

Bersaglio attivo in diamante per l'esperimento PADME

F.Oliva¹ on behalf of the Padme Active Target Group*

¹ INFN Lecce e Dip. di matematica e fisica, Università del Salento, federica.oliva@le.infn.it

Abstract

PADME (Positron Annihilation into Dark Matter Experiment) è un esperimento che ricerca il fotone oscuro A' nell'annichilazione di positroni su di un bersaglio fisso. L'osservazione di questa nuova particella nel range di massa tra $1 \text{ MeV}/c^2$ e $1 \text{ GeV}/c^2$ e parametro di mixing con fotone $\epsilon \approx 10^{-3}$ potrebbe giustificare la discrepanza tra il valore atteso e quello misurato del momento magnetico anomalo del muone. La collaborazione PADME si propone di raggiungere una sensibilità di 10^{-3} su ϵ per valori di massa fino a $23.7 \text{ MeV}/c^2$. La sezione di Lecce è responsabile dello sviluppo e realizzazione del bersaglio attivo in diamante dell'esperimento. Due prototipi di rivelatore in diamante, uno con elettrodi grafitici ed uno con elettrodi metallizzati, sono stati realizzati e testati con un fascio di particelle, al fine di scegliere opportunamente il bersaglio candidato ideale per l'esperimento finale.

Introduzione

L'esperimento PADME[1] si è consolidato durante il workshop INFN What Next (WN) ed è stato finanziato ed approvato alla fine del 2015.

Il primo run dell'esperimento è previsto per il 2018; esso sarà collocato presso la BTF (Beam Test Facility) dei Laboratori Nazionali di Frascati e sfrutterà un fascio secondario di positroni proveniente dal LINAC di DAΦNE.

Il rivelatore di PADME consta di diverse componenti: bersaglio attivo in diamante, dipolo magnetico, calorimetro elettromagnetico (ECAL), calorimetro a piccolo angolo (SAC) e veti per elettroni e positroni.

Il segnale è costituito da un evento di singolo fotone, dove uno dei due fotoni di annichilazione positrone-elettrone si converte

in un fotone oscuro poco interagente nell'apparato. Il fondo è per lo più dovuto a processi di bremsstrahlung, con un positrone ed un fotone nello stato finale, ed alla emissione di due o tre fotoni a seguito di una annichilazione positrone-elettrone. Il numero degli eventi di fondo è ridotto grazie alla presenza di scintillatori che fungono da veto per le particelle cariche, sia all'interno del dipolo magnetico, sia all'esterno, nelle vicinanze del sistema di dump del fascio, deflesso dal magnete. Inoltre, la presenza del SAC è utile a rigettare eventi di bremsstrahlung molto abbondanti con emissione di fotoni a piccolo angolo. All'interno della collaborazione PADME, la sezione di Lecce si occupa dello sviluppo e della realizzazione del bersaglio attivo in diamante.

* I membri del PADME Active Target group sono: R. Assiro, G. Chiodini, G. Fiore (INFN Lecce), A.P. Caricato, M. Corrado, M. De Feudis, M. Martino, G. Maruccio, A.G. Monteduro, F.Oliva, C. Pinto, S. Spagnolo (INFN Lecce e Dip. di Matematica e Fisica, Università del Salento).

Il rivelatore in diamante è, difatti, un ottimo candidato grazie al basso numero atomico del materiale ($Z=6$) che limita il conteggio degli eventi di bremsstrahlung, fondo principale per il segnale. Un primo test su fascio effettuato nel novembre 2015 ha permesso di caratterizzare un prototipo di rivelatore in diamante con elettrodi grafittici realizzati a Lecce, mentre in un secondo test condotto nel mese di luglio 2016 è stato testato un rivelatore in diamante con elettrodi metallici.

Materiali e metodologie

Il diamante presenta numerose proprietà chimiche e fisiche interessanti, ma solo da alcune decine d'anni è stato usato per scopi scientifici, a seguito dello sviluppo di tecniche di sintesi in laboratorio. La resistenza al danneggiamento da radiazione, l'alta mobilità di carica e la bassa corrente di buio, ne fanno un materiale interessante per la costruzione di rivelatori per la fisica delle alte energie.

Tradizionalmente, gli elettrodi sono realizzati mediante un processo litografico, con una prima deposizione di uno strato di cromo o titanio, che crea uno strato di carburo di natura ohmica, ed una successiva metallizzazione, tipicamente realizzata con palladio o oro per la contattazione con il circuito esterno.

Una possibile alternativa è la realizzazione di contatti grafittici mediante irraggiamento laser. Il calore generato su di una superficie di diamante irraggiato mediante laser comporta la creazione di strati grafittici conduttivi e ohmici.

Presso il laboratorio L3 dell'Università del Salento[2] viene utilizzato un laser ad eccimeri (ArF, $\lambda=193$ nm) con lunghezza d'onda tale da essere assorbito dal diamante.

Il rivelatore in diamante policristallino CVD acquistato presso l'Applied Diamond è stato testato sia con strisce grafittiche prodotte per mezzo di un laser ad eccimeri ArF, che con contattazioni metalliche ottenute mediante deposizione Cr-Au. Nelle fasi preparatorie dell'esperimento sono stati programmati diversi test su fascio presso la BTF ai LNF, al

fine di testare le diverse componenti sfruttando direttamente il fascio costituito da elettroni o positroni.

Il fascio di test è costituito da elettroni o positroni in alternanza, distribuiti in pacchetti di durata 10 ns e frequenza 50 Hz, di molteplicità media pari a 10000 particelle ed energia 450 MeV.

Il primo prototipo del bersaglio in diamante con elettrodi grafittici, avente dimensioni 2×2 cm², spesso 50 μ m ed avente 18 strisce grafiche su entrambe le superfici orientate in direzioni perpendicolari (Figura 1 a) e b)), è stato testato a Novembre 2015. Le varie strisce sono state connesse ad un circuito stampato mediante wire bonding o pasta d'argento.

Un ulteriore test sul fascio è stato svolto a luglio 2016, durante il quale è stato testato un secondo prototipo di rivelatore in diamante (2×2 cm², spessore 100 μ m) con strisce metallizzate Cr-Au (Figura 1 d)), possibile alternativa al diamante grafitizzato. In Figura 1 c) è mostrato un rivelatore a diamante grafitato con 19+19 strisce e spesso 100 μ m con cui si realizzerà il primo bersaglio attivo per PADME.

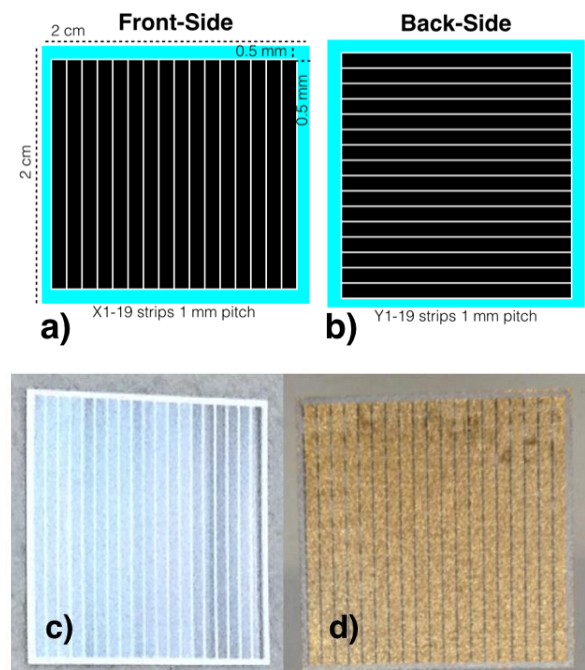


Figura 1: Segmentazione degli elettrodi del bersaglio attivo di diamante di PADME su entrambe le facce (a,b). Rivelatori di

diamante con elettrodi grafatici (c) e metallici (d) per realizzare il bersaglio attivo di PADME.

Nel test su fascio di novembre il segnale di ogni singola striscia è stato amplificato mediante amplificatori di carica e tensione e digitalizzato ad 1GS/s oppure 5 GS/s con un modulo V1742 CAEN, per misurare rispettivamente la risoluzione spaziale e temporale. In Figura 2 è possibile osservare un tipico segnale di una striscia grafatica in uscita da amplificatori di carica e tensione.

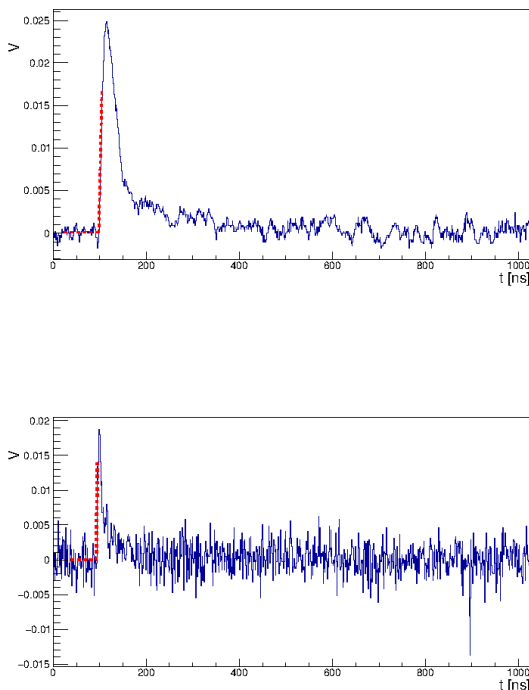


Figura 2: Tipici segnali in uscita dagli amplificatori di carica (in alto) e di tensione (in basso) con sovrapposta una funzione di fit opportuna per ottenere il tempo di inizio salita del segnale su singola striscia.

Nel test su fascio di luglio le strisce della superficie superiore sono state lette dalla stessa elettronica utilizzata nel test di novembre, mentre quelle della superficie inferiore sono state lette con un'elettronica basata su di un chip a multi-canale CMOS chiamato AMADEUS della IDEAS. In Figura 3 è

mostrato un tipico segnale di una striscia in uscita dal chip AMADEUS.

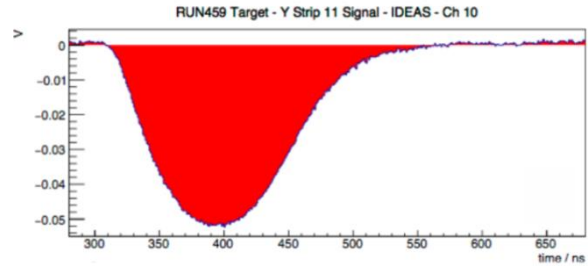


Figura 3: Segnale in uscita da un canale del chip AMADEUS di IDEAS.

Discussione

L'informazione primaria da estrarre dalle forme d'onda è l'integrale del segnale in una determinata finestra temporale. Esso fornisce la carica raccolta dalla striscia corrispondente moltiplicata per il fattore di guadagno del canale di lettura, quest'ultimo ottenuto con opportune calibrazioni. Inoltre per ogni canale è stato ottenuto il tempo di inizio salita del segnale, la cui fluttuazione determina la risoluzione temporale.

I profili X e Y del fascio possono essere ricostruiti per singolo evento o per un numero definito di eventi consecutivi valutando la carica raccolta da ogni singola striscia. Alle strisce non connesse è associato un valore di carica calcolato interpolando linearmente i valori di carica raccolta dalle strisce adiacenti. In Figura 3 è mostrato un profilo cumulativo di 300 eventi nella vista X (in alto) e Y (in basso).

La posizione media del fascio nel piano trasverso può essere stimata pacchetto per pacchetto misurando il baricentro (o centroide) di carica, calcolato per ogni evento per la vista X e Y indipendentemente:

$$\langle X (Y) \rangle = \frac{\sum_{i=1}^{M^{X(Y)}} Q_{x(y),i} \cdot x(y)_i}{\sum_{i=1}^{M^{X(Y)}} Q_{x(y),i}}$$

dove $M_x(y)$ è il numero delle strisce X (Y), $Q_x(y)_i$ è la carica raccolta dall'i-esima striscia X (Y) e $x(y)_i$ la relativa posizione.

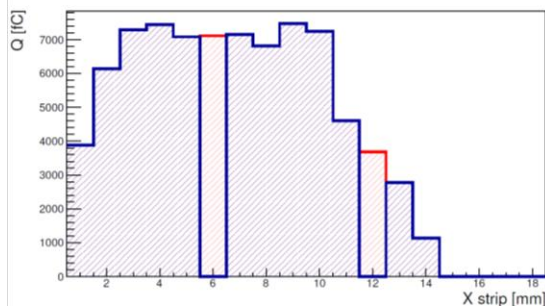


Figura 4: Profili cumulativi del fascio per la vista X (in alto) ed Y (in basso). In rosso le strisce non connesse, il cui valore è ottenuto mediante interpolazione lineare.

In Figura 5 è mostrata la distribuzione del baricentro di carica per le strisce della superficie superiore (X). La larghezza del fit gaussiano della distribuzione fornisce una stima della risoluzione spaziale del rivelatore.

Risultati

Dai risultati del test su fascio di novembre è stata misurata una risoluzione spaziale pari a 0.2 mm, come si evince in Figura 5 perfettamente in linea con le richieste dell'esperimento (< 1 mm). La risoluzione temporale è ottenuta considerando la differenza dei tempi di arrivo del segnale per due strisce centrali adiacenti. Considerando la dispersione del fit della distribuzione in Figura

6 e dividendo per la $\sqrt{2}$, la risoluzione temporale risulta essere pari a 2.04 ns.

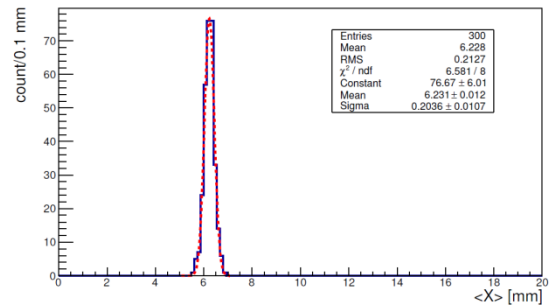


Figura 5: Distribuzione del baricentro di carica per le strisce X.

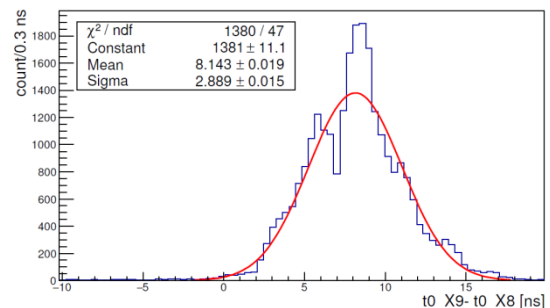


Figura 6: Distribuzione dei tempi d'arrivo del segnale per due strisce X centrali.

Analizzando i dati è stato, inoltre, possibile fornire una stima del valore di CCD (Charge Collection Distance), parametro intrinseco fondamentale di un materiale attivo policristallino, che rappresenta l'efficienza di raccolta di carica espressa in termini di spessore efficace del sensore. La CCD è data dalla formula: $CCD = L \frac{Q_o}{Q_g}$, dove L è lo spessore del rivelatore, Q_o la carica raccolta e Q_g quella generata. Qualora non ci fossero sorgenti di intrappolamento nel reticolo cristallino, la CCD sarebbe pari ad L. Indicativamente, $CCD < L/2$.

Il valore di CCD ottenuto per il prototipo di spessore 50 μm è pari a $11.0 \pm 0.5 \mu\text{m}$, in linea con il valore fornito dal produttore.

I dati raccolti nel test di luglio su rivelatore a diamante metallizzato devono essere elaborati e confrontati con quelli relativi al test su fascio precedente, in modo tale da

definire in breve tempo l'elettronica finale da utilizzare.

Conclusioni

L'analisi dei dati del test su fascio ha dimostrato l'efficienza del rivelatore in diamante con strisce grafitiche, possibile candidato dell'esperimento PADME, fornendo una stima della risoluzione spaziale e temporale.

Nel 2017 è previsto un run tecnico dell'esperimento, in vista del run finale del 2018. In quella occasione è opportuno disporre di rivelatori sia a strisce grafitiche che metalliche, al fine di determinare il migliore candidato per il run di fisica dell'esperimento nel 2018. Il rivelatore in diamante di grande area, sottile e con elettrodi grafitici, come quello impiegato da PADME, ha diverse applicazioni come monitor di fasci ad alta intensità e di dose per applicazioni mediche.

Riferimenti bibliografici

- [1] M. Raggi and V. Kozhuharov, *Proposal to Search for a Dark Photon in Positron on Target Collisions at DAΦNE LINAC*, Advances in High Energy Physics, Vol. 2014 (2014). arXiv:1403.3041;
- [2] M.De Feudis et. al, *Diamond graphitization by laser-writing for all-carbon detector applications*, Diamond & Related Materials **75**, 25-33, (2017).