

# Decadimenti rari a LHCb

Marianna Fontana

INFN (Cagliari) e CERN

20 Aprile 2016

IFAE 2017, Trieste



# Nuova fisica

- La ricerca di **Nuova Fisica (NF)** può avvenire in due modi:
  - **Misure dirette**: produzione di nuove particelle "reali", identificate direttamente attraverso i prodotti di decadimento
  - **Misure indirette**: produzione di particelle "virtuali", che appaiono in processi a loop, come ad esempio Flavour Changing Neutral Currents (FCNC)
- Le due ricerche vengono effettuate in modo complementare da esperimenti "multipurpose" (ATLAS, CMS) o attraverso esperimenti ad **alta precisione (LHCb)**

- Verranno presentati i seguenti risultati di LHCb:

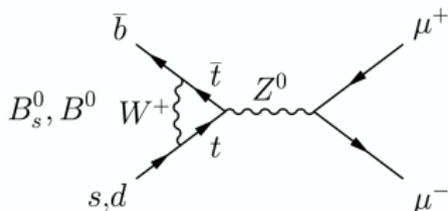
- $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$
- $B_s^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$
- $K_S^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$
- $\Sigma^+ \rightarrow p \mu^+ \mu^-$
- $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$

- In questa presentazione non verranno trattate le misure di Universalità Leptonica (v. S. Bifani)

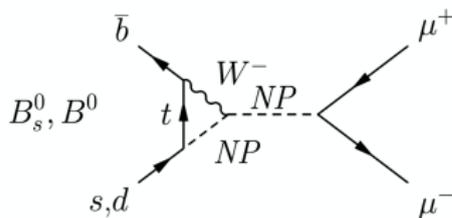


# Decadimenti rari

- I decadimenti rari del tipo FCNC sono vietati nel Modello Standard a livello albero e possono avvenire solamente attraverso diagrammi a loop



- Il contributo di NF può apparire come una correzione al MS attraverso nuove particelle pesanti



- La segnatura avviene tramite una modifica dei rapporti di diramazione o delle distribuzioni angolari

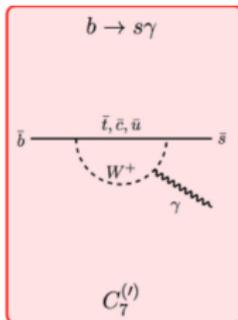
# Decadimenti rari nella teoria di campo efficace [arXiv:1606.00916]

- L'Hamiltoniana efficace per i processi FCNC può essere scritta come

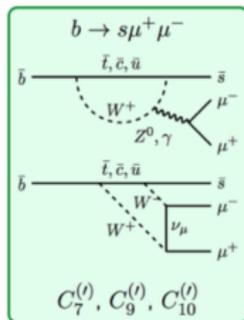
$$\mathcal{H}_{eff} = -\frac{4G_F}{\sqrt{2}} V_{tb} V_{ts}^* \sum_i (C_i \mathcal{O}_i + C_i' \mathcal{O}_i')$$

- I possibili **effetti di NF** vengono descritti come:
  - variazioni nei **coefficienti di Wilson**  $C_i$
  - nuovi **operatori locali**  $\mathcal{O}_i$

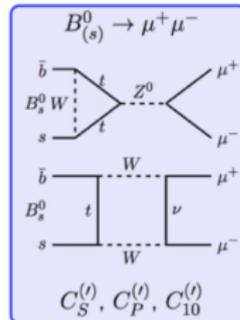
**photonic penguin**  
BR $\sim 3 \times 10^{-4}$



**electroweak penguin**  
BR $\sim 10^{-6}$



**"Higgs" penguin**  
BR $\sim 3.6 \times 10^{-9}$



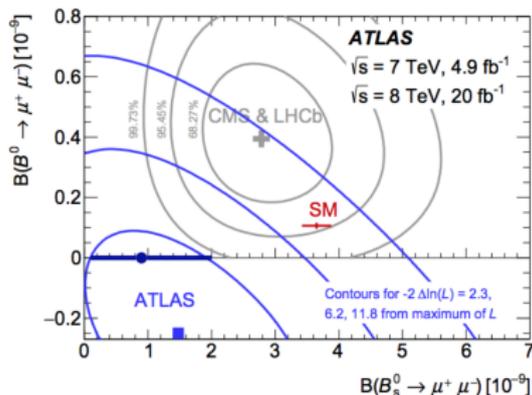
# Il decadimento $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$

- Decadimento puramente leptónico, soppresso per elicità  $\rightarrow$  predizione accurata nel MS
- Sensibile agli operatori  $C_{10}$ ,  $C_S$ ,  $C_P$

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

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

[MS: Bobeth et al. PRL 112 (2014) 101801]



**LHCb + CMS** [Nature 522 (2015) 68-72]

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

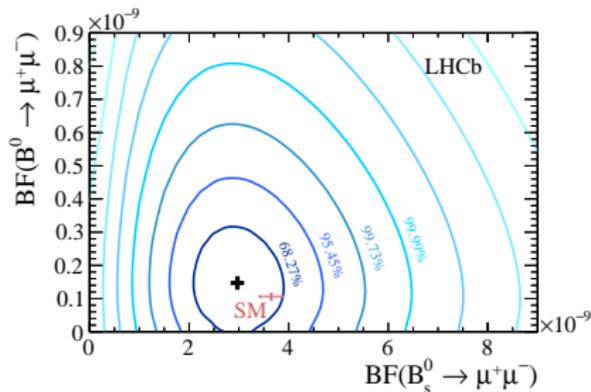
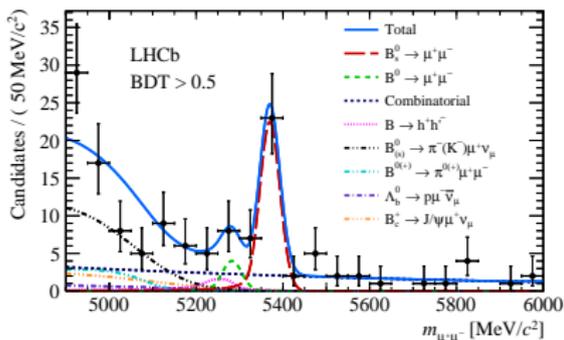
$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = 3.9_{-1.4}^{+1.6} \cdot 10^{-10} \quad (3.0 \sigma)$$

**ATLAS** [Eur.Phys.J. C76 (2016) 9, 513]

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = 0.9_{-0.8}^{+1.1} \cdot 10^{-9} \quad (2.0 \sigma)$$

$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 4.2 \cdot 10^{-10} \quad (95\% \text{ CL})$$

# Prima osservazione di $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ a LHCb [arXiv:1703.05747, sott. PRL]



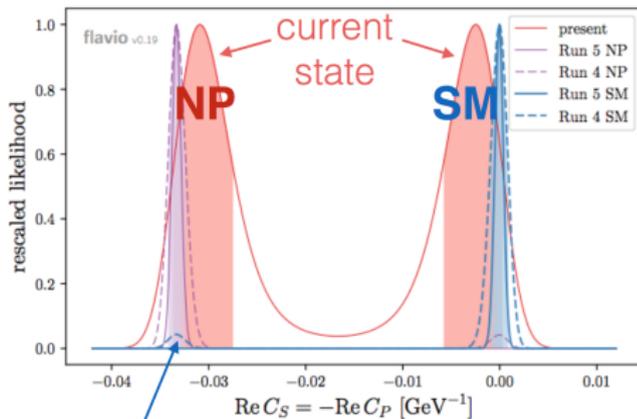
- Dati di LHCb di Run 1 ( $3 \text{ fb}^{-1}$ ) + Run 2 ( $1.4 \text{ fb}^{-1}$ )
- Separazione segnale/fondo tramite un fit a  $m_{\mu\mu}$  in 4 bin di BDT per Run
- Normalizzazione con  $B^+ \rightarrow J/\psi(\mu\mu)K^+$  e  $B^0 \rightarrow K^+\pi^-$
- Miglioramento nell'analisi dovuto a
  - migliore reiezione dei fondi adronici (50%)
  - stima dei fondi esclusivi determinata dai dati
  - nuove variabili di isolamento
- **Prima osservazione del  $B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-$  da singolo esperimento**

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-) = 3.0 \pm 0.6_{-0.2}^{+0.3} \cdot 10^{-9} \quad (7.8 \sigma)$$

$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-) < 3.4 \cdot 10^{-10} \quad (1.6 \sigma)$$

# Interpretazione dei risultati [arXiv:1702.05498]

- La sola misura della frazione di diramazione lascia un'ambiguità nello spazio dei parametri



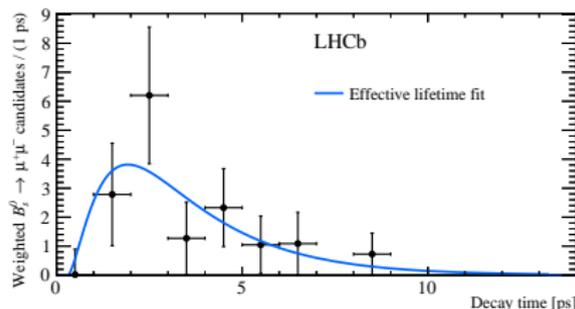
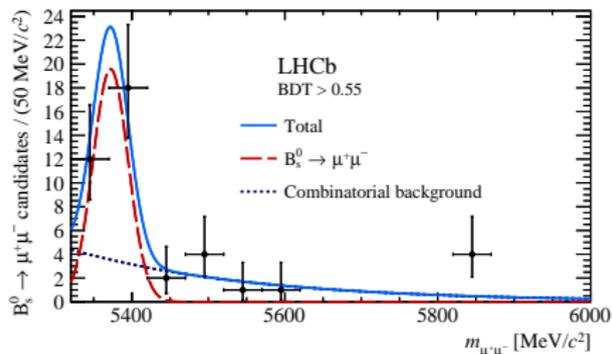
- L'ambiguità può essere risolta misurando la differenza nella frequenza di decadimento degli autostati di massa

$$A_{\Delta\Gamma} = \frac{\Gamma(B_s^H \rightarrow \mu^+ \mu^-) - \Gamma(B_s^L \rightarrow \mu^+ \mu^-)}{\Gamma(B_s^H \rightarrow \mu^+ \mu^-) + \Gamma(B_s^L \rightarrow \mu^+ \mu^-)}$$

- Intervallo: **NF**  $[-1 \dots +1]$  **SM**

# Tempo di vita effettiva del $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ [arXiv:1703.05747, sott. PRL]

- La differenza nel rate di decadimento degli autostati di massa può essere determinata da una misura del **tempo di vita effettiva** del  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$



$$\tau(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (2.04 \pm 0.44 \pm 0.05) \text{ps}$$

- Compatibile con il MS:  $\tau(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (1.615 \pm 0.010) \text{ps}$
- Misura di principio senza estrazione dell'asimmetria
- Consistente con lo stato dispari/MS (pari/NF) a 1 ( $1.4\sigma$ )

# Il decadimento $B_{(s)}^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-$ [arXiv:1703.02508, sott. PRL]

- La ricerca complementare di questo decadimento è di grande interesse, visti i risultati nelle misure di **universalità leptonica** con muoni ed elettroni:  $R(D^*)$ ,  $R(K)$ ,  $R(K^*)$
- In alcuni modelli di NF la frazione di decadimento è superiore al MS [PRL 112 (2014) 101801]

$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-) = (2.22 \pm 0.19) \cdot 10^{-8}$$

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-) = (7.73 \pm 0.49) \cdot 10^{-7}$$

- Unico limite esistente misurato da BaBar [Phys.Rev.Lett. 96 (2006) 241802]

$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-) < 4.1 \cdot 10^{-3} \text{ (90\% CL)}$$

- Analisi effettuata con i dati di Run 1 ( $3\text{fb}^{-1}$ ) di LHCb, utilizzando i **decadimenti adronici**

$$\mathcal{B}(\tau^\pm \rightarrow \pi^\pm \tau^\mp \pi^\pm \bar{\nu}_\tau) = (9.31 \pm 0.05)\%$$

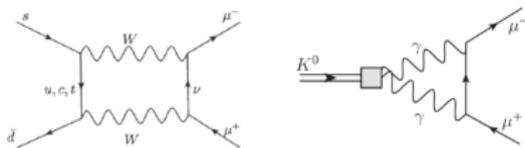
- Numero di candidati di segnale ottenuto tramite un fit all'output di un classificatore multivariato
- Normalizzazione effettuata con  $B^0 \rightarrow D^- D_s^+$  con  $D^- \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^-$  e  $D_s^+ \rightarrow K^+ K^- \pi^+$
- Simulazione effettuata utilizzando il generatore TAUOLA [Comput. Phys. Commun. 183 (2012) 821]
- Miglioramento di un fattore 2.6 sul limite del  $B^0$  e primo limite sul  $B_s^0$

$$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-) < 2.1 \cdot 10^{-3} \text{ (95\% CL)}$$

$$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \tau^+ \tau^-) < 6.8 \cdot 10^{-3} \text{ (95\% CL)}$$

# Il decadimento $K_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ [LHCb-CONF-2016-012]

- Predizione del MS [JHEP 0401 (2004) 009]



$$\mathcal{B}(K_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (5.0 \pm 1.5) \cdot 10^{-12}$$

- Primo risultato di LHCb con i dati del 2011: miglioramento di un fattore  $\sim 30$  [JHEP 01 (2013) 090]

- Nuovo risultato preliminare ottenuto con i dati del 2012 ( $2 \text{ fb}^{-1}$ )
- Nuova strategia d'analisi con miglioramento in
  - efficienza di trigger (fattore 2.5)
  - separazione segnale/fondo tramite due BDT, uno per il combinatoriale e uno per la doppia misID

- Normalizzazione tramite  $K_S^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$

$$\mathcal{B}(K_S^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) < 6.9 \cdot 10^{-9} \text{ (95\% CL)}$$

- Aggiornamento:** questo risultato è stato di recente rivisitato utilizzando una nuova strategia di trigger. Presto ci sarà una nuova pubblicazione

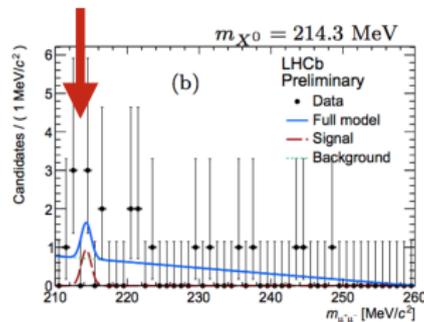
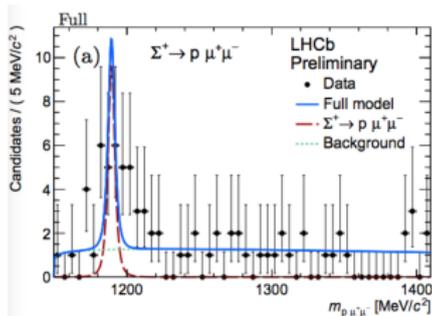
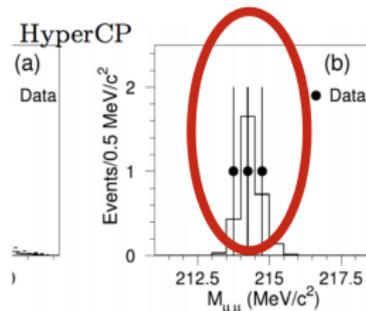
# Evidenza di $\Sigma^+ \rightarrow p\mu^+\mu^-$ [LHCb-CONF-2016-013]

- L'esperimento HyperCP ha misurato la frazione di diramazione [PRL 94 (2005) 021801]

$$\mathcal{B}(\Sigma^+ \rightarrow p\mu^+\mu^-) = (8.6_{-5.4}^{+6.6} \pm 5.5) \cdot 10^{-8}$$

in accordo con il MS [Phys.Rev. D72 (2005) 074003]

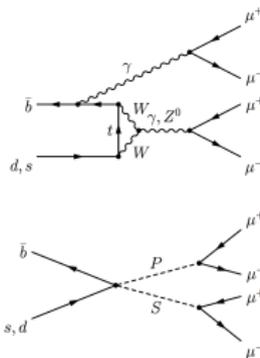
- La massa dei due muoni potrebbe indicare la presenza di una nuova risonanza a 214 MeV
- LHCb ha confermato il decadimento trovando 13 candidati (4  $\sigma$ ) con i dati di Run 1
- Non è stata trovata evidenza di una risonanza con due muoni
- La misura del BF verrà fornita in un articolo, con una precisione al livello di HyperCP



$$B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$$

# Il decadimento $B_{(s)}^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$ [JHEP 03 (2017) 001]

- Componente non risonante predetta molto piccola nel MS:  $3.5 \cdot 10^{-11}$   
[Phys.Lett. B556 (2003) 169-176]
- Possibili nuove risonanze intermedie (MSSM sgoldsino)



- Nuova analisi con l'intero dataset di Run 1, con miglioramenti nella selezione e nella normalizzazione

Mode	1 fb <sup>-1</sup>	3 fb <sup>-1</sup>	f
$B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$	$< 1.6 \times 10^{-8}$	$< 2.5 \times 10^{-9}$	6.4
$B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^- \mu^+ \mu^-$	$< 6.6 \times 10^{-9}$	$< 6.9 \times 10^{-10}$	9.5
$B_s^0 \rightarrow S(\mu^+ \mu^-)P(\mu^+ \mu^-)$	$< 1.6 \times 10^{-8}$	$< 2.2 \times 10^{-9}$	7.3
$B^0 \rightarrow S(\mu^+ \mu^-)P(\mu^+ \mu^-)$	$< 6.3 \times 10^{-9}$	$< 6.0 \times 10^{-10}$	10.5

(for the S/P scenario, assume short lived  $m(S)$  of 2.6GeV and  $m(P)$  of 214.3MeV)

# Conclusioni

- I dati dei Run 1 e 2 di LHCb hanno confermato l'osservazione del  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  con una frazione di decadimento in accordo con il MS. L'evidenza del  $B^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  non è stata confermata
- La misura del tempo di vita del  $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$  può aiutare a capire l'ambiguità dei contributi scalare e pseudoscalare. Primo risultato disponibile con una sensibilità limitata
- Le misure effettuate da LHCb in altri canali leptonici rari sono in accordo con il MS e pongono dei limiti stringenti a modelli di NF
- Molte misure verranno ripetute con i dati di Run 2
- Il Run del 2017 è alle porte...

...restate sintonizzati!!



# Backup

## Estrapolazioni

Type	Observable	Current precision	LHCb 2018	Upgrade (50 fb <sup>-1</sup> )	Theory uncertainty
$B_s^0$ mixing	$2\beta_s(B_s^0 \rightarrow J/\psi\phi)$	0.10 [139]	0.025	0.008	~0.003
	$2\beta_s(B_s^0 \rightarrow J/\psi f_0(980))$	0.17 [219]	0.045	0.014	~0.01
	$a_{\text{SI}}^s$	$6.4 \times 10^{-3}$ [44]	$0.6 \times 10^{-3}$	$0.2 \times 10^{-3}$	$0.03 \times 10^{-3}$
Gluonic penguins	$2\beta_s^{\text{eff}}(B_s^0 \rightarrow \phi\phi)$	–	0.17	0.03	0.02
	$2\beta_s^{\text{eff}}(B_s^0 \rightarrow K^{*0}\bar{K}^{*0})$	–	0.13	0.02	< 0.02
	$2\beta_s^{\text{eff}}(B^0 \rightarrow \phi K_S^0)$	0.17 [44]	0.30	0.05	0.02
Right-handed currents	$2\beta_s^{\text{eff}}(B_s^0 \rightarrow \phi\gamma)$	–	0.09	0.02	< 0.01
	$\tau^{\text{eff}}(B_s^0 \rightarrow \phi\gamma)/\tau_{B_s^0}$	–	5 %	1 %	0.2 %
Electroweak penguins	$S_3(B^0 \rightarrow K^{*0}\mu^+\mu^-; 1 < q^2 < 6 \text{ GeV}^2/c^4)$	0.08 [68]	0.025	0.008	0.02
	$s_0 A_{\text{FB}}(B^0 \rightarrow K^{*0}\mu^+\mu^-)$	25 % [68]	6 %	2 %	7 %
	$A_1(K\mu^+\mu^-; 1 < q^2 < 6 \text{ GeV}^2/c^4)$	0.25 [77]	0.08	0.025	~0.02
	$\mathcal{B}(B^+ \rightarrow \pi^+\mu^+\mu^-)/\mathcal{B}(B^+ \rightarrow K^+\mu^+\mu^-)$	25 % [86]	8 %	2.5 %	~10 %
Higgs penguins	$\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)$	$1.5 \times 10^{-9}$ [13]	$0.5 \times 10^{-9}$	$0.15 \times 10^{-9}$	$0.3 \times 10^{-9}$
	$\mathcal{B}(B^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)/\mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+\mu^-)$	–	~100 %	~35 %	~5 %
Unitarity triangle angles	$\gamma(B \rightarrow D^{(*)}K^{(*)})$	~10–12° [252, 266]	4°	0.9°	negligible
	$\gamma(B_s^0 \rightarrow D_s K)$	–	11°	2.0°	negligible
	$\beta(B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0)$	0.8° [44]	0.6°	0.2°	negligible
Charm CP violation	$A_{\Gamma}$	$2.3 \times 10^{-3}$ [44]	$0.40 \times 10^{-3}$	$0.07 \times 10^{-3}$	–
	$\Delta\mathcal{A}_{CP}$	$2.1 \times 10^{-3}$ [18]	$0.65 \times 10^{-3}$	$0.12 \times 10^{-3}$	–

# Vita media effettiva

- The effective lifetime is defined as

$$\tau_{\ell^+\ell^-} = \frac{\int_0^\infty t \langle \Gamma(B_s(t) \rightarrow \ell^+\ell^-) \rangle dt}{\int_0^\infty \langle \Gamma(B_s(t) \rightarrow \ell^+\ell^-) \rangle dt}$$

- The following holds

$$\tau_{\ell^+\ell^-} = \frac{\tau_{B_s}}{1 - y_s^2} \left[ \frac{1 + 2A_{\Delta\Gamma}^{\ell^+\ell^-} y_s + y_s^2}{1 + A_{\Delta\Gamma}^{\ell^+\ell^-} y_s} \right]$$

- Where:

$$y_s \equiv \tau_{B_s} \Delta\Gamma / 2 = 0.062 \pm 0.006$$

