

Gerarchia di massa e JUNO



Gioacchino Ranucci
INFN - Milano

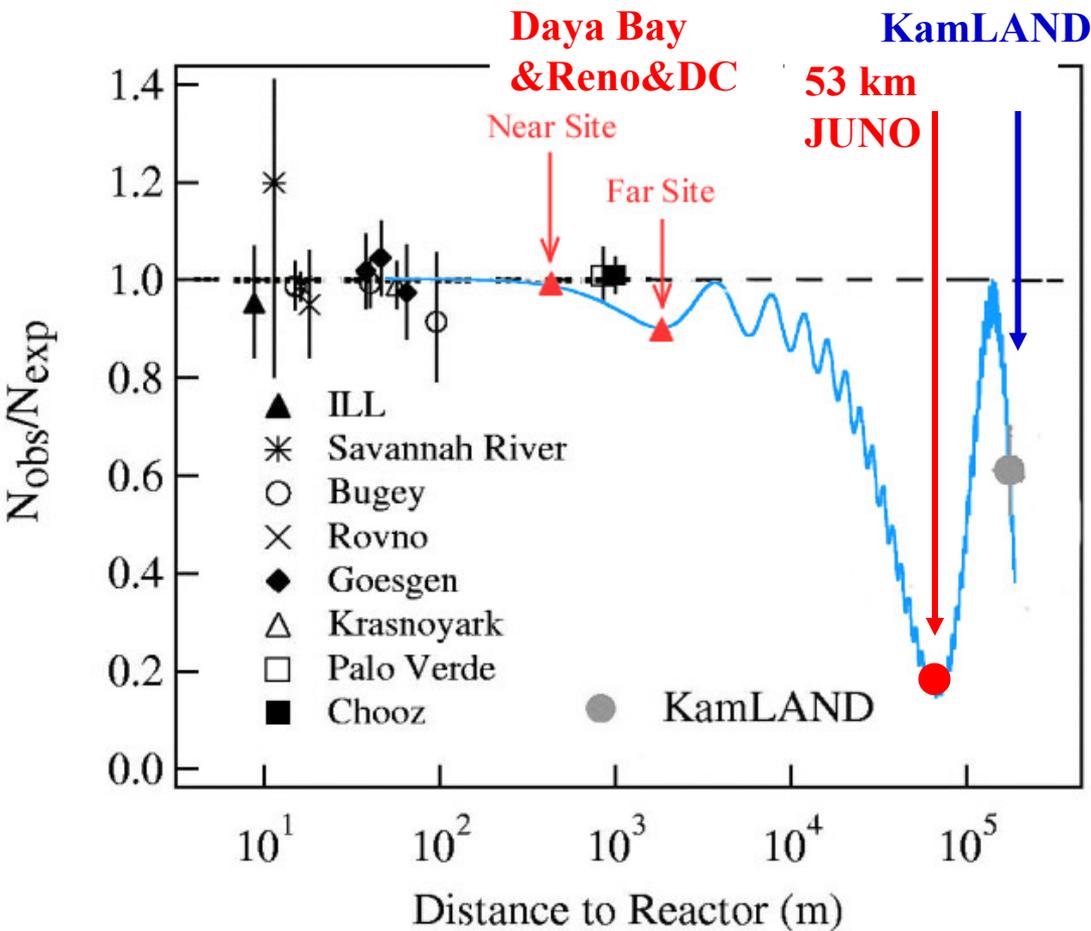
SIF 2020
Settembre 18, 2020

Sezione III – Aula Vera Rubin

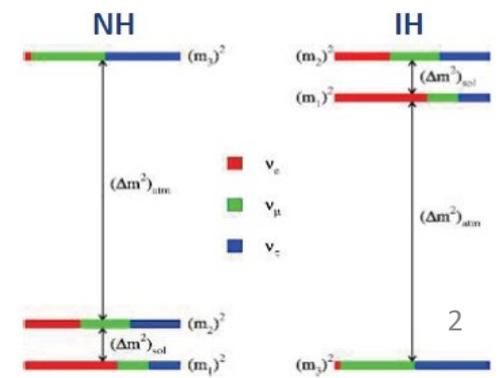
- Determinazione della gerarchia di massa del neutrino con un rivelatore a scintillatore liquido di grande massa posizionato a media distanza – 53 km – da una serie di complessi nucleari di alta potenza
- Misura di precisione dei parametri di oscillazione
- Vasto programma di astroparticle (al di fuori dello scopo di questo intervento)
- Sfide tecniche e stato della costruzione

Sommario della fisica di JUNO

- ◆ Rivelatore LS 20 kton
- ◆ ~3 % risoluzione di energia – la maggiore sfida tecnica
- ◆ Vasto programma di fisica
 - ⇒ Gerarchia di Massa
 - ⇒ Misura di precisione di 3 parametri di mixing
 - ⇒ Neutrini da Supernovae
 - ⇒ Geoneutrini
 - ⇒ Fondo diffuso di ν da Supernovae pregresse
 - ⇒ Atmos&sol neutrino
 - ⇒ Decadimento del protone
 - ⇒ Ricerche di segnali esotici



Neutrino Physics with JUNO, J. Phys. G 43, 030401 (2016)

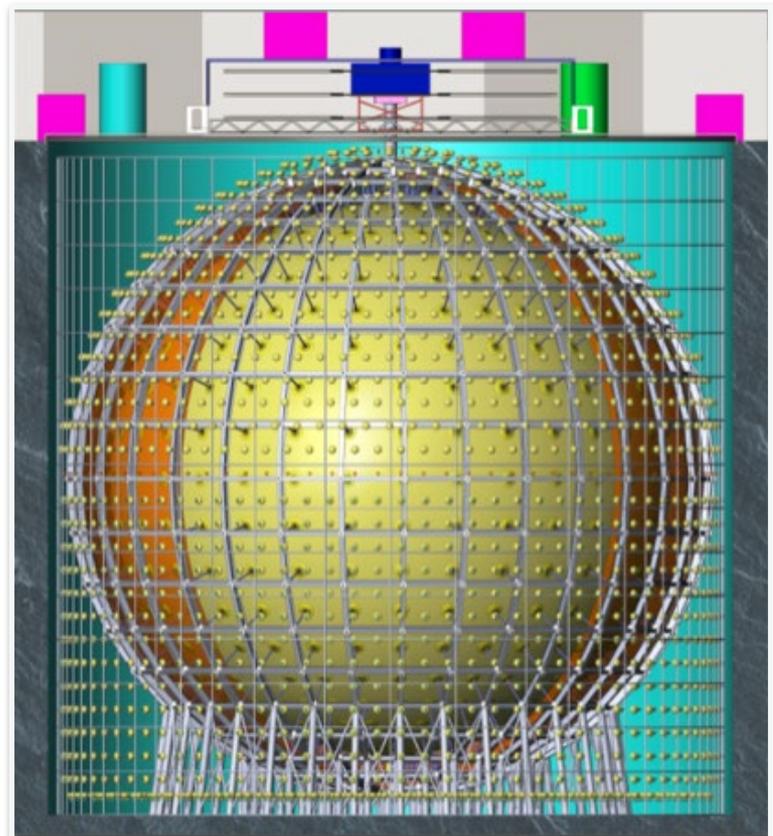


La fisica con un rivelatore sferico a LS

- LS di grande massa: → per la statistica
- Alta resa luminosa(PE) → per risoluzione energetica 1200 pe/MeV

Entrambi cruciali per gli obiettivi di fisica

- Intelaiatura di acciaio
- Sostegno per PMT
- ~20000 x 20"
- 18000 Interni
- 2000 veto
- ~25000 x 3"
- Sfera di acrilico
- Contenente 20 kt LS



JUNO è stato approvato in Cina a Feb. 2013

Partecipazioni e contribute da diverse altre nazioni:

- Armenia
- Belgium
- Brazil
- Chile
- Czechia
- Finland
- France
- Germany
- Italy
- Latvia
- Pakistan
- Russia
- Slovakia
- Taiwan
- Thailand
- USA

JUNO – la posizione

NPP	Daya Bay	Huizhou	Lufeng	Yangjiang	Taishan
Status	Operational	Planned	Planned	Completato	50% completato
Power	17.4 GW	17.4 GW	17.4 GW	17.4 GW	18.4 GW

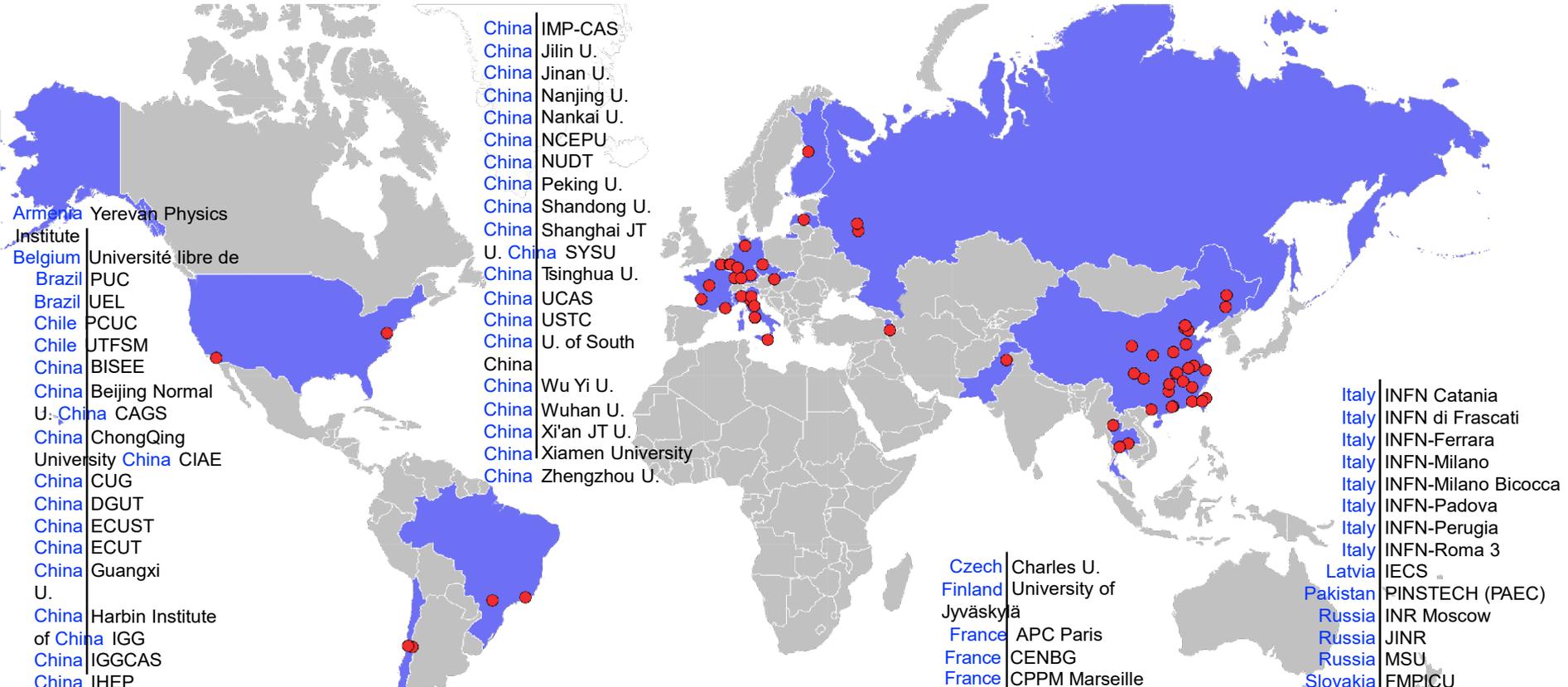
Profondità ~ 700 m

entro 2020: 26.6 GW





Collaborazione JUNO

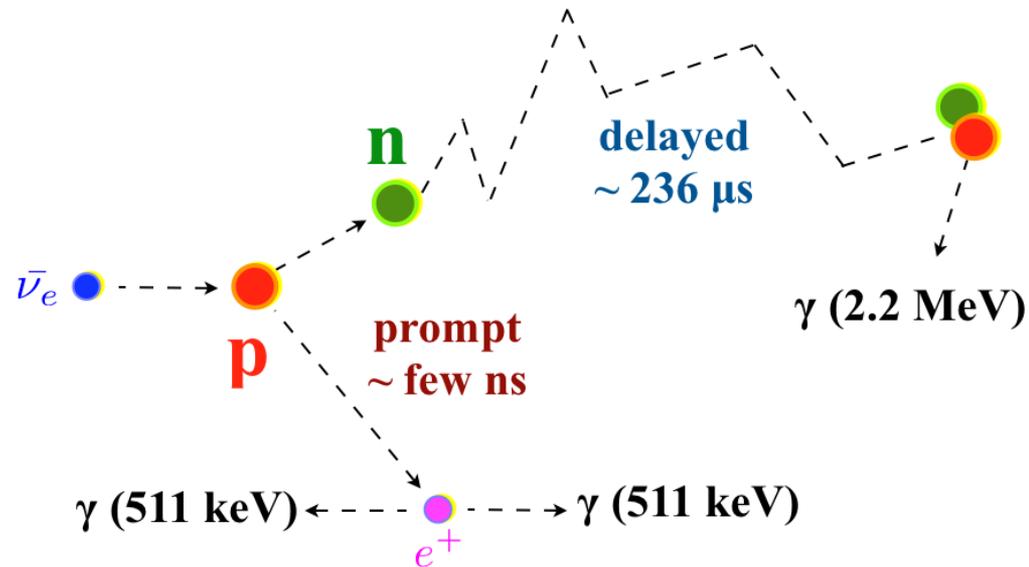
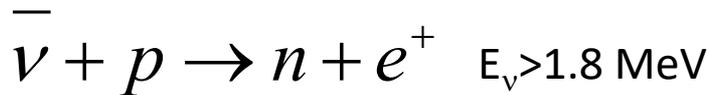


Collaborazione istituita a Luglio 2014
Attualmente 77 istituti~600 collaboratori

Metodologia per determinare la Gerarchia di Massa

La determinazione della gerarchia di massa si basa sull'identificazione nello spettro dei positroni della "segnatura" della probabilità di sopravvivenza anti- ν_e

Rivelazione attraverso la classica reazione di decadimento beta inverso



La coincidenza temporale tra il positrone ed il γ di cattura rigetta il fondo scorrelato

La quantità "osservabile" per inferire la gerarchia di massa è lo spettro del positrone

Risulta che $E_{\text{vis}}(e^+) = E(\bar{\nu}) - 0.8 \text{ MeV}$

MH e probabilità di sopravvivenza

arXiv 1210.8141

$$P_{ee} = \left| \sum_{i=1}^3 U_{ei} \exp\left(-i \frac{m_i^2}{2E_\nu} L\right) U_{ei}^* \right|^2$$

$$= 1 - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2(\Delta_{21})$$

$$- \cos^2 \theta_{12} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2(\Delta_{31})$$

$$- \sin^2 \theta_{12} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2(\Delta_{32})$$

$$\Delta_{ij} \equiv \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E_\nu}, \quad (\Delta m_{ij}^2 \equiv m_i^2 - m_j^2)$$

Ovvero per rendere l'effetto della gerarchia di massa esplicito, sfruttando l'approssimazione $\Delta m_{32}^2 \approx \Delta m_{31}^2$

$$P_{ee} = 1 - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2(\Delta_{21})$$

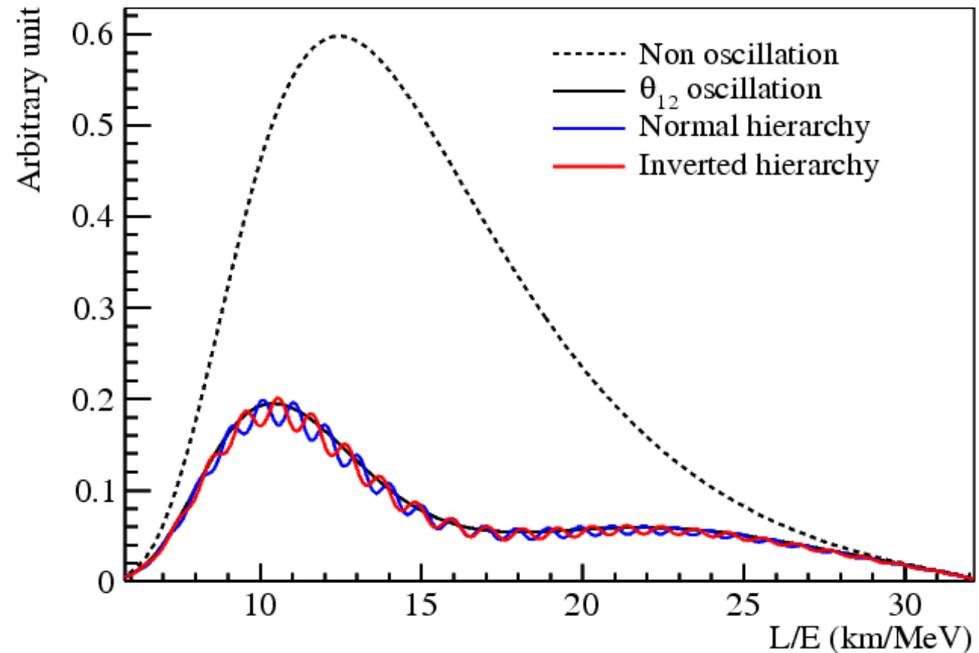
$$- \sin^2 2\theta_{13} \sin^2(|\Delta_{31}|)$$

$$- \sin^2 \theta_{12} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2(\Delta_{21}) \cos(2|\Delta_{31}|)$$

$$\pm \frac{\sin^2 \theta_{12}}{2} \sin^2 2\theta_{13} \sin(2\Delta_{21}) \sin(2|\Delta_{31}|)$$

+ NH

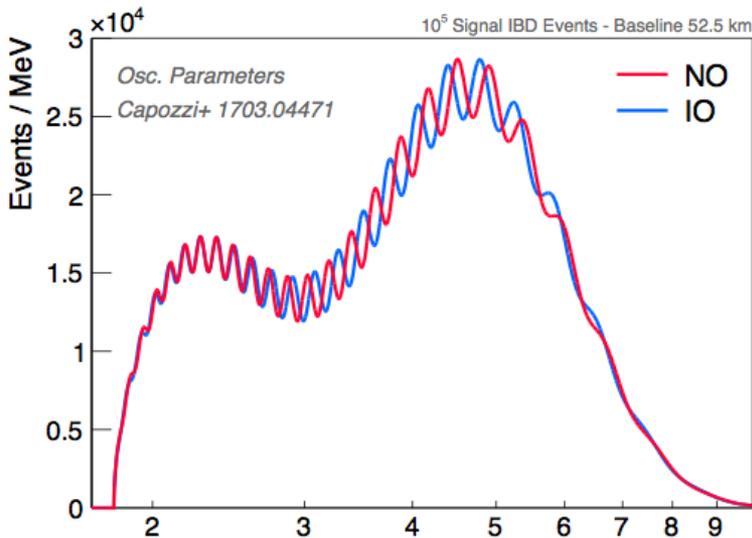
- IH



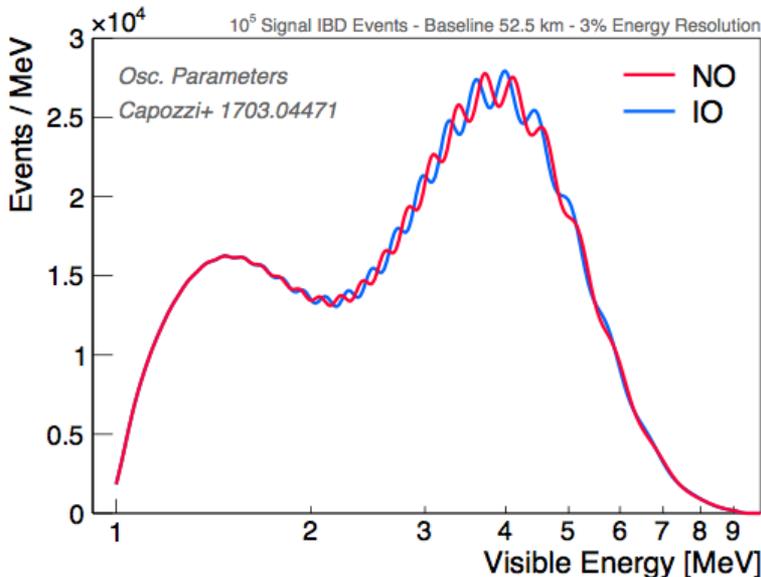
La forte soppressione è dovuta all'oscillazione "solare" $\rightarrow \Delta m_{21}^2, \sin^2 \theta_{12}$
L'ondulazione è l'oscillazione "atmosferaica" $\rightarrow |\Delta m_{31}^2|$ dalla frequenza - MH codificata nella fase "alto" valore di θ_{13} cruciale

Esempi di spettri dei Neutrini & Positroni

Spettro in funzione dell'energia del neutrino – senza risoluzione di energia



- Schema a tre neutrini
- Baseline: 52.5 km
- Volume fiduciale: 20 kt
- Potenza Termica : 36 GW
- Tempo di esposizione : 6 anni
- Valori nominali per JUNO**



Energia visibile dalla reazione di decadimento beta inverso

- $E(\text{vis}) \sim E(\nu) - 0.8 \text{ MeV}$
- Assumendo come risoluzione $3\% / \sqrt{E}$
- Assumendo trascurabile il termine costante nella risoluzione

Spettro in funzione dell'energia visibile del positrone – con risoluzione di energia

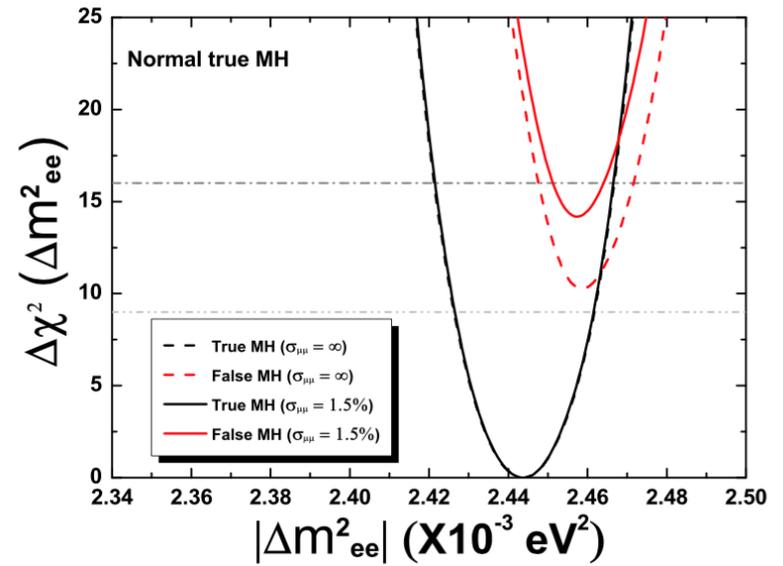


Esempio di confronto del χ^2 – NH vera

Valori numerici dalla slide precedente
 Scan del χ^2 penalizzato (cioè marginalizzato sugli
 Altri parametric di minimizzazione) vs. $|\Delta m_{31}^2|$

Caso NH vera- spettro medio
 (senza fluttuazioni – **Asimov data set**)
 Test statistics $\rightarrow \Delta\chi^2 = \chi^2_{\min}(\text{NH}) - \chi^2_{\min}(\text{IH})$

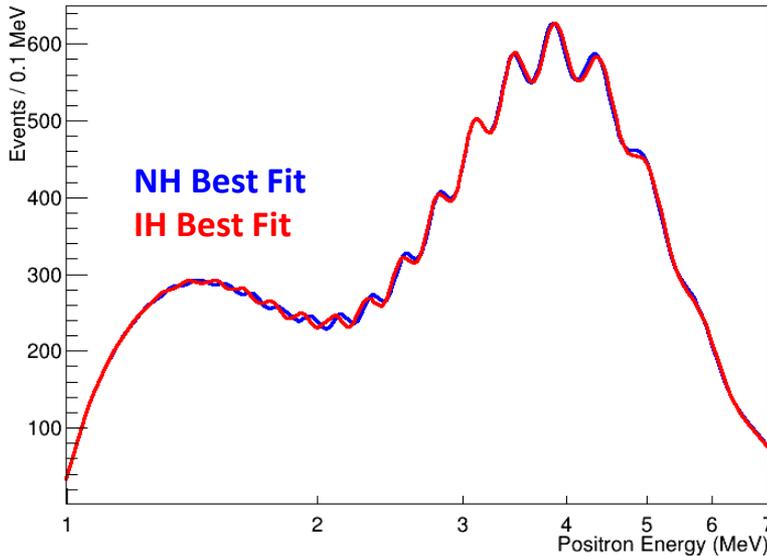
Fit NH minimo: $1.6 \cdot 10^{-2}$ (praticamente 0)
 FIT IH minimo: 16.0 -> solo effetti statistici
 $\overline{\Delta\chi^2} \sim 16.0$



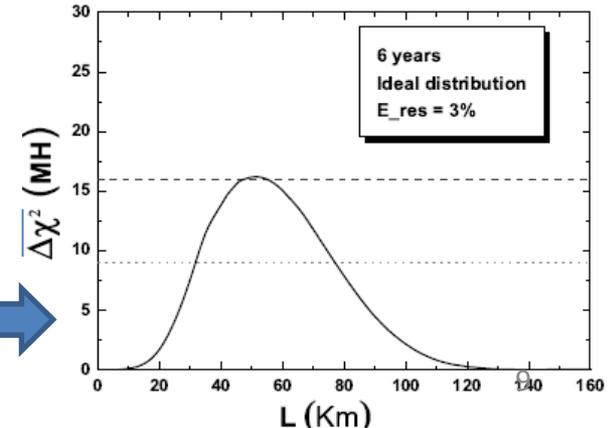
Confronto tra IH/NH fit ottimi
 Il fit ottimo $|\Delta m_{31}^2|$ è diverso nei due casi

Il fit riesce quasi ad adattare lo spettro IH ai
 dati NH

Le due soluzioni sono totalmente degenerate a parte in un
 limitato intervallo di distanze



Distanza
 ottimale per
 massimizzare
 $\overline{\Delta\chi^2}$

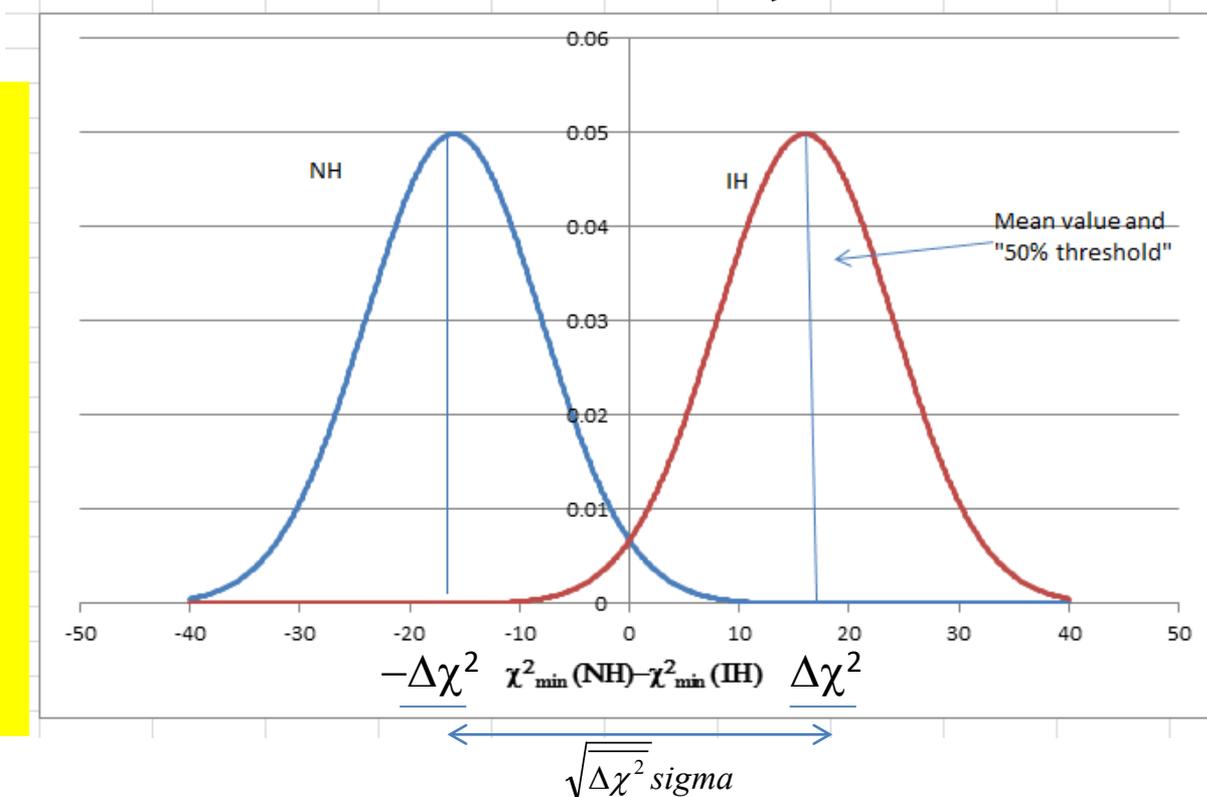


Da arXiv:1303.6733v1 [hep-ex] JUNO
 $\overline{\Delta\chi^2}$ può arrivare a **16** @ 52.5 km

Distribuzione della test statistics e numero di sigma di scoperta

- **Valutazione non univoca**
- Dipende dalla convenzione assunta (**frequentista o Bayesiana**)
- In pratica l'effettiva informazione è completamente codificata nell'ammontare di sovrapposizione delle due Gaussiane indipendentemente da come è espressa come numero di σ
- Risultato generale : sigma di ciascuna Gaussiana = $2\sqrt{\Delta\chi^2}$ **arXiv: 1210.8141v2**

Il valore medio delle curve Gaussiane è preso come rappresentativo della potenzialità di **JUNO** alla distanza nominale
arXiv:1303.673



I valori medi delle due curve sono distanziati esattamente di $\sqrt{\Delta\chi^2}$ sigmas

Assunto nella convenzione frequentista come quantificazione della capacità di scoperta

Sensibilità di JUNO alla Gerarchia di Massa – solo statistica

Con queste caratteristiche JUNO può raggiungere statisticamente 4σ di sensibilità, interpretate col significato precedente – spettro con circa 100000 eventi



- Baseline: 53 km
- Volume Fiduciale : 20 kt
- Potenza Termica: 36 GW
- Presa dati : 6-8 anni
- Contenuto di protoni 12% in massa
- Risoluzione energetica 3% @ 1 MeV



Sensibilità alla MH – effetti sistematici

- Differenze tra le distanze ~ 500 m dai core (interferenza dei segnali) - $3 \overline{\Delta\chi^2}$ loss
- Incertezza sulla forma dello spettro dai Reattori (1%)
- Incertezza statistica e di forma dei fondi

- **Non linearità della scala di energia (richiesta precisione sotto il percento)**

Altri esperimenti hanno già conseguito accuratèzze $<1\%$

(Daya Bay $\sim 0.5\%$, Double Chooz 0.74% , Borexino $<1\%$ (a basse energie), KamLAND 1.4%)

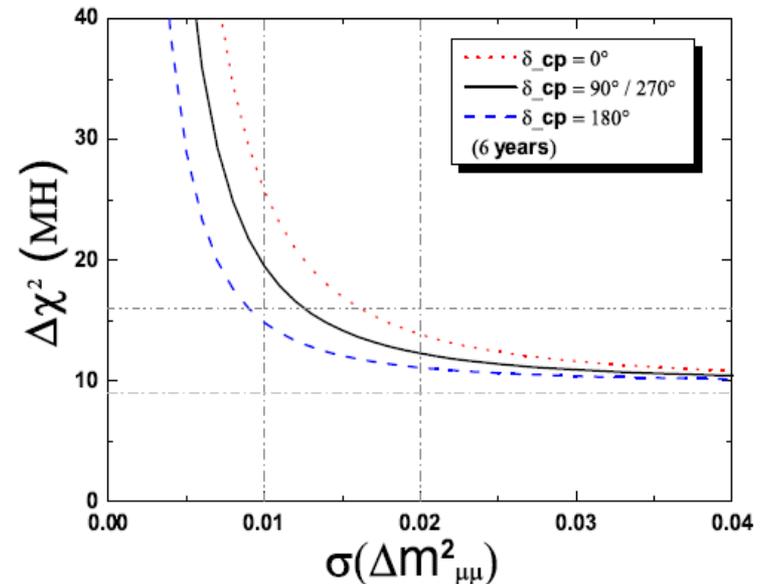
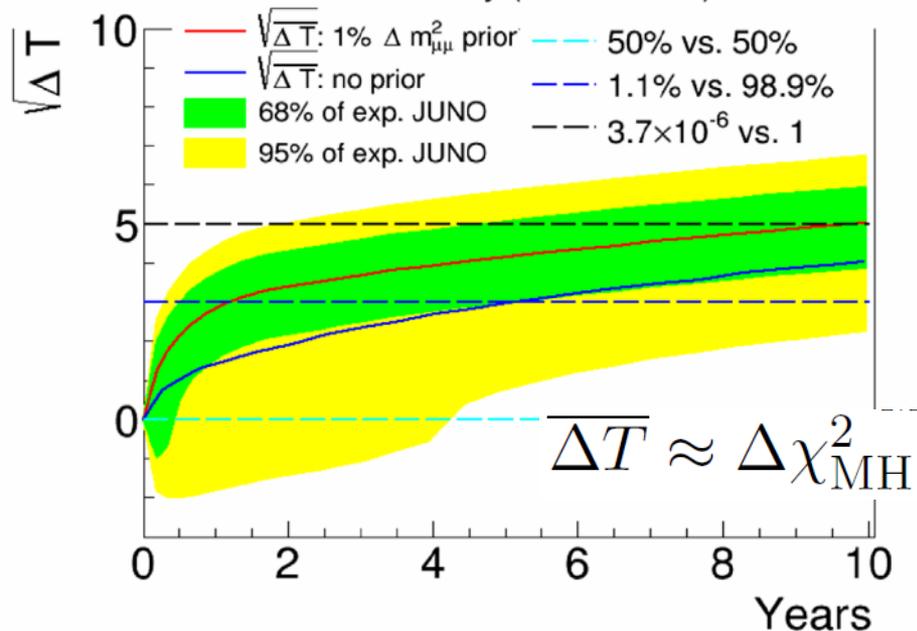
- **Sottostrutture nello spettro da reattore**

Si aggiunge un pull nel χ^2 per tenere conto della migliore precisione del parametro efficace $\Delta m_{\mu\mu}^2 \sim 1\%$ (combinazione parametri di mixing) al tempo della presa dati

Sommario della sensibilità alla MH

PRD 88, 013008 (2013)	Relative Meas.	Use absolute $\Delta m_{\mu\mu}^2$
Solo Statistica	4σ	5σ
Con sistematiche	3σ	4σ

**sensibilità di JUNO
alla MH con 6 anni
di dati (Potenza
nominale):**



	Stat.	Core dist.	DYB & HZ	Shape	B/S (stat.)	B/S (shape)	$ \Delta m_{\mu\mu}^2 $
Size	52.5 km	Tab. 1-2	Tab. 1-2	1%	6.3%	0.4%	1%
$\Delta \chi_{MH}^2$	+16	-3	-1.7	-1	-0.6	-0.1	+(4 - 12)

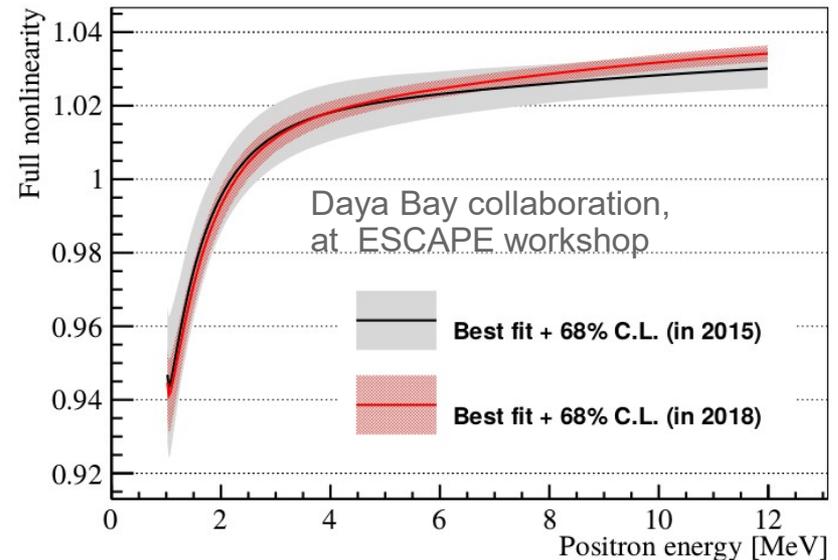
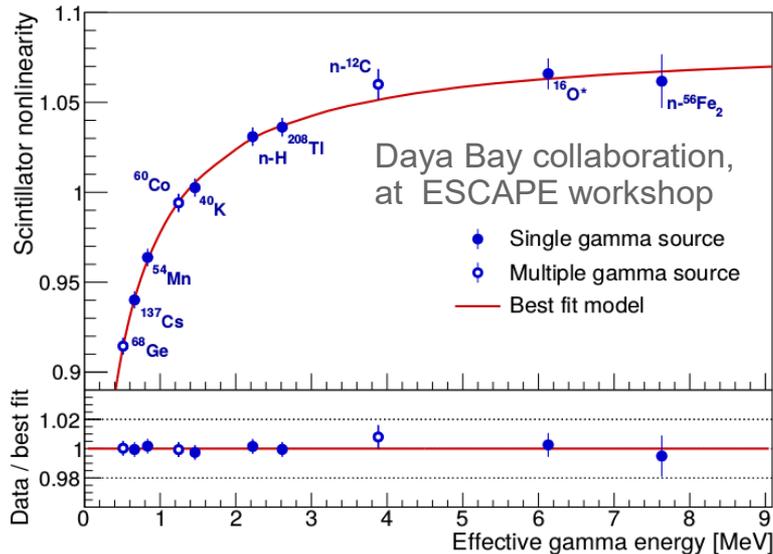
Controllo delle incertezze della scala di energia

Con accurate e frequenti procedure di calibrazione

Differenti sorgenti, su un ampio intervallo di energia, frequenti, ...

Ed inoltre metodologia addizionale per monitorare gli effetti sistematici → tramite sistema basato su 3" PMT

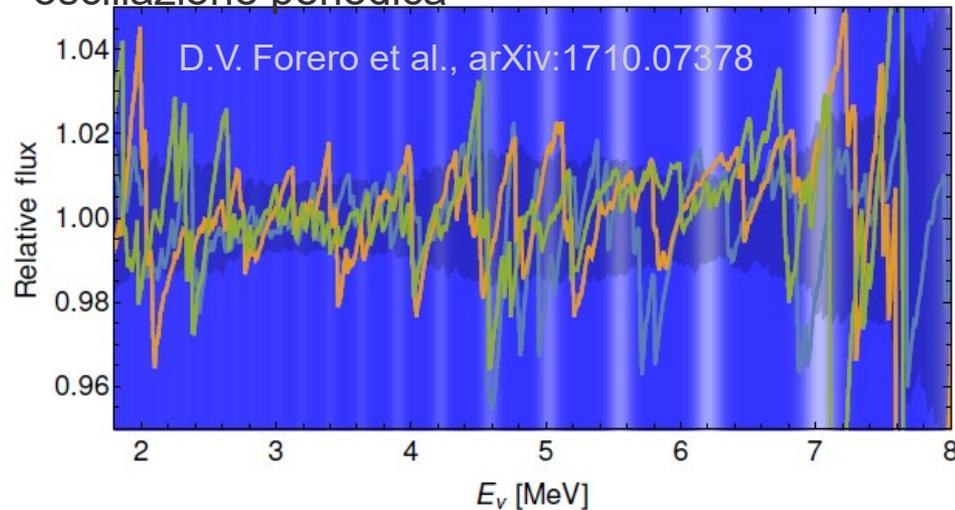
Esempio: risultati di calibrazione da Daya Bay



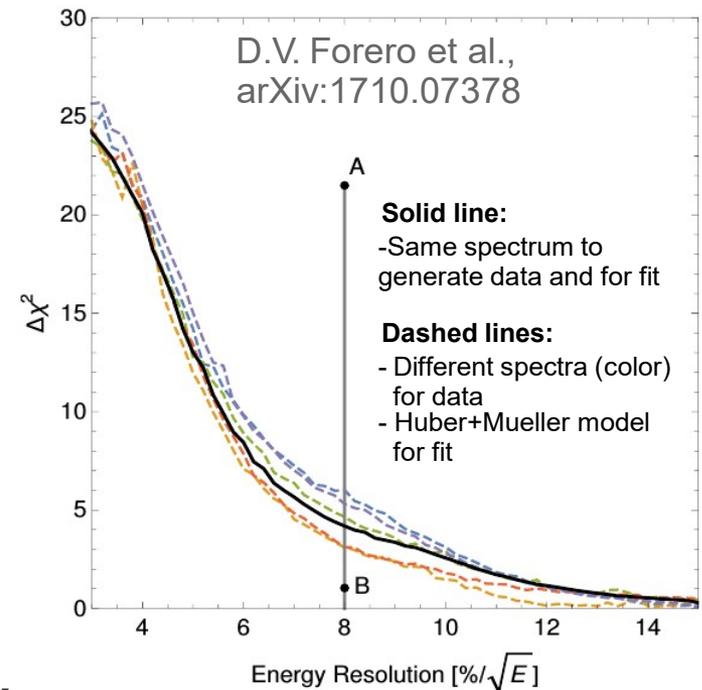
Banda di incertezza finale estremamente compressa

Implicazioni dell'incertezza sulla forma dello spettro da reattore

- L'incertezza "Standard" della forma dello spettro ha impatto minimo sulla sensibilità dell'esperimento
- Ma lo spettro da reattore può esibire micro-strutture
(ad esempio A.A.Sonzogni, et al. arXiv:1710.00092, D. A. Dwyer & T. J. Langford, Phys. Rev. Lett. 114,012502 (2015))
- Eventuali micro-strutture degradano la sensibilità alla MH emulando configurazioni di oscillazione periodica



Differenza relativa di 3 spettri sintetici rispetto allo spettro predetto dai dati ILL (modello Huber+Mueller)



→ Uno spettro da reattore misurato con risoluzione di energia almeno simile, o migliore, a JUNO evita di principio questo potenziale problema of reactor spectrum measurement

Concetto del rivelatore vicino - rivelatore di riferimento

Gd-LS in sfera di diametro 1800 mm

Superficie 10.2 m²

Volume 3.05 m³, o 2.63 ton.

1 ton. volume fiduciale con taglio a 25cm

Rate di eventi 30 volte JUNO

~30 m dal core del reattore

Risoluzione meglio di 1.7%

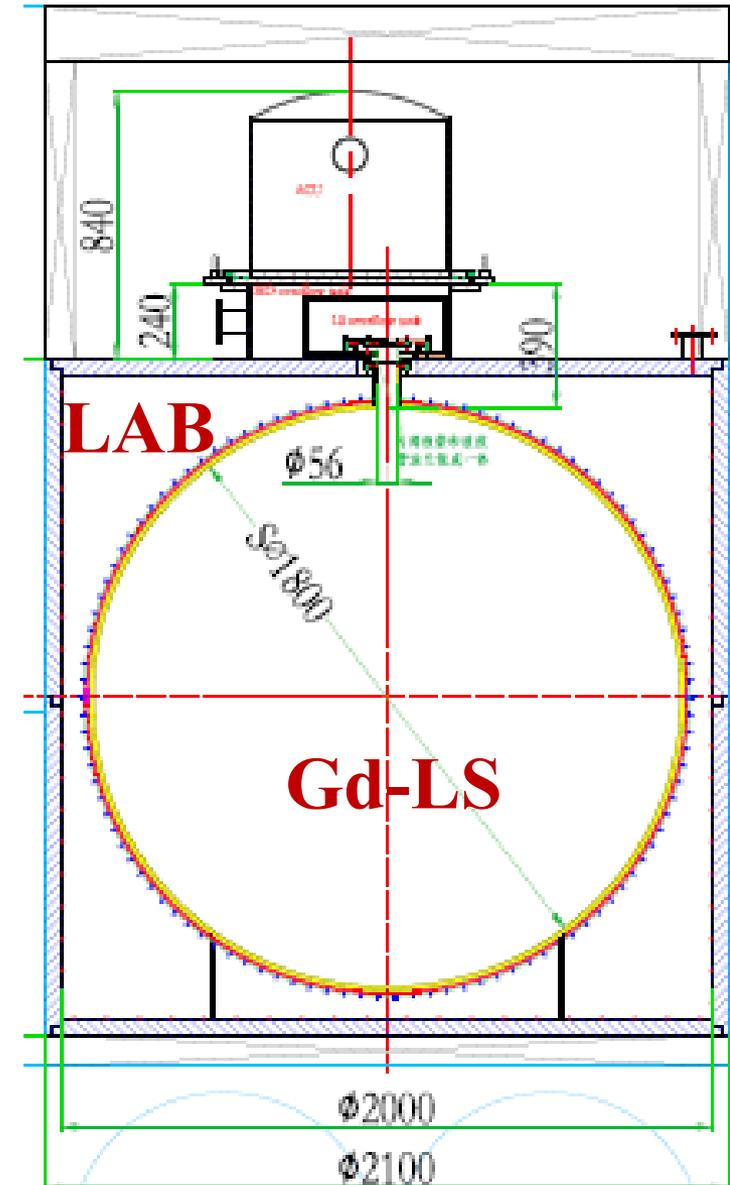
Pallone di Nylon con supporto di acrilico

10 m² SiPM of 50% PDE, operati a -50°C

LAB+quencher come buffer

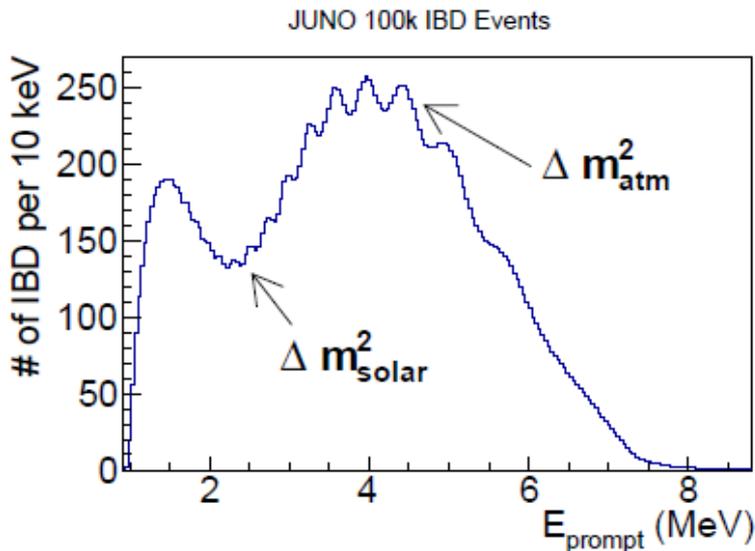
Vessel Criogenico

Daya Bay “Automatic Calibration Unit”

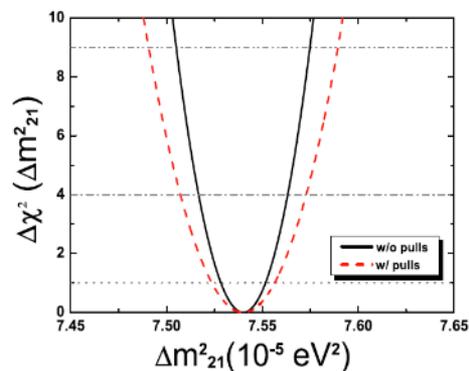


Misure di precisione

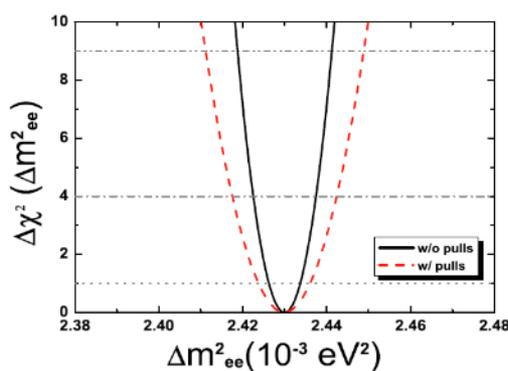
Test dell'unitarietà di U_{PMNS} to $\sim 1\%$
 Precisione maggiore degli elementi delle
 matrice CKM!



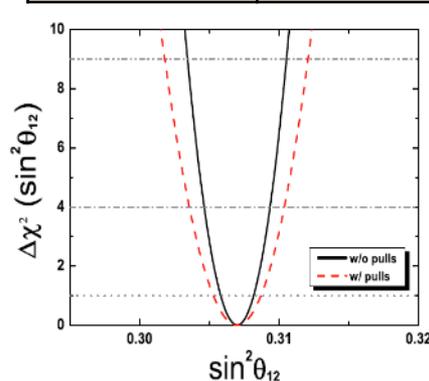
	Statistics	+BG +1% b2b +1% EScale +1% EnonL
$\sin^2 \theta_{12}$	0.54%	0.67%
Δm^2_{21}	0.24%	0.59%
Δm^2_{ee}	0.27%	0.44%



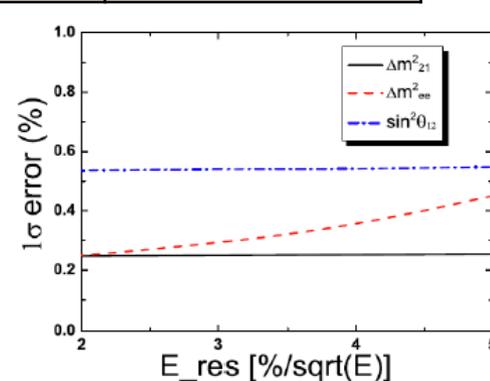
0.16% → 0.24%



0.16% → 0.27%



0.39% → 0.54%

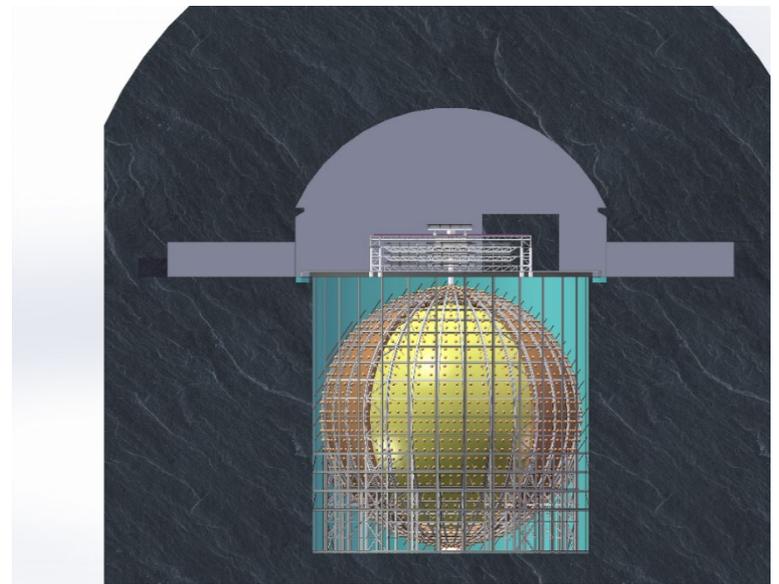
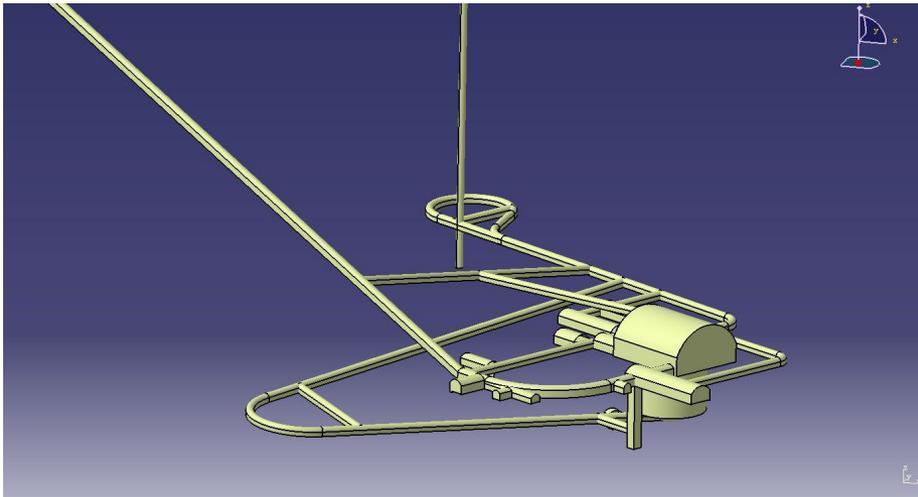


Risoluzione E

Correlazione tra i parametri

$$\Delta m^2_{ee} = \cos^2 \theta_{12} \Delta m^2_{31} + \sin^2 \theta_{12} \Delta m^2_{32}$$

Preparazioni e attività in corso

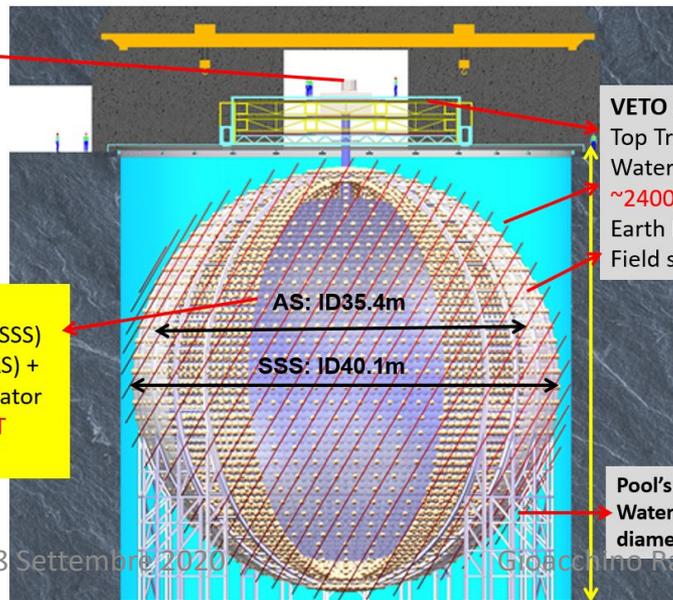


JUNO Detectors

Calibration

Central detector

- Steel structure (SSS)
- Acrylic sphere (AS) + 20kt Liquid scintillator
- ~18000 20" PMT
- ~25000 3" PMT



VETO system

- Top Tracker
- Water VETO with ~2400 20" PMT
- Earth Magnetic Field shielding coils

Pool's depth: 44m
Water depth and diameter: 43.5m



Scavo –resta da completare la sede del riv.
 Laboratorio esterno
 Costruzione dei componenti del rivelatore
 Costruzione degli impianti di purificazione e ausiliari
 TAO rivelatore vicino

Foto degli scavi



Sala sperimentale centrale



Sala per lo scintillatore
liquido

Completamento entro fine anno

Rivelatore centrale

- Sfera di acrilico con 20kt di scintillatore liquido
- PMTs nello schermo di acqua su una griglia di acciaio - 18k 20" and 25k 3"
- 78% copertura di fotocatodi

Water Cherenkov muon veto

- 2000 20" PMTs
- 35 kton acqua ultra-pura
- Efficienza > 95%
- Radon control → meno di 0.2 Bq/m^3

Bobine di compensazione

- Campo magnetico terrestre <10%
- Necessarie for 20" PMTs

Top tracker

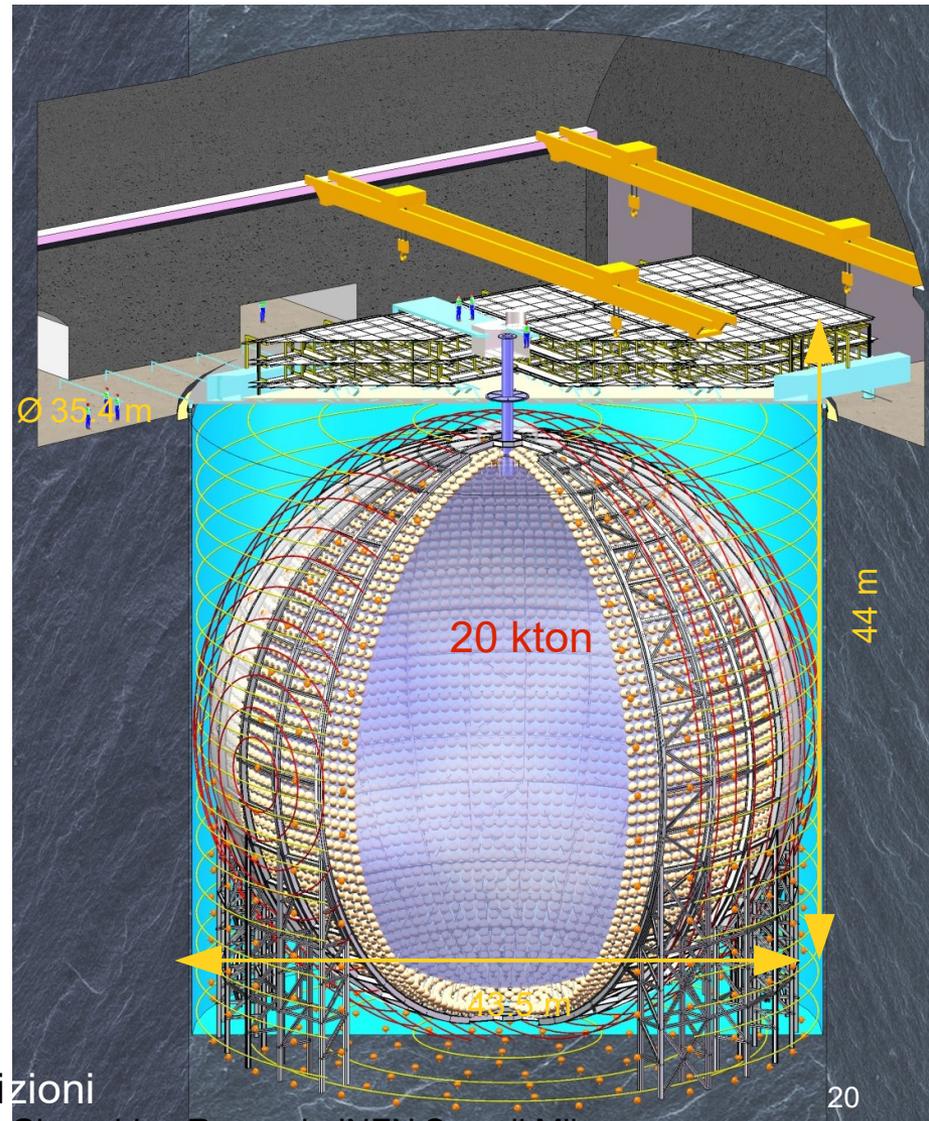
- Tracciamento preciso dei muoni
- 3 strati di scintillatore plastico
- Copertura metà dell'area sup.

Sistemi di calibrazione

- 4 sottosistemi complementari
- vari tipi di particelle, energie e posizioni

Schema del rivelatore

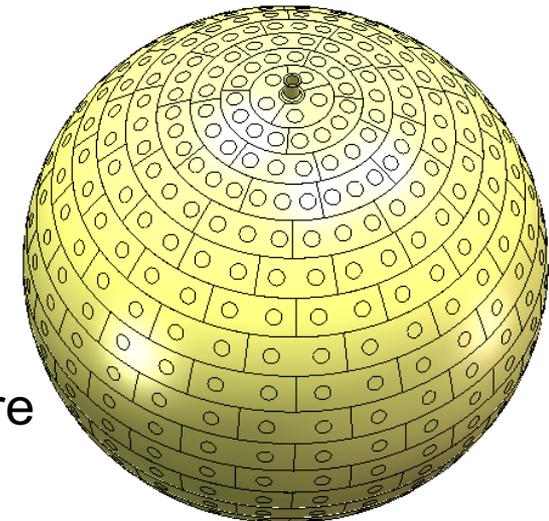
Ovunque controllo e monitoraggio del fondo





Rivelatore Centrale CD

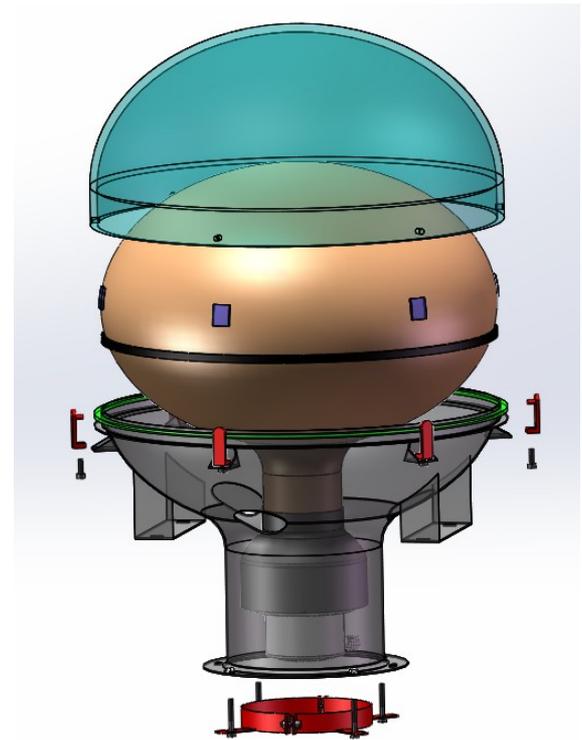
- Calorimetro a scintillatore liquido
 - Req.: **3% risoluzione & <1% precision scala en.**
- **Reticolo** supporto **PMTs (SS)+ Sfera di Acrilico (AS)**
 - Fuori da AS: acqua (schermo dai γ s PMT/SS)
 - Dentro AS: Scintillatore liquido
- Rivelazione dei **fotoni di** scintillazione :
 - 18k 20" PMTs + 25k 3" PMTs
 - 1200 pe/MeV
- Elettronica:
 - **1 GHz, 14 bit**, 1~4000 p.e. range dinamico
- Bobine per compensazione campo magnetico terrestre
- **Tutti gli elementi realizzativi in costruzione**



Photomultipliers

- **15000 MCP-PMTs da NNVT** (Northern Night Vision Technology)
- **5000 PMTs a dinodi Hamamatsu**
- **Quasi tutti prodotti (fine entro 2020)**
- **Test di accettazione**
- **8000 Instrumentati**

Characteristics	unit	MCP-PMT (NNVT)	R12860 (Hamamatsu)
Detection Efficiency (QE*CE)	%	27%	27%
P/V of SPE		3.5, > 2.8	3, > 2.5
TTS on the top point	ns	~12, < 15	2.7, < 3.5
Rise time/ Fall time	ns	R~2, F~12	R~5, F~9
Anode Dark Count	Hz	20K, < 30K	10K, < 50K
After Pulse Rate	%	1, < 2	10, < 15
Radioactivity of glass	ppb	238U: 50 232Th: 50 40K: 20	238U: 400 232Th: 400 40K: 40

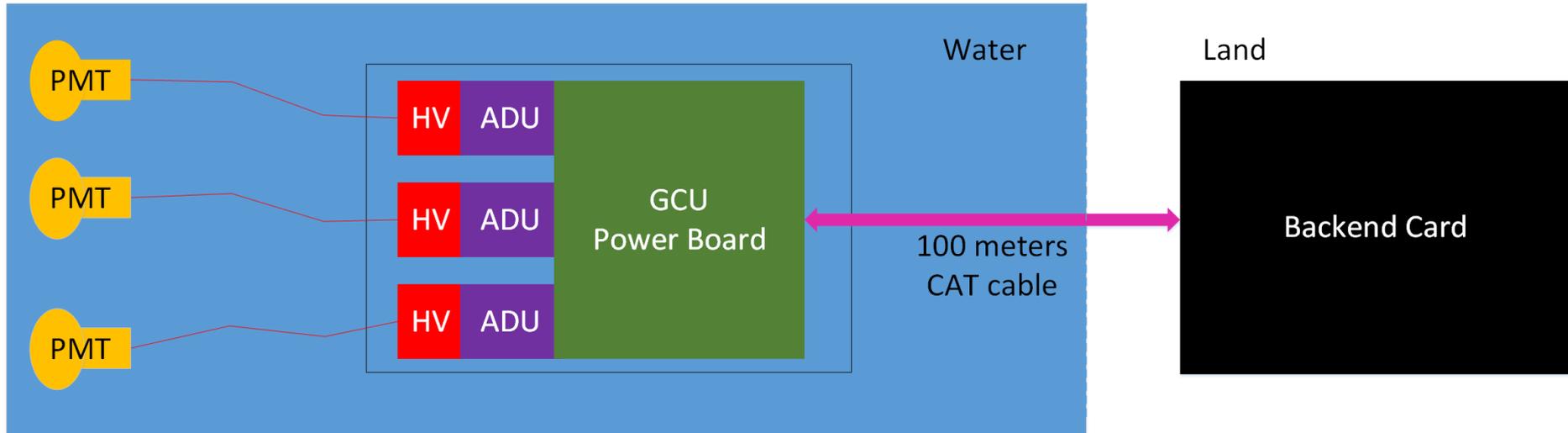


JUNO PMT con schermo
protettivo per
l'implosione

Elevata QE: nei MCP-PMT raggiunta PDE (photon detection efficiency) del 30%
Average PDE of HAMAMATSU: 28%

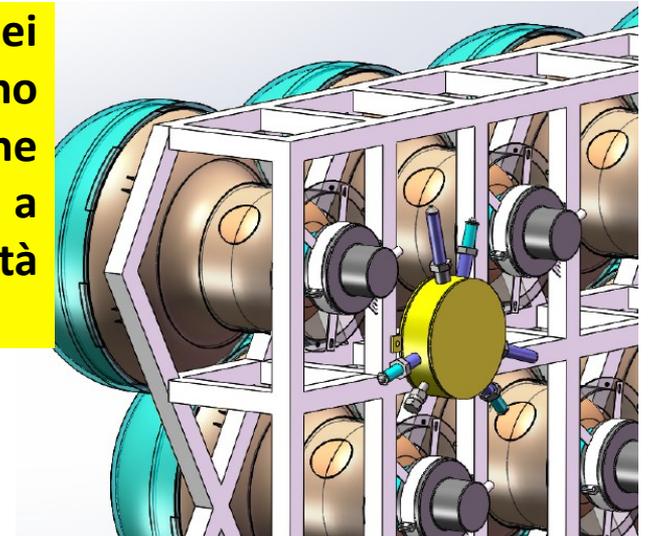
Elettronica di lettura

1F3 scheme



- PMT: tubi fotomoltiplicatori
- HV: Unità Alta Tensione
- ADU: convertitore analogico-digitale
- GCU: Global Control Unit
- CAT cable: Cavo Categoria 5e
- Alta affidabilità
- Requisiti stringenti di consumo di potenza
- Produzione entro 2021

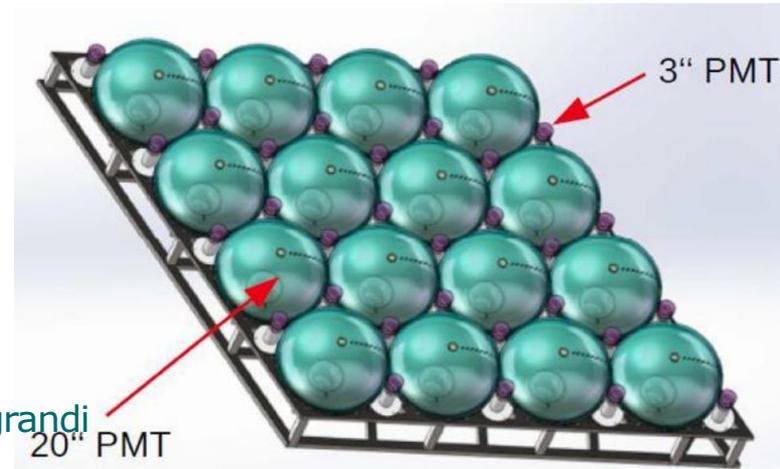
Le forme d'onda dei segnali dei PMT sono acquisite dal FADC, che è vicino al PMT a garanzia della qualità del segnale analogico



3" PMTs

- **Doppia calorimetria**

- Condizione di conteggio fotoni
→ Miglior controllo delle sistematiche
(Calibrazione della risposta non-lineare dei PMTs grandi)
- Range dinamico esteso →
di ausilio per segnali grandi
(muoni, supernova etc)



Risoluzione:
$$\frac{\sigma_E}{E} = \sqrt{\left(\frac{a}{\sqrt{E}}\right)^2 + b^2 + \left(\frac{c}{E}\right)^2}$$

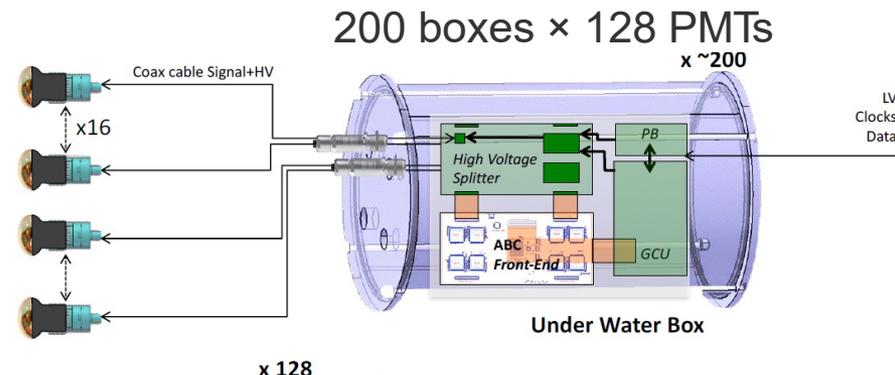
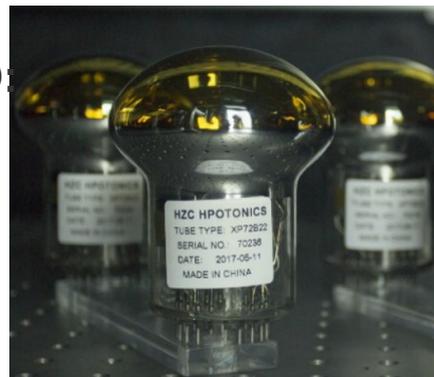
b e c termini non stocastici

- **Ordinati 25000 PMTs a HZC**

- **15000 prodotti e testati presso HZC**

Progetto custom xJUNO
XP72B22

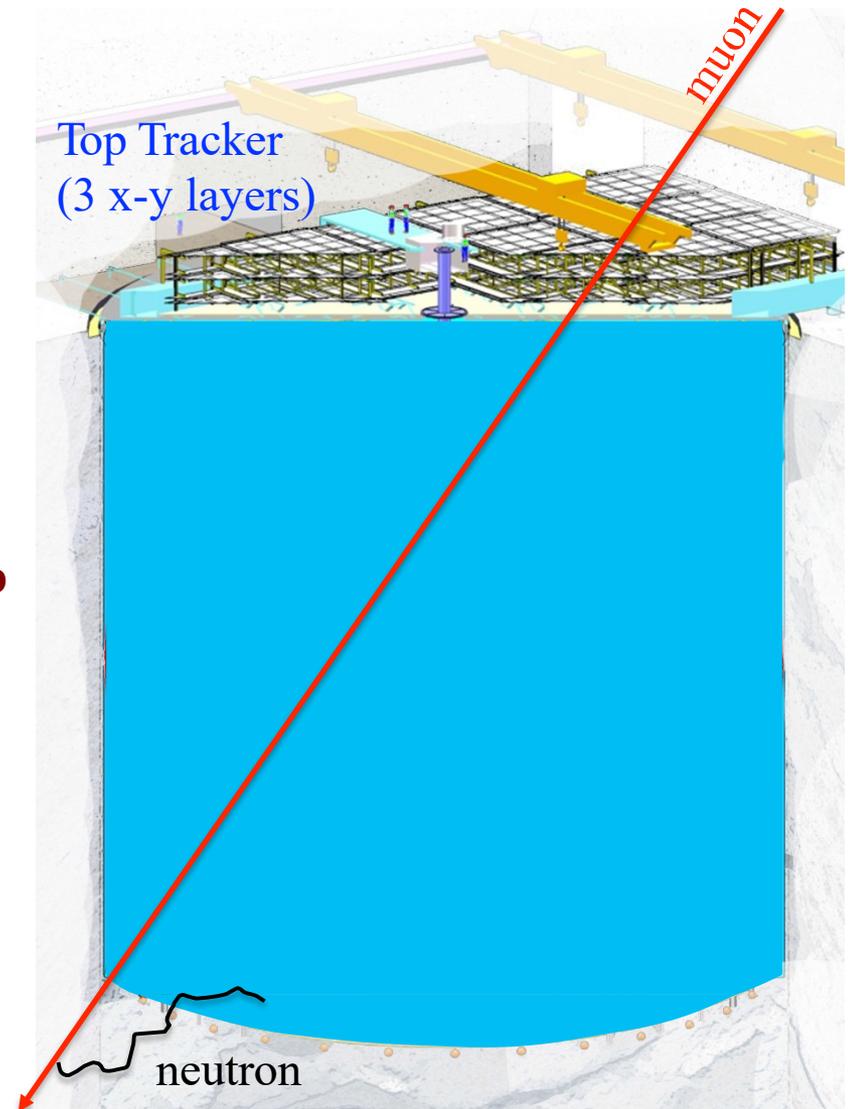
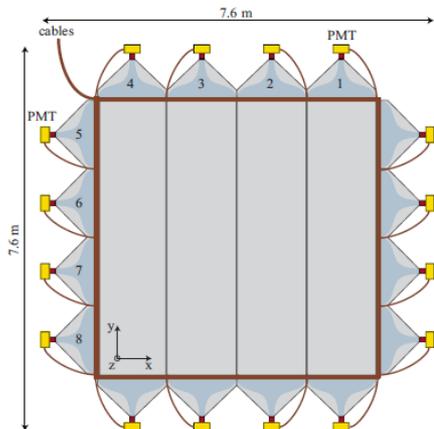
QE 24% , P/V 3.0
SPE resolution 30%
TTS 2-5 ns



Prototipazione completata

Rivelatori di veto

- **Flusso dei muoni cosmici**
 - Schermo di roccia: **~700 m**
 - Tasso di muoni residui: **0.003Hz/m²**
 - Energia media : **214 GeV**
- **Rivelatore Cherenkov ad acqua**
 - ~4 m di schermo d'acqua, Radon: **<0.2 Bq/m³**
 - ~2000 20" PMTs
 - 40 kton di acqua pura, roccia ricoperta di HDPE
 - Tecnologia simile a esperimenti pregressi (**99.8% efficiency**)
- **Bobine di compensazione del campo magnetico**
- **Top muon tracker**
 - Scintillatori plastici recuperati da OPERA



Preparazione componenti in fase avanzata

Scintillatore & Controllo del fondo

• Requirement for $3\%/\sqrt{E}$

- Elevata resa di luce: $\sim 10^4$ fotoni/MeV
- Molto trasparente:

Lunghezza di attenuazione (A.L.) > **25m @430nm**

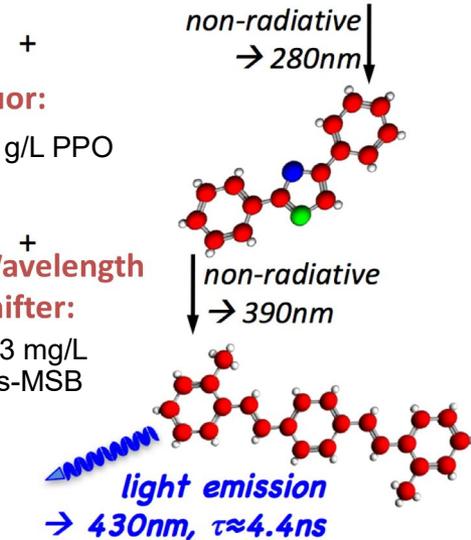
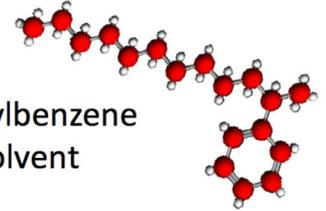
• Impianti di purificazione

- Serbatoio in superficie per 5 kt LAB
- Impianto di distillazione quasi completato - impianto rimozione gas spedito - entrambi costruiti in Italia
- Colonna di Al_2O_3 , Estrazione con Acqua e impianto di mescolamento in costruzione
- Produzione PPO con pre-purificazione presso produttore
- Azoto alta purezza: pronto per la realizzazione
- Acqua ultra pura: pronto per la realizzazione



Solvent:

Linear alkylbenzene
(LAB) as solvent



Controllo del fondo globale:

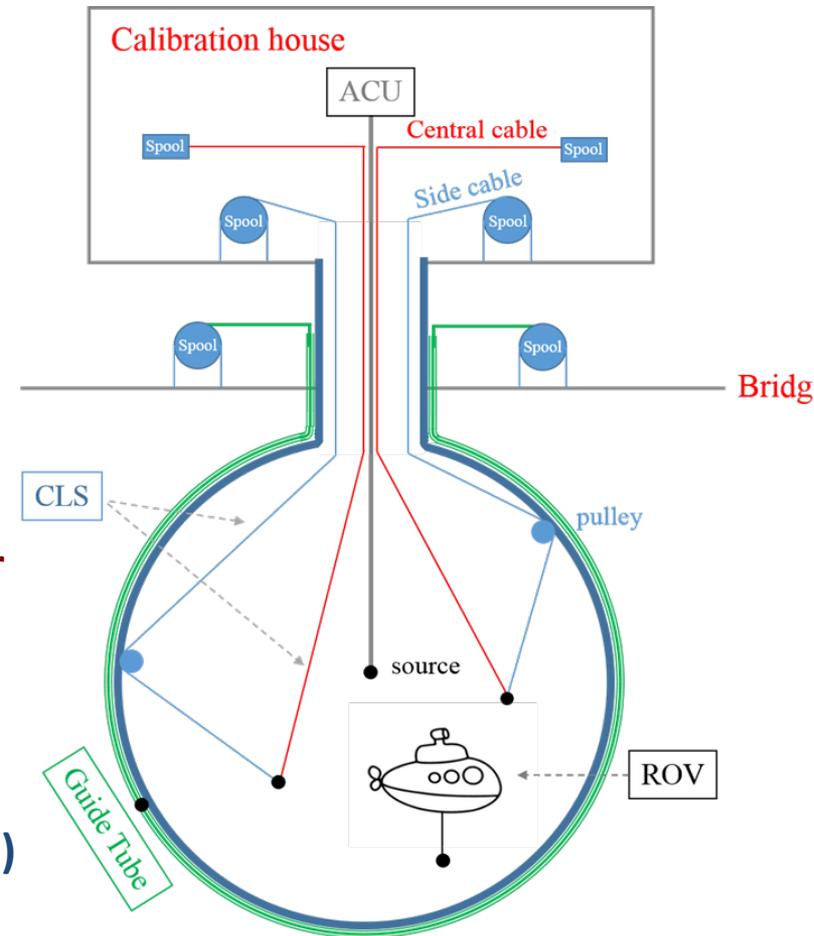
Materie prime, apparati & loro pulizia

Sistemi di ventilazione durante assemblaggio & installazione

Da chiarire: pulizia del of CD, controllo di tenuta, riempimento con acqua

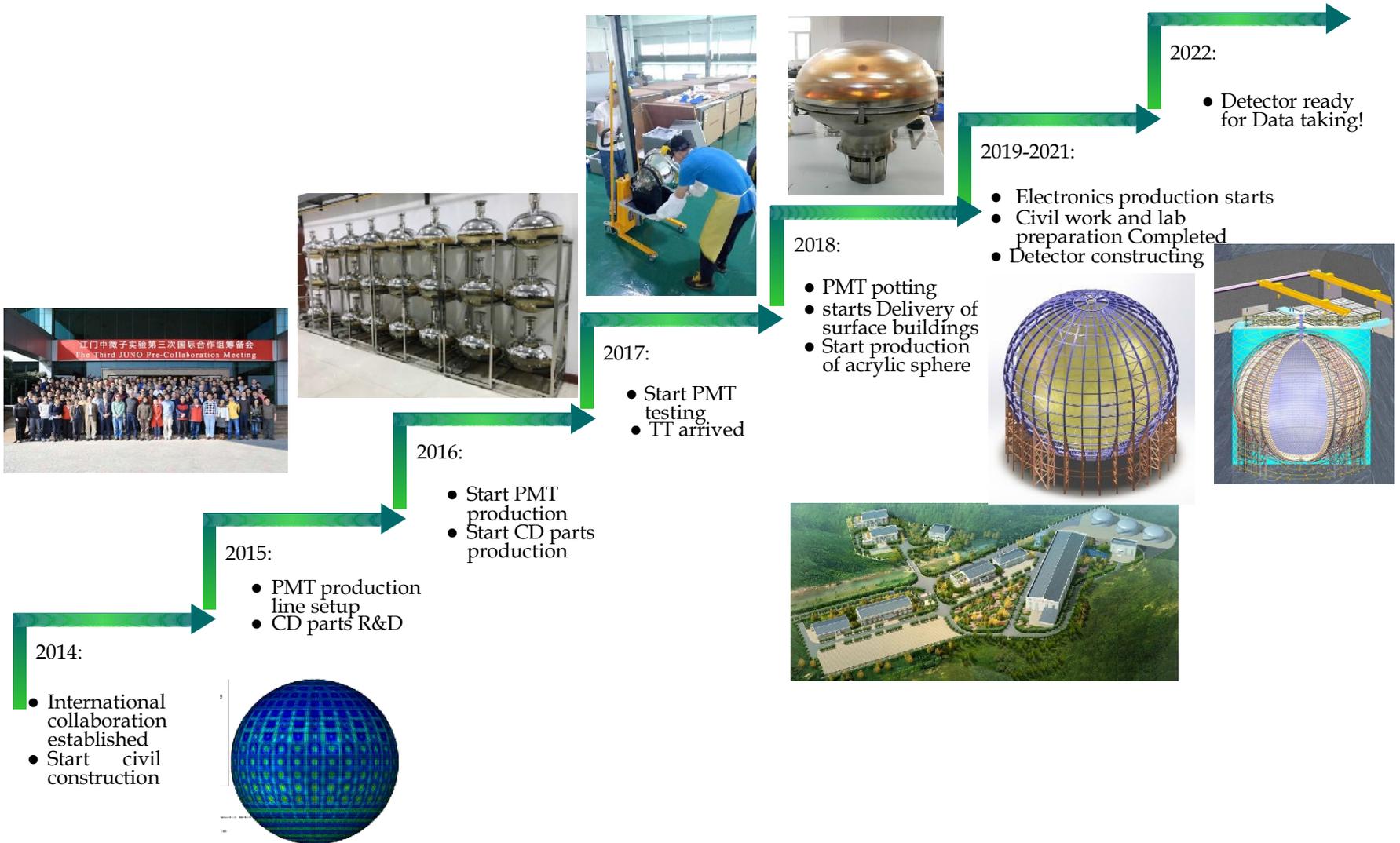
Sistema di calibrazione

- **Obiettivo:**
 - Risoluzione di energia globale: $\leq 3\%/VE$
 - Incertezza sulla scala di energia: $<1\%$
- **Sorgenti radioattive:**
 - γ : ^{40}K , ^{54}Mn , ^{60}Co , ^{137}Cs
 - e^+ : ^{22}Na , ^{68}Ge
 - n : $^{241}\text{Am-Be}$, $^{241}\text{Am-}^{13}\text{C}$ or $^{241}\text{Pu-}^{13}\text{C}$, ^{252}Cf
- **Quattro sistemi complementari**
 - **1-D: Automatic Calibration Unit (ACU)** → per la scansione asse verticale
 - **2-D:**
 - **Cable Loop System (CLS)** → scansione di piani verticali
 - **Guide Tube Calibration System (GTCS)** → scansione superficie esterna CD
 - **3-D: Remotely Operated under-LS Vehicle (ROV)** → scansione di tutto il rivelatore





Milestone & schedule





Conclusioni

- JUNO è caratterizzato da ampie opportunità nella fisica delle oscillazioni di neutrino con la sua **grande massa** e la **risoluzione di energia** spinta a livelli mai raggiunti prima
- Sensibilità alla gerarchia di massa in 6-8 anni:
 - $>3\sigma$ e può **raggiungere $>4\sigma$ con vincolo 1% su $\Delta m_{\mu\mu}^2$**
- **Misura sotto il percento** di $\sin^2\theta_{12} \Delta m_{12}^2$ and Δm_{ee}^2
- **Necessaria comprensione precisa delle risposta del rivelatore e della scala di energia**
- Previsto un rivelatore vicino TAO per un preciso spettro di riferimento
- Progetto in avanzata fase di realizzazione
- Inizio previsto della presa dati: entro **2022**