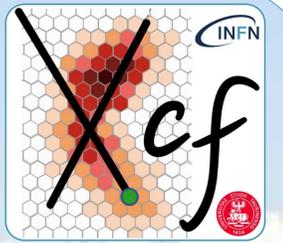




Supporto allo sviluppo di nuovi rivelatori con la X-ray Calibration Facility (XCF)



Finanziato dall'Unione europea NextGenerationEU

Ministero dell'Università e della Ricerca

Italiadomani

NODES

Spoke1

A. Frassà

M. Aglietta, R. Bonino, A. Gorgi, L. Latronico, S. Maldera, M. Marengo, S. Tugliani



Istituto Nazionale di Fisica Nucleare SEZIONE DI TORINO

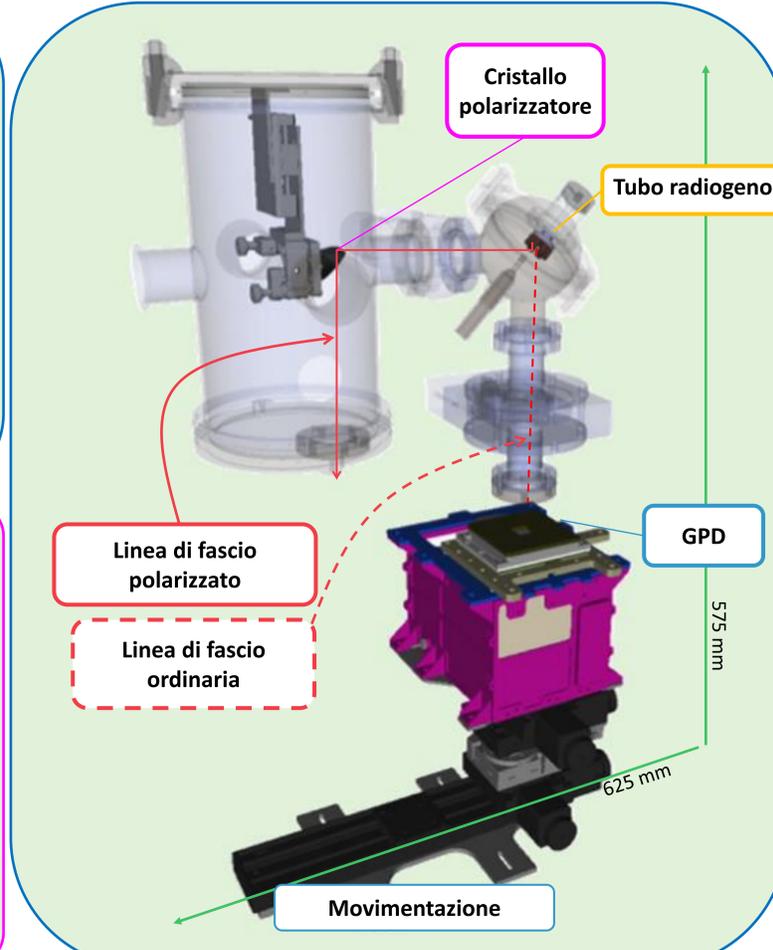
La X-ray Calibration Facility (XCF) disponibile presso l'Università di Torino è progettata per caratterizzare rivelatori di raggi X grazie al suo setup custom. In particolare, dispone di tubi a raggi X che forniscono 2 linee di fascio con energie comprese tra 0.1 e 10 keV; uno dei due fasci è polarizzato per diffrazione di Bragg su cristalli. La facility dispone di una sorgente di ^{55}Fe ed è dotata di un Silicon Drift Detector e di un CMOS ZWO ASI-294c, utilizzati per il monitoraggio dei fasci X.

XCF è in grado di caratterizzare i Gas Pixel Detector (GPD), rivelatori installati a bordo della missione spaziale IXPE, che hanno la capacità di misurare la polarizzazione dei raggi X incidenti. La facility è impiegata per monitorare le prestazioni dei GPD e rilevarne le variazioni nel tempo. Inoltre, è utilizzata per studiare il design di futuri detector per raggi X, come dimostrato nella ricerca sulla trasparenza delle finestre in Berillio.

X-RAY CALIBRATION FACILITY

La X-ray Calibration Facility, XCF, è concepita per testare, caratterizzare e qualificare rivelatori per misurare energia, direzione di arrivo, posizione e polarizzazione dei raggi X incidenti con elevata sensibilità, come ad esempio i Gas Pixel Detector (GPD).

- 2 tubi a raggi X
- Sistema da vuoto ($\sim 2 \times 10^{-6}$ mbar)
- Movimentazioni meccaniche
- Cristalli polarizzatori abbinati agli anodi del tubo radiogeno
- Sorgente di ^{55}Fe



SORGENTE DI RAGGI X in laboratorio

Le 3 sorgenti di radiazione sono una sorgente di ^{55}Fe e due tubi a raggi X (McPherson Mod. 642 e Micro X-ray Tube). Il primo tubo presenta un multi-anodo che permette di generare fasci di diversa energia nel range 0.1-10 keV (oltre alla componente di Bremsstrahlung, fino a 10 keV); il secondo invece è un tubo sigillato con anodo in Mo.



McPherson 642



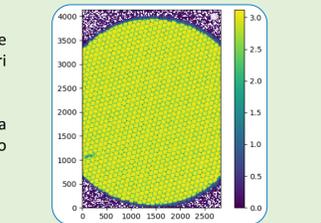
MX-r tube

MONITORAGGIO DEI FASCI X



Il CMOS consente di ottenere immagini spaziali oltre agli spettri energetici.

La figura sulla destra mostra un'immagine della linea di fascio non polarizzata.



XCF dispone di 2 detector per monitorare i fasci in uscita: un Silicon Drift Detector e un CMOS ZWO ASI-294c. Quest'ultimo nasce come fotocamera per astrofotografia, ma è stato riadattato per misurare raggi X rimuovendo il vetro protettivo.

CRISTALLI POLARIZZATORI

Il fascio di raggi X orizzontale viene polarizzato tramite diffrazione di Bragg su opportuni cristalli scelti in base all'energia dei fotoni primari.

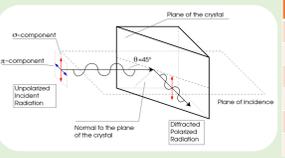
Diffrazione di Bragg $E = \frac{nhc}{2d \sin \theta}$

- E: energia di fotone
- d: passo reticolare
- n: ordine di diffrazione
- θ : angolo di incidenza

Il grado di polarizzazione della radiazione diffratta è $P = \frac{1-k}{1+k}$ con $k = \frac{R_{\parallel}^2}{R_{\perp}^2}$ rapporto fra le riflettività integrate della componente R parallela e R perpendicolare al piano di incidenza.

Radiazione totalmente polarizzata: $k=0$ e $\theta = \theta_{\text{Bragg}} = 45^\circ$.

Anodo	Energia [keV]	Cristallo	θ_{Bragg}
Molibdeno Mo	2.293 $L\alpha$	InSb 111	46.28°
Rodio Rh	2.697 $L\alpha$	Ge 111	44.87°
Palladio Pd	2.839 $L\alpha$	Si 111	44.12°
Titanio Ti	4.511 $K\alpha$	Si 220	45.71°
Ferro Fe	6.40 $K\alpha$	Si 400	45.6°
Nichel Ni	7.478 $K\alpha$	Ge 422	45.86°



GAS PIXEL DETECTOR

I Gas Pixel Detector sono attualmente utilizzati come detector unit dell'esperimento Imaging X-ray Polarimetry Explorer (IXPE), esperimento su satellite che misura la polarizzazione dei raggi X da sorgenti astrofisiche.

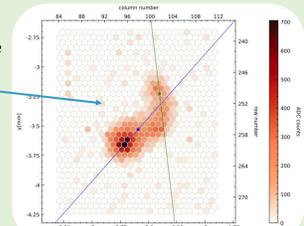
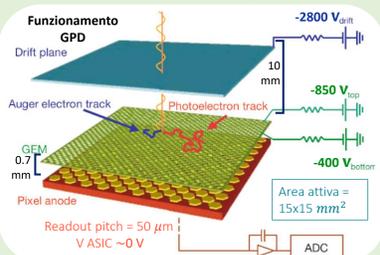
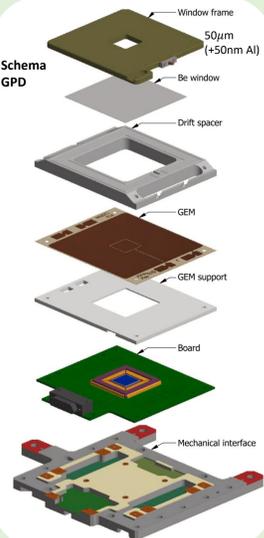
- 1) I fotoni entrano nel volume del detector tramite la finestra di Berillio e vengono quindi assorbiti nel gas, Dimetil Etere ($(\text{CH}_3)_2\text{O}$, a pressione 800 mbar, interagendo per effetto fotoelettrico.
- 2) All'interno del gap di gas, un campo elettrico ortogonale al piano del detector permette il drift degli elettroni della ionizzazione primaria verso il Gas Electron Multiplier (GEM), lo stadio di guadagno.
- 3) La carica viene raccolta sull'ASIC di readout, che agisce come anodo (array di pixel).

L'informazione sulla polarizzazione è ricavata su base statistica a partire dalla distribuzione azimutale delle direzioni di emissione dei fotoelettroni, ricostruite analizzando le proiezioni delle tracce sul piano di readout.

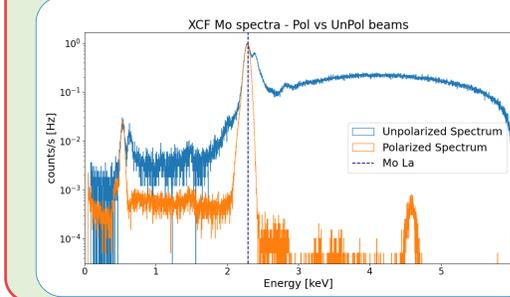
Sensibilità di un polarimetro:

- efficienza quantica ϵ .
 - fattore di modulazione μ : risposta ad una radiazione 100% polarizzata linearmente.
- Minimum Detectable Polarization: minimo grado di polarizzazione che può essere rivelato entro un certo livello di confidenza:

$$MDP \propto \frac{1}{\mu\sqrt{E}} \quad MDP_{99\%} \approx \frac{4.29}{\mu\sqrt{N}}$$



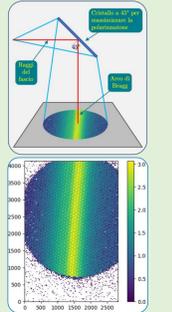
FASCIO POLARIZZATO



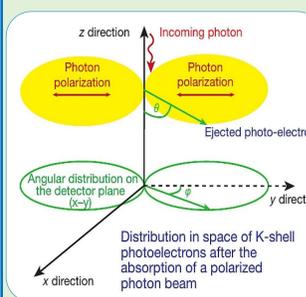
Il cristallo polarizzatore seleziona solo i fotoni eventi energia che soddisfa la condizione di Bragg.

Pertanto è verificata la relazione: $E \propto \cos(\theta)^{-1}$ e quindi si ottiene un arco di Bragg sul piano del detector.

La riga spaziale più intensa corrisponde all'energia del picco di emissione del Molibdeno.



MISURA DELLA POLARIZZAZIONE CON GPD



Sezione d'urto differenziale dell'effetto fotoelettrico per radiazione polarizzata:

$$\frac{d\sigma}{d\Omega} \propto \cos^2 \phi$$

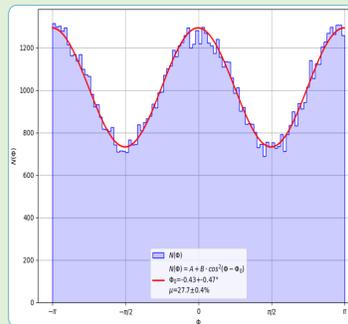
Il numero di eventi integrato risulta essere modulato secondo la legge

$$N(\phi) = A + B \cos^2(\phi - \phi_0)$$

Angolo di polarizzazione ϕ

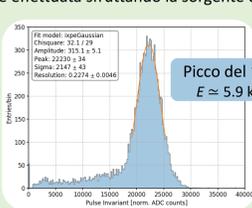
Fattore di modulazione

$$\mu = \frac{B}{2A + B} \sim 28\% @ 2.7 \text{ keV}$$



MISURA DELLE PERFORMANCE DEI GPD NEL TEMPO

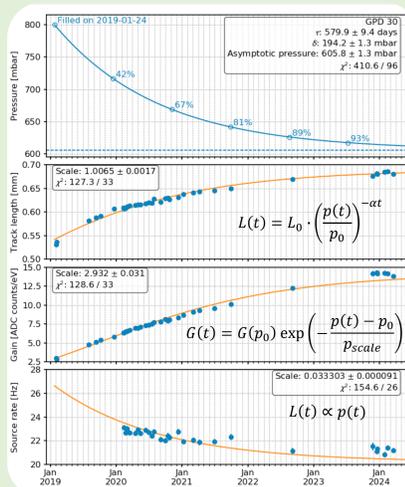
Viene effettuata sfruttando la sorgente di ^{55}Fe



- La pressione interna dei GPD diminuisce nel tempo modificandone le performance:
- aumenta la track-length degli elettroni
 - aumenta il guadagno
 - diminuisce il rate di eventi

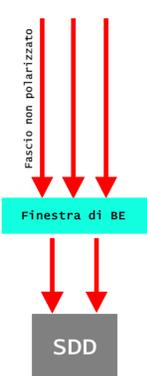
Misurando queste 3 quantità è possibile ricavare la pressione interna al GPD.

$$p = p_0 - \delta \cdot \left(1 - e^{-\frac{t}{\tau}}\right)$$



MISURA DI TRASPARENZA DI FINESTRE IN BERILLIO

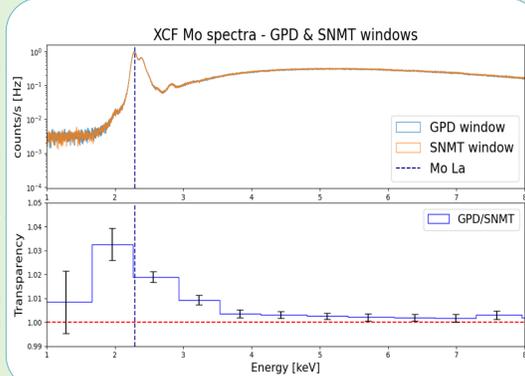
Nell'ambito dello sviluppo di futuri detector per raggi X, XCF è attualmente impiegato nella misura della trasparenza di diversi modelli di finestre in Berillio. Oltre alla finestra nominale presente nei GPD è stata testata una seconda finestra di produzione cinese della Shuoyao New Material Technology (SNMT).



Si è posizionata una finestra per volta sull'asse del fascio ed è stato utilizzato l'SDD per la misura dello spettro in energia.

Dal confronto tra i 2 spettri si nota una variazione del $3.3 \pm 0.7\%$ a basse energie, in prossimità del picco (Mo La, $E \approx 2,293 \text{ keV}$), mentre il loro rapporto è compatibile con 1 a energie maggiori.

Con la stessa tecnica e sfruttando il CMOS sono in corso misure di uniformità spaziale delle finestre.



Ringraziamenti:

Questo report fa parte del progetto NODES che ha ricevuto un finanziamento dal MUR - MAC2.1.5 del PNRR con l'accordo di sovvenzione n. ECS00000036.

Andrea Frassà andrea.frassa@unito.it

