

# Liquid Argon Refractive Index

*Bianca Bottino, Alice Campani, Ruggero Caravita, Simone Copello, Federico Ferraro*

1 marzo 2023

# LArRI

**Obiettivo principale:** Misura diretta dell'indice di rifrazione dell'Argon liquido a lunghezze d'onda prossime a 178 nm (Xe).

**Obiettivi Secondari:**

- misura a varie lunghezze d'onda (relazione di dispersione)
- misura della lunghezza di attenuazione
- misure ottiche con altri gas nobili liquefatti

Progetto finalizzato allo sviluppo di sistemi ottici, in particolare lenti, per imaging in LAr drogato con Xe.

# Strategia di misura

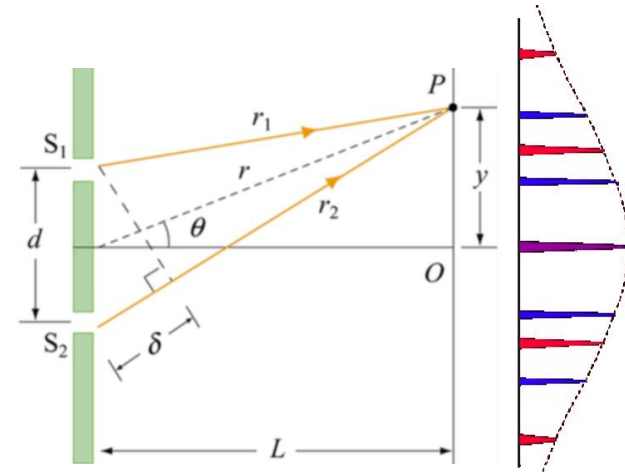
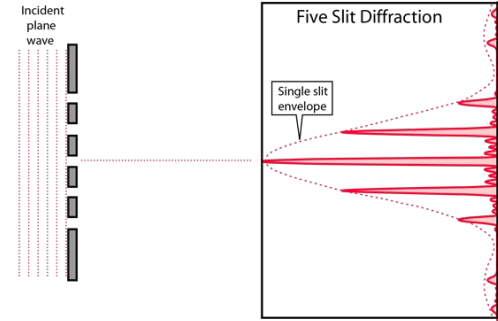
L'idea è misurare l'indice di rifrazione dell'argon liquido confrontando le figure di interferenza prodotte usando un reticolo di diffrazione, facendo propagare la luce in argon e in vuoto.

Immergendo il reticolo in LAr si ottiene che la posizione dei massimi di interferenza dipende da  $\lambda_L = \lambda_0/n$ .

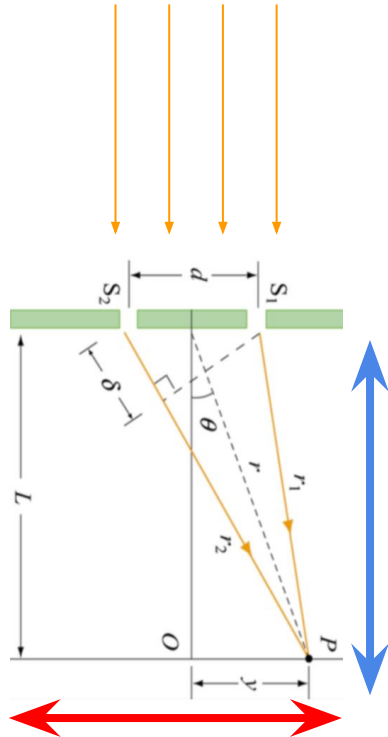
Massimi in vuoto:  $d \sin \theta_0 = \lambda_0$

Massimi in LAr:  $d \sin \theta_L = \lambda_L$

→ **Serve luce coerente e monocromatica**



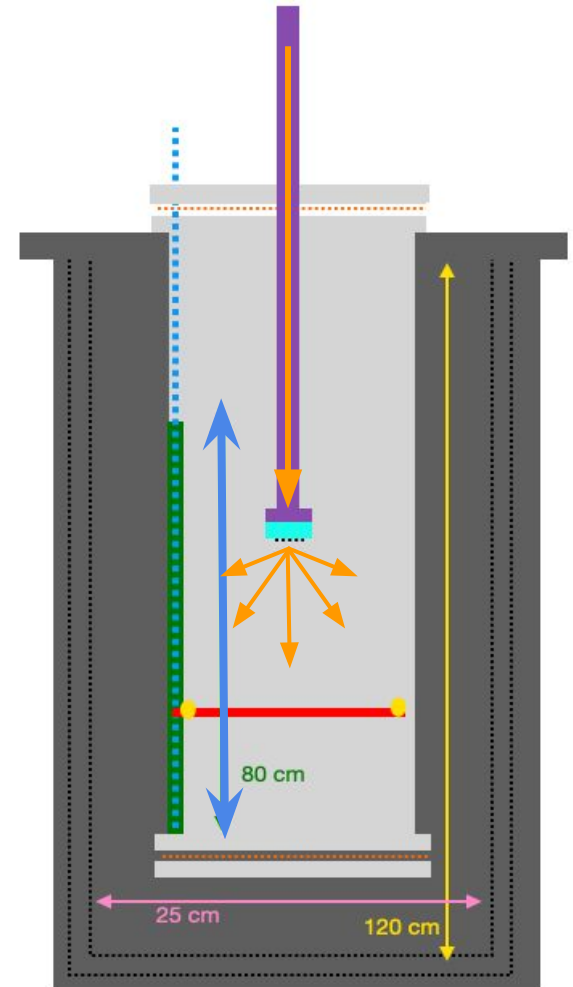
# Strategia di misura



Il pattern viene registrato eseguendo una **scansione** lungo un determinato asse **con un “singolo” SiPM**.

La **luce**, coerente e monocromatica, proviene dall'esterno del criostato, entrando dall'alto.

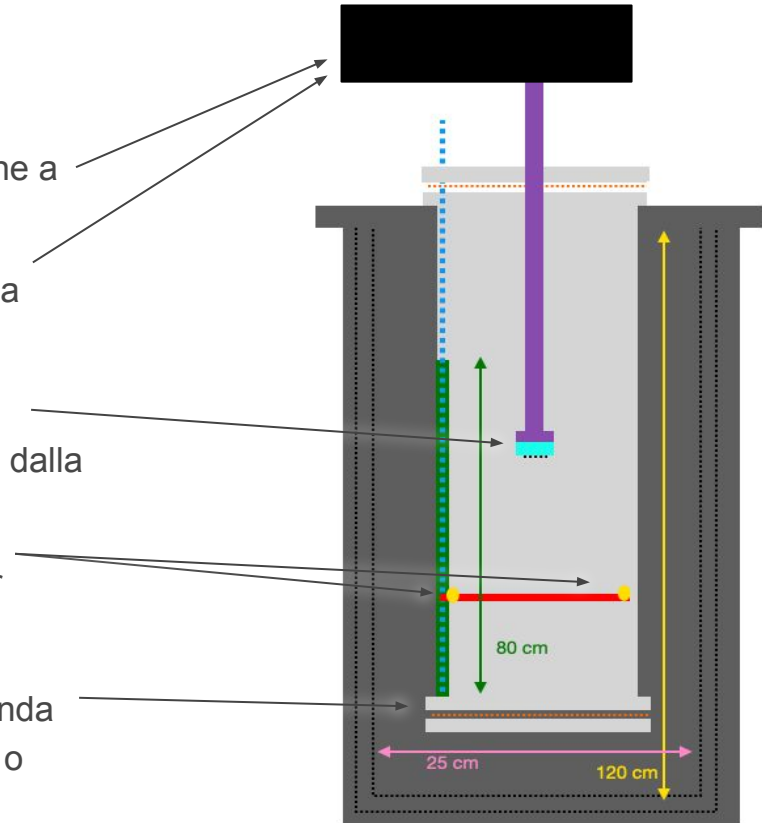
Per compattare l'apparato (adattandolo al criostato) non eseguiamo la scansione sul **lato opposto** al reticolo ma **sul fianco**.



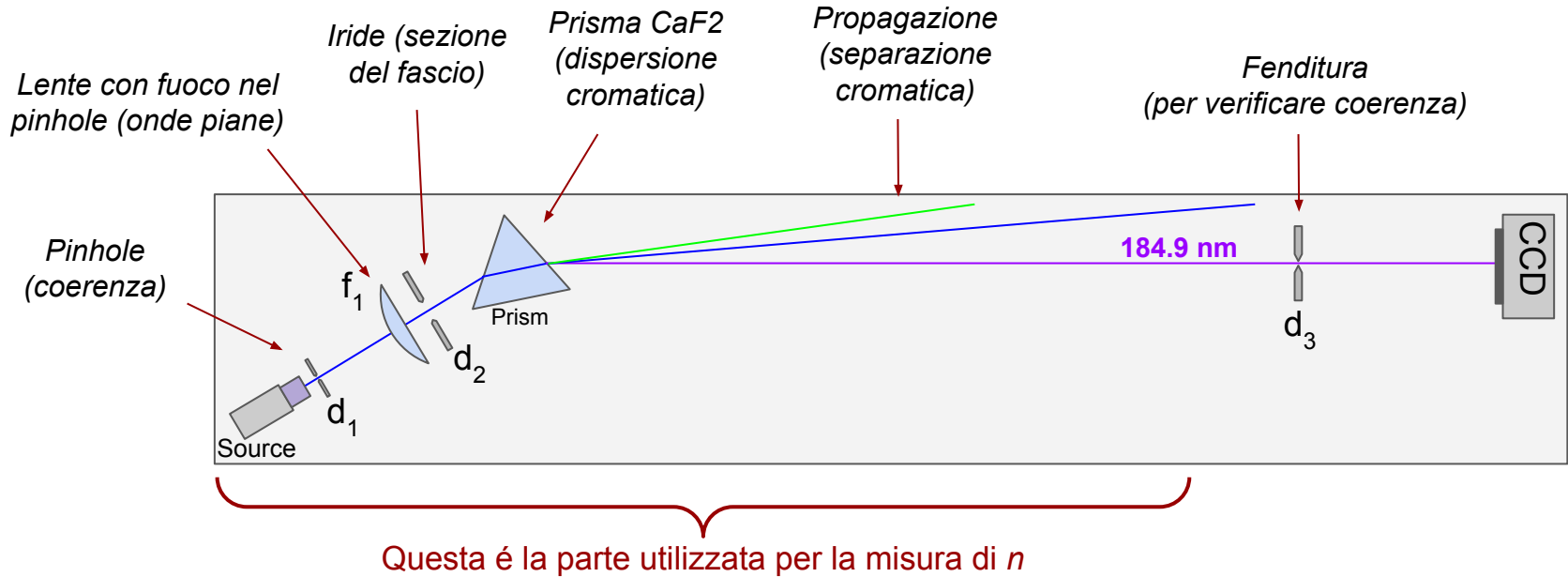
# Schema concettuale

Gli elementi costitutivi dell'apparato sperimentale sono:

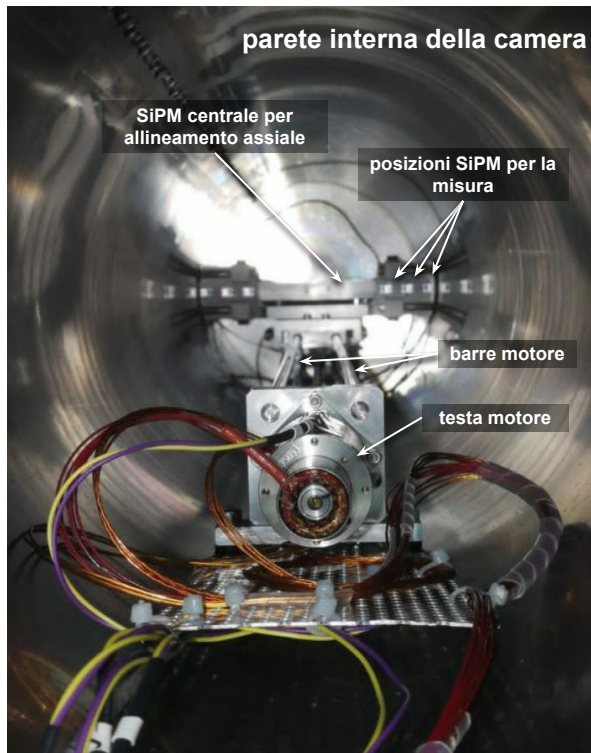
- **Sorgente di luce: lampada a mercurio** con emissione a 185 nm.
- **Sistema ottico** necessario per rendere il fronte d'onda coerente.
- **Reticolo di diffrazione** depositato sulla finestra (trasparente a luce VUV) che separa in sistema ottico dalla camera ottica.
- **SiPM** montati su un **sistema di movimentazione** per eseguire la scansione del pattern.
- **Camera ottica** contenente il reticolo e i SiPM. A seconda della configurazione potrà essere mantenuta in vuoto o riempita di LAr.



# Sistema ottico

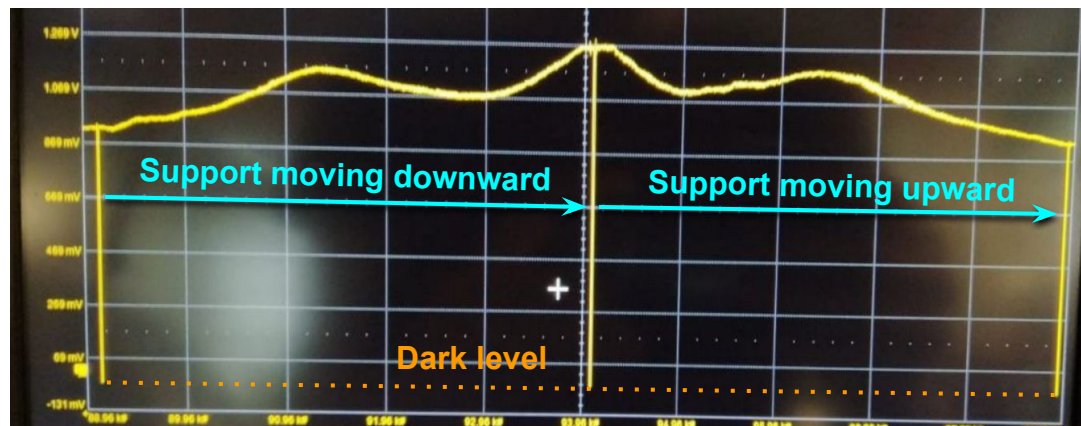


# Camera - primi test di allineamento



Visuale interna della camera con il motore installato, il supporto per i SiPM e 3 Pt100 per monitorare temperatura e livello del liquido.

Ottenuto un buon allineamento assiale con il laser a 403 nm laser e un singolo SiPM montato sul supporto centrale.

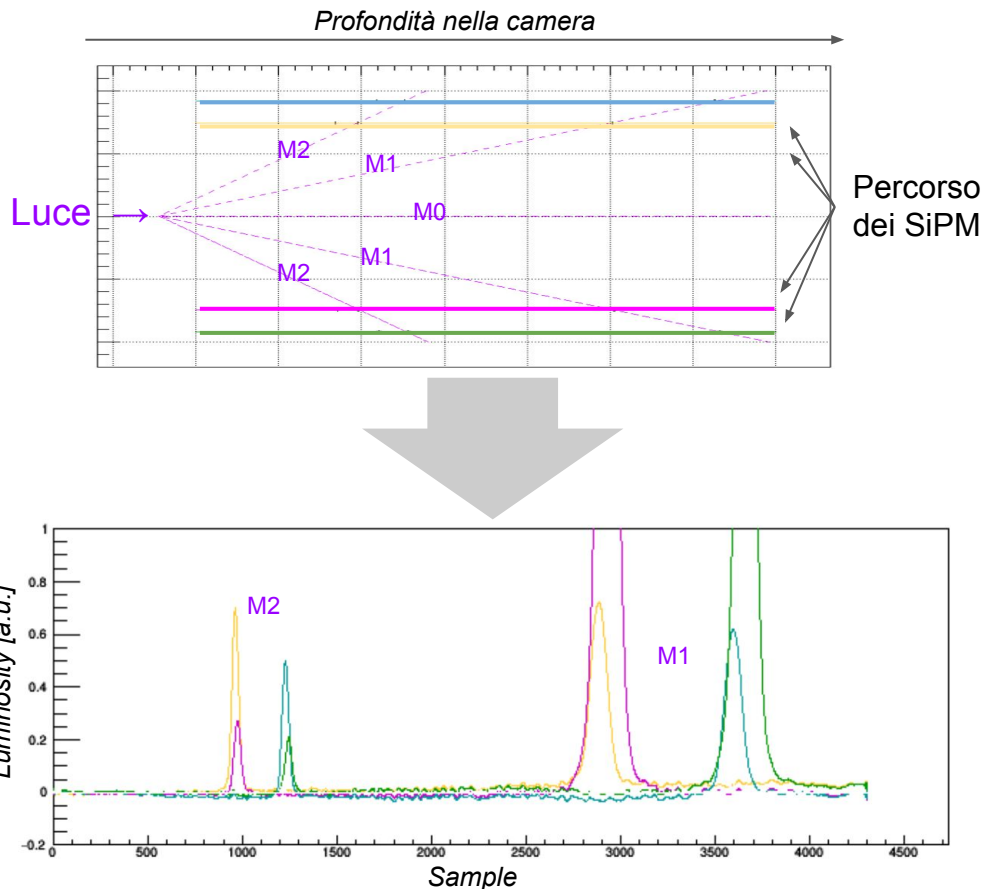


**SiPM integrated signal (luminosity) during support movement (40 cm):**  
signal is constant within ~30% and reproducible in the two directions.

# Electronics and acquisition

## SiPM

- The signals coming from the SiPM are integrated ( $\tau \sim 100$  ms) and amplified by the FE boards
- The signal thus obtained is acquired with the oscilloscope with windows of 20 ms
- The average value of voltage over the entire window represents a sample of the trace that we save

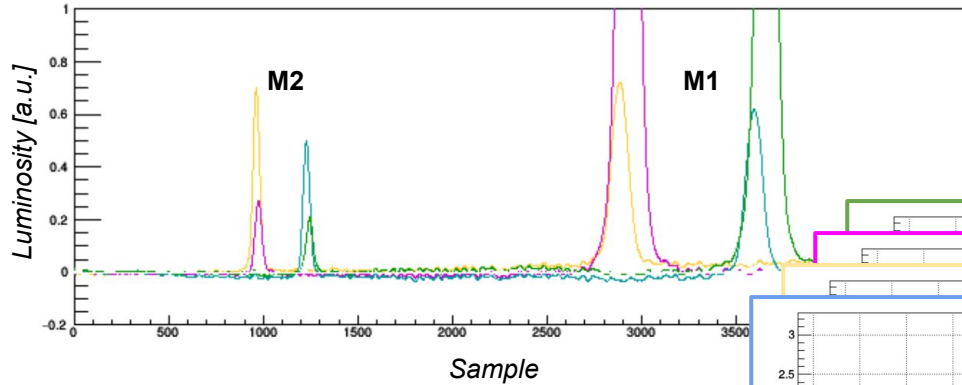


Un'altra traccia ci permette di ricostruire quando è stato mosso il motore (e quindi la posizione dei sensori)

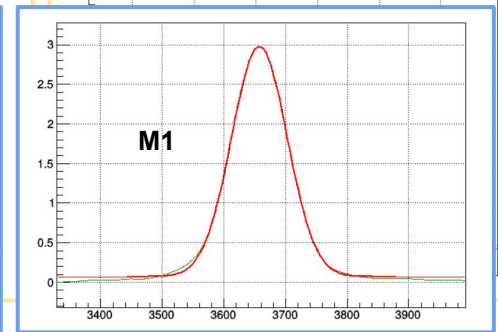
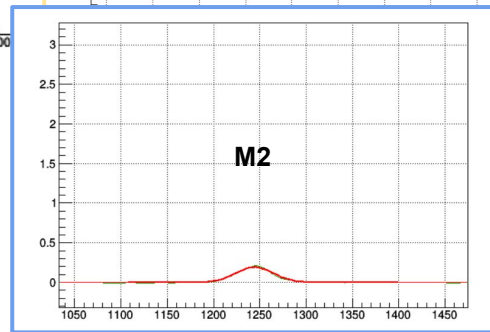


# Analisi - prima parte

Riguarda una singola scansione (quindi con una specifica lunghezza d'onda e mezzo di propagazione).  
Ha lo scopo di individuare la posizione dei massimi di interferenza M1 e M2, partendo dai tracciati dei singoli SiPM e sapendo posizione e tempo di partenza e di arrivo del motore.



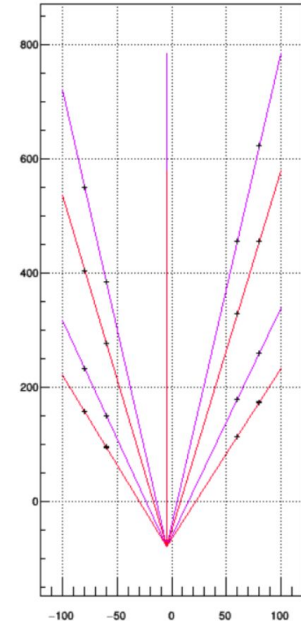
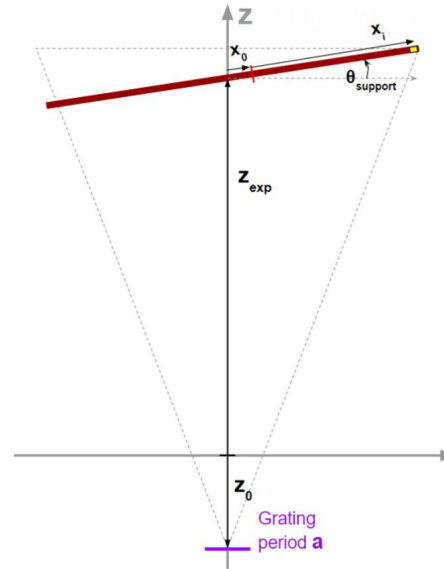
Al momento ogni picco é modellizzato con un fit gaussiano



# Analisi - seconda parte

Le posizioni ricavate da due scansioni distinte (quindi con due mezzi di propagazione) vengono combinate in un fit simultaneo per ricavare l'indice di rifrazione.

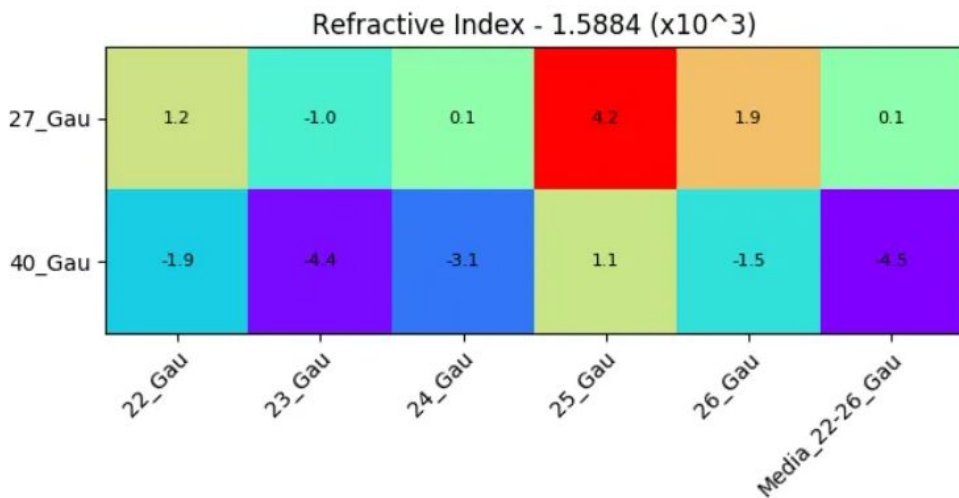
- Parametri liberi del modello:
  1.  $z_0$  posizione iniziale della lunetta (supporto)
  2.  $\theta_s$  angolo tra lunetta e movimento, meno 90 deg (ovvero varrà  $\sim 0$  gradi)
  3.  $x_0$  offset nella posizione della lunetta lungo l'asse x (ortog. al movimento) (varrà  $\sim 0$ )
  4.  $a_{\text{reticolo}}$  passo reticolare a freddo
  5.  $n$
- Delle 16 posizioni z solo 8 sono sensibili a  $n$ . Gli altri 4 parametri invece incidono su tutte le 16 z



Per la ricerca di effetti sistematici possono essere utilizzati dati provenienti da due scansioni entrambe in vuoto ma realizzate con lunghezze d'onda diverse fra loro, l'indice di rifrazione ottenuto deve coincidere col rapporto delle lambda considerate (vedi prossima slide)

# Misure preliminari: in vuoto a T ambiente

Target R.I. =  $402.9/253.65 = 1.5884$



Possiamo fingere che la variazione di lunghezza d'onda sia dovuta all'introduzione di un indice di rifrazione, per definizione uguale al rapporto tra le lunghezze d'onda considerate.

$$z_{exp} = \frac{(x_i + x_0) \cos \theta_s}{\tan \arcsin \frac{m\lambda}{an}} - (x_i + x_0) \sin \theta_s - z_0$$

Le reali lunghezza d'onda sono:

- 184,9 nm (misurato con spettrometro Avantes)
- 253,6 nm (misurato con spettrometro Avantes)
- 402,9 nm (caratterizzazione di Thorlabs)

# Conclusioni

- Hardware montato e testato. Sistema funzionante sia in vuoto a freddo, sia in liquido (azoto);
- Struttura analisi pronta e funzionante, testata su run fatti con laser e riga a 253 nm;
- Acquisiti i primi run con riga a 185 nm.

Prossimi passi:

- Migliorare la qualità dei dati a 185 nm
- Prendere run in LAr per fare la reale misura

Backup slides

# In letteratura

1. [Optical Properties of Liquid Noble Gas Scintillators](#), Alexander Maximilian Neumeier (Munich, Tech. U.), 2015  
⇒ **n** estrapolato da misure relative alla fase gassosa
2. [Index of refraction, Rayleigh scattering length, and Sellmeier coefficients in solid and liquid argon and xenon](#), E. Grace et al., NIM A 867 (2017) 204-208  
⇒ Estrapolazioni da lunghezze d'onda maggiori: **n=1,45**
3. [Light propagation in liquid argon](#), M. Babicz et al 2020 JINST 15 P09009  
⇒ Derivato dalla velocità di gruppo: **n=1,36**

# Sorgente di luce

La scelta della lampada e' guidata dai seguenti requisiti o fattori:

- Picco (vicino) a 178 nm
- Lunghezza di coerenza (picco stretto)
- Emettenza (ovvero anche dimensioni della sorgente e collimazione)

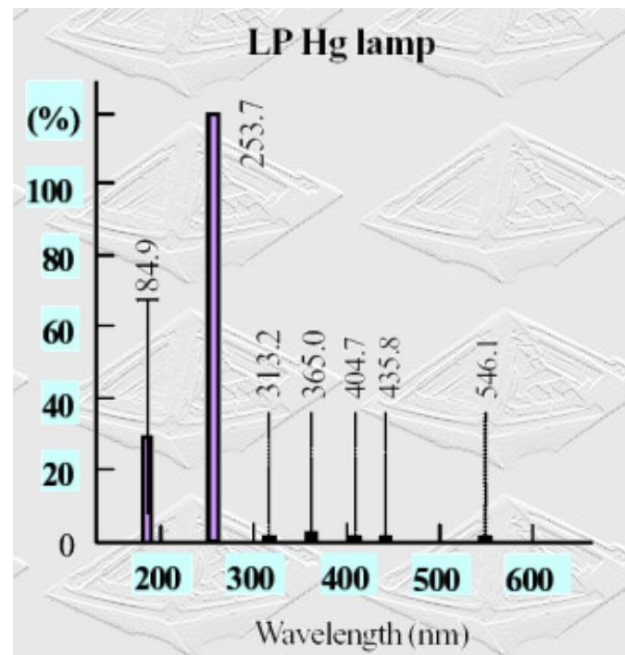
La **lunghezza di coerenza** é la massima distanza longitudinale tra due punti aventi fase correlata. La minima richiesta é data da:

$$L = N m \lambda = 1000 \cdot 2 \cdot 190 \text{ nm} = 380 \mu\text{m}$$

con ***N*** numero di fenditure del reticolo, ***m*** massimo ordine di interferenza che si intende osservare.

L'ipotesi piú promettente sembra quella della **lampade a mercurio a bassa pressione**

Presentano picchi a 185 e 254 nm (rapporto di potenza 1:5 circa)



# Sistema ottico

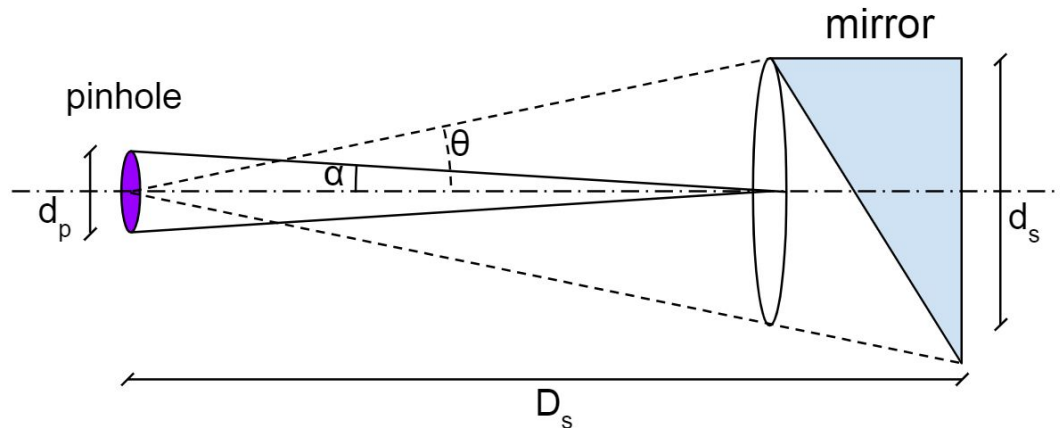
Serve a dare alla luce una maggiore **coerenza spaziale**:

*Massima distanza trasversa tra due punti aventi fase correlata*

Il modo piú semplice é utilizzare un pinhole seguito da uno specchio parabolico.

Dal principio di Heisenberg, fissata la distanza  $D_s$  (focale dello specchio), deduciamo la dimensione del pinhole

$$d_p \theta = d_p \frac{d_s}{2D_s} < \frac{\lambda}{2\pi}$$



Per esempio:

$$\lambda = 170 \text{ nm}$$

$$D_s = 60 \text{ mm}$$

$$d_s = 2 \text{ mm}$$

$$d_p = 2 \text{ } \mu\text{m}$$

Flusso atteso oltre il reticolo:

$$10^2 - 10^4 \text{ fotoni/s}$$



# Studio preliminare (ottica)

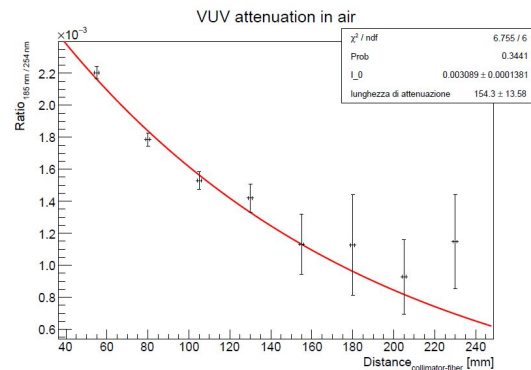
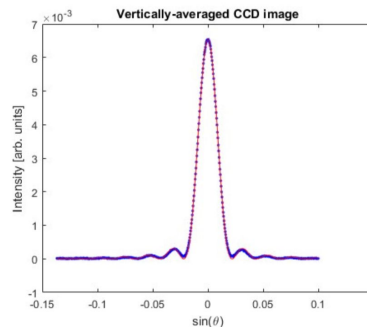
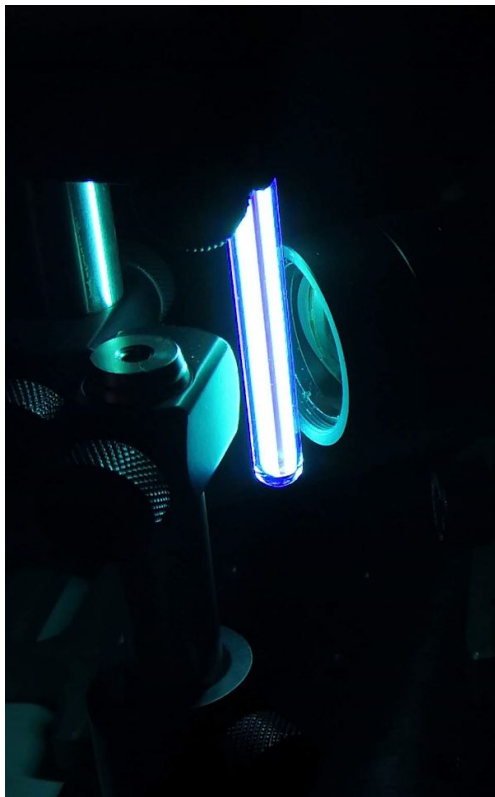
Stiamo lavorando a una pubblicazione che riassume i risultati ottenuti con il sistema ottico!

Nella prima fase ci siamo concentrati sullo studio della sorgente:

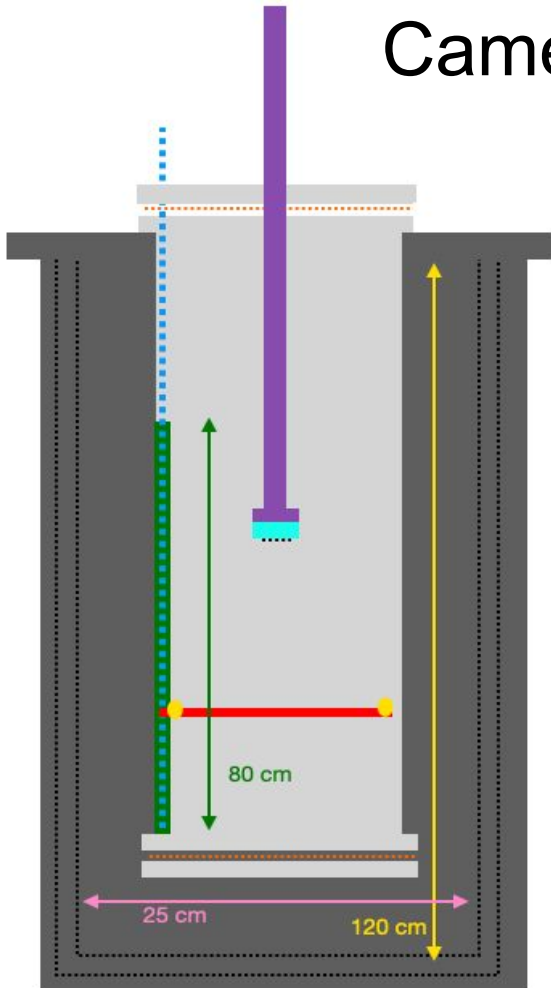
- Spettro della sorgente e larghezza del picco @ 184.9 nm (→ **coerenza temporale**)
- **Stabilità** nel tempo
- Lunghezza di **assorbimento** in aria

e del sistema ottico:

- **Flusso** ottenuto
- Livello di **coerenza**






# Camera ottica

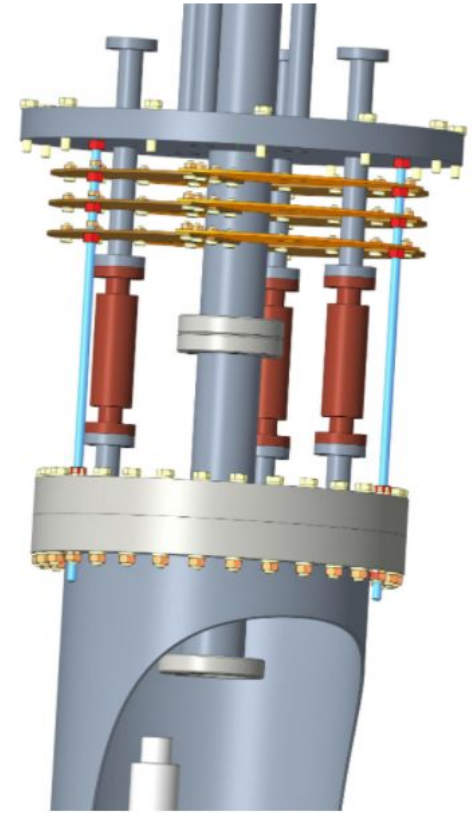
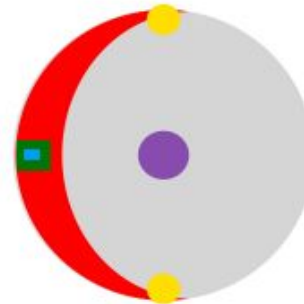


La rivelazione dei massimi della figura di interferenza avviene sulle pareti verticali della camera.

Questo design consente eventualmente di minimizzare la camera e di poter sfruttare la profondità di criostati già a disposizione.

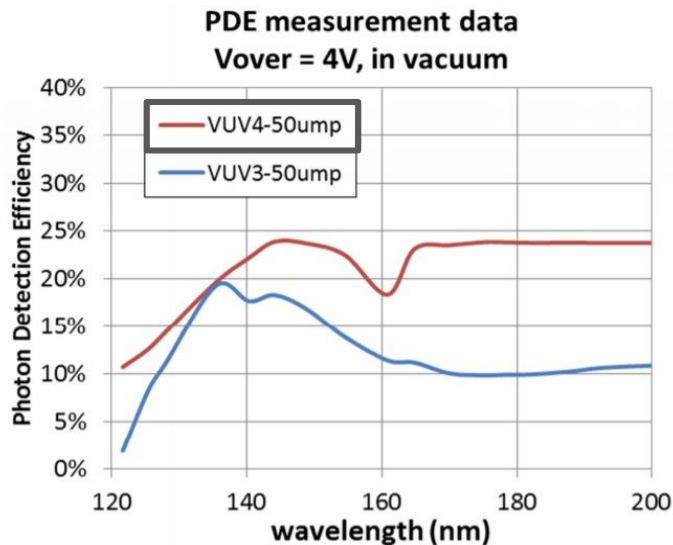
I 2 **SiPM** (uno per lato) sono **montati su un supporto** in grado di muoversi lungo la verticale per eseguire la scansione con una precisione di almeno 100  $\mu\text{m}$ .

-  Movimentazione
-  Supporto per SiPM
-  SiPM

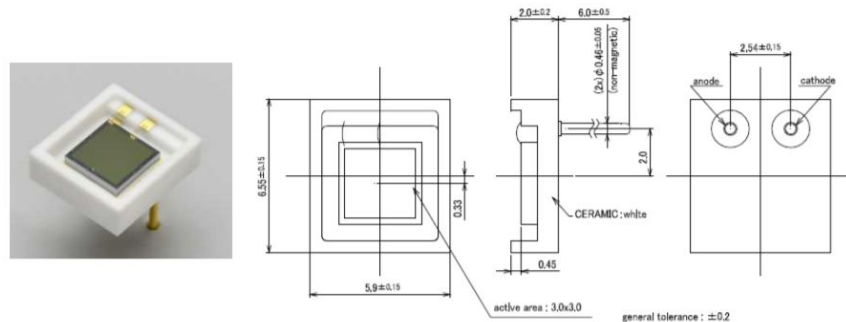


# SiPM Hamamatsu

Hamamatsu S13370-3075CN (9 mm<sup>2</sup>)  
DCR: < 1 Hz/mm<sup>2</sup> @ 165 K  
< 25 mHz/mm<sup>2</sup> @ 77K (S13360-DUNE)  
PDE: 24% @ 178 nm (nominale)



<S13370-3050CN / S13370-3075CN>



## Fondi da scintillazione

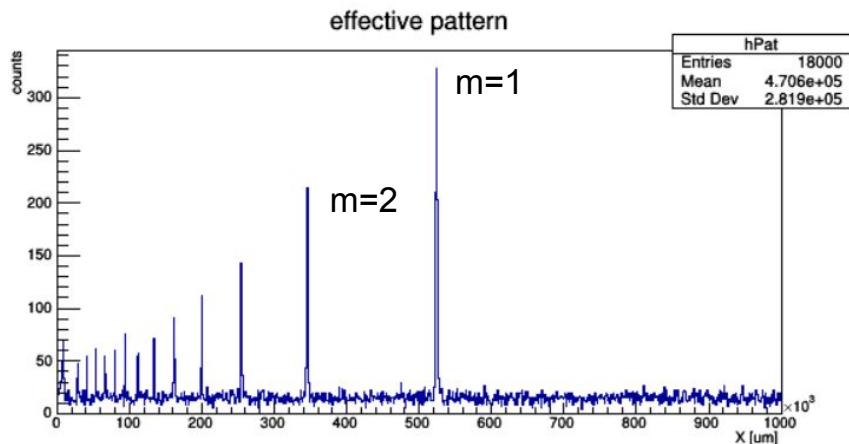
Per una camera di raggio 10 cm, alta 30-90 cm, i fondi aspettati sono

- raggi cosmici  $\Rightarrow$   $\sim 5-15 \text{ s}^{-1}$  in 50-150 MeV
- $^{39}\text{Ar}$   $\Rightarrow$   $\sim 10-30 \text{ s}^{-1}$  in 0-565 keV

Soluzione: più SiPM in anti-coincidenza.

# Simulazioni

Figura di interferenza generata, su un solo binario, nel caso di misura in vuoto e in LAr



grating\_step = 2  $\mu\text{m}$   
slit\_width = 0.4  $\mu\text{m}$   
N\_slits = 1000  
screen\_radius = 70 mm  
SiPM\_width = 1 mm  
rail\_step = 1 mm  
seconds\_per\_step = 30  
light\_rate = 100 Hz  
dark\_rate = 0.5 Hz

Viene utilizzata solo la parte contenente i primi due massimi ( $m=1,2$ ). Fit simultaneo di entrambe le configurazioni mediante il cambio di variabile:  $x \Rightarrow x' = R \text{Cotan}(\text{Sin}^{-1}(n \text{Sin}(\text{Cotan}^{-1}(x/R))))$

Valore di  $n$  ricostruito con errore relativo dell'ordine di  $10^{-4}$ .

# Segnali 184.9 nm

