

Violation de CP et saveurs lourdes

Introduction et prospective théorique



journées DSM/DAPNIA - IN2P3

La Colle sur Loup

11-15 octobre 2004

J. Charles

CPT - Marseille

groupe de travail

D. Bernard, JC, A. Höcker, R. Le Gac, D. Lhuillier, O. Naviliat,

P. Perret, B. Peyaud, O. Pène, A. Stocchi, G. Wormser

CP : une symétrie essentielle

C conjugaison de charge, **P** parité spatiale, **T** renversement du temps

C, **P**, **T** sont des transformations discrètes fondamentales

C et **P** sont violées maximalement (fermions chiraux)

CP et **T** sont violées à un niveau de 10^{-5}

C, **P** et **CP** sont des ingrédients cruciaux de la composition de l'Univers (baryogenèse)

CP : une symétrie essentielle

C conjugaison de charge, **P** parité spatiale, **T** renversement du temps

C, **P**, **T** sont des transformations discrètes fondamentales

C et **P** sont violées maximalement (fermions chiraux)

CP et **T** sont violées à un niveau de 10^{-5}

C, **P** et **CP** sont des ingrédients cruciaux de la composition de l'Univers (baryogenèse)

Historique des découvertes

1964 violation de **CP** indirecte dans le système des kaons neutres

1998 violation de **T** dans le système des kaons neutres

1999 violation de **CP** directe dans la désintégration des kaons neutres

2001 violation de **CP** induite par le mélange des **B** neutres

2004 violation de **CP** directe dans la désintégration des **B** neutres

CP : une symétrie essentielle

C conjugaison de charge, **P** parité spatiale, **T** renversement du temps

C, **P**, **T** sont des transformations discrètes fondamentales

C et **P** sont violées maximalement (fermions chiraux)

CP et **T** sont violées à un niveau de 10^{-5}

C, **P** et **CP** sont des ingrédients cruciaux de la composition de l'Univers (baryogenèse)

La violation de **CP** est (parfaitement ?) décrite par le Modèle Standard, mais on n'en a toujours aucune explication dynamique

Historique des découvertes

1964 violation de **CP** indirecte dans le système des kaons neutres

1998 violation de **T** dans le système des kaons neutres

1999 violation de **CP** directe dans la désintégration des kaons neutres

2001 violation de **CP** induite par le mélange des B neutres

2004 violation de **CP** directe dans la désintégration des B neutres

Le mélange des quarks

Modèle Standard : l'interaction faible mélange les saveurs de quarks

→ bi-diagonalisation sur la base des états propres par la matrice de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) :

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

Le mélange des quarks

Modèle Standard : l'interaction faible mélange les saveurs de quarks

→ bi-diagonalisation sur la base des états propres par la matrice de

Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM) :

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

Cette matrice unitaire est complexe ($V_{ub} \propto |V_{ub}| e^{-i\gamma}$) dès qu'il y a au moins trois générations de fermions massifs

source de violation de la symétrie CP

Hiérarchie et Triangle d'Unitarité

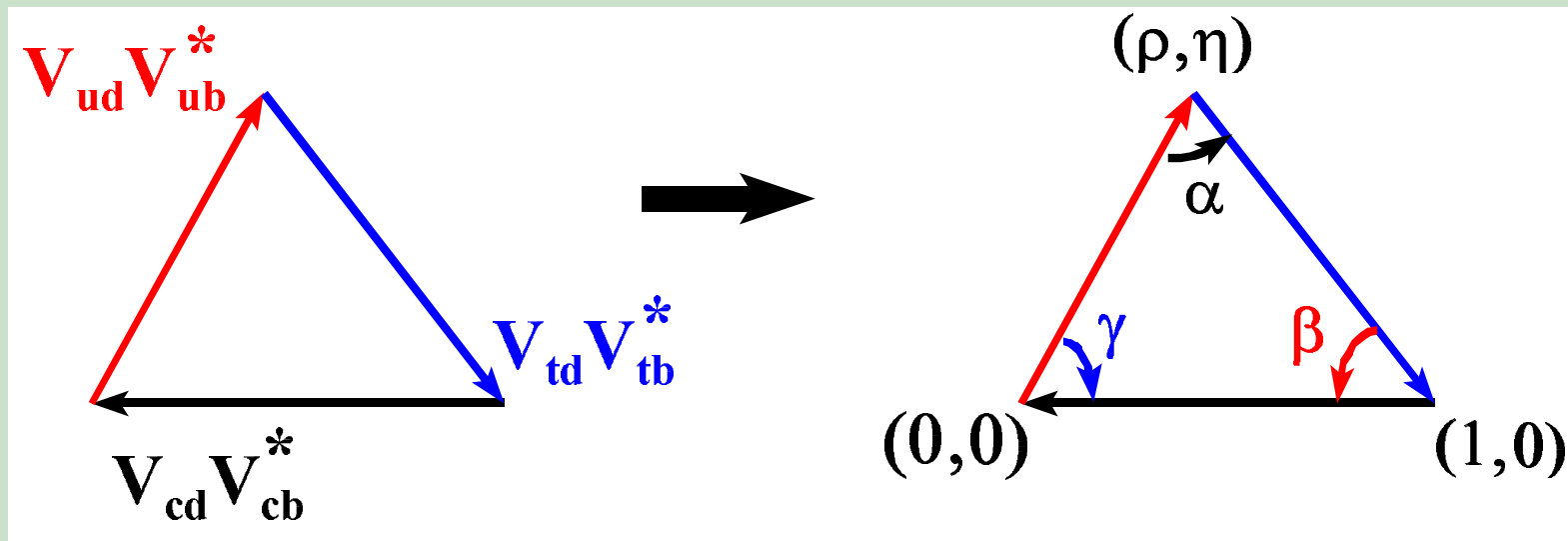
forte hiérarchie de la matrice CKM :

couplages diagonaux $\propto 1$

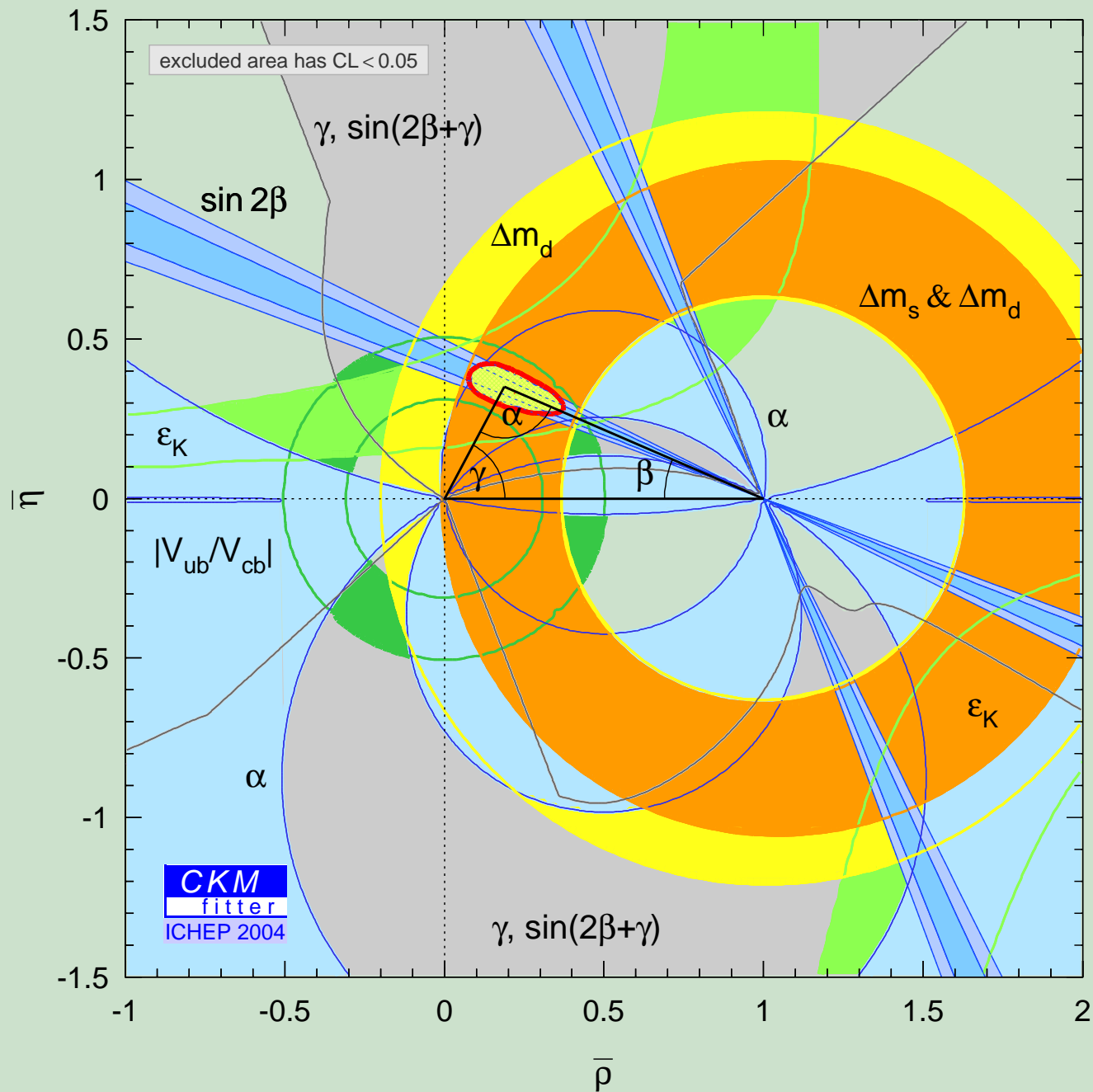
1ère \leftrightarrow 2ème (resp. 2ème \leftrightarrow 3ème) génération $\propto \lambda \sim 0.22$ (resp. $\propto \lambda^2$)

couplages 1ère \leftrightarrow 3ème génération $\propto \lambda^3$

unitarité CKM \Rightarrow six triangles dans le plan complexe, quatre sont quasiment plats, deux sont quasiment dégénérés



La situation en 2004



Le problème de hiérarchie

d'un côté le Higgs du Modèle Standard est un scalaire dont la masse reçoit des corrections radiatives ultraviolettes quadratiquement divergentes
la résolution du problème de Higgs nécessite
« quelque chose » à une échelle de l'ordre du **TeV**

Le problème de hiérarchie

d'un côté le Higgs du Modèle Standard est un scalaire dont la masse reçoit des corrections radiatives ultraviolettes quadratiquement divergentes
la résolution du problème de Higgs nécessite « quelque chose » à une échelle de l'ordre du **TeV**

d'un autre côté le succès du modèle CKM impose de reléguer la Nouvelle Physique à des échelles de **plusieurs dizaines de TeV**, si la structure de saveur est générique ($\delta_{sd} \sim \delta_{bd} \sim 1$)

$$\frac{\delta_{Qq}}{\Lambda_{NP}} \text{ vs. } \frac{V_{tQ}^* V_{tq}}{M_W}$$

Le problème de hiérarchie

d'un côté le Higgs du Modèle Standard est un scalaire dont la masse reçoit des corrections radiatives ultraviolettes quadratiquement divergentes
la résolution du problème de Higgs nécessite « quelque chose » à une échelle de l'ordre du **TeV**

d'un autre côté le succès du modèle CKM impose de reléguer la Nouvelle Physique à des échelles de **plusieurs dizaines de TeV**, si la structure de saveur est générique ($\delta_{sd} \sim \delta_{bd} \sim 1$)

$$\frac{\delta_{Qq}}{\Lambda_{NP}} \text{ vs. } \frac{V_{tQ}^* V_{tq}}{M_W}$$

si les arguments de naturalité sont corrects, la Nouvelle Physique doit respecter **des symétries de saveur très particulières**

Le problème de hiérarchie

d'un côté le Higgs du Modèle Standard est un scalaire dont la masse reçoit des corrections radiatives ultraviolettes quadratiquement divergentes
la résolution du problème de Higgs nécessite « quelque chose » à une échelle de l'ordre du **TeV**

d'un autre côté le succès du modèle CKM impose de reléguer la Nouvelle Physique à des échelles de **plusieurs dizaines de TeV**, si la structure de saveur est générique ($\delta_{sd} \sim \delta_{bd} \sim 1$)

$$\frac{\delta_{Qq}}{\Lambda_{NP}} \text{ vs. } \frac{V_{tQ}^* V_{tq}}{M_W}$$

si les arguments de naturalité sont corrects, la Nouvelle Physique doit respecter **des symétries de saveur très particulières**

toute la question est de savoir lesquelles ...

quelques possibilités

modèles MFV : toute la violation de CP est pilotée par CKM

—→ tests de précision des processus rares

Q : pourquoi ?

quelques possibilités

modèles MFV : toute la violation de CP est pilotée par CKM

—→ tests de précision des processus rares

Q : pourquoi ?

la Nouvelle Physique est essentiellement transparente à la saveur jusqu'à des échelles très grandes

—→ tests de CP conservant la saveur

Q : quid des leptons ?

quelques possibilités

modèles MFV : toute la violation de CP est pilotée par CKM

—→ tests de précision des processus rares

Q : pourquoi ?

la Nouvelle Physique est essentiellement transparente à la saveur jusqu'à des échelles très grandes

—→ tests de CP conservant la saveur

Q : quid des leptons ?

solutions intermédiaires (ex : seul $b \rightarrow s$ est affecté par NP à basse énergie) ...

Q : pourquoi les deux dernières générations seraient particulières ?

$$|V_{tb} V_{ts}| \sim \lambda^2, |V_{tb} V_{td}| \sim \lambda^3, |V_{ts} V_{td}| \sim \lambda^5$$

quelques possibilités

modèles MFV : toute la violation de CP est pilotée par CKM

—→ tests de précision des processus rares

Q : pourquoi ?

la Nouvelle Physique est essentiellement transparente à la saveur jusqu'à des échelles très grandes

—→ tests de CP conservant la saveur

Q : quid des leptons ?

solutions intermédiaires (ex : seul $b \rightarrow s$ est affecté par NP à basse énergie) ...

Q : pourquoi les deux dernières générations seraient particulières ?

$$|V_{tb} V_{ts}| \sim \lambda^2, |V_{tb} V_{td}| \sim \lambda^3, |V_{ts} V_{td}| \sim \lambda^5$$

...et d'autres alternatives encore inconnues qui constituent sans doute la bonne réponse

CP et QCD

dans le Modèle Standard la violation de CP ne concerne que le secteur des **quarks**, et n'est observable que dans les transitions entre **hadrons**

il n'y a pas d'approche analytique systématique pour calculer les éléments de matrice qui interviennent dans la physique des saveurs

CP et QCD

dans le Modèle Standard la violation de CP ne concerne que le secteur des **quarks**, et n'est observable que dans les transitions entre **hadrons**
il n'y a pas d'approche analytique systématique pour calculer les éléments de matrice qui interviennent dans la physique des saveurs

Les différentes techniques

simulations numériques sur réseau : calcul d'intégrales de chemin par Monte-Carlo

théories effectives valables dans certaines régions paramétriques et/ou cinématiques : développement perturbatif

symétries approximatives de saveur pour exploiter au maximum les données expérimentales

CP et QCD

dans le Modèle Standard la violation de CP ne concerne que le secteur des **quarks**, et n'est observable que dans les transitions entre **hadrons**
il n'y a pas d'approche analytique systématique pour calculer les éléments de matrice qui interviennent dans la physique des saveurs

Perspectives : la précision des prédictions de QCD sur réseau suit l'évolution de la puissance numérique disponible. L'avenir des méthodes analytiques est plus difficile à prévoir.

Les différentes techniques

simulations numériques sur réseau : calcul d'intégrales de chemin par Monte-Carlo

théories effectives valables dans certaines régions paramétriques et/ou cinématiques : développement perturbatif

symétries approximatives de saveur pour exploiter au maximum les données expérimentales

Examples

MS

$$B \rightarrow J/\psi K_s \quad \beta$$

$$B \rightarrow \pi\pi \quad \alpha$$

$$B \rightarrow DK \quad \gamma$$

Examples

MS

$$B \rightarrow J/\psi K_s \quad \beta$$

$$B \rightarrow \pi\pi \quad \alpha$$

$$B \rightarrow DK \quad \gamma$$

$MS \leftarrow QCD$

$$B \rightarrow D\ell\nu \quad |V_{cb}| \leftarrow f_+^{BD}$$

$$B \rightarrow \pi\ell\nu \quad |V_{ub}| \leftarrow f_+^{B\pi}$$

$$B \rightarrow \ell\nu \quad |V_{ub}| \leftarrow f_B$$

Examples

MS

$$B \rightarrow J/\psi K_s \quad \beta$$

$$B \rightarrow \pi\pi \quad \alpha$$

$$B \rightarrow DK \quad \gamma$$

NP

$$B \rightarrow \phi K_s \quad \beta$$

$$B_s \rightarrow \phi\phi \quad \beta_s$$

$$K \rightarrow \pi\nu\bar{\nu} \quad \rho, \eta$$

MS \leftarrow QCD

$$B \rightarrow D\ell\nu \quad |V_{cb}| \leftarrow f_+^{BD}$$

$$B \rightarrow \pi\ell\nu \quad |V_{ub}| \leftarrow f_+^{B\pi}$$

$$B \rightarrow \ell\nu \quad |V_{ub}| \leftarrow f_B$$

Examples

MS

$$B \rightarrow J/\psi K_s \quad \beta$$

$$B \rightarrow \pi\pi \quad \alpha$$

$$B \rightarrow DK \quad \gamma$$

NP

$$B \rightarrow \phi K_s \quad \beta$$

$$B_s \rightarrow \phi\phi \quad \beta_s$$

$$K \rightarrow \pi\nu\bar{\nu} \quad \rho, \eta$$

MS \leftarrow QCD

$$B \rightarrow D\ell\nu \quad |V_{cb}| \leftarrow f_+^{BD}$$

$$B \rightarrow \pi\ell\nu \quad |V_{ub}| \leftarrow f_+^{B\pi}$$

$$B \rightarrow \ell\nu \quad |V_{ub}| \leftarrow f_B$$

NP \leftarrow QCD

$$\varepsilon_K \quad \rho, \eta \leftarrow B_K$$

$$\Delta M_{d,s} \quad |V_{tb}V_{td,s}| \leftarrow B_B$$

$$B \rightarrow \ell^+\ell^- \quad |V_{td,s}| \leftarrow f_B$$

Exemples

MS

$$B \rightarrow J/\psi K_s \quad \beta$$

$$B \rightarrow \pi\pi \quad \alpha$$

$$B \rightarrow DK \quad \gamma$$

NP

$$B \rightarrow \phi K_s \quad \beta$$

$$B_s \rightarrow \phi\phi \quad \beta_s$$

$$K \rightarrow \pi\nu\bar{\nu} \quad \rho, \eta$$

MS ← QCD

$$B \rightarrow D\ell\nu \quad |V_{cb}| \leftarrow f_+^{BD}$$

$$B \rightarrow \pi\ell\nu \quad |V_{ub}| \leftarrow f_+^{B\pi}$$

$$B \rightarrow \ell\nu \quad |V_{ub}| \leftarrow f_B$$

NP ← QCD

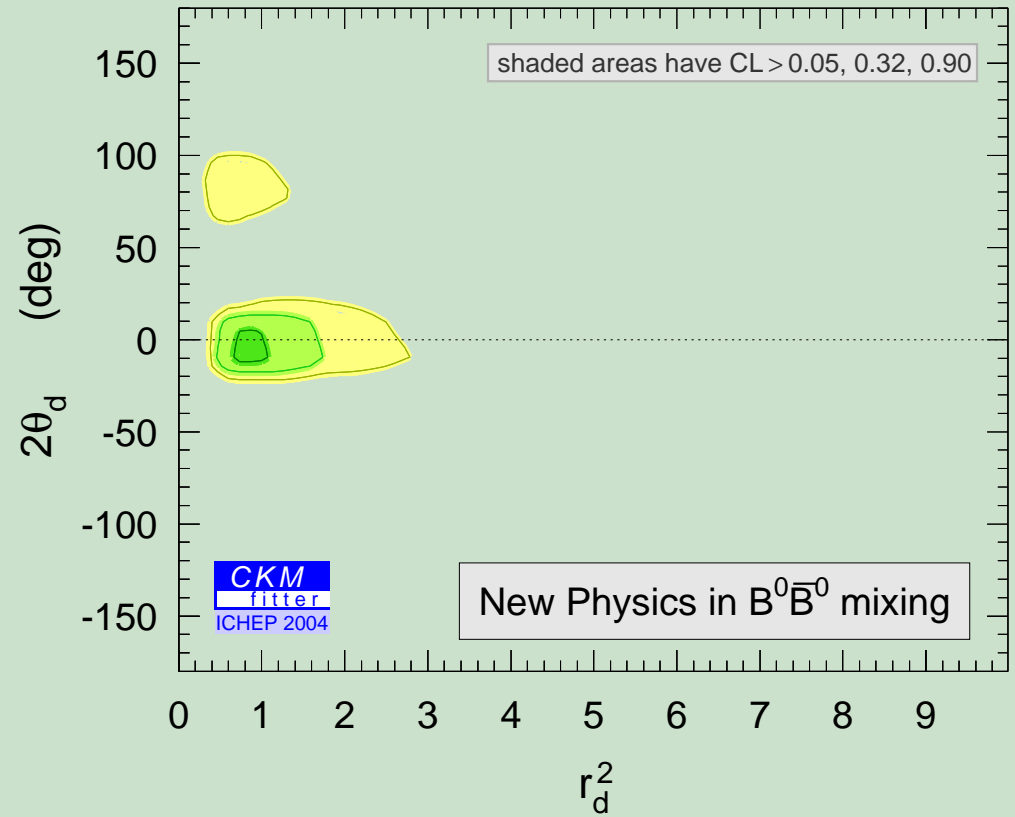
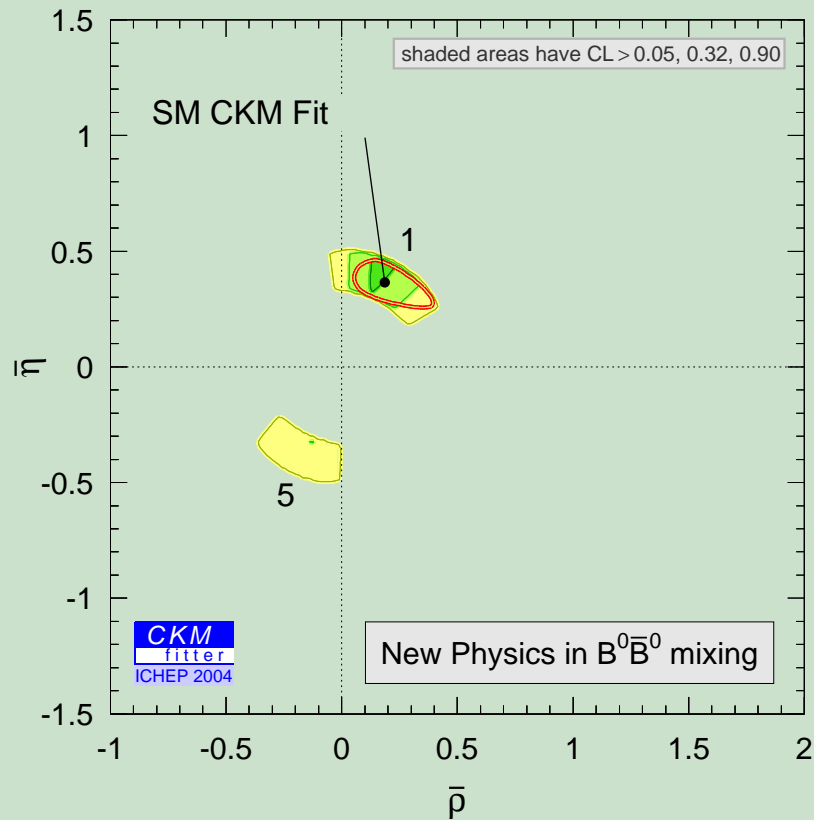
$$\varepsilon_K \quad \rho, \eta \leftarrow B_K$$

$$\Delta M_{d,s} \quad |V_{tb}V_{td,s}| \leftarrow B_B$$

$$B \rightarrow \ell^+\ell^- \quad |V_{td,s}| \leftarrow f_B$$

l'accord impressionnant entre mesures et modèle CKM impose de contrôler très finement les erreurs théoriques, afin de pouvoir mettre en évidence la dynamique sous-jacente

Contraintes 2004 : au-delà du Modèle Standard



hypothèses : pas de NP dans les désintégrations $b \rightarrow q_1 q_2 q_3$ à 4 changements de saveur,
ni dans $B \rightarrow J/\psi K_s$

contributions NP + SM arbitraires dans le mélange $B^0 \bar{B}^0$, $K^0 \bar{K}^0$ et dans les processus pingouin

2010

2010

odyssée II

	contrainte indirecte	calcul direct (réseau)
B_K	0.820 ± 0.072	0.930 ± 0.046
$f_{B_s} \sqrt{B_{B_s}}$ (MeV)	278.6 ± 11.5	276.0 ± 14.0
ξ	1.186 ± 0.032	1.200 ± 0.037

2010

odyssée II

	contrainte indirecte	calcul direct (réseau)
B_K	0.820 ± 0.072	0.930 ± 0.046
$f_{B_s} \sqrt{B_{B_s}}$ (MeV)	278.6 ± 11.5	276.0 ± 14.0
ξ	1.186 ± 0.032	1.200 ± 0.037

sous réserve que les simulations numériques progressent comme on s'y attend :

transition	progression	précision théorique
$\Delta S = 2$		$\times 2-3$
$\Delta B = 2$		$\times 2-3$
$\Delta B = 1$		$\times 3$

Les moments dipolaires électriques

neutron, électron

violation de T , liée à CP par le théorème CPT , invariante de saveur

la non observation de d_n borne un couplage de QCD : $\bar{\theta} < 10^{-9}$, « problème CP fort » pour lequel il n'y a pas d'explication valide

CKM prédit typiquement des valeurs très faibles, bien en-dessous de la sensibilité des expériences présentes ou à venir

de nombreux modèles de Nouvelle Physique à l'échelle de quelques TeV prédisent des valeurs observables
→ une autre fenêtre vers les hautes énergies

en admettant qu'un signal soit détecté, en ce qui concerne le neutron il reste à l'interpréter : calcul des éléments de matrice ?

Thématiques liées

symétrie CPT

conservée par (presque) toutes les théories des champs

intimement liée à la symétrie de Lorentz

meilleur test : $m_{K^0} - m_{\overline{K^0}}$, mais aussi des expériences fondamentales en physique atomique

Thématiques liées

symétrie CPT

conservée par (presque) toutes les théories des champs

intimement liée à la symétrie de Lorentz

meilleur test : $m_{K^0} - m_{\overline{K^0}}$, mais aussi des expériences fondamentales en physique atomique

physique du charme

CLEO-c : un laboratoire pour les premiers tests quantitatifs (quelques %) de la théorie des champs non perturbative simulée sur réseau

un ingrédient important pour l'extrapolation à l'échelle du B

des canaux sensibles à la Nouvelle Physique (mélange $D\overline{D}$)

Thématiques liées

symétrie CPT

conservée par (presque) toutes les théories des champs

intimement liée à la symétrie de Lorentz

meilleur test : $m_{K^0} - m_{\overline{K^0}}$, mais aussi des expériences fondamentales en physique atomique

saveurs leptoniques

l'existence de trois familles de quarks et de leptons est un indice que les symétries de saveur fondamentales relient les deux secteurs

consulter le groupe de travail dédié

physique du charme

CLEO-c : un laboratoire pour les premiers tests quantitatifs (quelques %) de la théorie des champs non perturbative simulée sur réseau

un ingrédient important pour l'extrapolation à l'échelle du B

des canaux sensibles à la Nouvelle Physique (mélange $D\overline{D}$)

Conclusion

Conclusion

Première lapalissade : la physique des saveurs est essentielle pour la métrologie des **paramètres fondamentaux** du Modèle Standard et pour la compréhension de QCD

Conclusion

Première lapalissade : la physique des saveurs est essentielle pour la métrologie des **paramètres fondamentaux** du Modèle Standard et pour la compréhension de QCD

Deuxième lapalissade : elle est également essentielle pour **exclure** des catégories entières de Nouvelle Physique

Conclusion

Première lapalissade : la physique des saveurs est essentielle pour la métrologie des **paramètres fondamentaux** du Modèle Standard et pour la compréhension de QCD

Deuxième lapalissade : elle est également essentielle pour **exclure** des catégories entières de Nouvelle Physique

Les transitions de saveur fourniront la base d'une nouvelle **classification périodique** si des particules non standard sont découvertes au LHC

Conclusion

Première lapalissade : la physique des saveurs est essentielle pour la métrologie des **paramètres fondamentaux** du Modèle Standard et pour la compréhension de QCD

Deuxième lapalissade : elle est également essentielle pour **exclure** des catégories entières de Nouvelle Physique

Les transitions de saveur fourniront la base d'une nouvelle **classification périodique** si des particules non standard sont découvertes au LHC

La théorie a besoin **d'équipement numérique lourd** pour pouvoir continuer à interpréter de manière compétitive les données expérimentales

Conclusion

Première lapalissade : la physique des saveurs est essentielle pour la métrologie des **paramètres fondamentaux** du Modèle Standard et pour la compréhension de QCD

Deuxième lapalissade : elle est également essentielle pour **exclure** des catégories entières de Nouvelle Physique

Les transitions de saveur fourniront la base d'une nouvelle **classification périodique** si des particules non standard sont découvertes au LHC

La théorie a besoin **d'équipement numérique lourd** pour pouvoir continuer à interpréter de manière **compétitive** les données expérimentales

Dans tous les cas la physique des saveurs de quarks reste **complémentaire** de celle des leptons

Conclusion

Première lapalissade : la physique des saveurs est essentielle pour la métrologie des **paramètres fondamentaux** du Modèle Standard et pour la compréhension de QCD

Deuxième lapalissade : elle est également essentielle pour **exclure** des catégories entières de Nouvelle Physique

Les transitions de saveur fourniront la base d'une nouvelle **classification périodique** si des particules non standard sont découvertes au LHC

La théorie a besoin **d'équipement numérique lourd** pour pouvoir continuer à interpréter de manière **compétitive** les données expérimentales

Dans tous les cas la physique des saveurs de quarks reste **complémentaire** de celle des leptons

« l'unification » est peut-être au coin de la rue

V_{ud}	V_{us}	V_{ub}
V_{cd}	merci!	V_{cb}
V_{td}	V_{ts}	V_{tb}