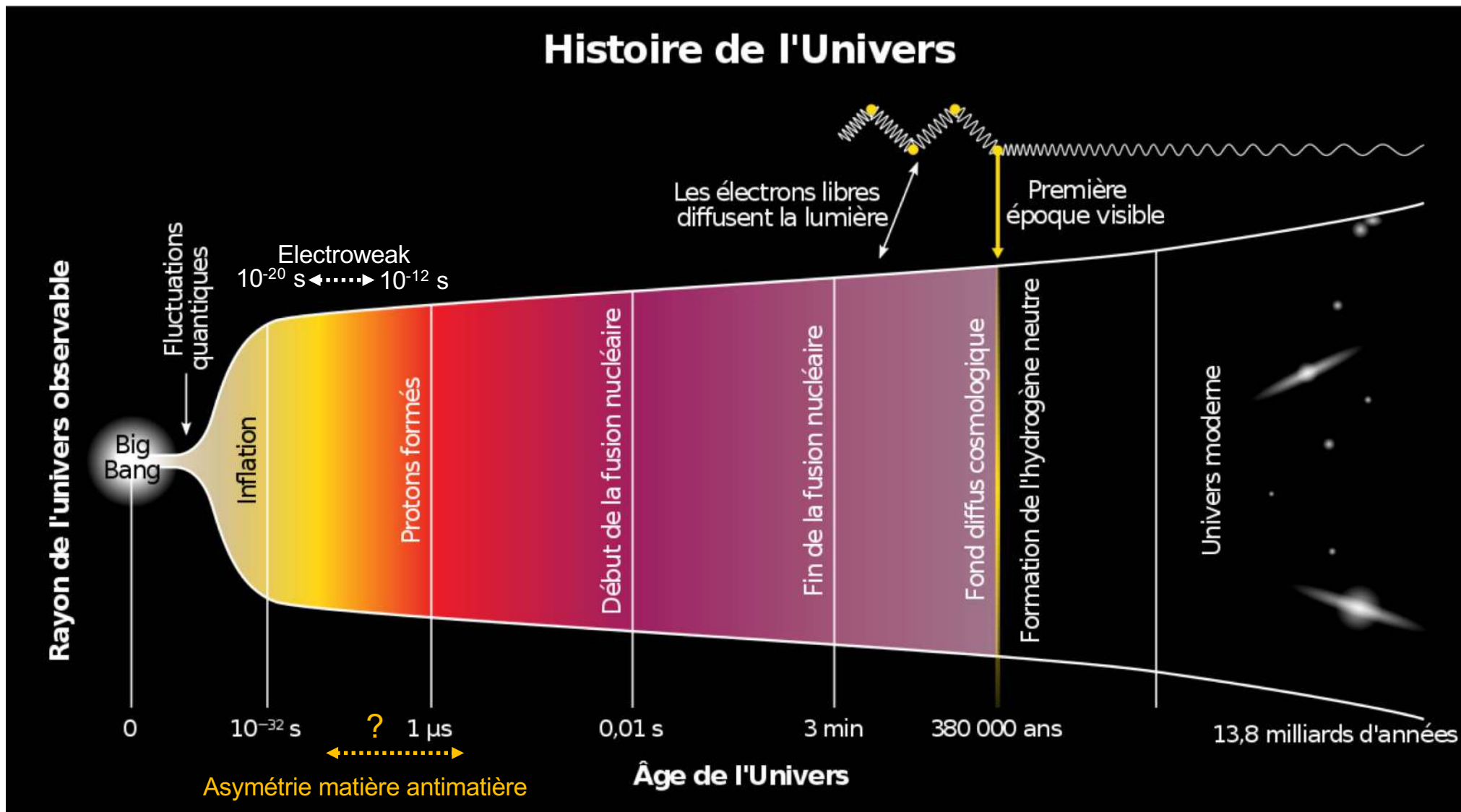
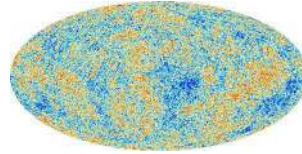




Asymétrie *matière-antimatière*



**Nucleosynthèse primordiale:**  
abondance des éléments légers → densité de baryons (protons, neutrons)  
+ fond diffus cosmologique



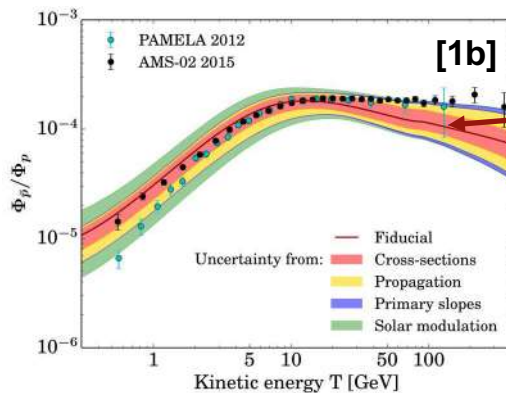
densité de baryons

$$\eta = \frac{n_b}{n_\gamma} = 6.1 \times 10^{-10}$$

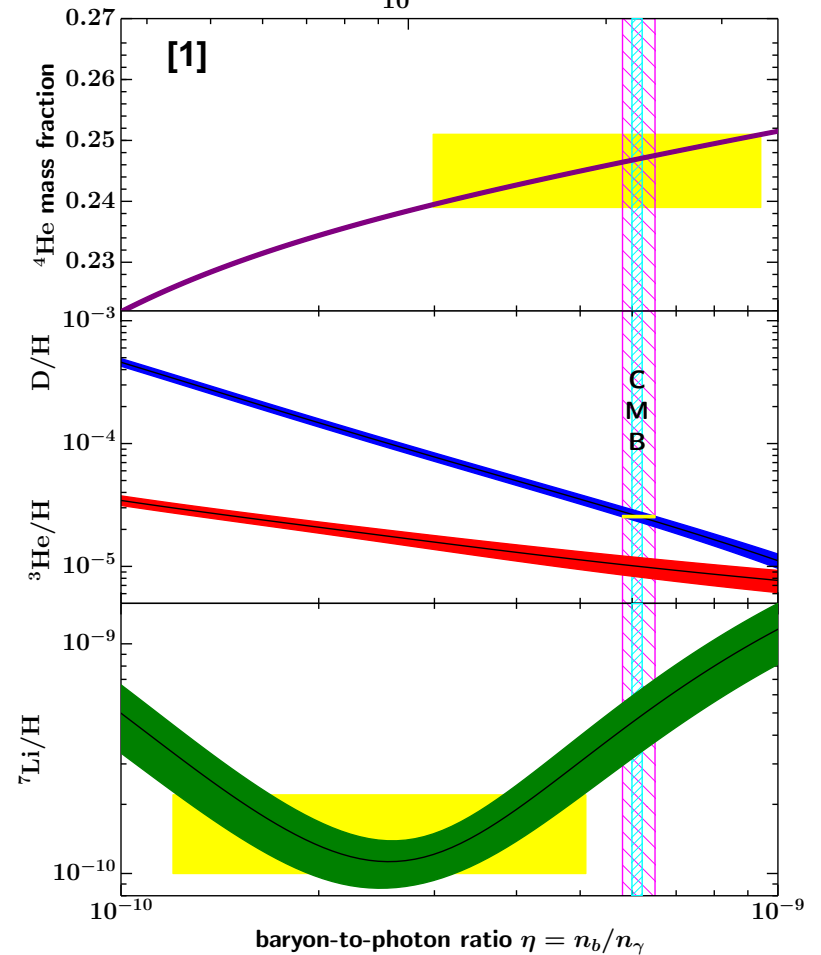
densité de photons

**Asymétrie baryonique:**

Pas de présence d'anti-noyaux (vent solaire, rayons cosmiques, pas d'annihilation nucleon-antinucleon, isotropic  $\gamma$ -ray bkg etc.)  $n_{\bar{b}} \ll n_b$



Flux antiprotons comparé aux prévisions des productions secondaires dues aux collisions dans le milieu interstellaire



Big Bang:  $B = 0$

Recette d'une bonne **baryogénèse**:  $B = 0 \xrightarrow{?} B \neq 0$



Andreï Sakharov [3]



1.  $\exists$  un mécanisme ne conservant pas le **nb baryonique**  
(sinon si  $B = 0$  à  $t=0$ ,  $B = 0 \forall t$ )
  - Mécanisme direct:  $\exists$  processus  $i \rightarrow f$  tq  $\Delta B(i \rightarrow f) \neq 0$
  - Mécanisme indirect (leptogénèse  $\Delta L \neq 0 \Rightarrow \Delta B \neq 0$ )
2. Symétries  $C$  et  $CP$  ne doivent pas être exactes  
(sinon taux de réaction avec particules = taux antiparticules)
3. Équilibre thermique doit être rompu pendant l'évolution de l'univers  
(sinon système stationnaire:  $i \leftrightarrow f$ )

# Violation du nombre baryonique désintégration du proton



1.  $\exists$  un mécanisme ne conservant pas le nb baryonique

Expérience  $\tau_p$  (1982-1990): Modane, tunnel du Frejus

Équipe : Physique : L. BOER, B. BOURANGE, Y. HINET, U. NGUYEN-KHOAC, P. SEBET, S. TISSIANDT.



## Calendrier

[4]

- 1980-1982 : Proposition de l'expérience  
Prototype et tests en faisceau
- 1982-1983 : Réalisation de l'électronique de lecture  
Écriture et tests des logiciels d'acquisition
- 1983-1984 : Installation du détecteur à Modane
- 1984-1988 : Prise de données et analyse.

Alors que les éléments du détecteur ont été construits à Saclay (plans de chambres à plasma) et à Orsay (plans de déclenchement formés de tubes Geiger nous avons réalisé le dispositif "acquisition des informations" (au-delà du pré-traitement du signal étudié par Wuppertal et Aachen). L'électronique de lecture des tubes à plasma, est pilotée par un microprocesseur du type CAB pouvant "lire" 10<sup>6</sup> canaux en 20 ms. Ce CAB assure en outre la lecture des informations provenant des plans de déclenchement, tandis qu'un autre CAB surveille la distribution des impulsions de haute tension pour les chambres à plasma. Cet ensemble est géré à partir d'un ordinateur PDP 11-44, de 384 Kbits de mémoire et disposant de 3 disques (10M octets) et d'un dérouleur de bande magnétique. Afin de minimiser la place en mémoire et le temps d'acquisition et de surveillance, le logiciel a été écrit entièrement en assembleur ("Macro 11"). Les événements sont pour la plupart reconnus et étiquetés en temps réel par le programme, ce qui permet aux physiciens de sélectionner rapidement les événements les plus intéressants.

Calorimètre « détecteur de traces » : 912 t de feuilles de fer équipées de couches de détection (compteurs proportionnels, flash, streamers et chambres à dérive)

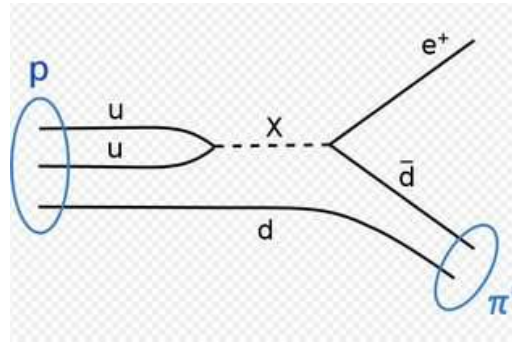
# Violation du nombre baryonique désintégration du proton

## Expérience $\tau_p$ (1982-1990)

### Théories de Grande Unification

$$(u, d, e^-, \nu_e) \leftrightarrow X$$

$$m_X \approx 10^{15} \text{ GeV}$$



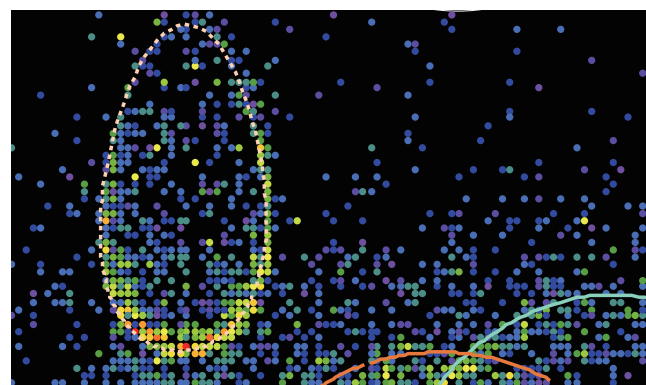
$$p \rightarrow e^+ + \pi^0 \quad p \rightarrow \mu^+ + \pi^0$$

$$p \rightarrow e^+ + \eta^0$$

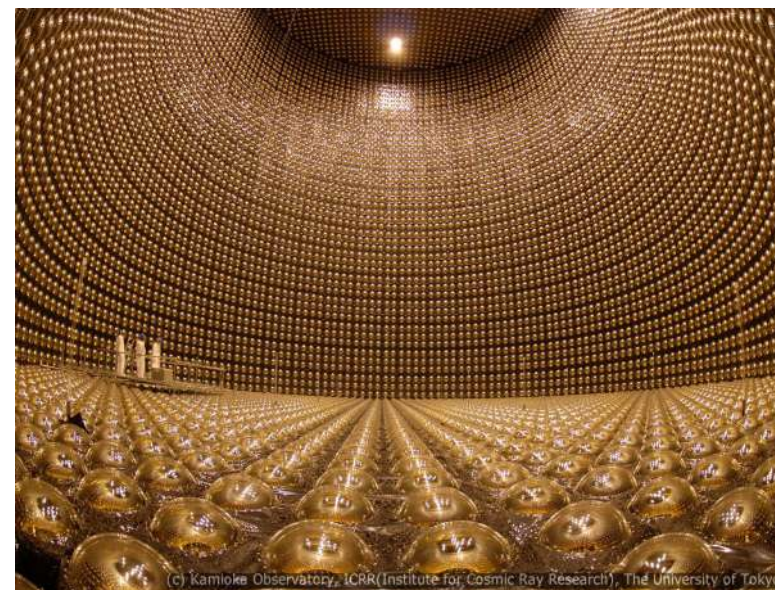
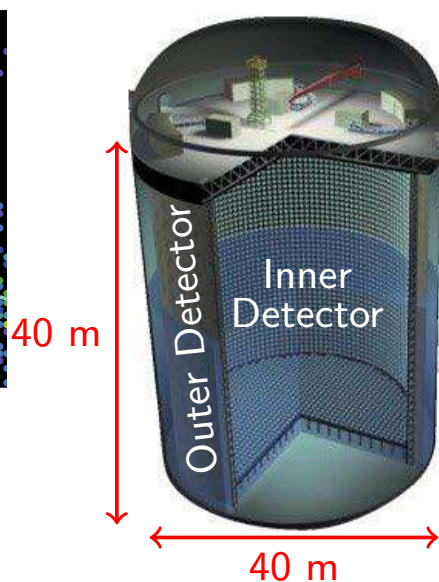
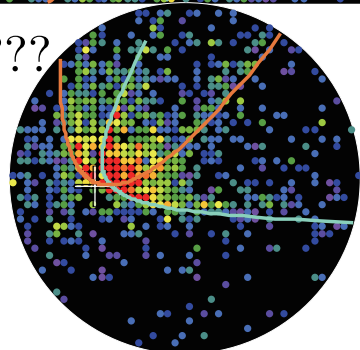
➔  $\tau_p / \text{Br} \gtrsim 0.4 \times 10^{32} \text{ yr @90\% CL [4,5]}$

## Expérience Super-Kamiokande

A. Coffani,<sup>10</sup> O. Drapier,<sup>10</sup> S. El Hedri,<sup>10</sup> A. Giampaolo,<sup>10</sup> M. Gonin,<sup>10</sup> Th. A. Mueller,<sup>10</sup> P. Paganini,<sup>10</sup> B. Quilain,<sup>10</sup>



$p \rightarrow \mu^+ \pi^0$  ???



(c) Kamioka Observatory, ICRR (Institute for Cosmic Ray Research), The University of Tokyo

[6]

FIG. 5. (color online) Event display of the second candidate event, zoomed to the region of the rings. The blue solid line and the tan dashed line show the reconstructed  $e$ -like and  $\mu$ -like ring, respectively. The dark orange solid line shows an additional  $e$ -like ring that was identified in the initial ring counting process, but it is rejected by the ring correction because it is too close in angle to the other  $e$ -like ring (blue line). As a result, this event is judged as a two-ring event.

### Meilleure limite mondiale [6]

PHYSICAL REVIEW D **102**, 112011 (2020)

Search for proton decay via  $p \rightarrow e^+ \pi^0$  and  $p \rightarrow \mu^+ \pi^0$  with an enlarged fiducial volume in Super-Kamiokande I-IV

$$\tau_p / \text{Br}(p \rightarrow e^+ \pi^0) \geq 2.4 \times 10^{34} \text{ yr @90\% CL}$$

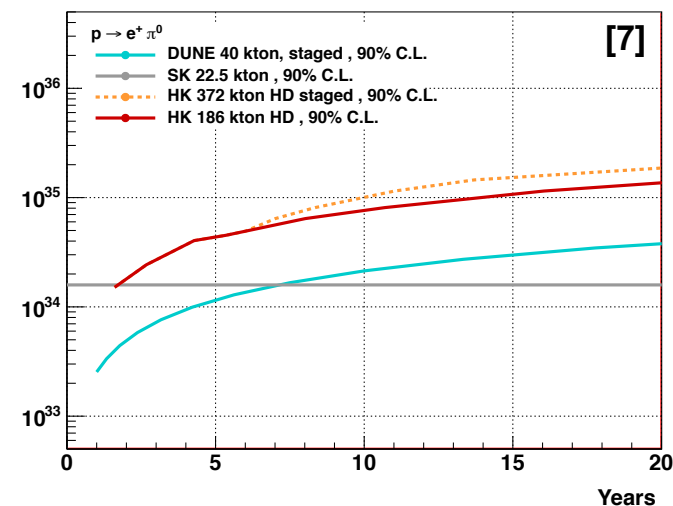
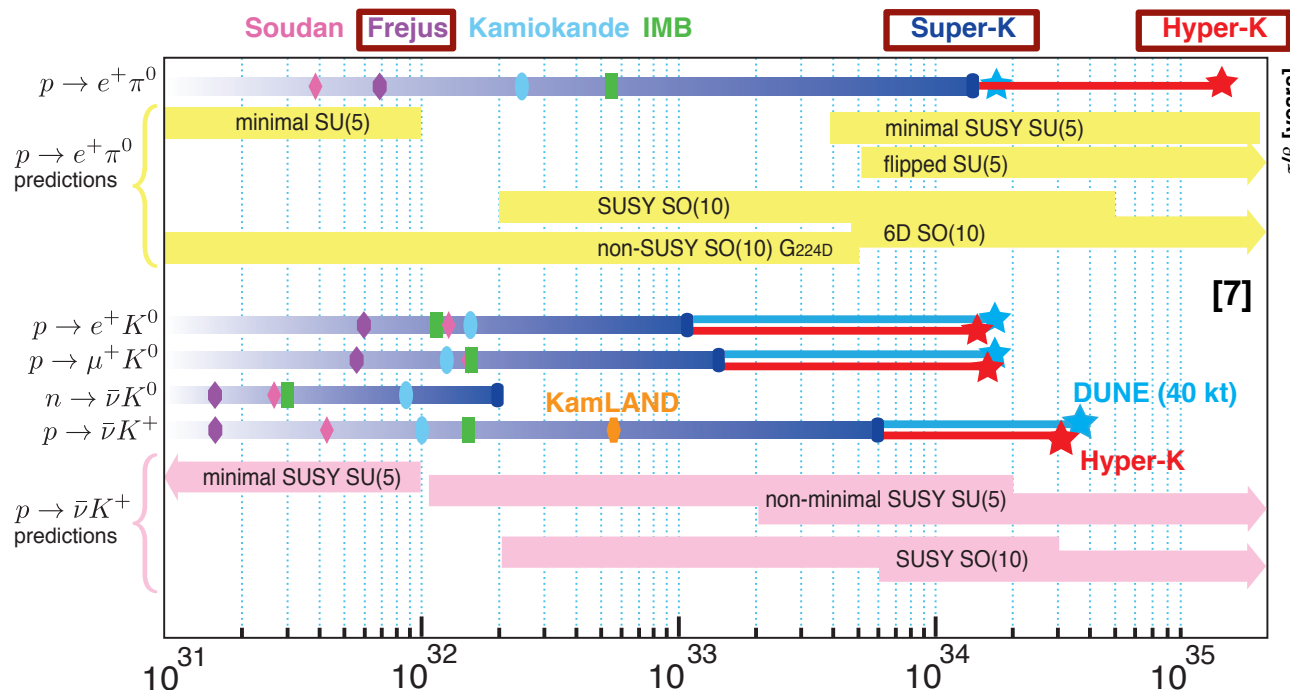
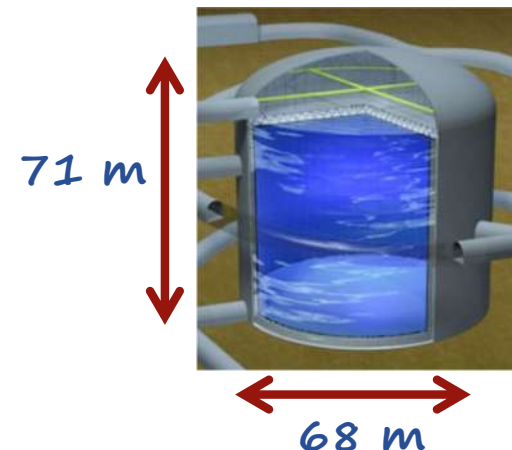
$$\tau_p / \text{Br}(p \rightarrow \mu^+ \pi^0) \geq 1.6 \times 10^{34} \text{ yr @90\% CL}$$

# Violation du nombre baryonique désintégration du proton

## Le futur: Hyper-Kamiokande (2027-)

M. Buizza Avanzini,<sup>10</sup> O. Drapier,<sup>10</sup> M. Gonin,<sup>10</sup> Th. A. Mueller,<sup>10</sup> P. Paganini,<sup>10</sup> B. Quilain,<sup>10</sup>

	Super-K	Hyper-K (1st tank)
Site	Mozumi	Tochibora
Number of ID PMTs	11,129	40,000
Photo-coverage	40%	40% ( <b>×2 sensitivity</b> )
Mass / Fiducial Mass	50 kton / 22.5 kton	260 kton / 187 kton



$$\tau_p / \text{Br} \gtrsim 10^{35} \text{ yr @90\% CL}$$

Hyper-K, Dune 10 ans de données  $\tau/B$  (years)

1 ordre de grandeur vs SK, DUNE





## 2. Symétries C et CP ne doivent pas être exactes

### Les transformations discrètes

- Conjugaison de charge **C**:
  - transforme particule en son antiparticule
  - toutes les charges internes  $Q \rightarrow -Q$
- Parité **P**:
  - inverse les coordonnées spatiales  $\vec{r} \rightarrow -\vec{r}$
- Renversement du temps, **T**  $t \rightarrow -t$

**CPT** supposée exacte  
(hypothèses très  
générales: localité,  
causalité, invariance de  
Lorentz) mais ni **C**, **P**,  
**CP** et **T** ne s'avèrent  
exactes

Pourquoi faut-il  $\not{C}$  et  $\not{CP}$ ?

Supposons  $i \rightarrow f$  ne conserve pas nb baryonique  $\Delta B(i \rightarrow f) \neq 0$

Si **C** symétrie exacte,  $\mathcal{A}(i \rightarrow f) = \mathcal{A}(\bar{i} \rightarrow \bar{f})$  et donc  $\Delta B(i \rightarrow f) + \Delta B(\bar{i} \rightarrow \bar{f}) = 0$

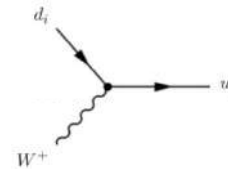
Si **CP** symétrie exacte,  $\mathcal{A}[i(\vec{p}_i, \lambda_i) \rightarrow f(\vec{p}_f, \lambda_f)] = \mathcal{A}[\bar{i}(-\vec{p}_i, -\lambda_i) \rightarrow \bar{f}(-\vec{p}_f, -\lambda_f)]$

$$\Gamma(i \rightarrow f) \propto \int d^3\vec{p} \sum_{\lambda_i, \lambda_f} |\mathcal{A}(i \rightarrow f)|^2 = \Gamma(\bar{i} \rightarrow \bar{f}) \Rightarrow \Delta B(i \rightarrow f) + \Delta B(\bar{i} \rightarrow \bar{f}) = 0$$

Un peu de théorie... 🤔

Quarks de type up couplés aux quarks de type down par échange de boson W

Up-type  $\rightarrow \begin{pmatrix} u \\ c \\ t \end{pmatrix}$   
 down-type  $\rightarrow \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$   $W^\pm$



Mélanges des quarks de type up avec les down

Lagrangien: 
$$\mathcal{L} = \sum_{i,j} -\frac{g_w}{\sqrt{2}} V_{ij} \bar{u}_L^i \gamma^\mu d_L^j W_\mu^+ - \frac{g_w}{\sqrt{2}} V_{ij}^* \bar{d}_L^j \gamma^\mu u_L^i W_\mu^-$$

Transformation CP des champs 
$$\mathcal{L} \rightarrow \mathcal{L}^{CP} = \sum_{i,j} -\frac{g_w}{\sqrt{2}} V_{ij} \bar{d}_L^j \gamma^\mu u_L^i W_\mu^- - \frac{g_w}{\sqrt{2}} V_{ij}^* \bar{u}_L^i \gamma^\mu d_L^j W_\mu^+$$



Lagrangien invariant sous CP si et seulement si  $V_{ij}$  réel  
 Violation de CP impose  $V_{ij} \neq V_{ij}^*$

CP requière également:  $m_u \neq m_c \neq m_t, m_d \neq m_s \neq m_b$

Rem:  $V_{ij} \neq V_{ij}^*$ , conséquence de la diagonalisation du Lagrangien de Yukawa resp. masse des fermions (c.f. talk Roberto)

$$\mathcal{L}_{yuk} = \sum_{ij} -y_{ij} \bar{\psi}_L^i \phi \psi_R^j - y_{ij}^* \bar{\psi}_R^j \phi^\dagger \psi_L^i$$

## Un peu de théorie... suite et fin

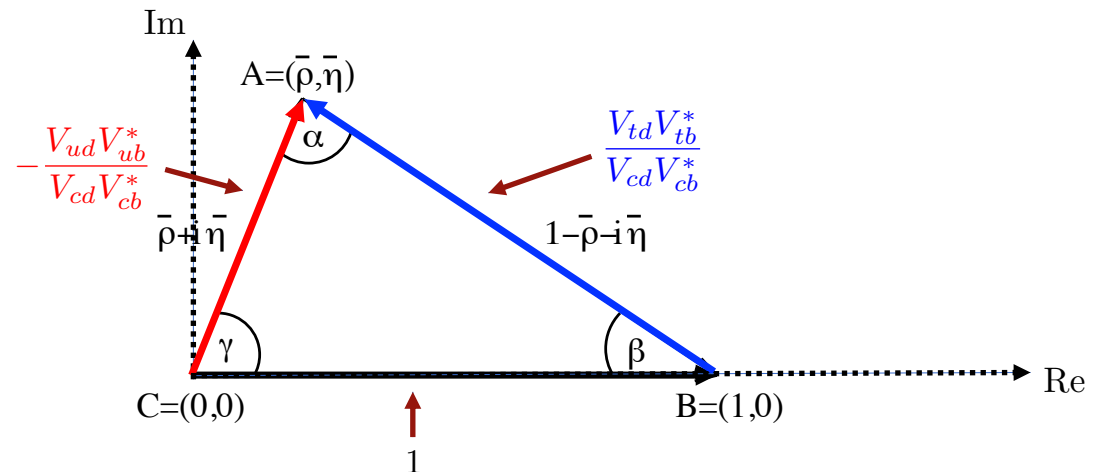
Challenge depuis 30 ans:  
mesurer  $(V_{ij}) = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$  **Cabbibo-Kobayashi-Maskawa**  
**CKM**

3 familles (SM)  $\rightarrow$  matrice 3x3 **CKM** doit être unitaire:  $(VV^\dagger)_{ij} = (V^\dagger V)_{ij} = \delta_{ij}$

$\rightarrow$  6 relations du type:  $V_{ud}V_{ub}^* + V_{cd}V_{cb}^* + V_{td}V_{tb}^* = 0$

Représentées par un triangle dans le plan complexe

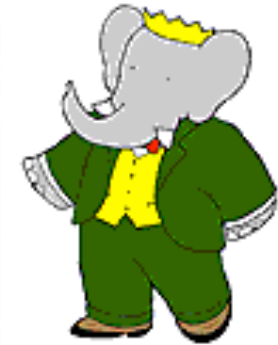
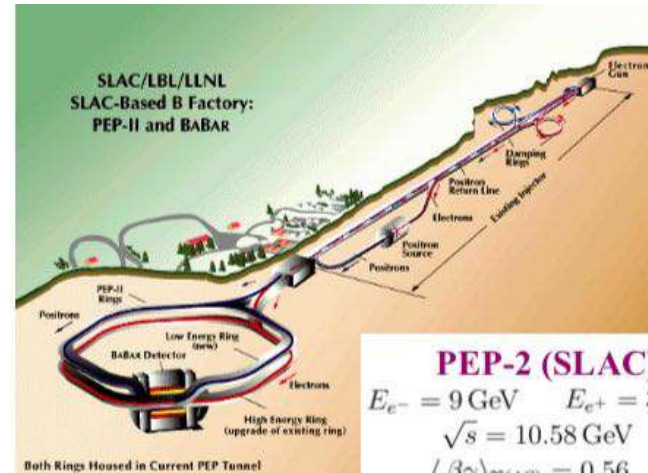
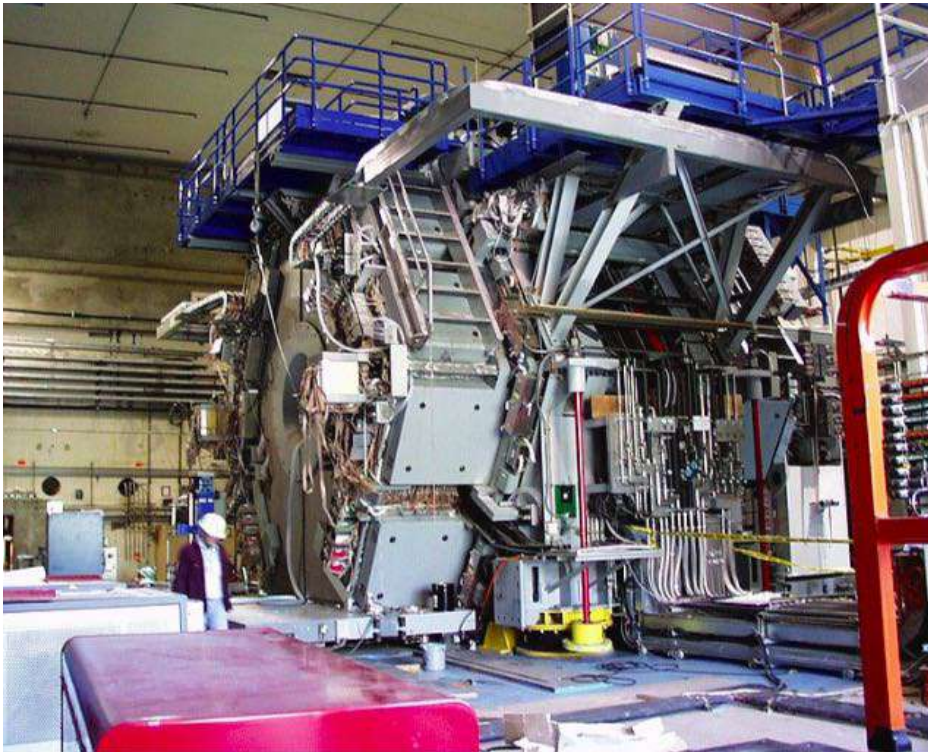
$$1 + \frac{V_{td}V_{tb}^*}{V_{cd}V_{cb}^*} = -\frac{V_{ud}V_{ub}^*}{V_{cd}V_{cb}^*}$$



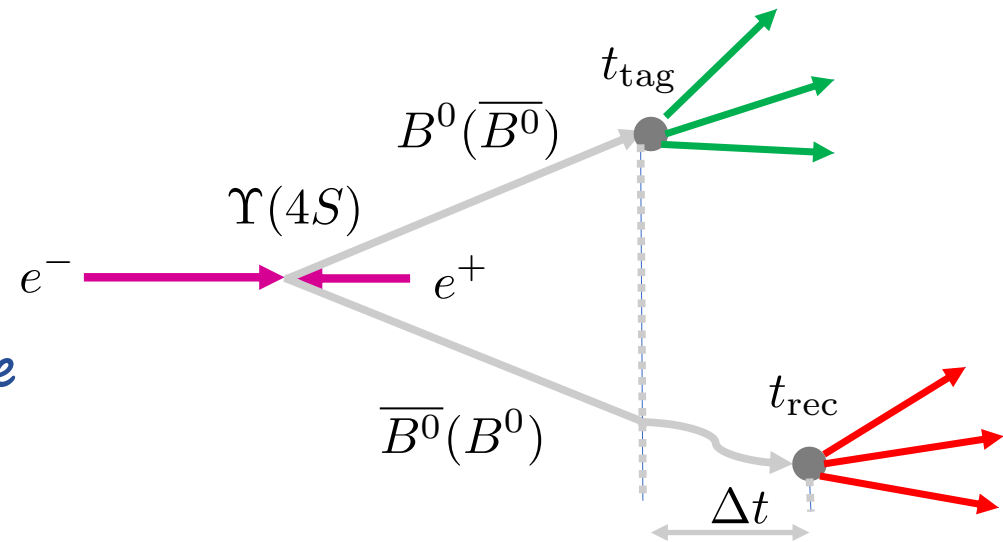
**Violation de CP si surface du triangle non nulle**  
**Physique au delà du SM si le triangle n'est pas un triangle!**

## Expérience BaBar, SLAC (1999-2008)

L. Behr,<sup>22</sup> D. Bernard,<sup>22</sup> G. R. Bonneaud,<sup>22</sup>  
 F. Brochard,<sup>22</sup> J. Cohen-Tanugi,<sup>22</sup> S. Ferrag,<sup>22</sup> E. Roussot,<sup>22</sup> S. T'Jampens,<sup>22</sup> Ch. Thiebaux,<sup>22</sup> G. Vasileiadis,<sup>22</sup>  
 M. Verderi,<sup>22</sup> P. Grenier, S. Schrenk,

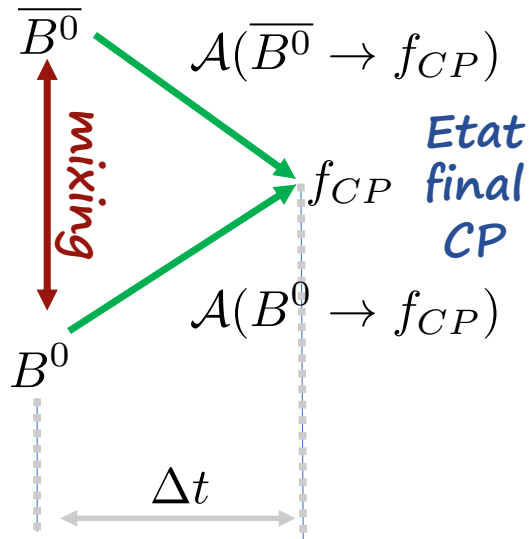


TM & © Neivana

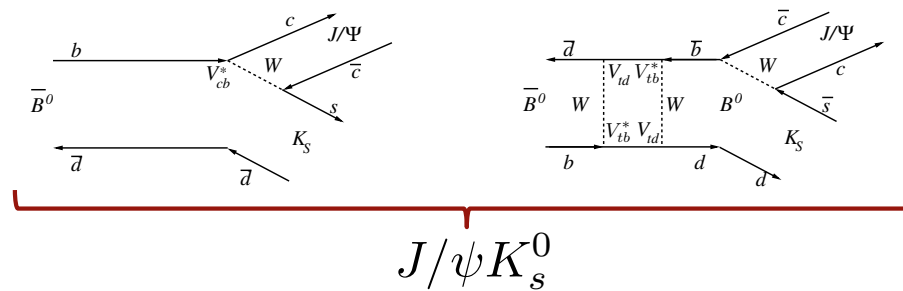


LLR: Construction de l'électronique de  
 contrôle du DIRC + logiciel

Principe:



$$A_{CP}(\Delta t) = \frac{\Gamma(B^0 \rightarrow f_{CP}) - \Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f_{CP})}{\Gamma(B^0 \rightarrow f_{CP}) + \Gamma(\bar{B}^0 \rightarrow f_{CP})} = f(\sin 2\beta, \Delta t)$$

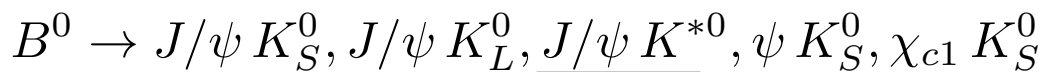
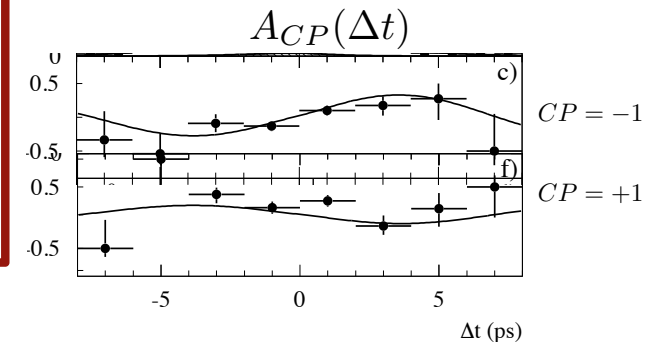


**2001: BABAR établi la violation de CP dans les B**

Phys. Rev. Lett. **87**, 091801 – Published 14 August 2001

Observation of CP violation in the  $B^0$  meson system [8]

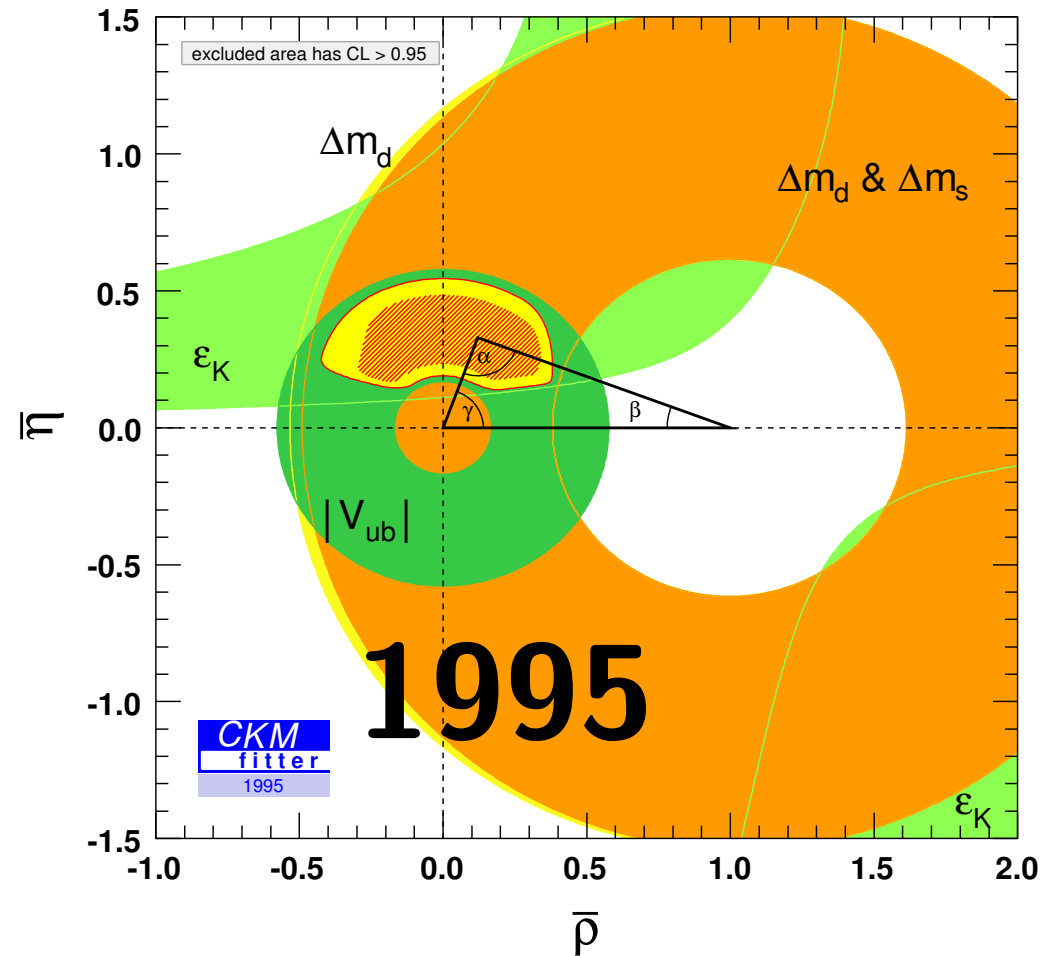
$$\sin 2\beta = 0.59 \pm 0.14 \text{ (stat)} \pm 0.05 \text{ (syst)}$$



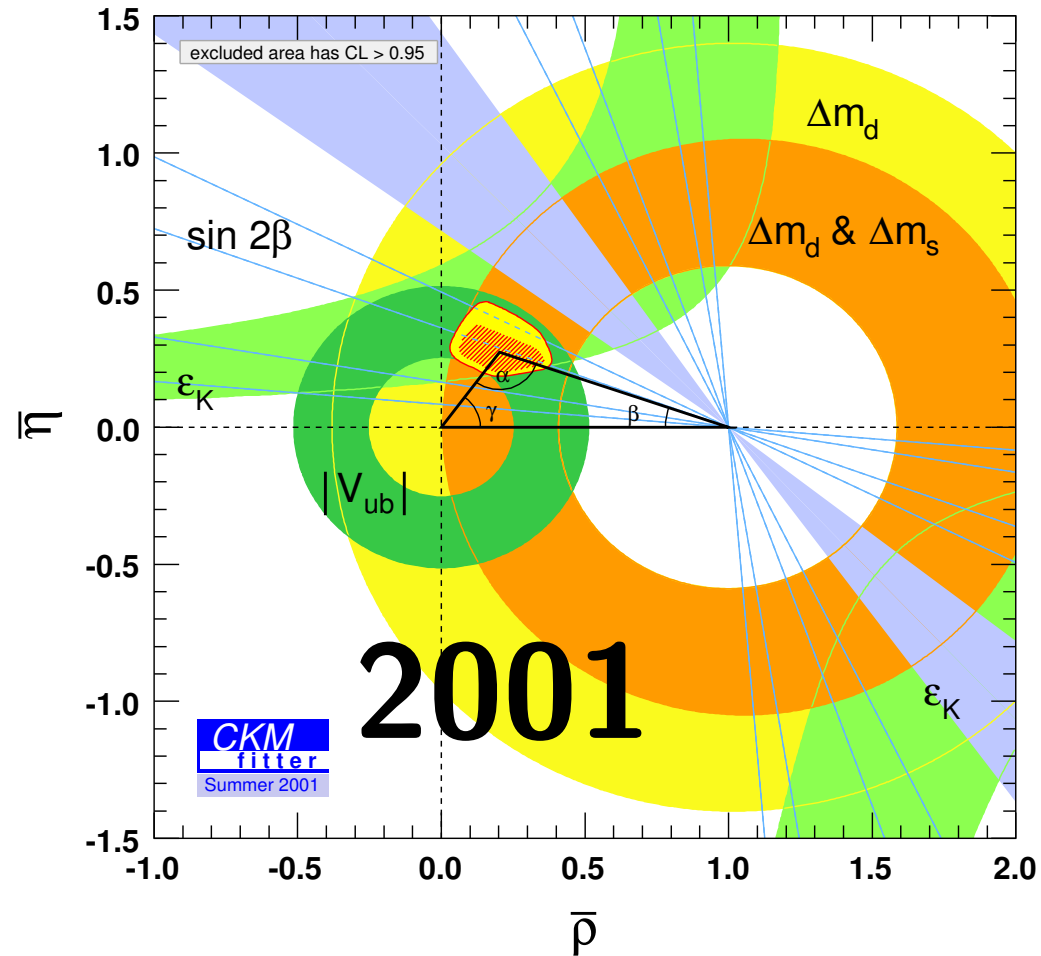
$$CP = -1 \quad 1 \quad -1 \quad -1$$

Contribution du LLR: mélange CP: 16%  $CP = -1$ , 84%  $CP = +1$  [9]

## Evolution du triangle d'unitarité [12]



## Evolution du triangle d'unitarité [12]

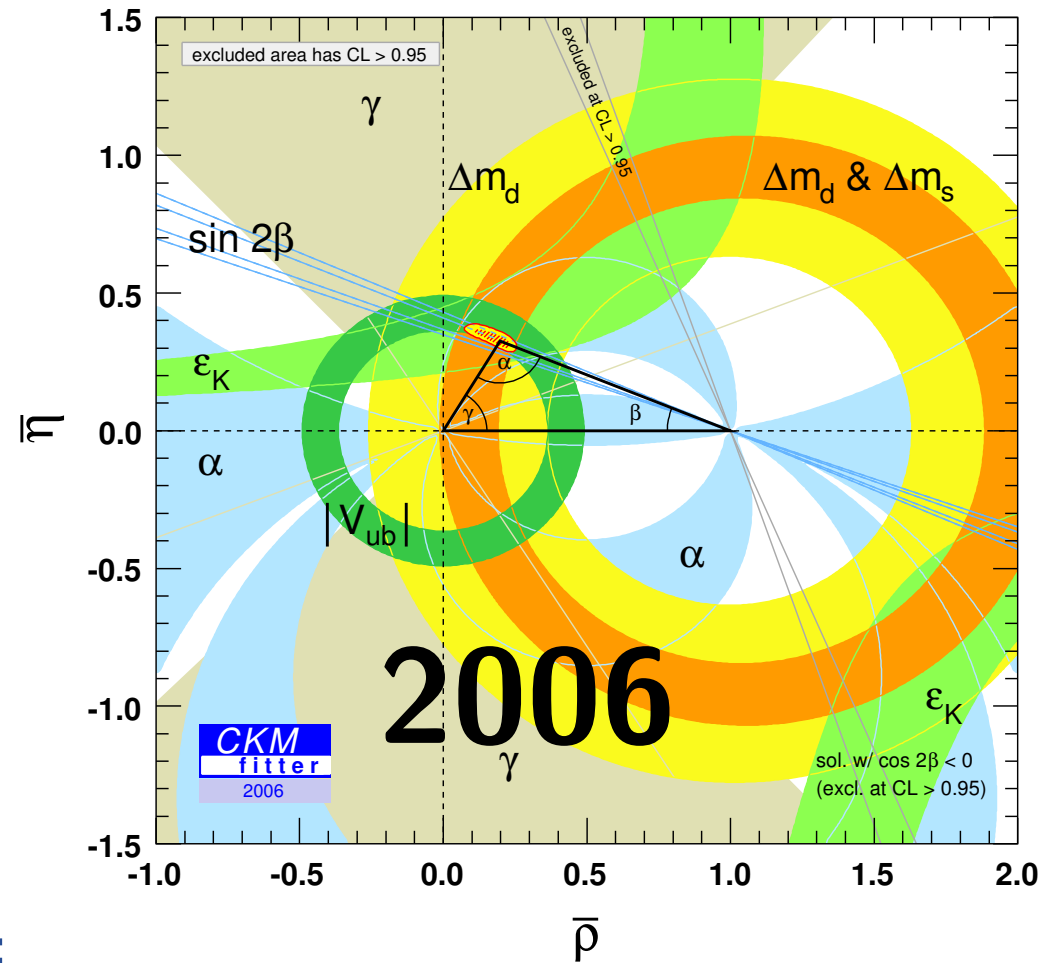


BABAR  
2001

BABAR mesure [8]:

$$\sin 2\beta = 0.59 \pm 0.14 \text{ (stat)} \pm 0.05 \text{ (syst)}$$

## Evolution du triangle d'unitarité [12]



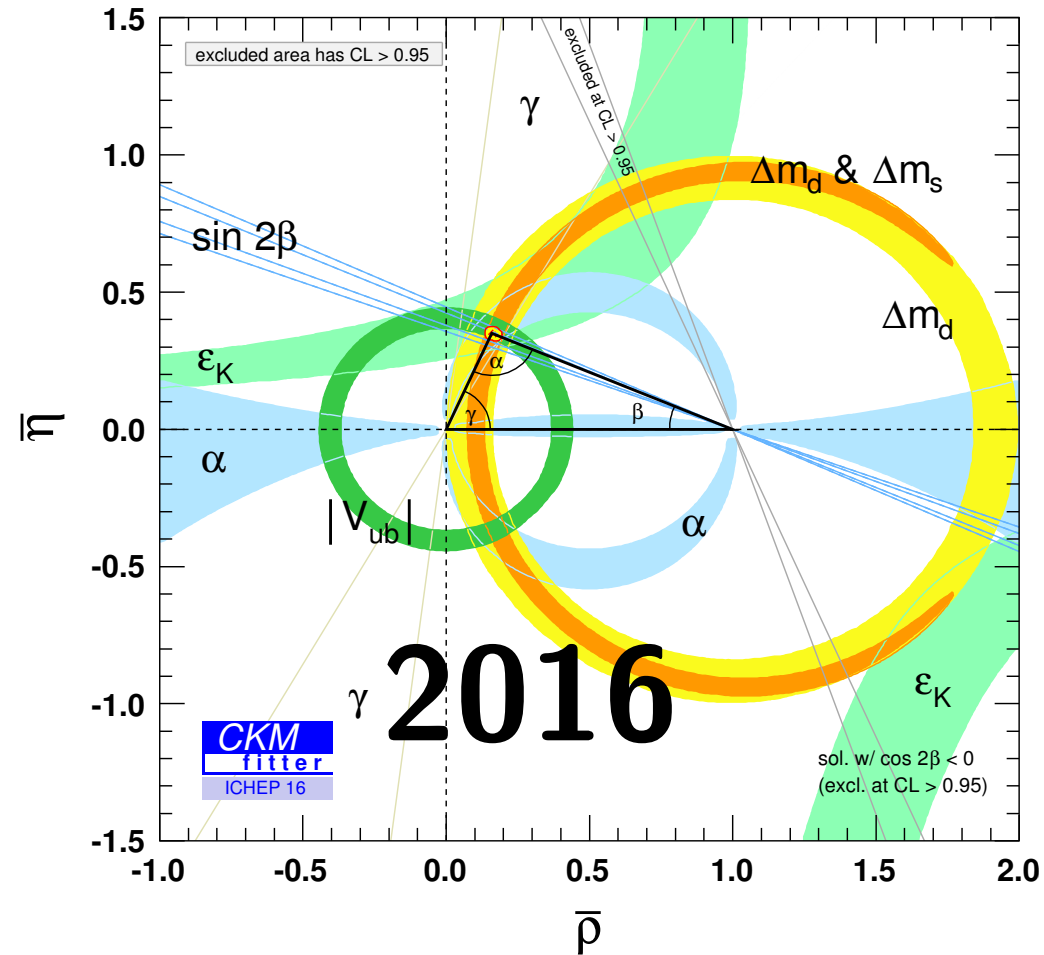
**BABAR  
2006**

**BABAR mesure [10]:**

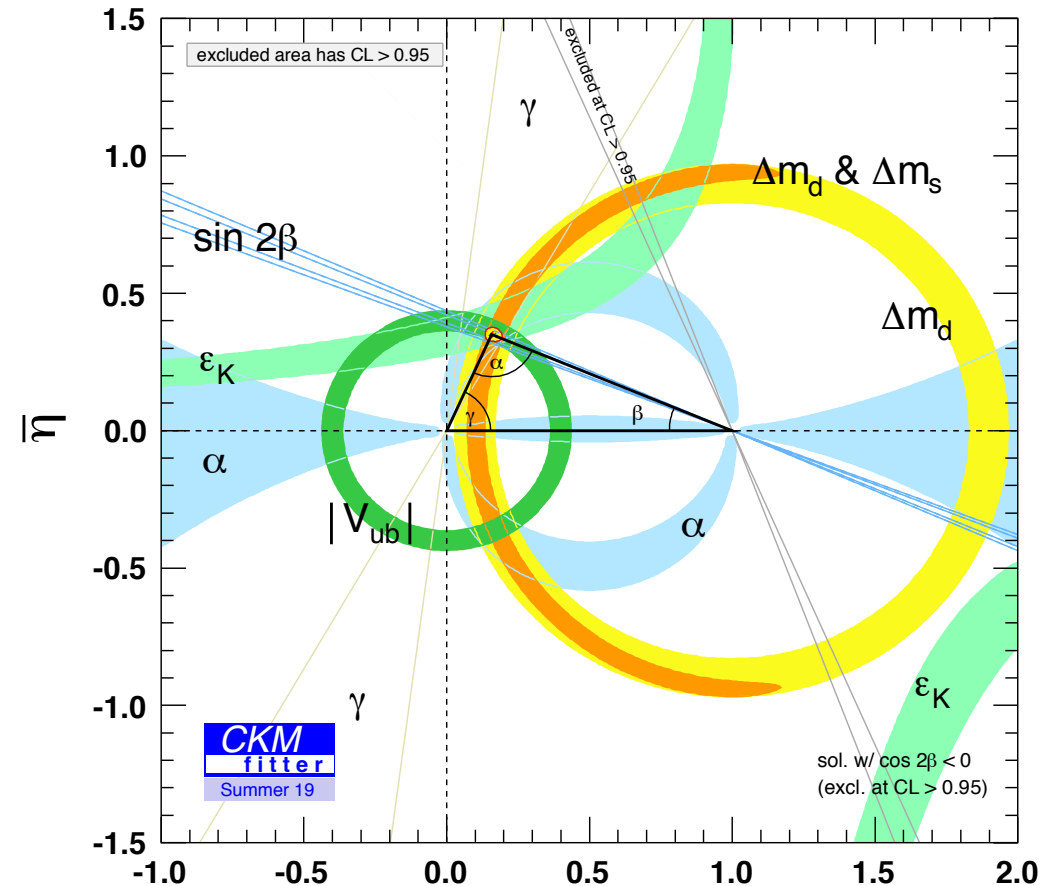
$$\cos 2\beta = 2.72^{+0.50}_{-0.79} \text{ (stat)} \pm 0.27 \text{ (syst)} \quad \cos 2\beta > 0 \text{ at } 86\% \text{ C.L.}$$



## Evolution du triangle d'unitarité [12]



## Evolution du triangle d'unitarité [12]



Conclusion: tous les phénomènes de la violation de CP chez les quarks sont compatibles avec CKM: des ordres de grandeur trop faibles pour expliquer asymétrie matière-antimatière [11]  $n_b/n_\gamma \simeq 10^{-20} \ll \eta^{\text{exp}} = 6.1 \times 10^{-10}$

## Etats propres de masse vs états propres d'interaction

Up-type  $\rightarrow$   $\begin{pmatrix} u \\ d \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} c \\ s \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} t \\ b \end{pmatrix}$

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \underbrace{\begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}}_{\text{CKM}} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$$

interaction masse

**CKM**  
Cabbibo-Kobayashi-Maskawa

$\begin{pmatrix} \nu_1 \\ e^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_2 \\ \mu^- \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} \nu_3 \\ \tau^- \end{pmatrix}$   $\left[ \begin{array}{l} \leftarrow \\ \leftarrow \end{array} \right] W^\pm$

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

interaction masse

**PMNS**  
Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata

## Violation de CP

$$V_{ij} \neq V_{ij}^* \quad \begin{array}{l} i = u, c, t \\ j = d, s, b \end{array}$$

$$U_{\alpha i} \neq U_{\alpha i}^* \quad \begin{array}{l} \alpha = e, \mu, \tau \\ i = 1, 2, 3 \end{array}$$

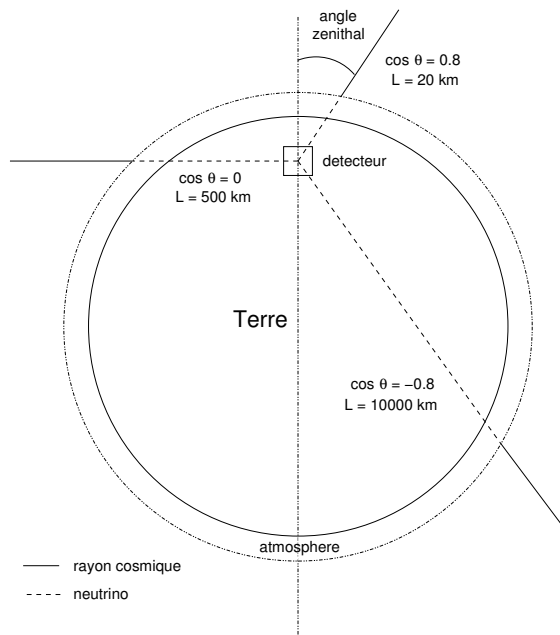
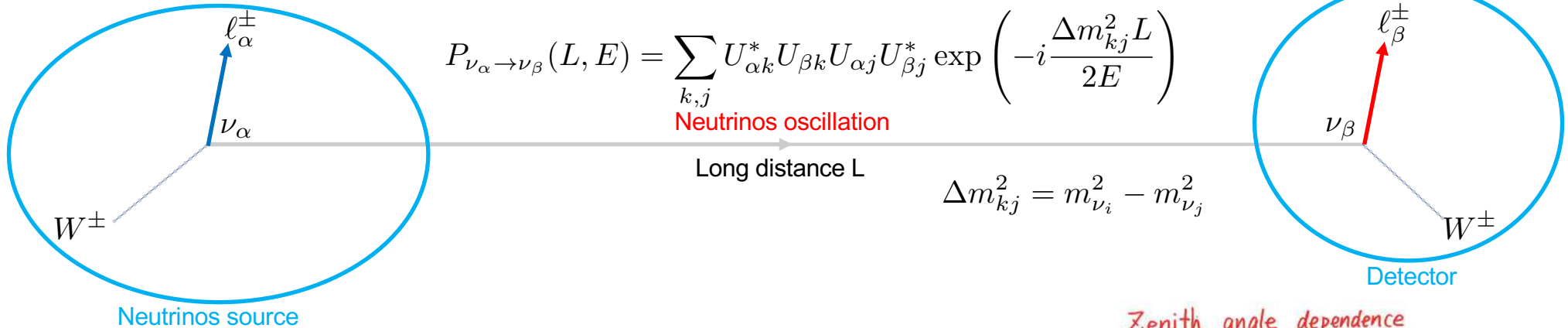
$$m_u \neq m_c \neq m_t, \quad m_d \neq m_s \neq m_b$$

$$m_{\nu_1} \neq m_{\nu_2} \neq m_{\nu_3}, \quad m_e \neq m_\mu \neq m_\tau$$

$$V_{\text{CKM}} \quad U_{\text{PMNS}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} e^{i\delta_{CP}} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$\theta_{12}, \theta_{12}, \theta_{23} \neq 0, \quad \frac{\pi}{2} \quad \delta_{CP} \neq 0, \pi$$

## Les neutrinos se mélangent (oscillation)



**Super-Kamiokande 1998:**  
Oscillation avec les neutrinos atmosphériques

$$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$$

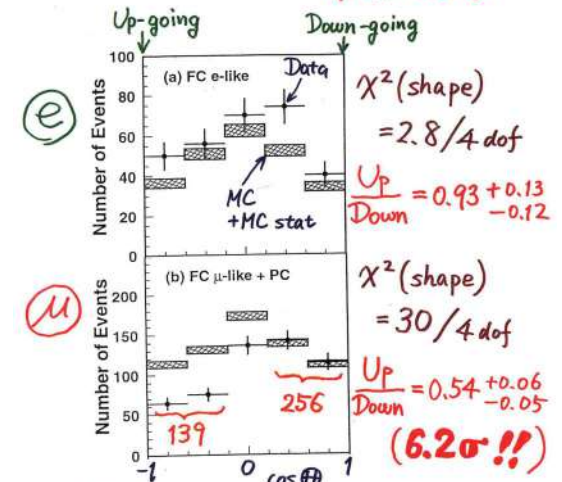


**SNO 2001:**  
Oscillation avec les neutrinos solaires

$$\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \nu_\tau$$

$$m_{\nu_1} \neq m_{\nu_2} \neq m_{\nu_3}$$

Zenith angle dependence  
(Multi-GeV)



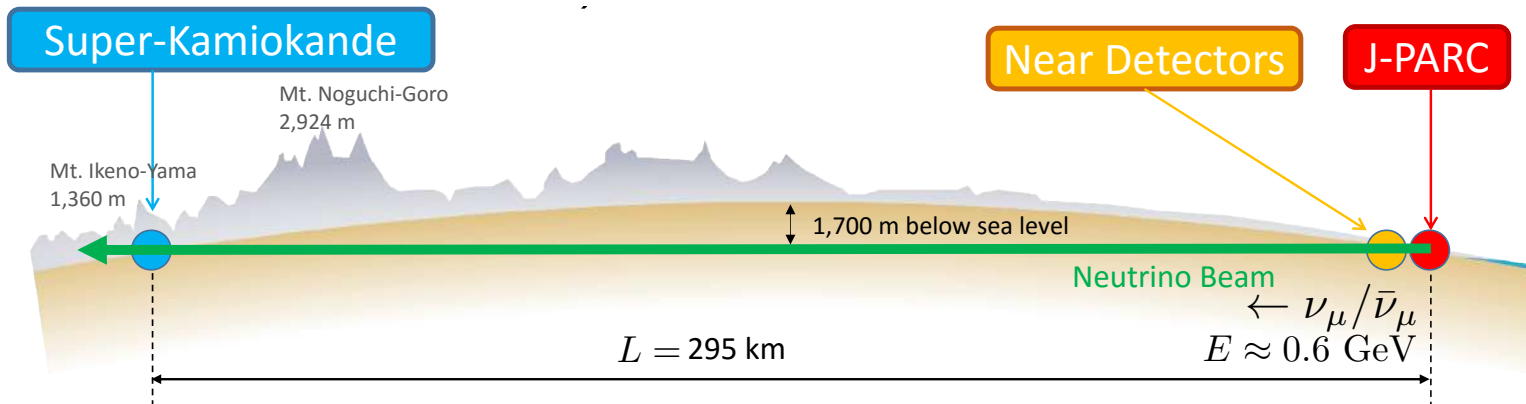
\* Up/Down syst. error for μ-like

Prediction (flux calculation .....  $\leq 1\%$ ) 1.8%  
1km rock above Sk ..... 1.5%

Data (Energy calib. for  $\uparrow \downarrow$  ..... 0.7%) 2.1%  
Non  $\nu$  Background .....  $< 2\%$

## L'expérience T2K

M. Buizza Avanzini<sup>30</sup>, O. Drapier<sup>30</sup>, M. Gonin<sup>30</sup>, Th. A. Mueller<sup>30</sup>, B. Quilain<sup>30</sup>,



LLR: multiples contributions aux détecteurs proches INGRID, module proton, WAGASCHI, et jouvence de ND280 (en cours)

Comment observer une violation de CP avec T2K?  $(\nu_\alpha)_L \xrightarrow{CP} (\bar{\nu}_\alpha)_R$

$$A_{\alpha,\beta}^{CP} = P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) - P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta}(L, E)$$

$$= 4 \sum_{k>j} \text{Im} [U_{\alpha k}^* U_{\beta k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^*] \sin \left( \frac{\Delta m_{kj}^2 L}{2E} \right)$$

T2K/SK cherche à mesurer  $A_{\mu,e}^{CP} \neq 0$  et donc  $\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23}, \delta_{CP}$

Disparition  $P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu}, P_{\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu} \Rightarrow \theta_{23}, \Delta m_{32}^2$

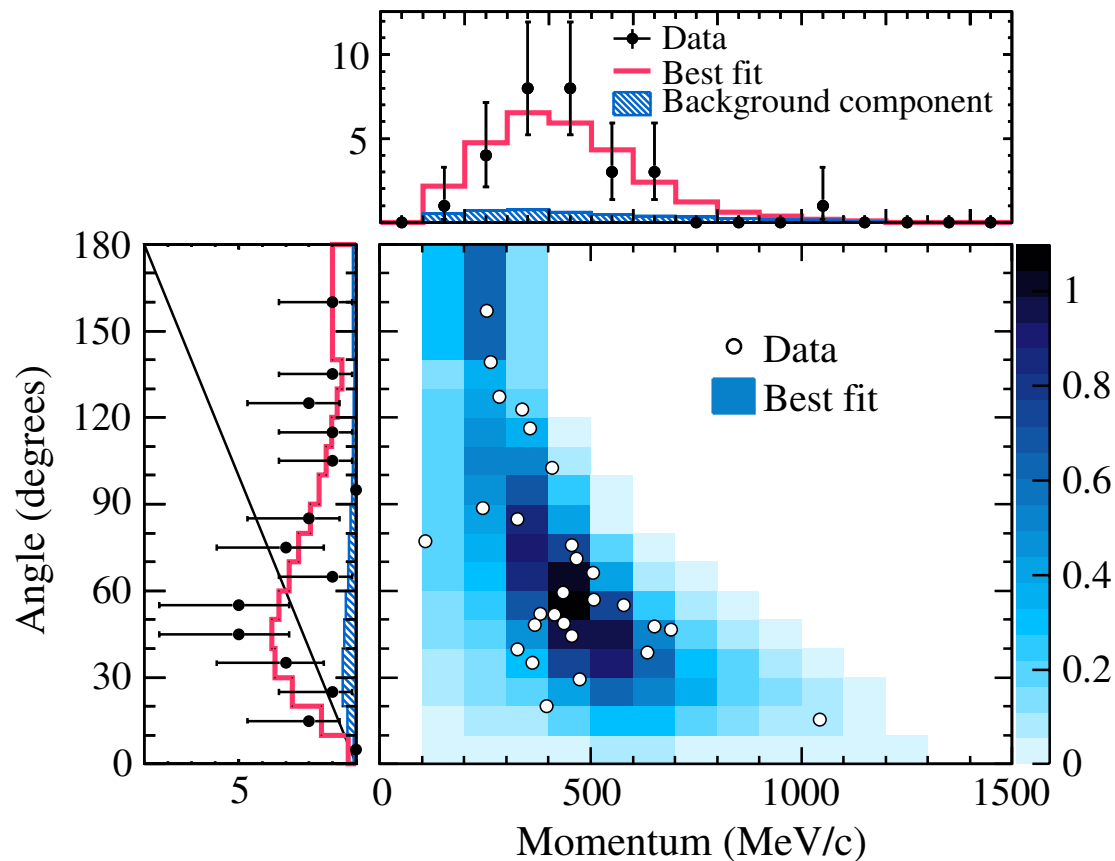
Apparition  $P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e}, P_{\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e} \Rightarrow \theta_{13}, \delta_{CP}$

T2K  
2014

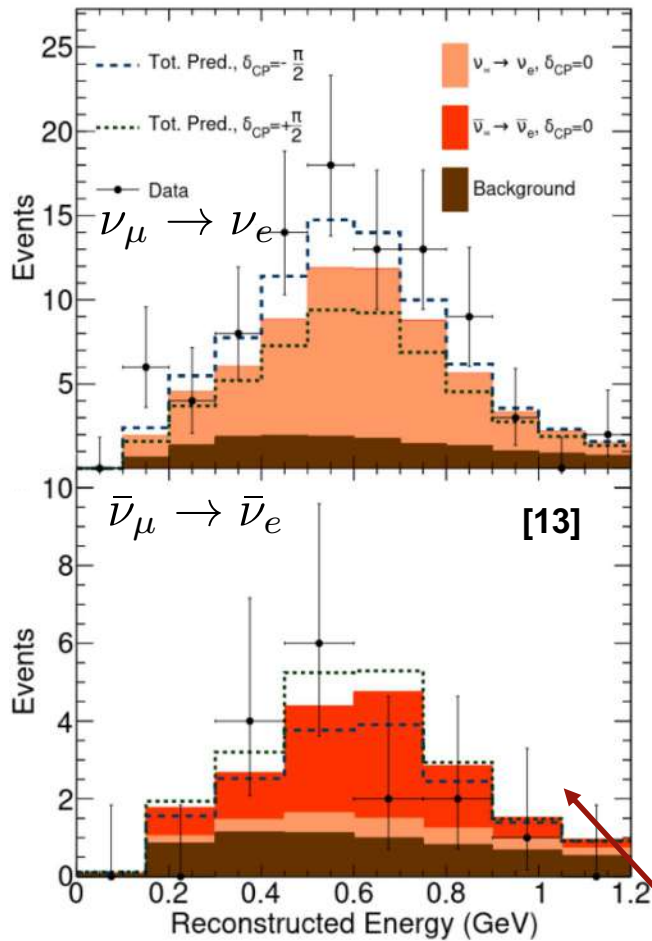
Première observation > à  $5\sigma$  de l'apparition  $\nu_\mu \rightarrow \nu_e$  [16]

Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam

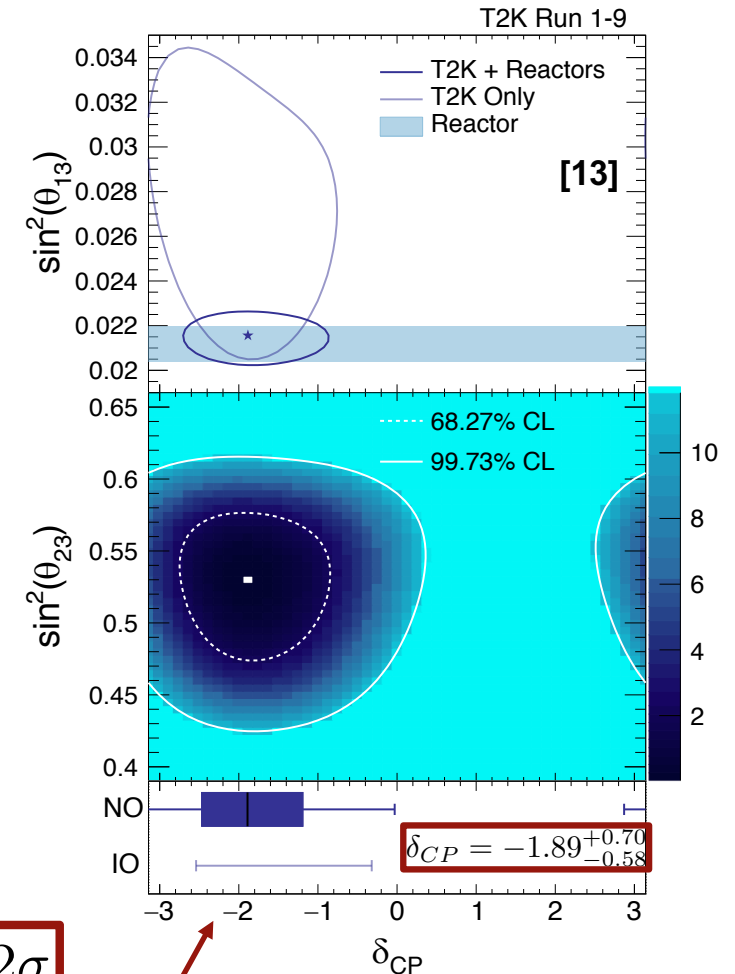
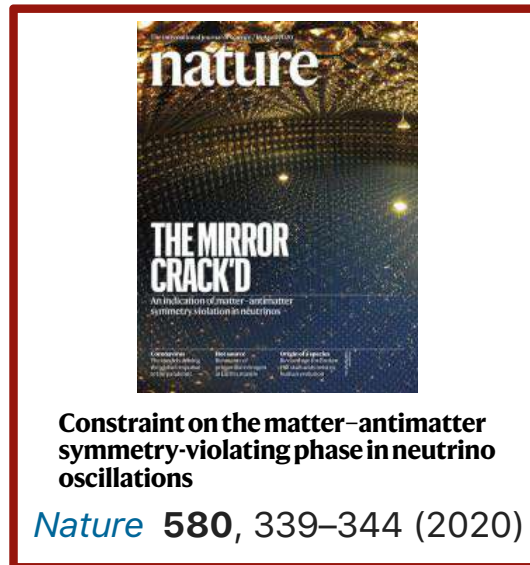
PRL 112, 061802 (2014)



28  $\nu_e$  observés, bruit de fond attendu  $4.92 \pm 0.55 \Rightarrow 7.3\sigma$



T2K  
2020



1ère apparition des  $\bar{\nu}_e > 2\sigma$

Conservation de CP  $\delta = 0, \pi$  exclue à 95% C.L.

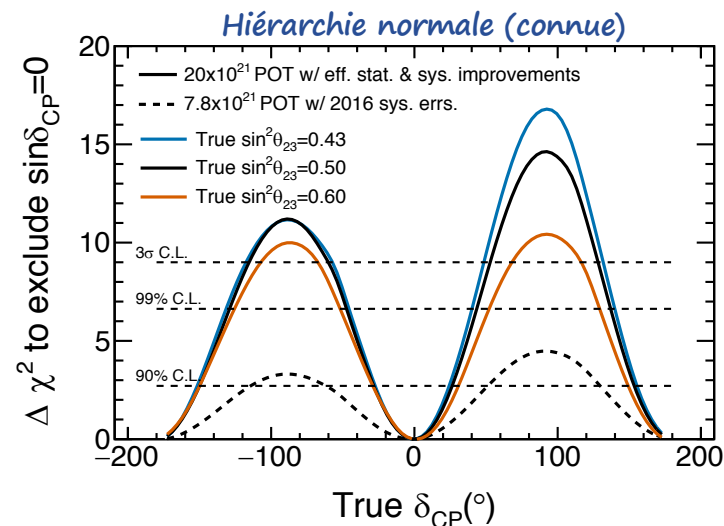
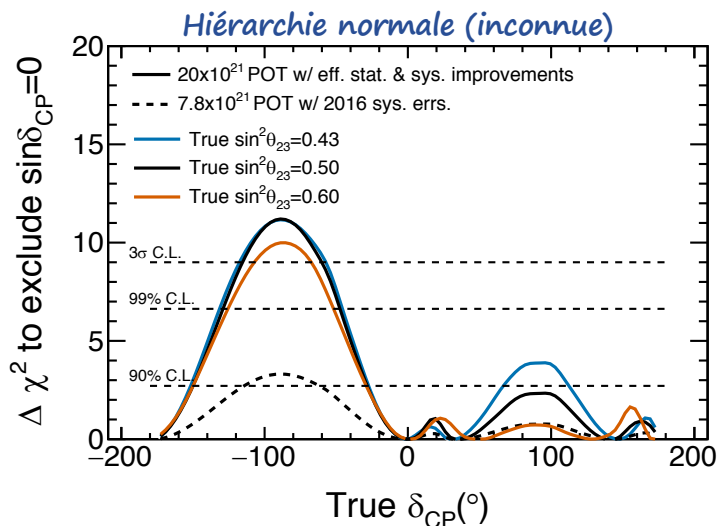
$$P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e} = a - J_{CP} \times b$$

$$P_{\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e} = a + J_{CP} \times b$$

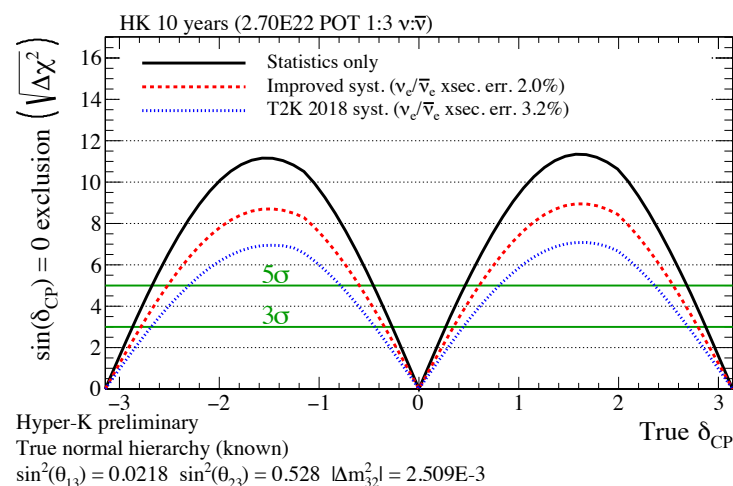
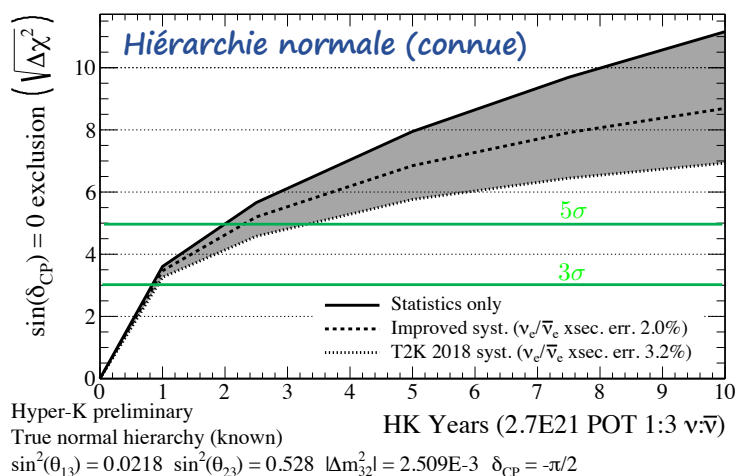
$$J_{CP} = \cos \theta_{12} \sin \theta_{12} \cos \theta_{23} \sin \theta_{23} \cos^2 \theta_{13} \sin \delta_{CP} = (P_{\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e} - P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e})/b$$

## Le futur: T2K-2 (2023-2027) et Hyper-Kamiokande (2027-)

T2K-2



HK

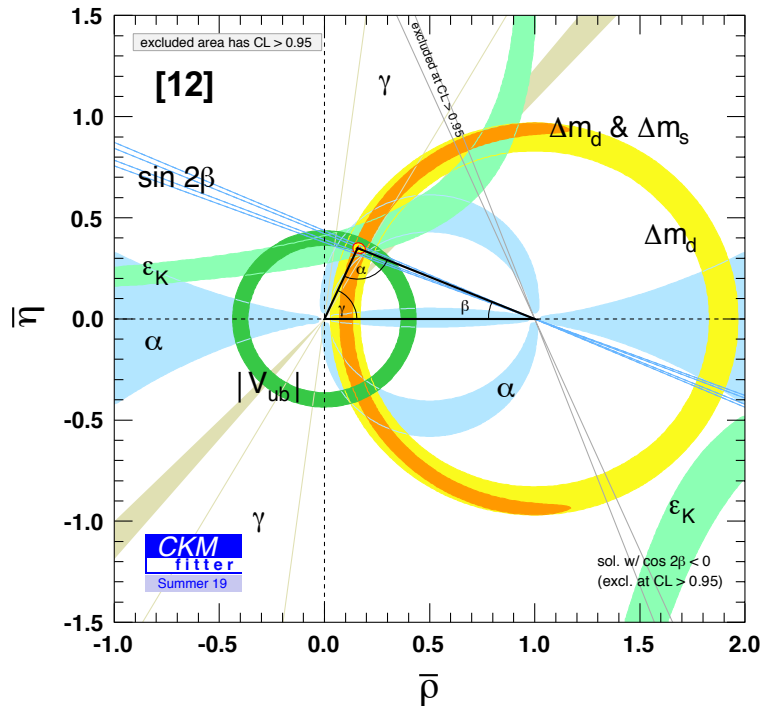


Si  $\delta_{CP} = -\pi/2$ , découverte après 2 à 4 ans

60% des valeurs couverts à 5σ



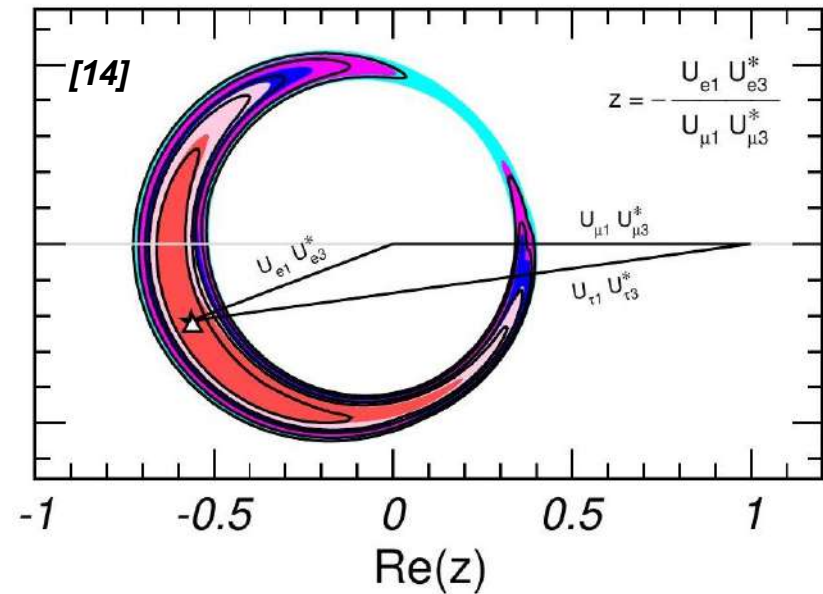
## Quarks



## Leptons

NuFIT 5.0 (2020)

Im(z)



$$J_{CP} = J_{CP}^{\max} \sin \delta_{CP} = \cos \theta_{12} \sin \theta_{12} \cos \theta_{23} \sin \theta_{23} \cos^2 \theta_{13} \sin \delta_{CP}$$

[15]

$$J_{CP}^{\max} = 3.22 \times 10^{-5}$$

[15]

$$\delta = 1.196_{-0.043}^{+0.045}$$

$$J_{CP} = (3.00_{-0.09}^{+0.15}) \times 10^{-5}$$

[14]

$$J_{CP}^{\max} = 0.0332 \pm 0.0008$$

[13]

$$\delta_{CP} = -1.89_{-0.58}^{+0.70}$$

$$J_{CP} \simeq -0.03$$

$$CP_{\text{quarks}} \sim 10^{-3} CP_{\text{leptons}}$$

- **Violation de CP dans secteur des quarks beaucoup trop faible pour expliquer l'asymétrie matière-antimatière**  $\eta = \frac{n_b}{n_\gamma} \sim 10^{-20}$   
 $\eta^{\text{exp}} = 6.1 \times 10^{-10}$
- **Violation de CP dans le secteur des leptons**  $CP_{\text{leptons}} \sim 10^3 CP_{\text{quarks}}$  (si phase CP maximale)  $\Rightarrow$  probablement **trop faible** pour expliquer  $\eta^{\text{exp}} = 6.1 \times 10^{-10}$
- Scénario type **leptogénèse** (introduction de neutrino(s) droit(s) lourd(s), neutrinos de Majorana) permettrait d'engendrer  $B$  à partir de  $L$  + termes supplémentaires **CP** + explication faible masse neutrinos (seesaw)
- Secteur des **neutrinos** encore **très mal connu**: unitarité de la matrice de mélange? Confirmation de violation CP quasi maximale? Existence de neutrinos droits?  $\Rightarrow$  Expérience **Hyper-Kamiokande** idéalement positionnée pour répondre à ces questions dans la prochaine décennie.

- [1] PDG 2020, Rev. Big Bang nucleosynthesis
- [1b] G. Giesen et al., JCAP09 (2015) 023
- [2] Steigman G., Annu. Rev. Astro. Astrophys. (1976), 14, 339-372
- [3] Sakharov, A. (1967), JETP Lett. 5-24
- [4] Rapports d'activités LLR, 1982, 1985, 1988.
- [5] Frejus coll., Zeitschrift fur Physics C 50, 385–394 (1991)
- [6] The Super-Kamiokande collaboration, Phys. Rev. D102, 072002 (2020) and Phys. Rev. D96, 012003 (2017)
- [7] Hyper-Kamiokande design report, arXiv:1805:04163 (2018)
- [8] BABAR Coll., Phys.Rev.Lett.87:091801, (2001)
- [9] BABAR Coll., Phys.Rev.Lett.87:241801, (2001)
- [10] BABAR Coll., Phys.Rev.D71:032005, (2005)
- [11] M.B. Gavela et al., Nucl.Phys.B 430 (1994) 382-426
- [12] CKMfitter Group, Eur. Phys. J. C41, 1-131 (2005) [hep-ph/0406184], <http://ckmfitter.in2p3.fr>
- [13] T2K Coll., Nature 580, 339-344 (2020)
- [14] NuFit Group, JHEP 09 (2020) 178, <http://www.nu-fit.org>
- [15] PDG 2020, Rev. CKM Quark-Mixing Matrix
- [16] T2K Coll., Phys. Rev. Lett. 112, 061802 (2014)



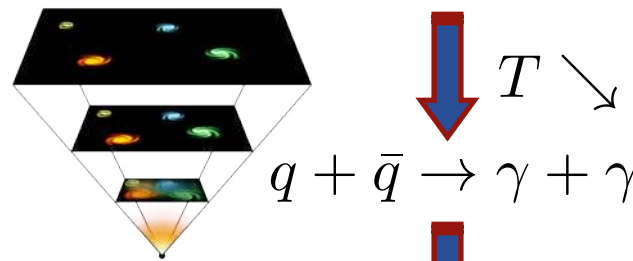
## Asymétrie baryonique:

Peu vraisemblable que seul notre univers proche ( $z < 1$ ) soit ainsi (voir [2]):  
les modèles supposant un univers  $n_b = n_{\bar{b}}$  concluent  $\eta_{\text{th}} \approx 10^{-18} \ll \eta$

- Univers: conditions initiales supposées symétriques pour tous les nombres quantiques: nb baryonique  $B = N_b - N_{\bar{b}} = 0$

*baryogénèse* ↓ Mécanisme inconnu  
Époque inconnue (mais après inflation)

- Univers avant nucléosynthèse:  $n_b \simeq n_{\bar{b}} \simeq n_\gamma$  Mais  $\frac{n_b - n_{\bar{b}}}{n_\gamma} = \eta = 6.1 \times 10^{-10}$   
 $T \gtrsim 1 \text{ GeV}$   $t \lesssim 10^{-6} \text{ s}$   
 $q + \bar{q} \leftrightarrow \gamma + \gamma$  Équilibre thermique



- Univers aujourd'hui:  
 $T = 2.73 \text{ K}$

$$\frac{n_b}{n_\gamma} = \eta = 6.1 \times 10^{-10}$$

$$n_{\bar{b}} \simeq 0$$

## Scénarios de baryogénèse Electroweak

Dans SM,  $B-L$  conservé mais  $B+L$  est changé par transformation de jauge  $SU(2)_L$   
(passage d'un état du vide à l'autre)

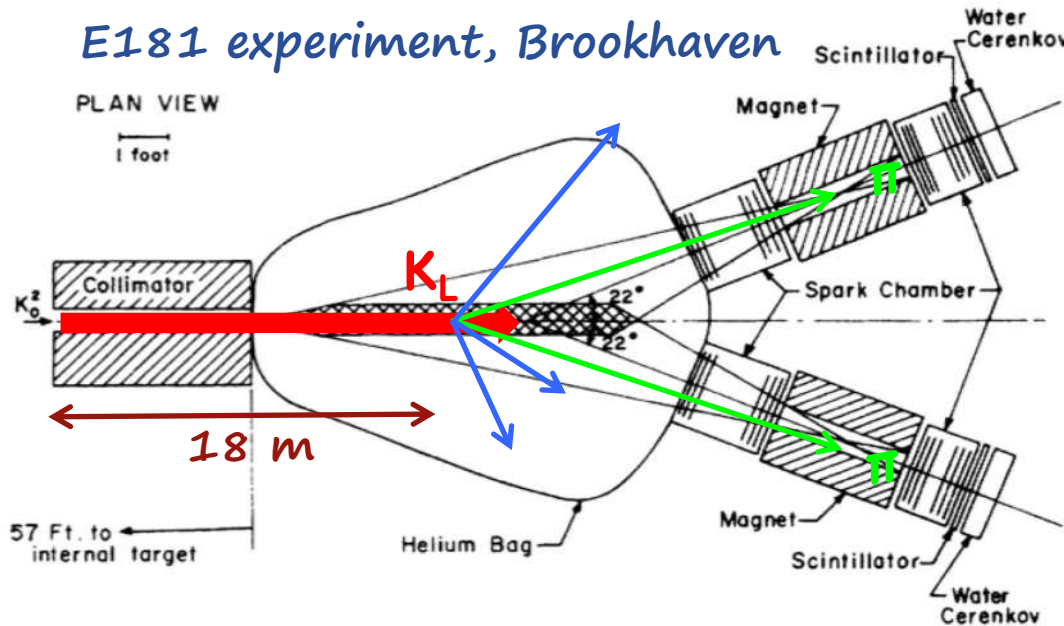
$$\Delta(B + L) = 2N_f N_{CS}$$

$B-L$  conservé:  $\Delta B = \Delta L \Rightarrow \Delta B = N_f N_{CS} = 3, 6, 9 \dots$

## Découverte de la violation de CP: Cronin & Fitch (1964)

E181 experiment, Brookhaven

Mésons K contiennent un quark s

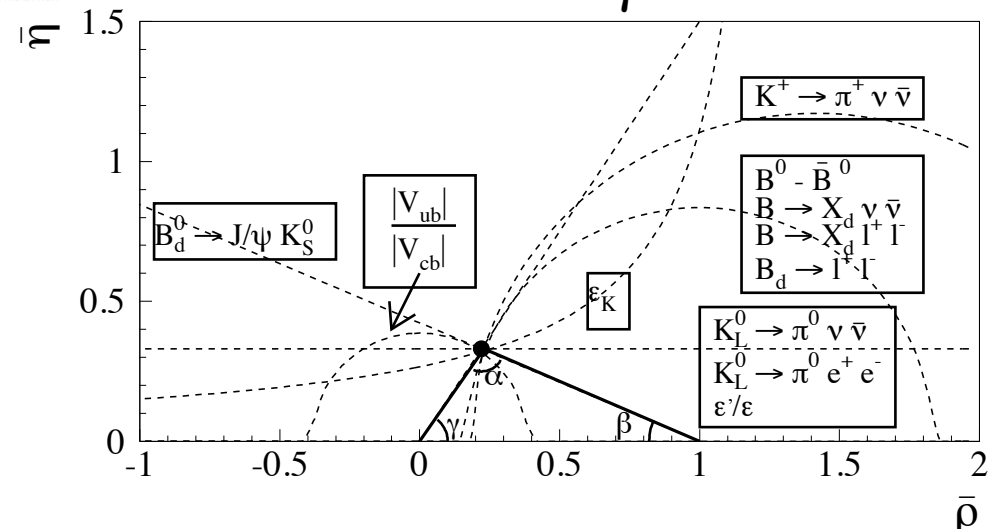


45 événements  $K_L \rightarrow 2\pi$   
/ 22700 événements

$$\epsilon_K \approx 0.2\%$$

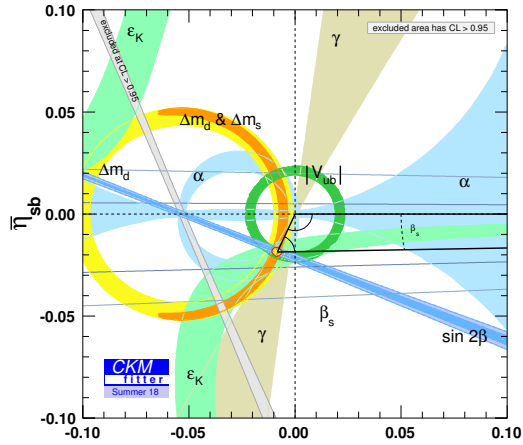
$$|K_L^0\rangle = \frac{1}{\sqrt{1 + |\epsilon_K|^2}} (|K_{CP=-1}^0\rangle + \epsilon_K |K_{CP=1}^0\rangle)$$

Dans un monde parfait:

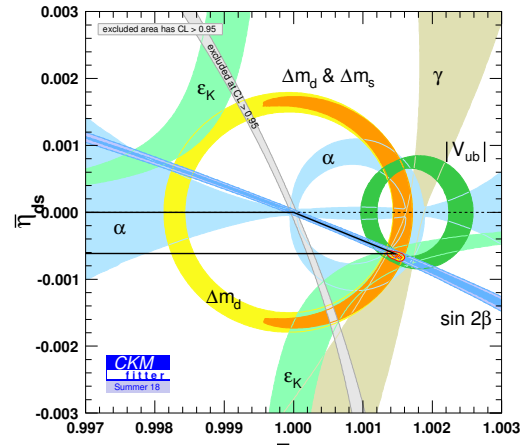


Nécessité de mesurer la violation CP dans le système des mésons B

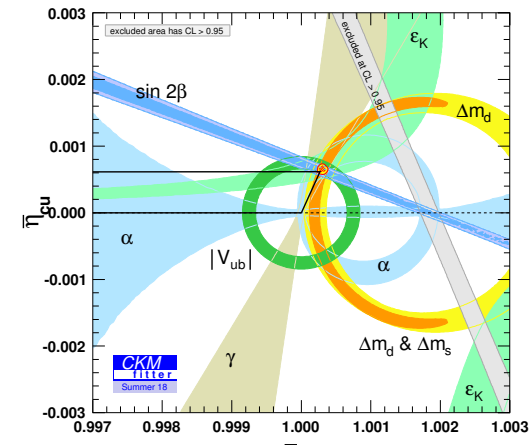
➡ Expériences BABAR et Belle



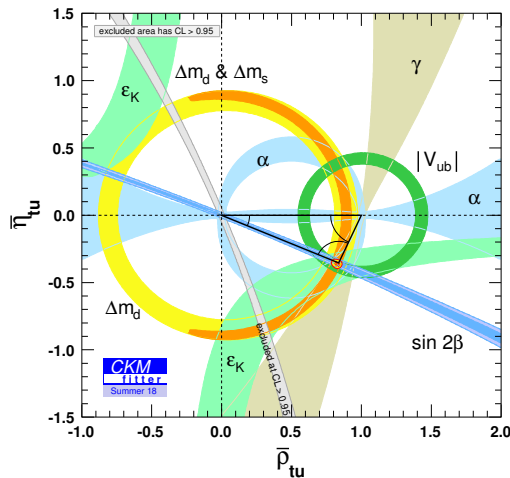
$$\bar{\rho}_{bs} + i\bar{\eta}_{bs} = -\frac{V_{us}V_{ub}^*}{V_{cs}V_{cb}^*}$$



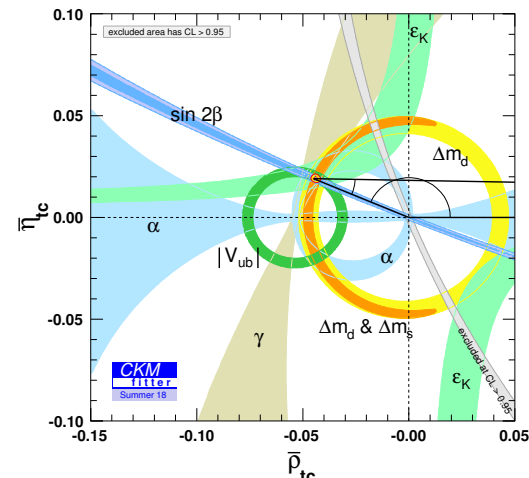
$$\bar{\rho}_{ds} + i\bar{\eta}_{ds} = -\frac{V_{ud}V_{us}^*}{V_{cd}V_{cs}^*}$$



$$\bar{\rho}_{cu} + i\bar{\eta}_{cu} = -\frac{V_{cd}V_{ud}^*}{V_{cs}V_{us}^*}$$



$$\bar{\rho}_{tu} + i\bar{\eta}_{tu} = -\frac{V_{td}V_{ud}^*}{V_{ts}V_{us}^*}$$



$$\bar{\rho}_{tc} + i\bar{\eta}_{tc} = -\frac{V_{td}V_{cd}^*}{V_{ts}V_{cs}^*}$$



$$V = U_{23}U_{\delta}^{\dagger}U_{13}U_{\delta}U_{12}$$

$$U_{23} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix}$$

$$U_{13} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix}$$

$$U_{12} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$U_{\delta} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-i\delta_{CP}} \end{pmatrix}$$

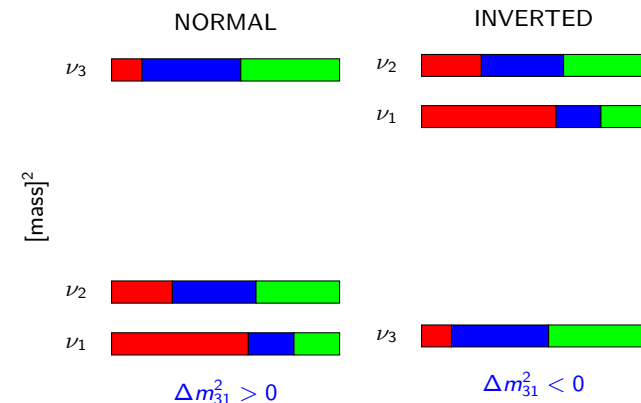
$$U_{\alpha_1, \alpha_2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_1} & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\alpha_2} \end{pmatrix}$$

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} 0.97401 \pm 0.00011 & 0.22650 \pm 0.00048 & 0.00361^{+0.00011}_{-0.00009} \\ 0.22636 \pm 0.00048 & 0.97320 \pm 0.00011 & 0.04053^{+0.00083}_{-0.00061} \\ 0.00854^{+0.00023}_{-0.00016} & 0.03978^{+0.00082}_{-0.00060} & 0.999172^{+0.000024}_{-0.000035} \end{pmatrix}$$

$$|U|_{3\sigma}^{\text{with SK-atm}} = \begin{pmatrix} 0.801 \rightarrow 0.845 & 0.513 \rightarrow 0.579 & 0.143 \rightarrow 0.155 \\ 0.234 \rightarrow 0.500 & 0.471 \rightarrow 0.689 & 0.637 \rightarrow 0.776 \\ 0.271 \rightarrow 0.525 & 0.477 \rightarrow 0.694 & 0.613 \rightarrow 0.756 \end{pmatrix}$$

$$\begin{aligned} \sin \theta_{12} &= 0.22650 \pm 0.00048, & \sin \theta_{13} &= 0.00361^{+0.00011}_{-0.00009}, \\ \sin \theta_{23} &= 0.04053^{+0.00083}_{-0.00061}, & \delta &= 1.196^{+0.045}_{-0.043}. \end{aligned}$$

$$U_{PMNS}^{\text{Majorana}} = U_{PMNS} U_{\alpha_1, \alpha_2}$$



## NEUTRINO 2016

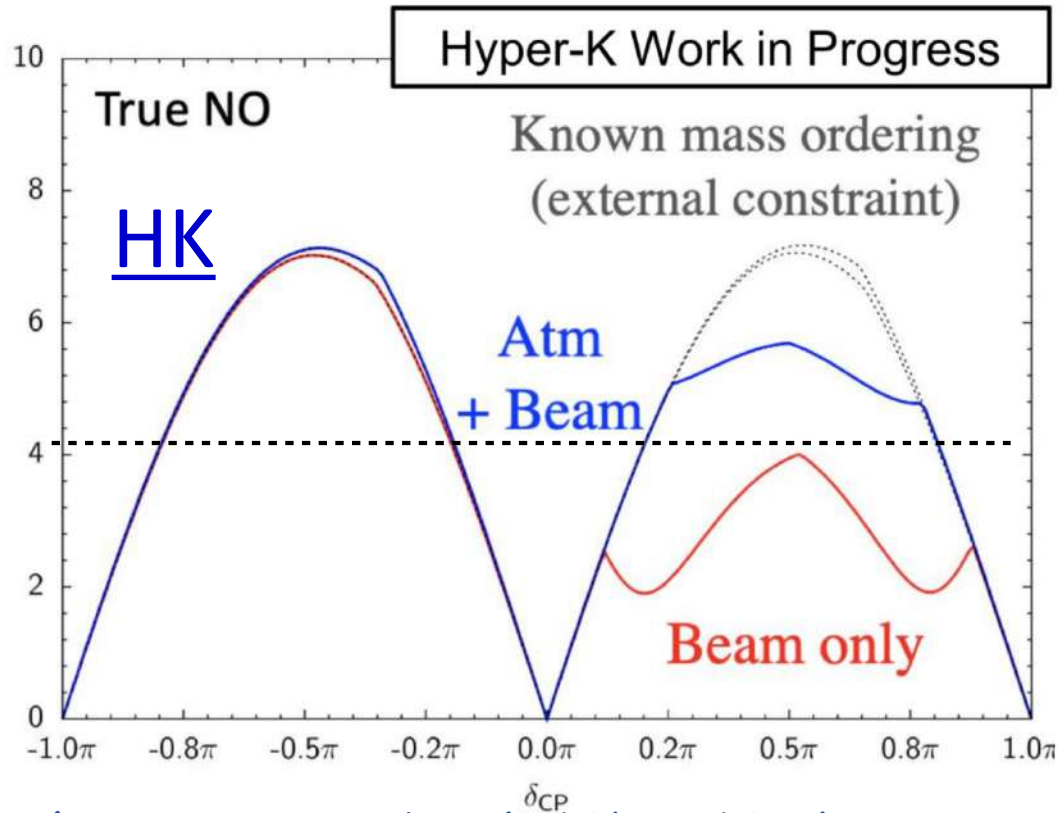
	Observed	$\delta_{CP} = -\pi/2$	$\delta_{CP} = 0$	$\delta_{CP} = \pi/2$	$\delta_{CP} = \pi$
$\nu_{\mu}$ disappearance	127	127.9	127.6	127.8	128.1
$\nu_e$ appearance	32	27.0	22.7	18.5	22.7
anti- $\nu_{\mu}$ disappearance	66	64.4	64.3	64.4	64.6
anti- $\nu_e$ appearance	4	6	6.9	7.7	6.8

## NEUTRINO 2018

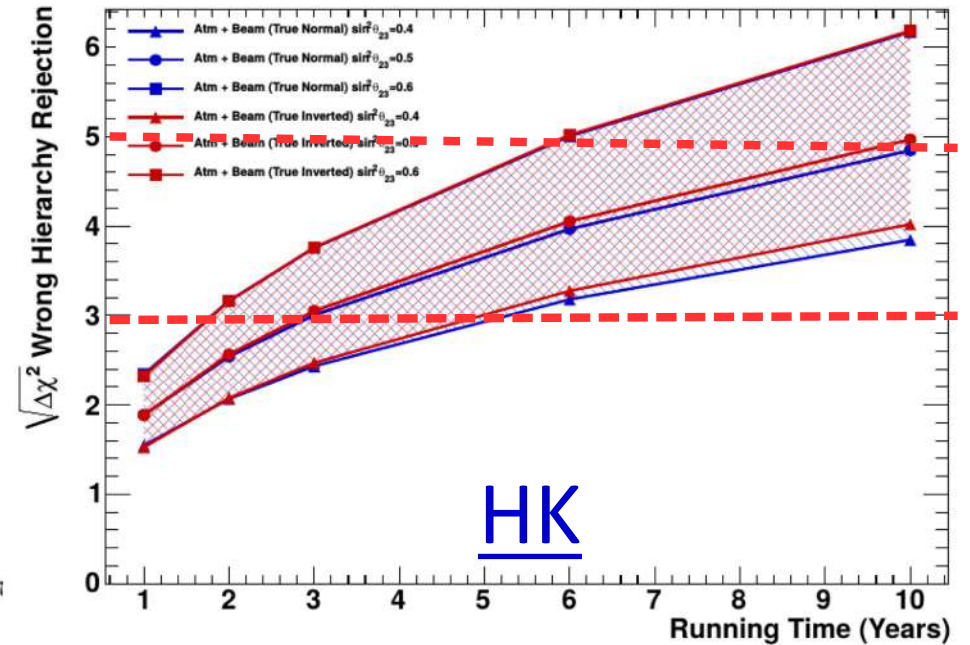
	Observed	$\delta_{CP} = -\pi/2$	$\delta_{CP} = 0$	$\delta_{CP} = \pi/2$	$\delta_{CP} = \pi$
$\nu_{\mu}$ disappearance	243	272.4	272	272.4	272.8
$\nu_e$ appearance	75	74.4	62.2	50.6	62.7
$\nu_e$ appearance (CC1 $\pi^+$ -like sample)	15	7.0	6.1	4.9	5.9
anti- $\nu_{\mu}$ disappearance	140	139.2	139.2	139.5	139.9
anti- $\nu_e$ appearance	15	17.1	19.4	21.7	19.3

## NEUTRINO 2020

	Observed	$\delta_{CP} = -\pi/2$	$\delta_{CP} = 0$	$\delta_{CP} = \pi/2$	$\delta_{CP} = \pi$
$\nu_{\mu}$ disappearance	318	346.6	345.9	346.6	347.4
$\nu_e$ appearance	94	96.6	81.6	66.9	81.6
$\nu_e$ appearance (CC1 $\pi^+$ -like sample)	14	9.3	8.1	6.6	7.8
anti- $\nu_{\mu}$ disappearance	137	135.8	135.4	135.8	136.2
anti- $\nu_e$ appearance	16	16.6	18.8	20.8	18.5



## Sensitivity to mass hierarchy



Même sans connaître la hiérarchie de mass, excellent potentiel sur CP avec la combinaison des données atmosphériques

	5 years HK & DUNE	10 years HK & DUNE
CP conserved $\delta_{CP} = 0$	8° & 13°	6° & 9°
$\delta_{CP} = -\pi/2$	25° & 29°	19° & 24°

NuFIT 5.0 (2020)

		Normal Ordering (best fit)		Inverted Ordering ( $\Delta\chi^2 = 2.7$ )	
		bf $\pm 1\sigma$	$3\sigma$ range	bf $\pm 1\sigma$	$3\sigma$ range
without SK atmospheric data	$\sin^2 \theta_{12}$	$0.304^{+0.013}_{-0.012}$	0.269 $\rightarrow$ 0.343	$0.304^{+0.013}_{-0.012}$	0.269 $\rightarrow$ 0.343
	$\theta_{12}/^\circ$	$33.44^{+0.78}_{-0.75}$	31.27 $\rightarrow$ 35.86	$33.45^{+0.78}_{-0.75}$	31.27 $\rightarrow$ 35.87
	$\sin^2 \theta_{23}$	$0.570^{+0.018}_{-0.024}$	0.407 $\rightarrow$ 0.618	$0.575^{+0.017}_{-0.021}$	0.411 $\rightarrow$ 0.621
	$\theta_{23}/^\circ$	$49.0^{+1.1}_{-1.4}$	39.6 $\rightarrow$ 51.8	$49.3^{+1.0}_{-1.2}$	39.9 $\rightarrow$ 52.0
	$\sin^2 \theta_{13}$	$0.02221^{+0.00068}_{-0.00062}$	0.02034 $\rightarrow$ 0.02430	$0.02240^{+0.00062}_{-0.00062}$	0.02053 $\rightarrow$ 0.02436
	$\theta_{13}/^\circ$	$8.57^{+0.13}_{-0.12}$	8.20 $\rightarrow$ 8.97	$8.61^{+0.12}_{-0.12}$	8.24 $\rightarrow$ 8.98
	$\delta_{CP}/^\circ$	$195^{+51}_{-25}$	107 $\rightarrow$ 403	$286^{+27}_{-32}$	192 $\rightarrow$ 360
	$\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2}$	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	6.82 $\rightarrow$ 8.04	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	6.82 $\rightarrow$ 8.04
	$\frac{\Delta m_{3\ell}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2}$	$+2.514^{+0.028}_{-0.027}$	+2.431 $\rightarrow$ +2.598	$-2.497^{+0.028}_{-0.028}$	-2.583 $\rightarrow$ -2.412
	with SK atmospheric data	$\sin^2 \theta_{12}$	$0.304^{+0.012}_{-0.012}$	0.269 $\rightarrow$ 0.343	$0.304^{+0.013}_{-0.012}$
$\theta_{12}/^\circ$		$33.44^{+0.77}_{-0.74}$	31.27 $\rightarrow$ 35.86	$33.45^{+0.78}_{-0.75}$	31.27 $\rightarrow$ 35.87
$\sin^2 \theta_{23}$		$0.573^{+0.016}_{-0.020}$	0.415 $\rightarrow$ 0.616	$0.575^{+0.016}_{-0.019}$	0.419 $\rightarrow$ 0.617
$\theta_{23}/^\circ$		$49.2^{+0.9}_{-1.2}$	40.1 $\rightarrow$ 51.7	$49.3^{+0.9}_{-1.1}$	40.3 $\rightarrow$ 51.8
$\sin^2 \theta_{13}$		$0.02219^{+0.00062}_{-0.00063}$	0.02032 $\rightarrow$ 0.02410	$0.02238^{+0.00063}_{-0.00062}$	0.02052 $\rightarrow$ 0.02428
$\theta_{13}/^\circ$		$8.57^{+0.12}_{-0.12}$	8.20 $\rightarrow$ 8.93	$8.60^{+0.12}_{-0.12}$	8.24 $\rightarrow$ 8.96
$\delta_{CP}/^\circ$		$197^{+27}_{-24}$	120 $\rightarrow$ 369	$282^{+26}_{-30}$	193 $\rightarrow$ 352
$\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2}$		$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	6.82 $\rightarrow$ 8.04	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	6.82 $\rightarrow$ 8.04
$\frac{\Delta m_{3\ell}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2}$		$+2.517^{+0.026}_{-0.028}$	+2.435 $\rightarrow$ +2.598	$-2.498^{+0.028}_{-0.028}$	-2.581 $\rightarrow$ -2.414