

# Fyzika těžkých kvarků v jádro-jaderných srážkách

Jakub Češka

Vedoucí práce: doc. Mgr. Jaroslav Bielčík, Ph.D.

Konzultant: Ing. Miroslav Myška, Ph.D.

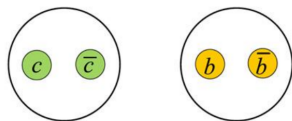
FJFI ČVUT v Praze / Online

11. Česko-Slovenská studentská vědecká konference ve fyzice  
(ČSSVK2020)  
18.9.2020

- Studium produkce  $\Upsilon$  mezonů v závislosti na multiplicitě v p+p srážkách při  $\sqrt{s} = 500$  GeV pomocí simulace srážek v MC Event Generátorech PYTHIA a HERWIG a porovnání výsledků s předběžnými STAR daty

# Kvarkonia

- Kvarkonia jsou vázané stavy těžkého kvarku a korespondujícího antikvarku ( $c\bar{c}$  nebo  $b\bar{b}$ )
- Fakt, že vzniklý mezon má nulový půvab, resp. krásu, se nazývá "skrytý" půvab, resp. "skrytá" krása
- Půvabná kvarkonia, tzv. charmonia, se mohou nacházet v různých stavech;  $J/\Psi$  (základní stav),  $\chi_c$  a  $\Psi'$  (excitované stavy)
- Taktéž krásná kvarkonia, tzv. bottomonia, tvoří různé stavy;  $\Upsilon$ ,  $\chi_b$ ,  $\Upsilon'$  či  $\chi'_b$



# Produkce kvarkonií

- Mechanismus produkce není ještě dobře znám - tvrdý rozptyl + neporuchová hadronizace
- Existuje několik modelů produkce:
  - ▶ Model barevného singletu
  - ▶ Model barevného oktetu
  - ▶ Model barevného vypaření
- Těžké kvarky mohou být v  $p+p$  srážkách produkovány při multipartonových interakcích - situace, kde při  $p+p$  srážce dojde k více než jednomu tvrdému rozptylu partonů

# Potlačení produkce kvarkonií

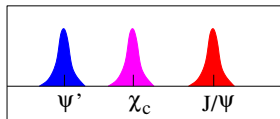
- Důležitou vlastností lehčích kvarkonií je, že se nerozpadají silnou interakcí na korespondující "otevřené" mezony ( $D^0 = c\bar{u}$ , resp.  $B^+ = u\bar{b}$ )
- K potlačení silného rozpadu kvarkonií dochází především proto, že hmotnost kvarkonia je nižší než dvojnásobek hmotnosti korespondujícího "otevřeného mezonu"

$$m_{J/\psi} \doteq 3,1\text{GeV}/c^2 < 2m_{D^0} \doteq 2 \cdot 1,87\text{GeV}/c^2$$

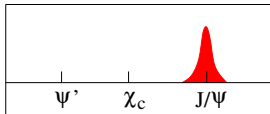
$$m_{\Upsilon} \doteq 9,46\text{GeV}/c^2 < 2m_{B^+} \doteq 2 \cdot 5,28\text{GeV}/c^2$$

# Potlačení produkce charmonií

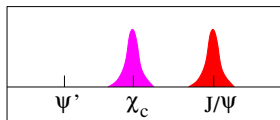
Porovnáním výtěžků jednotlivých kvarkonií je možné určit teplotní interval, ve kterém se hmota nachází



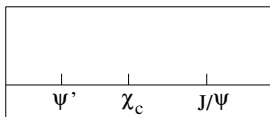
$$T < T_c$$



$$T_\chi < T < T_\Psi$$



$$T_{\Psi'} < T < T_\chi$$



$$T > T_\Psi$$

- Vázané stavy  $b\bar{b}$
- Obzvlášť zájem o  $\Upsilon(nS)$  stavy jako o sondu do QGP - podobné efekty jako pro  $J/\Psi$

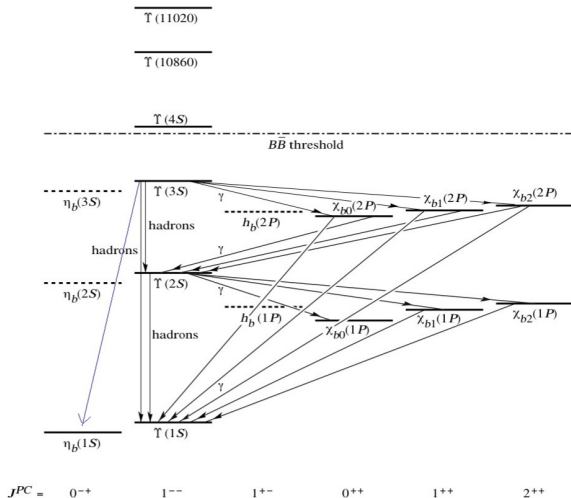
[*Phys.Lett.B 178(4), 416-422(1986)*]

- $\Upsilon(1S)$  - nejlehčí stav  $\Upsilon(nS)$ 
  - ▶  $m = 9460,30 \pm 0,26$  MeV
  - ▶ dileptonové rozpadové kanály
    - ★  $e^+e^-$  BR  $(2,38 \pm 0,11)\%$
    - ★  $\mu^+\mu^-$  BR  $(2,48 \pm 0,05)\%$

[*Phys.Rev.D 98, 030001(2018)*]

- $\Upsilon(2S)$  - druhý nejlehčí stav  $\Upsilon(nS)$ 
  - ▶  $m = 10023,26 \pm 0,31$  MeV
  - ▶ dileptonové rozpadové kanály
    - ★  $e^+e^-$  BR  $(1,91 \pm 0,16)\%$
    - ★  $\mu^+\mu^-$  BR  $(1,93 \pm 0,17)\%$
  - ▶ příspěvek feed-down efektů - rozpad na  $\Upsilon(1S)$  + něco

# Bottomonia





- Hadronizace implementovaná pomocí strunového modelu ("string model")
- Upsilon produkce
  - ▶  $gg \rightarrow b\bar{b}g$  v barevně singletním i barevně oktetním stavu
  - ▶  $q\bar{q} \rightarrow b\bar{b}g$
  - ▶  $gq \rightarrow b\bar{b}q$
- Umožňuje produkci  $\Upsilon$  přímo pomocí maticového elementu - možnost mít pouze události, ve kterých je generován  $\Upsilon$  mezon
- Umožňuje zvolit pouze některé rozpadové kanály částice
  - ▶  $\Upsilon \rightarrow e^+e^-$
  - ▶  $\Upsilon \rightarrow \mu^+\mu^-$

- Hadronizace implementovaná pomocí clusterového modelu
- Produkce Upsilon není možná pomocí přímého maticového elementu - k produkci dochází v průběhu hadronizace
  - ▶ možné pouze specifikovat produkci  $b\bar{b}$  páru
- Stejně jako v PYTHIA možné volit pouze určité rozpadové kanály  $\Upsilon$  mezonu
- Důležitý parametr "JetKtCut:MinKT" - určuje minimální hybnost kvarků vystupujících z maticového elementu

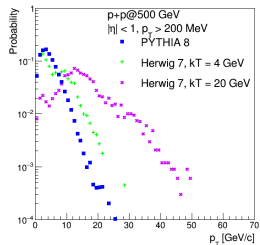
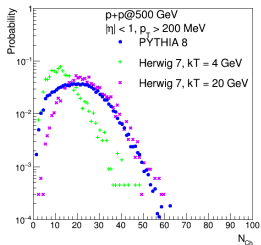
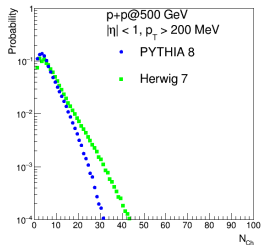
- Run card pro PYTHIA optimalizovaná pro produkci  $c$  a  $b$  kvarků při RHIC energiích
- MRSTMCal partonová distribuční funkce z LHAPDF6
- Produkce srážek s multi-partonovými interakcemi, initial-state zářením and final-state zářením
- Specifikováno  $m_c = 1,43$  GeV a  $m_b = 4,30$  GeV
- <https://www.star.bnl.gov/protected/heavy/ullrich/pythia8/>

- PYTHIA 8.240, HERWIG 7.1.4
- Minimum bias události
  - ▶ Vygenerována data pro nedifraktivní procesy a pro všechny soft QCD procesy - pro analýzu pouze nedifraktivní
  - ▶ Využity k určení spektra multiplicity při dané energii
- Události s Upsilon mezonem
  - ▶ Přesně 1 Upsilon v události
  - ▶ Produkce specifických  $\Upsilon$  stavů - v tomto případě pouze 1S a 2S
  - ▶ Rozpad Upsilon mezonu do dileptonového kanálu

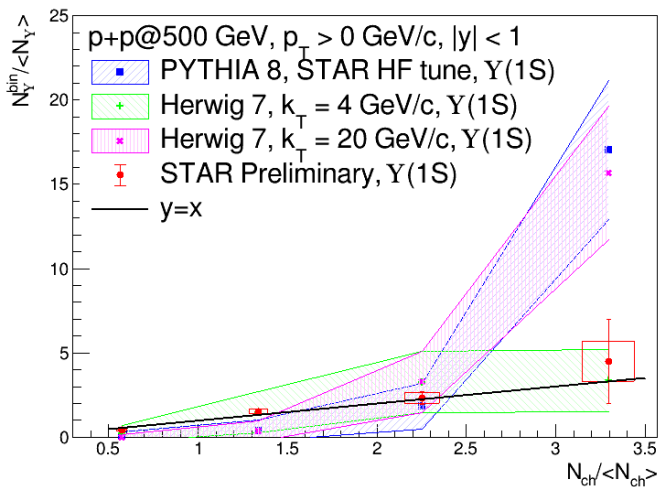
- Aplikovaná výběrová kritéria:
  - ▶  $|\eta| < 1$
  - ▶  $p_T > 200 \text{ MeV}/c$
- Pro PYTHIA 10M MB událostí, 10M událostí s Upsilon
- Pro HERWIG 10M MB událostí,  $\sim 2\text{-}3\text{k}$  událostí s Upsilon
- Porovnání s předběžnými STAR daty

- Závislost  $N_\Upsilon / \langle N_\Upsilon \rangle$  na  $N_{\text{ch}} / \langle N_{\text{ch}} \rangle$
- $N_{\text{ch}} \dots$  počet nabitých částic v události (multiplicita)
- $\langle N_{\text{ch}} \rangle \dots$  střední hodnota multiplicity
- $N_\Upsilon / \langle N_\Upsilon \rangle = (N_{\text{MB}} / N_{\text{MB}}^{\text{bin}})(N_\Upsilon^{\text{bin}} / N_\Upsilon)$ 
  - ▶  $N_\Upsilon \dots$  celkový počet srážek s Upsilon mezonem
  - ▶  $N_\Upsilon^{\text{bin}} \dots$  počet srážek s Upsilon mezonem s  $N_{\text{ch}} / \langle N_{\text{ch}} \rangle$  v korespondujícím binu
  - ▶  $N_{\text{MB}} \dots$  celkový počet minimum bias srážek
  - ▶  $N_{\text{MB}}^{\text{bin}} \dots$  počet minimum bias srážek s korespondujícím  $N_{\text{ch}} / \langle N_{\text{ch}} \rangle$

# Výsledky

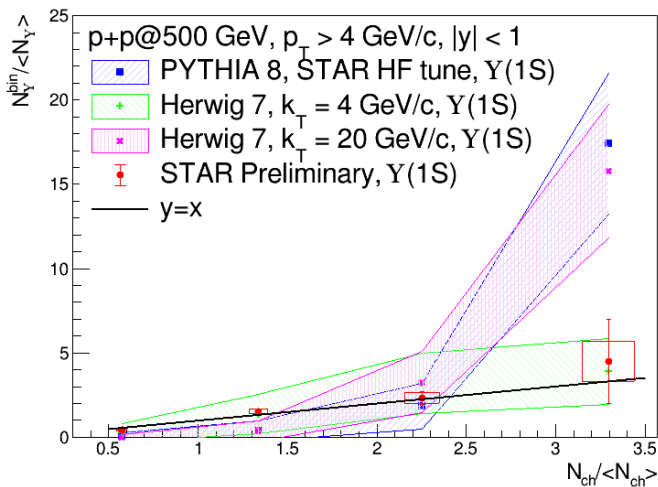


# Výsledky





# Výsledky



- Multiplicity generovaných dat se liší pro Herwig a PYTHIA
- Problematická produkce Upsilon v Herwig
- PYTHIA i Herwig ( $k_T = 20 \text{ GeV}/c$ ) předpovídají očekávaný silnější než lineární nárůst normalizovaného výtěžku Upsilon
- PYTHIA i Herwig ( $k_T = 20 \text{ GeV}/c$ ) v porovnání s předběžnými STAR daty předpokládají větší hodnoty výtěžku ve vyšších relativních multiplicitách a zároveň podceňují hodnoty pro nižší multiplicity
- Simulovaná data naznačují, že Upsilon mezony jsou produkovány v multipartonových interakcích