

## Introduzione

La **fisica degli ioni pesanti** è una branca della fisica nucleare e subnucleare che si prefigge di comprendere le proprietà di uno stato di materia largamente sconosciuto, il **Quark Gluon Plasma (QGP)**. Tra le principali attività del gruppo di LHCb di Cagliari vi è lo studio di eventi di collisione di nuclei pesanti ultrarelativistici fornite dall'acceleratore LHC locato a Ginevra. L'esperimento LHCb, è in una posizione eccellente per studiare queste particelle nelle collisioni di ioni pesanti, riuscendo a raggiungere precisioni e regioni spaziali ed energie (grazie a "SMOG") inaccessibili agli altri esperimenti.

### Quark Gluon Plasma

I costituenti fondamentali della materia che ci circonda, i quarks e gluoni, sono tenuti insieme dalla forza forte che, in condizioni normali, li costringe a restare confinati dentro il nucleo. Tuttavia a densità nucleari molto elevate la materia si trasforma in uno stato chiamato **Quark-Gluon Plasma (QGP)**, in cui i quarks e gluoni sono liberi di muoversi liberamente. Sebbene molto studiato da diversi esperimenti, le proprietà di questo nuovo stato di materia sono ancora largamente sconosciute e possono essere esplorate in collisioni di nuclei

pesanti dove densità estremamente elevate vengono raggiunte tali da permettere la formazione del QGP. Le caratteristiche del QGP possono poi venire studiate tramite il comportamento delle particelle prodotte nelle collisioni, notevolmente influenzato dalla presenza di QGP o di **Cold Nuclear Matter (CNM)**, la materia "ordinaria".

La produzione di mesoni D e B formati dai quark pesanti *c* e *b*, insieme al quarkonio (stati formati da un quark *c* o *b* ed un antiquark  $\bar{b}$  o  $\bar{c}$  come  $J/\psi$ ,  $\psi(2S)$ ,  $\chi_c$  e  $Y$ ) è il processo più sensibile alla presenza del QGP e pertanto la più importante da studiare in questo contesto.

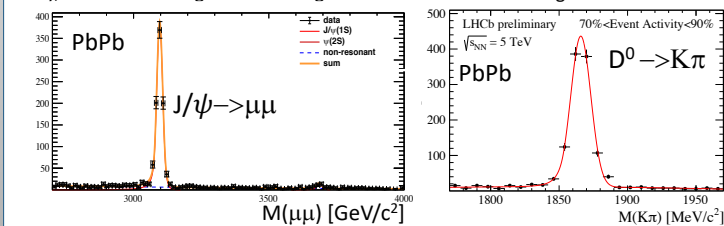
### Analisi portate avanti a Cagliari

La maggior parte delle osservabili in fisica degli ioni pesanti consistono in rapporti di grandezze misurate in PbPb o pPb rispetto a quelle misurate in pp. Un esempio è il

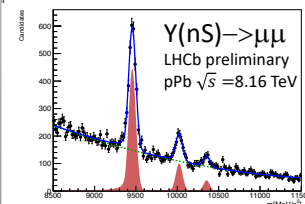
fattore di modificazione nucleare, definito come  $R_{AA}(\Delta p_T, \Delta y) \equiv \frac{\sigma_{J/\psi}^{AA}(\Delta p_T, \Delta y)}{A^2 \times \sigma_{J/\psi}^{pp}(\Delta p_T, \Delta y)}$ , dove A è il numero di massa del nucleo pesante colliso.

In una situazione di perfetta fattorizzazione e assenza di effetti di CNM o QGP, la sezione d'urto del nucleo A dovrebbe essere circa  $A^2$  volte la sezione d'urto pp, e quindi il rapporto  $R_{AA}$  definito sopra sarebbe uguale a uno. In presenza di QGP o effetti CNM la produzione è soppressa e  $R_{AA}$  diventa minore dell'unità.

A Cagliari studiamo i **rapporti di produzione di quarkonio** ( $J/\psi$ ,  $\psi(2S)$ ,  $\chi_c$  e  $Y$ ) e **mesoni charm** ( $D^0$ ,  $D^+$ ,  $\Lambda$ ) in PbPb e pPb con l'idea di rilevare una soppressione e quindi osservare la formazione di QGP. Il team lavora nell'ambito del progetto ERC-Consolidator-Grant EXPLORINGMATTER, sovvenzionato dalla comunità europea all'interno del gruppo LHCb di Cagliari e si occupa di tutti gli aspetti dell'analisi, con particolare attenzione agli algoritmi di tracciamento che saranno fondamentali per la prossima presa dati PbPb di fine 2018. Tutti i componenti del team sono in continuo contatto con i colleghi del CERN di Ginevra e la seconda parte del team ERC locato ad Orsay, in Francia. Di seguito alcuni segnali dei canali citati nei dati già raccolti.



Segnali di produzione nel campione di dati PbPb della  $J/\psi$  nel canale di decadimento con due muoni (sinistra), e del  $D^0$  in  $K\pi$  (destra).



Segnali di produzione nel campione di dati pPb della  $Y$  nel canale di decadimento con due muoni.

### Opportunità di tesi

Nell'ambito del progetto EXPLORINGMATTER vi sono possibilità di lavori di tesi che possono essere decisi con lo studente a seconda delle attitudini ed esigenze individuali.

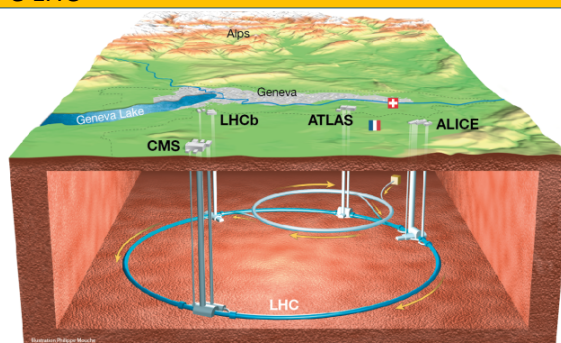
**Possibili temi sono:**

- determinazione di efficienze nella analisi degli eventi di  $J/\psi$  in PbPb;
- sviluppo di algoritmi di tracciamento per eventi ad alta molteplicità;
- simulazioni Monte Carlo di eventi PbPb/pPb/PbP

- determinazione del rapporto  $R_{AA}$  per stati di quarkonio e interpretazione teorica. Durante il lavoro di tesi gli studenti acquisiranno competenze nei seguenti ambiti:

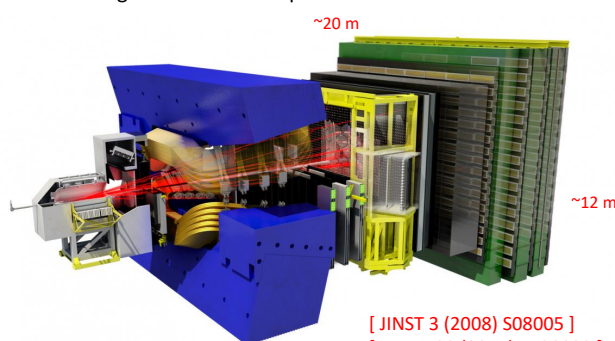
- linguaggio di programmazione come C/C++, Python, ROOT;
- studio dei principi di funzionamento dei rivelatori di particelle e loro lettura
- design di algoritmi di ricostruzione degli eventi in fisica delle alte energie e loro analisi
- lavorare in ambiti internazionali in continuo contatto con il CERN di Ginevra

### LHCb e LHC



L'esperimento LHCb è uno dei quattro esperimenti che usano i fasci dell'acceleratore LHC al CERN di Ginevra. Il rivelatore è sviluppato da un lato rispetto al punto di collisione dei fasci, ed è stato ottimizzato per la fisica dei mesoni B e D. Sia la sua geometria che le prestazioni dei sottorivelatori

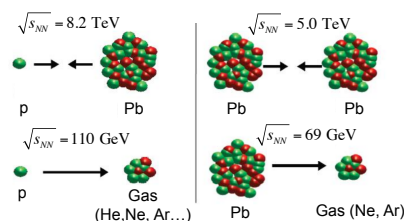
fanno di LHCb l'esperimento che può oggi studiare i mesoni B, ed il quarkonio con la più alta precisione



[ JINST 3 (2008) S08005 ]  
[ JIMPA 30 (2015) 1530022 ]

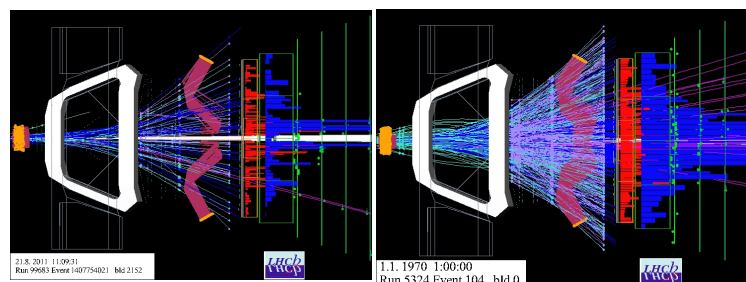
### Set-up sperimentale

LHCb si prefigge di studiare la fisica degli ioni pesanti in quattro configurazioni principali, legate alle collisioni sotto.



Schema delle collisioni registrate a LHCb con fasci di protone (a sinistra) e piombo (a destra).

- 1) protone-protone:** questo è il modo operativo principale di LHCb, in cui si fanno misure standard di fisica del b e c. Le misure di produzione di mesoni B, D e di quarkonio sono utilizzate come riferimento per le misure negli altri sistemi;
- 2) protone-piombo e piombo-protone,** dati fondamentali per quantificare precisamente gli effetti CNM, che possono mimare la presenza di QGP. Dato che QGP non si forma in pPb, ogni effetto osservato in questo sistema si può imputare a CNM, che può essere quindi quantificato e sottratto dalle interazioni dove ci aspettiamo QGP.
- 3) piombo-piombo,** dove possiamo osservare la formazione di QGP e studiare le sue caratteristiche in dettaglio.
- 4) protone-GAS e piombo-GAS:** grazie ad un dispositivo unico a LHCb, abbiamo la possibilità di iniettare gas direttamente nella regione di collisione, registrando gli eventi di interazione del fascio di protoni o piombo con il gas, che si comporta come un bersaglio fisso. In questo setup a seconda del gas si possono raggiungere valori in un largo intervallo di energie, in cui si possono studiare la fisica standard QCD, effetti CNM e anche QGP



Display del rivelatore LHCb in eventi di (sinistra) pp, e (destra) Piombo-Piombo