

L'asymétrie matière-antimatière avec les neutrinos

Marco Zito
IRFU/SPP CEA Saclay

Congrès général de la SFP
Strasbourg, 25 août 2015

Sommaire :

- L'asymétrie matière-antimatière
- Vers un explication dynamique
- La violation de CP dans les neutrinos
- Perspectives expérimentales



La grande question de Leibniz

« Pourquoi il y a plutôt quelque chose que rien ? Car le rien est plus simple et plus facile que quelque chose. De plus, supposé que des choses doivent exister, il faut qu'on puisse rendre raison pourquoi elles doivent exister ainsi, et non autrement. »

Leibniz (1646-1716), Principes de la nature et de la grâce, 1714.



L'asymétrie matière-antimatière

- Les mesures cosmologiques (dont celles du satellite Planck) confirment le modèle Λ CDM \rightarrow l'Univers a connu une phase initiale très chaude. Il est plausible que dans cette phase il y avait autant d'antimatière que de matière.
- Aujourd'hui : on n'observe pas d'antimatière primordiale
- La matière étant formée de baryons B (protons, neutrons etc) et l'antimatière d'antibaryons \bar{B} (antiprotons etc) on peut introduire une asymétrie baryonique: $\eta = (n(B) - n(\bar{B})) / n(\gamma)$
- La Nucléosynthèse Primordiale (BBN) est compatible avec $\eta = (5.9 \pm 0.5) 10^{-10}$
- Les mesures du CMB donnent $\eta = (6.20 \pm 0.15) 10^{-10}$
- NB: ces deux mesures sont espacées d'un très long intervalle de temps (BBN $\sim 1-300$ s, CMB $4 \cdot 10^5$ ans)

Conditions initiales ou dynamique ?

Pourquoi ne pas attribuer cette asymétrie à une simple question de valeur initiale ?

- Ajustement fin (fine tuning): 6 000 000 antiquarks pour 6 000 001 quarks (???)
- L'inflation a entraîné une dilution extrême de toute asymétrie initiale. L'univers commence par un vide rempli par l'énergie du vide de l'inflation (l'inflation correspond à une transition de phase)
- Une explication dynamique nous encourage à étudier les différences entre matière et antimatière au niveau des constituants élémentaires

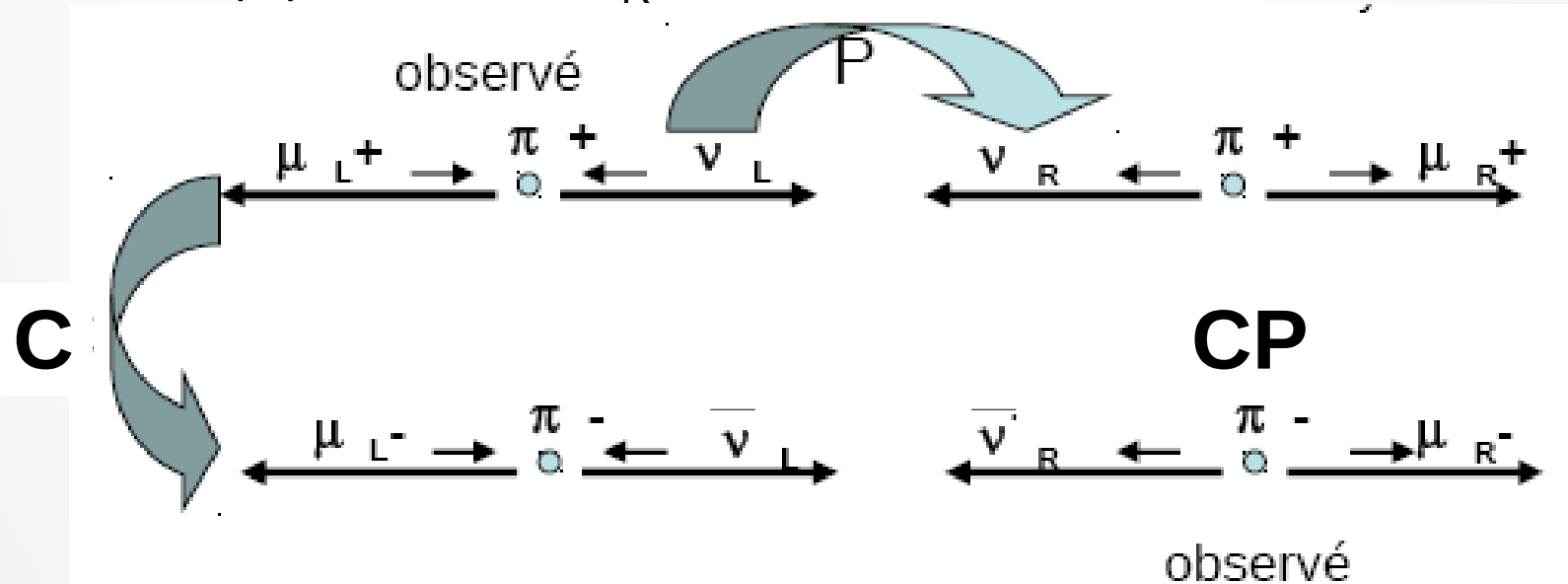
Matière, antimatière, particules

Transformation	Nom	Effet	Exemples
C	Conjugaison de charge	Particule \rightarrow anti-particule	$e^- \rightarrow e^+$
P	Transformation de parité (Inversion spatiale)	Système physique \rightarrow système miroir	$\vec{x} \rightarrow -\vec{x}$ $\vec{p} \rightarrow -\vec{p}$ $\vec{l} \rightarrow \vec{l}$ $e^-_L \rightarrow e^-_R$ $\vec{s} \rightarrow \vec{s}$
T	Inversion temporelle	$t \rightarrow -t$	
CP	Charge-parité		$e^-_L \rightarrow e^+_R$

Les interactions fortes et électromagnétiques sont invariantes par C et CP.

Les interactions faibles et CP

La transformation de charge-parité CP apparaît plus naturelle que C pour passer de la matière à l'antimatière. En effet, pour les interactions faibles, l'état e^+_R (\sim spin//impulsion) interagit par le courant faible tout comme e^-_L . L'état e^+_L est lui un singlet de SU(2) comme e^-_R .



Les interactions faibles violent de façon maximale C et P, et sont presque invariantes de CP

Les trois conditions de A. Sakharov

JETP Lett. 5, 24 (1967)

Les trois conditions nécessaires pour engendrer dynamiquement une asymétrie baryonique sont

1) Violation du nombre baryonique B

$$B=0 \text{ pour } T=0 \rightarrow B \neq 0$$

2) Violation de C et CP

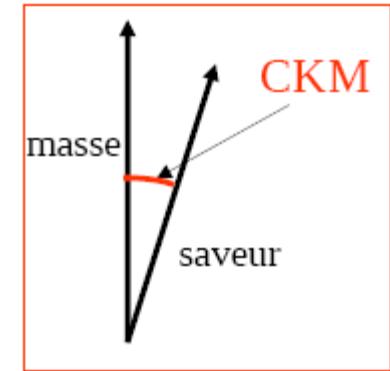
$$X \rightarrow Y + B : \Gamma(X \rightarrow Y + B) \neq \Gamma(\bar{X} \rightarrow \bar{Y} + \bar{B})$$

3) Processus hors équilibre thermique

Selon la symétrie CPT, la masse M d'une particule et d'une antiparticule sont identiques. A l'équilibre, les densités sont déterminées par le facteur de Boltzmann $\exp(-M/KT)$.

Le Modèle Standard de la Physique des Particules

Quarks	u	c	t
	d	s	b
Leptons	ν_e	ν_μ	ν_τ
	e	μ	τ



Le Modèle Standard, introduit deux termes d'interaction pour les fermions f élémentaires:

- 1) Interaction f_L -W (désintégrations faibles, courant chargé)
- 2) Interactions f-Higgs, termes de masse

Deux matrices unitaires (CKM pour les quarks, PMNS pour les leptons) relient les états propres de masse aux états de saveur

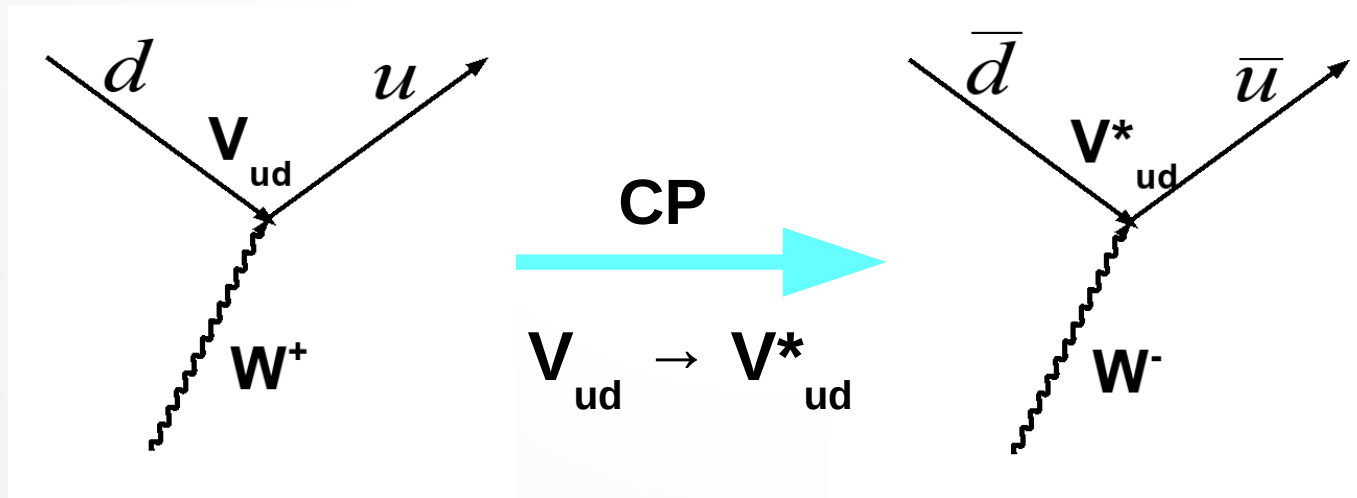
$$\text{États de saveur} \begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} \text{ États de masse}$$

$$\mathcal{L}_{\text{int}}^{\text{CC}} = -\frac{g_2}{\sqrt{2}} (\bar{u}_L, \bar{c}_L, \bar{t}_L) \gamma^\mu \hat{V}_{\text{CKM}} \begin{pmatrix} d_L \\ s_L \\ b_L \end{pmatrix} W_\mu^\dagger + \text{h.c.}$$

La violation de CP dans le Modèle Standard

Le Modèle Standard introduit la violation de CP, observée en 1964, par une phase dans la matrice CKM. Même possibilité pour la matrice PMNS dans les neutrinos.

$$V = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \approx \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4)$$



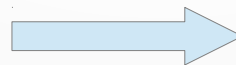
Différence entre matière et antimatière si la phase η est non nulle.

La baryogénèse dans le Modèle Standard

- Les trois conditions de Sakharov sont satisfaites par le Modèle Standard de la Physique des Particules avec
 - Violation du nombre baryonique B : sphalérons
 - Violation de C et CP : violation de CP dans le système des quarks, matrice CKM
 - Processus hors équilibre : la transition de phase électrofaible
- **Toutefois** numériquement cela ne marche pas. Il aurait fallu un boson de Higgs léger, avec une masse < 40 GeV
- De plus la violation de CP liée à CKM est insuffisante

$$J_{CP} \equiv (m_t^2 - m_c^2)(m_t^2 - m_u^2)(m_c^2 - m_u^2)(m_b^2 - m_s^2)(m_b^2 - m_d^2)(m_s^2 - m_d^2)s_{12}s_{23}s_{13}c_{12}c_{13}c_{23}s_\gamma \neq 0.$$

$$J_{CP}/T_c^{12} = 10^{-20}$$

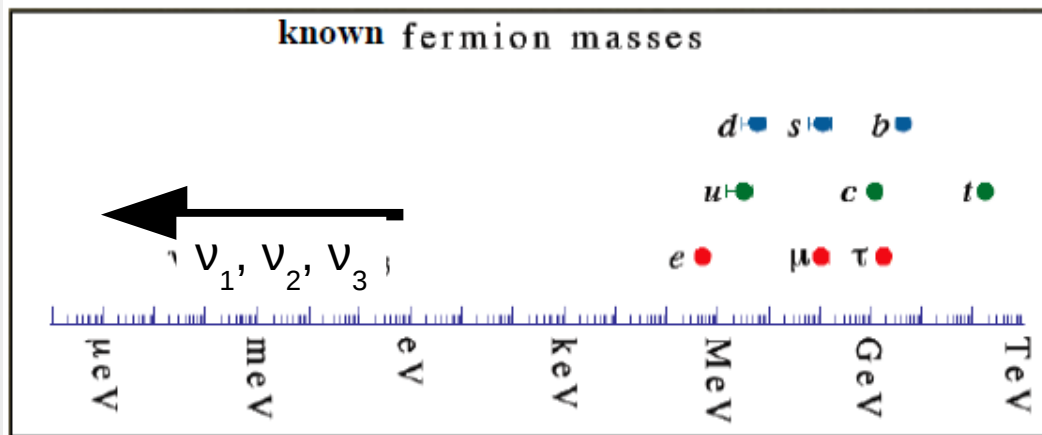


Il doit y avoir des nouvelles sources de violation de CP

Indices de la Physique au delà du Modèle Standard

- Matière noire
- L'asymétrie baryonique
- Les masses des neutrinos

Leptogénèse : on résout deux problèmes à la fois



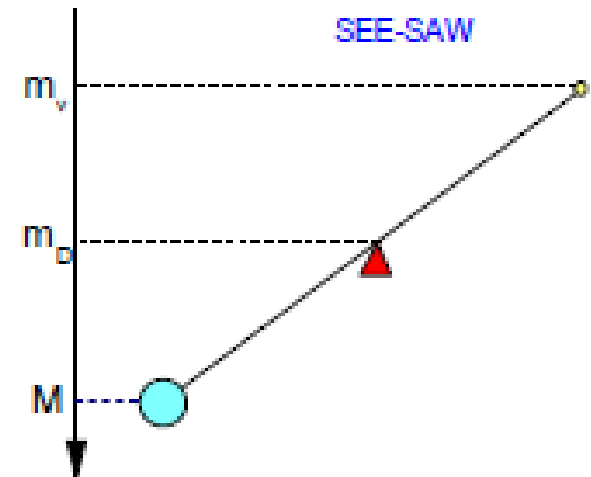
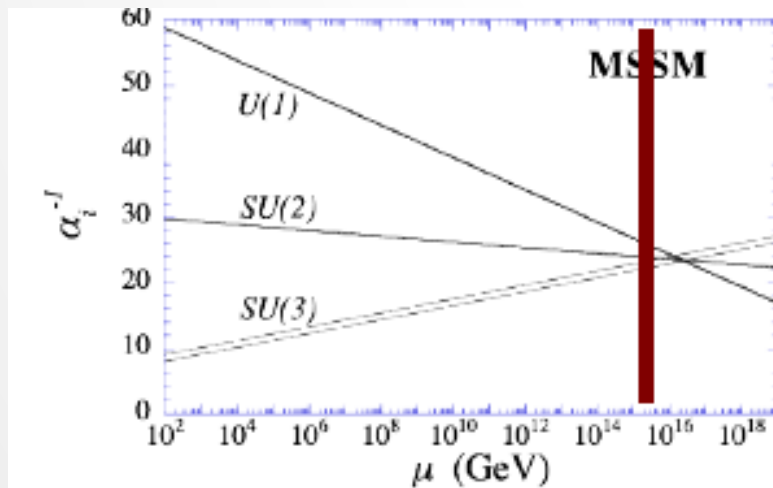
Le modèle de see-saw

- Comment expliquer le fait que les neutrinos soient aussi légers ?
- Faisons l'hypothèse qu'il existe un autre neutrino N_R avec cette matrice de masse

$$L = (\bar{\nu}_L, \bar{N}_R^c) \begin{pmatrix} 0 & m_D \\ m_D^T & M_R \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_L^c \\ N_R \end{pmatrix}$$

On obtient ces valeurs propres: $m_1 \approx M_R$ $m_2 = m_D^2 / M_R$

$M_R \sim 10^{15}$ GeV for $m_\nu \sim 0.1$ eV



Les étapes de la leptogénèse

Fukugita Yanagida 1986

La leptogénèse est une théorie qui explique la génération de l'asymétrie matière-antimatière à partir des propriétés de nouveaux leptons lourds (\sim neutrinos)

- 1) Inflation
- 2) Réchauffement à $T \sim 10^{15}$ GeV
- 3) Production thermique de nouveaux leptons lourds neutres N (des cousins des neutrinos)
- 4) Désintégration des N hors équilibre thermique
- 5) avec violation de CP \rightarrow génération de B-L
- 6) Lessivage partiel de l'asymétrie par les réactions inverses
- 7) Conversion de B-L en asymétrie de B (sphalérons)
- 8) Le nombre net B (dont nous) survit jusqu'à aujourd'hui

Indications de la leptogenèse

Pour étayer ce scénario il faut démontrer que

- Les neutrinos ont une masse *Vérfifié*
- Ils sont plus légers que 1 eV *Vérfifié*
- Les trois angles de la matrice PMNS ne sont pas nuls *Vérfifié*
- Il y a violation de CP dans PMNS *En cours*
- Les neutrinos sont de particules de Majorana (identiques à leur antiparticule) *En cours*
- ... il existe des états N très lourds, ...

Les oscillations des neutrinos

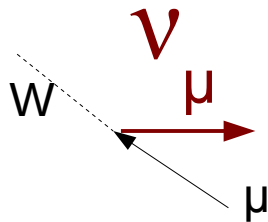
$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \end{pmatrix}$$

Si les états propres de saveur sont différents des états propres de masse, la propagation crée une différence de phase avec l'apparition d'une nouvelle saveur.

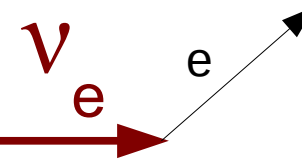
$$\nu_\mu = -\sin \theta \nu_1 + \cos \theta \nu_2$$

Propagation

Source



$$\begin{aligned} \nu_1 &\rightarrow \exp(-ip_1 x) \nu_1 \\ \nu_2 &\rightarrow \exp(-ip_2 x) \nu_2 \\ \Delta\phi &= \Delta m^2 L / (4E) \end{aligned}$$



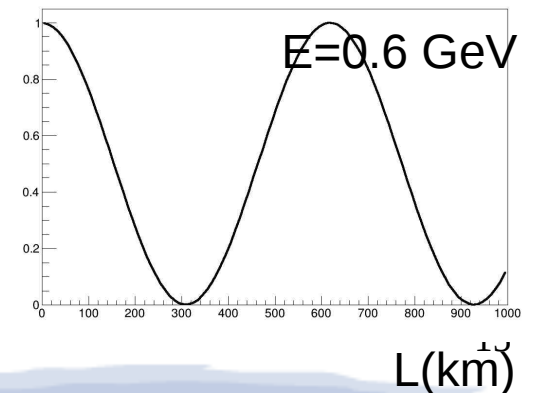
Detecteur



L

$$\text{Prob}(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) = 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2(\Delta m^2 L / 4E)$$

Dans un scénario simplifié à deux neutrinos



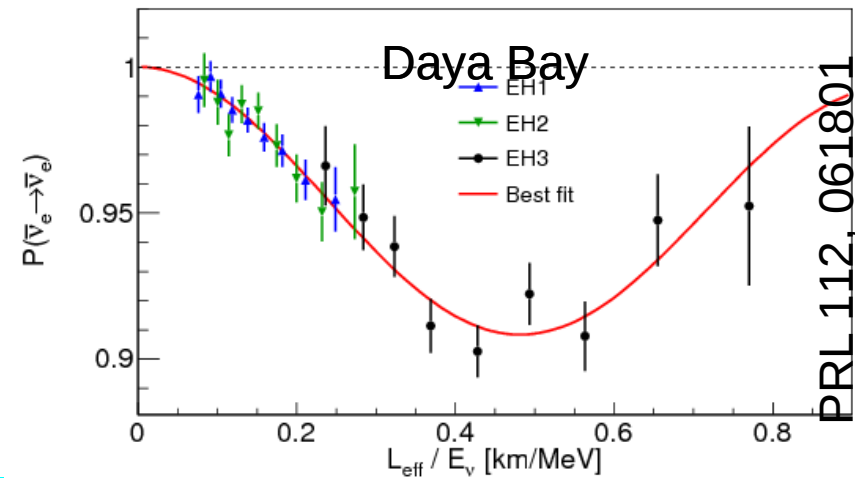
La matrice de mélange Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata (PMNS)

$$s_{ij} = \sin \theta_{ij}$$

$$\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu1} & U_{\mu2} & U_{\mu3} \\ U_{\tau1} & U_{\tau2} & U_{\tau3} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & c_{23} & s_{23} \\ 0 & -s_{23} & c_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{13} & 0 & s_{13} e^{-i\delta} \\ 0 & 1 & 0 \\ -s_{13} e^{i\delta} & 0 & c_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} c_{12} & s_{12} & 0 \\ -s_{12} & c_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 0 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$$

Atmosphérique Solaire

- Les oscillations de neutrinos ont été observé avec des neutrinos solaires, atmosphériques, de réacteur et d'accélérateur
- Les expériences vérifient actuellement des effets plus subtiles comme la violation de la symétrie CP



Parameter	Value	Precision (%)
Δm_{21}^2	$7.5 \cdot 10^{-5} \text{ eV}^2$	2.6
θ_{12}	34°	5.4
Δm_{32}^2	$2.4 \cdot 10^{-3} \text{ eV}^2$	2.6
θ_{23}	42°	~ 10
θ_{13}	9°	6 (Daya Bay 2014)

Capozzi et al.
 ArXiv:1312.2878
 Talk by M. Tortola

La mesure de la violation de CP

$$P(\nu_\mu \rightarrow \nu_e) \approx 4C_{13}^2 S_{13}^2 S_{23}^2 \sin^2 \Phi_{31}$$

Terme "Atmosphérique"

$$\pm 8C_{13}^2 C_{12} C_{23} S_{12} S_{13} S_{23} \sin \delta \sin \Phi_{32} \sin \Phi_{31} \sin \Phi_{21}$$

Terme de violation de CP

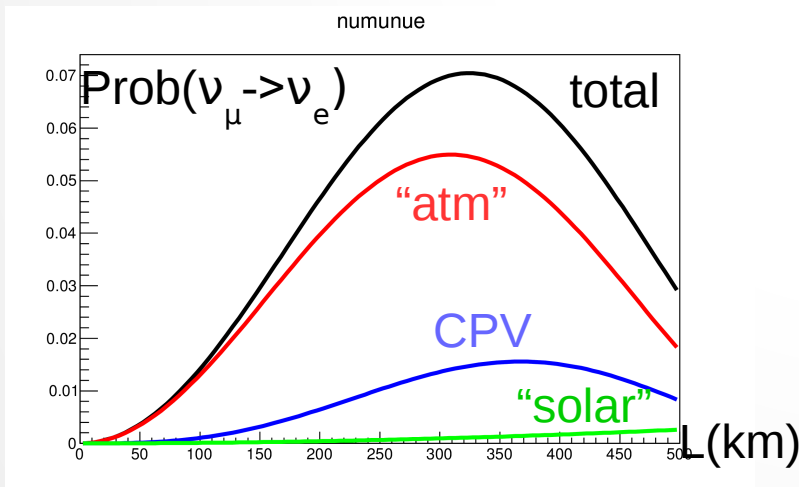
$$+4S_{12}^2 C_{13}^2 (C_{12}^2 C_{23}^2 + S_{12}^2 S_{23}^2 S_{13}^2 - 2C_{12} C_{23} S_{12} S_{23} S_{13} \cos \delta) \sin^2 \Phi_{21}$$

Terme "Solaire"

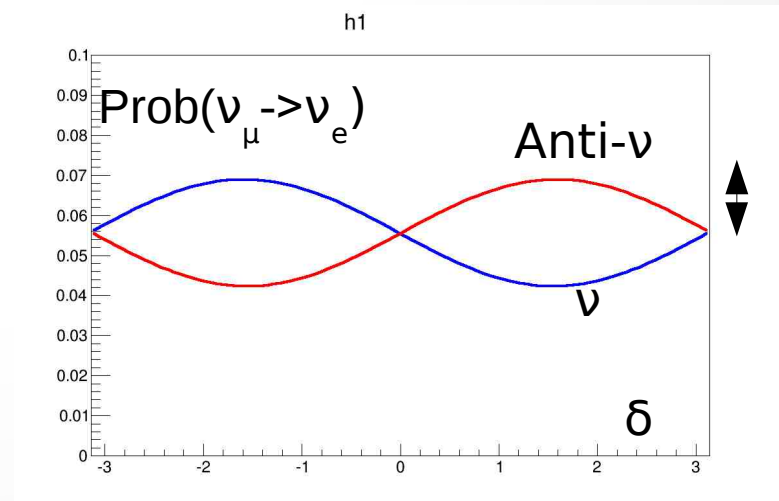
$$C_{ij} = \cos(\theta_{ij})$$

$$\Phi_{ij} = \Delta m_{ij}^2 L / 4 E$$

Changement de signe entre nu et anti-nu !



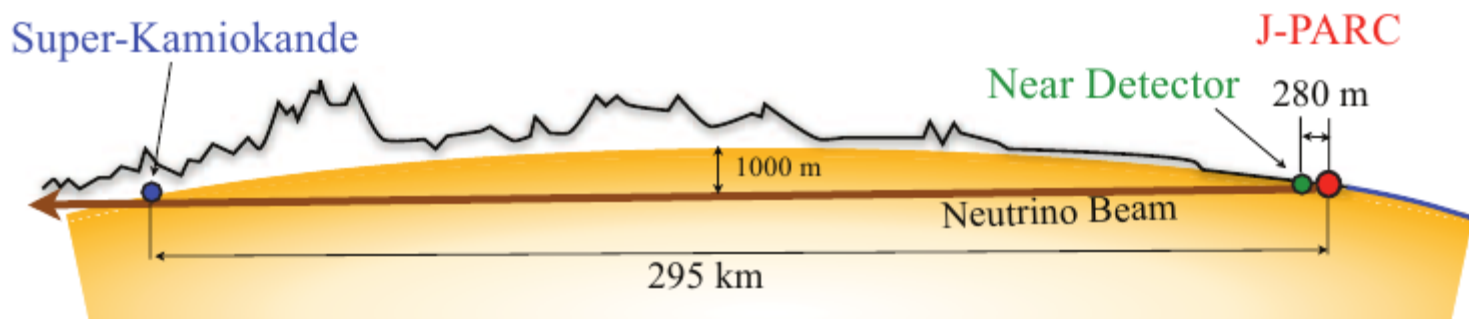
E=0.6 GeV



~20% modulation

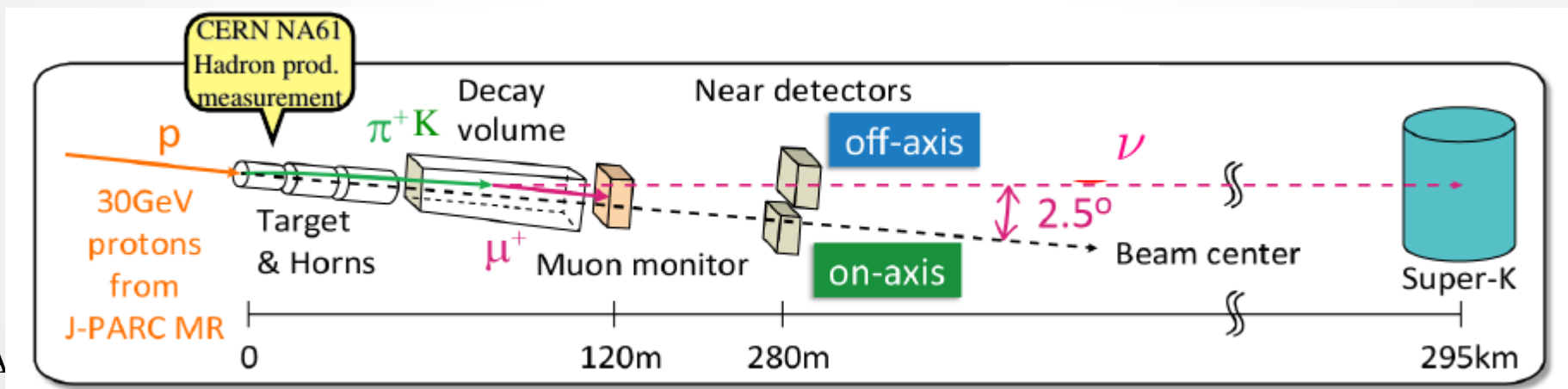
L'expérience Tokai to Kamioka (T2K)

- Expérience d'oscillation des neutrinos au Japon, de JPARC à SuperKamiokande (ligne de base de 295 km)
- Détermination des angles θ_{13} , θ_{23} et premières études de la violation de CP

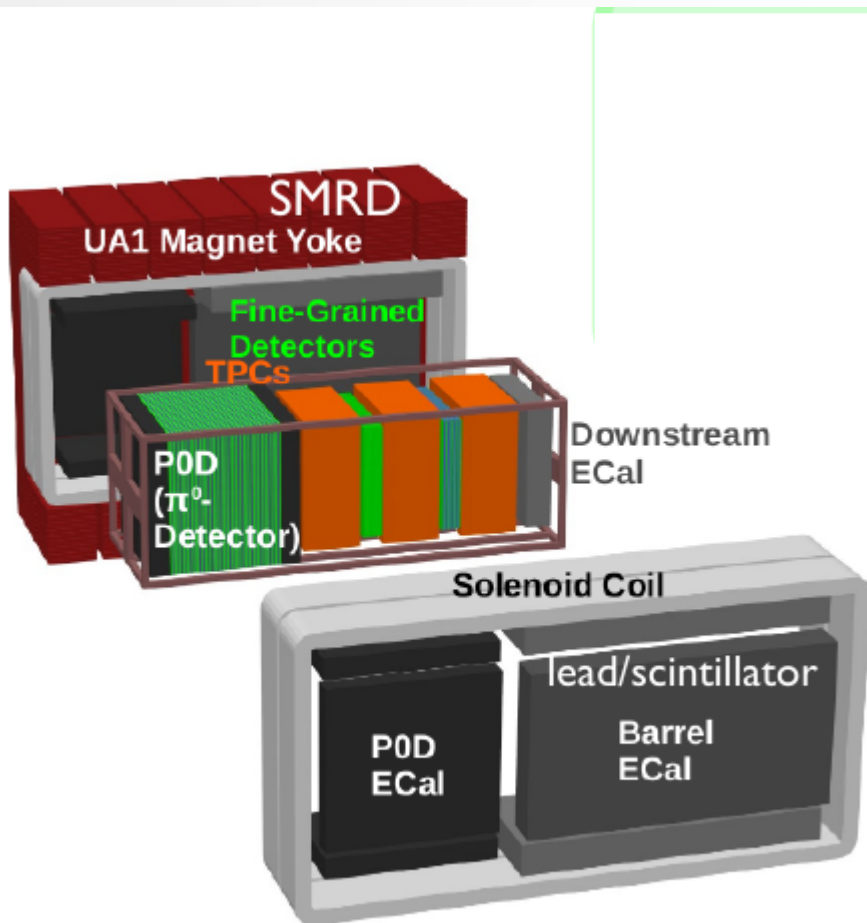


L'expérience T2K

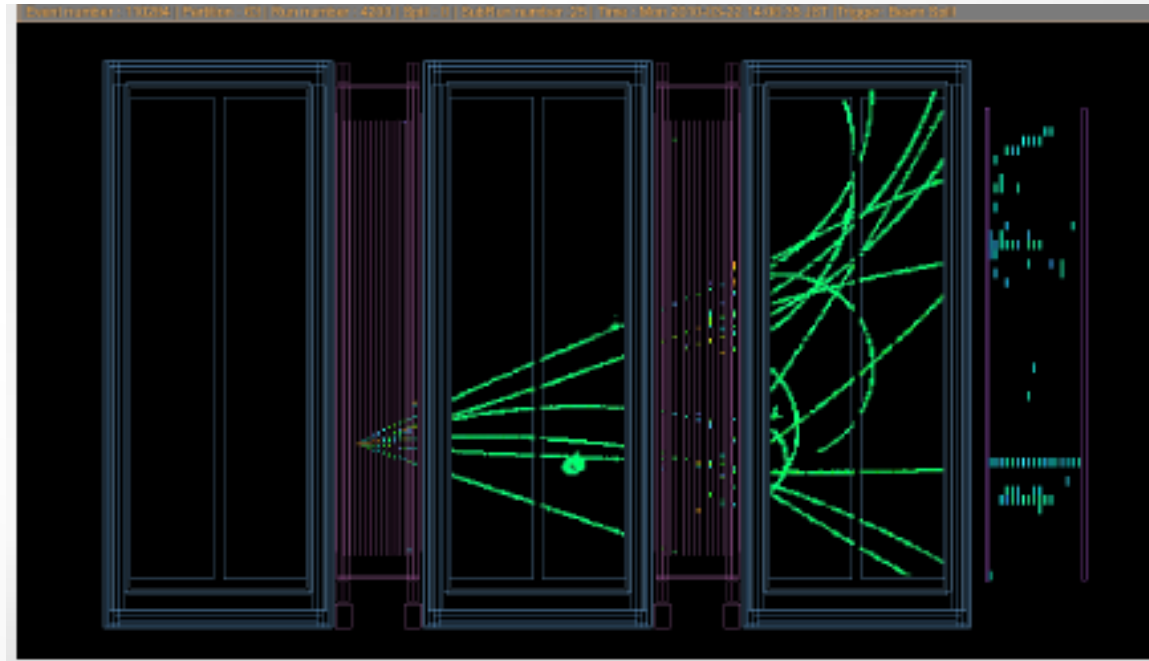
- Un faisceau très intense de proton (30 GeV, 371 kW) : $1.1 \cdot 10^{21}$ protons sur cible
- Production d'un faisceau de neutrino :
 $p + C \rightarrow \pi + X$ suivi de $\pi^+ \rightarrow \mu^+ \nu_\mu$ ou $\pi^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu$
- Détection des neutrinos en position proche
- Puis propagation sur 295 km et détection en position lointaine



Le détecteur proche de T2K

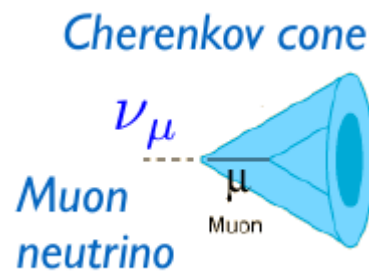
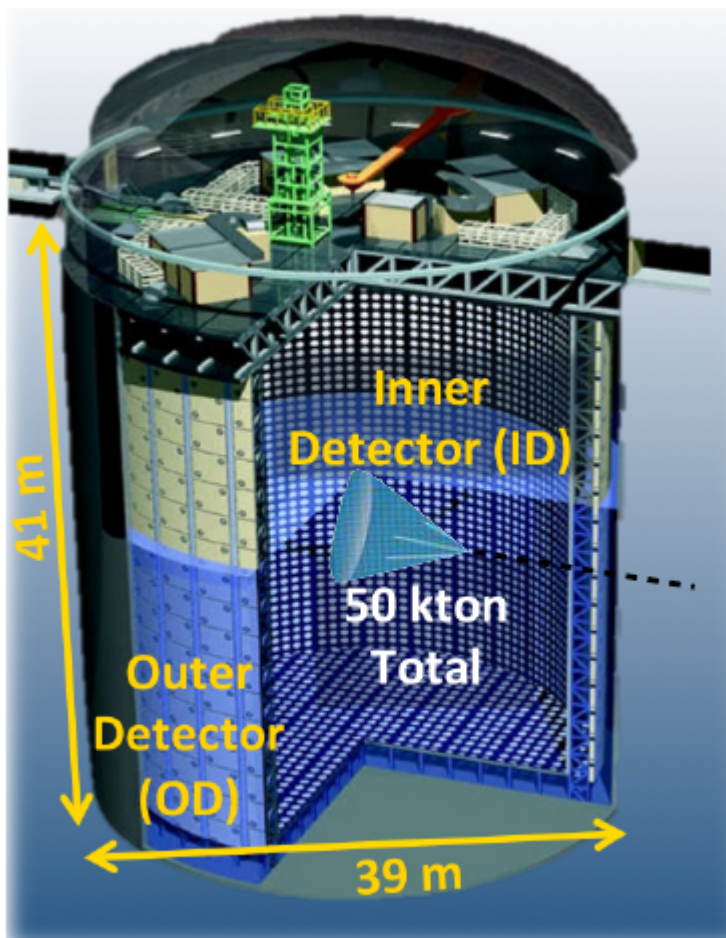


- Contribution française (CEA et IN2P3) : chambres à projection temporelle (TPC) et INGRID (sur l'axe du faisceau)
- Laboratoires impliqués en France : IRFU, IPNL, LPNHE, LLR
- Mesure précise du faisceau de neutrinos, de sa composition et des interactions



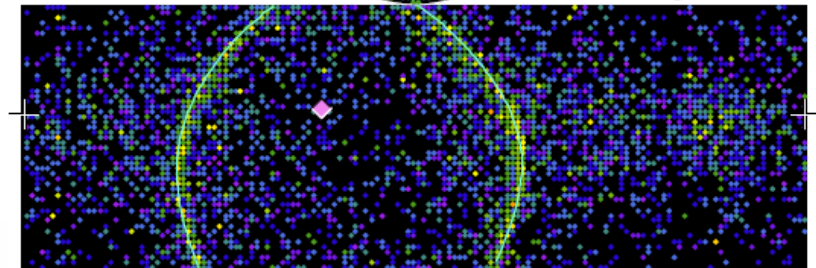
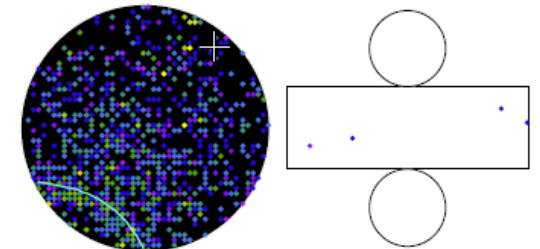
Le détecteur SuperKamiokande

- Situé dans une mine (1000 m de profondeur) : une cuve d'eau ultra-pure de 50 kton (diamètre 39 m), pour détecter les neutrinos grâce à l'effet Cherenkov
- 13000 photomultiplicateurs de grande taille

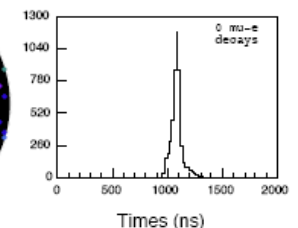
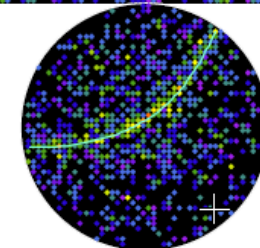


ν_e candidate event

mlokande IV
un 0 Spill 1039222
Sub 921 Event 218931934
5:18
1782.6 ns
its, 9970 pe
, 3 pe
000007
om
049.0 MeV/c



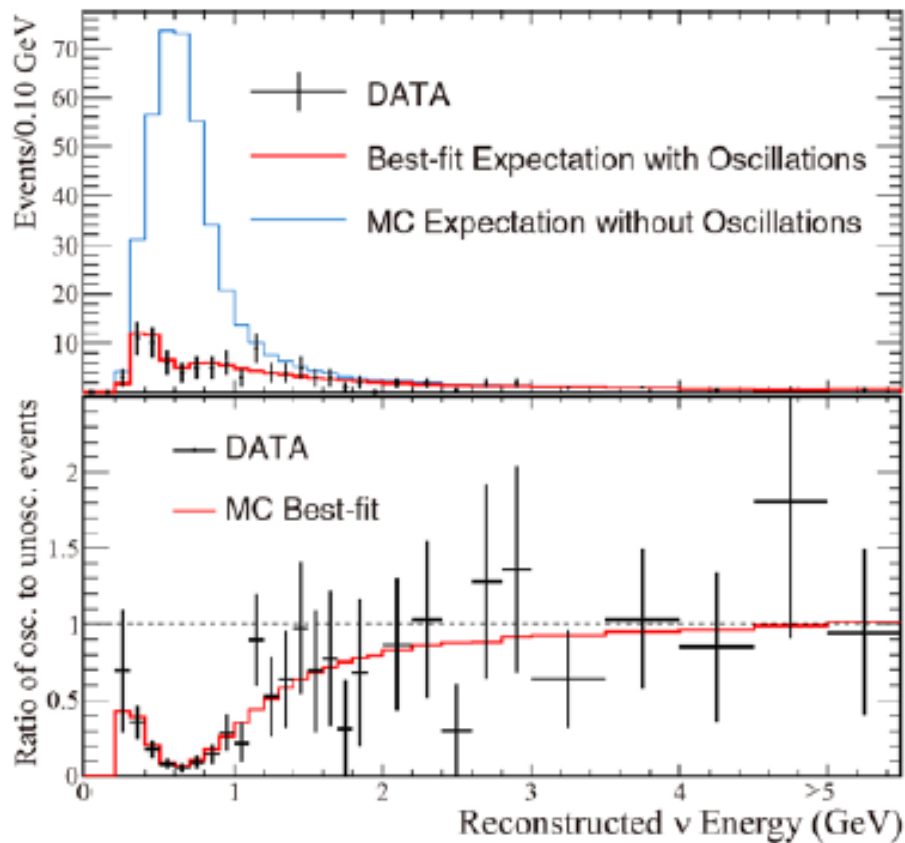
: 1049 MeV
: 0
: 0.04 MeV/c²
: 1120.9 MeV



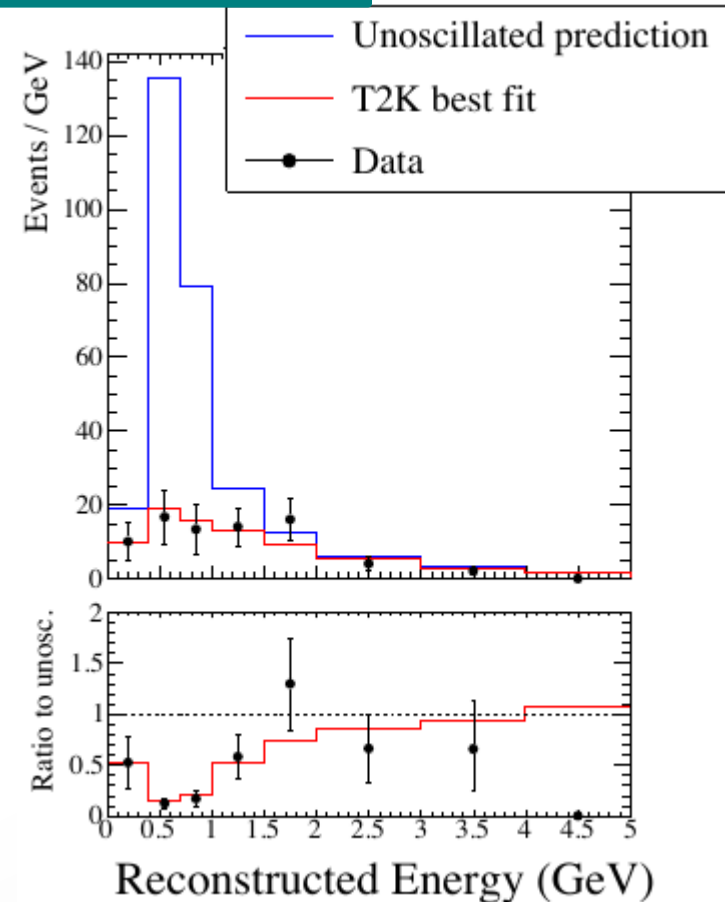
T2K : mesures de disparition

ν_μ

$$\text{Prob}(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \approx 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2(\Delta m^2 L / 4E)$$



446 év. attendus sans oscillation, 120 observés



104 év. attendus, 34 observés

L'angle θ_{23} est compatible avec $\pi/4$ (mélange maximal)

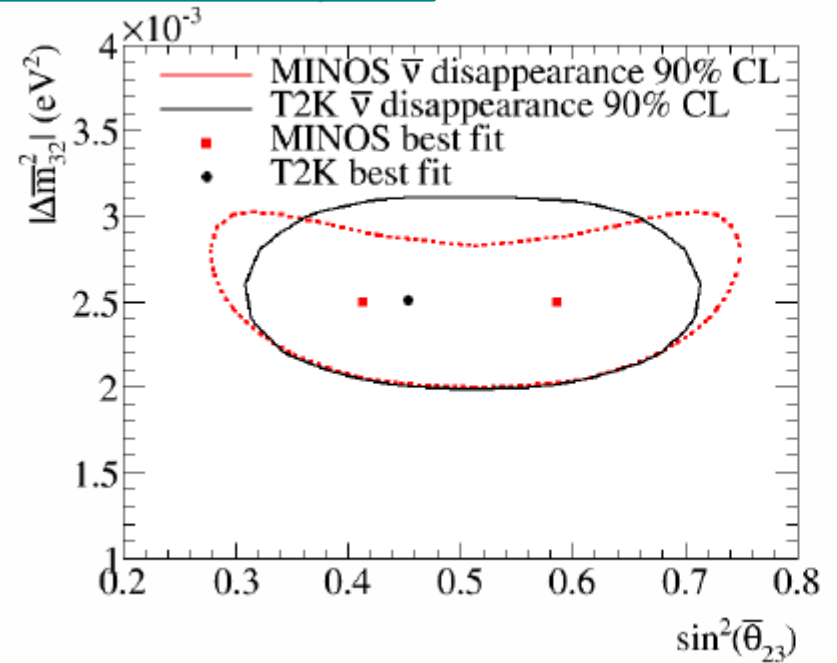
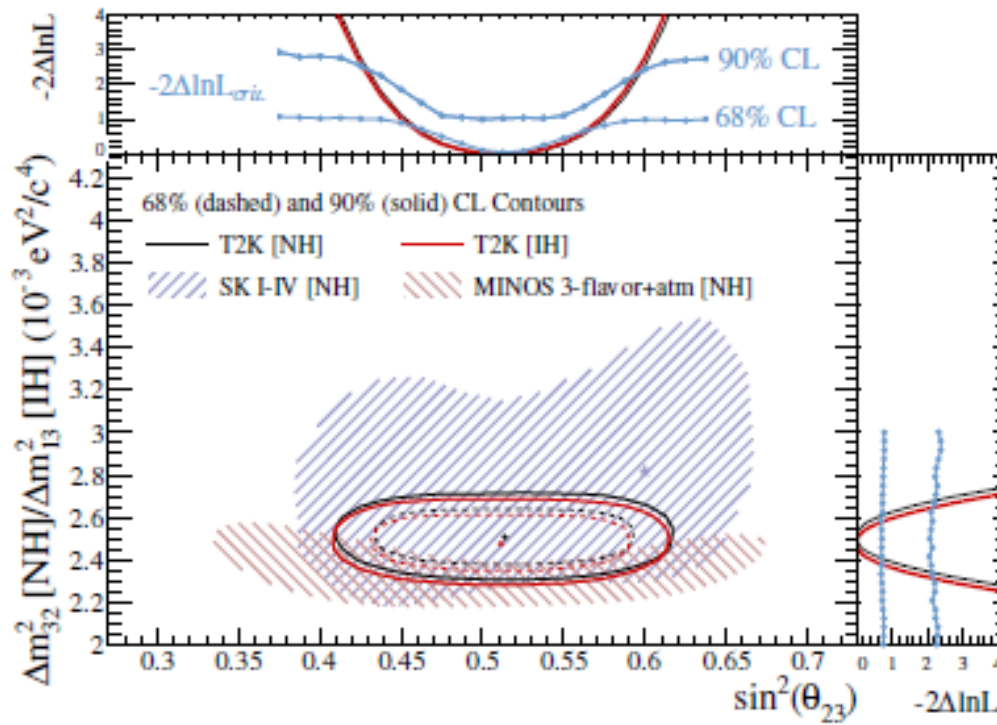
ν_μ

T2K : mesures de disparition

Neutrino

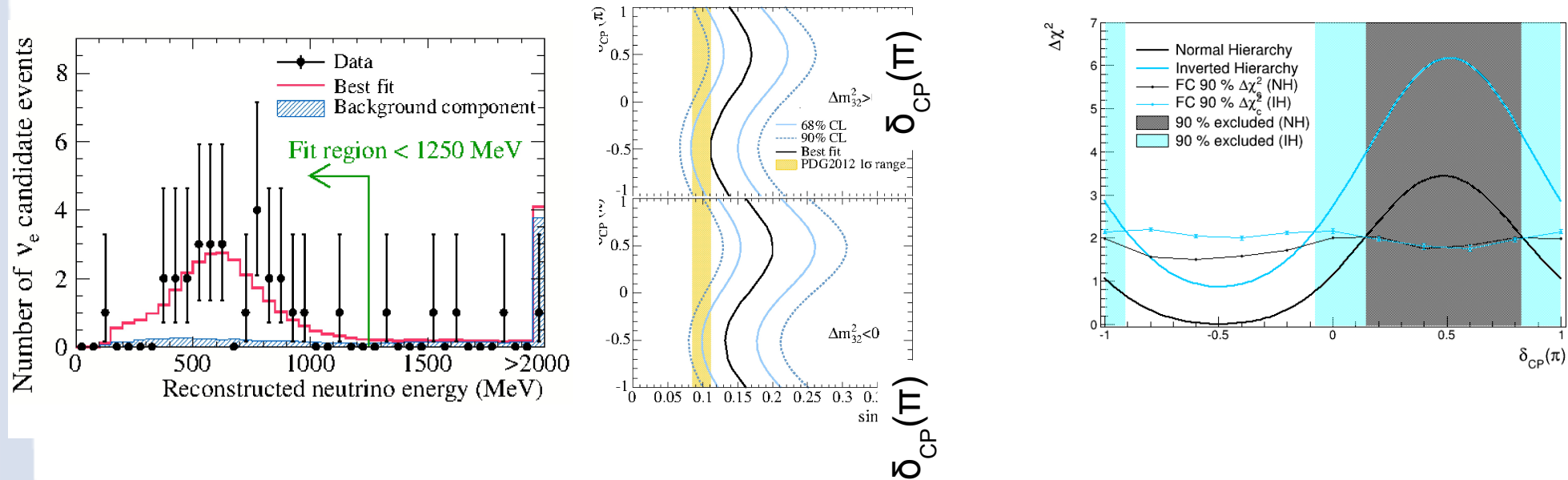
$$\text{Prob}(\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu) \approx 1 - \sin^2(2\theta) \sin^2(\Delta m^2 L / 4E)$$

Antineutrino



Mesure de précision dans le mode neutrino. Première mesure par T2K en mode antineutrino.

T2K : première contrainte sur la violation de CP



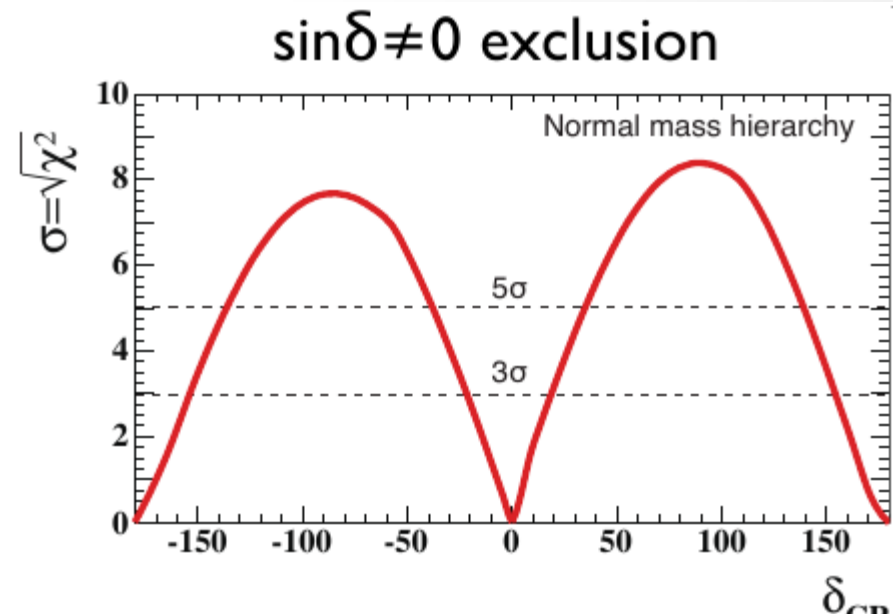
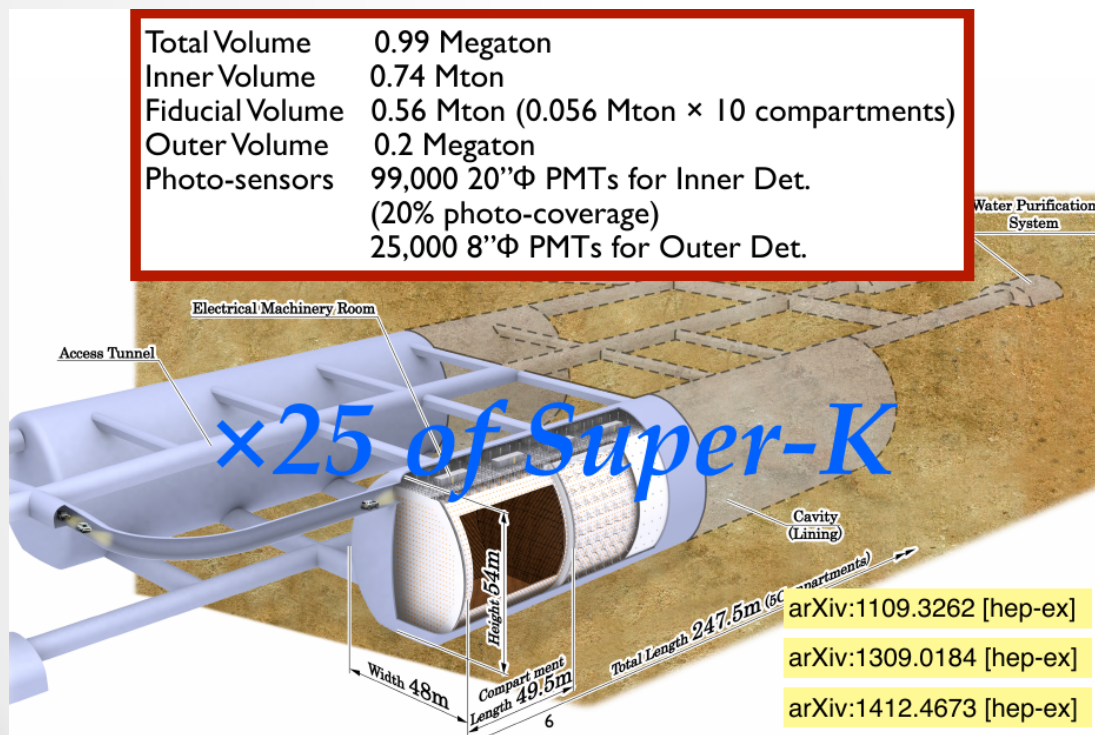
- Observation de l'apparition de ν_e 28 év. à T2K : premières indications sur la violation de CP (exclusion de certains intervalles)
- La prise de données continue : il s'agit d'un premier résultat avec 15 % de l'échantillon escompté
- NOVA apportera une sensibilité complémentaire (premiers résultats en août 2015 en accord avec T2K)
- Si $\delta = 3/2\pi$, leptogénèse sans autre violation de CP $|\sin \theta_{13} \sin \delta| \geq 0.11$
- Toutefois une étude précise nécessite d'une nouvelle installation (faisceau et détecteur)

Pascoli Petcov Riotto 2007

Hyper-Kamiokande

- Même ligne de base (Tokai to Kamioka 295 km) que T2K avec un possible upgrade du faisceau
- Masse fiducielle de 0.56 Mt (25 fois Superkamiokande) avec la technologie du Cherenkov à eau
- Échelle de temps : début de la physique en 2025

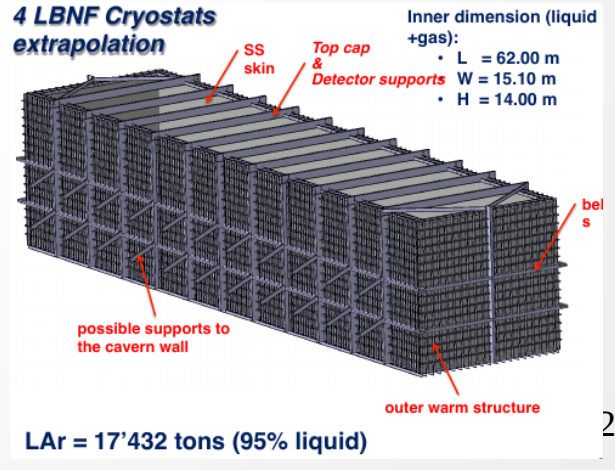
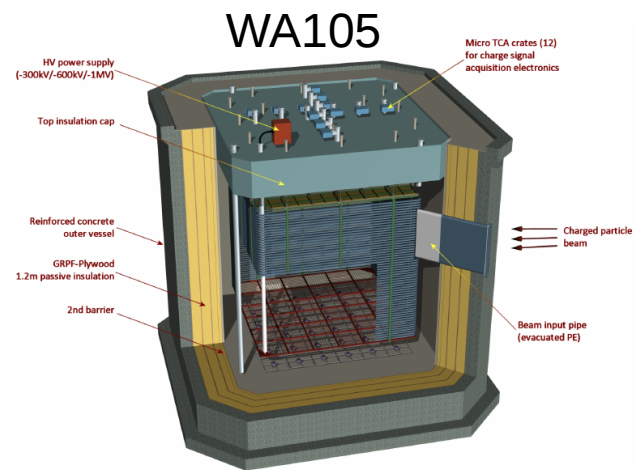
Total Volume	0.99 Megaton
Inner Volume	0.74 Mton
Fiducial Volume	0.56 Mton (0.056 Mton × 10 compartments)
Outer Volume	0.2 Megaton
Photo-sensors	99,000 20"Φ PMTs for Inner Det. (20% photo-coverage)
	25,000 8"Φ PMTs for Outer Det.



DUNE



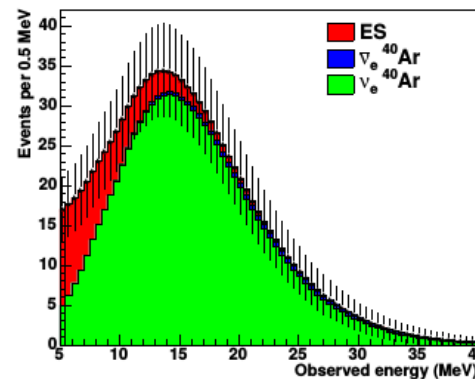
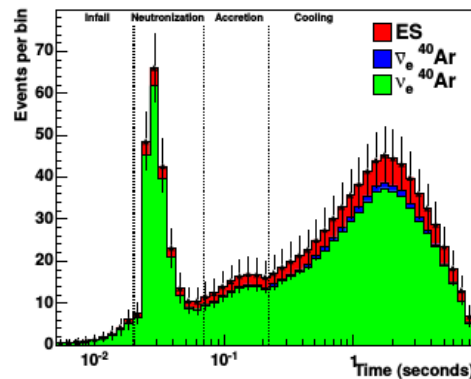
- Le projet LBNF/DUNE est fortement soutenu par le DOE
- Ligne de base de 1300 km de FNAL à SURF (South Dakota)
- Faisceau : upgrade PIP-II des accélérateurs de FNAL : 1.2 MW à 120 GeV (puissance max 2.4 MW)
- SURF (laboratoire lointain): 4 cavernes et 4 détecteurs chacun de 10 kt (masse fiducielle)
- Basée sur la technologie des TPC à Argon Liquide. Démonstration avec l'expérience WA105 en construction au CERN



Au delà du Modèle Standard



- Les grands détecteurs souterrains comme JUNO, DUNE et Hyper-Kamiokande sont des excellents observatoires sur la physique au-delà du Modèle Standard et les neutrinos du cosmos
- Les limites sur la durée de vie du proton peuvent atteindre 10^{35} ans. Lien avec la physique à l'échelle de Grande Unification.
- Étude des neutrinos produits dans l'explosion de Supernova : quelque 10^5 pourraient être détectés (à comparer à 24 pour SN1987A). Argon liquide : étiquetage de ν_e avec $\nu_e + {}^{40}\text{Ar} \rightarrow e^- + {}^{40}\text{K}^*$
- 200 ν solaires/jour à HK
- Étude des neutrinos atmosphériques : hiérarchie de masse



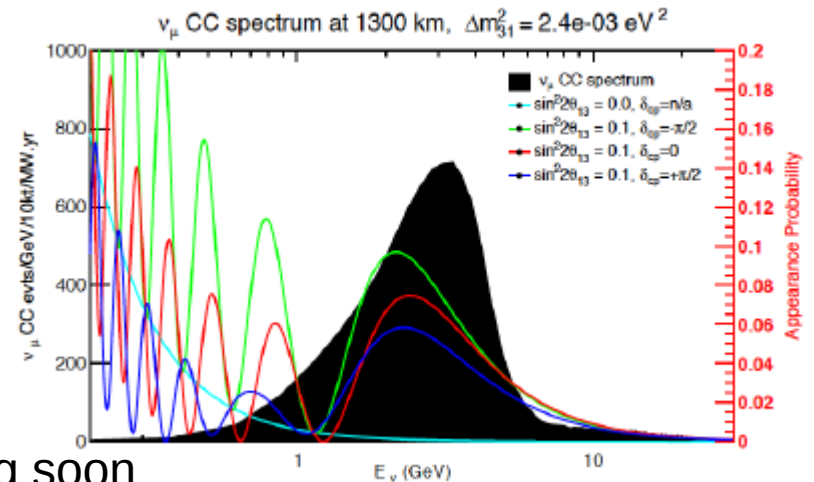
Neutrinos de Supernova
dans DUNE (LBNF LOI)

Conclusions

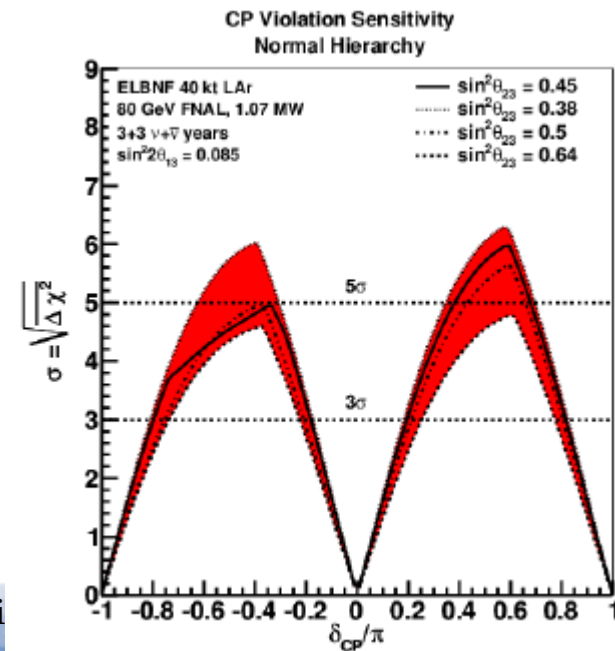
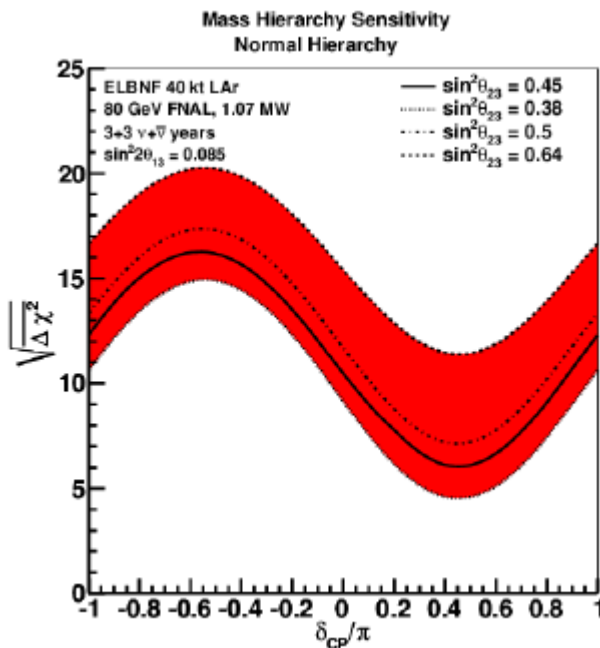
- Les modèles de leptogénèse constituent notre meilleur candidat pour expliquer l'asymétrie matière-antimatière
- Ils postulent l'existence de neutrino très lourds et de violation de la symétrie CP dans le secteur des neutrinos
- Les expériences actuelles (T2K, NOVA) apportent des premières contraintes.
- Les expérience futures (DUNE et HyperKamiokande) permettront de mesurer avec précision les paramètres de la matrice PMNS, dont la phase responsable de la violation de CP
- Les expériences souterraines avec un détecteur très massif permettront aussi d'étudier la durée de vie du proton et les neutrinos du cosmos

LBNF/DUNE sensitivity

- $>3 \sigma$ for CP sensitivity over a large fraction of the phase space
- $>5 \sigma$ for Mass Ordering



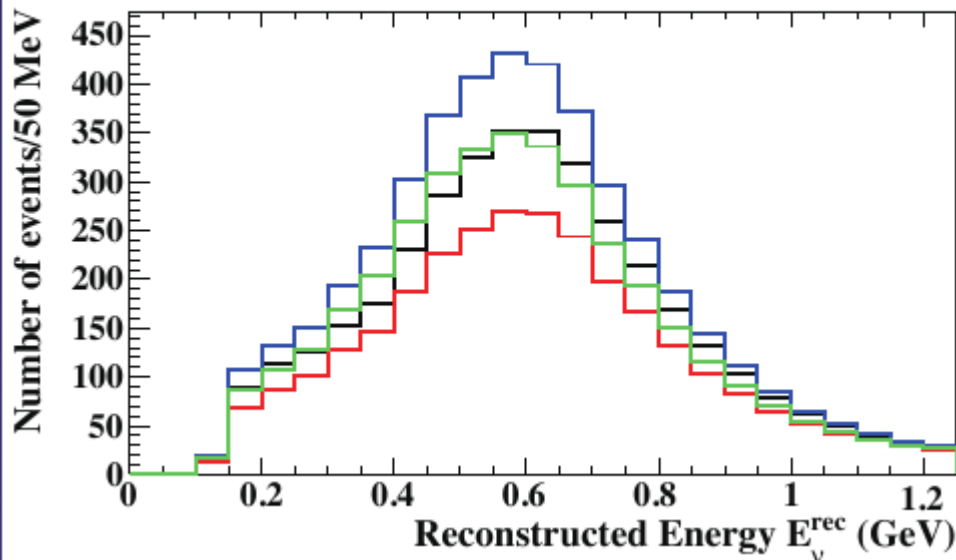
From ELBNF LOI (2015) DUNE sensitivities coming soon



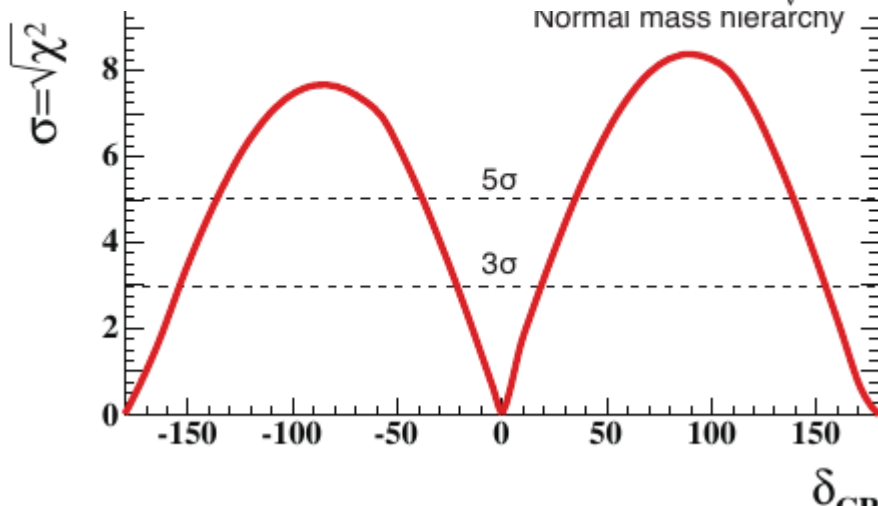
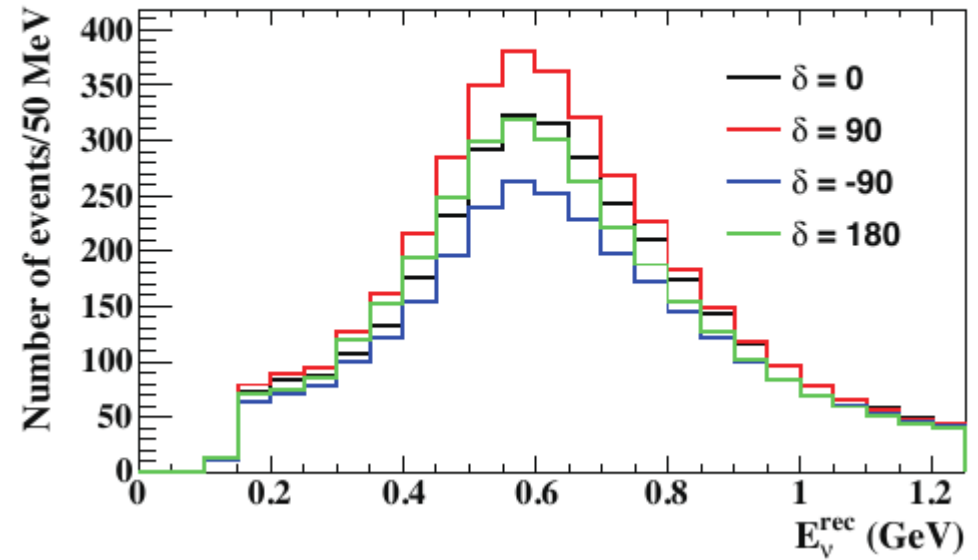
Hyper-Kamiokande CP sensitivity

Arxiv:1502.05199

Neutrino mode: Appearance

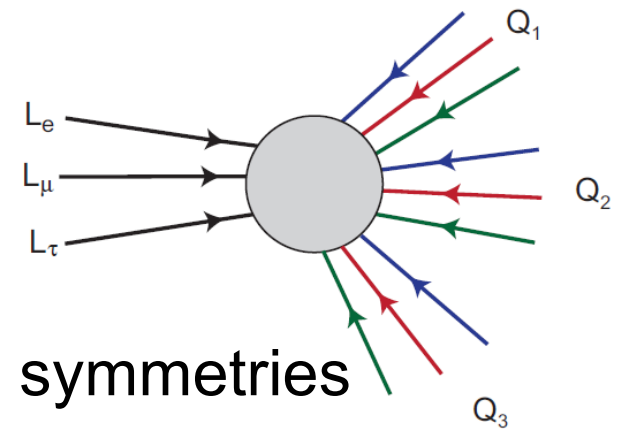


Antineutrino mode: Appearance



- $>3000 \nu_e$ appearance events (nu-mode) with ~ 700 bck
- Systematics extrapolated from T2K analysis (signal 3% nu mode)
- CPV $>3 \sigma$ for 76% of δ values

Sphalerons



- In the SM the L and B number are accidental symmetries
- At the quantum level they are violated by the triangular anomalies
- The divergence of the current is related to interactions with the gauge fields (W, B)
- This process is strongly suppressed today but was at the equilibrium for $E > E_{EW}$
- The process violates B+L but conserves B-L. It does not lead to the proton decay

FIG. 1.2: Sphaleron production process due to non-perturbative SM effects.



Figure 3.1: Evolution with time of the energy eigenstates of chiral fermions in a gauge field background with $FP \neq 0$.

es give B violation (and proton decay)

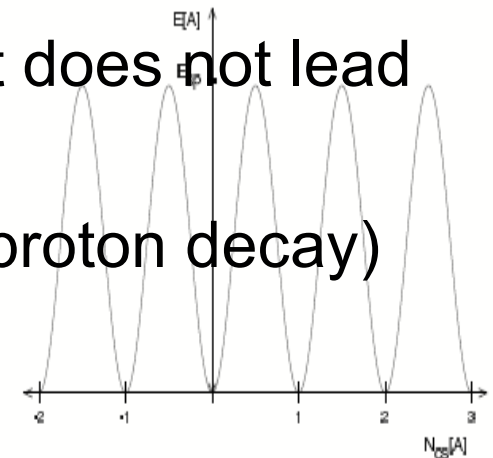
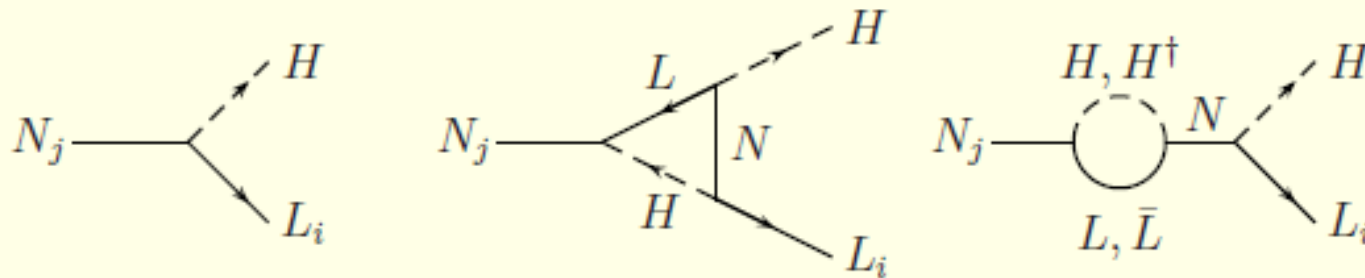


Fig. 1.3. The energy dependence of the gauge configurations A as a function of the Chern-Simons number, $N_{CS}[A]$. Sphalerons correspond to the saddle points, i.e. maxima of the potential.

Leptogénèse 2

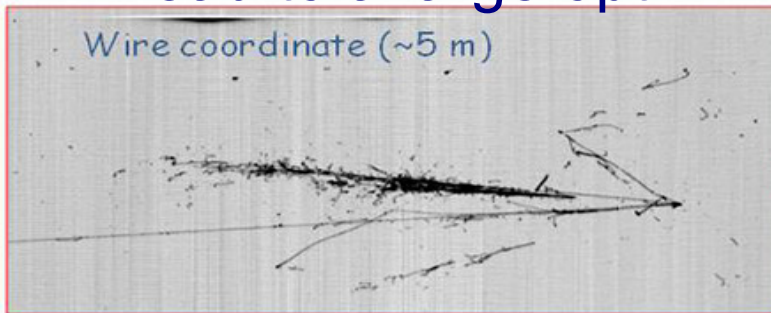
- La violation de CP vient de ces diagrammes et de leur interférence



- Les valeurs mesurées peuvent être obtenues si
- $m(N) > 10^{10}$ GeV, m
- A défaut de pouvoir mesurer directement les N et leurs propriétés, il est important de vérifier autant que possible ce scénario à nos énergies : masse des neutrinos, propriétés (Majorana ou Dirac), violation de CP

Why Liquid Argon TPC ?

- Technology pioneered by the ICARUS collaboration
- Fully active high granularity detector (voxel $\sim 3 \times 3 \times 0.4 \text{ mm}^3$): a modern bubble chamber
- PID (from range and dE/dx) and high resolution calorimetry
- Sensitive to ν_μ , ν_e and ν_τ
- Currently used by the MicroBoone short baseline exp.
- A full program with several prototypes and demonstrators will lead to a large optimized underground detector



Collection right view

