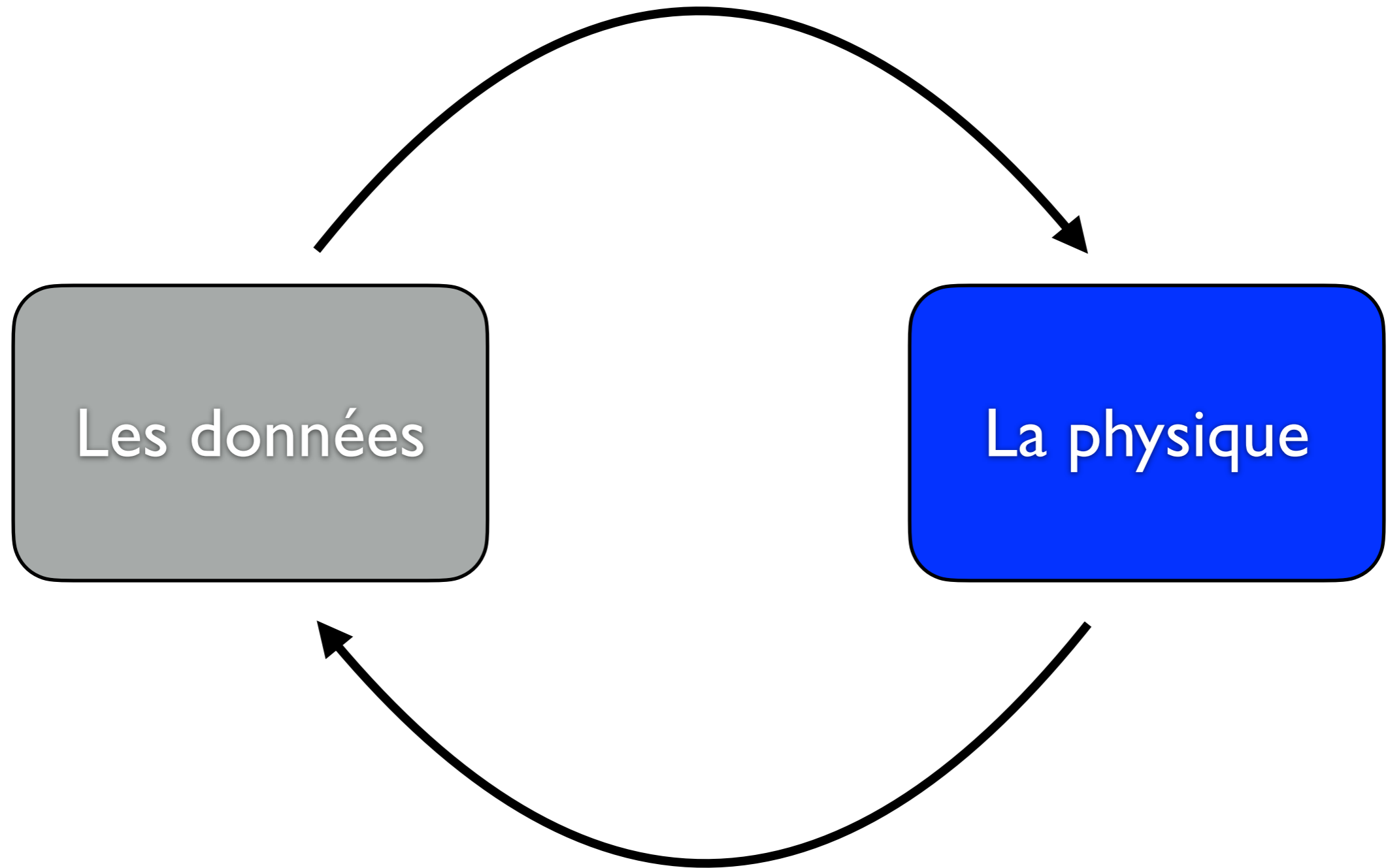


# Le charme aujourd'hui : une sélection très partielle

Mat Charles

(Sorbonne Université/LPNHE)



# C'est quoi, la physique du charme ?

- Le charme ( $c$ ) est l'une des six saveurs de quarks
- Il est de masse intermédiaire, entre les domaines
  - des quarks légers  $u, d, s$  de  $m < \Lambda_{\text{QCD}}$
  - du quark lourd  $b$  de  $m \gg \Lambda_{\text{QCD}}$
- Comme les autres quarks, il est confiné ; on ne lui voit pas en isolation/libre, mais à l'intérieur de hadrons
- Ces hadrons comprennent :
  - les mésons  $c\bar{c}$  (charmonium) : le charme caché
  - les mésons  $c\bar{q}$  et les baryons  $cqq'/ccq/cqc$  : le charme ouvert
  - d'autres combinaisons dites exotiques
- Que peut-on faire avec eux ?

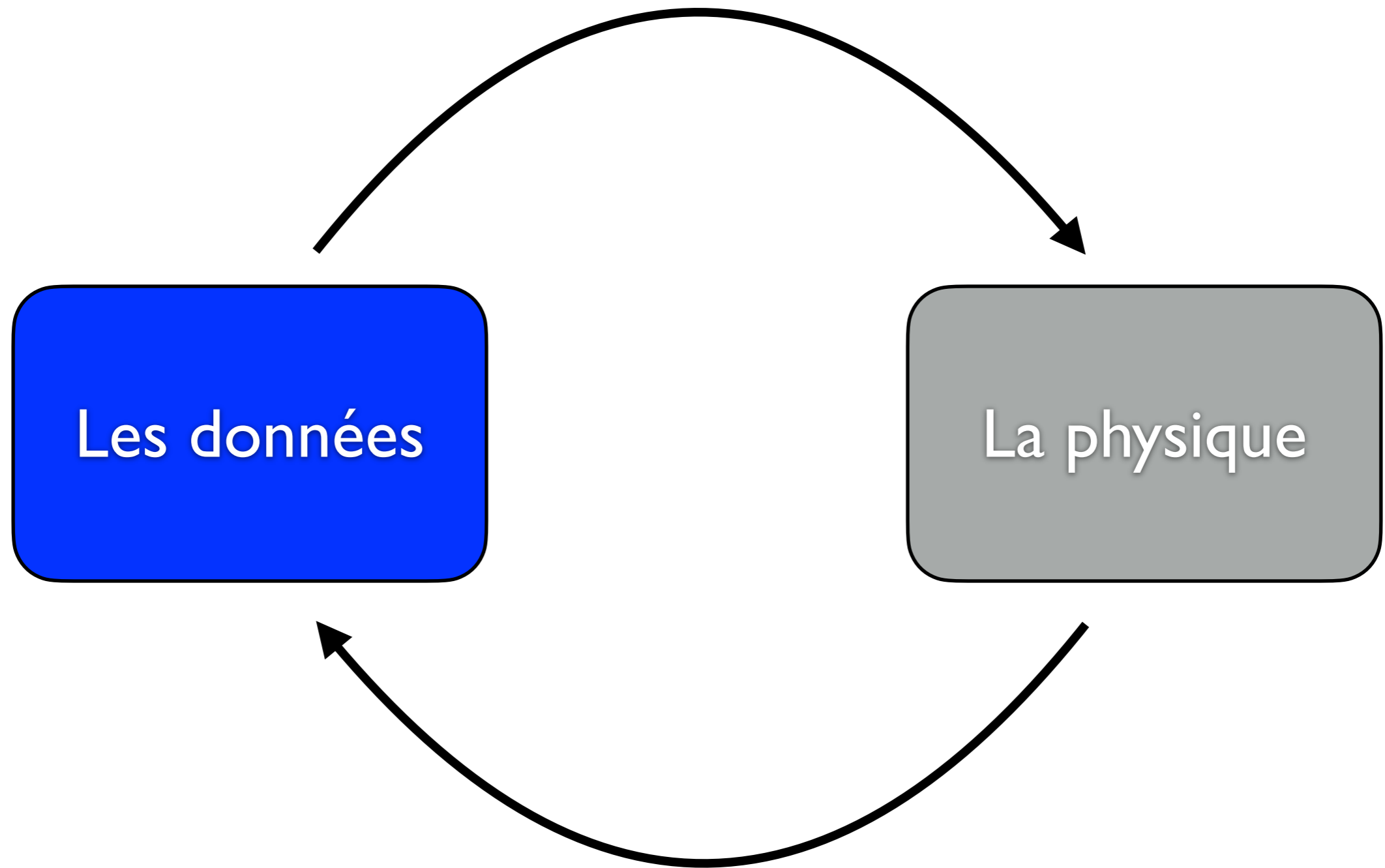
mass →	$\approx 2.3 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 1.275 \text{ GeV}/c^2$	$\approx 173.07 \text{ GeV}/c^2$
charge →	2/3	2/3	2/3
spin →	1/2	1/2	1/2
	<b>u</b> up	<b>c</b> charm	<b>t</b> top
	<b>d</b> down	<b>s</b> strange	<b>b</b> bottom
	$\approx 4.8 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 95 \text{ MeV}/c^2$	$\approx 4.18 \text{ GeV}/c^2$
	-1/3	-1/3	-1/3
	1/2	1/2	1/2

QUARKS

# C'est quoi, la physique du charme ?

- Que peut-on faire avec des hadrons charmés ? Beaucoup !
- Les propriétés des hadrons eux-mêmes (masses, largeurs et désintégrations de résonances, nombres quantiques) → QCD
- Les désintégrations des états fondamentaux (gamme large)
- Oscillations de  $D^0$  et asymétries de CP → CKM
- Sondes du Modèle Standard (et au-delà), dont :
  - Inputs aux tests du cadre CKM (mesures de précision)
  - Désintégrations rares, tests directs du MS
  - Origine des oscillations de  $D^0$  ?
  - Origine des asymétries de CP ?
- Alors, comment étudier ces phénomènes ?

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

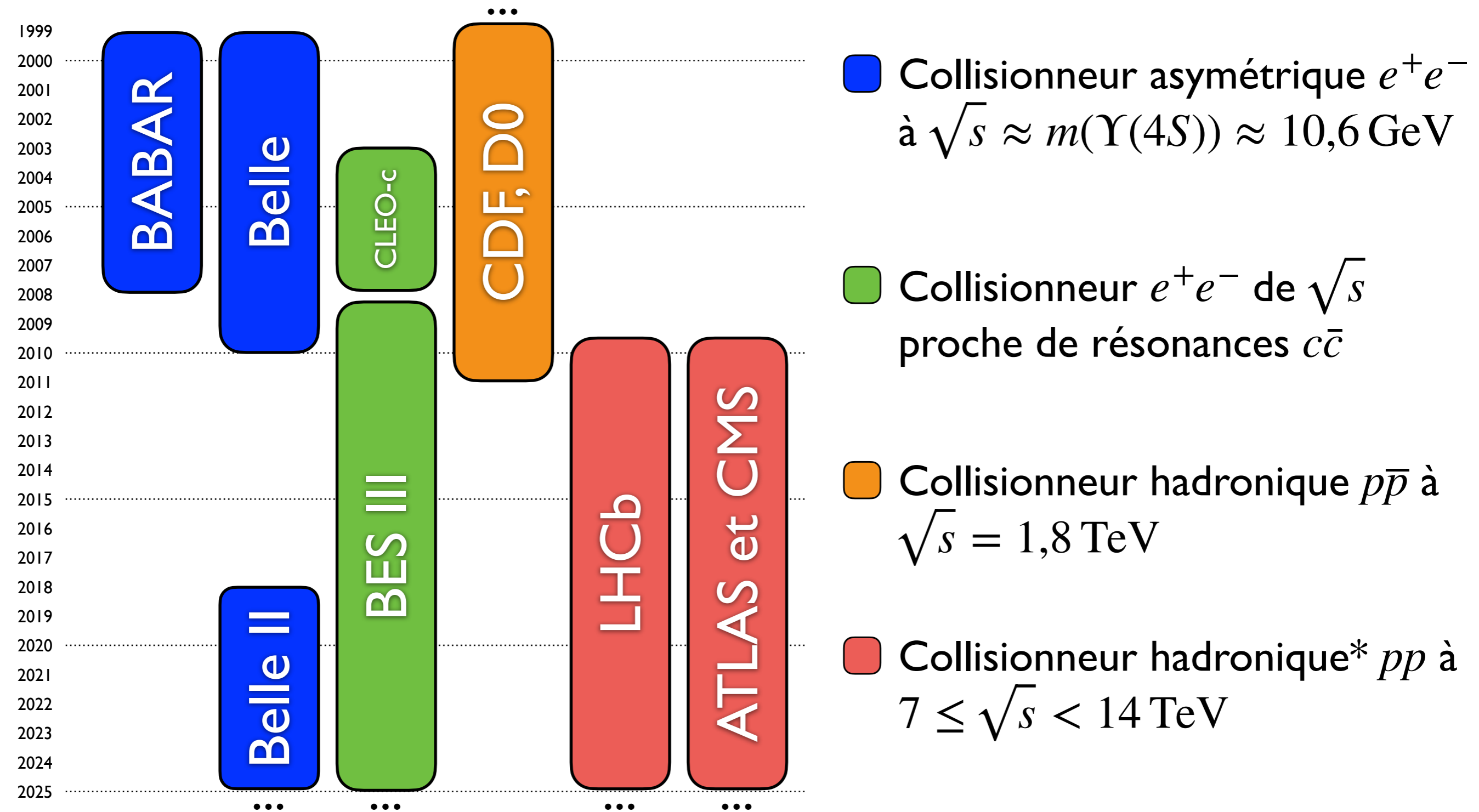


# Production de hadrons charmés

- Approches principales :
  - Production de paires  $c\bar{c}$  lors de collisions hadroniques
  - $e^+e^- \rightarrow c\bar{c} + X$  (continuum/inclusive)
  - Production de hadrons beaux,  $B \rightarrow$  hadrons charmés
  - $e^+e^- \rightarrow$  résonance  $\rightarrow$  hadrons charmés
- À chaque approche, ses points forts et faibles.
  - Inclusive : on peut tout produire
  - Exclusive : propre ; conditions initiales connues
- Une diversité d'environnements expérimentaux nous servira.

inclusive  
↓  
exclusive

# Quelles expériences, quelles données ?

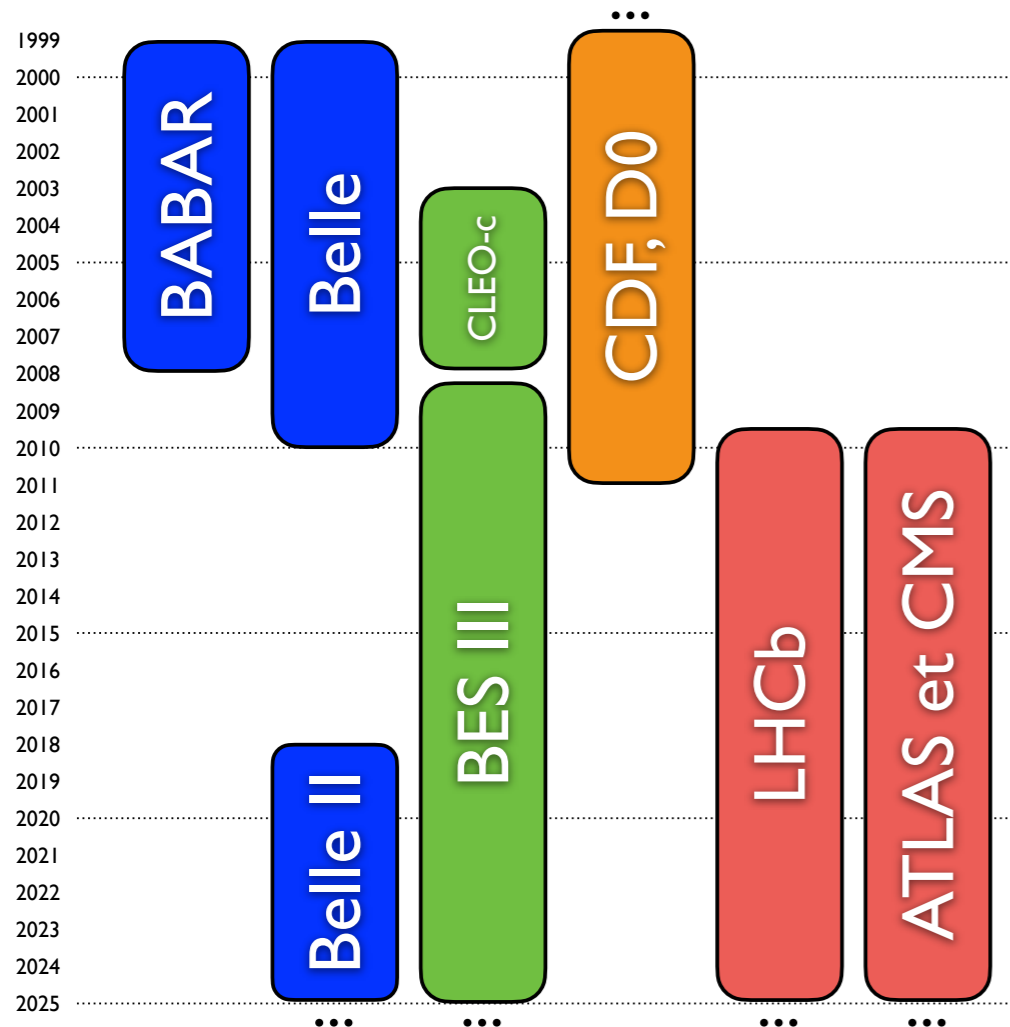


Il y en a d'autres ! Mais ceux sont les expériences les plus pertinentes à la physique du charme aujourd'hui.

# Et les échantillons ?

$$N = L \sigma$$

- Compromis entre  $L$  et  $\sigma$ .
- $\sigma$  : **LHC** > **Tevatron** > **BES/CLEO-c** > **BABAR/Belle**
- $L$  : **Belle II futur** >> **Belle, BABAR** > **LHCb futur** > les autres



- Qui gagne la course ?
- Je vous montrerai des chiffres, mais en bref, pour la production brute : **LHCb**.
- Exercice : Est-ce qu'un FCC-ee sera compétitif ? Un FCC-hh ?



# Tableau brutal

Où ?	$\sigma$	L	$\sigma L (10^9)$
BABAR	1,3 nb	514 /fb	0,7
Belle	1,3 nb	1 /ab	1,3
Belle II (2024)	1,3 nb	550 /fb	0,7
Belle II (futur)	1,3 nb	50 /ab	65
BES III (2024)	$\sim 25 \text{ nb}^*$	20 + 22 /fb*	1
CDF, D0	$\sim 0.1 \text{ mb}^*$	10 /fb (Run II)	$10^3$
LHCb (2024)	$\sim 3 \text{ mb}^*$	9 + 9 /fb	$54 \times 10^3$
LHCb (futur)	$\sim 3 \text{ mb}^*$	300 /fb	$900 \times 10^3$
ATLAS/CMS (2024)	$\sim 3 \text{ mb}^*$	360 /fb	$1080 \times 10^3$

\* voir page n+2

# Tableau brutal

Où ?	$\sigma$	L	$\sigma L (10^9)$
BABAR	1,3 nb	514 /fb	0,7
Belle	1,3 nb	1 /ab	1,3
Belle II (2024)	1,3 nb	550 /fb	0,7
Belle II (futur)	1,3 nb	50 /ab	65
BES III (2024)	$\sim 25 \text{ nb}^*$	20 + 22 /fb*	1
CDF, D0	$\sim 0.1 \text{ mb}^*$	10 /fb (Run II)	$10^3$
LHCb (2024)	$\sim 3 \text{ mb}^*$	9 + 9 /fb	$54 \times 10^3$
LHCb (futur)	$\sim 3 \text{ mb}^*$	300 /fb	$900 \times 10^3$
ATLAS/CMS (2024)	$\sim 3 \text{ mb}^*$	360 /fb	$1080 \times 10^3$
FCC-ee à Z	$(5 \times 10^{12} \text{ Z})$	150 /ab	$0,6 \times 10^3$ 😐
FCC-hh, 100 TeV	$\sim 20 \text{ mb} ?$	20-30 /ab ?	$0,5 \times 10^9$ 😄

# Détails brutaux

■ Collisionneur asymétrique  $e^+e^-$   
à  $\sqrt{s} \approx m(\Upsilon(4S)) \approx 10,6 \text{ GeV}$

$$\sigma_{c\bar{c}} \sim 1,3 \text{ nb (continuum)}$$

BABAR : 514/fb, Belle : 1/ab

Belle II : 550/fb so far, 50/ab planned

■ Collisionneur  $e^+e^-$  de  $\sqrt{s}$   
proche de résonances  $c\bar{c}$

$$\sigma(\psi(3770)) \sim 20 - 30 \text{ nb}$$

[BESIII, PRL 101 (2008) 102004]

BESIII : 20/fb au  $\psi(3770)$ , 22/fb à  $\sqrt{s} > 3,8 \text{ GeV}$

■ Collisionneur hadronique  $p\bar{p}$  à  
 $\sqrt{s} = 1,8 \text{ TeV}$

$$\sigma_{c\bar{c}} \sim \mathcal{O}(\text{few} \times 10^2 \mu\text{b})$$

[CDF, PRD 95 (2017) 9, 092006] ; [CDF, PRL 91 (2003) 241804]

CDF, D0 : 10/fb (Run II)

■ Collisionneur hadronique\*  $pp$  à  
 $7 \leq \sqrt{s} < 14 \text{ TeV}$

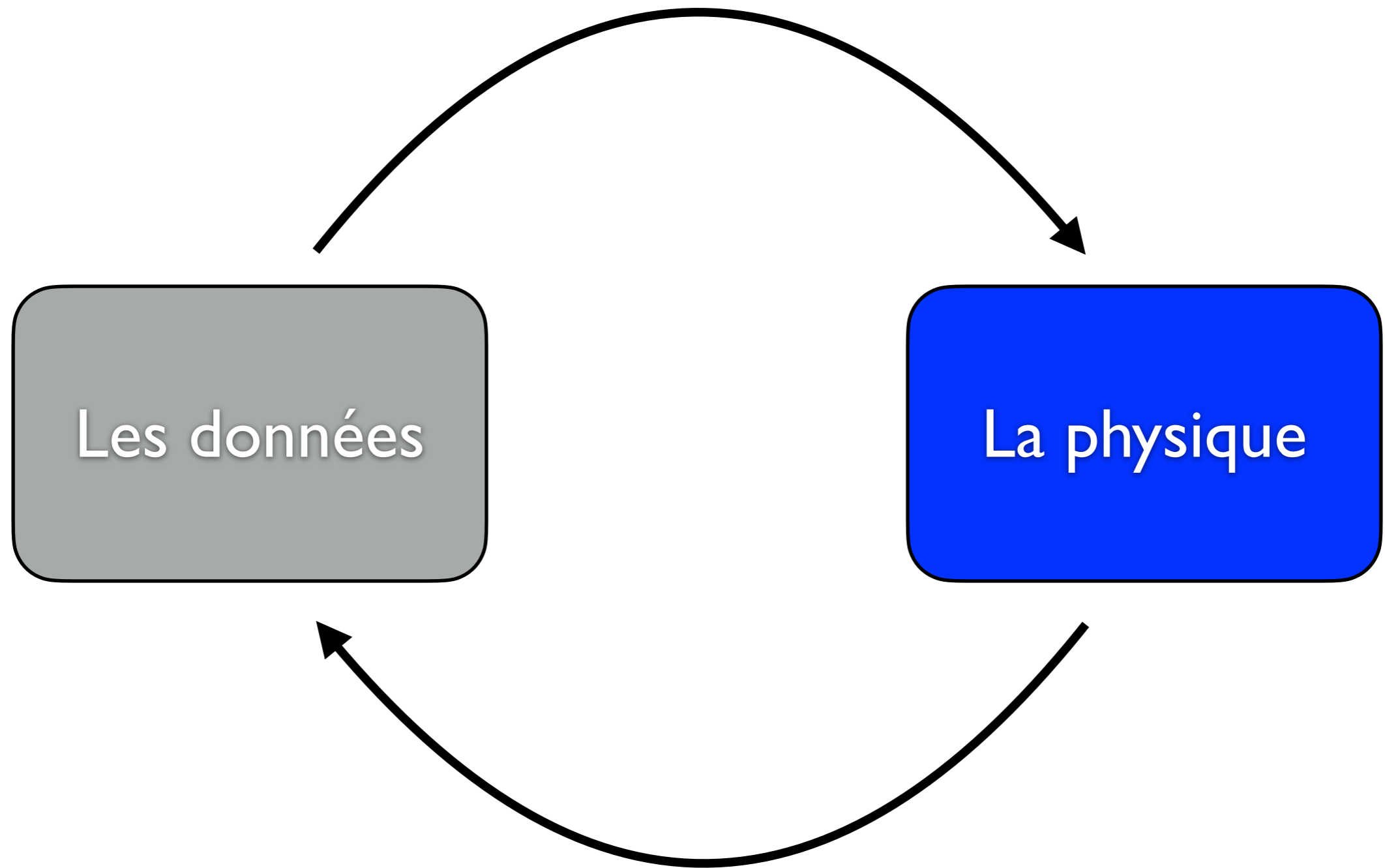
$$\sigma_{c\bar{c}} \sim \text{few mb}$$

[LHCb, JHEP 03 (2016) 159] ; [LHCb, Nucl.Phys.B 871 (2013) 1] ; [arXiv:2311.11426]

LHCb : 9 + 9/fb à présent, 50/fb après Run4, 300/fb au total si Upgrade II

# Des stats brutes ne suffisent pas

- Il faut aussi un détecteur à la hauteur
  - PID, tracking, mesure de  $t$  (identification du PV, boost, ...), muons, ECAL,  $4\pi$ , ...
  - p.ex. ATLAS et CMS produisent plus de charme que LHCb, mais  $\tau_D < \tau_B$  ; c'est plus difficile à séparer du fond.
- Pour certaines mesures, la production exclusive est incontournable.
  - p.ex. production  $D\bar{D}$  intriquée à BES III
- Aujourd'hui, LHCb domine plusieurs mesures.  
Que fait-on avec toutes ces données ?

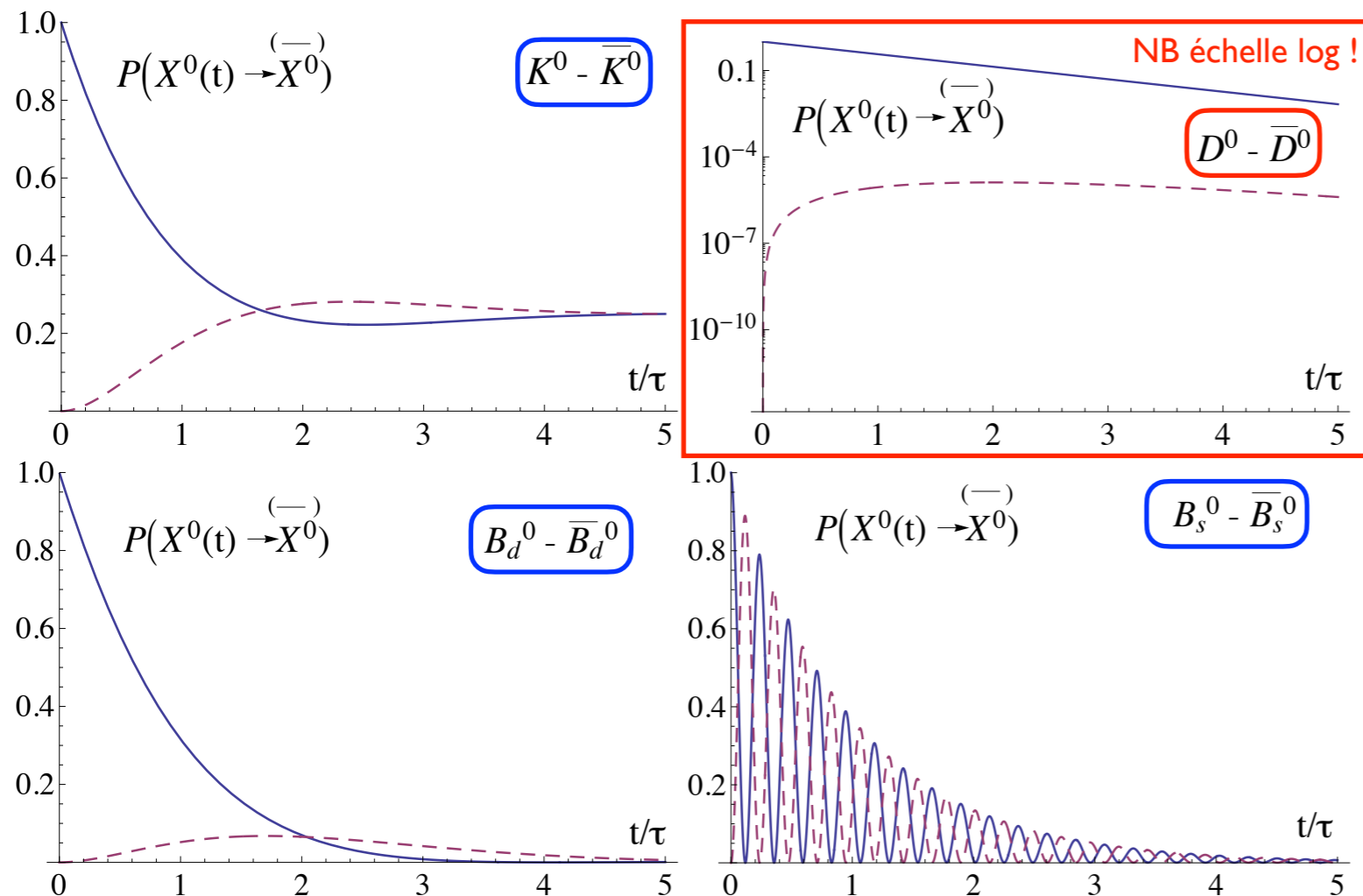


# Asymétries de CP, mélange

- Deux phénomènes reliés mais distincts :
- Oscillations  $D^0$ - $\bar{D}^0$
- Asymétries de CP
- Dans le SM, les deux sont des effets CKM :
  - Les oscillations ne sont possibles que si l'interaction faible ne conserve pas la saveur des quarks (vertex  $Wqq'$  => matrice CKM non-diagonale)
  - Les asymétries de CP ne sont possibles que si des coefficients de couplage complexes interviennent => matrice CKM complexe.

# Mélange et oscillations $D^0-\bar{D}^0$

- Comme pour les  $K^0, B^0, B_s^0$  : rien ne l'empêche.
- Cependant : le taux d'oscillations  $D^0$  est fort supprimé.
- Dominé par les interactions de longue distance (rescattering) plutôt que par de courte distance (diagrammes en boîte) => difficile à calculer.



On définit\* :

$$\Gamma = (\Gamma_1 + \Gamma_2)/2$$

$$x = (m_2 - m_1)/\Gamma$$

$$y = (\Gamma_2 - \Gamma_1)/(2\Gamma)$$

où  $m_1, m_2, \Gamma_1, \Gamma_2$  sont les valeurs propres de masse et de largeur.

$x$  et  $y$  sont  $\mathcal{O}(\%)$  pour les  $D^0$

# Mélange et oscillations $D^0-\bar{D}^0$

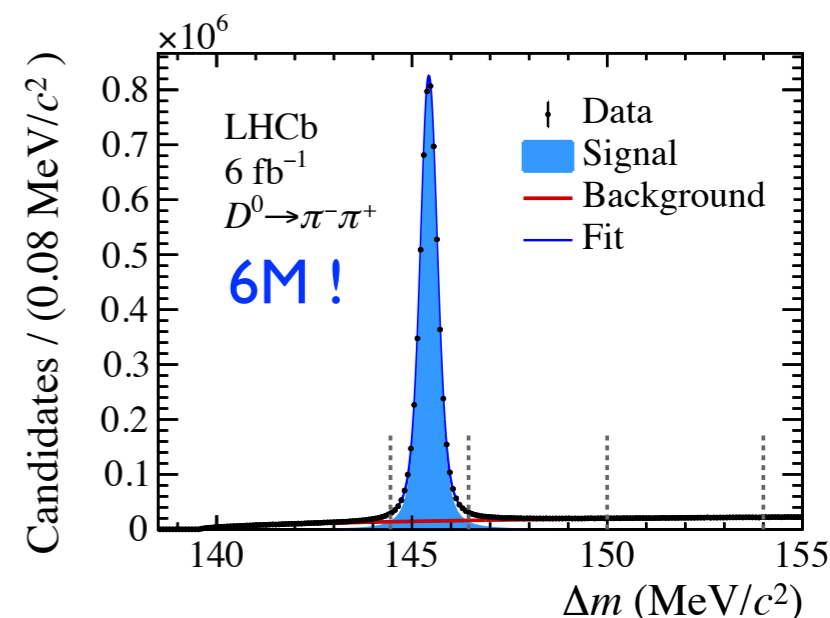
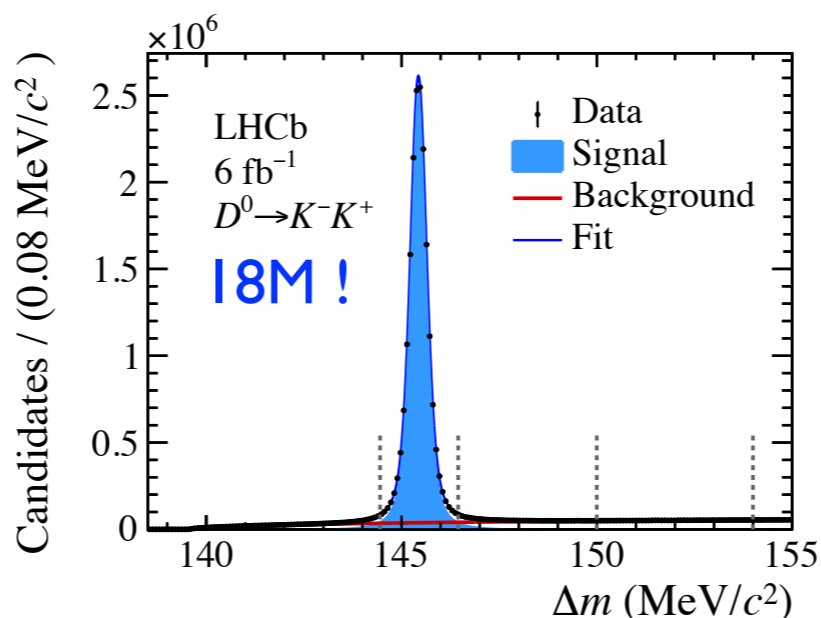
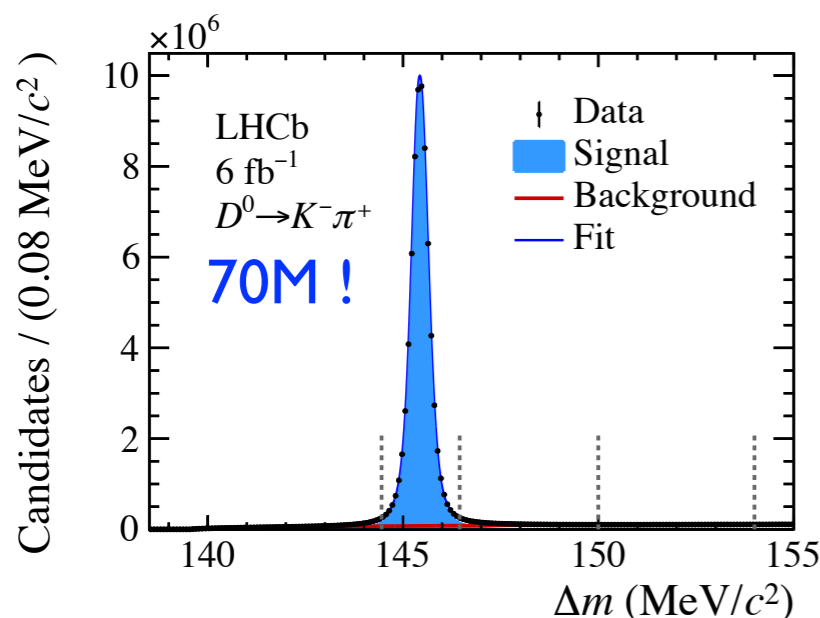
- $x$  et  $y$  faibles  $\Rightarrow$  oscillations difficilement observables.
- Le charme est connu depuis 1974, mais les oscillations :
  - première évidence ( $3\sigma$ ) de BABAR et Belle en 2006
  - première observation ( $5\sigma$ ) en une seule mesure par LHCb en 2012
- Plusieurs méthodes permettent d'accéder aux paramètres (exemples prochainement)
- Individuellement, chaque méthode a une sensibilité limitée, mais ensemble...





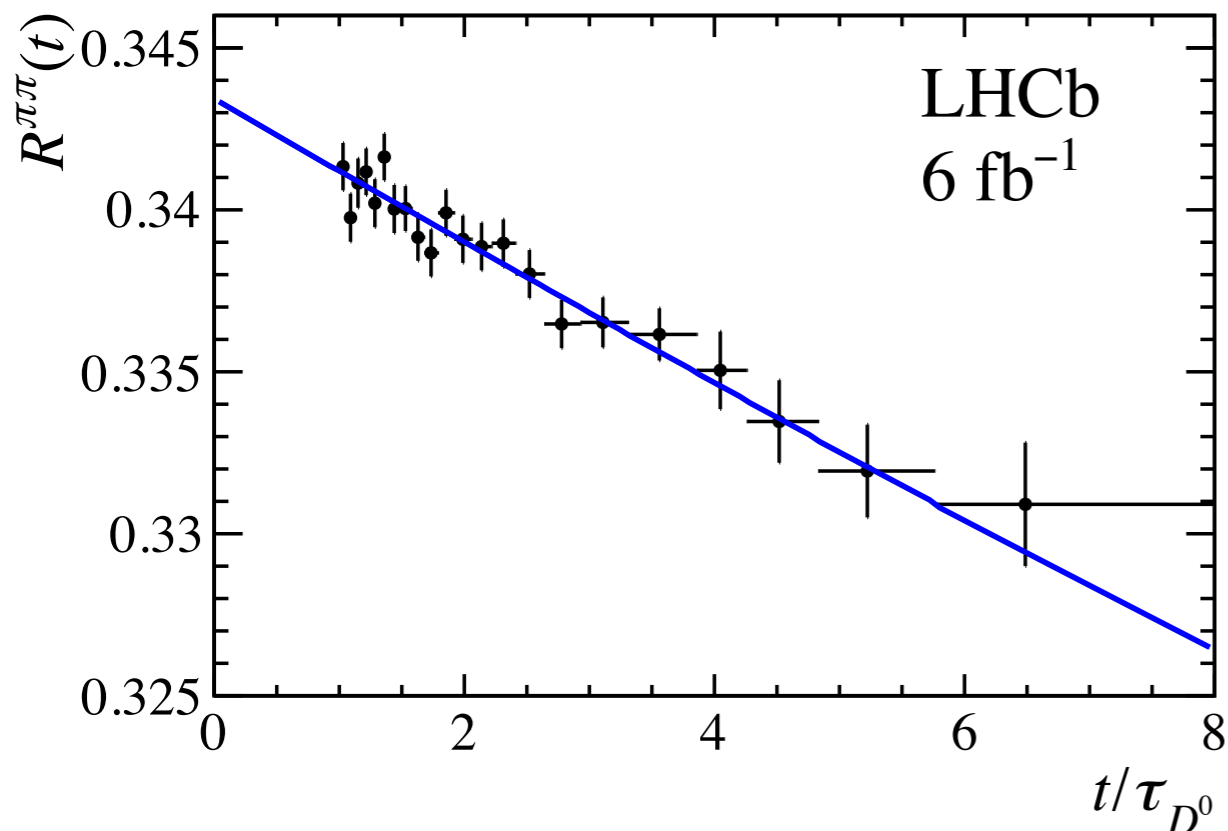
# Exemples d'inputs ( $y_{CP}$ )

- Dans le système  $K^0$ , on trouve
  - $K_S^0$  (approx CP +), de durée de vie courte
  - $K_L^0$  (approx CP -), de durée de vie longue
  - La différence des durées de vie =  $\Delta\Gamma$  ; rappel :  $y = \Delta\Gamma/(2\Gamma)$
- Par analogie, la différence de durées de vie mesurées de
  - $D^0 \rightarrow K^-K^+$  ou  $\pi^-\pi^+$  (CP +)
  - $D^0 \rightarrow K^-\pi^+$  (CP mixte)
 donne  $\Delta\Gamma/2$  (dans la limite où  $\Delta\Gamma \ll \Gamma$  et CPV nég.)
- Données LHCb :

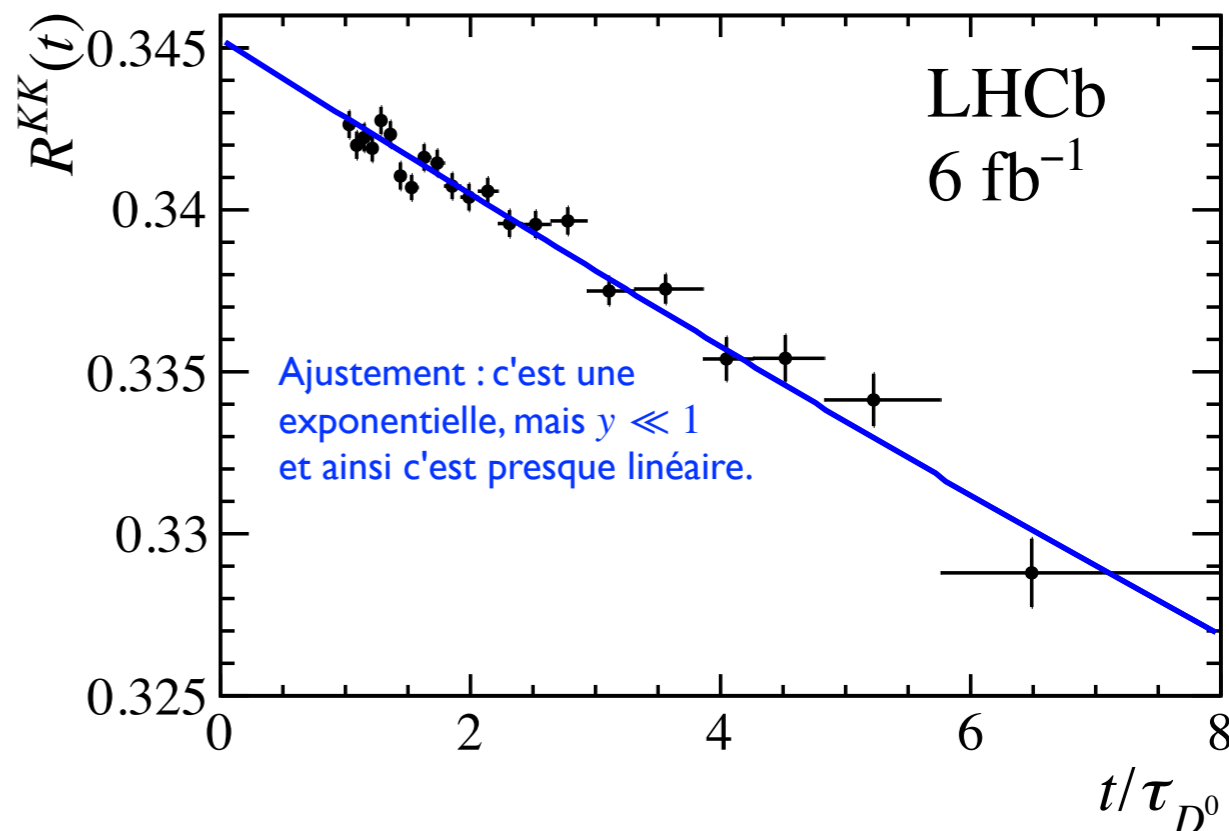


# Exemples d'inputs ( $y_{CP}$ )

- On construit le rapport  $R(t)$  des taux vers
  - $D^0 \rightarrow K^- K^+$  ou  $\pi^- \pi^+$  (CP +)
  - $D^0 \rightarrow K^- \pi^+$  (CP mixte)



$$y_{CP}^{\pi\pi} - y_{CP}^{K\pi} = (6.57 \pm 0.53 \pm 0.16) \times 10^{-3}$$



$$y_{CP}^{KK} - y_{CP}^{K\pi} = (7.08 \pm 0.30 \pm 0.14) \times 10^{-3}$$

$$y_{CP} - y_{CP}^{K\pi} = (6.96 \pm 0.26 \pm 0.13) \times 10^{-3}$$

# Exemples d'inputs ( $R_M$ )

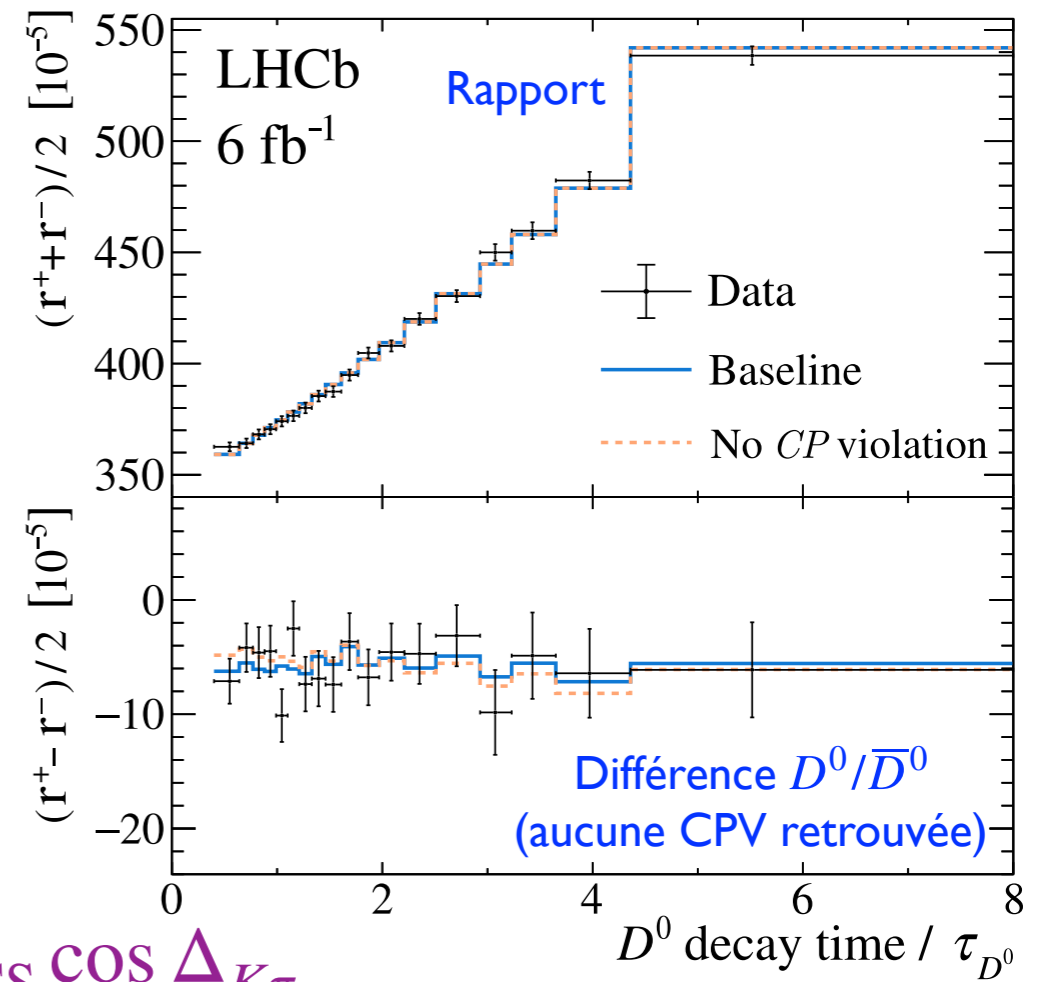
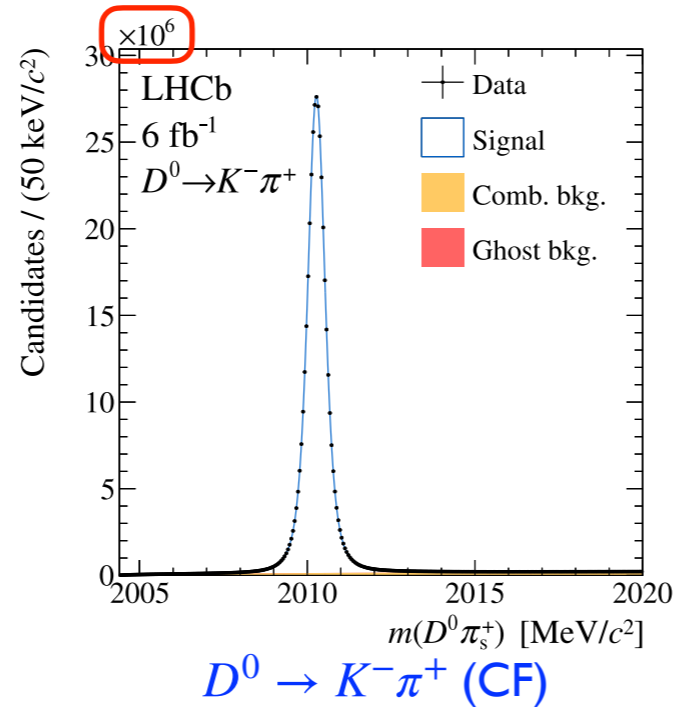
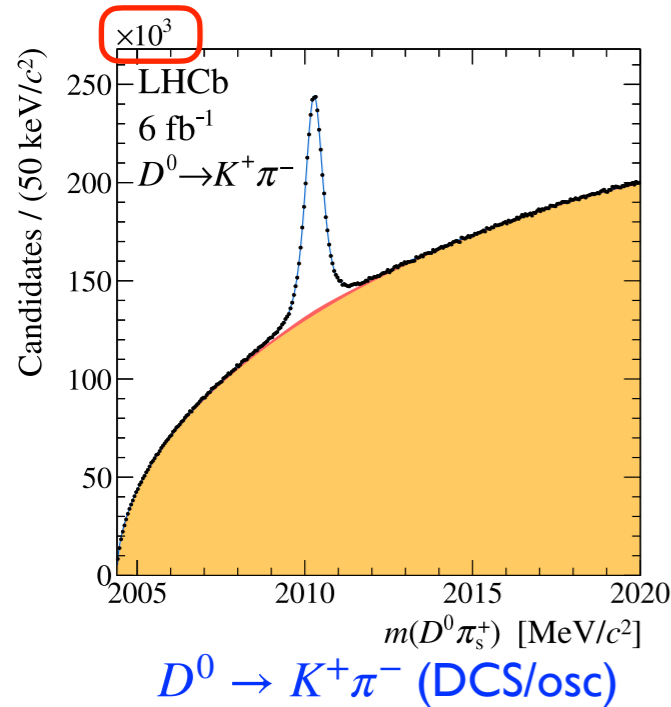
- On détermine la saveur d'un  $D^0/\bar{D}^0$  à l'instant de sa production avec un tag, p.ex.  $D^{*+} \rightarrow D^0\pi^+$  ou  $B^- \rightarrow D^0\mu^-\bar{\nu}_\mu$
- On détermine la saveur à l'instant de sa désintégration selon l'état final, p.ex.  $D^0 \rightarrow K^-\pi^+$  vs  $\bar{D}^0 \rightarrow K^+\pi^-$ 
  - mais attention aux désintégrations DCS comme  $D^0 \rightarrow K^+\pi^-$
- Si changement de saveur : oscillation !
- Les oscillations suivent des formules sinusoidal, mais dans la limite  $x, y \ll 1$  l'effet est quadratique. Dans l'absence de CPV :

$$R(t) = \frac{\Gamma_{D^0 \rightarrow K^+\pi^-}(t)}{\Gamma_{D^0 \rightarrow K^-\pi^+}(t)} = \underbrace{R_{\text{DCS}}^2}_{\text{DCS}} + \underbrace{(y R_{\text{DCS}} \cos \Delta_{K\pi}) t}_{\text{Interférence}} + \underbrace{\left( \frac{x^2 + y^2}{4} \right) t^2}_{\text{Oscillations}}$$

- Le terme d'interférence augmente la sensibilité MAIS elle contient une phase forte\*  $\Delta_{K\pi}$  a priori inconnue.

# Exemples d'inputs ( $R_M$ )

[LHCb, arXiv:2407.18001, soumis à PRD]



$R_{K\pi}$	$(342.7 \pm 1.9) \times 10^{-5}$	$\approx R_{\text{DCS}}^2$
$c_{K\pi}$	$(52.8 \pm 3.3) \times 10^{-4}$	$\approx y R_{\text{DCS}} \cos \Delta_{K\pi}$
$c'_{K\pi}$	$(12.0 \pm 3.5) \times 10^{-6}$	$\approx (x^2 + y^2)/4$
$A_{K\pi}$	$(-6.6 \pm 5.7) \times 10^{-3}$	
$\Delta c_{K\pi}$	$(2.0 \pm 3.4) \times 10^{-4}$	
$\Delta c'_{K\pi}$	$(-0.7 \pm 3.6) \times 10^{-6}$	

Sans CPV :  $R(t) = \frac{\Gamma_{D^0 \rightarrow K^+ \pi^-}(t)}{\Gamma_{D^0 \rightarrow K^- \pi^+}(t)} = \underbrace{R_{\text{DCS}}^2}_{\text{DCS}} + \underbrace{(y R_{\text{DCS}} \cos \Delta_{K\pi}) t}_{\text{Interférence}} + \underbrace{\left( \frac{x^2 + y^2}{4} \right) t^2}_{\text{Oscillations}}$

# Exemples d'inputs (phases fortes)

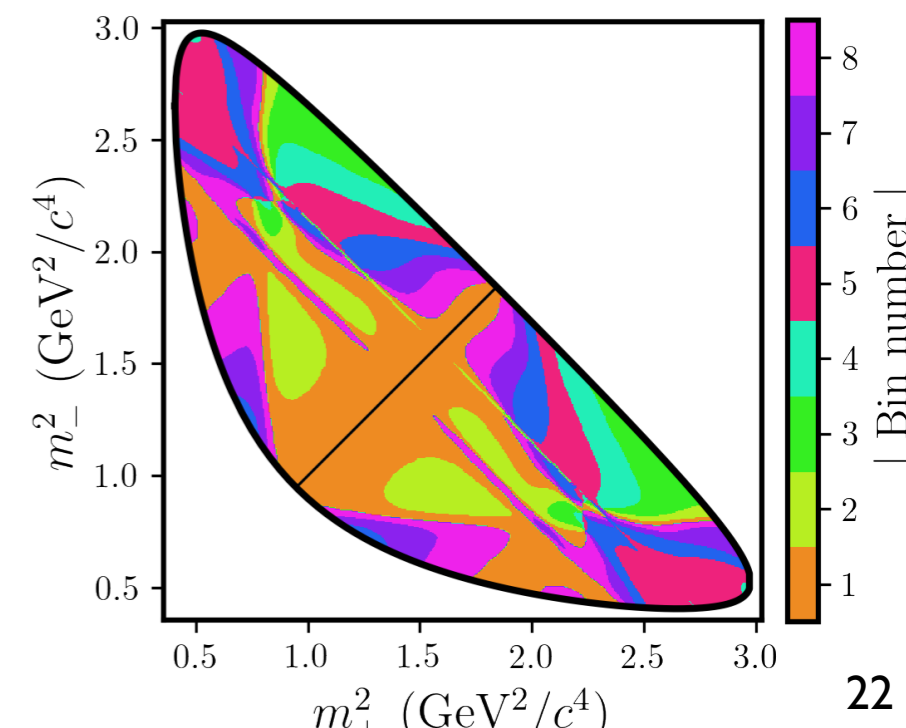
Sans CPV :  $R(t) = \frac{\Gamma_{D^0 \rightarrow K^+ \pi^-}(t)}{\Gamma_{D^0 \rightarrow K^- \pi^+}(t)} = R_{\text{DCS}}^2 + (y R_{\text{DCS}} \cos \Delta_{K\pi}) t + \left( \frac{x^2 + y^2}{4} \right) t^2$

- La phase forte  $\Delta_{K\pi}$  empêche d'accéder directement à  $y$ .
  - Grosso modo, c'est la phase entre  $\langle K^+ \pi^- | \mathcal{H} | D^0 \rangle$  et  $\langle K^- \pi^+ | \mathcal{H} | D^0 \rangle$
- LHCb n'a pas accès à cette phase... mais **BES III** l'a !
- Production intriquée (entangled) :  $e^+ e^- \rightarrow \psi(3770) \rightarrow D^0 \bar{D}^0$
- En mettant en comparaison
  - taux de  $D^0 \rightarrow K^\pm \pi^\mp$  lorsque  $\bar{D}^0 \rightarrow CP+$
  - taux de  $D^0 \rightarrow K^\pm \pi^\mp$  lorsque  $\bar{D}^0 \rightarrow CP-$
- ... on peut déterminer\* cette différence de phase  $\Delta_{K\pi}$
- BES III :  $A_{K\pi} = 0.132 \pm 0.011 \pm 0.007 \Rightarrow \Delta_{K\pi} = (187.6^{+8.9}_{-9.7} {}^{+5.4}_{-6.4})^\circ$
- La combinaison des mesures LHCb et BES III contraint fortement  $y$  ! Et ça marche aussi pour d'autres canaux...

$$*A_{K\pi} = \frac{\mathcal{B}(D_- \rightarrow K^- \pi^+) - \mathcal{B}(D_+ \rightarrow K^- \pi^+)}{\mathcal{B}(D_- \rightarrow K^- \pi^+) + \mathcal{B}(D_+ \rightarrow K^- \pi^+)} = \frac{-2R_{\text{DCS}} \cos \Delta_{K\pi} + y}{1 + (R_{\text{DCS}})^2} \quad 21$$

# Exemples d'inputs ( $K_S^0 \pi^+ \pi^-$ )

- Nous avons vu deux mesures de l'effet de mélange :
  - Rapports de ( $D^0 \rightarrow$  état final de CP /  $D^0 \rightarrow$  état mixte de CP)
  - Rapports de désintégrations supprimées/favorisées ( $c \rightarrow s$  /  $c \rightarrow \bar{s}$ )
- Mais pour un canal comme  $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$  on trouve les deux en même temps, avec interférence !
  - p.ex.  $D^0 \rightarrow K^{*-} \pi^+ \rightarrow K_S \pi^- \pi^+$  vs.  $D^0 \rightarrow K^{*+} \pi^- \rightarrow K_S^0 \pi^+ \pi^-$
  - p.ex.  $D^0 \rightarrow K_S^0 f_0$  et  $D^0 \rightarrow K_S^0 \rho^0$
- C'est une désintégration à 3 corps (Dalitz plot) auto-conjugée  $\Rightarrow$  on peut, en principe, déterminer les phases fortes via une analyse en amplitudes...
- ... mais on maîtrise mieux les incertitudes en prenant en input les mesures de BESIII.
- LHCb a fait cette mesure...



# Exemples d'inputs ( $K_S^0 \pi^+ \pi^-$ )

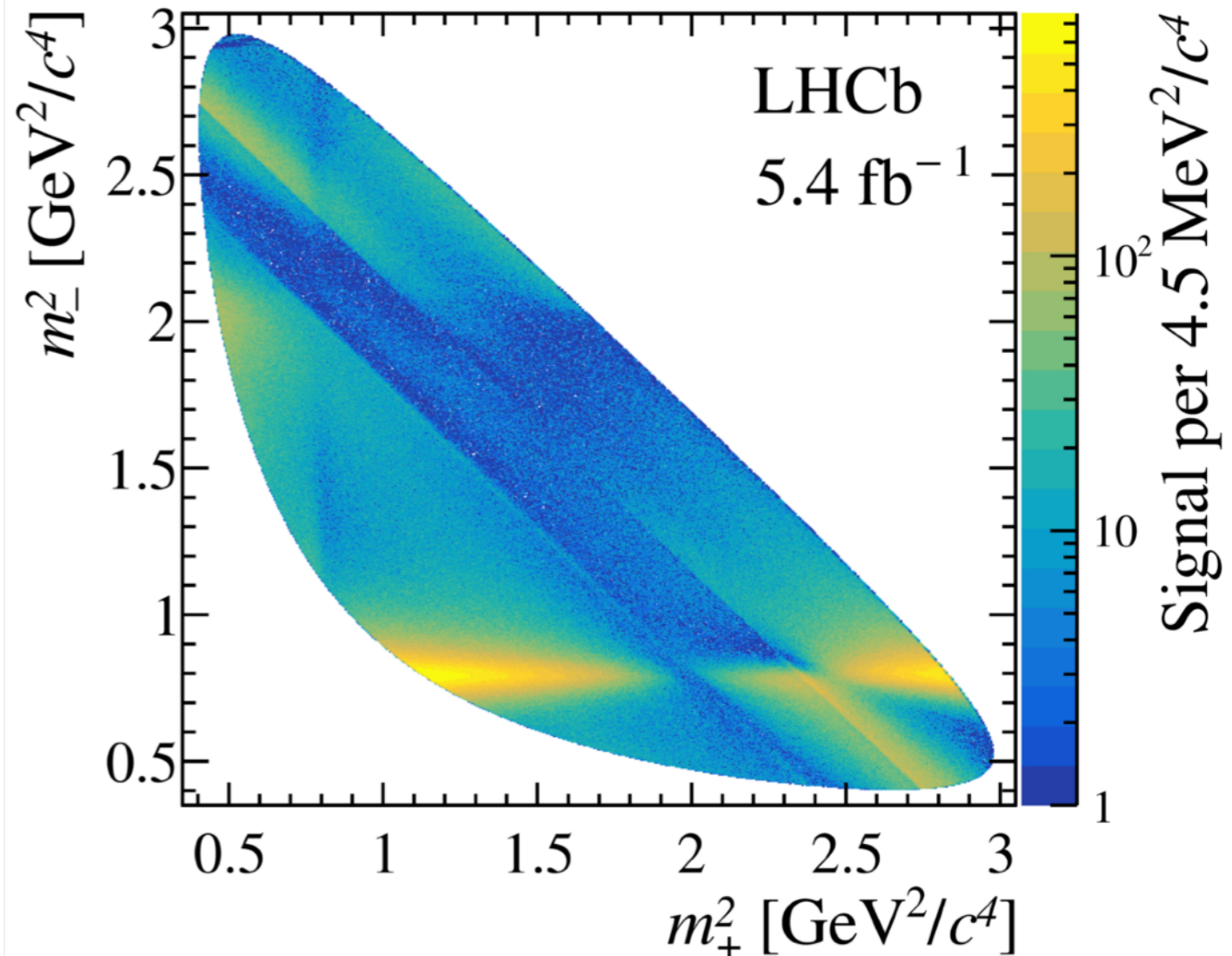
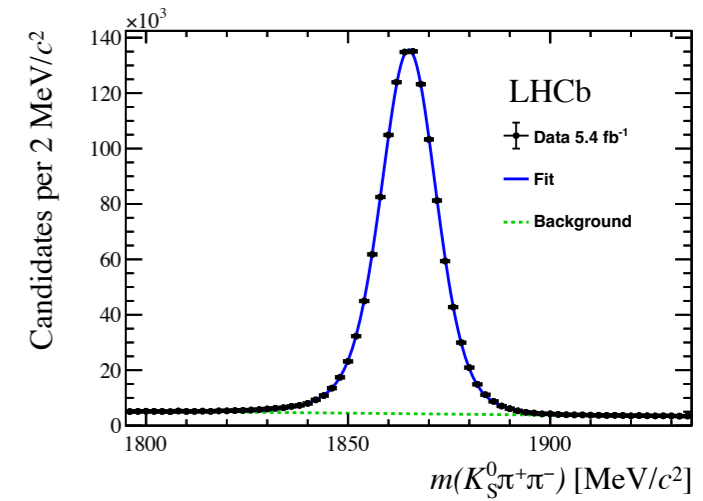
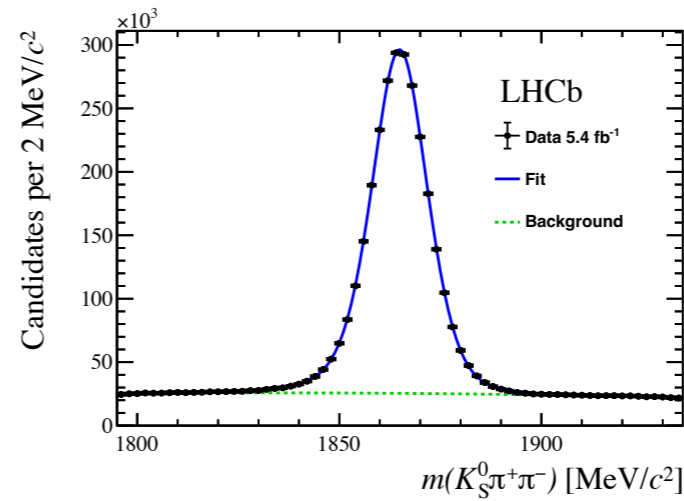
- Plusieurs mesures faites par LHCb ; celle-ci utilise comme tag  $\bar{B} \rightarrow D^0 \mu^- \bar{\nu}(X)$
- On mesure les rapports  $D^0(t)/\bar{D}^0(t)$  dans des bins du plan de Dalitz.
- La composition (CP+, CP-, CF, DCS) varie entre bins : beaucoup d'infos d'un coup !

$$x_{CP} = [ 4.29 \pm 1.48 \pm 0.26 ] \times 10^{-3},$$

$$y_{CP} = [ 12.61 \pm 3.12 \pm 0.83 ] \times 10^{-3},$$

$$\Delta x = [ -0.77 \pm 0.93 \pm 0.28 ] \times 10^{-3},$$

$$\Delta y = [ 3.01 \pm 1.92 \pm 0.26 ] \times 10^{-3},$$

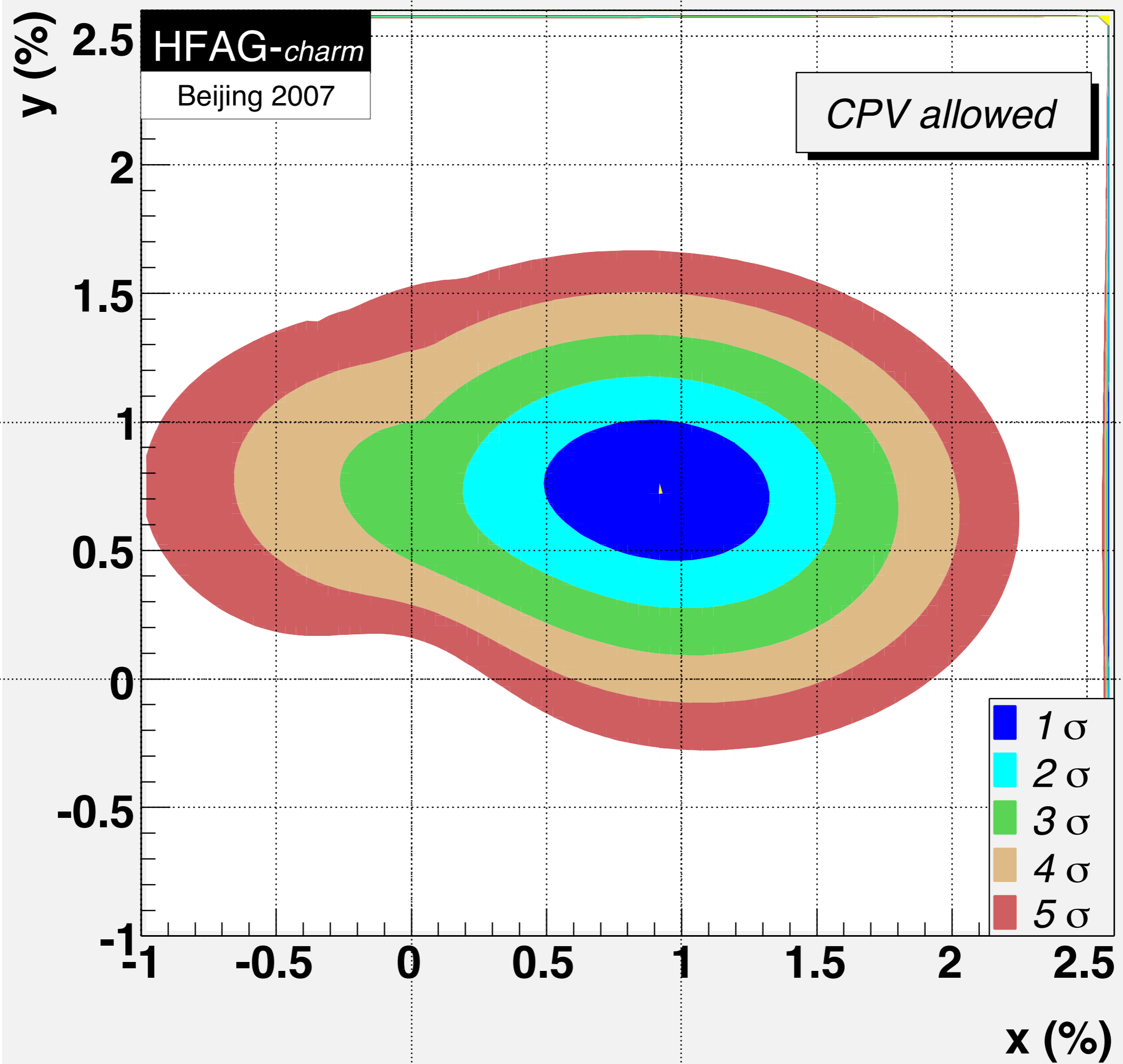


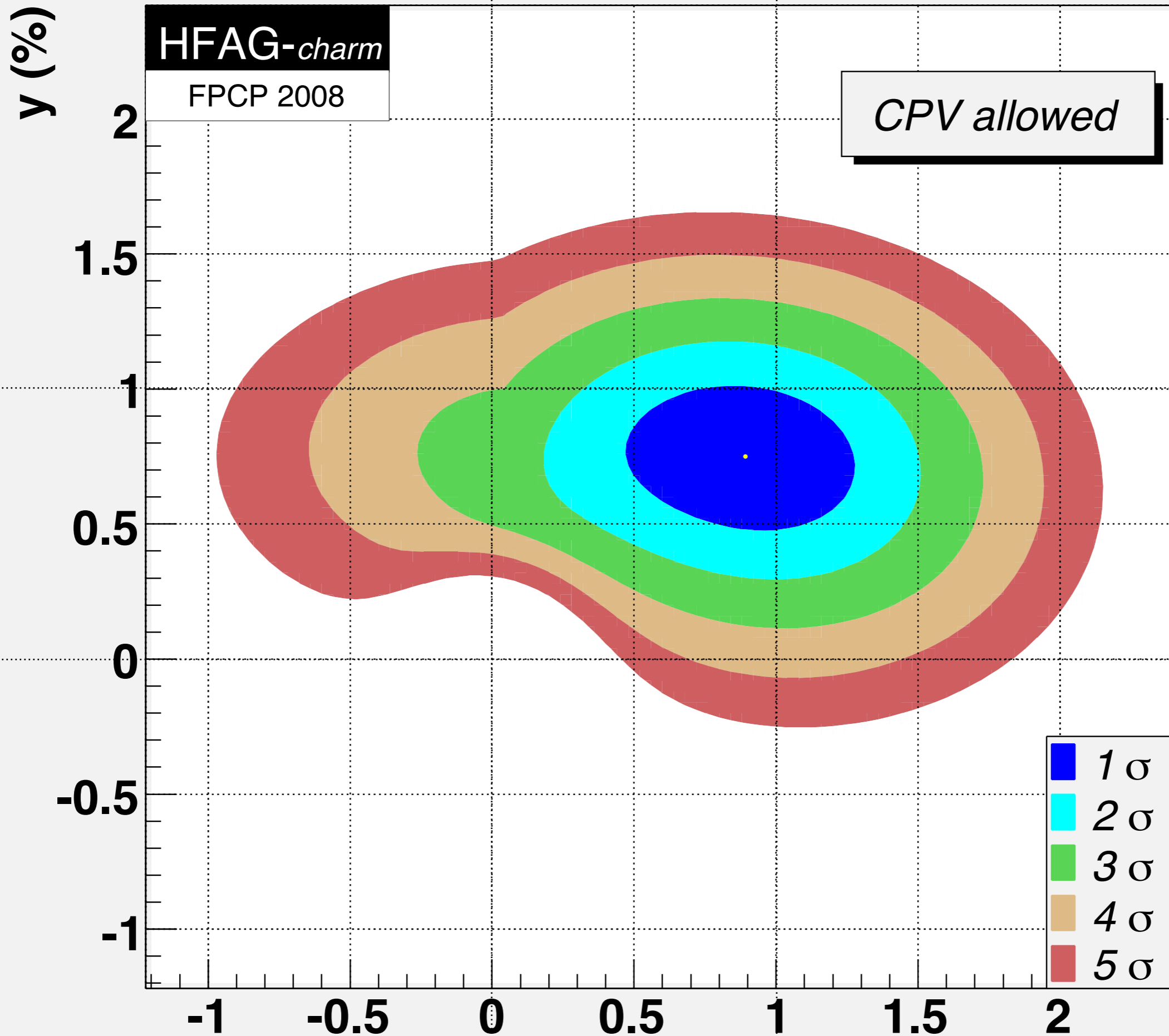
# Mélange et oscillations $D^0-\bar{D}^0$

- $x$  et  $y$  faibles  $\Rightarrow$  oscillations difficilement observables.
- Le charme est connu depuis 1974, mais les oscillations :
  - première évidence ( $3\sigma$ ) de BABAR et Belle en 2006
  - première observation ( $5\sigma$ ) en une seule mesure par LHCb en 2012
- Plusieurs méthodes permettent d'accéder aux paramètres (exemples prochainement)
- Individuellement, chaque méthode a une sensibilité limitée, mais ensemble...







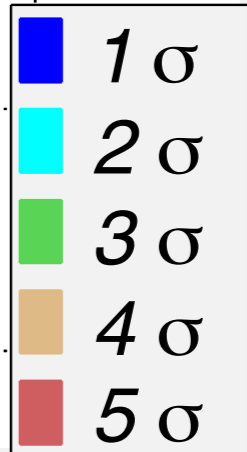
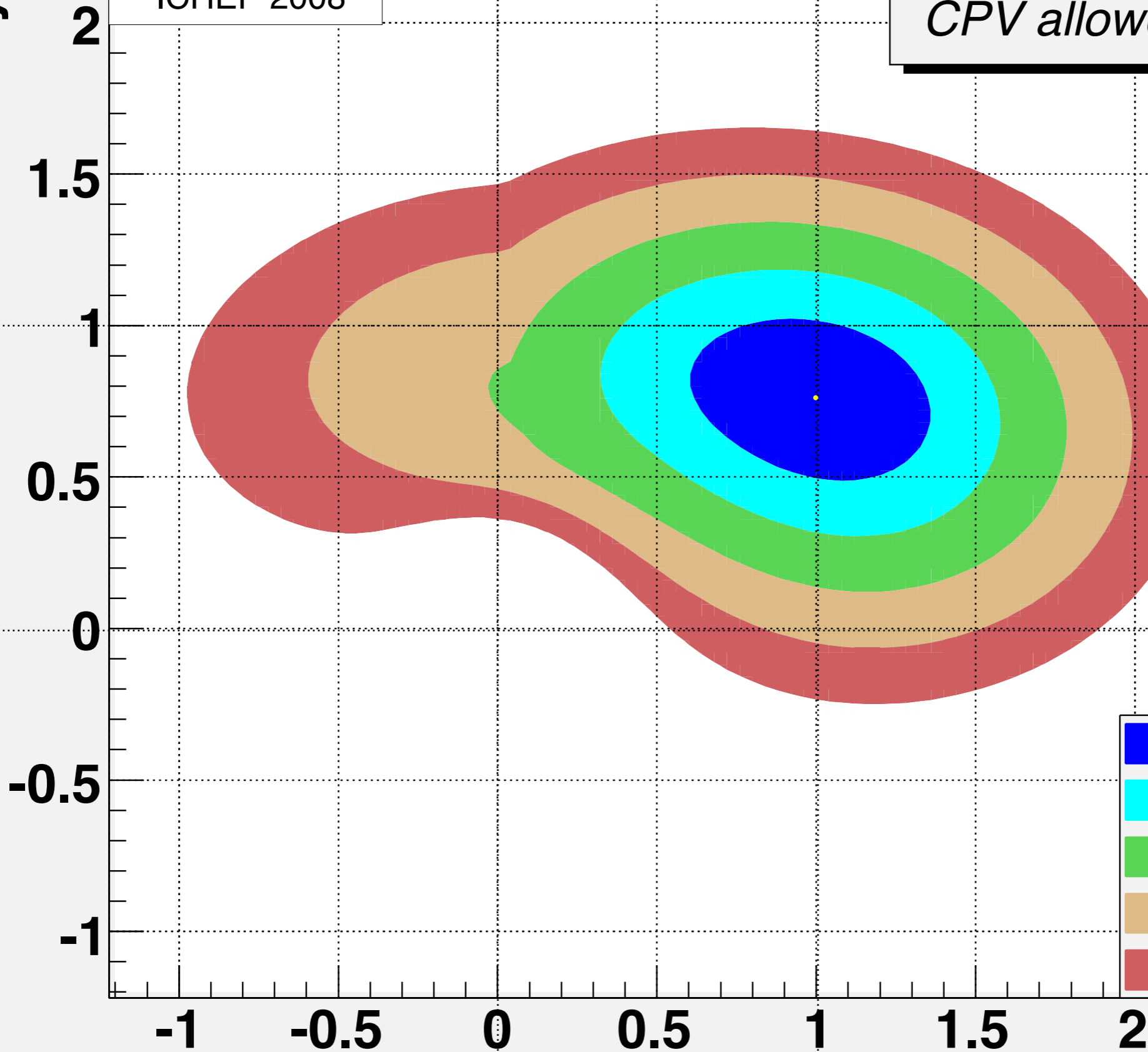


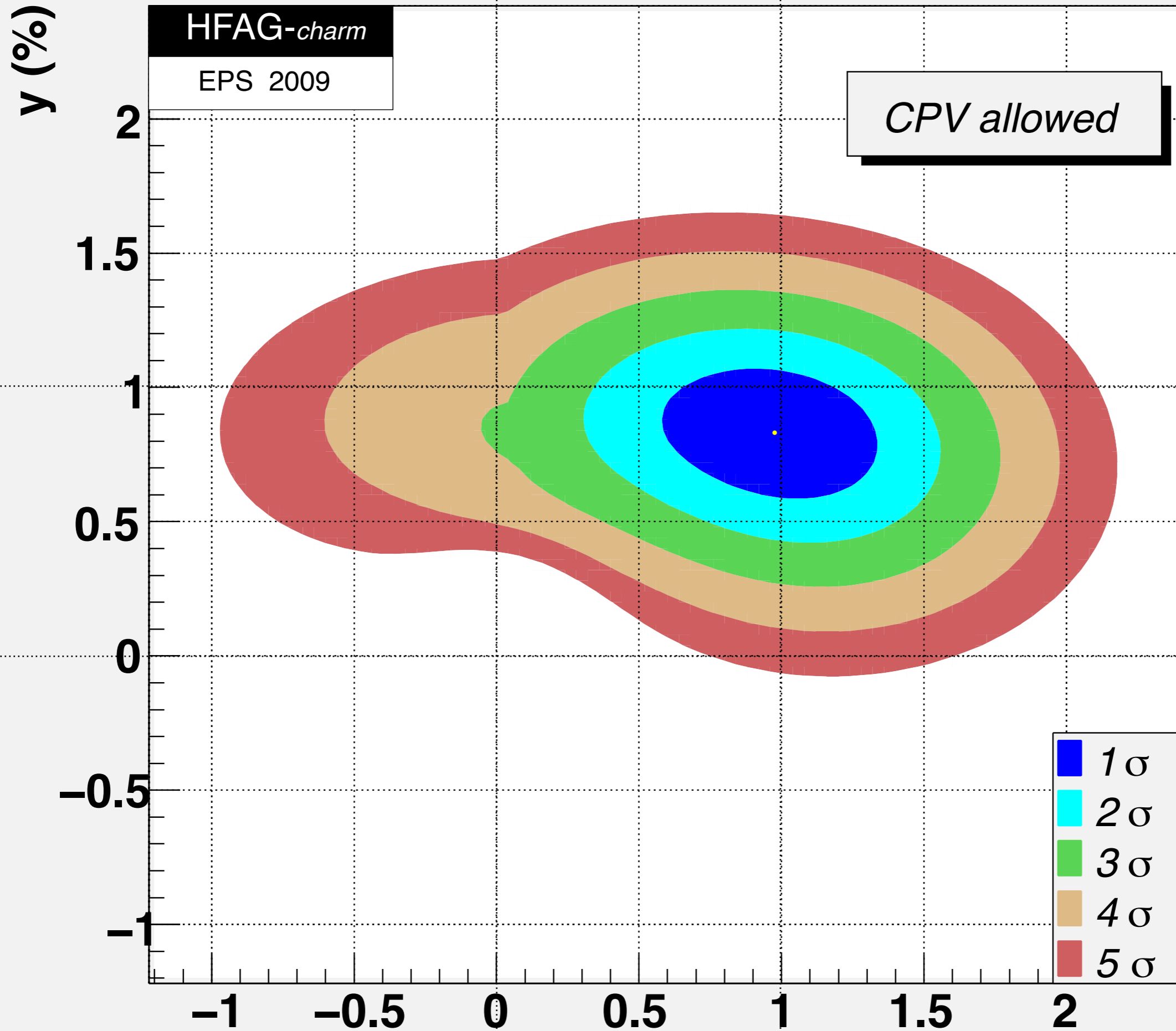
$y$  (%)

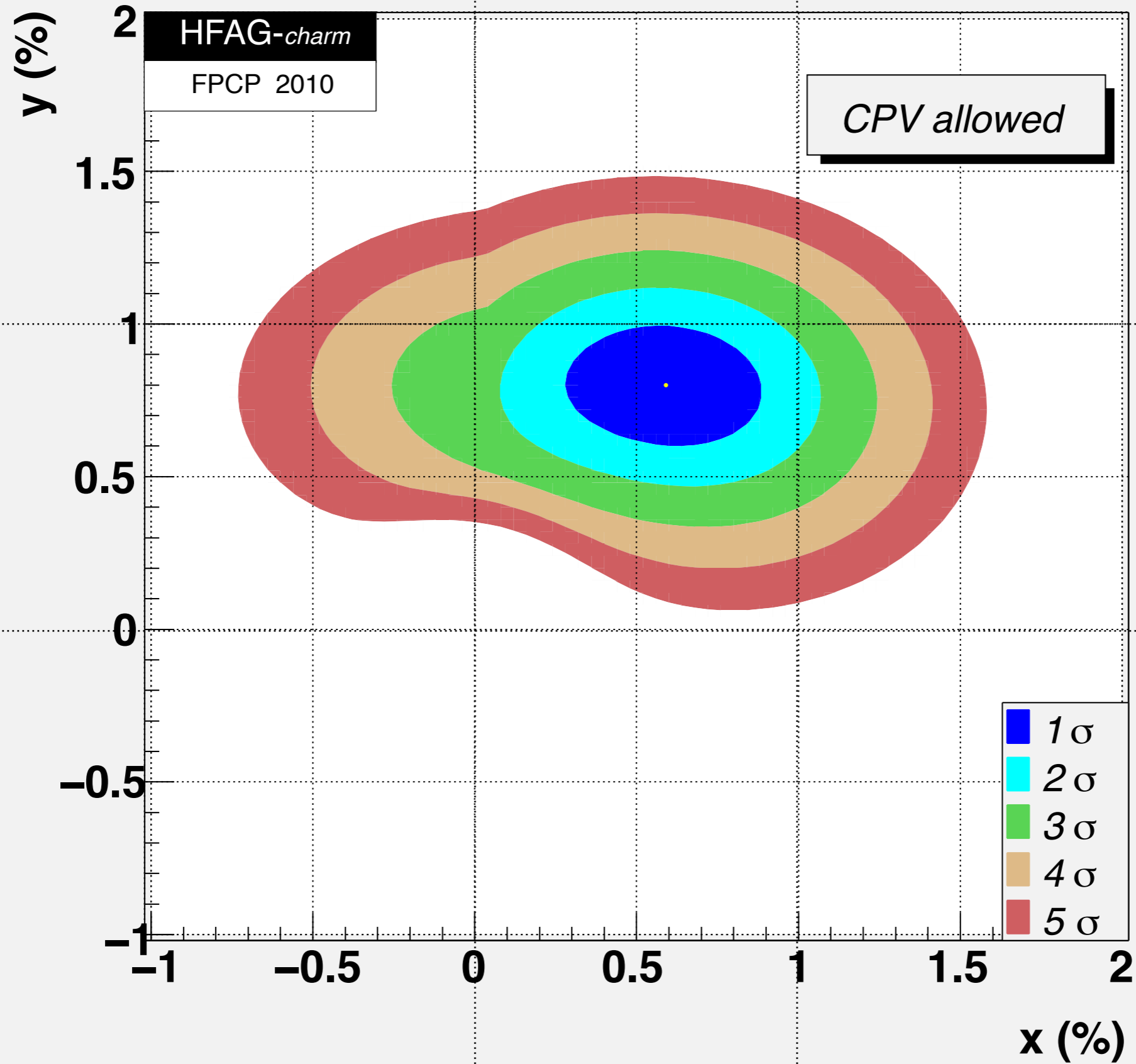
**HFAG-*charm***

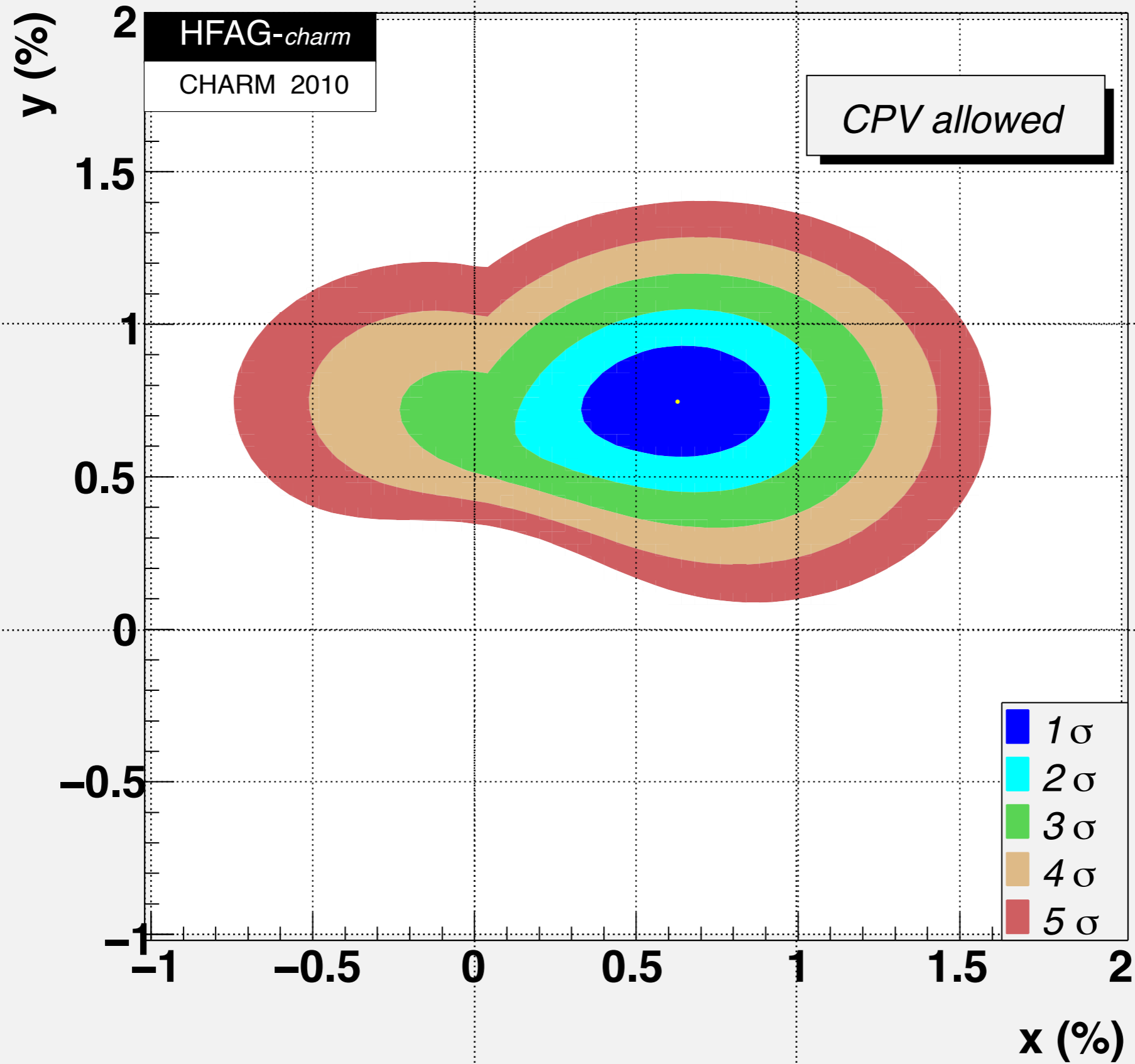
ICHEP 2008

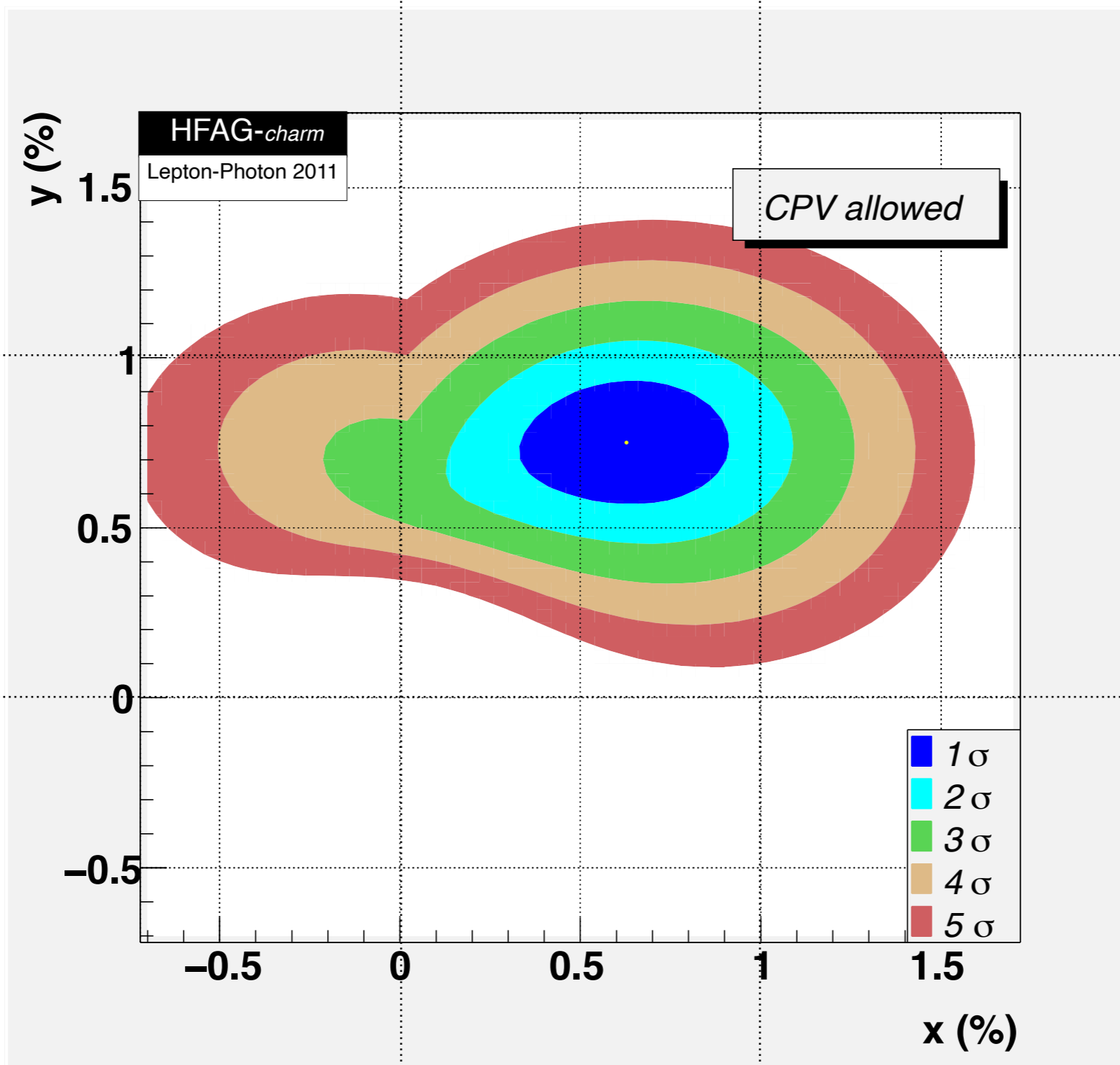
*CPV allowed*

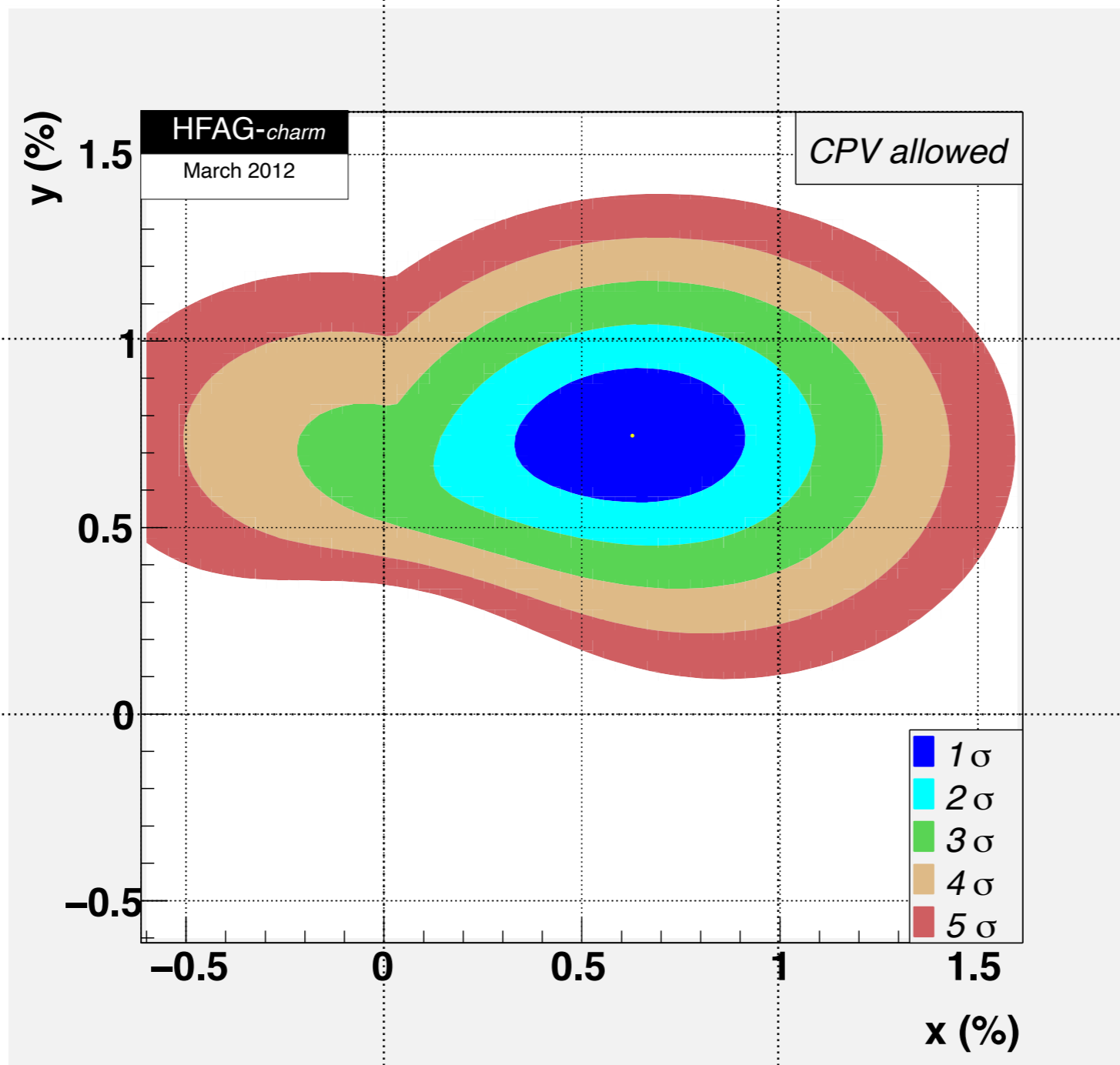




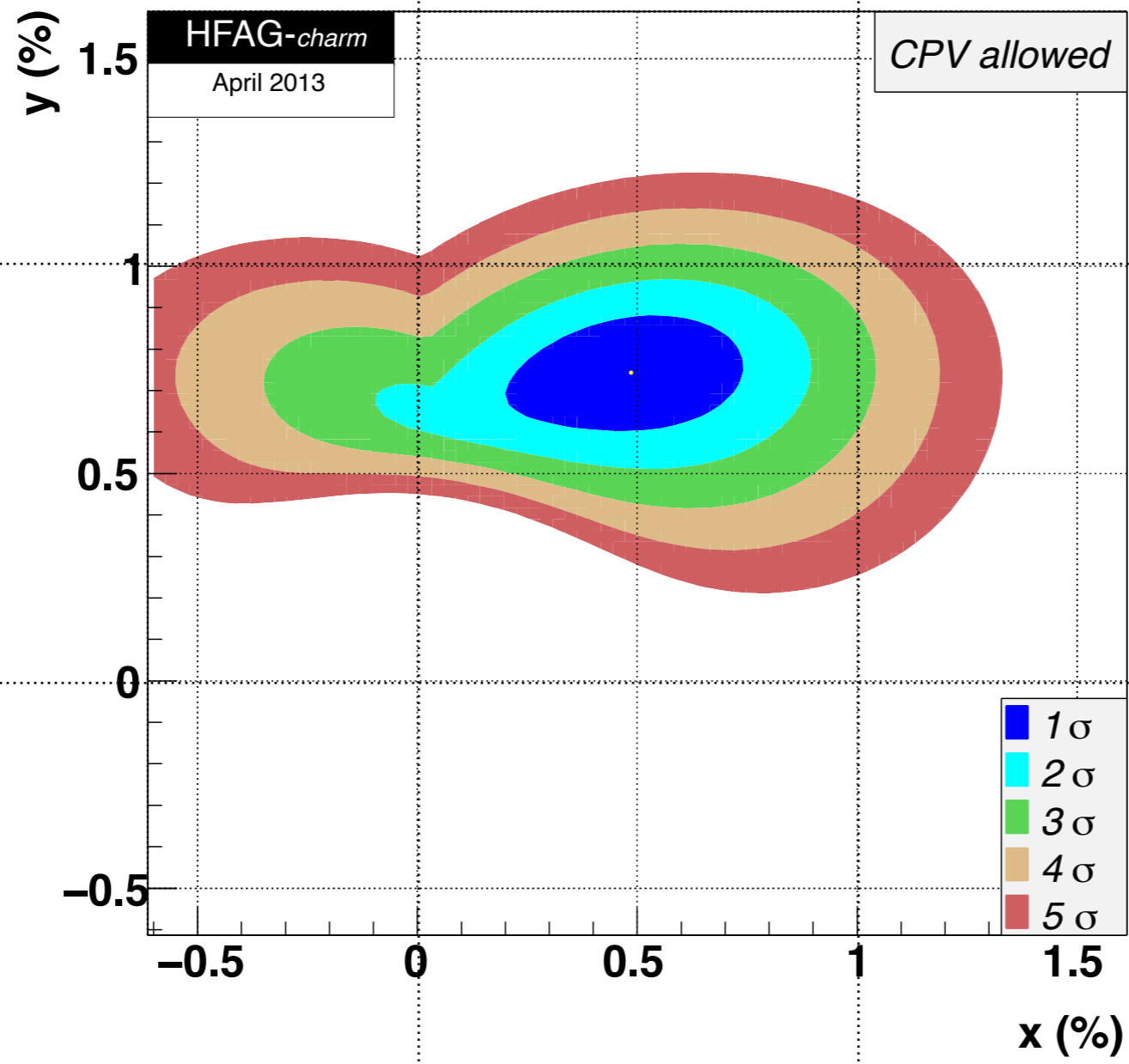


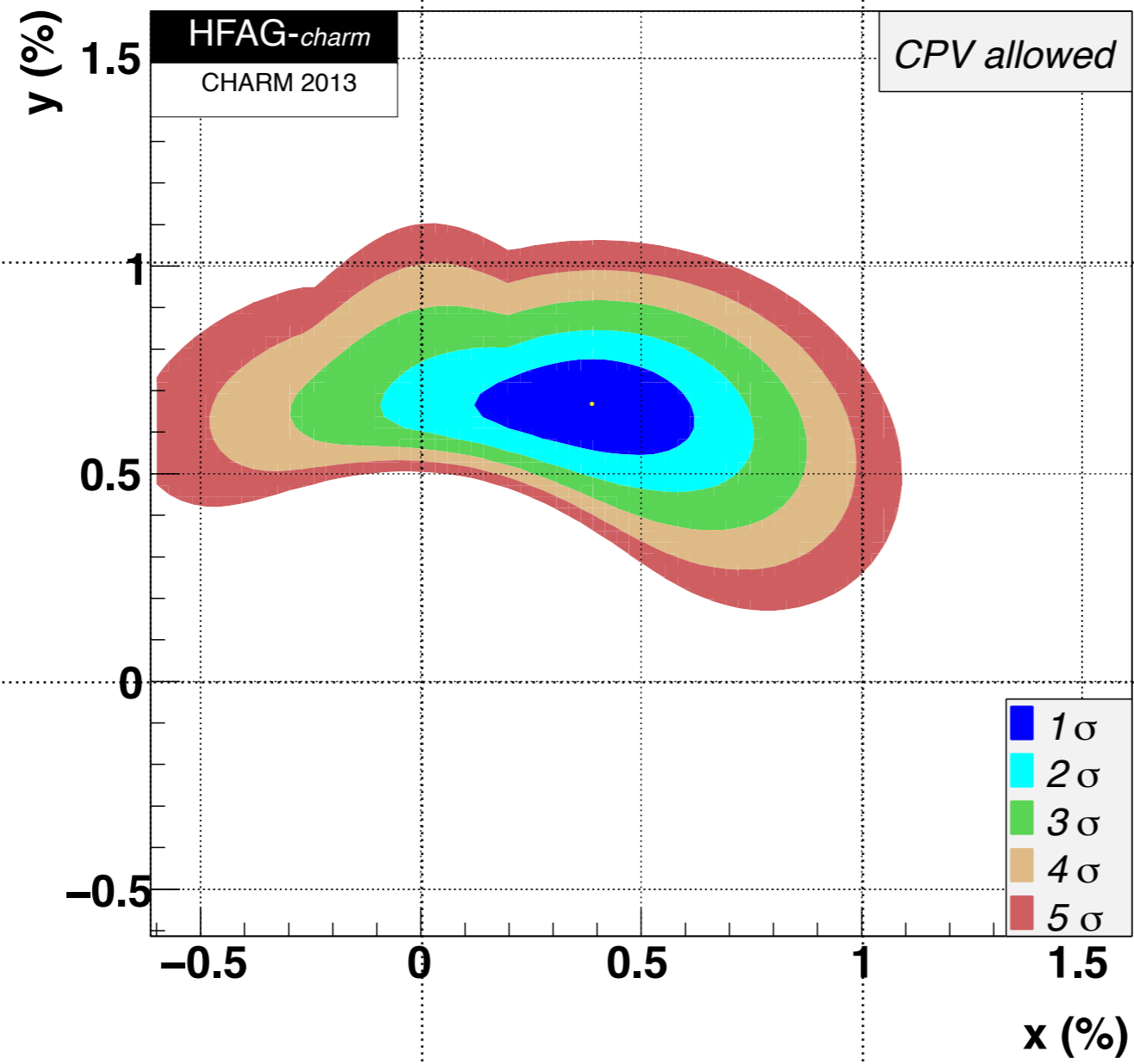


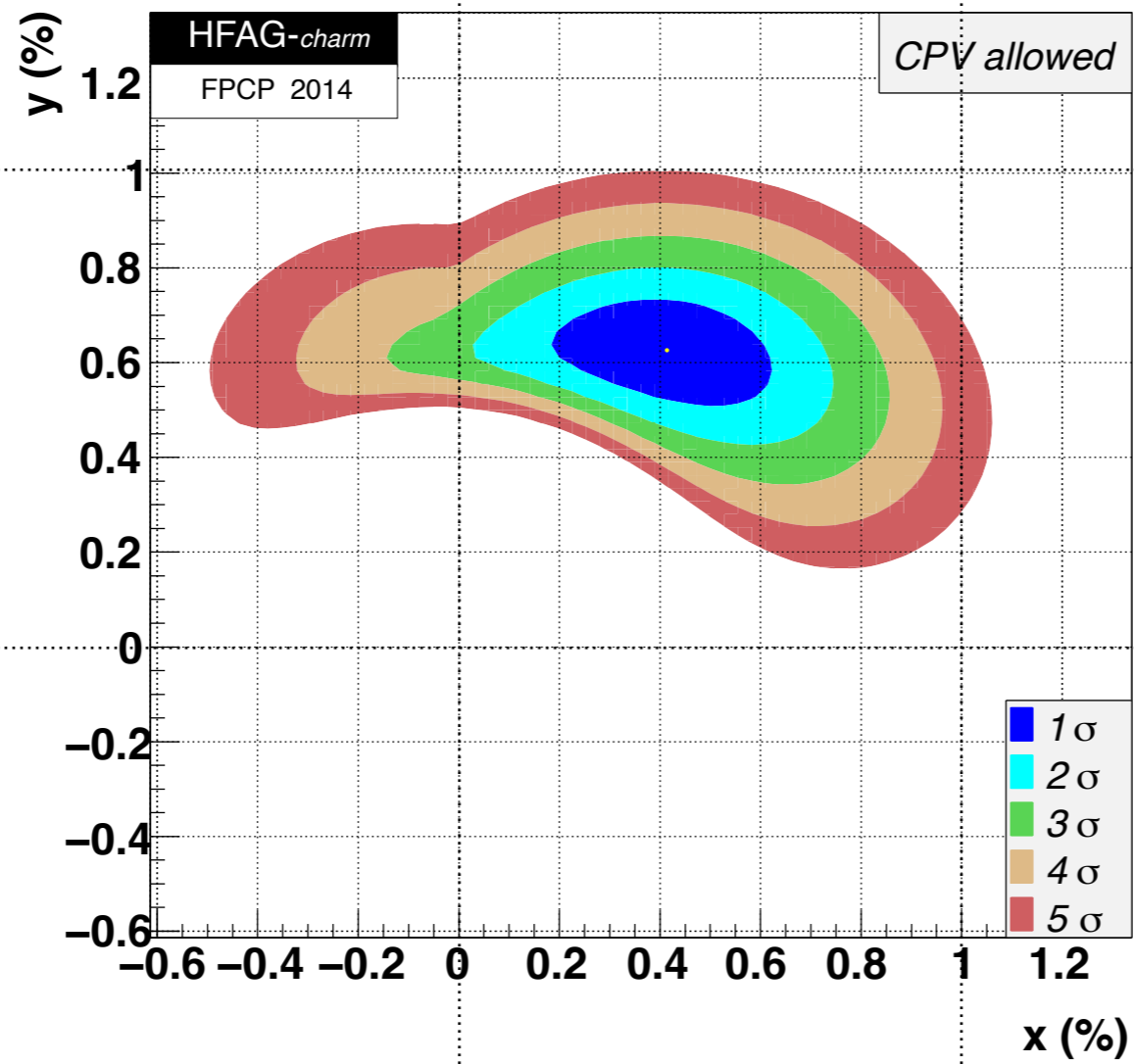


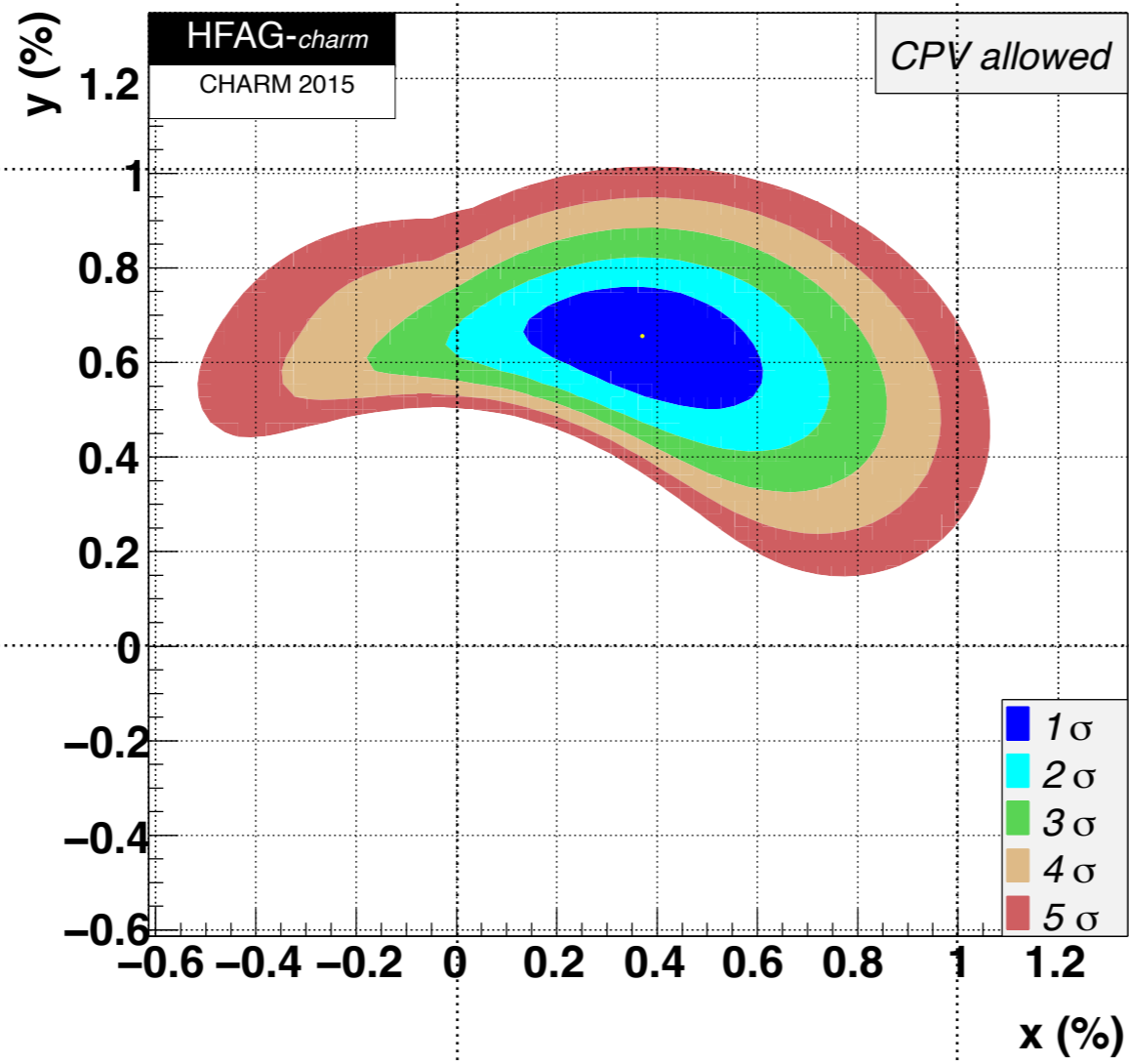


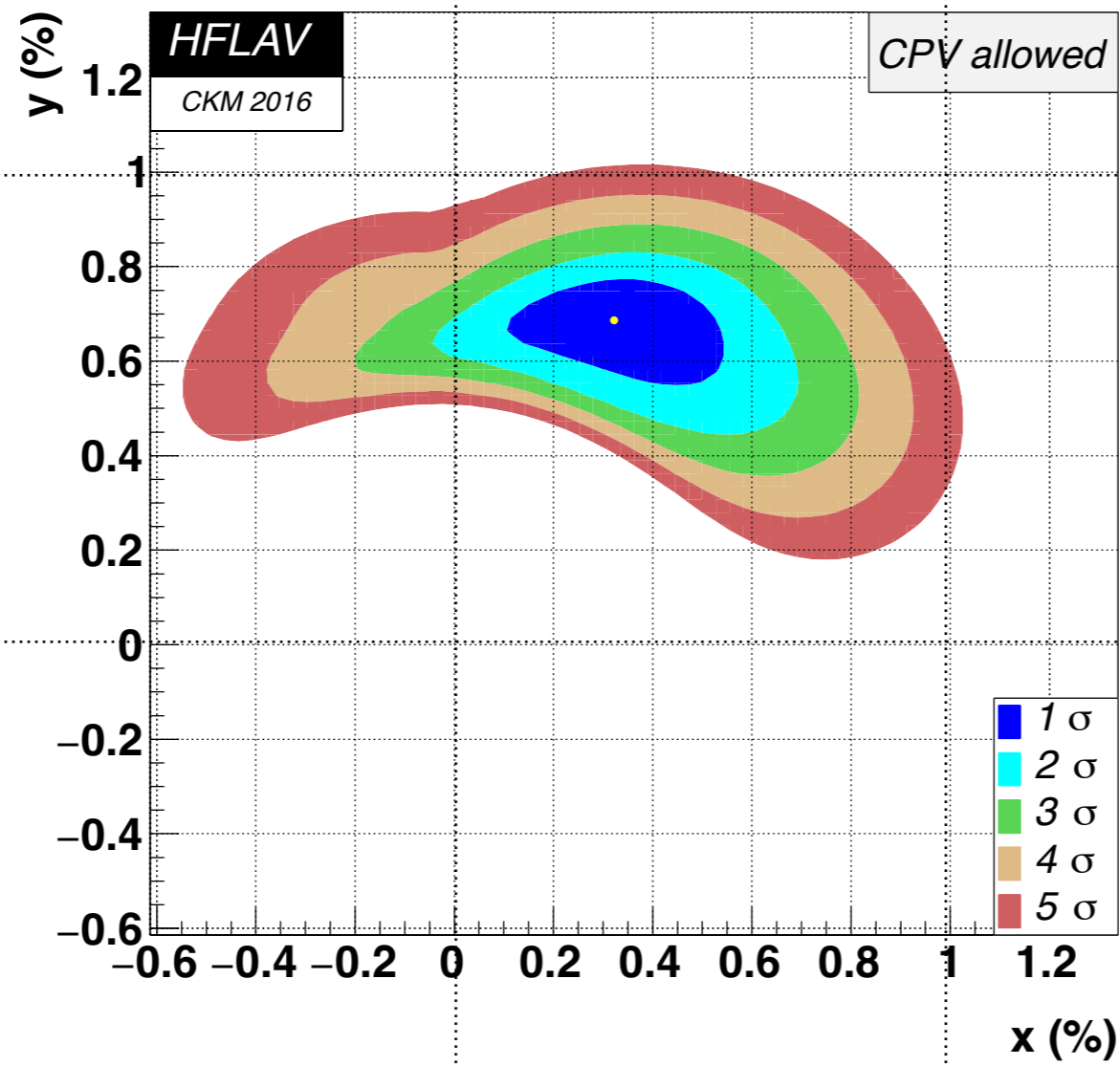


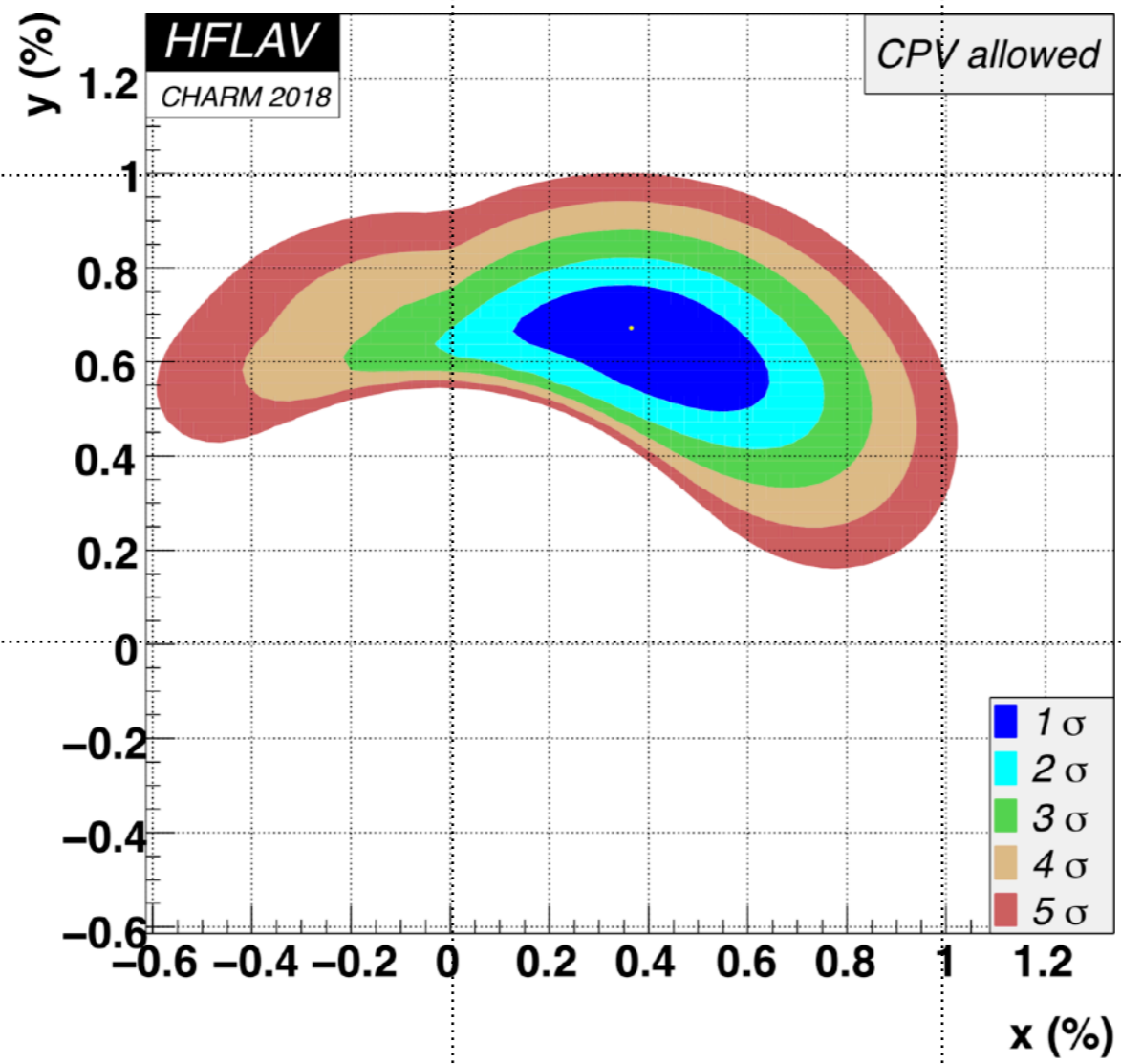


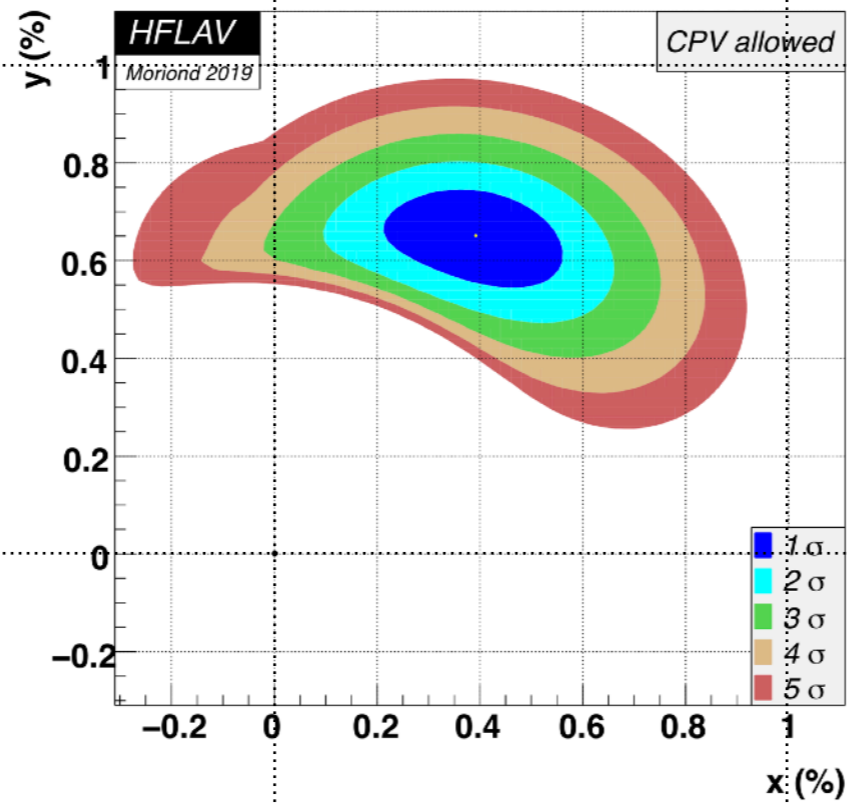


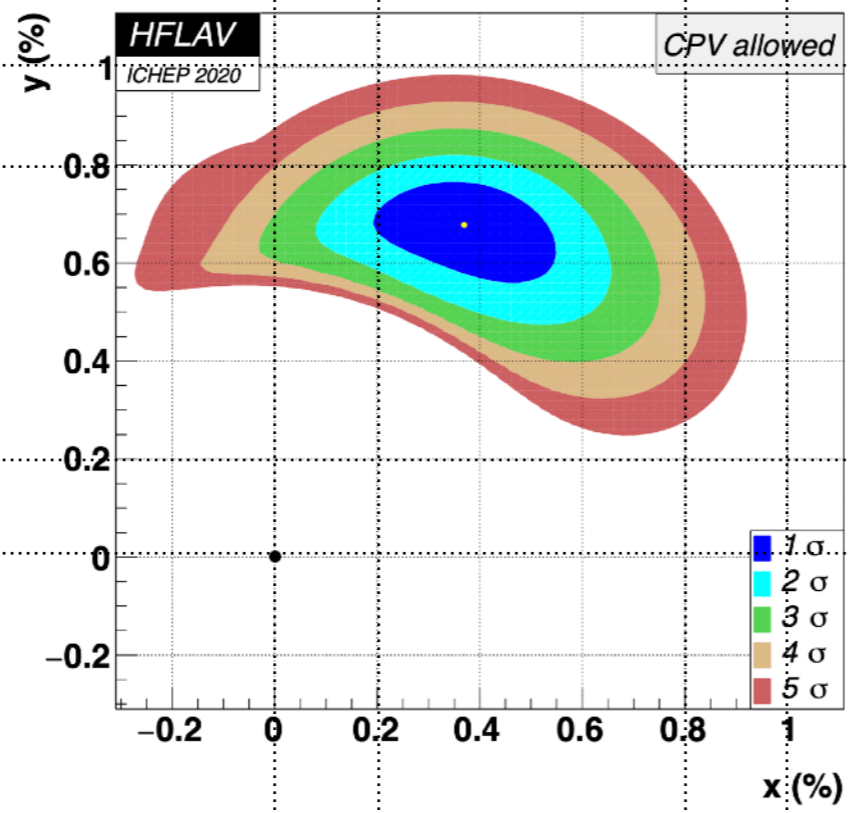




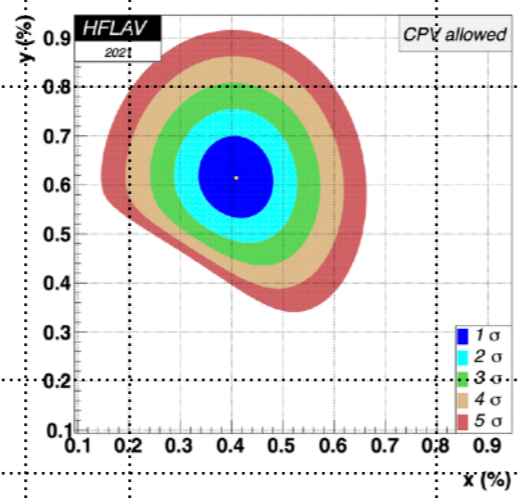


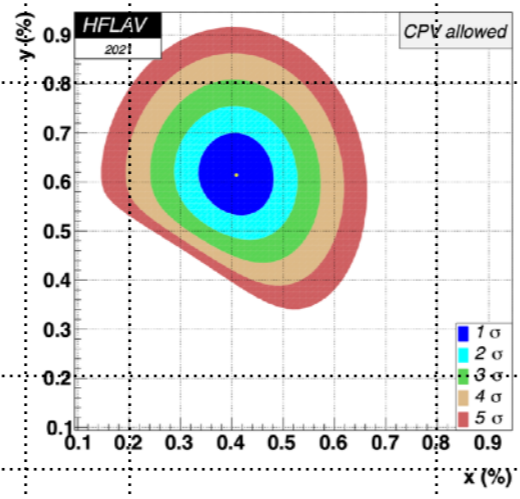


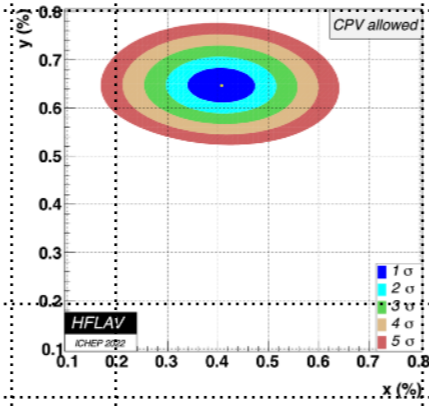


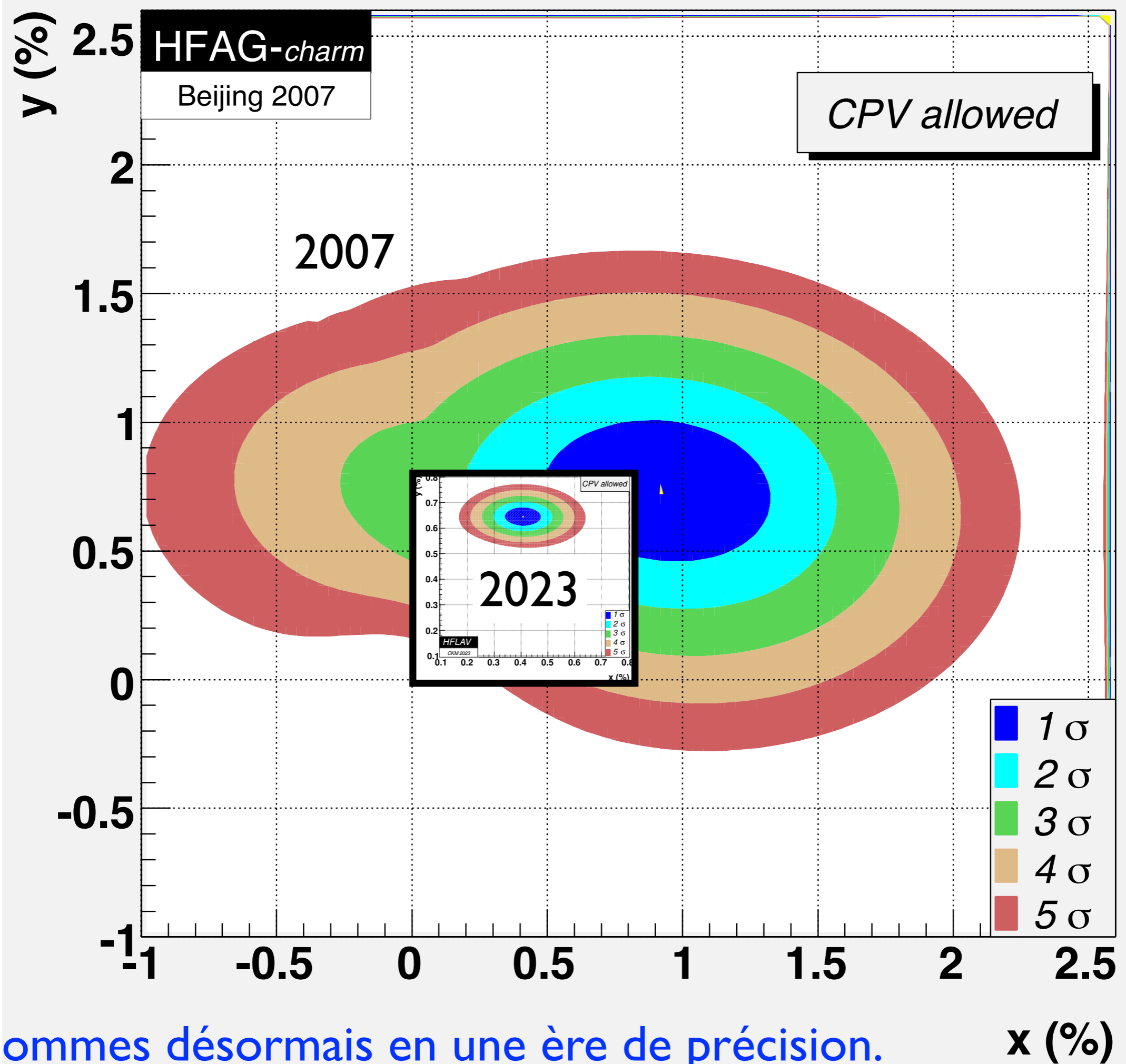












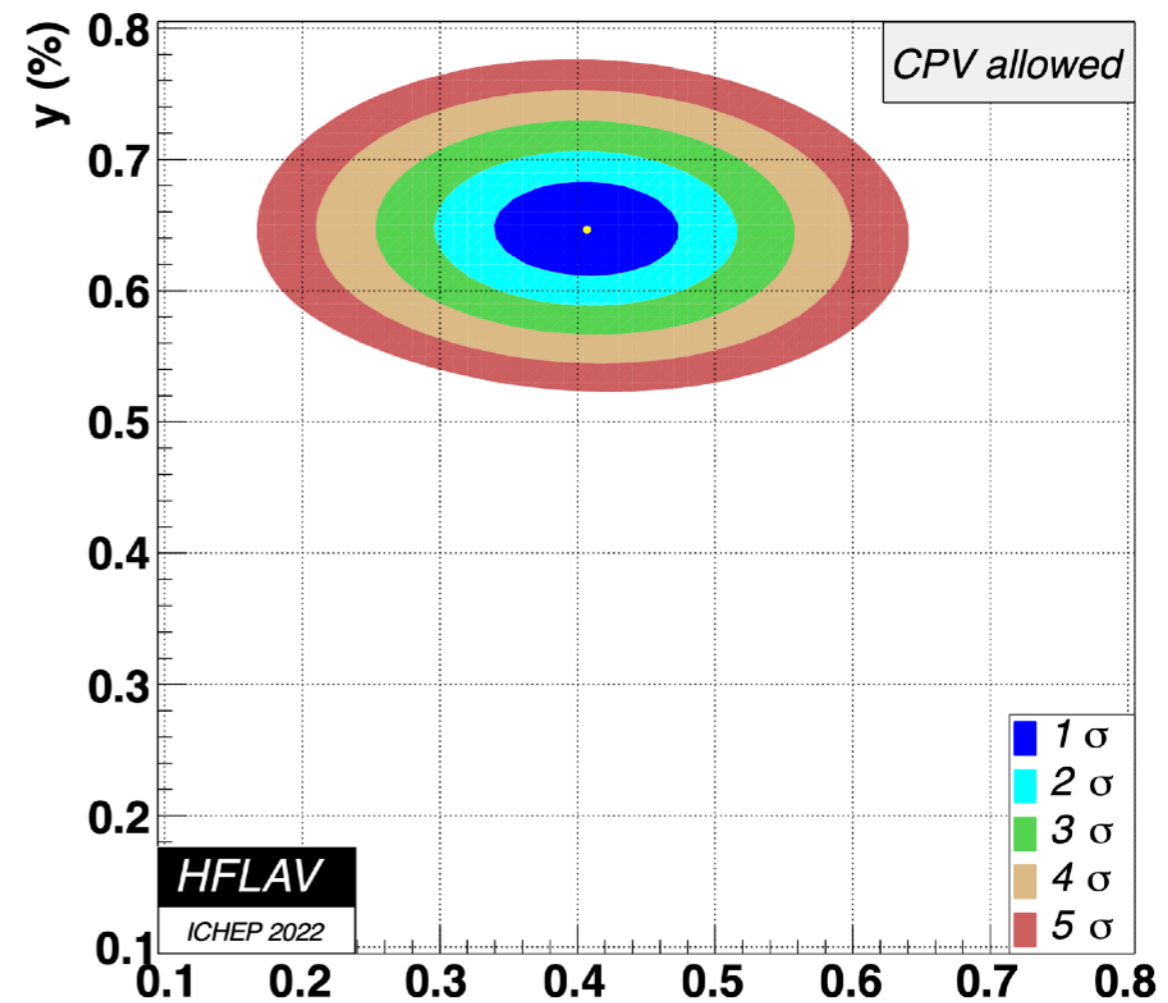
Nous sommes désormais en une ère de précision.

$x$  (%)



# Mélange et oscillations $D^0-\bar{D}^0$

- Nous sommes désormais en une ère de précision. Qu'avons nous appris ?
- Le mélange  $(x, y)$  est faible, mais pas si faible que ça.
- C'est vers la limite supérieure de ce qu'on attendrait dans le MS => il pourrait avoir une contribution importante de la NP.
  - L'expérience seule ne peut pas répondre à cette question
- En plus, il ouvre la porte à des recherches d'asymétries de CP dépendantes du temps.
  - Un taux de mélange importante ne garantie pas des asymétries importantes, mais un taux de mélange faible les aurait exclues.



# Asymétries de CP

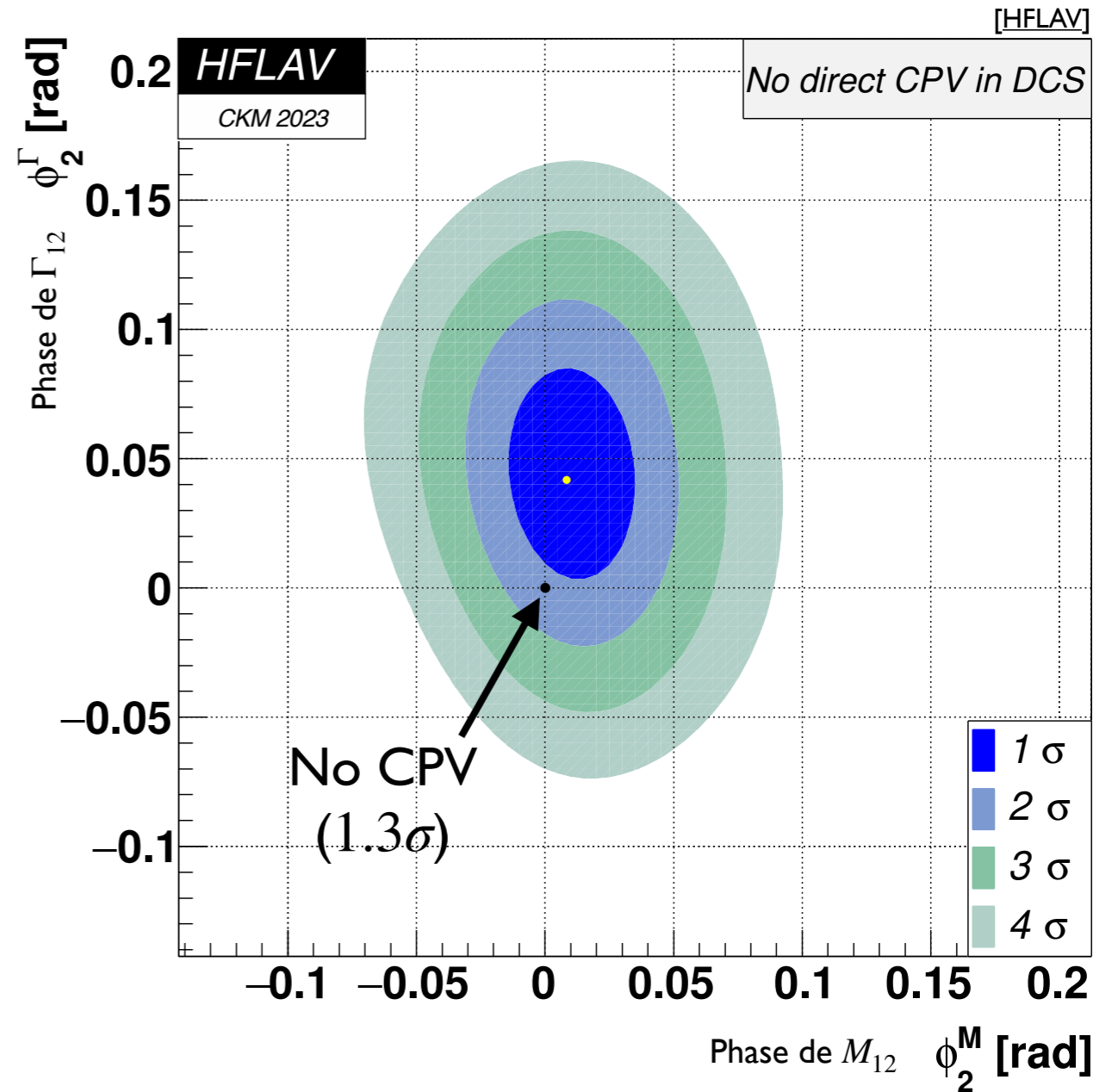
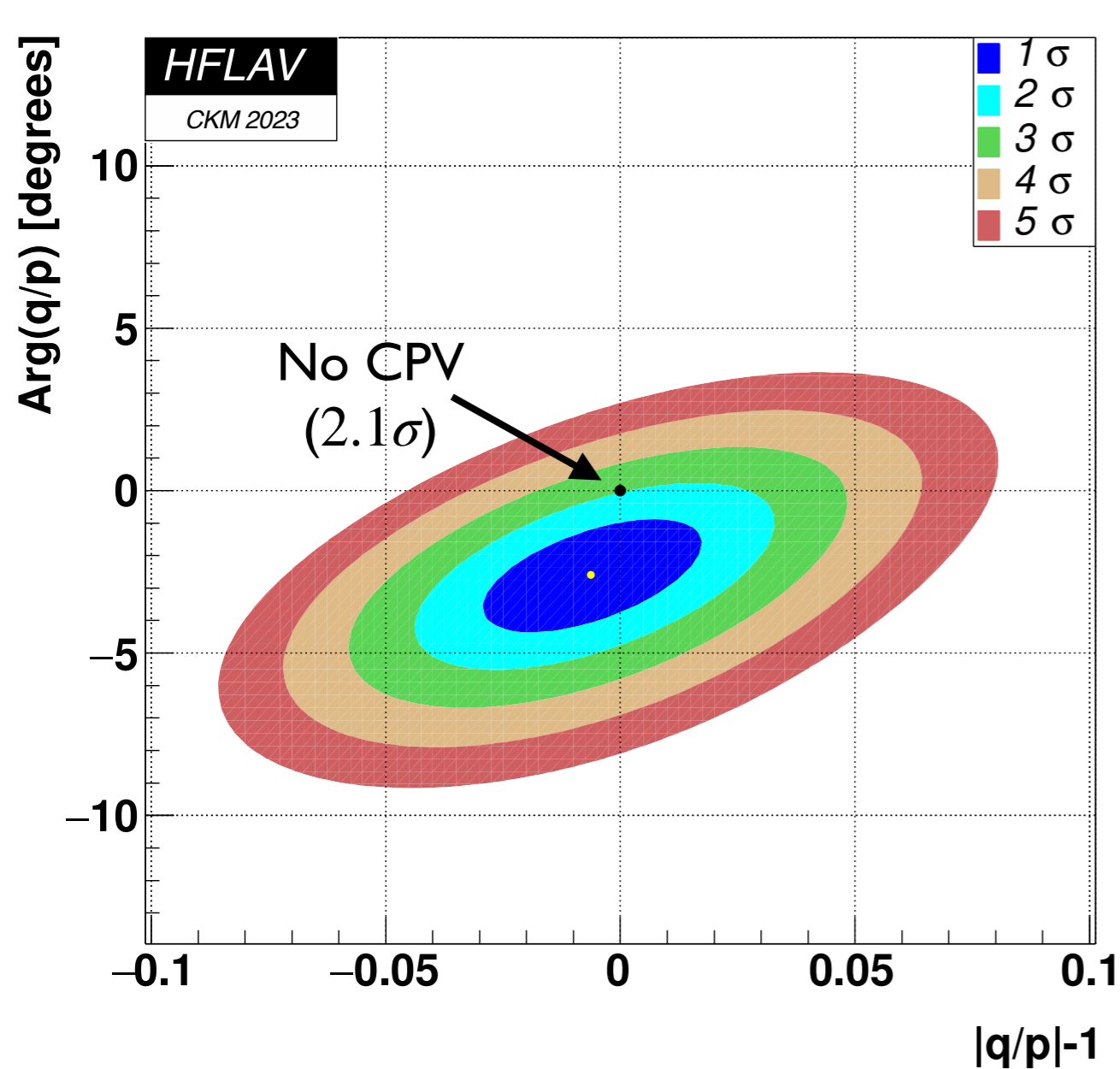
- Depuis l'ère de BABAR/Belle, on reconnaît trois types d'asymétrie CP dans le système beau :
  - CPV dans la désintégration
  - CPV dans le mélange
  - CPV dans l'interférence entre le mélange et la désintégration
- C'est pareil dans le charme.
- Le premier type concerne tout hadron charmé ; les autres dépendent du mélange et sont spécifiques au  $D^0$
- Dans le MS, on attend un niveau d'asymétrie CP faible pour la CPV directe, et très faible pour la CPV indirecte.
- Les attentes ont évolué (et continuent à évoluer) :
  - préjugé d'il y a 15 ans : aucune CPV visible dans le charme
  - préjugé d'il y a 5 ans : CPV directe faible, aucune CPV indirecte visible
  - aujourd'hui : CPV directe  $\leq \mathcal{O}(10^{-3})$ , CPV indirecte  $\leq \mathcal{O}(10^{-4})$  ?

# Asymétries de CP dépendantes du t

- Nous venons de voir plusieurs mesures des paramètres d'oscillation ( $x$ ,  $y$ , et al)
- Une asymétrie de CP peut induire une **différence des taux d'oscillation**  $D^0 \rightarrow \bar{D}^0$  et  $\bar{D}^0 \rightarrow D^0$ , ou un **déphasage** qui génère une différence observable via l'interférence.
- Ça génère des **asymétries dépendantes du temps** (qui, en général, persistent après l'intégration sur le temps)
- **CPV** : les paramètres d'oscillation différeraient entre  $D^0$  et  $\bar{D}^0$
- => Mesurer ces paramètres séparément pour  $D^0$  et  $\bar{D}^0$
- Donc, grâce aux mesures que vous avez déjà vu, on a des contraintes expérimentaux...



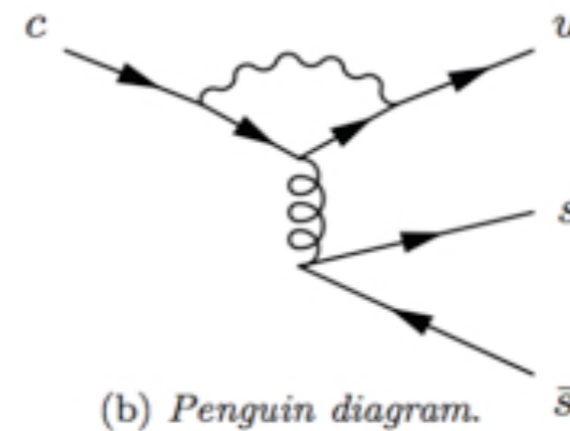
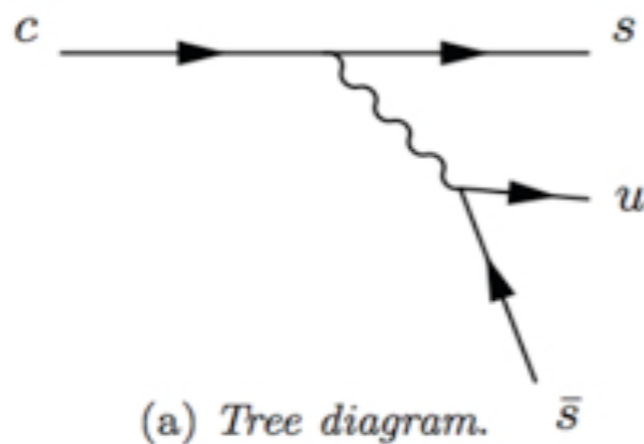
# Asymétries de CP dépendantes du t



- Deux cadres (le deuxième avec une hypothèse de plus)
- (0,0) = aucune CPV indirecte, à  $2.1\sigma$  (gauche) et  $1.3\sigma$  (droite)
- Il nous faut les stats de LHCb Runs 3+4 (au moins...)

# CPV dans la désintégration

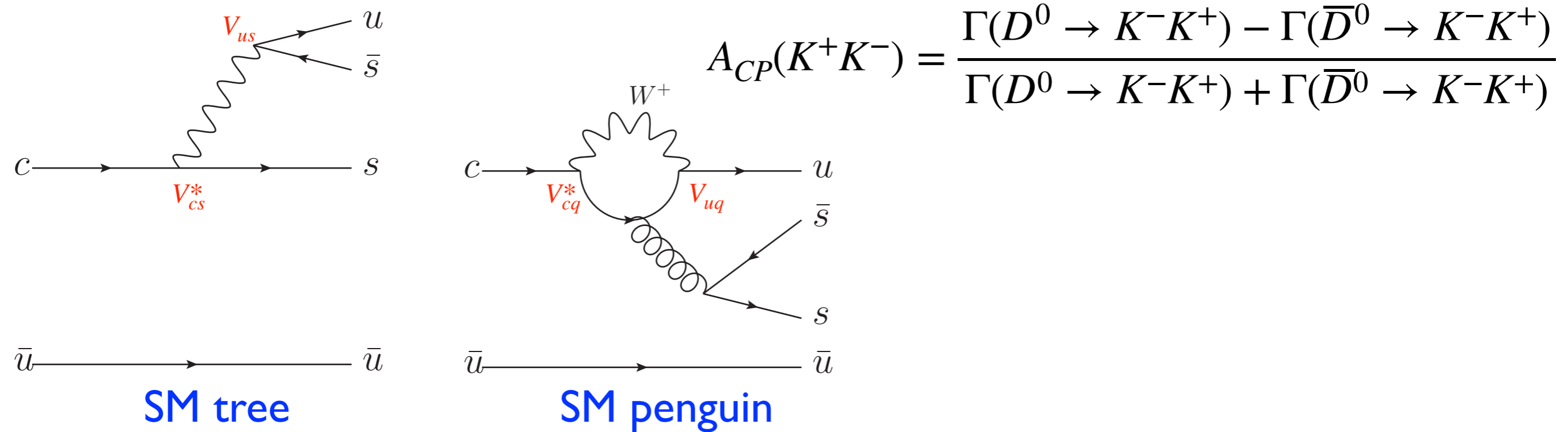
- Provient d'interférence entre **deux amplitudes**
  - ayant des **phases faibles différentes** et des **phases fortes différentes**
- Asymétrie spécifique à chaque état final
- Indépendante du temps (rien à voir avec le mélange)
- Pourrait se voir dans une désintégration faible de n'importe quel hadron charmé...
- ... mais pas dans n'importe quelle désintégration. Par exemple :



$$A_f = \frac{\Gamma(D \rightarrow f) - \Gamma(\bar{D} \rightarrow \bar{f})}{\Gamma(D \rightarrow f) + \Gamma(\bar{D} \rightarrow \bar{f})} = 2 r_f \sin \phi_f \sin \delta_f$$

Weak phase difference (pointing to  $\phi_f$ )  
Strong phase difference (pointing to  $\delta_f$ )  
Ratio of penguin/tree amplitudes (pointing to  $r_f$ )

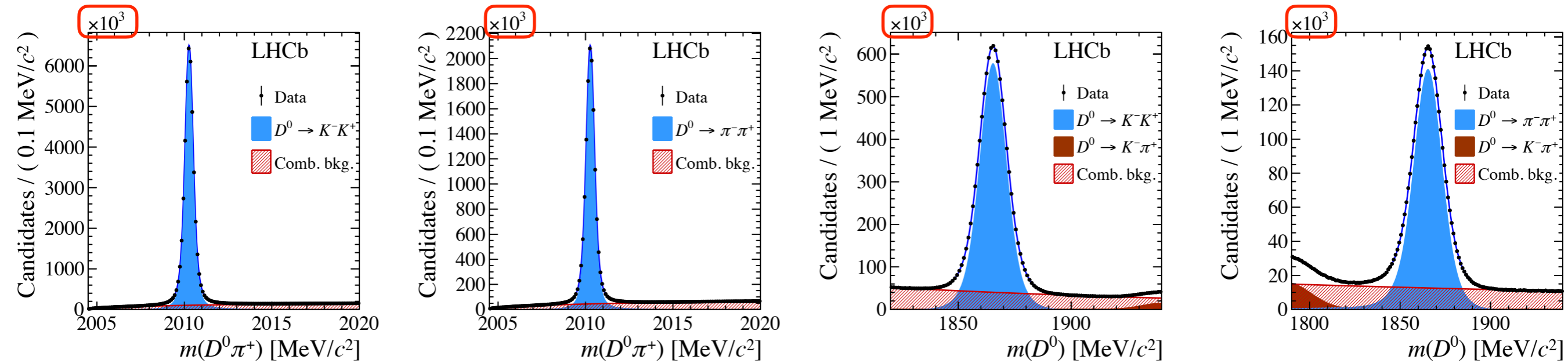
# $D^0 \rightarrow K^+K^-, D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-,$ et $\Delta A_{CP}$



$$A_{CP}(K^+K^-) = \frac{\Gamma(D^0 \rightarrow K^-K^+) - \Gamma(\bar{D}^0 \rightarrow K^-K^+)}{\Gamma(D^0 \rightarrow K^-K^+) + \Gamma(\bar{D}^0 \rightarrow K^-K^+)}$$

- Fait partie du cas le plus prometteur dans le MS (SCS)
- Interférence entre les diagrammes du MS peut générer une asymétrie, mais c'est faible : estimations  $\mathcal{O}(10^{-3})$  à  $\mathcal{O}(10^{-4})$ 
  - et difficile à calculer avec précision
- Deux défis expérimentaux principaux :
  - Il faut distinguer  $D^0 \rightarrow K^+K^-$  de  $\bar{D}^0 \rightarrow K^+K^- \Rightarrow$  **tag** (p.ex.  $D^{*+} \rightarrow D^0\pi^+$ )
  - Il faut distinguer l'asymétrie physique  $A_{CP}$  d'autres effets : asymétries de production, d'efficacité/détection, ...  $\Rightarrow \Delta A_{CP} = A(K^+K^-) - A(\pi^+\pi^-)$

# $D^0 \rightarrow K^+K^-, D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-,$ et $\Delta A_{CP}$



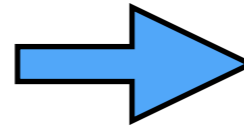
- En combinant des mesures de deux tags ( $D^{*+}$  et  $b \rightarrow D^0\mu^-\bar{\nu}$ ) et les données de Run1 + Run2, LHCb obtient :  

$$\Delta A_{CP} = (-15.4 \pm 2.9) \times 10^{-4} \quad (5.3\sigma)$$
- **Première observation de la CPV** dans le système du charme
- Dominé par la CPV directe (limites sur la CPV dép. du temps)
- Compatibilité plausible avec le MS, mais vers la limite sup.
- Mais d'où vient-il ?  $D^0 \rightarrow K^+K^-$ , ou  $D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ , ou les deux ?

# $D^0 \rightarrow K^+ K^-$ vs $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$

- $\Delta A_{CP} = A(K^+ K^-) - A(\pi^+ \pi^-)$  mesure la différence afin de minimiser les incertitudes systématiques.
- Séparer les deux nécessite un travail difficile et méticuleux.

$$\begin{aligned}
 A(K^- \pi^+) &\approx A_P(D^{*+}) - A_D(K^+) + A_D(\pi^+) + A_D(\pi_{\text{tag}}^+), \\
 A(K^- \pi^+ \pi^+) &\approx A_P(D^+) - A_D(K^+) + A_D(\pi_1^+) + A_D(\pi_2^+), \\
 A(\bar{K}^0 \pi^+) &\approx A_P(D^+) + A(\bar{K}^0) + A_D(\pi^+), \\
 A(\phi \pi^+) &\approx A_P(D_s^+) + A_D(\pi^+), \\
 A(\bar{K}^0 K^+) &\approx A_P(D_s^+) + A(\bar{K}^0) + A_D(K^+).
 \end{aligned}$$



$$\begin{aligned}
 C_{D^+} : \mathcal{A}^{CP}(K^- K^+) &= A(K^- K^+) - A(K^- \pi^+) + A(K^- \pi^+ \pi^+) - A(\bar{K}^0 \pi^+) + A(\bar{K}^0), \\
 C_{D_s^+} : \mathcal{A}^{CP}(K^- K^+) &= A(K^- K^+) - A(K^- \pi^+) + A(\phi \pi^+) - A(\bar{K}^0 K^+) + A(\bar{K}^0).
 \end{aligned}$$

- On mesure toutes les asymétries individuelles, on les met ensemble (dans les deux combinaisons), et...

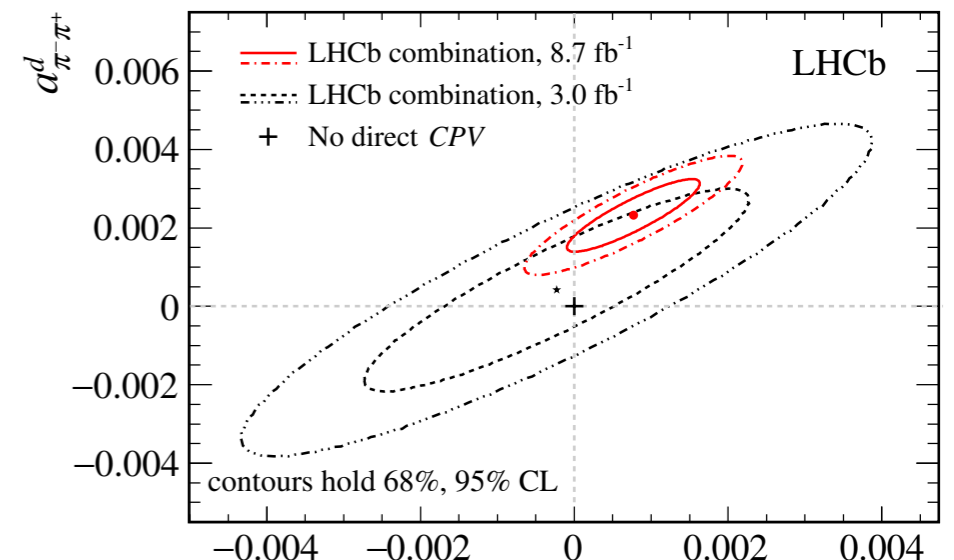
$$A_{CP}(K^- K^+) = (6.8 \pm 5.4 \pm 1.6) \times 10^{-4}$$

- ... plus de  $\Delta A_{CP}$  et des asym indirectes :

$$a_{K^- K^+}^d = (7.7 \pm 5.7) \times 10^{-4}$$

$$a_{\pi^- \pi^+}^d = (23.2 \pm 6.1) \times 10^{-4}$$

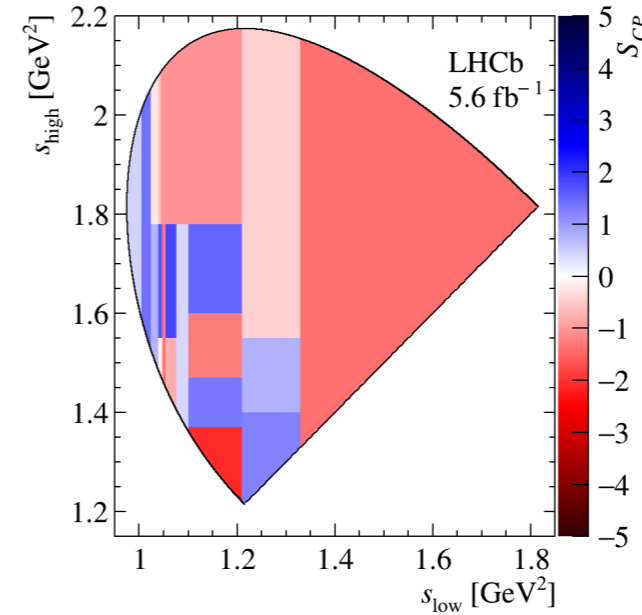
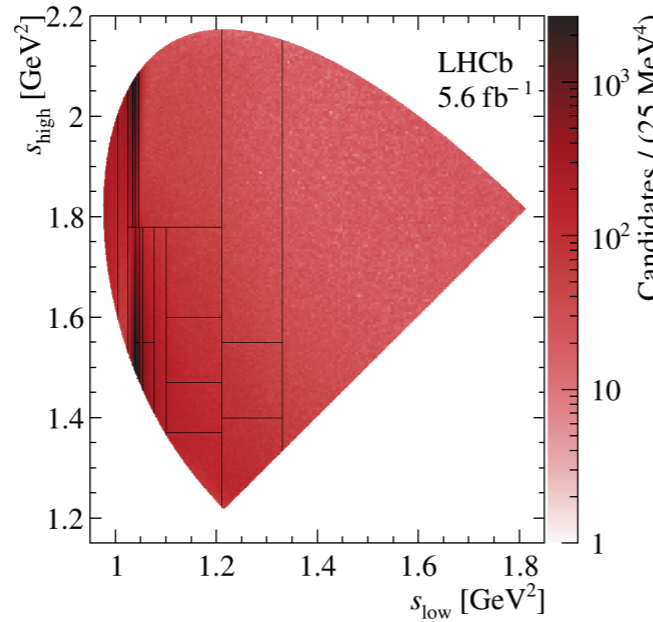
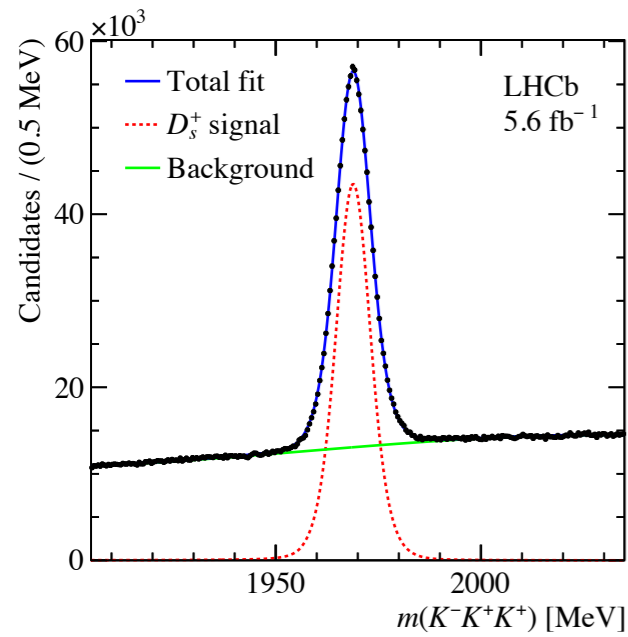
- $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^-$  semble dominer ?



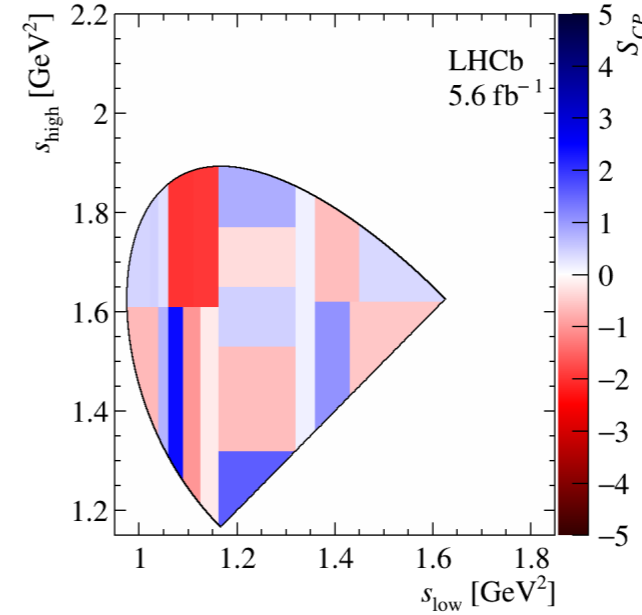
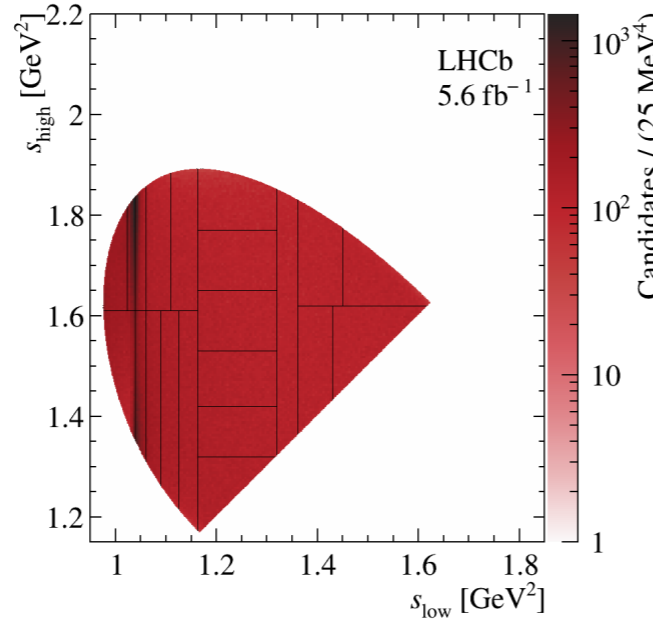
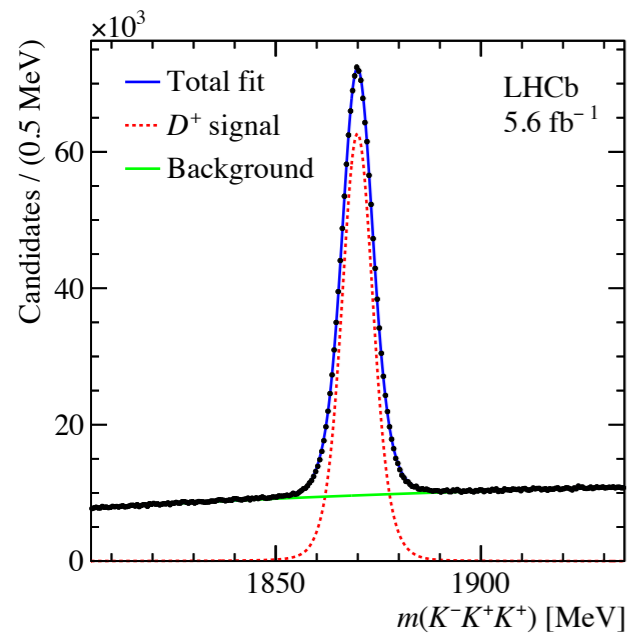
# CPV directe dans d'autres canaux ?

- En bref : beaucoup de recherches, aucune observation.
- Vu  $\Delta A_{CP}$ , on peut attendre à des asymétries d'entre  $10^{-3}$  et  $10^{-4}$
- => pour atteindre les  $5\sigma$  il faudrait un yield d'entre  $10^7$  et  $10^9$
- **Seulement LHCb a les stats nécessaires**, et pour certains canaux seulement.
  - Même avec  $50\text{ab}^{-1}$ , Belle II atteindrait l'incertitude de 0.02 % nécessaire à observer une asymétrie de  $10^{-3}$  en deux canaux uniquement :  $D^0 \rightarrow K_S^0 \pi^0$  et  $D^+ \rightarrow K_S^0 \pi^+$  ... mais CF! Aucun canal SCS. [Belle II Physics Book, PTEP 2019 (2019) 12, 123C01 p424]
- Canaux les plus faisables :  $D^+ \rightarrow K^+ K^- \pi^+ / \pi^+ \pi^- \pi^+$ ,  
 $D_s^+ \rightarrow K^+ K^- K^+ / K^+ \pi^+ \pi^-$  (mais aussi  $\Lambda_c^+ \rightarrow p h^+ h^-$ )
- États finaux avec  $\pi^0, \eta, \eta', K_S^0$  intéressants mais difficiles à LHCb.
- HFLAV : ~ 94 canaux dont les asymétries ont été mesurées ! Je vous montre quelques exemples.

# $D_s^+ \rightarrow K^+ K^- K^+$ et $D^+ \rightarrow K^+ K^- K^+$



$$D_s^+ \rightarrow K^+ K^- K^+ \\ p = 13.3 \%$$



$$D^+ \rightarrow K^+ K^- K^+ \\ p = 31.6 \%$$

Masse

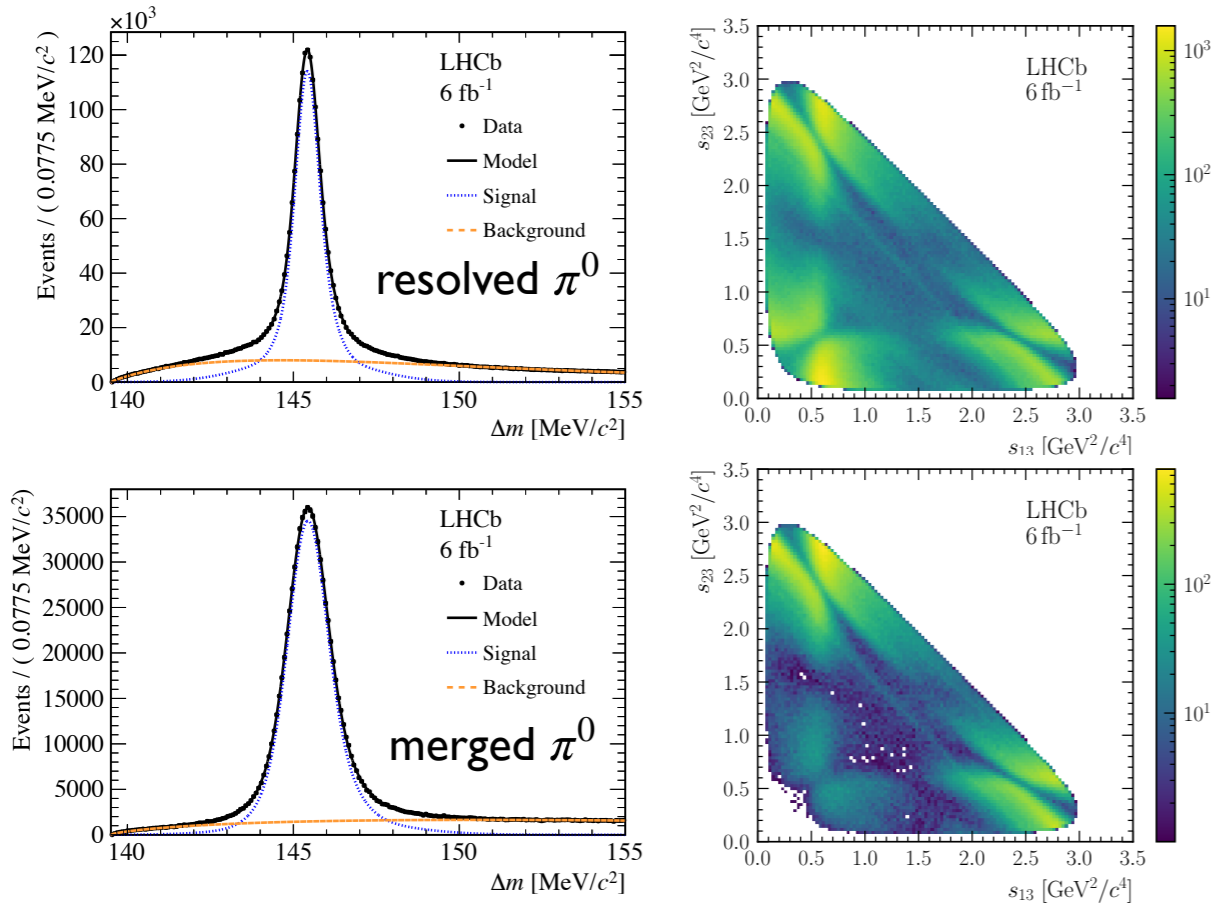
Plan de Dalitz

Signification locale

- Recherche d' $A_{CP}$  localisée dans l'espace de phases.
- Méthode puissante, mais aucune observation à présent.

# LHCb : Des canaux difficiles ?

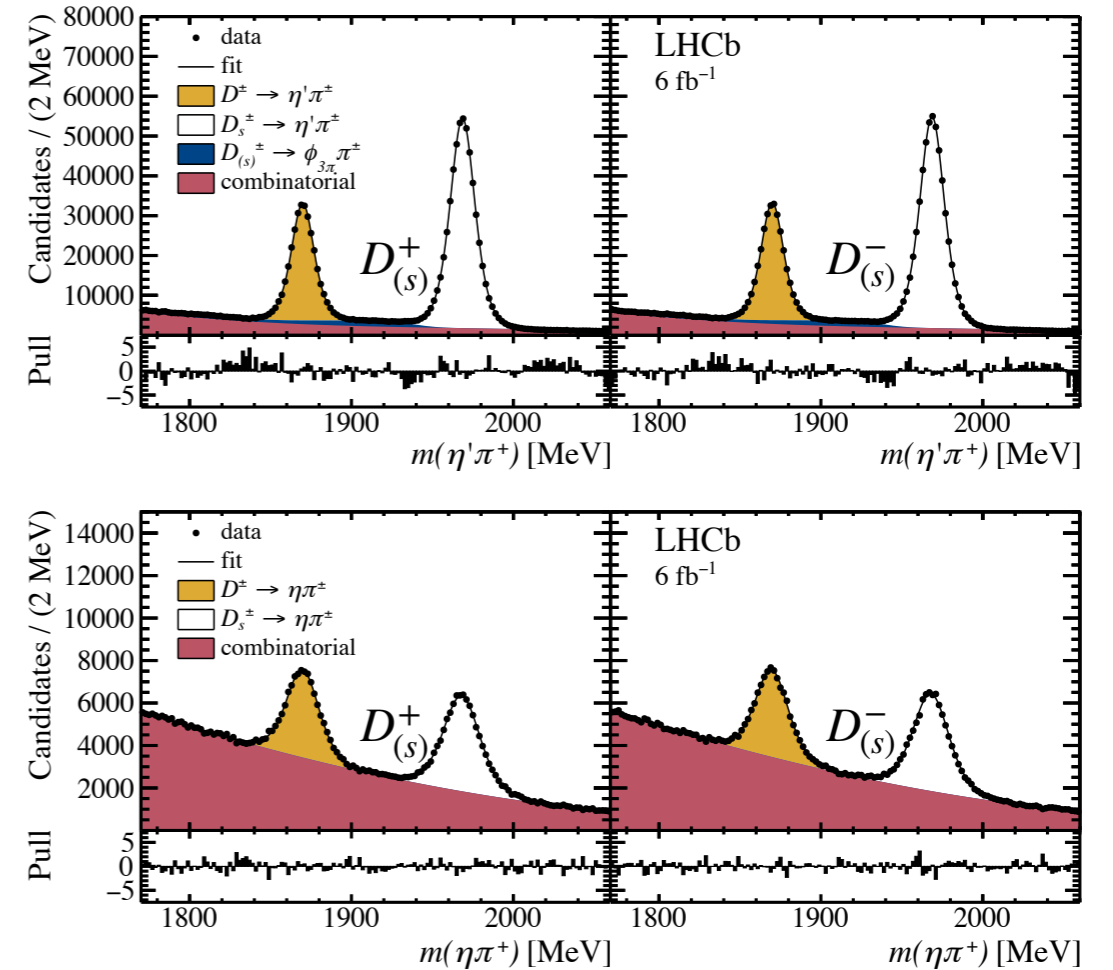
$$D^0 \rightarrow \pi^- \pi^+ \pi^0$$



Yield  $\sim 1.7\text{M} + 0.8\text{M}$

Test pour CPV dans l'espace des phases :  $p = 0.62$

$$D_{(s)}^+ \rightarrow \eta \pi^+ \text{ et } D_{(s)}^+ \rightarrow \eta' \pi^+$$



Yields  $\sim 1.1\text{M}$  et  $0.6\text{M}$  ( $D_s^+ / D^+ \rightarrow \eta' \pi^+$ )

Yields  $\sim 140\text{k}$  et  $110\text{k}$  ( $D_s^+ / D^+ \rightarrow \eta \pi^+$ )

$$\mathcal{A}^{CP}(D^+ \rightarrow \eta \pi^+) = (0.13 \pm 0.50 \pm 0.18)\%$$

$$\mathcal{A}^{CP}(D_s^+ \rightarrow \eta \pi^+) = (0.48 \pm 0.42 \pm 0.17)\%$$

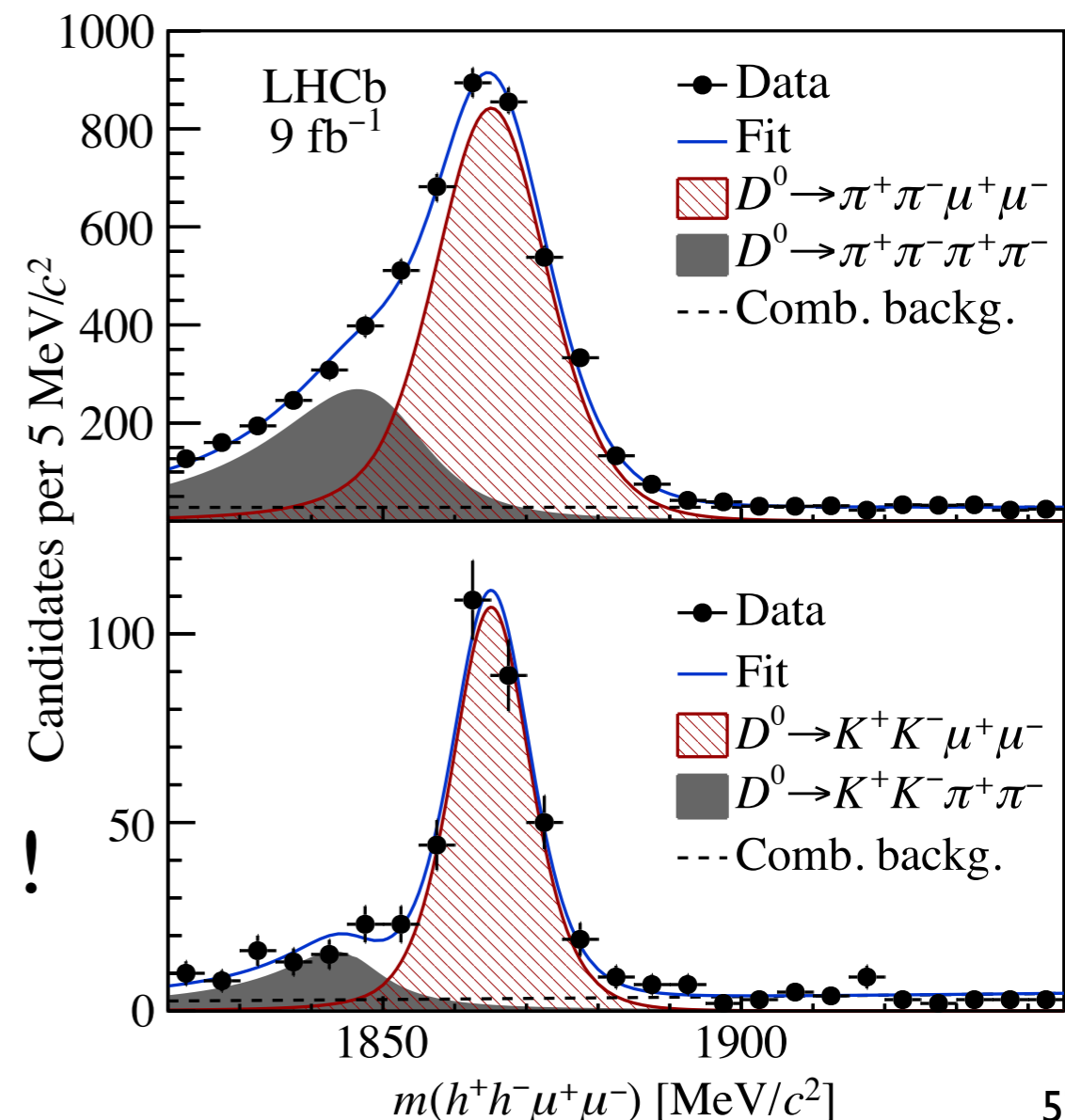
$$\mathcal{A}^{CP}(D^+ \rightarrow \eta' \pi^+) = (0.43 \pm 0.17 \pm 0.10)\%$$

$$\mathcal{A}^{CP}(D_s^+ \rightarrow \eta' \pi^+) = (-0.04 \pm 0.11 \pm 0.09)\%$$



$$D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \mu^+ \mu^- \text{ et } D^0 \rightarrow K^+ K^- \mu^+ \mu^-$$

- Idée clé : au lieu de chercher une asymétrie faible dans des canaux à hautes stats, **étudier une région où une asymétrie importante pourrait se manifester...**
- ... comme  $D^0 \rightarrow h^+ h^- \mu^+ \mu^-$  [Svjetlana Fajfer et al, [PRD76:074010,2007](#)]
- Mesures faites dans des régions de  $PHSP/q^2$ , et en utilisant une **analyse angulaire pour soustraire les contributions P-wave** (c'est-à-dire, les résonances comme le  $\rho$ ,  $\phi$ , etc très MS)
- Combinaison :  
 $D^0 \rightarrow \pi^+ \pi^- \mu^+ \mu^- : p = 79 \%$   
 $D^0 \rightarrow K^+ K^- \mu^+ \mu^- : p = 0.8 \% (2.7\sigma) !$



# Une surabondance de résultats

- Run3+4 seront transformateurs pour la physique du charme.
- Je regrette ne pas pouvoir vous en dire plus sur..
  - Les recherches de **désintégrations rares** du charme comme  $D^0 \rightarrow \mu^+ \mu^-$ , sensible à la NP
  - **La spectroscopie**, où on découvre, identifie, et mesure un nombre énorme de nouveaux états
  - ... dont des **états exotiques**, jusqu'au  $T_{\bar{c}\bar{c}cc}(6900)^0 \rightarrow J/\psi J/\psi$
  - ... et dont le **baryon doublement charmé**  $\Xi_{cc}^{++}$
- Le charme est passé d'une découverte, à un domaine à explorer, à un outil de précision -- et redevient une source de découvertes, avec une sensibilité de pointe à la NP.
- J'attends avec hâte voir ce que nous découvrirons ensuite.



