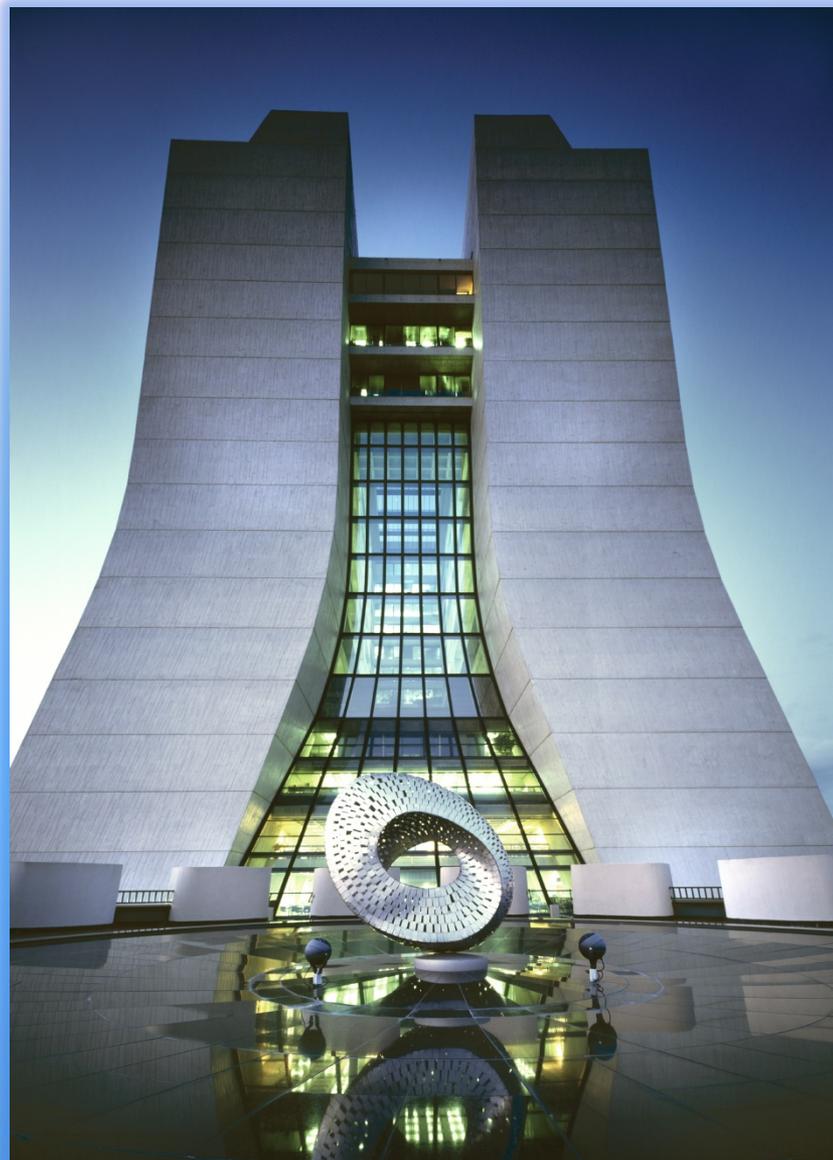


# Исследование одиночного и парного рождения $J/\psi$ -частиц в эксперименте $D\bar{D}$ на ускорителе Tevatron



## План доклада

- Ускоритель Tevatron и эксперимент DØ
- Мотивация
- Отбор данных
- Измерение сечения парного рождения  $J/\psi$
- Измерение сечения одиночного рождения  $J/\psi$
- Эффективное сечение двухпартонного рассеяния
- Заключение



# Tevatron и DØ

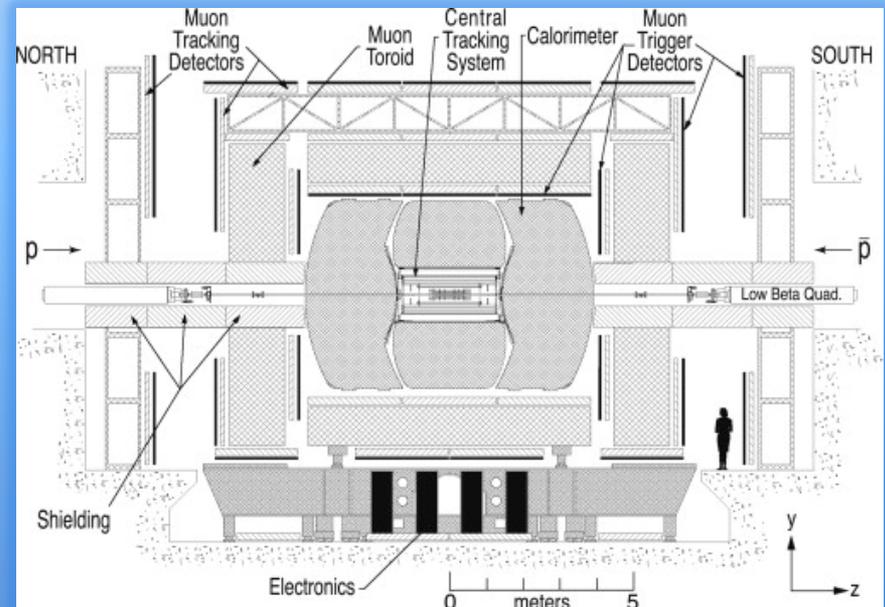
## Tevatron

- $p\bar{p}$  collider
- $\sqrt{s} = 1.96 \text{ TeV}$
- Детекторы: CDF и DØ
- Накопленная светимость (Run II): более  $10 \text{ fb}^{-1}$



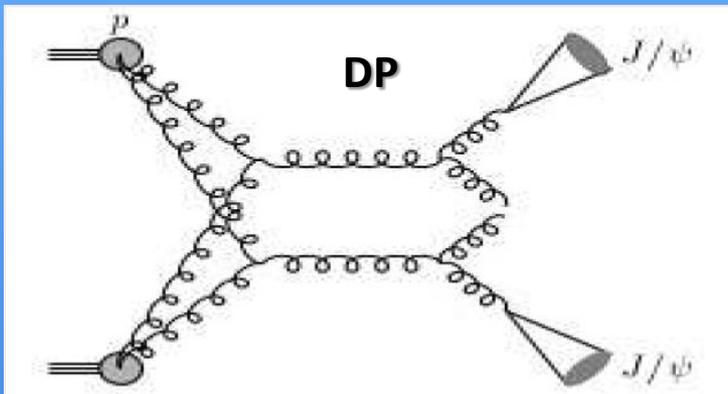
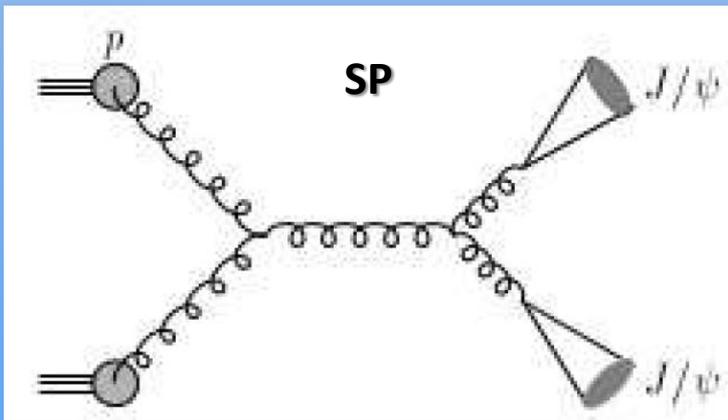
## Детектор DØ

- Центральный трековый детектор (Silicon Microstrip и Fiber Trackers)
- Калориметр (Liquid Ar./Uranium)
- Центральные и передние мюонные детекторы
- Магниты - Solenoid (2T), Toroid (1.8T)



# Мотивация

Однопартонное (SP) и двухпартонное (DP) взаимодействия при парном рождении  $J/\psi$

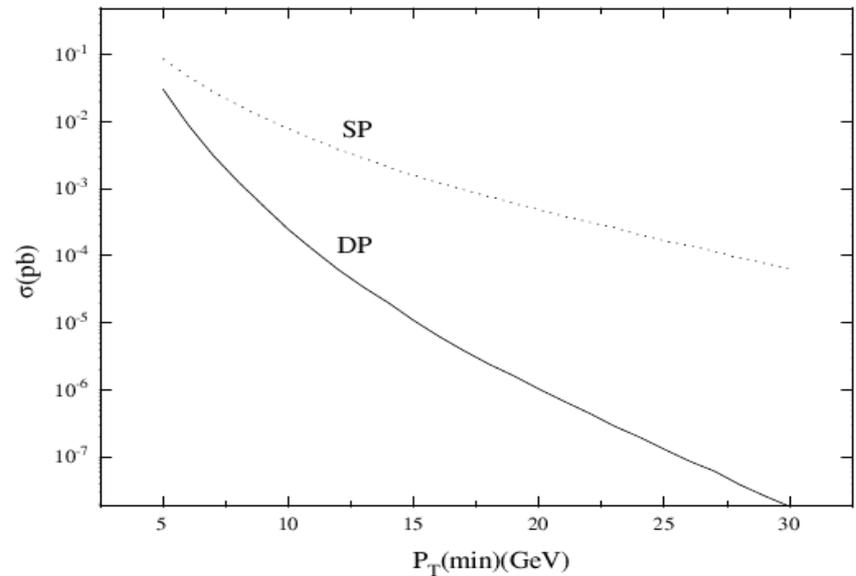


Предсказания для Tevatron (NRQCD):

$p_T(J/\psi) > 4 \text{ GeV}, |\eta(J/\psi)| < 0.6$

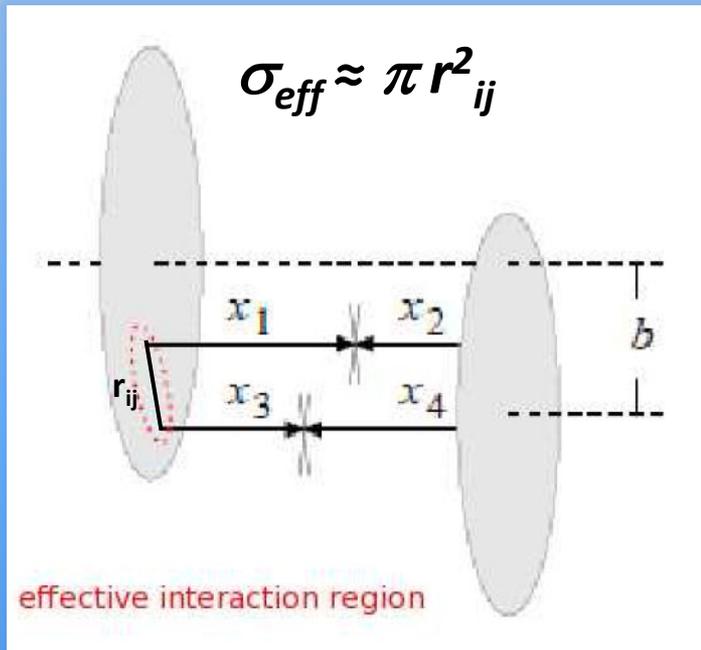
$J/\psi \rightarrow 2\mu$

Фракция DP событий может быть весьма существенной (10-15%), а для  $|\eta| < 2$  еще в  $\sim 2$  раза больше



# Мотивация

## Эффективное сечение двухпартонных взаимодействий



$$\sigma_{DP}(J/\psi J/\psi) = \frac{\sigma^2(J/\psi)}{2 \cdot \sigma_{eff}}$$

- Характеризует пространственное распределение партонов в нуклоне
- Необходимо измерение сечений как одиночного, так и парного рождения  $J/\psi$

### Итак, цели данного анализа:

- Измерение сечений SP и DP процессов в парном рождении  $J/\psi$  и, соответственно, их фракций в достаточно широкой кинематической области.
- Измерение полных сечений процессов одиночного рождения  $J/\psi$ .
- Вычисление  $\sigma_{eff}$  (особый интерес с учетом того, что основной вклад в нашем случае вносят gg-взаимодействия).

# Мотивация

Текущее состояние дел по проблеме:

Парное рождение  $J/\psi$  : LHCb (*Physics Letters B* 707 (2012) 52–59)

$$2 < \gamma(J/\psi) < 4.5, p_T(J/\psi) < 10 \text{ GeV}$$

$$\sigma(J/\psi J/\psi) = 5.1 \pm 1.1 \text{ nb},$$

(можно описать как 0.7 SP + 0.3 DP)

Одиночное рождение  $J/\psi$  : DØ (*Phys. Lett. B* 370 (1996) 239-248)

$$p_T(J/\psi) > 8 \text{ GeV}, |\eta(J/\psi)| < 0.6$$

$$\sigma(J/\psi) = 1.42 \pm 0.64 \text{ nb}$$

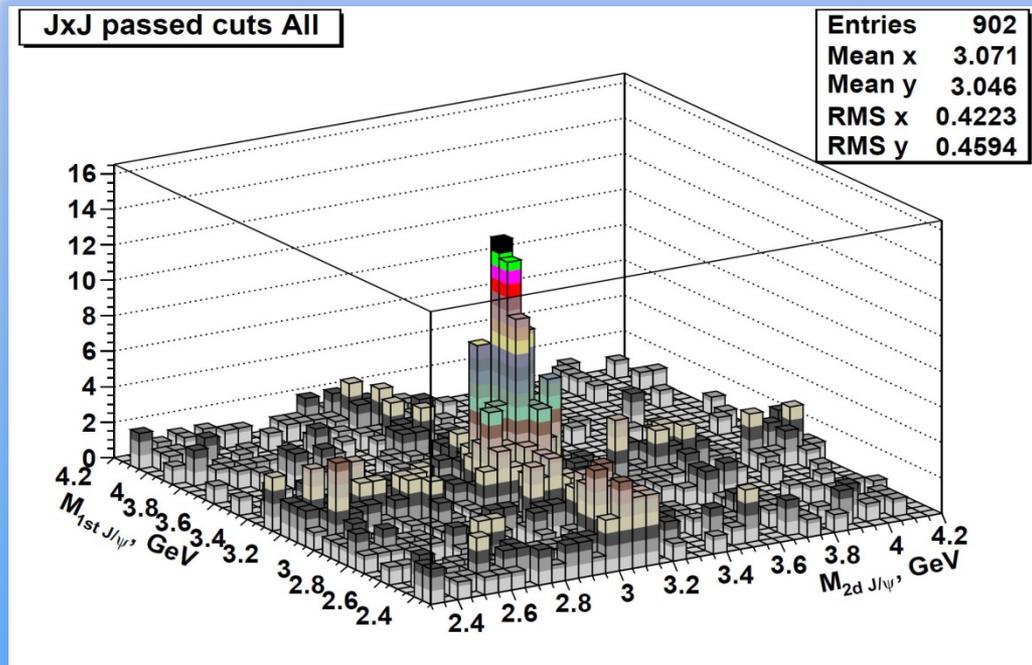
Одиночное рождение  $J/\psi$  : CDF (*arXiv:hep-ex/0412071v1*)

$$p_T(J/\psi) > 8 \text{ GeV}, |\eta(J/\psi)| < 0.6$$

$$\sigma(J/\psi) = 2.01 \pm 0.11 \text{ nb}$$

# Отбор событий

- 1-2 пары мюонов (SJ или DJ)
- $p_T^\mu > 2.0 \text{ GeV}$ ,  $|\eta^\mu| < 1.35$   
 $p^\mu > 4.0 \text{ GeV}$ ,  $1.35 < |\eta^\mu| < 2.0$
- Хороший трек в трековой и мюонных системах, «сшивающийся» между ними
- $r\text{-DCA} < 0.5 \text{ cm}$ ,  $z\text{-DCA} < 2.0 \text{ cm}$
- Мюоны в паре имеют противоположные знаки заряда
- $2.85 < m(J/\psi) < 3.35 \text{ GeV}$ ,  
 $p_T(J/\psi) > 4 \text{ GeV}$ ,  $|\eta(J/\psi)| < 2.0$

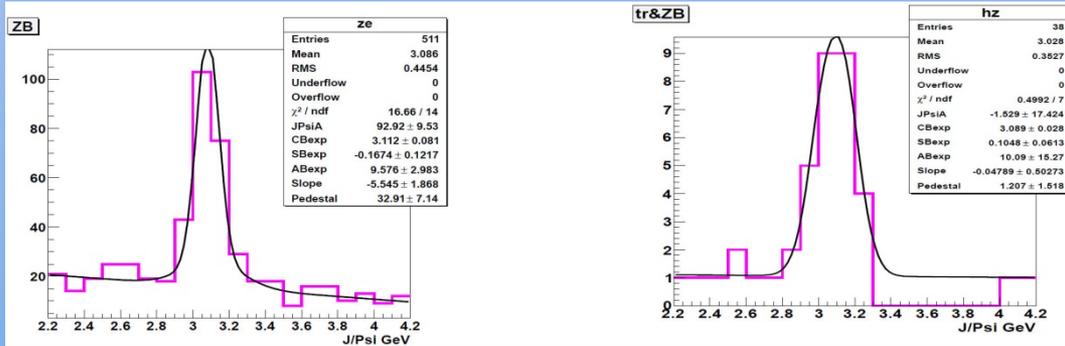


Общая статистика:  $8.1 \text{ fb}^{-1}$   
242 DJ (Double  $J/\psi$ )-кандидата  
6.5 миллиона SJ (Single  $J/\psi$ )-кандидатов

Монте-Карло:

DJpsiFDC, Herwig++ - для SP DJ;  
Pythia8 – для DP DJ и SJ.

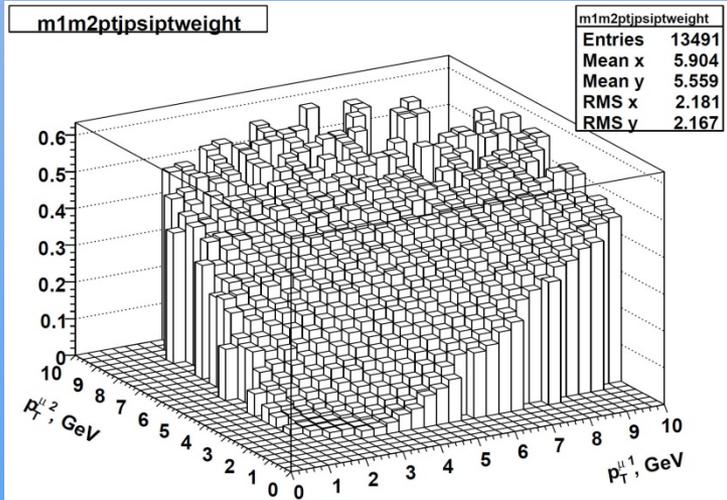
# Триггерные эффективности



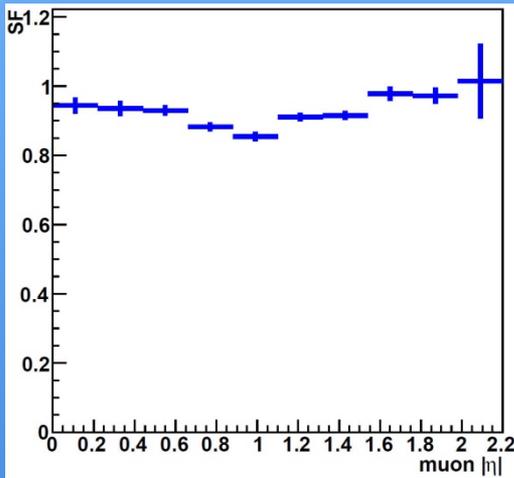
**Double J/ψ:**

$$\epsilon_{trig,comb} = 1 - (1 - \epsilon_{trig})^6$$

$$\epsilon_{trig,comb} = 56.9 \pm 8.3\%$$



**Двухмюонные триггера**  
 Single J/ψ:  $\epsilon_{trig} = 12.4 \pm 1.4(\text{стат.}) \pm 1.2(\text{сист.}) \%$



**Muon ID scale factors:**  
 Поправочные коэффициенты, учитывающие разницу между эффективностью идентификации мюонов в данных и Монте-Карло

**Double J/ψ:**

$$\epsilon_{trig,JJ} = 1 - \prod_{i,j=1,i<j}^4 (1 - \epsilon_{trig}^{\mu i, \mu j})$$

**SP:  $51.0^{+6.5}_{-7.5}\%$**

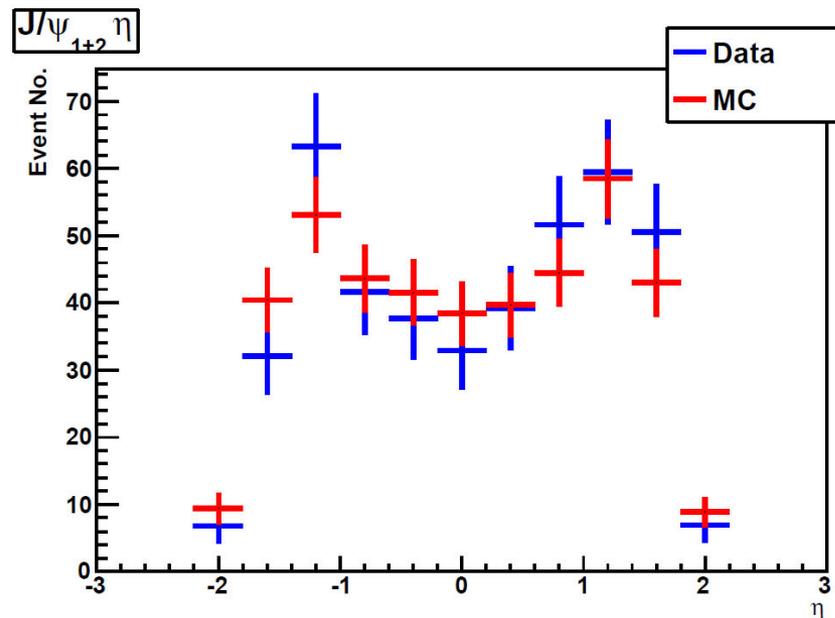
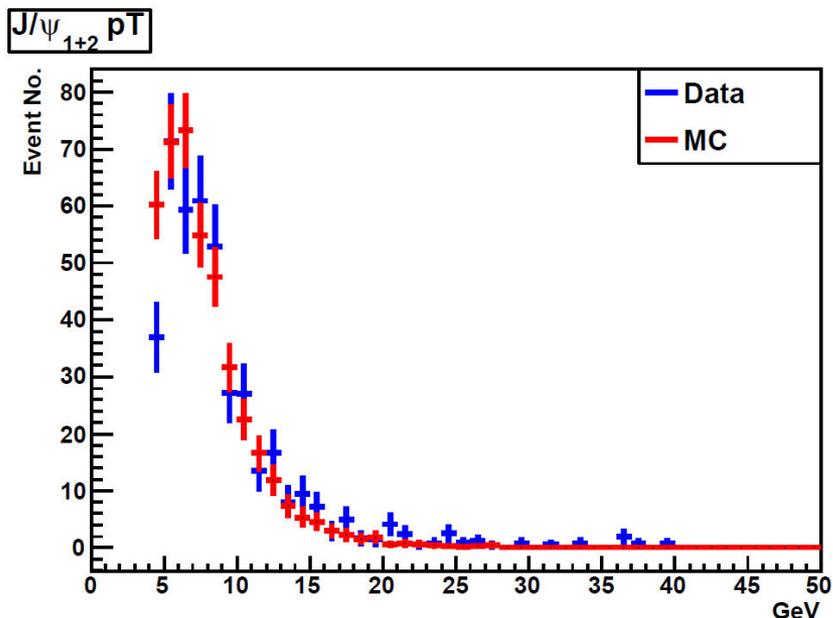
**DP:  $48.4^{+6.6}_{-7.7}\%$**

# Парное рождение $J/\psi$ : акцептанс

Monte-Carlo particle level cuts:

$$p_T^\mu > 2.0 \text{ GeV}, |\eta^\mu| < 1.35 \text{ или } p^\mu > 4.0 \text{ GeV}, 1.35 < |\eta^\mu| < 2.0$$

$$p_T(J/\psi) > 4 \text{ GeV}, |\eta(J/\psi)| < 2.0$$



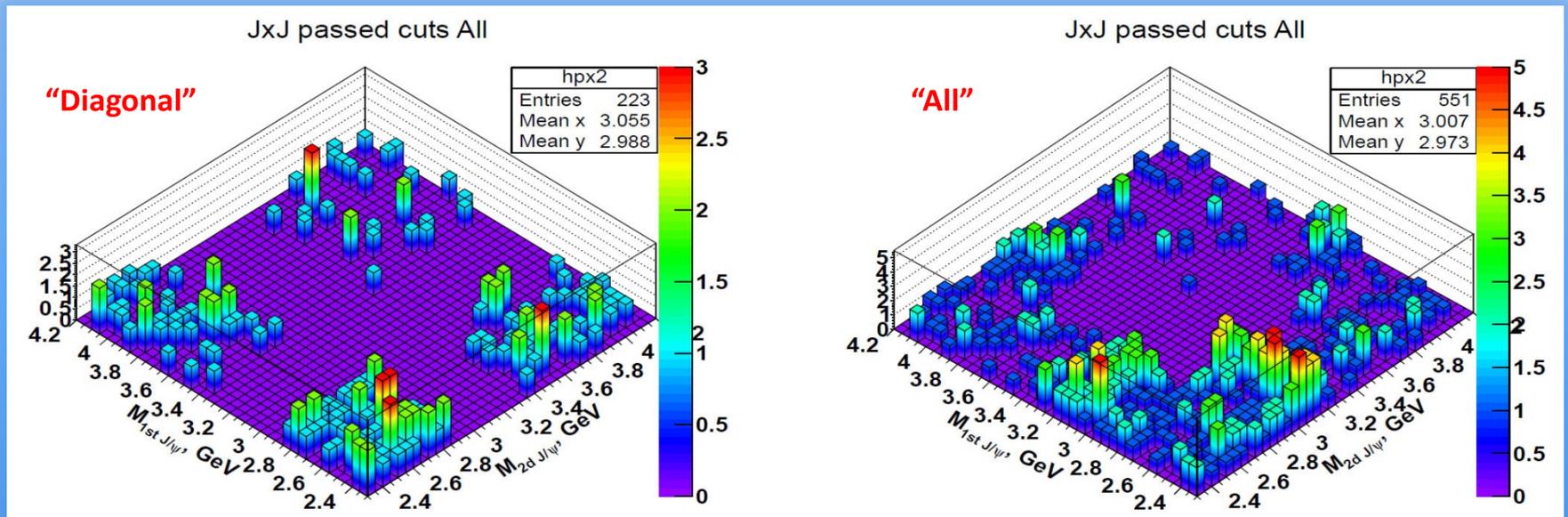
При подсчете акцептанса принимались во внимание muID SF's ( $\epsilon_{SF}$ )

$$\epsilon_{SF} \cdot A_{SP} = 11.6 \pm 0.2(\text{стат.}) \pm 0.3(\text{сист.})\%$$

$$\epsilon_{SF} \cdot A_{DP} = 10.5 \pm 0.6(\text{стат.}) \pm 0.3(\text{сист.})\%$$

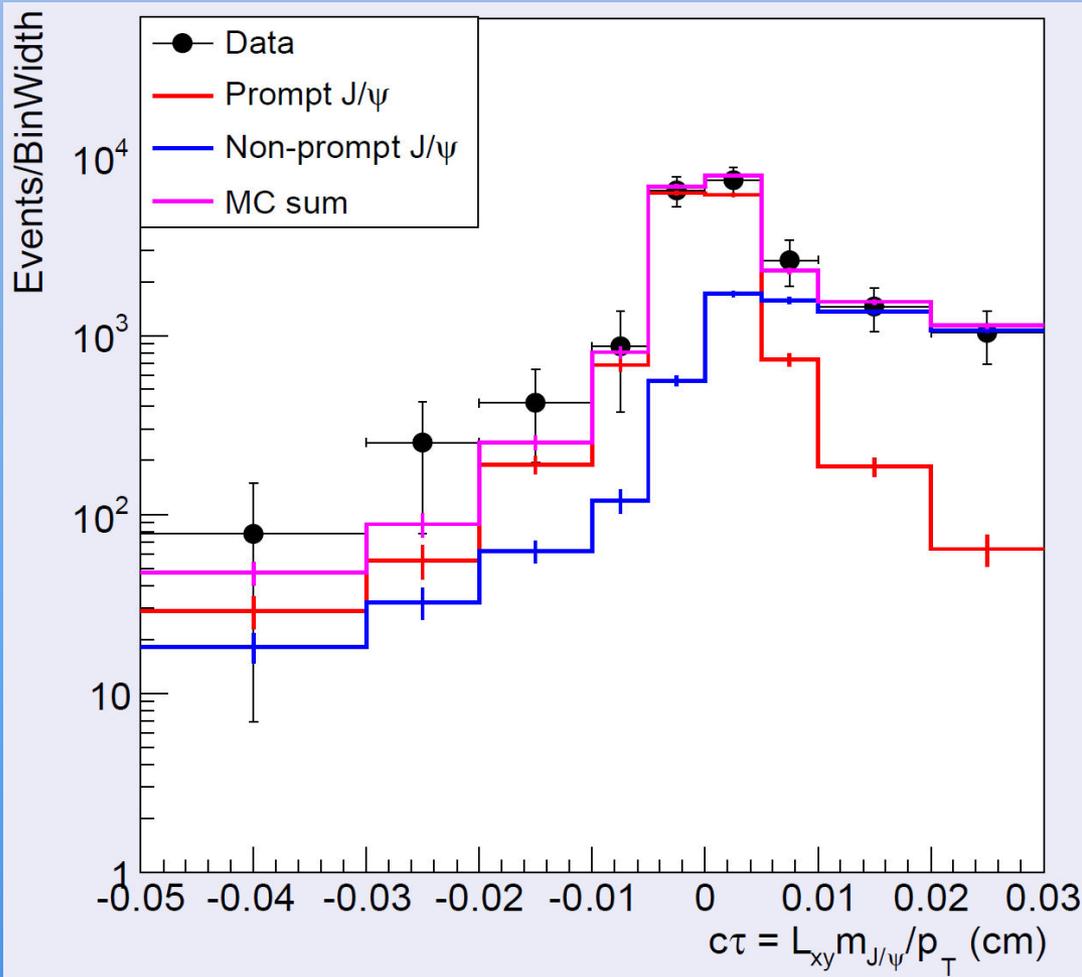
# Парное рождение $J/\psi$ : комбинаторный фон

- 4 мюона – 6 возможных комбинаций для для  $J/\psi$   $J/\psi$ , выбор наилучшей комбинации по критериям качества мюонных треков.
- Оценка комбинаторного фона – в широком массовом окне  $2.3 < M(J/\psi) < 4.2$  GeV, двумерный фит распределения  $M(J/\psi_1)$ ,  $M(J/\psi_2)$  в боковых областях и определение доли комбинаторики под пиком ( $2.85 < M(J/\psi) < 3.35$  GeV).



$$f_{\text{comb}} = 13.2 \pm 2.5(\text{сист.})\%$$

# Парное рождение $J/\psi$ : “Prompt Fraction”



Разделение «быстрых»  $J/\psi$ , идущих из вершины  $p\bar{p}$ -взаимодействия и «медленных»  $J/\psi$  от распадов  $b$ -адронов:

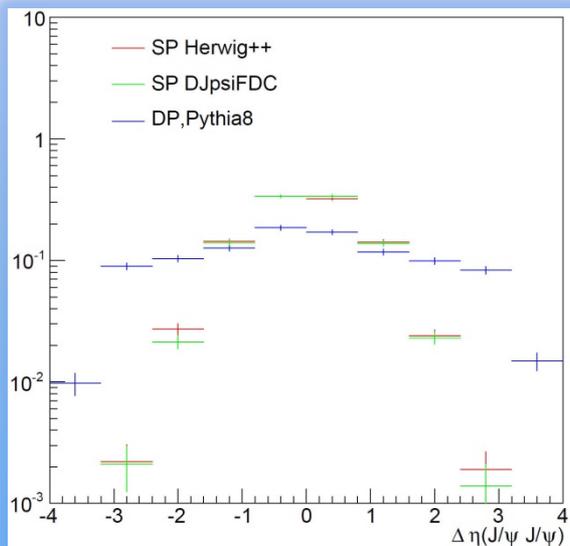
$$ct = L_{xy} \cdot M_{J/\psi} / p_{J/\psi}^T$$

Распределения по  $ct$  для «быстрых» и «медленных»  $J/\psi$  фитировались к данным для определения соотв. фракций.

“Prompt fraction”  $P = 0.600 \pm 0.078$

# Парное рождение $J/\psi$ : доли SP и DP

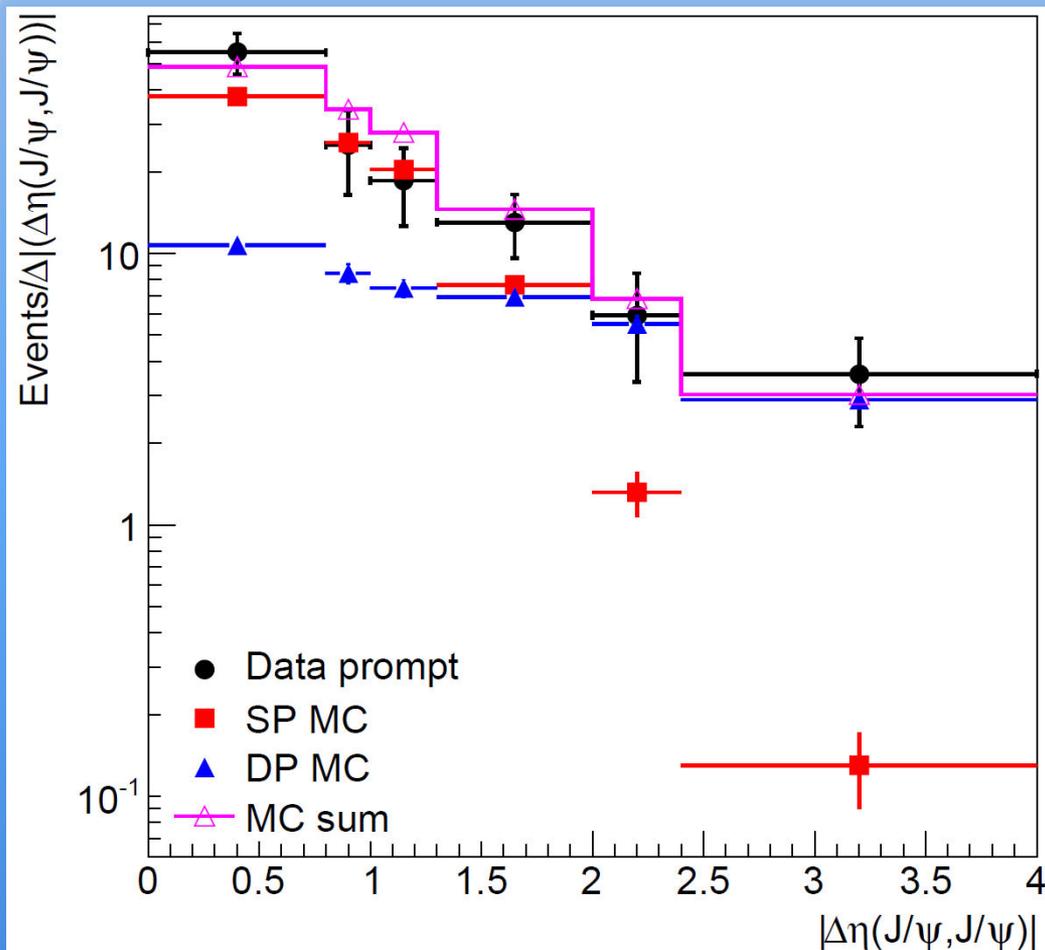
Для определения долей SP и DP использовались распределения по  $\Delta\eta(J/\psi, J/\psi)$  – для DP оно заметно более широкое, чем для SP.



Распределения по  $|\Delta\eta(J/\psi, J/\psi)|$  для SP (Herwig++, DJpsiFDC) и DP (Pythia 8, datalike model) фитировались к данным для определения соотв. долей:

**SP:  $68.9 \pm 6.7$ (сист.)%**

**DP:  $31.1 \pm 6.1$ (сист.)%**



# Парное рождение $J/\psi$ : полные сечения

## Single Parton

$$\sigma_{SP} = \frac{N_{data} \cdot P_{SP} \cdot P \cdot (1 - f_{comb})}{\epsilon_{trig}^{SP} \cdot L \cdot \epsilon_{SFA}^{SP} \cdot \epsilon_{c\tau}^{SP}}$$

Последний член в знаменателе – эфф. доп. ката  $-0.03 < c\tau < 0.03$ ;  $L = 8.1 \text{ fb}^{-1}$

$$\sigma_{SP}(J/\psi J/\psi) \times \text{Br}(J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-)^2 = 110.0 \pm 9.6(\text{стат.}) \pm 24.6(\text{сист.}) \text{ fb}$$

## Теория (Single Parton)

“kT factorization”:

$$\sigma(J/\psi J/\psi) \times \text{Br}(J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-)^2 = 55.1^{+28.5}_{-15.6}(\text{PDF})^{+31.0}_{-17.0}(\text{scale}) \text{ fb}$$

NRQCD:

$$\sigma(J/\psi J/\psi) \times \text{Br}(J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-)^2 = 51.9 \text{ fb}$$

# Парное рождение J/ψ: полные сечения

## Double Parton

$$\sigma_{DP} = \frac{N_{data} \cdot P_{DP} \cdot P \cdot (1 - f_{comb})}{\epsilon_{trig}^{DP} \cdot L \cdot \epsilon_{SF} A^{DP} \cdot \epsilon_{ct}^{DP}}$$

$$\sigma_{DP}(J/\psi J/\psi) \times Br(J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-)^2 = 57.7 \pm 5.9(\text{стат.}) \pm 16.6(\text{сист.}) \text{ fb}$$

$$\text{NRQCD (DP):} \quad \sigma_{DP}(J/\psi J/\psi) \times Br(J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-)^2 = 17.6 \text{ fb}$$

## Полное сечение (SP + DP)

$$\sigma(J/\psi J/\psi) \times Br(J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-)^2 = 167.7 \pm 13.3(\text{стат.}) \pm 29.7(\text{сист.}) \text{ fb}$$

Измеренные сечения заметно больше, чем предсказывает теория

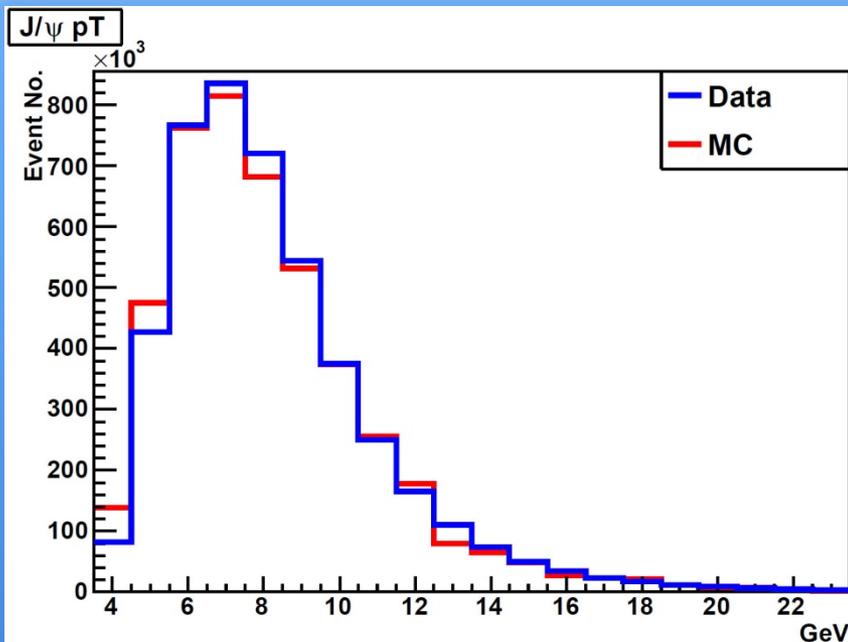
- Недостаток понимания глюонных PDF (в нашем случае доминирует gg-взаимодействие).
- Большая scale uncertainty (missing higher order corrections).
- Сильная зависимость вычислений от массы c-кварка
- Измеренное значение и теор. предсказания согласуются в пределах  $1.2\sigma$

# Одинокое рождение $J/\psi$

$$\sigma_{eff} = \frac{\sigma^2(J/\psi)}{2 \cdot \sigma_{DP}(J/\psi J/\psi)}$$

«Вторичная» цель – полное сечение одиночного рождения  $J/\psi$ : необходимо для вычисления  $\sigma_{eff}$ . Соответственно, все отборы и обрезания (за исключением числа мюонов), соответствуют применяемым для отбора событий парного рождения  $J/\psi$ .

Число отобранных кандидатов:  $[6.522 \pm 0.003(\text{стат.}) \pm 0.085(\text{сист.})] \times 10^6$

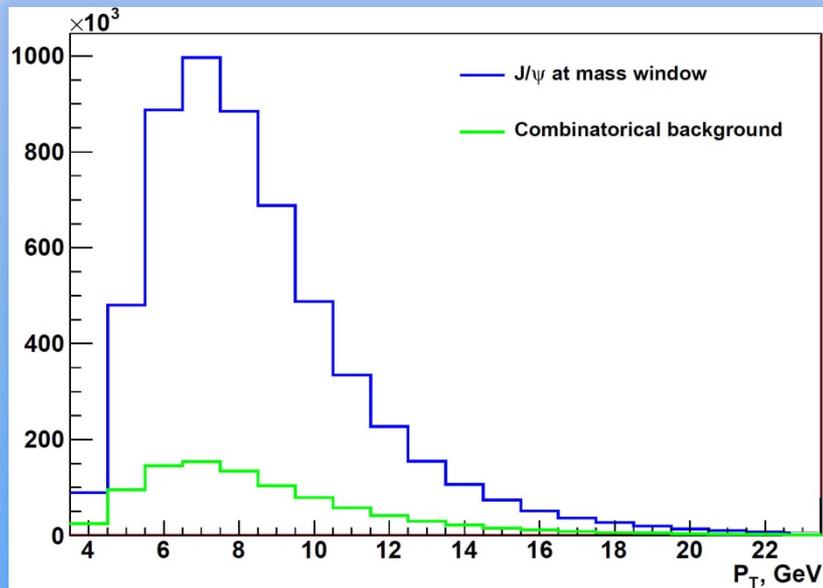


Триггерные эффективности для двухмюонных триггеров, а также Muon ID Scale Factors, вычисленные на предыдущем этапе, также остаются без изменений.

Акцептанс (с учетом MuID SF's)

$$\varepsilon_{SF} \cdot A_{SJ} = 22.1 \pm 0.2(\text{стат.}) \pm 0.7(\text{сист.})\%$$

# Одинокое рождение $J/\psi$

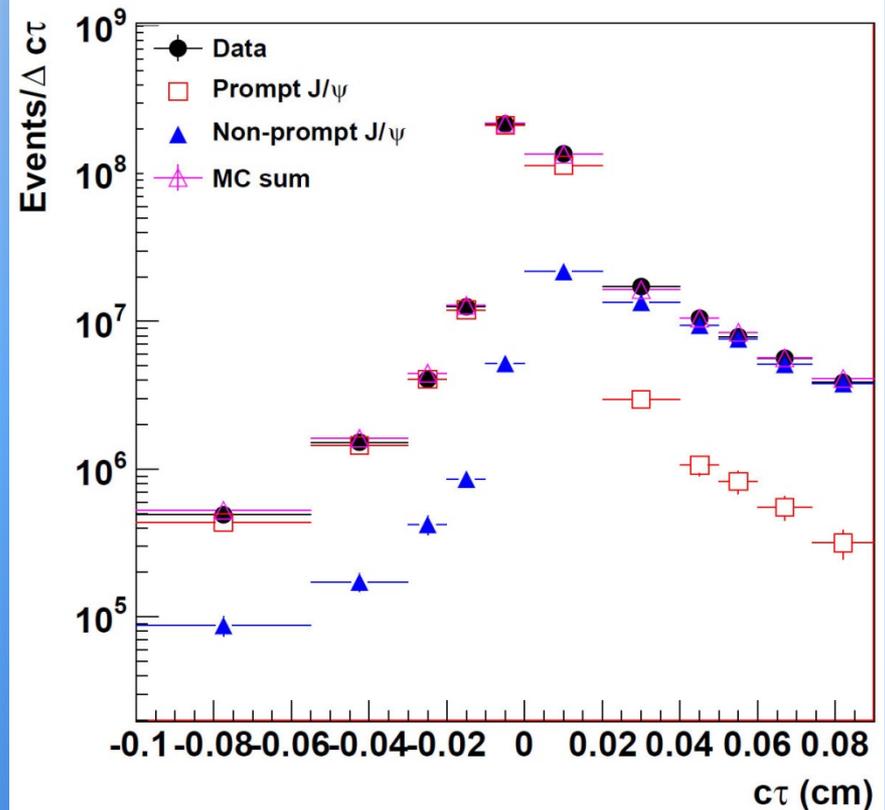


## Комбинаторный фон (более двух мюонов в событии)

Оценивается фитом распределений по  $M(J/\psi)$  при различных  $p_T(J/\psi)$ ,  $\eta(J/\psi)$  в широком массовом окне  $2.3 < M(J/\psi) < 4.2$  GeV

$$f_{\text{comb}} = 12.6 \pm 1.3 (\text{сист.})\%$$

“Prompt fraction”  
 $P = 0.814 \pm 0.009 (\text{сист.})$



## Одиночное рождение J/ψ: полное сечение

$$\sigma_{DP} = \frac{N_{data} \cdot P \cdot (1 - f_{comb})}{\varepsilon_{trig} \cdot L \cdot \varepsilon_{SFA}}$$

$$\sigma(J/\psi) \times Br(J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-) = 23.9 \pm 4.6(\text{стат.}) \pm 2.9(\text{сист.}) \text{ nb}$$

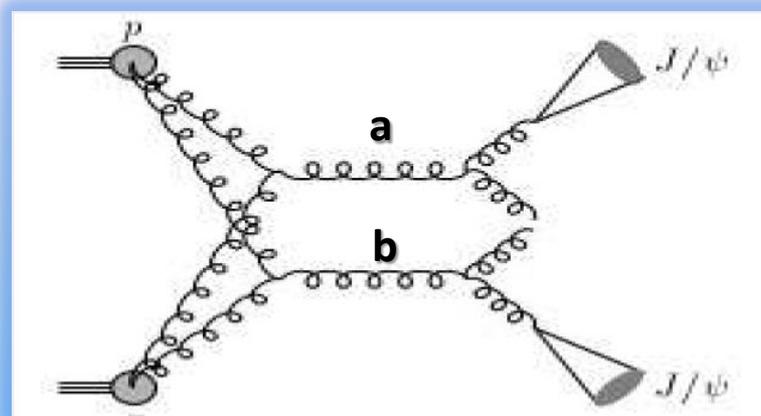
### Теория

“kT factorization”:

$$\sigma(J/\psi) \times Br(J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-) = 23.0 \pm 8.5 \text{ nb}$$

Если привести предыдущие измерения, сделанные DØ и CDF к «общему знаменателю» с представленным тут результатом (разные критерии отбора и кинематические области), то полученный результат находится в хорошем согласии с предыдущим результатом DØ и в несколько худшем (различие  $\sim 2\sigma$ ) – с результатом CDF.

# Эффективное сечение двухпартонных взаимодействий



$$\sigma_{ab} = \frac{m}{2} \cdot \frac{\sigma_a \cdot \sigma_b}{\sigma_{eff}} \Rightarrow \sigma_{eff} = \frac{\sigma^2(J/\psi)}{2 \cdot \sigma_{DP}(J/\psi J/\psi)}$$

Если процессы a и b неразличимы,  
как в нашем случае,  $m=1$ .

Что для нашего случая дает величину:

$$\sigma_{eff} = 4.9 \pm 0.5(\text{стат.}) \pm 2.0(\text{сист.}) \text{ mb}$$

# Эффективное сечение двухпартонных взаимодействий

$$\sigma_{\text{eff}} = 4.9 \pm 0.5(\text{стат.}) \pm 2.0(\text{сист.}) \text{ mb}$$

## Результаты предыдущих измерений

	$\sqrt{s}$ (GeV)	final state	$p_T^{\text{min}}$ (GeV)	$\eta$ range	Result
AFS, 1986	63	4jets	$p_T^{\text{jet}} > 4$	$ \eta^{\text{jet}}  < 1$	$\sigma_{\text{eff}} \sim 5 \text{ mb}$
UA2, 1991	630	4jets	$p_T^{\text{jet}} > 15$	$ \eta^{\text{jet}}  < 2$	$\sigma_{\text{eff}} > 8.3 \text{ mb}$ (95% C.L.)
CDF, 1993	1800	4jets	$p_T^{\text{jet}} > 25$	$ \eta^{\text{jet}}  < 3.5$	$\sigma_{\text{eff}} = 12.1^{+10.7}_{-5.4} \text{ mb}$
CDF, 1997	1800	$\gamma + 3\text{jets}$	$p_T^{\text{jet}} > 6$ $p_T^{\gamma} > 16$	$ \eta^{\text{jet}}  < 3.5$ $ \eta^{\gamma}  < 0.9$	$\sigma_{\text{eff}} = 14.5 \pm 1.7^{+1.7}_{-2.3} \text{ mb}$
D0, 2009	1960	$\gamma + 3\text{jets}$	$60 < p_T^{\gamma} < 80$	$ \eta^{\gamma}  < 1.0$ $1.5 <  \eta^{\gamma}  < 2.5$	$\sigma_{\text{eff}} = 16.4 \pm 2.3 \text{ mb}$
ATLAS, 2013	7000	$W + 2\text{jets}$	$p_T^{\text{jet}} > 20$	$ \eta^{\text{jet}}  < 2.8$	$\sigma_{\text{eff}} = 15 \pm 3^{+5}_{-3} \text{ mb}$

Измеренное значение  $\sigma_{\text{eff}}$  оказывается близким к результатам экспериментов с конечным состоянием 4jets (AFS, UA2и CDF 1993), и заметно меньше значений, полученных в экспериментах, изучавших конечные состояния  $\gamma+3\text{jets}$  и  $W+2\text{jets}$  (CDF 1997, D0, ATLAS)

В случае  $\gamma+jet$  и  $W+jet$  начальное состояние характеризуется взаимодействиями  $qg$  и  $qq$ , в то время как в случае multijet-событий в нем присутствует значительная  $gg$ -составляющая, что роднит их с рассматриваемым нами случаем, где доля событий с  $gg$ -взаимодействием в начальном состоянии составляет более 95%.

## Заключение

- Были проведены измерения сечений процессов парного и одиночного рождения  $J/\psi$  при энергии 1.96 TeV в кинематической области  $p_T(J/\psi) > 4 \text{ GeV}$ ,  $|\eta(J/\psi)| < 2.0$ .
- Для парного рождения были измерены сечения как однопартонного, так и двухпартонного взаимодействий.
- Результаты измерений:

$$\sigma_{\text{sp}}(J/\psi J/\psi) \times \text{Br}(J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-)^2 = 110.0 \pm 9.6(\text{стат.}) \pm 24.6(\text{сист.}) \text{ fb}$$

$$\sigma_{\text{dp}}(J/\psi J/\psi) \times \text{Br}(J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-)^2 = 57.7 \pm 5.9(\text{стат.}) \pm 16.6(\text{сист.}) \text{ fb}$$

$$\sigma_{\text{tot}}(J/\psi J/\psi) \times \text{Br}(J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-)^2 = 167.7 \pm 13.3(\text{стат.}) \pm 29.7(\text{сист.}) \text{ fb}$$

и

$$\sigma(J/\psi) \times \text{Br}(J/\psi \rightarrow \mu^+ \mu^-) = 23.9 \pm 4.6(\text{стат.}) \pm 2.9(\text{сист.}) \text{ nb}$$

- С использованием этих результатов было вычислено эффективное сечение двухпартонного рассеяния:

$$\sigma_{\text{eff}} = 4.9 \pm 0.5(\text{стат.}) \pm 2.0(\text{сист.}) \text{ mb}$$