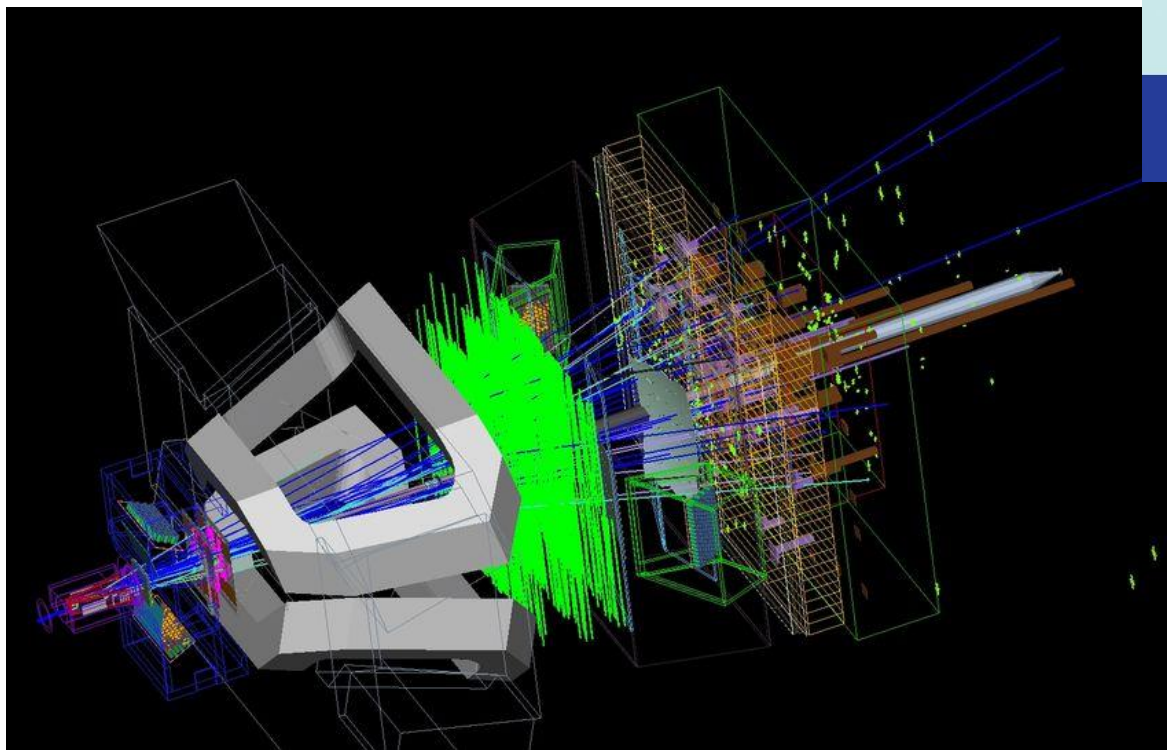


# Поиск редких распадов и новых частиц в эксперименте LHCb



LHCb  
ГНСП

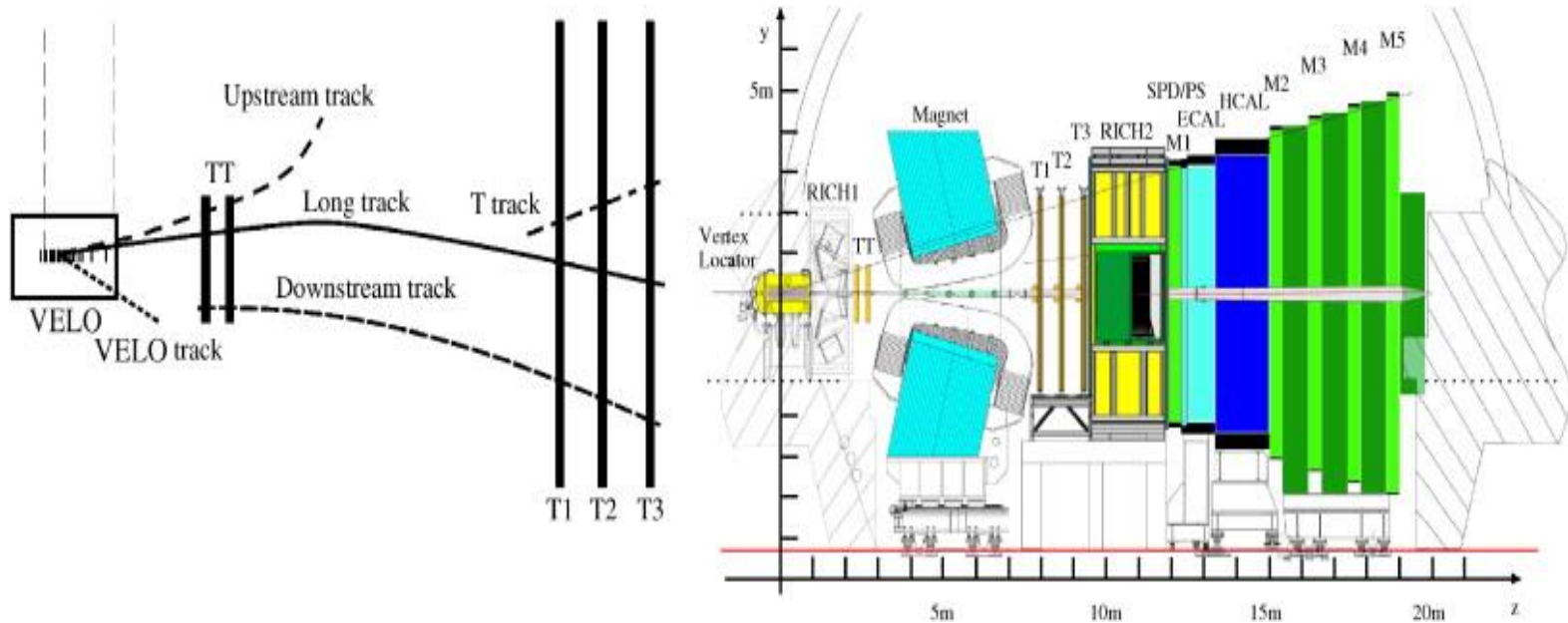
**Ю.Щеглов, А.А Воробьёв, А. А. Дзюба, Н. Р. Сагидова.**  
Новогодняя сессия ОФВЭ, 24 декабря, 2013



# Содержание

- Введение. LHCb детектор. Основные сведения о накопленной светимости и точности измерения параметров частиц
- Поиск редкого распада  $B_{s,d} \rightarrow \mu^+ \mu^-$ . Результаты для  $3 \text{ fb}^{-1}$ . Совместный результат LHCb и CMS.
- Поиск новых частиц и распадов. Пентакварк, распады очарованных гиперонов
- Заключение

# Детектор LHCb



LHCb детекторы:

- M1, M2, M3, M4, M5 – мюонные станции
- VELO (Vertex Locator) – вершинный детектор
- TT, T1, T2, T3 – трековые станции (измерение импульса)
- RICH1, RICH2 – черенковские детекторы (идентификация пионов, каонов, протонов)
- ECAL, HCAL - калориметры (электромагнитный, адронный, )
- SPD/PS – сцинтилляционный падовый детектор/preshower

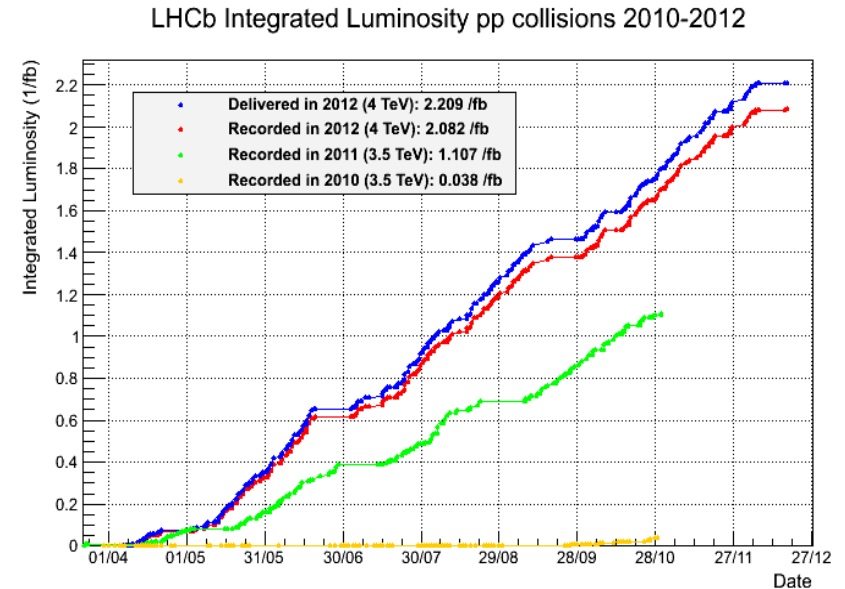
# Основные сведения

□ 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  $> 90\%$

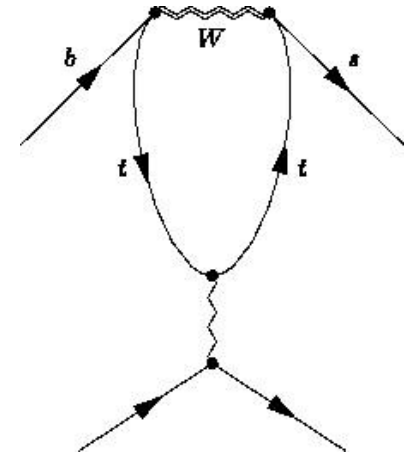
□ Параметры имеющие отношение к регистрации мюонов:

- 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



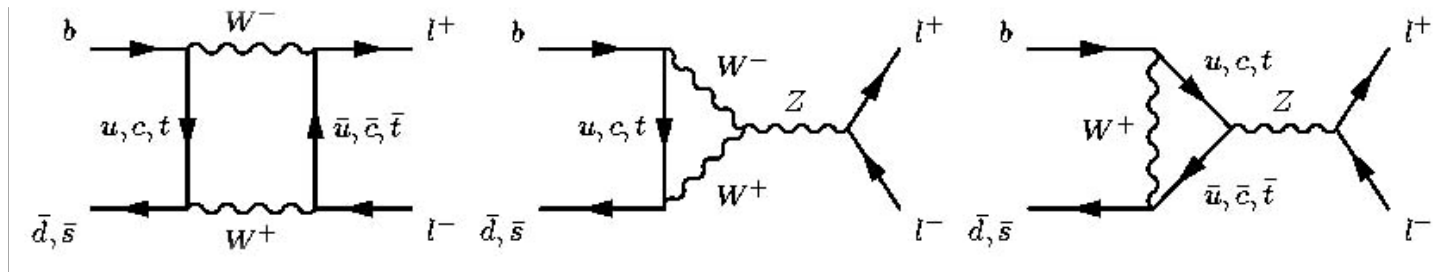
# Введение. Диаграммы пингвина для распадов В-мезонов

- 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  $B_s \rightarrow \mu^+\mu^-$



# Открытие распада $B_s \rightarrow 2\mu$ на Большом Адронном Коллайдере в эксперименте LHCb

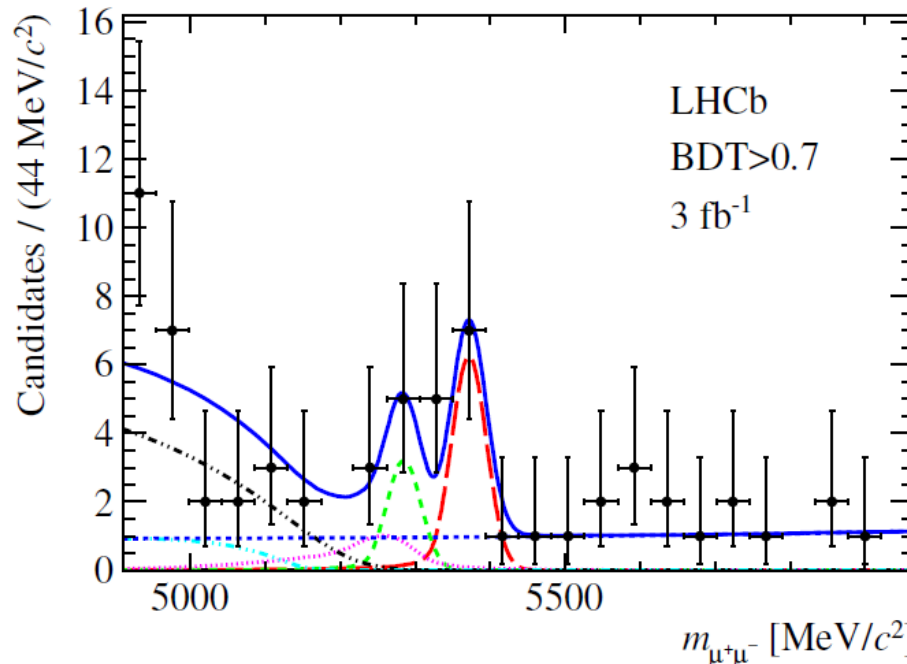
- Цель исследований – тест присутствия новой физики, например SUSY (суперсимметричное расширение стандартной модели), может увеличить вероятность распада  $B_s \rightarrow 2\mu$ .
- В Стандартной модели нейтральные токи меняющие ароматы кварков сильно подавлены, так что диаграммы Стандартной Модели дают вероятность распадов :  
 $B(B_s \rightarrow 2\mu) = (3.35 \pm 0.28) \times 10^{-9}$  и  $B(B_s \rightarrow 2\mu) = (1.07 \pm 0.1) \times 10^{-10}$ .



# Основные моменты анализа

- Предварительный отбор событий удовлетворивших димьюонному 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  $B_d \rightarrow 2\mu$ , а также 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.

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



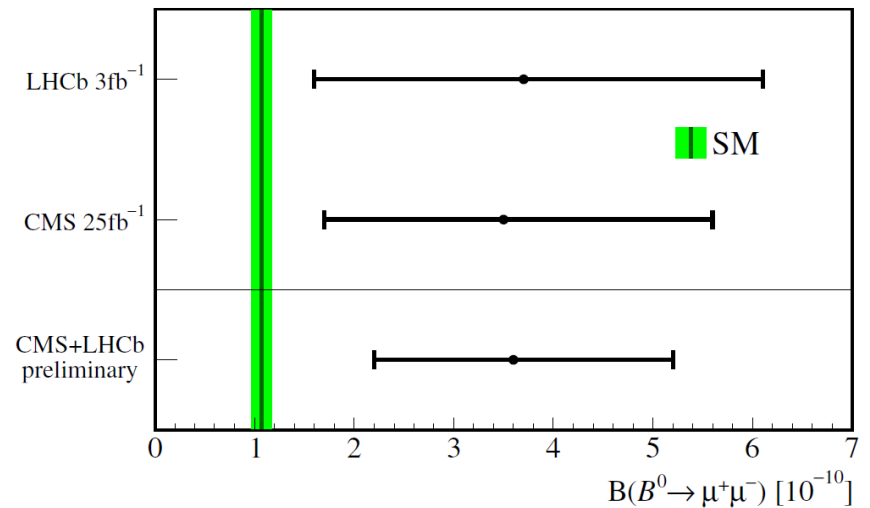
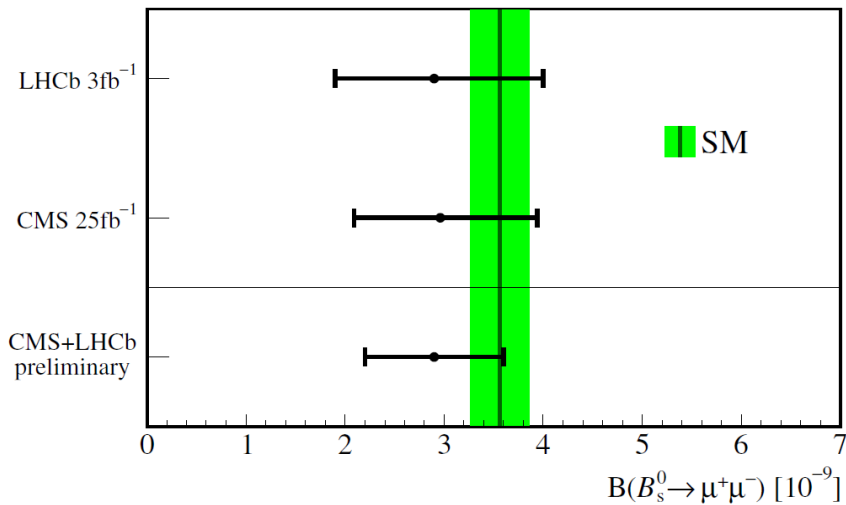
Экспериментальный спектр в районе масс  $B_s$  и  $B_d$  мезонов в эксперименте LHCb

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

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



# Совместный результат коллабораций LHCb и CMS

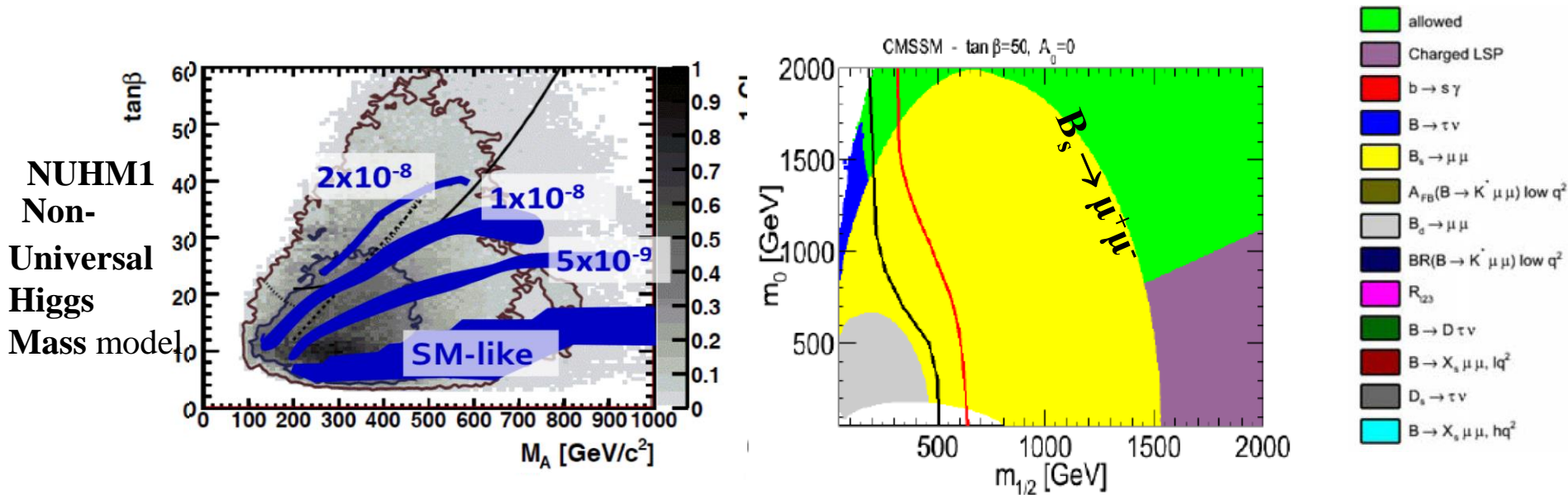


$$B(B_s \rightarrow 2\mu) = (2.9 \pm 0.7) \times 10^{-9};$$

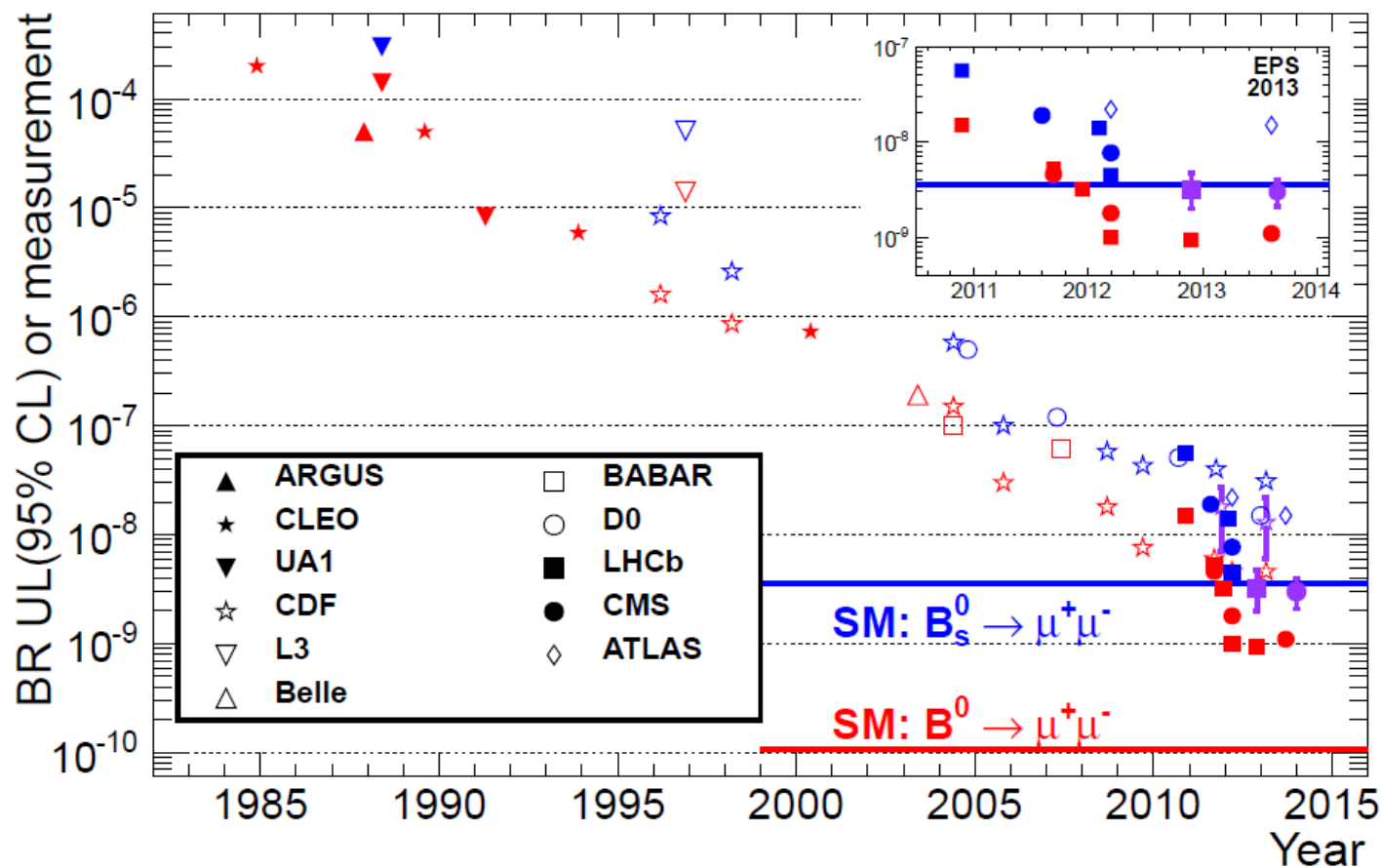
$$B(B_d \rightarrow 2\mu) = (3.7^{+1.6}_{-1.4}) \times 10^{-10}$$

# 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)



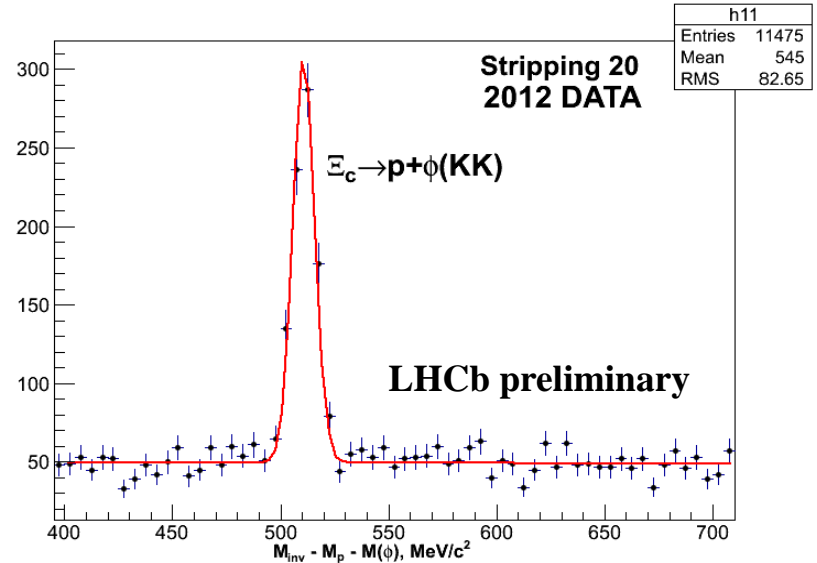
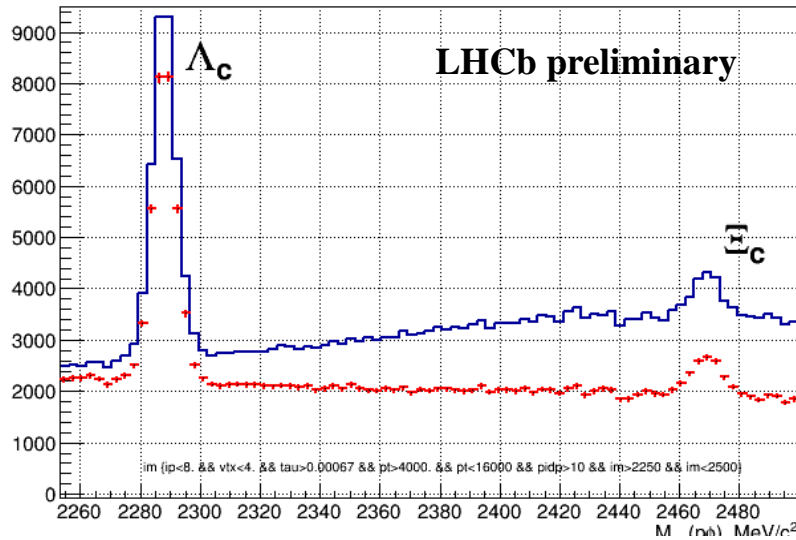
# 30 лет исследований



# Поиск новых частиц

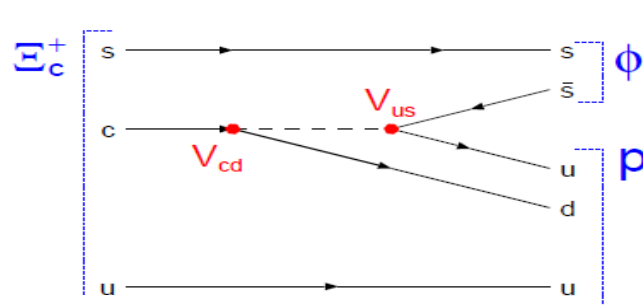
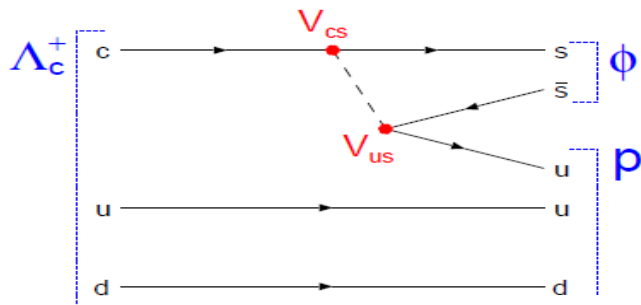
- Ещё одним направлением работы нашей группы в ЛНСБ является поиск пентакварков, гипотетических частиц, состоящих из пяти кварков, предсказанных в 1997 году Д.И. Дьяконовым, В. Ю. Петровым, М. В. Поляковым.
- В частности, Д. И. Дьяконовым было также предсказано существование очарованных и “beauty” пентакварков, где одним из 5 кварков является “с” или “b” – кварк соответственно  $\beta_c^+$  (*cuddsbar*),  $\beta_c^{++}$  (*cuudsbar*),  $\beta_b^0$  (*buddsbar*),  $\beta_b^+$  (*buudsbar*), так называемых  $\beta$  барионов
- Поиск очарованных пентакварков  $\beta_c^+$  и  $\beta_c^{++}$  возможен в каналах распада  $\beta_c^+ \rightarrow p + \varphi(K^+K^-)$  и  $\beta_c^{++} \rightarrow p + \varphi(K^+K^-) + \pi^+$
- Статус работы: был выполнен предварительный анализ экспериментальных данных полученных ЛНСб в 2011 и 2012 годах. Результаты анализа докладывались на совещаниях рабочей группы и совещаниях коллаборации

# Спектр инвариантных масс $p+\phi[1020]$ ( $K^+K^-$ ) в районе $\sim 2400$ МэВ



Cabibbo-Suppressed

Doubly Cabibbo-Suppressed



# Измерение отношения выходов $\Xi_c \rightarrow p + \varphi(K^+K^-) / \Lambda_c \rightarrow p + \varphi(K^+K^-)$

- В данный момент измеряется отношение выхода гиперонов  $\Xi_c$  и  $\Lambda_c$  в каналах  $p + \varphi(K^+K^-)$  и  $p + K^*(K\pi)$

$$R_{\Xi_c/\Lambda_c}(P_t(Y_c)) = \frac{\sigma(\Xi_c) \times B(\Xi_c \rightarrow p\varphi)}{\sigma(\Lambda_c) \times B(\Lambda_c \rightarrow p\varphi)} ;$$

- Канал  $\Xi_c (\Lambda_c) \rightarrow p + K^*(K\pi)$  используется для сравнения поведения относительного хода сечений
- Цель измерений – связать неизвестное сечение рождения очарованного каскадного гиперона  $\Xi_c$  и неизвестную вероятность распада  $\Xi_c \rightarrow p + \varphi$  с известными величинами сечения и вероятности распада для  $\Lambda_c \rightarrow p + \varphi$
- Результаты измерений докладывались на совещаниях рабочей группы и совещаниях коллаборации. Статус исследований - выполнен анализ данных, завершается написание ноты

# Заключение

- Десятилетия исследований завершились открытием распада  $B_s \rightarrow 2\mu$ . Измерена величина вероятности распада  $B = (2.9 \pm 0.7) \times 10^{-9}$
- В канале  $p + \phi[1020](KK)$  достигнута чувствительность необходимая для начала поиска очарованных пентакварков  $\beta_c^+$ , в предположении, что механизм рождения не отличается радикальным образом от механизма рождения очарованных гиперонов
- Экспериментально обнаружены новые виды распадов очарованного каскадного бариона  $\Xi_c^+$ , такие как, дважды Кабиббо подавленный распад бариона  $\Xi_c^+ \rightarrow p + \phi[1020]$ , а также распады  $\Xi_c^+ \rightarrow \Delta^{++} + K^-$  и  $\Xi_c^+ \rightarrow \Lambda[1520] + \pi^+$
- Всего в процессе поиска пентакварков  $\beta_c^+$ ,  $\beta_c^{++}$  и  $\Theta^+$ , а также в процессе проведения измерений рабочая группа ПИЯФ в LHCb наблюдала 17 видов распадов очарованных гиперонов  $\Xi_c^+$ ,  $\Lambda_c^+$  и  $\Sigma_c^{++}$ , из них 7 видов распадов наблюдалось впервые (отсутствуют в PDG)



# С Новым годом!





# 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  $B \rightarrow D^+ X \mu$

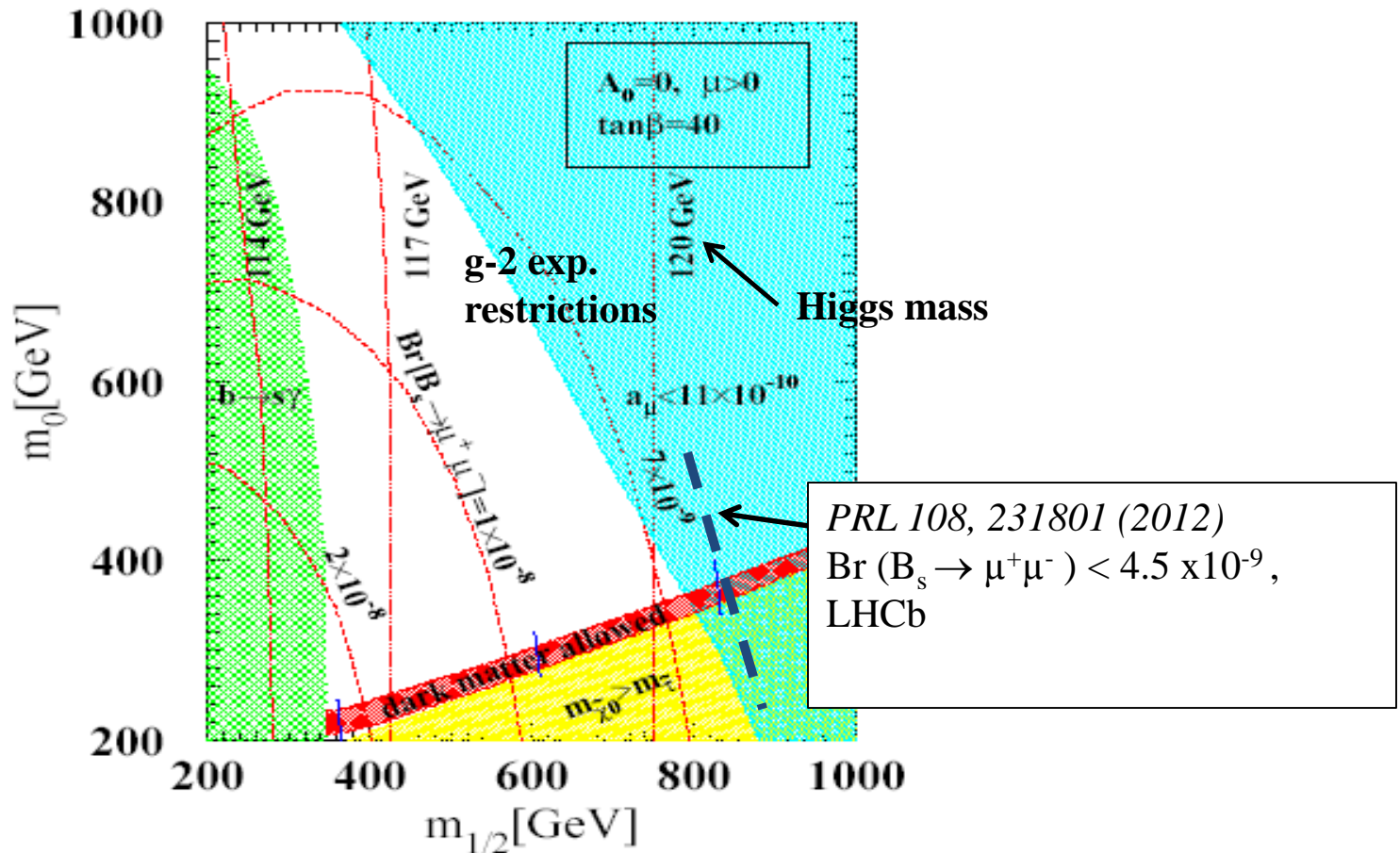
*Phys. Rev. D 85, 032008 (2011)*

- 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

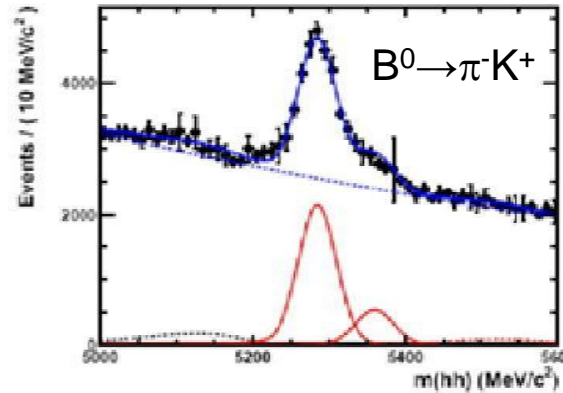
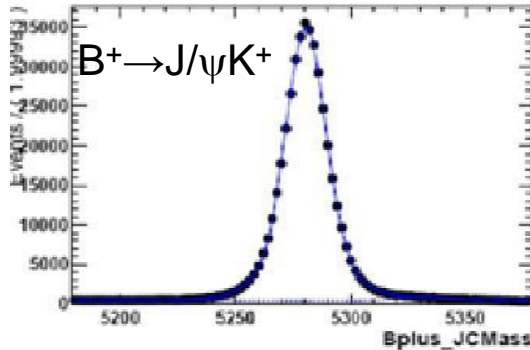
□ A decision tree is able to split the phase space into a large number of hypercubes, where each can be identified as “signal-like” or “background-like”

□ 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  $f_s/f_d = 0.256 \pm 0.02$

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

Calculated from MC

Measured from data

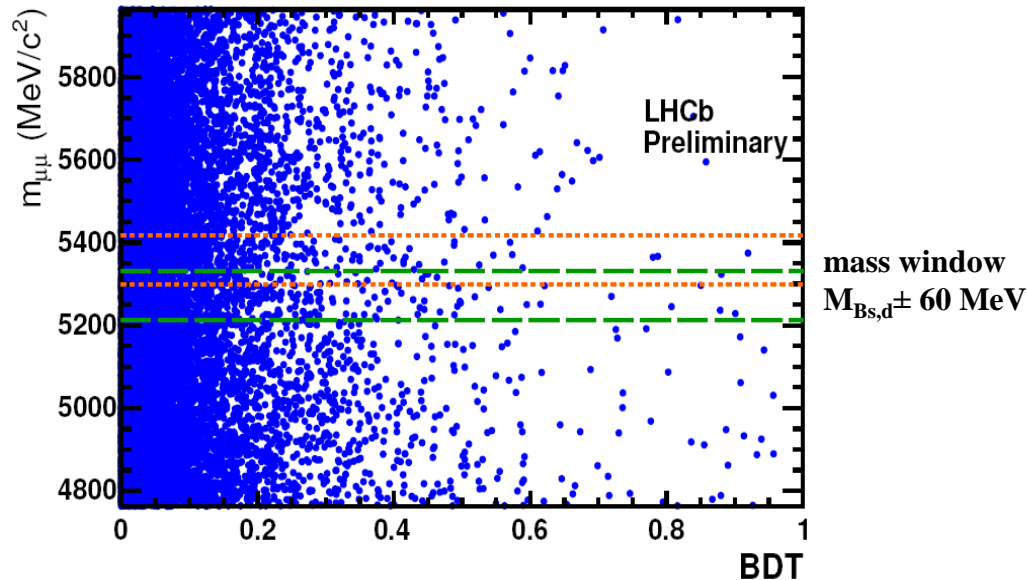
Number of events in normalization channel

- 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-CL<sub>b</sub>) 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.

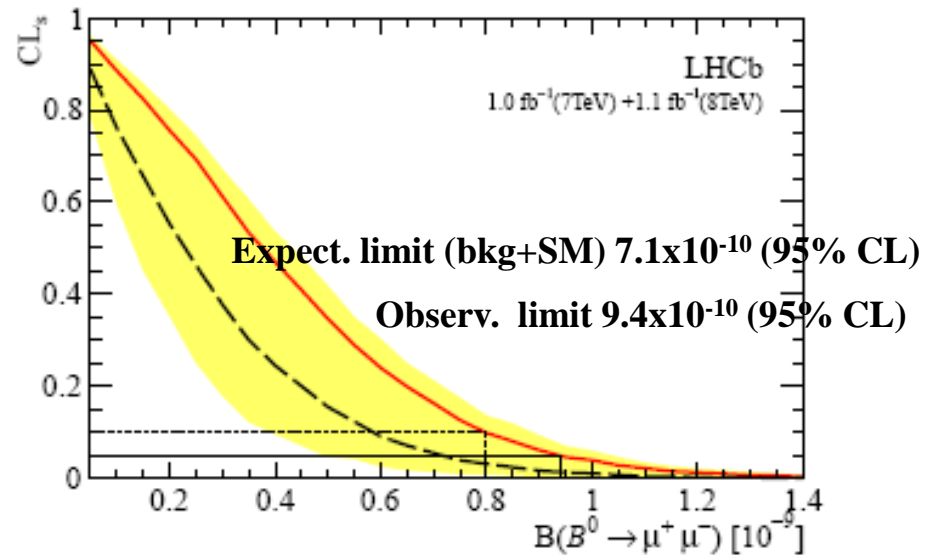
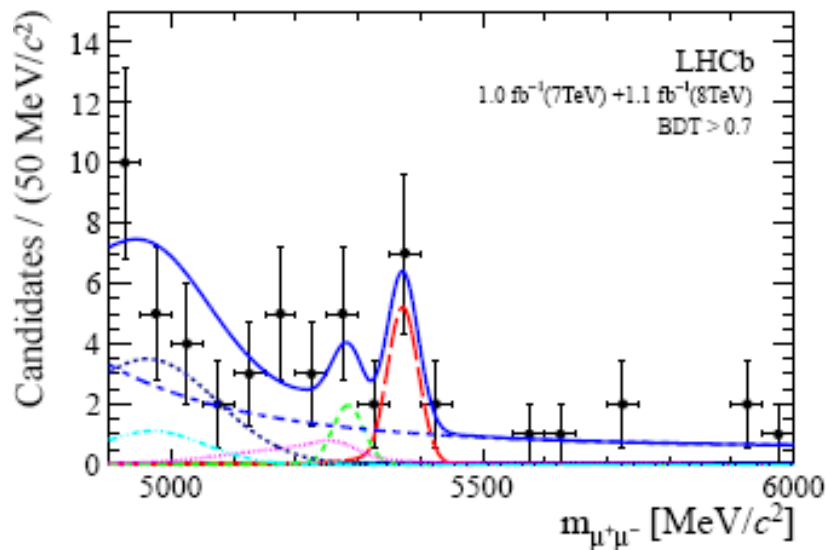
# LHCb upper limit with 2.1 fb<sup>-1</sup> 2011+2012 data

“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	$8.0 \times 10^{-10}$	$9.4 \times 10^{-10}$

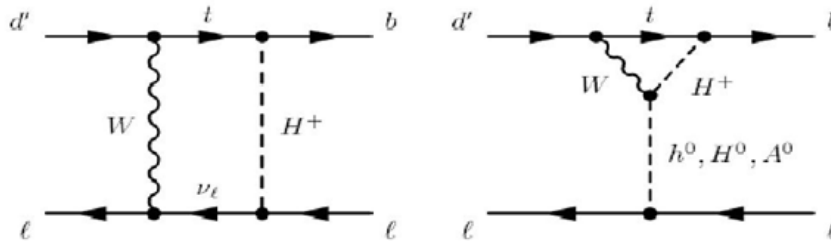


Combination for 2011 and 2012 years data gives the

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

# Physics motivation: MSSM models

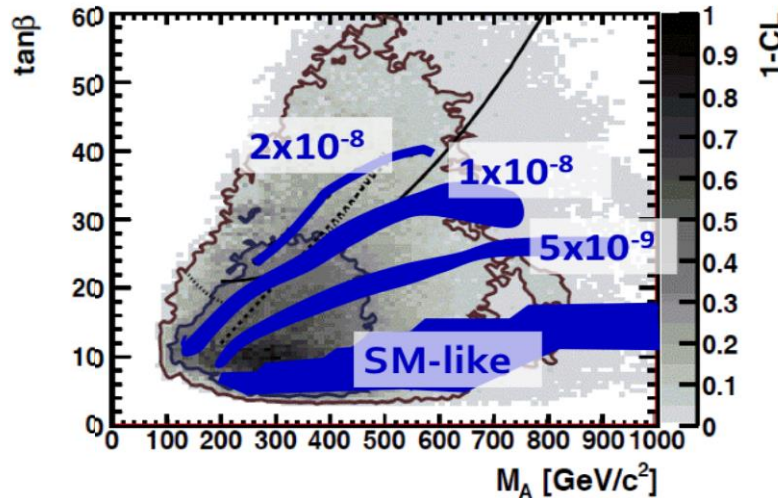
□  $B_s \rightarrow \mu^+\mu^-$  branching ratio can be very sensitive to the SUSY diagrams contributions. Two Higgs-Dublet (2HDM) model provides a big contribution in the region of large  $\tan \beta$



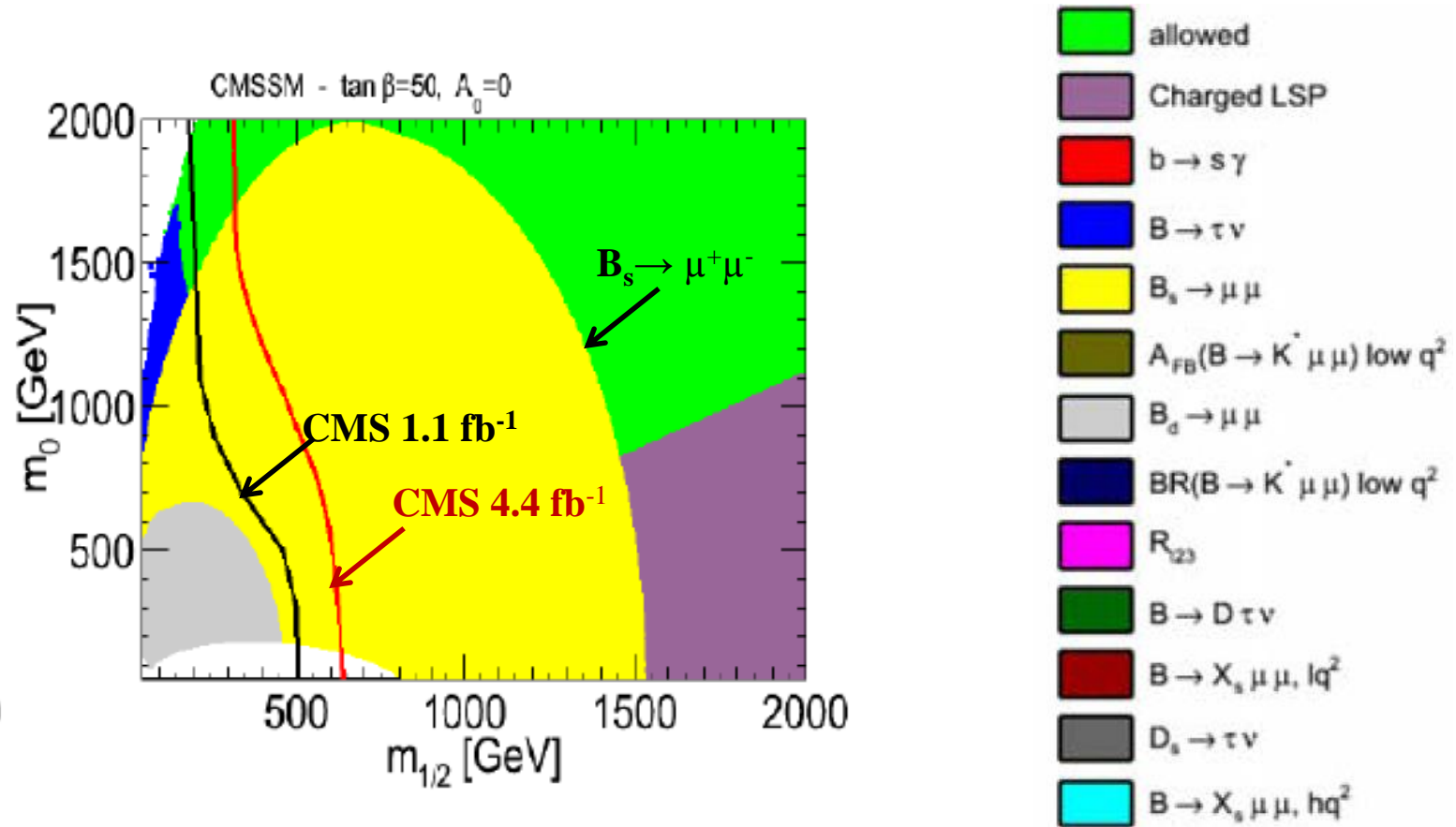
$$BR(SUSY) \propto BR(SM) \cdot \frac{m_b^4 \cdot (\tan \beta)^6}{m_{H^0}^4}$$

□ 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