

Imaging delle interazioni di neutrino con ricostruzione su GPU in DUNE

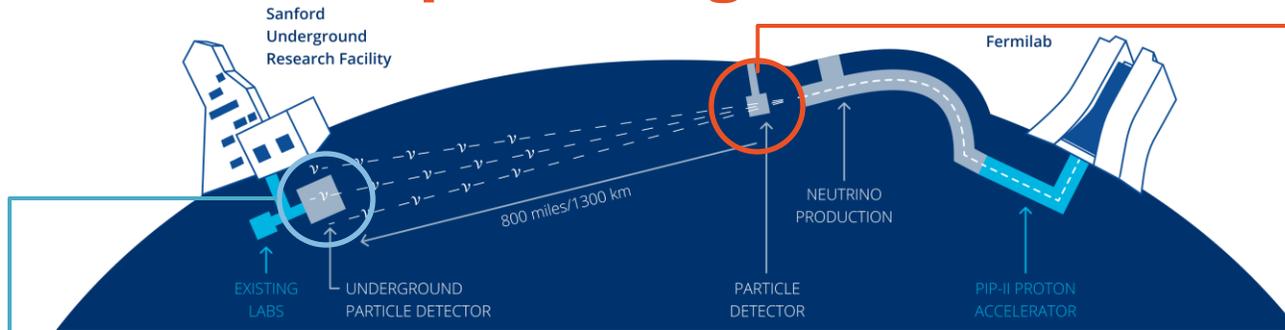
Lorenzo Pierini
(Università di Ferrara, INFN Ferrara)
per conto della collaborazione DUNE

IFAE 2025

Cagliari, 10/04/2025



DUNE: Deep Underground Neutrino Experiment



Il Deep Underground Neutrino Experiment (DUNE) è un esperimento di nuova generazione long-baseline per la fisica dei neutrini.

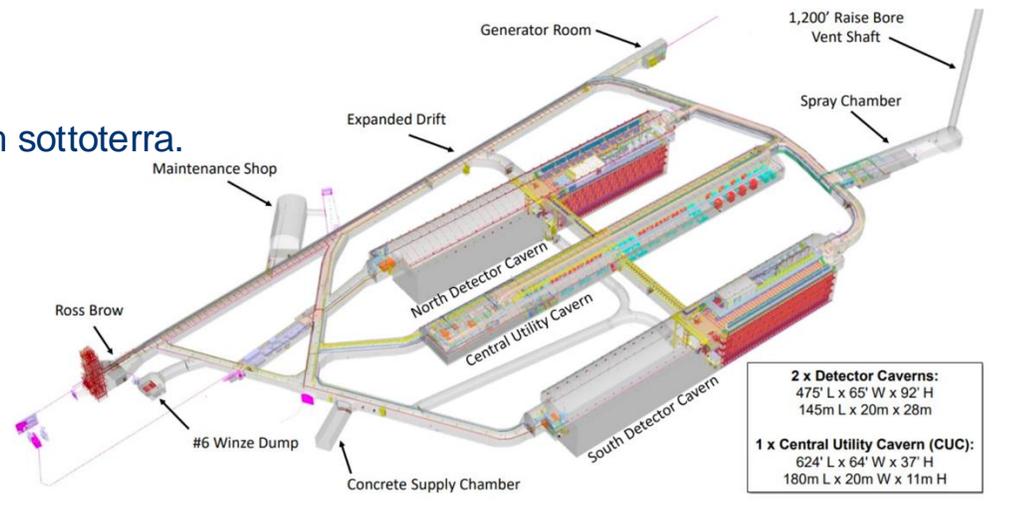
Obiettivi principali:

- Misure ad alta precisione dei parametri di oscillazione dei neutrini: δ_{CP} , mass ordering, θ_{23} ;
- Rivelazione dei neutrini di supernova e solari;
- Fisica Beyond the Standard Model (BSM).

Far Detector (FD)

SURF (South Dakota):
1300 km dal ND e 1.5 km sottoterra.

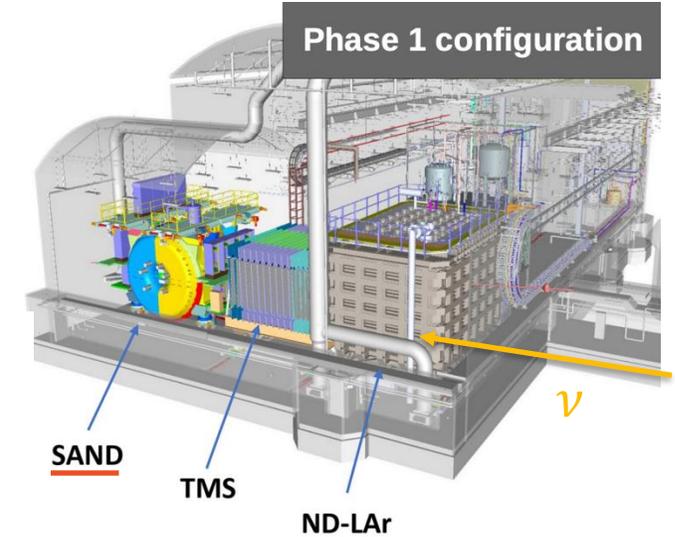
3 moduli di LArTPC
-> massa fiduciale
17 kton [1]



Near Detector (ND)

Fermilab (Chicago, Illinois)

Phase 1 configuration



Fascio di neutrini $\nu/\bar{\nu}$, dal Fermilab:

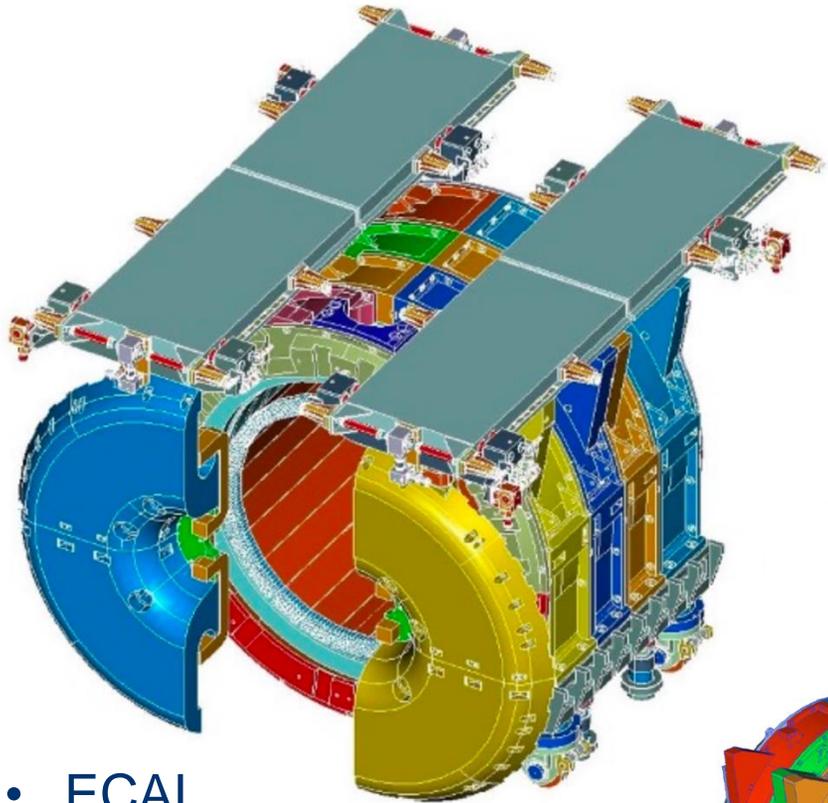
- a banda larga, con picco a 2.5 GeV
- alta intensità 1.2 MW (fino a 2.4 MW)

Complesso di tre detector [2]:

- SAND
- TMS
- ND-LAr

SAND

System for on-Axis Neutrino Detection

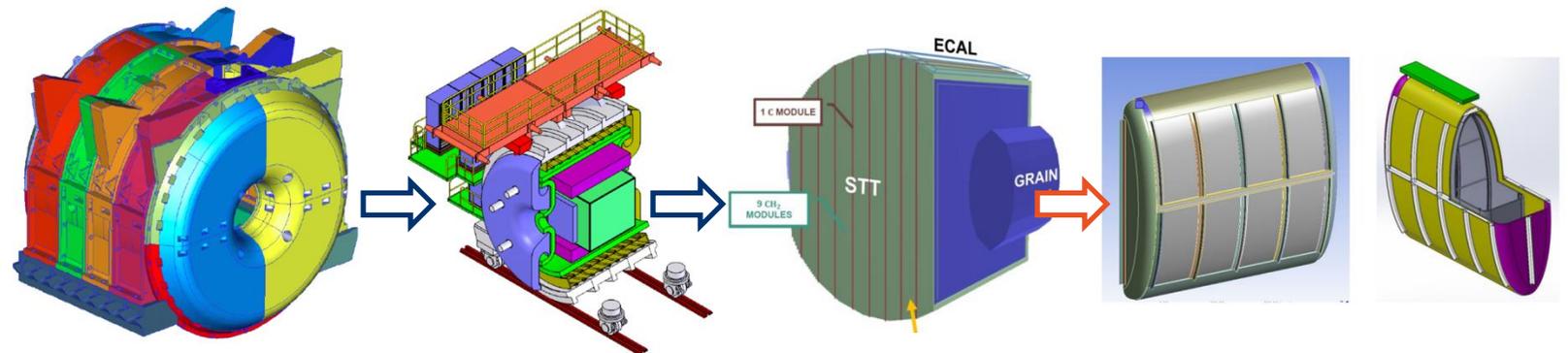


ND complex: caratterizzerà il fascio e ridurrà le incertezze sistematiche associate al detector e agli effetti nucleari [2].

SAND sarà permanentemente localizzato in asse con il fascio di $\nu/\bar{\nu}$:

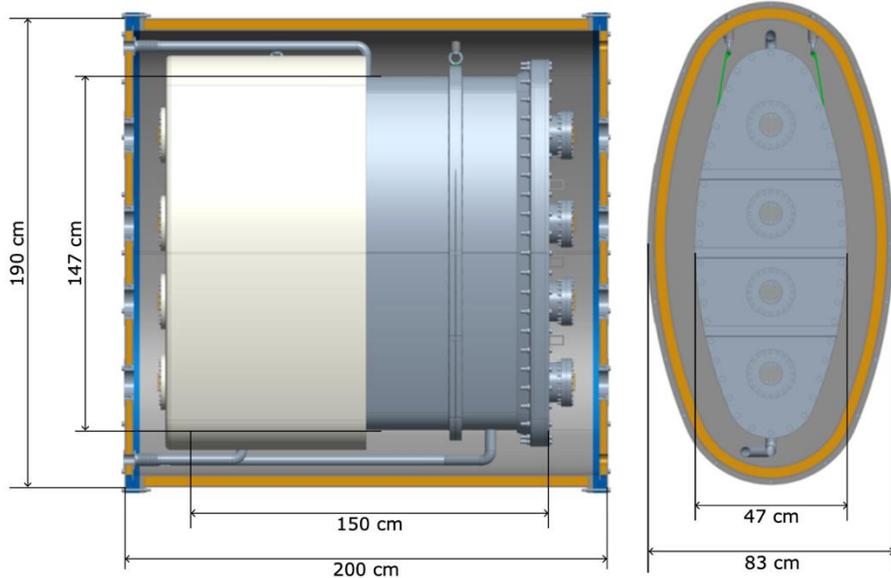
- misurare il flusso $\nu/\bar{\nu}$ e lo spettro di energia;
- misure della sezione d'urto per differenti target nucleari;
- rivelatore multiuso in grado di rilevare interazioni di neutrini su diversi materiali bersaglio, eseguendo misure di tracciamento di precisione e calorimetria.

- ECAL
- Tracker
- GRAIN



GRAIN

GRanular Argon for Interactions of Neutrinos



Bersaglio da 1-ton di LAr:

- Criostato interno in acciaio a 1.5 bar;
- Vessel esterno a vuoto in materiali compositi a 10^{-5} bar.

Motivazioni principali:

- Vincolo sulla sistematica per le sezioni d'urto di ν -Ar;
- Bersaglio Ar complementare per la calibrazione incrociata con ND-LAr.

BERSAGLIO ATTIVO con lettura ottica

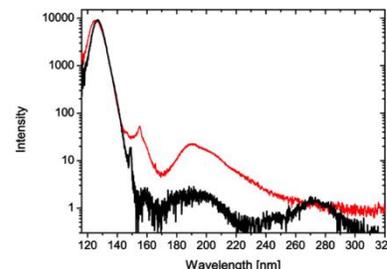
Rivelatore di neutrino a imaging:

Ricostruire le tracce delle particelle utilizzando la luce di scintillazione

Imaging della luce di scintillazione

Proprietà della luce di scintillazione del LAr:

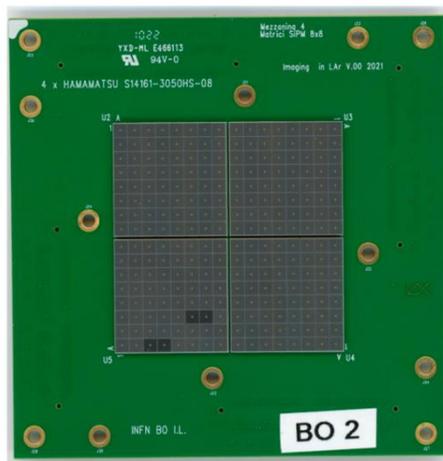
- Elevata resa di fotoni per unità di energia;
- Tempo di emissione componente veloce 6-8 ns;
- Spettro con picco a 128 nm (VUV).



E' possibile scattare foto di tracce di particelle utilizzando sensori segmentati accoppiati a un dispositivo ottico.

Camere: array di Silicon Photo-Multipliers (SiPM) + dispositivo ottico

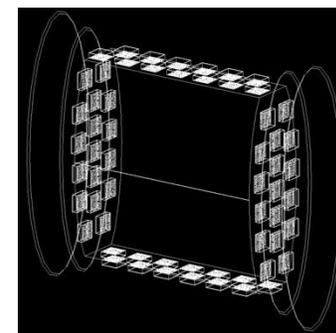
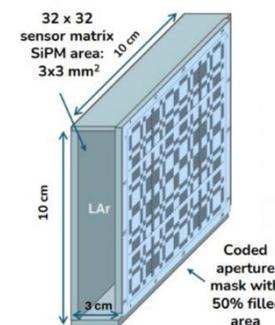
Rivestimento di Tetrafenil Butadiene (TPB) wavelength shifter
128 nm -> 430 nm



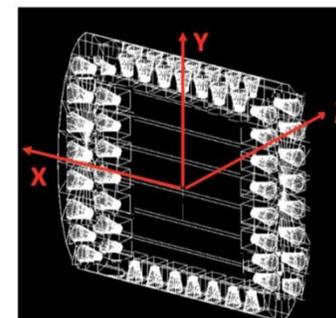
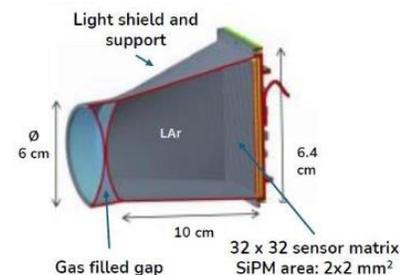
Maschere ad apertura codificata [3]

60 camere

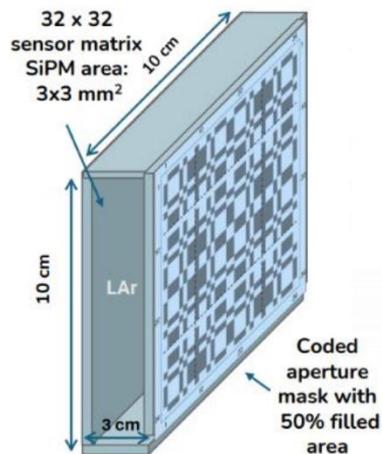
Matrice SiPM 32 x 32
Area SiPM: 3x3 mm²



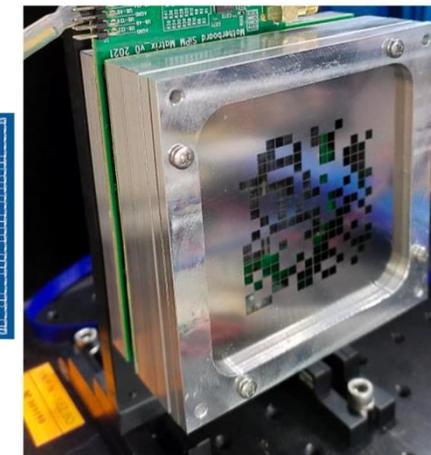
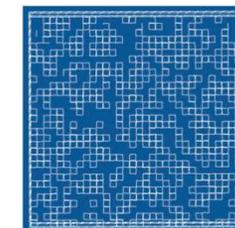
Lenti [4]
53 camere
Matrice SiPM 32 x 32
Area SiPM: 1x1 mm²



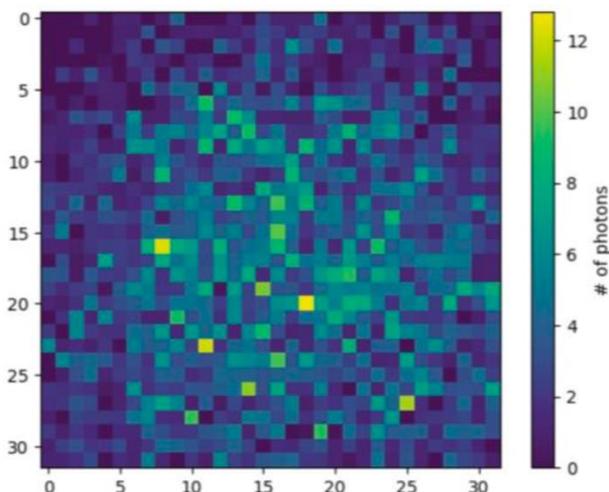
Maschere ad apertura codificata



Una maschera ad apertura codificata è un sottile foglio di materiale opaco con uno **schema ben definito di fori stenopeici** posizionati a una distanza fissa dal piano del sensore.

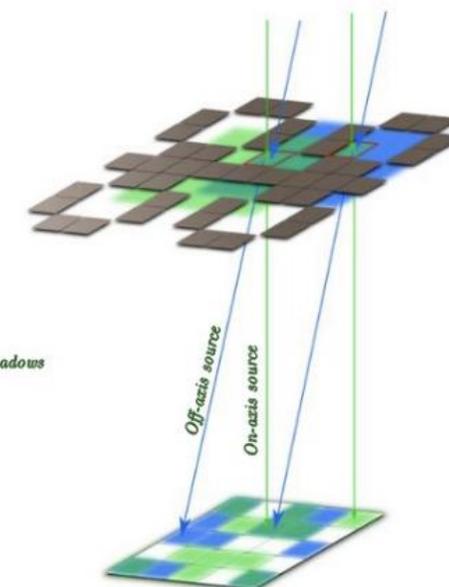


Il design delle camere è stato ottimizzato, con simulazioni, in una geometria semplificata. [3]



Evoluzione di una camera a singolo pin -> **mantiene la buona risoluzione angolare del singolo foro ma aumenta l'efficienza nel raccogliere luce.**

L'immagine formata sul sensore è la **sovrapposizione di più immagini stenopeiche.**



Algoritmo di Ricostruzione di GRAIN

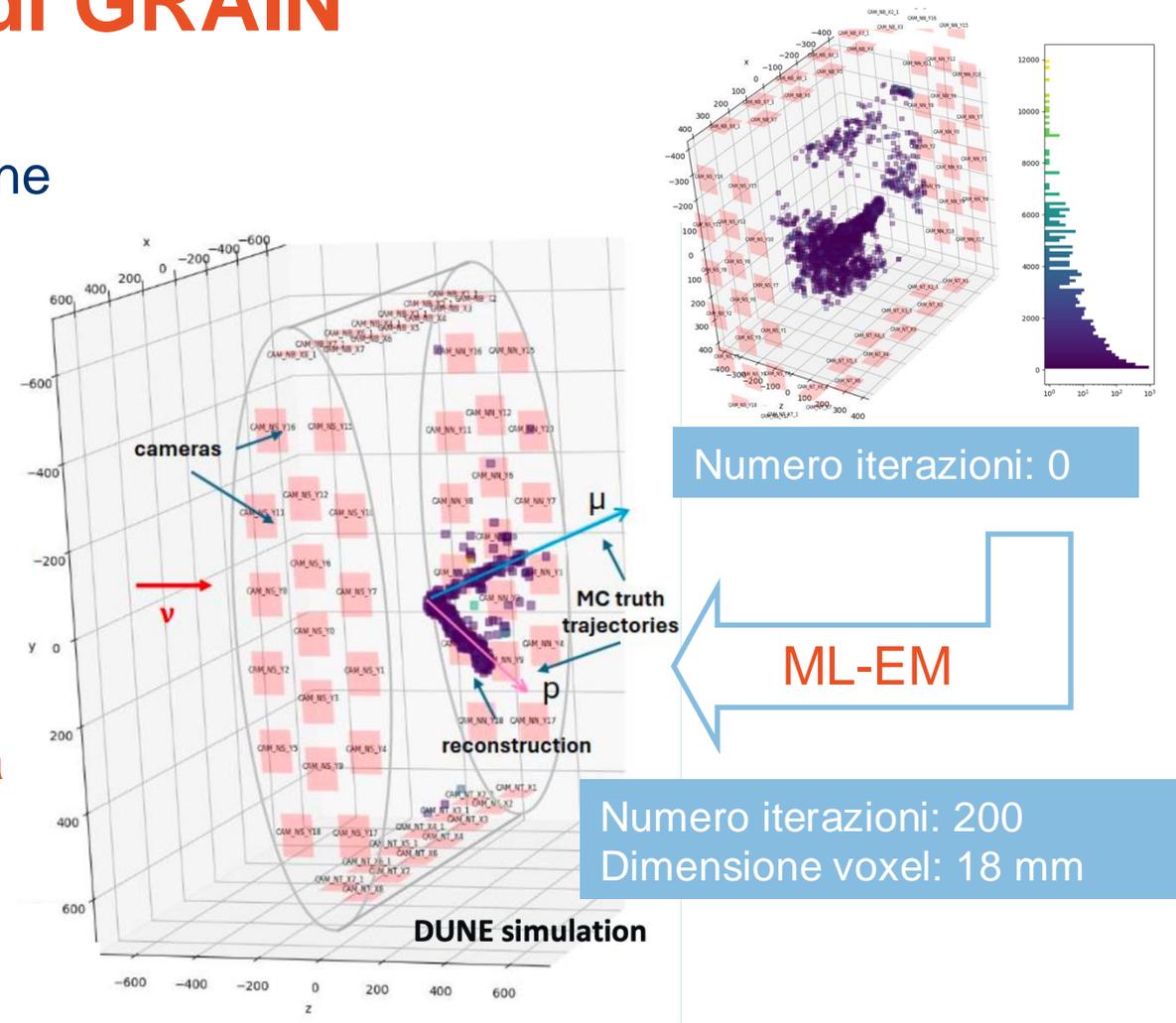
Ricostruzione 3D degli eventi:

- Ricostruisce direttamente in 3D la distribuzione iniziale della sorgente fotonica in un volume segmentato (**voxel**);
- Combina le informazioni di più telecamere contemporaneamente;
- Algoritmo iterativo basato sulla **Maximum Likelihood - Expectation Maximization**;



Converge iterativamente alla distribuzione della sorgente di fotoni che massimizza la probabilità di rivelare le immagini osservate

Implementato per l'esecuzione su (più) GPU utilizzando kernel **OpenCL**.



ν -Ar Corrente Carica scattering Quasi-Elastico (CCQE)

System Matrix

∀ camera:

Il conteggio dei fotoni è descritto da una pdf poissoniana:

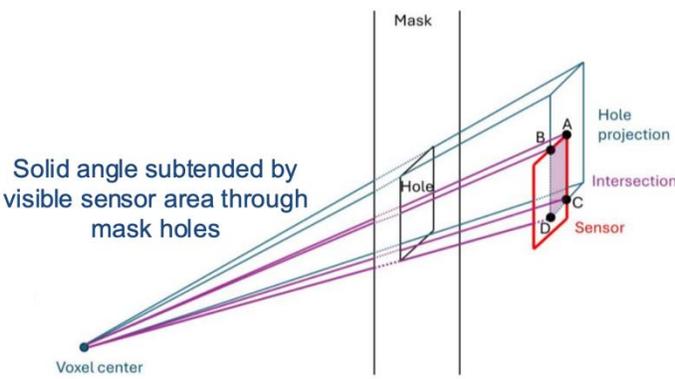
$$f(H_s | [\lambda_s]) = e^{-[\lambda_s]} \frac{[\lambda_s]^{H_s}}{H_s!}$$

H_s numero di fotoni rivelati dal sensore s

$[\lambda_s]$ valore di aspettazione dei fotoni rivelati

$$[\lambda_s] = \sum_{j=1}^J \lambda_j p(j, s)$$

λ_j emissione di fotoni sconosciuta in voxel j
 $p(j, s)$ probabilità che un fotone originato nel voxel j sia rilevato dal pixel s



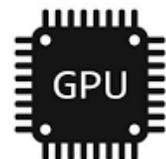
$p(j, s) = P_{\text{geometry}}(j, s) \cdot P_{\text{LAr}}(j, s) \cdot P_{\text{sensor}}(s)$

Angolo solido sotteso dall'area del sensore visibile attraverso i fori della maschera

L'assorbimento dei fotoni in LAr dipende dalla distanza tra voxel e sensore + Rayleigh scattering

SiPM Photo Detection Efficiency (PDE)

System Matrix J x S :
 J: numero di voxel
 S: numero di pixel in una matrice di SiPM



1 GPU

Calcolo necessario solo una volta dipendentemente dalla geometria considerata e dalla dimensione dei voxel.

Algoritmo di Ricostruzione di GRAIN

∀ camera:

$$\text{Likelihood: } \prod_{s=1}^S e^{-[\lambda_s]} \frac{[\lambda_s]^{H_s}}{H_s!}$$

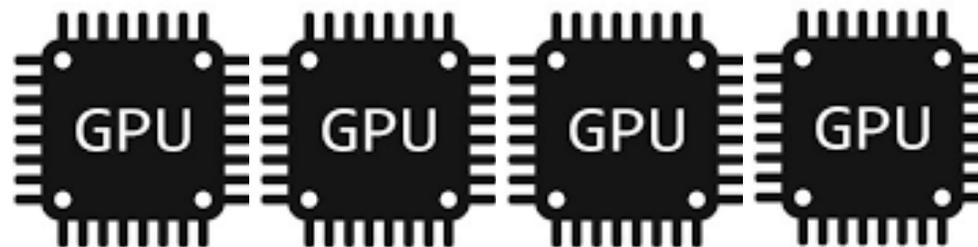
Massimizzazione

$$\lambda_j^{k+1} = \frac{\lambda_j^k}{\sum_{s=1}^S p(j, s)} \cdot \sum_{s=1}^S \frac{H_s \cdot p(j, s)}{\sum_{j'=1}^J p(j', s) \cdot \lambda_{j'}^k}$$

ML-EM

k passo dell'iterazione

Esecuzione in parallelo per ogni **telecamera**
Fino a **4 GPU**



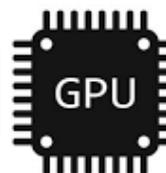
Kernel OpenCL per caricare i dati nella RAM delle GPU
ed eseguire i calcoli.

Risorse

Host (CPU)



Device (GPU)

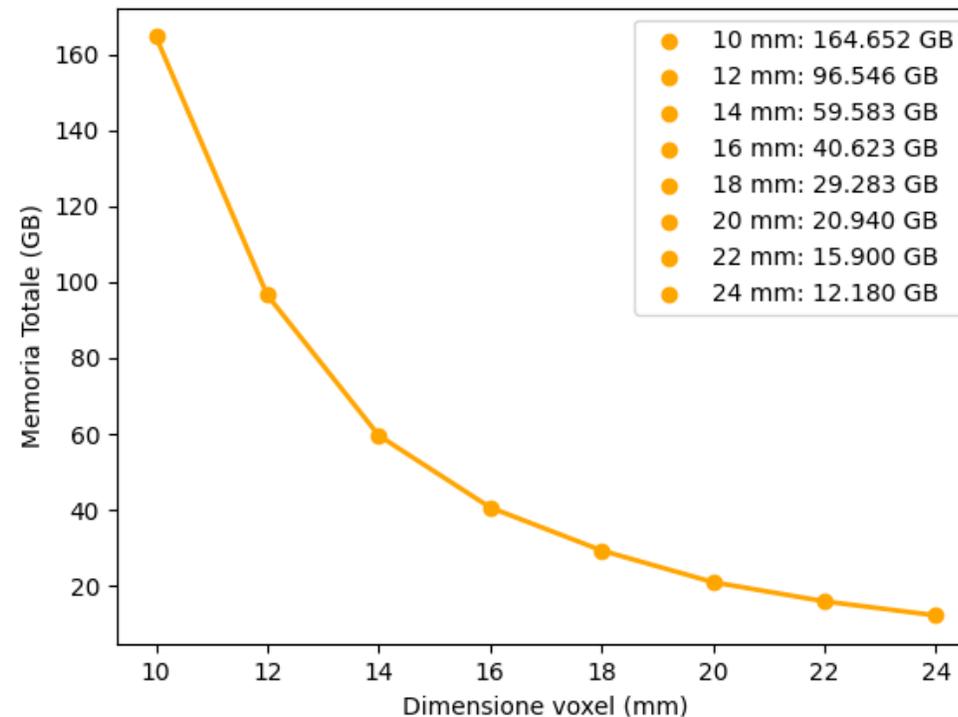


pyopenCL

- Context
- Queue
- Buffer

Dati	Buffer Size (float32, x 4 bytes)
System matrix: $p(j, s)$ (una camera)	$n_{pixel} \times n_{voxel}$
Sensitivity matrix: $\sum_s p(j, s)$ (tutte le camere)	n_{voxel}
Hits buffer: dati della risposta del rivelatore (H_s)	$n_{pixel} \times n_{camere}$
ML-EM step di iterazione	
Expectation step buffer	n_{pixel}
Maximization step buffer	n_{voxel}
Previous amplitude buffer	n_{voxel}

Memoria allocata su GPU



$$n_{voxel} = J$$

$$n_{pixel} = S = 32 \times 32 = 1024$$

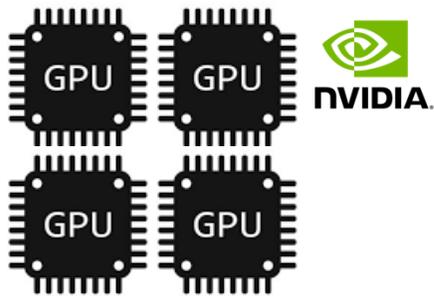
$$n_{camere} = 60$$

Cluster HPC

L'utilizzo di cluster HPC, come Leonardo, consente di ridurre significativamente i tempi di elaborazione, mantenendo una precisione spaziale adeguata.

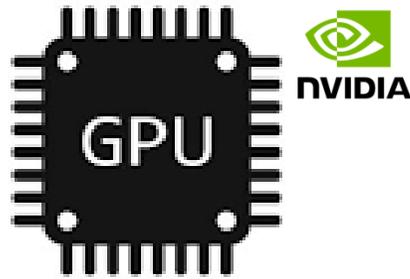
Geometria: 60 camere + voxel da 18 mm
1 evento ν -Ar CCQE

HPC CNAF
4 x Tesla-V100 SXM2
Volta - 32 GB



≈15 min

LEONARDO
1 x Nvidia custom Ampere
GPU 64GB HBM2-A100
Ampere - 64 GB



≈10 min



BOOSTER node
4x Nvidia custom Ampere
GPU 64GB HBM2

≈2.5 min

Speed-up x6
Riduzione del tempo di esecuzione:
83.33%

Ottimizzazione

Ricostruzione: 1 evento ν -Ar CCQE (18mm, 60 camere)

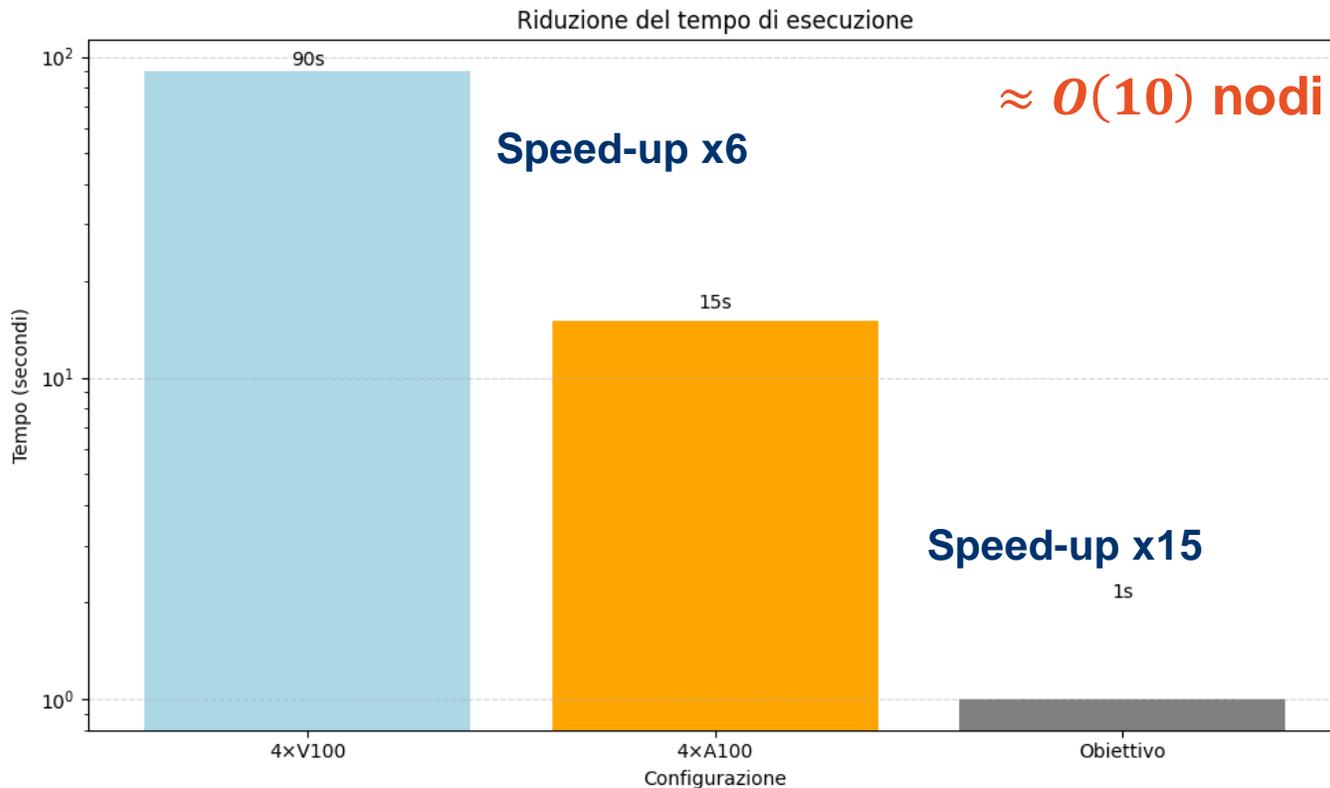
2.5 min = 150 sec

Distribuiti su $\approx O(10)$ nodi messi a disposizione da DUNE.



Ricostruzione Online

1 $\frac{\text{Ricostruzione}}{\text{sec}}$



Speed-up x15

Riduzione del tempo di esecuzione:
93.33%

- Esecuzione di più Kernel in parallelo su una stessa GPU:
`CL_QUEUE_OUT_OF_ORDER_EXEC_MODE_ENABLE` (A100 compatibili);
- Ottimizzazione dell'algoritmo: ML-EM OSEM (Ordered Subset Expectation Maximization).

Conclusioni

- SAND monitorerà e caratterizzerà il fascio di neutrini, nel Near Detector in DUNE, eseguendo anche un ricco programma di fisica oltre alle oscillazioni;
- Includerà GRAIN, un rivelatore innovativo, che sfrutterà l'imaging della luce di scintillazione dell'argon per eseguire ricostruzioni di traccia ed energia;
- Sono in fase di sviluppo due sistemi ottici: telecamere basate su lenti e maschere ad apertura codificata (CA);
- Per il sistema CA si è implementato un algoritmo MLEM che ricostruisce direttamente l'evento in 3D, con accelerazione GPU;
- L'utilizzo di cluster HPC, come Leonardo, consente di ridurre significativamente i tempi di elaborazione, mantenendo una precisione spaziale adeguata;
- È in corso l'ottimizzazione della ricostruzione su più fronti, in modo da renderla abbastanza veloce nei limiti richiesti.

Bibliografia

- [1] B. Abi et al. (DUNE Collaboration), "[DUNE TDR volume III. Dune far detector technical coordination](#)", JINST 15 T08009 (2020);
- [2] A. A. Abud et al. (DUNE Collaboration), "[Deep Underground Neutrino Experiment \(DUNE\) Near Detector Conceptual Design Report](#)", arXiv:2103.13910 (2021);
- [3] V. Cicero, "[Study of the tracking performance of a liquid Argon detector based on a novel optical imaging concept](#)", PhD Thesis, University of Bologna (2023);
- [4] M. Vicenzi, "[A Grain of SAND for DUNE: Development of simulations and reconstruction algorithms for the liquid Argon target of the SAND detector in DUNE](#)", PhD Thesis, University of Genova (2023).

Grazie per l'attenzione!