Risultati sul $B_d, B_s \to \mu\mu$

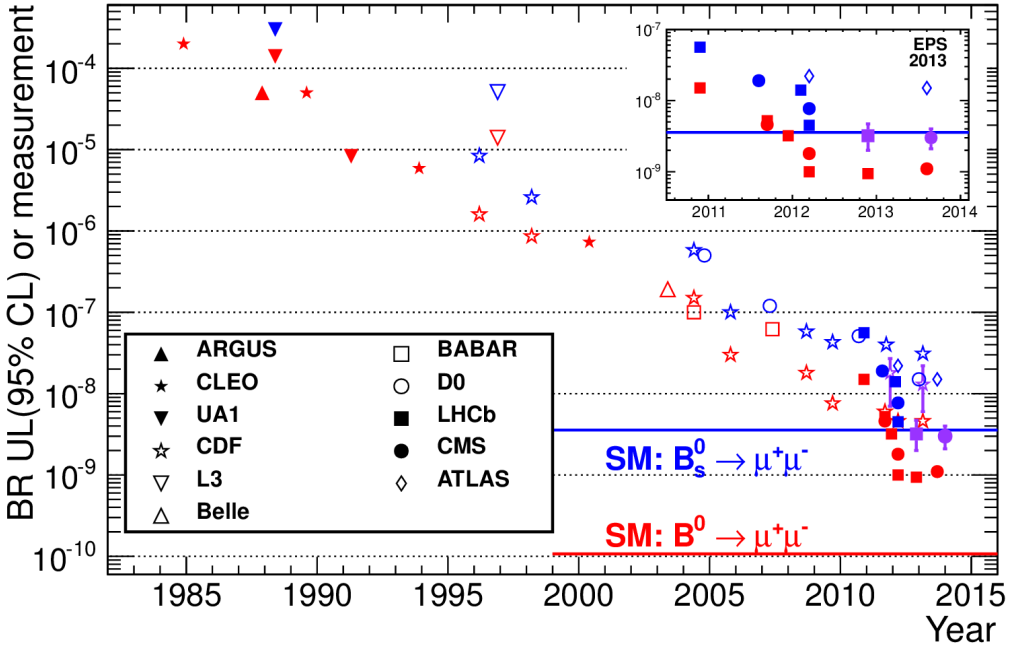
M. Galanti
(Università di Padova & INFN Padova)

Università degli Studi di Padova

INFN Istituto Nazionale di Fisica Nucleare

Introduzione

- I decadimenti rari $B_s/B_d \longrightarrow \mu\mu$ sono tra i test cardine dello Standard Model condotti nell'ambito della fisica del flavour
  - Previsioni SM molto precise
  - Ricerca sperimentale che dura da circa 30 anni
- In questa presentazione mi concentrerò sui risultati più recenti pubblicati da ATLAS, CMS e LHCb

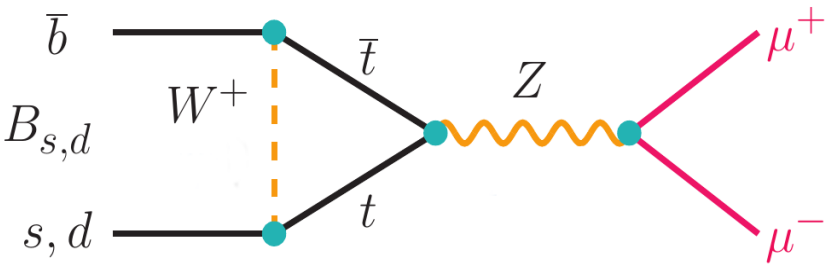


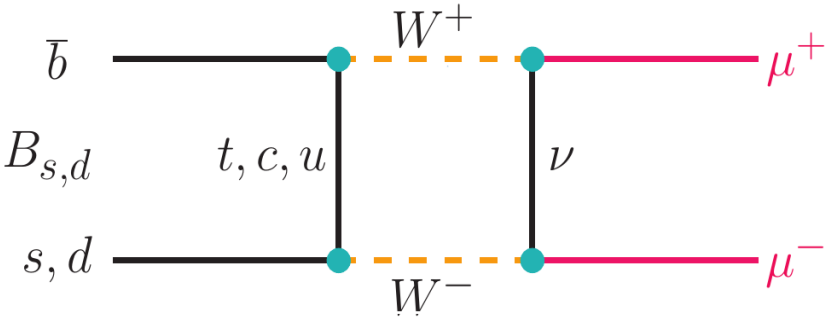
Sommario del talk

- Introduzione teorica
- Descrizione delle tre misure
- Combinazione dei risultati
- Prospettive per il futuro

Decadimenti rari $B^0_{(s)} \to \mu^+\mu^-$

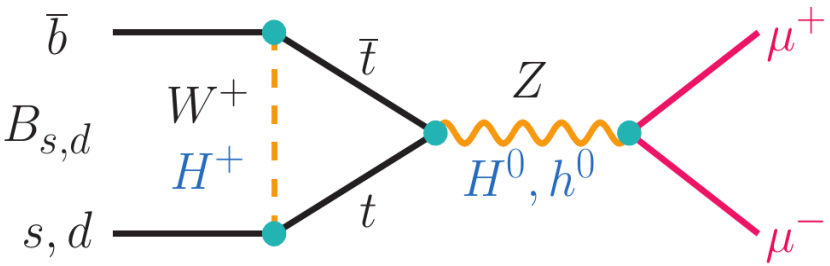
- Doppiamente soppressi nello SM
  - FCNC $\longrightarrow$ no livello albero
  - Elicità (m_μ^2/m_B^2)
- Possono avvenire tramite diagrammi a 1 loop

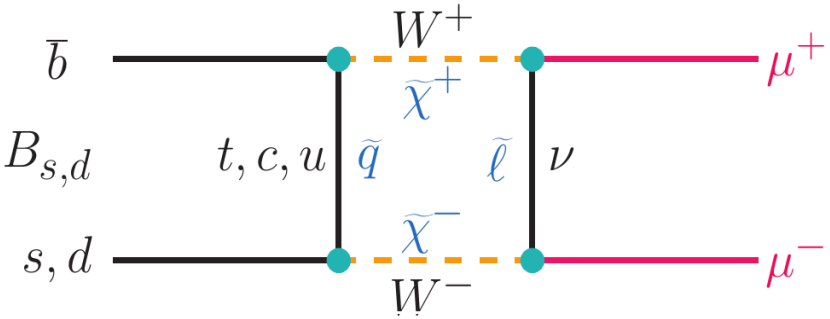




Decadimenti rari $B^0_{(s)} \to \mu^+\mu^-$

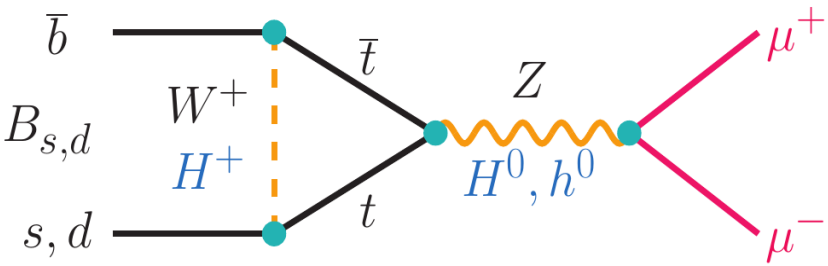
- Doppiamente soppressi nello SM
  - FCNC $\longrightarrow$ no livello albero
  - Elicità (m_μ^2/m_B^2)
- Possono avvenire tramite diagrammi a 1 loop
  - Sensibili a **contributi di nuova fisica** nel loop



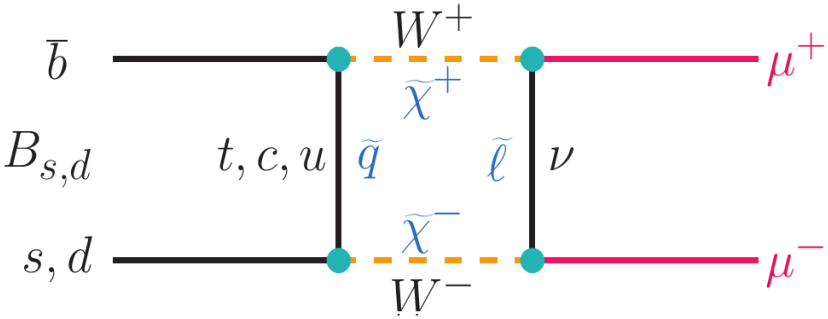


Decadimenti rari $B^0_{(s)} \to \mu^+\mu^-$

- Doppiamente soppressi nello SM
  - FCNC $\longrightarrow$ no livello albero
  - Elicità (m_μ^2/m_B^2)



- Possono avvenire tramite diagrammi a 1 loop
  - Sensibili a **contributi di nuova fisica** nel loop
  - **Complementari ad altri canali come $B^0 \to K^{0*}\mu\mu$ ($\longrightarrow$ v. presentazione di G. Lanfranchi)**



Operator $\mathcal{O}_i^{(\prime)}$	$B_{s(d)} \to X_{s(d)}\mu^+\mu^-$	$B_{s(d)} \to \mu^+\mu^-$
$\mathcal{O}_7$: Photon	✓	
$\mathcal{O}_9$: Vector	✓	
$\mathcal{O}_{10}$: Axial-Vector	✓	✓
$\mathcal{O}_{S,P}$: (Pseudo)-Scalar	(✓)	✓

K. Petridis, Moriond QCD 2014

$\mathcal{B}(B^0_{(s)} \to \mu^+\mu^-)$ nel Modello Standard

Eur. Phys. J. C 72 (2012) 2172
JHEP 07 (2013) 077

$$\mathcal{B}^{(0)}_{s,\mathrm{SM}} = \frac{G_F^2}{\pi}\left[\frac{\alpha_{\mathrm{em}}(M_Z)}{4\pi\sin^2\theta_W}\right]^2 \tau_{B_s} f_{B_s}^2 m_{B_s} m_\mu^2 \times \sqrt{1-\frac{4m_\mu^2}{m_{B_s}^2}}\left|V_{\mathrm{tb}}^* V_{\mathrm{ts}}\right|^2 Y^2(x_{tW}, x_{ht}; \alpha_s)$$

$\mathcal{B}(B^0_{(s)} \to \mu^+\mu^-)$ nel Modello Standard

Eur. Phys. J. C 72 (2012) 2172
JHEP 07 (2013) 077

$$\mathcal{B}^{(0)}_{s,\mathrm{SM}} = \frac{G_F^2}{\pi}\left[\frac{\alpha_{\mathrm{em}}(M_Z)}{4\pi\sin^2\theta_W}\right]^2 \tau_{B_s} f_{B_s}^2 m_{B_s} m_\mu^2 \times \sqrt{1-\frac{4m_\mu^2}{m_{B_s}^2}}\left|V_{\mathrm{tb}}^* V_{\mathrm{ts}}\right|^2 Y^2(x_{tW}, x_{ht}; \alpha_s)$$

Espressione fenomenologica per la frazione di decadimento:

$$\mathcal{B}^{(0)}_{s,\mathrm{SM}} = 3.2348\times 10^{-9} \times \left(\frac{M_t}{173.2\ \mathrm{GeV}}\right)^{3.07}\left(\frac{f_{B_s}}{227\ \mathrm{MeV}}\right)^2 \times \left(\frac{\tau_{B_s}}{1.466\ \mathrm{ps}}\right)\left|\frac{V_{\mathrm{tb}}^* V_{\mathrm{ts}}}{4.05\times 10^{-2}}\right|^2$$

$\mathcal{B}(B^0_{(s)} \to \mu^+\mu^-)$ nel Modello Standard

Eur. Phys. J. C 72 (2012) 2172
JHEP 07 (2013) 077

$$\mathcal{B}^{(0)}_{s,\mathrm{SM}} = \frac{G_F^2}{\pi}\left[\frac{\alpha_{\mathrm{em}}(M_Z)}{4\pi \sin^2\theta_W}\right]^2 \tau_{B_s} f_{B_s}^2 m_{B_s} m_\mu^2 \times \sqrt{1-\frac{4m_\mu^2}{m_{B_s}^2}}\left|V_{\mathrm{tb}}^* V_{\mathrm{ts}}\right|^2 Y^2(x_{tW}, x_{ht}; \alpha_s)$$

Espressione fenomenologica per la frazione di decadimento:

$$\mathcal{B}^{(0)}_{s,\mathrm{SM}} = 3.2348 \times 10^{-9} \times \boxed{\left(\frac{M_t}{173.2\ \mathrm{GeV}}\right)^{3.07}} \left(\frac{f_{B_s}}{227\ \mathrm{MeV}}\right)^2 \times \left(\frac{\tau_{B_s}}{1.466\ \mathrm{ps}}\right)\left|\frac{V_{\mathrm{tb}}^* V_{\mathrm{ts}}}{4.05 \times 10^{-2}}\right|^2$$

Valori usati nella previsione teorica

Tevatron: M_t = 173.2 ± 0.9 GeV → 1.6%

$\mathcal{B}(B^0_{(s)} \to \mu^+\mu^-)$ nel Modello Standard

Eur. Phys. J. C 72 (2012) 2172
JHEP 07 (2013) 077

$$\mathcal{B}^{(0)}_{s,\mathrm{SM}} = \frac{G_F^2}{\pi}\left[\frac{\alpha_{\mathrm{em}}(M_Z)}{4\pi \sin^2\theta_W}\right]^2 \tau_{B_s} f_{B_s}^2 m_{B_s} m_\mu^2 \times \sqrt{1-\frac{4m_\mu^2}{m_{B_s}^2}}\left|V_{\mathrm{tb}}^* V_{\mathrm{ts}}\right|^2 Y^2(x_{tW}, x_{ht}; \alpha_s)$$

Espressione fenomenologica per la frazione di decadimento:

$$\mathcal{B}^{(0)}_{s,\mathrm{SM}} = 3.2348 \times 10^{-9} \times \left(\frac{M_t}{173.2\ \mathrm{GeV}}\right)^{3.07} \boxed{\left(\frac{f_{B_s}}{227\ \mathrm{MeV}}\right)^2} \times \left(\frac{\tau_{B_s}}{1.466\ \mathrm{ps}}\right)\left|\frac{V_{\mathrm{tb}}^* V_{\mathrm{ts}}}{4.05 \times 10^{-2}}\right|^2$$

Valori usati nella previsione teorica

Tevatron: M_t = 173.2 ± 0.9 GeV → 1.6%
Lattice QCD: f_{B_s} = 227 ± 8 MeV → 7%

$\mathcal{B}(B^0_{(s)} \to \mu^+\mu^-)$ nel Modello Standard

Eur. Phys. J. C 72 (2012) 2172
JHEP 07 (2013) 077

$$\mathcal{B}^{(0)}_{s,\mathrm{SM}} = \frac{G_F^2}{\pi}\left[\frac{\alpha_{\mathrm{em}}(M_Z)}{4\pi\sin^2\theta_W}\right]^2 \tau_{B_s} f_{B_s}^2 m_{B_s} m_\mu^2 \times \sqrt{1-\frac{4m_\mu^2}{m_{B_s}^2}}\left|V_{\mathrm{tb}}^* V_{\mathrm{ts}}\right|^2 Y^2(x_{tW}, x_{ht}; \alpha_s)$$

Espressione fenomenologica per la frazione di decadimento:

$$\mathcal{B}^{(0)}_{s,\mathrm{SM}} = 3.2348\times10^{-9}\times\left(\frac{M_t}{173.2\ \mathrm{GeV}}\right)^{3.07}\left(\frac{f_{B_s}}{227\ \mathrm{MeV}}\right)^2\times\boxed{\left(\frac{\tau_{B_s}}{1.466\ \mathrm{ps}}\right)}\left|\frac{V_{\mathrm{tb}}^* V_{\mathrm{ts}}}{4.05\times10^{-2}}\right|^2$$

Valori usati nella previsione teorica

Tevatron: M_t = 173.2 ± 0.9 GeV → 1.6%
Lattice QCD: f_{B_s} = 227 ± 8 MeV → 7%
PDG: τ_{B_s} = 1.516 ± 0.011 ps → 0.7%

$\mathcal{B}(B^0_{(s)} \to \mu^+\mu^-)$ nel Modello Standard

Eur. Phys. J. C 72 (2012) 2172
JHEP 07 (2013) 077

$$\mathcal{B}^{(0)}_{s,\mathrm{SM}} = \frac{G_F^2}{\pi}\left[\frac{\alpha_{\mathrm{em}}(M_Z)}{4\pi \sin^2\theta_W}\right]^2 \tau_{B_s} f_{B_s}^2 m_{B_s} m_\mu^2 \times \sqrt{1-\frac{4m_\mu^2}{m_{B_s}^2}}\left|V_{\mathrm{tb}}^* V_{\mathrm{ts}}\right|^2 Y^2(x_{tW}, x_{ht}; \alpha_s)$$

Espressione fenomenologica per la frazione di decadimento:

$$\mathcal{B}^{(0)}_{s,\mathrm{SM}} = 3.2348 \times 10^{-9} \times \left(\frac{M_t}{173.2\ \mathrm{GeV}}\right)^{3.07} \left(\frac{f_{B_s}}{227\ \mathrm{MeV}}\right)^2 \times \left(\frac{\tau_{B_s}}{1.466\ \mathrm{ps}}\right) \boxed{\left|\frac{V_{\mathrm{tb}}^* V_{\mathrm{ts}}}{4.05 \times 10^{-2}}\right|^2}$$

Valori usati nella previsione teorica

Tevatron: M_t = 173.2 ± 0.9 GeV → 1.6%
Lattice QCD: f_{B_s} = 227 ± 8 MeV → 7%
PDG: τ_{B_s} = 1.516 ± 0.011 ps → 0.7%
CKM: $\mathrm{Re}(V^*_{tb}V_{ts})$ = 4.05 ± 0.08 ×10^{-2} → 4%

$\mathcal{B}(B^0_{(s)} \to \mu^+\mu^-)$ nel Modello Standard

Eur. Phys. J. C 72 (2012) 2172
JHEP 07 (2013) 077

$$\mathcal{B}^{(0)}_{s,\mathrm{SM}} = \frac{G_F^2}{\pi}\left[\frac{\alpha_{\mathrm{em}}(M_Z)}{4\pi \sin^2\theta_W}\right]^2 \tau_{B_s} f_{B_s}^2 m_{B_s} m_\mu^2 \times \sqrt{1-\frac{4m_\mu^2}{m_{B_s}^2}}\left|V_{\mathrm{tb}}^* V_{\mathrm{ts}}\right|^2 Y^2(x_{tW}, x_{ht}; \alpha_s)$$

Espressione fenomenologica per la frazione di decadimento:

$$\mathcal{B}^{(0)}_{s,\mathrm{SM}} = 3.2348 \times 10^{-9} \times \left(\frac{M_t}{173.2\ \mathrm{GeV}}\right)^{3.07} \left(\frac{f_{B_s}}{227\ \mathrm{MeV}}\right)^2 \times \left(\frac{\tau_{B_s}}{1.466\ \mathrm{ps}}\right) \left|\frac{V_{\mathrm{tb}}^* V_{\mathrm{ts}}}{4.05 \times 10^{-2}}\right|^2$$

Valori usati nella previsione teorica

Tevatron: M_t = 173.2 ± 0.9 GeV → 1.6%
Lattice QCD: f_{B_s} = 227 ± 8 MeV → 7%
PDG: τ_{B_s} = 1.516 ± 0.011 ps → 0.7%
CKM: $\mathrm{Re}(V^*_{tb}V_{ts})$ = 4.05 ± 0.08 ×10^{-2} → 4%

Valori confrontabili con i dati

- Correzioni radiative (γ "soft")
- Effetto di $\Delta\Gamma_s$

$\mathcal{B}(B_s \to \mu\mu)$ = (3.56 ± 0.30) × 10^{-9}
$\mathcal{B}(B^0 \to \mu\mu)$ = (1.07 ± 0.10) × 10^{-10}

$\mathcal{B}(B^0_{(s)} \to \mu^+\mu^-)$ nel Modello Standard

Eur. Phys. J. C 72 (2012) 2172
JHEP 07 (2013) 077

$$\mathcal{B}^{(0)}_{s,\mathrm{SM}} = \frac{G_F^2}{\pi}\left[\frac{\alpha_{\mathrm{em}}(M_Z)}{4\pi \sin^2\theta_W}\right]^2 \tau_{B_s} f_{B_s}^2 m_{B_s} m_\mu^2 \times \sqrt{1-\frac{4m_\mu^2}{m_{B_s}^2}}\left|V_{\mathrm{tb}}^* V_{\mathrm{ts}}\right|^2 Y^2(x_{tW}, x_{ht}; \alpha_s)$$

Espressione fenomenologica per la frazione di decadimento:

$$\mathcal{B}^{(0)}_{s,\mathrm{SM}} = 3.2348 \times 10^{-9} \times \left(\frac{M_t}{173.2\ \mathrm{GeV}}\right)^{3.07} \left(\frac{f_{B_s}}{227\ \mathrm{MeV}}\right)^2 \times \left(\frac{\tau_{B_s}}{1.466\ \mathrm{ps}}\right) \left|\frac{V_{\mathrm{tb}}^* V_{\mathrm{ts}}}{4.05 \times 10^{-2}}\right|^2$$

Valori usati nella previsione teorica

Tevatron: M_t = 173.2 ± 0.9 GeV → 1.6%
Lattice QCD: f_{B_s} = 227 ± 8 MeV → 7%
PDG: τ_{B_s} = 1.516 ± 0.011 ps → 0.7%
CKM: $\mathrm{Re}(V^*_{tb}V_{ts})$ = 4.05 ± 0.08 ×10^{-2} → 4%

Valori confrontabili con i dati

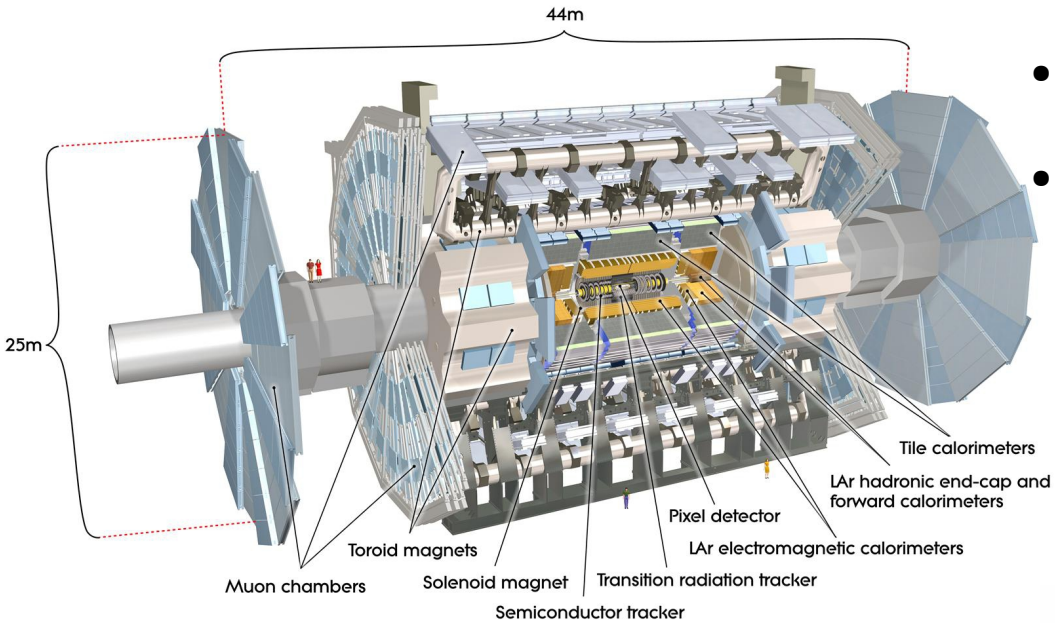
- Correzioni radiative (γ "soft")
- Effetto di $\Delta\Gamma_s$

$\mathcal{B}(B_s \to \mu\mu)$ = (3.56 ± 0.30) × 10^{-9}
$\mathcal{B}(B^0 \to \mu\mu)$ = (1.07 ± 0.10) × 10^{-10}

- Alcuni sviluppi recenti nella teoria
  - Riduzione dell'**incertezza su f_{B_s}** (errore ~2.7%) FLAC (lattice average) 2013
  - Migliore stima delle **correzioni elettrodeboli** PRD 89 (2014) 034023, PRL 112 (2014) 101801

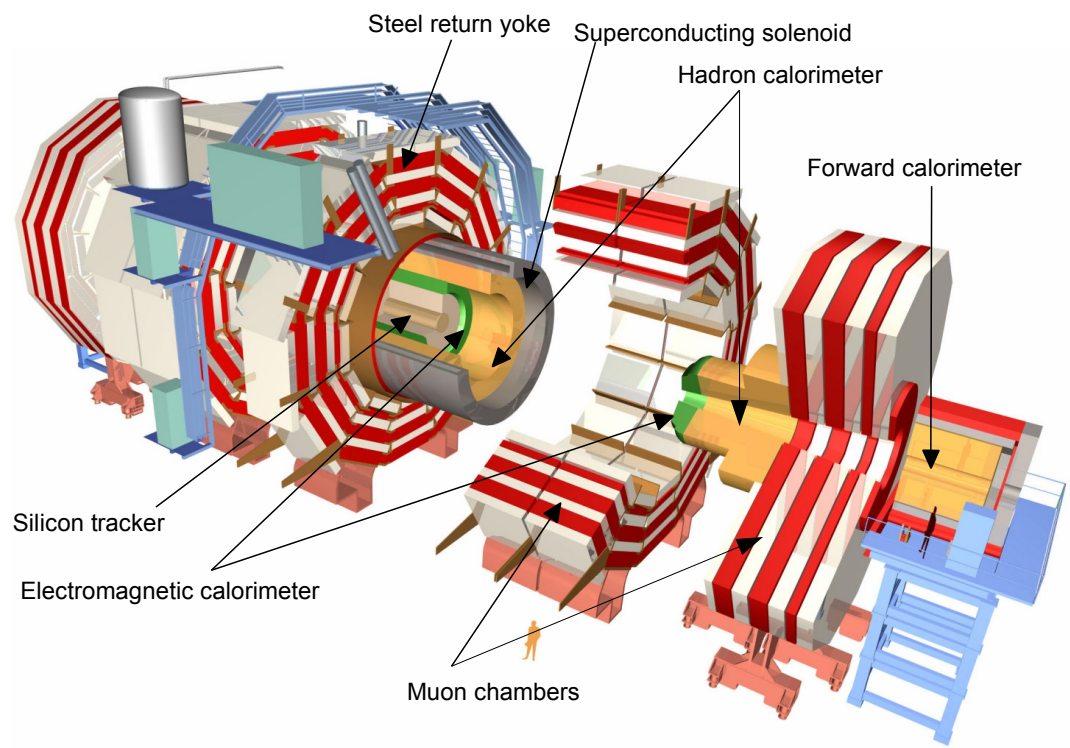
ATLAS e CMS

ATLAS: JINST 3 (2008) S08003
CMS: JINST 3 (2008) S08004



- Rivelatori non dedicati alla fisica del b
- Segnatura basata su **muoni** nello stato finale
  - Misura di $B \to \mu\mu$ basata principalmente sui **tracciatori** e sui **rivelatori per muoni** per il trigger e la ricostruzione

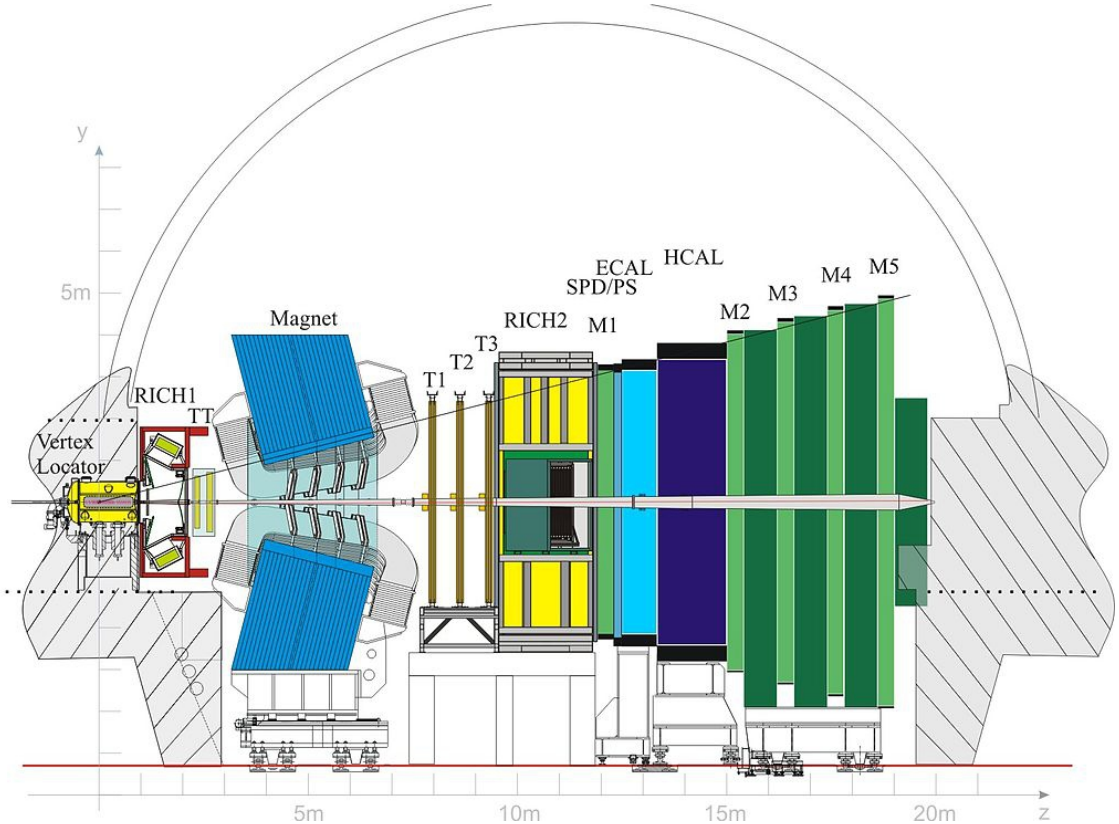
- Durante il Run 1 di LHC raccolti **~25 fb^{-1}** di dati da ciascun esperimento
- I risultati mostrati nel seguito sono basati su
  - ~5 fb^{-1} (2011) per ATLAS
  - ~5 fb^{-1} (2011) + ~20 fb^{-1} (2012) per CMS



LHCb

LHCb: JINST 3 (2008) S08005

- **Rivelatore dedicato** alla fisica del c e del b
- Copre la regione di pseudorapidità in avanti ($2 < \eta < 5$)
- Luminosità livellata: raccolti 3 fb^{-1} di dati nel Run 1 di LHC
  - 1 fb^{-1} nel 2011 e 2 fb^{-1} nel 2012
- Minore luminosità raccolta compensata dalla maggiore σ di produzione di b in avanti



Strategia generale

- **Alta reiezione del fondo**
  - Selezioni stringenti sui muoni per ridurre i fondi adronici (π, K, p) $\longrightarrow \mu$
  - Approccio basato su tecniche multivariate (BDT) per selezionare gli eventi di segnale dai fondi
- **Analisi "blind"**: scoprire la regione di segnale solo dopo aver congelato i tagli
  - Uso della simulazione per stimare l'effetto sul segnale e la sensibilità attesa
- Uso di **canali di normalizzazione** per ridurre i sistematici:

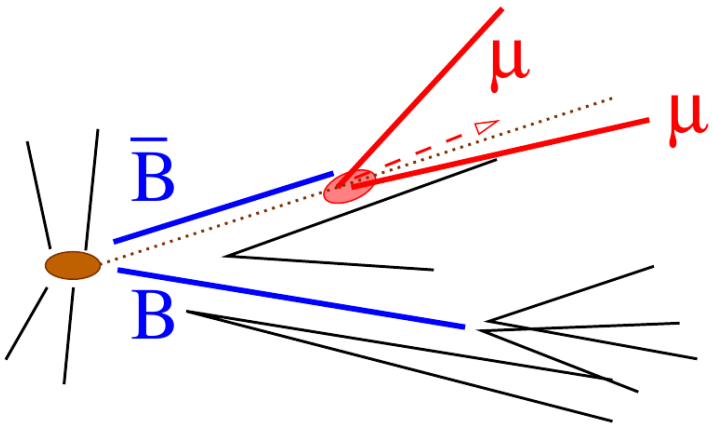
$$\mathcal{B} = \mathcal{B}_{\text{norm}} \frac{\epsilon_{\text{norm}}}{\epsilon_{\text{sig}}} \frac{f_{\text{norm}}}{f_{d(s)}} \frac{N_{B^0_{(s)} \to \mu^+\mu^-}}{N_{\text{norm}}}$$

  - **$B^+ \longrightarrow J/\psi K^+$** (ATLAS, CMS)
  - **$B^+ \longrightarrow J/\psi K^+$, $B^0 \longrightarrow K^+\pi^-$** (LHCb)
- **$B_s \longrightarrow J/\psi\phi$** come **canale di controllo** della simulazione del segnale
- Estrazione di limiti superiori a $\mathcal{B}$ con CL_s (ATLAS, CMS, LHCb)
- Misura di $\mathcal{B}$ tramite fit basati su likelihood (CMS, LHCb)

Caratteristiche del segnale

ATLAS: ATLAS-CONF-2013-076 (2013)
CMS: PRL 111 (2013) 101804
LHCb: PRL 111 (2013) 101805

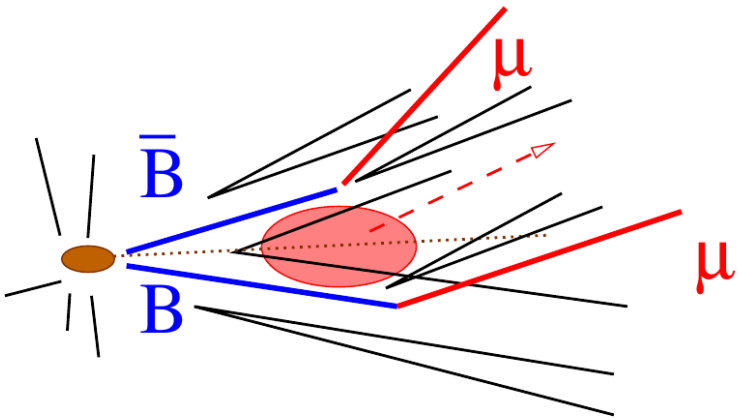
- **Due muoni** provenienti da un decadimento di B
  - Vertice secondario
  - Impulso del di-μ allineato con la direzione di volo
  - Massa $m_{\mu\mu}$ vicina alla massa nominale del $B^0_{(s)}$
  - Isolamento dei due μ



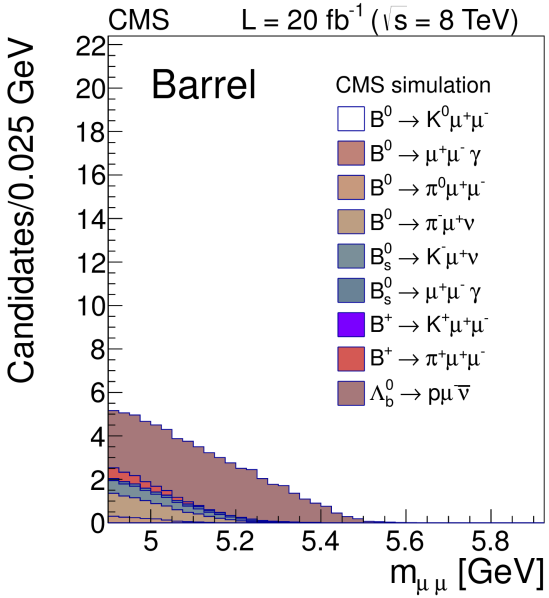
- **Trigger e preselezione del segnale**
  - Trigger di-μ (ATLAS, CMS) o mono- e di-μ (LHCb)
  - $p_T^\mu > 4$ GeV, $|\eta^\mu| < 2.5$ (ATLAS, CMS), $0.25 < p_T^\mu < 40$ GeV, $p^\mu < 500$ GeV, $2 < \eta^\mu < 5$ (LHCb)
  - Tagli su vertice, lunghezza di volo, parametro d'impatto (dipendenti dall'esperimento)
  - Massa invariante $m_{\mu\mu}$ nell'intorno delle masse del B^0/B_s
    - $4.766 < m_{\mu\mu} < 5.966$ GeV (ATLAS)
    - $4.9 < m_{\mu\mu} < 5.9$ GeV (CMS)
    - $4.9 < m_{\mu\mu} < 6.0$ GeV (LHCb)

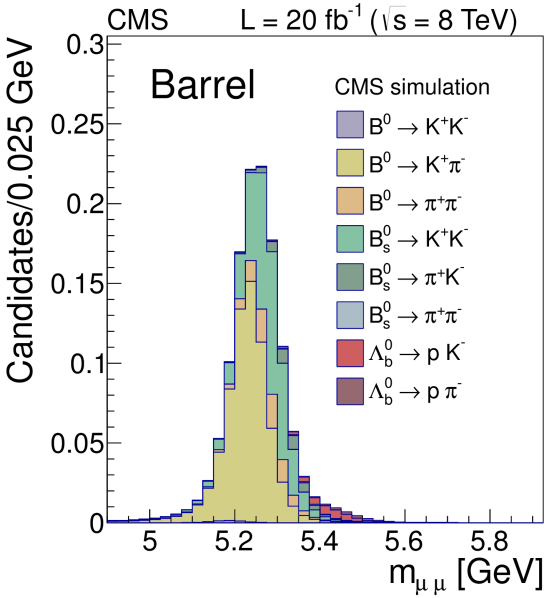
Fondi principali

- **Fondo combinatorio**: principalmente di-μ veri provenienti da processi non correlati
  - Piatto attorno alla regione di segnale
  - Si stima a partire dalle sideband nei dati



- **Fondi semileptonici**: decadimenti di adroni B in μμ+X, o in (π, K, p)+μν con l'adrone misidentificato come μ
- **Fondi piccati**: decadimenti di adroni B⟶hh′ (h, h′ = π, K, p), con entrambi gli adroni misidentificati come μ
  - Si studiano a partire dalle simulazioni



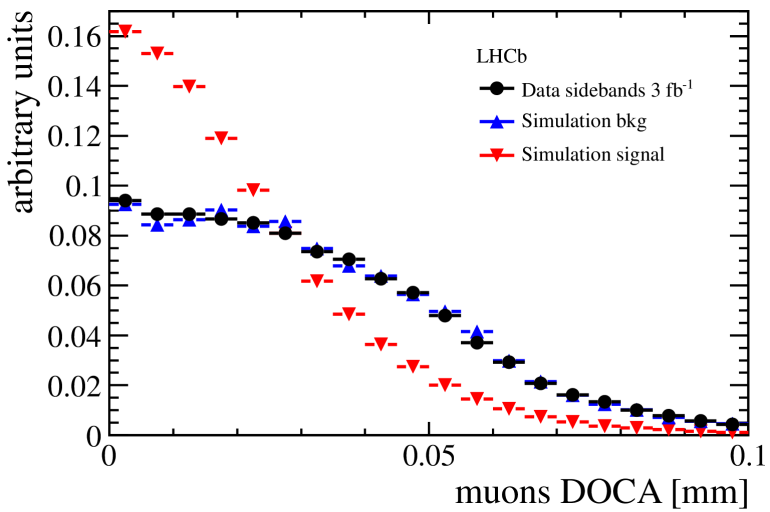


Reiezione dei fondi

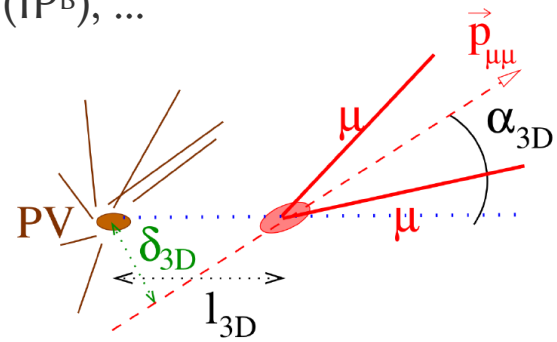
ATLAS: ATLAS-CONF-2013-076 (2013)
CMS: PRL 111 (2013) 101804
LHCb: PRL 111 (2013) 101805

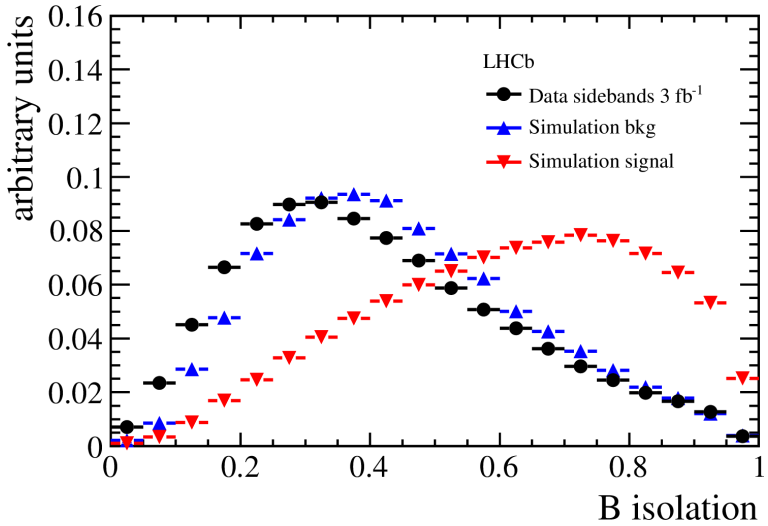
- Stretti **tagli di qualità** (ATLAS e LHCb) o BDT (CMS) per selezionare i μ veri
  - Necessari per ridurre il fondo piccato da B⟶hh′ e il fondo semileptonico

Probabilità di ricostruire un adrone come μ (%)			
	$\pi^{\pm}$	K^{+}/K^{-}	p
ATLAS	0.21	0.41/0.33	--
CMS	0.05-0.13	0.08-0.22	0.04-0.15



- **Selezione del segnale basata su BDT**
- Variabili usate dipendenti dall'esperimento
- In generale, variabili relative a
  - Traiettoria e tempo di volo
    - α_{2D}, α_{3D}, l_{3D}, δ_{3D}, $IP^{B}/\sigma(IP^{B})$, ...
  - Isolamento
    - N_{trk}^{close}, I^{B}, I^{μ}, ...
  - Vertice dei due muoni
    - $DOCA^{\mu\mu}$, χ^2_{vtx}, ...



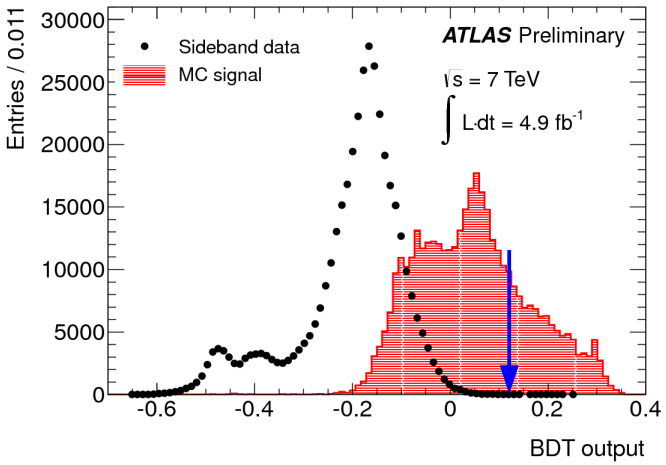


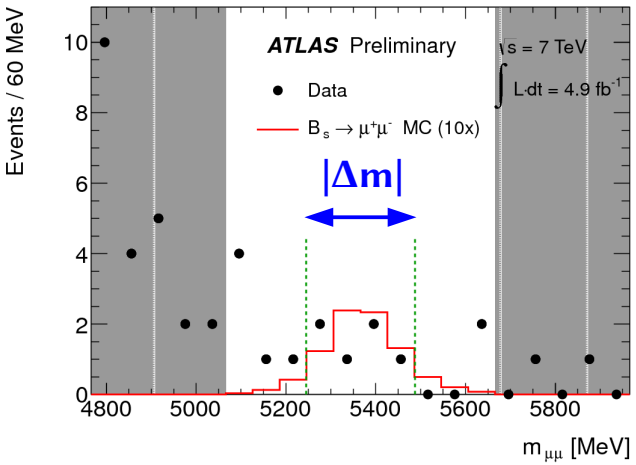
Misura di ATLAS

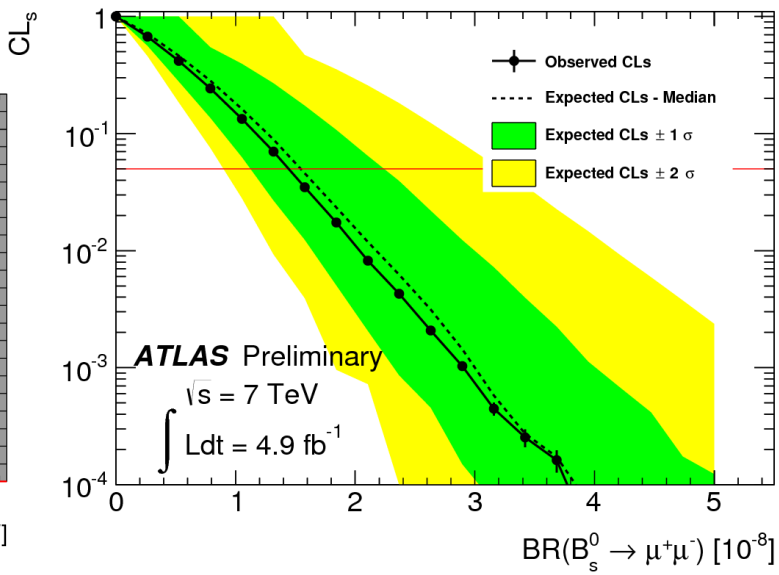
ATLAS: ATLAS-CONF-2013-076 (2013)

- Analizzati solo 4.9 fb^{-1} di dati a 7 TeV del run 2011 per il momento
  - Non ancora sufficienti per misurare la frazione di decadimento del B_s
- BDT addestrata con eventi di segnale e di fondo simulati ($B_s \to \mu\mu$ e $b\bar{b} \to \mu\mu X$)
  - Tagli ottimizzati utilizzando le sideband nei dati: **BDT output > 0.118** e finestra di massa **|Δm| < 121 MeV**
- Limite superiore a $\mathcal{B}(B_s \to \mu\mu)$ con il metodo CL_s

	95% CL ($\times 10^{-8}$)	**90% CL ($\times 10^{-8}$)**
Osservato	1.5	1.2
Previsto	$1.6^{+0.7}_{-0.4}$	$1.3^{+0.7}_{-0.4}$



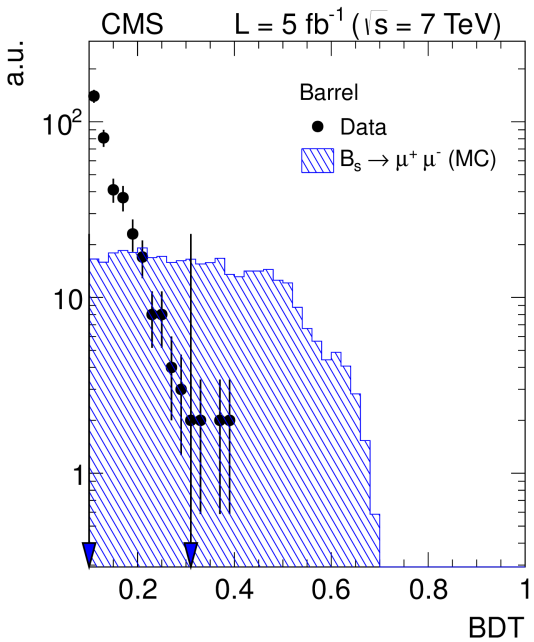


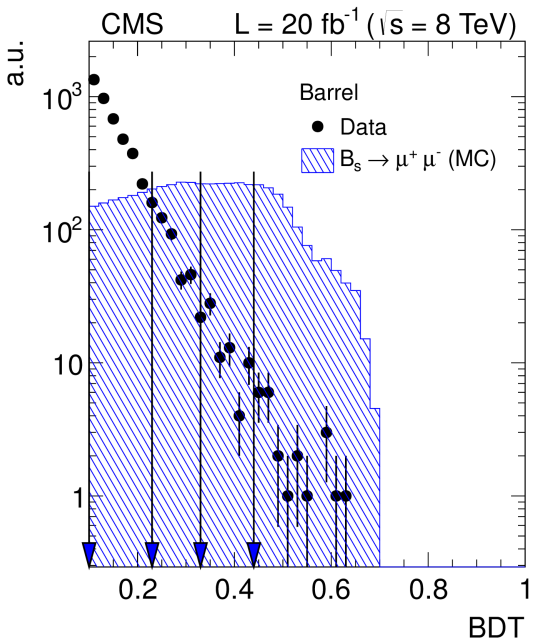


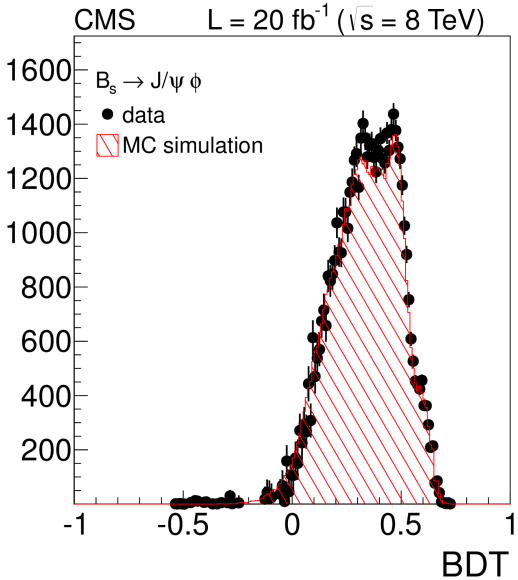
CMS: BDT

CMS: PRL 111 (2013) 101804

- **4 diverse classi di eventi**: (2011, 2012) × (barrel, endcap)
  - Barrel se $|\eta^{\mu}| < 1.4$ per entrambi i μ, endcap negli altri casi
- BDT addestrate con **segnale da MC** e **fondo da sideband nei dati**
  - Eventi di fondo in ogni classe divisi casualmente in **3 campioni distinti**
    - **Ad**destramento, **T**est, **Ap**plicazione
  - Campioni **ruotati ciclicamente** per sfruttare l'intero potere statistico dei dati
    - **BDT1**: Ad:1 ⟶ T:2 ⟶ Ap:3
    - **BDT2**: Ad:2 ⟶ T:3 ⟶ Ap:1
    - **BDT3**: Ad:3 ⟶ T:1 ⟶ Ap:2
  - **12 diverse BDT**, statisticamente equivalenti a gruppi di tre
- Output testato sul campione di controllo $B_s \longrightarrow J/\psi\phi$



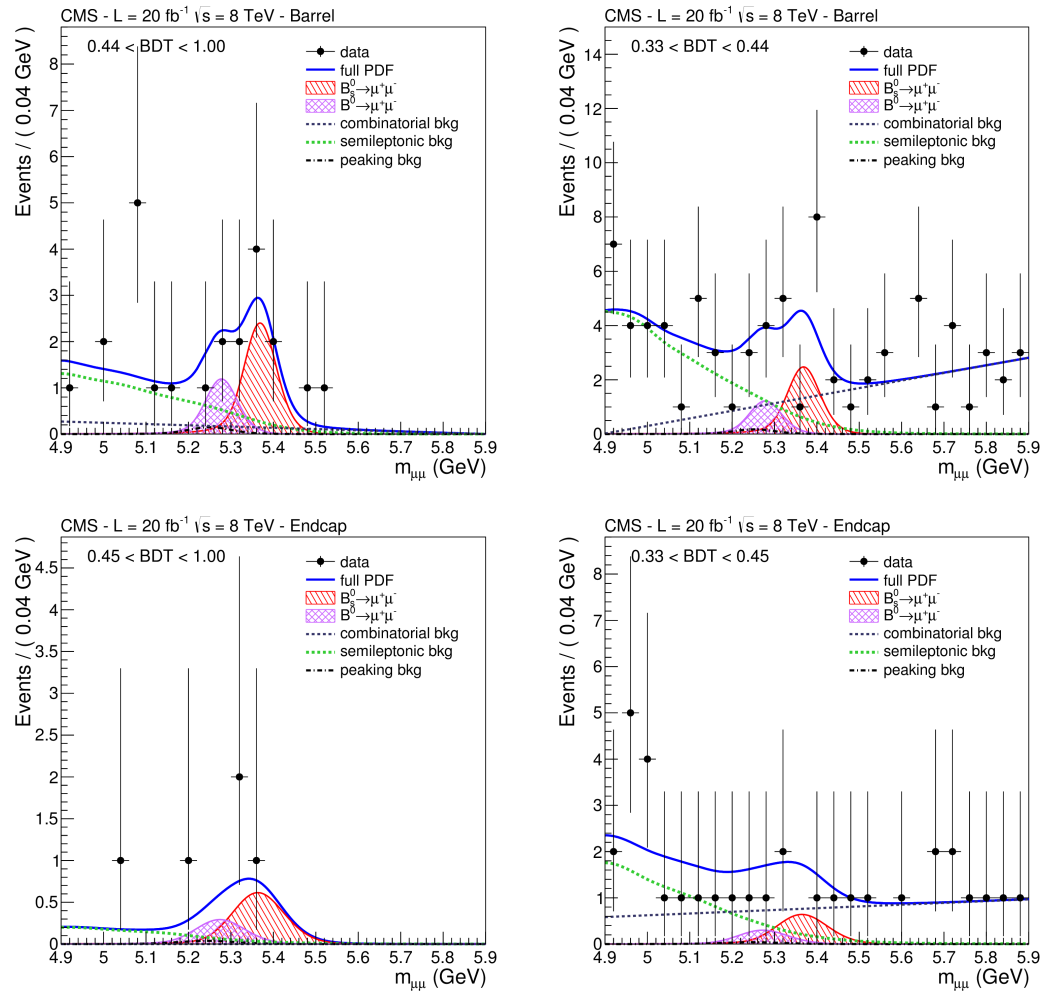




CMS: fit

CMS: PRL 111 (2013) 101804

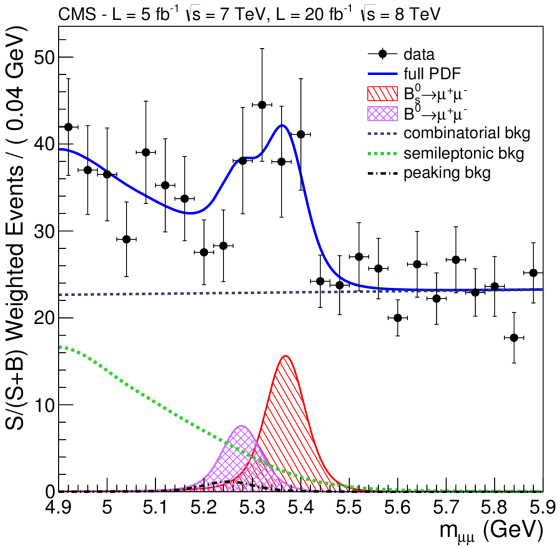
- Suddivisi gli eventi in 2(4) **bin** per barrel e endcap 2011(2012) in base all'output della BDT
  - Uguale N_{sig} atteso in ogni bin
  - Intera statistica di segnale
  - Fit simultaneo in ciascun bin
- PDF da MC
  - Segnale (Crystal Ball)
  - Fondo piccato (Crystal Ball + gaussiana)
  - Fondo semileptonico (Kernel gaussiani)
  - Fondo combinatorio modellato con un polinomio di 1° grado
- Sistematici inclusi nel fit come vincoli gaussiani



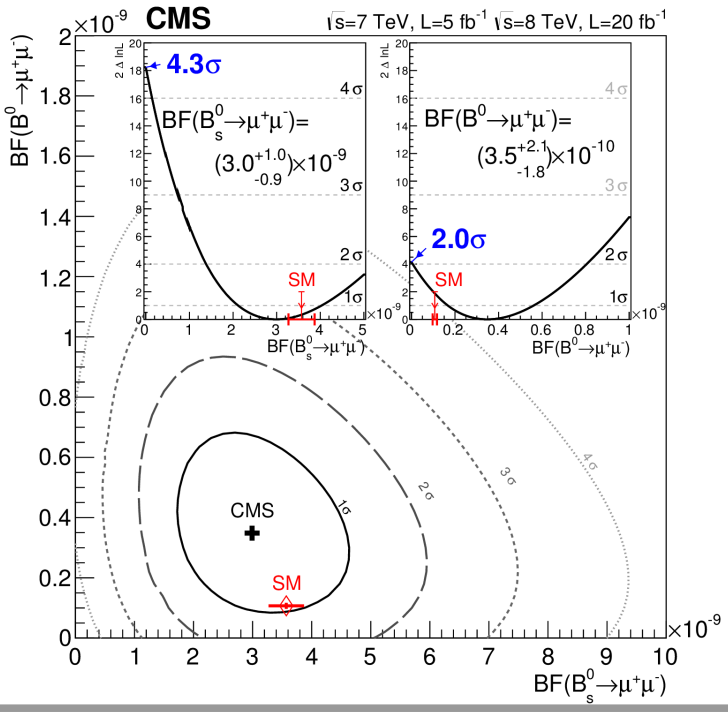
Fit sui dati 2012 per le categorie con maggiore S/B nel barrel (sopra) e nell'endcap (sotto)

CMS: risultati

CMS: PRL 111 (2013) 101804

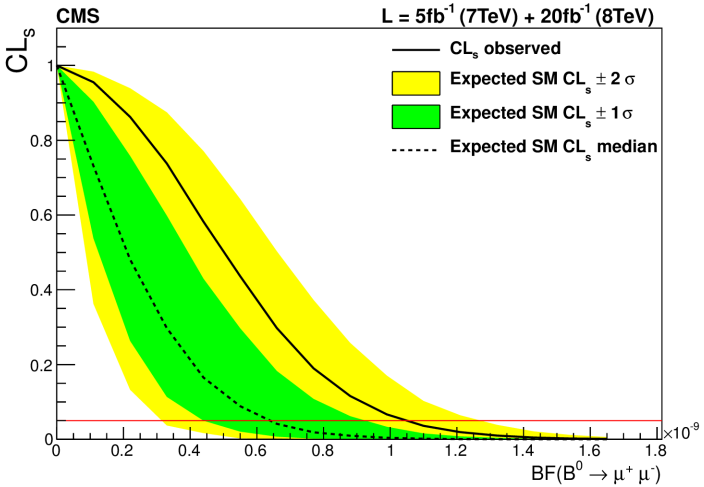


Combinazione delle diverse categorie pesata su S/(S+B)



- $\mathcal{B}(B_s \to \mu\mu) = 3.0^{+1.0}_{-0.9} \times 10^{-9}$
  - Significanza di **4.3 σ**
- $\mathcal{B}(B^0 \to \mu\mu) = 3.5^{+2.1}_{-1.8} \times 10^{-10}$
  - Significanza di **2.0 σ**
- Risultati **compatibili con le previsioni del Modello Standard** entro 1 σ

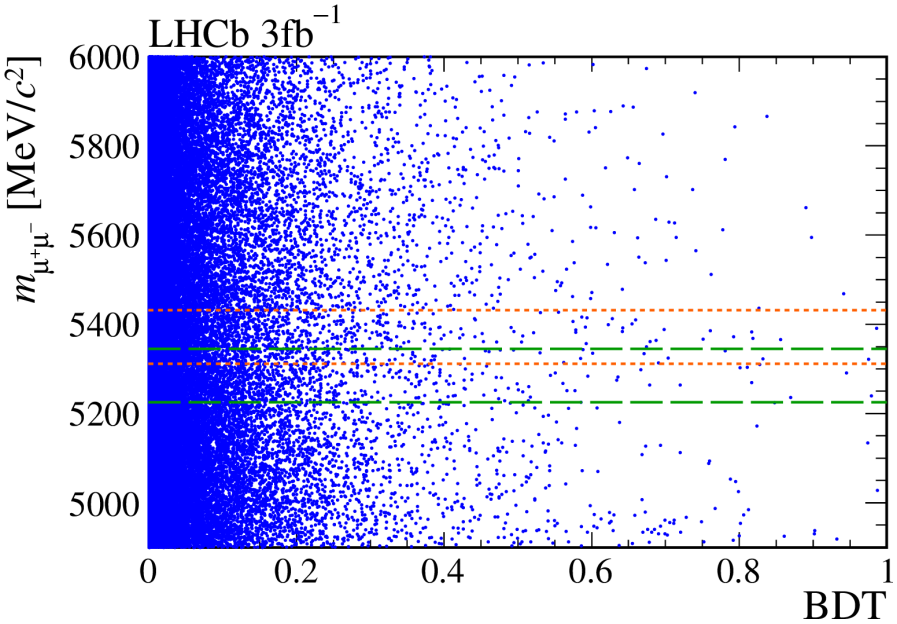
- **Limite superiore a $\mathcal{B}(B^0 \to \mu\mu)$** con il metodo CL_s
- Utilizzato un metodo diverso rispetto alla misura della frazione di decadimento
  - **Taglio sull'output della BDT** dipendente da periodo (2011-2012) e pseudorapidità (barrel-endcap)
- **$\mathcal{B}(B^0 \to \mu\mu) < 1.1 \times 10^{-9}$ a 95% CL**

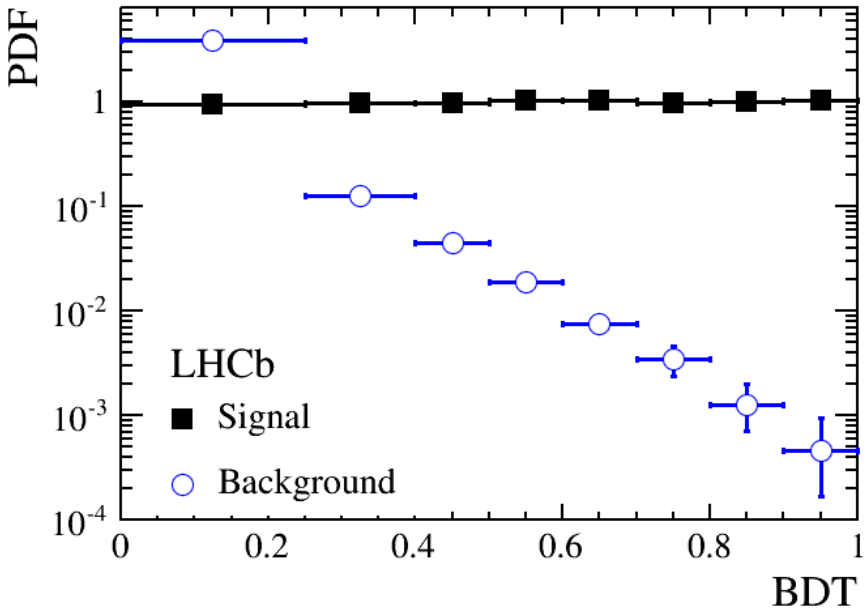


LHCb: BDT e normalizzazione

LHCb: PRL 111 (2013) 101805

- **Una sola classe di eventi** (invece delle 4 di CMS)
  - Condizioni simili tra 2011 e 2012
  - Nessuna divisione tra barrel e endcap
- BDT addestrata con solo la simulazione
  - **$B_s \to \mu\mu$** per il segnale
  - **$b\bar{b} \to \mu\mu X$** per il fondo
- **MC calibrato sui dati** usando
  - $B \to hh'$ per il segnale
  - Sideband di massa di $B \to \mu\mu$ per i fondi
- **Due canali di normalizzazione**
  - **$B^+ \to J/\psi K^+$** (1.1×10^6 eventi)
  - **$B^0 \to K^+\pi^-$** (3.8×10^4 eventi)
  - Risultato dato dalla media pesata dei due

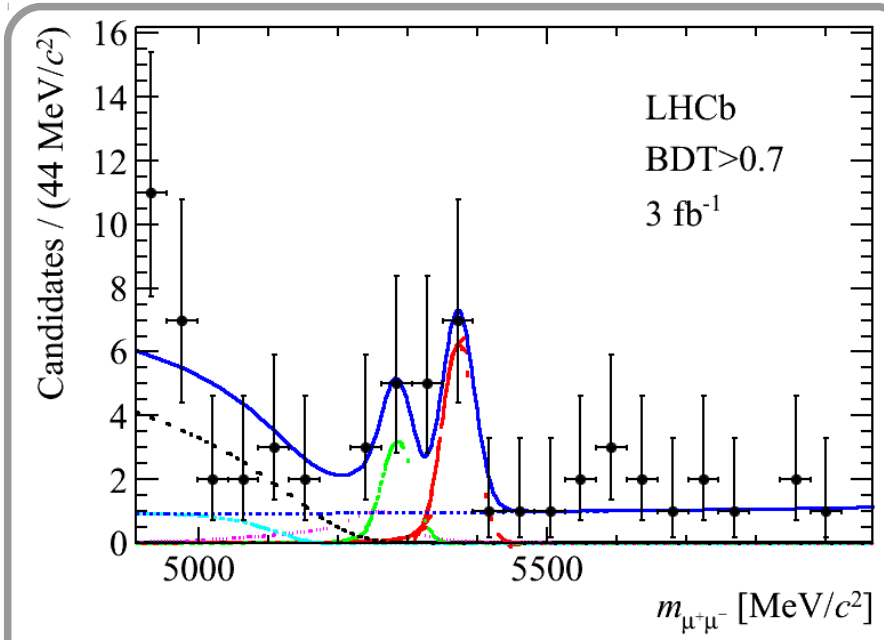




LHCb: f_s/f_d e fit

LHCb: PRL 111 (2013) 101805

- **f_s/f_d determinato *in situ*** usando
  - Decadimenti semileptonici: rapporto tra $B_s \to D_s \mu X$ e $B \to D^+ \mu X$
  - Decadimenti adronici: rapporto tra $B_s \to D_s \pi^+$ e $B^0 \to D^- \pi^+$
- **$f_s/f_d = 0.259 \pm 0.015$**
  - **Valore usato anche da CMS**, con un errore aggiuntivo del 5% legato all'estrapolazione alla regione cinematica diversa
- Divisi tutti gli eventi in 8 bin in base all'output della BDT
- **Fit simultaneo sugli 8 bin**
  - Forme di tutte le componenti costrette alla simulazione
  - Normalizzazione del fondo combinatorio e del segnale libere
  - Fondi piccati e semileptonici vincolati alla previsione del MC



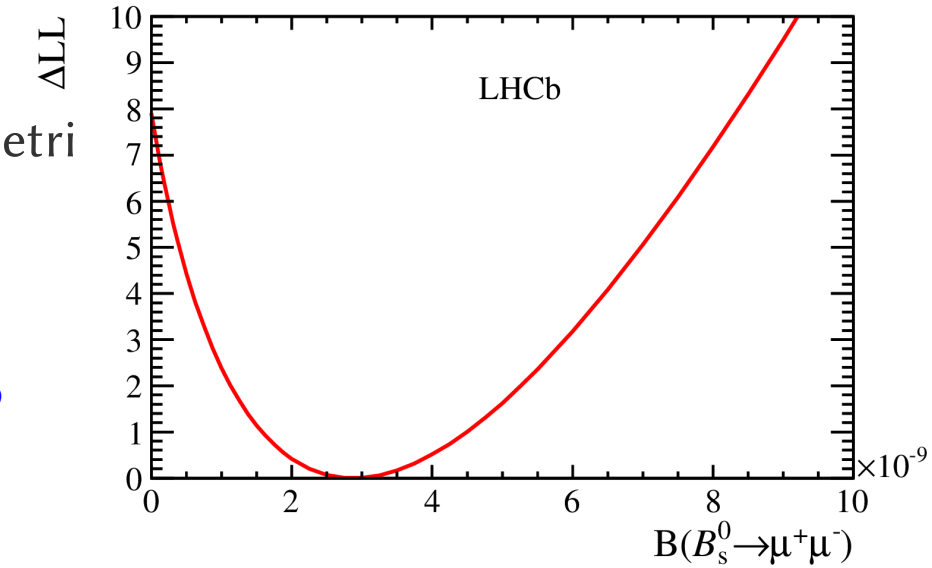
Fit nei tre bin con S/B più alto (BDT > 0.7)

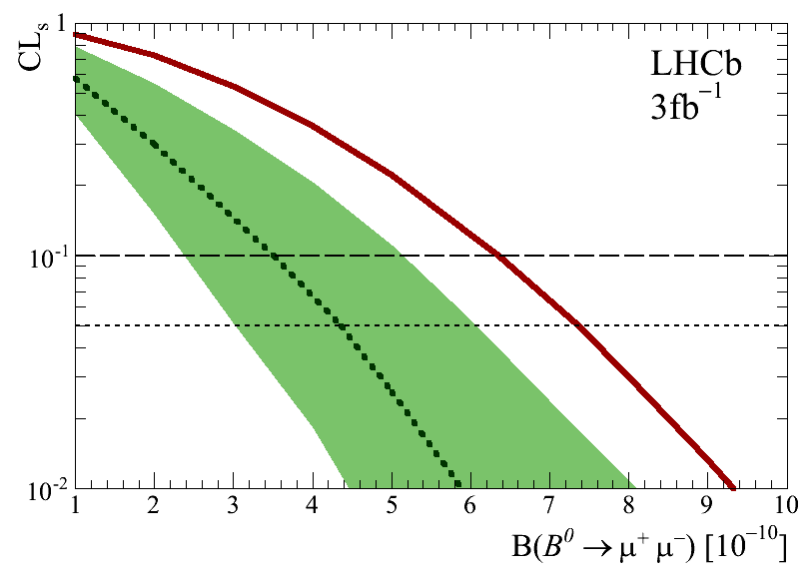
LHCb: risultati

LHCb: PRL 111 (2013) 101805

- Incertezze sistematiche inserite nella likelihood e calcolate insieme a quella statistica
  - Stima separata dell'incertezza statistica ottenuta eseguendo un fit con tutti i parametri fissati eccetto $\mathcal{B}(B_s \to \mu\mu)$ e $\mathcal{B}(B^0 \to \mu\mu)$
- **Risultati**
- $\mathcal{B}(B_s \to \mu\mu) = 2.9\,^{+1.1}_{-1.0}\,(\text{stat})\,^{+0.3}_{-0.1}\,(\text{sist}) \times 10^{-9}$
  - Significanza di **4.0 σ**
- $\mathcal{B}(B^0 \to \mu\mu) = 3.7\,^{+2.4}_{-2.1}\,(\text{stat})\,^{+0.6}_{-0.4}\,(\text{sist}) \times 10^{-10}$
  - Significanza di **2.0 σ**
- **Limite superiore a $\mathcal{B}(B^0 \to \mu\mu)$** con CL_s

	90% CL	95% CL
Atteso fondo	3.5×10^{-10}	4.4×10^{-10}
Atteso fondo+SM	4.5×10^{-10}	5.4×10^{-10}
Osservato	6.3×10^{-10}	7.4×10^{-10}





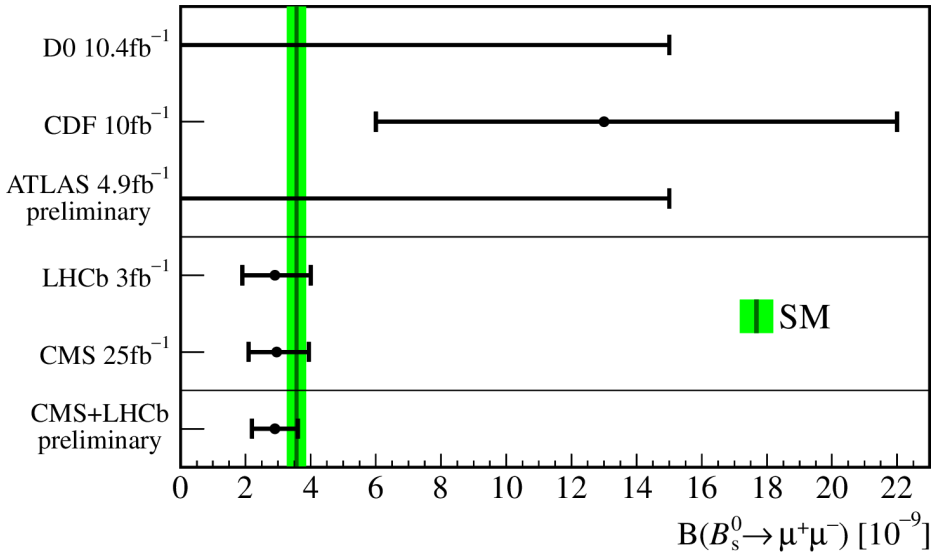
Combinazione CMS-LHCb

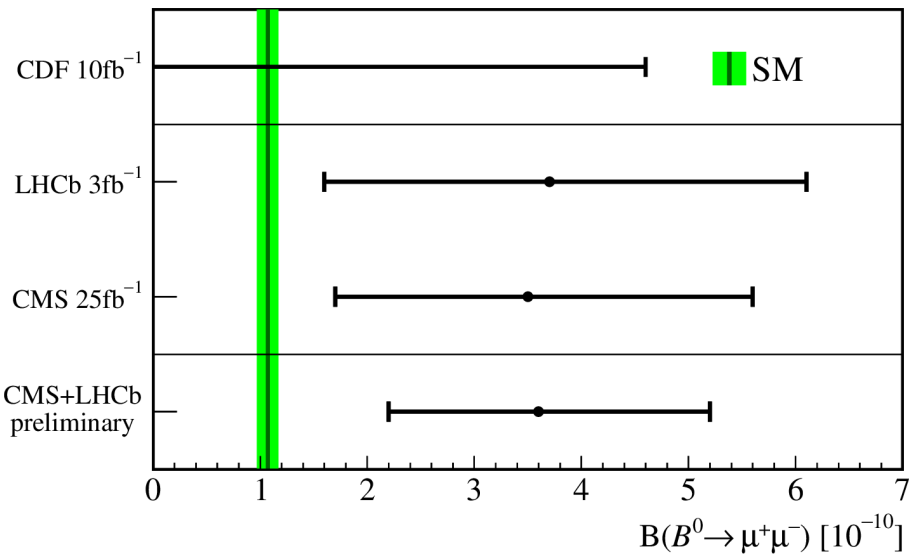
CMS: CMS-PAS-BPH-13-007
LHCb: LHCb-CONF-2013-012

- **Combinazione preliminare** dei risultati di CMS e LHCb basata sul tutta la statistica del Run 1
  - Correlazione nota tra le incertezze di f_s/f_u tenuta in considerazione
  - Lavori in corso nei due esperimenti per i risultati definitivi della combinazione
- Risultato combinato preliminare:

$$\mathcal{B}(B_s \to \mu\mu) = (2.9 \pm 0.7) \times 10^{-9} \text{ (significanza combinata > 5σ)}$$

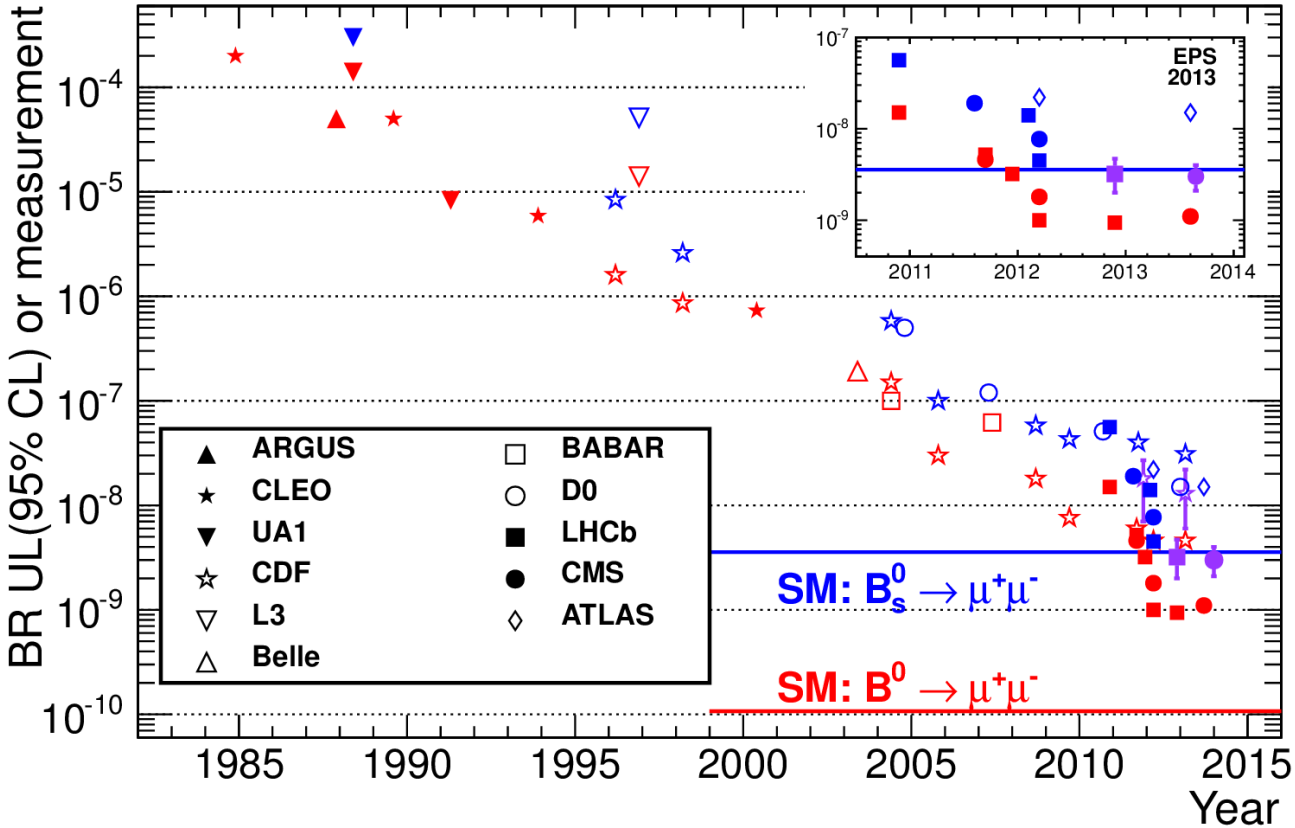
$$\mathcal{B}(B^0 \to \mu\mu) = (3.6\,^{+1.6}_{-1.4}) \times 10^{-10} \text{ (significanza combinata < 3σ)}$$





Evoluzione storica delle misure

- I recenti risultati prodotti a LHC costituiscono l'ultimo passo di una ricerca trentennale

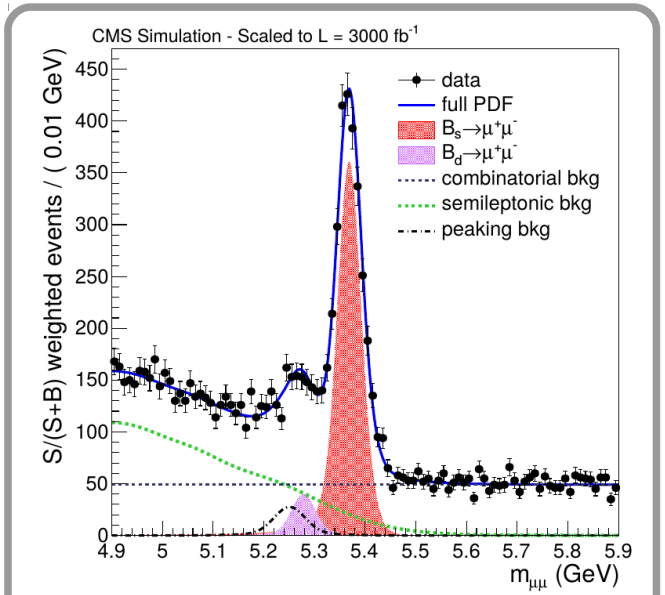


- $B_s \to \mu\mu$ è ormai stato osservato e la sua frazione di decadimento sarà misurata con sempre maggiore precisione nei prossimi anni
- **Quali altre previsioni si possono fare per il futuro...?**

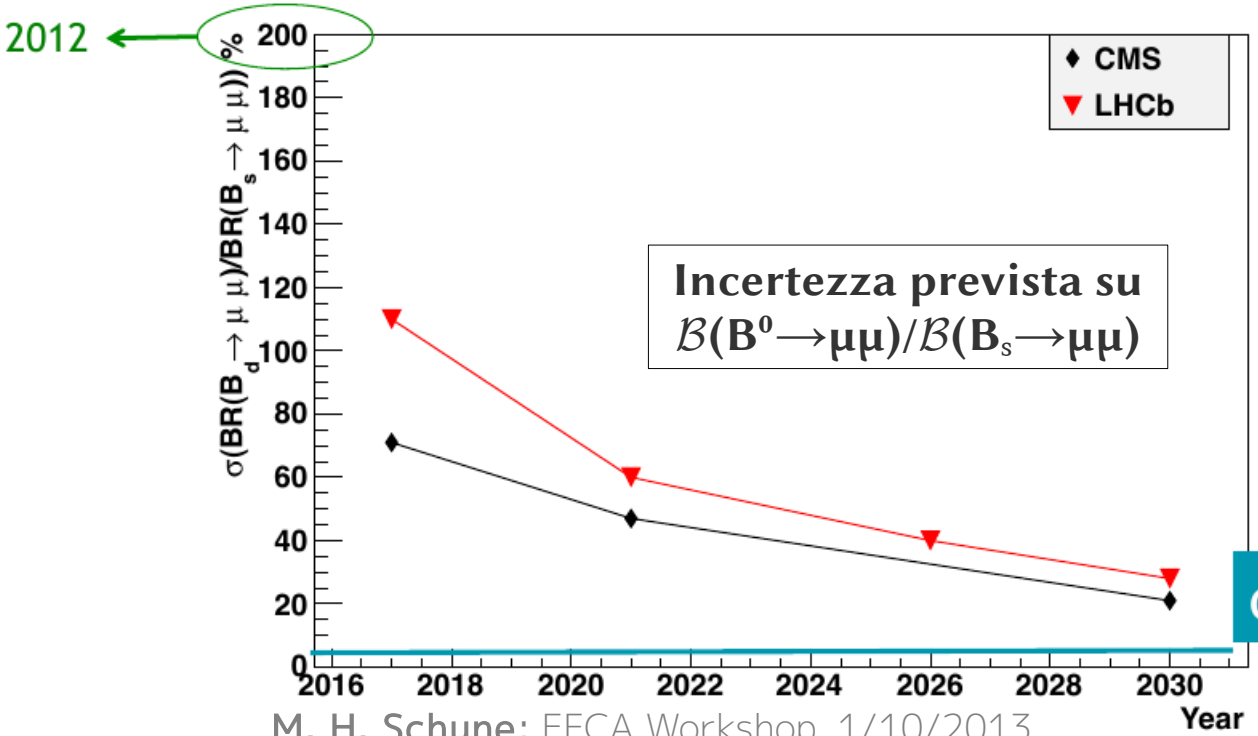
Prospettive per il futuro

CMS: CMS-PAS-FTR-13-0022
LHCb: LHCb-PUB-2013-015

- CMS e LHCb hanno pubblicato delle **stime della sensibilità prevista** nei prossimi ~10 anni
- Osservabili importanti da determinare
  - $\mathcal{B}(B^0 \to \mu\mu)$
  - $\mathcal{B}(B^0 \to \mu\mu)/\mathcal{B}(B_s \to \mu\mu)$
  - Vita media efficace di $B_s \to \mu\mu$



Proiezione di CMS (3000 fb^{-1})



M. H. Schune: EFCA Workshop, 1/10/2013

σ_{theory} ~5 %

- Necessari alta luminosità integrata (**HL-LHC**) e **upgrade dei rivelatori** per misurare con precisione queste tre osservabili

Conclusioni

- I decadimenti rari $B_s \to \mu\mu$ e $B^0 \to \mu\mu$ sono stati studiati a LHC durante il Run 1
- **ATLAS** ha analizzato finora i primi 4.9 fb^{-1} di dati e ha posto un limite superiore a $B_s \to \mu\mu$
- **CMS** e **LHCb**, analizzando l'intera statistica raccolta, hanno osservato per la prima volta il decadimento $B_s \to \mu\mu$ con significanza > 5 σ, misurando:
  - $\mathcal{B}(B_s \to \mu\mu) = (2.9 \pm 0.7) \times 10^{-9}$ $[\mathcal{B}(B_s \to \mu\mu)_{SM} = (3.56 \pm 0.30) \times 10^{-9}]$
- Per $B^0 \to \mu\mu$ la significanza è ancora < 3 σ e la misura combinata CMS-LHCb è:
  - $\mathcal{B}(B^0 \to \mu\mu) = (3.6\,^{+1.6}_{-1.4}) \times 10^{-10}$ $[\mathcal{B}(B^0 \to \mu\mu)_{SM} = (1.07 \pm 0.10) \times 10^{-10}]$
- Questo è il punto di arrivo di 30 anni di ricerche, ma anche un punto di partenza:
  - $\mathcal{B}(B^0 \to \mu\mu)$ è ancora da osservare e misurare con precisione
  - Il programma sperimentale prevede già per il futuro la misura di **altre osservabili sensibili a contributi di nuova fisica**
- **Questi decadimenti manterranno probabilmente un ruolo molto importante nella fisica del flavour almeno per il prossimo decennio**