

# Sensibilità delle distribuzioni in rapidità delle $J/\psi$ nello spettrometro di muoni di ALICE alle PDF nella regione di $x < 10^{-5}$

D. Stocco<sup>1</sup> e E. Vercellin<sup>1</sup>  
R. Guernane<sup>2</sup> (Produzione del fondo correlato)

<sup>1</sup>Università/INFN Torino

<sup>2</sup>LPC Clermont-Ferrand

24 Ottobre 2006

- 1 **Introduzione**
  - Quarkonia: panoramica
- 2 **PDF**
  - Introduzione
  - Regioni cinematiche
  - Osservabili sperimentali
- 3 **Simulazioni**
  - Tecnica
  - Input
  - Risultati

- 1 **Introduzione**
  - Quarkonia: panoramica
- 2 PDF
  - Introduzione
  - Regioni cinematiche
  - Osservabili sperimentali
- 3 Simulazioni
  - Tecnica
  - Input
  - Risultati

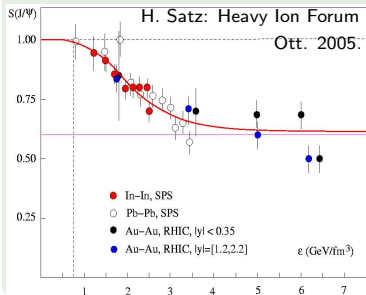
# Quarkonia in collisioni Pb-Pb

- Quarkonia pesanti: stati legati  $c\bar{c}$  e  $b\bar{b}$ .
- “Hard probes” del deconfinamento:
  - Coppia  $Q\bar{Q}$  prodotta nelle prime fasi della collisione ( $\tau \sim 1/m_Q$ )
  - Formazione legame sensibile al mezzo attraversato.



## SPS/RHIC

- $J/\psi$ : soppressione.

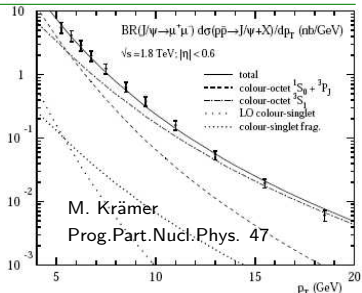
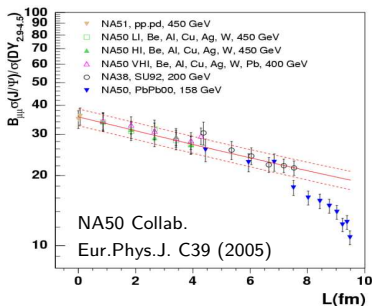


## LHC

- $\Upsilon$ : soppressione (?).
- $J/\psi$ :
  - aumento (ricombinazione)?
  - soppressione?

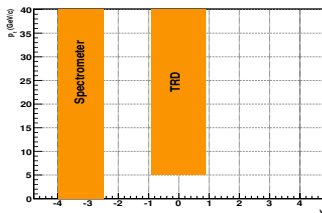
Quarkonia in collisioni p-p sono importanti

- 1 come riferimento per le collisioni Pb-Pb:
  - insieme alle collisioni p-A per la comprensione di effetti dovuti alla materia nucleare ordinaria.
- 2 intrinsecamente:
  - studi dei meccanismi di produzione, descritti da modelli (CSM, CEM, nrQCD).



# Quarkonia nell'esperimento ALICE

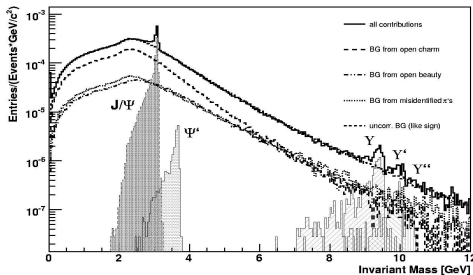
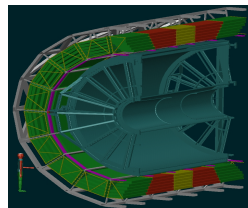
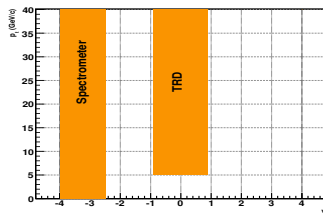
- Quarkonia rivelati nei decadimenti in:
  - Onium  $\rightarrow e^+e^-$
  - Onium  $\rightarrow \mu^+\mu^-$
- $e^+e^-$  rivelati tramite TRD.
- $J/\psi$  dal decadimento di mesoni B rivelati grazie all'informazione sul vertice (ITS+TPC).



Massa invariante di  $e^+e^-$  in  
 $7.5 \times 10^7$  collisioni Pb-Pb.

# Quarkonia nell'esperimento ALICE

- Quarkonia rivelati nei decadimenti in:
  - Onium  $\rightarrow e^+e^-$
  - Onium  $\rightarrow \mu^+\mu^-$
- $e^+e^-$  rivelati tramite TRD.
- $J/\psi$  dal decadimento di mesoni B rivelati grazie all'informazione sul vertice (ITS+TPC).

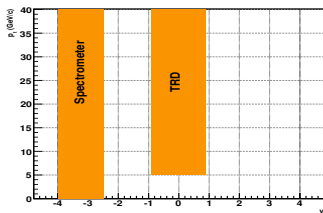


Massa invariante di  $e^+e^-$  in  $7.5 \times 10^7$  collisioni Pb-Pb.

ALICE Physics Performance Report Vol. II  
J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 32 (2006)

# Quarkonia nell'esperimento ALICE

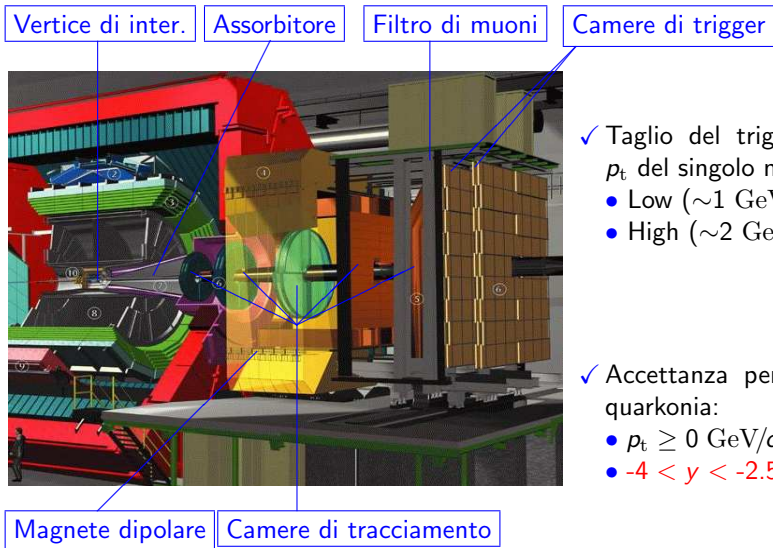
- Quarkonia rivelati nei decadimenti in:
  - $\text{Onium} \rightarrow e^+e^-$
  - $\text{Onium} \rightarrow \mu^+\mu^-$
- $e^+e^-$  rivelati tramite TRD.
- $J/\psi$  dal decadimento di mesoni B rivelati grazie all'informazione sul vertice (ITS+TPC).



Massa invariante di  $e^+e^-$  in  
 $7.5 \times 10^7$  collisioni Pb-Pb.



# Spettrometro di muoni di ALICE



- ✓ Taglio del trigger sul  $p_t$  del singolo muone:
  - Low ( $\sim 1$  GeV/c)
  - High ( $\sim 2$  GeV/c)

- ✓ Accettanza per quarkonia:
  - $p_t \geq 0$  GeV/c
  - $-4 < y < -2.5$

- 1 Introduzione
  - Quarkonia: panoramica
- 2 PDF
  - Introduzione
  - Regioni cinematiche
  - Osservabili sperimentali
- 3 Simulazioni
  - Tecnica
  - Input
  - Risultati

# Funzioni di distribuzione

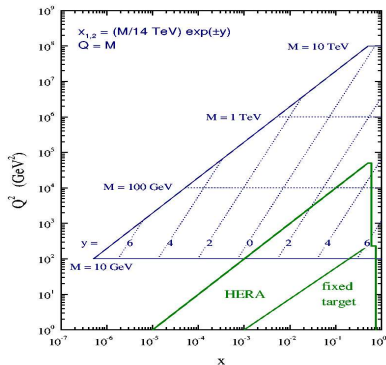
- Teorema di fattorizzazione: separazione dei contributi perturbativi da quelli non perturbativi:

$$\sigma(AB \rightarrow X) = \int \int dx_1 dx_2 f_{i/A}(x_1) f_{j/B}(x_2) \hat{\sigma}_{ij}$$

- I contributi non perturbativi (universali) delle PDF sono ricavati da interpolazioni di dati sperimentali.

- CTEQ
- MRST

- Necessità di coprire regioni cinematiche sempre più ampie.



- La variabile  $x$  di Bjorken può essere messa in relazione con variabili macroscopiche del sistema:

$$M^2 = \hat{s} = x_1 x_2 s \quad y = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{E + p_z}{E - p_z} \right) = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{x_1}{x_2} \right)$$

⇓

$$x_1 = \frac{M}{\sqrt{s}} e^y \quad x_2 = \frac{M}{\sqrt{s}} e^{-y}$$

Per  $J/\psi$  a 14 TeV:  $|y| > 3 \Leftrightarrow x < 10^{-5}$ .

- Bassi valori di  $x$  raggiungibili con:
  - energie nel centro di massa elevate  $\Rightarrow$  Acceleratore
  - piccole scale  $\Rightarrow$  Tipo di particella
  - rapidità elevate  $\Rightarrow$  Caratteristiche rivelatore

- La variabile  $x$  di Bjorken può essere messa in relazione con variabili macroscopiche del sistema:

$$M^2 = \hat{s} = x_1 x_2 s \qquad y = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{E + p_z}{E - p_z} \right) = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{x_1}{x_2} \right)$$



$$x_1 = \frac{M}{\sqrt{s}} e^y \qquad x_2 = \frac{M}{\sqrt{s}} e^{-y}$$

Per  $J/\psi$  a 14 TeV:  $|y| > 3 \Leftrightarrow x < 10^{-5}$ .

- Bassi valori di  $x$  raggiungibili con:
  - energie nel centro di massa elevate  $\Rightarrow$  Acceleratore
  - piccole scale  $\Rightarrow$  Tipo di particella
  - rapidità elevate  $\Rightarrow$  Caratteristiche rivelatore

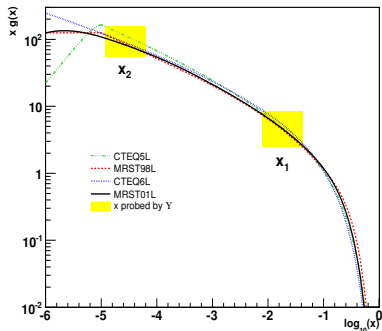
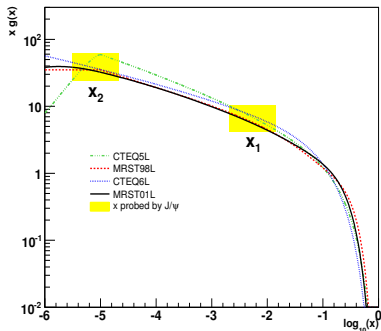
# Regioni accessibili ai quarkonia nello spettrometro

- Calcoli LO.

$J/\psi$

Regioni esplorate da  
( $2.5 < y < 4$ )

$\Upsilon$



- Bassi valori di  $x \Rightarrow$  scarsità di dati sperimentali  $\Rightarrow$  estrapolazioni  $\Rightarrow$  maggiori differenze tra i modelli.

- 1 Introduzione
  - Quarkonia: panoramica
- 2 PDF
  - Introduzione
  - Regioni cinematiche
  - Osservabili sperimentali
- 3 Simulazioni
  - Tecnica
  - Input
  - Risultati

# Il contesto: Color Evaporation Model

- La descrizione del meccanismo di produzione di quarkonia si basa su modelli teorici (CSM, nrQCD, ecc.).
- Nei calcoli seguenti si sono adottate le previsioni del Color Evaporation Model (CEM).

$$\sigma_C^{CEM} = F_C \sum_{i,j} \int_{4m_Q^2}^{4m_H^2} d\hat{s} \int dx_1 dx_2 f_{i/A}(x_1, \mu^2) f_{j/B}(x_2, \mu^2) \hat{\sigma}_{ij}(\hat{s}) \delta(\hat{s} - x_1 x_2 s)$$

- $C$  = tipo di quarkonio.
- $A, B$  adroni collidenti.
- $ij = q\bar{q}$  o  $gg$ .
- $F_C$  frazione di  $Q\bar{Q}$  che forma stato legato (non-perturbativo ma universale).



- Nel CEM la sezione d'urto totale di produzione di  $J/\psi$  dipende dalle funzioni di distribuzione, ma non solo.
- Un'osservabile migliore è costituita da:

$$\frac{d\sigma_c^{CEM}}{dy} = \frac{F_C}{s} \sum_{i,j} \int_{4m_Q^2}^{4m_H^2} d\hat{s} \hat{\sigma}_{ij}(\hat{s}) f_{i/A}\left(\sqrt{\frac{\hat{s}}{s}} e^y, \mu^2\right) f_{j/B}\left(\sqrt{\frac{\hat{s}}{s}} e^{-y}, \mu^2\right)$$



- Nel CEM la **forma** delle distribuzioni in rapidità delle  $J/\psi$  ad  $y$  elevate dipende dalle funzioni di distribuzione di gluoni.

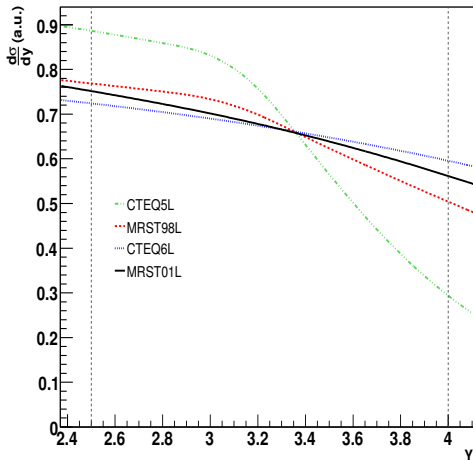
L'integrale nella finestra di accettazione  
( $2.5 < y < 4.0$ ) è normalizzato a 1

## Approssimazioni

- Calcoli LO
- Contributo  $gg$  dominante

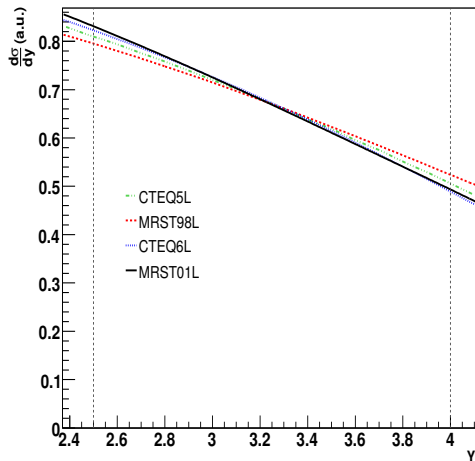


$$\hat{\sigma}_{ij}(\hat{s}) = \hat{\sigma}_{gg}$$



L'integrale nella finestra di accettazione  
( $2.5 < y < 4.0$ ) è normalizzato a 1

- Le  $\Upsilon$  sono sensibili ad una regione di  $x$  in cui le differenze tra PDFs sono contenute.



- 1 Introduzione
  - Quarkonia: panoramica
- 2 PDF
  - Introduzione
  - Regioni cinematiche
  - Osservabili sperimentali
- 3 **Simulazioni**
  - **Tecnica**
  - **Input**
  - **Risultati**

# “Fast simulation”

- La simulazione della statistica richiesta a LHC richiederebbe tempi di calcolo molto elevati.



## Fast simulation

- Parametrizzazione della risposta del rivelatore al singolo muone.
- Due fasi:
  - 1 Generazione di quarkonia da distribuzioni in rapidità e impulso trasverso.
  - 2 Assegnazione di una probabilità di rivelazione a seconda dei parametri cinematici della particella generata.

# Input della simulazione

- Sezioni d'urto **Prompt** dal CEM.

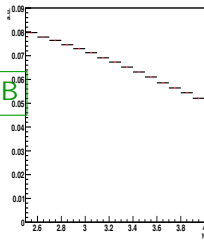
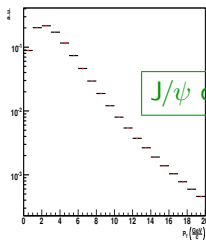
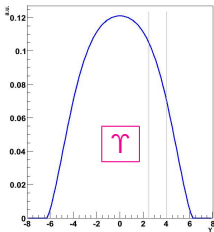
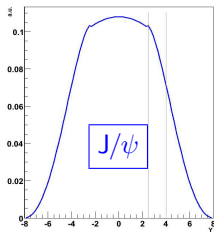
- + Produzione diretta ( $\sigma_{dir}$ )
- + Feed-down da risonanze di massa superiore

$$\Rightarrow$$

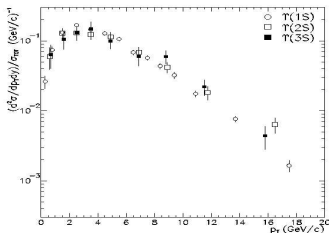
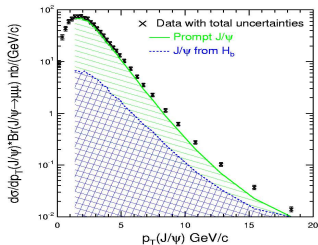
	$\sigma \times BR_{\mu^+\mu^-}$	$\sigma_{dir}/\sigma$
$\Upsilon$	28 nb	0.52
$J/\psi$	$3.18 \mu\text{b}$	0.62

- Sezioni d'urto differenziali:

Sorgente	Tipo	Quarkonia	Dettagli
CEM	$d\sigma/dy$	$\psi$ <b>prompt</b>	
		$\Upsilon$	
PYTHIA	$d\sigma/dy$	$\psi$ da B	$\sigma_{b\bar{b}}=0.51 \text{ mb}$
	$d\sigma/dp_t$		



# Input della simulazione: da Tevatron a LHC

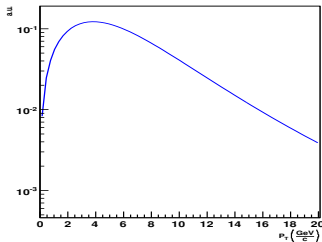
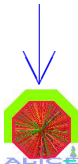
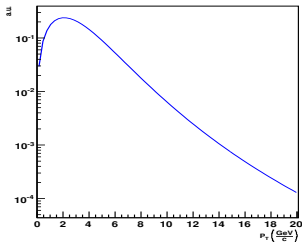


J/ψ

Il CEM predice un aumento in  $\langle p_t^2 \rangle$

γ

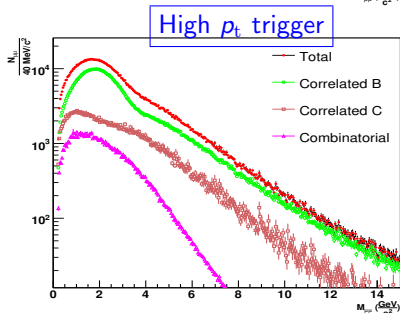
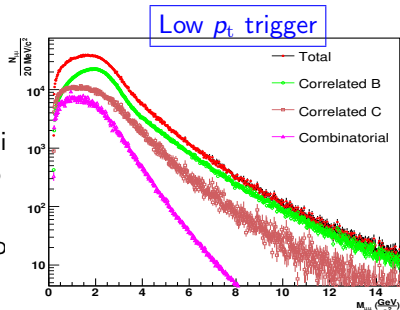
Accardi et al. "Hard Probes in Heavy Ion Collisions at the LHC: PDFs, Shadowing and pA Collisions"



- **Combinatoriale** (coppie di  $\mu$  di segno opposto dal decadimento scorrelato di b, c,  $\pi/K$ ).
- **Correlato** (coppie di  $\mu$  di segno opposto del decadimento a catena di  $b\bar{b}$  e  $c\bar{c}$ ).

$$\mu + X \leftarrow D \quad D \rightarrow X + \mu$$

$$\begin{array}{l} \mu + D \leftarrow B \quad B \rightarrow D + \mu \\ \mu + X \leftarrow \quad \quad \quad \hookrightarrow X + \mu \end{array}$$



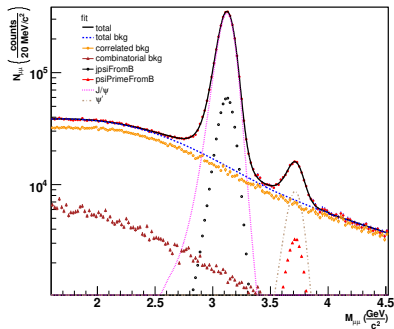
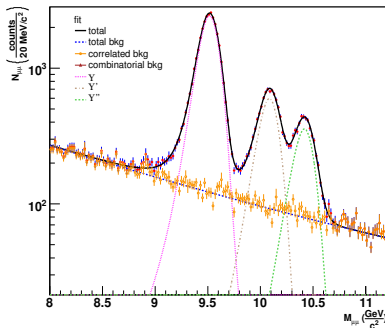


# Quarkonia attesi

Scenario di presa dati in collisioni

p-p:

- $\mathcal{L} = 3 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$
- $t = 10^7 \text{ s}$

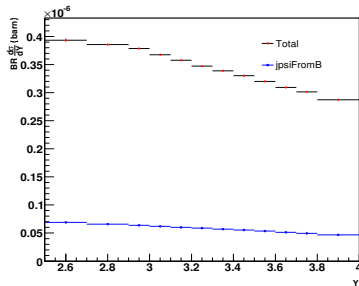
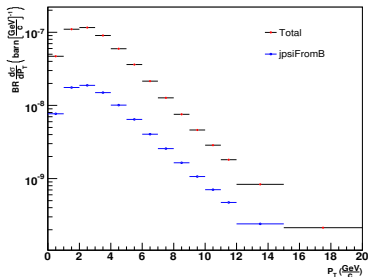


## Quarkonia attesi

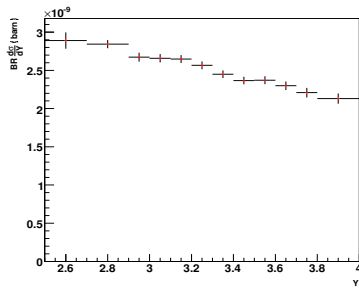
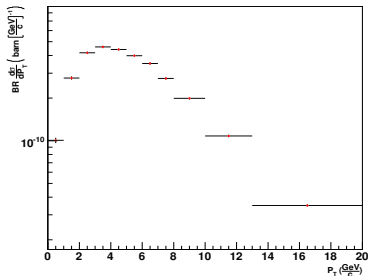
$\Upsilon$	$29 \times 10^3$
$\Upsilon'$	$7.2 \times 10^3$
$\Upsilon''$	$4.5 \times 10^3$
$J/\psi$	$3 \times 10^6$
$\psi'$	$0.078 \times 10^6$

# Distribuzioni in $p_t$ e rapidità

J/ψ



γ

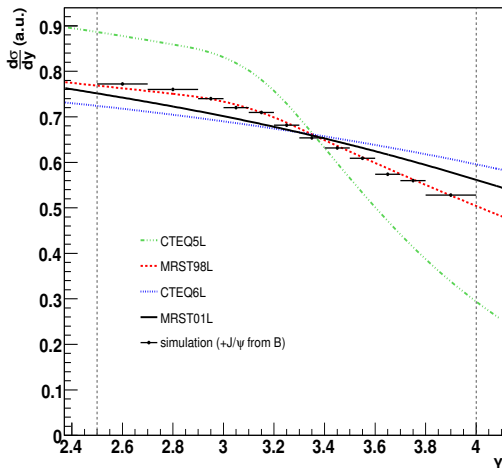


$p_t$

$y$

# Confronto con la simulazione

- I dati simulati includono le  $J/\psi$  dal decadimento del B.
- L'accuratezza dei dati che saranno presi a LHC sembra essere sufficiente per...



... fornire utili informazioni sulle funzioni di distribuzioni dei gluoni nella regione di bassi  $x$

## Conclusioni

- L'esperimento ALICE presenta ottime potenzialità per la rivelazione dei quarkonia:
  - nel barile centrale ( $p_t \geq 5 \text{ GeV}/c$ ,  $|y| < 0.6$ , vertice secondario).
  - nella regione in avanti ( $p_t \geq 0 \text{ GeV}/c$ ,  $-4 < y < -2.5$ )
- La statistica attesa nello Spettrometro di Muoni è sufficiente per misure delle distribuzioni in  $p_t$  e  $y$  (utilizzabili per studi dei meccanismi di produzione).
- Da una semplice analisi (basata sul CEM e includente alcune approssimazioni) risulta che la forma delle distribuzioni in rapidità delle  $J/\psi$  prompt nella finestra di accettazione dello Spettrometro sia sensibile alle distribuzioni di gluoni a bassi  $x$ .

## Prospettive

- Verifica della sensibilità alle PDFs nell'ambito della nrQCD (integrata in PYTHIA 6.324 e attualmente in corso di convalida ad opera di GENSER+PYTHIA+LHCb).

# Extra

Rapidità:  $y = \frac{1}{2} \ln \left( \frac{E+p_z}{E-p_z} \right)$

Pseudorapidità:  $\eta = -\ln \tan \frac{\vartheta}{2}$

x di Bjorken:  $x = \frac{Q^2}{2P \cdot q}$

# Processi del fondo correlato

**DDprompt:**  $\mu^+ X_1 \leftarrow D(c) \quad D(\bar{c}) \rightarrow X_2 \mu^-$

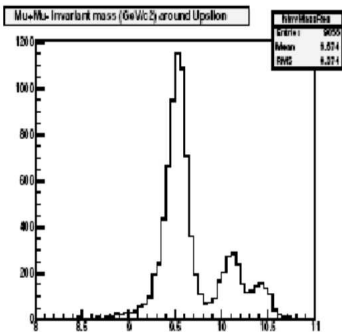
**BBdiff:**  $\mu^+ X_1 \leftarrow B(\bar{b}) \quad B(b) \rightarrow X_2 \mu^-$

**BDdiff:**  $\mu^+ X_1 \leftarrow B(\bar{b}) \quad B(b) \rightarrow D(c) X_2$   
 $\hookrightarrow X_3 \mu^+$

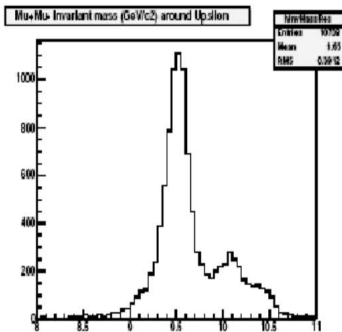
**DDdiff:**  $X_1 D(\bar{c}) \leftarrow B(\bar{b}) \quad B(b) \rightarrow D(c) X_2$   
 $\mu^- X_3 \leftarrow \quad \hookrightarrow X_4 \mu^+$

**BDsame:**  $X_1 X_2 \leftarrow B(\bar{b}) \quad B(b) \rightarrow D(c) \mu^-$   
 $\hookrightarrow X_3 \mu^+$

# Effetti del disallineamento delle camere



0  $\mu\text{m}$



100  $\mu\text{m}$

E. Dumonteil, PhD. thesis



# Parametri TRD (1)

Pseudo-rapidity coverage	$-0.9 < \eta < 0.9$
Pseudo-rapidity coverage	$2\pi$
Radial position	$2.9 < r < 3.7$ m
Length	Up to 7.0 m
Azimuthal segmentation	18-fold
Radial segmentation	Six layers
Longitudinal segmentation	5-fold
Total number of modules	540
Largest module	$117 \times 147 \text{cm}^2$
Active detector area	$736 \text{m}^2$
Radiator	Fibres/foam sandwich, 4.8 cm per layer
Radial detector thickness	$X/X_0 = 15\%$
Module segmentation in $\phi$	144
Module segmentation in $z$	1216
Typical pad size	$0.7 \times 8.8 \text{cm}^2 = 6.2 \text{cm}^2$
Number of pads	$1.16 \times 10^6$
Detector gas	Xe/CO <sub>2</sub> (85%/15%)
Gas volume	$27.2 \text{m}^3$
Depth of drift region	3 cm
Depth of amplification region	0.7 cm
Nominal magnetic field	0.4 T
Drift field	$0.7 \text{ kV cm}^{-1}$
Drift velocity	$1.5 \text{ cm} \mu\text{s}^{-1}$
Longitudinal diffusion	$D_L = 250 \mu\text{m cm}^{1/2}$
Transverse diffusion	$D_T = 180 \mu\text{m cm}^{1/2}$
Lorentz angle	8

# Parametri TRD (2)

Number of readout channels	$1.16 \times 10^6$
Time samples in $r$ (drift)	20
Number of readout pixels	$2.32 \times 10^7$
ADC	10 bit, 10 MHz
Number of multi-chip modules	71928
Number of readout boards	4108
Pad occupancy for $dN_{ch}/d\eta = 8000$	34%
Pad occupancy in p-p	$2 \times 10^4$
Space-point resolution at 1 GeV/c in $r\phi$	400 (600) $\mu m$ for $dN_{ch}/d\eta = 2000$ (8000)
in $z$	2mm (offline)
Momentum resolution	$\delta p/p = 2.5\% \oplus 0.5\%$ (0.8%)p for $dN_{ch}/d\eta = 2000$ ( $dN_{ch}/d\eta = 8000$ )
Pion suppression at 90% electron efficiency and $p \geq 3$ GeV/c	Better than 100
Event size for $dN_{ch}/d\eta = 8000$	11MB
Event size for p-p	6 kB
Trigger rate limits for minimum-bias events	100 kHz
Trigger rate limits for p-p	100 kHz

Font: ALICE Physics Performance Report Vol. I, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 30 (2004)

# TRD: quarkonia in collisioni Pb-Pb

- Quarkonia attesi per il 10% degli eventi più centrali, integrati su tutta l'accettanza per  $dN/d\eta = 3000$ .
- I numeri corrispondono a un intervallo di  $\pm 1.5\sigma$  intorno alla massa della risonanza.
- Luminosità:  $\mathcal{L} = 5 \times 10^{26} \text{ cm}^{-2}\text{s}^{-1}$

State	S ( $\times 10^3$ )	B ( $\times 10^3$ )	S/B	$S/\sqrt{S+B}$
$J/\psi$	110.7	92.1	1.2	245
$\Upsilon$	0.9	0.8	1.1	21
$\Upsilon'$	0.25	0.7	0.35	8

Font: ALICE Physics Performance Report Vol. II, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 32 (2006)

# Parametri Spettrometro di Muoni (1)

## Muon detection

Polar, azimuthal angle coverage	$2 \leq \theta \leq 9, 2\pi$
Minimum muon momentum	4 GeV/c
Resonance detection	$J/\psi$ $\gamma$
Pseudo-rapidity coverage	$4.0 \leq \eta \leq 2.5$ $4.0 \leq \eta \leq 2.5$
Transverse momentum range	$0 \leq p_t$ $0 \leq p_t$
Mass resolution	70 MeV 100 MeV

## Front absorber

Longitudinal position (from IP)	$5030\text{mm} \leq z \leq 900\text{mm}$
Total thickness (materials)	$10\lambda$ (carbon-concrete-steel)

## Dipole magnet

Nominal magnetic field, field integral	0.7 T, 3 Tm
Free gap between poles	2.972 – 3.956 m
Overall magnet length	4.97m
Longitudinal position (from IP)	$z = 9.87\text{m}$ (centre of the dipole yoke)

## Tracking chambers

Number of stations, number of planes per station	5, 2
Longitudinal position of stations	$z = 5357, 6860, 9830, 12920, 14221$ mm
Anodecathode gap (equal to wire pitch)	2.1 mm for st. 1; 2.5 mm for st. 2-5
Gas mixture	80%Ar/20%CO <sub>2</sub>
Pad size st. 1 (bending plane)	$4 \times 6, 4 \times 12, 4 \times 24\text{mm}^2$
Pad size st. 2 (bending plane)	$5 \times 7.5, 5 \times 15, 5 \times 30\text{mm}^2$
Pad size st. 3, 4 and 5 (bending plane)	$5 \times 25, 5 \times 50, 5 \times 100\text{mm}^2$
Max. hit density st. 15 (central PbPb×2)	5.0, 2.1, 0.7, 0.5, $0.6 \cdot 10^2$ hits $\text{cm}^2$
Spatial resolution (bending plane)	$\simeq 70 \mu\text{m}$

# Parametri Spettrometro di Muoni (2)

---

<b>Tracking electronics</b>	
Total number of FEE channels	$1.09 \times 10^6$
Shaping amplifier peaking time	$1.2 \mu\text{s}$
<b>Trigger chambers</b>	
Number of stations, planes per station	2, 2
Longitudinal position of stations	$z = 16\ 120, 17\ 120\ \text{mm}$
Total number of RPCs, total active surface	72, $\sim 150\text{m}^2$
Gas gap	single, 2 mm
Electrode material and resistivity	Bakelite <sup>TM</sup> , $\rho = 24 \times 10^9\ \text{cm}$
Gas mixture	Ar/C <sub>2</sub> H <sub>2</sub> F <sub>4</sub> /i-butane/SF <sub>6</sub> ratio 49/40/7/1
Pitch of readout strips (bending plane)	10.6, 21.2, 42.5 mm (for trigger st. 1)
Max. strip occupancy bend. (non bend.) plane	3%(10%) in central Pb-Pb
Maximum hit rate on RPCs	3 (40) Hz $\text{cm}^2$ in Pb-Pb (Ar-Ar)
<b>Trigger electronics</b>	
Total number of FEE channels	$2.1 \times 10^4$
Number of local trigger cards	234 + 2

---

Font: ALICE Physics Performance Report Vol. I, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 30 (2004)

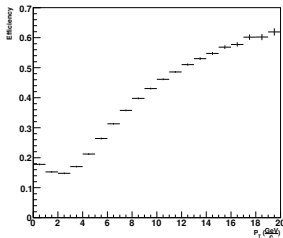
# Spettrometro di Muoni: quarkonia in collisioni p-p

- Quarkonia attesi per in  $10^7$  s di presa dati.
- I numeri corrispondono a un intervallo di  $\pm 1$  FWHM intorno alla massa della risonanza.
- Luminosità:  $\mathcal{L} = 3 \times 10^{30} \text{ cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$

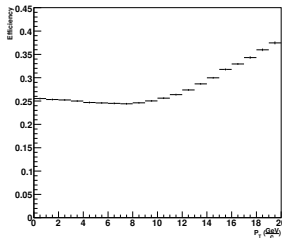
state	S ( $\times 10^3$ )	B ( $\times 10^3$ )	S/B	$S/\sqrt{S+B}$
J/ $\psi$	2807	235	12.0	1610
$\psi'$	75	120	0.62	170
$\Upsilon$	27.1	2.6	10.4	157
$\Upsilon'$	6.8	2.0	3.4	73
$\Upsilon''$	4.2	1.8	2.4	55

# Probabilità di rivelazione di quarkonia

- Calcolata con la “fast simulation” (include accettazione geometrica, efficienza di ricostruzione e trigger).



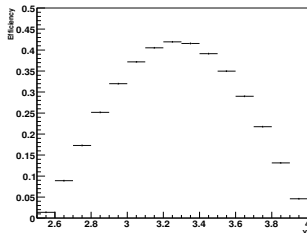
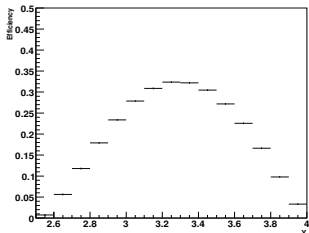
⇐ Normalizzata all'accettanza ⇒  
 $2.5 < y < 4.0$



$J/\psi$   
2.6%

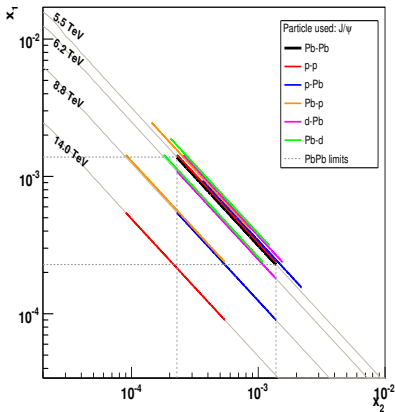
⇐ Probabilità di rivelazione globali (normalizzate all'intero spazio fasi) ⇒

$\Upsilon$   
3.4%

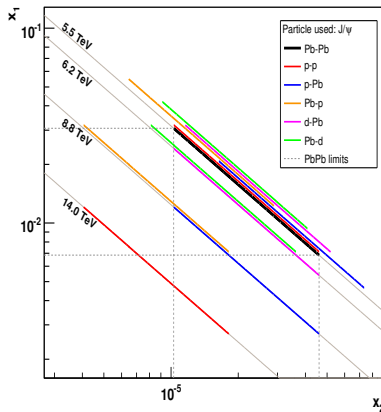


# Regioni di $x$ esplorati con sistemi di collisioni differenti

- Collisioni p-p @ 14 TeV: statistica elevata ma sovrapposizione esigua con le regioni di  $x$  esplorate in Pb-Pb



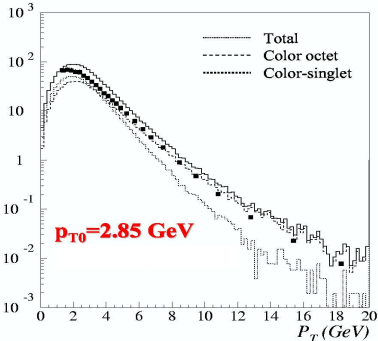
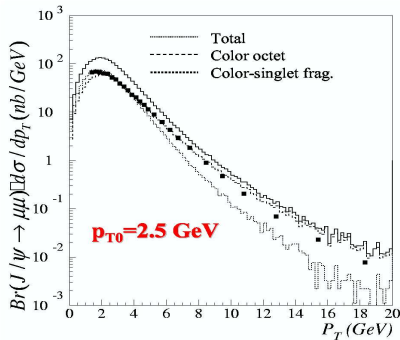
$$|y| < 0.9$$



$$-4 < y < -2.5$$



- Elementi di matrice di nrQCD sono implementati in PYTHIA dalla versione 6.324 (Agosto 2005)
- Il codice è attualmente in fase di convalida (collaborazione GENSER+PYTHIA+LHCb).



M. Bargiotti, International Workshop on Heavy Quarkonium, BNL 27-30 June 2006.