

Production des Quarkonia Lourds dans les Collisions de Haute Énergie

Luminita Mihaila *

Université de Hambourg

Mars 2004

Contenu

- La QCD dans la limite non relativiste
- Production inclusive du J/Ψ dans les collisions photon-photon.
- Conclusions

* en collaboration avec M.Klasen, B.Kniehl and M.Steinhauser

- **Quarkonium**: état lié (int. forte) de q et \bar{q} de même saveur
 $c\bar{c}$ -**charmonium**- $J/\Psi(^3S_1), \chi_{cJ}(^3P_J), \eta_c(^1S_0), h_c(^1P_1)$;
 $b\bar{b}$ -**bottomonium**- $\Upsilon(nS), \chi_{bJ}(^3P_J), \dots$

- Pourquoi les quarkonia **lourds**?

- les systèmes **le plus simples** pour l'interaction forte
- informations sur les processus à **haute** et **basse** énergie
- opportunité de tester un grand secteur du MS

- **Spectroscopie**: $\Psi, \Psi', \chi_c, \Upsilon(nS), \chi_b$ depuis 1975

Nouvelles résonances (2003)	non observées
$\eta_c \rightarrow K_s K \pi$ BES, CLEO III	h_c
$\eta'_c \rightarrow K_s K \pi$ BaBar, BES, CLEO III	h'_c
$\Upsilon(1^3D_2) \rightarrow \chi_{bJ}(^3P_J)\gamma$ CLEO, LQCD	$\eta_b(!), h_b$
$X(3870)$ BELLE, CDF, D0	

- **Désintégrations**

- mesures de précision pour $\Gamma_{had}, \Gamma_{ll}, \Gamma_{EM}$:
- des tests pour la QCD et pour les modèles de potentiels

$$\frac{B(\Psi(2S) \rightarrow Had.)}{B(J/\Psi(1S) \rightarrow Had)} \simeq 15 \pm 2\% \text{ non confirmé par BES}$$

- recherche des **glueballs**: $J/\Psi \rightarrow \gamma gg \rightarrow \gamma G$

G exclu par LEP, CLEO, mais dans l'attente de **CLEOc**

- La CDQ dans la limite non relativiste (NRQCD)

G. Bodwin, E. Braaten and G. Lepage '96

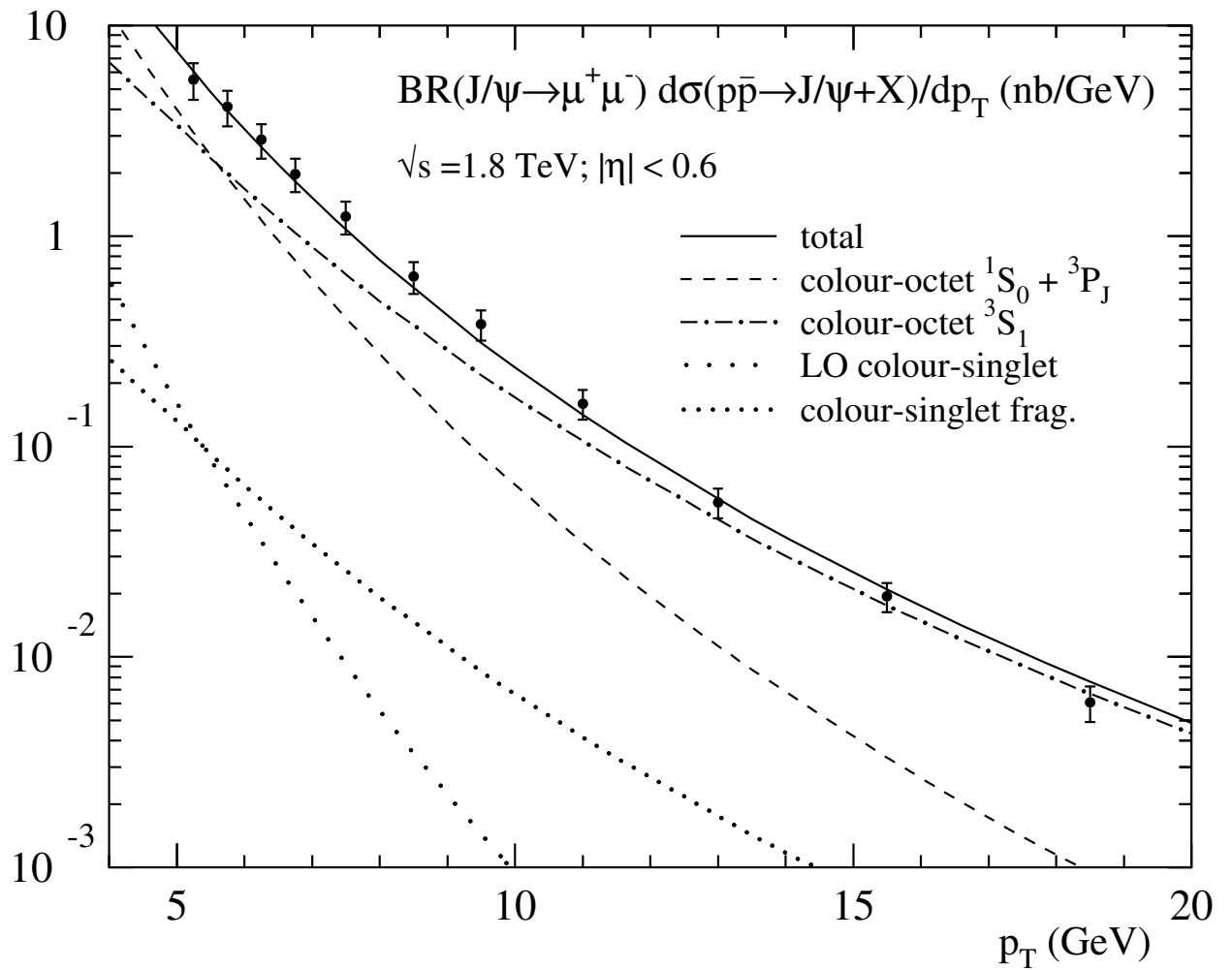
(LD) P. Cho and A. Leibovich '96, (LSDL) A. Petrelli et al '98

- **séparation** des processus à différentes **échelles d'énergie**
- **existence** des **états d'octet de couleur** (COM) dans la nature
- **explique** la production du J/Ψ et du Ψ' auprès du Tevatron(Run I), du LEP2(DELPHI) et du RHIC (PHENIX)
- **surestime** les taux de production du J/Ψ à grand z à **HERA**
- **surestime** la **polarisation** du J/Ψ et du Ψ' au Tevatron

- La NRQCD mise à l'épreuve

- la **production** de paires de J/Ψ dans l'annihilation e^+e^- auprès de BELLE.
- la **production associée** de J/Ψ et des mesons D dans l'annihilation e^+e^- auprès de BELLE (en attendant BaBar).
- la **polarisation** du J/Ψ et du Ψ' auprès du Tevatron RunII.
- l'étude des processus de **désintégration** du meson B
- **calculs de précision à LSDL** en α_s ou tenant compte des corrections **relativistes**
- l'élaboration des **règles précises** pour hiérarchiser les contributions provenant d'états octet de couleur

- Les résultats de la NRQCD et du CSM pour la hadroproduction du J/Ψ ,
 $pp \rightarrow J/\Psi + X$ auprès du Tevatron



- on impose un *cutoff* $UV, \Lambda \simeq M$, au \mathcal{L}_{QCD}
- on supprime tous les degrés *relativistes* de la théorie.
- les effets relativistes sont décrits par nouvelles *interactions locales* dans le \mathcal{L}
- les effets relativistes sont contenus exclusivement dans les constantes de couplage *renormalisées*
- les processus relativistes et non relativistes sont *factorisés*.

$$\mathcal{L}_{NRQCD} = \mathcal{L}_{\text{light}} + \mathcal{L}_{\text{heavy}} + \delta\mathcal{L}$$

$$\mathcal{L}_{\text{heavy}} = \psi^\dagger \left(iD_t + \frac{\vec{D}^2}{2M} \right) \psi + \chi^\dagger \left(iD_t + \frac{\vec{D}^2}{2M} \right) \chi$$

les spinors de Dirac \rightarrow séparés dans 2 spinors de Pauli

- les effets relativistes :

$$\delta\mathcal{L} = \delta\mathcal{L}_{\text{bilin}} + \delta\mathcal{L}_{4\text{-fermion}} + \dots + \delta\mathcal{L}_{2n\text{-fermion}}$$

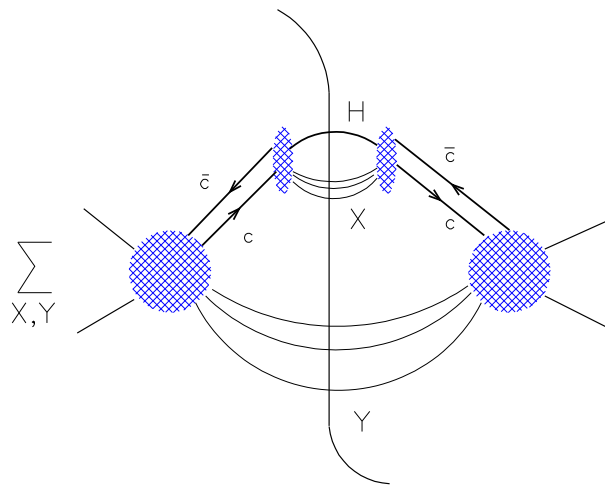
$$\delta\mathcal{L}_{\text{bilin}}^1 = c_1 \frac{g}{M^2} (\psi^\dagger (\vec{D} \cdot \vec{E} - \vec{E} \cdot \vec{D}) \psi + \text{cc})$$

- la production et l'annihilation des $Q\bar{Q}$ décrites par

$$\delta\mathcal{L}_{4\text{-fermion}} = \sum_n \frac{f_n(\Lambda)}{M^{d_n-4}} \mathcal{O}_n(\Lambda),$$

$$\mathcal{O}[^1S_0^{[1]}] = \psi^\dagger \chi \chi^\dagger \psi$$

- **factorisation topologique**: separation d'une diagramme entre une **partie à courte distance** et une **partie à longue distance**



- **La formule de factorisation** tenant compte des **Opérateurs** de la NRQCD (OME):

$$d\sigma = \sum_n d\hat{\sigma}(Q\bar{Q}[n] + X) \langle O^H[n] \rangle.$$

- **l'Universalité**: OME sont indépendants du processus **dur**
- Les **opérateurs** sont des **paramètres phénoménologiques**.
- **La Decomposition en États de Fock**

$$|J/\Psi\rangle = \Psi^{J/\Psi} |c\bar{c}[{}^3S_1^{[1]}]\rangle + \Psi_g^{J/\Psi} |c\bar{c}[{}^3P_J^{[8]}] + g\rangle + \Psi_g^{J/\Psi} |c\bar{c}[{}^1S_0^{[8]}] + g\rangle + \Psi_{gg}^{J/\Psi} |c\bar{c}[{}^3S_1^{[8]}] + gg\rangle + \dots$$

transition **électrique** (ET): $\Delta L = \pm 1, \Delta S = 0, \sim v^2$

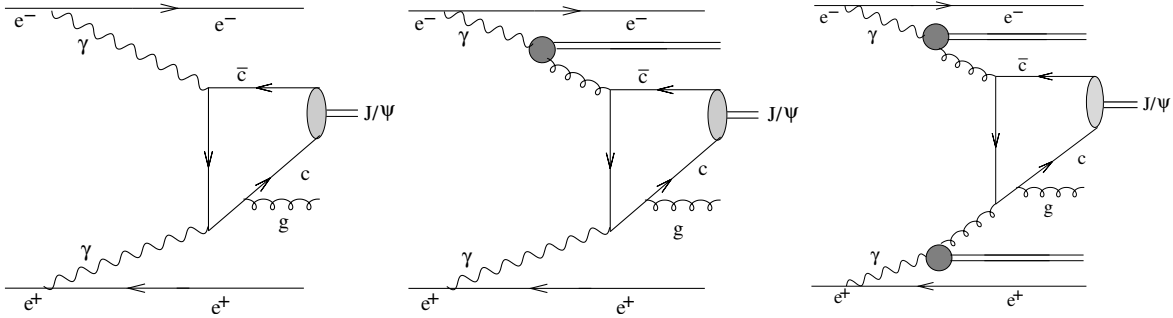
transition **magnétique** (MT): $\Delta L = 0, \Delta S = \pm 1, \sim v^4$

● Processus $\gamma\gamma$

i) **direct**: $\gamma\gamma \rightarrow J/\Psi + X, X = g; \gamma$

ii) **single-resolved**: $g(q)\gamma \rightarrow J/\Psi + X, X = g, q; \gamma$

iii) **double-resolved**: $gg(q\bar{q}) \rightarrow J/\Psi + X, X = g; \gamma$

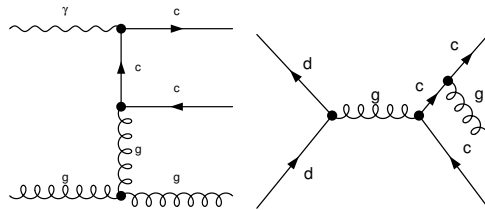


● le canal **single-resolved** est dominant.

● les processus partoniques sont :

i) $\gamma\gamma \rightarrow c\bar{c}[n] + \gamma, n = {}^3S_1^{[1]}$

$\gamma\gamma \rightarrow c\bar{c}[n] + g, n = {}^3S_1^{[8]}$



ii) $g\gamma \rightarrow c\bar{c}[n_8] + \gamma$

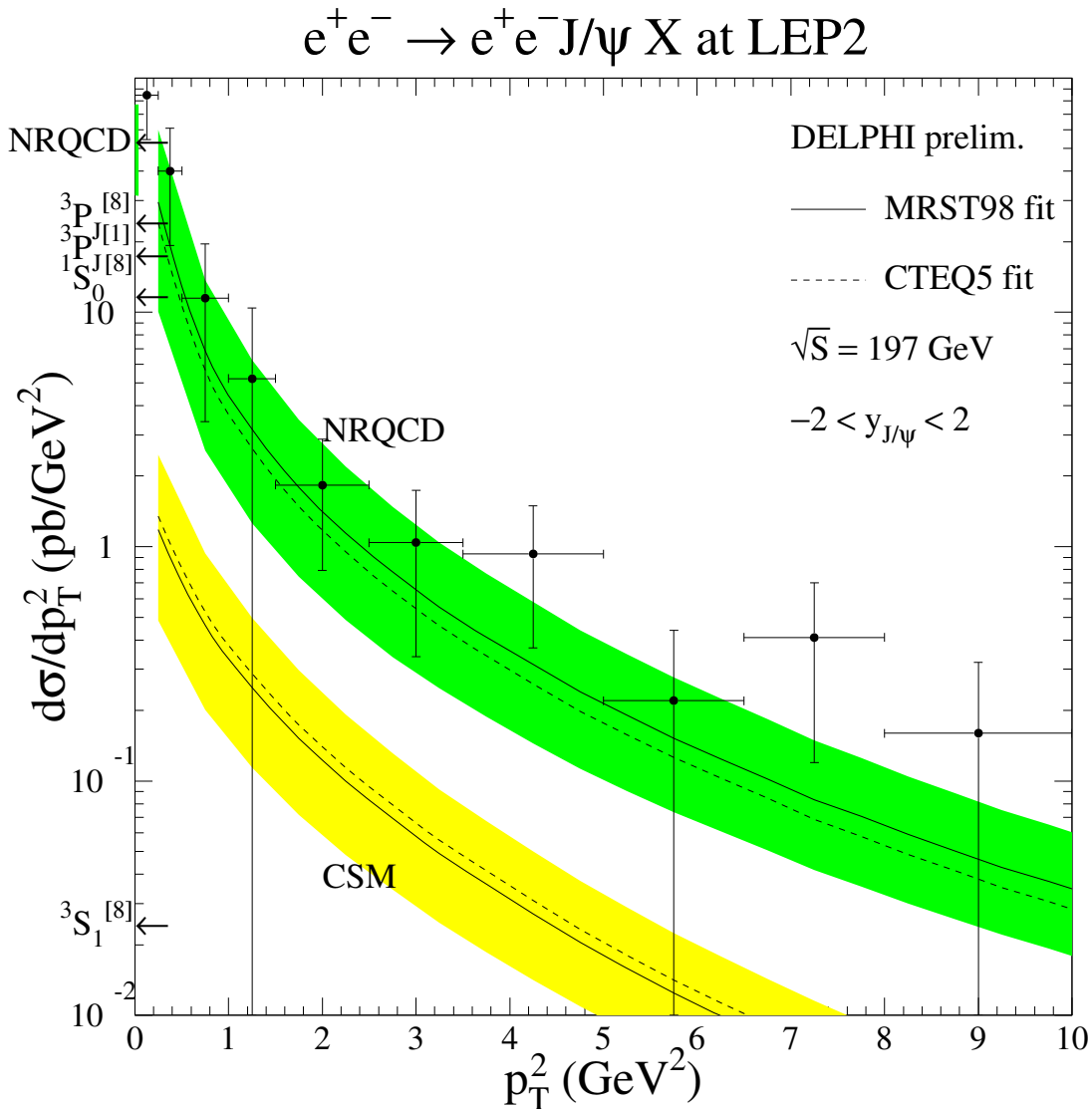
$g(q)\gamma \rightarrow c\bar{c}[n_{1,8}] + g(q), n_{1,8} = {}^3S_1, {}^3P_J, {}^1S_0$

iii) $g(q)g(\bar{q}) \rightarrow c\bar{c}[n_{1,8}] + \gamma$

$g(q)g(\bar{q}) \rightarrow c\bar{c}[n_{1,8}] + g$

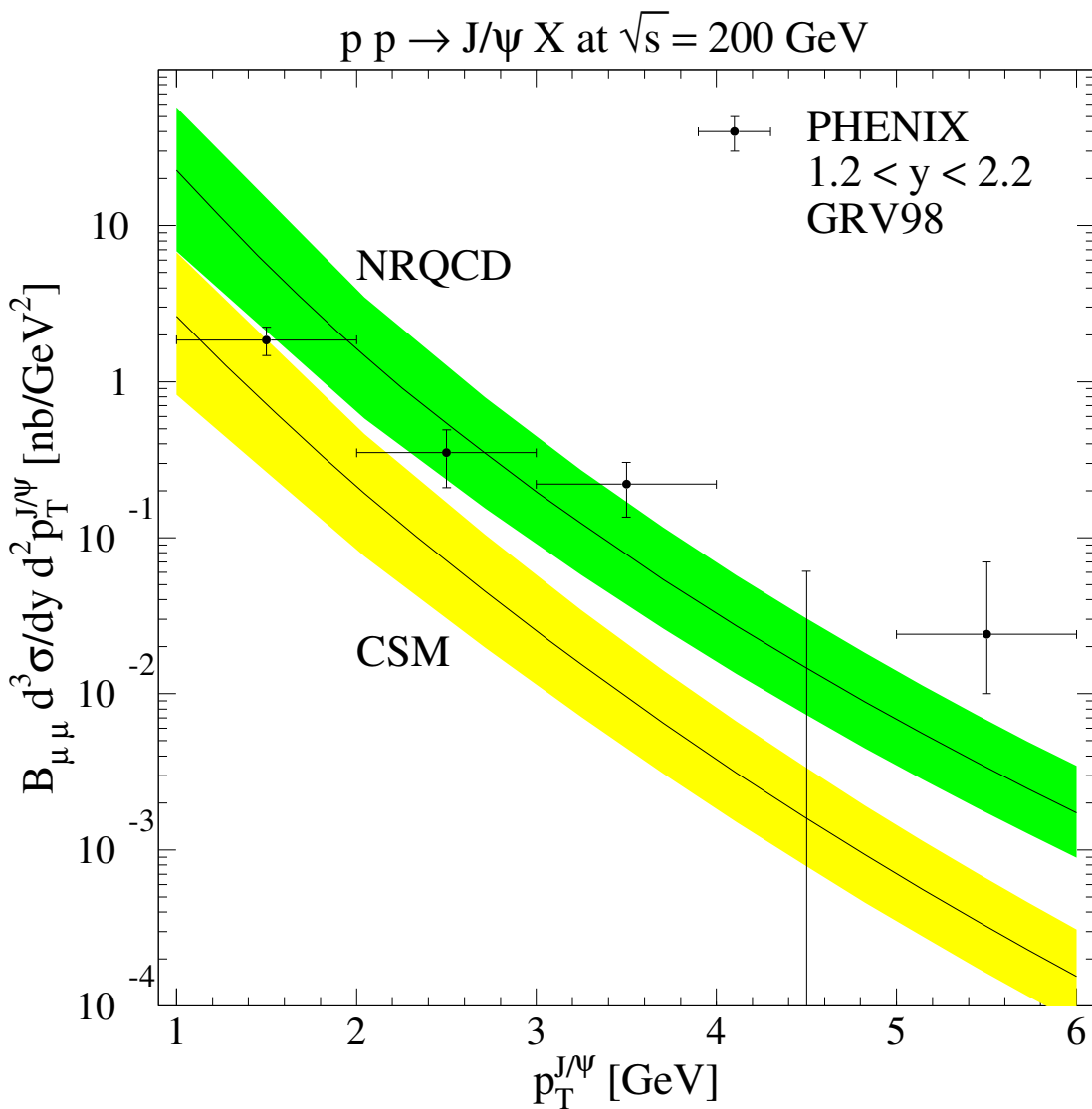
● Les valeurs des **opérateurs** ont été calculées (Braaten et al '98) en utilisant les données prises par **CDF** auprès du Tevatron Run1 .

- **données expérimentales** pour $e^+e^- \rightarrow e^+e^- + J/\Psi + X$
 $N(J/\Psi \rightarrow \mu^+\mu^-) = 36 \pm 7$ événements
la section efficace totale $\sigma(J/\Psi + X) = 45.3 \pm 18.8$ pb
- le photon final prompt est exclu par les coupures expérimentales
(Chapkin et al., DIS,Hadron,Photon 2001)(**Preliminary**)



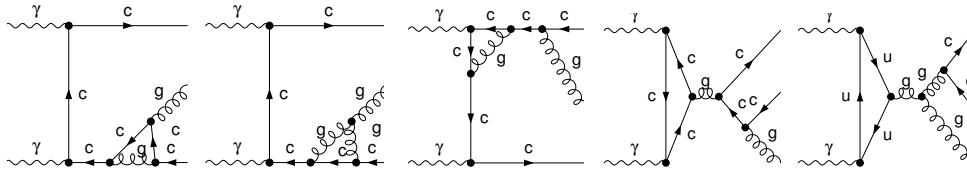
- les calculs à **LD** dépendent fortement des échelles de factorisation et de renormalisation → besoin des calculs à **LSLD**
- bandes d' **erreurs** en variant les échelles, la m_c , les OMEs, les PDFs du photon.

- processus hadroniques: $pp \rightarrow J/\Psi + X$
partoniques: $g(q)g(q) \rightarrow c\bar{c}[n_{1,8}] + X$
- distribution de la section efficace inclusive (pour la production du J/Ψ) en p_T (auprès du RHIC).
- incertitudes théoriques en variant $m_c, \mu, M_a, \langle O^{J/\Psi}[n] \rangle$.

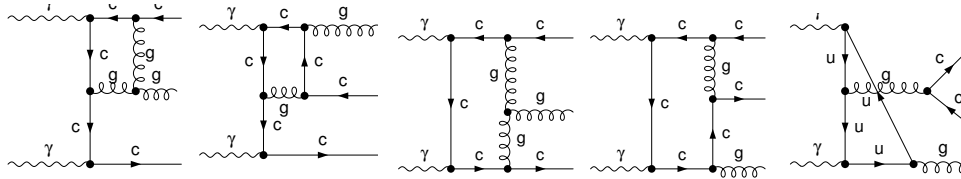


Corrections virtuelles du $\gamma\gamma \rightarrow c\bar{c}[^3S_1^{[8]}] + g$

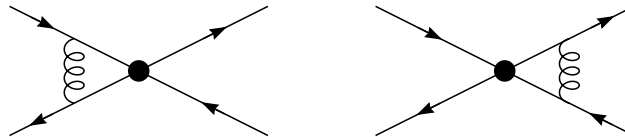
- Diagrammes de Feynman à une boucle :
- 12 diagrammes de type **auto-énergie** contenant divergences UV
- 52 corrections de **vertex** contenant divergences UV et IR



etc ...



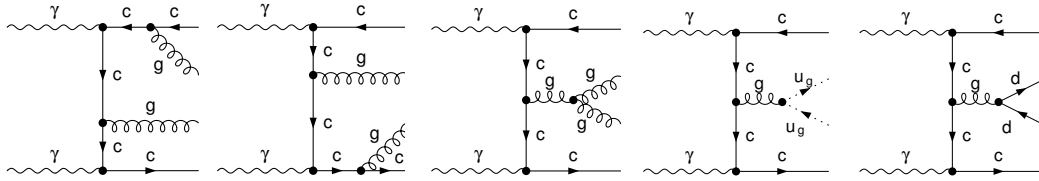
- Singularités **universelles** de Coulomb π^2/v quand un **gluon longitudinal** est changé entre deux particules externes
- Regularisation à **D dimensions**
- Renormalisation $m_0 = Z_m^{OS} m_r$, $\Psi_0 = \sqrt{Z_2^{OS}} \Psi_r$ (On-Shell)
et $g_s^0 = Z_g g_s$ (\overline{MS}) \rightarrow l'annulation des divergences UV.
- L'annulation de divergences de Coulomb
– corrections à une boucle pour les opérateurs de NRQCD



$$\langle \mathcal{O}[8] \rangle = \langle \mathcal{O}[8] \rangle_{\text{Born}} \left(1 + \left(-\frac{1}{2N_c} \right) \frac{\alpha_s}{\pi} \frac{\pi^2}{2v} \right)$$

$$\left(|\mathcal{A}_{\text{Born}}|^2 + 2 \text{Re} \left(\mathcal{A}_{\text{Born}} \mathcal{A}_{\text{pent}}^* \right)_{\text{coul}} \right) \langle \mathcal{O}[8] \rangle_{\text{Born}} = 0_{\text{coul}}$$

● **Diagrammes de Feynman** pour $\gamma\gamma \rightarrow c\bar{c}[n] + gg$



● Nouveaux canaux $^1S_0^{[1,8]}$, $^3P_j^{[1,8]}$, $j = 0, 1, 2$ et $^3S_1^{[8]}$

● **Décomposition de l'espace des phases:**

$E_g \leq \Delta_{\text{cut}} 2m_c$ l'émission du **gluon mou** (div. IR)

$E_g > \Delta_{\text{cut}} 2m_c$ l'émission du **gluon dur** (fini)

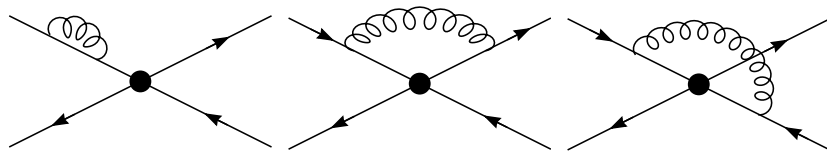
● Contributions du canal $^1S_0^{[1,8]}$ sont **finies**

● Le canal $^3S_1^{[8]}$: corrections réelles + virtuelles = **finies** (KLN)

● Contributions du canal $^3P_j^{[1,8]}$

★ contiennent des **divergences IR** (émission gluon mou).

★ Corrections à **une boucle** de l'opérateur $\langle \mathcal{O}^{[3S_1^{[8]}]} \rangle$:

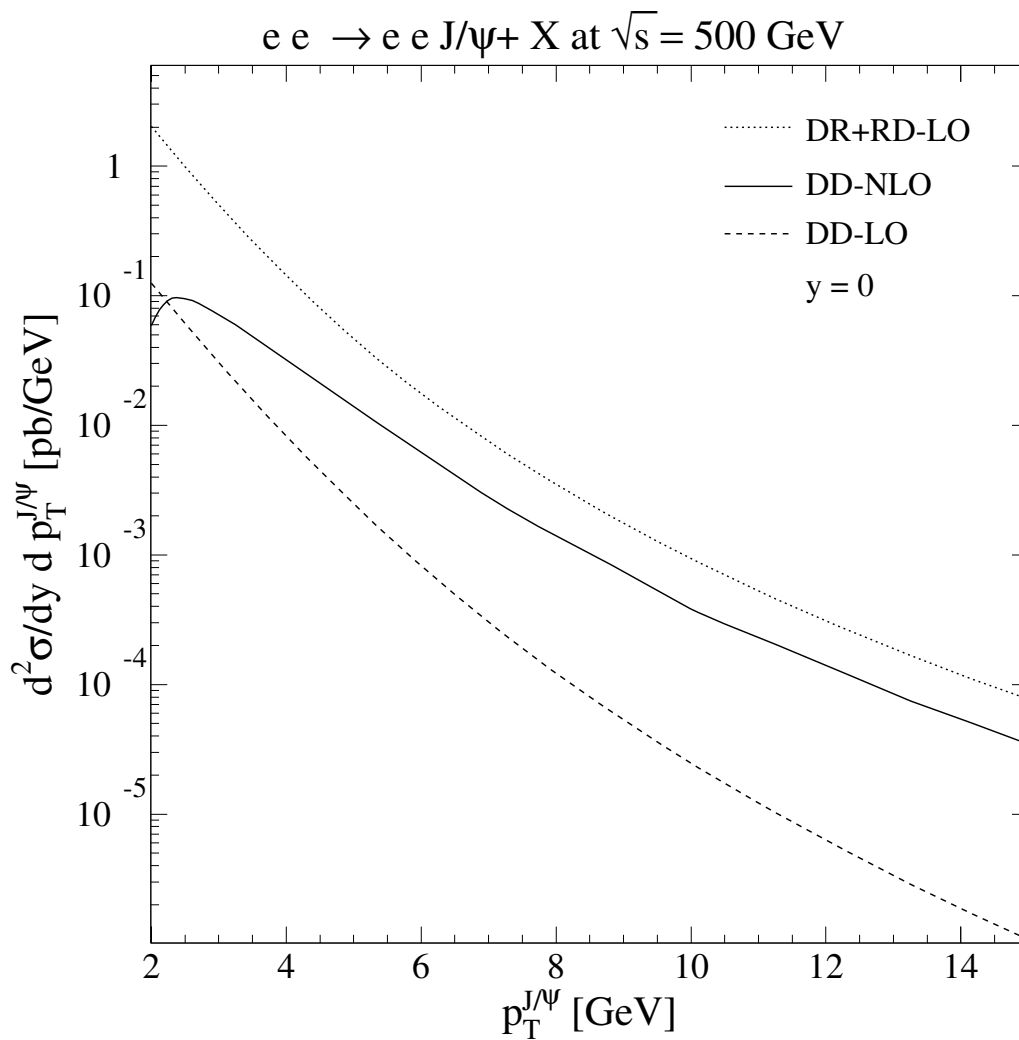


– **renormalisation** de l'opérateur pour soustraire les div. UV

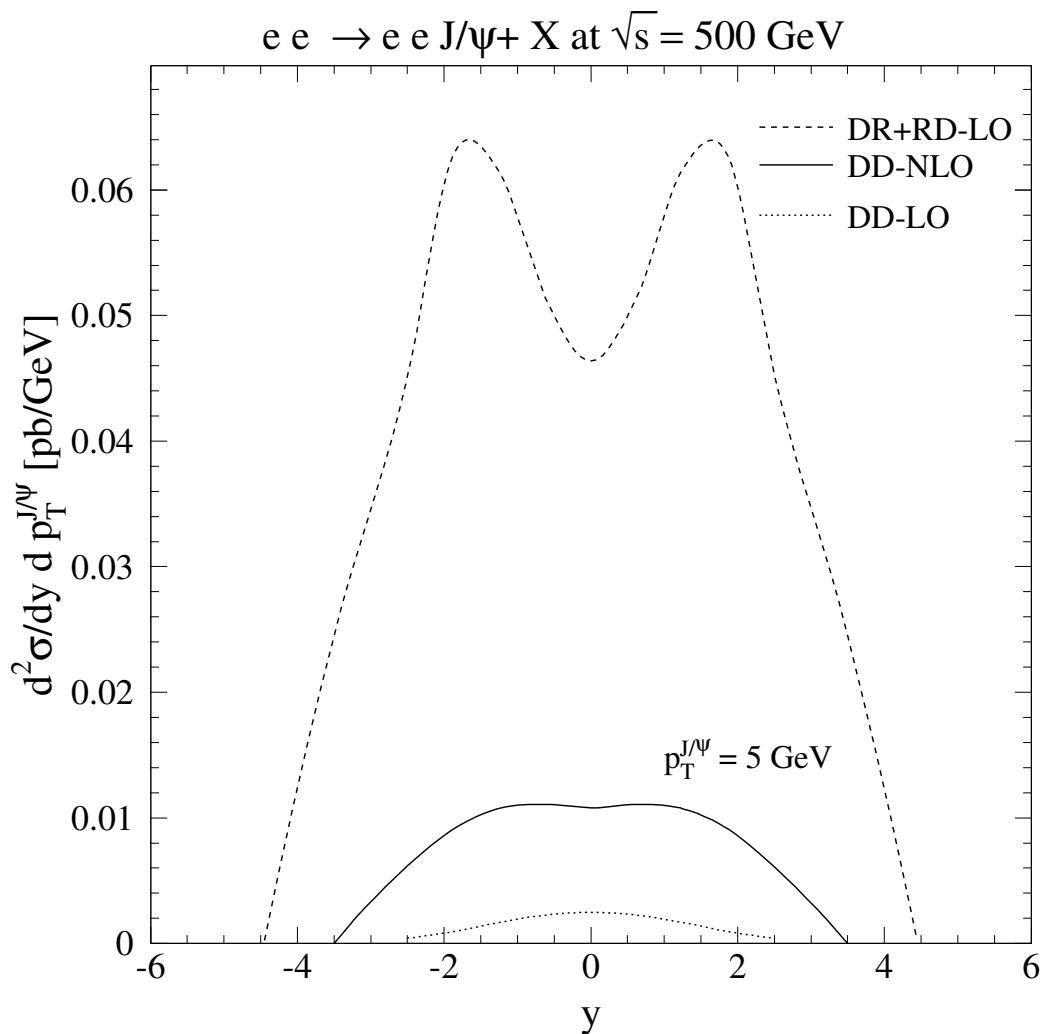
– **divergences IR** de l'opérateur(NRQCD) et celles

du **processus dur** (QCD) **s'annulent** mutuellement.

- distribution en p_T de la section efficace différentielle $d^2\sigma/dy dp_T$ à $y = 0$ (auprès de TESLA).
- á **grandes** p_T les corrections réelles sont **dominantes** (plusieurs canaux **activés** par lémission d'un gluon réel).
- á **p_T moyennes** les corrections virtuelles compensant celles réelles deviennent importantes



- dépendance en y de la $d^2\sigma/dy dp_T$ pour $p_T = 5\text{GeV}$
- à **impulsions moyennes** $p_T \simeq 5\text{GeV}$, la production associée du J/Ψ et d'une paire de quarks légers est atténuée.
- la **symétrie** autour de $y = 0$ est gardée, mais les pics sont aplatis.



Conclusions

- La **NRQCD** est une théorie consistante comprenant les états de **Singlet de Couleur** et d'**Octet de Couleur**. De plus, toutes les divergences **s'annulent** mutuellement.
- Les prédictions de la **NRQCD** sont en **accord** avec les données expérimentales du **DELPHI** (LEP2) et **PHENIX** (RHIC), alors que celles du CSM sont d'un ordre de grandeur plus petites.
- Premier calcul pour les processus $2 \rightarrow 2$ dans le cadre de la NRQCD, *i.e* production directe $\gamma\gamma \rightarrow J/\Psi + jet$
- Le facteur $K_{NLO} \equiv \sigma_{NLO}/\sigma_{Born} \simeq 6$ confirme que les corrections en α_S et celles relativistes sont **significatives** pour charmonia.