

# What Next: Fisica dei Neutrini

Gruppo di Lavoro “Neutrini”: Chiara Brofferio,

Carlo Giunti, Eligio Lisi, Maurizio Spurio,

Francesco Terranova

16 feb 2016

Roma

# (Executive) Summary

- *La fisica del neutrino è un settore che si presta a un approccio di tipo “What Next” (soluzioni innovative, interdisciplinarietà...) ?*

Secondo noi, sì. Molte opportunità “al di fuori” delle roadmap ma altrettante “nascoste” nei cosiddetti programmi balistici

- *What Next Neutrino ha portato ad idee e progetti innovativi?*

Sì. Con tutte le varianti possibili: da idee diventate progetti approvati dalle CSN o dall'EU, fino a spunti rimasti immaturi

- *What Next Neutrino ha trovato sinergie non banali con altri WG?*

Soprattutto con Rad. Cosmica, Dark Matter, Nuove Tecnologie. In generale: molto positivo l'ascolto degli altri GdL e CSN!

- *Ci sono settori il cui l'impatto è stato marginale o che richiederebbero un supplemento di indagine?*

ν sterili e CPV hanno ricevuto poca attenzione → ... (WN)<sup>2</sup> ?

# The 2015 Nobel Prize in Physics



*“for the discovery of  
 neutrino oscillations ...*

*... which shows that  
 neutrinos have mass”*



# Lessons from the 2015 Nobel Prize in Physics

Non è sempre vero che...

*“Yesterday’s signal  
is today’s background and  
tomorrow’s calibration”*

P.es., fisica dei neutrini atmosferici:

<1998:	<b>Background</b> to Nucleon Decay Expts (Kamioka-NDE)
1998 – today:	<b>Signal</b> of neutrino oscillations
2014 – today:	<b>Background</b> to high-energy astrophysical $\nu$ (IceCube)
>20XY:	<b>Signal</b> of Earth matter effects and of $\nu$ mass hierarchy
>20YZ:	<b>Background</b> to diffuse SN neutrino signal (at low E)
>20ZW:	<b>Signal</b> of nonstandard neutrino states or interactions?
>20WX:	<b>Background</b> to proton decay signals?

**Neutrini atmosferici e solari forniscono fasci intensi, “eterni” e gratuiti:**

Abbiamo il dovere di utilizzarli e studiarli in dettaglio  $\rightarrow (WN)^n$

# More lessons from the 2015 Nobel Prize in Physics

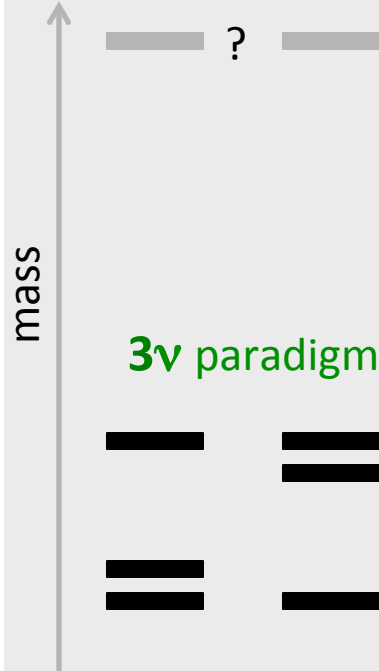
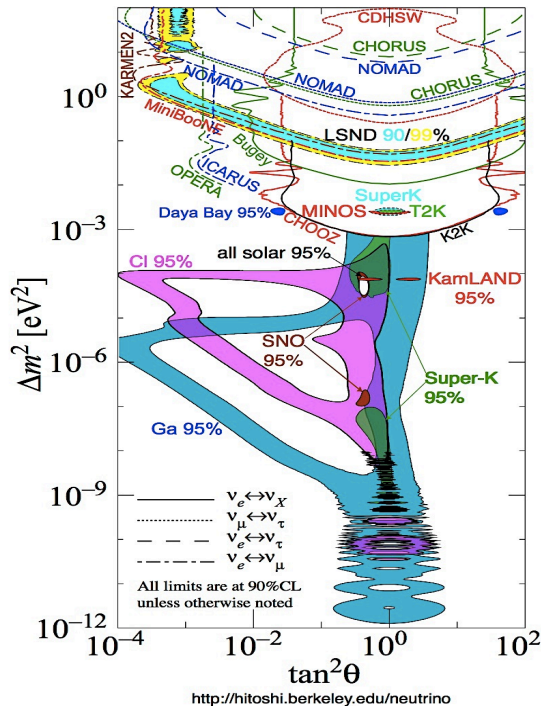


From a **broad-brush** picture of neutrinos...

... and **back** ...

... to **precision** neutrino physics ...

... and **forth** ...



## Unknowns:

- Absol. masses and nature: → beyond Higgs mech.?
- CPV phase(s) → beyond CKM / PMNS ?
- New states, interactions? → beyond SM ?

## Knowns (accuracy)

$\Delta m^2$	1.8 %
$\delta m^2$	2.4 %
$\sin^2\theta_{13}$	4.7 %
$\sin^2\theta_{12}$	5.8 %
$\sin^2\theta_{23}$	~ 9 %

# Neutrinos and Roadmaps

Il “three family neutrino paradigm” definisce le “domande importanti” e le sensibilità richieste per dare delle risposte univoche:

*Il mixing dei neutrini è un’ulteriore sorgente di violazione di CP nell’universo?*

La fase di CP si può misurare con fasci di neutrino al GeV. Servono rivelatori enormi e un controllo delle sistematiche che tenda al livello del per cento.

*Qual’è la gerarchia di massa dei neutrini?*

Si può misurare spingendo al limite tecnologie già disponibili, usando effetti di materia (fasci acc.,  $\nu$  atmosferici) o l’oscillometria di precisione (reattori)

*I neutrini sono particelle di Dirac o Majorana?*

Se la gerarchia di massa è “inversa” (IH) lo sapremo grazie al decadimento doppio  $\beta$  senza neutrino (DBD) se la sensibilità degli esperimenti è  $<20$  meV

Se la gerarchia di massa è “normale” (NH) si può misurare con il DBD, ma sono possibili cancellazioni accidentali qualunque sia la sensibilità

*Qual’è la massa assoluta dei neutrini?*

IH: si può misurare con il decadimento beta. Sensibilità exp.  $<50$  meV

NH: si può misurare con il decadimento beta. Sensibilità exp.  $<10$  meV

## Molte opportunità e sfide dietro le risposte (anche balistiche) alla roadmap

Materiale discusso disponibile su web:

**Gran Sasso:** Prospettive per il ruolo scientifico dei LNGS

<https://agenda.infn.it/conferenceDisplay.py?ovw=True&confId=8474>

**Padova:** Nuovi esperimenti per la misura dei parametri PMNS e “terra incognita”

<https://agenda.infn.it/conferenceDisplay.py?ovw=True&confId=8736>

**Bologna:** Sezione d’urto dei neutrini: modelli, sistematiche e nuove misure

<https://agenda.infn.it/conferenceDisplay.py?ovw=True&confId=10251>

**Satellite meetings:**  $0\nu\beta\beta$ , relic e Mossbauer neutrinos, gerarchia di massa

[https://lists.infn.it/sympa/d\\_read/whatnextnu/](https://lists.infn.it/sympa/d_read/whatnextnu/)

<b>Gerarchia di massa</b> (Diverse possibili sorgenti ma sensibilità sperimentali incerte)		
<b>Forti sinergie con l’astronomia dei neutrini (ORCA)</b>	<b>Valorizzazione del know-how INFN acquisito in Borexino (JUNO)</b>	<b>Incertezze teoriche</b>
Satellite meeting 6/2014 Workshop Padova 12/2014	Satellite meeting 6/2014 Padova 12/2014	Bologna 11/2015

<b>Doppio Beta</b> (Non abbiamo ancora la tecnologia per sfondare il muro dei 20 meV)		
<b>Forti sinergie con gli esperimenti di Dark Matter</b>	<b>Infrastrutture per esperimenti su grande scala</b>	<b>Esperimenti dedicati di Fisica Nucleare (NUMEN)</b>
LNGS 10/2014	LNGS 10/2014	Satellite meeting 3/2014 <i>NUMEN workshop 12/2015</i>

<b>Masse assolute</b> (Molto lontani dalla tecnologia necessaria per sfondare il muro dei 50 meV)			
<b>Forti sinergie con gli esperimenti di Dark Matter (basse soglie)</b>	<b>Sinergie con la rivelazione dei relic neutrinos (KATRIN)</b>	<b>Neutrini sterili alla scala di massa del keV</b>	<b>Cosmologia osservativa</b>
LNGS 10/2014	Satell. meeting 4/2014 Bologna 11/2015	Satell. meeting 4/2014	<i>GdL New Direct.</i>

<b>Violazione di CP</b> (Physics reach dominato dalle incertezze sistematiche)			
<b>Comprensione teorica meccanismi di produz. ed interazioni di <math>\nu</math></b>	<b>Nuove tecniche per le misure di sezioni d'urto</b>	<b>Sviluppi tecnologici nei rivelatori a grande massa</b>	<b>Valorizzazione del know-how INFN acquisito in ICARUS</b>
Bologna 11/2015	Padova 12/2014 Bologna 11/2015	Padova 12/2014	Padova 12/2014



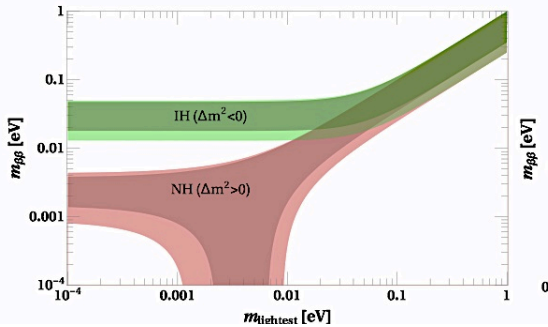
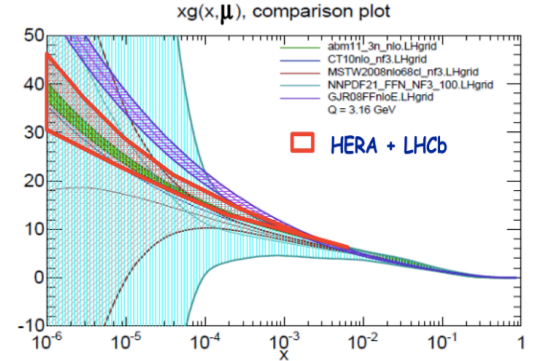
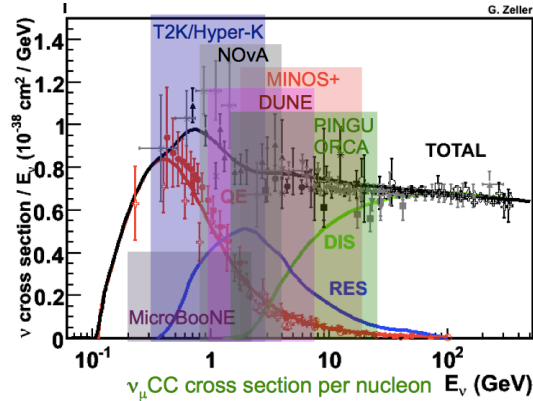
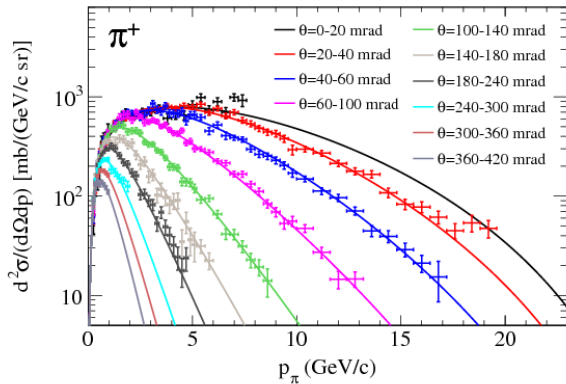
# Problema ubiquo ed interdisciplinare: fisica del neutrino vs fisica adronica

“Weak versus Strong” → CSN 1-2-3-4-5 → (WN)<sup>2</sup>

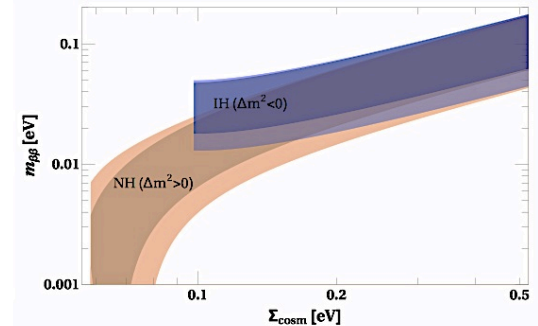
Hadron production data, e.g.  $pA \rightarrow \pi X$ , +theory models for improved estimates of atm. and acceler.  $\nu$  fluxes and errors (HARP, NA61/SHINE etc.)

Current understanding of  $\nu$  cross sections at O(GeV) does not match the needs of next-generation  $\nu$  expts and their MC simulations

Improved PDFs at low-x via  $\sim$  forward charm production data at LHCb essential to constrain prompt component in IceCube HE neutrino data



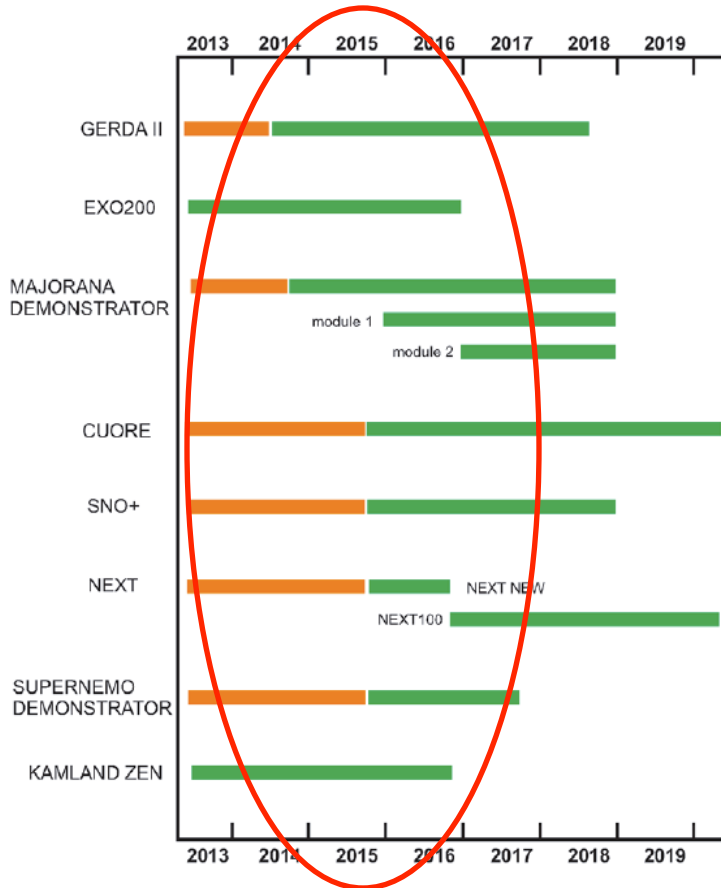
Current understanding of nuclear structure does not match the needs of DBD expts and makes their sensitivity uncertain (also wrt cosmology)



... e molto altro!

# Neutrinoless double beta decay

## Roadmap



## What Next

Link vita media DBD  $\rightarrow$  massa del neutrino molto incerto (elementi di matrice nucleare). Metodi data-driven:  
**Ruolo chiave per i LNS**

Infrastrutture condivise (DBD, Dark Matter,  $\nu$  solari) per il material screening e per la produzione dei rivelatori  
**Ruolo chiave per i LNGS**

Diverse tecnologie potenzialmente capaci di raggiungere i 50 meV

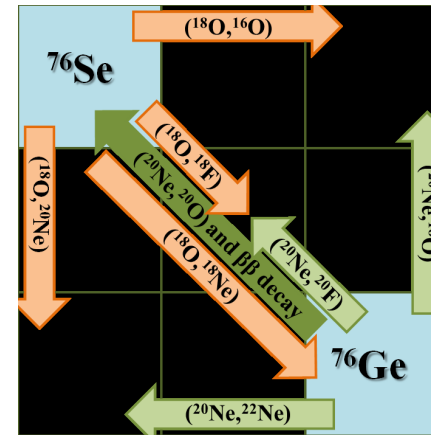
Neutrinoless double beta decay (“Gruppo II”)

← **NUMEN** →

Heavy Ion Double Charge Exchange (“Gruppo III”)

Elementi di matrice nucleare per il doppio decadimento beta

$$1/T_{1/2}^{0\nu}(0^+ \rightarrow 0^+) = G_{01} |M^{\beta\beta 0\nu}|^2 \left| \frac{\langle m_\nu \rangle}{m_e} \right|^2$$



Progetto\* nato durante What Next e che ora ha una sua piena maturità scientifica:

- Proposal dell’esperimento e dell’upgrade delle facility presentato in Gruppo III
- **Fase I approvata e finanziata**
- Collaborazione tra teorici (nucleari) e sperimentali (nucleari e astroparticellari) finalizzata in modo specifico agli elementi di matrice di interesse per il DBD

NUMEN2015 workshop INFN-LNS , Dec 1-2, 2015

<https://agenda.infn.it/conferenceDisplay.py?confId=10196>

(\* ) F. Capuzzello, C. Agodi, M. Bondi, D. Carbone, M. Cavallaro, A.Foti, J.Phys.CS. 630 (2015) 012018

# Sinergie con Dark Matter

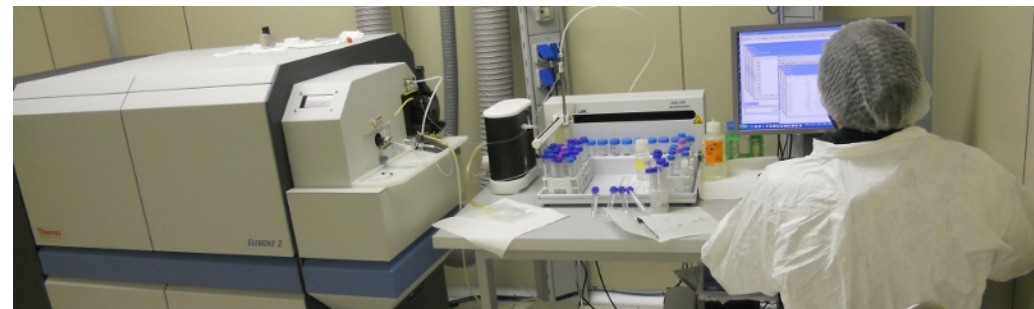
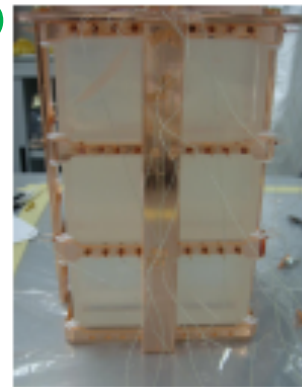
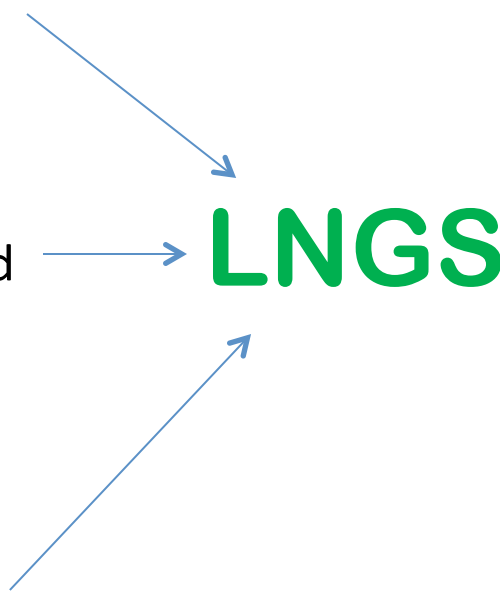
Workshop congiunto LNGS Ottobre 2014

<https://agenda.infn.it/conferenceDisplay.py?confId=8474>

Sito underground

Screening materiali ad  
elevata radiopurezza

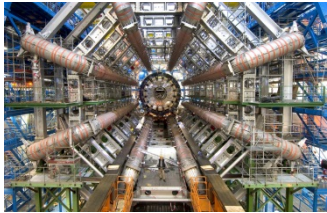
Protocolli di realizzazione  
dei detector e crystal growth



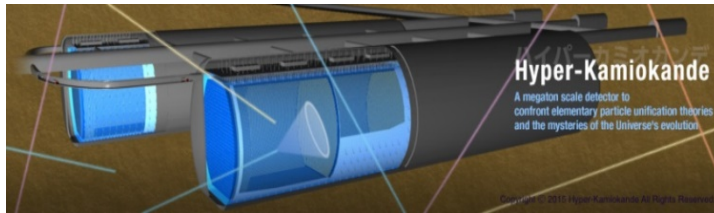
# Oscillazioni dei neutrini

## Roadmap per CPV...

A

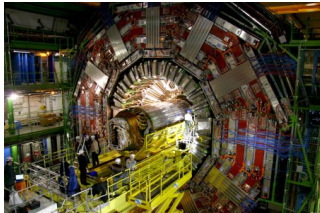


H

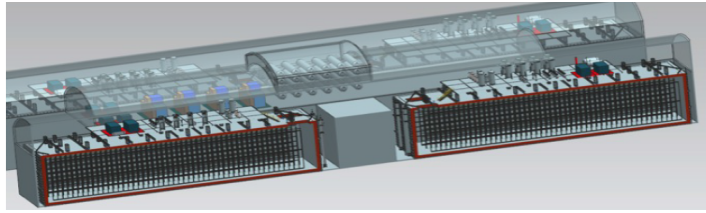


**A:C = H:D** ovvero  
ATLAS sta a CMS come  
Hyper-Kamiokande sta a DUNE

C



D



Rapida convergenza a livello  
globale verso i programmi  
sulla ricerca di CPV

*[Con un pizzico di fortuna, segnale a  $\sim 3$  sigma già da T2K + NOvA nel caso di CPV massimale]*

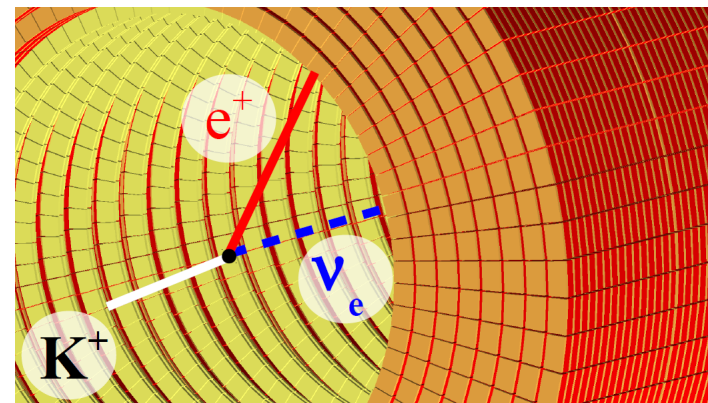
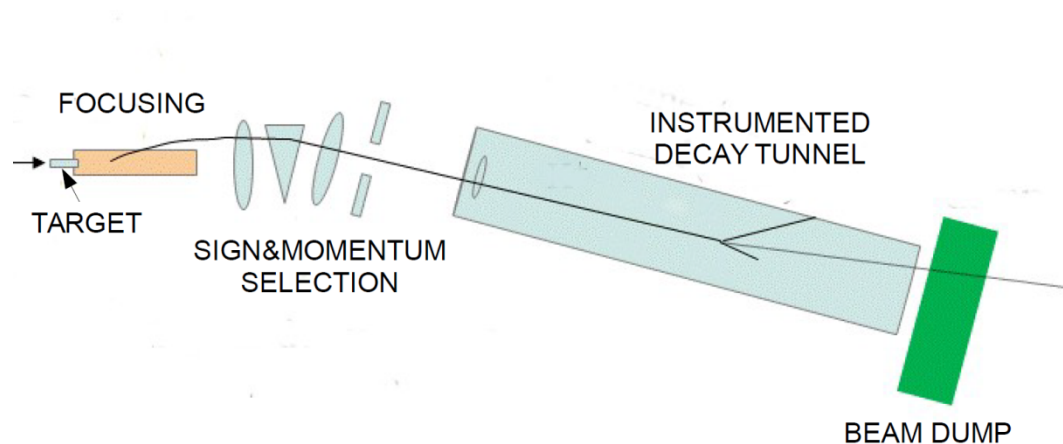
### What Next...

Esplorare tecniche molto diversificate  
per la misura della **gerarchia**.  
Enfasi su proposte oggi parte  
integrante dei programmi INFN:  
JUNO, ORCA/ARCA

Boost sul tema delle misure  
e modelli delle **sezioni d'urto**  
(un po' sotto traccia nell'INFN):  
networking dei gruppi teorici e  
nuove proposte sperimentali

# ENUBET

Una tecnica non convenzionale per la misura della sezione d'urto dei  $\nu$  elettronici: monitoraggio del rate di positroni nel tunnel di decadimento dei neutrini



Progetto\* nato durante What Next e che ora ha una sua piena maturità scientifica:

- Test di prototipi in corso nell'ambito della Commissione V (SCENTT)
- **Progetto recentemente approvato da European Research Council** (Consolidator Grant 2015, PI Andrea Longhin)



(\* ) A. Longhin, L. Ludovici, F. Terranova EPJC 75 (2015) 155

# Sinergie con WG Radiazione Cosmica

Workshop congiunto Padova Dicembre 2014

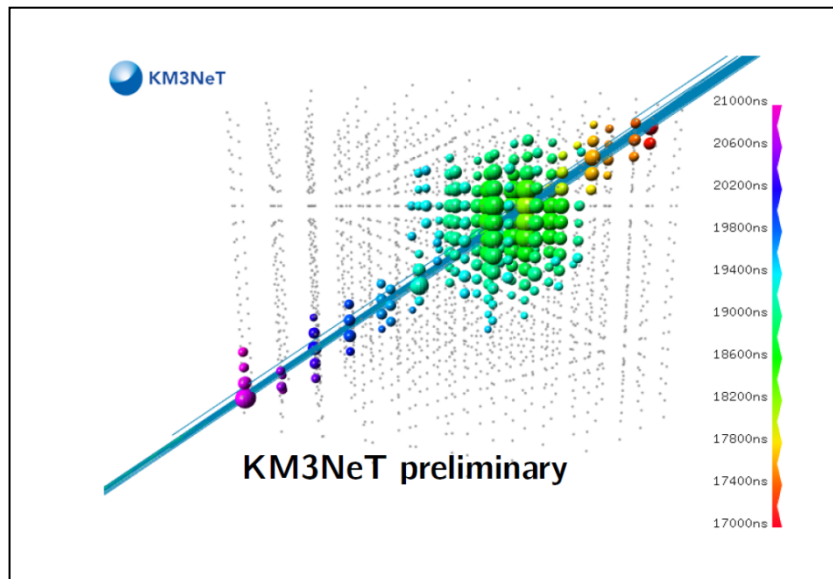
<https://agenda.infn.it/conferenceDisplay.py?confId=8736>

<https://agenda.infn.it/conferenceDisplay.py?confId=8763>

Molti temi in comune e discussi trasversalmente (supernovae, neutrini solari, sezioni d'urto alle scale degli atmosferici e del KM3) ma, **indiscutibilmente, due grandi protagonisti** - sia in What Next sia nelle Commissioni Scientifiche

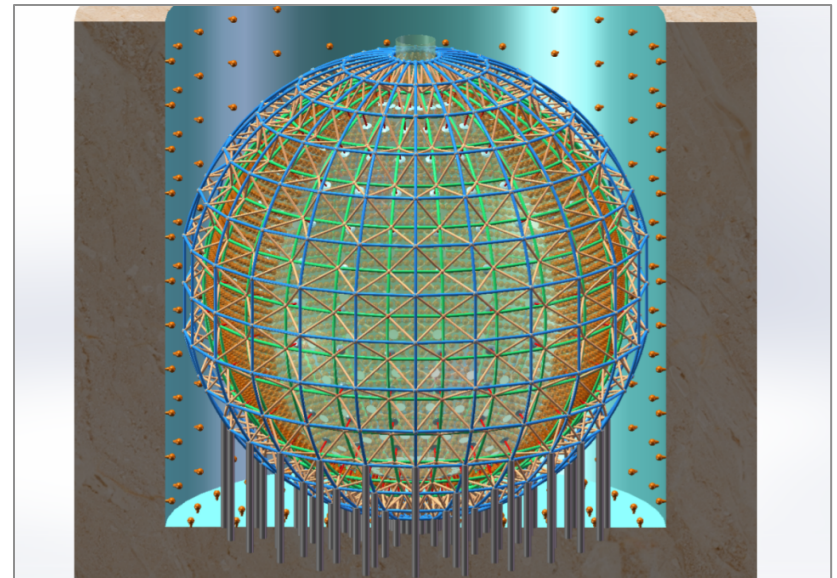
## KM3Net2.0 (ARCA and ORCA)

S. Adrián-Martínez et al. arXiv:1601.07459



## JUNO

F. An et al. arXiv:1507.05613; arXiv:1508.07166



# Il ruolo di What Next in questo caso specifico

KM3Net2.0 (ARCA and ORCA)

JUNO

Queste proposte erano già molto avanzate e sono approdate alle Commissioni Scientifiche indipendentemente da What Next. Tuttavia WN Neutrini e Radiazione Cosmica hanno contribuito alla maturazione di questi progetti all'interno dell'INFN

Gerarchia: opportunità e rischi rispetto ad altri approcci

KM3

JUNO

Geoneutrini e neutrini solari

JUNO

Ruolo delle incertezze sistematiche vs alta statistica

KM3

JUNO

Matching e consistenza dei generatori MC alle scale GeV-TeV

KM3



# Cosa avrebbe meritato più spazio o un supplemento di indagine

- Masse assolute: un argomento che si è sviluppato in forte sinergia con il gruppo Nuove Tecnologie soprattutto sui temi dei rivelatori termici. Tuttavia, i protagonisti in WN sono state soprattutto le proposte legate alla Cosmologia Osservativa e al ruolo che l'INFN può avere in questo contesto (LSPE e EUCLID)  
→ **WG New Directions**
- Sez. d'urto di produzione e interazione di  $\nu$ : esigenza di un approccio organico

...e soprattutto:

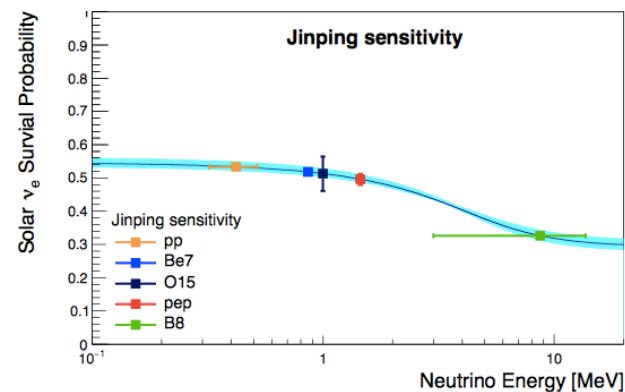
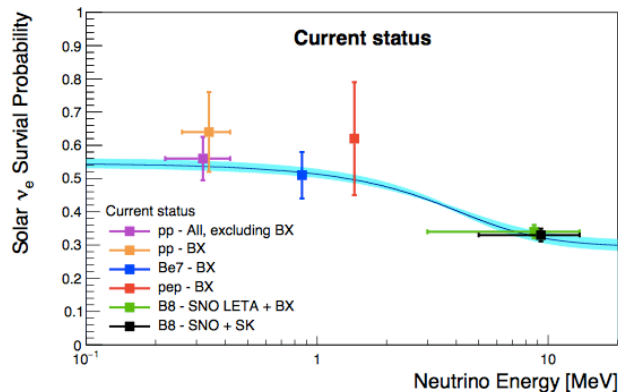
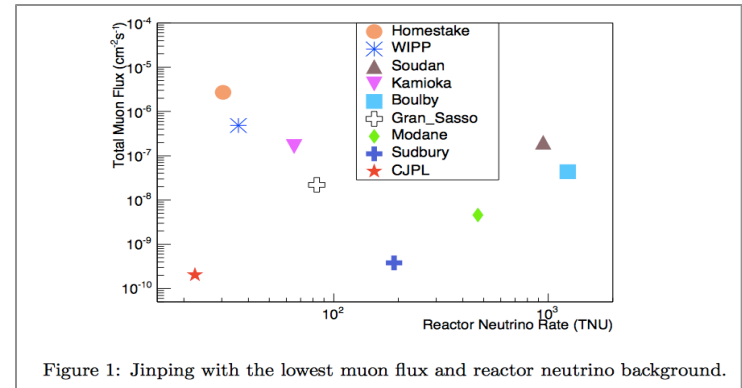
- $\nu$  sterili: le proposte sperimentali erano già delineate (SOX, Fermilab-SBL) e questo ha raffreddato il dibattito, anche se l'eventuale scoperta di neutrini sterili a qualunque scala (eV con oscillazioni, keV con DM, GeV con beam dump, TeV con LHC, ...) aprirebbe un intero campo di indagine per molti "What Next" a venire. Più spazio hanno ricevuto gli heavy neutral leptons grazie a SHiP  
→ **WG Beyond SM**
- Violazione di CP: il contributo INFN a questo tema chiave della fisica del neutrino è stato avvertito come legato ad aspetti strategici/politici/balistici e dunque non molto approfondito in WN (incluse le implicazioni teoriche di CPV).

# Conclusioni

La domanda “What Next ?” è comune ad altre comunità scientifiche, e le sfide possono arrivare anche nei campi tradizionalmente più congeniali all’INFN...

Letter of Intent:  
arXiv:1602.01733v2  
Jinping Neutrino Experiment

John F. Beacom<sup>1</sup>, Shaomin Chen<sup>\*2</sup>, Jianping Cheng<sup>2</sup>, Sayed N. Doustimotlagh<sup>2</sup>, Yuanning Gao<sup>2</sup>, Shao-Feng Ge<sup>3</sup>, Guanghua Gong<sup>2</sup>, Hui Gong<sup>2</sup>, Lei Guo<sup>2</sup>, Ran Han<sup>4</sup>, Xingtao Huang<sup>5</sup>, Jianmin Li<sup>2</sup>, Jin Li<sup>2</sup>, Mohan Li<sup>2</sup>, Xueqian Li<sup>6</sup>, Guey-Lin Lin<sup>7</sup>, Zuowei Liu<sup>2</sup>, William McDonough<sup>8</sup>, Jian Tang<sup>10</sup>, Linyan Wan<sup>2</sup>, Yuanqing Wang<sup>9</sup>, Zhe Wang<sup>12</sup>, Zongyi Wang<sup>9</sup>, Hanyu Wei<sup>2</sup>, Yufei Xi<sup>11</sup>, Ye Xu<sup>12</sup>, Zhenwei Yang<sup>2</sup>, Chunfa Yao<sup>13</sup>, Minfang Yeh<sup>14</sup>, Qian Yue<sup>2</sup>, Liming Zhang<sup>2</sup>, Yang Zhang<sup>2</sup>, Zhihong Zhao<sup>9</sup>, Yangheng Zheng<sup>15</sup>, Xiang Zhou<sup>16</sup>, Xianglei Zhu<sup>2</sup>, and Kai Zuber<sup>17</sup>



... sta a noi raccoglierle, e rilanciare con nuove idee e proposte coraggiose