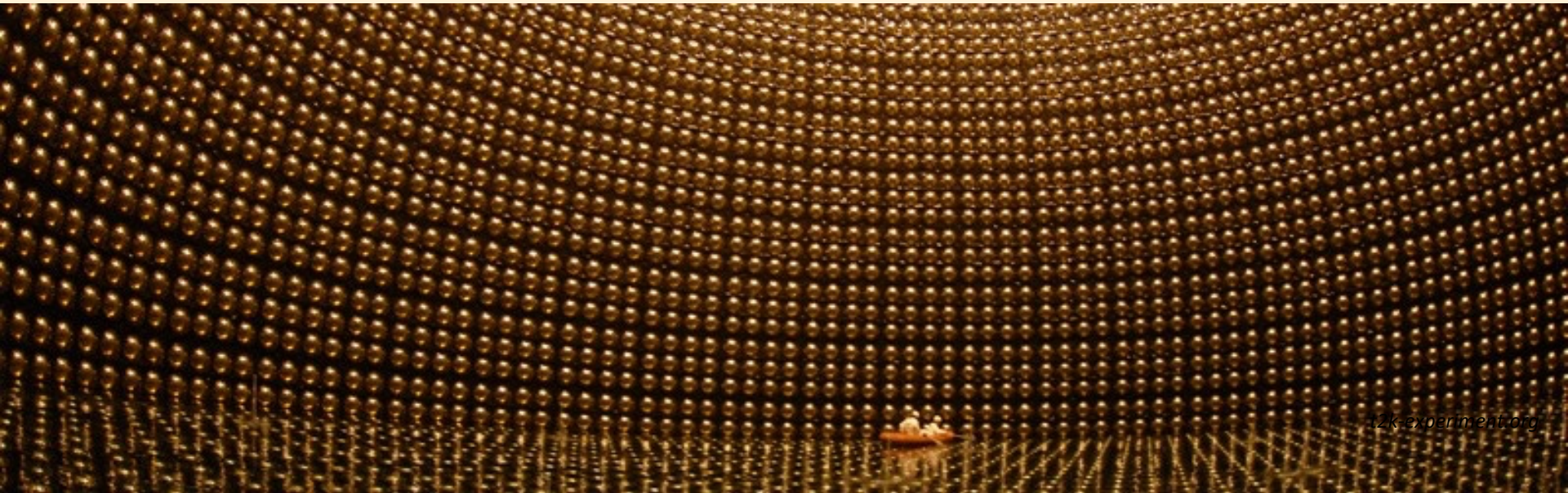


Préparation de l'expérience Hyper-Kamiokande pour des mesures précises des paramètres d'oscillation des neutrinos

Encadrement: Mathieu Guigue et Boris Popov



hk-experiment.org

Concours de l'école doctorale STEP'UP

Année 2019/2020

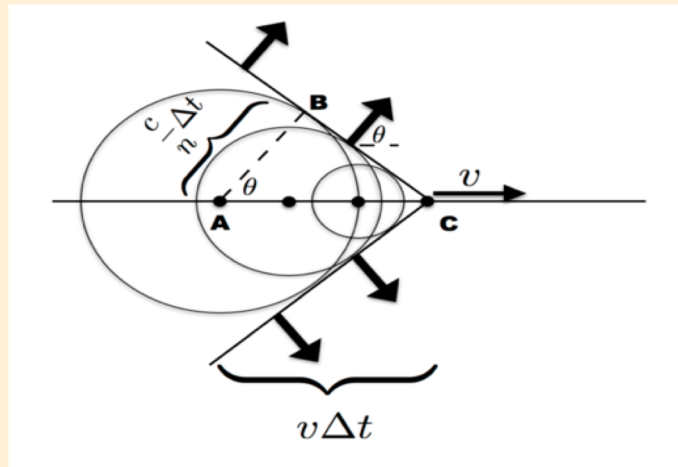
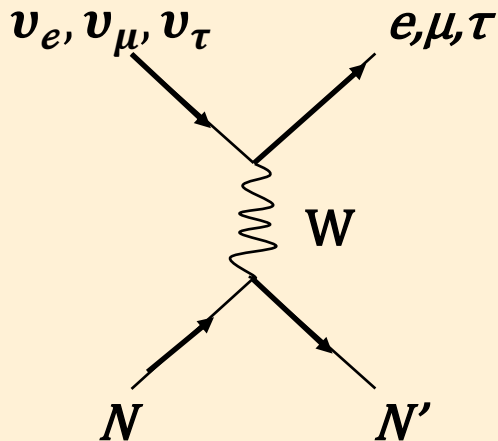
Lucile Mellet

Parcours dans l'enseignement supérieur

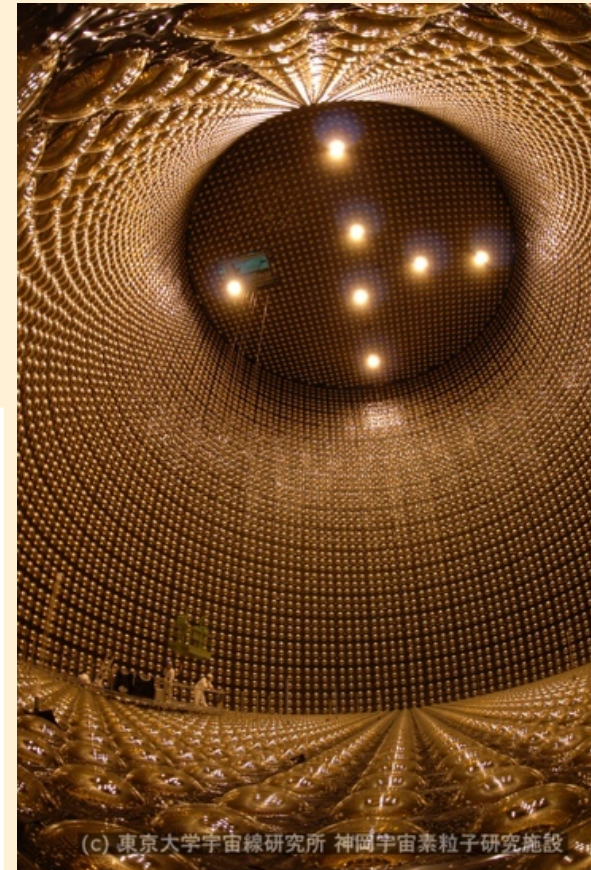
- ❖ **Licence de Physique fondamentale, Université de Bordeaux, Mention Bien**
- ❖ **Master 1 Physique fondamentale, Sorbonne Université, Paris**
 - ❖ UE Physique nucléaire et des particules
 - ❖ UE Théorie classique des champs
 - ❖ UE Physique atomique et moléculaire
 - ❖ UE Physique des satellites et du positionnement → horloges atomiques
- ❖ **Master 2 NPAC (Noyau, Particules, Astroparticules, et Cosmologie)**
 - ❖ UE Physique des particules
 - ❖ UE Astroparticules et Cosmologie
 - ❖ UE Neutrinos et matière noire

Contexte : Les expériences T2K et SK

- ❖ SuperKamiokande, Mine Mozumi (1000m), 1996 , Kamioka, Japon
- ❖ Neutrinos atmosphériques, solaires , et de supernovæ
Durée de vie du proton
- ❖ Détection de la lumière Cherenkov
 - ❖ 50 kTonnes d'eau
 - ❖ 11000 tubes photo-multiplificateurs (PMT)



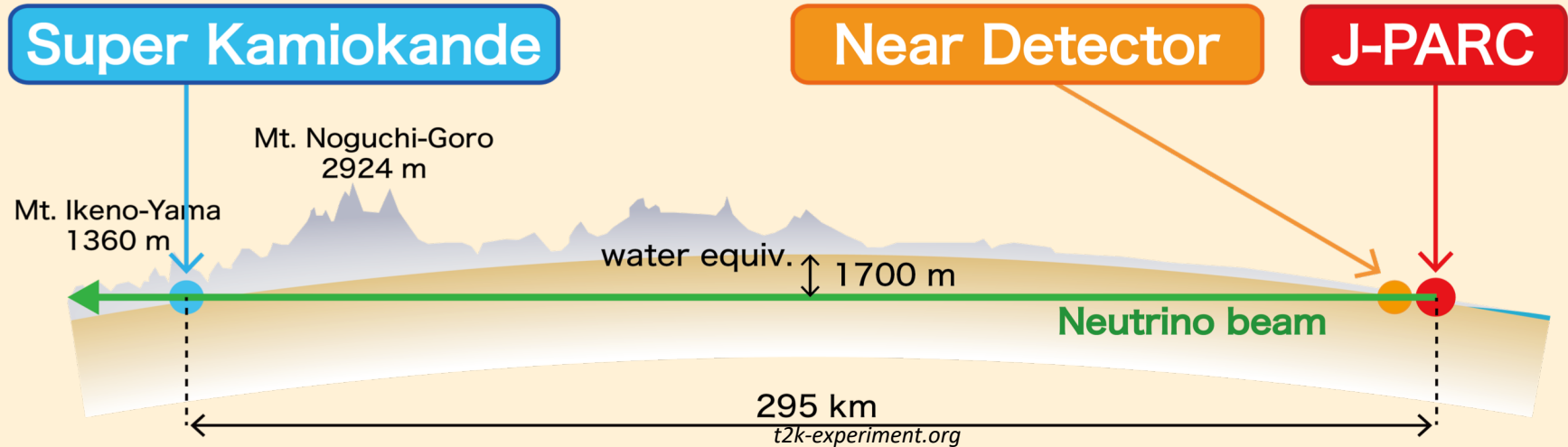
https://casper.ssl.berkeley.edu/astrobaki/index.php/Cherenkov_Radiation



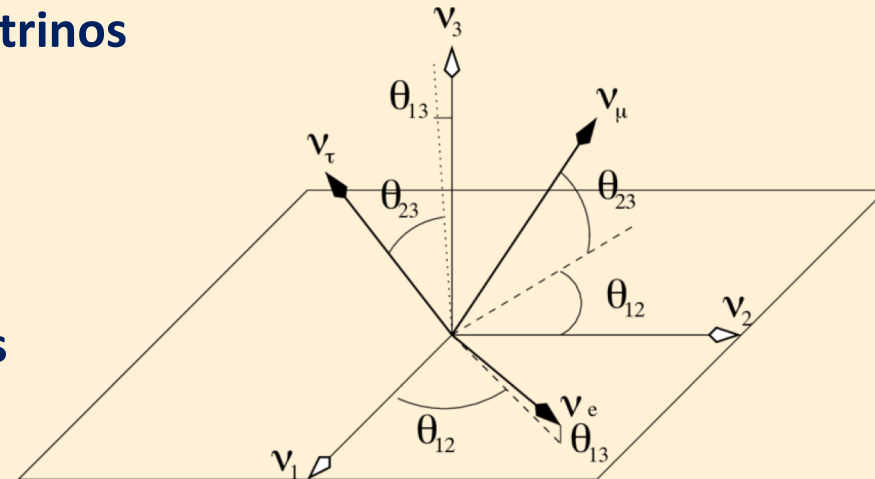
(c) 東京大学宇宙線研究所 神岡宇宙素粒子研究施設

t2k-experiment.org

Contexte : Les expériences T2K et SK

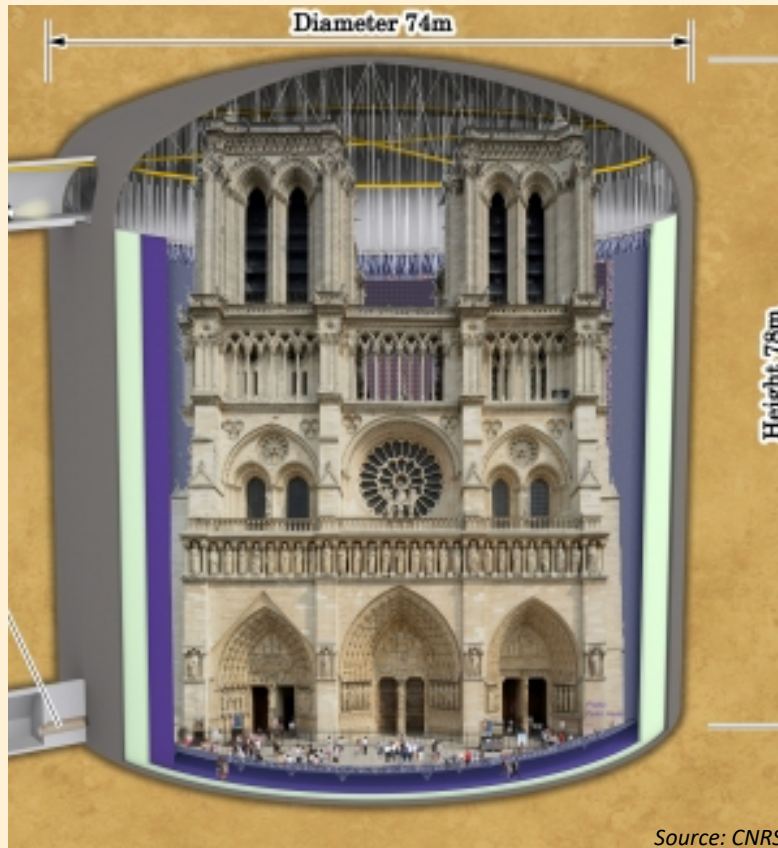


- Angles de mélanges
- δ_{CP}
- Hiérarchie de masse

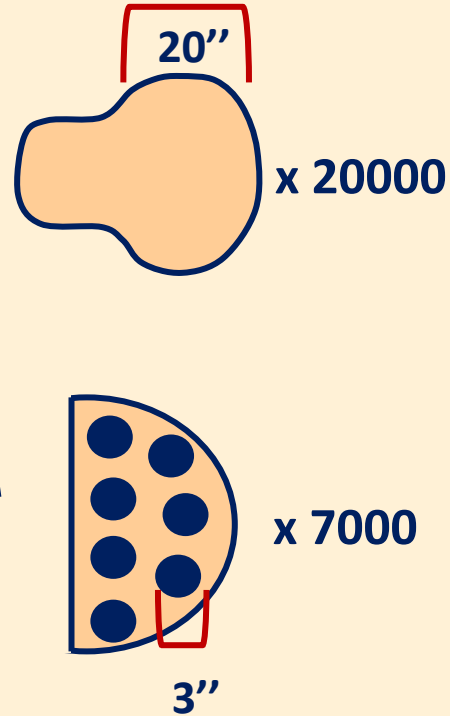


- ❖ Tokai to Kamioka, 2010
- ❖ Expérience d'oscillation de saveur des neutrinos
- ❖ Faisceau, deux modes ν_μ et $\bar{\nu}_\mu$
- ❖ Mesure de l'apparition de ν_e
- ❖ But actuel principal: découverte de la violation de CP dans le secteur des leptons
 - ✓ 3σ , publication Nature, avril 2020

Le futur : Hyper-Kamiokande



Source: CNRS



- ❖ Cuve 5 fois plus grande
- ❖ Précision et synchronisation d'horloges, PMT et multi-PMT (uniformément)
- ❖ Une seule collaboration internationale
- ❖ δ_{CP} , Supernovae, ...

Préparation à l'expérience HK : volet détection/R&D

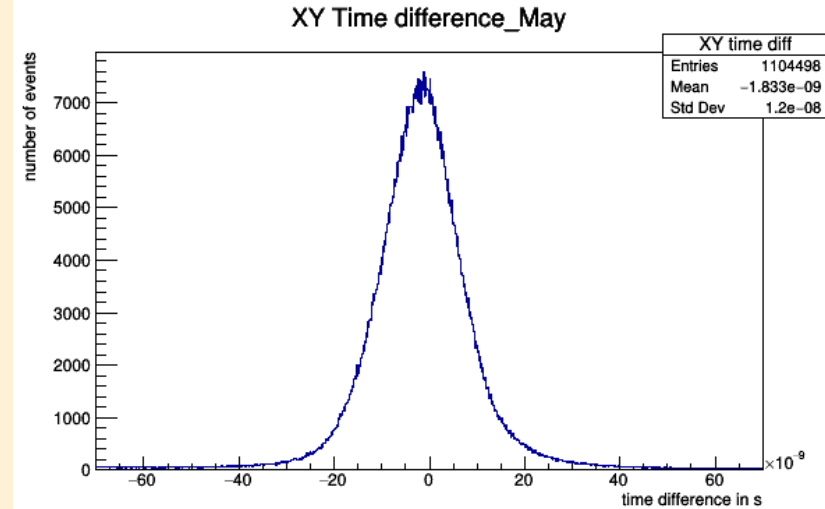
Plan de scintillateurs

2,50 m

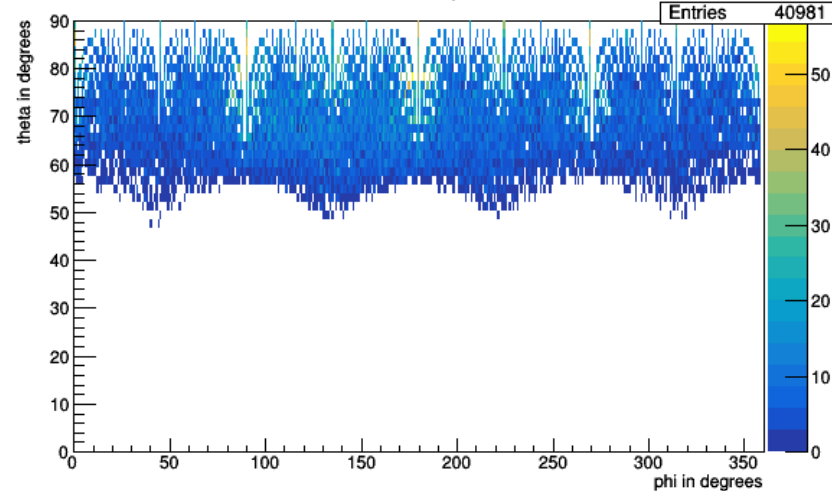
Plan de scintillateurs

- ❖ Memphyno : caractérisation des performances en stage de M1

Muons cosmiques

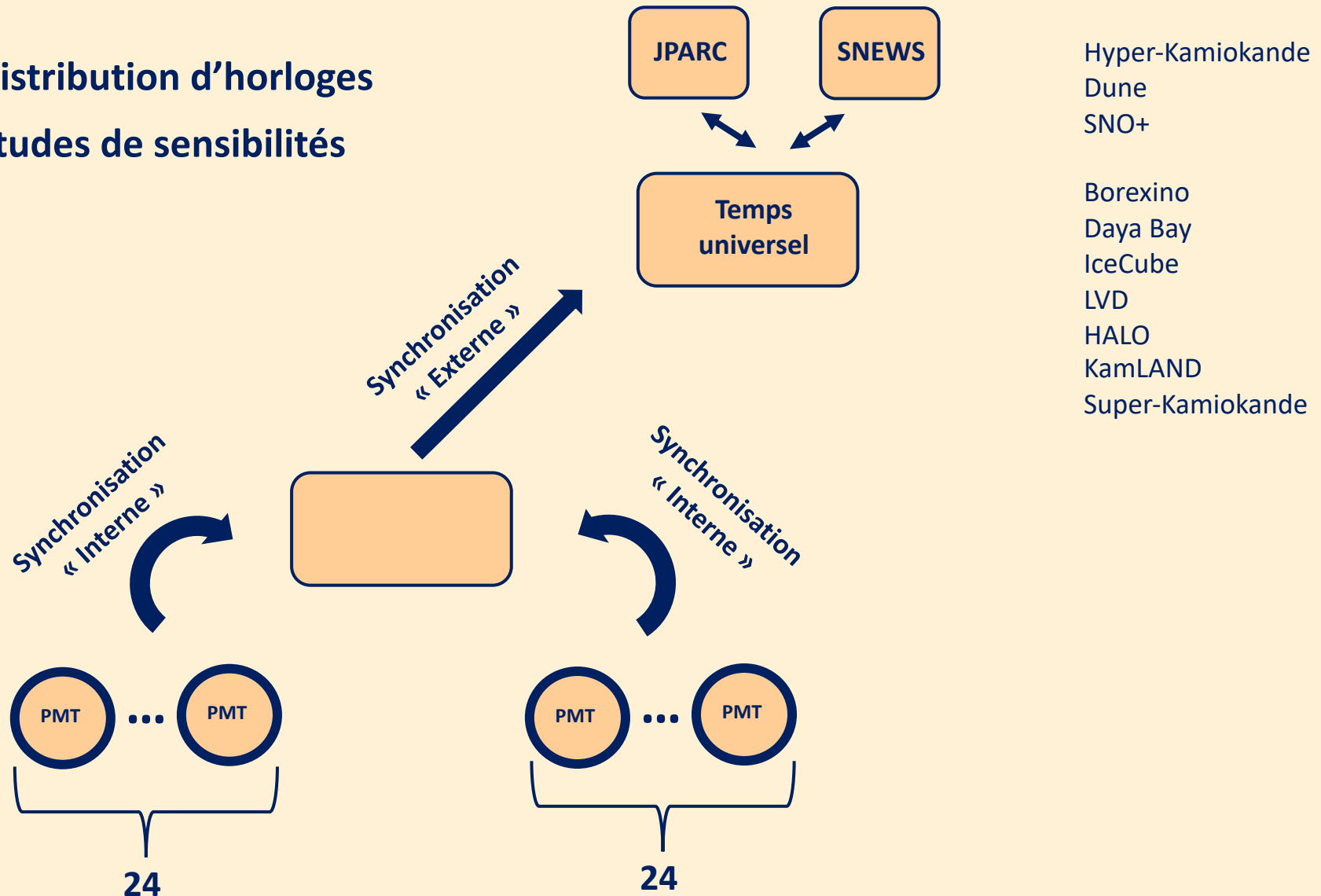


Theta vs phi



Préparation à l'expérience HK : volet détection/R&D

- ❖ Distribution d'horloges
- ❖ Études de sensibilités



Préparation à l'expérience HK : volet analyse

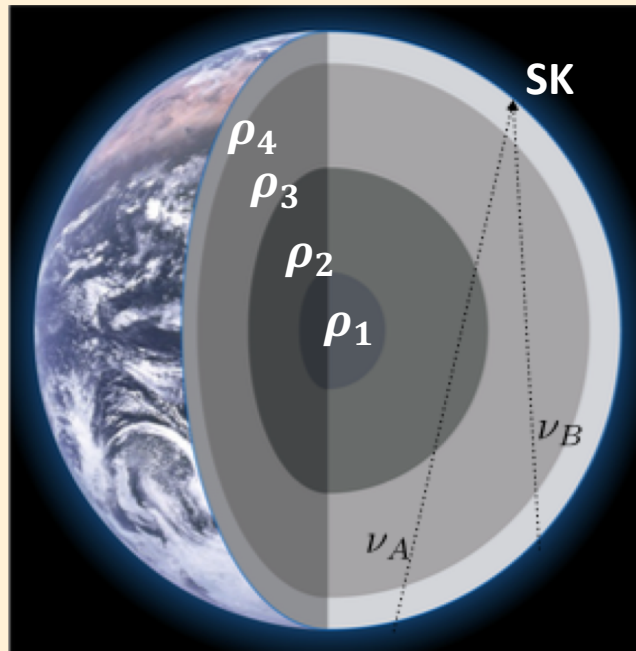
Une analyse combinée SK (atmosphérique)/T2K (faisceau): Pourquoi ? Comment ?

❖ Complémentarité des deux expériences

- ❖ Énergies, Densités, longueurs
- ❖ Saveurs, interactions, ν vs $\bar{\nu}$

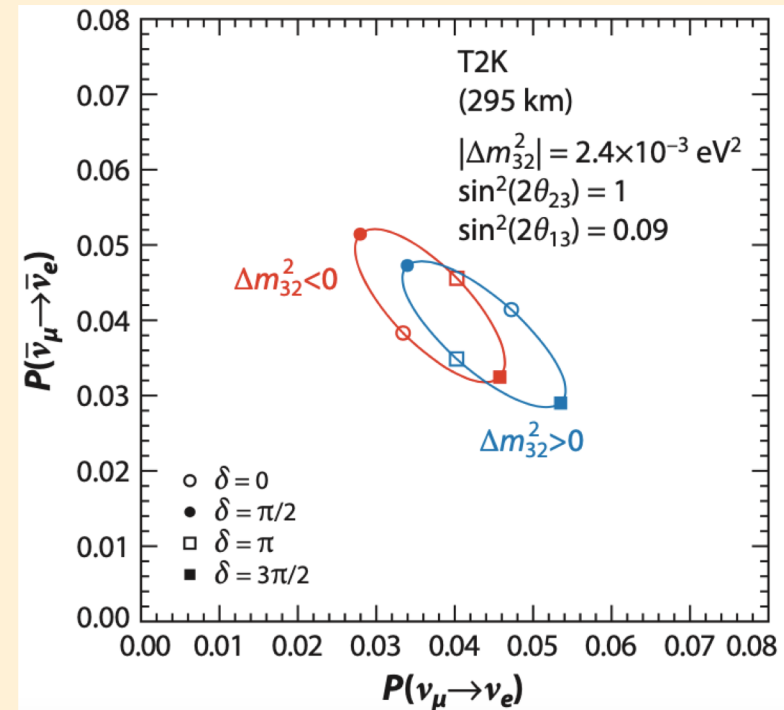
❖ Sensibilité δ_{CP} / hiérarchie de masse

❖ Lien avec Hyper-Kamiokande



K. Abe et al., Phys. Rev. D, vol. 97, 2018

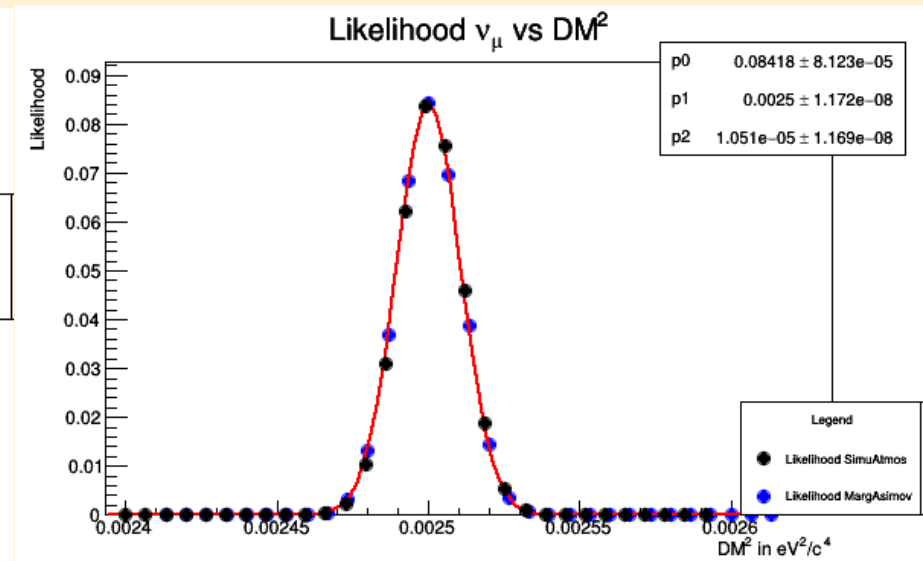
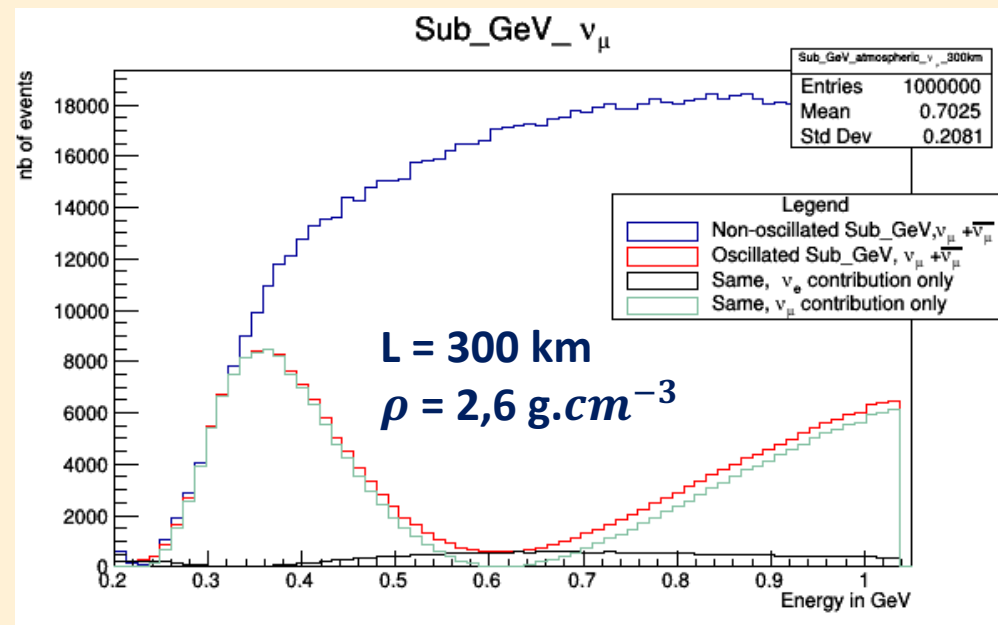
Lucile Mellet



R. B. Patterson, Annu. Rev. Nucl. Part. Sci., vol. 65, . 2015

Stage de M2 = préparation à cette analyse
1^{ère} étape du sujet de thèse

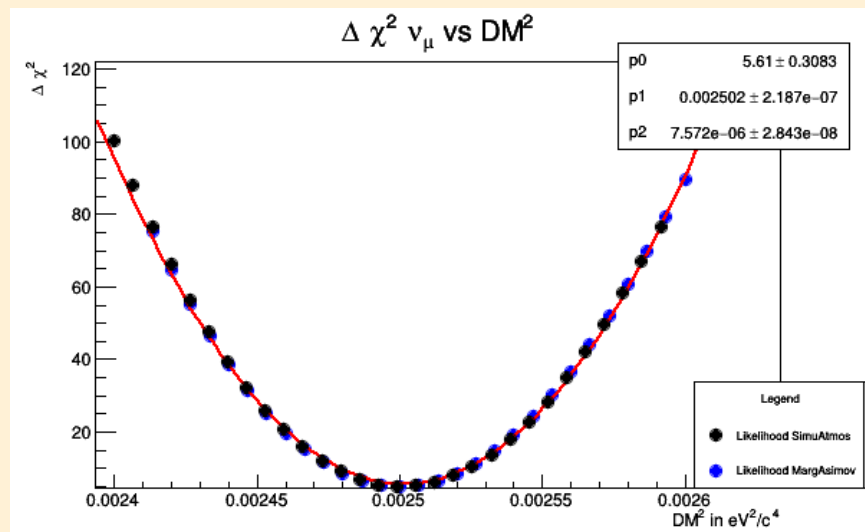
Stage de M2



68%

$$\Delta m_{32}^2 \in [2.498; 2.511] 10^{-3} eV^2 . c^{-4}$$

- ❖ Génération de fausses données atmosphériques à partir de spectres publiés
- ❖ Oscillations -> Utilisation du logiciel ModProb3++
- ❖ Adaptation du logiciel du groupe d'analyse P-theta
 - ❖ Sans paramètre systématique
 - ❖ Binning, modèle non-oscillé, fichiers de configuration ...
- ❖ Première analyse des « données » générées



Motivations

- ❖ **Recherche et Enseignement**
- ❖ **2 stages sur ce sujet et dans cette équipe**
- ❖ **Choix d'option en Master 2**

- ❖ **Défi de la détection des neutrinos**
- ❖ **Questions scientifiques ouvertes et Physique au delà du Modèle Standard**
- ❖ **Champs de recherche et thématiques associés divers:**
 - ❖ **Asymétrie matière/anti-matière**
 - ❖ **Sources astrophysiques (supernovae...)**
 - ❖ **Fusion dans le soleil**
 - ❖ **Radioactivité**

Conclusion

- ❖ **Cohérence du parcours académique**
 - ❖ Stages précédents
 - ❖ Choix de formation

- ❖ **2 Volets complémentaires:**
 - ❖ Expérimental
 - ❖ Analyse/Simulation

- ❖ **Perspective du nouveau détecteur (HK) et données actuelles (T2K/SK)**

- ❖ **Cadre d'une collaboration internationale**



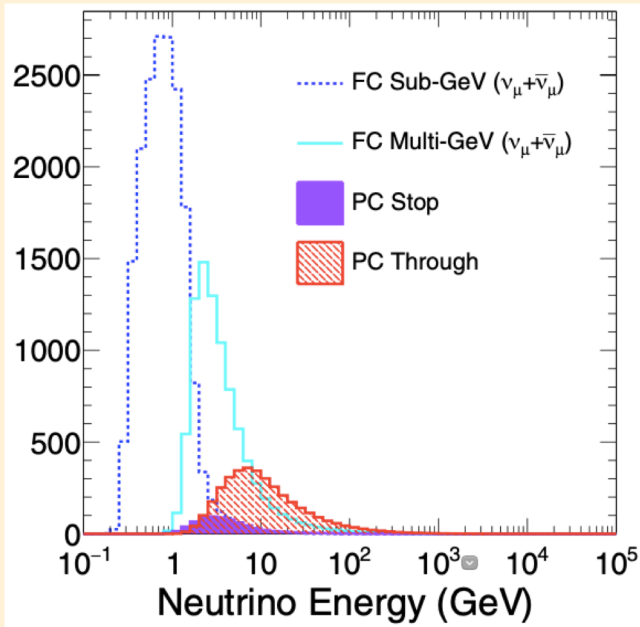
Complément : Oscillations et effets de matière

$$U = \begin{pmatrix} c_{12}c_{13} & s_{12}s_{13} & s_{13}e^{-i\delta_{CP}} \\ -s_{12}c_{23} - c_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{12}c_{23} - s_{12}s_{13}s_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{13}s_{23} \\ s_{12}s_{23} - c_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta_{CP}} & -c_{12}s_{23} - s_{12}s_{13}c_{23}e^{i\delta_{CP}} & c_{13}c_{23} \end{pmatrix} P$$

$$\begin{aligned} P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) &\simeq \sin^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{13} \frac{\sin^2(\Delta_{31} - aL)}{(\Delta_{31} - aL)^2} \Delta_{31}^2 \\ &+ \sin 2\theta_{23} \sin 2\theta_{13} \sin 2\theta_{12} \frac{\sin(\Delta_{31} - aL)}{(\Delta_{31} - aL)} \Delta_{31} \frac{\sin(aL)}{(aL)} \Delta_{21} \cos(\Delta_{31} + \delta_{CP}) \\ &+ \cos^2 \theta_{23} \sin^2 2\theta_{12} \frac{\sin^2(aL)}{(aL)^2} \Delta_{21}^2, \end{aligned}$$

Ordre 1 , densité constante

$$\Delta_{ij} = \frac{\Delta m_{ij}^2 L}{4E} \quad \text{et } a = G_F N_e / \sqrt{2}$$



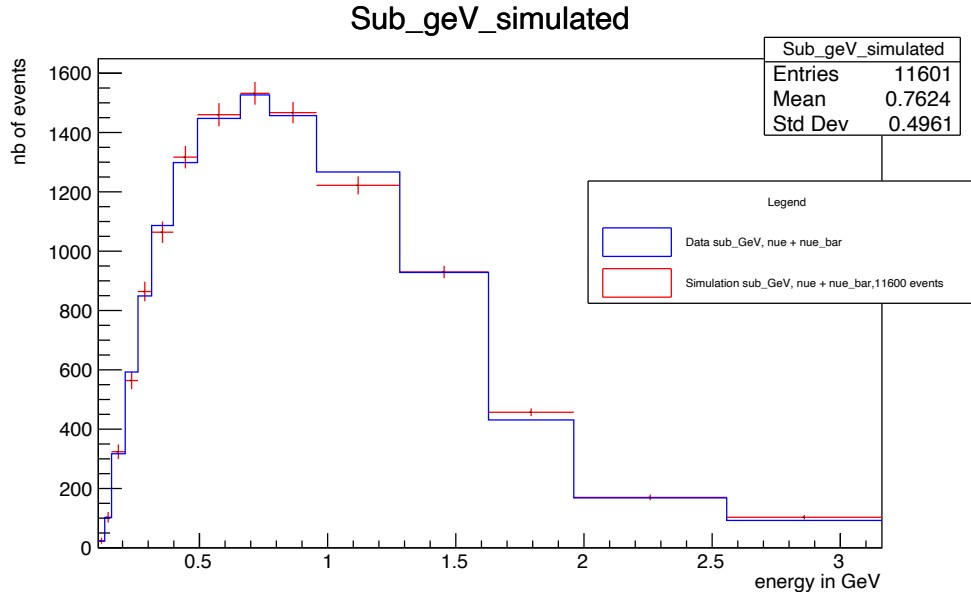
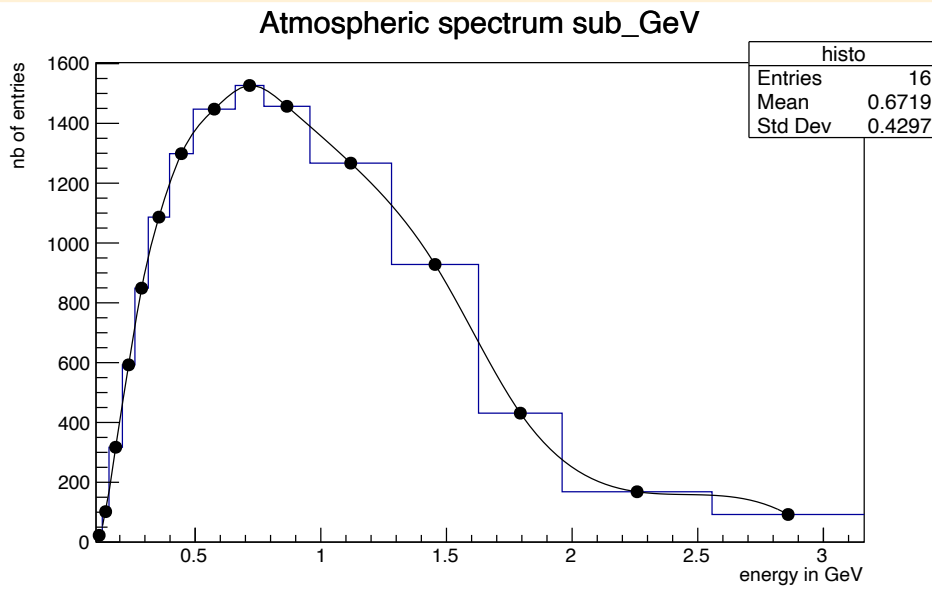
K. Abe et al., Phys. Rev. D, vol. 97,2018

Complément

Histogramme : un point par bin, binning d'origine

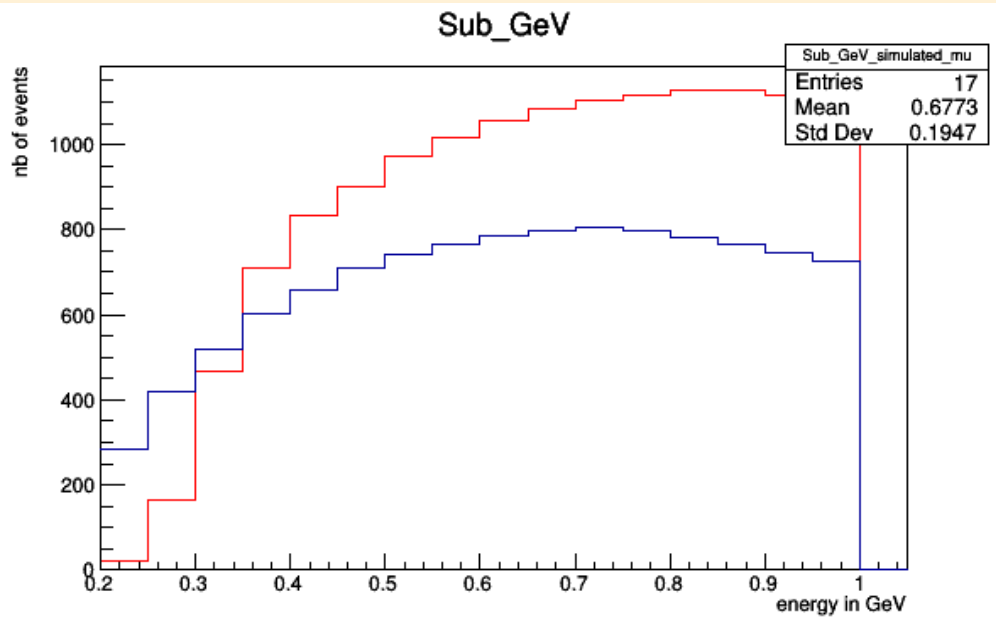
Extrapolation cubique entre les bins -> fonction continue

Tirage aléatoire avec 50MeV/bin, ~ 15000 évènements , proportions ν_e / ν_μ conservée

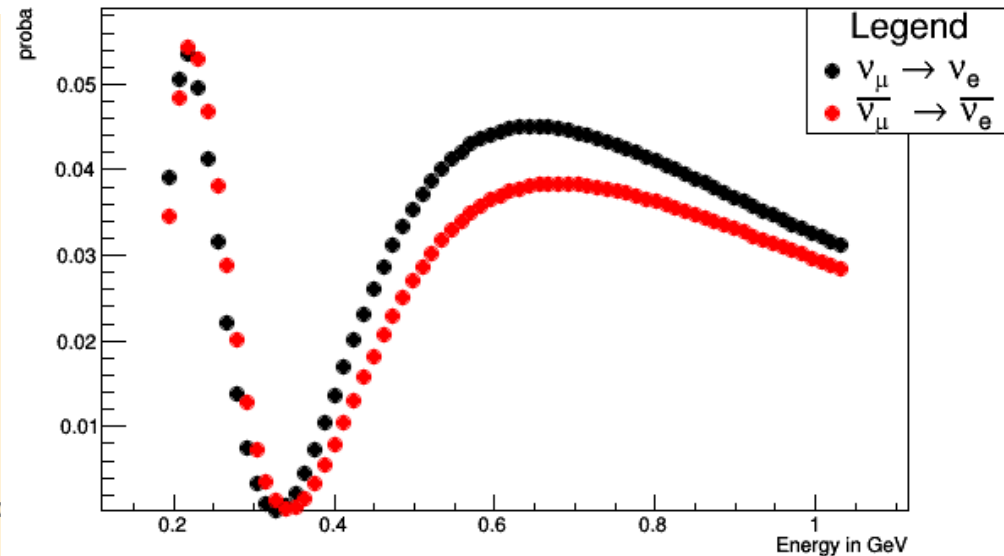


Complément

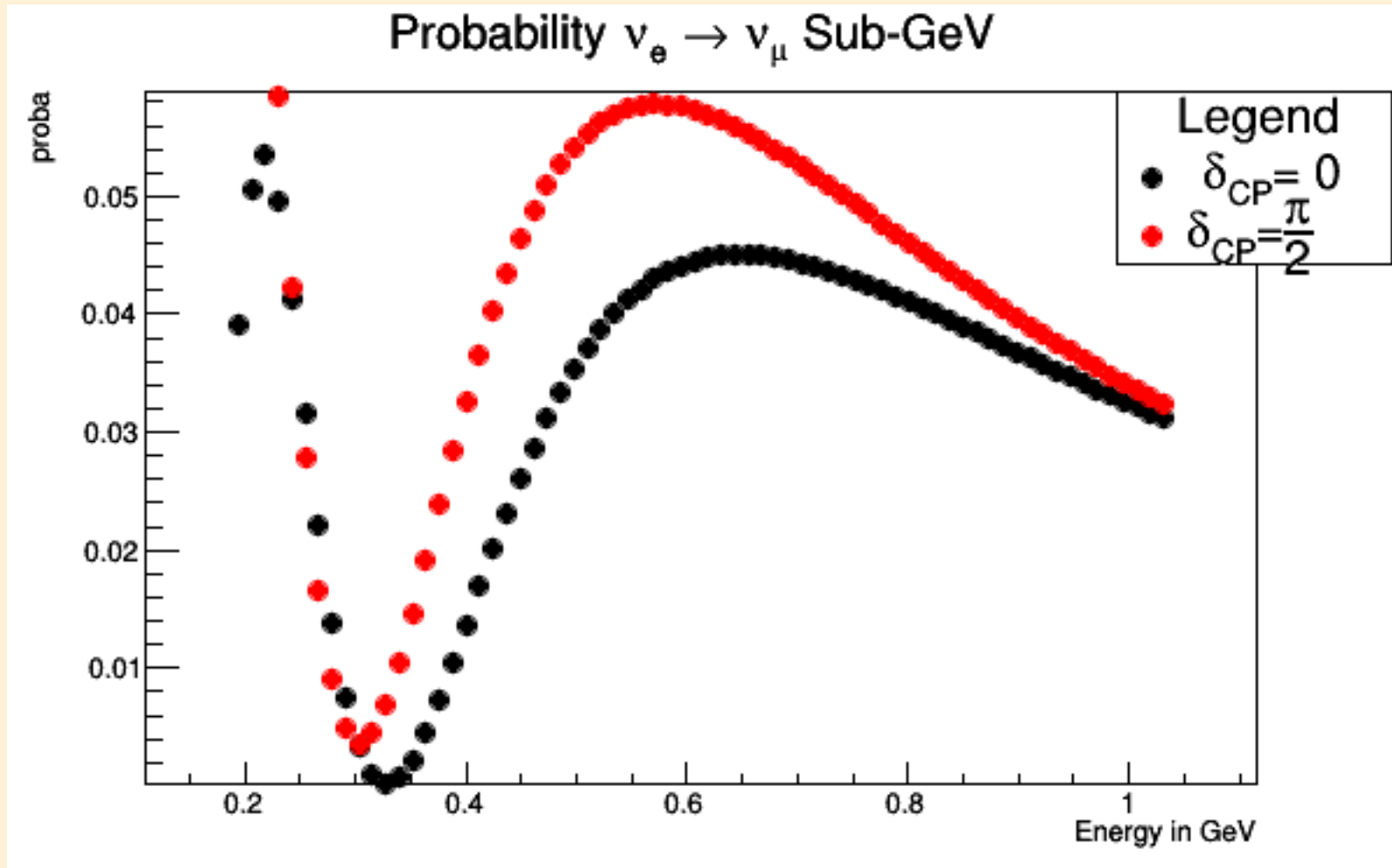
$$\text{Spectre}_{\text{oscillé}, \nu_\mu} = \text{Spectre}_{\nu_\mu} * P(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) + \text{Spectre}_{\nu_e} * P(\nu_e \rightarrow \nu_\mu)$$



Probability $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$ Sub-GeV $\delta_{CP}=0$

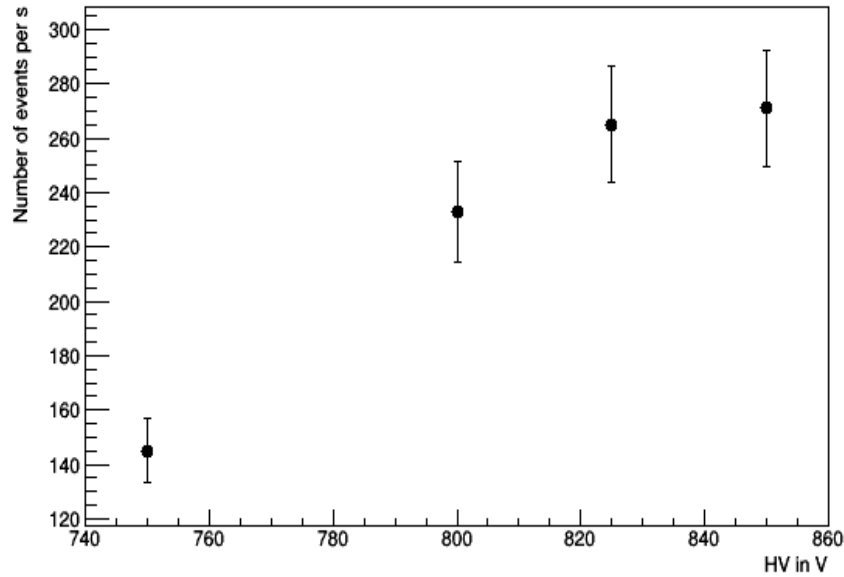


Complément

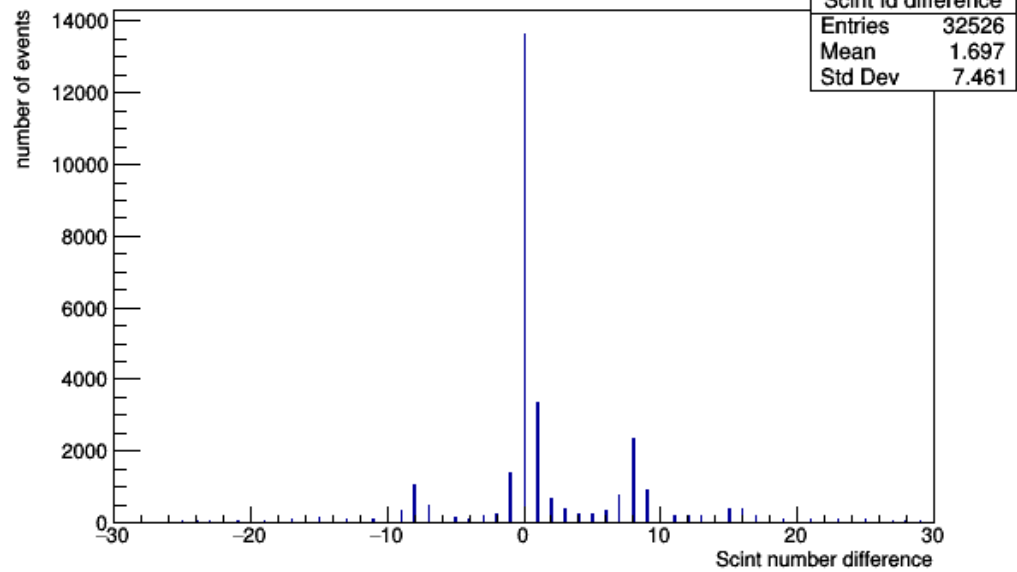


Complément: stage de M1

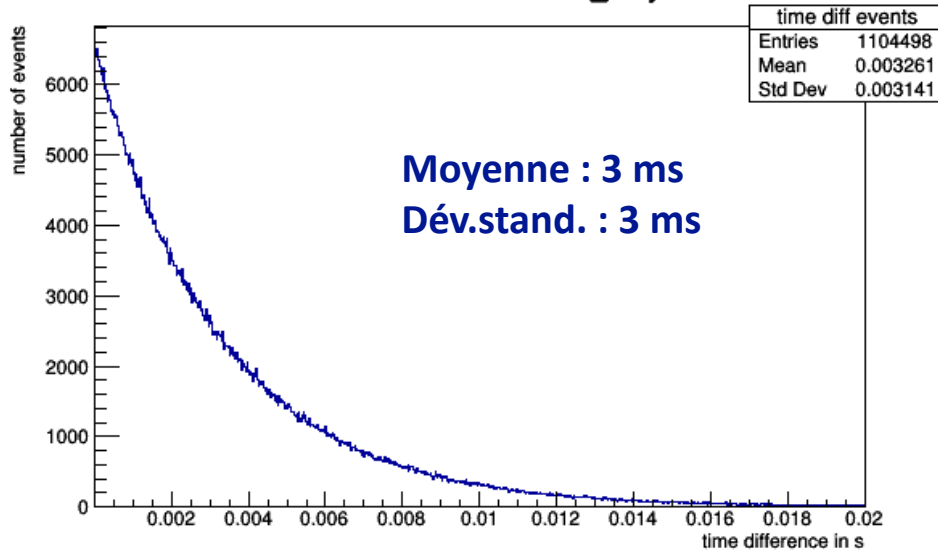
Number of events per seconds vs High Voltage



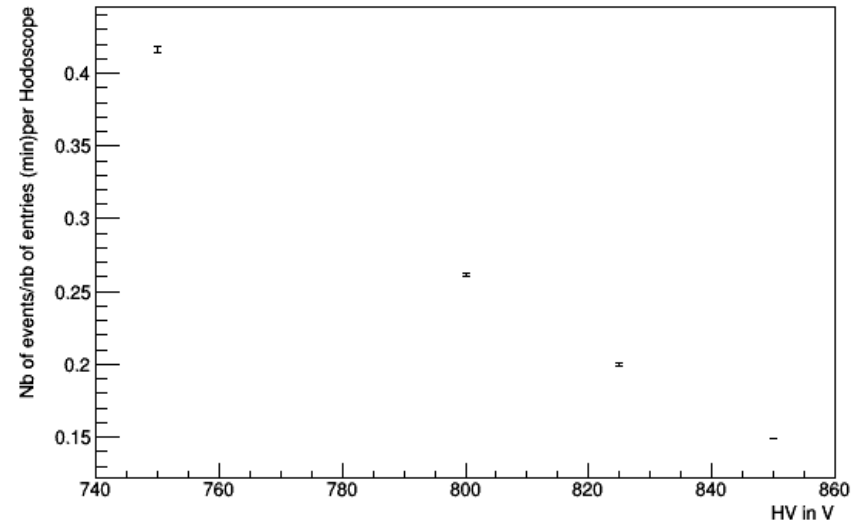
Scint Id difference_small time differences_May



Time difference events_May



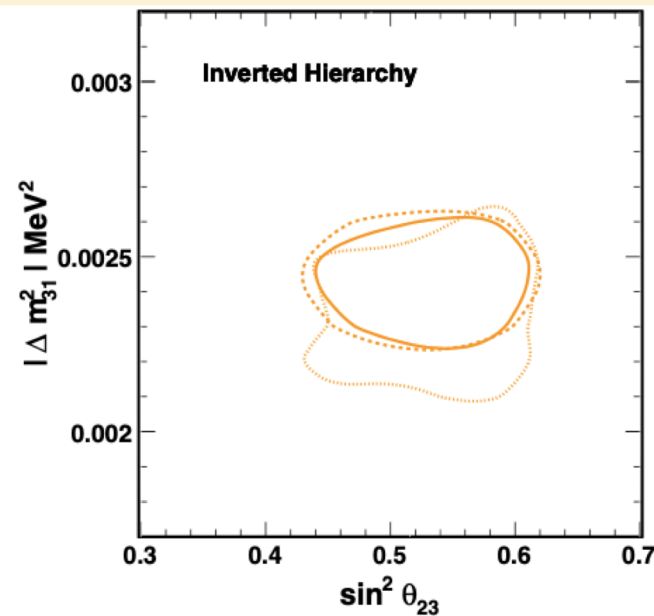
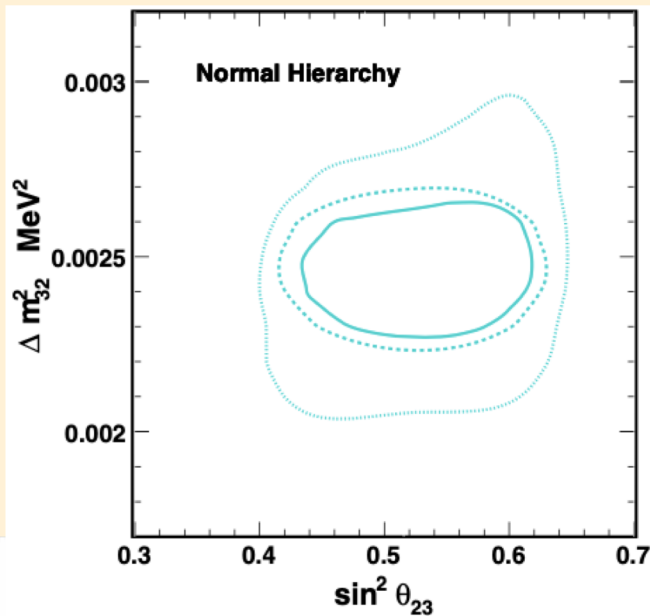
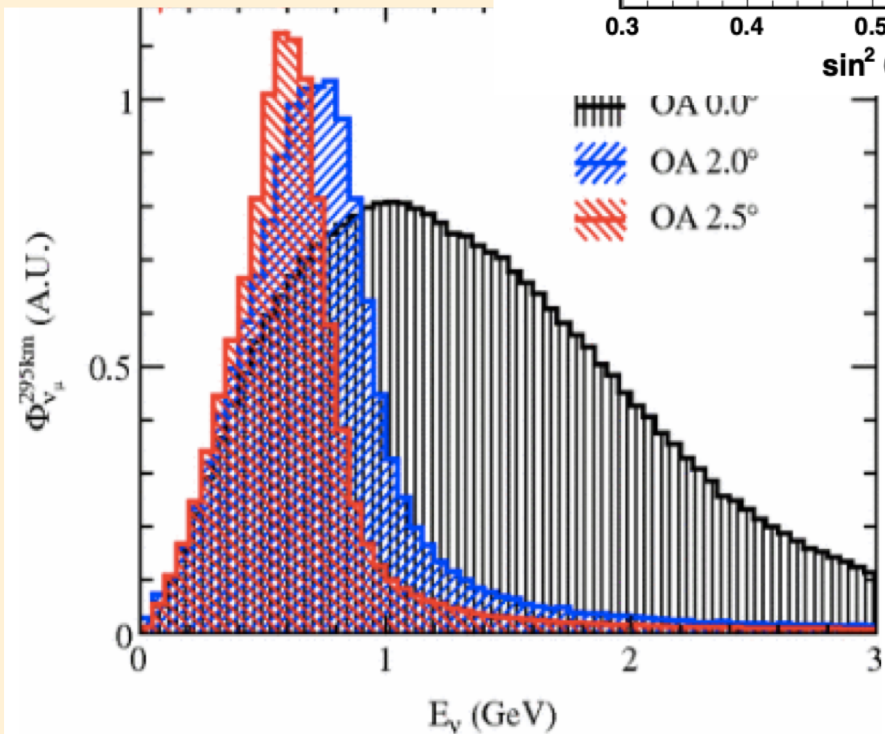
Frequency of events vs High Voltage



Complément

Flux de ν_μ à 295km en unité arbitraire (en bas)

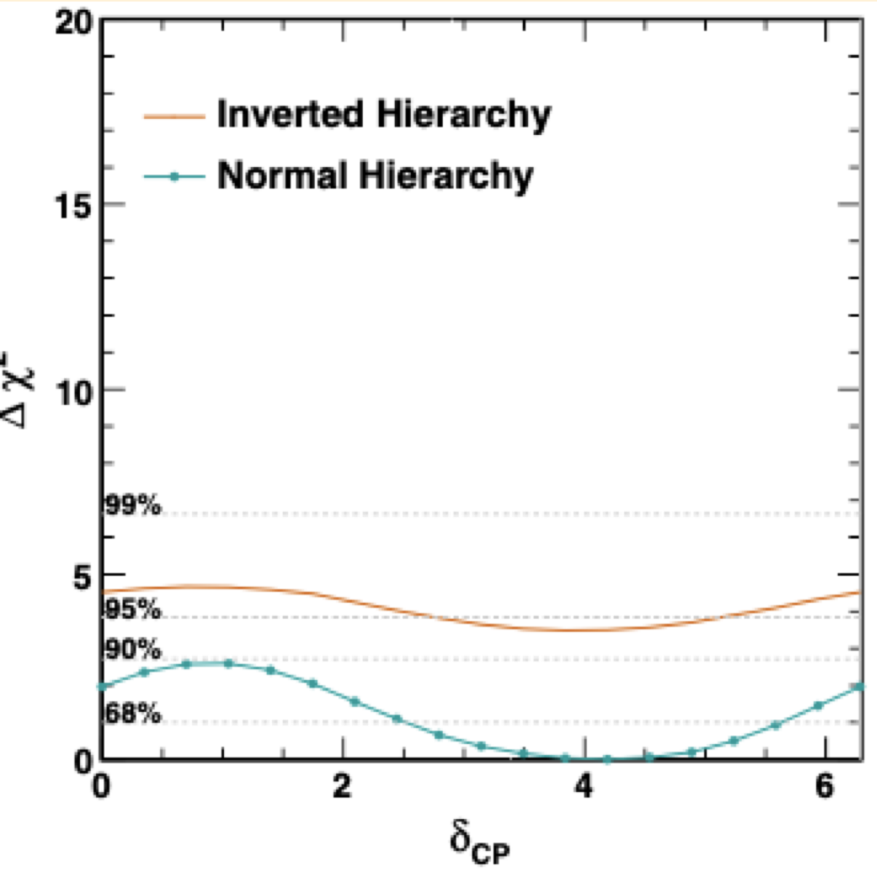
issue K. Abe et al., "T2K neutrino flux prediction," Phys. Rev. D, 2013



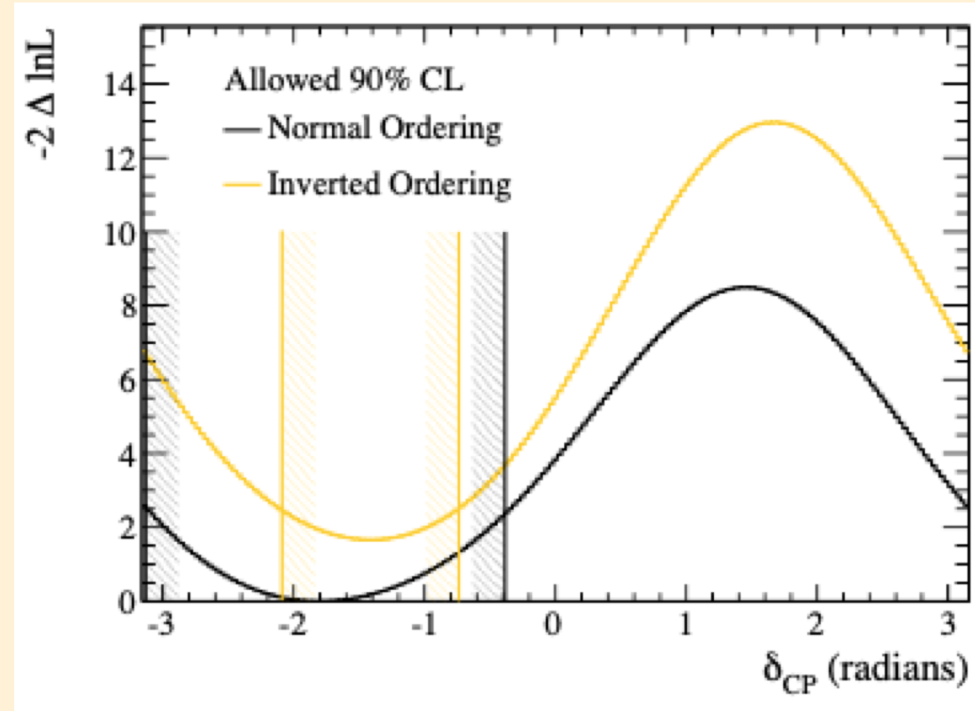
Contours des contraintes obtenues dans le plan Δm_{32}^2 vs $\sin^2 \theta_{23}$ pour SK seul (gros pointillés), modèle de T2K (pointillés fins) et avec la combinaison (ligne continue)

issue de K. Abe et al., Phys. Rev. D, vol. 97, 2018

Complément

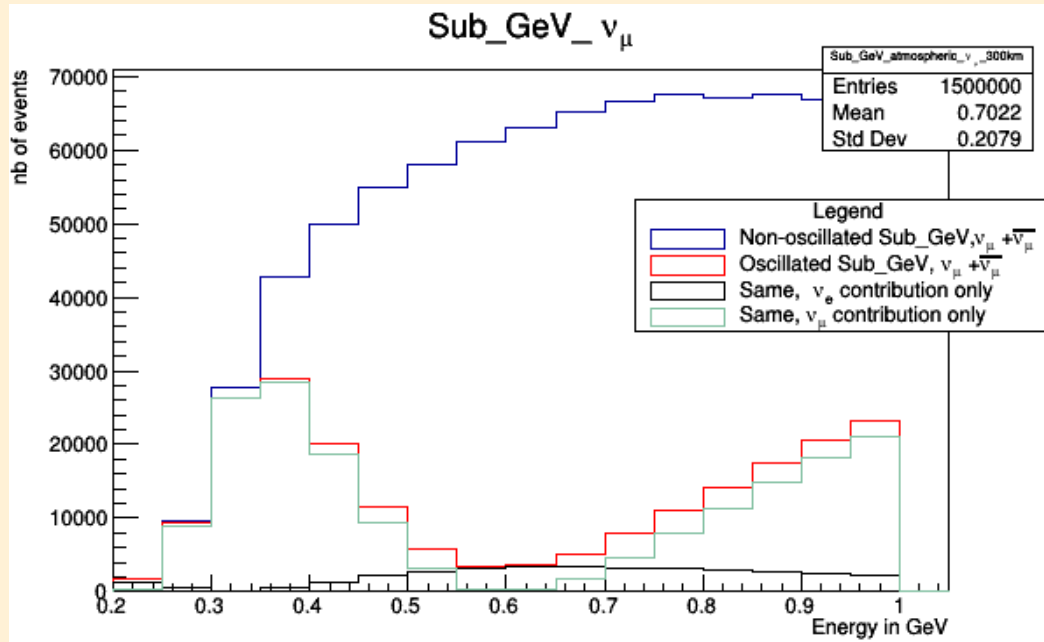


issue de K. Abe et al., Phys. Rev. D, vol. 97, 2018



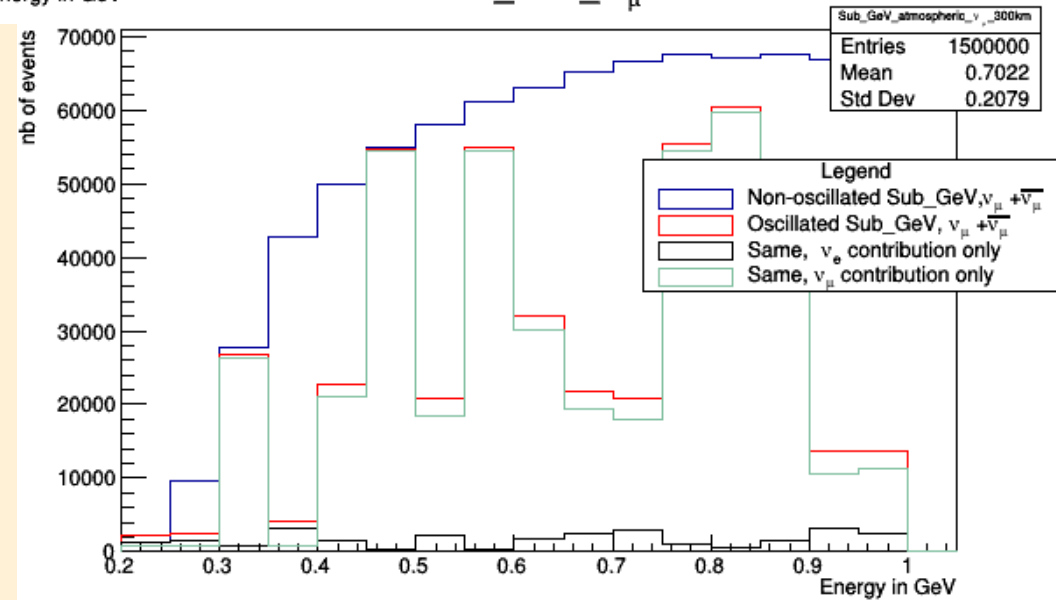
K. Abe et al., Phys. Rev. Lett., vol. 118, 2017

Complément



L = 300 km
 $\rho = 2,6 \text{ g.cm}^{-3}$

L = 13000 km
 $\rho = 5,1 \text{ g.cm}^{-3}$



Complément

0.0025	0.225	0.225	2.80794	1.39179	4	4	0.2	0.2	2.80009	1.39179
0.0025	0.275	0.275	89.7263	89.9512	5	5	0.25	0.25	89.6897	89.9512
0.0025	0.325	0.325	264.823	278.41	6	6	0.3	0.3	264.897	278.41
0.0025	0.375	0.375	284.496	296.626	7	7	0.35	0.35	284.709	296.626
0.0025	0.425	0.425	187.513	185.549	8	8	0.4	0.4	187.75	185.549
0.0025	0.475	0.475	91.6402	78.4494	9	9	0.45	0.45	91.832	78.4494
0.0025	0.525	0.525	31.0265	32.5254	10	10	0.5	0.5	31.1568	32.5254
0.0025	0.575	0.575	3.83092	3.91645	11	11	0.55	0.55	3.90309	3.91645
0.0025	0.625	0.625	2.2601	2.34427	12	12	0.6	0.6	2.28284	2.34427
0.0025	0.675	0.675	18.5517	18.488	13	13	0.65	0.65	18.5362	18.488
0.0025	0.725	0.725	46.0383	47.1304	14	14	0.7	0.7	45.9946	47.1304
0.0025	0.775	0.775	79.2574	81.3528	15	15	0.75	0.75	79.1943	81.3528
0.0025	0.825	0.825	114.604	110.894	16	16	0.8	0.8	114.529	110.894
0.0025	0.875	0.875	148.42	144.689	17	17	0.85	0.85	148.338	144.689
0.0025	0.925	0.925	181.107	171.974	18	18	0.9	0.9	181.021	171.974
0.0025	0.975	0.975	211.728	213.16	19	19	0.95	0.95	211.642	213.16

$$\ln(L) = -(N_{Pred} - N_{Obs}) - N_{Obs} \times e^{\ln(N_{Obs}/(N_{Pred}))}$$