

Jornadas sobre los proyectos científicos del IFIC
19/01/2017

Oscilaciones de neutrinos en T2K y DUNE

Anselmo Cervera Villanueva
IFIC (UV-CSIC)
Valencia

Objetivos del grupo

- Estudiar las propiedades del neutrino: **matriz de mezcla** (\sim CKM) diferencia de **masas**, modos de **interacción**, etc
- Por ello hemos trabajado en T2K desde 2006
- T2K ya ha cumplido su principal objetivo, el descubrimiento de la oscilación $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ ($\theta_{13} \neq 0$). En la actualidad acumulando más datos y mejorando los análisis con la esperanza de encontrar una indicación seria de **violación de CP**
- Mirando al futuro hemos comenzado nuestra participación en **DUNE**, pues los experimentos actuales (T2K y NOvA) no tienen suficiente sensibilidad a δ_{CP} . Es nuestra intención participar en todas las fases del experimento, como hicimos en T2K

A. Cervera (CT)
M. Sorel (CT)
P. Novella (RyC)
A. Izmaylov (JdC)
Nuevo post-doc en 2017

FPA2016-78417-C2-1-P
195.000 € para tres años

Estrategias experimentales

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{21} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

Estrategias experimentales

$\theta_{23} \sim 42^\circ$ (8.4%), **octant ?**

$\theta_{13} \sim 8.9^\circ$ (2%), **δ_{CP} ?**

$\theta_{12} \sim 34^\circ$ (4.5%)



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

Estrategias experimentales

$\theta_{23} \sim 42^\circ$ (8.4%), **octant ?**

$\theta_{13} \sim 8.9^\circ$ (2%), **δ_{CP} ?**

$\theta_{12} \sim 34^\circ$ (4.5%)



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

$\Delta m^2_{12} \sim 7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ (3.4%)

$|\Delta m^2_{23}| \sim 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ (2.4%)

sign(Δm^2_{23}) unknown

Estrategias experimentales

$\theta_{23} \sim 42^\circ$ (8.4%), **octant ?**

$\theta_{13} \sim 8.9^\circ$ (2%), **δ_{CP} ?**

$\theta_{12} \sim 34^\circ$ (4.5%)



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

$\Delta m^2_{12} \sim 7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ (3.4%)

$|\Delta m^2_{23}| \sim 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ (2.4%)

sign(Δm^2_{23}) unknown

Estrategias experimentales

$\theta_{23} \sim 42^\circ$ (8.4%), **octant ?**

$\theta_{13} \sim 8.9^\circ$ (2%), **δ_{CP} ?**

$\theta_{12} \sim 34^\circ$ (4.5%)



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

$\Delta m_{12}^2 \sim 7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ (3.4%)

$|\Delta m_{23}^2| \sim 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ (2.4%)

sign(Δm_{23}^2) unknown

- Medida independiente de θ_{13} en experimentos con reactores

$$P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e} = 1 - \overset{\text{short baseline}}{\sin^2 2\theta_{13} \sin^2(\Delta m_{ee}^2 \frac{L}{4E})} - \overset{\text{long baseline}}{\cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2(\Delta m_{21}^2 \frac{L}{4E})}$$

Estrategias experimentales

$\theta_{23} \sim 42^\circ$ (8.4%), **octant ?**

$\theta_{13} \sim 8.9^\circ$ (2%), **δ_{CP} ?**

$\theta_{12} \sim 34^\circ$ (4.5%)



$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13}e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13}e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{21} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$\Delta m^2_{12} \sim 7.5 \times 10^{-5} \text{ eV}^2$ (3.4%)

$|\Delta m^2_{23}| \sim 2.4 \times 10^{-3} \text{ eV}^2$ (2.4%)

sign(Δm^2_{23}) unknown

- Medida independiente de θ_{13} en experimentos con reactores

$$P_{\bar{\nu}_e \rightarrow \bar{\nu}_e} = 1 - \overset{\text{short baseline}}{\sin^2 2\theta_{13} \sin^2(\Delta m^2_{ee} \frac{L}{4E})} - \overset{\text{long baseline}}{\cos^4 \theta_{13} \sin^2 2\theta_{12} \sin^2(\Delta m^2_{21} \frac{L}{4E})}$$

- Medida combinada θ_{13} - δ_{CP} en aceleradores a larga distancia (LBL)

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \sim \boxed{\sin^2 2\theta_{13}} \times \boxed{\sin^2 \theta_{23}} \times \boxed{\frac{\sin^2[(1-x)\Delta]}{(1-x)^2}} \\ \boxed{-\alpha \sin \delta} \times \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{13} \sin 2\theta_{23} \times \sin \Delta \frac{\sin[x\Delta]}{x} \frac{\sin[(1-x)\Delta]}{(1-x)} \\ + \alpha \cos \delta \times \sin 2\theta_{12} \sin 2\theta_{13} \sin 2\theta_{23} \times \cos \Delta \frac{\sin[x\Delta]}{x} \frac{\sin[(1-x)\Delta]}{(1-x)} \\ + \mathcal{O}(\alpha^2)$$

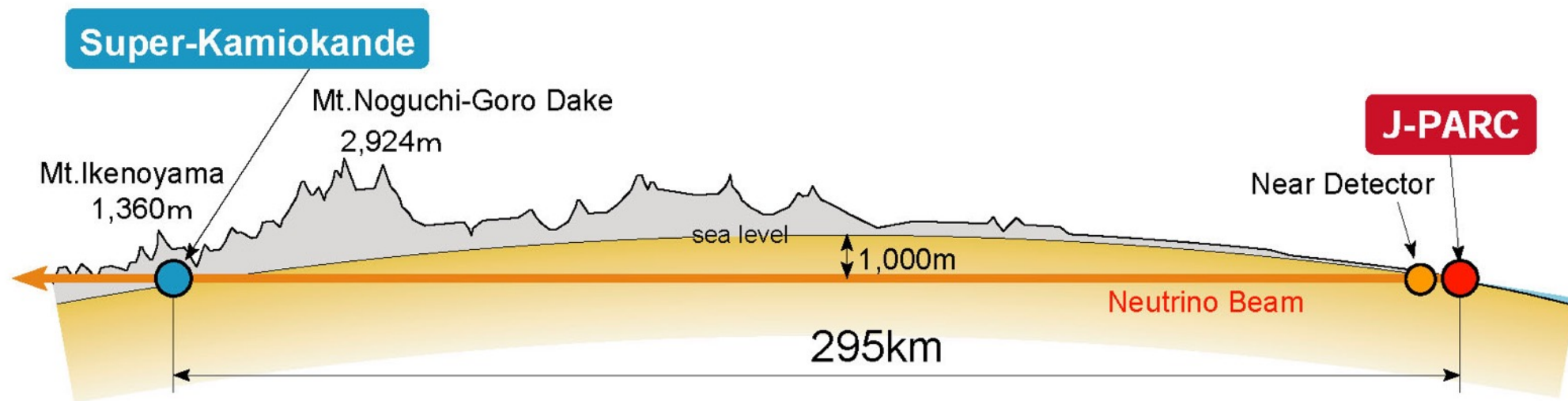
$$\alpha = \left| \frac{\Delta m^2_{21}}{\Delta m^2_{31}} \right| \sim \frac{1}{30} \quad \Delta \equiv \frac{\Delta m^2_{31} L}{4E} \quad \boxed{x \equiv \frac{2\sqrt{2}G_F N_e E}{\Delta m^2_{31}}}$$

M. Freund, Phys.Rev. D64 (2001) 053003

El experimento T2K

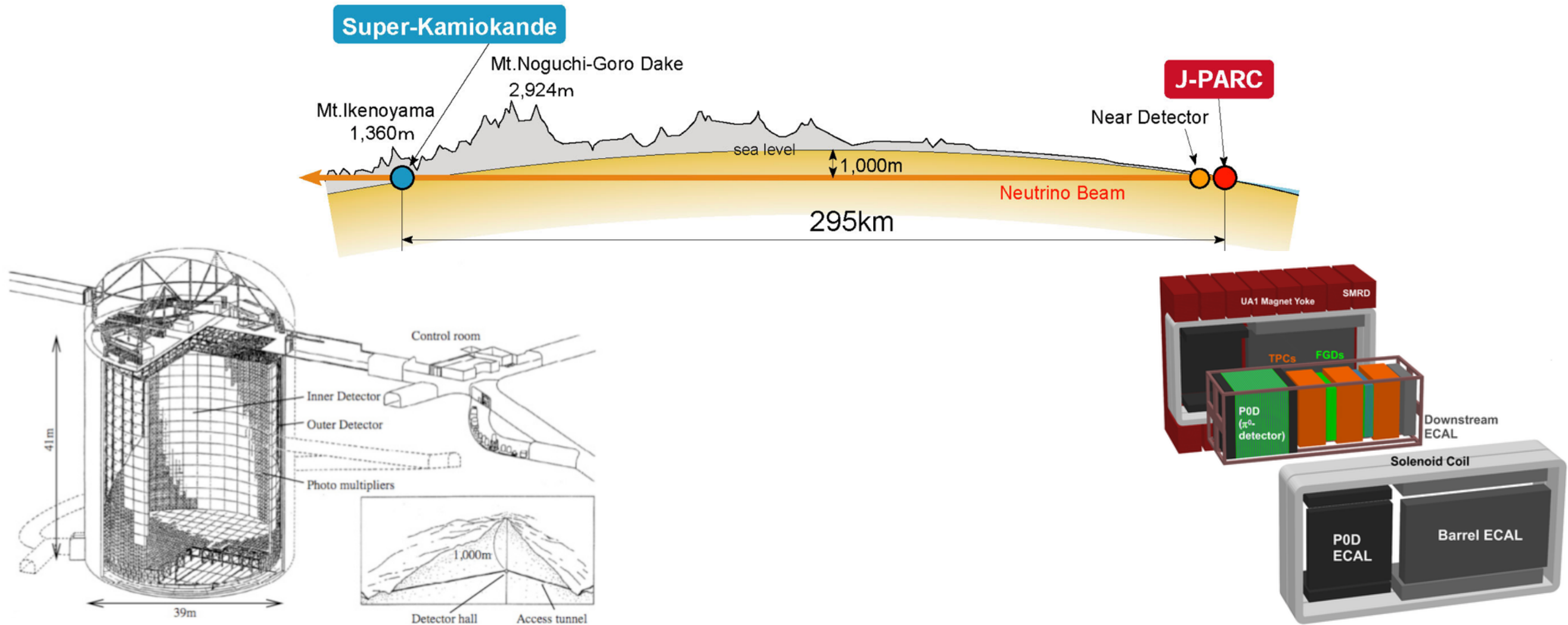


- Primer experimento de oscilaciones de neutrinos (y antineutrinos) LBL **off-axis**, comenzó a tomar datos a principios de 2010

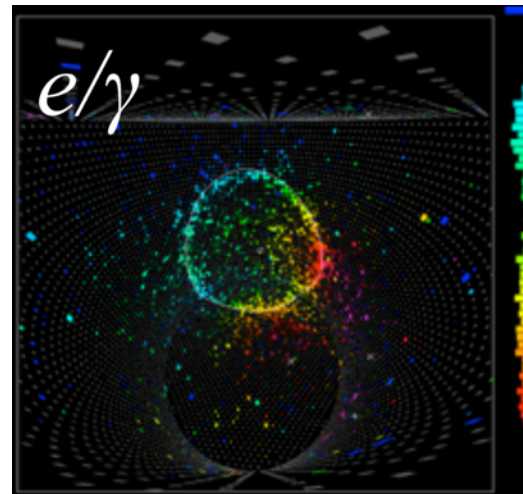
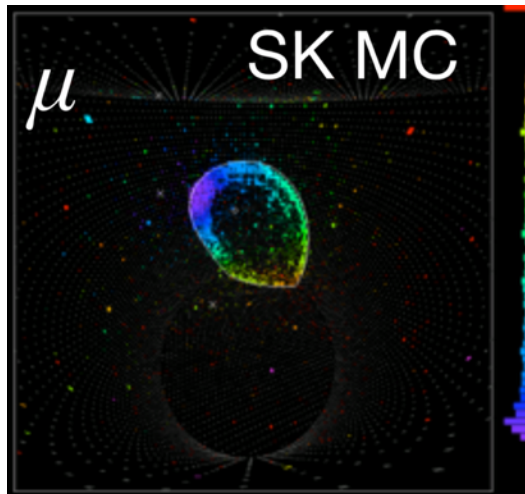
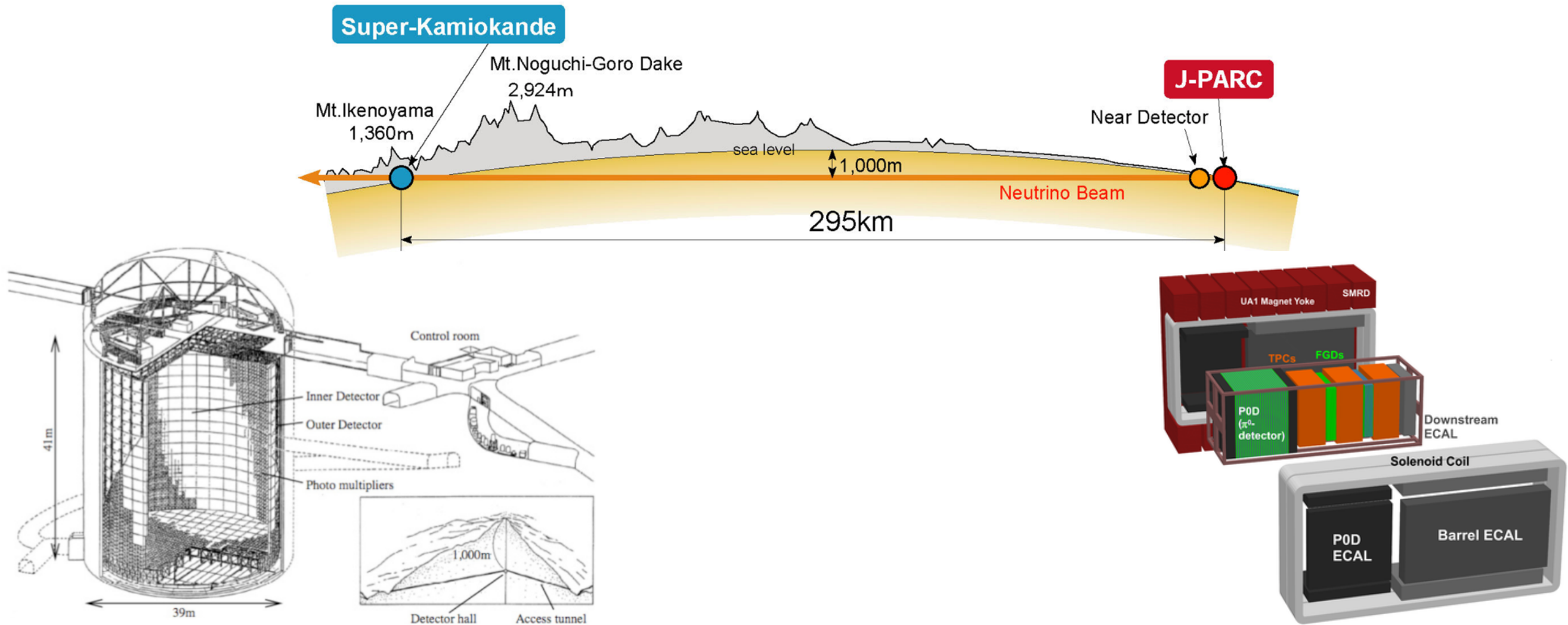


- En 2011 primera indicación de $\nu_{\mu} \rightarrow \nu_e$ (y $\theta_{13} \neq 0$), descubierta ($> 5\sigma$) más tarde en 2013
- Sigüientes objetivos:
 - Descubrimiento de $\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e$
 - Búsqueda de una indicación fuerte de **violación de CP**

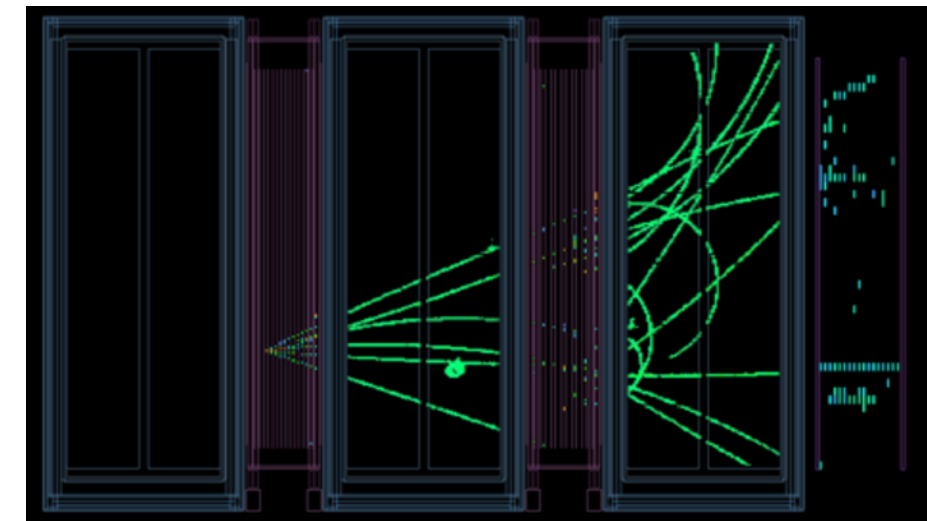
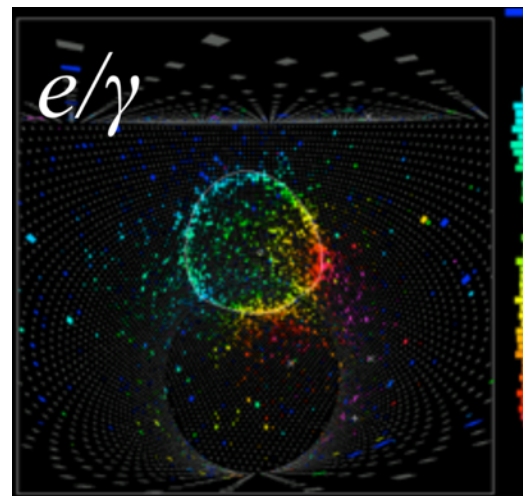
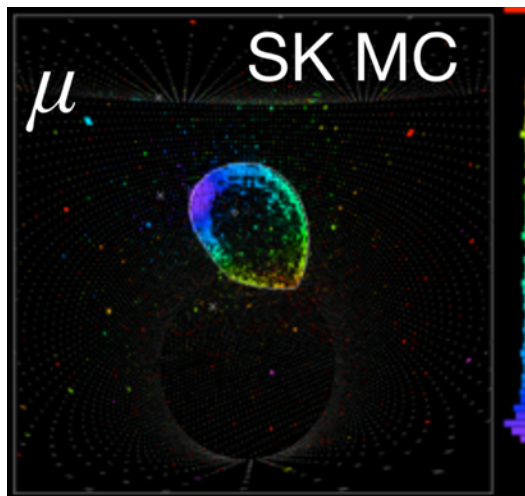
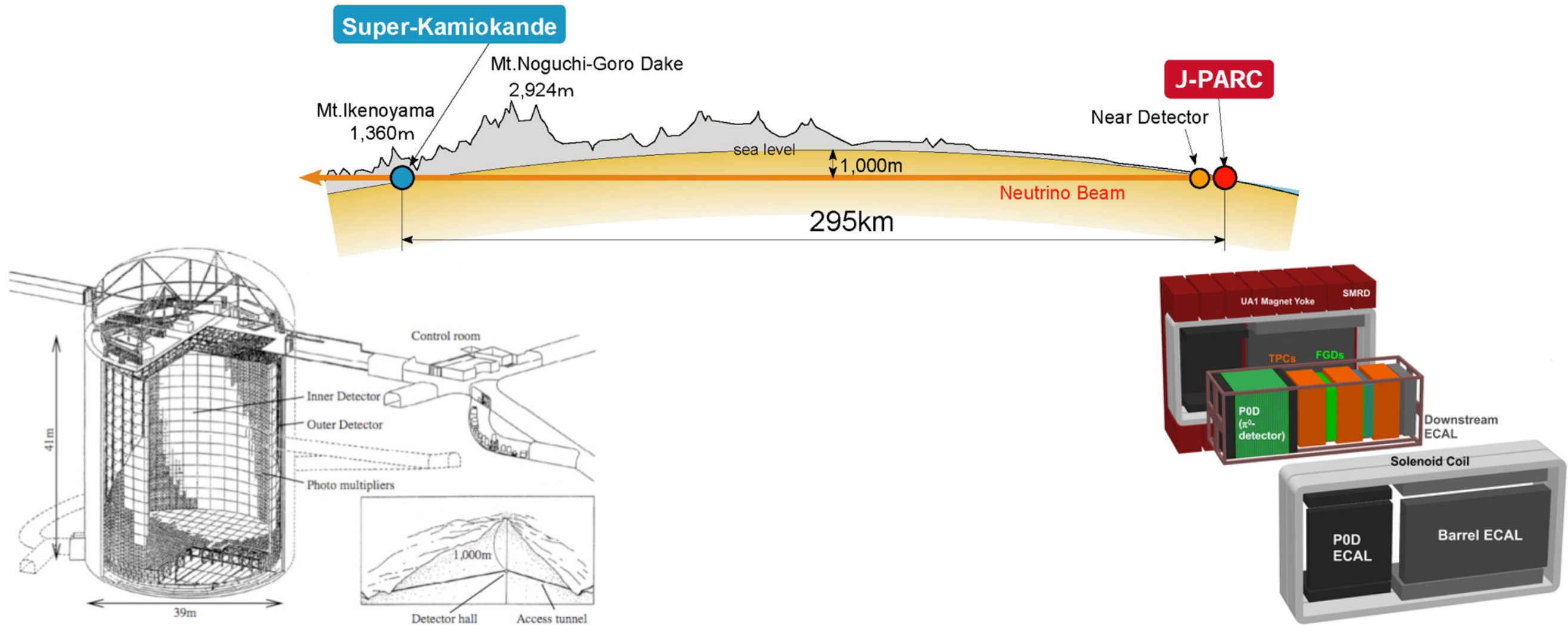
Los detectores de T2K



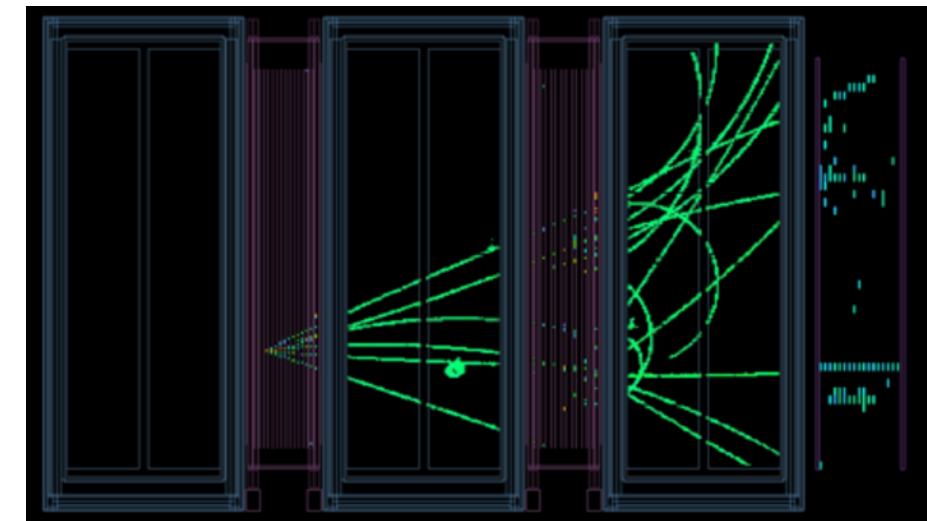
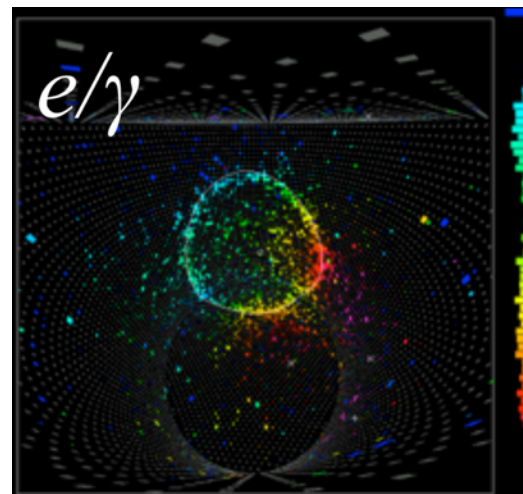
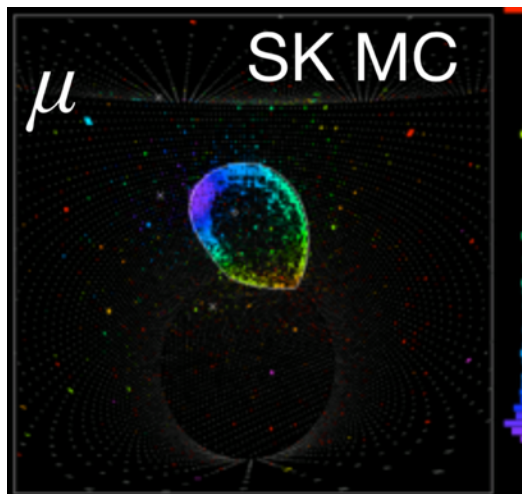
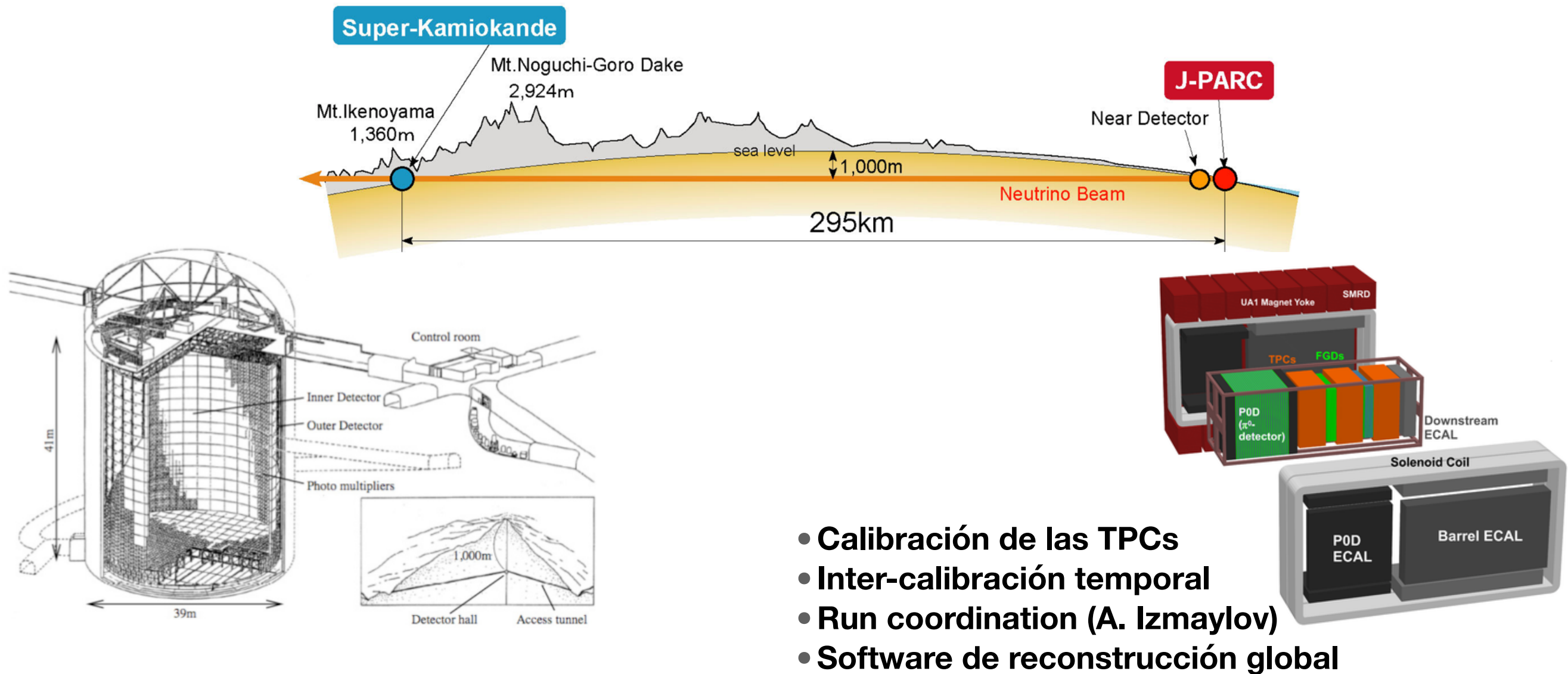
Los detectores de T2K



Los detectores de T2K



Los detectores de T2K

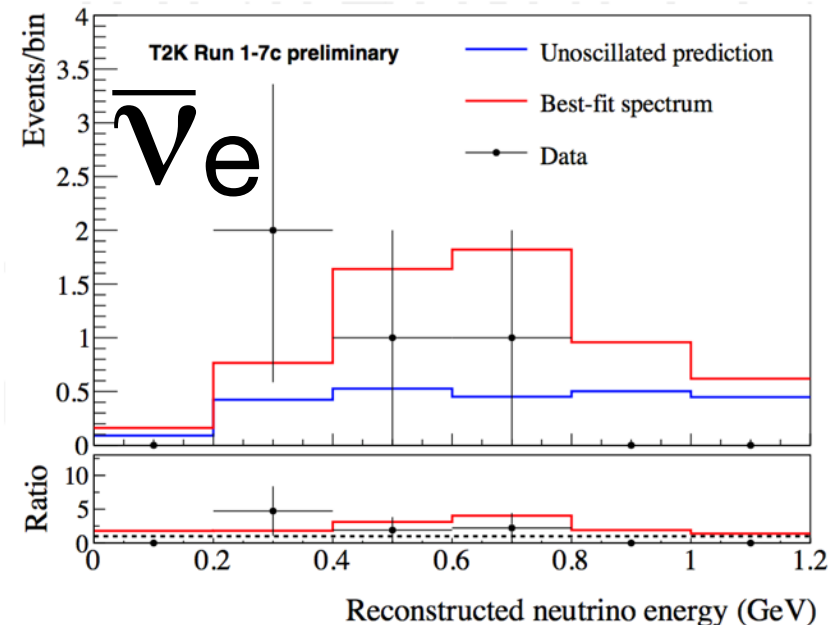
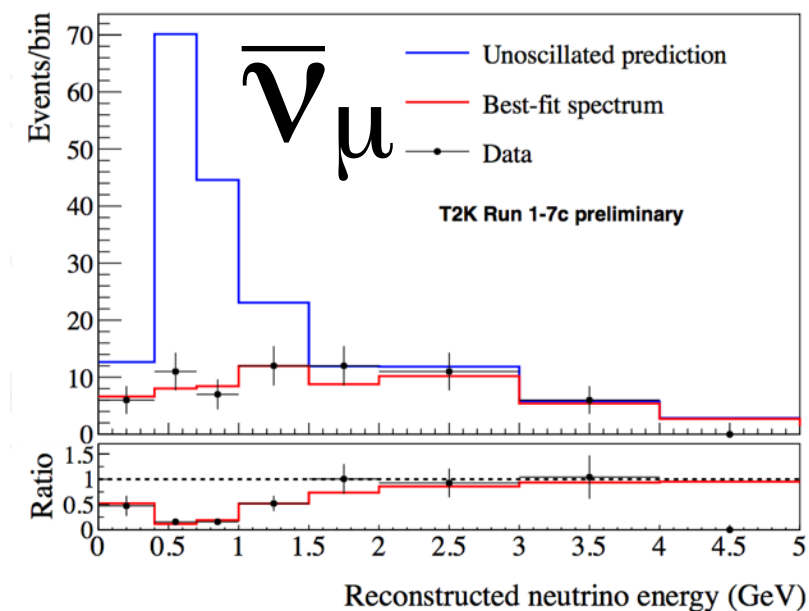
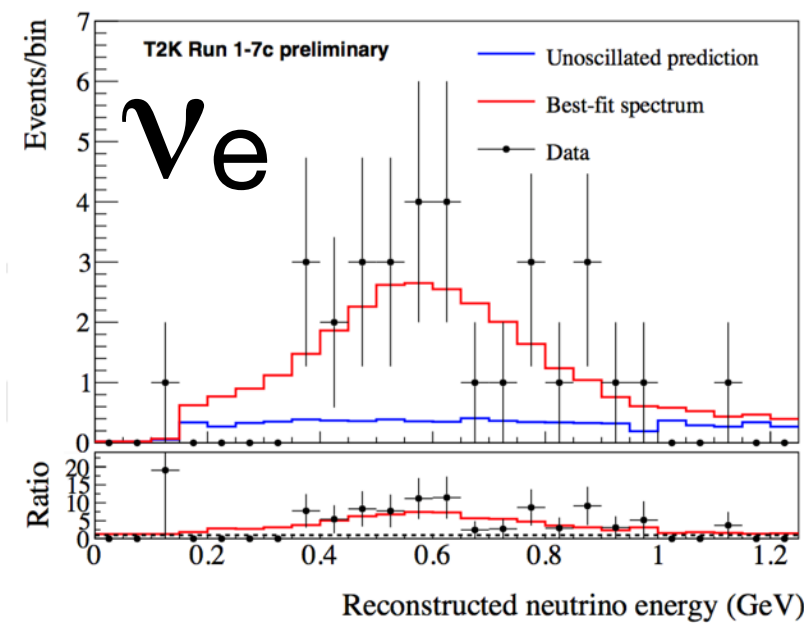
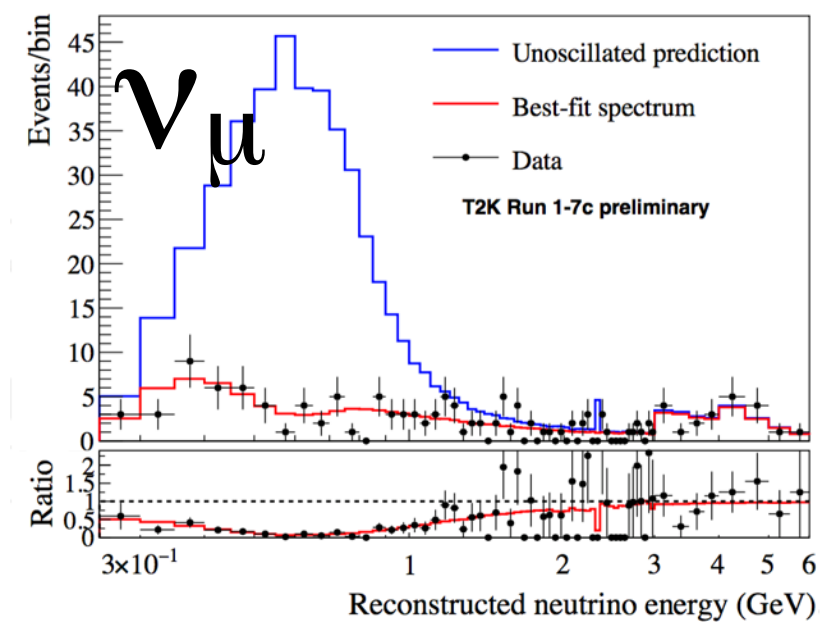


4 muestras de neutrinos



Primer análisis combinando todos los canales con neutrinos y antineutrinos

déficit de ν_μ — — — exceso de ν_e



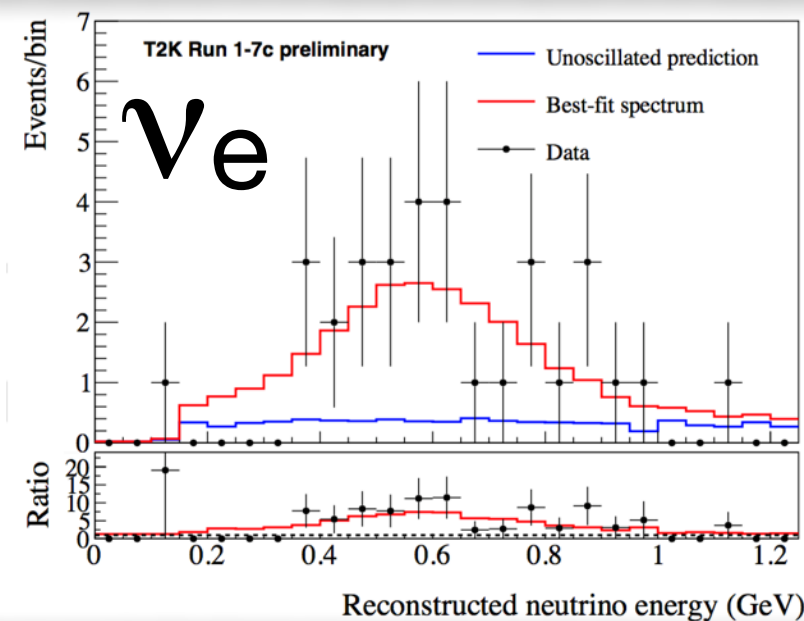
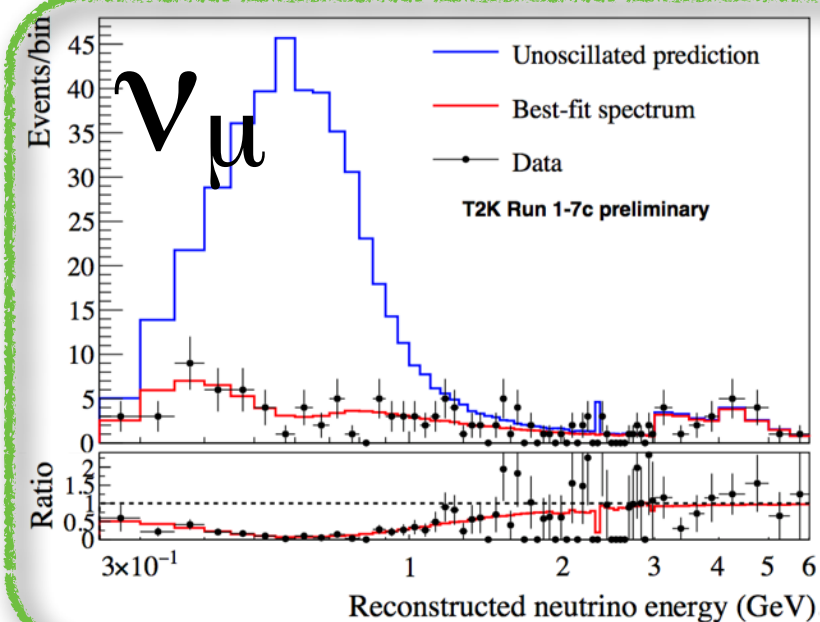
4 muestras de neutrinos



Primer análisis combinando todos los canales con neutrinos y antineutrinos

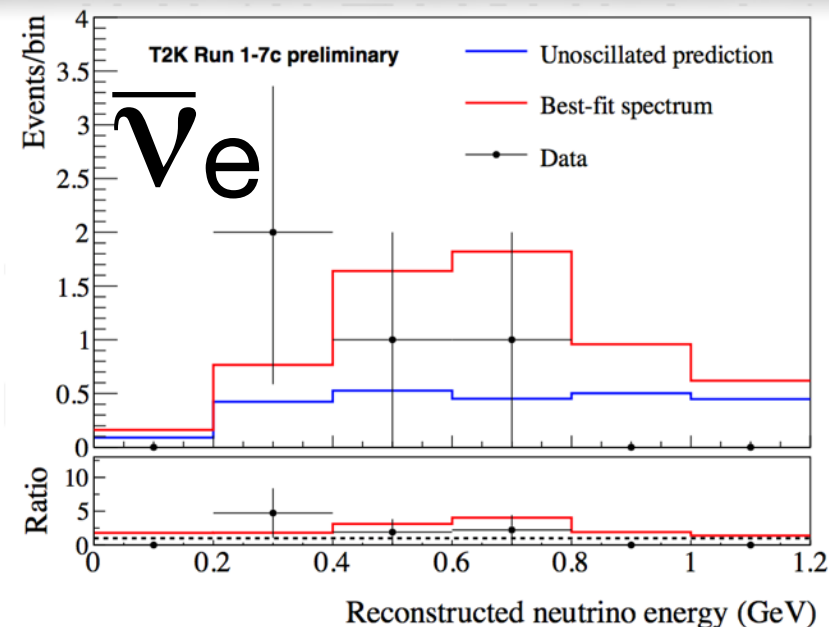
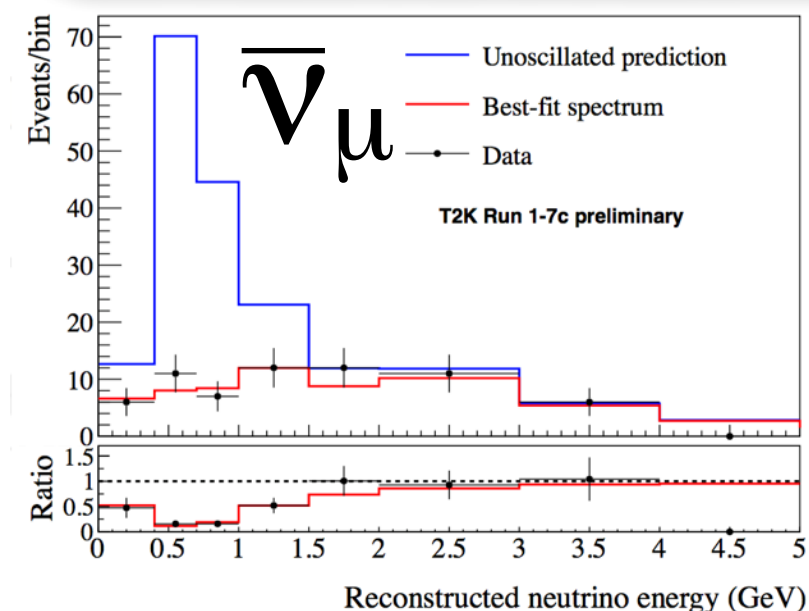
déficit de ν_μ

exceso de ν_e



**Nuestro grupo
(Lorena Escudero)
realizó el primer análisis
combinado**

**Premio extraordinario de
doctorado 2016**

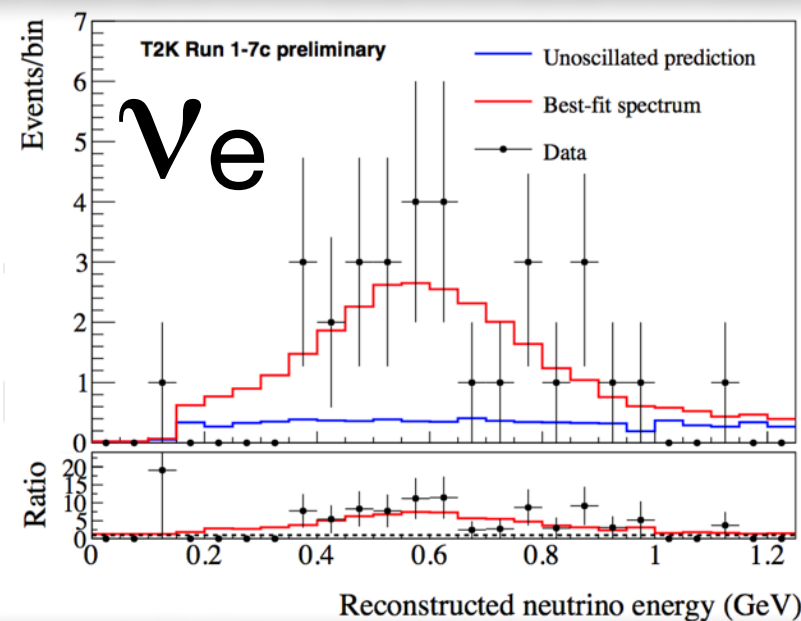
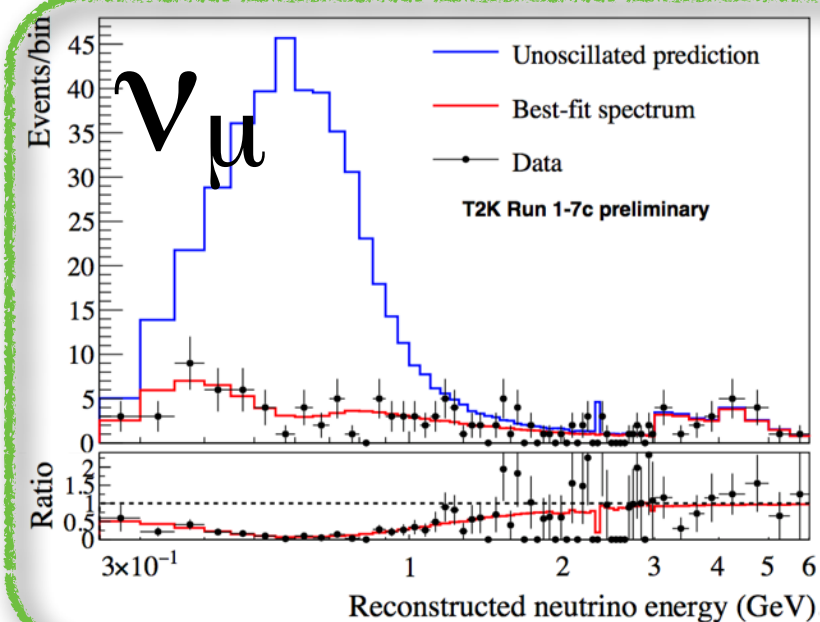


4 muestras de neutrinos



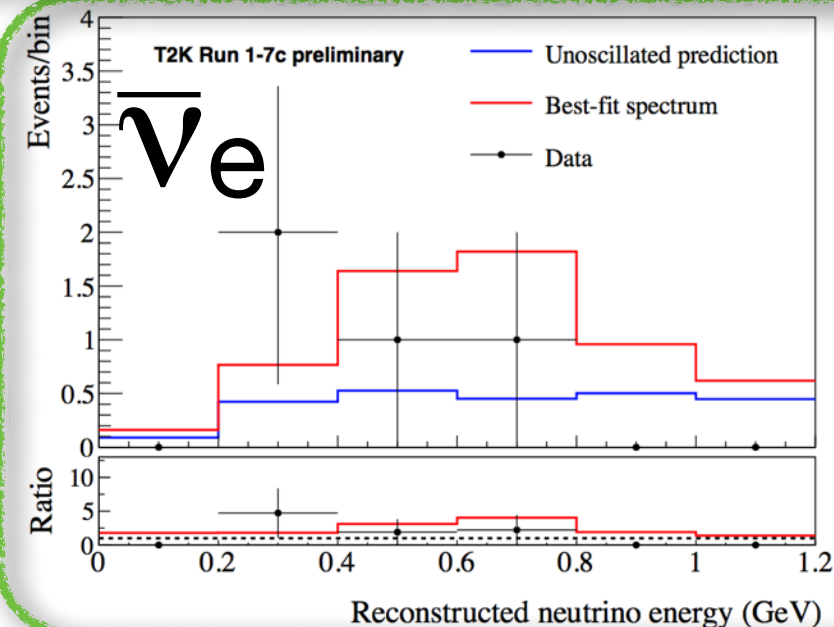
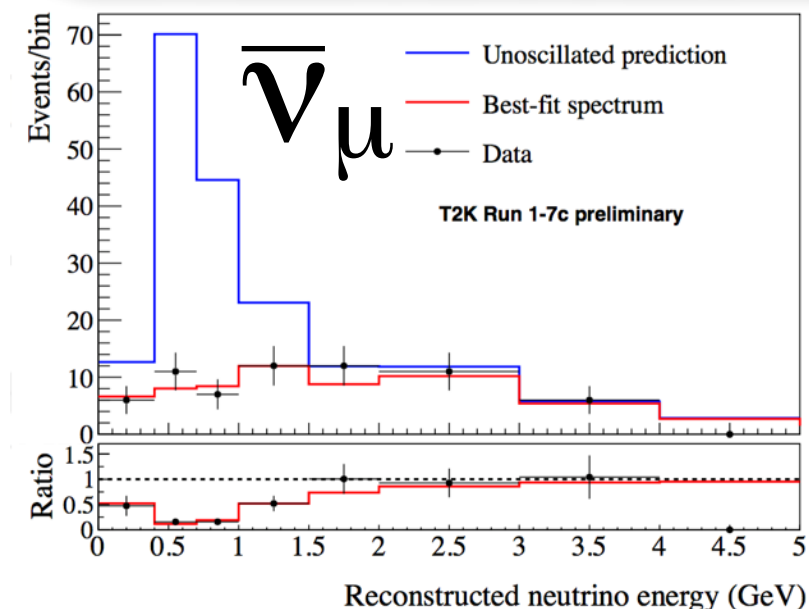
Primer análisis combinando todos los canales con neutrinos y antineutrinos

déficit de ν_μ — — — exceso de ν_e



**Nuestro grupo
(Lorena Escudero)
realizó el primer análisis
combinado**

**Premio extraordinario de
doctorado 2016**



Hacia la aparición de anti- ν_e 's

**A estas alturas deberíamos
observar más anti- ν_e 's**

Quizás una indicación de δ_{CP}

Análisis combinado



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

$$\nu_{\mu} \rightarrow \nu_{\mu}$$

$$\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_e$$

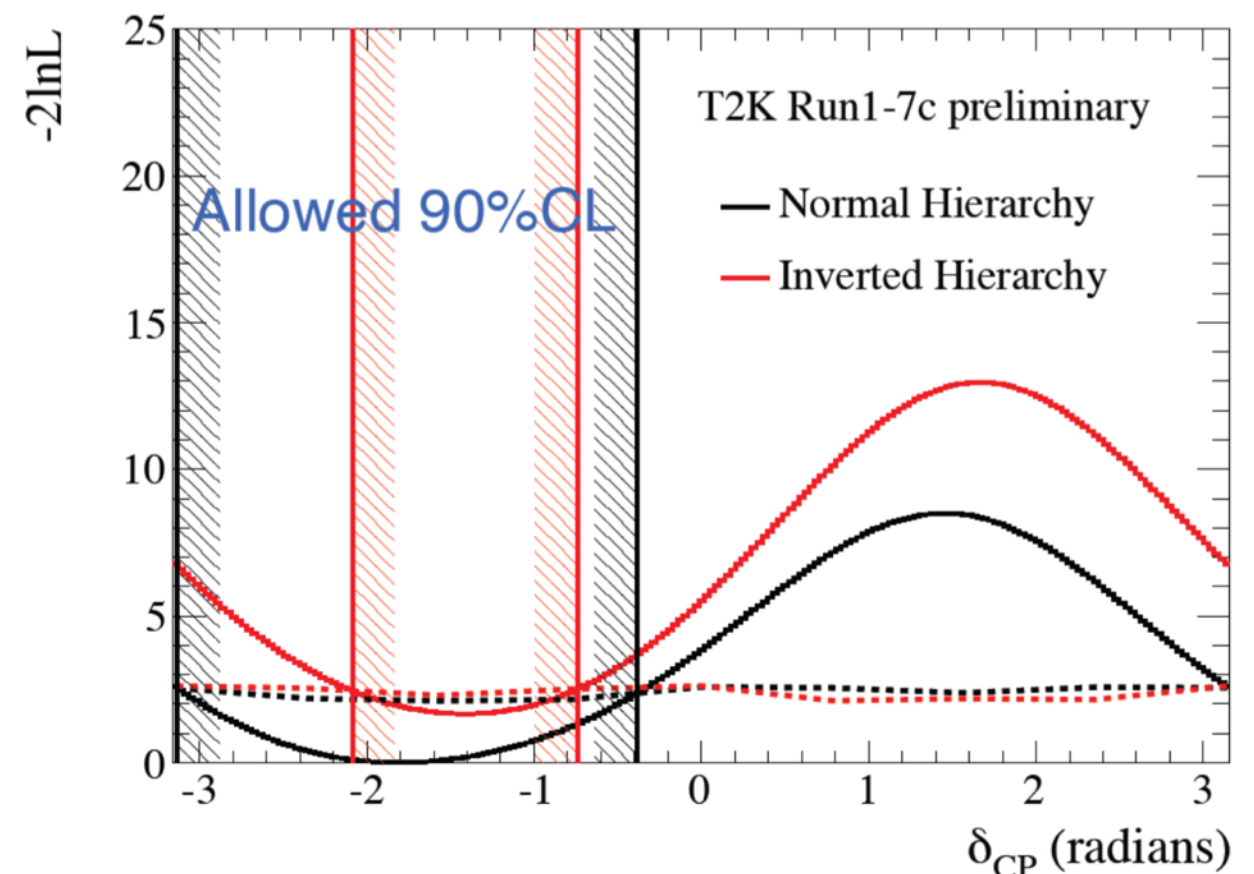
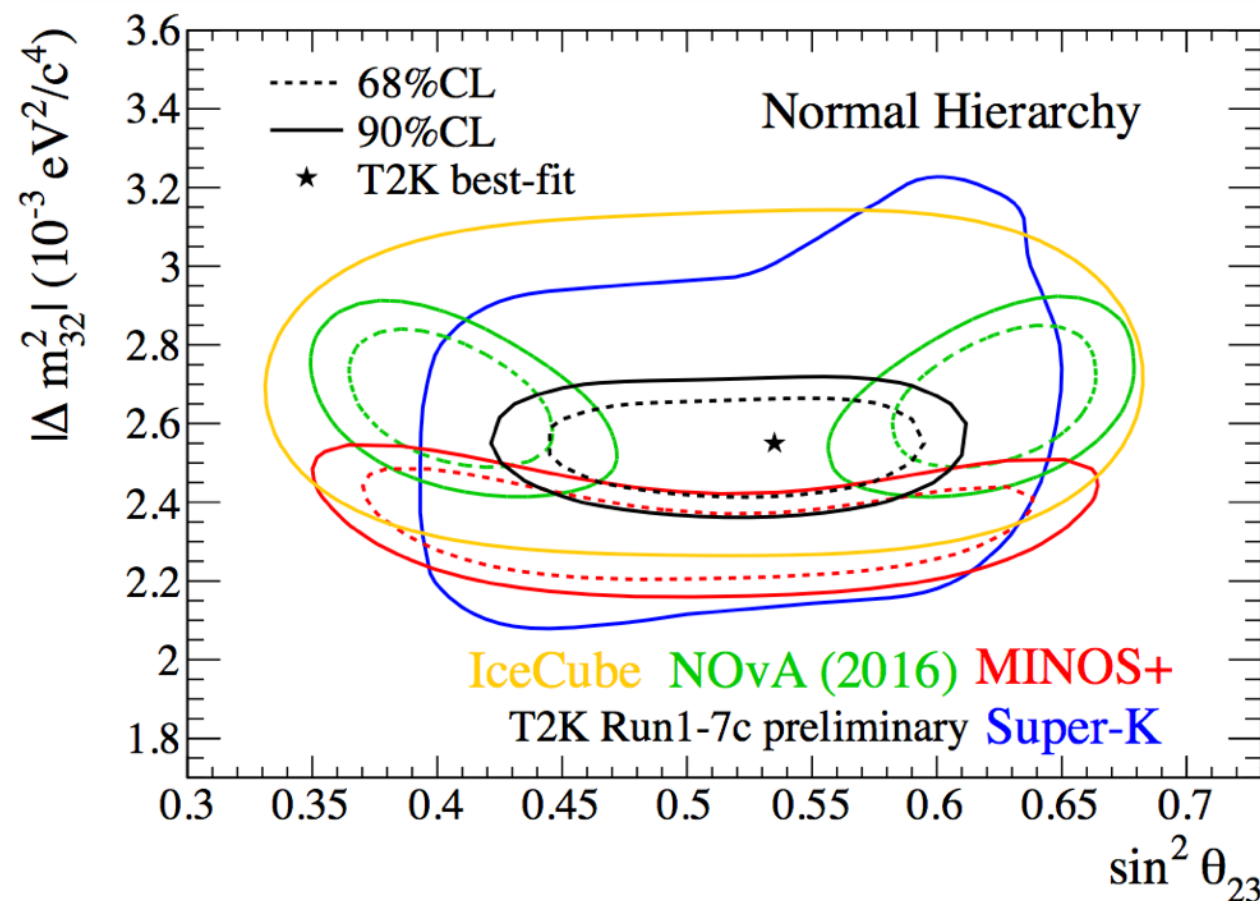
$$\bar{\nu}_{\mu} \rightarrow \bar{\nu}_{\mu}$$

Mejor medida de Δm^2_{23} y θ_{23}

Interesante tensión con NOvA,
posible indicación de θ_{23} no máximo ($\neq 45^\circ$)

$\delta_{CP} = -\pi/2$ y jerarquía normal ($\Delta m^2_{23} > 0$)
preferido por los datos

$\delta_{CP} = 0, 2\pi$ excluidos a 2σ

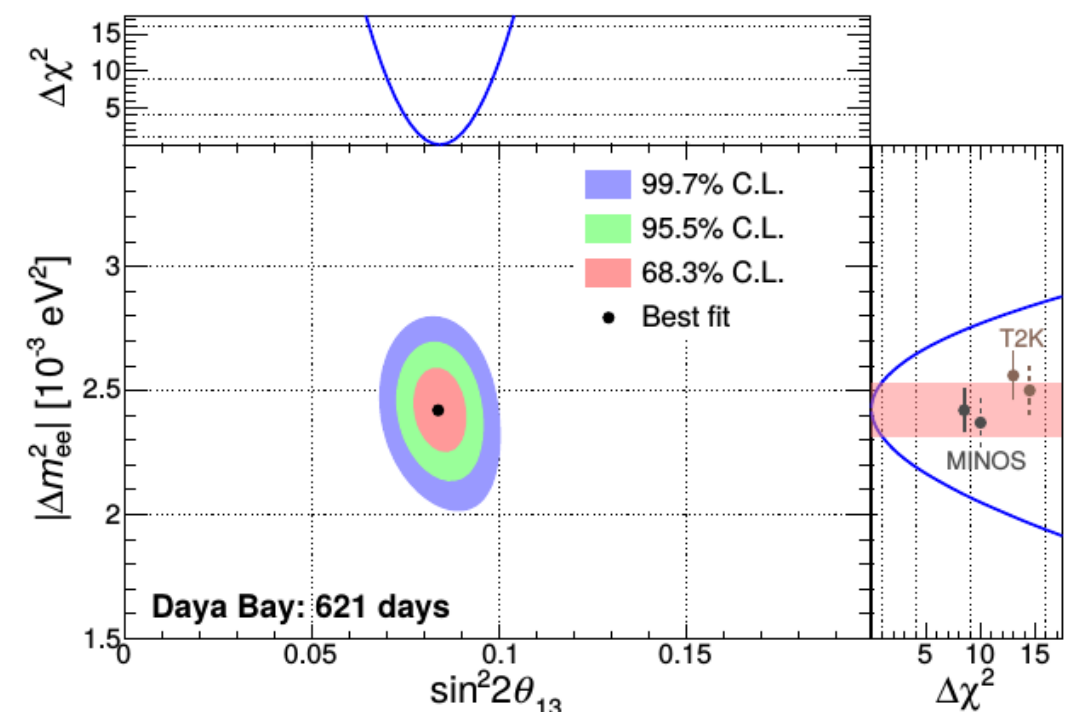


Tambien tests de CPT: neutrinos y antineutrinos son consistentes

- Coordinación: **reconstrucción**, dos WG de Física, **NuMu** y **Nueva Física** (A. Izmaylov), y el WG de **software** (A. Cervera)
- Somos los encargados de la **framework de análisis** y participamos activamente en la mejora de la **selección de eventos** y la propagación de **errores sistemáticos**
- También hemos abierto una nueva línea de investigación: el análisis combinado de **T2K y reactores** (pionero mundial !!!)

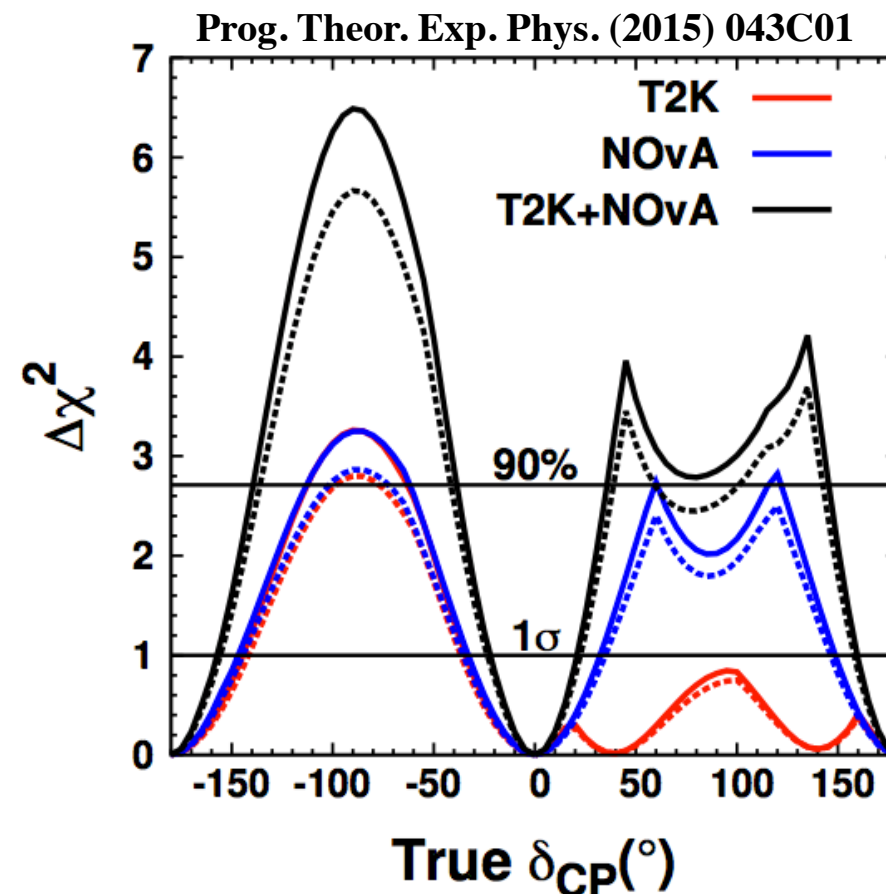
Los experimentos LBL usan un valor fijo de $\theta_{13}^{\text{reactor}}$, pero no tienen en cuenta su sensibilidad a Δm^2 .

Hemos comenzado (P. Novella) un análisis que combina de forma rigurosa estos experimentos



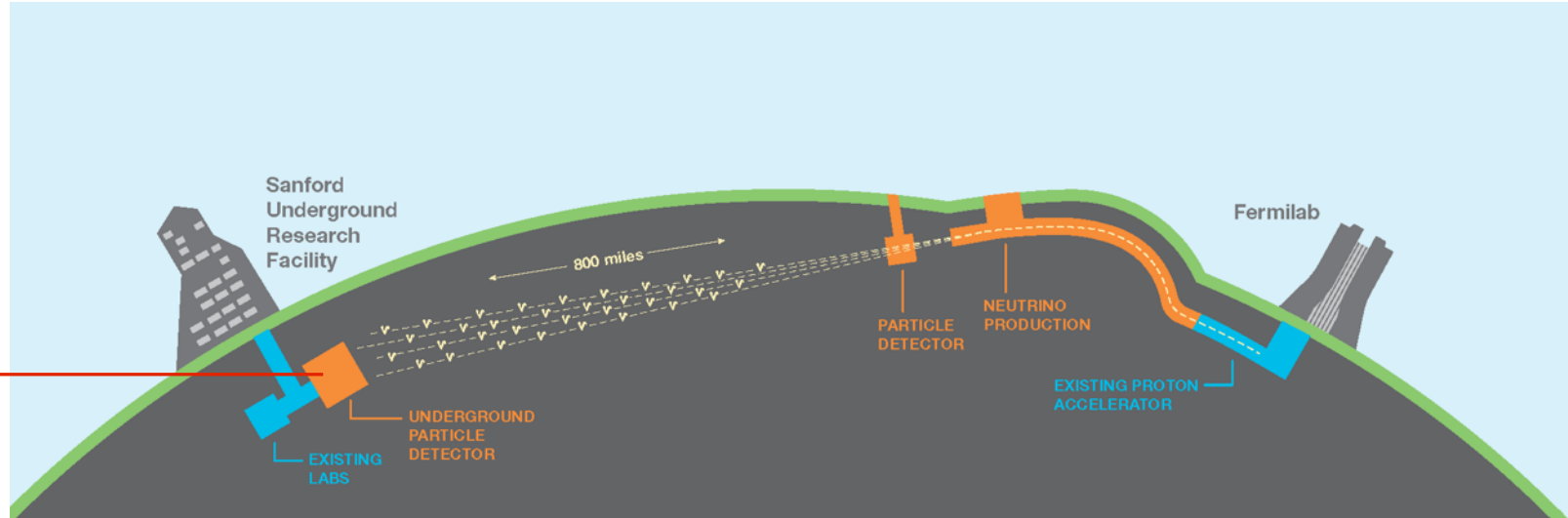
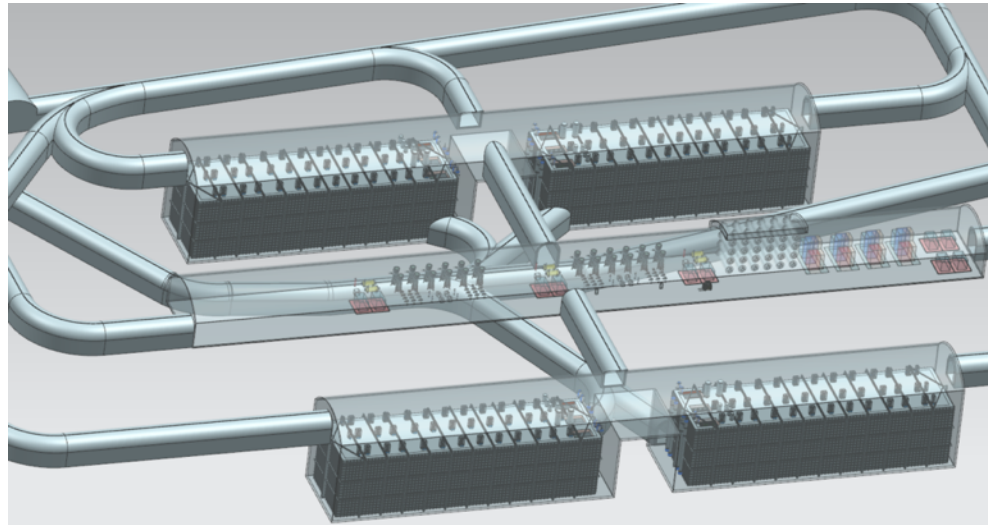
¿Cual es el siguiente paso ?

- La combinación de todos los experimentos actuales probablemente resultará en una medida de la jerarquía de masas (el signo de Δm_{13}^2) y una indicación de violación de CP ($2-3\sigma$)

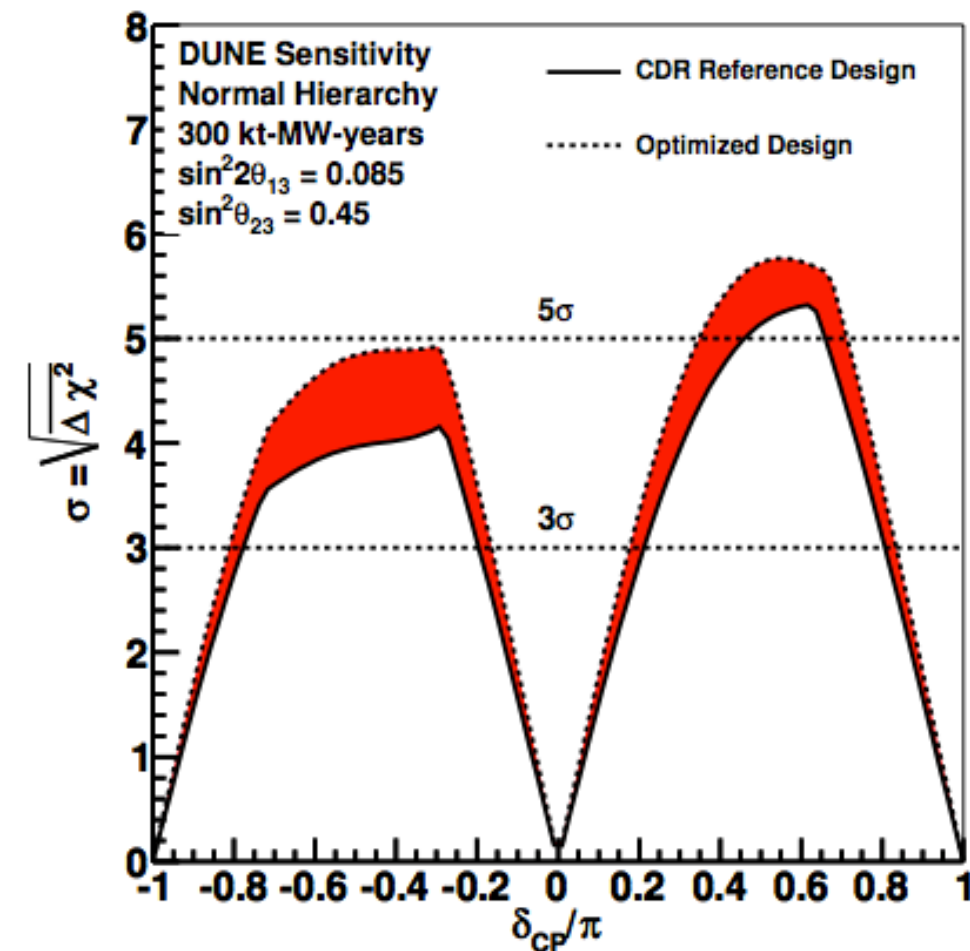


- Se necesita una nueva generación de experimentos para descubrir (y medir) CP: detectores más grandes y/o precisos y haces más potentes

Deep Underground Neutrino Experiment



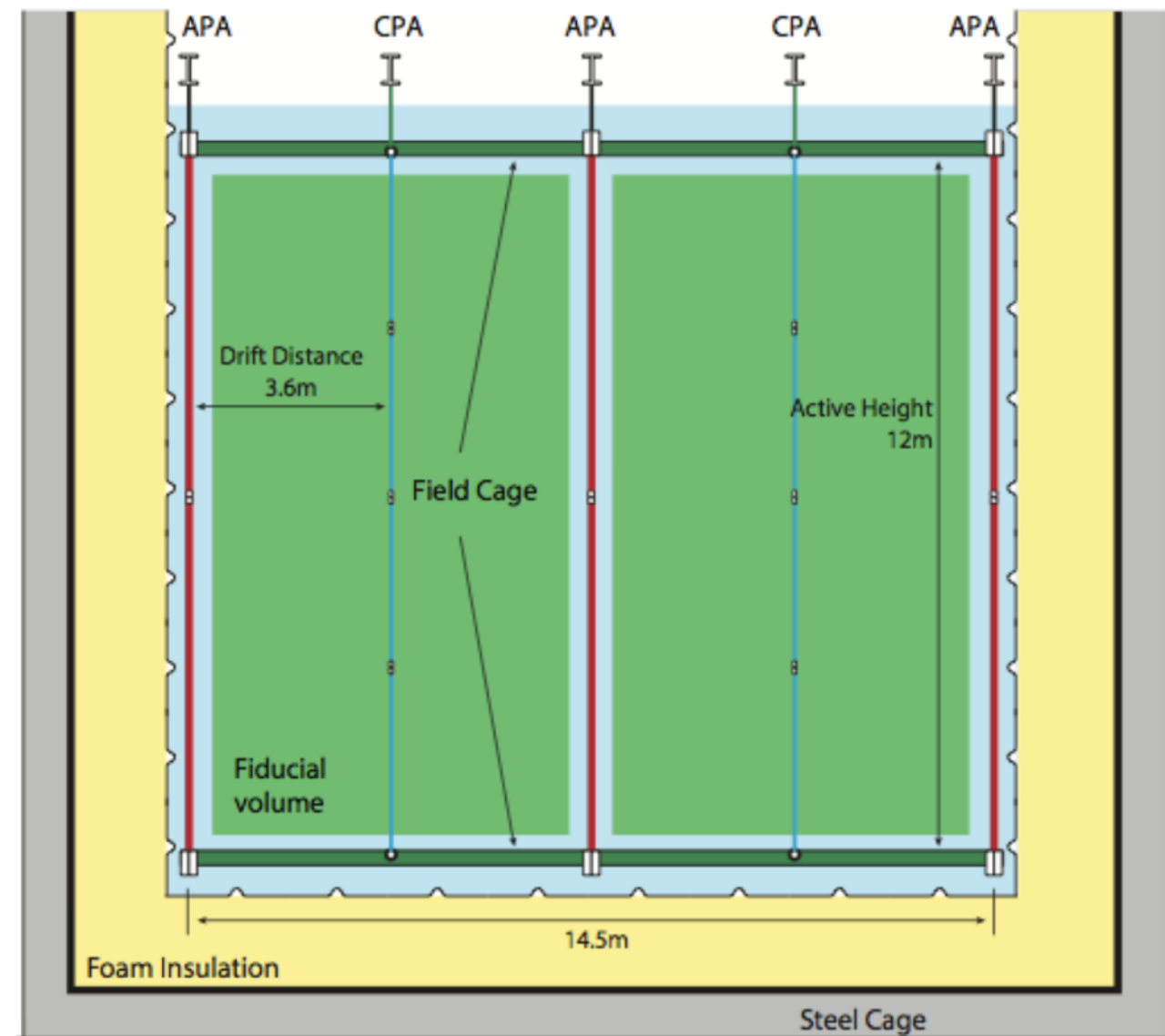
- **Intenso haz de banda ancha** desde Fermilab a SURF (Homestake mine), a **1300 km**
- **40 kton**: 4 TPCs de argón líquido de 10 Ktons cada una
- Primera TPC en **2024**
- **Física** con haz en **2026**



CD-3a approval” en 2016: 300 M\$ para construcción civil

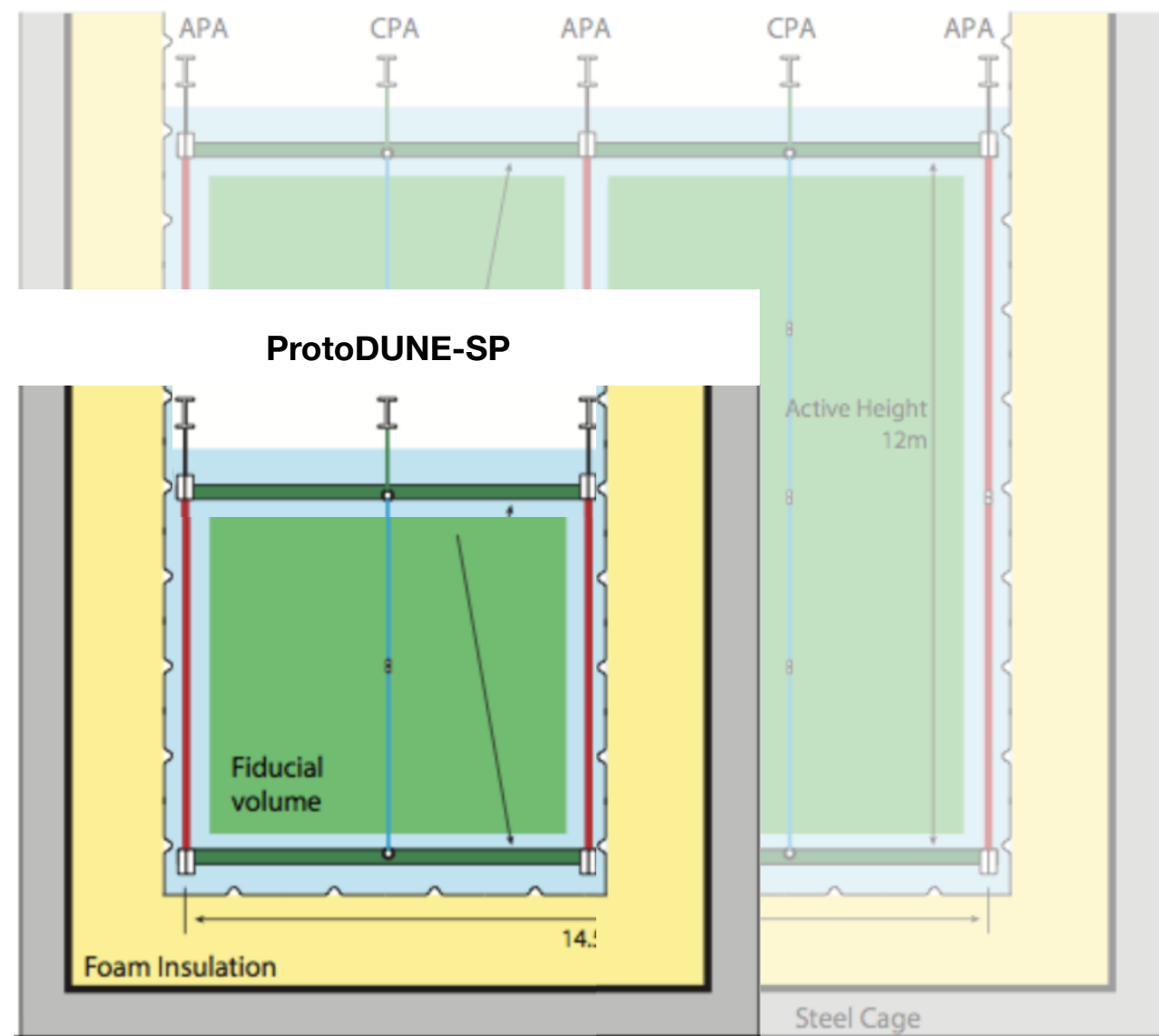
El detector lejano

- Cada TPC tiene unos **15x12 m²** de sección activa y **60 m de longitud** (en varios módulos casi independientes) y está rellena con más de **10 kton de Argón Líquido** (88k)
- Actividades del IFIC:
 - Coordinamos el grupo de **desintegración de nucleones** (M. Sorel)
 - También hemos adaptado la **framework de análisis** de T2K, que se ha convertido en un paquete de software general
 - **Estudios de nueva física:** non-standard interactions, lorentz violation (M. Tórtola y G. Barenboim)

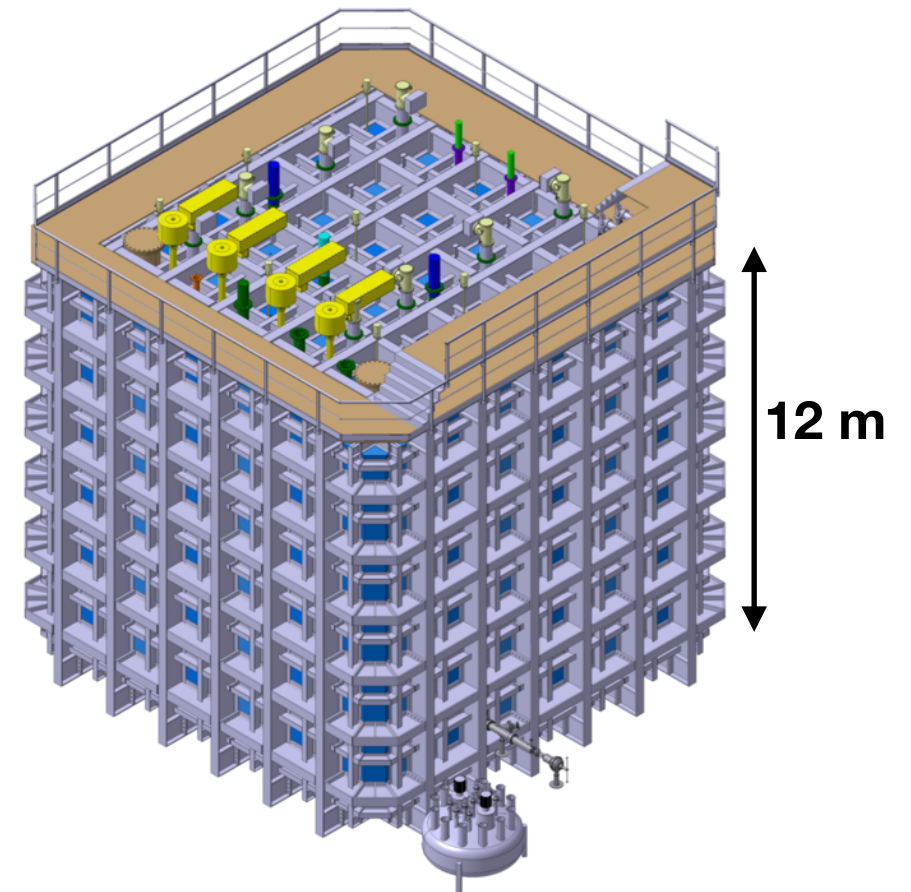
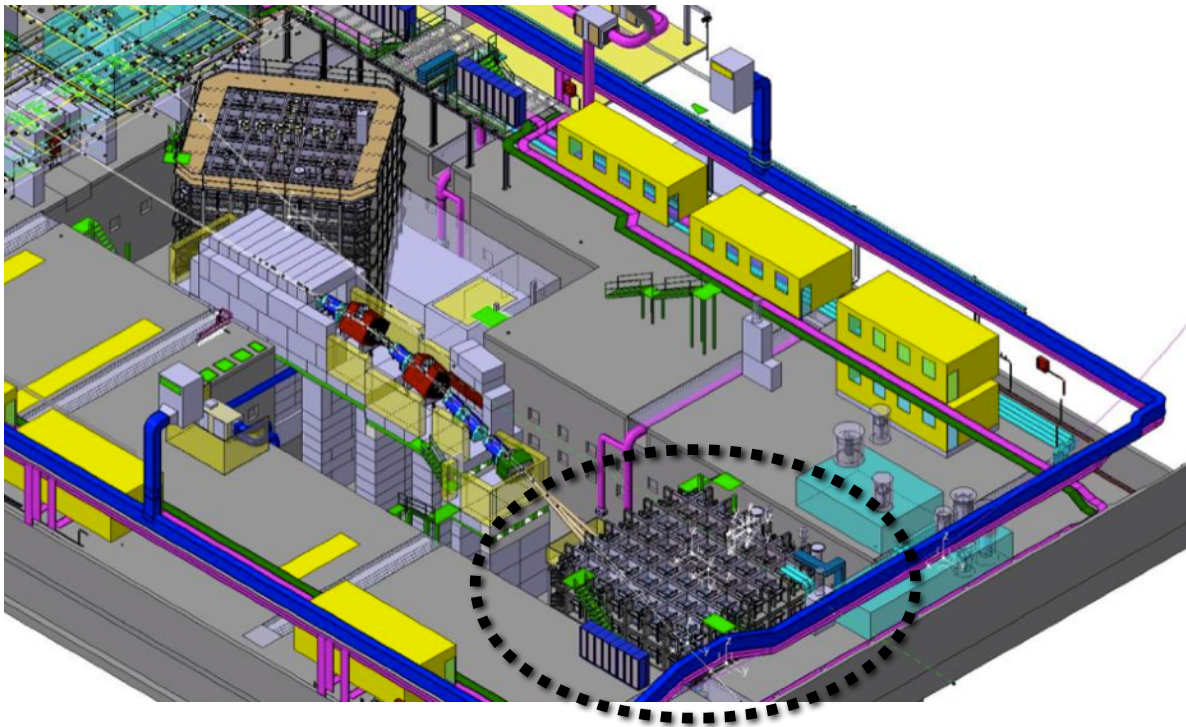


El detector lejano

- Cada TPC tiene unos **15x12 m²** de sección activa y **60 m de longitud** (en varios módulos casi independientes) y está rellena con más de **10 kton de Argón Líquido** (88k)
- Actividades del IFIC:
 - Coordinamos el grupo de **desintegración de nucleones** (M. Sorel)
 - También hemos adaptado la **framework de análisis** de T2K, que se ha convertido en un paquete de software general
 - **Estudios de nueva física:** non-standard interactions, lorentz violation (M. Tórtola y G. Barenboim)



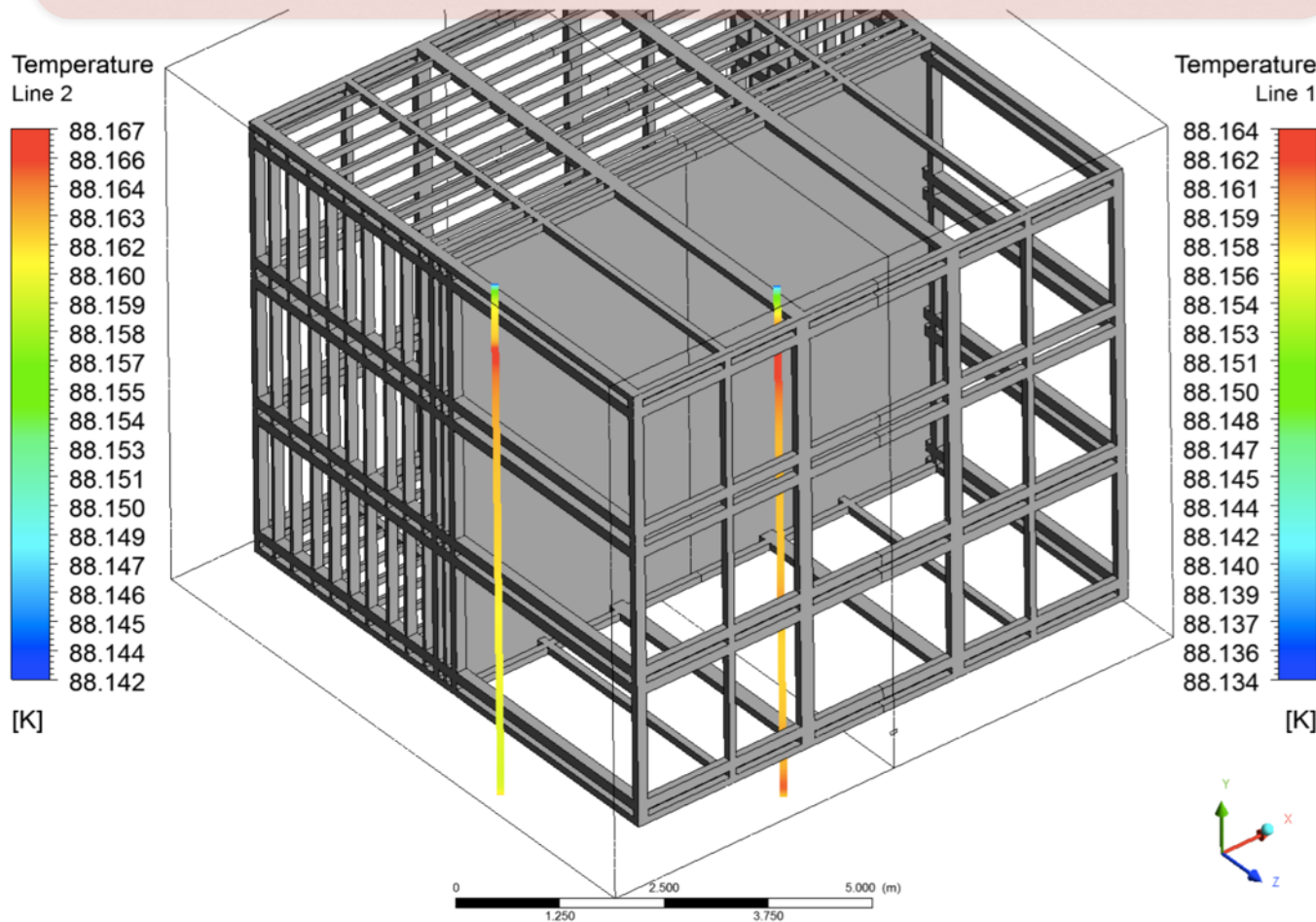
- Un prototipo del primer detector de 10 ktons operará en el CERN en 2018 y 2019



- El IFIC coordina dos WGs: **sistema de control** (“slow control”) e **instrumentación** del detector (A. Cervera)
- Además participamos en el **analysis de datos**: selección de kaones, de interés para los estudios de desintegración del protón

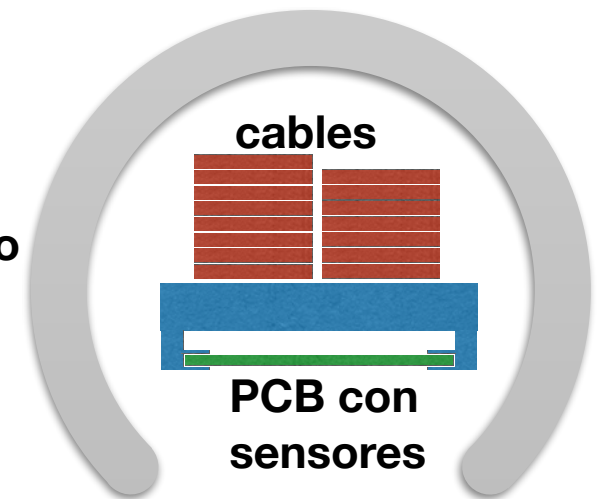
Medidas de temperatura

$\Delta T_{\text{vertical}} \sim 0.02 \text{ k}$



Tubo de 7 m instrumentado con sensores de $<0.01 \text{ k}$ de precisión cada 10 cm

tubo de aluminio para apantallamiento del campo eléctrico (6 kV/cm)



Sistema de calibración de los sensores en Argón Líquido (88 k)

- Colaboración con los servicios de mecánica y de electrónica del IFIC



Los sensores calibrados son 5 veces más caros

Resumen

- El campo de **Oscilaciones de neutrinos** ha sido de gran relevancia durante las dos últimas décadas, crucial para el entendimiento de las propiedades del neutrino, como los ángulos de mezcla y las diferencias de masas, medidas con **precisiones mejores que el 4%, excepto θ_{23} ($\sim 8\%$)**
- Tres incógnitas: **δ_{CP}** , **$\text{signo}(\Delta m^2_{23})$** y el **octante de θ_{23}**
- Existen indicaciones para las tres. La generación actual de experimentos, **T2K**, NOvA, Daya Bay, etc, debería alcanzar una sensibilidad de 3σ en δ_{CP} y $\text{signo}(\Delta m^2_{23})$
- La nueva generación de experimentos, **DUNE** y HK, cubrirá un rango mayor de **δ_{CP}** con **sensibilidades superiores a 5σ**
- El IFIC pretende desempeñar un rol importante en esta historia