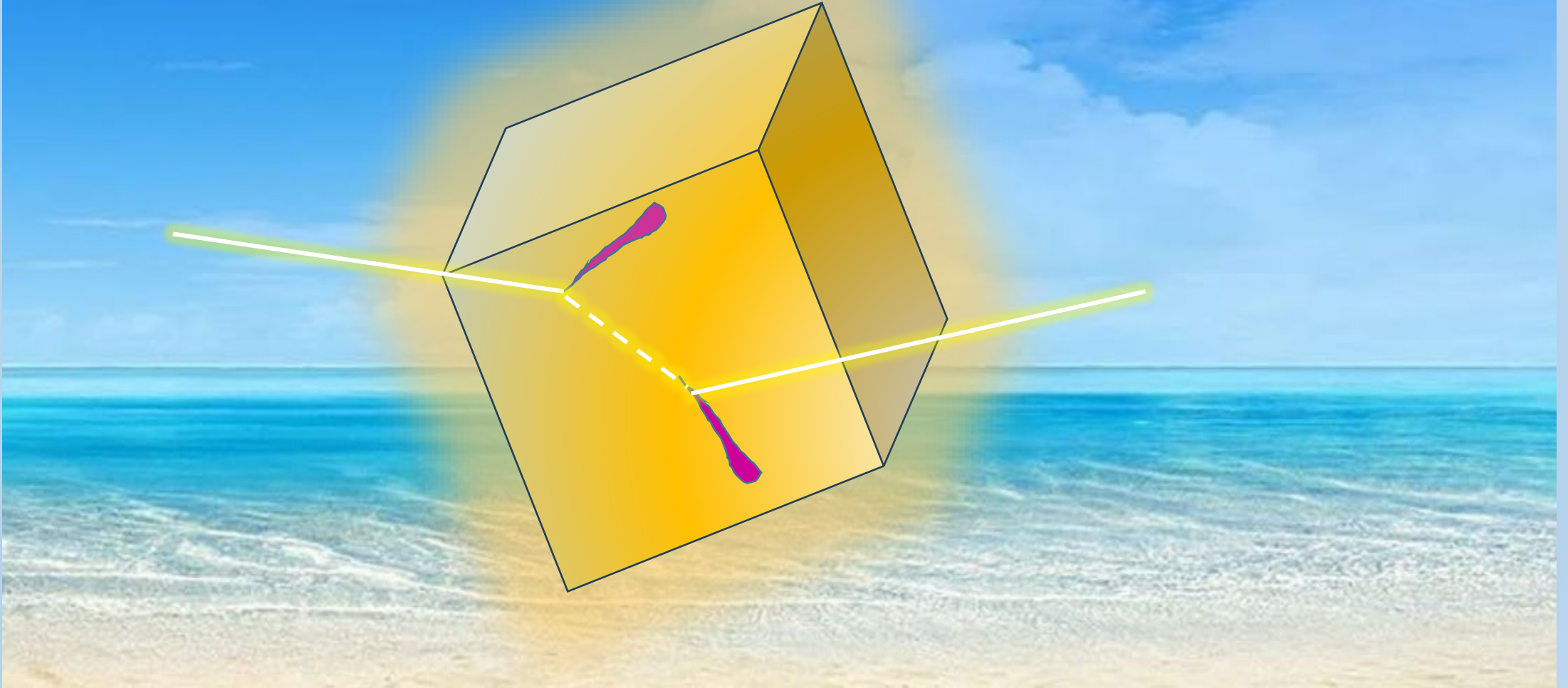


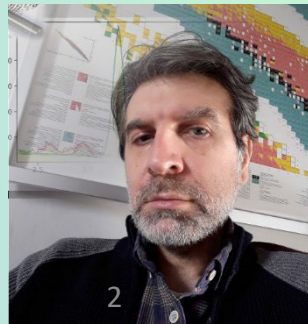
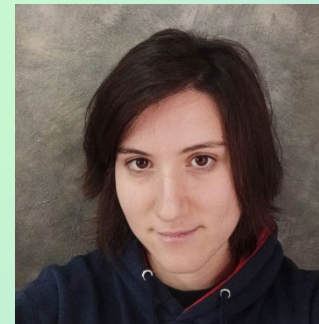
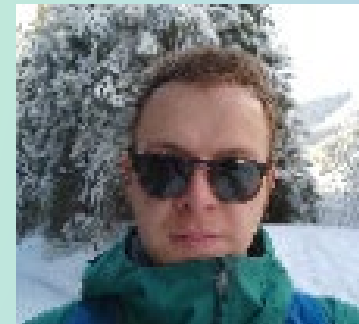
RIPTIDE: Recoil Proton Imaging Detector



Bologna, luglio 2024,
Roberto spighi on behalf of RIPTIDE Collaboration

Il gruppo (3.8 FTE)

Il gruppo si espande con
l'ingresso di Triestino Minniti,
UniRoma 2 (FTE da valutare)



Laureati/ndi



Nonostante sia un progetto giovane abbiamo già 4 laureandi (2 si stanno laureando e 2 già laureati)

NEW: al prossimo concorso di dottorato a Bologna, una borsa riservata a studio di immagini (applicato anche a Riptide) → **altri FTE**

Lavoro svolto



MISURE EFFETTUATE IN LABORATORIO

Caratterizzazione del sensore e dell'ottica

- ☐ sensibilità
- ☐ rumore
- ☐ Linearità
- ☐ Segnali dalle sorgenti
- ☐ Campo visivo e profondità di campo



MC E ANALISI DEI DATI SIMULATI

Stato del codice di simulazione

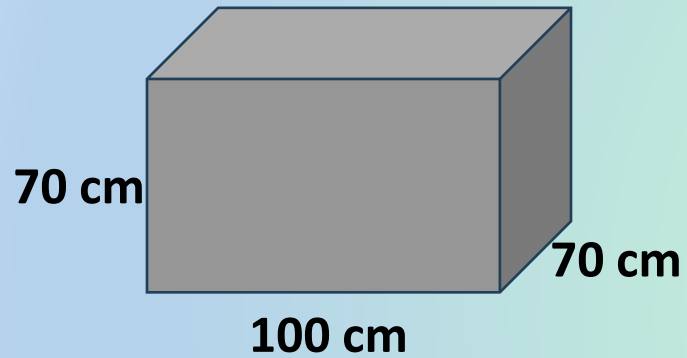
Studio di vari metodi di Ricostruzione

- ☐ Fit lineari
- ☐ Principal Component Analysis (PCA)
- ☐ Trasformata di Hough
- ☐ Metodo dei momenti

Misure effettuate in laboratorio

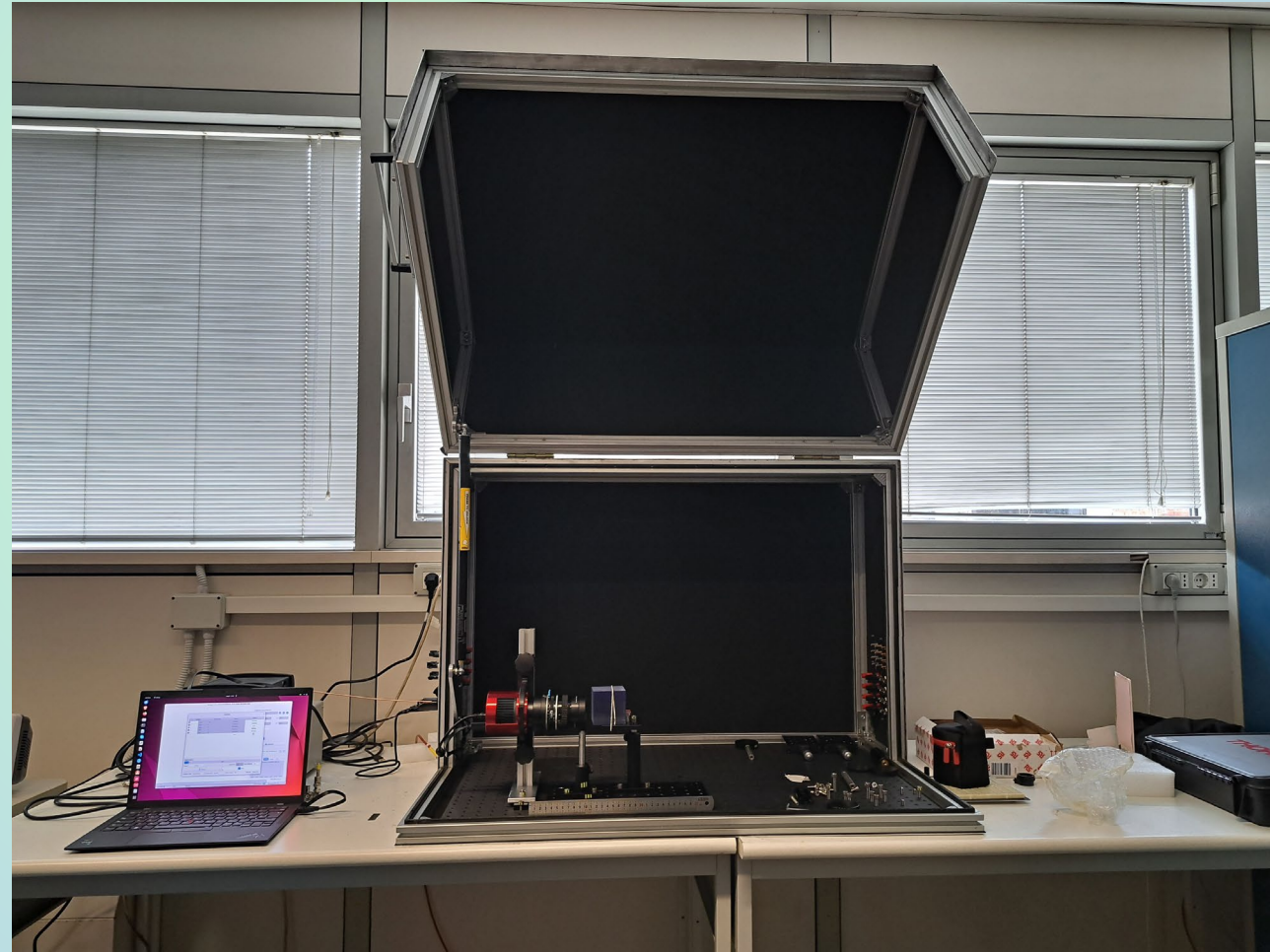
La camera oscura

Progettata e realizzata con il servizio di Officina dell'INFN di Bologna una camera buia per realizzare le misure



Presenti tutti i tipi di connessioni
interne-esterne

L'interno equipaggiato con
diverse strutture ottiche
acquistate dalla ThorLabs

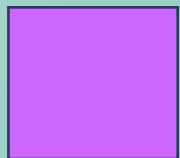


La camera
presenta un
buio completo



SENSORE

Camera ASI 533 Pro
Sensor: Sony IMX533CMOS



Max Frame Rate 20/s



basso, vorremmo KHz



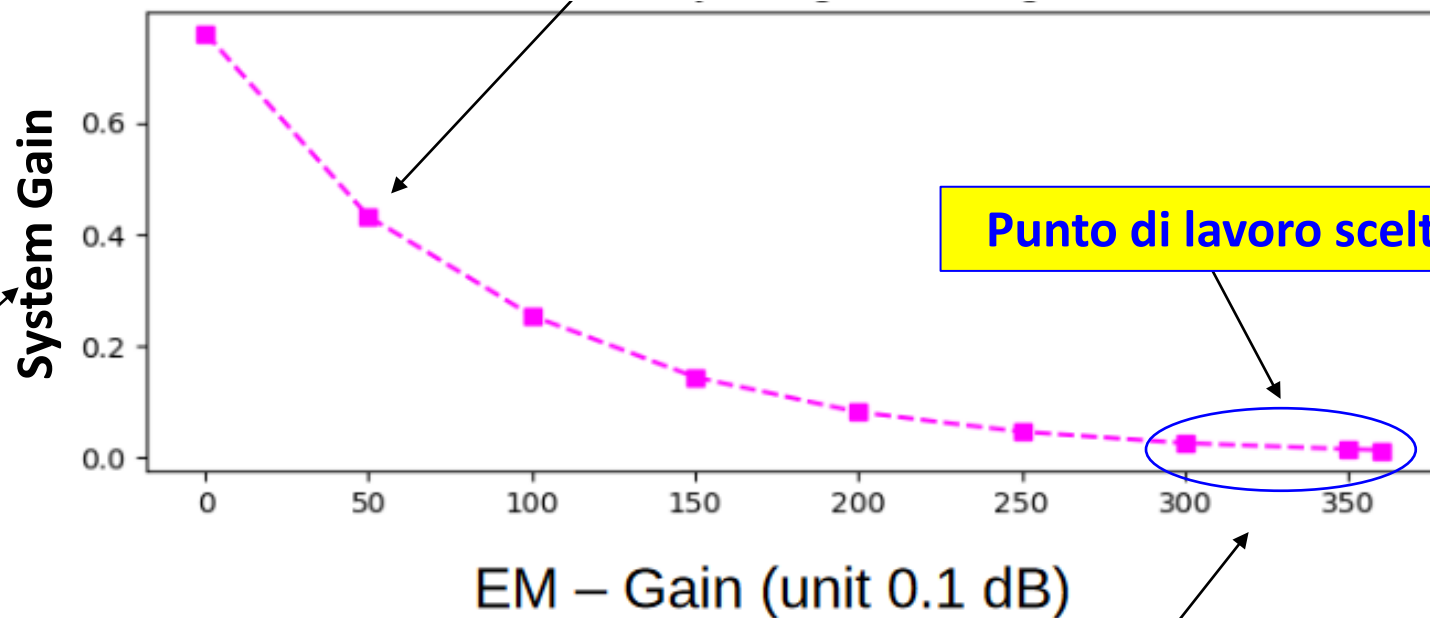
Non è il sensore finale

System Gain: numero di
elettroni per livello di grigio

Numero di livelli di grigio: $2^{16} = 64000$

Caratterizzazione del sensore: sensibilità

Esempio: 0.4 è il numero di elettroni per
avere un livello di grigio



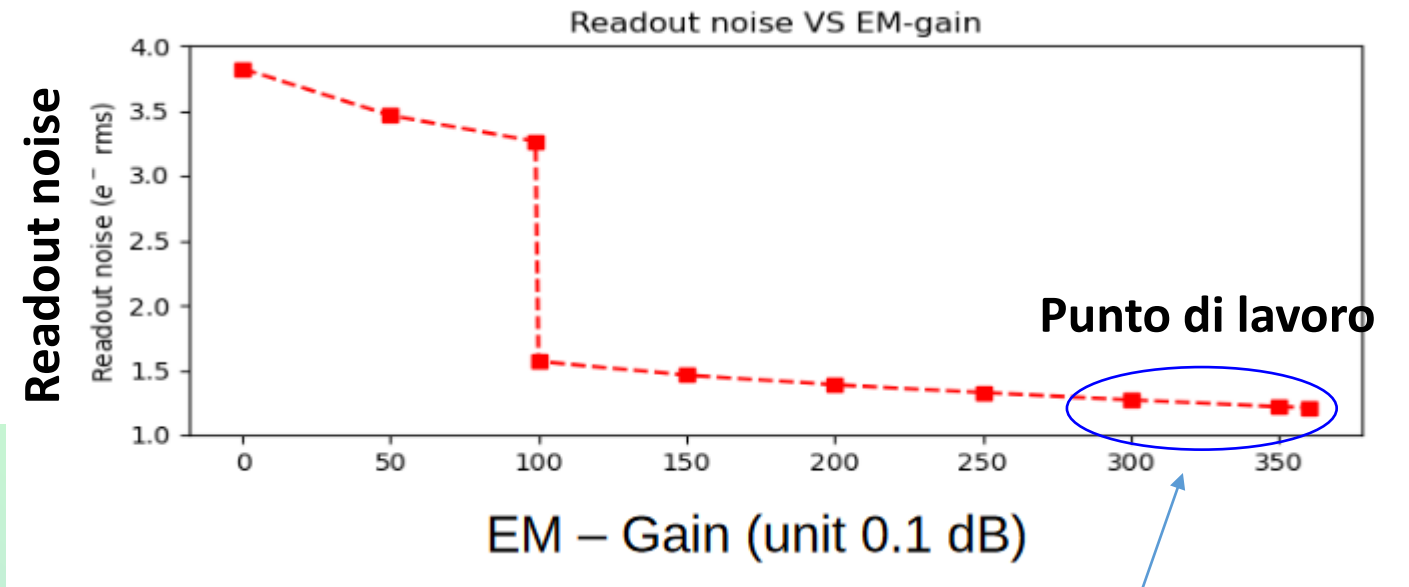
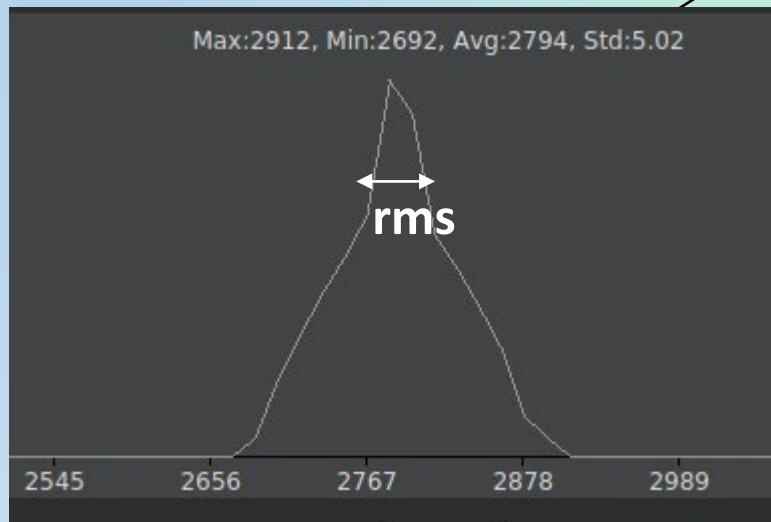
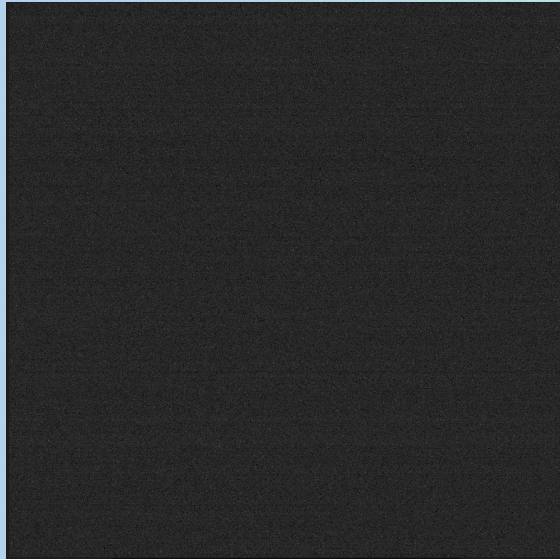
EM (Electromagnetic) Gain: amplificazione del numero di fotoelettroni

Minore è il numero, maggiore è la sensibilità

Ad es: $1 / 0.02 = 50 \rightarrow$ con u fotoelettrone salti di 50 livelli di grigio

Caratterizzazione del sensore: rumore

Acquisizione fatta completamente al buio

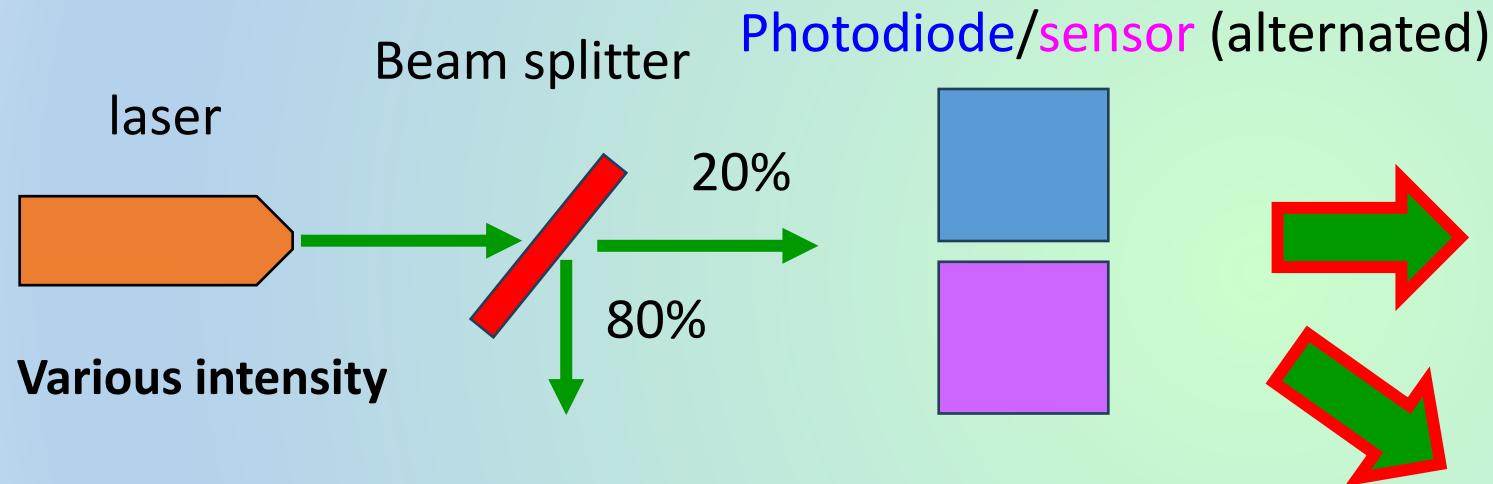


Rumore elettronico: $1.3 e^- \rightarrow \pm 1.3$

La dark current è trascurabile perché dipende dalla temperatura, ma il sensore lavora raffreddato (-30° rispetto alla temperatura esterna)

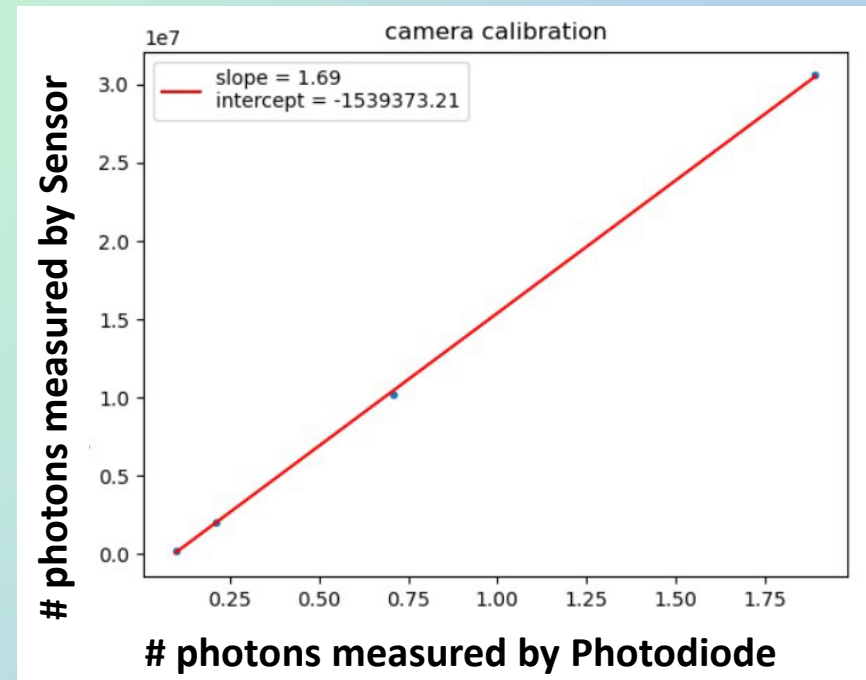
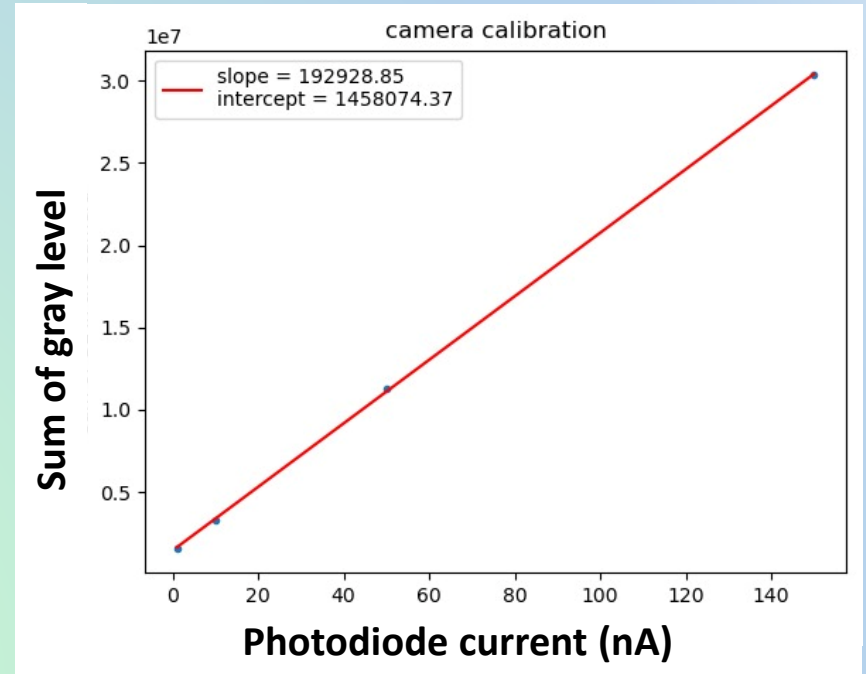
Caratterizzazione del sensore: linearità della risposta

Misura effettuata in parallelo con un fotodiodo calibrato



- ❑ Verificata la linearità
- ❑ Valutato il numero di fotoni emessi dal laser
 - ❑ $(\sum \text{gray levels}) * \text{System Gain} * \text{Quantum Efficiency}$

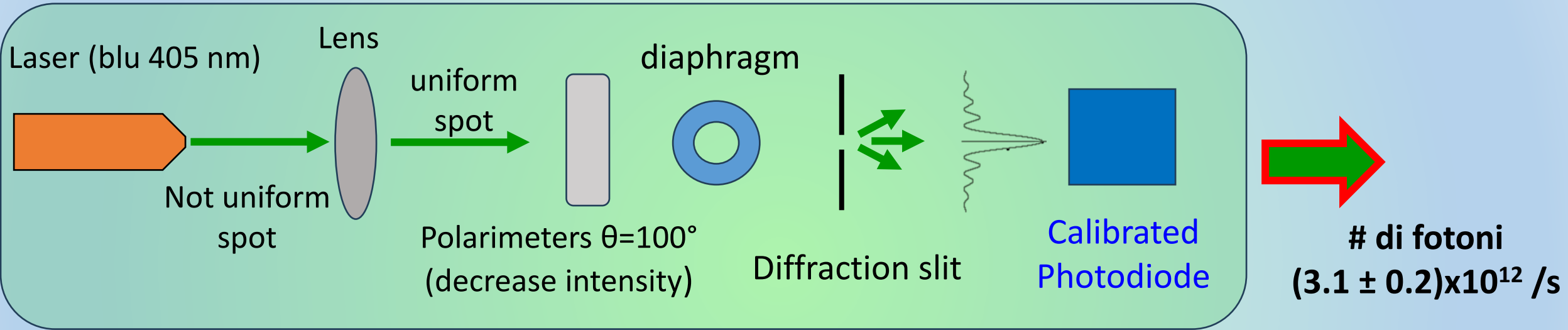
Il laser non scendeva a deboli intensità (risultava instabile) → necessario scendere in intensità per vedere la minima luce rivelata



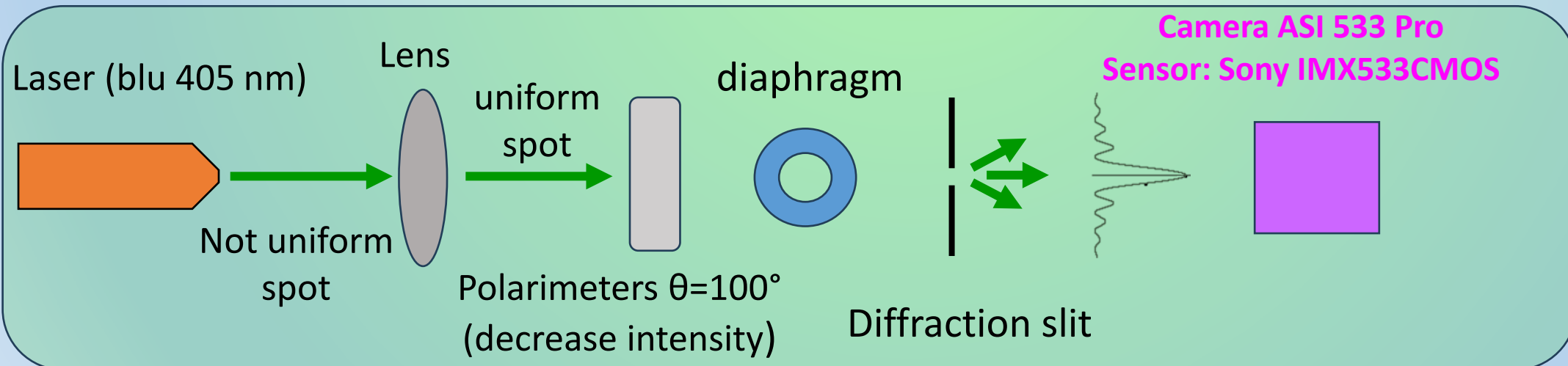
Caratterizzazione del sensore: sensibilità

Scendere in intensità per verificare quanti fotoni servono per vedere un segnale: mettiamo una fenditura in modo da fare una figura di diffrazione e misurare il segnale nell'ennesimo picco.

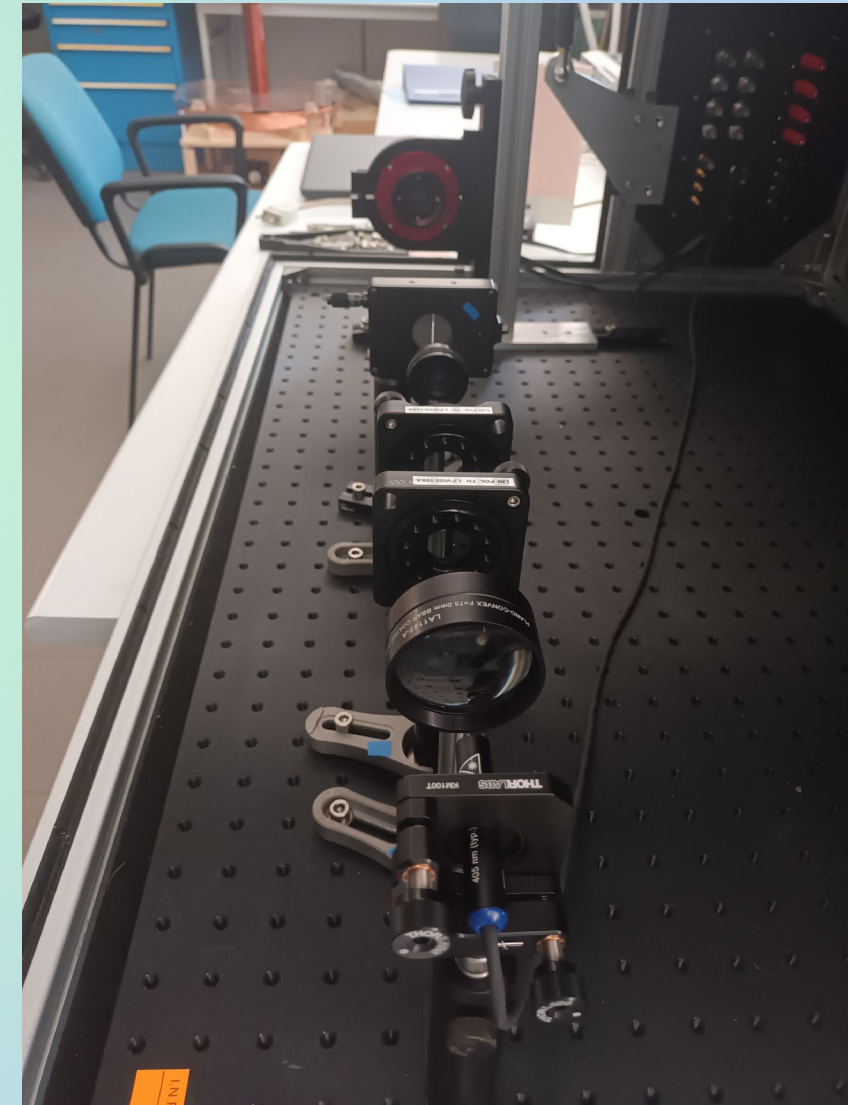
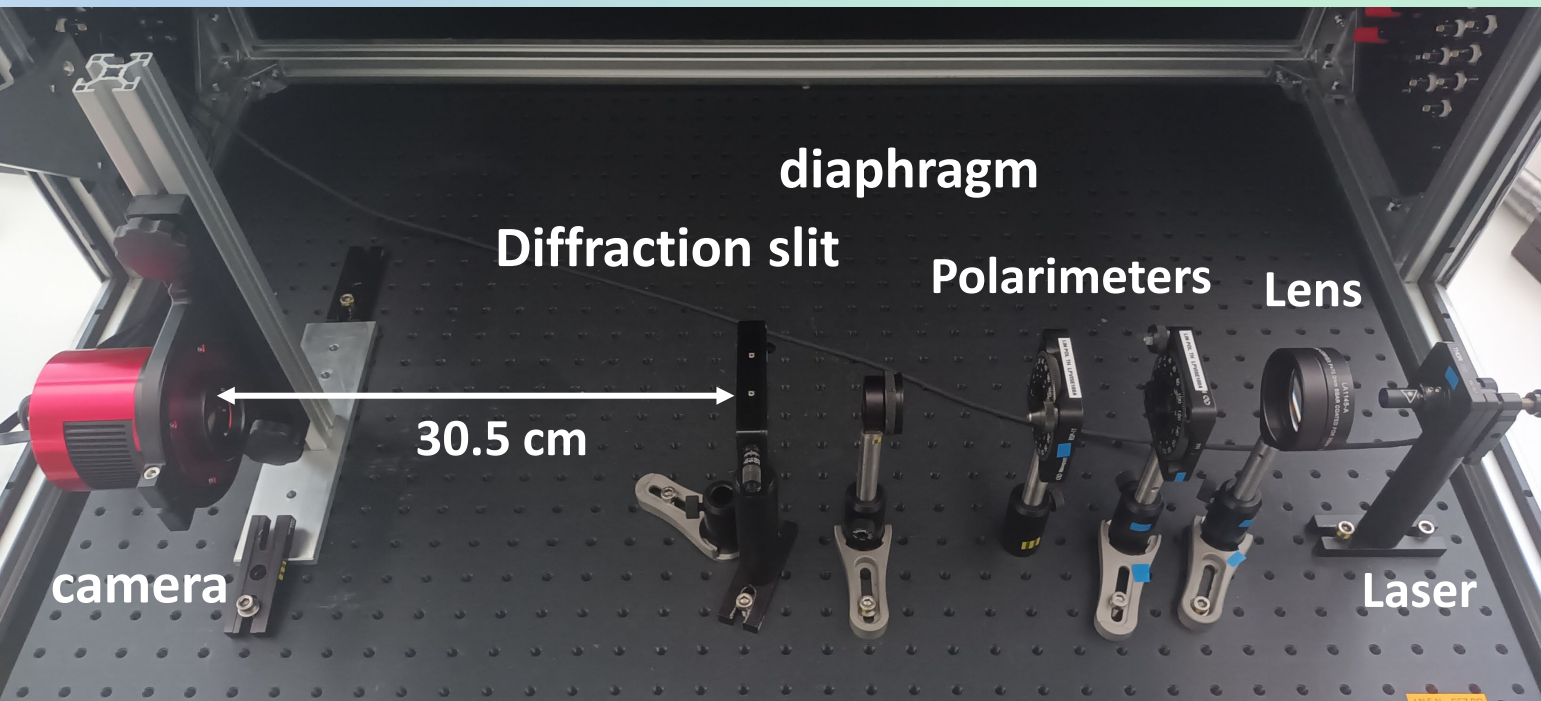
SETUP



Stesso SETUP, ma con il nostro sensore



SETUP per la misura di diffrazione

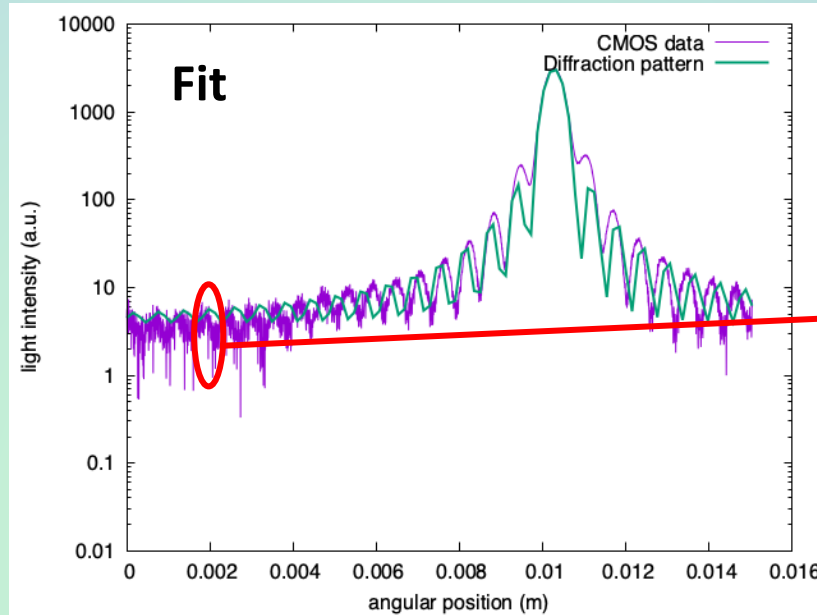


Tempo di esposizione 10^{-3} s

Figura di diffrazione

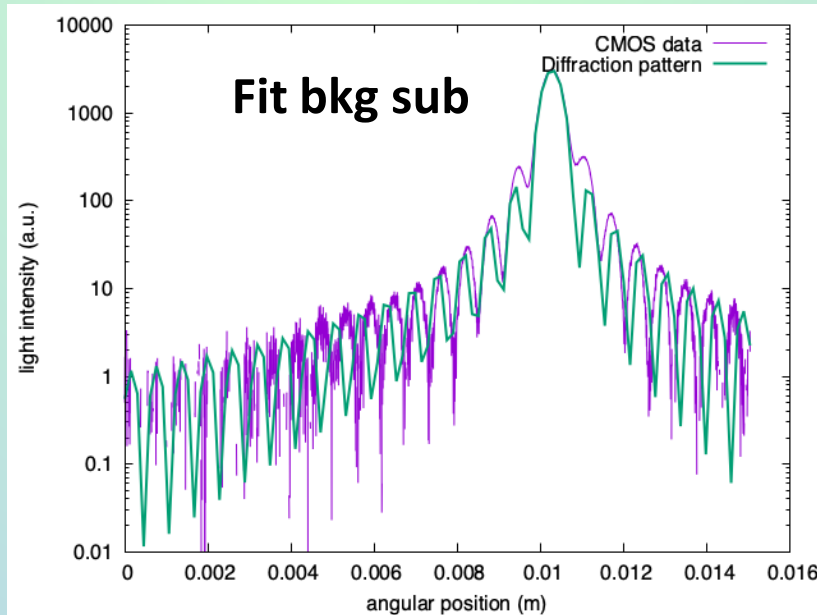
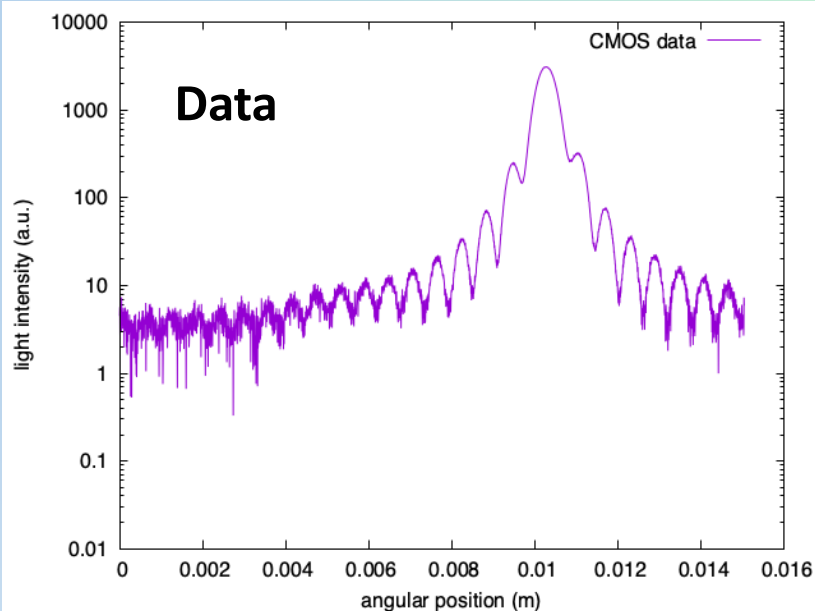
pixelx= 1,2 5, 10, 20, 30, 50

pixel = (pixelx x 1200)



Ultimo picco visibile

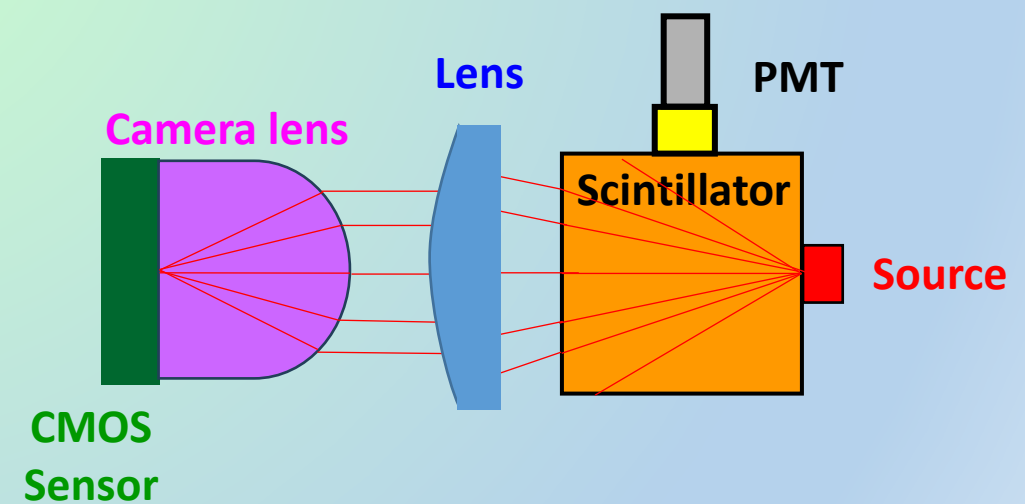
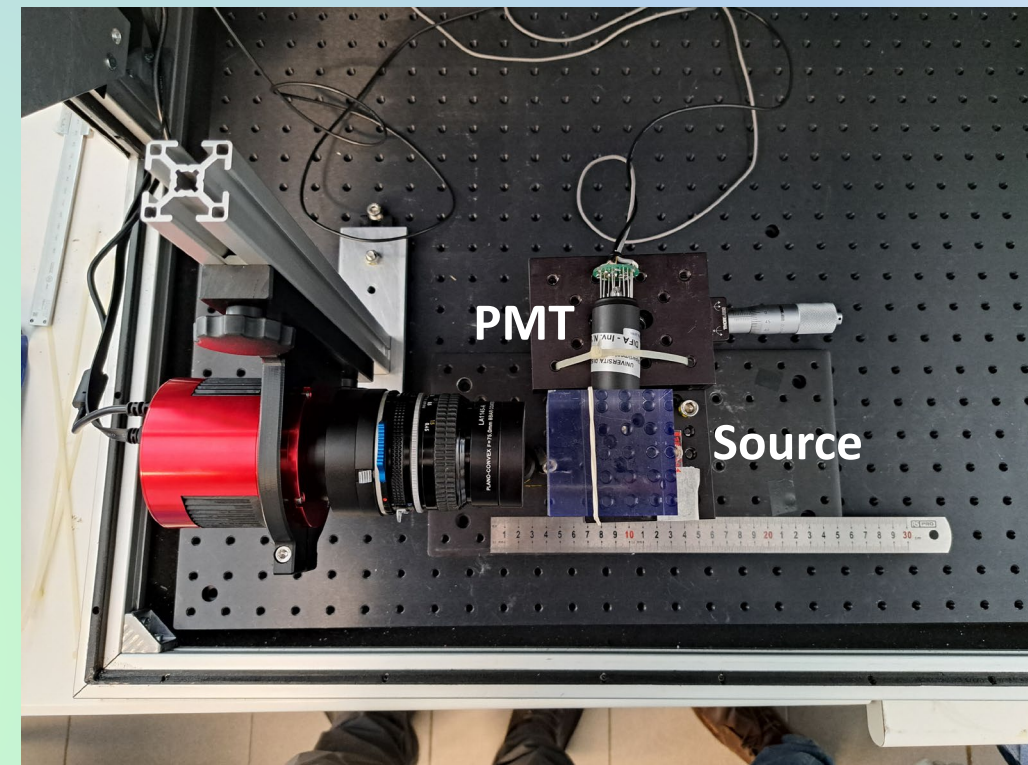
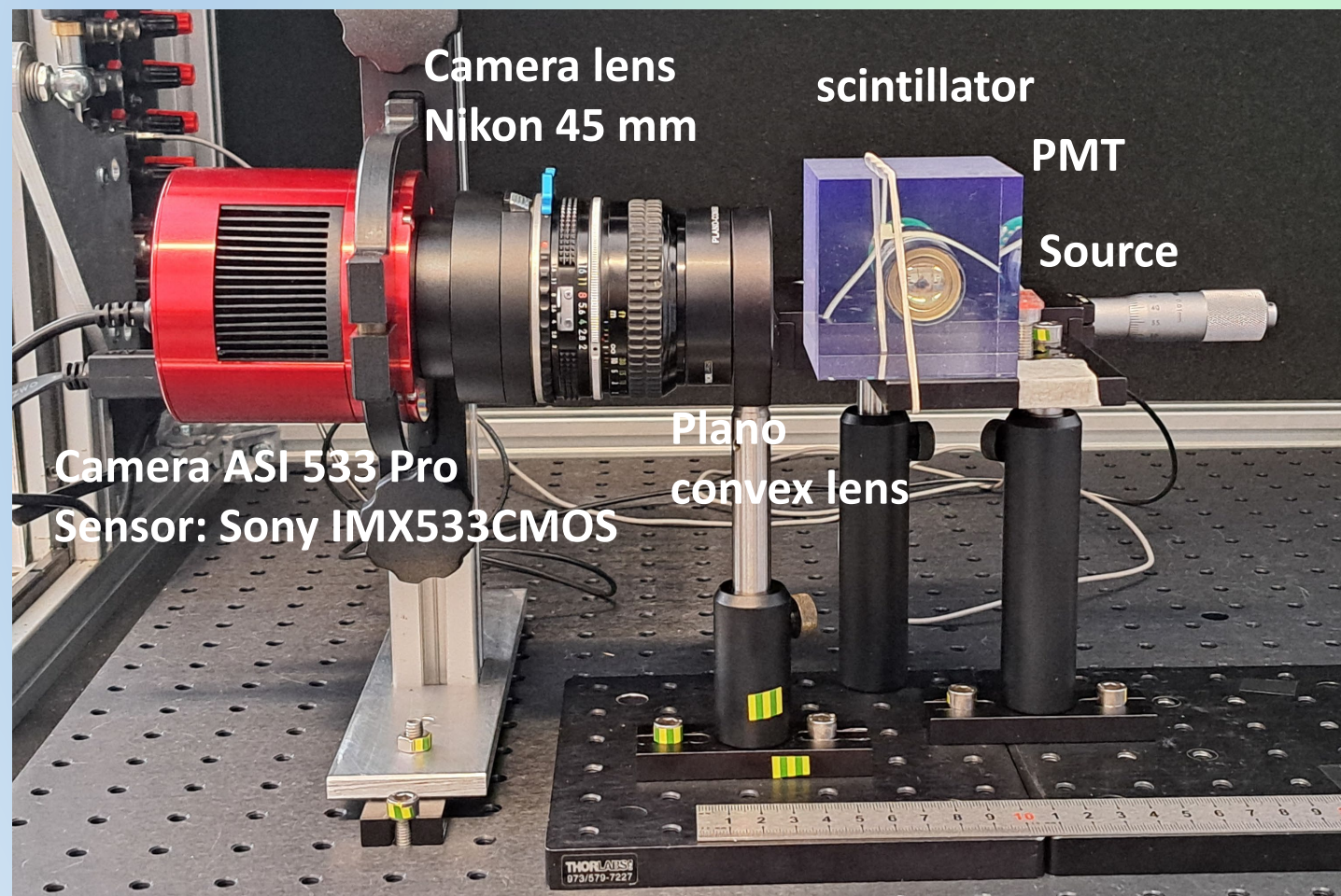
(6 ± 3) fotoni/pixel (2 gray level)



0.3 gray level per fotone

necessario un intensificatore di
segnale (MCP) → vorremmo
100 gray level per fotone

Misura con le sorgenti



Americio → decadimento alfa (5.443 and 5.486 MeV)

$\text{Am}(Z=95, A=241) \rightarrow \text{Np}(Z=93, A=237)$

Attività della sorgente 370 KBq iniziali

Angolo solido ~ 0.057% (non facile da valutare)

Vita media 432.2 anni



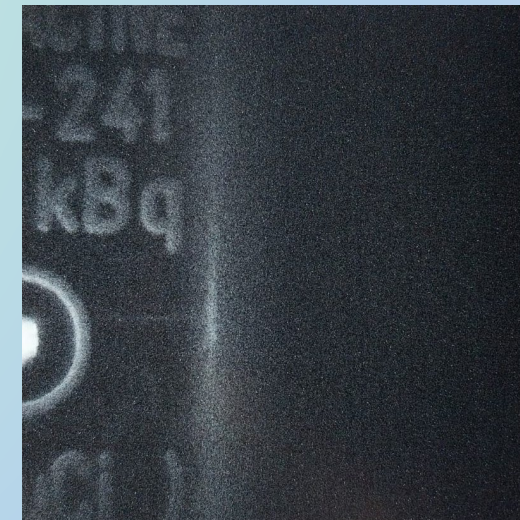
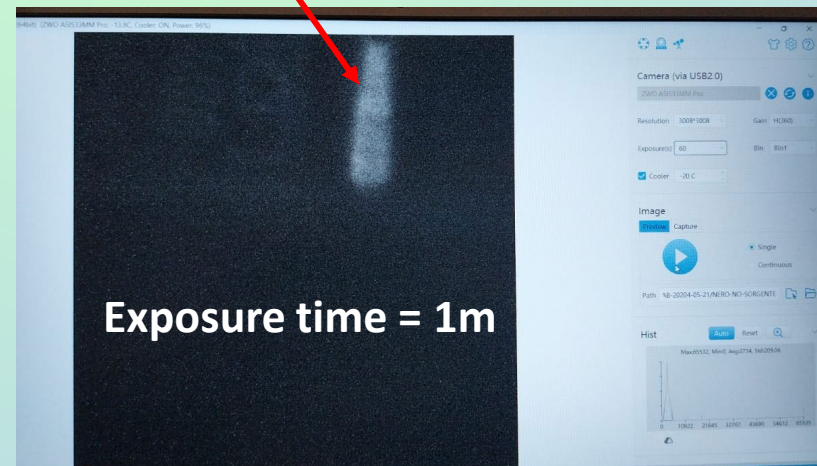
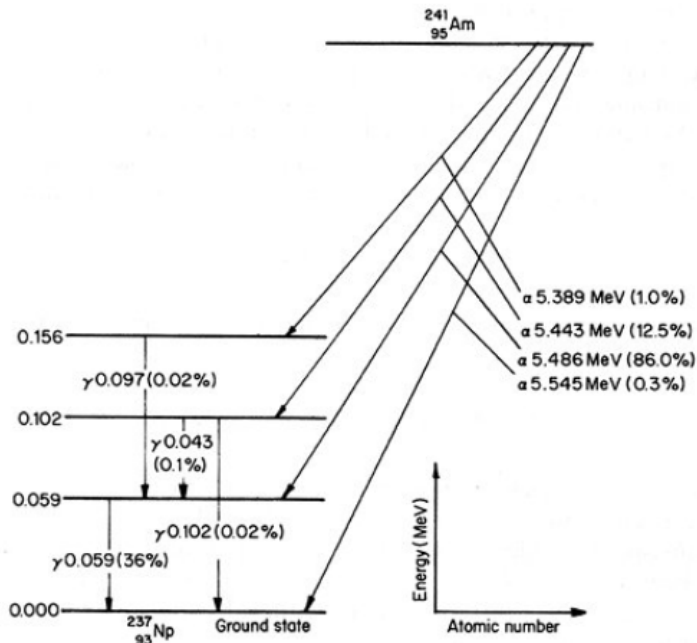
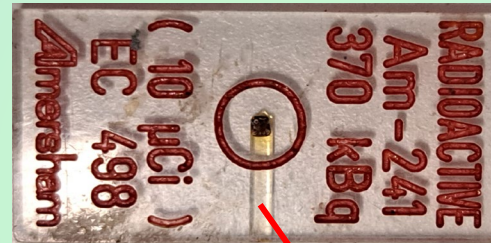
Produzione di alfa e gamma

Sorgente di alfa

Signal produced by α and γ

Exposure time = 1s

1 mm



Sorgente di gamma

Cesio 137 → decadimento beta (0.51 and 1.17 MeV)

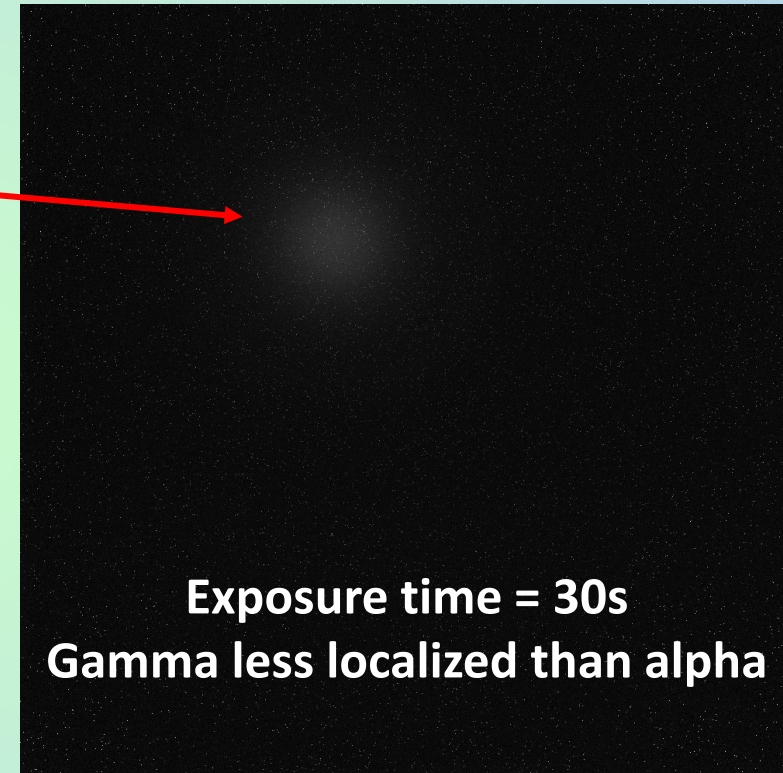
$\text{Cs}(Z=55, A=137) \rightarrow \text{Ba}^*(Z=56, A=137) + \text{beta}$



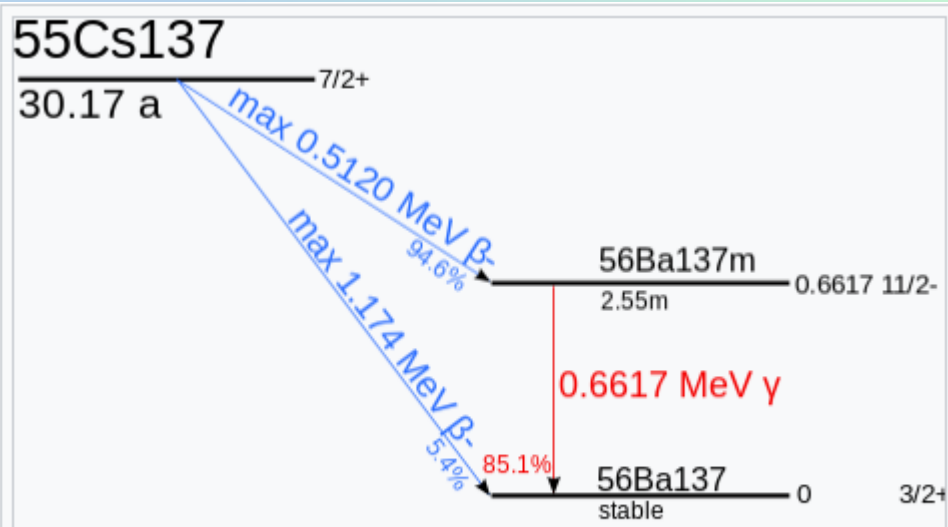
$\text{Ba}^* \rightarrow \text{Ba} + \gamma (661 \text{ KeV})$

Attività della sorgente circa 190 KBq

Vita media 30 anni



Exposure time = 30s
Gamma less localized than alpha

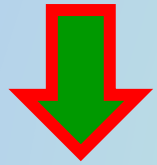


Schema di decadimento del Cs-137

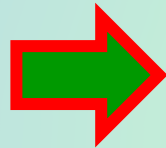
Considerazioni sul sensore

Sensore caratterizzato (Sony IMX533CMOS)

- ❑ basso livello di rumore (Rumore elettronico: $1.3 e^- \rightarrow \pm 1.3$)
- ❑ poca sensibilità (per accendere un pixel circa 30 fotoni)
- ❑ Massimo frame rate 20 f/s



Vogliamo un alto Frame Rate



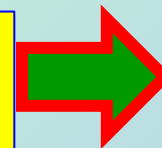
CMOS high frame rate (~CYCLONE 2000): Frame rate di 1 KHz



alto livello di rumore (Rumore elettronico: $\sim 30 e^-$)



Necessità di amplificare il segnale (ad es. MCP doppio strato con amplificazione 10^6)



Vede il singolo fotone

Rumore elettronico trascurabile

Prima possibilità

La ditta Photek ci presterà un MCP per 2 mesi

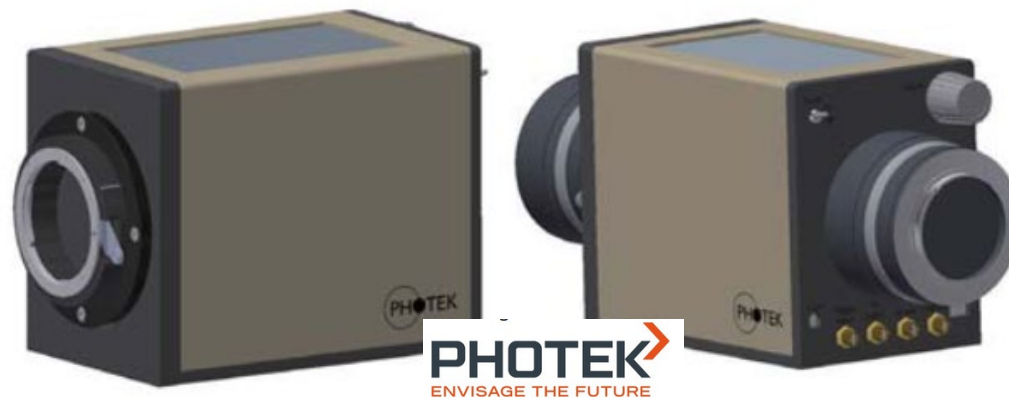
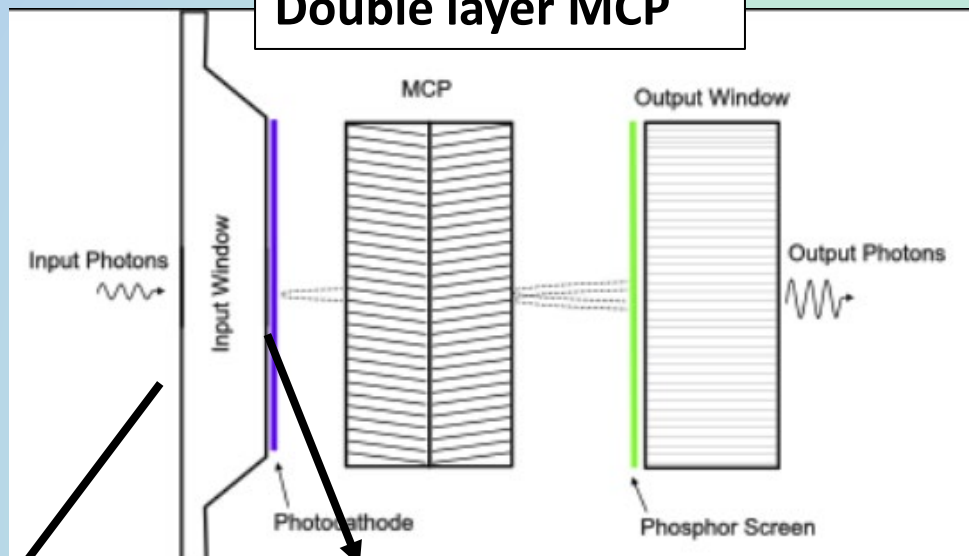
MCP225/Q/BI/P46/IFO SN: 83230725

Gain 10^6

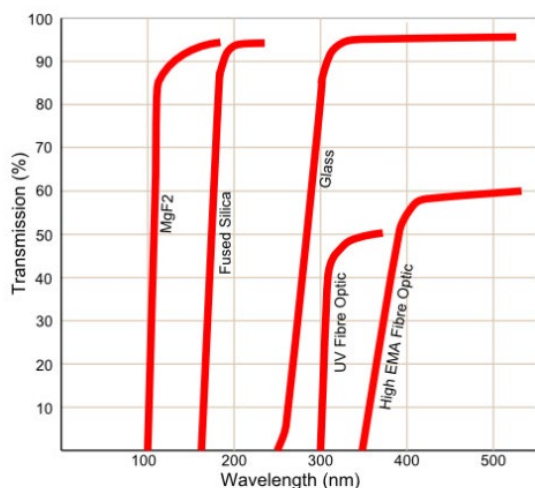
price (2023) 17 k€ + iva

1)

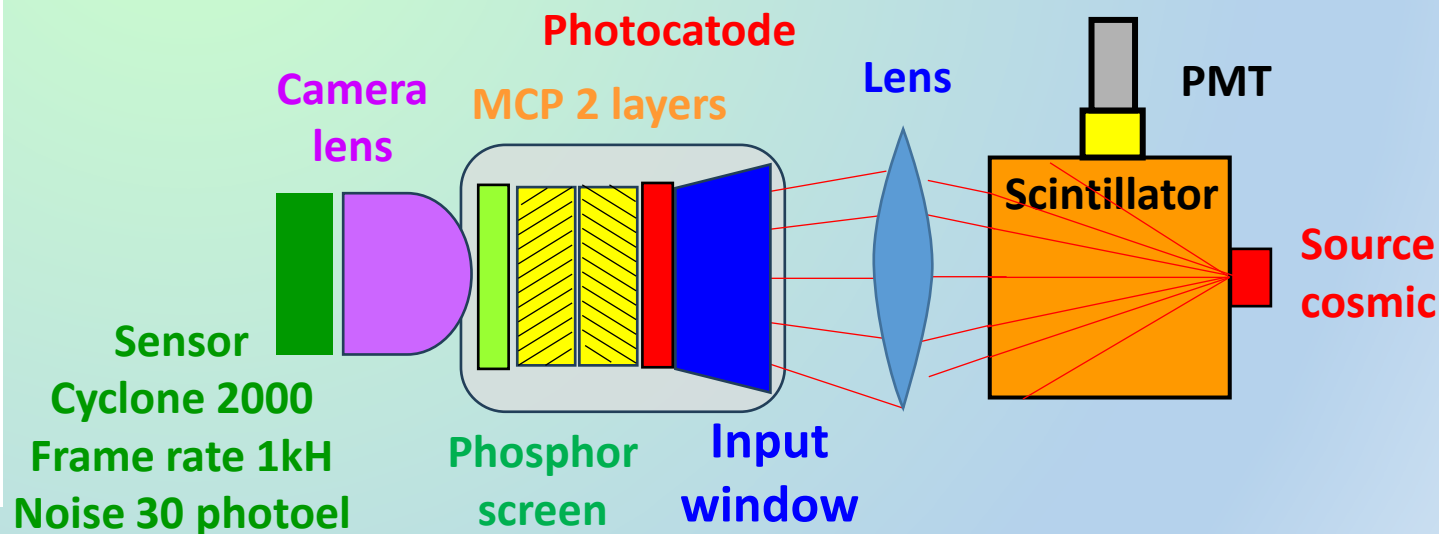
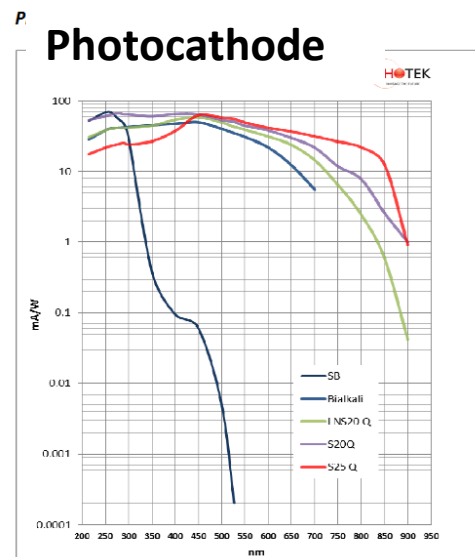
Double layer MCP



Input window



Photocathode



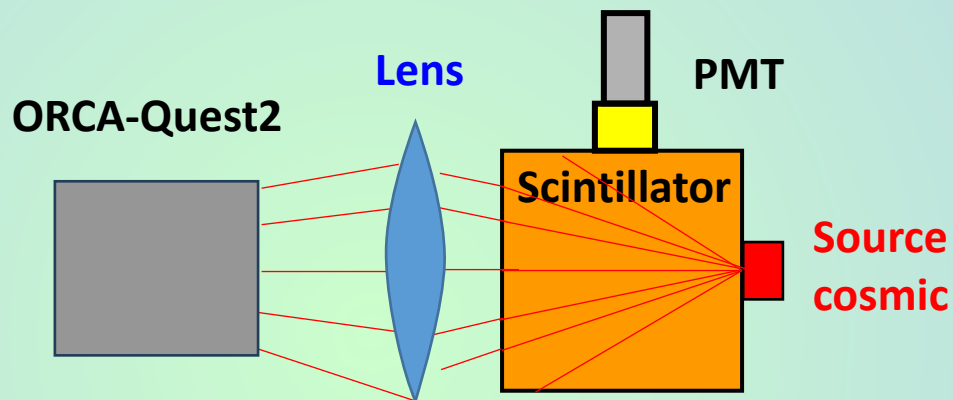
2)



Hamamatsu ci presterà una camera
qCMOS Camera (low readout noise)

- ❑ Frame rate 25/s
- ❑ Noise 0.27 photoel → possibility to see single photoelectron
- ❑ **Price 35k€ + iva**

Altre possibilità

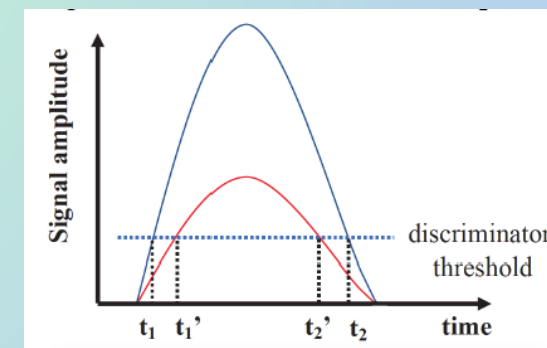
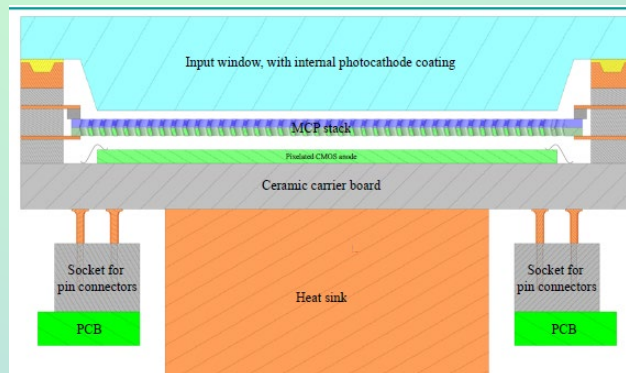


Soluzione più compatta,
ma basso frame rate

3)

Contact Fiorini (FE)

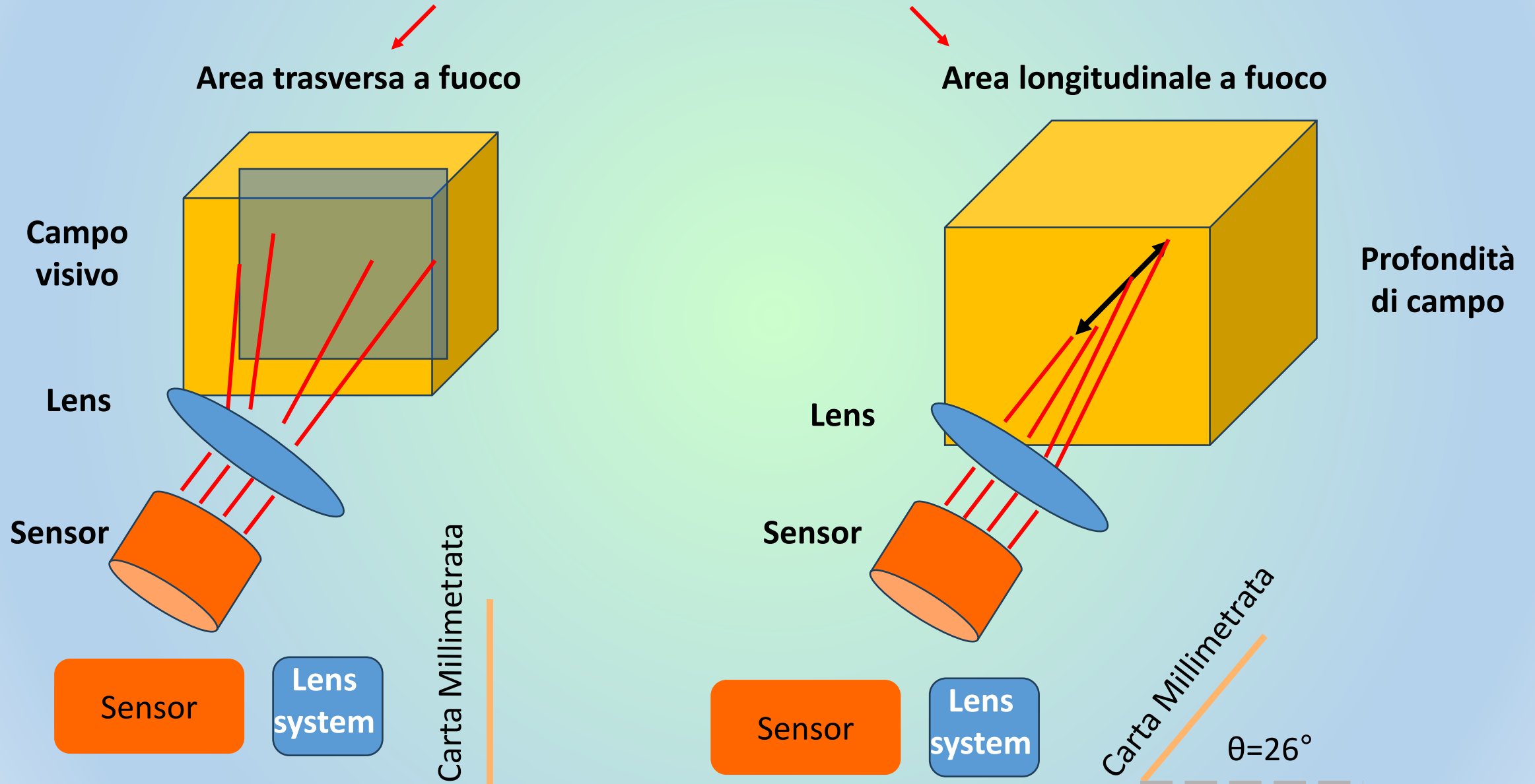
- ❑ MCP connesso ad un TimePix



Al momento faremo richiesta per la prima possibilità

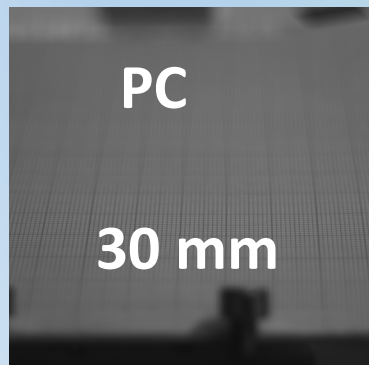
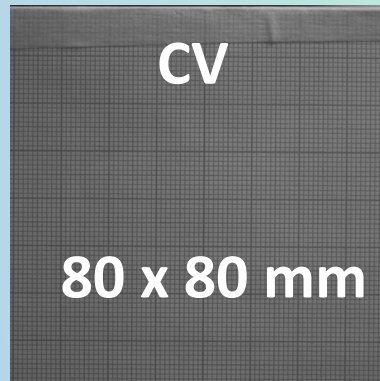
Caratterizzazione dell'ottica

Misura del Campo Visivo (CV) e della profondità di campo (PC) con diversi setup

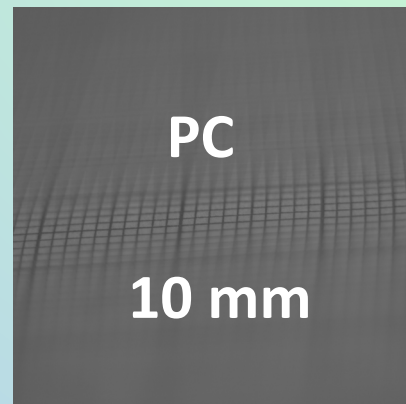
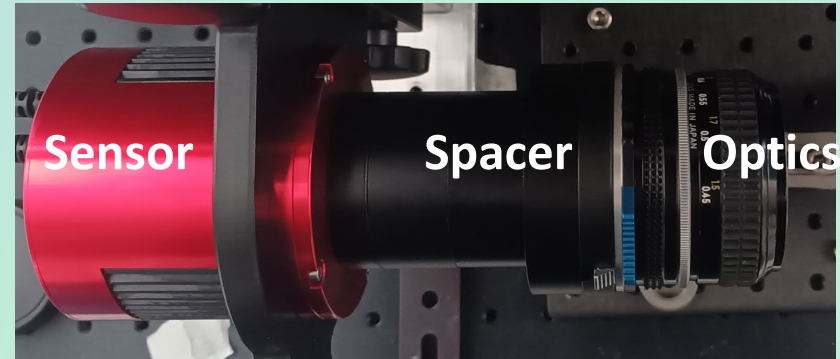


3 diversi setups

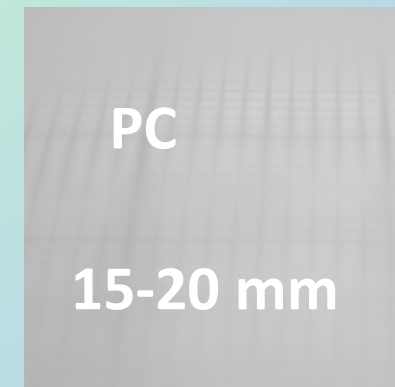
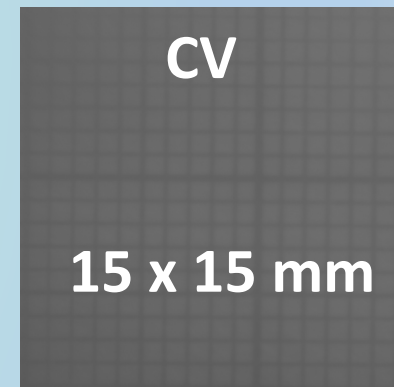
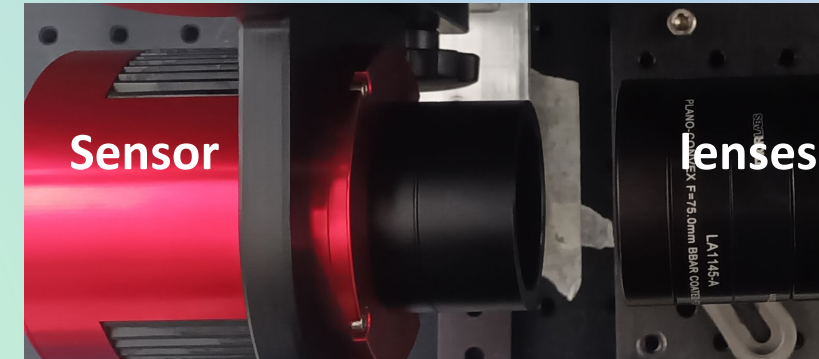
Sensore + Ottica (Obiettivo)



Sensore + Spaziatore + Ottica (Obiettivo)



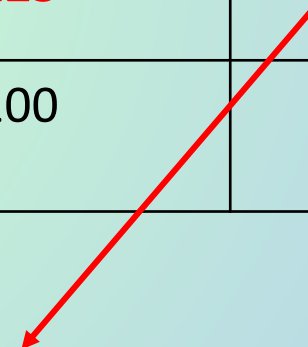
Sensore + lenti



Caratterizzazione dell'ottica: riassunto

Tipologia lente	CV (mm ²)	PC (mm)	Distanza lente sorgente (mm)	Angolo solido (rad)
Obiettivo	80x80	~30	400	~0.004
Obiettivo + distanziatore (21 mm)	30x30	~10	180	~0.02
Due lenti: F75-F100	15x15	~17	~100	~0.19
Due lenti: F75-F125	20x20	~30	~125	~0.13
Due lenti: F75-F200	30x30	~40	~200	~0.05

Raggio lente: 25mm
Raggio obiettivo: 15mm



**Preferibile per maggiore angolo
solido e profondità di campo**

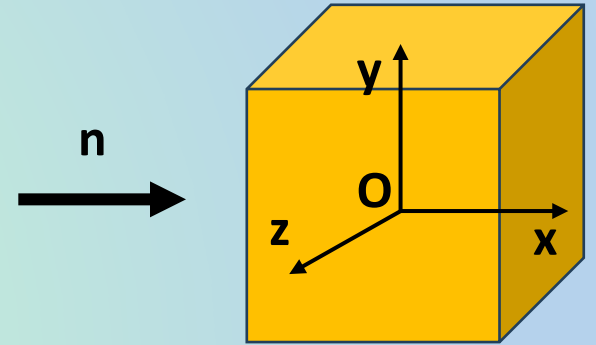
MC e Analisi dei dati simulati

Simulazione dell'apparato e generazione di eventi

Il codice di simulazione diviso in 2 parti

1) Utilizzo di Geant4

- ❑ Scintillatore simulato in tutti i dettagli
- ❑ Modelli di trasporto
 - ❑ p & n derivati dai risultati di n-TOF
 - ❑ Emissione isotropica di 10^4 fotoni per MeV di protoni
 - ❑ Trasporto dei fotoni fino alla superficie dello scintillatore
- ❑ Generati milioni di gamma, protoni, neutroni in diverse con diverse cinematiche



2) Toys MC

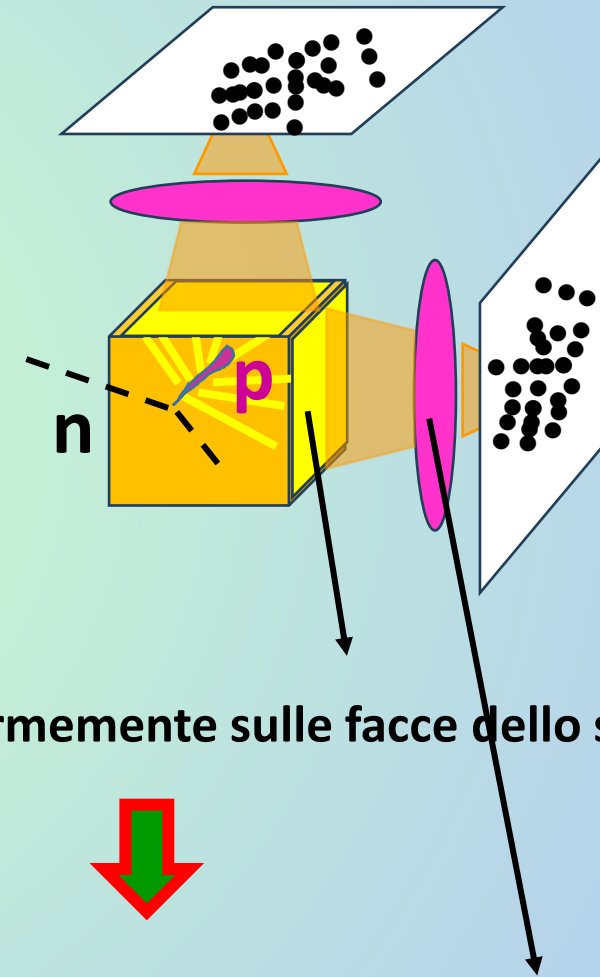
- ❑ Fotoni presi da Geant4 e trasportati al sensore attraverso aria e lenti
- ❑ Simulati tutti i possibili effetti (rifrazione, polarizzazione, lenti spesse, ...)

Il codice è funzionante e nella sua fase finale di stesura

Affrontati diversi metodi di ricostruzione del protone

Metodi investigati

- ☐ Fit Lineare
- ☐ Principal Component Analysis (PCA)
- ☐ Trasformata di Hough
- ☐ Metodo dei Momenti



La luce è distribuita uniformemente sulle facce dello scintillatore



Necessario avere un sistema ottico per ricostruire la direzione dei fotoni

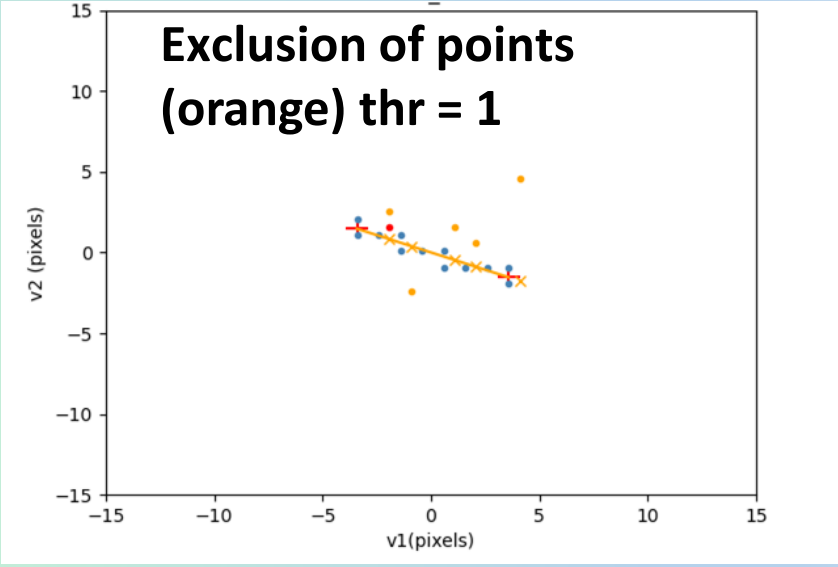
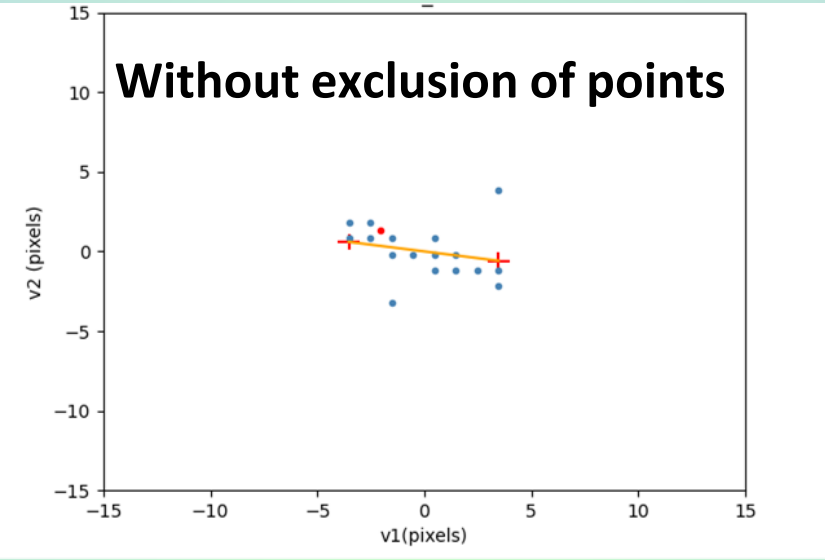
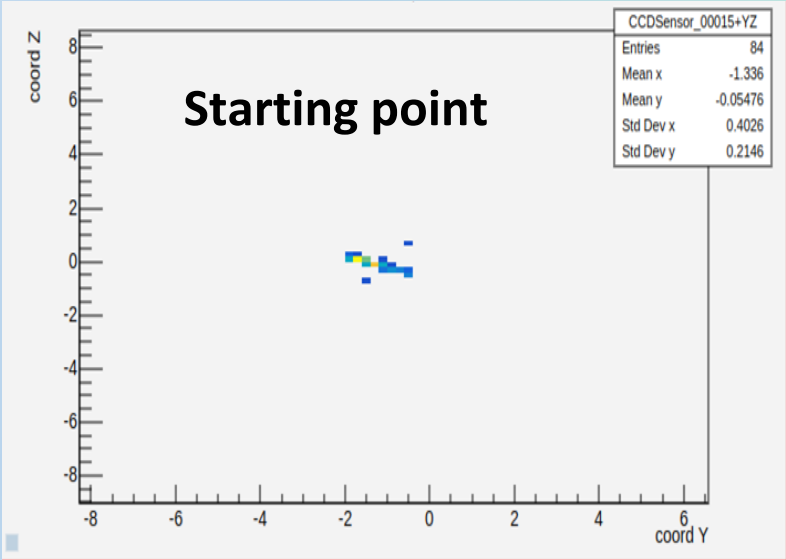
Protoni 30 MeV

Raggio della lente: 0.5 cm

CMOS pixel: 100x100

Fit Lineare

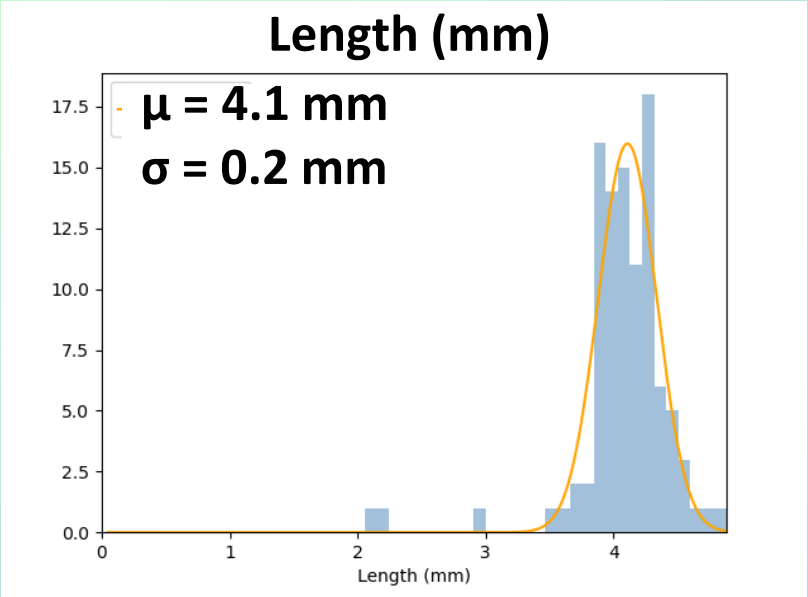
Esclusi i pixel con un # di fotoni < soglia (i punti esclusi sono quelli gialli)



Range dipende dai punti iniziali e finali



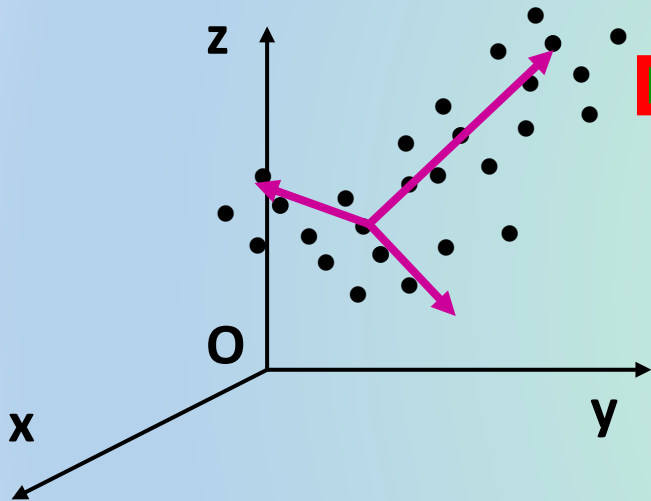
Cruciale identificare i pixel da scartare



Range ricostruito correttamente

PCA Principal Component Analysis

In general (not our case) →
n points (x, y, z) in the space



$$\begin{pmatrix} \langle (x_i - \langle x \rangle)^2 \rangle & \langle (x_i - \langle x \rangle)(y_i - \langle y \rangle) \rangle & \langle (x_i - \langle x \rangle)(z_i - \langle z \rangle) \rangle \\ \langle (y_i - \langle y \rangle)(x_i - \langle x \rangle) \rangle & \langle (y_i - \langle y \rangle)^2 \rangle & \langle (y_i - \langle y \rangle)(z_i - \langle z \rangle) \rangle \\ \langle (z_i - \langle z \rangle)(x_i - \langle x \rangle) \rangle & \langle (z_i - \langle z \rangle)(y_i - \langle y \rangle) \rangle & \langle (z_i - \langle z \rangle)^2 \rangle \end{pmatrix}$$

Matrice di Covarianza

Diagonalizzata

3 autovettori e 3 autovalori

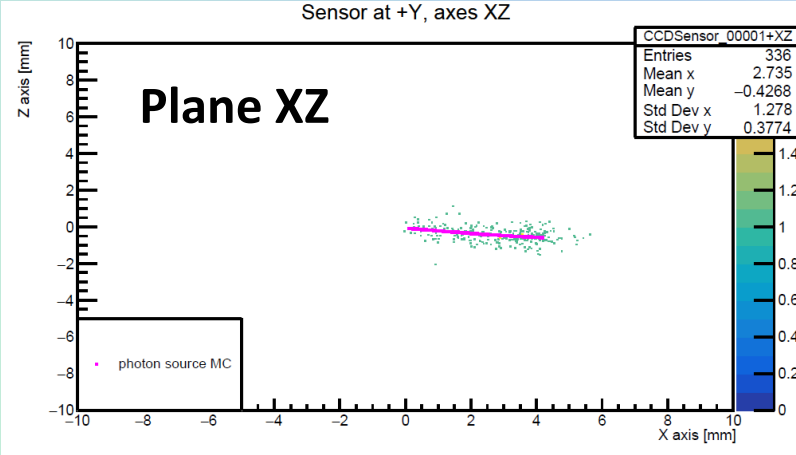
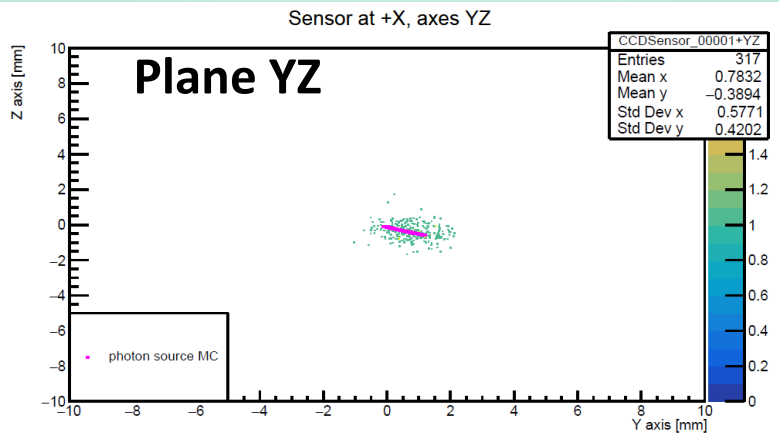
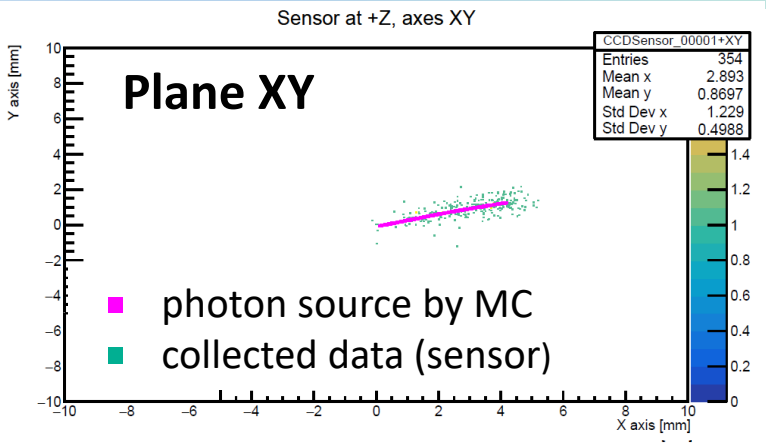
(massimo autovalore → direzione principale)

Proiettare i punti sulla direzione
principale → Bragg Peak

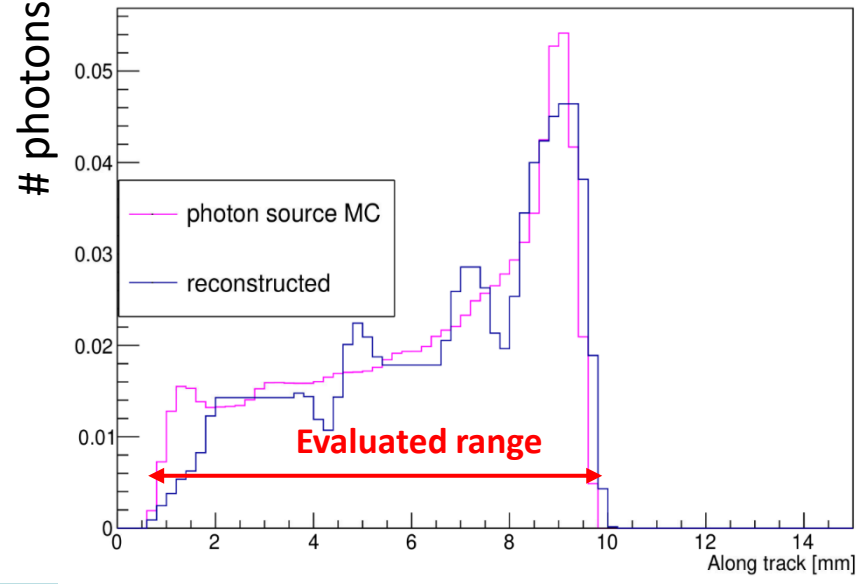
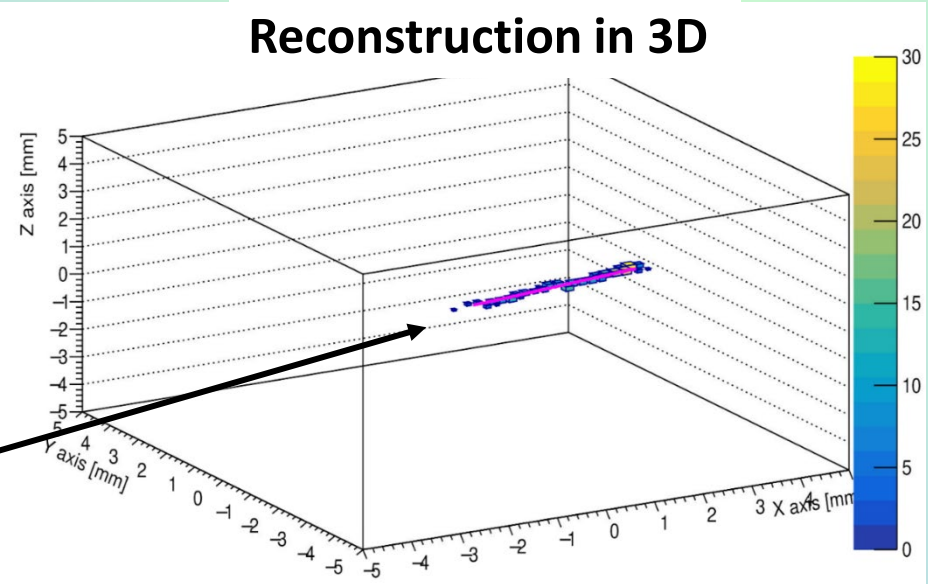
Riduzione delle dimensioni
3n punti → 3 vettori

Protoni, 30 MeV
Generati in (2x2x2)cm³
Direzione isotropica

PCA (Principal Component Analysis)

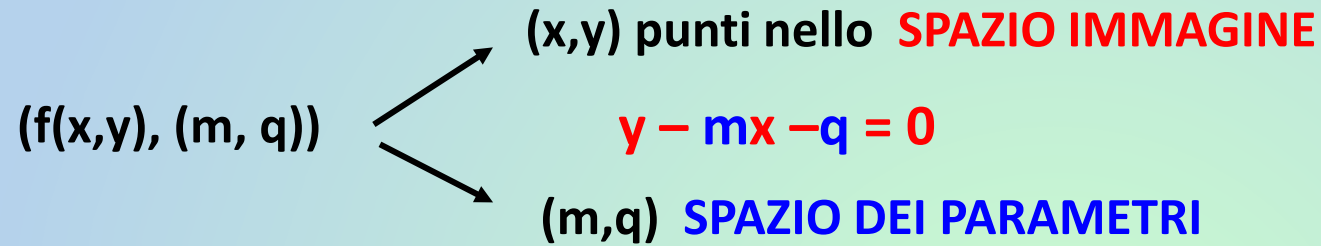


Traccia del protone
Protone ricostruito



Metodo di riconoscimento di immagine (~ 1970)

Ipotesi: traccia del protone → retta



Ogni punto dello **SPAZIO IMMAGINE** corrisponde ad un punto nello **SPAZIO DEI PARAMETRI**

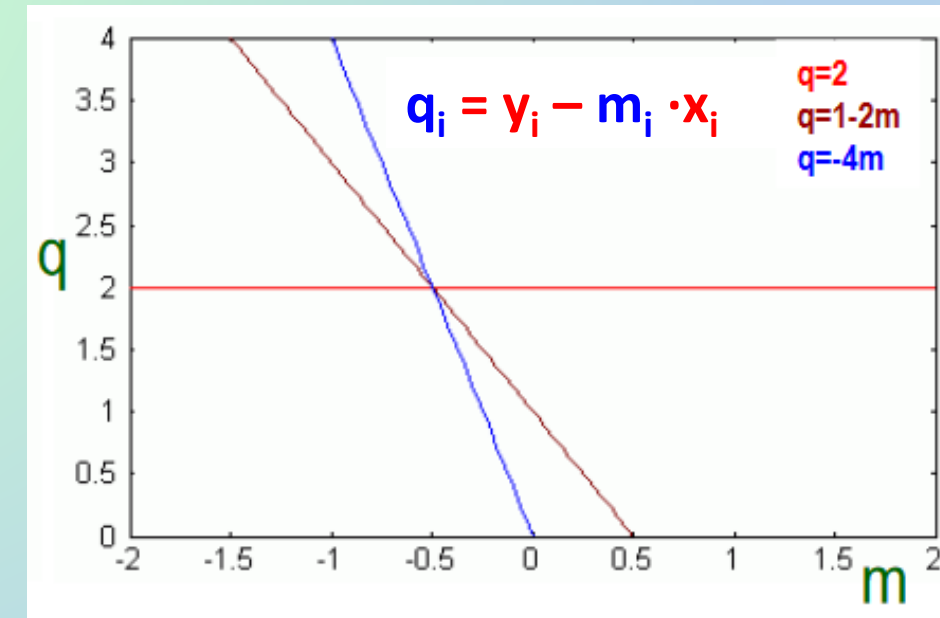
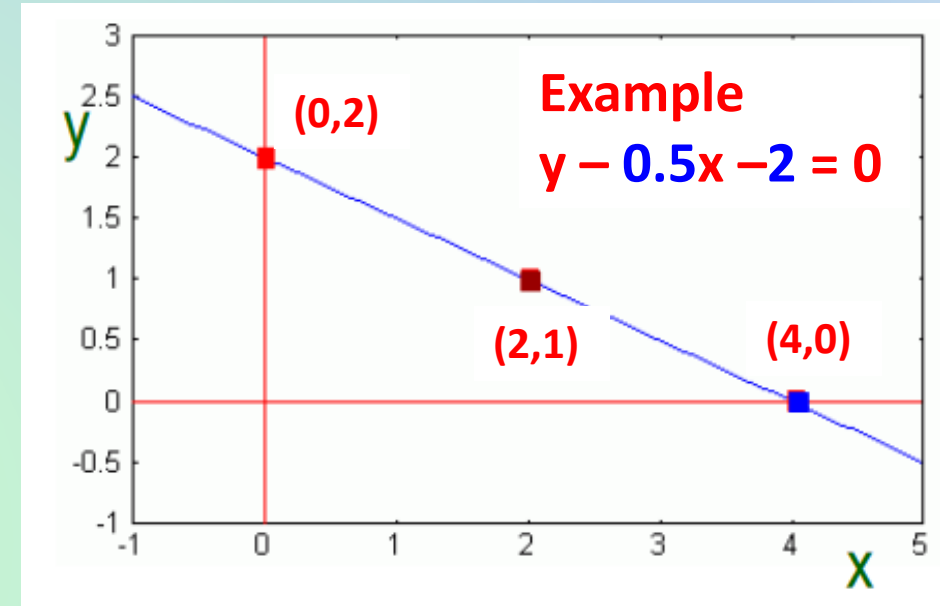


N punti che appartengono alla stessa linea creano n superfici che si intersecano nello stesso punto



Il metodo è time consuming

Trasformata di Hough



Single track (MC proton)

Starting track

Reconstructed

$R = 5 \text{ mm}$, 100×100 pixels

Risultati della Trasformata di Hough

Double tracks (MC protons)

Starting tracks

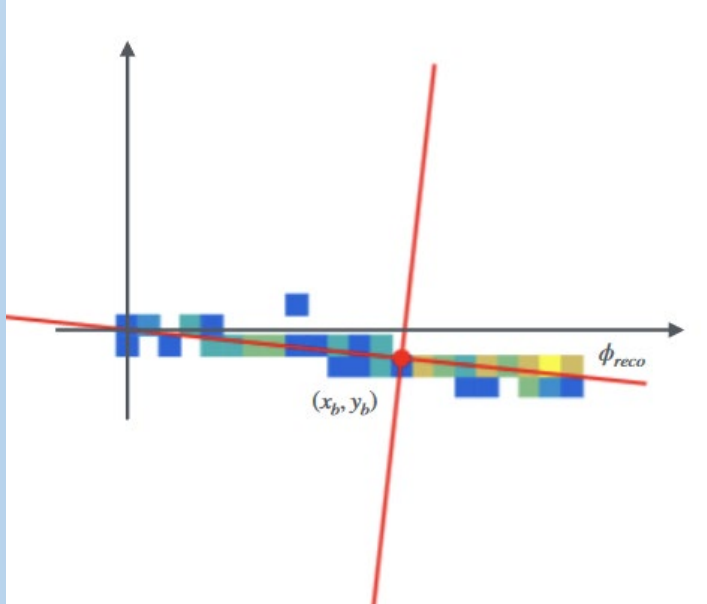
Reconstructed

Overlapped 1: $R = 5 \text{ mm}$, 100×100 pixels

Metodo dei Momenti,1

$$\vec{x}_b = \left(\frac{\sum_i Q_i x_i}{\sum_i Q_i}, \frac{\sum_i Q_i y_i}{\sum_i Q_i} \right)$$

x_b (y_b) centro di gravità
(momento di primo ordine)



$$\begin{pmatrix} x'_i(\phi) \\ y'_i(\phi) \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\phi & \sin\phi \\ -\sin\phi & \cos\phi \end{pmatrix} \begin{pmatrix} x_i \\ y_i \end{pmatrix}$$

Asse di rotazione

$$M_2(\phi) = \frac{\sum_i Q_i x_i'^2(\phi)}{\sum_i Q_i} = \frac{\sum_i Q_i (x_i \cos\phi + y_i \sin\phi)^2}{\sum_i Q_i}$$

Momento di secondo ordine

$$\frac{\partial M_2(\phi)}{\partial \phi} = 0$$

$$\phi_{max,min} = -\frac{1}{2} \arctan \left[\frac{2 \sum_i Q_i x_i y_i}{\sum_i Q_i (y_i^2 - x_i^2)} \right]$$

Assi principali

second order momentum ($\phi_{max,min}$)

$$M_{max,min}^{(2)} = \frac{\sum_i Q_i (x_i \cos(\phi_{max,min}) + y_i \sin(\phi_{max,min}))^2}{\sum_i Q_i}$$

$$R = f(\epsilon) \sqrt{M_{max}^{(2)}}$$

Range

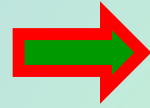
Deve essere valutato

Metodo dei Momenti, 2

Per una distribuzione ellittica (come è)

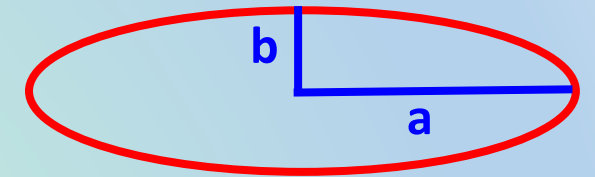
$$R = f(\epsilon) \sqrt{M_{max}^{(2)}}$$

Range



$$\epsilon = \frac{M_2^{max}}{M_2^{min}} = \frac{1}{\sqrt{1-e}}$$

eccentricità



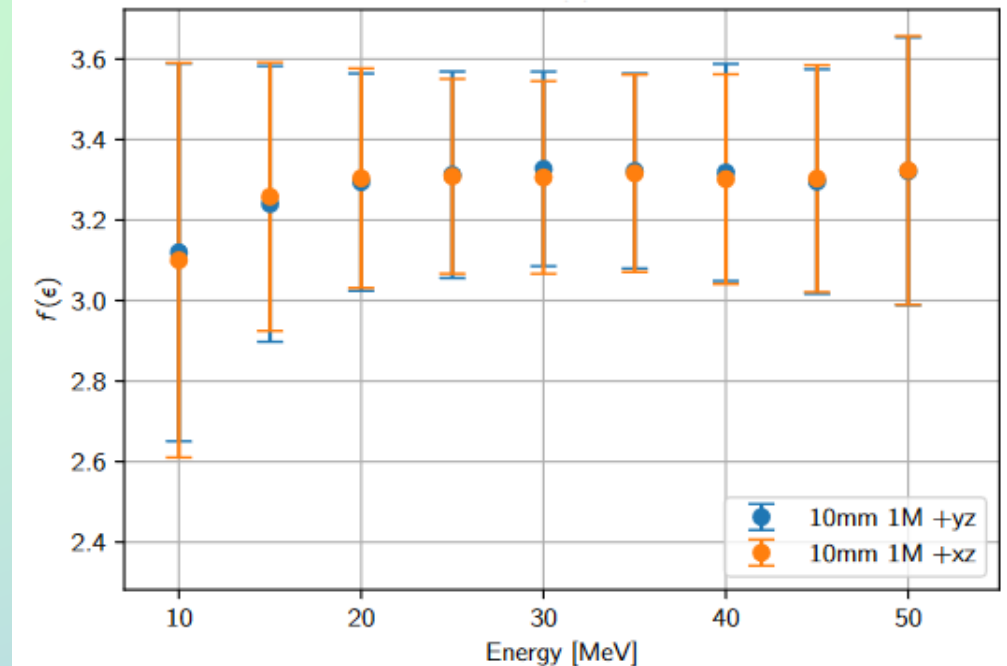
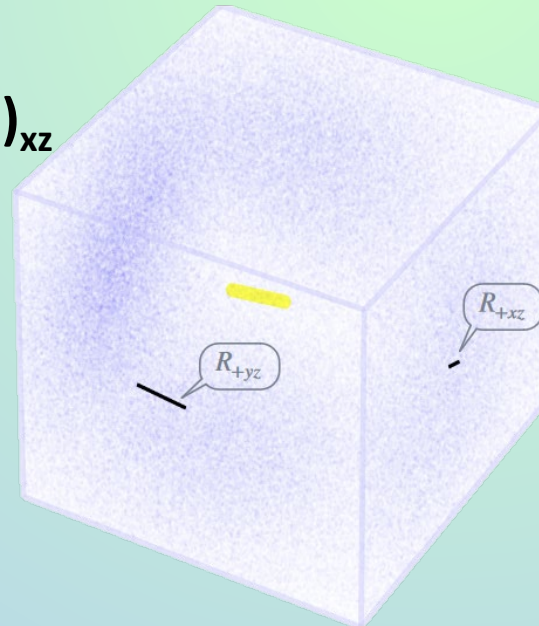
$$e = b^2/a^2$$

Il Range è una funzione dell'eccentricità

Valutato dalle simulazioni

per 2 dimensioni $\rightarrow f(\epsilon)_{yz}$ and $f(\epsilon)_{xz}$

$$f(\epsilon)_{+yz(+xz)} = \frac{R_{+yz(+xz)}}{\sqrt{M_{+yz(+xz)}^{(2),max}}}$$



Milestones

M1: Definition of all the geometry except the image intensifier
M2: Light yield and multianode PMT measurements
M3: Firmware for image acquisition
M4: Image acquisition with external trigger
M5: Reconstruction of the neutron kinematics in double scattering events
M6: Simultaneous acquisition from multiple cameras with external trigger
M7: First prototype realization (without the image intensifier)
M8: First laboratory tests with radioactive neutron source
M9: Analysis of radioactive source data
M10: Data taking with proton and neutron beams
M11: Track reconstruction from beam data

					2024												2025												2026											
TASK ID	TASK TITLE	START DATE	END DATE	DURATION IN MONTHS	Q1			Q2			Q3			Q1			Q2			Q3			Q1			Q2			Q3											
					Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec	Jan	Feb	Mar	Apr	May	Jun	Jul	Aug	Sep	Oct	Nov	Dec
1	Simulation & Analysis	01/01/2024	31/12/2025	24										M1											M5															
2	Optics	01/01/2024	30/06/2025	18										M2																										
3	Electronics & DAQ	01/07/2024	31/12/2025	18									M3					M4							M6															
4	Demonstrator	01/01/2025	31/12/2025	12														M4							M7															
5	Data Analysis	01/07/2025	31/12/2026	18																															M9					M11
6	Test	01/07/2025	30/06/2026	12																					M8								M10							

Le milestones del 2024 finiscono a dicembre

- ❑ Simulazioni & analisi (vedi M1)
- ❑ Ottica (alcuni punti fatti, altri definiti con l'arrivo del MCP)
- ❑ Nella seconda parte dell'anno: DAQ

Sia nel campo delle misure di laboratorio, che nell'analisi è stato svolto molto lavoro: siamo in linea coi tempi

Analisi: una borsa a Bologna per un PhD su ricostruzione di immagini

End time	milestone
31/12/2025	studi MC per la definizione della geometria finale dell'apparato (probabilmente eccetto i dettagli sull'intensificatore di immagine).
31/12/2025	ricostruzione della cinematica del neutrone in eventi simulati di doppio scattering
31/12/2025	completamento della scrittura del firmware per il programma di acquisizione
30/7/2025	misurazione dell'intensita' di luce proveniente da sorgenti e/o laser e/o cosmici con un PMT
30/7/2025	sviluppo di un sistema di trigger esterno

Richieste

CAPITOLO	DESCRIZIONE	2025	2500 SJ
Inventario	MCP Photek	20.5	
	MCP Photek		20.5
	Camera ad alto frame rate Cyclone-2-2000M	7.5	
Apparati			
Consumo	Scintillators of different characteristics and size	1.0	
	Lenses, mirrors and cables	2.0	
Missioni	In presence meetings	1.0	
Totale		32	20.5

Luglio 2024: restituiti 7.5 keuro acquisto cyclone spostato al 2025)

Nessuna richiesta ai servizi di sezione

L'acquisto MCP della Photek è comprensivo di iva, ma avremo anche la possibilità di acquistarlo al CERN tramite n-TOF e non pagare l'iva.

La richiesta del secondo MCP SJ è, nel caso questo vada bene, per instrumentare la seconda faccia.

Anche la richiesta di una camera Cyclone-2-2000 ad alto frame rate è per instrumentare la seconda faccia.

Come materiale di consumo chiediamo l'acquisto di lenti, specchi e scintillatori per definire il miglior setup

Missioni: 1 keuro per riunioni in presenza.

Tutte le richieste sono corredate da preventivi delle ditte (inserite nel database

Anagrafica RIPTIDE 2025

Nome	Ruolo	FTE 2025
Console Camprini Patrizio	Ricercatore ENEA Bologna	0.2
Giacomini Francesco	Primo Tecnologo CNAF Bologna	0.1
Massimi Cristian	Professore associato UNIBO	0.3
Mengarelli Alberto	Tecnologo INFN Bologna	0.2
Minniti Triestino	Rtd-B Roma 2	Da definire
Ridolfi Riccardo	Assegnista di Ricerca Bologna	0.5
Spighi Roberto	Dirigente di Ricerca INFN Bologna	0.5
Terranova Nicholas	Ricercatore ENEA Frascati	0.5
Pisanti Claudia	Dottoranda	1.0
PhD su ricostruzione immagine	Dottorando	Da definire
Musumarra Agatino	Professore Associato UNICT	0
Pellegriti Maria Grazia	Ricercatore INFN	0
Villa Mauro	Professore Ordinario	0
TOTALE FTE		> 3.8

Conclusione

Lavoro svolto

- ❑ Misure in laboratorio
 - ❑ Sensibilità del sensore (Sony IMX533CMOS)
 - ❑ Rumore del sensore
 - ❑ Linearità del sensore
 - ❑ Acquisizione di segnali di γ e α da sorgenti
 - ❑ Misura della profondità di campo e del campo visivo con diversi setup
- ❑ Simulazione di dati (milioni di gamma, protoni, neutroni con diverse cinematiche)
- ❑ Analisi dei dati simulati
 - ❑ Ricostruzione della traccia di protone con Fit lineare
 - ❑ « » con Principal Component Analysis (PCA)
 - ❑ « » con la Trasformata di Hough T
 - ❑ « » con il metodo dei Momenti
- ❑ Prossime misure
 - ❑ Misure in laboratorio con MCP Photek

Gran lavoro fatto
Siamo nei tempi

Richieste

- ❑ 29 keuro + 25 keuro (SJ)

Anagrafica

- ❑ In aumento