

# Studio e ottimizzazione delle prestazioni dell'esperimento HERD per misure di flusso e anisotropia di elettroni e positroni nei raggi cosmici e ricerca indiretta di segnali di materia oscura

## Abstract

Grazie alle molteplici misure di raggi cosmici condotte negli ultimi dieci anni, si sono aperti due problemi fondamentali sull'origine di elettroni e positroni cosmici. Il primo riguarda il possibile contributo di singole sorgenti locali al flusso di *elettroni+positroni*, che è previsto manifestarsi come strutture ad energie di qualche TeV. Il secondo riguarda l'origine dell'eccesso di positroni osservato da PAMELA, FERMI e AMS-02, tuttora dibattuto e generalmente spiegato ricorrendo a fenomeni come l'annichilazione di materia oscura o il contributo di sorgenti locali. L'esperimento HERD, il cui lancio in orbita è previsto nel 2027, è basato su un calorimetro 3D, omogeneo e isotropo, in grado di estendere le misure relative ai raggi cosmici carichi di circa un ordine di grandezza in energia rispetto ai limiti attuali. Il presente progetto è volto all'ottimizzazione delle prestazioni di HERD per la misura del flusso e dell'anisotropia di *elettroni+positroni*. In particolare, si propone tre obiettivi: lo studio del sistema *hardware* del calorimetro dell'esperimento, volto ad implementarne gli effetti strumentali in simulazione; lo studio e l'ottimizzazione del fattore di reiezione di protoni e nuclei rispetto a elettroni e positroni; lo studio della dipendenza delle prestazioni dell'esperimento in base alla direzione di arrivo e al punto di incidenza dei raggi cosmici sul rivelatore.

## Stato dell'arte

Due problematiche attuali di fondamentale importanza nella fisica dei raggi cosmici sono una relativa all'origine di elettroni di alta energia, l'altra all'origine dell'eccesso di positroni, rispetto alla sola produzione secondaria nel mezzo interstellare, osservato dagli esperimenti PAMELA, FERMI e AMS-02 [1]. In particolare, riguardo al primo punto, vista la presenza di oggetti astrofisici vicini alla Terra che secondo le nostre conoscenze dovrebbero produrre raggi cosmici, ci aspettiamo di osservare ad alte energie delle strutture nel flusso di *elettroni+positroni* che deviano dall'andamento a legge di potenza in funzione dell'energia. Finora non è mai stata osservata alcuna struttura nel flusso riconducibile alla presenza di sorgenti locali. Per quanto riguarda l'eccesso di positroni, esso è stato osservato per energie maggiori di qualche decina di GeV. Fra le varie ipotesi sulla sua origine si segnalano la possibile presenza di sorgenti astrofisiche locali (che potrebbero essere *pulsars* o *supernovae remnants*) e l'annichilazione di coppie *particella-antiparticella* di materia oscura in coppie  $e^+e^-$ .

HERD (*High Energy cosmic-Radiation Detection*) [2] è un esperimento internazionale la cui installazione sulla stazione spaziale cinese *Tiangong3* è prevista nel 2027. Lo strumento, concepito in modo tale da estendere le misure relative a *elettroni+positroni*, protoni e nuclei di circa un'ordine di grandezza in energia rispetto ai limiti attuali, è basato su un calorimetro a forma di prisma a base ottagonale costituito da circa 7500 cristalli cubici scintillanti di *LYSO*. Esso avrà una profondità di circa 55 lunghezze di radiazione per particelle che incidono verticalmente su una faccia del rivelatore. Questo comporta un'ottima risoluzione energetica: inferiore al 2% per  $e^+e^-$  con energie maggiori di 100 GeV. Inoltre, grazie all'elevato grado di omogeneità e isotropia, il rivelatore è in grado di ricostruire particelle incidenti su tutte le sue facce. Questo comporta un elevato fattore geometrico efficace per  $e^+e^-$ , di circa  $2 \text{ m}^2\text{sr}$ . Con queste prestazioni si stima che HERD potrà misurare elettroni e positroni con energie fino a qualche decina di TeV. Inoltre, nonostante l'esperimento HERD possa misurare solo il flusso totale di *elettroni+positroni* e non distinguere le due specie, eventuali strutture nella misura del flusso, opportunamente combinate con la misura dell'anisotropia, possono far luce non solo sui contributi di sorgenti locali ad alta energia, ma anche sulle diverse teorie formulate per spiegare l'eccesso di positroni.

## Descrizione del progetto

Lo scopo del presente progetto è di contribuire alla realizzazione degli strumenti necessari per una misura accurata del flusso e dell'anisotropia di *elettroni+positroni* con l'esperimento HERD. A questo scopo saranno condotti due studi legati all'ottimizzazione delle prestazioni dell'esperimento, preceduti da un primo studio che è propedeutico ad essi.

Il primo studio proposto è l'introduzione nel modello del rivelatore di HERD, già esistente ed implementato su software *Geant4*, di vari effetti strumentali del calorimetro non ancora inclusi. Questo è essenziale per ottenere un modello sufficientemente realistico da poter usare per eseguire simulazioni accurate. A questo scopo sarà necessario studiare tali effetti strumentali, quali il contributo del rumore elettronico e l'efficienza di raccolta di luce. Questo sarà effettuato tramite un'attività di caratterizzazione del sistema *hardware* del calorimetro in laboratorio, in piena continuità con il lavoro svolto durante la tesi magistrale.

Il secondo studio proposto è dedicato all'implementazione e all'ottimizzazione di algoritmi di reiezione per rimuovere il fondo di protoni e nuclei dalle misure di *elettroni+positroni*. A questo scopo si prevede di utilizzare il modello del rivelatore di HERD per simulare con metodi Monte Carlo eventi di elettroni (tra 10 GeV e 10 TeV) e protoni (tra 10 GeV e 10 PeV) incidenti in modo isotropo sull'esperimento. Con i risultati delle simulazioni verrà eseguita un'analisi approfondita per individuare tutte le possibili variabili utili a distinguere gli sciami adronici da quelli elettromagnetici sfruttando l'elevata granularità del calorimetro. Saranno effettuati anche dei *test su fascio* con prototipi dell'esperimento, di cui il primo è in programma per Novembre 2021 al SPS (*Super Proton Synchrotron*) del CERN con protoni ed elettroni di alta energia. I dati acquisiti saranno analizzati e confrontati con i risultati delle simulazioni Monte Carlo, allo scopo di validare ed eventualmente calibrare tali simulazioni al fine di riprodurre accuratamente le osservazioni sperimentali. Oltre all'approccio classico, si eseguiranno degli studi basati sull'analisi multivariata [3], visto l'elevato numero di variabili e di correlazioni tra esse tipico di questo tipo di studio. In particolare, viene ormai comunemente usata la tecnica del *boosted decision tree*, come fatto per esempio da CALET [4]. Un ulteriore sviluppo possibile di questa analisi è l'utilizzo di algoritmi di *deep learning*, che si basano su *reti neurali*. Questi metodi sono attualmente usati per l'analisi dati di esperimenti a *collider* adronici, in quanto risultano essere i più performanti tra le varie tecniche di analisi multivariata proposte per la fisica delle alte energie.

Il terzo studio proposto è finalizzato alla misura dell'anisotropia di *elettroni+positroni*. Grazie all'elevata accettazione, l'esperimento disporrà di una sensibilità mai raggiunta per energie superiori al TeV. Al fine di sfruttare al massimo questa caratteristica, è fondamentale studiare come la risoluzione energetica e il potere di reiezione di protoni e nuclei da *elettroni+positroni* dipendano dall'angolo di incidenza e dal punto di impatto delle particelle sul rivelatore. Questa dipendenza è dovuta sia alla variabilità della frazione di energia dello sciame che fuoriesce longitudinalmente e lateralmente dal calorimetro, che all'accuratezza con cui è possibile ricostruire la traccia e la carica. Da questo studio è inoltre possibile determinare l'area efficace di HERD, la quale, unita ad un'accurata simulazione dell'orbita della stazione spaziale, consentirà di stimare la mappa di esposizione ai fini della misura di anisotropia. In questo modo sarà possibile determinare la sensibilità attesa sul termine di dipolo dell'asimmetria nei 10 anni di attività dell'esperimento.

## Bibliografia

- [1] M. Aguilar et al., *The Alpha Magnetic Spectrometer (AMS) on the international space station: Part II – Results from the first seven years*, Physics Reports 894, 1-116, 2021.
- [2] S.N. Zhang et al., *The high energy cosmic-radiation detection (HERD) facility onboard China's Space Station*, Space Telescopes and Instrumentation 2014: Ultraviolet to Gamma Ray. Vol. 9144. International Society for Optics and Photonics, 2014.
- [3] A. Hocker et al., *TMVA the Toolkit for Multivariate Data Analysis with ROOT*, Proceedings of Science, ACAT2007 040, 2007.
- [4] O. Adriani et al., *Energy Spectrum of Cosmic-Ray electron and Positron from 10 GeV to 3 TeV Observed with the Calorimetric Electron Telescope on the International Space Station*, Physical Review Letters 119, 181101, 2017.