

# Studio delle Oscillazioni del Neutrino ai Reattori: JUNO

---

DAVIDE CHIESA

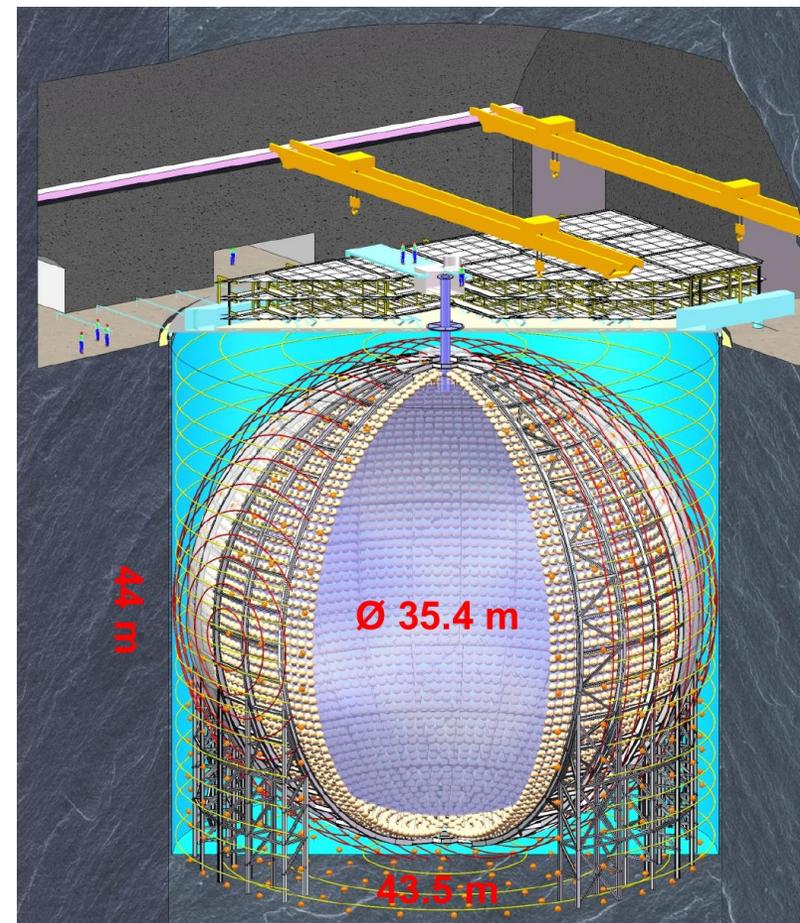
# JUNO: il più grande osservatorio sotterraneo di neutrini al mondo

**JUNO: J**iangmen **N**eutrino **U**nderground **O**bservatory

**Obiettivo scientifico primario:**

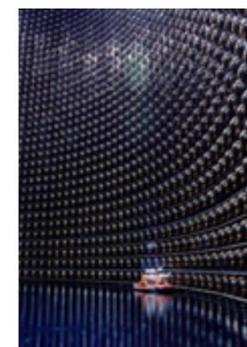
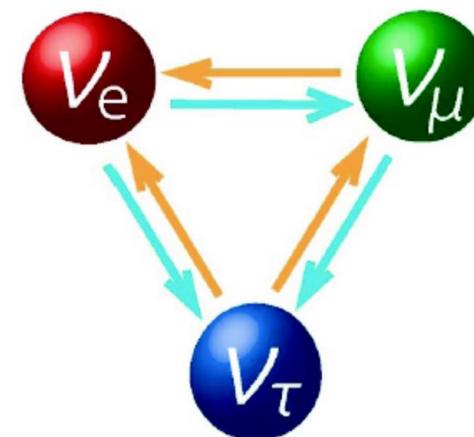
→ **determinare l'ordinamento delle masse dei neutrini ( $\nu$ )**

- Massive: ~20 kton Liquid Scintillator (LS)
- Underground: ~700 m overburden
- High energy resolution: 3% /  $\sqrt{E}$  (MeV)
- Energy scale uncertainty: <1%



# Oscillazioni dei neutrini

- Ad oggi conosciamo tre tipi di neutrino: **elettronico**, **muonico** e **tauonico** (detti autostati di **sapore**)
- Secondo il Modello Standard, i neutrini hanno massa nulla.
- L'osservazione delle oscillazioni dei neutrini ha dimostrato che i neutrini hanno massa non nulla (seppur molto piccola).
- Gli autostati di massa dei neutrini ( $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ ) non coincidono con gli autostati di sapore e i neutrini, quando propagano nello spazio, si trasformano ciclicamente nei diversi stati di sapore.
- Premio Nobel 2015, per la scoperta dell'oscillazione dei neutrini, che dimostra che il Neutrino ha massa.



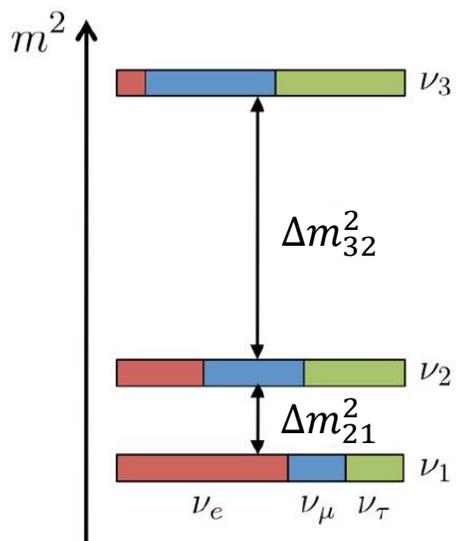
SuperKamiokande



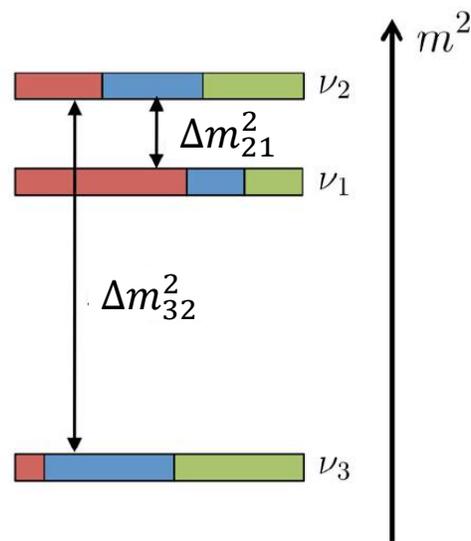
SNO

# La questione dell'ordinamento delle masse dei neutrini

Normal Hierarchy (NH)



Inverted Hierarchy (IH)



$$\Delta m_{ij}^2 \equiv m_i^2 - m_j^2$$

$$\Delta m_{21}^2 \approx 7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$$

$$|\Delta m_{32}^2| \approx 2.5 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\text{NH: } |\Delta m_{31}^2| = |\Delta m_{32}^2| + |\Delta m_{21}^2|$$

$$\text{IH: } |\Delta m_{31}^2| = |\Delta m_{32}^2| - |\Delta m_{21}^2|$$

La misura dell'ordinamento delle masse dei  $\nu$  può essere effettuata sfruttando le oscillazioni degli antineutrini elettronici emessi dai reattori nucleari

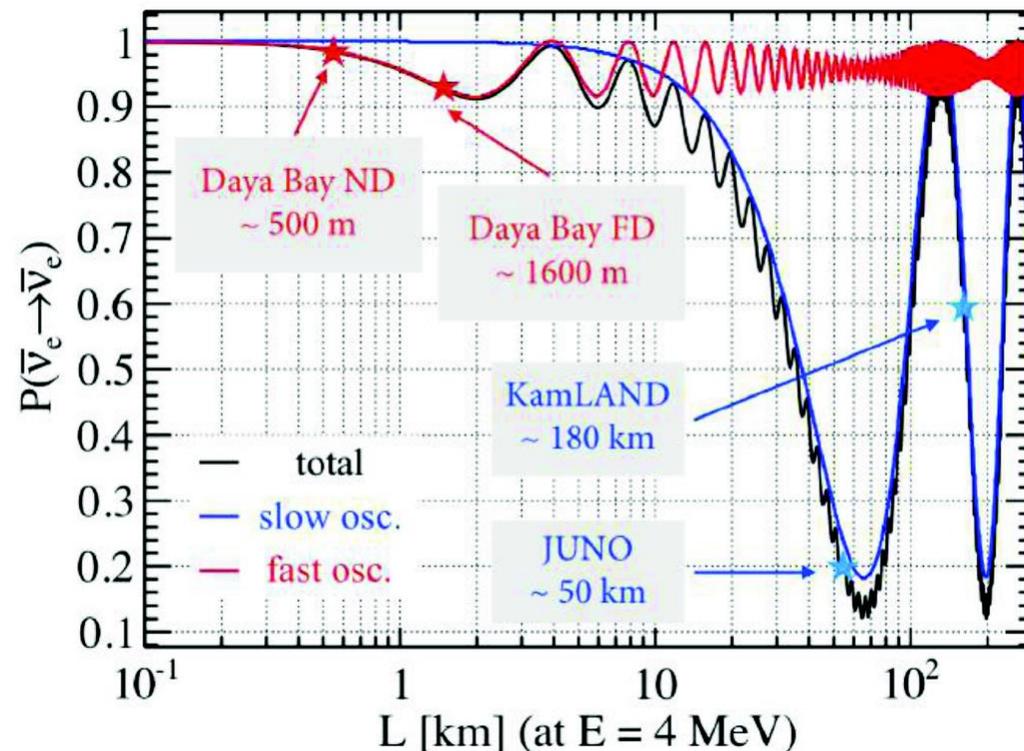
# Oscillazione degli antineutrini elettronici

➤ La probabilità di sopravvivenza dell'antineutrino elettronico è:

$$P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e} = 1 - \boxed{\cos^4 \vartheta_{13} \sin^2 2\vartheta_{12} \sin^2 \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E}} +$$

$$- \boxed{\sin^2 2\vartheta_{13} \left( \cos^2 \vartheta_{12} \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} + \sin^2 \vartheta_{12} \sin^2 \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \right)}$$

- Solar (slow)
- Atmospheric (fast)



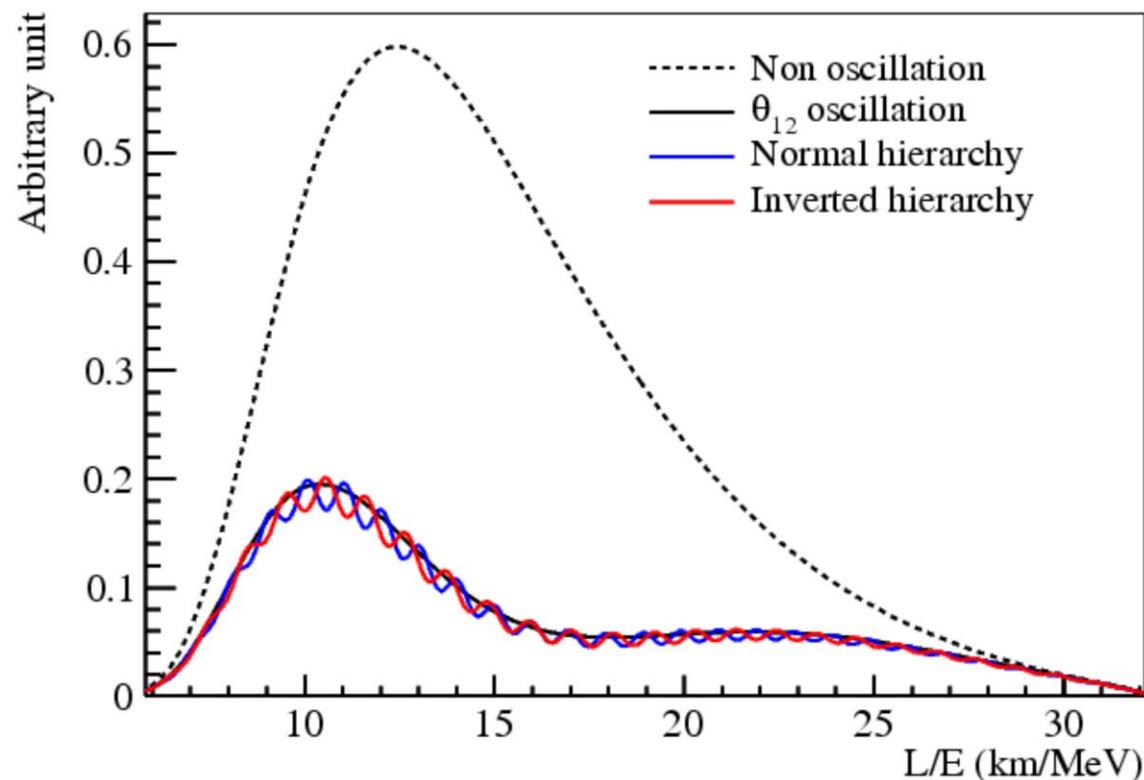
# Misura dell'ordinamento delle masse dei neutrini

La forma dello spettro oscillato dipende dall'ordinamento di massa (sfasamento)

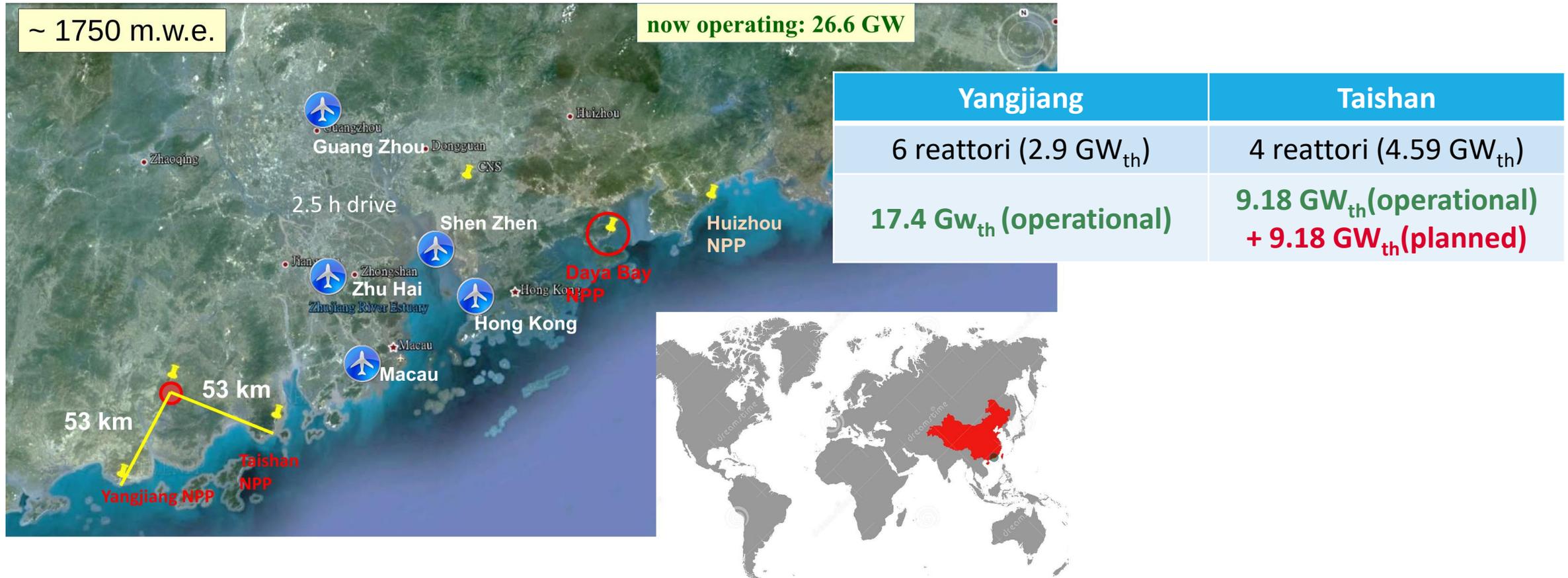


Per osservare lo sfasamento tra i due scenari (NH vs IH), è necessario:

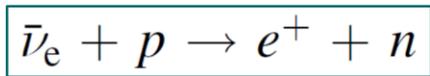
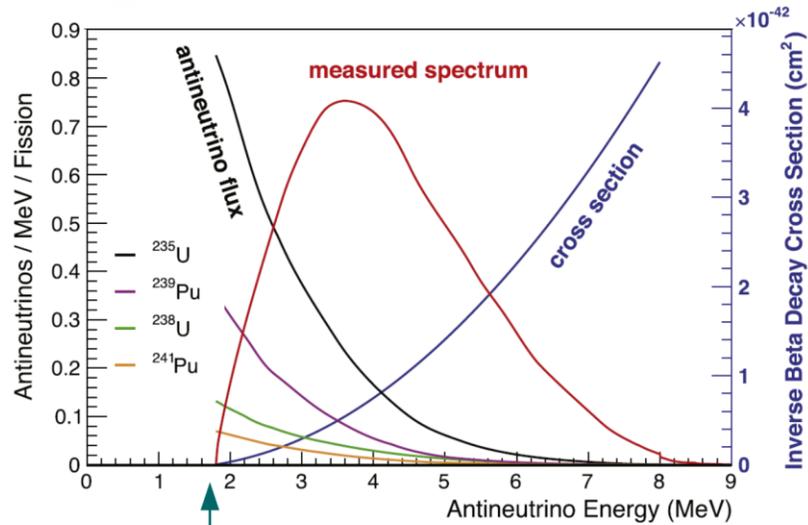
- Accumulare statistica → massa rivelatore, sorgente intensa, tempo di presa dati
- Buona risoluzione energetica → almeno  $3\% / \sqrt{E}$  (MeV)
- Bassa incertezza sulla scala energetica (<1%)



# La sorgente di neutrini per JUNO: i reattori nucleari

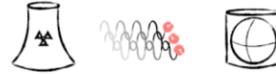


# Rivelazione degli antineutrini da reattore in JUNO

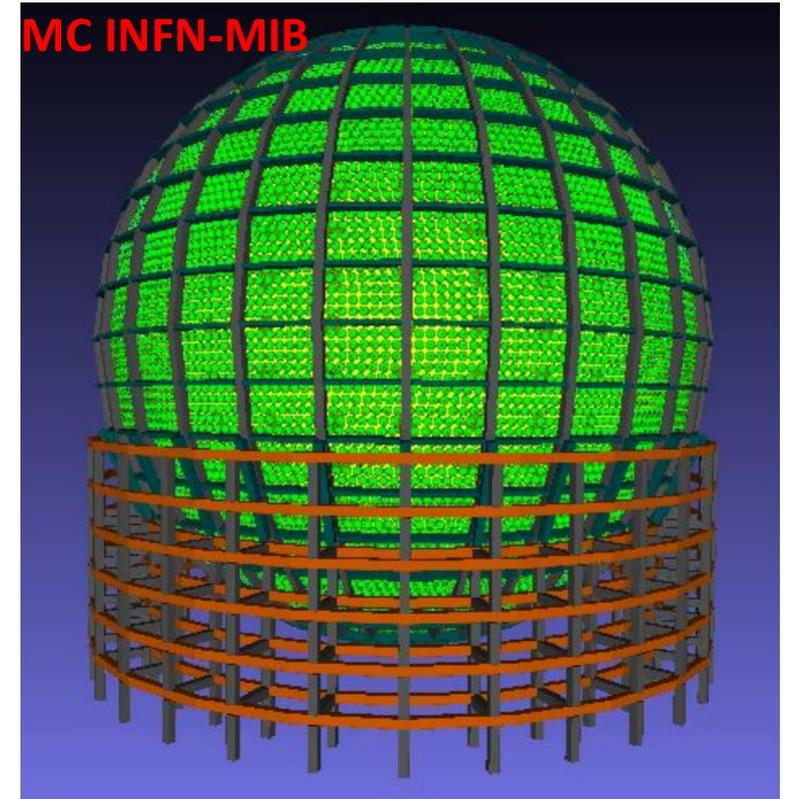
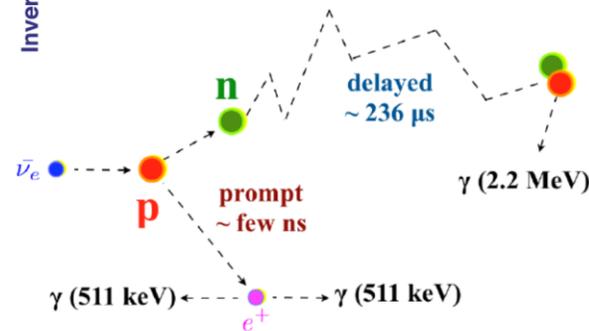


- $E_{\text{vis}}(e^+) \simeq E(\bar{\nu}_e) - 0.8 \text{ MeV}$
- Time coincidence between prompt and delayed signals to reject uncorrelated background

Antineutrinos from reactors

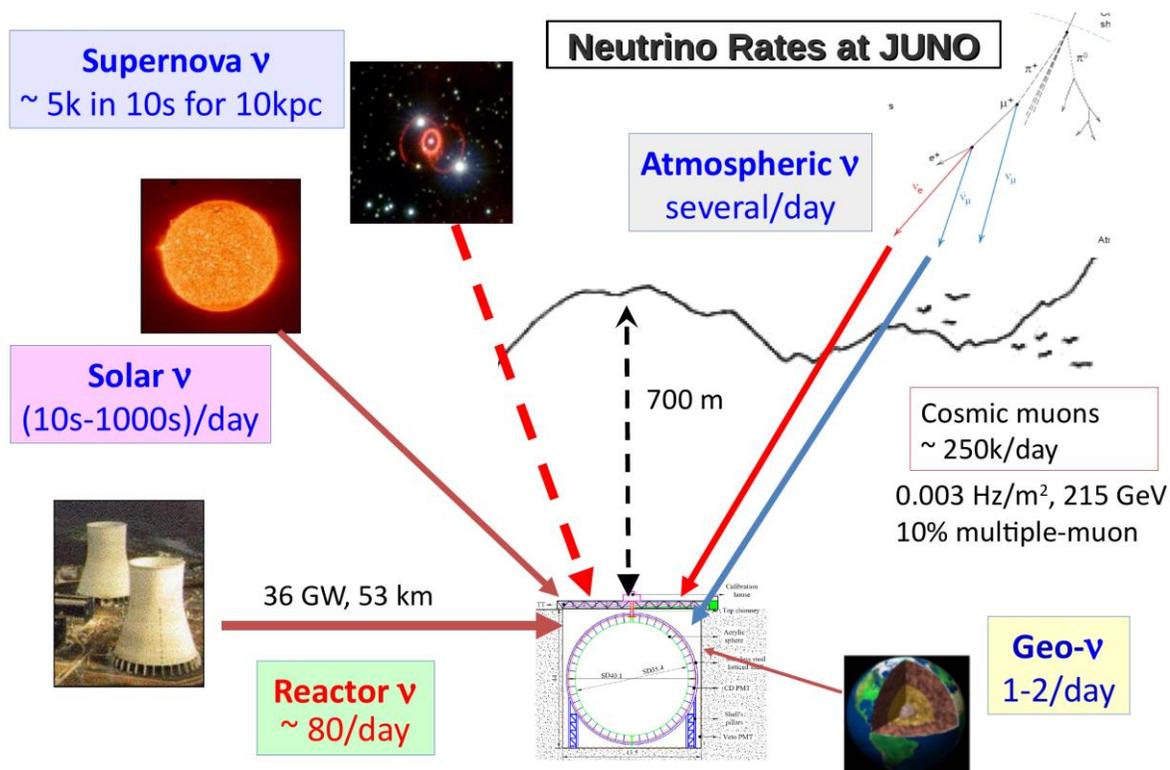


INVERSE BETA DECAY (IBD) reaction on the scintillator:



# Le sfide di JUNO

## IN GENERALE...



## IN BICOCCA...

Alta statistica, buona risoluzione energetica e precisione sulla scala energetica non sono gli unici ingredienti necessari per riuscire a determinare l'ordinamento in massa dei neutrini.

Due ulteriori aspetti cruciali sono:

- **Basso fondo** → selezione di materiali ad elevata radiopurezza
- **Controllo delle sistematiche** → studio e modellizzazione dello spettro di antineutrini emessi dai reattori nucleari

# Analisi delle componenti di fondo da radioattività naturale

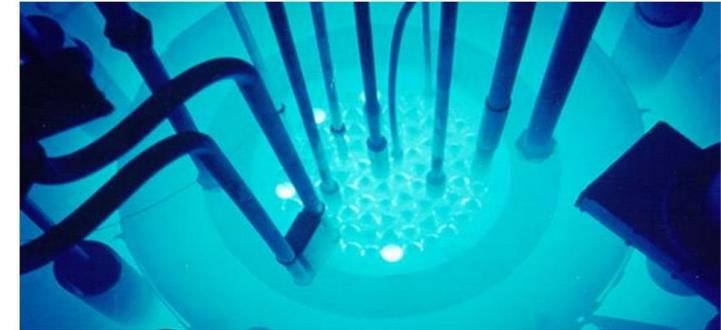
## ➤ Selezione dei materiali

Individuare i materiali con il minor contenuto di contaminanti radioattivi (U/Th/K) adatti ad essere utilizzati nell'esperimento

Misure a basso fondo



Neutron Activation Analysis



## ➤ Background model

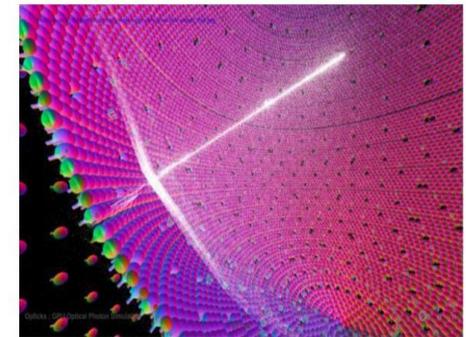
Ricostruzione dello spettro di fondo prodotto dai contaminanti

→ Fondamentale per la misura dei neutrini solari

Misure in coincidenza



Software MC



# Reactor antineutrino flux

*...its uncertainty is not negligible!*

- It's the starting point to build the expected  $\bar{\nu}_e$  spectrum
- $\bar{\nu}_e$  are emitted from  $\beta$ -decays of fission fragments
- > 99% of reactor  $\bar{\nu}_e$  emissions come from fissions of four main isotopes:  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{U}$ .

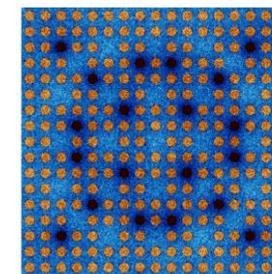
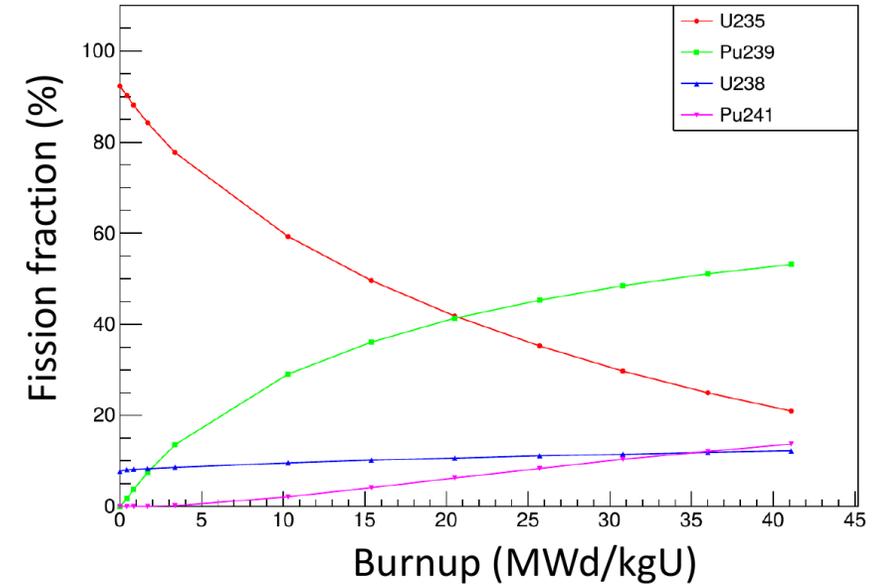
If one knows the **fission rates** of each isotope ( $f_i$ ) and the  **$\bar{\nu}_e$  energy spectrum** of each isotope ( $S_i(E_\nu)$ ), the  $\bar{\nu}_e$  flux is simply obtained as:

$$S(E_\nu) = \sum_i f_i S_i(E_\nu)$$

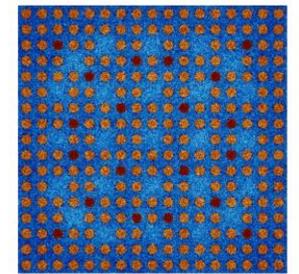
We need to know  $f_i$  and  $S_i(E_\nu)$  with high accuracy and precision



Reactor simulations



Fresh fuel assembly



Fuel assembly after burnup



# Proposte di tesi

---

- Analisi dell'evoluzione temporale dello spettro di antineutrini emessi dai reattori di potenza.
- Misura di contaminanti in traccia in campioni solidi e liquidi mediante attivazione neutronica e tecniche radiochimiche.
- Studio delle componenti del fondo radioattivo atteso per l'esperimento JUNO.

## CONTATTI

Monica Sisti ([monica.sisti@mib.infn.it](mailto:monica.sisti@mib.infn.it) )

Davide Chiesa ([davide.chiesa@unimib.it](mailto:davide.chiesa@unimib.it))

Massimiliano Nastasi ([massimiliano.nastasi@unimib.it](mailto:massimiliano.nastasi@unimib.it) )