



Risultati e prospettive sulle interazioni multi-partoniche con CMS

Dalle risonanze multi-bosoniche ai mesoni con quark pesanti

IFAE, 3-5 Aprile 2024, Firenze



In rappresentanza della collaborazione CMS



Maria Elena Ascoti | PhD student
Università di Perugia
maria.elena.ascioti@cern.ch
mariaelena.ascioti@pg.infn.it

AGENDA

1

Introduzione

2

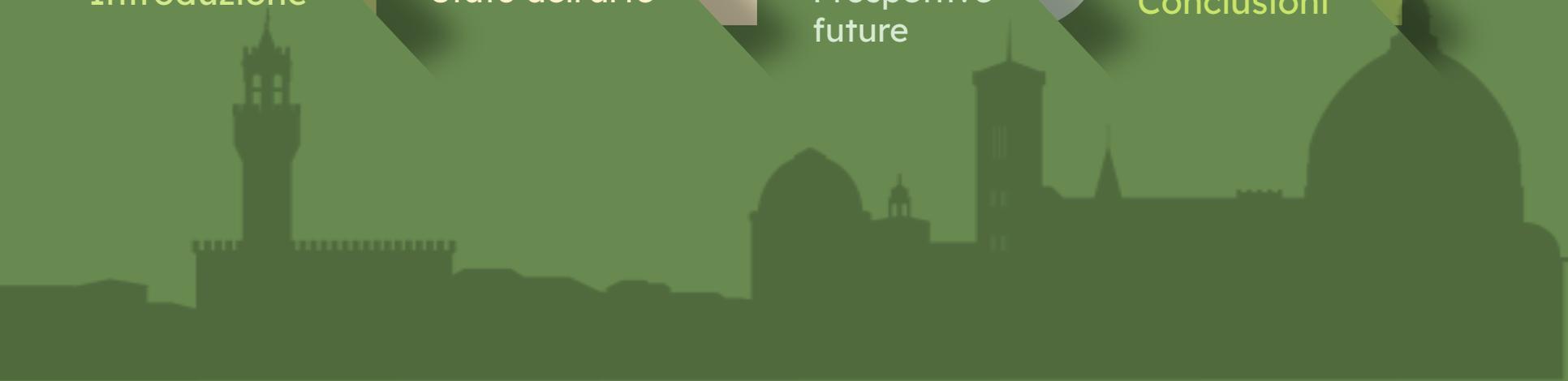
Stato dell'arte

3

Prospettive
future

4

Conclusioni



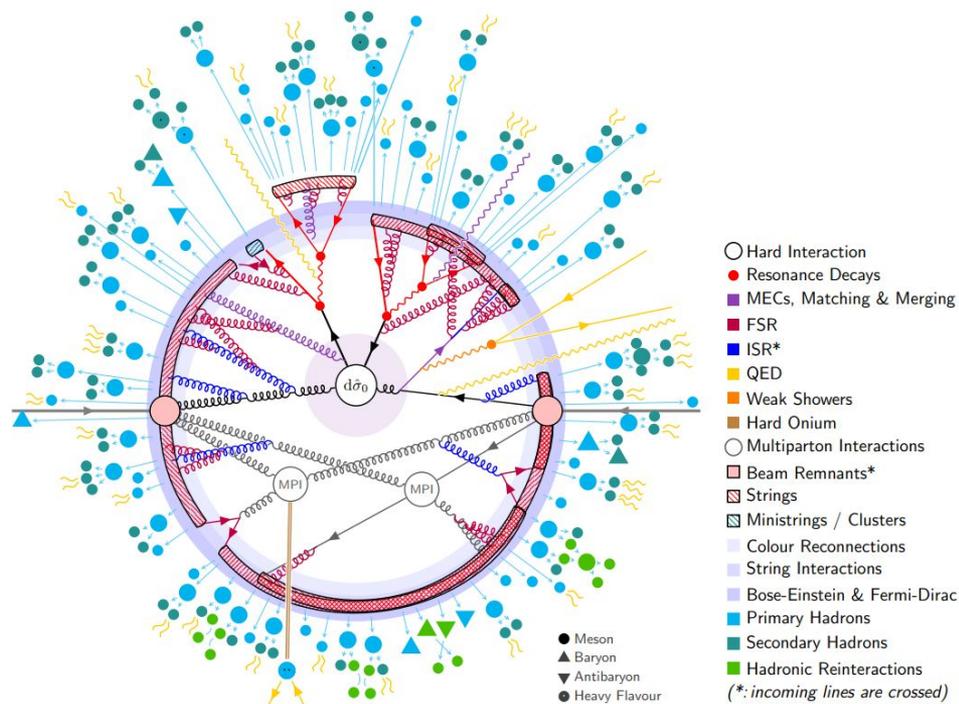
1

Introduzione



Interazione multi-partoniche: due scale di energia

- L'interazione tra due protoni possa coinvolgere interazioni simultanee di più partoni.
- Tali interazioni tendono ad aumentare con l'energia del centro di massa a causa dell'aumento di partoni.
- Le interazioni multi-partoniche (MPI):
 - **regime soft** (p_T bassi): attività adronica secondaria ;
 - **regime hard** (p_T alti): scattering energetici tra più coppie di partoni.



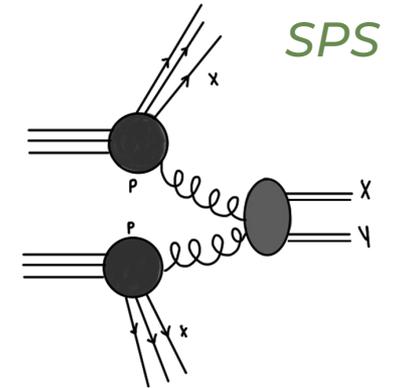
[A comprehensive guide to the physics and usage of PYTHIA 8.3](#)

Interazione multi-partoniche



Single-Parton Scattering (SPS):

- produzione di due o più particelle attraverso una **singola interazione** tra due partoni.
- La cinematica è correlata e le emissioni aggiuntive di gluoni si trascurano.



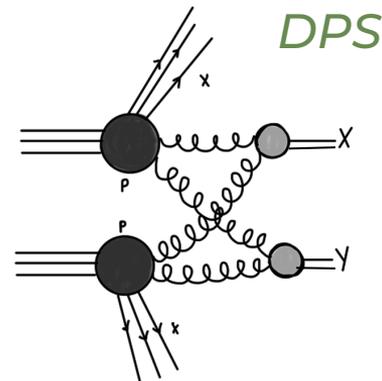
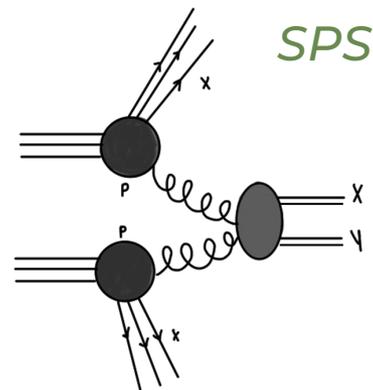
Interazione multi-partoniche

Single-Parton Scattering (SPS):

- produzione di due o più particelle attraverso una **singola interazione** tra due partoni.
- La cinematica è correlata e le emissioni aggiuntive di gluoni si trascurano.

Double-Parton Scattering (DPS):

- produzione di due particelle attraverso una **doppia interazione** tra due partoni appartenenti agli stessi protoni.
- Si assume che gli scattering siano non correlati.



Interazione multi-partoniche

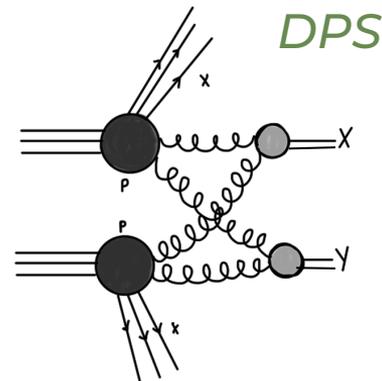
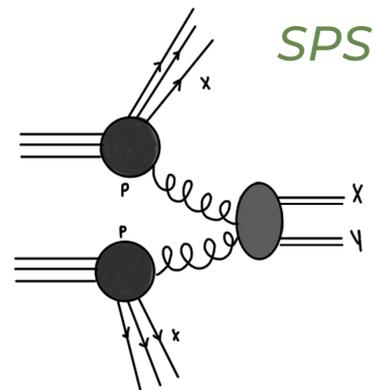
Single-Parton Scattering (SPS):

- produzione di due o più particelle attraverso una **singola interazione** tra due partoni.
- La cinematica è correlata e le emissioni aggiuntive di gluoni si trascurano.

Double-Parton Scattering (DPS):

- produzione di due particelle attraverso una **doppia interazione** tra due partoni appartenenti agli stessi protoni.
- Si assume che gli scattering siano non correlati.

In termini della sezione d'urto totale, il meccanismo **DPS** è soppresso in potenza rispetto a SPS: tuttavia, **potrebbe essere predominante in alcuni canali**.



Interazione multi-partoniche

Single-Parton Scattering (SPS):

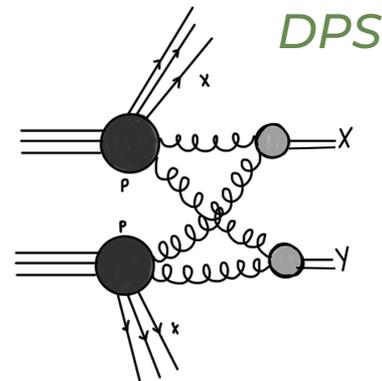
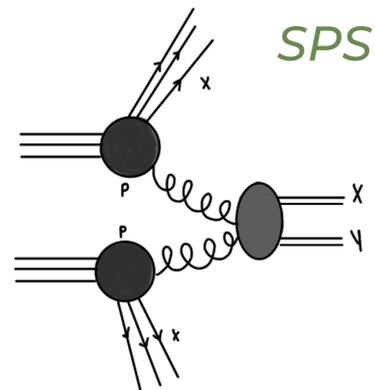
- produzione di due o più particelle attraverso una **singola interazione** tra due partoni.
- La cinematica è correlata e le emissioni aggiuntive di gluoni si trascurano.

Double-Parton Scattering (DPS):

- produzione di due particelle attraverso una **doppia interazione** tra due partoni appartenenti agli stessi protoni.
- Si assume che gli scattering siano non correlati.

I processi DPS vengono descritti dalla **pocket formula**:

$$\sigma_{DPS}^{pp \rightarrow A, B} = \left(\frac{m}{2!} \right) \frac{\sigma_{SPS}^{pp \rightarrow A} \cdot \sigma_{SPS}^{pp \rightarrow B}}{\sigma_{\text{eff}, DPS}}$$



Interazione multi-partoniche

Single-Parton Scattering (SPS):

- produzione di due o più particelle attraverso una **singola interazione** tra due partoni.
- La cinematica è correlata e le emissioni aggiuntive di gluoni si trascurano.

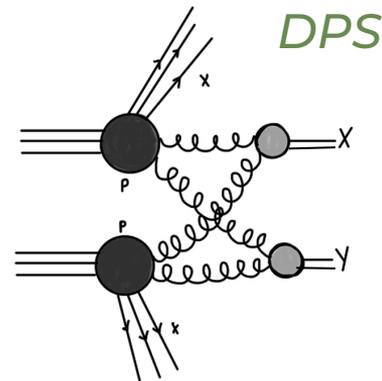
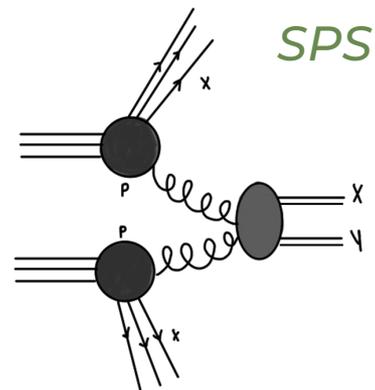
Double-Parton Scattering (DPS):

- produzione di due particelle attraverso una **doppia interazione** tra due partoni appartenenti agli stessi protoni.
- Si assume che gli scattering siano non correlati.

I processi DPS vengono descritti dalla **pocket formula**:

$$\sigma_{DPS}^{pp \rightarrow A, B} = \left(\frac{m}{2!} \right) \frac{\sigma_{SPS}^{pp \rightarrow \{A\}} \cdot \sigma_{SPS}^{pp \rightarrow \{B\}}}{\sigma_{\text{eff}, DPS}}$$

FATTORE COMBINATORIALE



Interazione multi-partoniche

Single-Parton Scattering (SPS):

- produzione di due o più particelle attraverso una **singola interazione** tra due partoni.
- La cinematica è correlata e le emissioni aggiuntive di gluoni si trascurano.

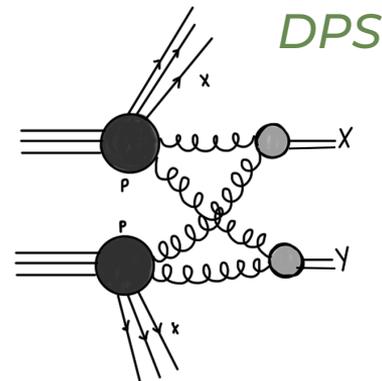
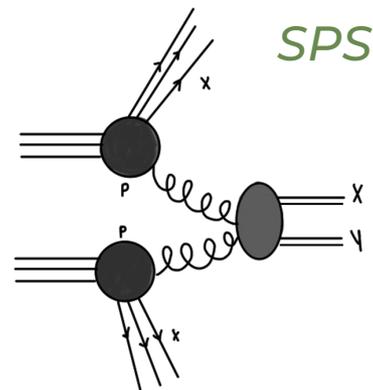
Double-Parton Scattering (DPS):

- produzione di due particelle attraverso una **doppia interazione** tra due partoni appartenenti agli stessi protoni.
- Si assume che gli scattering siano non correlati.

I processi DPS vengono descritti dalla **pocket formula**:

$$\sigma_{DPS}^{pp \rightarrow A, B} = \left(\frac{m}{2!} \right) \frac{\sigma_{SPS}^{pp \rightarrow A} \cdot \sigma_{SPS}^{pp \rightarrow B}}{\sigma_{\text{eff}, DPS}}$$

SEZIONI D'URTO SINGOLE



Interazione multi-partoniche

Single-Parton Scattering (SPS):

- produzione di due o più particelle attraverso una **singola interazione** tra due partoni.
- La cinematica è correlata e le emissioni aggiuntive di gluoni si trascurano.

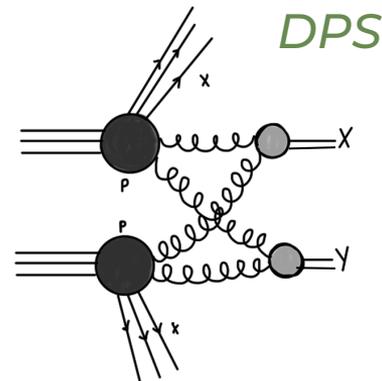
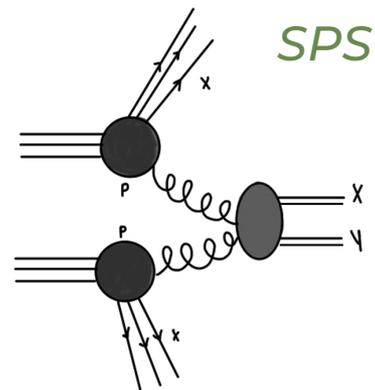
Double-Parton Scattering (DPS):

- produzione di due particelle attraverso una **doppia interazione** tra due partoni appartenenti agli stessi protoni.
- Si assume che gli scattering siano non correlati.

I processi DPS vengono descritti dalla **pocket formula**:

$$\sigma_{DPS}^{pp \rightarrow A, B} = \left(\frac{m}{2!} \right) \frac{\sigma_{SPS}^{pp \rightarrow A} \cdot \sigma_{SPS}^{pp \rightarrow B}}{\sigma_{\text{eff}, DPS}}$$

SEZIONE D'URTO EFFICACE



2

Stato dell'arte



Recenti pubblicazioni inerenti al RUN 2



2023

PHYSICAL REVIEW LETTERS **131**, 091803 (2023)

Observation of Same-Sign WW Production from Double Parton Scattering in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV

A. Tumasyan *et al.*^{*}
(CMS Collaboration)

 (Received 6 June 2022; accepted 18 August 2022; published 1 September 2023)

Produzione in coppia di bosoni ss-WW



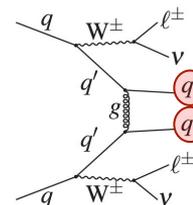
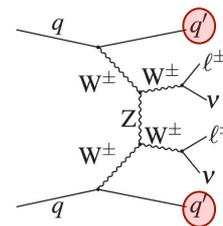
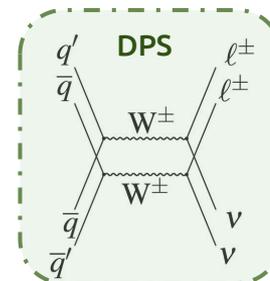
- Il caso di produzione di **coppia di bosoni WW dello stesso segno** (ss-WW) è un **canale d'oro** per lo studio del **DPS**:
 - la **segnatura sperimentale** di questo stato finale è estremamente **pulita**;
 - il **contributo SPS** è **fortemente soppresso**.

I decadimenti considerati comprendono **due leptoni dello stesso segno** ($e^\pm \mu^\pm$ oppure $\mu^\pm \mu^\pm$).

e	$p_T > 10 \text{ GeV}$	$ \eta < 2.5$	S.R. ($e^\pm \mu^\pm$)	$p_T > 25 \text{ GeV}$
μ	$p_T > 10 \text{ GeV}$	$ \eta < 2.4$	S.R. ($\mu^\pm \mu^\pm$)	$p_T > 10 \text{ GeV}$

I background principali sono:

- WZ in cui entrambi i bosoni decadono leptonicamente,
- eventi con W+jet e eventi di QCD con più jet.
- produzioni SPS di $W^\pm W^\pm, VVV$ e ttV (rari).



[Observation of Same-Sign WW Production from DPS](#)

Produzione in coppia di bosoni ss-WW

Usando i dati raccolti tra il 2016 e il 2018 durante il **Run 2** ad un'energia del c.m. di **13 TeV** per una totalità di luminosità integrata 138 fb^{-1} , la **sezione d'urto totale** è pari a:

$$80.7 \pm 11.2(\text{stat})_{-8.6}^{+9.5}(\text{syst}) \pm 12.1(\text{model}) \text{ fb}$$

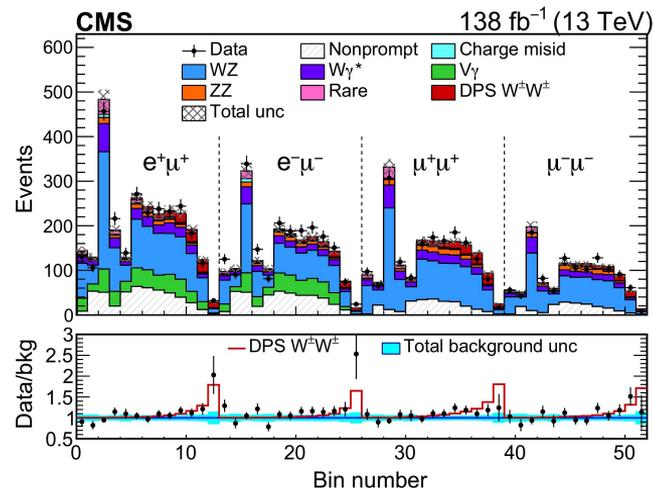
Mentre la **sezione d'urto fiduciale** risulta essere pari a:

$$6.28 \pm 0.81(\text{stat}) \pm 0.69(\text{syst}) \pm 0.37(\text{model}) \text{ fb}$$

Quest'ultima corrisponde ad una significanza del segnale rispetto all'ipotesi di solo background di **6.2 deviazioni standard**.

Inoltre è stato estratto un valore per la **sezione d'urto efficace per il DPS** pari a :

$$\sigma_{\text{eff}} = 12.2_{-2.2}^{+2.9} \text{ mb}$$



Recenti pubblicazioni inerenti al RUN 2



Physics Letters B 808 (2020) 135578

Contents lists available at ScienceDirect

Physics Letters B

ELSEVIER www.elsevier.com/locate/physletb

Measurement of the $Y(1S)$ pair production cross section and search for resonances decaying to $Y(1S)\mu^+\mu^-$ in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV

The CMS Collaboration*

CERN, Switzerland



PHYSICAL REVIEW LETTERS **131**, 091803 (2023)

Observation of Same-Sign WW Production from Double Parton Scattering in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV

A. Tumasyan *et al.**
(CMS Collaboration)

(Received 6 June 2022; accepted 18 August 2022; published 1 September 2023)

Misura della produzione in coppia: $Y(1S)Y(1S)$ e $Y(1S) + \mu\mu$

Obiettivi dell'analisi:

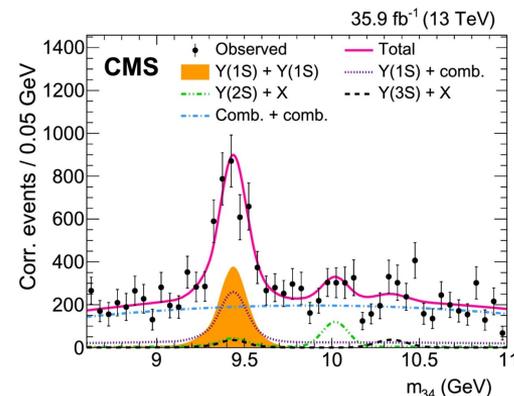
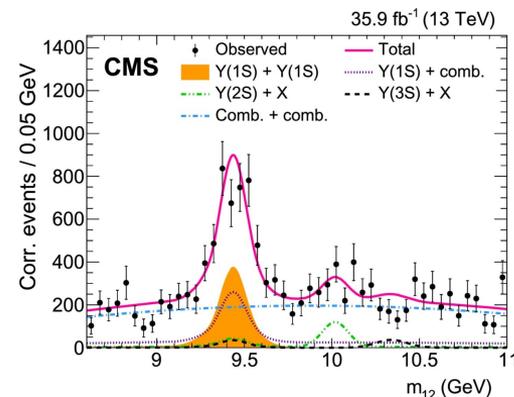
- Misura della **sezione d'urto** della produzione della coppia $Y(1S)Y(1S)$;
 - estrapolazione **contributo DPS**.
- Ricerca di una **nuova risonanza** nello stato finale $Y(1S) + \mu\mu$.

Risultati ottenuti:

- Nella regione dove entrambe la $Y(1S)$ hanno $|\eta| < 2$ la **sezione d'urto per la produzione in coppia** risulta essere:

$$\sigma = 79 \pm 11(\text{stat}) \pm 6(\text{syst}) \pm 3 \text{ pb}$$

- Nella regione tra 17.5 e 19.5 GeV (circa quattro volte la massa del quark b): **è stato fissato un nuovo limite per la sezione d'urto** di produzione con decadimento in $Y(1S) + \mu\mu \rightarrow \mu\mu + \mu\mu$.



[Measurement of the \$Y\(1S\)\$ pair production cross section](#)

Misura della produzione in coppia: $Y(1S)Y(1S)$ e $Y(1S) + \mu\mu$

La **cinematica del processo DPS** è diversa rispetto a quella **SPS**: ci aspettiamo una **maggiore separazione in rapidità** $|\Delta y(Y(1S), Y(1S))|$ tra i mesoni e una **maggiore massa invariante** $m_{(1S), Y(1S)}$.

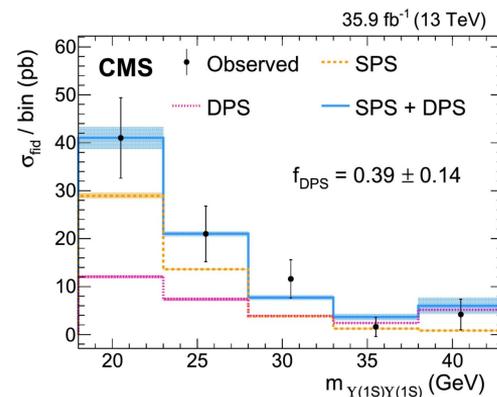
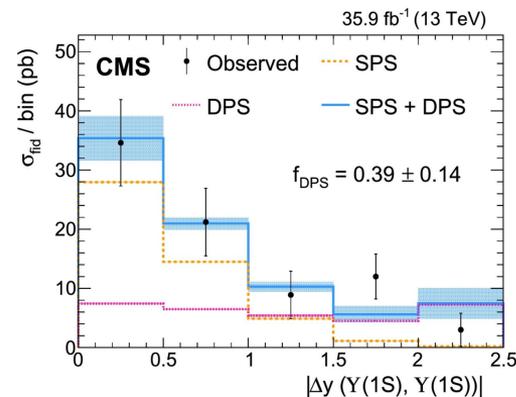
Calcolando le sezioni d'urto differenziali possiamo ottenere la **frazione di eventi DPS** come:

$$f_{\text{DPS}} = \frac{\sigma_{\text{fid}}^{\text{DPS}}}{\sigma_{\text{fid}}^{\text{SPS}} + \sigma_{\text{fid}}^{\text{DPS}}}$$

I risultati ottenuti sono:

- $f_{\text{DPS}}(|\Delta y(Y(1S), Y(1S))|) = 0.39 \pm 0.14$
- $f_{\text{DPS}}(m_{(1S), Y(1S)}) = 0.27 \pm 0.22$

I risultati includono sia le incertezze statistiche (largamente dominanti) che quelle teoriche.



Recenti pubblicazioni inerenti al RUN 2



Physics Letters B 808 (2020) 135578

Contents lists available at ScienceDirect

Physics Letters B

www.elsevier.com/locate/physletb

Measurement of the $Y(1S)$ pair production cross section and search for resonances decaying to $Y(1S)\mu^+\mu^-$ in proton-proton collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV

The CMS Collaboration*

CERN, Switzerland

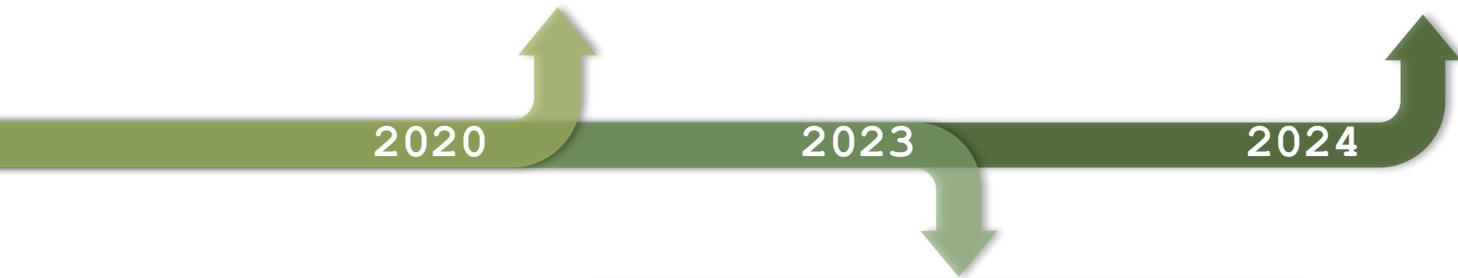
PHYSICAL REVIEW LETTERS 132, 111901 (2024)

Editors' Suggestion

New Structures in the $J/\psi J/\psi$ Mass Spectrum in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV

A. Hayrapetyan *et al.**
(CMS Collaboration)

(Received 12 June 2023; revised 7 December 2023; accepted 31 January 2024; published 15 March 2024)



PHYSICAL REVIEW LETTERS 131, 091803 (2023)

Observation of Same-Sign WW Production from Double Parton Scattering in Proton-Proton Collisions at $\sqrt{s} = 13$ TeV

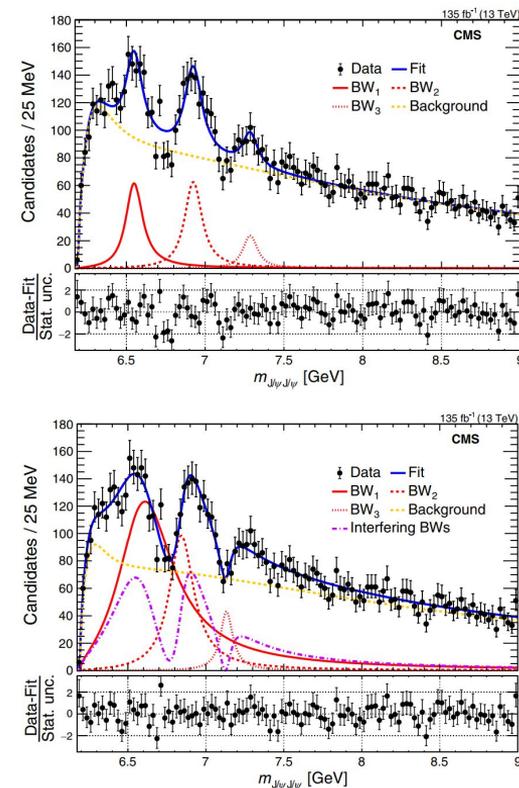
A. Tumasyan *et al.**
(CMS Collaboration)

(Received 6 June 2022; accepted 18 August 2022; published 1 September 2023)

Nuove struttura nello spettro di massa di di- J/ψ

- Nel **2020 LHCb** ha annunciato una **nuova risonanza** stretta nello spettro di massa $J/\psi J/\psi$ designata come **X(6900)**. Tale picco è stato interpretato come uno stato legato di quattro quark (**tetraquark**). La stessa analisi è stata poi ripetuta sia da **ATLAS** che da **CMS**.
- CMS ha analizzato i dati raccolti durante il Run 2 corrispondenti ad una luminosità integrata di 135 fb^{-1} ad un'energia del c.m. di 13 TeV.
- Le J/ψ sono state ricostruite nel **canale di-muonico** richiedendo che la loro massa invariante fosse compresa tra 2.95 e 3.25 GeV con $p_T > 3.5 \text{ GeV}$.

Risonanza	Deviazioni standard
X(6600)	7.9
X(6900)	9.8
X(7100)	4.7



Nuove struttura nello spettro di massa di di-J/ ψ

E il DPS?

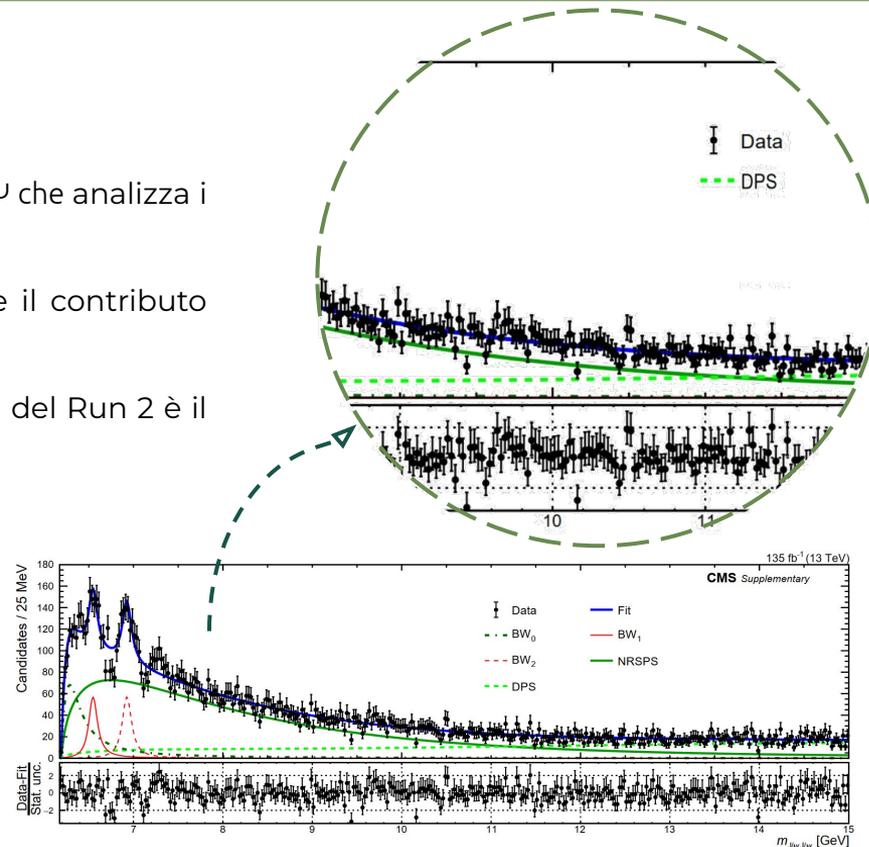
In passato CMS ha pubblicato un'analisi del canale di di-J/ ψ che analizza i dati raccolti durante il Run 1 con energia nel c.m. di 7 TeV.

Già in questo caso era evidente l'importanza di includere il contributo DPS.

Una delle **principali sorgenti di fondo** dell'analisi di di-J/ ψ del Run 2 è il **DPS** che si prevede incidere circa il **25% sul background**.

Nella regione **sopra gli 11 GeV** per $m_{J/\psi J/\psi}$ ci aspettiamo che il **contributo DPS sia dominante**.

Non ci resta quindi che cercare il DPS anche qua! (Spoiler: ci stiamo lavorando!)

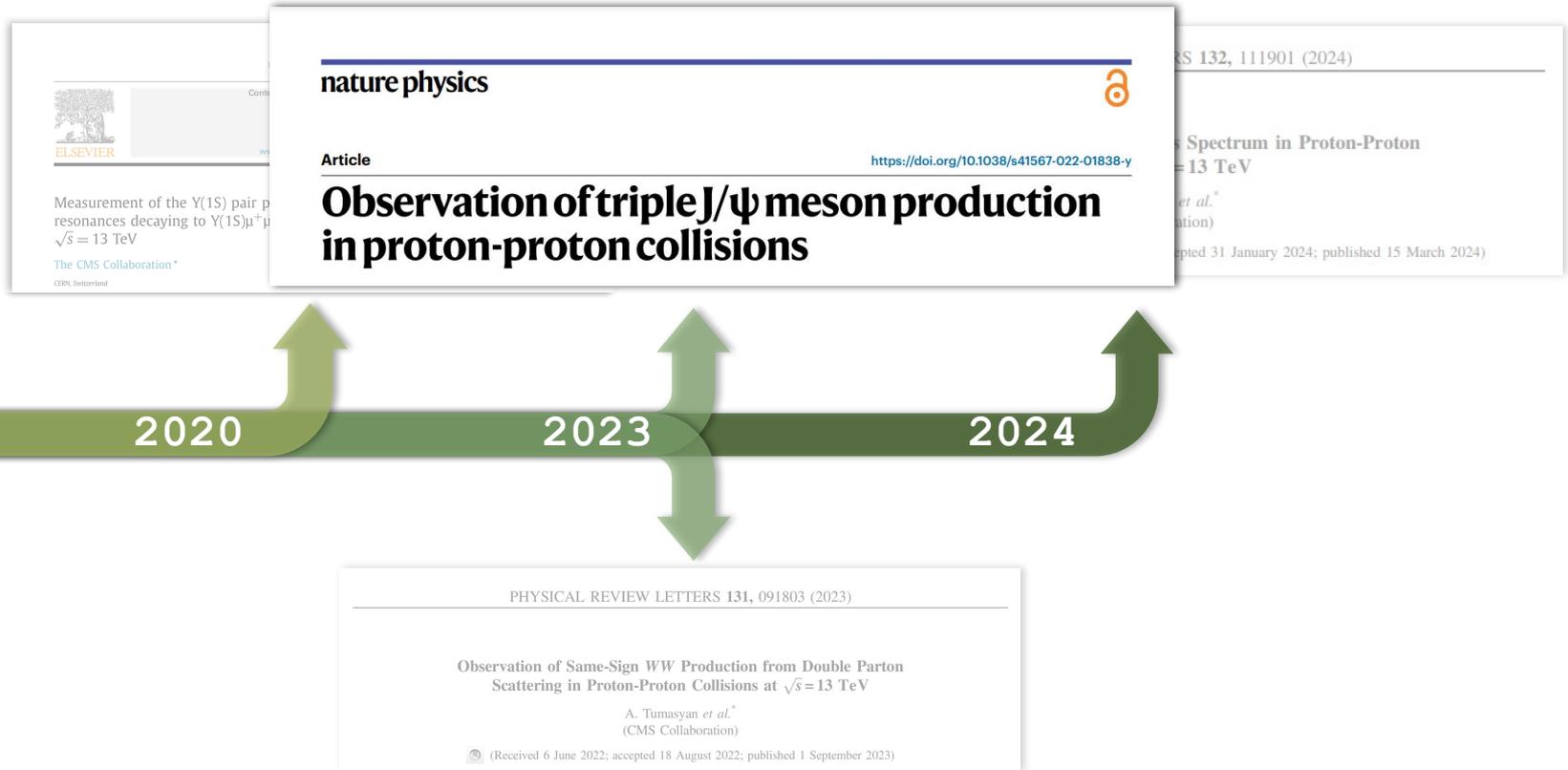


3

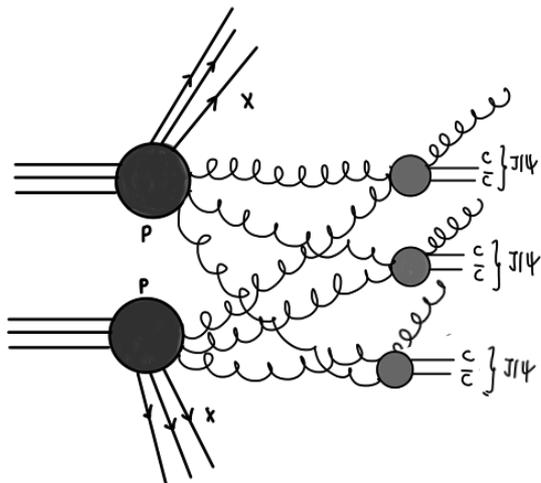
Prospective
future



Singolo, Doppio e Triplo scattering partonico



Singolo, Doppio e Triplo scattering partonico



Il naturale passo in avanti dal Doppio scattering partonico è il **Triplo scattering partonico**.

Si considerano, come per il DPS, **completamente indipendenti le tre coppie partoniche interagenti** e i **prodotti delle tre interazioni**.

Formalmente tale processo viene descritto ancora una volta da una **pocket formula**:

$$\sigma_{\text{TPS}}^{\text{pp} \rightarrow \psi_1 \psi_2 \psi_3 + X} = \left(\frac{m}{3!} \right) \frac{\sigma_{\text{SPS}}^{\text{pp} \rightarrow \psi_1 + X} \sigma_{\text{SPS}}^{\text{pp} \rightarrow \psi_2 + X} \sigma_{\text{SPS}}^{\text{pp} \rightarrow \psi_3 + X}}{\sigma_{\text{eff,TPS}}^2}$$

Ad oggi è stata condotta **una sola analisi** per il **Triplo scattering partonico (TPS)** ed è stata pubblicata da CMS nel 2023, lo stato finale studiato prevede la **produzione simultanea di tre J/ψ**.

Tre J/ψ in un colpo solo

Analizzando tutti i dati raccolti durante il **RUN 2** ($L = 133 \text{ fb}^{-1}$) sono stati trovati **5 eventi di segnale** e uno di fondo.

$$N_{\text{sig}}^{3J/\psi} = 5.0^{+2.6}_{-1.9}$$

I contributi attesi dall'**SPS**, **DPS** e **TPS** riferiti alla misura di sezione d'urto della tripla-J/ψ sono rispettivamente: **6%**, **74%** e **20%**.

La sezione d'urto fiduciale è:

$$272^{+141}_{-104} \text{ (stat)} \pm 17 \text{ (syst)} \text{ fb}$$

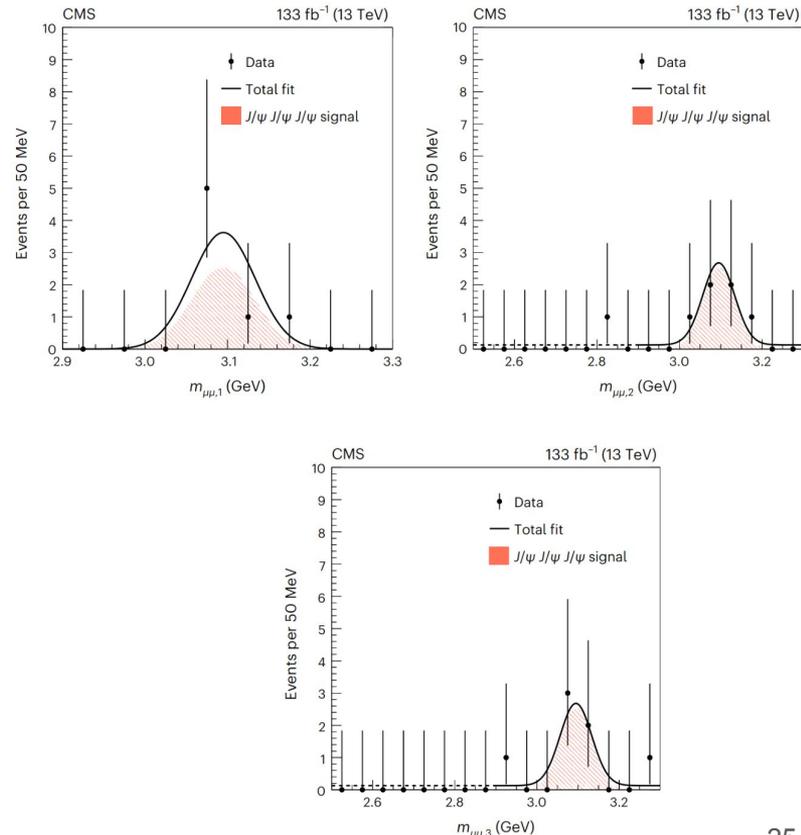
La **sezione d'urto efficace per il DPS** è pari a:

$$\sigma_{\text{eff,DPS}} = 2.7^{+1.4}_{-1.0} \text{ (exp)} +1.5^{+1.5}_{-1.0} \text{ (theo)} \text{ mb}$$

mentre quella relativa al **TPS** è di:

$$\sigma_{\text{eff,TPS}} = (0.82 \pm 0.11) \sigma_{\text{eff,DPS}}$$

[Observation of triple J/ψ meson production](#)



Tre J/ψ in un colpo solo

Analizzando tutti i dati raccolti durante il **RUN 2** ($L = 133 \text{ fb}^{-1}$) sono stati trovati **5 eventi di segnale** e uno di fondo.

$$N_{\text{sig}}^{3J/\psi} = 5.0^{+2.6}_{-1.9}$$

I contributi attesi dall'**SPS**, **DPS** e **TPS** riferiti alla misura di sezione d'urto della tripla-J/ψ sono rispettivamente: **6%**, **74%** e **20%**.

La sezione d'urto fiduciale è:

$$272^{+141}_{-104} \text{ (stat)} \pm 17 \text{ (syst)} \text{ fb}$$

La **sezione d'urto efficace per il DPS** è pari a:

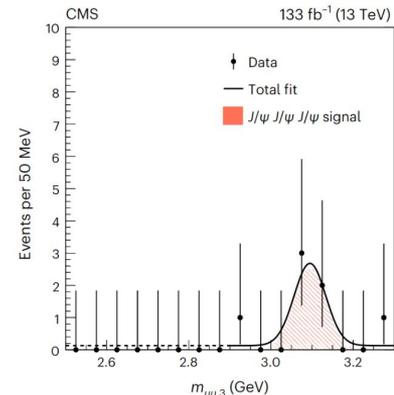
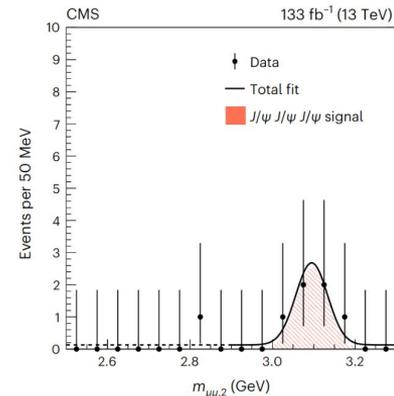
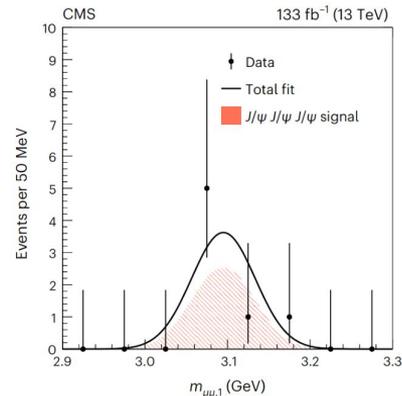
$$\sigma_{\text{eff,DPS}} = 2.7^{+1.4}_{-1.0} \text{ (exp)} +1.5^{+1.5}_{-1.0} \text{ (theo)} \text{ mb}$$

mentre quella relativa al **TPS** è di:

$$\sigma_{\text{eff,TPS}} = (0.82 \pm 0.11) \sigma_{\text{eff,DPS}}$$

*è frutto di una previsione teorica,
non è estrapolata dai dati*

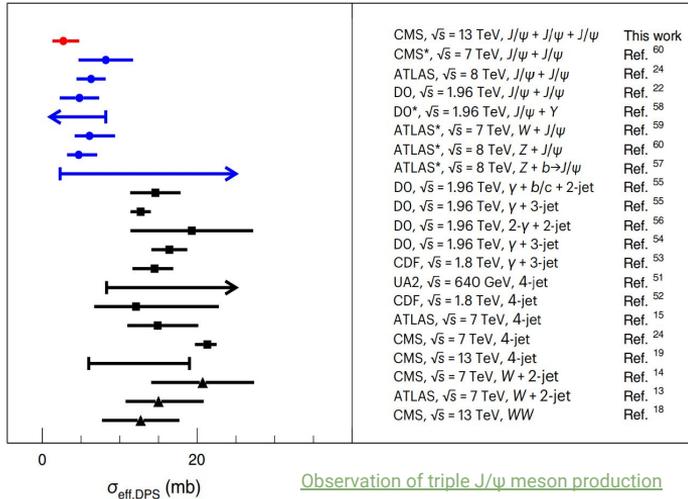
[Observation of triple J/ψ meson production](#)



4

Conclusioni





Lo studio delle interazioni multi-partoniche deve essere di interesse perché:

- Può darci degli **input importanti sulla struttura degli adroni**.
- Ci dà informazioni in un settore difficile da sondare come quello delle **interazione partoniche**.
- **Il contributo DPS** inizia a farsi **sempre più presente** grazie all'aumento di luminosità e di energia nel c.m.

Rimangono aperte le **domande sulla sezione d'urto efficace**:

- **perchè varia?**
- quanto è **dipendente dal tipo di processo?** dalla **cinematica** e dall'**energia?**

Grazie per l'attenzione!

BACKUP

La pocket formula

Per un generico processo di interazione partonica singola (**SPS**) la sezione d'urto è data:

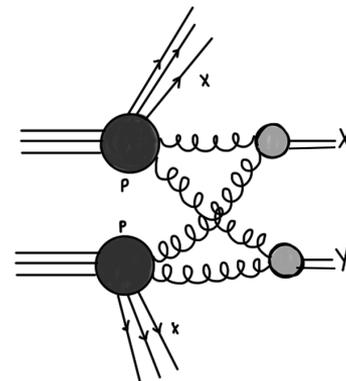
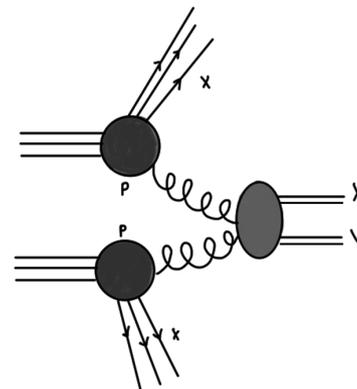
$$\frac{d\sigma_{pp \rightarrow q\bar{q}}^{SPS}}{dy_1 dy_2 d^2p_{1,t} d^2p_{2,t}} = \frac{1}{16\pi^2 (x_1 x_2 S)^2} \int \frac{d^2k_{1t}}{\pi} \frac{d^2k_{2t}}{\pi} |\mathcal{M}_{gg \rightarrow q\bar{q}}|^2 \times \delta^2(\vec{k}_{1t} + \vec{k}_{2t} - \vec{p}_{1t} - \vec{p}_{2t}) \mathcal{F}_g(x_1, k_{1t}^2, \mu^2) \mathcal{F}_g(x_2, k_{2t}^2, \mu^2)$$

Mentre la sezione d'urto per un processo **DPS** è data:

$$\sigma_{pp \rightarrow q\bar{q}q\bar{q}}^{DPS} = \frac{m}{2!} \int \Gamma_p^{gg}(x_1, x_2; \vec{b}_1, \vec{b}_2; \mu_1^2, \mu_2^2) \hat{\sigma}_{q\bar{q}}^{gg}(x_1, x'_1, \mu_1^2) \hat{\sigma}_{q\bar{q}}^{gg}(x_2, x'_2, \mu_2^2) \times \Gamma_p^{gg}(x'_1, x'_2; \vec{b}_1 - \vec{b}, \vec{b}_2 - \vec{b}; \mu_1^2, \mu_2^2) dx_1 dx_2 dx'_1 dx'_2 d^2b_1 d^2b_2 d^2b$$

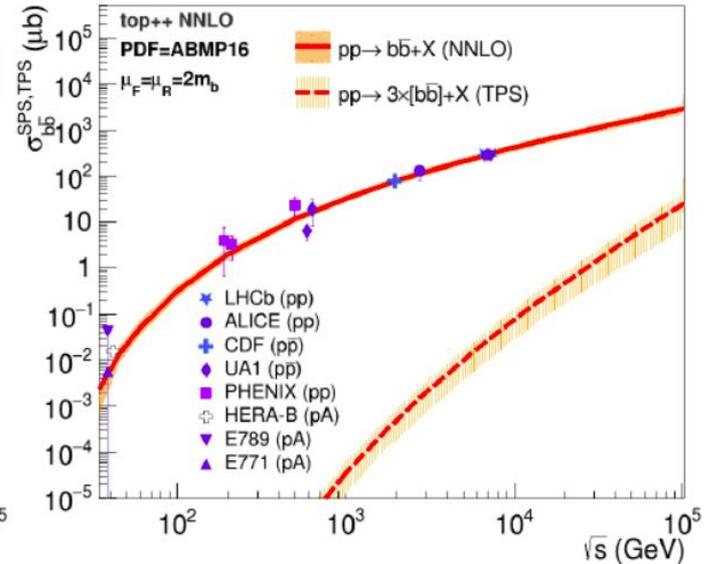
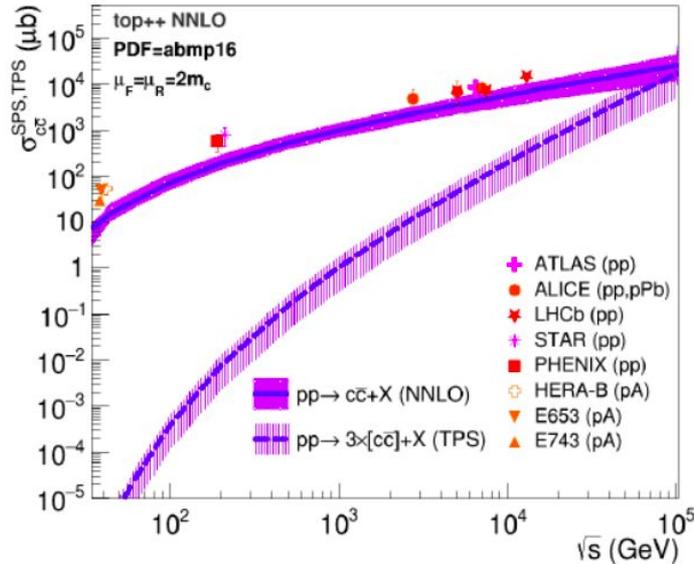
Fattorizzando i vari contributi si ottiene quindi la cosiddetta **pocket formula**:

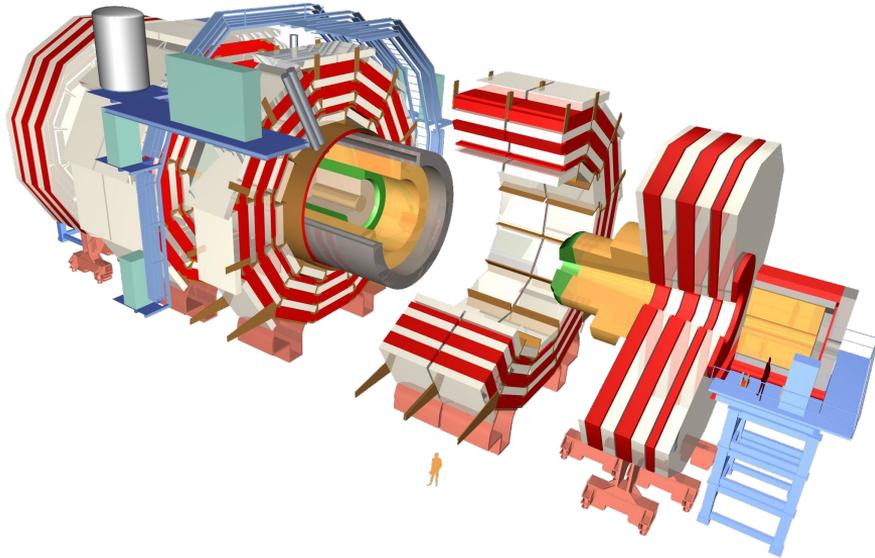
$$\sigma_{DPS}^{pp \rightarrow A, B} = \left(\frac{m}{2!} \right) \frac{\sigma_{SPS}^{pp \rightarrow A} \cdot \sigma_{SPS}^{pp \rightarrow B}}{\sigma_{\text{eff}, DPS}}$$



Previsioni andamento sezione d'urto

Nel settore charm, ci si aspetta che la sezione d'urto TPS sia grande quanto la sezione d'urto SPS a $\sqrt{s} = 100$ TeV.

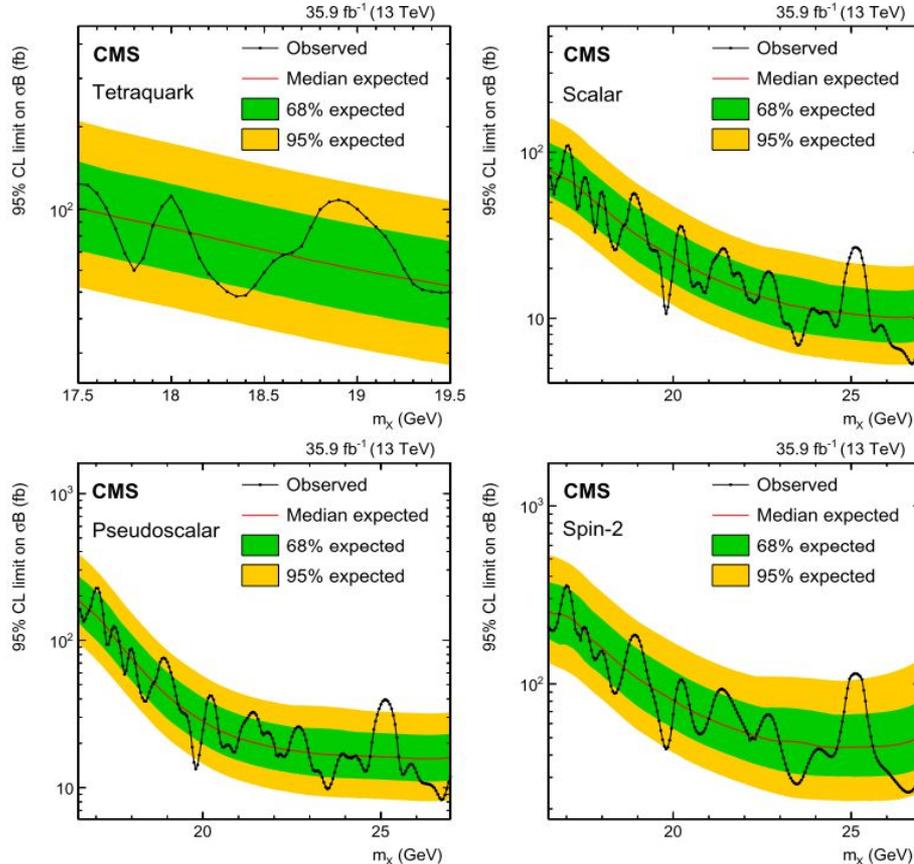




- CMS copre un'ampia gamma di pseudorapidità con $|\eta| < 5$.
- Sistema di Tracciamento: Il sistema di tracciamento consiste in rivelatori al silicio, sia a pixel che a strisce. L'incertezza relativa nelle misurazioni del momento varia tipicamente dallo 0.5% all'1.0%.
- Identificazione delle Particelle (PID): gli adroni carichi sono identificati utilizzando informazioni di tracciamento e l'energia depositata nei calorimetri. Fotoni, elettroni, sono identificati e misurati utilizzando calorimetri elettromagnetici. I muoni sono identificati tramite rivelatori di muoni dedicati composti da strati di ferro e tecnologie di rivelatori multiple come i tubi a deriva (DT), le camere a strisce catodiche (CSC) e le camere a piastre resistive (RPC).

Alla ricerca di nuove risonanze

[Physics Letters B 808 \(2020\) 135578](#)



Le masse tra 17.5 e 19.5 GeV sono esplorate nel contesto della ricerca del tetraquark mentre i limiti nell'intervallo di massa esteso 16.5–27 GeV sono stabiliti per la ricerca generica,

I limiti superiori al 95% di CL sul prodotto della sezione d'urto e del branching fraction per un tetraquark (in alto a sinistra), uno stato scalare (in alto a destra), uno pseudoscalare (in basso a sinistra) e uno stato di spin-2 (in basso a destra).