

# Esperimento JUNO

e

## attività del gruppo JUNO Milano-Bicocca

---

Andrea Barresi

[andrea.barresi@unimib.it](mailto:andrea.barresi@unimib.it)

# Neutrini e l'esperimento JUNO

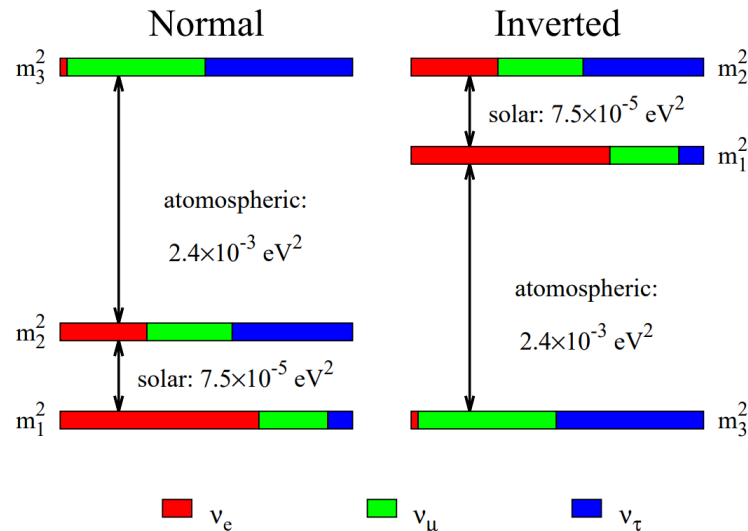
# Oscillazioni di neutrini e ordinamento delle masse

L'osservazione delle oscillazioni dei neutrini ha dimostrato:

- I neutrini hanno massa non nulla
- Gli autostati di massa dei neutrini ( $\nu_1, \nu_2, \nu_3$ ) non coincidono con gli autostati di sapore ( $\nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ )

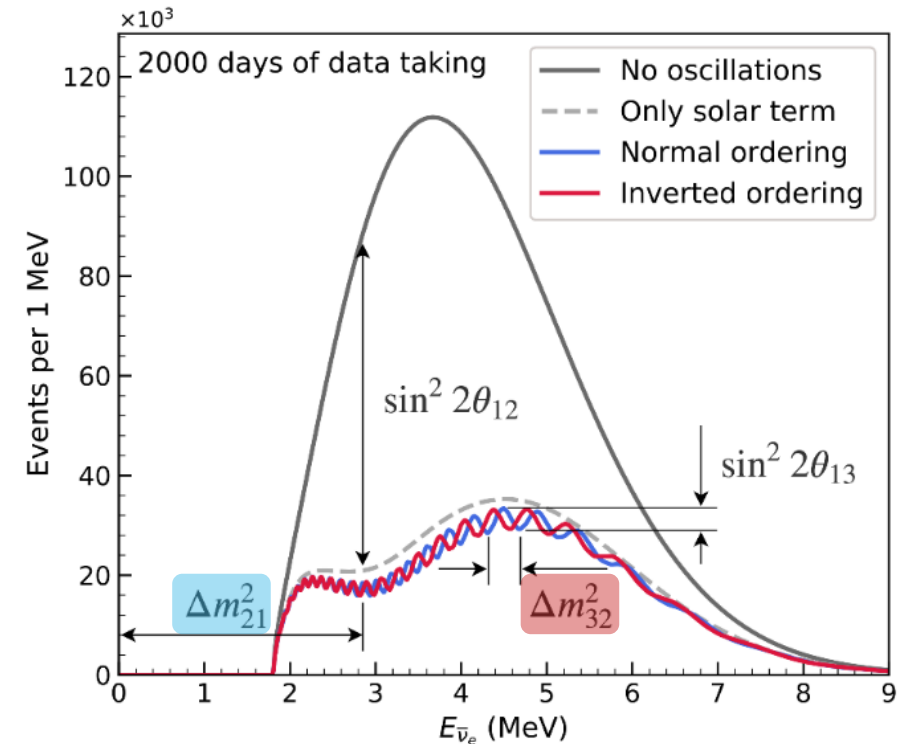
Gli esperimenti di oscillazione hanno permesso di determinare solo i  $\Delta m^2$  tra gli autostati di massa

L'**ordinamento delle masse** neutrini è un problema aperto di grande rilevanza



Può essere risolto attraverso la misura della **forma dello spettro energetico** degli antineutrini prodotti dai reattori nucleari

$$P_{\nu_e \rightarrow \nu_e} = 1 - \cos^4 \vartheta_{13} \sin^2 2\vartheta_{12} \sin^2 \frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E} + \sin^2 2\vartheta_{13} \left( \cos^2 \vartheta_{12} \sin^2 \frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E} + \sin^2 \vartheta_{12} \sin^2 \frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E} \right)$$



# L'esperimento JUNO - Jiangmen Underground Neutrino Observatory

## Obiettivi

Determinazione  
ordinamento di massa

Misura di precisione dei  
parametri di oscillazione  
( $\theta_{12}$ ,  $\Delta m_{21}^2$ ,  $\Delta m_{31}^2$ )

### • Top Tracker (veto muoni)

### • Central detector:

- ~ 20 000 t di liquido scintillante in sfera di acrilico
- 17612 large PMT (20-inch)
- 25600 small PMT (3-inch)
- ~ 78% copertura PMT
- Bobina di compensazione campo magnetico terrestre

### • Water Cherenkov Detector (veto muoni):

- 2400 PMT da 20 pollici
- 35 000 t acqua ultra pura
- Efficienza rivelazione muoni

## Caratteristiche

### Statistica

Elevata massa  
(20 kton)

Antineutrini da  
reattore (26,6 GW)

### Risoluzione energetica

Elevata copertura  
PMT (78 %)

Liquido scintillante  
elevate  
trasparenza

PMT ultra efficienza  
(30%)

### Incertezze spettro degli antineutrini

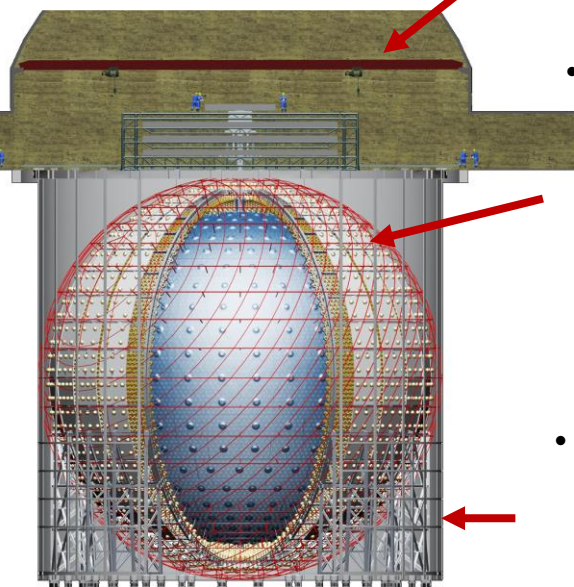
Rivelatore TAO

### Controllo del fondo

Rivelatore  
sotterraneo  
(~ 700 m)

Veto ad alta  
efficienza (>99,5%)

Selezione dei  
materiali

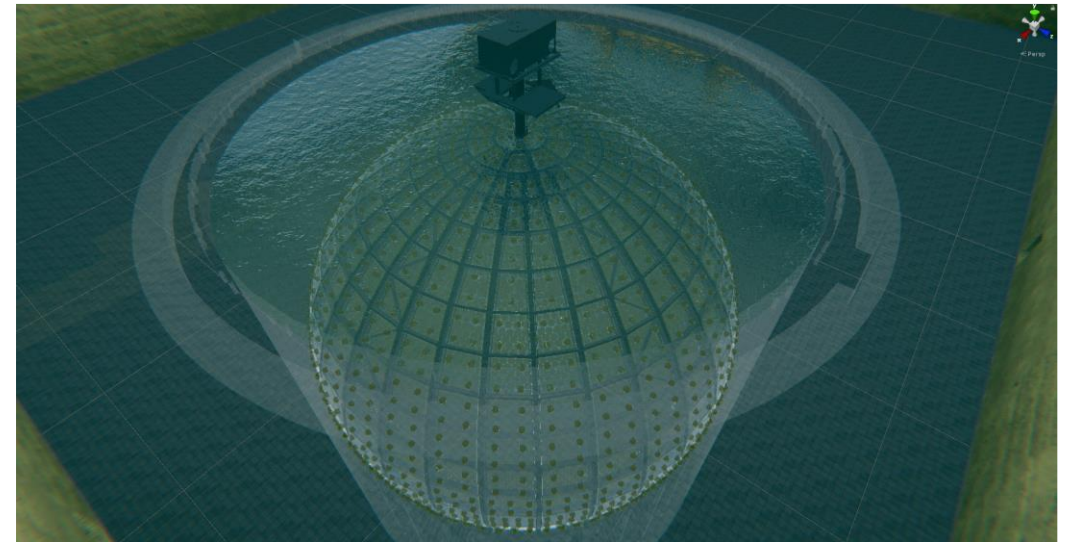
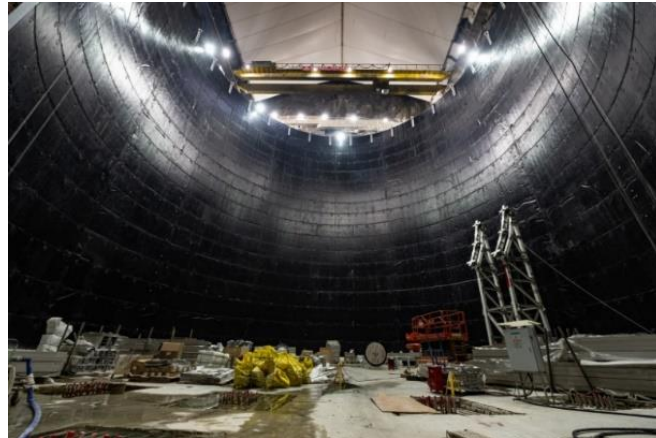


# Sito di JUNO e costruzione

JUNO è attualmente in costruzione nella provincial di Guangdong, in Cina, a 53 km da due impianti nucleari in modo da massimizzare la sensibilità all'ordinamento di massa.



Completamento previsto nel 2023



# Rivelatore TAO - Taishan antineutrino observatory

La conoscenza dello spettro degli antineutrini prodotti dai reattori è fondamentale

## Obiettivi

Misurare lo spettro degli antineutrini da reattore ad alta risoluzione

Fornire uno spettro di riferimento per JUNO, altri esperimenti e database nucleari



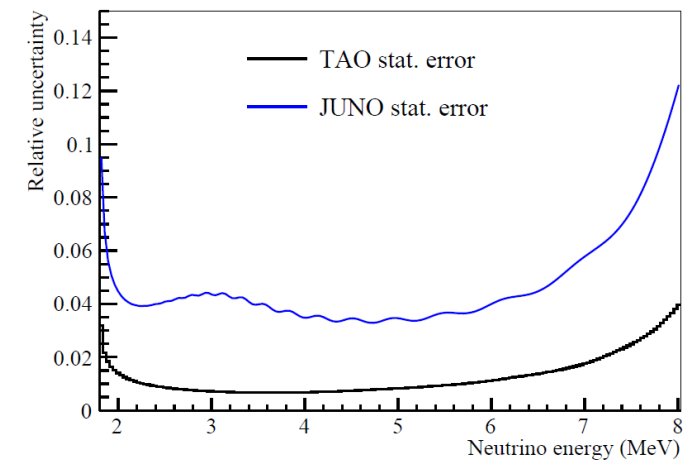
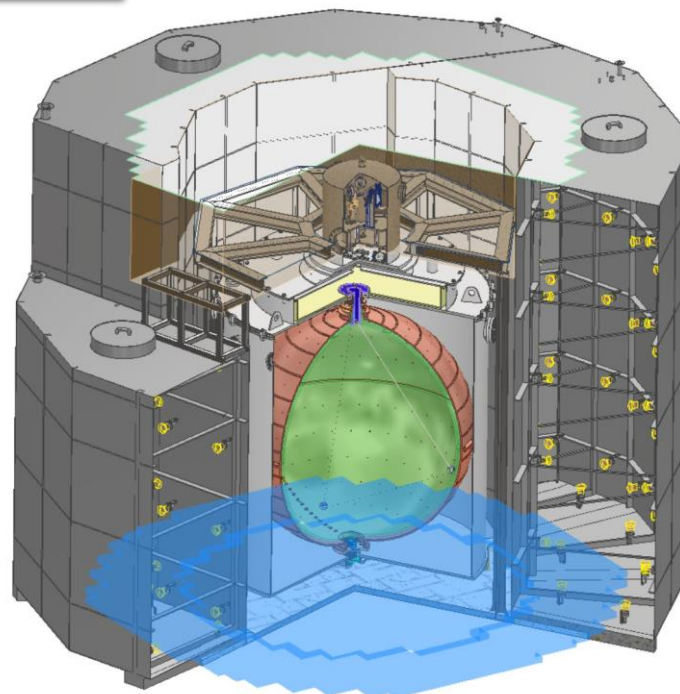
## Caratteristiche

~30 m dal nucleo del reattore da 4,6 GWth

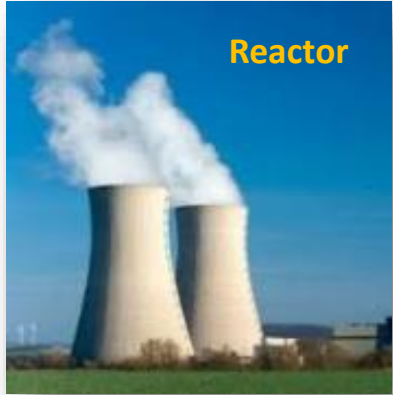
Volume attivo ~ 3t di LS (Gd)

Veto muoni con scintillatori plastici e rivelatore Cherenkov

Risoluzione ~ 2% @1 MeV



# Altre possibilità con JUNO



Reactor

~60 IBDs / giorno



Atmosphere

Alcuni / giorno



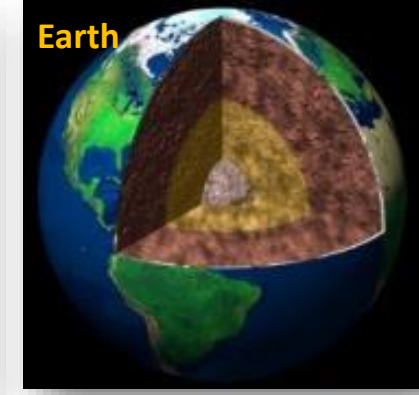
Solar

Centinaia / giorno



Supernova

~5000 IBDs per  
CCSN @10 kpc



Earth

Alcuni IBDs / giorno

+  
Nuova  
fisica

Oscillazioni e proprietà dei neutrini

Neutrini come sonde

# **Attività del gruppo JUNO Milano-Bicocca**



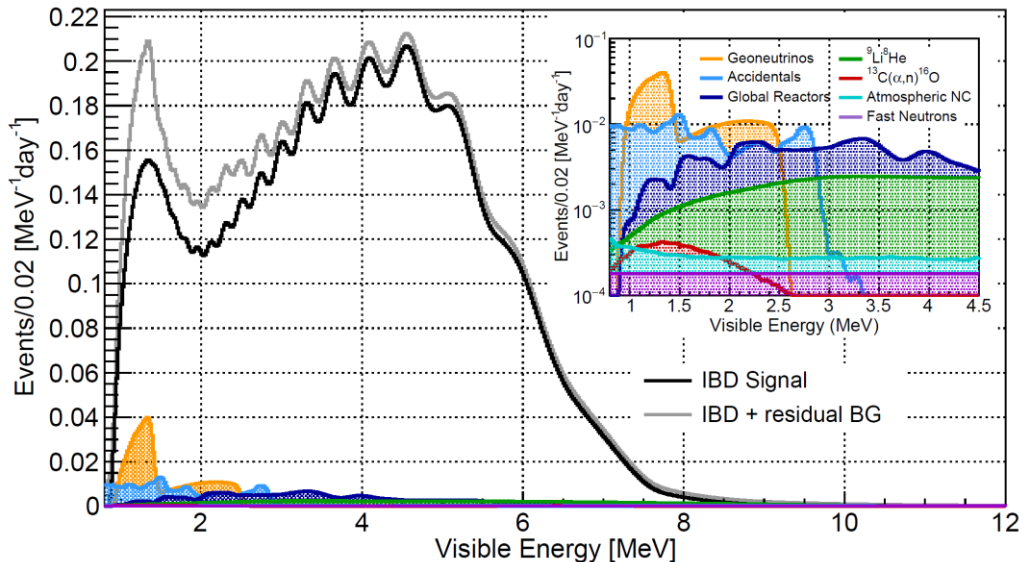
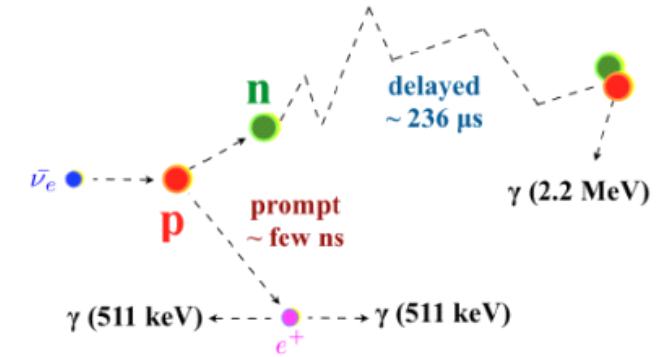
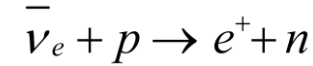
# Segnale IDB e fondo

JUNO è stato progettato per rivelare gli antineutrini da reattore tramite la reazione di **Decadimento Beta Inverso** (IBD)

Numero di eventi di segnale atteso: 60 cpd ( $> 10^5 / 6$  anni)

## Segnale IBD:

- Segnale prompt dal positrone (ionizzazione e annichilazione)
- Segnale ritardato dalla cattura del neutrone su  $^1\text{H}$  (2.2 MeV  $\gamma$ )



## Sorgenti di background per eventi IBD:

- Eventi accidentali prodotti dalla radioattività naturale nei materiali
- Nuclidi cosmogenici ( $^9\text{Li}/^8\text{He}$ )
- Neutroni veloci e reazioni ( $\alpha, n$ )
- Geo-neutrini
- Muoni cosmici

Source	Rate
Geo vs	1,2
Reattori vs	1
Accidentali	0,8
$^9\text{Li}/^8\text{He}$	0,8
Atm vs	0,16
Fast n	0,1
( $\alpha, n$ )	0,05

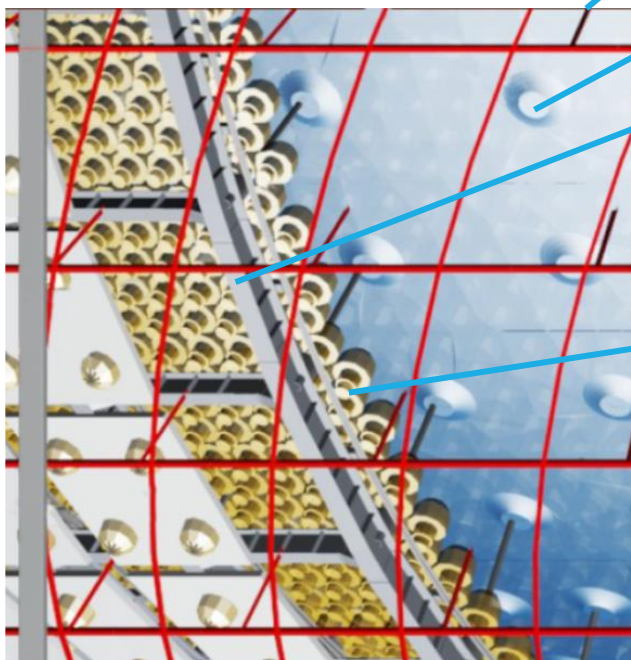
Il **rate di eventi singoli** da radioattività naturale deve essere **minore di 10 Hz** in tutto il volume fiduciale del rivelatore ( $R < 17.2$  m)

È necessario effettuare una accurata **selezione dei materiali**, pulizia delle superfici, dell'emanazione di radon e controllo della polvere.

# Richieste di radiopurezza

Le richieste di radiopurezza diventano meno stringenti all'aumentare della distanza dalla parte attiva del rivelatore (liquido scintillante)

Tutti i materiali devono essere selezionati dal punto di vista del loro contenuto di nuclidi radioattivi



Material	Mass (t)	Radius (m)	<sup>238</sup> U (ppb)	<sup>232</sup> Th (ppb)	<sup>40</sup> K (ppb)	<sup>210</sup> Pb/ <sup>222</sup> Rn	<sup>60</sup> Co (mBq/kg)
Liquid scintillator							
LS reactor	2000	0-17.7	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-6</sup>	10 <sup>-7</sup>	10 <sup>-13</sup> ppb	
LS solar			10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-8</sup>	10 <sup>-9</sup>	10 <sup>-15</sup> ppb	
Acrylic vessel	580	17.7-17.8	0.001	0.001	0.001		
Acrylic nodes	28.5	17.8-17.9	0.001	0.001	0.001		
Calibration parts	0.04		1.5	4.5	0.02		
SS structure							
truss	1000	20.0-20.05	1	3	0.2		20
bars	65	17.9-20.0	0.2	0.6	0.02		1.5
LPMT glass							
NNTV	84.5	19.2-19.8	200	120	4		
Hamamatsu	33.5	19.2-19.8	400	400	40		
veto (NNTV)	16.0	20.2-20.8	200	120	4		
LPMT cover							
acrylic	110	19.2-19.4	0.003	0.01	0.01		
SS	150	19.4-19.8	0.4	2.5	0.12		
LPMT readout							
divider	0.6	19.8-19.9	3000	5000	100		
potting	24.5	19.7-19.9	70	50	4		
UWB	100	20.1-20.4	50	200	5		20
SPMT glass	2.6	19.3-19.4	400	400	200		
SPMT readout							
divider	0.15	19.4	3000	10000	200		
potting	5.1	19.4-19.5	100	50	20		
UWB	11	20.1-20.4	50	200	5		20
Water	35000	17.8-21.8				10 mBq/m <sup>3</sup>	
Rock			10000	30000	5000		

Distanza dal centro

Concentrazione

0 m

~ppq -> 10<sup>-15</sup> g/g  
10<sup>-8</sup> Bq/kg (<sup>238</sup>U)

17,7 m

17,82 m

~ppt -> 10<sup>-12</sup> g/g  
10<sup>-5</sup> Bq/kg (<sup>238</sup>U)

19,50 m

~ ppb /ppm

21,75 m

# Tecniche di misura

La migliore tecnica di misura dipende da diversi fattori



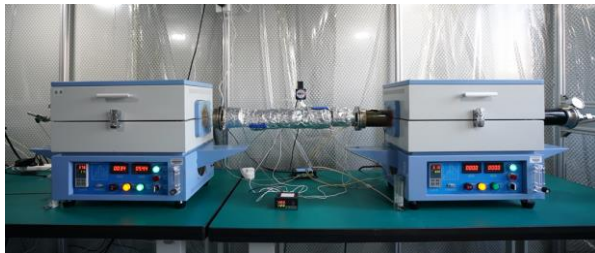
- Vita media del radionuclide
- Natura della matrice del campione
- Distribuzione della contaminazione

<b>Spettrometria gamma con HPGe</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Emettitori gamma a vita breve</li> <li>• Matrici di ogni tipo</li> <li>• Campioni massivi</li> </ul>
<b>Attivazione neutronica</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nuclidi a vita lunga (es U, Th e K)</li> <li>• Matrici di ogni tipo (non attivabili)</li> <li>• Campioni piccola massa</li> </ul>
<b>Spettrometria di massa</b>	<ul style="list-style-type: none"> <li>• Nuclidi a vita lunga (eccetto K)</li> <li>• Matrici acquose</li> <li>• Campioni piccola massa</li> </ul>

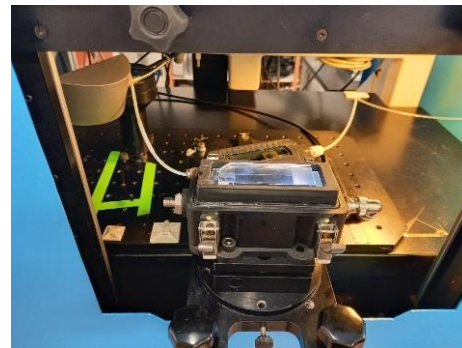
ICP-MS



Fornace per acrilico ICP-MS



Laser ablation ICP-MS



NAA



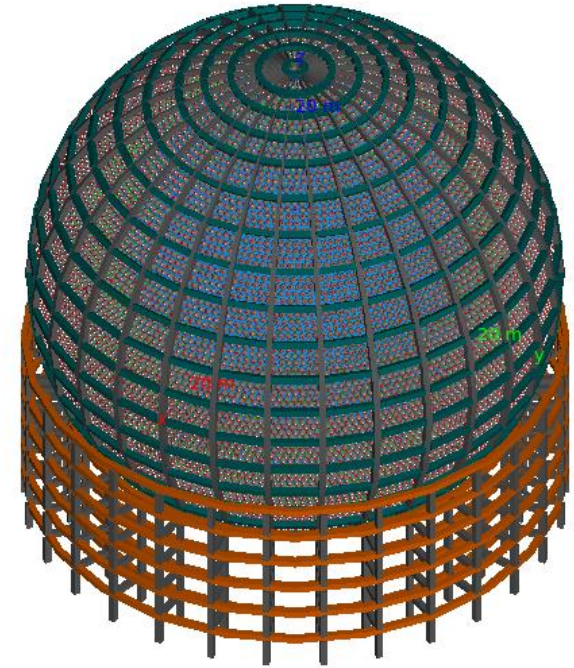
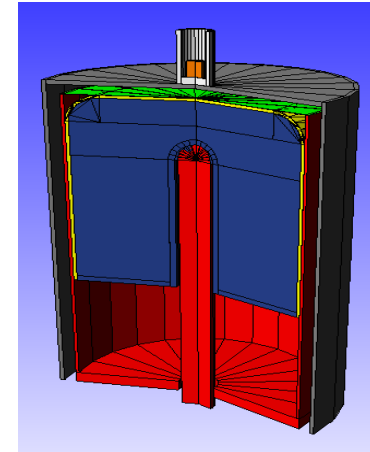
HPGe



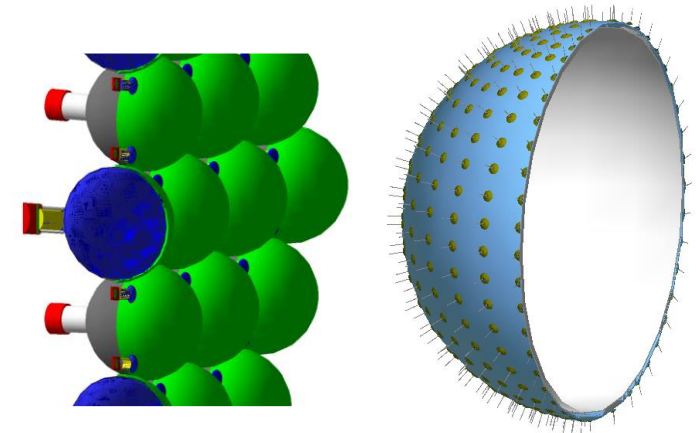
- Screening materiali con rivelatori HPGe
- Validazione della radiopurezza del liquido scintillante tramite attivazione neutronica, tecniche di chimica e radiochimica
- Validazione della produzione su larga scala dei pannelli di acrilico tramite attivazione neutronica
- Simulazioni Monte Carlo per *background budget* dell'esperimento

# Laboratori e strumenti

## Laboratorio di misura con rivelatori HPGe standard



## Laboratorio di sviluppo sistemi di misura a bassissimo fondo



# Screening dei materiali per l'esperimento JUNO

## Acrilico JUNO: U, Th, K < 1 ppt

Sample	Mass (g)	40K (ppt)	238U (ppt)	232Th (ppt)
S0201	41.4	0.09±0.02	<0.17	<0.13
S1001 S0301	42.0	0,38±0,04	<0,24	<0,71
S0701-3000	26.7	0,07±0,02	<0,4	<0,7
S0701-2000	26.7	0,14±0,04	<0,3	<0,5

### Misure tramite attivazione neutronica

1. Taglio laser dei campioni
2. Pulizia
3. Attivazione al reattore TRIGA MKII (Pavia)
4. Misure con rivelatori HPGe



## PMT JUNO: U, Th, K < ~ Bq/kg

Misure tramite  
spettroscopia  
gamma HPGe



Sample (Bq/kg)	238U from 226Ra	232Th from 224Th	40K
Glass	5,4±0,2	1,9±0,1	1,7±0,3

# Validazione della radiopurezza del liquido scintillante

Limiti al ppq (LS JUNO) richiedono sistemi di misura dedicati



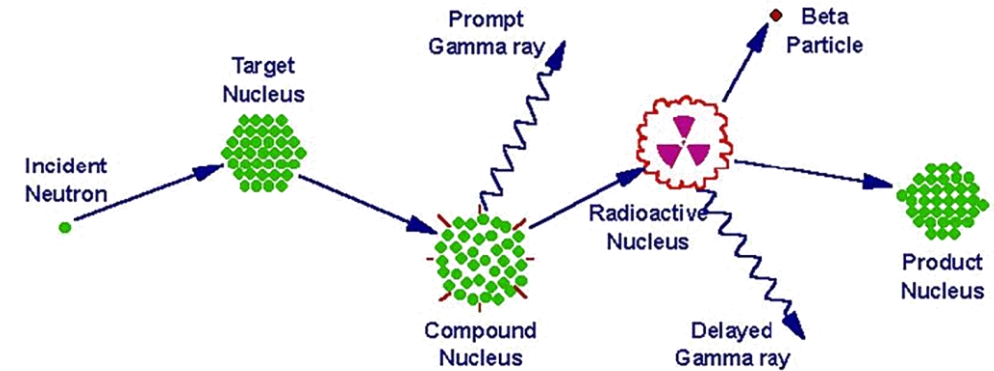
Tecnica Attivazione Neutronica



Sviluppo di un nuovo rivelatore e tecniche di misura

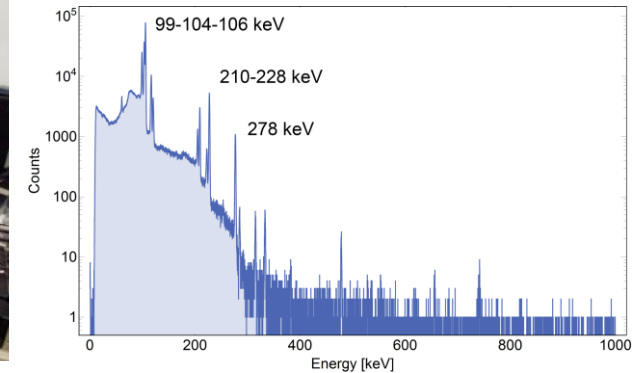
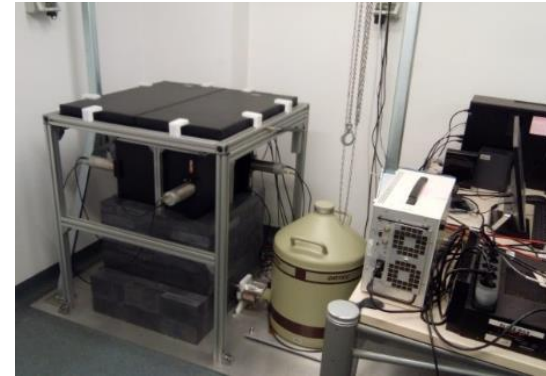
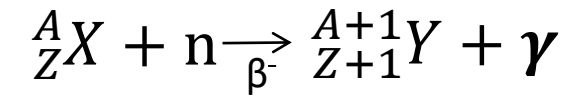


- Coincidenza  $\beta/\gamma$
- Tecniche radiochimiche per aumentare la sensibilità di misura

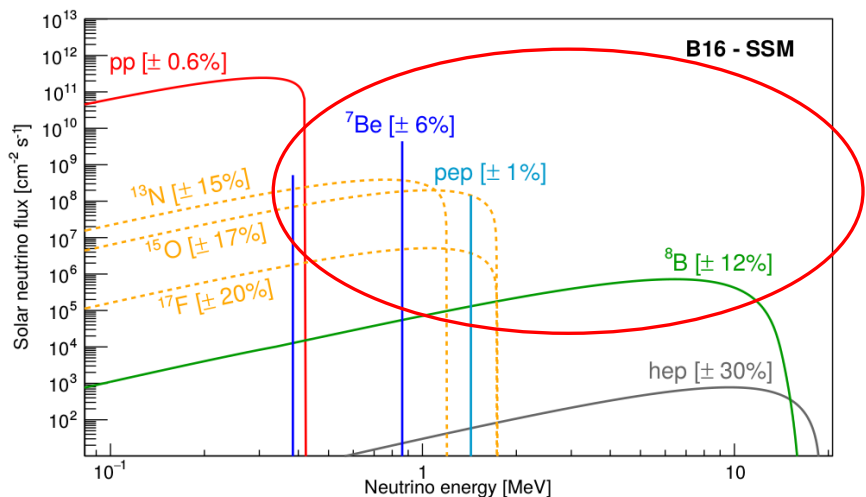
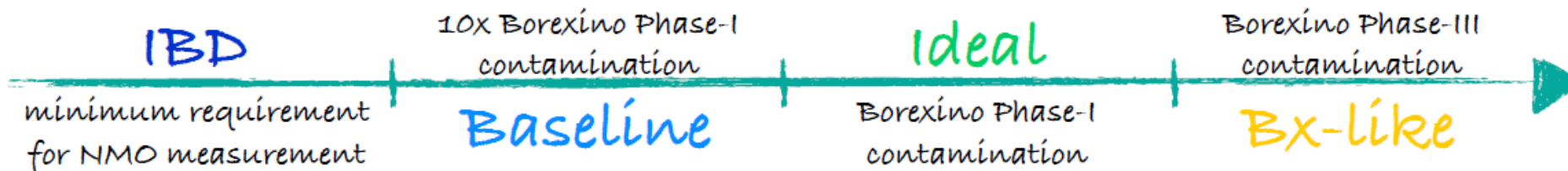


## La tecnica NAA si articola in tre fasi

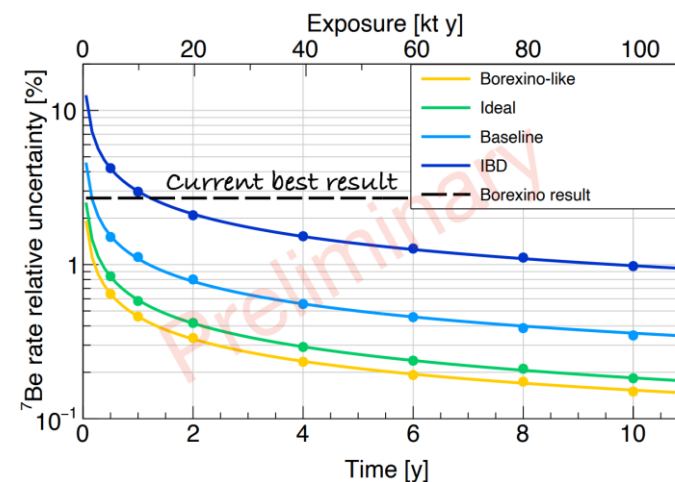
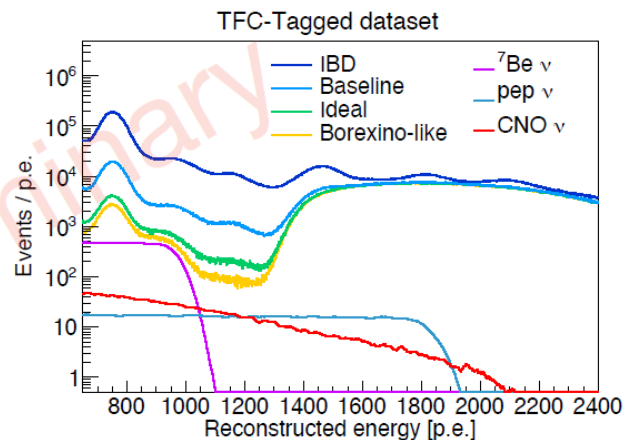
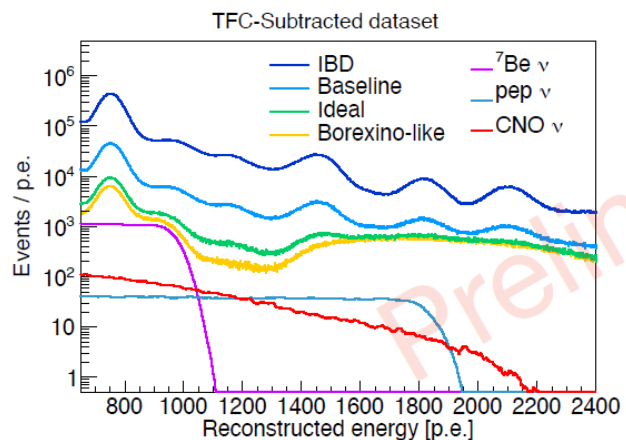
1. **Esposizione** del campione ad un flusso di neutroni
2. Estrazione del campione e misurazione della **radioattività gamma** (HPGe)
3. Calcolo della **concentrazione dell'elemento** precursore ( $^A_ZX$ ) o del **flusso di neutroni**



# Analisi neutrini solari con JUNO



- Gli unici portatori di informazione in tempo reale da nucleo del sole
- Sono prodotti nelle due sequenze di fusione nucleare nel sole: la catena pp (99%) e il ciclo CNO (1%)
- Possono essere usati per studiare il problema della metallicità solare
- È richiesta un bassissimo livello di fondo e una ottima conoscenza delle diverse sorgenti di fondo (background model)





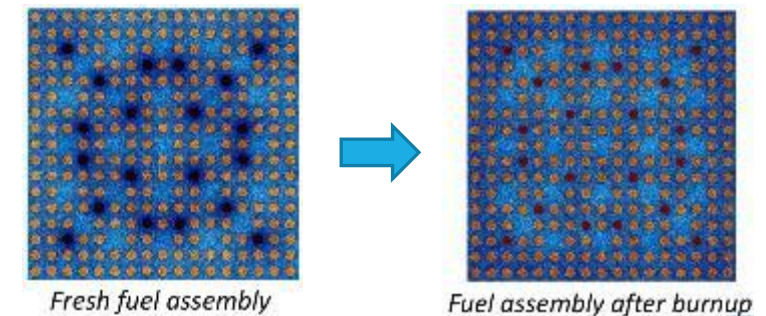
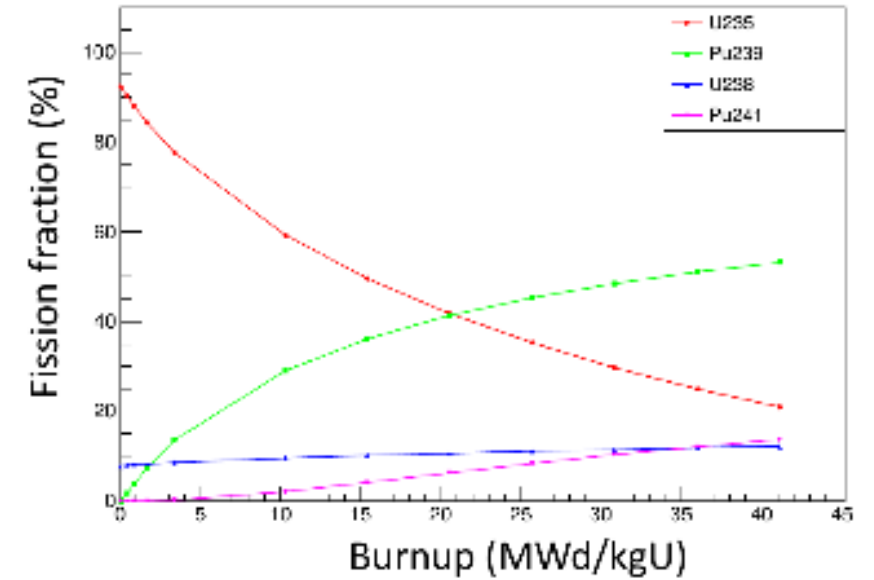
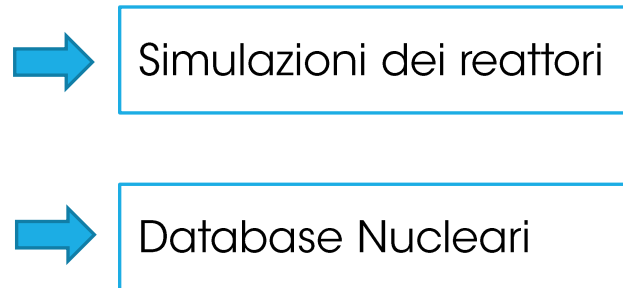
# Flusso degli antineutrini da reattore

- L'incertezza sullo spettro degli antineutrini prodotti dai reattori non è trascurabile!
- È il punto di partenza per determinare lo spettro atteso da JUNO
- $\bar{\nu}_e$  sono emessi dal decadimento  $\beta$  dei frammenti di fissione
- > 99% degli  $\bar{\nu}_e$  emessi proviene dalla fissione di quattro isotopi:  $^{235}\text{U}$ ,  $^{239}\text{Pu}$ ,  $^{241}\text{Pu}$ ,  $^{238}\text{U}$ .

Se si conoscesse il rate di fissione di ogni isotopo ( $f_i$ ) e il relativo spettro di antineutrini ( $S_i(E_\nu)$ ), il flusso può essere calcolato come:

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

- Bisogna conoscere i rate di fissione  $f_i$  con elevata accuratezza e precisione in funzione del tempo
- Analisi delle incertezze sugli spettro  $S_i(E_\nu)$  (approccio *ab initio*)



# Proposte di tesi

## □ Attività sperimentali

- Misure di attivazione neutronica e trattamenti radiochimici
- Misure con rivelatori HPGe
- Sviluppo di algoritmo di machine learning per la classificazione dei segnali

## □ Attività analisi / programmazione

- Costruzione del background model di JUNO nella regione di interesse per i neutrini solari
- Analisi dell'evoluzione temporale dello spettro di antineutrini emessi dai reattori, mediante simulazioni Monte Carlo del burnup di un reattore PWR, con lo studio delle incertezze sistematiche legate ai parametri di funzionamento del reattore.
- Ricostruzione ab initio degli spettri di antineutrini a partire dai database nucleari e analisi delle principali strutture fini misurabili con il rivelatore TAO ad alta risoluzione energetica
- Studio della sensibilità di JUNO per la misura dell'ordinamento di massa dei neutrini includendo le incertezze associate allo spettro di antineutrini da reattore

### 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))

Andrea Barresi ([andrea.barresi@unimib.it](mailto:andrea.barresi@unimib.it))