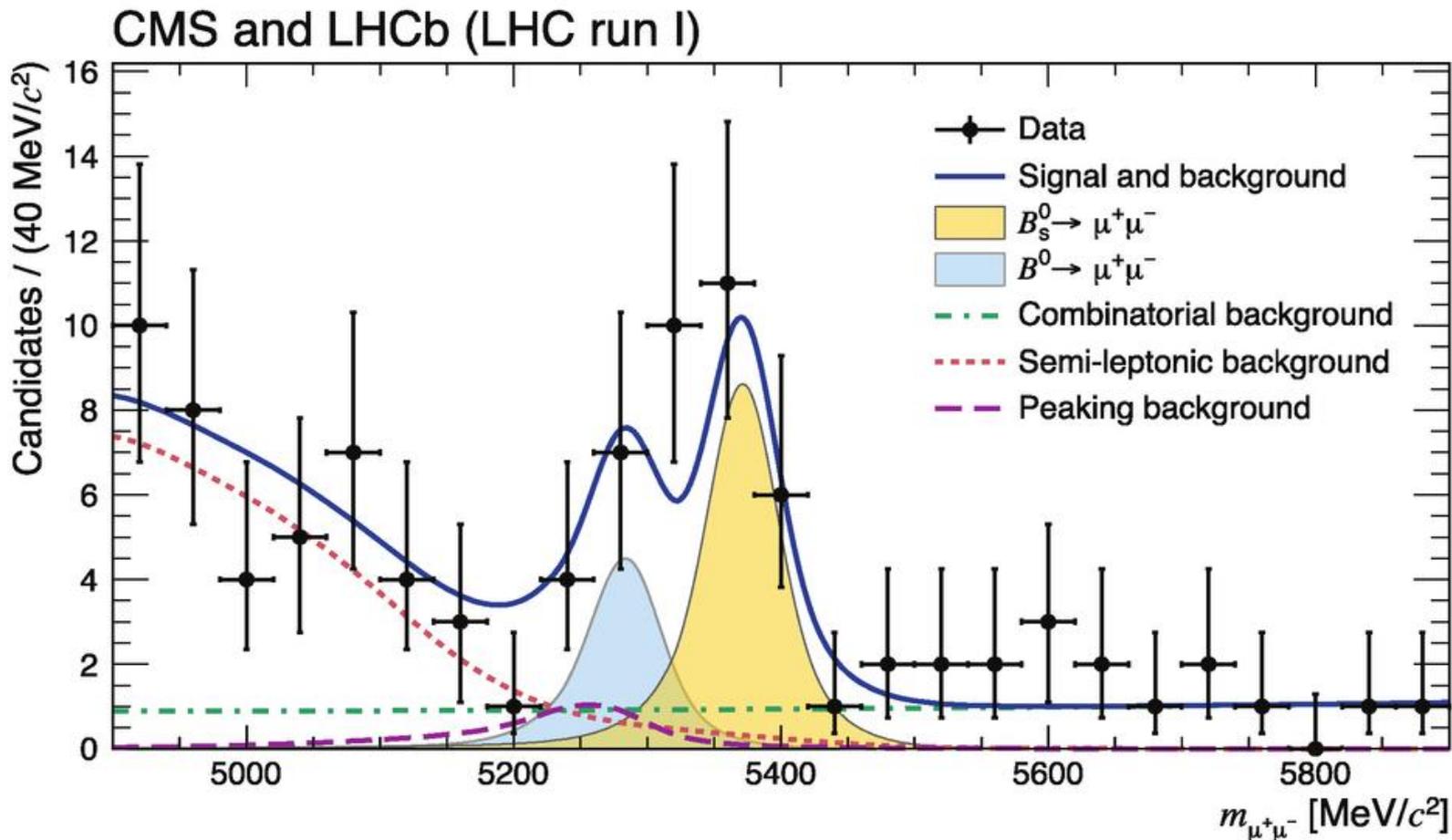
Dataset	Limit at	90% CL	95% CL
2012	Exp. bkg+SM	$8.5 \times 10^{-10}$	$10.5 \times 10^{-10}$
	Exp. bkg	$7.6 \times 10^{-10}$	$9.6 \times 10^{-10}$
	Observed	$10.5 \times 10^{-10}$	$12.5 \times 10^{-10}$
2011+2012	Exp. bkg+SM	$5.8 \times 10^{-10}$	$7.1 \times 10^{-10}$
	Exp. bkg	$5.0 \times 10^{-10}$	$6.0 \times 10^{-10}$
	Observed	$8.0 \times 10^{-10}$	$9.4 \times 10^{-10}$



Combination for 2011 and 2012 years data gives the

result ,  $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-) = (3.2_{-1.2}^{+1.4}(\text{stat})_{-0.3}^{+0.5}(\text{syst})) \times 10^{-9}$

An alternative representation of the fit to the dimuon invariant-mass distribution for the six categories with the highest  $S/(S + B)$  value for CMS and LHCb



# Основные формулы для вероятности распада

$$\text{BR}(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-) = \frac{G_F^2 \alpha^2}{64\pi^3} f_{B_s}^2 m_{B_s}^3 |V_{tb} V_{ts}^*|^2 \tau_{B_s} \sqrt{1 - \frac{4m_\mu^2}{m_{B_s}^2}} \quad (2.1)$$

$$\times \left\{ \left(1 - \frac{4m_\mu^2}{m_{B_s}^2}\right) |C_{Q_1} - C'_{Q_1}|^2 + \left| (C_{Q_2} - C'_{Q_2}) + 2(C_{10} - C'_{10}) \frac{m_\mu}{m_{B_s}} \right|^2 \right\},$$

$$\text{BR}(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (3.53 \pm 0.38) \times 10^{-9}, \quad (2.2)$$

$$C_{Q_1} \approx -C_{Q_2} \approx -\mu A_t \frac{\tan^3 \beta}{(1 + \epsilon_b \tan \beta)^2} \frac{m_t^2}{m_{\tilde{t}}^2} \frac{m_b m_\mu}{4 \sin^2 \theta_W M_W^2 M_A^2} f(x_{\tilde{t}\mu}), \quad (2.3)$$

where  $x_{\tilde{t}\mu} = m_{\tilde{t}}^2/\mu^2$ , with  $m_{\tilde{t}}$  the geometric average of the two stop masses, and

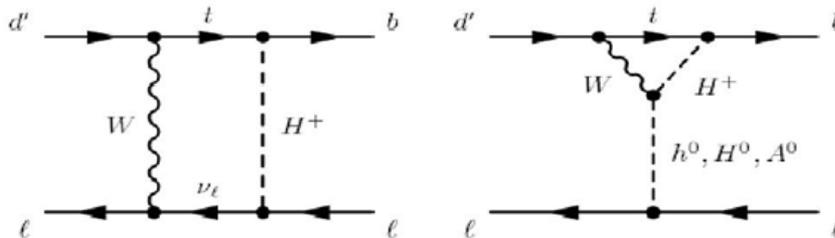
$$f(x) = -\frac{x}{1-x} - \frac{x}{(1-x)^2} \ln x. \quad (2.4)$$

# Основные формулы для вероятности распада

where  $f_{B_s}$  is the  $B_s$  decay constant,  $m_{B_s}$  is the  $B_s$  meson mass and  $\tau_{B_s}$  is its mean lifetime.  $C_{Q_1}$  and  $C_{Q_2}$  are the Wilson coefficients of the semileptonic scalar and pseudo-scalar operators<sup>1</sup>, and  $C_{10}$  the axial semileptonic Wilson coefficient. The  $C'_i$  terms correspond to the chirality flipped coefficients. In the SM, only  $C_{10}$  is non-vanishing and it gets its largest contributions from a  $Z$  penguin top loop (75%) and a  $W$  box diagram (24%) (see Fig. 1). The SM expected value is evaluated using  $m_b^{\overline{MS}}(m_b) = (4.18 \pm 0.03)$  GeV and  $m_t^{\text{pole}} = (173.5 \pm 0.6 \pm 0.8)$  GeV [31], corresponding to  $C_{10} = -4.16 \pm 0.04$ , from which the following SM prediction for the branching fraction is derived [17]:

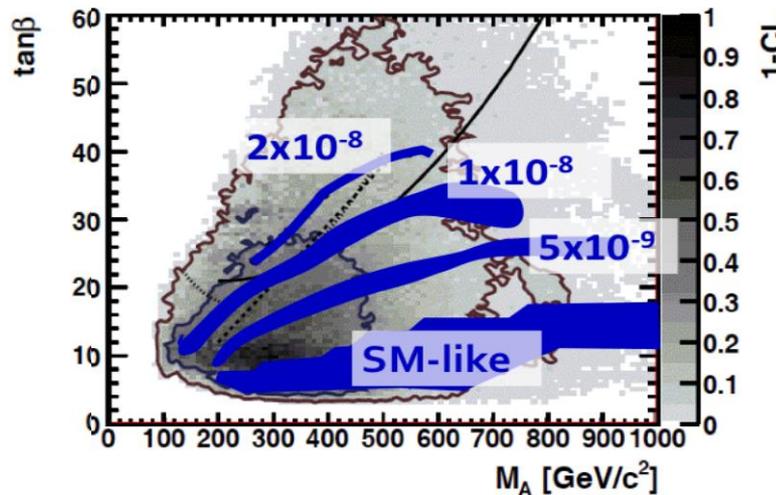
# Physics motivation: MSSM models

□  $B_s \rightarrow \mu^+\mu^-$  branching ratio can be very sensitive to the SUSY diagrams contributions. Two Higgs-Dublet (2HDM) model provides a big contribution in the region of large  $\tan \beta$



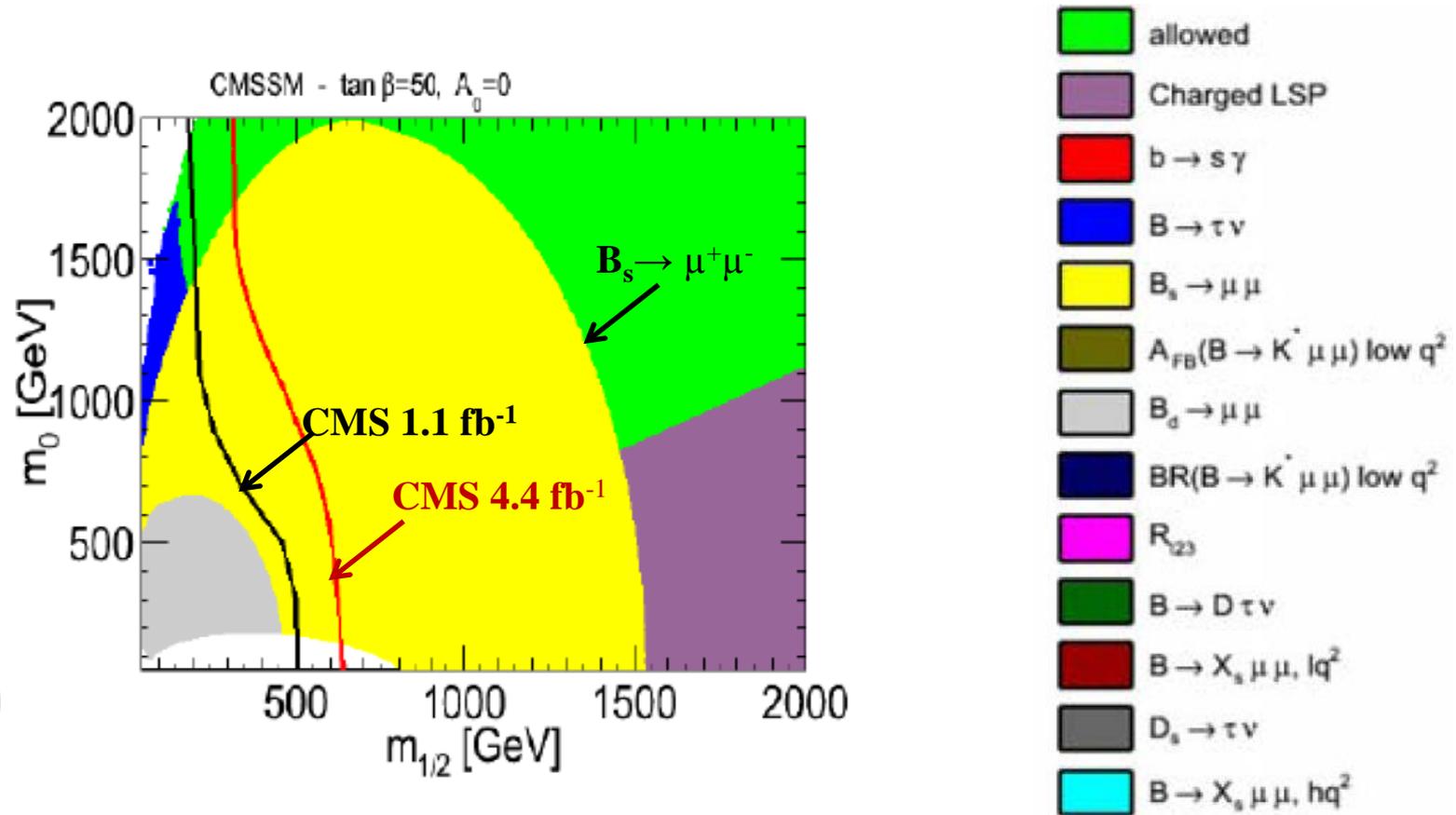
$$BR(SUSY) \propto BR(SM) \cdot \frac{m_b^4 \cdot (\tan \beta)^6}{m_{H^0}^4}$$

□ The indirect  $B_s \rightarrow \mu^+\mu^-$  search restriction power for SUSY parameters (blue regions) can be comparable with the results of direct SUSY searches (gray region):

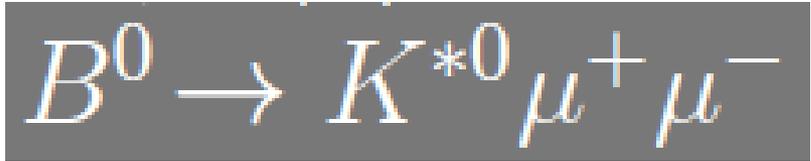


Non-  
Universal  
Higgs  
Mass model  
NUHM1

# Impact to CMSSM parameters



□  $B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-$  branching upper limit and experimental branching ratio restricted the big enough region of possible parameters magnitudes at the large magnitudes of  $\tan(\beta)$  for the constraint MSSM (CMSSM) model



[LHCb-CONF-2015-002]

