



ISTITUTO NAZIONALE DI FISICA NUCLEARE

Sezione di Genova

INFN- 24-04-GE
14 Marzo 2024

**TRACCIATORE A PIXEL DI SILICIO DEL PRECISION PROTON
SPECTROMETER DI CMS:
SVILUPPO DELLA NUOVA MECCANICA CON MOVIMENTAZIONE INTERNA,
PROCEDURE DI ASSEMBLAGGIO E TEST**

Adriano Bevilacqua¹, Stefano Cerchi¹, Antonello Mercenaro¹, Rosanna Puppo¹, Enrico Robutti¹, Cecilia Rossi¹, Andrea Trovato¹

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

SOMMARIO

Il presente lavoro descrive l'evoluzione del supporto meccanico e del sistema di movimentazione interna del tracciatore del Precision Proton Spectrometer (PPS) dell'esperimento CMS. Scopo di questo upgrade è quello di rendere più agevoli e meno rischiose le procedure di assemblaggio e installazione, e di migliorare le prestazioni del sistema di movimentazione interna. Vengono inoltre descritte le procedure di test utilizzate per l'installazione e la movimentazione, nonché quella per la misura di posizione dei sensori.

INTRODUZIONE

Il Precision Proton Spectrometer (PPS) è un rivelatore dell'esperimento CMS, installato lungo l'anello del Large Hadron Collider (LHC) del CERN, a circa 200 m dal punto di interazione di CMS, in entrambe le direzioni. Scopo di questo rivelatore è di ricostruire i protoni diffusi a piccolissimo angolo che emergono intatti nelle collisioni di LHC [1]. Dell'apparato fa parte una serie di tracciatori, costituiti da rivelatori a pixel in silicio con tecnologia 3D [2], e alloggiati in particolari strutture meccaniche dette "Pentole Romane" o "Roman Pot" (RP), che consentono di avvicinare i sensori nell'immediata prossimità (fino a circa 1,5 mm) del fascio di LHC.

A causa della vicinanza al fascio di protoni, la dose di radiazione ricevuta dai sensori e dai chip di lettura è molto alta in alcune zone, ma è distribuita in modo molto disuniforme (su un intervallo di oltre tre ordini di grandezza) sull'intera superficie. Questo fatto compromette la lettura corretta dei dati dall'intero sensore dopo tempi di presa dati piuttosto brevi, dell'ordine di una settimana. Per mitigare questo problema, la Sezione di Genova ha studiato, progettato, costruito, testato ed integrato un sistema di movimentazione del pacchetto rivelatori interna al RP che permette, tramite spostamenti periodici di circa 0,5 mm, di distribuire in modo più uniforme il danno da radiazione, prolungando significativamente la vita del rivelatore. Una prima versione, sviluppata durante l'ultima fase della presa dati di Run 2 (2016-2018) è documentata in [3]. La presente nota descrive l'evoluzione del sistema, utilizzato durante la presa dati in corso di Run 3 (da 2022), nonché le modifiche sostanziali apportate all'intero pacchetto rivelatori, al fine di migliorarne le operazioni di assemblaggio e installazione; sono inoltre brevemente descritte alcune delle nuove procedure di assemblaggio e di test utilizzate.

NUOVA STRUTTURA DI SUPPORTO

Procedura di montaggio

Il nuovo rivelatore consta sempre di due parti: la parte fissa che chiameremo “telaio” collegata alla flangia che chiude il RP tramite due colonnine, ed una parte mobile, il “pacchetto rivelatori”, che si muove sul fondo del RP tramite le stesse sfere portanti della vecchia versione.

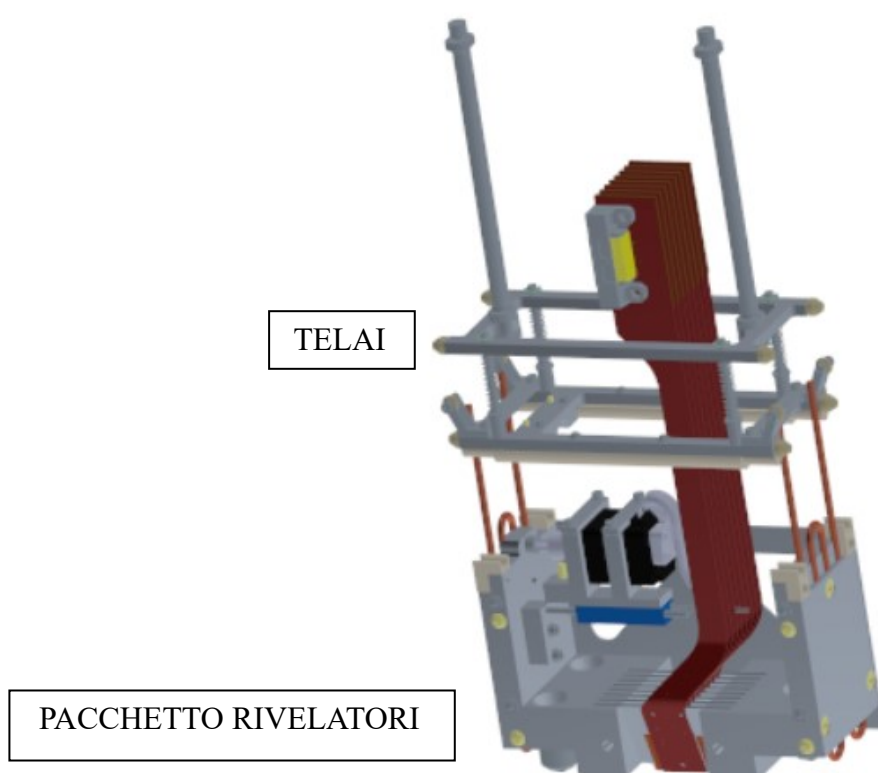


Fig. 1 – Rivelatore completo

Le molle e le colonnine che mantengono il pacchetto sul fondo del RP sono le stesse usate in precedenza.

Per leggere i sensori a pixel del rivelatore, sono stati utilizzati circuiti stampati di kapton flessibili (flex) il cui connettore all'altro capo è piuttosto ingombrante e complica quindi la fase di montaggio. Per agevolare il passaggio dei flex durante le operazioni di montaggio, è stata quindi eliminata la traversina centrale sull'incastellatura superiore, dove vengono avvitate le colonnine di ottone.

Sistema di inserimento

I test di inserzione del pacchetto nella configurazione definitiva hanno evidenziato alcune problematiche. L'inserzione del rivelatore è complicata: l'ingresso del RP si trova sul lato esterno dell'acceleratore, più difficilmente accessibile (vedi Fig.2 e 3), e l'inserzione è in orizzontale a sbalzo.



Fig. 2 – Inserzione in galleria al Cern



Fig. 3 – Dettaglio inserzione

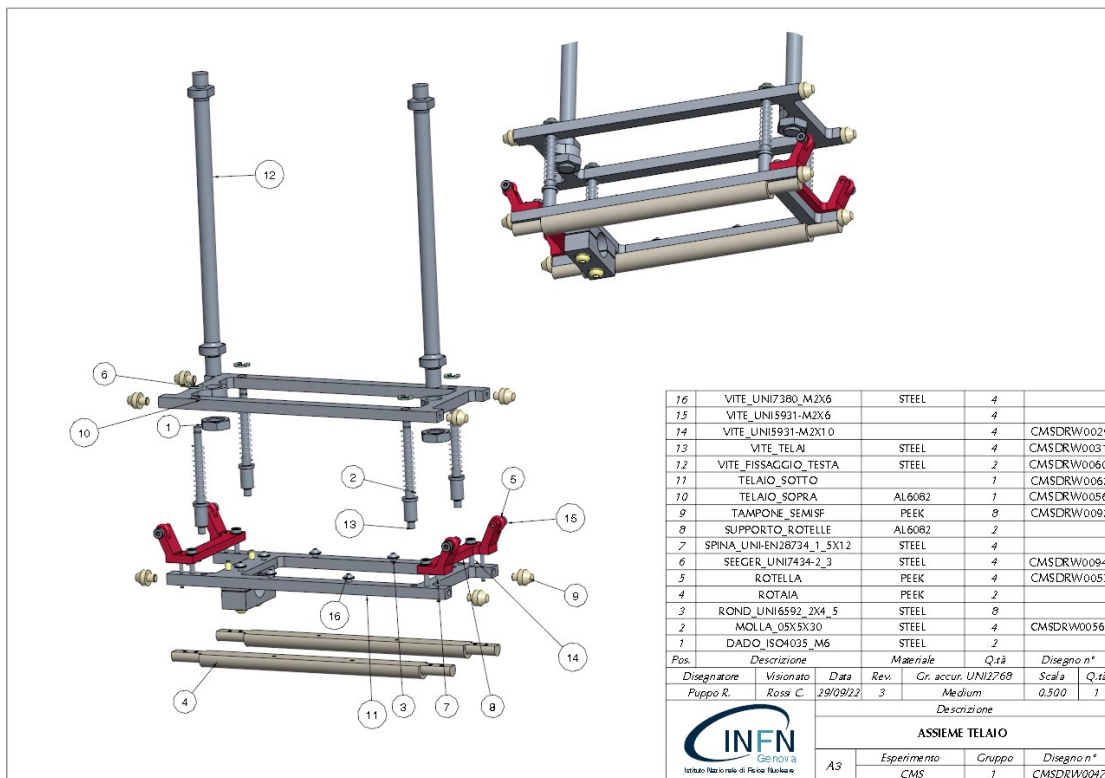


Fig. 4 – Assieme telaio

Per agevolare il più possibile questo lavoro, ed evitare che il pacchetto si intraversi durante l’inserzione, sono stati aggiunti due carrellini, denominati “supporto rotelle” che impediscono al rivelatore, in fase di inserimento nel RP, di bloccarsi, così come accadeva con il vecchio modello (v. Fig. 4 in rosso).

È stata anche modificata la forma dei tamponcini in PEEK posti alle estremità del telaio, la cui forma conico-sferica ne agevola l’inserzione e garantisce la precisione di posizione in quanto l’ingombro sinistra-destra tra le due coppie di supporti rotelle ha tolleranza nominale, mentre quello tra le due coppie di tamponcini è mantenuto leggermente sotto quota (0.05 mm). Questo evita una spinta non uniforme da parte delle molle.

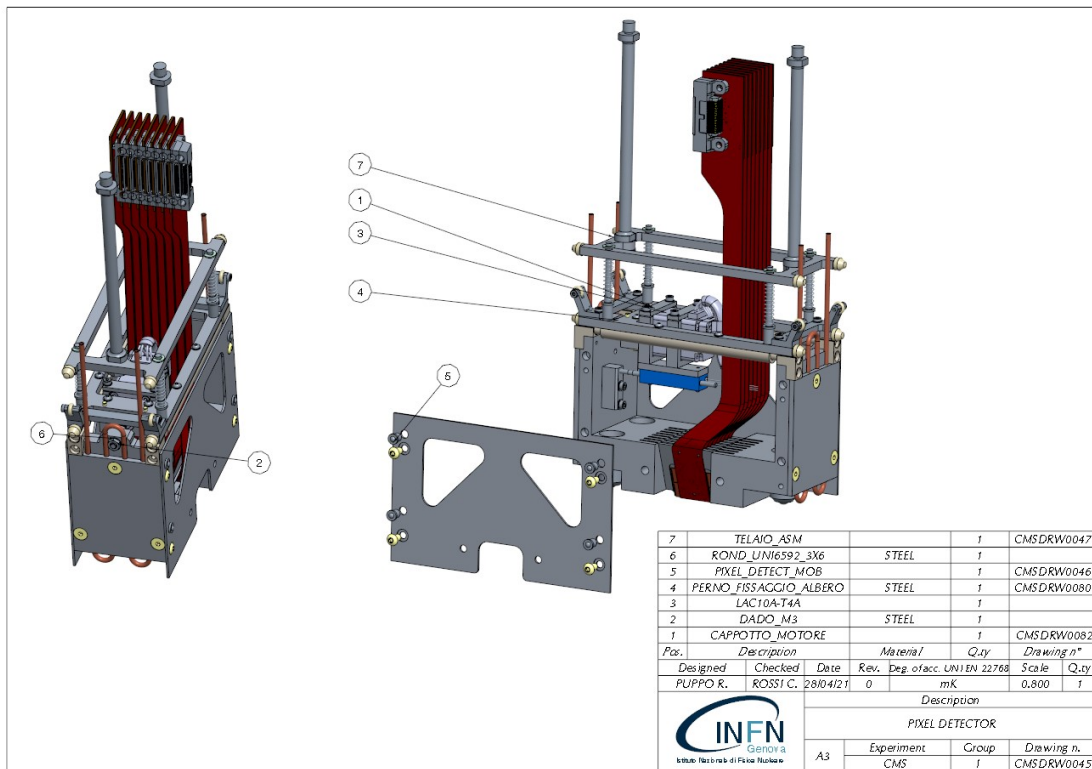


Fig. 5 – Pacchetto rivelatori

Test di inserzione

Tutte le prove di inserzione del pacchetto rivelatori e di funzionamento del sistema di movimentazione interna vengono anzitutto effettuate utilizzando un'apposita attrezzatura di test provvista di un RP con dimensioni nominali. Successivamente, dopo il trasporto al CERN, l'inserzione viene ripetuta in una riproduzione esatta dei RP dell'esperimento inclusa in una struttura che comprende il sistema di acquisizione dati completo e gli impianti per il vuoto e il raffreddamento.

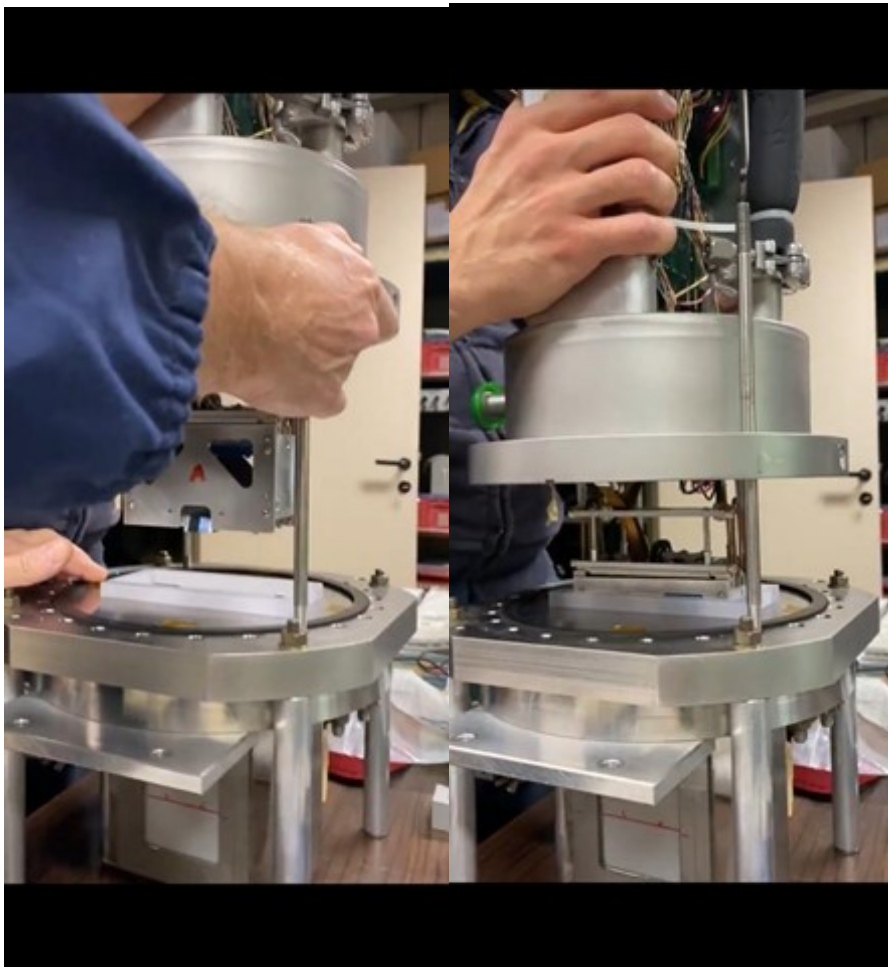


Fig. 6 – Inserzione nel RP di test meccanici

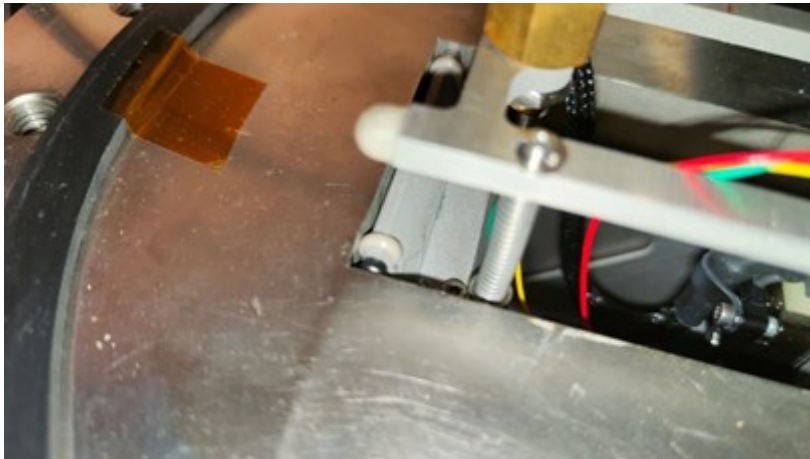


Fig. 7 – Dettaglio carrello durante l'inserzione nel RP

Poiché la posizione del rivelatore sul tubo a vuoto di LHC comporta un'installazione disagiata, è stato inoltre predisposto un carrello che simuli la configurazione reale, in modo da poter effettuare prove di inserzione realistiche (Fig.8).



Fig.8 - Prove di inserimento in posizione realistica

MOVIMENTAZIONE DEL PACCHETTO RIVELATORI

Nuovo sistema di movimentazione interna

Nella precedente versione con l'attuatore piezoelettrico, l'albero motore su cui si agganciava il pacchetto ruotava, creando alcuni problemi di attrito. Si era notato che i giochi lasciati per il collegamento tra albero e pacchetto generavano dell'isteresi. Inoltre, la distanza tra l'asse di spinta del motore e l'asse delle guide generava un indesiderato e problematico momento. Infine, la parte posteriore dell'albero motore sporgeva durante l'arretramento, avvicinandosi pericolosamente ai circuiti flex.

Queste problematiche ci hanno spinto a cercare una soluzione alternativa all'attuatore piezoelettrico.

La scelta è ricaduta su un attuatore lineare Zaber LAC 10°-T4A (in Fig. 9 le caratteristiche), un attuatore compatto, il cui albero trasla, offrendo così un collegamento semplice e preciso.

Specification	Value
<u>Microstep Size (Default Resolution)</u>	0.0238125 μm
<u>Travel Range</u>	10 mm
<u>Accuracy (unidirectional)</u>	10 μm
<u>Repeatability</u>	< 1.5 μm
<u>Backlash</u>	< 2 μm
<u>Maximum Speed</u>	14 mm/s
<u>Minimum Speed</u>	0.000015 mm/s
<u>Speed Resolution</u>	0.000015 mm/s
<u>Encoder Type</u>	None
<u>Peak Thrust</u>	40 N
<u>Linear Motion Per Motor Rev</u>	0.3048 mm
<u>Motor Type</u>	Stepper (2 phase)
<u>Motor Rated Current</u>	240 mA/phase
<u>Motor Winding Resistance</u>	20.4 ohms/phase
<u>Inductance</u>	5 mH/phase
<u>Default Resolution</u>	1/64 of a step
<u>Mechanical Drive System</u>	Precision lead screw
<u>Mounting Interface</u>	3/8-32 nut or 3/8"(9.5mm) shank
<u>Weight</u>	0.076 kg

Fig. 9 – Caratteristiche motore Zaber

Questa opzione ha portato molteplici vantaggi. Anzitutto abbiamo eliminato ogni problema di attrito dovuto alla rotazione dell'albero dell'attuatore piezoelettrico, poiché l'albero motore Zaber trasla. Essendo compatto, il suo posizionamento all'interno del rivelatore è stato più semplice e funzionale: siamo quindi riusciti a ridurre in modo sostanziale il braccio tra l'asse di spinta del motore e l'asse delle guide, minimizzando in modo efficiente il momento.

Il corpo motore è fissato tramite blocchetti in alluminio lavorati con precisione, spinati, per garantirne la posizione, ed avvitati al telaio. La testa dell'albero motore è stata sostituita con un perno filettato che va a calettarsi sulla parete del pacchetto ed è a questa

fissato con un dado (Fig. 10). Questa operazione garantisce il movimento del pacchetto, in quanto questo è fissato solidalmente al motore.

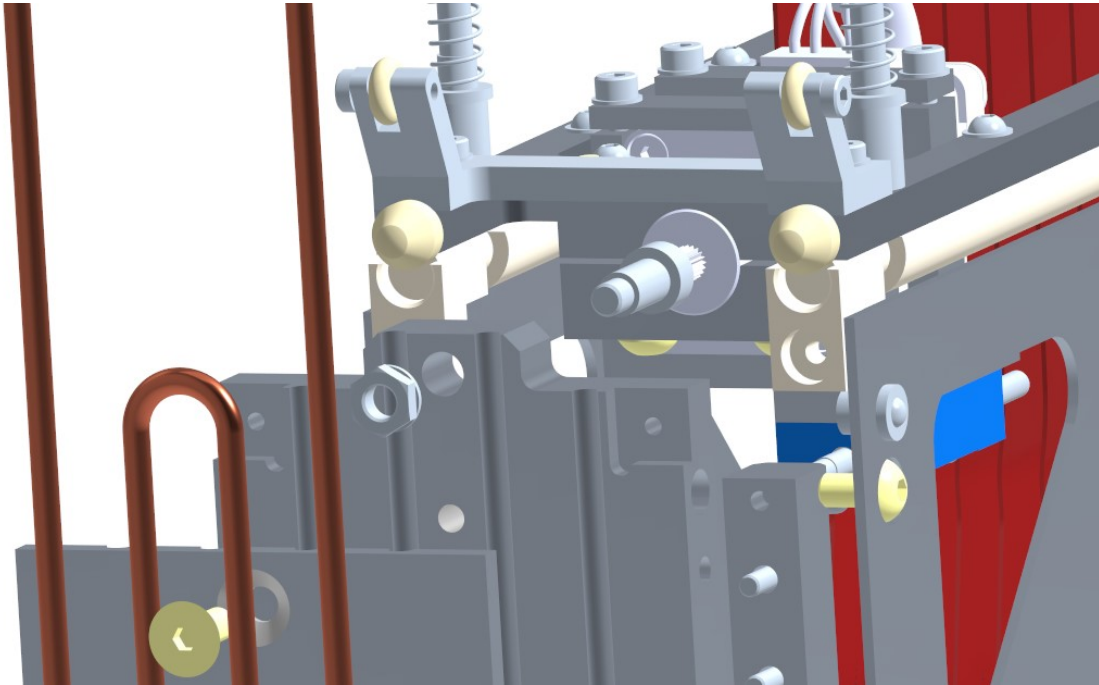


Fig. 10 – Dettaglio fissaggio motore

Al corpo motore è fissato il potenziometro a cursore usato in precedenza, ed il gambo dello stesso è avvitato tramite un blocchetto alla parete del pacchetto.

Test di movimentazione

Numerosi test sono stati effettuati per verificare la funzionalità del sistema di movimentazione interna, a partire da quelli più elementari per le funzionalità di base, fino ad arrivare a quelli in condizioni che simulano fedelmente la configurazione di presa dati. Tra questi:

- movimentazione libera a temperatura ambiente;
- movimentazione libera a temperatura operativa (-25°C);
- movimentazione all'interno di modello del volume del RP;
- movimentazione in RP di test dopo il montaggio del pacchetto sulla flangia di chiusura, a temperatura ambiente e a temperatura operativa.

Il controllo della movimentazione è stato effettuato da PC sia direttamente con il software fornito da Zaber sia, per i test finali, con l'intero sistema (hardware + software) sviluppato per la movimentazione nel tunnel di LHC. Per tutti i pacchetti assemblati è stato possibile verificare la rispondenza alle specifiche richieste in termini di precisione e intervallo di movimentazione.

IL PACCHETTO RIVELATORI

Assemblaggio dei moduli

L'assemblaggio dei moduli del rivelatore, che includono i sensori al silicio e l'elettronica di front-end, avviene in quattro fasi che prevedono incollaggi e saldature, e l'utilizzo di una serie di attrezzature realizzate appositamente dal servizio di disegno meccanico e dal servizio di officina meccanica della Sezione.

Si esegue anzitutto l'incollaggio, con silicone fluido, del sensore a una piastrina di alluminio che funge da supporto meccanico e dissipatore di calore, e si attendono i tempi per l'asciugatura; dopodiché si utilizza una pellicola biadesiva 3M appositamente sagomata per incollare il circuito stampato (PCB) flessibile all'altra faccia del sensore. In entrambi i casi viene applicata una pressione il più possibile uniformemente distribuita con l'uso di appositi pesi calibrati.

Si completa la parte meccanica dell'assemblaggio incollando il chip di front-end readout (TBM) sul PCB.

Infine, si realizzano le connessioni, tramite wire-bonding, tra PCB e sensore, e tra PCB e TBM.



Fig. 11 – Modulo rivelatore assemblato

Misura di posizione dei sensori con CMM

La geometria nominale del pacchetto rivelatori prevede che, una volta installato il pacchetto nel RP, il bordo dei sensori si trovi a 250 μm dal fondo. Per poter ottenere questa configurazione con buona precisione (entro 50 μm), è importante poter misurare preventivamente la posizione del bordo dei sensori rispetto alle tre sfere portanti: l'altezza delle sfere è regolabile individualmente, in modo da poter calibrare il parallelismo e la distanza dei sensori dal fondo in base alle misure effettuate.

La CMM usata per le misure è una DEA Mistral con tastatore, integrata con un misuratore ottico che consente misure di alta precisione senza contatto (Fig.12). Le specifiche principali sono le seguenti:

- Intervallo di misura = 10000 μm
- Risoluzione assiale = 450 nm
- Accuratezza = 900 nm



Fig.12 – Tastatore e misuratore ottico

La misura consiste nella scansione col sensore ottico di un'area rettangolare che comprende le sfere ed i sensori. (Fig.12 e 13)

Il file dati, così prodotto dall'applicativo PCD_Automation di nostra realizzazione, viene successivamente processato utilizzando il pacchetto software ROOT del CERN per restituire graficamente le posizioni delle sfere e dei sensori e determinare i piani di appoggio sul fondo e di involuppo dei sensori. In base alla geometria rilevata si interviene sulle viti di regolazione delle sfere per impostare la distanza sfere-sensori richiesta.

A seguito della regolazione viene effettuata una seconda scansione di verifica.

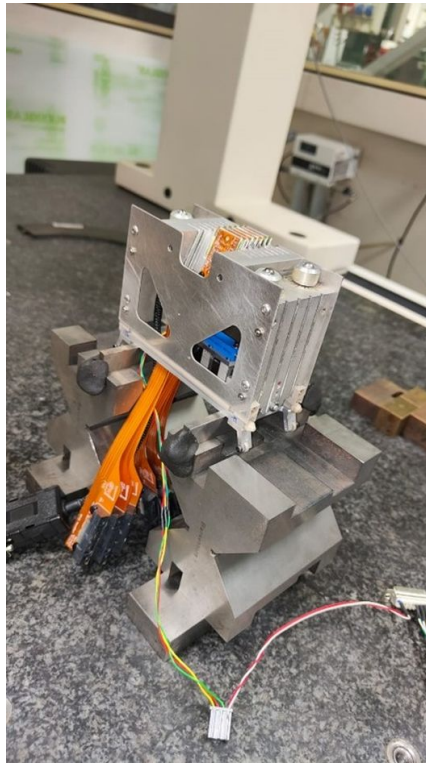


Fig.13 – Pacchetto rivelatori su CMM

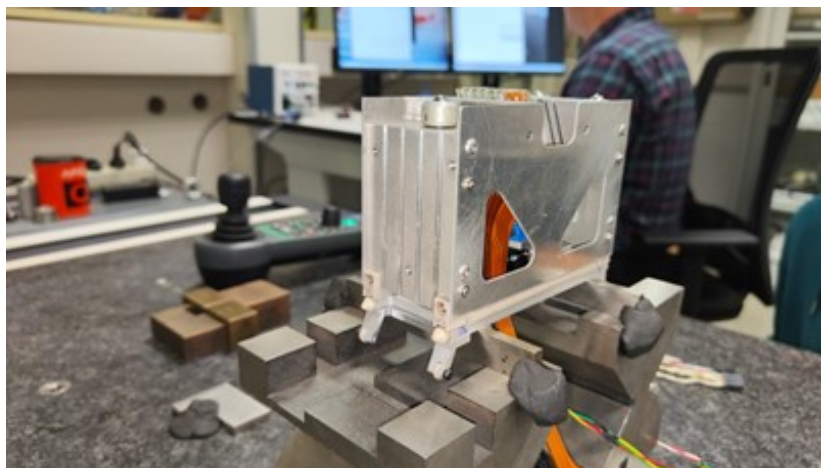


Fig.14 – Dettaglio rivelatore su CMM

CONCLUSIONI

Nell'inverno/primavera 2022 sono stati assemblati, testati e installati su LHC 4 nuovi rivelatori del tracciatore di PPS. Tra dicembre 2022 e febbraio 2023 i pacchetti sono stati aggiornati con il nuovo sistema di inserzione, o sostituiti con nuovi pacchetti. Sono state prodotte le strutture di supporto complete per un totale di 8 pacchetti rivelatore, in modo da poter disporre di un set in grado di sostituire rivelatori problematici o con prestazioni degradate da danni per la dose di radiazione ricevuta. I nuovi rivelatori del tracciatore a pixel di PPS stanno regolarmente prendendo dati, integrati con il resto di CMS, dall'inizio del Run 3 di LHC.



Fig.15 – Installazione di uno dei rivelatori sul LHC

Bibliografia

- [1] M. Albrow et al., "CMS-TOTEM Precision Proton Spectrometer - Technical Design Report", *CMS-TDR-013*, 2014.
- [2] CMS Collaboration, "Development of the CMS detector for the CERN LHC Run 3", *arXiv:2309.05466*.
- [3] S. Cerchi et al., "Sistema di movimentazione del tracciatore a pixel del Precision Proton Spectrometer di CMS", nota *INFN-20-05/GE*, <http://www.lnf.infn.it/sis/preprint/getfilepdf.php?filename=INFN-20-05-GE.pdf>, 2020.