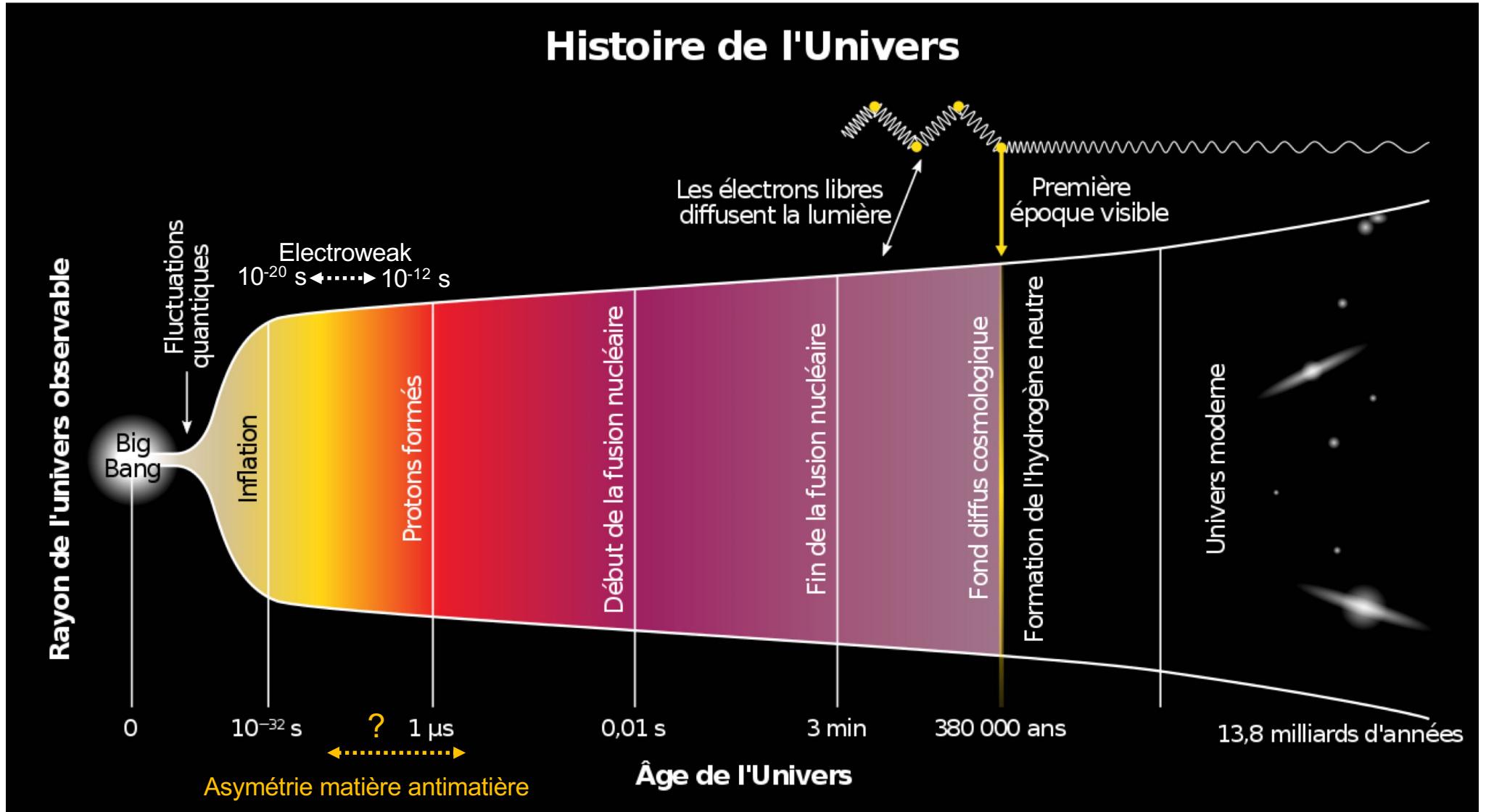




Asymétrie matière-antimatière

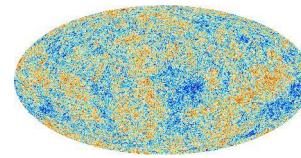


Nucleosynthèse primordiale:
abondance des éléments légers → densité de baryons (protons, neutrons)
+ fond diffus cosmologique

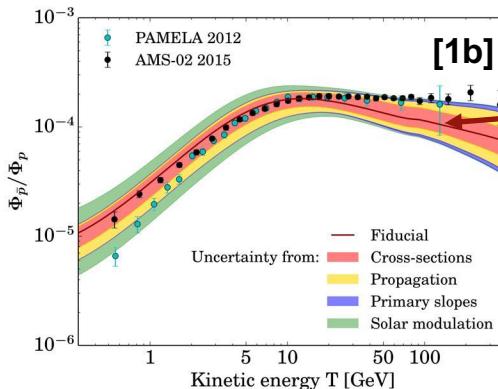
densité de baryons

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

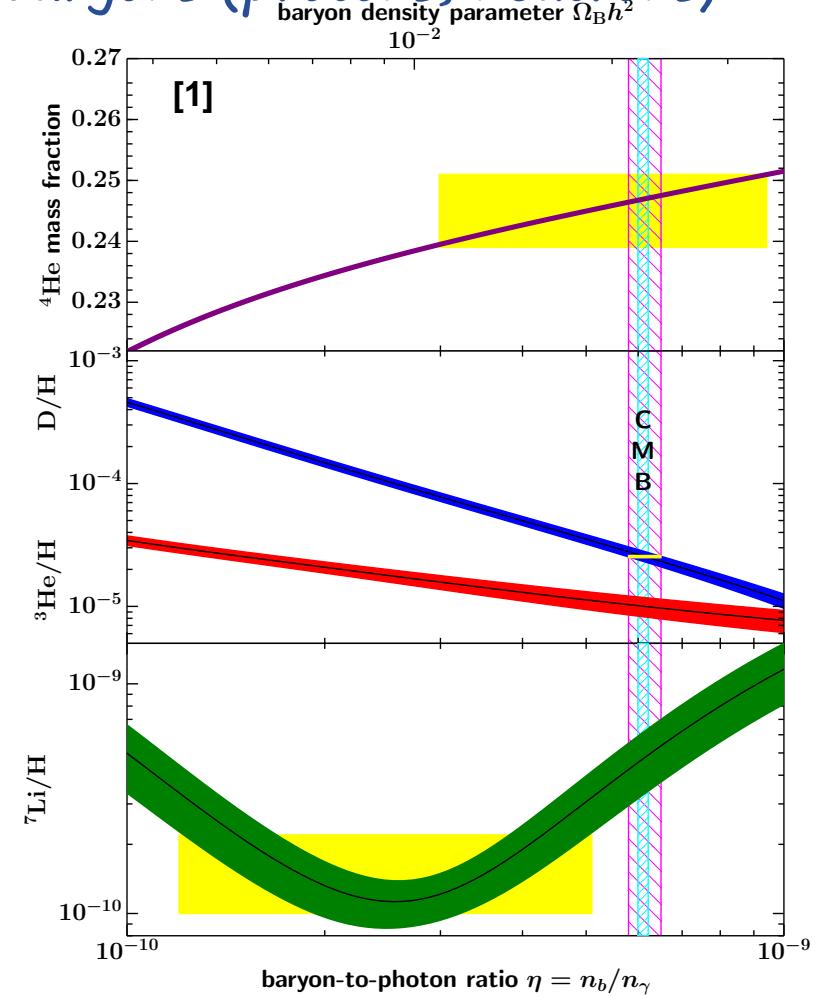
densité de photons



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



Flux antiprotons comparé
aux prévisions des
productions secondaires
dûes 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 $t=0$, $B = 0 \quad \forall t$)
 - 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 τ_p (1982-1990): Modane, tunnel du Frejus



Equipe : Physique : L. BENOIT, B. BEGRANCE, Y. HINET, U. NGUTEH-KIAC, P. SERRI,
S. TISSERANT.

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" 10^6 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 Kbytes 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)

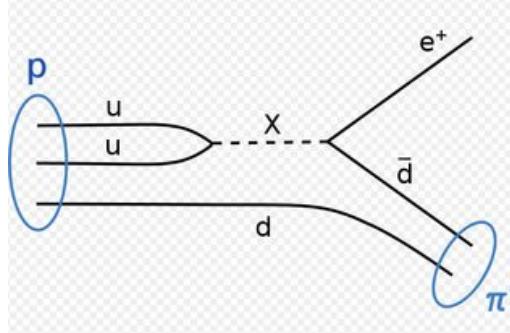
Violation du nombre baryonique désintégration du proton

Expérience τ_p (1982-1990)

Théories de Grande Unification

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

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



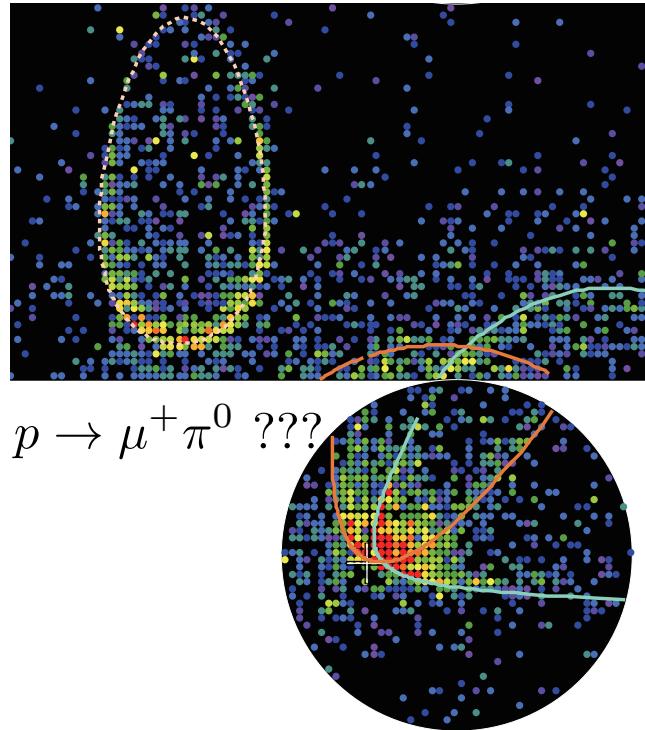
$$\begin{aligned} p &\rightarrow e^+ + \pi^0 & p &\rightarrow \mu^+ + \pi^0 \\ p &\rightarrow e^+ + \eta^0 \end{aligned}$$

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

Violation du nombre baryonique désintégration du proton

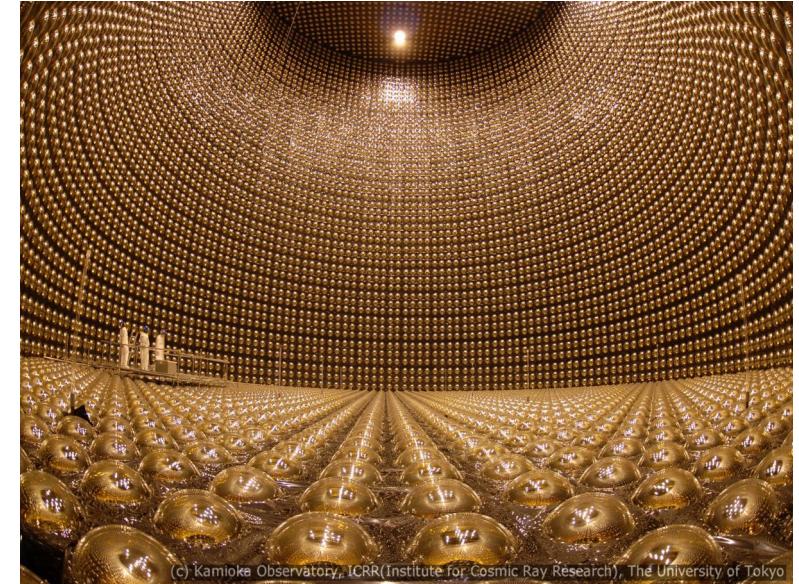
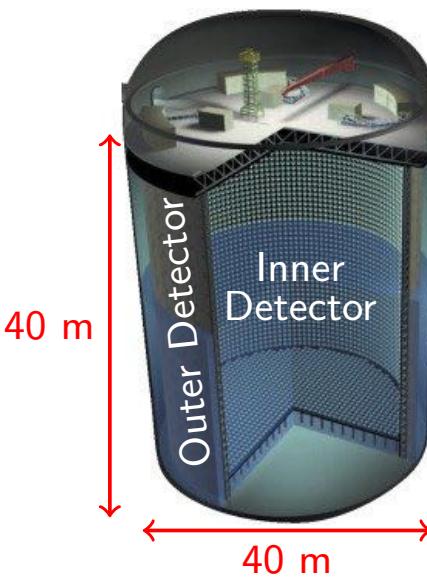
Expérience Super-Kamiokande

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



[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 μ -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

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

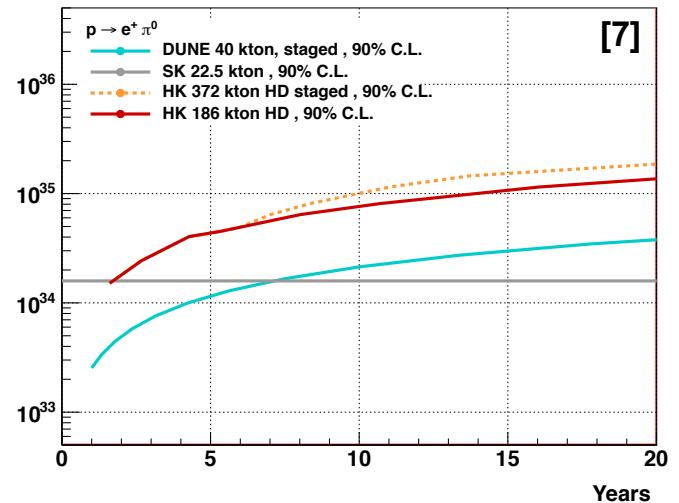
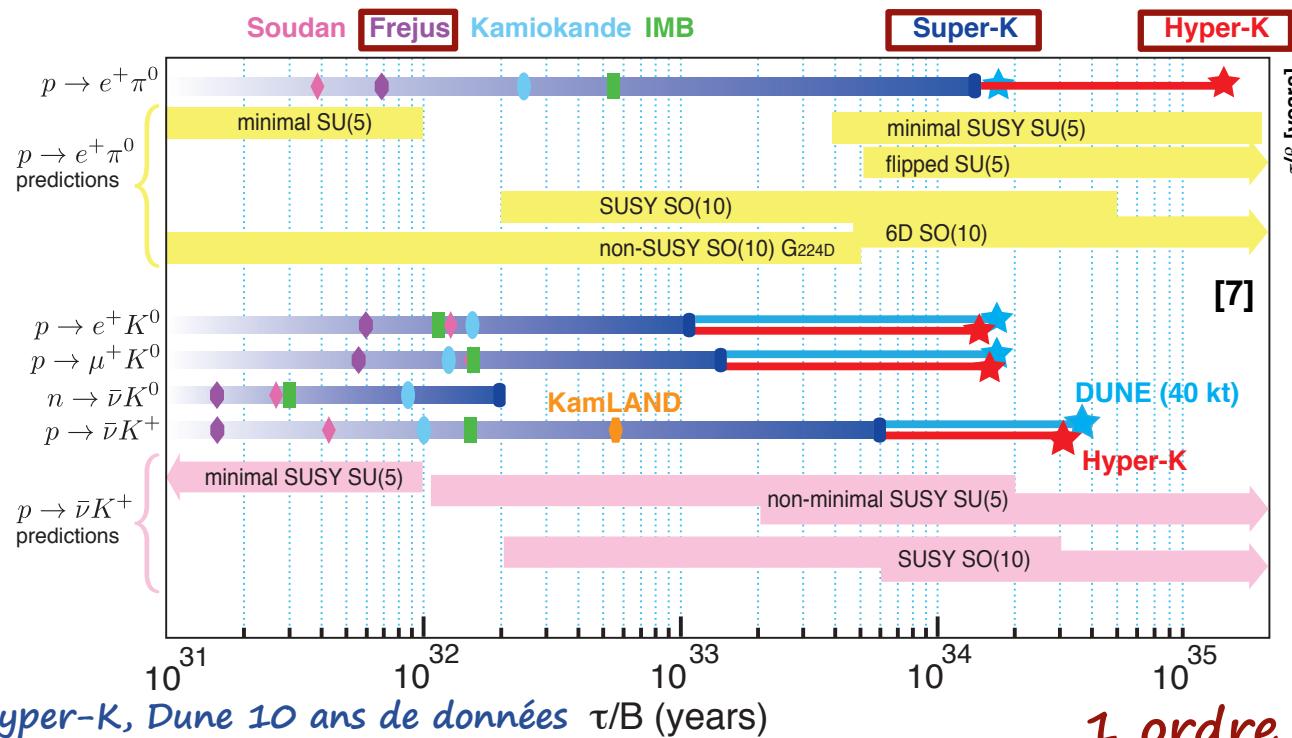
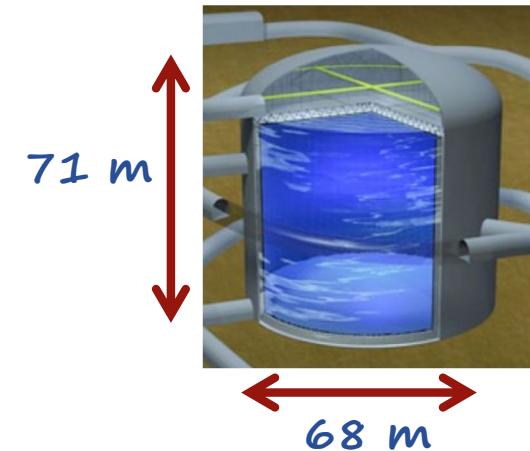
$$\tau_p / \text{Br}(p \rightarrow \mu^+ \pi^0) \geq 1.6 \times 10^{34} \text{ yr} @ 90\% \text{ CL}$$

Violation du nombre baryonique désintégration du proton

Le futur: Hyper-Kamiokande (2027-)

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

	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



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

Hyper-K, Dune 10 ans de données τ/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 **C** et **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, $\mathcal{A}[i(\vec{p}_i, \lambda_i) \rightarrow f(\vec{p}_f, \lambda_f)] = \mathcal{A}[\bar{i}(-\vec{p}_i, -\lambda_i) \rightarrow \bar{f}(-\vec{p}_f, -\lambda_f)]$

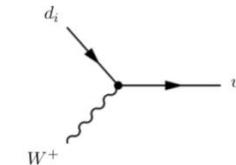
$$\Gamma(i \rightarrow f) \propto \int d^3 \vec{p} \sum_{\lambda_i, \lambda_f} |\mathcal{A}(i \rightarrow f)|^2 = \Gamma(\bar{i} \rightarrow \bar{f}) \rightarrow \Delta B(i \rightarrow f) + \Delta B(\bar{i} \rightarrow \bar{f}) = 0$$

Un peu de théorie...



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

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



Mélanges des quarks type up avec les down

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

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



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

CP requiert 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)

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

Un peu de théorie... suite et fin

Challenge depuis 30 ans:

$$\text{mesurer } (V_{ij}) = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix}$$

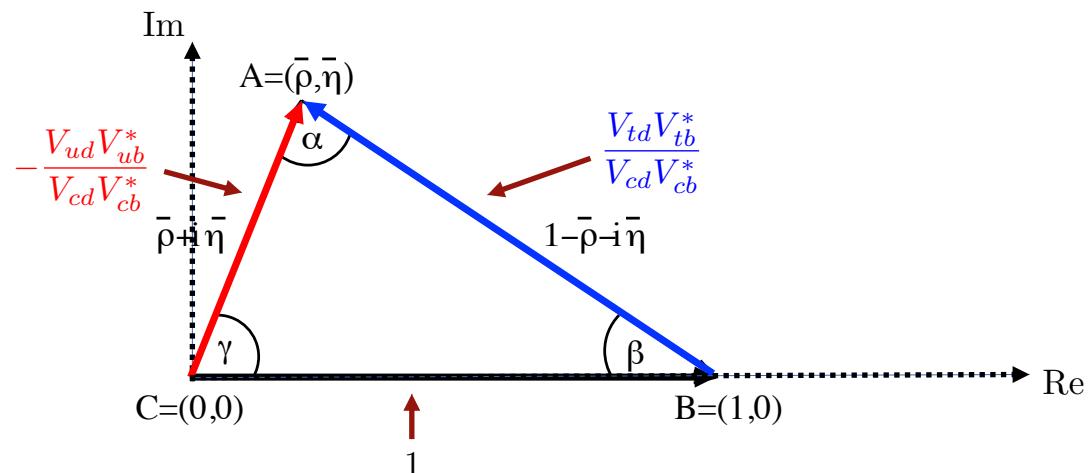
Cabbibo-Kobayashi-Maskawa
CKM

3 familles (SM) \rightarrow matrice 3×3 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

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

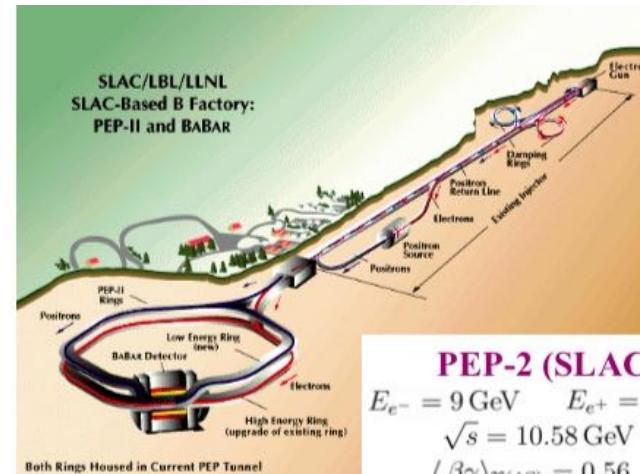
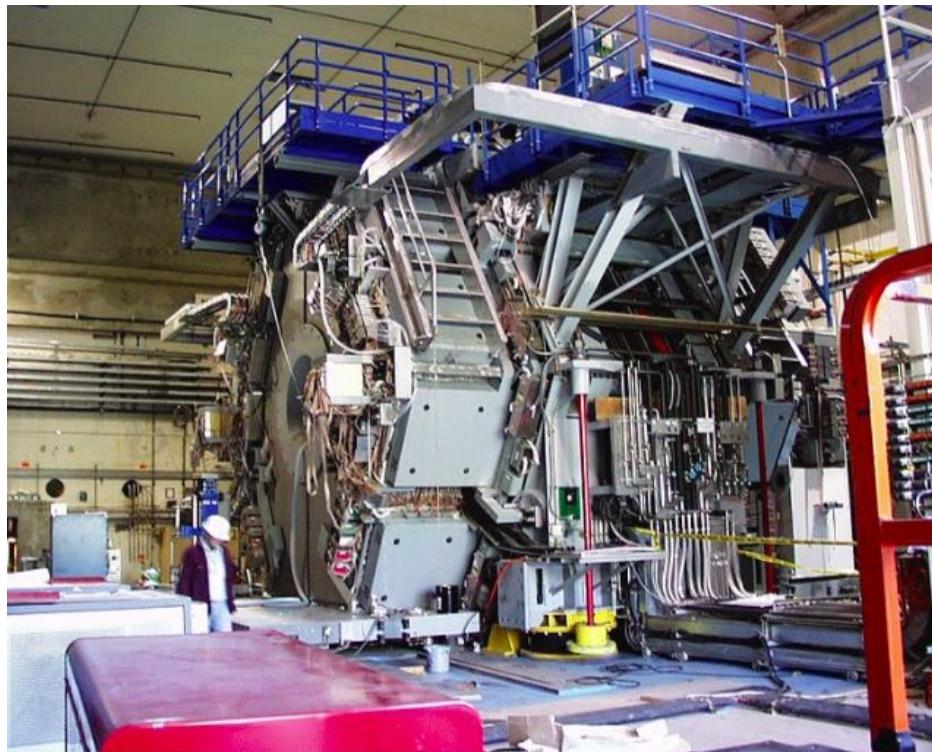


Violation de CP si surface du triangle non nulle

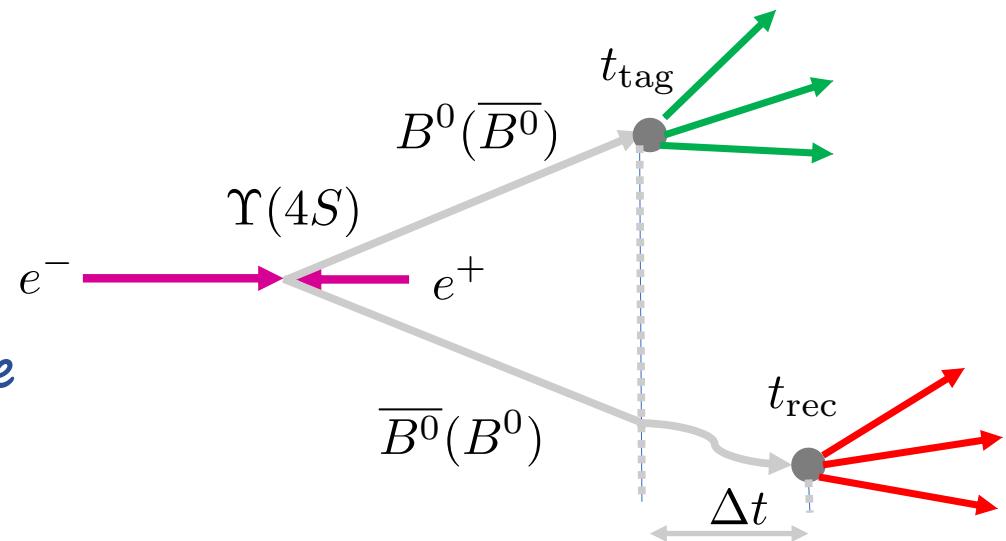
Physique au delà du SM si le triangle n'est pas un triangle!

Expérience BaBar, SLAC (1999-2008)

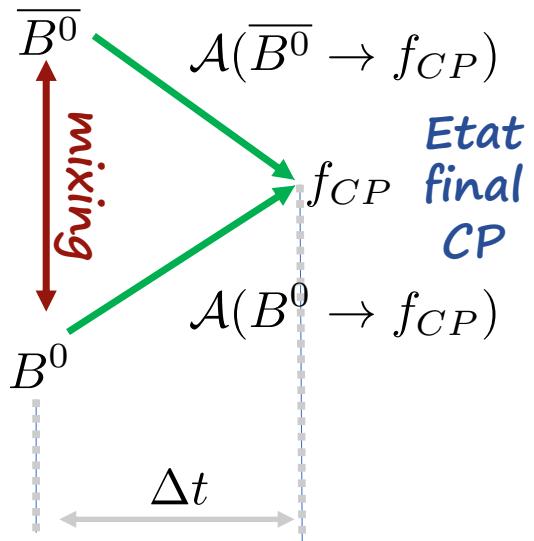
L. Behr,²² D. Bernard,²² G. R. Bonneauud,²²
 F. Brochard,²² J. Cohen-Tanugi,²² S. Ferrag,²² E. Roussot,²² S. T'Jampens,²² Ch. Thiebaux,²² G. Vasileiadis,²²
 M. Verderi,²² P. Grenier, S. Schrenk,



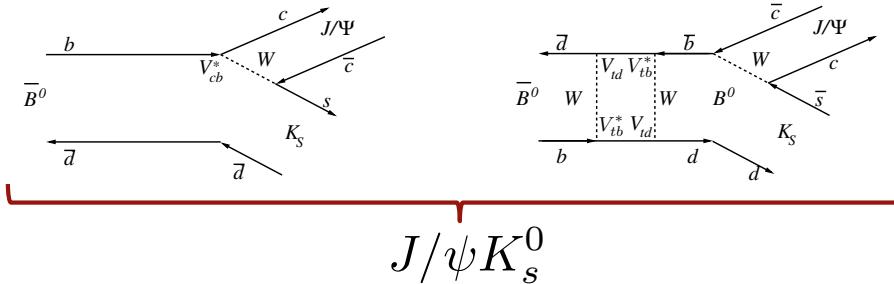
LLR: Construction de l'électronique de
contrôle du DIRC + logiciel



Principe:



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



2001: BABAR établi la violation de CP dans les B

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

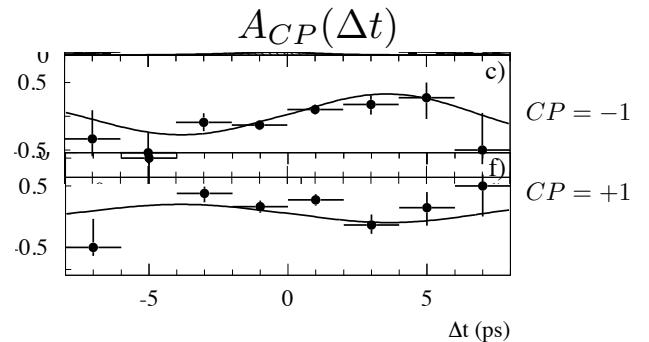
Observation of CP violation in the B^0 meson system [8]

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

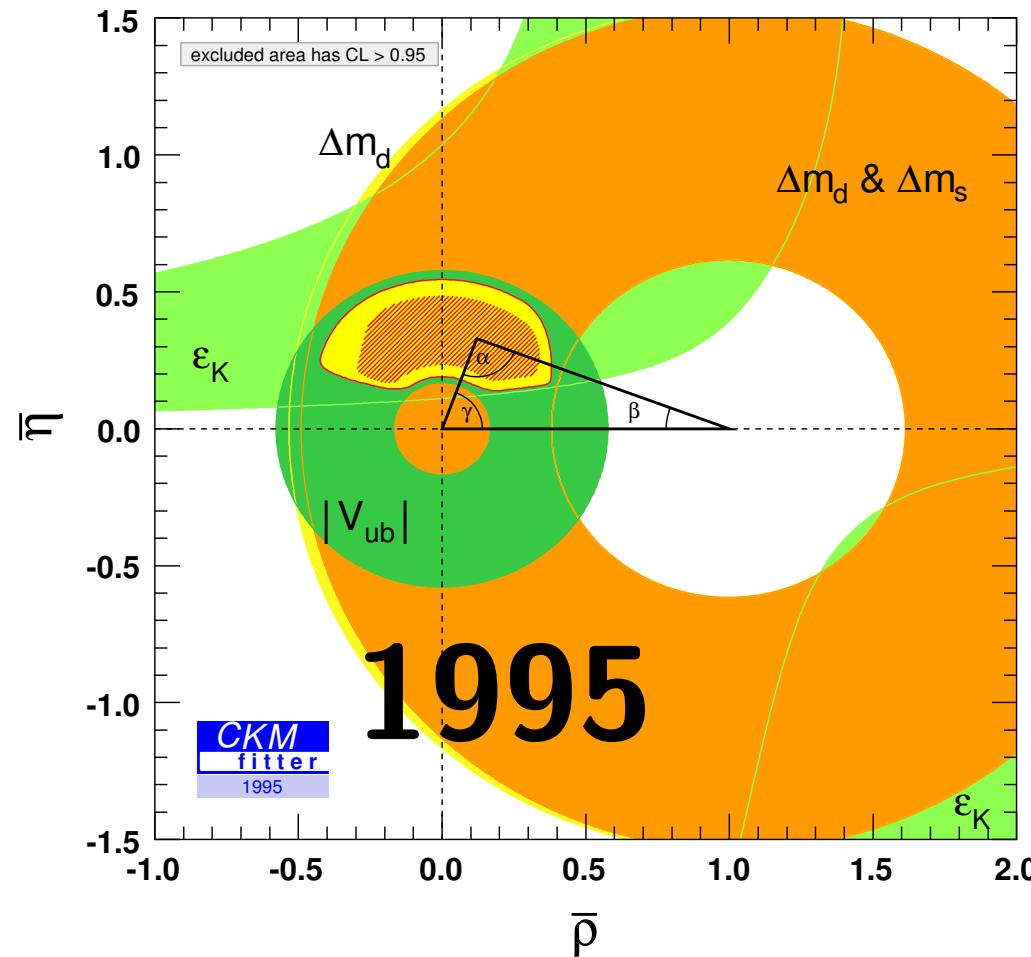
$$B^0 \rightarrow J/\psi K_S^0, J/\psi K_L^0, J/\psi K^{*0}, \psi K_S^0, \chi_{c1} K_S^0$$

$CP = -1$	1	-1	-1
-----------	-----	------	------

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

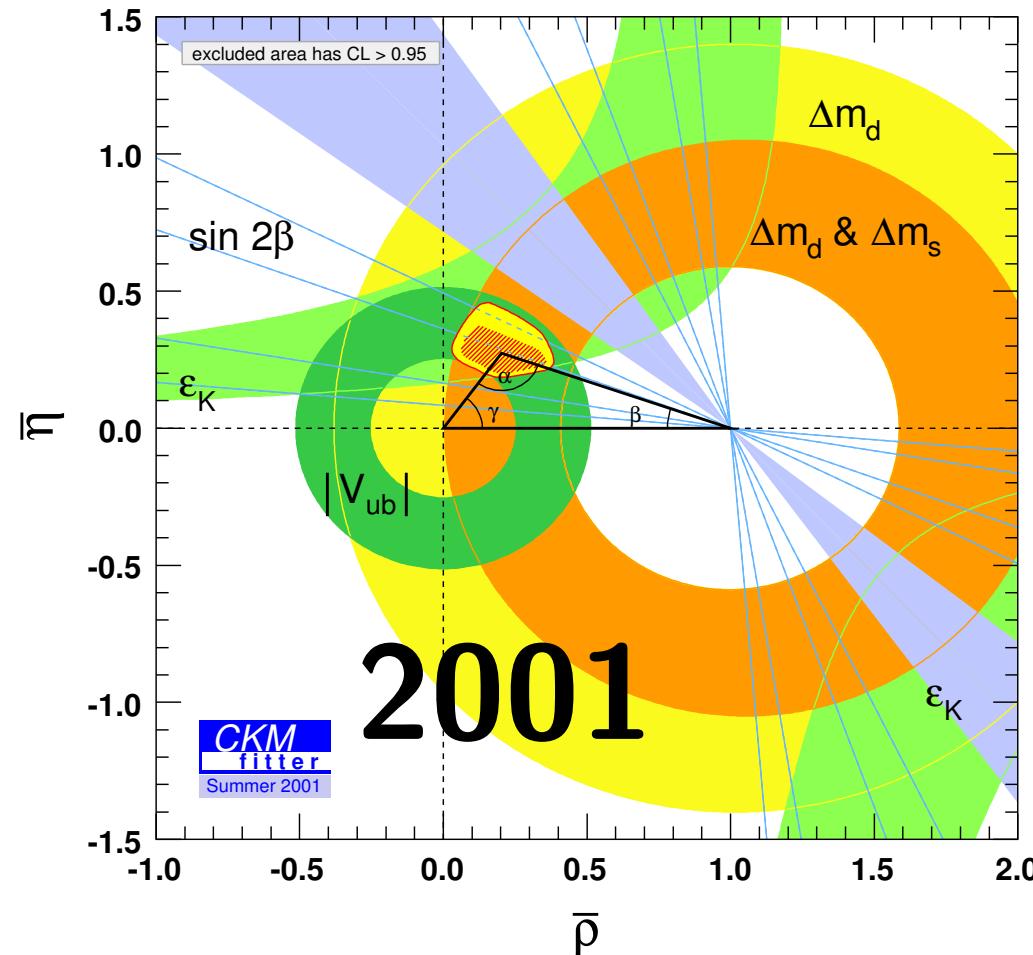


Evolution du triangle d'unitarité [12]



Evolution du triangle d'unitarité [12]

BABAR
2001

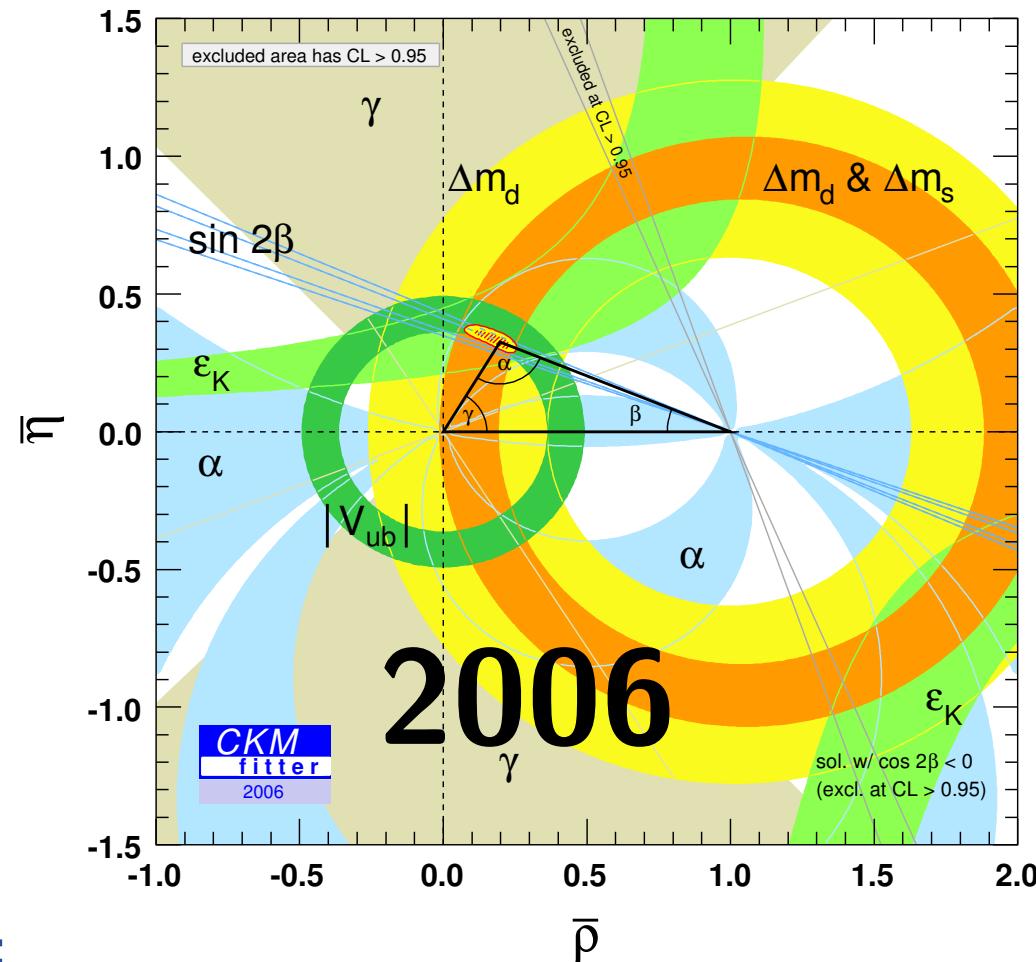


BABAR mesure [8]:

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

Evolution du triangle d'unitarité [12]

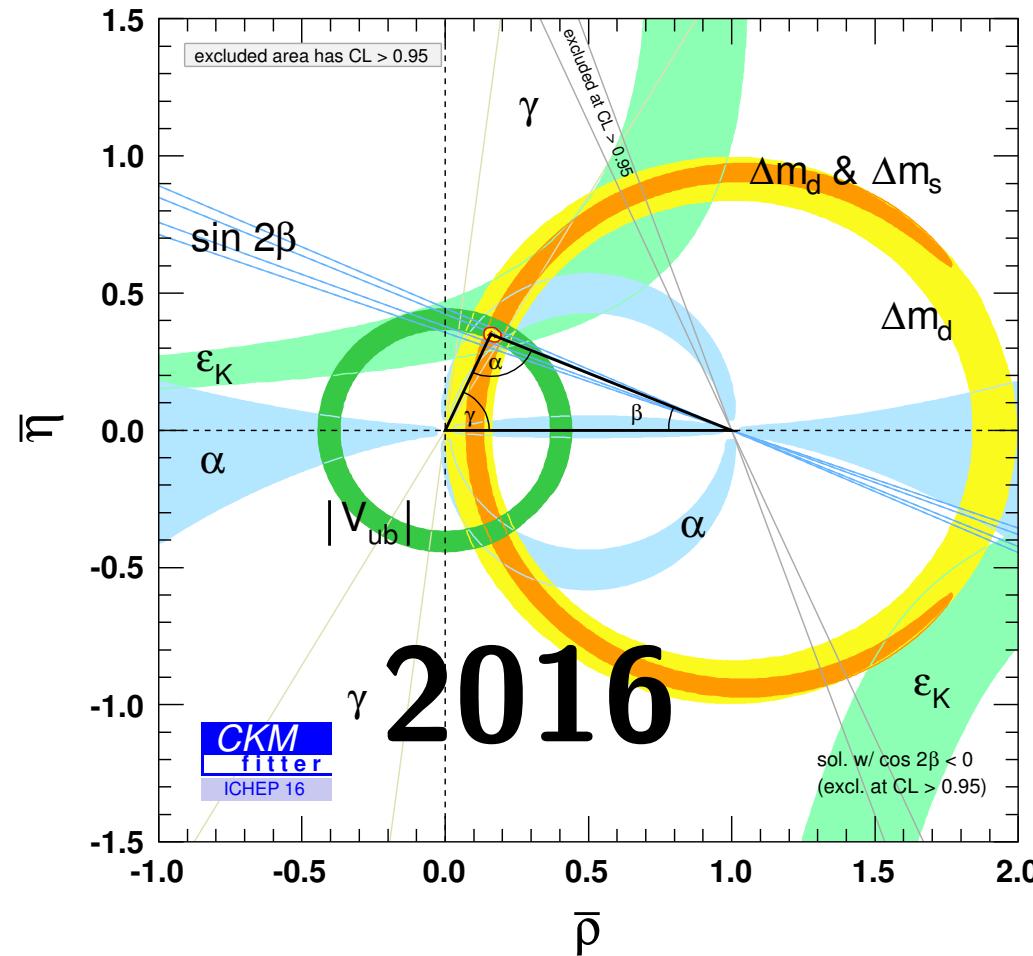
BABAR
2006



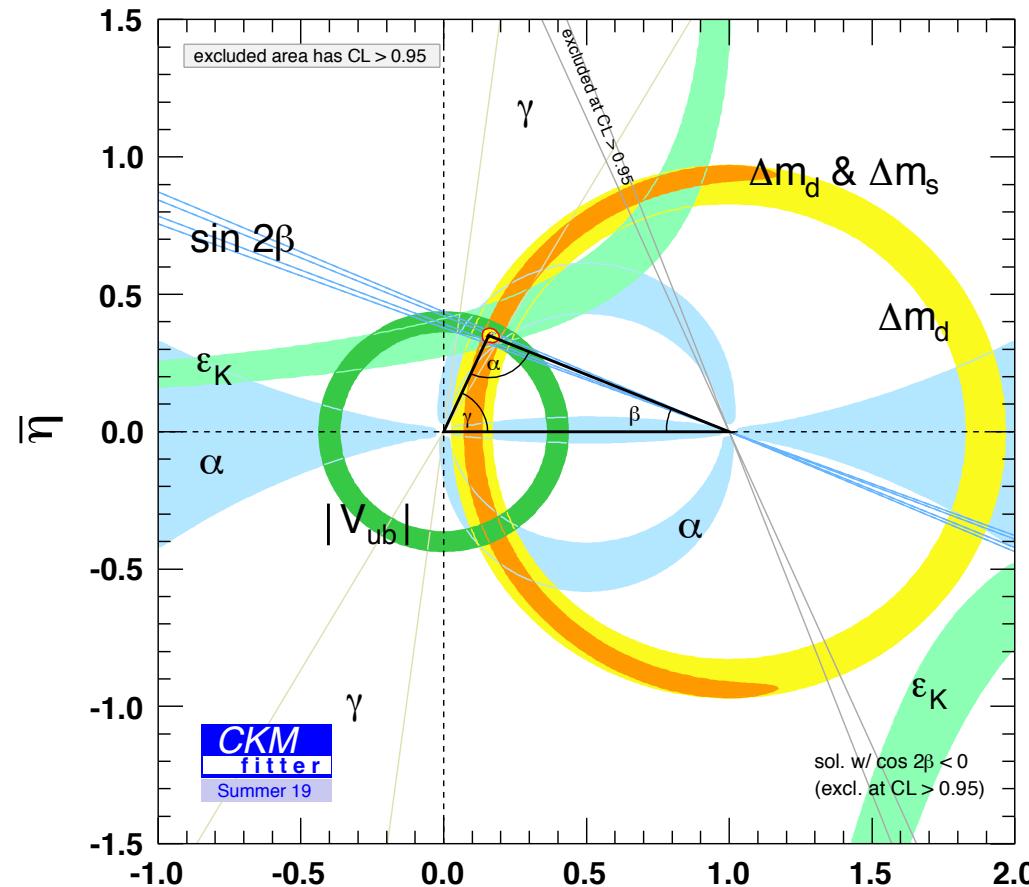
BABAR mesure [10]:

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

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

$\text{Up-type} \rightarrow \begin{pmatrix} u \\ c \\ t \end{pmatrix}, \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$ $\text{down-type} \rightarrow \begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}$ <p style="text-align: center;"><small>interaction</small> <small>masse</small></p> <p style="text-align: center;"><small>CKM</small> Cabbibo-Kobayashi-Maskawa</p>	$\begin{pmatrix} \nu_1 \\ e^- \\ \nu_2 \\ \mu^- \\ \nu_3 \\ \tau^- \end{pmatrix}, W^\pm$ $\begin{pmatrix} \nu_e \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} U_{e1} & U_{e2} & U_{e3} \\ U_{\mu 1} & U_{\mu 2} & U_{\mu 3} \\ U_{\tau 1} & U_{\tau 2} & U_{\tau 3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \nu_1 \\ \nu_2 \\ \nu_3 \end{pmatrix}$ <p style="text-align: center;"><small>interaction</small> <small>masse</small></p> <p style="text-align: center;"><small>PMNS</small> Pontecorvo-Maki-Nakagawa-Sakata</p>
-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------	-------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------------

Violation de CP

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

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

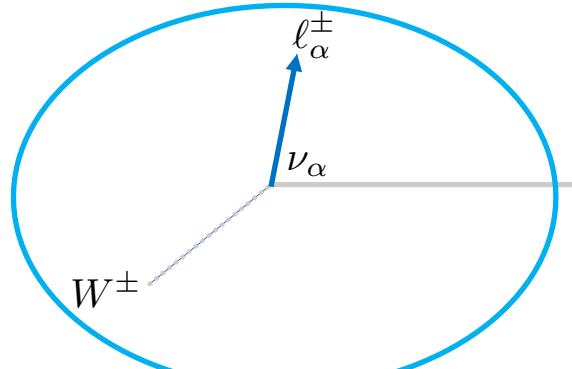
$$U_{\text{PMNS}} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} e^{-i\delta_{CP}} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} e^{i\delta_{CP}} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix}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

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

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

$$\theta_{12}, \theta_{13}, \theta_{23} \neq 0, \frac{\pi}{2} \quad \delta_{CP} \neq 0, \pi$$

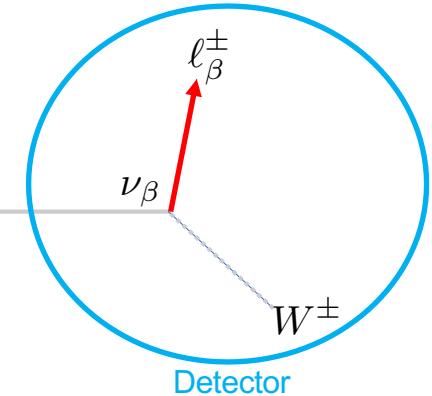
Les neutrinos se mélangent (oscillation)



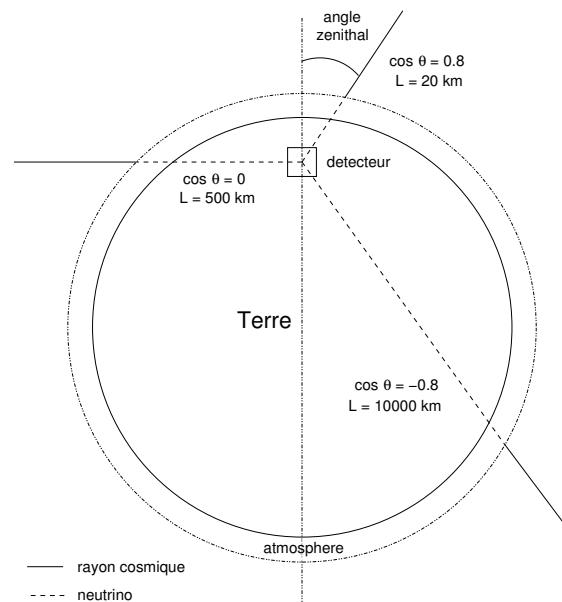
$$P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) = \sum_{k,j} U_{\alpha k}^* U_{\beta k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \exp\left(-i \frac{\Delta m_{kj}^2 L}{2E}\right)$$

Neutrinos oscillation

Long distance L



$$\Delta m_{kj}^2 = m_{\nu_i}^2 - m_{\nu_j}^2$$



Super-Kamiokande 1998:
Oscillation avec les
neutrinos atmosphériques

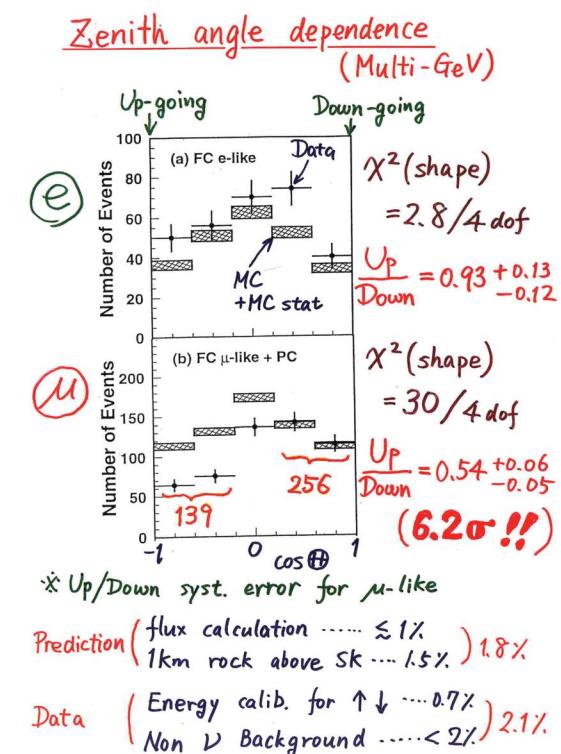
$$\nu_\mu \rightarrow \nu_\tau$$



SNO 2001:
Oscillation avec les
neutrinos solaires

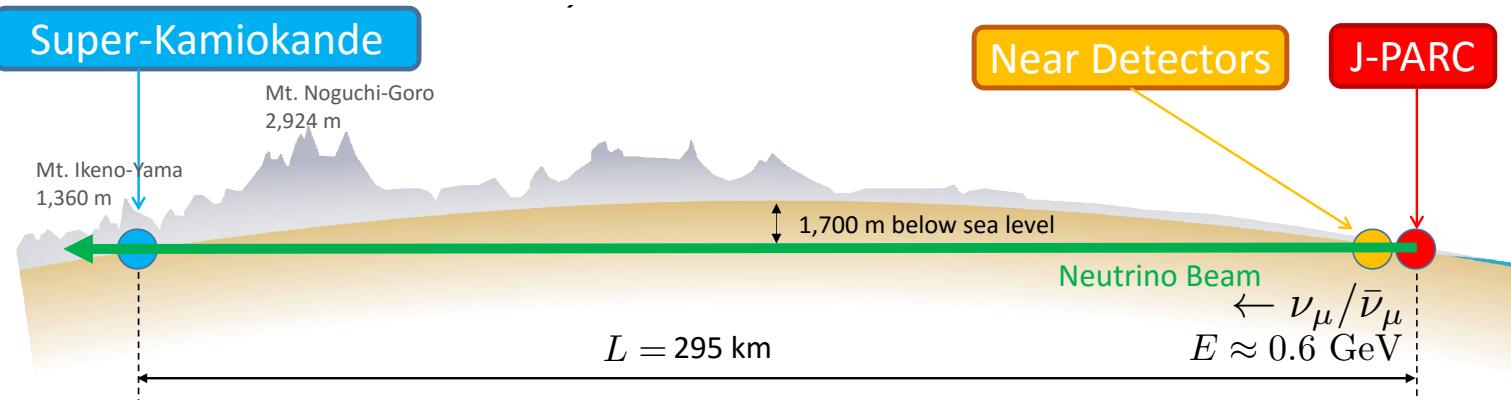
$$\nu_e \rightarrow \nu_\mu, \nu_\tau$$

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



L'expérience T2K

M. Buizza Avanzini³⁰, O. Drapier³⁰, M. Gonin³⁰, Th. A. Mueller³⁰, B. Quilain³⁹,



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

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

$$\begin{aligned} A_{\alpha,\beta}^{CP} &= P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(L, E) - P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta}(L, E) \\ &= 4 \sum_{k>j} \text{Im} \left[U_{\alpha k}^* U_{\beta k} U_{\alpha j} U_{\beta j}^* \right] \sin \left(\frac{\Delta m_{kj}^2 L}{2E} \right) \end{aligned}$$

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

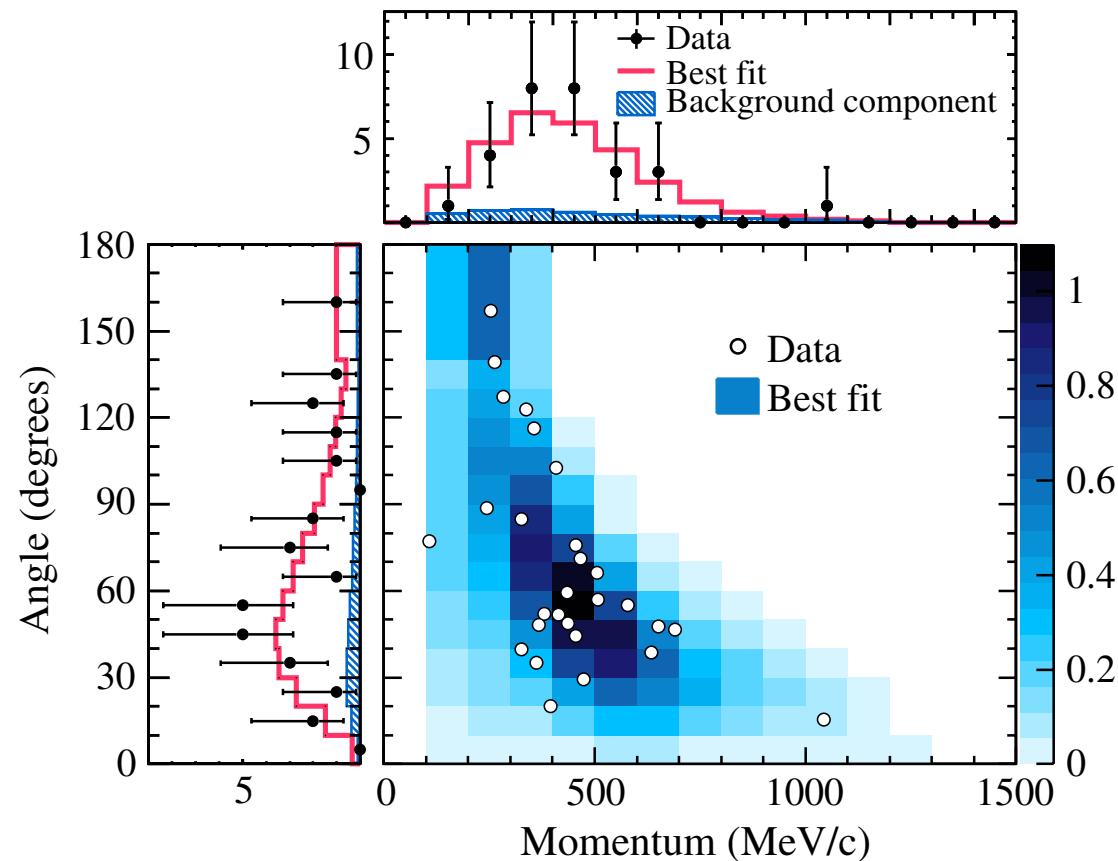
Disparition $P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_\mu}, P_{\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_\mu} \rightarrow \theta_{23}, \Delta m_{32}^2$
Apparition $P_{\nu_\mu \rightarrow \nu_e}, P_{\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e} \rightarrow \theta_{13}, \delta_{CP}$

T2K
2014

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

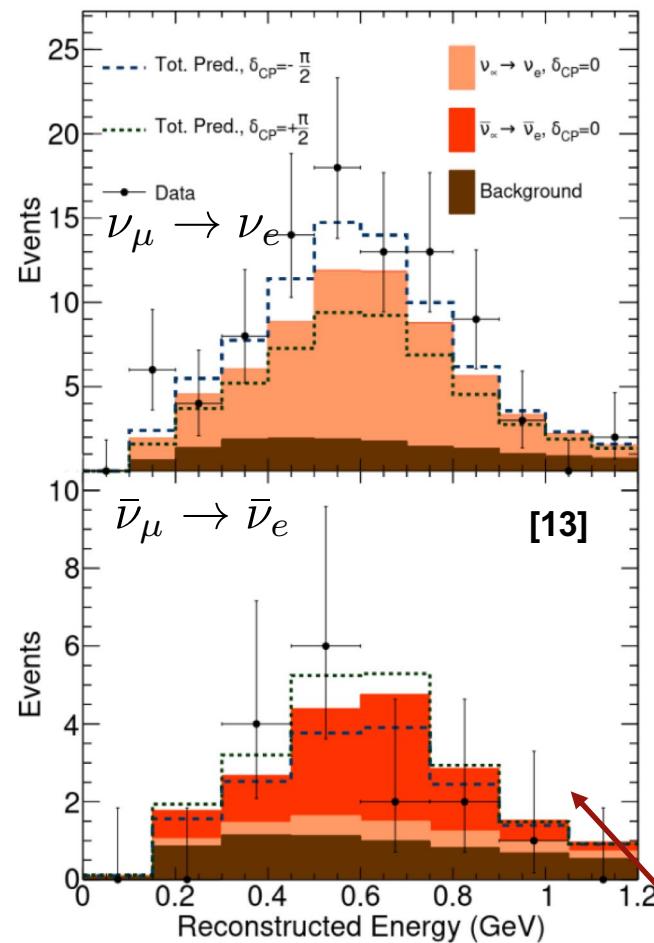
Observation of Electron Neutrino Appearance in a Muon Neutrino Beam

PRL 112, 061802 (2014)

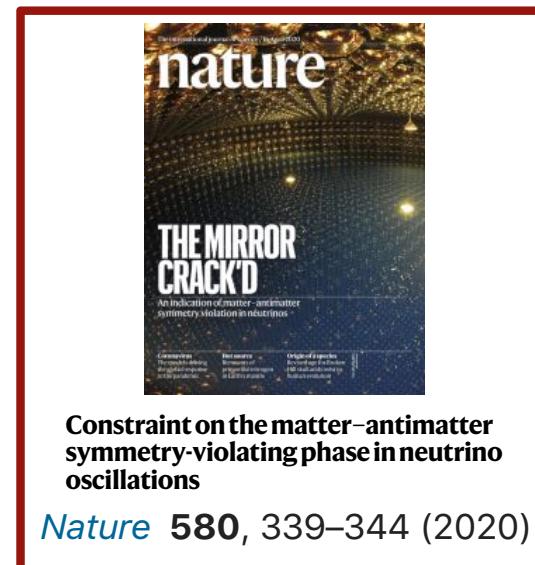


28 ν_e observés, bruit de fond attendu $4.92 \pm 0.55 \rightarrow 7.3\sigma$

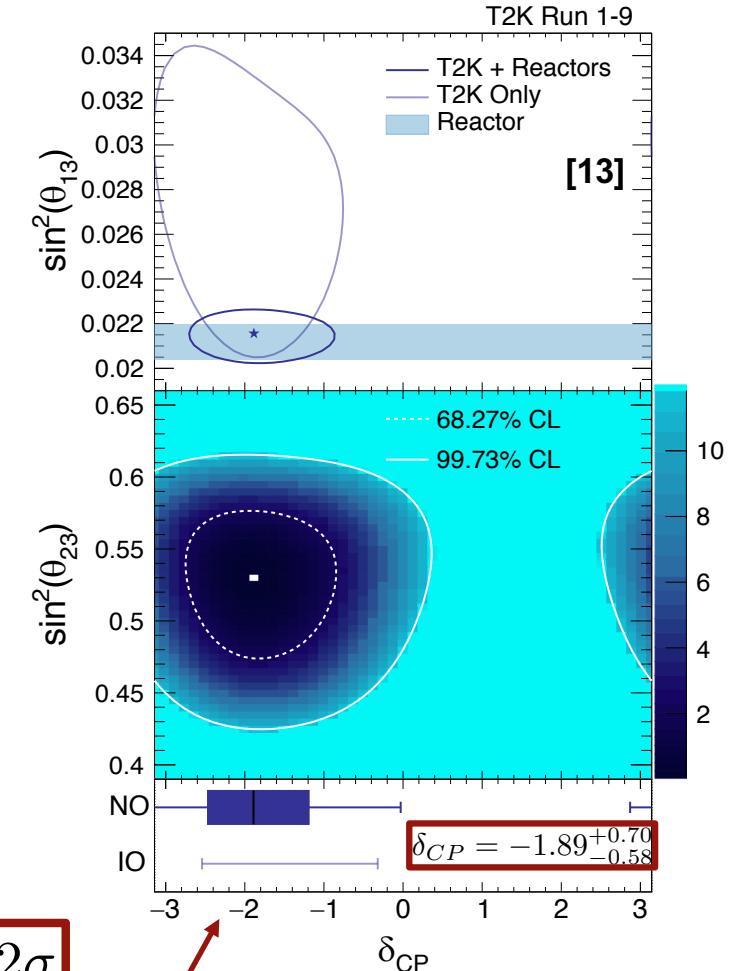
Violation de CP chez les leptons



T2K
2020



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



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

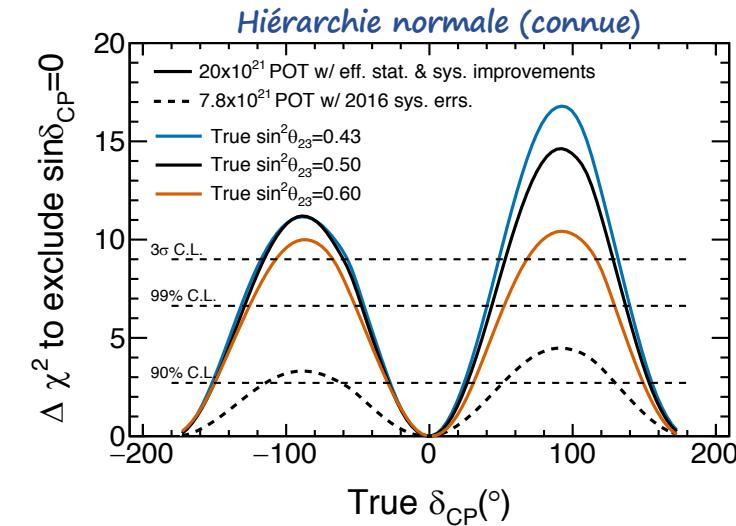
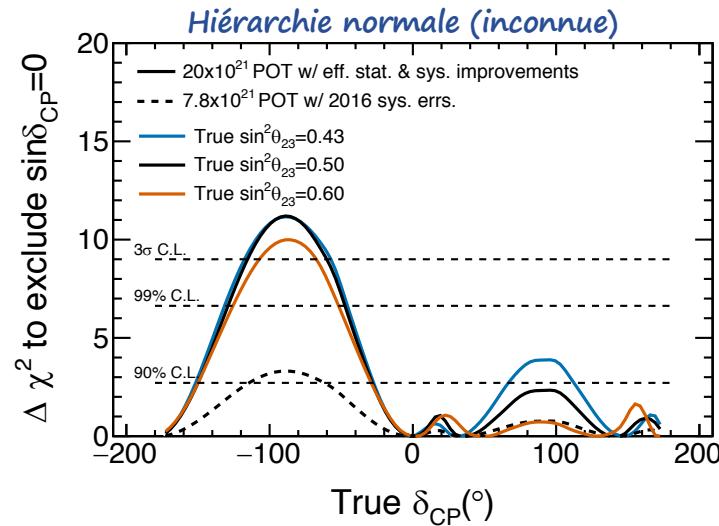
$$P_{\bar{\nu}_\mu \rightarrow \bar{\nu}_e} = a + J_{CP} \times b$$

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

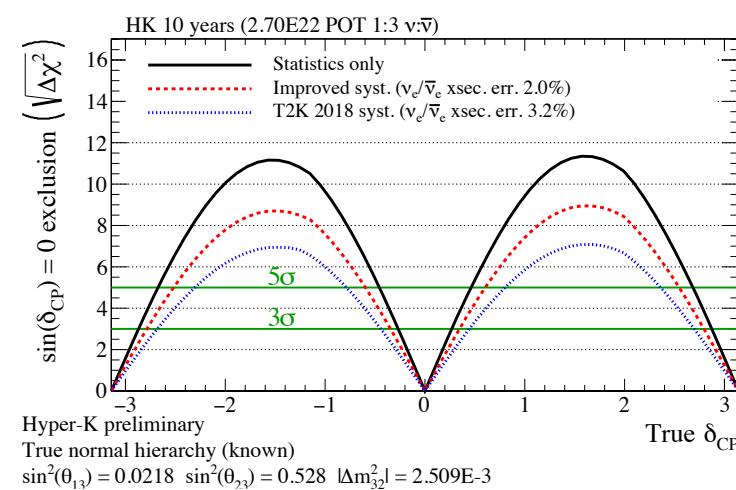
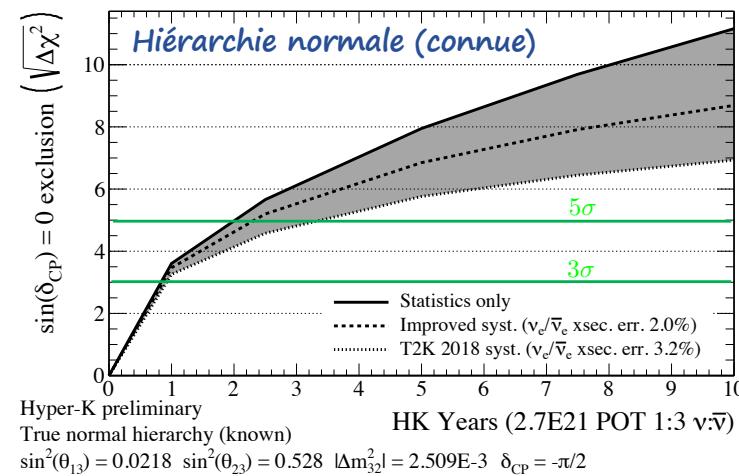
Conservation de CP $\delta = 0, \pi$ exclue à 95% C.L.

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

T2K-2



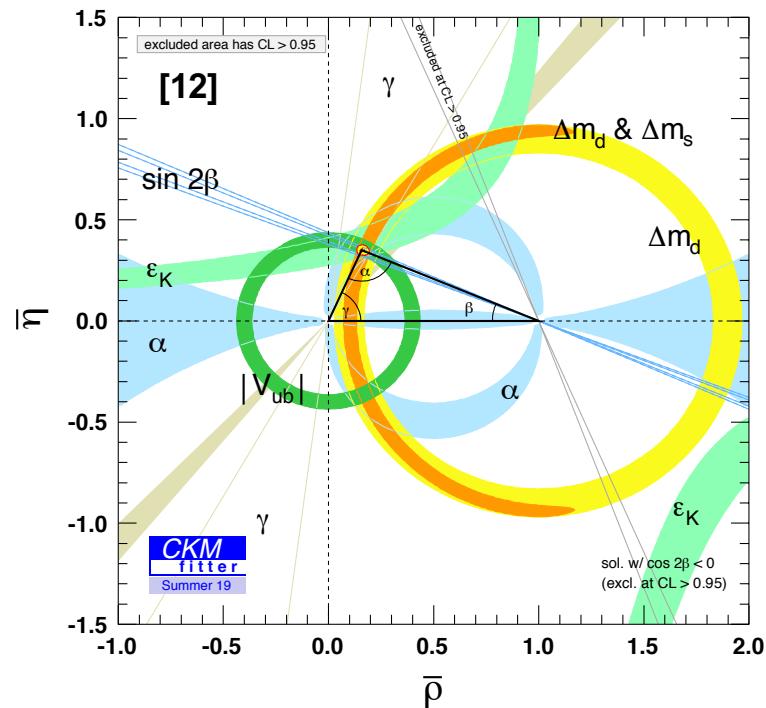
HK



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

60% des valeurs couverts à 5 σ

Quarks



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

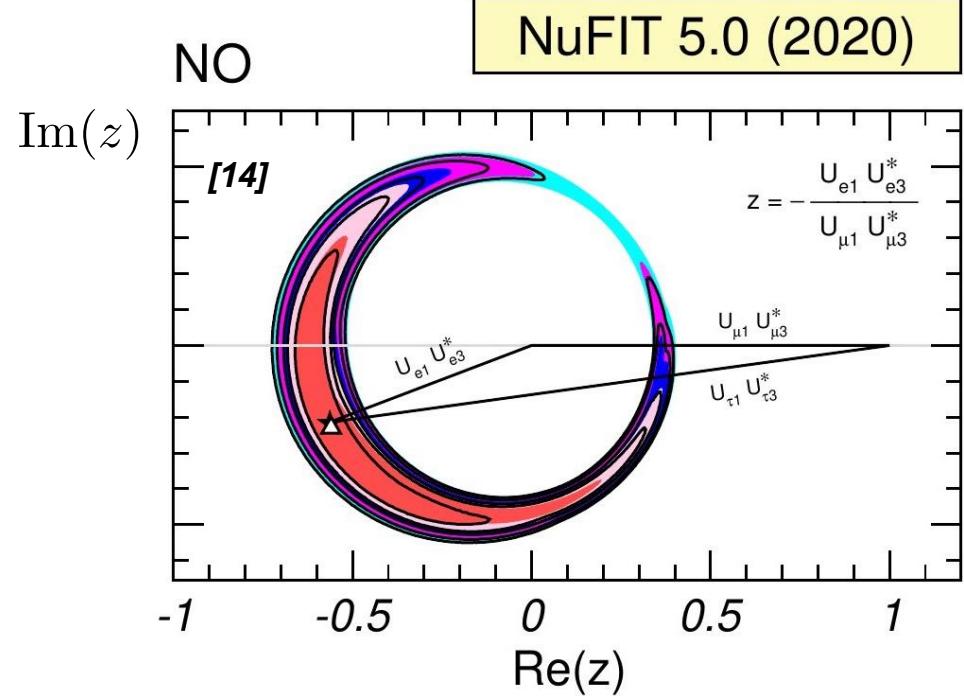
[15]

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

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

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

Leptons



[15]

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

[14]

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

[13]

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

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

Conclusions

- 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) → 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 \mathcal{B} à partir de \mathcal{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? → Expérience Hyper-Kamiokande idéalement positionnée pour répondre à ces questions dans la prochaine décennie.

Bibliographie

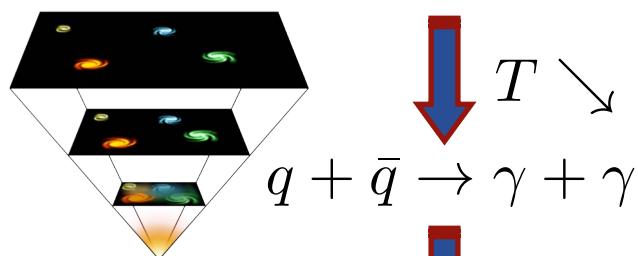
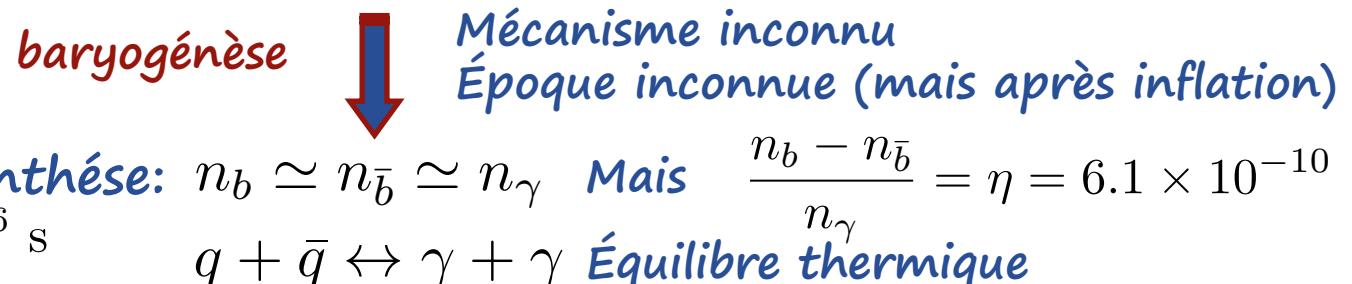
- [1] PDG 2020, Rev. Big Bang nucleosynthesis
- [1b] G. Giesen et al., JCAP09 (2015) 023
- [2] Steigman G., Annu. Rev. Astro. Astrophys. (1976), 14, 339-372
- [3] Sakharov, A. (1967), JETP Lett. 5-24
- [4] Rapports d'activités LLR, 1982, 1985, 1988.
- [5] Frejus coll., Zeitschrift fur Physics C 50, 385–394 (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** $B = N_b - N_{\bar{b}} = 0$



- 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)

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

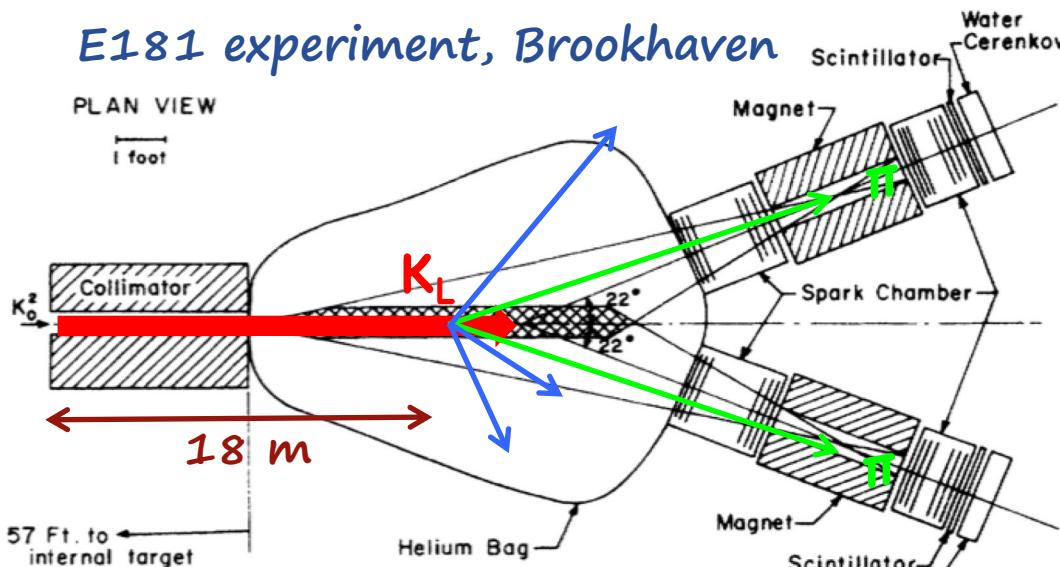
$B-L$ conservé: $\Delta B = \Delta L \Rightarrow \Delta B = N_f N_{CS} = 3, 6, 9 \dots$

Violation de CP chez les quarks

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

E181 experiment, Brookhaven

Mésons K contiennent un quark s



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

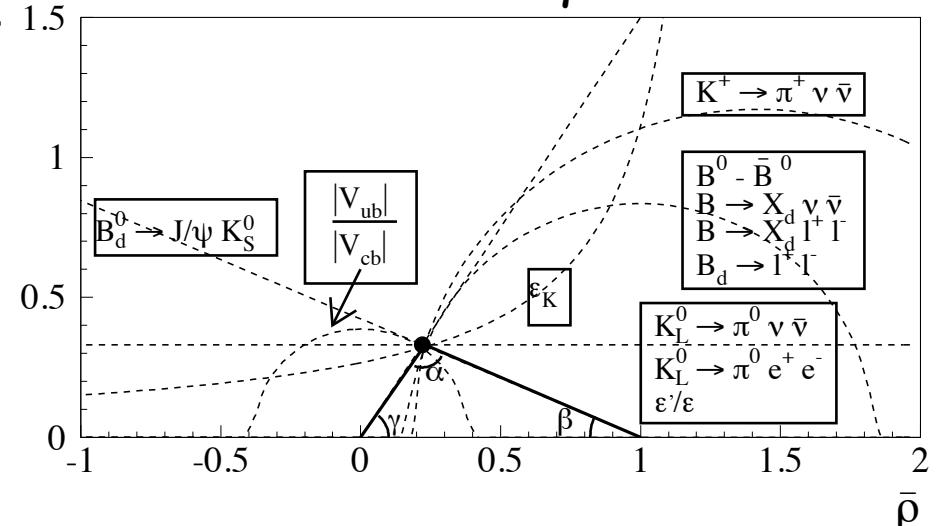
→ Expériences BABAR et Belle

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

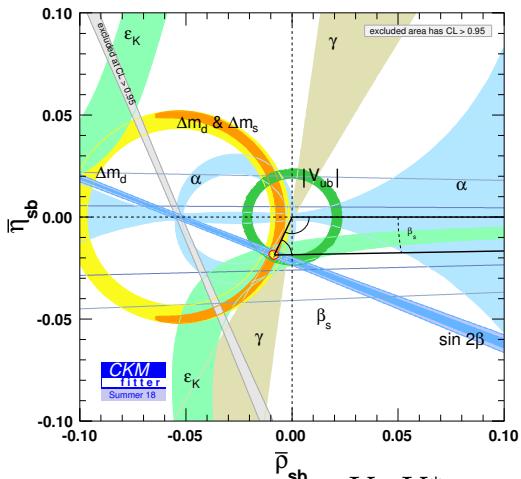
$$\epsilon_K \approx 0.2\%$$

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

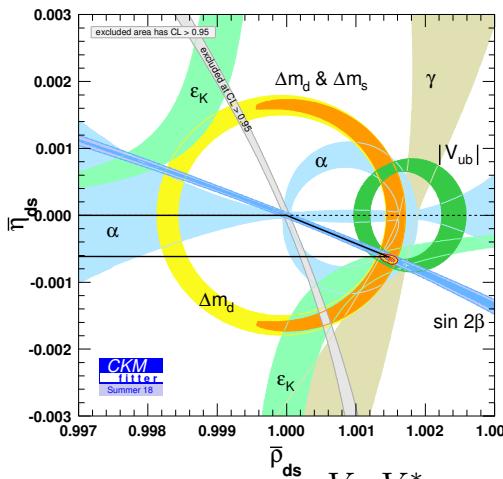
Dans un monde parfait:



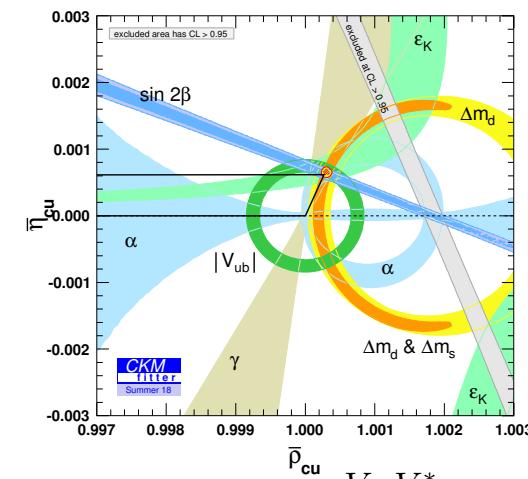
Quarks: autres triangles



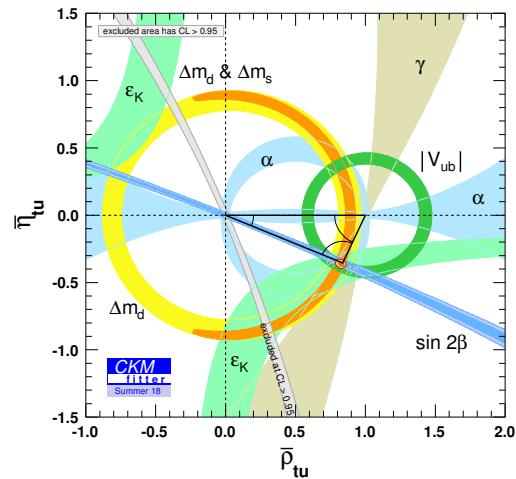
$$\bar{\rho}_{bs} + i\bar{\eta}_{bs} = -\frac{V_{us}V_{ub}^*}{V_{cs}V_{cb}^*}$$



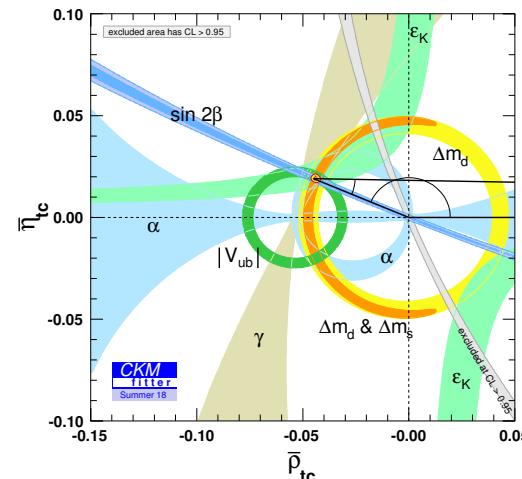
$$\bar{\rho}_{ds} + i\bar{\eta}_{ds} = -\frac{V_{ud}V_{us}^*}{V_{cd}V_{cs}^*}$$



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



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



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

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

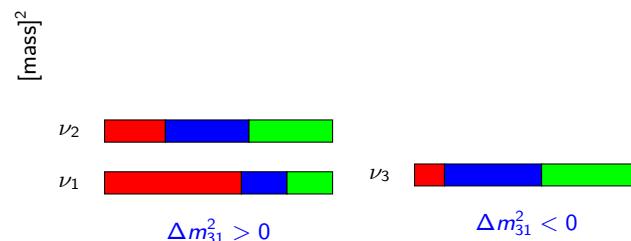
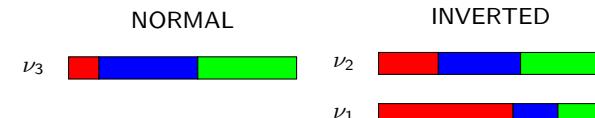
$$U_{23} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \cos \theta_{23} & \sin \theta_{23} \\ 0 & -\sin \theta_{23} & \cos \theta_{23} \end{pmatrix} \quad U_{13} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{13} & 0 & \sin \theta_{13} \\ 0 & 1 & 0 \\ -\sin \theta_{13} & 0 & \cos \theta_{13} \end{pmatrix} \quad U_{12} = \begin{pmatrix} \cos \theta_{12} & \sin \theta_{12} & 0 \\ -\sin \theta_{12} & \cos \theta_{12} & 0 \\ 0 & 0 & 1 \end{pmatrix}$$

$$U_\delta = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & e^{-i\delta_{CP}} \end{pmatrix} \quad U_{\alpha_1, \alpha_2} = \begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & e^{i\alpha_1} & 0 \\ 0 & 0 & e^{i\alpha_2} \end{pmatrix}$$

$$V_{\text{CKM}} = \begin{pmatrix} 0.97401 \pm 0.00011 & 0.22650 \pm 0.00048 & 0.00361^{+0.00011}_{-0.00009} \\ 0.22636 \pm 0.00048 & 0.97320 \pm 0.00011 & 0.04053^{+0.00083}_{-0.00061} \\ 0.00854^{+0.00023}_{-0.00016} & 0.03978^{+0.00082}_{-0.00060} & 0.999172^{+0.000024}_{-0.000035} \end{pmatrix} \quad |U|_{3\sigma}^{\text{with SK-atm}} = \begin{pmatrix} 0.801 \rightarrow 0.845 & 0.513 \rightarrow 0.579 & 0.143 \rightarrow 0.155 \\ 0.234 \rightarrow 0.500 & 0.471 \rightarrow 0.689 & 0.637 \rightarrow 0.776 \\ 0.271 \rightarrow 0.525 & 0.477 \rightarrow 0.694 & 0.613 \rightarrow 0.756 \end{pmatrix}$$

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

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



NEUTRINO 2016

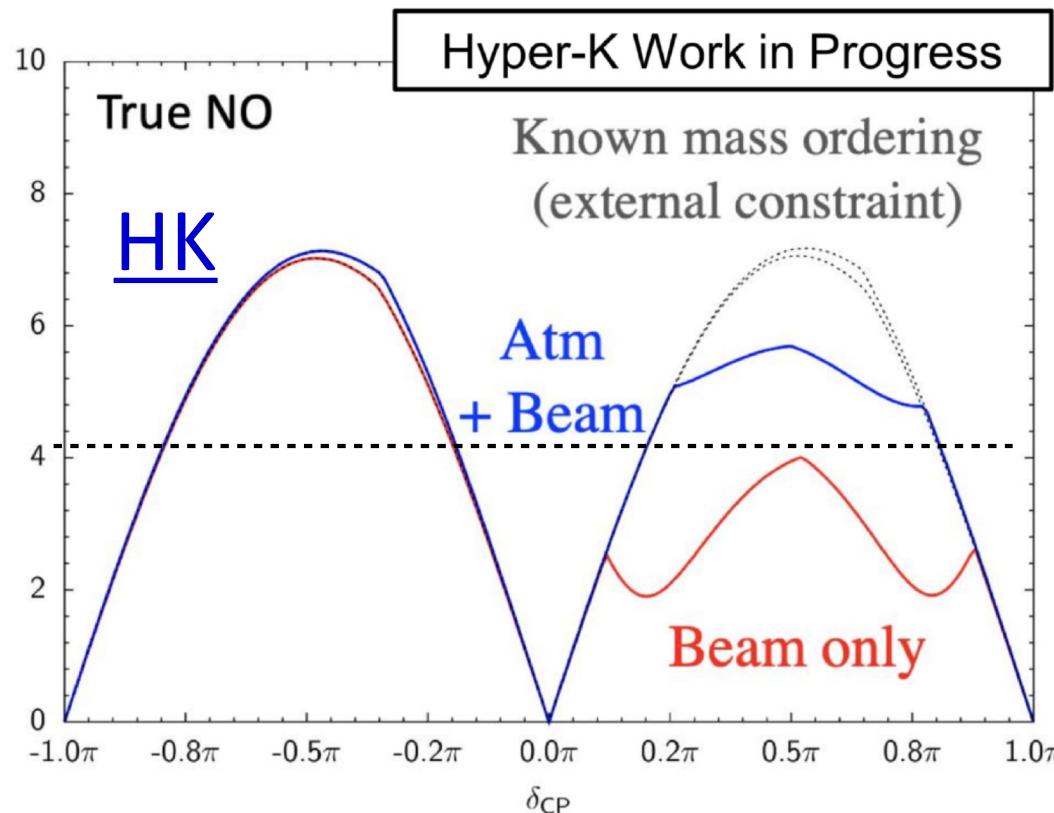
	Observed	$\delta_{CP} = -\pi/2$	$\delta_{CP} = 0$	$\delta_{CP} = \pi/2$	$\delta_{CP} = \pi$
ν_μ disappearance	127	127.9	127.6	127.8	128.1
ν_e appearance	32	27.0	22.7	18.5	22.7
anti- ν_μ disappearance	66	64.4	64.3	64.4	64.6
anti- ν_e appearance	4	6	6.9	7.7	6.8

NEUTRINO 2018

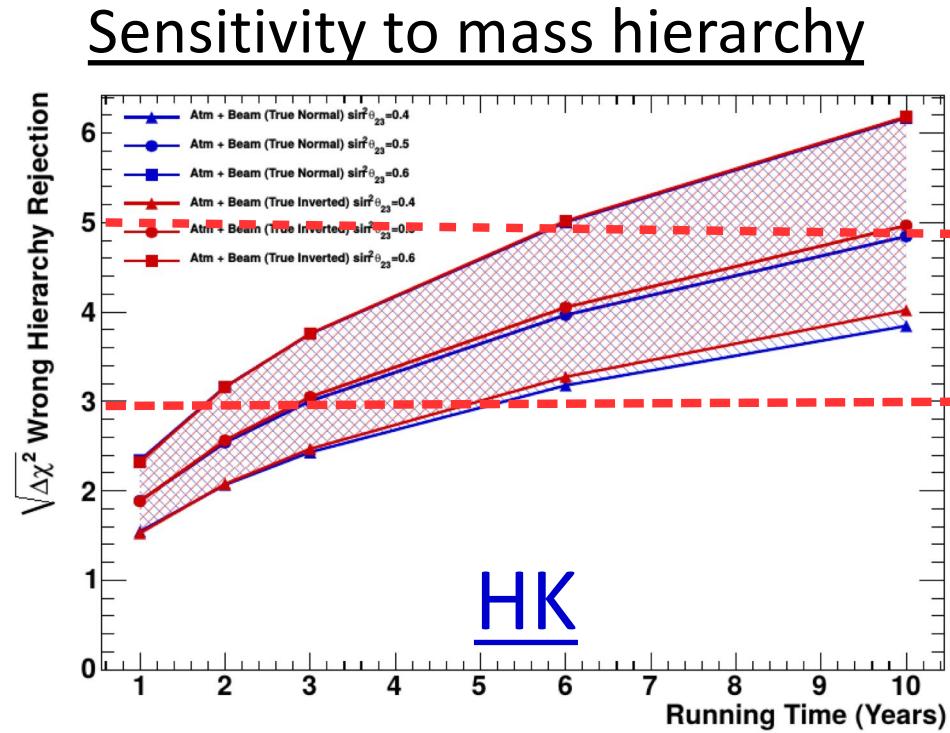
	Observed	$\delta_{CP} = -\pi/2$	$\delta_{CP} = 0$	$\delta_{CP} = \pi/2$	$\delta_{CP} = \pi$
ν_μ disappearance	243	272.4	272	272.4	272.8
ν_e appearance	75	74.4	62.2	50.6	62.7
ν_e appearance (CC1 π^+ -like sample)	15	7.0	6.1	4.9	5.9
anti- ν_μ disappearance	140	139.2	139.2	139.5	139.9
anti- ν_e appearance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

NEUTRINO 2020

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



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 ($\Delta\chi^2 = 2.7$)	
		bfp $\pm 1\sigma$	3σ range	bfp $\pm 1\sigma$	3σ range
without SK atmospheric data					
$\sin^2 \theta_{12}$		$0.304^{+0.013}_{-0.012}$	$0.269 \rightarrow 0.343$	$0.304^{+0.013}_{-0.012}$	$0.269 \rightarrow 0.343$
$\theta_{12}/^\circ$		$33.44^{+0.78}_{-0.75}$	$31.27 \rightarrow 35.86$	$33.45^{+0.78}_{-0.75}$	$31.27 \rightarrow 35.87$
$\sin^2 \theta_{23}$		$0.570^{+0.018}_{-0.024}$	$0.407 \rightarrow 0.618$	$0.575^{+0.017}_{-0.021}$	$0.411 \rightarrow 0.621$
$\theta_{23}/^\circ$		$49.0^{+1.1}_{-1.4}$	$39.6 \rightarrow 51.8$	$49.3^{+1.0}_{-1.2}$	$39.9 \rightarrow 52.0$
$\sin^2 \theta_{13}$		$0.02221^{+0.00068}_{-0.00062}$	$0.02034 \rightarrow 0.02430$	$0.02240^{+0.00062}_{-0.00062}$	$0.02053 \rightarrow 0.02436$
$\theta_{13}/^\circ$		$8.57^{+0.13}_{-0.12}$	$8.20 \rightarrow 8.97$	$8.61^{+0.12}_{-0.12}$	$8.24 \rightarrow 8.98$
$\delta_{\text{CP}}/^\circ$		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					
		Normal Ordering (best fit)		Inverted Ordering ($\Delta\chi^2 = 7.1$)	
		bfp $\pm 1\sigma$	3σ range	bfp $\pm 1\sigma$	3σ range
$\sin^2 \theta_{12}$		$0.304^{+0.012}_{-0.012}$	$0.269 \rightarrow 0.343$	$0.304^{+0.013}_{-0.012}$	$0.269 \rightarrow 0.343$
$\theta_{12}/^\circ$		$33.44^{+0.77}_{-0.74}$	$31.27 \rightarrow 35.86$	$33.45^{+0.78}_{-0.75}$	$31.27 \rightarrow 35.87$
$\sin^2 \theta_{23}$		$0.573^{+0.016}_{-0.020}$	$0.415 \rightarrow 0.616$	$0.575^{+0.016}_{-0.019}$	$0.419 \rightarrow 0.617$
$\theta_{23}/^\circ$		$49.2^{+0.9}_{-1.2}$	$40.1 \rightarrow 51.7$	$49.3^{+0.9}_{-1.1}$	$40.3 \rightarrow 51.8$
$\sin^2 \theta_{13}$		$0.02219^{+0.00062}_{-0.00063}$	$0.02032 \rightarrow 0.02410$	$0.02238^{+0.00063}_{-0.00062}$	$0.02052 \rightarrow 0.02428$
$\theta_{13}/^\circ$		$8.57^{+0.12}_{-0.12}$	$8.20 \rightarrow 8.93$	$8.60^{+0.12}_{-0.12}$	$8.24 \rightarrow 8.96$
$\delta_{\text{CP}}/^\circ$		197^{+27}_{-24}	$120 \rightarrow 369$	282^{+26}_{-30}	$193 \rightarrow 352$
$\frac{\Delta m_{21}^2}{10^{-5} \text{ eV}^2}$		$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	$6.82 \rightarrow 8.04$	$7.42^{+0.21}_{-0.20}$	$6.82 \rightarrow 8.04$
$\frac{\Delta m_{3\ell}^2}{10^{-3} \text{ eV}^2}$		$+2.517^{+0.026}_{-0.028}$	$+2.435 \rightarrow +2.598$	$-2.498^{+0.028}_{-0.028}$	$-2.581 \rightarrow -2.414$