

# Vzácné semileptonové rozpady $\Lambda_b$

Pavel Řezníček  
ÚČJF, MFF, Karlova Univerzita v Praze

## Osnova:

Úvod

B-fyzika na LHC/ATLASu

Semileptonové rozpady - motivace

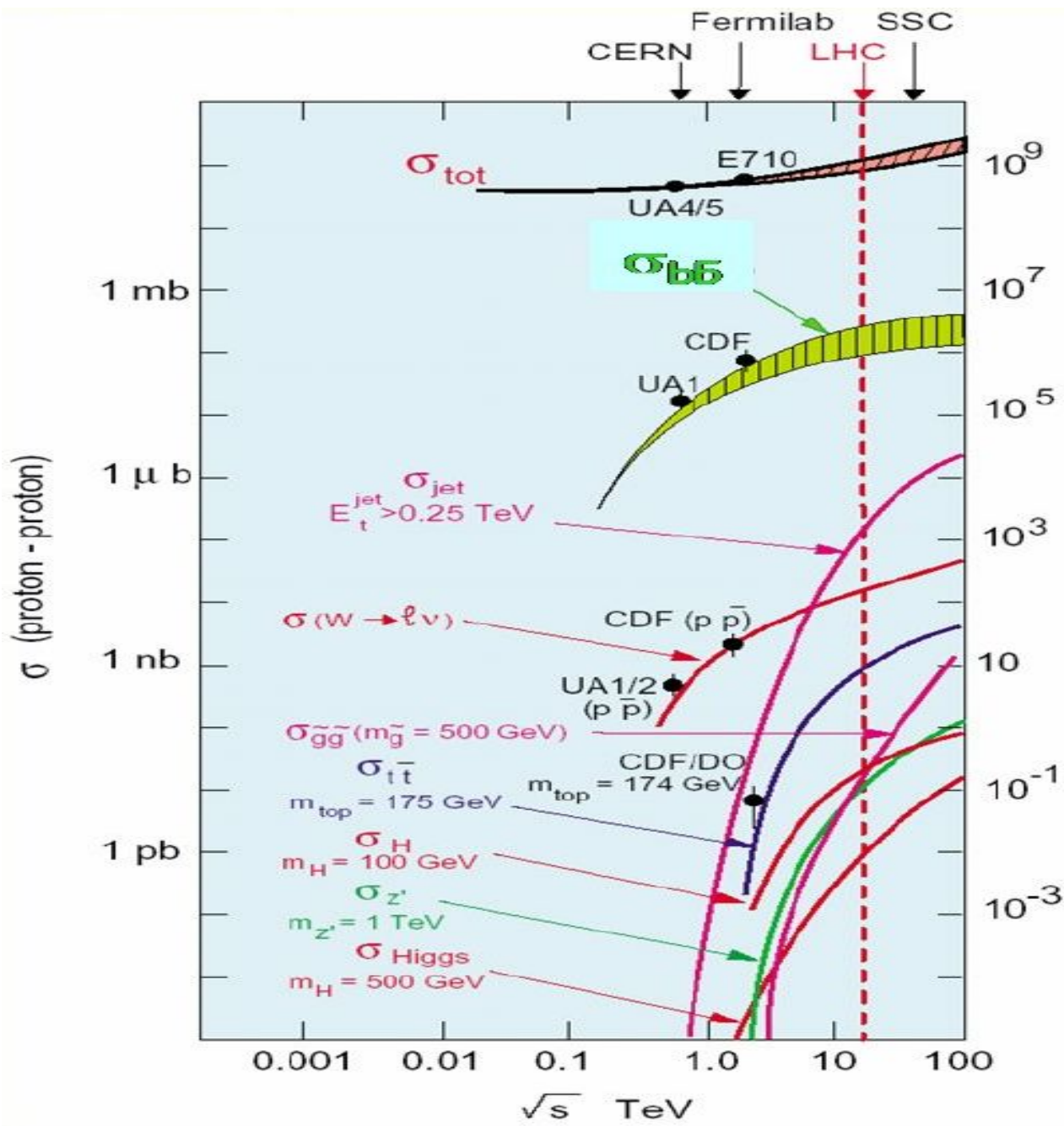
Rozpad  $\Lambda_b \rightarrow \Lambda^0 \mu^+ \mu^-$

- Trigger
- MC simulace
- Analýza
- Shrnutí





# B-fyzika na LHC



## B-produkce na LHC:

- $\sigma_{\text{total}} = 100 \text{ mb}$
- $\sigma_{\text{inelastic}} = 80 \text{ mb}$
- $\sigma_{b\bar{b}} = 500 \mu\text{b}$
- neurčitost produkce  
~ factor 2

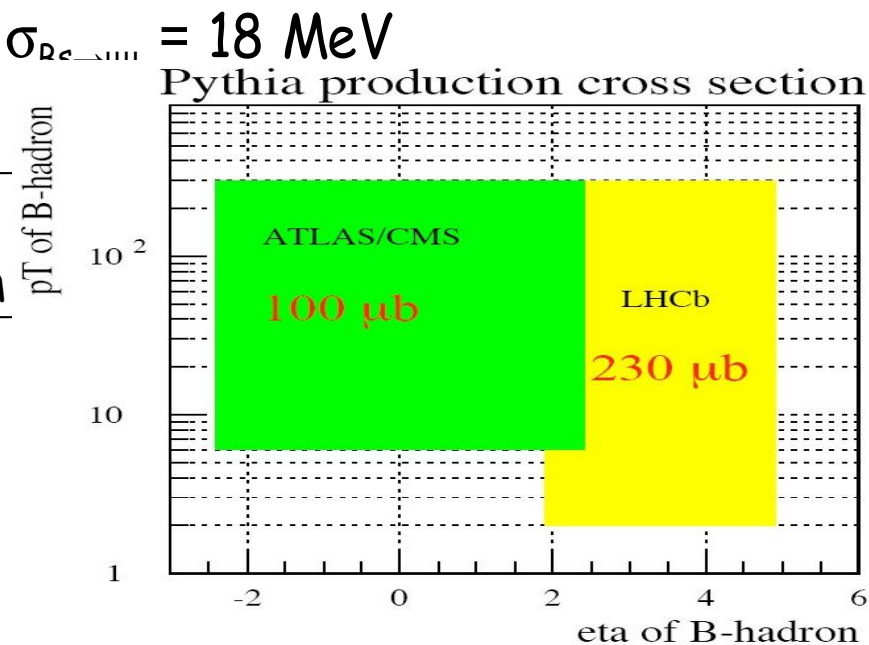
Events / sec for  $\mathcal{L} = 10^{34} \text{ cm}^{-2} \text{ sec}^{-1}$



# B-fyzika na LHC (2)

| ATLAS/CMS univerzální detektory  | LHCb specializovaný na B-fyziku   |
|--|---|
| $ \eta  < 2.5, p_T > 10 \text{ GeV}, \sigma = 100 \mu\text{b}$   | $1.9 < \eta < 4.9, p_T > 2 \text{ GeV}, \sigma = 230 \mu\text{b}$   |
| $L_{\text{low}} = 1 \div 2 \cdot 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$<br>$L_{\text{high}} = 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ | $L = 2 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$<br>( $L_{\text{max}} = 5 \cdot 10^{32} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ) |
| $B^0_{s,d} \rightarrow \mu^+\mu^-$ triggerovatelné at $L_{\text{high}}$  | od 1. fyzikálního runu  |
| $n_{\text{low}} \sim 3 \quad n_{\text{high}} \sim 23$<br>$f = 32 \text{ MHz}$  | $n \sim 0.5 \Rightarrow$ nízké pozadí<br>$f = 30 \text{ MHz}$   |
| $L_{\text{int}} = 10 \text{ fb}^{-1}/\text{year}$ at $L_{\text{low}}$ (3 years)  | $L_{\text{int}} = 2 \text{ fb}^{-1}/\text{year}$ ( $10 \text{ fb}^{-1}$ after 5 years)                                    |
| ATLAS: $\sigma_{B_s \rightarrow \mu\mu} = 80 \text{ MeV}$<br>CMS: $\sigma_{B_s \rightarrow \mu\mu} = 46 \text{ MeV}$               | $\sigma_{B_c \rightarrow \mu\mu} = 18 \text{ MeV}$  |
| Vzdálenost 1. detektoru od svazku:<br>ATLAS $\sim 5 \text{ cm}$ CMS $\sim 4 \text{ cm}$  | LHCb $\sim 8 \text{ mm}$  |

f - frekvence křížení svazku (efektivní)  
n - střední počet neelastických pp-interakcí  
při jedno křížení svazku  $L \cdot \sigma_{\text{inelastic}} / f$



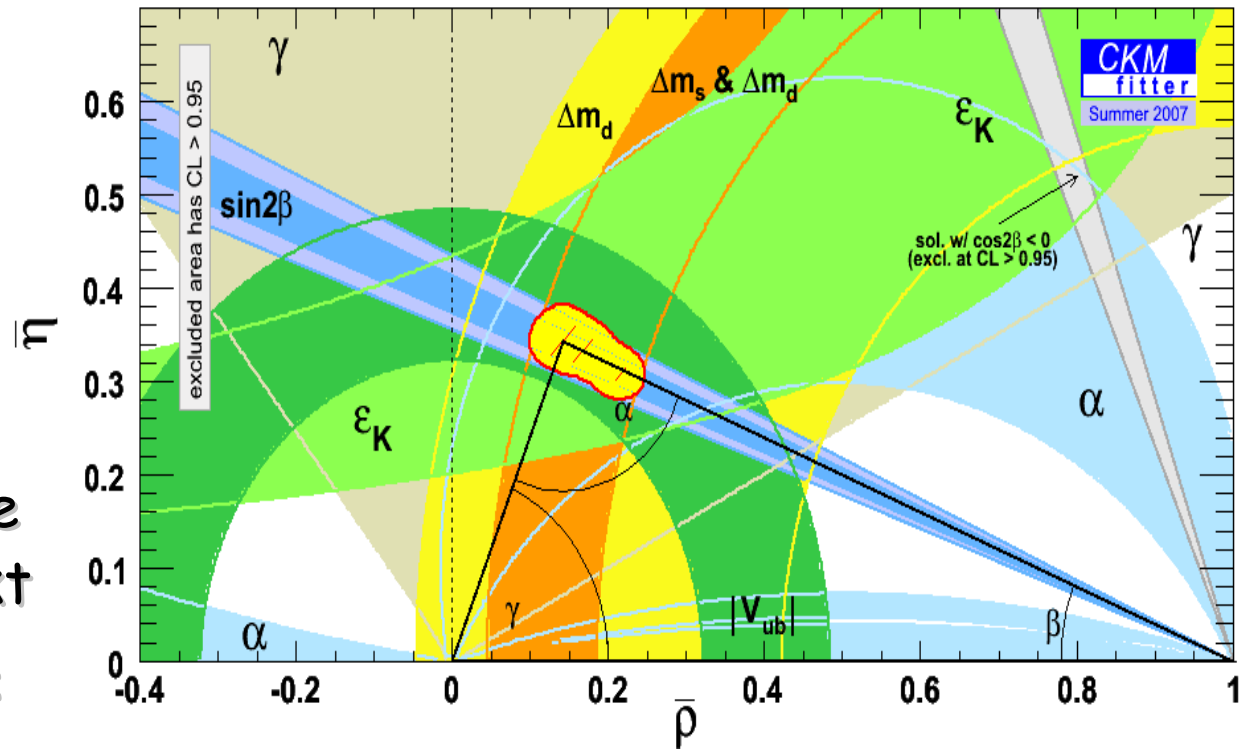
# *B-fyzikální program ATLASu*

- program je zaměřený na hledání efektů non-SM fyziky v oblastech, kde může poskytnout porovnatelné výsledky jako LHCb
  - CP narušení v  $B_s \rightarrow J/\psi\phi$  a  $B_d \rightarrow J/\psi K_s$  rozpadech
  - Mixing v  $B_s \rightarrow D_s^-(\phi\pi^+)\pi^+$   $B_s \rightarrow D_s^-(\phi\pi^+)a_1^+(\rho\pi^+)$
  - **Vzácné semileptonové rozpady:**
    - $B_{s,d} \rightarrow \mu\mu$ ,  $B_d \rightarrow K^*\mu\mu$ ,  $B_s \rightarrow \phi\mu\mu$ ,  $B_s \rightarrow \rho\mu\mu$ ,  $\Lambda_b \rightarrow \Lambda\mu\mu$ ,  $B^+ \rightarrow K^*\mu\mu$ ,  
 $B^+ \rightarrow K^{*+}\mu\mu$
  - Přesná měření:
    - vlastnosti  $B_c$  hadronů
    - polarizace  $\Lambda_b$  v rozpadovém kanálu  $\Lambda_b \rightarrow J/\psi\Lambda$
  - *program je výlučně zaměřen na exklusivní kanály, které lze úplně zrekonstruovat*

# Semileptonové Vzácné Rozpady - Motivace

Kde hledat odchylky od Standardního Modelu ve slabých interakcích ?

- popis pomocí CKM je velmi úspěšný
- jakékoli rozšíření SM zde musí mít pouze malý efekt
- většina měření pochází z:
  - rozpadů  $s \rightarrow u$ ,  $b \rightarrow c$  a  $b \rightarrow u$  na stromové úrovni
  - amplitud mixingů:  $\Delta B, \Delta S = 2$
- ale je málo experimentálních výsledků z FCNC rozpadů typu  $b \rightarrow s$ ,  $b \rightarrow d$ :
  - $b \rightarrow sg$  (např.  $B \rightarrow \phi K_s$ )
  - $b \rightarrow s\gamma$
  - **$b \rightarrow sl^+l^-$**  a  $b \rightarrow l^+l^-$



# Rozpady $B \rightarrow X \mu^+ \mu^-$

- zakázány na stromové úrovni, v nejnižším řádu 1-smyčkové diagramy
  - malý BR, velká citlivost na případné non-SM částice ve smyčkách
  - $BR(B \rightarrow X \mu^+ \mu^-) \sim 10^{-6}$

- obecný popis amplitudy rozpadů  $b \rightarrow s l^+ l^-$  a  $b \rightarrow s \gamma$  pomocí OPE:

$$\mathcal{H} = -4 \frac{G_F}{\sqrt{2}} V_{tb} V_{ts}^* \sum_{i=1}^{10} C_i(\mu) O_i(\mu)$$

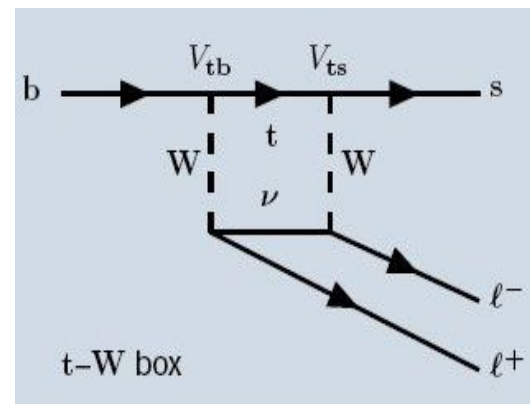
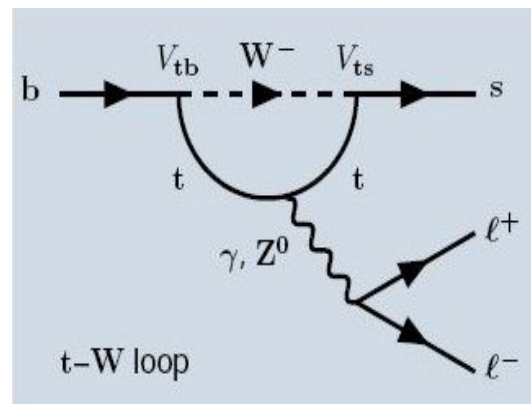
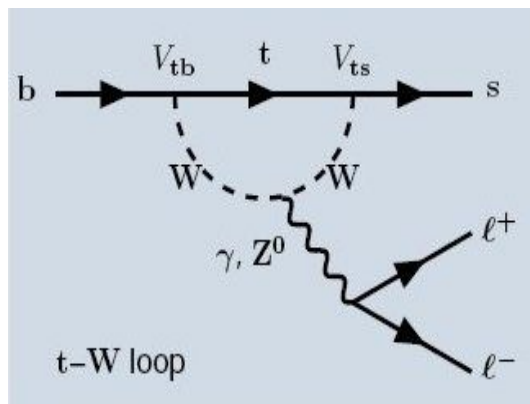
- zavedení form-faktorů pro maticové elementy typu:

$$\langle \Lambda | \bar{s} \gamma_\mu (1 \mp \gamma_5) b | \Lambda_b \rangle ,$$

$$\langle \Lambda | \bar{s} \sigma_{\mu\nu} (1 \mp \gamma_5) b | \Lambda_b \rangle ,$$

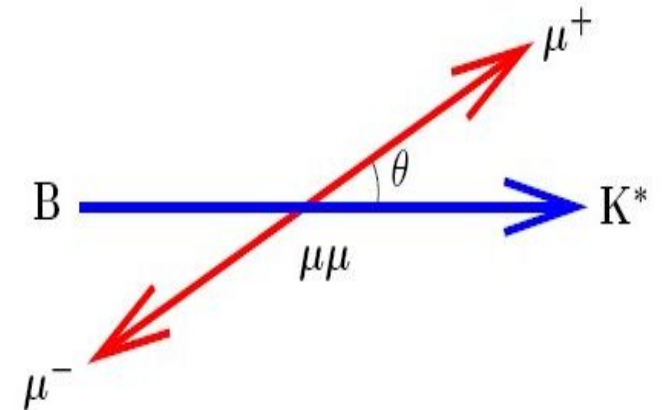
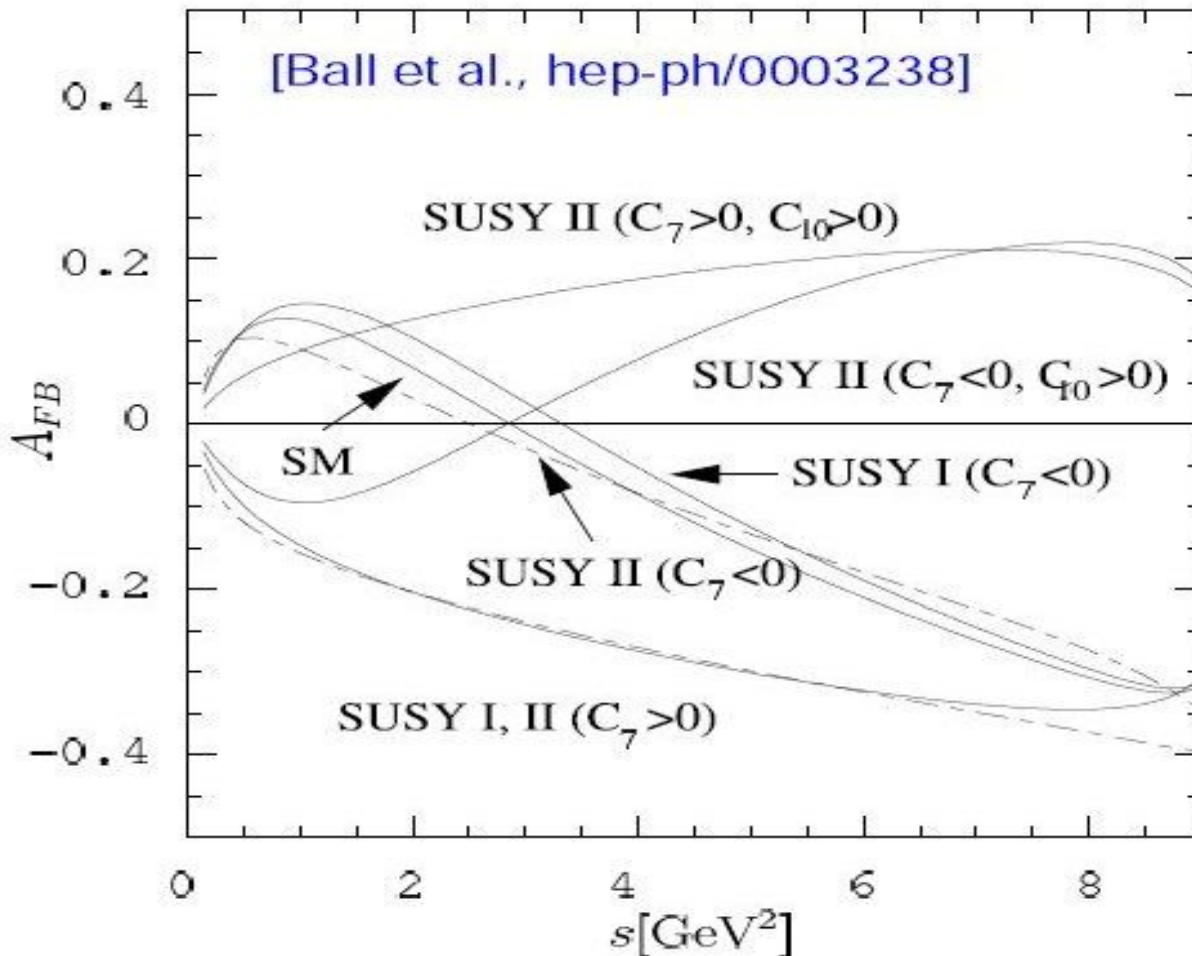
$$\langle \Lambda | \bar{s} (1 \mp \gamma_5) b | \Lambda_b \rangle .$$

- inclusivní procesy teoreticky lépe popsané (nevystupují zde FF), ale experimentálně obtížně měřitelné



# Rozpady $B \rightarrow X \mu^+ \mu^-$ (2)

- již změřené BR jsou v souladu s předpovědí pro SM
- předozadní asymetrie  $A_{FB}$ , parametry asymetrie (polarizace)

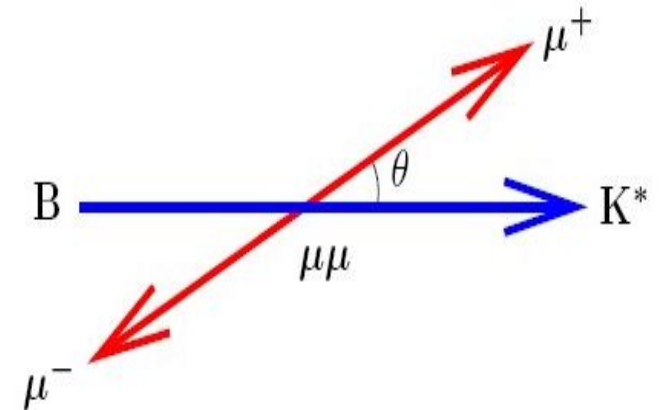
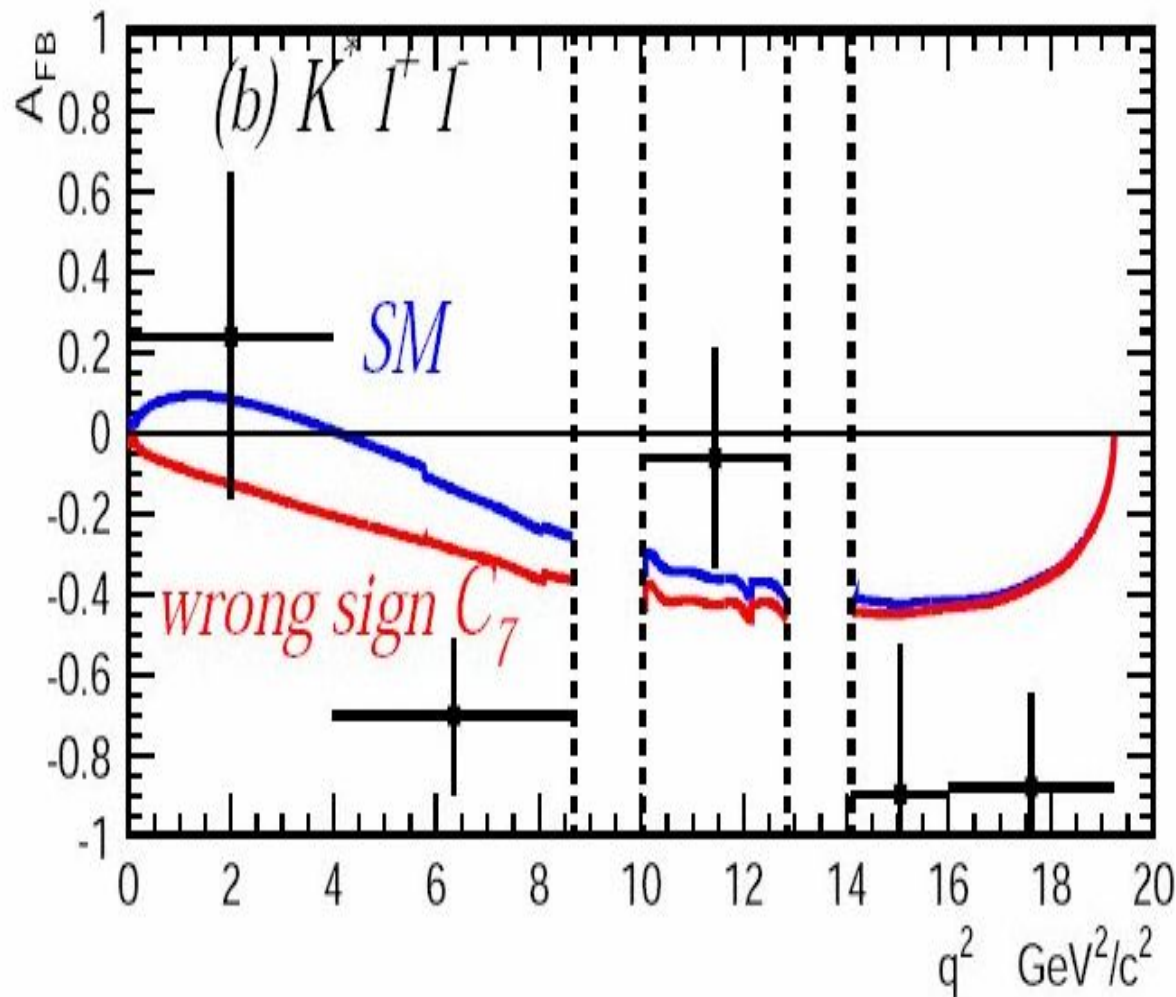


$$A_{FB} \sim N(\theta > 90^\circ) - N(\theta < 90^\circ)$$

- „měření“  $C_7, C_9, C_{10}$
- průsečík  $A_{FB}(s_0) = 0$  téměř necitlivý na volbu FF,  $s_0 \sim C_7/C_9$

# Rozpady $B \rightarrow X \mu^+ \mu^-$ (2)

- již změřené BR jsou v souladu s předpovědí pro SM
- předo-zadní asymetrie  $A_{FB}$ , parametry asymetrie (polarizace)



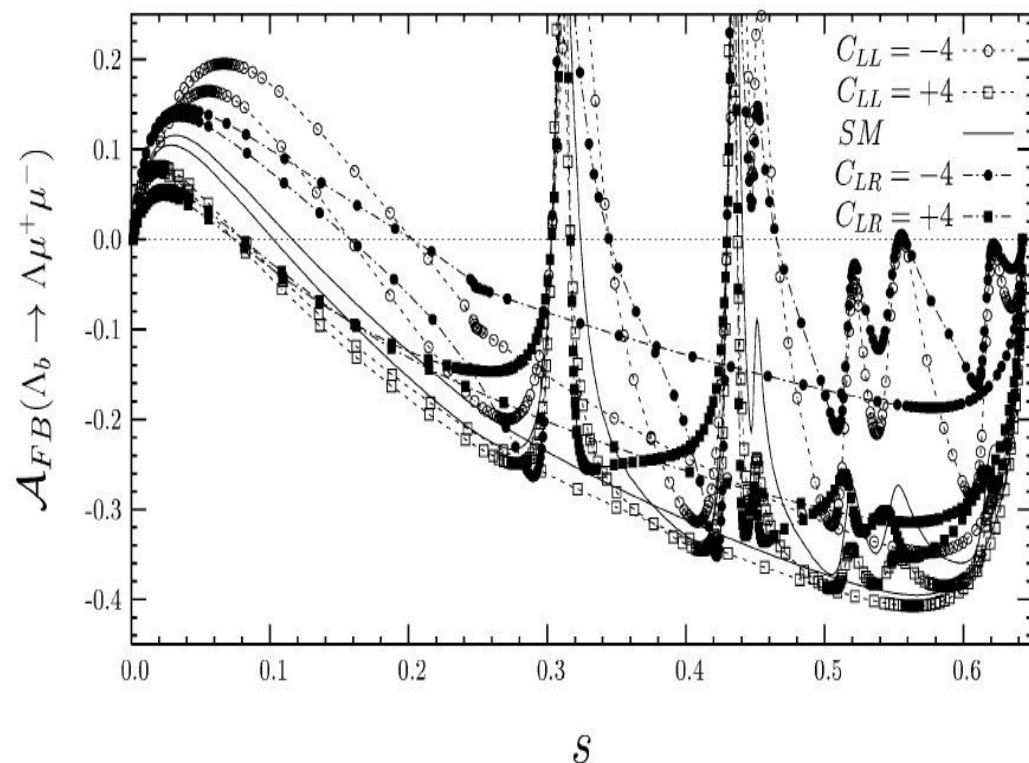
$$A_{FB} \sim N(\theta > 90^\circ) - N(\theta < 90^\circ)$$

- „měření“  $C_7, C_9, C_{10}$
- průsečík  $A_{FB}(s_0)=0$  téměř necitlivý na volbu FF,  $s_0 \sim C_7/C_9$





- $b \rightarrow s l^+ l^-$  v baryonovém rozpadu
- ATLAS a CMS zde má výhodu oproti LHCb
  - dopředná geometrie => většina  $\Lambda^0$  se nestihne rozpadnout v objemu LHCb detektoru)



- výpočty v různých non-SM modelech ukazují až na 5x zvětšení BR oproti SM



# $\Lambda_b \rightarrow \Lambda^0 \mu^+ \mu^-$

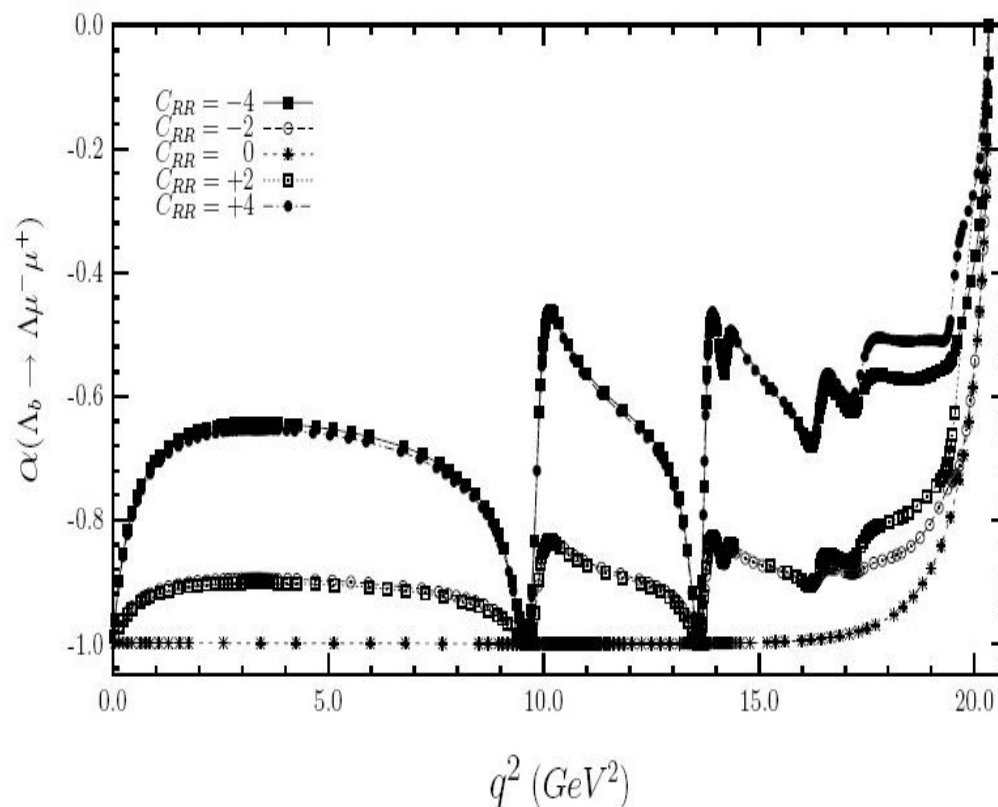
- $b \rightarrow s l^+ l^-$  v baryonovém rozpadu
- ATLAS a CMS zde má výhodu oproti LHCb
  - dopředná geometrie => většina  $\Lambda^0$  se nestihne rozpadnout v objemu LHCb detektoru)

- kromě  $A_{FB}$  umožňuje studovat polarizaci  $\Lambda^0$  resp. parametry asymetrie

$$\frac{d\Gamma}{dq^2 d\cos\theta_\Lambda} \sim 1 + \alpha\alpha_\Lambda \cos\theta_\Lambda$$

$\theta_\Lambda$  - polární úhel protonu v klidovém systému  $\Lambda^0$

- je nutné vzít v úvahu polarizaci  $\Lambda$  (měřena pomocí rozpadu  $\Lambda_b \rightarrow J/\psi$ )



# ATLAS di-muon trigger

3-stupňový trigger:

- **LVL1**

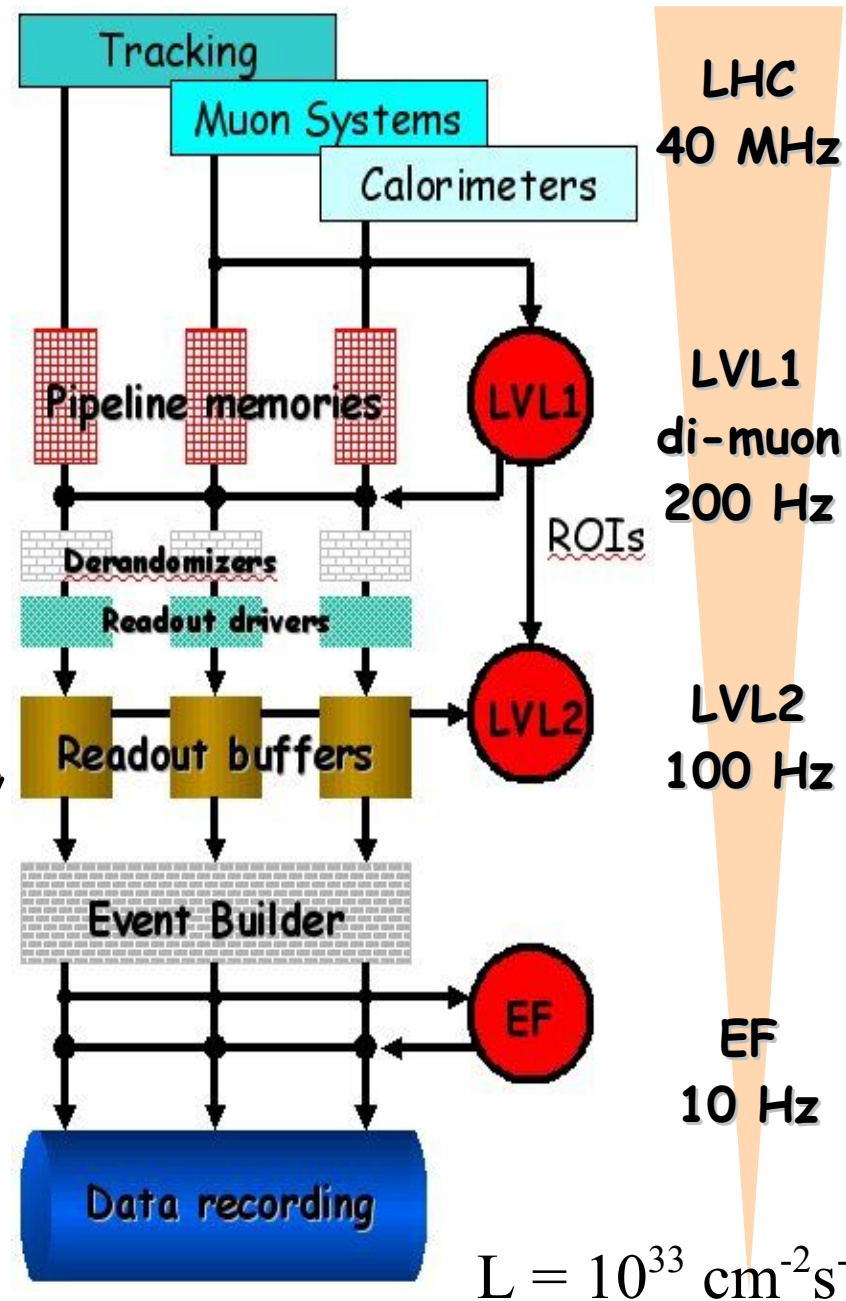
- 2 miony ( $p_{T\mu 1} > 6 \text{ GeV}$ ,  $p_{T\mu 2} > 4 \text{ GeV}$ ) detekované rychlými minovými detektory (TGC, RPC)

- **LVL2**

- potvrzení přesnými mionovými detektory MDT a calorimetry, extrapolace do vnitřního detektoru
- ROIs, fitování sekundárních vertexů, základní selekce (inv. hmota  $\mu\mu$ , ...)

- **Event Filter**

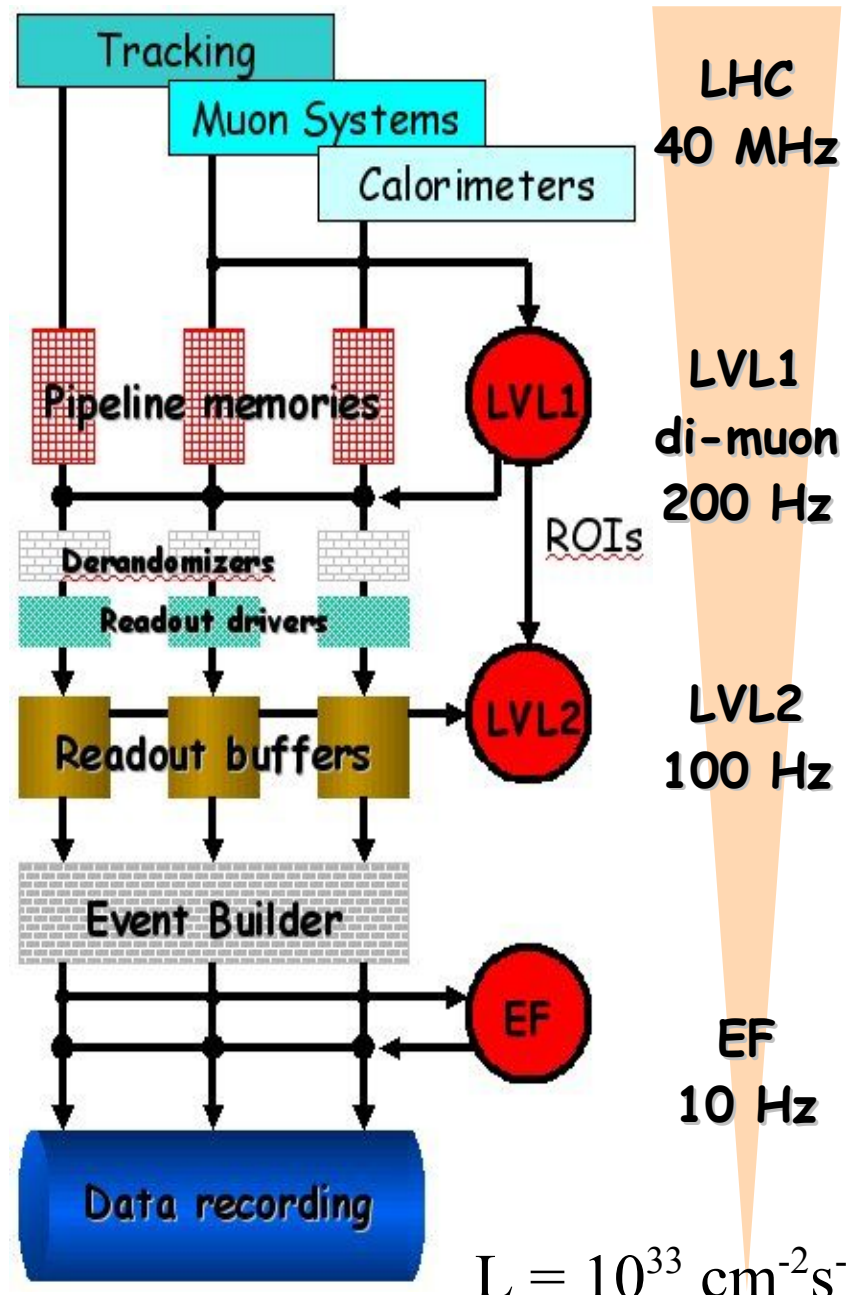
- rekonstrukce jednotlivých exklusivních kanálů





# ATLAS di-muon trigger (2)

- detekce  $p_T > 3-4 \text{ GeV}$
- účinnost 1-mionového LVL1 triggeru  $\sim 75\%$
- účinnost 2-mionového LVL1 triggeru  $\sim 60\%$ 
  - pokles o 10% pro vzájemný úhel  $\Delta\eta < 0.1 \Delta\phi < 0.1$
- potlačení falešných 2-mionových triggerů z překrývajících se detektorů



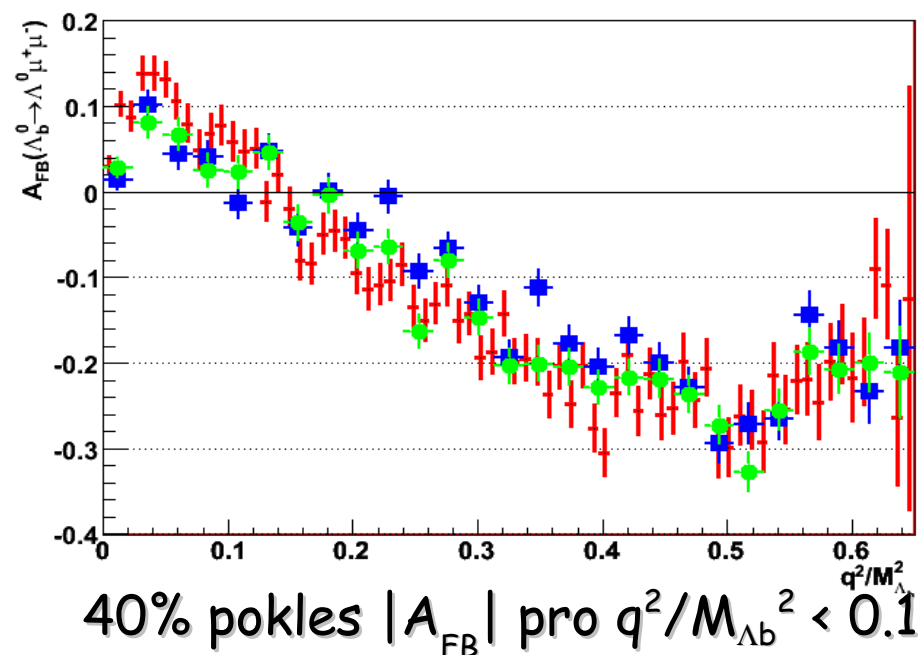
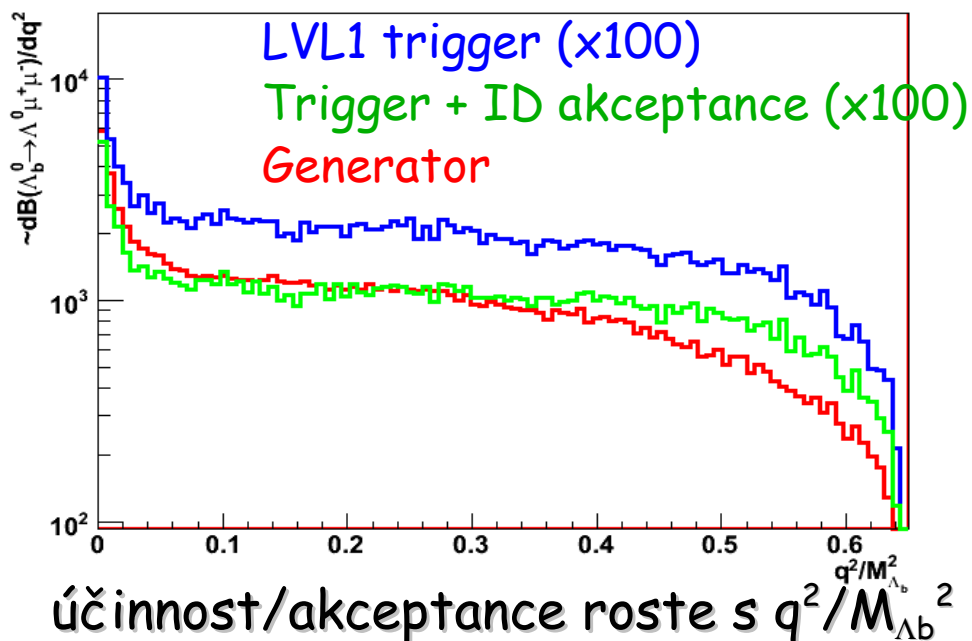


# MC Simulace

- použití Pythia + EvtGen (amplituda rozpadu  $\Lambda_b$ ) v ATLAS SW prostředí Athena **generator** → **simulace** → **digitizace** → **rekonstrukce** → **analýza**
- počet detekovatelných  $\Lambda_b \rightarrow \Lambda^0 \rightarrow p\pi \mu^+\mu^-$  rozpadů při  $L_{int} = 30 \text{ fb}^{-1}$ :

|                                |  |                      |
|--------------------------------|--|----------------------|
| $\Lambda_b$ produkce           | $\sigma_{b\bar{b}} \times \text{Br}_{b \rightarrow \Lambda_b} = 50 \mu\text{b}$                                  | $1.5 \times 10^{12}$ |
| větvící poměr rozpadu          | $\text{BR}_{\Lambda_b \rightarrow \Lambda\mu\mu} = 2 \cdot 10^{-6}, \text{BR}_{\Lambda \rightarrow p\pi} = 0.64$ | <b>1.800.000</b>     |
| ~ 2-mionový LVL1 trigger       | $p_T > 6 / 4 \text{ GeV},  \eta  < 2.5$  | <b>52.000</b>        |
| akceptance vnitřního detektoru | $p_T > 0.5 \text{ GeV},  \eta  < 2.5$  | <b>28.000</b>        |

- Dopad triggeru a akceptance vnitřního detektoru na  $A_{FB}$  a  $M(\mu^+\mu^-)$  spektrum



# Analýza

- **2-mionový vertex:**

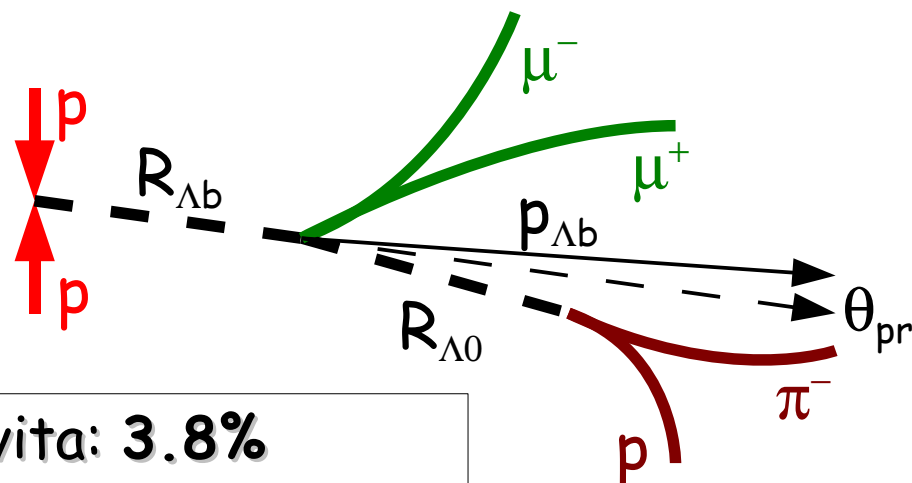
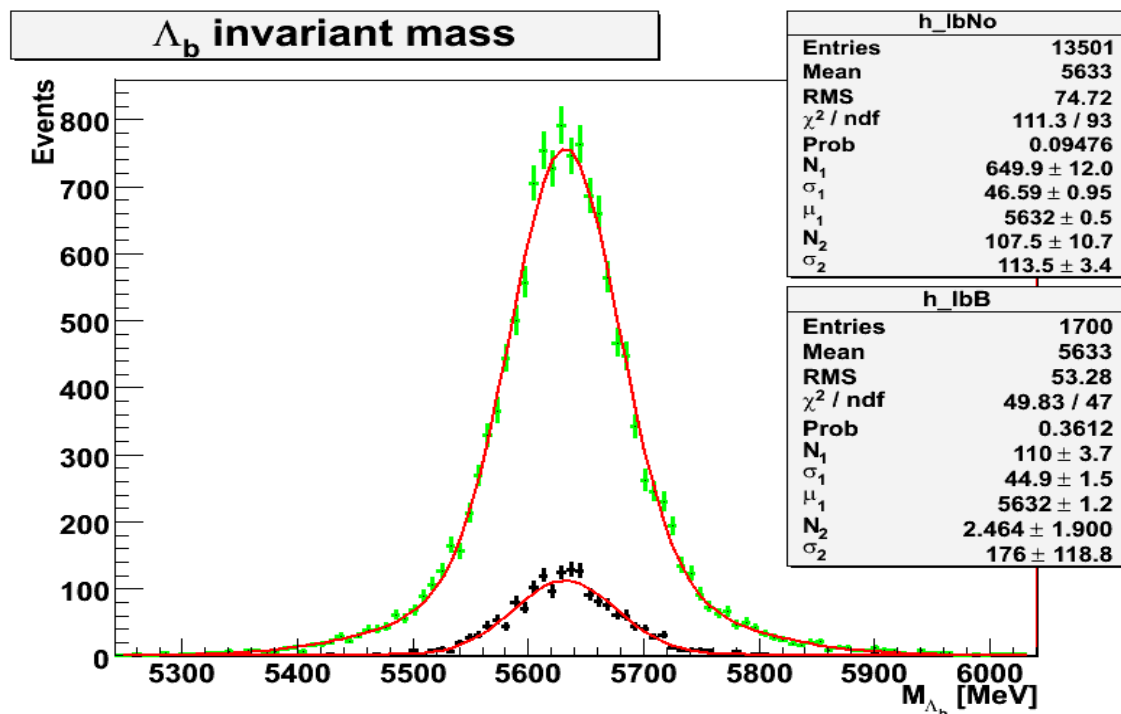
- vertex  $\chi^2/\text{NDoF} < 3$
- $q_{\min} < M_{\mu^+\mu^-} < q_{\max}$
- vyloučení  $M_{\mu^+\mu^-} \approx 120 \text{ MeV}$  okolo hmot  $J/\psi$  a  $\psi'$

- **$\Lambda^0$  vertex:**

- vertex  $\chi^2/\text{NDoF} < 3$
- $M = M_{\Lambda^0} \pm 6 \text{ MeV}$
- $p(p) > p(\pi)$
- $1 \text{ cm} < R_{\Lambda^0} < 45 \text{ cm}$
- $p_{T\Lambda^0} > 4 \text{ GeV}$

- **$\Lambda_b$  vertex:**

- vertex  $\chi^2/\text{NDoF} < 2$
- $M = M_{\Lambda_b} \pm 100 \text{ MeV}$
- $\tau_{\Lambda_b} > 0.5 \text{ ps}$  ( $R_{\Lambda_b} \sim 750 \mu\text{m}$ )
- $\theta_{pr} < 2.3^\circ$

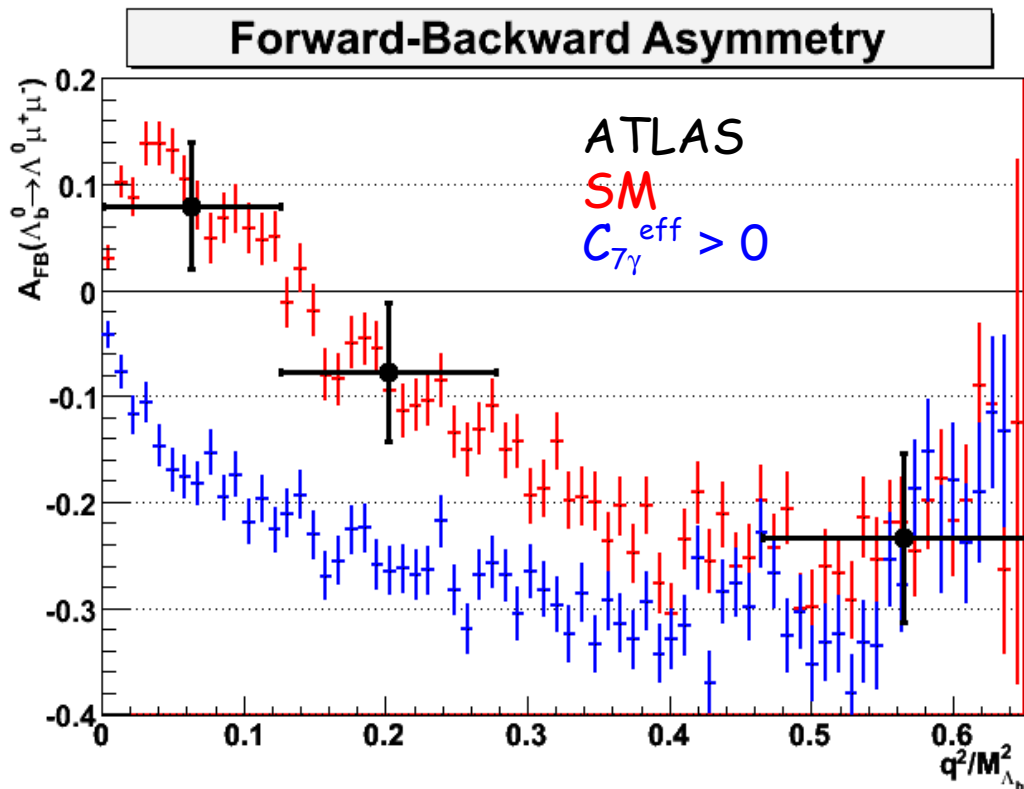


Efektivita: 3.8%  
Potlačení pozadí:  $< 10^{-6}$



# Analýza (2)

- předpokládaný výsledek při  $L_{\text{int}} = 30\text{fb}^{-1}$ : 800 rekonstruovaných případů

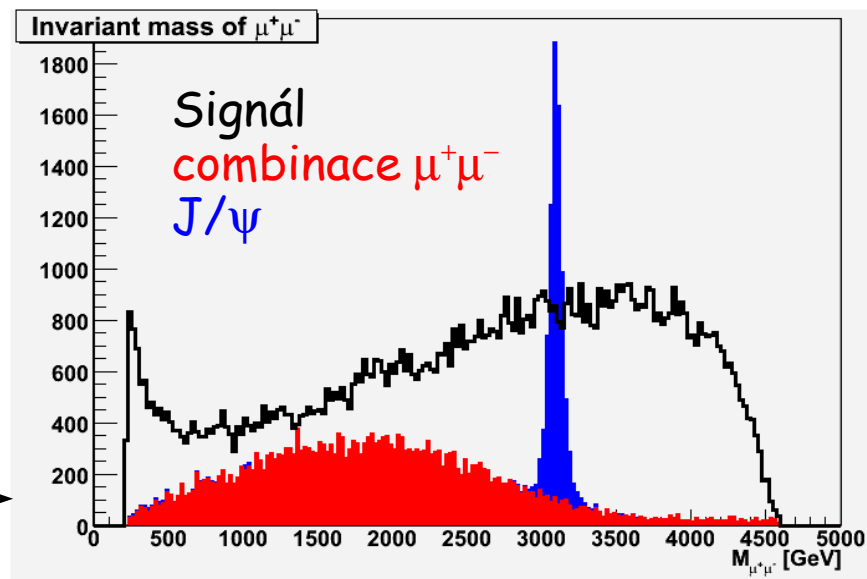


- experimentální body odpovídají průměrné  $A_{\text{FB}}$  v daném intervalu a statistické chybě (dominantní)

- statistika nebude dostačující k měření bodu  $A_{\text{FB}} = 0$

- MC simulace a analýza 150.000  $bb \rightarrow \mu_{pT>4\text{GeV}} \mu_{pT>4\text{GeV}} X$  vede hornímu limitu na pozadí: 4000 ev.

– převládá v oblasti nízkých  $q^2$  →





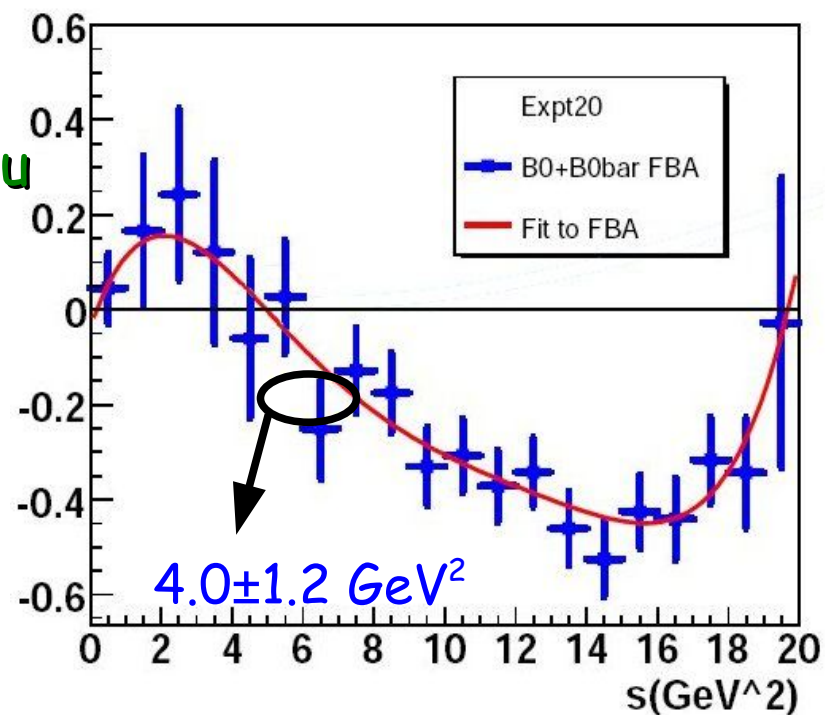
# Shrnutí

- ATLAS bude měřit  $b \rightarrow s l^+ l^-$  v těchto rozpadech:

|   | Signál | Pozadí | $(L_{\text{int}} = 30\text{fb}^{-1})$        |
|---|--------|--------|--|
| - $B_d^0 \rightarrow K^{0*} \mu^+ \mu^-$        | 2500   | < 3000 |  |
| - $B_s^0 \rightarrow \phi \mu^+ \mu^-$          | 900    | < 3000 |  |
| - $B_d^0 \rightarrow \rho \mu^+ \mu^-$          | 300    | < 1000 |  |
| - $B^+ \rightarrow K^+ \mu^+ \mu^-$             | 1500   | < 4000 | (SM: nulová $A_{FB}$ v celém spektru $q^2$ ) |
| - $B^+ \rightarrow K^{*+} \mu^+ \mu^-$          | 900    | < 4000 |  |
| - $\Lambda_b \rightarrow \Lambda^0 \mu^+ \mu^-$ | 800    | < 4000 |  |

- experimenty na urychlovači LHC poskytnou dostatečně přesné měření k vyloučení některých modelů (např. s  $C_7^{\text{eff}} > 0$ ) již během fáze nízké luminosity  $10^{33} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

- dominovat budou především LHCb měření rozpadů  $B \rightarrow K^* \mu^+ \mu^-$  ( $\sim 4500/\text{rok}$ ) umožňující měření bodu  $A_{FB} = 0$

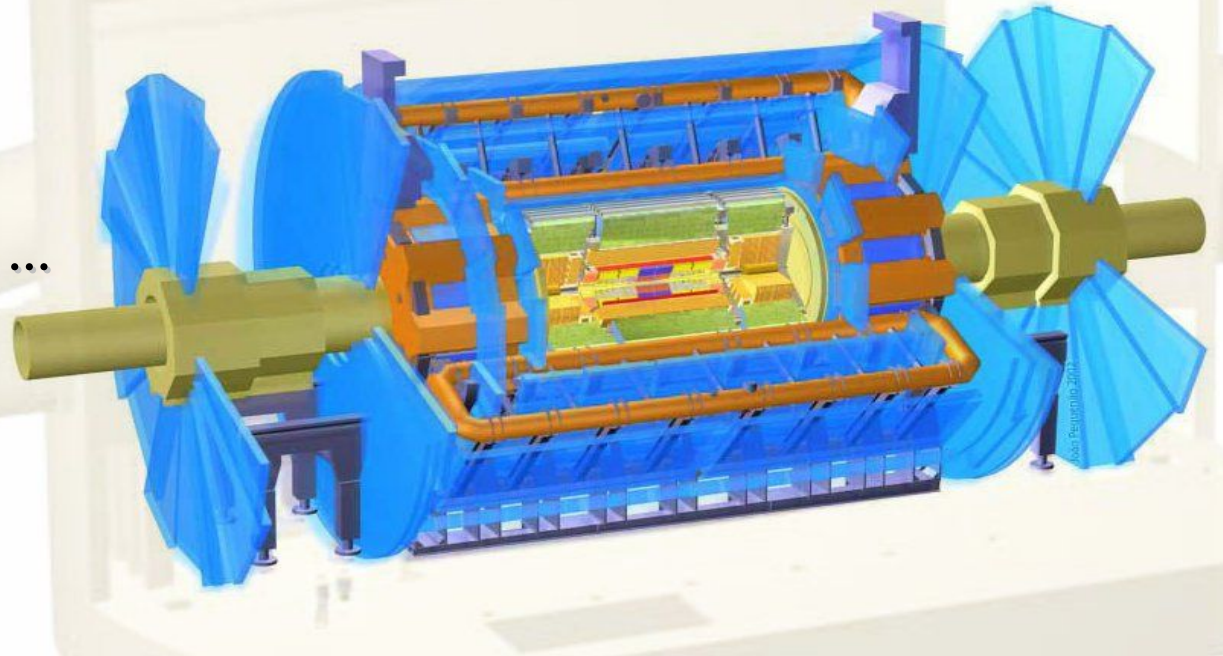
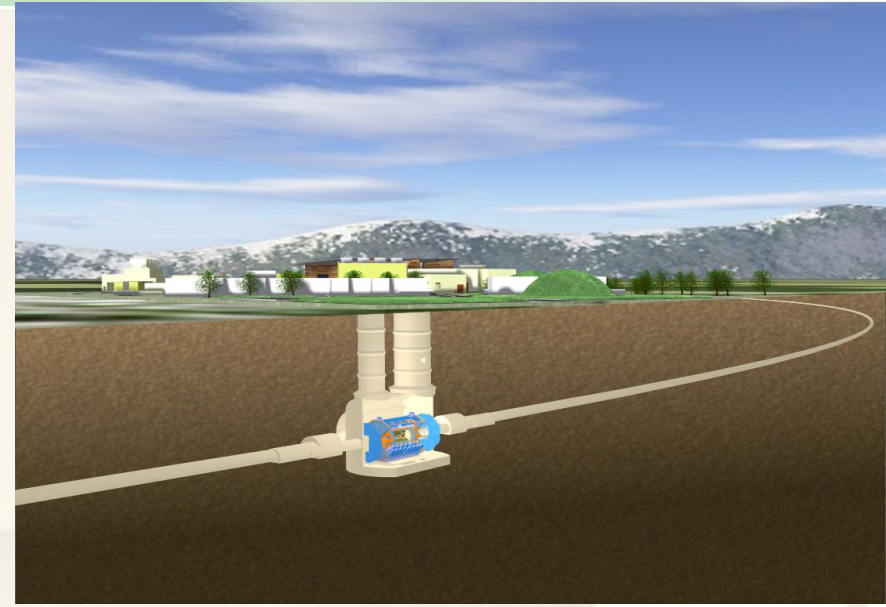




# *Backup Slides*

# ATLAS Experiment

- univerzální detektor urychlovače  
Large Hadron Collider:
  - $E_{CMS} = 7+7 \text{ TeV}$
  - $L_{\text{nominální}} = 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$
  - frekvence p+p srážek 40 MHz
- přepokládaný datum spuštění:  
léto 2008
- fyzikální program:
  - Higgs, SUSY, Exotics, ...
  - B-fyzika, top-fyzika,  
Standardní model



# *B-fyzikální program ATLASu (2)*

- **prověření vlastností detektoru v první fázi spuštění LHC**
  - kalibrace triggerového systému, trackingu a mionových systémů
  - měření invariantní hmoty a dob života dobře známých B-hadronů
- **v 1% srážek dojde k vytvoření  $b\bar{b}$  páru  $\Rightarrow$  frekvence 20 kHz v akceptanci detektoru ATLAS (při  $L = 10^{33} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$ ), ale pouze 100 Hz se bude ukládat pro celý ATLAS, z toho 10 Hz má rezervována B-fyzika**
  - nelze ukládat všechny měřitelné  $b\bar{b}$  případy, ale je třeba vybrat pouze ty nejzajímavější
  - je třeba velmi selektivní trigger
    - založený na detekci di-mionu, single-mionu, nebo mionu + clusteru v kalorimetru

# $B \rightarrow \mu^+ \mu^-$

- $BR_{SM} \sim 10^{-9}$ , může být výrazně jiné v non-SM modelech

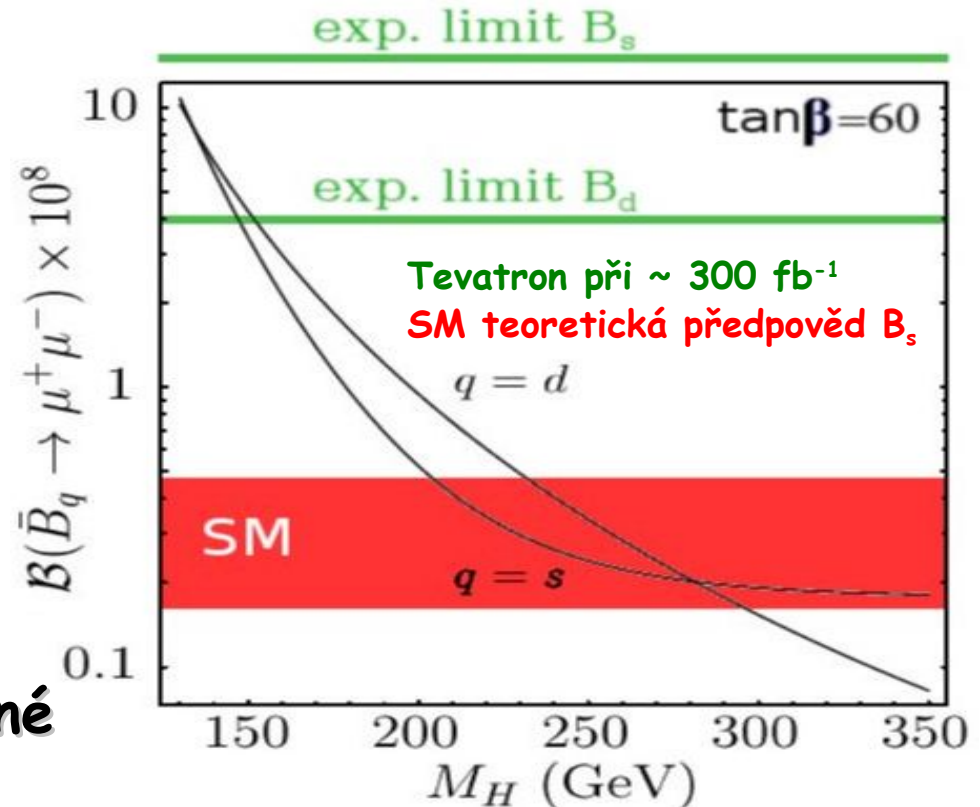
- výpočet zatížen malými teoretickými chybami

$$BR(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (3.42 \pm 0.52) \cdot 10^{-9}$$

$$BR(B_d^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) = (1.00 \pm 0.14) \cdot 10^{-10}$$

- současné experimenty umožňují určit horní limit (CDF+D0):  
 $BR(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-) \sim 10^{-7}$ , předpokládané vylepšení v budoucnu  $\sim 5-8x$

- LHC: při nominální  $L = 10^{34} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$  umožní změřit BR i menší než SM
- při odhadu pozadí je nutné brát v úvahu i velmi vzácné rozpady (obvykle chybějící v MC generátorech) a mis-identifikaci hadronů za miony:  $B_{d,s}^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$ ,  $B_{d,s}^0 \rightarrow K^- \pi^+$ , ...,  $B^{0\pm} \rightarrow \pi^{0\pm} \mu^+ \mu^-$ ,  $B^+ \rightarrow \mu^+ \mu^- l^+ \nu_l$ , ...





# Event Generator

- using **EvtGen** for  $\Lambda_b^0$  and consequent  $\Lambda^0$  decay
  - decay model can be defined either by **amplitude** or **probability**
    - need to know maximum probability (simple scanning whole phase space)
    - can simply introduce  $\Lambda_b^0$  polarization, model parameters at job-options level
    - EvtGen algorithm to avoid **inefficient accept-reject algorithm** and difficulty to find **maximum probability** in case of long or complicated decay chain:

$$A = \sum_{\lambda_{D^*} \lambda_\tau} A_{\lambda_{D^*} \lambda_\tau}^{B \rightarrow D^* \tau \nu} \times A_{\lambda_{D^*}}^{D^* \rightarrow D \pi} \times A_{\lambda_\tau}^{\tau \rightarrow \pi \nu}$$

$$P_B = \sum_{\lambda_{D^*} \lambda_\tau} |A_{\lambda_{D^*} \lambda_\tau}^{B \rightarrow D^* \tau \nu}|^2$$

accept-reject algorithm

$$\rho_{\lambda_{D^*} \lambda'_{D^*}}^{D^*} = \sum_{\lambda_-} A_{\lambda_{D^*} \lambda_\tau}^{B \rightarrow D^* \tau \nu} [A_{\lambda'_{D^*} \lambda_\tau}^{B \rightarrow D^* \tau \nu}]^*$$

$$P_{D^*} = \frac{1}{\text{Tr} \rho^{D^*}} \sum_{\lambda_{D^*} \lambda'_{D^*}} \rho_{\lambda_{D^*} \lambda'_{D^*}}^{D^*} A_{\lambda_{D^*}}^{D^* \rightarrow D \pi} [A_{\lambda'_{D^*}}^{D^* \rightarrow D \pi}]^*$$

$$\tilde{\rho}_{\lambda_{D^*} \lambda'_{D^*}}^{D^*} = A_{\lambda_{D^*}}^{D^* \rightarrow D \pi} [A_{\lambda'_{D^*}}^{D^* \rightarrow D \pi}]^*$$

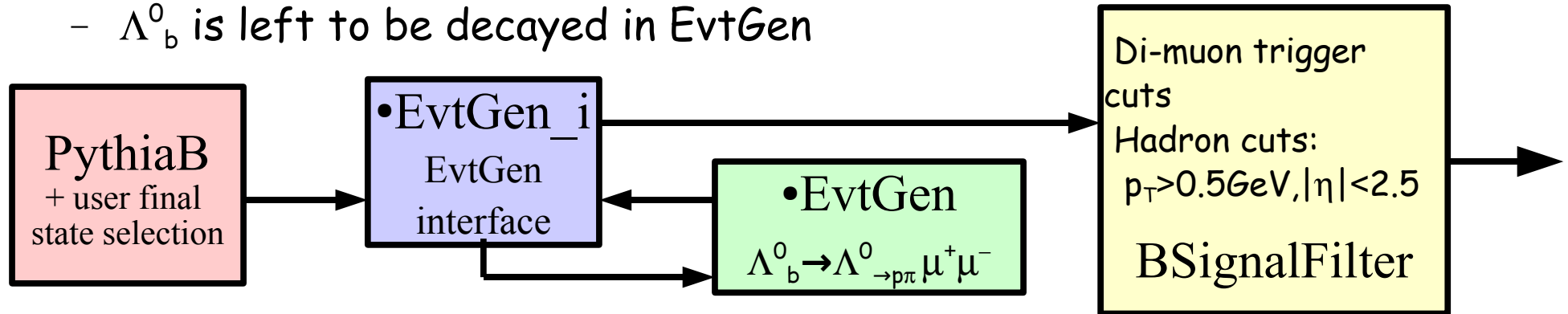
$$\rho_{\lambda_\tau \lambda'_\tau}^\tau = \sum_{\lambda_{D^*} \lambda'_{D^*}} \tilde{\rho}_{\lambda_{D^*} \lambda'_{D^*}}^{D^*} A_{\lambda_{D^*} \lambda_\tau}^{B \rightarrow D^* \tau \nu} [A_{\lambda'_{D^*} \lambda'_\tau}^{B \rightarrow D^* \tau \nu}]^*$$

$$P_\tau$$

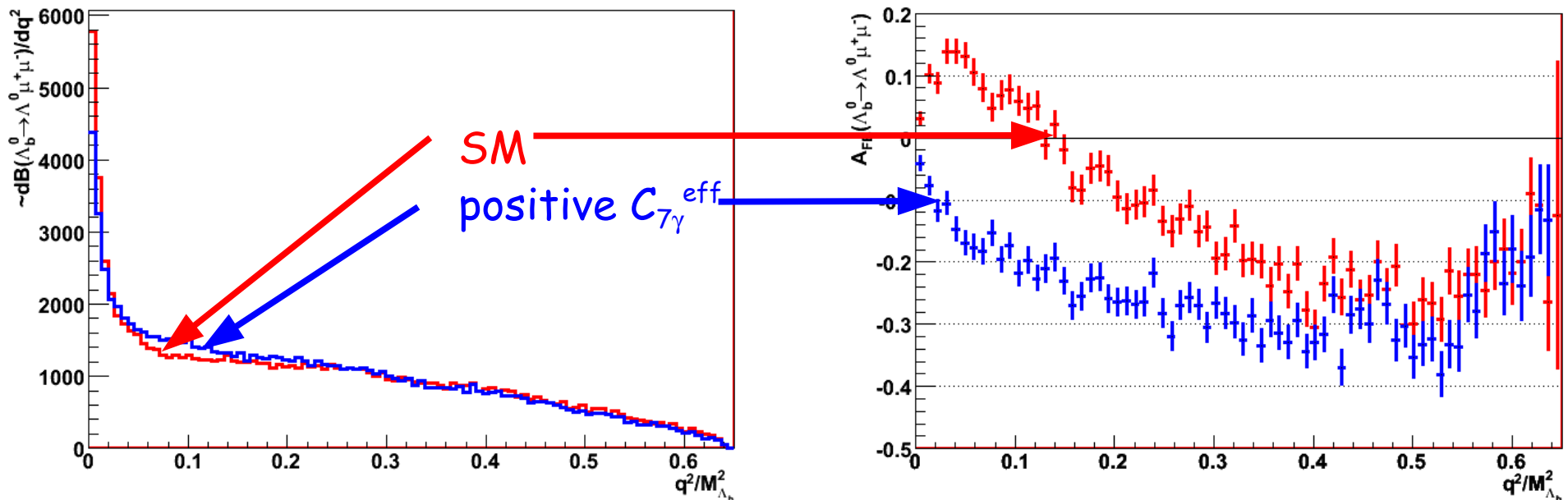
- created 3 new EvtGen classes:
  - EvtLb2LII -  $\Lambda_b^0 \rightarrow \Lambda^0 \mu^+ \mu^-$  decay amplitude ([T.M. Aliev et al.,...])
    - can chose physics model, FF model (HQET by default), include LD effects
  - EvtWilsonCoefficients - W.C. for SM ([A.J.Buras et al.,...])
  - EvtHypNonLepton -  $\Lambda^0 \rightarrow p \pi$  decay amplitude ([Review of Particle Physics])

# Event Generator (2)

- EvtGen reads output from **PythiaB** (pythia 6.205 tuned to b-physics)
  - forced hadronization to  $\Lambda_b^0$  (to speed up generation - thanks to [Cladio Ferreti](#))
  - $\Lambda_b^0$  is left to be decayed in EvtGen

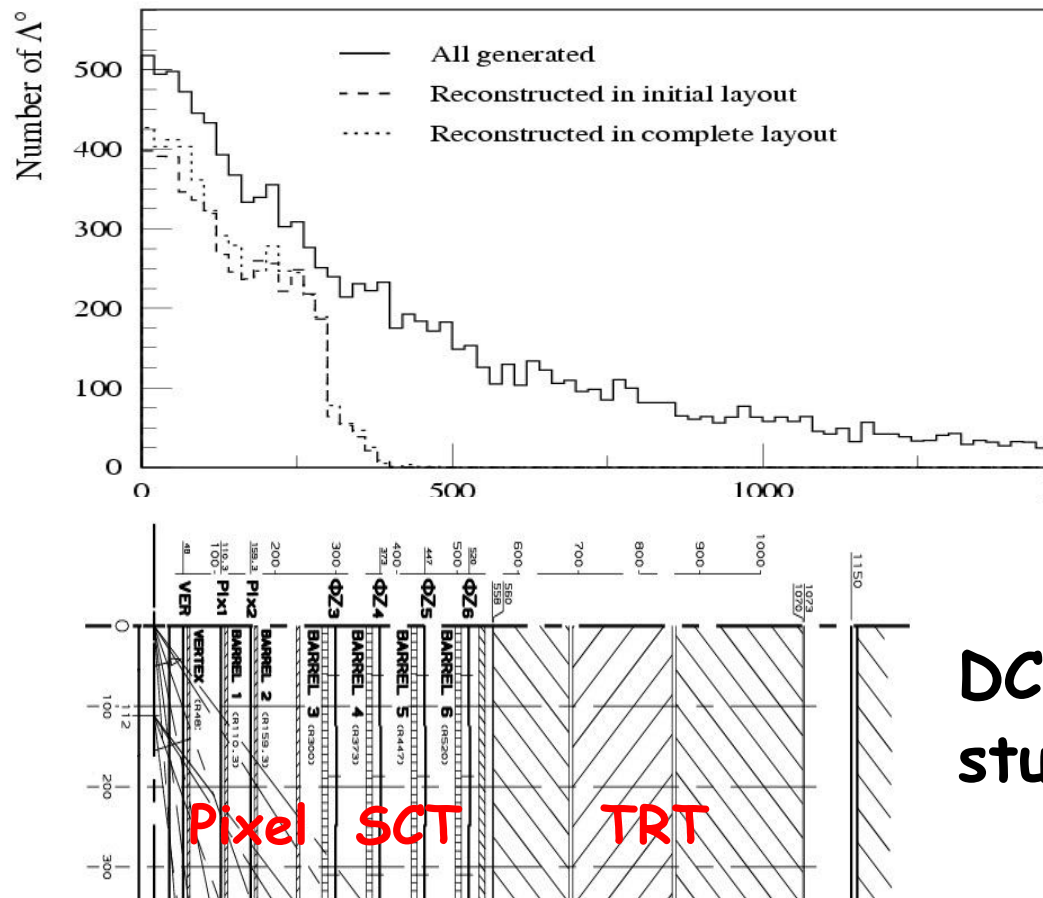


- non SM physics effects on  $A_{FB}$  and di-lepton mass spectrum:
  - 100k events generated by **EvtGen** - model in agreement with theoretical papers

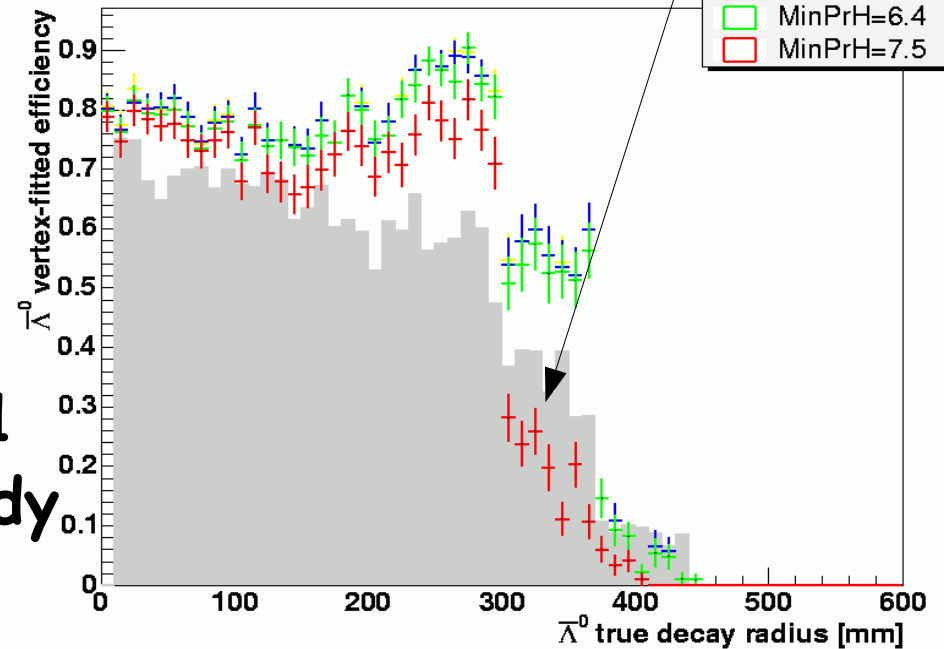


# Signal Reconstruction

- using xKalman and iPatRec reconstruction algorithm with modified parameters optimized to  $V^0$  finding
  - minimum PT lowered to 0.5 GeV/c (inner detector limit due to magnetic field)
  - xKalman: minimum number of precision (Si) hits lowered from 7 to 6 hits (3 SCT layers)
  - iPatRec: maximum impact parameter of tracks increased from 40 to 100 mm
- using xKalman reconstruction strategy optimal for initial layout



$\bar{\Lambda}^0$  using true information



DC1  
study