

Détermination indirecte de la masse du quark top

Mickaël BARSIVE

Master PSA, Université de Strasbourg

14 Juin 2016

encadré par Jean ORLOFF



- 1 Aspects théoriques et expérimentaux
 - Motivations
 - Notion de masse
 - Cadre de notre étude
- 2 Mise en oeuvre de la détermination indirecte
 - Formalisme de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa
 - CKMfitter
 - Exemple d'ajustement
- 3 Analyse des résultats
 - Étude de l'article de Giudice et al.
 - Analyse globale
 - Perspectives

Aspects théoriques et expérimentaux

Motivations (1)

Tests de précision

- La masse du quark top a été mesurée directement au Tevatron puis au LHC

$$(M_t)_{pole} = 173.34 \text{ GeV} \pm 0.76 \text{ GeV}.$$

Cette mesure souffre d'incertitudes théoriques irréductibles (états liés $t\bar{t}$, cascade partonique, effets de QCD non-perturbative).

- Tests de précision essentiels pour étudier les prédictions du Modèle Standard. (Exemple : métastabilité du vide électro-faible)

Motivations (2)

Recherche de nouvelle physique

- De nombreux indices nous laissent penser que le modèle standard n'est pas une théorie complète.
- Une détermination indirecte de la masse du quark top pourrait indiquer la présence de nouvelle physique dans le cas où la mesure indirecte n'était pas cohérente avec la mesure directe.
(Exemple : dans les processus $B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$)

Notion de masse (1)

Renormalisation en théorie quantique des champs

- Le calcul des boucles engendre des divergences dans les amplitudes de Feynman.

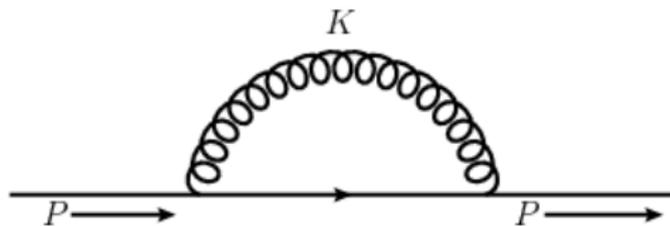


Figure : Diagramme de Feynman de la self énergie du quark

- Solution? Réguler les infinis en introduisant un paramètre de coupure Λ .
- Est-ce vraiment une solution? Non car nos prédictions dépendent d'un paramètre non-physique Λ qui redonne les infinis lorsqu'il tend vers l'infini.
- Solution? Ajouter des contretermes dans le lagrangien initial.

Notion de masse (2)

Schémas de renormalisation

- L'ajout de contretermes fait apparaître une masse running. (i.e la masse $m_t(\mu)$ dépend d'un paramètre d'échelle μ).
⇒ Différents schémas de renormalisation.
- Schéma \overline{MS} : on ne soustrait que les termes divergents et on fixe $\mu = m_t$ où $m_t = m_t^{\overline{MS}}(m_t)$.
- Schéma pôle : on fixe le pôle du propagateur à une valeur $M_t = (M_t)_{pole}$ (i.e $k^2 = M_t^2$)

Notion de masse (3)

Relation entre les schémas

- P. Marquard, A V. Smirnov, V A. Smirnov et M. Steinhauser (arXiv :hep-th/1502.01030) ont donné une relation entre les deux schémas

$$M_t = m_t (1 + 0.4244\alpha_s + 0.8345\alpha_s^2 + 2.375\alpha_s^3 + (8.49 \pm 0.25)\alpha_s^4) \quad (1)$$

où $\alpha_s = \alpha_s^{(n_f=6)}(m_t) = 0.1088$

- La distinction entre les deux schémas mène à une différence de 6%.
- Un outil pour manipuler les relations de passage entre les schémas : RunDec (arXiv :0004189)

Cadre de notre étude (1)

Physique des saveurs

La masse du quark top apparaît dans des processus de changement de saveurs sous la forme de boucles (fonctions d'Inami-Lim).

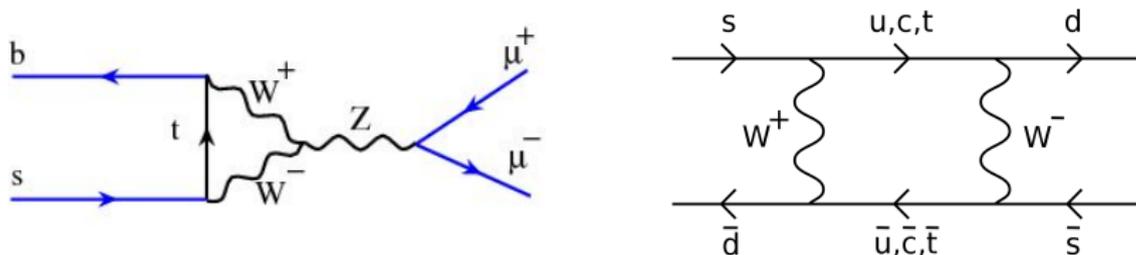


Figure : Diagramme "pingouin" à gauche et diagramme en "boîte" à droite

Les différentes observables que nous allons rencontrer sont

$$\Delta m_s, \Delta m_d, \epsilon_K, \mathcal{B}(B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-).$$

Cadre de notre étude (2)

Origine

La dernière détermination de la masse du quark top date d'Août 2015, Giudice et al. (arXiv :1508.05332v2) ont déterminé M_t via des processus de saveurs.

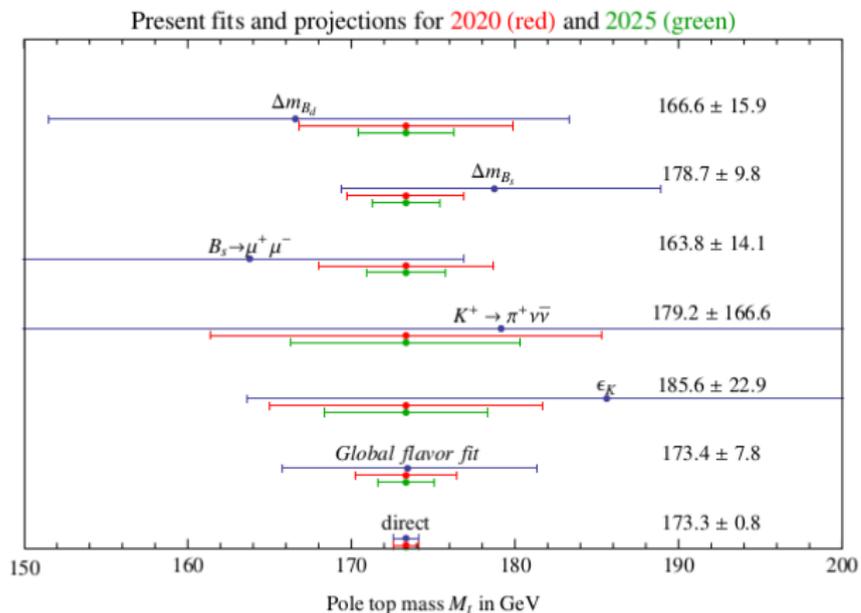


Figure : Détermination indirecte de la masse du top via les observables de saveur par GPS

Mise en oeuvre de la recherche indirecte

Formalisme CKM (1)

Formalisme de Cabibbo-Kobayashi-Maskawa

La matrice CKM lie les états propres faibles et les états propres de masses.

$$\begin{pmatrix} d' \\ s' \\ b' \end{pmatrix}_{\text{faible}} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix}_{\text{masse}} \quad (2)$$

C'est une matrice 3×3 complexe et unitaire.

Elle est décrite par 4 paramètres (3 angles de rotations + une phase) compte tenu du rephasage des champs.

Formalisme CKM (2)

Paramétrisation de Wolfenstein

Ces 4 paramètres sont $A, \lambda, \bar{\rho}$ et $i\bar{\eta}$

$$\lambda^2 = \frac{|V_{us}|^2}{|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2} \quad (3)$$

$$A^2 \lambda^4 = \frac{|V_{cb}|^2}{|V_{ud}|^2 + |V_{us}|^2} \quad (4)$$

$$\bar{\rho} + i\bar{\eta} = -\frac{V_{ud} V_{ub}^*}{V_{cd} V_{cb}^*} \quad (5)$$

- λ est déterminé principalement par les mesures des désintégrations β et les désintégrations semileptonique des kaons.
- A est déterminé par les désintégrations semileptonique des B.
- Les deux autres paramètres déterminent le triangle d'unitarité.

Formalisme CKM (3)

Triangle d'unitarité

La relation d'unitarité $(V_{CKM} V_{CKM}^\dagger)_{db} = 0$ mène à

$$\frac{V_{ud} V_{ub}^*}{V_{cd} V_{cb}^*} + \frac{V_{cd} V_{cb}^*}{V_{cd} V_{cb}^*} + \frac{V_{td} V_{tb}^*}{V_{cd} V_{cb}^*} = 0 \quad (6)$$

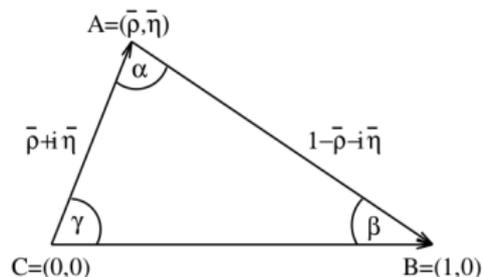


Figure : Triangle d'unitarité dans le plan complexe $(\bar{\rho}, \bar{\eta})$

$$R_u = \left| \frac{V_{ud} V_{ub}^*}{V_{cd} V_{cb}^*} \right| = \sqrt{\bar{\rho}^2 + \bar{\eta}^2} \quad (7)$$

$$R_t = \left| \frac{V_{td} V_{tb}^*}{V_{cd} V_{cb}^*} \right| = \sqrt{(1 - \bar{\rho})^2 + \bar{\eta}^2} \quad (8)$$

CKMfitter (1)

La collaboration et le framework

- CKMfitter est un groupe d'une dizaine de théoriciens et d'expérimentateurs.
- C'est un outil qui permet de réaliser une analyse globale via le formalisme CKM. CKMfitter implémente une approche fréquentiste des incertitudes théoriques.
- Codé en FORTRAN et en MATHEMATICA. Une couche ROOT pour la partie graphique, MacroROOT.

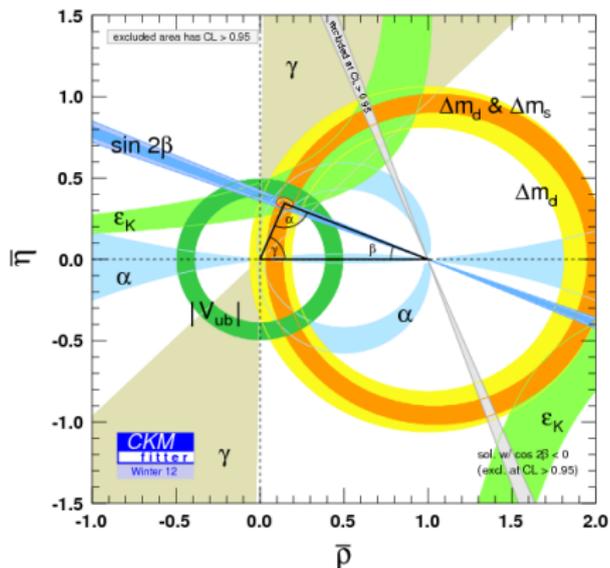


Figure : Exemple d'analyse globale effectuée avec CKMfitter

CKMfitter (2)

Architecture

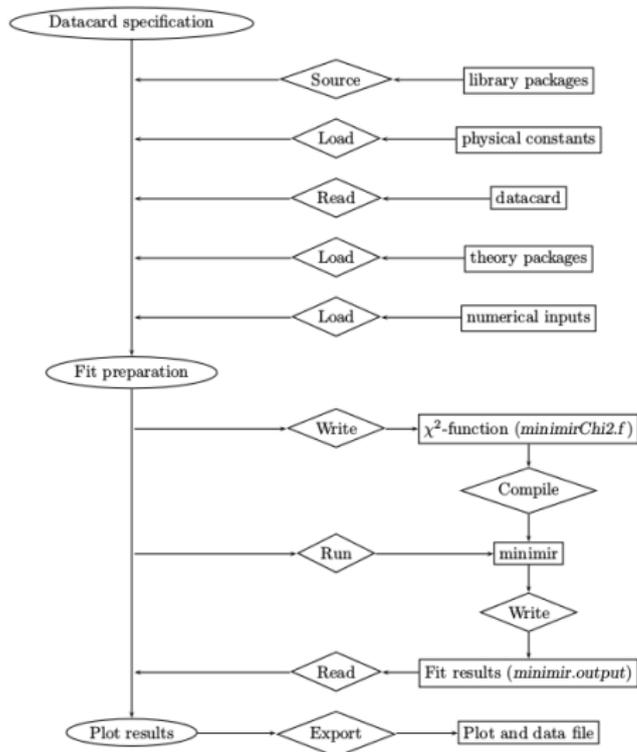


Figure : Architecture de CKMfitter

Exemple d'ajustement

$$B_s^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$$

Contraintes d'ajustement :

$$[V_{ud}, V_{us}, V_{ub}, V_{cd}, V_{cs}, V_{cb}, \alpha, \sin(2\beta), \gamma, \mathcal{B}(B_s \rightarrow \tau\nu)] + \mathcal{B}(B_s \rightarrow \mu^+\mu^-)$$

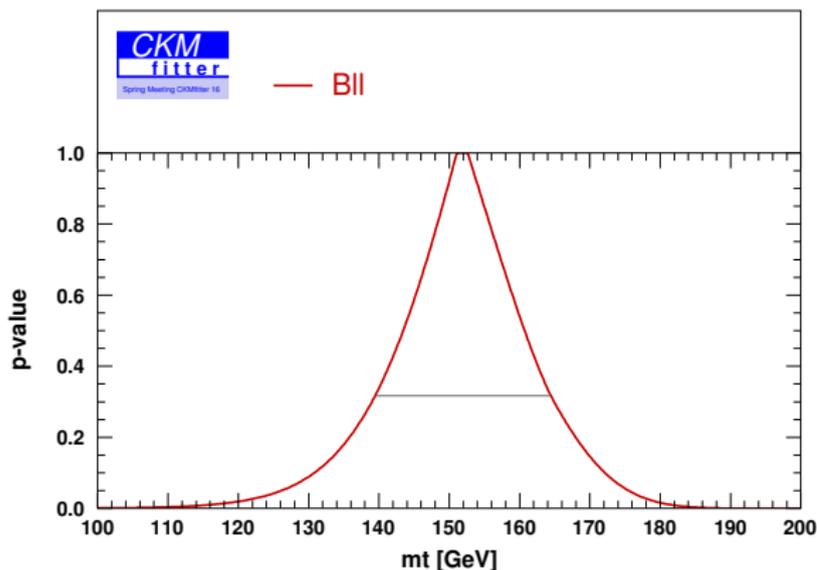


Figure : Fonction de p-value en fonction de m_t

$$(m_t)_{\text{BII}} = 152^{+13.0}_{-12.0} \text{ GeV}$$

$$(M_t)_{\text{BII}} = 161.1^{+13.8}_{-12.7} \text{ GeV}$$

Analyse des résultats

Étude de l'article de Giudice et al. (1)

Procédure d'extraction de M_t

Prenons l'exemple de l'extraction de M_t

$$\Delta m_s = \frac{G_F^2}{6\pi^2} m_{B_s} M_W^2 \hat{B}_{B_s} f_{B_s}^2 \eta_B S_0(x_t) |V_{ts} V_{tb}^*|^2 \quad (9)$$

où $x_t = \frac{m_t^2}{M_W^2}$ et $S_0(x_t)$ est une fonction d'Inami-Lim.

A partir des valeurs centrales de chaque paramètre, on obtient

$$\Delta m_{B_s} = \frac{16.9 \pm 1.4}{\text{ps}} \left(\frac{\sqrt{\hat{B}_{B_s}} f_{B_s}}{261 \text{ MeV}} \right)^2 \left(\frac{M_t}{173.34 \text{ GeV}} \right)^{1.52} \left(\frac{|V_{ts} V_{tb}^*|}{0.0401} \right)^2 \left(\frac{\eta_B}{0.55} \right). \quad (10)$$

On peut donc extraire M_t

$$(M_t)_{\Delta m_s} = 179.3 \pm 9.7 \text{ GeV}$$

On a corrigé $(M_t)_{\Delta m_s} = 179.5 \text{ GeV}$ à cause d'arrondis.

Étude de l'article de Giudice et al. (2)

Utilisation de CKMfitter

Tout comme l'article de GPS, on prend comme contraintes d'ajustement (qui ne dépendent pas de m_t)

$$V_{us}, V_{cb}, \beta \text{ et } \gamma$$

Comparaison between GPS and US

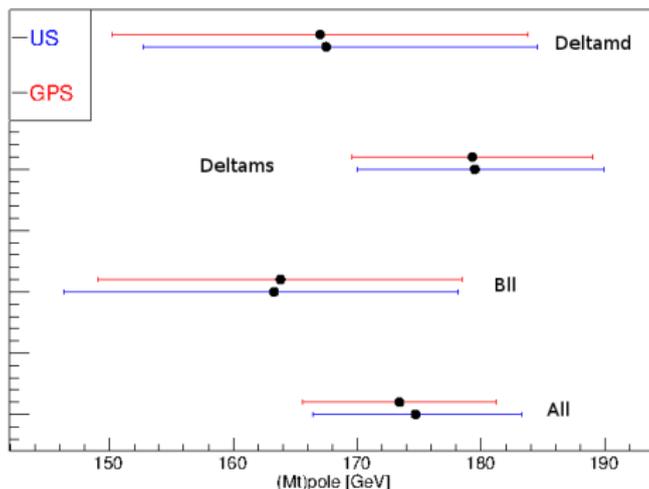


Figure : Détermination indirecte de la masse du top : les limites obtenues par GPS (en rouge) et nos résultats (en bleu) en utilisant leurs contraintes d'ajustement

Analyse globale avec CKMfitter (1)

Comparaison entre GPS et nous

Nous effectuons une analyse globale avec beaucoup plus de contraintes d'ajustement

$$V_{ud}, V_{us}, V_{ub}, V_{cd}, V_{cs}, V_{cb}, \alpha, \sin(2\beta), \gamma, \mathcal{B}(B_s \rightarrow \tau\nu)$$

Comparaison between GPS and US-Global

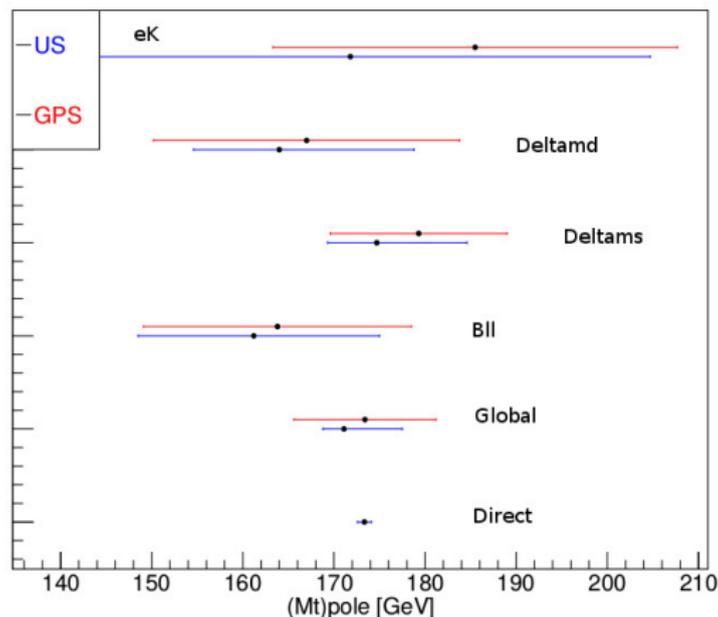


Figure : Détermination indirecte de la masse du top : les limites obtenues par GPS (en rouge) et nos résultats (en bleu) en utilisant leurs contraintes d'ajustement

$$(M_t)_{\text{GPS}}^{\text{global}} = 173.4_{-7.8}^{+7.8} \text{ GeV}$$

$$(M_t)_{\text{CKMfitter}}^{\text{global}} = 171.1_{-2.3}^{+6.4} \text{ GeV}$$

Analyse globale avec CKMfitter (2)

Fonction de p-value pour les différentes analyses

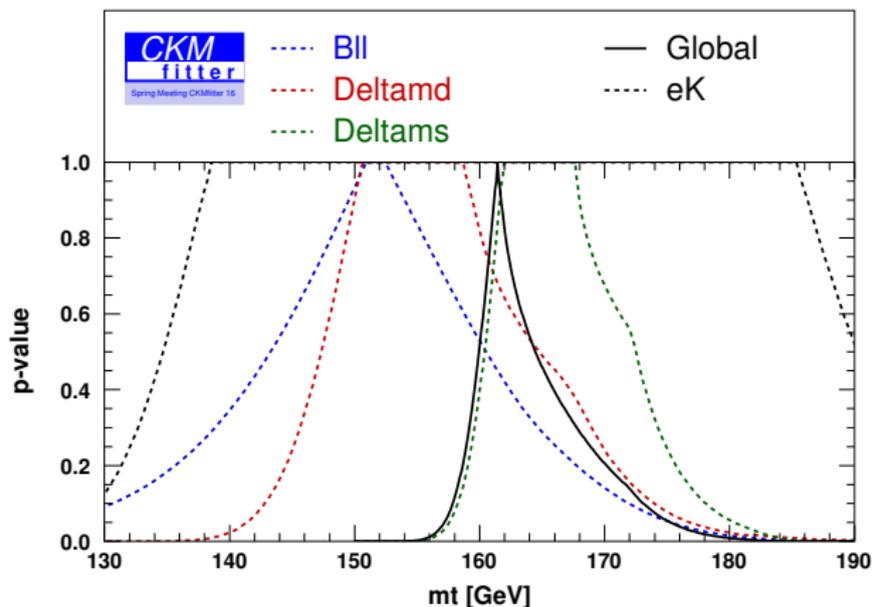


Figure : Fonction p-value pour les différentes analyses

Perspectives

- Continuer les discussions sur les différents schémas et convertir CKMfitter de telle sorte de choisir M_t au lieu de m_t .
- Ajustement électro-faible et combiner la physique des saveurs avec l'électro-faible.
- Tester CKMlive.

Conclusion

- CKMfitter nous a permis de réduire l'incertitude de GPS

$$(M_t)_{\text{GPS}} = 173.4^{+7.8}_{-7.8} \text{ GeV}$$

$$(M_t)_{\text{CKMfitter}} = 171.1^{+6.4}_{-2.3} \text{ GeV}$$

(i.e 6.9 GeV soit 44%).

- L'accord directe/indirecte résiste à l'amélioration de la précision indirecte.
- Les futurs résultats expérimentaux diminuera les incertitudes de la méthode indirecte.
- L'ajustement électro-faible devrait donner de bons résultats.

Merci de votre attention

Back up

Motivations (1) - Exemple

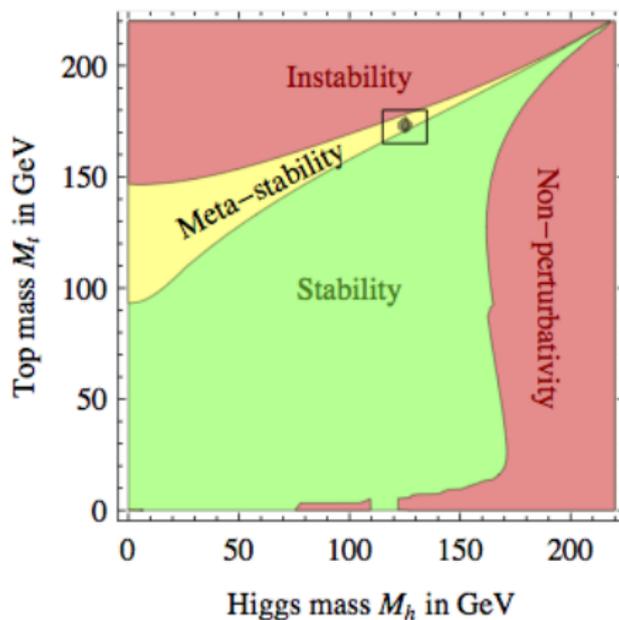


Figure : Zone de stabilité du vide électrofaible

Paramétrisation de Wolfenstein

Elle consiste à paramétrer V_{CKM} avec 4 paramètres (A, λ, ρ, η) et à développer V_{CKM} en puissances de $\lambda \approx |V_{us}| \approx 0.22$. On définit

$$s_{12} = \lambda, \quad (11)$$

$$s_{23} = A\lambda^2, \quad (12)$$

$$s_{13} e^{-i\delta} = A\lambda^3(\rho - i\eta), \quad (13)$$

la matrice CKM s'écrit à l'ordre λ^4 :

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} 1 - \frac{\lambda^2}{2} & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \frac{\lambda^2}{2} & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + \mathcal{O}(\lambda^4). \quad (14)$$

Triangle d'unitarité

- R_u est déterminé par la désintégration des mésons B.
- R_t est déterminé par le mélange des mésons B.
- α détermine l'asymétrie CP dans le mélange des mésons B.
- β détermine l'asymétrie CP dans les processus de mélange.
- γ détermine l'asymétrie dans la transition $b \rightarrow u$.

Étude de l'article de Giudice et al.

Comment calculer $|V_{td} V_{tb}^*|$?

$$|V_{td} V_{tb}^*| = |V_{us}| |V_{cb}| \frac{\sin(\gamma)}{\sin(\gamma + \beta)} [1 + \mathcal{O}(\lambda^4)]. \quad (15)$$

$$|V_{ts} V_{tb}^*| = |V_{cb}| \left[1 - \frac{\lambda^2 \sin(\gamma - \beta)}{2 \sin(\gamma + \beta)} + \mathcal{O}(\lambda^4) \right]. \quad (16)$$

Étude de l'article de Giudice et al.

Valeurs numériques de GPS

Observable	Valeur
$ G_F \times 10^{-5} (\text{GeV}^{-2})$	1.16637(1)
$M_W (\text{GeV})$	80.385(15)
$M_Z (\text{GeV})$	91.1876(21)
$\sin^2 \theta_W$	0.23116(13)
$\alpha_{\text{em}}^{-1}(M_Z)$	128.952(13)
$\alpha_s(M_Z)$	0.1184(7)
$m_c(m_c) (\text{GeV})$	1.279(13)
$m_K (\text{MeV})$	497.614(24)
$m_{B_s} (\text{MeV})$	5366.8(2)
$m_{B_d} (\text{MeV})$	5279.2(2)
$\Delta m_K (\text{ps}^{-1})$	0.005292(9)
$\Delta m_{B_d} (\text{ps}^{-1})$	0.510(3)
$\Delta m_{B_s} (\text{ps}^{-1})$	17.757(21)
$\tau_H^s (\text{ps})$	1.607(10)
$ V_{us} $	0.2249(9)
$ V_{cb} \times 10^3$	40.9(11)
$ V_{ub} \times 10^3$	3.81(40)
$\sin 2\beta$	0.679(20)

Observable	Valeur
γ	$(73.2^{+6.3}_{-7.0})^\circ$
$\mathcal{B}(B_s \rightarrow \mu^+ \mu^-) \times 10^9$	2.8(7)
$\mathcal{B}(K^+ \rightarrow \pi^+ \nu \bar{\nu}) \times 10^{11}$	$17.3^{+11.5}_{-10.5}$
$\mathcal{B}(K_L \rightarrow \pi^0 \nu \bar{\nu}) \times 10^{11}$	—
$ \epsilon_K \times 10^{-3}$	2.228(11)
$f_K (\text{MeV})$	156.3(9)
\hat{B}_K	0.766(10)
κ_ϵ	0.94(2)
η_B	0.55(1)
η_{cc}	1.87(76)
η_{ct}	0.496(47)
η_{tt}	0.5765(65)
$\delta P_c(X)/P_c(X)$	0.408(24)
$f_{B_s} (\text{MeV})$	226(5)
\hat{B}_{B_s}	1.33(6)
f_{B_s}/f_{B_d}	1.204(16)
$\hat{B}_{B_s}/\hat{B}_{B_d}$	1.03(8)

Résumé des résultats

Masse	All	Bll	Δm_s	Δm_d
m_t [GeV]	$164.8^{+8.1}_{-7.8}$	154^{+14}_{-16}	$169.3^{+9.8}_{-9.0}$	158^{+16}_{-14}
M_t [GeV]	$174.7^{+8.6}_{-8.3}$	$163.3^{+14.8}_{-17}$	$179.5^{+10.4}_{-9.5}$	$167.5^{+17}_{-14.8}$

Figure : Résultats en reprenant l'analyse GPS avec CKMfitter

Masse	Global	Bll	Δm_s	Δm_d	ϵ_K
m_t [GeV][1σ]	$161.4^{+6.0}_{-2.2}$	152^{+13}_{-12}	$164.8^{+9.3}_{-5.1}$	$154.7^{+14}_{-8.9}$	162^{+31}_{-29}
M_t [GeV][1σ]	$171.1^{+6.4}_{-2.3}$	$161.2^{+13.8}_{-12.7}$	$174.7^{+9.9}_{-5.4}$	$164.0^{+14.8}_{-9.4}$	$171.8^{+32.9}_{-30.7}$
M_t [GeV][2σ]	$171.1^{+14.9}_{-4.6}$	$161.2^{+25.4}_{-27.6}$	$174.7^{16.8}_{-7.7}$	$164.0^{+23.3}_{-14.8}$	$171.8^{+47.7}_{-36}$
M_t [GeV][3σ]	$171.1^{+22.1}_{-6.9}$	$161.2^{+36}_{-46.6}$	$174.7^{+21.9}_{-10.1}$	$164.0^{+38.2}_{-19.1}$	$171.8^{+67.8}_{-42.4}$

Figure : Résultats avec l'analyse globale de CKMfitter