

# Fyzika těžkých kvarků v jádro-jaderných srážkách

**Jakub Češka**

Ve spolupráci s:

doc. Mgr. Jaroslav Bielčík, Ph.D.

Ing. Miroslav Myška, Ph.D.

Leszek Kosarzewski, BEng, Ph.D.

FJFI ČVUT v Praze

Zimní škola EJČF

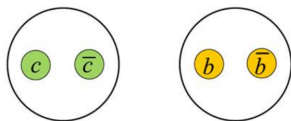
Bílý Potok

17.1.2020

- Studium produkce  $\Upsilon$  mezonů v závislosti na multiplicitě v p+p srážkách při  $\sqrt{s_{NN}} = 500$  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

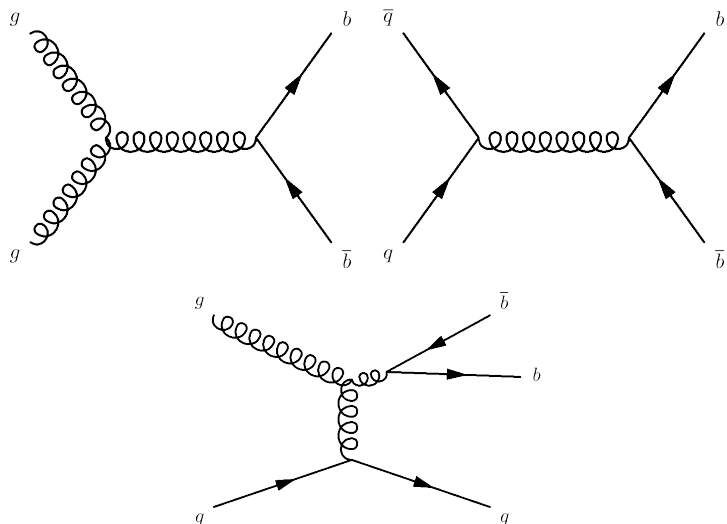


- Půvabná kvarkonia, tzv. charmonia, se mohou nacházet v různých stavech;  $J/\psi$  (základní stav),  $\chi_c$  a  $\psi'$  (excitované stavy)
- Taktéž krásná kvarkonia, tzv. bottomonia, tvoří různé stavy;  $\Upsilon$ ,  $\chi_b$ ,  $\Upsilon'$  či  $\chi'_b$

# 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

# Produkce kvarkonií



# 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"

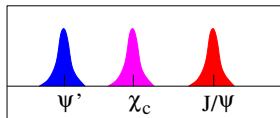
$$m_{J/\psi} \doteq 3,1\text{GeV}/c^2 < 2m_{D^0} \doteq 2 \cdot 1,87\text{GeV}/c^2$$

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

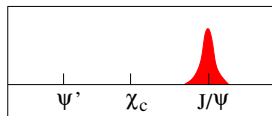
# Potlačení produkce kvarkonií

- Měření kvarkonií vzešlých ze srážky těžkých iontů lze využít jako způsob zjištění teploty vzniklého QGP
- Porovnáním výtěžků jednotlivých kvarkonií je možné určit teplotní interval, ve kterém se hmota nachází
- Toto je možné, jelikož jednotlivé stavy mají jinou teplotu, při které se rozpadají
- Hmotnost stavu je úměrná jeho poloměru, tudíž těžší kvarkonia mající větší poloměr se rozpadají při nižších teplotách
- V případě charmonií to tedy znamená, že při nejnižší teplotě se rozpadá stav  $\Psi'$ , následovaný stavem  $\chi_c$  a nejvyšší teploty vydrží stav  $J/\Psi$

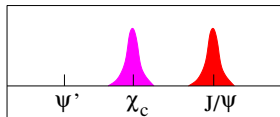
# Potlačení produkce charmonií



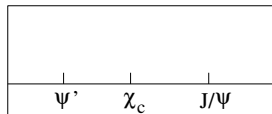
$$T < T_c$$



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



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



$$T > T_\Psi$$



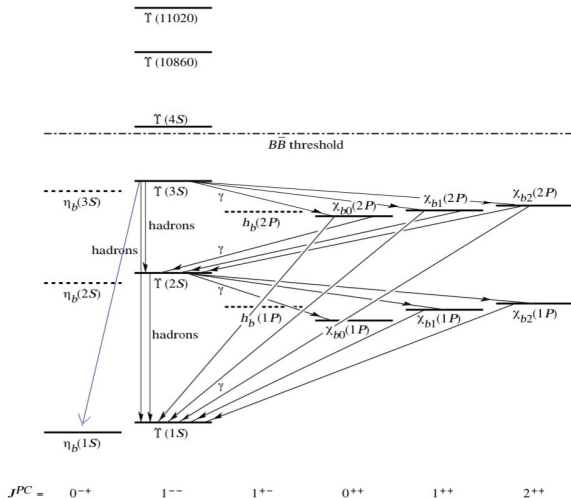
- Vázané stavy  $b\bar{b}$
- Obzvlášť zájem o  $\Upsilon(nS)$  stavy jako o sondu do QGP - podobné efekty jako pro  $J/\Psi$

[*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



- 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 PYTHII možné volit pouze určité rozpadové kanály  $\Upsilon$  mezonu
- Důležitý parametr "JetKtCut:MinKT" - určuje minimální hybnost kvarků vystupujících z maticového elementu

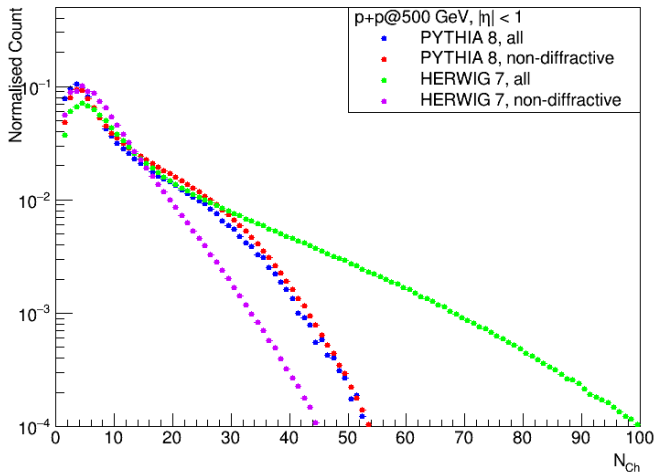
- <https://www.star.bnl.gov/protected/heavy/ullrich/pythia8/>
- Run card pro PYTHIA využívaná ve fyzice těžkých kvarků při RHIC energiích
- MRSTMCal partonové distribuční funkce z LHAPDF6
- Obsahuje multi-partonové interakce, initial-state záření and final-state záření
- Specifikováno  $m_c = 1,43 \text{ GeV}$  a  $m_b = 4,30 \text{ GeV}$

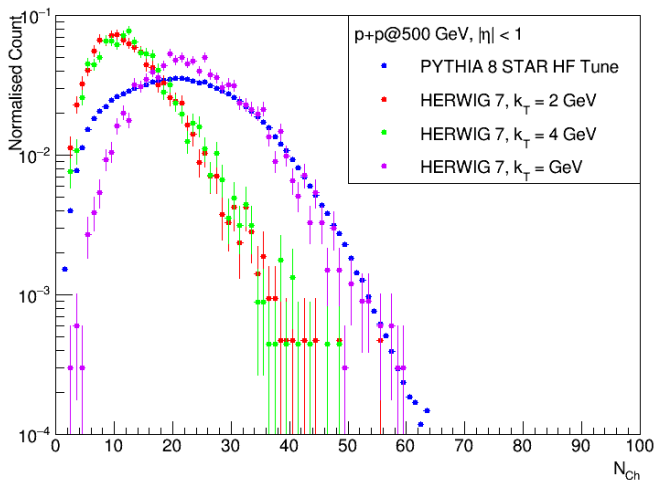
- PYTHIA 8.240, HERWIG 7.1.4
- Minimum bias události
  - ▶ Vygenerována data pro nedifraktivní procesy a pro všechny soft QCD procesy - pro analýzu pouze nedifraktivní
  - ▶ Využity k určení spektra multiplicity při dané energii
- Události s Upsilon mezonem
  - ▶ Přesně 1 Upsilon v události
  - ▶ Produkce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

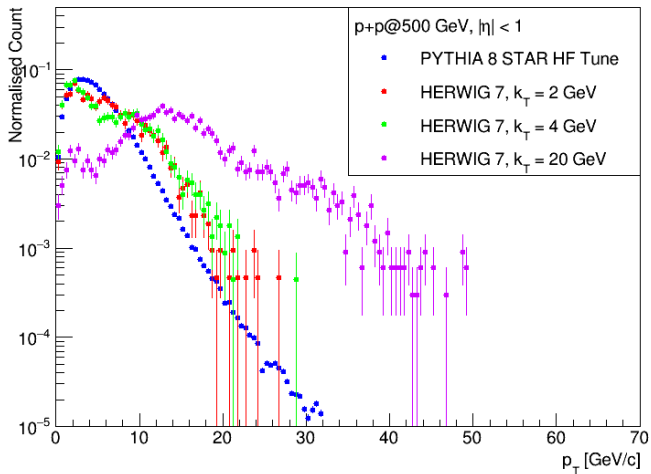
- Aplikované cuty:
  - ▶  $|\eta| < 1$
  - ▶  $p_T > 200 \text{ MeV}/c$
- Pro PYTHIA 10M MB událostí, 10M událostí s Upsilon
- Pro HERWIG 10M MB událostí,  $\sim 2\text{-}3\text{k}$  událostí s Upsilon (generováno 1,25G událostí pro  $k_T = 2$  a 4 GeV, 5G pro  $k_T = 20$  GeV)
- Porovnání s předběžnými STAR daty  
*[[https://drupal.star.bnl.gov/STAR/files/Quarkonium\\_EPS-HEP\\_LK\\_2019\\_7\\_12\\_v4.pdf](https://drupal.star.bnl.gov/STAR/files/Quarkonium_EPS-HEP_LK_2019_7_12_v4.pdf)]*

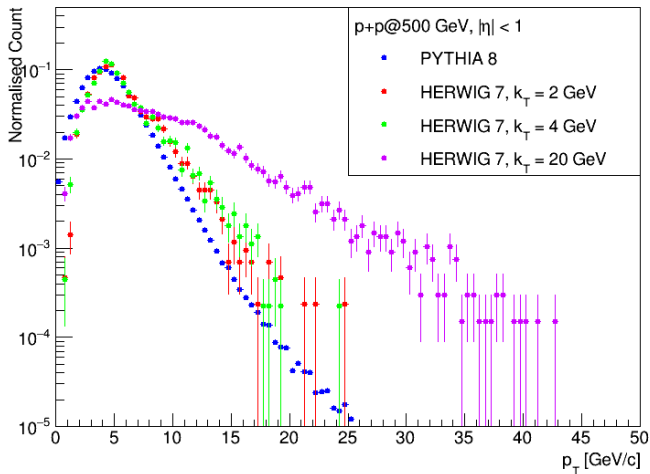
- Závislost  $N_\Upsilon / \langle N_\Upsilon \rangle$  na  $N_{\text{ch}} / \langle N_{\text{ch}} \rangle$
- $N_{\text{ch}} \dots$  počet nabitých částic v události (multiplicita)
- $\langle N_{\text{ch}} \rangle \dots$  střední hodnota multiplicity
- $N_\Upsilon / \langle N_\Upsilon \rangle = (N_{\text{MB}}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



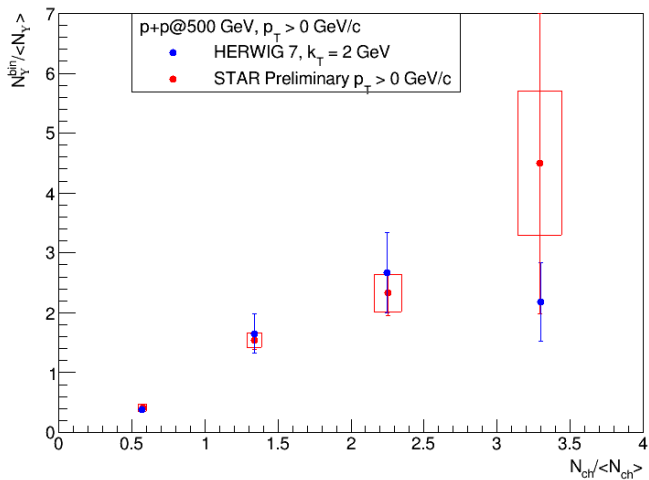




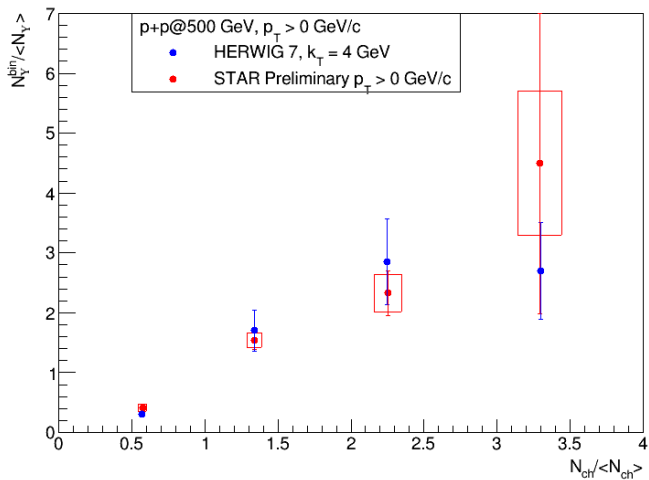




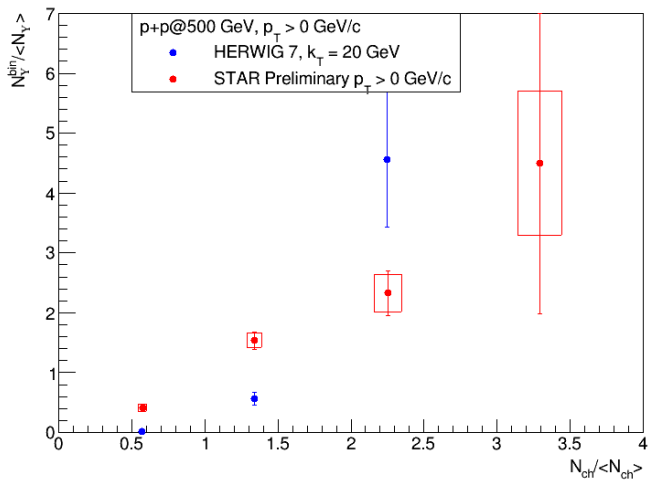
# Výsledky



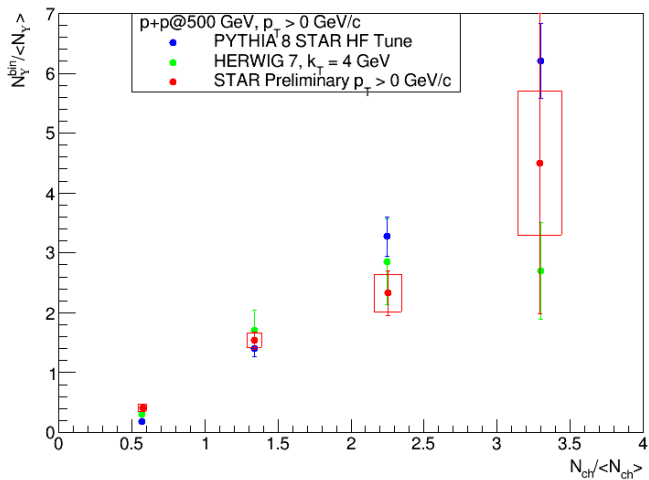
# Výsledky



# Výsledky

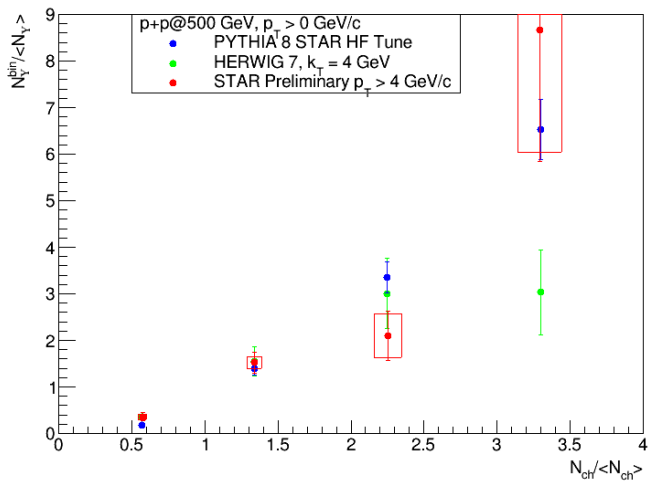


# Výsledky

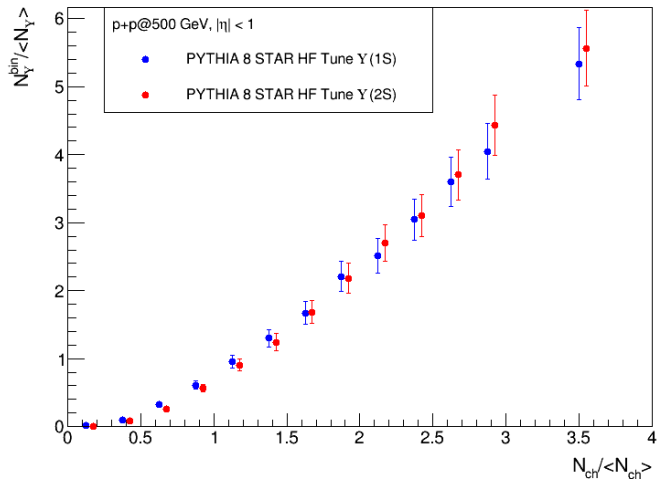




# Výsledky



# Výsledky



- PYTHIA 8 popisuje data v rámci chyb - souhlasí s předpokládanými trendy dat
- HERWIG 7 popisuje data dostatečně dobře pro nižší multiplicity ( $< 2.5 N_{\text{ch}} / \langle N_{\text{ch}} \rangle$ ), pro vyšší multiplicity produkce klesá
- Data naznačují, že Upsilon mezony jsou produkovány v multipartonových interakcích
- Data pro 1S a 2S stavy vykazují řazení podle hmotnosti v důsledku nižšího vlivu perkolačních/saturačních efektů pro tvrdší procesy
- Další plány zahrnují podrobnější studii feed-down efektů těžších stavů na 1S pomocí generátoru PYTHIA

## T(2S) DECAY MODES

Mode	Fraction ( $\Gamma_i/\Gamma$ )	Scale factor/ Confidence level
$\Gamma_1$ $T(1S)\pi^+\pi^-$	(17.85 ± 0.26) %	
$\Gamma_2$ $T(1S)\pi^0\pi^0$	( 8.6 ± 0.4 ) %	
$\Gamma_3$ $\tau^+\tau^-$	( 2.00 ± 0.21 ) %	
$\Gamma_4$ $\mu^+\mu^-$	( 1.93 ± 0.17 ) %	S=2.2
$\Gamma_5$ $e^+e^-$	( 1.91 ± 0.16 ) %	
$\Gamma_6$ $T(1S)\pi^0$	< 4	$\times 10^{-5}$ CL=90%
$\Gamma_7$ $T(1S)\eta$	( 2.9 ± 0.4 ) $\times 10^{-4}$	S=2.0
$\Gamma_8$ $J/\psi(1S)$ anything	< 6	$\times 10^{-3}$ CL=90%
$\Gamma_9$ $J/\psi(1S)\eta_c$	< 5.4	$\times 10^{-6}$ CL=90%
$\Gamma_{10}$ $J/\psi(1S)\chi_{c0}$	< 3.4	$\times 10^{-6}$ CL=90%
$\Gamma_{11}$ $J/\psi(1S)\chi_{c1}$	< 1.2	$\times 10^{-6}$ CL=90%
$\Gamma_{12}$ $J/\psi(1S)\chi_{c2}$	< 2.0	$\times 10^{-6}$ CL=90%
$\Gamma_{13}$ $J/\psi(1S)\eta_c(2S)$	< 2.5	$\times 10^{-6}$ CL=90%
$\Gamma_{14}$ $J/\psi(1S)X(3940)$	< 2.0	$\times 10^{-6}$ CL=90%
$\Gamma_{15}$ $J/\psi(1S)X(4160)$	< 2.0	$\times 10^{-6}$ CL=90%
$\Gamma_{16}$ $\chi_{c1}$ anything	( 2.2 ± 0.5 ) $\times 10^{-4}$	
$\Gamma_{17}$ $\chi_{c1}(1P)^0 X_{tetra}$	< 3.67	$\times 10^{-5}$ CL=90%
$\Gamma_{18}$ $\chi_{c2}$ anything	( 2.3 ± 0.8 ) $\times 10^{-4}$	
$\Gamma_{19}$ $\psi(2S)\eta_c$	< 5.1	$\times 10^{-6}$ CL=90%
$\Gamma_{20}$ $\psi(2S)\chi_{c0}$	< 4.7	$\times 10^{-6}$ CL=90%
$\Gamma_{21}$ $\psi(2S)\chi_{c1}$	< 2.5	$\times 10^{-6}$ CL=90%
$\Gamma_{22}$ $\psi(2S)\chi_{c2}$	< 1.9	$\times 10^{-6}$ CL=90%
$\Gamma_{23}$ $\psi(2S)\eta_c(2S)$	< 3.3	$\times 10^{-6}$ CL=90%
$\Gamma_{24}$ $\psi(2S)X(3940)$	< 3.9	$\times 10^{-6}$ CL=90%
$\Gamma_{25}$ $\psi(2S)X(4160)$	< 3.9	$\times 10^{-6}$ CL=90%