



IN2P3
Les deux infinis

LM



Panorama sur la violation CP dans le secteur leptonique d'hier à 2040

Benjamin Quilain

(Laboratoire Leprince-Ringuet, CNRS/Ecole polytechnique)

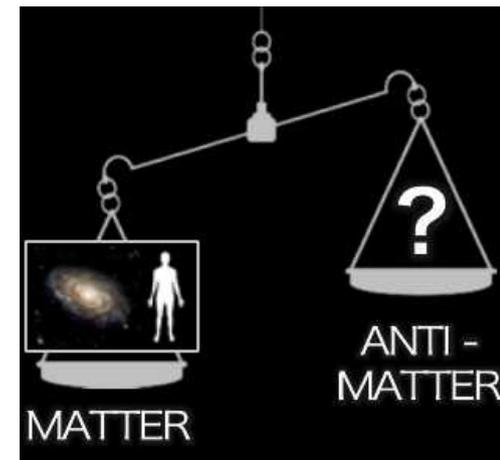


Hyper-Kamiokande

Séminaire au LLR, Palaiseau, 2020/05/11



- Qu'allons nous apprendre sur la violation CP leptonique (CPV) d'aujourd'hui à 2040 ?
- Cela viendra t'il impacter nos scénarios expliquant l'asymétrie matière/antimatière ?



1. Oscillation de neutrinos et état de l'art sur la CPV.

2. Avant 2027 (HK et DUNE) ?

3. DUNE et HK.

4. Sensibilités de DUNE et HK sur la mesure de la CPV en 2030.

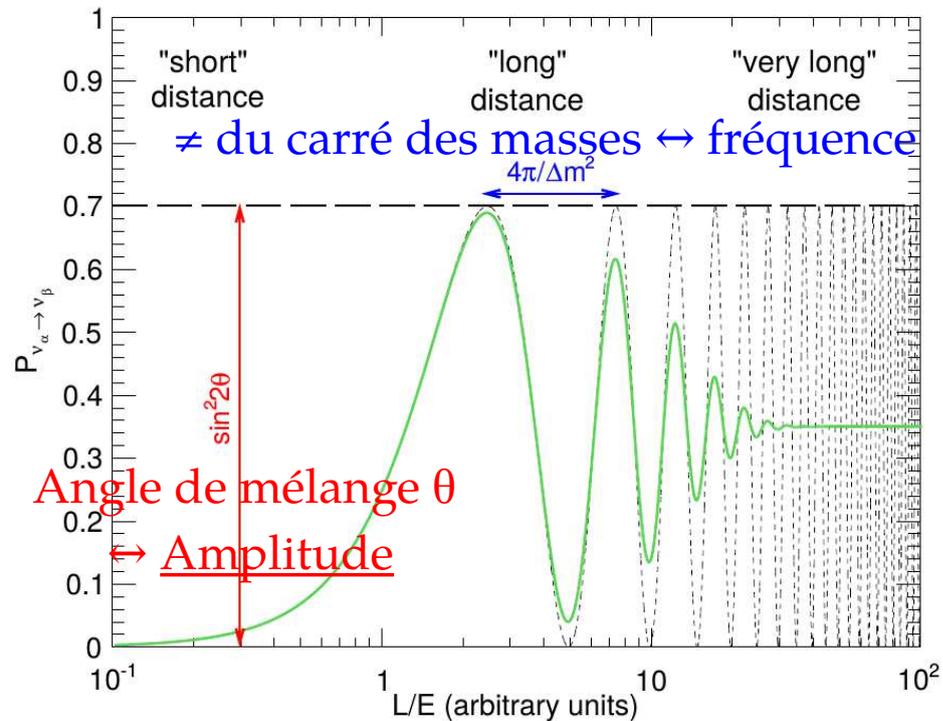
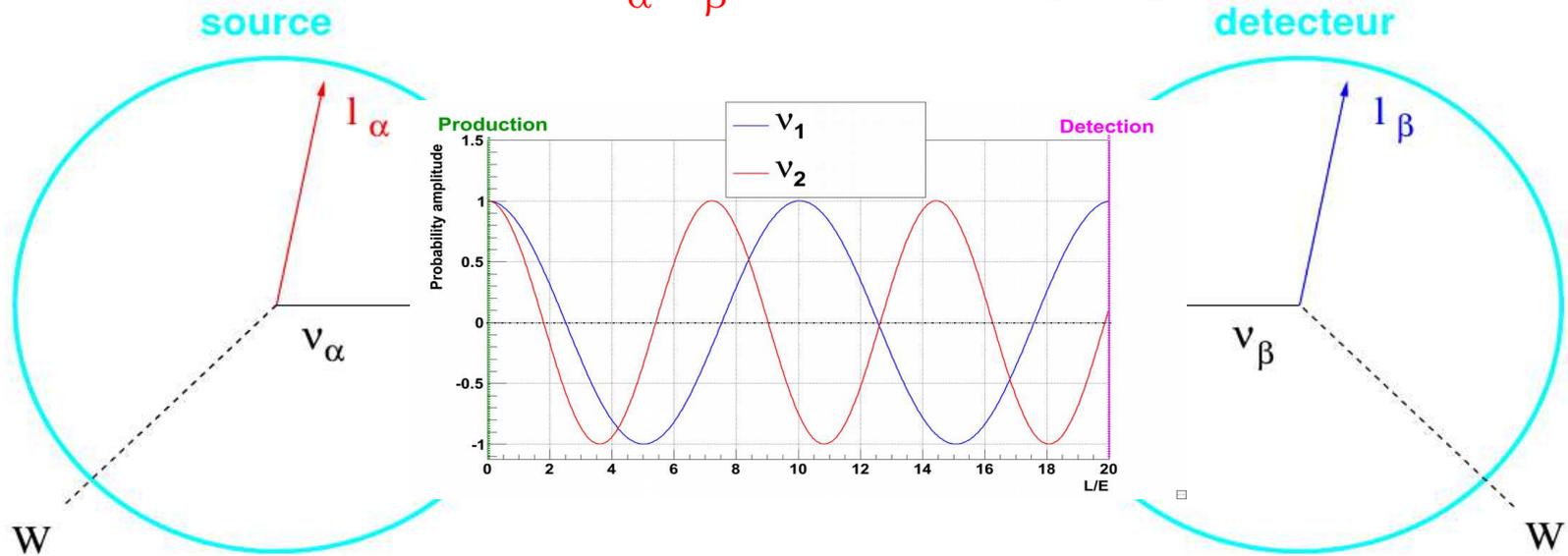
5. Impacts de ces résultats sur les théories, et après la mesure de CPV ?



I. Oscillation de neutrinos et état de l'art

Oscillations de neutrino et symétrie CP ⁴

- Etats d'interaction (saveur) $(\nu_\alpha, \nu_\beta) \neq$ états de propagation (masse) (ν_1, ν_2)



Dans l'approximation à 2 saveurs :

$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) = \sin^2 2\theta \sin^2 \left(\frac{\Delta m^2 L}{4E} \right)$$

Oscillation en L/E

Similaire pour 3 saveurs, avec :

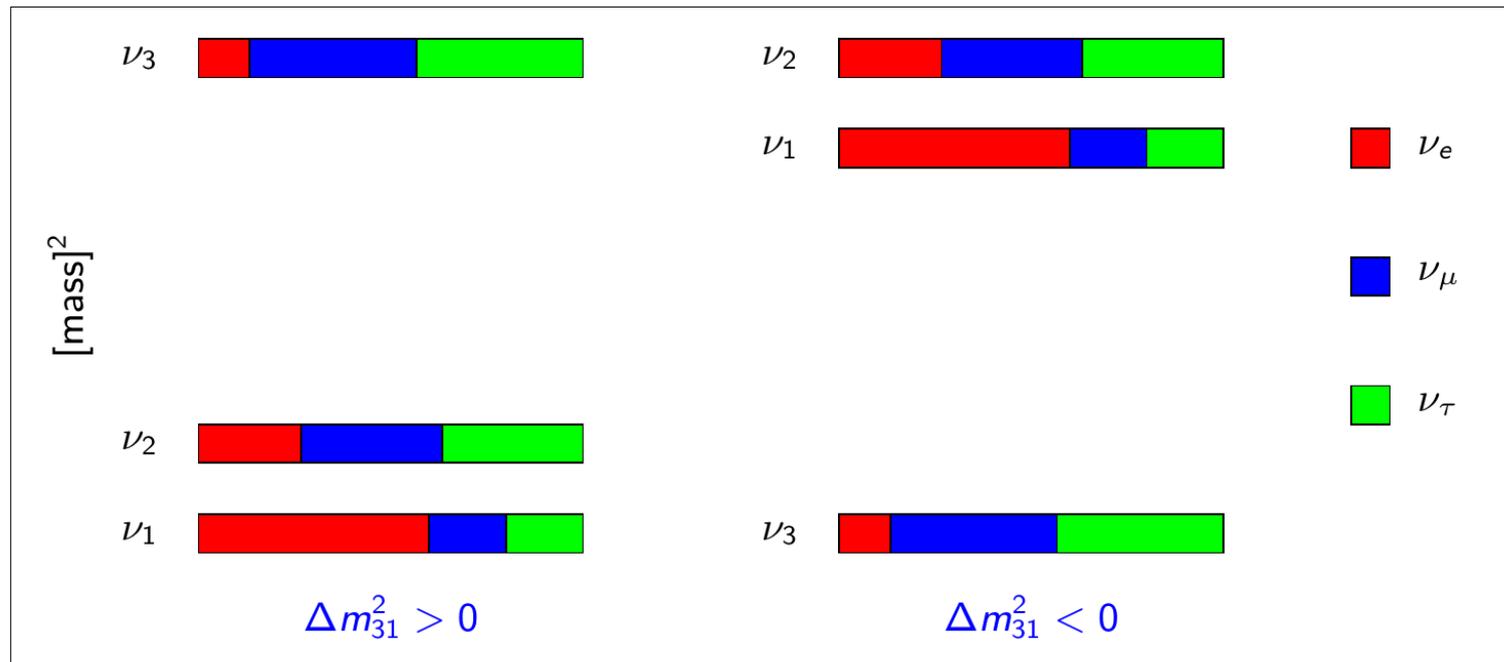
- 3 angles des mélange.
- 2 différences de masse.
- 1 paramètre de violation CP.

Le problème de la hiérarchie de masse

5

1. 3 états de masses : ν_1, ν_2, ν_3 .
2. Effets de matière dans le Soleil $\rightarrow m_2 > m_1$.
3. Oscillation neutrinos atmosphériques vs solaire $\rightarrow |\Delta m_{32}^2| > |\Delta m_{21}^2|$

2 Scenarios : $m_3 > m_2 > m_1$ ou $m_2 > m_1 > m_3$.



4. ν_3 est-il plus léger ou plus lourd que le couple ν_1, ν_2 ? \rightarrow Mesures via :
 - a. Interférences : JUNO. ↑ plus on traverse la Terre
 - b. Effets de matière dans la Terre : T2K/SK/HK, DUNE, IceCube....

Mesurer la brisure de symétrie CP

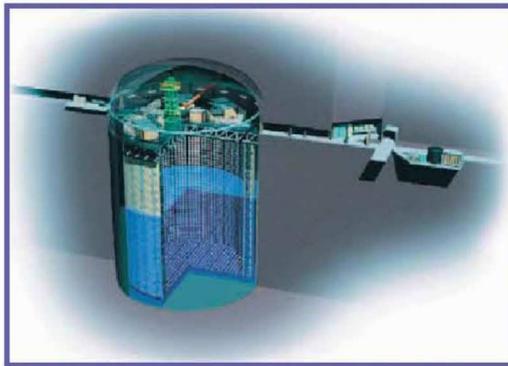
6

- L'asymétrie CP (CPV) peut être mesurée via l'asymétrie de probabilité :

$$P(\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta) \neq P(\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta).$$

- En 2020 : les plus fortes contraintes sur la CPV proviennent de T2K

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \neq P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e).$$



Super-Kamiokande
(ICRR, Univ. Tokyo)

Détection de
 $\nu_\mu, \nu_e / \bar{\nu}_\mu, \bar{\nu}_e$



Production de $\nu_\mu / \bar{\nu}_\mu$

J-PARC Main Ring
(KEK-JAEA, Tokai)



Puzzle symétrie CP / hiérarchie de masse⁷

Apparition de $\nu_e / \bar{\nu}_e$

1. Effet de $\sin^2(2\theta_{13})$: terme dominant.

2. Effet de la violation CP :

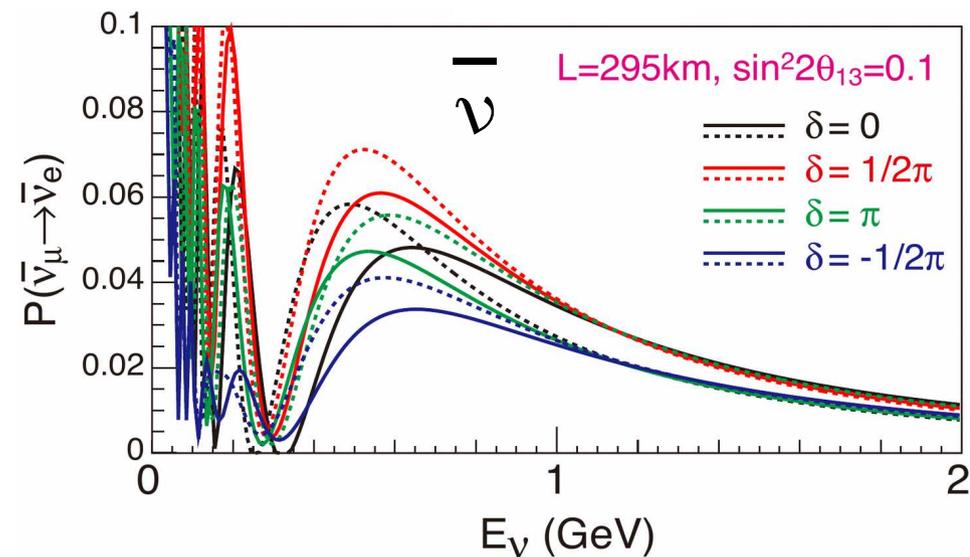
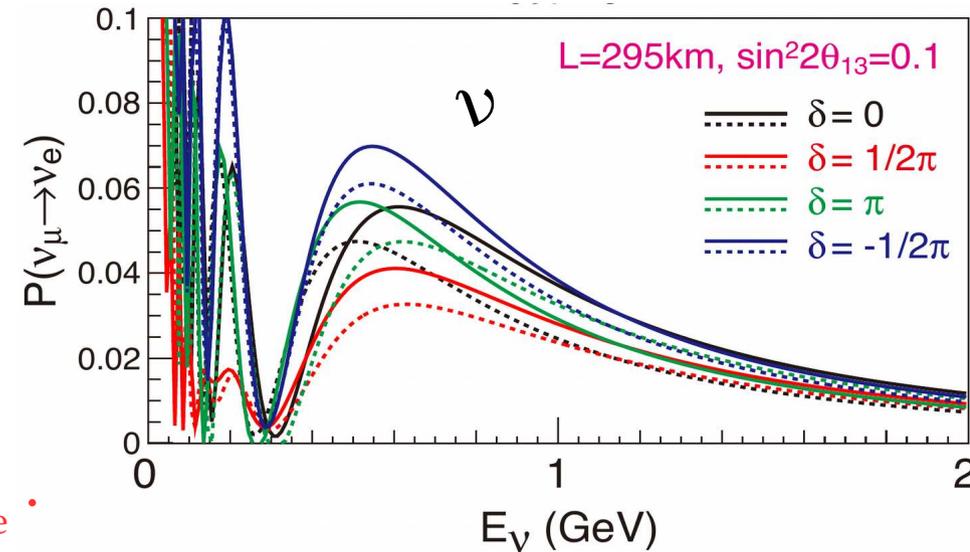
→ si $\delta_{CP} = -\pi/2$: $\uparrow \nu_\mu \rightarrow \nu_e$ & $\downarrow \bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$.

→ $\sim 27\%$ @T2K ($\sin^2(2\theta_{23})=1$)

3. Effet de la hiérarchie de masse :

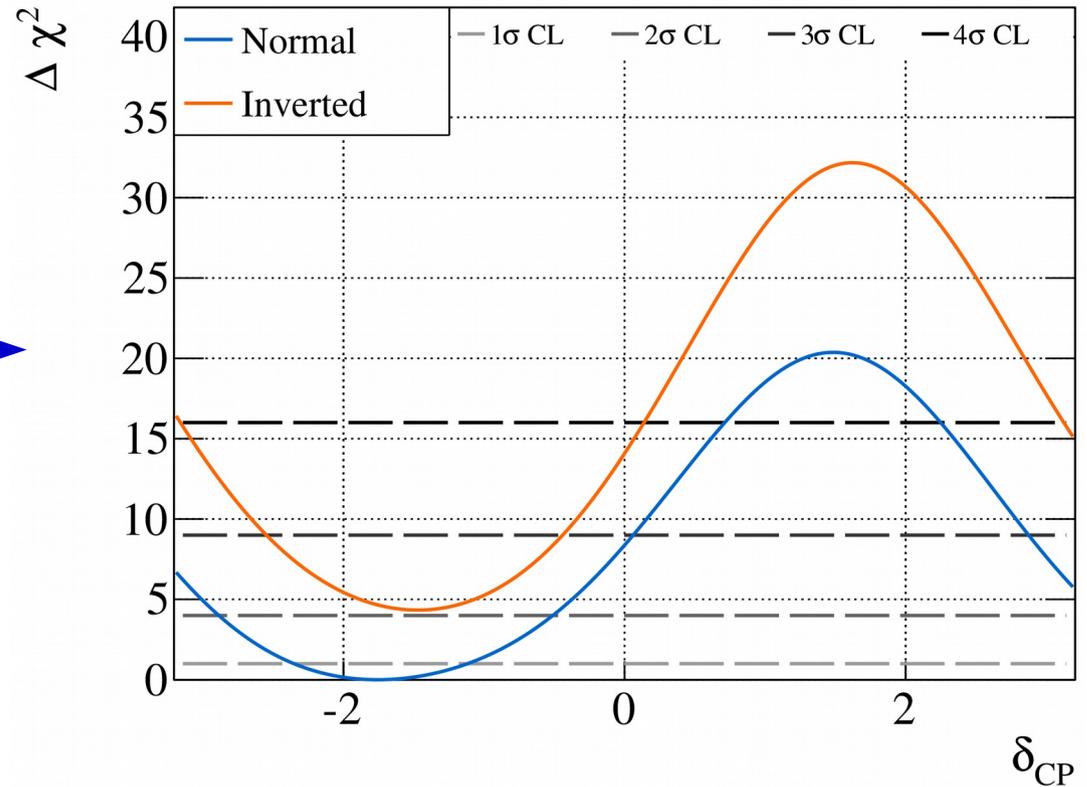
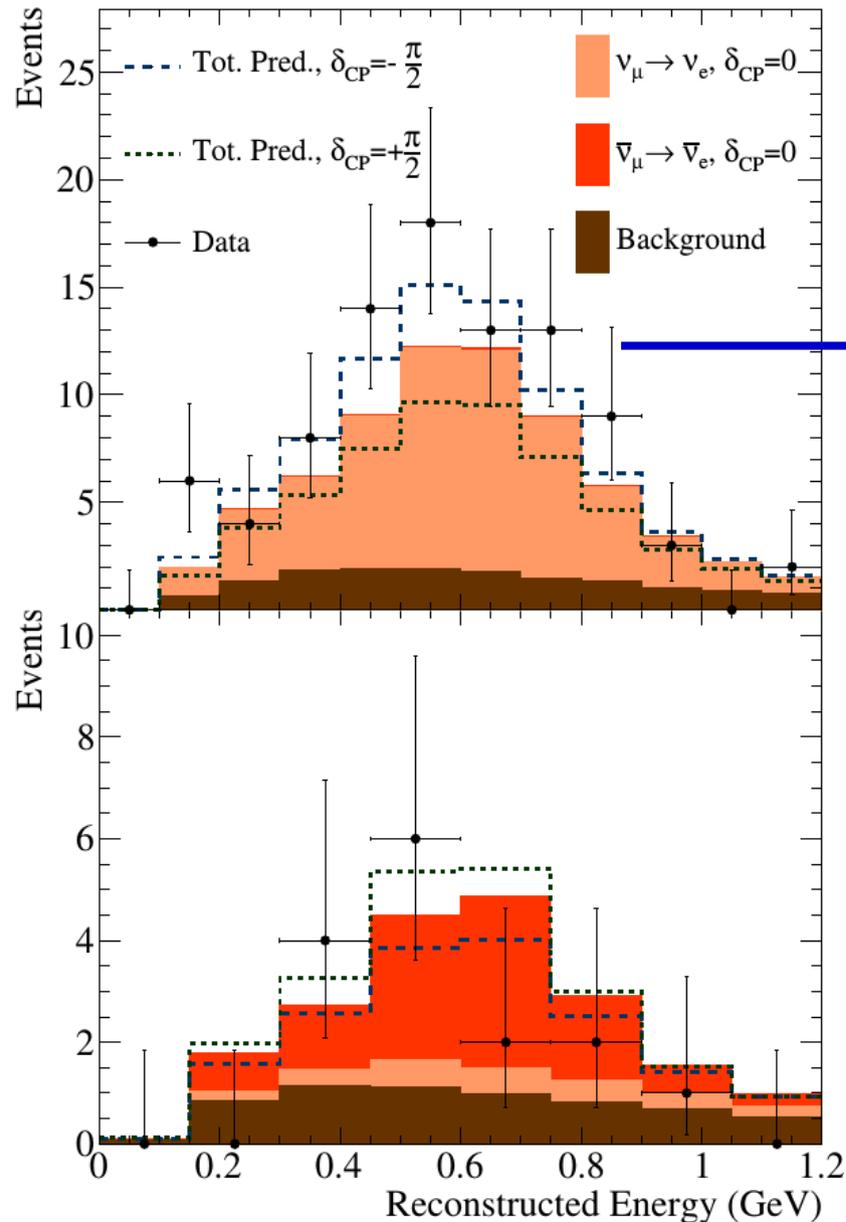
→ si NH : $\uparrow \nu_\mu \rightarrow \nu_e$ & $\downarrow \bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e$.

→ $\sim 10\%$ @T2K ($\sin^2(2\theta_{23})=1$)



Dégénérescence : effets de violation CP vs hiérarchie de masse !

→ A T2K : c'est moins que l'on souhaite mesurer la hiérarchie de masse, c'est surtout que l'on n'a pas le choix si on veut mesurer la violation CP.

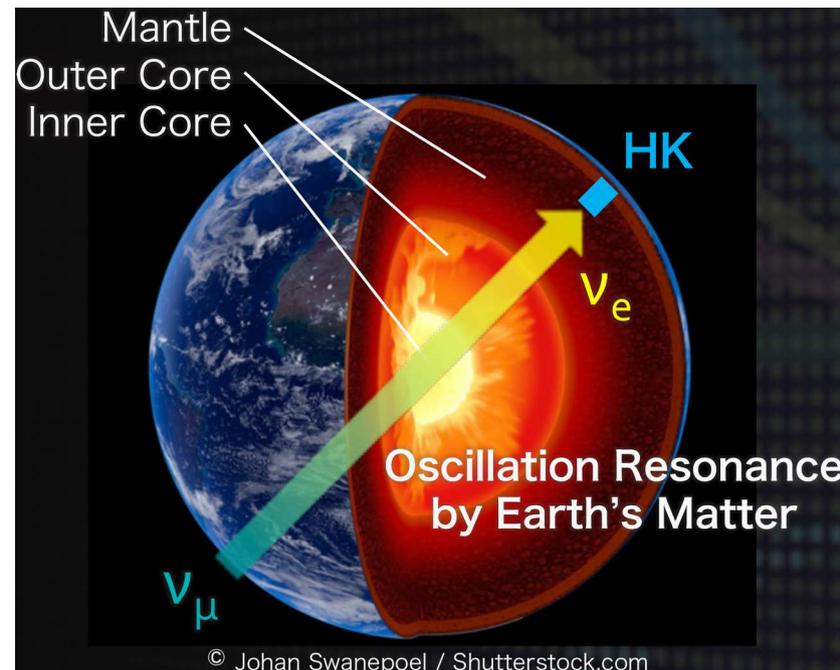


- Conservation CP exclue $> 2\sigma$.
- Violation CP maximale $\delta_{CP} = -\pi/2$ favorisée \rightarrow Symétrie cachée ?
- Hiérarchie de masse normale favorisée.



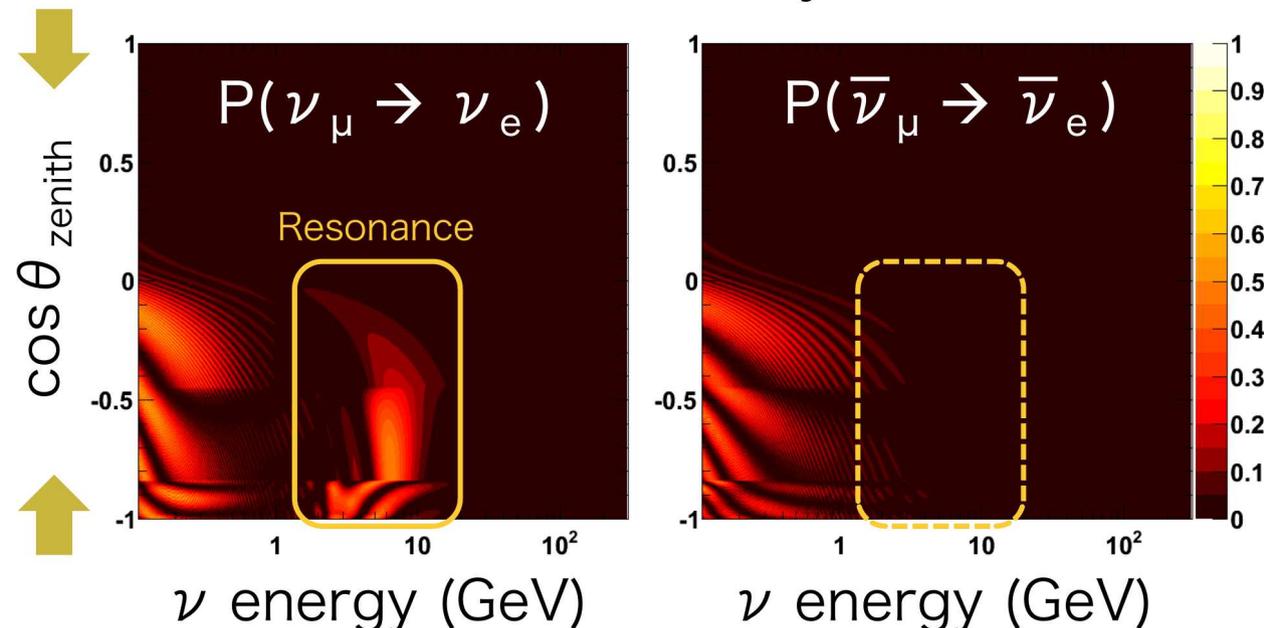
II. Physique d'aujourd'hui à 2025

- Première méthode, T2K-SK:
Ajustement commun neutrinos de faisceau T2K et atmosphériques SK.
→ Meme détecteur lointain i.e. systématiques.
→ Lever la dégénérescence CPV vs MH.
- Neutrinos atmosphériques : traversent 0 – 12000 km dans la Terre
→ Effets de matière \gg pour neutrinos d'accélérateur ($L = 300$ km).



© Johan Swanepoel / Shutterstock.com

Normal Hierarchy case

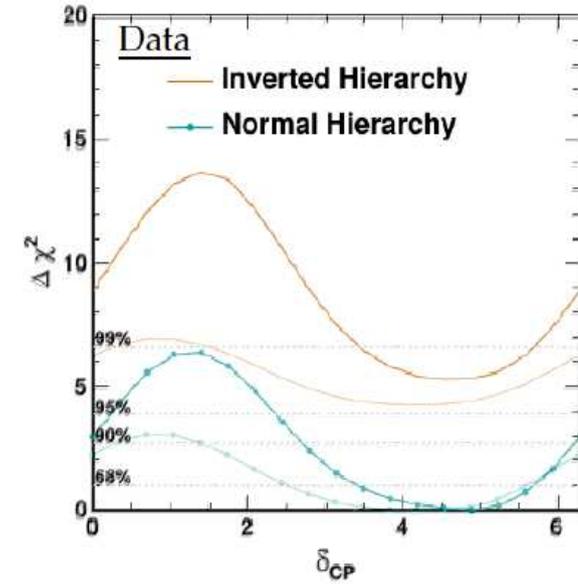
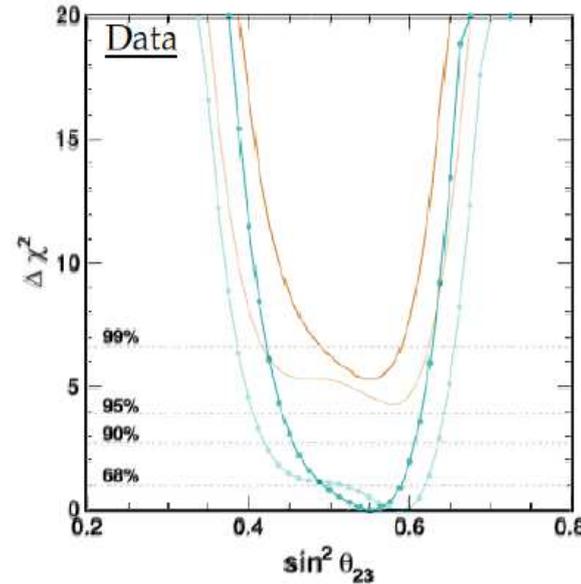
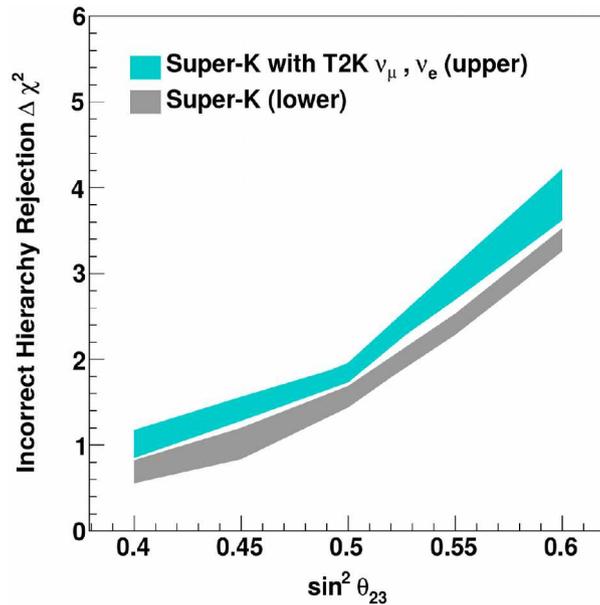


- Première méthode, T2K-SK:

Ajustement commun ν de faisceau T2K et atmosphériques SK.

→ Meme détecteur lointain i.e. systématiques.

→ Lever la dégénérescence CPV vs MH.



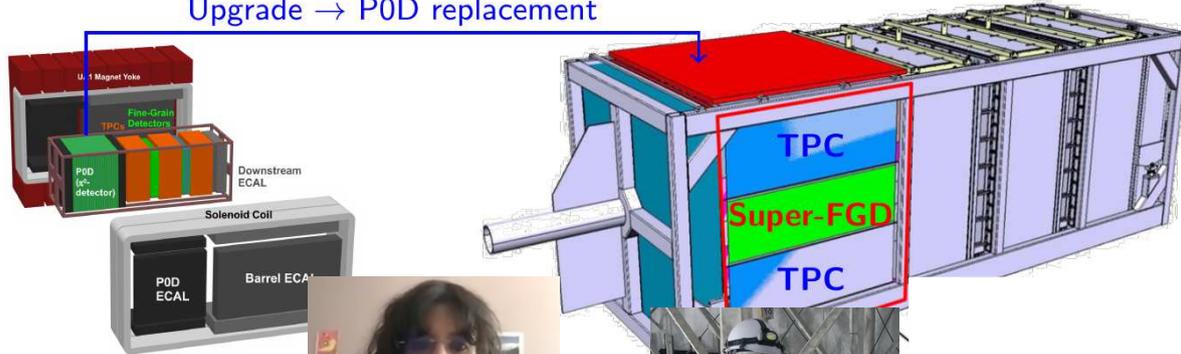
- Si $\sin^2\theta_{23} \geq 0.55$ (BF actuel ~ 0.52): Premières indications à 3σ de la MH.
- Premières indications à 3σ de la CPV et de la MH. si $\delta_{CP} = -\pi/2$
- Mesure de précision des paramètres PMNS → 1er tests unitarité PMNS.

- Seconde méthode, T2K-II :

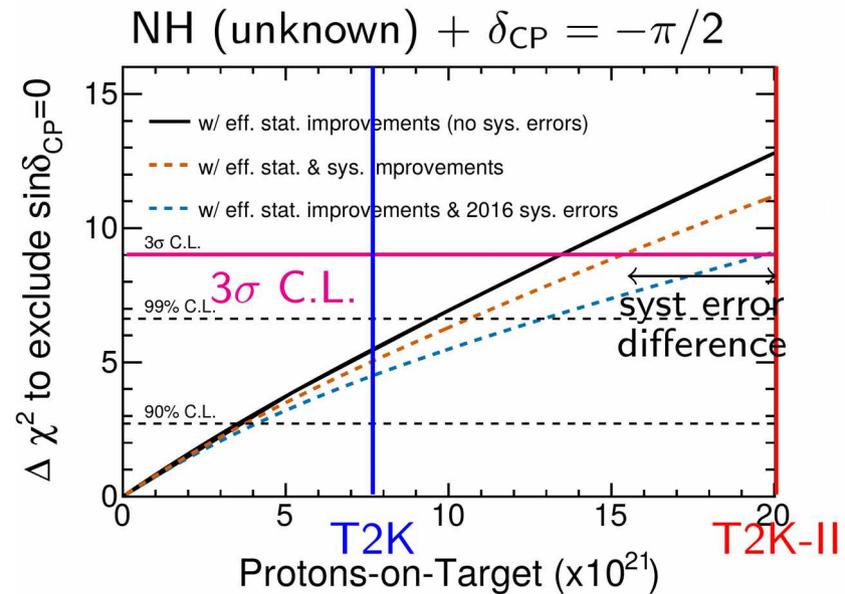
Upgrade faisceau (\downarrow err. stat.) et détecteur proches (\downarrow err. syst.) pour mesurer CPV à 3σ . si $\delta_{CP} = -\pi/2$

Talk Thomas aux perspectives

Upgrade \rightarrow POD replacement



+ Franck
+ Jerome
+ Mark



- 2 méthodes permettent d'atteindre 3σ si et seulement si $\delta_{CP} = -\pi/2$.

\rightarrow Combiner les deux pour élargir l'espace de phase couvert à 3σ .

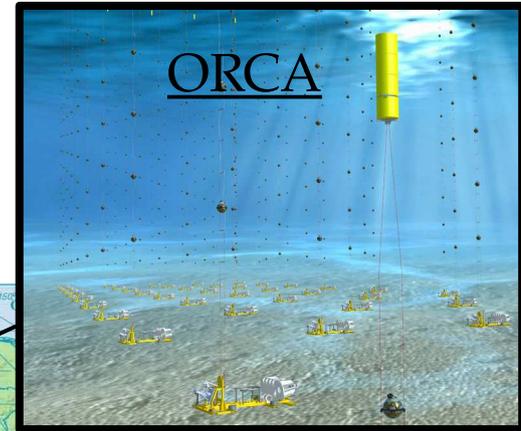
(+ préparer les détecteur et analyses HK.)

\rightarrow Le LLR est directement impliqué sur les deux aspects

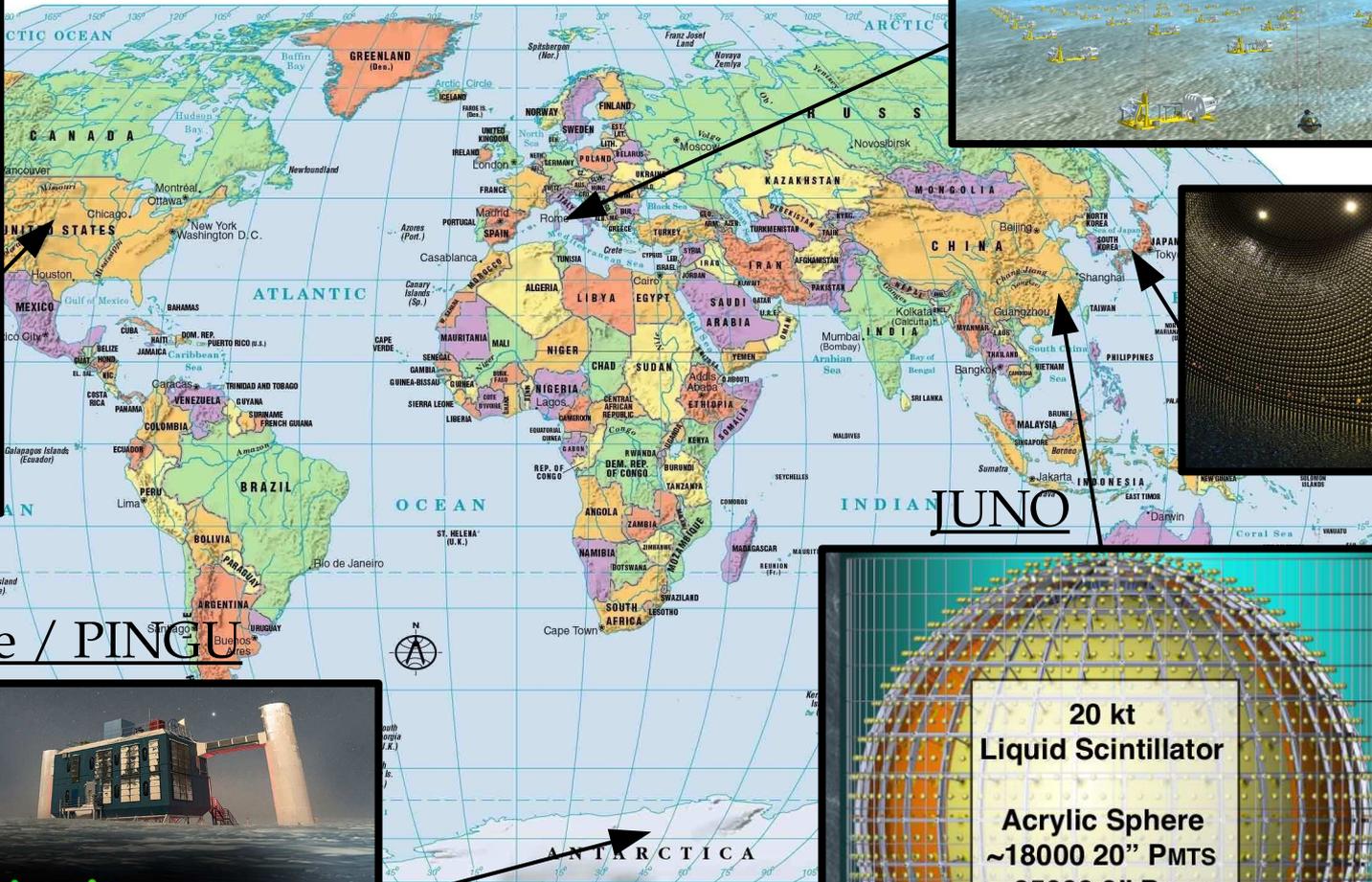
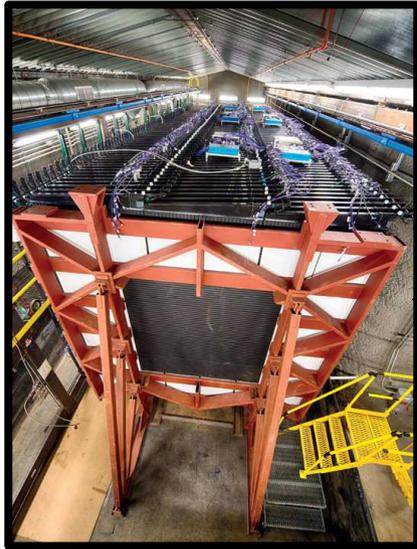
Et la hiérarchie de masse ?

But avant 2025 : Mesurer la hiérarchie de masse à 3 voir 5 σ .

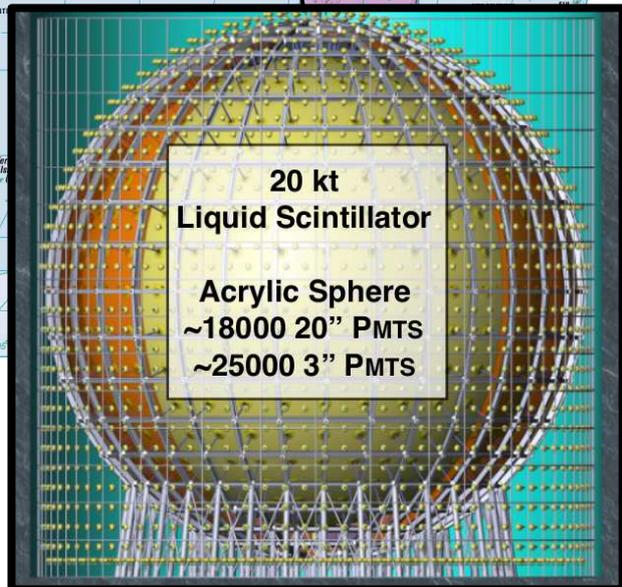
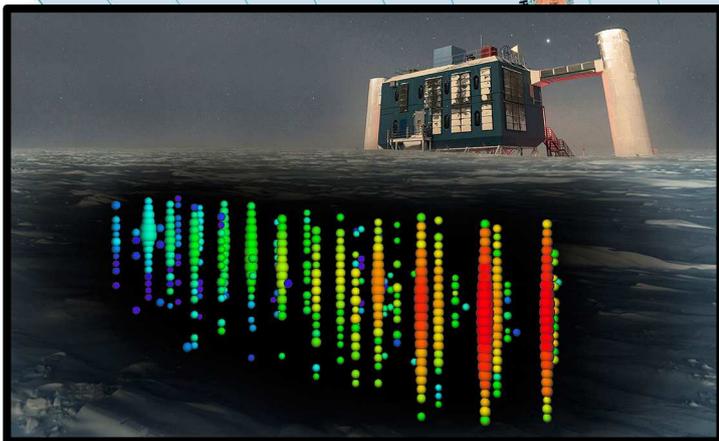
Nova



SK

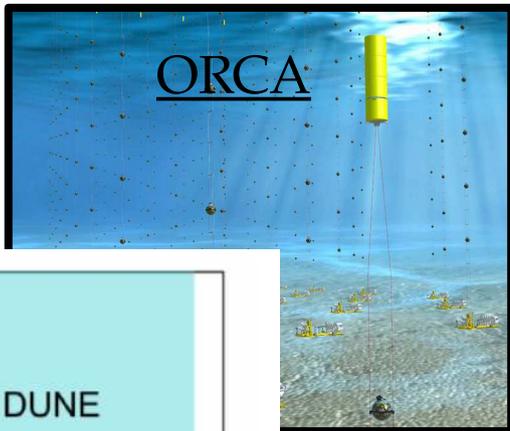


IceCube / PINGU



Et la hiérarchie de masse ?

1. Que fait on en terme de physique avant 2026 ?
→ Mesurer la hiérarchie de masse à 3 voir 5σ.

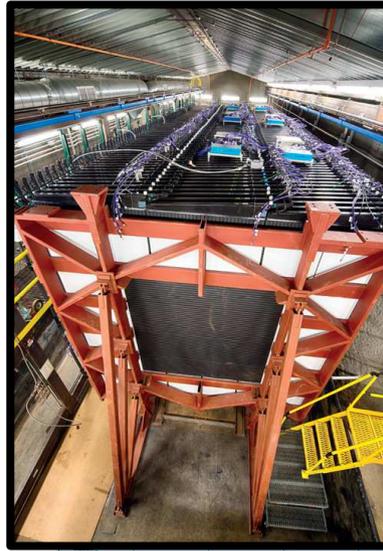


ORCA

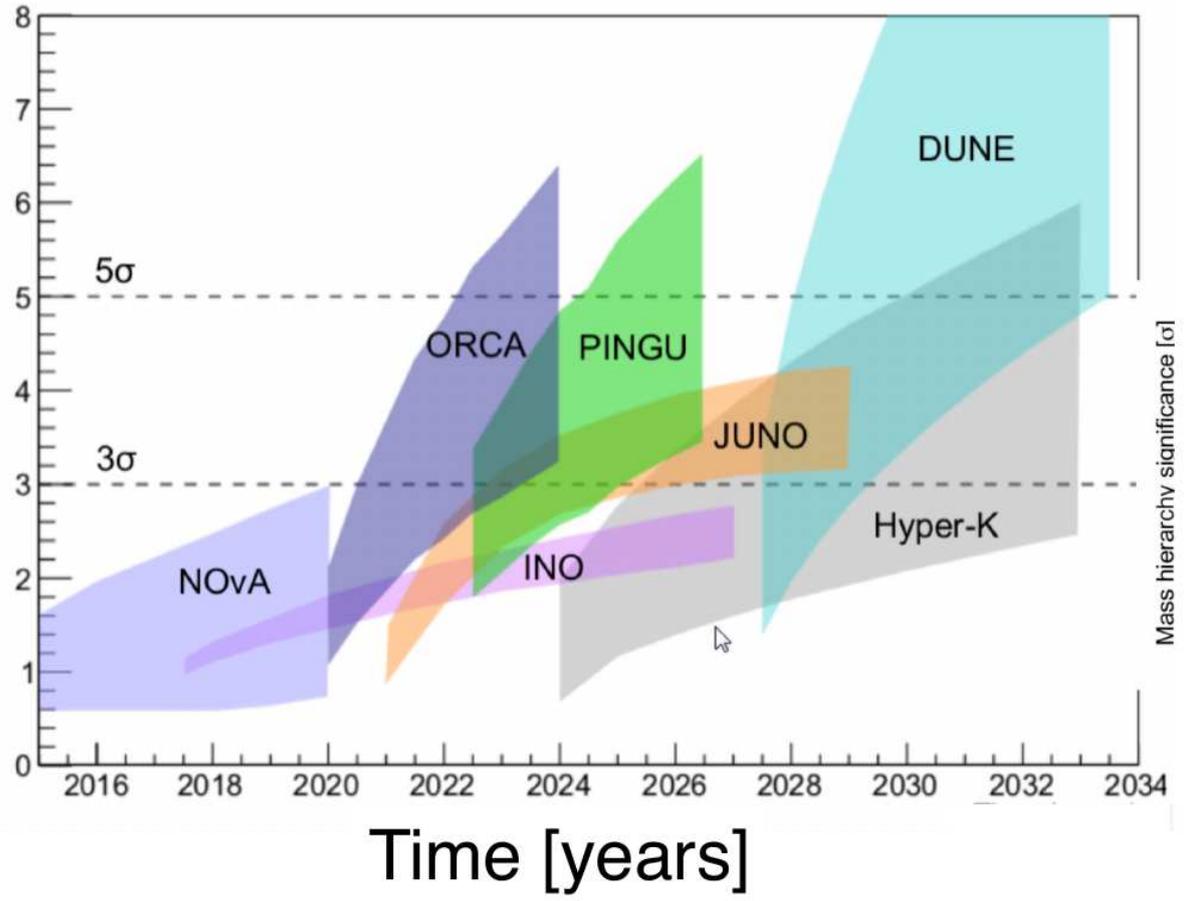


SK

Nova



Median Sensitivity [σ]



Mass hierarchy significance [σ]

Time [years]



IceCu

La MH sera probablement connue à 3-5σ en 2025

→ Sans compter la cosmologie, qui devrait avoir ~5σ en 2025-2030

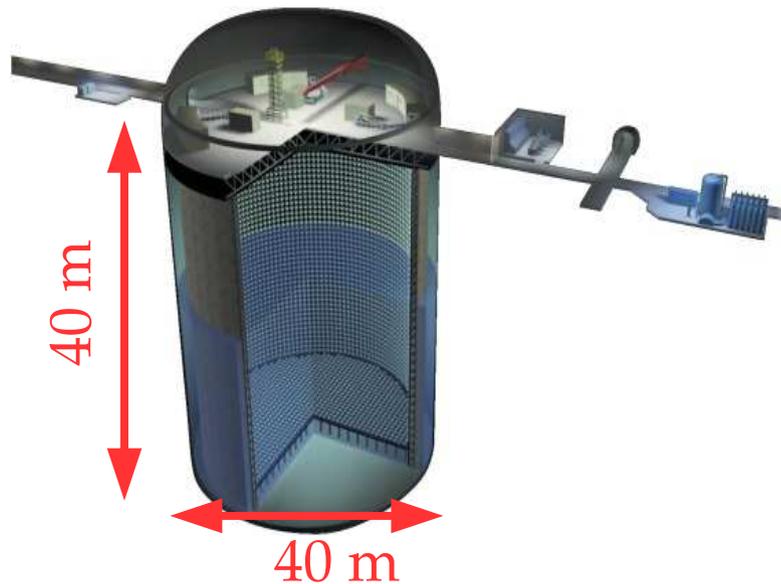


III. Depuis T2K vers HK et DUNE

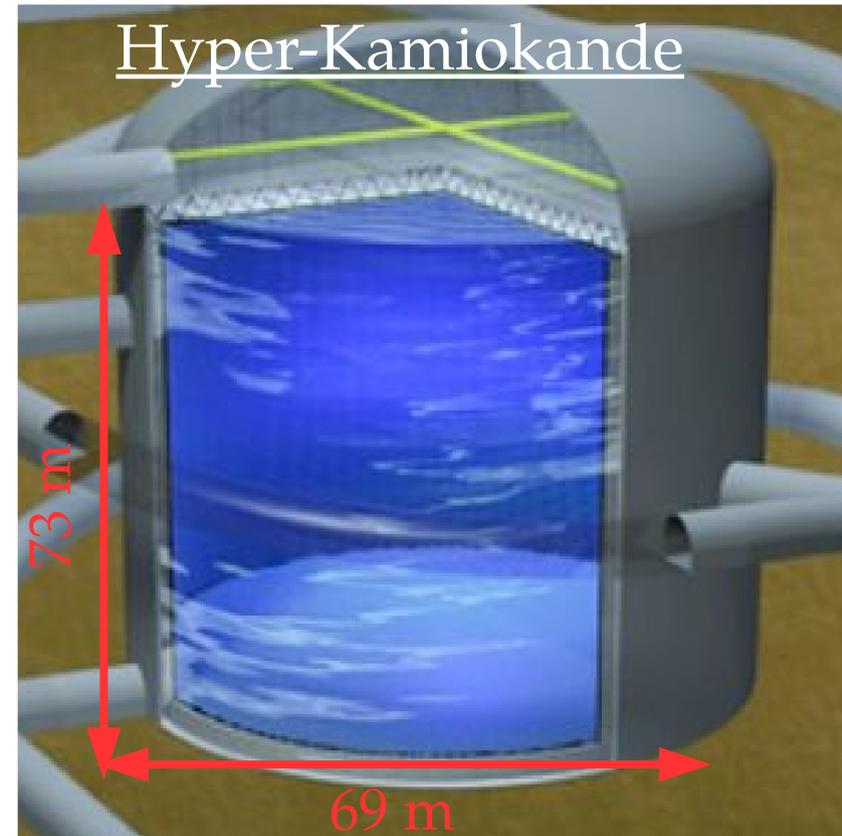
HK, c'est quoi ?

- Hyper-Kamiokande (HK) = la prochaine génération d'observatoire à effet Tcherenkov au Japon → Début construction : Mai 2020.

Super-Kamiokande



Hyper-Kamiokande



	Super-K	Hyper-K (1st tank)
Site	Mozumi	Tochibora
Number of ID PMTs	11,129	40,000
Photo-coverage	40%	40% (x2 sensitivity)
Mass / Fiducial Mass	50 kton / 22.5 kton	260 kton / 187 kton

→ 8 fois le volume fiduciel de SK

HK, c'est où ?

- Toujours a Kamioka, dans la montagne voisine a Super-Kamiokande :

Mt. Ikeno-yama 1000 m
SK

Maruyama
Excavated rock disposal site
Capacity : >2 million m³

Mt. Nijyugo-yama 650 m
HK

Route 41

Kamioka Town

Funatsu Bridge

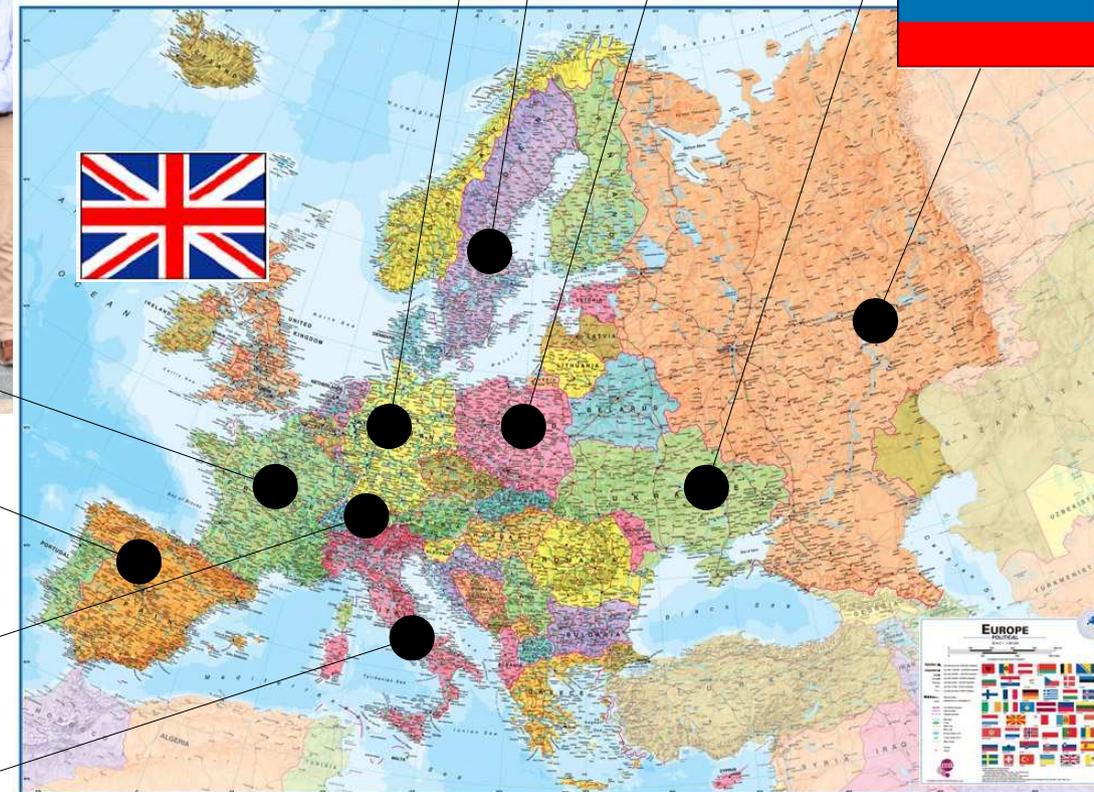
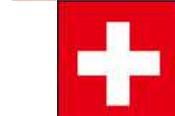
Wasabo
Tunnel Entrance
Access tunnel
Prefectural Road 484
Modified route of Road 484 (a plan)
Wasabo tailings dam owned by KMS

Japan (Inset map labels: Wakkani, Asahikawa, Kitami, Sapporo, Niigata, Sendai, Tokyo, Yokohama, Nagoya, Osaka, Hiroshima, Fukuoka, Kumamoto, Matsuyama)

Diagram Labels: 外周道路, 実用トンネル坑道, 上段アクセス坑道, 下水管坑道, 1階スロープ坑道, 2階トンネル坑道, 4階トンネル坑道, 下段アクセス坑道

HK, c'est qui ?

- Une collaboration de 84 institutes repartis dans 18 pays: ~350 membres
→ dont 10 pays en Europe



En France :

- Le LLR
- Le LPNHE
- Le DPhP (CEA/Irfu)

1er chapitre : CPV

- Découverte Violation CP dans le secteur des leptons.
- Haute sensibilité à la hiérarchie de masse des ν .

Second chapitre : GUT

- Vérification des Théories de Grande Unification via la désintégration du proton

Troisième chapitre : Astrophysique

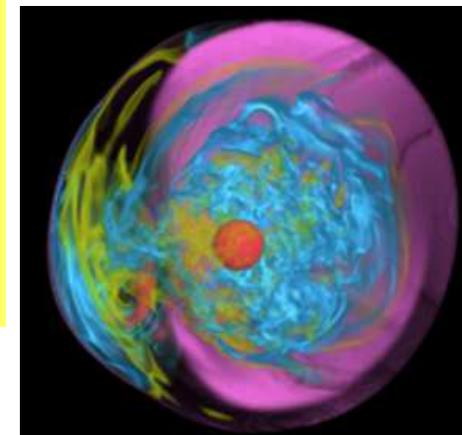
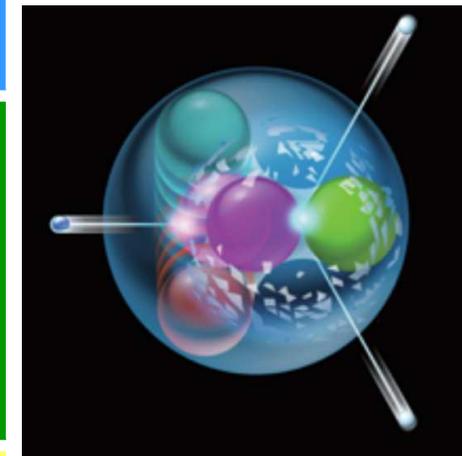
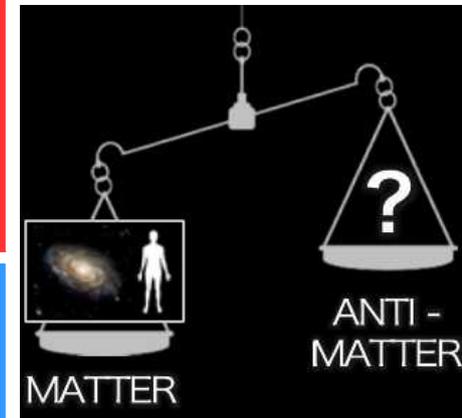
- Contrainte sur les modèles de Supernovae.
- Contraintes sur les formations des étoiles au cours de l'histoire de l'Univers.

Quatrième chapitre : Solaire

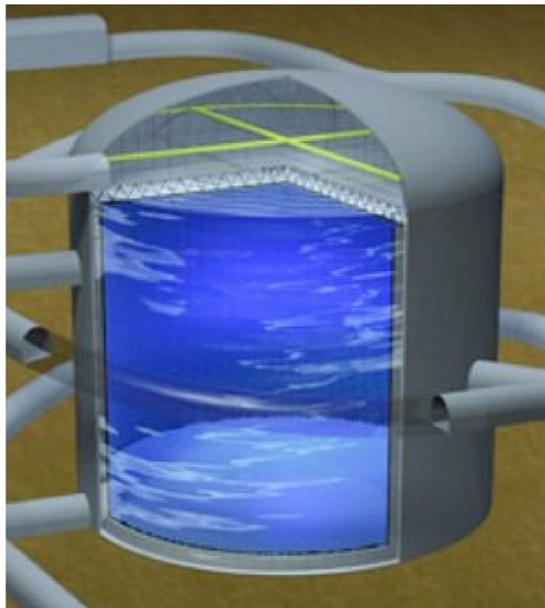
- Effet MSW dans le Soleil.
- Neutrinos steriles.
- Interactions non-standardes dans le Soleil.

HK est le seul observatoire à couvrir tous ces aspects

→ Combine un gigantesque volume à un seuil bas en énergie



- S'appuyer sur les forces de T2K :
 - Un faisceau quasi-monochromatique pour maximiser l'oscillation.
 - Une baseline courte pour minimiser la dégénérescence avec la MH.



Detection de
 $\nu_{\mu}, \nu_e / \bar{\nu}_{\mu}, \bar{\nu}_e$



Production de $\nu_{\mu} / \bar{\nu}_{\mu}$

J-PARC Main Ring
(KEK-JAEA, Tokai)



- En intégrant 3 nouveautés principales :
 - Tripler l'intensité du faisceau de neutrinos : 500 kW \rightarrow > 1.3 MW.
 - Nouveaux détecteurs proches : \downarrow systématique de 5 % a < 3 %.
 - Un détecteur lointain 8 x plus gros : HK.

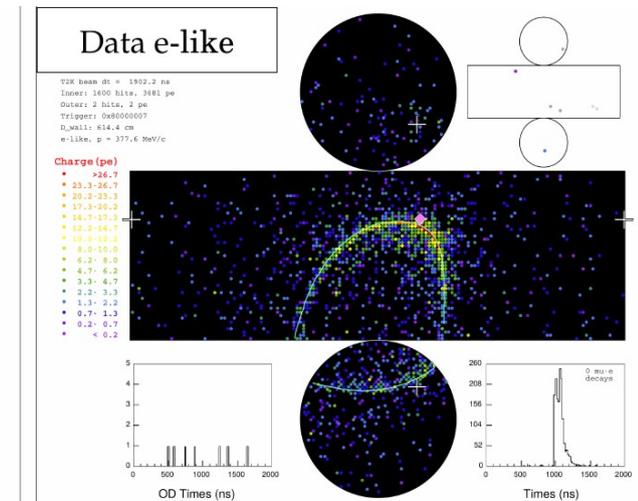
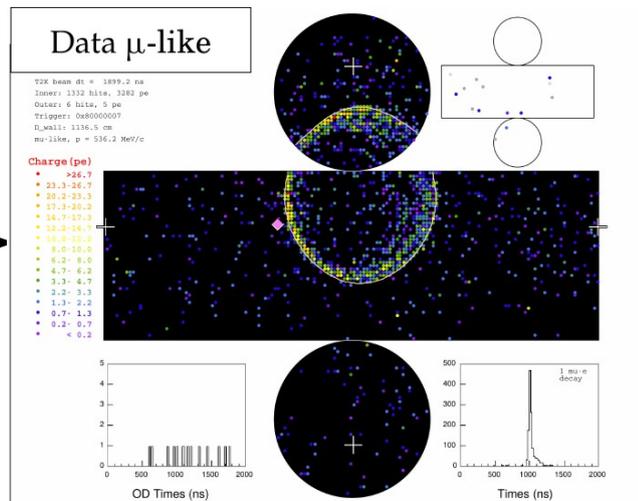
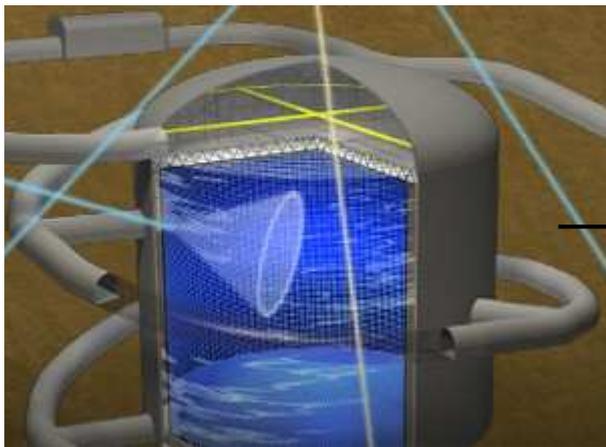
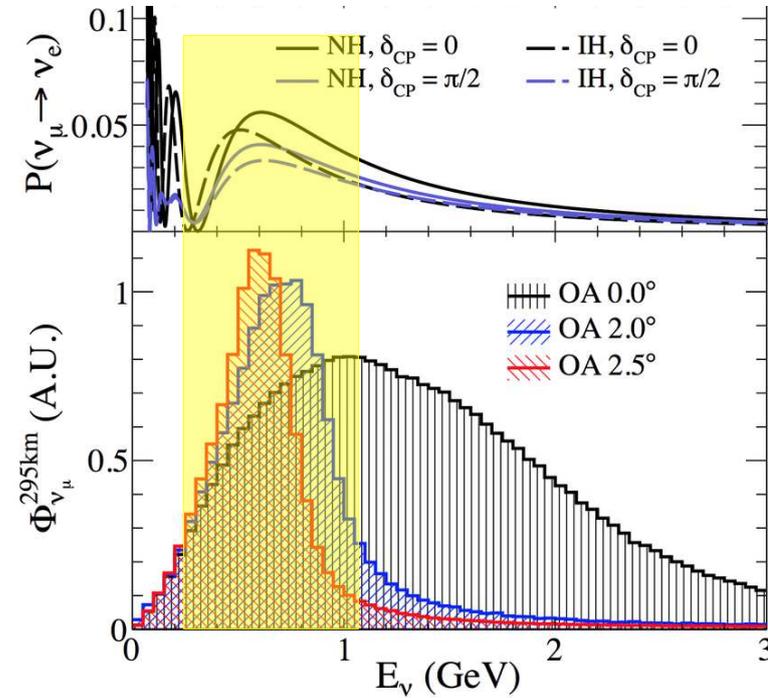
- T2K/T2HK hors-axe: faisceau avec angle de 2.5° avec HK \rightarrow Quasi-monochromatique

1. Maximiser l'oscillation (L/E).

2. Réduire le bruit de fond non-oscillant (ν_μ)

- HK : effet Tcherenkov dans 190 kton d'eau

1. Excellente séparation $\nu_\mu/\nu_e > 99\%$.



- T2K/T2HK hors-axe: faisceau avec angle de 2.5° avec HK \rightarrow Quasi-monochromatique

1. Maximiser l'oscillation (L/E).

2. Réduire le bruit de fond non-oscillant (ν_μ)

- HK : effet Tcherenkov dans 190 kton d'eau

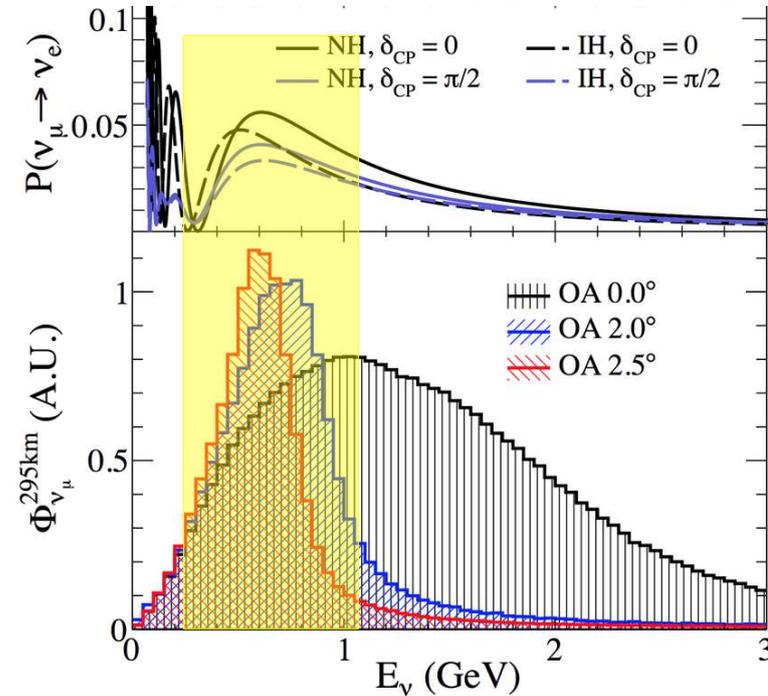
1. Excellente séparation $\nu_\mu/\nu_e > 99\%$.

\rightarrow Sélection ν_e : eff. 65 %, pur 80 %

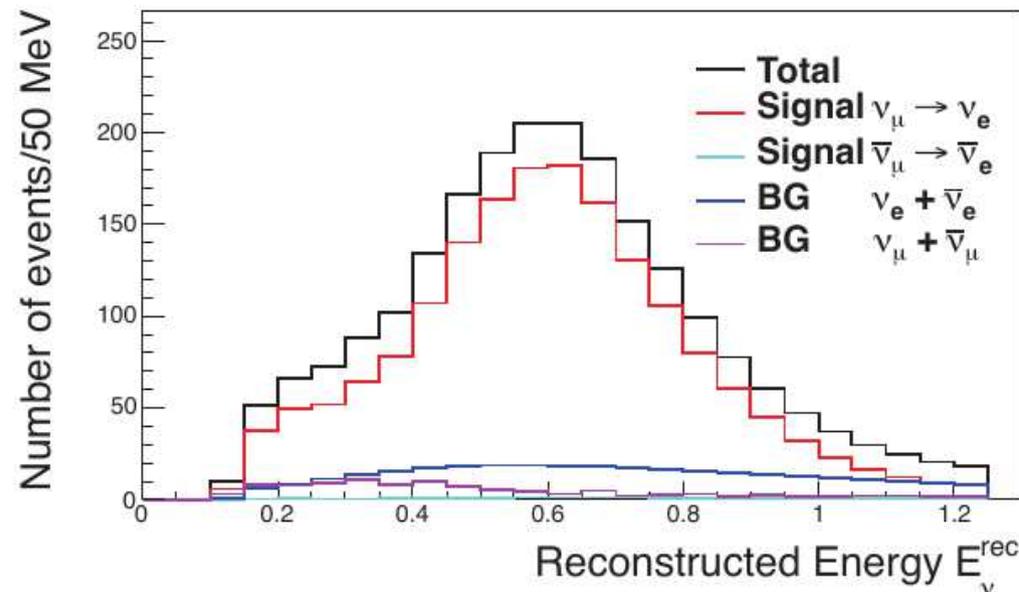
\rightarrow Background : ν_μ .

2. Seuil en Energie ~ 3.5 MeV.

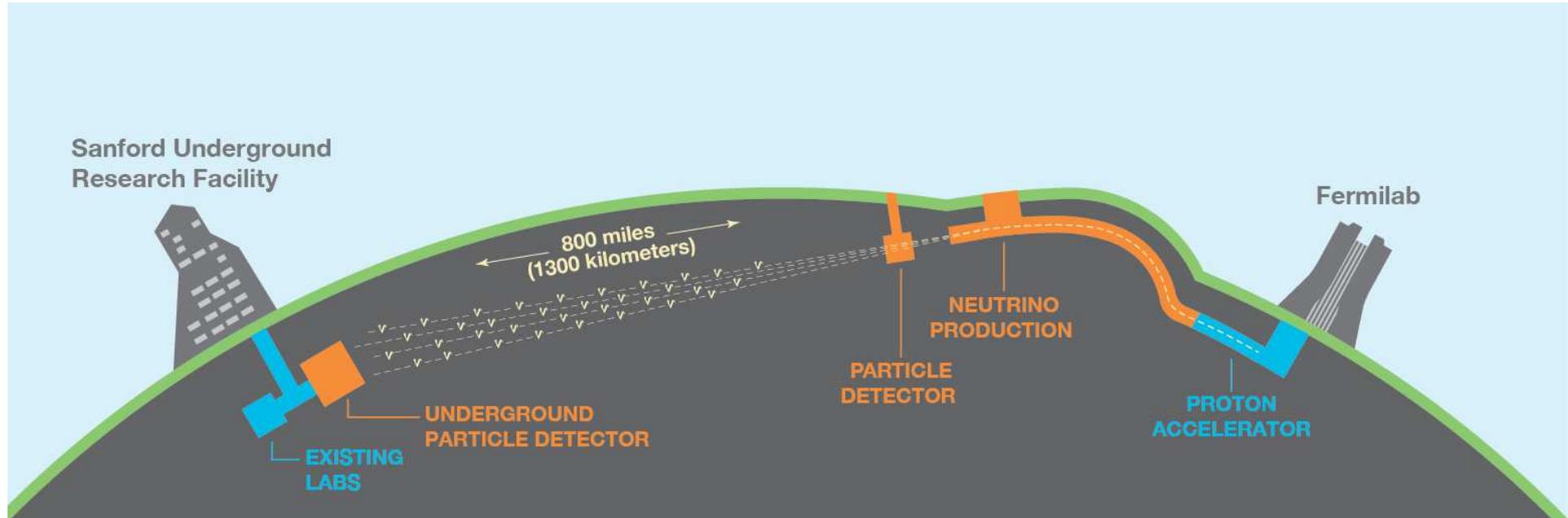
\rightarrow Crucial pour les ν de basse E.



Appearance ν mode



- DUNE est similaire à T2K / HK, qui sera située aux Etats-Unis.
→ Expérience faisceau à base longue, Baseline : $L = 1300$ km

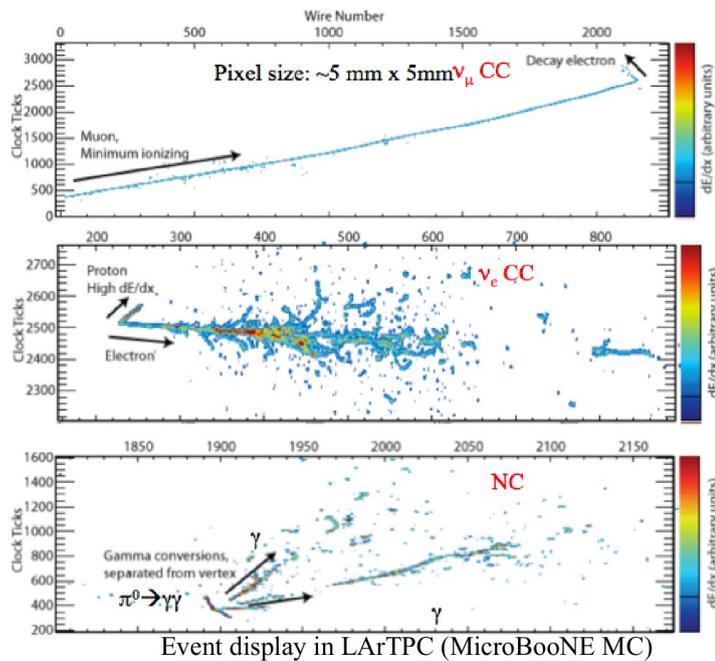
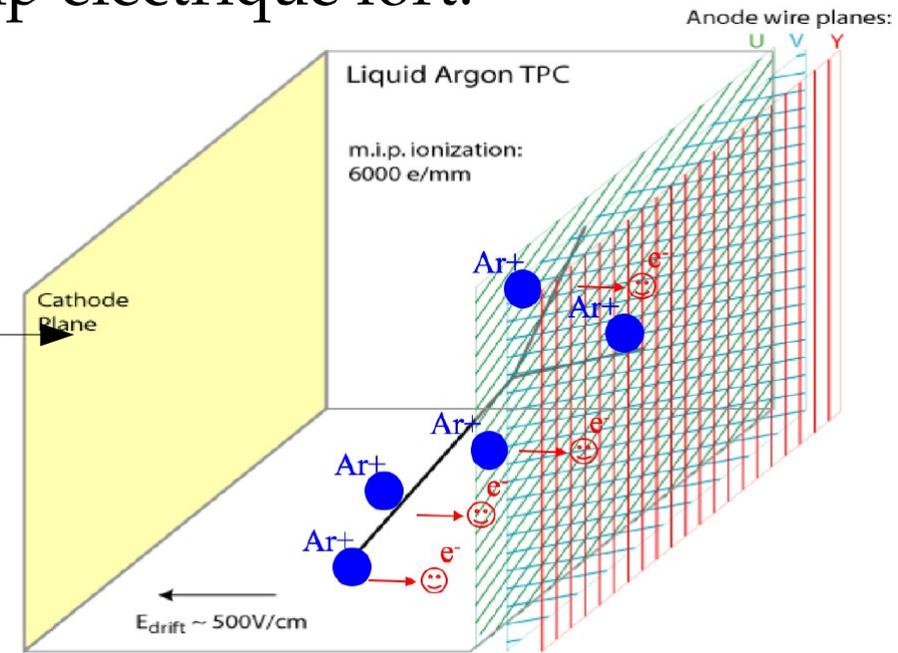
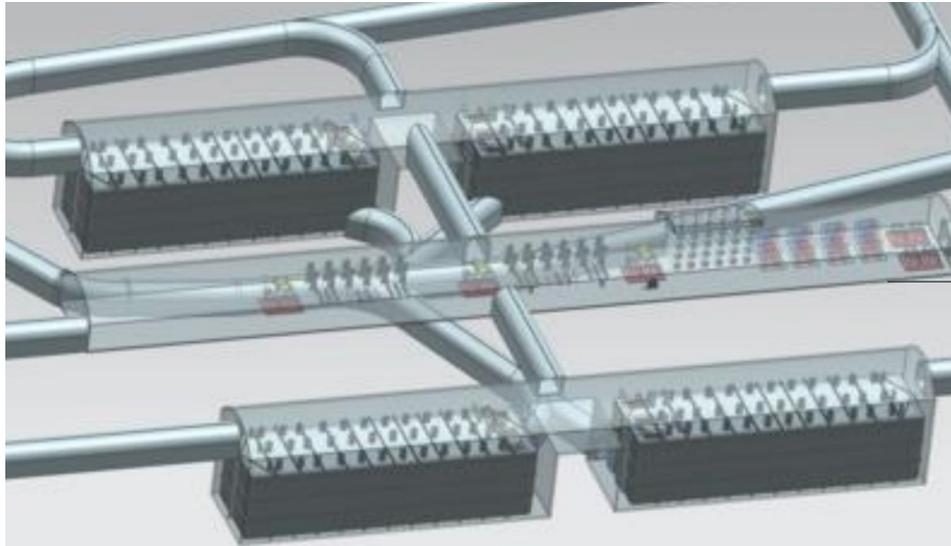


- Différences principales entre DUNE et HK

	HK	DUNE
Baseline	295 km	1300 km
Energie	Piqué à 600 MeV	Large Spectre 0.8 → 6 GeV
Masse fiducielle	190 kton	20 - 40kton

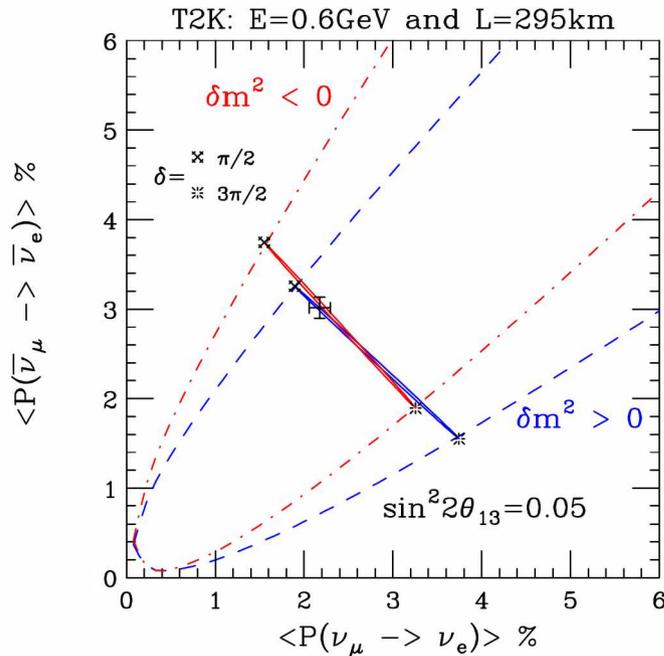
- 2 à 4 modules de 10 kton de volume fiduciel

→ TPC liquide : Argon liquide sous champ électrique fort.



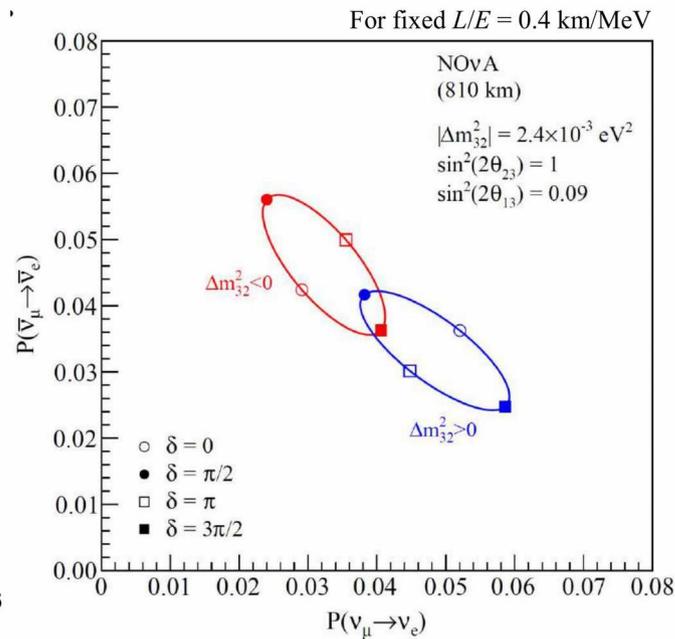
- ++ : Potentiel de reconstruction de trace inégale pour un détecteur lointain ν .
- -- : Seuil de reconstruction en énergie demeure incertain → 5, 10, 20, 30 MeV ?
→ Peut être un obstacle à la physique des solaires et Supernovae.

- + longue baseline : + d'effets de matières.
- de statistique (+ grande dispersion angulaire)



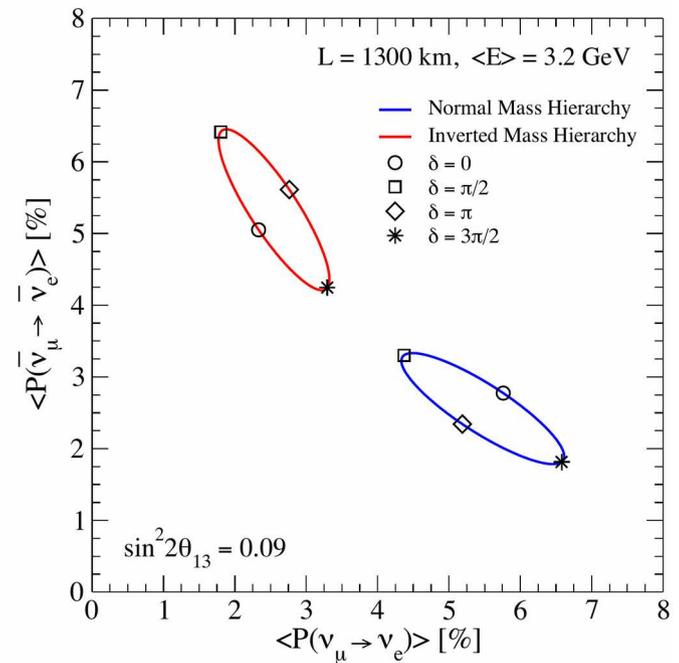
T2K / HK :

L = 295km, E = 600 MeV



Nova :

L = 810km, E = 2 GeV

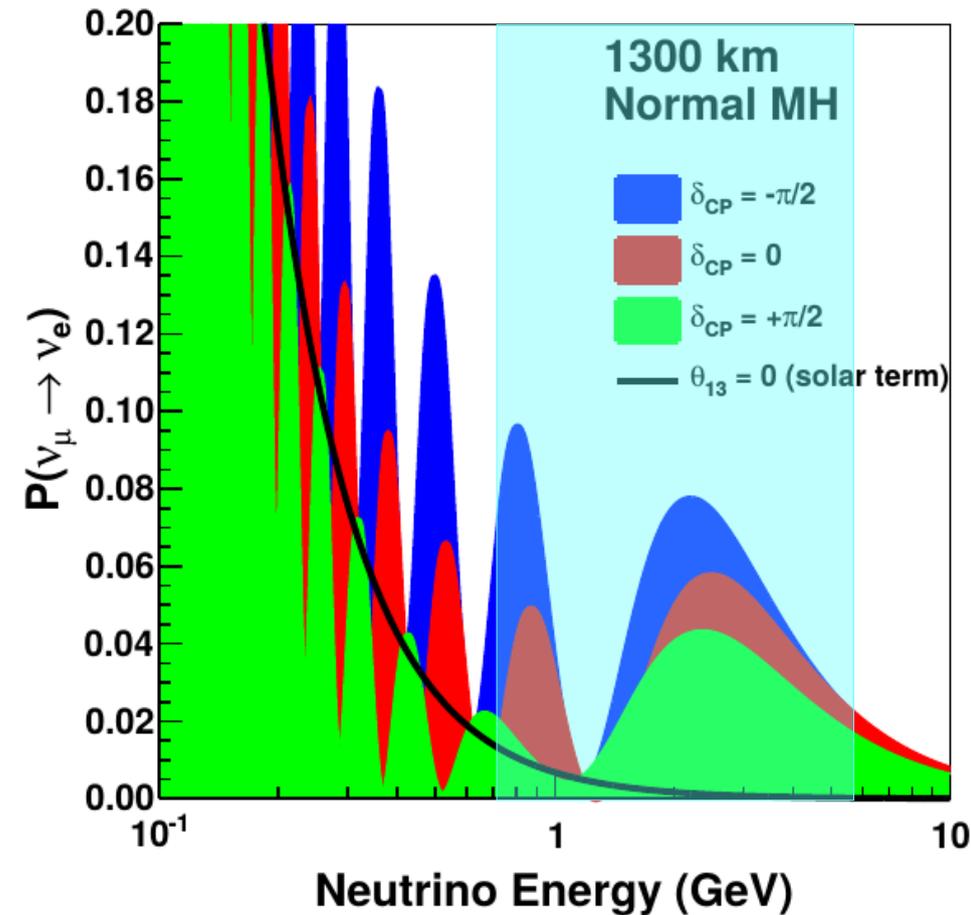
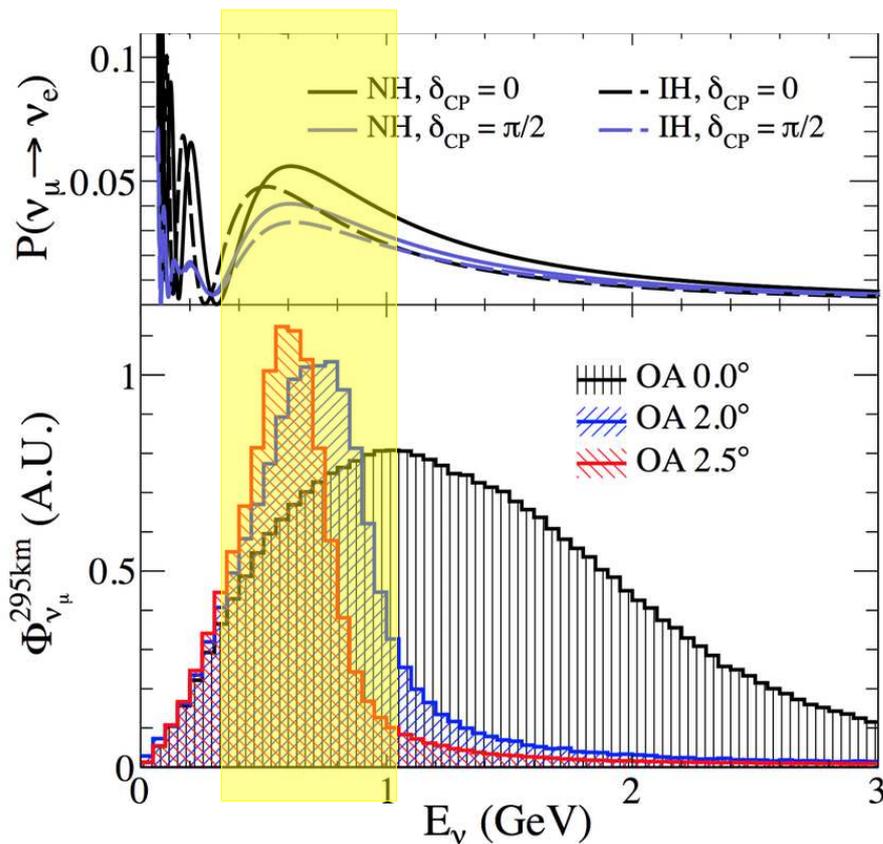


DUNE :

L = 1300km, E = 3 GeV

- Stratégie HK : limiter l'impact des effets de matière pour mesurer dCP.
- Stratégie DUNE : exacerber les effets de matière pour les mesurer, puis mesurer dCP.

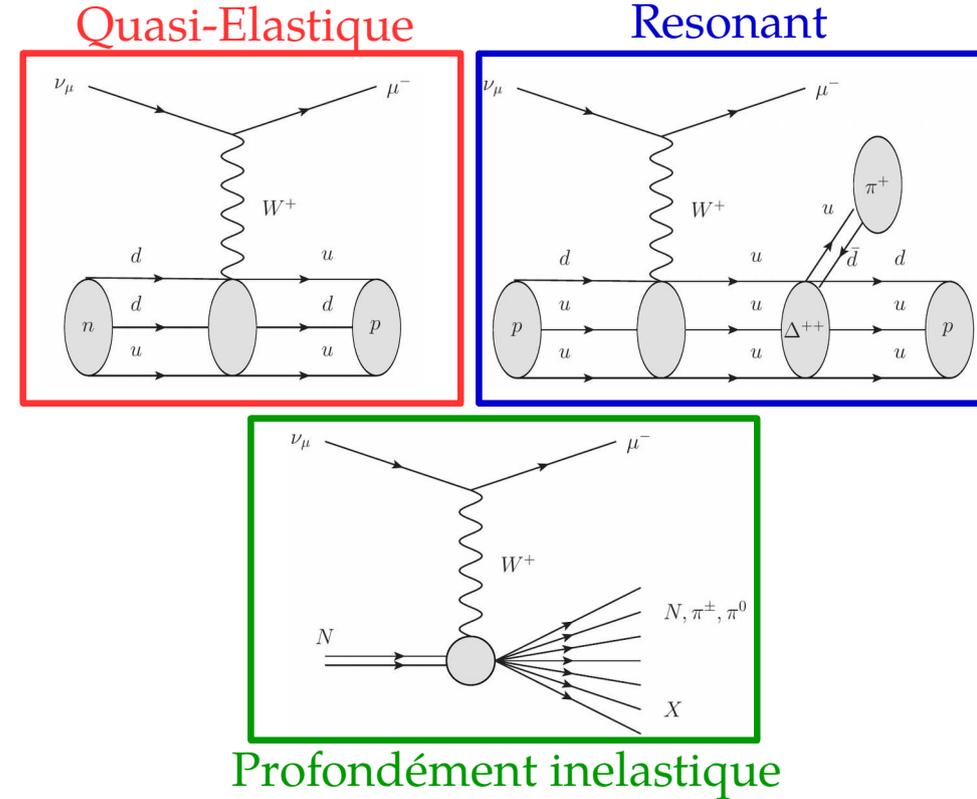
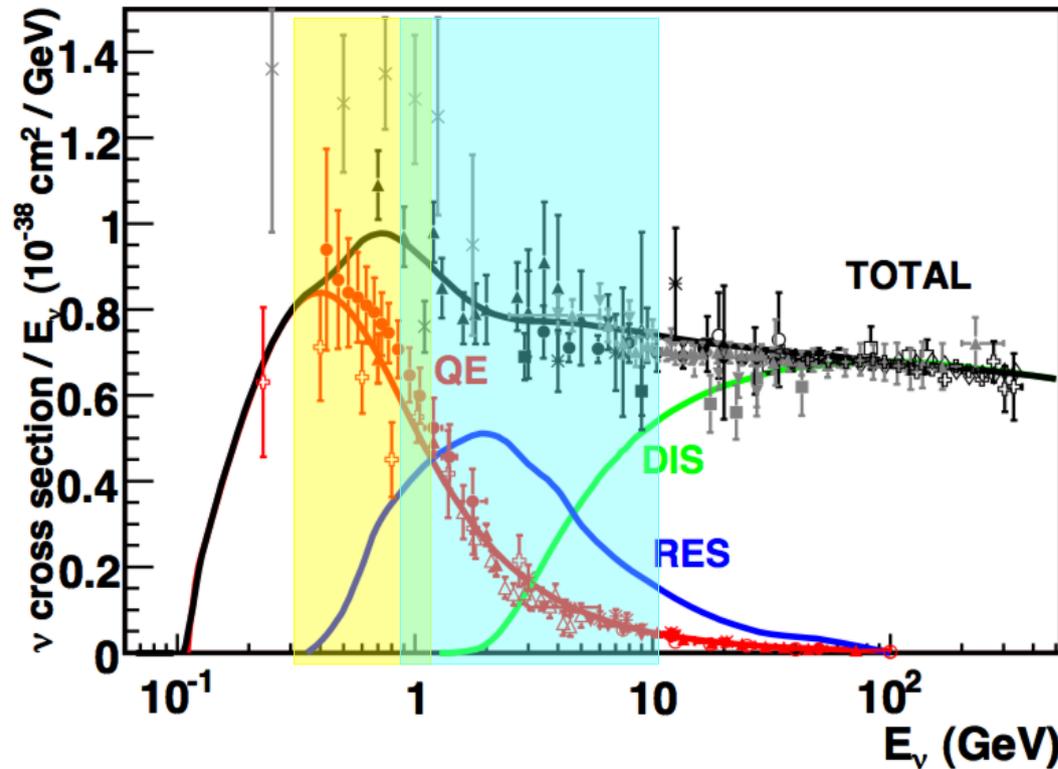
- Longue baseline : grande énergie (oscillations en L/E).
 → Mais DUNE utilise de plus un spectre large.



- Avantages du faisceau large : voir deux maximums d'oscillation
 → Meilleure sensibilité à δ_{CP} au 2^e maximum qu'au premier.
 → Meilleure séparation MH et δ_{CP} en combinant les deux maximums.

Le revers de la médaille : les erreurs syst.²⁷

- Inconvénients faisceau large : pourquoi T2K a choisi un faisceau piqué
 1. Beaucoup + de ν_μ non-oscillés \rightarrow Bruit de fond pour les ν_e .
 2. Beaucoup + de types d'interactions neutrinos...



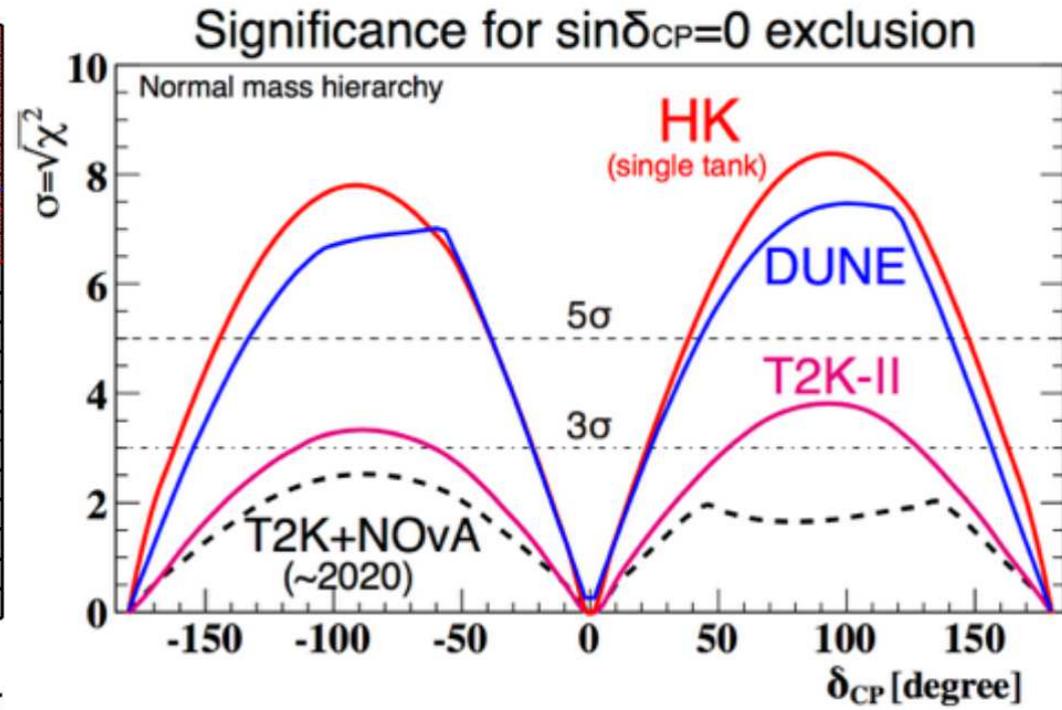
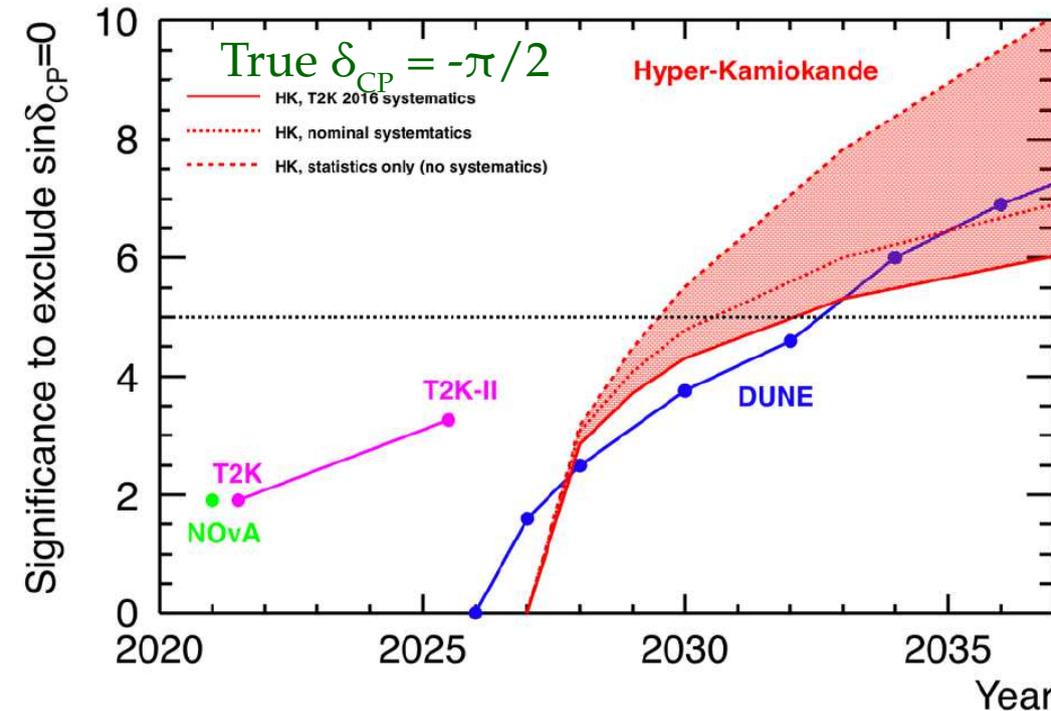
... Et donc de possibilités de mal-reconstruire l'interaction \rightarrow Biais E_ν .

- Pour T2K : seulement QE \rightarrow 12 ans pour \downarrow systématiques à 5 %
 \rightarrow DUNE est un pari, qui se reposera sur les capacités de leur détecteur !



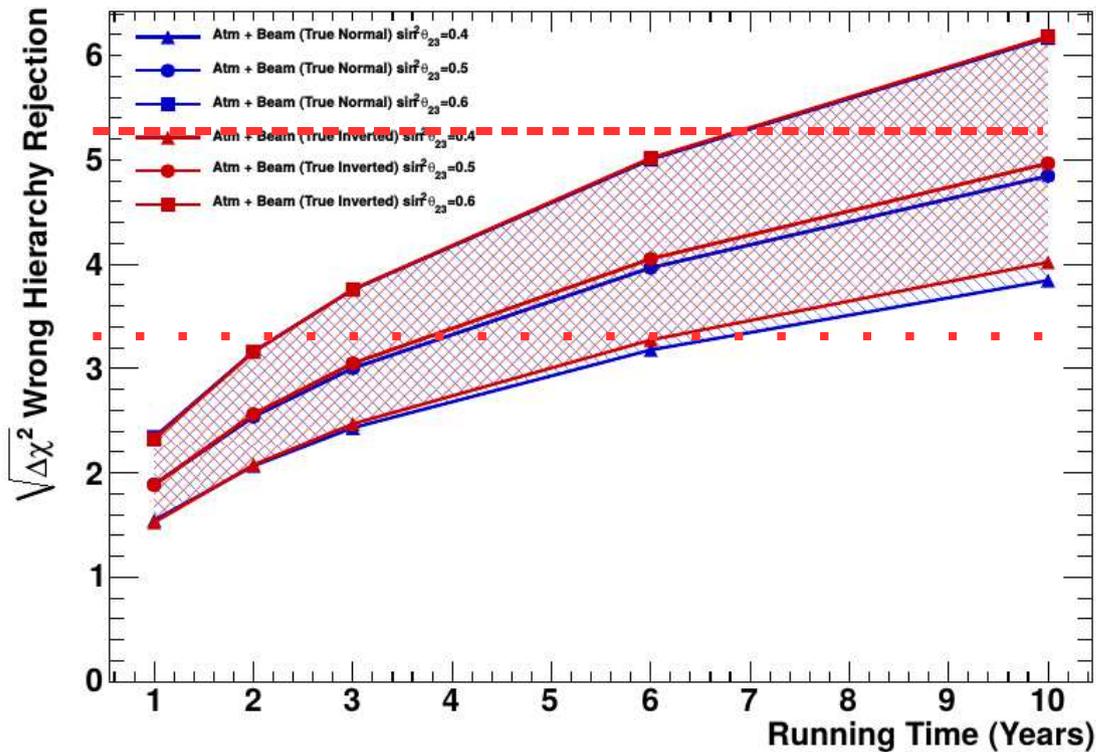
IV. Sensibilités de HK et DUNE

- En supposant un run $\nu:\bar{\nu} = 1:3$ @1.3MW (peut être ajusté si besoin).

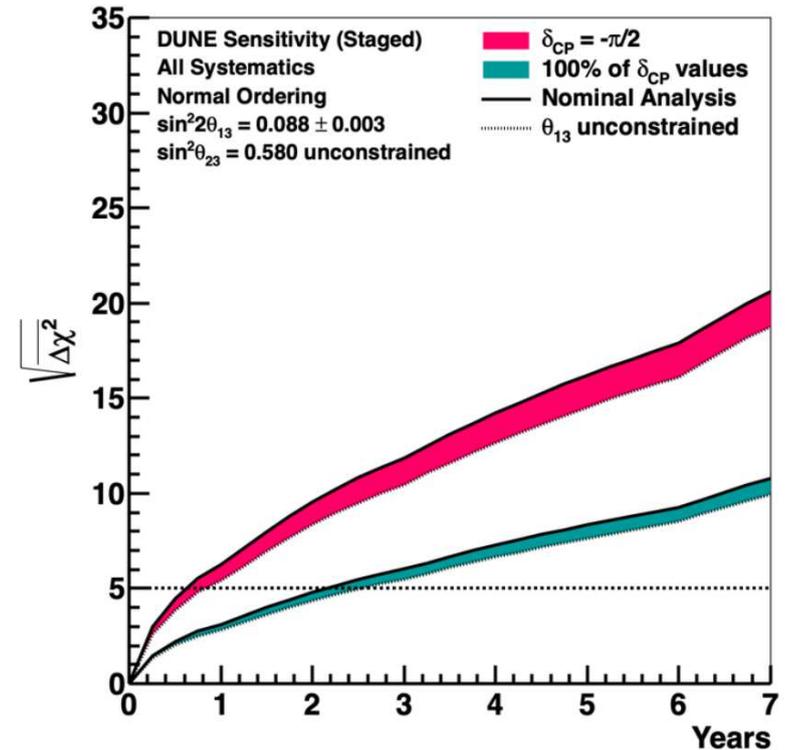


- Si violation CP est maximale: 5σ après 3 années de prise de données !
- HK aura une sensibilité à 5σ sur 55% de l'espace des phases de δ_{CP} .
- Sensibilité supérieure aux autres expériences, en particulier DUNE...
... si la hiérarchie de masse est connue en 2030 !

Hyper-Kamiokande



DUNE



- Meme si la hiérarchie de masse n'est pas connue au démarrage d'HK
→ HK pourra la déterminer à 5σ après $\geq 6-10$ ans via atmosphériques.
- DUNE à une sensibilité inégalée à la MH (designée pour) :
→ $\sim 1-2$ ans pour la déterminer.
→ Si la MH n'est pas connue en 2026 → DUNE la déterminera



V. Quel impacts sur l'asymétrie
matière/antimatière ? Et après 2030 ?

2. Que fait on après la découverte de la CPV > 2030 ?

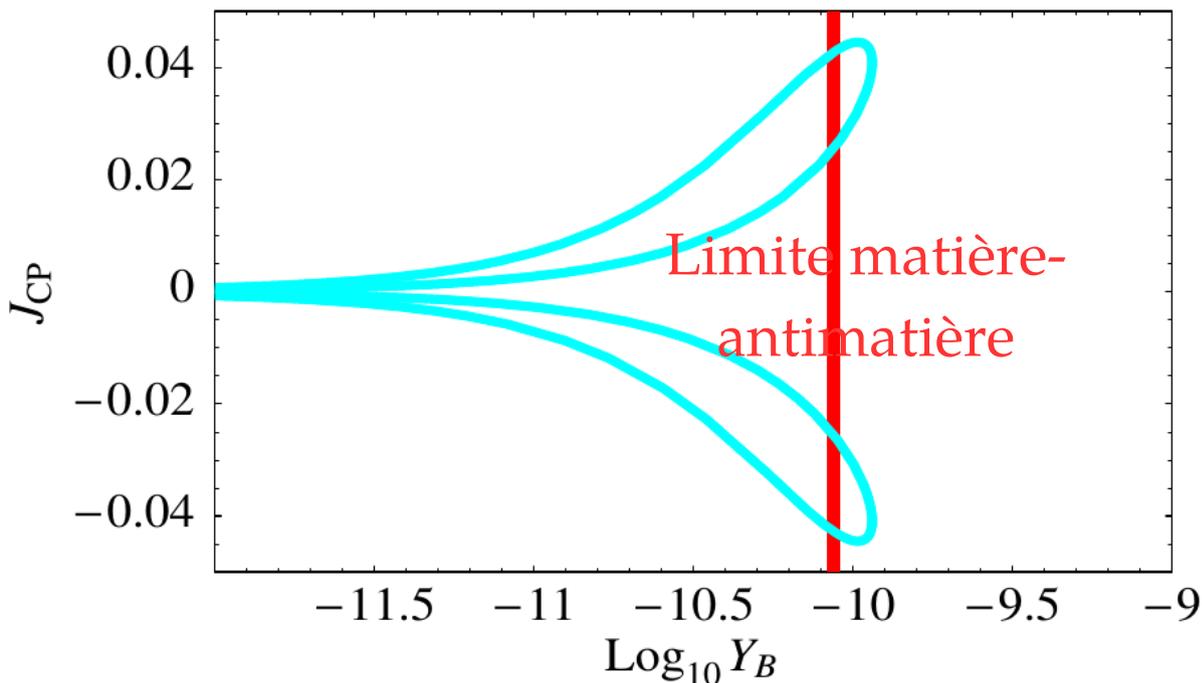
a. On mesure avec précision la CPV i.e. $\sin \delta_{\text{CP}}$.

Violation CP des
neutrinos de basse E

Leptogénèse

Asymétrie matière et
l'antimatière

$$\Delta P = P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) - P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) \propto J_{\text{CP}} \quad |Y_B| \cong 2.8 \times 10^{-13} |\sin \delta| \left(\frac{s_{13}}{0.2}\right) \left(\frac{M_1}{10^9 \text{ GeV}}\right)$$



Précision sur $\sin \delta_{\text{CP}}$

↔ Précision de la sonde des
modèles de leptogénèse

Limite basse leptogénèse :

$$|\sin \theta_{13} \sin \delta \delta_{\text{CP}}| \geq 0.11$$

$$\rightarrow |\sin \delta| \geq 0.78$$

2. Que fait on après la découverte de la CPV > 2030 ?

a. On mesure avec précision la CPV i.e. $\sin \delta_{CP}$.

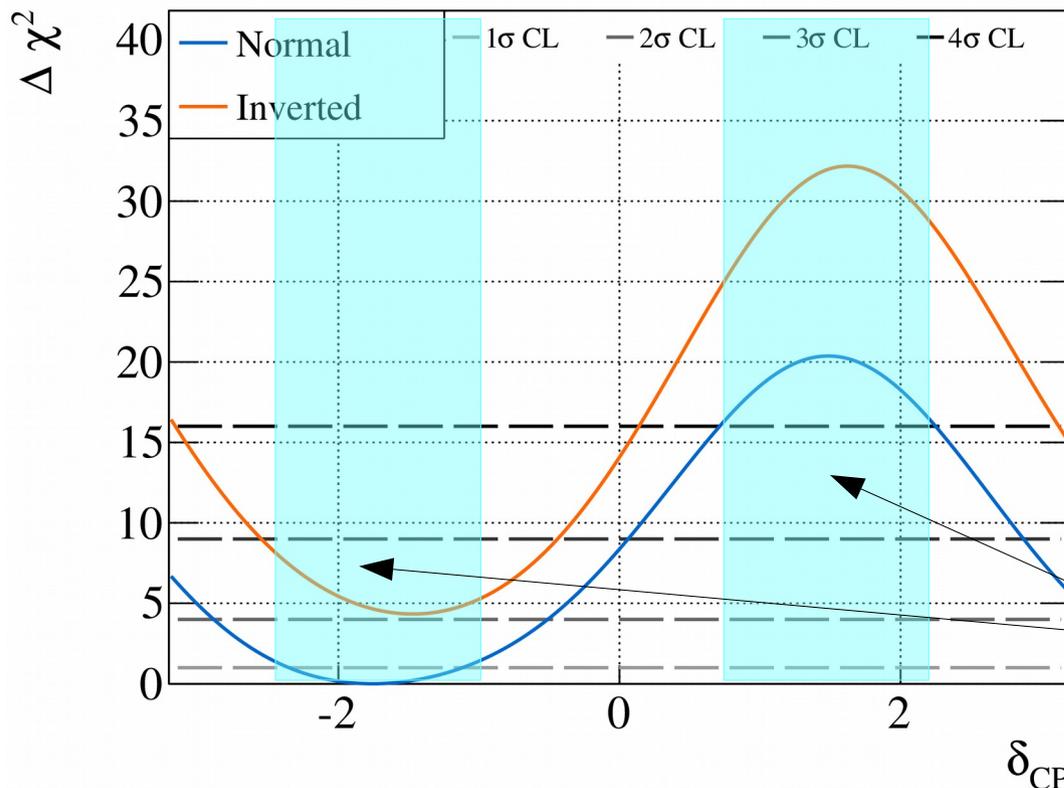
Violation CP des
neutrinos de basse E

Leptogénèse

Asymétrie matière et
l'antimatière

$$\Delta P = P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) - P(\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e) \propto J_{CP}$$

$$|Y_B| \cong 2.8 \times 10^{-13} |\sin \delta| \left(\frac{s_{13}}{0.2}\right) \left(\frac{M_1}{10^9 \text{ GeV}}\right)$$



Précision sur $\sin \delta_{CP}$

↔ Précision du sondage des
modèles de leptogénèse

Limite basse leptogénèse :

$$|\sin \theta_{13} \sin \delta \delta_{CP}| \geq 0.11$$

$$\rightarrow |\sin \delta| \geq 0.78$$

Symétrie de saveurs

2. Que fait on après la découverte de la CPV > 2030 ?

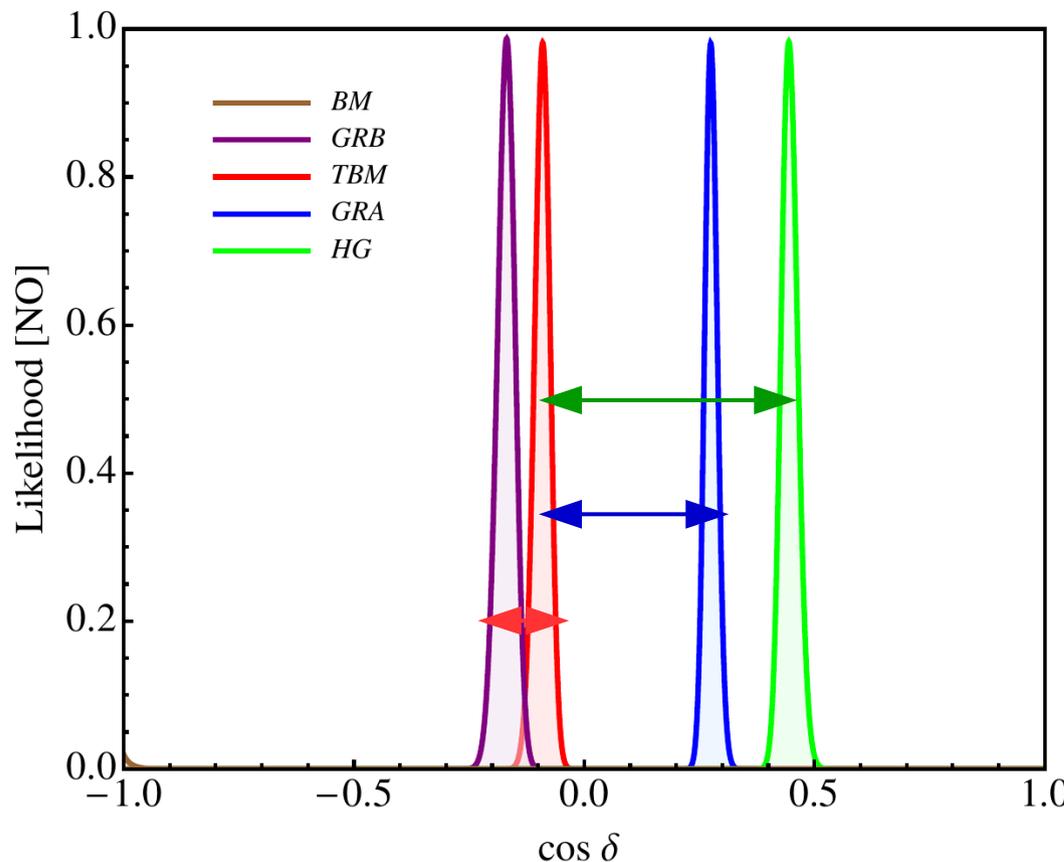
a. On mesure avec précision la CPV i.e. $\sin \delta_{CP}$.

b. On mesure avec précision δ_{CP} .

$$\cos \delta = \frac{\cos 2\theta_{23} \cos 2\theta_{13}}{\sin 2\theta_{23} \sin \theta_{13} (2 - 3 \sin^2 \theta_{13})^{\frac{1}{2}}}$$

Modèle de symétries de génération des leptons

Relient les paramètres de PMNS



δ_{CP} le moins bien connu
→ limite pour contraindre modèles

- Séparation des modèles requiert :
- Début de séparation : $\delta [\delta_{CP}] < 30^\circ$
 - Bonne Séparation : $\delta [\delta_{CP}] < 23^\circ$
 - Excellente séparation : $\delta [\delta_{CP}] < 5^\circ$

→ Précision HK et DUNE ?



Disgression : mais comment mesure t'on δ_{CP}
en réalité ?

Mesure précise de δ_{CP}

- Après la détermination de la CPV is determined, mesures δ_{CP} cruciales
- CPV maximale ? Leptogénèse ? Symétrie des générations de leptons ...

δ_{CP}

$\sin \delta_{CP}$

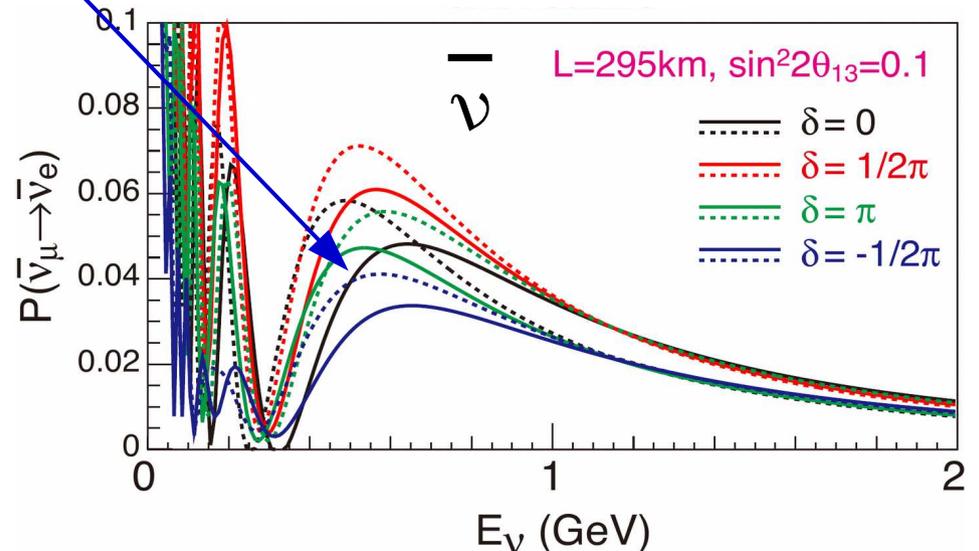
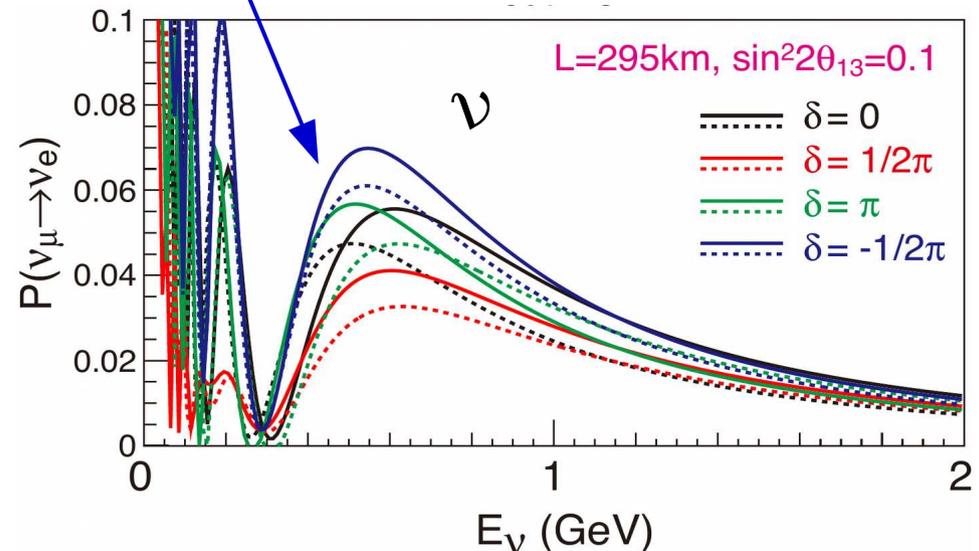
δ_{CP}

Comment la mesurer précisément ?

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = 4c_{13}^2 s_{13}^2 s_{23}^2 \sin^2 \Delta_{31} + 8c_{13}^2 s_{12} s_{13} s_{23} (c_{12} c_{23} \cos \delta - s_{12} s_{13} s_{23}) \cos \Delta_{32} \sin \Delta_{31} \sin \Delta_{21} - 8c_{13}^2 c_{12} c_{23} s_{12} s_{13} s_{23} \sin \delta \sin \Delta_{32} \sin \Delta_{31} \sin \Delta_{21} + \dots$$

$\sin \delta$:

- CP impair : effet opposé $\nu / \bar{\nu}$.
 - Dérivée quasi nulle pour $\delta_{CP} \sim -\pi/2$
- Faible sensibilité à δ_{CP} .



Mesure précise de δ_{CP}

- Après la détermination de la CPV is determined, mesures δ_{CP} cruciales
 → CPV maximale ? Leptogénèse ? Symétrie des générations de leptons ...
 δ_{CP} $\sin \delta_{CP}$ δ_{CP}

Comment la mesurer précisément ?

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = 4c_{13}^2 s_{13}^2 s_{23}^2 \sin^2 \Delta_{31}$$

$$+8c_{13}^2 s_{12} s_{13} s_{23} (c_{12} c_{23} \cos \delta - s_{12} s_{13} s_{23}) \cos \Delta_{32} \sin \Delta_{31} \sin \Delta_{21}$$

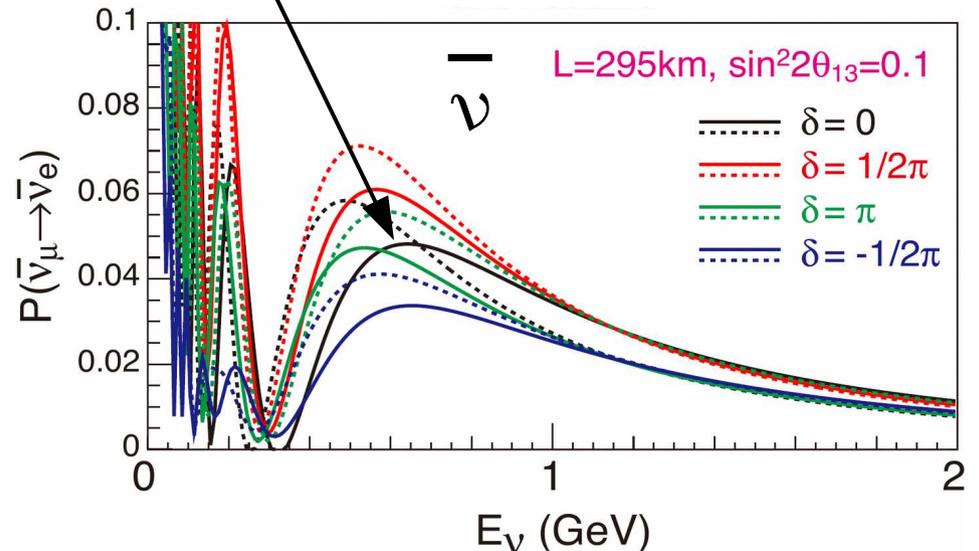
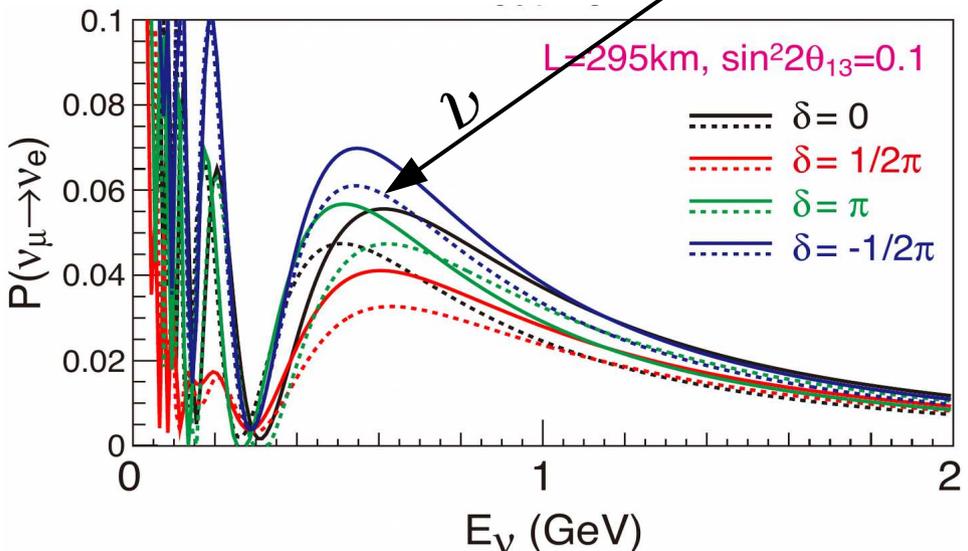
$$-8c_{13}^2 c_{12} c_{23} s_{12} s_{13} s_{23} \sin \delta \sin \Delta_{32} \sin \Delta_{31} \sin \Delta_{21} + \dots$$

sin δ :

- CP impair : effet opposé $\nu / \bar{\nu}$.
- Dérivée quasi nulle pour $\delta_{CP} \sim -\pi/2$
 → Faible sensibilité à δ_{CP} .

cos δ :

- CP pair : Meme effet $\nu / \bar{\nu}$.
- Dérivée forte pour $\delta_{CP} \sim -\pi/2$
 → Grande sensibilité à δ_{CP} .
 → Terme parfait pour mesurer δ_{CP} .



- Après la détermination de la CPV is determined, mesures δ_{CP} cruciales
 → **CPV maximale ?** **Leptogénèse ?** **Symétrie des générations de leptons ...**
 δ_{CP} $\sin \delta_{CP}$ δ_{CP}

Comment la mesurer précisément ?

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) = 4c_{13}^2 s_{13}^2 s_{23}^2 \sin^2 \Delta_{31}$$

$$+8c_{13}^2 s_{12} s_{13} s_{23} (c_{12} c_{23} \cos \delta - s_{12} s_{13} s_{23}) \cos \Delta_{32} \sin \Delta_{31} \sin \Delta_{21}$$

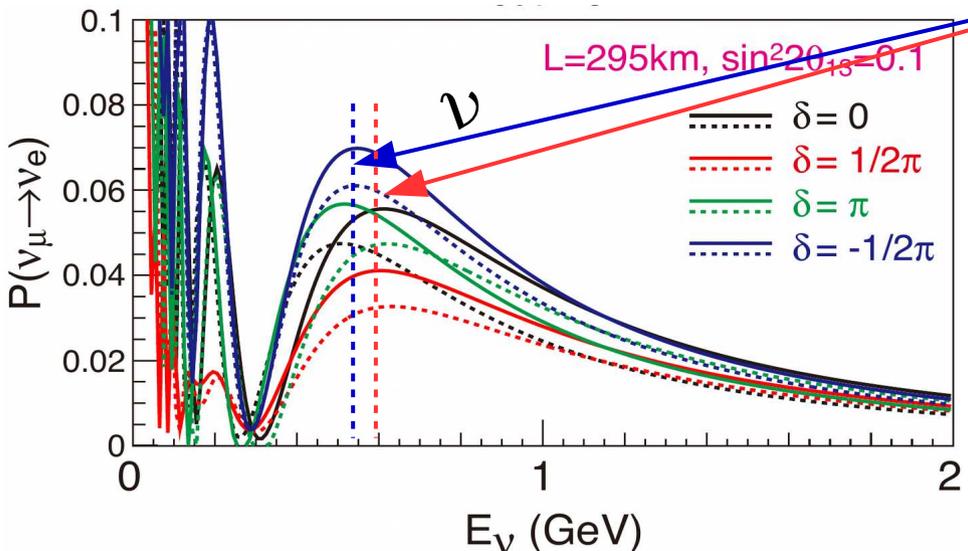
$$-8c_{13}^2 c_{12} c_{23} s_{12} s_{13} s_{23} \sin \delta \sin \Delta_{32} \sin \Delta_{31} \sin \Delta_{21} + \dots$$

sin δ :

- CP impair : effet opposé $\nu / \bar{\nu}$.
- Dérivée quasi nulle pour $\delta_{CP} \sim -\pi/2$
 → Faible sensibilité à δ_{CP} .

cos δ :

- CP pair : Meme effet $\nu / \bar{\nu}$.
- Dérivée forte pour $\delta_{CP} \sim -\pi/2$
 → Grande sensibilité à δ_{CP} .
 → Terme parfait pour mesurer δ_{CP} .
- Correspond à un shift du maximum d'apparition (voir $\neq -\pi/2$ vs $+\pi/2$).

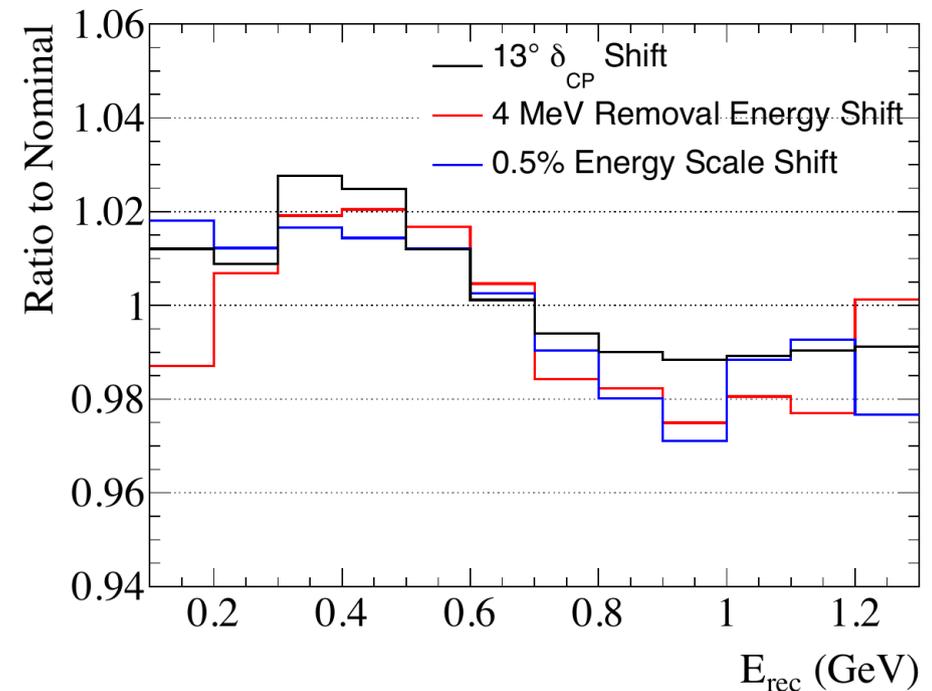


Conclusion :

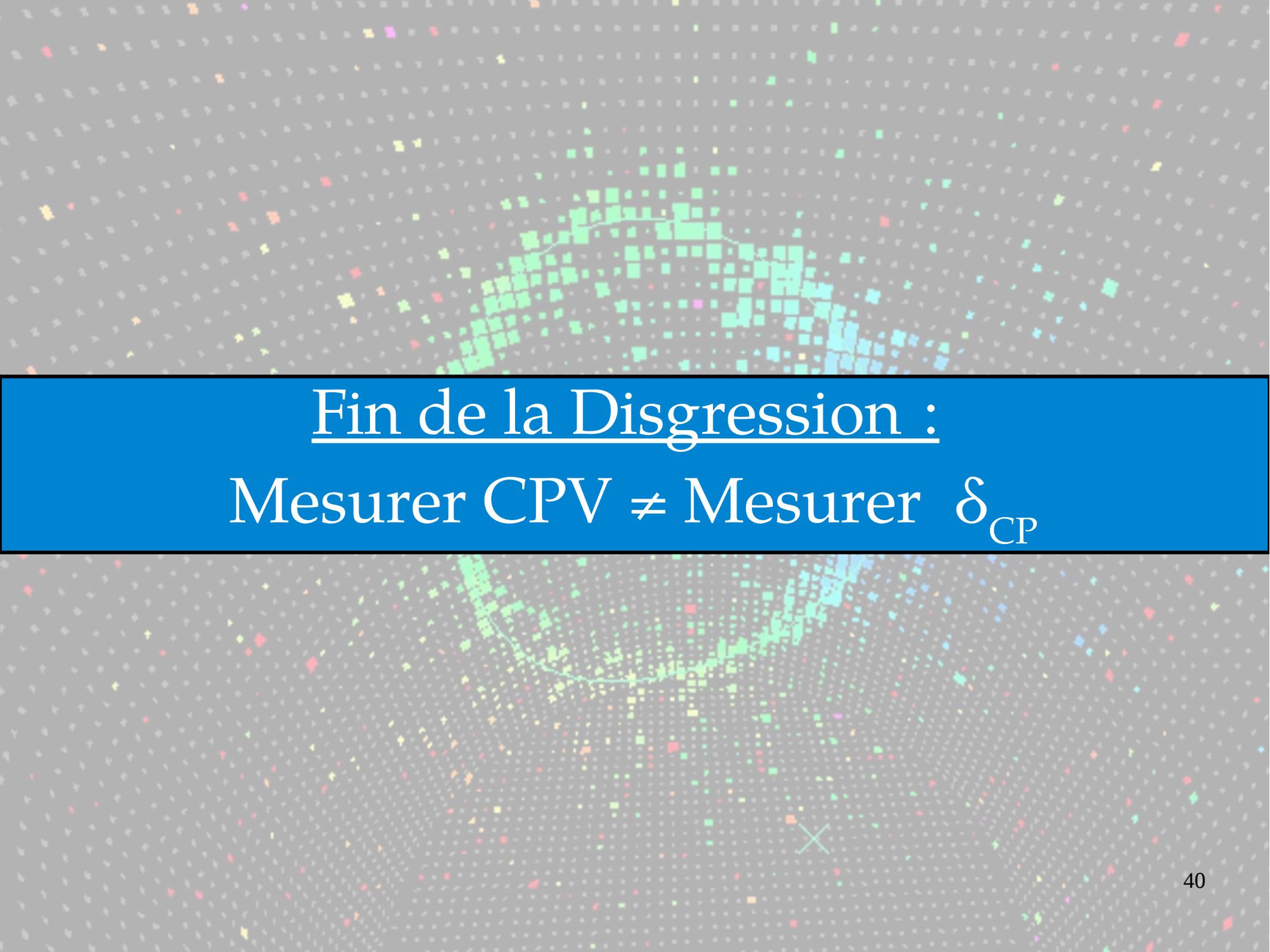
- Si $\delta_{CP} = -\pi/2$, mesurer la CPV i.e $\sin \delta_{CP} \neq$ mesurer précisément δ_{CP} .

- La Sensibilité sera limité essentiellement par la systématique :
 - Pas de CPV ($\delta_{CP} \sim 0$): Mesurer CPV = Mesurer δ_{CP} (meme syst.) $\rightarrow \sin\delta$.
 - CPV max ($\delta_{CP} \sim -\pi/2$): Mesurer CPV \neq Mesurer δ_{CP}
 - \rightarrow Syst. dominantes sont celle s'apparantant à un effet de $\cos\delta_{CP}$.
 - \rightarrow Shift du maximum en L/E \leftrightarrow Shift en énergie du neutrino (L fixé).
- Shift de 13° de $\delta_{CP} \leftrightarrow$ (examples):

- Shift de 0.5 % de E-calibration.
- Shift de 4 MeV dans la mesure de l'énergie de libération du noyau.
- Changement de 5 % dans la fraction des types d'interactions : QE, Resonant, DIS.



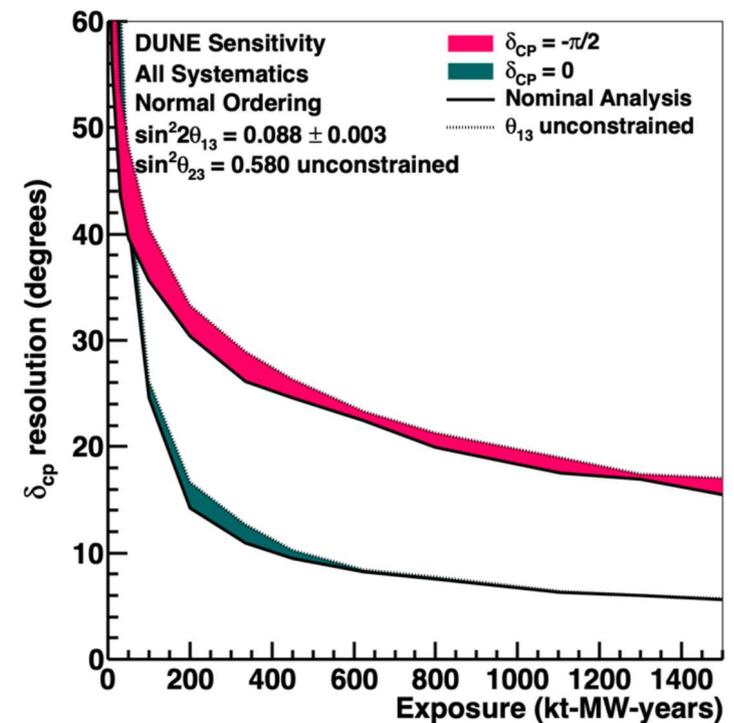
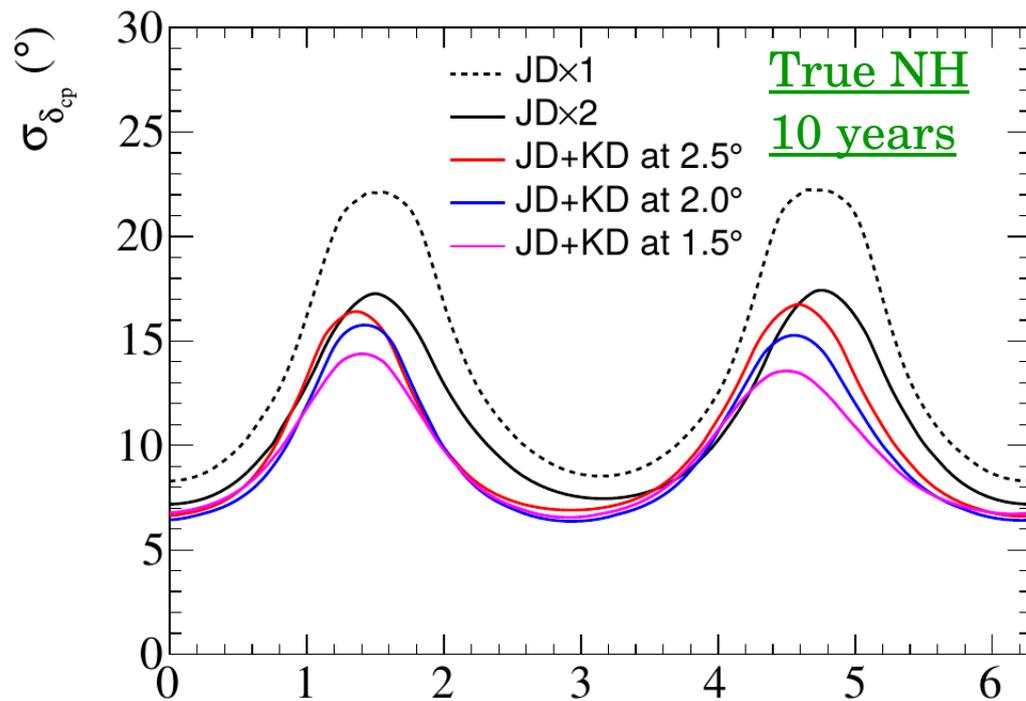
Contraints par les détecteurs proches



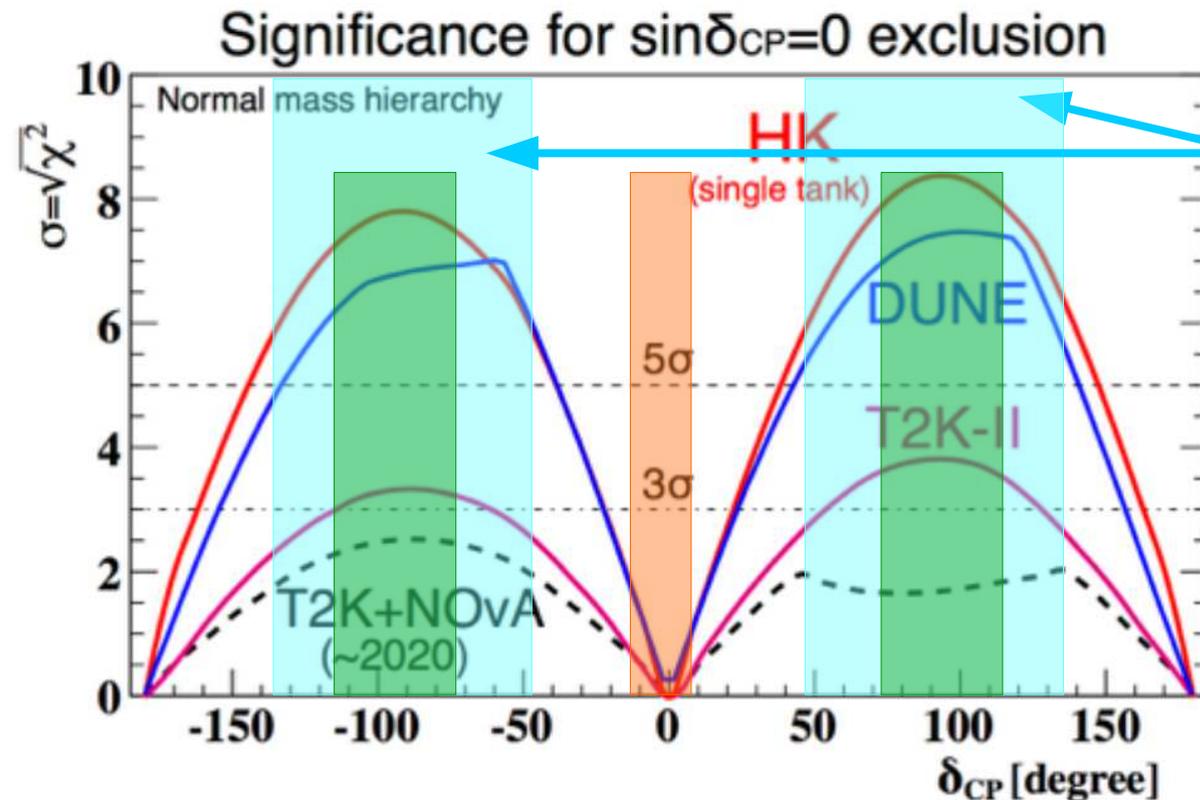
Fin de la Disgression :
Mesurer CPV \neq Mesurer δ_{CP}

Mesures précises de δ_{CP} par HK et DUNE⁴¹

- HK : Minimiser largeur du faisceau pour \downarrow bkg.
Se limiter aux interactions Quasi-Elastiques pour \downarrow systématiques.
- DUNE : Fort bkg mais détecteur performant \rightarrow \downarrow systématiques.
Deuxième maximum d'oscillation \rightarrow \uparrow effet de $\cos\delta_{CP}$.



	HK [10 ans \rightarrow Final]	DUNE [10 ans \rightarrow Final]
CPV et $\delta_{CP} = 0$	$8^\circ \rightarrow 6^\circ$	$10^\circ \rightarrow 8^\circ$
$\delta_{CP} = -\pi/2$	$22^\circ \rightarrow 20^\circ$	$26^\circ \rightarrow 19^\circ$



Limite basse leptogénèse :

$$|\sin \delta| \geq 0.78$$

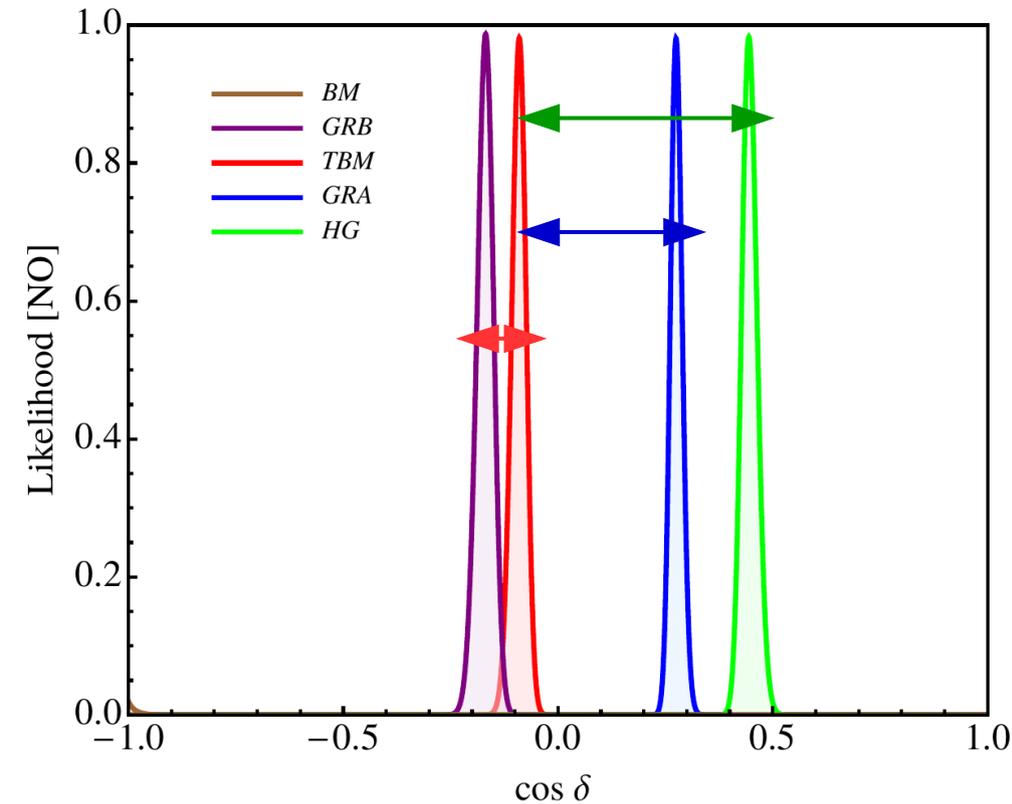
Précision HK/DUNE

$$\rightarrow \text{Si } \delta_{CP} = 0$$

$$\rightarrow \text{Si } \delta_{CP} = -\pi/2$$

- Si pas de CPV (Si $\delta_{CP} = 0$) : Définitive exclusion de toute explication de l'asymétrie mat./antimat. par la CPV de Dirac.
- Si CPV (i.e $\delta_{CP} = -\pi/2$) : Fortes contraintes sur modèles de leptogénèse.

	HK [10 ans → Final]	DUNE [10 ans → Final]
CPV et $\delta_{CP} = 0$	$8^\circ \rightarrow 6^\circ$	$10^\circ \rightarrow 8^\circ$
$\delta_{CP} = -\pi/2$	$22^\circ \rightarrow 20^\circ$	$26^\circ \rightarrow 19^\circ$



Séparation des modèles requiert :

Début de séparation : $\delta [\delta_{CP}] < 30^\circ$

Bonne Séparation : $\delta [\delta_{CP}] < 23^\circ$

Excellente séparation : $\delta [\delta_{CP}] < 5^\circ$

- Précisions finales de HK et DUNE seront similaires → Bonnes

• Il n'y aura peut être pas de génération suivant HK et DUNE :

→ On aura alors deux mesures avec des systématiques complètement \neq

→ Idéal pour un ajustement commun !

	HK [10 ans → Final]	DUNE [10 ans → Final]
CPV et $\delta_{CP} = 0$	$8^\circ \rightarrow 6^\circ$	$10^\circ \rightarrow 8^\circ$
$\delta_{CP} = -\pi/2$	$22^\circ \rightarrow 20^\circ$	$26^\circ \rightarrow 19^\circ$



Conclusions

1er chapitre : CPV

- Découverte Violation CP dans le secteur des leptons.
- Haute sensibilité à la hiérarchie de masse des ν .

Second chapitre : GUT

- Vérification des Théories de Grande Unification via la désintégration du proton

Troisième chapitre : Astrophysique

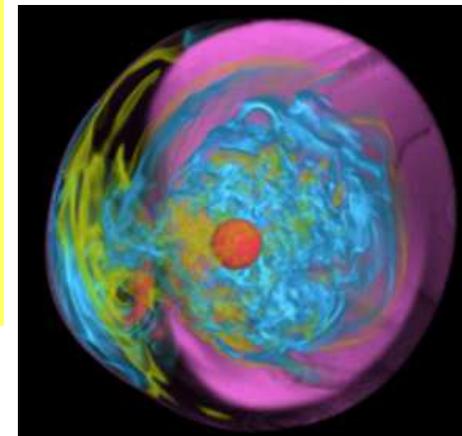
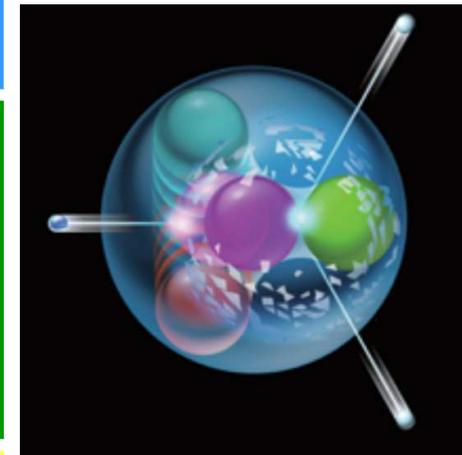
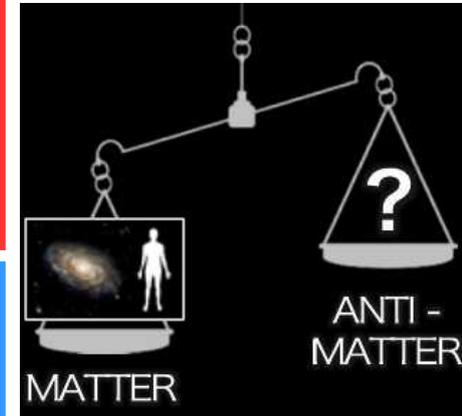
- Contrainte sur les modèles de Supernovae.
- Contraintes sur les formations des étoiles au cours de l'histoire de l'Univers.

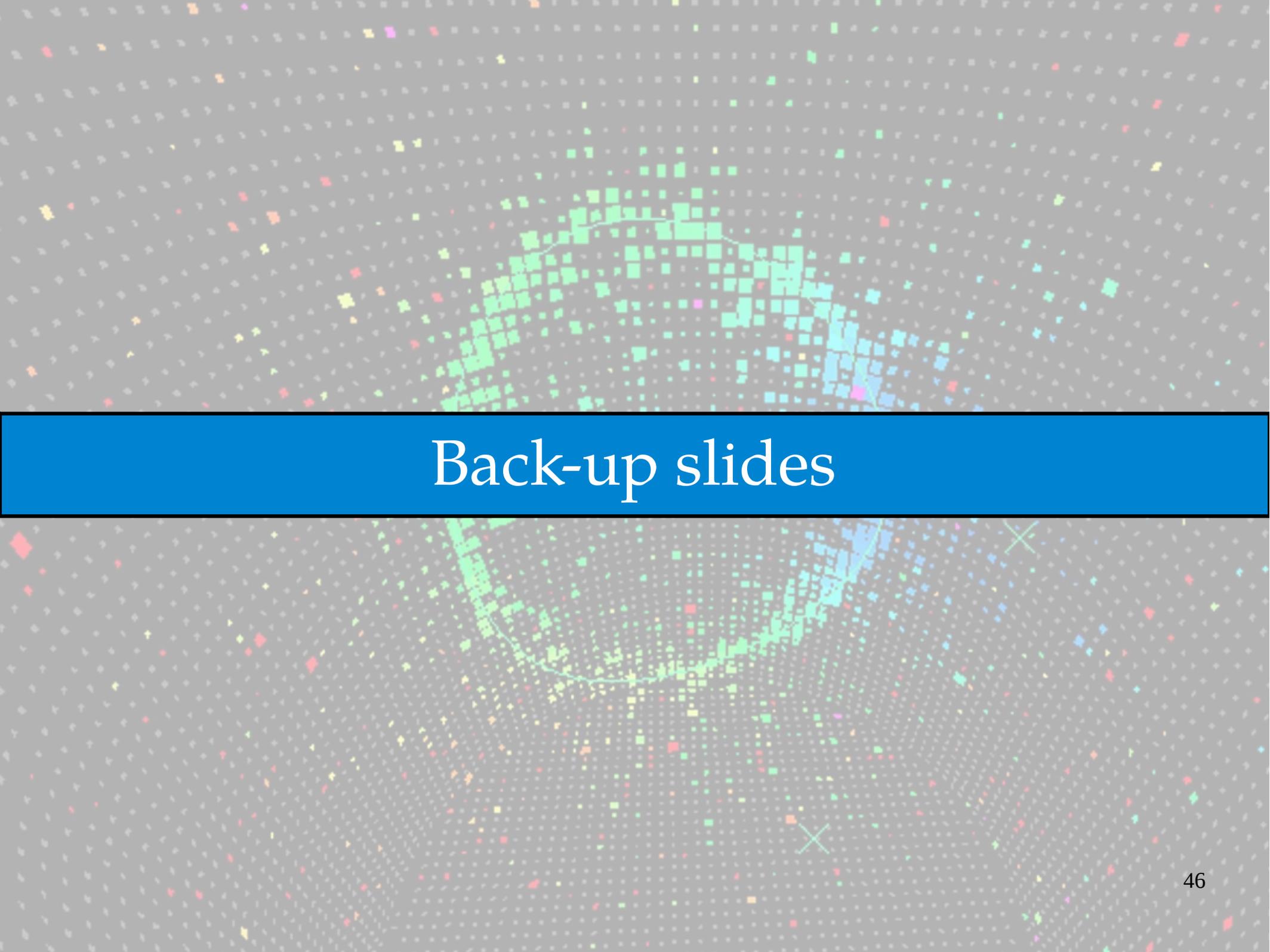
Quatrième chapitre : Solaire

- Effet MSW dans le Soleil.
- Neutrinos steriles.
- Interactions non-standard dans le Soleil.

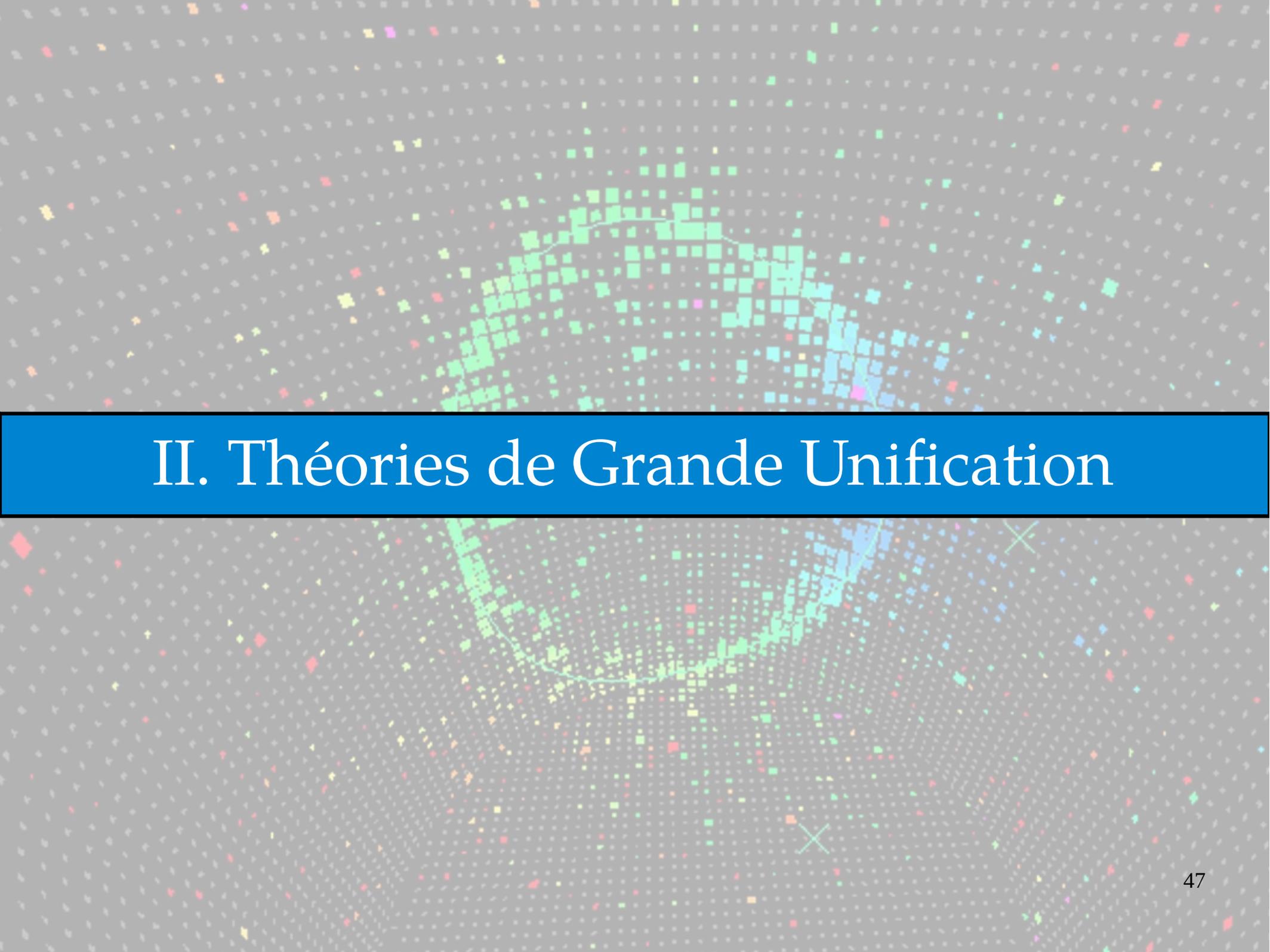
HK est le seul observatoire à couvrir tous ces aspects

→ Combine un gigantesque volume à un seuil bas en énergie



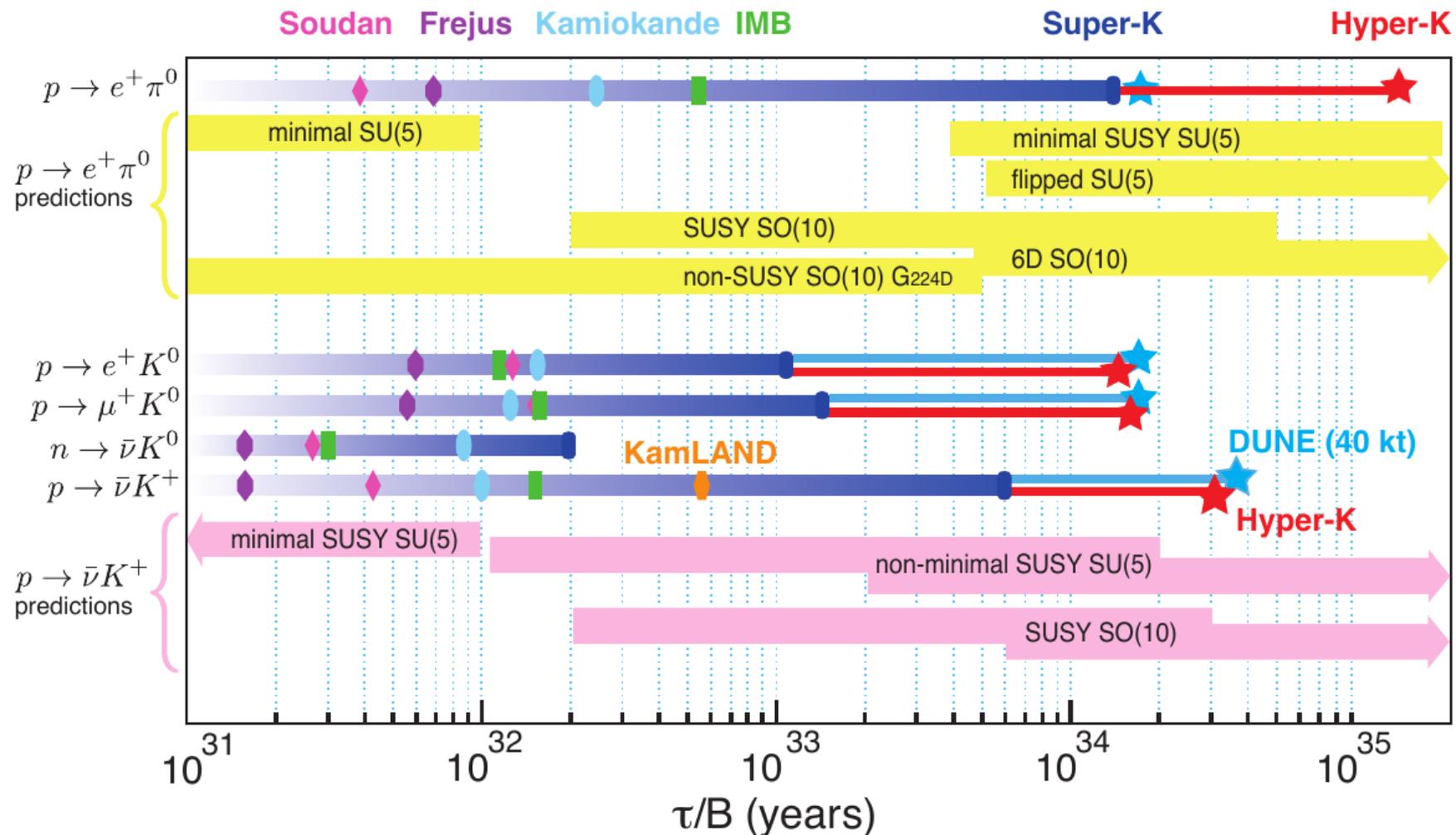


Back-up slides

The background of the slide features a complex mathematical plot. It consists of a grid of small, multi-colored squares (green, blue, yellow, red) arranged in a pattern that suggests a curved surface or a specific mathematical function. A thin, light-colored line is drawn across the grid, following a similar curved path. The overall appearance is that of a data visualization or a mathematical model. A solid blue horizontal banner is positioned across the middle of the slide, containing the title text in white.

II. Théories de Grande Unification

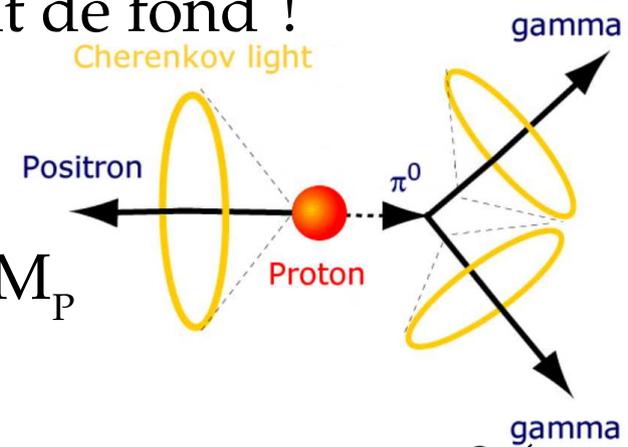
- Désintégration du proton prédite par les théories de grande unification.



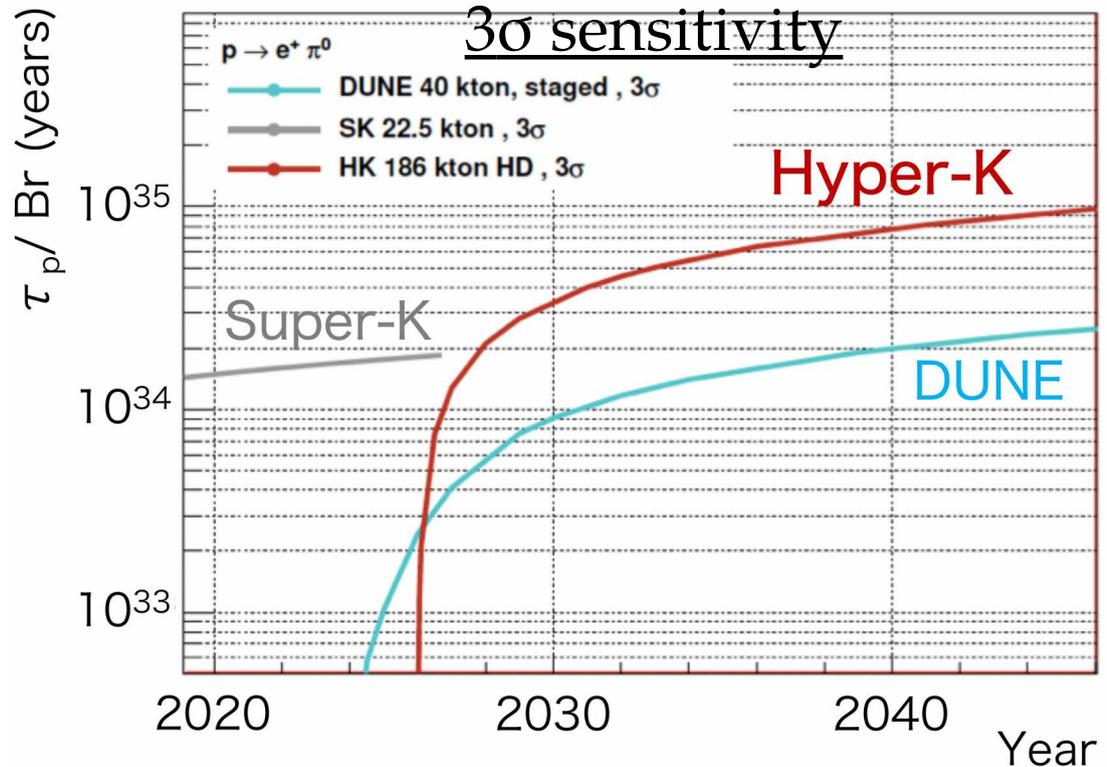
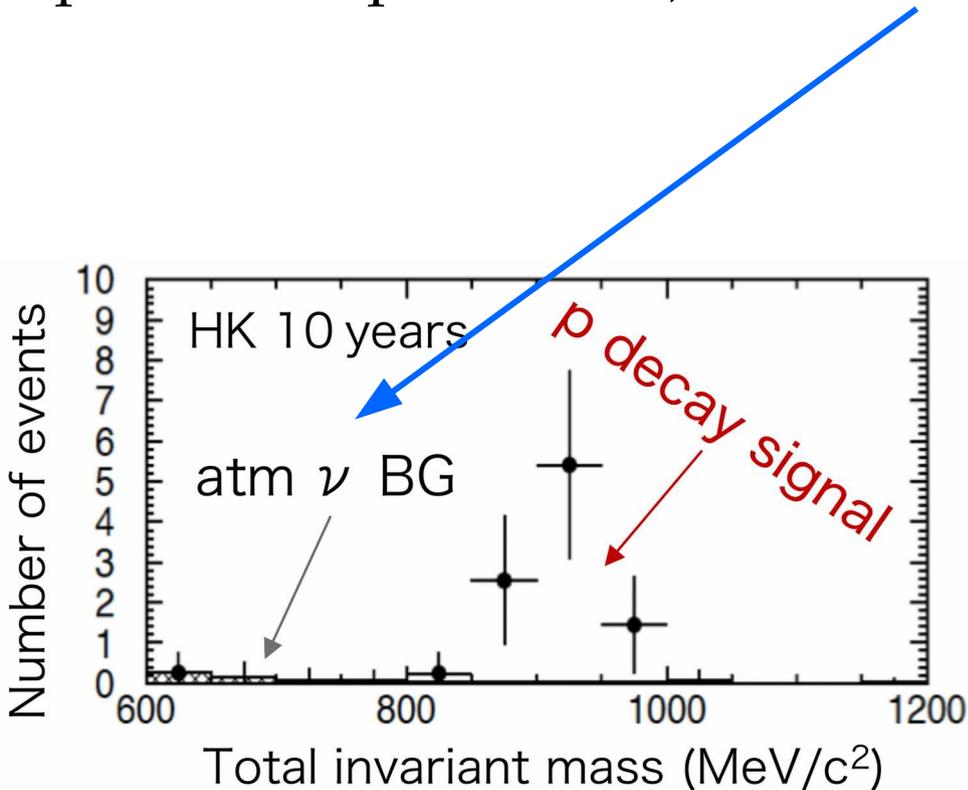
- HK sera capable de sonder les modèles **Minimal SUSY-SU(5) & SUSY-SO(10)** quasi-intégralement, avec une sensibilité inégalable ailleurs.

- Canal magique : $p \rightarrow e^+ + \pi^0 \rightarrow$ Presque sans bruit de fond !

- Signal : 3 anneaux de type γ/e
+ énergie reconstruite = Masse invariante proton M_p



- Bkg : ν atmosphériques ont souvent 1 anneau, mais peut en avoir 3 (si pion, ou capture du n) \rightarrow Restent a basse energie.

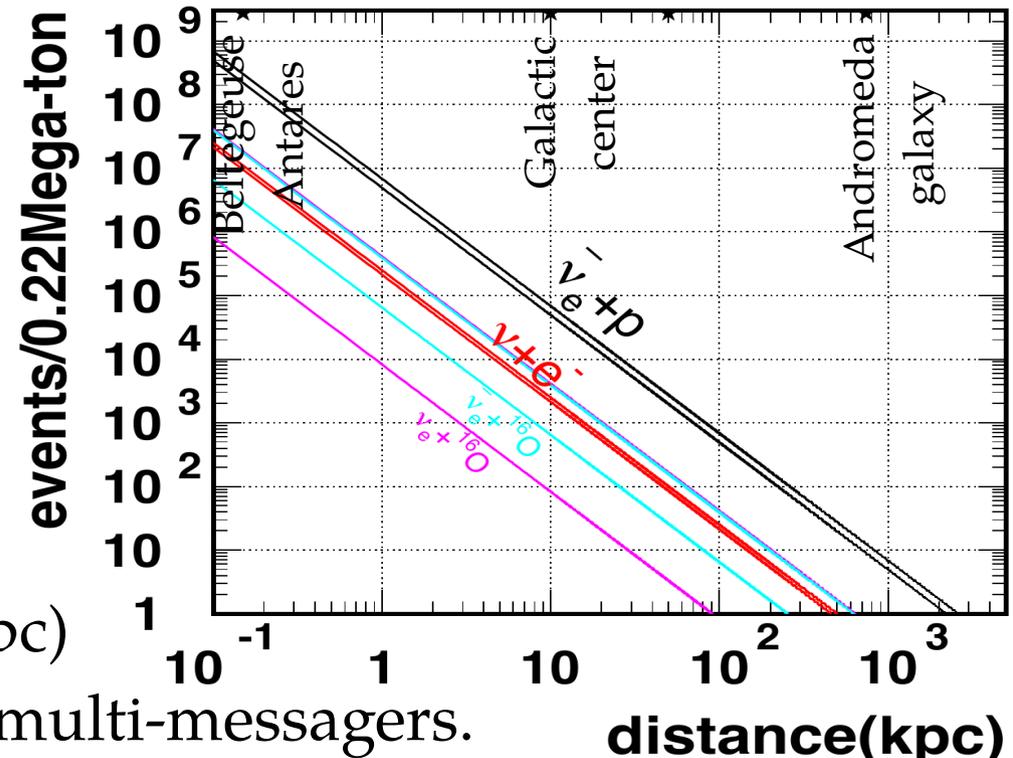
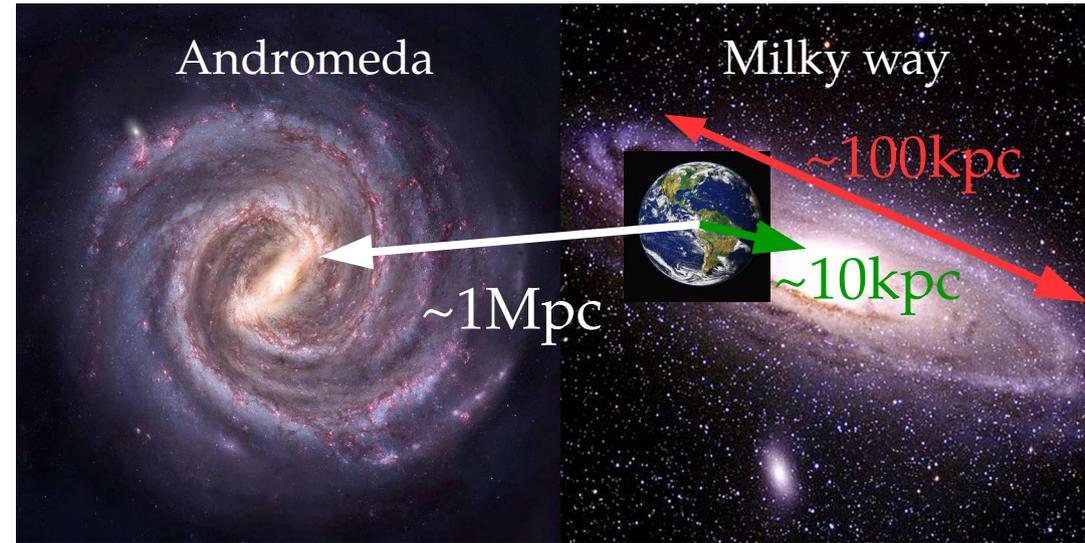




III. Neutrinos de Supernovae

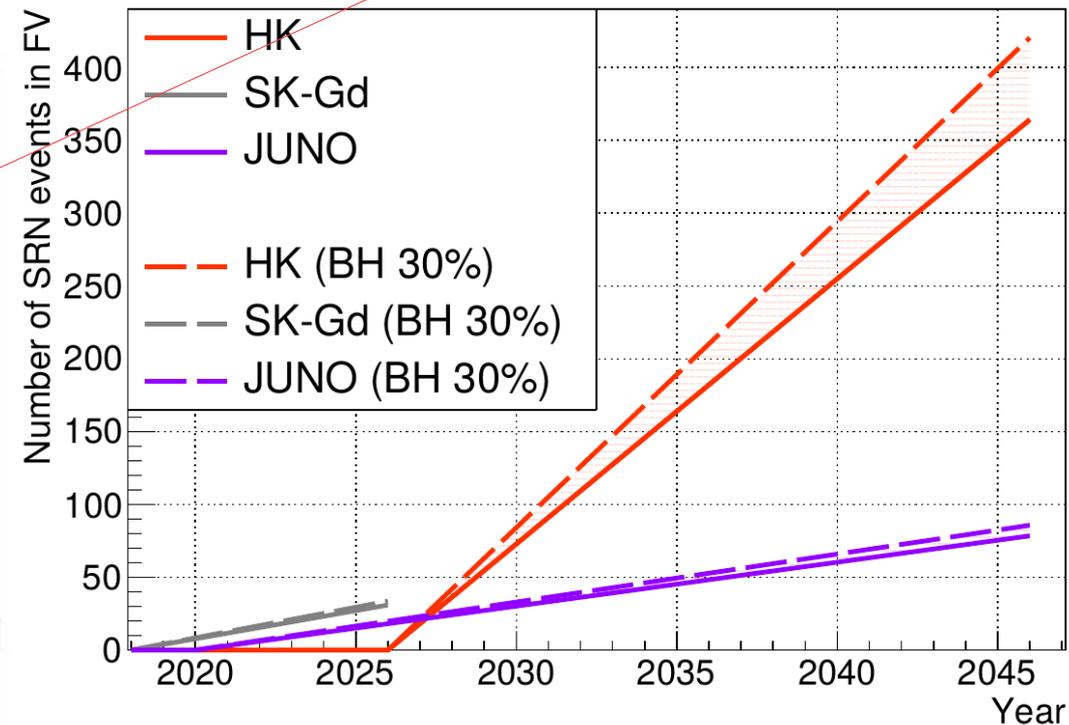
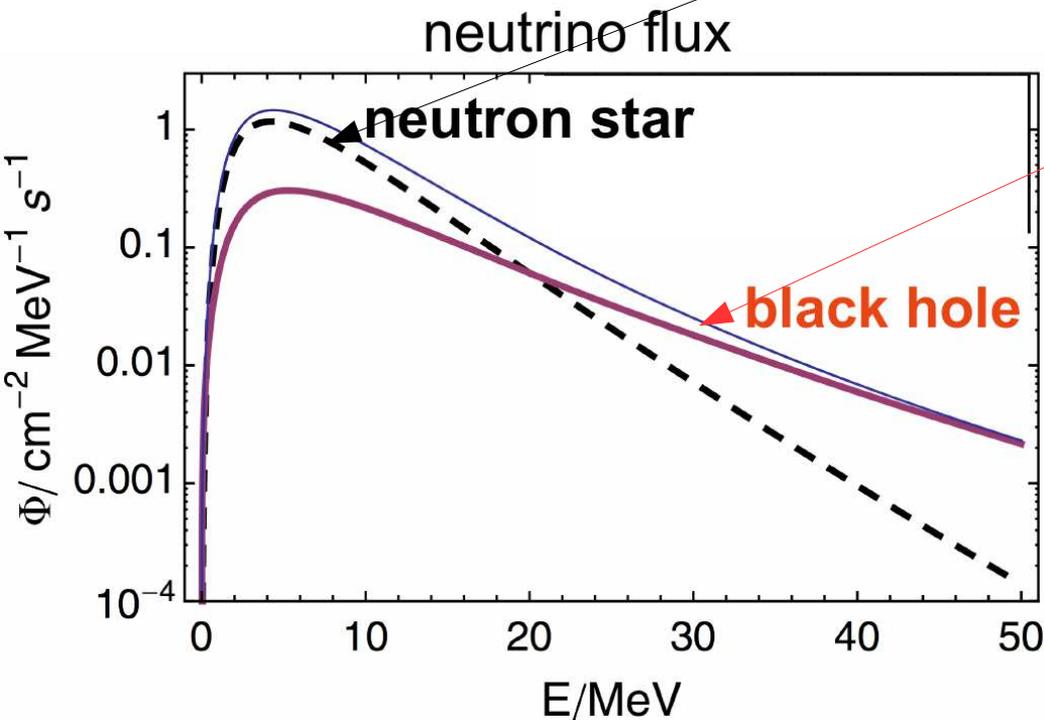
Neutrinos de Supernovae

- 99 % de l'énergie des SN émise en ν : source incroyable d'informations.
- Mais SK n'est sensible qu'aux SN galactiques ou périphériques
→ Détection directe extrêmement rare : 1987a seulement !
- HK aussi sensible aux SN **extra-galactiques** venant d'Andromède !
- Si SN centre Voie Lactée : **~50k événements** → Contraintes en temps et énergie sans précédent sur les SNs.
- Résolution directionnelle de 1° (@10kpc)
→ Forte contribution à l'astronomie multi-messagers.



Neutrinos Reliques de Supernovae Passées¹⁴

- Les neutrinos reliques de SN = nouvelles sondes pour contraindre l'histoire de formation des étoiles → 1e détection dans SK-Gd ?
- Le spectre sera déterminée par HK : Basse énergie ↔ Etoiles anciennes
Plus grand redshift
- Aussi sensible au taux de formation d'étoiles à neutrons vs **trous noirs**.

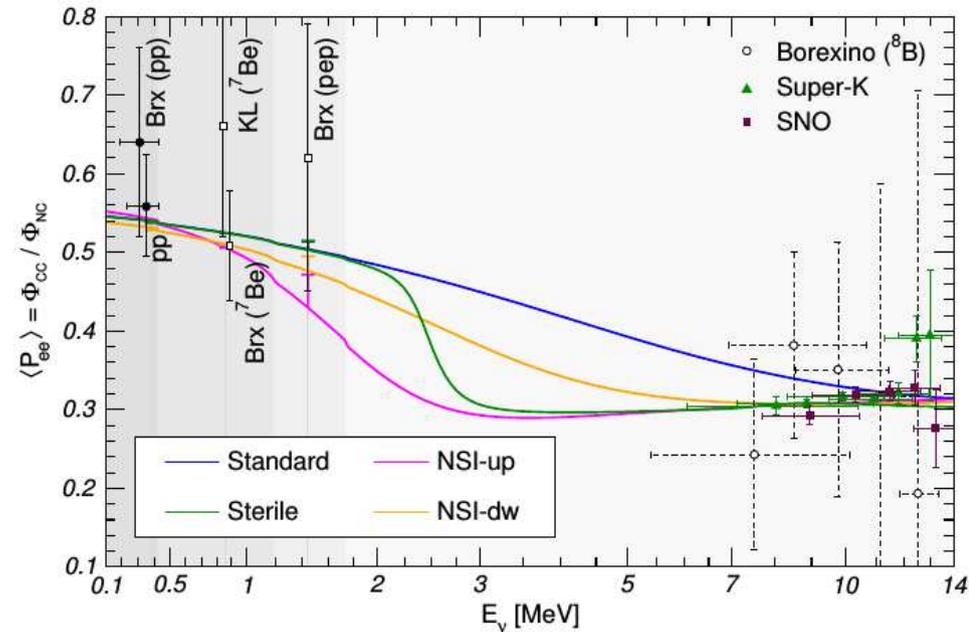
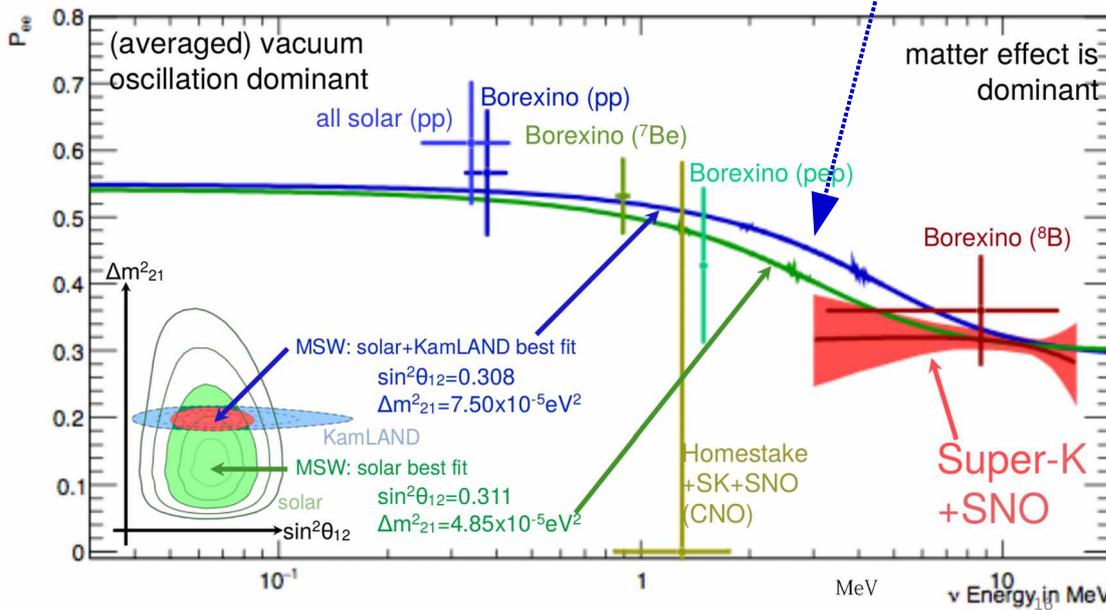




IV. Neutrinos Solaires

- SK/SNO ne voient pas « l'upturn » des neutrinos solaires (3σ)

Région de transition entre oscillation avec et sans effets de matière dans le Soleil



Causes possibles de déplacement/réduction de l'upturn :

1. Fluctuations statistiques ?
2. Neutrino stériles léger (masse $\sim m_1$ et m_2) ?
3. Interactions non-standardes dans les zones les plus denses du Soleil ?

→ 10 ans ↔ HK rejette l'hypothèse de l'upturn « classique » à 5σ .



Conclusions