

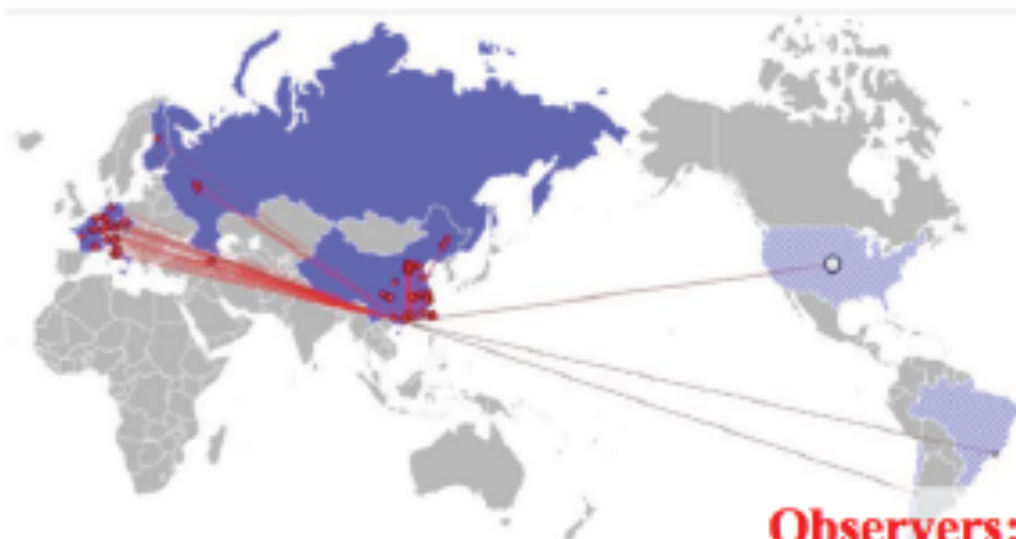
The Jiangmen Underground Neutrino Observatory: JUNO



The Jiangmen Underground Neutrino Observatory:



JUNO Collaboration



Europe (23)

APC Paris	INR Moscow
Charles U	JINR
CPPM Marseille	LLR Paris
FZ Julich	RWTH Aachen
INFN-Frascati	Subatech Nantes
INFN-Ferrara	TUM
INFN-Milano	U.Hamburg
INFN-Padova	ULB
INFN-Perugia	U Mainz
INFN-Roma 3	U Oulu
IPHC	U Tuebingen
Strasbourg	YPI Armenia

Observers:

US institutions
 HEPHY Vienna
 PUC Brazil
 PCUC Chile
 MPP Munich
 Jyvaskyla U.

Asia (28)

BNU	Nanjing U	SYSU
CAGS	Nankai U	Tsinghua
CQ U	Natl. CT U	UCAS
CIAE	Natl. Taiwan U	USTC
DGUT	Natl. United U	Wuhan U
ECUST	NCEPU	Wuyi U
Guangxi U	Pekin U	Xiamen U
HIT	Shandong U	Xi'an JTU
IHEP	Shanghai JTU	
Jilin U	Sichuan U	



Oscillazione dei neutrini

- Matrice PMNS (Pontecorvo, Maki, Nakagawa, Sakata; 1962): descrive l'ampiezza di probabilità che un neutrino di sapore α si possa trovare in un autostato di massa i

$$\begin{bmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{bmatrix}$$

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Atm

Reattore

Sol

U parametrizzata da tre angoli di oscillazione ($\theta_{12}, \theta_{23}, \theta_{13}$) e da un fattore di fase complesso δ (necessario per introdurre la violazione di CP)

Parametri PMNS

- Ampiezza di oscillazione $\rightarrow \theta_{ij}$
- Frequenza di oscillazione \rightarrow Differenza quadratica massa neutrini Δm^2_{ij}

Sorgente	ν	Energia (GeV)	Distanza (km)
Sole	ν_e	10^{-3}	10^8
Reattore	Anti- ν_e	10^{-3}	1-100
Atmosfera	$\nu_\mu, \text{anti-}\nu_\mu (\nu_e, \text{anti-}\nu_e)$	1-20	$10-10^4$
Acceleratore	$\nu_\mu, \text{anti-}\nu_\mu$	1-100	$1-10^3$

Due possibili approcci per lo studio di oscillazioni

Esperimenti di scomparsa

Esperimenti di apparizione

PMNS ad oggi

PMNS parametrizzata da 3 termini \longrightarrow 3 differenti regimi sperimentali

💧 θ_{12} \longrightarrow neutrini solari + da reattore
KamLAND+Solar: $\sin^2\theta_{12} = 0.857 \pm 0.024$

💧 θ_{23} \longrightarrow neutrini atmosferici e da acceleratori (LB)
SuperK: $\sin^2\theta_{23} > 0.94$ @ 90% C.L.

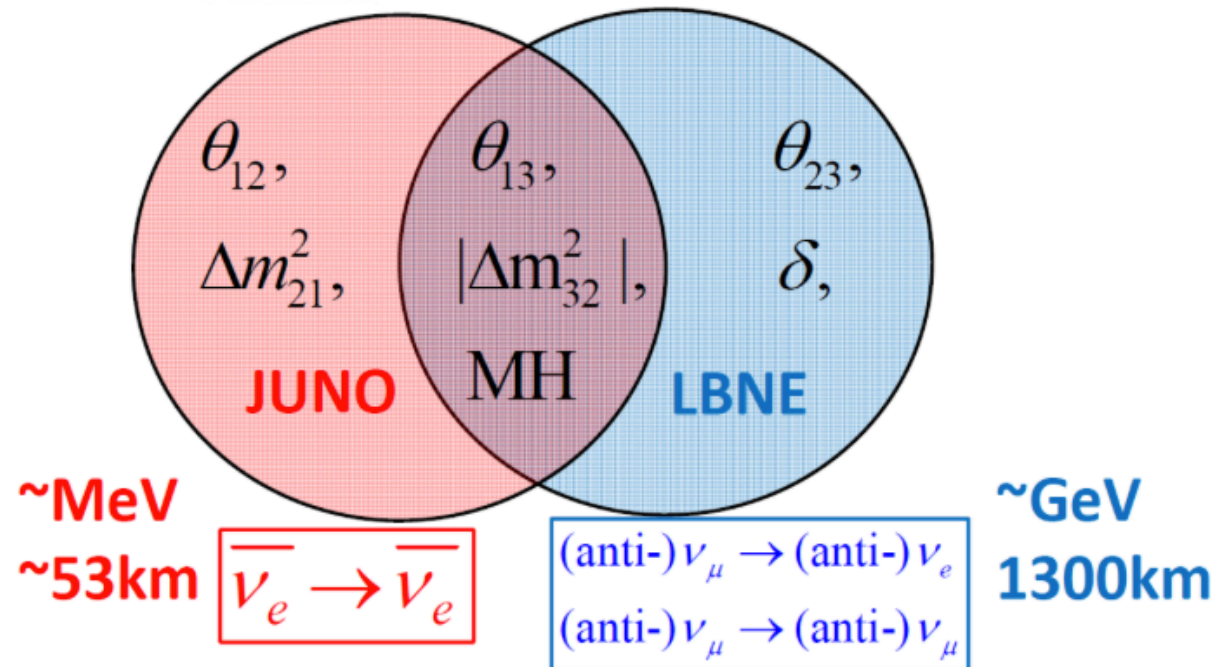
💧 θ_{13} \longrightarrow neutrini da reattore e acceleratore
Fit (T2K+RENO+Daya Bay): $\sin^2\theta_{13} = 0.098 \pm 0.013$

💧 δ_{CP} ?

} Angoli grandi
A differenza dei termini in CKM

} Per osservare la fase di violazione di CP $\neq 0$, ma piccolo

PMNS di domani...



JUNO + LBNE forniranno una conoscenza completa dei 7 parametri fondamentali della PMNS

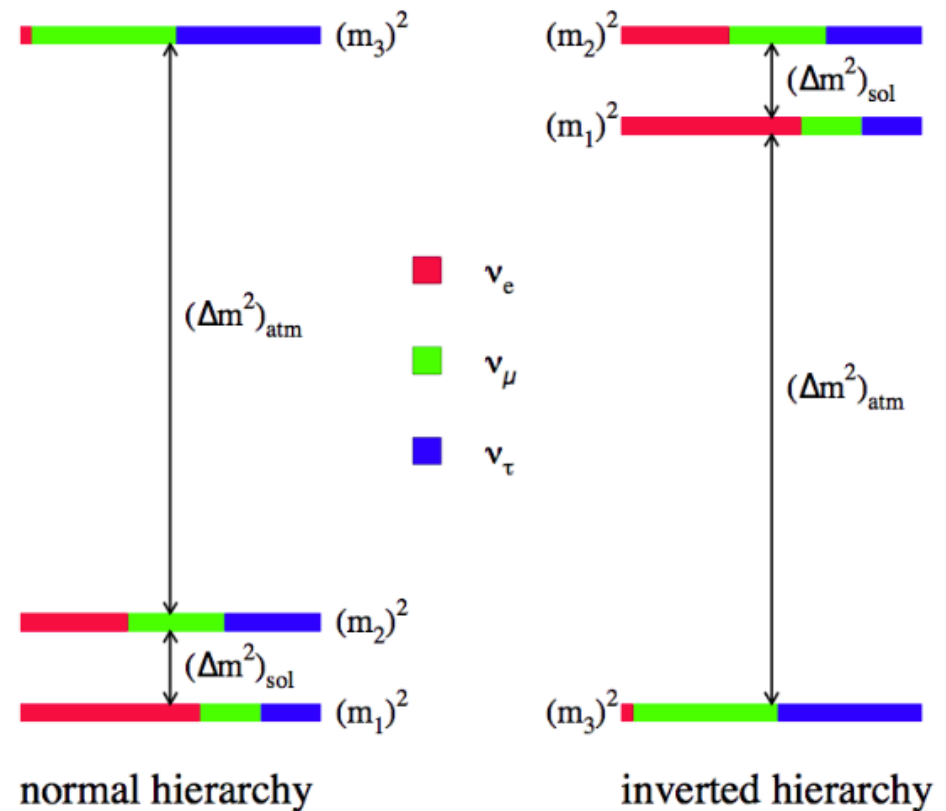
Gerarchia di massa

• E' necessario conoscere la gerarchia di massa per:

- Ridurre l'incertezza su δ_{CP}
- Determinare la scala di massa assoluta dei neutrini
- Comprendere/capire Supernovae di tipo II (core-collapse)



“Completare” il MS



Obiettivi di Juno

- ◆ Determinare la gerarchia di massa dei neutrini
 - ◆ misurare Δm^2_{21} , Δm^2_{32} con una precisione di $\sim 1\%$
- ◆ Misure di precisione dei parametri di oscillazioni
- ◆ Studi su:
 - ◆ Neutrini da Supernovae
 - ◆ Geoneutrini
 - ◆ Neutrini atmosferici
 - ◆ Neutrini sterili
 - ◆ Ricerche “esotiche” (dec. protone)

strategia

- ◆ Studio dello spettro in energia
 - ◆ Segnali di anti- ν : IBD
 - ◆ Statistica sufficiente: $ER < 3\%/\sqrt{E}(\text{MeV})$
- ◆ Combinazione con LBNE
 - ◆ Alta sensibilità: grande statistica e controllo delle sistematiche

Con un rivelatore liquido a scintillazione posto oltre 30 km da un reattore si possono osservare oscillazioni dovute:

Solar mass-
squared splitting

Atmospheric mass-
squared splitting

Oscillazione e MH (1)

$$\begin{aligned}
 P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e} &= 1 - \sin^2 2\theta_{13}(\cos^2 \theta_{12} \sin^2 \Delta_{31} + \sin^2 \theta_{12} \sin^2 \Delta_{32}) - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 \Delta_{21} \\
 &= 1 - 2s_{13}^2 c_{13}^2 - 4c_{13}^2 s_{12}^2 c_{12}^2 \sin^2 \Delta_{21} + 2s_{13}^2 c_{13}^2 \sqrt{1 - 4s_{12}^2 c_{12}^2 \sin^2 \Delta_{21}} \cos(2\Delta_{32} \pm \phi)
 \end{aligned}$$

L: baseline

$$\Delta_{21} \equiv \Delta m_{21}^2 L / 4E$$

Solar mass-squared splitting

Φ : fase di shift

E: anti ν energy

$$\Delta_{32} \equiv \Delta m_{32}^2 L / 4E,$$

Atmospheric mass-squared splitting

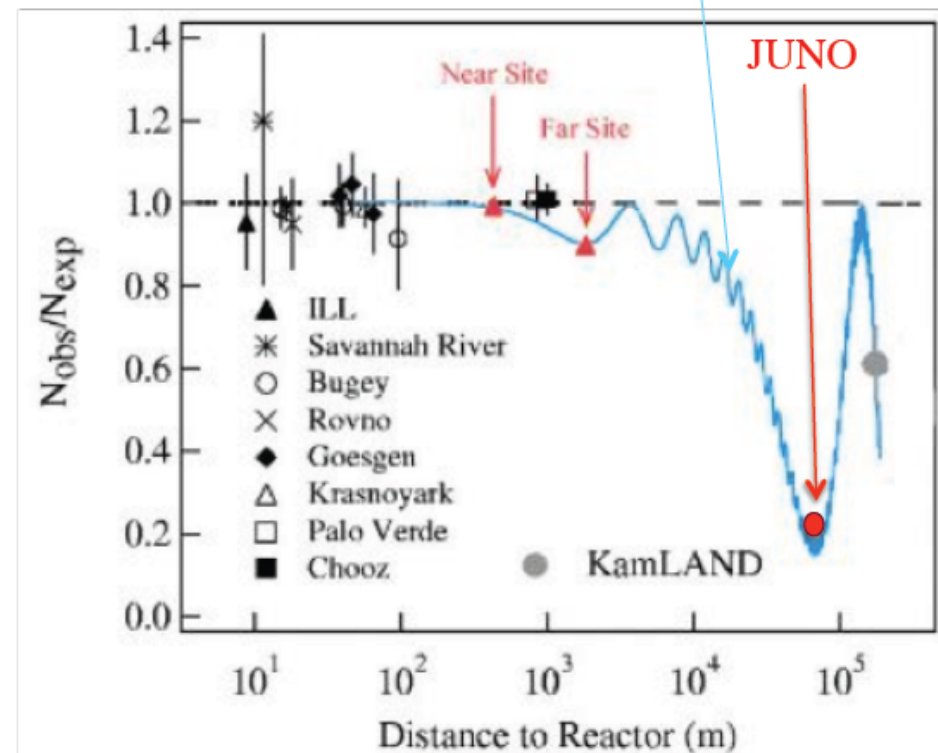
MH dipende da ϕ

+: gerarchia normale (NH)

-: gerarchia inversa (IH)

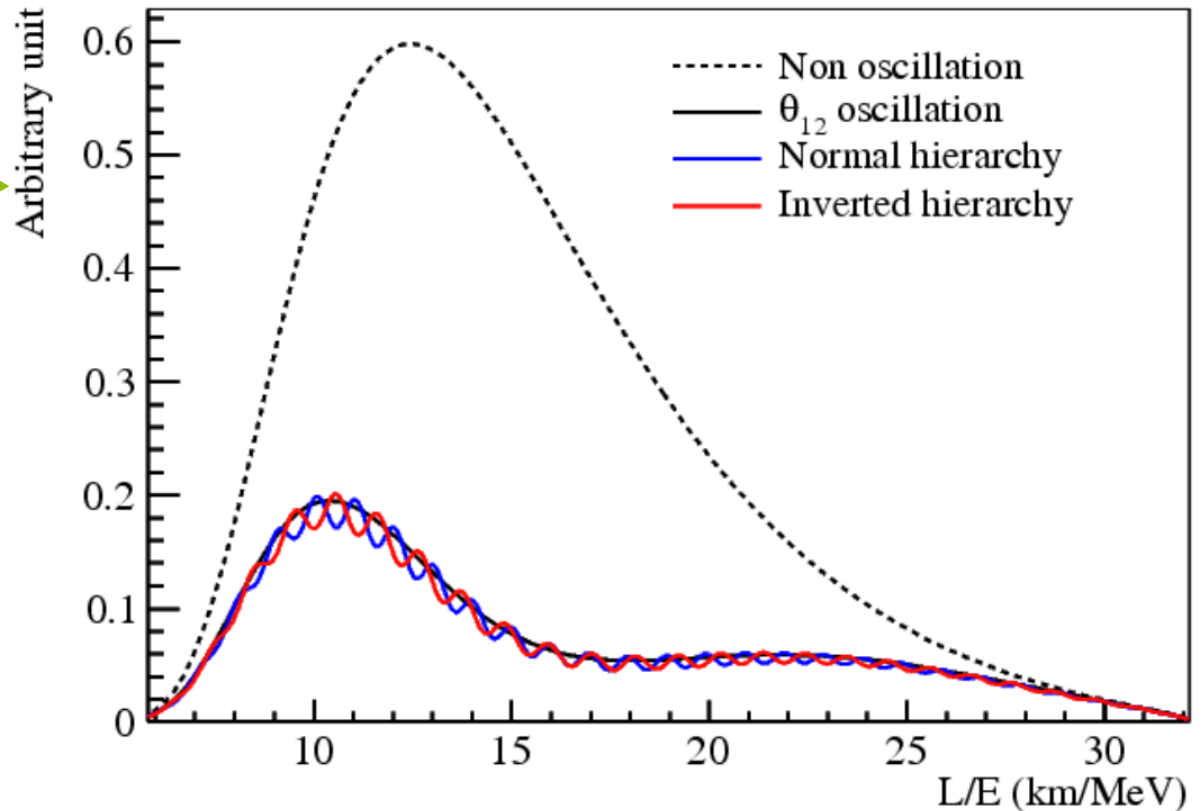
Flusso vs Distanza

- Reattori: sorgente di anti- ν_e
- Nessuna evidenza di scomparsa tra 10 m e ~ 1 km (errori di pochi %)
- Scomparsa di $\sim 1/3$ a distanze maggiori



Oscillazione e MH (2)

- ◆ Probabilità di sopravvivenza
- ◆ MH “codificato” nella fase



Test statistici

- Spettro fittato con entrambi i modelli di gerarchia -> miglior fit

Per
quantificare

Test statistici: $\Delta X^2 = X^2_{min}(NH) - X^2_{min}(IH)$

- Minimizzazione dei parametri di oscillazione
- Normalizzazione al numero totale di eventi


$\Delta X^2 > 0 : IH$

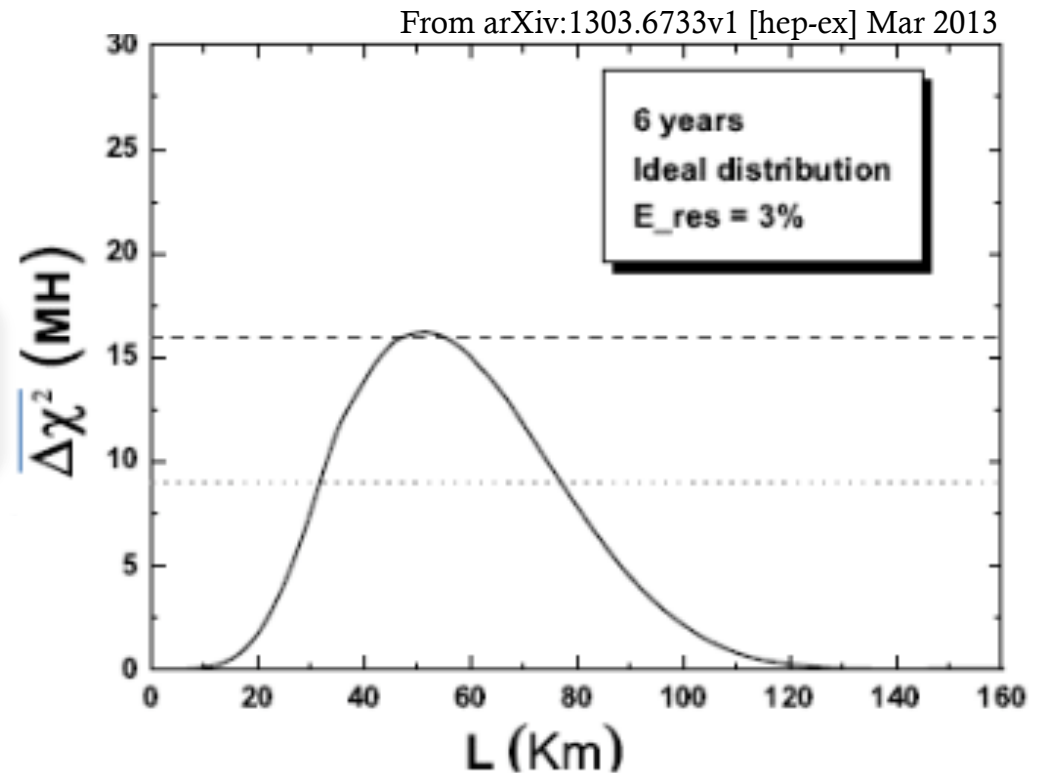
$\Delta X^2 < 0 : NH$

Test statistici: ottimizzazione baseline

- Da simulazioni MC
- Discriminatore utilizzato per ottimizzare la baseline:

$$\overline{\Delta \chi^2} = [\chi^2_{\min}(\text{NH}) - \chi^2_{\min}(\text{IH})] / \text{Dati_MH}$$

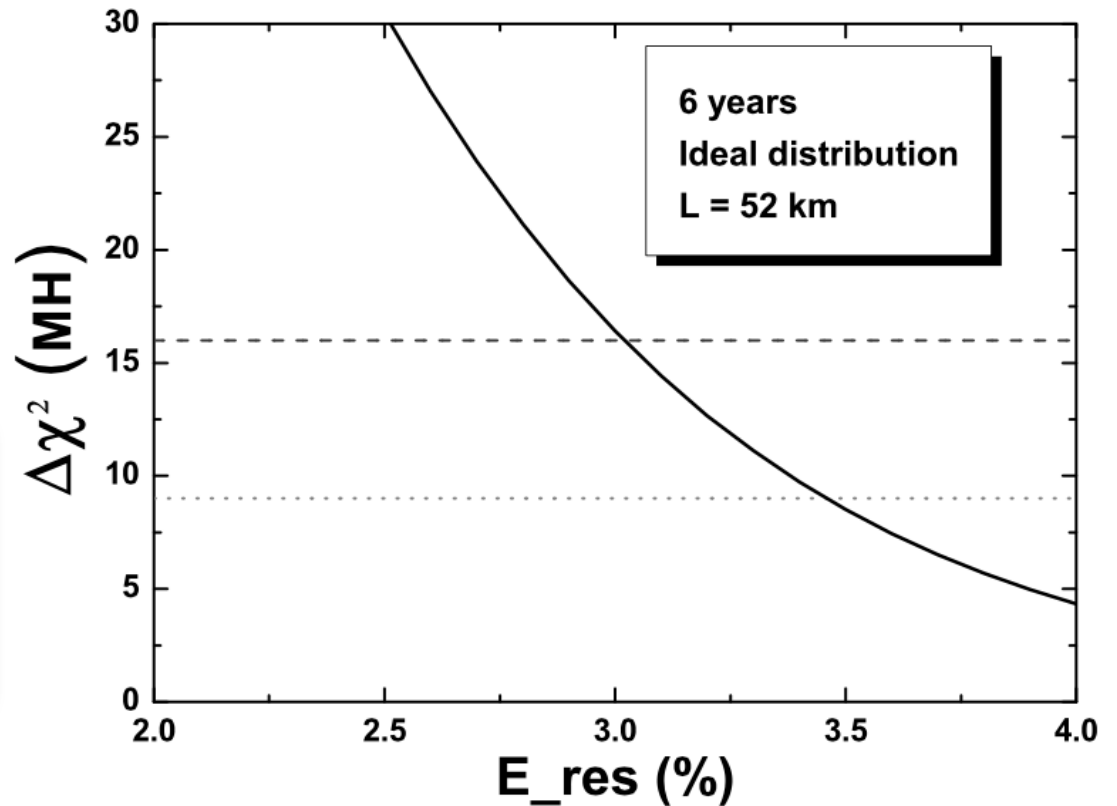
- Distanza ottimale per massimizzare $\Delta \chi^2$ 



Test statistici vs ER

- Da simulazioni MC
- Impatto della RE sul discriminatore

Baseline ottimale: $\Delta\chi^2 \sim 16$
@ ~50 km
@ 3% di RE

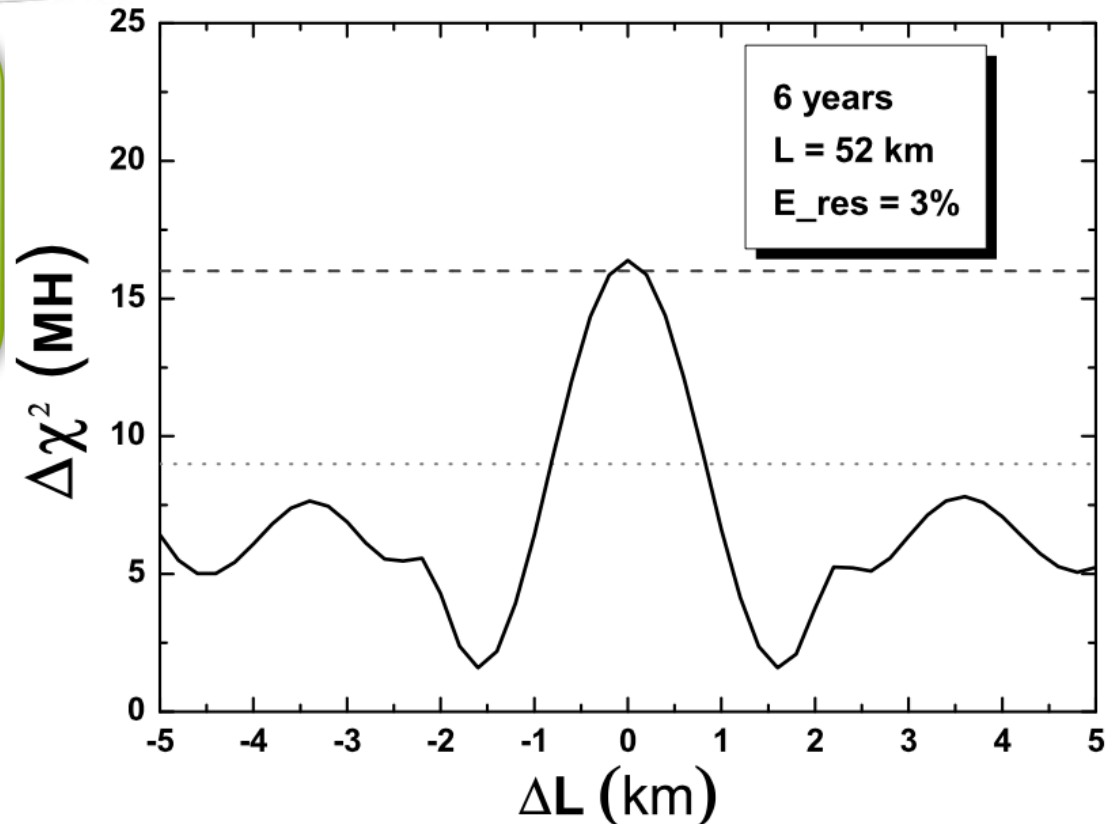


Test Statistici: distanza dai reattori

Baseline ottimale: $\Delta\chi^2 \sim 16$

@ ~50 km
@ 3% di RE

Da entrambi i reattori!



Sensibilità

- ◆ Cosa influisce la sensibilità?
 - ◆ Differente distanza dai reattori
 - ◆ Scala di energia non lineare (necessaria calibrazione all'1%)

Simulazioni (arXiv:1303.6733v1) mostrano che JUNO può raggiungere in 6 anni valori di $\Delta\chi^2$ tra 15-20 (4σ)

Tempi e prospettive

- ◆ Determinazione MH a 4σ
- ◆ Schedule:
 - ◆ Costruzione 2014 – 17
 - ◆ Produzione dei componenti del detector: 2016 – 17
 - ◆ Produzione dei fototubi (PMT): 2016 – 19
 - ◆ Assemblaggio e installazione del detector: 2018 – 2019
 - ◆ Data taking: 2020
- ◆ Costo: ~ 100 di milioni di dollari

Prospettive: oltre MH

	Current	JUNO
Δm^2_{12}	3%	0.6%
Δm^2_{13}	5%	0.6%
$\sin^2 \theta_{12}$	6%	0.7%
$\sin^2 \theta_{23}$	20%	N/A
$\sin^2 \theta_{13}$	14%-4%	~15%

💧 Sarà più precisa della matrice CKM

Strategia dell'esperimento

- ◆ 53 km distante dai reattori Yangjiang e Taishan Nuclear Power Plants
 - ◆ Due reattori per incrementare la statistica
 - ◆ Energia antineutrini: $(1.8 \div 10) \text{ MeV}$
 - ◆ Potenza termica totale: 36 GW
 - ◆ Ottenere una buona risoluzione energetica: $ER < 3\%/\sqrt{E}(\text{MeV})$
- ◆ Sotto 700 m di granito -> schermare i cosmici (principale bg)
- ◆ >10 kt LS detector

Risoluzione in Energia

Come affermato, è necessario una $ER < 3\%/ \sqrt{E}(\text{MeV})$



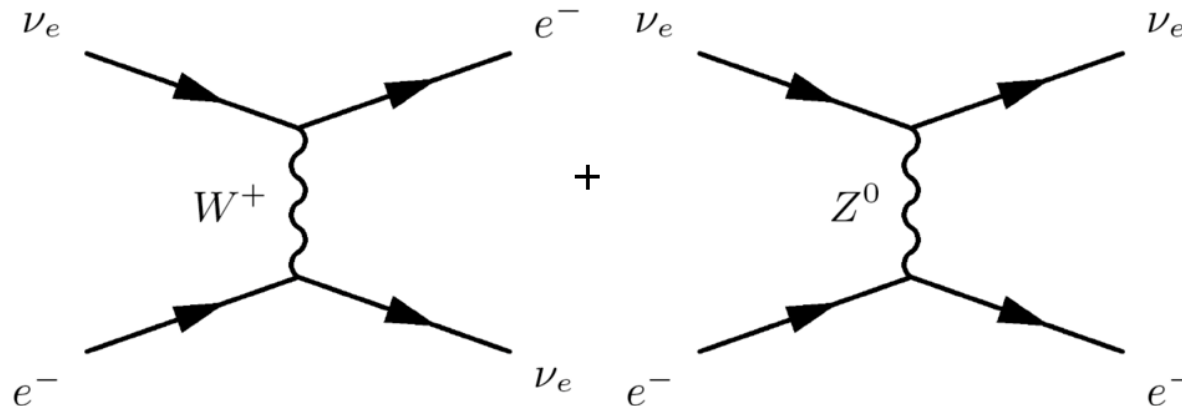
- High photocatode coverage: $\sim 80\%$
 - PMT con QE $\sim 35\%$
- LS ad alta trasparenza (lunghezza di attenuazione $\sim 35\text{ m}$ @ 20 kt detector)
 - LS ad alta LY ($\sim 1300\text{-}1400\text{ p.e./MeV}$)

Decadimento β inverso

Interazione debole!

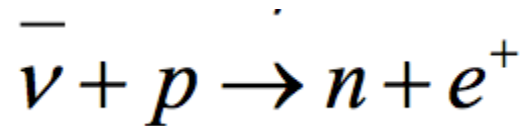
In corrente carica

In corrente neutra



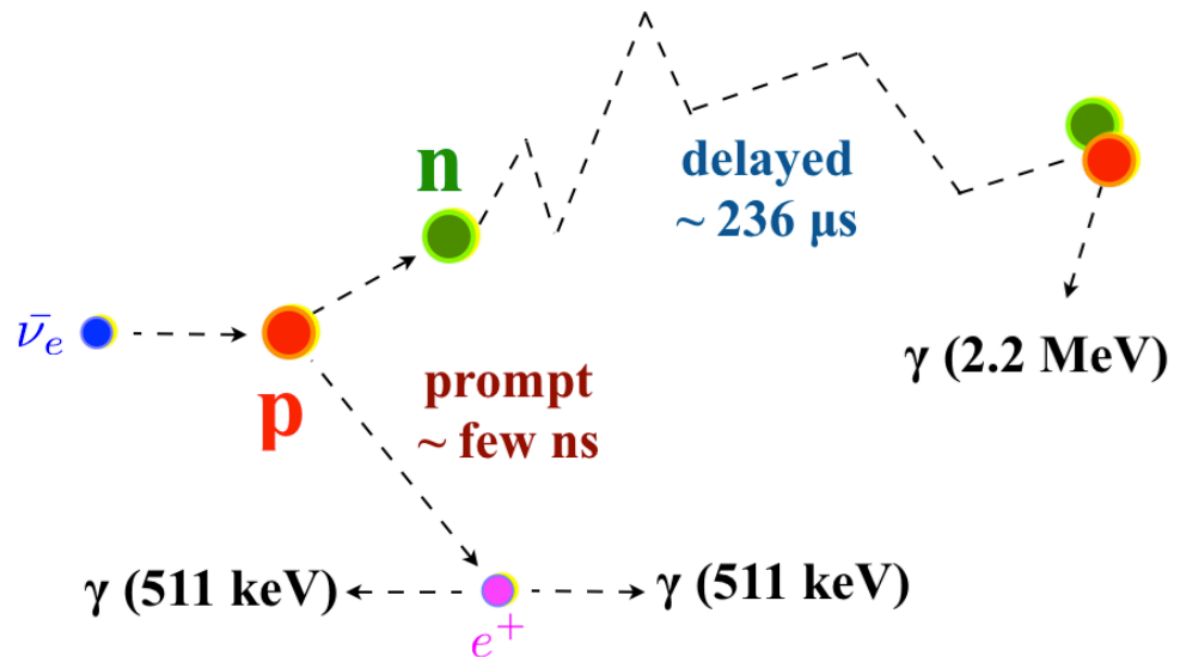
Metodo di rilevazione

Studio dello spettro del positrone proveniente dall'anti- ν_e



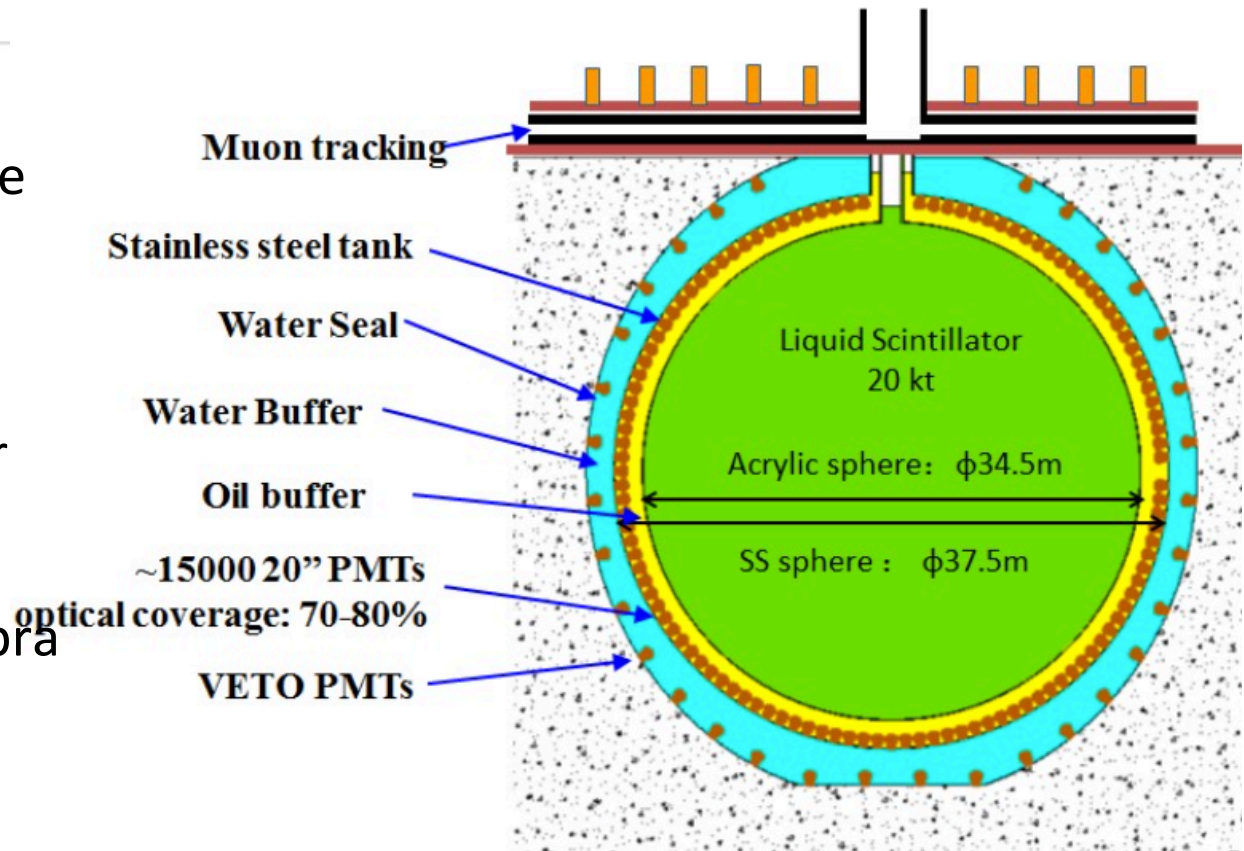
$$E_{\text{soglia}} = 1.8 \text{ MeV}$$

- ◆ Coincidenza temporale tra e^+ e γ per eliminare il bg

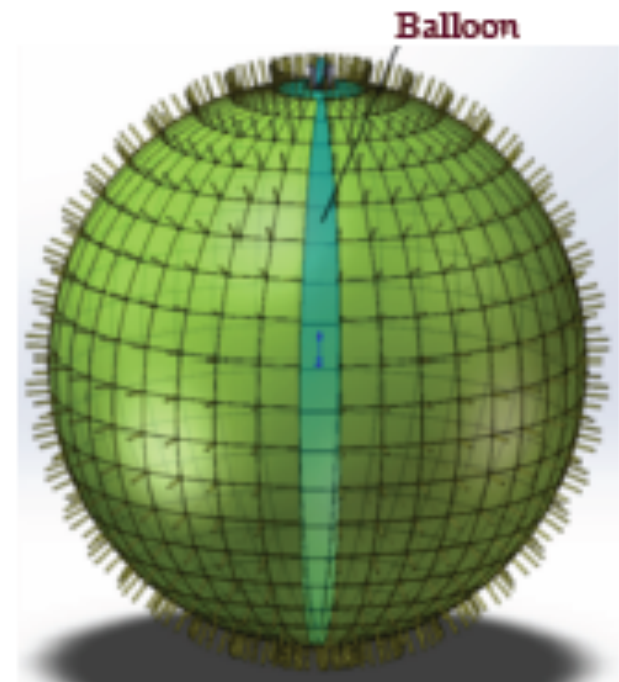
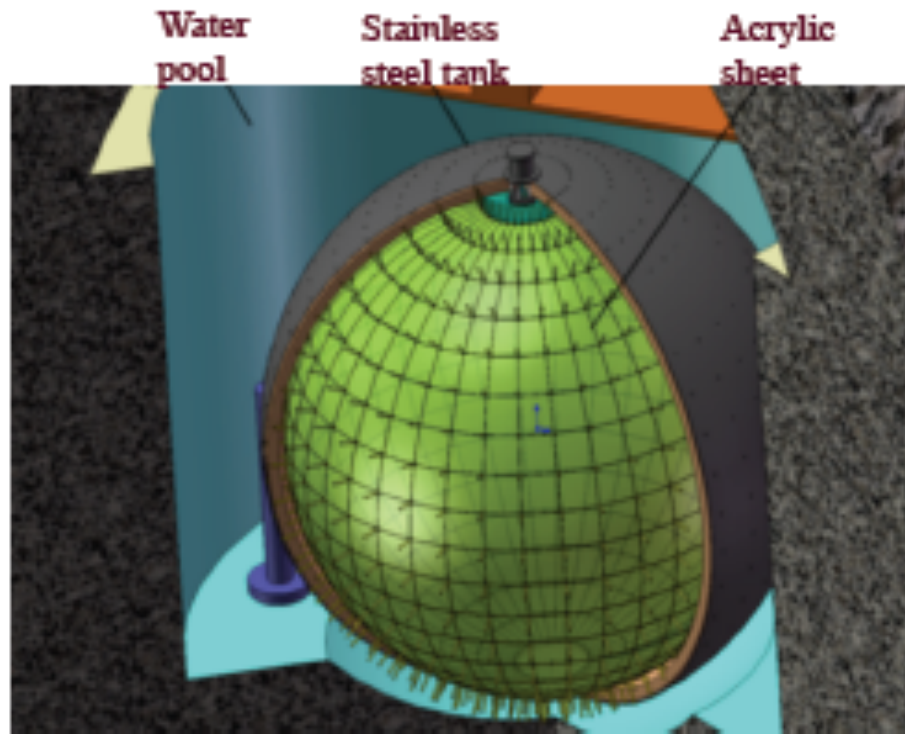


Rivelatore

- Rivelatore a scintillazione di grande massa (20 kt)
- Vasca di acqua
 - Cherenkov detector per taggare i cosmici
- Tracciatore di muoni sopra la "piscina"



Rivelatore



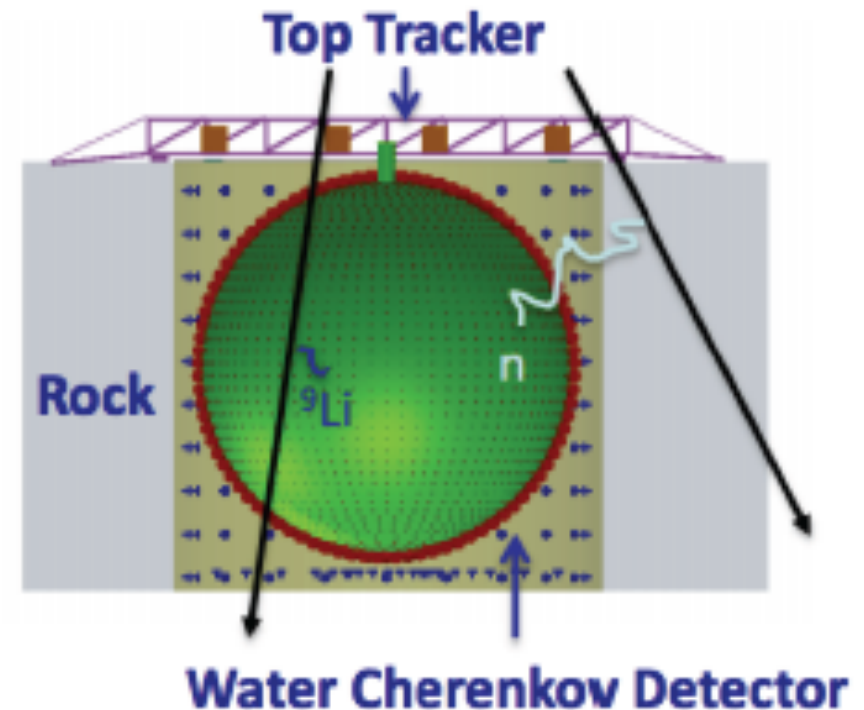
Veto

Acqua

- protegge il rivelatore centrale (radioattività ambientale delle rocce)
- Dati MC mostrano che bastano 2 m di acqua + 1500 PMTs da 20"

Top veto

- Migliora l'efficienza di rivelazione dei muoni
- Diverse opzioni: RPC, LS, PS



PMT

- ◆ PMTs ad alta QE e capacità di “collezionamento”
- ◆ Basso dark noise
- ◆ Necessaria high photocatode coverage

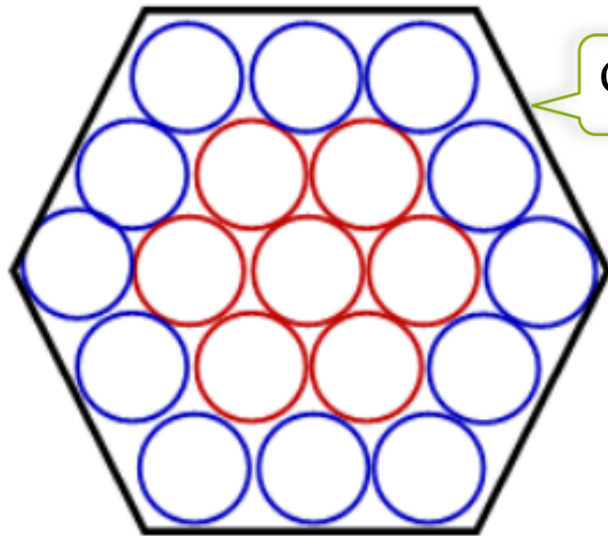
Sviluppo di 3 PMTs da 20” (New MCP-PMT, Hamamatsu R5912-100, Photonics-type PMT)



PMT coverage

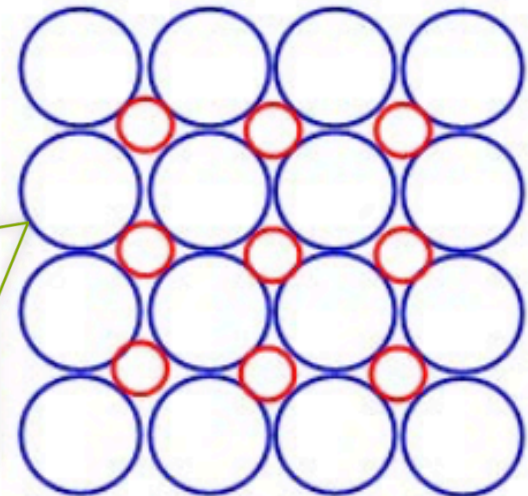
2 opzioni:

PMT da 20"



Copertura: 86.3 %

PMT da 20" + PMT da 8"



Copertura: 83%
PMTs da 8" consentono
una migliore
ricostruzione temporale
del vertice

DAQ

- ◆ Read-out di ~ 20000 PMT \rightarrow 20000 canali
 - ◆ Misure accurate di segnali piccoli
 - ◆ Preservare info di grandi segnali da μ
 - ◆ Rate di eventi: ~ 50 KHz (cosmici + IBD + noise)
 - ◆ **No trigger**
- ◆ Front-end e read out all'interno del detector
- ◆ Informazioni digitali trasportate tramite fibre ottiche al DAQ
- ◆ Piani
 - ◆ Minimizzare il numero di cavi
 - ◆ FADC da 1GHz \rightarrow info su timing e carica

Calibrazione risposta in energia

- ◆ Uniformità risposta -> date le dimensioni del detector è un aspetto cruciale
- ◆ Necessari + punti di calibrazione
 - Differenti tipi di sorgenti radioattive
 - Tunable e^+/e^- pelletron
- ◆ Test del LS in una camera per caratterizzare la calibrazione in situ
 - Risposta di luce
 - Non-linearità

Statistica

- ◆ Considerando una potenza di ~ 36 GW, a distanza di ~ 53 km un tale detector dovrebbe osservare:
 - ◆ $\sim 10^5$ IBD \rightarrow ER $\sim 2.6\%/ \sqrt{E(\text{MeV})}$ (6 anni)
 - ◆ ~ 750 geoneutrini/anno (range energia: 1.8 – 3.3 MeV)
 - ◆ ~ 3000 dec- β inversi + ~ 3000 eventi visibili in altri canali di interazione di ν da Supernovae
- ◆ Se si giunge ad un TR dell'ordine del ns \rightarrow limite sulla BR del processo $p \rightarrow K^+ \text{ anti-}\nu$ (in 10 anni di run)

Juno Italia

- ◆ Mi: purificazione LS, test PMT
- ◆ MiB: flusso di anti-nu
- ◆ PD: elettronica F/E
- ◆ Frascati: muon Veto (Opera)
- ◆ Fe: analisi e geo-nu
- ◆ Ct: analisi e computing
- ◆ Pg: esperti di chimica

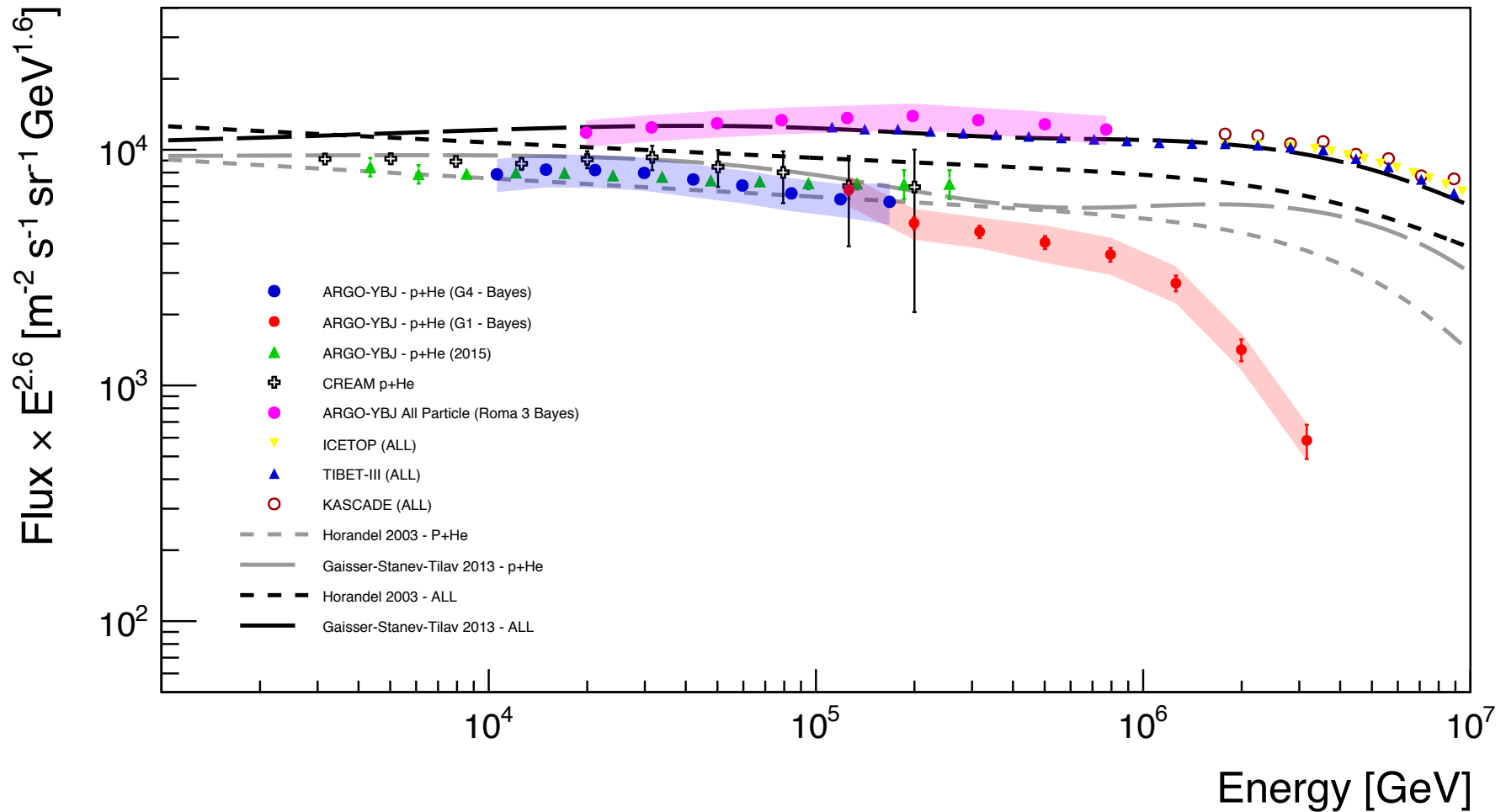
Gruppo II @ RM3

◆ 2015:

- ◆ Spettro RC: risultato importante, analisi di Rm3 (sm, *pm*) (si chiude quest'anno)
- ◆ Darkside-50: (*i.james*, sm)
 - ◆ Completato il modello di calcolo
 - ◆ Porting del SW al CNAF
 - ◆ Data transfer LNGS – CNAF – FNAL
- ◆ Juno: (a.budano, *i.james*, sm, g.salamanna)
 - ◆ Preparazione documentazione per approvazione
 - ◆ Porting del SW da IHEP al CNAF

Spettro leggeri

ARGO-YBJ Preliminary



Gruppo II @ RM3

Exp	2016	2017	2018
Darkside-50	Data Transfer: LNGS – CNAF – FNAL SW It. Coll.	Data Transfer: LNGS – CNAF – FNAL SW It. Coll.	
Juno	Computing Model SW It. Coll. Analysis	SW It. Coll. MC generation Analysis Testing prototypes	SW It. Coll. MC generation Analysis Detector
Necessita' di una risorsa aggiuntiva, rapidamente. siamo in palese violazione delle norme di GII			

Gruppo II @ RM3 2016

Exp	FTE		\$\$	
Darkside-50	SBussino	0.3	Missioni	10k
	MdVincenzi	0.2	Cons	1k
	IJames	0.3	Inv	2k
	sm	0.4		
		1.2/4		
	2 M.U. serv. El.			
Juno	ABudano	0.2	Missioni	19k
	SBussino	0.3	Cons	1k
	IJames	0.3	Inv	2k
	GSalamanna	0.3		
	sm	0.5		
		1.6/5		
	2M.U. serv. El.			