

Ricerca di antimateria in collisioni protone-gas con LHCb

La misura della frazione di antimateria nei raggi cosmici è un importante canale sensibile all'osservazione indiretta di sorgenti esotiche di produzione di antimateria, come l'annichilazione di materia oscura; gli esperimenti PAMELA e AMS-2, operando fuori dall'atmosfera terrestre, hanno permesso di misurare con precisione sempre maggiore la composizione dei raggi cosmici con energie fino a 500 GeV e in particolare il rapporto tra gli antiprotoni e i protoni \bar{p}/p . I valori ottenuti hanno messo in evidenza un discostamento nella regione superiore a 10 GeV dall'andamento teorico previsto assumendo come unico meccanismo di produzione le collisioni ad alta energia fra un raggio cosmico primario e il mezzo interstellare, principalmente costituito da idrogeno ed elio, benché i valori siano ancora compatibili entro le incertezze teoriche [1]. Nell'intervallo di energia di interesse, la principale fonte di incertezza è data dalla limitata conoscenza che si ha della sezione d'urto di produzione di \bar{p} nei processi considerati, ottenuta tramite estrapolazione da misure ad energie diverse. La geometria del rivelatore LHCb al CERN, uno spettrometro a singolo braccio in avanti, rende l'esperimento ideale per effettuare misure a bersaglio fisso; in particolare, l'apparato SMOG (*System for Measuring Overlap with Gas*) [2] permette di iniettare all'interno del tubo a vuoto di LHC gas nell'intorno della regione d'interazione tra i due fasci accelerati, in modo da studiare gli urti dei protoni con i nuclei a riposo del gas. Questa configurazione risulta di grande interesse per una misura diretta delle sezioni d'urto di produzione di antimateria nell'intervallo di energia rilevato da AMS-2, grazie alle eccellenti capacità del rivelatore nell'individuazione dei vertici, nella tracciatura e nell'identificazione delle particelle. Nel corso dello sviluppo della mia Tesi di Laurea Triennale, ho avuto l'opportunità di contribuire alla prima e pionieristica misura di questo tipo effettuata dall'esperimento LHCb, volta ad ottenere la sezione d'urto di produzione $\sigma(pHe \rightarrow \bar{p}X, \sqrt{s_{NN}} = 110 \text{ GeV})$ con dati raccolti nel run dedicato del 2016 [3].

Prossimo aggiornamento e opportunità di misura

Alcune tra le principali fonti di incertezza associata alla sezione d'urto totale di produzione di \bar{p} sono legate all'assenza di misure dirette [4]:

- La sezione d'urto di produzione di \bar{p} in urti pp è stata misurata direttamente dagli esperimenti NA49 e NA61 presso SPS fino a $\sqrt{s_{NN}} < 30 \text{ GeV}$, mentre è estrapolata per energie superiori.
- Non esistono dati sulla produzione di antineutroni alle energie di interesse, che si assume essere uguale a quella di antiprotoni per simmetria di isospin.

Con l'aggiornamento di SMOG chiamato SMOG2 [5], che entrerà in funzione durante il Run 3 di LHC, sarà possibile iniettare all'interno del tubo a vuoto anche idrogeno e deuterio oltre a gas nobili e sarà possibile iniettare una quantità maggiore di gas, aumentando quindi la luminosità disponibile; questo permetterà a LHCb di essere in grado di effettuare misure dirette di produzione di \bar{p} con bersagli diversi sull'intervallo di energie tra $41 < \sqrt{s_{NN}} < 115 \text{ GeV}$. In particolare, utilizzando l'idrogeno come bersaglio, è possibile misurare direttamente la sezione d'urto $\sigma(pp \rightarrow \bar{p}X)$ ad energie $\sqrt{s_{NN}} > 30 \text{ GeV}$ e determinare precisamente il rapporto $\frac{\sigma(pHe \rightarrow \bar{p}X)}{\sigma(pp \rightarrow \bar{p}X)}$, dove molte delle incertezze sistematiche si cancellano. Utilizzando invece il deuterio come bersaglio, si può misurare il rapporto $\frac{\sigma(pd \rightarrow \bar{p}X)}{\sigma(pp \rightarrow \bar{p}X)}$, da cui è possibile risalire al rapporto $\frac{\sigma(pp \rightarrow \bar{n}X)}{\sigma(pp \rightarrow \bar{p}X)}$.

L'aumento della luminosità offerto da SMOG2 apre le porte anche alla possibilità di effettuare misure di produzione di antinuclei leggeri ($\bar{d}, {}^3\bar{He}, {}^4\bar{He}$), la cui osservazione da parte di esperimenti che operano fuori dall'atmosfera terrestre rappresenta un canale più sensibile alla presenza di nuova fisica, poiché la probabilità di produrli in collisioni con il mezzo interstellare è alcuni ordini di grandezza inferiore rispetto a quella degli antiprotoni. Il rivelatore allo stato attuale non è ottimizzato per permettere l'identificazione di nuclei leggeri; in particolare, i RICH sono ottimizzati per l'identificazione di K e π , fondamentali nelle misure di fisica del sapore pesante, per cui l'identificazione di antinuclei leggeri nell'intervallo di impulso di interesse risulta proibitiva a causa dello scarso rapporto segnale/fondo. Questo limite può essere superato utilizzando misure di tempo di volo per migliorare le capacità di identificazione delle particelle dei RICH ed estenderla verso impulsi più bassi. Il prossimo aggiornamento per l'esperimento LHCb, in previsione del Run 5, prevede di implementare all'interno del rivelatore di vertice (VELO) un sistema di tracciatura quadridimensionale, con l'aggiunta dell'informazione temporale per ogni punto di interazione nel rivelatore, che ne migliora la capacità di ricostruzione delle tracce anche in condizioni di elevata occupanza; è possibile quindi utilizzare l'informazione temporale proveniente dal VELO e combinarla con quella prevista a livello di RICH (nuovo rivelatore TORCH) per ottenere un'accurata misura sul tempo di volo delle particelle. L'aggiornamento complessivo dell'esperimento LHCb in vista del Run 5 è necessario poiché si prevede di operare sfruttando maggiormente la luminosità offerta da LHC. L'aumento di luminosità mette in particolare a dura prova il rivelatore di vertice a causa dell'aumento in molteplicità

delle particelle prodotte, delle tracce presenti e del numero dei vertici primari; in assenza di un aggiornamento, si prevede una significativa perdita di efficienza nella ricostruzione e un aumento drastico del costo computazionale. Queste problematiche possono essere affrontate sviluppando rivelatori che siano in grado di fornire una misura estremamente accurata della posizione e dell'istante temporale in cui sono attraversati da particelle cariche; l'aggiunta dell'informazione temporale permette di separare le tracce provenienti da collisioni distinte, riducendo quindi la complessità degli algoritmi di ricostruzione mantenendo elevata efficienza con un costo computazionale accettabile. Per poter trarre beneficio da questa tecnica per estendere il programma di fisica di LHCb anche alla ricerca di antinuclei leggeri prodotti in collisioni a bersaglio fisso, mantenere le performance odierne nella regione a più alta rapidità è un requisito ancora più critico che per lo studio della fisica dei quark pesanti. Avvicinarsi ai fasci in condizioni di alta luminosità pone però sfide tecnologiche importanti in termini di resistenza alla radiazione, che potrebbero essere affrontati sostituendo i rivelatori a pixel di silicio con rivelatori pixel al diamante. Durante lo sviluppo della mia Tesi Magistrale ho preso parte allo sforzo di ricerca in questa direzione contribuendo all'attività scientifica della collaborazione TimeSPOT, che ha lo scopo di sviluppare un sistema completo di tracciatori quadridimensionali in grado di soddisfare le necessità imposte da HL-LHC [6]. In particolare, la Sezione INFN di Firenze, in collaborazione con LENS e CNR-INO, si occupa della produzione, sviluppo e caratterizzazione di sensori tridimensionali al diamante, la cui geometria è pensata per potenziarne la risoluzione temporale e la resistenza alle radiazioni. Benché allo stato attuale la risoluzione temporale che offrono non sia ancora sufficiente a soddisfare le specifiche, ho identificato i contributi dominanti nella determinazione della risoluzione definendo, quindi, le priorità per l'ottimizzazione del processo di nanofabbricazione che affronterò nel corso del mio Dottorato di Ricerca [7].

Obiettivi del progetto

Durante il mio dottorato intendo contribuire all'analisi dei dati raccolti nell'ambito del programma SMOG2 che potranno fornire le misure necessarie a ridurre l'incertezza sulla predizione della frazione di antimateria prodotta nelle collisioni fra raggi cosmici e mezzo interstellare, senza tralasciare lo sviluppo di hardware per costruire un sistema di tracciatura quadridimensionale di futura generazione. In particolare, mi occuperò dei seguenti temi:

- Collaborerò alle prime campagne di presa dati con il nuovo bersaglio gassoso SMOG2 durante Run 3.
- Ripeterò l'analisi effettuata sui dati raccolti negli urti pHe per i nuovi dati raccolti con urti pp .
- Attraverso i dati raccolti negli urti su bersaglio di deuterio studierò il rapporto $\frac{\sigma(pd \rightarrow \bar{p}X)}{\sigma(pp \rightarrow \bar{p}X)}$.
- Infine, completerò il processo di ottimizzazione dei sensori a pixel al diamante con elevata risoluzione temporale in previsione della presentazione del dimostratore completo di TimeSPOT (fine 2021) e ne studierò l'applicabilità come sistema di misura del tempo di volo per l'identificazione degli antinuclei leggeri anche attraverso simulazioni, in previsione di una loro inclusione nel programma a bersaglio fisso per il Run 5 di LHCb.

Riferimenti bibliografici

- [1] G. Giesen *et al.*, *AMS-02 antiprotons, at last! Secondary astrophysical component and immediate implications for Dark Matter*, JCAP **09** (2015) 023, arXiv:1504.04276.
- [2] LHCb, R. Aaij *et al.*, *Precision luminosity measurements at LHCb*, JINST **9** (2014) P12005, arXiv:1410.0149.
- [3] LHCb, R. Aaij *et al.*, *Measurement of Antiproton Production in pHe Collisions at $\sqrt{s_{NN}} = 110$ GeV*, Phys. Rev. Lett. **121** (2018) 222001, arXiv:1808.06127.
- [4] A. Bursche *et al.*, *Physics opportunities with the fixed-target program of the LHCb experiment using an unpolarized gas target*, Tech. Rep. LHCb-PUB-2018-015. CERN-LHCb-PUB-2018-015, CERN, Geneva, 2018.
- [5] LHCb, *LHCb SMOG Upgrade*, Tech. Rep. CERN-LHCC-2019-005. LHCb-TDR-020, CERN, Geneva, 2019.
- [6] L. Anderlini *et al.*, *Intrinsic time resolution of 3D-trench silicon pixels for charged particle detection*, arXiv:2004.10881.
- [7] C. Lucarelli, *Studio di rivelatori 3D al diamante per i tracciatori ad elevata risoluzione temporale degli esperimenti di HL-LHC*, Master's thesis, Università degli studi di Firenze, 2020.