

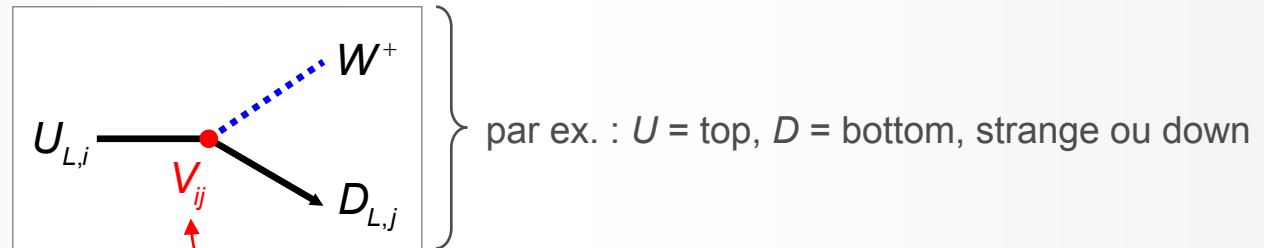
Revenons an arrière ...

Ayant rappelé les constituants de la matière et des forces, et ayant compris l'origine de la masse des fermions et bosons par la brisure spontanée de la symétrie électrofaible par le champ du Higgs ...

Comment expliquer le phénomène observé de violation de CP ?

Mélange de quarks et violation de CP

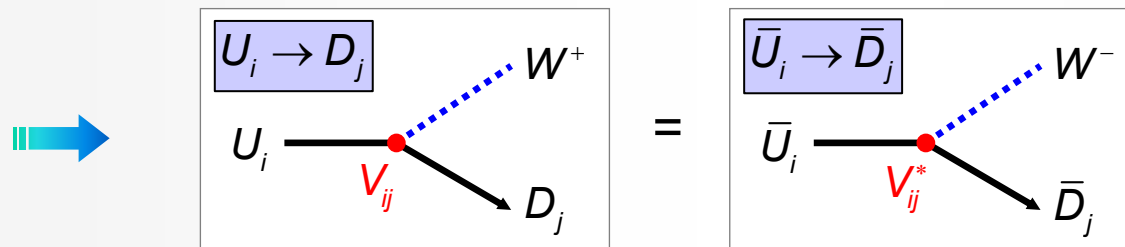
- Le courant faible transmis par les $W^\pm$ bosons génère des transitions entre familles de quarks :



Pour N générations, Il y a $N \times N$ de ces couplages $\rightarrow$ matrice !

- Les « quarks physiques » sont donc des « mélanges » de N saveurs de quarks

- Conservation de CP exige : $A(U_i \rightarrow D_j) = \bar{A}(\bar{U}_i \rightarrow \bar{D}_j)$



seulement, si: $V_{ij} = V_{ij}^*$

... car l'opération de CP entraîne mathématiquement une conjugaison complexe

La matrice de mélange de quarks V (1)

- ☀ Les $|V_{ij}|^2$ décrivent des probabilités de transition $\rightarrow V$ est unitaire
 - 🖼 Par ex : le quark top ne peut se désintégrer qu'en quark bottom, strange ou down $\rightarrow$ la somme des probabilités de transition doit être 1.

$$|V_{td}|^2 + |V_{ts}|^2 + |V_{tb}|^2 = 1$$

- ☀ Condition d'unitarité:

$$VV^\dagger = 1 \Leftrightarrow \sum_j V_{ij} V_{jk}^* = \delta_{ik}$$

- ☀ Cette condition contraint fortement les éléments de la matrice V , qui initialement a $2N^2$ inconnues

La matrice de mélange de quarks V (1)

- ☀ Rappelons qu'au moment de la découverte de violation de CP via les désintégrations de $K_L \rightarrow \pi\pi$ seulement 3 quarks étaient connus : u , d , s
- 🖥 Par intuition géniale, Glashow-Iliopoulos-Maiani ont postulé en 1970 l'existence d'un 4^{ème} quark (charme) pour expliquer le faible taux observé pour $K_L \rightarrow \mu\mu \rightarrow$ **2 familles**
- ☀ V peut-il être complexe avec 2 familles ?

➡ $N = 2$ generations:

- 🖥 8 inconnues – 4 modules et 4 phases
 - 🖥 Unitarité apporte 4 contraintes $VV^\dagger = \begin{pmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{pmatrix}$
 - 🖥 Pour 4 quarks, nous pouvons ajuster 3 phases relatives non physiques
- ➡ Seulement 1 paramètre libre, **un angle de rotation^(*)**; pas de phase $\rightarrow$ pas de violation de CP

(*) C'est l'angle (θ_C) a été introduit par N. Cabibbo en 1967 pour expliquer les désintégrations de particules étranges

La matrice de mélange de quarks V (1)

☀ Kobayashi-Maskawa (KM) en 1973 ont eu l'audace d'incrémenter le nombre de familles – sans le moindre indice expérimental ...

➡ $N = 3$:

🖼 18 inconnues – 9 modules et 9 phases

🖼 Unitarité apporte 9 contraintes

🖼 Pour 6 quarks, nous pouvons ajuster 5 phases relatives non physiques

➡ Restent 4 paramètres libres : 3 angles de rotation et **1 phase** → **CPV** !

La découverte d'événements $K_L \rightarrow \pi\pi$ et la lucidité de KM ont permis de prédire l'existence de 2 nouveaux quarks et – par symétrie – de 2 nouveaux leptons

Suite des événements

confirmation du « mécanisme de KM »

- 1964 Découverte de violation de CP (VCP) dans le système des Kaons
- 1973 Publication de Kobayashi-Maskawa → matrice CKM avec 3 familles
- 1974 Résonance J/ψ : découverte du quark c (Ting, Richter – BNL / SLAC)
- 1975 Découverte du lepton Tau → 3^{ème} famille (Perl – SLAC)
- 1977 Résonance Υ : découverte du quark b → 3^{ème} famille (Lederman – FNAL)
- 1995 Découverte du quark top (FNAL)
- 1998 Découverte d'oscillation de neutrinos → ν massifs ! → violation de CP ?
- 2000 Observation du neutrino Tau (FNAL)
- 2001 Découverte de VCP dans le système du B (SLAC / KEK)
- 2008 Grand nombre de mesures de VCP en parfait accord avec KM

La matrice CKM

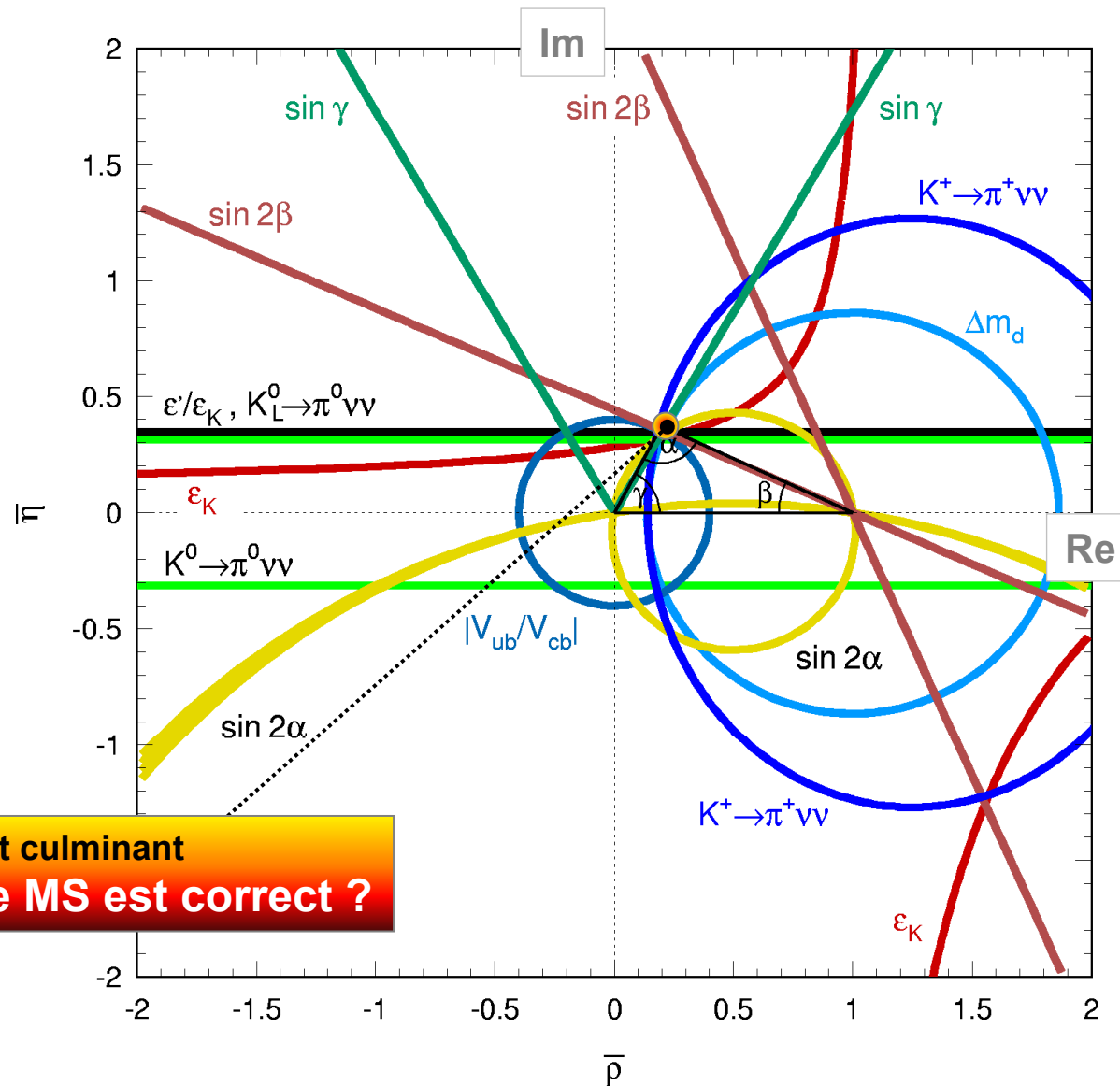
$$V = \begin{pmatrix} \text{■} & \text{■} & \text{○} \\ \text{■} & \text{■} & \text{■} \\ \text{○} & \text{■} & \text{■} \end{pmatrix}$$

- Hiérarchie entre transitions : $\lambda = V_{us} = 0.22$
- Éléments avec « phases CP » petits

$$= \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & -\lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + O(\lambda^4)$$

Diagram illustrating the CKM matrix structure and its expansion in terms of λ . The matrix is shown in two forms: a qualitative representation using squares and circles, and a quantitative expansion. The expansion includes terms like $1 - \lambda^2/2$, $-\lambda$, $A\lambda^3(\rho - i\eta)$, $A\lambda^2$, and 1 . The parameter λ is highlighted in red. Blue arrows and ovals indicate the hierarchy and the small phases CP (represented by ρ and η).

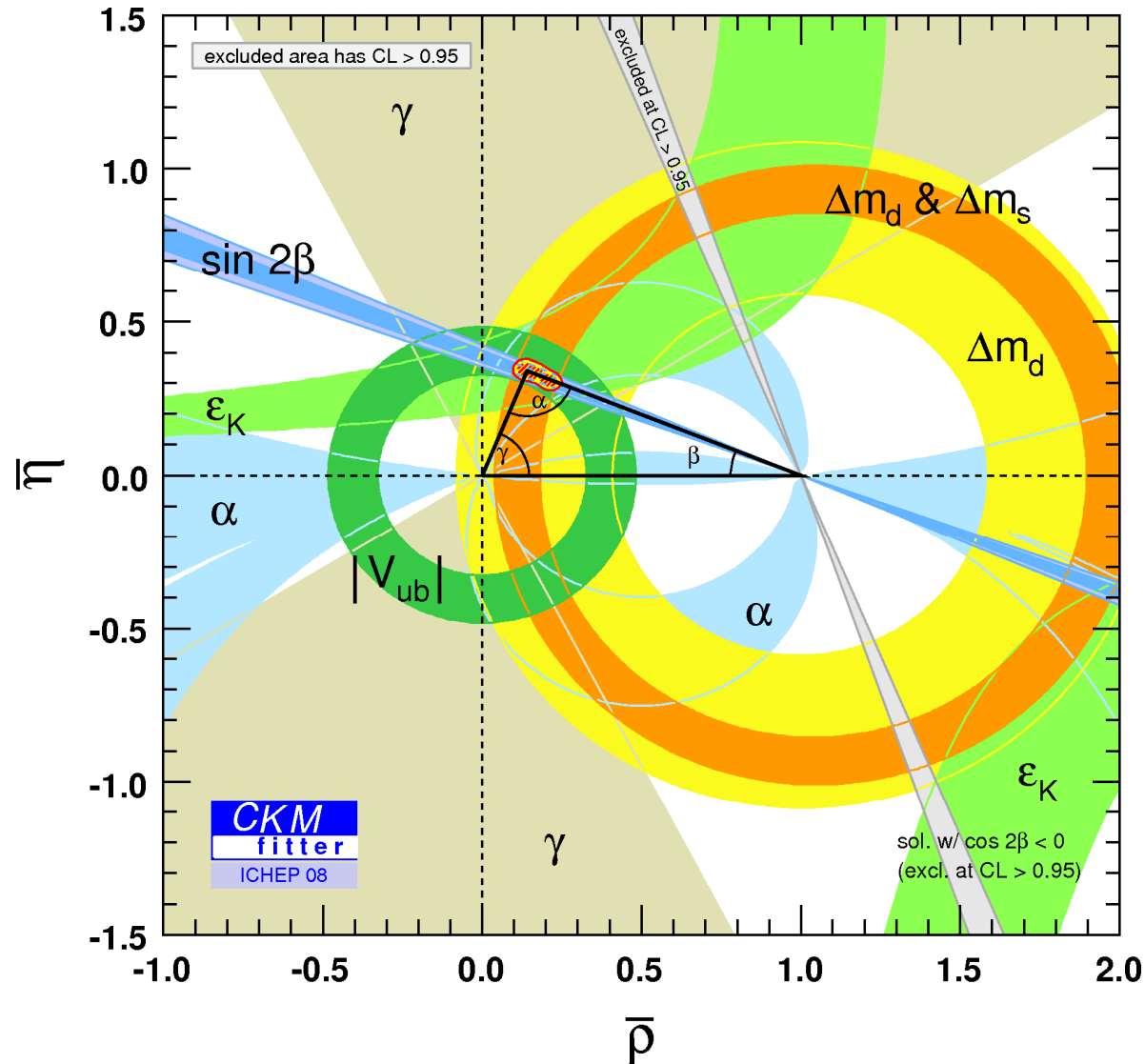
Contraindre la phase CP de la matrice CKM



Point culminant
Est-ce que le MS est correct ?

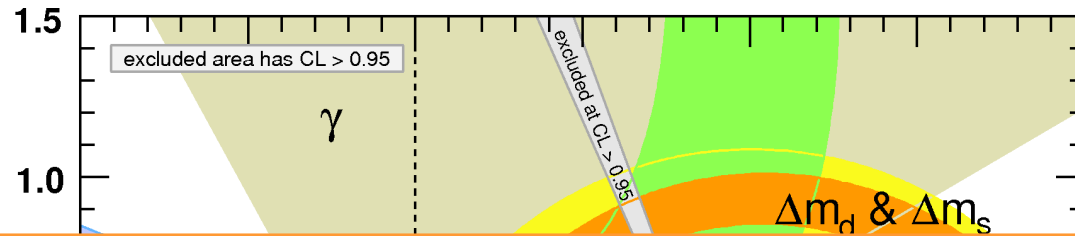
La situation expérimentale actuelle du fit global de la matrice CKM

SUMMER
2008



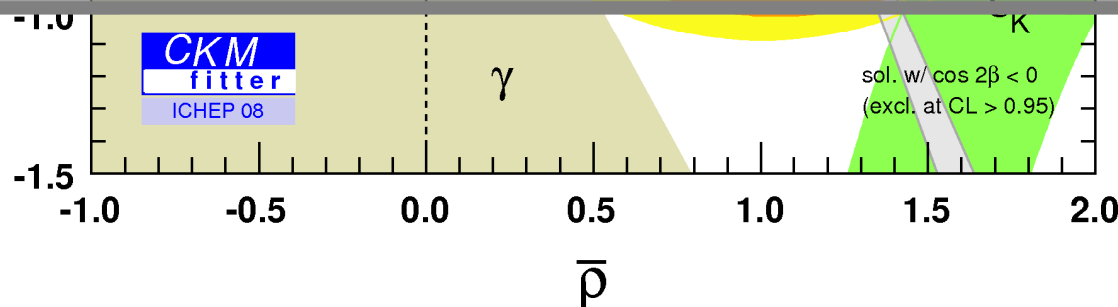
La situation expérimentale actuelle du fit global de la matrice CKM

SUMMER
2008



Le fit démontre que le mécanisme KM est la source dominante de violation de CP à l'échelle d'énergie électrofaible (~ 100 GeV)

Aucune nécessité d'introduire de la « nouvelle physique »



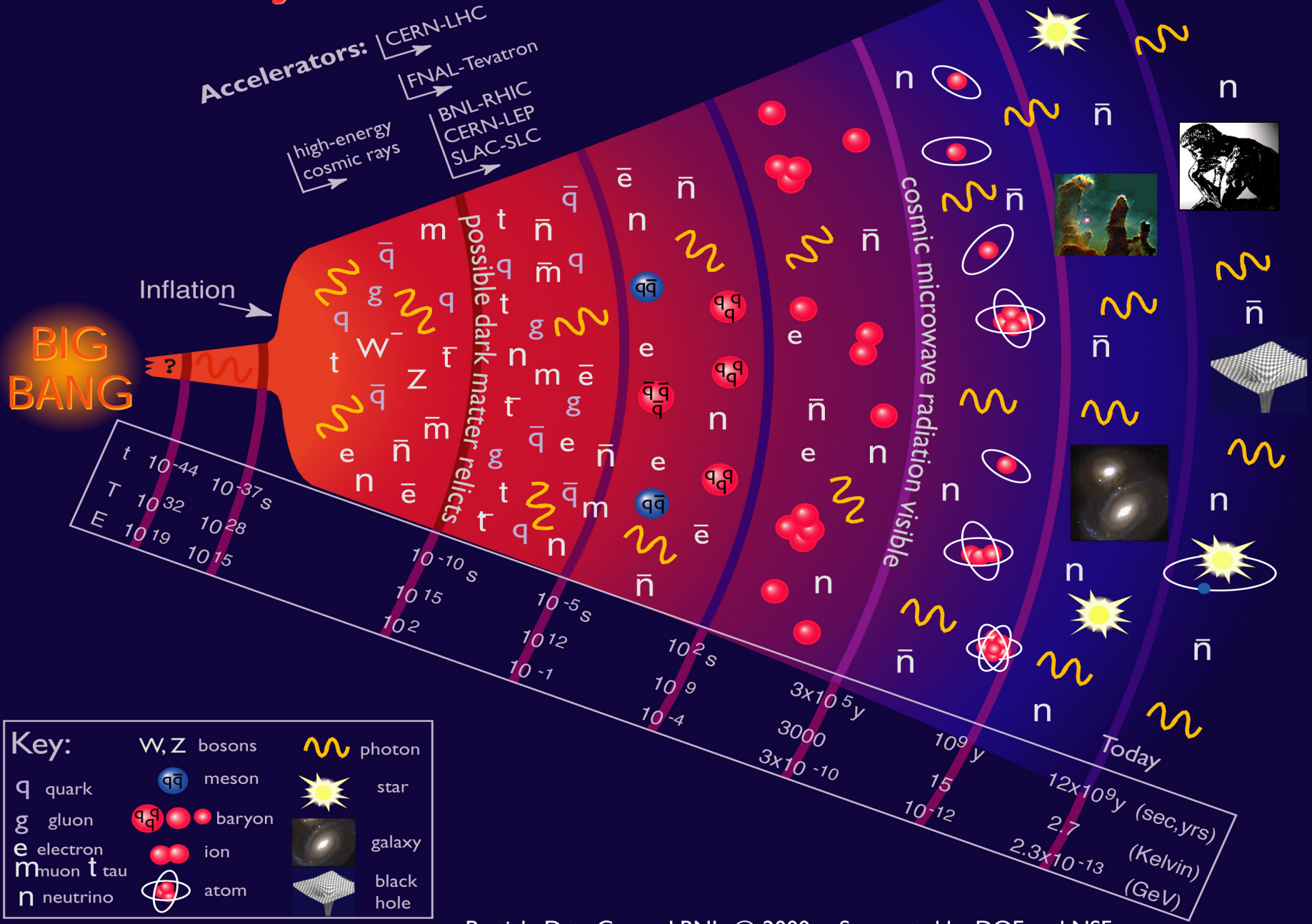
Mais – en dépit de ce **formidable succès**, le
Modèle Standard est en **crise** ...

Autant de questions fondamentales auxquelles le MS ne répond pas ...

- (Le boson de Higgs n'a pas encore été observé !)
- (Le Higgs est la seule particule élémentaire scalaire)
- Quelle est l'origine de l'énorme hiérarchie de masse entre les particules ?
- De quelle substance est faite la matière noire ?
- Quel processus est responsable de l'énergie noire ?
- Comment peut-on unifier les forces électrofaible et forte à grande énergie ?
- Comment résoudre le problème de la hiérarchie de jauge ?
- Pourquoi n'a-t-on pas observé de violation de CP dans l'interaction forte ?
- Quelle est la nature des neutrinos (Dirac vs. Majorana) ?
- Comment unifier la Gravitation avec les autres forces ?
- **Comment générer l'excès de matière par rapport à l'antimatière ?**

Rappelons-nous que **l'excès de matière** a été créé au **tout début du Big Bang** – en effet avant la première **10^{-10} -ème seconde** au moment où la température de l'univers dépassait **10^{15} K** (= 100 GeV)

History of the Universe





Univers actuelle

En 10^{-10} seconde le Big Bang a généré un excès de 10^{-10} de baryon par rapport à la quantité de matière initiale (= nombre de photons après annihilation)

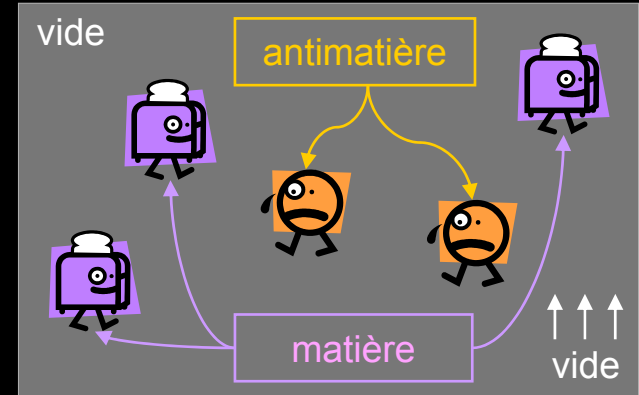
La phase de la matrice CKM
est-elle à l'origine de cet excès ?

➡ **Non** (très probablement) – des calculs (compliqués) ont montré que le MS ne peut produire qu'une toute petite asymétrie baryonique de $\sim 10^{-19}$

En 10^{-10} seconde le Big Bang a généré un **excès**
de 10^{-10} de **baryon** par rapport à la quantité de
matière initiale (= nombre de photons après annihilation)

L'antimatière a-t-elle vraiment disparu ?

➡ **Oui** (très probablement) –
les recherches d'antinoyaux et
de signes d'annihilation entre
matière et antimatière ont été
infructueuses



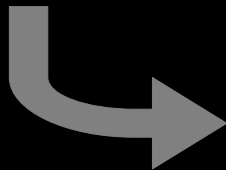
L'univers ressemble-t-il a un fromage suisse ?
→ difficile a concilier avec la dynamique du
Big Bang et l'expansion de l'univers

En 10^{-10} seconde le Big Bang a généré un **excès**
de 10^{-10} de **baryon** par rapport à la quantité de
matière initiale (= nombre de photons après annihilation)

Quid alors ?

➡ 3 théories pour la « baryogenèse (BG) » :

- BG au moment de la grande unification
- BG au moment de la transition de phase électrofaible
- BG via la création d'une **asymétrie leptonique** (« leptogenèse »)



Probablement l'approche la plus prometteuse ...
poussée par la découverte d'oscillation de neutrino

Baryogenèse via leptogenese

- ☀ Les ν légers auraient partenaires lourds ($M_N \sim 10^{12}$ GeV) de chiralité droite : $N_{i=1,2,3}$
- ☀ La dynamique permet leurs désintégrations violant le nombre leptonique :

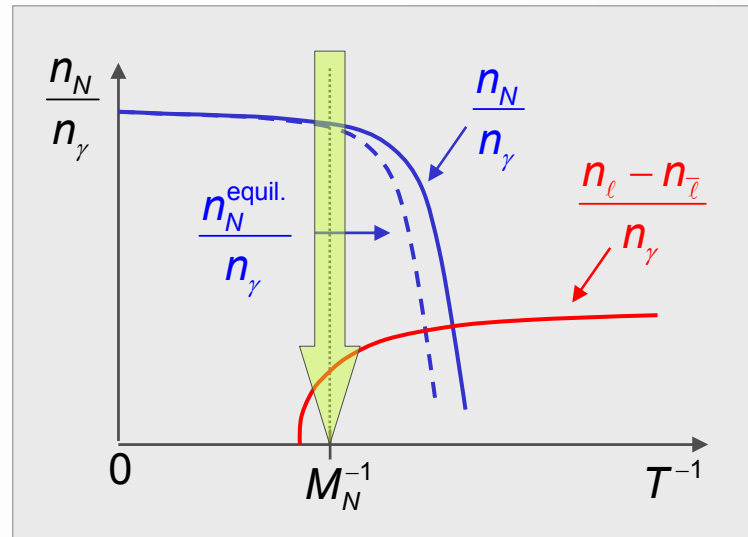
$$N_i \rightarrow \ell \phi \quad \text{and} \quad N_i \rightarrow \bar{\ell} \phi^*$$

➡ Règle de Sakharov 2 :



Différences de taux due à la violation de CP dans la désintégration (une petite asymétrie $\sim 10^{-6}$ suffit)

➡ Règle de Sakharov 3 :



L'évolution de n_N/n_γ lors de l'expansion de l'univers

Départ de l'équilibre thermodynamique

$\Gamma_{\Delta L=2}(T) < H(T)$
(pour éviter des réactions estompant ΔL)

à $T < M_N$

➡ Règle de Sakharov 1:

ΔL induit la baryogenèse via des réactions de « sphalérons » créant des transitions $\Delta(B + L) \neq 0$, mais conservant $\Delta(B - L) = 0$

Epilogue ...

Que faire pour remédier aux multiples problèmes du Modèle Standard ?

A une majorité d'entre eux, le LHC pourrait apporter des éléments de réponses ...

Qu'apportera le Futur



Probleme

Abordé par le LHC ?

(Le boson de Higgs n'a pas encore été observé !)



(Le Higgs est la seule particule élémentaire scalaire)



Quelle est l'origine de l'énorme hiérarchie de masse entre les particules ?



De quelle substance est faite la matière noire ?



Quel processus est responsable de l'énergie noire ?



Comment peut-on unifier les forces électrofaible et forte à grande énergie ?



Comment résoudre le problème de la hiérarchie de jauge ?



Pourquoi n'a-t-on pas observé de violation de CP dans l'interaction forte ?



Quelle est la nature des neutrinos ?



Comment unifier la Gravitation avec les autres forces ?



Comment générer l'excès de matière par rapport à l'antimatière ?



Yoichiro Nambu
Fermi Inst., USA



Makoto Kobayashi
KEK, Japan



Toshihide Maskawa
Kyoto U., Japan



**Souhaitez-nous
bonne chance !**