

# Upgrade del rivelatore LUCID per High Luminosity LHC

---

IFAE 2024

3-5 APRILE 2024

DAVIDE CREMONINI



# Luminosità di un collider

Luminosità  $\rightarrow L = \frac{R}{\sigma}$

Frequenza di un processo  $\rightarrow R$

Sezione d'urto  $\rightarrow \sigma$

Numero di protoni nei bunch  $\rightarrow n_1, n_2$

Frequenza di rivoluzione  $\rightarrow f_r$

Sezioni trasversali dell'area di sovrapposizione dei fasci  $\rightarrow 2\pi \Sigma_x \Sigma_y$

$$L = \frac{f_r n_1 n_2}{2\pi \Sigma_x \Sigma_y}$$

La luminosità:

- **Fondamentale** per misurare le **sezioni d'urto** dei processi (offline);
- Fornisce informazioni sulle **prestazioni dell'acceleratore** in tempo reale (online).

Può essere misurata usando diversi algoritmi

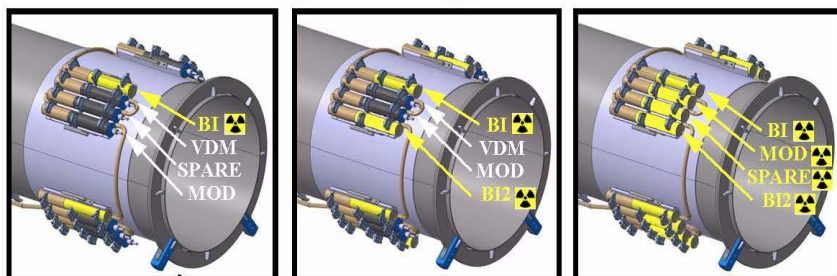
- **Hit counting**: conteggio del numero di segmenti del rivelatore che non hanno registrato segnali sopra soglia(hit);
- **Particle counting**: osservabile  $\propto$  luminosità (numero di tracce, energia nei calorimetri).

# LUCID 2

4 sets of 4 Photomultipliers

Cherenkov medium: Quartz windows

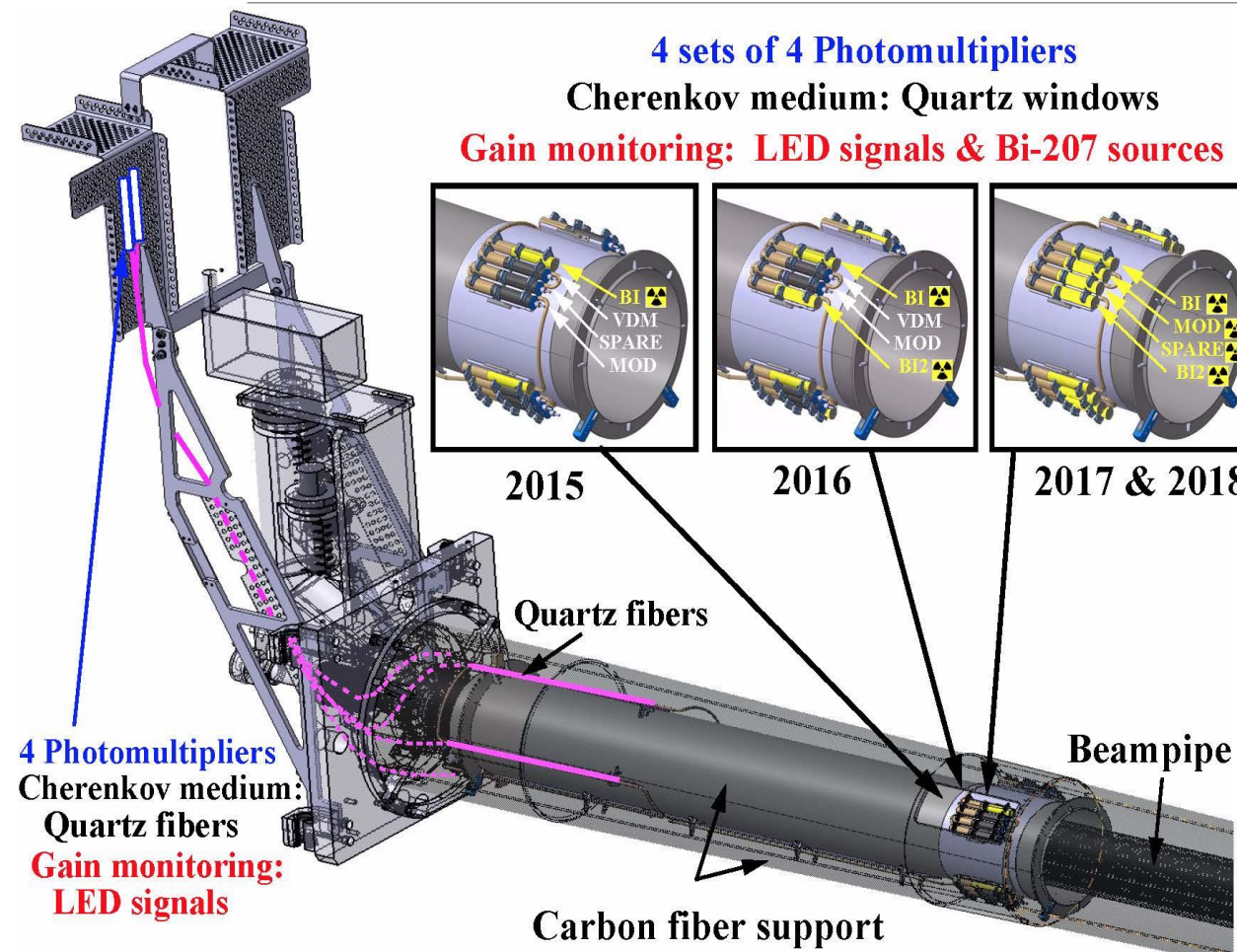
Gain monitoring: LED signals & Bi-207 sources



2015

2016

2017 & 2018



2 moduli simmetrici rispetto al punto di interazione posizionati a 17m di distanza dall'IP.

4 blocchi di 4 PMTs (Hamamatsu R760) + 4 fibre di quarzo (dismesse) in ciascun lato.

Finestra del PMTs in quarzo funge da radiatore Cherenkov.

Calibrazione PMTs:  $^{207}\text{Bi}$  depositato su finestra PMTs.

Calibrazione fibre: LED (nessun monitoraggio dei PMTs di readout).

Algoritmi usati:

- Hit counting (principale HitOrBi2);
- Particle counting (carica prodotta dai PMTs).

Stabilità sul lungo periodo migliore del 1%.

Precisione offline 0.8%.

Simili performance attese anche in Run-3 (in corso)

Performance non raggiungibile durante HL-LHC (vedi slide successiva).

# Requisiti LUCID-3

---

## Limitazioni di LUCID-2 in HL-LHC:

- Incremento del numero di interazioni per bunch crossing ( $\mu$ ) da 60 a 200 -> Saturazione degli algoritmi;
- Luminosità più alta (300->4000  $fb^{-1}$ ) -> Maggiore danno da radiazioni;
- Impossibile raggiungere la precisione dell'1%.

## Requisiti:

- **Evitare la saturazione** anche a  $\mu=200$ :
  - Uso di PMTs di diametro inferiore (rispetto agli Hamamatsu R760 usati in LUCID-2);
  - PMTs posizionati più lontano dalla linea di fascio (diminuzione del flusso di particelle).
- **Precisione** sulla misura della luminosità **OFFLINE dell'1%**;
- **Precisione** sulla misura della luminosità **ONLINE dell'ordine del 2/3%**;
- Mitigazione dei danni da radiazione;
- **Nuova elettronica** attualmente in sviluppo a Bologna:
  - Compatibile con gli standard di ATLAS (DAQ basata su Felix);
  - Frequenza di campionamento dei segnali dei PMTs più alta.

# Progetti per LUCID-3

2 rivelatori principali:

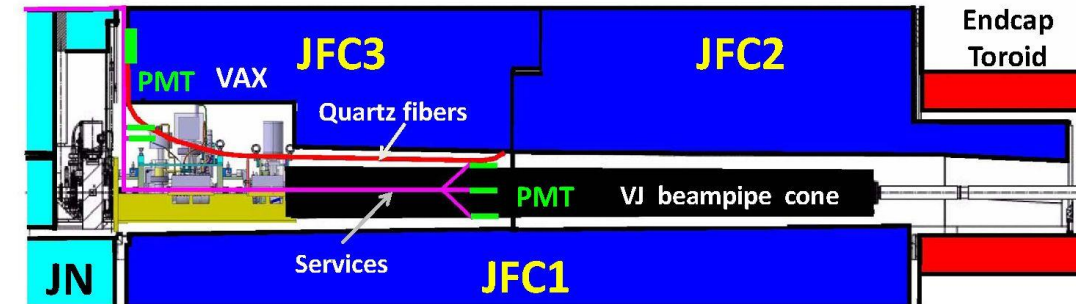
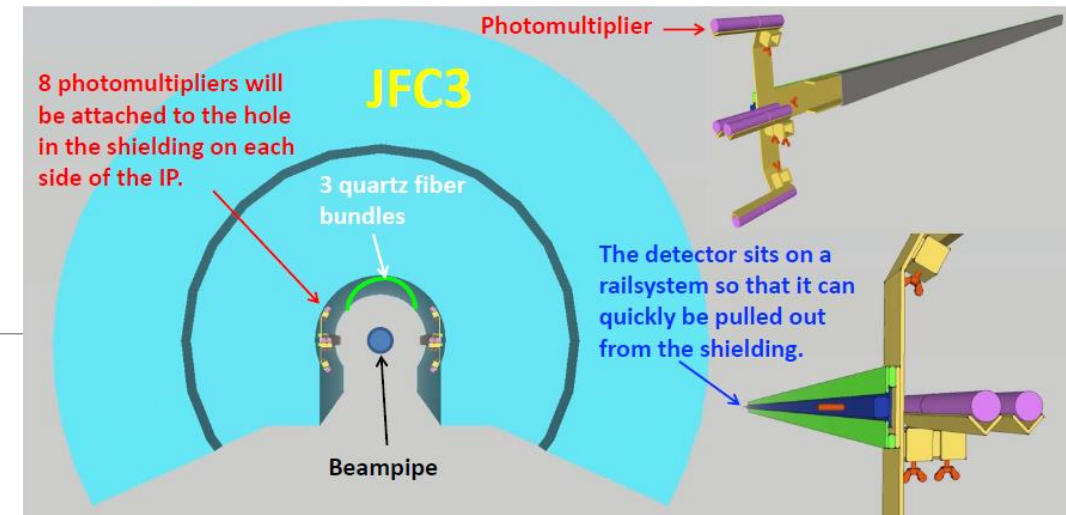
- Rivelatore a PMT;
- Rivelatore a fibre.

**Rivelatore a PMT:**

- Riduzione accettazione
- PMTs attaccati al «JFC-3 forward shielding» (circa 17m dal punto di interazione) tramite un sistema di rotaie estraibili per ridurre l'esposizione a radiazioni durante la manutenzione.

**Rivelatore a fibre:**

- Carica  $\propto$  luminosità;
- PMTs posizionati in una zona a minore radiazione;
- Sistema di calibrazione migliorato rispetto a Run-2;
- Fibre attaccate al «JFC-3 shielding» per non interferire con il sistema a vuoto di LHC;
- Complementare al rivelatore a PMT.

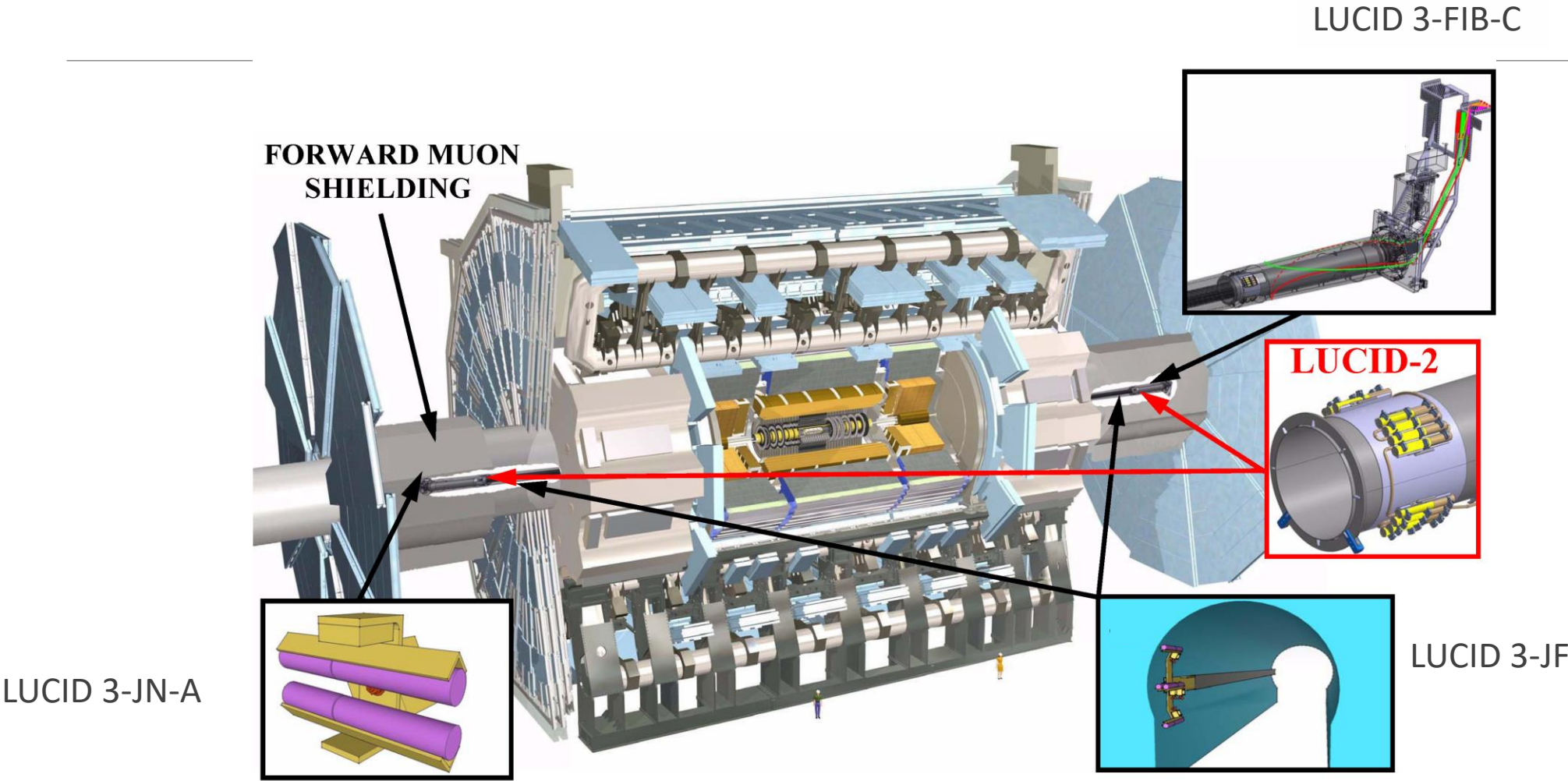


I vari progetti sono sotto studio mediante l'utilizzo di tre prototipi già installati in ATLAS in una configurazione simile a quella definitiva:

- LUCID 3-JN-A
- LUCID 3-JF
- LUCID 3-FIB-C (argomento principale)



# LUCID-2 e prototipi LUCID-3 in Run-3



# Prototipi a PMT

Riduzione del flusso di particelle:

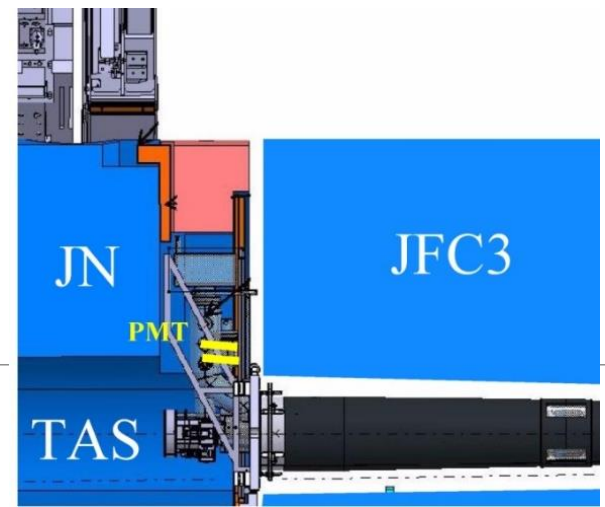
- Nuovi PMTs più piccoli (R1635)

PMTs più lontani dalla linea di fascio (LUCID 3-JF)

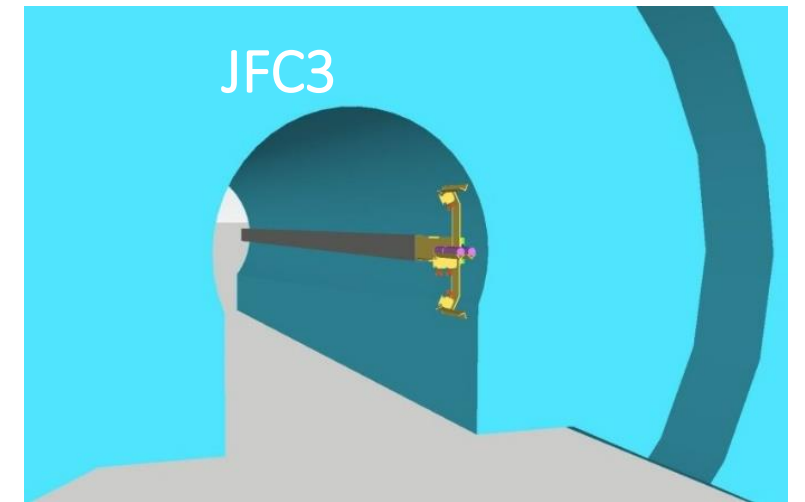
- Rivelatore principale per LUCID-3;
- R1635 sul lato A, R760 sul lato C per confronto.

PMTs dietro lo shielding (LUCID 3-JN-A)

- Accettanza ridotta (riduzione del danno);
- Attesa maggiore linearità rispetto a  $\mu$ ;
- Non calibrabile direttamente con i van der Meer scans\*.

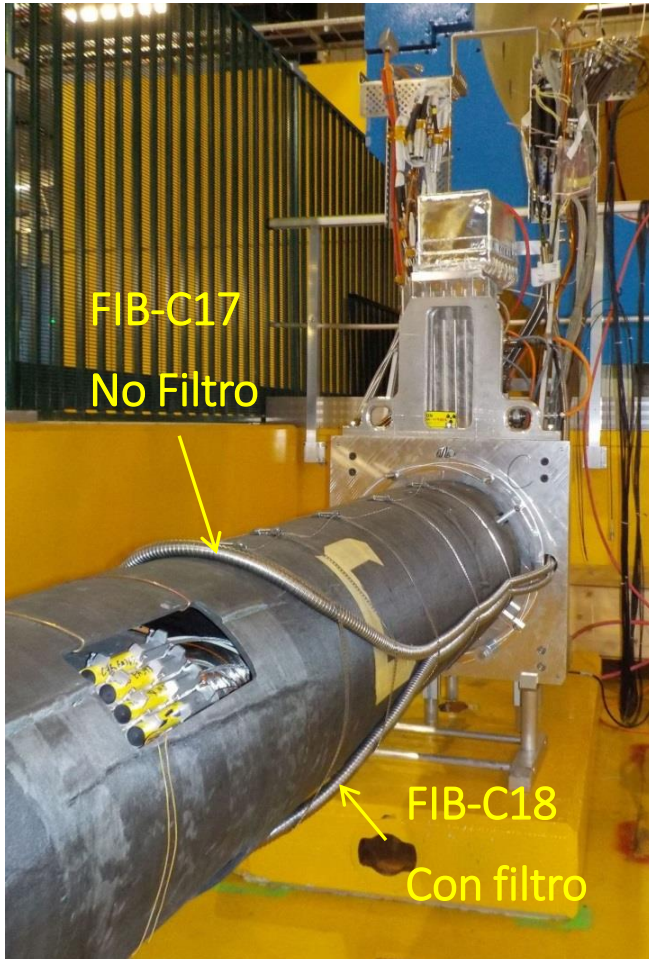


LUCID 3-JN-A – confronto per il detector principale



LUCID 3-JF – Principale sostituto di LUCID-2

# Prototipi a Fibre



2 nuovi fasci di fibre in quarzo accoppiati con 2 nuovi PMTs Hamamatsu R7459.

Fibre fungono da radiatore Cherenkov e trasportano la luce fino al PMT.

Una delle fibre equipaggiata con un filtro UV (vedi slides successive).

PMT calibrato con  $^{207}\text{Bi}$  depositato sulla finestra (novità rispetto a fibre dismesse di LUCID-2).

**Nuovo sistema di monitoraggio del danno da radiazione alle fibre:**

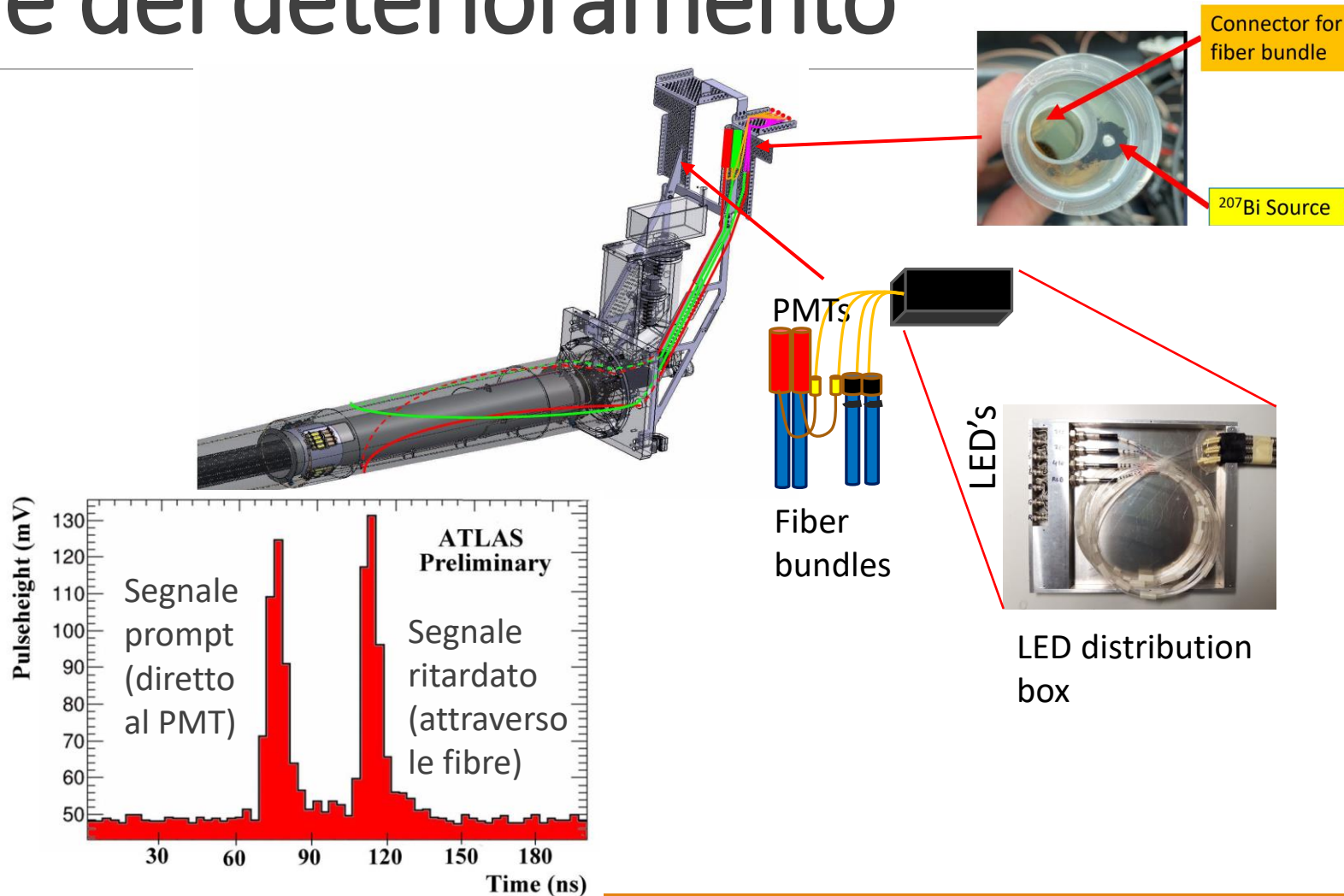
- **Controllo online** della **degradazione delle fibre**;
- **Simulazione di ATLAS** per stimare il **flusso di particelle** attraverso le fibre;
- **Sessione di irraggiamento** per studiare il **deterioramento** delle fibre;
- **Test su fascio** per studiare la dipendenza **dell'ampiezza/carica del segnale** in funzione della **direzione della particella incidente**.



# Controllo online del deterioramento

6 LEDs ( $\lambda$  fra 310 e 627 nm) per controllare la degradazione delle fibre:

- Box di distribuzione per dividere la luce dei LED;
- Parte di essa va diretta al PMT (segnale prompt);
- Parte di essa passa attraverso la fibra (segnale ritardato);
- Rapporto ci fornisce misura sul deterioramento delle fibre;
- Analisi in corso per determinarne l'uso per la correzione OFFLINE della luminosità.



# Linearità rispetto a $\mu$

$\mu_{algo} / \mu_{tracks}$  vs  $\mu_{tracks}$

- $\mu_{tracks}$ :  $\mu$  calcolato con algoritmi di track-counting,
- $\mu_{algo}$ : algoritmo del LUCID in considerazione.

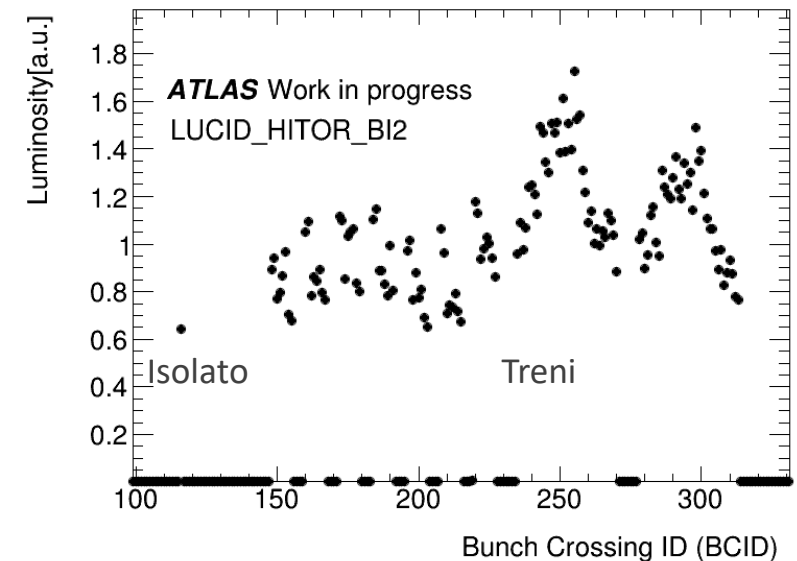
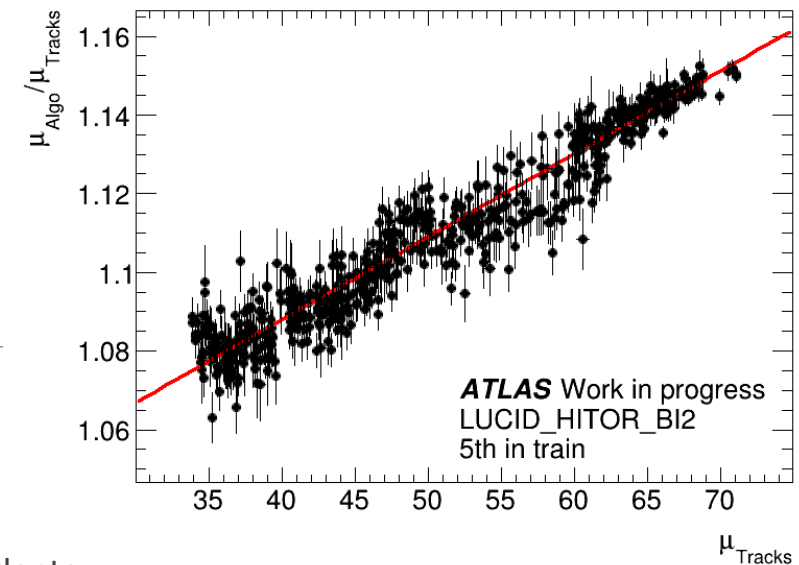
Fit lineare per estrarre intercetta e pendenza:

- Intercetta: fornisce informazioni sulla calibrazione;
- Pendenza: correzione da applicare per non-linearità.

Se ripetuto per ogni tipologia di pacchetto (isolato\*, 1° nel treno\*\*, 2° nel treno, ecc) -> Informazioni sulla dipendenza di intercetta e pendenza dallo schema di riempimento del fascio di LHC (train dependence).

Confronto con LUCID-2 (LUCID HitOrBi2).

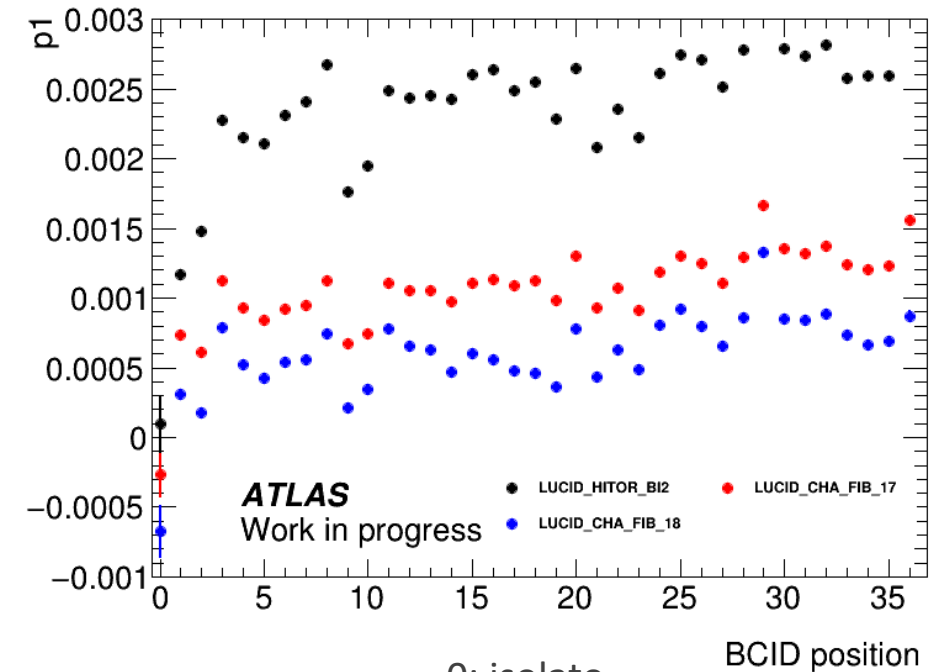
\*Isolato: Nessun pacchetto collidente subito prima o subito dopo  
\*\*Treno: serie di più pacchetti collidenti in successione



# Linearità rispetto a $\mu$

**Fibra C17** (senza filtro UV) leggermente peggiore rispetto a **C18**.

**C18** mostra linearità migliore di un fattore 4-5 rispetto a LUCID-2 (**HitOrBi2**).



0: isolato  
1: 1° nel treno  
2: 2° nel treno

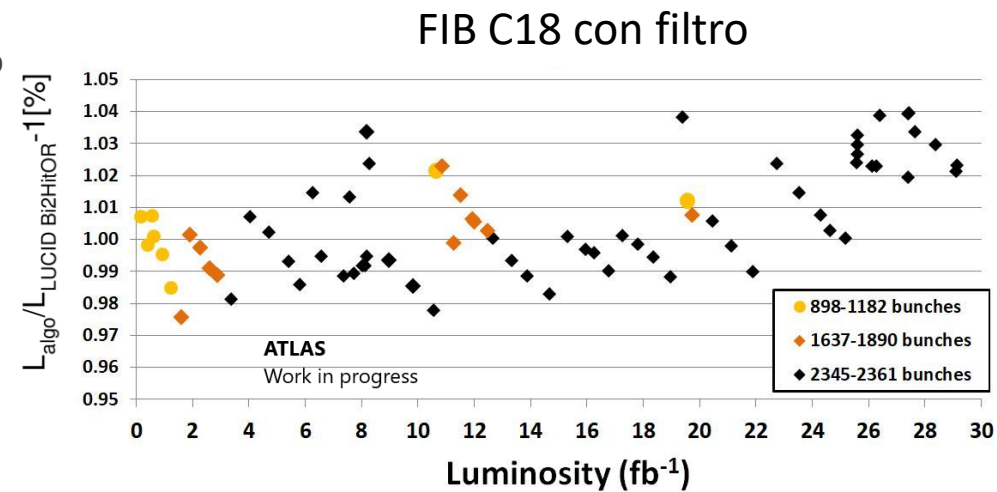
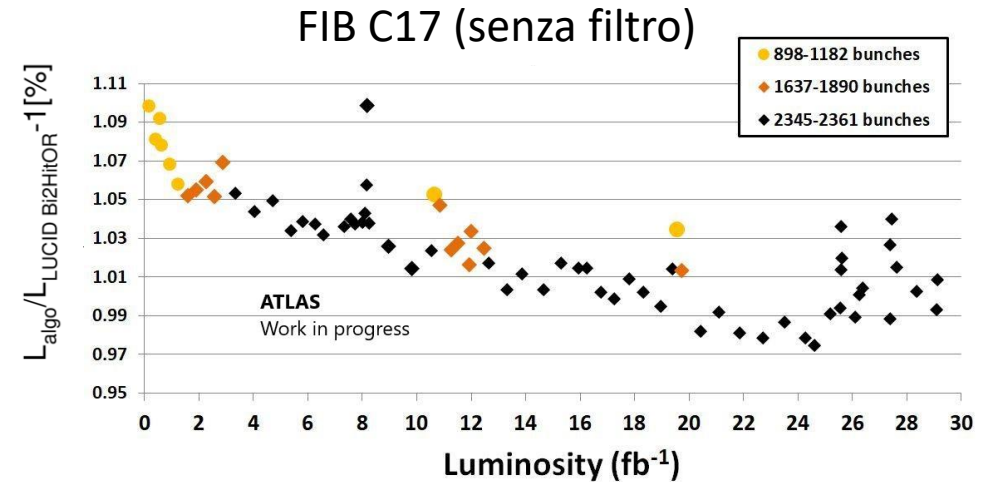
# Stabilità sul lungo periodo

FIB C18 (con filtro UV) molto più stabile rispetto a FIB C17 (senza filtro UV) :

- Filtro riduce effetti deterioramento fibra (vedi slide successiva).

FIB C18 presenta un andamento a dente di sega:

- Dovuto a un problema di sensibilità nelle calibrazioni,
  - Sensibilità nel monitoraggio delle correnti non sufficiente ad un aggiustamento del HV per mantenere la stabilità entro il % sul breve periodo.
- Studio in corso per aumentare la frequenza di calibrazione e la sensibilità del monitoraggio delle correnti per un aggiustamento più frequente del guadagno.



# Degradamento della fibra

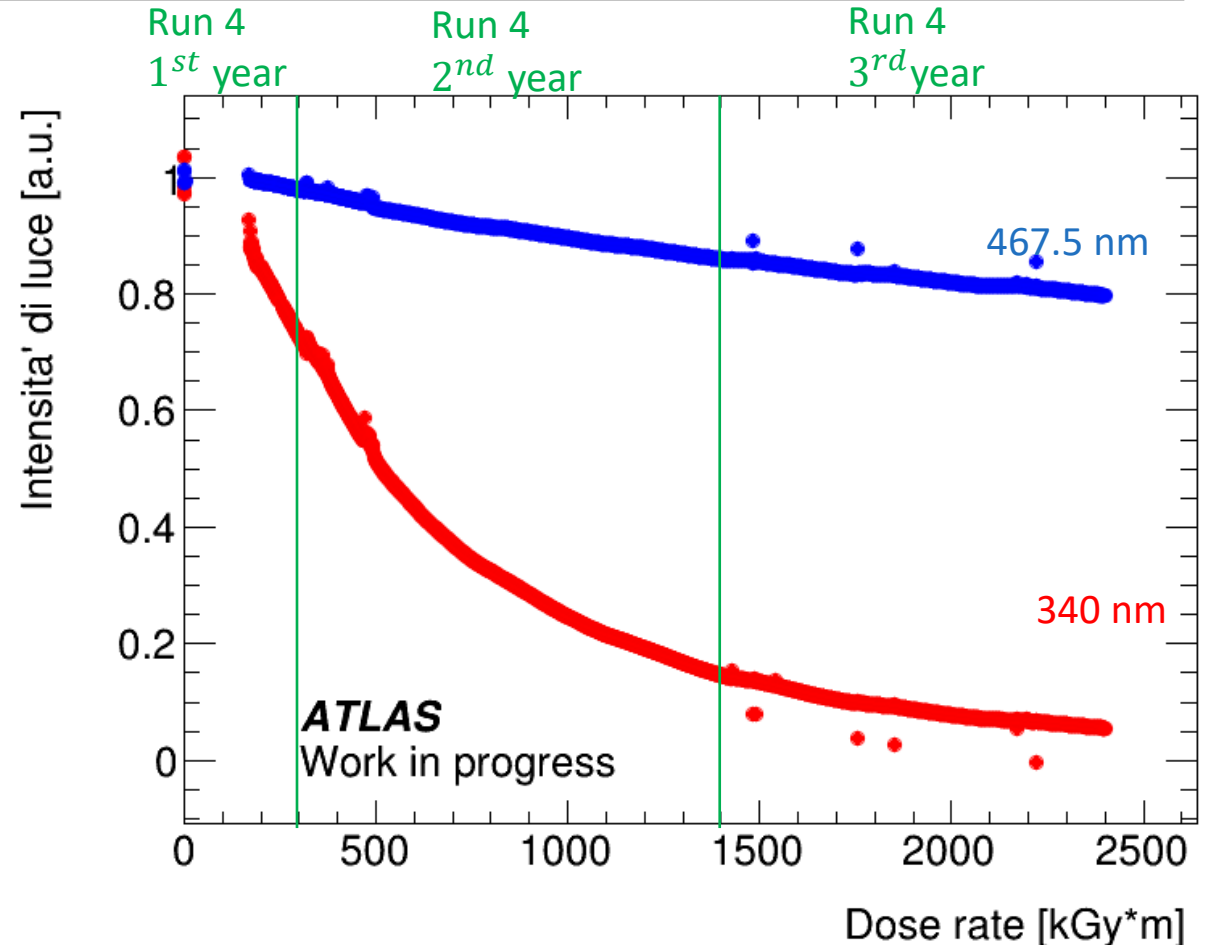
Fibre testate all'impianto di irraggiamento gamma Calliope (Enea, Roma).

6 differenti lunghezze d'onda ( $\lambda$  fra 285 e 627 nm) alternate durante l'irraggiamento per monitorare il deterioramento delle fibre in funzione della dose e della lunghezza d'onda.

Perdita di luce confrontata con le attese durante il Run-4.

Perdita di trasmissività della luce per danni da radiazione osservata in particolare nell'UV. Inferiore alle alte lunghezze d'onda:

- motivazione per inserimento del filtro UV in uno dei prototipi.





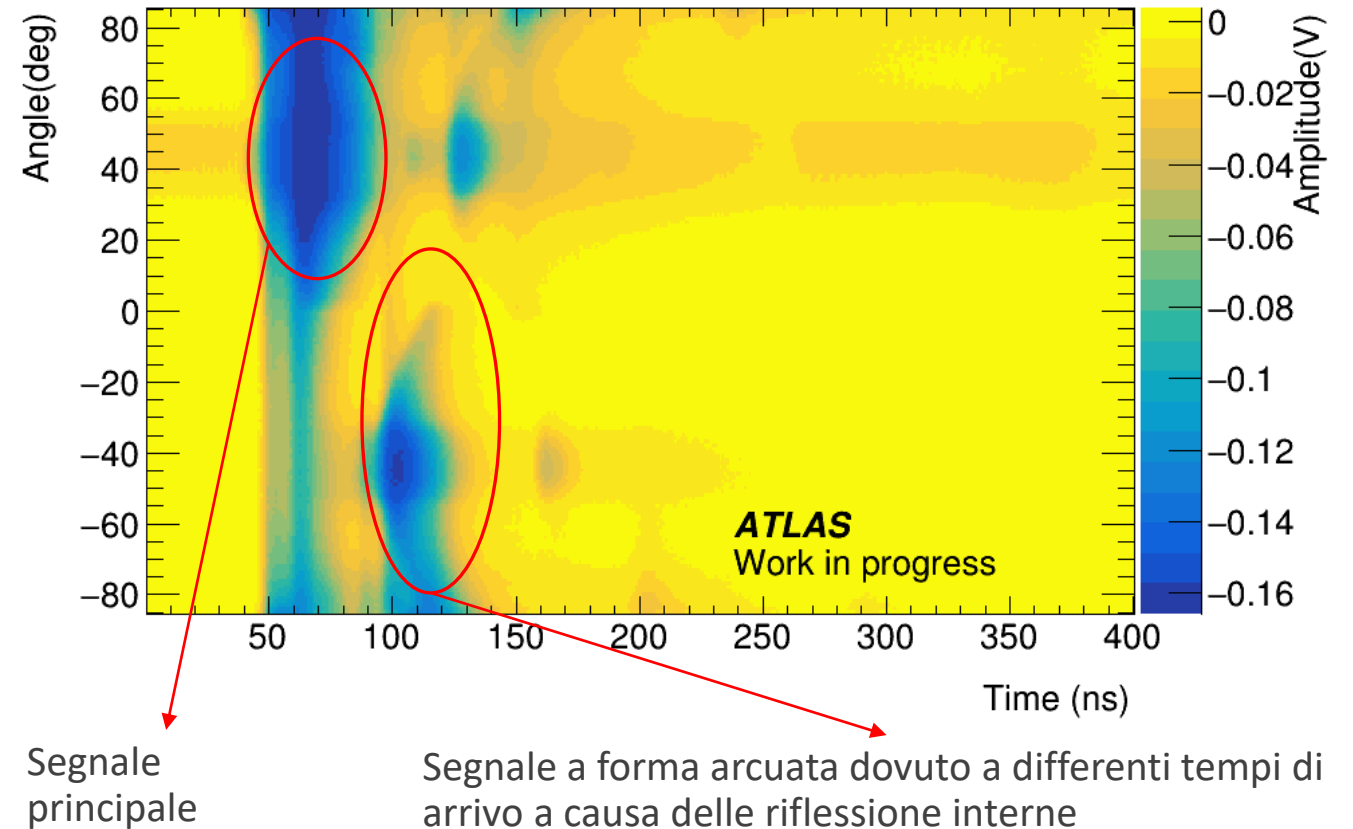
# Produzione Cherenkov dentro fibra

Prove su fascio effettuate a CLEAR (CERN) utilizzando fasci di elettroni a 200MeV.

Scopi:

- Misurare l'ampiezza/carica del segnale in funzione dell'angolo di incidenza del fascio;
- Validazione dei dati raccolti durante l'irraggiamento usando luce Cherenkov.

Monitoraggio delle fibre, simulazione e dati del test beam verranno utilizzati per correggere la misura di luminosità con il prototipi a fibre



# Conclusioni

---

LUCID-2 ha avuto ottime prestazioni in Run-2 (0.8% di incertezza) e prestazioni simili sono attese per Run-3.

LUCID-2 non potrà operare a HL-LHC a causa della saturazione degli algoritmi e maggiore danno da radiazioni -> Nuovo LUCID (LUCID-3).

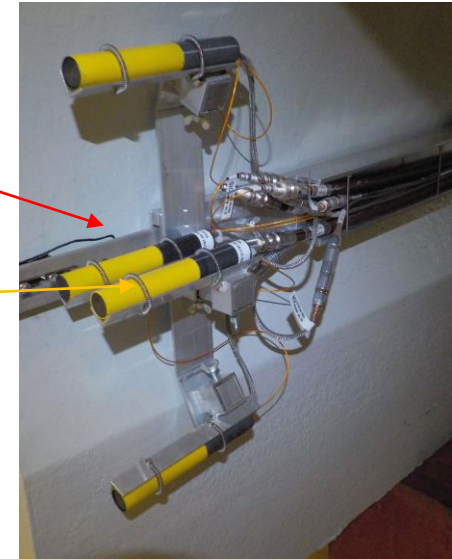
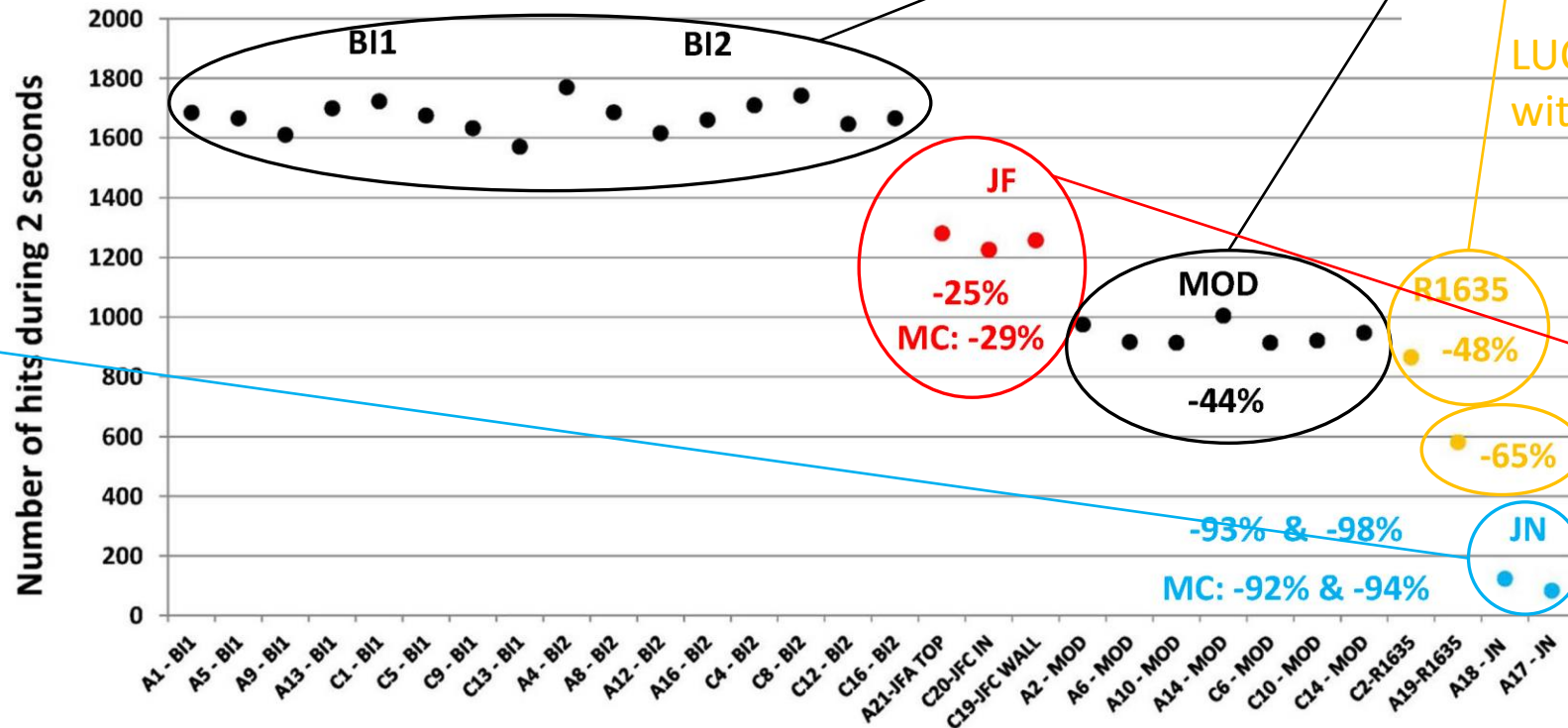
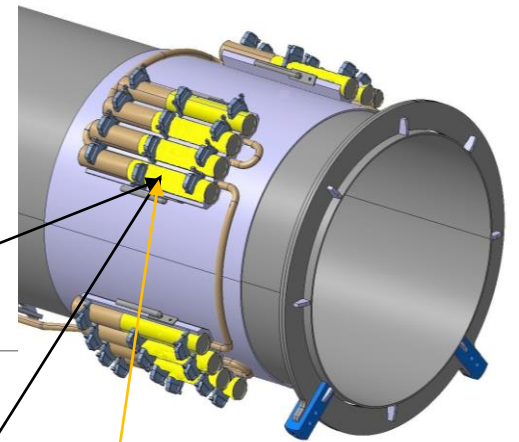
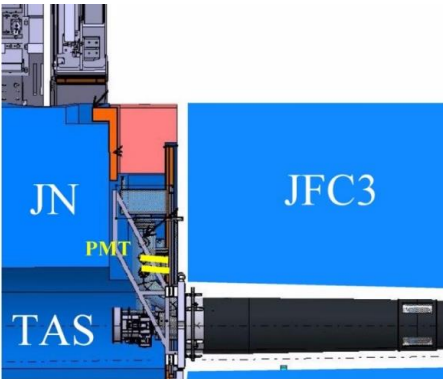
Prototipi di LUCID-3 attualmente sotto studio:

- JF (rivelatore principale): linearità e stabilità simile a LUCID-2 ma con minore accettazione (no saturazione);
- JN (rivelatore di controllo): maggiore linearità, ridotto danno da radiazione, stabilità simile a LUCID-2;
- Fibre (rivelatore complementare):
  - Filtro UV migliora sia linearità che stabilità sul lungo periodo,
  - Correzione offline per deterioramento fibra ancora in studio,
  - Miglioramento calibrazioni sotto studio per ridurre instabilità nel breve periodo.

# Grazie per l'attenzione

Backup

# Flux comparison in first collision data



- Flux reduction crucial aspect for LUCID-3 design
- Observed acceptance reduction consistent with MC simulation model.



# Precisione attesa

Online (errore statistico  $\approx$  2-3%):

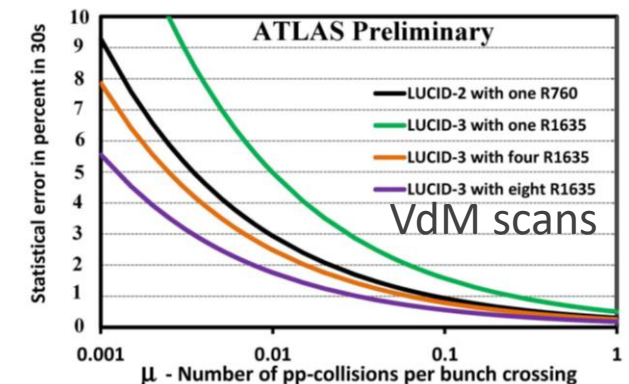
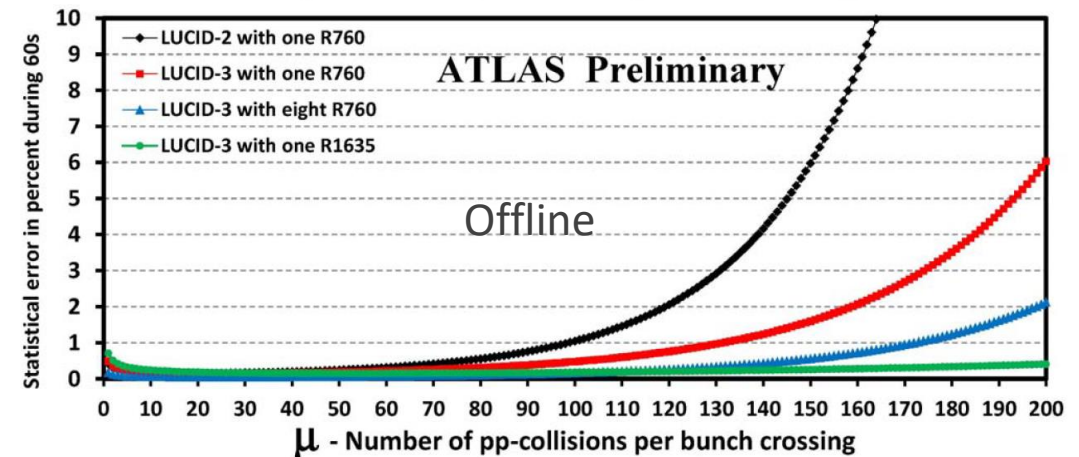
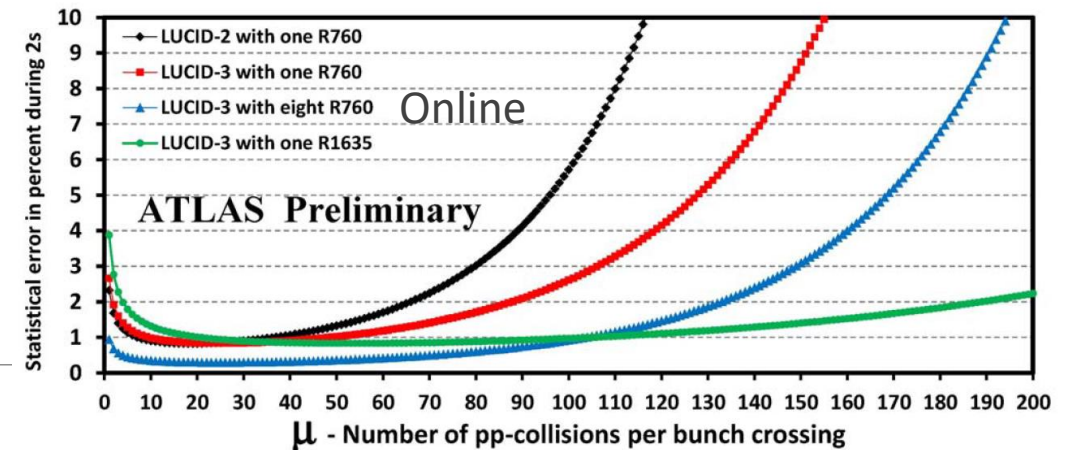
- 8 R760 capaci di lavorare fino a  $\mu = 150$  (errore statistico 3%)
- Solo 1 R1635 capace di raggiungere  $\mu = 200$  (errore statistico 2%)

Offline (errore statistico  $< 1\%$ ):

- 8 R760 capaci di raggiungere  $\mu = 170$
- 1 R1635 capace di raggiungere  $\mu = 200$  con un errore statistico migliore dell'1%

VdM scans:

- 1 R1635 manca di statistica
- Sono richiesti almeno 4 o 8 R1635



# Conclusion

---

LUCID-2 won't be able to operate during HL-LHC due to hit saturation and radiation damage

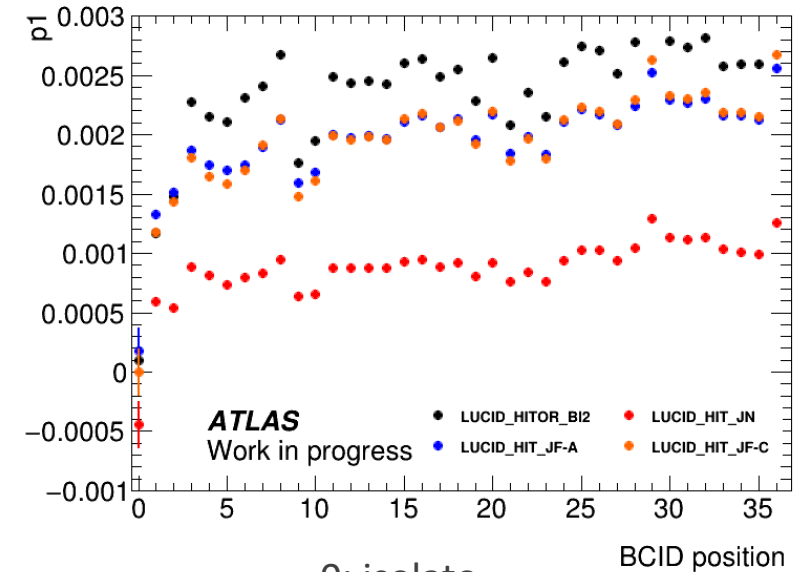
LUCID-3 prototypes are currently under study:

- JN: very low  $\mu$  correction but high run-to-run fluctuations
- JF: very good run-to-run stability but  $\mu$  correction similar to LUCID-2
- New R1635 PMT needs a new readout board with higher sampling rate
- Fiber calibration system under development
  - Fiber irradiation session -> filter inserted in one of the prototype to improve time stability
  - Beam test data: analysis in progress

# Linearità rispetto a $\mu$

JN mostra linearità migliore di un fattore 4-5 rispetto a LUCID-2 (come atteso).

JF comportamento simile a LUCID HitOR (simile tra R760 e R1635).



0: isolato  
1: 1° nel treno  
2: 2° nel treno

# Luminosità di un collider

Luminosità  $\rightarrow$   $L = \frac{R}{\sigma}$

Frequenza di un processo  $\rightarrow$   $R$

Sezione d'urto  $\rightarrow$   $\sigma$

Numero di protoni nei bunch  $\rightarrow$   $n_1, n_2$

Frequenza di rivoluzione  $\rightarrow$   $f_r$

Sezioni trasversali dell'area di sovrapposizione dei fasci  $\rightarrow$   $2\pi\Sigma_x\Sigma_y$

$$L = \frac{f_r n_1 n_2}{2\pi\Sigma_x\Sigma_y}$$

La luminosità:

- **Fondamentale** per misurare le **sezioni d'urto** dei processi (offline);
- Fornisce informazioni sulle **prestazioni dell'acceleratore** in tempo reale (online).

Può essere misurata usando diversi algoritmi

- Hit counting:  $\mu_{vis} = -\ln\left(1 - \frac{N_{HIT}}{N_{CH}N_{BC}}\right)$ ;
- Particle counting: osservabile  $\propto$  luminosità (numero di tracce, energia nei calorimetri).

# Stabilità sul lungo periodo

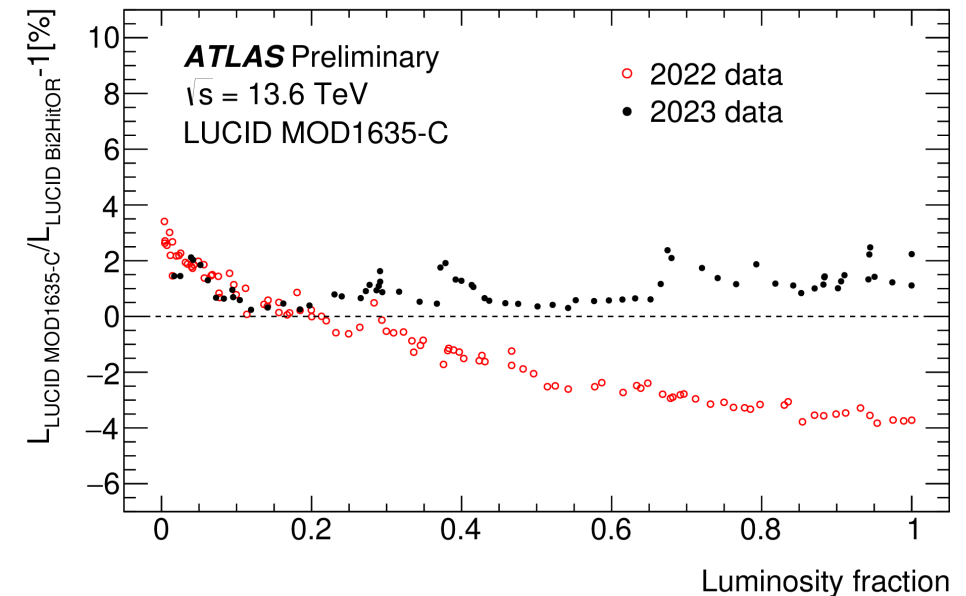
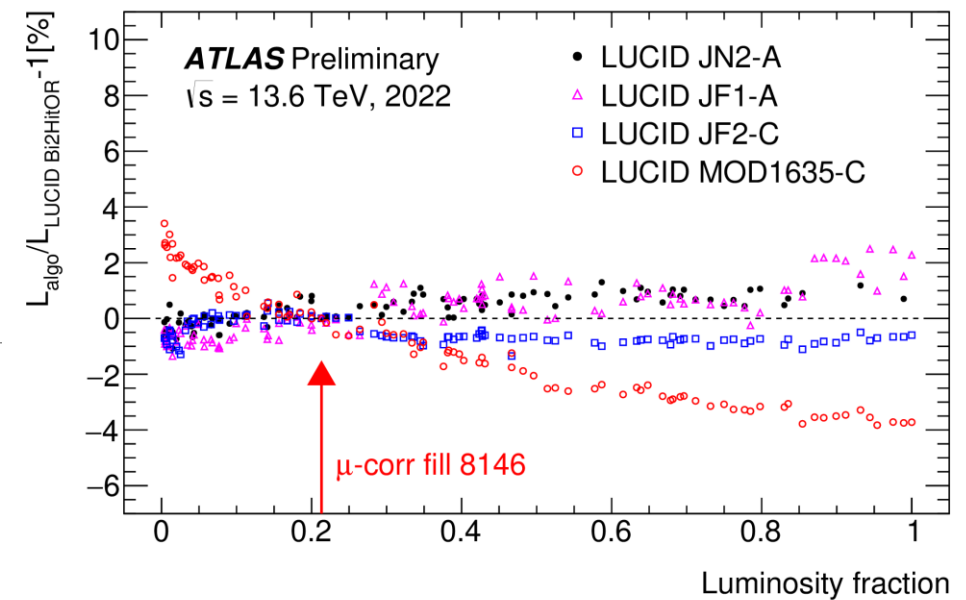
Stabilità temporale:

- Confronto con LUCID HitOr(algoritmo principale) nell'arco di un'intera presa dati.

Tutti i prototipi stabili al livello dell'1%.

Il PMT R1635 posizionato nel LUCID-2 presenta una deriva:

- Deriva corretta nel 2023 grazie al miglioramento del campionamento dei segnali nell'elettronica di RO;
- Analisi in corso per capire la residua instabilità;
- PMT lavora in condizioni di corrente oltre le specifiche fornite da Hamamatsu;
- Ridotta la tensione operativa nel 2024 per rientrare nelle specifiche.



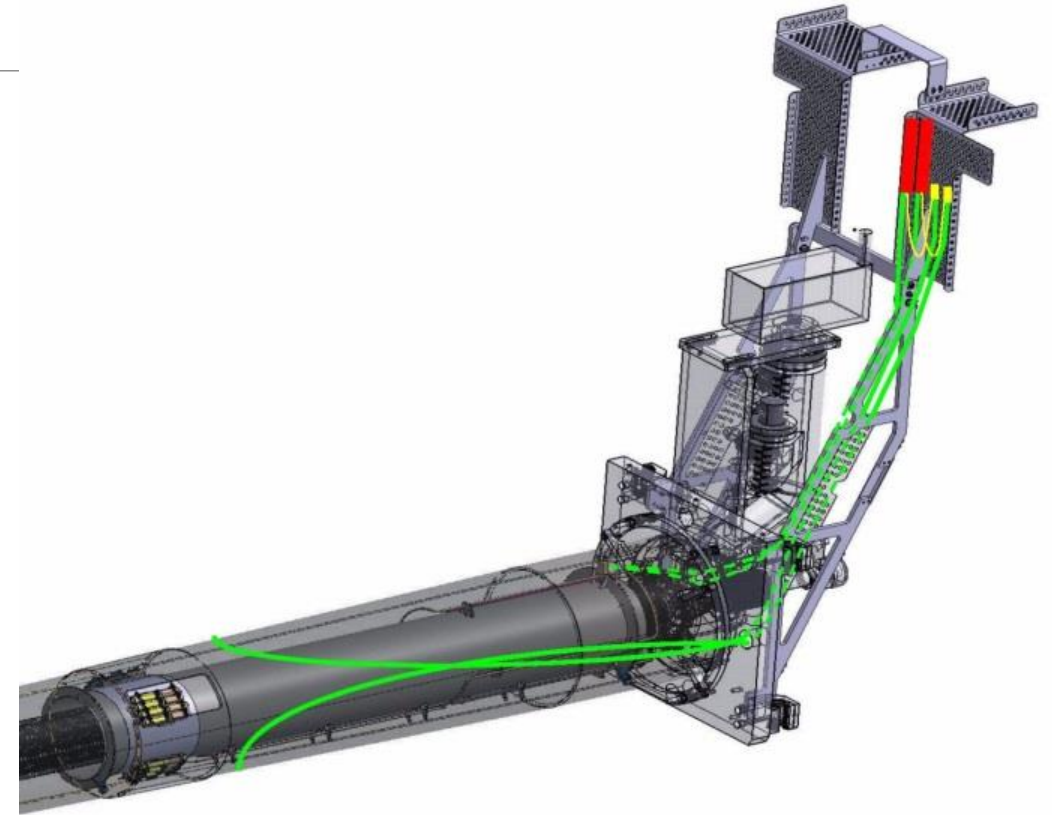


# LUCID-3 fiber prototype

Nuovi fasci di fibre e nuovo PMT ([R7459](#))

Tecnica di calibrazione avanzata:

- $^{207}\text{Bi}$  per calibrare il PMT
- LED per misurare degradazione della fibra

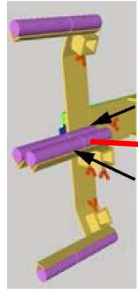


**LUCID 2-FIB-C** - a two channel fiber detector with the PMTs calibrated by Bi-207 and the fibers by LED signals.

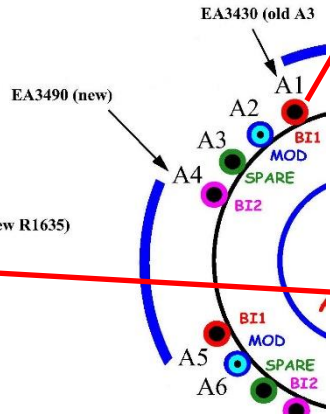
# Bismuth calibration



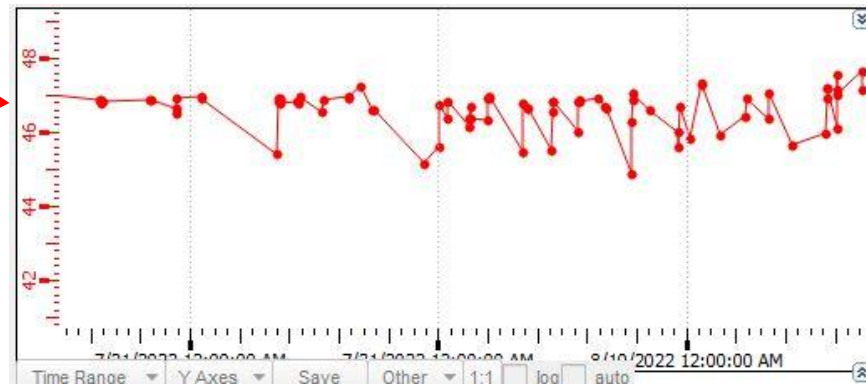
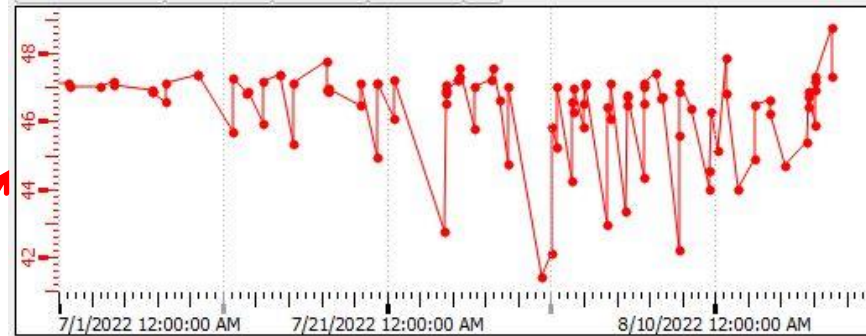
A17 EA3487 (new) JN-A1  
A18 EA3461 (new) JN-A2



A19 ZU5468 (new R1635)  
JF-A1



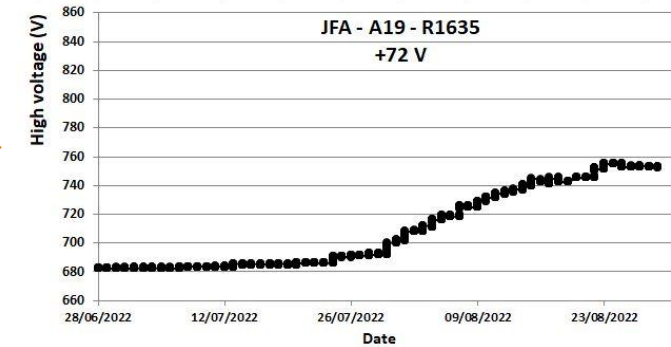
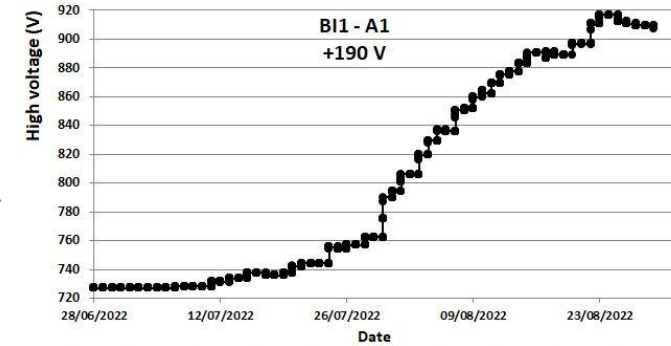
Mean amplitude in Bi-207 calib. runs



Automatic  
HV script



High voltage

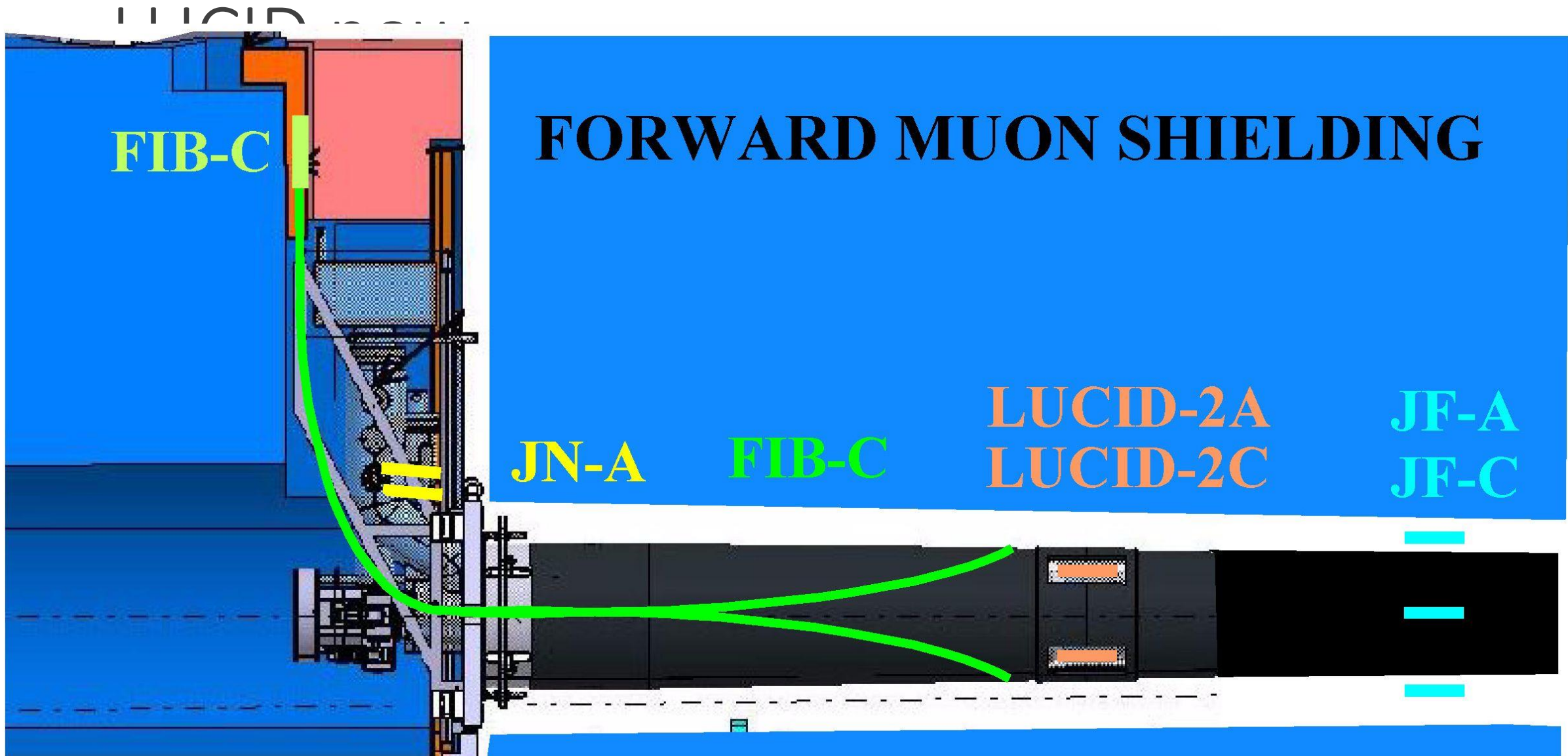


The Bi-207 gain calibrations look as expected

Rapid increase of the high voltage as a result of the calibrations

Increase for different PMTs is as expected and consistent with Run 2 experience

Less gain loss during runs for JF detector and small PMTs



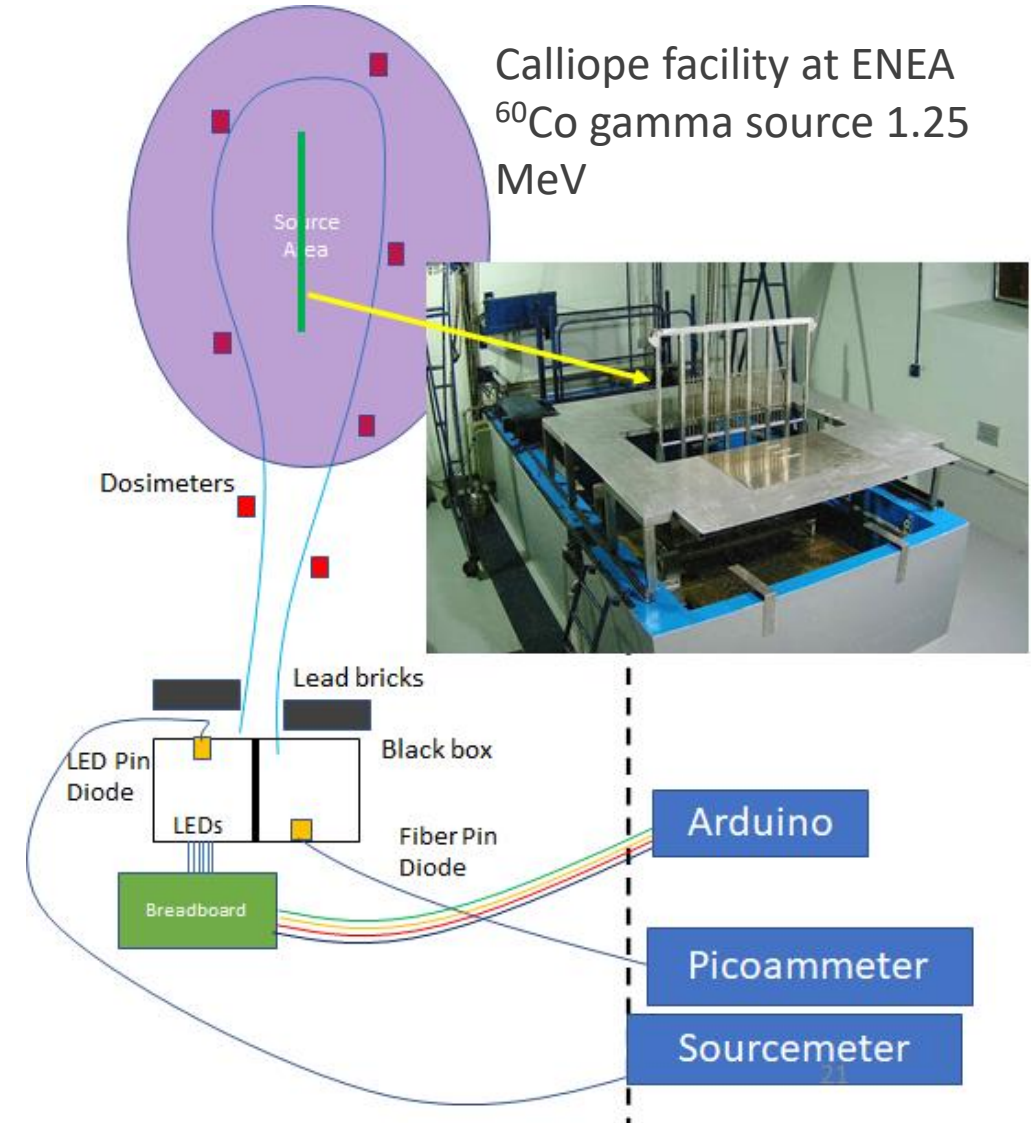
# Experimental apparatus at ENEA

## 4 different LEDs for light injection:

- MTE280F13-UV ( $\lambda=280$  nm)
- MTE340H21 ( $\lambda=340$  nm)
- VCC VAOL-5GUV8T4 ( $\lambda=385$  nm)
- LEDRGBE ( $\lambda=627.5, 525, 467.5$  nm)

## 2 Pin diodes for output measurements

- LED pin diode: monitoring of light emitted from LEDs
- Fiber pin diode: monitoring of light at the end of fibers





# Beam test setup

3 different fibers under study:

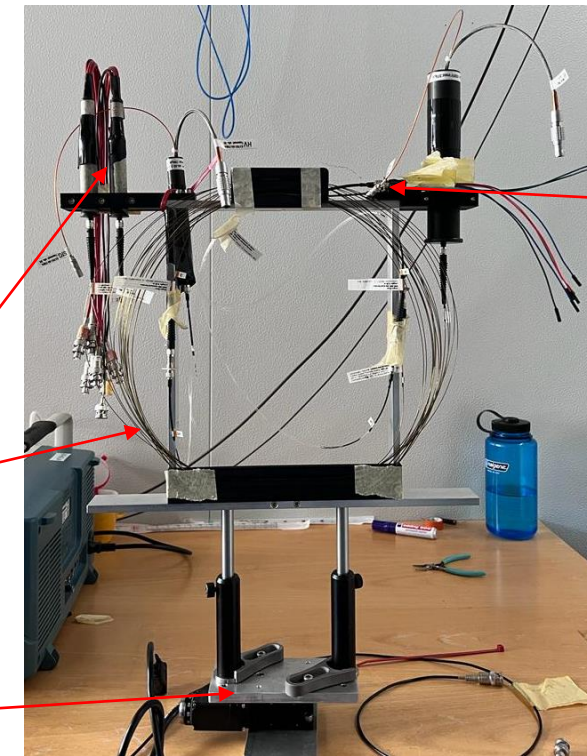
- Non irradiated LUCID fiber
- Irradiated LUCID fiber (704KGy)
- Irradiated fiber with lower numerical aperture (0.22 instead of 0.28)

Rotating support for the fibers

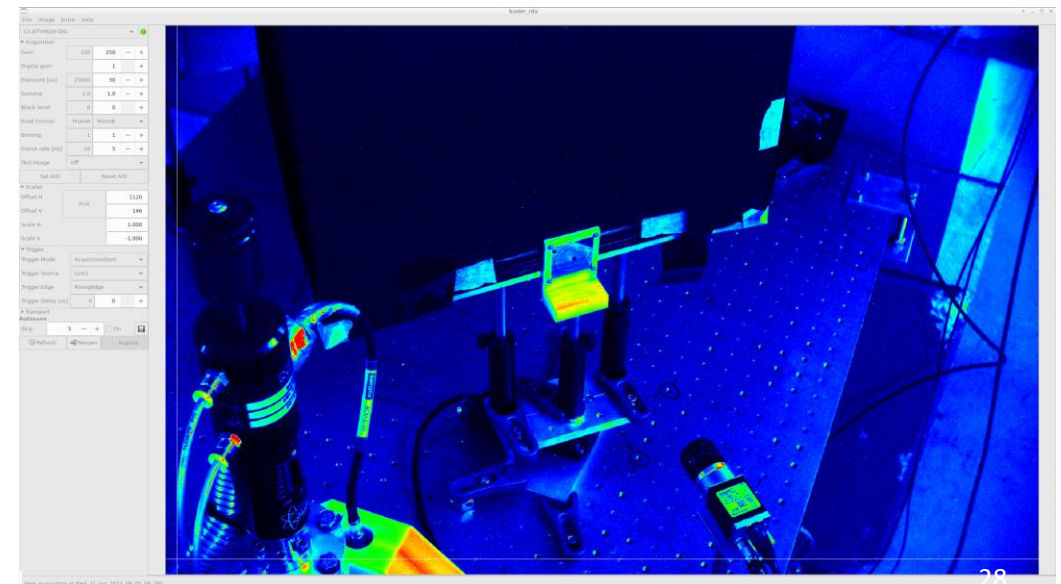
200 MeV electron beam hitting fibers in 3 different points

Signals read-out by 3 PMTs attached to the support

LED system to monitor fibers degradation during data taking + 1 PMT to monitor LEDs



LEDs





# New fiber calibration

Innovative calibration system:

- Online monitoring of fiber degradation
- ATLAS simulation to get the particle flux through LUCID fibers
- Irradiation session to study the degradation of the fibers due to radiation
- Beam test to study the dependence of the signal amplitude/charge as function of the incident particle angle

Goal: get a correction factor to be applied to luminosity measured by this prototype