

La fisica del neutrino agli acceleratori nell'era di Nando Ferroni 😊

F. Terranova

Università di Milano-Bicocca & INFN Milano-Bicocca

Perché questo titolo?

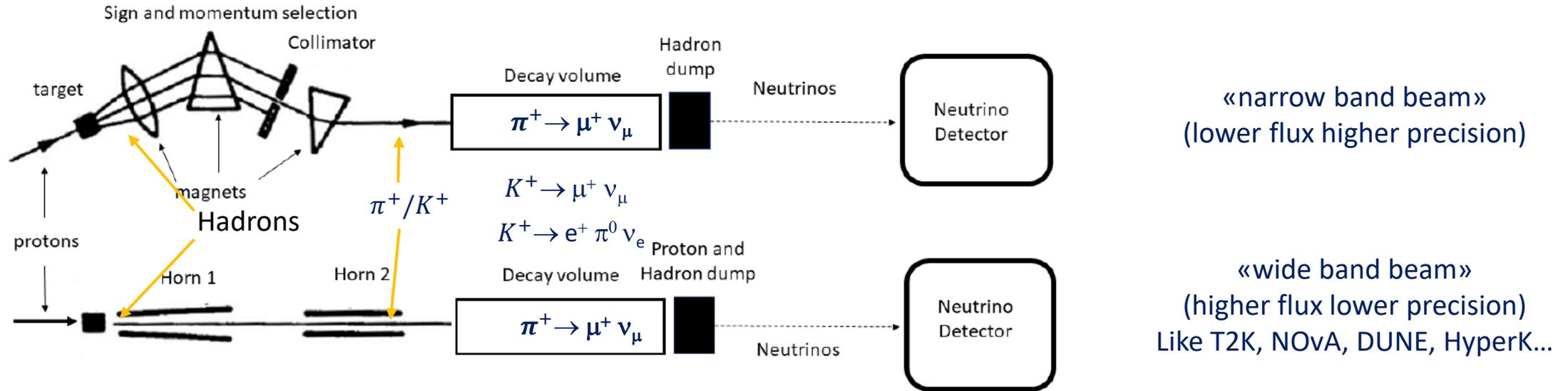
La fisica del neutrino agli acceleratori ha avuto un enorme espansione a partire dal 2012 (“scoperta di θ_{13} ”) ed è oggi il settore mainstream della fisica del neutrino. L’INFN si è trovata a prendere decisioni cruciali e difficili in pochissimo tempo:

- Come fare a mantenere una posizione di leadership a livello globale senza un laboratorio europeo di fisica del neutrino agli acceleratori?
- Cosa fare dei Laboratori del Gran Sasso e del CERN?
- Dove incanalare l’enorme expertise accumulata dai fisici italiani nel decennio precedente?

I “tre anni di fuoco” della fisica del neutrino (2011-13) coincidono con l’inizio della presidenza di Nando e lui stesso è stato un protagonista fondamentale di questo processo che ha portato (2014-2019) l’INFN ad avere un ruolo di grande visibilità nell’“epoca di DUNE e HyperKamiokande”



Neutrini da acceleratori di protoni



Vantaggi:

- Sorgenti artificiali e dunque “ben controllabili” (energia, flusso, flavor)
- Conosco bene l’energia e la distanza tra la sorgente e l’acceleratore (L) e dunque la fase di oscillazione dei flavor che dipende da L/E
- Sfruttano gli enormi progressi nella “intensity frontier” (high intensity proton drivers) per ottenere fasci di grande intensità (“Superbeams”)

Svantaggi:

- Sono prevalentemente sorgenti di ν_μ e, dunque, possono studiare “solo” oscillazioni $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ e $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$
- Sono “poco tunabili” perchè i neutrini sono prodotti nel range 100 MeV – 10 GeV e le distanze non superano il raggio della terra $O(1000 \text{ km})$. Bisogna essere fortunati con i parametri del Modello Standard (angoli di mixing e differenze di massa dei neutrino) affinché le oscillazioni siano osservabili

Ci dicevamo fortunati... ma il meglio doveva ancora arrivare 😊

Tra il 1998 e il 2005, le evidenze di oscillazioni di neutrino diventano davvero molto solide (SuperKamiokande, SNO, MACRO, K2K...) e appare chiaro che **esiste almeno un'oscillazione visibile sulla terra con sorgenti artificiali**. Quella tra la seconda e la terza famiglia di neutrino ("scala degli atmosferici"):

$$\frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E}$$

Year 2005



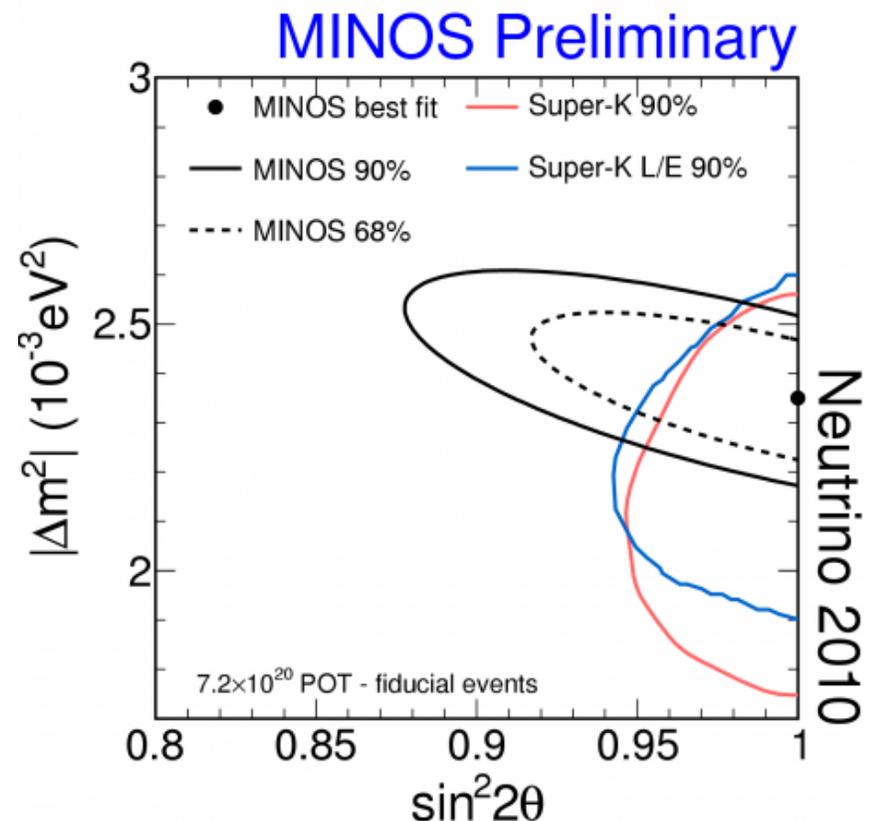
«oscillation phase» It is O(1) for
E= O(1 GeV) and L= O(100 km)

Cool, we can build experiment on Earth 😊

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau) \simeq \underbrace{\cos^4 \theta_{13}}_{\approx 1} \underbrace{\sin^2 2\theta_{23}}_{\approx 1} \sin^2 \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E}$$

$$P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) = \underbrace{\sin^2 2\theta_{13}}_{\approx 0.1} \sin^2 \theta_{23} \sin^2 \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E}$$

<0.1 (ma quanto piccolo??)



Se c'è un modo di ottenere un'evidenza incontrovertibile delle oscillazioni di neutrino, è di osservare la comparsa di neutrini tau da un fascio di neutrini muonici prodotti artificialmente

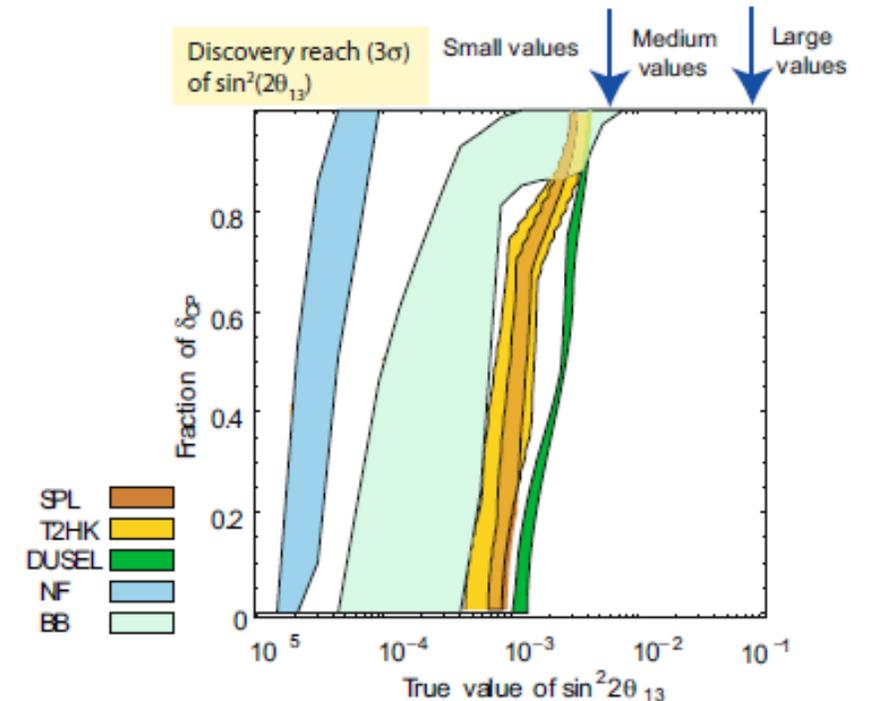
Il “senso comune” a pochi mesi dall’arrivo di Nando...

La fisica del neutrino agli acceleratori possiede le potenzialità per:

- Dimostrare in modo incontrovertibile le oscillazioni di neutrino attraverso l’osservazione dell’apparance dei tau (OPERA, ICARUS)
- Cercare l’apparance dei neutrini elettronici “alla cieca” perché l’entità dell’oscillazione dipende da un parametro **ignoto e piccolo** ($\theta_{13} < 12^\circ$)
- Che bello se θ_{13} non fosse troppo piccolo... potremmo osservare effetti interferenziali a tre famiglie proprio come con la CKM (violazione di CP nel settore leptonic, fisica di precisione)

Sì, cazzo (*), ma dove troviamo gente a disposta a finanziare progetti costosissimi come le “neutrino factories” o i “beta beams” senza sapere se vedranno qualcosa?

(*) Nando Ferroni a Roberto Battiston, circa 2010



L'estate del 2011

PRL 101, 141801 (2008)

PHYSICAL REVIEW LETTERS

week ending
3 OCTOBER 2008

Hints of $\theta_{13} > 0$ from Global Neutrino Data Analysis

G.L. Fogli,^{1,2} E. Lisi,² A. Marrone,^{1,2} A. Palazzo,³ and A. M. Rotunno^{1,2}

PRL 107, 041801 (2011)

Selected for a Viewpoint in *Physics*
PHYSICAL REVIEW LETTERS

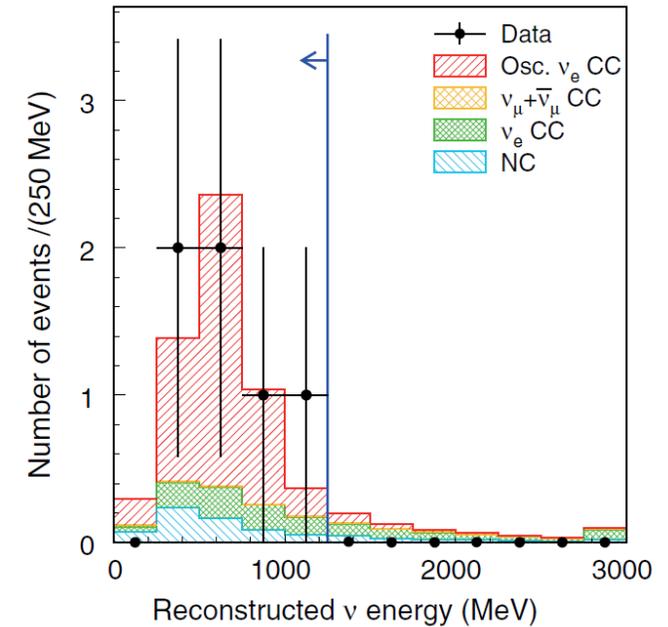
week ending
22 JULY 2011

Indication of Electron Neutrino Appearance from an Accelerator-Produced Off-Axis Muon Neutrino Beam

The T2K experiment observes indications of $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ appearance in data accumulated with 1.43×10^{20} protons on target. Six events pass all selection criteria at the far detector. In a three-flavor neutrino oscillation scenario with $|\Delta m_{23}^2| = 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$, $\sin^2 2\theta_{23} = 1$ and $\sin^2 2\theta_{13} = 0$, the expected number of such events is $1.5 \pm 0.3(\text{syst})$. Under this hypothesis, the probability to observe six or more candidate events is 7×10^{-3} , equivalent to 2.5σ significance. At 90% C.L., the data are consistent with $0.03(0.04) < \sin^2 2\theta_{13} < 0.28(0.34)$ for $\delta_{CP} = 0$ and a normal (inverted) hierarchy.

Questo risultato si sarebbe potuto consolidare nell'estate 2011 se T2K avesse potuto prender dati...

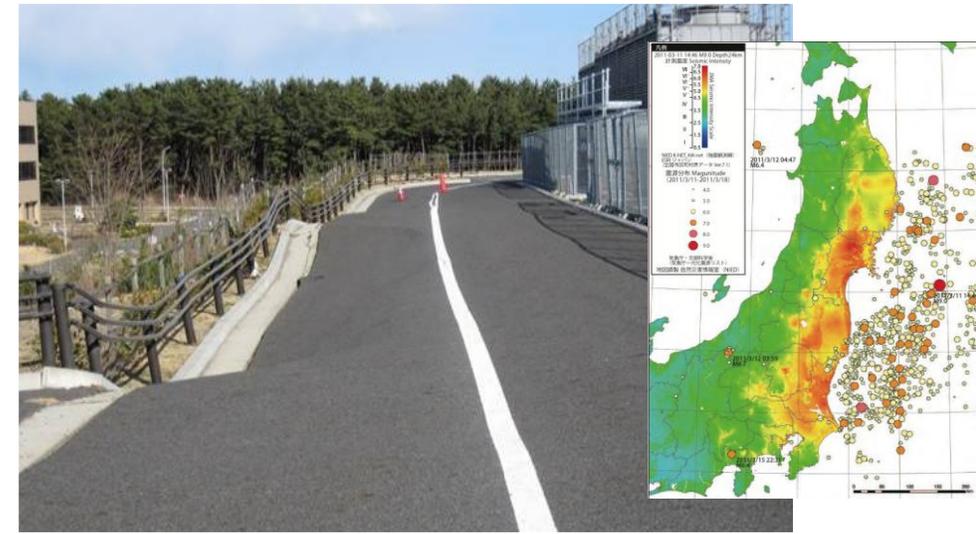
... mentre gli esperimenti ai reattori – competitors di T2K – stavano finendo il commissioning.



Beam was provided to all users from April 2009.
 Users run of JFY2010 was stopped as scheduled at 7:00 on March 11, 2011.
 Just linac group continued the beam study in the daytime.....

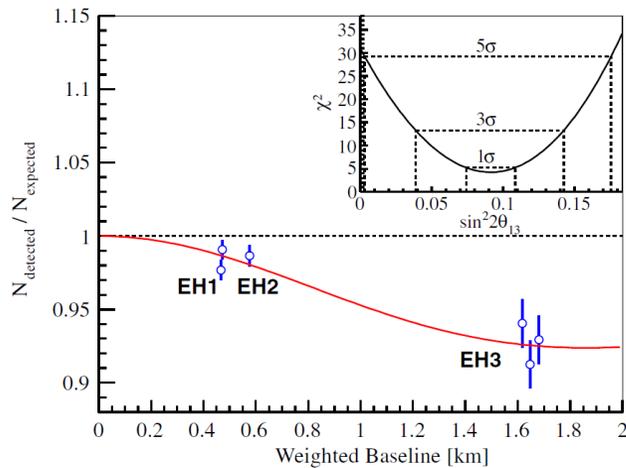
Disaster we had in March 2011

1. The biggest earthquake (Mar., 11, 14:46)
2. Tsunami near J-PARC (Mar., 11, 16:52)
3. First hydrogen explosion of the nuclear power plant in Fukushima (Mar., 12, 15:36)



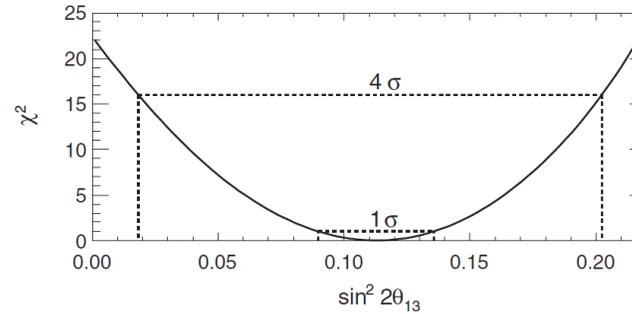
Observation of Electron-Antineutrino Disappearance at Daya Bay

8 Marzo 2012



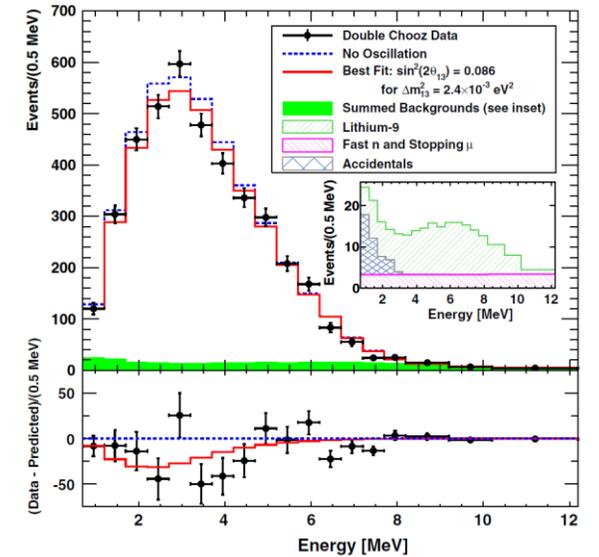
Observation of Reactor Electron Antineutrinos Disappearance in the RENO Experiment

3 Aprile 2012



Indication of Reactor $\bar{\nu}_e$ Disappearance in the Double Chooz Experiment

28 Marzo 2012



Un altro genere di terremoto

PHYSICAL REVIEW D **76**, 072005 (2007)

Measurement of neutrino velocity with the MINOS detectors and NuMI neutrino beam

The velocity of a ~ 3 GeV neutrino beam is measured by comparing detection times at the near and far detectors of the MINOS experiment, separated by 734 km. A total of 473 far detector neutrino events was used to measure $(v - c)/c = 5.1 \pm 2.9 \times 10^{-5}$ (at 68% C.L.). By correlating the measured energies of 258 charged-current neutrino events to their arrival times at the far detector, a limit is imposed on the neutrino mass of $m_\nu < 50 \text{ MeV}/c^2$ (99% C.L.).

Fin dal 2010, OPERA osservava una chiara discrepanza sulla velocità del neutrino, simile a quella di MINOS ma con una significanza molto maggiore. Che fare?

I testi interni del gruppo che aveva effettuato l'analisi non avevano rivelato sistematiche aggiuntive e MINOS stava aggiornando il sistema di temporizzazione per migliorare la precisione mentre quello di OPERA era significativamente più performante di quello americano.

La collaborazione non trovò un consenso unanime e subito dopo l'estate la maggioranza dei membri di OPERA decisero di presentare il risultato a un seminario CERN che ebbe (comprensibilmente...) un'enorme eco mediatica.

Come è noto, quella scelta si rivelò sciagurata





Workers help build the neutrino-beam facility used at CERN to shoot particles to Italy in a 2005 picture. PHOTOGRAPH COURTESY MAXIMILIEN BRICE, CERN

Particles Moved Faster Than Speed of Light?

"Crazy" neutrino find has many physicists skeptical, still backing Einstein.

Hawking on the future of mankind



To mark his 70th birthday, physicist Professor Stephen Hawking answered a selection of questions from listeners to Radio 4's Today Programme.

FASTER THAN LIGHT?

2. What will be the impact on Einstein's theory of relativity if the neutrino is confirmed to be able to travel faster than the speed of light? - David Pointon, Maidstone

Einstein's theory of relativity predicts that nothing can travel faster than light.

Thus if the Opera experiment is correct and neutrinos do travel faster than light, then relativity theory is wrong.

However, I don't believe the Opera results, because they disagree with the detection of neutrinos from supernova SN1987A.

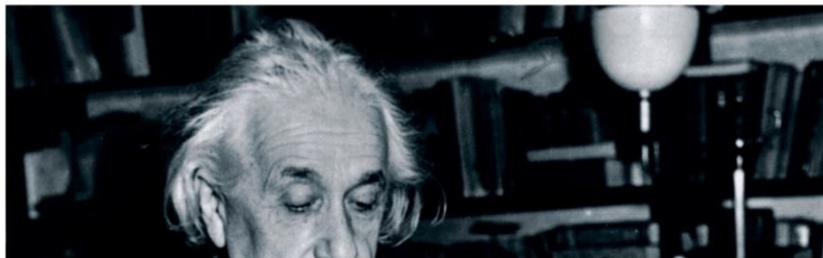
WHAT IS OPERA EXPERIMENT?

- Oscillation Project with Emulsion-Racking Apparatus
- Collaboration between Cern in Switzerland and Italy's Laboratori Nazionali del Gran Sasso (LNGS)
- Measures neutrino time-of-flight between Cern and LNGS

Health Health Care Medical Mysteries Science Well+Being

Health & Science

Faster-than-light neutrino poses the ultimate cosmic brain teaser for physicists



The Washington Post
Democracy Dies in Darkness

Particles Faster Than the Speed of Light? Not So Fast, Some Say

Give this article



Elwood H. Smith

News | Science and Technology

Scientists claim to break speed of light

Finding by CERN team, if confirmed, could overturn Einstein's theory of relativity and fundamental rules of physics.



22 Sep 2011

OH, RAGASSSI!



NON SIAM MICA QUI A COSTRUIRE TUNNEL AI NEUTRINI!



A bocce ferme

Il fatto che θ_{13} sia davvero molto grande (circa uguale al limite di esclusione pubblicato da Chooz negli anni '90) è stato un incredibile colpo di fortuna! Tuttavia, l'INFN non era nella situazione migliore per sfruttarlo:

- Gli esperimenti che usavano il fascio dal CERN al Gran Sasso non erano al picco di oscillazione ma erano stati progettati per vedere i neutrini tau. Non si prestano a fare misure di violazione di CP malgrado la size di θ_{13}
- I neutrini non vanno più veloce della luce. La sistematica che generava l'effetto (malfunzionamento di una scheda di timing) fu compresa tre mesi dopo da OPERA e le nuove misure di Borexino, ICARUS, OPERA risultarono in perfetto accordo con la relatività ristretta
- L'esperimento OPERA aveva la massa e la sensibilità per osservare i neutrini tau con significanza ben maggiore di quella ottenuta fino ad allora (1 candidato tau, 2 sigma) ma la collaborazione era divisa e frustrata da quanto successo nel 2011
- L'esperimento ICARUS aveva la sensibilità ma non la massa per osservare i neutrini tau con alta significanza statistica

E' stato in questo difficile contesto che Nando si è fatto protagonista di un generale ripensamento della strategia INFN per capitalizzare gli investimenti fatti e gettare le basi di un programme a lungo termine nella fisica dei neutrini agli acceleratori

OPERA

Malgrado le difficoltà sperimentate durante la “crisi” del 2011, il potenziale di fisica di OPERA era intatto in quanto:

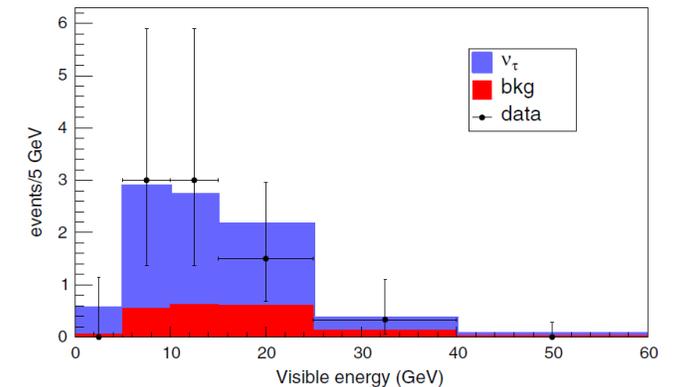
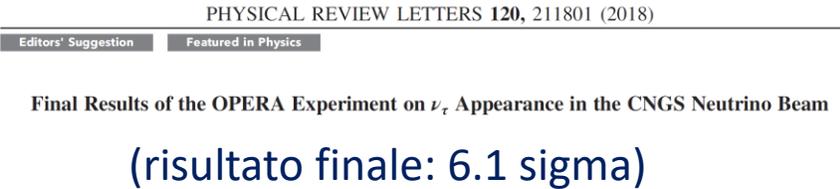
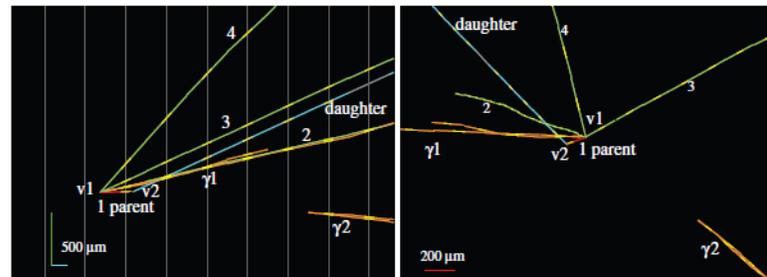
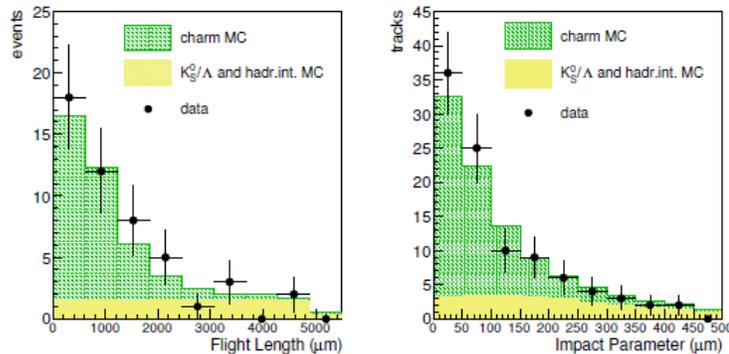
- Nessun esperimento al mondo era in grado (nè tuttora è in grado) di studiare le oscillazioni $\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$ osservando in modo diretto la produzione dei leptoni tau. Il caso di fisica di OPERA rimaneva sostanzialmente intatto
- OPERA aveva già dimostrato di poter osservare neutrini tau con un buon controllo delle sistematiche grazie anche al campione di controllo degli eventi con charm
- Si trattava di potenziare le capacità di scan delle emulsioni, accumulare statistica e diversificare i canali di decadimento del tau accessibili. **L'INFN ha sostenuto con determinazione questo sforzo e i risultati non si sono fatti attendere**

Agosto 2013 - JHEP11 (2013) 036

(2 candidati tau, 2.4 sigma, control sample)

Luglio 2014 – PTEP 2014, 101C01

(4 candidati tau, 4.2 sigma)



Un incredibile colpo di fortuna 😊

$$\begin{aligned}
 P_{\nu_e \rightarrow \nu_\mu} \simeq & \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 \theta_{23} \frac{\sin^2[(1 - \hat{A})\Delta]}{(1 - \hat{A})^2} & \Delta \equiv \Delta m_{31}^2 L / (4E) & \xrightarrow{\text{Year 2005}} & \text{«oscillation phase» It is O(1) for} \\
 & + \alpha \sin 2\theta_{13} \xi \sin \delta \sin(\Delta) \frac{\sin(\hat{A}\Delta)}{\hat{A}} \frac{\sin[(1 - \hat{A})\Delta]}{(1 - \hat{A})} & & & E = O(1 \text{ GeV}) \text{ and } L = O(100 \text{ km}) \\
 & + \alpha \sin 2\theta_{13} \xi \cos \delta \cos(\Delta) \frac{\sin(\hat{A}\Delta)}{\hat{A}} \frac{\sin[(1 - \hat{A})\Delta]}{(1 - \hat{A})} & \alpha \equiv \Delta m_{21}^2 / |\Delta m_{31}^2| & \xrightarrow{\text{Year 2003}} & \text{Cool, we can build experiment on Earth 😊} \\
 & + \alpha^2 \cos^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{12} \frac{\sin^2(\hat{A}\Delta)}{\hat{A}^2} & & & \text{Must be } < 1. \text{ The larger the better.} \\
 & & \xi \equiv \frac{\cos \theta_{13} \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{23}}{\sin^2 2\theta_{13}} & \xrightarrow{\text{Year 2012}} & \text{We know now that is } 0.028 \\
 & & & & \text{The larger the better! It is O(1) in} \\
 & & & & \text{neutrinos! (it is tiny in quarks..)}
 \end{aligned}$$

Nel settore di Yukawa leptonic del modello standard:

- Tutti gli angoli di mixing sono grandi. Il più piccolo (θ_{13}) è circa grande quanto l'angolo di Cabibbo!!
- Il valore assoluto degli autostati di massa non è attualmente noto ma sappiamo che è piccolo mentre le differenze di massa sono abbastanza grandi da permettere oscillazioni di neutrini “da acceleratori” (1 GeV) per distanze di alcune centinaia di chilometri

In linea di principio, un esperimento di neutrino agli acceleratori “sufficientemente potente” sarebbe in grado di ricostruire tutto il settore di Yukawa del Modello Standard per i leptoni

Come trarre profitto da questo colpo di fortuna?

Gli esperimenti attuali (T2K e NOvA) sono stati progettati prima della scoperta di θ_{13} ma, ovviamente, ne hanno tratto grande profitto. Se la stanno cavando “discretamente”:

- Conosciamo gli angoli di mixing con precisioni tipiche del 10% (v. dopo)
- Non sappiamo se il mixing tra il secondo e il terzo autostato è massimale (“**octant ambiguity**”)
 - Non è una questione accademica perchè mixing massimali sono indicatori di simmetrie a scale energetiche più alte
- Non sappiamo se CP è violata nel settore leptonic nè qual’è l’entità di questa violazione (**fase di CP**)
 - Come per i quark, è un parametro chiave del Modello Standard per il quale non abbiamo predizioni teoriche credibili
 - E’ una questione di grande importanza perché al momento l’unica sorgente nota di CPV è quella della CKM e sappiamo che sorgenti alternative sono necessarie, per esempio, per spiegare la simmetria materia-antimateria
- Non sappiamo se l’autostato che si mixa maggiormente con il neutrino elettronico sia quello più pesante (“Inverted Ordering”) o quello più leggero (“Normal Ordering”) [**Gerarchia di Massa**]
 - E’ decisamente una cosa importante non solo per i modelli che tentano di spiegare l’origine del flavor: “Inverted Ordering” sarebbe una straordinaria opportunità per chi cerca di misurare il doppio decadimento beta senza neutrini o le masse assolute dei neutrino col decadimento beta
 - E’ di grande rilevanza in cosmologia perchè i neutrino elettronici interagiscono con gli elettroni via Corrente Cariche mentre non ci sono grandi quantità di muoni o tau nell’universo attuale e primordiale.

INFN What Next (2014-2016)

Questa iniziativa, fortemente voluta da Nando, ha gettato le basi della moderna strategia INFN in questo settore. In particolare, ha dato visibilità a un gran numero di nuove proposte e ha fatto emergere – a livello italiano – le opportunità che offriva la scoperta di θ_{13} oltre alle contingenze del momento:

- Gli esperimenti progettati prima della scoperta di θ_{13} usano la tecnica giusta per determinare l'intero settore di Yukawa del Modello standard (fasci convenzionali di neutrino). Mancano tuttavia di massa (circa un fattore 10) e precisione
- La tecnica sperimentale di OPERA non è scalabile a queste masse ma la tecnica di ICARUS sì (TPC ad Argon Liquido).
- Malgrado molti studi fatti in quegli anni (M. Mezzetto, C. Rubbia, FT, F. Vissani etc.) è parso infine chiaro che il gran sasso non era il laboratorio ideale per la fisica di precisione delle oscillazioni di neutrino:
 - i LNGS sono diventati il laboratorio di riferimento per la fisica degli eventi rari (v. talk di Ezio Previtali)
 - il CERN è diventato il laboratorio di riferimento per lo sviluppo di nuovi rivelatori di neutrino scalabili a masse O(100 kton)
 - il Fermilab ha ridefinito il proprio programma di ricerca mettendo al centro la fisica delle oscillazioni di neutrino



La nascita della CERN Neutrino Platform

Progettare e realizzare rivelatori da decine di migliaia di tonnellate ha richiesto una serie di scoperte fondamentali nella fisica dei rivelatori underground. Molte di queste scoperte sono avvenute al CERN grazie a un'iniziativa coordinate a livello globale che ha avuto al CERN il suo hub ed è stata possibile grazie ai contributi di S. Bertolucci, F. Ferroni, M. Nesi e C. Rubbia

- L'upgrade del rivelatore ICARUS per lo studio dei neutrini sterili al Fermilab (NP01/ICARUS@FNAL)
- La realizzazione di grandi TPC ad argon liquido con criostati commerciali ("membrane cryostat" – NP02-04/ProtoDUNE-SP e DP)
- La dimostrazione su grandi masse della scalabilità delle TPC ad Argon Liquido (NP04/ProtoDUNE-SP)
- L'invenzione del superFDG per il Near Detector di T2K/HyperK (NP07)
- La dimostrazione della fattibilità dei "monitored neutrino beams" (NP06/ENUBET)

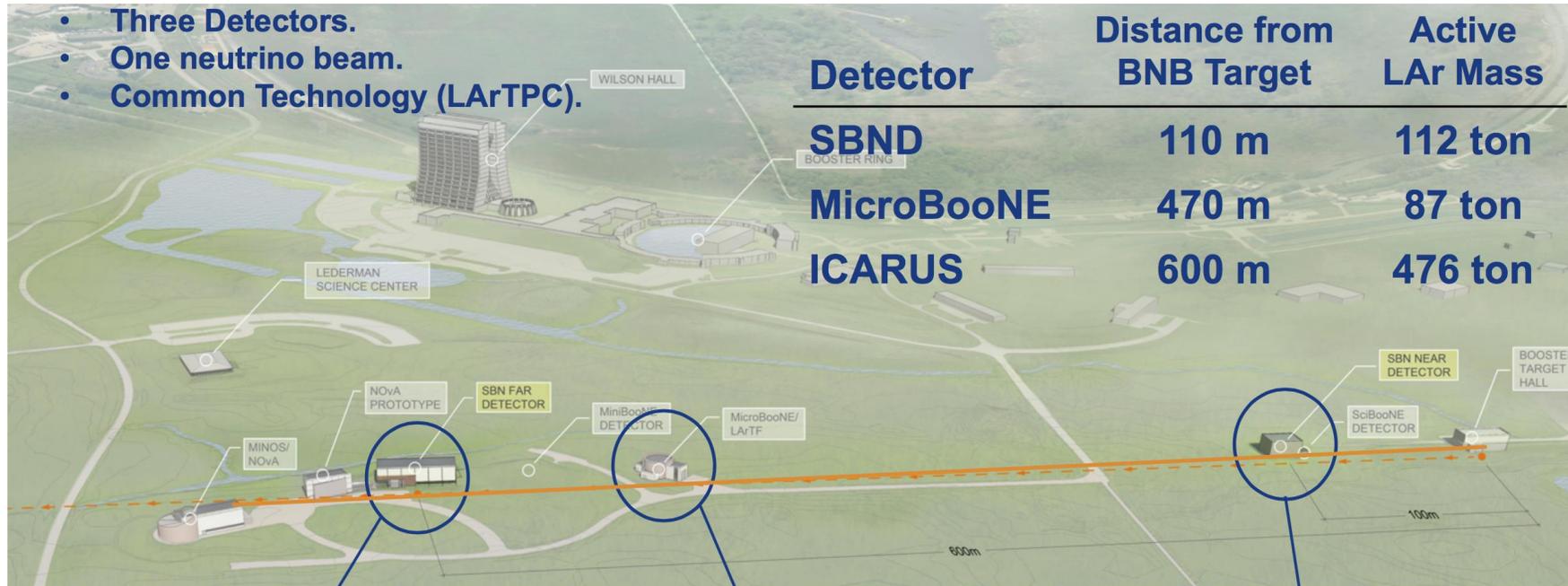
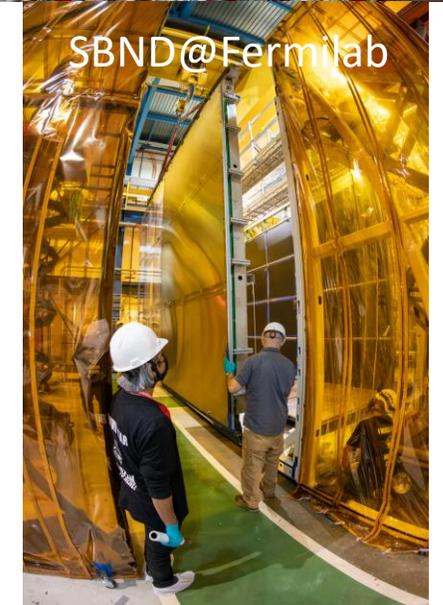


ICARUS al Fermilab

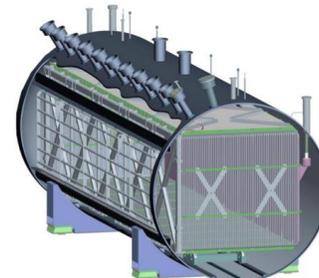
La size di ICARUS non permette un utilizzo diretto del rivelatore per la fisica delle oscillazioni «standard» ma è risultato ideale per lo studio dei neutrini sterili

- Three Detectors.
- One neutrino beam.
- Common Technology (LArTPC).

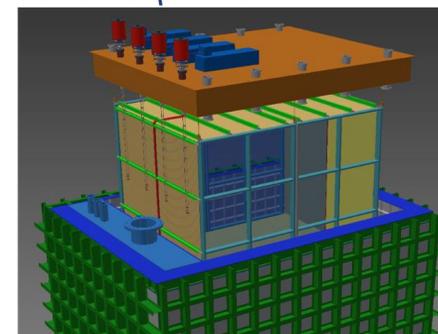
Detector	Distance from BNB Target	Active LAr Mass
SBND	110 m	112 ton
MicroBooNE	470 m	87 ton
ICARUS	600 m	476 ton



ICARUS



MicroBooNE

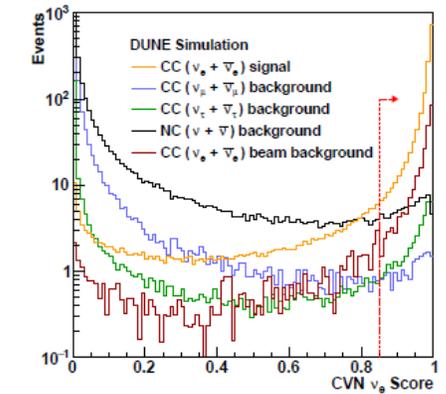


SBND

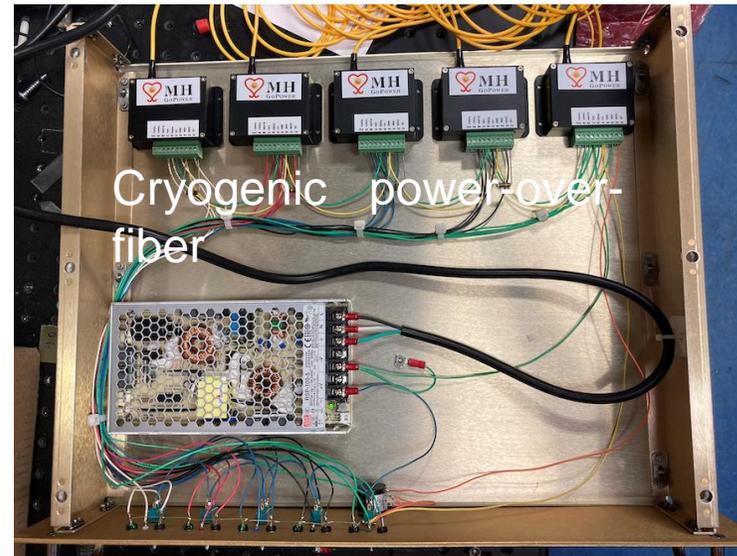
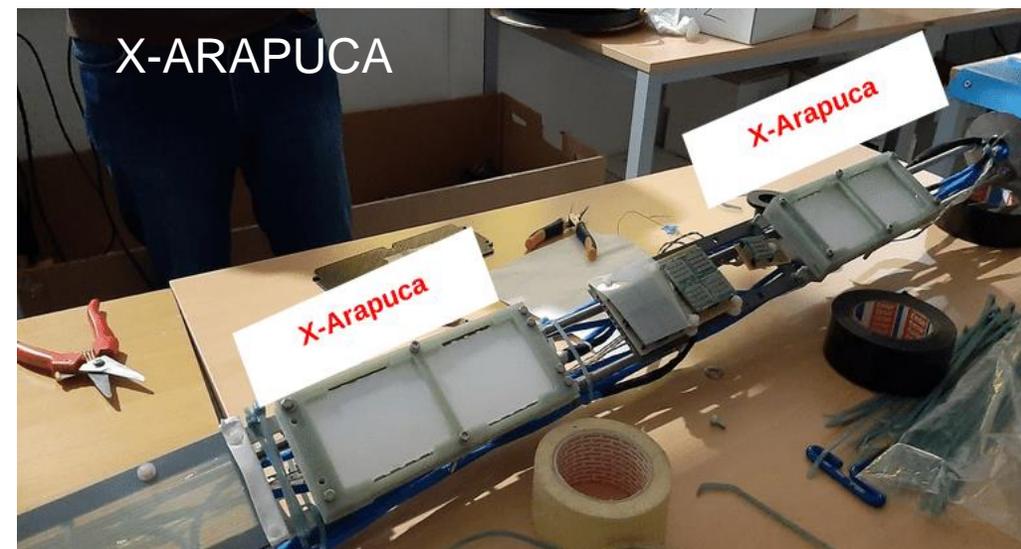
La tecnologia di DUNE e ProtoDUNE-SP



Tra il 2016 e il 2021 al CERN si sono dimostrate **cinque nuove tecniche** cruciali per costruire le TPC di DUNE (17,000 tonnellate di argon liquido)



Automatic reconstruction of neutrino interactions

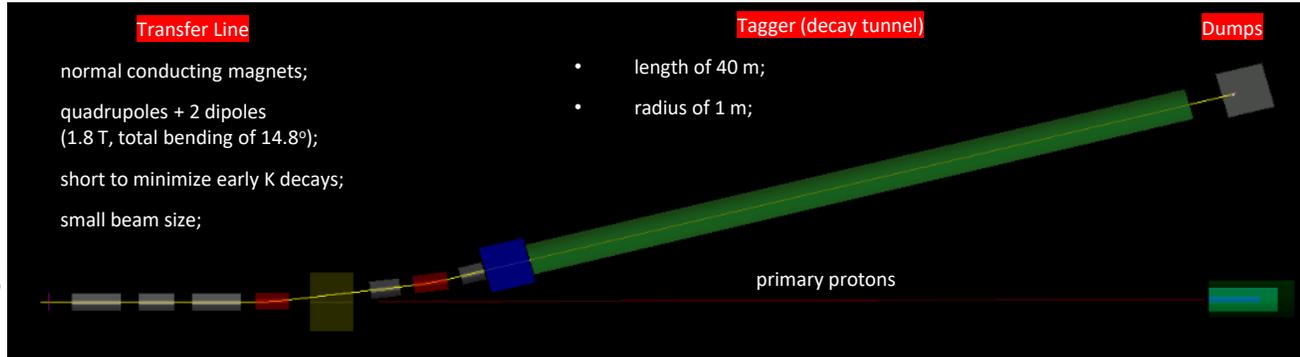
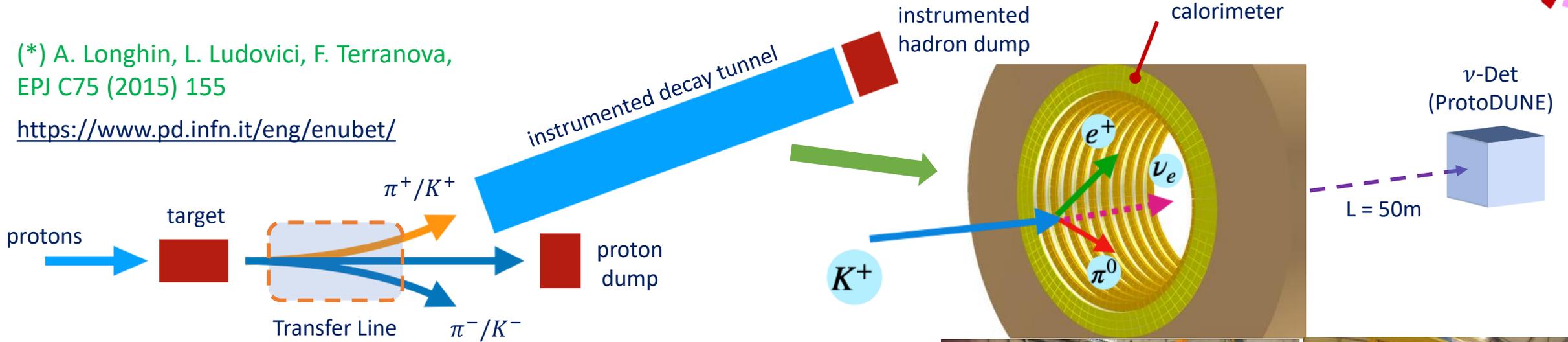


NP06/ENUBET: il primo “monitored neutrino beam” (*)



(*) A. Longhin, L. Ludovici, F. Terranova, EPJ C75 (2015) 155

<https://www.pd.infn.it/eng/enubet/>

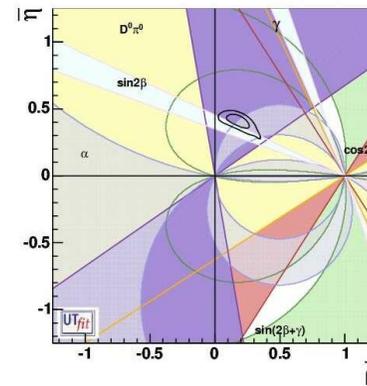


Il successo di questo R&D (2016-2024) offre, per la prima volta, la possibilità di avere **un fascio di neutrini al CERN** che utilizzi i ProtoDUNE per misure di precision (1%) delle sezioni d'urto nella regione di interesse per DUNE e HyperKamiokande.

Ne rimarrà soltanto uno? La lezione di BaBar...

Il costo e la complessità dei progetti su cui lavorava la Neutrino Platform lasciava supporre che alla fine un solo progetto sarebbe stato finanziato a livello globale. DUNE o HyperKamiokande? Fortunatamente, non siamo stati costretti a compiere questa scelta. E, con un po' di memoria storica, ce lo saremmo dovuti aspettare. Non ho mai chiesto a Nando se anche lui facesse parte del club del "ne rimarrà soltanto uno" (lo faccio ora 😊) ma secondo me anche lui non si aspettava che si sarebbe **ripetuta alla lettera la vicenda Belle vs Babar**:

- un caso di fisica fortissimo: violazione di CP nel settore leptonic e misura della fase di CP
- diversi laboratori interessati alla realizzazione di questi progetti
- infrastrutture ed expertise preesistenti



DUNE e HyperKamiokande

La scoperta di θ_{13} e le limitazioni intrinseche di T2K e NoVA hanno portato all'approvazione nel 2018-20 di due progetti di scala mondiale che possono sfruttare appieno le opportunità dei fasci di neutrino.

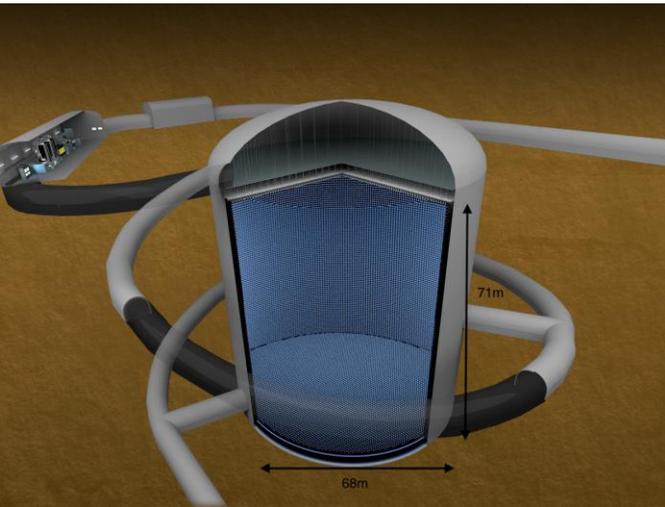
- “Exposure” (massa x n. di protoni integrati ovvero la “luminosità integrate” dei fasci di neutrino) enorme rispetto al passato
 - HyperKamiokande 500 kton water cherenkov detector, 1.2 MW beam
 - DUNE 40 kton liquid argon detector 1.2 → 2.4 MW beam
- Strumenti molto più potenti per il controllo delle sistematiche nella comparazione tra il Near e il Far detector:
 - Hybrid Near Detectors (water Cherenkov + MD280 for HyperK, liquid argon + SAND + gas argon for DUNE)
 - Movable near detectors: PRISM technique
- Risoluzione spaziale e energetica per la ricostruzione di precisione delle interazioni di neutrino

Complementarietà tra DUNE e HyperKamiokande:

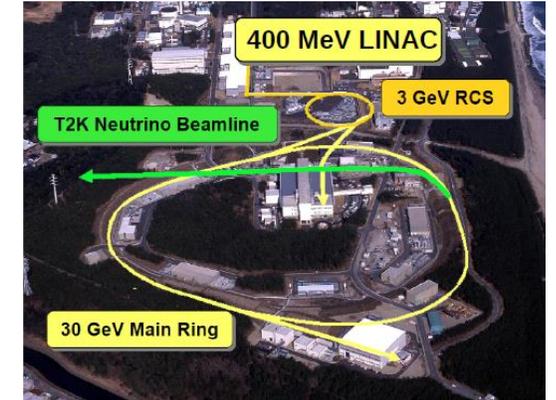
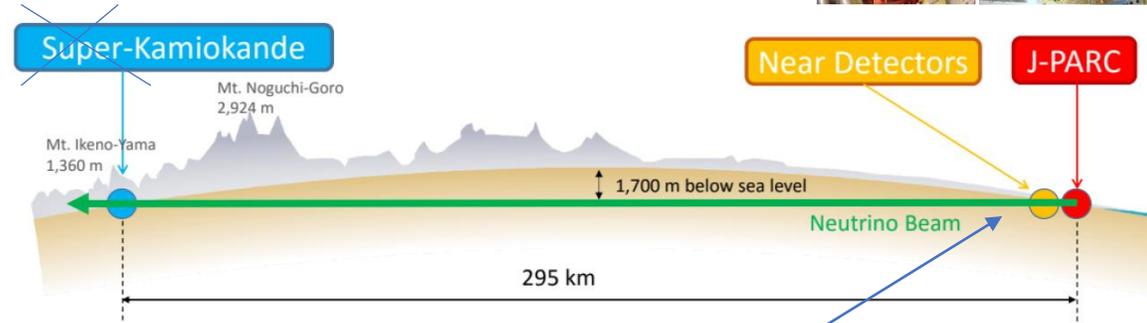
- L=200 km (HyperK) versus L=1300 km (DUNE)
- Massa versus particle identification capability (water cherenkov versus liquid argon TPC)
- Fascio narrow-band (sensitività massima alla CP violation - HyperK) versus fascio wide-band (riduzione delle sistematiche e massima sensitività alla gerarchia di massa- DUNE)

Entrambi i progetti hanno le dimensioni, la complessità e il costo di un esperimento LHC e – per la prima volta nella storia della fisica del neutrino – abbiamo creato delle Collaborazioni di dimensioni analoghe a quelle di LHC che runneranno questi esperimenti per almeno 20 anni con un programma di fisica molto ampio

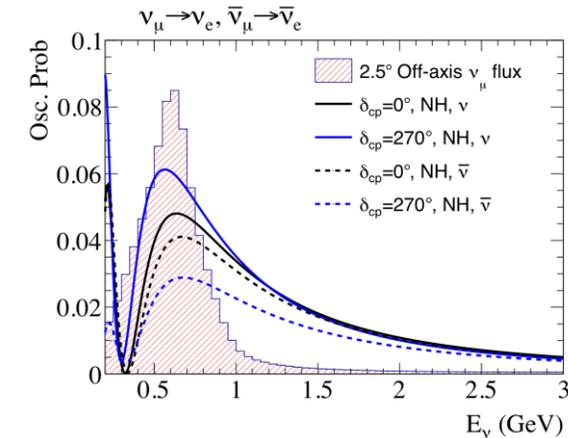
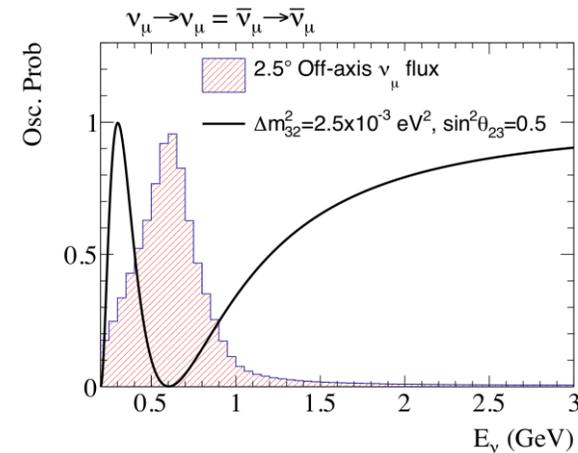
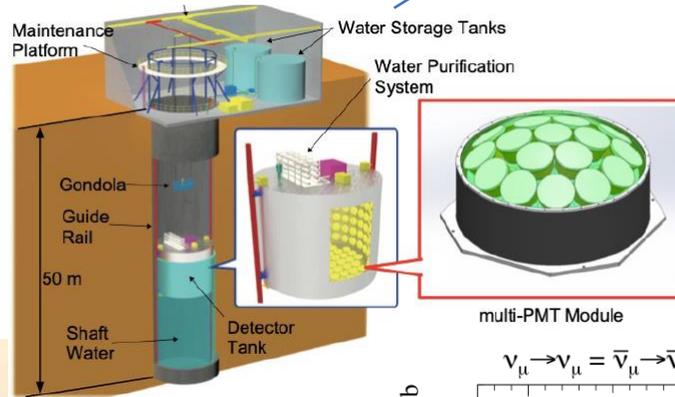
HyperKamiokande



Hyper!!



Intermediate detector



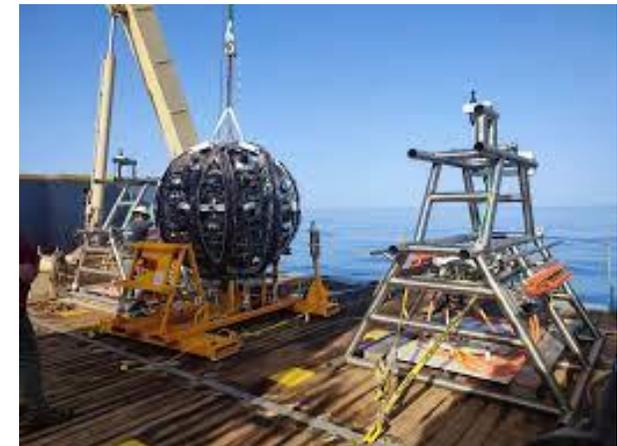
L'INFN in T2K e HyperKamiokande

L'INFN è da sempre (2005!) presente in T2K, seppur con una partecipazione ridotta, e in passato ci si è concentrate soprattutto sul Near Detector. HyperK, tuttavia, offre opportunità nuove all'INFN che stiamo attivamente perseguendo:

Filone classico:

- Upgrade del Near Detector (ND280) attraverso la realizzazione di TPC a grande accettazione angolare
- Contributi all'analisi del Near Detector
- Sistematiche relative alle oscillazioni
- Calibrazione e contribute al run on-site (T2K Far Detector, ovvero, SuperKamiokande)

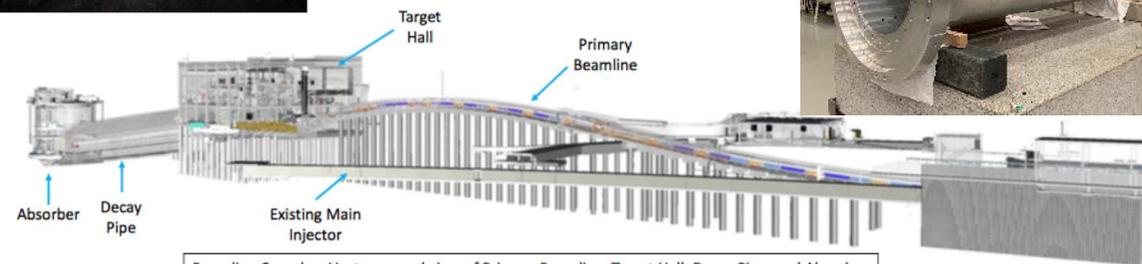
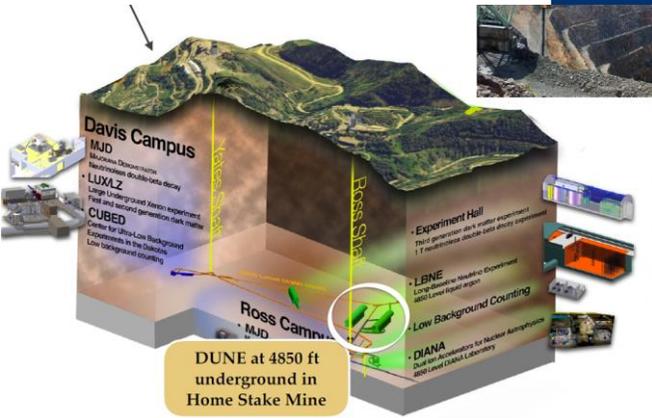
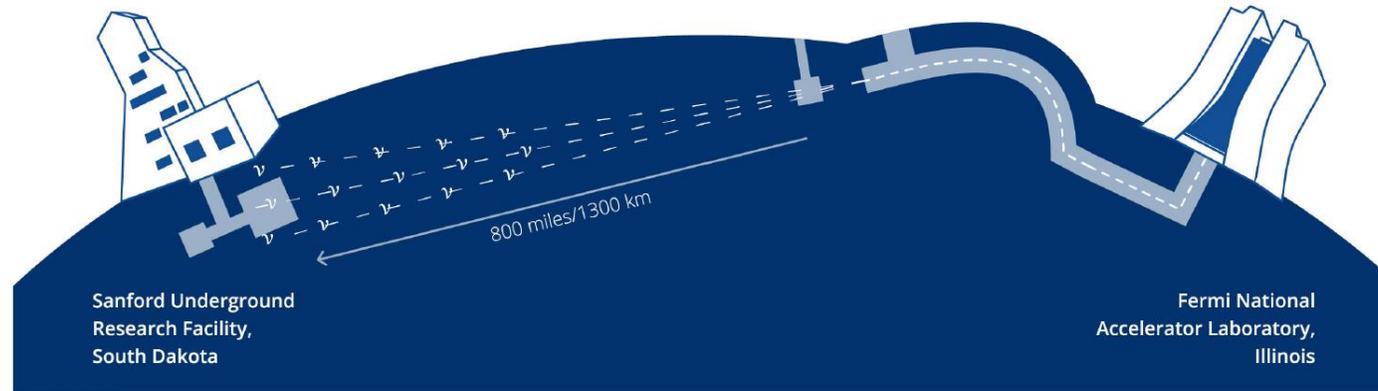
HyperKamiokande: utilizzerà i PMT da 20' con elettronica di front-end progettata e realizzata dall'INFN (project leader), Giappone e Francia (onboard calibration). **Inoltre, utilizzerà' dei multiPMT analoghi a quelli usati dall'INFN per KM3Net: flagship contribution dell'INFN (project leader)**



La “Long Baseline Neutrino Facility” e SURF

A differenza di HyperK, 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.

L'INFN è fortemente coinvolta sia per gli stretti legami col Fermilab sia perché la tecnologia del Far Detector è basata su una tecnologia INFN: le TPC ad Argon Liquido proposta da C. Rubbia e sviluppata da ICARUS.



Beamline Complex: Upstream end view of Primary Beamline, Target Hall, Decay Pipe, and Absorber

L'INFN in DUNE

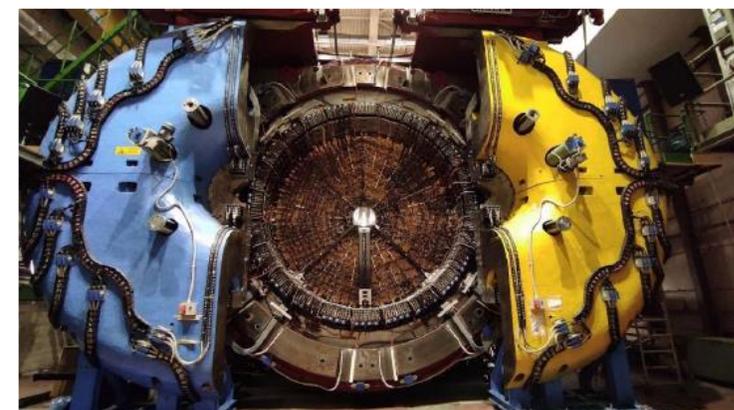
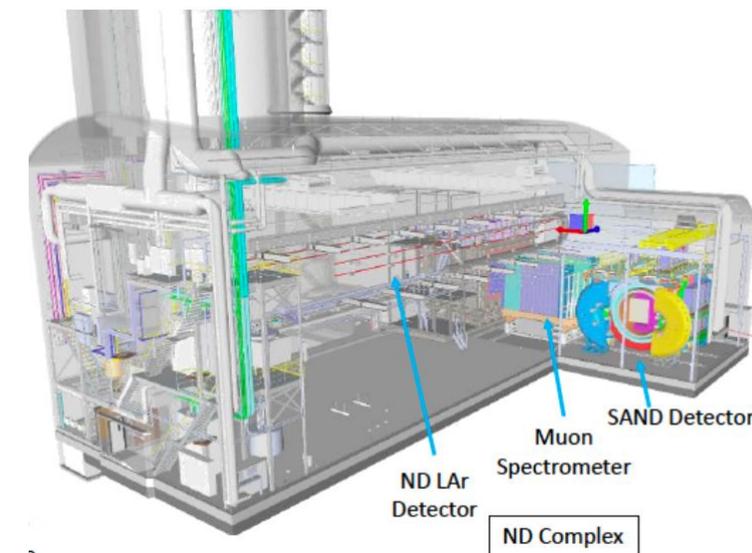
Malgrado il progetto sia il flagship americano nel settore, l'INFN ha in DUNE un ruolo di leadership grazie:

- Agli investimenti fatti dall'INFN nella tecnologia dell'argon liquid
- Ai contributi INFN all'upgrade degli acceleratori Fermilab (PEP-II e PEP-III)
- Alla possibilità di utilizzare il rivelatore KLOE per il Near detector di DUNE

Al momento, il Gruppo INFN di DUNE (123 persone, 48.8 FTE):

- esprime il co-spokesperson della collaborazione (S. Bertolucci), il coordinamento scientifico (L. Stanco) e tecnico (C. Montanari) di SAND, del Photon Detection System (FT) e molti responsabili L2/L3.
- **fornisce il rivelatore SAND attraverso la modifica, trasporto e run di KLOE e la sua integrazione nel DUNE Near Detector Complex**
- E' impegnato a realizzare – all'interno del magnete di KLOE un nuovo rivelatore ad argon liquid con lettura ottica: GRAIN
- Coordina e realizza il Sistema di rivelazione della luce di scintillazione ("Photon Detection System") per il primo e secondo modulo di DUNE

Inoltre, grazie al fatto che buona parte di queste tecnologie sono innovative, il Progetto ha important ramificazioni in Gruppo 5 (IBIS, Cryo-PoF), nelle università (Dip. di Eccellenza, bandi PRIN) e a livello europeo (Aidainnova)



La lezione di Nando

Se c'è una cosa che ho sempre invidiato a Nando è la sua incredibile sfacciataggine nel trasformare imprevisti in opportunità

