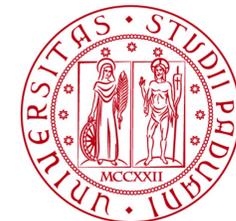


Stato attuale e prospettive di fisica dell'esperimento JUNO

Vanessa Cerrone, per la collaborazione JUNO
Università di Padova & INFN Padova

12-14 aprile 2023 -- *Incontri di Fisica delle Alte Energie (IFAE 2023)*



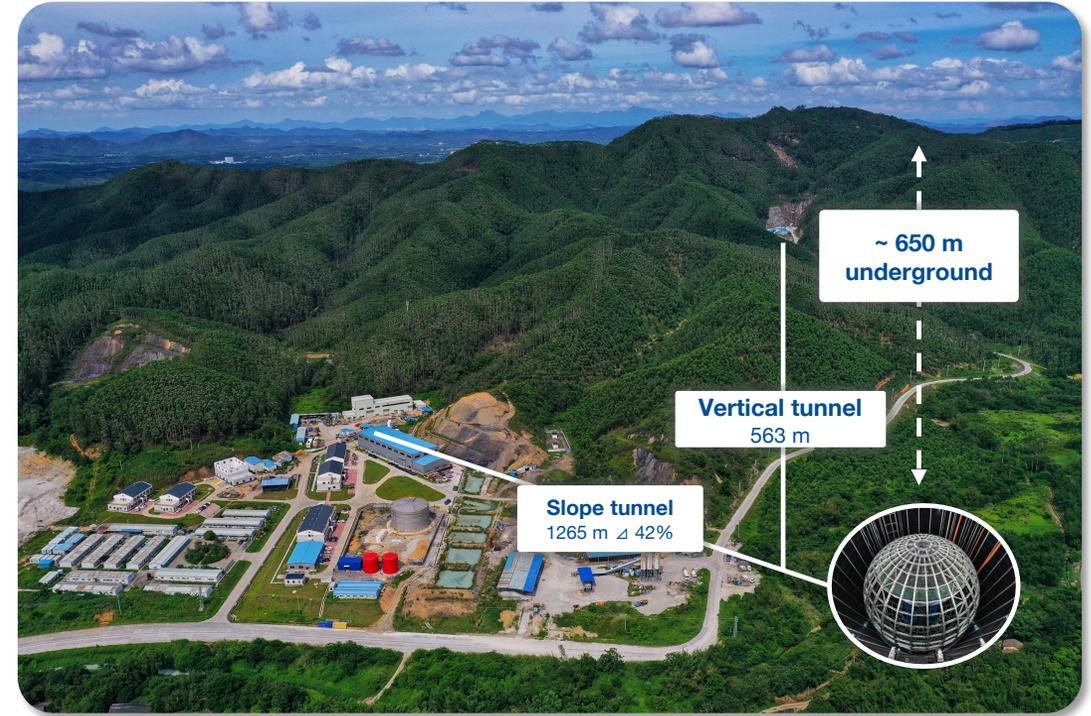
UNIVERSITÀ
DEGLI STUDI
DI PADOVA



L'esperienza JUNO

Jiangmen **U**nderground **N**eutrino **O**bservatory

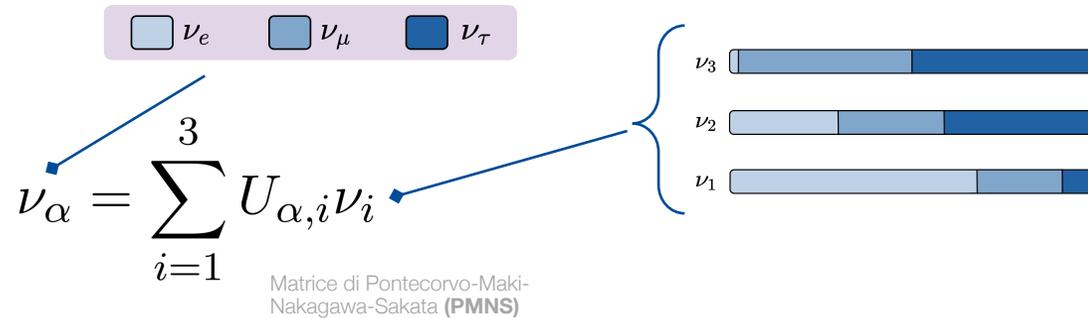
JUNO è un esperimento di neutrini in costruzione nel sud della Cina.



- 20 kton di scintillatore liquido
- Situato a 53 km da 8 reattori nucleari con potenza termica totale di $26.6 \text{ GW}_{\text{th}}$
- Obiettivo primario: determinazione dell'**ordinamento di massa** dei neutrini

Perché JUNO?

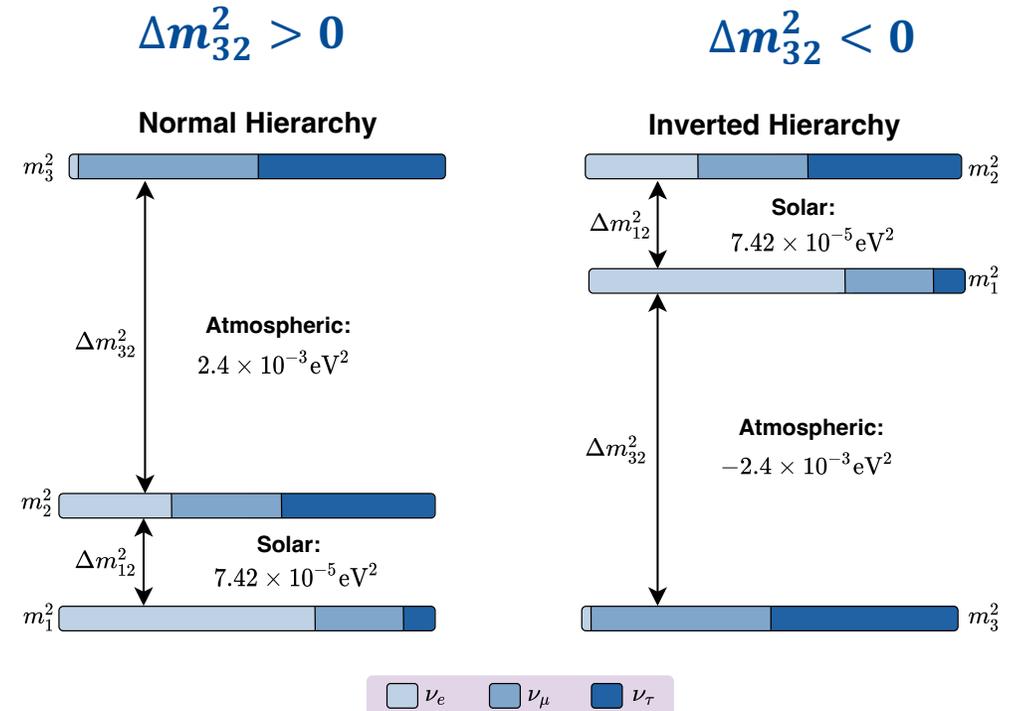
- Osservazione delle **oscillazioni dei neutrini**
 - Neutrini sono massivi
 - Autostati di massa (ν_i) \neq autostati di sapore (ν_α)



- **Ordinamento di massa: $\Delta m_{32}^2 \geq 0$?**
 $\Delta m_{ij}^2 = m_i^2 - m_j^2$

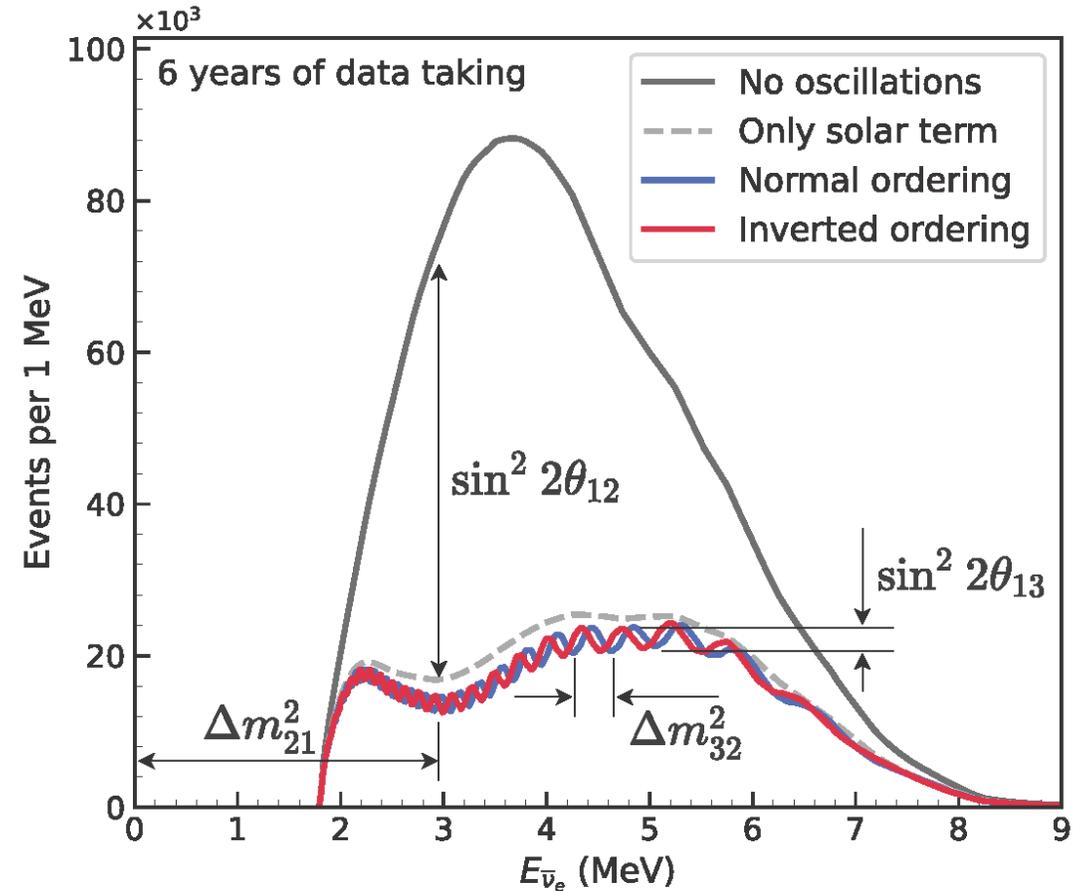
- **Metodi principali:**
 - Oscillazioni nella materia con neutrini da acceleratore @ esperimenti a lunga distanza sorgente-rivelatore

- Oscillazioni nel vuoto con antineutrini $\bar{\nu}_e$ da reattore a media distanza (≈ 50 km)
 → Probabilità di sopravvivenza dei $\bar{\nu}_e$
 → Indipendenza da δ_{CP} e θ_{23}



L'ordinamento di massa in JUNO

- Parametri solari Δm^2_{21} , $\sin^2(2\theta_{12})$: oscillazione lenta con minimo ad una distanza di circa 50 km
- Parametri atmosferici Δm^2_{32} , $\sin^2(2\theta_{32})$: oscillazione veloce
- JUNO è il primo esperimento sensibile ad entrambe le oscillazioni → ordinamento di massa (MO) dall'interferenza
- Misura ambiziosa → limiti stringenti sul design del rivelatore (risoluzione energetica e temporale, linearità della carica, ...)



Obiettivo: distinguere le distribuzioni in energia in **blu/rosso**

Rivelatore centrale

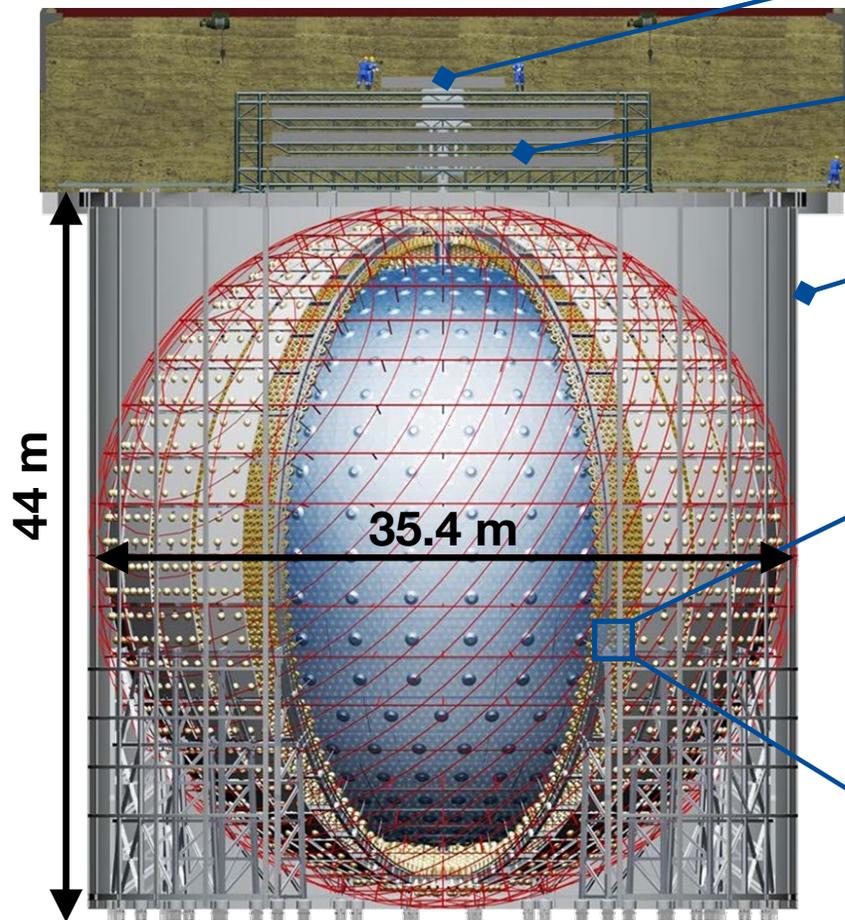
Rivelatore centrale (CD):
20 kton scintillatore liquido

Sistema di calibrazione

Top Tracker

Piscina - rivelatore Cherenkov:

35 kton di acqua ultra-pura
2400 PMT da 20 pollici



Requisiti principali:

- **Alta statistica di eventi**
→ ampio volume fiduciale
- **Risoluzione energetica $\leq 3\%$ a 1 MeV**
→ copertura del sistema dei fotomoltiplicatori $> 75\%$
- **Minimizzazione e controllo dei fondi**

Sistema di fotomoltiplicatori (PMT) del CD:

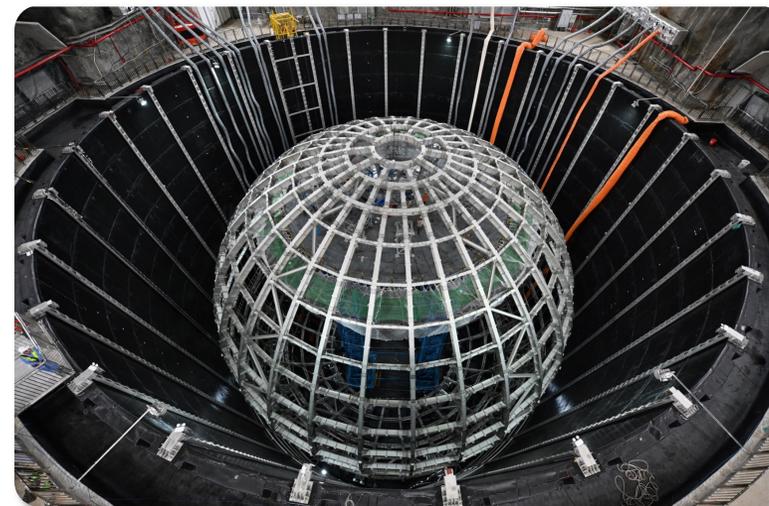
17612 (*Large-*)PMT da 20 pollici
25600 (*Small-*)PMT da 3 pollici

Rivelatore centrale

Struttura portante in acciaio

- Funzione di **supporto** per pannelli di acrilico, scintillatore, fotomoltiplicatori, elettronica di front-end, ecc.,...
- 40.1 m di diametro
- Precisione di assemblaggio < 3 mm
- Materiale a bassa contaminazione

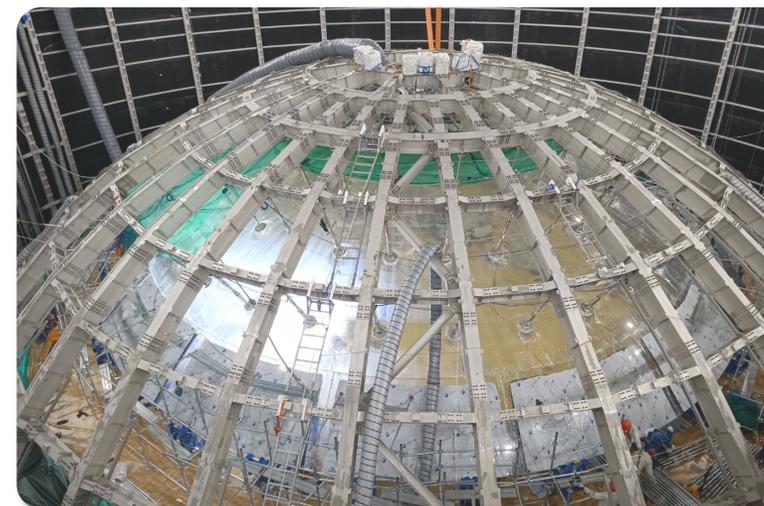
Assemblaggio
terminato a
giugno 2022



Struttura in acrilico

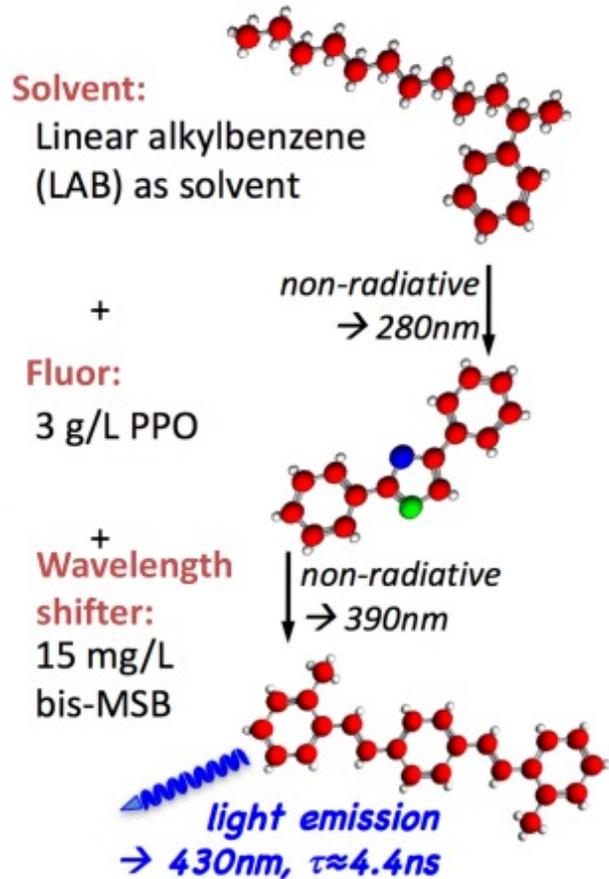
- Diametro interno (35.40 ± 0.04) m
- Spessore (124 ± 4) mm
- Trasparenza al di sopra del 96%
- Radiopurezza: U/Th/K < 1 ppt

Assemblaggio
iniziato a luglio
2022, *in corso*



Scintillatore liquido

Linear Alkyl Benzene (LAB) + 2.5 g/L PPO + 3 mg/L bis-MSB



[NIM A 988\(2021\)164823](#)

- Resa di luce complessiva (*light yield*) > 1300 fotoelettroni / MeV
- Lunghezza di attenuazione > 20 m
- Alta radiopurezza

Requisiti di radiopurezza

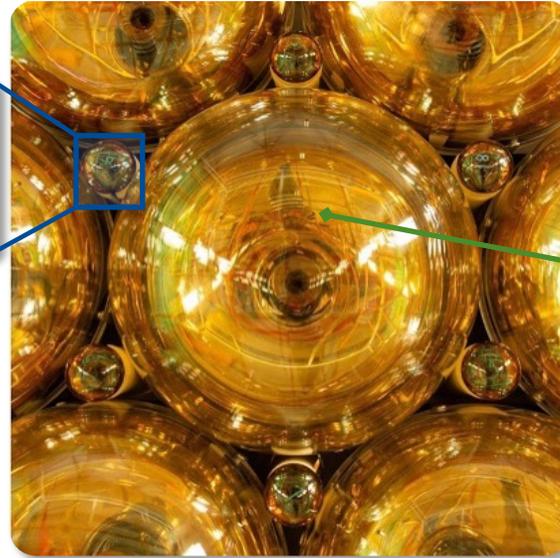
	$^{238}\text{U} / ^{232}\text{Th}$	^{40}K	^{210}Pb
ν da reattore	< 10^{-15} g/g	< 10^{-16} g/g	< 10^{-22} g/g
ν solari	< 10^{-17} g/g	< 10^{-18} g/g	< 10^{-24} g/g

[JHEP11\(2021\)102](#)

- Diverse strategie di purificazione
 - Sistema di rivelazione (OSIRIS) ad hoc per monitorare la radiopurezza durante le fasi di riempimento del rivelatore
- Online Scintillator Internal Radioactivity Investigation System**

Sistema di fotomoltiplicatori

25600 PMT da **3 pollici**



17612 (CD) + 2400 (veto)
PMT da **20 pollici**

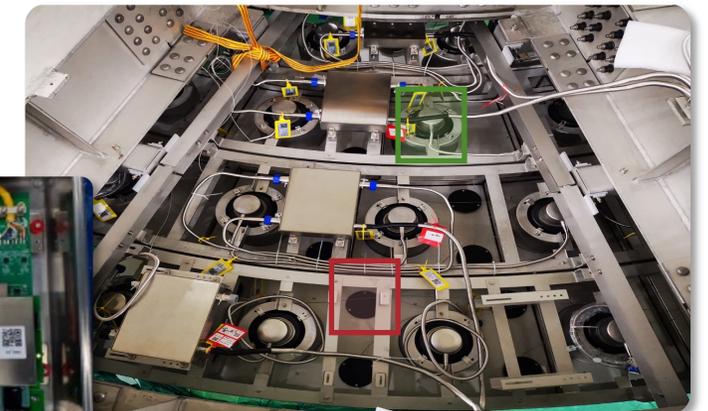


Sistema sinergico di fotomoltiplicatori da 3 e 20 pollici →
risoluzione energetica e linearità della carica

- PMT da 3 e 20 pollici: tutti i PMT sono stati prodotti, testati, e sigillati (*potted*). Installazione in corso
- Installazione dell'**elettronica** in corso

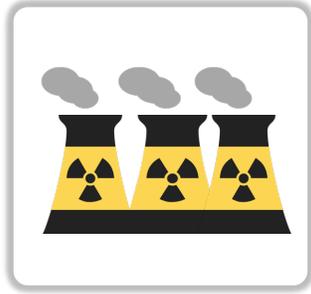


3 PMT da 20
pollici in ogni box

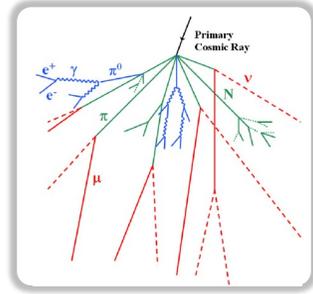


Studi di fisica in JUNO

Primi studi di sensitività: *Neutrino Physics with JUNO*, 2016 *J. Phys. G: Nucl. Part. Phys.* 43 030401
 Studi aggiornati: *JUNO Physics and Detectors*, *Prog. Part. Nucl. Phys.* 123 (2022) 103927



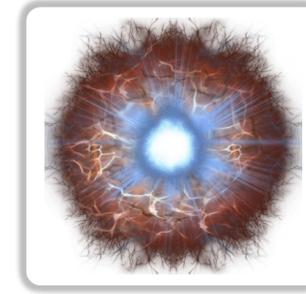
$\bar{\nu}_e$ da reattore



ν atmosferici



ν solari



ν da supernovae



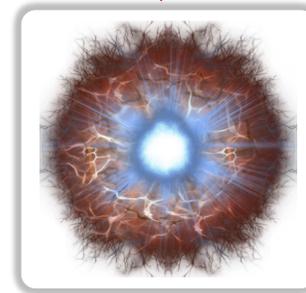
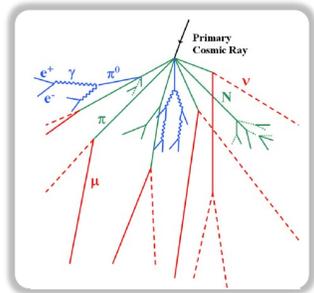
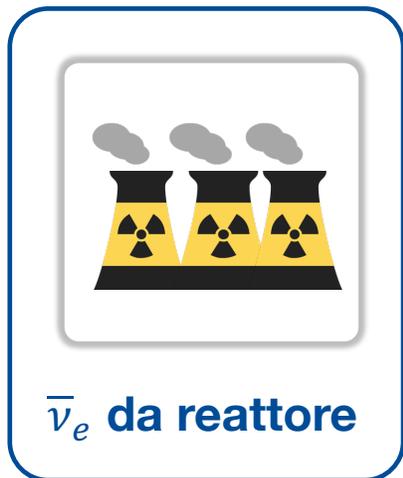
geoneutrini



+

- Studi di nuova fisica:
- Neutrini sterili
 - Interazioni non-standard
 - Invarianza di Lorentz
 - Decadimento del protone
 - ...

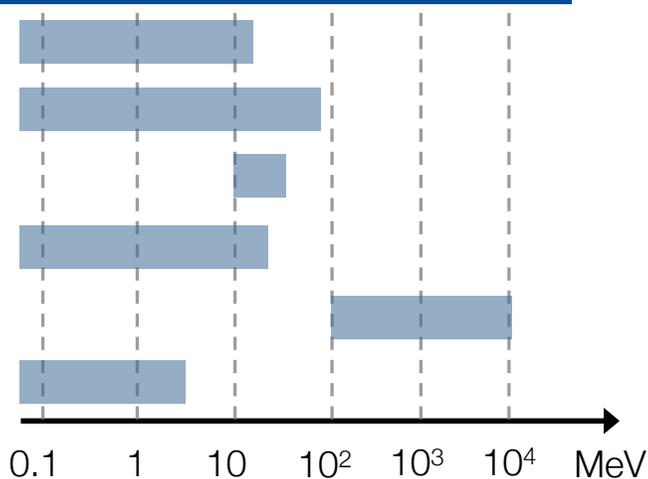
Studi di fisica in JUNO



Poster di Claudio Lombardo:
Rivelazione dei neutrini da esplosioni stellari in JUNO

Sorgente	Segnale atteso	Range di energia
----------	----------------	------------------

Reattore	~ 60 / giorno
Esplosione di supernova	~ 7300 a 10 kpc in pochi s
Diffuse Supernova Background	~ 2-4 / anno
Solari (da ^8B)	O(100) / giorno
Atmosferici	~ O(100) /anno
Geoneutrini	~ 400 / anno



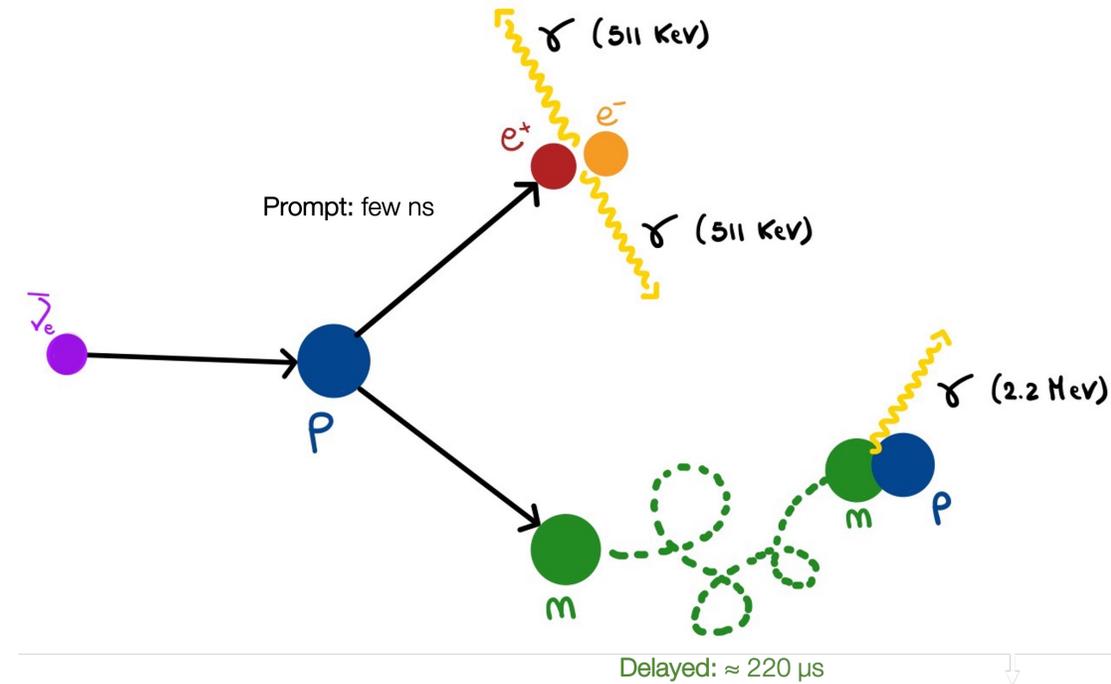
+

Studi di nuova fisica:

- Neutrini sterili
- Interazioni non-standard
- Invarianza di Lorentz
- Decadimento del protone
- ...

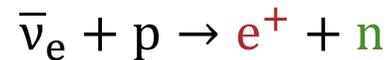
$\bar{\nu}_e$ da reattore: decadimento beta inverso

- Sorgente del segnale: 26.6 GW_{th} da 2 centrali nucleari
- Rivelazione tramite decadimento beta inverso (**IBD**)
$$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$$
 - Segnale **prompt**: positrone
 - Segnale **delayed**: n-H (2.22 MeV, $\tau \sim 200 \mu\text{s}$) o n-¹²C



$\bar{\nu}_e$ da reattore: decadimento beta inverso

- Sorgente del segnale: 26.6 GW_{th} da 2 centrali nucleari
- Rivelazione tramite decadimento beta inverso (**IBD**)

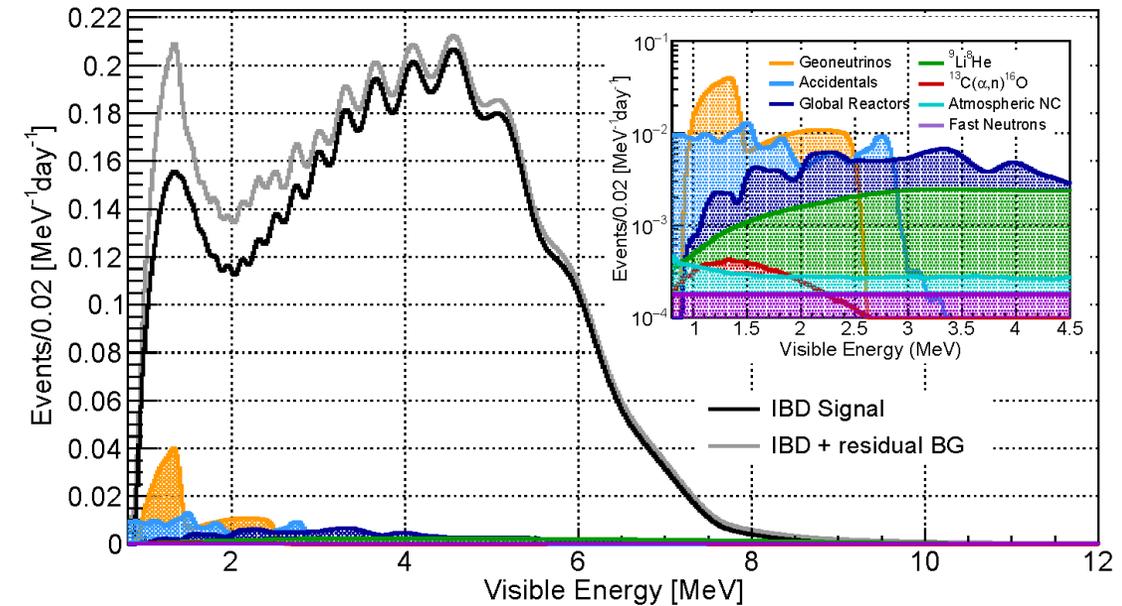


- Segnale **prompt**: positrone
 - Segnale **delayed**: n-H (2.22 MeV, $\tau \sim 200 \mu\text{s}$) o n-¹²C
- **Coincidenza prompt-delayed**: segnatura per distinguere interazioni di IBD dagli eventi di fondo



- Selezione basata sulla topologia spaziale e temporale degli eventi

Chinese Phys. C 46 123001 (2022)



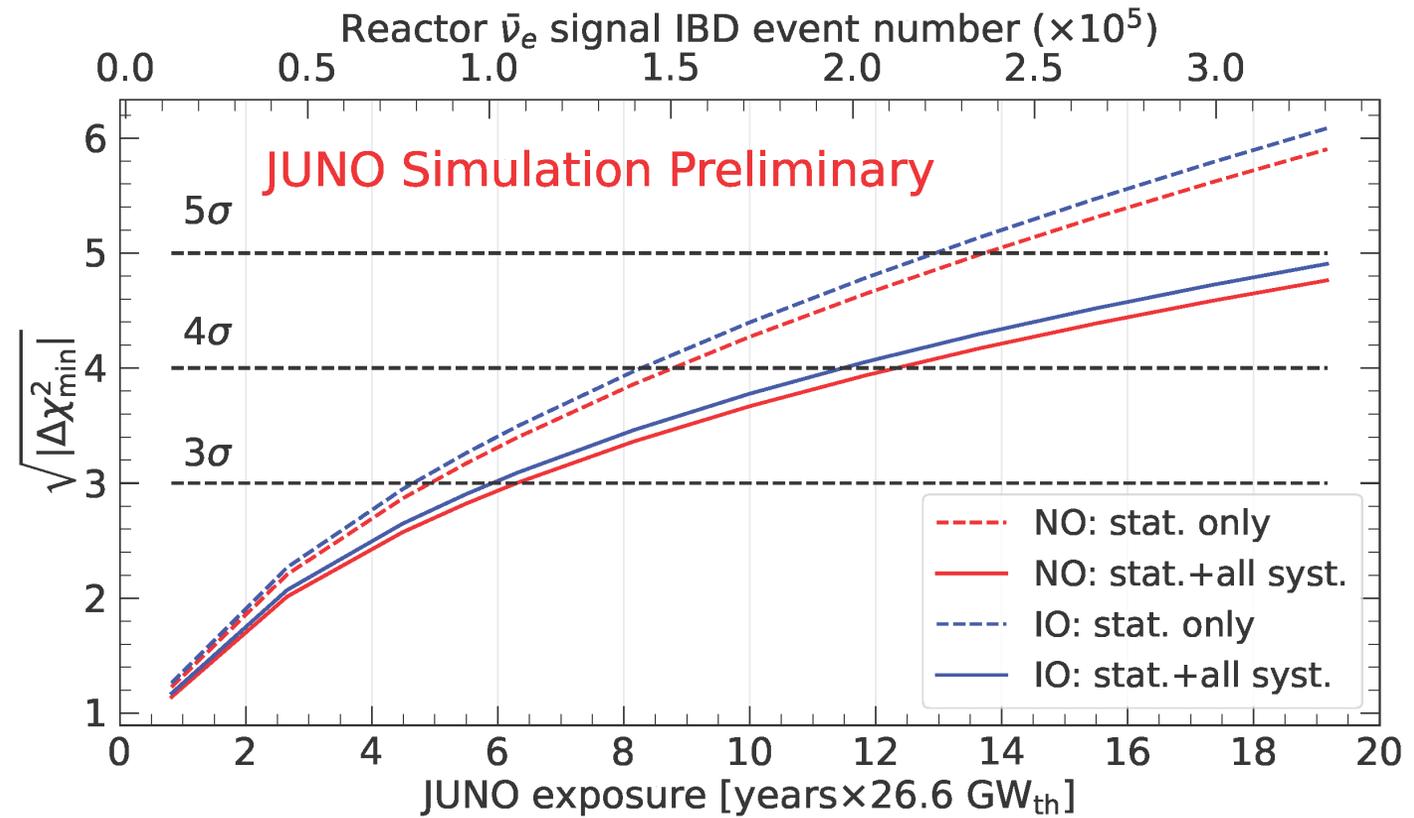
Rate del segnale attesa: **47.1 IBD/ giorno**

Rate del background attesa: **4.11 / giorno**

$\bar{\nu}_e$ da reattore: ordinamento di massa

- Sensibilità attesa per la determinazione dell'ordinamento di massa: **3σ in ~ 6 anni** con $26.6 \text{ GW}_{\text{th}}$
- Possibilità di studio combinato con la rivelazione di neutrini atmosferici
- Articolo in preparazione
[zenodo.6775075](https://zenodo.org/record/6775075)

$$\Delta\chi_{\text{MO}}^2 = |\chi_{\text{min}}^2(\text{NO}) - \chi_{\text{min}}^2(\text{IO})|$$

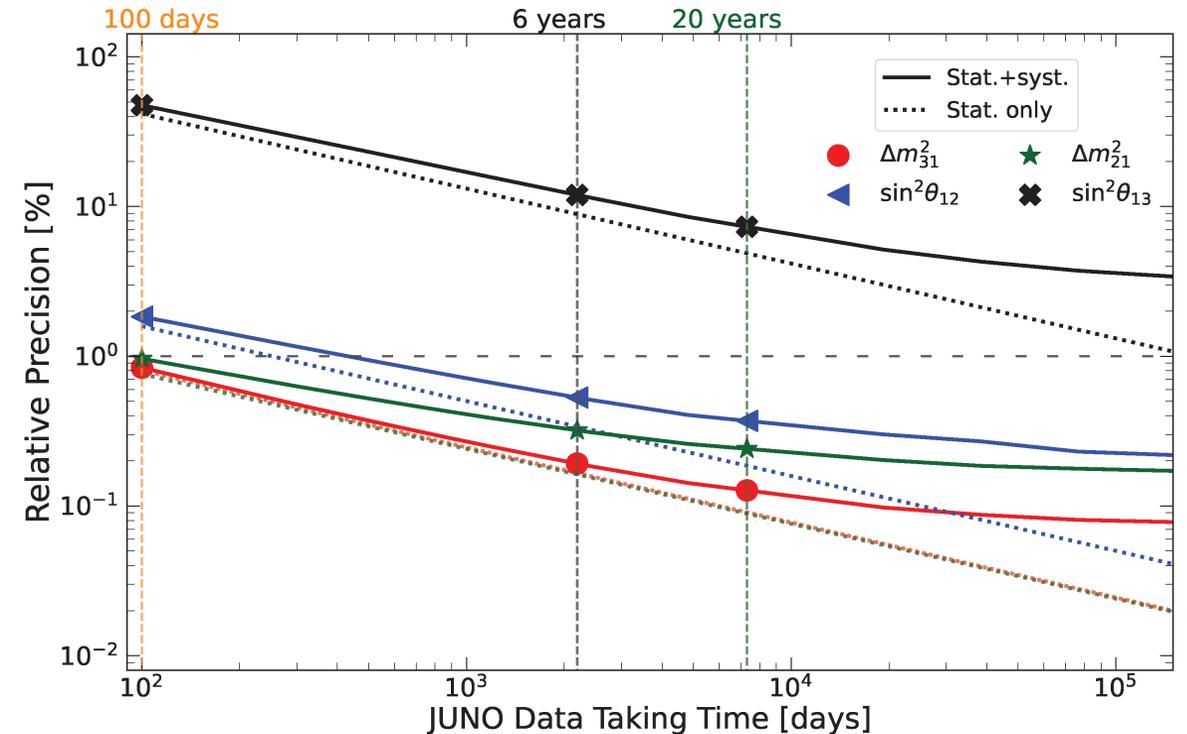


$\bar{\nu}_e$ da reattore: parametri di oscillazione

$$P(\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e) = 1 - \sin^2 2\theta_{13} \left(\sin^2 \theta_{12} \sin^2 \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} + \cos^2 \theta_{12} \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} \right) - \sin^2 2\theta_{12} \cos^4 \theta_{13} \sin^2 \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E}$$

	Δm_{31}^2	Δm_{21}^2	$\sin^2 \theta_{12}$	$\sin^2 \theta_{13}$
PDG 2020	1.4%	2.4%	4.2%	3.2%
100 days	~0.8%	~1.0%	~1.9%	~47.9%
6 years	~0.2%	~0.3%	~0.5%	~12%

- Precisione < 1% su Δm_{21}^2 , e Δm_{31}^2 in 100 giorni
- Precisione < 1% su $\sin^2(2\theta_{12})$ in 1 anno

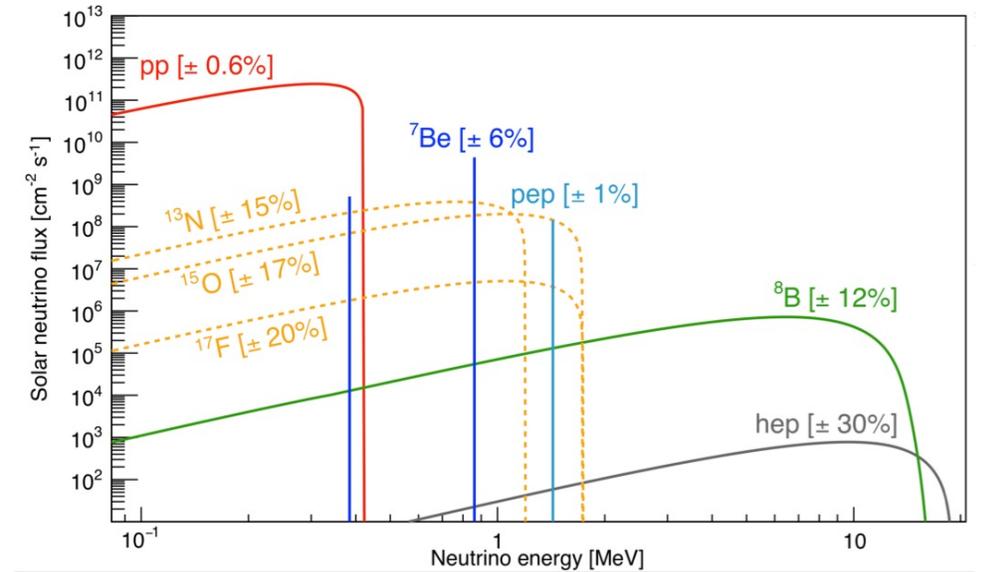
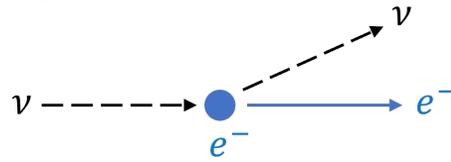


Misura di $\sin^2(2\theta_{12})$ e Δm_{21}^2 anche con neutrini solari (prossima slide)

Chinese Phys. C 46 123001 (2022)

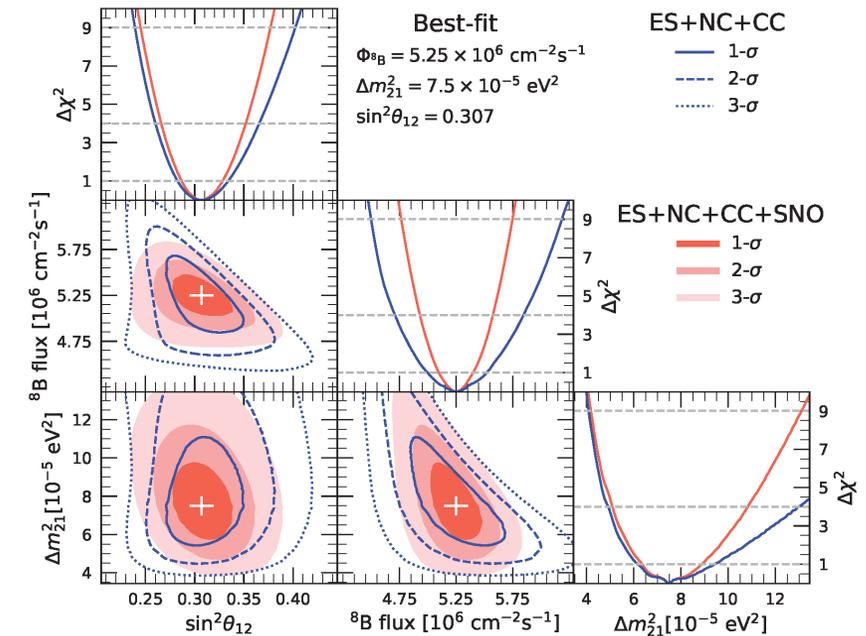
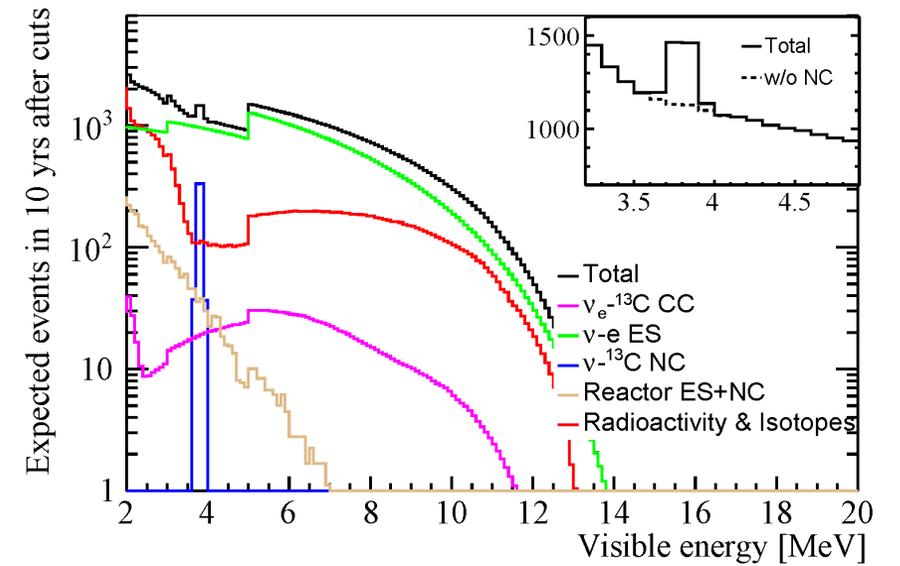
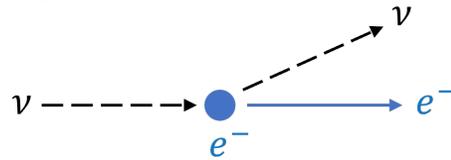
Neutrini solari ($E_{\text{vis}} > 2 \text{ MeV}$)

- Rivelazione tramite scattering elastico νe^-
- Neutrini solari dal ^8B



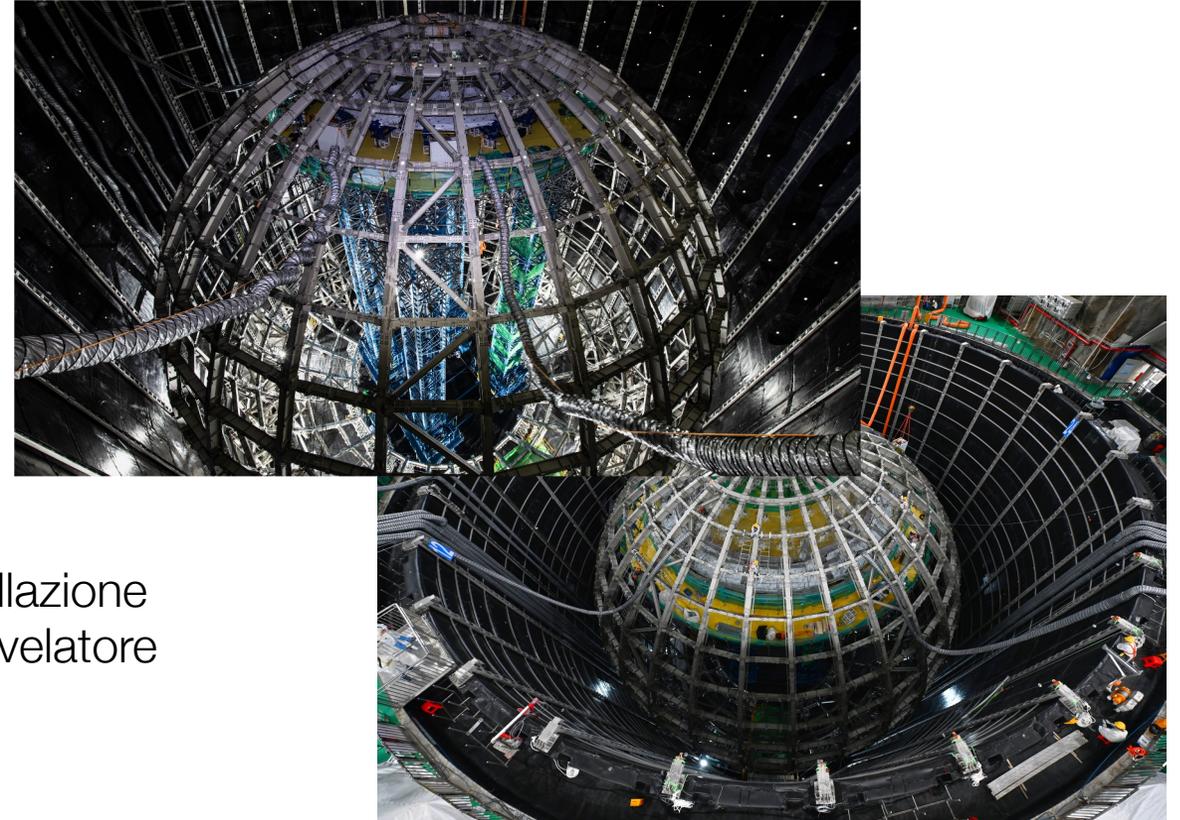
Neutrini solari ($E_{\text{vis}} > 2 \text{ MeV}$)

- Rivelazione tramite scattering elastico νe^-
- Neutrini solari dal ^8B
- Misura dei parametri di oscillazione $\sin^2(2\theta_{12})$ e Δm^2_{21}
- Precisione attesa in 10 anni:
 - Flusso di neutrini da ^8B : 5 %
 - $\sin^2(2\theta_{12})$: +9% / -8%
 - Δm^2_{21} : +27% / -17%



ES + CC + NC [arXiv:2210.08437](https://arxiv.org/abs/2210.08437) (sottomesso a APJ)
 Solo ES [Chin.Phys.C 45\(2021\)023004](https://doi.org/10.1088/1361-6470/ac1304)

- JUNO sarà il più grande esperimento a scintillatore liquido
- Numerosi obiettivi di fisica da diverse sorgenti (reattori, solari, SN, ...)
- Gerarchia di massa dei neutrini a **3σ in ~ 6 anni**
- Precisione $< 1\%$ su Δm^2_{21} , Δm^2_{31} , $\sin^2(2\theta_{12})$ in 1 anno



Stay tuned!

Grazie per l'attenzione!

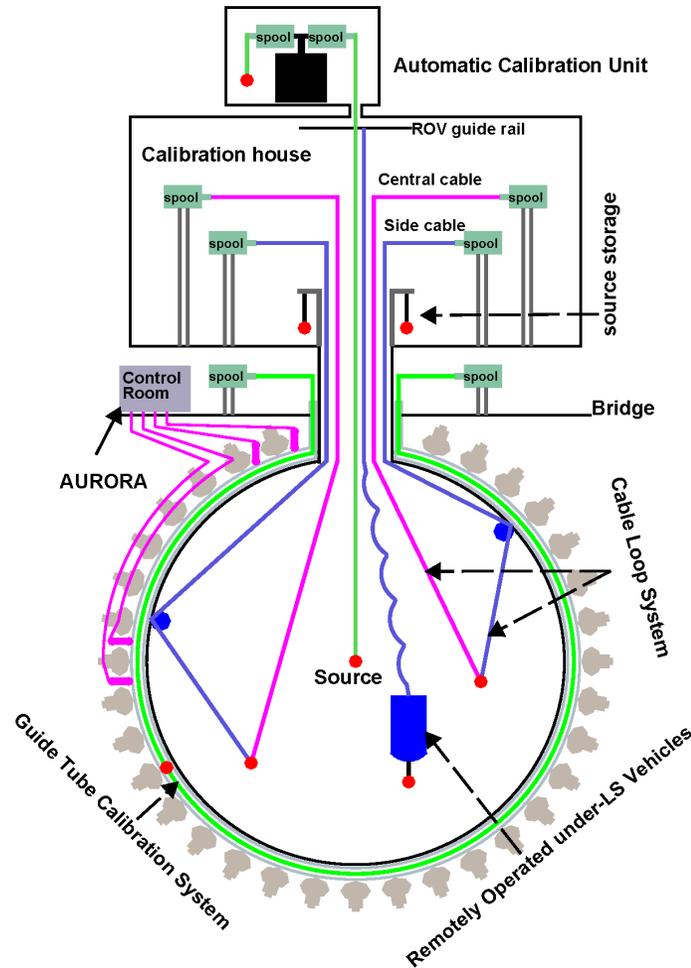
BACKUP

JUNO: caratteristiche principali

Esperimento	Daya Bay	Borexino	KamLAND	JUNO
Volume attivo	20 ton	~ 300 ton	~ 1kton	20 kton
Copertura	~ 12 %	~ 34 %	~ 34 %	~ 78 %
Risoluzione σ_E	~ 8 %/ \sqrt{E}	~ 5 %/ \sqrt{E}	~ 6 %/ \sqrt{E}	~ 3 %/\sqrt{E}
Light yield	~ 160 PE/MeV	~ 500 PE/MeV	~ 250 PE/MeV	> 1300 PE/MeV

- Ingente volume fiduciale
- Basso livello di contaminazione:
 - Laboratorio sotterraneo a circa 600 m di profondità, schermato dalla roccia sovrastante (≈ 1800 m.w.e.)
 - Screening e scelta dei materiali per minimizzare la contaminazione radioattiva
 - Attenta procedura di installazione
- Alta risoluzione energetica:
 - Resa di luce dello scintillatore $\approx 10^4$ fotoni/MeV
 - Copertura dei PMT $\approx 78\%$
 - Alta trasparenza dello scintillatore
 - Programma di calibrazione dedicato

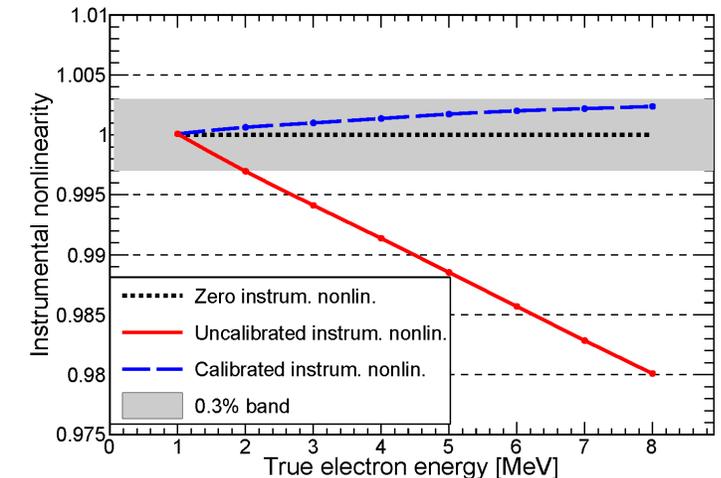
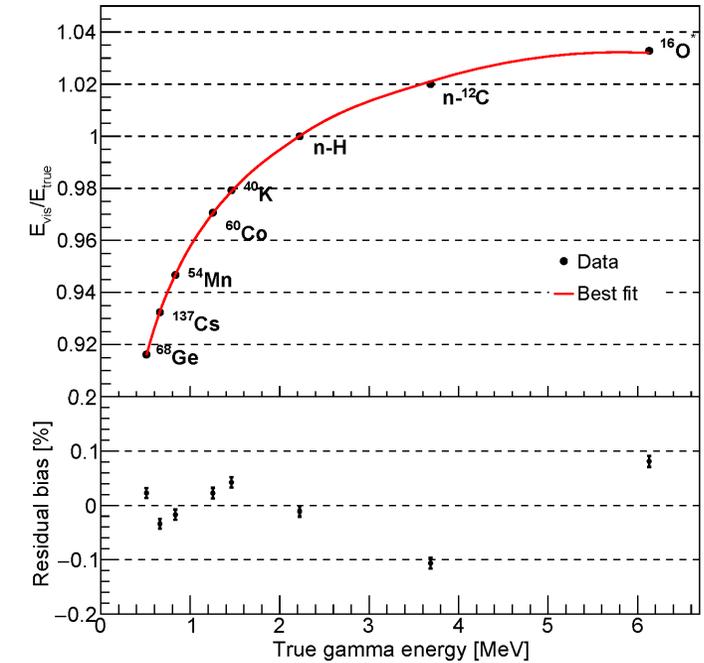
Sistema di calibrazione



- 4 sistemi di calibrazione
- Programma di calibrazioni settimanali e mensili
- Non-linearità dello scintillatore:
 - 5 sorgenti gamma
 - 2 sorgenti di neutroni
 - Spettro del ^{12}B
- Non-linearità strumentale:
 - Sorgente laser UV

Dual Calorimetry Calibration

- PMT da 3 pollici come riferimento per la scala lineare
- Risposta dei PMT da 20 pollici è corretta per singolo canale
- Non-linearità residua < 0.3 %



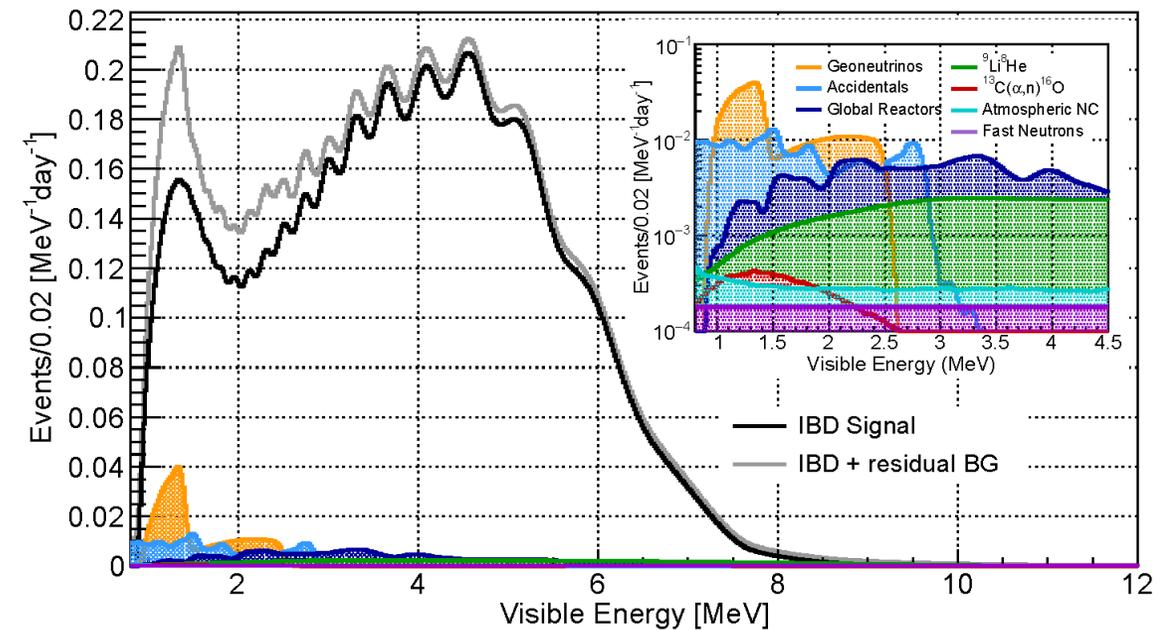
JHEP 03(2021)004

$\bar{\nu}_e$ da reattore: segnale e background

- Alcune sorgenti di fondo:
 - **Accidentali**, ^9Li - ^8He cosmogenici, geoneutrini, ...
- Principali criteri di selezione:
 - Volume fiduciale $r < 17.2$ m
 - Energia eventi *prompt* $E_p \in (0.7, 12)$
 - Energia eventi *delayed* $E_d \in (1.9, 2.5) \cup (4.4, 5.5)$
 - Correlazione temporale $\Delta t < 1$ ms
 - Correlazione spaziale $\Delta r < 1.5$ m
 - Veto dei muoni

Rate del segnale attesa: **47.1 IBD/ giorno**

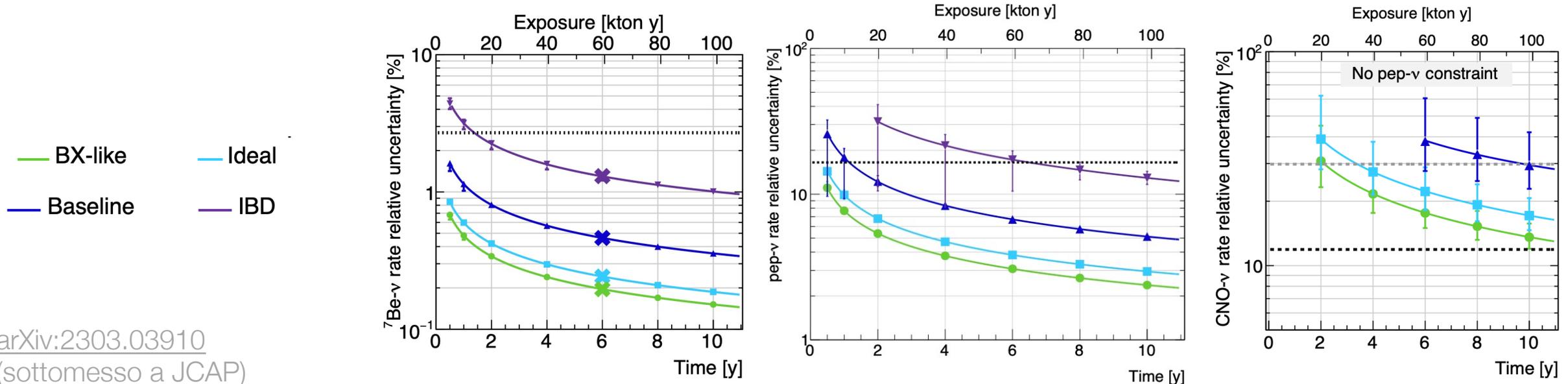
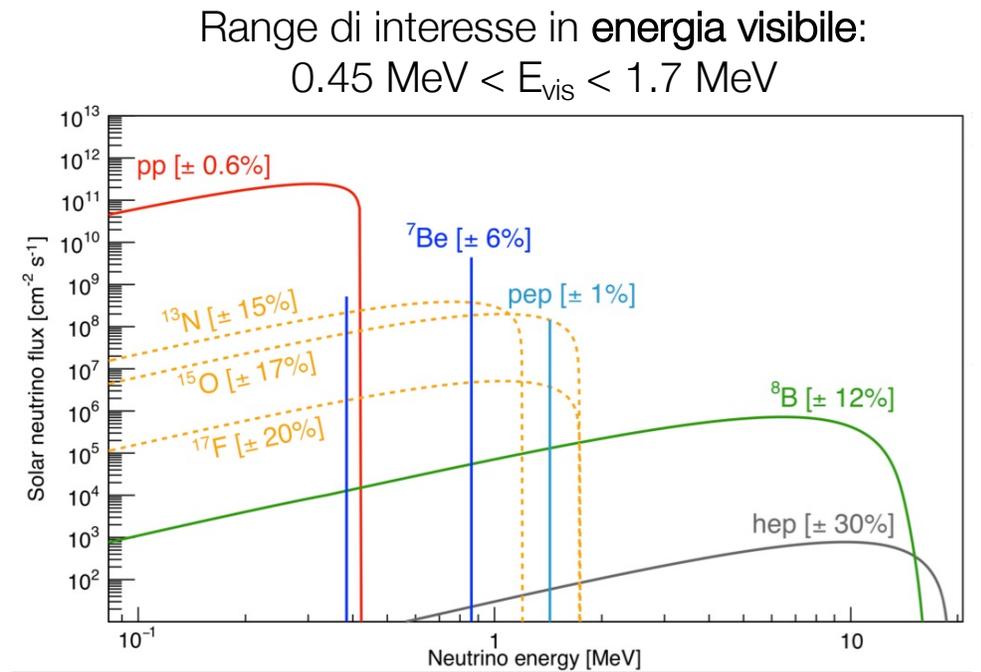
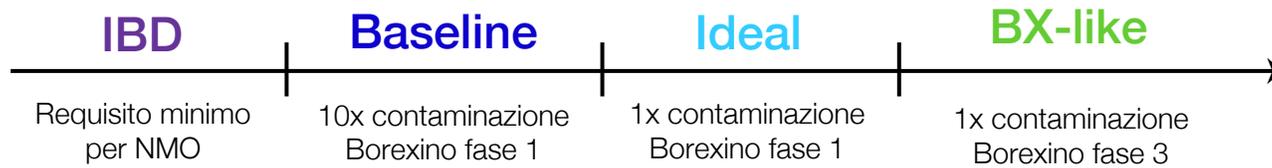
Rate del background attesa: **4.11 / giorno**



Chinese Phys. C 46 123001 (2022)

Neutrini solari ($E_{\text{vis}} < 2 \text{ MeV}$)

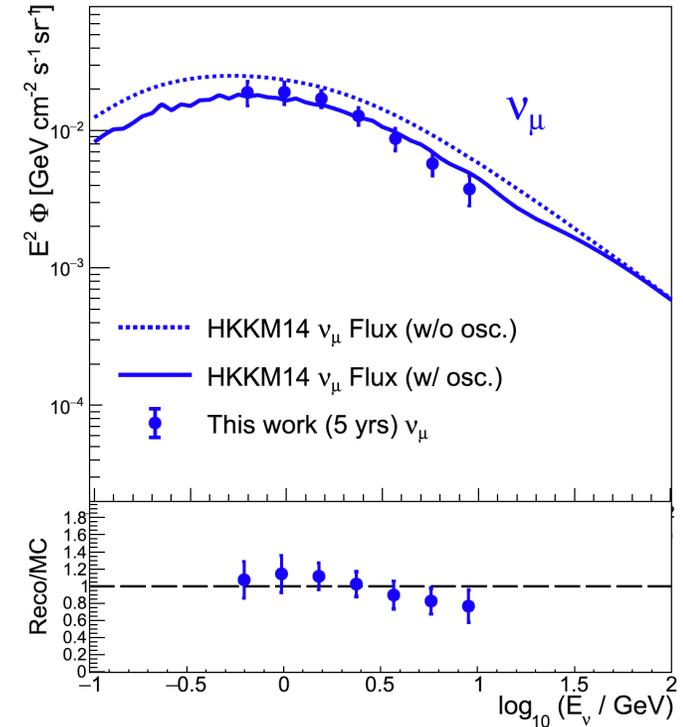
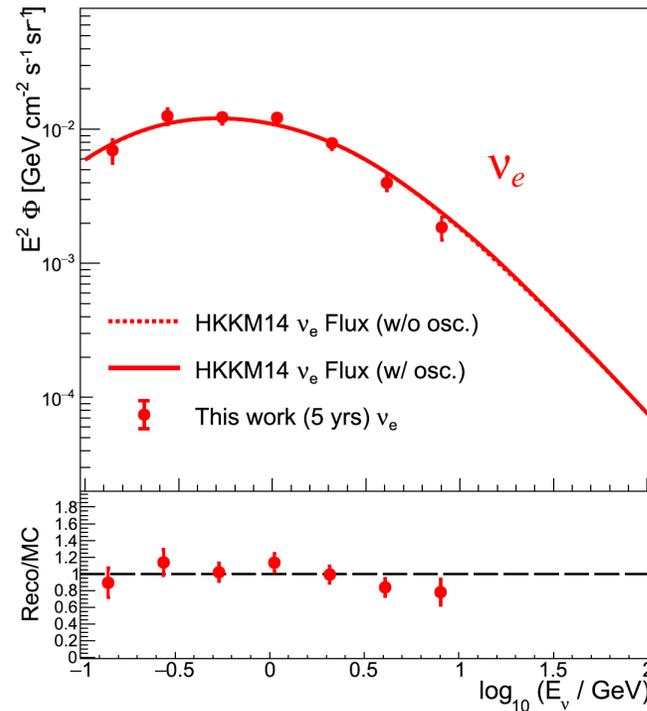
- Neutrini solari da ${}^7\text{Be}$, pep, CNO
- Diversi scenari di radiopurezza:



arXiv:2303.03910
 (sottomesso a JCAP)

Neutrini atmosferici

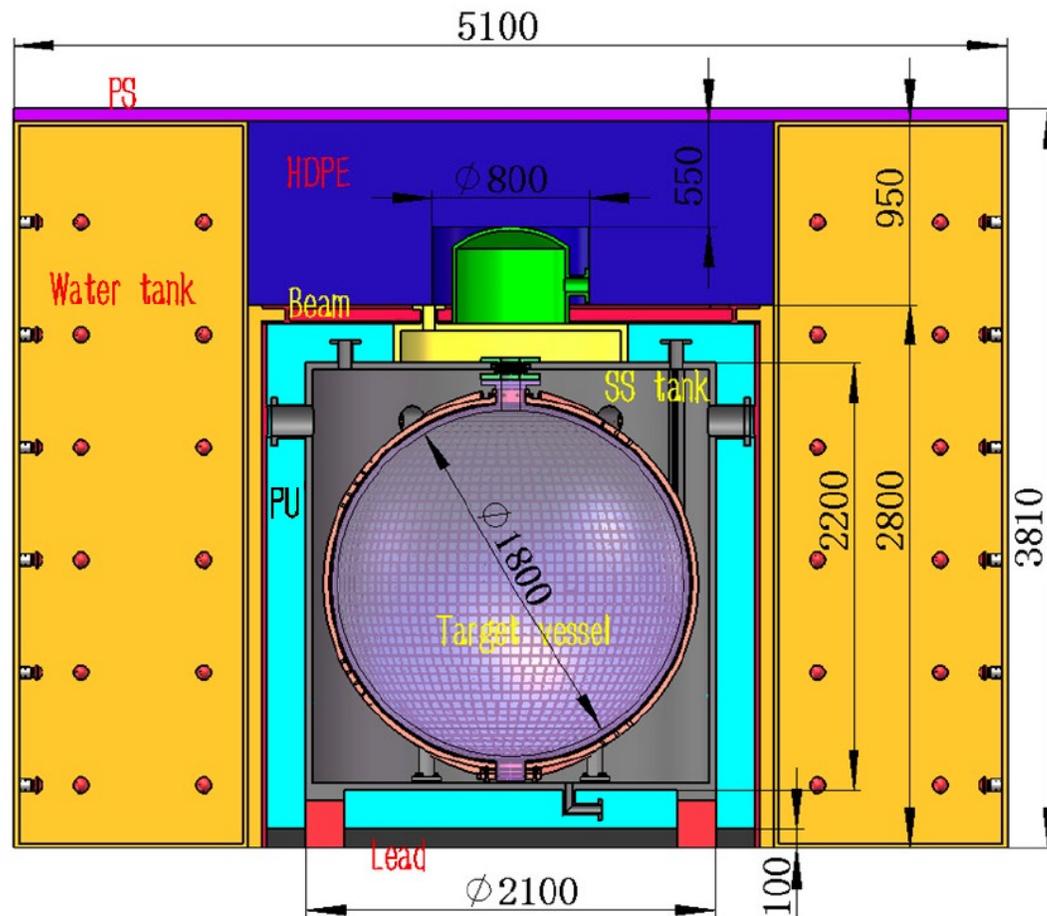
- Prima misura in scintillatore liquido: studi nel range 100 MeV – 10 GeV
- Analisi basata solo su eventi CC *fully contained*:
 - Distinzione tra neutrini muonici ed elettronici possibile tramite l'hit time
 - Ricostruzione dello spettro di ν_e e ν_μ con una precisione tra il 10% e il 25% in 5 anni
- Possibilità di analisi combinata per la sensitività all'ordinamento di massa
- Misura del parametro θ_{23}



[EPJC \(2021\) 81:887](#)

JUNO-TAO

Taishan Antineutrino Observatory



[arXiv: 2005.08745](https://arxiv.org/abs/2005.08745)

- 2.8-ton Gd-LS in sfera di acrilico
- 10 m² SiPM
 - Copertura del ~94%
 - 50% PDE
- 4500 PE/MeV
- Risoluzione energetica < 2% @ 1 MeV
- 30 m dalla centrale di Taishan
 - 30x rate attesa in JUNO

Obiettivo principale: fornire uno spettro di riferimento per JUNO