

DUNE

Consiglio di Sezione

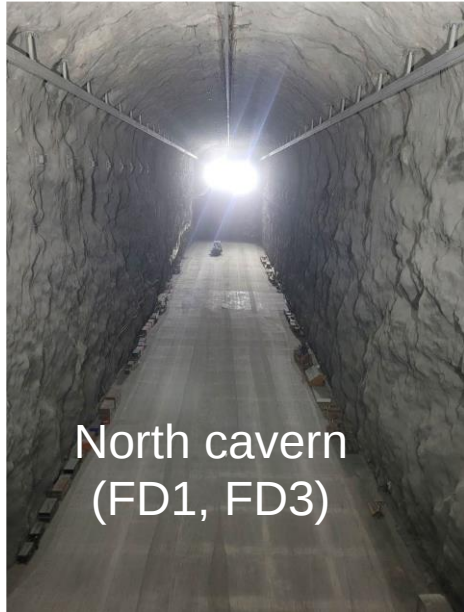
9 luglio 2024

E. Bertolini, L. Bomben, F. Bramati, A. Branca, C. Brizzolari, G. Brunetti, P. Carniti, C. Cattadori, E. Cristaldo Morales M. Delgado, A. Falcone, F. Galizzi, C. Gotti, D. Guffanti, L. Meazza, A. Minotti, M. Perego, G. Pessina, G. Piemonti, M. Prest, A. Scanu, H. Souza, F. Terranova (RL), M. Torti, E. Vallazza

DUNE, la “Long Baseline Neutrino Facility” (LBNF) e SURF

DUNE utilizza due nuove facilities pensate per sostenere il programma di fisica delle particelle americano per i prossimi decenni: un fascio broad band da 1.2 → 2.4 MW power e il laboratorio SURF in South Dakota. E', perciò, il progetto flagship del Fermilab e della fisica underground USA.

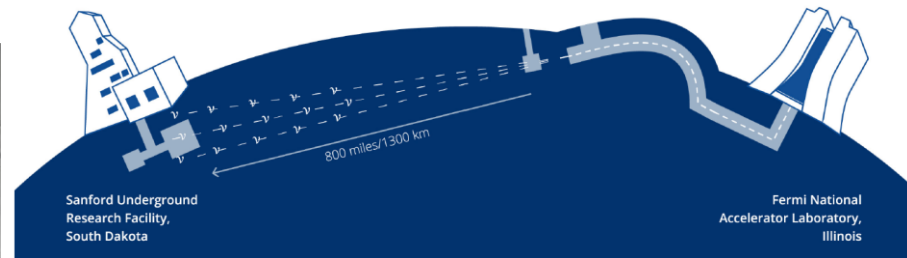
Nel 2024 sono stati completati gli scavi di SURF in un tempo record e senza particolari difficoltà tecniche. I laboratori saranno consegnati agli esperimenti a fine anno.



North cavern
(FD1, FD3)



South cavern
(FD2, FD4)



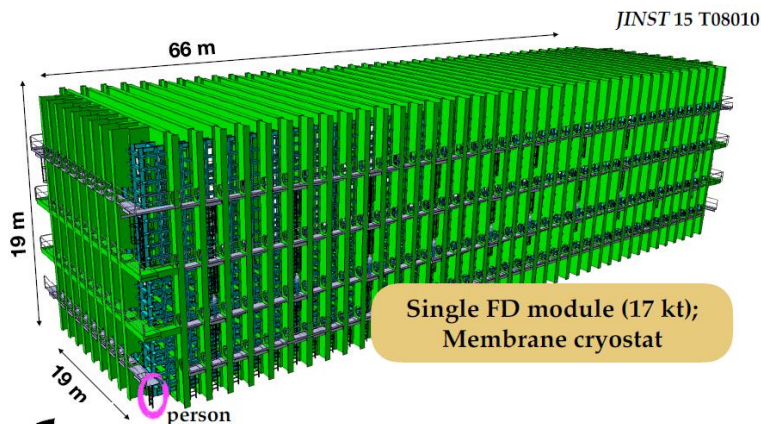
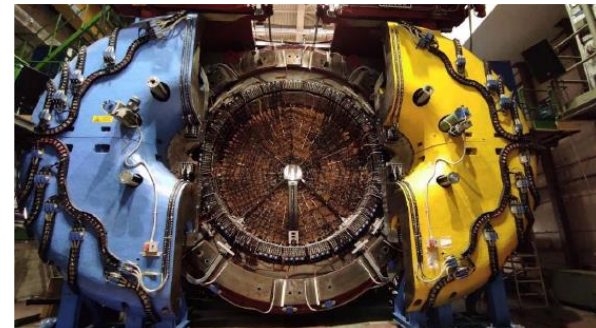
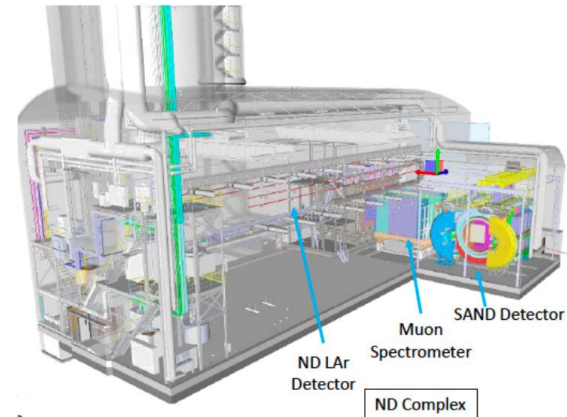
DUNE in a nutshell

Massa: il Far Detector di DUNE è composto da 4 moduli di liquid argon per una **mass fiduciale totale di 40 kton** (full mass **70 kton**).

Risoluzione: DUNE è basata sulla migliore tecnica di **particle imaging** disponibile alla scala del kton: la Liquid Argon TPC (C. Rubbia, 1977)

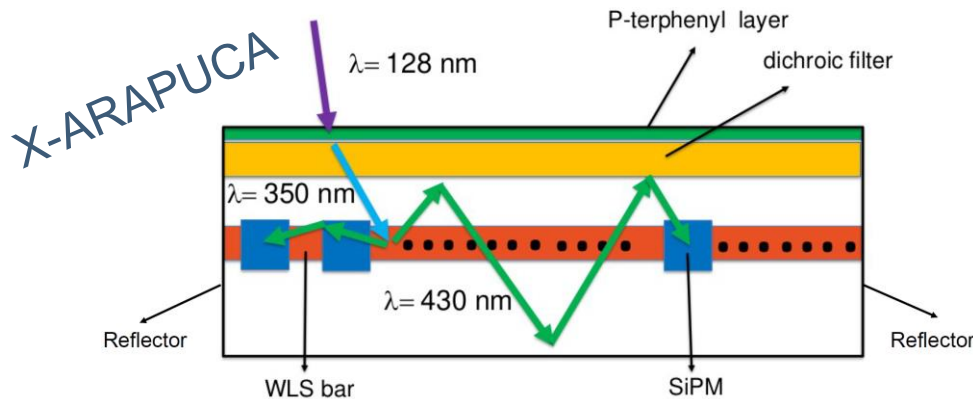
I primi due moduli (“Horizontal” e “Vertical” drift sono già in costruzione

Precisione: DUNE utilizza un **near detector complex** per la caratterizzazione del fascio basato su un Sistema mobile (NDLAr, TMS/NDGar) + un rivelatore on-axis (SAND) detector.



Milano Bicocca

Milano Bicocca coordina la costruzione del **Photon Detection System** per tutti i moduli del Far Detector di DUNE e, in particolare,

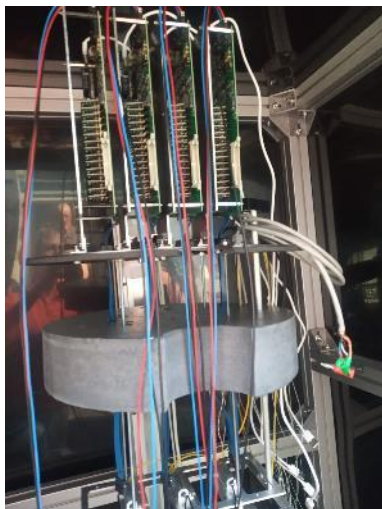


- Coordina la produzione e il test dei SiPM criogenici (Resp. F. Terranova)
- Coordina la produzione e il test dell'elettronica criogenica di FD1 (Resp. C. Gotti)
- Coordina la produzione e i test delle barre WLS e dei filtri dicroici per il II Modulo di DUNE (Resp. C. Cattadori)
- Coordina lo sviluppo della warm electronics di FD2 **NEW!**
- Team di analisi e simulazione per la calorimetria combinata luce-carica, simulazione PDS, neutrini solari (Resp. G. Brunetti)
- Contribuisce alla costruzione e run di ProtoDUNE-HD e VD al CERN

Highlight del 2023-24: (I) CACTUS

La produzione di massa dei SiPM è arrivata al 50% e i test con le facility CACTUS hanno raggiunto il 30% del totale dei SiPM prodotti

Milano Bicocca ospita una di queste facilities e coordina l'intero sforzo (Bologna, Ferrara, Granada, Praga, Mib), inclusa la gestione del database di collaborazione (M. Delgado, A. Minotti)

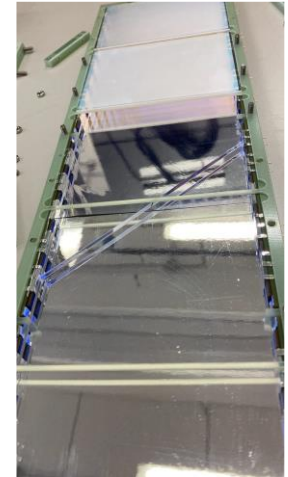
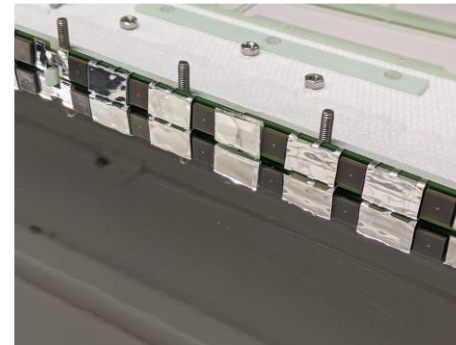
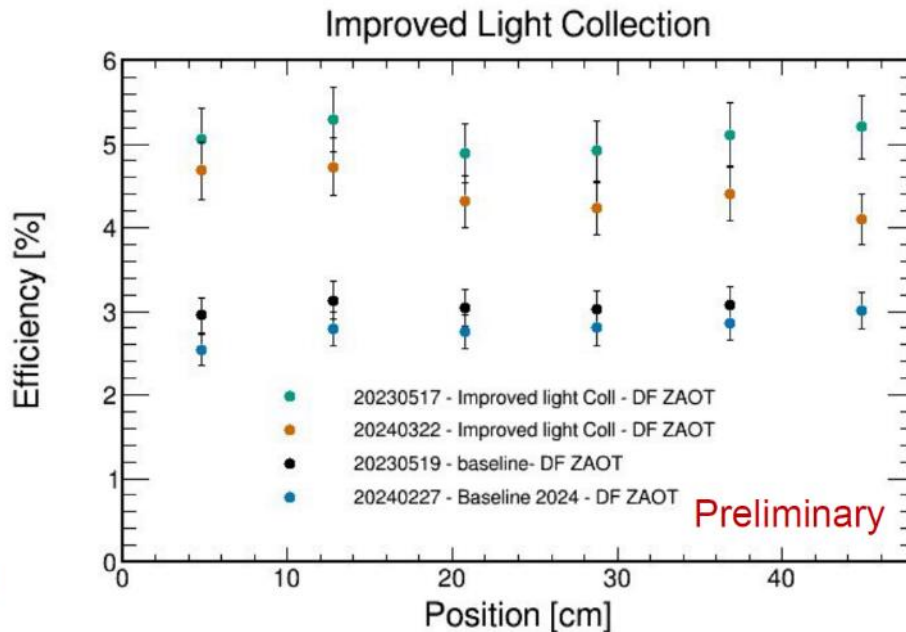


Coord. C. Brizzolari, M. Delgado

Un grazie speciale al servizio elettronica e a **M. Perego** per il supporto, e al gruppo Plasmì (C. Riccardi) per l'ospitalità in U9

Highlight del 2023-24: (II) X-ARAPUCA

Nel corso dell'ultimo biennio, Milano Bicocca (coord. C. Cattadori) ha svolto una campagna di ottimizzazione dei rivelatori di luce e apportato innovazioni nella realizzazione del dispositivo che hanno **quasi raddoppiato l'efficienza del rivelatore**. Il Consorzio si avvia a implementare tali migliorie nella produzione di massa per FD1



E. Bertolini, C. Brizzolari,
C. Cattadori, L. Meazza

Un forte coinvolgimento delle realtà produttive lombarde (Glass-to-Power, Zao), dei nostri partner industriali e dei servizi di sezione

Highlight del 2023-24: (III) ProtoDUNE-HD

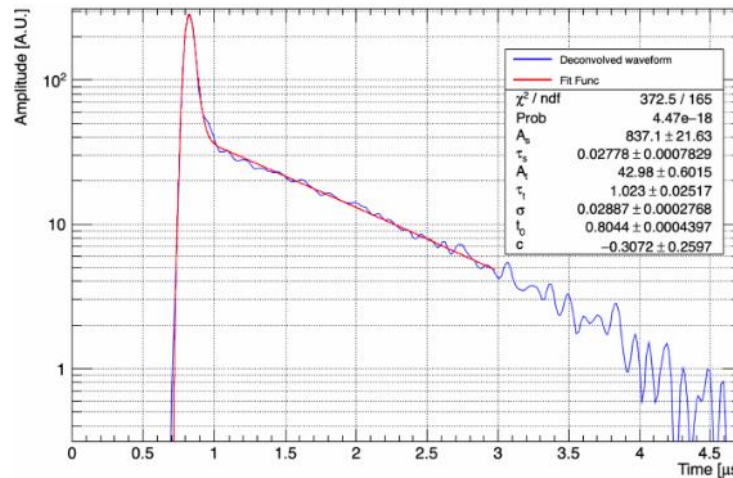
La versione definitiva del Photon Detection System di DUNE è stata installata in ProtoDUNE-HD (ex ProtoDUNE-SP) ed è attualmente in presa dati. Milano Bicocca partecipa attivamente (deputy RC del PDS: A. Minotti) sia al run che all'analisi.

APA 3

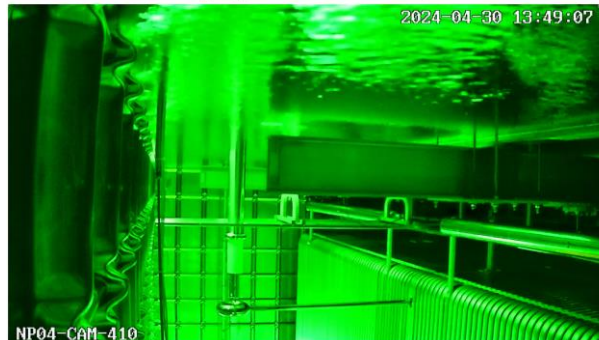
70 2.7 kHz	60 3.0 kHz	50 3.3 kHz	40 3.4 kHz
71 3.0 kHz	61 3.4 kHz	51 3.6 kHz	41 3.7 kHz
72 3.1 kHz	62 3.4 kHz	52 3.7 kHz	42 3.8 kHz
73 3.2 kHz	63 3.5 kHz	53 3.7 kHz	43 3.9 kHz
74 3.2 kHz	64 3.4 kHz	54 3.7 kHz	44 3.8 kHz
75 3.0 kHz	65 3.4 kHz	55 3.5 kHz	45 3.7 kHz
76 2.9 kHz	66 3.2 kHz	56 3.4 kHz	46 3.5 kHz
77 2.7 kHz	67 2.9 kHz	57 3.1 kHz	47 3.3 kHz
78 2.4 kHz	68 2.7 kHz	58 2.9 kHz	48 3.1 kHz
79 2.0 kHz	69 2.3 kHz	59 2.6 kHz	49 2.6 kHz

Filippo Bramati (Mib)

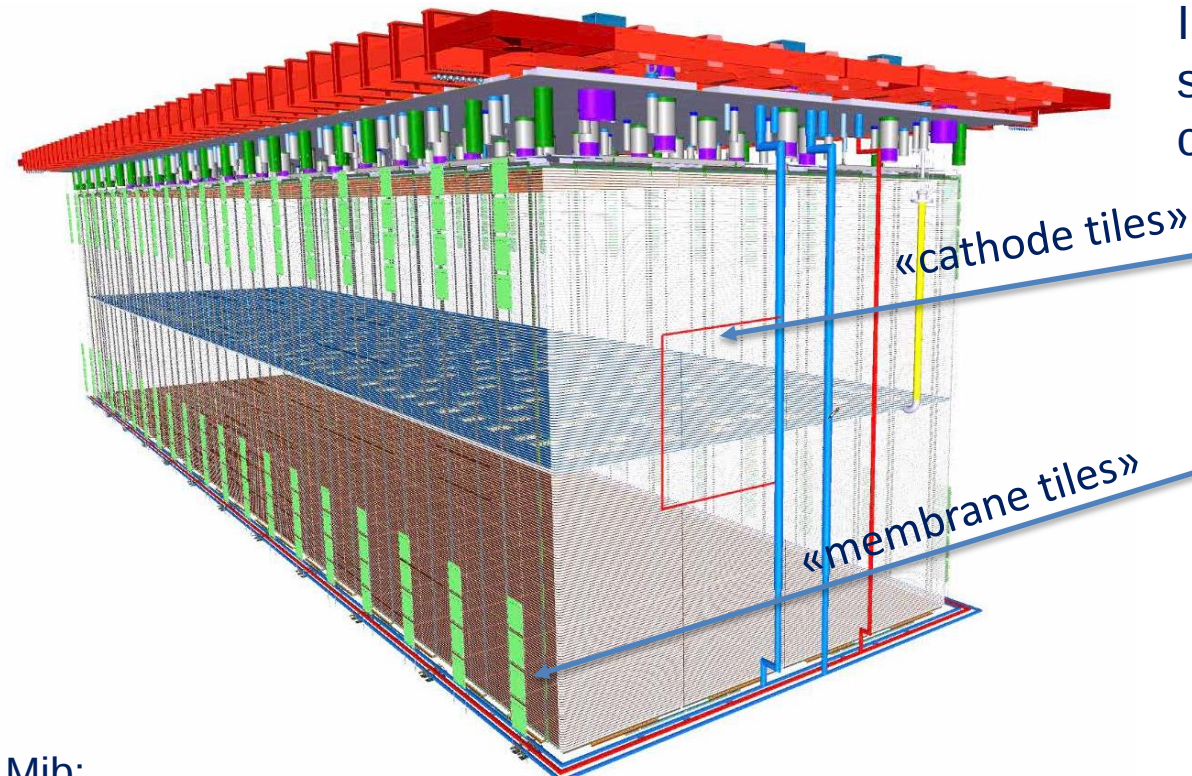
Federico Galizzi (MiB)



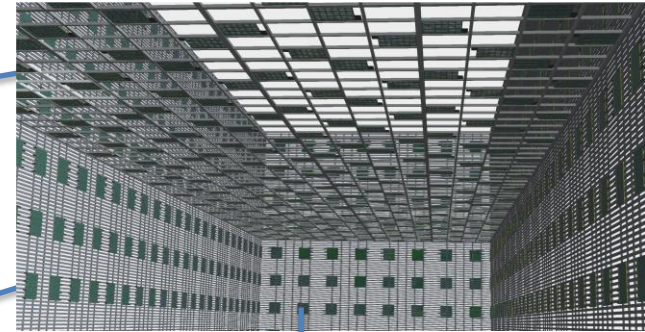
Filling stopped at 13:30 on the 30th of April



Nel 2025 comincia la costruzione di FD2-VD



Il «modulo» del FD1-HD è sostituito dalla «tile» (due canali, 160 SiPMs)



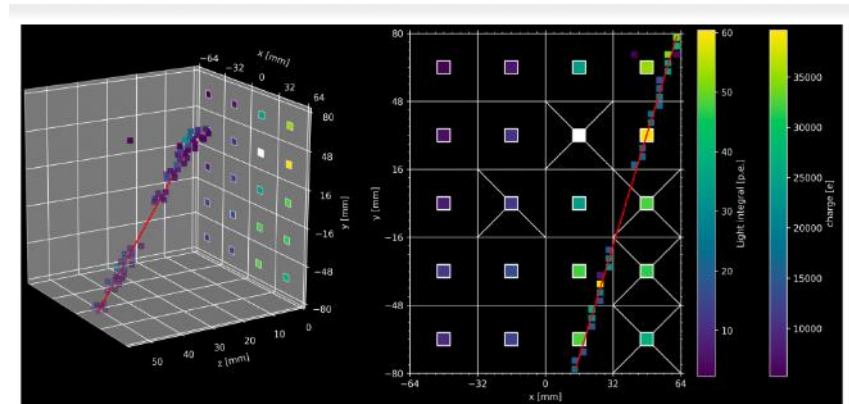
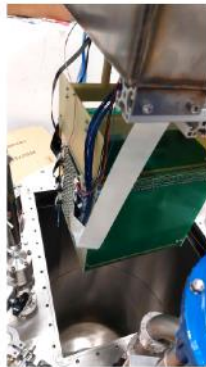
Mib:

- Coord. tecnico di tutta l'elettronica del PDS (F. Terranova)
- Realizzazione delle barre WLS e dei filtri dicroici (coord. C. Cattadori)
- Realizzazione della warm electronics e (forse) della cold electronics di membrana (C. Gotti)
- Signal-over-fiber in collaborazione con APC Parigi (E. Cristaldo, H. Souza)

DUNE Phase II

Gli altri due moduli di DUNE sono ancora in fase di R&D e solo parzialmente finanziati («Phase II») Milano Bicocca è fortemente coinvolta in questo R&D

Progetto **SoLAR** e **CADMO**: portare la sensibilità di DUNE alla scala del MeV per l'osservazione dei neutrini solari e la ricerca di Boosted Dark Matter. Principali finanziatori **Dip. di eccellenza Unimib**, STFC (UK), Swiss NSF



Power over Fiber tunabile per permettere la modifica dei parametri di run delle tile di catodo anche durante la presa dati. R&D svolto nell'ambito di gruppo V – progetto CryoPoF (PI M. Torti) in collaborazione con Milano Statale e Parma (PRIN 2022 PI F. Terranova – sostituisce C. Galbiati dal 2024)

Sviluppo di sensori back-illuminated per alta efficienza quantica nel VUV (IBIS_NEXT, Resp. Loc. A. Falcone e Dipartimento di Eccellenza/CADMO)

Principali richieste finanziarie e di servizi

Item	Costo (k€)	Note
produzione WLS per FD2-VD	320	core cost
filtri dicroici per FD2-VD	1029	core cost
Warm electronics	216	core cost
Laminazione di PEN	12	DRD2
Liquidi criogenici per il run di CACTUS	15	
Meccanica tile membrana	40	core cost
Missioni	53	

Servizio di elettronica: supporto a Cactus 6 m.u. (M. Perego)

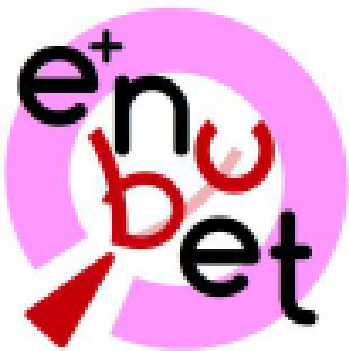
Servizio di meccanica: 1 m.u. (test X-ARAPUCA)

Anagrafica Milano Bicocca

	FTE
Bomben Luca	20%
Bramati Filippo	30%
Branca Antonio	60%
Brizzolari Claudia	70%
Brunetti Giulia	70%
Carniti Paolo	10%
Cattadori Carla	30%
Cristaldo Morales	30%
Delgado Maritza	60%
Falcone Andrea	40%
Galizzi Federico	100%
Gotti Claudio	30%
Guffanti Daniele	80%
Meazza Luca	60%
Minotti Alessandro	30%
Pessina Gianluigi	5%
Prest Michela	30%
Souza Henrique	90%
Terranova Francesco	40%
Torti Marta	60%
Trotta Davide	20%
Vallazza Erik Silvio	10%
TOTALE: 22 persone	9.75 FTE

A questi si aggiungono 1.7 FTE su IBIS_NEXT

1 FTE borsa dottorato DM610 cofinanziata FBK che assegneremo il 1 settembre



ENUBET_NP06

G. Brunetti (RL) F. Terranova (RN)

L. Bomben, F. Bramati, A. Branca, C. Brizzolari, G. Brunetti, M. Capitani, D. Guffanti, L. Meazza, M. Prest, G. Saibene, A. Scanu, F. Terranova

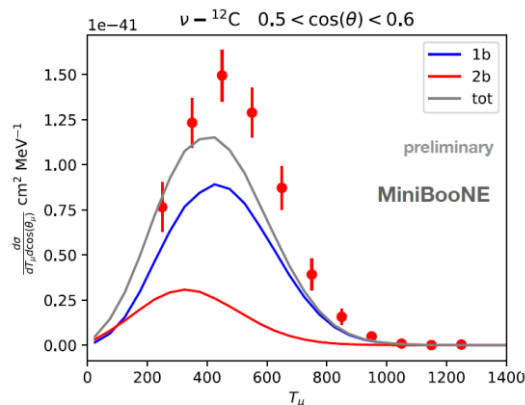
Storia del Progetto:

- Idea originaria A. Longhin, L. Ludovici, F. Terranova, EPJ C75 (2015) 155
- ENUBET: ERC Consolidator Grant. Jun 2016 - Dic 2022. PI: A. Longhin.
- Dall' April 2019, ENUBET è un **esperimento CERN (Neutrino Platform) NP06/ENUBET (2019-2026)** – Comm.2: ENUBET_2
- Grazie al successo di questo R&D siamo dal 2023 in Physics Beyond Collider (SBN@PBC) con lo scopo di preparare un proposal per un fascio di neutrini monitorati al CERN puntante verso i ProtoDUNE – Comm.1: ENUBET_NP06

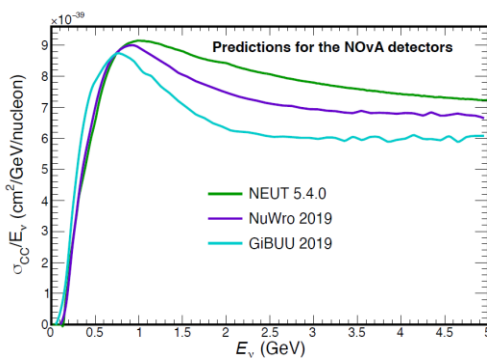
Perché abbiamo bisogno di ENUBET

La conoscenza della sezione d'urto dei neutrini è ferma da decenni al livello del 10-30% mentre le esigenze della comunità dei neutrini richiedono precisioni dell'1% perché:

- Principale sistematica per esperimenti long baseline → Fisica delle oscillazioni dei neutrini
- Possibilità limitata di validare gli effetti elettrodeboli nucleari ("nucleo e correzione nucleare") → Fisica elettrodebole
- I generatori di neutrini basati su diversi approcci forniscono ancora risultati con discrepanze superiori al 50% → Fisica nucleare

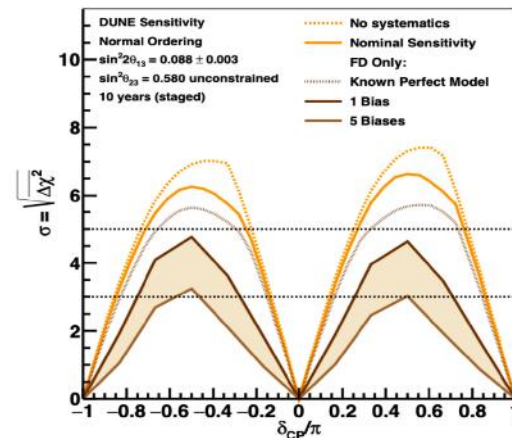


N. Rocco, Nufact2022

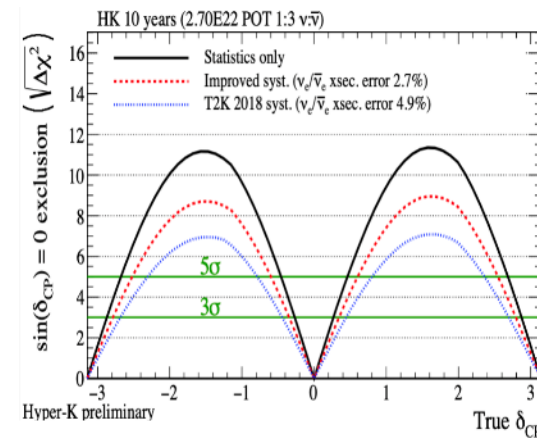


J. Paley, Nufact2022

DUNE



HyperKamiokande

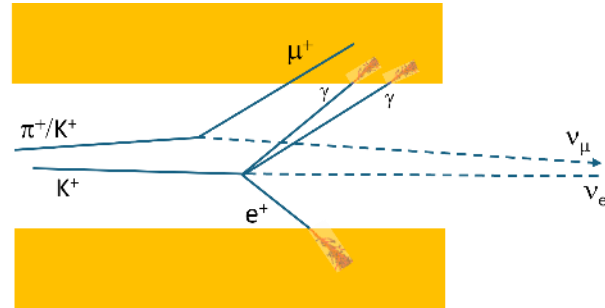


ENUBET è un “monitored neutrino beam” (*)



(*) A. Longhin, L. Ludovici, F. Terranova, [EPJ C75 \(2015\) 155](#)

Un fascio di neutrini con un tunnel di decadimento strumentato, dove identifichiamo e contiamo i leptoni carichi prodotti insieme ai neutrini.



A causa dell'elevato flusso di particelle nel tunnel, ENUBET ha posto enormi sfide tecniche che sono state risolte nel 2016 – 2023 dalla Collaborazione NP06/ENUBET al CERN.

Grazie a questo successo, ENUBET è attualmente studiato nel quadro di Physics Beyond Collider per una possibile implementazione al CERN.

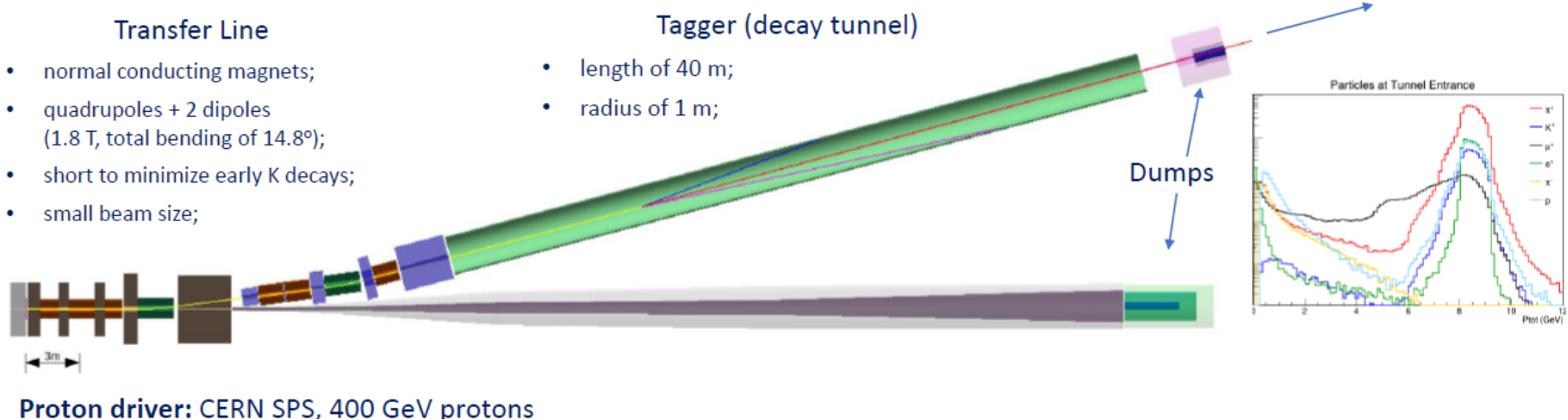
Collaboration: 74 physicists & 17 institutions; Spokespersons:
A. Longhin, F. Terranova;
Technical Coordinator: V. Mascagna



Highlight del 2023-24 (I)

Nel 2023, ENUBET ha pubblicato la prima simulazione end-to-end di un fascio monitorato basato sul SPS del CERN che non utilizza horns e, pertanto, usa un'estrazione di protoni “lenta” che ci permette di monitorare tutti i leptoni nel tunnel di decadimento, inclusi i muoni da decadimento del π

[See EPJ C 83 \(2023\) 964](#)



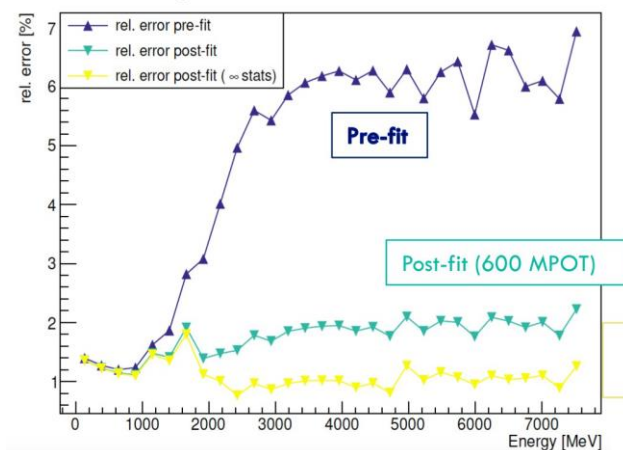
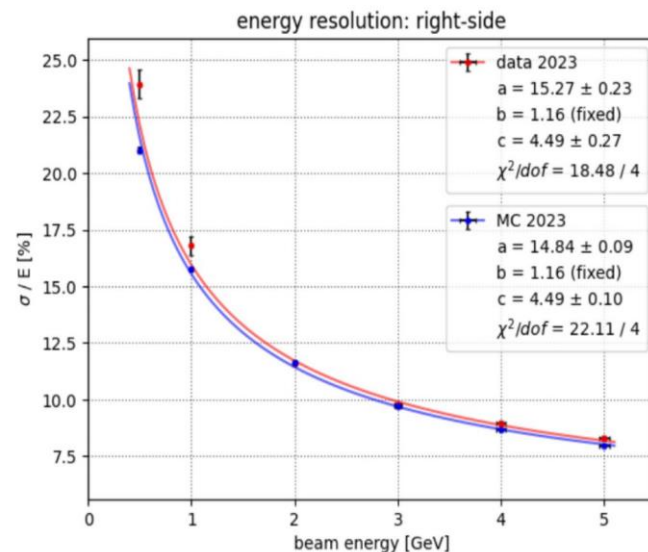
Nel 2023/24 la Divisione acceleratori del CERN (Coord. N. Charitonidis, M. Jebramcik) ha riottimizzato la beamline riducendo di un fattore 3 il numero di protons-on-target necessari ad ottenere la stessa statistica sui ProtoDUNE. Questa facility prende ora il nome di SBN@PBC (v. dopo)

Highlight del 2023-24 (II)

Abbiamo completato il test del Dimostratore di ENUBET, una frazione del tunnel instrumentato esposta a fasci di particelle cariche (T9 East Area) per validarne le performance



Abbiamo dimostrato attraverso una full simulation che l'osservazione di positroni (studio completato) e muoni (in progress) abbatte l'incertezza sui flussi – e dunque sulle sezioni d'urto – di un ordine di grandezza portandola all'1%



Attività nel 2025



- Completare l'R&D realizzando un prototipo di hadron dump strumentato per monitorare i muoni forward da decadimento di pioni. Finanziato dalla Francia (ANR – Progetto Picosec Micromegas for ENUBET, PIMENT) per quanto concerne l'elettronica e il tracking, e dall'INFN (richieste 2025) per il rivelatore
- Studiare l'implementazione della facility al CERN incluse le infrastrutture (CERN BE), gli aspetti radioprotezionistici (CERN BE + Milano Bicocca) e i costi
- Simulare anche le interazioni di neutrino in ProtoDUNE per l'assessment del caso di fisica. Questa attività è svolta in collaborazione con DUNE e CERN EP (coord. S. Dolan)
- Valutare la possibilità di “taggare” i neutrini usando tracciatori veloci inseriti nella beamline (tecnologia sviluppata dall'INFN nell'ambito del Progetto IGNITE e dalla coll. NuTAG in Francia)
- Cominciare la stesura della Expression of Interest per l'esperimenti al CERN

ENUBET è attualmente finanziato dal CERN, la Francia, l'INFN e l'Unione Europea. Il Progetto EU, tuttavia, riguarda la possibilità di implementare la nostra tecnica alla European Spallation Source per sezioni d'urto al di sotto del GeV (Progetto ESSnuSB+, coord. M. Dracos).

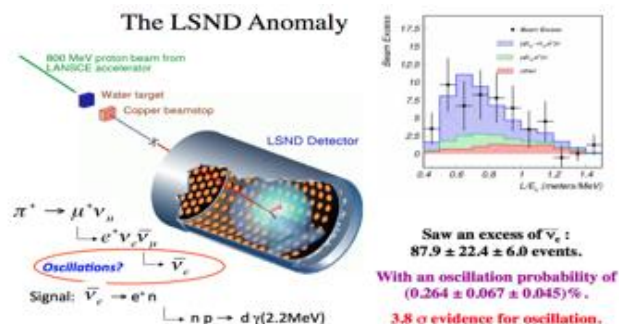
Anagrafica e richieste finanziarie



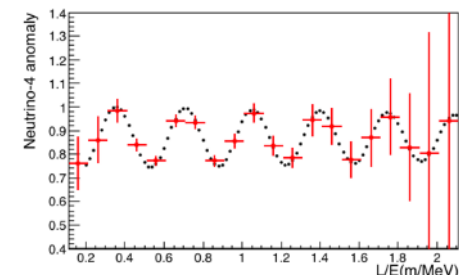
Item	Costo (k€)
rivelatori per hadron dump	15
missioni per testbeam	12
missioni per implementazione in fluka	8
consumabili per test CERN	3

Personale	FTE
Bomben Luca	80%
Bramati Filippo	70%
Branca Antonio	30%
Brizzolari Claudia	20%
Brunetti Giulia	30%
Guffanti Daniele	20%
Meazza Luca	40%
Prest Michela	20%
Saibene Giosuè	80%
Scanu Anna	100%
Terranova Francesco	50%
TOTALE	540%

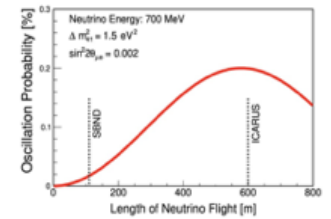
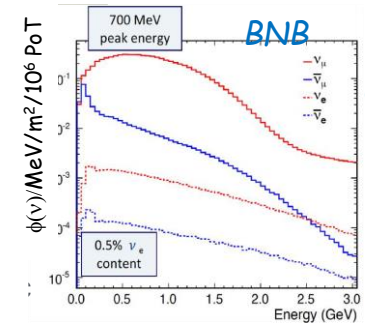
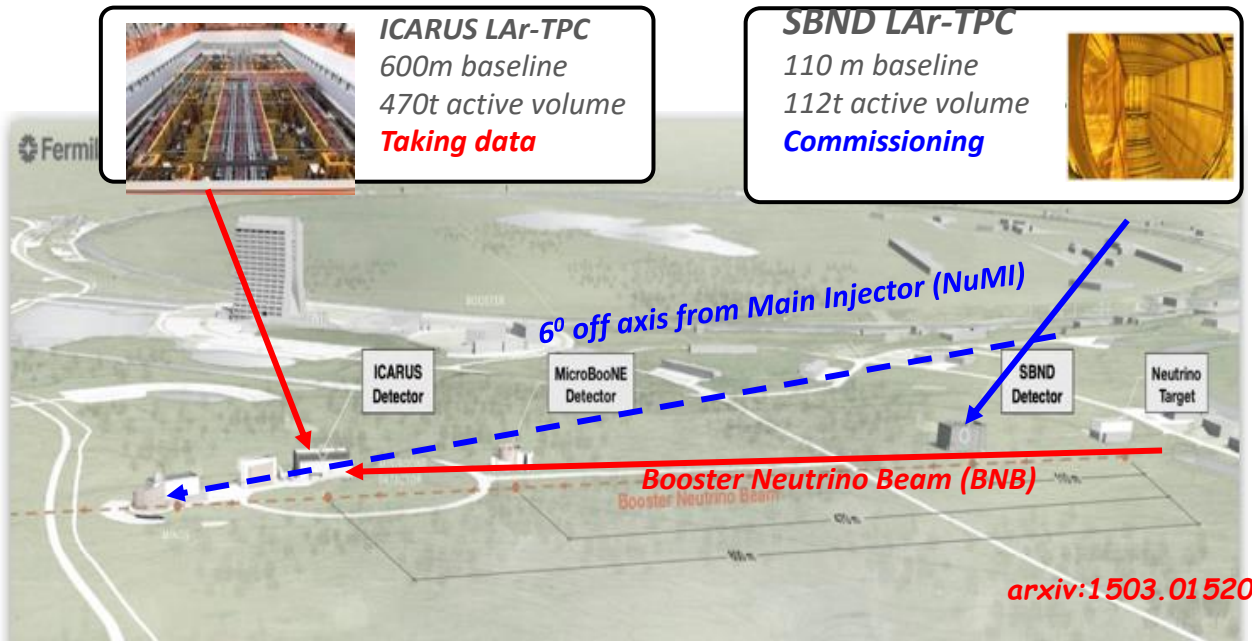
- ❑ The SBN program should clarify the question of sterile neutrinos exploiting the BNB beam and comparing the ν_e and ν_μ interactions observed at different distances from target by ICARUS and SBND Lar-TPCs
- ❑ ICARUS at FNAL presents remarkable similarities to NEUTRINO-4 which should allow to settle the NEUTRINO-4 sterile- ν claims in the initial ICARUS-only run
- ❑ Study of ν_e , ν_μ events from off-axis NUMI beam, to measure ν -Ar interaction cross sections
- ❑ Search for BSM scalar decays in $\mu^+\mu^-$ with NuMI
- ❑ Dark sector models investigations
- ❑ **Pubblicazioni:**
 - **Abratenko et al.**, ``Time calibration and Synchronization of the Scintillator Light detection System in ICARUS-T600'', sottomesso a JINST
 - **P. Abratenko et al.**, ``Angular dependent measurement of electron-ion recombination in argon for ionization calorimetry in the ICARUS liquid argon time projection chamber, sottomesso a JINST
 - **M. Bonesini et al.**, ``The upgraded laser calibration system of the ICARUS experiment at FNAL'', sottomesso a Nucl. Instrum. Meth. **A**
 - **G.L. Raselli et al.**, Time calibration and Synchronization of the Scintillator System in ICARUS-T600, JINST 19(2024) 01,C01027



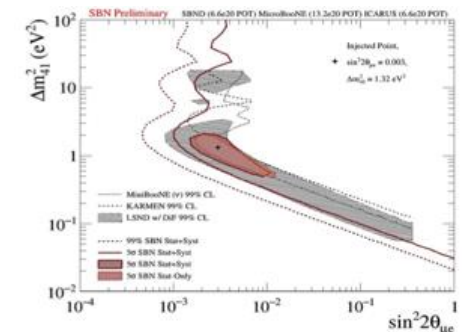
- Prediction for Neutrino-4 best fit (black) at BNB
- Expected measured ν_μ oscillation pattern with statistical errors (red)



**Short Baseline Neutrino (SBN) at FNAL BNB and NuMi beams:
*a definitive answer to sterile neutrinos***

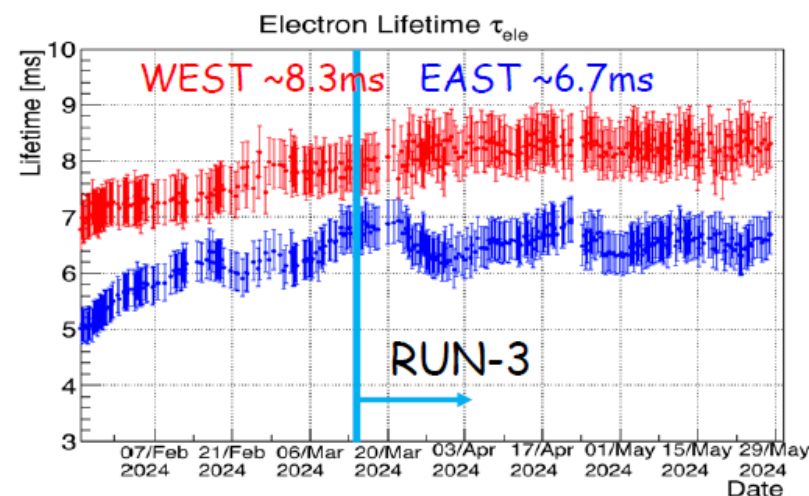


- ICARUS and SBND Liquid Argon TPCs (LAr-TPC) are installed at 600 and 110 m from the Booster target, searching for sterile- ν oscillations both in appearance and disappearance channels
- In addition: high-statistics ν -Ar cross-section measurements and event identification/reconstruction studies in view of DUNE
 - $\sim 10^6$ events/y in SBND < 1 GeV from Booster
 - $\sim 10^5$ events/y in ICARUS > 1 GeV from off-axis NuMI beam.



ICARUS FNAL operations:2022-2024

- June 2022: start of data taking for physics with TPCs, PMT light detection system and CRT fully operational;
- Events are triggered requiring at least 4 fired PMT pairs inside a 6 m longitudinal T600 slice in coincidence with BNB, NuMI beam spills, >90% efficiency for $E_{\text{dep}} > 200$ MeV;
- Data acquisition is largely successful, currently with >97% collection efficiency;
- The cryogenic and purification system performed smoothly keeping residual impurities in LAr at ~ 40 p.p.t. of $[O_2]$ equivalent:
 - The free electron drift lifetime $\tau_{\text{ELE}} \approx 7\text{-}8$ ms, results in an almost full track detection efficiency in the whole 1.5 m drift ($t \sim 1$ ms).



Collected Protons on target (PoT)	BNB (FHC) positive focusing	NuMI (FHC) positive focusing	NuMI (RHC) negative focusing
RUN-1 (Jun-Jul 22)	$0.41 \cdot 10^{20}$	$0.68 \cdot 10^{20}$	-
RUN-2 (Dec 22-Jul 23)	$2.05 \cdot 10^{20}$	$2.74 \cdot 10^{20}$	-
RUN-3* (Mar-Jun 23)	$0.95 \cdot 10^{20}$	-	$2.02 \cdot 10^{20}$
TOTAL (PoT)	$3.41 \cdot 10^{20}$	$3.42 \cdot 10^{20}$	$2.02 \cdot 10^{20}$

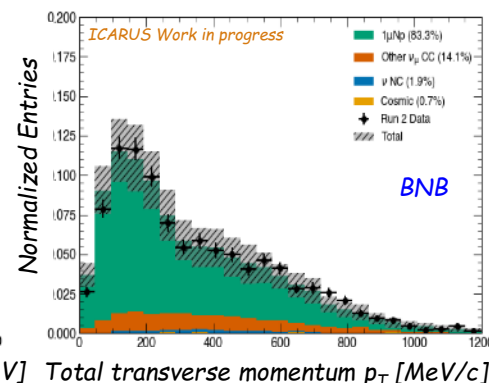
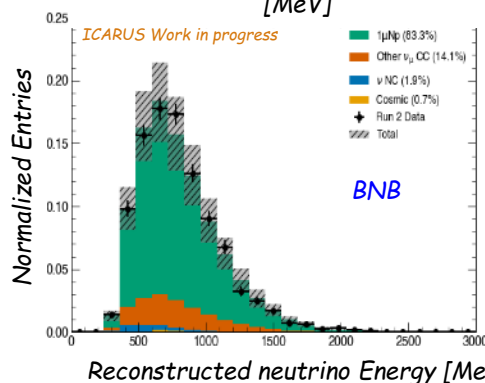
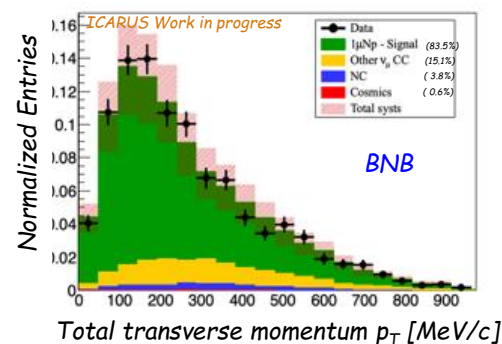
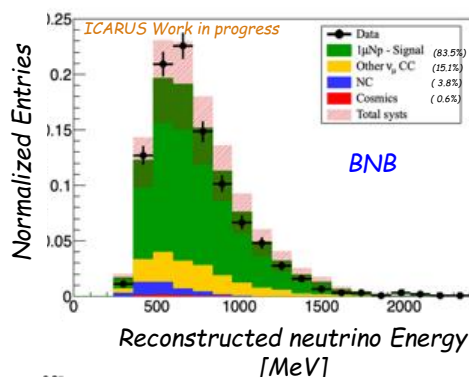
* Reduced exposure for RUN-3 due to the prolonged accelerator shutdown

1 μ Np analysis – event selection results

- Data- MC agree within systematics for all studied event kinematic variables; (10% of RUN-2 data analyzed, 20 time more data available) ;

- Pandora based analysis
(~50% efficiency for signal):
BNB beam $1.93 \cdot 10^{19}$ PoT
(~34 k events for $3.89 \cdot 10^{20}$ PoT)

- ML based analysis
(>50% efficiency for signal):
BNB beam $1.92 \cdot 10^{19}$ PoT
(~42 k events for $3.89 \cdot 10^{20}$ PoT)



- Ready for the next analysis steps: enlarge the control sample size to confirm the analysis robustness and then proceed to full dataset unblinding and oscillation fit.

Attività prevista per il 2025

- ☐ Upgrade del sistema laser: in particolare stabilità del laser
- ☐ Calibrazione per guadagno/timing dei PMTs
- ☐ Turni di controllo esperimento (6 shifters) e manutenzione sistema laser a FNAL
- ☐ Partecipazione agli sviluppi del sistema di rivelazione della luce di scintillazione basato su PMT
- ☐ Partecipazione analisi dati esperimento, simulazione beamline BNB

Anagrafica

	FTE 2025	
R. Benocci	.60	RL
M. Bonesini	.60	
A. Falcone	.20	
M. Giovannini	.40	
M. Tardocchi	.40	
M. Torti	.20	
+ C. Brizzolari/F.Terranova	% su DUNE (CRT)	
R. Bertoni (inclusive di FAMU)	.40	

Richieste

CAPITOLO		kEuro	Note
missioni		32 KE	
consumo e altroconsumo		2 KE	Consumables for laser system (FNAL/MIB)
manutenzione		2 KE	maintenance/calibration PicoScope 9311 +laser lab INFN MIB maintenance
Spese servizi		2 KE	contribution to mechanics workshop/spare mechanics items
trasporti		2 KE	ransport CERN/FNAL of items connected to laser calibration system
apparati		5 KE	Laser stability monitor (2 PMTS+ ancillary equipment)
Richieste servizi	mesi/uomo	Note (attività particolari, motivazione ...)	
Officina	2	Richiesta cumulativa con FAMU	