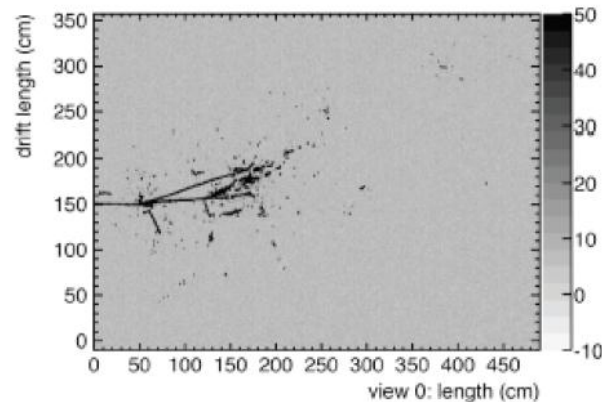
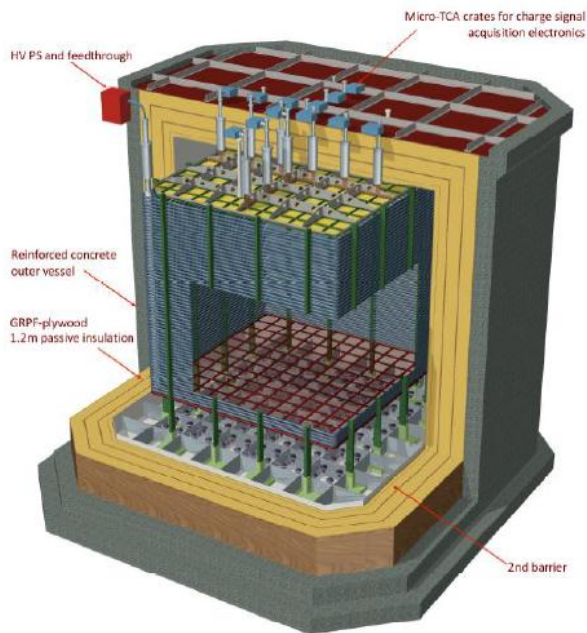


# Activité faisceau $\nu$ longue distance: développement de prototype de détecteur

D. Duchesneau  
LAPP

programme de R&D sur la technologie LAr pour détecteur  
lointain avec des faisceaux longue distance



Réunion sélection postdoc ENIGMASS  
LPSC, 15 juillet 2013

# MNSP Matrix and 3 ν oscillation

(MNSP: Maki-Nakagawa-Sakata-Pontecorvo)

$$\nu_\alpha = \sum_{j=1}^3 U_{\alpha j} \nu_j$$

$U_{\alpha j}$  matrix element

## Formalism

Mixing since 15 years

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

$$U = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ c_{23} & s_{23} & 0 \\ -s_{23} & c_{23} & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \Delta m_{31}^2 & & \\ & \Delta m_{31}^2 & \\ & & \Delta m_{21}^2 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & e^{-i\delta} s_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -e^{i\delta} s_{13} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

atmos+LBL(dis)      Reactor + LBL (app)      solar+KamLAND

Theoretical framework well consolidated since 15 years

## Oscillation probability

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} = \sum_{ij} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* U_{\alpha i}^* U_{\beta i} e^{-i \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{2E}} \approx \sin^2 2\theta_{ij} \sin^2 \left( \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \right)$$

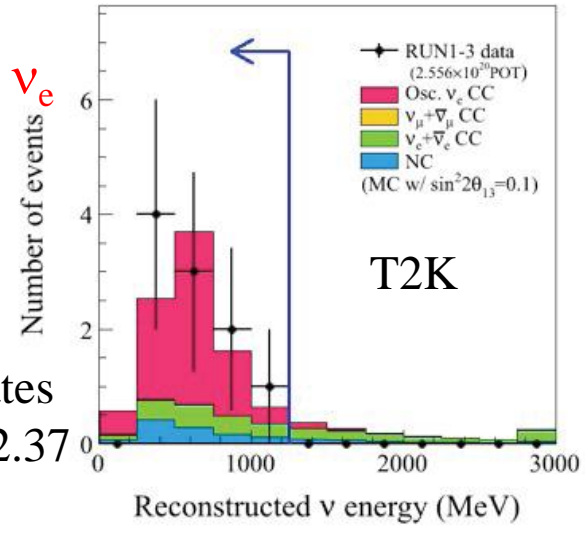
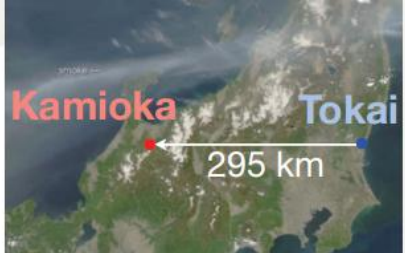
6 parameters to determine:

- 3 angles, 2 mass differences,
- 1 CP violation phase

# The latest major breakthrough: $\theta_{13}$

## At accelerators from the $\nu_e$ appearance

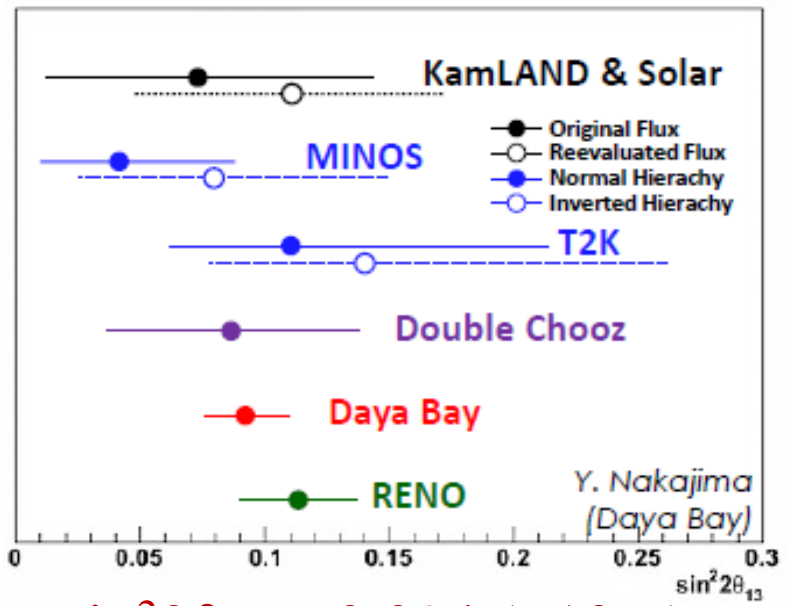
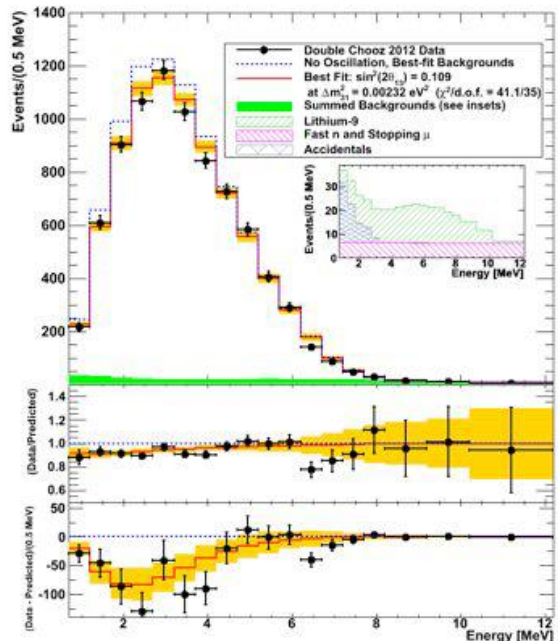
T2K :  $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$



## At reactors from the survival rate of $\bar{\nu}_e$

3 experiments;  $\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e$

- Double Chooz (France)
- Daya Bay (China)
- Reno (Korea)



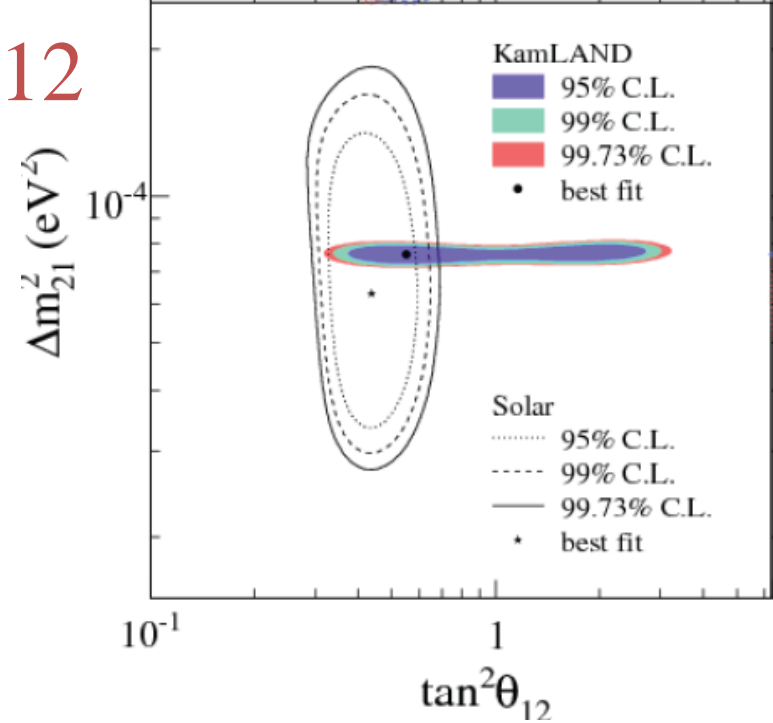
2012

$\sin^2 2\theta_{13} = 0.094 (\pm 10\%)$

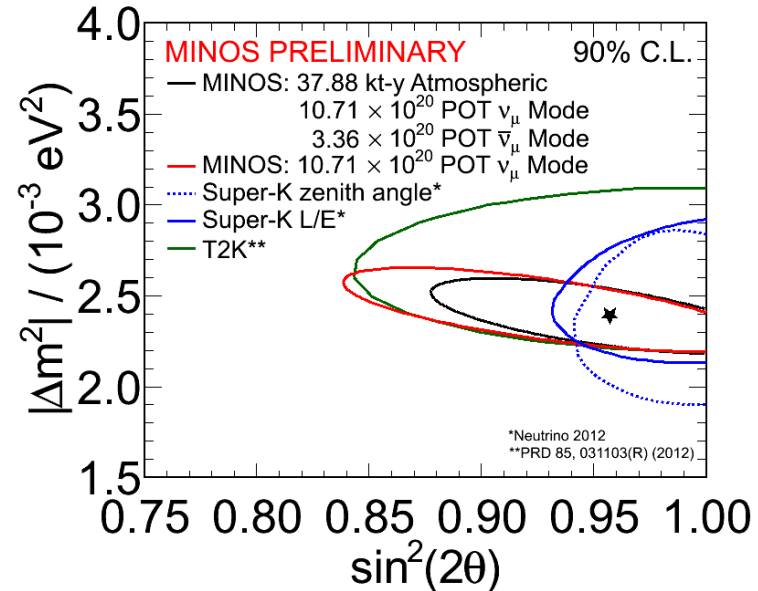
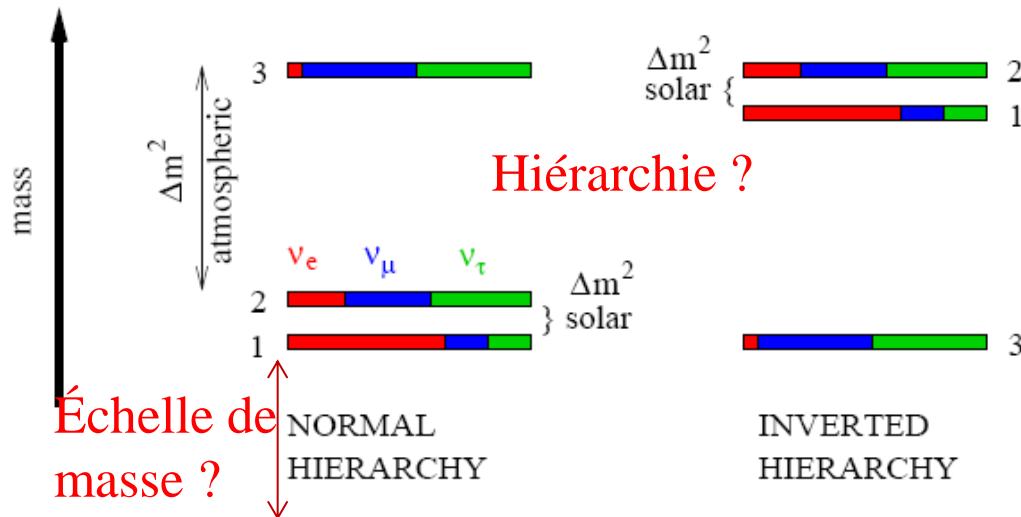
Large  $\theta_{13} \Rightarrow$  important for mass hierarchy and to search for CP violation in leptonic sector

# Etat des lieux des mélanges 2012

6 parameters		Precision $2\sigma$	
$\Delta m^2_{12}$	$7.54 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$	5%	
$ \Delta m^2_{23} $	$2.43 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$	7%	Signe ?
$\sin^2 \theta_{12}$	0.307	11%	
$\sin^2 \theta_{23}$	0.386	12%	
$\sin^2 \theta_{13}$	0.024	21%	
$\delta$	Valeur ?		



Ref: G.L. Fogli et al. arXiv:1205.5254v3



# les neutrinos: encore de nombreuses questions fondamentales

- quelle est l'échelle de masse absolue?
  - fondamental pour cosmologie et le schéma d'unification des interactions
- la nature des neutrinos:
  - si Majorana => violation du nombre leptonique, conséquence théorique (leptogénèse, GUT)
- Existe-t-il plus de 3 neutrinos, quelle est l'origine de l'anomalie réacteur?



- **Violation de la symétrie CP dans le secteur des leptons?**
  - expériences faisceau long baseline car CP due à termes d'oscillation sous-dominant
- **Quelle est la hiérarchie de masse?**
  - essentiel pour la quête de la violation CP
  - Distinguée par effet de matière sur oscillations (long baseline, atmosphérique...)

Programme expérimental de longue haleine dans lequel le Labex peut être un acteur majeur

# Enjeu mondial:

## Hiérarchie de masse:

- atmosphérique (ex: pré-étude en cours Pingu, Orca...)
- Réacteurs (ex: DayaBay II, ou RENO-50 (20kton de LSc, 60 km)
- Faisceau Long BaseLine (> 1000 km)
  - Europe => LBNO avec Argon Liquide
  - US => LBNE avec Argon Liquide

## Violation CP:

- Faisceau Long BaseLine (>100 km)
  - Europe => LBNO avec Argon Liquide / 2300 et 1300 km?
  - US => LBNE avec Argon Liquide / 1300 km
  - Japon => Cerenkov à eau / 295 km

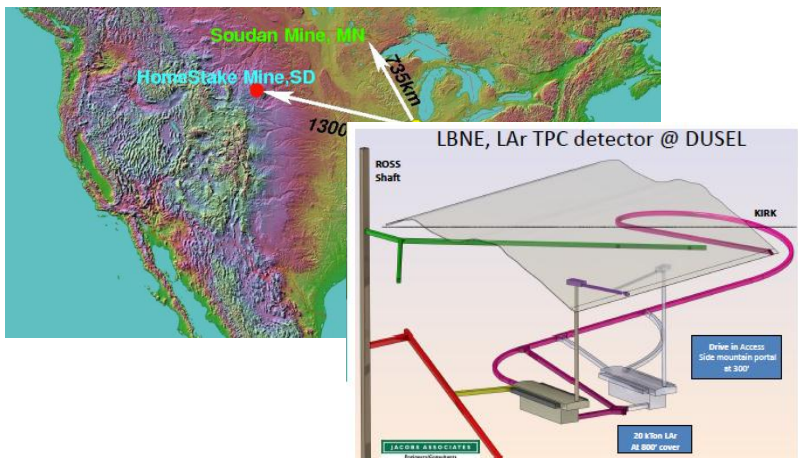
**A terme:** probablement 1 seul projet de faisceau LBL dans le monde mais dispositif incontournable pour la violation CP



# Future Long Baseline Projects in the World

## US : LBNE

Liquid Argon TPC 25 kton  
 at DUSEL (Homestake Mine) ~2400mwe  
 Beam from Fermilab (0.7-2.5MW)  
 baseline=1300 km  $\langle E \rangle \sim 3$  GeV

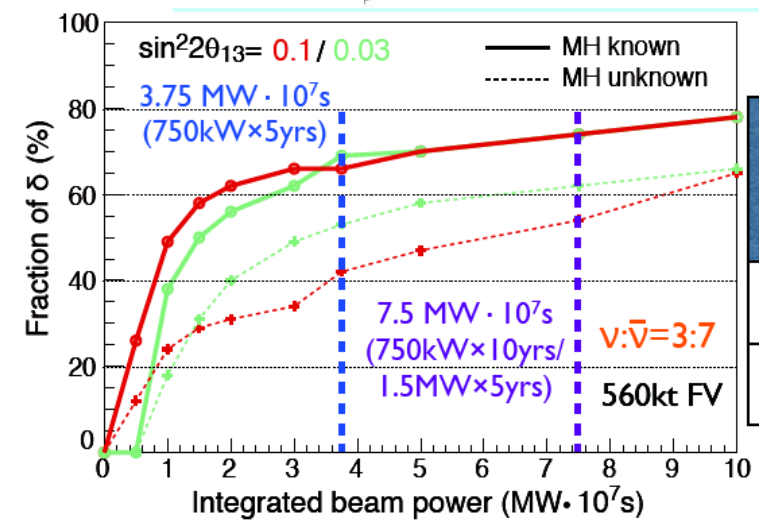
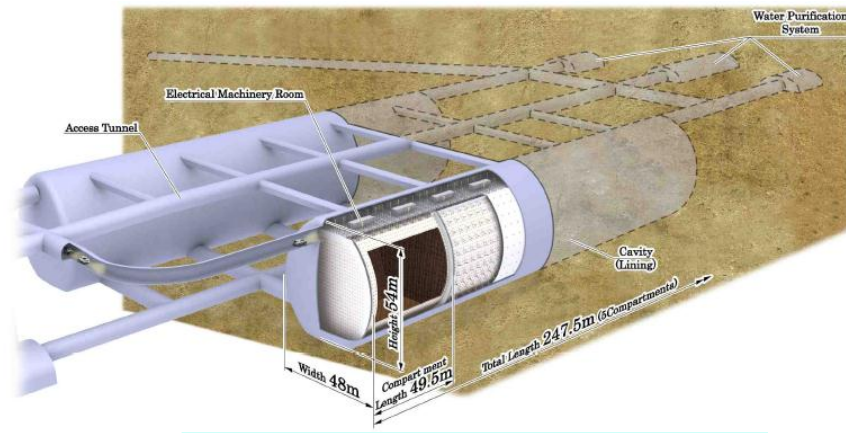


“downscoped” by DOE in 2012  
 Under re evaluation

- First phase 2022 : 700 kW beam from FNAL to Homestake, 1300 km
- limited matter effects 10 kton LAr far detector on surface no near detector

## Japan : Hyper-K

Water Cherenkov 560 kton  
 near Kamioka, 1750 mwe  
 Beam from JPARC (1.66MW)  
 baseline=,295 km  $\langle E \rangle \sim 0.8$  GeV



# Etudes de projet futur faisceau en Europe (LAGUNA-LBNO)

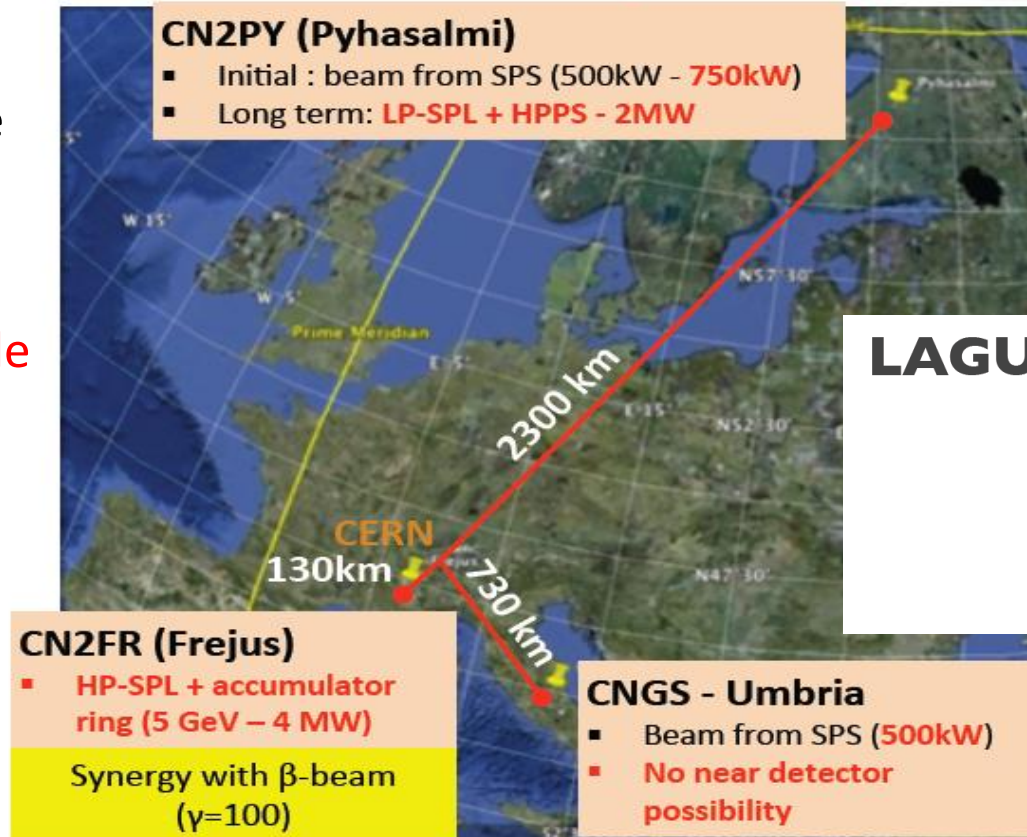


## v-beams - LAGUNA-LBNO DS (2011-2014)

### ▶ Long-baseline options from CERN - Large underground detectors

Effort européen  
(études similaires se font aux US et Japon)

Riche programme de physique



## LAGUNA-LBNO Design Study

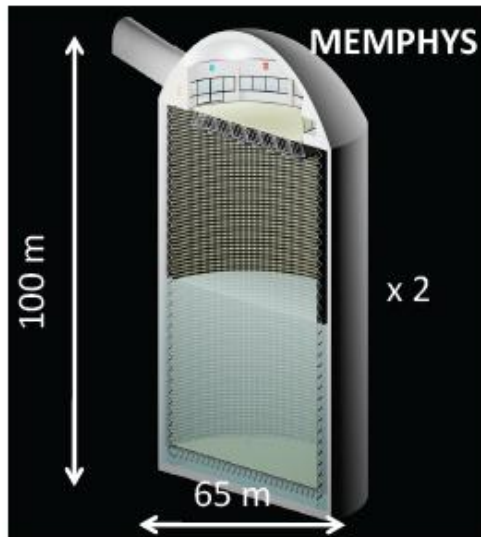
Large  
Apparatus studying  
Grand  
Unification  
Neutrino  
Astrophysics

... and  
Long  
Baseline  
Neutrino  
Oscillations

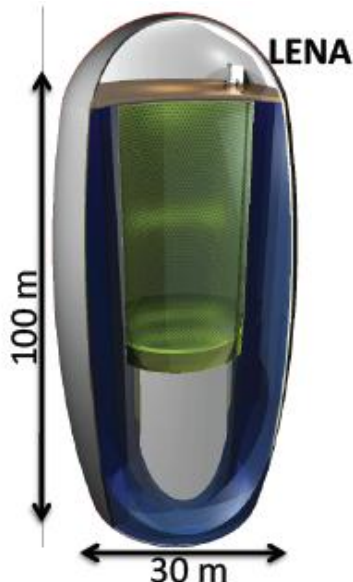


## Détecteurs souterrains de grand volume => Riche programme de physique

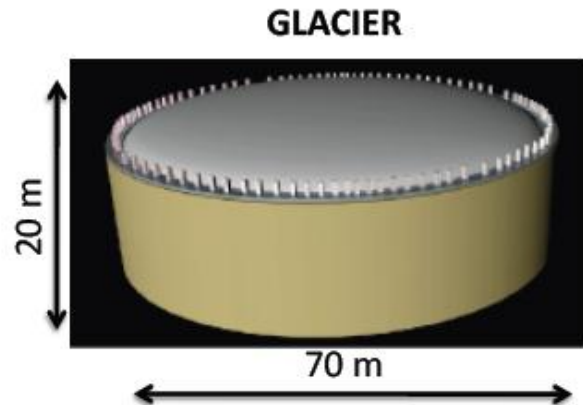
- Propriétés des  $\nu$  (oscillation, violation CP leptonique: faisceaux,  $\nu$  atm..)
- Etudes de phénomènes astrophysiques liés aux  $\nu$ :
  - Effondrement gravitationnel d'étoiles ( $\nu$  des Supernovae)
  - Formation des étoiles au début de l'univers (fond diffus de  $\nu$  de SN)
  - Etude des processus de fusion avec  $\nu$  solaires
- Test des modèles géophysiques de la terre (Geo -  $\nu$  , U, Th -  $\nu$ )
- Désintégration du proton



Water Čerenkov 2x 300kT

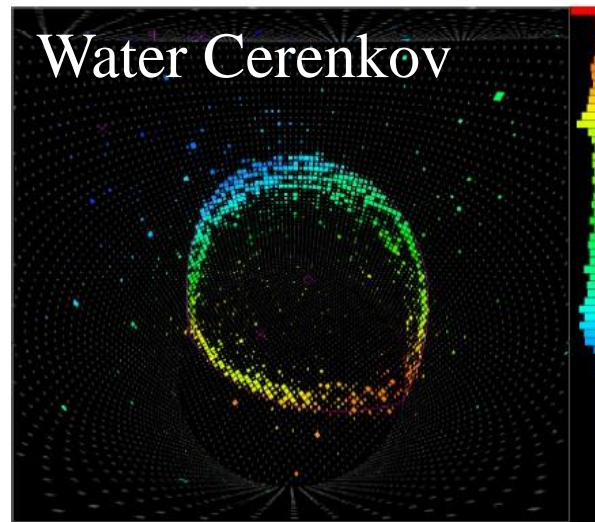


Liq. Scintillator → 50kT

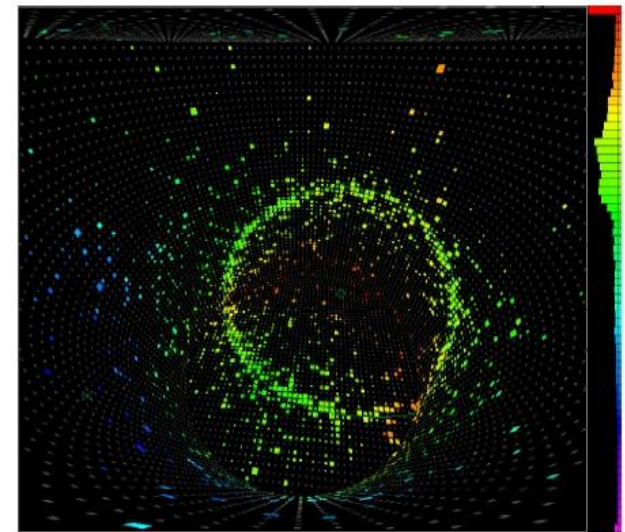


Liq. Argon → 100kT

Avec faisceau  $\nu$ :  
2 technologies de  
détecteur:

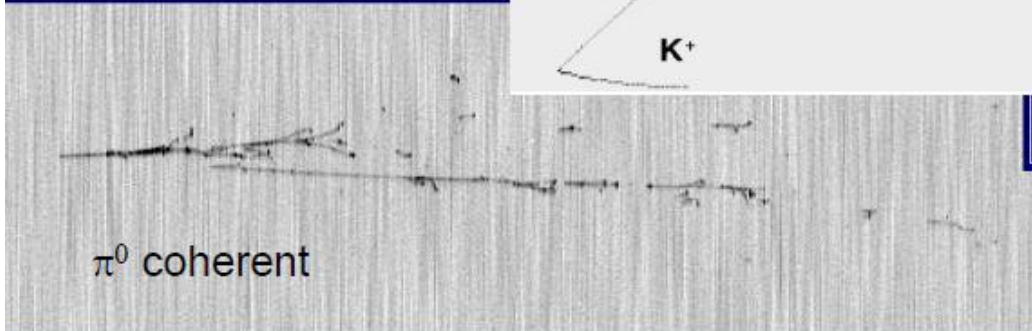
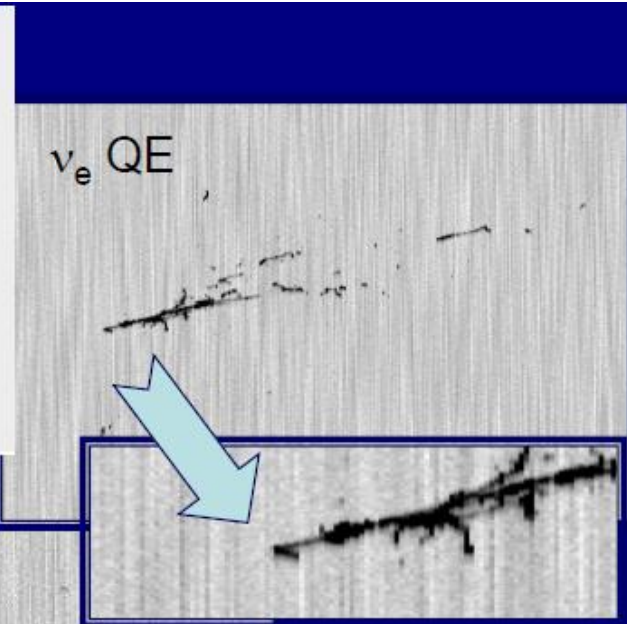
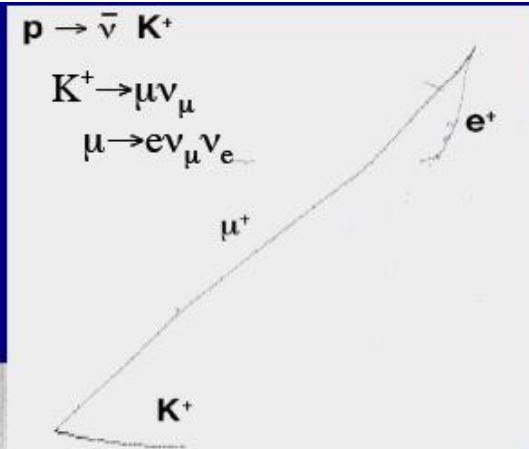


Muon atmosphérique (FC)



Électron atmosphérique

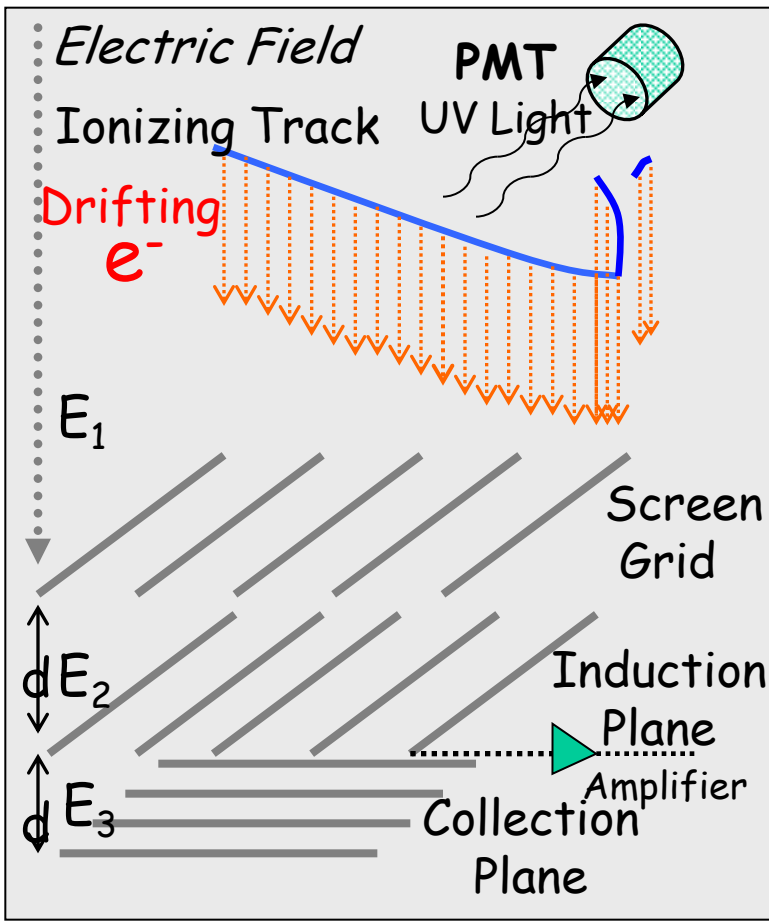
TPC Liquid  
Argon  
Homogeneous  
massive target and  
ionization detector



# TPC Argon liquide

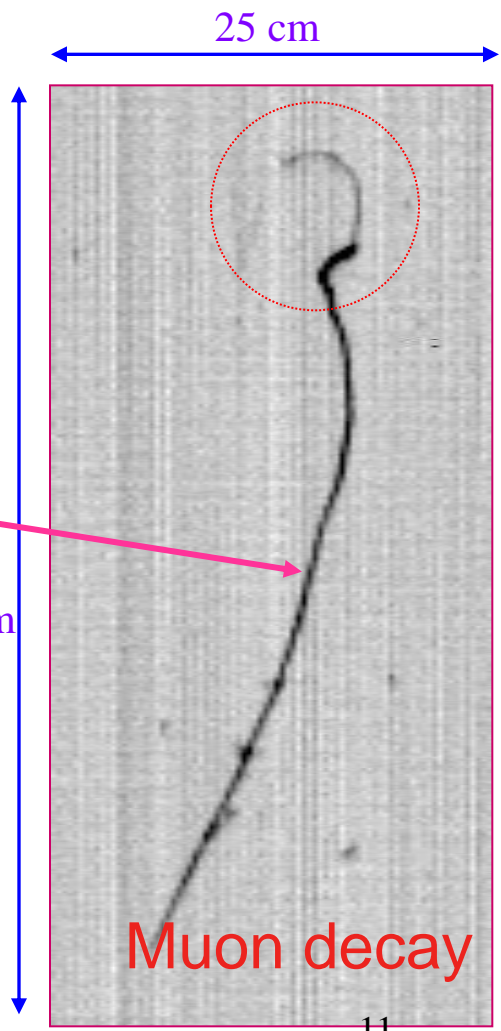
## Principle: 3D imaging in a large volume Liquid Argon TPC

- very pure LAr (<0.1ppb) → electrons can drift over large distances (>1.5 m)
- UV scintillation light (5000 photons/mm @ 128 nm) for  $t_0$
- Primary ionization in LAr: 1 m.i.p ~ 20000 e- on 3 mm
  - → 3D reconstruction with ~1 mm resolution



Energy deposition measured for each point (400 ns sampling)

ICARUS  
T600 test





# Projet européen de Long Baseline:

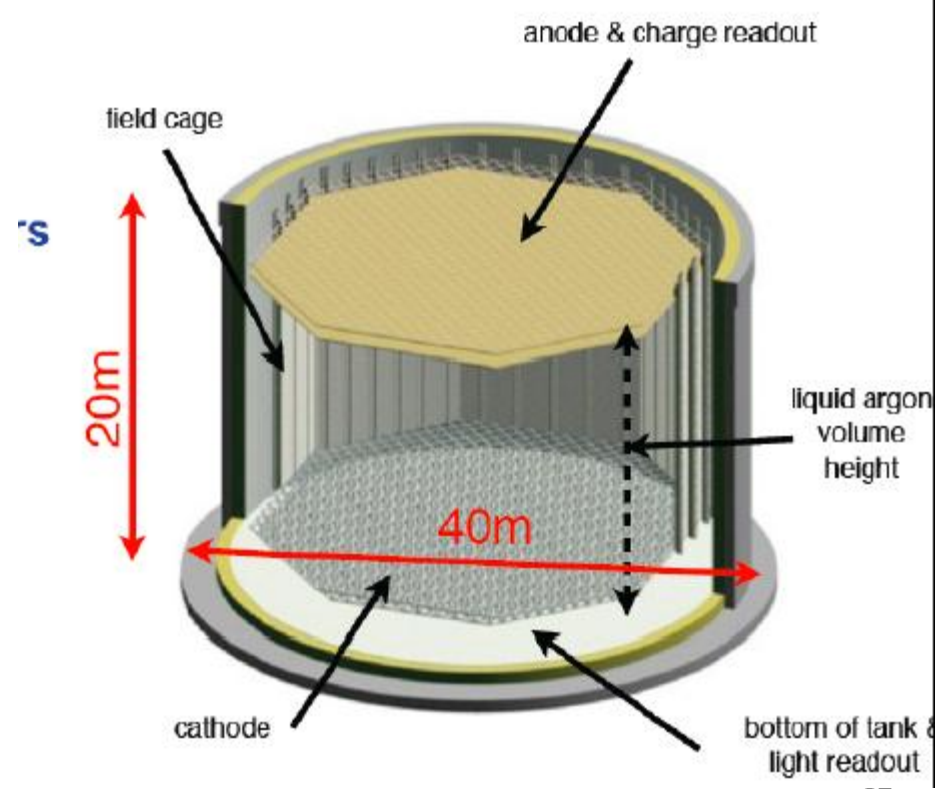
Après les études de LAGUNA et LAGUNA-LBNO

CERN-Pyhäsalmi (2300 km)  
GLACIER (20 kton) + MIND (35 ktons)



## Pyhäsalmi

Puis approche séquentielle  
20kton => 50 kton LAr



# Layout of the LAGUNA-LBNO observatory at Pyhäsalmi (-1400m)



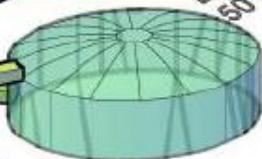
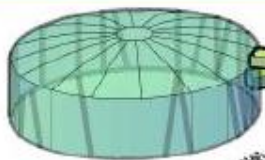
Total available space for up to  
 2x50 kton LAr + 50 kton LSc  
 879'000 m<sup>3</sup> excavation  
 Design to be finalised within  
 LAGUNA-LBNO by ≈2014

**A possible configuration**

**20kton LAr+  
35 kton MIND**

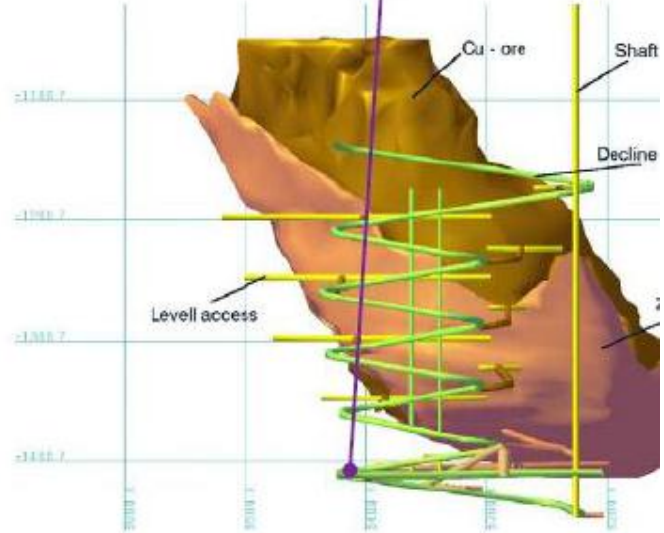
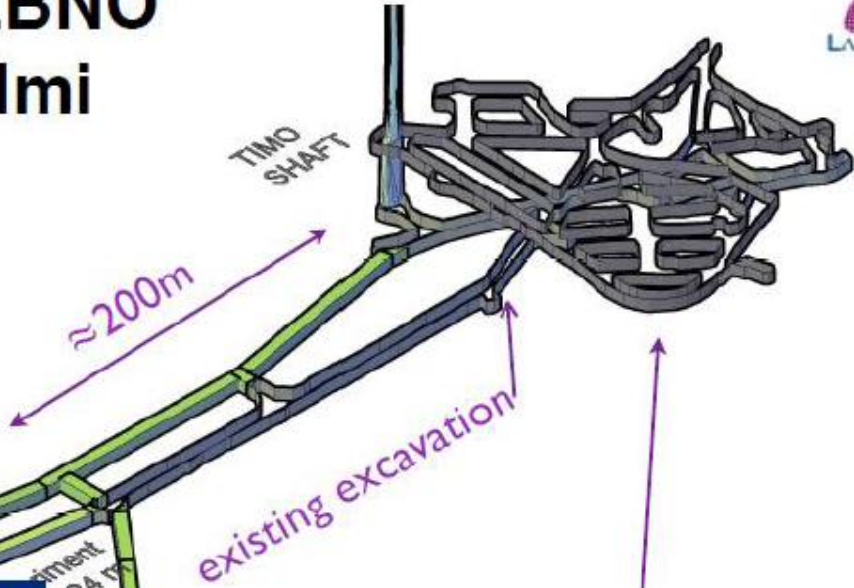
**50kton LAr**

**50kton LSc**



Installation facilities  
Clean room etc.

LSc experiment  
Depth -1500 m  
50 kton



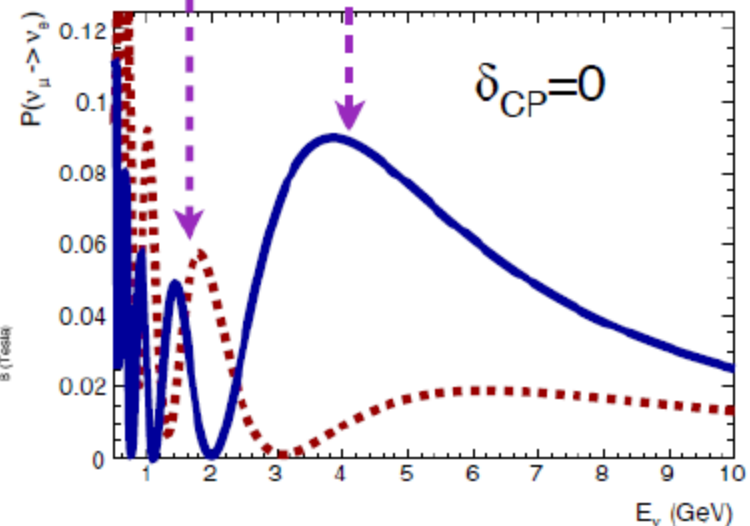
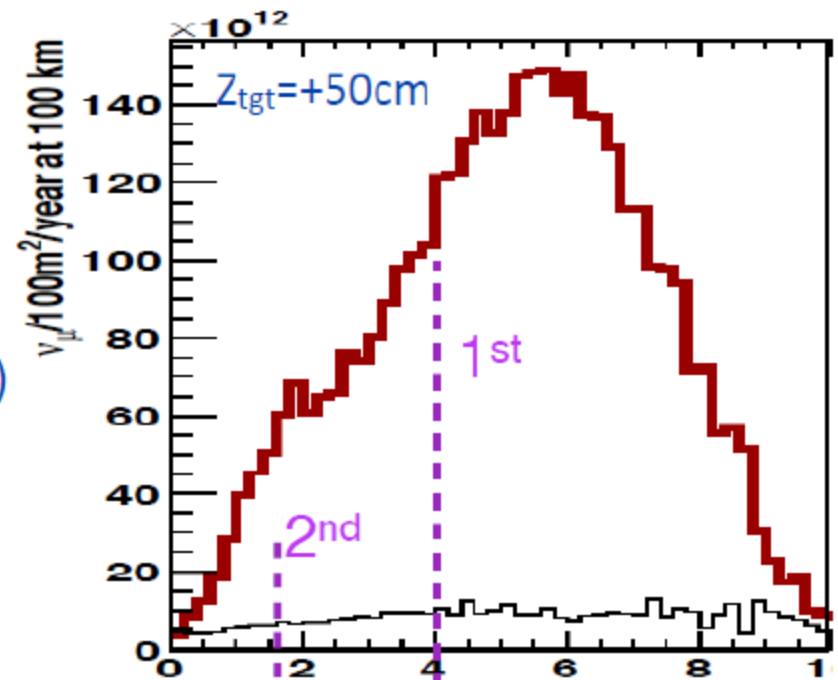
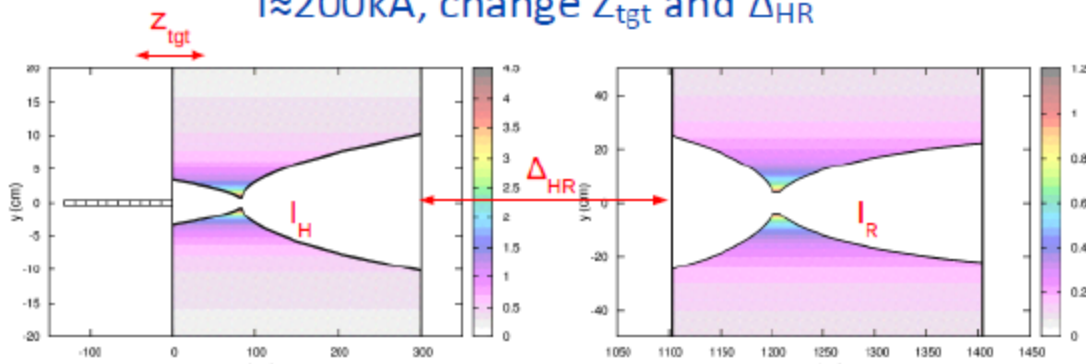


# LBNO baseline beam optimisation

- Conventional beam, horn focused
- Medium energy to cover at  $E_\nu \approx 4$  GeV (1<sup>st</sup> max) and  $E_\nu \approx 1.5$  GeV (2<sup>nd</sup> max)
- Wide band covering 1<sup>st</sup> and 2<sup>nd</sup> maximum
- Small tail at high energy
- Positive and negative focus ( $\nu$  and anti- $\nu$  modes)
- High beam power (initially 700 kW then 2MW)
- Angle 10deg dip angle (distance = 2300km)
- Muon monitors
- Magnetised near neutrino detector

## Focusing optimisation (preliminary)

Graphite target ( $r=4$ mm), Horn shapes fixed,  $\approx 200$ kA, change  $Z_{tgt}$  and  $\Delta_{HR}$

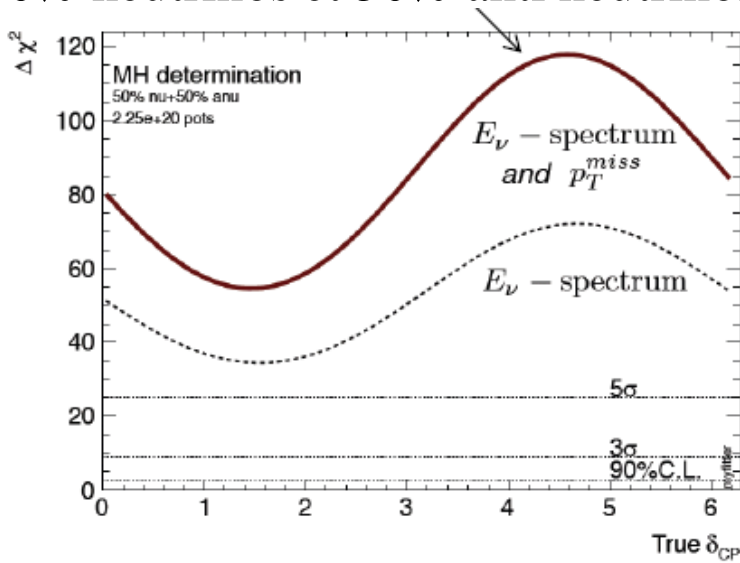


# Performances:

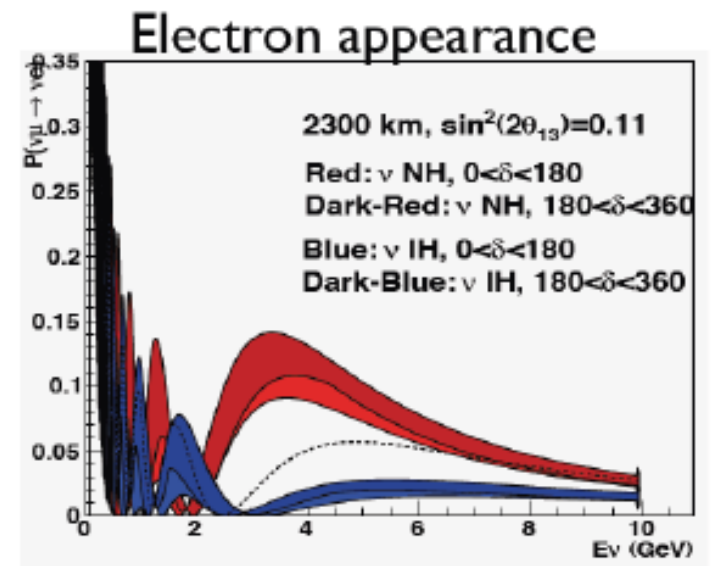
Hiérarchie de masse en 2 ans à plus de 5 sigmas

Début d'investigation de la violation CP  
 => selon les résultats augmenter graduellement les masses de détecteur.

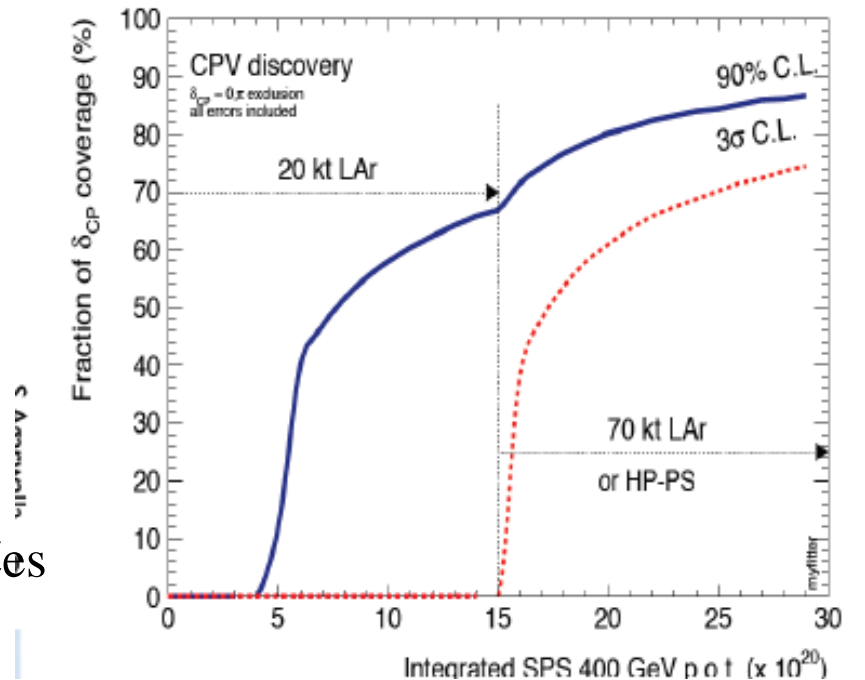
Démarrage en 2023:Après 2 ans  
 50% neutrinos et 50% anti neutrinos



$\delta_{CP}$ : Première phase LBNO 20kton (5+5 années nu/nubar) 71 (44)% coverage at 90% ( $3\sigma$ )

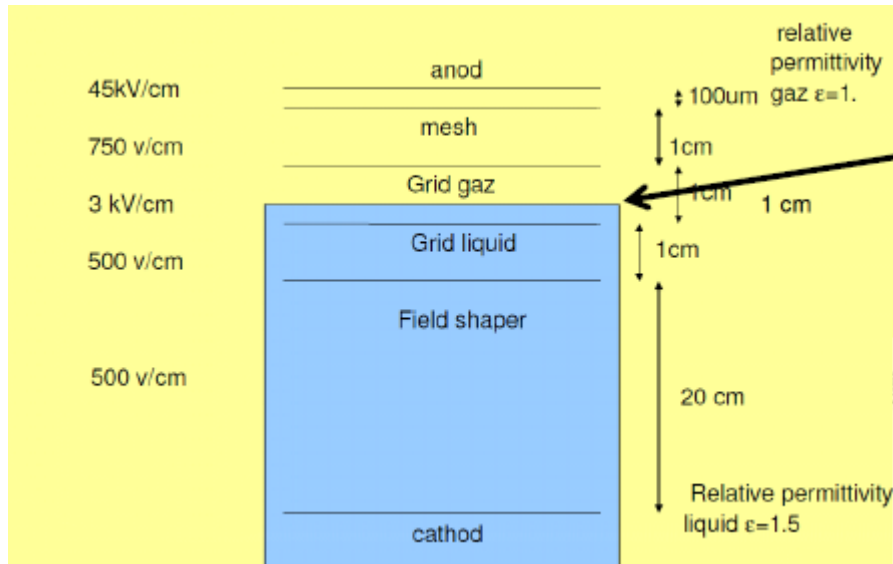


## Incremental approach with conventional beams



# Détecteur de très grande dimension:

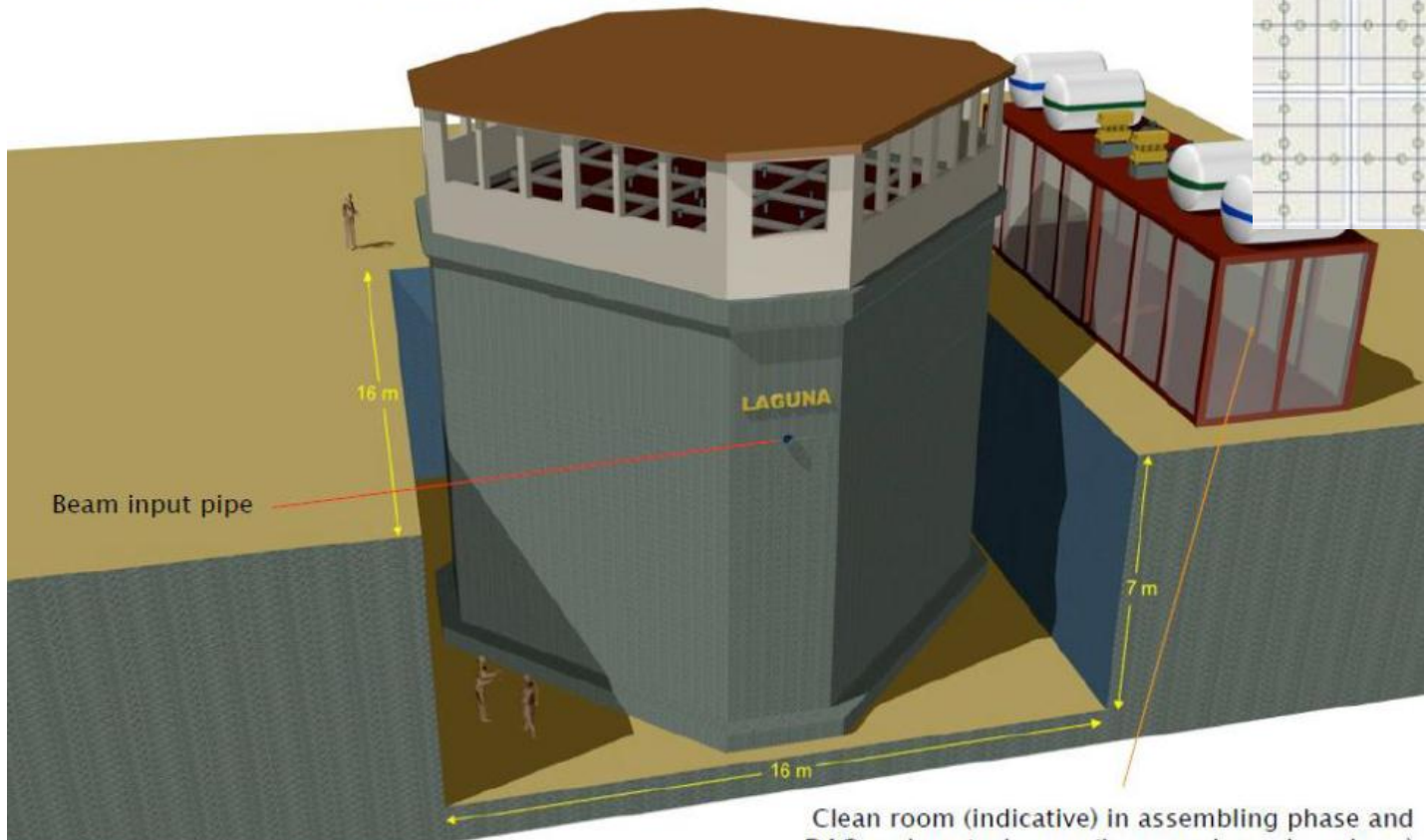
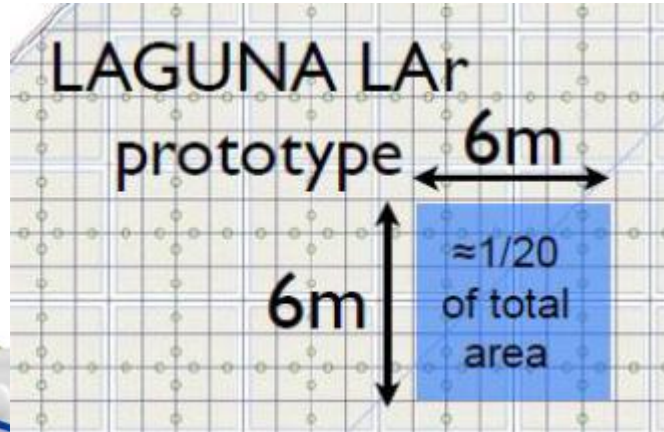
Principe: lecture double phase Argon (liquide et gaz) après une distance de dérive pouvant aller jusqu'à 20m



## Points techniques à valider avec un prototype de grande échelle:

- Technique de construction des réservoirs LNG
- Système de purification
- Grande longueur de dérive des électrons
- Système de Haute tension des électrodes 300-600 KV
- Lecture à double-phase
- L'électronique de lecture
- Reconstruction des interactions dans la TPC

# General overview



A installer dans la North Area au CERN

Sur faisceau de particules chargées

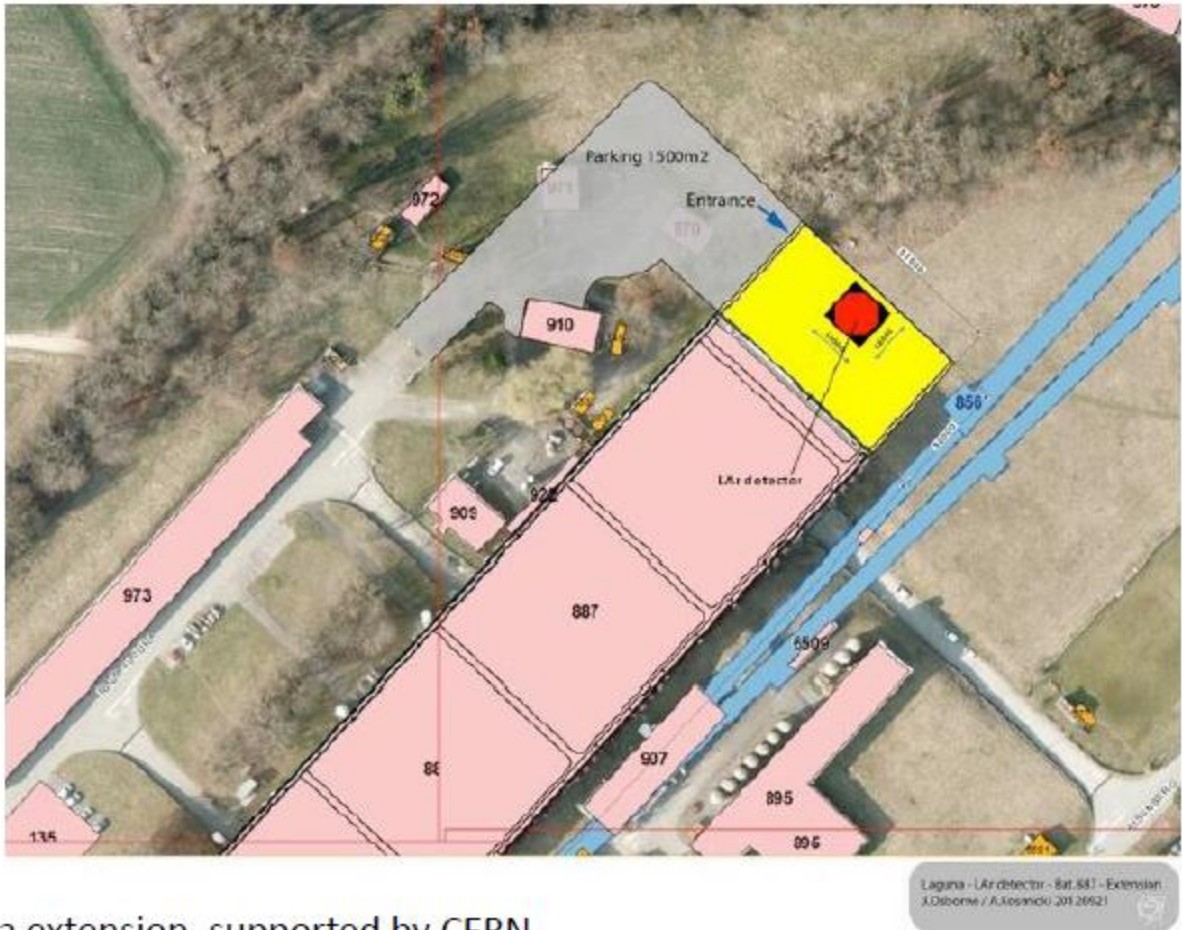
Clean room (indicative) in assembling phase and DAQ and control room (in normal running phase). Eventually used as support for cryocoolers and cryogenic liquid storage vessels

SPSC recommendation: "validate large scale"

6x6x6m<sup>3</sup> active volume LAr TPC detector with double phase + charge amplification + 2-D collection readout PCB anode. Exposure to charged hadrons beam (1-20 GeV/c)



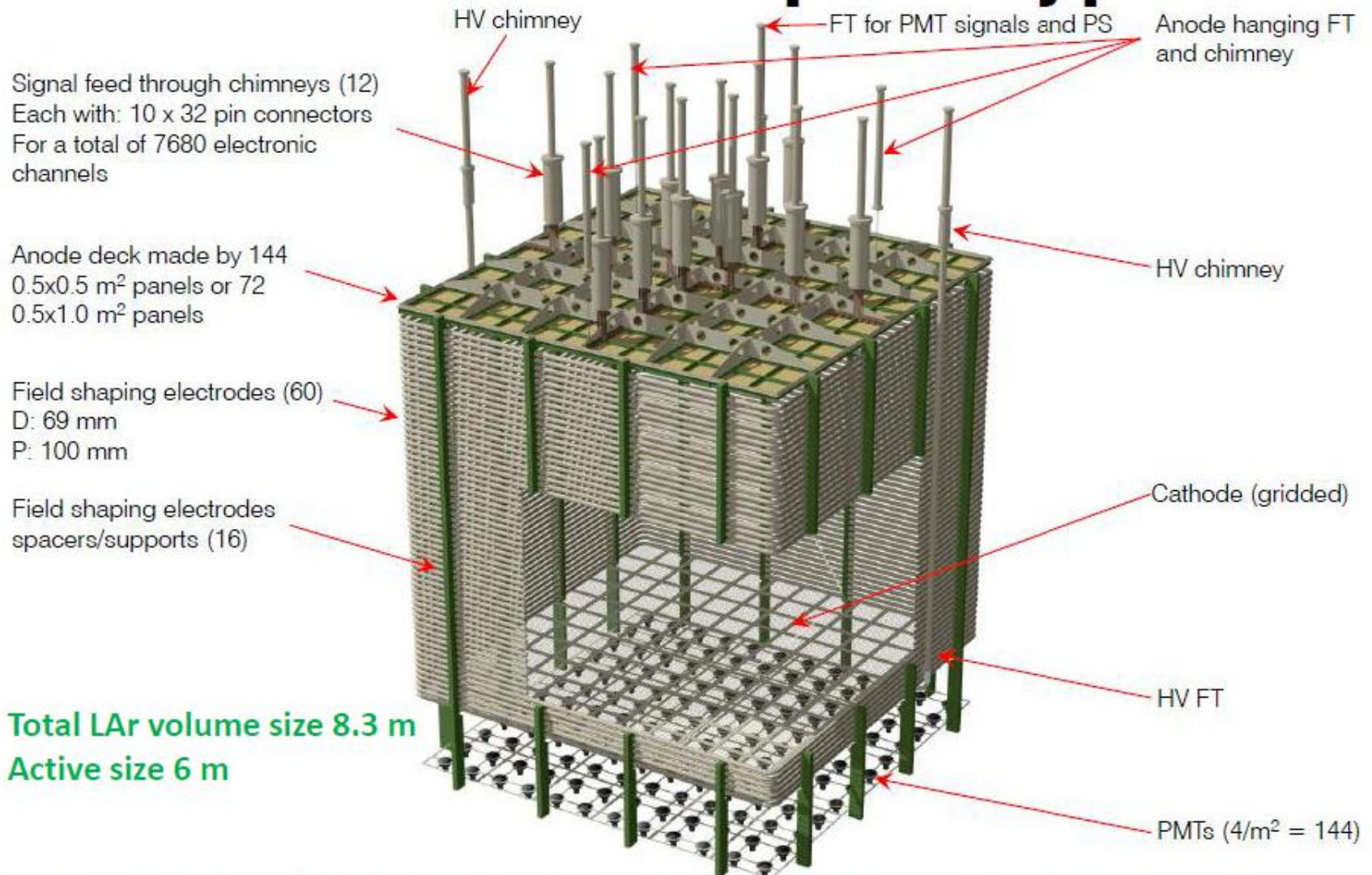
# Scenario of installation: EHN1 extension



North area extension, supported by CERN,  
Extension activities already started, completion middle 2014 ?

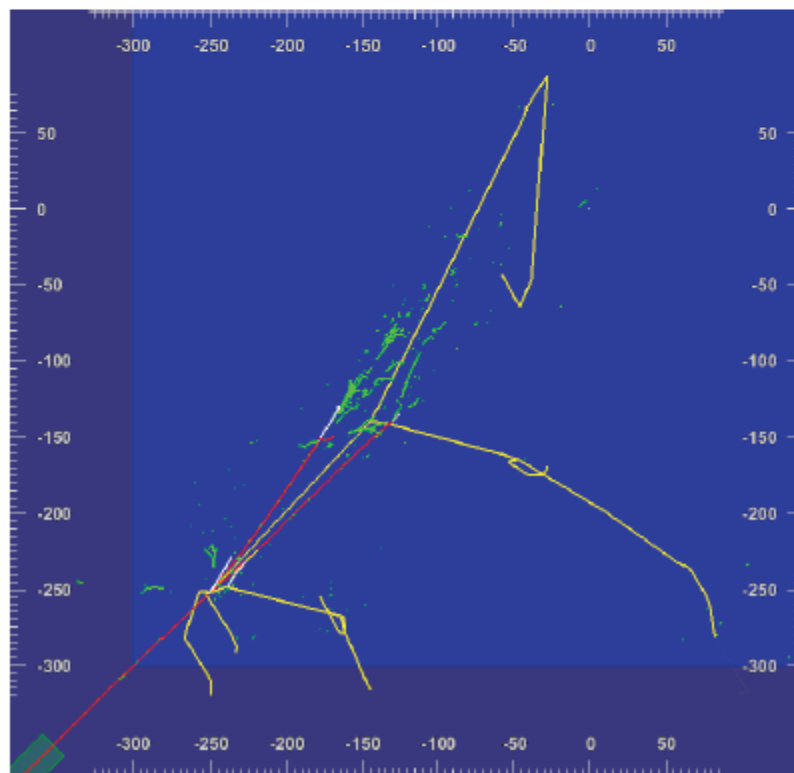
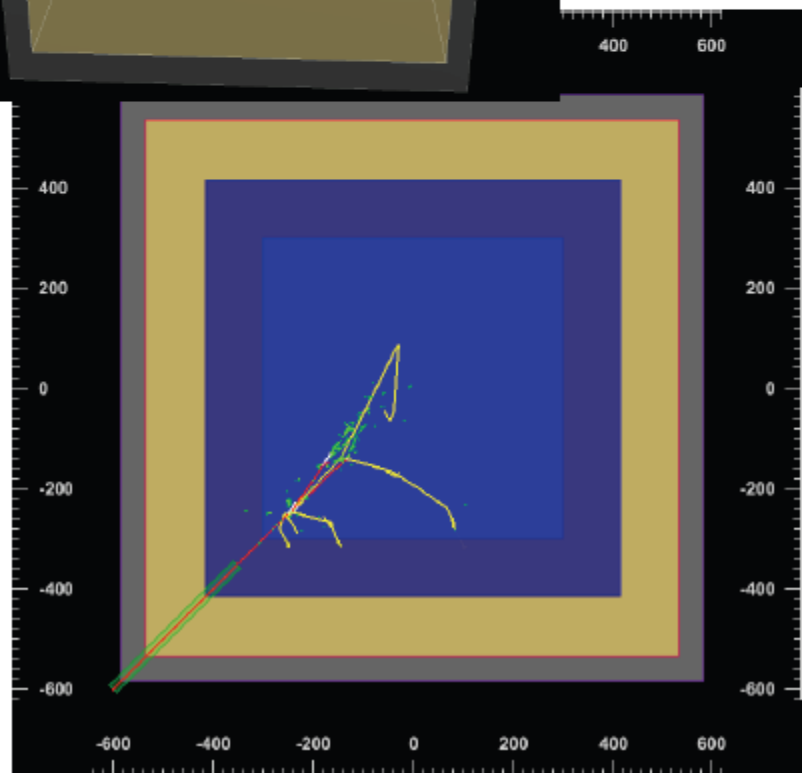
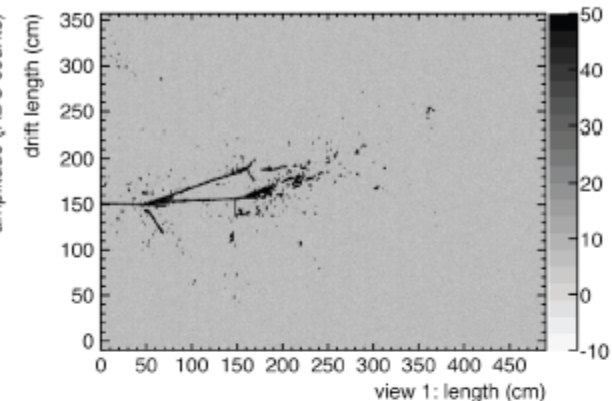
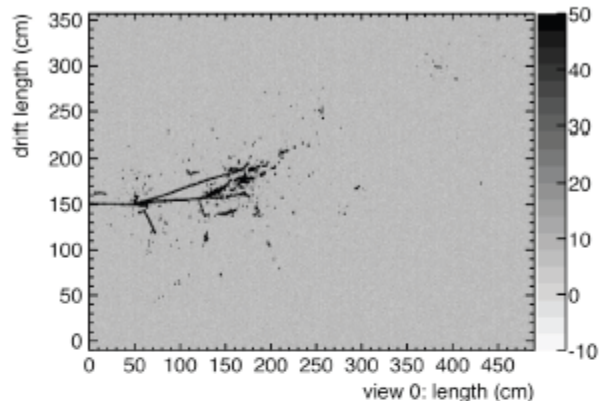
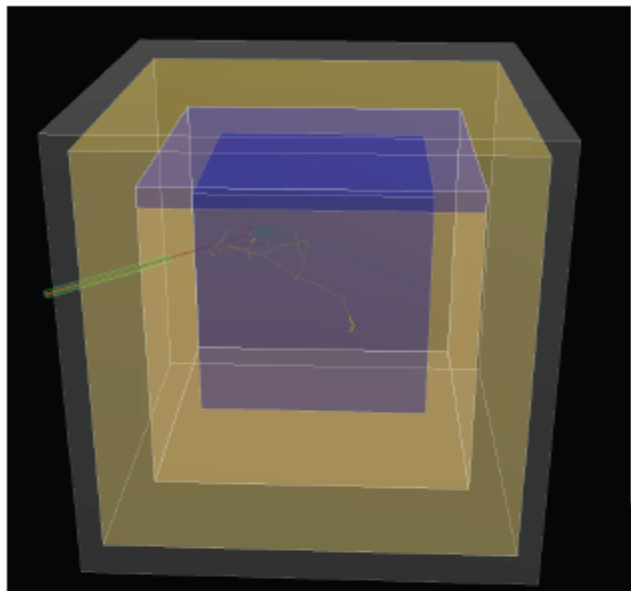


# LAGUNA LAr prototype



7680 readout channels, ICARUS T600 for a similar fiducial mass had 27000 channels

# 5 GeV $\pi^+$ simulation in 6x6x6m<sup>3</sup>



## Prototype LAr pour Long Baseline:

### Calendrier (basé sur une activité CERN en 2013 pour le hall EHN1)

- mi 2014: fin de la préparation de l'extension du Hall EHN1 au CERN
  - mi 2014- mi 2015: construction du réservoir
  - mi 2015- 2016: instrumentation interne et installation
  - 2016-2017: prise de données sur faisceau de particules chargées
- 
- Projet de prototype soutenu de manière importante par le CERN, le SPSC et European Strategy Group.
  - Présenté au CS de l'IN2P3 le 27/06/2013 pour demande de financement projet sur 4 ans.

# Long Baseline au LAPP

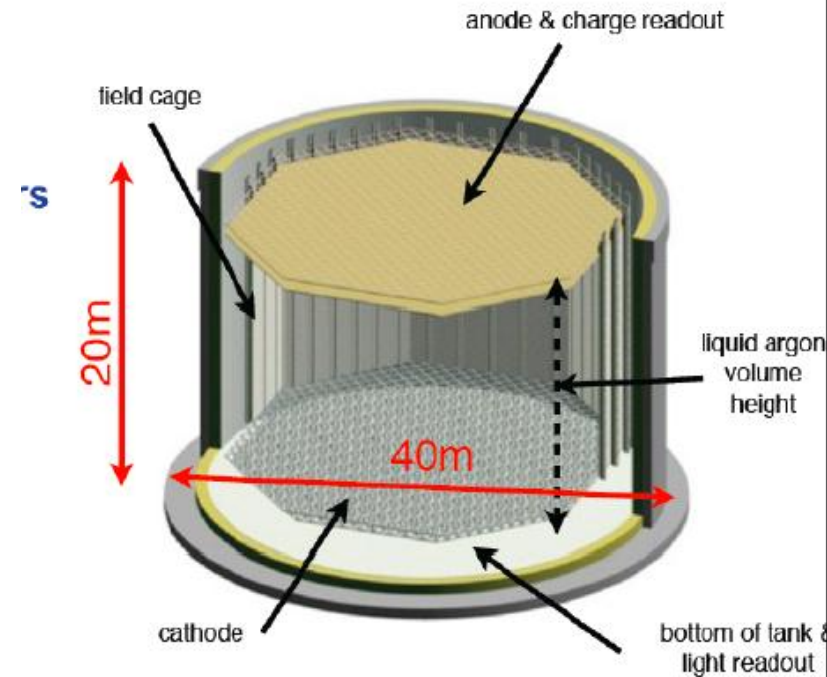
**Chercheurs**

**D. Duchesneau, H. Pessard**

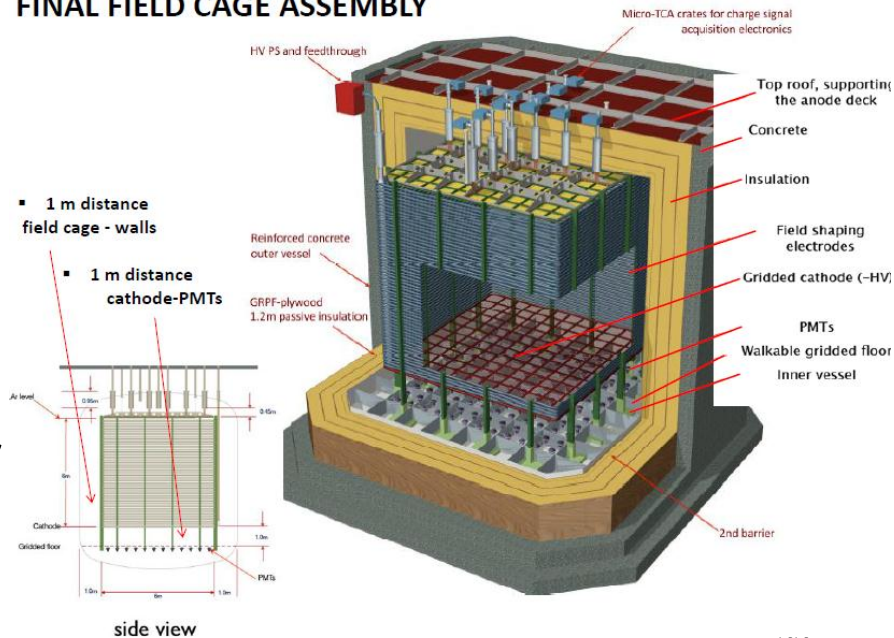
## Activités envisagées et en discussion:

Participation à la réalisation du prototype de détecteur TPC Argon Liquide (6x6x6 m<sup>3</sup>) au CERN avec APC, IPNL, LPNHE et Irfu (voir CS IN2P3 27/06/13):

- Lecture des signaux des photomultiplicateurs: Adapter PMm2 au proto avec environnement cryogénique
- Automatisation: Système de positionnement du plan d'anode au dessus de la surface du liquide
- Mécanique de la Field Cage (électrodes) / du plan d'anodes



## FINAL FIELD CAGE ASSEMBLY





## Rôle du post-doc pour le projet Long Base Line dans ENIGMASS

- Le candidat aura un **rôle principal** dans la mise en place de l'activité Long Base Line au sein du Labex.
- **Forte implication** dans le développement de l'activité de détecteur TPC LAr au LAPP. Mais aussi dans tous les aspects importants du projet avec l'avantage d'être localisé à Annecy, à proximité du CERN.
- La première année sera dédiée aux études de conception et les tests en laboratoire.
- La seconde et troisième année seront ciblées pour la fabrication, l'installation sur site du détecteurs et la préparation des logiciels d'analyse.

*Minimum requirements are:* PhD degrees in Particle physics, experience in techniques for particle detectors, Monte-Carlo simulations and data analysis. Previous post doctoral experience in neutrino physics is a benefit.



## Impact escompté du postdoc et lien avec les objectifs scientifiques du LABEx):

- Développer la ligne de recherche pour les projets de physique des neutrinos du LABEX ayant pour objectif la détermination de la hiérarchie de masse et la quête de la violation CP dans le secteur leptonique

## Aspects collaboratifs entre équipes du LABEx

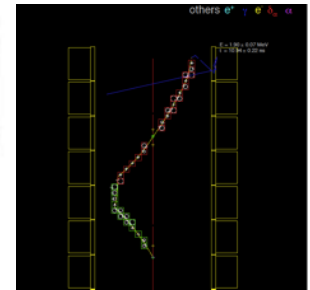
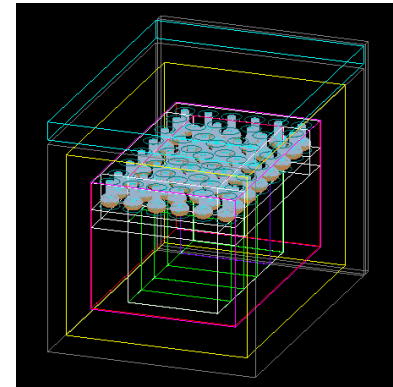
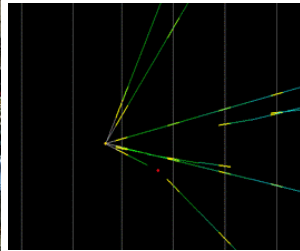
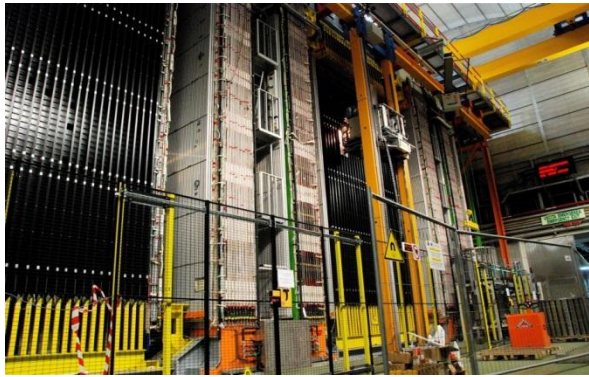
- Le projet de détecteur de grande masse en souterrain offre **un panorama de physique très étendu** : la physique des oscillations neutrino sur faisceau mais aussi l'astroparticule, l'étude des neutrinos solaires, des neutrinos atmosphériques et les neutrinos issus d'explosion de supernovae. Ces détecteurs offriront aussi une fenêtre unique sur la recherche de la désintégration du proton, fortement lié à l'évolution de l'Univers et aux modèles de grande unification.
- Dans ce cadre, nombre de sujets concernent les recherches à la fois expérimentales au LSM et théoriques au LapTh et au LPSC.

**Des collaborations sont envisageables sur un plus long terme**

# La physique des $\nu$ dans le Labex



- actuel: oscillation
- Court et moyen termes: sterile et désintégration double beta
- Long terme: Hiérarchie de Masse et violation CP



- programme en cohérence avec la stratégie nationale et internationale et touchant les questions fondamentales du moment avec retour de physique sur le moyen terme
- Le projet de faisceau Long base Line est l'avenir à long terme du domaine. Un engagement progressif passant par une participation au R&D détecteur proposé est une étape essentielle pour mettre à profit les expertises des labos, se positionner et acquérir des expertises nouvelles.

The End

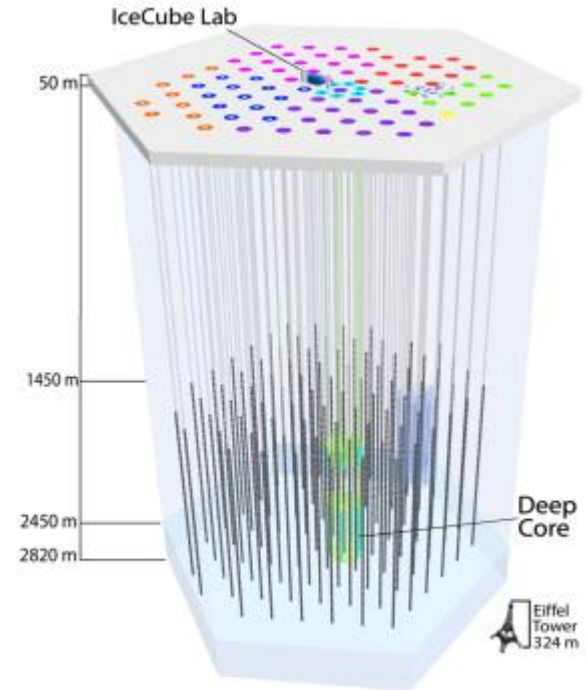
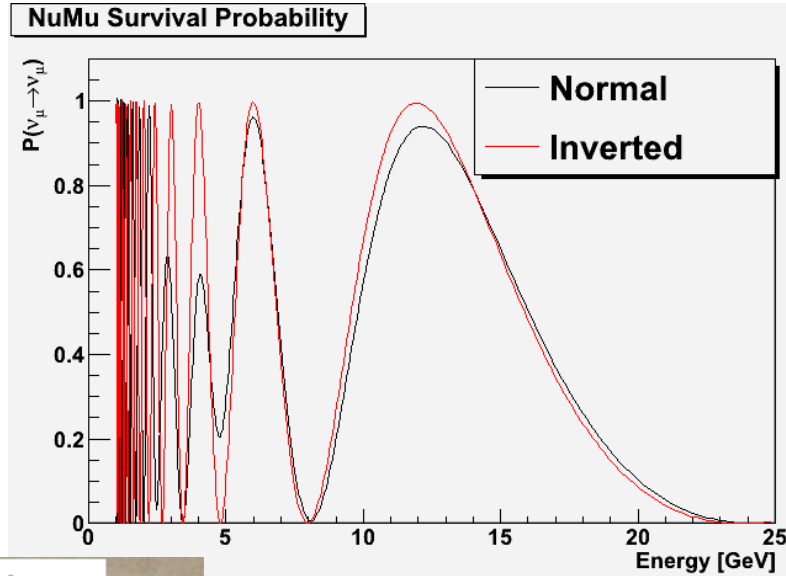
# Mass hierarchy:

Other investigation techniques:

**Atmospheric neutrinos:** looking at the effect of matter effect in the  $\nu_\mu$  rate

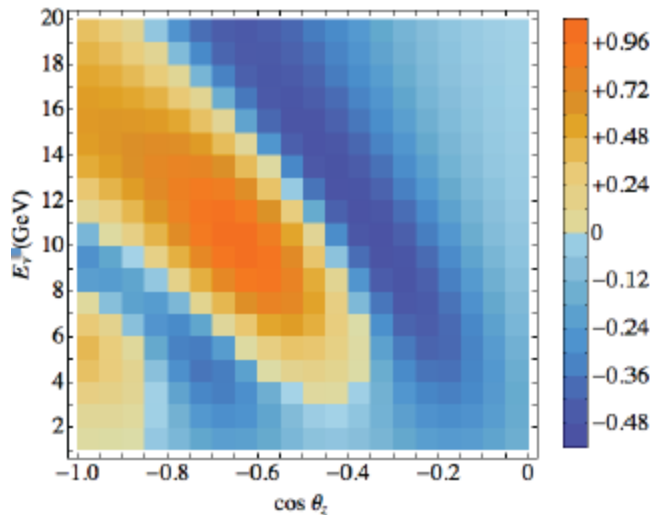
<10% effect

PINGU



$\sigma_E = 2 \text{ GeV}, \sigma_\theta = 11.25^\circ$

$(N_\mu^{\text{IH}} - N_\mu^{\text{NH}})/(N_\mu^{\text{NH}})^{1/2}$  [PINGU 1 yr] Smeared



Also

INO: 50 kton iron-RPC calorimeter

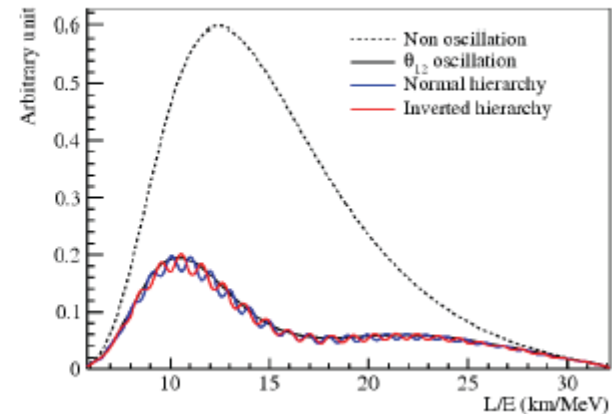
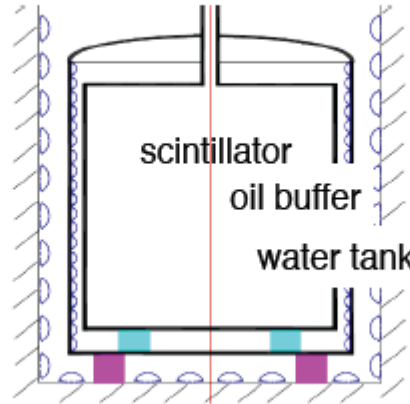
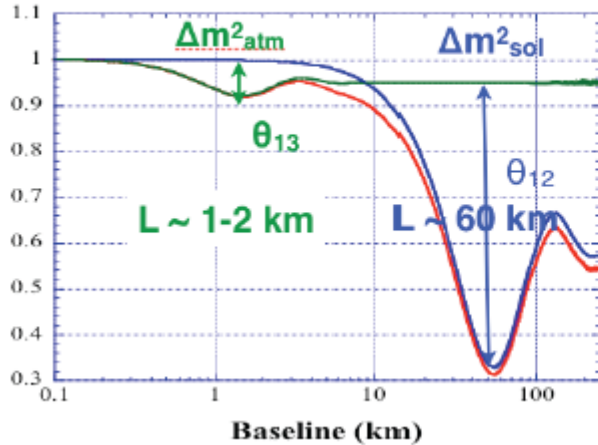
HyperK in Japan



# Mass hierarchy:

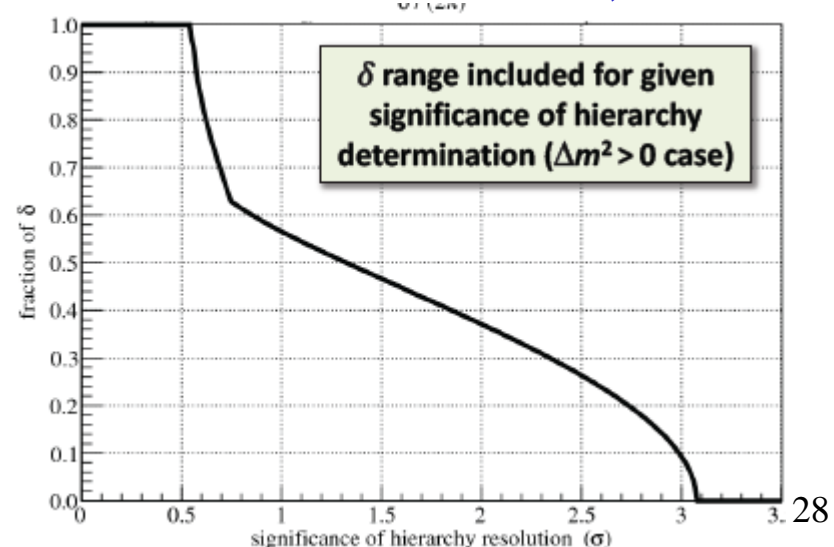
## Daya Bay II

## Long Baseline reactor with large detector

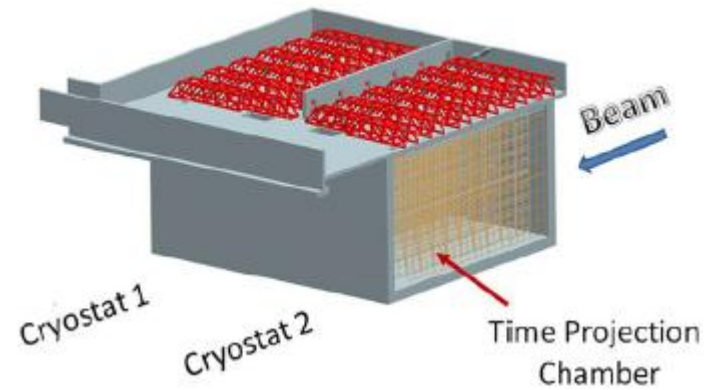
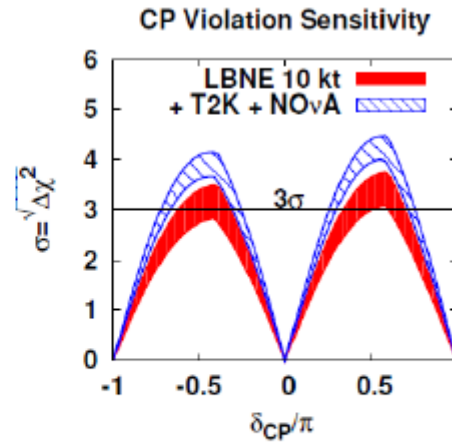
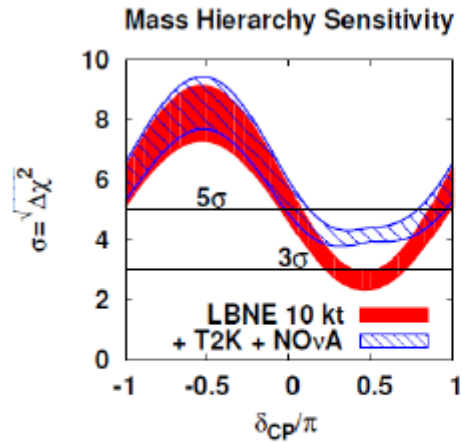


- 20-50 kton LS detector
- 2-3 % energy resolution
- Rich physics possibilities
  - ⇒ Mass hierarchy
  - ⇒ Precision measurement of 4 mixing parameters
  - ⇒ Supernovae neutrino
  - ⇒ Geoneutrino
  - ⇒ Sterile neutrino
  - ⇒ Atmospheric neutrinos
  - ⇒ Exotic searches

## Accelerator: Nova, T2K



# LBNE in US:



Can resolve MH with  $\geq 5/4\sigma$  for 50%/all  $\delta_{CP}$  combined

Can resolve CPV with  $\geq 3\sigma$  for 45%  $\delta_{CP}$  combined

# Summary of the French groups contributions, related budgets and time profile

Group	Contribution	Hardware cost
APC	Photomultipliers digitization system	48 keur
IPNL	Cryogenic ASICs and DAQ system	265 keur
IRFU	Charge readout detectors	
LAPP	Photomultipliers digitization system	12 keur
	Field cage construction and readout plane alignment system under discussion	(under evaluation)
LPNHE	High voltage system and feedthroughs	150 keur
Total		475 keur / 3250 keur (total detector cost)

Table 1: Contributions to the prototype hardware costs by the French groups

- Half 2014: EHN1 ready for installation
- 2014-2015 detector construction
  - ✓ 9 months for tank construction
  - ✓ tank inner instrumentation
  - ✓ 2015: electronics production
- Start data-taking: spring 2016
- 2016-2017: two years of running before CERN LS2

Year	APC				IPNL				LAPP				LPNHE				Total	Year
	FTE	Detector	Missions	Function.	FTE	Detector	Missions	Function.	FTE	Detector	Missions	Function.	FTE	Detector	Missions	Function.		
2014	3,8	15	10	10	6,7	40	20	10	0,8	2	4	0,5	2,5	30	10	5	156,5	2014
2015	3,9	25	15	10	6,7	200	30	10	0,8	8	4	0,5	2,5	100	10	5	417,5	2015
2016	4,9	8	15	10	6,7	25	25	10	0,8	2	4	0,5	2,5	20	10	5	134,5	2016
2017	4	0	10	5	6,7	0	25	10	0,8	0	4	0,5	2,5	0	10	5	69,5	2017
	16,6	48	50	35	26,8	265	100	40	3,2	12	16	2	10	150	40	20	778	Grand total (hardware+Miss.+Func.)
																	475	Hardware total
			85	5,120482			140	5,223881			18	5,625			60	6		
			Mis+Fun	Mis+Fun/FTE			Mis+Fun	Mis+Fun/FTE			Mis+Fun	Mis+Fun/FTE			Mis+Fun	Mis+Fun/FTE		

## Budget over 4 years: 2014-2017

- 475 keur hardware costs
- 303 keur missions+ functioning

## Timely activity in view of:

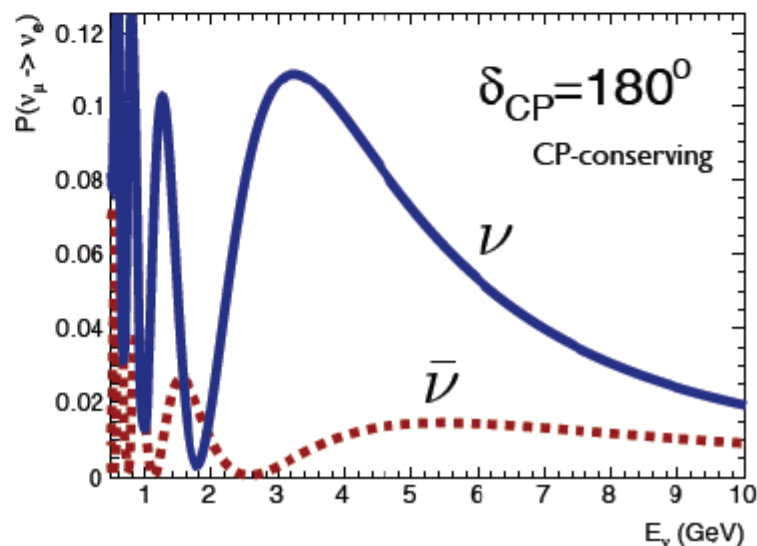
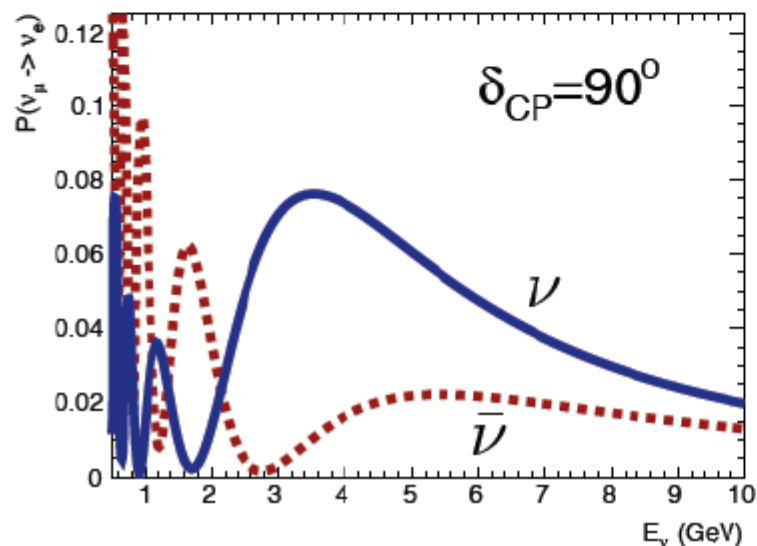
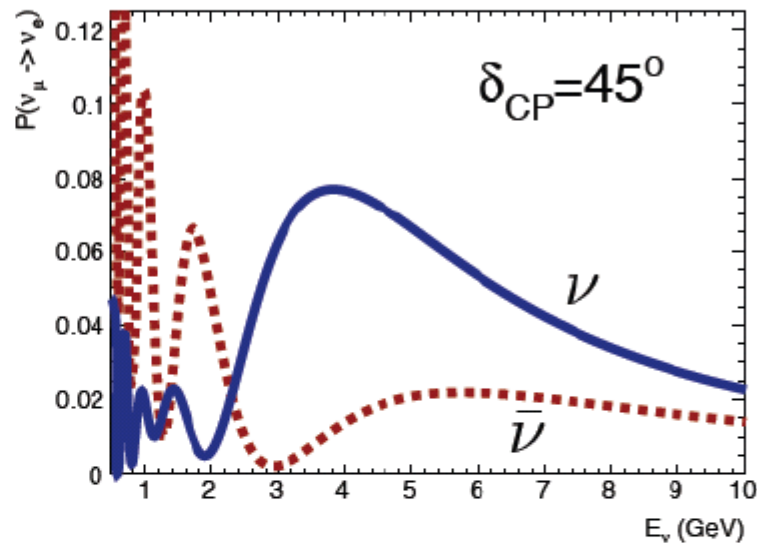
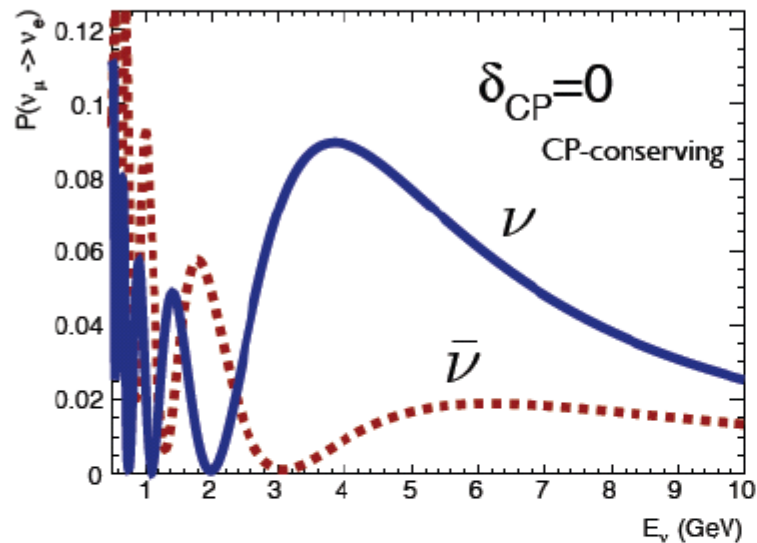
- 1) The construction of the far detector
- 2) CERN LS2

# CERN-Pyhäsalmi: spectral information $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$

★ Normal mass hierarchy

L=2300 km

$$\sin^2(2\theta_{13}) = 0.09$$





# Staged search for CP violation

First phase:

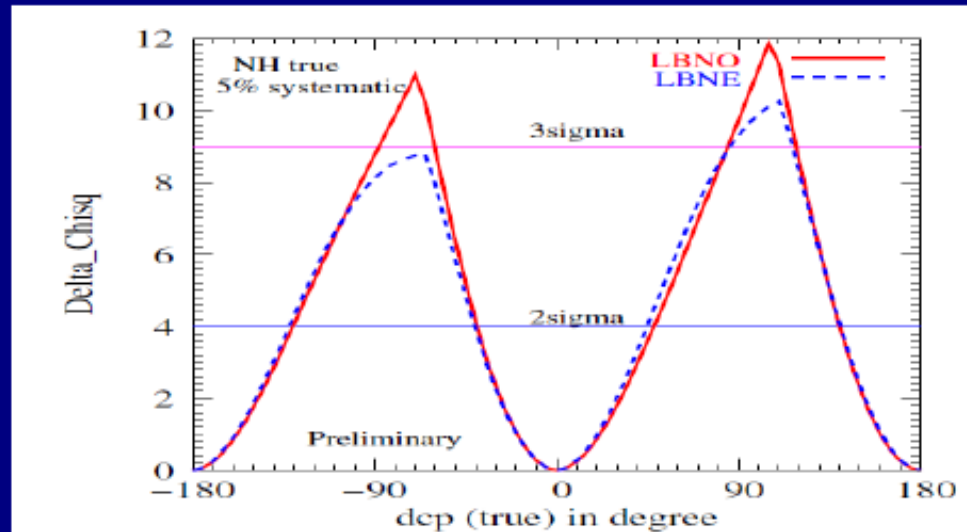
LBNO 20kton

e.g. (5+5 years nu/nubar)

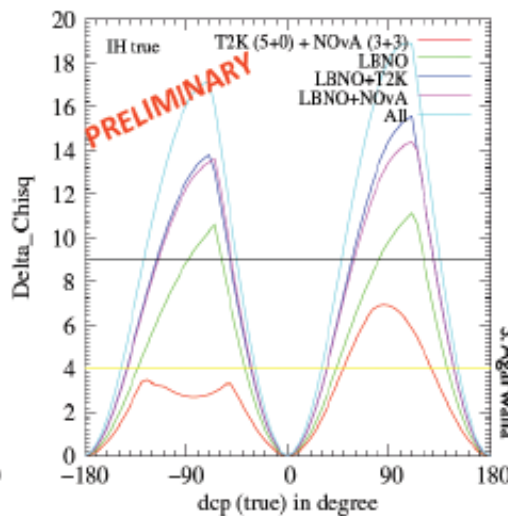
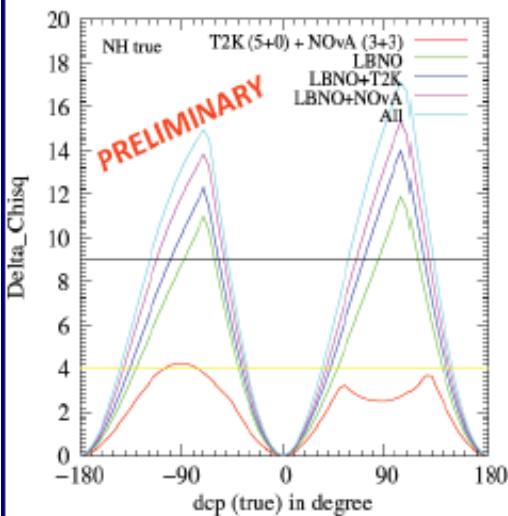
71% (20%) coverage at 90% ( $3\sigma$ )

Second phase:

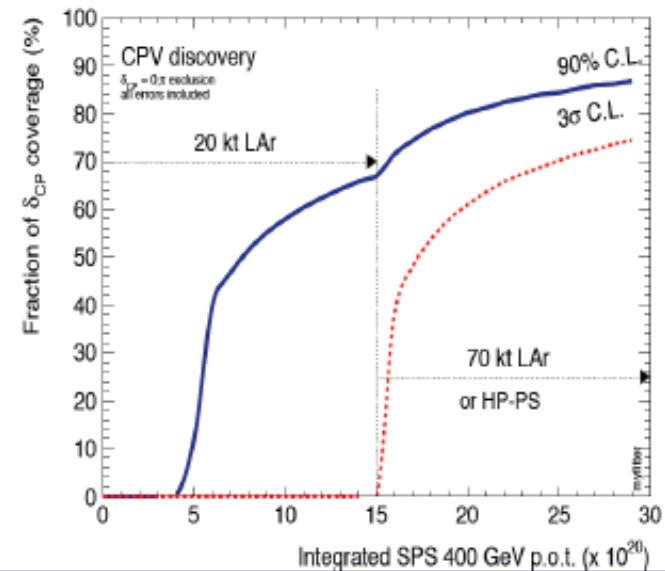
LBNO 70 kton, 2MW HP-PS



Sensitivity combining T2K(295km), NOvA(810km) and LBNO(2300km)







Incremental approach with conventional beam



The power of combining several different baselines L:

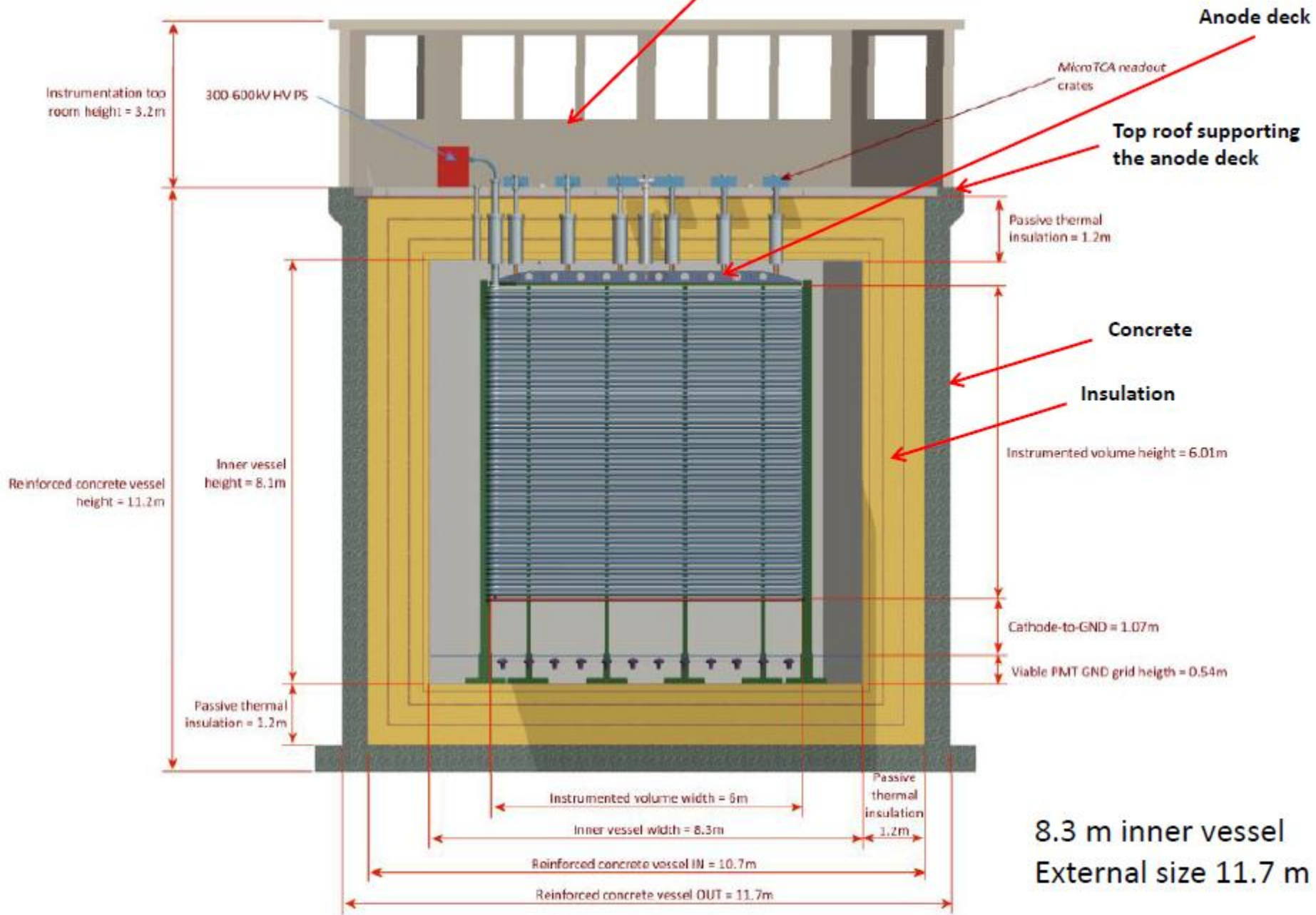
LBNO 20kton(5+5) + T2K(5+0) + NOvA(3+3) : 40-45% CPV at  $>3\sigma$  C.L.

# Overview of parameters

Liquid argon density at 1.2 bar	[T/m <sup>3</sup> ]	1.38346
Liquid argon volume height	[m]	7.6
Active liquid argon height	[m]	5.992
Pressure on the bottom due to LAr	[T/m <sup>2</sup> ]	1.05 (≡ 0.1 MPa ≡ 1.031 bar)
Inner vessel size (W x L x H)	[m x m x m]	 8.288 x 8.288 x 8.108
Inner vessel base surface	[m <sup>2</sup> ]	67.6
Total liquid argon volume	[m <sup>3</sup> ]	509.6
Total liquid argon mass	[T]	 705.0
Active LAr area (percentage)	[m <sup>2</sup> ]	36 (53.3%)
Active (instrumented) mass	[T]	 298.2
Charge readout square panels (0.5m×0.5m)		144
Number of signal feedthroughs (640 channels/FT)		12
Number of readout channels		 7680
Number of PMT (area for 1 PMT)		144 (0.5m×0.5m)

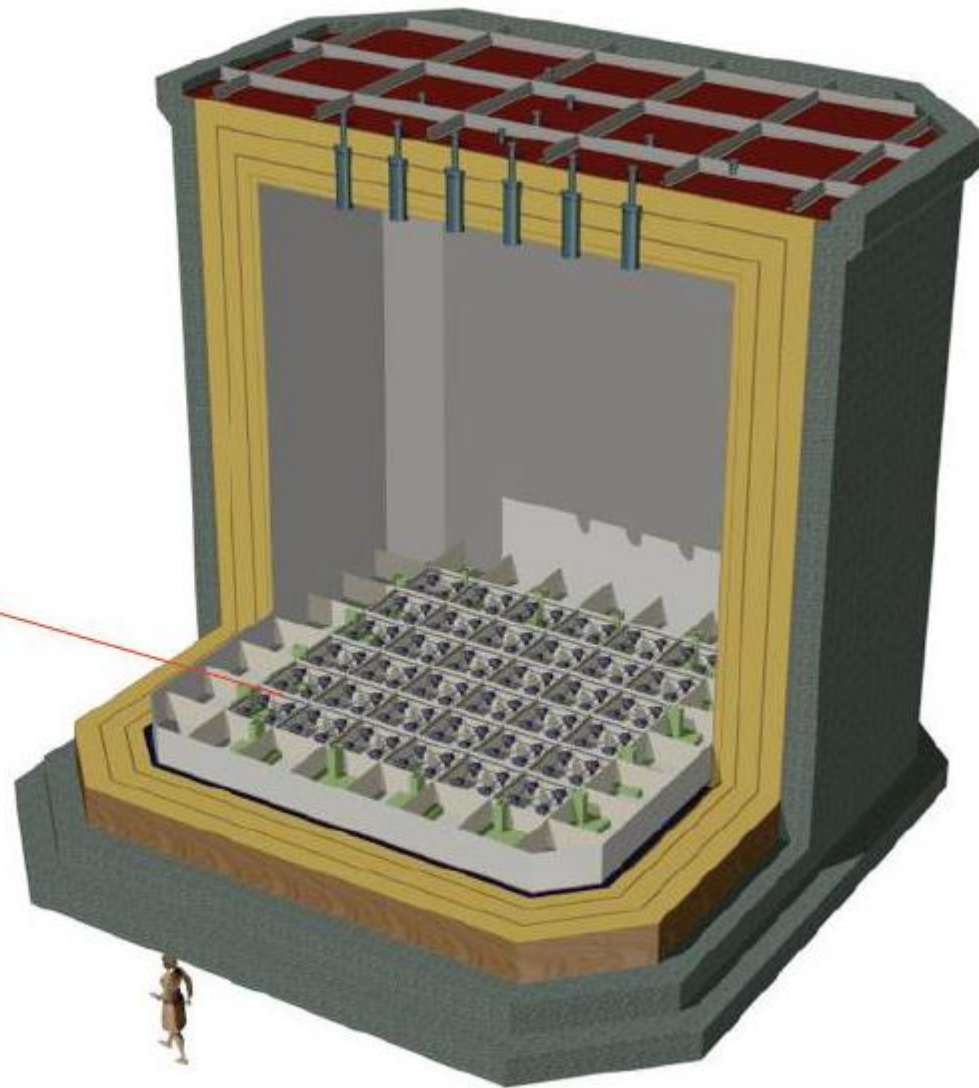
# Vertical cross-section

## Penthouse for electric, electronic, cryogenic instrumentation



8.3 m inner vessel  
External size 11.7 m

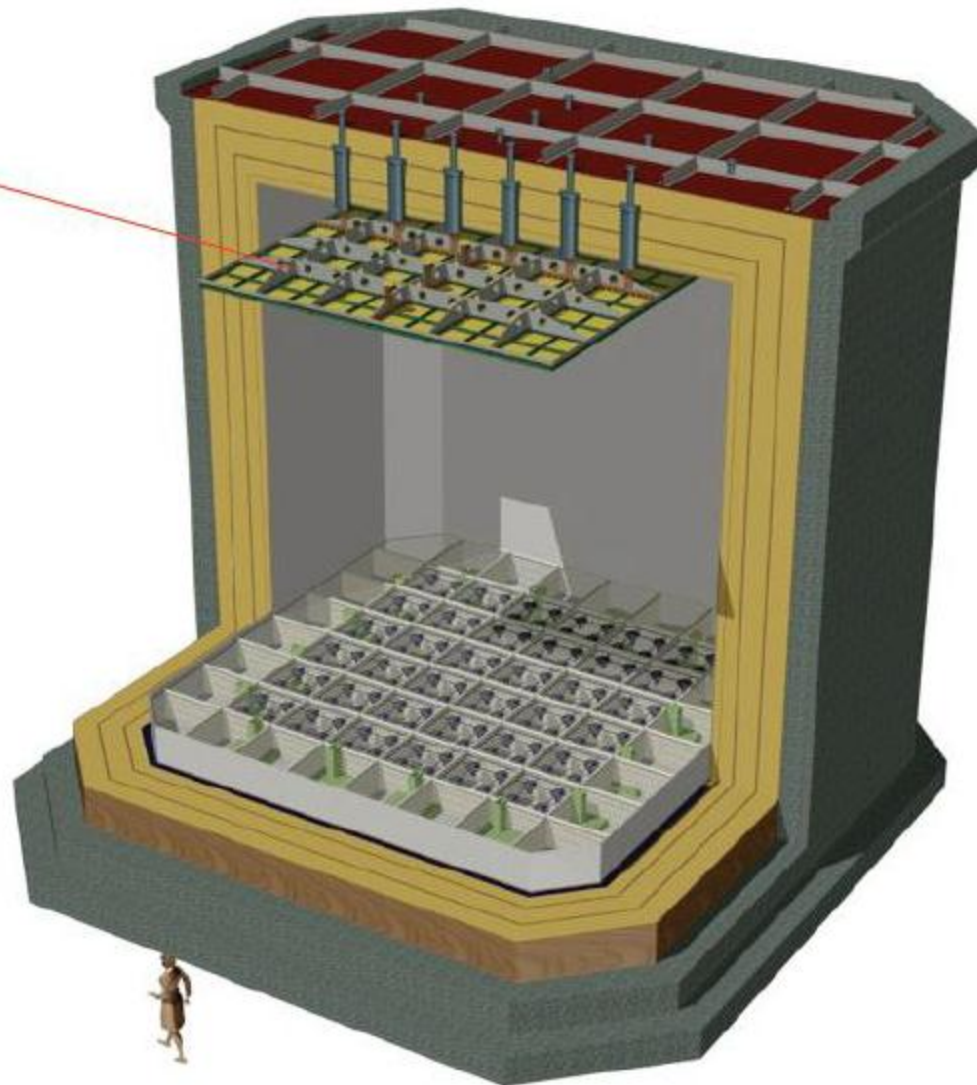
PMT array





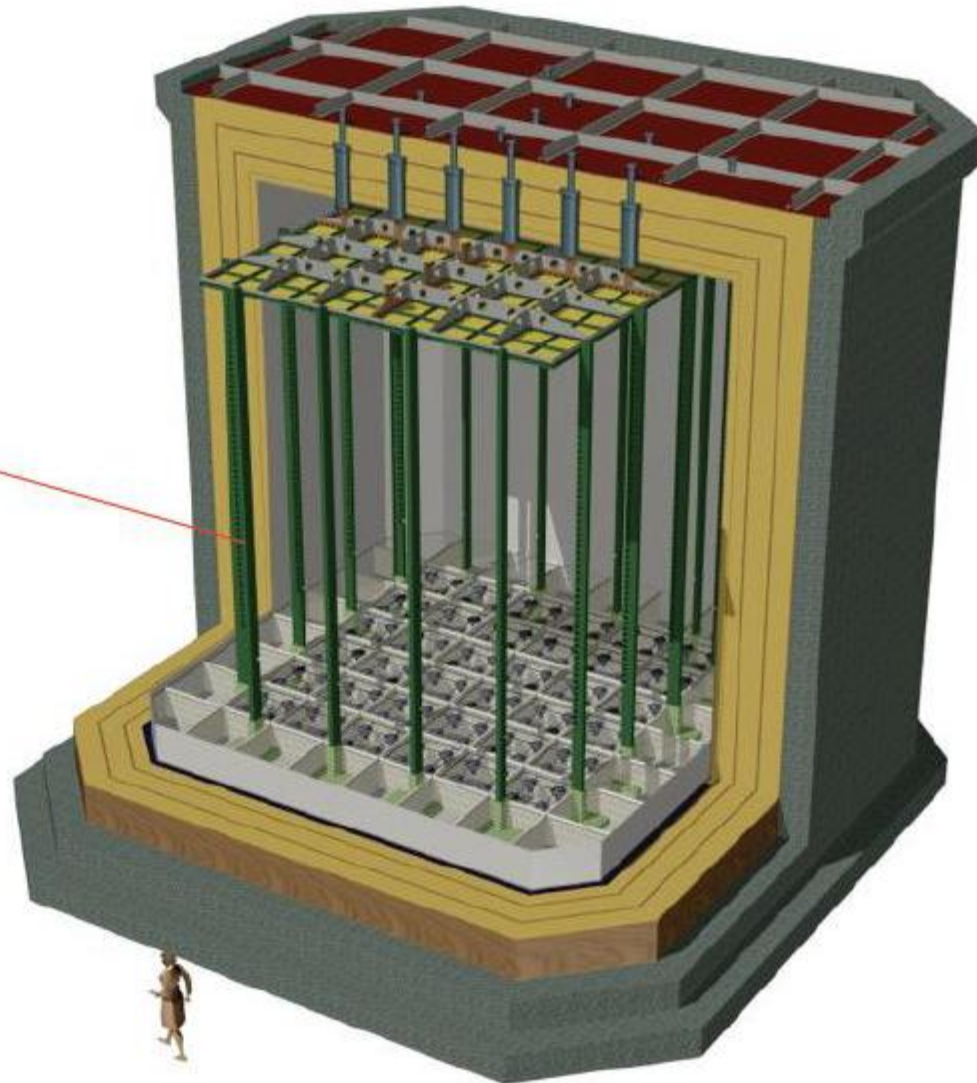
# Readout anode deck

Top anode deck,  
including charge  
extraction grid, LEM,  
2D charge readout  
panels

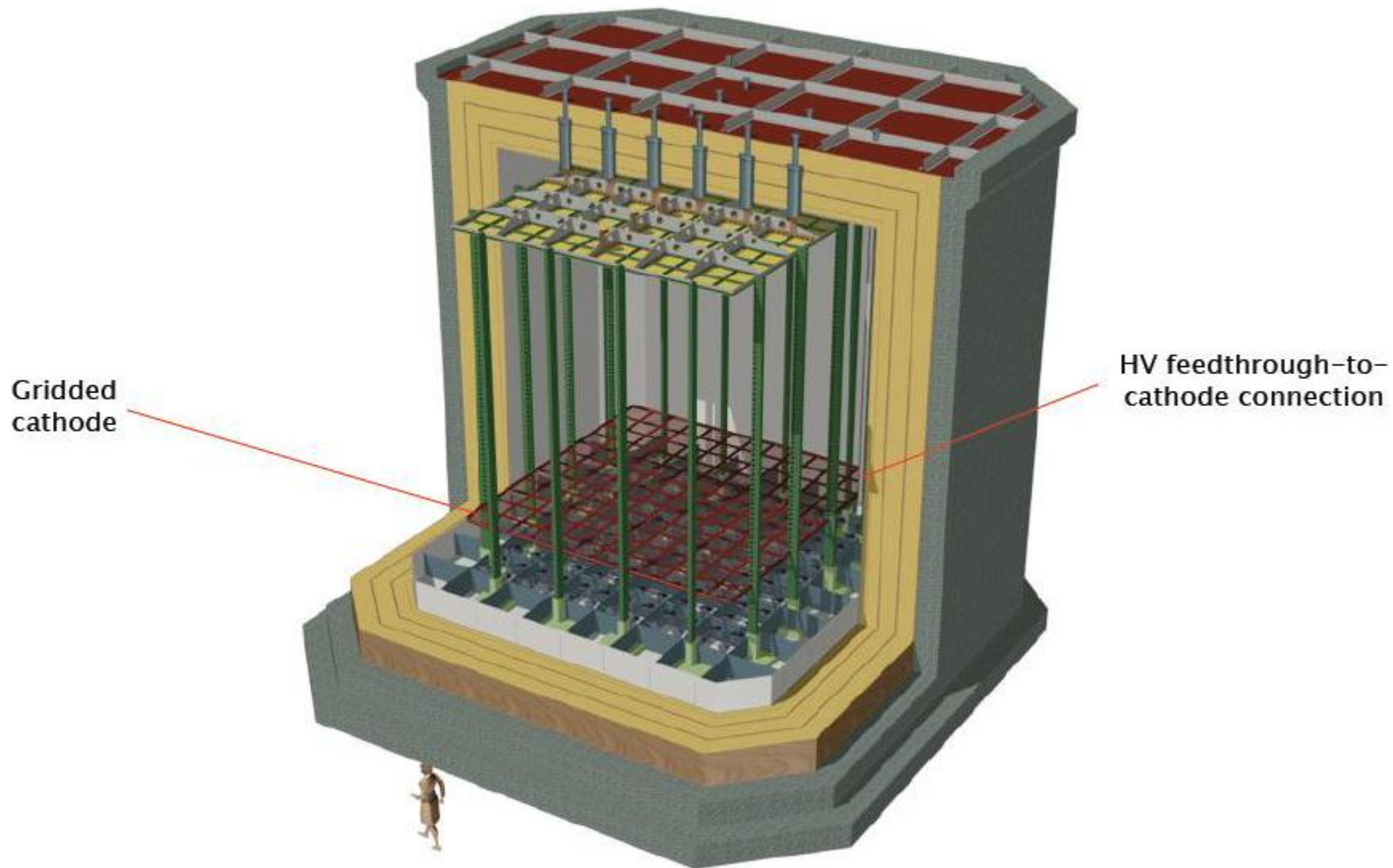


# Field cage assembly (I)

R4 insulating supports for field cage electrodes



# Field cage assembly (II)

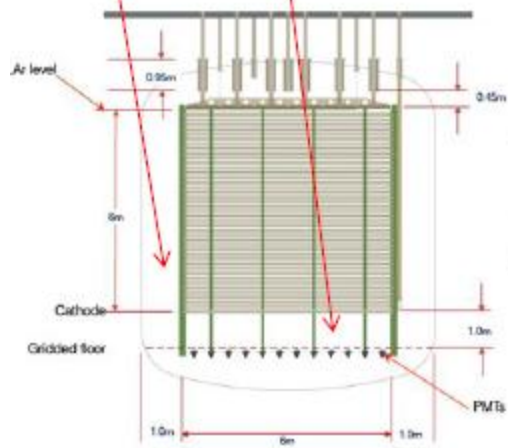




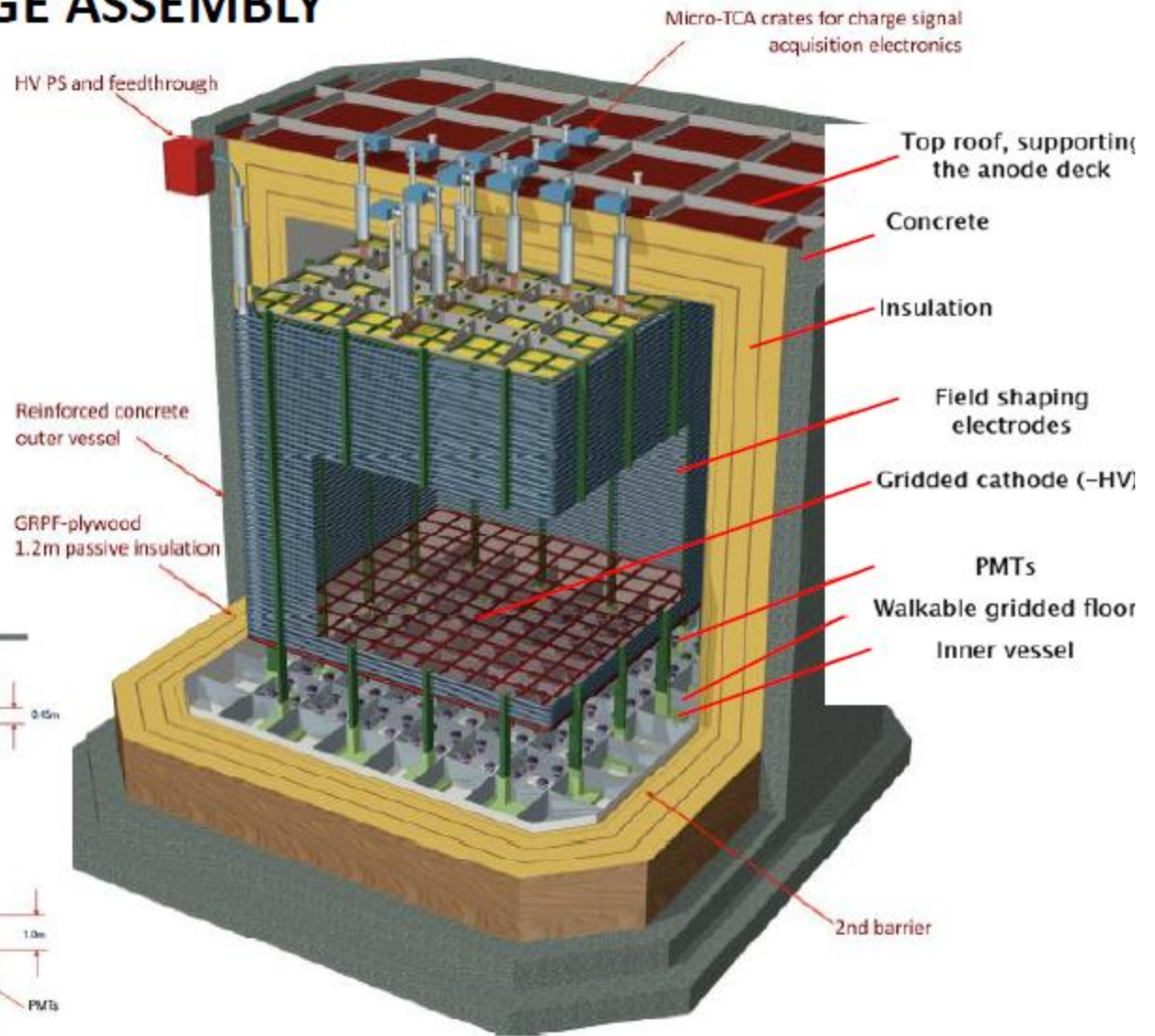
# FINAL FIELD CAGE ASSEMBLY

- 1 m distance field cage - walls

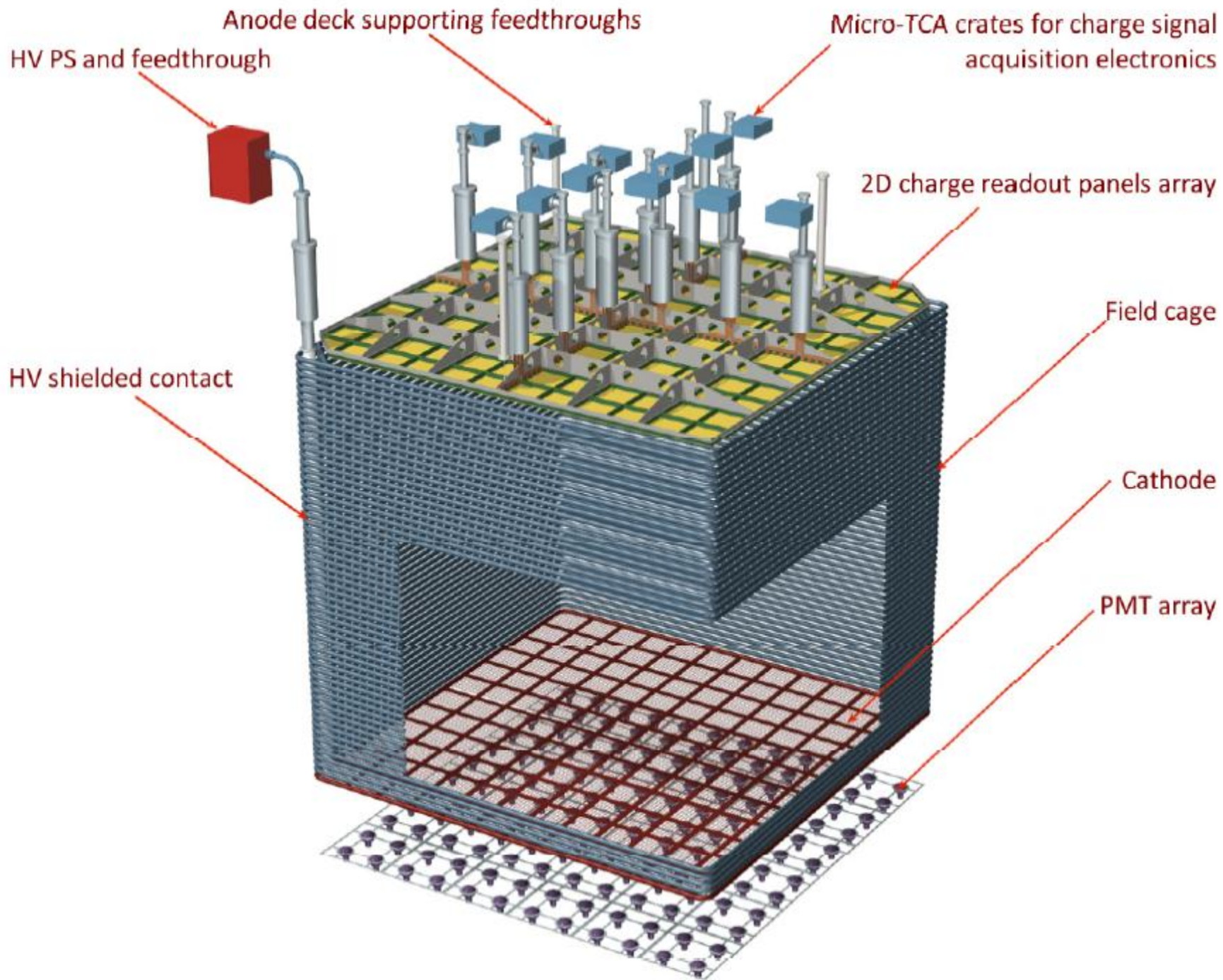
- 1 m distance cathode-PMTs



side view



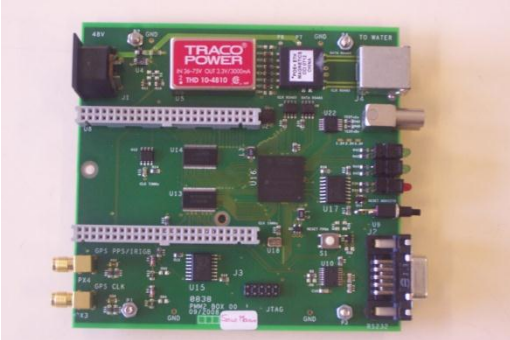
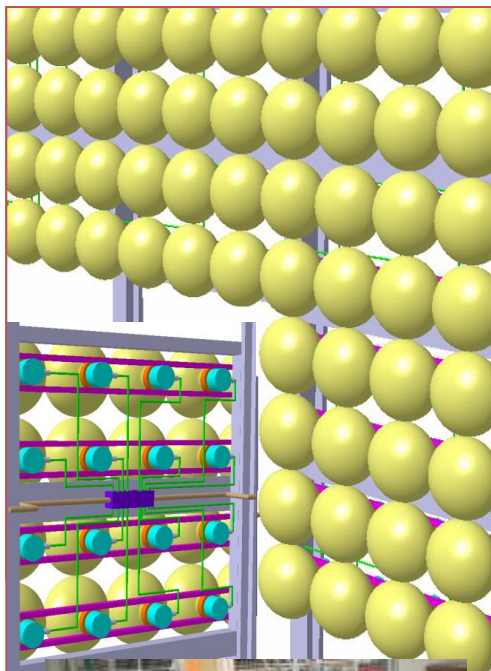




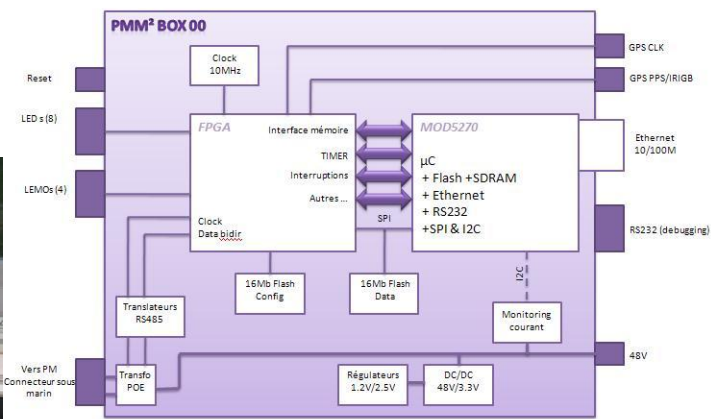
# Activités proposées LBL:

## Adapter PMm2 au proto avec environnement LAr

- Electronique innovante pour photo-détecteurs distribués en physique des particules et astroparticule
  - Mise en réseau des photo-détecteurs
  - 1 seul câble par groupe de PMTs (16 pour le démonstrateur)
- Engagements techniques du LAPP
  - Conception et réalisation de l'électronique d'acquisition
  - Choix et qualification électrique d'un câble sous marin de 100m



## PMM<sup>2</sup> box : acquisition en surface



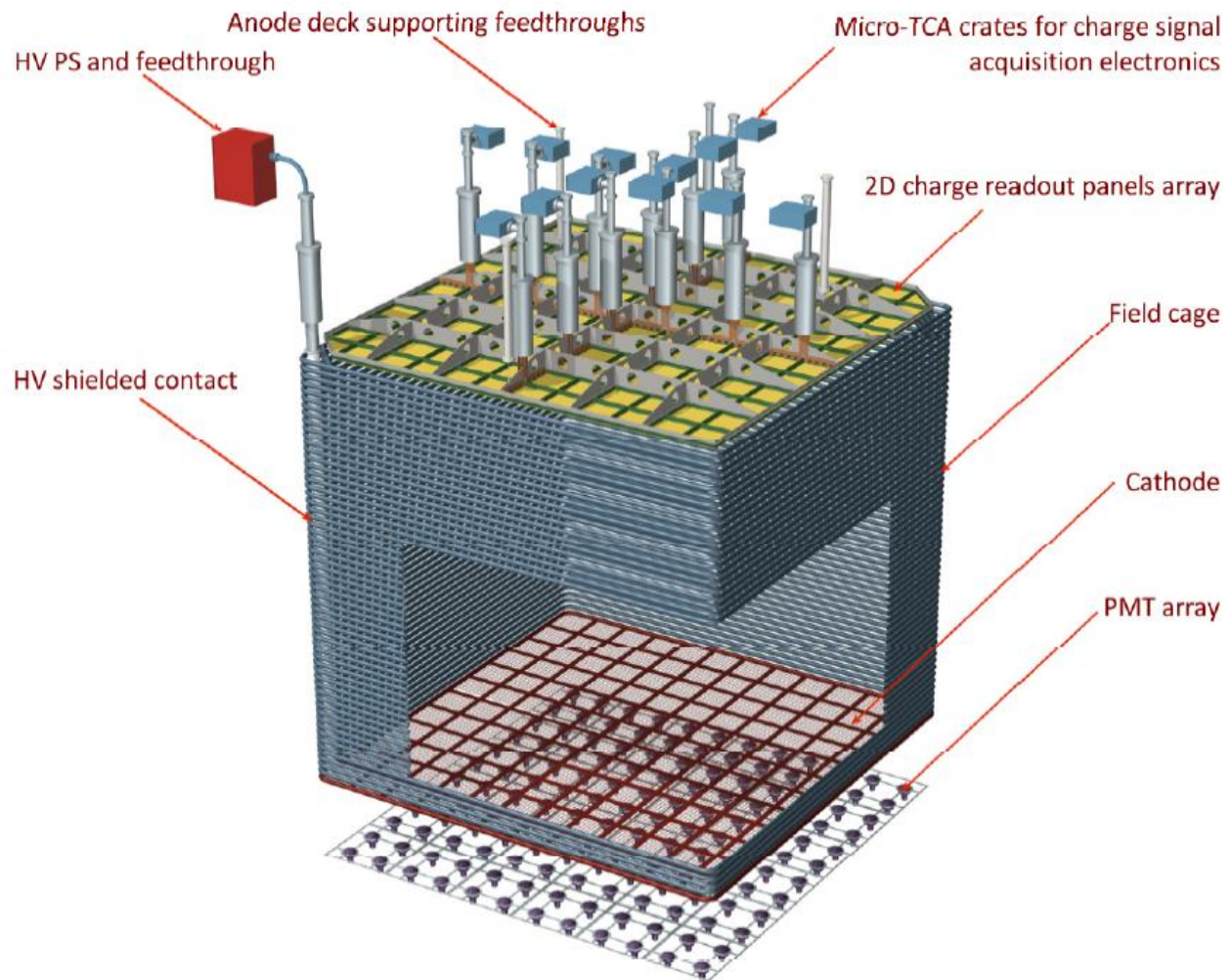
## PMM<sup>2</sup> box : acquisition en surface





# Activités envisagées LBL:

Automatisme; Système de control de positionnement du plan d'anode au dessus de la surface du liquide



Mécanique de la Field Cage électrodes / plan anode