Caratteristiche, stato e prospettive dell'esperimento JUNO V. Antonelli⁺

(Dipartimento di Fisica, Università degli Studi di Milano & INFN Milano – Via Celoria 16 Milano; vito.antonelli@mi.infn.it)

⁺per conto (on behalf) della Collaborazione JUNO

Abstract

Presto entrerà in funzione nel sud della Cina JUNO, uno più interessanti esempi di esperimenti che eseguiranno misure di precisione e proveranno a risolvere alcuni problemi aperti nella fisica dei neutrini. Il rivelatore di JUNO è uno scintillatore di più di 35 m di diametro e con una massa di 20 kton, installato a circa 700 m di profondità, caratterizzato da una elevatissima Scopo risoluzione energetica. principale dell'esperimento con antineutrini da reattore è la determinazione (a 3-4 σ) della gerarchia di massa (normale o inversa) dei neutrini. In aggiunta, JUNO ridurrà di quasi un ordine di grandezza l'incertezza sui valori di diversi parametri di massa e di mescolamento, avrà un'elevata sensibilità alla rivelazione di neutrini da Supernova e potrà studiare anche i geoneutrini ed neutrini atmosferici. Inoltre la rivelazione a JUNO dei neutrini solari (soprattutto da ⁸B e ⁷Be) contribuirà allo studio del problema della metallicità solare e, mediante l'analisi dello spettro, permetterà di testare la validità della soluzione di LMA per le oscillazioni, alla ricerca di eventuali segnali di Interazioni Non Standard per i neutrini. Lo stato di avanzamento dei lavori viene discusso. La presa dati dovrebbe cominciare nel 2021, dando il via a questo programma di ricerca di elevato interesse per fisica delle particelle e l'astrofisica.

La gerarchia di massa dei neutrini

- Massa e reale natura (Majorana o Dirac) dei neutrini ancora ignoti ma note le differenze dei quadrati dei loro autovalori di massa $\Delta m_{ii}^2 = m_i^2 - m_i^2$.
- Dai solar KamLAND Dagli atmosferici e LBL $\Delta m_{21}^2 = (7.37 \pm 0.17) \times 10^{-5} \text{eV}^2; \quad |\Delta m_{32(31)}^2 = (2.52 \pm 0.04) \times 10^{-3} \text{eV}^2$

Due possibili scenari compatibili coi dati: **Gerarchia normale (NH) o inversa (IH)**

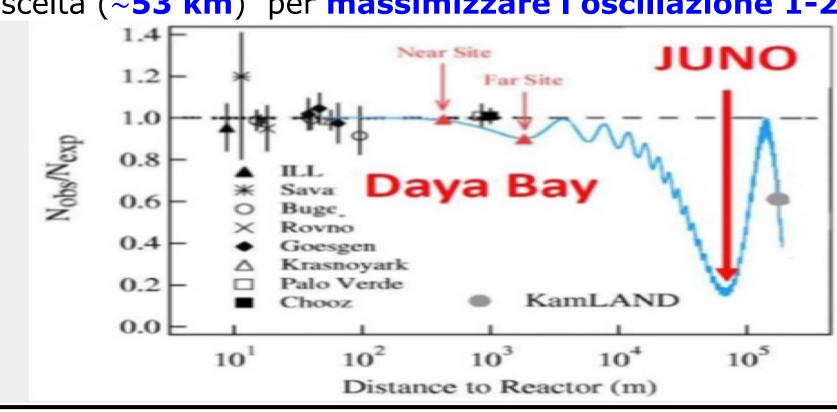
(e.g.**JHEP1701**(2017)087;**PRD95**(2017)n.9,096014;**NPB00**(2016)) Normal solar: 7.5×10⁻⁵ eV² atomospheric: 2.4×10⁻³ eV² atomospheric: $2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ solar: 7.5×10⁻⁵ eV²

 $\left| \Delta m_{31}^2 \right| = \left| \Delta m_{32}^2 \right| - \Delta m_{21}^2$ $\left| \Delta m_{31}^2 \right| = \left| \Delta m_{32}^2 \right| + \Delta m_{21}^2$ Determinazione di Gerarchia di massa (MH) è uno dei grandi problemi aperti fisica dei neutrini

- discriminare Fondamentale per possibili estensioni del Modello Standard e stimare le **potenzialità d esperimenti** futuri (es.0ν2β: doppio dec.β senza neutrini)
- Angolo θ_{13} relativamente grande: possibile **studio di** gerarchia dalle correzioni (dipendenti da MH e proporzionali a $\sin^2(2\theta_{13})$) alla probabilità di oscillazione per antineutrini da reattore con circa 18000 PMTs da "baseline" media
- Complementare a LBL (NOvA, T2K e DUNE) e Neutrino Telescopes (IceCube e in futuro PINGU,ORCA), ma vantaggio di <u>indipendenza da incertezze su</u> densità materia nella terra e fase di violazione di CP Richiesto esperimento con antieutrini da reattore di grandi dimensioni (statistica) ed elevata risoluzione energetica: JUNO

JUNO

JUNO (Jiangmen Underground Neutrino Observatory): esperimento da reattore in costruzione vicino a Kaiping condizioni criogeniche (-50°C) : sfida tecnologica. (Cina) che coinvolge più di 70 istituti in 3 continenti. Ha molte finalità, ma è concepito per studiare la gerarchia di massa. "Baseline" reattore-rivelatore è scelta (~53 km) per massimizzare l'oscillazione 1-2



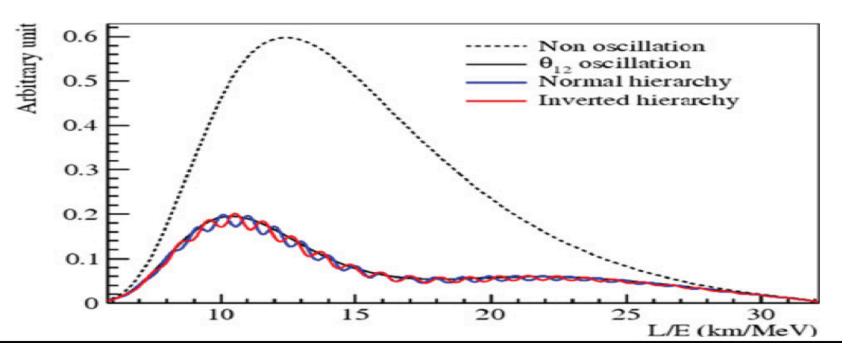
La gerarchia di massa e JUNO

Probabilità di sopravvivenza per $\bar{\nu}_e$: $P_{ee} = 1 - P_{21} - P_{3x}$

$$\begin{split} P_{21} &= \cos^4\theta_{13} \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E}\right) \\ P_{3x} &= \sin^2(2\theta_{13}) \left[\cos^2\theta_{12} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{31}^2 L}{4E}\right) + \sin^2\theta_{12} \sin^2\left(\frac{\Delta m_{32}^2 L}{4E}\right)\right] = \\ \frac{1}{2} \sin^2(2\theta_{13}) \left\{ 1 - \left[1 - \sin^2(2\theta_{12}) \sin^2\left(\frac{\Delta m_{21}^2 L}{4E}\right)\right]^{1/2} \cos\left(2 \left|\frac{\Delta m_{ee}^2 L}{4E}\right| \pm \varphi\right) \right\} \end{split}$$

In formula (α), $\Delta m_{ee}^2 = \cos^2\theta_{12}\Delta m_{31}^2 + \sin^2\theta_{12}\Delta m_{32}^2$ e abbiamo denotato con $\cos \varphi$ combinazioni dei parametri di massa e mescolamento del settore 1-2. Il segno della fase φ dipende dalla gerarchia di massa: +1 per NH e -1 per IH.

Oscillazioni "rapide", opposte gerarchie, per le 2 sovrapposte allo schema di oscillazione generale. Combinando la probabiltà di oscillazione col flusso di antineutrini da reattore e la sezione d'urto per decadimento inverso si ottiene il seguente spettro.



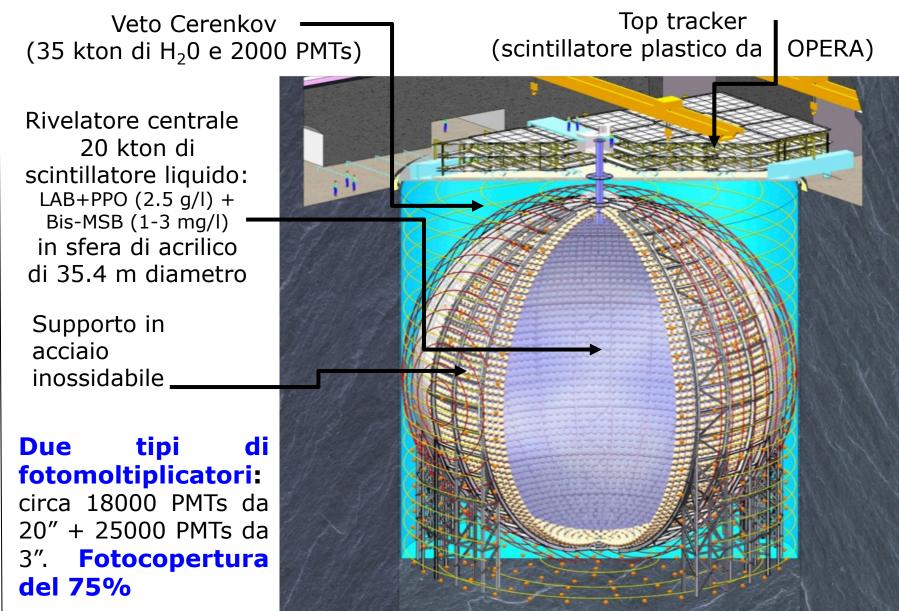
L'esperimento JUNO

Sotterraneo a profondità di circa 700 m



Fascio di antineutrini principalmente da 10 **reattori** nucleari posti in 2 diversi siti a~53 km dal rivelatore

Concezione e struttura del rivelatore



Rivelatore di vicinanza ("near detector")

 Rivelatore più vicino al fascio (near detector) a 30 m da reattore. TAO (Taishan Anti-neutrino Observatory) misura di spettro antineutrini dei reattori con precisione del % per evitare potenziali errori sistematici in analisi dei dati di oscillazione legati a anomalie nel flusso. Scintillatore liquido (2.6 t) con Gd. Risoluzione energetica (1.5% $/\sqrt{E}$) Si utilizzeranno SiPM, operanti, come lo sciintillatore in

Principali caratteristiche di JUNO

- Elevata statistica (grande massa e vicinanza a sorgenti) Ottima risoluzione energetica ($\sigma(E)/\sqrt{E} = 3\%$)
- Elevata resa luminosa ("photon yield"): 1200 p.e./MeV grazie a caratteristiche scintillatore (trasparenza) e fotomoltiplicatori (alta copertura fotocatodo e efficienza di rivelazione).
- •Basso fondo cosmogenico (per profondità e sistema di veto)

ESPERIMENTO	DAYA	Borexino	KamLAND	JUNO
	BAY			
massa sciintillatore (tonnellate)	20/rive latore	~ 300	~ 1000	~20000
N. fotoelettroni raccolti/MeV	~ 160	~ 500	~ 250	~1200
risoluzione E @1MeV	~ 7.5%	~ 5%	~ 6%	~ 3%

Stato dell'esperimento JUNO

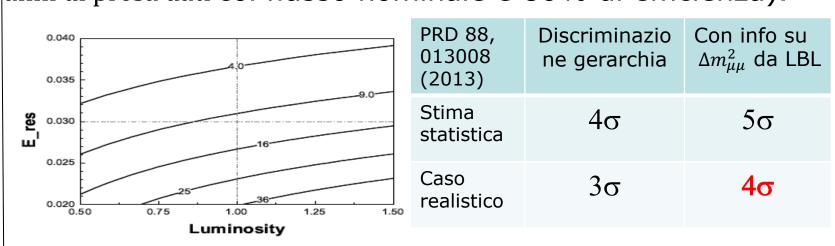
Lavori di scavo ultimati

- Vari metodi purificazione scintillatore: distillazione; purif.con colonna di Al₂O₃; filtraggio; estrazione con acqua; "stripping" con gas. \Rightarrow **Tests positivi** a impianto pilota.
- Lunghezza di attenuazione per LAB purificato >25 m
- Studi avanzati per raggiungere radiopurezza desiderata • Rivelatore (OSIRIS) per monitorare radiopurezza a livello 10⁻¹⁶ g/g durante il riempimento di JUNO.
- Prototipo per rivelatore centrale è pronto per il test.
- Produzione di fotomoltiplicatori iniziata nel 2016 e tests proseguono con uso di struttura "dedicata"
- Lavori in corso per sistemi di calibrazione, sistema di veto (da OPERA) già nel sito di JUNO ed elettronica
 - inizio presa dati previsto per il 2021

La gerarchia di massa a JUNO

Per dettagli: JUNO Yellow Book, J.Phys.G.43(2016)n.3, 030401 • Decadimento β inverso: $\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$. Coincidenza tra segnali di e+(immediato) e di cattura neutrone (ritardato)

- Analisi spettro e confronto con n. eventi attesi, che dipende da gerarchia di massa (MH). Analisi del χ^2 e ricerca dei minimi per le 2 gerarchie (NH e IH).
- · Sensibilità a gerarchia di massa espressa in termini di $\Delta \chi_{MH}^2 = |\chi_{MIN,NH}^2 - \chi_{MIN,IH}^2|$
- Linee di contorno iso- $\Delta \chi^2$: rappresentano $\Delta \chi^2_{MH}$ in funzione di risoluzione energetica e luminosità (L=1 per 6 anni di presa dati col flusso nominale e 80% di efficienza).



Altri studi rilevanti a JUNO

(Vedi JUNO YB o V. Antonelli, L. Miramonti, POS NEUTEL 2017 (2018) 056)

☐ Misure di precisione di parametri oscillazione

 $(\Delta m_{21}^2, \Delta m_{ee}^2, \theta_{12})$ al livello del sub-percento (grazie a statistica e risoluzione energetica elevate)

Parametro di oscillazione	Precisione attuale (1σ)	Esperiment i dominanti	Poten- zialità JUNO
Δm^2_{21}	2.2%	KamLAND	0.6%
$\left \Delta m_{ee}^2 = \cos^2 \theta_{12} \Delta m_{31}^2 + \sin^2 \theta_{12} \Delta m_{32}^2 \right $	2.4%	MINOS, T2K	0.4- 0.5%
$\sin^2(\theta_{12})$	5.4%	SNO	0.7%

■ Neutrini da Supernova

Sensibilità a v da esplosione di Supernova (SN) e da fondo diffuso. 3 fasi esplosione, accrescimento, raffreddamento. Per SN a d=10 kpc attesi migliaia eventi (in ≠ canali:Corrente Carica, Neutra, Urto Elastico); $\langle E_{\nu} \rangle = 14 \text{ MeV}$

□ Geoneutrini

Studio contributo radiogenico a potenza termica totale della Terra. Da misura v da $^{238}\mathrm{U}$, $^{232}\mathrm{Th}$ e rapporto Th/U, tests di modelli geochimici della Terra. Vantaggi JUNO: dimensioni, radiopurezza, profondità.

Attesi ~ 300-500 eventi/anno >KamL.+Borex + SNO+ **□** Neutrini atmosferici

Difficile discriminazione eventi $\nu_e - \nu_\mu$, ma allo studio algoritmi per discriminazione tramite ricostruzione di forma (pattern) temporale (vedi: arXiv: 1901.10340)

□ Ricerche esotiche

- Decadimento protone
- Effetti di violazione di invarianza di Lorentz (vedi altro poster di V. Antonelli, et al)

□ Neutrini solari @ JUNO

Vantaggi: Statistica e resoluzione elevate; Difficoltà: a)Profondità<altri esperimenti (fondo cosmogenico); b) Fondo radiioattivo: serve radiopurezza simile a Borexino Studi neutrini da ⁷Be ⁸B (in stesura lavoro di Collaborazione con **grande contributo di JUNO IT**)

- Possibile determinazione dei **flussi**. Contributo, insieme a v CNO (da altri esp.), a soluzione problema metallicità e discriminazione ≠ versioni di modelli Solari **Standard** (alto Z, basso Z e basso Z con opacità modificata).
- Studio dello spettro: ricerca risalita ("upturn") in zona transizione (E≈3-4 MeV) tra alte E (oscillazione MSW) e basse E (osc. in vuoto) e e asimmetrie giornonotte: controll consistenza di oscillazione LMA (grande angolo mescolamento) e eventuali segnali di Interazioni non Standard con la materia per neutrini

(termini non diagonali nel sapore che modificano

interazione con materia) previsti in estensioni del

Modelllo Standard (SuperSimmetria, Materia Oscura).