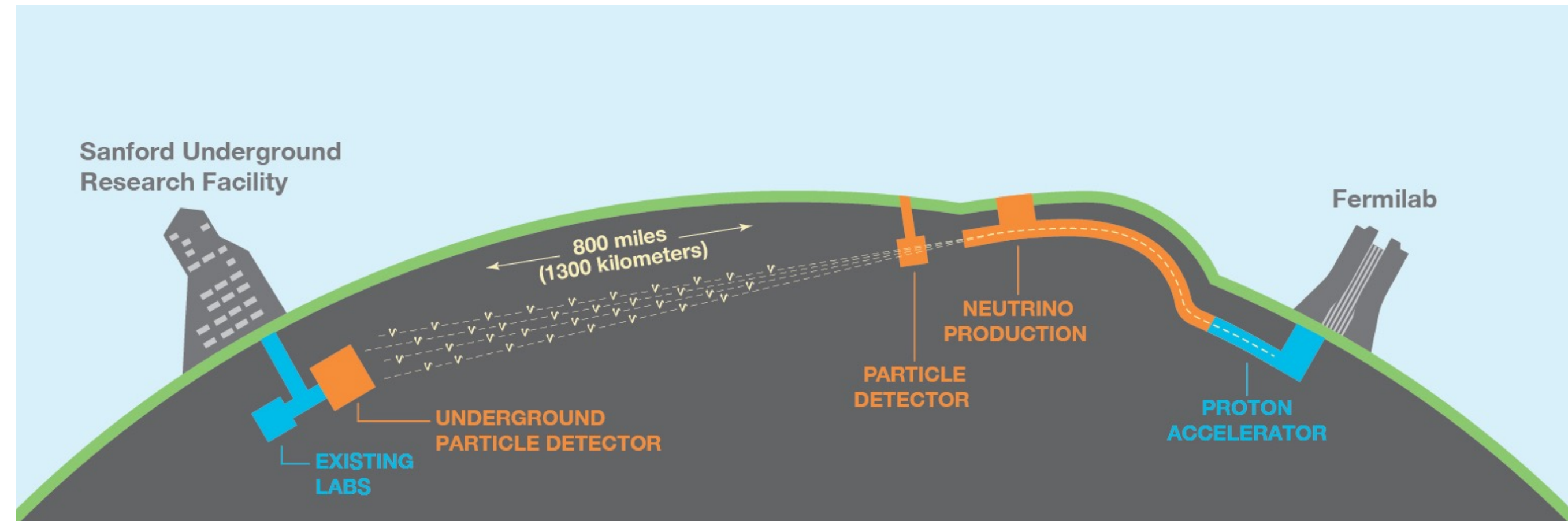

ovvero

DUNE

SBN/ICARUS

Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE)

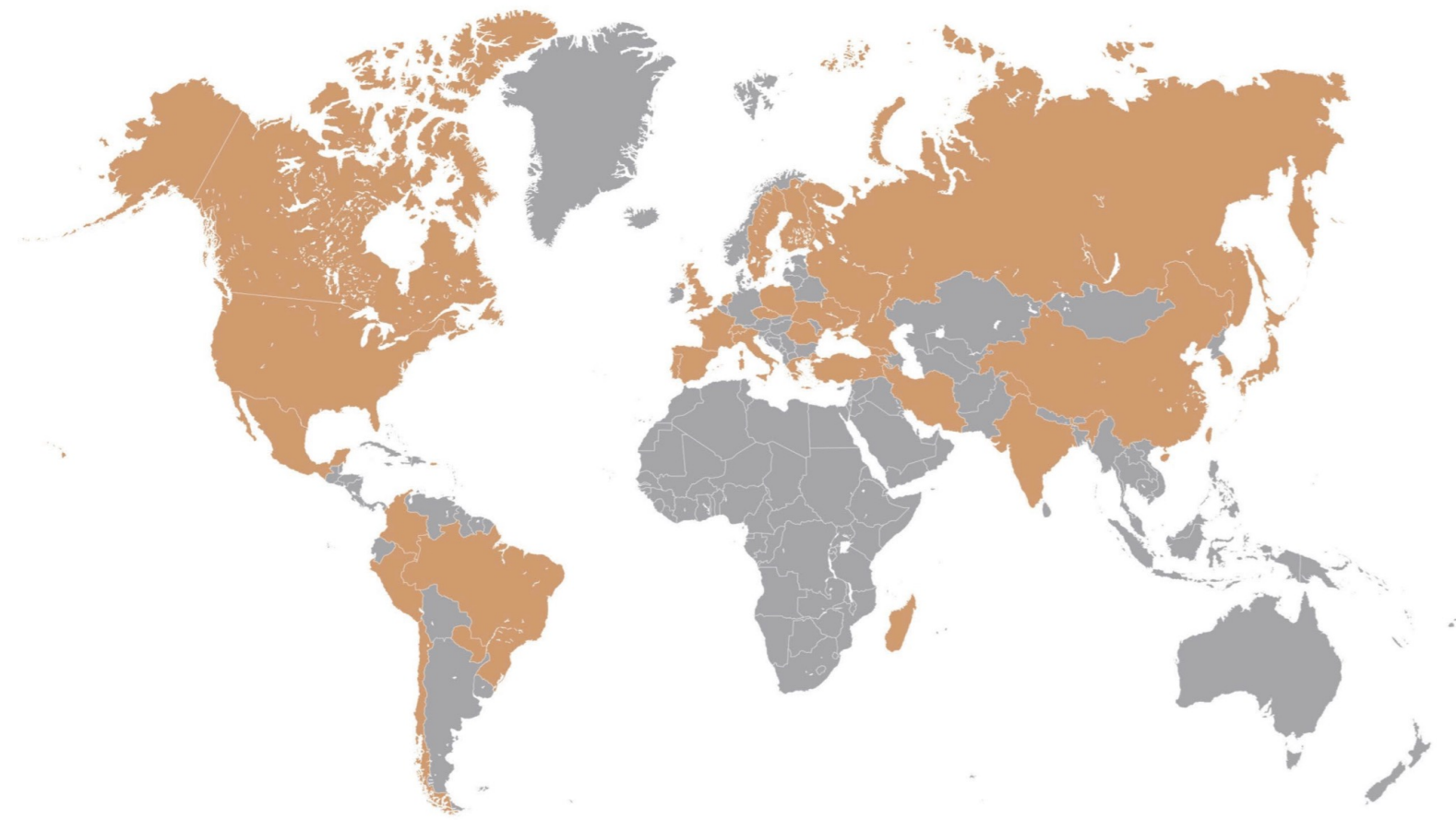
- Esperimento «long baseline» sulle oscillazioni dei neutrini



- Fascio di (anti)neutrini ad alta intensità prodotto a Fermilab
- Rivelatore «lontano» (Far Detector): 4 moduli (Module 1...Module 4) di argon liquido (~70 kt) presso SURF (Sanford Underground Research Facility) Sud Dakota) a ~1500 m di profondità
- Rivelatore «vicino» (Near Detector) - a Fermilab - a 570 m dalla zona di produzione del fascio

La Collaborazione

1300+ Membri
200+ Istituzioni
30+ Paesi e CERN



CERN, Gennaio 2020

Il Programma di Fisica di DUNE

- **Oscillazione dei neutrini**

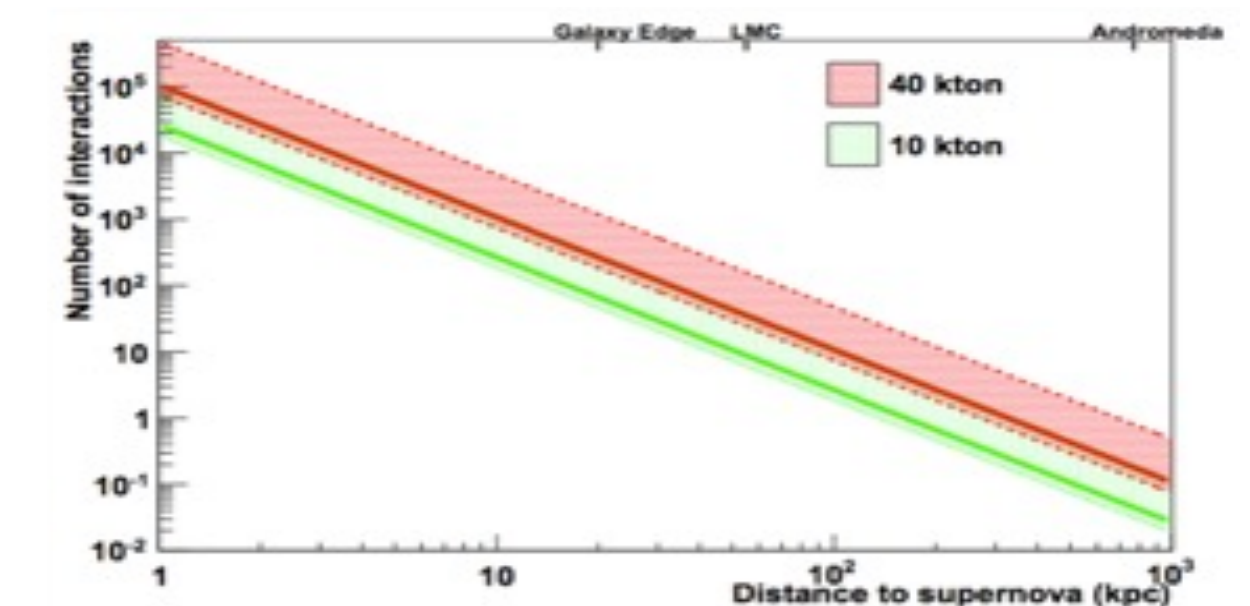
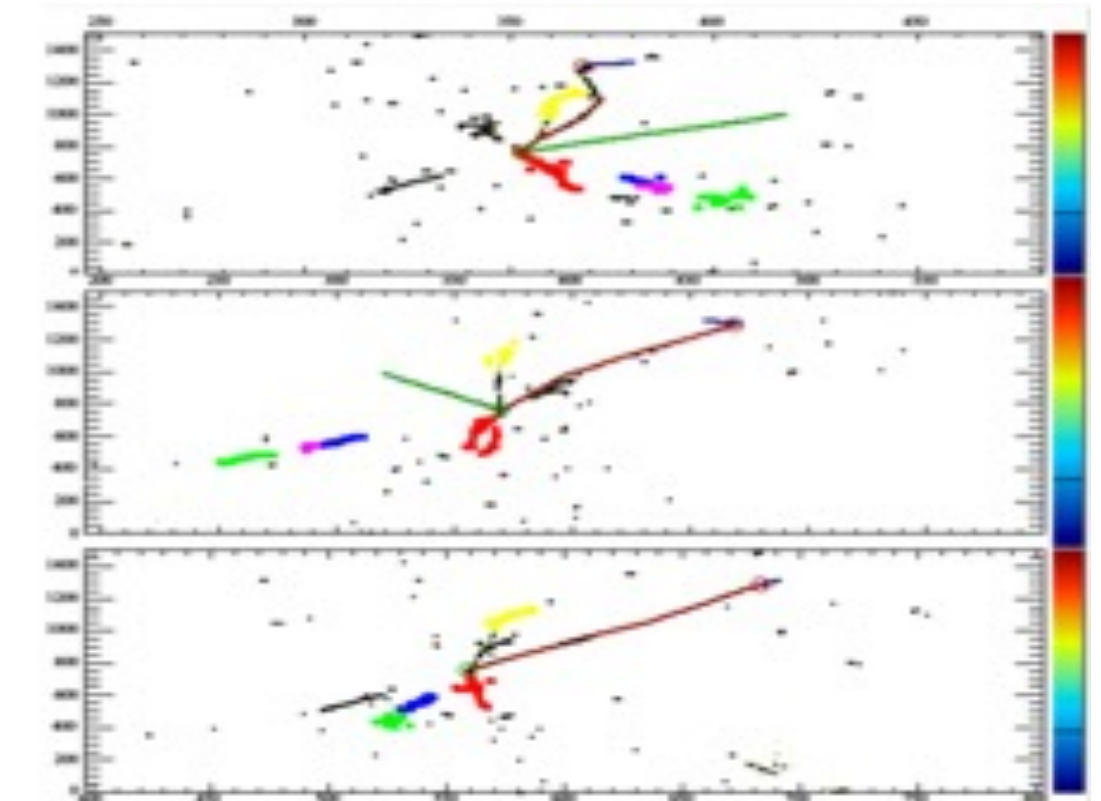
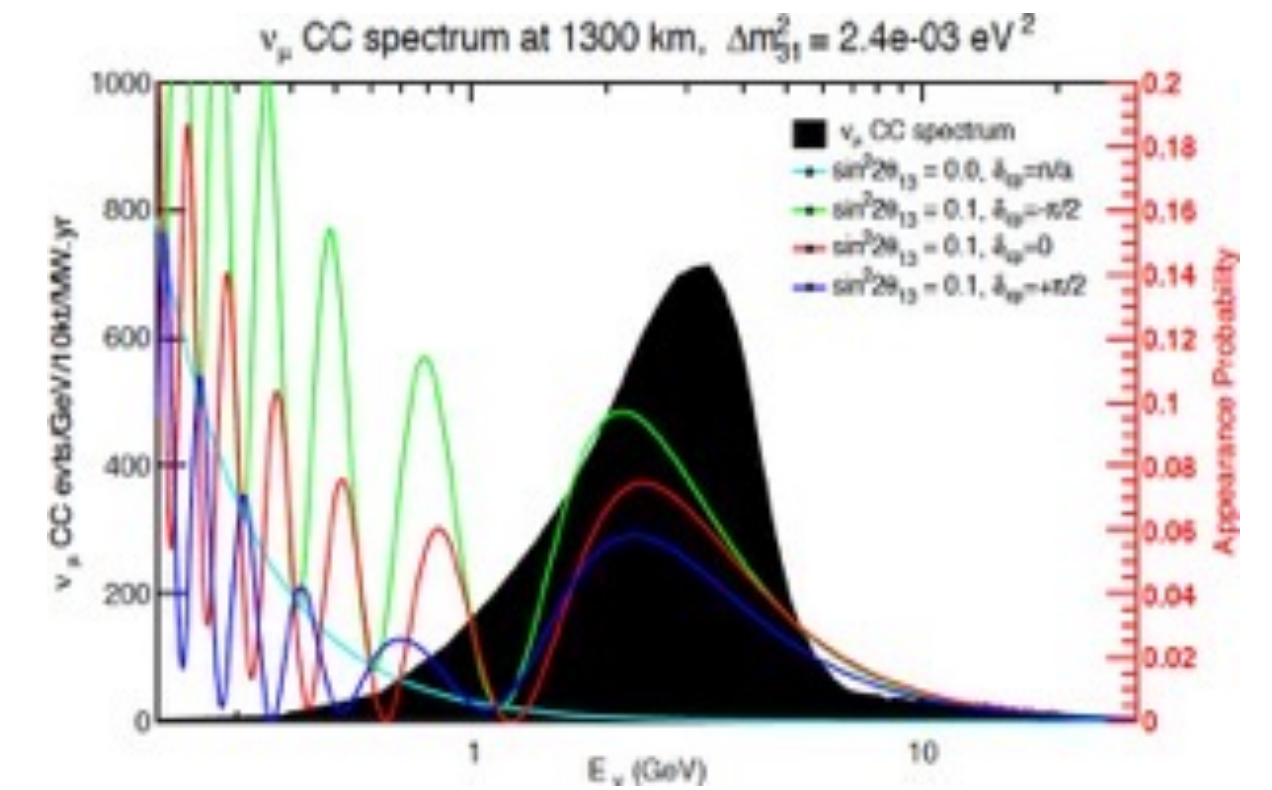
- Ricerca violazione di CP nel settore dei neutrini
- Gerarchia di massa dei neutrini
- Misura precisa di θ_{13}

Neutrino Astrophysics

- Neutrini da Supernova
- Neutrini solari

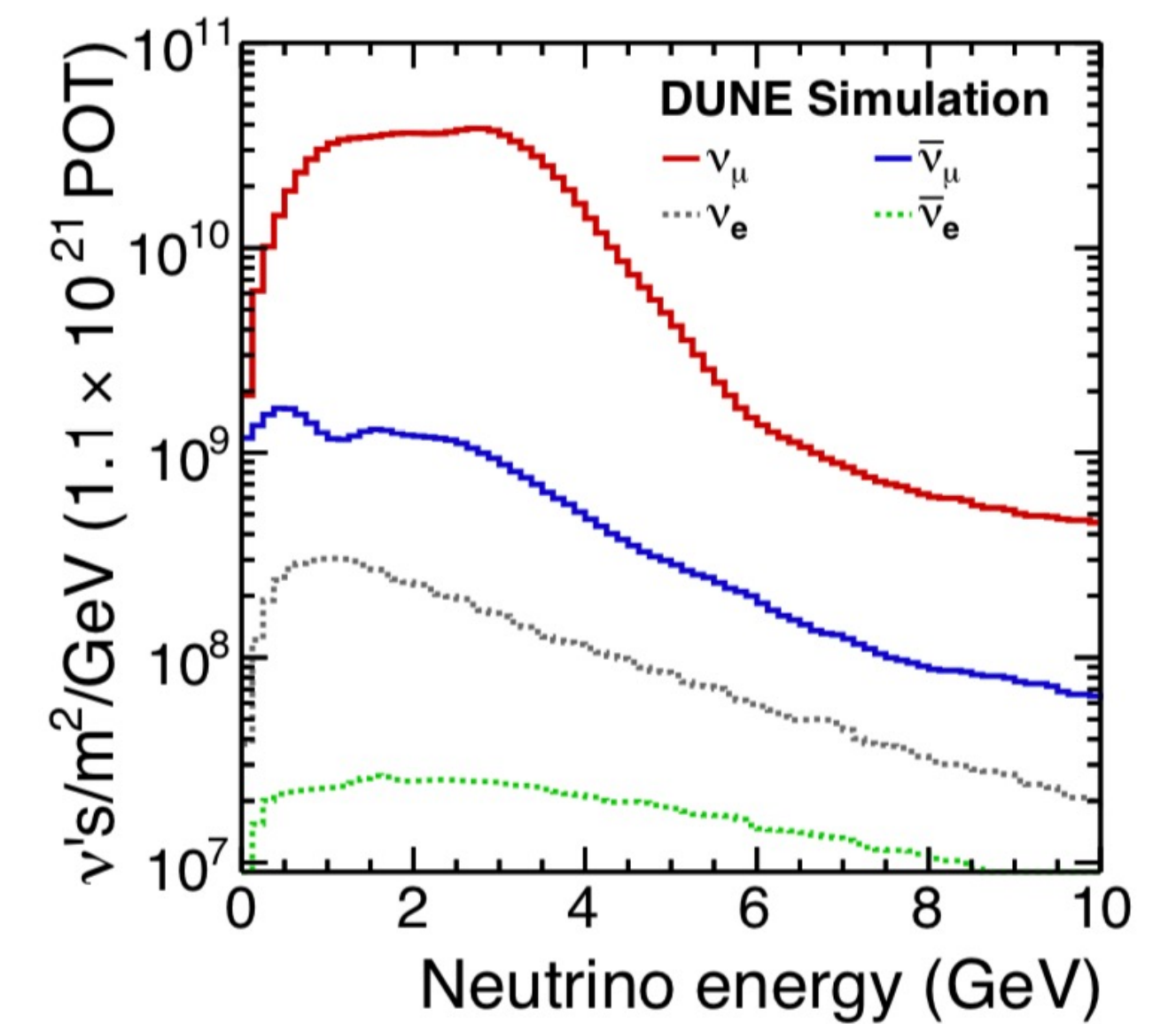
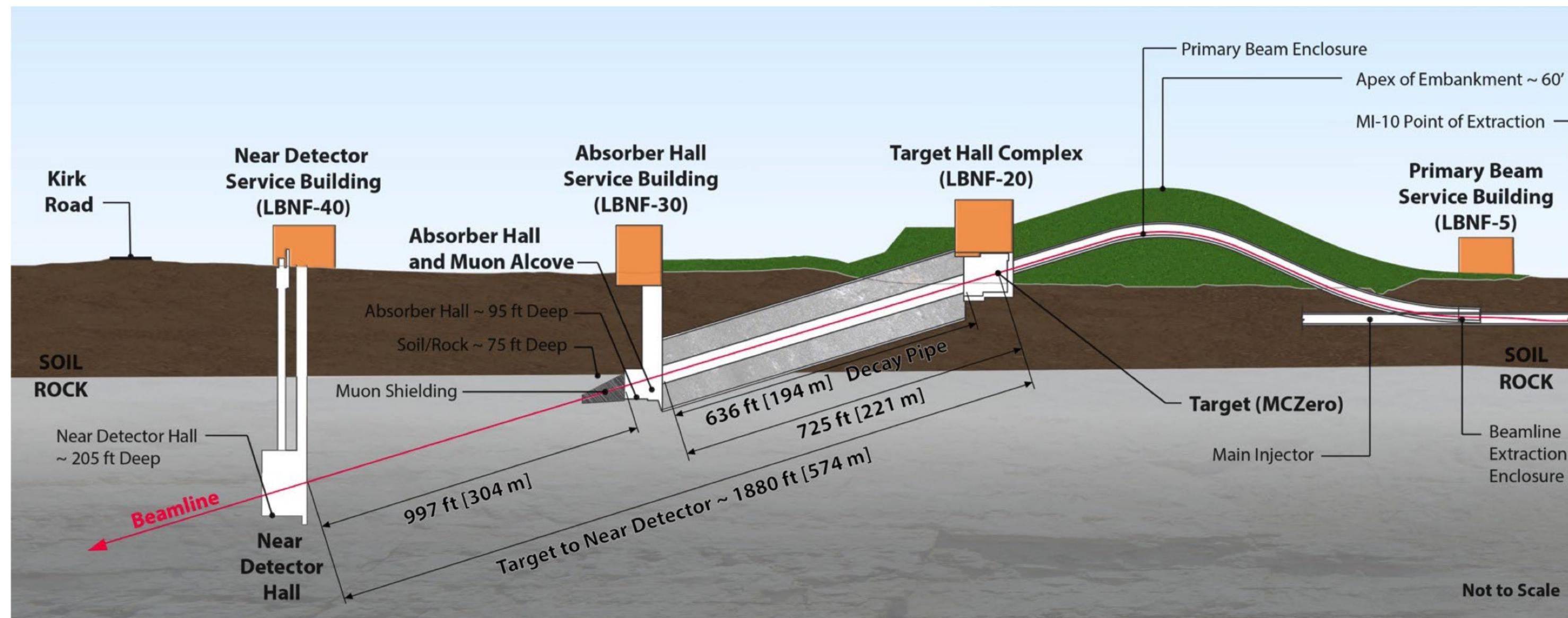
- **Fisica oltre il Modello Standard**

- Violazione del numero barionico
- Dark matter
- Non-standard interactions
- Neutrini sterili
- Heavy Neutral Leptons

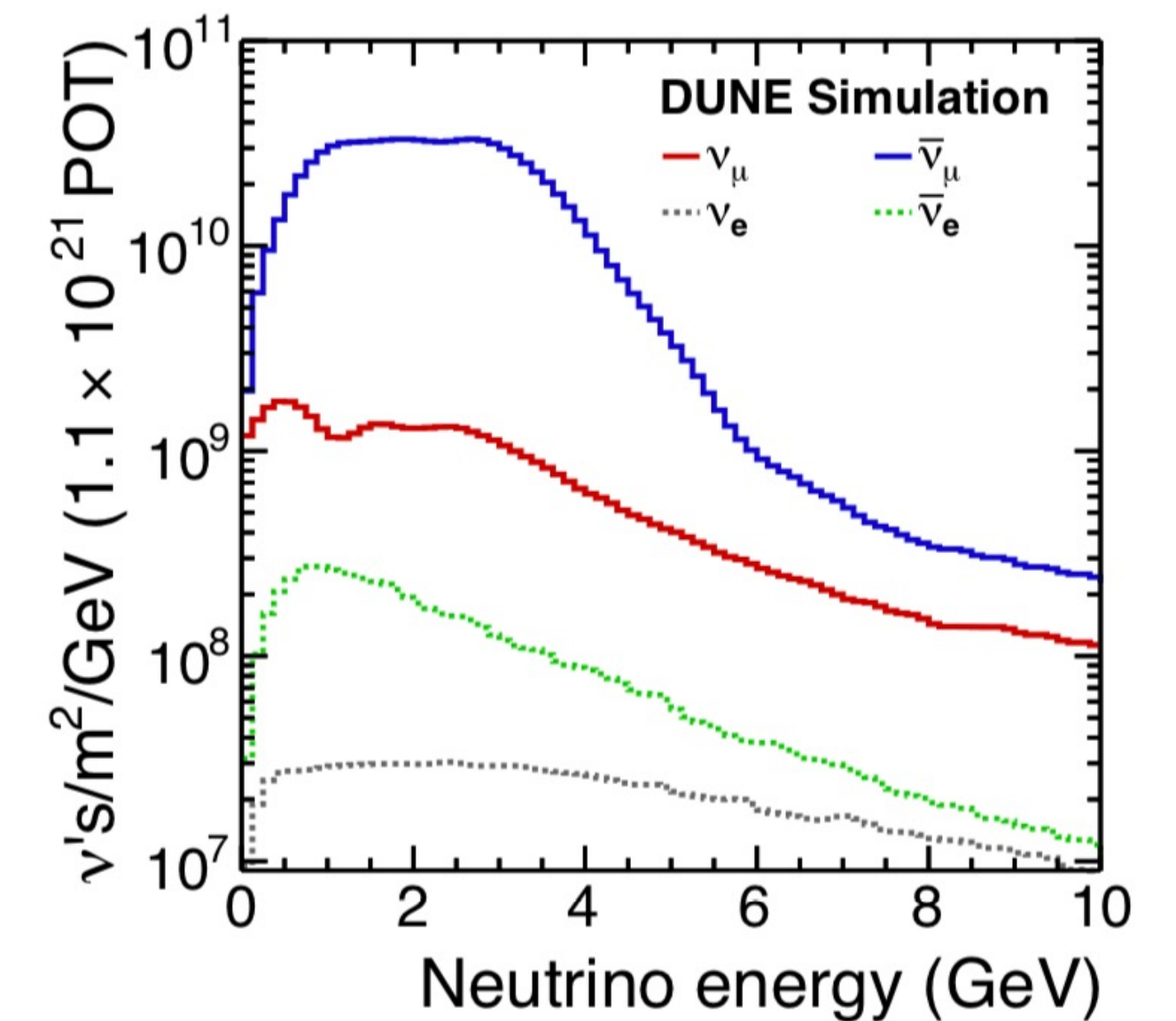


LBNF Neutrino Beam

- Nuovo fascio di neutrini in costruzione al Fermilab
- Protoni da 120 GeV su bersaglio di carbonio
- Potenza iniziale : 1.2 MW, poi a 2.4 MW
- Fascio a banda larga
- Funziona in modalità neutrino (FHC) e antineutrino (RHC)



FHC



RHC

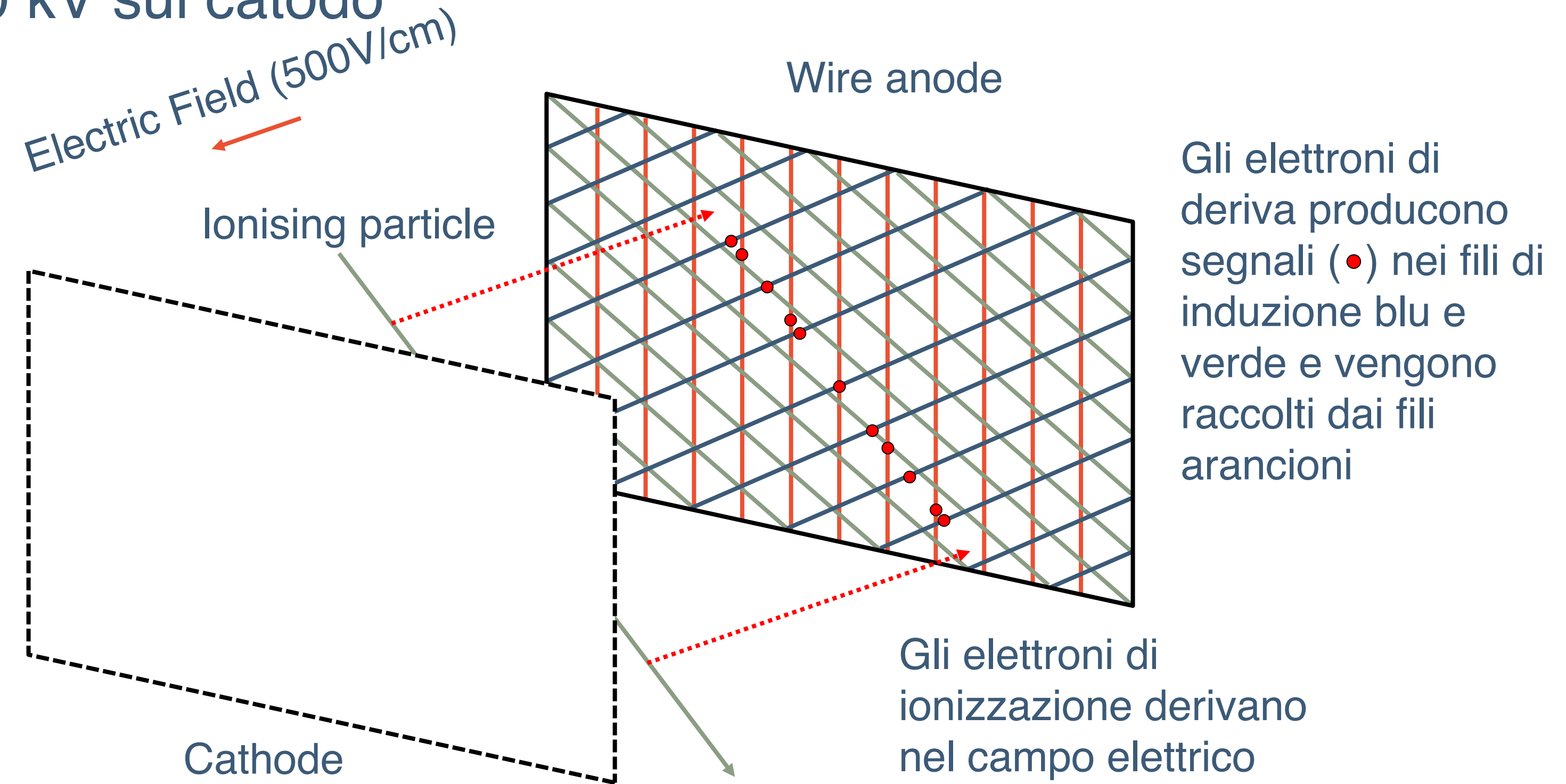
B. Abi, et al., (DUNE Collaboration), Long-baseline neutrino oscillation physics potential of the DUNE experiment *Eur. Phys. J. C* **80** 10, 978 (2020)

La tecnologia base dell'esperimento: TPC ad Argon Liquido

- Il rivelatore lontano e parte del rivelatore vicino saranno LAr TPC
- Gli elettroni di ionizzazione derivano in un campo elettrico verso i piani di lettura

- **Horizontal Drift (HD)**

- Il campo elettrico è orizzontale -180 kV sul catodo
- Lunghezza di deriva 3.6 m
- Simile alle precedenti LArTPC
- Tre piani di fili di lettura con sistema rivelazione fotoni incorporato nei piani dei fili (X-ARAPUCA)



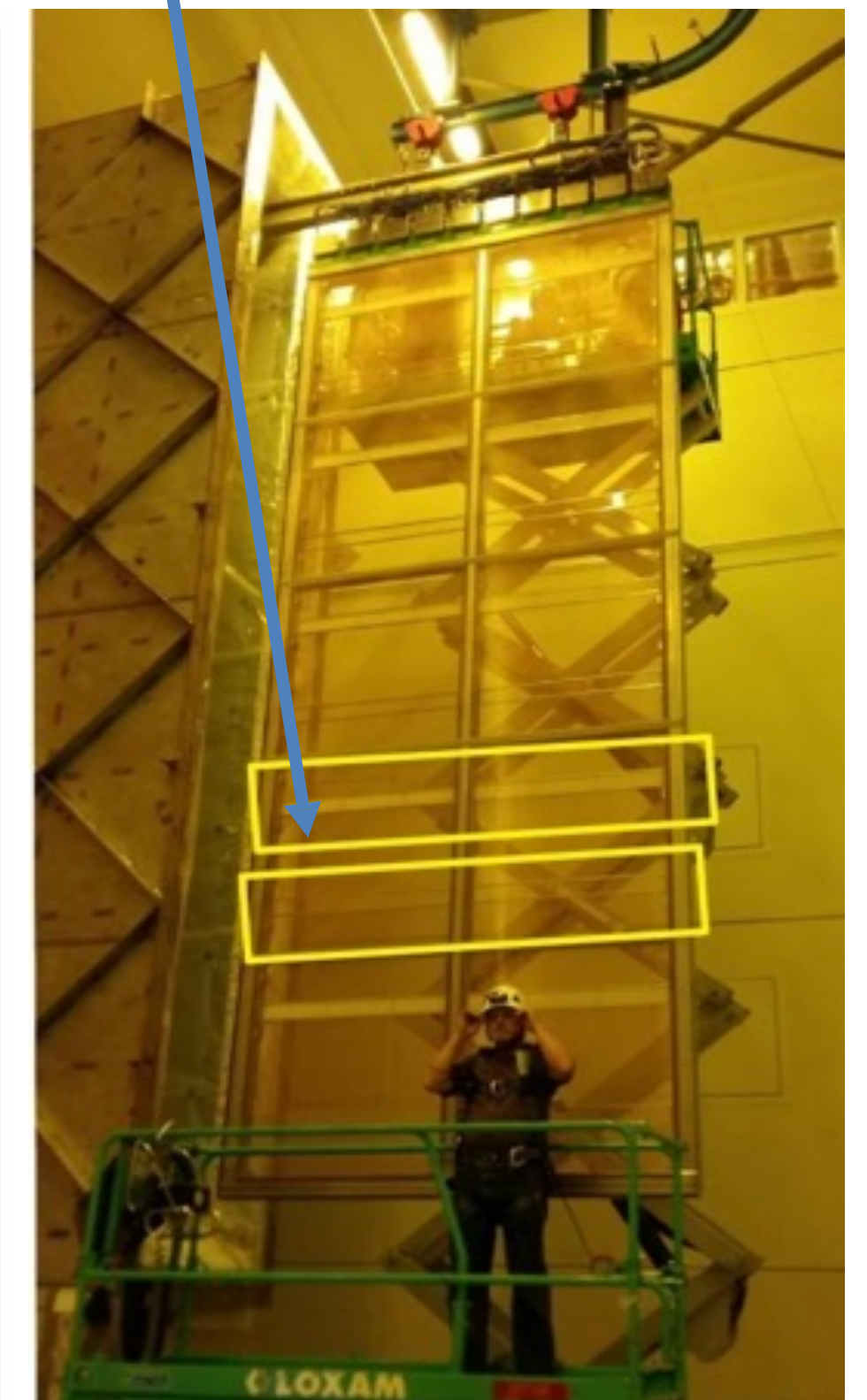
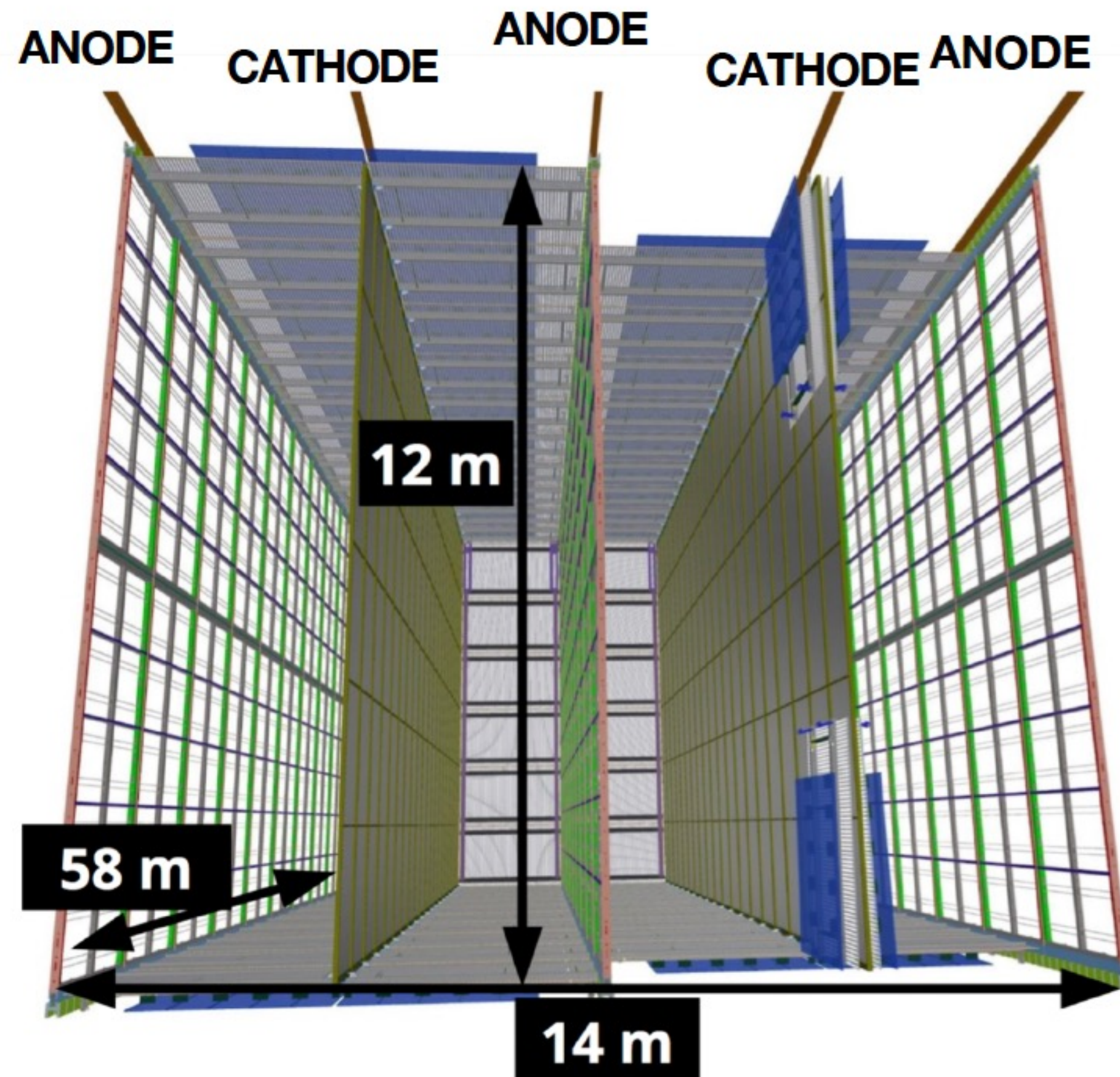
La tecnologia base dell'esperimento: TPC ad Argon Liquido

- Il rivelatore lontano e parte del rivelatore vicino saranno LAr TPC
- Gli elettroni di ionizzazione derivano in un campo elettrico verso i piani di lettura

- **Horizontal Drift (HD)**

- Il campo elettrico è orizzontale - 180 kV sul catodo
- Lunghezza di deriva 3.6 m
- Simile alle precedenti LArTPC
- Tre piani di fili di lettura con sistema rivelazione fotoni incorporato nei piani dei fili (X-ARAPUCA)

al Modulo 1 del Far Detector

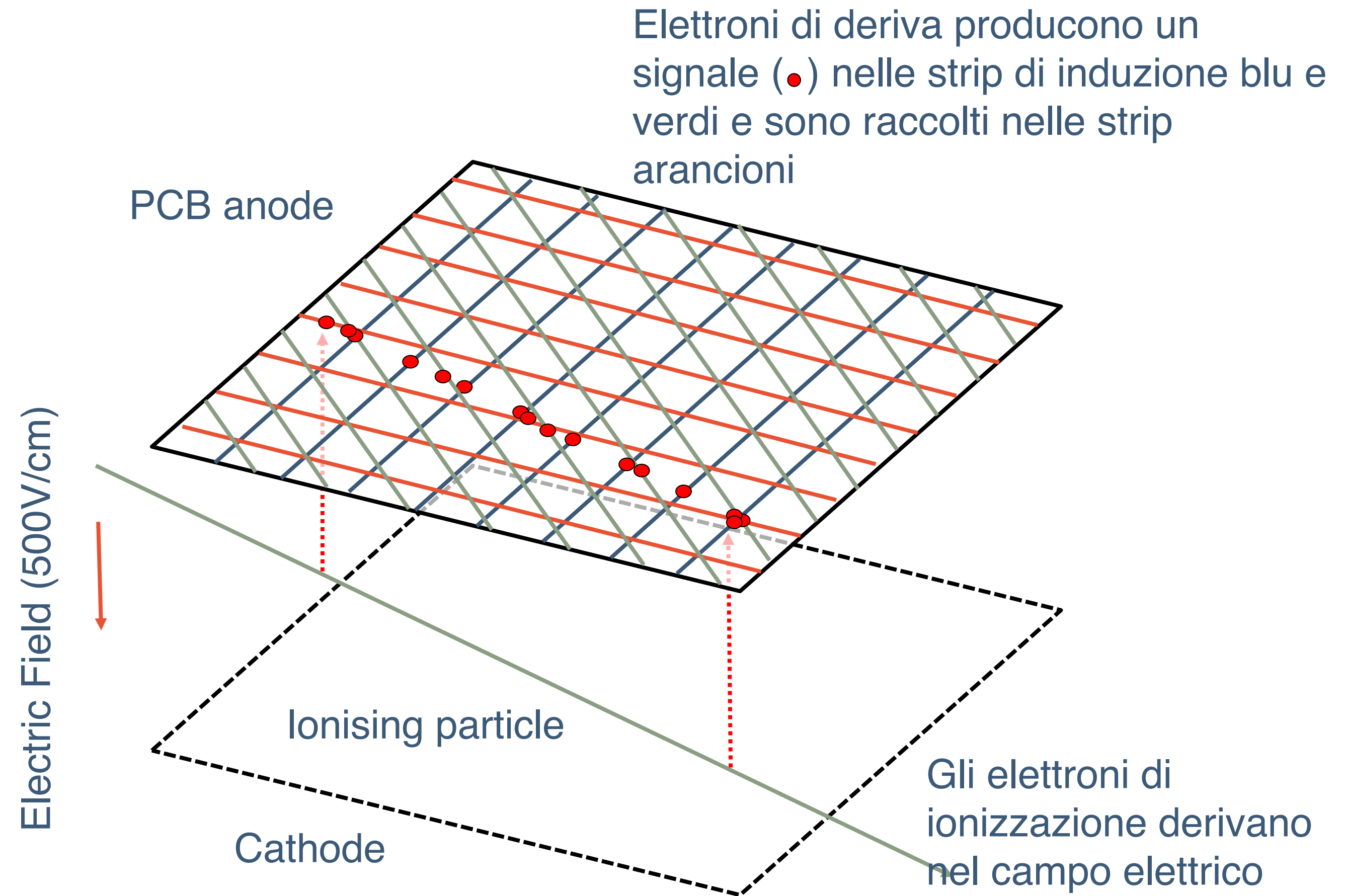


La tecnologia base dell'esperimento: TPC ad Argon Liquido

- Il rivelatore lontano e parte del rivelatore vicino saranno LAr TPC
- Gli elettroni di ionizzazione derivano in un campo elettrico verso i piani di lettura

- **Vertical Drift (VD)**

- Il campo elettrico è verticale
- 6.5 m di lunghezza di drift
- -300 kV sul catodo
- PCB perforati con 3 readout
- Photon Detector System sulle pareti del criostato e sul catodo (X-ARAPUCA)

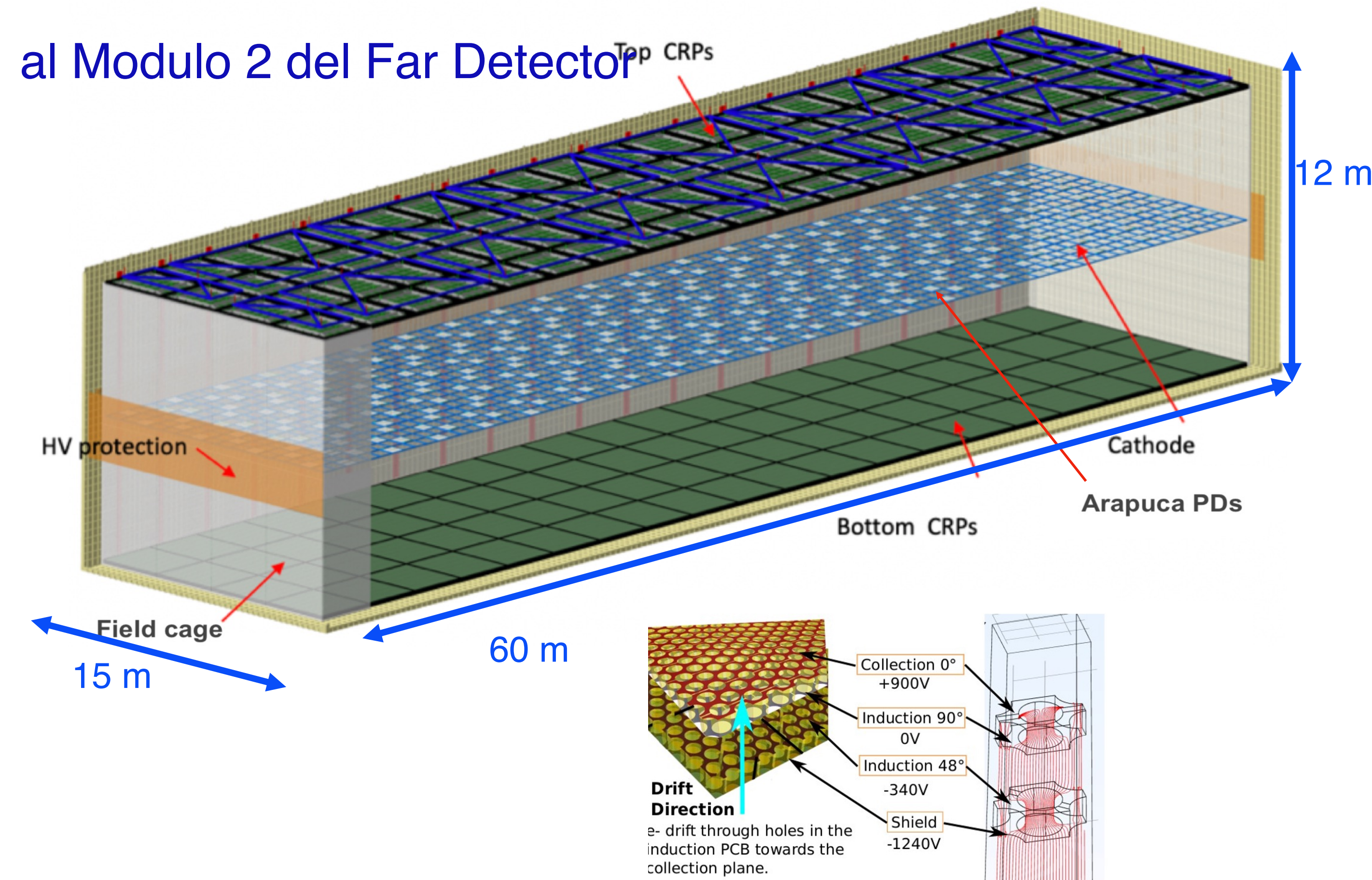


La tecnologia base dell'esperimento: TPC ad Argon Liquido

- Il rivelatore lontano e parte del rivelatore vicino saranno LAr TPC
- Gli elettroni di ionizzazione derivano in un campo elettrico verso i piani di lettura

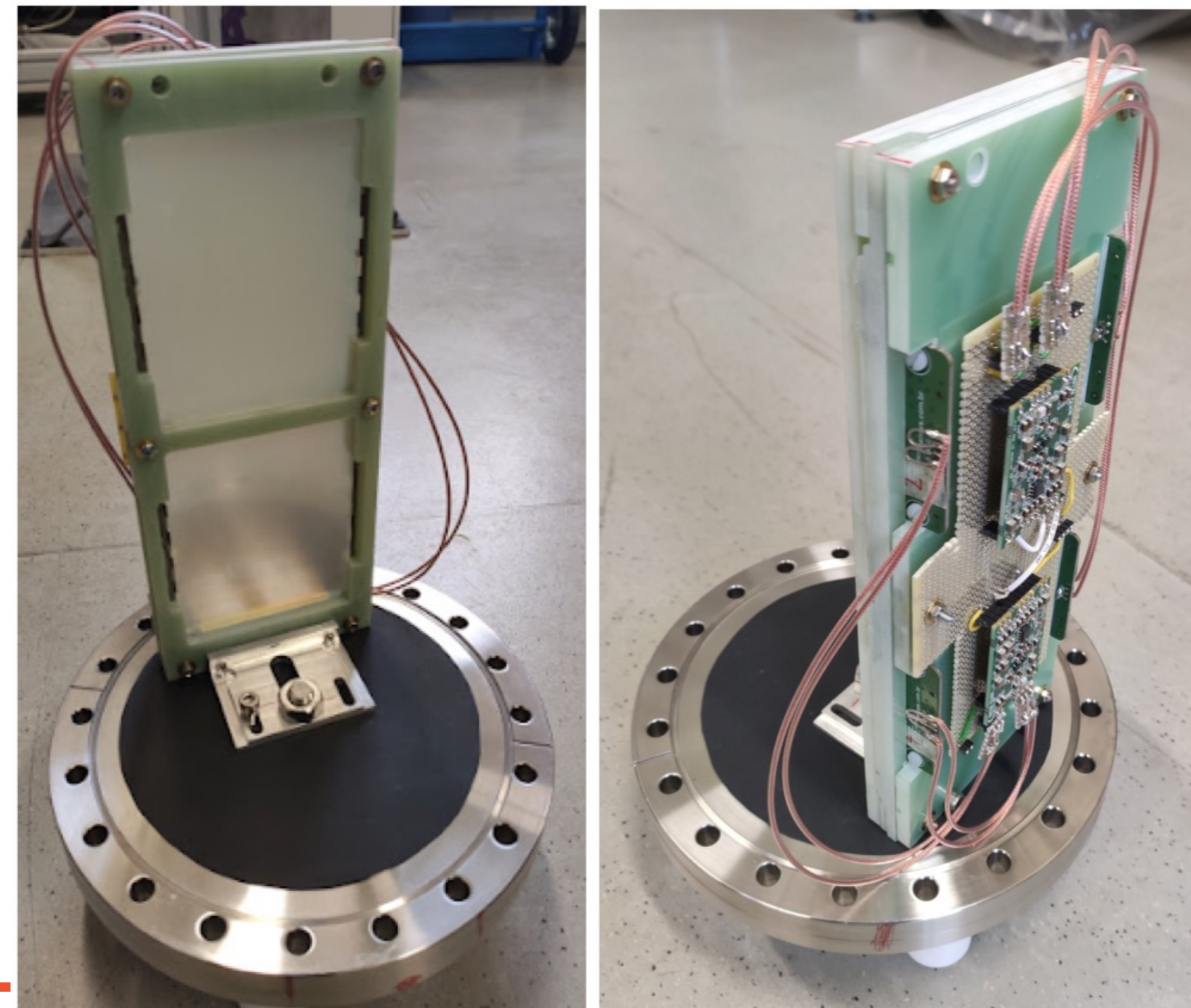
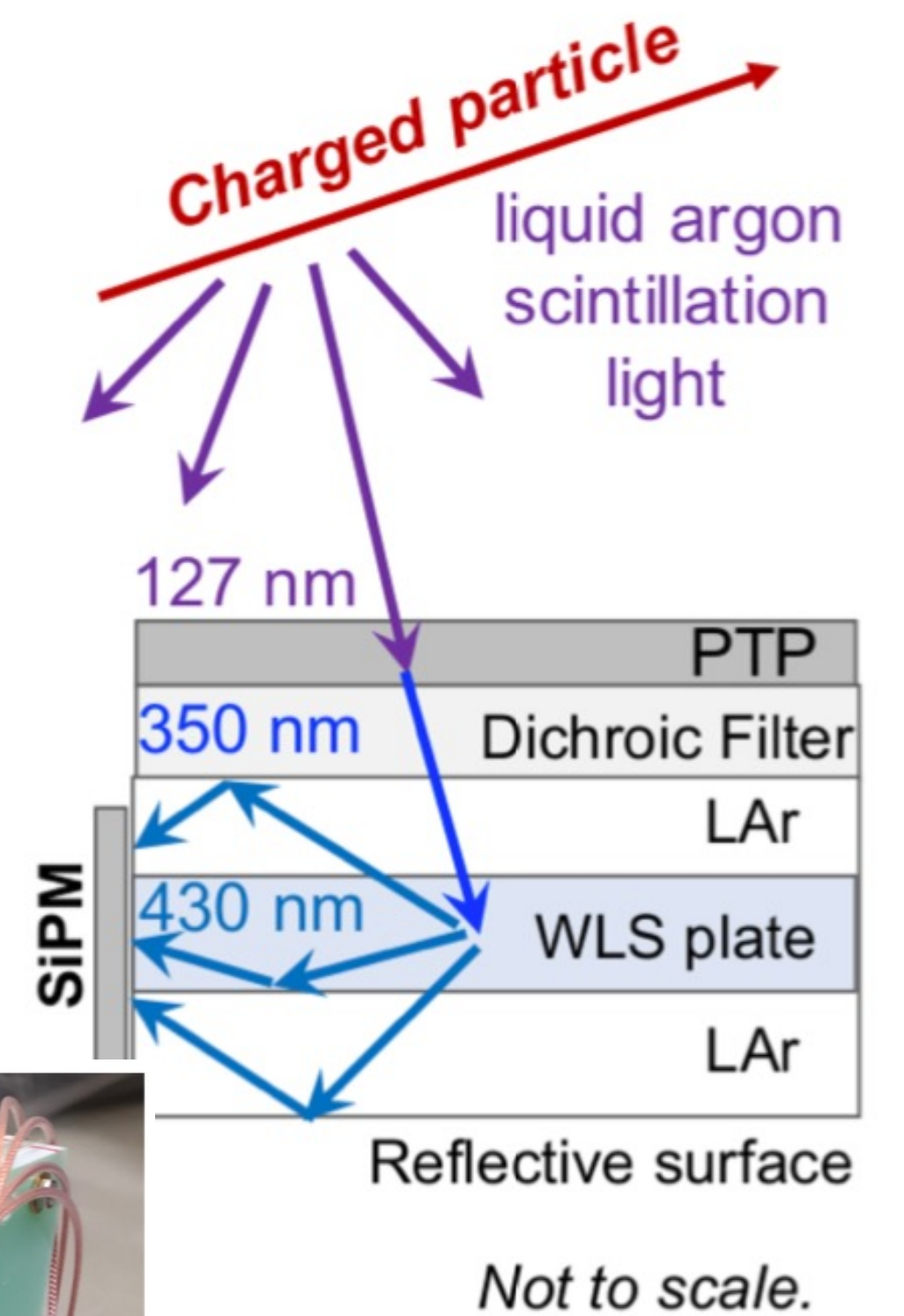
- **Vertical Drift (VD)**

- Il campo elettrico è verticale
- 6.5 m di lunghezza di drift
- -300 kV sul catodo
- PCB perforati con 3 readout
- Photon Detector System sulle pareti del criostato e sul catodo (X-ARAPUCA)



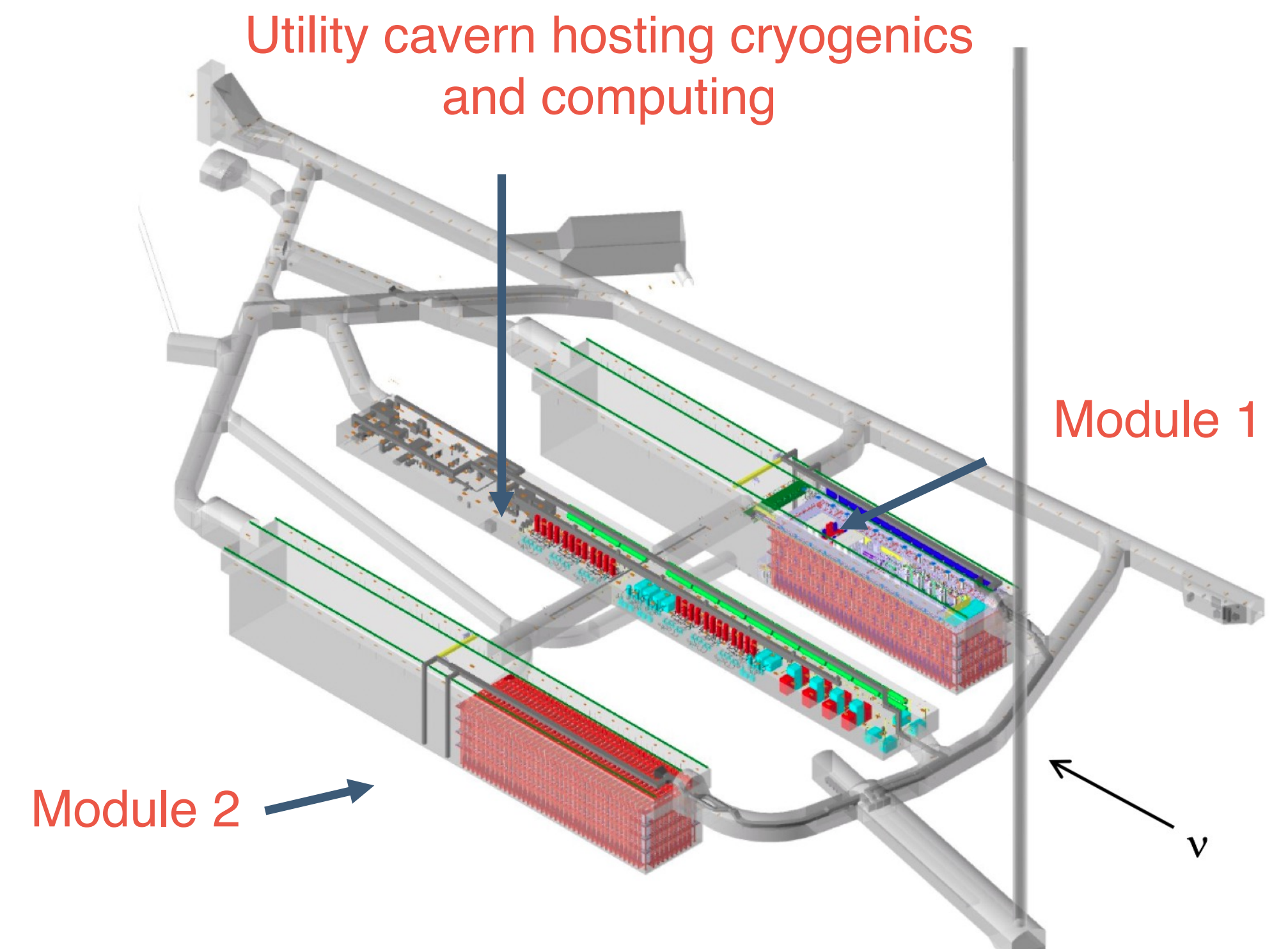
Photon Detection System

- X-ARAPUCA per misurare la luce di scintillazione del LAr
- Lunghezza d'onda ~ 127 nm (VUV)
- Ibrido tra una trappola di luce e una guida di luce
 - La lunghezza d'onda viene spostata sul visibile
 - Riflessione interna totale
- Lettura con SiPM
- Evoluzione ARAPUCA utilizzati in ProtoDUNE

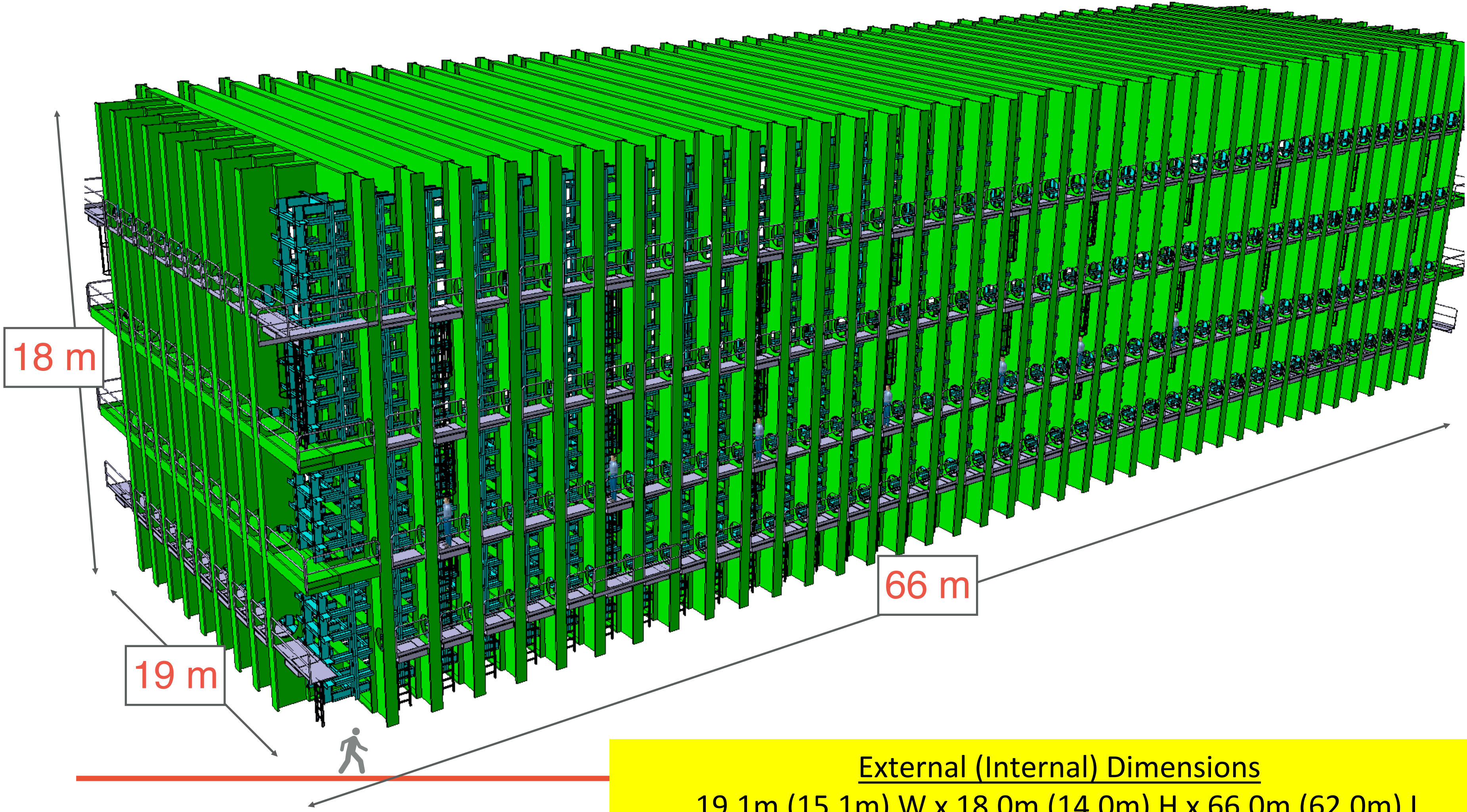


Far Detector (FD)

- Modulo 1 : Horizontal Drift, Modulo 2 Vertical Drift
 - Volume attivo 12m x 14m x 58m
 - Ciascuno con 17 kton LAr
 - Questi due moduli rappresentano la Fase 1
- Moduli 3 e 4 completeranno il FD
 - Quale tecnologia è da decidere
- Gli scavi a SURF sono iniziati
 - 1500 m underground

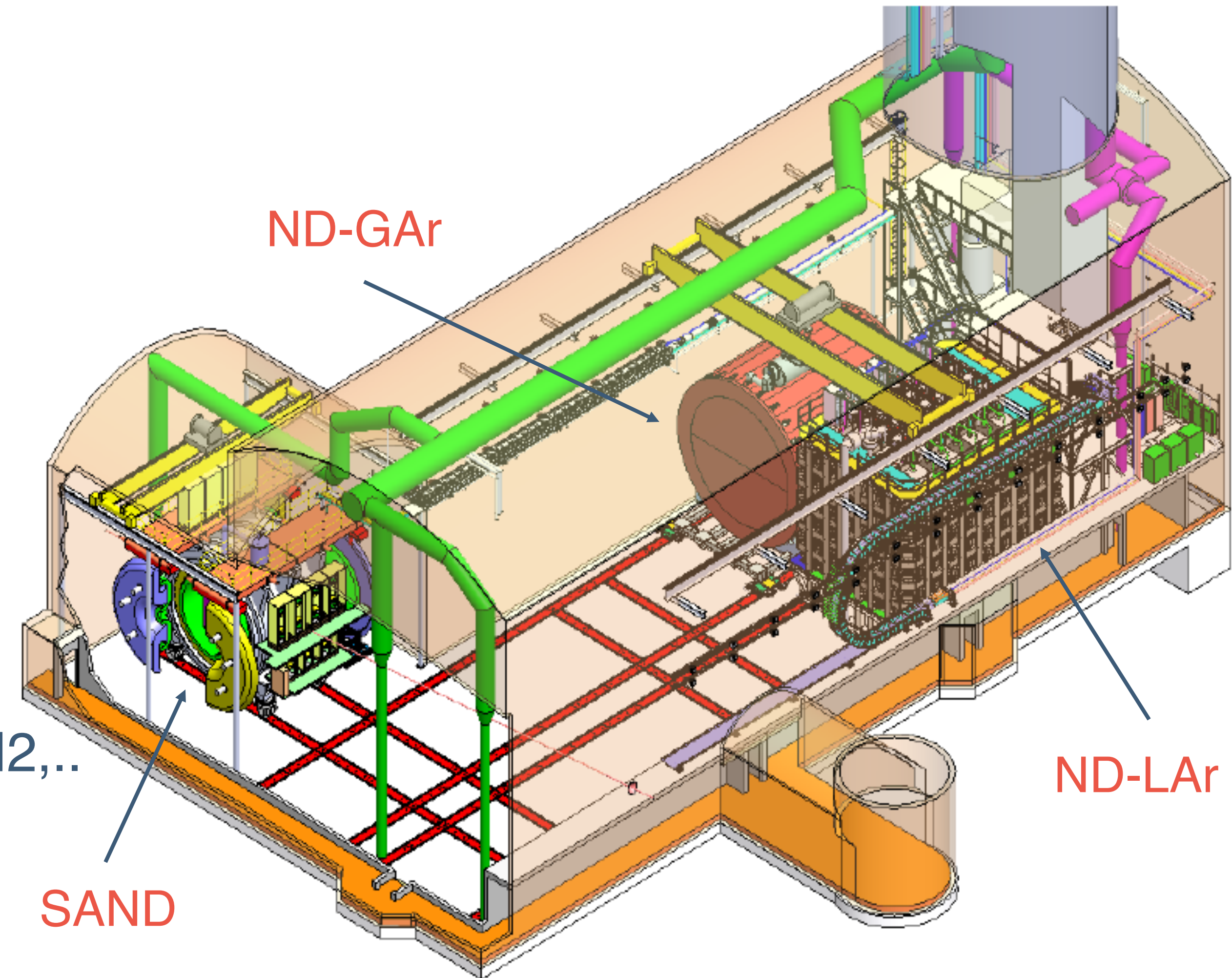


The first FD Module:
17 kt LAr cryostat



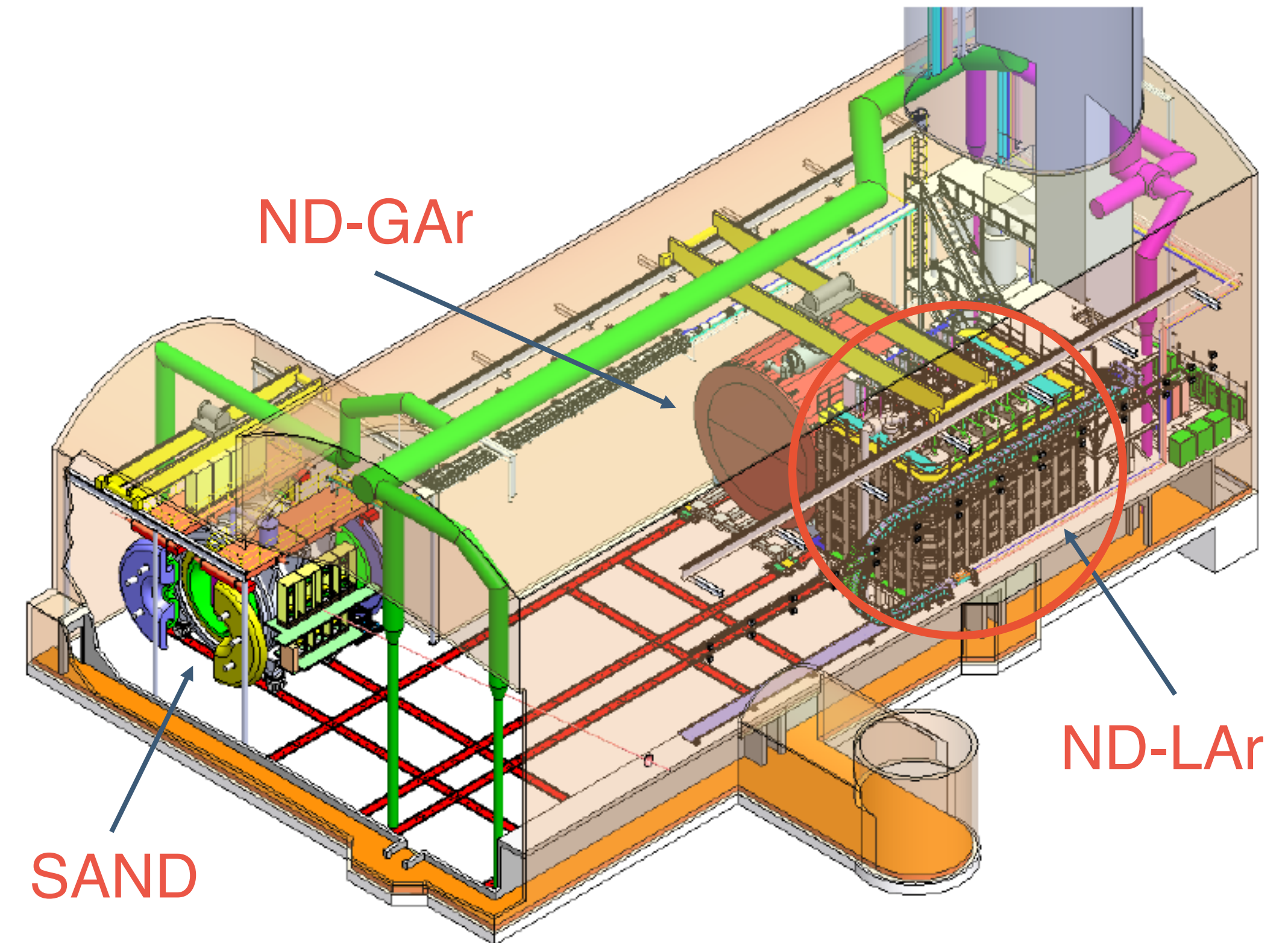
Near Detector (ND)

- Al Near Site un sistema di rivelatori
 - LArTPC (ND-LAr)
 - TPC ad argon gassoso (ND-GAr)
 - Un tracciatore ibrido magnetizzato (SAND)
- Il Near Detector fondamentale per :
 - misura del flusso
 - sezioni d'urto (anti)neutrino su Argon, C, CH₂,...
 - contenere le sistematiche



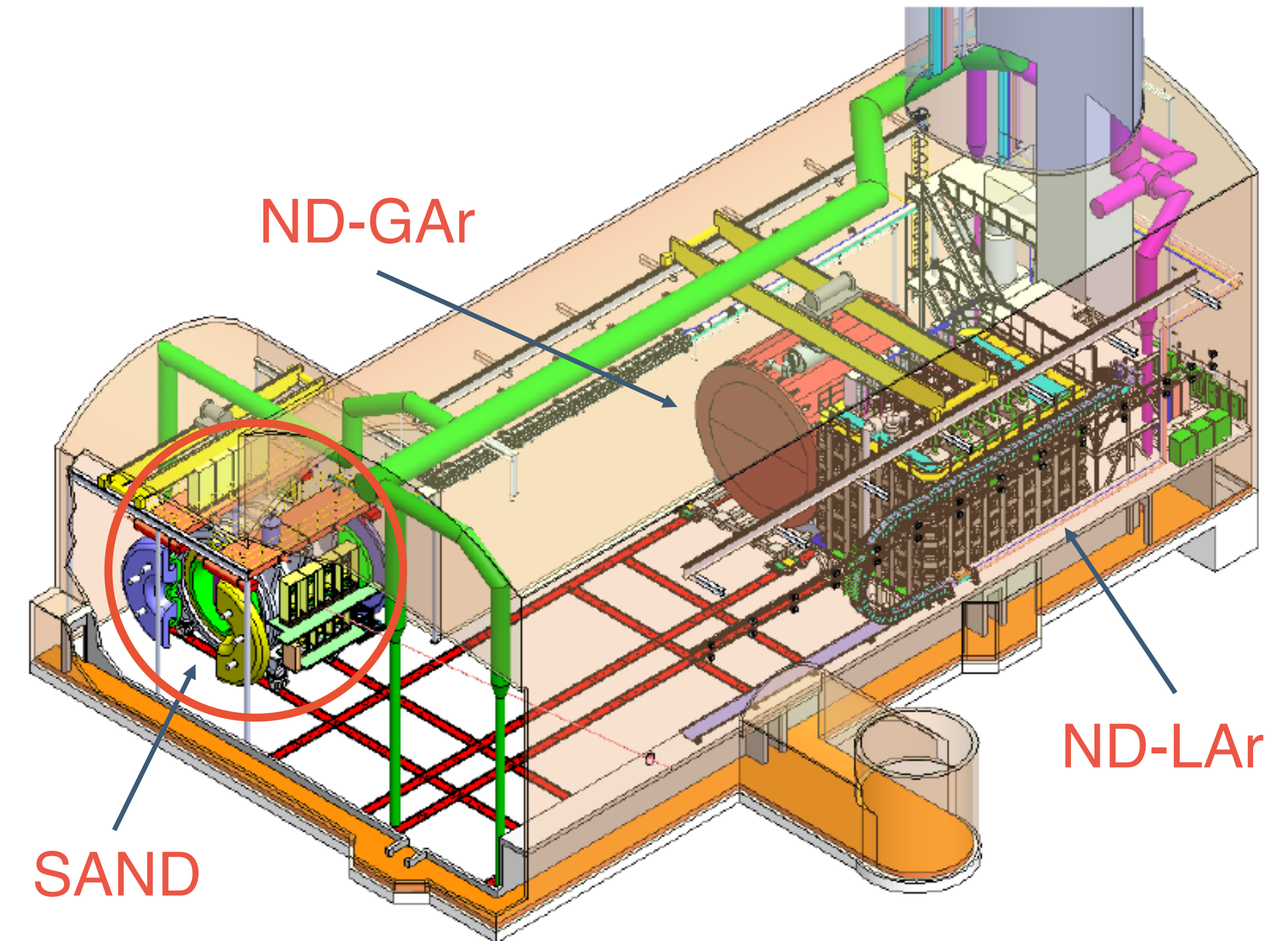
Near Detector

- Al Near Site un sistema di tre rivelatori
 - LArTPC (ND-LAr)
 - TPC ad argon gassoso (ND-GAr)
 - Un spettrometro magnetizzato (SAND)
- ND-LAr e' una TPC a LAr
- Stesso bersaglio del Far Detector
- 50 t massa fiduciale
- Pixelated charge readout
- Struttura modulare Modular con 35 moduli 1m x 1m x 3.5m
 - dimostratore (2x2 moduli) presto sul fascio NuMI per test



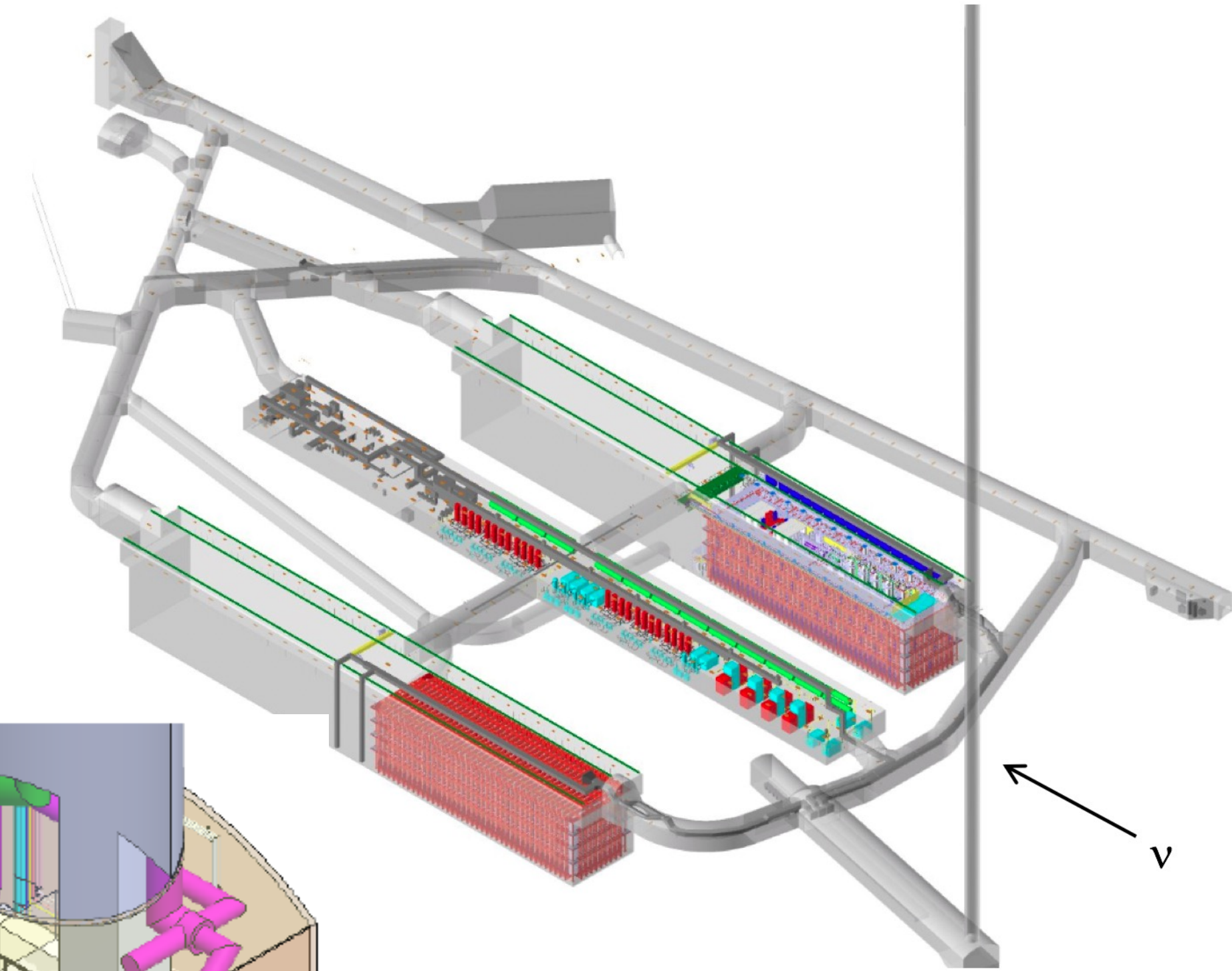
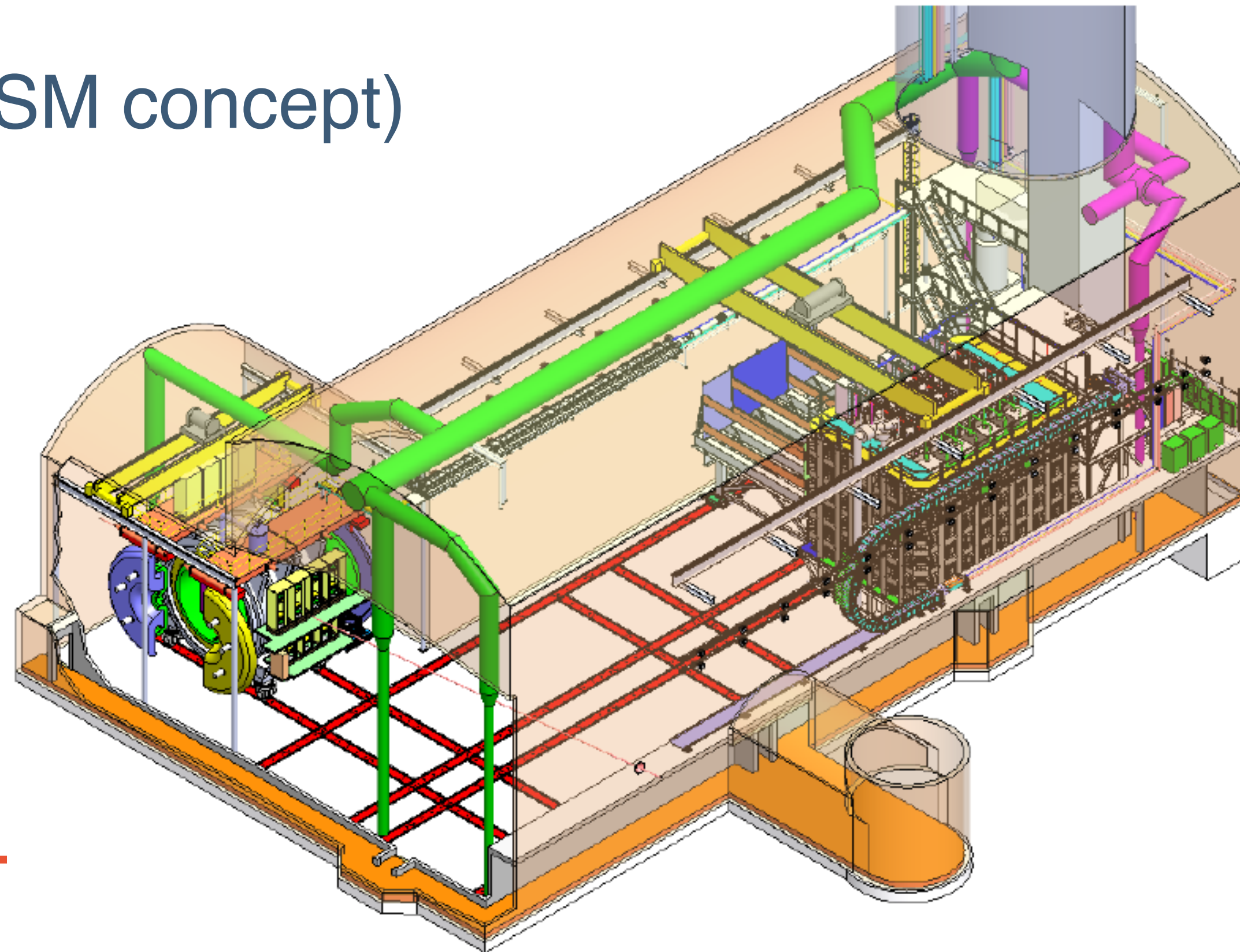
Near Detector

- Al Near Site un sistema di tre rivelatori
 - LArTPC (ND-LAr)
 - TPC ad argon gassoso (ND-Gar)
 - Un spettrometro magnetizzato (SAND)
- SAND : magnete e calorimetro elettromagnetico da KLOE
 - Monitor on-axis del beam
 - composizione del fascio
 - sezioni d'urto v e anti $-v$
 -



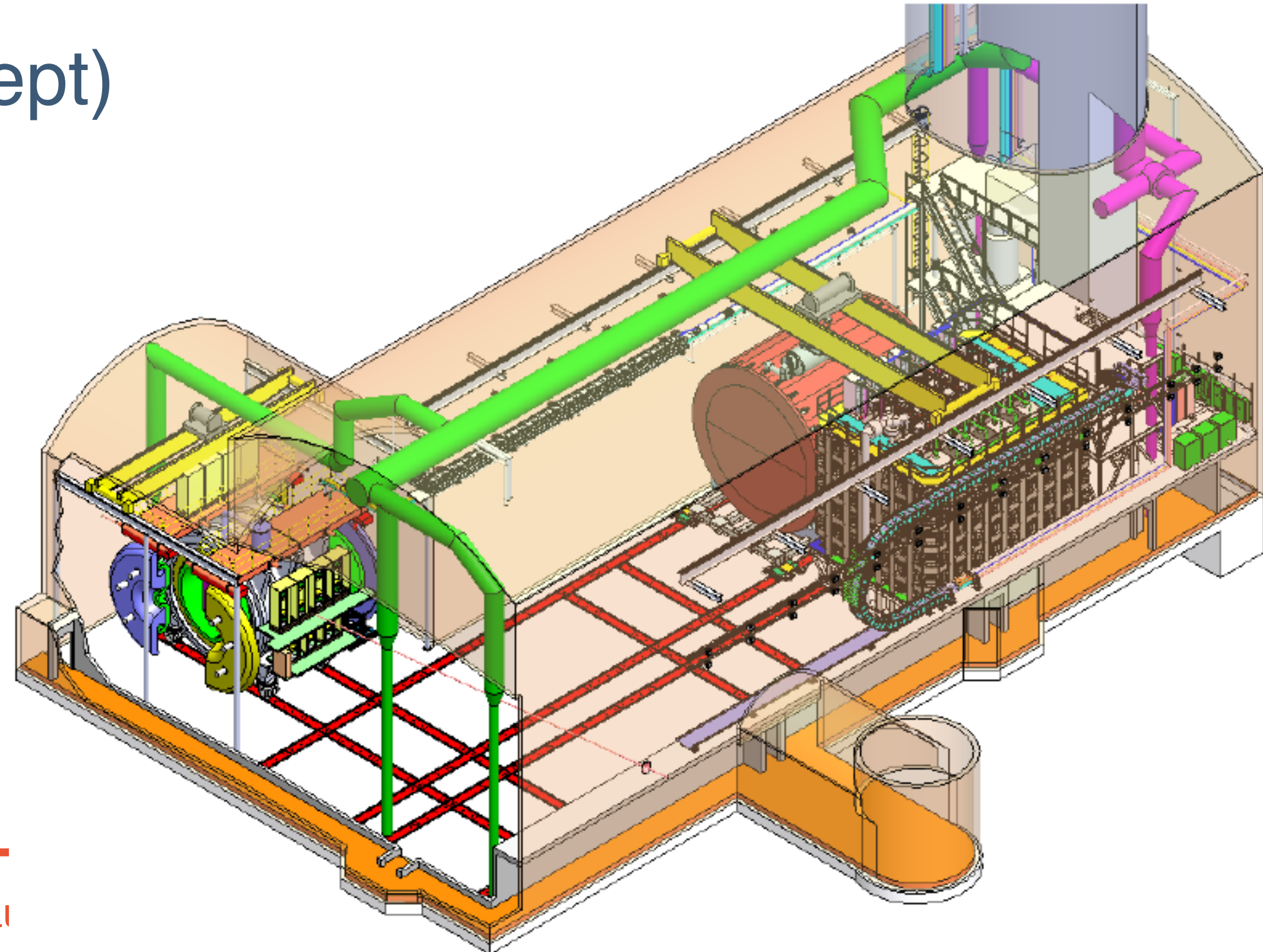
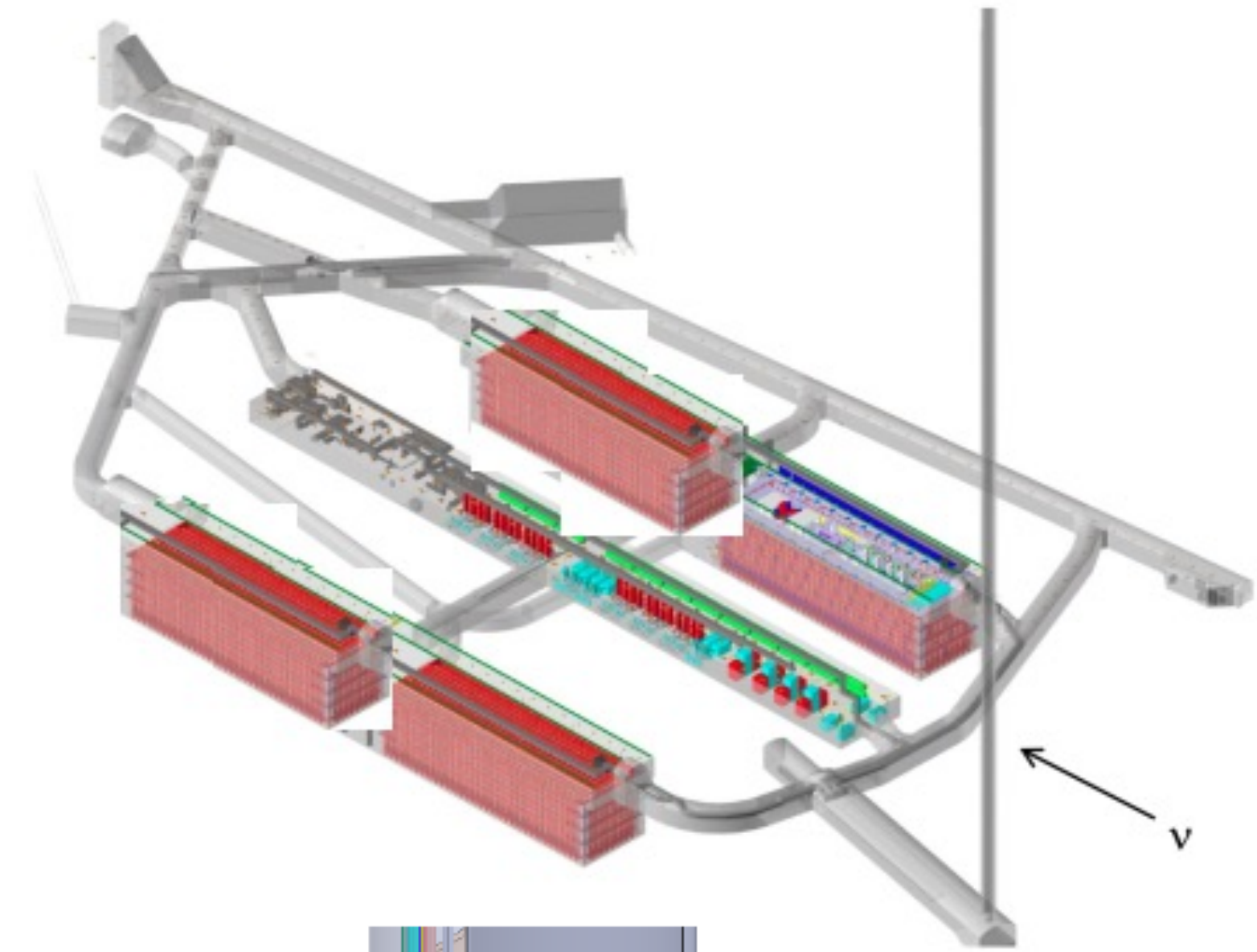
La costruzione di DUNE : Fase I

- Fascio di neutrini - 1.2 MW
- FAR Detector : 2 LArTPC (17 kt x 2)
- Near Detector:
 - ND-LAr + TMS
(in movimento - PRISM concept)
 - SAND



La costruzione di DUNE : Fase II

- Fascio Neutrini a 2.4 MW
- Quattro LArTPC (17kt x4) al Far Detector
- Near Detector:
 - ND-LAr + ND-GAr (+ PRISM concept)
 - SAND



Oscillazioni a tre sapori

- Matrice PMNS

$$c_{jk} = \cos \theta_{jk}, s_{jk} = \sin \theta_{jk}$$

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

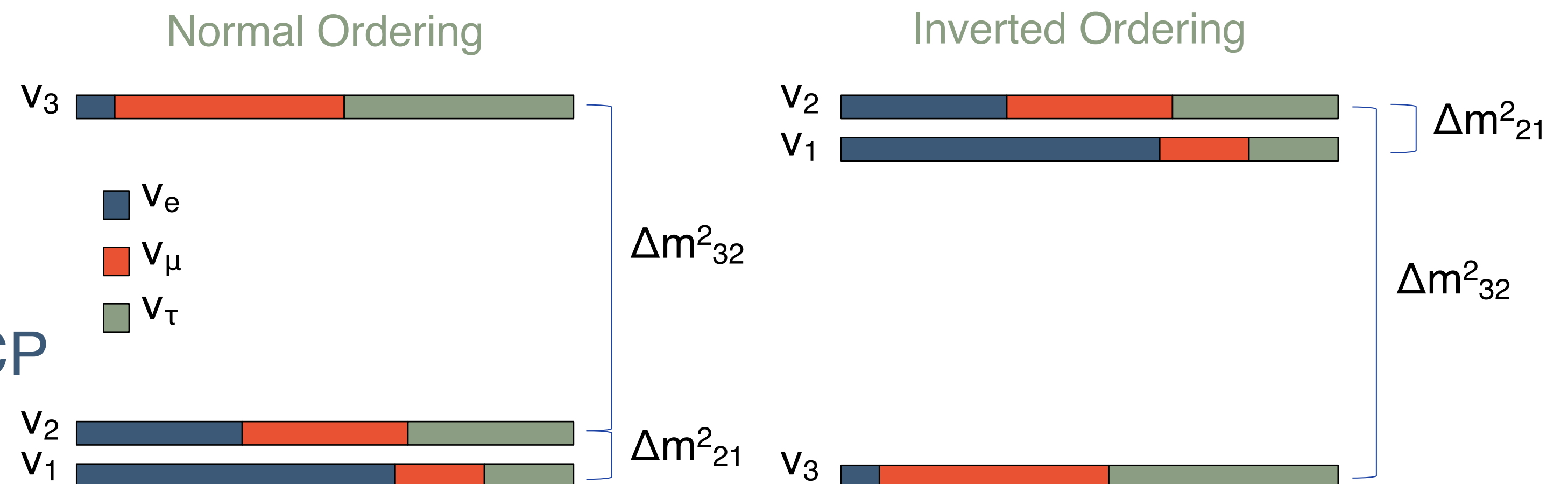
ν_μ and $\bar{\nu}_\mu$ disappearance
(accelerator and atmospheric)

$\bar{\nu}_e$ disappearance (reactor)
 ν_e and $\bar{\nu}_e$ appearance (accelerator)

ν_e and $\bar{\nu}_e$ disappearance
(solar and reactor)

- DUNE misurerà con precisione

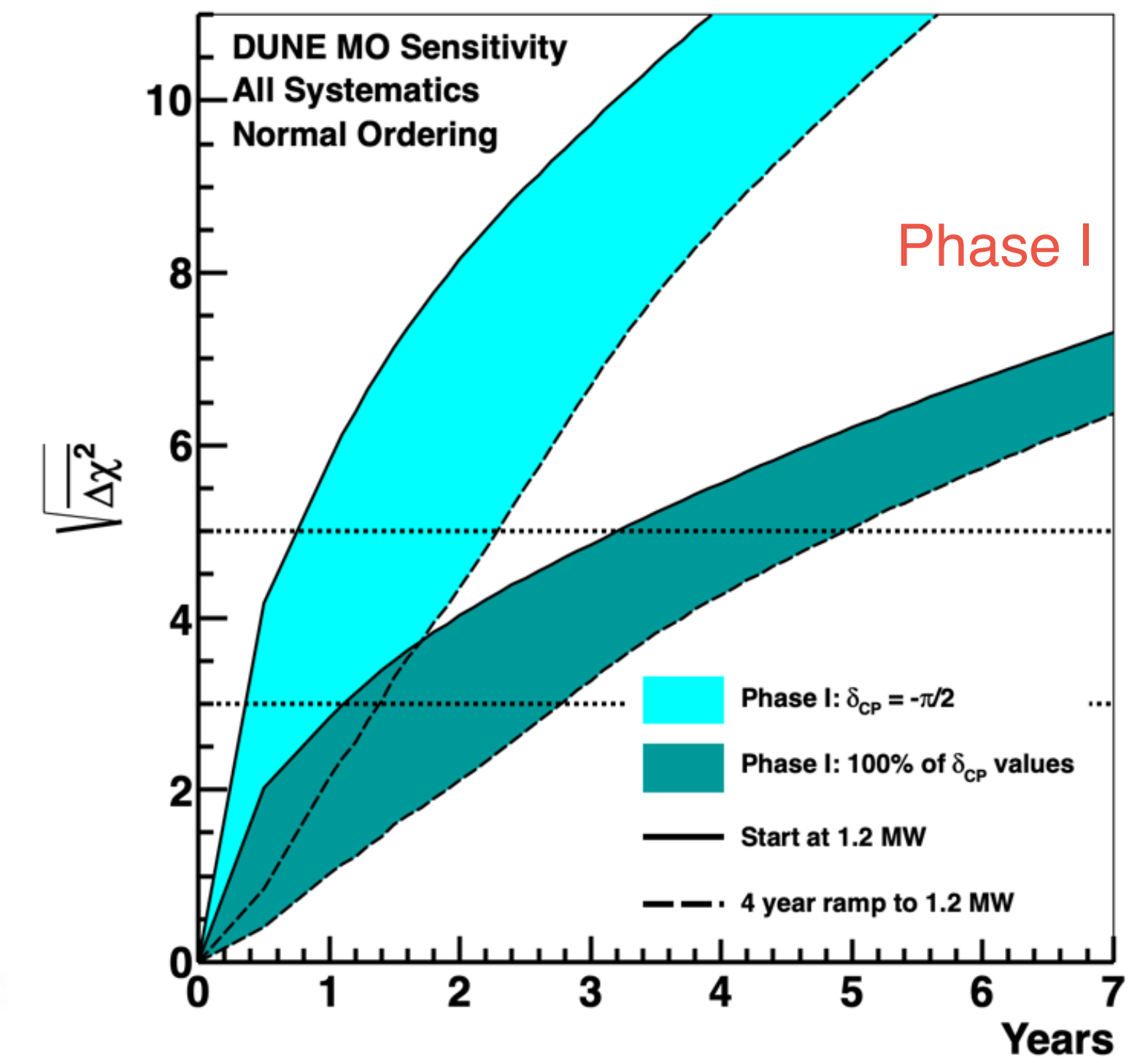
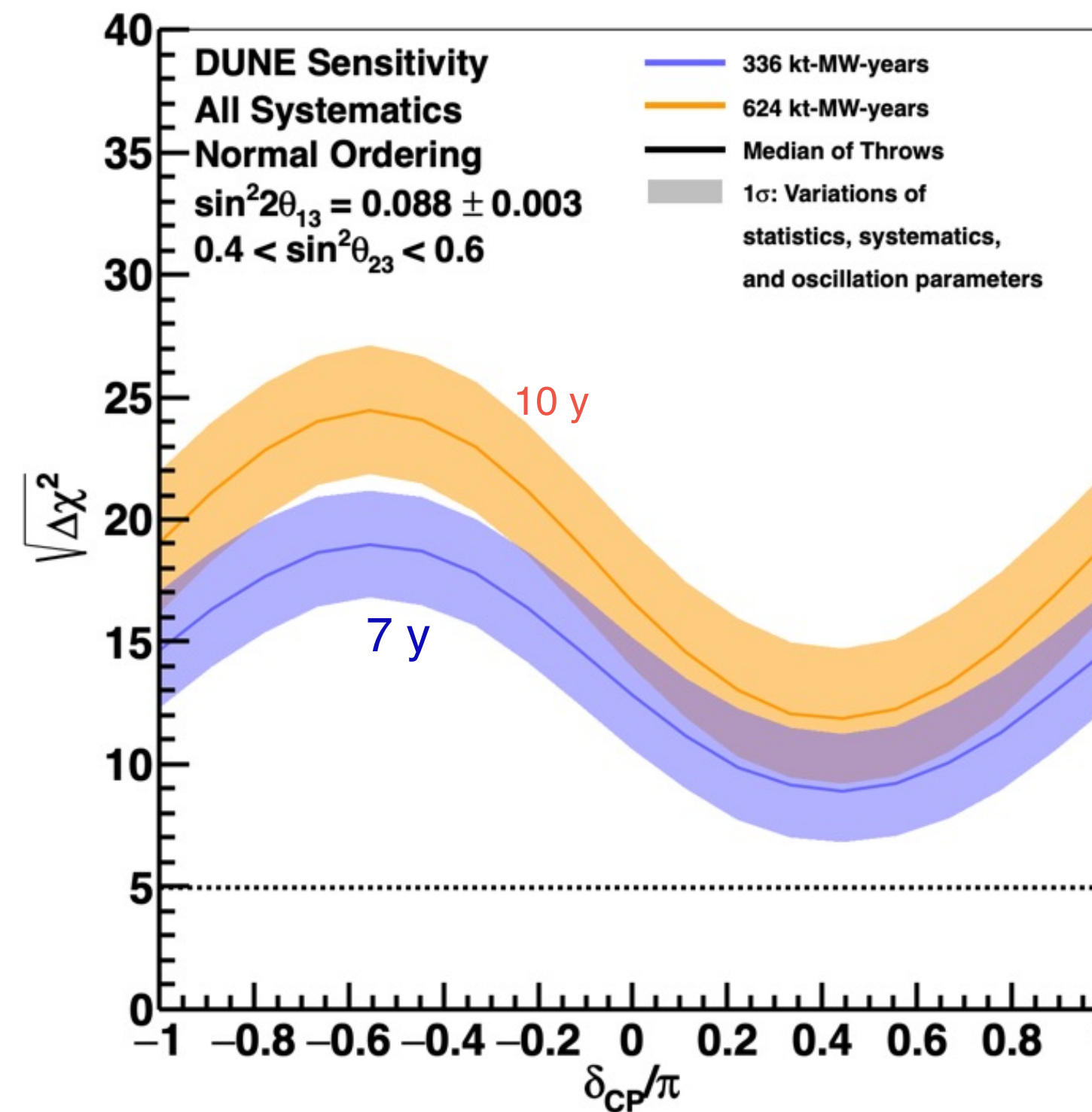
- θ_{13} , θ_{23} , δ_{CP} , e Δm^2_{32}
- il segno di Δm^2_{32}
- scoprire eventuale violazione di CP



- L'entità dell'effetto materia negli esperimenti su distanze molto grandi (>1000 km) rende la misura molto sensibile all'ordinamento di massa

Gerarchia di Massa

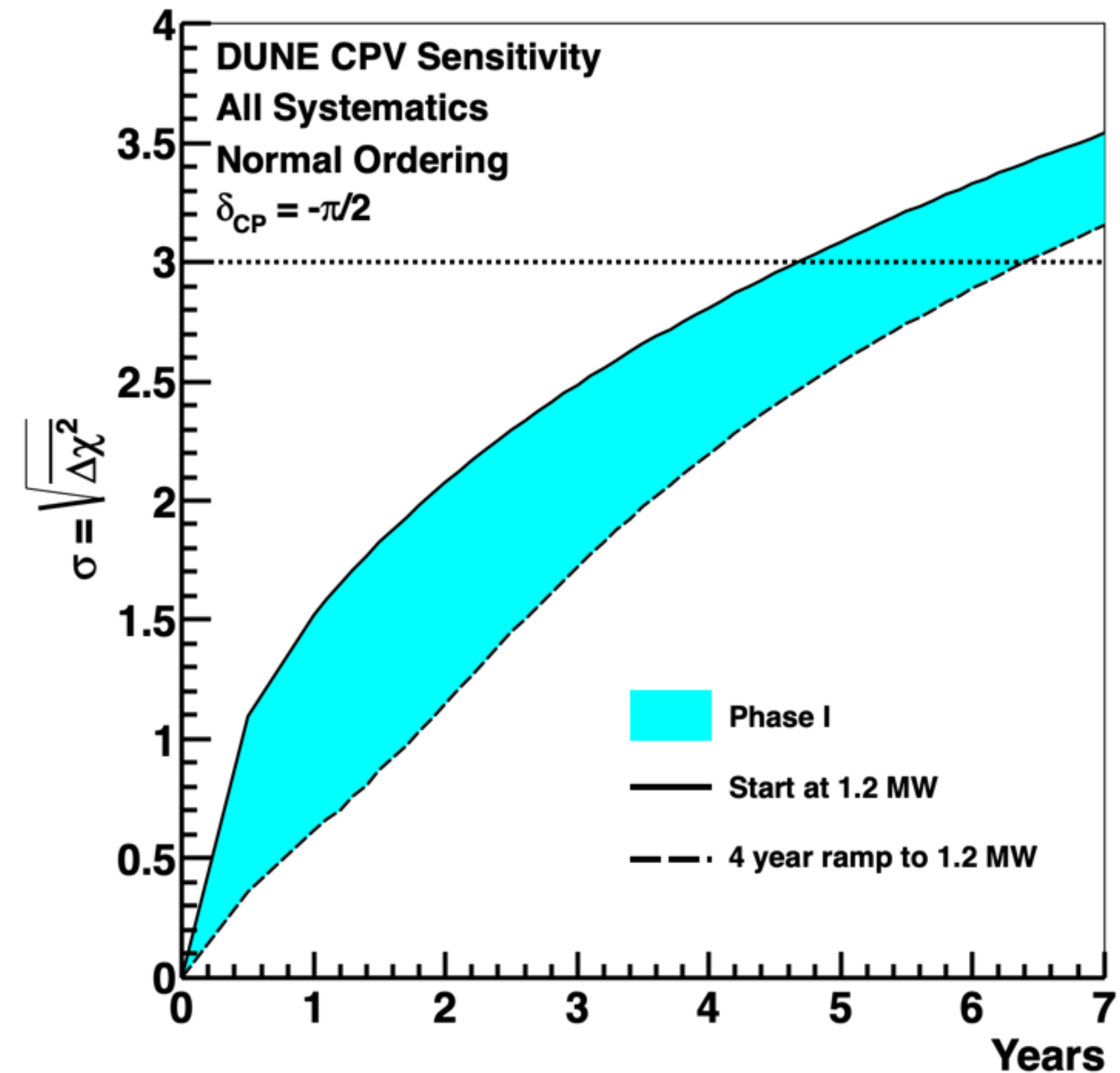
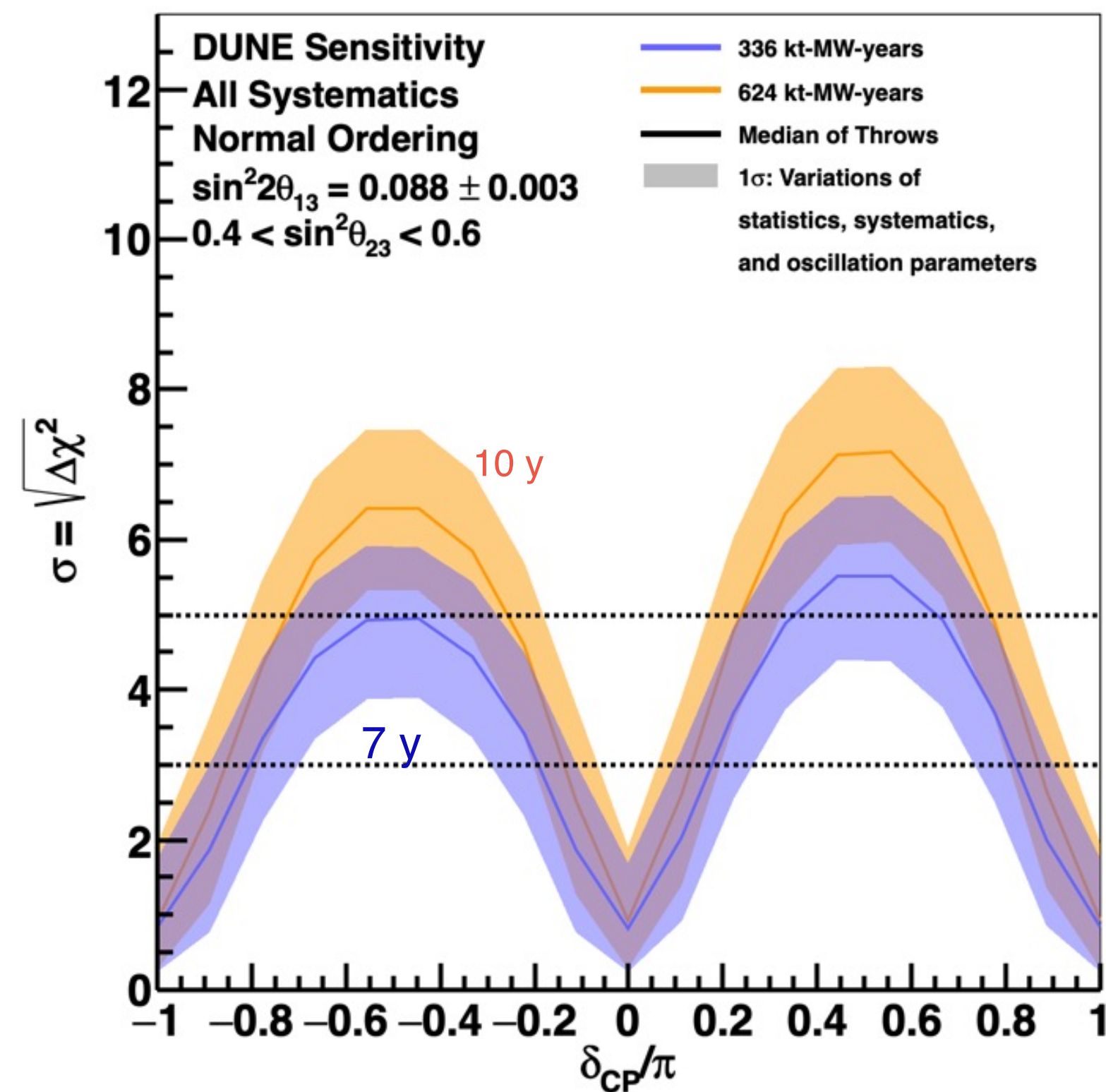
- Fit simultaneo degli spettri prodotti al FD e al ND
- errori sistematici su flusso, sezione d'urto e risposta del rivelatore vincolati dai set di dati al ND
- Risolvere la gerarchia di massa
 - Nessuna dipendenza da altri esperimenti
- Scoperta possibile in Fase I
 - 2 moduli al Far Detector
massa fiduciale totale of 20 kt,
Fascio: 1.2 MW



B. Abi, et al., (DUNE Collaboration), Long-baseline neutrino oscillation physics potential of the DUNE experiment *Eur. Phys. J. C* **80** 10, 978 (2020)

Violazione CP

- potenziale di scoperta (5σ) su $> 50\%$ intervallo δ_{CP}
- Phase I: evidenza a 3σ se $\delta_{CP} \sim O(\pm\pi/2)$



B. Abi, et al., (DUNE Collaboration), Long-baseline neutrino oscillation physics potential of the DUNE experiment *Eur. Phys. J. C* **80** 10, 978 (2020)

Ricercatori e Tecnologi : S. BERTOLUCCI (Resp. Naz., DUNE Co-spokes) ; A. CERVELLI, A. GABRIELLI ; M. GUERZONI;
G. LAURENTI; N. MAURI; A. MONTANARI (Convener PDS WG, GRAIN WG) , N.MOGGI,
L. PATRIZII (Resp.Naz, Resp. Loc.); A. PALADINO; G. PIAZZA; M. POZZATO (Convener SAND
DAQ WG), G. SIRRI (Convener STT WG); M. TENTI (convener SW&Analysis WG), N.TOSI,
R. TRAVAGLINI, S. ZUCHELLI

Tecnici Partecipanti: L. DEGLI ESPOSTI; D. DI FERDINANDO; C. GUANDALINI; I. LAX, M. LOLLI, V. TOGO, C. VALIERI

Assegnisti : L. PASQUALINI

Dottorandi : V. CICERO; G. INGRATTA; V. PIA (Icarus Run Coordinator) F. POPPI (Icarus Run Coordinator)

Laureandi (DUNE) F. CHIAPPONI; A. RUGGERI; A. BADIALI,

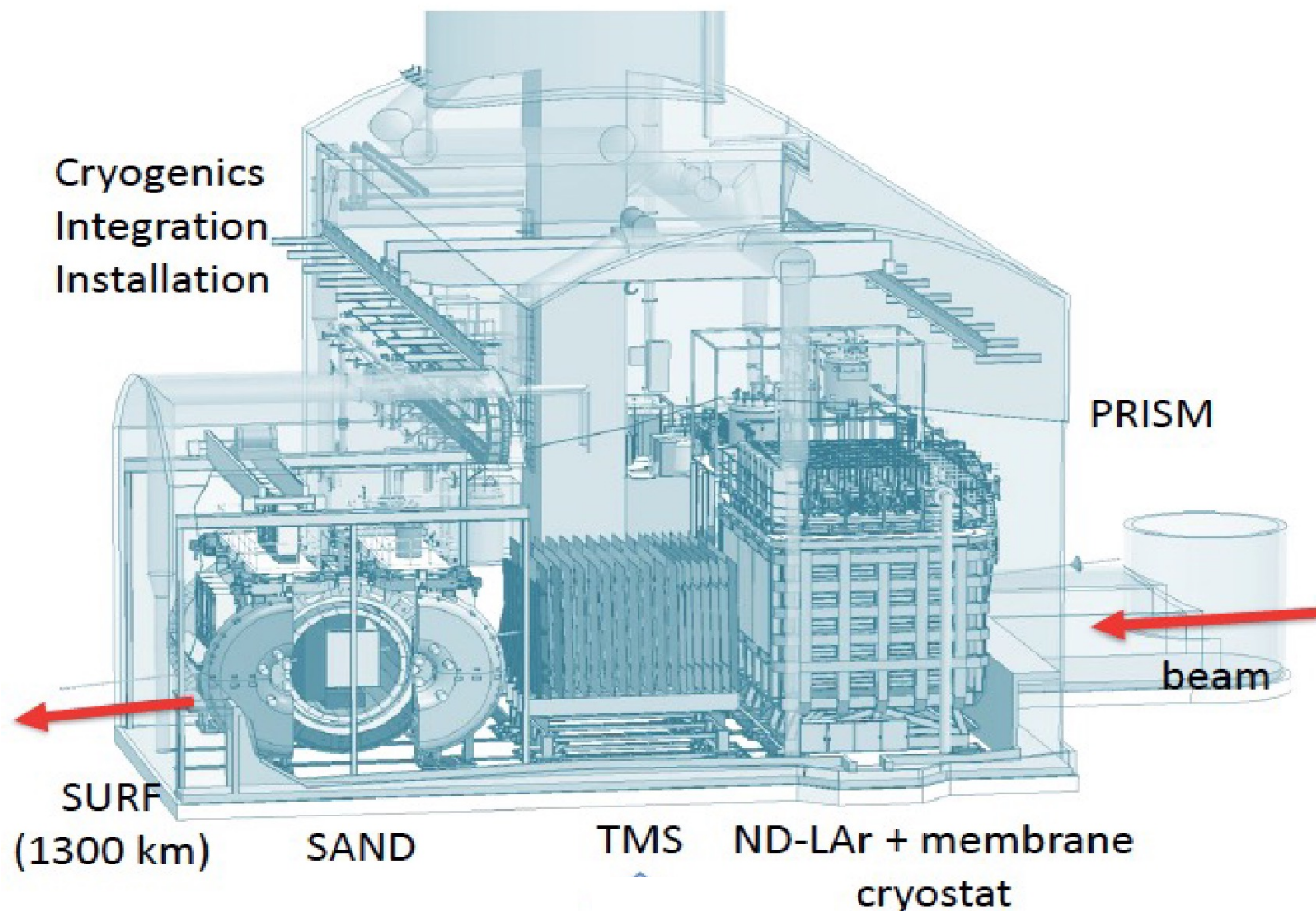
Servizi di Sezione Coinvolti : DIREZIONE, AMMINISTRAZIONE, LAB ELETTRONICA, PROGETTAZIONE, STG,
OFFICINA MECCANICA, PREVENZIONE E PROTEZIONE, CALCOLO

Disclaimer: indicati nelle slides i colleghi coinvolti nelle principali attività, con forte rischio di non volute omissioni

Bologna in DUNE

- SAND al Near Detector Complex
- Photon Detection System al Far Detector
- Diversi ruoli di responsabilità in entrambi

SAND (System for on Axis Neutrino Detection)



SAND è l'unico rivelatore sempre in asse sul fascio

Compito

- monitorare le variazioni del fascio su scale temporali della settimana
- misura del flusso
- misura componenti del fascio;
- contribuire al controllo delle sistematiche;
- programma di fisica oltre quello delle oscillazioni senza alcuna modifica

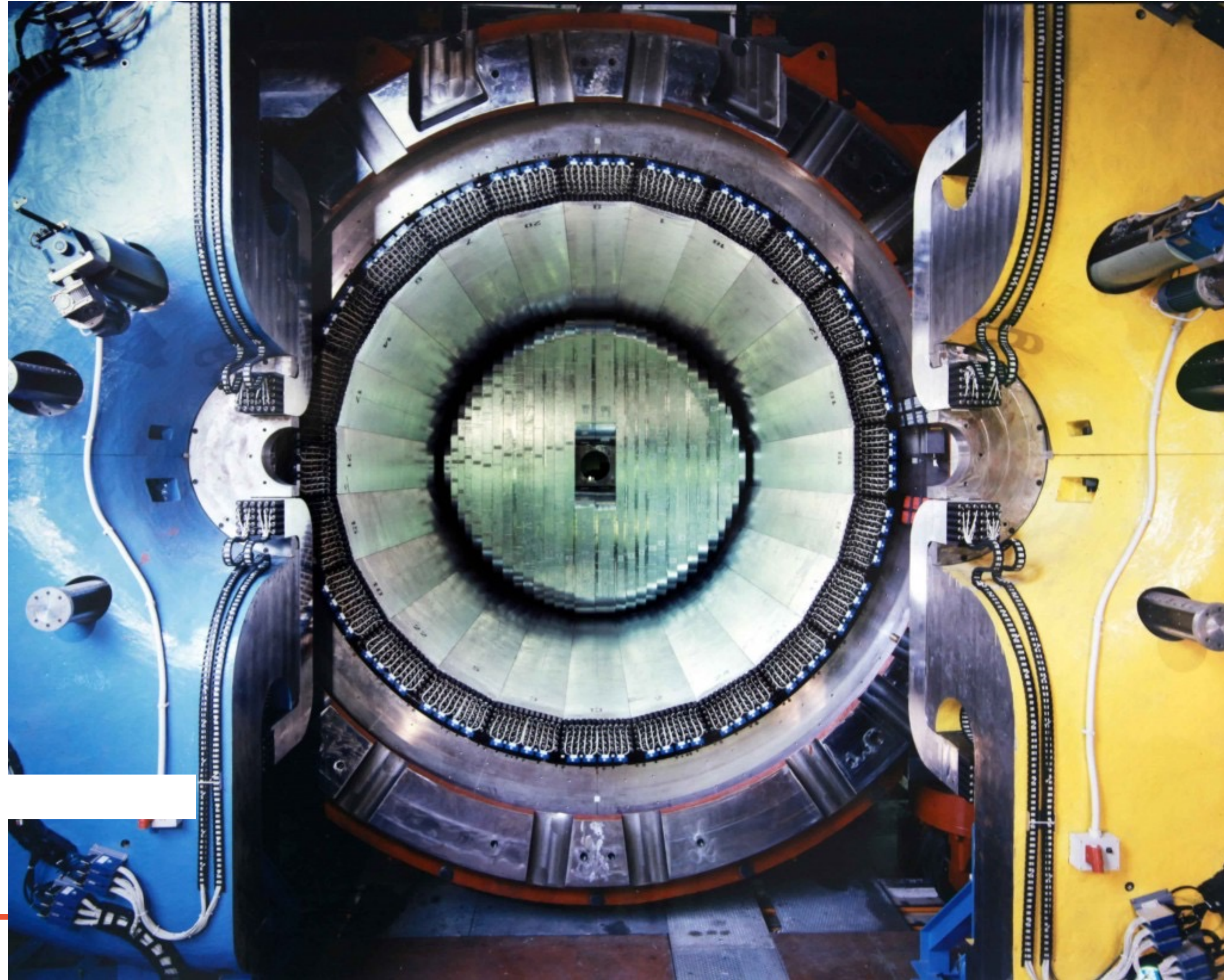
Fisica e sostenibilità

SAND: il riutilizzo di KLOE

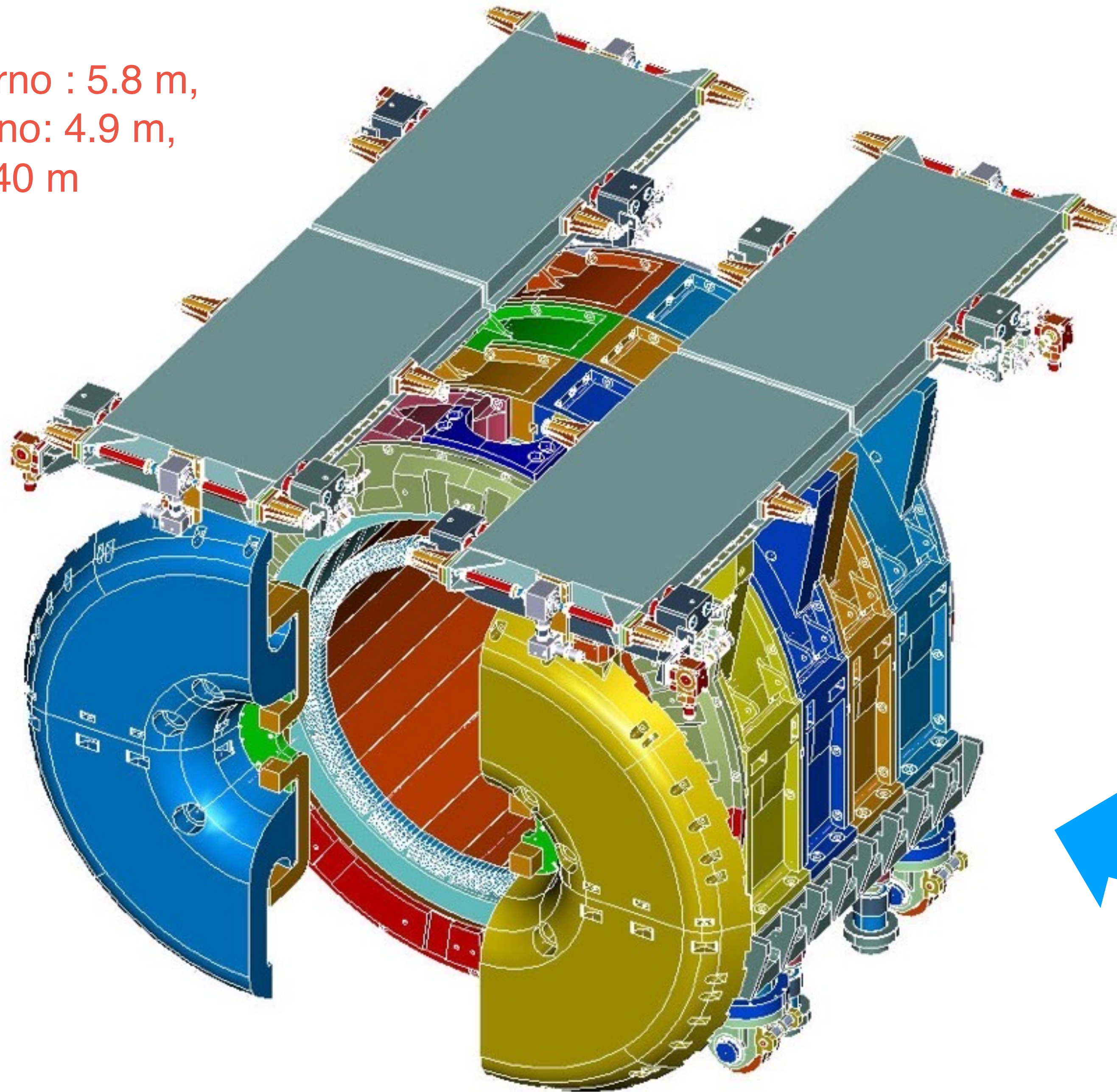
Solenoidi
Superconduttore
0.6T

Calorimetro
 4π Pb-SciFi

43 m³ di volume
magnetico
per sistemi
traccianti



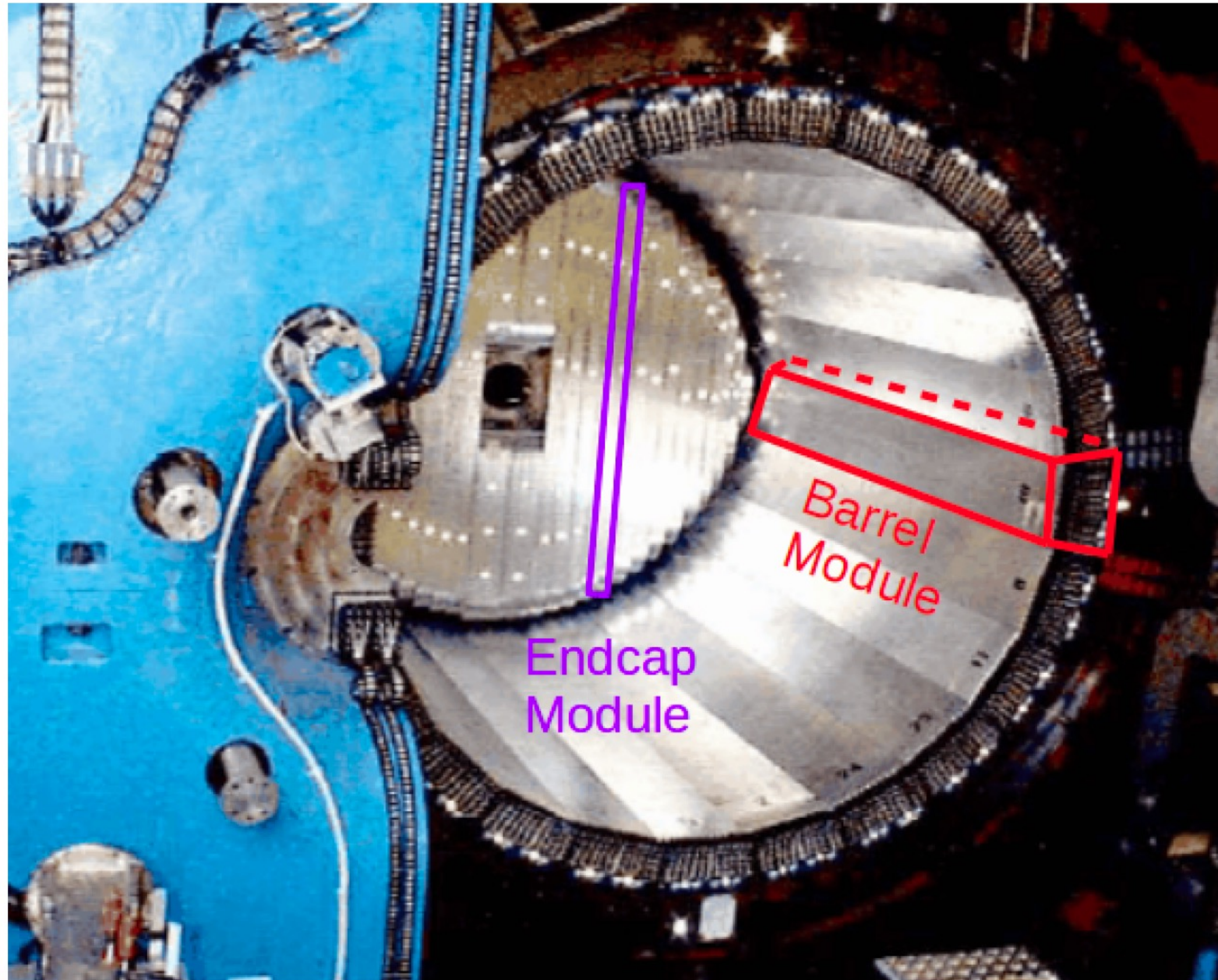
diametro esterno : 5.8 m,
diametro interno: 4.9 m,
lunghezza: 4.40 m



modello 3D (dai disegni «as built»)
già condiviso con ND I&I
engineering group @ FNAL

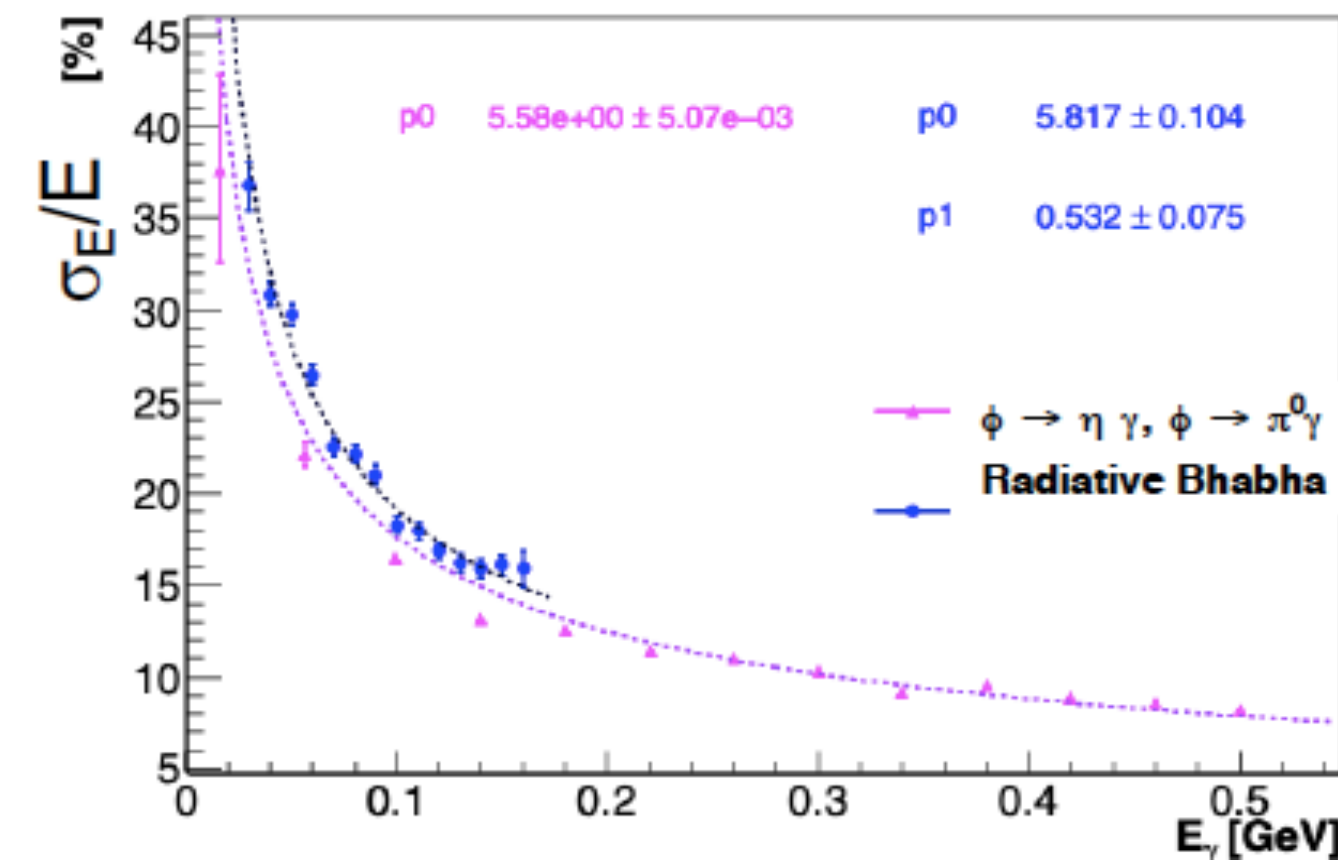
© Servizio Progettazione Bo
(M. Guerzoni, C. Guandalini)

Il calorimetro di KLOE:



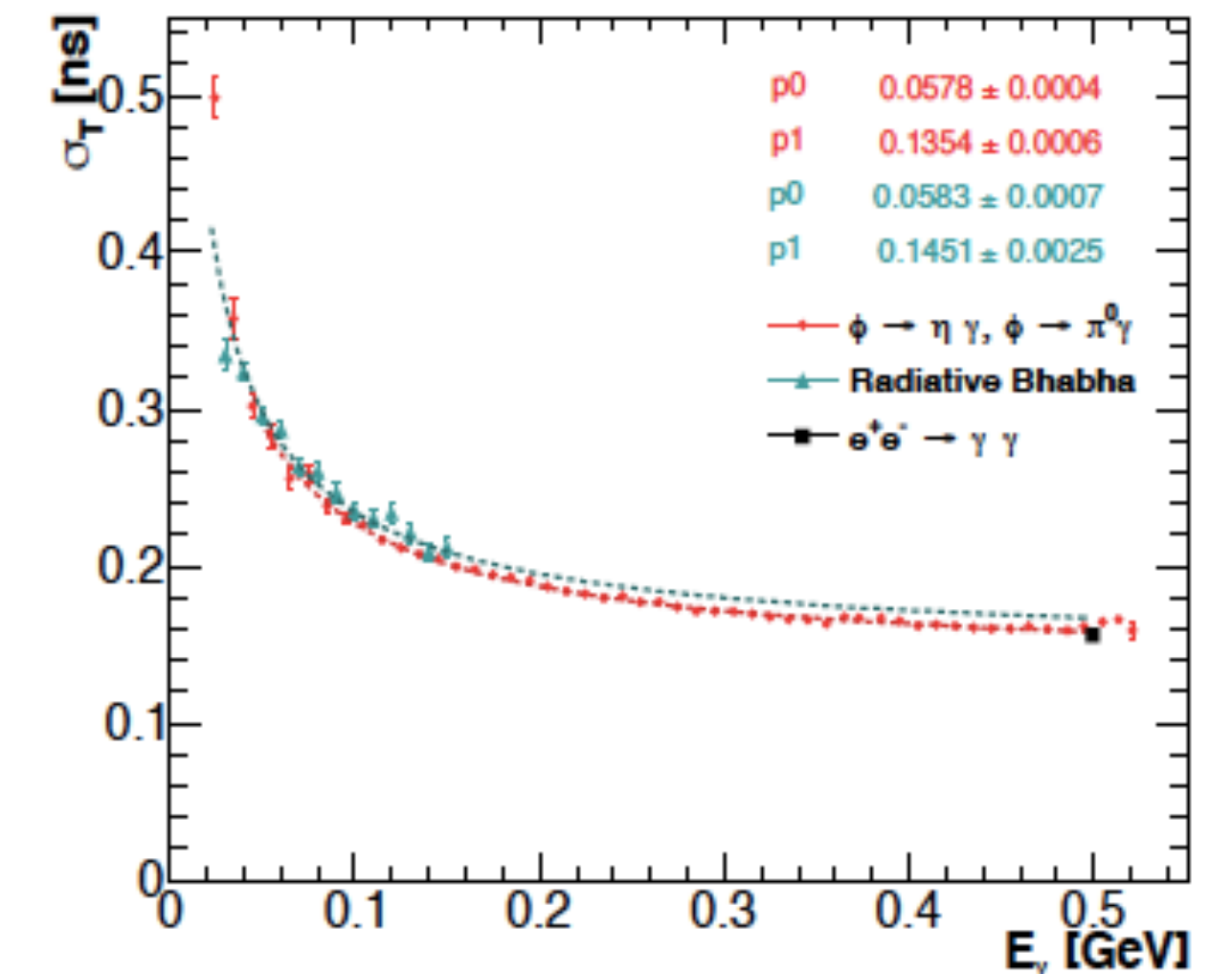
In funzione dal 1999 al 2018
 eccellenti prestazioni per elettroni e fotoni
 buone capacità di separazione $\pi/\mu/e$ e rivelazione di neutroni

Check e.m. calorimeter performance
 during KLOE-2 data taking (2015-2018):
 compatible with known performance.



$$\sigma_E/E \cong 5.6\% / \sqrt{E(\text{GeV})}$$

$$\sigma_\tau \cong 58 \text{ ps} / \sqrt{E(\text{GeV})} \oplus 135 \text{ ps}$$



Moduli calorimetro:

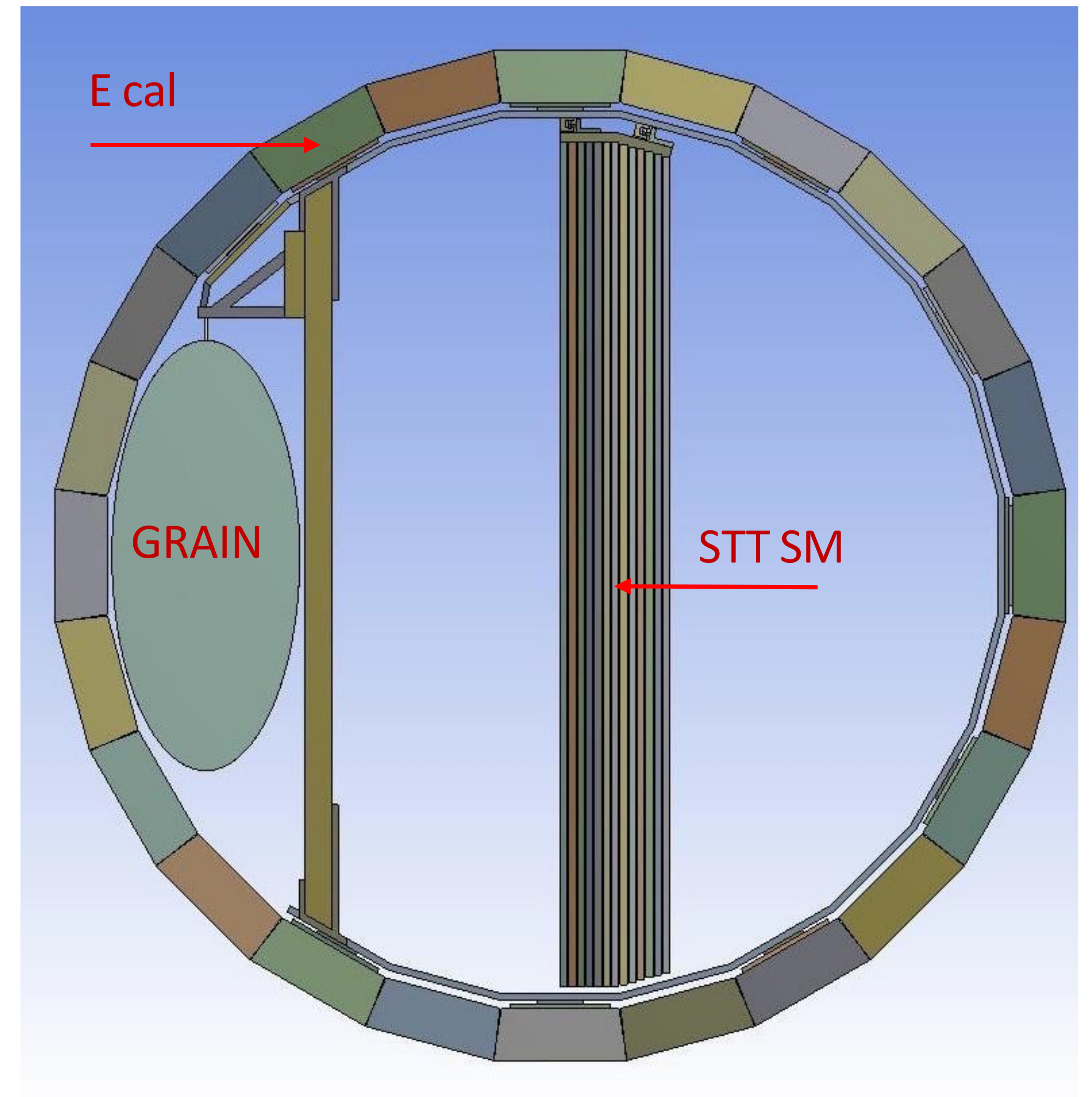
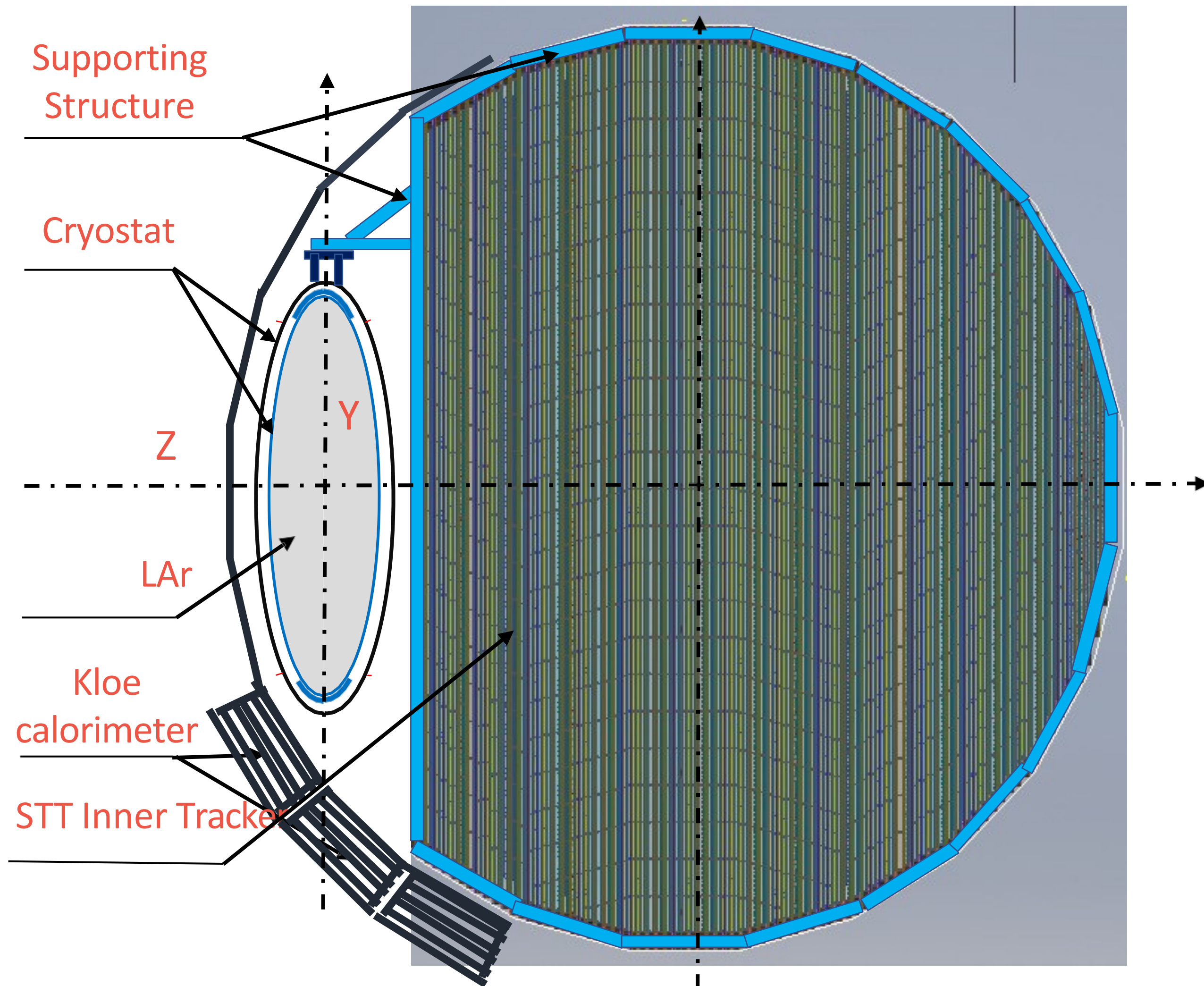
200 strati 1 mm Pb alternati 200 strati fibre scintillanti \varnothing 1 mm

densità media 5 g/cm³;

$X_0 = 1.5$ cm

Calorimetro 15 X_0

GRAIN e STT (Straw Tube Target Tracker) in SAND



Design © C. Guandalini, M.Guerzoni, G.Laurenti, G. Piazza

Il Tracciatore a Straw Tubes

STT: progettato per controllo delle interazioni dei neutrini simile agli esperimenti e^\pm DIS :

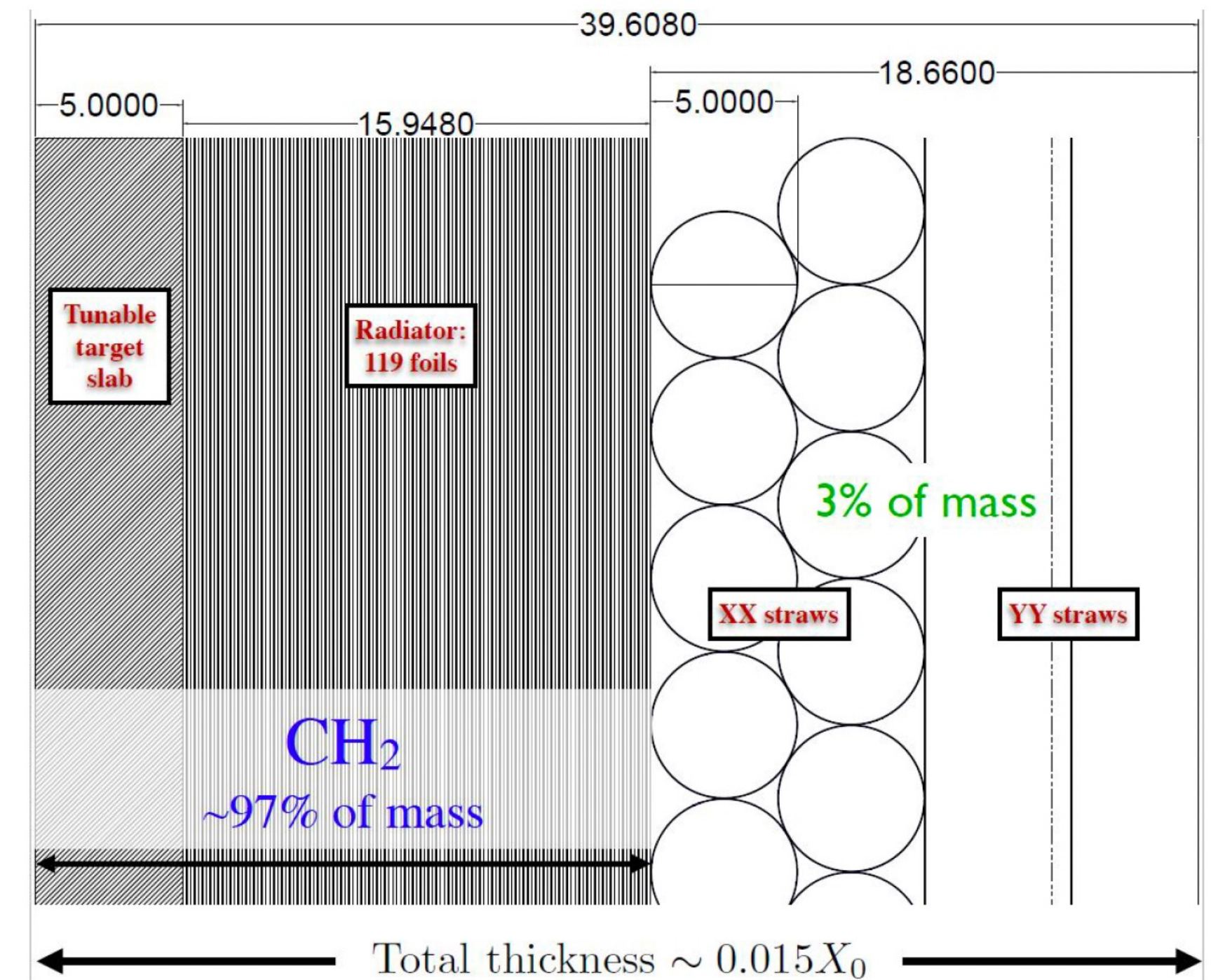
- Struttura modulare: 90 moduli con piani di straw tubes da 5 mm organizzati in strati XXYY(XX)
- Strati sottili di materiale passivo (1-2% X_0) separati da piani di straw tubes;
- Sistema bersaglio /tracciatore "trasparente" : lunghezza totale $\sim 1.3X_0$;
- Strati di materiale bersaglio distribuiti nel volume
- Densità. $0.005 \leq \rho \leq 0.18 \text{ g/cm}^3$
- Bersagli 97% della massa del tracciatore (straws 3%)
- FV mass: 4.7 t CH₂, 557 kg C

Precisa ricostruzione della cinematica nel piano trasverso :

$$\Delta p/p \leq 3\%, \Delta \theta/\theta' \leq 1.5 \text{ mrad}$$

Particle Id & tracciamento

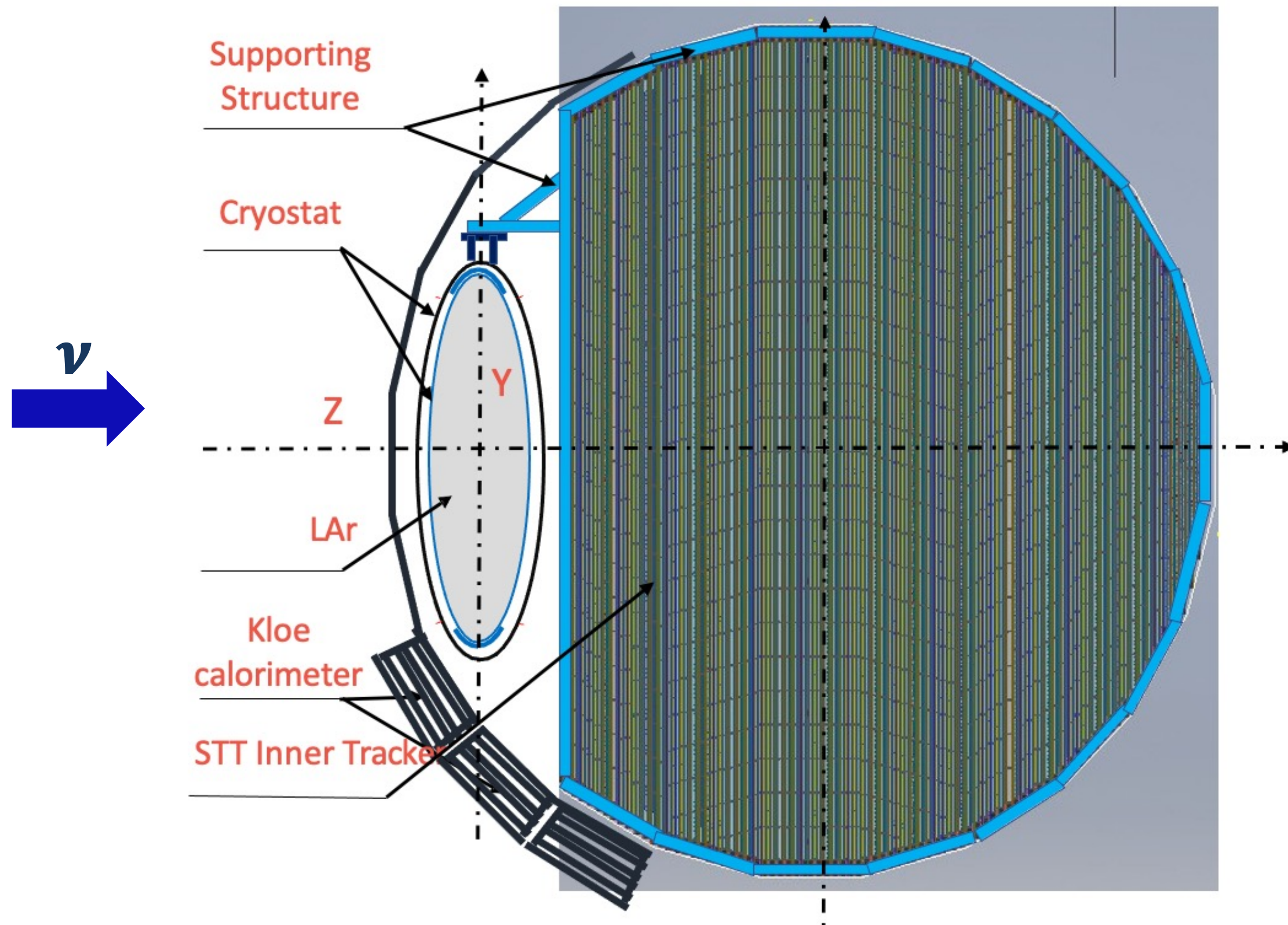
- ID elettroni con Transition Radiation e $dE/dx \Rightarrow \pi/e \sim 10^{-3}$;
- rivelazione π^0 da conversione fotoni all'interno del volume del STT;
- $p/\pi/K$ ID con dE/dx e range.
- Sinergia con PID del Calorimetro e.m.



Modulo STT che comprende tre elementi principali (da sinistra a destra): bersaglio CH₂; lamine di polipropilene (TR) e quattro strati di straws XXYY (Al-Mylar)

G. Sirri convener STT WG in SAND

GRAIN (GRanular Argon for Interactions of Neutrinos)



- Uno strumento per
 - misurare interazioni ν_x e $(\text{anti})\nu_x$ in Ar in campo magnetico, insieme allo spettrometro e al calorimetro
 - contenere sistematiche effetti nucleari confrontando interazioni di ν su bersagli di H, C, Ar, Pb nello stesso rivelatore
 - cross check spettri dei muoni, molteplicità e carica adroni (misure in ND-LAr +TMS)
- ~ 50 k eventi/settimana in FHC e FV

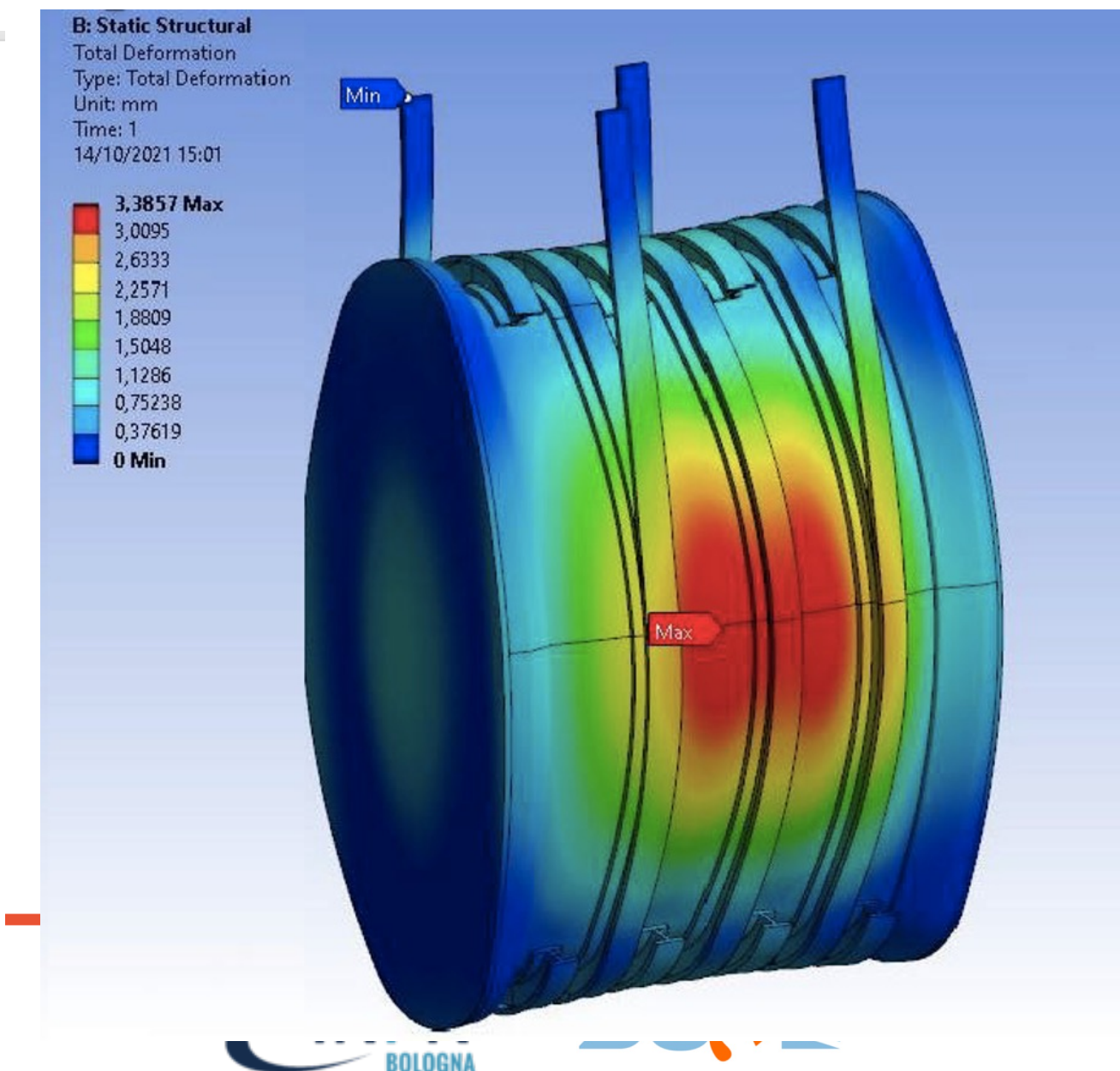
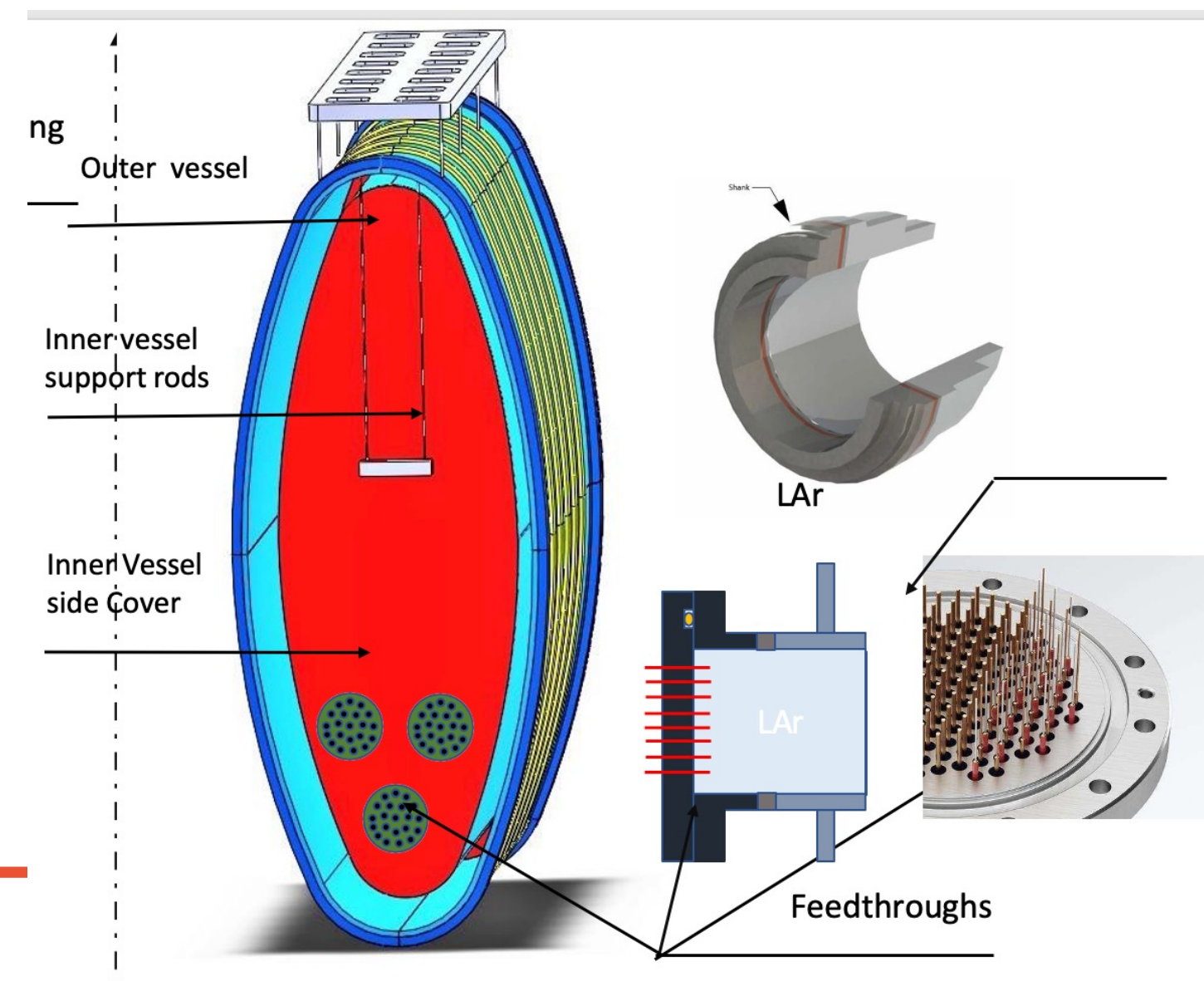
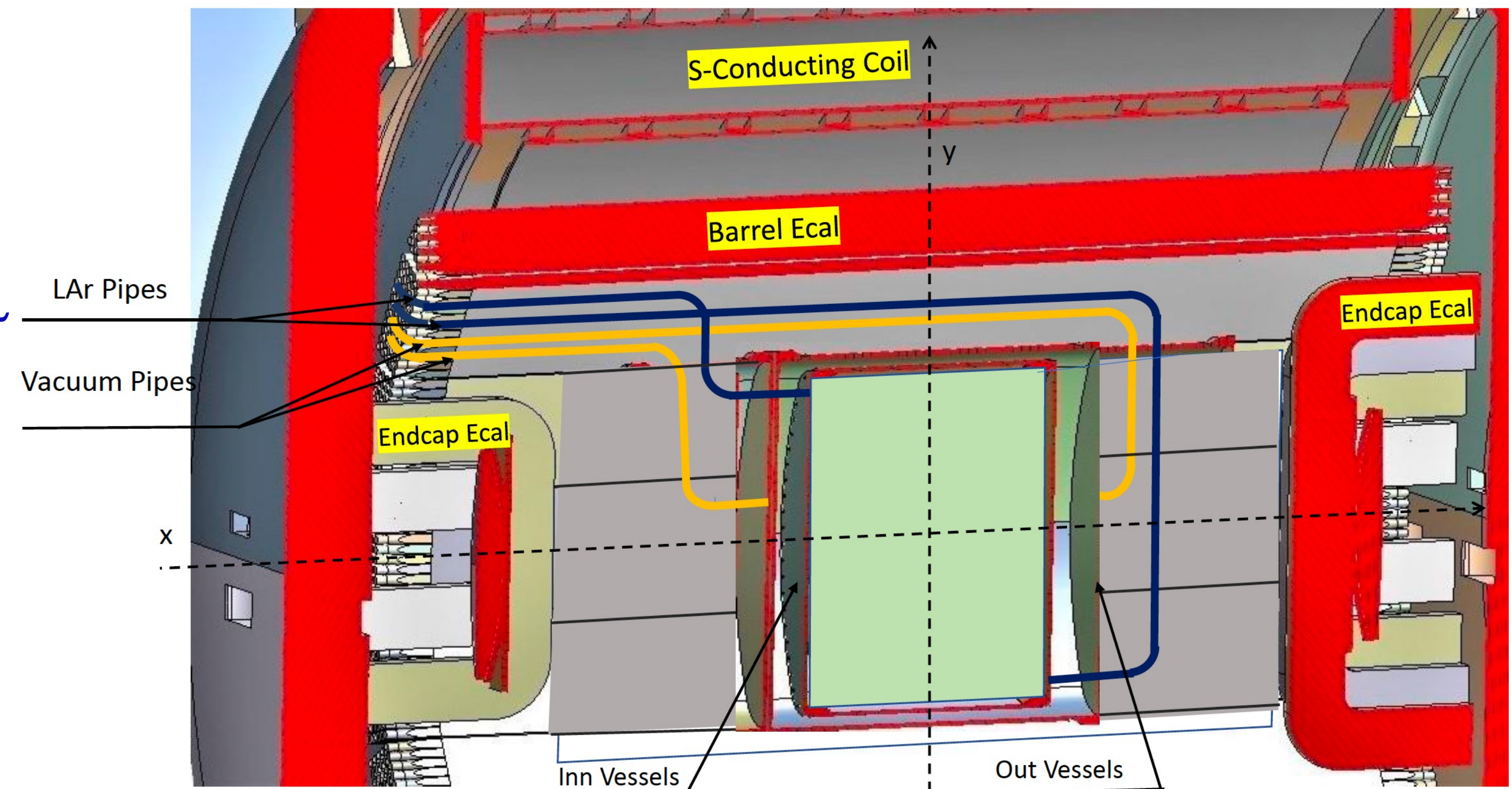
Non sostituisce ND-LAr, ma lo complementa

GRAIN in SAND

Il design: requisiti

- adeguata massa di LAr minimizzando $\sim X/X_0$
Ottimizzazione in corso
- Preservare prestazioni di SAND, specie per beam monitoring
- Minimizzare materiale passivo (criostato, servizi), rispettando norme ES&H
- che sia inseribile/riparabile/rimovibile nell' «alcova» con minimo impatto operativo.

Design © G. Laurenti, M.Guerzoni, G. Piazza

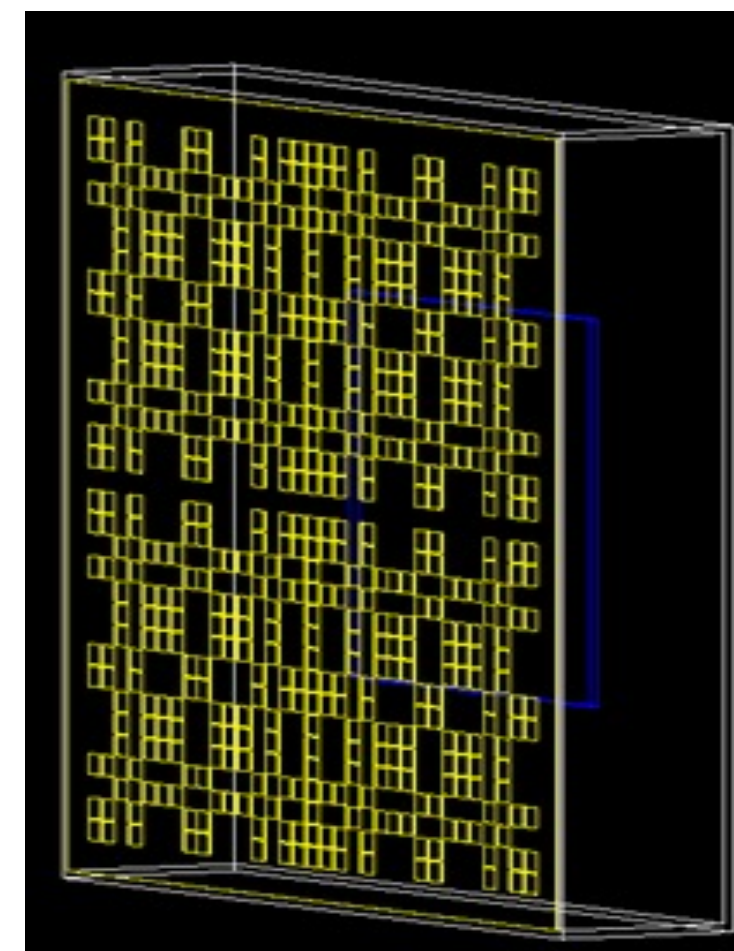


GRAIN: readout ottico

Usare la luce di **scintillazione per** ricostruire le tracce (supera limitazioni TPC)

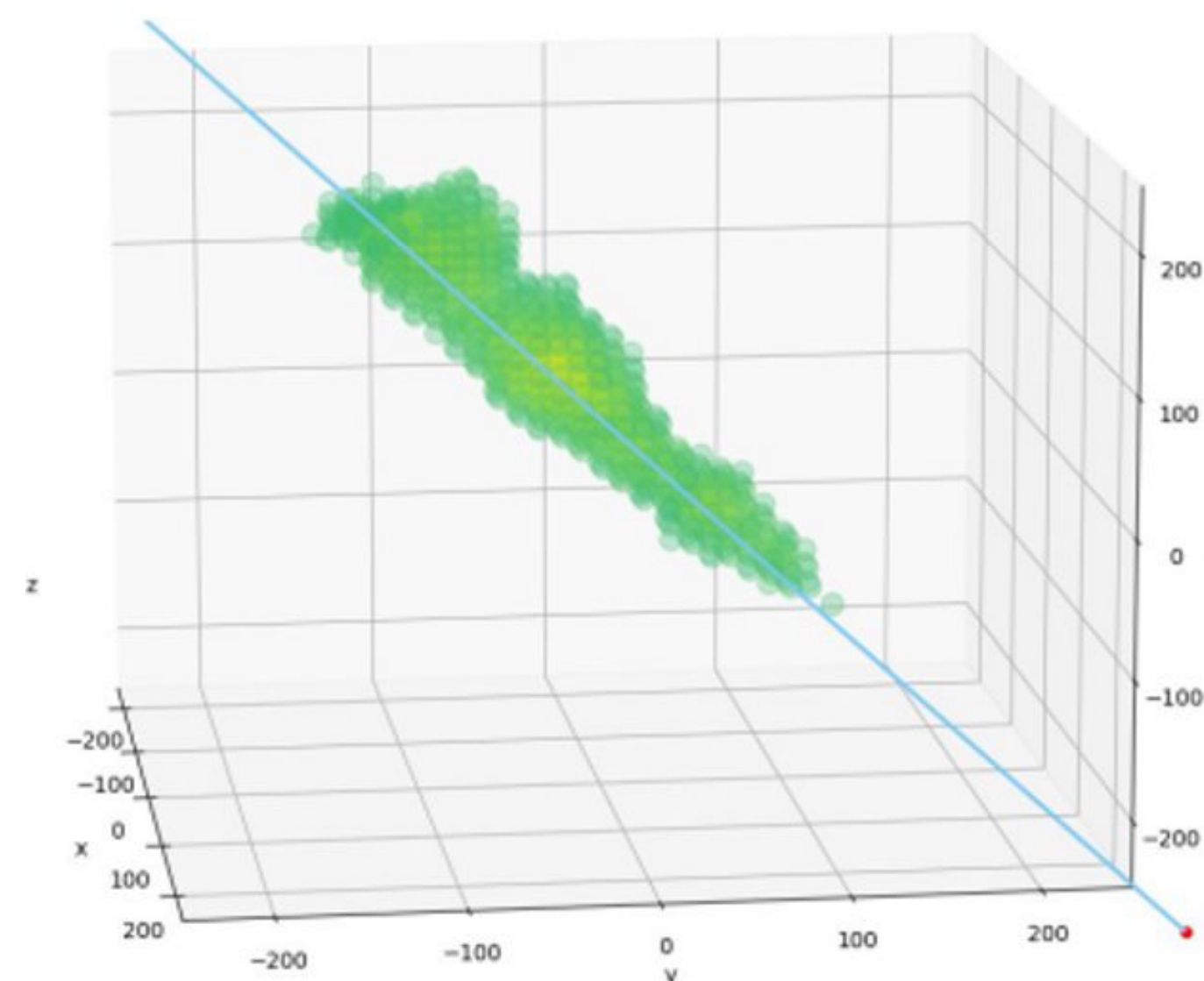
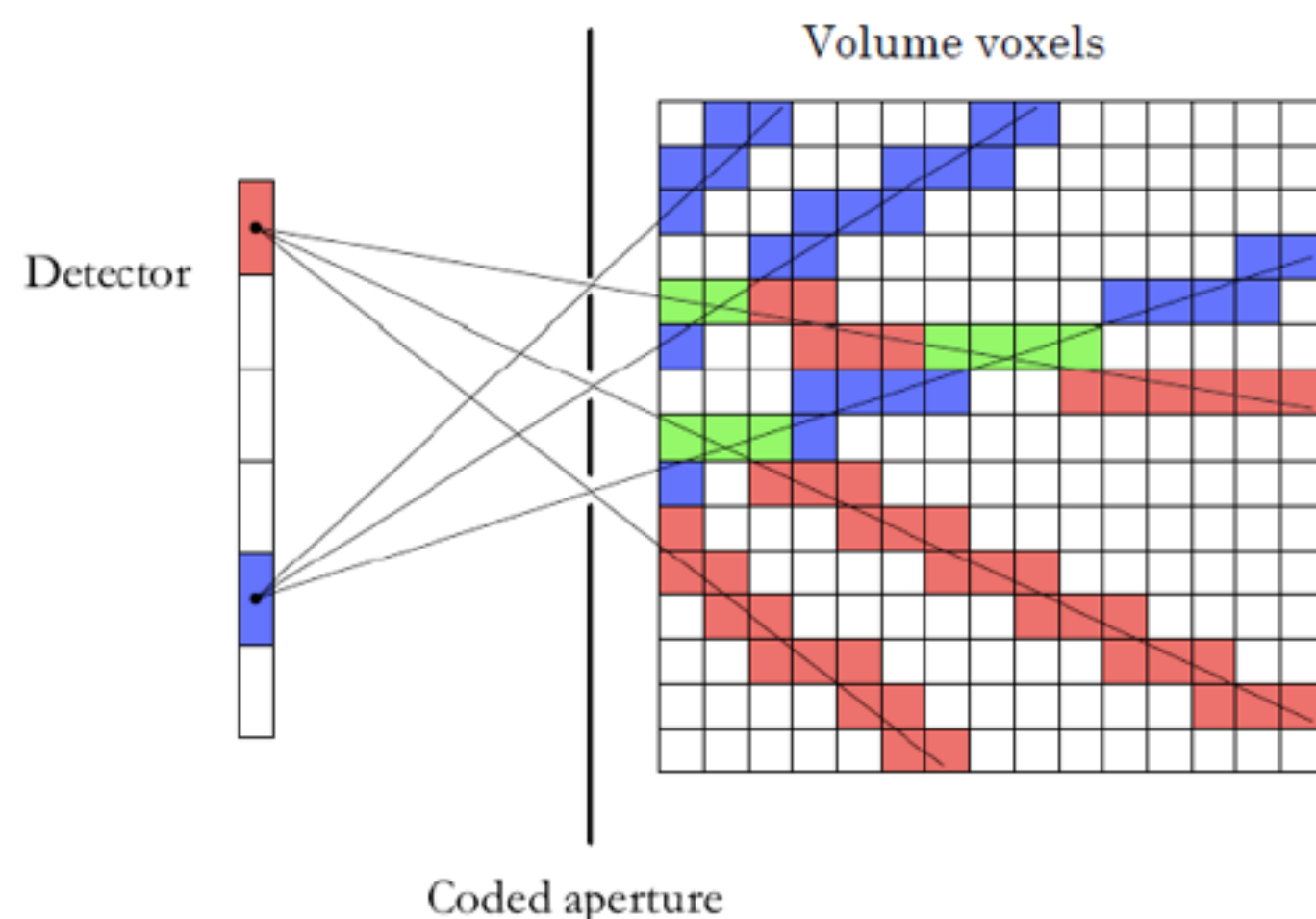
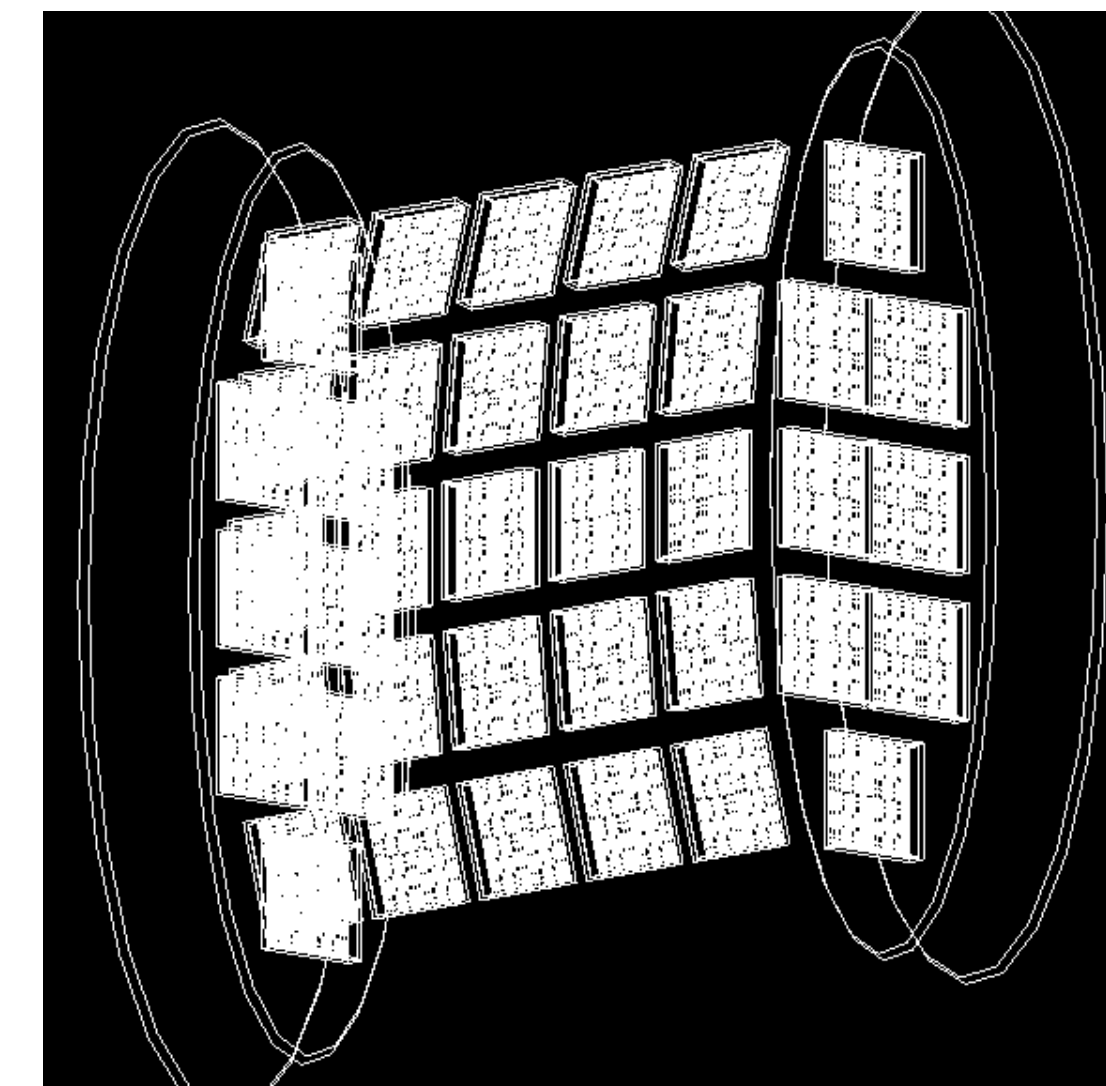
Imaging basato su **matrice di SiPM** con davanti una maschera realizzata secondo un pattern di fori (coded mask, matrice di pinholes)

ricostruzione 3D : volume diviso in voxels. Ricerca della sorgente di luce più probabile



A single camera

Set-up (parziale) in GRAIN



Local team: V. Cicero, G. Ingratta, A. Montanari (conv. GRAIN WG in SAND) N. Mauri, V. Pia, M. Pozzato, A. Ruggeri, N. Tosi

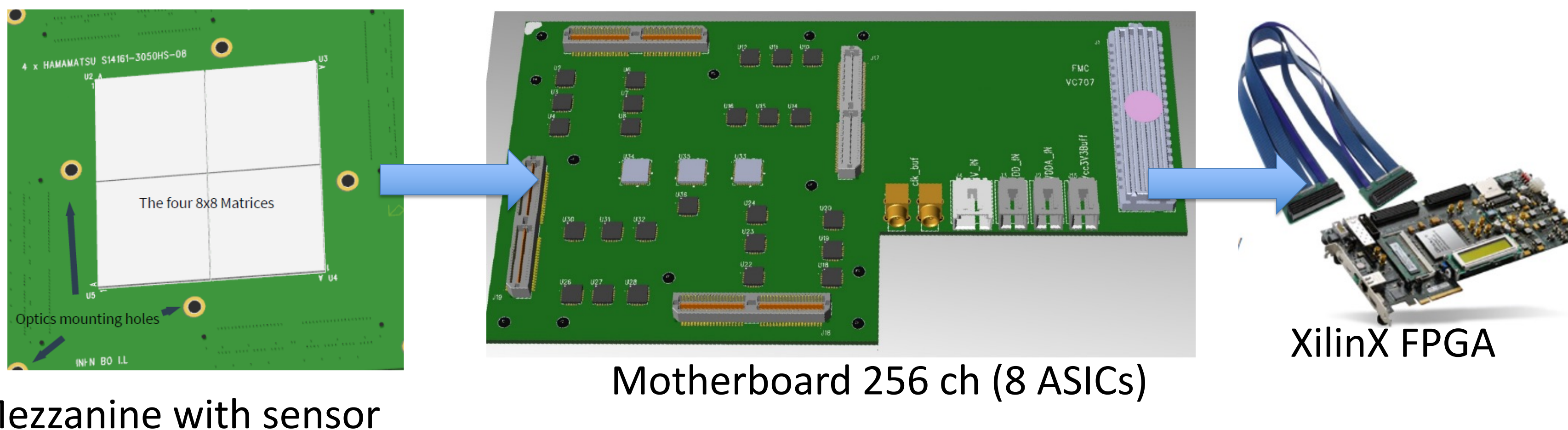
GRAIN: readout demonstrator prototype

Per verificare la tecnica, stiamo costruendo un prototipo su piccolo scala

Matrice di Sensori: Hamamatsu 16x16 (SiPM size 3x3 mm²)

Cold frontend electronics : 8 x ASIC (32ch, "ALCOR" from INFN Torino) = 256 ch

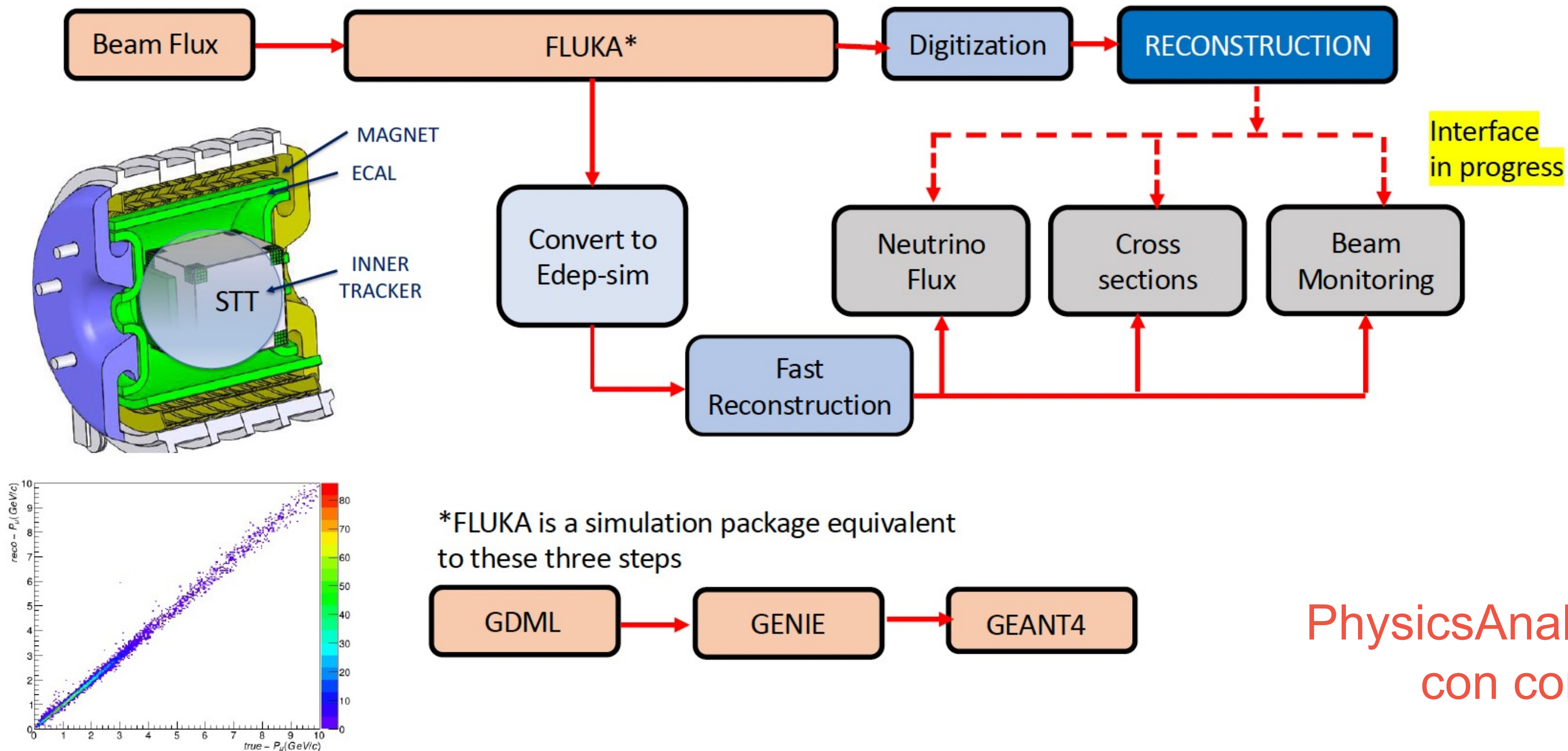
Readout: Xilinx demo board



Local Team: A. Badiali, I. Lax, A. Montanari, N. Tosi, R. Travaglini

Simulation and Reconstruction Chain

SAND



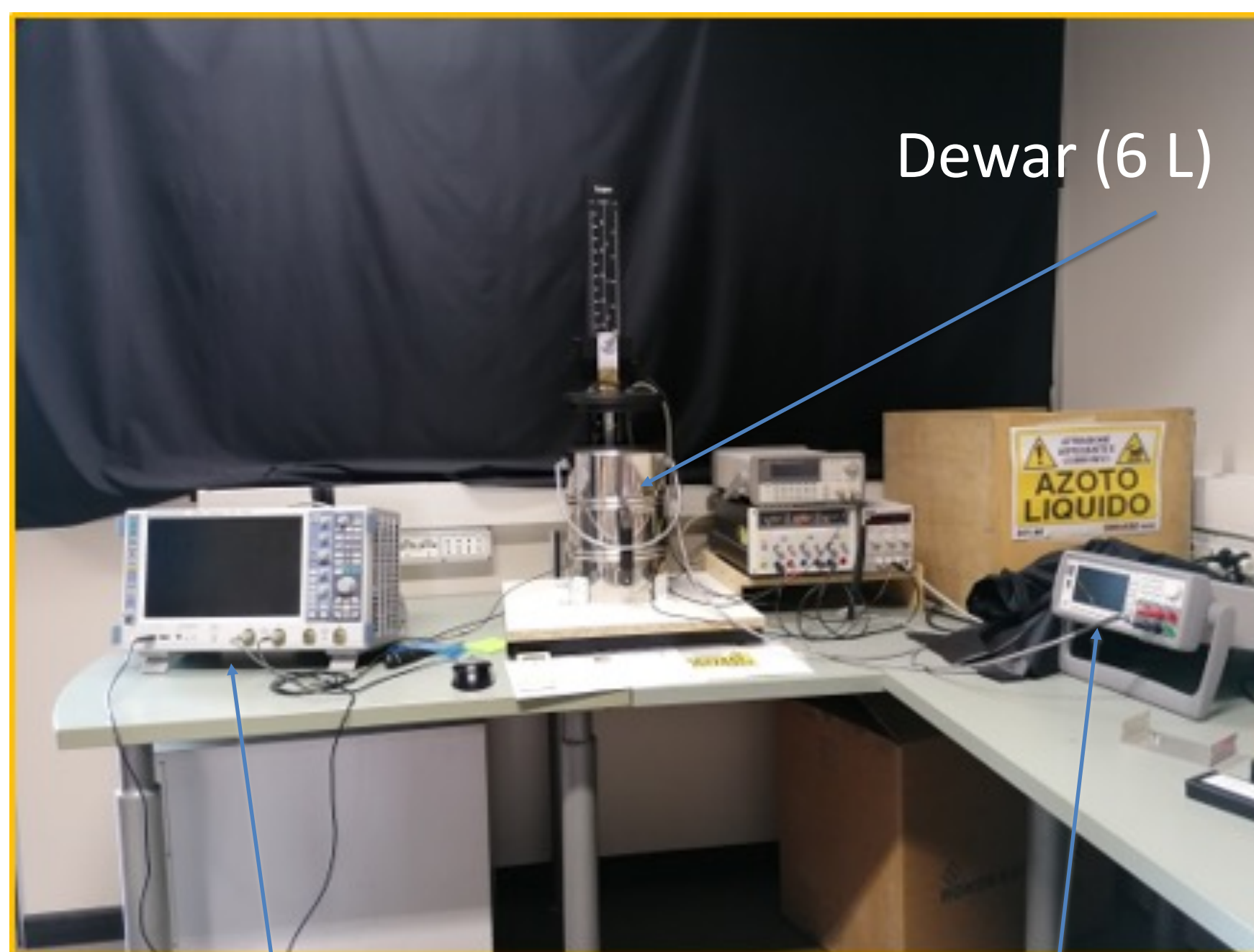
PhysicsAnalyses: docdb-13262
con contributi da tutti

Local team: G. Ingratta, M. Pozzato, G. Sirri, M.Tenti (WG coordinator in SAND)

Fotosensori per il Far Detector

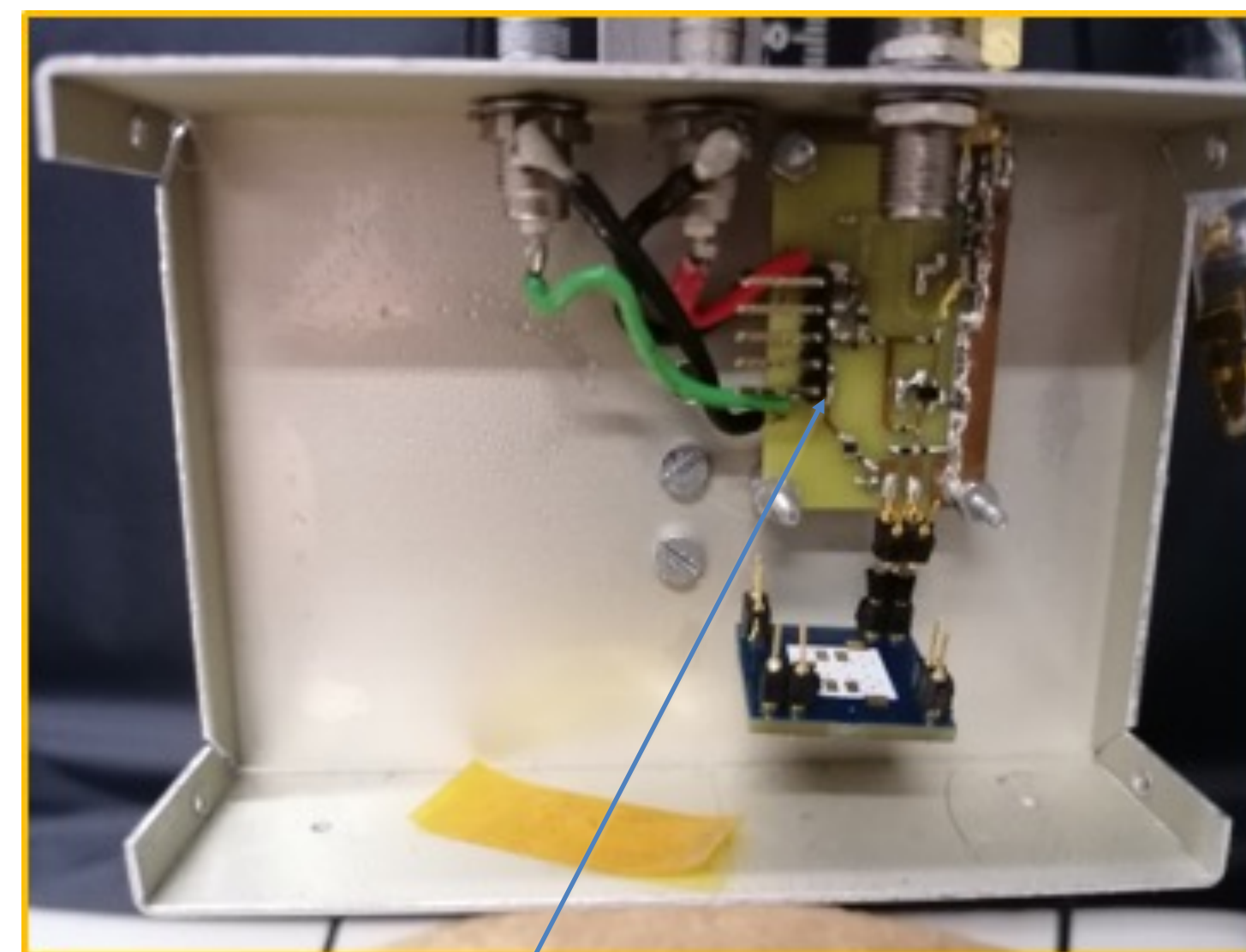
A. Montanari Convener nel Phtosensor WG

- Principale attività nel 2022: caratterizzazione in LN2 dei SiPM HPK e FBK, per scegliere il sensore più adatto per Far Detector di DUNE.
- Stazione di test di Bologna «reference» per gli altri Lab. Selezione completata.
- Gara per fornitura di 290000 sensori avviata



Scope Rhode&Schwarz
RTO 2024

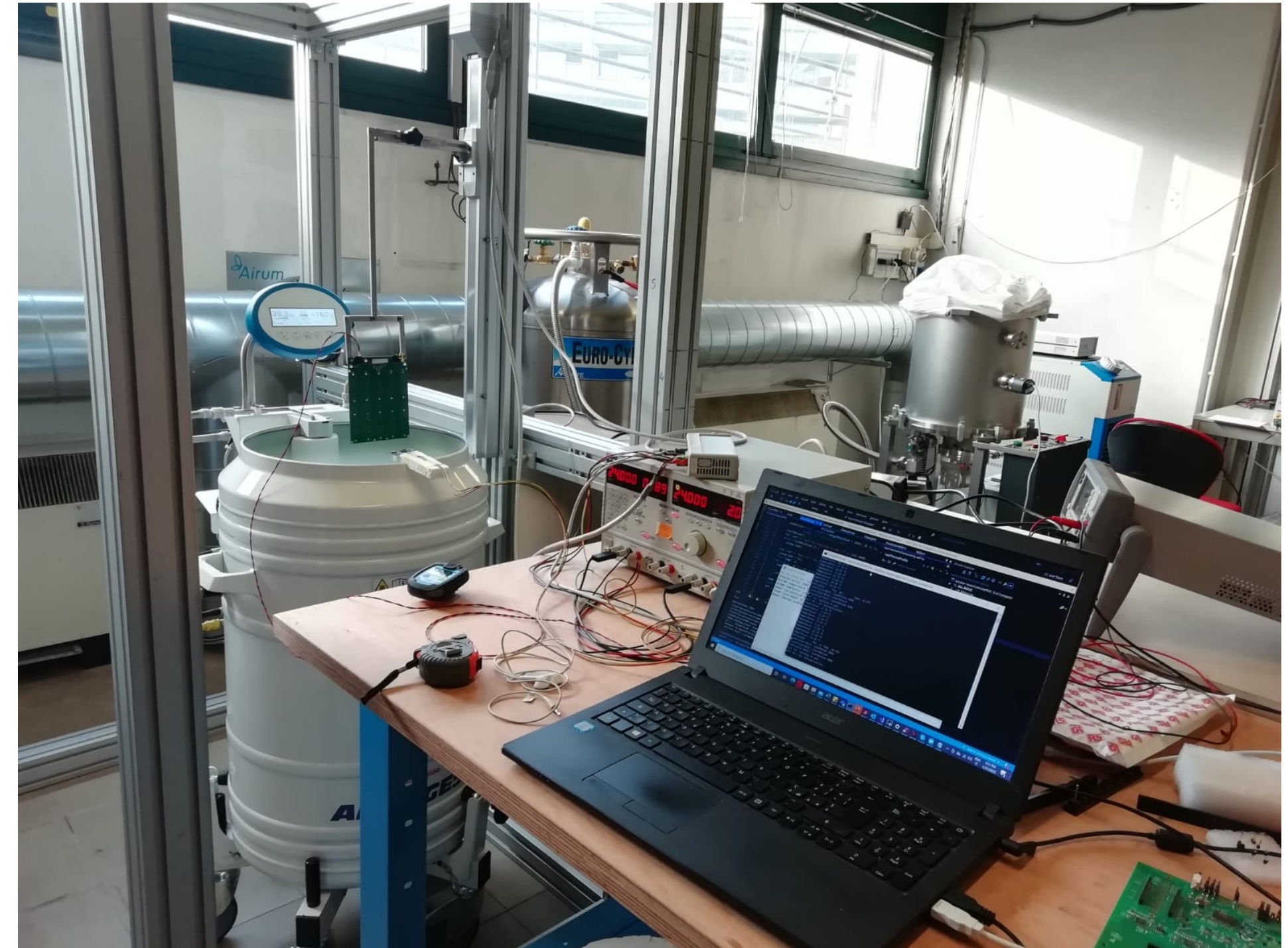
Source meter
Keysight B2901A



Amplifier by Bologna
Electronic workshop
(© Ignazio Lax)

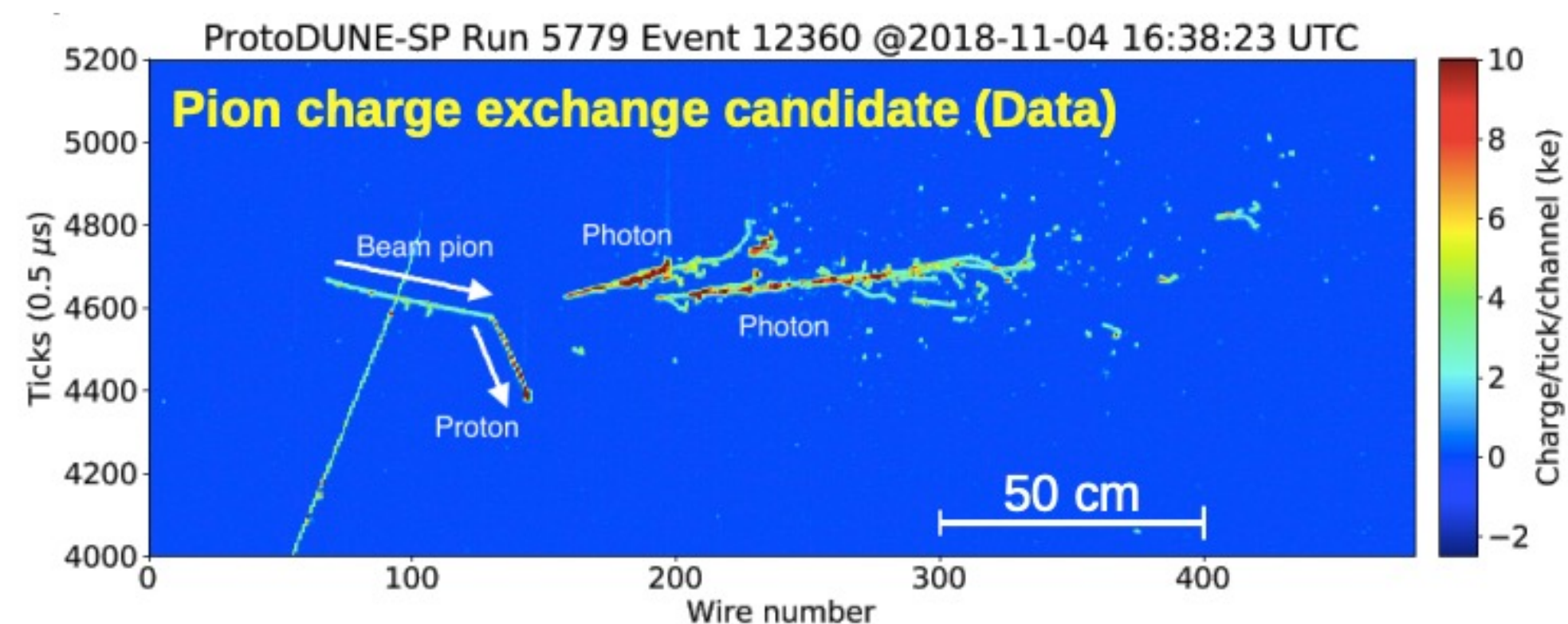
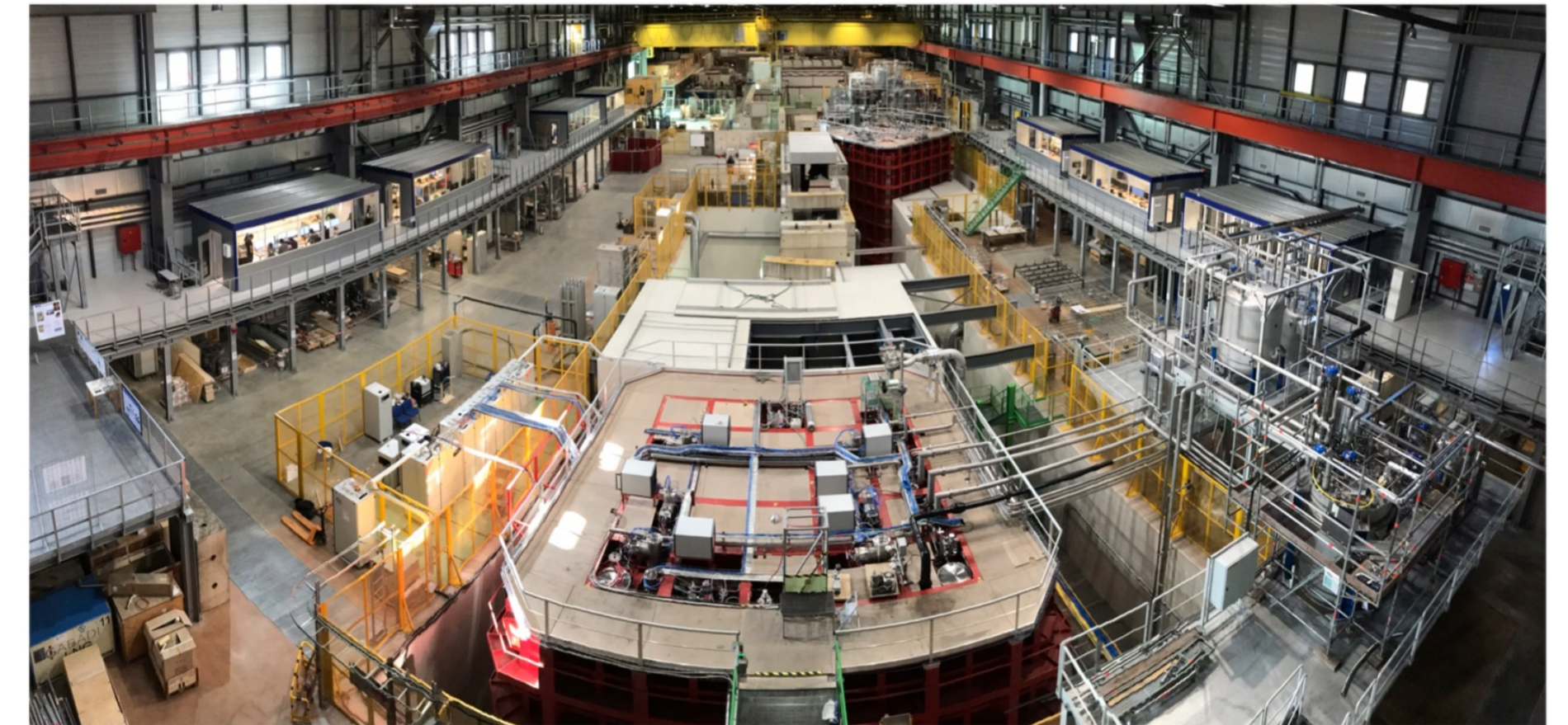
Fotosensori per il Far Detector

- Bologna responsabile con Ferrara del design della Test Mass Facility
 - Test ~4000 SiPM per ProtoDUNE2 (in corso)
 - presso le facilities di BO and FE + 4 clonate per altri 3 lab test di tutti 290000 SiPM per il FD module 1.
- Cicli termici e misure di 120 sipm in parallelo



Prototipi

- ProtoDUNE-SP (HD prototype, 770 t LAr) ha preso dati su fasci di particelle cariche al CERN in 2018
- Test di successo con parametri di progetto
 - 500 V/cm campo elettrico > 99% canali attivi
 - Alto rapporto segnale-rumore
 - Ampio programma hadron-argon cross-section
- Pronto per un nuovo run dall' autunno 2022



Anodo con tre piani di fili

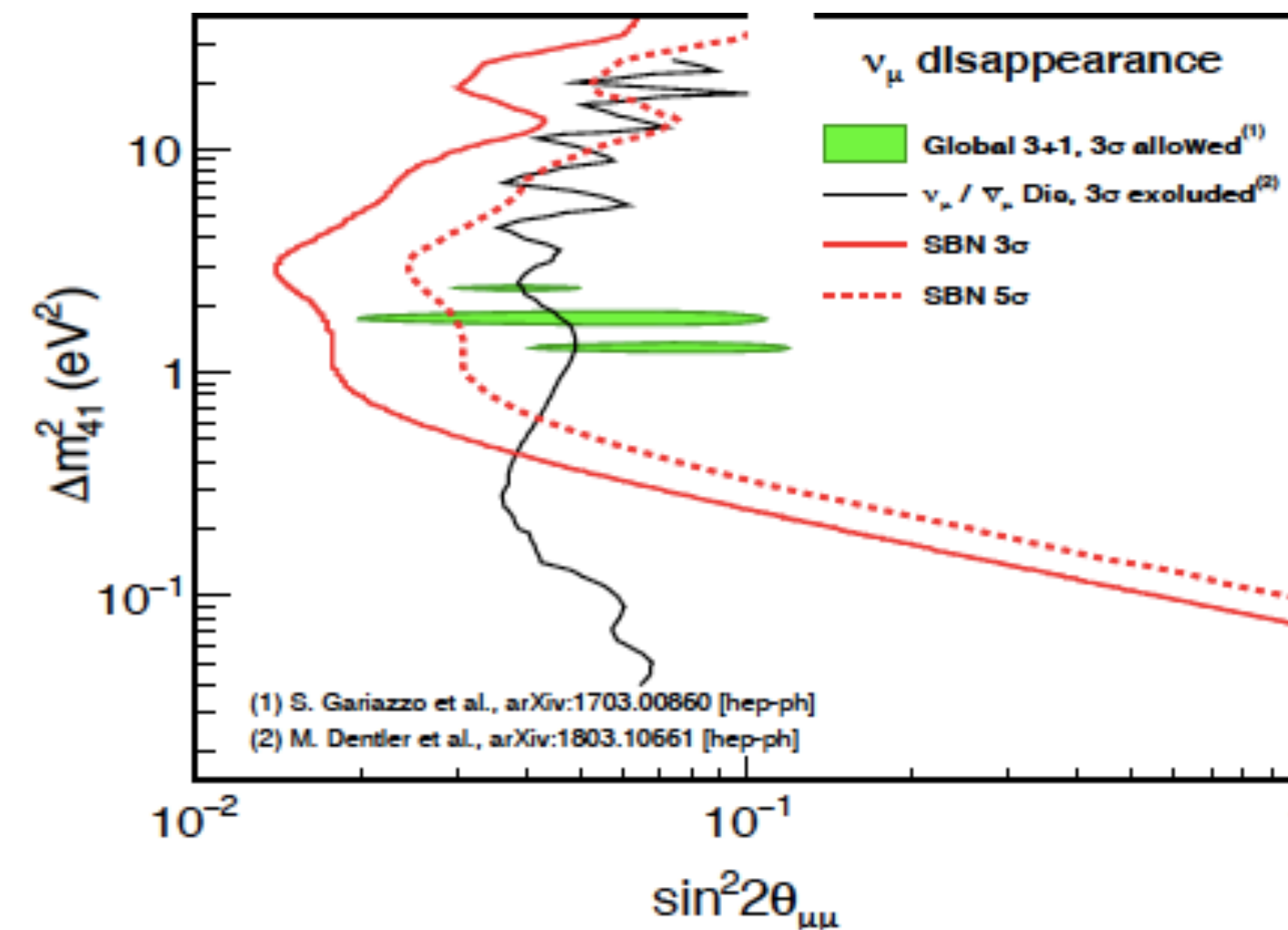
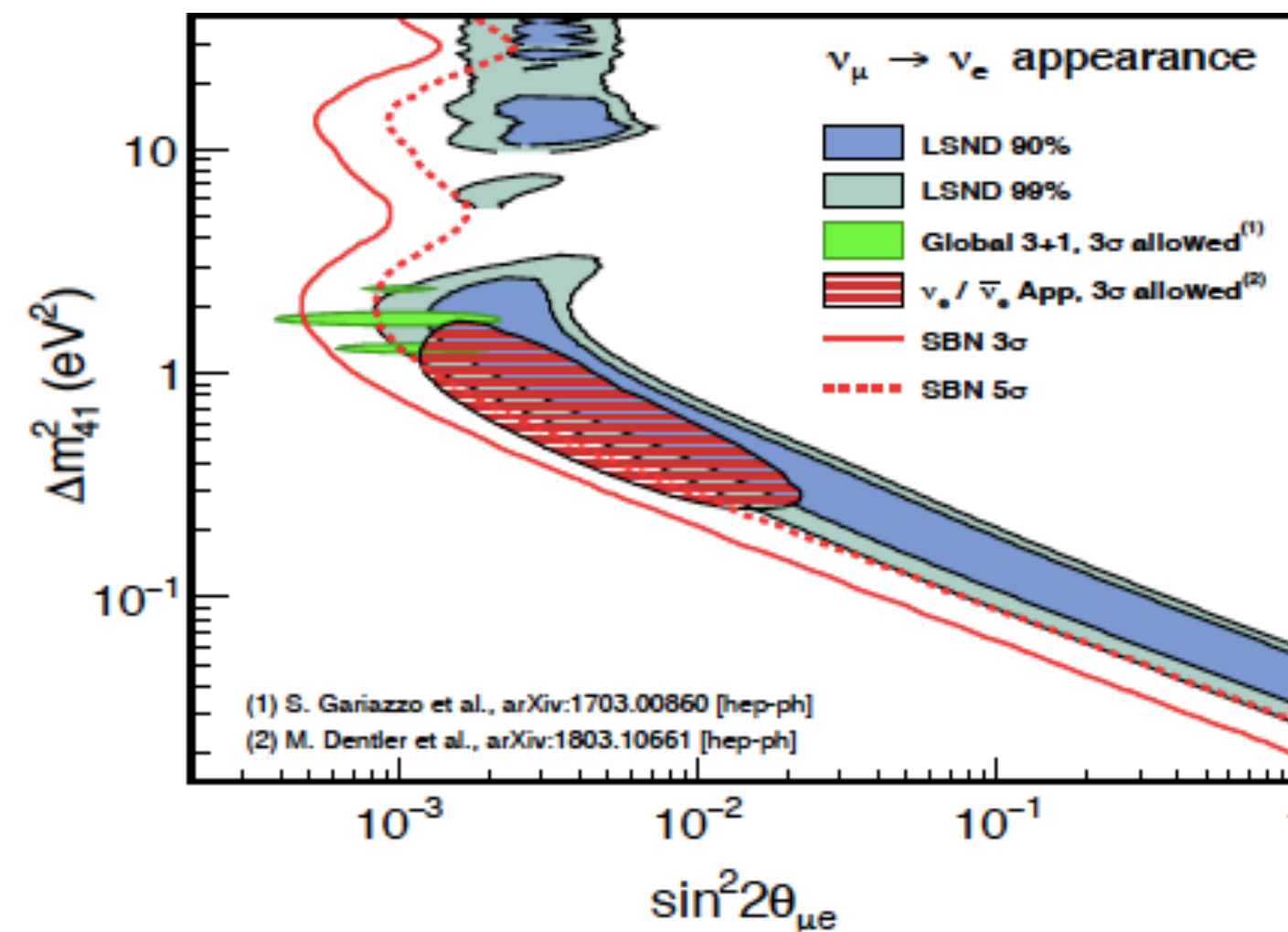
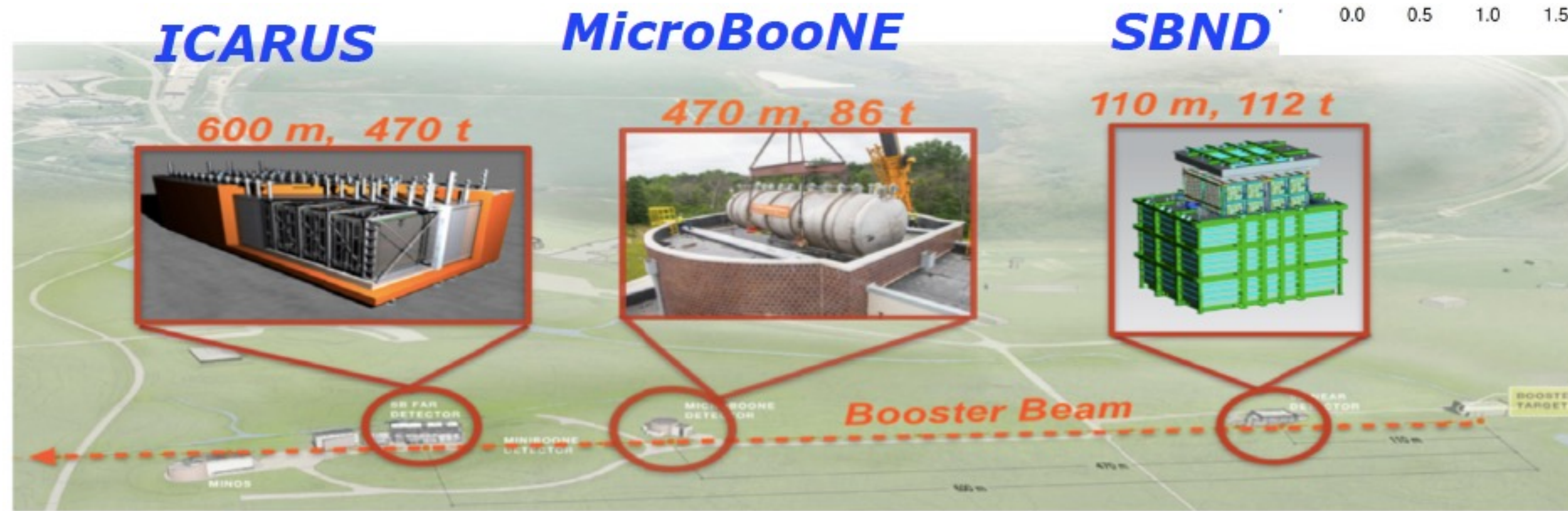
Field cage



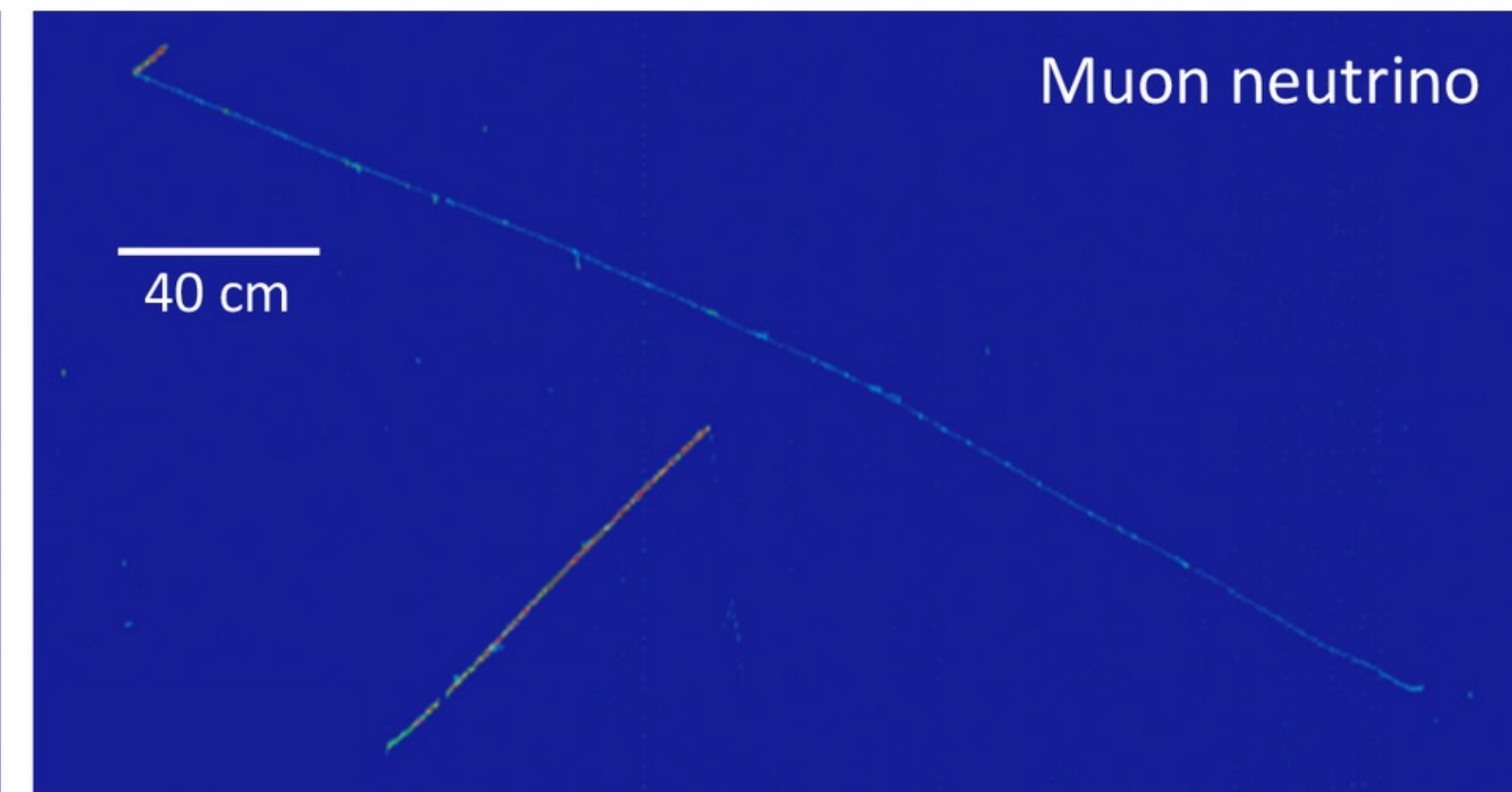
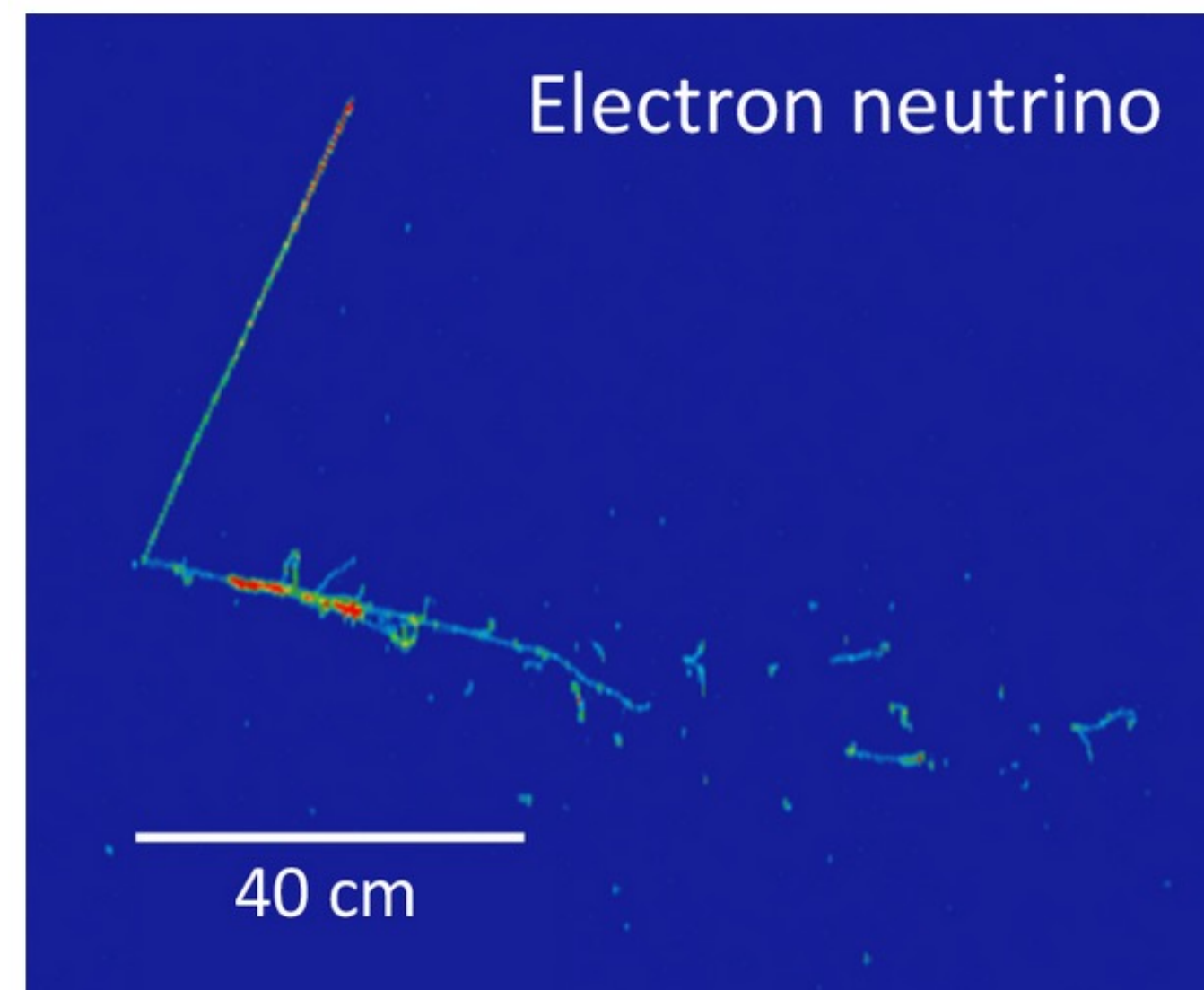
Catodo

Bologna in ProtoDune per PDS e DAQ (A. Gabrielli)

SBN



- Responsabile del Top Cosmic Ray Tagger di ICARUS
(design/costruzione/ installazione commissioning/integration)
- CRT Data Analysis (dati simulati e reali)
- Slow Control System
- TPC Event scanning
- Run Coordination
- Shift da remoto
- Analisi dati ICARUS

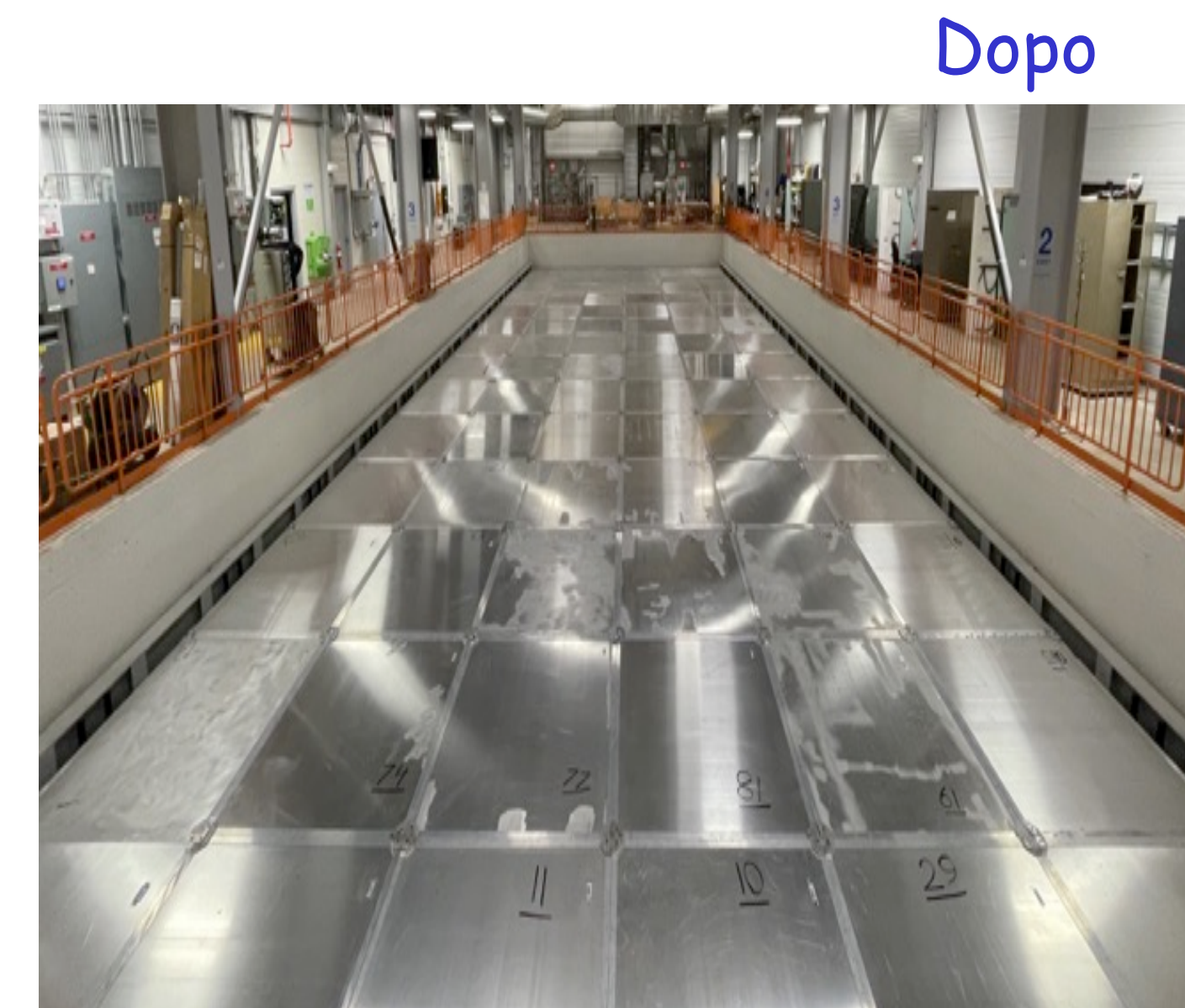
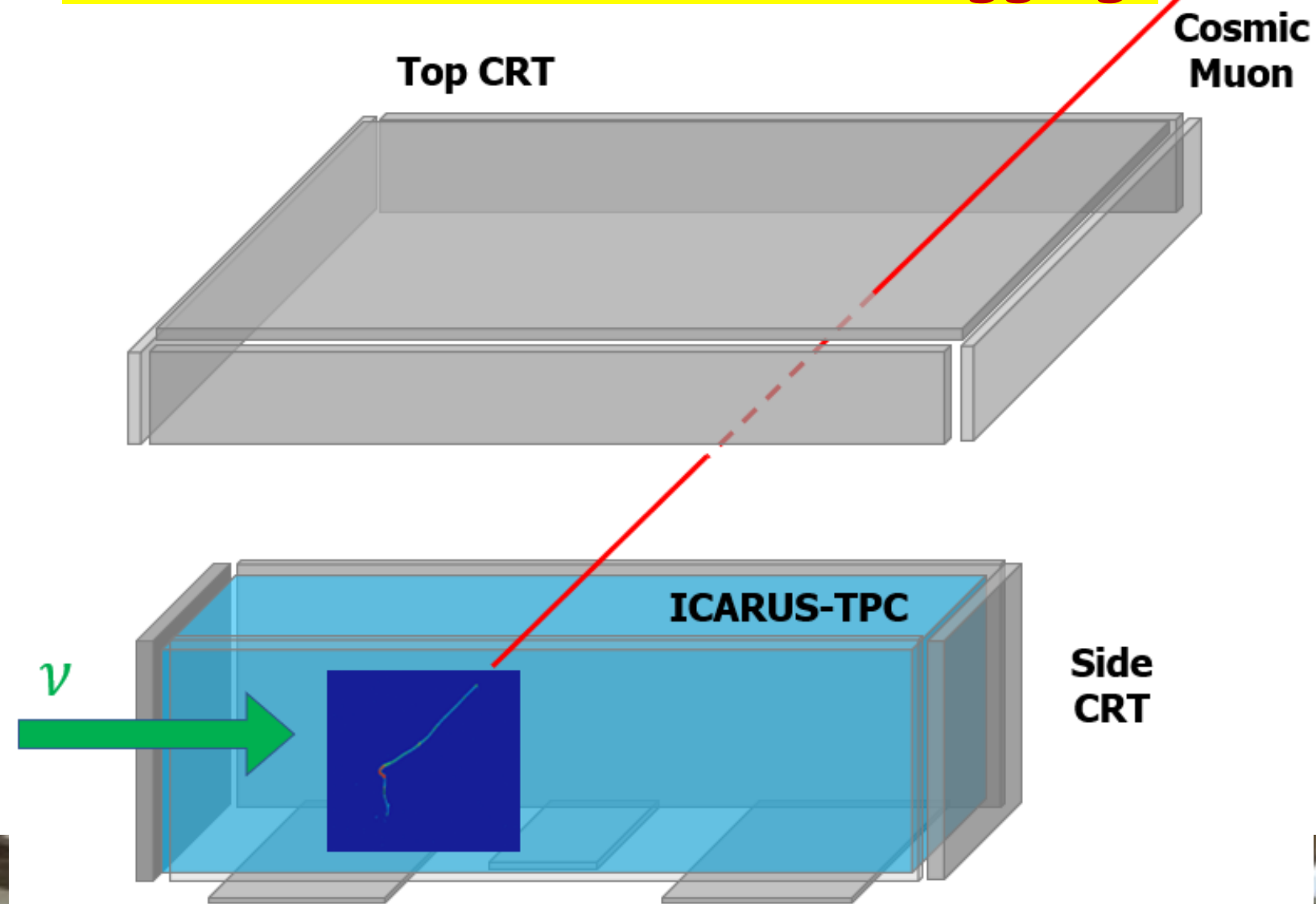


F. Poppi ICARUS Run Coordinator (next will be V. Pia)
 L. Pasqualini ICARUS DAQ Coordinator
 N. Moggi : SlowControl System expert

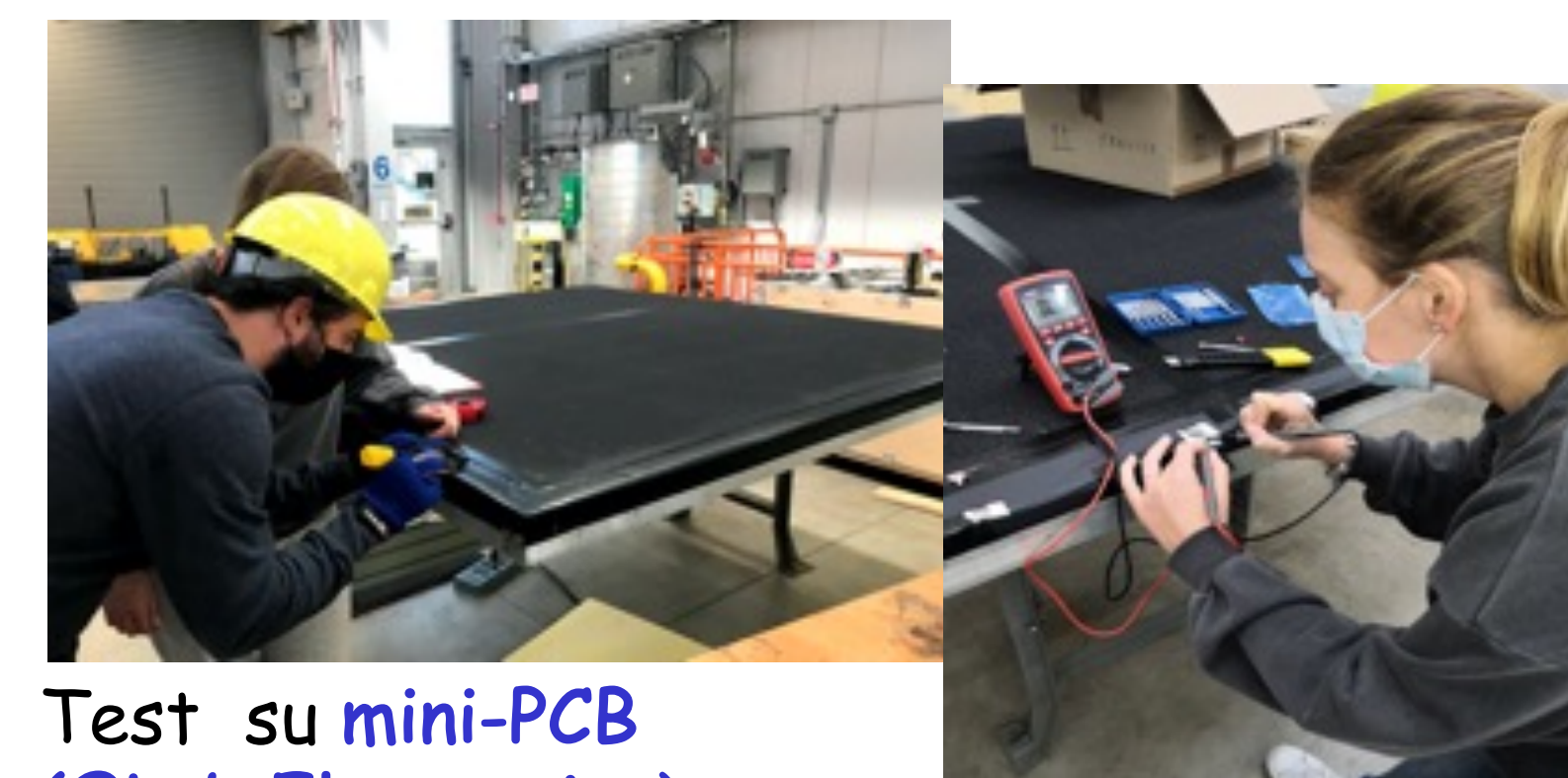
ICARUS Top Cosmic Ray Tagger system

- **Top CRT: 123 moduli/ ognuno 2x2 m²**
Design ©Progettazione Bo

84 Moduli orizzontali e 39 su piani verticali (> 80% CR muons tagging)



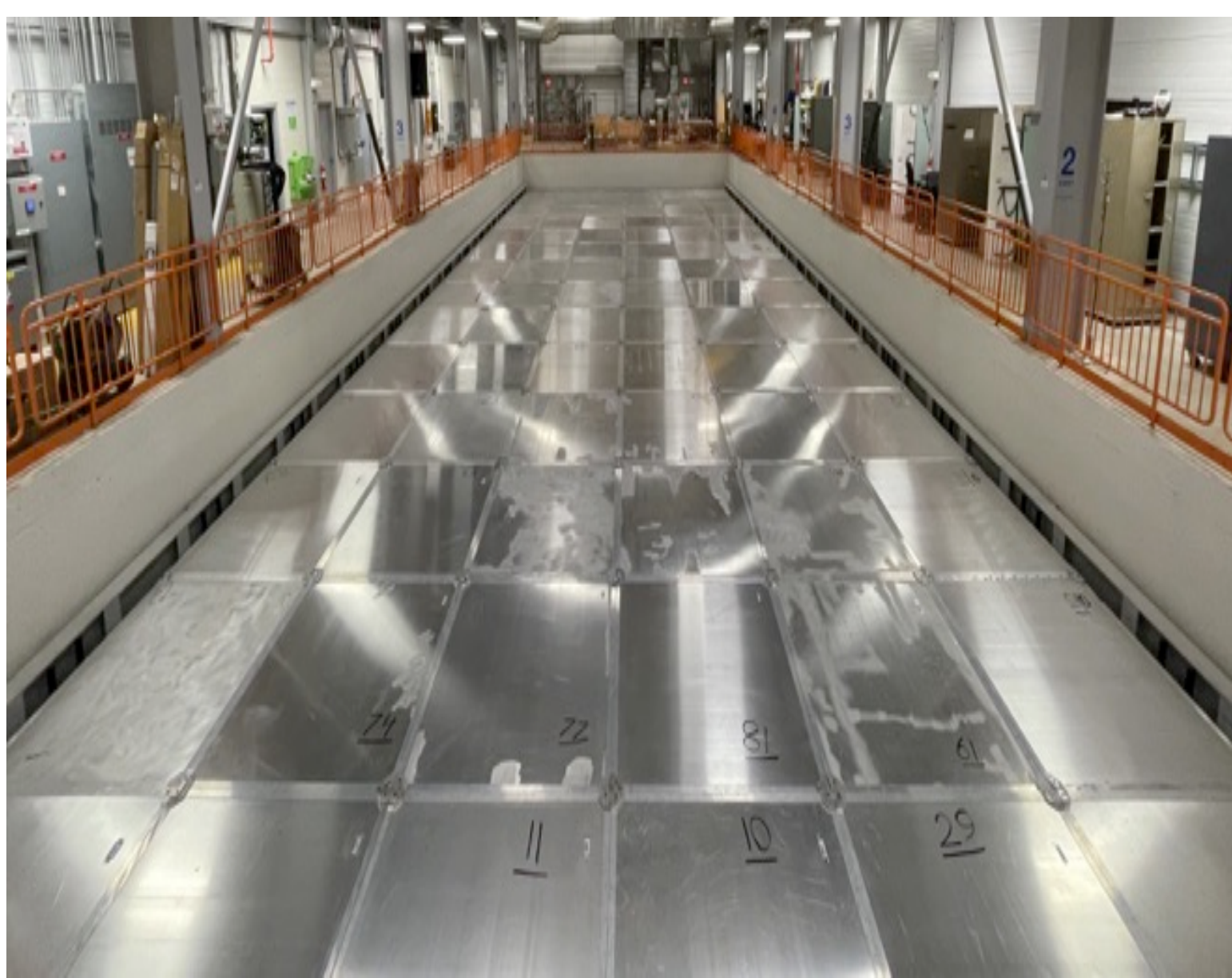
Moduli assemblati e verificati a LNF e di nuovo a FNAL
(Lab Elettronica, STG, Officina Meccanica, Progettazione)



1st Top CRT crew a Fermilab: Sept 20 2021.

Installazione completata Dic. 2021.

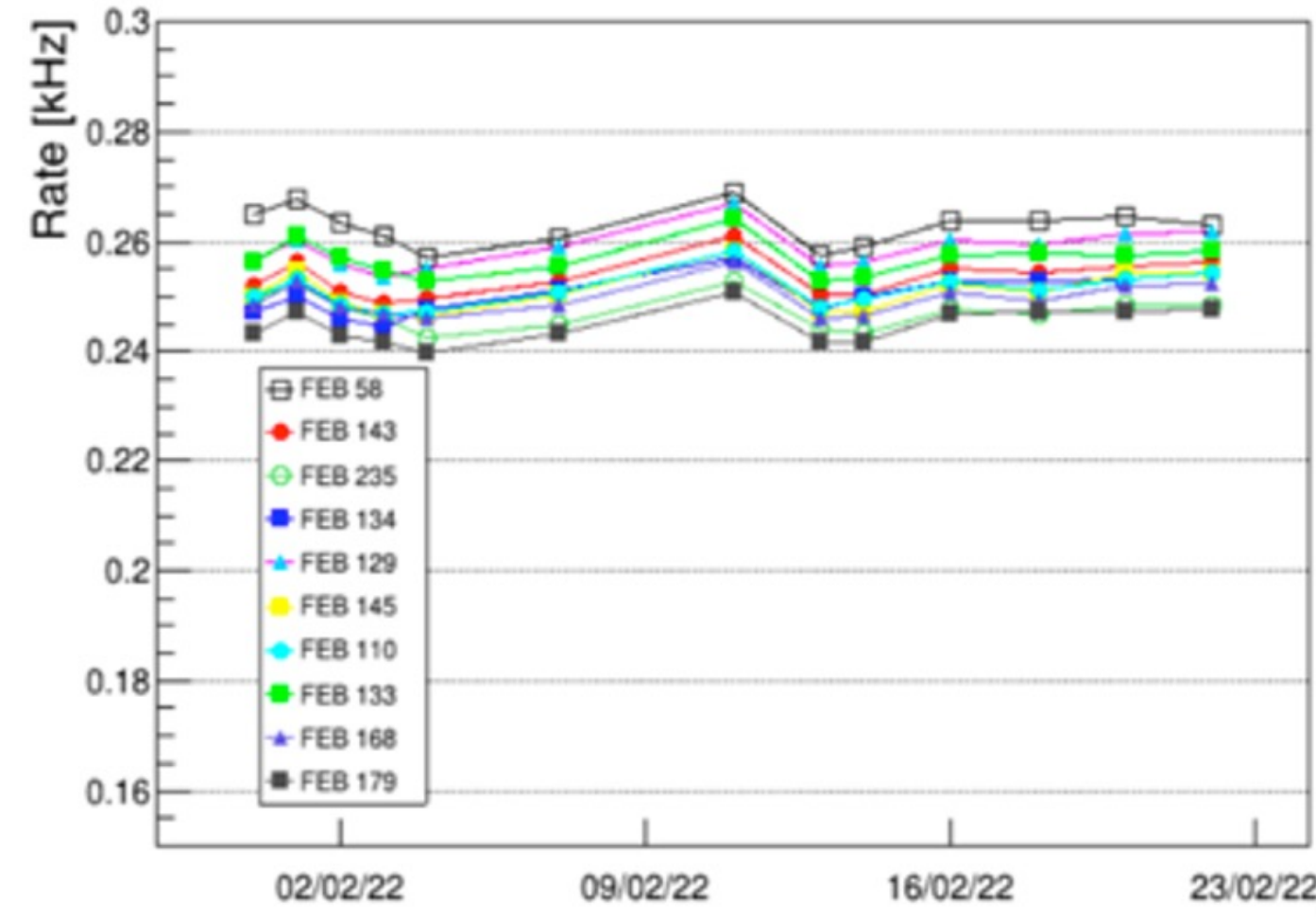
Test su mini-PCB
(©Lab Elettronica)



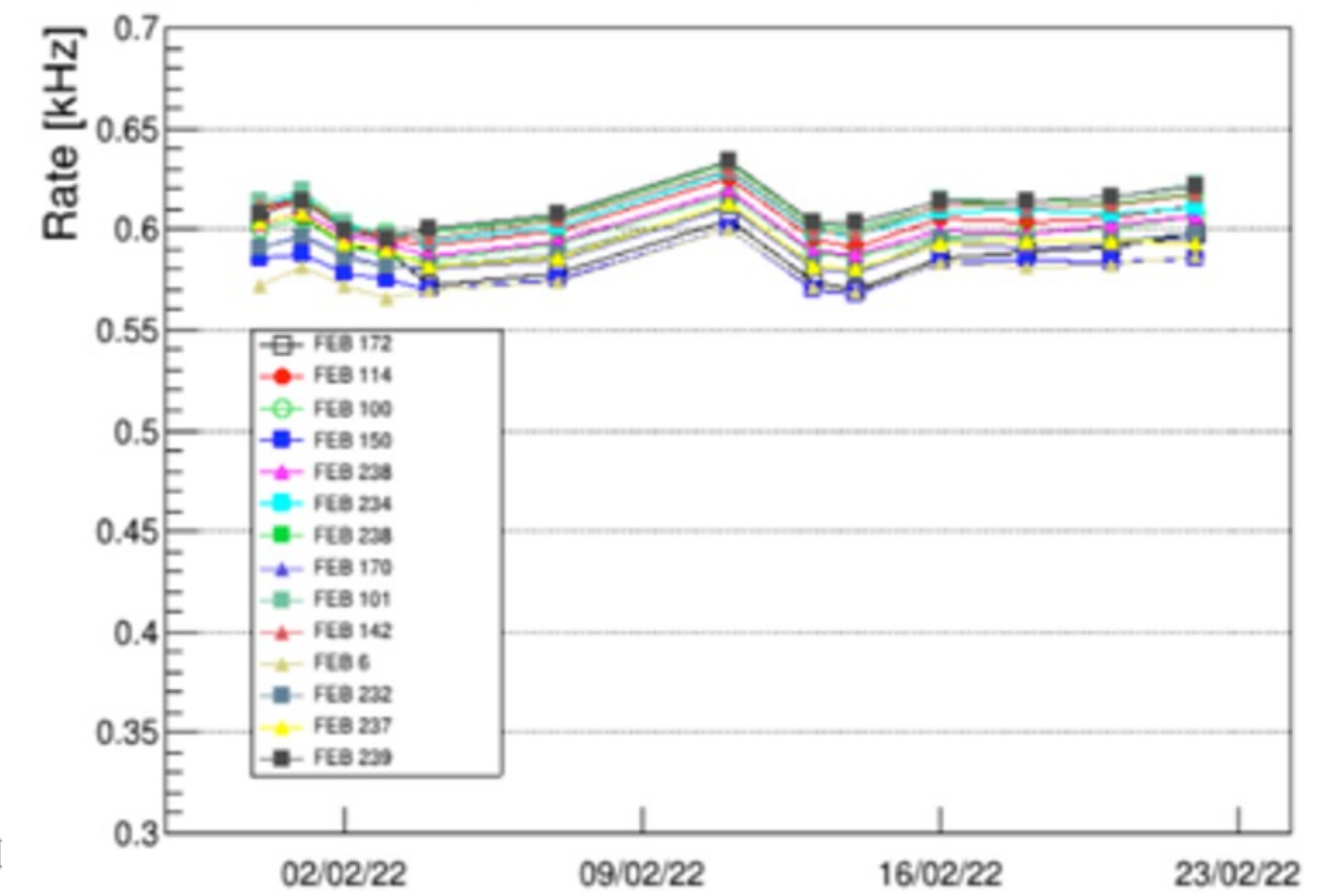
*Installazione
completata
Dec. 2021*

*Lab elettronica
STG*

vertical modules ~ rate 250 Hz

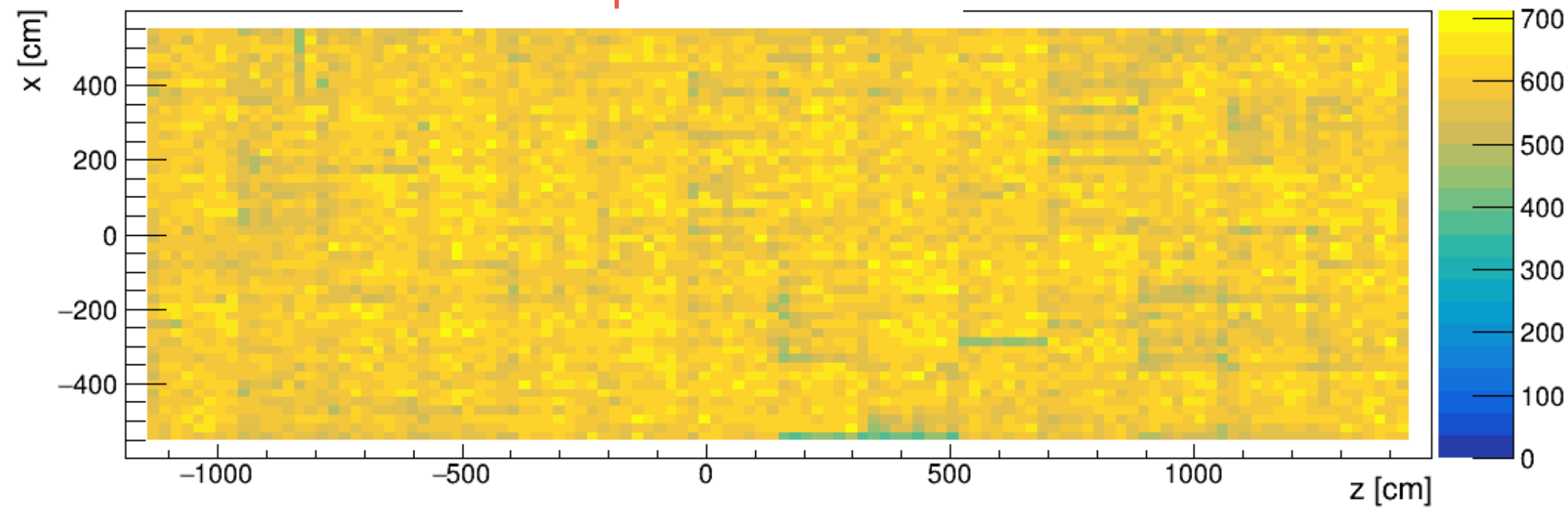


horizontal modules ~ rate 600 Hz

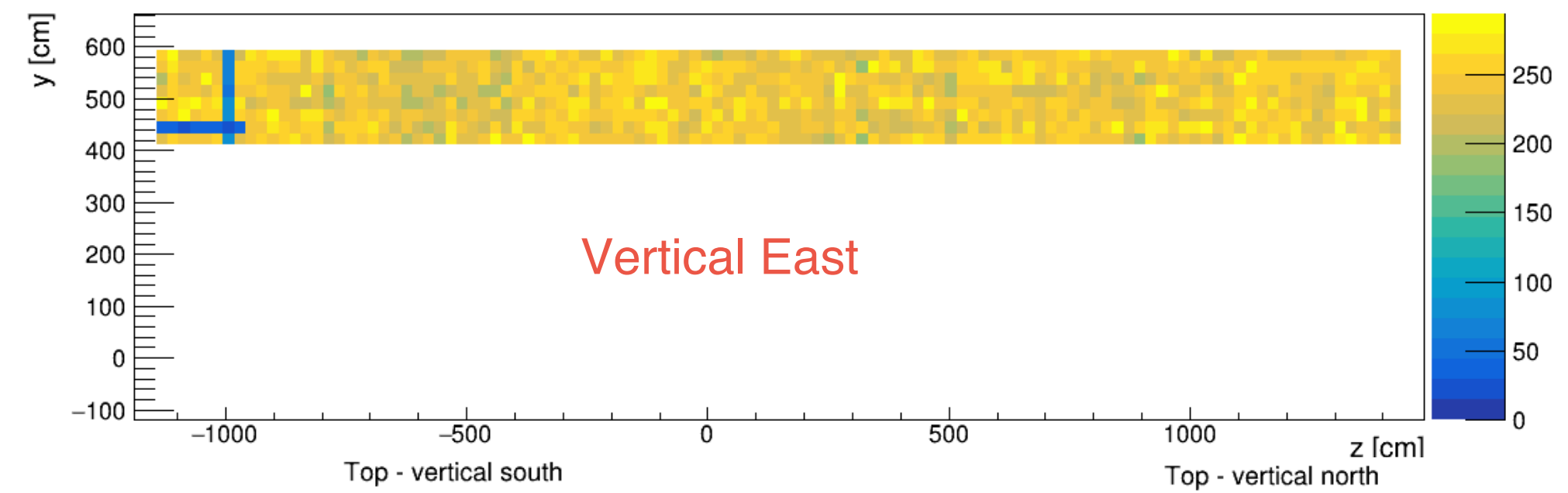


Top CRT – hits reconstructed position - run 7844

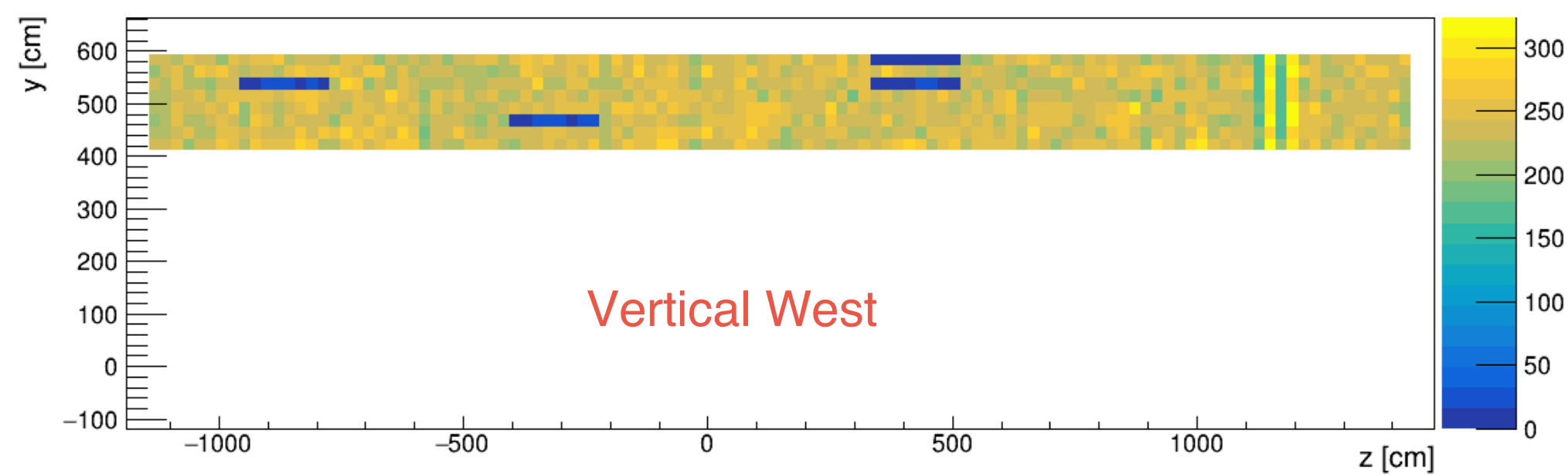
Top Horizontal



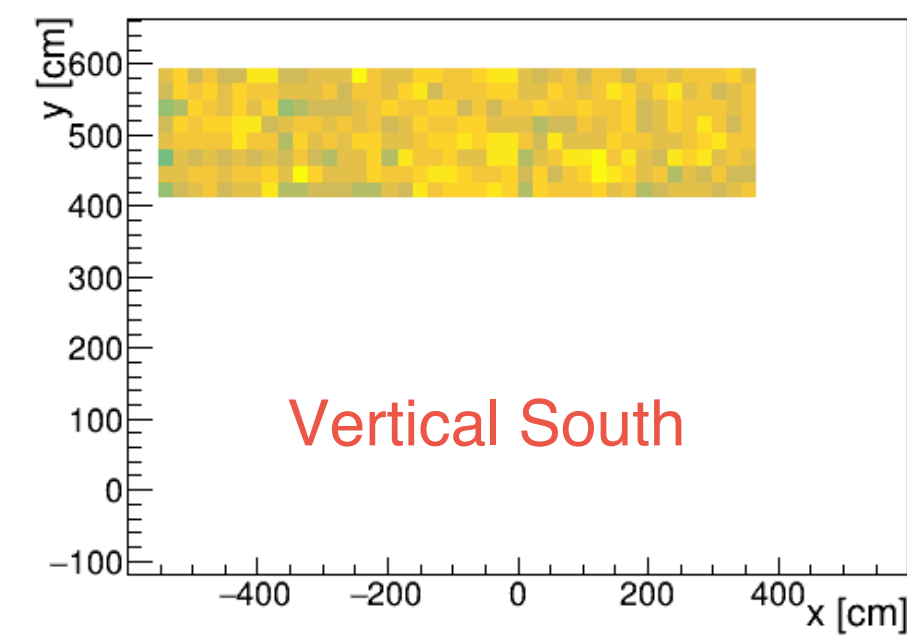
Top - vertical east



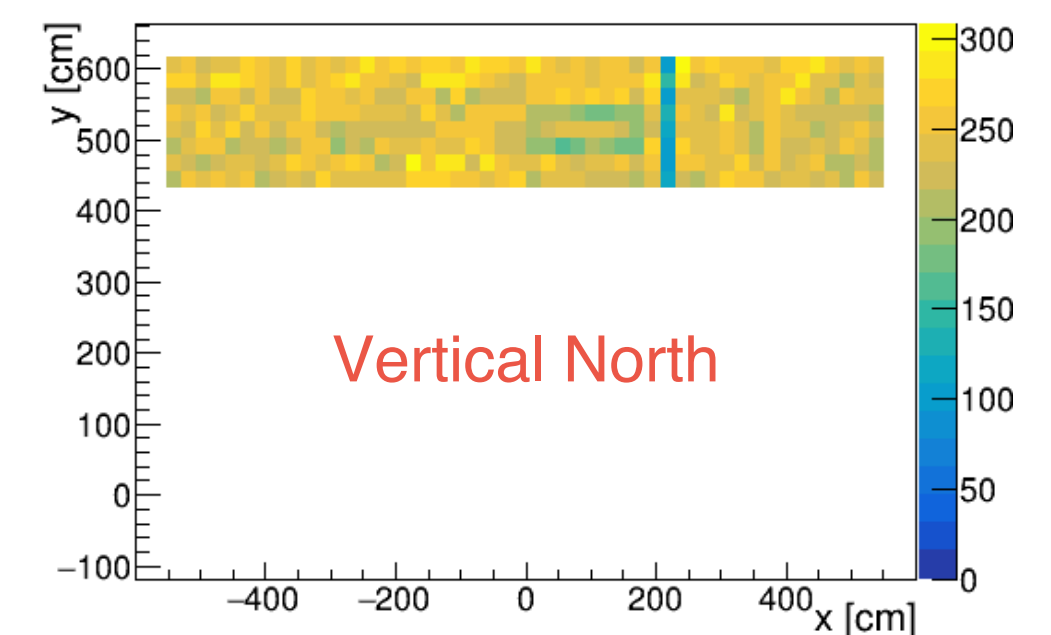
Top - vertical west

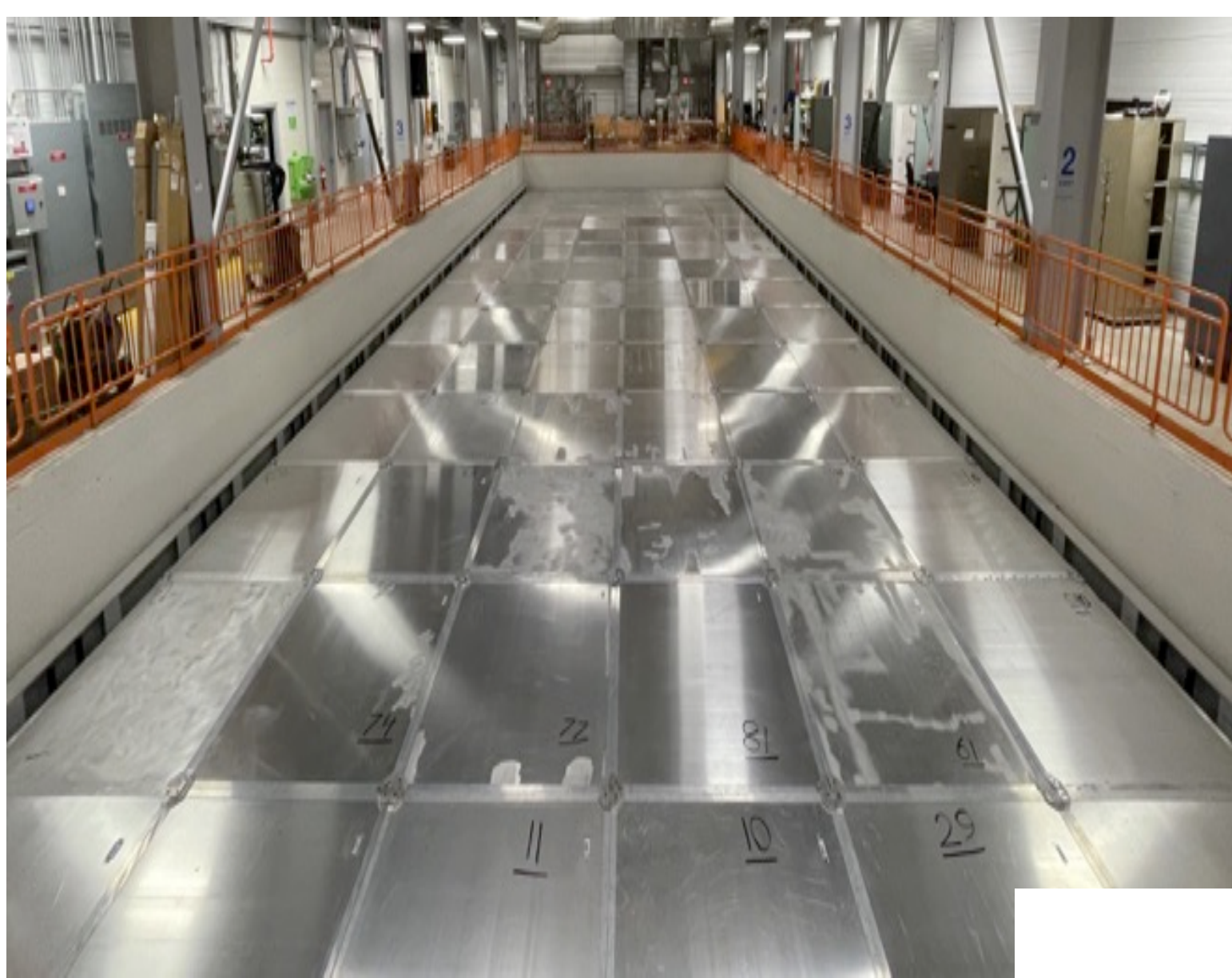


Top - vertical south



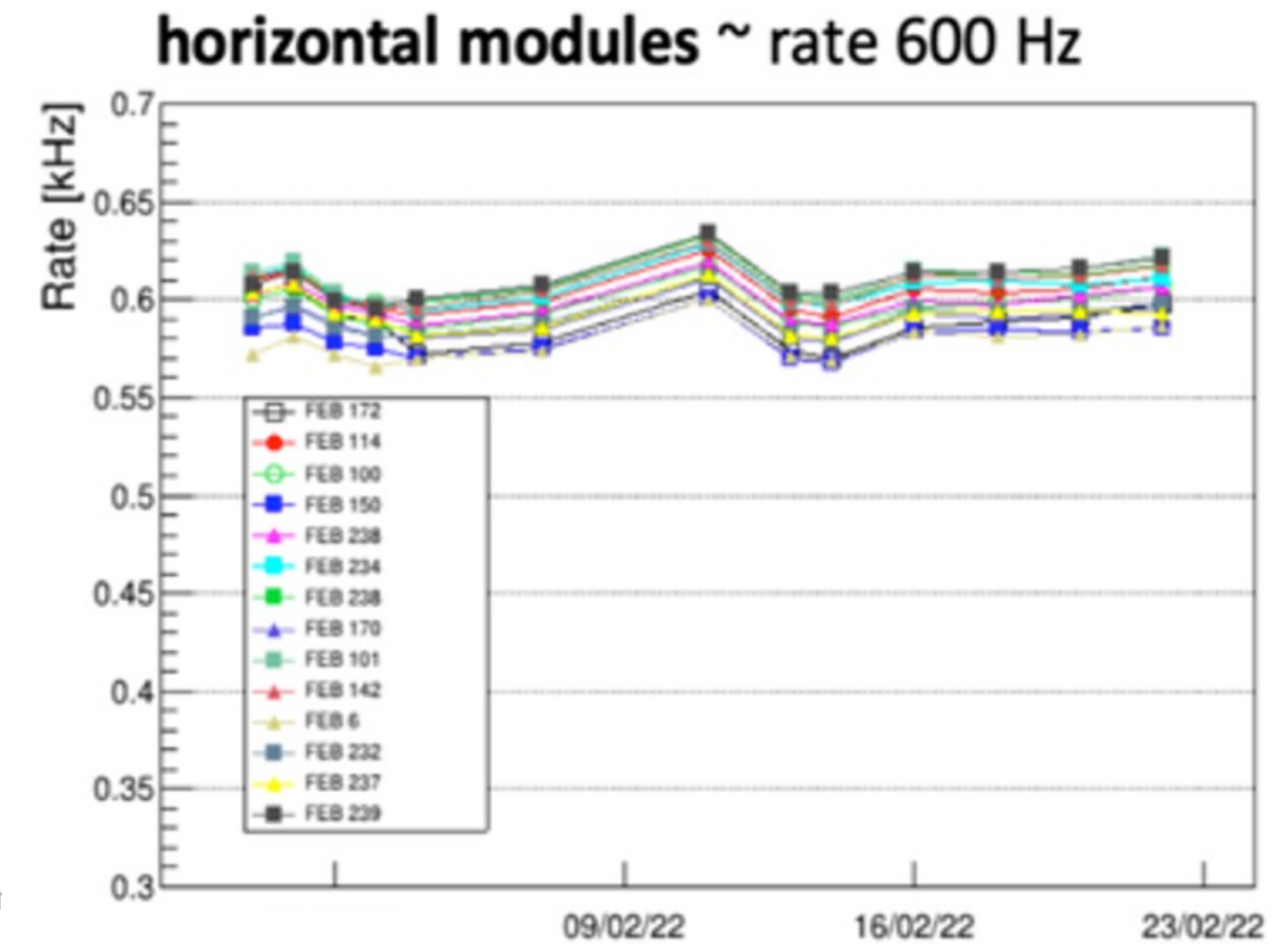
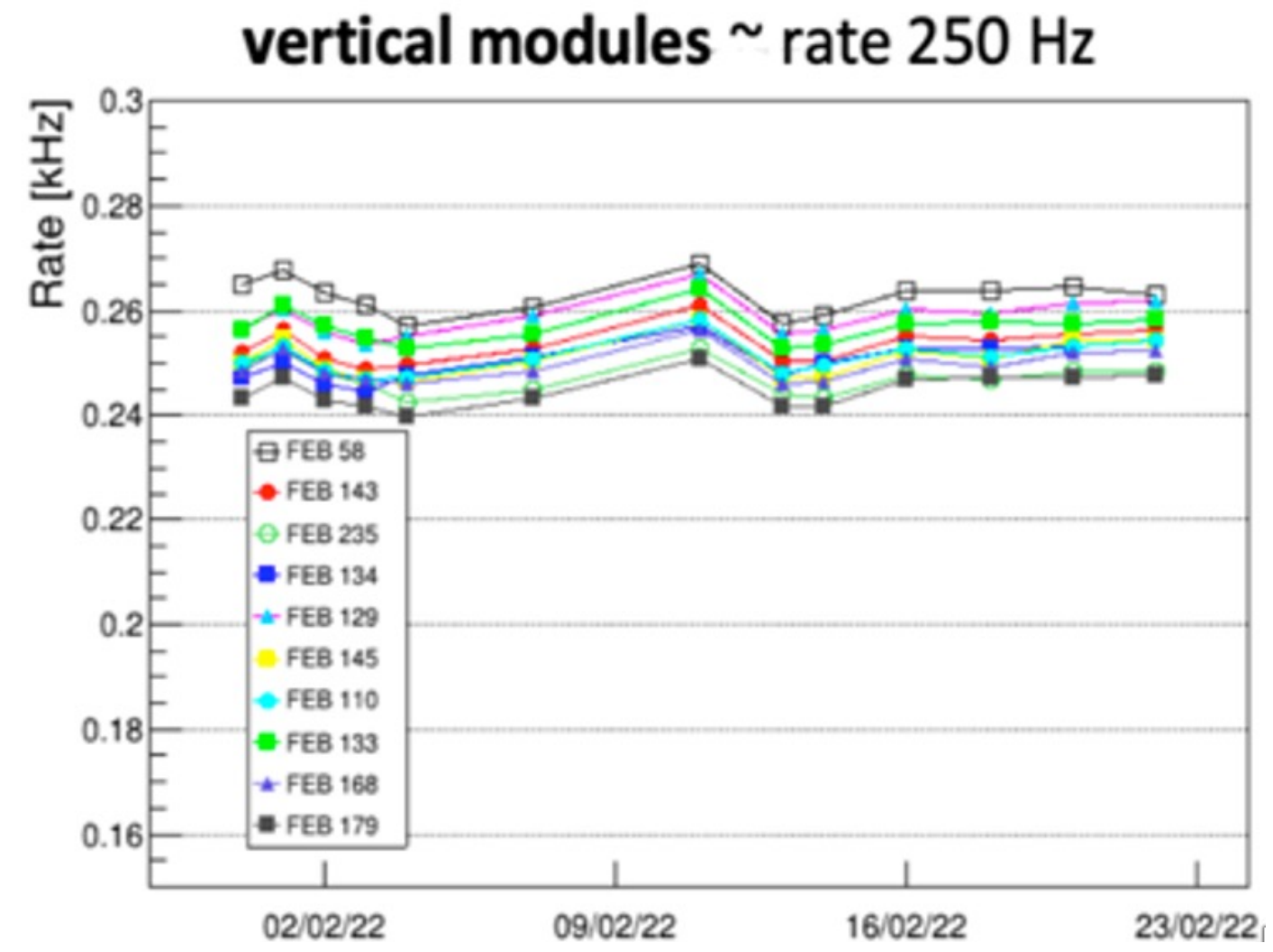
Top - vertical north





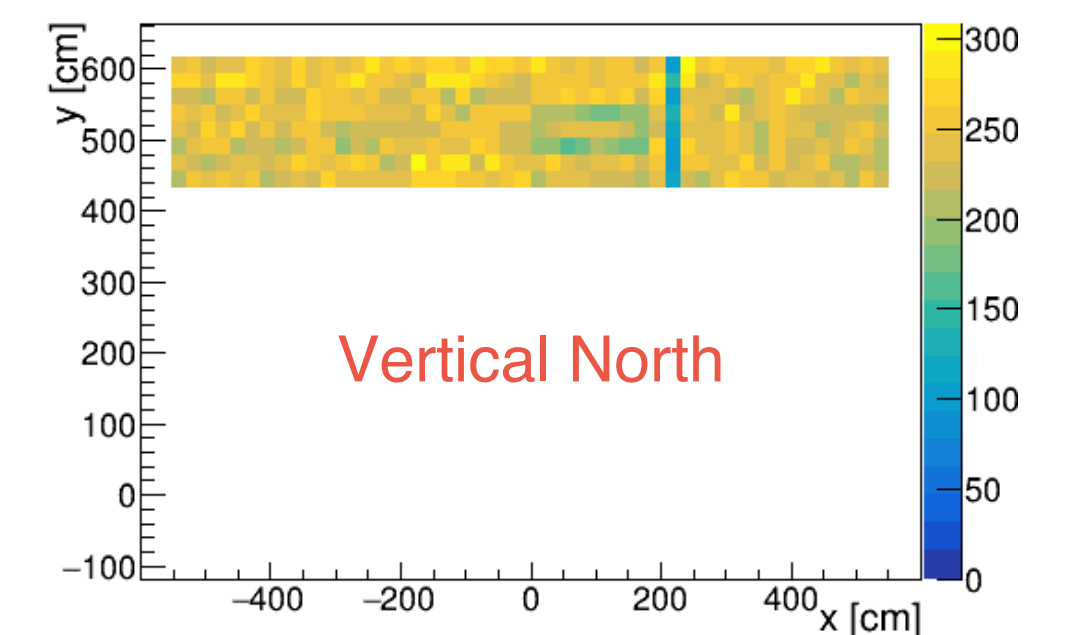
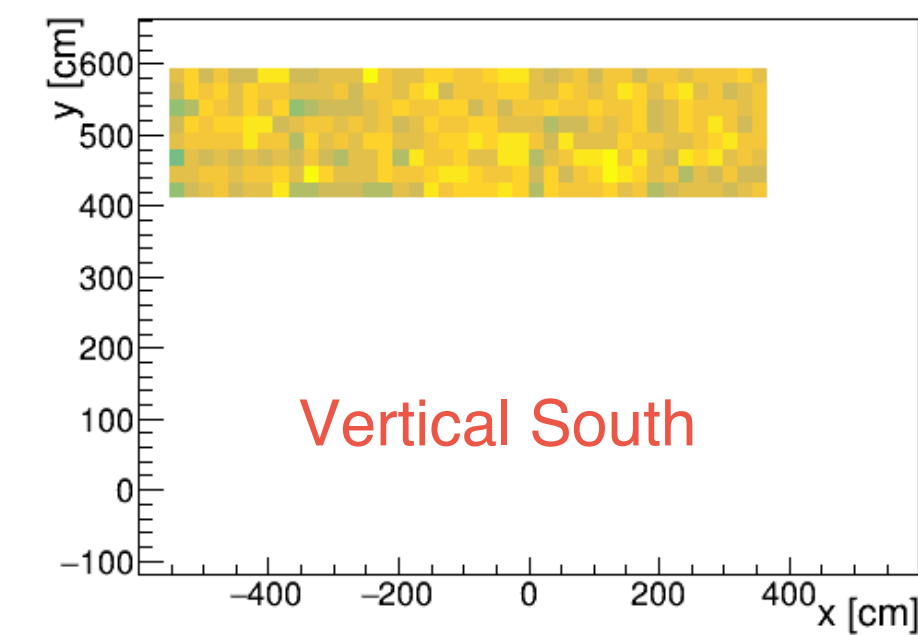
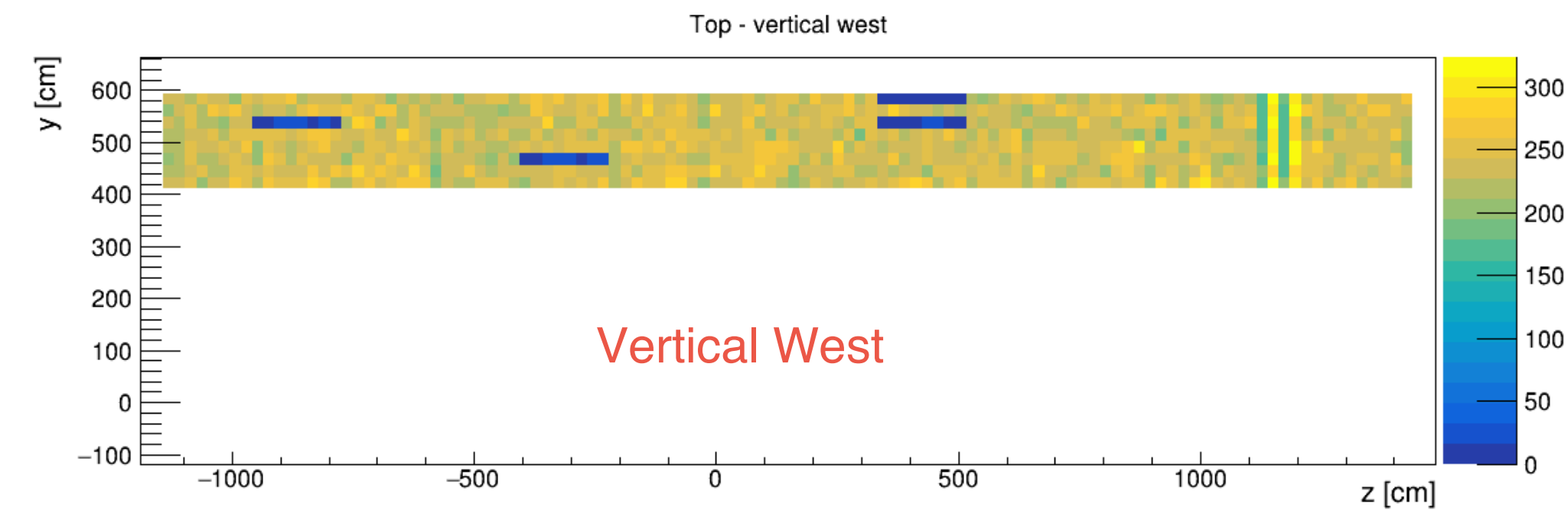
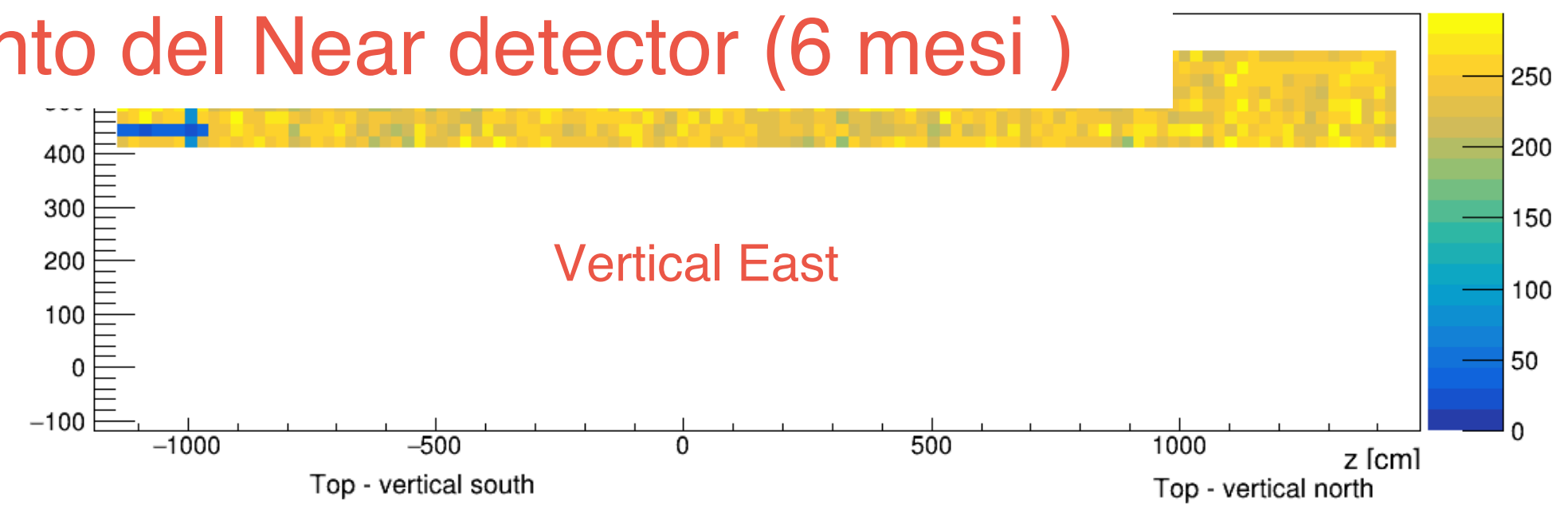
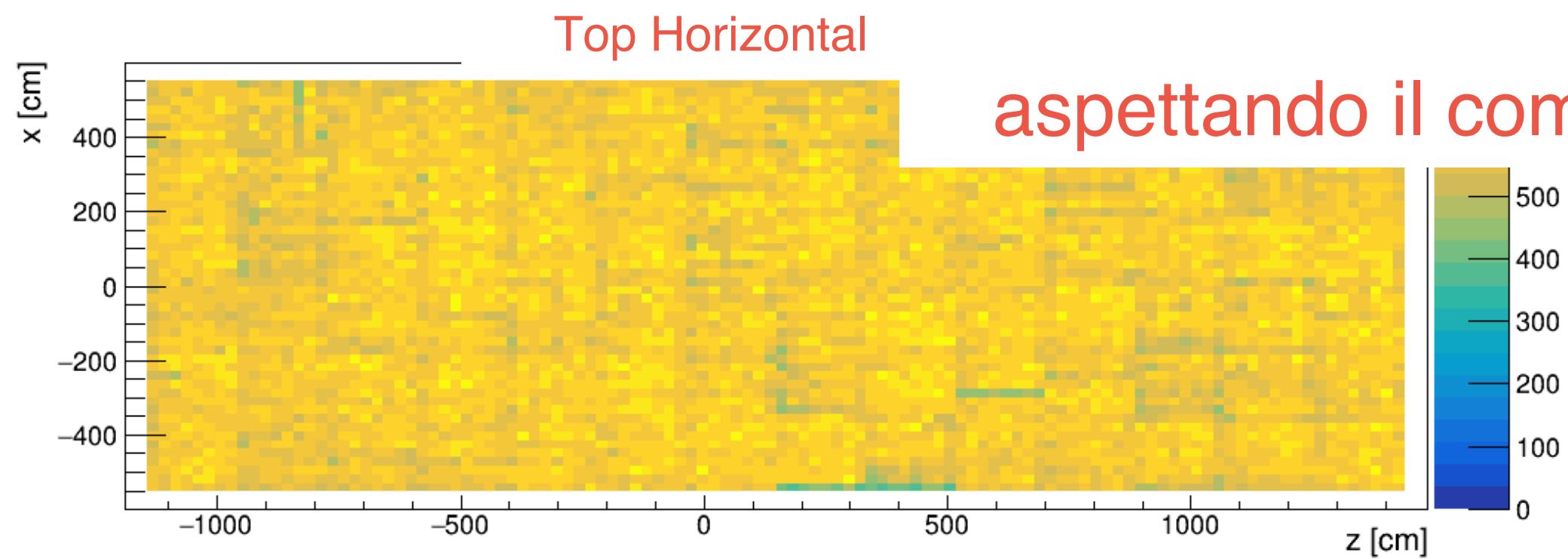
*Installazione
completata
Dec. 2021*

*Lab elettronica
STG*



Nei prossimi mesi:

Presi dati ICARUS con detector completo! sul fascio del
Booster e su NUMI
aspettando il completamento del Near detector (6 mesi)



Conclusione

Una nuova generazione di esperimenti di neutrini, con e senza acceleratori, è in corso o sta cominciando

Il nostro gruppo è stato protagonista in alcune delle avventure più importanti, a partire dal 1998 con MACRO, poi OPERA, e ora SBN e DUNE

Un ambito di ricerca stimolante, promettente, ricco di opportunità, un contesto ideale per la preparazione di giovani ricercatori, tecnici e tecnologi

GRAZIE

PRISM

- Combinazioni lineari dello spettro al ND a diversi angoli off-axis per il matching con lo spettro oscillato al FD
- Muovere ND-LAr e ND-GAr in varie posizioni fuori asse e misurare il flusso
- Combinazioni lineari dello spettro dei neutrini a diversi angoli off axis
- Spettro oscillato al FD con ridotta dipendenza dal modello

