

Perché questa tesina?

Fin da piccola sono stata affascinata dalla fisica e vedermi offerta la possibilità di portare avanti il mio lavoro di PCTO sotto la guida di uno dei responsabili degli esperimenti del CERN è stato per me incredibile ed ancor più felice mi ha resa la possibilità di collegarmi ad un tema che trovo specialmente affascinante, ovvero la fisica dello spazio.

Cosa mi ha interessato?

In questo progetto ho trovato particolarmente interessante vedere come i risultati provenienti da esperimenti e studi diversi abbiano effetto uno sull'altro e in che modo si colleghi lo studio di campi all'apparenza distanti quanto le particelle subatomiche e i moti delle galassie.

---

## PRIME COLLISIONI CON BERSAGLIO FISSO ALL'LHC:

## IMPLICAZIONI PER LO STUDIO DELLA DARK MATTER

### -LHC

LHC (*Large Hadron Collider*) è un acceleratore di particelle del CERN di Ginevra collocato all'interno di un tunnel lungo 26.7 km a 100 m di profondità. Esso permette la collisione di due fasci di adroni, particelle quali i protoni, in quattro punti di interazione dove sono collocati i quattro rivelatori ATLAS (*A Toroidal LHC ApparatuS*), CMS (*Compact Muon Solenoid*), ALICE (*A Large Ion Collider Experiment*) e LHCb (*LHC beauty*). ATLAS e CMS possono essere impiegati per vari scopi, mentre ALICE è stato ideato specificatamente per lo studio di collisioni fra ioni pesanti e LHCb per lo studio di particelle con quark pesanti. Per raggiungere l'energia necessaria per le collisioni e permettere le collisioni stesse, prima di essere immessi in LHC le particelle attraversano una serie di passaggi in vari dispositivi.

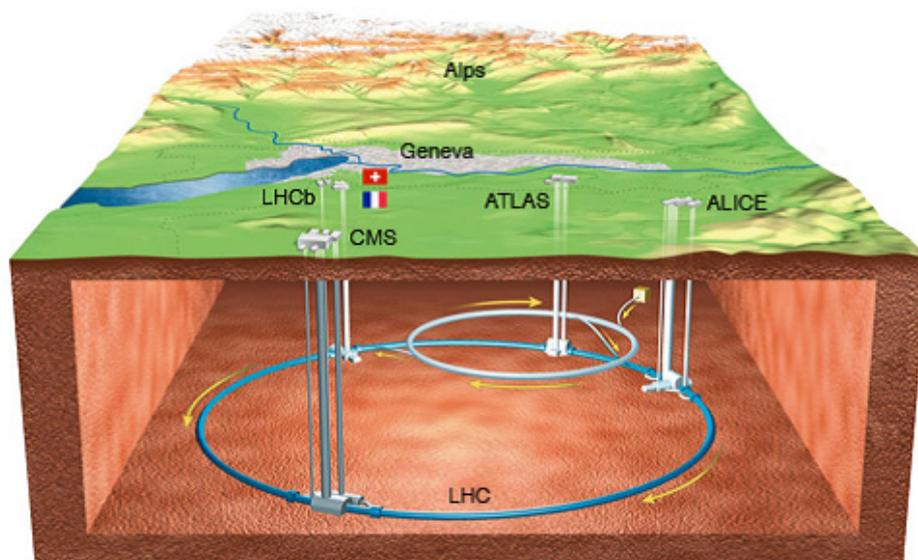


Figura 1: collocato a cavallo del confine franco-svizzero, LHC è qui rappresentato evidenziando i quattro rivelatori (ATLAS, CMS, ALICE e LHCb) e il percorso dei protoni.

In primo luogo, dell'idrogeno molecolare ( $H_2$ ) viene sottoposto ad un campo elettrico che permette di estrarre l'elettrone e far rimanere solo il nucleo, che è appunto formato da un solo protone. Quest'ultimi vengono poi immessi in un acceleratore lineare, il LINAC2, e successivamente in diversi sincrotroni, acceleratori circolari quali PS (*Proton Synchrotron*), entrambi dispositivi che permettono di aumentare l'energia dei protoni. A questo punto i protoni vengono immessi in LHC in due percorsi diversi, TI2 e TI8, che permettono ai fasci di scontrarsi mentre percorrono in versi opposti la beam pipe di LHC; avendo questa forma circolare i fasci di protoni devono essere mantenuti in traiettoria da un forte campo magnetico (ottenuto grazie a numerosi dipoli magnetici mantenuti a bassissima temperatura, appena 1.85 K sopra allo zero assoluto). Grazie al controllo dell'immissione dei fasci e della loro traiettoria le collisioni avvengono nei quattro punti in corrispondenza dei rivelatori. Le particelle, viaggiando ad una velocità prossima a quella della luce, percorrono il tunnel di 27 km oltre 11000 volte al secondo.

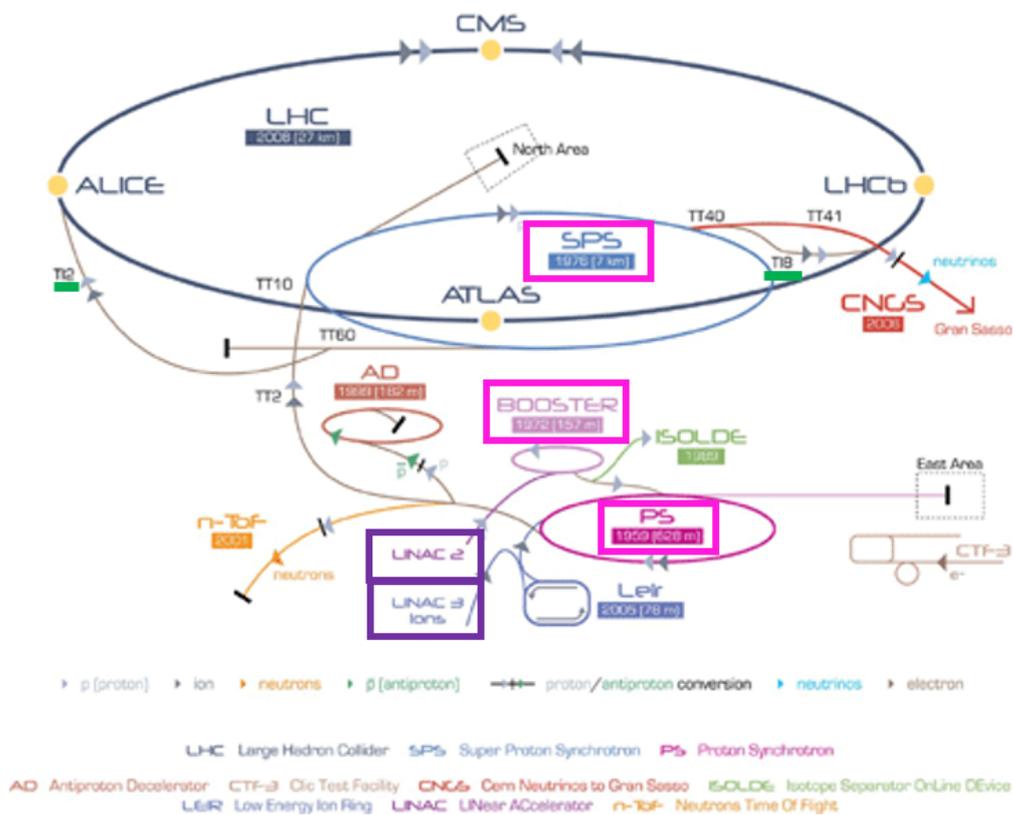


Figura 2: schema del complesso dell'acceleratore. In viola sono segnati gli acceleratori lineari, in rosa i sincrotroni, in verde sono sottolineati i due percorsi in cui viene immesso il fascio di protoni.

### -LHCb e collisioni con bersaglio fisso

Fra questi rivelatori, LHCb ha la caratteristica di poter essere impiegato non soltanto per collisioni fascio-fascio, ma anche per lo studio di collisioni a bersaglio fisso, in particolare fascio-gas (o beam-gas). Una delle possibili misure interessanti è lo studio della produzione di antiprotoni derivante dalla collisione con bersagli di elio (He), collegata ad un possibile indicatore della Materia Oscura

proveniente dall'Universo. Le misure di LHCb sono utili per interpretare i dati di AMS (descritto in seguito), un esperimento condotto a bordo della Stazione Spaziale Internazionale.

Nelle collisioni fascio-fascio LHCb è pensato in modo da analizzare solo una parte dello spazio attorno alla direzione del fascio, in quanto ad alte energie la produzione di quark b che deve essere rivelata avviene ad angoli molto piccoli rispetto alla direzione del fascio. Al contrario, nelle collisioni fascio-bersaglio, proprio per la cinematica "in avanti", vengono ricostruite tutte le particelle prodotte.

LHCb si compone a sua volta di una serie di sotto-rivelatori, che permettono di studiare il complesso risultato delle collisioni. Il primo rivelatore è un localizzatore di vertici, VELO, che permette di misurare le tracce dovute alle collisioni distinguendo il punto di interazione, dove è avvenuta la collisione, e il punto di decadimento di particelle pesanti, risultato della collisione. Un magnete permette poi di deviare le particelle cariche e i rivelatori di Cherenkov, RICH, rendono possibile determinare il tipo di particella. Successivamente dei calorimetri permettono di misurare posizioni e energie di adroni, elettroni e fotoni. I muoni prodotti, che attraversano i primi rivelatori senza esserne fermati sono invece rivelati da spessi rivelatori appositi. Per ricostruire le tracce è presente anche un sistema di camere traccianti, composto da TT (*Trigger Tracker*) prima del magnete e T1, T2 e T3, tutte presenti dopo di esso.

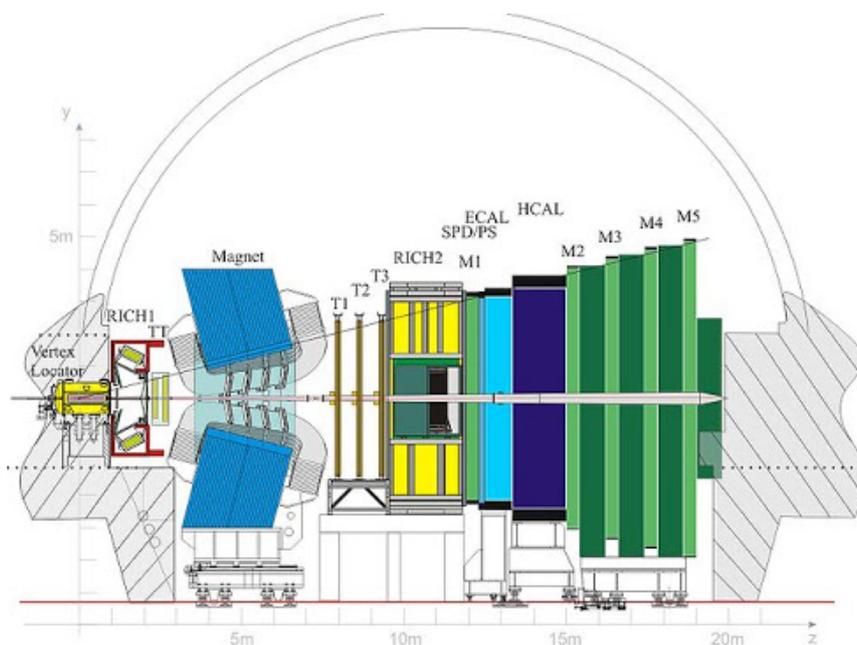


Figura 3: schema della sezione di LHCb con i suoi rivelatori, in ordine il localizzatore di vertici VELO (*Vertex Locator*), il primo dei rivelatori Cherenkov (RICH1), il primo elemento delle camere traccianti (TT), il magnete, le restanti camere traccianti (T1-3), il secondo rivelatore Cherenkov (RICH2), il primo dei rivelatori per i muoni (M1), i calorimetri (ECAL) e i restanti quattro rivelatori per muoni (M2-5).

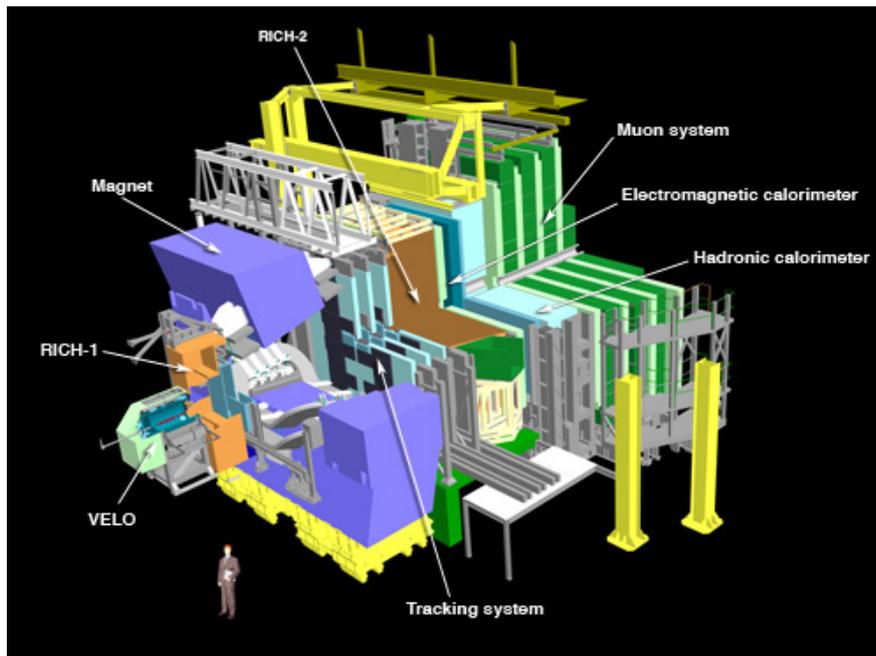


Figura 4: rappresentazione tridimensionale di LHCb a confronto con la figura umana.

Le collisioni con *fixed-target* vengono prodotte grazie al sistema SMOG2 (*System for Measuring Overlap with Gas*). È l'unico dispositivo in LHC in cui possono essere prodotte collisioni protone-protone, se il gas bersaglio è idrogeno, protone-nucleo e nucleo-nucleo per diversi bersagli. Grazie alla propria struttura e collocazione, esso permette anche misure contemporanee delle collisioni fascio-fascio e fascio-bersaglio.

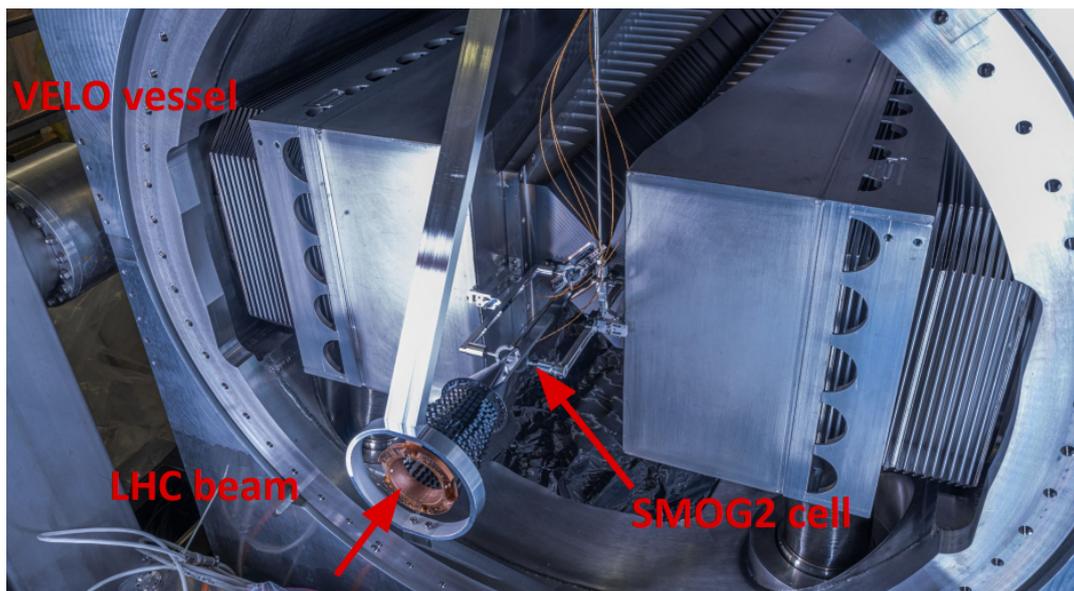


Figura 5: fotografia di SMOG2 al momento della sua installazione con indicata la posizione rispetto al fascio e il localizzatore di vertici.

Usando un bersaglio fisso possono essere analizzati valori cinematici molto più difficili da raggiungere in collisioni fascio-fascio e per questo poco esplorate. È importante valutare le differenze nelle caratteristiche del fascio a seguito dell'inserimento del bersaglio e che potrebbero portare a una perdita di protoni del fascio in funzione del tempo. È dimostrato che, a seguito dell'inserimento di vari gas, le perdite di protoni avvengono su tempi che superano di molto la vita media dei fasci di LHC e quindi da ritenersi irrilevanti.

Particolarmente importante è il calcolo della produzione di antiprotoni in collisioni fra protoni e nuclei di elio, uno degli elementi maggiormente presenti nell'Universo. Discostamenti dalle previsioni del Modello Standard, per il rapporto protoni-antiprotoni permetterebbero infatti di ammettere la presenza della Dark Matter, che non è contenuta nel Modello Standard stesso. Essendo gli antiprotoni presenti naturalmente nei Raggi Cosmici (CR), particelle e nuclei ad alta energia di origine galattica e extra-galattica che attraversano lo spazio colpendo anche la Terra, l'osservazione dei CR stessi è uno dei metodi indiretti dello studio della materia oscura.

### **-Dark Matter (DM)**

La Materia Oscura è un tipo di materia neutra, che non interagisce con la radiazione elettromagnetica ma la cui esistenza può essere dedotta dai suoi effetti gravitazionali. La DM è stata infatti introdotta per spiegare la velocità della materia delle galassie rotanti: molto maggiore di quanto il modello precedente prevedesse e con andamento costante in funzione della distanza dal centro galattico, la velocità di tale materia poteva essere spiegata da una presenza massiva non rivelabile se non attraverso la sua interazione gravitazionale.

Dal momento che gli antiprotoni presenti nei CR potrebbero essere un prodotto dell'annichilazione della DM, il loro studio risulta particolarmente importante per la ricerca delle sorgenti di questo tipo di materia. Gli antiprotoni sono tuttavia prodotti anche dalle interazioni dei Raggi Cosmici con nuclei di idrogeno e elio, abbondantemente presenti nel mezzo interstellare, di cui sono i principali componenti. Per questo motivo misure sperimentali di antiprotoni in numero superiore alle previsioni per le sole collisioni protone-elio potrebbero essere prova della presenza della DM.

### **-Misura di AMS per la DM**

L'esperimento AMS-02 (*Alpha Magnetic Spectrometer*), successore di PAMELA (*Payload for Antimatter Matter and Light-nuclei Astrophysics*), ancorato alla stazione internazionale orbitante ISS, si occupa precisamente della ricerca di DM. Una delle misure effettuate riporta un rapporto antiprotoni-protoni provenienti dallo spazio maggiore del previsto soprattutto a energie cinetiche superiori a 10 GeV. A causa dell'incertezza sulla produzione di antiprotoni da parte delle interazioni p-He oltre questo livello energetico i valori misurati sono ancora riconducibili al modello teorico senza Materia Oscura. Tale incertezza è principalmente dovuta all'interazione con l'InterStellar Medium (ISM): le misure degli antiprotoni derivano da altre misurazioni con incertezze anche importanti e intervalli energetici molto diversi.

### **-Misura di LHCb per la DM**

Il sistema SMOG permette lo studio di collisioni fra protoni a energie e un bersaglio fisso di elio ed in particolare grazie ad esso può essere fortemente migliorata l'incertezza correlata alla produzione

di antiprotoni nella collisione p-He. I dati di LHCb riescono a stabilire quali, tra i modelli teorici disponibili, è in accordo con i dati. In particolare, due modelli teorici, HIJING 1.38 e QGSJETII-04m, risultano particolarmente vicini a tali misure.

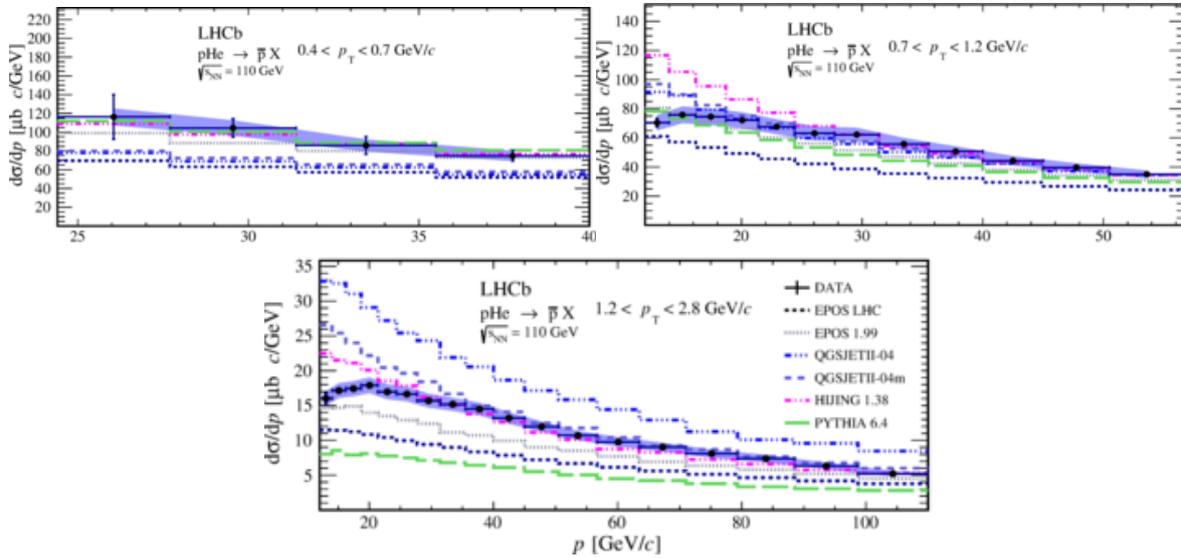


Figura 6: i tre grafici, sezione d'urto-quantità di moto mostrano il confronto fra i dati sulla produzione di antiprotoni rilevata da LHCb, in nero (con incertezza segnata in viola), e le previsioni di alcuni modelli teorici, in particolare in rosa HIJING 1.38 e tratteggiato in grigio-azzurro QGSJETII-04m; in entrambi i casi si nota buona corrispondenza oltre 25GeV/c, ben visibile nel primo grafico.

I modelli teorici di DM, migliorati attraverso i risultati di LHCb, si presentano molto più in accordo coi dati di AMS. Nelle due figure seguenti si può vedere il miglioramento delle incertezze dei modelli teorici per il rapporto fra antiprotoni e protoni nelle condizioni energetiche degli esperimenti spaziali, dovuto principalmente ai dati di LHCb e che ci dice che, al momento, l'accordo dati di AMS, Standard Model senza DM sono in accordo. In futuro si misurerà anche la produzione secondaria di antiprotoni nelle interazioni p-He. Grazie a questo miglioramento sarà possibile ridurre ulteriormente l'incertezza sulla misura della produzione primaria di antiprotoni collegata alla presenza di DM.

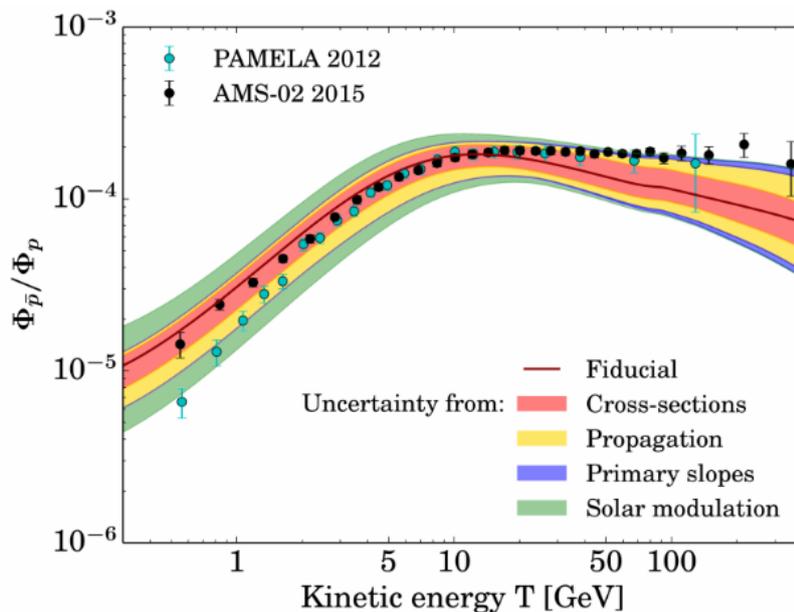


Figura 7: confronto fra la predizione teorica e le misure di PAMELA in azzurro e le misure iniziali di AMS.

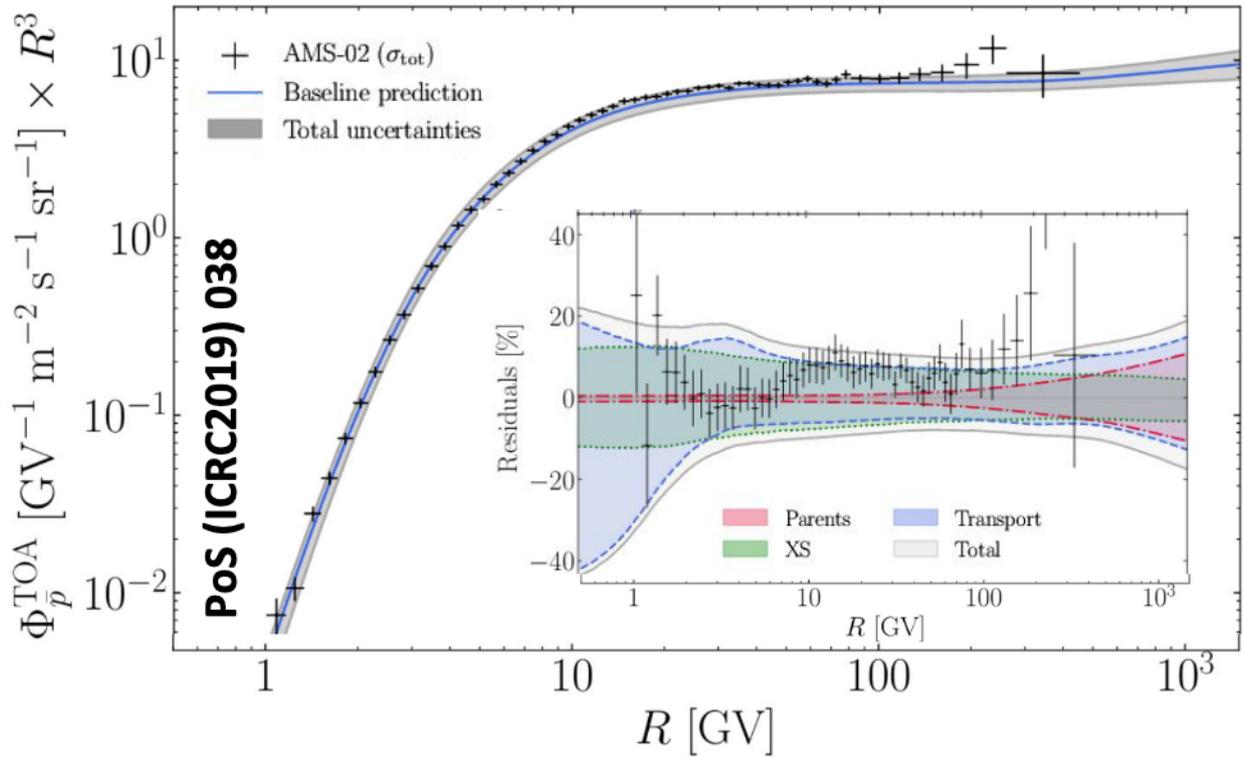


Figura 8: confronto dei dati di AMS con il modello dopo la raccolta dei dati di LHCb: come nella figura 5, anche con i dati migliorati non è ancora possibile determinare univocamente la presenza di DM.

Tra le tante e nuove misure, l'analisi delle collisioni protoni-bersaglio offre la possibilità di simulare le interazioni fra CR e ISM e pertanto potrà contribuire allo studio dei Raggi Cosmici stessi e delle astroparticelle.