



is CL > 0.95

UPMC
SORBONNE UNIVERSITÉS

LPNHE
PARIS

$\sin 2\beta$

γ

Δm_d & Δm_s

Δm_d

Search for new physics in three-body charmless decays of B mesons

$|V_{ub}|$

Emilie BERTHOLET

Thesis supervisors : Eli Ben-Haim and Matthew Charles

CKM
fitter
EPS 15

γ

sol. w/ $\cos 2\beta < 0$
(excl. at CL > 0.95)

THESIS: Search for new physics in three-body charmless decays of B mesons

LPNHE, LHCb group

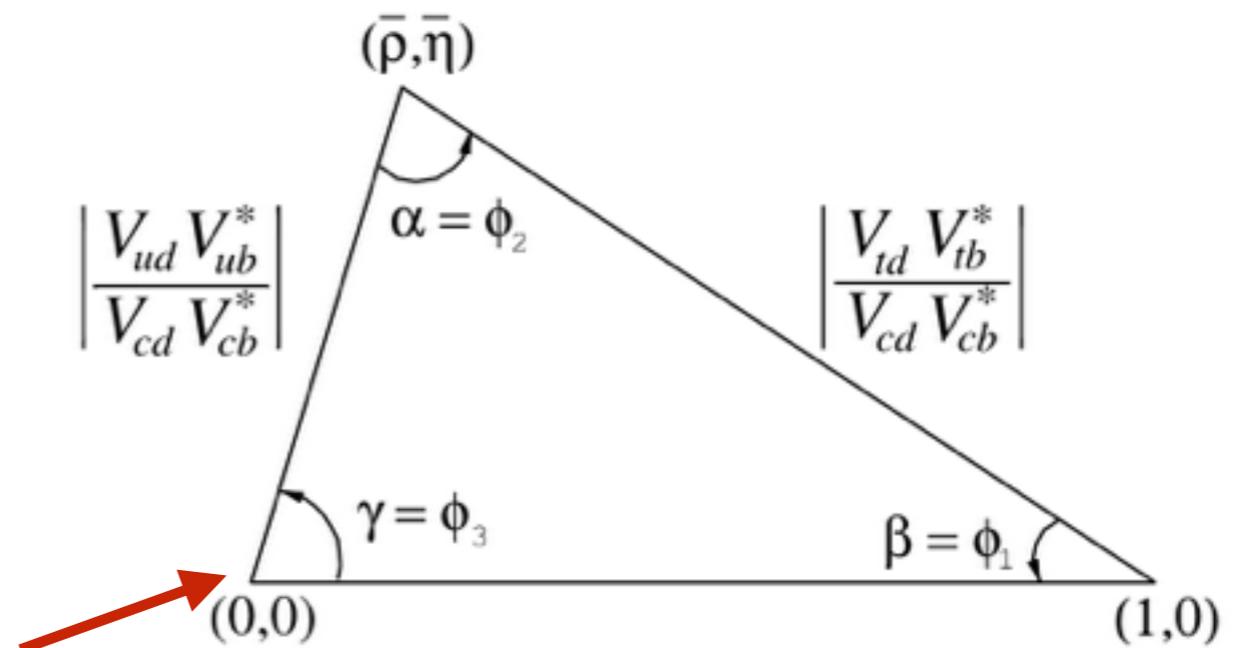
- Decay channels: $B_{d,s}^0 \rightarrow K_s h^+ h'^-$, where h can be a pion or a kaon.
- Measurements of observables sensitive to new physics (run 2 will provide a great amount of data).
- Study of a method of extraction of the γ angle of the unitarity triangle.

INTERNSHIP: Search for new physics in three-body charmless decays of B mesons

LPNHE, LHCb group

- Method sensitive to new physics, developed by a group of theoreticians from Montréal University

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



- **Objective:** test the sensitivity of the method in order to apply it to LHCb data.

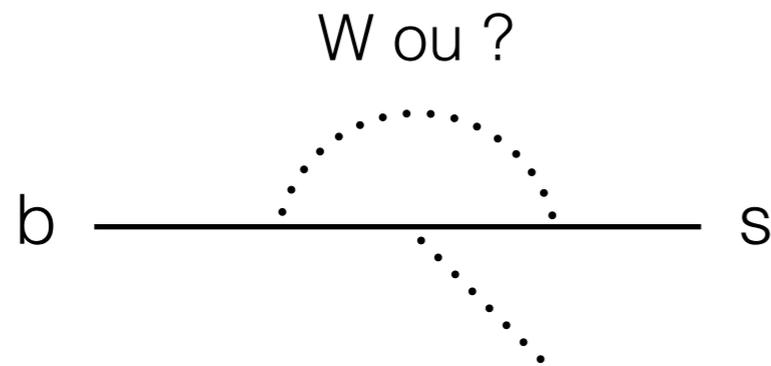
INTERNSHIP: Search for new physics in three-body charmless decays of B mesons

LPNHE, LHCb group

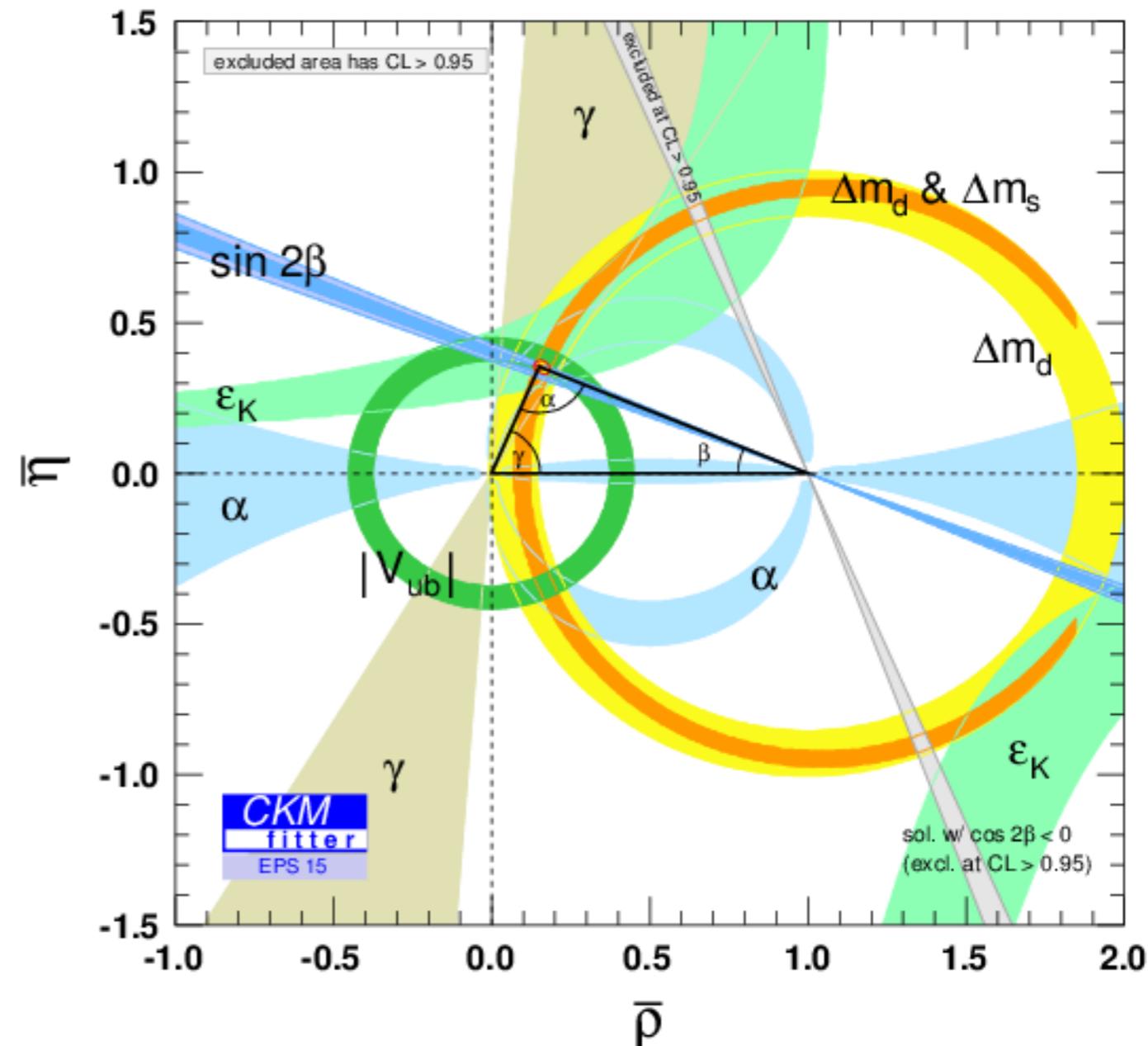
- **The traditional method** is based on **tree** processes (SM-like)

$$\gamma = 73.2^{\circ+6.3^{\circ}}_{-7.0^{\circ}}$$

- **Here** the processes imply **loops** (penguin diagrams)



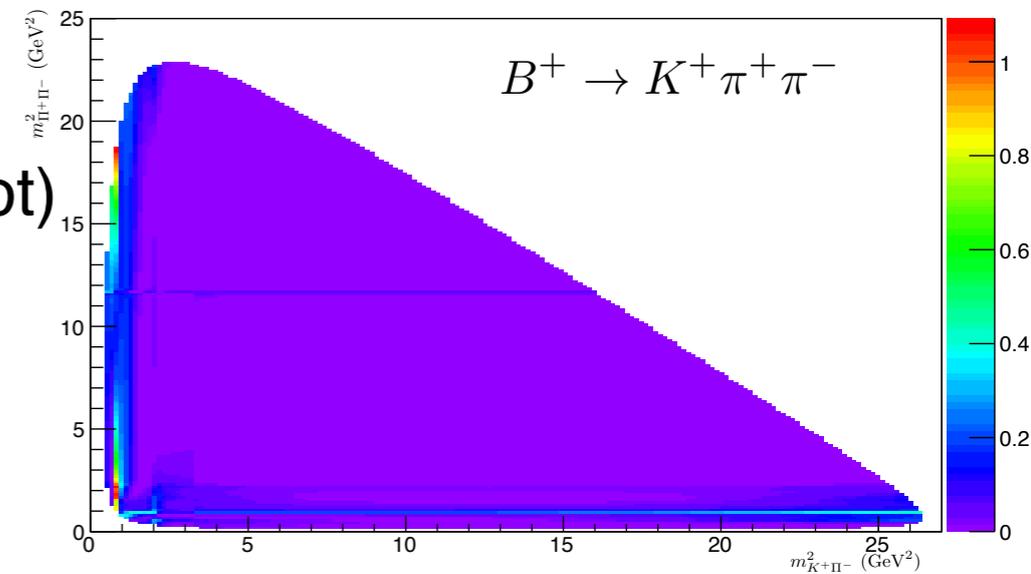
- **3-body decay**: the amplitude depends on the momentum of the particles



INTERNSHIP: Search for new physics in three-body charmless decays of B mesons

LPNHE, LHCb group

- 3-body decay: phase space lies on a plane (Dalitz plot)
- The method combines data coming from 5 channels



$$B^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^-$$

$$B^0 \rightarrow K^0 \pi^+ \pi^-$$

$$B^0 \rightarrow K^0 K^0 \bar{K}^0$$

$$B^0 \rightarrow K^+ \pi^0 \pi^-$$

$$B^0 \rightarrow K^+ K^0 K^-$$

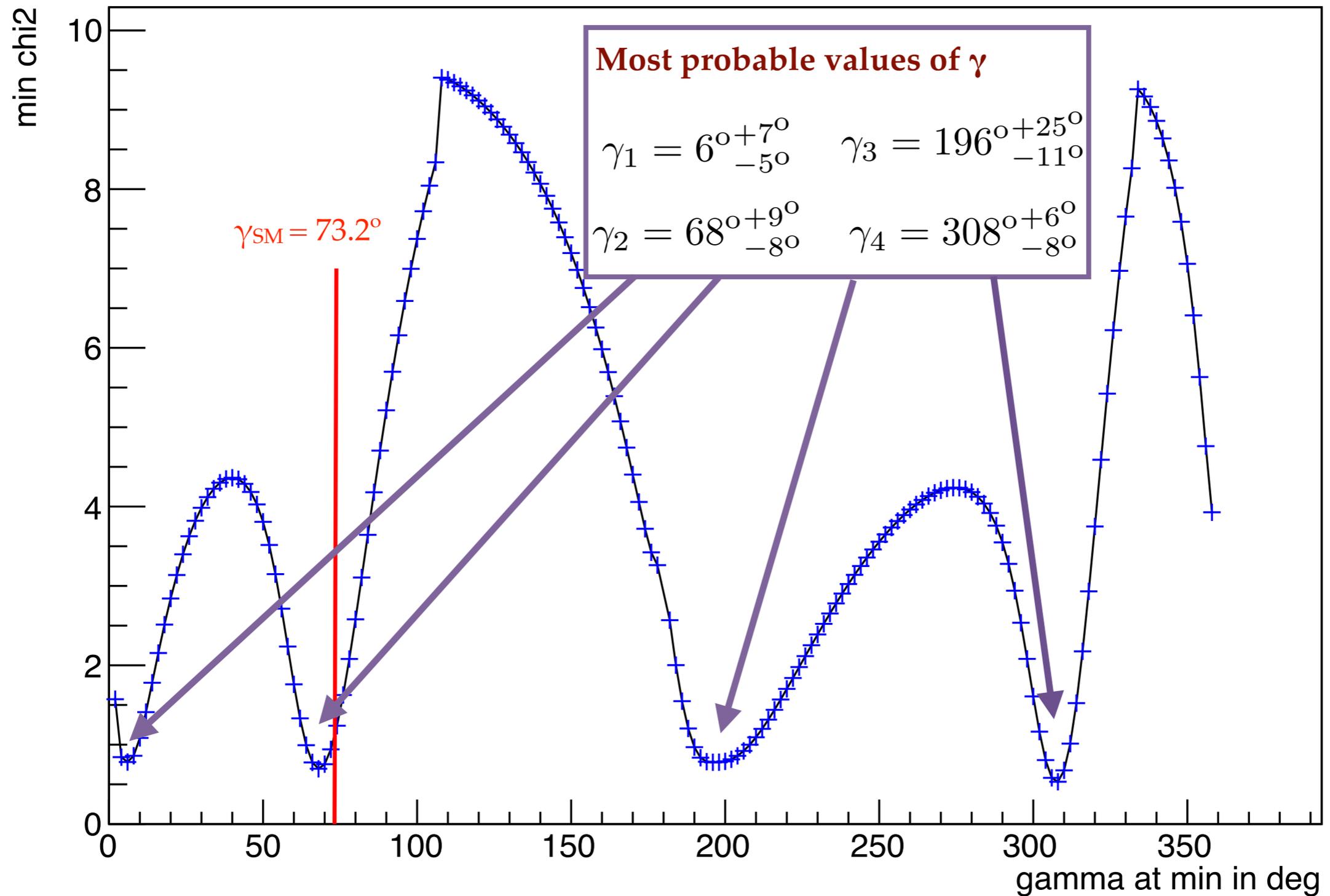
$$A_{exp} \rightarrow \text{measure}$$

$$A_{th} \rightarrow f(\text{parameters}; \gamma)$$

γ is obtained by minimizing a χ^2 function

Technical point: this method uses SU(3) flavour symmetry.

INTERNSHIP: Preliminary results



CONCLUSION

- Preliminary results are very encouraging.
- We need to further develop the study: include systematics, compute correlations between the points on the Dalitz, etc.

BACKUP

NPAC

UPMC
SORBONNE UNIVERSITÉS

LPNHE
PARIS

Recherche de nouvelle physique dans la désintégration des mésons B en trois particules non charmées

Emilie BERTHOLET

Stage de pré-thèse effectué dans le groupe LHCb au LPNHE.

Supervisé par Eli Ben-Haim et Matthew Charles

CKM
fitter
EPS 15
07 juin 2016

sol. w/ $\cos 2\beta < 0$
(excl. at CL > 0.95)

Introduction

- ❖ Étude d'une méthode d'extraction de l'angle γ du triangle d'unitarité basée sur des désintégrations à 3 corps sans particule charmée du méson B sensible à la nouvelle physique. [Phys.Lett. B728 \(2014\) 206-209](#)
- ❖ **Objectif** : utiliser les données de BaBar afin de tester la méthode dans le but d'appliquer la méthode aux données de LHCb.

Matrice CKM

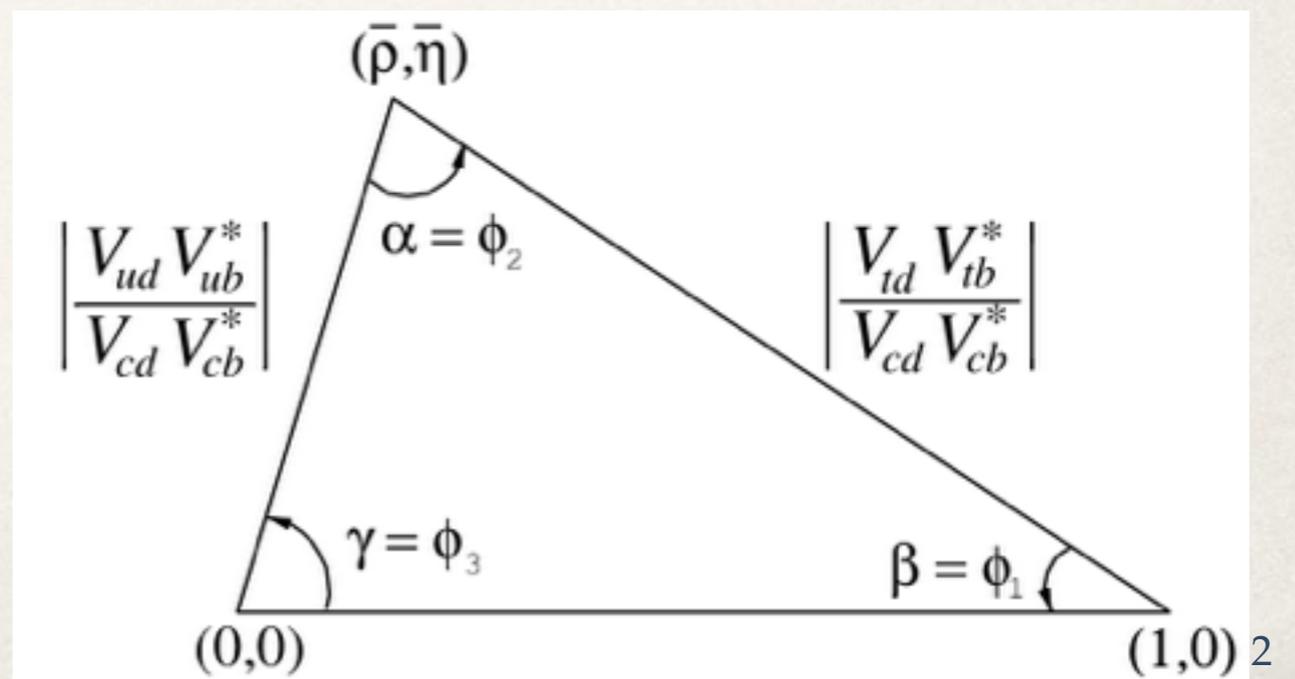
- ❖ Dans le modèle standard (SM), les états propres de l'interaction faible ne sont pas états propres de saveur.
- ❖ Le mélange entre les quarks peut être décrit par une matrice unitaire 3x3

$$V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} 1 - \lambda^2/2 & \lambda & A\lambda^3(\rho - i\eta) \\ -\lambda & 1 - \lambda^2/2 & A\lambda^2 \\ A\lambda^3(1 - \rho - i\eta) & -A\lambda^2 & 1 \end{pmatrix} + O(\lambda^4)$$

$$\lambda = |V_{us}| \approx 0.23, A \approx 0.82, \rho \approx 0.15, \eta \approx 0.35$$

- ❖ L'angle γ est défini par

$$\gamma = \arg\left(-\frac{V_{ud} V_{ub}^*}{V_{cd} V_{cb}^*}\right)$$

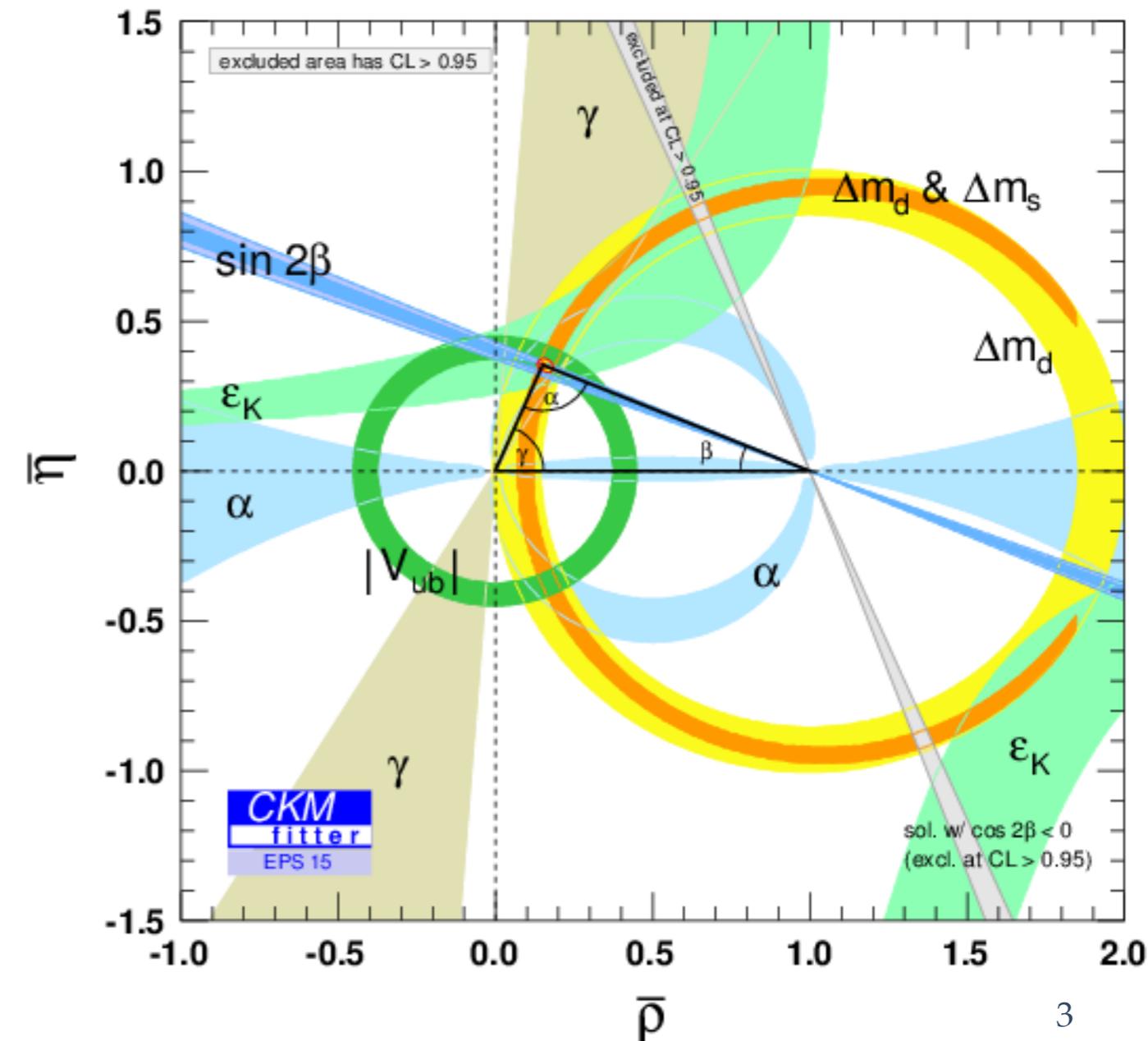


Mesure de l'angle γ

- ❖ **Méthode "traditionnelle"** de mesure basée sur des processus en **arbre** (modèle standard).

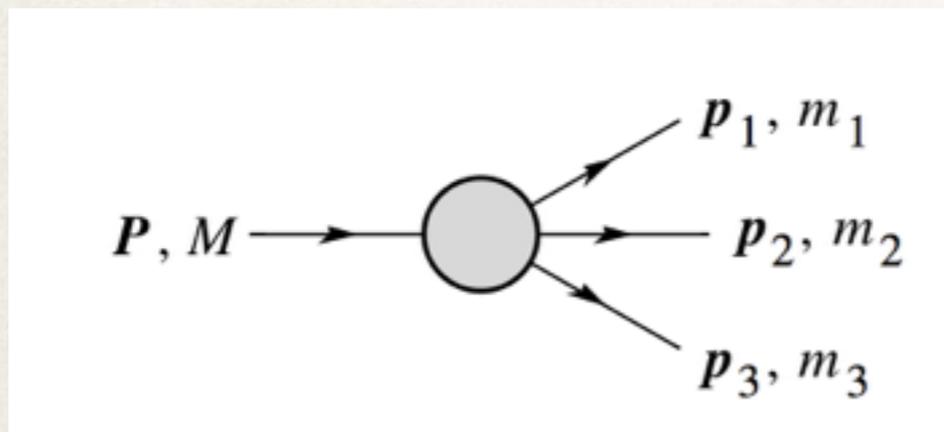
$$\gamma = 73.2^{\circ} {}^{+6.3^{\circ}}_{-7.0^{\circ}}$$

- ❖ **La méthode proposée** utilise des processus impliquants des **boucles de particules virtuelles** (sensible à la nouvelle physique).
- ❖ **Désintégrations à 3 corps** : l'amplitude dépend de l'impulsion des particules.



Plan de Dalitz

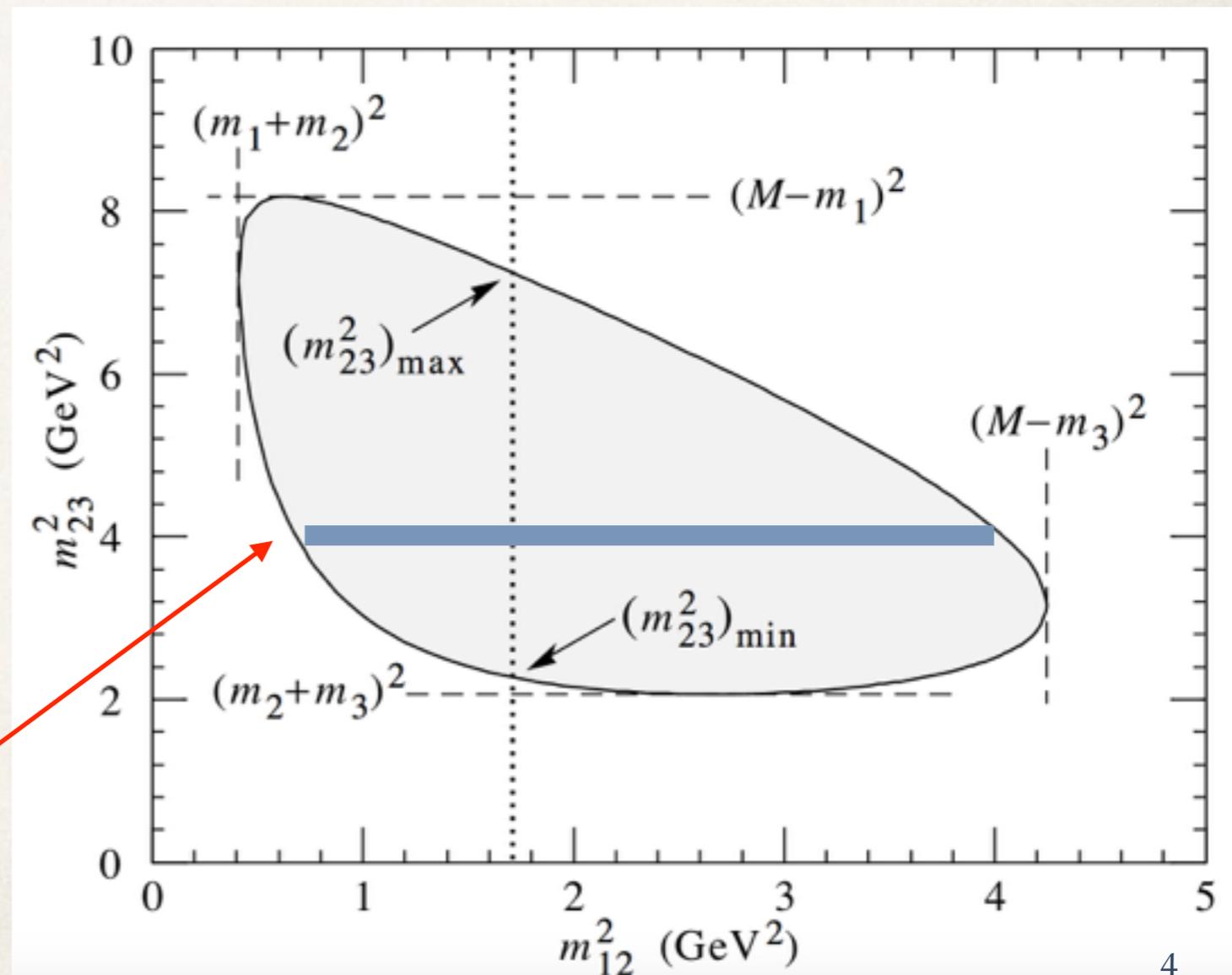
- Le nombre de paramètres libres dans une désintégration à 3 corps peut être ramené à 2.



- Largeur partielle (spin 0) :

$$d\Gamma = \frac{1}{(2\pi^3)} \frac{1}{32M^2} \overline{|A|^2} dm_{12}^2 dm_{23}^2$$

- Résonances localisées dans le plan.



Amplitude

- ❖ Dans l'approximation isobare l'amplitude en un point est exprimée sous la forme d'une somme cohérente d'amplitudes de N canaux individuels intermédiaires

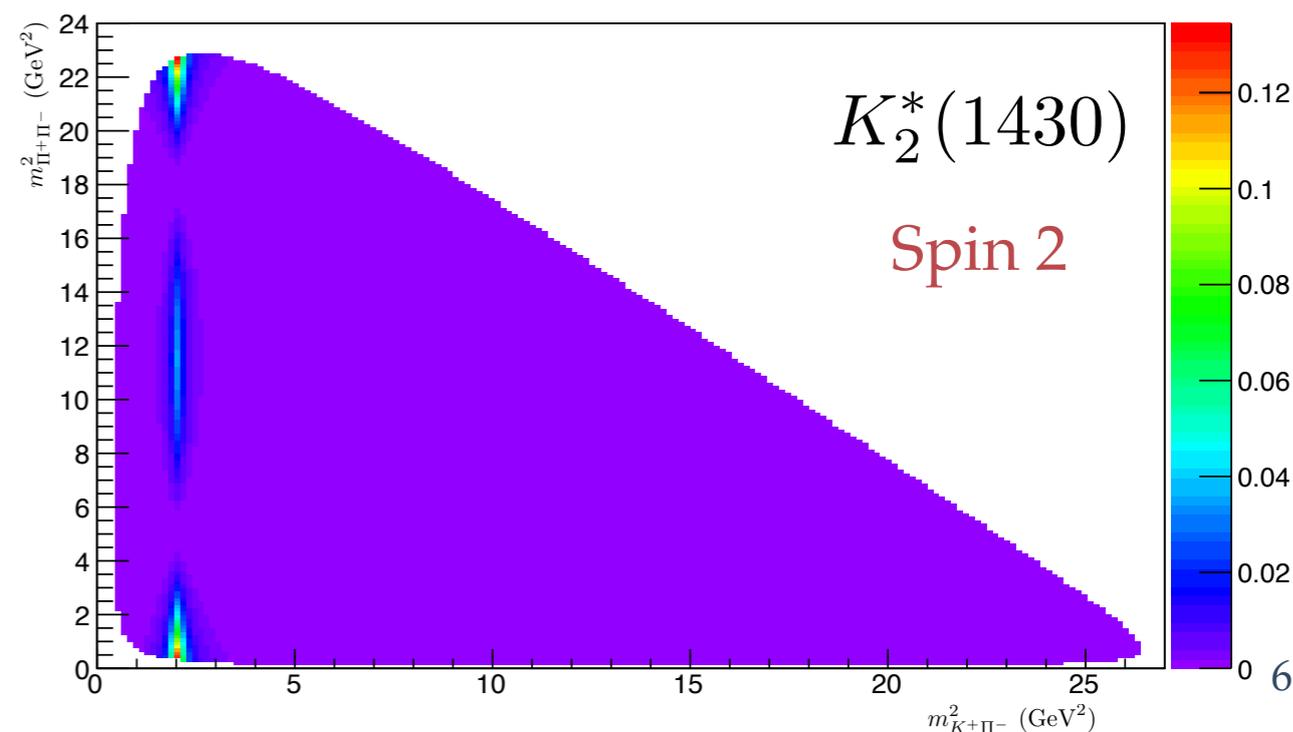
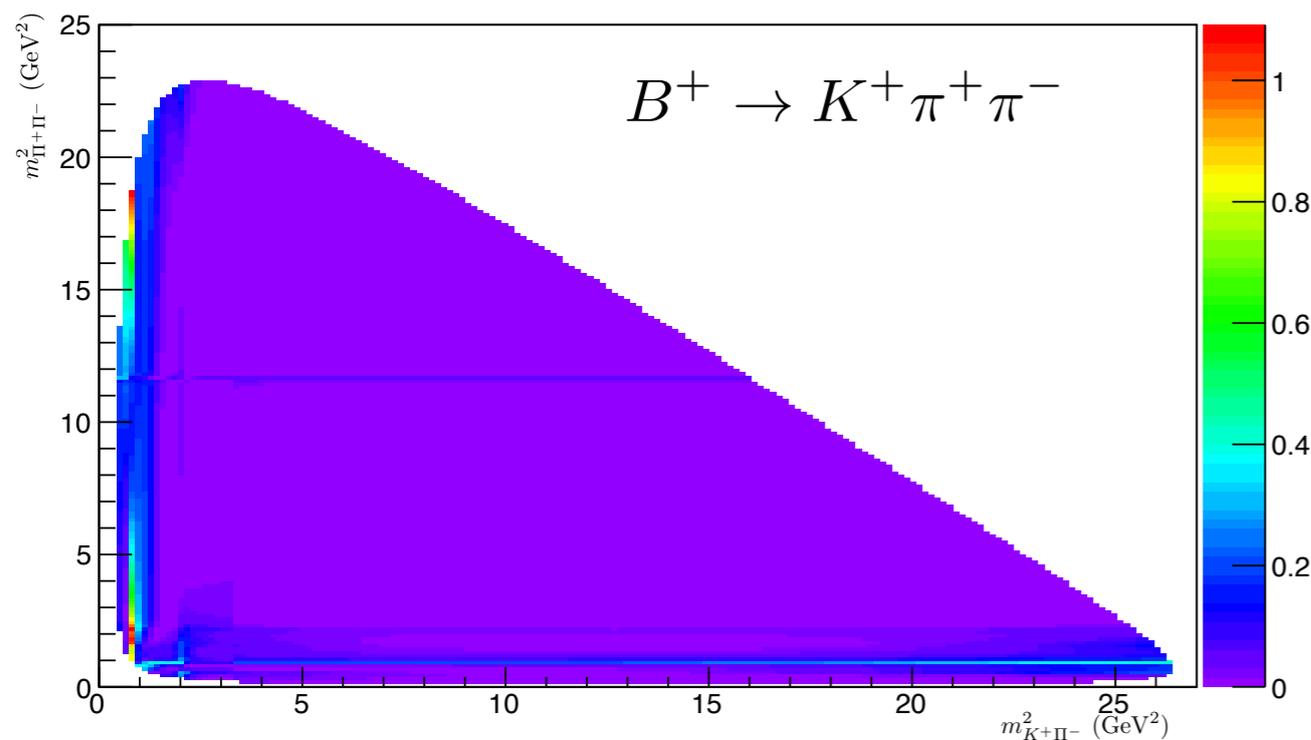
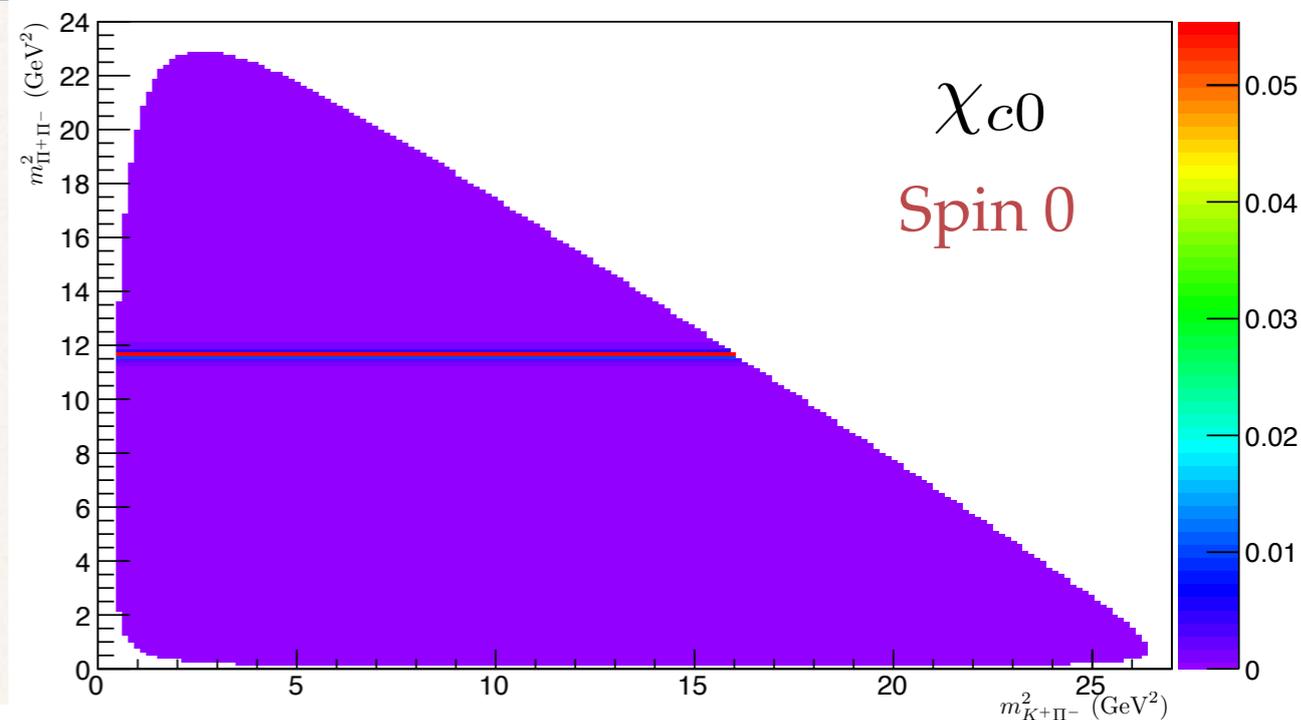
$$A(s_{12}, s_{13}) = \sum_{j=1}^N c_j e^{i\theta_j} F_j(s_{12}, s_{13})$$

paramètres isobares
dynamique faible

lineshape
dynamique forte

Résonances sur le plan de Dalitz

Exemples de plans de Dalitz obtenus avec les données de BaBar



Canaux de désintégration

- ❖ Extraction de l'angle γ à partir de l'analyse en amplitude de différentes désintégrations en 3 corps du méson B

$$B^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^-$$

$$B^0 \rightarrow K^0 \pi^+ \pi^-$$

$$B^0 \rightarrow K^0 K^0 \bar{K}^0$$

$$B^0 \rightarrow K^+ \pi^0 \pi^-$$

$$B^0 \rightarrow K^+ K^0 K^-$$

- ❖ Symétrie SU(3) de saveur : relation de proportionnalité entre les diagrammes **pingouin électro-faible** et **arbre** pour les transitions $\bar{b} \rightarrow \bar{s}$

$$P'_{EW} = \kappa T' \quad P'^c_{EW} = \kappa C'$$

NB : cette relation n'est valable que pour des amplitudes complètement symétriques :

$$A_{fs} = \frac{1}{\sqrt{6}} (A(s_{12}, s_{13}) + A(s_{13}, s_{12}) + A(s_{12}, s_{23}) + A(s_{23}, s_{12}) + A(s_{23}, s_{13}) + A(s_{13}, s_{23}))$$

Amplitudes théoriques

- ❖ Les amplitudes de désintégration peuvent être exprimées en fonction de 5 diagrammes effectifs ([Phys.Rev. D84 \(2011\) 034040](#))

$$2A(B^0 \rightarrow K^+ \pi^0 \pi^-)_{\text{fs}} = be^{i\gamma} - \kappa c,$$

$$\sqrt{2}A(B^0 \rightarrow K^0 \pi^+ \pi^-)_{\text{fs}} = -de^{i\gamma} - \tilde{P}'_{\text{uc}} e^{i\gamma} - a + \kappa d,$$

$$\sqrt{2}A(B^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^-)_{\text{fs}} = -ce^{i\gamma} - \tilde{P}'_{\text{uc}} e^{i\gamma} - a + \kappa b,$$

$$\sqrt{2}A(B^0 \rightarrow K^+ K^0 K^-)_{\text{fs}} = \alpha_{\text{SU}(3)}(-ce^{i\gamma} - \tilde{P}'_{\text{uc}} e^{i\gamma} - a + \kappa b),$$

$$A(B^0 \rightarrow K^0 K^0 \bar{K}^0)_{\text{fs}} = \alpha_{\text{SU}(3)}(\tilde{P}'_{\text{uc}} e^{i\gamma} + a),$$

Amplitudes théoriques

- ❖ Les amplitudes de désintégration peuvent être exprimées en fonction de 5 diagrammes effectifs ([Phys.Rev. D84 \(2011\) 034040](#))

$$\begin{aligned} a &= -\tilde{P}'_{tc} + \kappa\left(\frac{2}{3}T'_1 + \frac{1}{3}C'_1 + \frac{1}{3}C'_2\right) & b &= T'_1 + C'_2 & \tilde{P}'_{uc} \\ c &= T'_2 + C'_1 & d &= T'_1 + C'_1 \end{aligned}$$

$$2A(B^0 \rightarrow K^+ \pi^0 \pi^-)_{\text{fs}} = be^{i\gamma} - \kappa c,$$

$$\sqrt{2}A(B^0 \rightarrow K^0 \pi^+ \pi^-)_{\text{fs}} = -de^{i\gamma} - \tilde{P}'_{uc}e^{i\gamma} - a + \kappa d,$$

$$\sqrt{2}A(B^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^-)_{\text{fs}} = -ce^{i\gamma} - \tilde{P}'_{uc}e^{i\gamma} - a + \kappa b,$$

$$\sqrt{2}A(B^0 \rightarrow K^+ K^0 K^-)_{\text{fs}} = \alpha_{\text{SU}(3)}(-ce^{i\gamma} - \tilde{P}'_{uc}e^{i\gamma} - a + \kappa b),$$

$$A(B^0 \rightarrow K^0 K^0 \bar{K}^0)_{\text{fs}} = \alpha_{\text{SU}(3)}(\tilde{P}'_{uc}e^{i\gamma} + a),$$

Amplitudes théoriques

- Les amplitudes de désintégration peuvent être exprimées en fonction de 5 diagrammes effectifs ([Phys.Rev. D84 \(2011\) 034040](#))

$$\begin{aligned}
 a &= -\tilde{P}'_{tc} + \kappa\left(\frac{2}{3}T'_1 + \frac{1}{3}C'_1 + \frac{1}{3}C'_2\right) & b &= T'_1 + C'_2 & \tilde{P}'_{uc} \\
 c &= T'_2 + C'_1 & d &= T'_1 + C'_1
 \end{aligned}$$

Paramètres théoriques

- 5 magnitudes
- 4 phases fortes relatives

$$2A(B^0 \rightarrow K^+ \pi^0 \pi^-)_{\text{fs}} = be^{i\gamma} - \kappa c,$$

$$\sqrt{2}A(B^0 \rightarrow K^0 \pi^+ \pi^-)_{\text{fs}} = -de^{i\gamma} - \tilde{P}'_{uc}e^{i\gamma} - a + \kappa d,$$

$$\sqrt{2}A(B^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^-)_{\text{fs}} = -ce^{i\gamma} - \tilde{P}'_{uc}e^{i\gamma} - a + \kappa b,$$

$$\sqrt{2}A(B^0 \rightarrow K^+ K^0 K^-)_{\text{fs}} = \alpha_{\text{SU}(3)}(-ce^{i\gamma} - \tilde{P}'_{uc}e^{i\gamma} - a + \kappa b),$$

$$A(B^0 \rightarrow K^0 K^0 \bar{K}^0)_{\text{fs}} = \alpha_{\text{SU}(3)}(\tilde{P}'_{uc}e^{i\gamma} + a),$$

Amplitudes théoriques

- Les amplitudes de désintégration peuvent être exprimées en fonction de 5 diagrammes effectifs ([Phys.Rev. D84 \(2011\) 034040](#))

$$\begin{aligned}
 a &= -\tilde{P}'_{tc} + \kappa\left(\frac{2}{3}T'_1 + \frac{1}{3}C'_1 + \frac{1}{3}C'_2\right) & b &= T'_1 + C'_2 & \tilde{P}'_{uc} \\
 c &= T'_2 + C'_1 & d &= T'_1 + C'_1
 \end{aligned}$$

Paramètres théoriques

- 5 magnitudes
- 4 phases fortes relatives
- 1 phase faible (γ)

$$2A(B^0 \rightarrow K^+ \pi^0 \pi^-)_{\text{fs}} = be^{i\gamma} - \kappa c,$$

$$\sqrt{2}A(B^0 \rightarrow K^0 \pi^+ \pi^-)_{\text{fs}} = -de^{i\gamma} - \tilde{P}'_{uc}e^{i\gamma} - a + \kappa d,$$

$$\sqrt{2}A(B^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^-)_{\text{fs}} = -ce^{i\gamma} - \tilde{P}'_{uc}e^{i\gamma} - a + \kappa b,$$

$$\sqrt{2}A(B^0 \rightarrow K^+ K^0 K^-)_{\text{fs}} = \alpha_{\text{SU}(3)}(-ce^{i\gamma} - \tilde{P}'_{uc}e^{i\gamma} - a + \kappa b),$$

$$A(B^0 \rightarrow K^0 K^0 \bar{K}^0)_{\text{fs}} = \alpha_{\text{SU}(3)}(\tilde{P}'_{uc}e^{i\gamma} + a),$$

Amplitudes théoriques

- Les amplitudes de désintégration peuvent être exprimées en fonction de 5 diagrammes effectifs ([Phys.Rev. D84 \(2011\) 034040](#))

$$\begin{aligned}
 a &= -\tilde{P}'_{tc} + \kappa\left(\frac{2}{3}T'_1 + \frac{1}{3}C'_1 + \frac{1}{3}C'_2\right) & b &= T'_1 + C'_2 & \tilde{P}'_{uc} \\
 c &= T'_2 + C'_1 & d &= T'_1 + C'_1
 \end{aligned}$$

Paramètres théoriques

- 5 magnitudes
- 4 phases fortes relatives
- 1 phase faible (γ)
- $\alpha_{\text{SU}(3)}$

$$2A(B^0 \rightarrow K^+ \pi^0 \pi^-)_{\text{fs}} = be^{i\gamma} - \kappa c,$$

$$\sqrt{2}A(B^0 \rightarrow K^0 \pi^+ \pi^-)_{\text{fs}} = -de^{i\gamma} - \tilde{P}'_{uc}e^{i\gamma} - a + \kappa d,$$

$$\sqrt{2}A(B^+ \rightarrow K^+ \pi^+ \pi^-)_{\text{fs}} = -ce^{i\gamma} - \tilde{P}'_{uc}e^{i\gamma} - a + \kappa b,$$

$$\sqrt{2}A(B^0 \rightarrow K^+ K^0 K^-)_{\text{fs}} = \alpha_{\text{SU}(3)}(-ce^{i\gamma} - \tilde{P}'_{uc}e^{i\gamma} - a + \kappa b),$$

$$A(B^0 \rightarrow K^0 K^0 \bar{K}^0)_{\text{fs}} = \alpha_{\text{SU}(3)}(\tilde{P}'_{uc}e^{i\gamma} + a),$$

Observables

- ❖ À partir des amplitudes complètement symétrisées, selon la physique du mode, on peut extraire les observables :

$$X = |A_{\text{fs}}|^2 + |\bar{A}_{\text{fs}}|^2$$

$$Y = |A_{\text{fs}}|^2 - |\bar{A}_{\text{fs}}|^2$$

$$Z = \text{Im}[A_{\text{fs}}^* \bar{A}_{\text{fs}}]$$

Observables

- ❖ À partir des amplitudes complètement symétrisées, selon la physique du mode, on peut extraire les observables :

Rapport de branchement effectif moyenné sur la saveur.

Mesurable pour tous les canaux

$$X = |A_{fs}|^2 + |\bar{A}_{fs}|^2$$

$$Y = |A_{fs}|^2 - |\bar{A}_{fs}|^2$$

$$Z = \text{Im}[A_{fs}^* \bar{A}_{fs}]$$

Observables

- ❖ À partir des amplitudes complètement symétrisées, selon la physique du mode, on peut extraire les observables :

Rapport de branchement effectif moyenné sur la saveur.

Mesurable pour tous les canaux

$$X = |A_{fs}|^2 + |\bar{A}_{fs}|^2$$

$$Y = |A_{fs}|^2 - |\bar{A}_{fs}|^2$$

$$Z = \text{Im}[A_{fs}^* \bar{A}_{fs}]$$

Asymétrie CP directe.

Mesurable pour tous les canaux

Observables

- ❖ À partir des amplitudes complètement symétrisées, selon la physique du mode, on peut extraire les observables :

Rapport de branchement effectif moyenné sur la saveur.

Mesurable pour tous les canaux

$$X = |A_{fs}|^2 + |\bar{A}_{fs}|^2$$

$$Y = |A_{fs}|^2 - |\bar{A}_{fs}|^2$$

$$Z = \text{Im}[A_{fs}^* \bar{A}_{fs}]$$

Asymétrie CP directe.

Mesurable pour tous les canaux

Asymétrie CP indirecte.

Uniquement pour les modes invariant sous CP
(ex. $K_S \text{Pi}^+ \text{Pi}^-$)

Observables

- ❖ À partir des amplitudes complètement symétrisées, selon la physique du mode, on peut extraire les observables :

Rapport de branchement effectif moyenné sur la saveur.

Mesurable pour tous les canaux

$$X = |A_{fs}|^2 + |\bar{A}_{fs}|^2$$

$$Y = |A_{fs}|^2 - |\bar{A}_{fs}|^2$$

$$Z = \text{Im}[A_{fs}^* \bar{A}_{fs}]$$

Asymétrie CP directe.

Mesurable pour tous les canaux

Asymétrie CP indirecte.

Uniquement pour les modes invariant sous CP
(ex. $K_s \text{Pi}^+ \text{Pi}^-$)

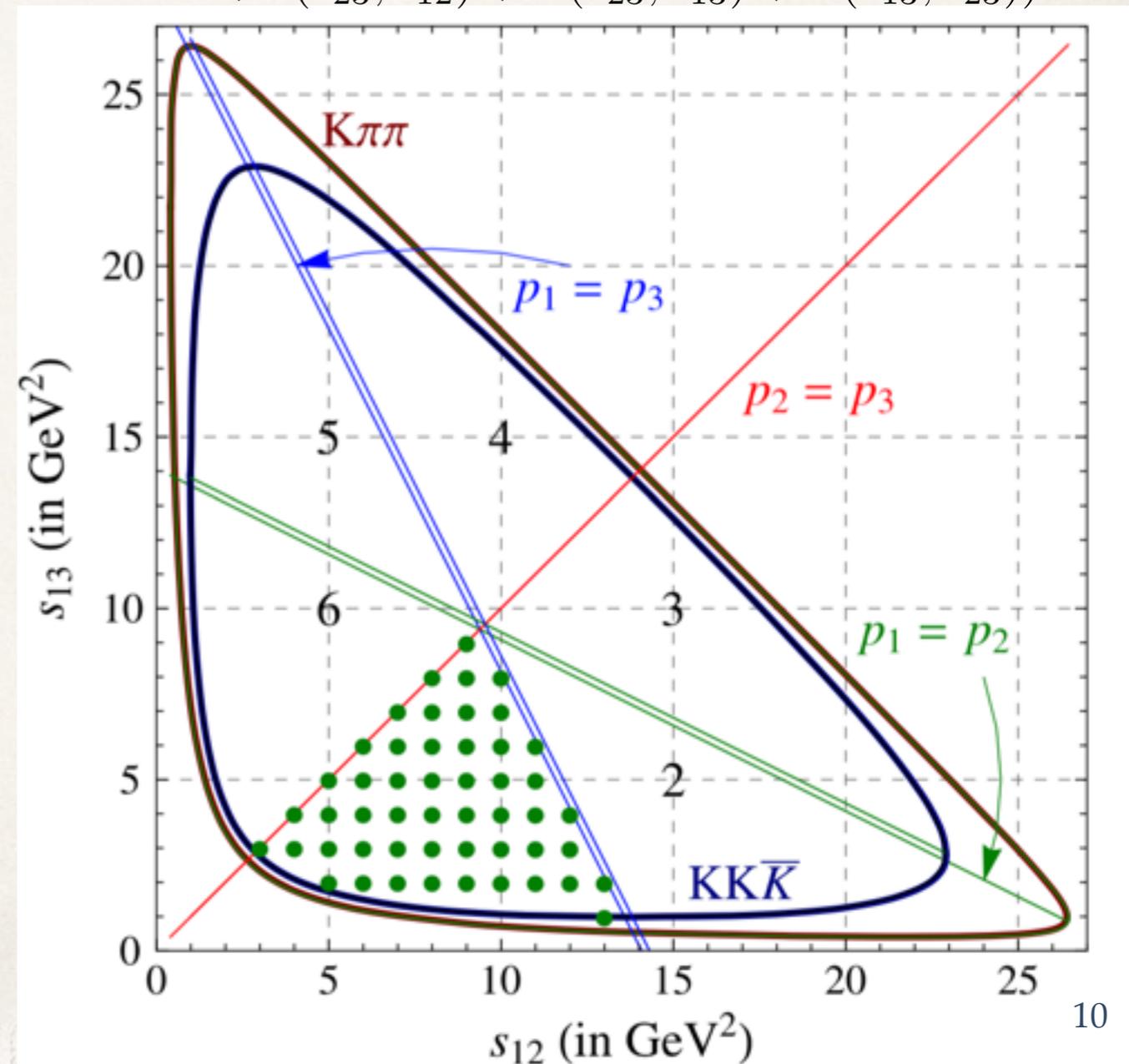
➔ 9 paramètres théoriques et 11 paramètres expérimentaux*

* pour $K_s K_s K_s$ seulement X est disponible

Extraction de γ

- ❖ Plan de Dalitz symétrisé.
- ❖ Extraction de γ à l'aide d'un fit.
- ❖ **Étude existante** : traitement simplifié (erreurs statistiques uniquement, sans corrélations).
[Phys.Lett. B728 \(2014\) 206-209](#)
- ❖ **Objectif de ce travail** : effectuer l'étude la plus complète possible (inclure les erreurs systématiques, les corrélations entre les points...) et obtenir une incertitude réaliste sur γ .

$$A_{fs} = \frac{1}{\sqrt{6}} (A(s_{12}, s_{13}) + A(s_{13}, s_{12}) + A(s_{12}, s_{23}) + A(s_{23}, s_{12}) + A(s_{23}, s_{13}) + A(s_{13}, s_{23}))$$



Organisation du travail

Calcul des amplitudes

Calcul des observables X, Y, Z

Calcul des incertitudes :

- Prise en compte des erreurs systématiques
- Corrélations entre les paramètres isobares en un point
- Corrélations entre les points du plan de Dalitz

Extraction de γ

Calcul des incertitudes

- ❖ Incertitudes sur X, Y, Z en un point du plan de Dalitz

$$G = \begin{pmatrix} \sum_{j=1}^{n_{\text{iso}}} \frac{\partial X_1}{\partial a_j} \\ \sum_{j=1}^{n_{\text{iso}}} \frac{\partial Y_1}{\partial a_j} \\ \sum_{j=1}^{n_{\text{iso}}} \frac{\partial Z_1}{\partial a_j} \\ \vdots \\ 11 \text{ params} \end{pmatrix}$$

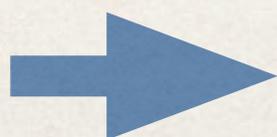
a_j : paramètres isobares (mesurés)

V : matrice d'erreur des paramètres isobares

x, y : coordonnées d'un point sur le plan de Dalitz

$$V_{XYZ}(x, y) = G^T(x, y) V G(x, y)$$

- ❖ Généralisation à N points pour 11 observables :



Matrice $11N \times 11N$

Calcul du χ carré

- ❖ χ carré, sans corrélations :

$$\chi^2 = \sum_{i=1}^N \frac{(X_i^{exp} - X_i^{th})^2}{\sigma_i^2}$$

- ❖ χ carré généralisé sous forme matricielle, avec corrélations :

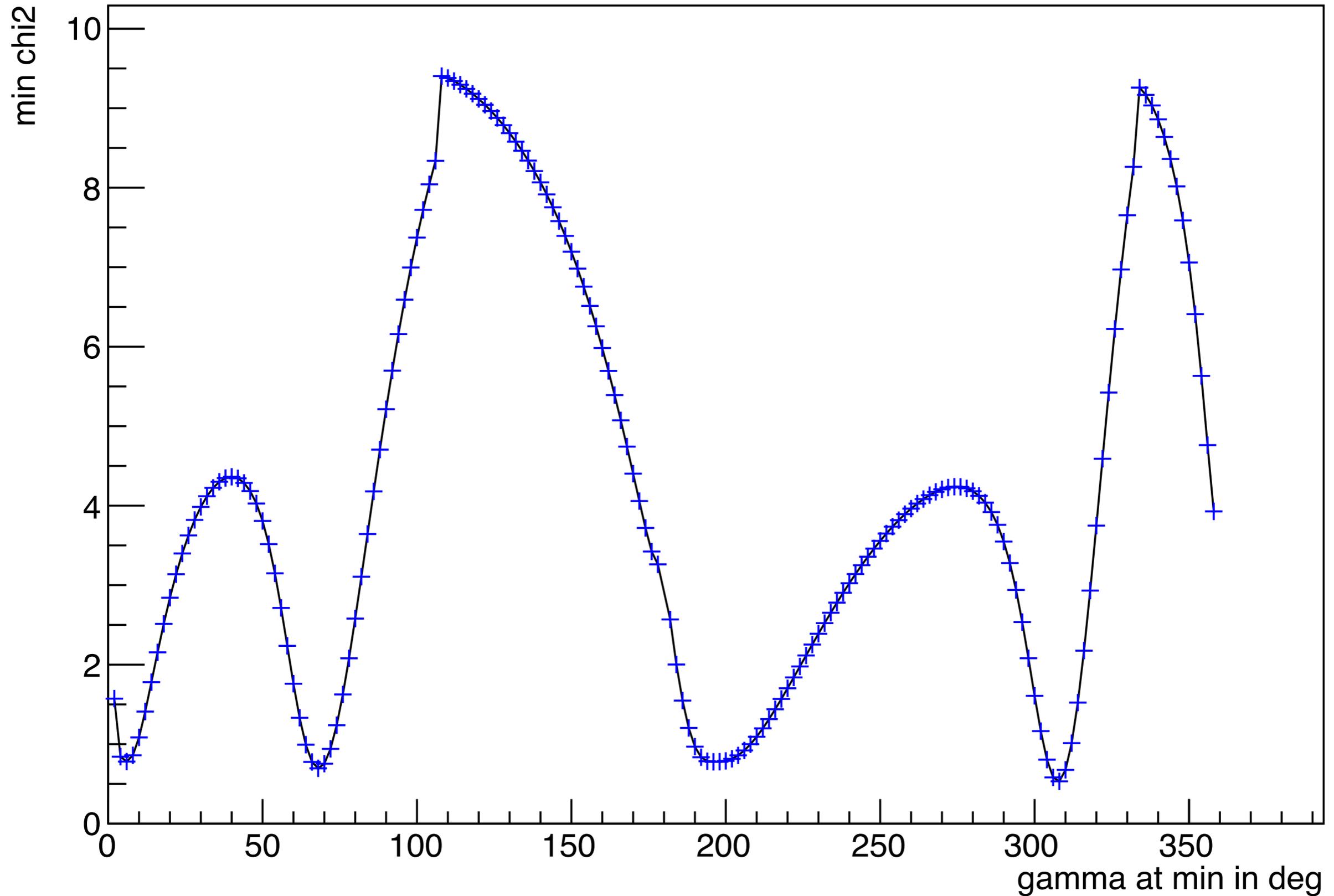
$$\Delta X = \begin{pmatrix} X_1^{exp} - X_1^{th} \\ Y_1^{exp} - Y_1^{th} \\ \vdots \end{pmatrix}$$

$$\chi^2 = \Delta X^T V_{XYZ}^{-1} \Delta X$$

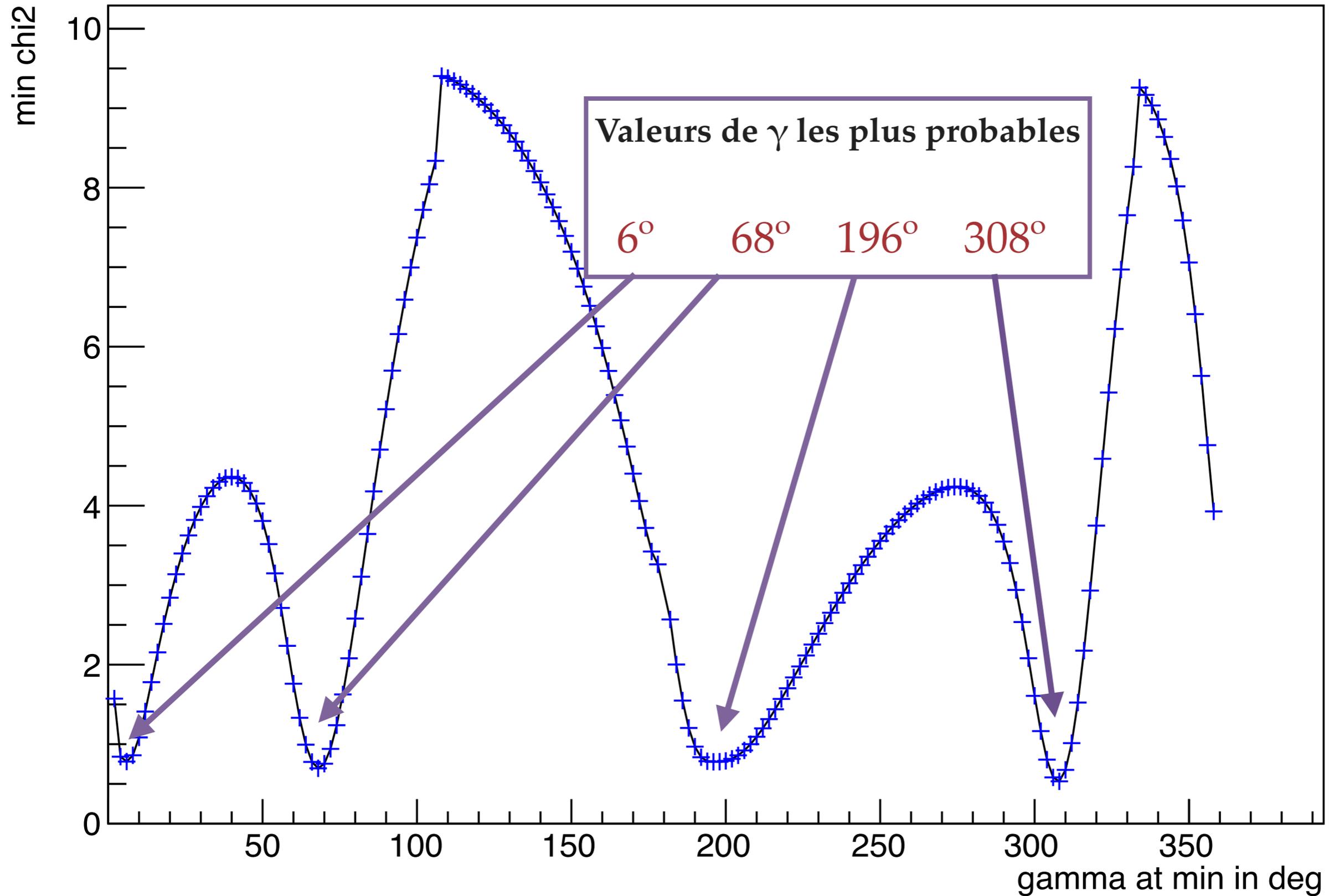
- ❖ Extraction de l'angle par minimisation du χ carré et "scan" sur γ

Scan sur γ en un point du plan de Dalitz ($\alpha=1$)

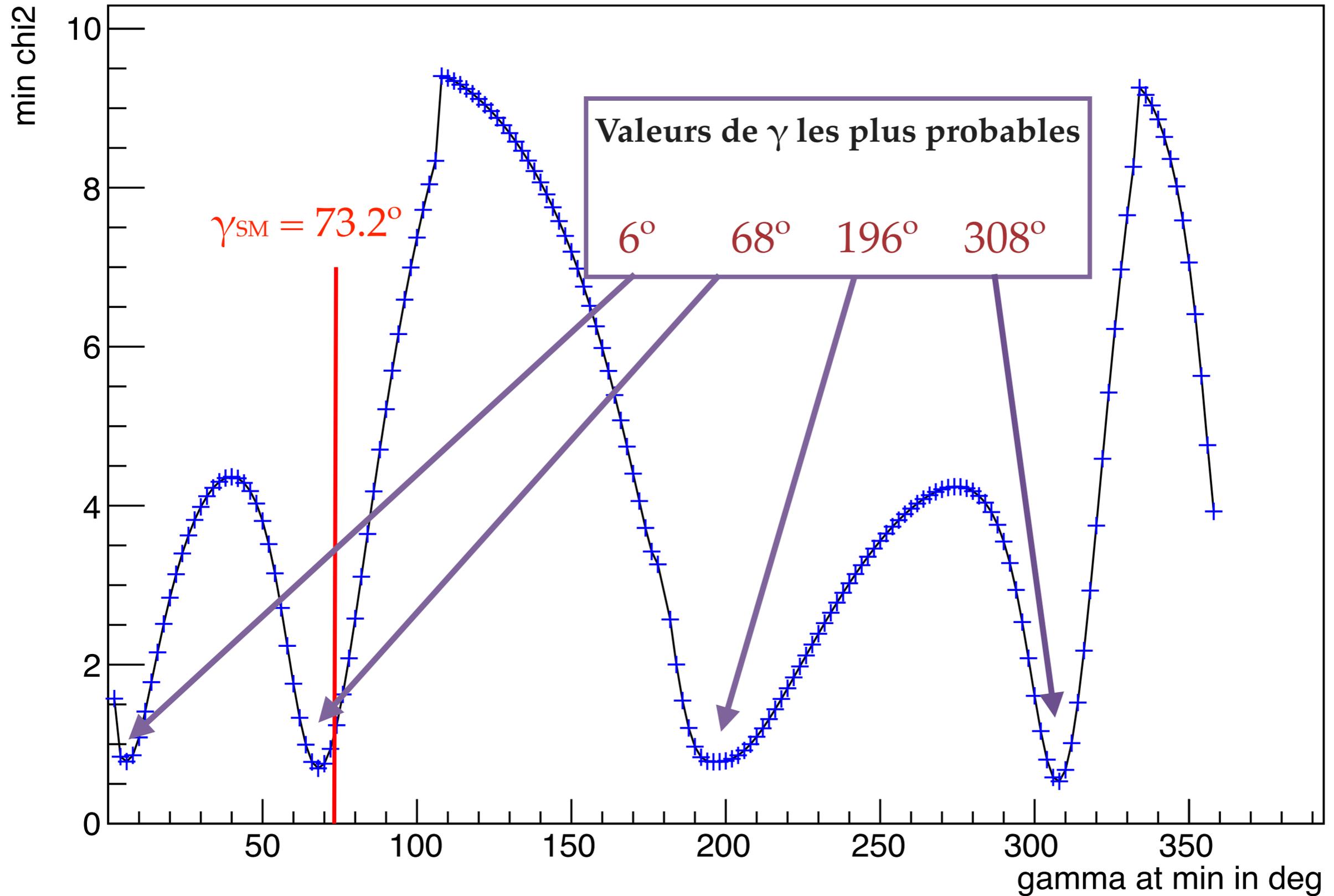
pour chaque valeur de γ on calcule le minimum du χ carré



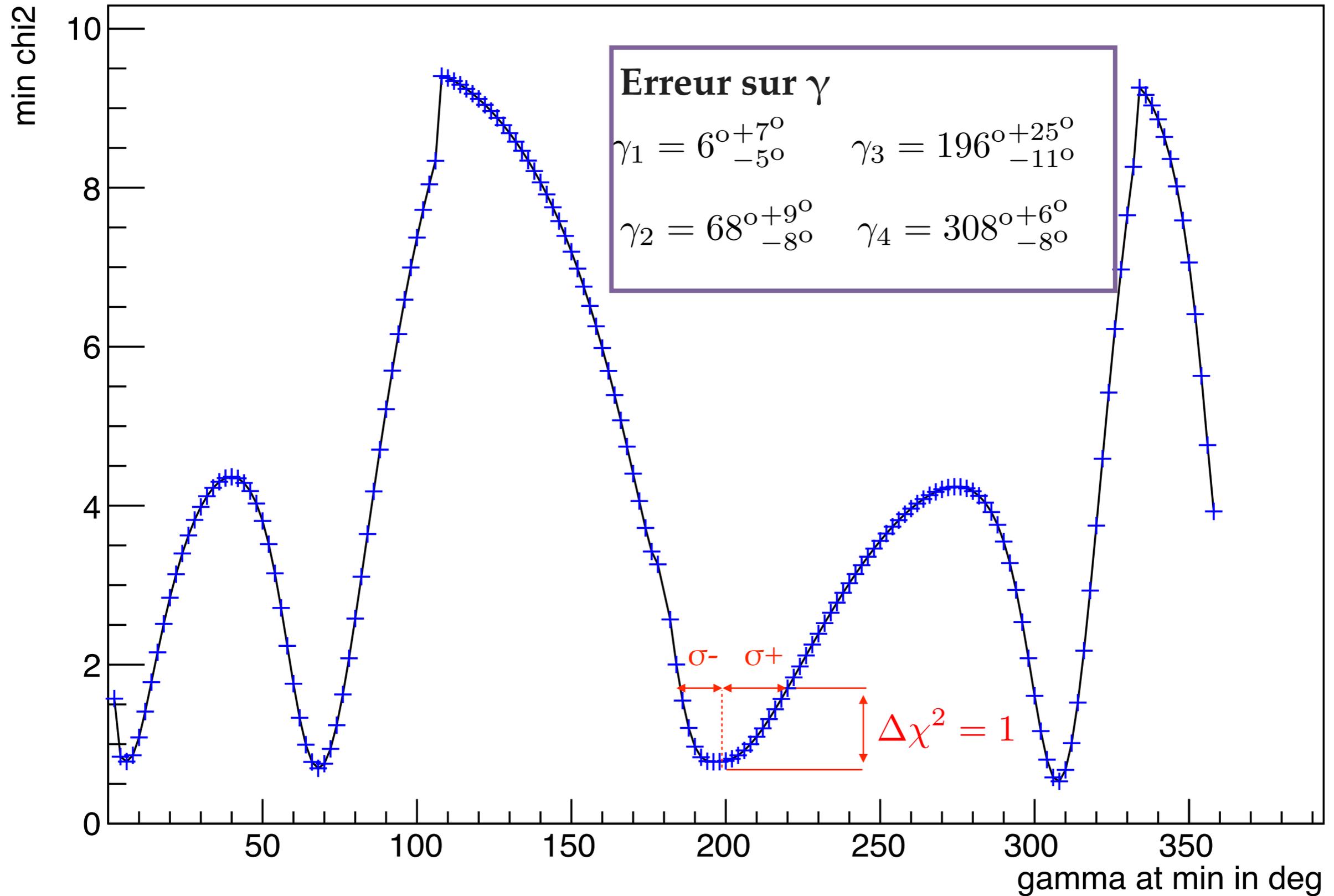
Scan sur γ en un point du plan de Dalitz ($\alpha=1$)



Scan sur γ en un point du plan de Dalitz ($\alpha=1$)

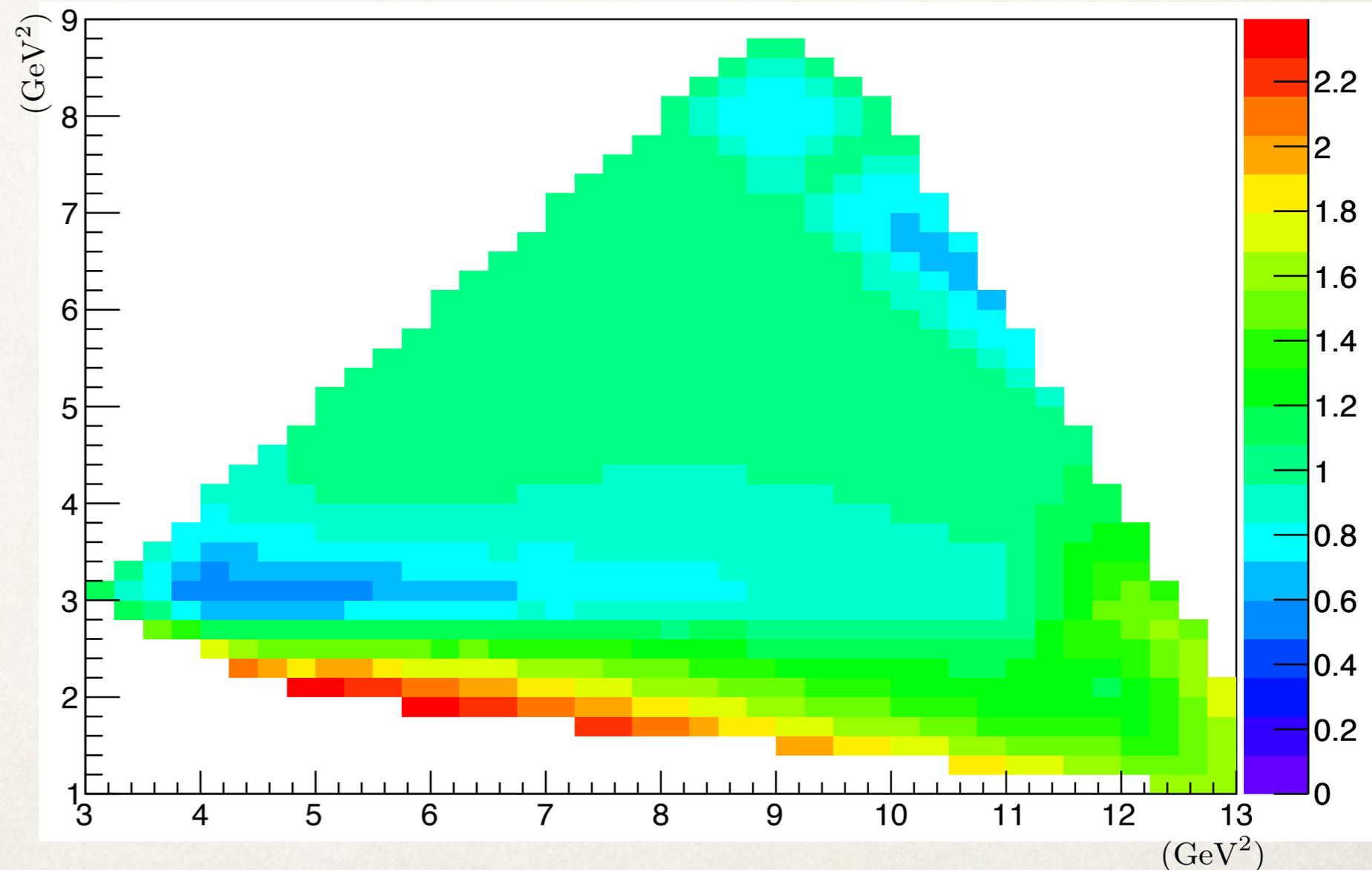


Scan sur γ en un point du plan de Dalitz ($\alpha=1$)

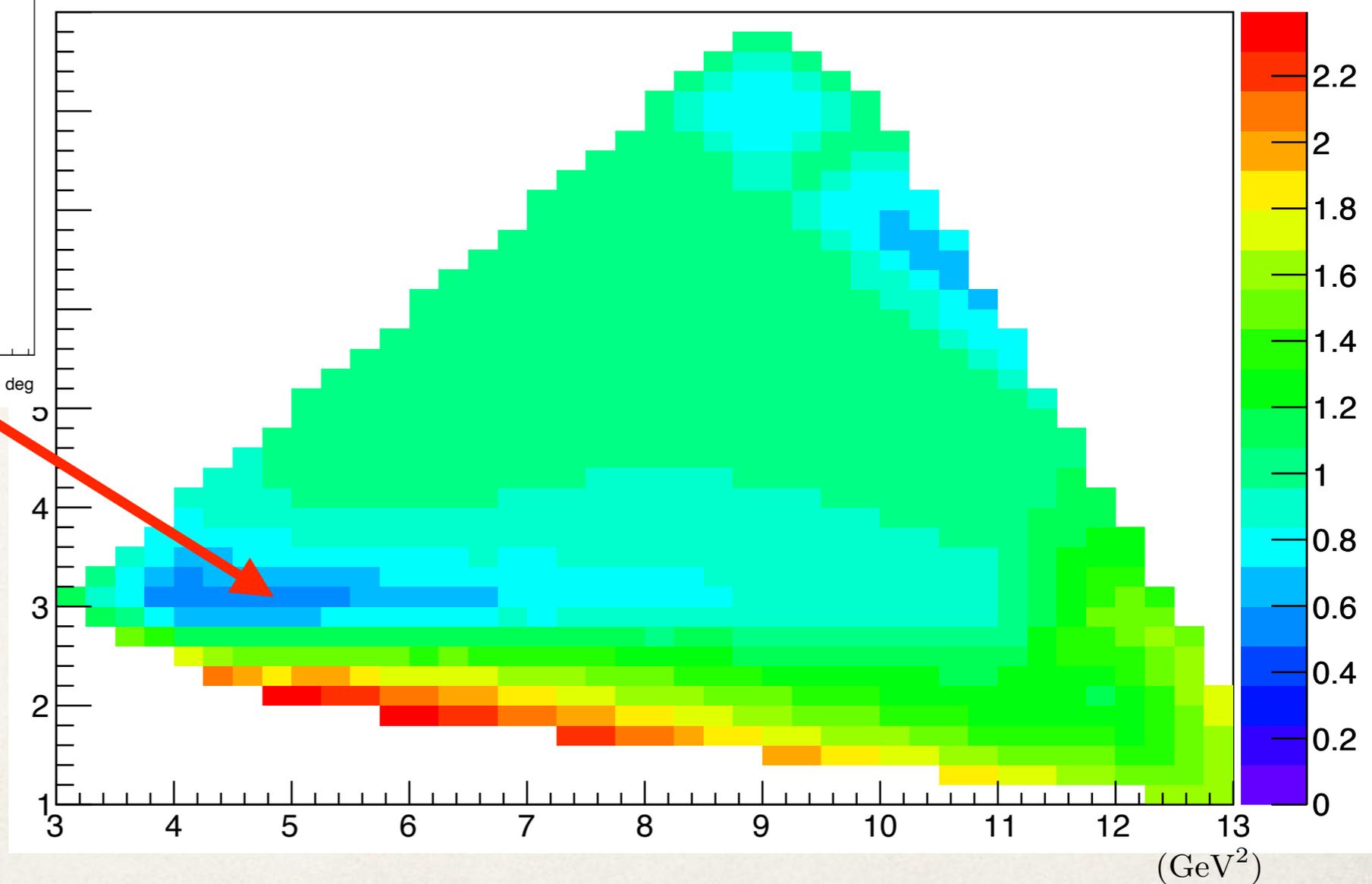
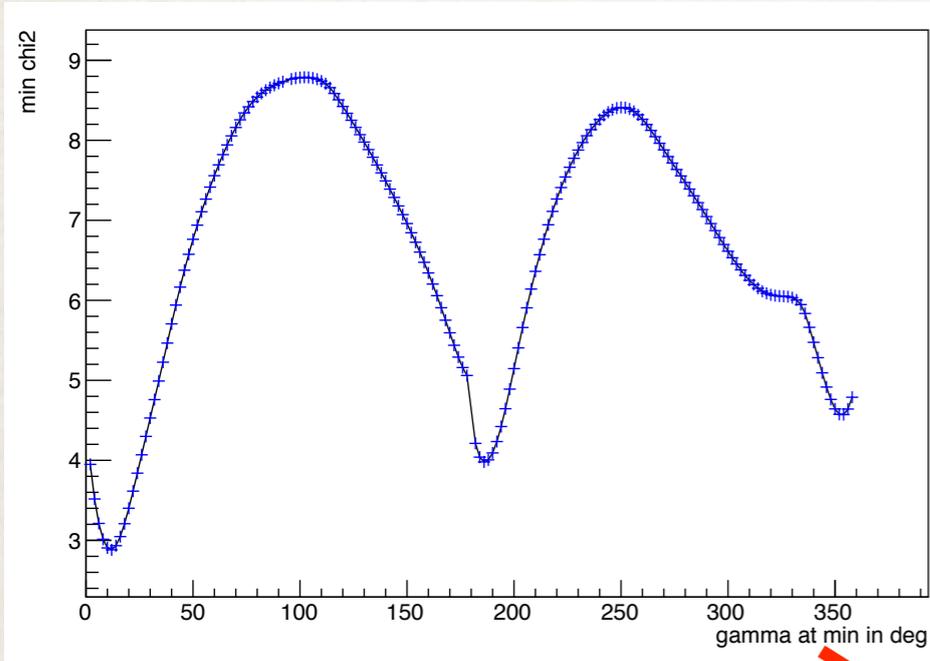


$\alpha_{\text{SU}(3)}$ sur le plan de Dalitz ($\gamma = 73.2^\circ$)

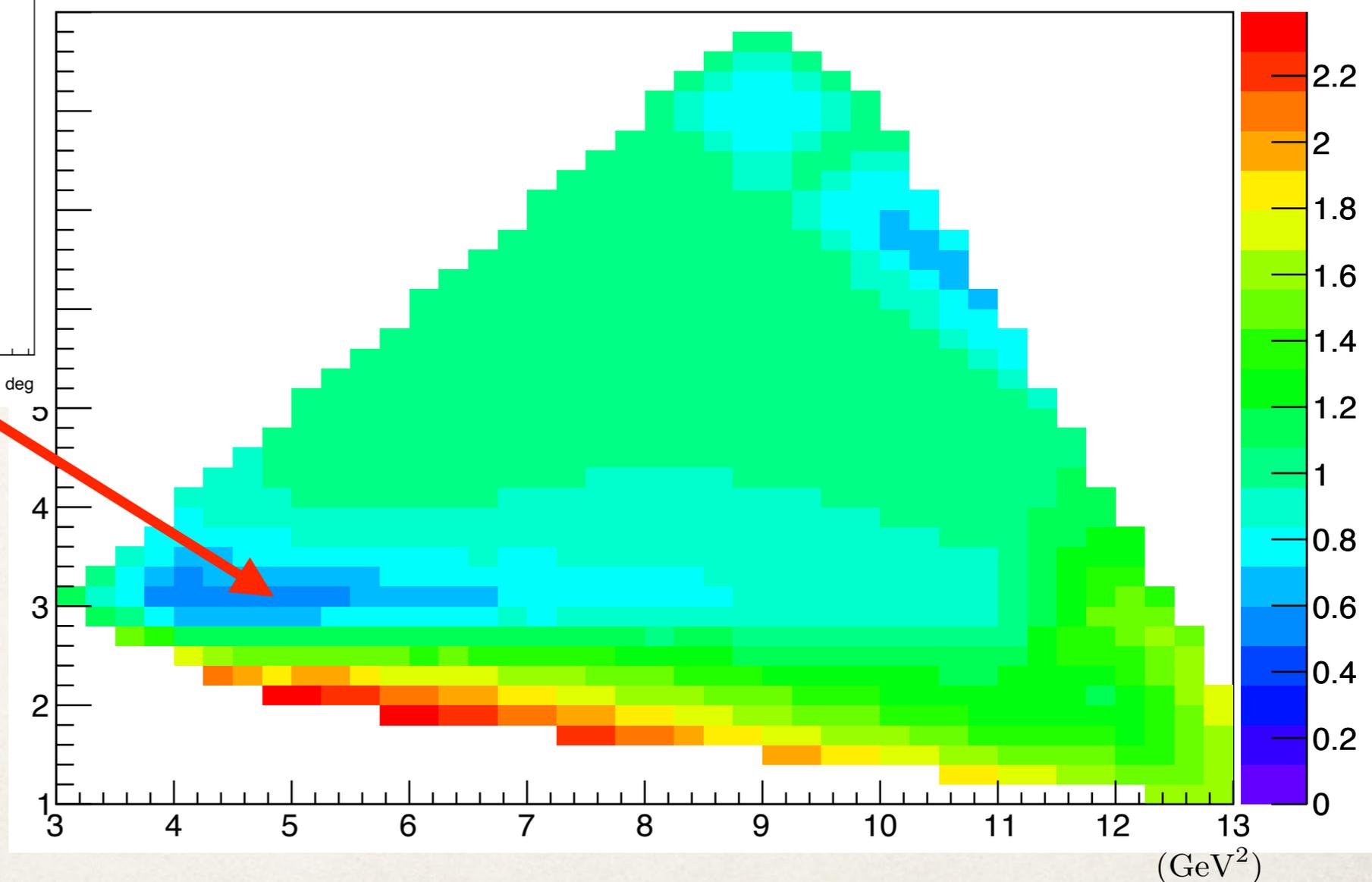
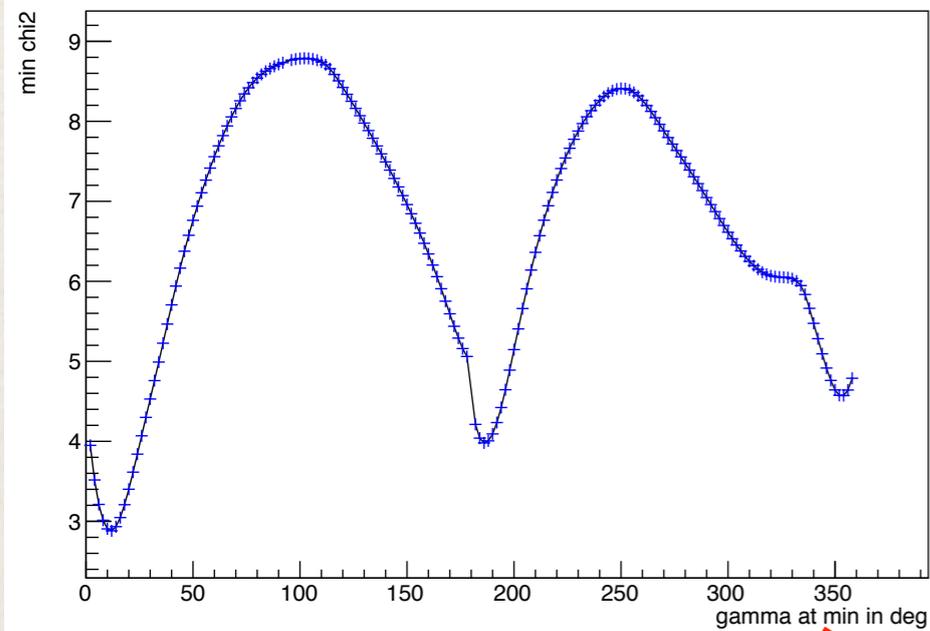
- ❖ γ fixé à la valeur du modèle standard
- ❖ Calcul de la valeur de $\alpha_{\text{SU}(3)}$ qui minimise le χ carré



$\alpha_{SU(3)}$ le plan de Dalitz ($\gamma = 73.2^\circ$)



$\alpha_{\text{SU}(3)}$ le plan de Dalitz ($\gamma = 73.2^\circ$)

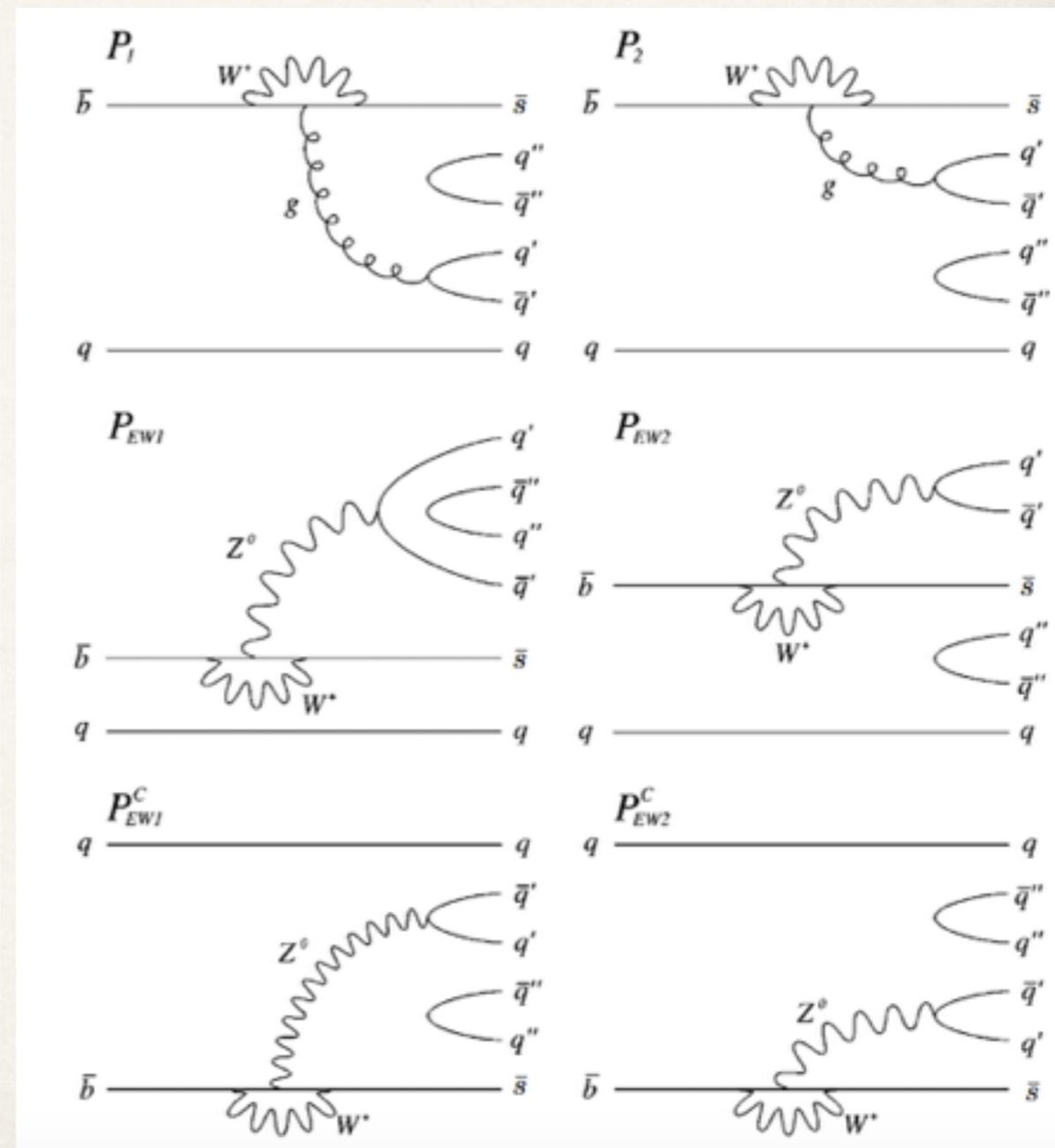
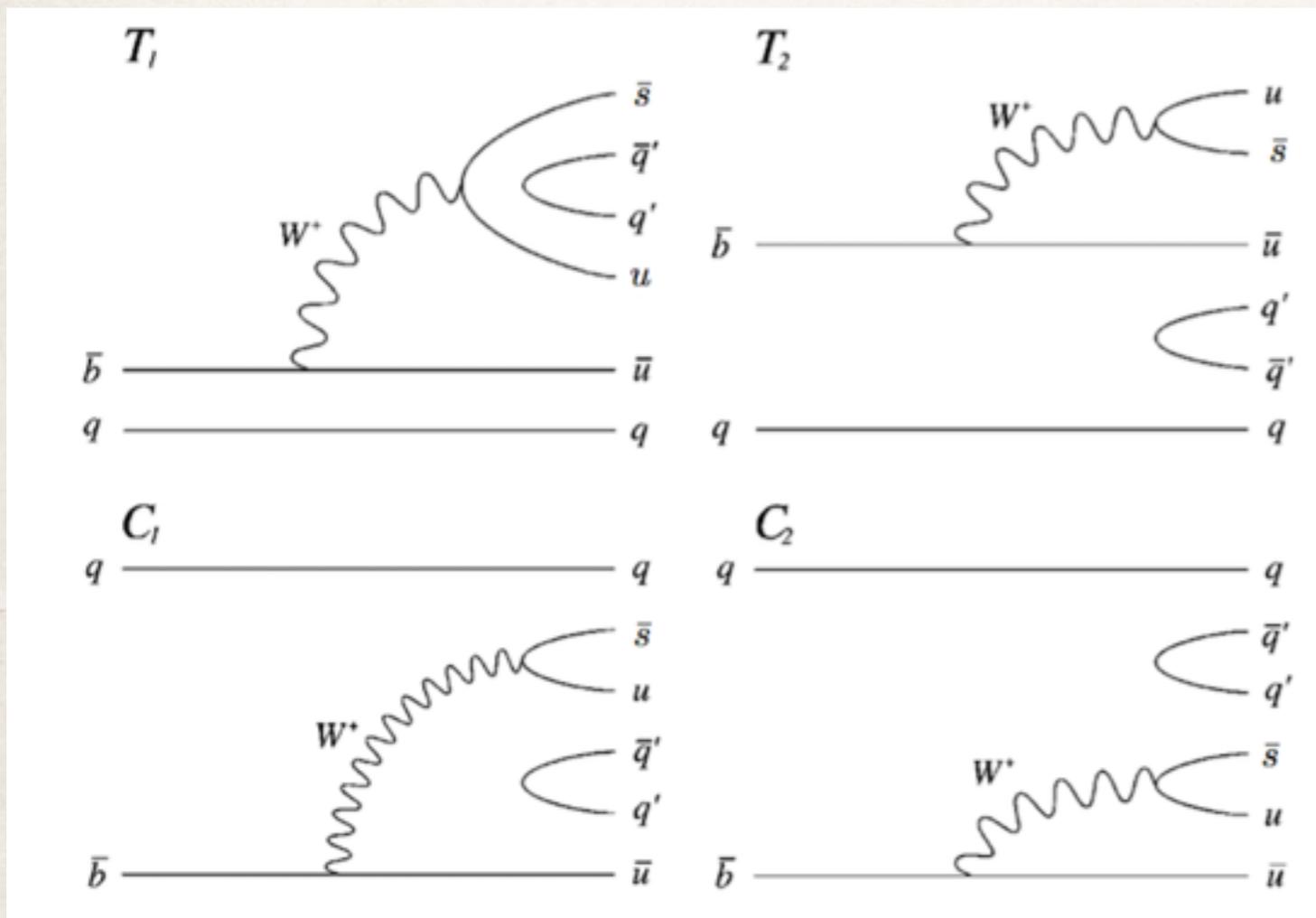


$\alpha_{\text{SU}(3)}$ moyen = 1.08396

Conclusion

- ❖ Résultats obtenus pour un point du plan encourageants (une des valeurs de γ extraite est proche de celle du modèle standard, incertitude sur l'angle acceptable, la valeur de $\alpha_{\text{SU}(3)}$ moyennée sur le plan de Dalitz proche de 1...).
- ❖ Il reste à extraire γ en utilisant tous les points de la grille et en incluant les erreurs systématiques.
- ❖ Développements ultérieurs :
 - Étudier l'impact du nombre de points de la grille sur le résultat.
 - Prendre en compte d'autres symétrisations possibles de l'amplitude.

Diagrammes



Violation de CP

- ❖ Due à la présence d'une phase dans la matrice CKM qui change de signe selon que l'on considère les transitions entre les quarks ou les antiquarks.

- ❖ Amplitude d'une désintégration d'un état i vers un état f (et son CP conjugué)

$$A(i \rightarrow f) = |A|e^{i\theta}e^{i\phi}$$

$$\bar{A}(\bar{i} \rightarrow \bar{f}) = |A|e^{i\theta}e^{-i\phi}$$

Phase forte

Phase faible

- ❖ Expérimentalement, on a accès à $|A|^2$, on a donc besoin d'interférences pour observer la violation de CP (ie. au moins 2 chemins différents de i à f)

$$A(i \rightarrow f) = |A_1|e^{i\theta_1}e^{i\phi_1} + |A_2|e^{i\theta_2}e^{i\phi_2}$$

$$\bar{A}(\bar{i} \rightarrow \bar{f}) = |A_1|e^{i\theta_1}e^{-i\phi_1} + |A_2|e^{i\theta_2}e^{-i\phi_2}$$

Mesure traditionnelle de γ

- ✦ Utilisation des modes chargés (arbres) : $B^\pm \rightarrow D^0 K^\pm$

$$A(B^- \rightarrow D^0 K^-) \propto V_{cb} V_{us} = a$$

$$A(B^- \rightarrow \bar{D}^0 K^-) \propto V_{ub} V_{cs} = r a e^{i\theta} e^{-i\gamma}$$

$$r = \frac{A(B^- \rightarrow \bar{D}^0 K^-)}{A(B^- \rightarrow D^0 K^-)} \approx 0.1$$

- Propre
- Dominée par des arbres
- Faibles rapports de branchement (10^{-5} - 10^{-7})

Phase forte