

# Neutrino group T2K/HK/NA61

Claudio Giganti

Biennale LPNHE - Mai 2024

# Group members

- 6 chercheurs: Claudio Giganti, Mathieu Guigue, Marco Martini (IPSA), Boris Popov, Stefano Russo, Marco Zito
- 3 emeriti: Pierre Billoir, Alain Blondel, Jacques Dumarchez
- 2 postdocs : Gonzalo Diaz Lopez (ANR Bertha), William Saenz-Arevalo (ANR Suncore+Bertha)
- 4 Phd Students: Claire Dalmazzone, Ulysse Virginet, Anaelle Chalumeau, Lavinia Russo + 2 qui demarreront en 2024



## Ingénieurs, techniciens, administrateurs:

Jean-Marc Parraud, Eric Pierre, Yann Orain, Julien Coridian, David Martin, Romain Gaior, Vincent Voisin, Diego Terront, Carla Carvalahis

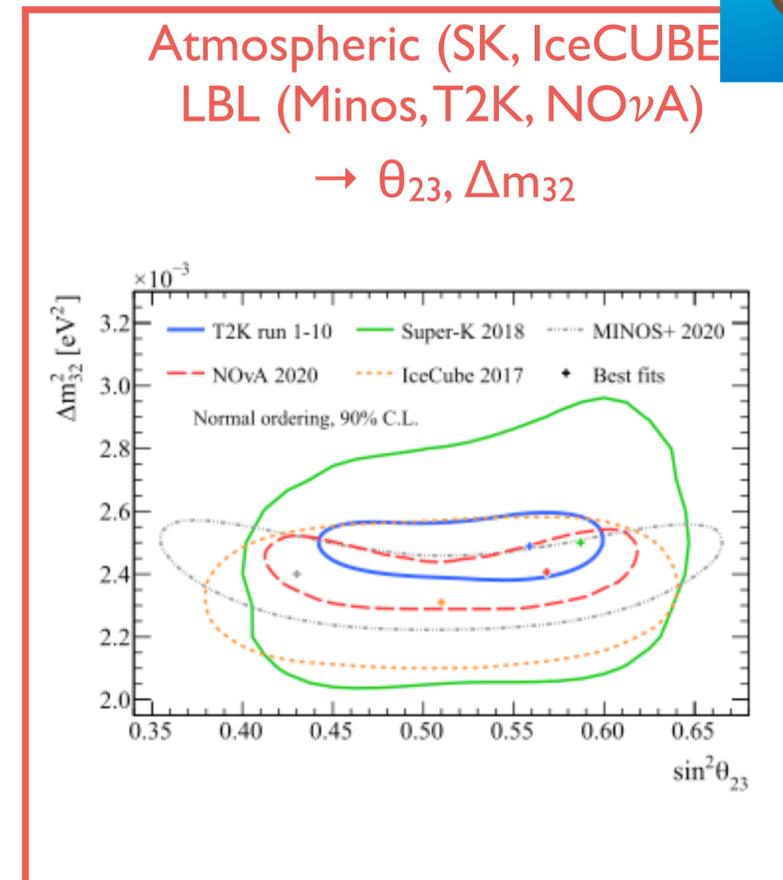
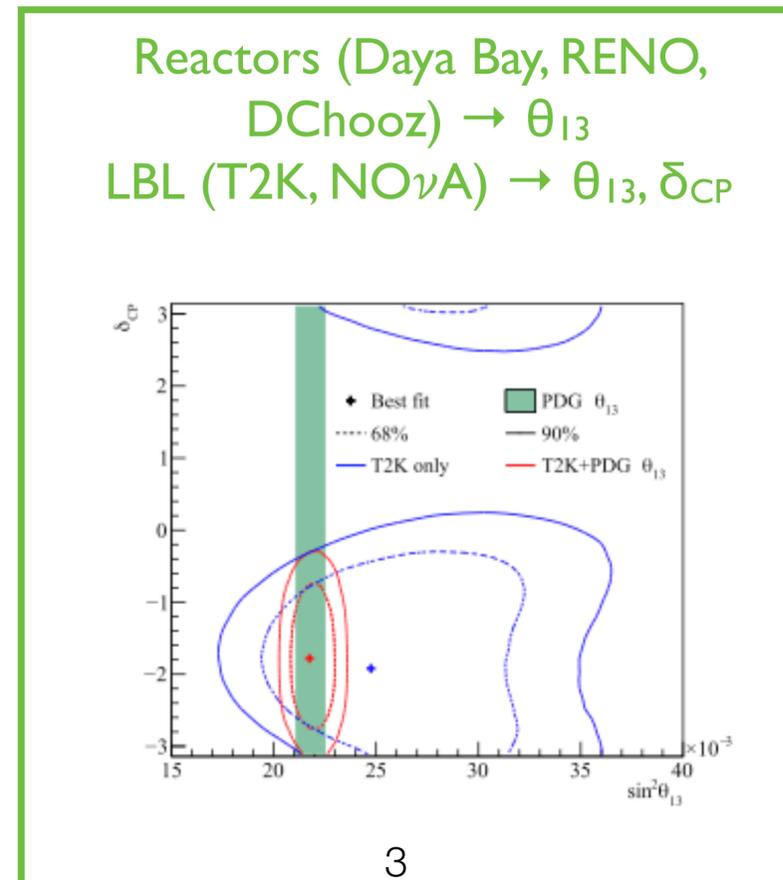
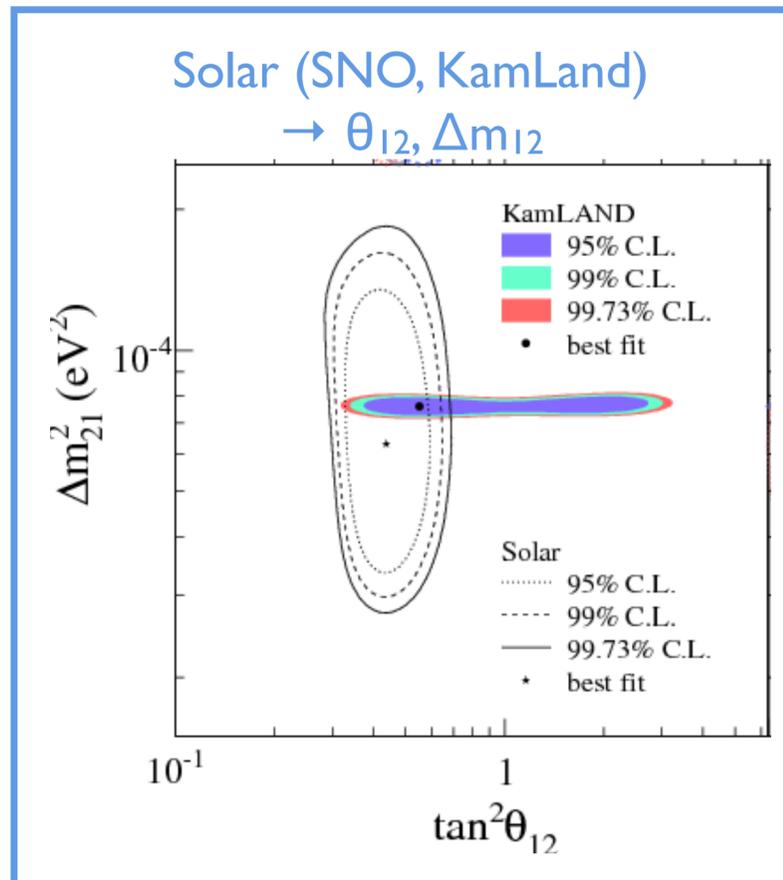
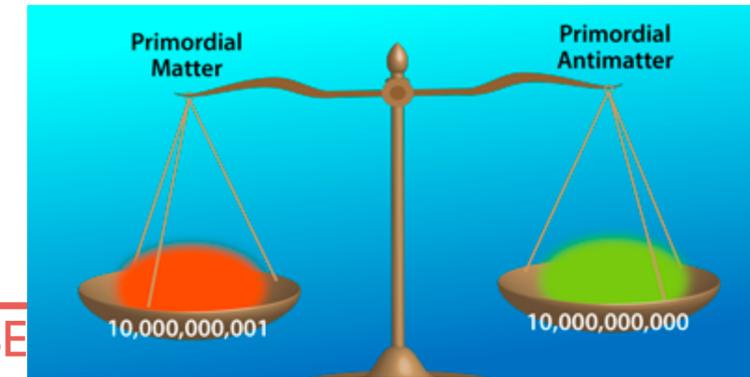
Anciennes membres du groupe:

Postdocs: Sergey Suvorov, Adrien Blanchet,  
PhD: Viet Nguyen, Lucile Mellet, Vlada Yevarouskaya  
Bernard :-)

# Oscillation des neutrinos

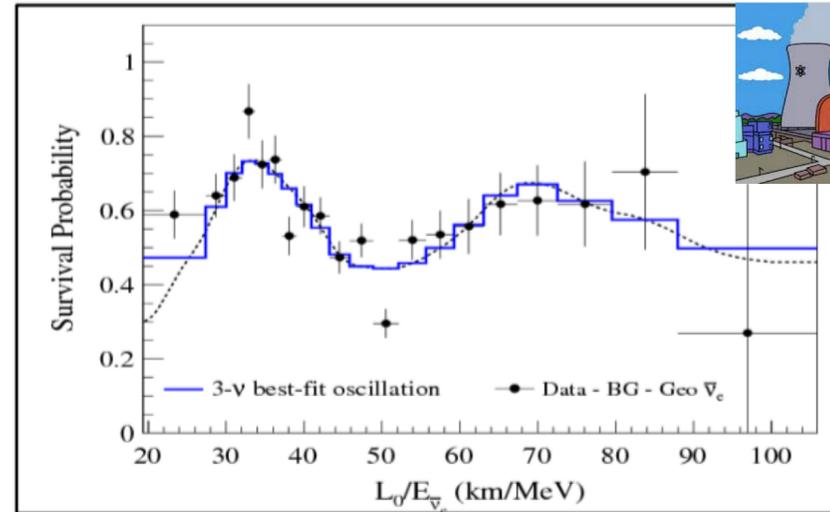
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} e^{i\delta_{CP}} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

- 3 angles de mélange, 2 différences de mass → mesurés
- 1 phase de violation de Charge-Parité → pas encore mesuré

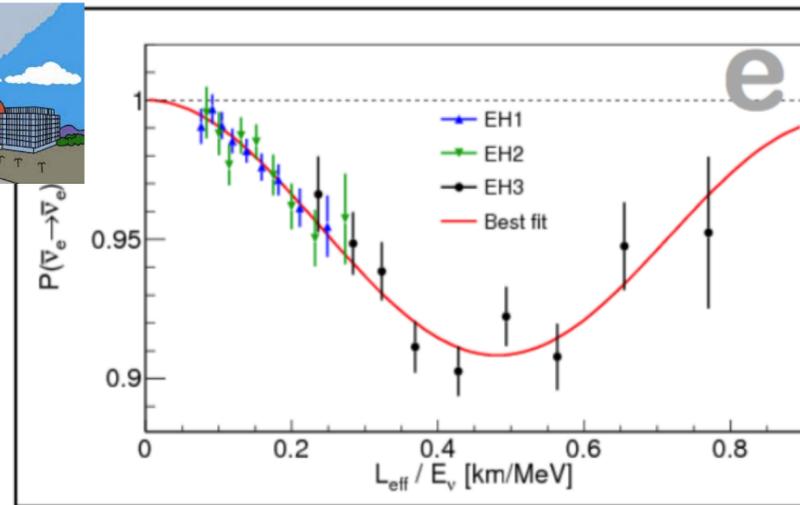


# Oscillation des neutrinos

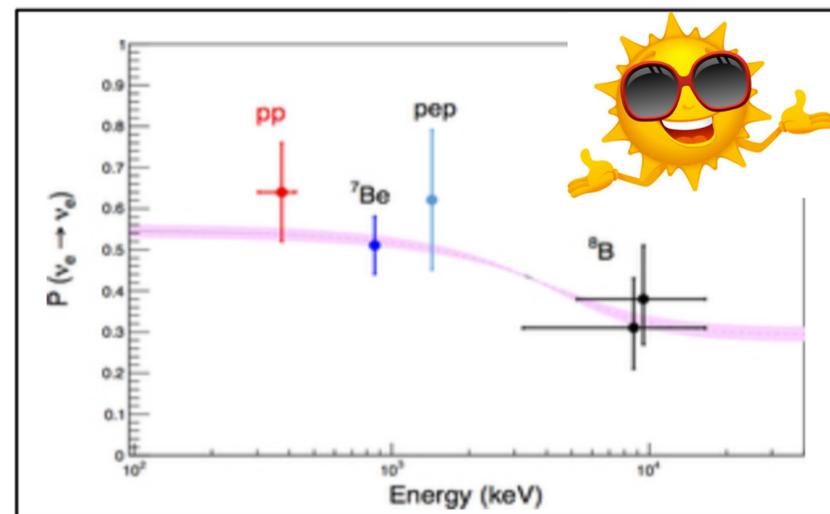
$e \rightarrow e$  ( $\delta m^2$ ,  $\theta_{12}$ )



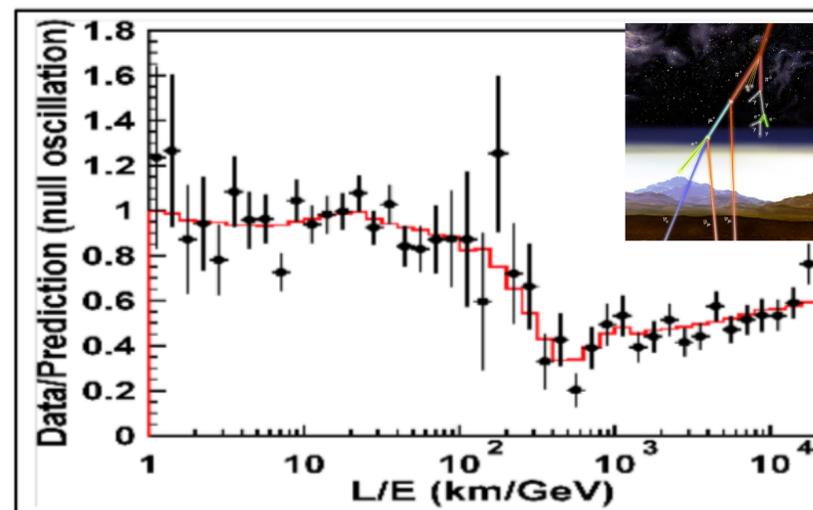
$e \rightarrow e$  ( $\Delta m^2$ ,  $\theta_{13}$ )



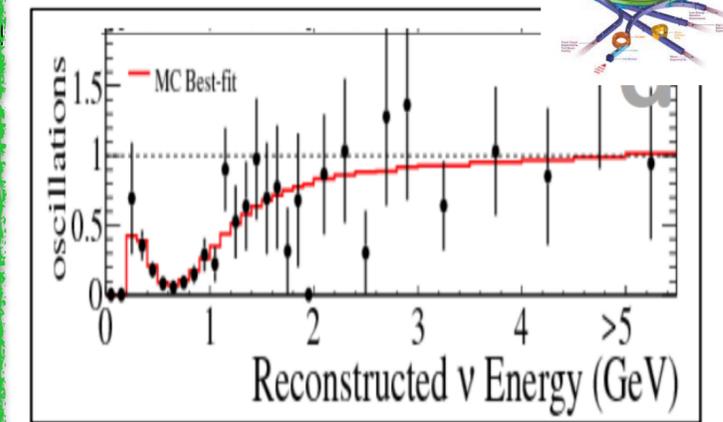
$e \rightarrow e$  ( $\delta m^2$ ,  $\theta_{12}$ )



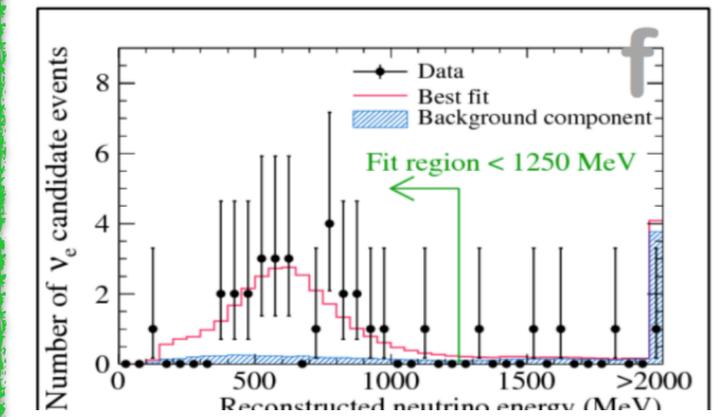
$\mu \rightarrow \mu$  ( $\Delta m^2$ ,  $\theta_{23}$ )



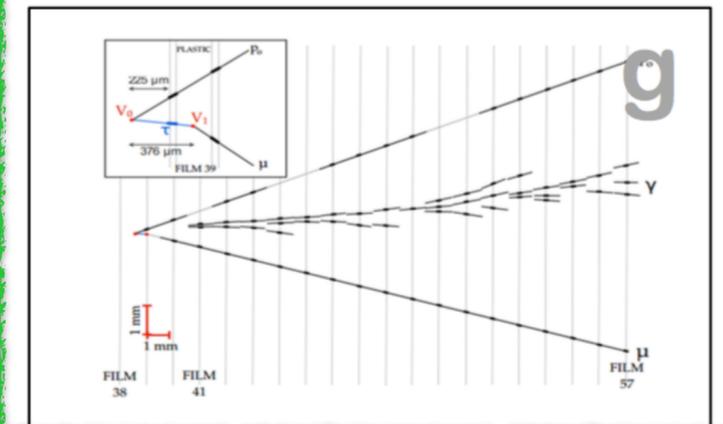
$\mu \rightarrow \mu$  ( $\Delta m^2$ ,  $\theta_{23}$ )



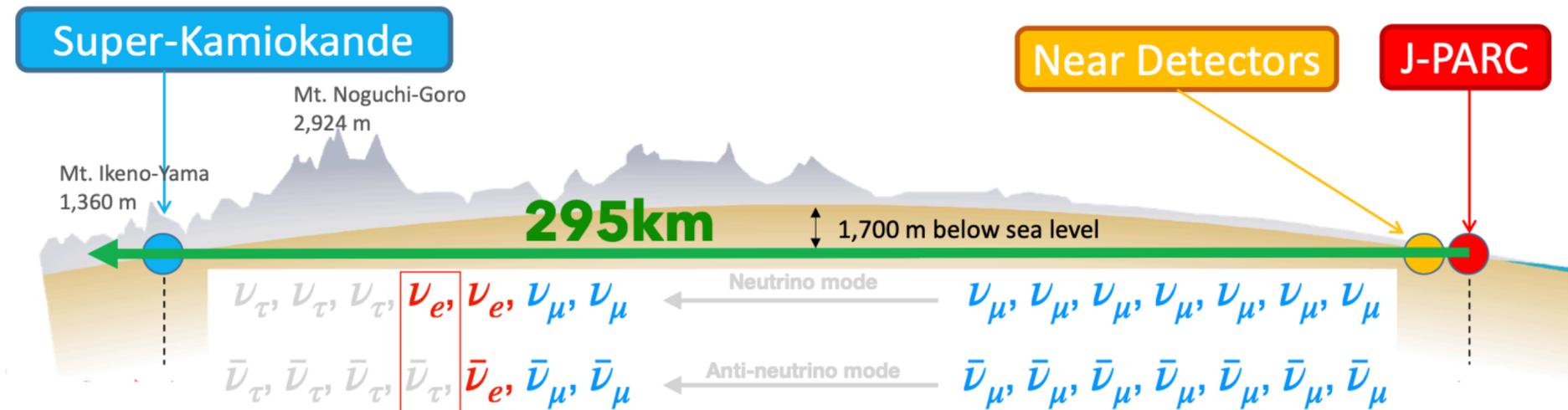
$\mu \rightarrow e$  ( $\Delta m^2$ ,  $\theta_{13}$ ,  $\theta_{23}$ )



$\mu \rightarrow \tau$  ( $\Delta m^2$ ,  $\theta_{23}$ )

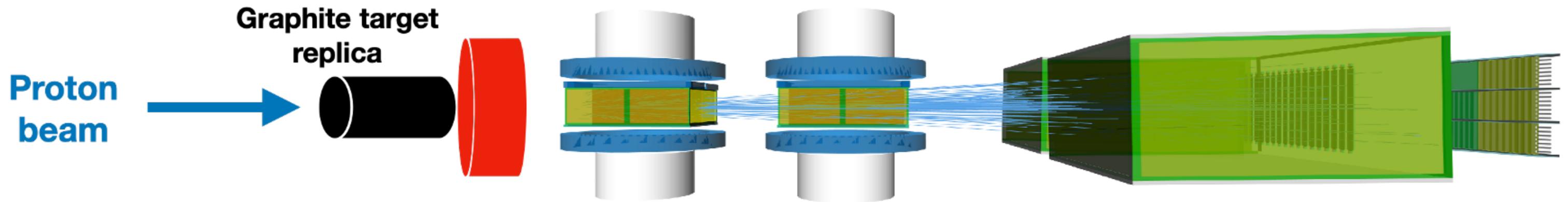


# Expériences des neutrinos sur accélérateurs

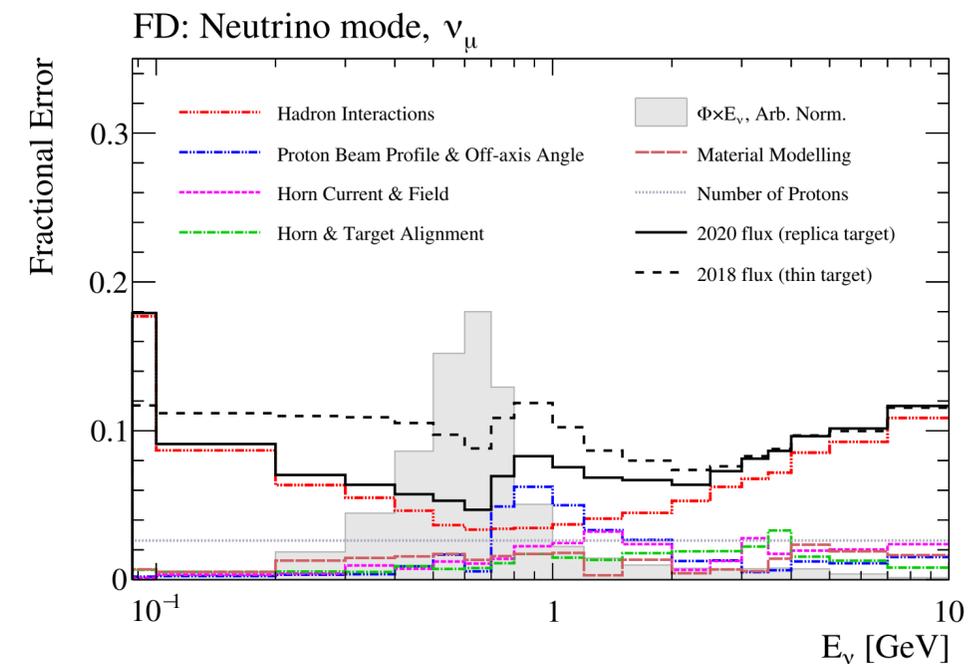


- Production de un faisceau de  $\nu_\mu$  ou de  $\bar{\nu}_\mu$
- Détection des neutrinos avant oscillation dans un détecteur proche → réduction des erreurs sur la connaissance du flux et des probabilités d'interactions de neutrinos → de 15% à <5%
- Détection de neutrinos au détecteur lointain où on observe la disparition des  $\nu_\mu$  et l'apparition des  $\nu_e$  → différences entre l'apparition de  $\nu_e$  et  $\bar{\nu}_e$  peuvent être expliquées par une violation de CP

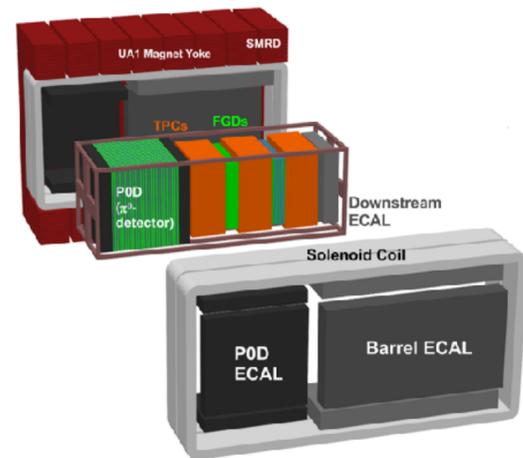
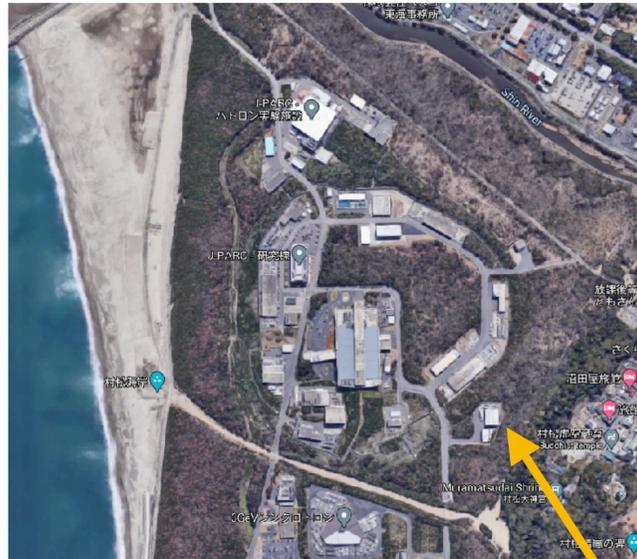
# NA61/SHINE @ CERN



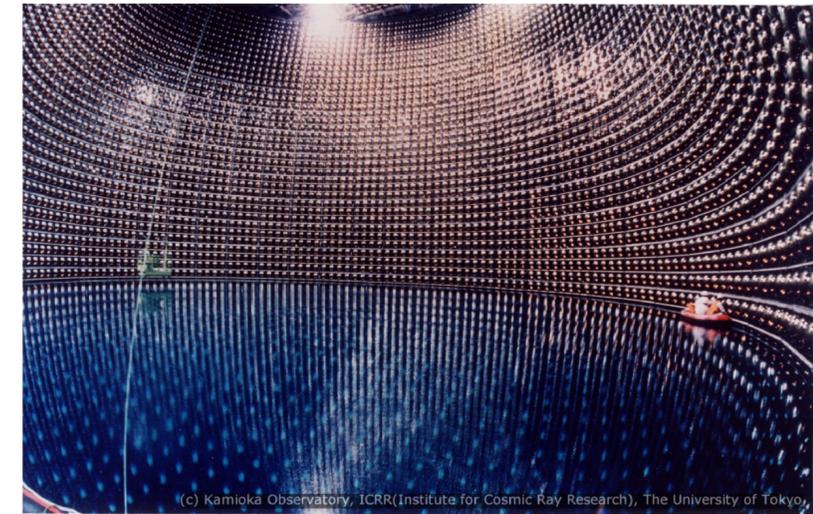
- Les faisceau des neutrinos sont produit par les interactions des protons sur une cible → ceci produit des pions qui se désintègrent en neutrinos muoniques
- L'incertitude dominant est du a la méconnaissance sur la production des pions
- NA61/SHINE expérience dédiée au CERN → réduction des incertitudes sur le flux des neutrinos ~5%



# Ce qu'on faisait (2010-2022)



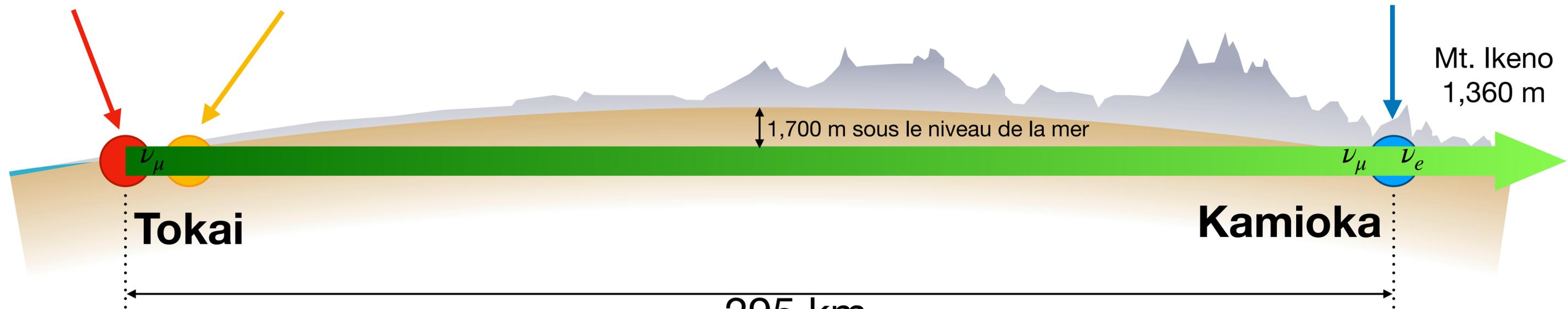
T2K



J-PARC

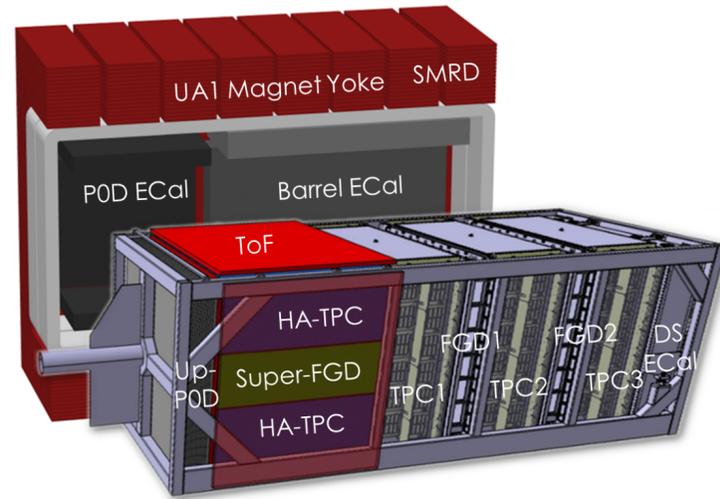
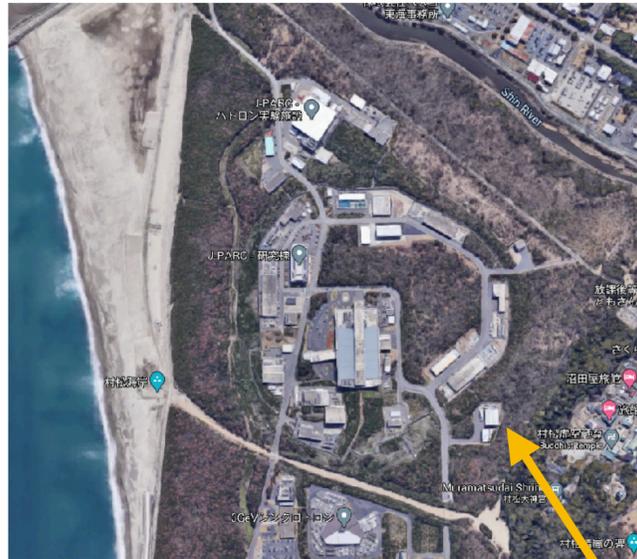
ND280

Super-Kamiokande

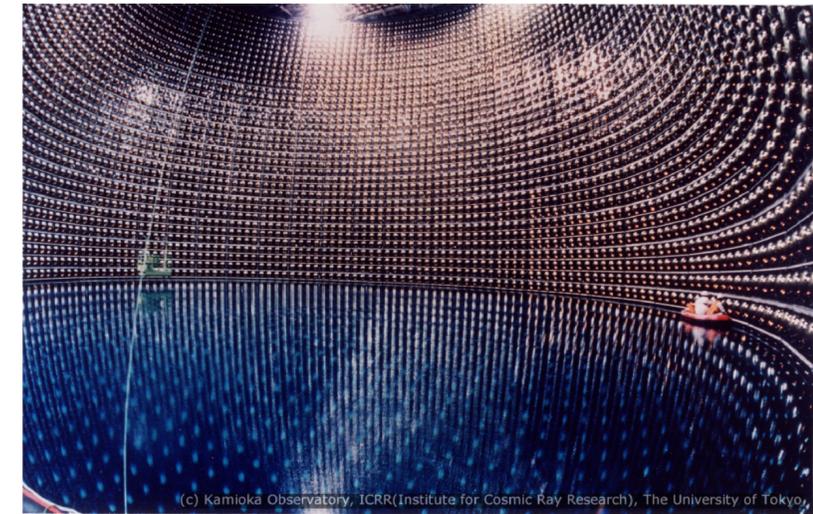


295 km

# Ce qu'on fait aujourd'hui



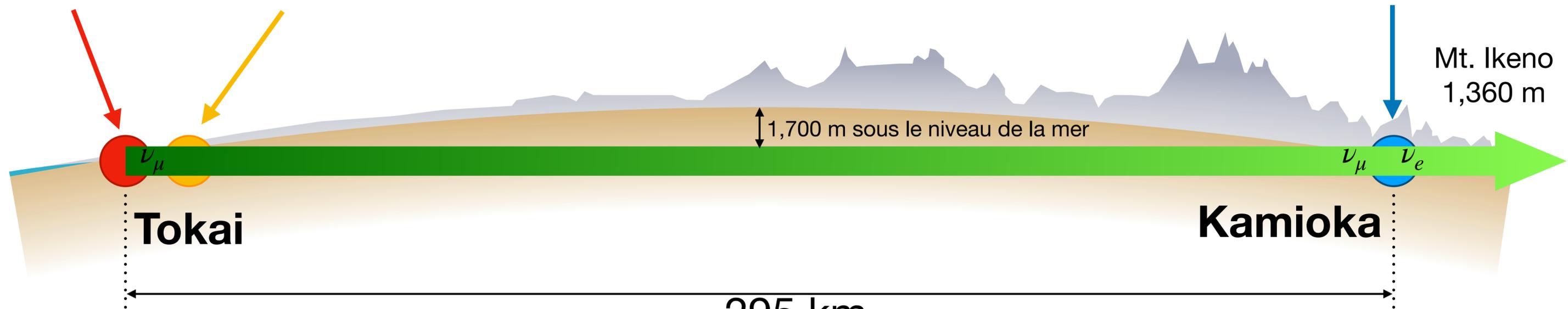
T2K



J-PARC

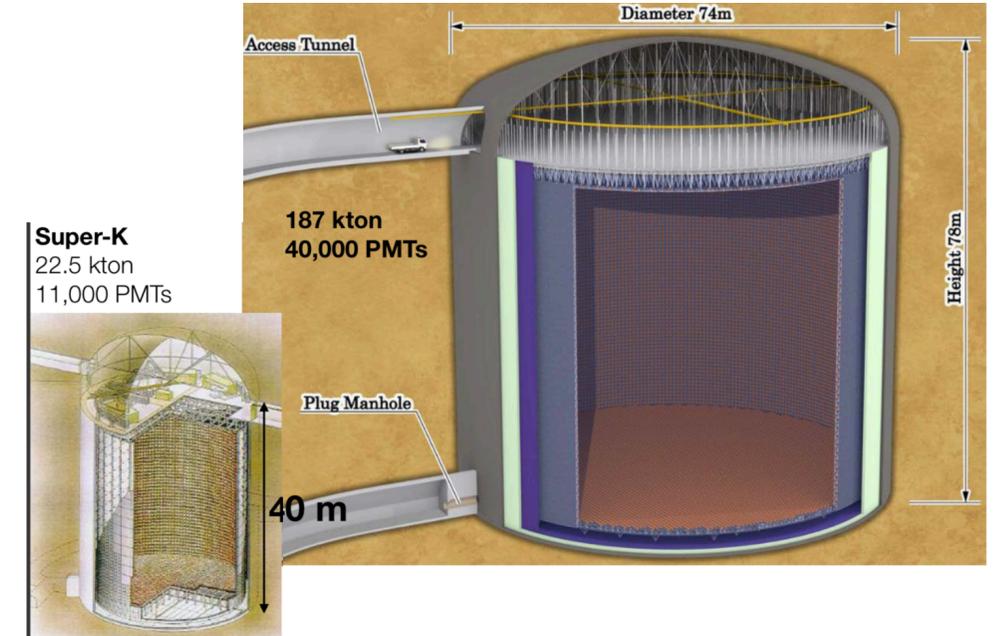
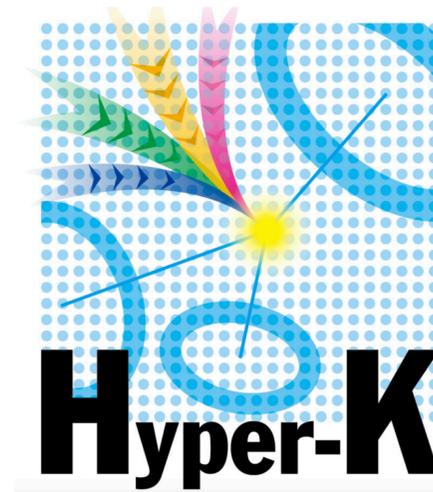
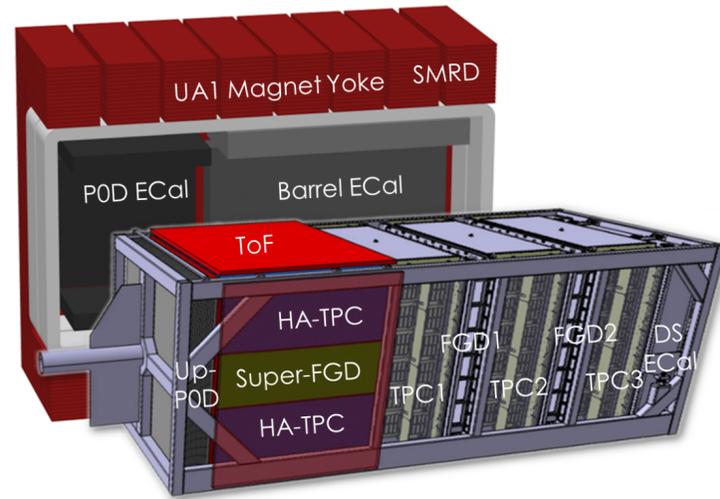
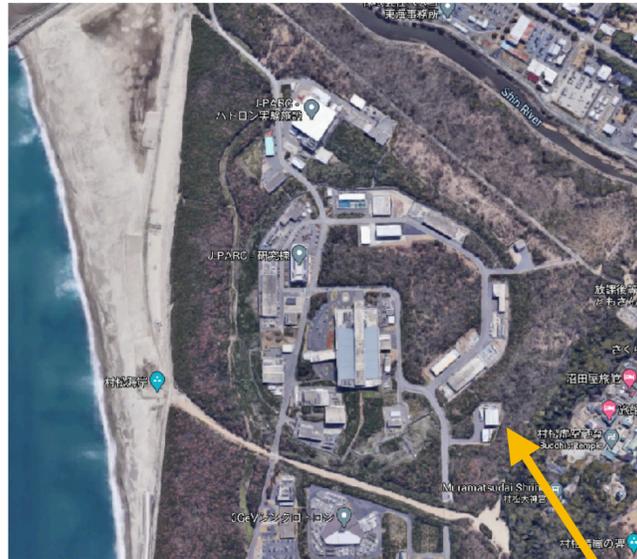
ND280-upgrade

Super-Kamiokande



295 km

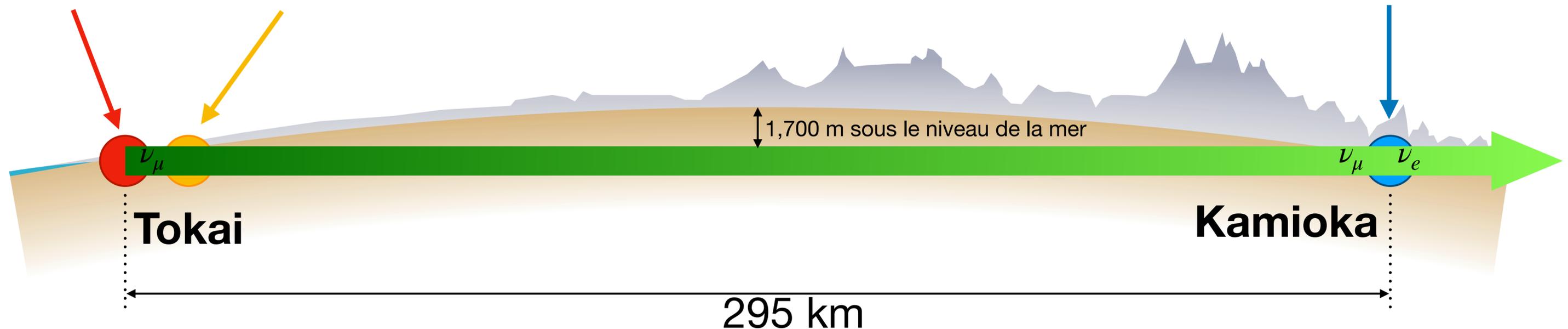
# Ce qu'on fera (2027)



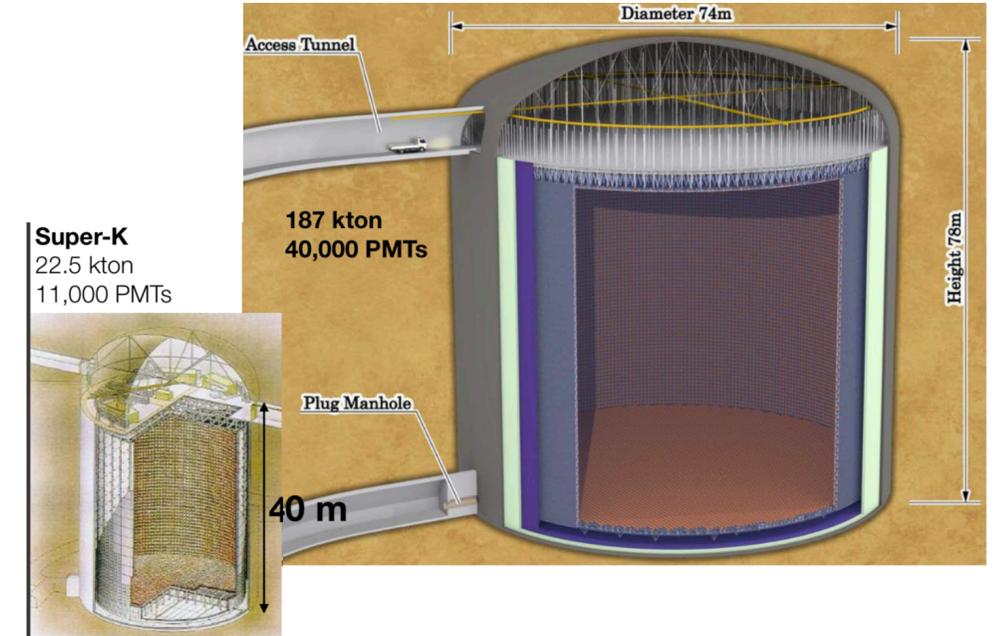
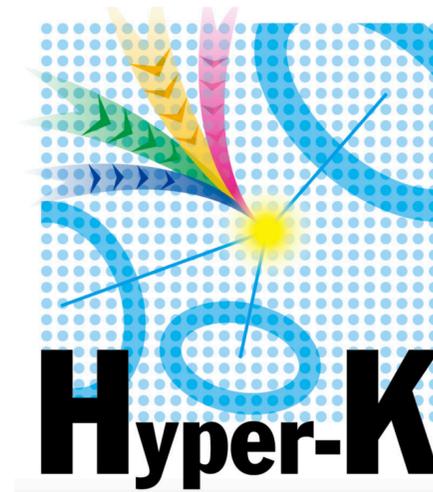
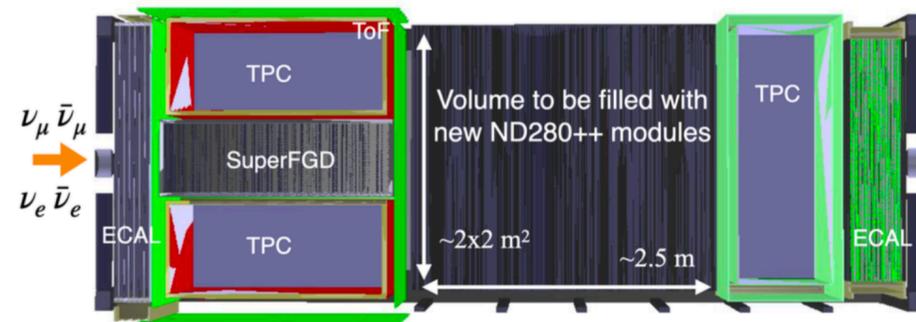
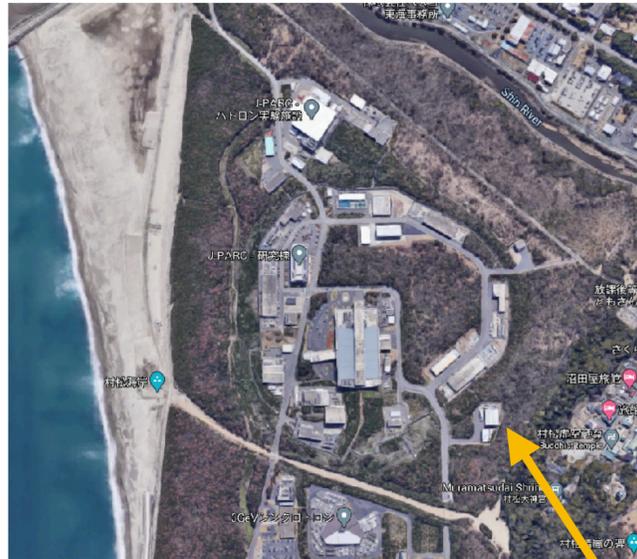
J-PARC

ND280-upgrade

Hyper-Kamiokande



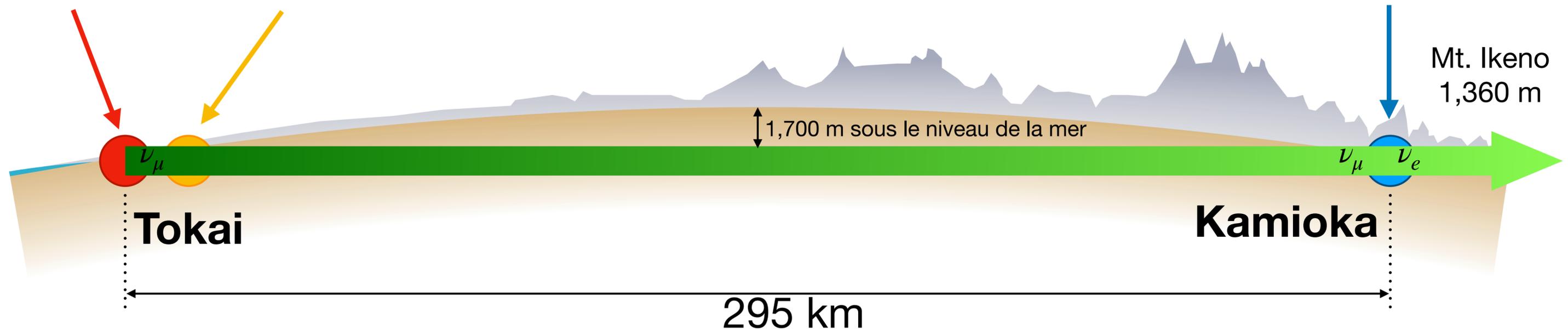
# Et puis encore (2030)



**J-PARC**

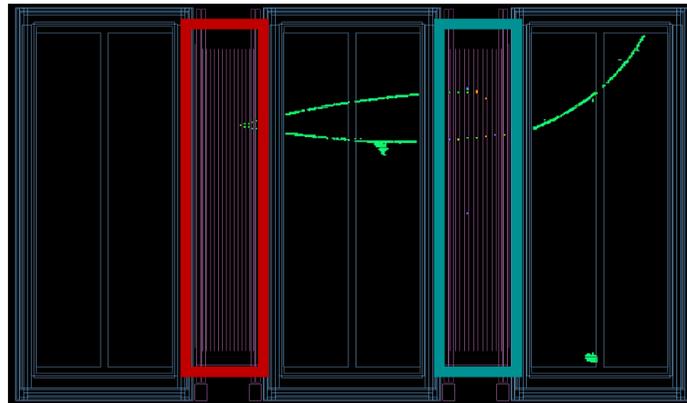
**ND280++**

**Hyper-Kamiokande**



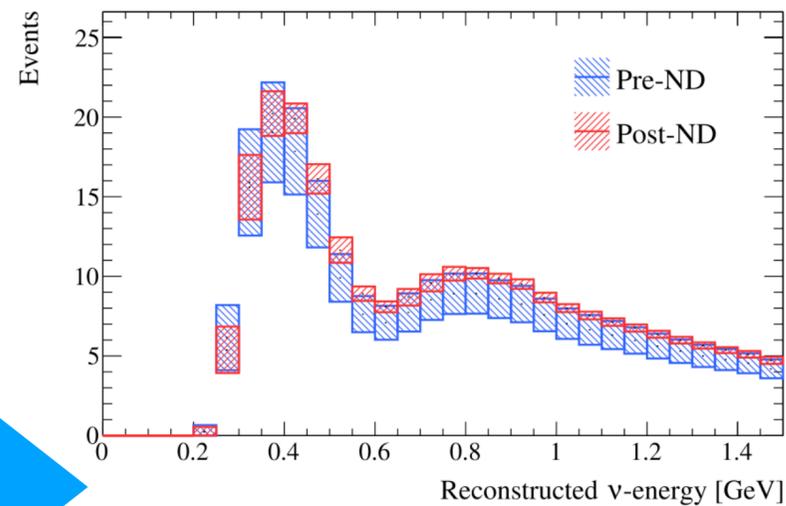
# Analyse des données dans T2K

Selection des neutrinos au détecteur proche (ND280) →  
~1% de  $\nu_e$ , ~99% de  $\nu_\mu$

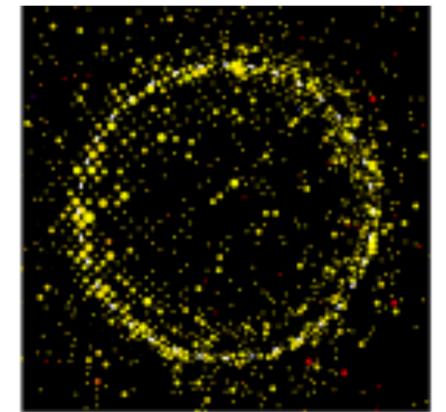


Réduction des incertitudes sur flux\*x-sec

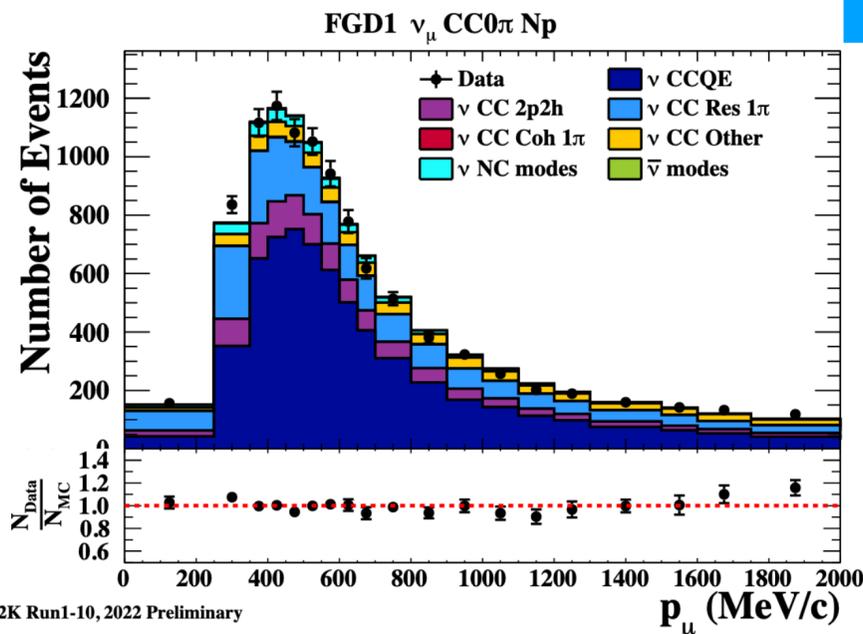
Spectre de  $\nu_\mu$  attendu au détecteur lointain



Selection des neutrinos au détecteur lointain (Super-K)  
~30% de  $\nu_e$  → apparition de  $\nu_e$

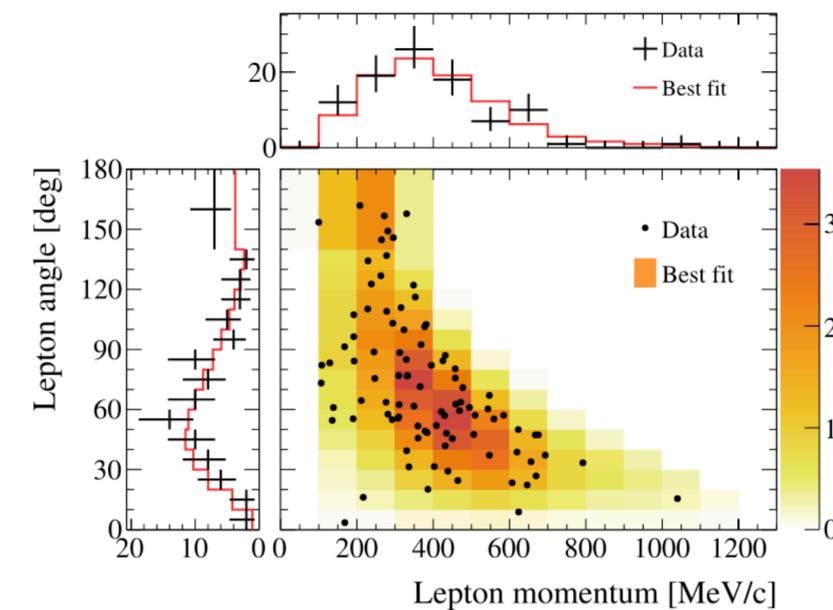


$\nu_e$ -like



T2K Run1-10, 2022 Preliminary

Sample	Pre-ND FIT error	Post-ND FIT error
FHC 1R $\mu$	11.1%	3.0%
RHC 1R $\mu$	11.3%	4.0%
FHC 1Re	13.0%	4.7 %
RHC 1Re	12.1%	5.9%
FHC 1Re 1d.e.	18.7%	14.3%

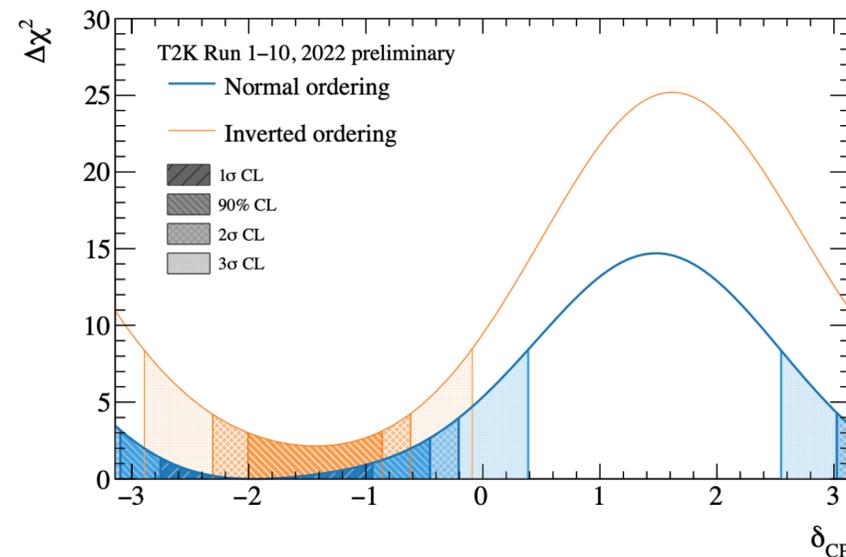
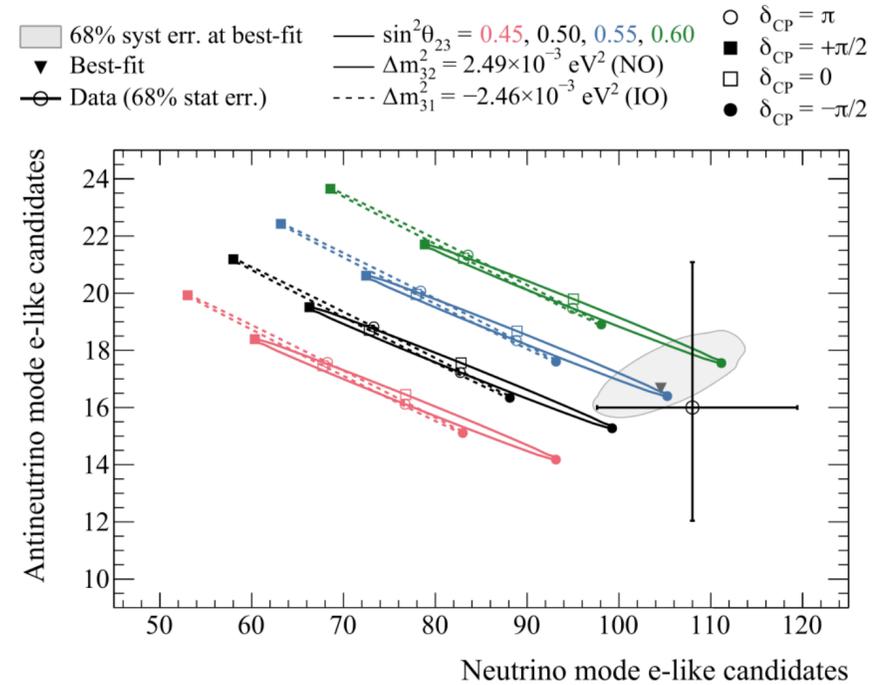


(b)  $\nu$ -mode 1Re

# Résultats d'oscillation de T2K

Sample		True $\delta_{CP}$ (rad.)				Data
		$-\pi/2$	0	$\pi/2$	$\pi$	
1R $\mu$	$\nu$ -mode	346.61	345.90	346.57	347.38	318
	$\bar{\nu}$ -mode	135.80	135.45	135.81	136.19	137
1Re	$\nu$ -mode	96.55	81.59	66.89	81.85	94
	$\bar{\nu}$ -mode	16.56	18.81	20.75	18.49	16
1Re1de	$\nu$ -mode	9.30	8.10	6.59	7.79	14

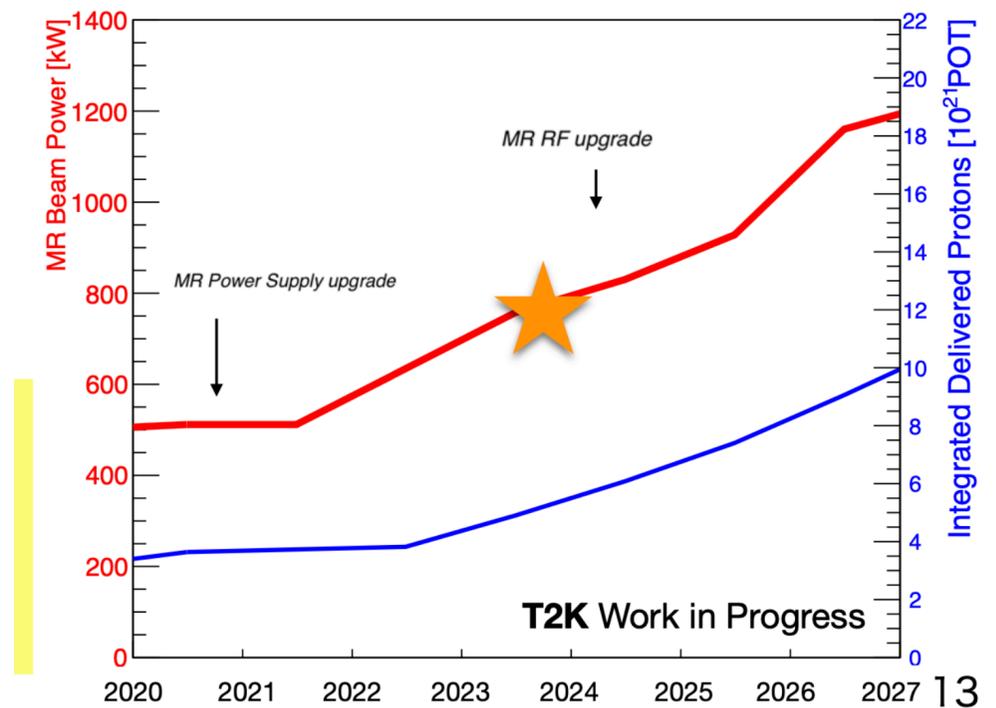
- Au détecteur lointain on observe l'apparition des neutrinos électroniques et des anti-neutrinos électroniques
- L'apparition de  $\nu_e$  et plus grand que celui de  $\bar{\nu}_e \rightarrow$  violation de CP ou fluctuation statistiques ?



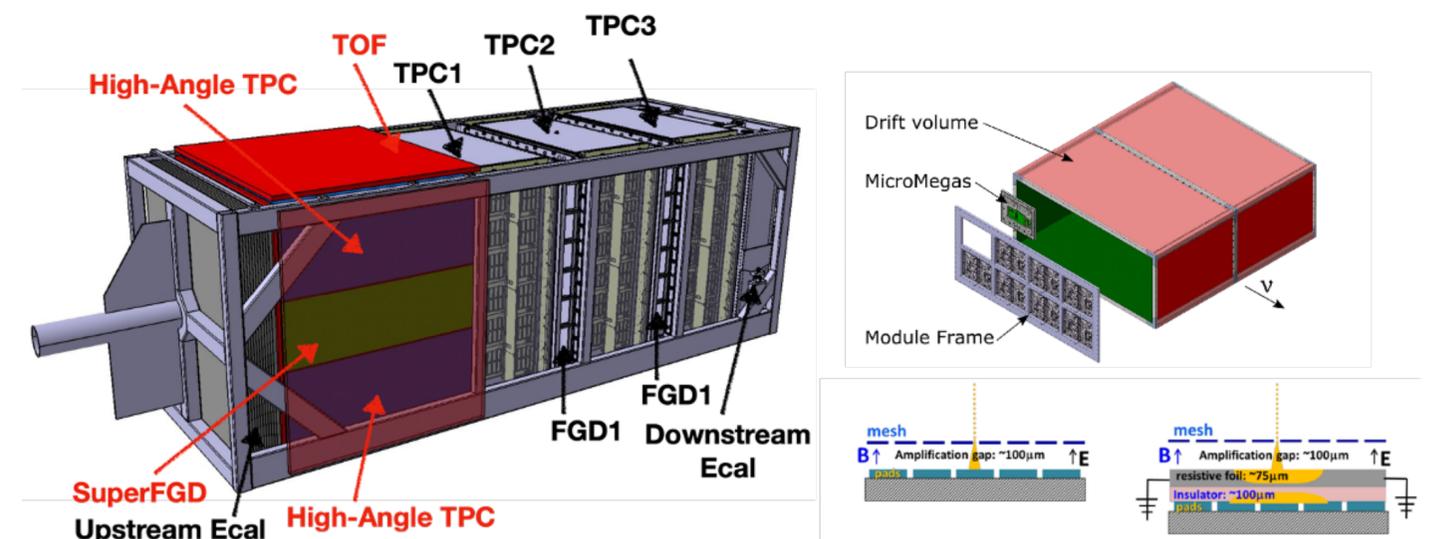
# T2K phase-II

- Nouvelle phase commencé en Decembre 2023
- Mise a niveau de l'accélérateur à J-PARC
  - Puissance de faisceau augmenté de 500 kW a 750 kW → à terme on veut arriver a 1.3 MW en 2027 (début de Hyper-Kamiokande)
  - Plus des statistique pour confirmer/rejeter les indication de violation de CP observé par T2K
- En parallèle → mise a niveau du détecteur proche ND280 pour mieux étudier les interactions de neutrinos et réduire les incertitudes systématiques pour T2K et pour HK

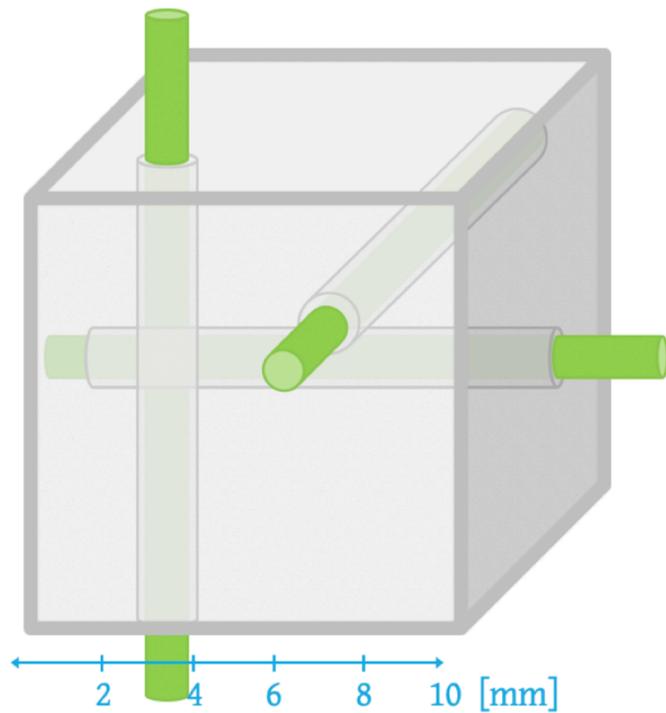
T2K Projected POT (Protons-On-Target)



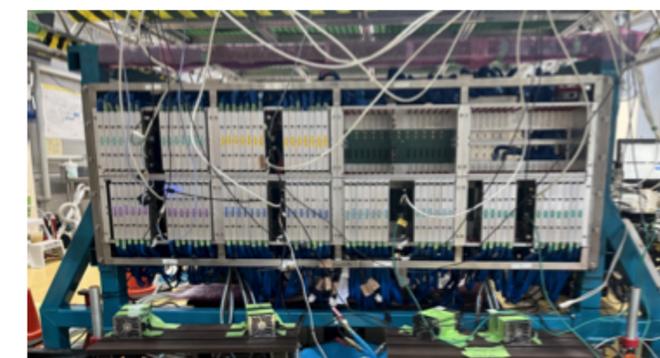
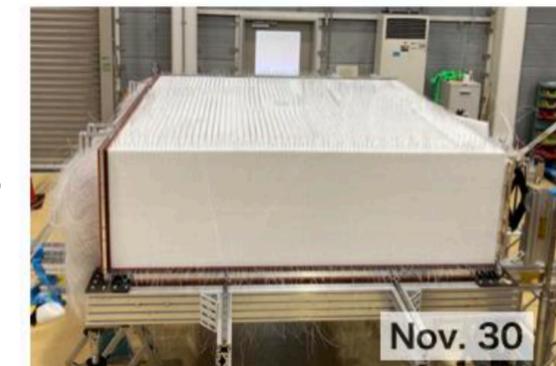
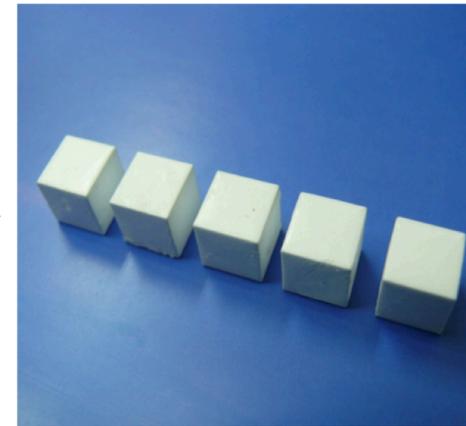
- Cible très granulaire → Super-FGD (2 millions de cubes de scintillateur plastique)
- 2 Chambres a projection temporelle a haute angle (HA-TPC)
- Détecteurs de temps de vol (TOF)



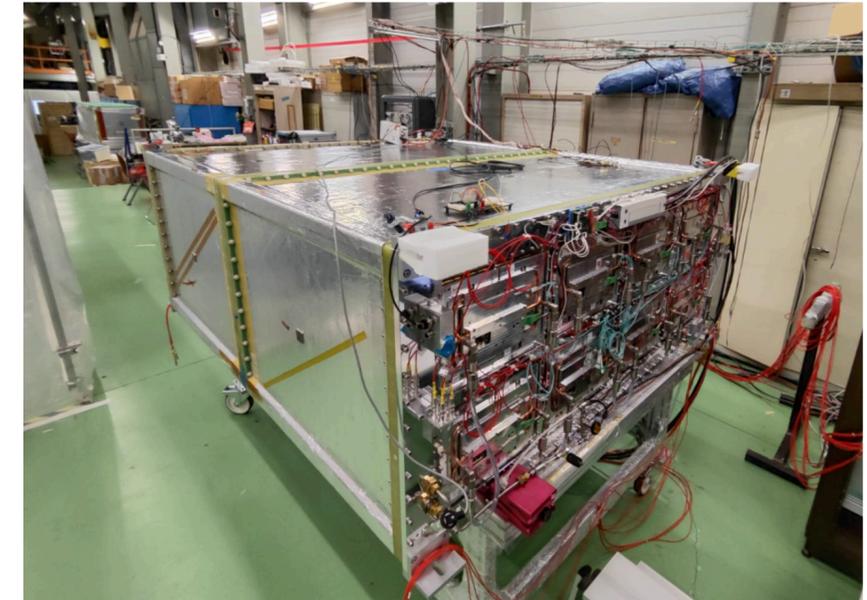
# Production et assemblage du Super-FGD



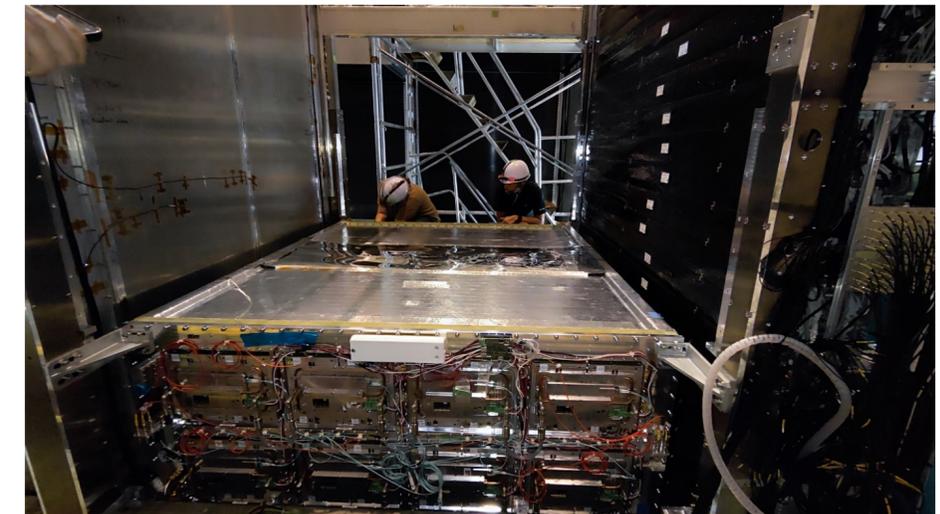
- 2 millions des cubes de scintillateur plastique isolés optiquement
- 3 fibres dans chaque cube → 3D readout



# High-Angle TPCs

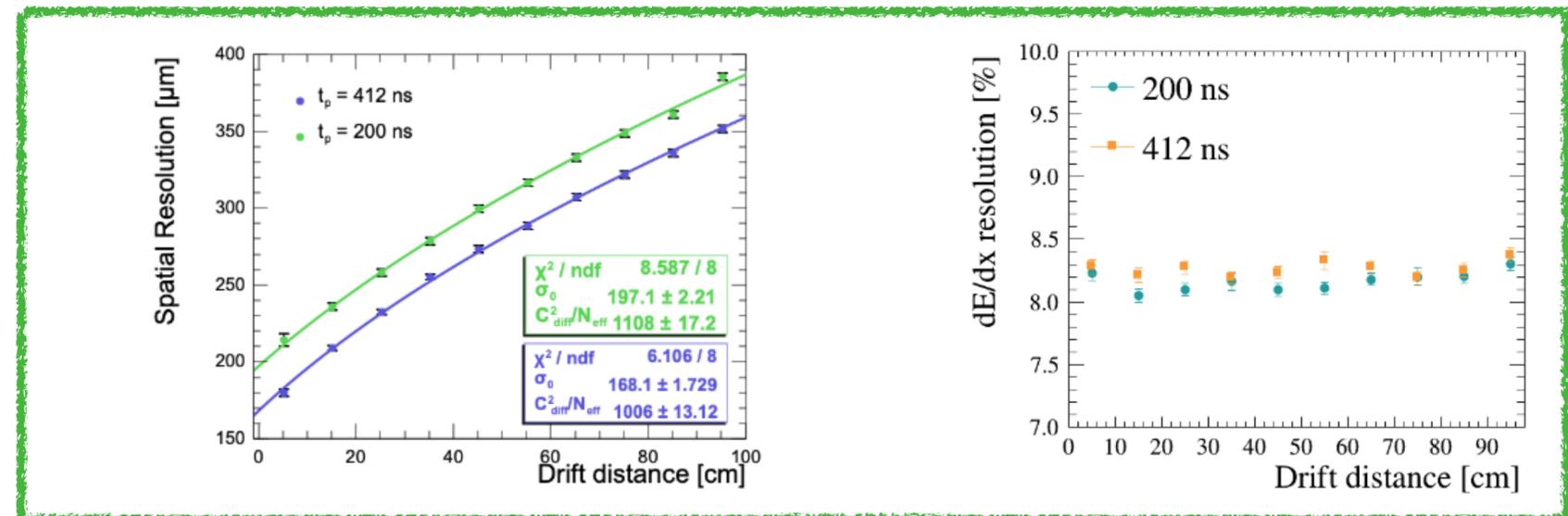
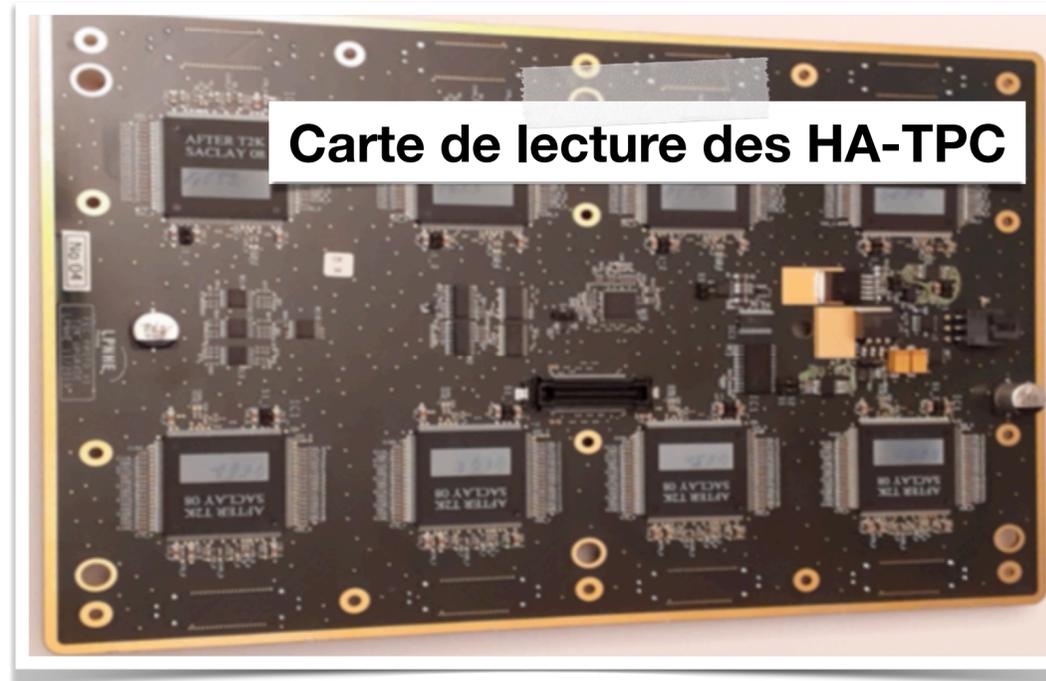


- Assemblage et tests des HATPCs au CERN
- Expedition au Japon
- Installation des HA-TPCs en Septembre 2023 et Avril 2024



# HA-TPCs au LPNHE

- Au LPNHE on a produit les carte de lecture des HA-TPC → 72 cartes installés
- Responsable du développement de l'acquisition des données (DAQ)
- Développement des algorithmes des reconstruction pendant plusieurs campagnes de test beam au CERN et à DESY

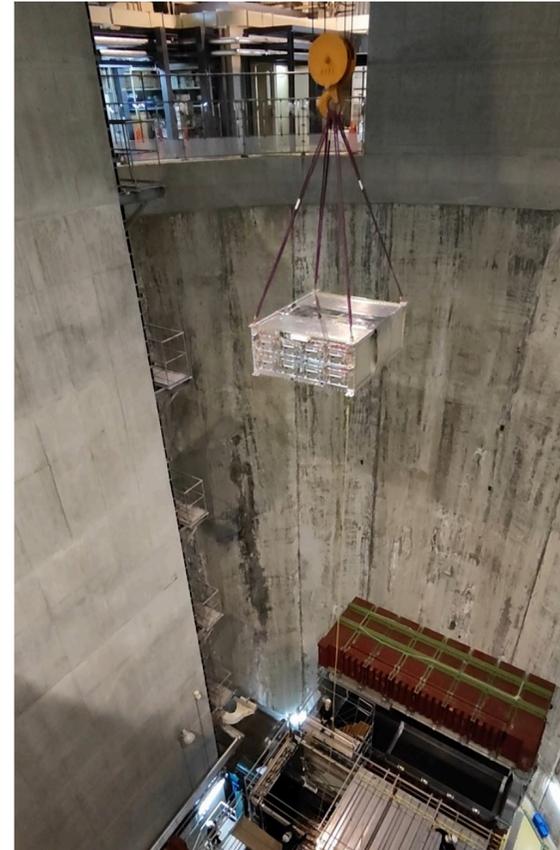


# Installation à J-PARC

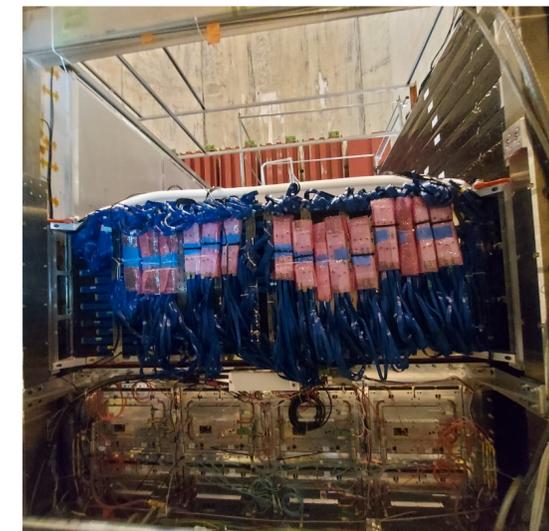
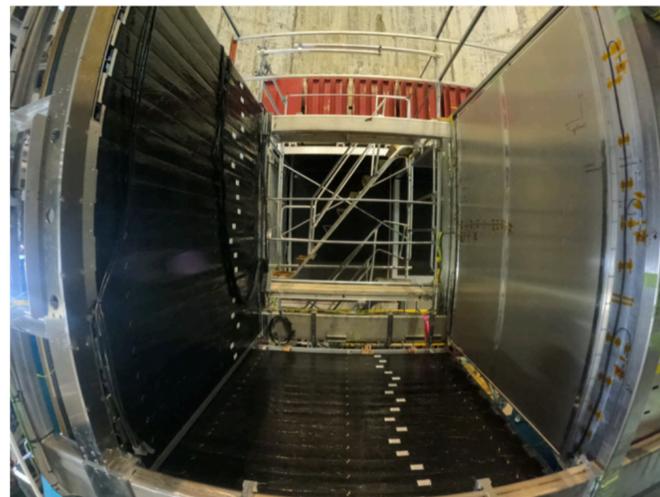
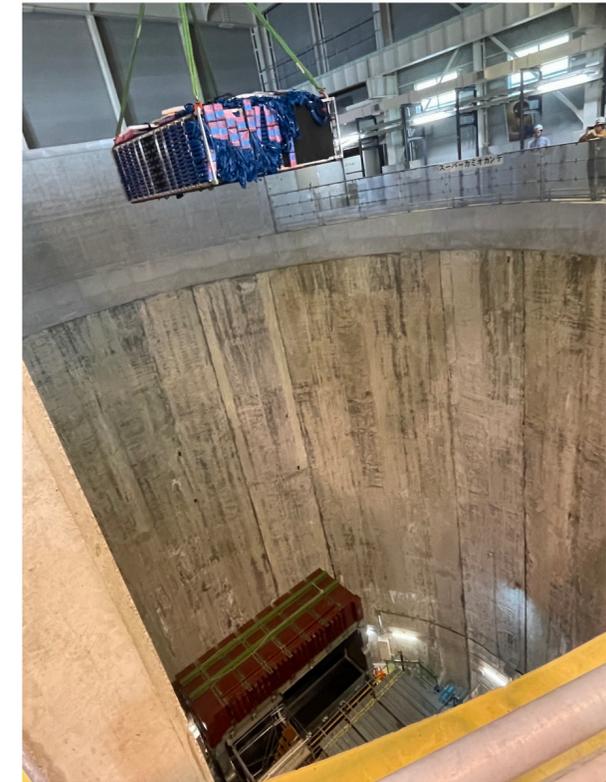
TOF installation (July 2023)



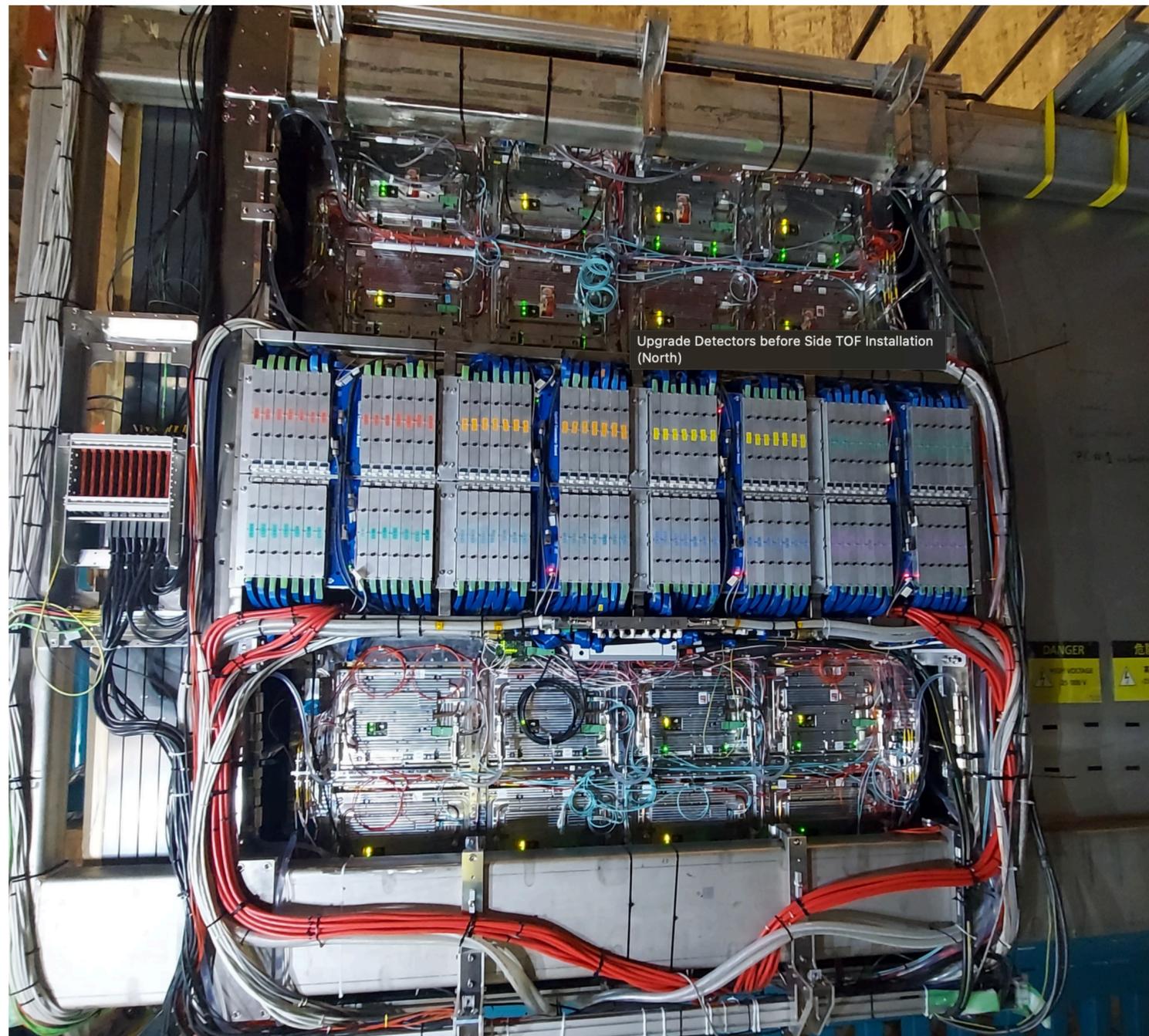
Bottom TPC installation (September 2023)



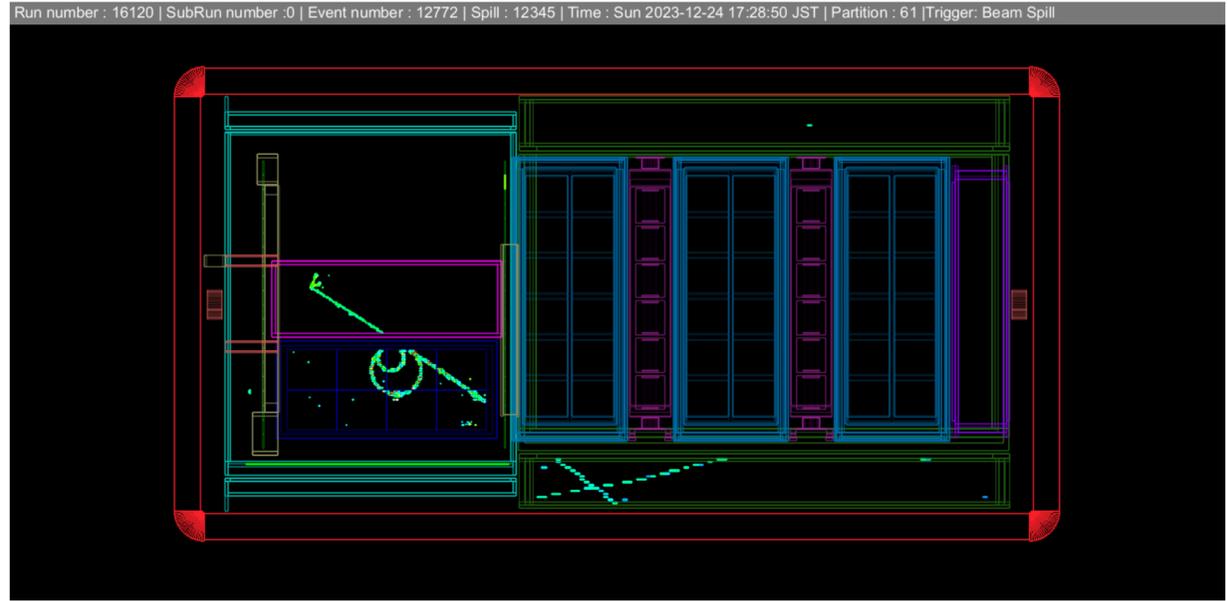
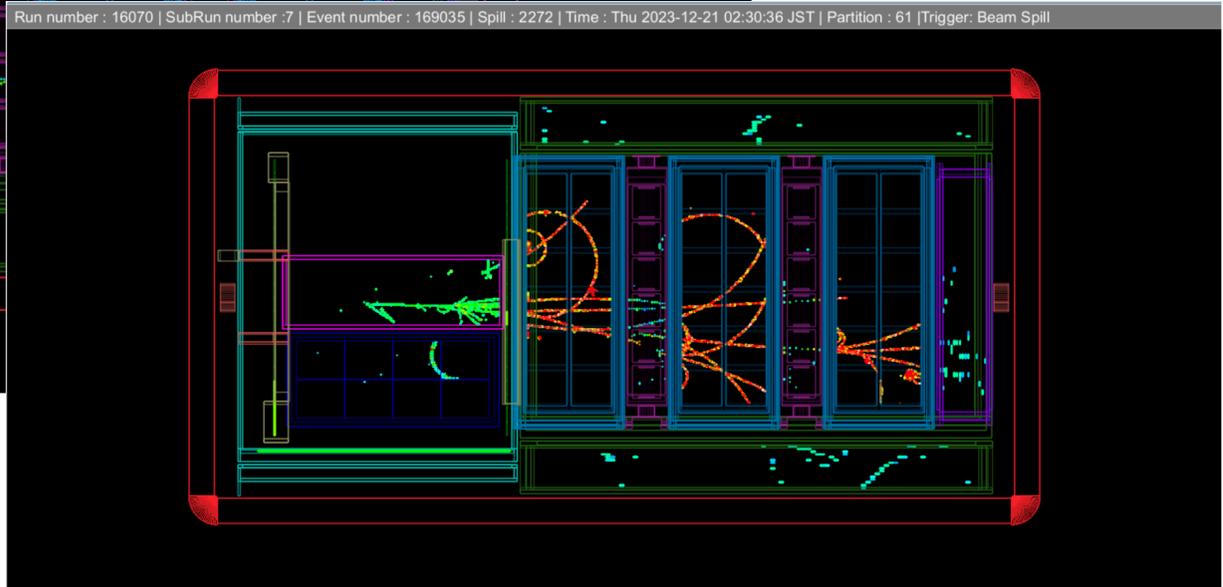
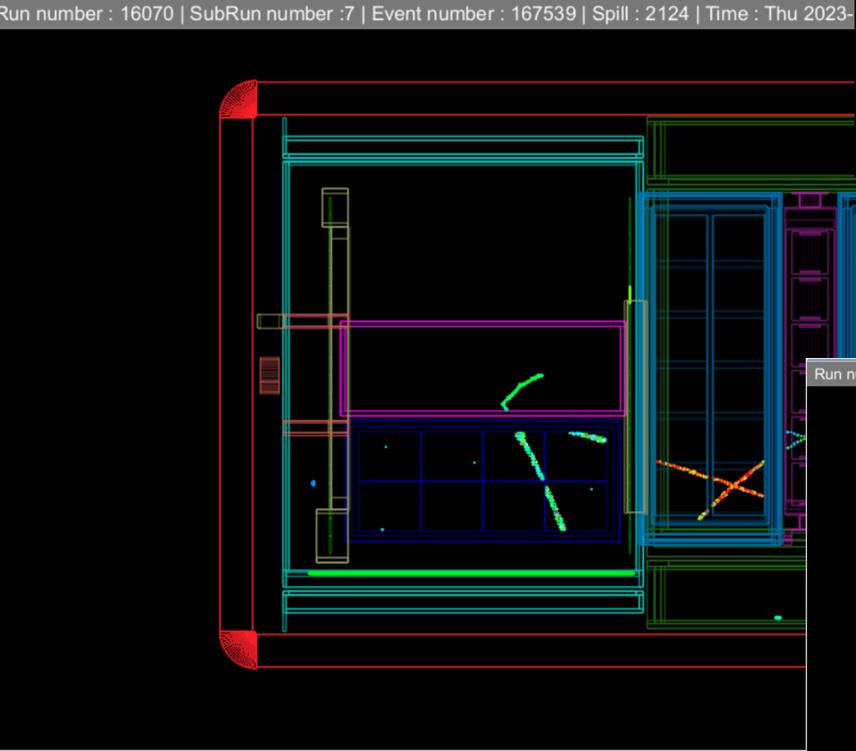
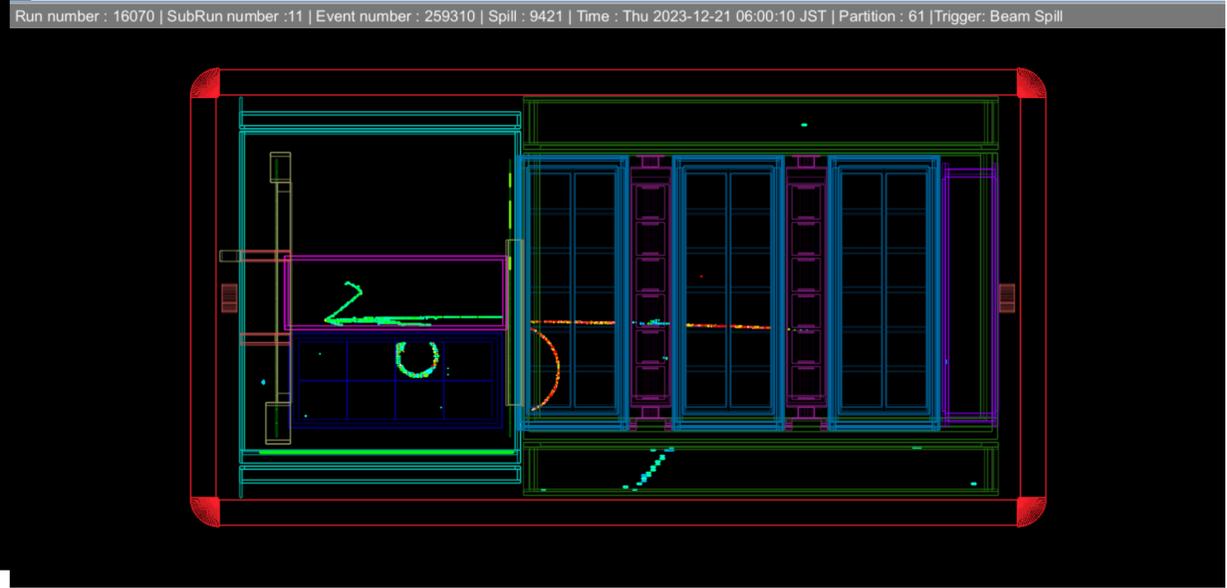
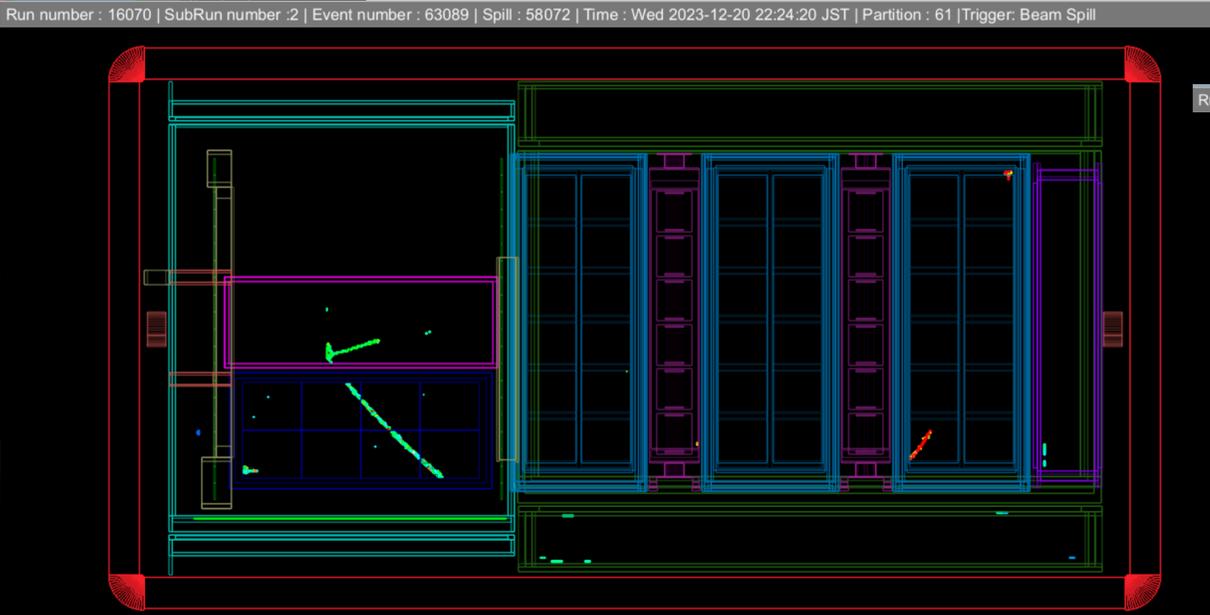
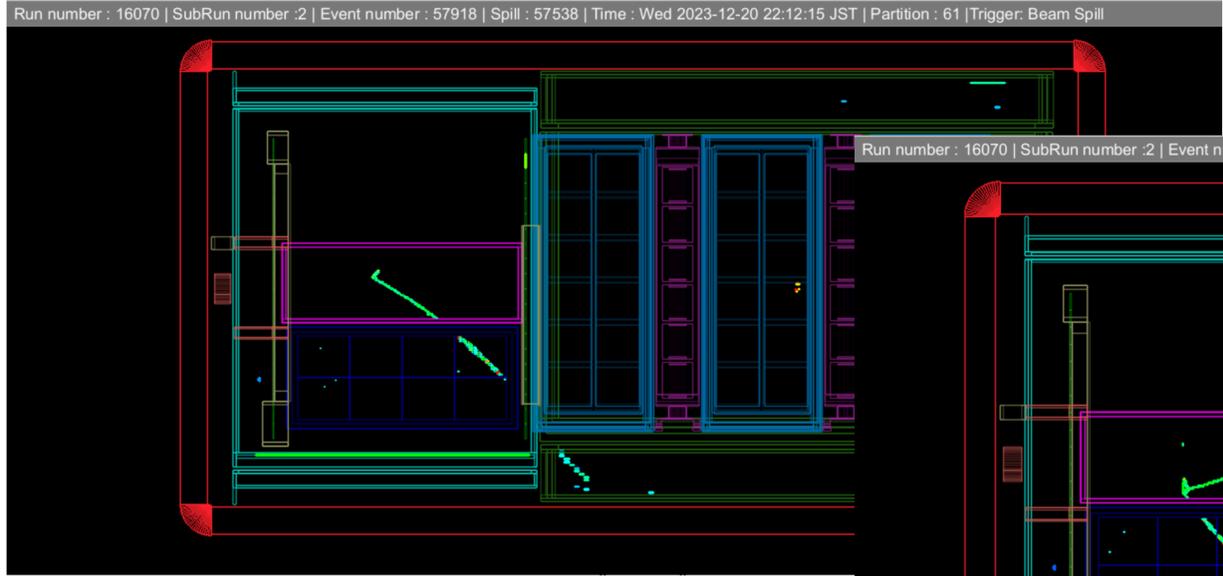
Super-FGD installation (October 2023)



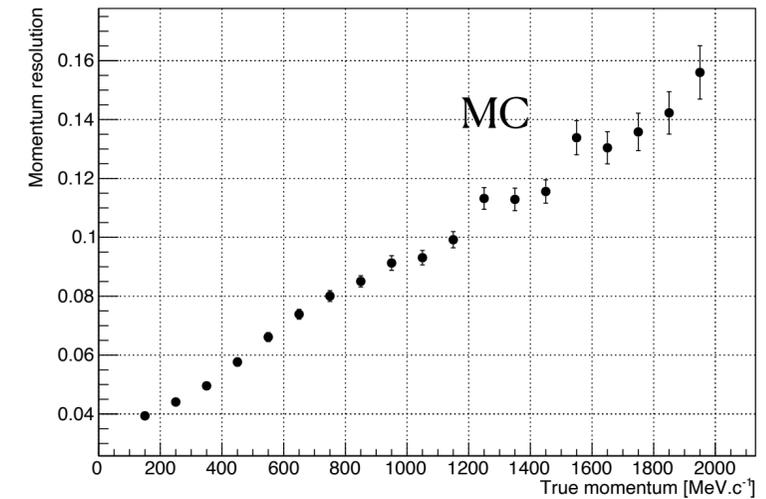
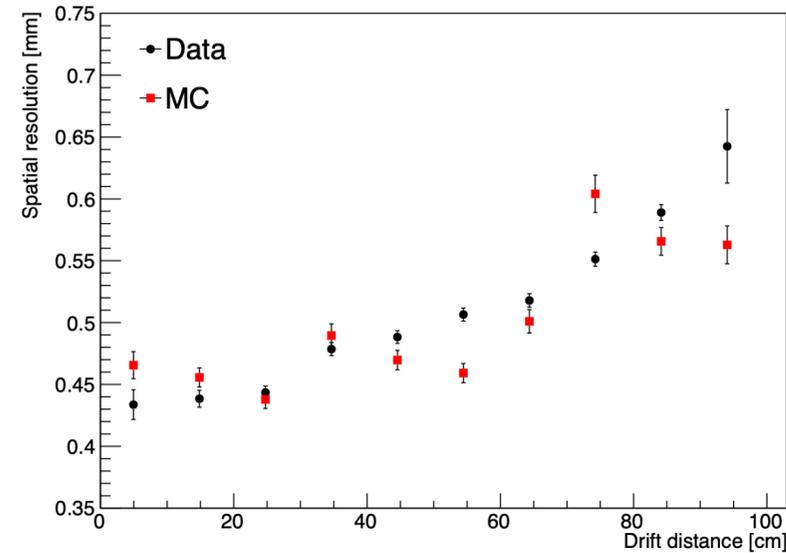
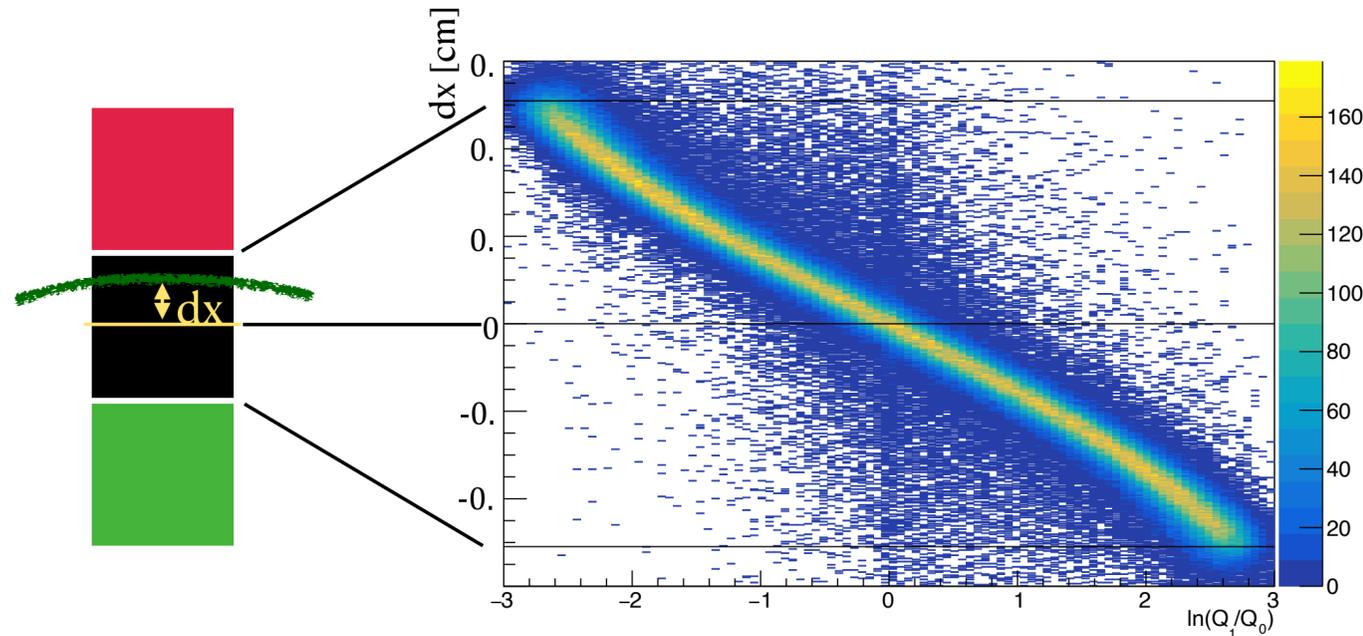
# Détecteurs installés à ND280



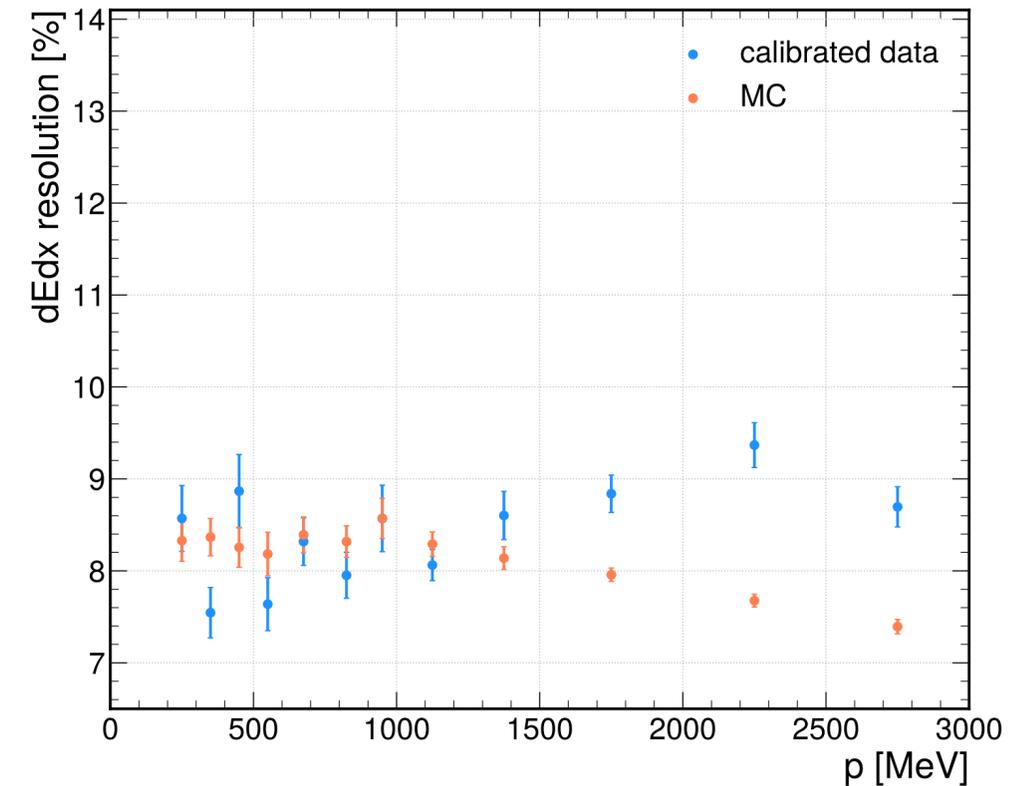
# Interactions des neutrinos (Dec 2023)



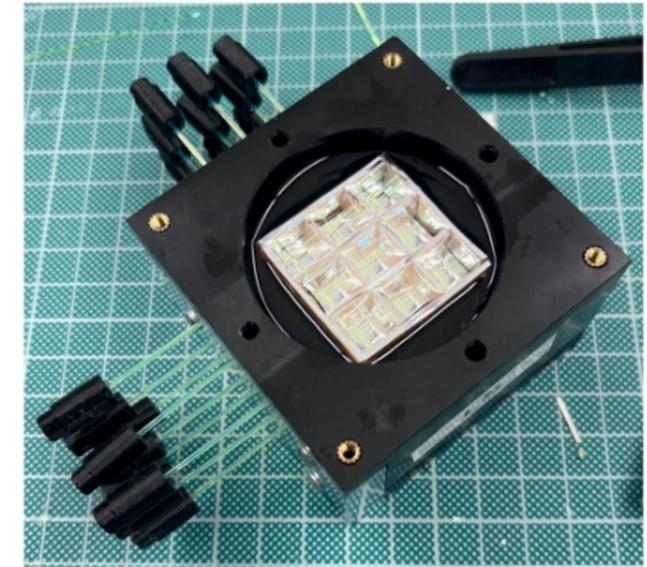
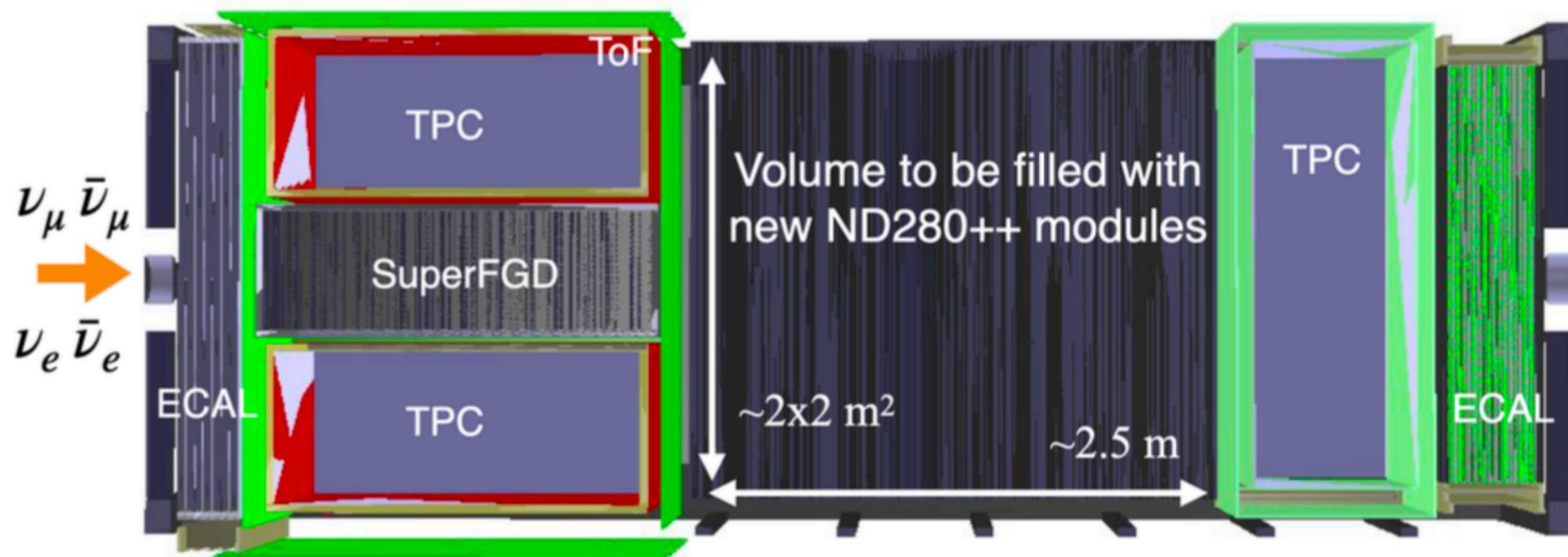
# Performances des HATPCs à J-PARC



- Performances avec les premières données cosmiques prise a J-PARC → bon accord entre données et simulations
- Plus des détails dans les poster de Anaelle, Ulysse et Lavinia



# ND280++ pour Hyper-K

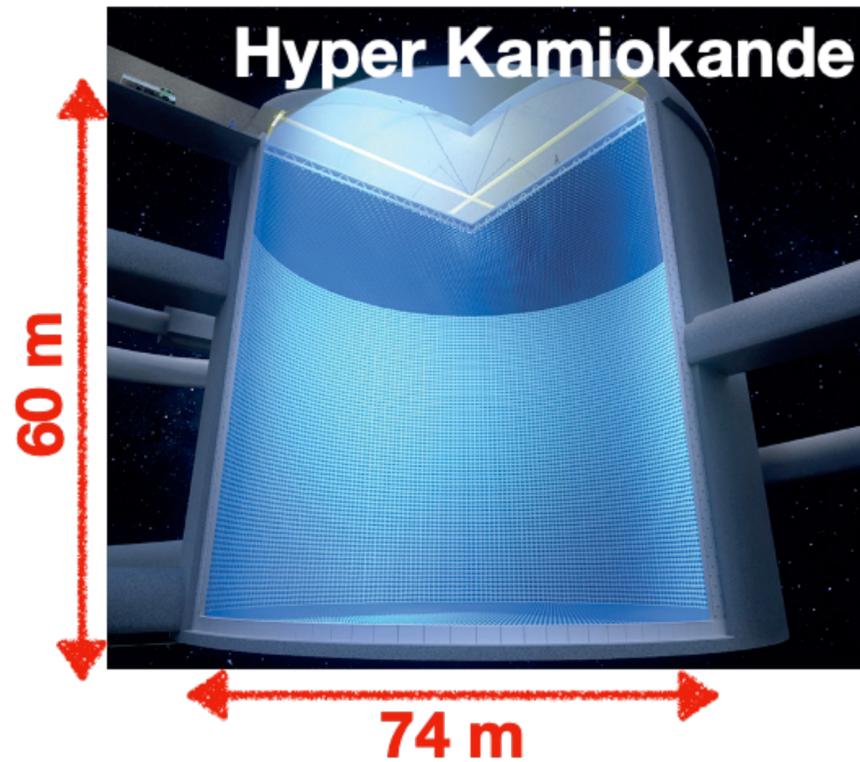


Water-Based Liquid Scintillator prototype at ETH Zurich

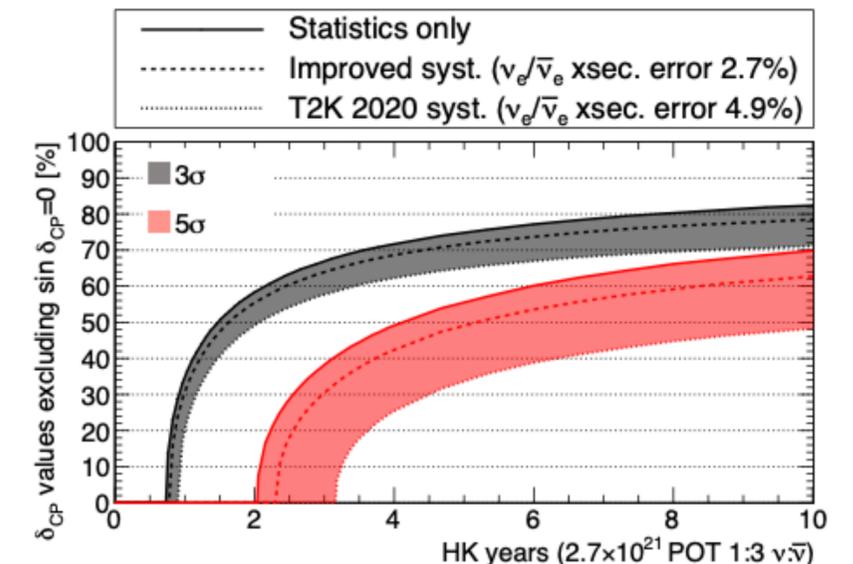
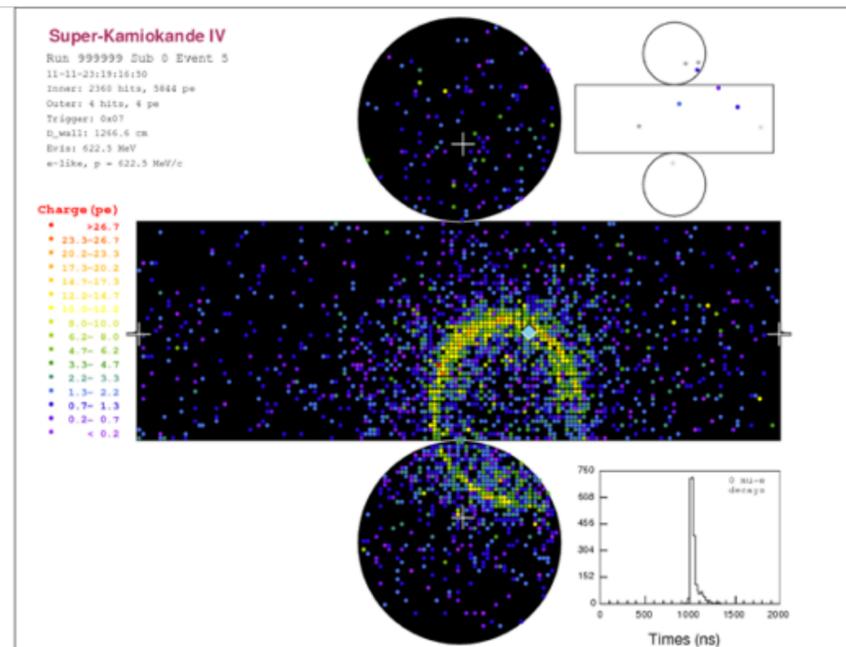
PRCI avec ETHZ soumis →  
Marco “J’ai une salle au sous-sol sans  
fenêtres que personne veut utiliser”

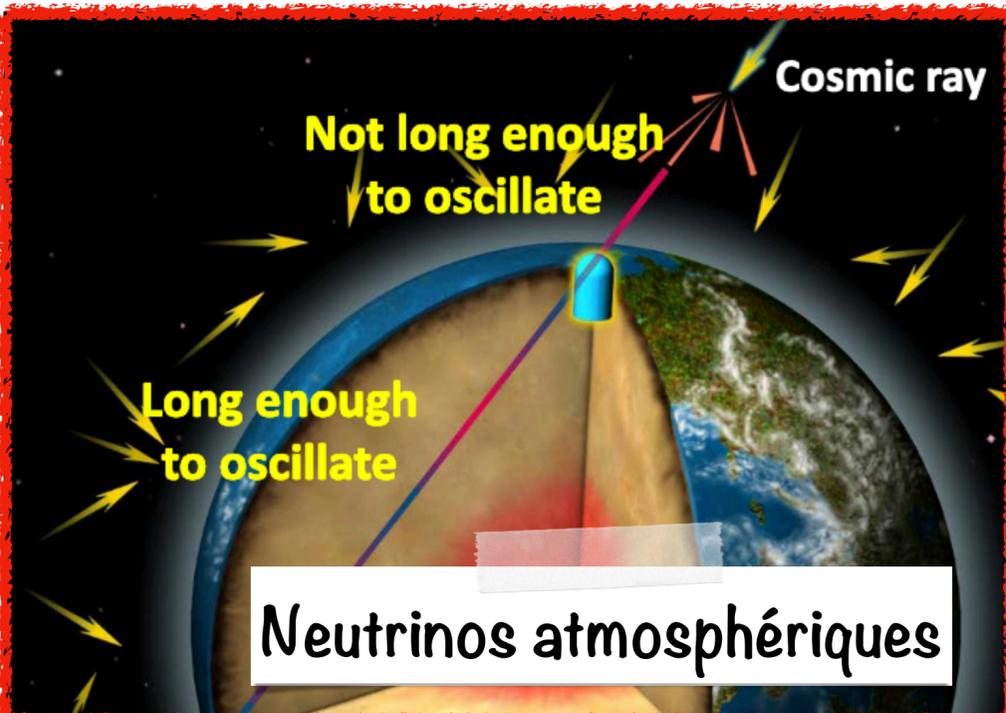
- ND280 sera aussi le détecteur proche pour Hyper-Kamiokande
- Grâce à son design modulaire et à ce qu’on apprendra avec ND280 on pourra faire d’autres upgrades pour la phase des mesures de haute précision avec Hyper-K → détecteur de ~10 ton avec des nouvelles technologies pour améliorer la sensibilité de Hyper-K
  - Une fois finalisé l’installation de la mise à niveau de ND280 on commence à collaborer avec d’autres groupes européens dans T2K/HK pour un R&D pour ND280++

# Hyper-Kamiokande



- Nouvelle génération de détecteur Cherenkov a eau au Japon
- 8 fois plus grande que Super-Kamiokande
- Expérience plus sensible a la violation de CP dans le secteur leptonique → plus des details dans le poster de Claire
- Construction en cours à Kamioka

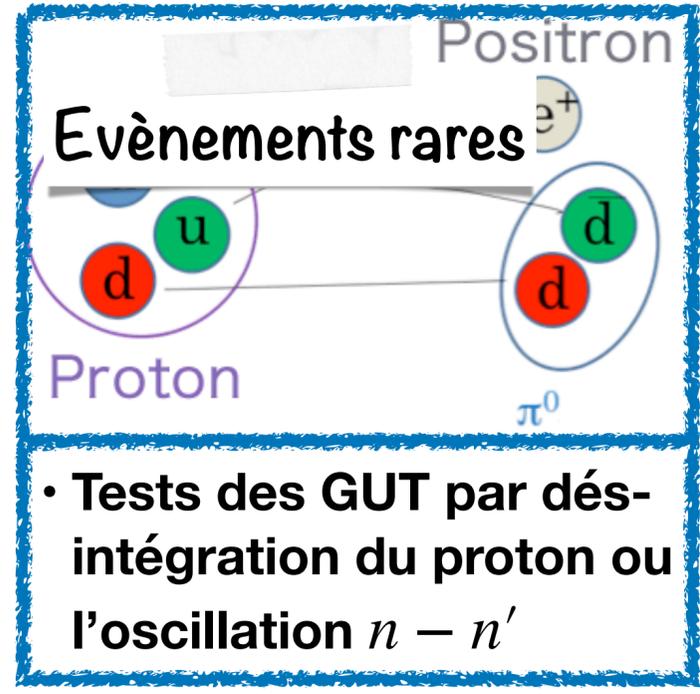




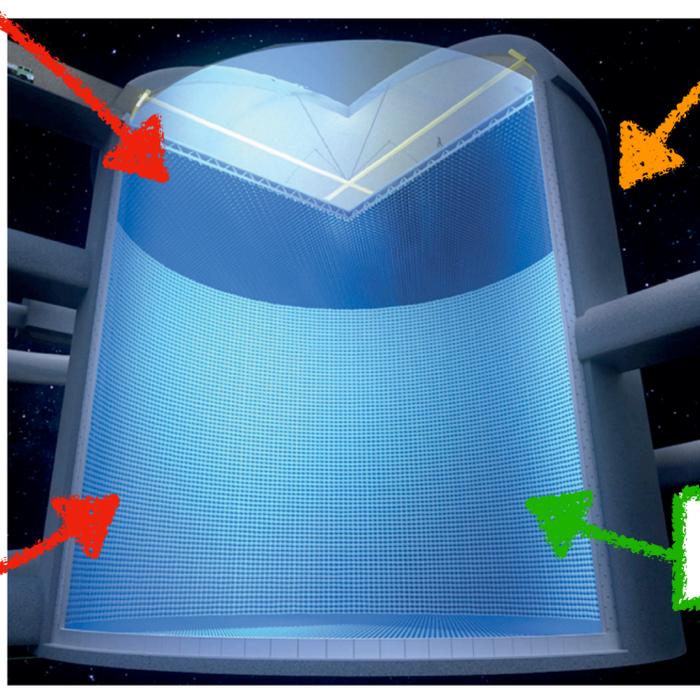
- Observation de la violation CP pour les leptons à  $5\sigma$
- Mesure précise de  $\delta_{CP}$
- Sensibilité à la hiérarchie de masses



Neutrinos d'accélérateur (J-PARC)

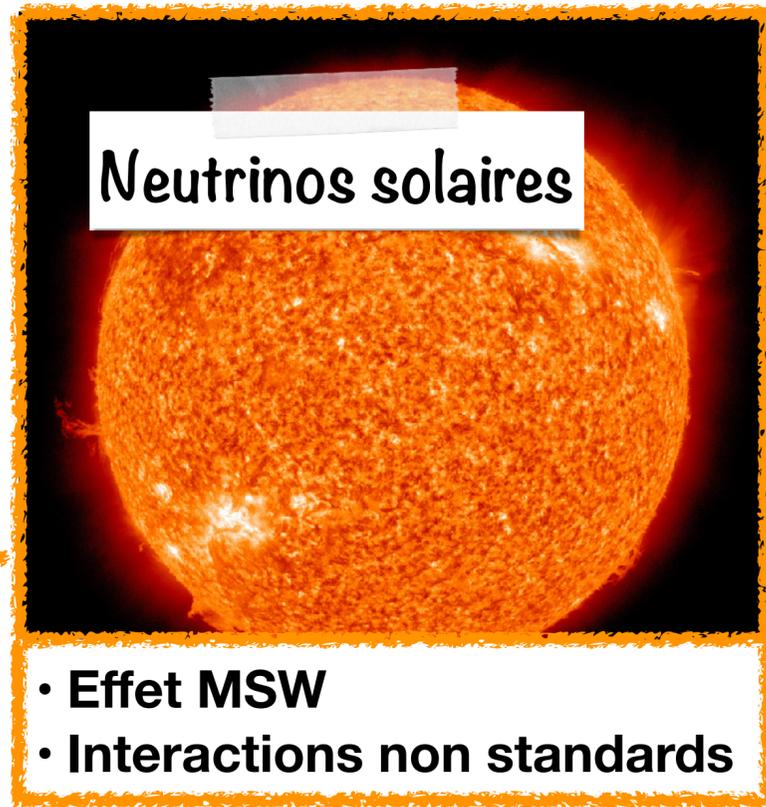


$\nu_e$   $\nu_e$   
 $\nu_\mu$   $\bar{\nu}_\mu$

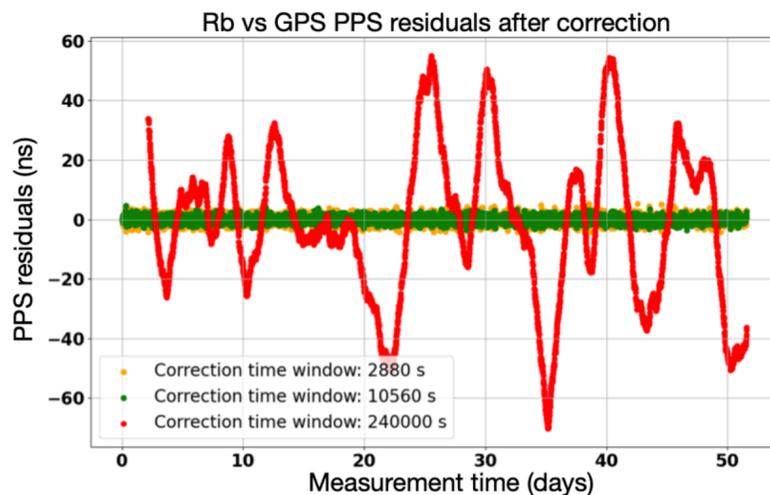
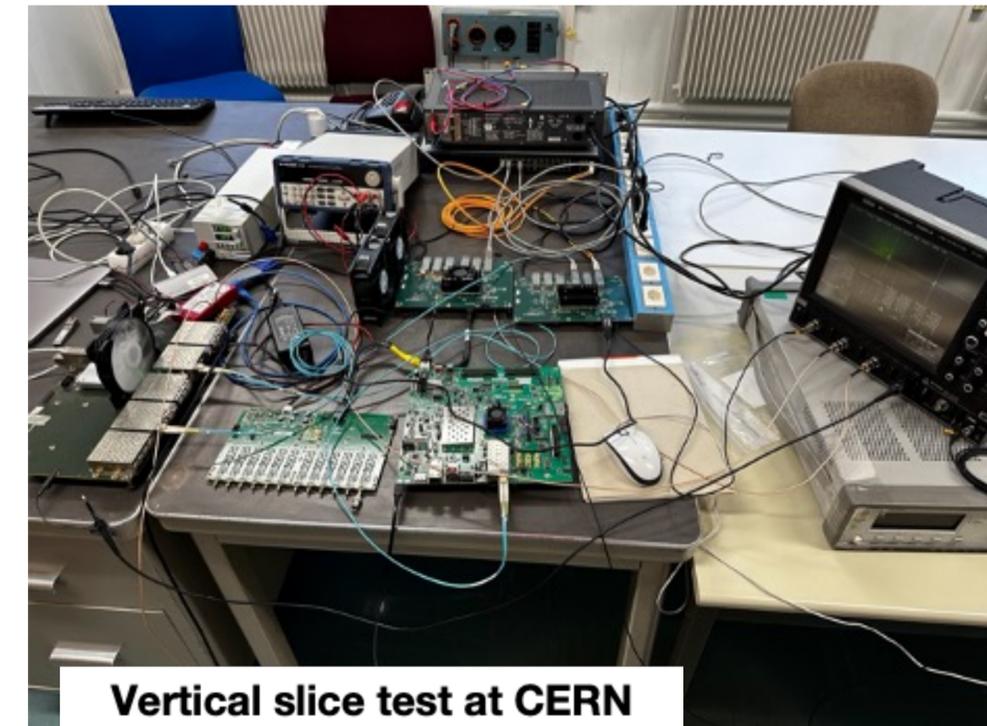
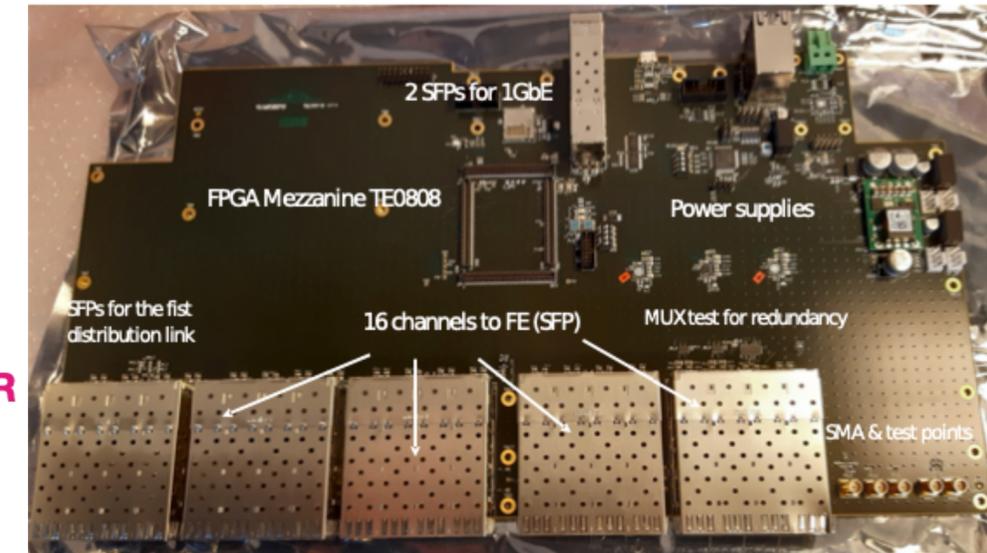
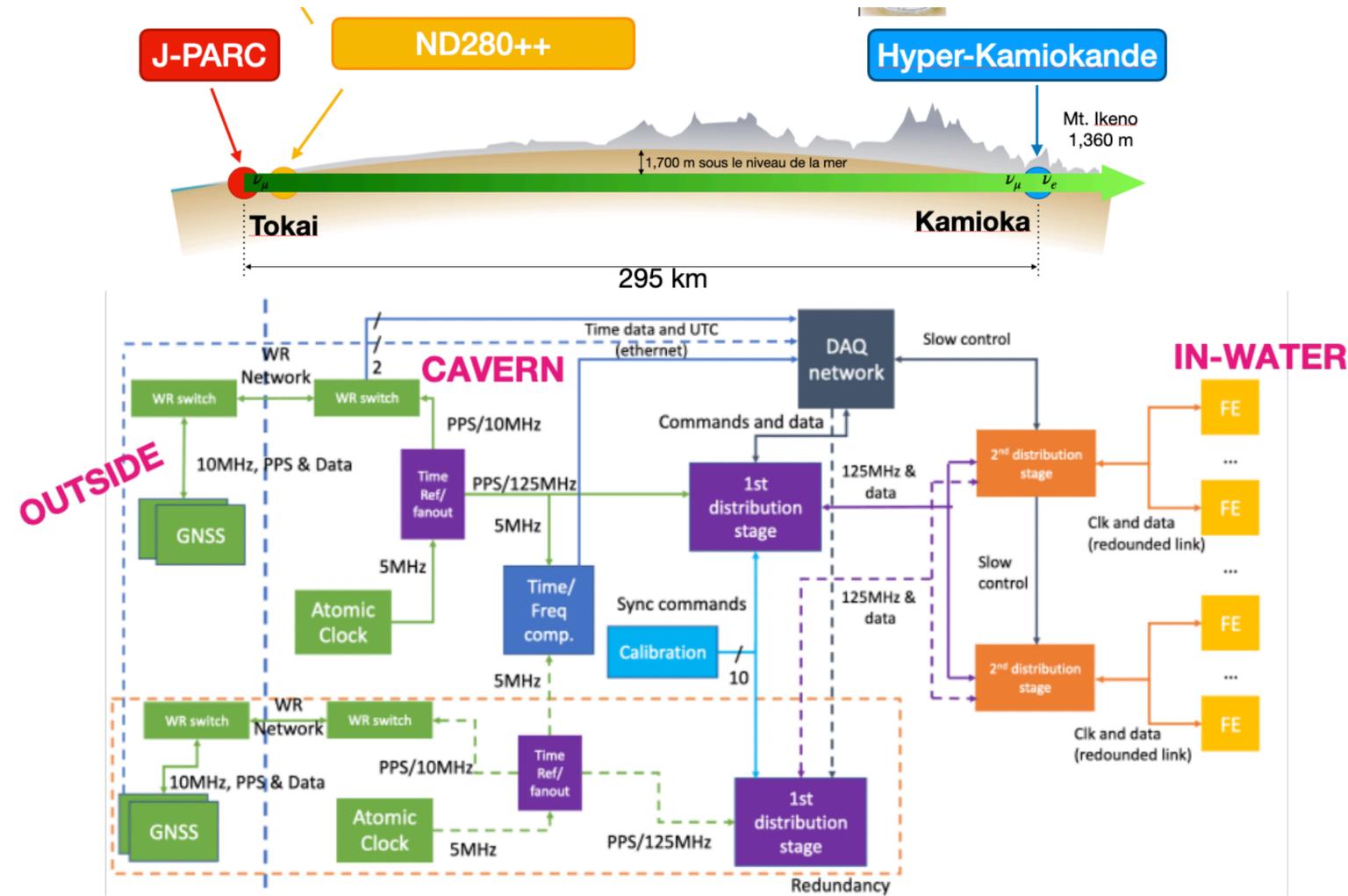


$\nu_e$   $\nu_e$   
 $\nu_\mu$   $\bar{\nu}_\mu$

$\nu_e$



# Systeme de synchronisation de temps a HK

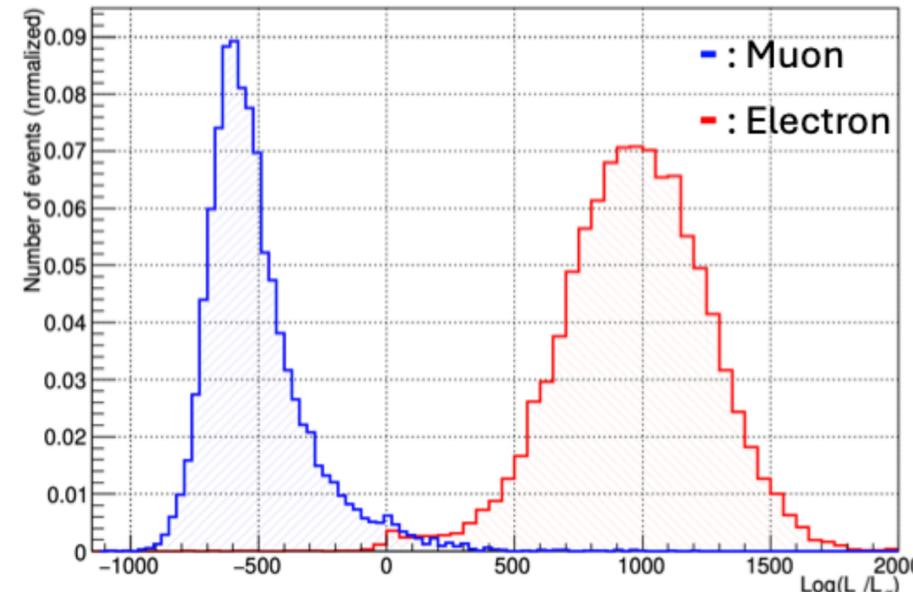
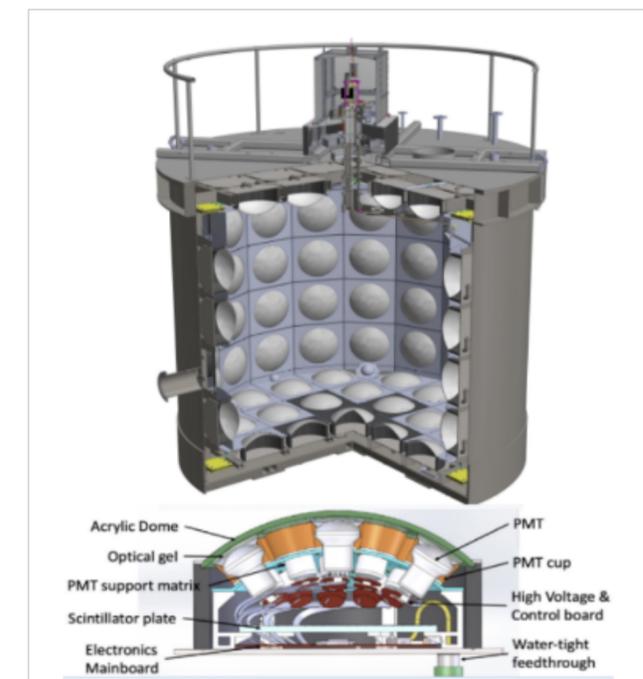
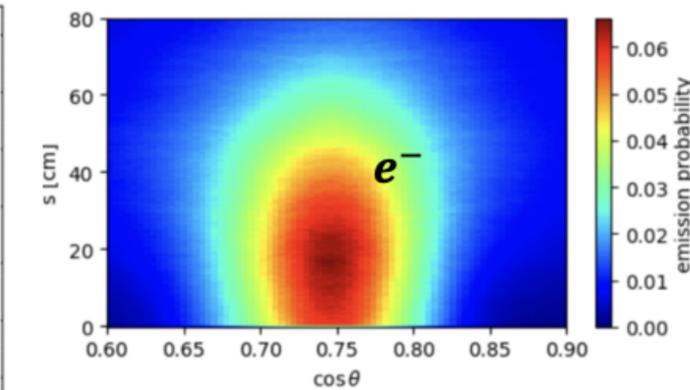
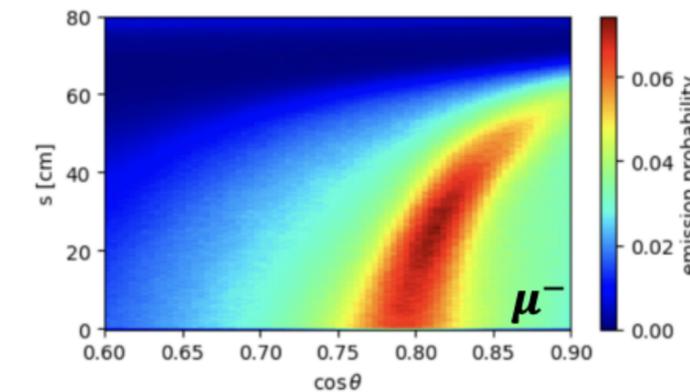


- LPNHE responsable pour le systeme de synchronisation de temps entre J-PARC et les 20k PMTs de Hyper-Kamiokande
- Production de ~90 cartes pour le systeme de distribution de temps en 2024

# Hyper-K reconstruction

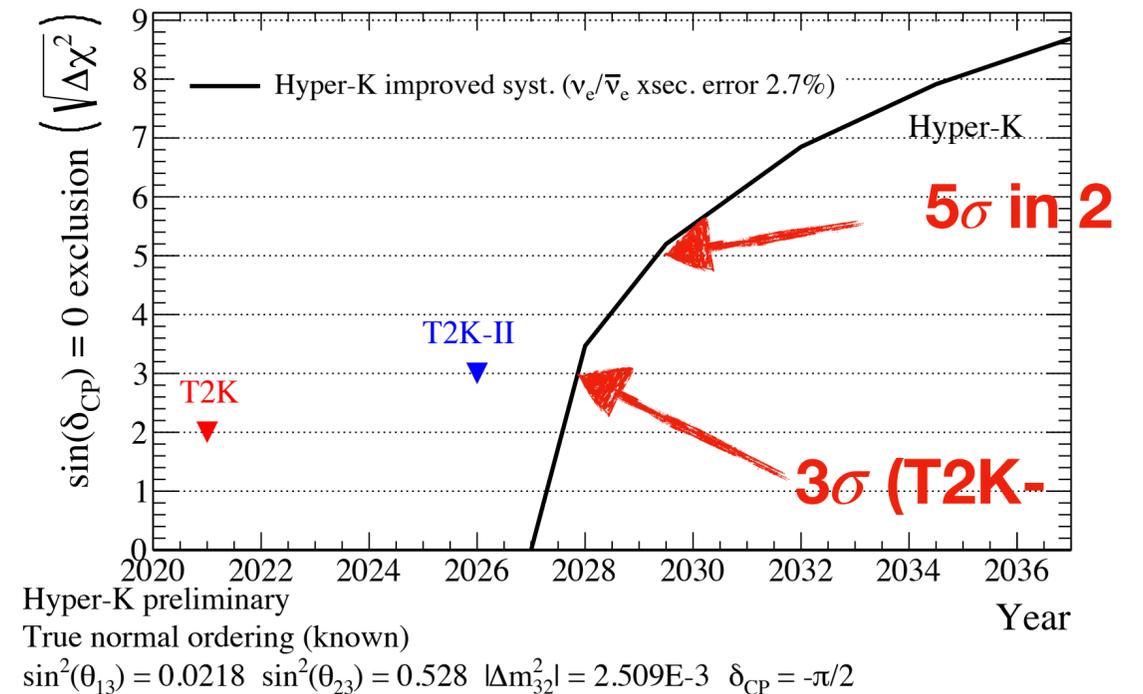
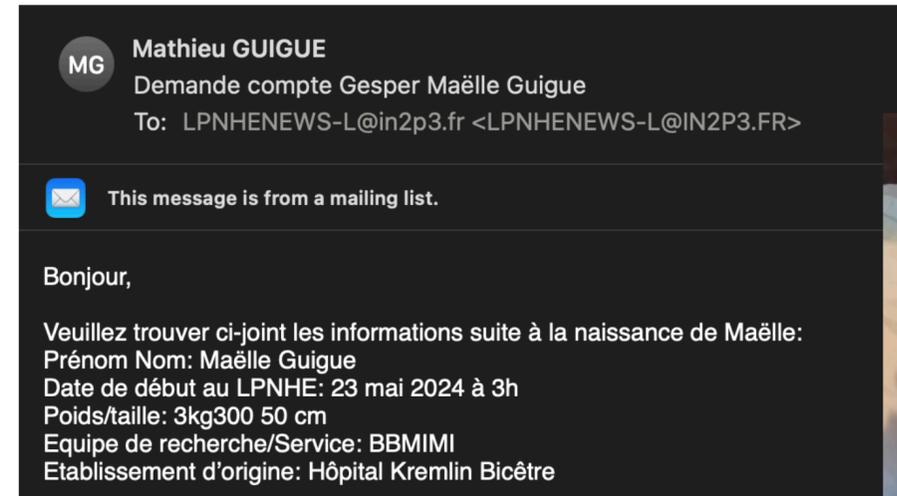
- Particules chargés voyage plus vite que la lumière (dans le milieu!)
- Lumière produite par effet Cherenkov produit un anneau reconstruit par le PMTs sur les parois du détecteur
- Selon la forme de l'anneau on peut distinguer electrons de muons  
→  $\nu_\mu$  de  $\nu_e$
- Developpement des nouveaux algorithms de reconstruction pour HK (Gonzalo Diaz Lopez, Lorenzo Restrepo, Mathieu Guigue)

$$L(\mathbf{x}) = \prod_j \underbrace{P_j(\text{unhit}|\mu_j)}_{\text{PMT unhit probability}} \prod_i \underbrace{\{1 - P_i(\text{unhit}|\mu_i)\}}_{\text{PMT hit probability}} \underbrace{f_q(q_i|\mu_i)}_{\text{PMT charge pdf}} \underbrace{f_t(t_i|\mathbf{x})}_{\text{PMT timing pdf}}$$



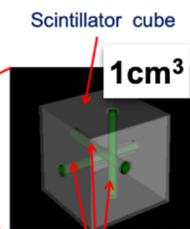
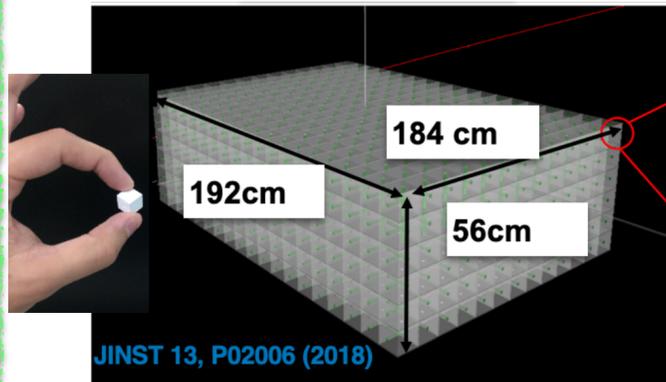
# Conclusions

- Groupe jeune et dynamique (Boris said)
- Le groupe neutrinos est impliqué, depuis plusieurs années sur le programme des expériences long-baseline au Japon
- T2K
  - Installation de l'upgrade du détecteur proche en 2023
  - Exploitation des données pour la période 2023-2027
- Hyper-Kamiokande
  - En construction, démarrage prévu en 2027
  - Responsable de système de synchronisation
  - HK sera un observatoire au delà de la physique d'oscillation → astrophysique multi-messenger et synergies avec les autres groupes du labo

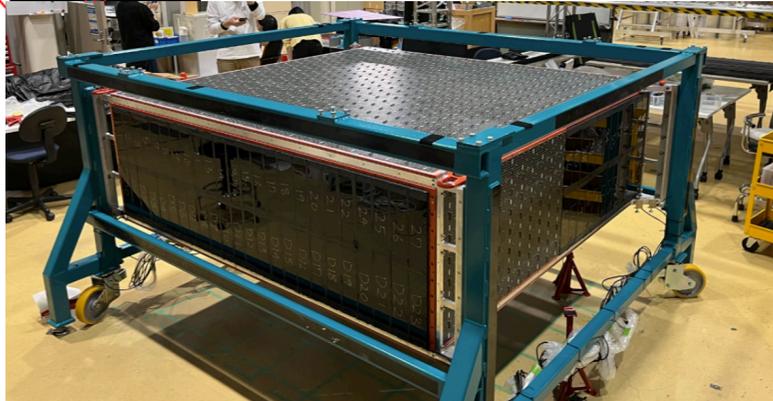


# Back-up

# New detectors



## Super-FGD

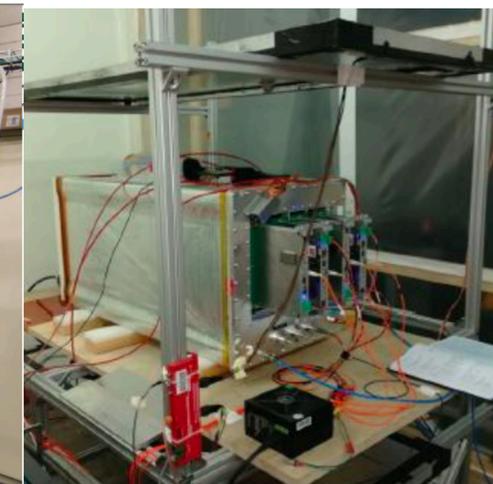
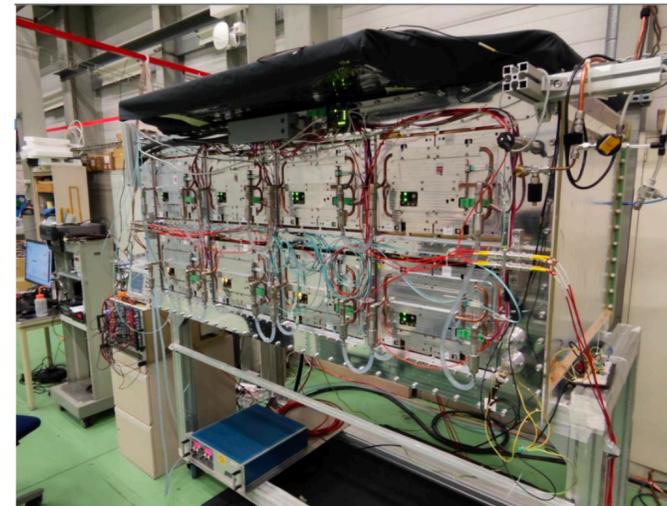


More details in Viet talk tomorrow

- \* New concept of detectors,  $2 \times 10^6$   $1\text{cm}^3$  cubes
- \* Each cube is read by 3 WLS → 3D view

More details in Ulysse talk tomorrow

## High-Angle TPCs



- \* New TPCs instrumented with Encapsulated Resistive Anode MicroMegas (ERAM)



JPS Conf. Proc. 27, 011005 (2019)

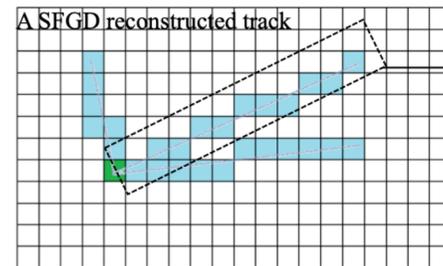
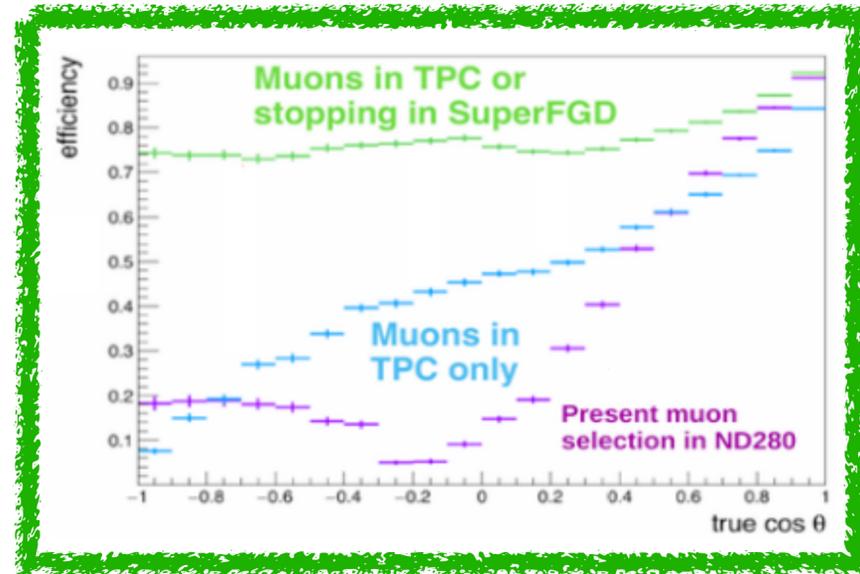
## TOF

6 TOF planes to reconstruct track direction  
Time resolution ~150 ps

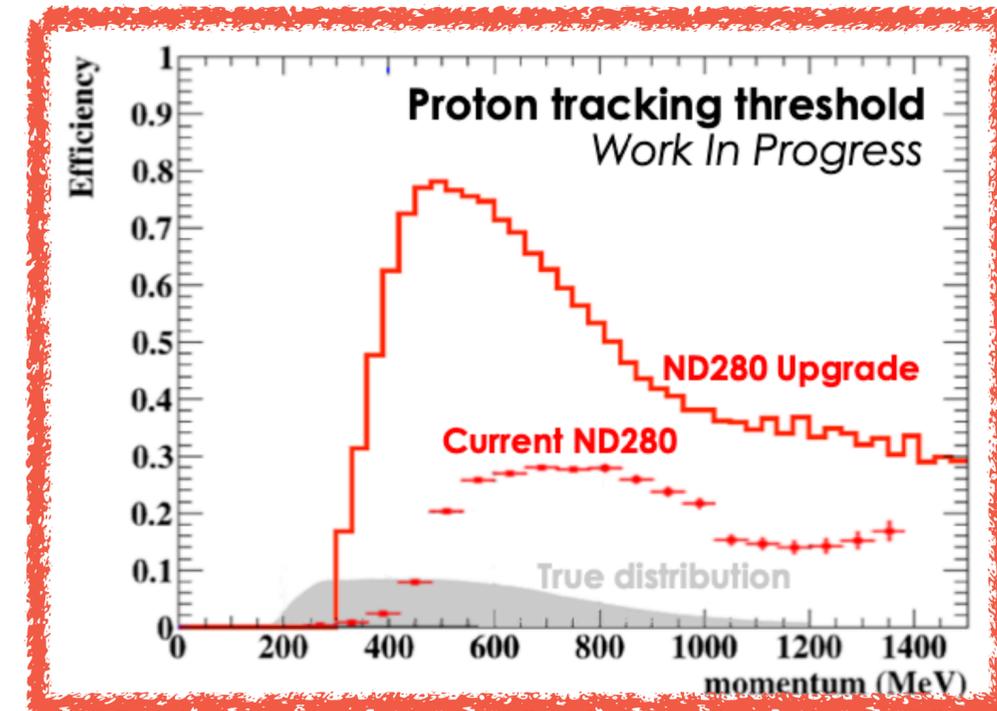




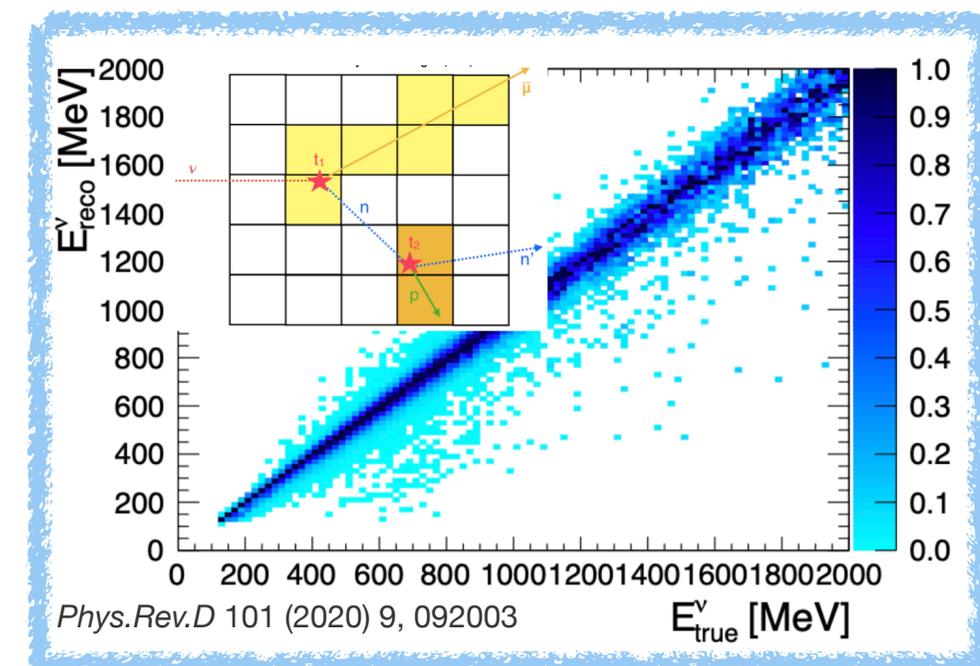
# ND280 Upgrade improvements



Protons  $\rightarrow$  threshold down to 300 MeV/c  
( $>500/c$  MeV with current ND280)



- High-Angle TPCs allow to reconstruct **muons at any angle with respect to beam**
- Super-FGD allow to fully reconstruct in 3D the tracks issued by  $\nu$  interactions  $\rightarrow$  **lower threshold and excellent resolution to reconstruct protons at any angle**
  - Improved PID performances thanks to the high granularity and light yield
- **Neutrons will also be reconstructed** by using time of flight between vertex of  $\bar{\nu}$  interaction and the neutron re-interaction in the detector



# Expected results

- First physics run with full upgrade installed in June
- Expect to collect 20k  $\nu\mu$  CC0pi interactions in the sFGD

## CC0 $\pi$ Event rates

Expect 85%-90% purity for SFGD samples

FHC only	1 cycle	3+1 cycles
SFGD total	21.8k	90.0k
SFGD w/nucleon	10.6k	43.9k

**FGD**



**SFGD**

