

Prospettive per l'identificazione di anti-deuterio nei raggi cosmici



mediante un calorimetro a base di elio pressurizzato

Francesco Rossi^{2,1}, Francesco Nozzoli^{1,2}, Irina Rashevskaya¹, Leonardo Ricci², Piero Spinnato¹, Enrico Verroi¹,

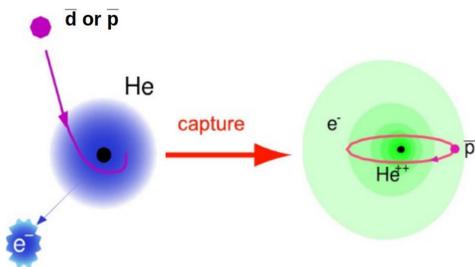
Paolo Zuccon^{2,1} e Gregorio Giovanazzi².

¹TIFPA-INFN, Via Sommarive 14, 38123 Trento, Italia
²Università di Trento, Via Sommarive 14, 38123 Trento, Italia



La ricerca di anti-deuterio (\bar{d}) con energia sotto al GeV/n nei raggi cosmici permette di affrontare problemi di fisica fondamentale come la natura della materia oscura o la presenza di antimateria primordiale. Il progetto PHeSCAMI (Pressurized Helium Scintillating Calorimeter for AntiMatter Identification) ha come obiettivo l'identificazione di \bar{d} nei raggi cosmici sfruttando l'esistenza di annichilazioni ritardate ($\sim \mu\text{s}$) attese in un bersaglio di He pressurizzato.

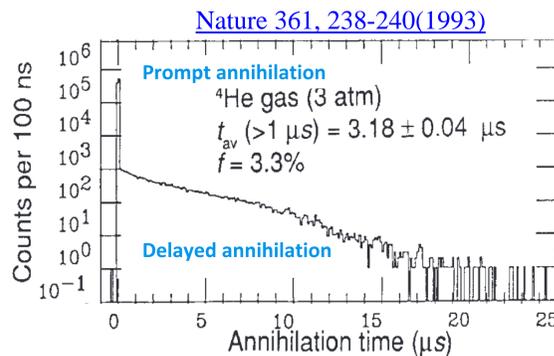
Stati metastabili degli atomi esotici $\bar{p}\text{-He}$ e $\bar{d}\text{-He}$



Antiparticelle in quiete nella materia annichilano $\sim \text{ps}$, tuttavia \bar{p} che si arrestano nell'elio hanno tempi di vita medi maggiori $\sim \mu\text{s}$. Comportamenti analoghi sono stati osservati anche per π^- e K^- .

La descrizione teorica del fenomeno predice un aumento del tempo di vita proporzionale alla massa ridotta al quadrato dell'atomo esotico.

Antiparticelle come \bar{p} e \bar{d} possono essere catturate in prossimità di un nucleo di He e sostituire uno degli e^- . L'antiparticella occupa uno stato con numero quantico principale elevato ($n \sim 38$ per \bar{p}). La diseccitazione per effetto Auger è soppressa a causa della presenza di un solo e^- , mentre l'effetto Stark collisionale è soppresso dalla dimensione dell'orbita. L'unico modo per raggiungere lo stato fondamentale è tramite transizioni radiative, che garantiscono la metastabilità dell'atomo esotico $\bar{p}\text{-He}$ o $\bar{d}\text{-He}$.

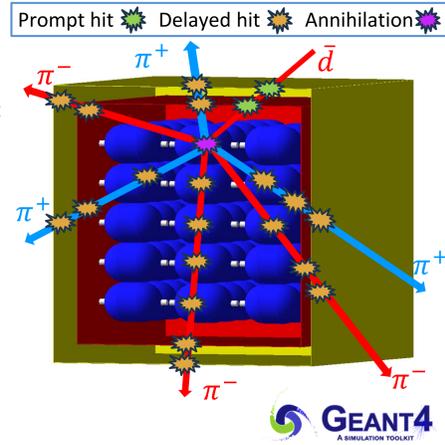


PHeSCAMI detector

Sistema di misura di tempo volo (TOF) composto da due strati di scintillatori plastici segmentati ($4 \text{ mm} \times 54 \text{ m}^2$) con risoluzioni: $\sigma_\beta = 5\%$ e $\sigma_E = 5\%$.

Calorimetro segmentato (HeCal) composto da 75 tank di He (75 L e 310 bar), con risoluzioni: $\sigma_t \sim \text{ns}$ e $\sigma_E = 10\%$.

HeHPV (Helium High-Pressure Vessel) sono qualificati per lo spazio per ESA.



Logica di trigger

La logica di trigger si basa su due selezioni: una immediata (prompt), che si occupa di rigettare tutte le particelle minimo ionizzanti (MIPs) che attraversano il detector e una posticipata (delayed) che ricerca le evidenze legate ad un'avvenuta annichilazione.

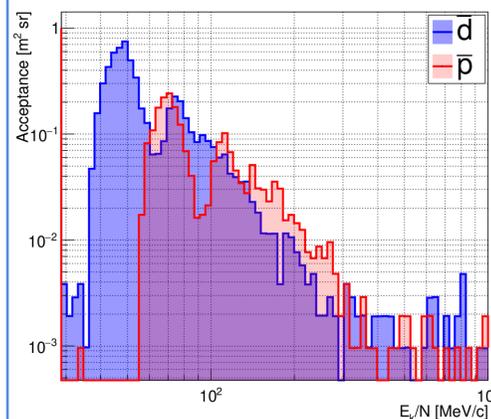
La selezione immediata deve essere soddisfatta entro 50 ns, a seguire si apre un gate di durata 3.95 μs entro cui la selezione posticipata deve essere verificata per acquisire l'evento.

Immediata (prompt)	Posticipata (delayed)
Max E_{dep} TOF > 2 MIP_{TOF}	Max E_{dep} TOF > 1 MIP_{TOF}
Max E_{dep} HeCal > 1.3 MIP_{HeCal}	Max E_{dep} HeCal > 1.3 MIP_{HeCal}
Numero di hit immediate TOF ≤ 3	Numero di hit posticipate TOF > 4



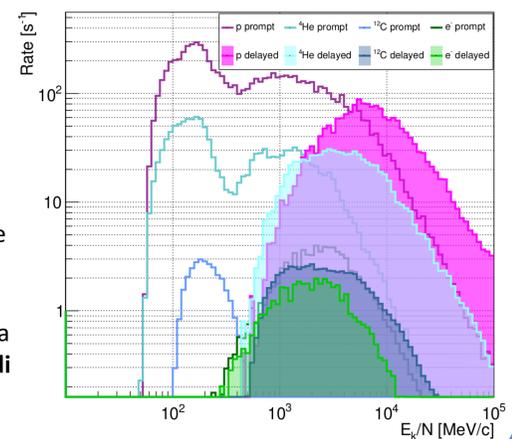
Il rilascio di energia medio di una particella MIP nel TOF $MIP_{TOF} = 0.80 \text{ MeV}$
Il rilascio di energia medio di una particella MIP nel HeCal $MIP_{HeCal} = 7.50 \text{ MeV}$
Numero di hit immediate TOF: tutte le hit con energia > 2 MIP_{TOF}
Numero di hit posticipate TOF: tutte le hit con energia $\in (1 MIP_{TOF}, 2 MIP_{TOF})$

Accettanze, rate di trigger e DAQ attesi



L'immagine di sinistra mostra le accettanze geometriche in funzione dell'energia per nucleone. Esse contengono la probabilità che si formi uno stato metastabile ($\sim 3.3\%$) e che l'annichilazione avvenga tra 50 ns e 4 μs .

Sensibilità per $\bar{d} \sim 10^{-5} [\text{GeV} \cdot \text{m}^2 \cdot \text{sr} \cdot \text{s}]^{-1}$ (3 voli su pallone stratosferico circumpolare)



Entrambe le selezioni di trigger sono state applicate indipendentemente alle particelle e ai nuclei più comuni nei raggi cosmici ($p, e^-, {}^4\text{He}$ e ${}^{12}\text{C}$). In questo modo sono stati studiati i rate attesi, mostrati nella figura a destra, e si è determinato il rate di eventi di materia ordinaria acquisiti pari a $\sim 100 \text{ Hz}$.

Discriminazione tra \bar{d} e \bar{p}

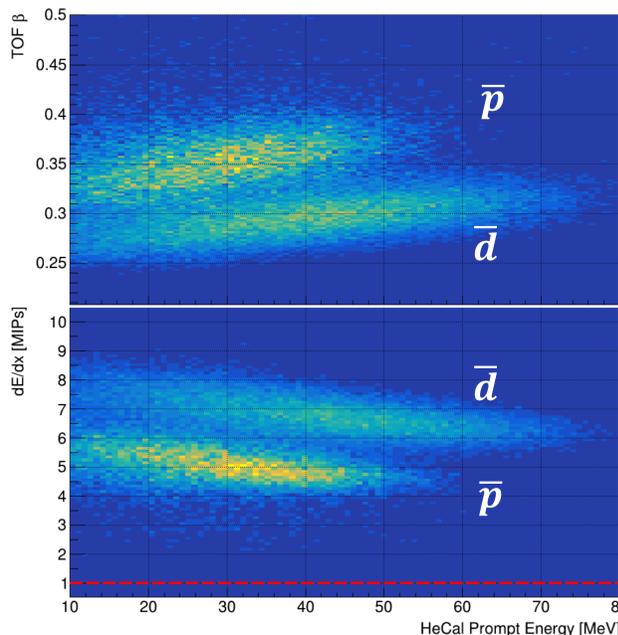
Applicando le selezioni di trigger sopra descritte sono stati selezionati gli eventi mostrati in questi quattro grafici.

L'immagine in alto a destra mostra la velocità misurata dal TOF in funzione dell'energia immediata rilasciata nell'HeCal.

L'immagine mostra il rilascio energetico nello strato esterno del TOF normalizzato ad una MIP (2.0 MeV/cm) in funzione dell'energia immediata rilasciata nell'HeCal.



<https://doi.org/10.3390/instruments8010003>



I grafici a destra mostrano il numero totale di hit nel TOF, per \bar{d} in alto e per \bar{p} in basso, in funzione dell'energia misurata nell'HeCal nell'intervallo 50 ns - 4 μs .

La differenza osservata è dovuta alla diversa molteplicità media di particelle cariche prodotte in un'annichilazione:

$$\bar{d} \rightarrow 6\pi^\pm$$

$$\bar{p} \rightarrow 3\pi^\pm$$

Applicando una ricostruzione di traccia e un classificatore multivariato è possibile raggiungere una reiezione di 1/1000 del fondo di \bar{p} .

