



**Programma di ricerca per l'attività del
Dottorato in Fisica - Ciclo XXXI**



**RICERCA e STUDIO
di STATI ESOTICI
QUARKONIUM-LIKE in**
anche con l'uso delle GPU



Dottorando : Adriano Di Florio

Programma di ricerca

● Si prevedono due linee di attività che si intersecano:

1. Utilizzo delle GPU in applicazioni di ricostruzione ed analisi dati:

● Applicazioni di interpolazione mediante GooFit:

a. Significatività statistica di un segnale (risonanza) inatteso

b. Implementazione in GooFit di interpolazioni complesse del tipo *Full Amplitude Analysis* in decadimenti a tre corpi dei mesoni con beauty.

● Ripensamento GPU-compatibile e riscrittura per GPU del codice di *Pattern Recognition* con gli *hit* nel tracciatore di CMS.

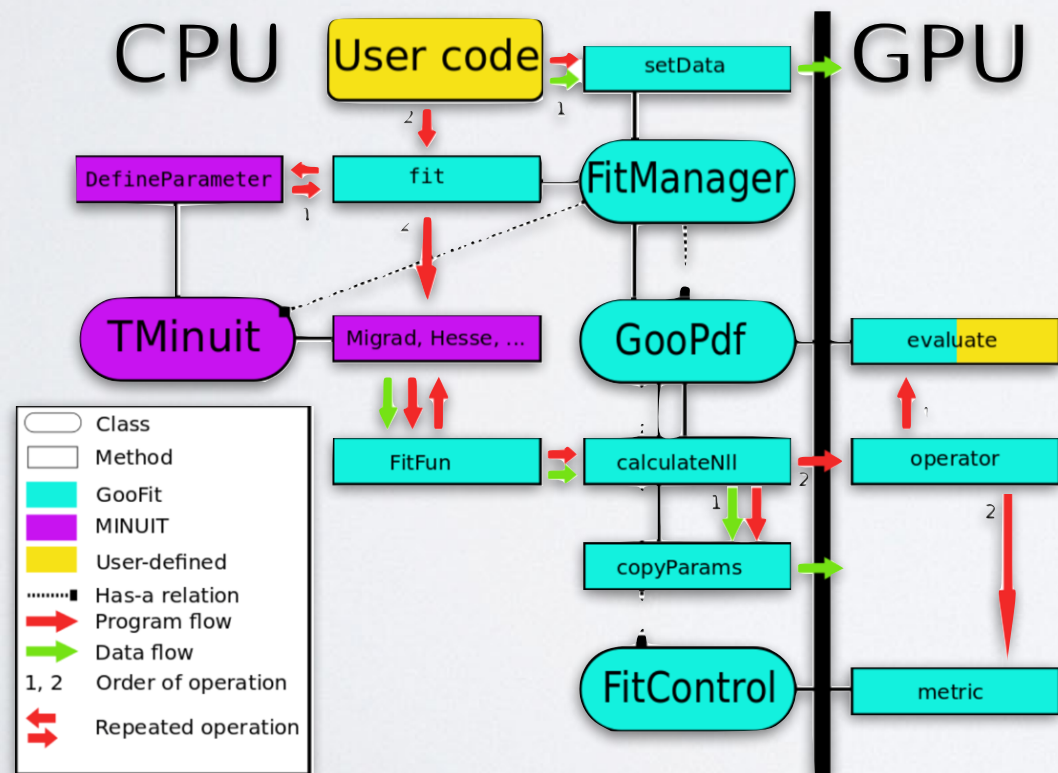
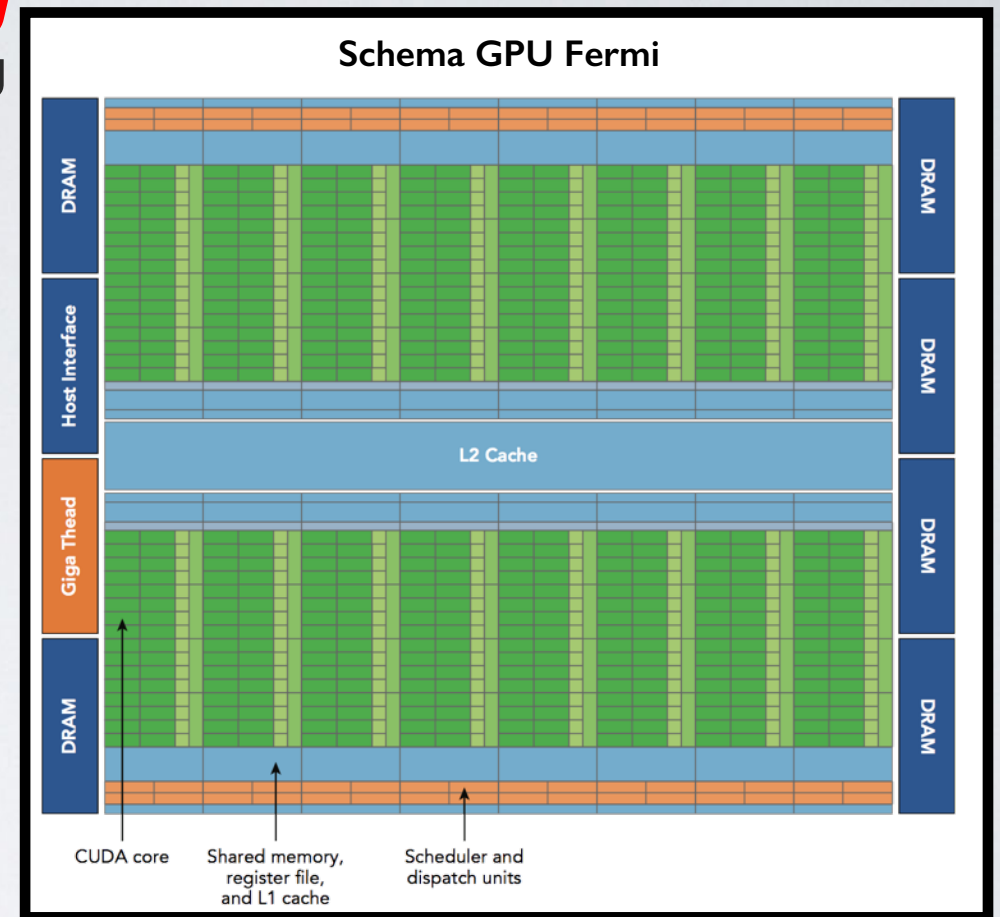
2. Ricerca dello stato *quarkonium-like* X_b , partner della X(3872) nel settore del bottomonio

1. Uso delle GPU per applicazioni di interpolazione

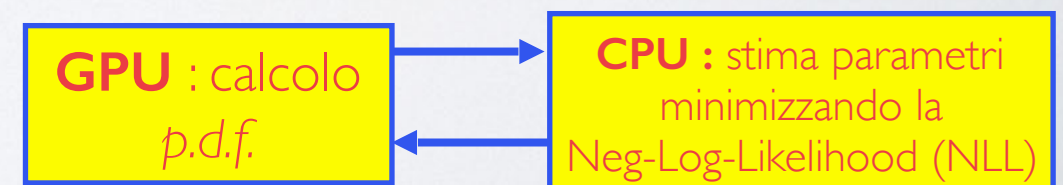
Il cosiddetto **computing accelerato dalle GPU** consiste nell'affiancare una GPU ad una o più CPU per accelerare, fra l'altro, applicazioni di analisi dati.

Cos'è una GPU? *Graphic Processing Unit*

- Architettura adatta allo sviluppo di software **videoludico e per l'elaborazione grafica in 3D**. **Enormi quantità di operazioni aritmetiche elementari ripetute su enormi quantità di dati**
 - **Migliaia** di cores che lavorano in parallelo
 - Ottimizzate per **gestire grandi quantità di dati**
 - Clock del singolo core **relativamente basse** (~1GHz)
 - Unità specializzate per effettuare operazioni aritmetiche in **un solo ciclo di clock** (*sin, cos, sqrt, reciproco*)

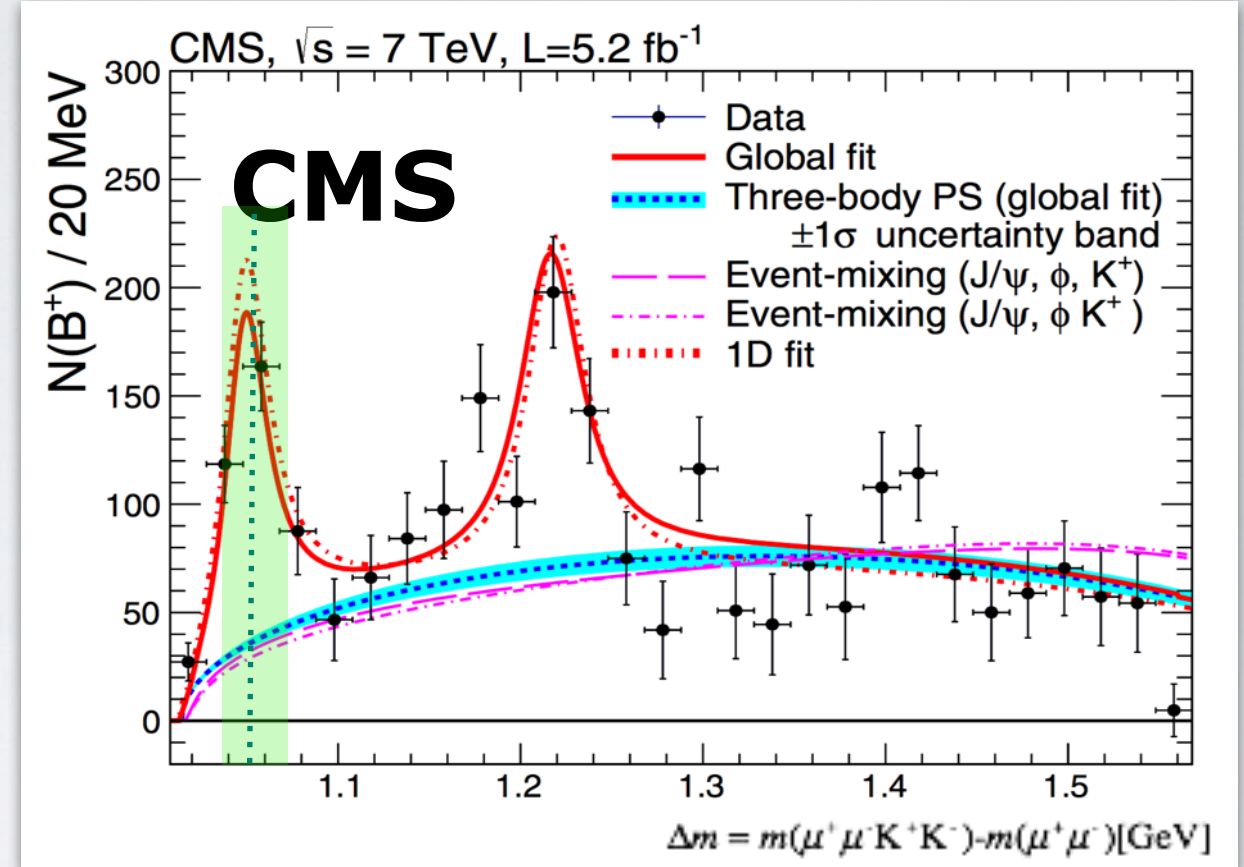
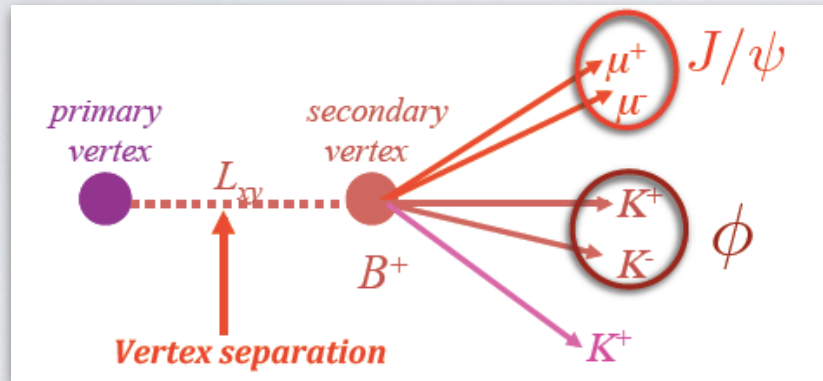


- **GooFit** permette l'analisi massiva di dati: interfaccia tra MINUIT su CPU e una GPU e permette di calcolare una *p.d.f.* in parallelo. Basato sul linguaggio **CUDA** (*Compute Unified Device Architecture*)

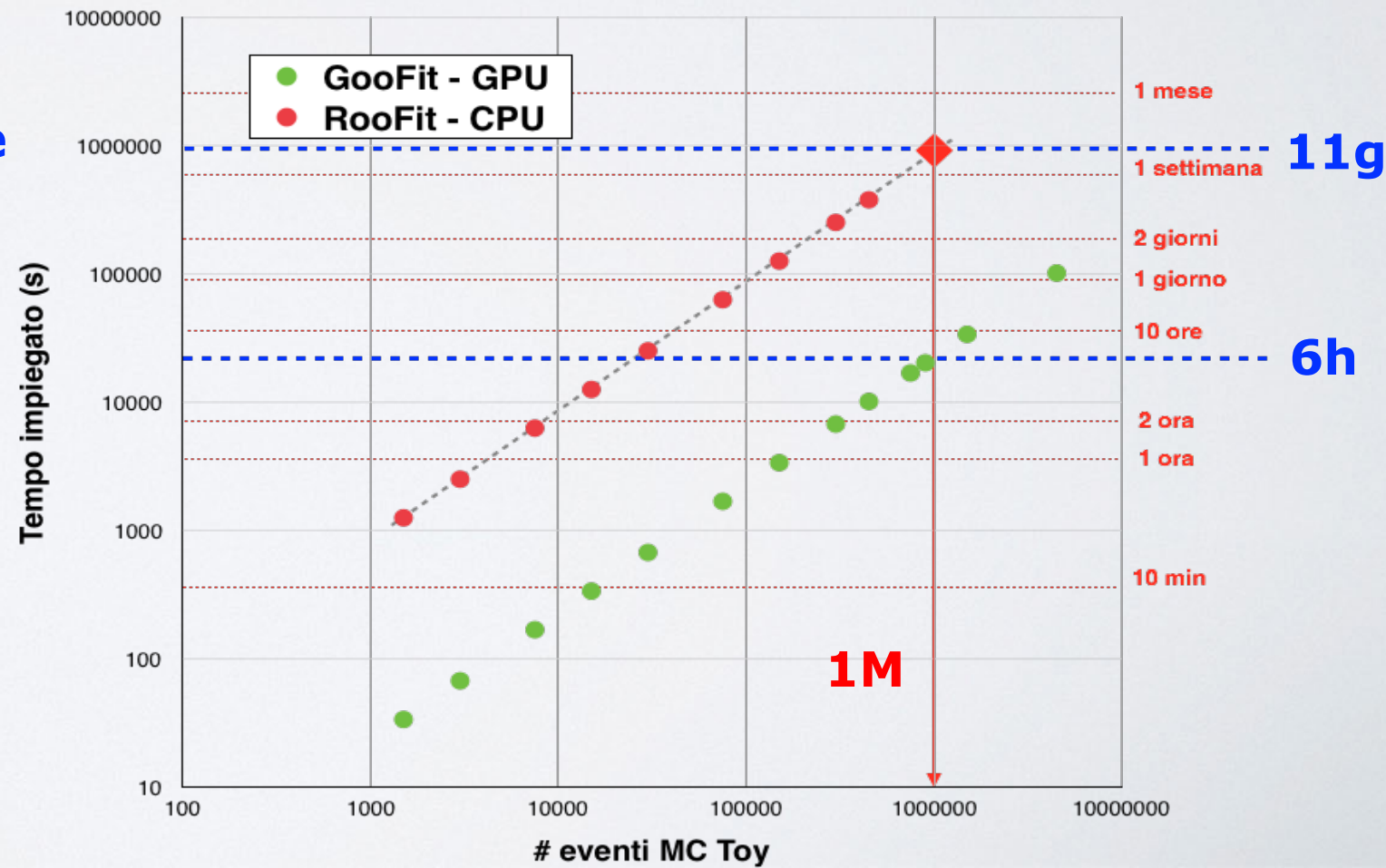
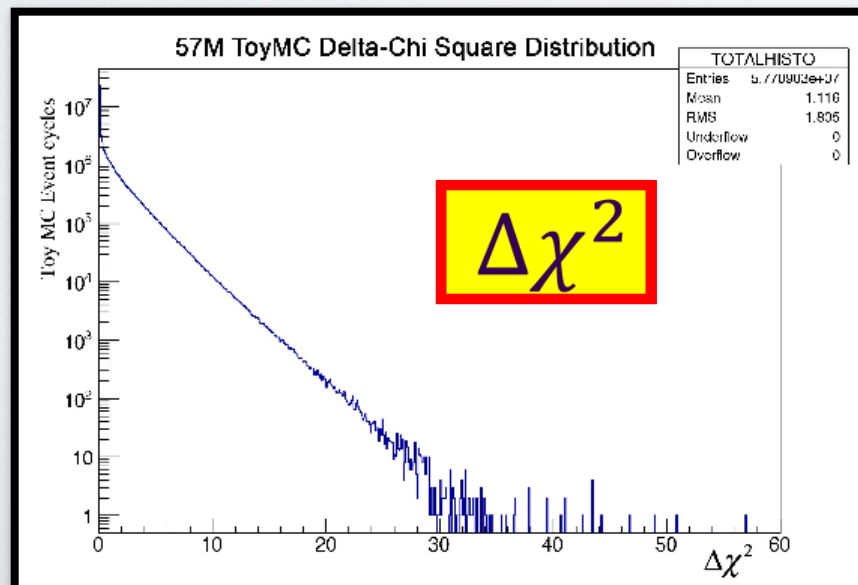


Significatività statistica di un nuovo segnale (esempio)

- Pubblicazione CMS PLB 734(2014) 261 : **significatività statistica** della struttura in prossimità della soglia cinematica nello spettro di massa della $J/\psi\phi$ è valutata per mezzo di Toy MC con ROOT/RooFit



Per calcolare il p -value si stima la probabilità che una fluttuazione del solo fondo dia origine ad un segnale per mezzo di pseudo-esperimenti



GooFit – Applicazioni

- Si prevedono due linee in questa attività in relazione alle applicazioni di interpolazione mediante GooFit:

1a. **Estensione** del lavoro di tesi a casi generici di segnale inatteso (eventualmente esotico) in cui considerare anche il cosiddetto **Look-Elsewhere-Effect** in modo da stimare una **significatività globale**.

Essendo il segnale inatteso nel calcolo del *p-value* bisogna infatti considerare **tutte le possibili fluttuazioni sull'intero spettro** in esame.

Si punta a far diventare questa applicazione di GooFit una **procedura consolidata negli studi di spettroscopia** nell'ambito del programma di *Fisica dei Saponi Pesanti* in CMS (*B-Physics Analysis Group*).

2a. **Porting di *Unbinned Maximum Likelihood Fit* su GPU** nel caso di **interpolazioni CPU-intensive**, come le *full amplitude analysis* usate nei decadimenti a 3 corpi dei mesoni B con vettori nello stato finale:

$B^0 \rightarrow \psi(2S)\pi K$ per studiare le $Z(4430)$ e $Z_c(4240)$

$B^+ \rightarrow J/\psi\phi K^+$ per studiare la natura della $Y(4140)$

Track Reconstruction

In CMS la ricostruzione delle tracce e' divisa grosso modo in tre fasi :

1) SEED FINDING

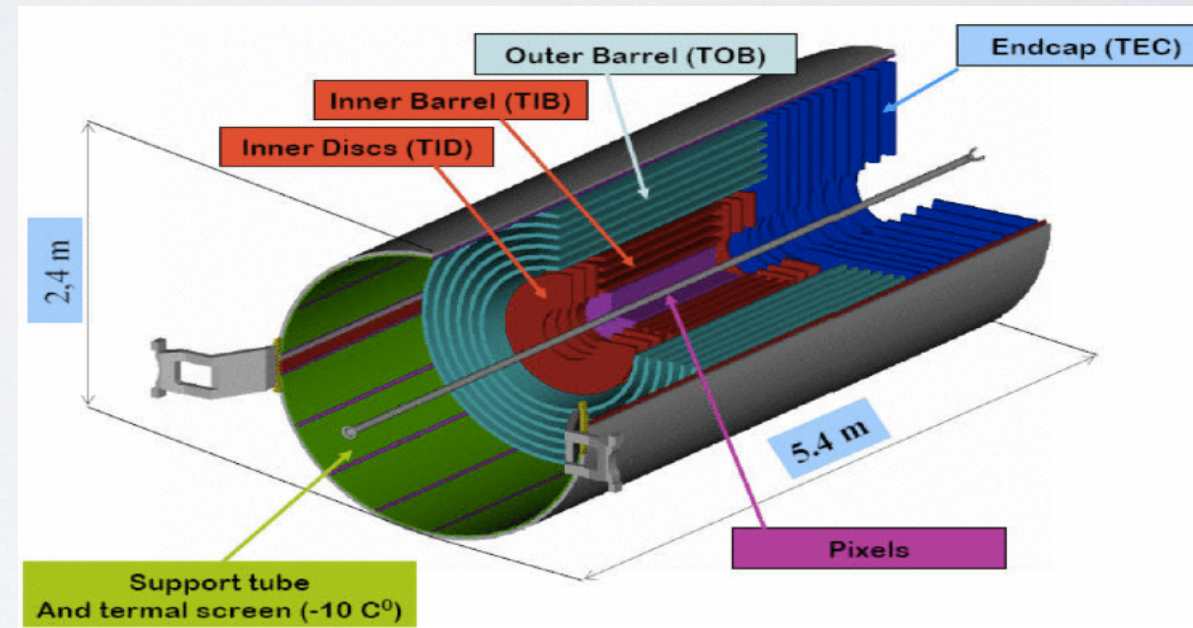
in cui vengono individuati i cosiddetti "**semi**" di una possibile traccia; [p.es. *tripletti di hit nel pixel*] che consentono di vincolare fortemente i parametri delle eliche compatibili con la regione di interazione. In generale i semi si costruiscono a partire da hit sia nella parte a pixel che nella parte a microstrisce.

2) PATTERN RECOGNITION

(*combinatorial track finding*)
in cui, a partire dal seme, un processo iterativo di layer in layer aggiunge gli hit.

3) INTERPOLAZIONE (track fitting)

in cui con l'insieme degli hit combinati in una possibile traccia viene eseguita un'interpolazione che fornisce la traccia vera e propria.



Questa procedura va ripensata (in particolare la **1^a fase**) in termini di **calcolo parallelo** e riscritta in un codice che possa essere eseguito su **GPU (OpenCL, CUDA)**

2. Ricerca dello stato *quarkonium-like* X_b partner della X(3872) nel settore del bottomonio

Negli ultimi dieci anni il settore dei *quarkonia esotici* (stati XYZ) è in continua evoluzione sia per il susseguirsi di scoperte sperimentali che per lo sviluppo di modelli teorici che cercano di darne una spiegazione unitaria.

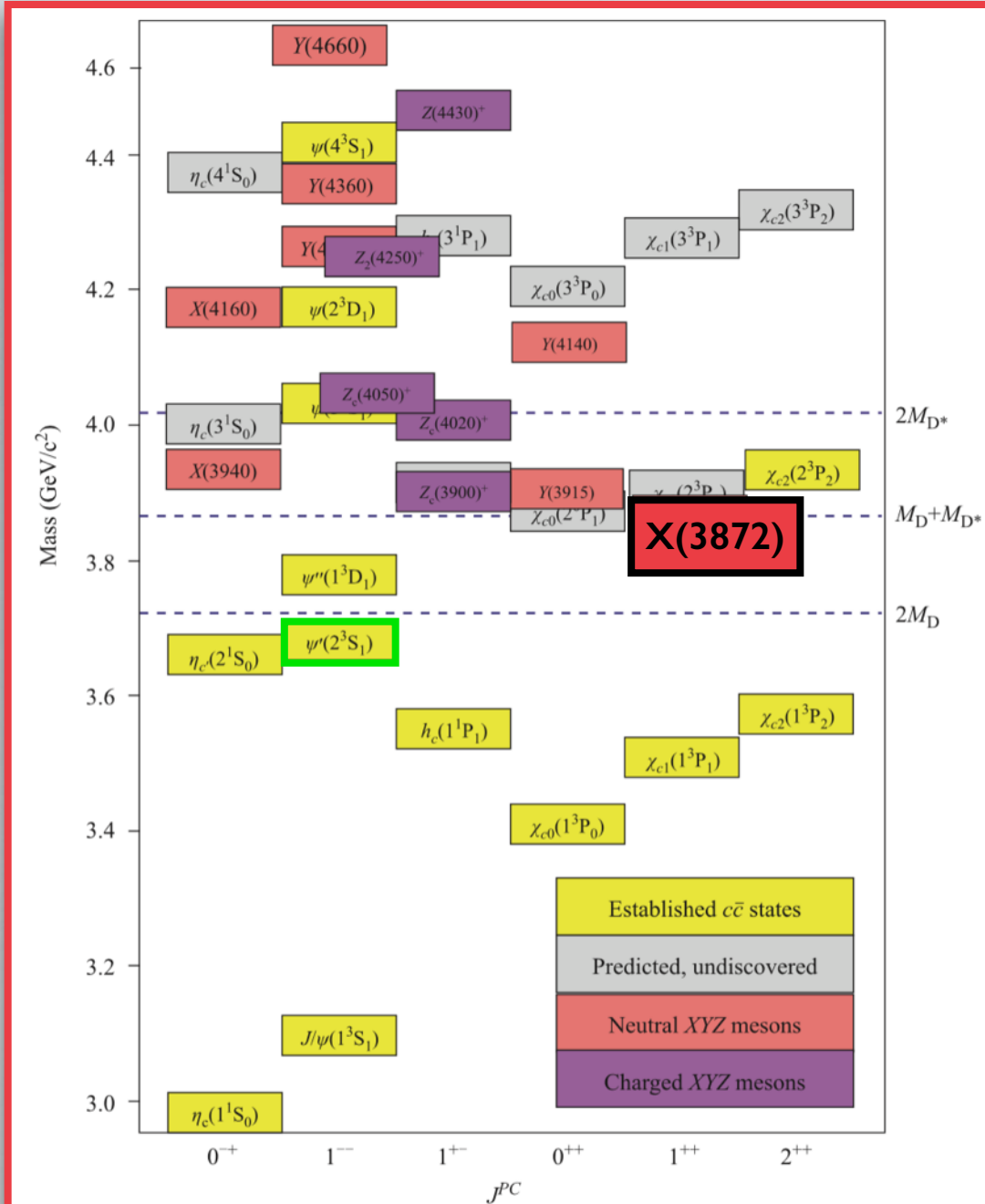
Poiché non vi è alcuna ragione fondamentale per cui debbano esistere solo combinazioni di 3 quark (barioni) o quark-antiquark (mesoni), tali ricerche esplorano l'esistenza di nuove aggregazioni dei quark.

Con i dati raccolti finora la collaborazione internazionale CMS ha contribuito a queste ricerche con importanti risultati fra cui lo studio della produzione della X(3872), la conferma dell'esistenza dello stato Y(4140) e la *ricerca del partner (X_b) della X(3872) nello spettro del bottomonio.*

Quest'ultima analisi potrà beneficiare della nuova presa dati [Run-2 (2015-2017)] in corso ad energia del centro-di-massa maggiore (13TeV).

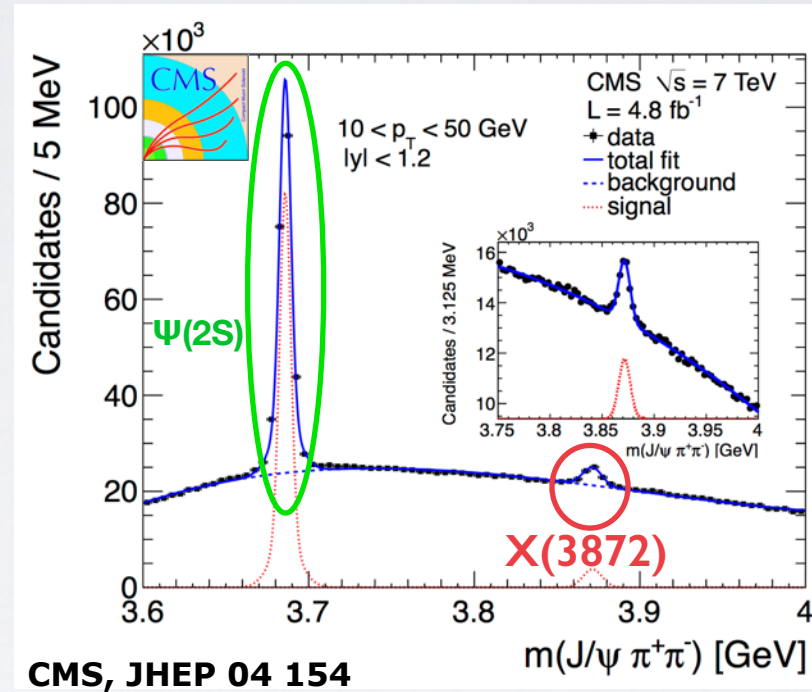
X(3872)

Stati di Charmonio



A new hadron spectroscopy
S.Olsen, *Front. Phys.* DOI **10.1007**, Springer 2014

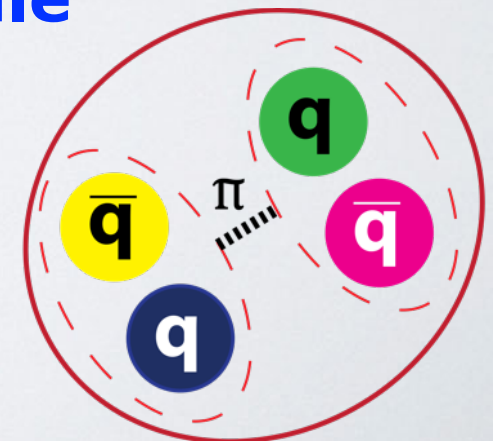
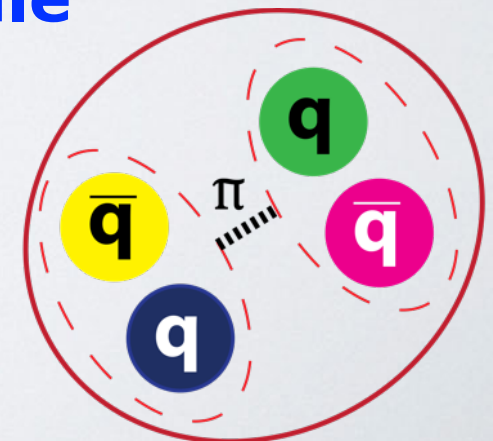
- **X(3872)** : Primo stato candidato esotico scoperto da *Belle* nel 2003, e osservato anche da altri esperimenti fra cui CMS (2012) in collisioni $p\bar{p}$



$p\bar{p} \rightarrow X(3872) + \text{other}$
 \downarrow
 $J/\psi\pi^+\pi^-$

$p\bar{p} \rightarrow \psi(2S) + \text{other}$

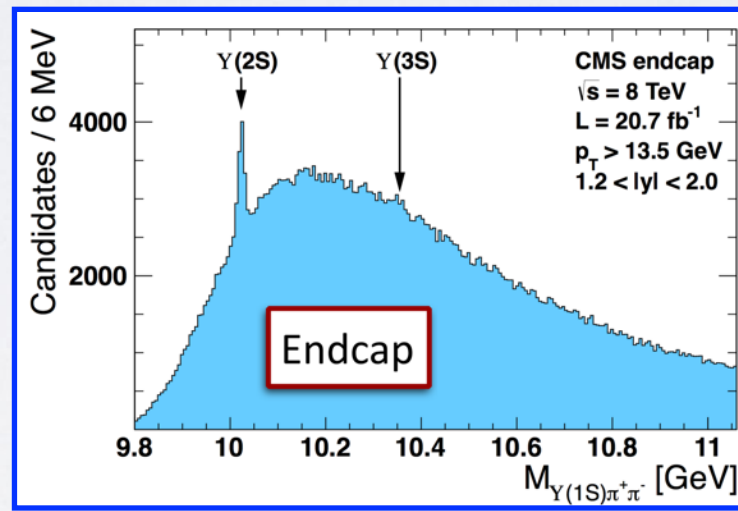
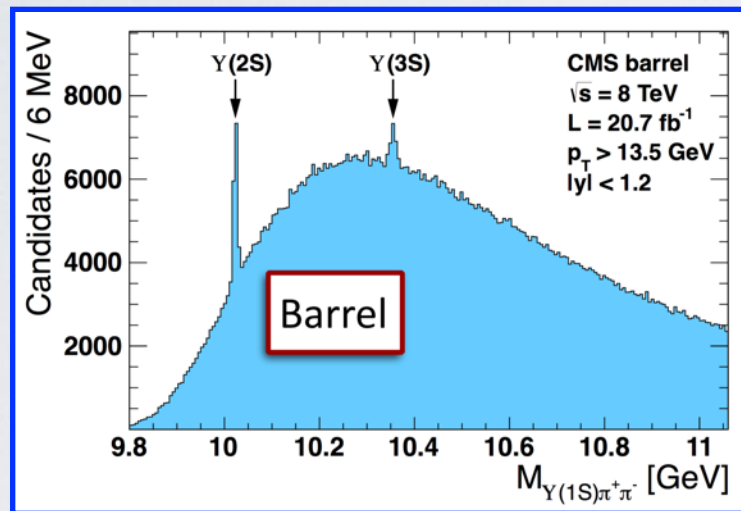
- **Tre ipotesi principali:**
 - **charmonio convenzionale**
 - **molecola adronica**
 - **tetraquark**



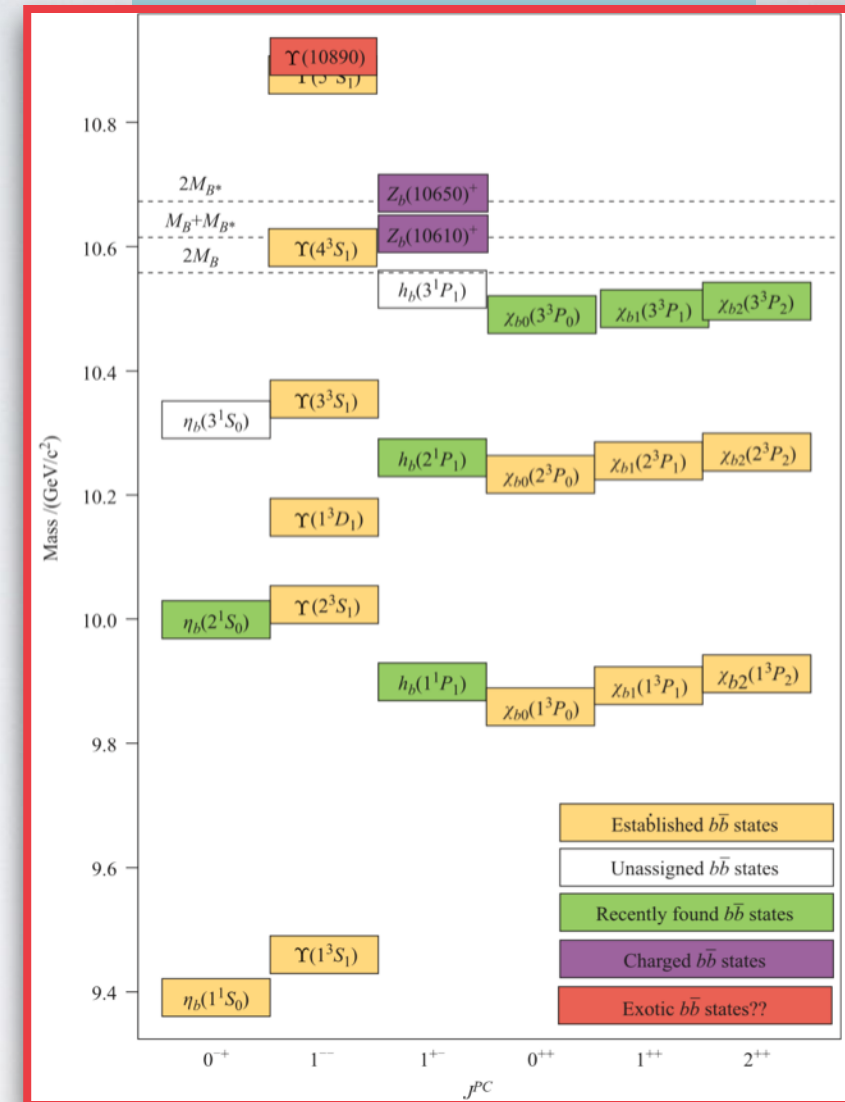
Ricerca X_b

Per comprendere meglio questi stati *esotici* si studia lo spettro simmetrico nel settore del *bottonomio*. Per la $X(3872)$ ci si aspetta un partner *neutro* X_b :

- Massa prossima alla soglia BB^* o BB . Nel caso di una molecola la massa deve trovarsi vicinissima alla soglia e il valore previsto (Swanson 2004) $m_{X_b} = 10.561$
- In analogia con il canale di decadimento della $X(3872)$ si è studiato il canale $X_b \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^+\pi^-$



Stati di Bottonomio

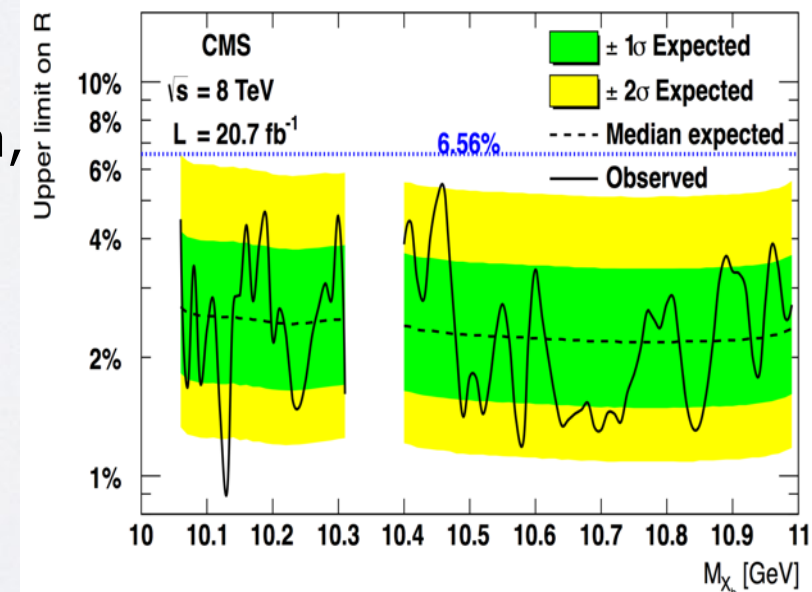


Nessun segnale significativo oltre $\Upsilon(2S)$ & $\Upsilon(3S)$

- Mass ranges : [10.06-10.31] & [10.40-10.99] e per ogni massa, si è valutato il rapporto

$$R = \frac{\sigma_{X_b} \times BR(X_b \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^+\pi^-)}{\sigma_{\Upsilon(2S)} \times BR(\Upsilon(2S) \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^+\pi^-)} = \frac{N_{X_b}^{obs}}{N_{\Upsilon(2S)}^{obs}} \frac{\epsilon_{\Upsilon(2S)}}{\epsilon_{X_b}}$$

... ottenendo il 95% C.L. upper limit su R : 0.9-5.4%



Ricerca X_b - Prospettive

Secondo **Karliner and Rosner** [*Phys. Rev. D*91 (2015) 014014.] l'analogia tra i modi di decadimento della X_b e della $X(3872)$ può essere fuorviante:

- Se la X_b ha $J^{PC}=1^{++}$ e $I=0$ ed è vicino alla soglia BB^* il canale $X_b \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^+\pi^-$ violerebbe isospin e sarebbe **soppresso** rispetto al decadimento in $\Upsilon(1S)\omega$ (conserva isospin). Nel caso della **$X(3872)$** , invece, il canale $J/\psi\omega$ che conserva isospin è cinematicamente soppresso ($Q - value < m_\omega = 783MeV$).
- Nel caso della X_b il Q -valore della reazione è ben al disopra della m_ω : $m_B + m_{B^*} - m_{\Upsilon(1S)} \approx 1145MeV$ e quindi lo stato finale del tipo **$\Upsilon(1S)\omega$** dovrebbe essere più rilevante dello stato $\Upsilon(1S)\rho(\rightarrow \pi^+\pi^-)$.

Ad **LHC** [e in **CMS**] tre canali possono essere esplorati:

- 1) $X_b \rightarrow \Upsilon(1S)\pi^+\pi^-\pi^0$
- 2) $X_b \rightarrow \Upsilon(3S)\gamma$
- 3) $X_b \rightarrow \chi_{b1}(1P)\pi^+\pi^-$ [$\chi_{b1}(1P) \rightarrow \Upsilon(3S)\gamma$]

In particolare **CMS** ha la capacità di ricostruire gli ultimi due canali di decadimento (**2 & 3**), grazie ai dati raccolti nel corso del Run II (*previsti* $\sim 100 fb^{-1}$), usando fotoni convertiti in coppie elettrone-positrone (basse efficienze di conversione).

CMS ha infatti già dimostrato di poter ben ricostruire i fotoni per conversione in coppia elettrone-positrone, e poter distinguere i picchi $\chi_{c2}(1P)$ e $\chi_{b2}(1P)$ dai picchi $\chi_{c1}(1P)$ e $\chi_{b1}(1P)$ rispettivamente, grazie alla buona risoluzione in massa.

