



ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE

Sezione di Genova

INFN- 20-05/GE
20/05/2020

**SISTEMA DI MOVIMENTAZIONE DEL TRACCIATORE A PIXEL DEL
PRECISION PROTON SPECTROMETER DI CMS**

Stefano Cerchi¹, Rosanna Puppo¹, Enrico Robutti¹, Cecilia Rossi¹, Andrea Trovato¹

¹INFN-Sezione di Genova, via Dodecaneso 33 16146 Genova, Italia

SOMMARIO

Il presente lavoro descrive il sistema di movimentazione del tracciatore PPS dell'esperimento CMS. Scopo del sistema di movimentazione è quello di minimizzare la disuniformità di danneggiamento dei chip di lettura dei rivelatori. Il sistema è stato progettato e prodotto presso la Sezione di Genova dell'INFN. Vengono inoltre descritti alcuni test preliminari di funzionamento.

INTRODUZIONE

Il Precision Proton Spectrometer (PPS) dell'esperimento CMS, presso il CERN, ha lo scopo di studiare i protoni che, dopo lo scontro tra i due fasci di LHC, perdono parte della propria energia rimanendo intatti e continuando a viaggiare all'interno del tubo a vuoto di LHC nelle vicinanze del fascio [1]. Gli eventi di interazione di questi protoni vengono rilevati grazie ad una serie di tracciatori installati da entrambi i lati del fascio a 210 m dal punto di collisione di CMS. I rivelatori sono posizionati in speciali contenitori mobili detti 'Roman Pot' che possono avvicinarsi fino a circa 1.5 mm dal fascio. I tracciatori sono composti da una serie di rivelatori a pixel di silicio con tecnologia 3D che misurano la posizione delle particelle cariche.

Poiché la zona in cui il flusso di protoni è più significativo è molto ridotta rispetto alle dimensioni del rivelatore stesso ($\sim 500 \mu\text{m}$ vs. $\sim 15 \text{ mm}$), è presente una forte disuniformità di irraggiamento tra diverse regioni, pari addirittura a 3 ordini di grandezza. I chip di lettura accoppiati al sensore hanno la possibilità di essere riconfigurati in modo da compensare, entro una certa misura, le variazioni di prestazioni dovute al danno da radiazione; ma tali configurazioni si applicano al chip nel loro insieme e non sono perciò in grado di mitigare l'effetto dovuto ad un danno molto diversificato tra diverse zone. Poiché questo effetto provoca un degrado irreversibile delle prestazioni del rivelatore quando la dose assorbita si avvicina a quella corrispondente a una luminosità integrata di circa 10 fb^{-1} , è stato necessario individuare una soluzione.

Scopo del presente lavoro è quello di descrivere il sistema di movimentazione dei rivelatori studiato ed implementato presso la Sezione di Genova dell'INFN per distribuire la degradazione sui rivelatori. Nel momento in cui la luminosità integrata raggiungerà livelli elevati, sarà possibile traslare il rivelatore in modo tale da concentrare l'irraggiamento su una zona non degradata e distribuire quindi il danno prodotto dalla radiazione. Data la dimensione della regione più irraggiata ($500 \mu\text{m}$) è sufficiente effettuare spostamenti di 0.5 mm alla volta. La corsa totale possibile, pari a 6 mm, è vincolata invece allo spazio disponibile sul fondo del Roman Pot.

TRACCIATORE A PIXEL DI PPS

Il tracciatore a pixel 3D di PPS (Figura 1) consta di due parti: una parte fissa, che chiameremo “telaio”, collegata al Roman Pot tramite due colonnine di ottone, e una parte mobile, che chiameremo “pacchetto rivelatori”, appoggiata sul fondo del Roman Pot mediante sfere portanti. In Figura 1 sulla destra è messo in evidenza in blu l’involucro in cui è contenuto il rivelatore: il Roman Pot.

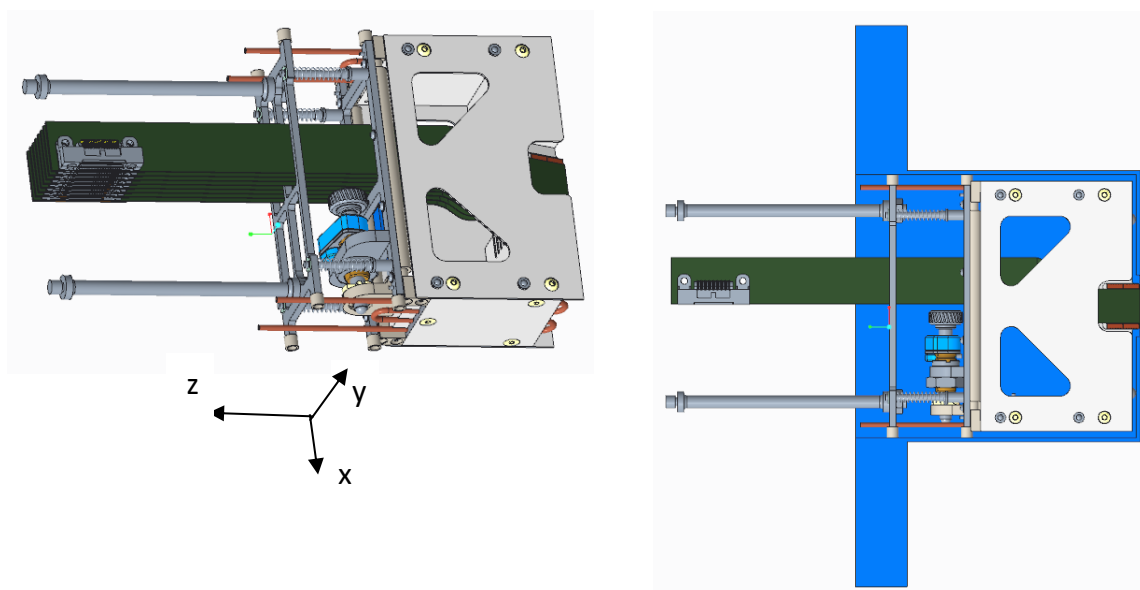


Figura 1 – Modello 3D del tracciatore PPS

Per entrambe le parti che compongono l’assieme, la movimentazione in z viene bloccata grazie alla presenza di 4 molle posizionate in corrispondenza di alcune colonnine in inox. La spinta delle molle deve essere sufficiente a mantenere il pacchetto rivelatori sul fondo del Roman Pot, ma tale da non aggravare eccessivamente gli attriti in gioco nel sistema di movimentazione: sono state scelte molle non troppo rigide e che hanno, ognuna, un carico a pacco di 8.04 N.

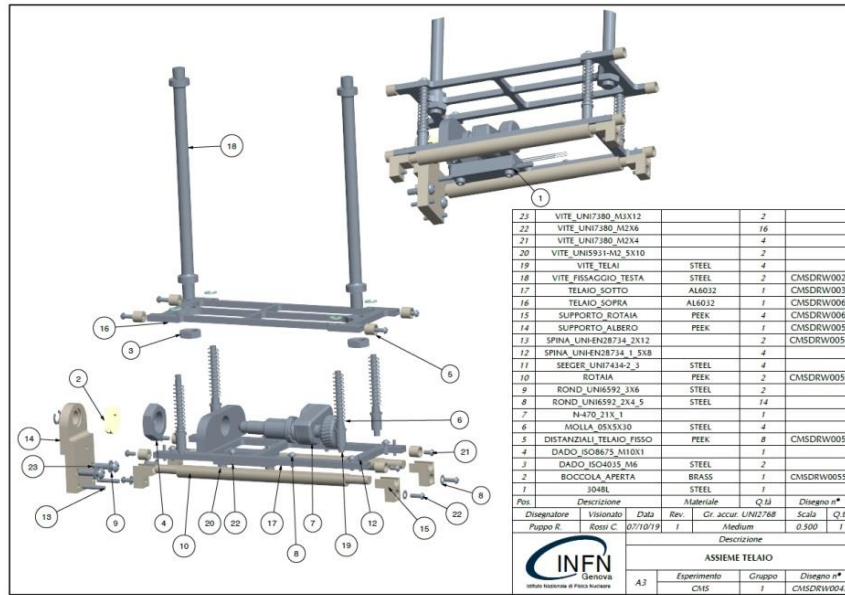


Figura 2 – Parte fissa dell'assieme: il telaio

Il telaio (Figura 2), che rappresenta la parte fissa dell'assieme, è inoltre bloccato in x e y . La traslazione in x è impedita da quattro distanziali posti alle estremità del telaio, mentre quella in y è impedita da pressori a molla.

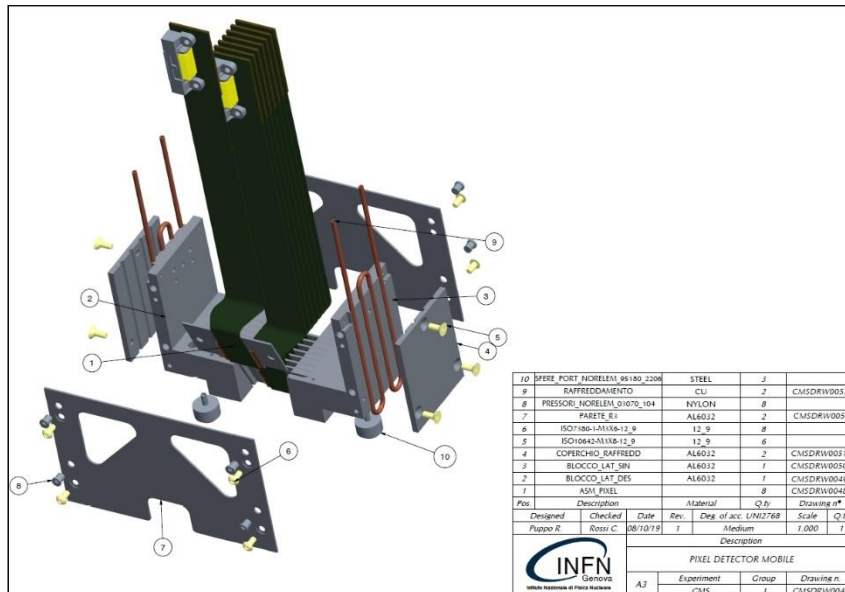


Figura 3 – Parte mobile dell'assieme: il pacchetto rivelatori

All'interno della parte mobile (pacchetto rivelatori, Figura 3) sono presenti i sensori a pixel. I sensori sono inclinati rispetto al fondo del Roman Pot (Figura 4), al fine di minimizzare l'inefficienza geometrica intrinseca dei rivelatori. L'inclinazione contribuisce inoltre a migliorare la risoluzione in posizione dei protoni grazie alla distribuzione di carica. Le tracce dei protoni vengono ricostruita grazie alla presenza di diversi sensori paralleli ed equidistanti tra di loro (3.8 mm). Una maggiore inclinazione dei sensori consentirebbe un'acquisizione ottimale, tuttavia, date le limitazioni in termini di spazio, è stato necessario effettuare un

compromesso tra il numero di sensori a pixel e l'inclinazione possibile che è risultata essere pari quindi a 20° rispetto al fondo del Roman Pot. La posizione dei rivelatori al silicio viene garantita da due blocchetti laterali in alluminio all'interno dei quali i sensori verranno inseriti.

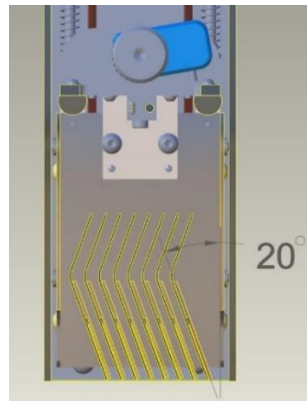


Figura 4 – Inclinazione dei pixel detectors

Il pacchetto rivelatori è composto 6 sensori di silicio a pixel con tecnologia 3D (con la possibilità di portarne a 8 il numero), un sistema di raffreddamento per la refrigerazione dell'elettronica di lettura ed alcune mini sfere portanti e pressori a molla.

I pixel con tecnologia 3D sono bondati su 6 schede di kapton flessibile a 6 strati, dello spessore totale di meno di 0.5 mm, con relativa elettronica di FrontEnd per la comunicazione con la scheda Portcard posta all'interno del Roman Pot. La singola scheda, delle dimensioni di circa 16 x 250 mm è incollata su una piastrina di alluminio da 1 mm di spessore, che ne permette il montaggio nel pacchetto del rivelatore.

Le sfere portanti ed i pressori a molla hanno lo scopo di mantenere il pacchetto rivelatori nella posizione corretta ed al tempo stesso agevolarne lo scorrimento minimizzando l'attrito sulle pareti ed il fondo del Roman Pot. La posizione dei pressori a molla su uno dei lati del pacchetto rivelatori è visibile in Figura 5, mentre quella delle sfere portanti sul fondo del rivelatore è riportata in Figura 6. Entrambi i componenti sono in inox al fine di evitare problemi con l'ambiente in cui verranno inseriti che è soggetto ad un alto livello di radiazione.

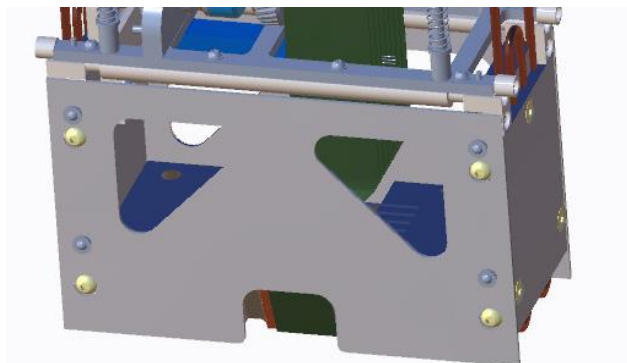


Figura 5 - Posizione pressori a molla laterali

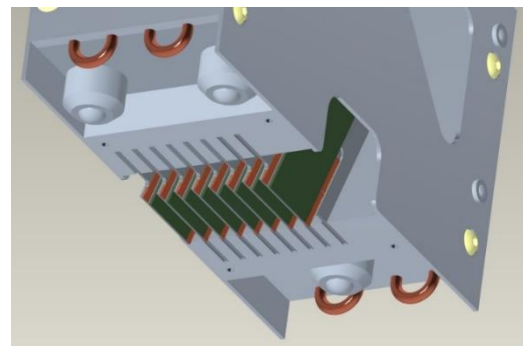
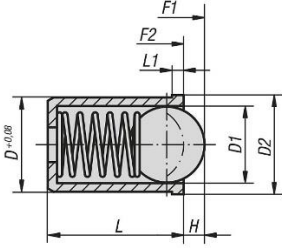


Figura 6 - Posizione sfere portanti fondo

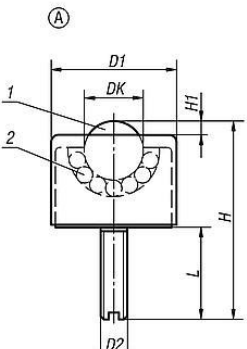
I pressori a molla sono stati scelti in funzione dello spazio limitato a disposizione in direzione z ($H < 1$ mm) e della forza necessaria a mantenere il rivelatore nella posizione corretta, evitando al tempo stesso che le pareti del Roman Pot possano essere rigate durante l'inserimento. I dettagli dei pressori scelti (Norelem, modello 03070-104) sono riportati in Tabella 1.

Tabella 1 - Caratteristiche pressori a molla laterali

	D	D1	D2	L	L1	H	Forza elastica inizio	Forza elastica fine
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]	[N]
	4	3	4.6	9	1	0.8	12	22

Le mini sfere portanti posizionate sul fondo del pacchetto rivelatori hanno anch'esse lo scopo di minimizzare l'attrito sul Roman Pot e sono state scelte in funzione dello spazio molto ridotto a disposizione essendo tra le più piccole disponibili sul mercato. È stato inoltre necessario fossero regolabili in altezza per mantenere una distanza adeguata tra il sensore e il fondo del Roman Pot e permettere, nella fase di assemblaggio del rivelatore, il corretto posizionamento dei pixel rispetto alla zona di interazione prevista. Prima di inserire l'insieme all'interno del Roman Pot si provvederà infatti, all'interno del nostro centro misure, alla registrazione delle sfere rispetto ai chip di lettura. Le caratteristiche delle sfere portanti scelte sono riportate in Tabella 2 (Norelem, modello 95180_2206).

Tabella 2 - Caratteristiche mini sfere portanti posizionate alla base del pacchetto rivelatori.

	DK	D1	D2	H	H1	H	Fattore di carico
	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[mm]	[N]
	6.4	13	3	16.5	2	6	100

Al fine di garantire la traslazione del pacchetto rivelatori è stato quindi necessario disaccoppiare il movimento in y delle due parti minimizzando, oltre all'attrito tra il pacchetto rivelatori ed il Roman Pot, anche quello tra il rivelatore ed il telaio.

Per la traslazione del pacchetto rivelatori rispetto al telaio sono previste delle guide e dei binari in PEEK, materiale che garantisce resistenza alle radiazioni, precisione nella lavorazione e buon coefficiente di attrito (coefficiente di attrito dinamico su acciaio 0.30-0.38). I binari sono fissati con viti e spine al telaio fisso e le guide sono fissate con viti e spine alla parte mobile. Le guide ed i binari sono assemblati con precisione $\pm 0.01\text{mm}$. La tolleranza è stata scelta al fine garantire al tempo stesso uno scorrimento agevole ed un assemblaggio preciso delle parti.

Il movimento del telaio è ottenuto grazie ad un attuatore piezoelettrico il quale si basa sulla piezoelettricità, fenomeno per cui è possibile generare un potenziale elettrico applicando una pressione su determinati materiali, le cosiddette piezoceramiche. Gli attuatori piezoelettrici sfruttando questa proprietà al contrario, variando la tensione applicata per cambiare periodicamente le dimensioni del componente piezoelettrico. I principali vantaggi degli attuatori piezoelettrici sono la possibilità di fare movimenti estremamente piccoli (step dell'ordine dei 20 nm, nel nostro caso) con tempi di risposta molto ridotti. Gli attuatori piezoelettrici possiedono inoltre un'elevata precisione e stabilità di posizionamento ed una durata di vita considerevole ($>1'000'000'000$ steps, nel nostro caso), elementi evidentemente fondamentali data la posizione prossima al fascio in cui il rivelatore verrà inserito e l'impossibilità, quindi, di interventi su di esso una volta installato. L'attuatore scelto è il modello N-470.210 della Physik Instruments. La scelta è basata, oltre che sulle dimensioni estremamente ridotte, sulle sue caratteristiche meccaniche. Si riportano le caratteristiche dimensionali dell'attuatore N-470 in *Figura 7*, in cui viene evidenziata anche la corsa del motore ($B=13\text{mm}$) che è pienamente adeguata alle nostre necessità, e le specifiche principali dello stesso in *Tabella 3*.

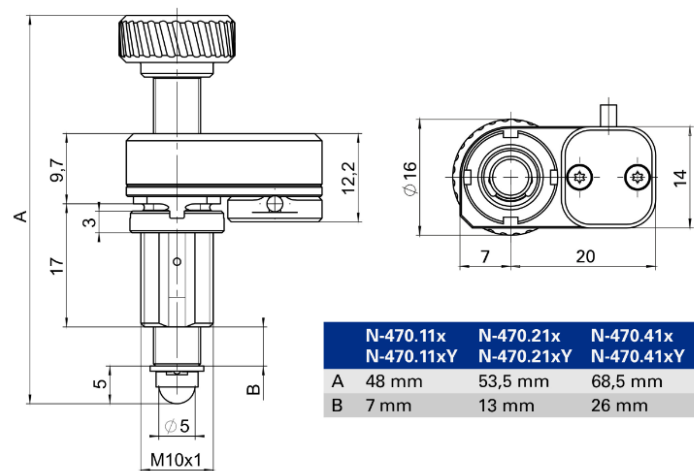


Figura 7 - Caratteristiche dimensionali dell'attuatore piezoelettrico

Tabella 3 - Specifiche dell'attuatore piezoelettrico N-470.21x

Movimento e posizionamento	
Range di spostamento	13 mm
Dimensione massima di step in step mode	50 nm
Typ. Step size	20 nm
Frequenza step	2000 Hz
Massima velocità in full-step mode	3.6 mm/min
Velocità Typ. In full-step mode	2.4 mm/min
Proprietà meccaniche	
Intefaccia meccanica	Filettatura M10x1
Rigidezza nella direzione di moto	15 N/um
Forza in avanzamento (attiva)	22 N
Forza di tenuta (passiva)	> 100 N
Proprietà dell'unità di movimentazione	
Tipo	Attuatore piezoelettrico
Voltaggio massimo	80 V
Potenza massima consumata	5 W
Massa	80 g

L'attuatore piezoelettrico consta di due parti: una parte fissa che corrisponde al corpo del motore ed una parte mobile, l'albero motore. Dovendo svincolare il movimento del telaio da quello del pacchetto rivelatori, è stato necessario vincolare il corpo e l'albero ognuno ad una delle parti che compongono il nostro assieme, rendendo quindi il movimento solidale ad essi. Più precisamente, si è vincolato la parte fissa dell'attuatore tramite un dado ed una ghiera al telaio ed il suo albero al pacchetto rivelatori grazie ad un supporto di PEEK (Figura 8).

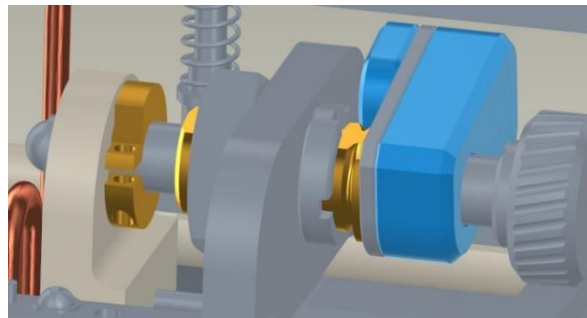


Figura 8 - Vincolo del motore piezoelettrico al telaio

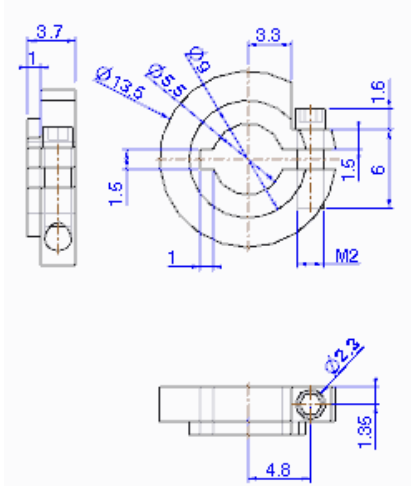


Figura 9 – Vincolo del motore piezoelettrico al pacchetto rivelatori e dettaglio della ghiera in ottone

Il supporto di PEEK viene avvitato e spinato al pacchetto rivelatori e fissato all'albero dell'attuatore da un lato con un Seeger e dall'altro con una ghiera di ottone. La ghiera di ottone viene stretta attorno all'albero, riducendo così l'isteresi al minimo. La ghiera è inoltre filettata al suo interno per consentire una grande precisione di posizionamento ed al tempo stesso un bloccaggio molto efficace. L'utilizzo dell'ottone inoltre consente di limitare l'attrito sul supporto in PEEK e lasciare quindi il movimento dell'attuatore indisturbato.

La posizione del pacchetto rivelatori rispetto al telaio viene tenuta sotto controllo da un potenziometro a cursore vincolato al telaio stesso mediante due viti (v. Figura 10). Anche in questo caso la scelta del dispositivo è correlata a caratteristiche meccaniche e geometriche dello stesso. La scelta si è inoltre basata sulla sua resistenza a radiazione e sulla sua semplicità di utilizzo e costo ridotto. Le caratteristiche dimensionali e meccaniche del potenziometro scelto (modello 3048L-5-103 della Bourns) sono riportate in Figura 10 e Tabella 4.

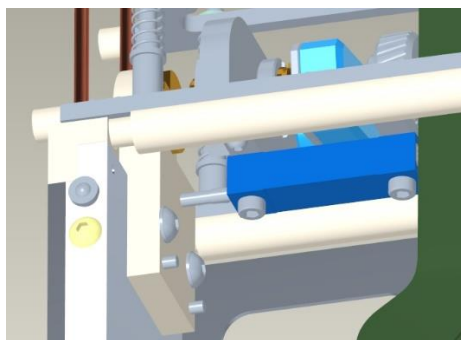


Figura 10 - Sistema di vincolo del potenziometro a cursore

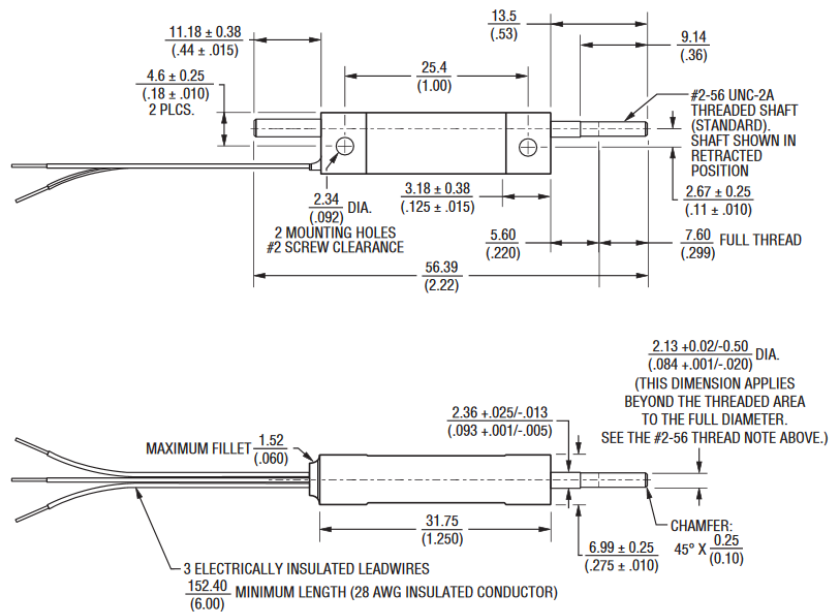


Figura 11 – Caratteristiche geometriche del potenziometro a cursore

Tabella 4 - Specifiche del potenziometro a cursore

Corsa elettrica standard	0.2; 0.3; 0.4; 0.5 in (5.08; 7.62; 10.16; 12.70 mm)
Resistenza elettrica standard	1..50 kΩ
Linearità indipendente	±5%
Risoluzione	Infinita
Backslash	Trascurabile
Durata	500'000 cicli
Temperatura di funzionamento	-55..125 °C

PROVE PRELIMINARI SPERIMENTALI

Alcune prove preliminari sono state effettuate a Luglio 2019 al fine di verificare sperimentalmente il funzionamento del sistema di movimentazione.

Le prove sono state effettuate sul prototipo prodotto nella Sezione di Genova dell'INFN visibile in Figura 12.

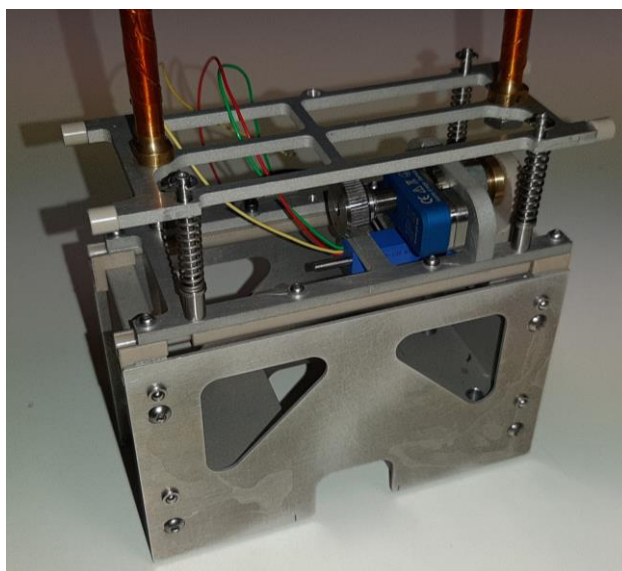


Figura 12 – Prototipo tracciatore PPS con Sistema di movimentazione

Per questi test di preliminari si è deciso di preparare un setup sperimentale essenziale al fine di ridurre al minimo le variabili in gioco e potersi concentrare sulla verifica del sistema di movimentazione del pacchetto rivelatori. È stata quindi prodotta una struttura di alluminio per simulare il Roman Pot in modo semplificato ma realistico dal punto di vista degli spazi in gioco (Figura 13). Il tracciatore è stato poi posizionato all'interno della struttura e vincolato tramite le sue colonnine in ottone alla piastra di alluminio superiore della struttura stessa. Si è infine deciso, per le prove preliminari, di mantenere il tracciatore in orizzontale in appoggio quindi sulle sue sfere portanti.



Figura 13 - Test setup per prove sperimentali preliminari

Durante i test, il pacchetto rivelatori è stato mosso in entrambe le direzioni: forward e backward. Si intende con forward il movimento che porta il pacchetto rivelatori verso il motore, cioè verso sinistra in Figura 12 e Figura 14, e viceversa per backward. I movimenti sono ovviamente equivalenti al movimento dell'albero motore verso il motore stesso.



Figura 14 - Movimenti frontwards e backwards

Gli spostamenti sono stati quindi effettuati a passi costanti mantenendo il motore piezoelettrico ad una frequenza di 2000 Hz, ossia 2000 step al secondo. Considerando che la dimensione di step tipica è di 20 nm, questa frequenza corrisponde quindi ad una velocità di circa 40 μm al secondo. Volendo effettuare il movimento completo richiesto (6 mm) saranno quindi necessari all'incirca 300000 step.

Durante i test il potenziometro a cursore è stato collegato ad un multimetro digitale che ne rilevasse la resistenza elettrica in modo tale da dedurre la posizione relativa del pacchetto rivelatori.

Sono state quindi messe in relazione la resistenza del sensore di posizione e quindi la posizione con il numero di step.

I risultati ottenuti sono riportati in Figura 15 sia per il movimento forwards che backwards. Le misure mostrano che i punti misurati vengono interpolati in modo soddisfacente da una relazione lineare. Inoltre in entrambe le direzioni, la pendenza della retta di interpolazione è la medesima (-1.290) con buona approssimazione, Da osservare infine come nelle prove effettuate sia presente un'isteresi nella prima parte e nell'ultima parte del movimento che andrà quindi minimizzata. La presenza della ghiera filettata ha consentito di ridurre questo fenomeno di isteresi che tuttavia rimane ancora presente. Le ragioni dell'isteresi verranno indagate da futuri test. Lo scopo dei test sarà quello di identificarne la causa e capire quindi se il fenomeno è riconducibile intrinsecamente al motore o relativa al complesso.

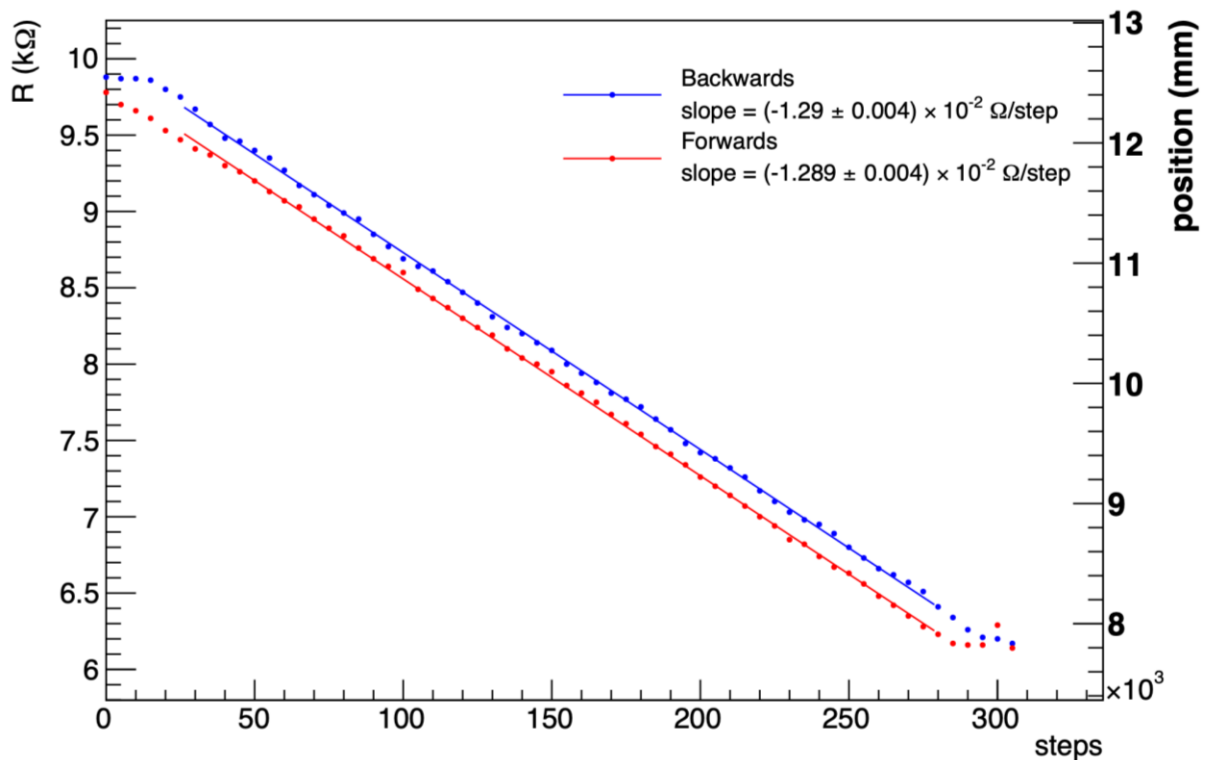


Figura 15 - Risultati prime prove sperimentali del sistema di movimentazione del pacchetto rivelatori del tracciatore PPS.

CONCLUSIONI

Le prove preliminari effettuate hanno confermato il funzionamento del sistema di movimentazione disegnato e prodotto all'INFN di Genova. Queste prove ci hanno inoltre permesso di evidenziare sperimentalmente alcuni elementi che è necessario migliorare come ad esempio la presenza di un'isteresi all'inizio ed alla fine del movimento che andrà quindi minimizzata con opportuni accorgimenti. Una delle possibili soluzioni sarà quella di aumentare il gioco con la ghiera al fine di agevolare l'inversione di spostamento.

Da sottolineare che questi test preliminari rappresentano solo una prima fase e sarà quindi necessario aggiungere ulteriori test sperimentali al fine di verificare il funzionamento del sistema di movimentazione in condizioni più prossime possibili a quelle di installazione reali.

In particolare, sarà quindi necessario testare sperimentalmente il sistema nelle posizioni di inserzione reali e nelle condizioni ambientali effettive.

Come precedentemente descritto, i tracciatori saranno posizionati da entrambi i lati del punto di interazione, prossimi alla linea di fascio grazie ai Roman Pot. Si troveranno quindi in una posizione simile a quella rappresentata in Figura 1 ed avranno, a seconda del lato in cui si troveranno, il motore piezoelettrico posizionato in alto o in basso. Dovranno di conseguenza essere effettuati alcuni test sperimentali a temperatura ambiente posizionando il tracciatore in entrambe le posizioni.

Dovendo inoltre valutare l'andamento del sistema nelle condizioni ambientali effettive (temperatura = -20 °C e livello di vuoto 10 mbar), si prevede di testarlo prima a bassa temperatura e pressione atmosferica utilizzando una camera ambientale, per poi passare successivamente ad un test completo nelle condizioni ambientali richieste dall'esperimento.

Ad ogni fase di test sperimentale seguiranno quindi aggiustamenti meccanici del prototipo, ove necessari.

Bibliografia

- [1] Albrow, M., et al. CMS-TOTEM precision proton spectrometer. *No. CMS-TDR-13. 2014.*