



JUNO : statut de l'expérience et bilan des contributions de l'équipe Neutrino

Frédéric Perrot

LP2i Bordeaux, Univ. Bordeaux/ IN2P3



Conseil Scientifique du LP2i Bordeaux, 18 janvier 2023

Equipe Neutrino et projets de recherche

- **Responsable** : Anselmo Meregaglia
- **Membres permanents en 2023**
 - Cédric Cerna (IR)
 - Emmanuel Chauveau (CR)
 - Cécile Jollet (MCF)
 - Anselmo Meregaglia (CR)
 - Christine Marquet (DR)
 - Frédéric Perrot (MCF)
 - Fabrice Piquemal (DR)
 - Michel Pravikoff (bénévol)
- **Post-doctorants en 2023**
 - Loïc Labit (2021-2023)
 - Guillaume Oliviéro (2022-2024)
- **Doctorants en 2023**
 - Xalbat Aguerre (2020-2023)
 - Pierre Charpentier (2021-2024)

Projets de recherche:

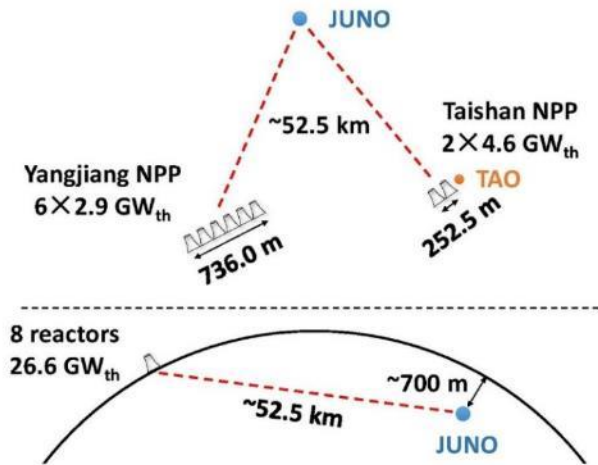
- **JUNO** (mesure de la hiérarchie de masse des neutrinos)
- **SuperNEMO** (recherche de la désintégration double bêta sans émission de neutrinos)
- **DUNE** depuis 2023 (mesure de la phase de violation δ_{CP})
- Projets R&D : **R2D2** et **LiquidO** déjà évalués en 2019 par le CS

Expérience JUNO: motivations physiques et état des lieux

Jiangmen Underground Neutrino Observatory



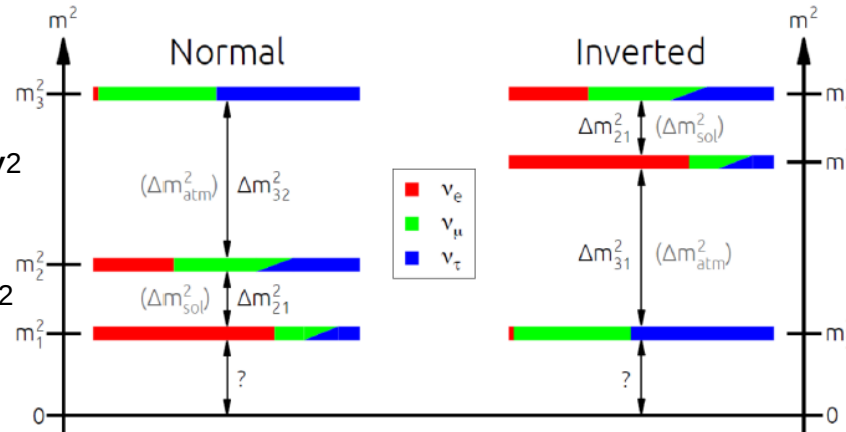
- Objectif principal de JUNO: détermination de la hiérarchie de masse des neutrinos à 3σ en 6 ans de prise de données
- Expérience actuellement en construction en Chine dans la province de Jiangmen à ~ 53 km de 2 centrales nucléaires
- Détecteur situé à 650 m de profondeur (1800 m.w.e.) pour réduire le flux de muons et les bruits de fond induits
- TAO (Taishan Antineutrino Observatory): situé à ~30 m d'un des réacteurs pour une mesure précise du spectre en énergie



Hiérarchie de masse des neutrinos

$$m_1 < m_2 \ll m_3$$

$$m_3 \ll m_1 < m_2$$



$$\Delta m_{32}^2 = m_3^2 - m_2^2 \sim 10^{-3} \text{ eV}^2$$

$$\Delta m_{21}^2 = m_2^2 - m_1^2 \sim 10^{-5} \text{ eV}^2$$

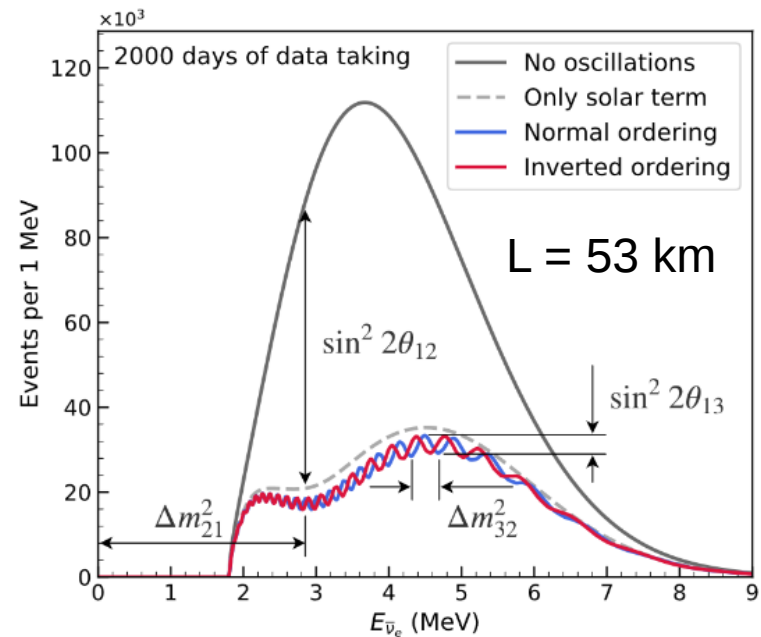
→ Signe de Δm_{32}^2 non mesuré

→ Ordre des masses ?

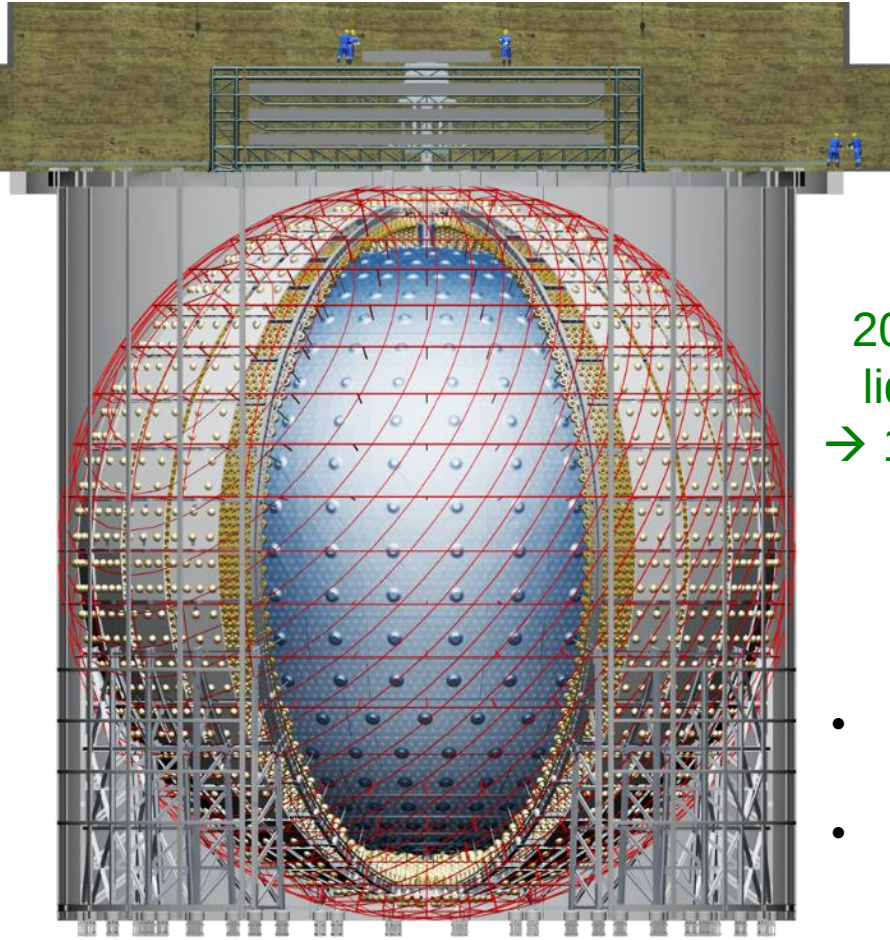
Probabilité de survie de l'antineutrino électronique

$$P_{ee} = 1 - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 (\Delta_{21}) - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 (|\Delta_{31}|) - \sin^2 \theta_{12} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 (\Delta_{21}) \cos (2|\Delta_{31}|) \pm \frac{\sin^2 \theta_{12}}{2} \sin^2 2\theta_{13} \sin (2\Delta_{21}) \sin (2|\Delta_{31}|)$$

+ → NO: $m_1 < m_2 \ll m_3$
- → IO: $m_3 \ll m_1 < m_2$



Détecteur JUNO



Calorimètre de **grande taille** et de
grande précision

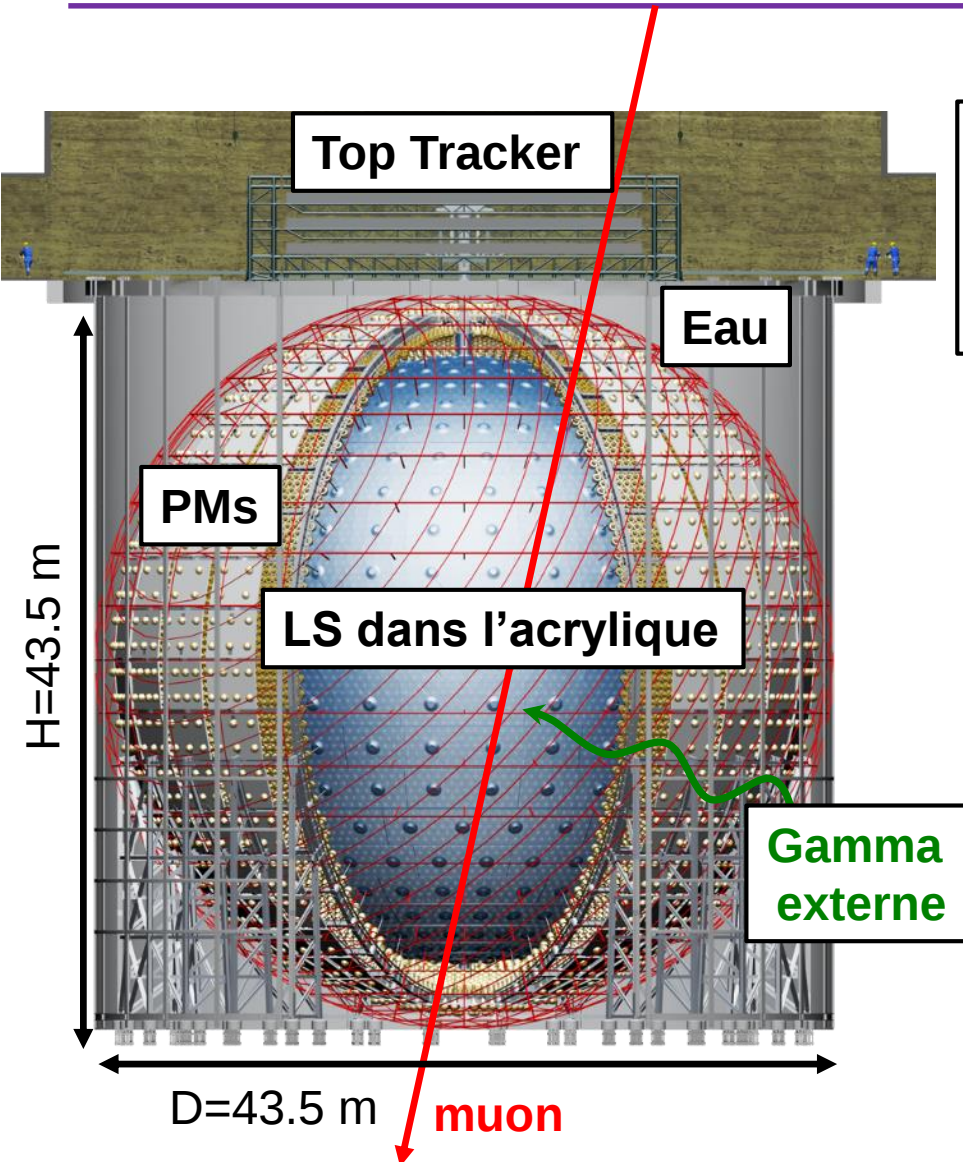
20 000 tonnes de
liquide scintillant
→ 10^5 evts en 6 ans

3% (σ) de résolution
en énergie à 1 MeV

R&D

- Rendement lumineux + transparence (>20 m)
- Efficacité quantique (30%) + grande surface de couverture des PM (78%)
- Plusieurs systèmes d'étalonnage en énergie

Détecteur JUNO



Détecteur central

- Liquide scintillant (LS) dans une sphère en acrylique de 35,4 m de diamètre
- 17600 PM 20 pouces (système LPMT) + 25600 PM 3 pouces (système SPMT)

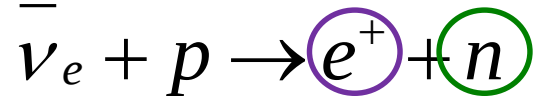


Détecteurs véto

- Piscine d'eau
 - Détection des muons via la lumière cherenkov
 - Blindage gamma contre la radioactivité de la roche et des matériaux
- Top tracker → point d'entrée du muon et véto muon

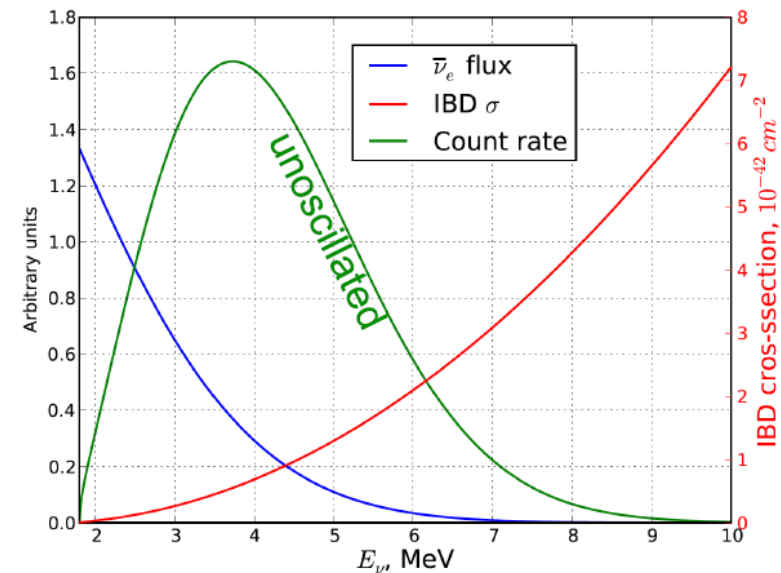
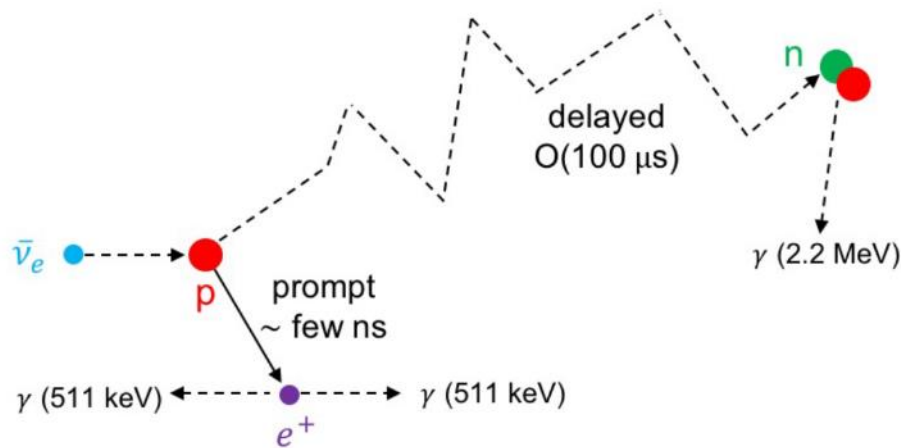
Détection des antineutrinos électroniques

- Antineutrinos détectés par réaction beta inverse (Inverse Beta Decay or IBD)



Seuil en énergie : 1,8 MeV

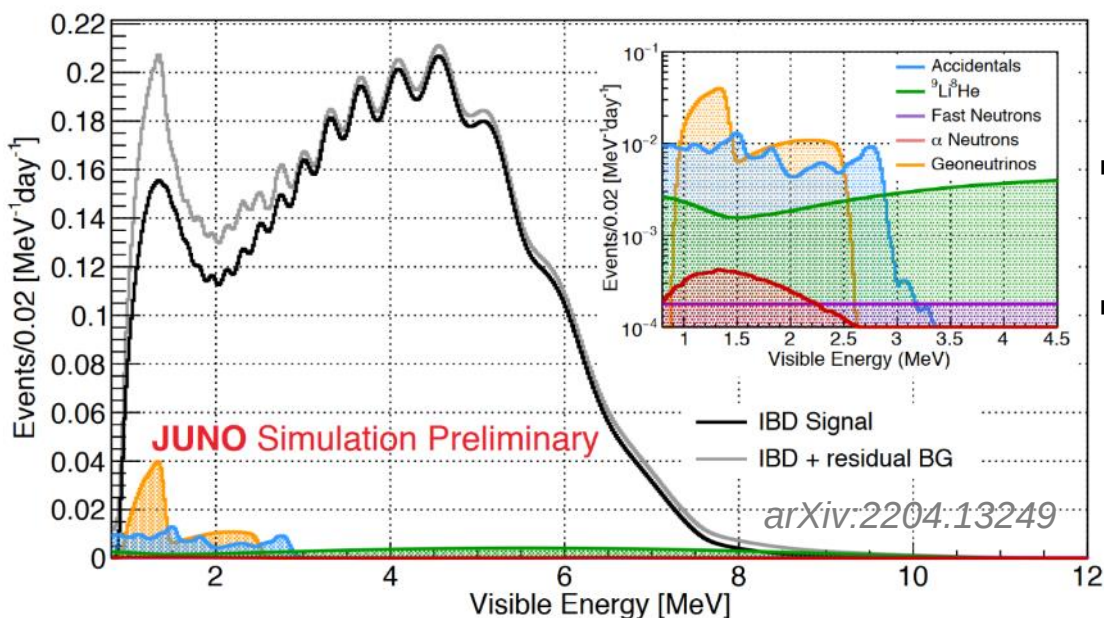
Energie visible $E_{vis} = E(e^+) = E(\bar{\nu}_e) - 0,8 \text{ MeV}$



Signature IBD :

- Signal prompt du positron : ionisation+annihilation en 2γ (1-10 MeV)
- Signal retardé du neutron : capture sur ^1H (gamma de 2,2 MeV)
- Temps de corrélation typique : $\sim 200 \mu s$

Signal and backgrounds



- Spectre en énergie visible dû à l'oscillation des $\bar{\nu}_e$ dans JUNO
- Contribution de 5 sources principales de bruits de fond (radioactivité naturelle et induite par les muons)

Coupures principales:

- Seuil en énergie: $E_{vis} > 0.7 \text{ MeV}$
- Volume fiduciel : $R_{LS} < 17.2 \text{ m}$ (0,5 m de LS)
- Coupure temporelle : $\Delta T_{p-d} < 1 \text{ ms}$
- Coupure spatiale : $R_{p-d} < 1.5 \text{ m}$
- Vétos contres les muons et bruits de fond induits

Background	Rate (day^{-1})
Geo-neutrinos	1.2
Accidentals	0.8
$^9\text{Li}/^8\text{He}$	1.4
Fast neutrons	0.1
$^{13}\text{C}(\alpha, n)^{16}\text{O}$	0.05



→ ~47 IBD/jour (efficacité~82%) contre ~3.6 evt bruits/jour

Physique de JUNO au-delà de la hiérarchie

- De nombreuses physiques au-delà de la détermination de la hiérarchie de masse

“Neutrino Physics with JUNO”, J. Phys. G **43** (2016) no.3, 030401

“JUNO physics and detector”, Prog. Part. Nucl. Phys. 123 (2022) 103927

- Précision sans précédent (<1%) atteinte pour 3 paramètres d'oscillations avec JUNO seul → contraintes sur l'unitarité de la matrice PMNS

	Δm_{31}^2	Δm_{21}^2	$\sin^2 \theta_{12}$	$\sin^2 \theta_{13}$
JUNO 6 years	$\sim 0.2\%$	$\sim 0.3\%$	$\sim 0.5\%$	$\sim 12\%$
PDG2020	1.4%	2.4%	4.2%	3.2%

Abusleme A. et al., Chinese Phys. C 46 (2022) 123001

- Autres études de physiques hors neutrinos de réacteurs

- ✓ Explosion de Supernovae (SN)

- ✓ Fond diffus des neutrinos de SN Abusleme A. et al, JCAP 10 (2022) 033

- ✓ Géo-neutrinos arXiv:2210.09165v1 [physics.geo-ph]

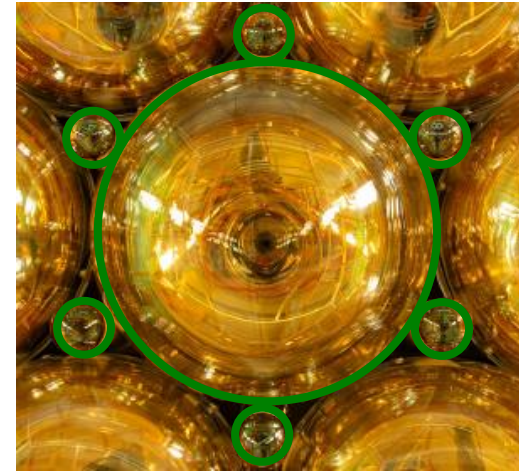
- ✓ Neutrinos solaires Abusleme A. et al, Chinese Phys. C 45 (2021) 023004

- ✓ Neutrino atmosphériques Abusleme A. et al, Eur. Phys. J. C 81 (2021) 887

- ✓ Durée de vie du proton arXiv:2212.08502 [hep-ex]

Systèmes LPMT et SPMT

- **Système de photodétection principal avec PM 20 pouces**
 - 5 000 PM dynodes (Hamamatsu)
 - 15 000 PM MCP (NNVT)
- **Système complémentaire avec PM 3 pouces (SPMT)**
 - 25 600 PM dynodes (HZC)



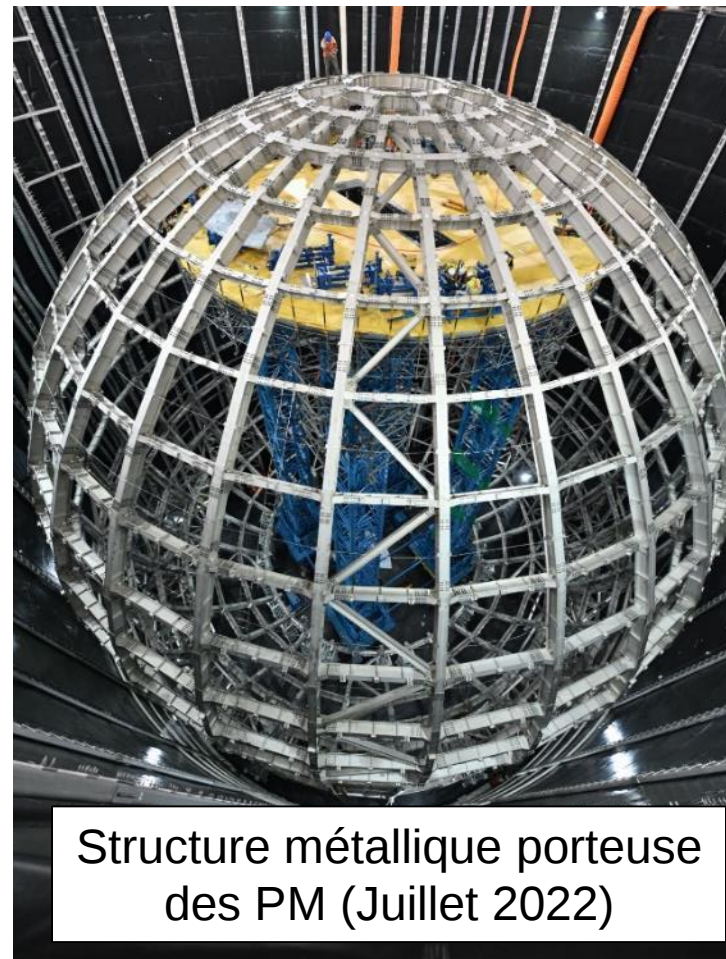
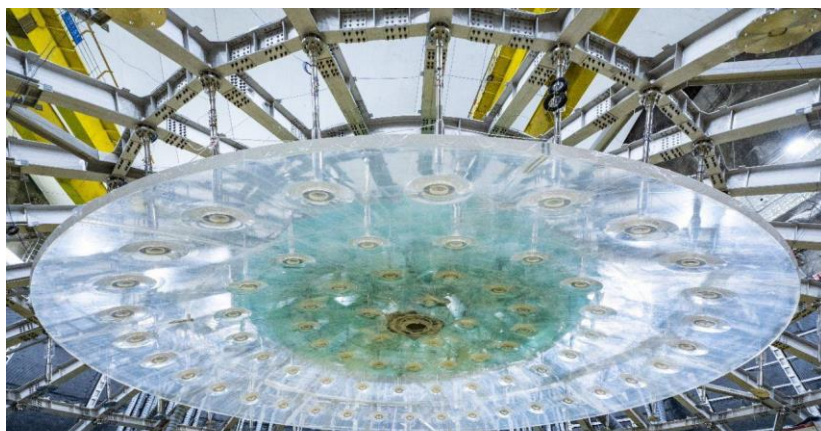
	Hamamatsu	NNVT	HZC
Efficacité de détection des PE	28.5 %	30.1%	25%
Transit Time Spread (TTS)	1.3 ns	7.0 ns	1.6 ns
Gamme dynamique pour IBDs	[0-100] PEs		[0-2] PEs
Couverture photons	75%		3%

PE = PhotoElectron

- **Problème** : forte illumination des LPMT et possible non linéarité en charge à haute énergie (>6 MeV)
- **Solution**: système complémentaire de photodetection SPMT fonctionnant en mode comptage de photons uniques (0 ou 1 PE) par PM

Installation de JUNO

- Construction civile achevée en décembre 2021



Calendrier JUNO

- Retards dans JUNO dus à la construction civile (présence d'eau souterraine) et à la pandémie de COVID-19
- Rythme de construction du détecteur soutenu depuis début 2022
- Structure en acrylique et PM installés d'ici fin 2023
- Remplissage du détecteur en eau puis en liquide scintillant (6 mois) en parallèle de l'installation du Top Tracker
- Prise de données prévue courant 2024
 - période pour la hiérarchie de masse : 2024-2030

La collaboration JUNO

77 institutions, ~650 membres

Country	Institute	Country	Institute	Country	Institute
Armenia	Yerevan Physics Institute	China	IMP-CAS	Germany	U. Mainz
Belgium	Universite libre de Bruxelles	China	SYSU	Germany	U. Tuebingen
Brazil	PUC	China	Tsinghua U.	Italy	INFN Catania
Brazil	UEL	China	UCAS	Italy	INFN di Frascati
Chile	PCUC	China	USTC	Italy	INFN-Ferrara
Chile	SAPHIR	China	U. of South China	Italy	INFN-Milano
China	BISEE	China	Wu Yi U.	Italy	INFN-Milano Bicocca
China	Beijing Normal U.	China	Wuhan U.	Italy	INFN-Padova
China	CAGS	China	Xi'an JT U.	Italy	INFN-Perugia
China	ChongQing University	China	Xiamen University	Italy	INFN-Roma 3
China	CIAE	China	Zhengzhou U.	Latvia	IECS
China	DGUT	China	NUDT	Pakistan	PINSTECH (PAEC)
China	ECUST	China	CUG-Beijing	Russia	INR Moscow
China	Guangxi U.	China	ECUT-Nanchang City	Russia	JINR
China	Harbin Institute of Technology	Croatia	UZ/RBI	Russia	MSU
China	IHEP	Czech	Charles U.	Slovakia	FMPICU
China	Jilin U.	Finland	University of Jyvaskyla	Taiwan-China	National Chiao-Tung U.
China	Jinan U.	France	IJCLab Orsay	Taiwan-China	National Taiwan U.
China	Nanjing U.	France	LP2i Bordeaux	Taiwan-China	National United U.
China	Nankai U.	France	CPPM Marseille	Thailand	NARIT
China	NCEPU	France	IPHC Strasbourg	Thailand	PPRLCU
China	Pekin U.	France	Subatech Nantes	Thailand	SUT
China	Shandong U.	Germany	RWTH Aachen U.	USA	UMD-G
China	Shanghai JT U.	Germany	TUM	USA	UC Irvine
China	IGG-Beijing	Germany	U. Hamburg		
China	IGG-Wuhan	Germany	FZJ-IKP		

La collaboration JUNO

Dernière réunion en présentiel (Nanning, janvier 2020)

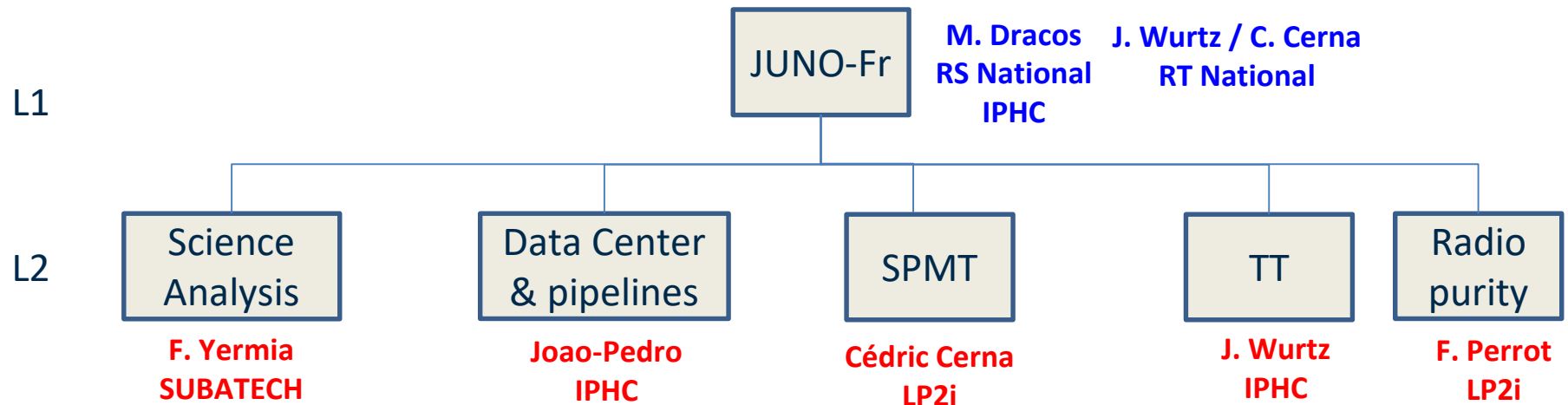


The 15th JUNO Collaboration Meeting

January 13-17, 2020, Guangxi University, Nanning

Organisation JUNO-France

- 5 laboratoires impliqués : CPPM, IJCLab, IPHC, LP2i Bordeaux, SUBATECH
- 1 centre de microélectronique : OMEGA pour la production des différents Asics
- 2 contribution techniques majeures dans JUNO: électronique SPMT et Top Tracker
- Actuellement environ 12 physiciens permanents



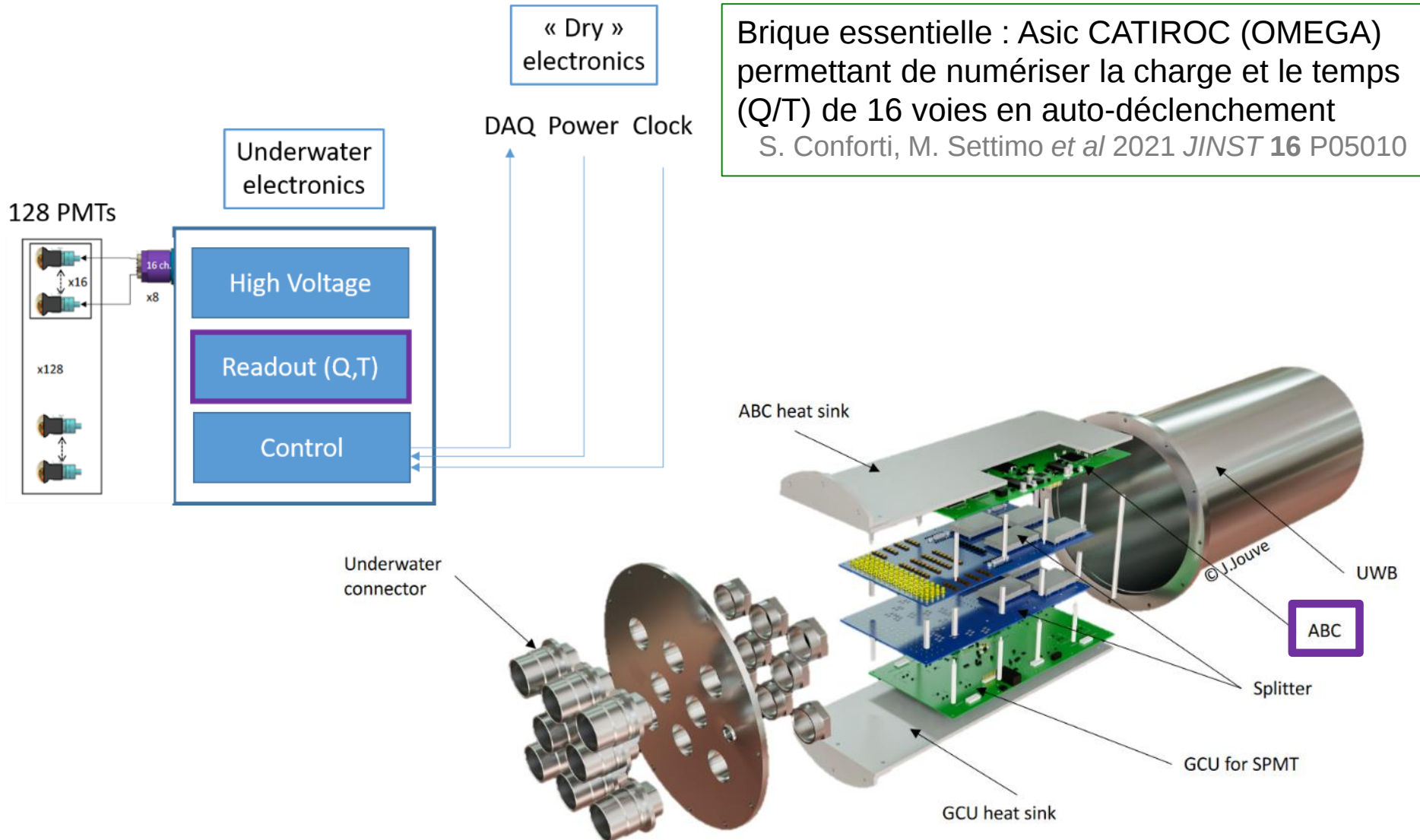
Contributions de l'équipe Neutrino au projet JUNO

Equipe Neutrino dans le projet JUNO

- **Responsable local** : Frédéric Perrot
- **Membres permanents sur la période 2017-2022**
 - Cédric Cerna (~70%) : L2 manager du système SPMT
 - Cécile Jollet (~70%) : co-responsable du groupe AFG Simulations
 - Anselmo Mereaglia (~15%) : czar du CC IN2P3
 - Frédéric Perrot (~70%) : membre de l'Executive Board
- **Post-doctorants**
 - Loïc Labit (2021-2023)
 - Reem Rasheed (2020-2022)
- **Doctorant**
 - Clément Bordereau (2017-2021)

Forte contribution des services du laboratoire, notamment le service électronique et acquisition pour le développement des cartes front-end SPMT

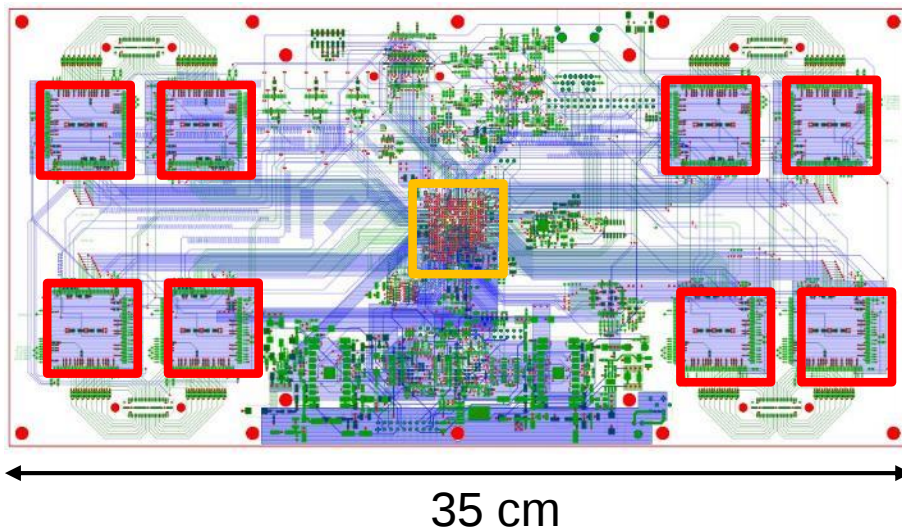
Electronique front-end du système SPMT



Carte front-end du système SPMT

- **Livable IN2P3** : 200 cartes front-end numérisant chacune les signaux de 128 PM (soit 25600 voies de lecture)

→ **responsabilité du LP2i Bordeaux** : design, routage, production des cartes (service électronique) et validation de leurs performances (équipe Neutrino)



Challenges :

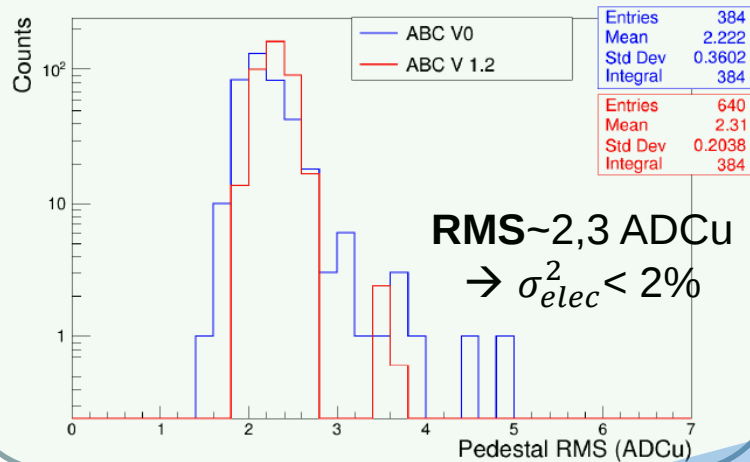
- Numériser des signaux PM de ~ 3 mV avec **8 CATIROC (16 voies chacun)**
- Monter le **FPGA** sur la même carte front-end avec un bruit électronique faible (~ 100 μ V)

Caractéristiques :

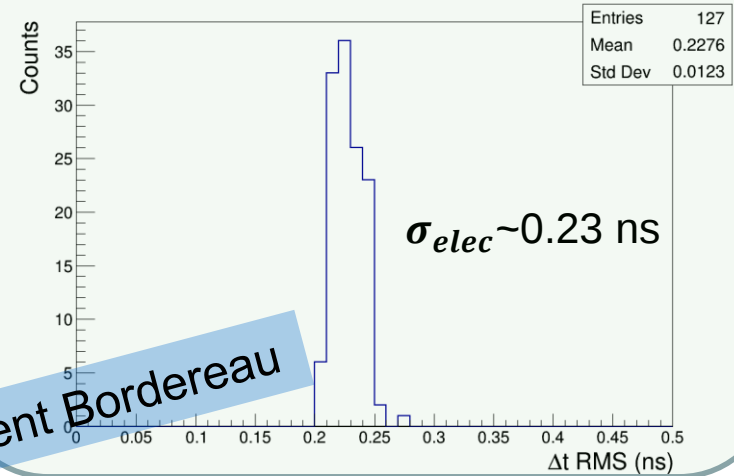
- carte front-end 12 couches
- 4 prototypes développés (2017 à 2021)
- Firmware associé complexe pour gérer 128 signaux PM aléatoires

Performances de la carte front-end seule

Excellente résolution en charge

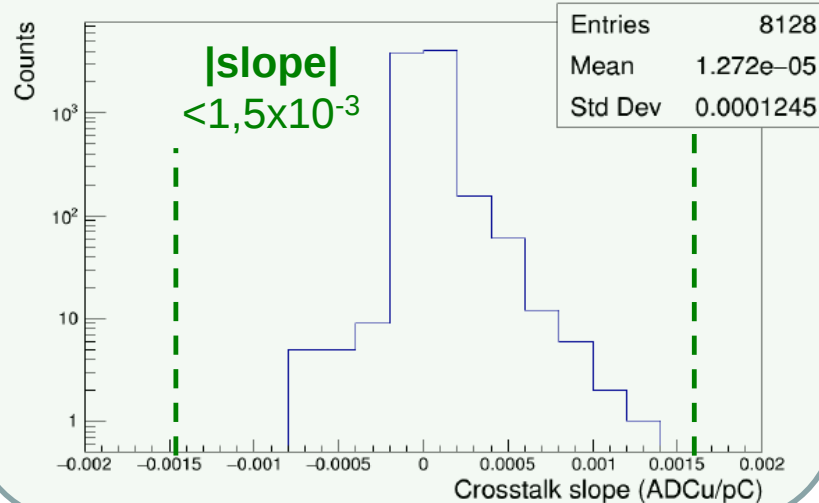


Excellente résolution en temps

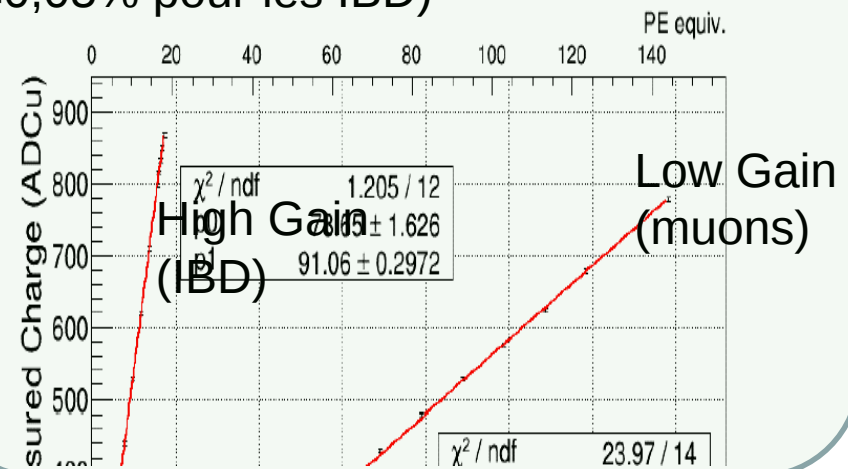


Thèse de Clément Bordereau

Faible crosstalk (<0,15%)



Excellente linéarité en charge (déviaton <0,05% pour les IBD)

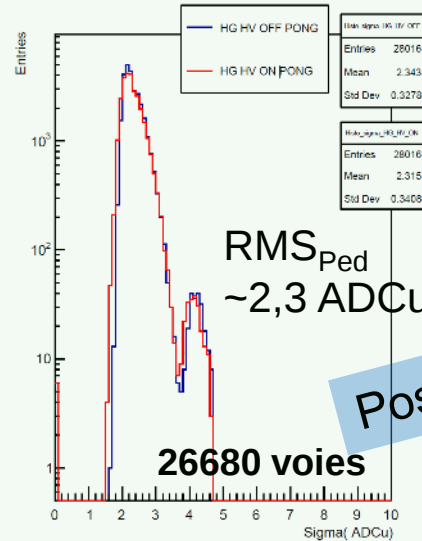


Performances/étalonnage des 220 cartes

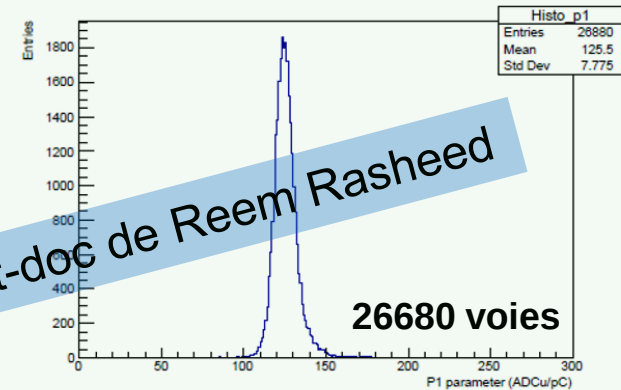
Validation avec 128 PM 3 pouces JUNO et la chaîne électronique complète



- Bruit électronique avec HT PM **OFF/ON**
- Etalonnage en charge en High Gain



Pente ~125 ADCu/pC
1 PE ~0,5 pC



Post-doc de Reem Rasheed

- Tests de performances et étalonnage des 220 cartes en 2021-2022 au LP2i Bordeaux
- Envoi de 214 cartes sur le site JUNO et intégration de l'électronique SPMT en cours

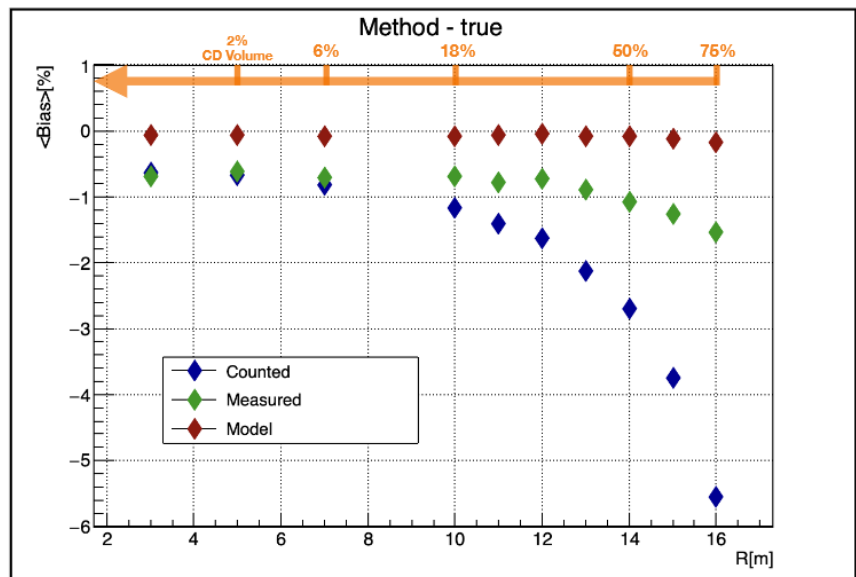
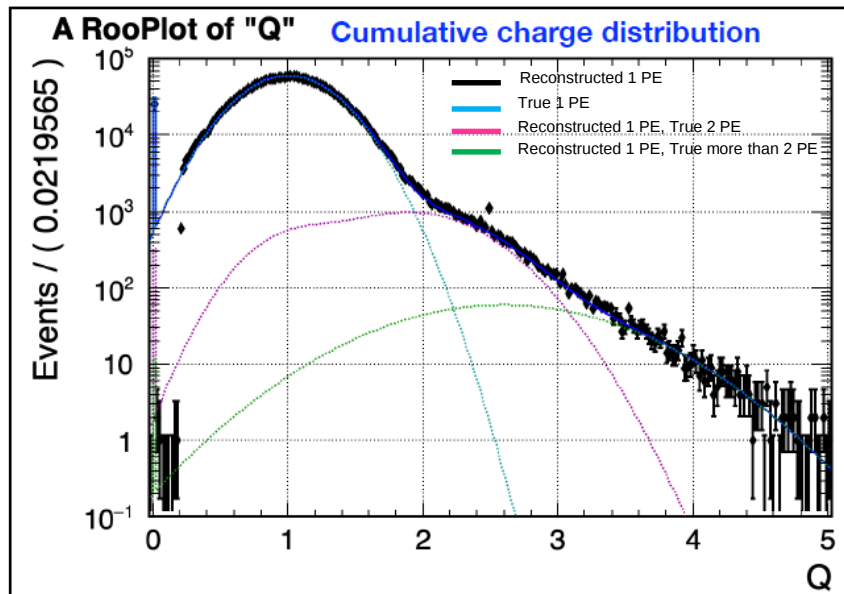
Implémentation dans la simulation JUNO

- Implémentation des performances des PMs (résolution du photoélectron, dispersion du temps de transit, bruit électronique) dans la simulation SNI_{PER}
- Développement d'un module pour simuler la réponse de l'électronique, en particulier celle de l'ASIC CATIROC (travaux de SUBATECH et LP2i Bordeaux pour les performances et l'implémentation)
- Etudes menées sur la reconstruction en énergie et sur la reconstruction du vertex avec le système SPMT seul
 - Limitée par résolution en charge à 1 PE et la résolution en temps du PM (TTS)
 - Impact totalement négligeable de l'électronique
- Système SPMT exploité par toute la collaboration pour différentes études de physique

Reconstruction de la charge avec SPMT

- Deux possibilités de mesure de la charge avec le système SPMT
 - comptage des hit (PM touchés) → photocounting
 - reconstruction de la charge

Post-doc de Loïc Labit



- Avec une modélisation de la charge mesurée par un PM 3 pouces, le biais sur la reconstruction de la charge semble bien plus faible ($<0,2\%$) par rapport à la mesure de charge ($<1,5\%$) et le mode comptage de PM touchés ($<5,5\%$)

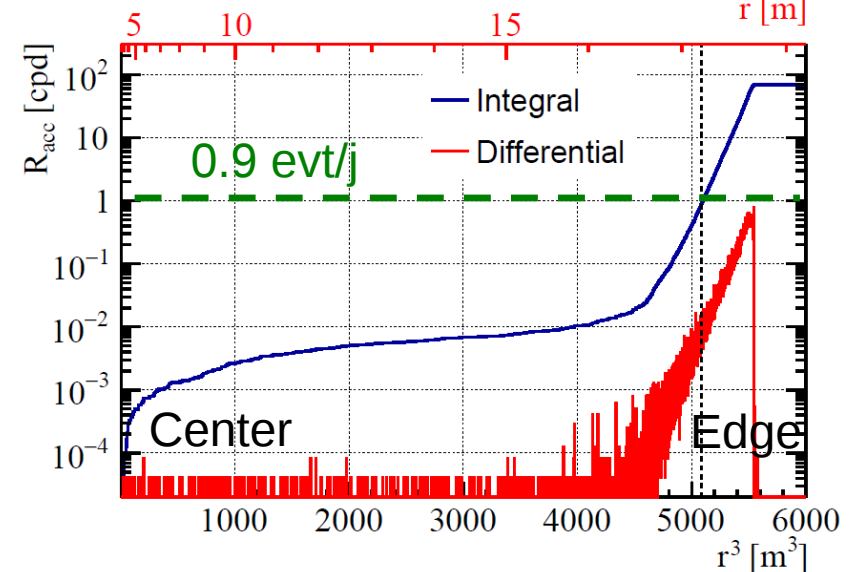
Simulation de l'impact de la radioactivité

- Radioactivité naturelle des matériaux : bruit de fond avec émission de gammas

→ Peut causer une coïncidence fortuite mimant un événement IBD

$r=17,2$ m

Material	Mass [t]	Target impurity concentration					Singles	
		^{238}U [ppb]	^{232}Th [ppb]	^{40}K [ppb]	^{210}Pb [ppb]	^{60}Co [mBq/kg]	ALL [Hz]	FV [Hz]
LS-reactor	20000	10^{-6}	10^{-6}	10^{-7}	10^{-13}		2.5	2.2
Acrylic	610	10^{-3}	10^{-3}	10^{-3}			8.4	0.4
SS structure	65	0.2	0.6	0.02		1.5	15.9	1.1
	1000	1	3	0.2		20		
PMT glass	33.5	400	400	40			26.2	2.8
	100.5	200	120	4				
	2.6	400	400	200				
PMT readout	125	68	194	5		16	3.4	0.4
	16.3	93	243	12		14		
Other							2.5	0.3
Sum							59	7.2



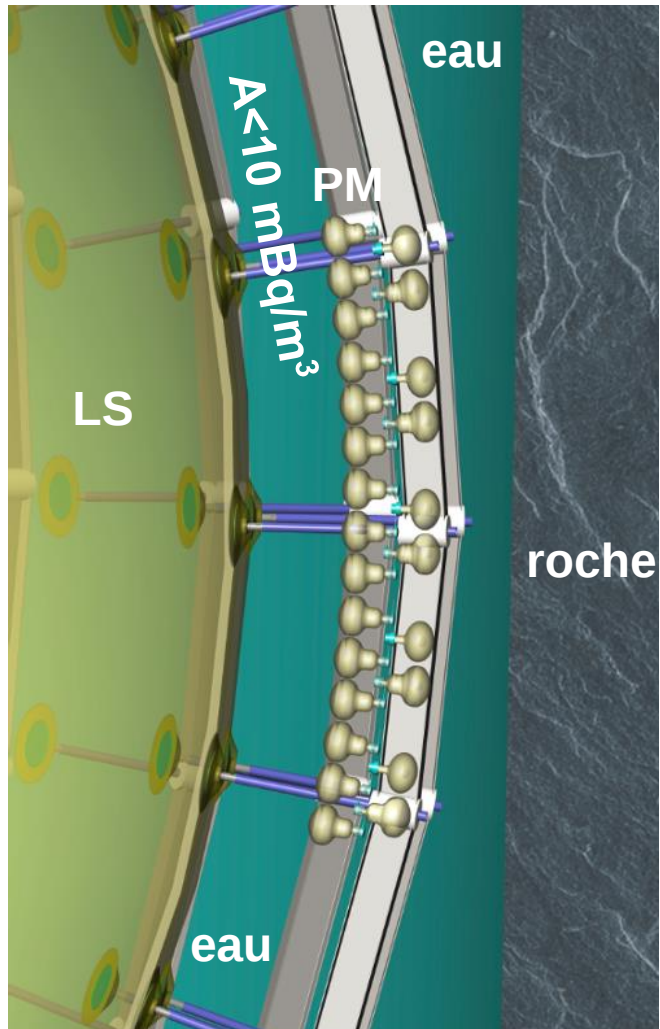
- Validation du code officiel JUNO de simulation SNIper pour les radioactivités
- Taux de comptage gamma dans le détecteur <10 Hz si rayon < 17.2 m ($-0,5$ m LS)
- Bruit de fond accidentel attendu : ~ 0.9 evt/jour contre 47 evts IBD/jour

→ Contributions majeures à l'article de collaboration JUNO, Radioactivity control strategy for the JUNO detector

Abusleme A. et al, JHEP (2021) 102

Stratégie de contrôle de la radioactivité

Qualification de nombreux matériaux par spectroscopie gamma et émanation Radon



- Exemple: composants du système SPMT (PM 3 pouces, cartes électronique,...) caractérisés par spectroscopie gamma (PRISNA, LSM)

→ Contribution au taux de comptage $< 0,2 \text{ Hz}$

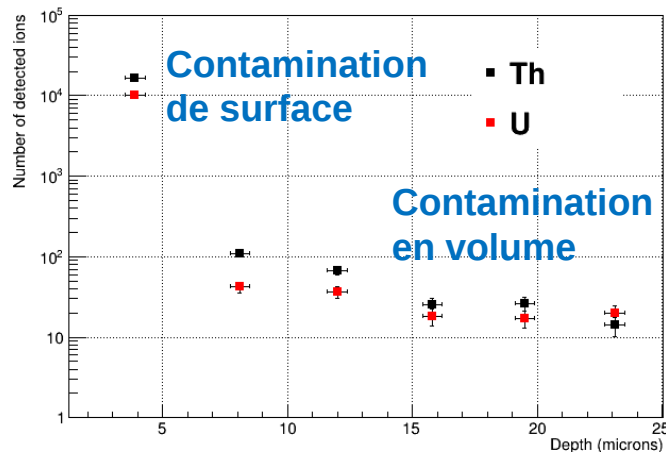
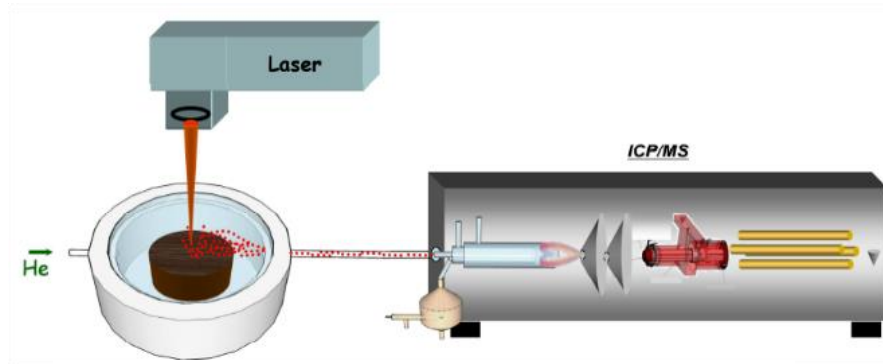
- Nombreuses études d'émanation en Radon des PM 20 pouces (critique car pouvant migrer au plus près du LS) avec un système sensible de grand volume unique dans la collaboration



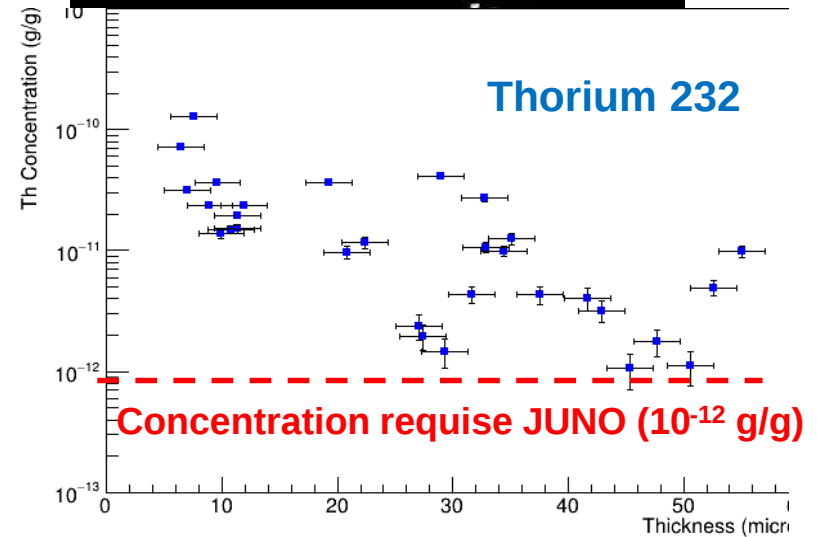
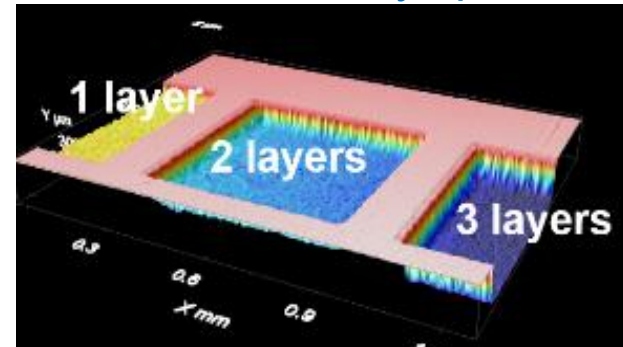
→ émanation Radon des PM $< 2 \text{ mBq/m}^3$ (soit bien inférieure à la valeur max requise dans l'eau)

Caractérisation de l'acrylique par LA-ICPMS

- ICPMS par Ablation Laser : technique développée à Pau et adaptée à la caractérisation de traces Uranium/Thorium en surface de l'acrylique



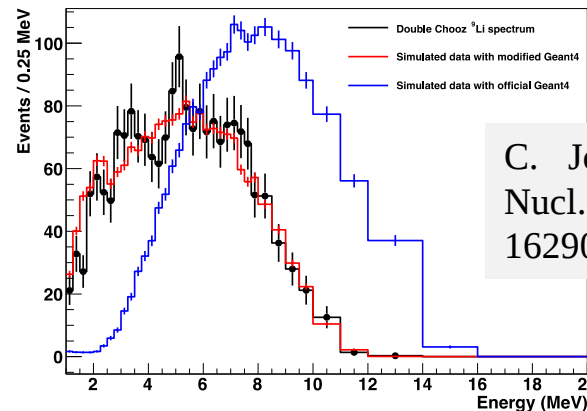
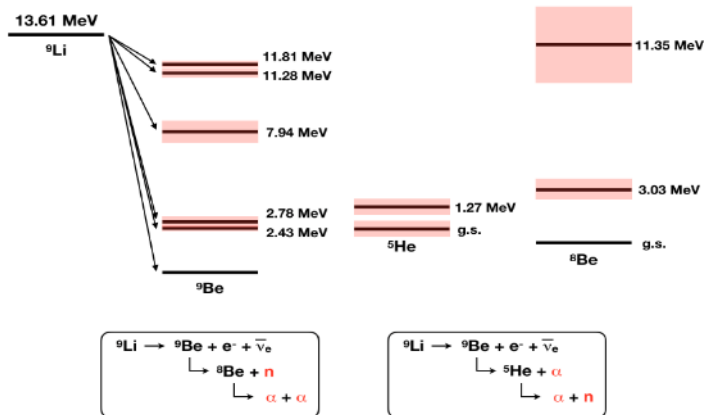
→ permet tester l'homogénéité de la contamination U/Th en surface et en profondeur de l'acrylique



→ méthode innovante pour quantifier la concentration U/Th en surface (~100 μm) et valider la technique de nettoyage/polissage

Bruit de fond cosmogénique

- Noyaux cosmogéniques $^8\text{He}/^9\text{Li}$ produits par les muons dans le LS → principaux bruits de fond corrélés mimant les signaux IBD
- Développement d'un générateur $^9\text{Li}/^8\text{He}$ complet sur GEANT4 pour simuler les désintégrations des noyaux cosmogéniques ^9Li et ^8He
- Bon accord avec un spectre expérimental de Double Chooz.

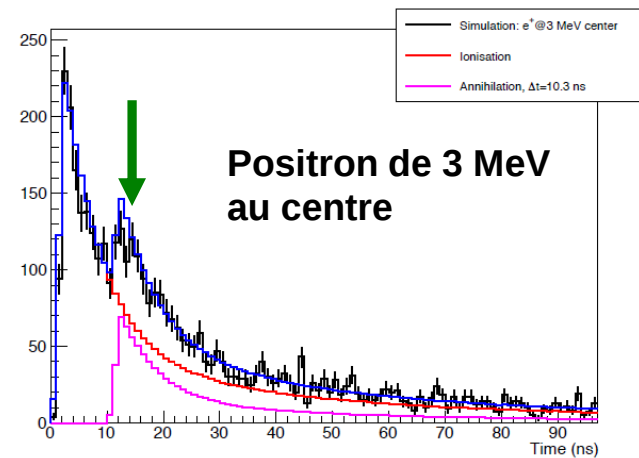
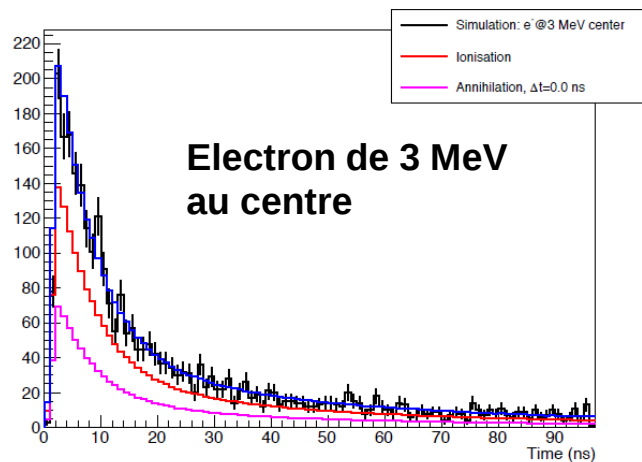


C. Jollet and A. Meregaglia,
Nucl.Instrum.Meth.A 949 (2020)
162904

- Important lors de l'analyse spectrale pour la détermination de la hiérarchie de masse dans JUNO
- Possibilité de faire de la discrimination de particules dans le LS et d'étudier les corrélations ^9Li avec les muons (distance noyau-trace muon, nombre de neutrons générés) pour optimiser le veto contre les muons

Générateur de l'orthopositronium

- Etat métastable de e^+/e^- dont 75% dans un état ortho-positronium avec une durée de vie de 3,1 ns dans le LS
- Ecart temporel entre lumière de scintillation produite par **ionisation du positron** et par **annihilation du positronium** pour distinguer un électron d'un positron
- Modification de l'annihilation du positron dans Geant4 pour prendre en compte cela dans le liquide scintillant de JUNO et implémentation dans SNIKER



→ potentiel de discrimination e^+/e^- très prometteur pour une durée de vie de l'orthopositronium supérieure à 5 ns et une énergie des e^+ inférieure à 5 MeV

Perspectives

- Système SPMT

- Participation sur site à l'intégration de l'électronique SPMT (printemps 2023)
 - ~1 mois sur site JUNO pour équipe Neutrino + service électronique
- Firmware final de l'électronique SPMT (2023)
 - équipe Neutrino (validation ~0,25 ETP) + service élec (développement)
- Mise en route du système SPMT, optimisation de la prise de données (déclenchement des SPMTs seuls, définition du seuil, optimisation de la fenêtre temporelle...) et stratégie d'étalonnage en énergie (2023-2025)
 - équipe Neutrino (~1 ETP)
 - peut se faire à distance pendant le remplissage du détecteur (6 mois)

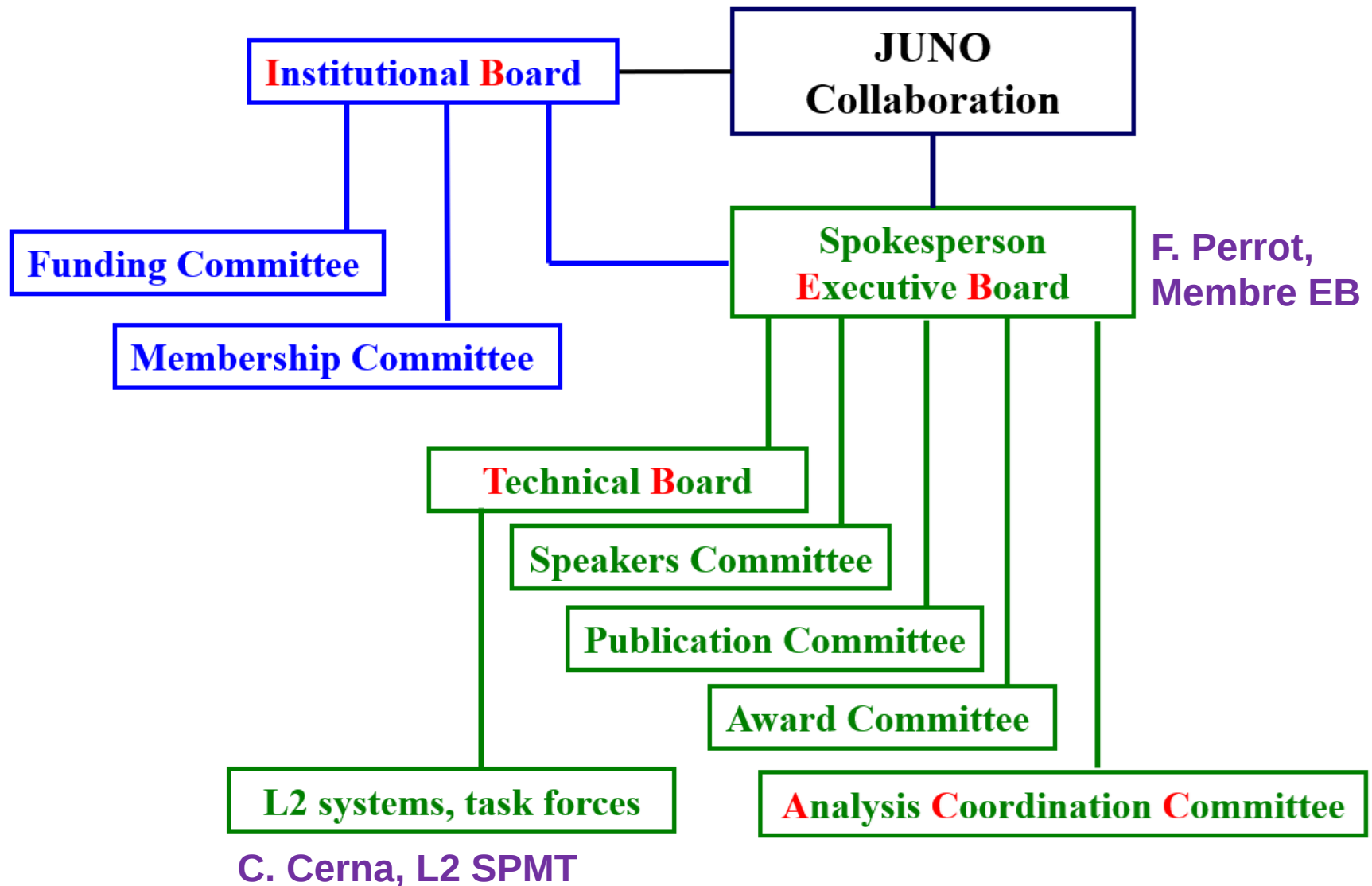
Perspectives

- **Etudes des bruits de fond accidentel et cosmogénique** pour la détermination de la hiérarchie de masse (2023-2027)
 - optimisation des véto (fiduciel et muon)
 - détermination des taux restants dans l'échantillon IBD
 - reconstruction des spectres en énergie des bruits de fond vs simulations
→ équipe Neutrino (~1,2 ETP)
 - **Possibilité d'implication dans TAO** (bruits de fond d'origine cosmogénique et reconstruction du spectre en énergie pour la hiérarchie de masse) (2023-2027)
→ équipe Neutrino (~0,25 ETP)
- **Départ de Loïc Labit fin 2023** mais renfort en oct. 2023 d'un doctorant financé par l'IN2P3 (mise en route du système SPMT et études des bruits de fond)

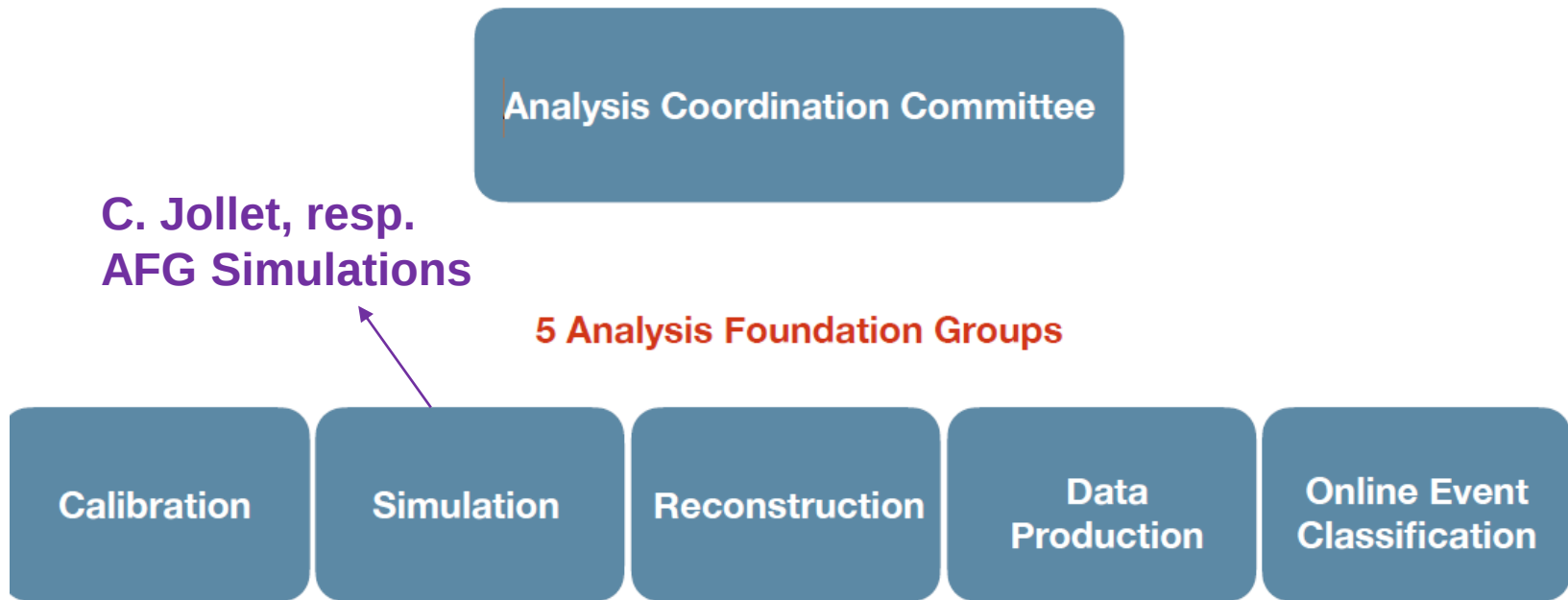
→ sur les 3-4 prochaines années, **~2,5 ETP nécessaires** pour soutenir toutes nos implications dans le système SPMT et dans l'analyse JUNO et TAO avec des données attendues en 2024

Backup slides

JUNO structure internationale



Structuration de l'analyse des données



L' ACC et les AFGs ont été mis en place en novembre 2021.

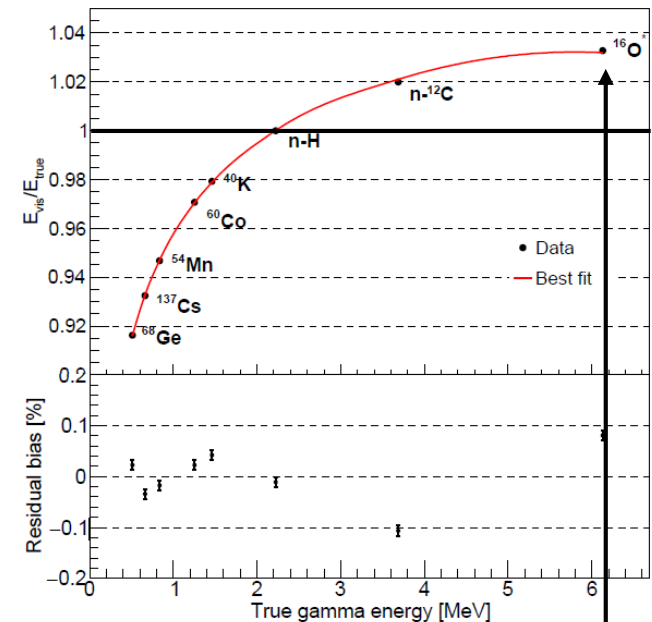
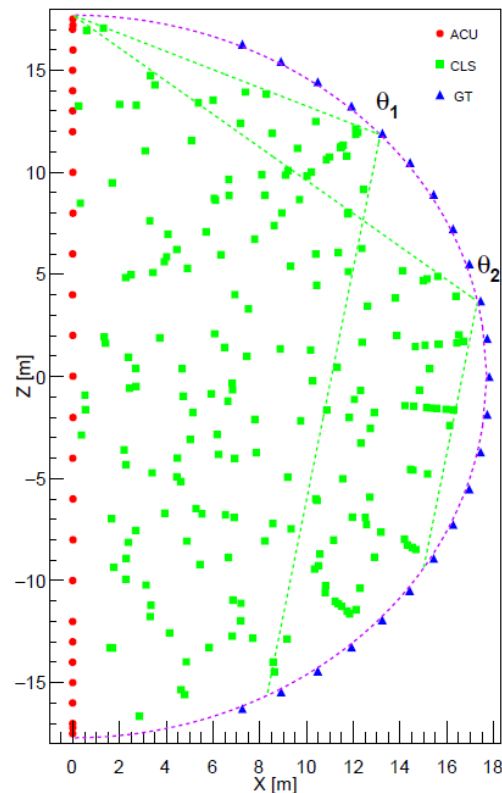
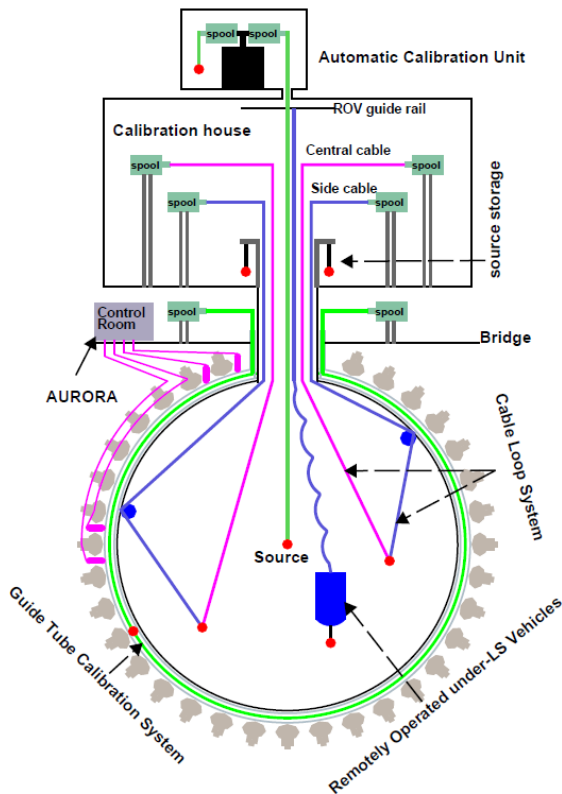
Le but des AFGs est de **préparer l'ensemble des outils communs utiles pour l'analyse des données.**

Exemple des tâches pour l'AFG Simulation : générateurs, géométrie du détecteur, paramètres optiques, event data model, simulation de l'électronique, mélange des événements, simulation du trigger.

Energy calibration systems

- **Goal:** to control the energy scale $<1\%$ and the detector response non-uniformity
- **Strategy:** to deploy various radioactive sources using 1D and 2D scan systems

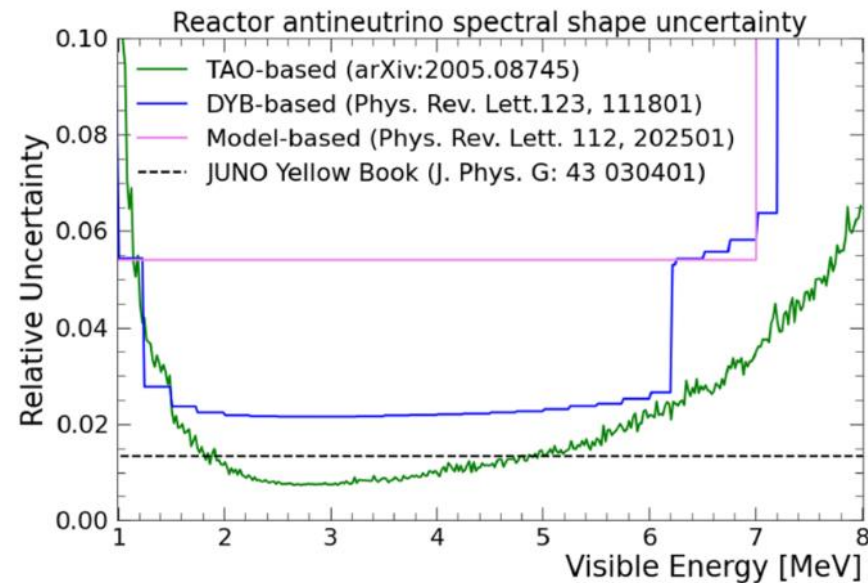
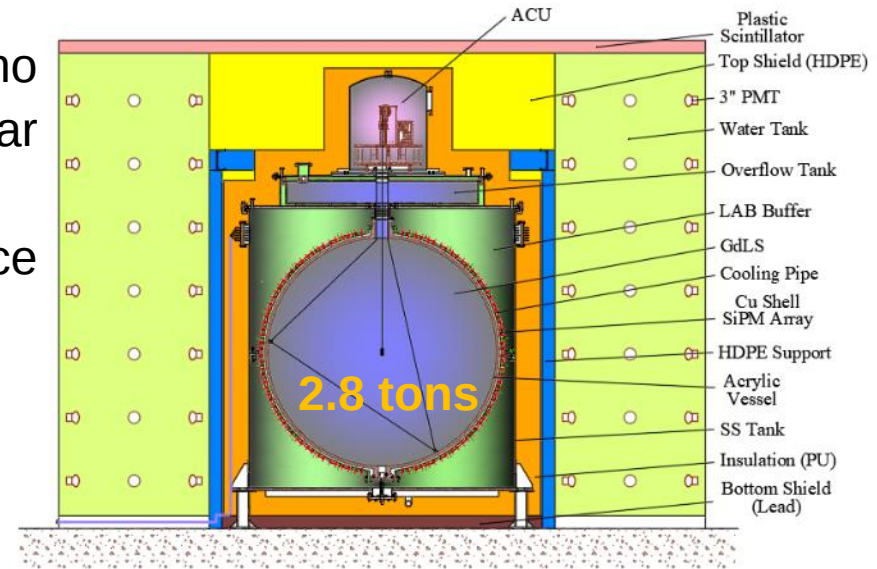
JUNO Calibration strategy: Abusleme, A. et al., J. High Energy. Phys. 2021 (2021) 4



Calibration range up to 6 MeV

Taishan Antineutrino Observatory (JUNO-TAO)

- **Goal:** high precision reactor antineutrino energy spectrum @30m from one nuclear reactor
 - to provide a model-independent reference spectrum for JUNO
 - to search for light sterile neutrinos



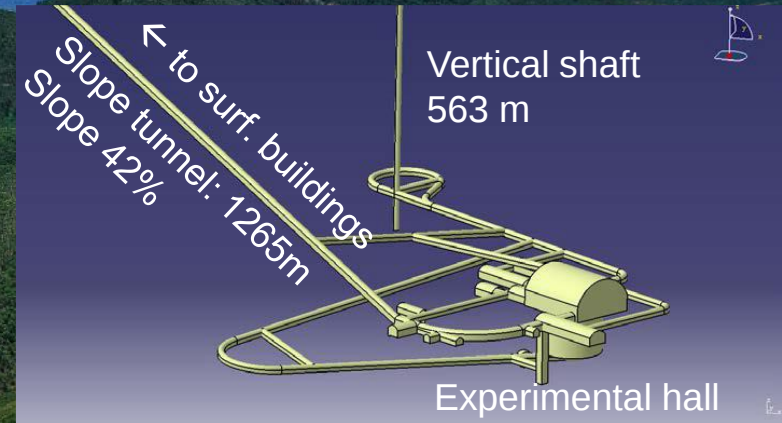
• Detector design

- 2.8 ton gadolinium-doped liquid scintillator
- 10 m² 95% coverage with SiPM
- operate at -50°C (to reduce SiPM dark noise)
- 4500 PE/MeV → 1.5% energy resol. @1 MeV
- 2000 reactor antineutrinos / day
- start operation in 2024

Surface buildings and experimental hall

5000 m³ LS
storage tank

Surface buildings

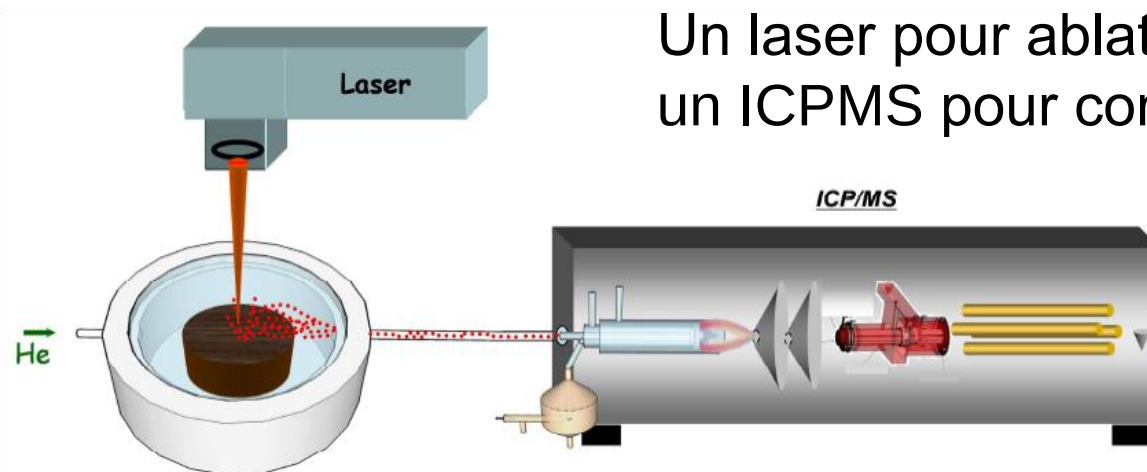


JUNO experimental hall

→ Civil construction finished in Dec, 2021

Avantages LA-ICPMS vs ICPMS

- Technique LA-ICPMS



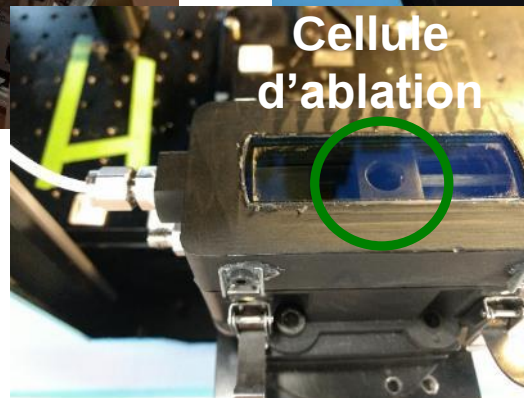
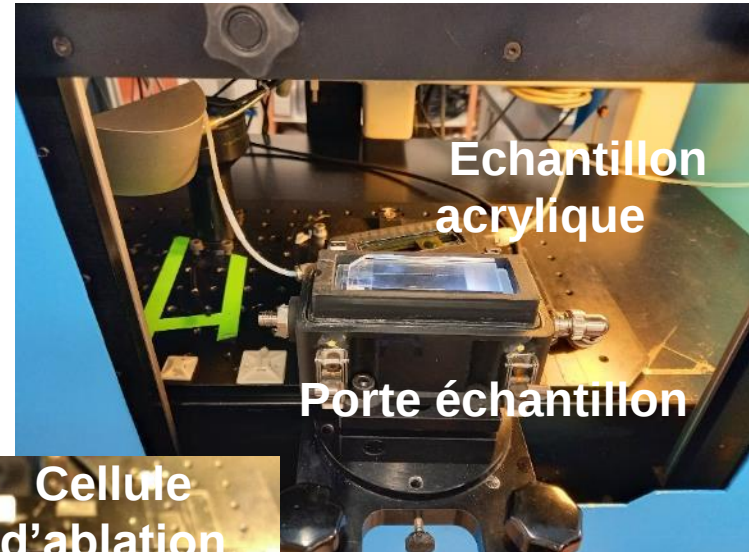
Un laser pour ablater l'échantillon,
un ICPMS pour compter les ions...

- Principales caractéristiques

- pas nécessaire d'avoir des solvants ultra-purs en U/Th donc pas de risque de contamination de l'échantillon (10^{-12} g/g !)
- Accès à l'hétérogénéité de la contamination de U/Th en surface / volume → cartographie spatiale U/Th en « 3D »
- Quantification plus compliquée que la technique ICPMS classique en voie humide → nouvelle méthode proposée

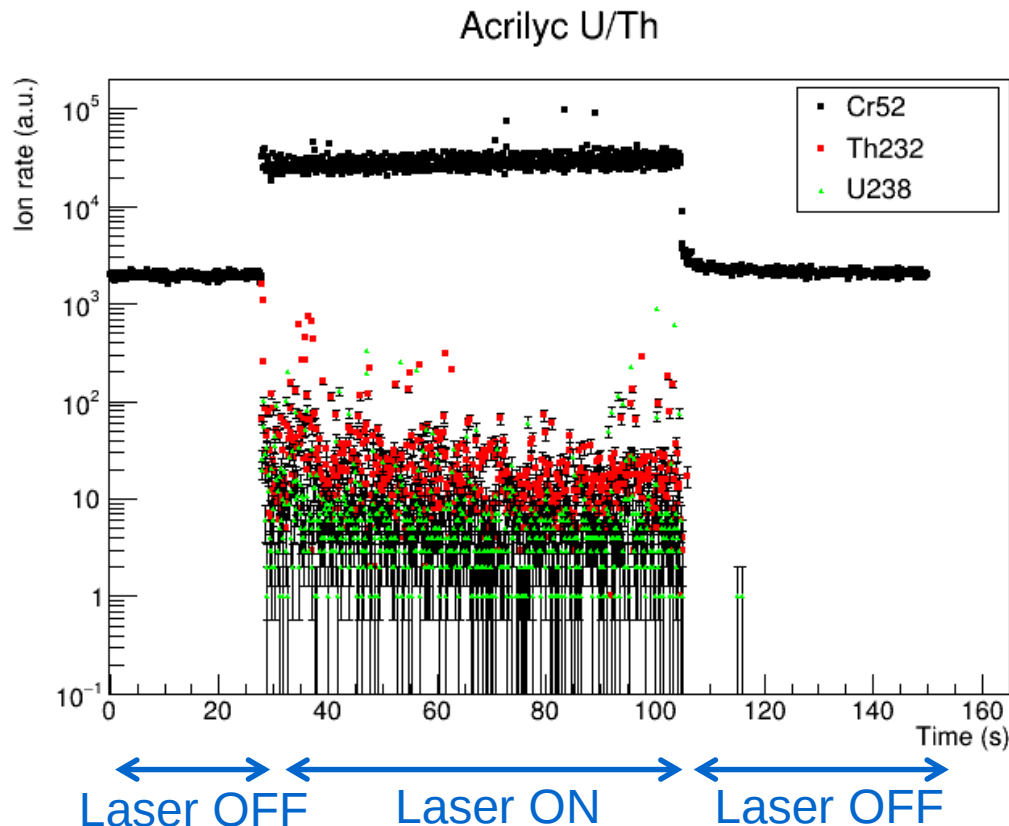
Plateforme PAMAL: LA-ICPMS utilisé

- **Laser IR fs** : $\lambda=1030$ nm, $\Delta T=360$ fs, $f=400$ Hz, $E=17$ $\mu\text{J/pulse}$
- **Chambre d'ablation**: temps de rinçage de ~ 500 ms
- **ICP-MS/MS** (Agilent 8900)



Protocole de mesure et bruit de fond

- **Acrylique** ($\text{C}_5\text{H}_8\text{O}_2$)_n → mesure de la **masse 52** ($^{12}\text{C}+^{40}\text{Ar}$) pour l'estimation de la quantité de matière ablatée
- **Dwell time** : 10 ms (^{52}Cr), 52 ms (^{238}U), 52 ms (^{232}Th)



- **Laser ON** pour la mesure de l'échantillon
- **Laser OFF** pour la mesure du bruit de fond (effet mémoire)

→ excellents fonds !

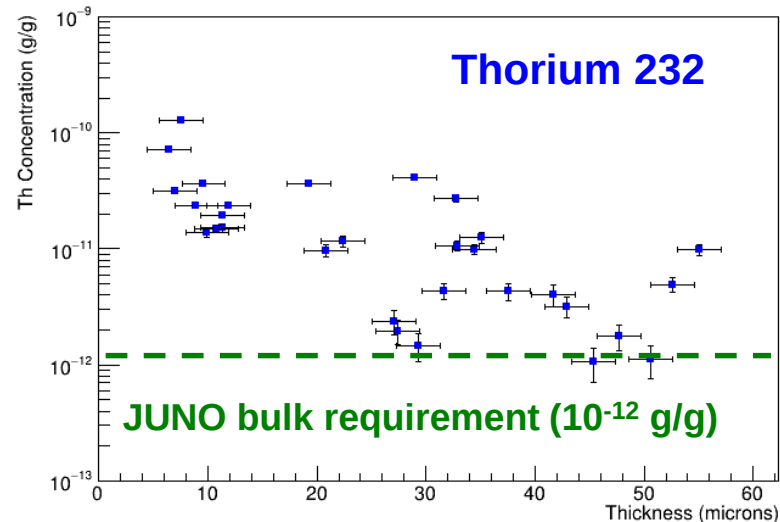
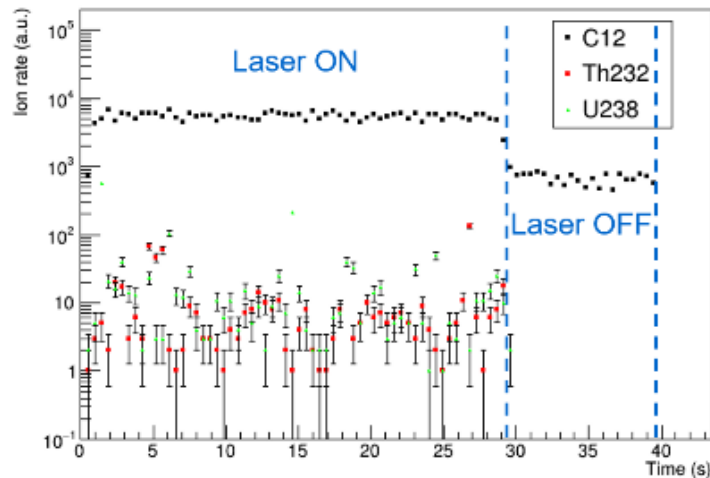
- ^{238}U : ~0,09 ion/s
- ^{232}Th : ~0,06 ion/s

Caractérisation de l'acrylique par LA-ICPMS

- Méthode quantitative de la concentration C en g/g

$$C = \frac{\text{Nb d'ions mesurés}}{N_A} \times \frac{M}{m_{\text{acrylique}}} \times \frac{1}{\text{Transmission}}$$

Acrylic square 600x600 microns

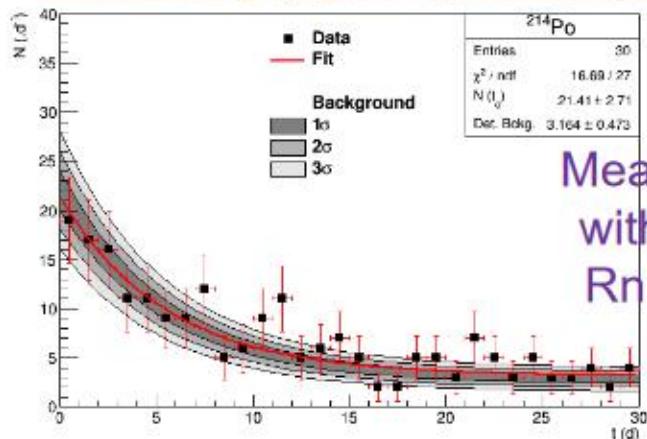
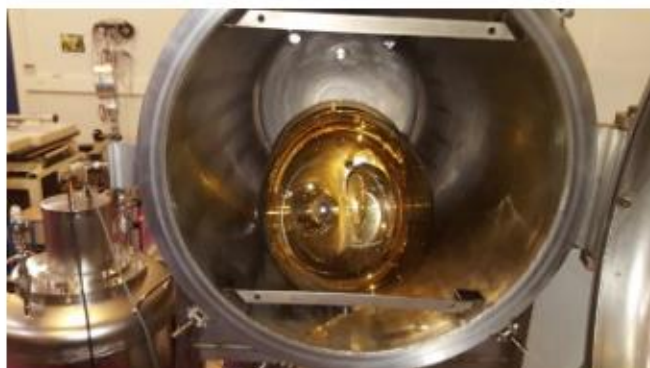


- Forte contamination de surface en U/Th sur les 100 premiers μm jusqu'à 10^{-10} g/g
- A permis de modifier le protocole de polissage et nettoyage des panneaux d'acrylique pour atteindre les niveaux requis autour de 10^{-12} g/g

Reminder

- Preliminary measurements have been performed in 2017 :

With 2 NNVT 20" PMTs

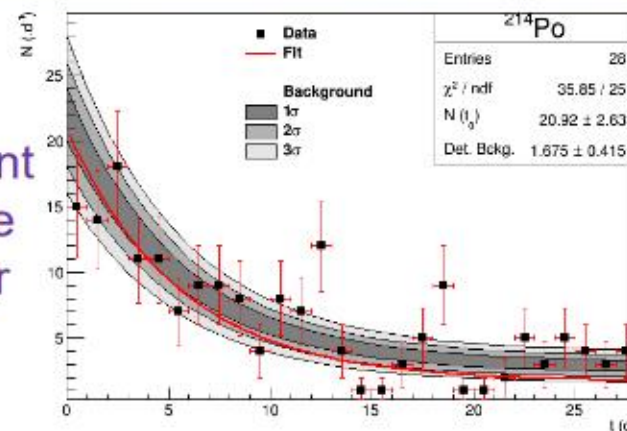


Measurements consistent
with the background the
Rn emanation chamber

→ $A_{\text{emanation}} < 1.9 \text{ mBq/20" PMT (90\% C.L.)}$

DocDB-2875

With 29 bulbs of HZC 3" PMTs (XP72B20)



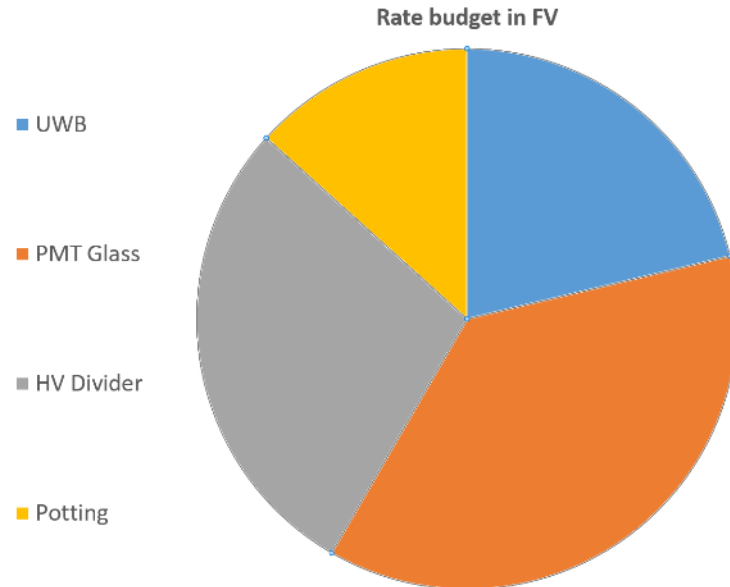
→ $A_{\text{emanation}} < 0.13 \text{ mBq/3" PMT (90\% C.L.)}$

DocDB-2741

UWB and SPMT instrumentation radiopurity

- Comparison between PMT glass, HV Divider, Potting and UWB components

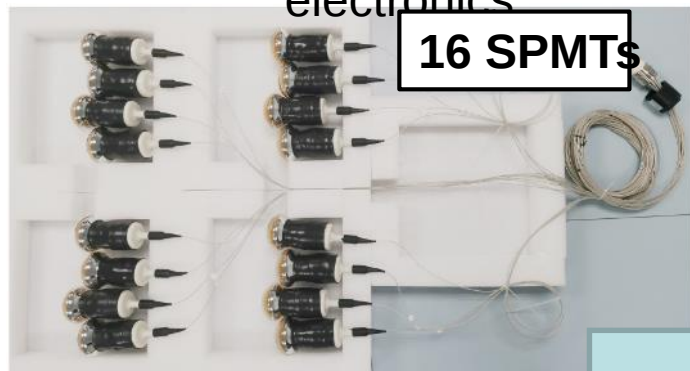
SPMT components	Rate (mHz)	Rate (%)
UWB components	33.5	21
PMT Glass	50.0	37
HV Divider	45.8	29
Potting	21.5	13
Total	150.8	100



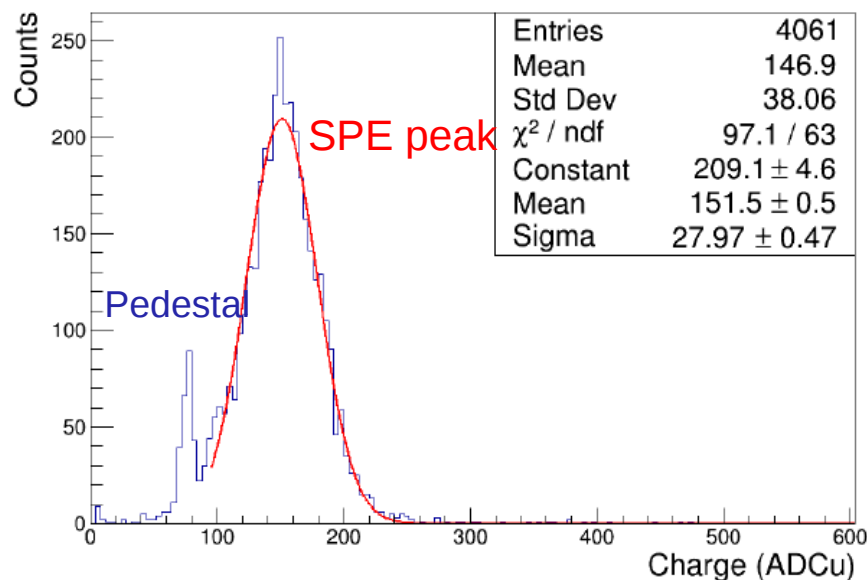
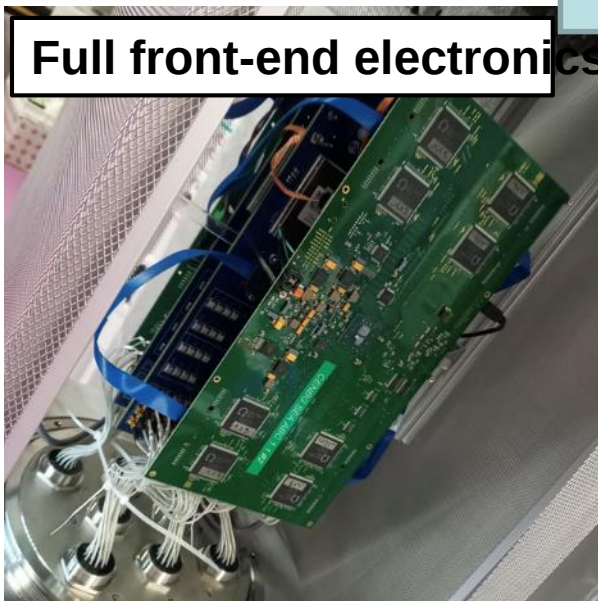
- UWB components is ~21% of the total counting rate coming from SPMT system. Mainly due to the fact that the UWB is far from the LS sphere compared to PMT instrumentation
- the total counting rate of the SPMT system is ~150 mHz, within the 200 mHz SPMT requirement
- SPMT radiopurity goal achieved !

Validation of full electronics with 16 3-inch PMTs

1st joining of PMTs and front-end electronics

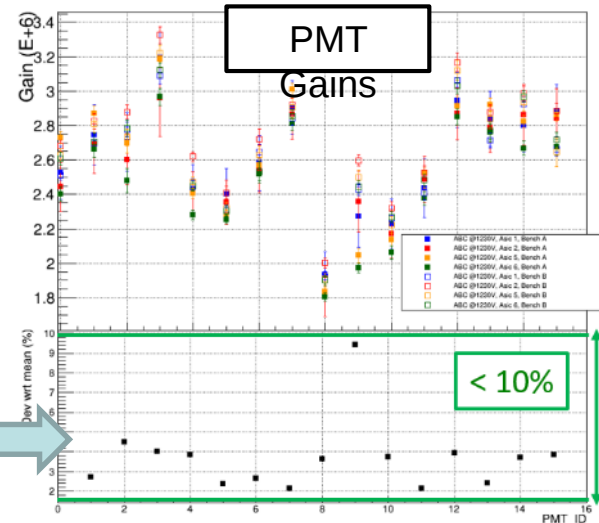


Full front-end electronics



- Readout very low Q from 1 PMT
- Asynchronously trigger on random events from 16 PMTs

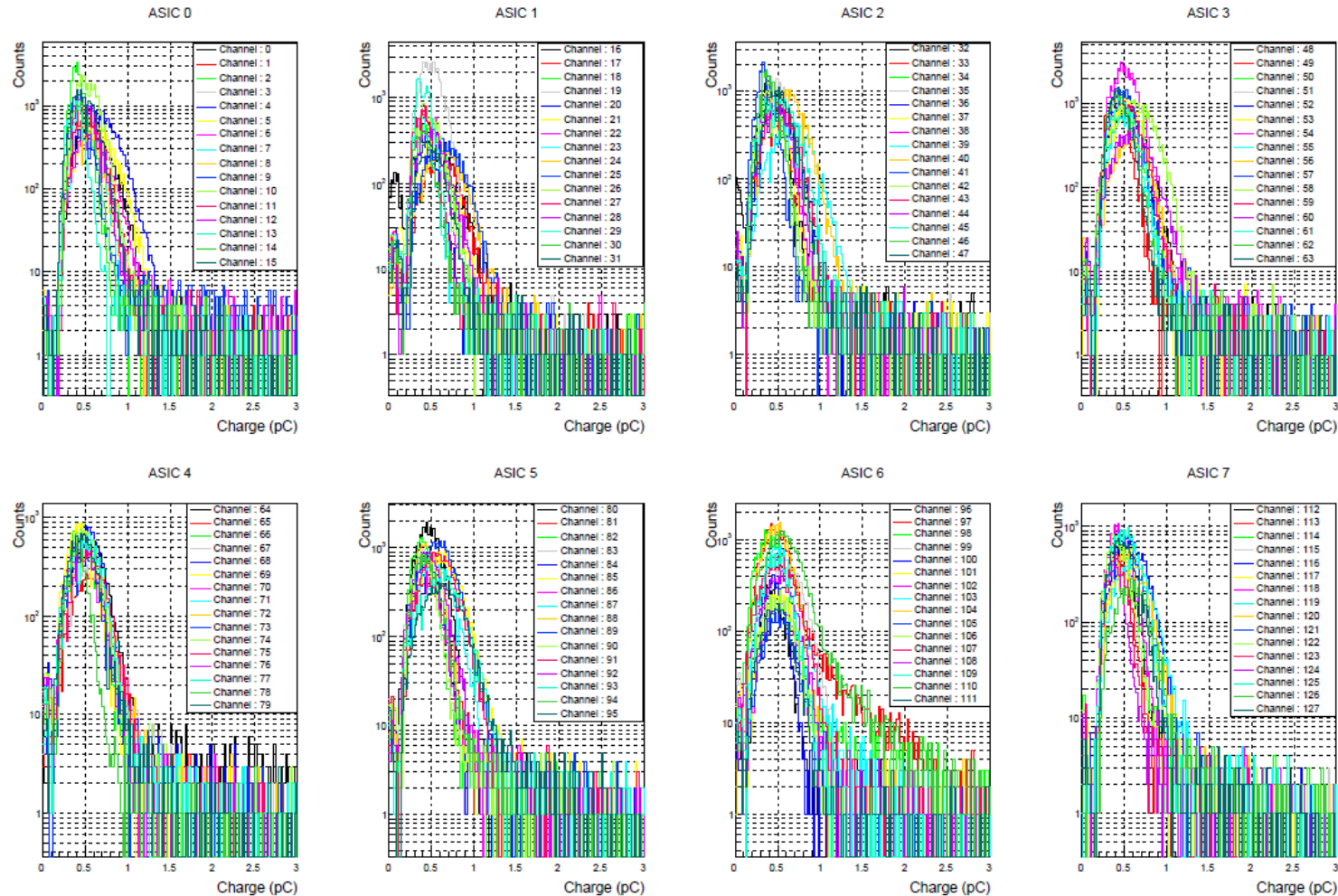
- 16 PMTs measured on 8 different ASICs



→ PMT performances consistent with intrinsic fluctuations as measured in HZC

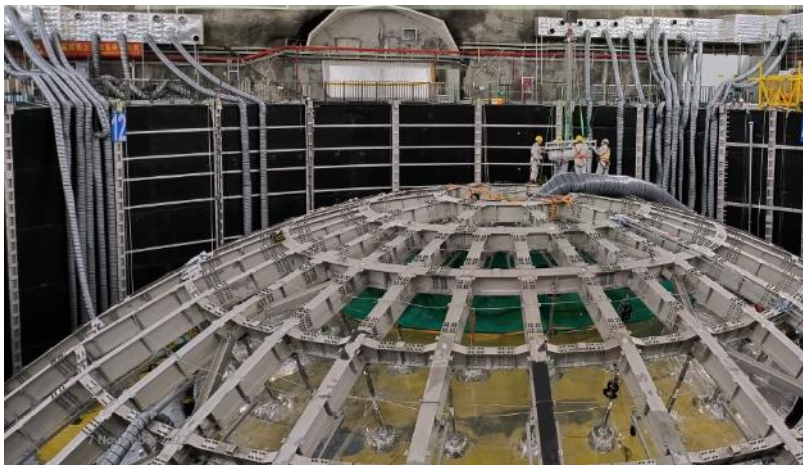
Validation of full electronics with 128 PMTs

- Main achievement at L2Pi Bordeaux : **128 PMT readout in physics mode on ABC front-end board**



SPMT electronics integration on JUNO site

- All electronics boards produced and currently under integration at JUNO site
- Installation of 3-inch PMTs installation started in December



3 flavour configuration

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = U_{PMNS} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$



$$U_{PMNS} = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \times \begin{bmatrix} e^{i\alpha_1/2} & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_2/2} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{bmatrix}$$

$c_{ij} = \cos(\theta_{ij})$
 $s_{ij} = \sin(\theta_{ij})$
 δ : CP phase term
 α_i : Majorana phases

$$P_{\alpha\beta} = \delta_{\alpha\beta} - 4 \sum_{i>j} \text{Re}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin^2(1.27 \Delta m_{ij}^2 L/E) + 2 \sum_{i>j} \text{Im}(U_{\alpha i}^* U_{\beta i} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*) \sin(2.54 \Delta m_{ij}^2 L/E)$$

$$\Delta m_{ij}^2 \equiv m_i^2 - m_j^2$$

θ : mixing angle

Defines how different the flavour states are from the mass states

L/E : variable parameter

Baseline / Energy

- Adapted for accelerator and reactor ν_i
- Fixed for solar and atmospheric ν_i

Δm^2 : mass

squared difference

No information on ordering of masses

Reactor neutrino based experiments

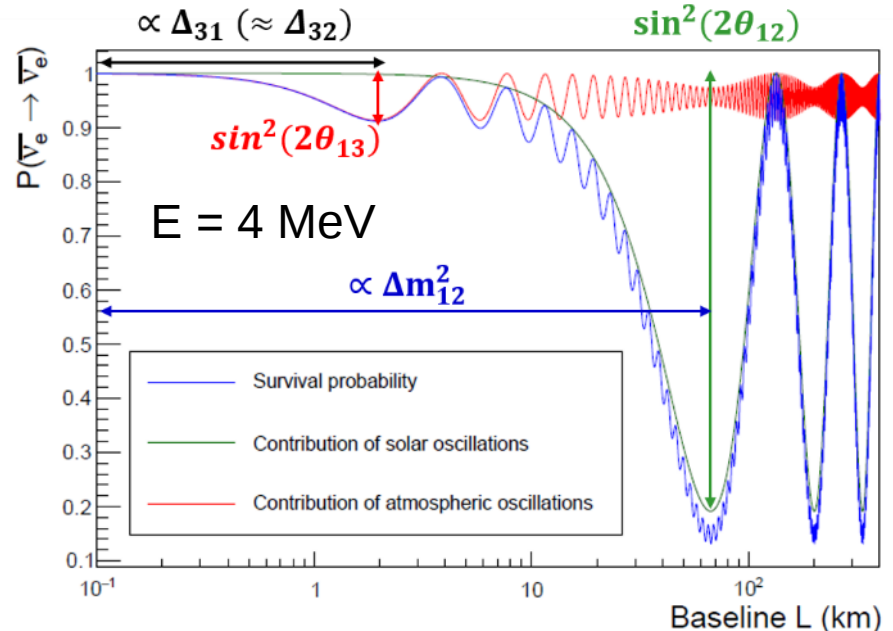
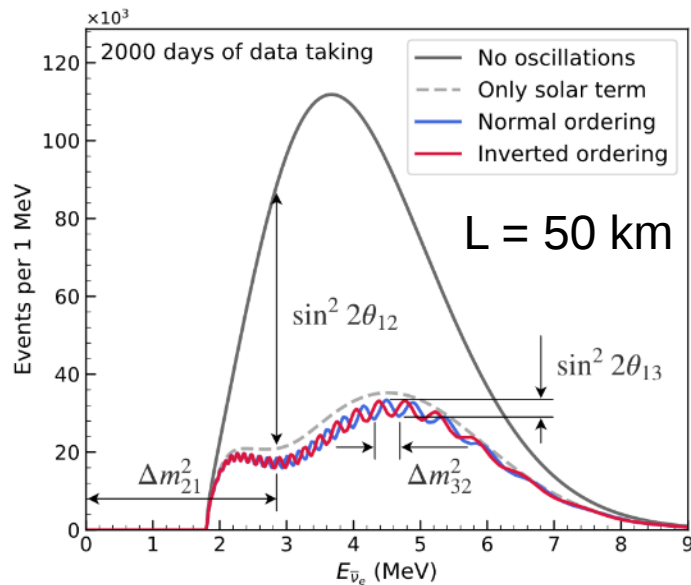
- Antineutrino survival probability :

$$P_{ee} = 1 - \cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2 (\Delta_{21}) - \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 (|\Delta_{31}|) - \sin^2 \theta_{12} \sin^2 2\theta_{13} \sin^2 (\Delta_{21}) \cos (2|\Delta_{31}|)$$

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

$+$ $\rightarrow$ NO: $m_1 < m_2 \ll m_3$

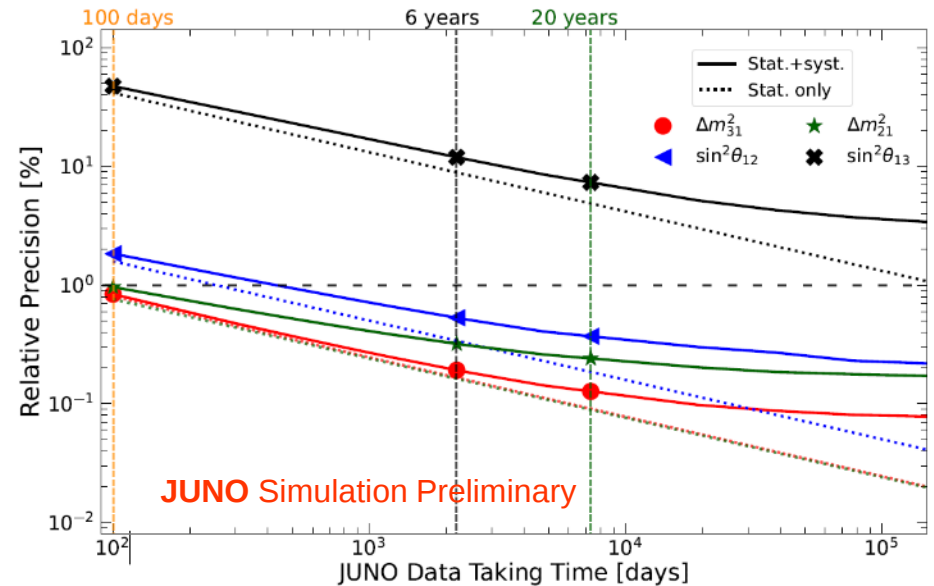
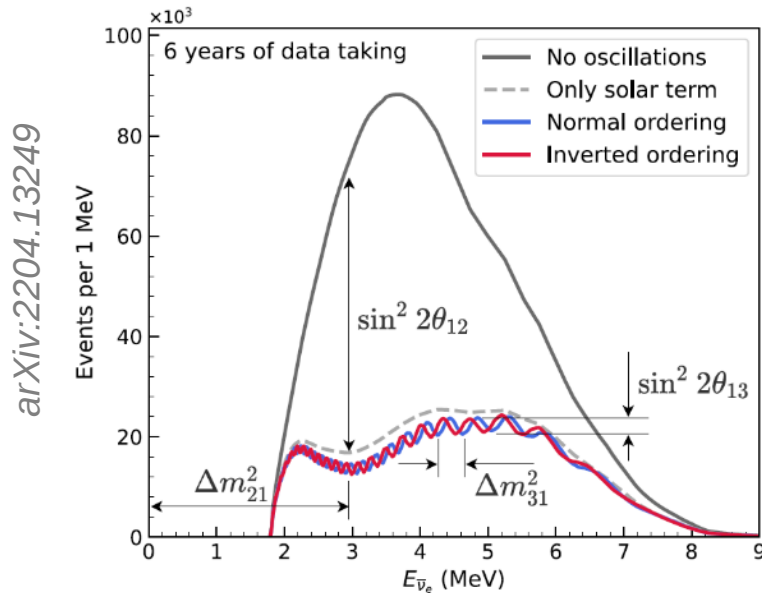
$-$ $\rightarrow$ IO: $m_3 \ll m_1 < m_2$



- JUNO : 1st experiment for precision measurements of both slow and fast oscillations
- Reconstructed energy spectrum
 - $\rightarrow$ Spectral analysis
 - $\rightarrow \chi^2$ study for NO and IO $\rightarrow \Delta\chi^2$
- Several conditions on baseline and energy resolution are necessary for such a measurement

Neutrino oscillation studies using reactor $\bar{\nu}_e$

- JUNO's main goal is to determine the Neutrino Mass Ordering (**normal** or **inverted**) at 3σ level using spectral information in the oscillation pattern
- JUNO will detect for the 1st time Δm_{21}^2 and Δm_{32}^2 oscillation modes simultaneously



	Δm_{31}^2	Δm_{21}^2	$\sin^2 \theta_{12}$	$\sin^2 \theta_{13}$
JUNO 6 years	$\sim 0.2\%$	$\sim 0.3\%$	$\sim 0.5\%$	$\sim 12\%$
PDG2020	1.4%	2.4%	4.2%	3.2%

→ Subpercent precision will be reached for 3 of the parameters with JUNO only !

JUNO: an observatory for rare events



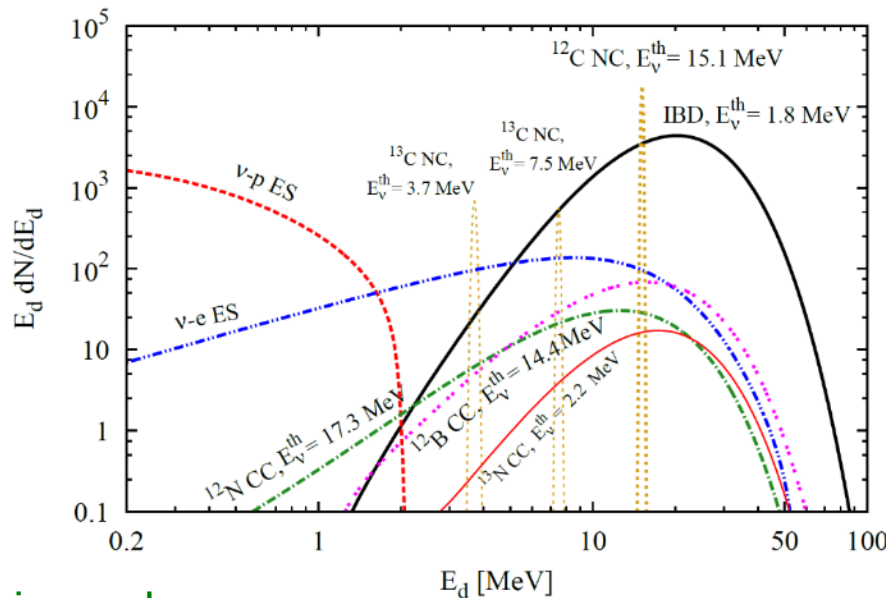
JUNO will have a vast neutrino program beyond reactor antineutrinos !

- “Neutrino Physics with JUNO”, J. Phys. G **43** (2016) no.3, 030401
- “JUNO physics and detector”, Prog. Part. Nucl. Phys. 123 (2022) 103927

Neutrino source	Signal rate	Energy range
Reactor	~47 evts/day	0-12 MeV
SN burst	~10 ⁴ evts at 10 kpc	0-80 MeV
Diffuse SN background	2-4 evts/year	10-40 MeV
Sun ⁸ B	hundreds /year	0-16 MeV
Earth	~400 evts/year	0-3 MeV
Earth's atmosphere	hundreds /year	0.1-100 GeV

Core Collapse Supernova neutrinos

- A Core-Collapse Supernova (CCSN) releases 99% of its energy in neutrinos and antineutrinos of all flavors
- Rate of CCSN in the Milky Way is $1.63 \pm 0.46/\text{century}$ *New Astronomy Vol.83, 101498*
- JUNO with 20 kt LS has excellent capability of detecting all neutrino flavors



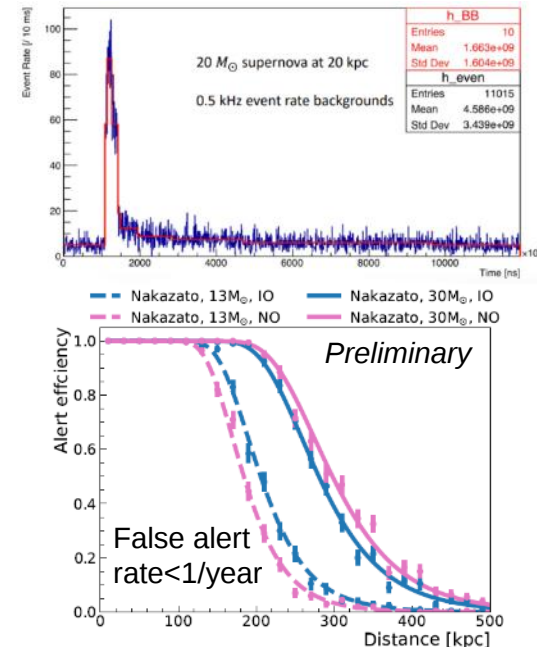
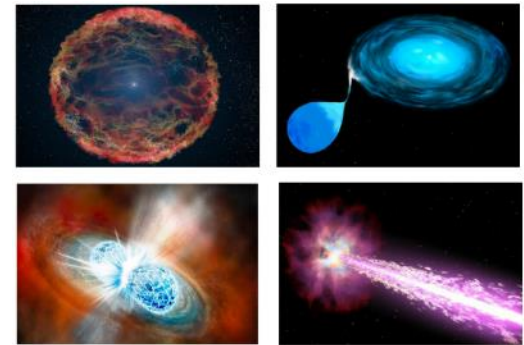
Type	Process	Nb of evts @10 kpc
CC (IBD)	$\bar{\nu}_e + p \rightarrow e^+ + n$	~5000
eES	$\nu + e \rightarrow \nu + e$	~300
pES	$\nu + p \rightarrow \nu + p$	~2000
NC	$\nu + ^{12}\text{C} \rightarrow \nu + ^{12}\text{C}^*$	~300
CC	$\nu_e + ^{12}\text{C} \rightarrow e^- + ^{12}\text{N}$ $\nu_e + ^{12}\text{C} \rightarrow e^- + ^{12}\text{B}$	~200

Main goals:

- Measurement of flavour content, time evolution, flux, energy spectrum
- Study of star parameters, SN physics, late-stage stellar evolution
- Constrain of absolute neutrino mass $m_\nu < (0.83 \pm 0.24) \text{ eV}$ (95% CL) @10 kpc

Multi-Messenger trigger in JUNO

- JUNO has a great potential to observe several astronomical events in neutrinos:
 - Supernovae (Pre-burst, type Ia, CCSN type II)
 - Neutron star mergers
 - Gamma ray bursts
- Design of a Multi-Messenger (MM) trigger system in order to monitor transient signals in real time from the entire sky via all neutrino flavors
- Two trigger systems in JUNO: Global trigger with $E_{\text{thr}} \sim 200$ keV and MM trigger with $E_{\text{thr}} \sim 20$ keV
- Online SN monitoring with IBD events: 50% alert efficiency for 30 solar masses at ~ 300 kpc

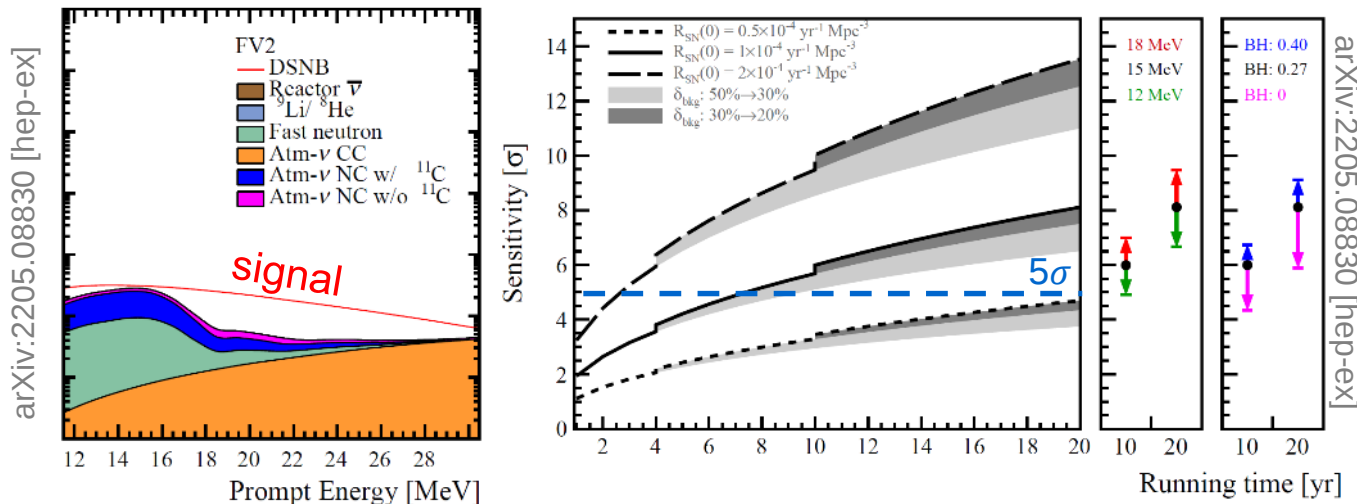


→ JUNO will be a powerful neutrino telescope for transient MM observations

→ Major role in the next-generation Supernova Early Warning System (**SNEWS2.0**)

Diffuse Supernova Neutrino Background

- Diffuse Supernova Neutrino Background (DSNB): integrated signal from all the SN explosions in the Universe.
- Holds the precise information on the average CCSN neutrino spectrum, cosmic star-formation rate and fraction of failed black-hole forming SNe
- $\bar{\nu}_e$ IBD DSNB signal in JUNO: constrained at low E (<10 MeV) by reactor $\bar{\nu}_e$'s, at high E by NC atmospheric ν 's
- pulse shape discrimination in order to reduce NC atm ν 's and fast neutrons
- Optimal energy window [12-30 MeV] with 2-4 events/year expected

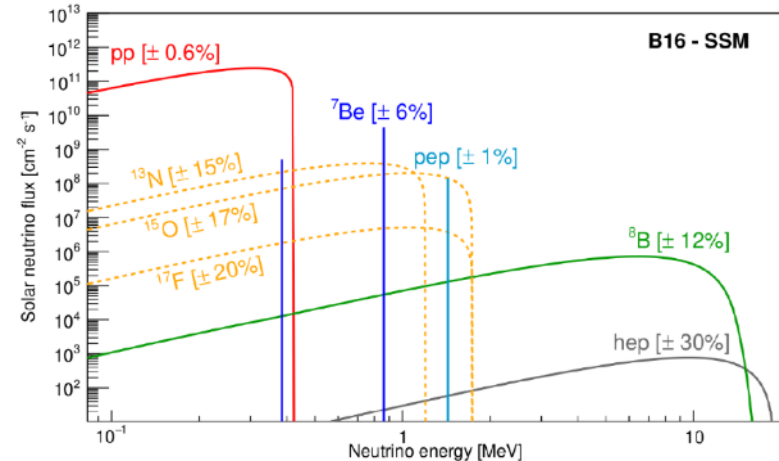


→ 5σ sensitivity to detect DSNB signal with <10 years using nominal SN rate

→ JUNO will be one of the best candidates to observe DSNB signal for the 1st time

Solar neutrinos

- Neutrinos are produced in thermonuclear fusion reactions in the solar core up to 16 MeV
- Direct information about the **solar metallicity**
- Study of **fundamental neutrino properties** and **neutrino interactions with matter**



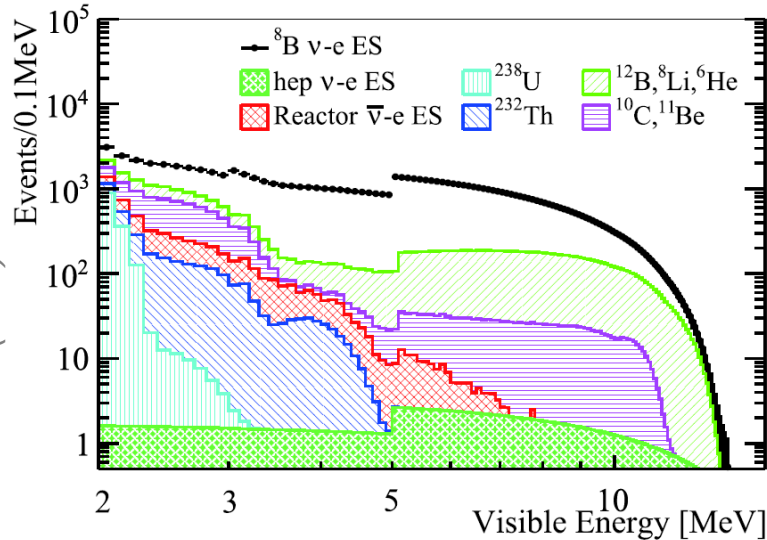
- JUNO can benefit from its huge LS mass to detect thousands of solar neutrinos
- Main channel: **Elastic Scattering (ES) on electrons**
- Statistics for 200 kton.year exposure

	Type	Reaction	Threshold	Final products	^8B	<i>hep</i>
1	ES	$\nu + e^- \rightarrow \nu + e^-$	0	e^-	3×10^5	640
2	CC	$\nu_e + {}^{12}\text{C} \rightarrow e^- + {}^{12}\text{N}$	16.8 MeV	e^-	0	0.41
3	CC	$\nu_e + {}^{13}\text{C} \rightarrow e^- + {}^{13}\text{N}$	2.2 MeV	e^- and ${}^{13}\text{N}$ decay	3768	14
4	NC	$\nu + {}^{12}\text{C} \rightarrow \nu + {}^{12}\text{C}^* (1^+)$	15.1 MeV	γ	0.2	5
5	NC	$\nu + {}^{13}\text{C} \rightarrow \nu + {}^{13}\text{C}^* (\frac{3}{2}^-)$	3.685 MeV	γ	3165	13.5

Solar neutrinos

High energy neutrinos: from ^8B

Chinese Phys. C45 0230042 (2021)

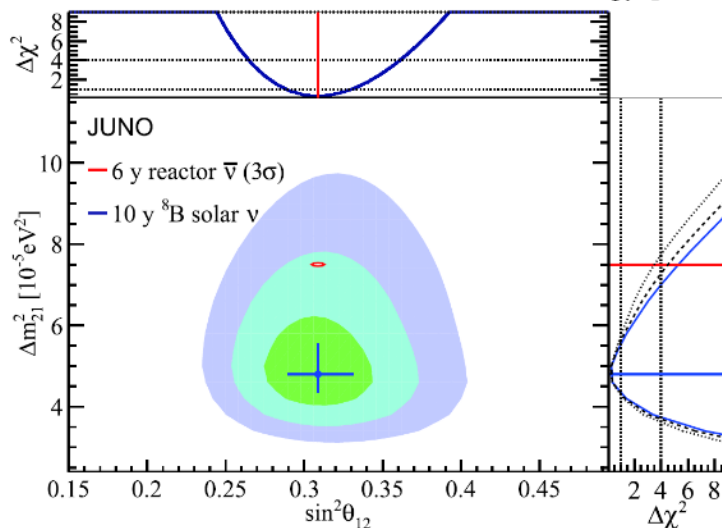


- Neutrino-electron ES
- 2 MeV energy threshold
- Assume LS U/Th radiopurity of 10^{-17} g/g
- Background reduction using fiducial volume cuts and active cosmogenic veto

→ 60,000 expected signal events and 30,000 bckg events in 200 kton.year exposure

- Day-night asymmetry at a level of 0.9%
- Upturn of P_{ee} at 3σ if $\Delta m_{21}^2 = 7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$
- *Under study: independent ^8B solar neutrinos fluxes using CC and NC reactions on ^{13}C*

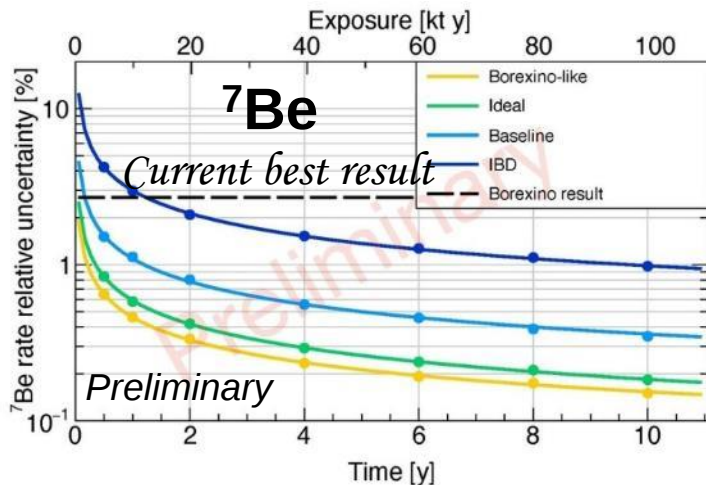
- Possibility to constrain $\sin^2 \theta_{12}$ and Δm_{21}^2 oscillation parameters using both solar and reactor neutrinos



Solar neutrinos

Low-intermediate energy neutrinos: **from ^7Be , pep and CNO**

- Huge statistics with JUNO compared to previous experiments
- Large mass allow to perform stringent fiducial volume cuts ($R < 13\text{-}15\text{ m}$)
- Sensitivities very dependent on the intrinsic radioactivity of the liquid scintillator (For U/Th impurities, **Reactor/Baseline: 10^{-15} g/g** , **Solar/Ideal: 10^{-17} g/g**)



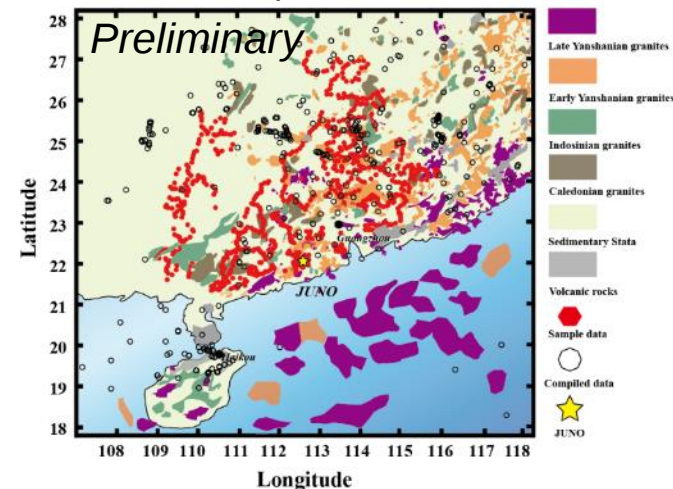
- ✓ Borexino result for ^7Be (**2.7%**) would be matched in **1 year of data taking** in all the scenarios → short-term measurements
- ✓ Borexino result for **pep and CNO** may be matched and overcome in **few years** depending on the scenarios → long-term meas.

→ JUNO has the potential to detect ^7Be , pep and CNO neutrinos with highly improved accuracy with respect to current state-of-the-art (depending on radiopurity scenario)

Geo-neutrinos

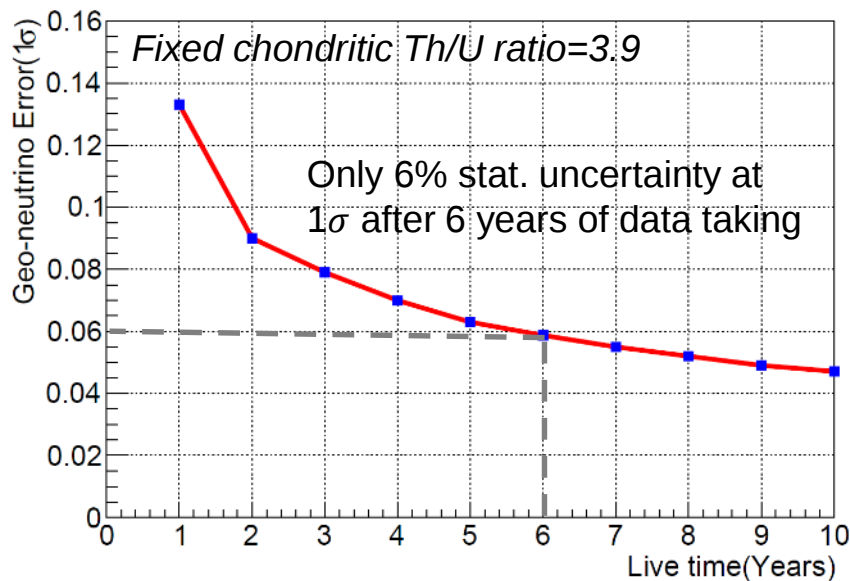
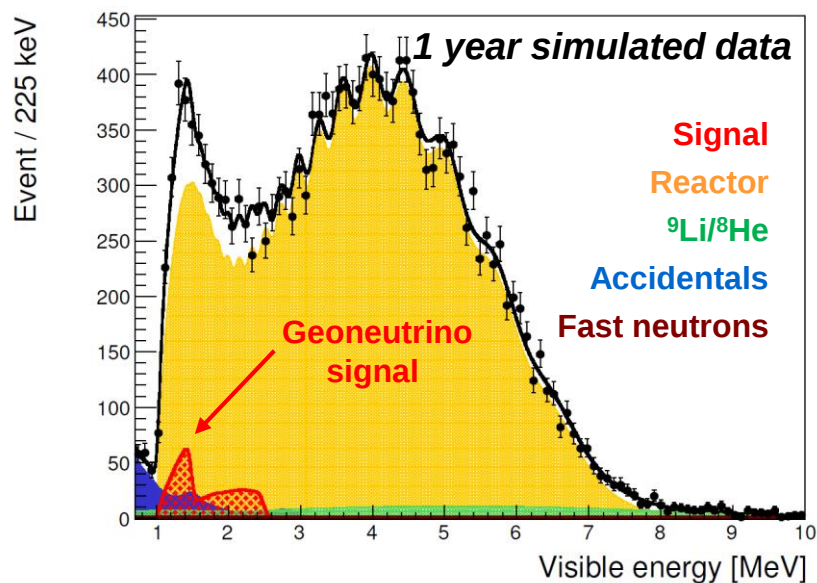
- Unique neutrino source to probe the inner structure of Earth, especially the Uranium (U) and Thorium (Th) abundances (no access to ^{40}K due to the 1.8 MeV threshold)
- Measure Th/U ratio in crust and mantle to understand Earth's formation
- Estimation of U and Th radiogenic power contribution to terrestrial heat production
- Local geological studies ongoing to constrain crustal contribution (and thus derive mantle contribution) and to tackle largest uncertainty sources
- Up to now, only Borexino experiment and KamLAND experiments have detected geo-neutrinos with $52.6_{-8.6}^{+9.4}(\text{stat})_{-2.1}^{+2.7}(\text{sys})$ and $168.6_{-26.5}^{+26.3}$ events, respectively

1002 rock samples around JUNO



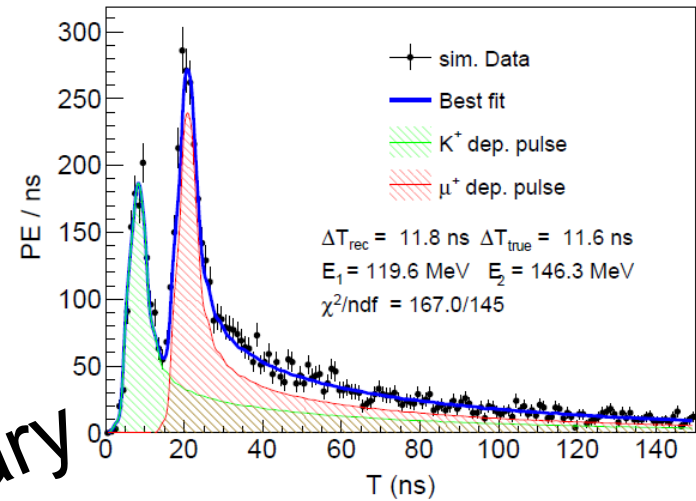
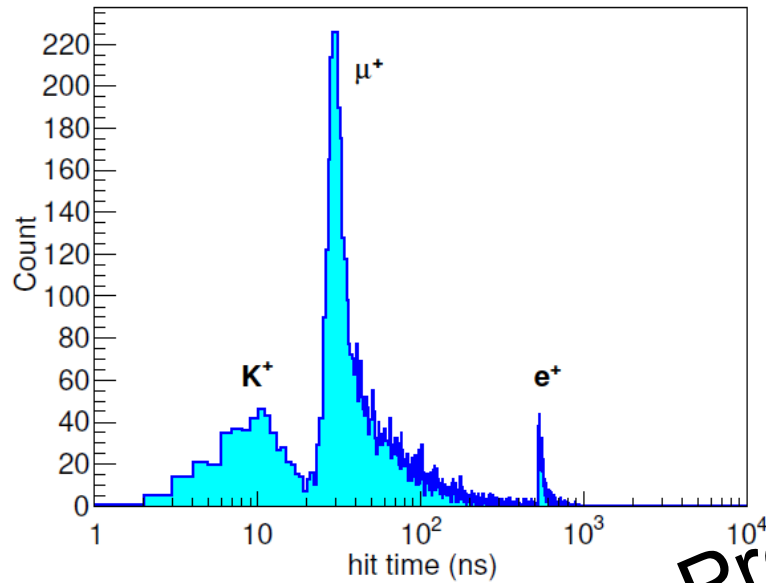
Geo-neutrinos

- Expected signal in JUNO of 39 TNU (Terrestrial Neutrino Units), i.e. ~ 400 geo-neutrinos per year $\rightarrow$ more geo-neutrinos than ever measured in one year only
- The 500 km range of the crust around JUNO will contribute to more than 50% of the total signal $\rightarrow$ local refined geological models needed for precise measurement of the crustal signal and for disentanglement of the mantle signal

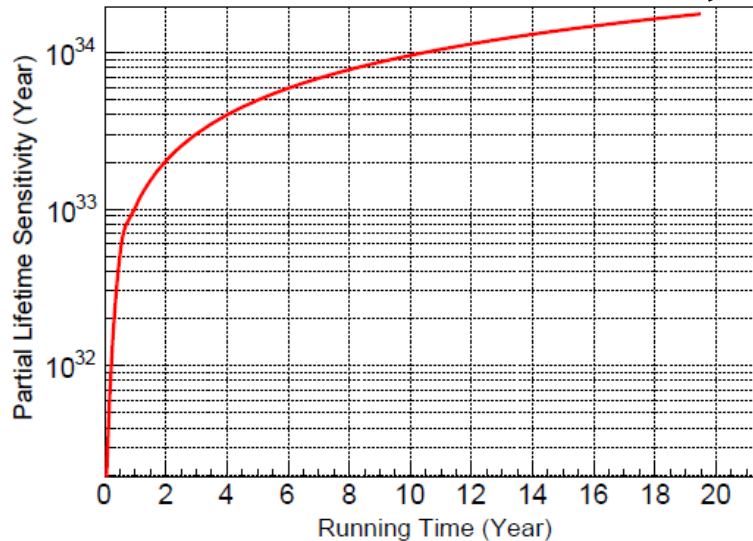


$\rightarrow$ JUNO has the potential to constrain Th/U ratio in the observed geoneutrino signal

JUNO sensitivity on proton decay $p \rightarrow \bar{\nu} K^+$



(a) Hit time spectrum of a proton decay event



JUNO sensitivity at 90% C.L. with 200 kton-y

$$\tau/B(p \rightarrow \bar{\nu} K^+) > 9.6 \times 10^{33} \text{ years.}$$

Liquid scintillator



20 kt liquid scintillator: LAB based, PPO as fluorescence, bis-MSB as wavelength shifter

- ✓ Good transparency: attenuation length $> 20\text{m}$ @ 430 nm, no doping, Al_2O_3 purification and distillation
- ✓ Ultrapure: required radioactivity 10^{-15} g/g for reactor and 10^{-17} g/g for solar, distillation and others
- ✓ Full system commissioning will start soon



All the LS related systems will finish assembly in summer.



Online Scintillator Internal Radioactivity Investigation System (OSIRIS)



A 20-t detector to monitor radiopurity of LS before and during filling to the central detector

- ✓ Few days: U/Th (Bi-Po) $\sim 1 \times 10^{-15}$ g/g (reactor baseline case)
- ✓ 2~3 weeks: U/Th (Bi-Po) $\sim 1 \times 10^{-17}$ g/g (solar ideal case)
- ✓ Other radiopurity can also be measured: ^{14}C , ^{210}Po and ^{85}Kr

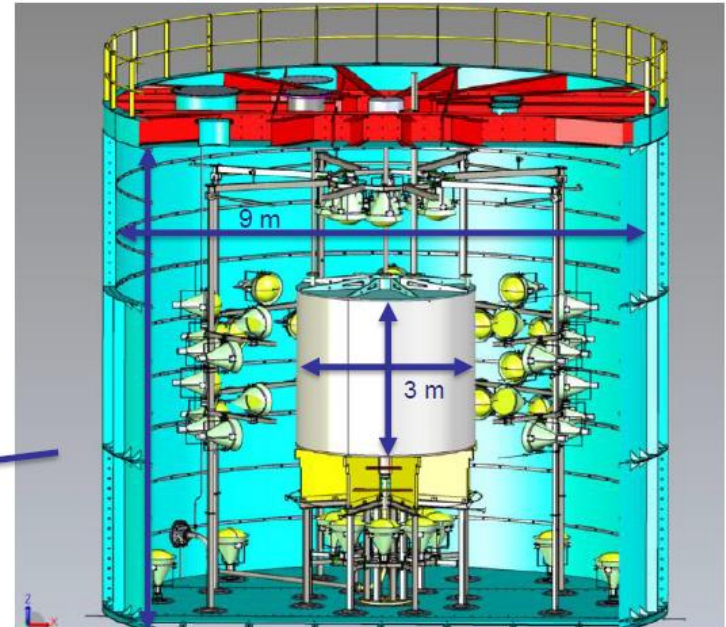


Expect to start commissioning in July.

Possible upgrade to Serappis (SEarch for RAre PP-neutrinos In Scintillator): [arXiv: 2109.10782](https://arxiv.org/abs/2109.10782)

- ✓ A precision measurement of the flux of solar pp neutrinos on the few-percent level

Eur.Phys.J.C 81 (2021) 11, 973



Muon veto system



~650 m rock overburden (1800 m.w.e.) $\rightarrow R_\mu = 4$ Hz in LS, $\langle E_\mu \rangle = 207$ GeV

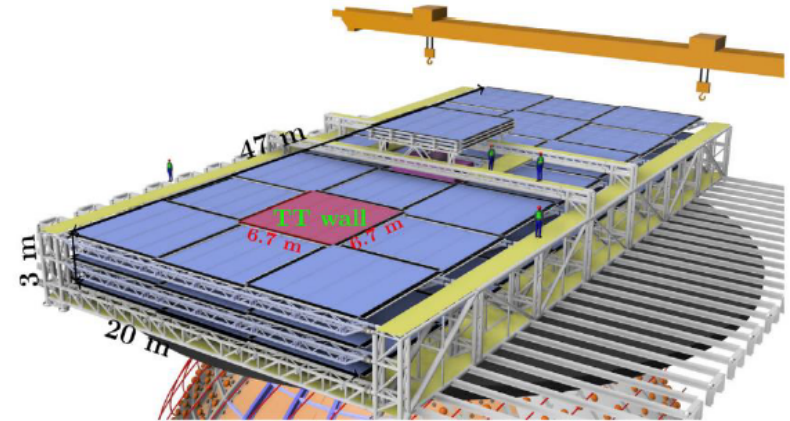
- ✓ About 127 ^9Li and 40 ^8He isotopes, but 57 antineutrinos per day
- ✓ Effective veto strategy keeps 47.1 antineutrinos but only 0.8 residual Li/He bkg



Ultrapure water system

35 kton of ultrapure water serving as passive shield and water Cherenkov detector.

- ✓ 2400 20-inch MCP PMTs, detection efficiency of cosmic muons larger than 99.5%



Plastic scintillator from the OPERA

- ✓ About 50% coverage on the top, three layers to reduce accidental coincidence
- ✓ All scintillator panels arrived on site in 2019