

Da KLOE a DUNE: dai kaoni ai neutrini cercando la violazione di CP

Lea Di Noto

per la collaborazione DUNE

Universita' degli Studi di Genova

Istituto Nazionale di Fisica Nucleare Sez. Genova



107° CONGRESSO NAZIONALE
della SOCIETA' ITALIANA di FISICA

15 Settembre 2021

lea.dinoto@ge.infn.it



Tra passato e futuro

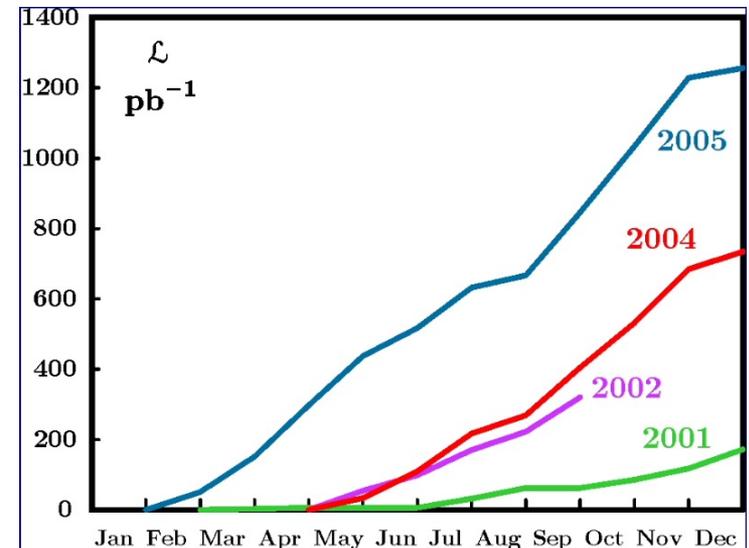
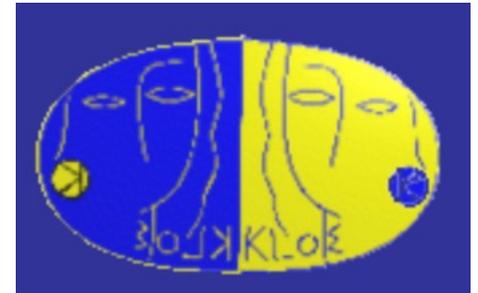
- L'esperimento **KLOE** ai Laboratori Nazionali di Frascati
 - obiettivo principale: misura della violazione di CP nei decadimenti dei K
 - il rivelatore
 - i risultati

- Il Progetto **DUNE**
 - obiettivo principale: la misura di δ_{CP} nelle oscillazioni di neutrino
 - l'apparato sperimentale
 - Il Near Detector e SAND (utilizza il magnete e il calorimetro di KLOE!)
 - Risultati attesi

KLOE: un esperimento dedicato alla fisica dei mesoni K

un po' di storia

- Nel 1940 prime scoperte nella fisica dei K
- Nel 1990 inizio progetto DAFNE ai Laboratori Nazionali di Frascati
 - Collisioni e⁺e⁻ per la produzione della particella Φ
 - per misure di precisione e ad alta statistica
- Inizio installazione di KLOE: **gen 1997- dec 1998**
- Presa dati: **mar 1999- 2006**
- Pubblicazione dei risultati: dal 2002 > 60 articoli
- KLOE- II per studi decadimenti dei mesoni leggeri
- Fine presa dati: marzo 2018

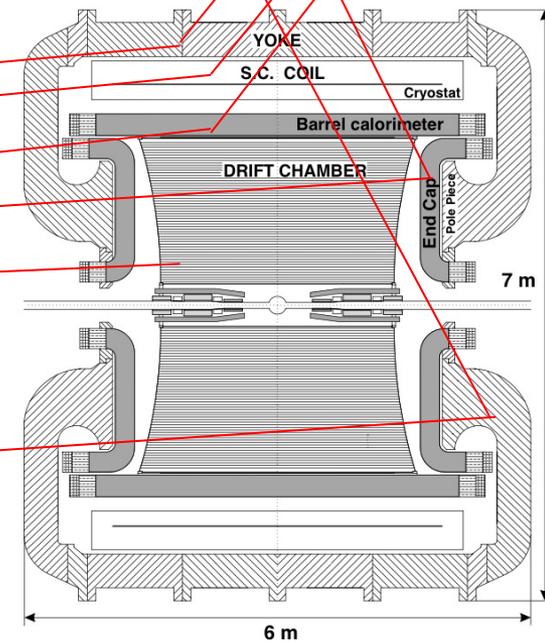
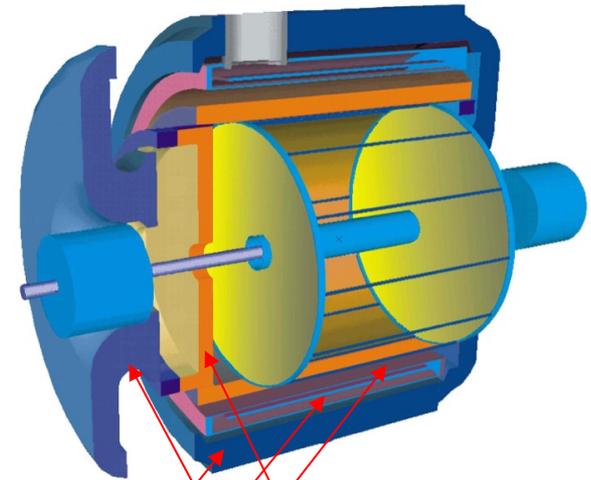
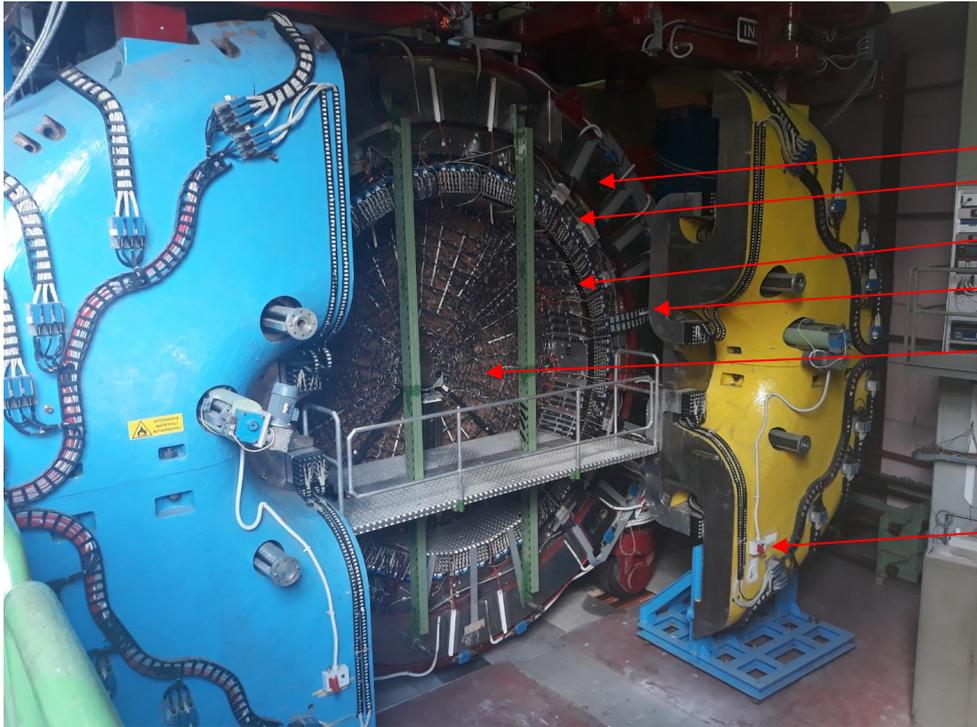


$$L=8 \text{ fb}^{-1} \Rightarrow 2.4 \cdot 10^{10} \phi \text{ decays}$$

Luminosità integrata di KLOE sul fascio di DAFNE

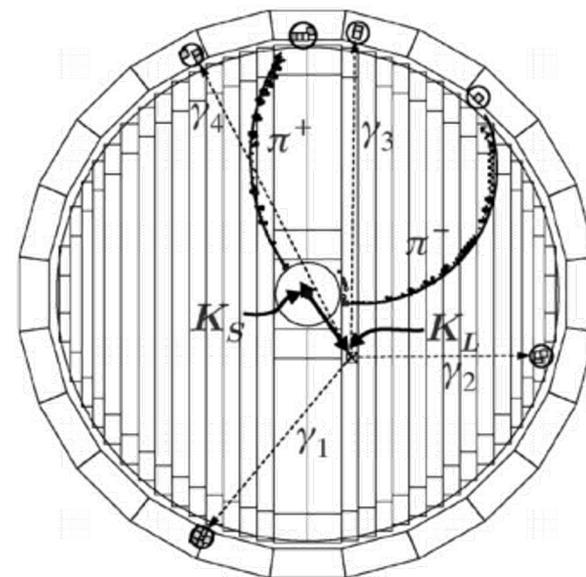
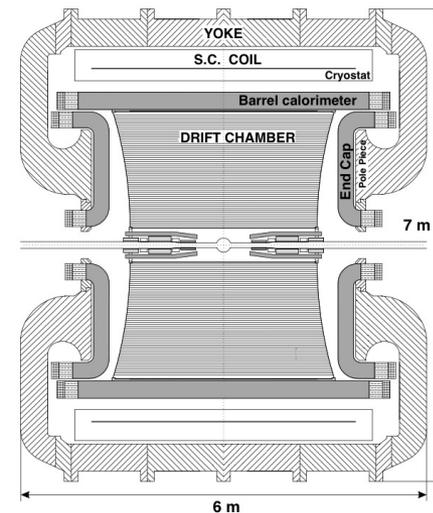
L'esperimento KLOE

- Obiettivo: la rivelazione di tutti i canali di decadimento della Φ (tutti i canali dei kaoni e dei mesoni η e η')
- Apparato:
 - magnete solenoide superconduttore 0.6 T
 - calorimetro elettromagnetico
 - camera a deriva



L'apparato

- Grandi dimensioni: 4 m di diametro, 3.4 m di lunghezza
 - ottimizzate per avere un'alta accettazione per il decadimento del K_L
- CAMERA A DERIVA: per rivelare le particelle cariche **NIM A488, 1-2 (2002)**
 - tracciamento in 3D: risoluzione nel piano di bending di 200 μm
 - alta precisione nell'identificazione del vertice: risoluzione 1 mm
 - struttura in fibra di carbonio e miscela di gas leggero 90% He-10% $i\text{C}_4\text{H}_{10}$
- CALORIMETRO: **NIM A482, 1-2 (2002)**
 - per rivelare i fotoni emessi dai decadimenti
 - per precise misure di tempo di volo \rightarrow per identificare i K neutri, gli elettroni, i pioni
- IL MAGNETE: **IEEE Trans.Appl.Supercond. 7 (1997) 2, 630-632**
 - costituito da un bobina superconduttrice raffreddata a 4 K da un sistema criogenico con He liquido
 - genera un campo solenoidale di 0.6 T per la misura del momento delle particelle cariche

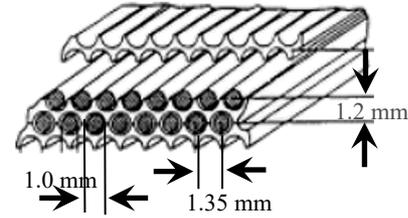


$$\Phi \rightarrow K_S K_L$$

$$K_S \rightarrow \pi^+ \pi^- \quad K_L \rightarrow \pi^0 \pi^0$$

Il calorimetro

NIM A482, 1-2 (2002)



Densità media: 5 g/cm³
Lunghezza di radiazione: 1.5 cm
larghezza \approx 15 lunghezze di radiazione

- Struttura ottimizzata (compatta, modellabile)

Fibre scintillanti (\varnothing 1.0 mm, $\lambda_{\text{Peak}} \approx 460\text{nm}$)

immerse in 200 strati di fogli di piombo da 0.5 mm

rapporto volumetrico Piombo- fibre- colla = 42:48:10

- Geometria 4π ottimizzata

- Spessore: 23 cm

- Barrel: 24 moduli

- 60 celle ciascuno

- 5 piani

- H:4.4-5.3 cm – W:4.4 cm – L:4.3 m

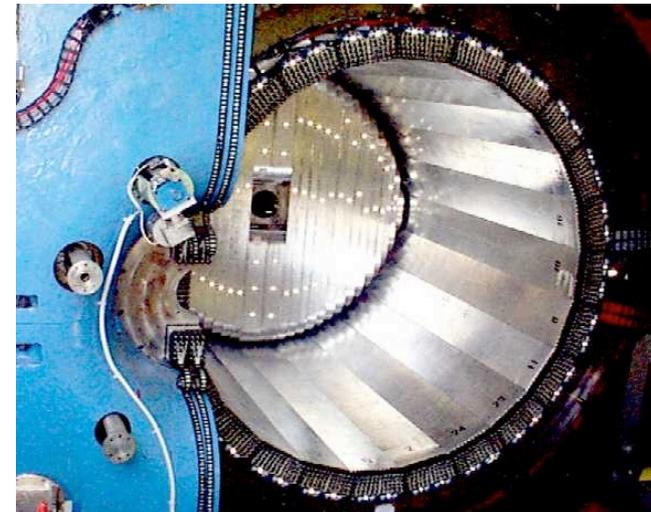
- 2880 canali

- Endcap: 32 moduli

- 10-15-30 celle ciascuno

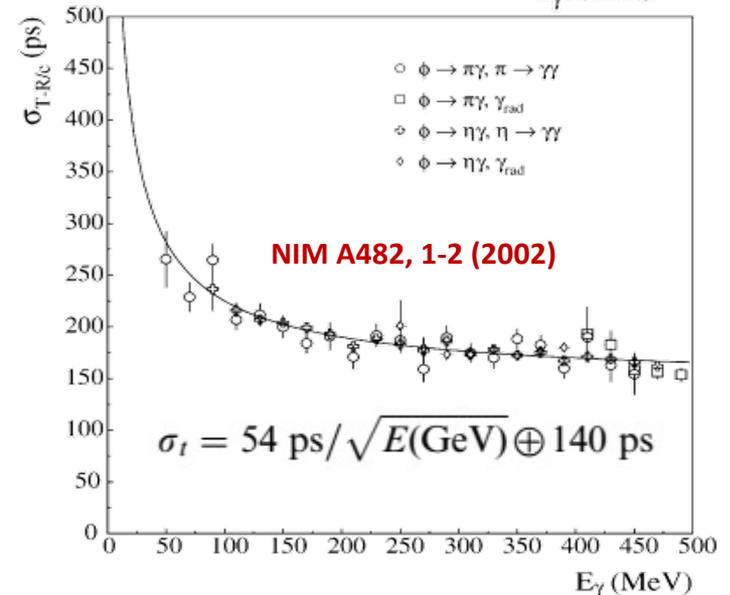
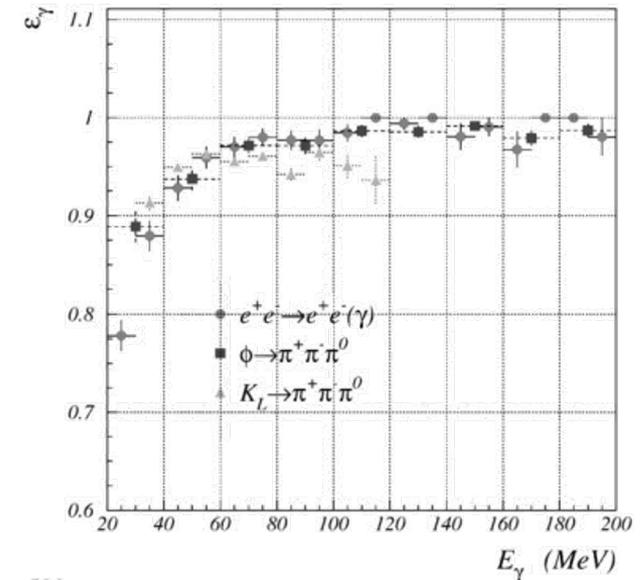
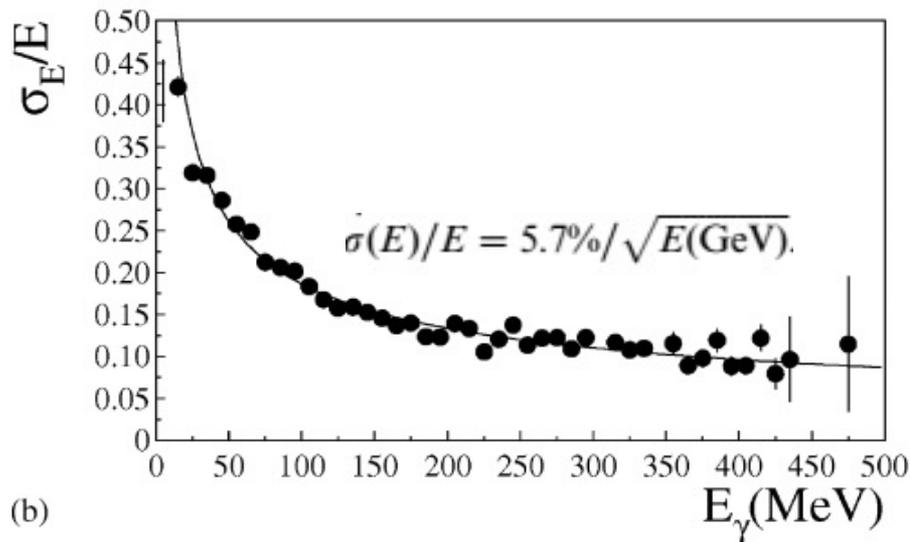
- 1000 canali

- Ogni cella ha 2 PMT (1,5 inch) ai due lati



Efficienza del calorimetro

- alta efficienza per la rivelazione dei gamma
- alta risoluzione per l'identificazione del vertice della shower (grazie all'elevata granularità)
- ottima risoluzione temporale
- ottima risoluzione energetica



I risultati

- Misura dei **decadimenti dei mesoni K** nei vari canali
- Misura dei **decadimenti dei mesoni η** nei vari canali
- Test della **simmetria CPT**: **JHEP12(2006)011**

- Dalla misura del branching ratio del decadimento

$$\text{BR}(K_S \rightarrow \pi e \nu) = (6.91 \pm 0.37) \times 10^{-4}$$

- Test di **violazione di CP** dai due processi:

- il limite sperimentale sul decadimento del $K_S \rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^0$
- la misura del rapporto di decadimento del $K_L \rightarrow \pi^+ \pi^-$

- Test di **unitarietà della matrice CKM** con una precisione dell'1 per mille

$$V_{ud}^2 + V_{us}^2 = 0.9985 \pm 0.0009.$$

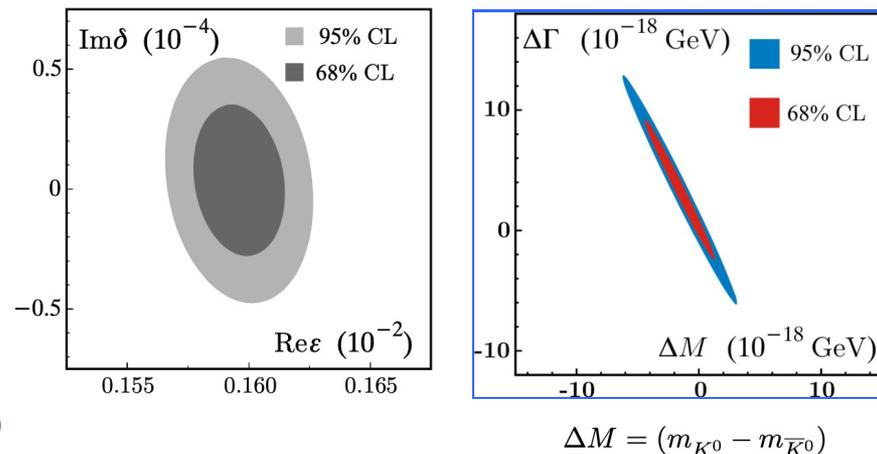
JHEP04(2008)059

ottenuta combinando due misure sperimentali indipendenti di V_{us} , dalle misure dei rapporti di **decadimento semileptonici** del K e dal BR del decadimento $K^+ \rightarrow \mu^+ \nu$.

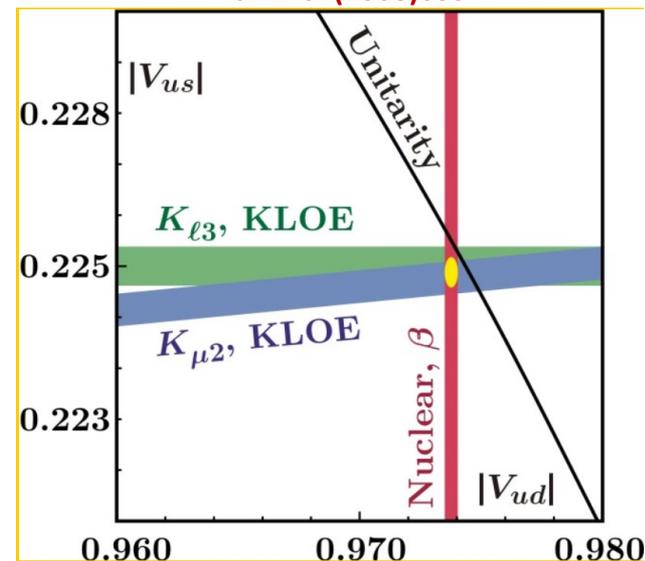
- Altre **misure**:

- misura di precisione della sezione d'urto adronica, rilevante per la predizione del momento magnetico del muone
- misure sui mesoni leggeri

JHEP12(2006)011



JHEP04(2008)059



La violazione di CP: la storia continua

E' il processo necessario per **spiegare l'asimmetria** tra materia e antimateria nell'Universo

- È stata rivelata nelle interazioni deboli, nel settore dei quark
 - nei decadimenti dei mesoni K (1964) (NA31, KLOE, ...)
 - nei decadimenti dei mesoni B (2004) (Belle, BaBar)
 - nei decadimenti dei mesoni D (2019) (LHCb)

ma le violazioni rivelate non sono sufficienti a spiegare l'asimmetria dell'Universo!!

- Altri settori da investigare per la ricerca della violazione CP:
 - nel quark top
 - nel settore dell' Higgs
 - nell'interazione forte
 - nel **settore leptonic** → ha influenza sulle oscillazioni dei neutrini → **esperimento DUNE**

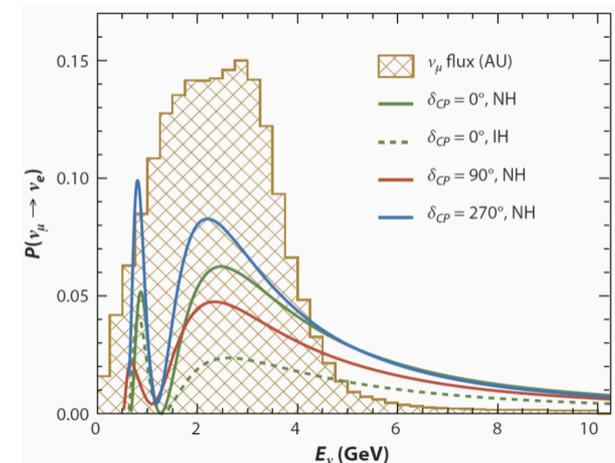
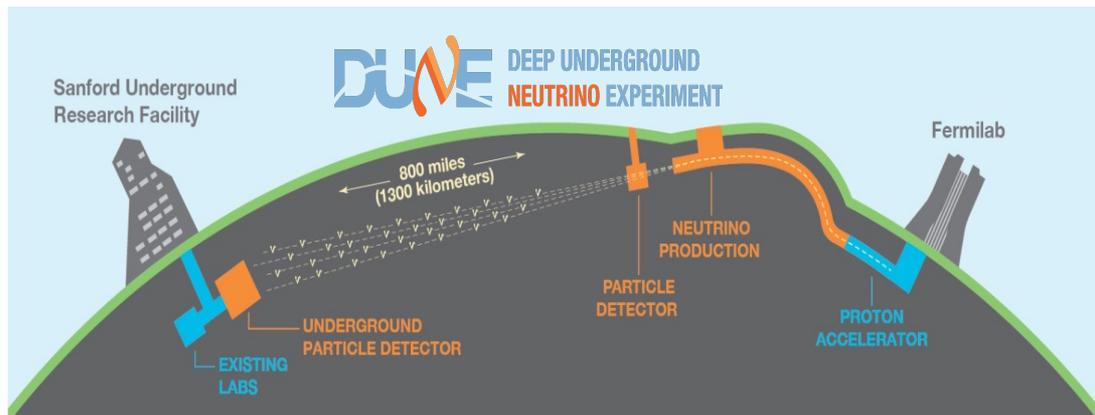
DUNE: Deep Underground Neutrino Experiment

Obiettivi:

- misurare con precisione la **probabilità di oscillazione di $\nu_\mu/\bar{\nu}_\mu$** per stimare:
 - violazione di CP,
 - gerarchia di massa
 - l'angolo θ_{23} ,
- osservare i neutrini da supernova, osservare il decadimento del protone

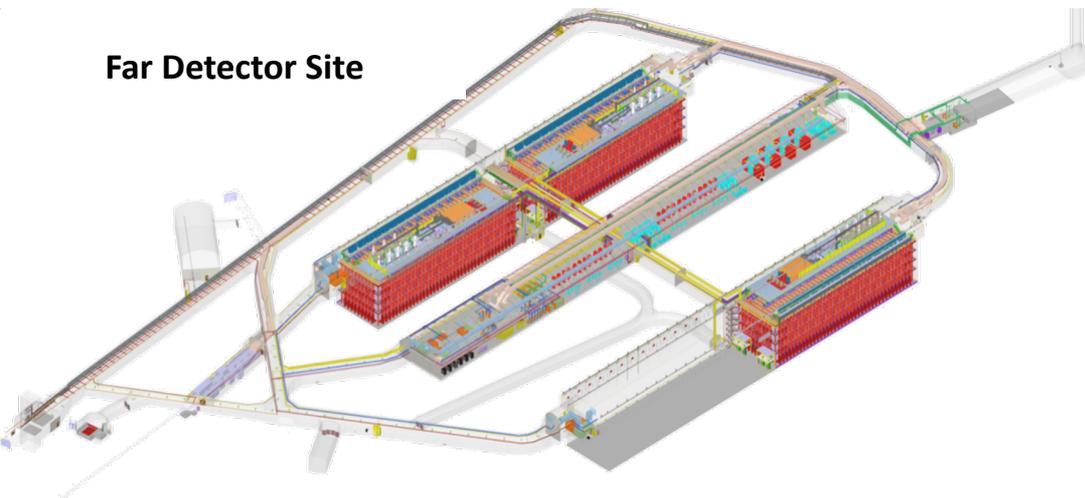
Apparato sperimentale:

- Long Baseline Neutrino Facility al Fermilab: fascio di neutrini **più intenso** 1.2 MW – 1.1×10^{21} POT/year (previsto upgrade a 2.4 MW) e a **largo spettro** (energia piccata in 2.6 GeV)
- **Near e Far Detector** ad una distanza di **1300 km**: per separare univocamente l'effetto della gerarchia di massa e della violazione di CP nelle oscillazioni



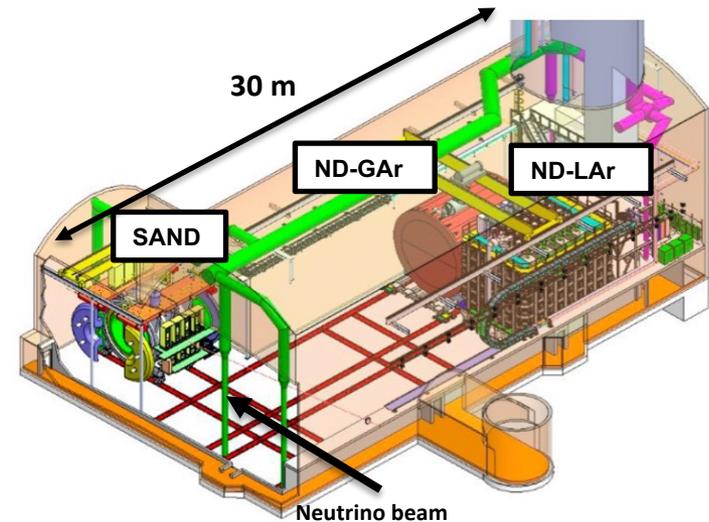
Un apparato sperimentale di grandi dimensioni

Far Detector Site



- **4 moduli:** camere a proiezione temporale ad Argon liquido (LArTPC) di massa 17 kton ciascuno (15 m X 15 m x 64 m)
- situati al **Sanford Underground Facility** in South Dakota, 1.5 km sotto la superficie terrestre
- EVENTI: 3000 ν_μ CC/anno, 250 ν_e CC/anno

Near Detector complex

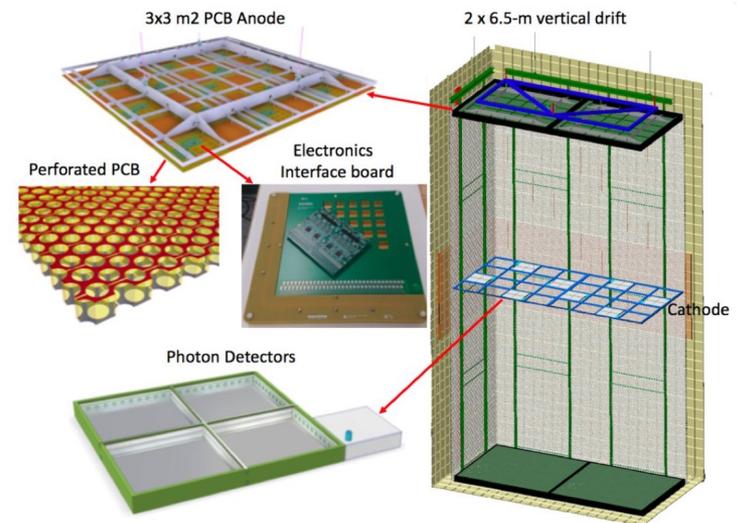
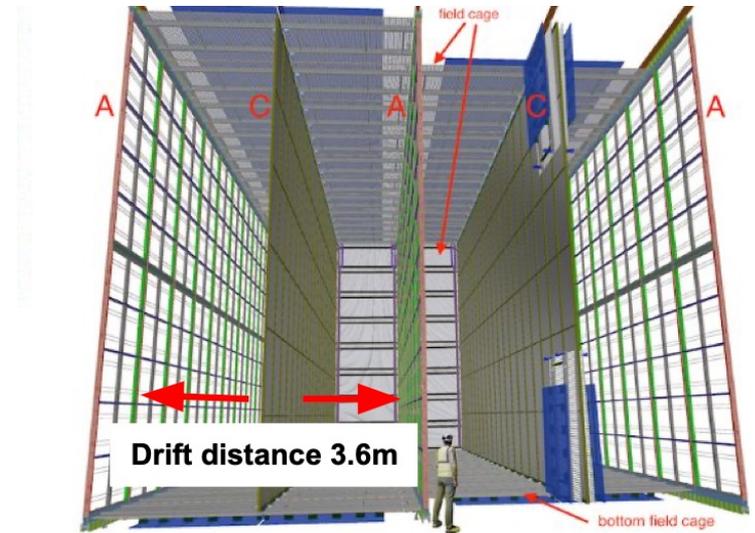


- Near Detector complex al **Fermilab** (a 600 m dal beam target).
- 3 rivelatori:
 - ND-LAr, ND-GAr spostabili insieme fuori asse
 - SAND permanentemente sull'asse del fascio
- EVENTI: $O(10^8)$ eventi CC/anno in ND-LAr, $O(10^6)$ eventi CC/anno in ND-GAr/SAND

Il magnete e il calorimetro di KLOE verranno utilizzati nel rivelatore SAND

Far Detector

- 2 moduli LArTPC a singola fase :
- Modulo 1 :
 - direzione di drift orizzontale di lunghezza 3.6 m,
 - con piani dell'anodo e del catodo verticali
 - con sensori di luce X-ARAPUCA sul piano dell'anodo
 - ProtoDUNE-SP già funzionante al CERN dal 2018
- Modulo 2:
 - direzione di drift verticale di lunghezza 6.5 m
 - piani dell'anodo e del catodo orizzontali
 - carica acquisita da strips su PCB (Printed circuit board)
 - sensori di luce analoghi al modulo 1
 - prototipo di dimensioni finali nei prossimi anni
- + 2 moduli ancora in definizione



Obiettivi del Near detector

Probabilità di oscillazione

$$\frac{dN_x^{FD}}{dE_{rec}}(E_{rec}) = \int \Phi_{\nu\mu}^{FD}(E_\nu) P_{\nu\mu \rightarrow x}(E_\nu) \sigma_x^{Ar}(E_\nu) T_x^{FD,Ar}(E_\nu, E_{rec}) dE_\nu$$

Flusso al FD
Sezione d'urto
risposta del FD

Le incertezze sistematiche sono dovute alla conoscenza del flusso di neutrini e alla sezione d'urto

- Il Near Detector ha lo scopo di misurare il flusso di neutrino con alta statistica

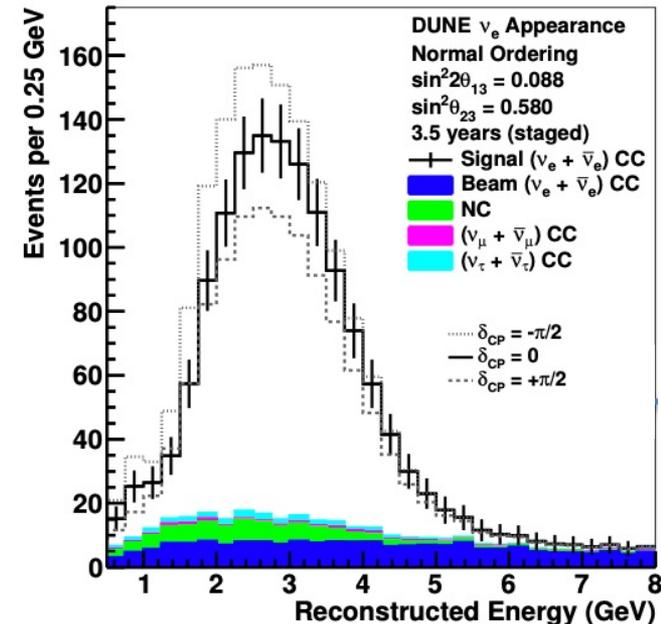
$$\frac{dN_x^{ND}}{dE_{rec}}(E_{rec}) = \int \Phi_x^{ND}(E_\nu) \sigma_x^m(E_\nu) T_x^{d,m}(E_\nu, E_{rec}) dE_\nu$$

per estrapolare con adeguata precisione lo spettro dei neutrini ν_μ e ν_e al FD

Per ottenere una misura di delta CP a 5σ le incertezze sistematiche devono essere ridotte al livello di qualche %

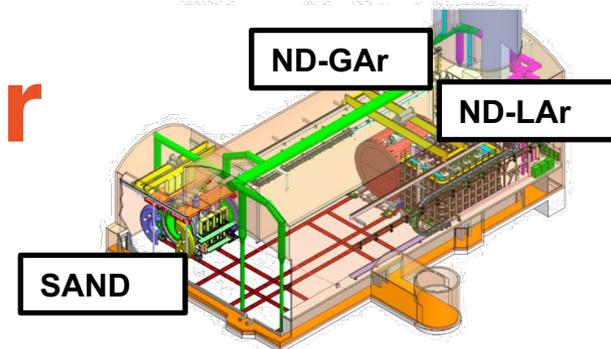
Per controllare le incertezze sistematiche è necessario:

- misurare il flusso** e lo spettro di **tutti i flavour** di neutrino presenti nel fascio
- misurare gli **effetti nucleari** e accordare i **modelli** di interazione dei neutrini alle energie del GeV
- monitorare il fascio** per controllarne la stabilità e rivelare eventuali cambiamenti

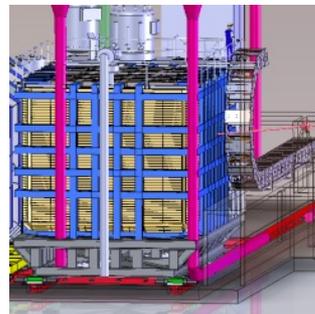


I rivelatori ND-LAr ND-GAr

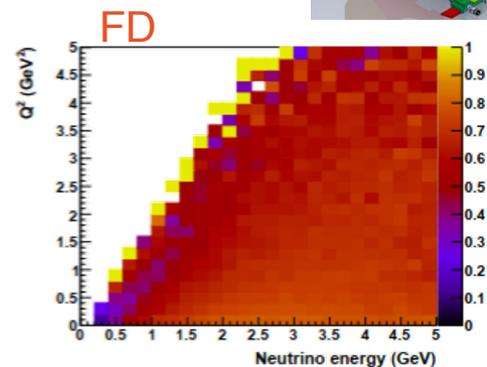
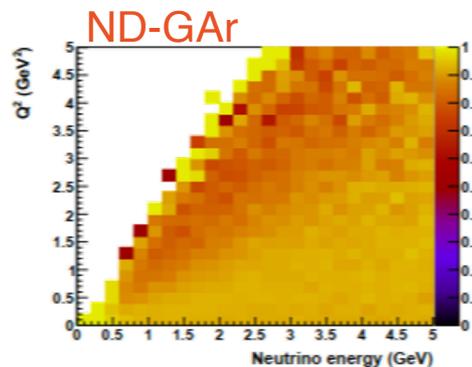
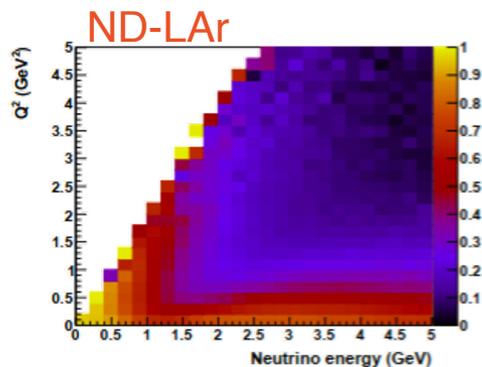
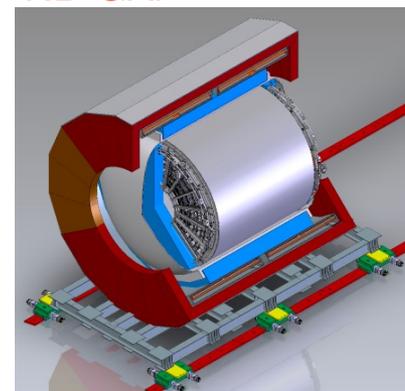
- Rivelatore progettato per essere funzionalmente simile al FD
 - con un tasso di interazioni molto più alto ($O(50)$ interazioni/spill)
 - con un volume magnetizzato per l'identificazione della carica
- ND-LAr: **50 ton** Ar liquido (FV)
 - TPC ad Argon liquido, segmentata in 35 moduli e con acquisizione basata su pixel
- ND-GAr: **1 ton** Ar gassoso
 - TPC ad Argon gassoso ad alta pressione, circondata da un calorimetro elettromagnetico in campo magnetico da 0.5 T



ND-LAr



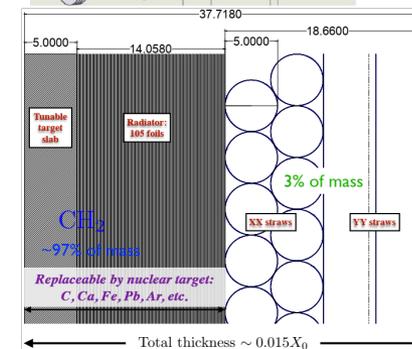
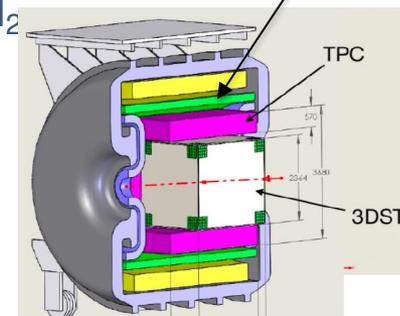
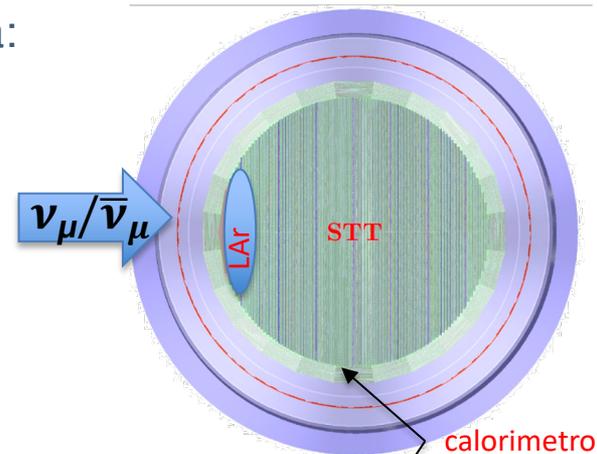
ND-GAr



ND-LAr-ND-GAr dimostrano di avere buona efficienza di rivelazione per la tipologia degli eventi osservati dal FD (phase-space match)

SAND: System for On-Axis Neutrino Detector

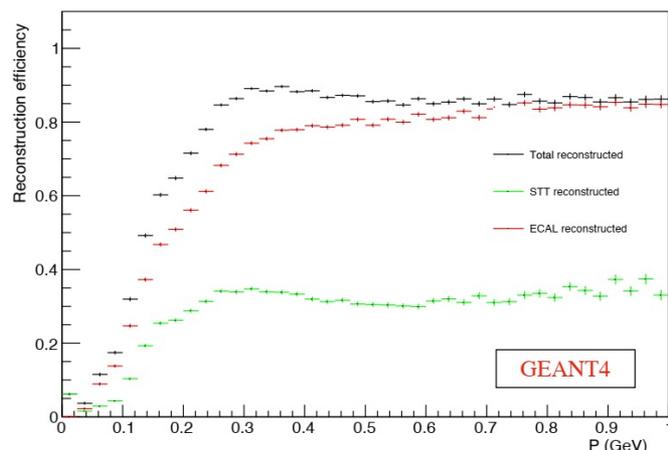
- Rivelatore situato sull'asse del fascio di neutrini costituito da:
 - magneti e calorimetro di KLOE
 - tracciatore
 - 1 ton di Argon liquido con rivelatori di luce
- TRACCIATORE (ancora da ottimizzare) *vedi talk di M. Vicenzi*
 - piani di Straw tube (\varnothing 5 mm) intermezzati da fogli di grafite o di CH_2
 - rivelatore 3DST (3D projection scintillator tracker) in combinazione con gas TPC
- Per osservare le interazioni di neutrino:
 - nella parte «upstream» del calorimetro (28 ton) per **monitorare il fascio**
 - nel tracciatore (su bersaglio di carbonio o di idrogeno per studi di **sezione d'urto**)
 - nell'Argon liquido (per confronto con ND-LAr - ND-GAr)
 - $10^6 \nu_\mu$ CC eventi/anno in 1 ton LAr



Prestazioni attese

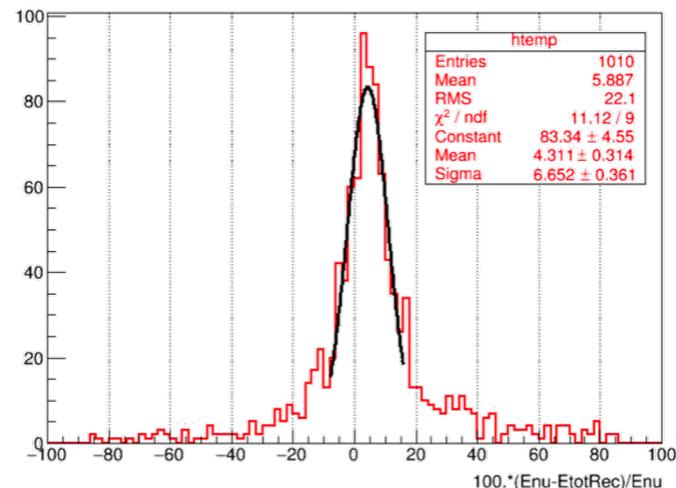
- alta **efficienza di ricostruzione** delle tracce delle particelle cariche nel piano trasverso $\Delta p/p \leq 3\%$, $\Delta\theta/\theta \leq 1.5\%$ mrad
- alta **efficienza di rivelazione dei π^0** dalla conversione dei gamma (49% nel volume degli STT)
- capacità di identificazione **e/π** per mezzo del rivelatore di transizione ($e/\pi \sim 10^{-3}$)
- capacità di identificazione **$p/\pi/K$** attraverso dE/dx e il range
- buona efficienza per la rivelazione dei neutroni da 3DST/STT e dal calorimetro

Efficienza di rivelazione dei neutroni



Target	QE	RES	DIS	Total
Carbon	64.8 %	76.5 %	80.1 %	73.6 %
Hydrogen	80.5 %	85.0 %	87.4 %	82.3 %

Risoluzione sulla ricostruzione dell'energia del neutrino



Risultati attesi dal Near Detector

<https://arxiv.org/abs/2103.13910>

- Misura del flusso assoluto dalla diffusione elastica $\nu + e$ (100 ev/anno/ton) \rightarrow 2%
- Misura dello spettro da analisi «low-nu» \rightarrow 5% per $E_\nu > 1$ GeV
- Misure su interazioni su idrogeno
 - per la comprensione degli effetti nucleari dal confronto diretto delle misure su H, Ar, C
 - per un'ulteriore stima del flusso
- Monitoraggio del fascio rispetto a possibili cambiamenti dei parametri di focalizzazione

ECAL+3DST option Beam parameter	Parameter description		Significance, $\sqrt{\chi^2}$		
	Nominal	Changed	Rate-only	FHC	RHC
proton target density	1.71 g/cm ³	1.74 g/cm ³	0.02	8.51	5.65
proton beam width	2.7 mm	2.8 mm	0.02	4.67	2.93
proton beam offset x	N/A	+0.45 mm	0.09	2.84	1.70
proton beam θ	N/A	0.07 mrad	0.03	0.50	0.42
proton beam (θ, ϕ)	N/A	(0.07,1.571) mrad	0.00	0.51	0.35
horn current	293 kA	296 kA	0.2	12.64	7.97
water layer thickness	1 mm	1.5 mm	0.5	5.30	3.20
decay pipe radius	2 m	2.1 m	0.5	7.45	4.20
horn 1 along x	N/A	0.5 mm	0.5	4.77	2.94
horn 1 along y	N/A	0.5 mm	0.1	3.53	2.27

ECAL+STT option Beam parameter	Parameter description		Significance, $\sqrt{\chi^2}$	
	Nominal	Changed	Rate-only	ECAL+STT
proton target density	1.71 g/cm ³	1.74 g/cm ³	0.02	4.4
proton beam width	2.7 mm	2.8 mm	0.02	6.1
proton beam offset x	N/A	+0.45 mm	0.09	4.7
proton beam θ	N/A	0.07 mrad	0.03	0.5
proton beam (θ, ϕ)	N/A	(0.07,1.571) mrad	0.00	0.4
horn current	293 kA	296 kA	0.2	10.3
water layer thickness	1 mm	1.5 mm	0.5	4.7
decay pipe radius	2 m	2.1 m	0.5	6.9
horn 1 along x	N/A	0.5 mm	0.5	3.8
horn 1 along y	N/A	0.5 mm	0.1	4.2

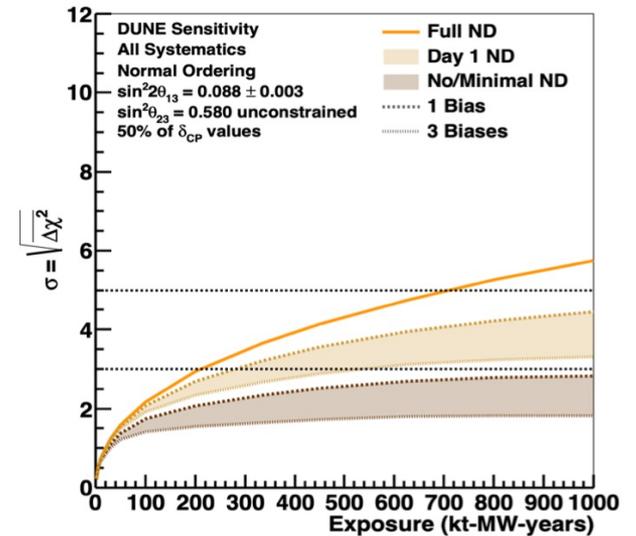
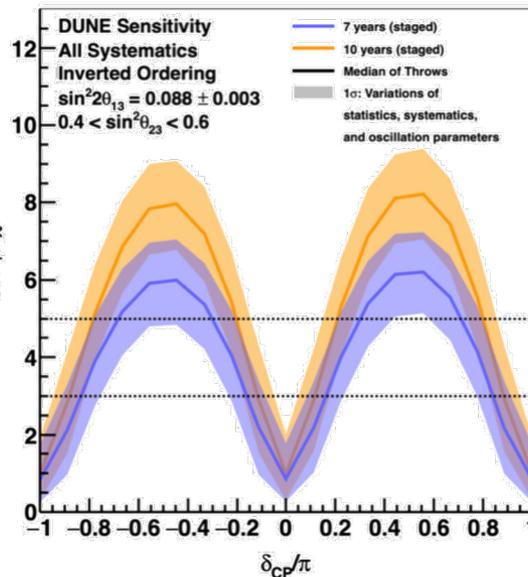
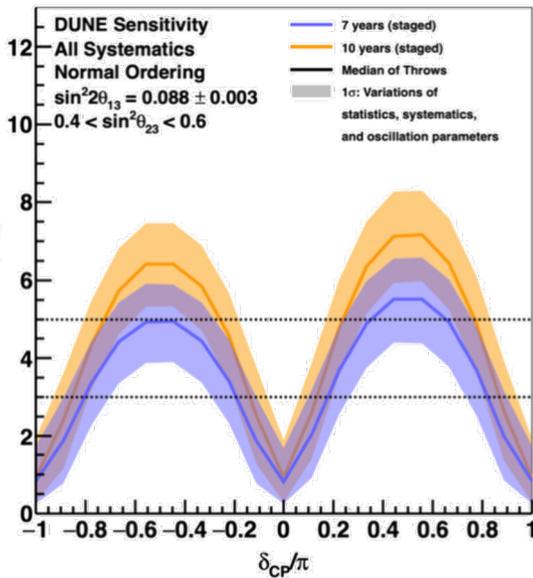
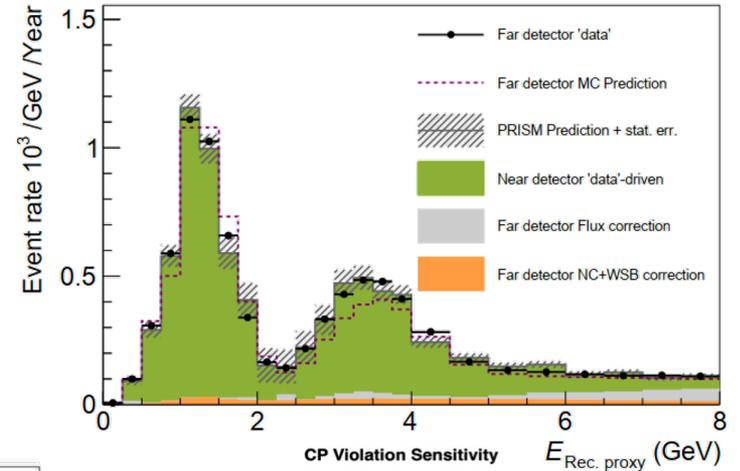
con una presa dati di una settimana SAND riesce a rivelare cambiamenti di tutti i parametri significativi per l'analisi di oscillazione

Sensitività attesa di DUNE

Il Near Detector Complex è progettato per fornire **misure robuste e complementari** per ridurre le sistematiche per un'analisi delle oscillazioni di neutrino guidata dai dati del ND

per la misura di δ_{CP} in 7-10 anni

NuFit 4.1, $\Delta|M^2|_{32} = 2.52 \times 10^{-3} \text{ eV}$, $\sin^2(\theta_{23}) = 0.525$



EPJC 80, 978 (2020)

Conclusioni

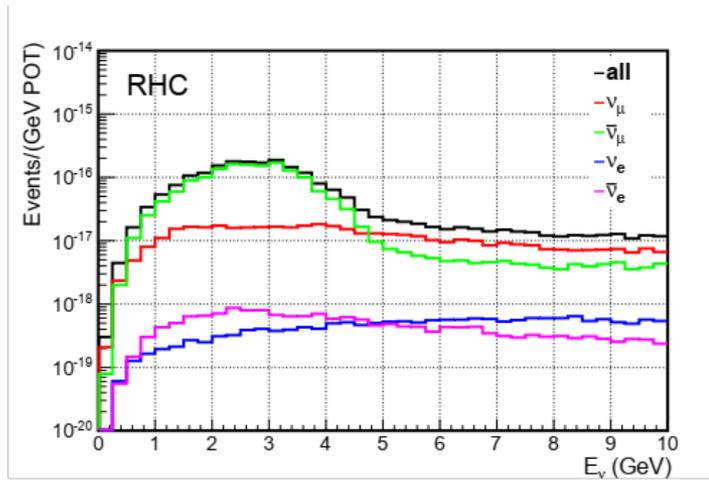
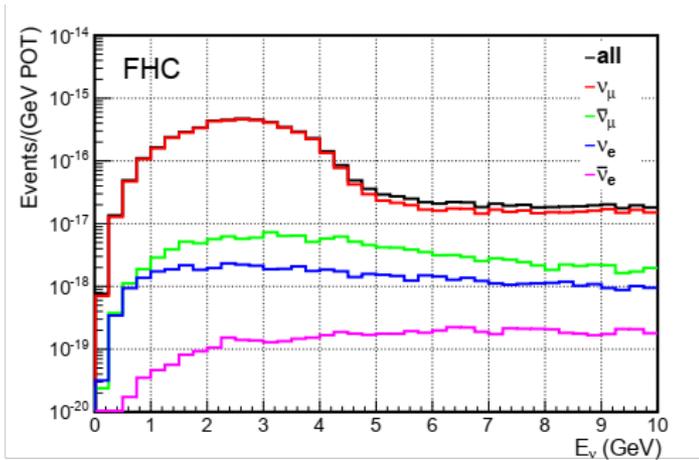
- KLOE è stato un esperimento fondamentale per la misura precisa di CP nei decadimenti dei K
- Il calorimetro elettromagnetico ha dimostrato di avere alta risoluzione energetica e temporale e alta efficienza di rivelazione di particelle neutre, prestazioni fondamentali per la ricostruzione di interazioni di neutrino
- Il calorimetro e il magnete nei prossimi anni saranno rimessi in funzione per essere integrati nel rivelatore SAND nel Near Detector Complex di DUNE per la misura di violazione di CP nel settore leptonic



backup



ND flux components



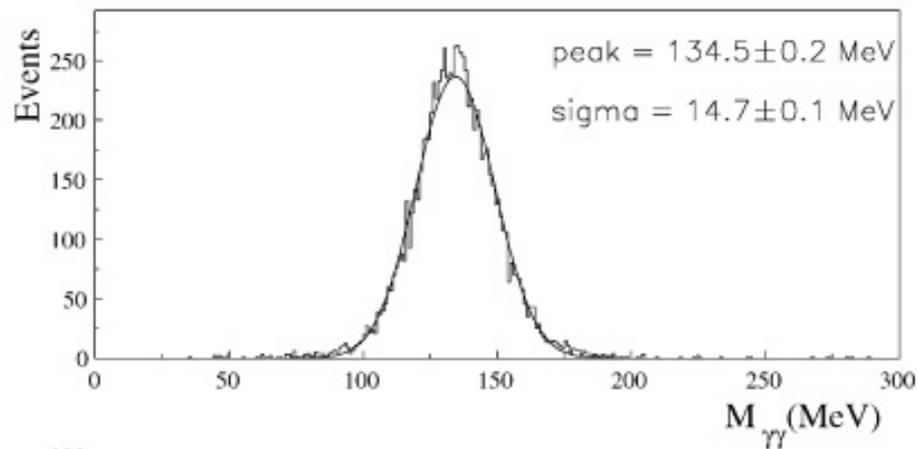
ND-LAr –ND-GAr

- detector functionally similar to FD but in high rate environment
- magnetized volume for charge sign identification
 - off-axis detector

SAND

permanently on-axis detector
with Ar, C, H targets

Massa invariante π^0



DUNE-PRISM

- Method:
 - 50% data taken with ND-LAr+ND-GAr off-axis at various position (8 steps 12 day each)+ horn variation
- Goal:
 - create a ND data sets with flux spectra very similar to the oscillated FD fluxes,
 - minimizing errors arising from the near-to-far flux difference,
 - minimizing errors related to the neutrino interaction model

