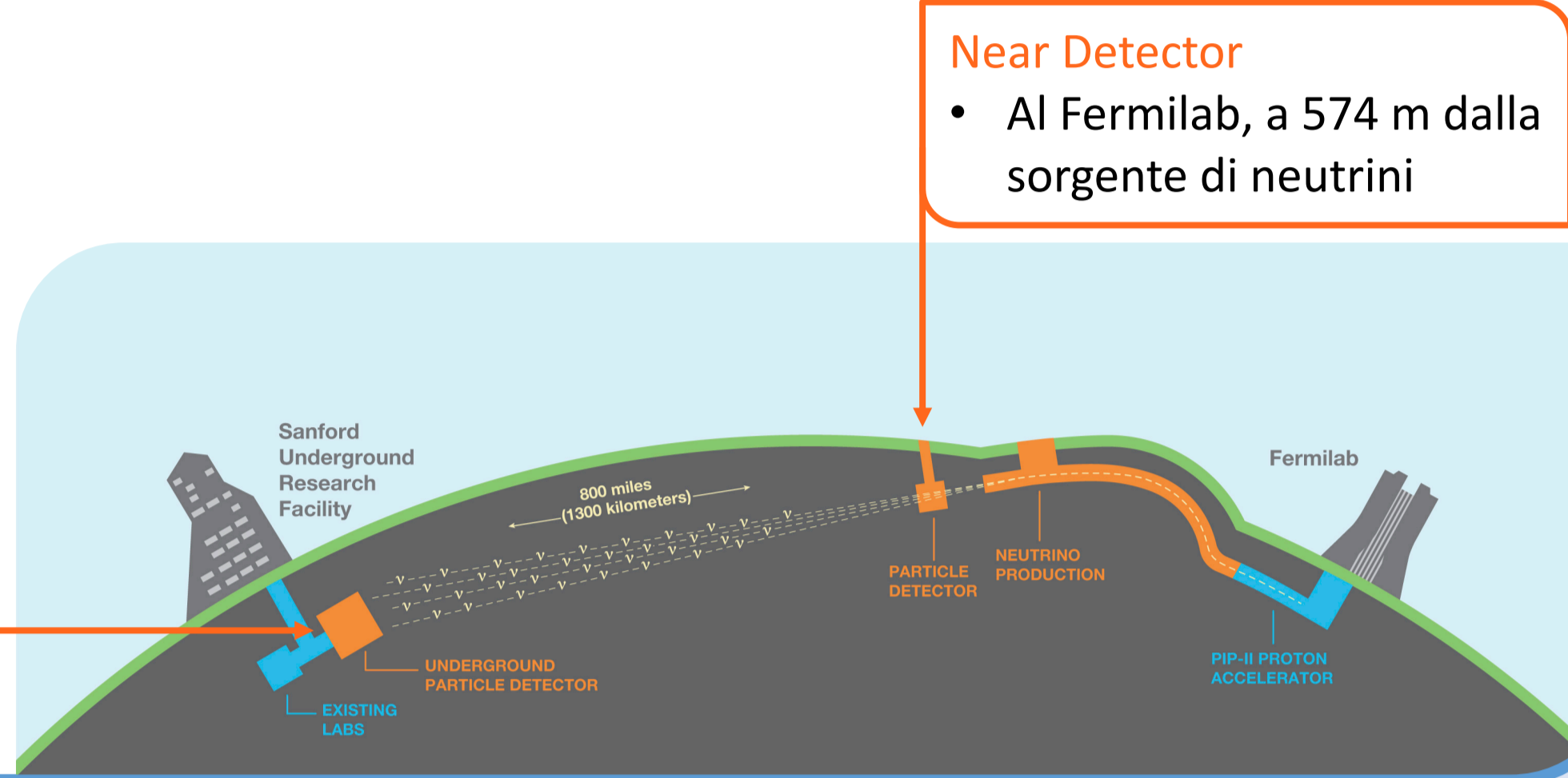


L'esperimento DUNE

- DUNE (Deep Underground Neutrino Experiment) è un esperimento di nuova generazione per la fisica del neutrino. Il suo ricco programma scientifico includerà [1]:
 - misure di δ_{CP} , ordinamento delle masse, unitarietà della matrice PMNS
 - ricerca di fisica oltre il Modello Standard
 - misura del flusso di neutrini da supernovae galattiche
- DUNE si troverà sulla linea del fascio di neutrini LBNF, il più intenso mai costruito, a banda larga e con picco a 2.5 GeV.
- DUNE avrà una baseline di 1300 km tra i due siti sperimentali del Near Detector e del Far Detector.

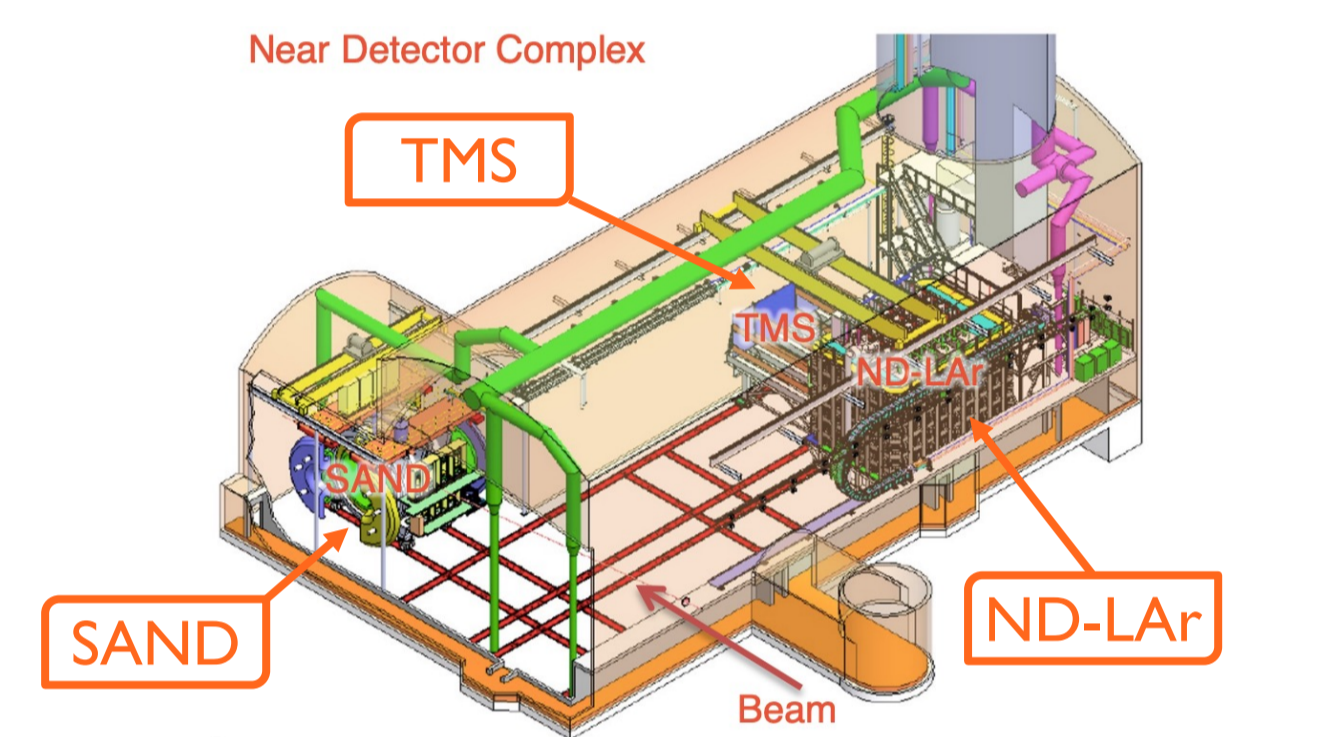
- Far Detector**
- Al laboratorio SURF in South Dakota
 - Profondità di 1.5 km
 - quattro LArTPC innovative, ciascuna con una massa di 17 kT



- Near Detector**
- Al Fermilab, a 574 m dalla sorgente di neutrini

Il Near Detector di DUNE

- Il Near Detector di DUNE eseguirà misure di precisione per controllare il fascio di neutrini, limitare le sistematiche e migliorare i modelli di interazione di neutrino [2].
- Il Near Detector avrà tre componenti:
 - ND-LAr: una LArTPC modulare con massa fiduciaria di ~60 t
 - TMS: Temporary Muon Spectrometer
 - SAND: System for on-Axis Neutrino Detection



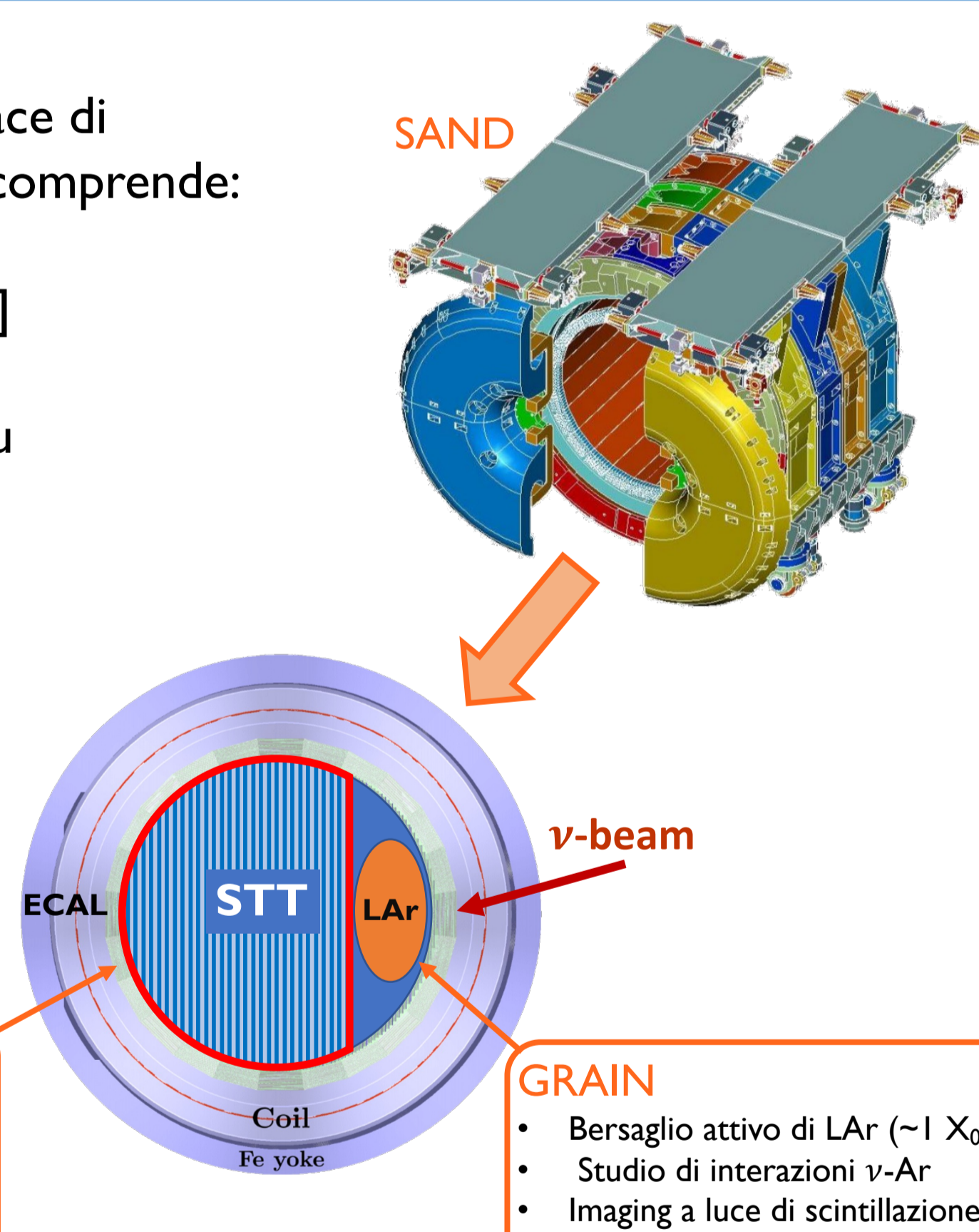
SAND sarà collocato in una posizione fissa in asse al fascio di neutrini, mentre ND-LAr e TMS saranno mossi off-axis lungo la direzione trasversa, per la presa dati in intervalli di energia differenti.

Il rivelatore SAND

- SAND è un rivelatore con diversi obiettivi capace di tracciamento e calorimetria di precisione, che comprende:
 - un magnete superconduttore da 0.6 T
 - un calorimetro elettromagnetico (ECAL) [3]
 - GRAIN: un bersaglio attivo in LAr (~1 t)
 - STT: un tracciatore a bassa densità basato su Straw Tubes con bersaglio distribuito [2]

- SAND condurrà diverse misure cruciali per il Near Detector di DUNE, dal monitoraggio del fascio, allo studio di effetti nucleari fino ad un ampio programma di misure di precisione [2].

- ECAL**
- Piombo-fibre di scintillatore, ~15 X_0
 - $\sigma_E/E = 5.7\%/\sqrt{E(\text{GeV})}$
 - $\sigma_t = 54/\sqrt{E(\text{GeV})}$ ps



- GRAIN**
- Bersaglio attivo di LAr (~1 X_0)
 - Studio di interazioni ν -Ar
 - Imaging a luce di scintillazione

Obiettivi di Fisica di SAND

- SAND monitorerà costantemente il fascio in modo da rilevare variazioni nello spettro di energia e nella distribuzione spaziale di eventi ν_μ -CC, rispetto ai valori nominali.
- La maggior parte delle deviazioni sarà osservabile su base settimanale, con una sensibilità $\sqrt{\Delta\chi^2} > 3$ [4].

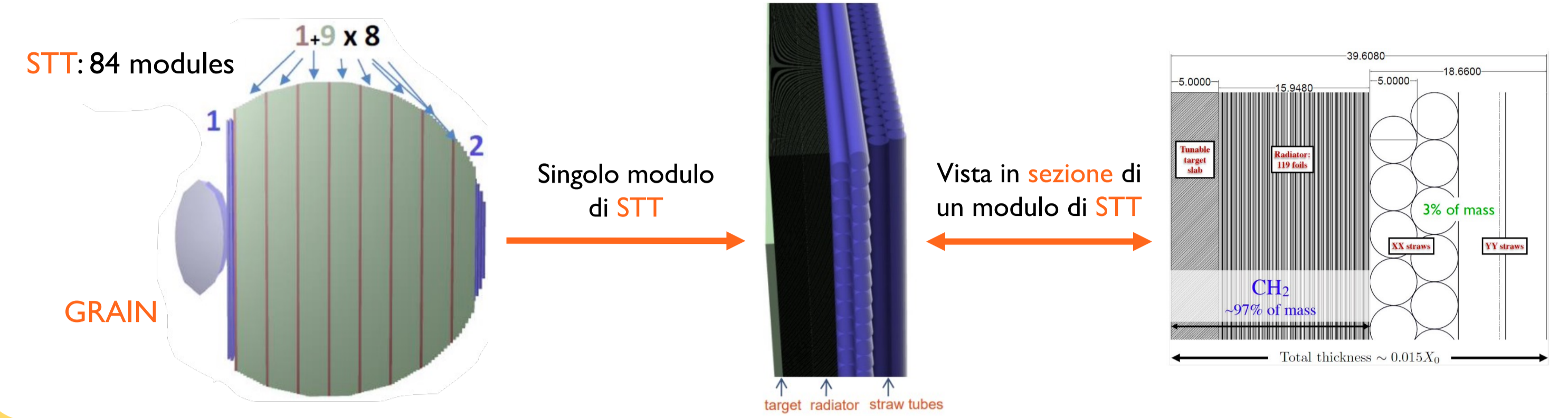
- Informazioni topologiche e temporali da ECAL ed STT permetteranno la reiezione del principale fondo da interazioni di neutrino con il materiale esterno.
- Analisi multivariate raggiungono un fattore di reiezione di 3×10^{-5} , efficienza del 92.7% e purezza 99.6% [4].

- SAND limiterà le incertezze sul flusso di $\nu/\bar{\nu}$ e gli effetti di smearing nucleare sull'energia ricostruita.
- La deconvoluzione in Argon del prodotto chiave $\sigma_X R_{phys} R_{det}$ nella predizione del numero di eventi rivelati $N_X(E_\nu)$ è possibile tramite confronto con misure in idrogeno ($R_{phys} \equiv 1$) [5].

- SAND contribuirà al programma di fisica del Near Detector con misure di precisione [4]:
 - misure di $\sin \theta_W$ e ulteriore fisica elettrodebole
 - test di fisica dell'isospin con interazioni di $\nu/\bar{\nu}$
 - misure della strangeness dei nucleoni
 - studi di QCD e struttura nucleare

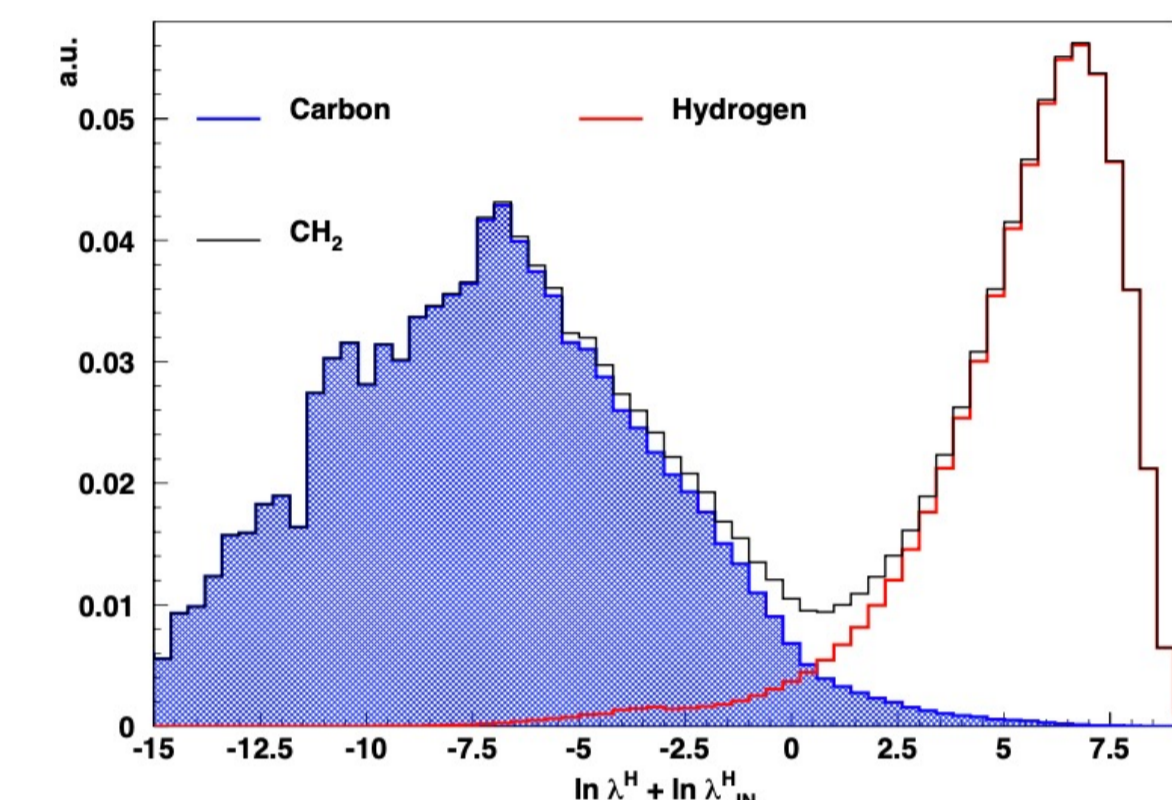
Lo Straw Tube Tracker di SAND (STT)

- Tracciatore a bassa densità basato su Straw Tubes con diametro di 5 mm [2]
- Strati sottili ($1 - 2\% X_0$) di diversi materiali passivi tra i piani di straws
- Transition Radiation Detector tra piani di bersaglio e quelli di straw tubes per separazione e/π
- 84 moduli, ciascuno con uno strato di bersaglio, TRD e quattro piani di straw in configurazione XXXY
- Nella configurazione base: uno strato di C (grafite) ogni nove di CH_2 (polipropilene)
- Risoluzione spaziale prevista su singolo punto $< 200 \mu\text{m}$
- Miscela di Xe/CO_2 (70%/30%) a 1.9 atm



Misure con Idrogeno Solido

- L'errore sistematico sulla ricostruzione del flusso di $\nu/\bar{\nu}$ e la riduzione dello smearing da effetti nucleari sull'energia ricostruita sono cruciali per DUNE.
- Tramite lo studio di interazioni CC $\nu(\bar{\nu})$ -idrogeno $\nu_\mu p \rightarrow \mu^- \pi^+$, $\bar{\nu}_\mu p \rightarrow \mu^+ p \pi^-$ and $\bar{\nu}_\mu p \rightarrow \mu^+ n$
- saranno raggiunte accuratezze complessive $< 1\%$ nel range di energia del fascio di DUNE
- si otterranno limiti indipendenti dai modelli sugli effetti nucleari negli stati iniziali e finali [5]
- Sarà possibile ottenere un'alta statistica di interazioni ν -CC su H, sottraendo le misure su bersagli di C da quelle sui bersagli di CH_2 (Idrogeno Solido) [6].



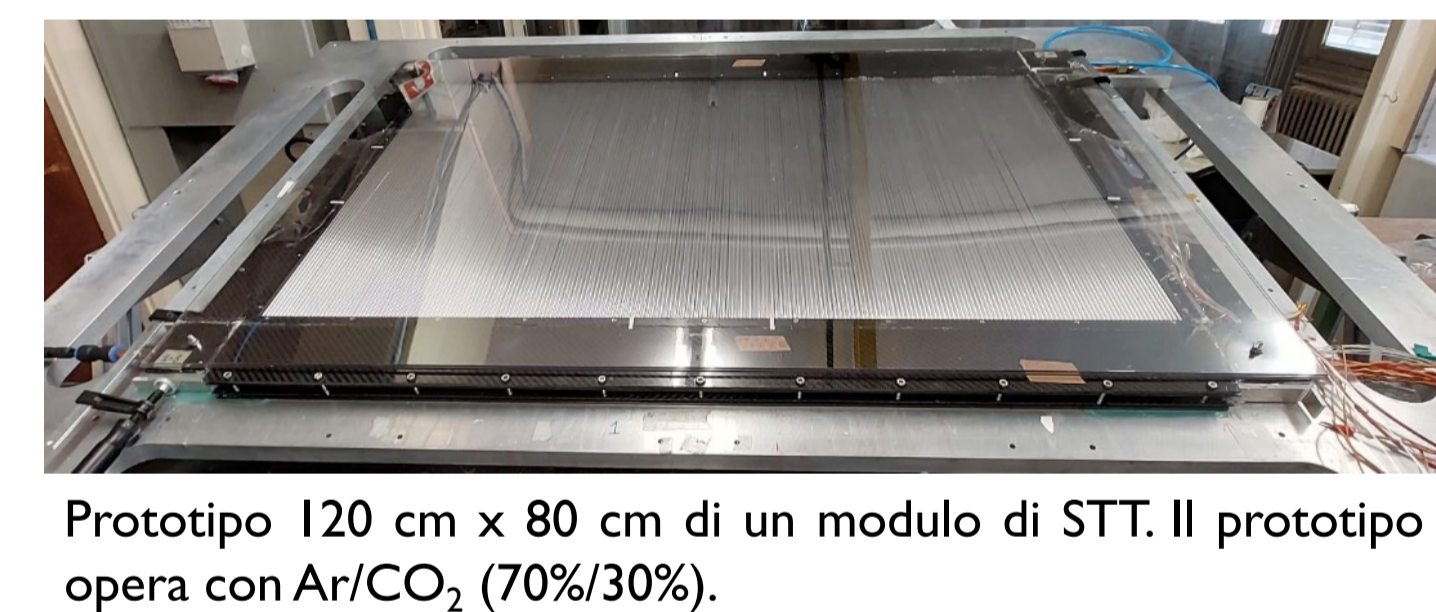
Identificazione cinematica delle interazioni $\nu_\mu p \rightarrow \mu^- \pi^+$ su H in STT. La selezione di interazioni su H è migliorabile con tecniche di analisi multivariata, raggiungendo efficienza e purezza di ~95% [7].

Statistica di eventi CC prevista in STT (5 t di CH_2) con le due potenze previste per il fascio LBNF di DUNE, in modalità ν (FHC) e $\bar{\nu}$ (RHC) [6].

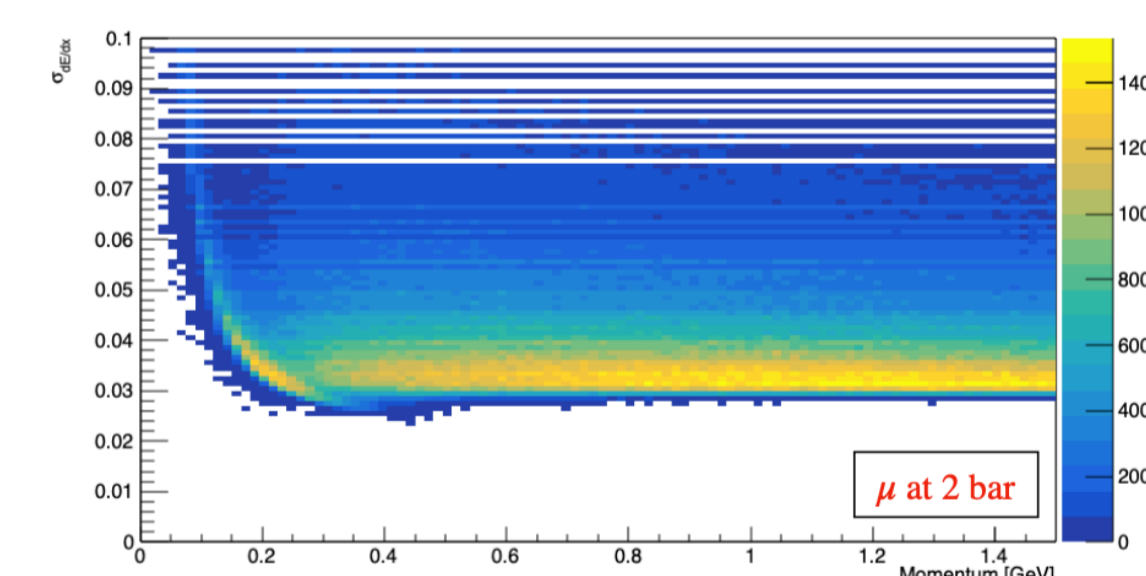
Fascio da 1.2 MW		
Interazione	CH_2	H
ν_μ -CC (FHC, 5 yrs.)	35×10^6	3.6×10^6
$\bar{\nu}_\mu$ -CC (RHC, 5 yrs.)	13×10^6	2.9×10^6
Fascio da 2.4 MW		
Interazione	CH_2	H
ν_μ -CC (FHC, 2 yrs.)	66×10^6	6.5×10^6
$\bar{\nu}_\mu$ -CC (RHC, 2 yrs.)	24×10^6	4.3×10^6

Prototipo STT: costruzione e test

- Un prototipo di modulo STT 120 cm x 80 cm con frame in fibra di carbonio è stato costruito e testato con successo al CERN:
 - definita la procedura di assemblaggio e validato il design del modulo
 - testate le schede di lettura integrate tramite una sorgente di ^{55}Fe
 - realizzato un modello in scala del sistema di raffreddamento
- Readout e prestazioni validati ad un testbeam con fascio di muoni al CERN
- Lavoro in corso per la progettazione dei moduli da installare in SAND
- Fase preparatoria dei siti di produzione dei moduli
- Progettazione di un sistema alternativo (back-up) basato su Camere a Deriva



Prototipo 120 cm x 80 cm di un modulo di STT. Il prototipo opera con Ar/CO_2 (70%/30%).



Risoluzione in dE/dx misurata per il prototipo.

Conclusione e Prospettive

- SAND misurerà le variazioni nello spettro dei neutrini del LBNF al Near Detector di DUNE e realizzerà un ampio programma di fisica, da misure di precisione a fisica oltre il Modello Standard
- Il tracciatore STT di SAND permetterà di condurre misure di precisione sul flusso di neutrini
- Le misure su Idrogeno Solido permetteranno di ridurre significativamente l'errore sistematico legato ai modelli di interazione neutrino-nucleo
- Lo sviluppo e il test di prototipi è in corso, con risultati positivi
- La progettazione dei moduli STT e dei centri di produzione è in corso

Riferimenti

- Abi, Babak, et al. "Volume I. introduction to DUNE." *Journal of instrumentation* 15.08 (2020):T08008.
- Abud, A. Abed, et al. "Deep underground neutrino experiment (DUNE) near detector conceptual design report." *Instruments* 5.4 (2021): 31.
- Adinolfi, M., et al. "The KLOE electromagnetic calorimeter." *NIMA* 482.1-2 (2002): 364.
- G. Adamov et al., A Proposal to Enhance the DUNE Near Detector Complex. <https://docs.dunescience.org/cgi-bin/private/ShowDocument?docid=13262>
- Duyang, H., et al. "A precise determination of (anti) neutrino fluxes with (anti) neutrino-hydrogen interactions." *Physics Letters B* 795 (2019): 424.
- Petti, R. "Precision measurements of fundamental interactions with (anti) neutrinos." *arXiv preprint arXiv:1910.05995* (2019).
- Duyang, H., et al. "A Novel Approach to Neutrino-Hydrogen Measurements." *arXiv preprint arXiv:1809.08752*.