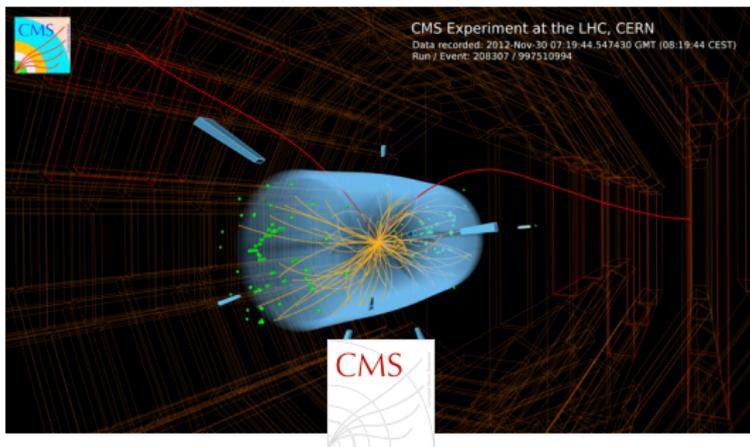


Ricerca di nuova fisica nei decadimenti dei mesoni B (incl. $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$) a CMS

Luca Martini
per la collaborazione CMS

INFN Pisa & Università di Pisa

8 aprile 2015



Decadimenti rari del modello standard

- I decadimenti $B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ sono proibiti a livello albero nel Modello Standard (MS)
 - FCNC, procedono tramite diagrammi a pinguino e box, soppressi per l'elicità di un fattore $(m_\mu/m_B)^2$, soppressi per CKM

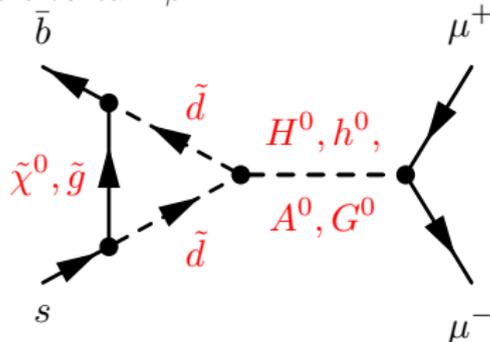
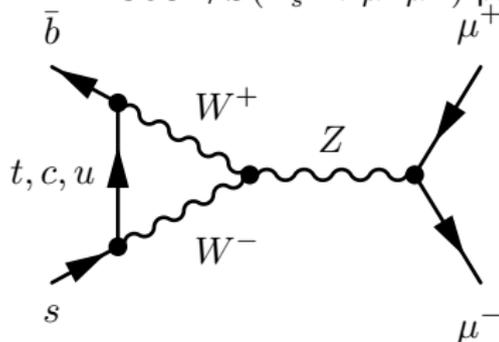
- Sono tra i più semplici da calcolare [arXiv:1311.0903v3]:

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{MS} = (3.66 \pm 0.23) \times 10^{-9}$$

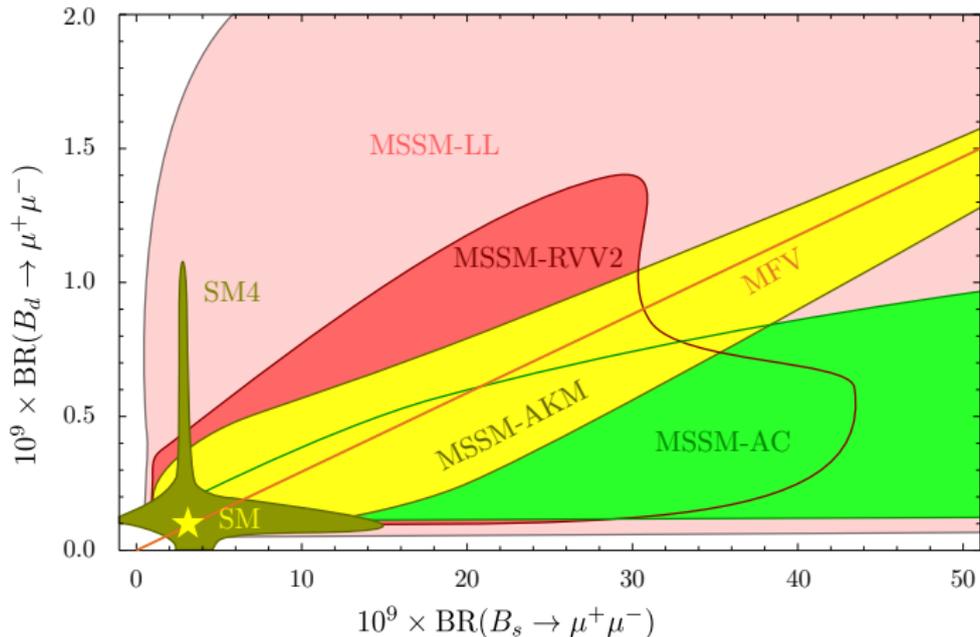
$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{MS} = (1.06 \pm 0.09) \times 10^{-10}$$

- Hanno valori piccoli ed incertezze molto piccole (dominate da CKM e f_B), molto sensibili a contributi di nuova fisica

- In SUSY, $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ può dipendere da $\tan^6 \beta$



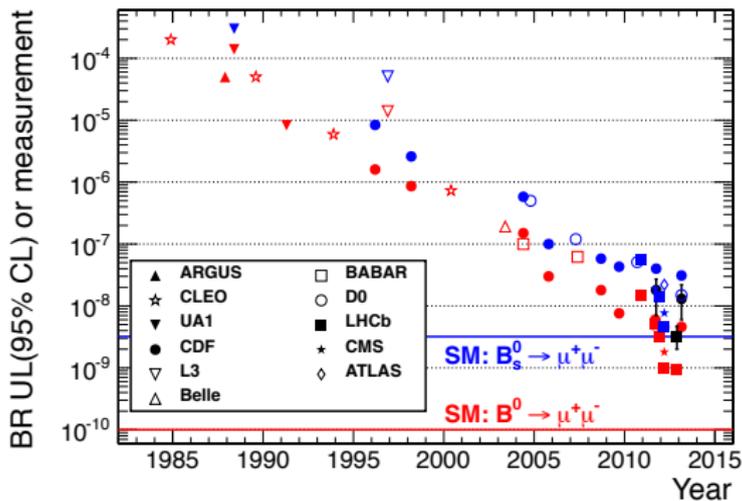
- Modelli differenti di SUSY permettono diversi valori delle Frazioni di Decadimento (FD) (Straub):



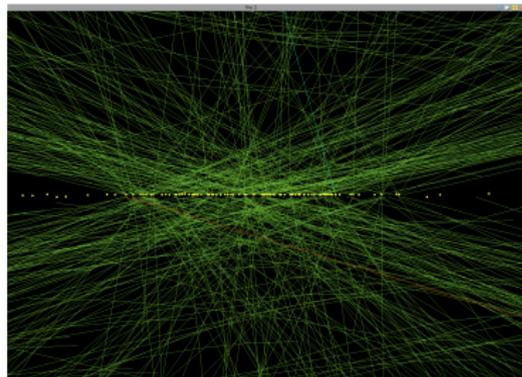
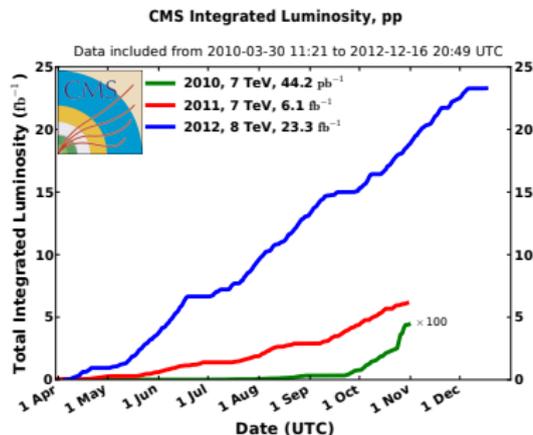
- Per cui è fondamentale misurare sia $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ sia $\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$

Stato sperimentale

- Molte collaborazioni di fisica delle alte energie hanno pubblicato risultati su $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ o $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$
 - Negli ultimi 30 anni c'è stato un considerevole progresso
- Il fattore limitante è la statistica di dati acquisiti



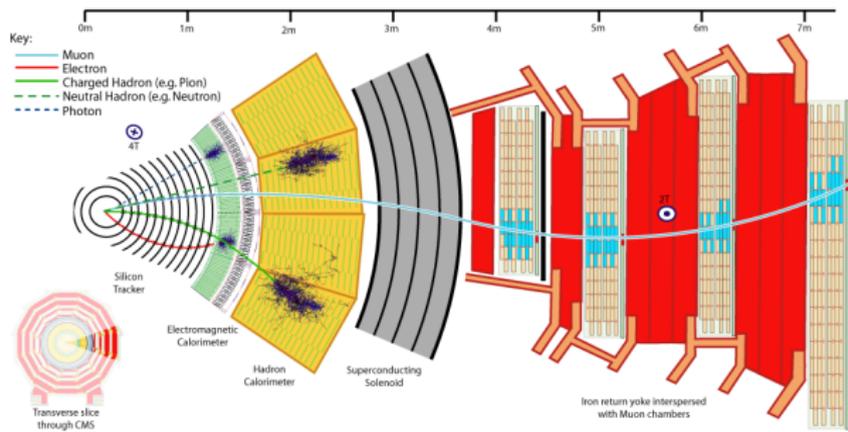
- Collisioni protone-protone
 - $\sqrt{s} = 7 \text{ TeV}$ e $L = 5 \text{ fb}^{-1}$ nel 2011
 - $\sqrt{s} = 8 \text{ TeV}$ e $L = 20 \text{ fb}^{-1}$ nel 2012
- LHC ha fornito una luminosità istantanea sempre crescente



- Al costo di un numero d'interazioni primarie per evento (*pile-up*) fino a 40:
 $\langle \mu \rangle_{2011} = 8 \text{ PV}$, $\langle \mu \rangle_{2012} = 21 \text{ PV}$

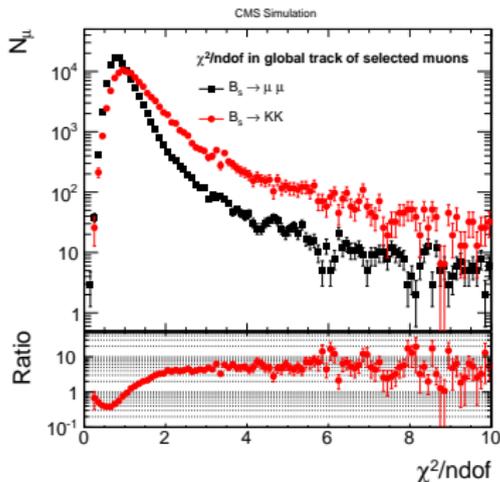
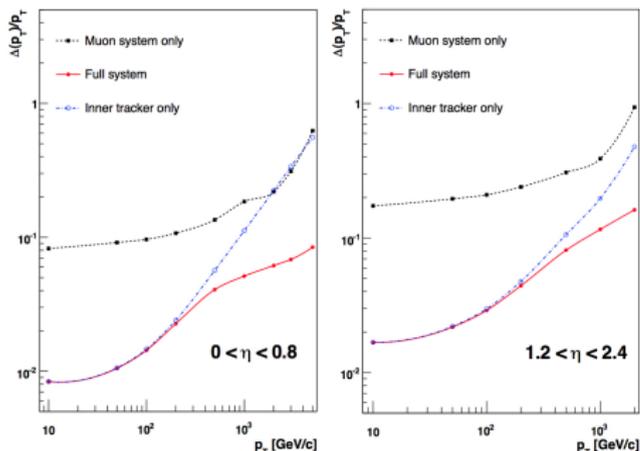
Principali caratteristiche di CMS

- Rivelatore cilindrico con copertura $|\eta| < 5$
- Solenoide superconduttore che produce un campo magnetico pari a 3.8 T
- Tracciatore interno in silicene che ricostruisce le tracce delle particelle cariche ed i vertici in $|\eta| < 2.5$
- Rivelatori per identificare e ricostruire muoni nell'intervallo $p_T \approx 4 \text{ GeV} - 1 \text{ TeV}$
- Calorimetri elettromagnetici ed adronici per misure d'energia dell'evento

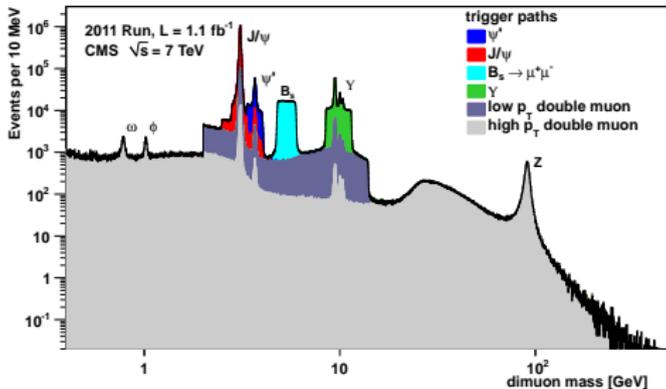


Le prestazioni dei tracciatori

- Altissime efficienza ($\approx 99\%$) e risoluzione per la ricostruzione delle tracce e dei vertici
- È stata sviluppata inoltre un'analisi MVA per discriminare i muoni dal fondo di protoni, kaoni e pioni prodotti dai decadimenti degli adroni con b
- In questo modo è stato possibile ridurre ulteriormente la loro identificazione errata di un fattore 2, a discapito di una perdita minimale (10%) nell'efficienza d'identificazione dei muoni reali



- CMS usa un *trigger* a due livelli per selezionare solo gli eventi più significativi
 - ① Il tasso d'interazione di LHC è pari a 40 MHz
 - ② Algoritmi hardware L1 (tasso massimo < 100 kHz)
 - ③ Algoritmi software HLT (tasso massimo \lesssim 500 Hz)
 - Per eventi $B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ sono stati scelti *trigger* ad alta efficienza di segnale
 - ① B_s^0 L1: 2 muoni con $p_T > 3$ GeV e $|\eta| < 2.2$
 - ② B_s^0 HLT: richieste su p_T e $|\eta|$ dei muoni e dei dimuoni, massa invariante, probabilità del vertice e lunghezza di decadimento
- *Trigger* ad alta efficienza, con tassi di pochi Hz

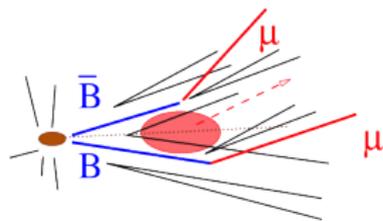


- Data la sensibilità aspettata di CMS, i risultati sono stati ottenuti in due modi diversi
 - $\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$: un esperimento di conteggio di eventi nella finestra di massa invariante del mesone B^0
 - $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$: un *fit unbinned* di massima verosimiglianza in una finestra di massa invariante $M \in [4.9, 5.9]$ GeV
- I risultati sono stati estratti normalizzando rispetto a $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm \rightarrow \mu^+ \mu^- K^\pm$
 - per evitare le incertezze sulla sezione d'urto di produzione $b\bar{b}$ e sulla luminosità
 - per cancellare al primo ordine molte incertezze sistematiche

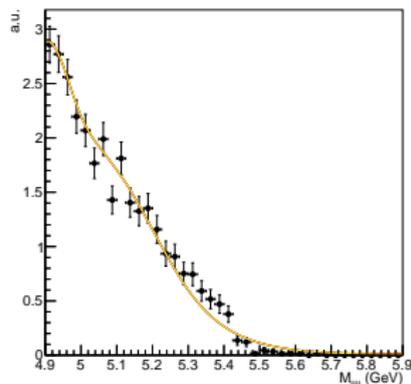
$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = \frac{N_{\text{obs}}^{B_s^0}}{N_{\text{obs}}^{B^\pm}} \times \frac{\epsilon_{B^\pm}}{\epsilon_{B_s^0}} \times \frac{f_u}{f_s} \times \mathcal{B}(B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm) \times \mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-)$$

- Rapporto tra numero di eventi, efficienze e modi di produzione
- Un'analisi cieca**: tutte le selezioni sono fissate senza usare eventi appartenenti alle regioni di segnale, per evitare errori sistematici
- Le distribuzioni del mesone B_s^0 sono state validate nei dati usando il decadimento $B_s^0 \rightarrow J/\psi \phi \rightarrow \mu^+ \mu^- K^+ K^-$

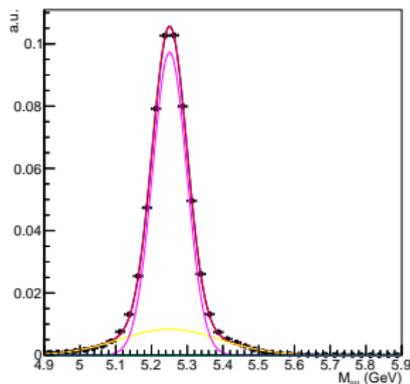
- ① **Combinatorio**, formato dai muoni provenienti da decadimenti deboli di b o c , $q \rightarrow X\mu\bar{\nu}$. **Studiato sulle bande laterali**
- ② **Raro semileptonico**, come $B_s^0 \rightarrow K^- \mu^+ \nu_\mu$, dove un adrone è erroneamente identificato come un muone. **Studiato su dati e MC**
- ③ **Raro a picco**, come $B_s^0 \rightarrow K^+ K^-$, dove entrambi gli adroni sono identificati come muoni. **Studiato su dati e MC**
- ④ **Eventi di segnale non risolti** di $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ e $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$, a causa della risoluzione sperimentale del rivelatore. **Studiato su MC**



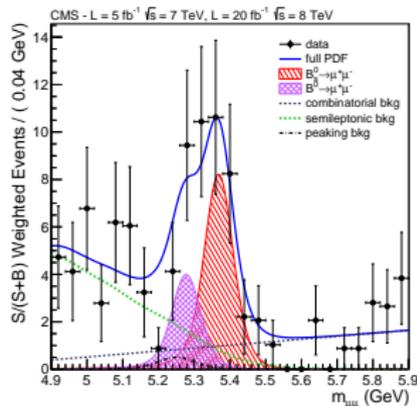
- 1 **Combinatorio**, formato dai muoni provenienti da decadimenti deboli di b o c , $q \rightarrow X\mu\bar{\nu}$. **Studiato sulle bande laterali**
- 2 **Raro semileptonico**, come $B_s^0 \rightarrow K^- \mu^+ \nu_\mu$, dove un adrone è erroneamente identificato come un muone. **Studiato su dati e MC**
- 3 **Raro a picco**, come $B_s^0 \rightarrow K^+ K^-$, dove entrambi gli adroni sono identificati come muoni. **Studiato su dati e MC**
- 4 **Eventi di segnale non risolti** di $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ e $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$, a causa della risoluzione sperimentale del rivelatore. **Studiato su MC**



- ① **Combinatorio**, formato dai muoni provenienti da decadimenti deboli di b o c , $q \rightarrow X\mu\bar{\nu}$. **Studiato sulle bande laterali**
- ② **Raro semileptonico**, come $B_s^0 \rightarrow K^- \mu^+ \nu_\mu$, dove un adrone è erroneamente identificato come un muone. **Studiato su dati e MC**
- ③ **Raro a picco**, come $B_s^0 \rightarrow K^+ K^-$, dove entrambi gli adroni sono identificati come muoni. **Studiato su dati e MC**
- ④ **Eventi di segnale non risolti** di $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ e $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$, a causa della risoluzione sperimentale del rivelatore. **Studiato su MC**

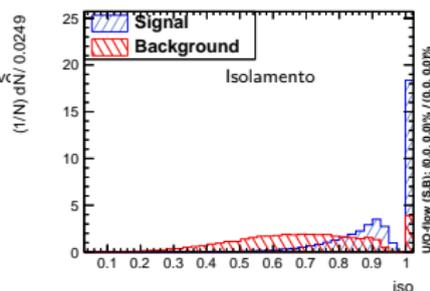
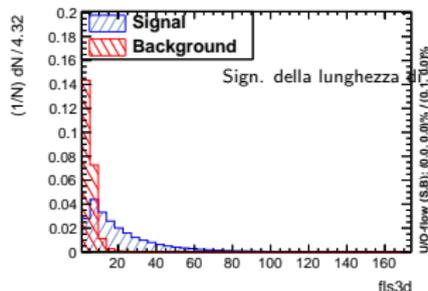
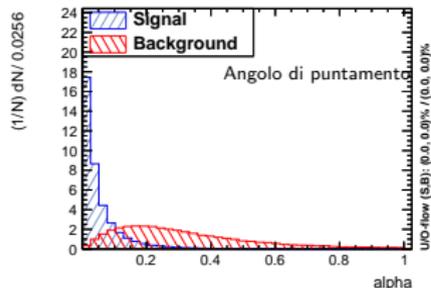
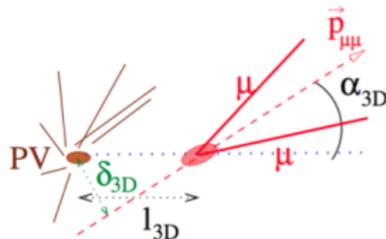


- ① **Combinatorio**, formato dai muoni provenienti da decadimenti deboli di b o c , $q \rightarrow X\mu\bar{\nu}$. **Studiato sulle bande laterali**
- ② **Raro semileptonico**, come $B_s^0 \rightarrow K^- \mu^+ \nu_\mu$, dove un adrone è erroneamente identificato come un muone. **Studiato su dati e MC**
- ③ **Raro a picco**, come $B_s^0 \rightarrow K^+ K^-$, dove entrambi gli adroni sono identificati come muoni. **Studiato su dati e MC**
- ④ **Eventi di segnale non risolti** di $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ e $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$, a causa della risoluzione sperimentale del rivelatore. **Studiato su MC**



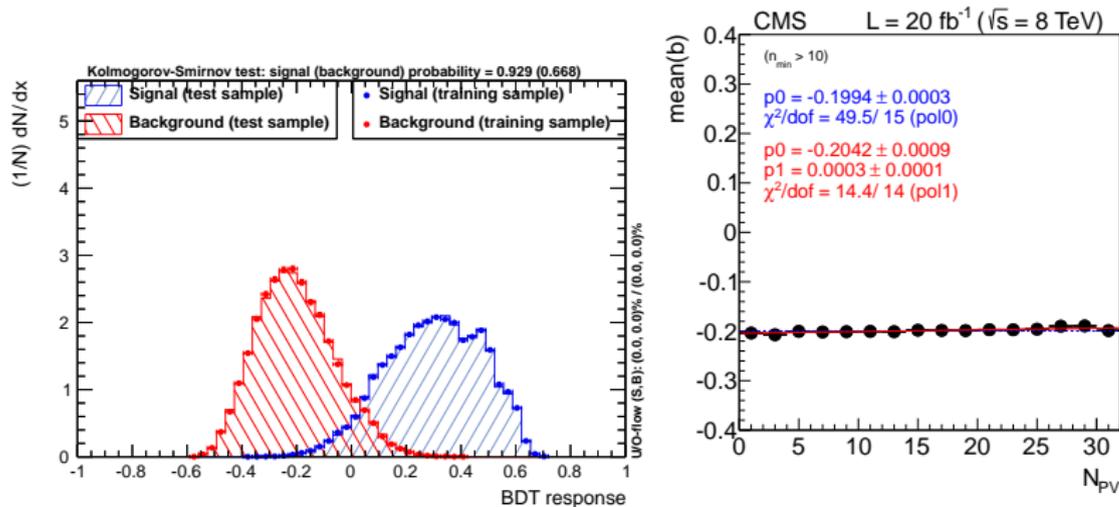
Selezione dei candidati $B^0_{(s)}$

- Il fondo combinatorio consiste di due muoni scorrelati
 - il loro vertice secondario è ricostruito malamente
 - non proveniente da uno dei vertici primari
 - ci sono altre particelle intorno (non sono muoni isolati)
- Queste caratteristiche sono tutte sfruttate per separare il segnale dal fondo, con un'analisi multivariata (BDT), in 10 variabili



Risultati del BDT

- La figura di merito è la significatività: $\frac{S}{\sqrt{S+B}}$

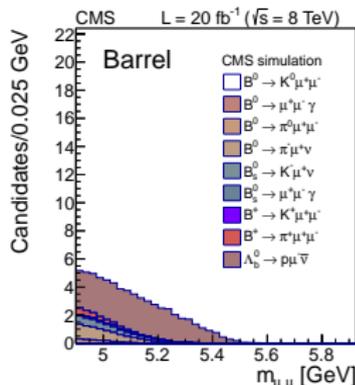
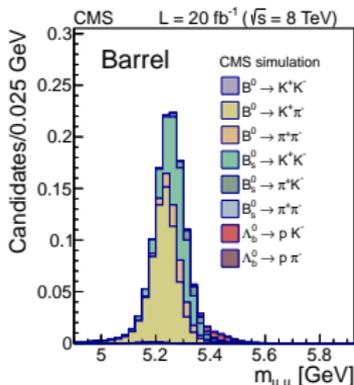


- Verificato che non ci sono effetti sistematici, né dipendenze da *pile-up* o massa invariante
- L'incertezza sistematica sull'efficienza dei tagli è stata presa dalle differenze tra dati e MC nei campioni di **normalizzazione** e **controllo**

- I fondi rari sono stati normalizzati al canale $B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm$:

$$N(X) = \frac{\mathcal{B}(X)}{\mathcal{B}(B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm) \times \mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-)} \frac{f_X}{f_u} \frac{\epsilon_X^{\text{ana}}}{\epsilon_{B^\pm}^{\text{ana}}} N_{\text{obs}}^{B^\pm}$$

- Includono decadimenti a 2 e 3 corpi di B_s^0 , B^0 , Λ_b^0
 - Le loro incertezze entrano come parametri di rumore della verosimiglianza



Altri studi di effetti sistematici e di controllo

- I rapporti tra i numeri di eventi di segnale e controllo sono stabili nel tempo
- I meccanismi di produzione del $B_{(s)}^0$, che possono cambiare l'accettazione e l'isolamento, sono nelle giuste proporzioni nei MC
- Le scale di massa e le risoluzioni sono state studiate nei dati sui mesoni J/ψ , $\psi(2S)$, $\Upsilon(nS)$
- Sommario delle incertezze sistematiche:

Categoria	Barrel (%)	Endcap (%)
f_s/f_u : rapporto di produzione dei <i>quark</i> u e s	8.0	8.0
accettazione: processi di produzione	3.5	5.0
scala di massa e risoluzione	5.0	5.0
efficienza (segnale): dati/MC	9.5 - 3.3	7.9 - 2.3
efficienza (normalizzazione): dati/MC	0.5 - 2.3	0.5 - 1.1
efficienza (normalizzazione): traccia kaone	4.0	4.0
efficienza <i>trigger</i>	3.0	3.0
efficienza identificazione	2.0	2.0
normalizzazione: <i>fit</i>	5.0	5.0

- Tutti i contributi sono sotto il 10%

Fit unbinned di massima verosimiglianza

- Il *fit* è usato per l'estrazione della FD e per misurarne la significatività
- *Fit* simultaneo in 12 categorie:

- ① muoni centrali ($|\eta| < 1.4$) o in avanti
- ② condizioni dei dati 2011 o 2012
- ③ *bin* della variabile del BDT B_s^0

- La verosimiglianza (estesa) è formata da 5 contributi:

$$L = N_{B_s^0} F_{B_s^0} + N_{B^0} F_{B^0} + N_{\text{comb}} F_{\text{comb}} + N_{\text{peak}} F_{\text{peak}} + N_{\text{semi}} F_{\text{semi}}$$

- Le incertezze sistematiche sono state aggiunte come parametri di rumore gaussiani
- La verosimiglianza totale è il prodotto di tutte le categorie indipendenti e di

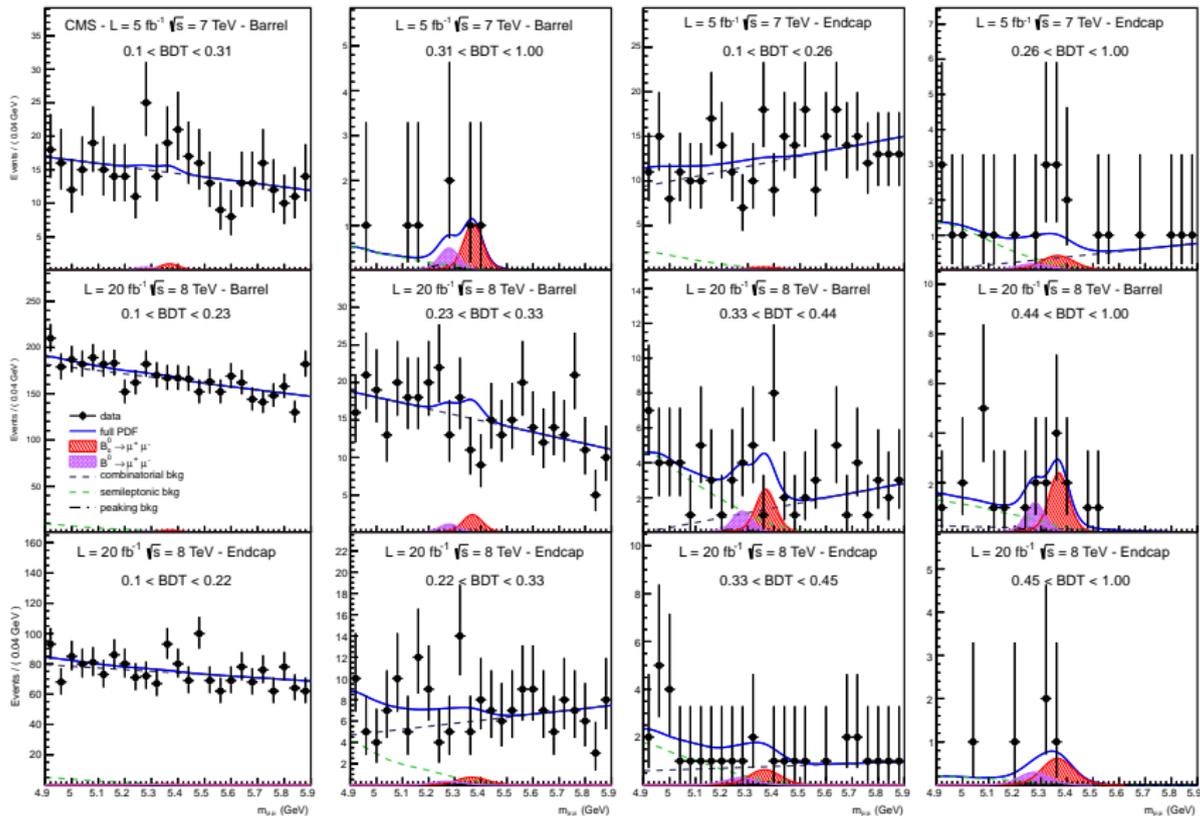
tutti i vincoli:
$$L_{\text{tot}} = \prod_{i=0}^{11} L_i L_i^{\text{constr}}$$

- La significatività è misurata con il test del rapporto delle verosimiglianze profilate:

→ **Ipotesi nulla** \mathcal{L}_0 : $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = 0$.

→ **Ipotesi alternativa** \mathcal{L}_1 : $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ lasciato libero

- Significatività mediana aspettata = 4.8σ



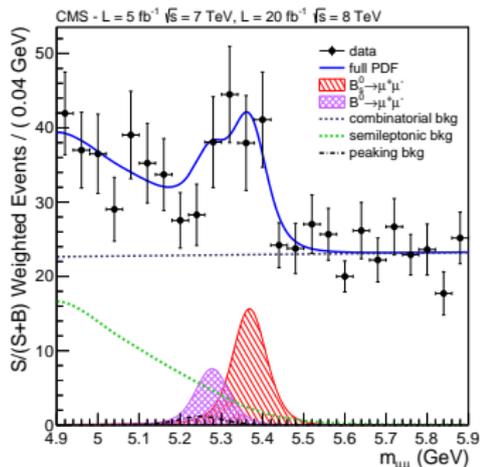
$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ misurato!

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{\text{CMS}} = (3.0_{-0.9}^{+1.0}) \times 10^{-9} = (3.0_{-0.8}^{+0.9}(\text{stat.})_{-0.4}^{+0.6}(\text{syst.})) \times 10^{-9}$$

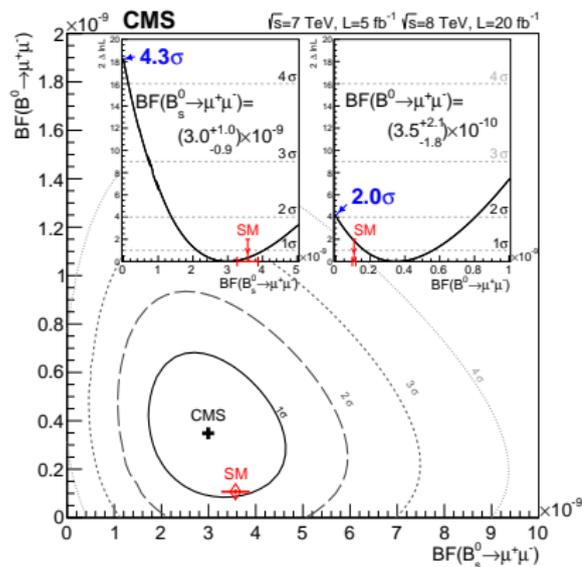
$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{\text{SM}} = (3.66 \pm 0.23) \times 10^{-9}$$

$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{\text{CMS}} = (3.5_{-1.8}^{+2.1}) \times 10^{-10}$$

$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)_{\text{SM}} = (1.06 \pm 0.09) \times 10^{-10}$$



- Compatibile col MS
- Limitati statisticamente



$$\text{sign}(\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)) = 4.3 \sigma$$

$$\text{sign}(\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)) = 2.0 \sigma$$

- La più alta significatività di $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ fino ad oggi!
- Più bassa della mediana aspettata (4.8σ)
- La FD misurata è leggermente più bassa della FD MS
- La significatività per l'ipotesi senza $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ né $\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ è:

$$\text{sign}(\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) \cap \mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)) = 4.7 \sigma$$

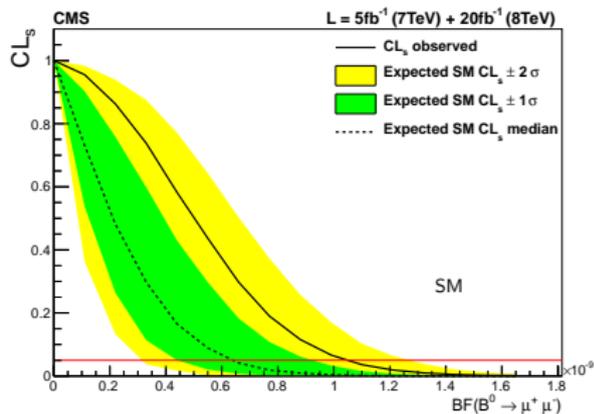
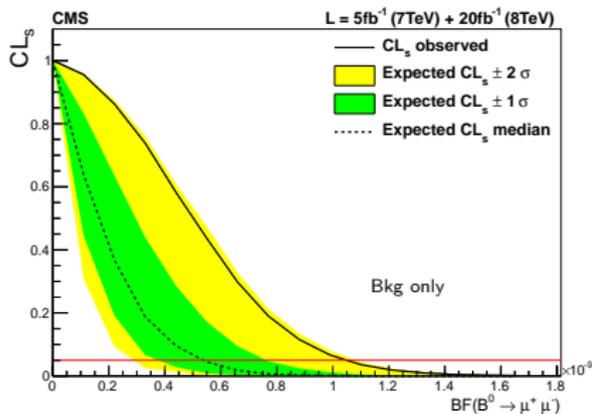
Limite superiore per $\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$

Risultati *binned*

- Nessun eccesso significativo nella finestra di massa intorno al B^0
- Il risultato è stato estratto con il metodo CL_S :

$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) \leq 1.1 \times 10^{-9} \quad \text{at 95\% CL}$$

- Più eventi misurati di quelli attesi, corrispondenti a 1.9σ
- $\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ è compatibile coi risultati del *fit*
- Questo valore è comunque ancora 10 volte sopra il valore atteso dal MS

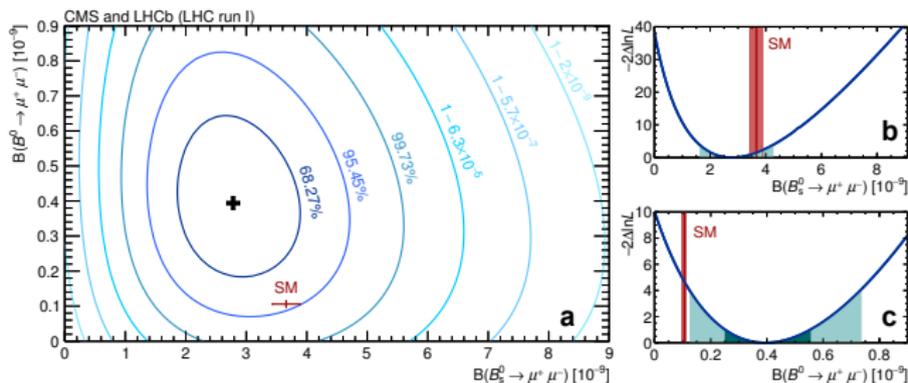


La combinazione CMS-LHCb

- Anche la collaborazione LHCb ha pubblicato le FD di $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ (4σ), e di $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ (2σ) [Phys.Rev.Lett. 111 (2013)]
- Dopo una combinazione preliminare, [CMS-PAS-BPH-13-007], una combinazione delle verosimiglianze è stata fatta ed i risultati sottomessi a Nature [arXiv:1411.4413]:

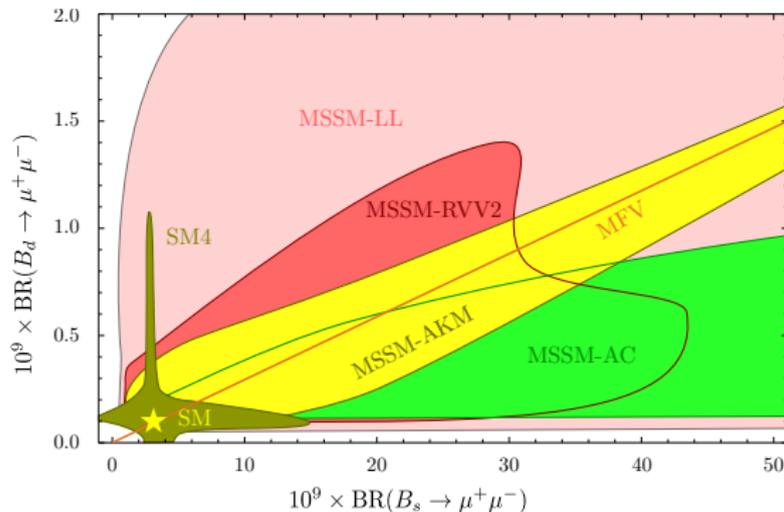
$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (2.8_{-0.6}^{+0.7}) \times 10^{-9} \quad (6.2\sigma)$$

$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (3.9_{-1.4}^{+1.6}) \times 10^{-10} \quad (3.2\sigma)$$



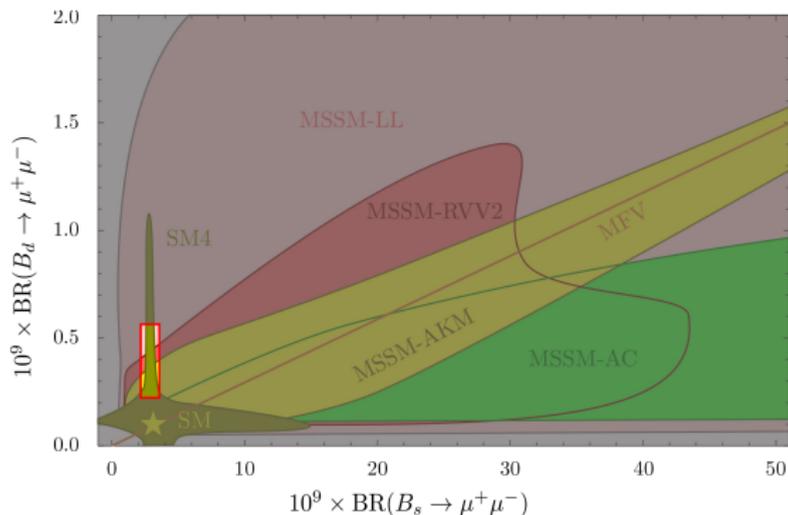
L'impatto sulla nuova fisica

- L'accuratezza di queste misure pone limiti stringenti
- Lo spazio delle fasi di parametri di SUSY è notabilmente ridotto:



L'impatto sulla nuova fisica

- L'accuratezza di queste misure pone limiti stringenti
- Lo spazio delle fasi di parametri di SUSY è notabilmente ridotto:



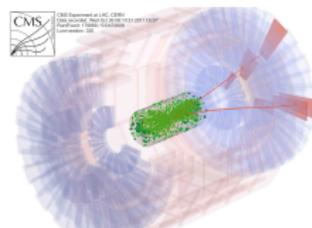
- Qualche tensione in $\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ potrebbe essere spiegata da modelli di nuova fisica
 - Ma è troppo presto per dire alcunché

$\mathcal{B}(B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ ed il Run II

- LHC Run II comincerà quest'anno
 - Ci aspettiamo un centinaio di fb^{-1} a $\sqrt{s} = 13 \text{ TeV}$ con una luminosità istantanea doppia di Run I
 - Un ambiente impegnativo, con $\langle \mu \rangle = 50 \text{ PV}$ ed alti tassi di *trigger*
 - CMS conterà gli studi di $\mathcal{B}(B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ con *trigger* ed analisi migliorati
- $\mathcal{B}(B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ è una delle analisi prioritarie di CMS
- L'attenzione si sta spostando su $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$:

$\mathcal{L}(\text{fb}^{-1})$	$\delta\mathcal{B}/\mathcal{B}(B_s^0)$	$\delta\mathcal{B}/\mathcal{B}(B^0)$	B^0 sign.	$\delta \frac{\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)}$
100 (2015–2017)	15%	66%	0.5–2.4 σ	71%

- Presentato la prima misura di $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ ed il più recente limite superiore di $\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$, usando i dati raccolti da CMS durante 2011 e 2012
- Risultati pubblicati su *Phys.Rev.Lett.* 111 (2013)
- La misura di $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ con la sua incertezza relativa del 30%, è la più precisa a oggi ed è in accordo con quanto pubblicato da LHCb
- Ambedue i risultati sono pienamente compatibili col MS
- E pongono limiti stringenti a parametri di nuova fisica
- Le misure di alta precisione sono la chiave per la ricerca indiretta di nuova fisica nel futuro prossimo
- Per $B \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$ seguite il talk CMS di Alessio nella sezione dottorandi!



Proprietà mesone B_s^0

- Stato legato $\bar{b}s$ 0^-
- B_s^0 è un autostato di sapore, non di massa
 - oscilla tra B_s^0 - \bar{B}_s^0 prima di decadere
 - è importante nel confronto valori sperimentali e teorici
- Massa ≈ 5.4 GeV
 - Relativamente bassa da rilevare
- lunga lunghezza di decadimento $c\tau \approx 450$ μm
 - possibile misurare la distanza tra il vertice primario di produzione e quello secondario di decadimento

Frazione di decadimento MS

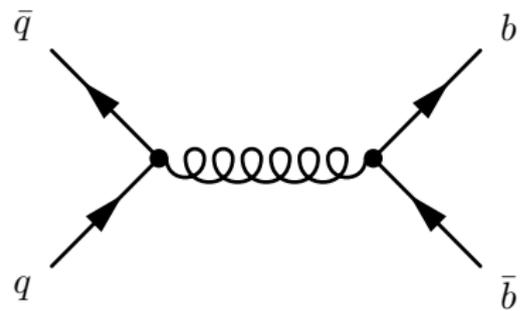
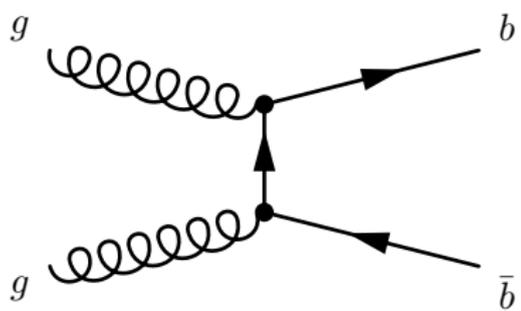
$$\mathcal{B}_{SM}^0 (B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = \tau (B_s^0) \frac{G_F^2}{\pi} \left(\frac{\alpha}{4\pi \sin^2 \theta_w} \right)^2 F_{B_s^0}^2 m_\mu^2 \times \\ \times m_{B_s^0} \sqrt{1 - 4 \frac{m_\mu^2}{m_{B_s^0}^2}} |V_{tb}^* V_{ts}|^2 Y^2(x_t)$$

- Tempo di decadimento
- Costanti di gauge e CKM e funzione di corta distanza
 - con correzioni QCD NLO
- Elemento di matrice adronica
- Soppressione chirale

Produzione quark b

LO

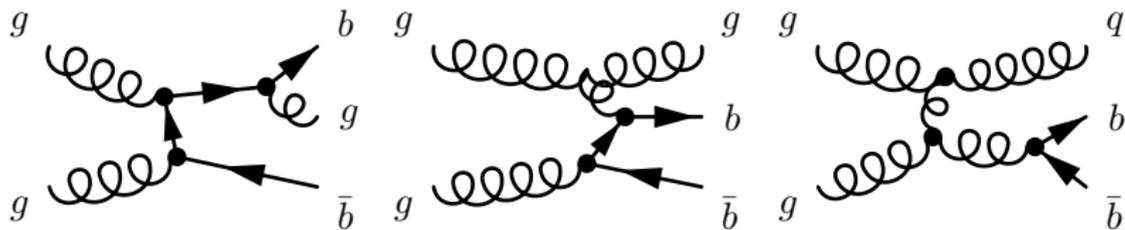
- Creazione di coppia



Produzione quark b

NLO

- Creazione di coppia, eccitazione del sapore, suddivisione di gluoni

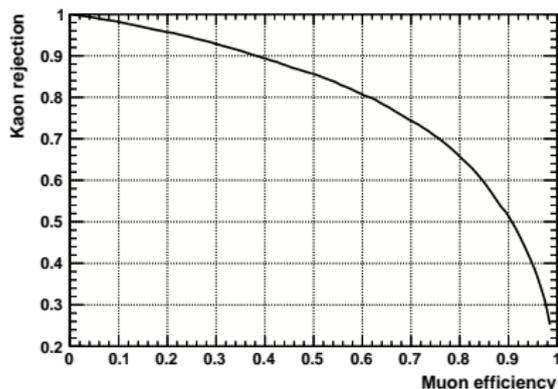


- Tutte le selezioni sono state “congelate” senza usare eventi appartenenti alla regione del segnale, per evitare errori sistematici
- distribuzioni del segnale B_s^0 validati sui dati usando il campione di controllo $B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi \rightarrow \mu^+\mu^-K^+K^-$
- Il livello del fondo e la risoluzione dipendono fortemente dall' η dei muoni
 - I dati sono stati divisi in categorie “*barrel*” e “*endcap*”:
 - *barrel* = ambedue i muoni in $|\eta| < 1.4$
 - *endcap* = altrimenti

Definizione	Intervallo di massa invariante (GeV)
Intervallo totale	[4.9, 5.9]
Segnale $B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$	[5.2, 5.3]
Segnale $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$	[5.3, 5.45]
Finestra cieca	[5.2, 5.45]
Bande laterali	[4.9, 5.2] \cup [5.45, 5.9]

Selezione dei singoli muoni: BDT

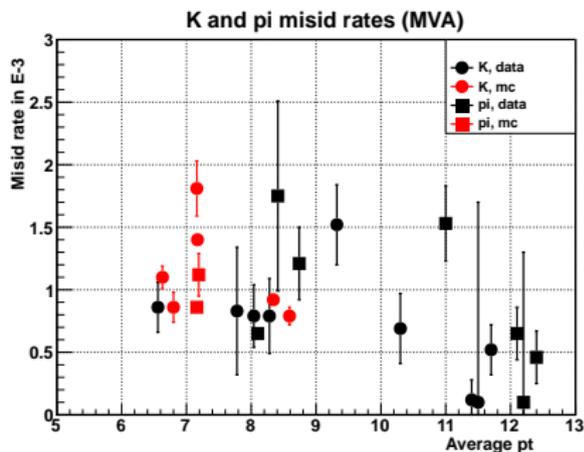
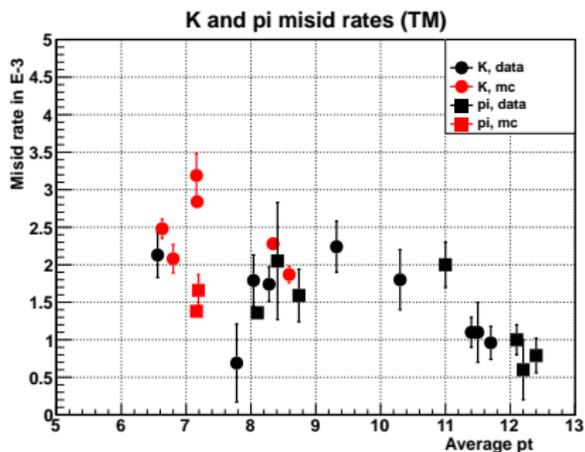
- I fondi rari dipendono dalla “misidentificazione” dei muoni
- **Kaoni, pioni and protoni identificati erroneamente come muoni a causa di punch-through e decadimenti in volo**
- Molti parametri delle tracce sono stati usati per separare i muoni “veri” (da $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$) da muoni “falsi” (da $B_s^0 \rightarrow K^+ K^-$), con un’analisi multivariata BDT
- **Miglioramento del 50% della rimozione di muoni falsi contro un’efficienza del 90% per i muoni veri**



Adrone	Misid. ($\times 10^{-3}$)
π	0.5–1.3
K	0.8–2.2
p	0.4–1.5

- Misidentificazione intorno all’1‰
- Con un’incertezza del 50%

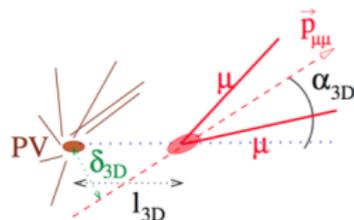
Validazione del BDT di singolo muone



Selezione del candidato $B_{(s)}^0$

- Variabili del vertice secondario

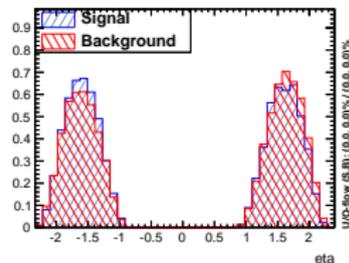
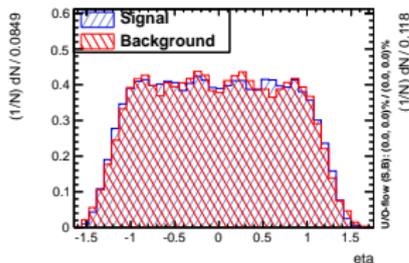
- χ^2 del vertice
- angolo di puntamento α_{3D}
- parametro d'impatto 3D δ_{3D}
- minima distanza tra i due muoni d_{ca}^{\max}
- lunghezza di decadimento ℓ_{3D}



Il candidato $B_{(s)}^0$

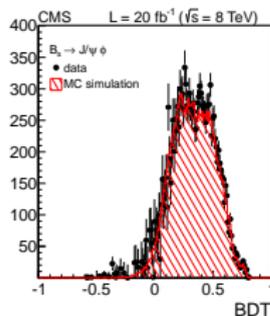
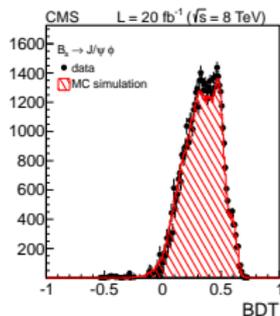
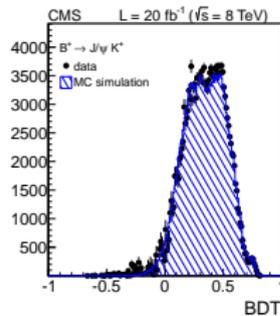
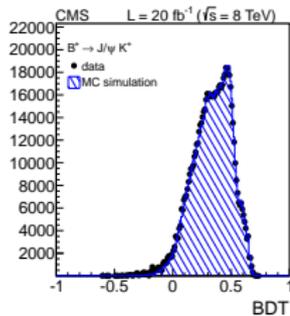
- Le due tracce muoniche sono combinate per formare il candidato B

Definizione	Intervallo di massa invariante (GeV)
Intervallo totale	[4.9, 5.9]
Segnale $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$	[5.2, 5.3]
Segnale $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$	[5.3, 5.45]
Finestra cieca	[5.2, 5.45]
Bande laterali	[4.9, 5.2] \cup [5.45, 5.9]



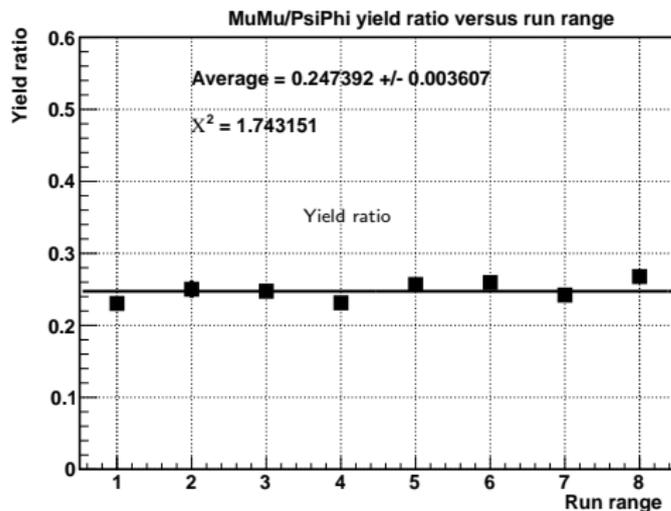
Sistematiche del BDT del $B_{(s)}^0$

- L'incertezza sistematica sull'efficienza del BDT presa dalla differenza tra dati e MC nei campioni di **normalizzazione** e **controllo**



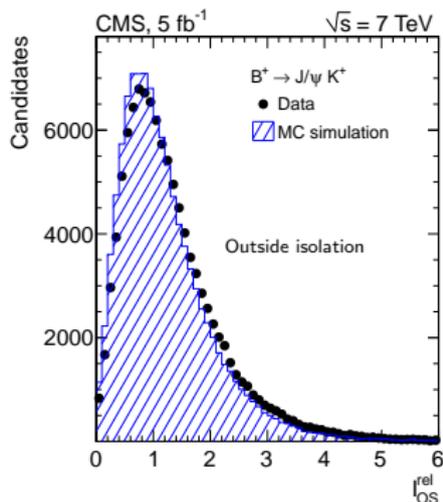
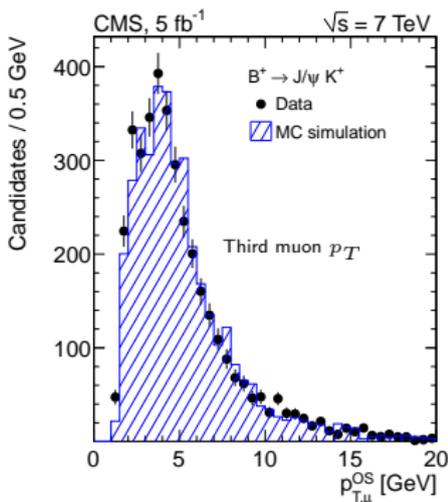
Altri studi di effetti sistematici e di controllo

- 1 I rapporti tra i numeri di eventi di segnale e controllo sono stabili nel tempo
- 2 I meccanismi di produzione del $B(s)$, che possono cambiare l'accettazione e l'isolamento, sono nelle giuste proporzioni nei MC
- 3 Le scale di massa e le risoluzioni sono state studiate nei dati sui mesoni J/ψ , $\psi(2S)$, $\Upsilon(nS)$



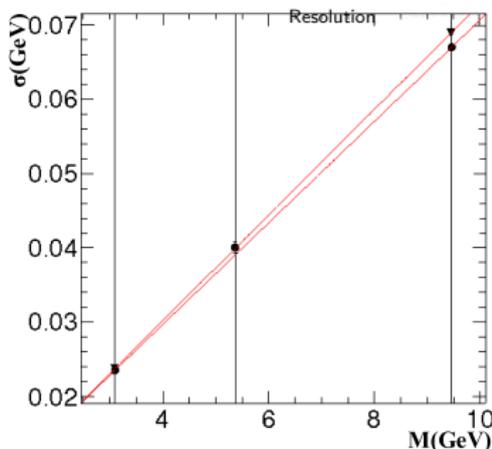
Altri studi di effetti sistematici e di controllo

- 1 I rapporti tra i numeri di eventi di segnale e controllo sono stabili nel tempo
- 2 I meccanismi di produzione del $B_{(s)}^0$, che possono cambiare l'accettazione e l'isolamento, sono nelle giuste proporzioni nei MC
- 3 Le scale di massa e le risoluzioni sono state studiate nei dati sui mesoni J/ψ , $\psi(2S)$, $\Upsilon(nS)$



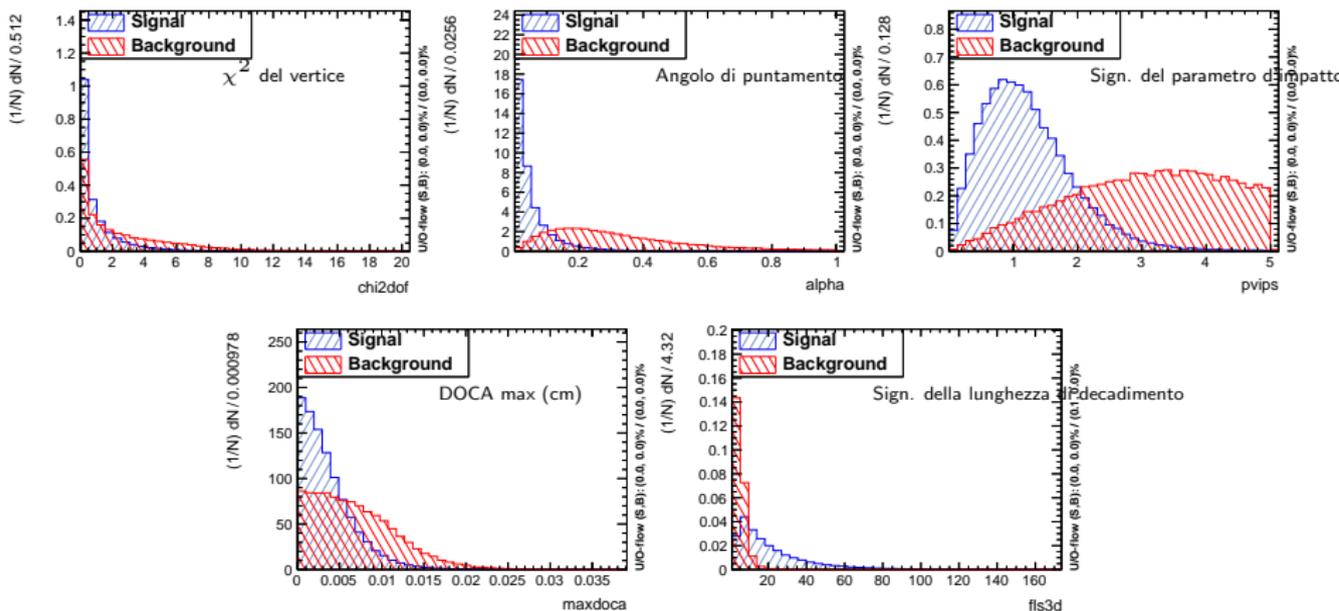
Altri studi di effetti sistematici e di controllo

- 1 I rapporti tra i numeri di eventi di segnale e controllo sono stabili nel tempo
- 2 I meccanismi di produzione del $B_{(s)}^0$, che possono cambiare l'accettazione e l'isolamento, sono nelle giuste proporzioni nei MC
- 3 Le scale di massa e le risoluzioni sono state studiate nei dati sui mesoni J/ψ , $\psi(2S)$, $\Upsilon(nS)$



Selezione del candidato $B_{(s)}^0$: il vertice secondario

- Dopo una preselezione leggera, le variabili fanno parte del *training* del BDT
 - Segnale = $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ MC; Fondo = bande laterali dei dati
- Grande separazione tra segnale e fondo combinatorio:

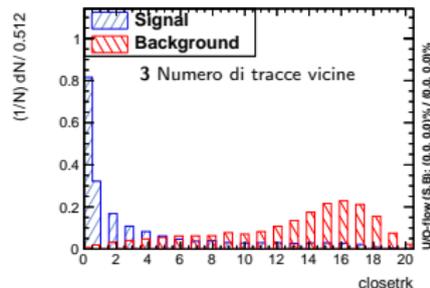
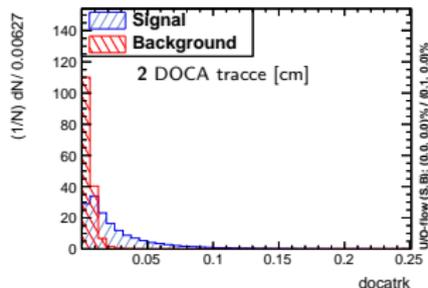
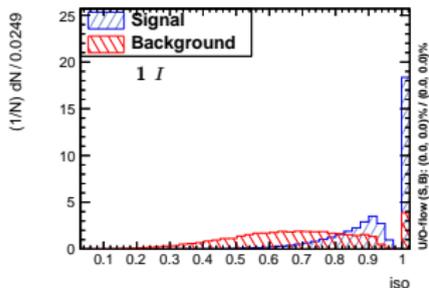


Selezione del candidato $B_{(s)}^0$: variabili d'isolamento

- Separano il segnale, che è isolato, dal fondo contenente tracce da *jet*
 - 1 Somma su tutte le tracce in un cono intorno al $B_{(s)}^0$ o ai due muoni:

$$I = \frac{p_T(B)}{p_T(B) + \sum_{\text{trk}} p_T}$$

- 2 d_{ca}^0 minimo delle tracce
- 3 Numero di tracce vicine



Modello statistico

Analisi *binned*

- Il numero di eventi in ogni intervallo di massa è una variabile stocastica che soddisfa la statistica di Poisson
 - Intervalli di massa: [4.9, 5.2, 5.3, 5.45, 5.9] GeV
- Il totale è la somma di variabili poissoniane
 - comb. + raro + segnali
- Il numero atteso di decadimenti ricostruiti è

$$\nu_i = \frac{\mathcal{B}_{\text{SM}}(B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{B}(B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm) \times \mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-)} \frac{f_s}{f_u} \frac{\epsilon_{B_s^0}}{\epsilon_{B^\pm}} N_{\text{obs}}^{B^\pm}$$

- La verosimiglianza è il prodotto di tutte le variabili poissoniane e di tutti i vincoli (gaussiane biforcute)

Analisi *binned* per il limite superiore di $\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$

- Il totale è la somma di variabili poissoniane
- Limite superiore estratto col metodo CL_S

		$N_{\text{signal}}^{\text{exp}}$	$N_{\text{total}}^{\text{exp}}$
2011	B^0 Barrel	0.27 ± 0.03	1.3 ± 0.8
	B_s^0 Barrel	2.97 ± 0.44	3.6 ± 0.6
	B^0 Endcap	0.11 ± 0.01	1.5 ± 0.6
	B_s^0 Endcap	1.28 ± 0.19	2.6 ± 0.5
2012	B^0 Barrel	1.00 ± 0.10	7.9 ± 3.0
	B_s^0 Barrel	11.46 ± 1.72	17.9 ± 2.8
	B^0 Endcap	0.30 ± 0.03	2.2 ± 0.8
	B_s^0 Endcap	3.56 ± 0.53	5.1 ± 0.7

- Limite superiore sulla FD di $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ atteso:

$$6.3_{-2.0}^{+2.7} \times 10^{-10} \quad \text{MS}$$

$$5.4_{-1.6}^{+2.3} \times 10^{-10} \quad \text{solo fondo}$$

fit unbinned di massima verosimiglianza

- Fit simultaneamente in ogni categoria di dati per estrarre insieme $\mathcal{B}(B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$:

- 1 Muoni centrali ($|\eta| < 1.4$) or in avanti
- 2 Condizioni di dati 2011 o 2012
- 3 Bin di BDT

- 5 contributi all'UML:

$$L = N_{B_s^0} F_{B_s^0} + N_{B^0} F_{B^0} + N_{\text{comb}} F_{\text{comb}} + N_{\text{peak}} F_{\text{peak}} + N_{\text{semi}} F_{\text{semi}}$$

- La FD è:

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = N_{B_s^0} \times K_{B_s^0}$$

dove

$$K_{B_s^0} = (N_{B^\pm}) \left(\frac{f_s}{f_u} \right) \left(\frac{\epsilon_{B_s^0}}{\epsilon_{B^\pm}} \right) \left(\frac{1}{\mathcal{B}(B^\pm \rightarrow J/\psi K^\pm) \times \mathcal{B}(J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-)} \right)$$

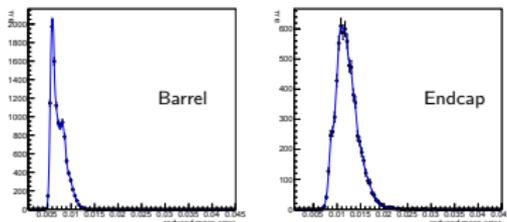
- Incertezze sistematiche aggiunte con parametri di rumore gaussiani

fit unbinned di massima verosimiglianza per $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$

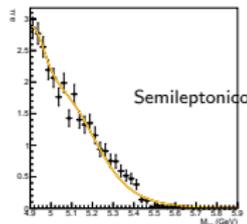
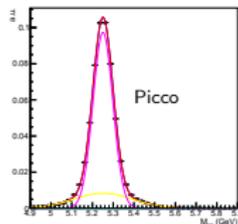
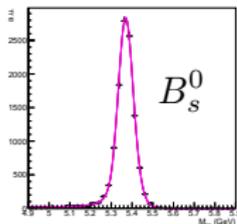
- La verosimiglianza estesa è data da 5 contributi:

$$L = N_{B_s^0} F_{B_s^0} + N_{B^0} F_{B^0} + N_{\text{comb}} F_{\text{comb}} + N_{\text{peak}} F_{\text{peak}} + N_{\text{semi}} F_{\text{semi}}$$

- Implementato un errore per evento: la larghezza della pdf presa direttamente dall'incertezza sulla massa invariante dell'evento $\sigma(\eta)$
 - Utilizzato un errore sulla massa ridotto: $\sigma_r(\eta) \equiv \sigma(\eta)/m$ per rimuovere la sua dipendenza lineare dalla massa
- La pdf totale è la **pdf di massa** \times **pdf dell'errore sulla massa ridotto** $M^R(\sigma_r(\eta))$
- La pdf $M^R(\sigma_r(\eta))$ è descritta col metodo dei nuclei gaussiani
 - La pdf *unbinned* è fatta dalla somma di pdf normali (uno per evento)

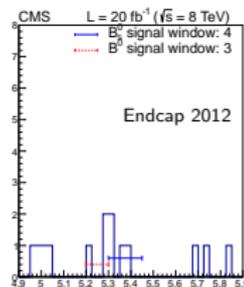
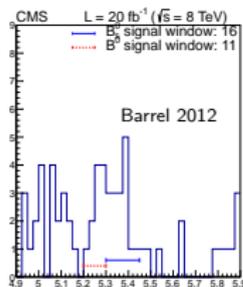
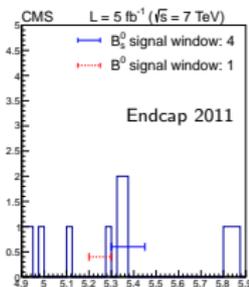
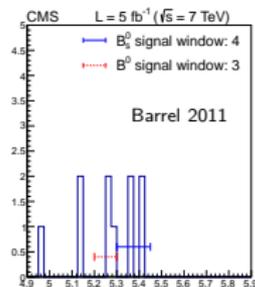


- pdf del segnale = Crystal Ball con errore dato per evento:
 - Larghezza barrel ≈ 50 MeV
 - Larghezza endcap ≈ 80 MeV
- pdf combinatoria = polinomio di primo ordine
 - Forma studiata sulle bande laterali e sui **muoni non BDT**
- pdf del picco raro = Crystal Ball + gaussiana, che tiene di conto
 - Larghezza dovuta all'assegnamento della massa di muone a kaoni, pioni, protoni
 - Larghezza dovuta ai differenti valori delle masse di B_s^0 , B^0 , Λ_b^0
- pdf del semileptonico raro descritta col metodo nei nuclei gaussiani
 - La pdf *unbinned* è fatta dalla somma di pdf normali (uno per evento)



Risultati: l'unblinding

- Dopo la scelta finale di tutte le selezioni, i risultati possono essere estratti



Categoria	$N_{B^0}^{\text{exp}}$	$N_{B^0}^{\text{obs}}$	$N_{B_s^0}^{\text{exp}}$	$N_{B_s^0}^{\text{obs}}$	$N_{B^\pm}^{\text{obs}}$
Barrel 2011	1.3 ± 0.8	3	3.6 ± 0.6	4	$(71.2 \pm 4.1) \times 10^3$
Endcap 2011	1.5 ± 0.6	1	2.6 ± 0.5	4	$(21.4 \pm 1.1) \times 10^3$
Barrel 2012	7.9 ± 3.0	11	17.9 ± 2.8	16	$(309 \pm 16) \times 10^3$
Endcap 2012	2.2 ± 0.8	3	5.1 ± 0.7	4	$(69.3 \pm 3.5) \times 10^3$

La frazione di decadimento $\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$

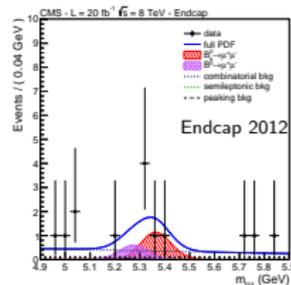
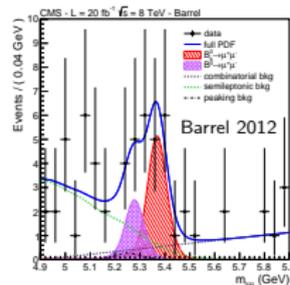
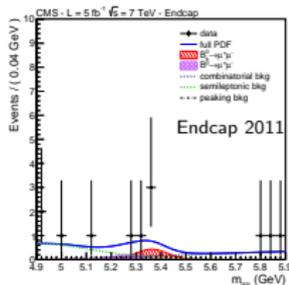
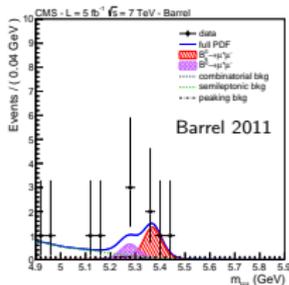
Risultati *unbinned*

- *Fit* fatti coi due metodi 1D-BDT e categorized BDT
- Risultati Categorized BDT:

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (3.0_{-0.9}^{+1.0}) \times 10^{-9} \quad [\text{SM} : (3.66 \pm 0.23) \times 10^{-9}]$$

$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (3.5_{-1.8}^{+2.1}) \times 10^{-10} \quad [\text{SM} : (1.06 \pm 0.09) \times 10^{-10}]$$

- 1D-BDT:



- $\mathcal{B}(B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)$ sono dominati dall'incertezza statistica
 - LHC fornirà centinaia e migliaia di fb^{-1} a CMS a $\sqrt{s} \approx 14 \text{ TeV}$

$\mathcal{L}(\text{fb}^{-1})$	$\delta\mathcal{B}/\mathcal{B}(B_s^0)$	$\delta\mathcal{B}/\mathcal{B}(B^0)$	B^0 sign.	$\delta \frac{\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)}{\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-)}$
100 (2015–2017)	15%	66%	0.5–2.4 σ	71%
300 (2019–2021)	12%	45%	1.3–3.3 σ	47%
3000 (2023–)	12%	18%	5.4–7.6 σ	21%

- Gli aggiornamenti di CMS sul tracciatore ed i rivelatori di μ sono essenziali
- L'aspetto più impegnativo saranno i tassi dei *trigger* ed il *pile-up*
 - Fino a $\langle \mu \rangle = 140 \text{ PVs}$