

***Soutenance de Master
M2 Physique Subatomique et
Astroparticules***

**Etude des propriétés CP du boson de Higgs dans
le canal $\tau\tau$ dans l'expérience CMS auprès du LHC**

Mario SESSINI

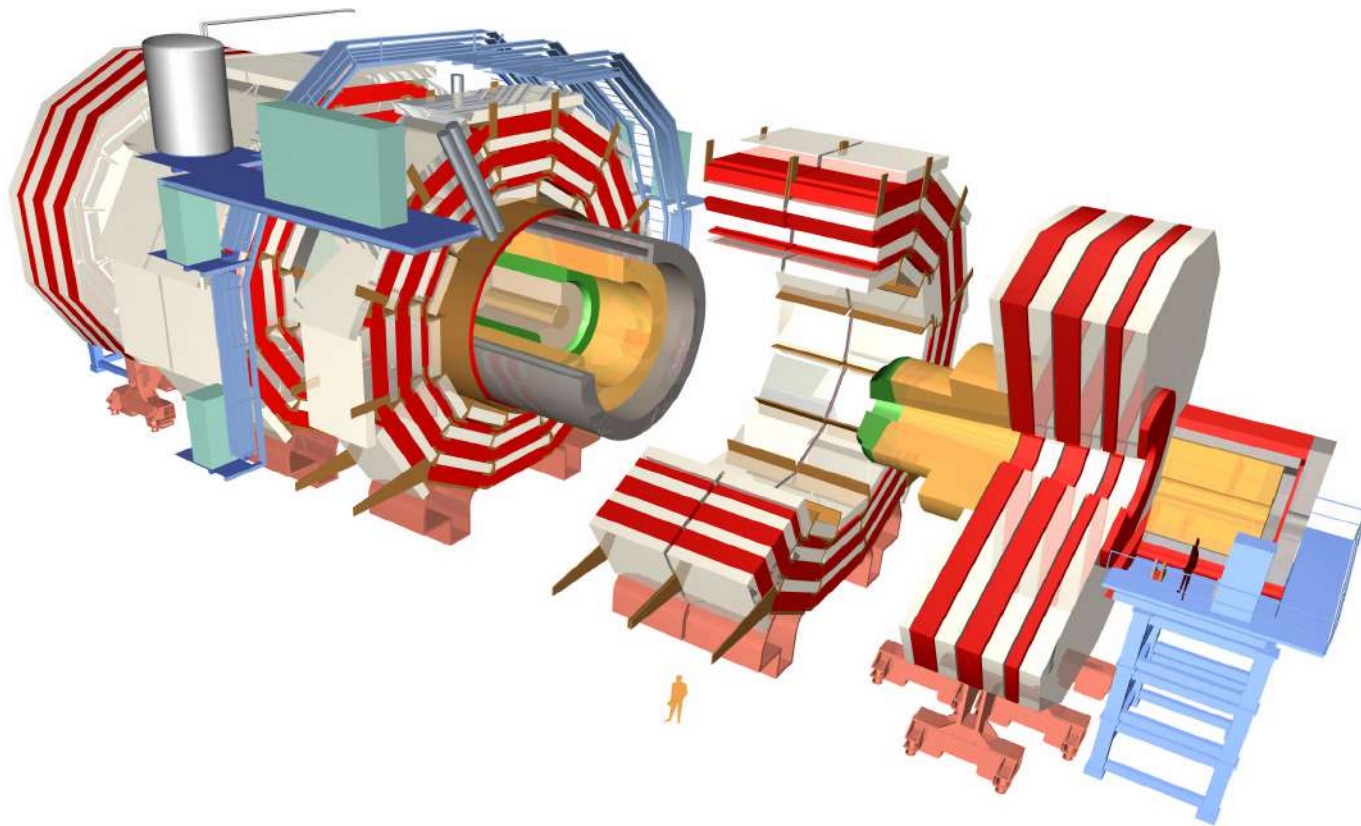
(Direction Anne-Catherine LE BIHAN)

19 juin 2020

Dispositif expérimental

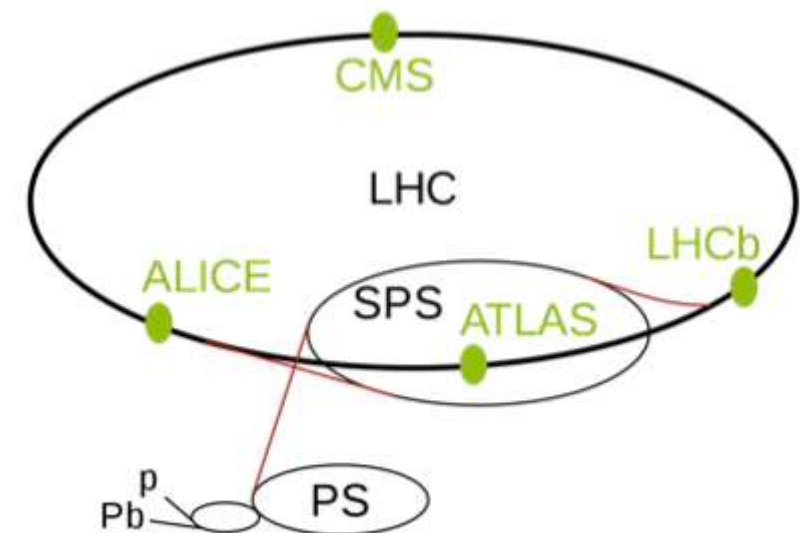
CMS (Compact Muon Solenoid) est un détecteur de type cylindrique en couches :

- Trajectographe
- Calorimètres
- Aimant supraconducteur
- Chambres à muons



Quelques dates clés du LHC :

- 2010-2012 : 1ère prise de données (7-8 TeV)
- 2015-2018 : 2ème prise de données (13 TeV)
- 2021 : début 3ème prise de données (13-14 TeV)



Il permet de **reconstruire** et **d'identifier** les particules produites lors des **collisions** de protons **accélérés** par le LHC

Le boson de Higgs

Découverte en **2012** par ATLAS et CMS : son interaction avec les autres particules leur confère une **masse**

On connaît : sa charge électrique, son spin, sa masse, son temps de vie...

On tente de mieux comprendre : ses interactions avec les fermions, ses propriétés CP

L'objectif est de mesurer les propriétés CP du boson de Higgs dans son canal de désintégration $H \rightarrow \tau\tau$.

Le **modèle standard** regroupe toutes les particules élémentaires et leurs **propriétés**

masse →	≈2.3 MeV/c ²	≈1.275 GeV/c ²	≈173.07 GeV/c ²	0	≈126 GeV/c ²
charge →	2/3	2/3	2/3	0	0
spin →	1/2	1/2	1/2	1	0
	u up	c charm	t top	g gluon	H boson de Higgs
	≈4.8 MeV/c ²	≈95 MeV/c ²	≈4.18 GeV/c ²	0	
	-1/3	-1/3	-1/3	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
QUARKS	d down	s strange	b bottom	γ photon	
	0.511 MeV/c ²	105.7 MeV/c ²	1.777 GeV/c ²	91.2 GeV/c ²	
	-1	-1	-1	0	
	1/2	1/2	1/2	1	
	e électron	μ muon	τ tau	Z⁰ boson Z ⁰	
	<2.2 eV/c ²	<0.17 MeV/c ²	<15.5 MeV/c ²	80.4 GeV/c ²	
	0	0	0	±1	
	1/2	1/2	1/2	1	
LEPTONS	ν_e neutrino électronique	ν_μ neutrino muonique	ν_τ neutrino tauique	W[±] boson W [±]	BOSONS DE JAUGE

Plan

Stratégie : Comment obtenir une observable permettant de mesurer les propriétés CP du boson de Higgs

Méthodes : Présentation des méthodes permettant d'obtenir ces observables

Résultats : Mise en oeuvre des méthodes, comparaison des méthodes

Stratégie

Le boson de Higgs transmet ses propriétés CP aux fermions à travers le **couplage de Yukawa** : **il est différent pour chaque fermion**.

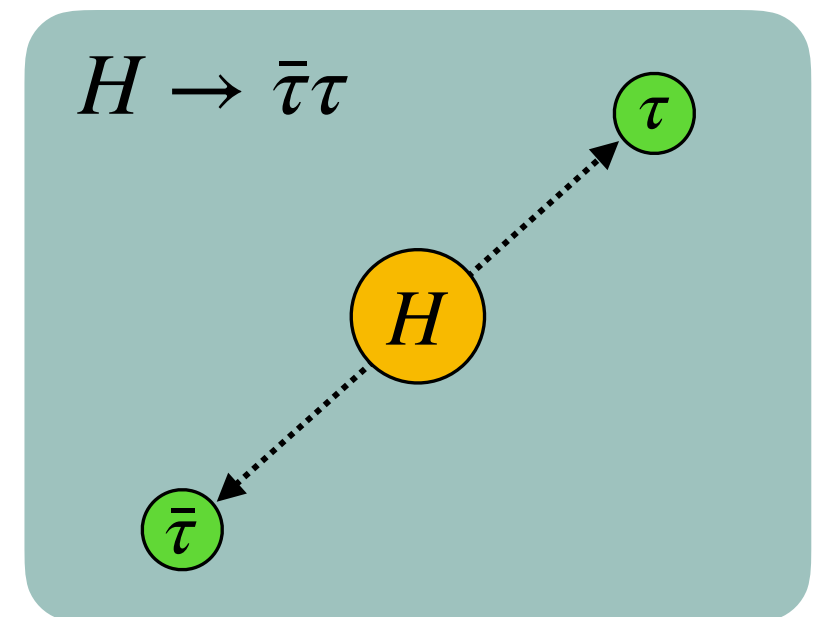
Pour un couplage à une **paire de taus** il s'écrit :

$$L_Y = -\frac{m_\tau}{v}\kappa_\tau(\cos \Phi_\tau \bar{\tau}\tau + \sin \Phi_\tau \bar{\tau}i\gamma_5\tau)H$$

Si $\Phi_\tau = 0$, l'interaction est **scalaire**

Si $\Phi_\tau = \pi/2$, l'interaction est **pseudo scalaire**

Si Φ_τ est compris entre ces deux valeurs, on a une **combinaison** des deux



Pour mesurer les propriétés CP du boson de Higgs il faut mesurer Φ_τ !

Stratégie

Pour accéder à Φ_τ , il faut étudier les **propriétés de spin** des taus

$$\mathbf{S} = \mathbf{1} \left| \begin{array}{l} |1, +1\rangle = |\uparrow\uparrow\rangle \\ |1, 0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle + |\downarrow\uparrow\rangle) \\ |1, -1\rangle = |\downarrow\downarrow\rangle \end{array} \right.$$

$$\mathbf{S} = \mathbf{0} \left| |0, 0\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}}(|\uparrow\downarrow\rangle - |\downarrow\uparrow\rangle) \right.$$

Création d'un **triplet symétrique** et d'un **singlet antisymétrique**

Le **boson de Higgs** possède un moment angulaire total $\vec{J} = \vec{S} + \vec{L} = 0$

$$S = 0 \rightarrow L = 0$$

$$S = 1 \rightarrow L = 1$$

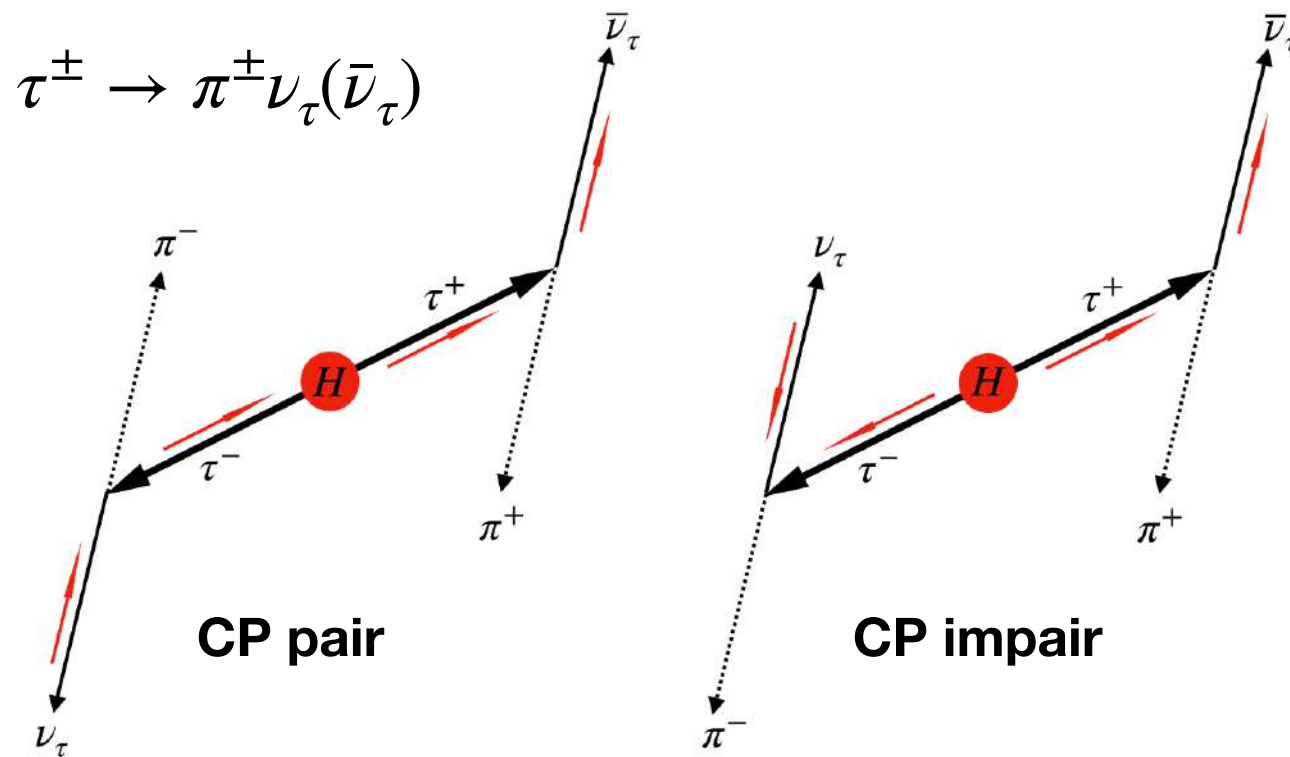
$$C|\tau^+\tau^-\rangle = (-1)^{S+L}|\tau^+\tau^-\rangle = +1|\tau^+\tau^-\rangle$$

$$P|\tau^+\tau^-\rangle = (-1)^{L+1}|\tau^+\tau^-\rangle$$

$$\begin{aligned} CP|\tau^+\tau^-\rangle &= (-1)^{L+1}|\tau^+\tau^-\rangle \\ &= (-1)^{S+1}|\tau^+\tau^-\rangle \end{aligned}$$

Le triplet est **CP pair** tandis que le singlet est **CP impair**

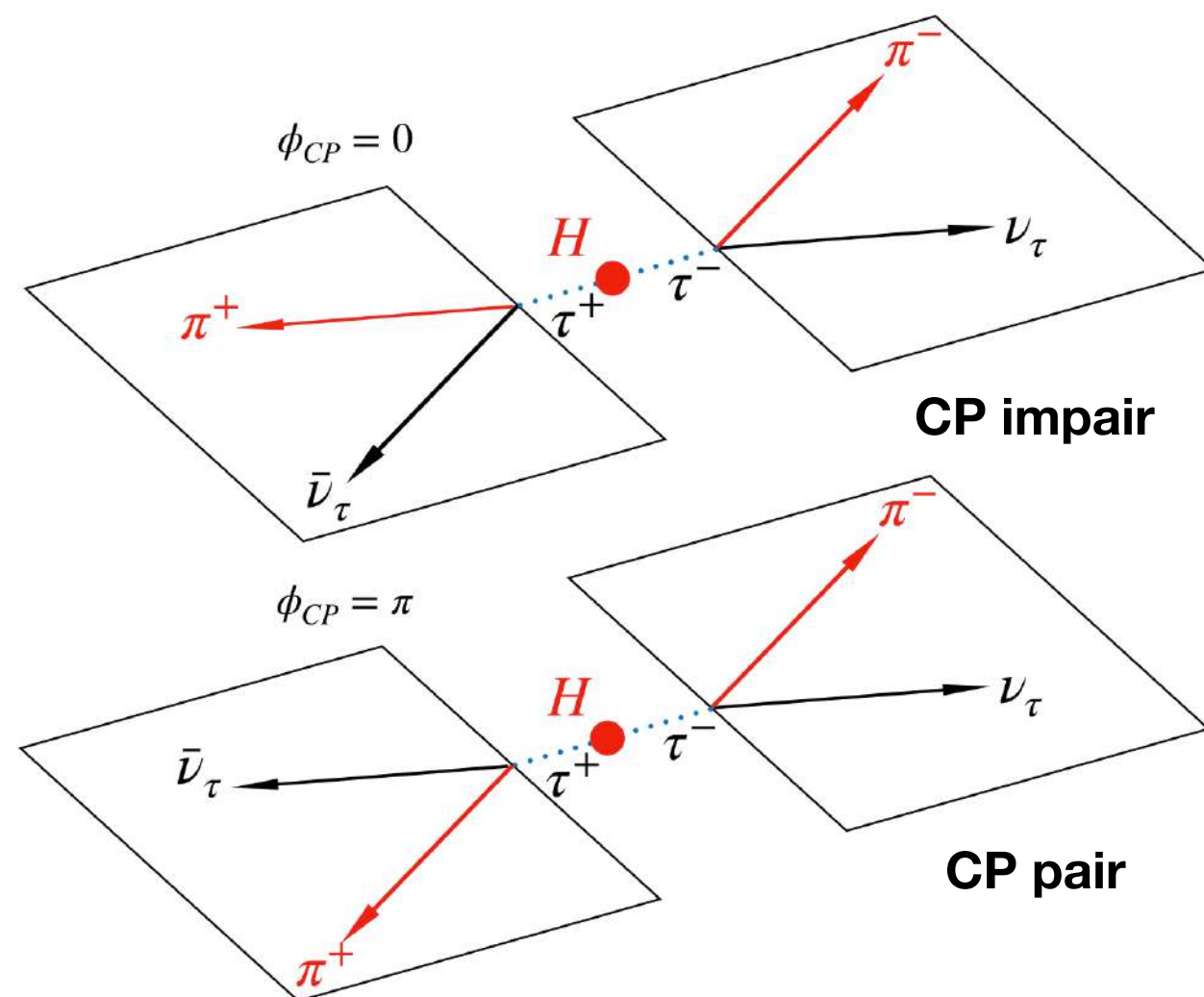
Stratégie



La **distribution de l'angle** entre les plans de désintégration des taus devrait présenter un maximum en $0 (2\pi)$ ou π **selon l'état CP**

L'**orientation spatiale** des produits de désintégration des **taus** est **sensible** à l'**état CP** du boson de Higgs

$$\Gamma(H \rightarrow \tau^+ \tau^-) \propto 1 - s_z^- s_z^+ \pm s_\perp^- s_\perp^+$$



Stratégie

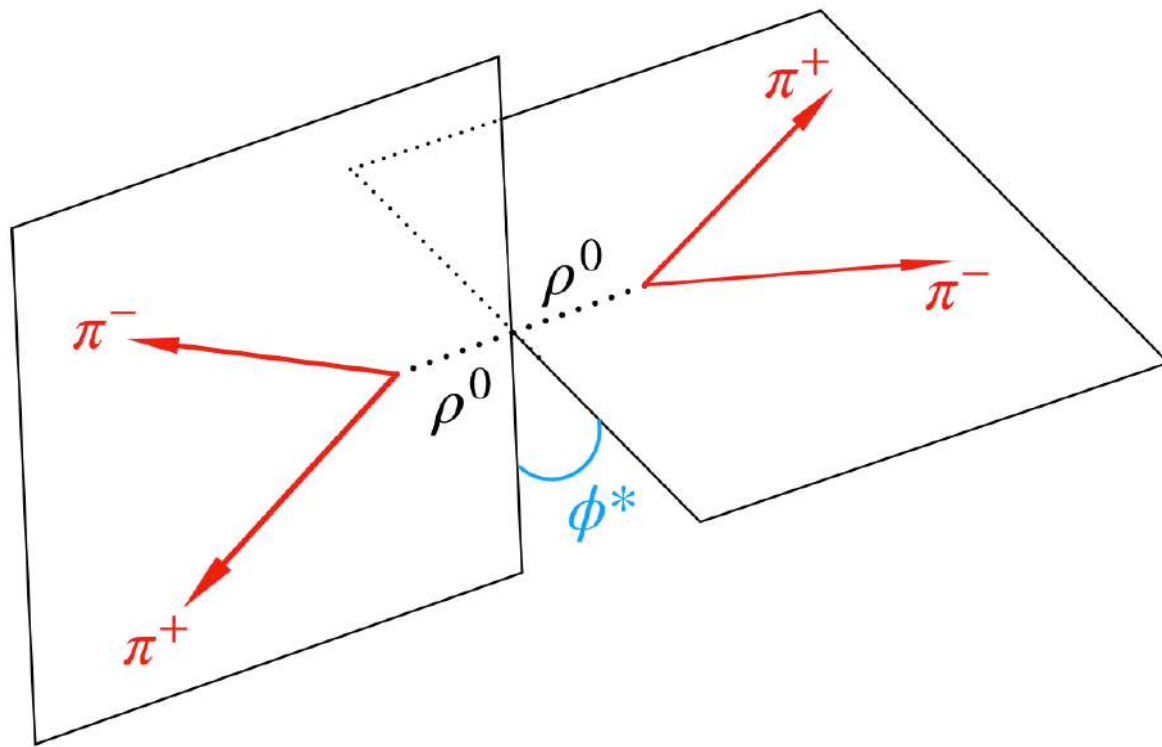
Decay mode	$\mathcal{B}$ [%]
$\tau^- \rightarrow e^- \bar{\nu}_e \nu_\tau$	17.8
$\tau^- \rightarrow \mu^- \bar{\nu}_\mu \nu_\tau$	17.4
All leptonic decays	35.2
$\tau^- \rightarrow h^- \nu_\tau$	11.5
$\tau^- \rightarrow \rho(770) \nu_\tau$	$\rho(770) \rightarrow h^- \pi^0 \nu_\tau$ 25.9
$\tau^- \rightarrow a_1(1260) \nu_\tau$	$a_1(1260)^{1\text{pr}} \rightarrow h^- \pi^0 \pi^0 \nu_\tau$ 9.5
	$a_1(1260)^{3\text{pr}} \rightarrow h^- h^+ h^- \nu_\tau$ 9.8
$\tau^- \rightarrow h^- h^+ h^- \pi^0 \nu_\tau$	4.8
Remaining hadronic decays	3.3
All hadronic decays	64.8

L'équipe strasbourgeoise est spécialisée dans le canal $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow a_1 a_1 (\nu\bar{\nu})$ notamment via la méthode dite du **vecteur polarimétrique**

Méthode **précise** mais **complexe** car nécessite la reconstruction **complète** de l'événement

Decay Plane Method

Mise en place de la Decay Plane Method dans le canal $\tau^\pm \rightarrow a_1^\pm(\nu/\bar{\nu}) \rightarrow \pi^\pm \rho^0 \rightarrow \pi^\pm \pi^\mp \pi^\pm$

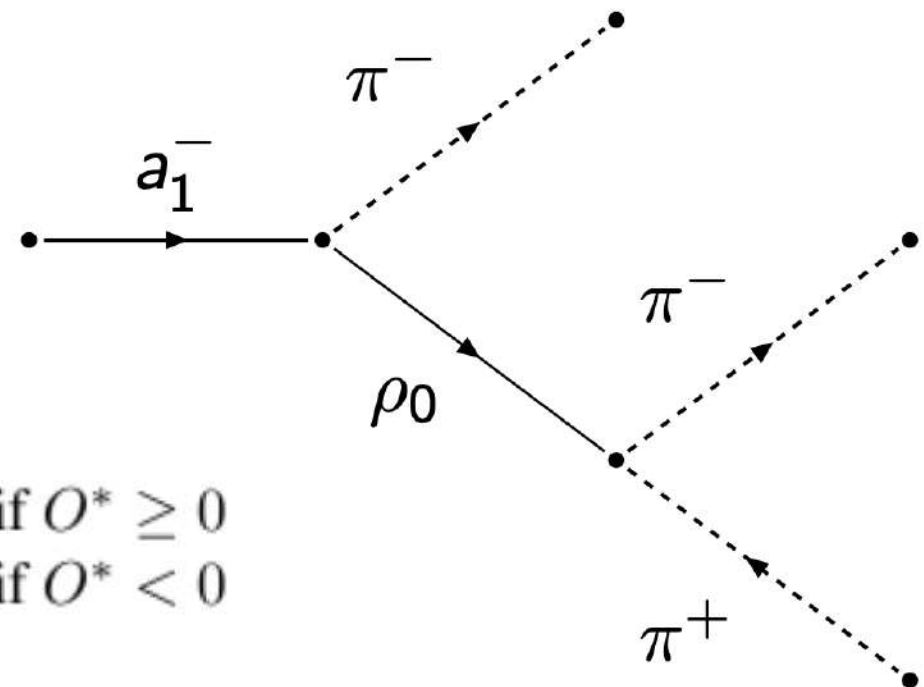


$$\phi^* = \arccos(\hat{\eta}_\perp^{*+} \cdot \hat{\eta}_\perp^{*-})$$

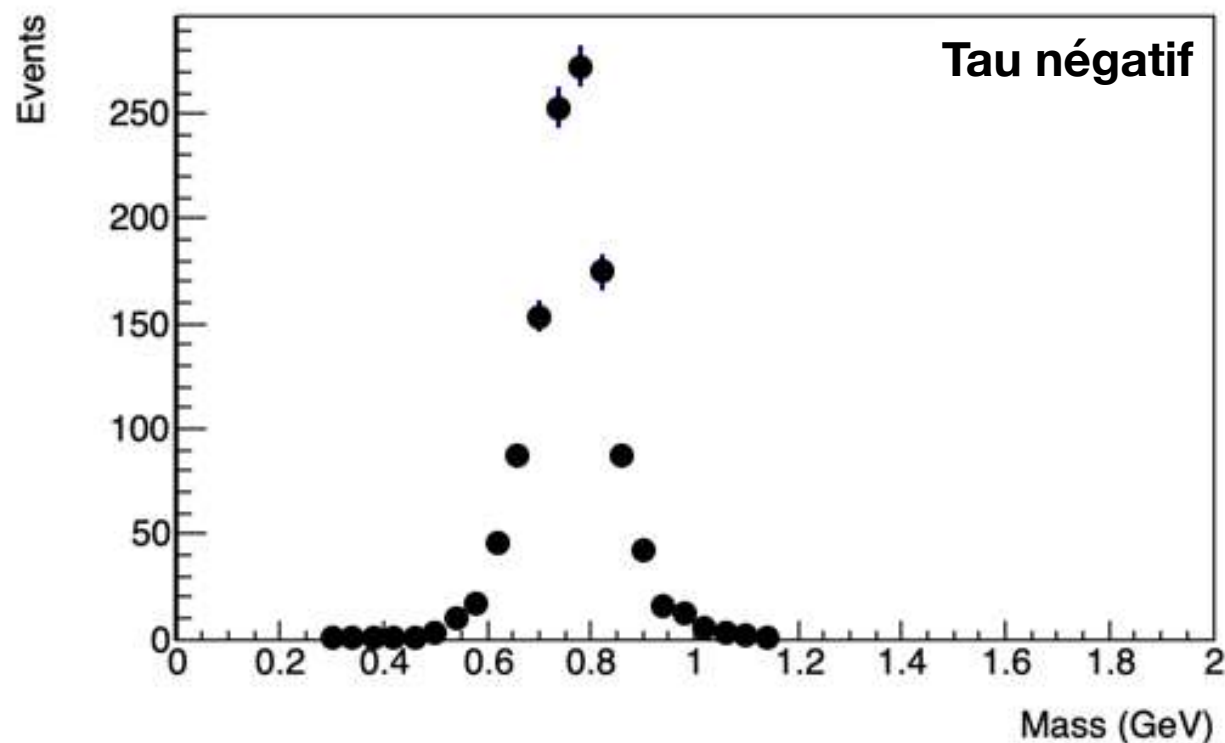
$$O^* = \hat{q}^{*-} \cdot (\hat{\eta}_\perp^{*+} \times \hat{\eta}_\perp^{*-}),$$

$$\phi_{CP} = \begin{cases} \phi^* & \text{if } O^* \geq 0 \\ 2\pi - \phi^* & \text{if } O^* < 0 \end{cases}$$

- Vecteur $\eta_\perp^*$ donné par la normale du plan contenant l'impulsion des deux pions
- Vecteur q^* donné par l'impulsion du pion chargé boosté dans le ZMF
- O^* permet de ramener ϕ_{CP} dans l'intervalle $[0, 2\pi]$

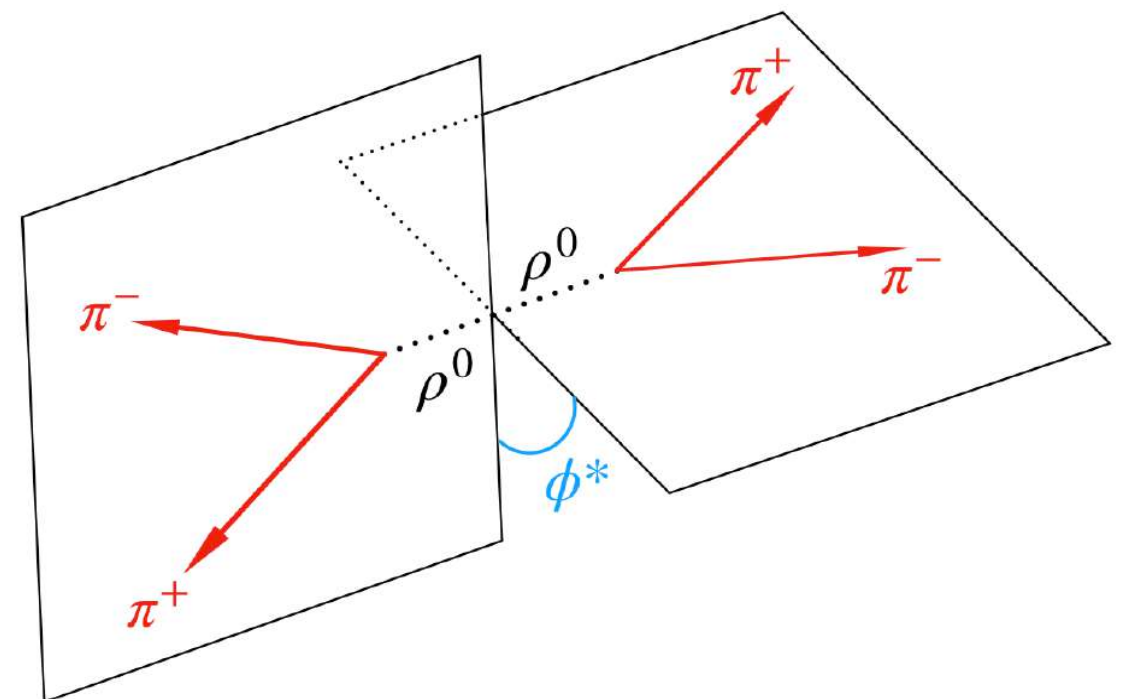
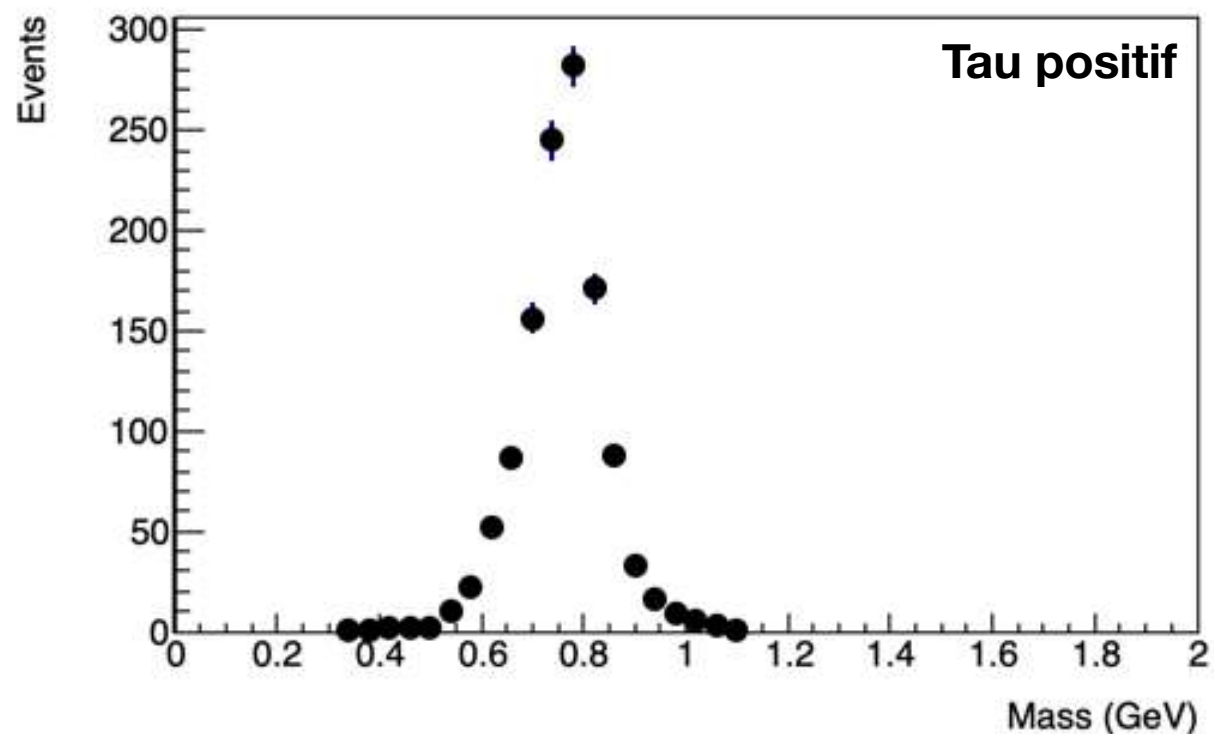


Mise en place



Première étape : vérification de la masse invariante des paires de pions reconstruites

$$m_{\rho^0} = 775.26 \pm 0.25 \text{ MeV (PDG 2018)}$$



Mise en place

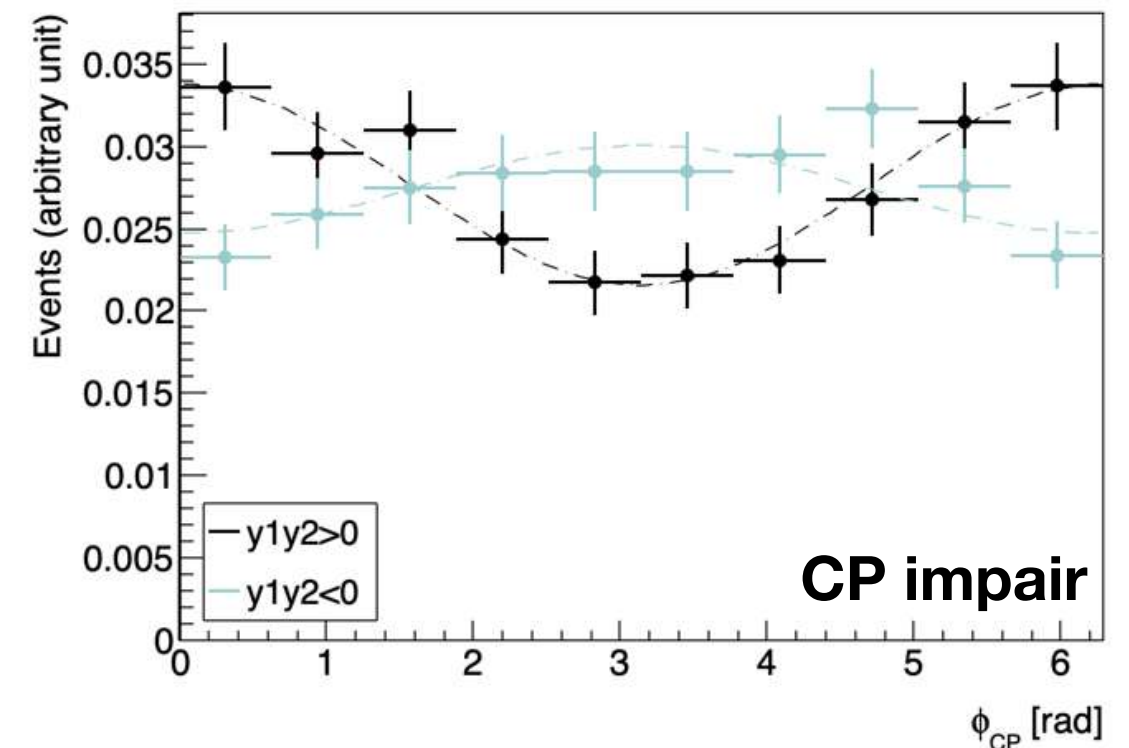
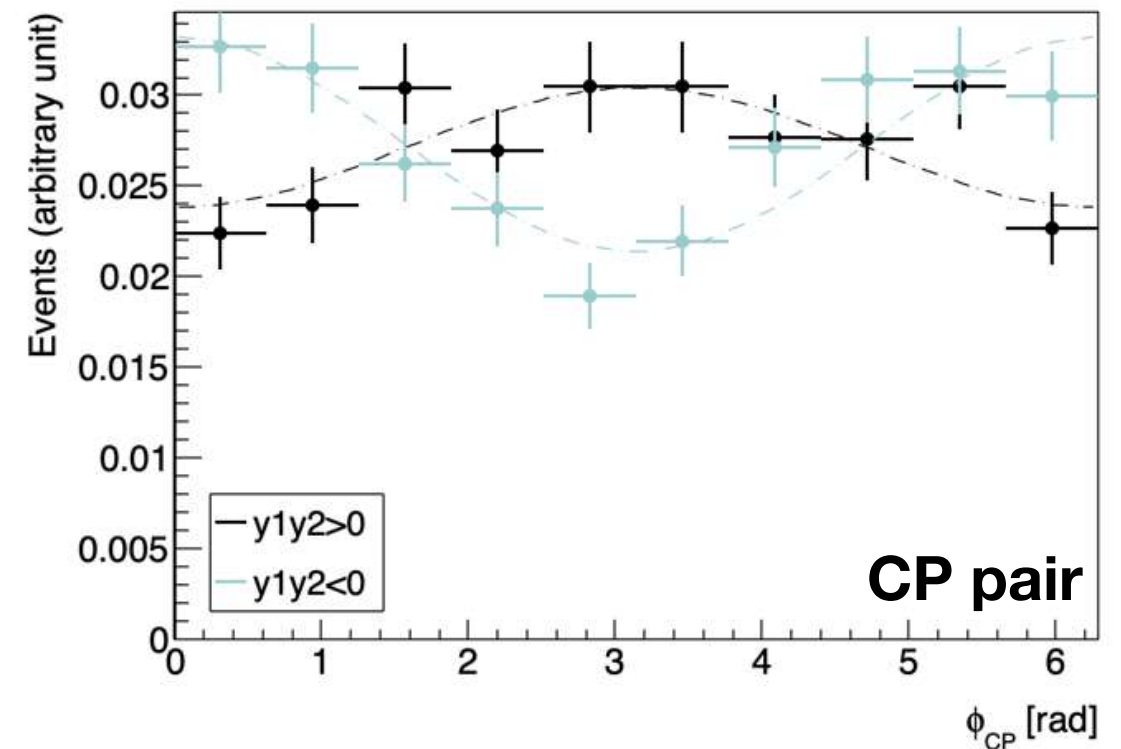
$$y^{\tau^-} = \frac{E_{\pi^-} - E_{\pi^+}}{E_{\pi^-} + E_{\pi^+}}, \quad y^{\tau^+} = \frac{E_{\pi^+} - E_{\pi^-}}{E_{\pi^+} + E_{\pi^-}},$$

$$y^{\tau} = y^{\tau^-} y^{\tau^+}$$

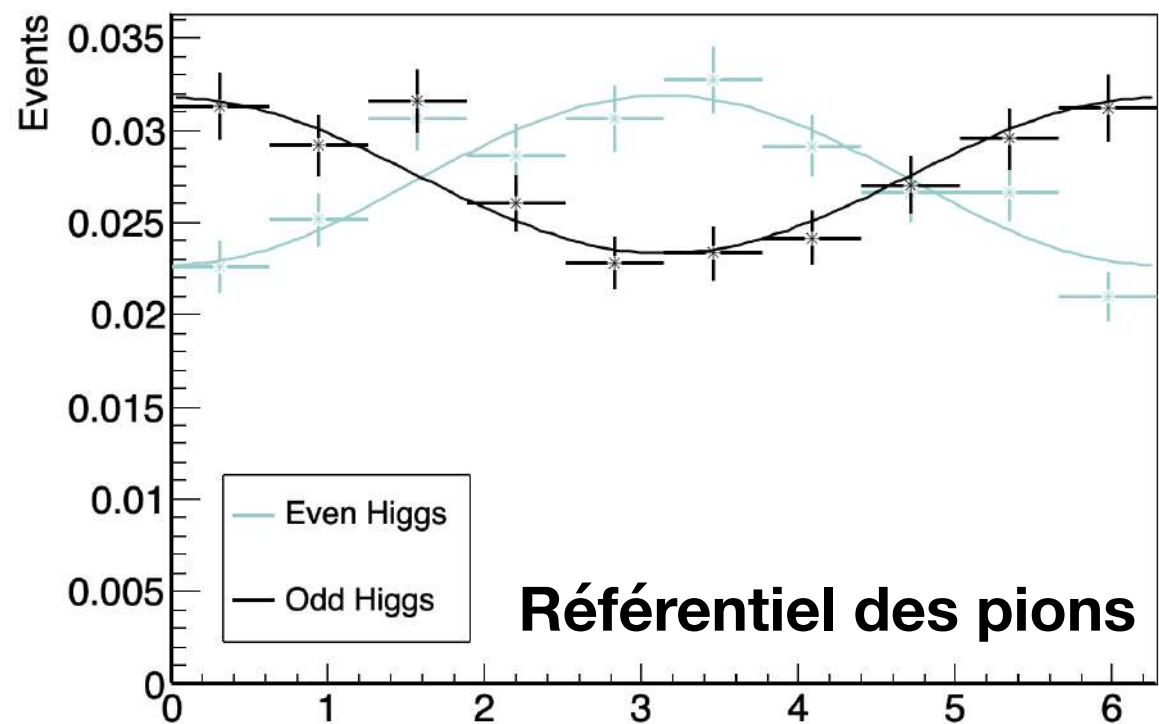
si y^{τ} négatif :
polarisation
des rhos
différente

$$\phi_{CP} = 2\pi - \phi_{CP}$$

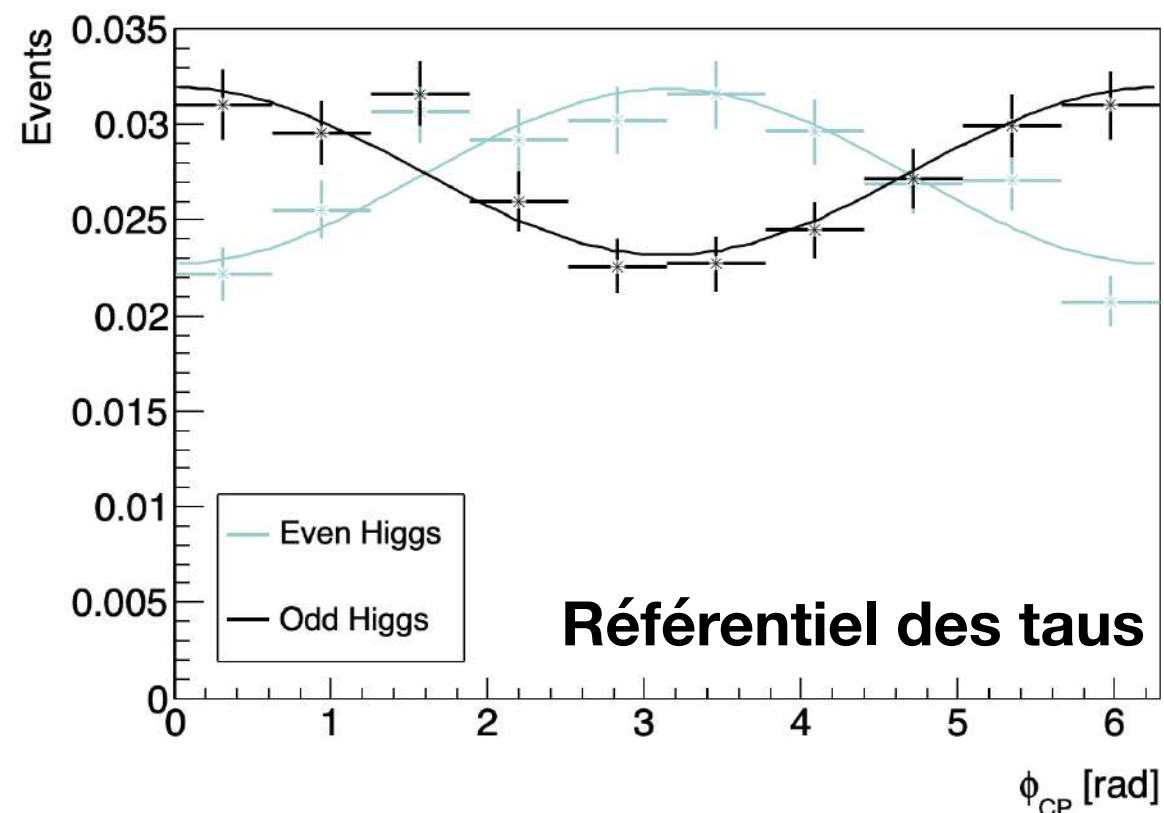
Permet d'obtenir des états
de polarisation identiques



Mise en place

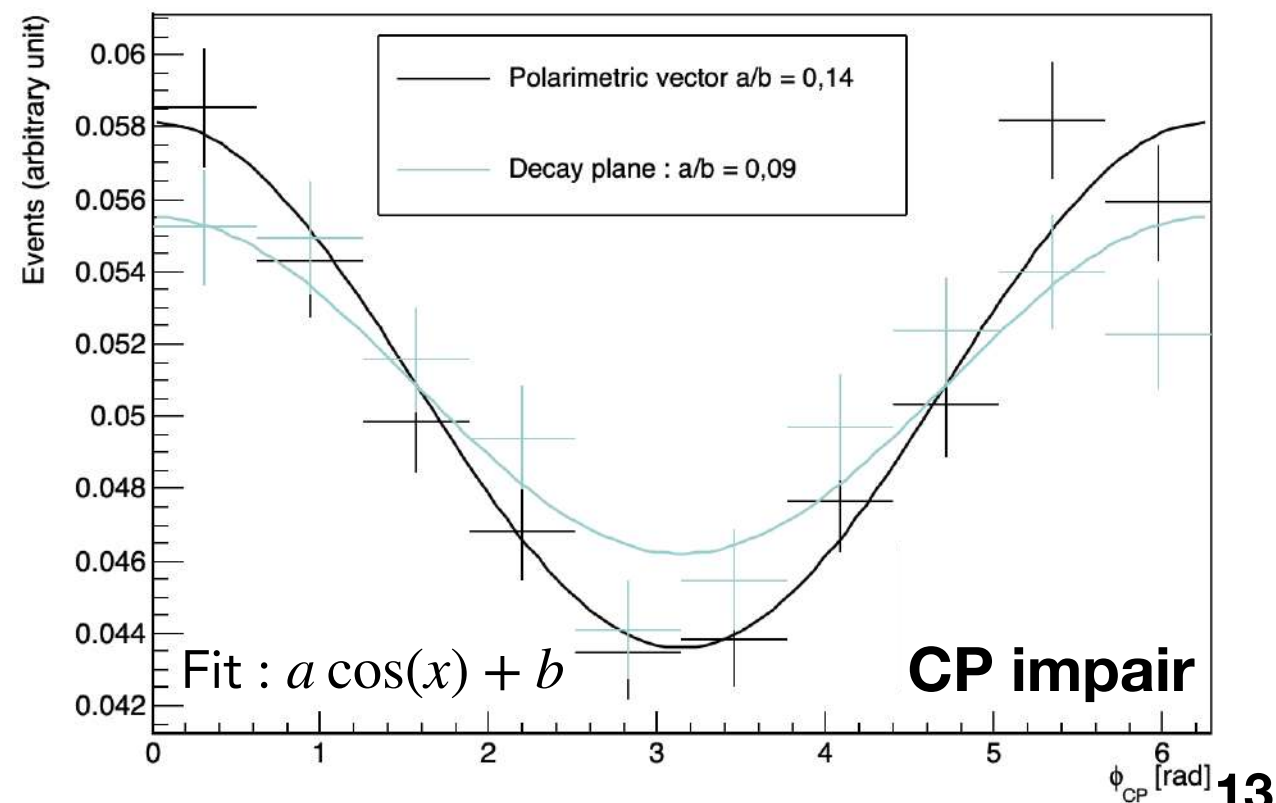
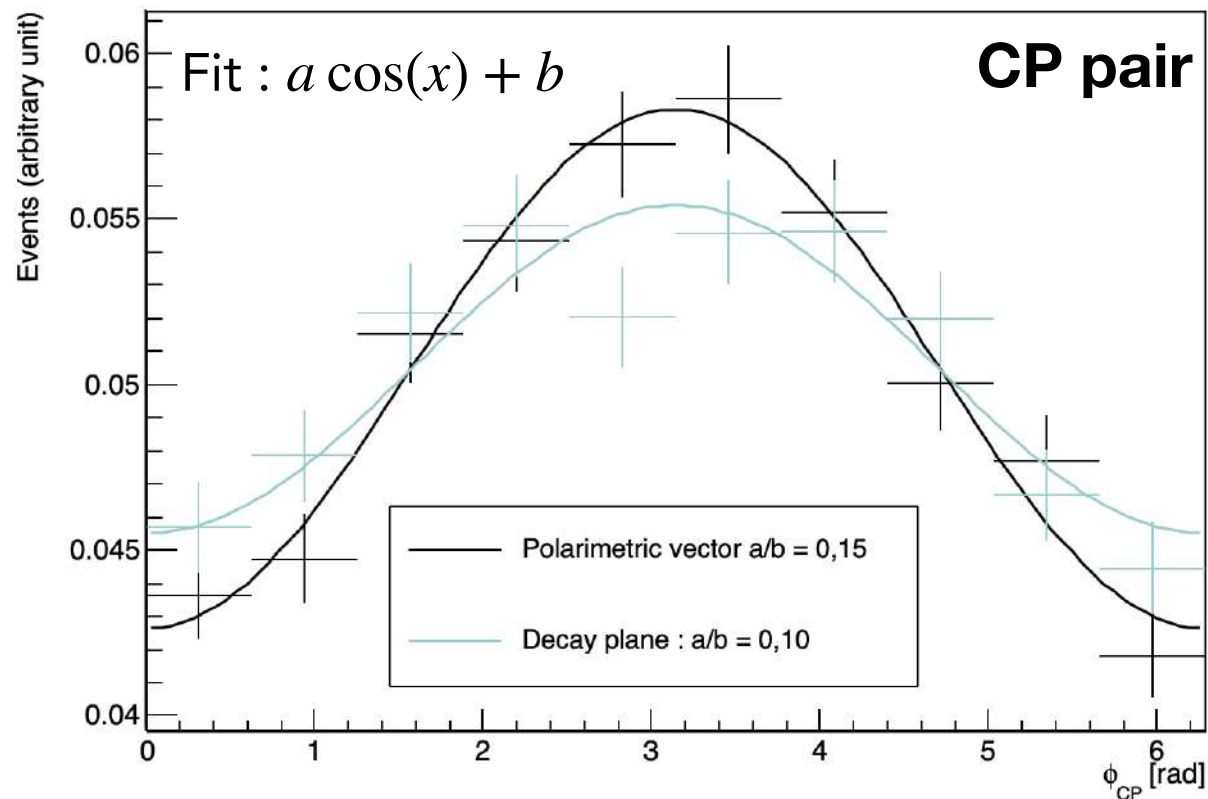


Le niveau reconstruit prend en compte la **géométrie** et les **défauts** du détecteur CMS et les **algorithmes** de reconstruction des particules



Aucune différence notable lorsque le référentiel des taus est utilisé comme ZMF

Résultats



Comparaison de la
decay plane method et
de la méthode du
vecteur polarimétrique

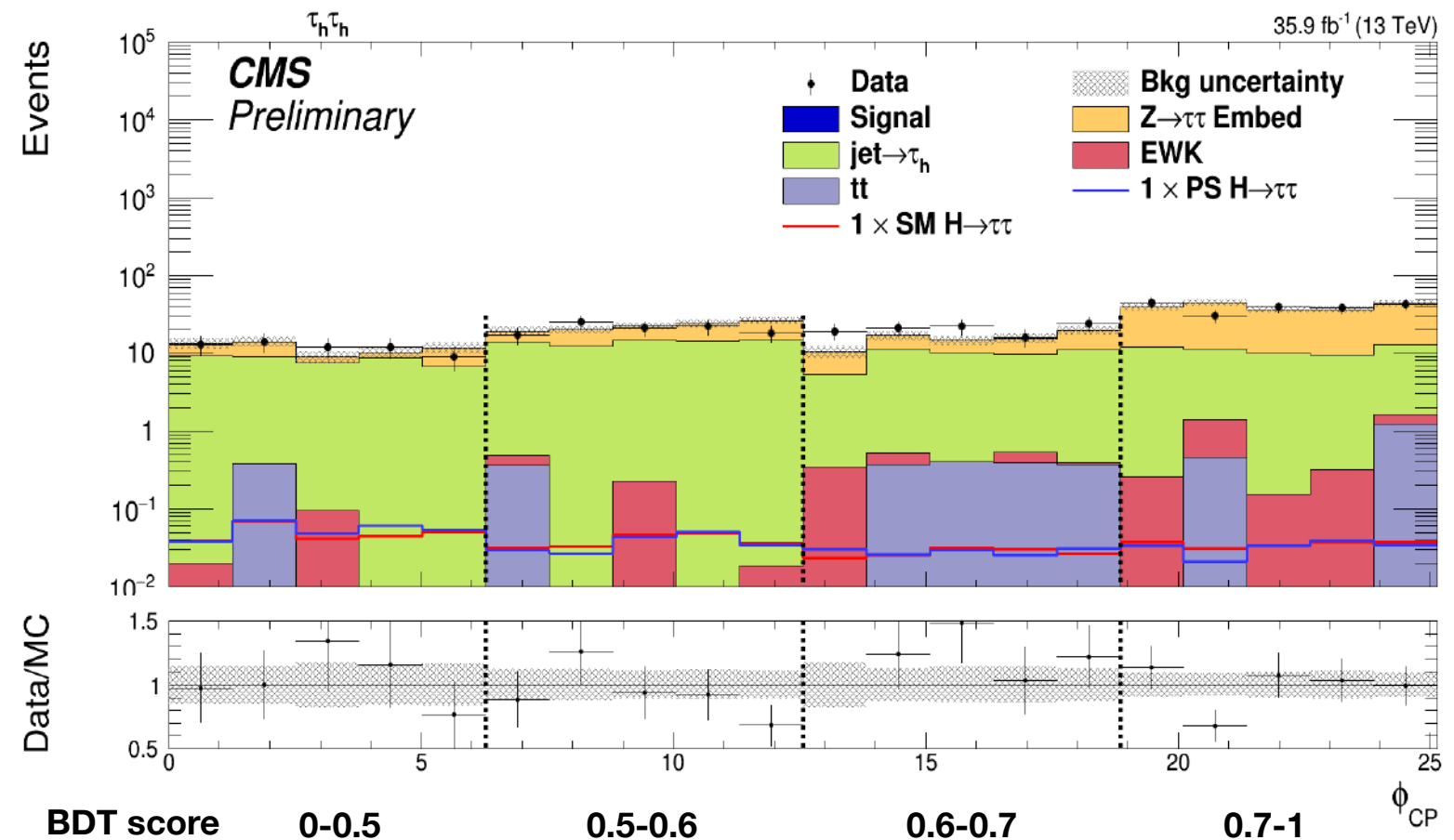
Comme **attendu** la méthode du
vecteur polarimétrique offre une
meilleure **amplitude de signal**

Dans les **deux cas** : existence
d'une observable permettant de
séparer les deux états

Résultats

Plus de la moitié du **Run II** est déjà analysée (**2016 + 2017**)

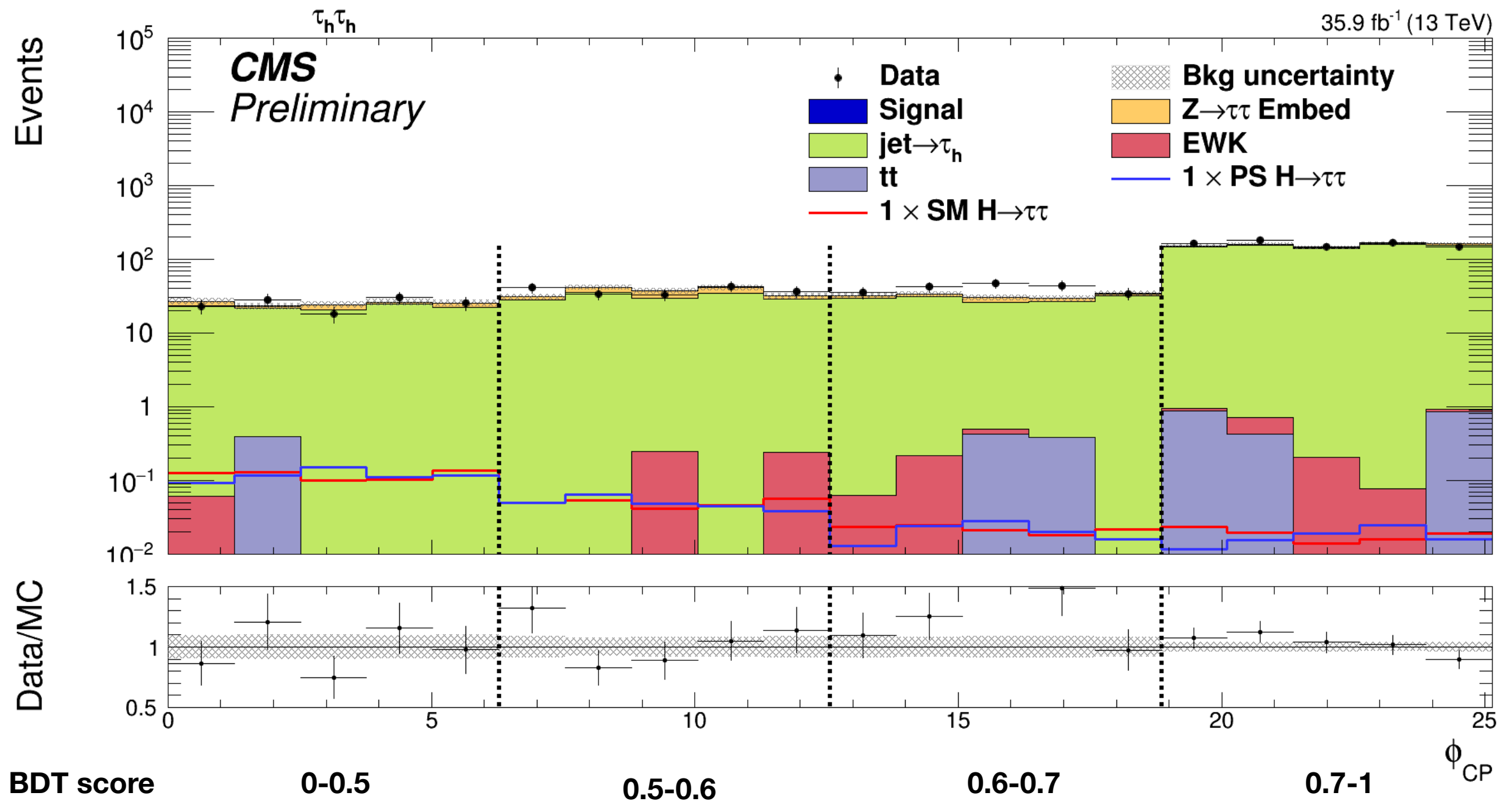
Les résultats montrent un **très bon accord** entre les **données** et le **bruit de fond** estimé



	2016	2017
Decay Plane	0.06 σ	0.05 σ
Polarimetric vector	0.12 σ	0.13 σ

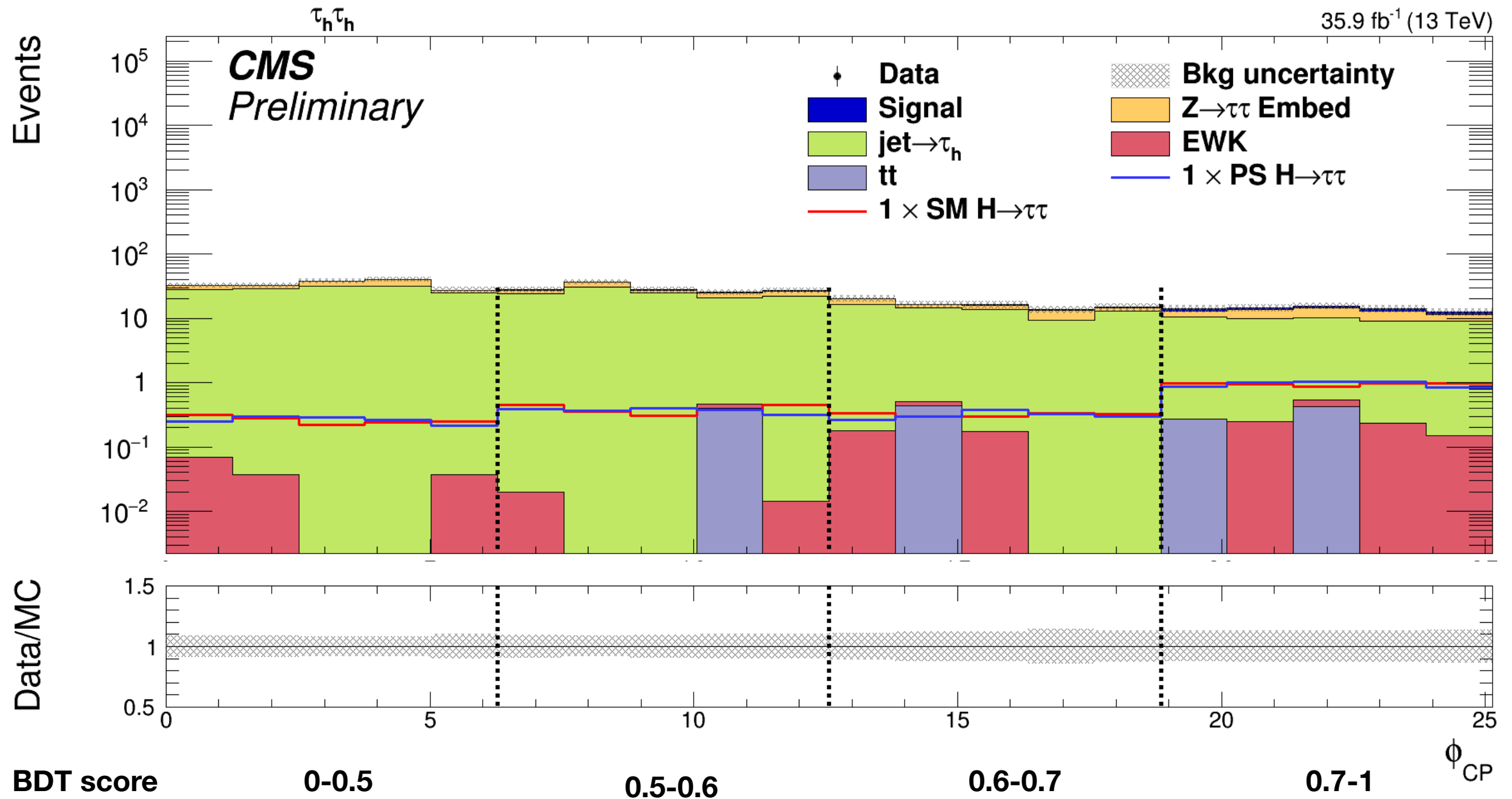
Comparaison de la **sensibilité** ("pouvoir séparateur") obtenue pour chaque méthode, calculée avec les **outils de CMS**

Résultats



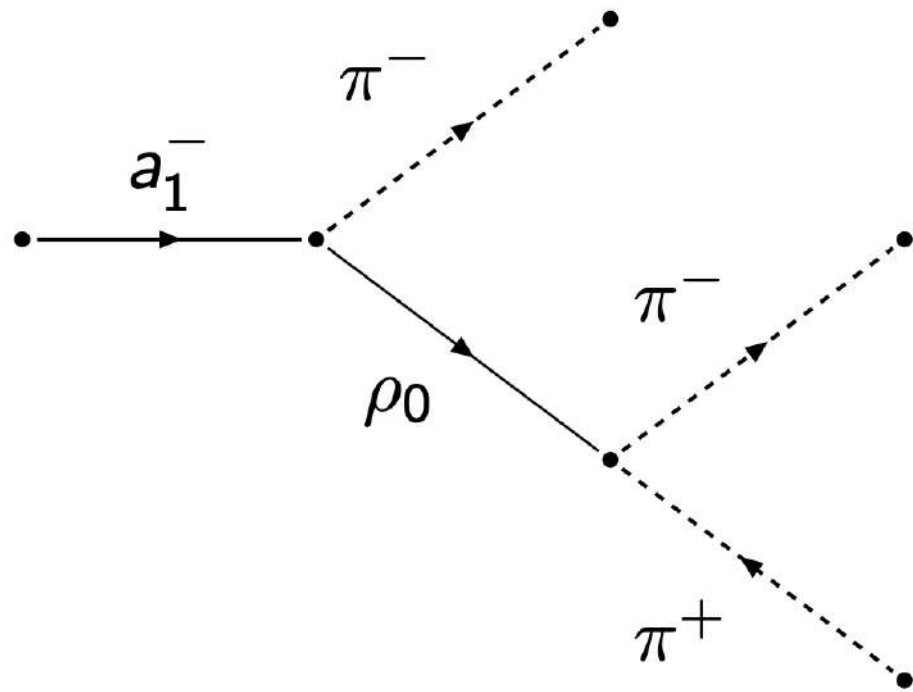
Région enrichie en événements $jet \rightarrow \tau_h$

Résultats



Région enrichie en événements Higgs

Application au plan a_1



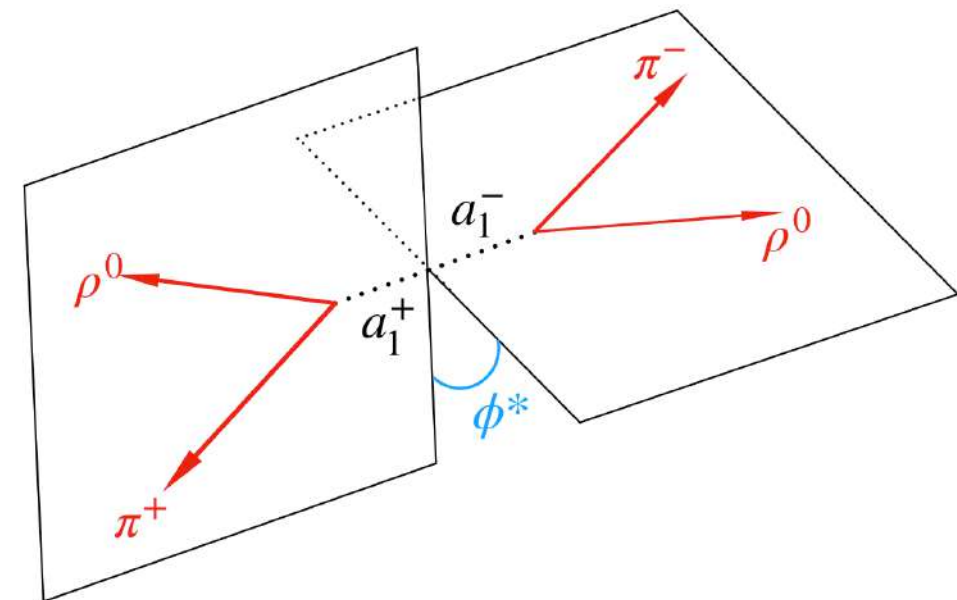
Même principe que précédemment en utilisant le **pion chargé** du a_1 et la **résonance rho**

Idée : utiliser le plan de désintégration du a_1 pour intégrer **plus d'information**. Meilleure sensibilité ?

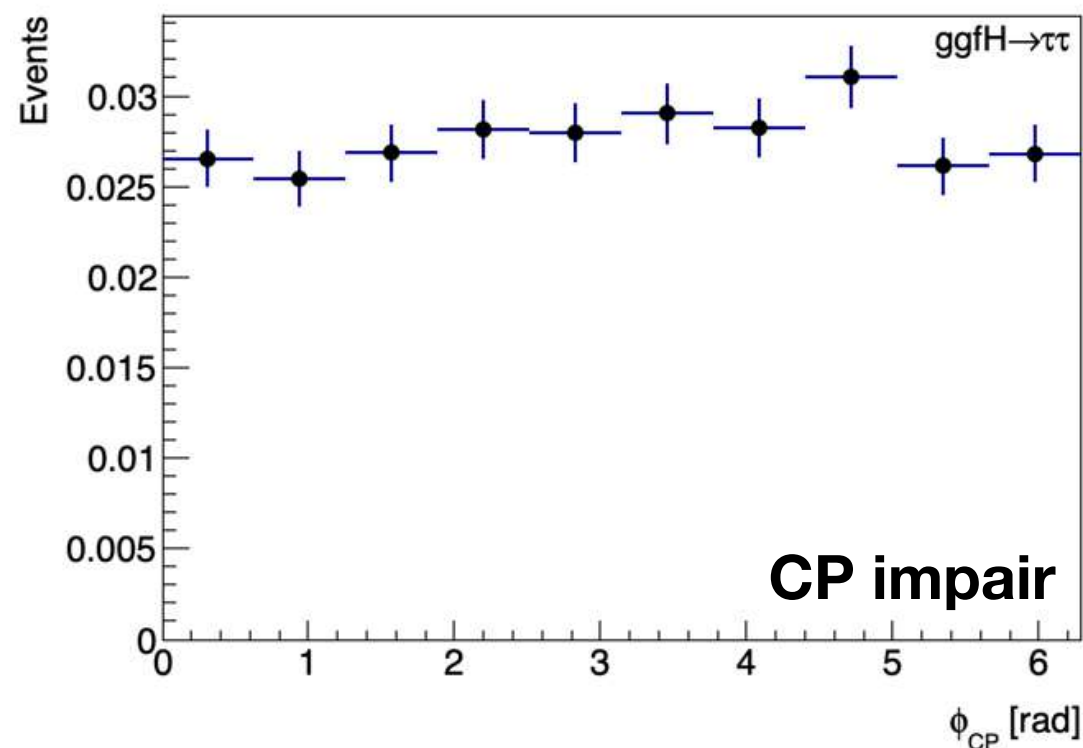
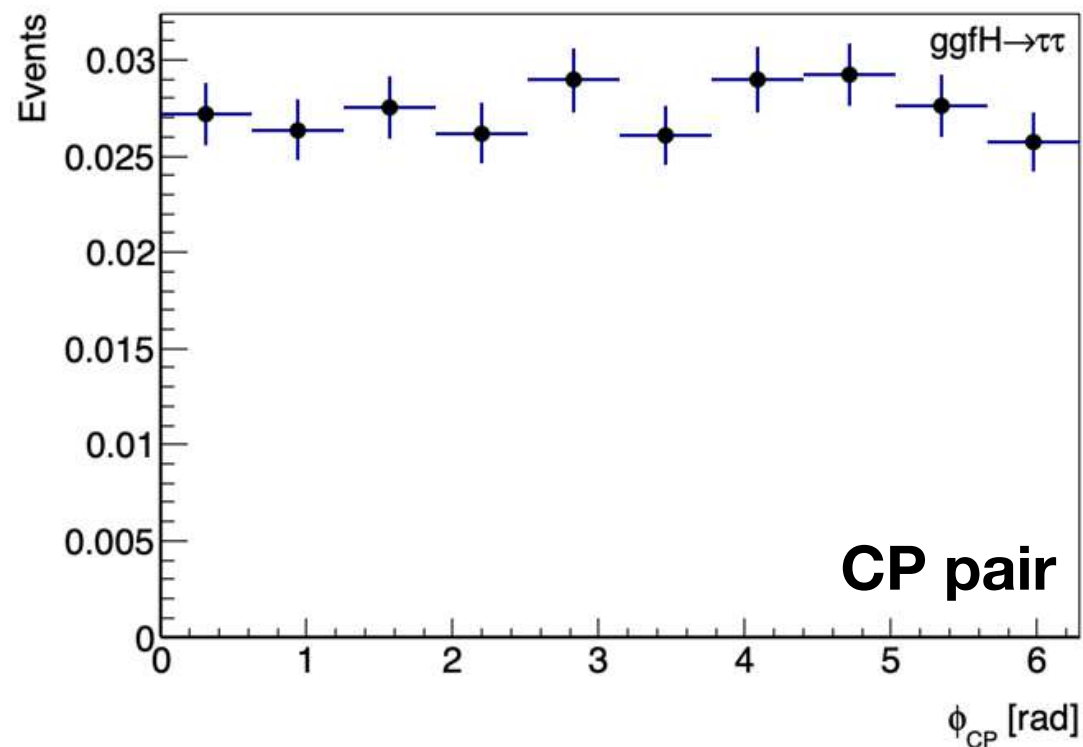
$$y^{\tau^-} = \frac{E_{\pi^-} - E_{\rho^0}}{E_{\pi^-} + E_{\rho^0}},$$

$$y^{\tau^+} = \frac{E_{\pi^+} - E_{\rho^0}}{E_{\pi^+} + E_{\rho^0}},$$

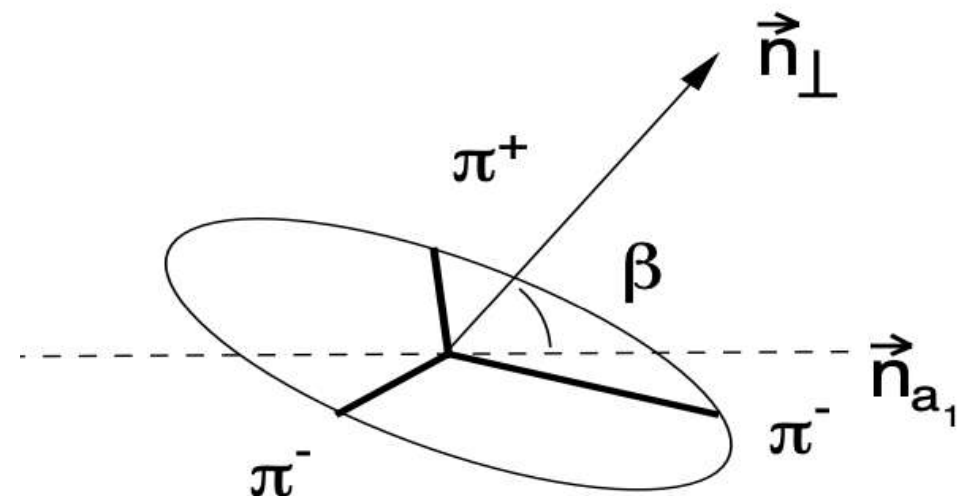
$$y^\tau = y^{\tau^-} y^{\tau^+}$$



Application au plan a_1

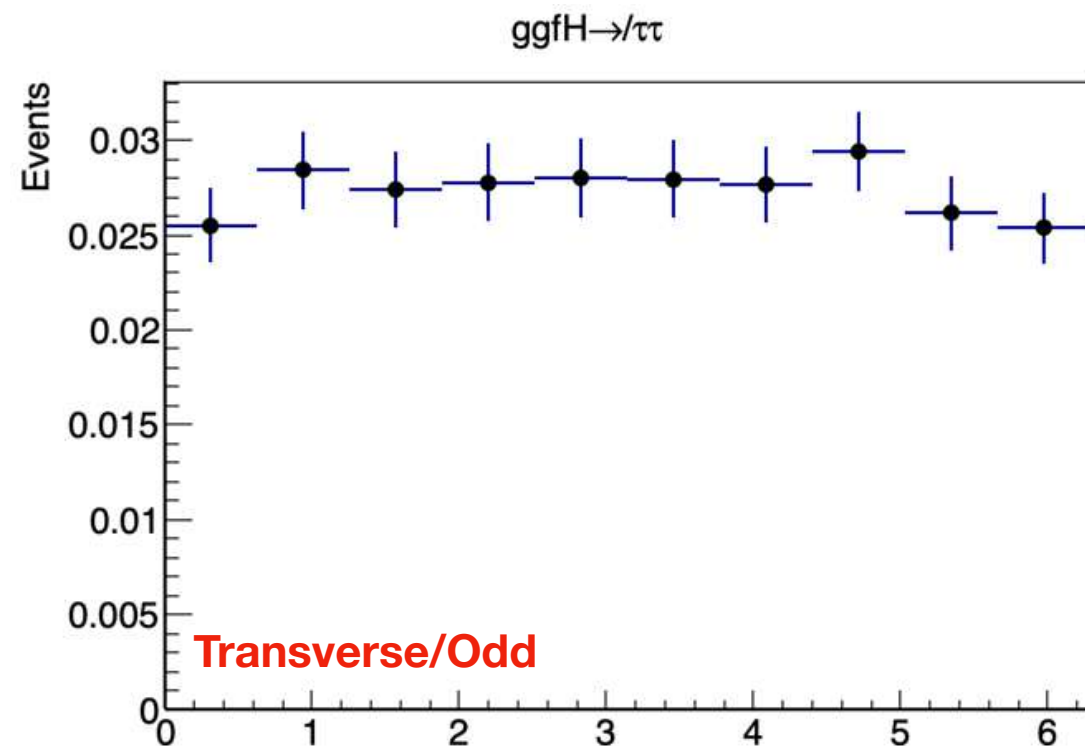
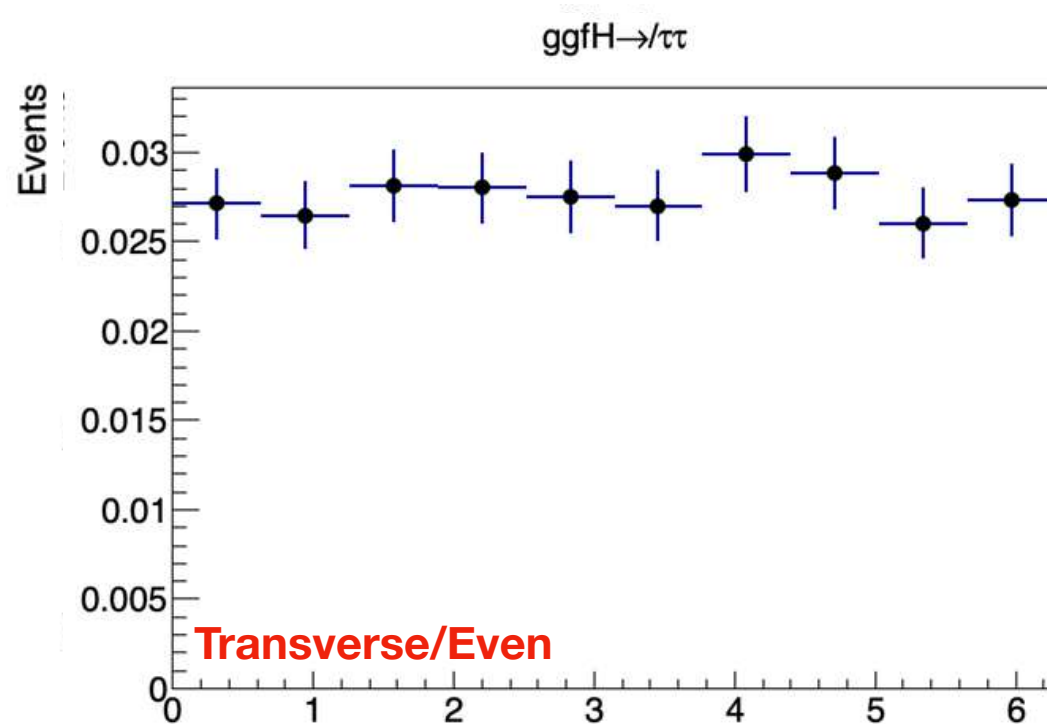
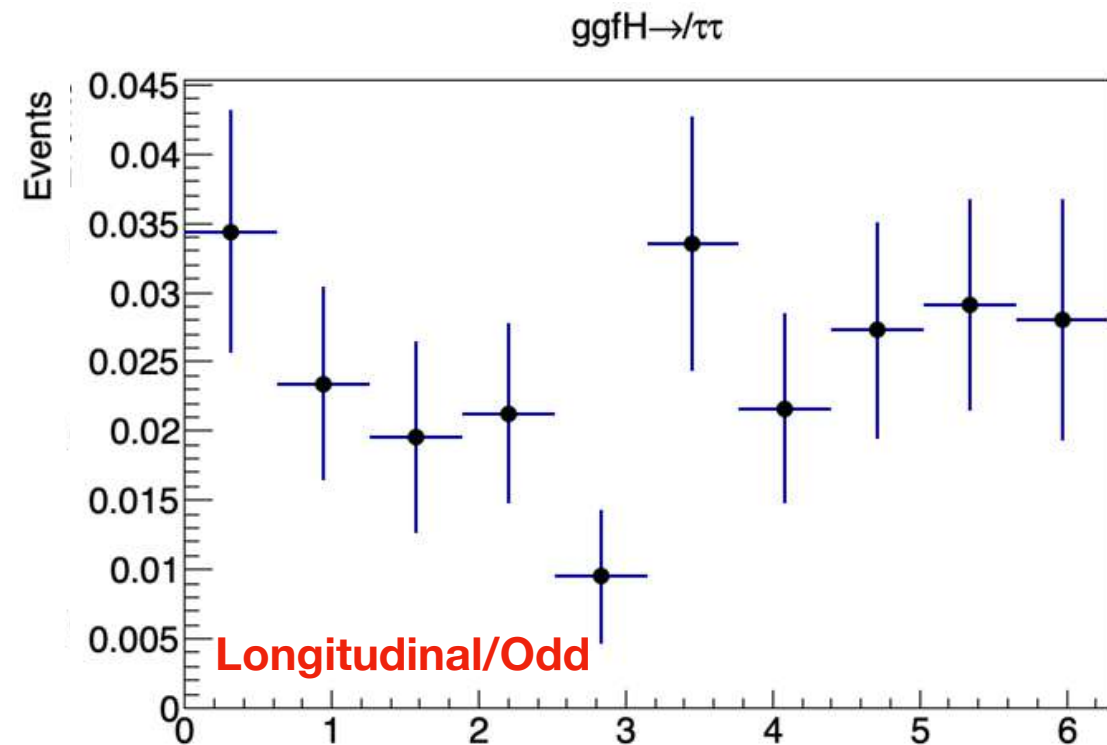
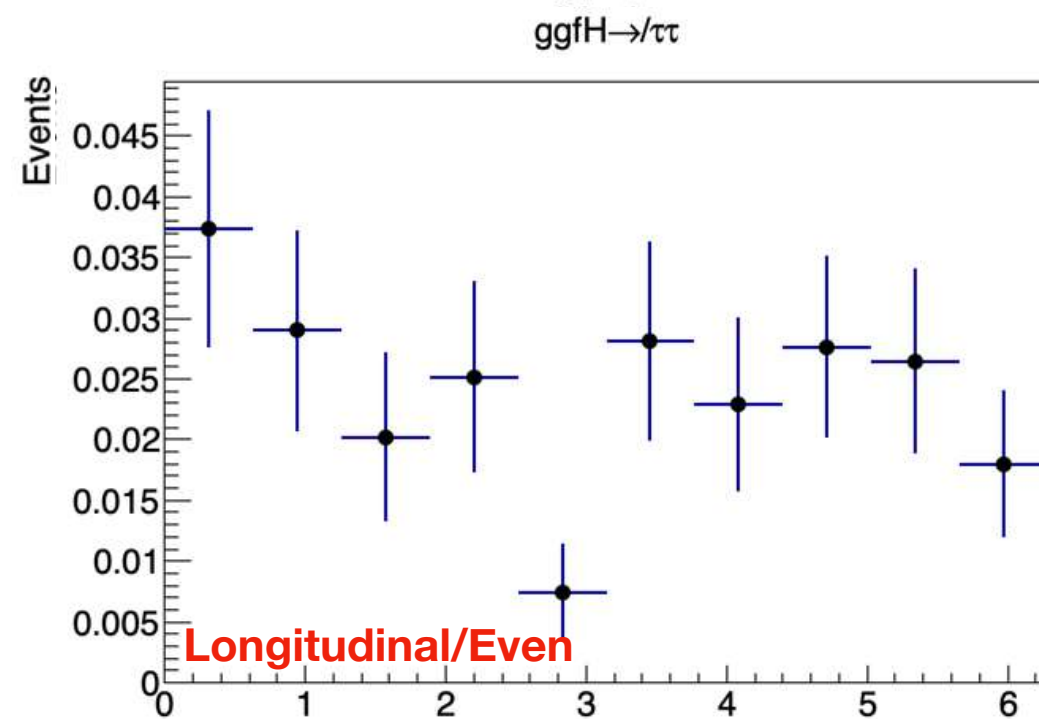


Pas de séparation des états : la variable y n'est pas adaptée à la polarisation du a_1



- Petit β : polarisation transverse
- Grand β : polarisation longitudinale

Application au plan a_1

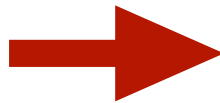


Conclusion

Dans le modèle standard le boson de Higgs est **purement scalaire**

Découvrir un état non purement scalaire
représenterait :

- Des implications en cosmologie
- Une porte vers de la nouvelle physique

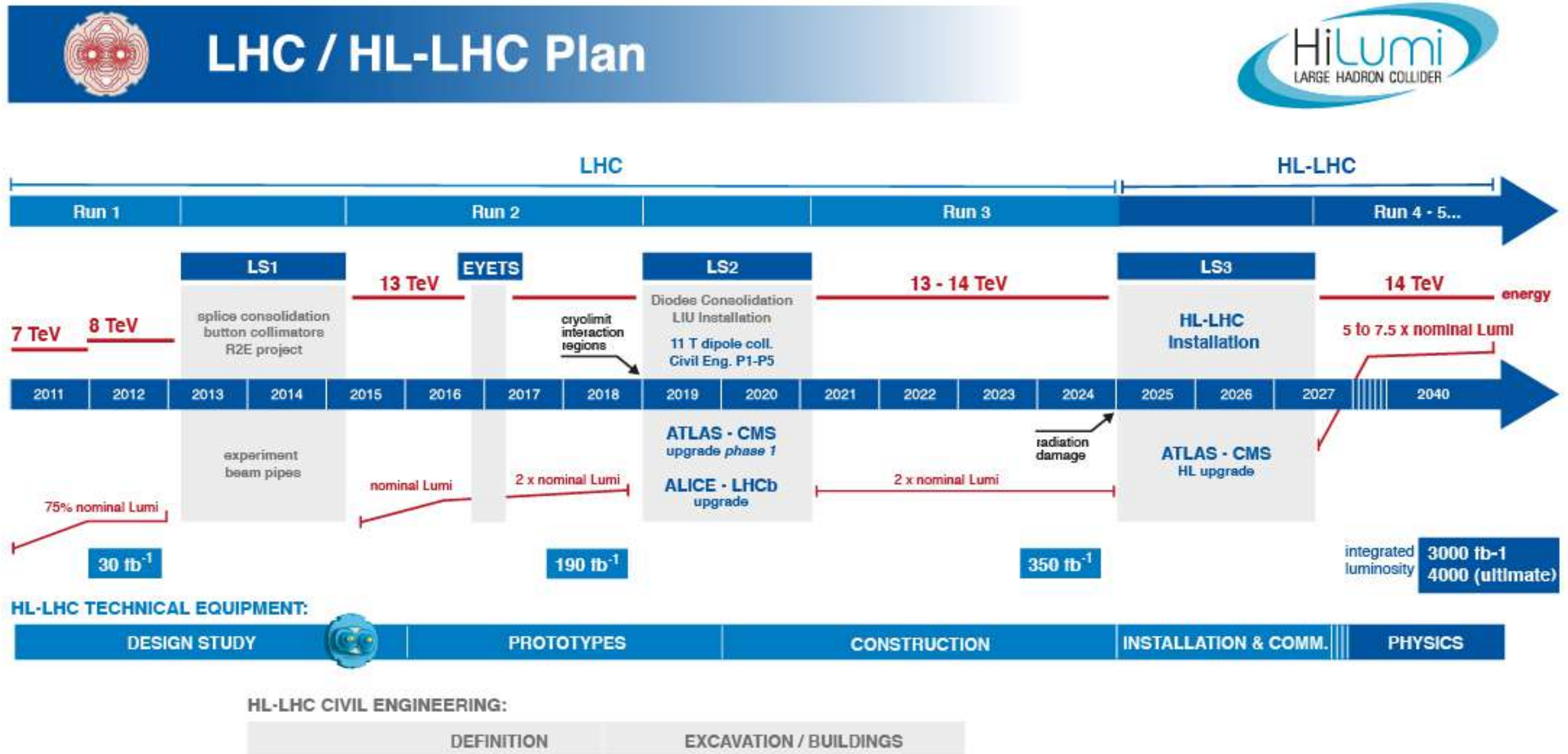
Plus de statistiques à prévoir
dans les **prochaines phases** du LHC (Run III, HL-LHC) 

Ces travaux **préparent** et **valident**
les **méthodes** qui seront employées
dans le **futur**

Les résultats de la **decay plane method** laissent envisager
son utilisation dans d'autres **canaux**, ex : $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow a_1\rho$

Backup

Programme LHC/HL-LHC



Sensibilité

Calcul de la vraisemblance :

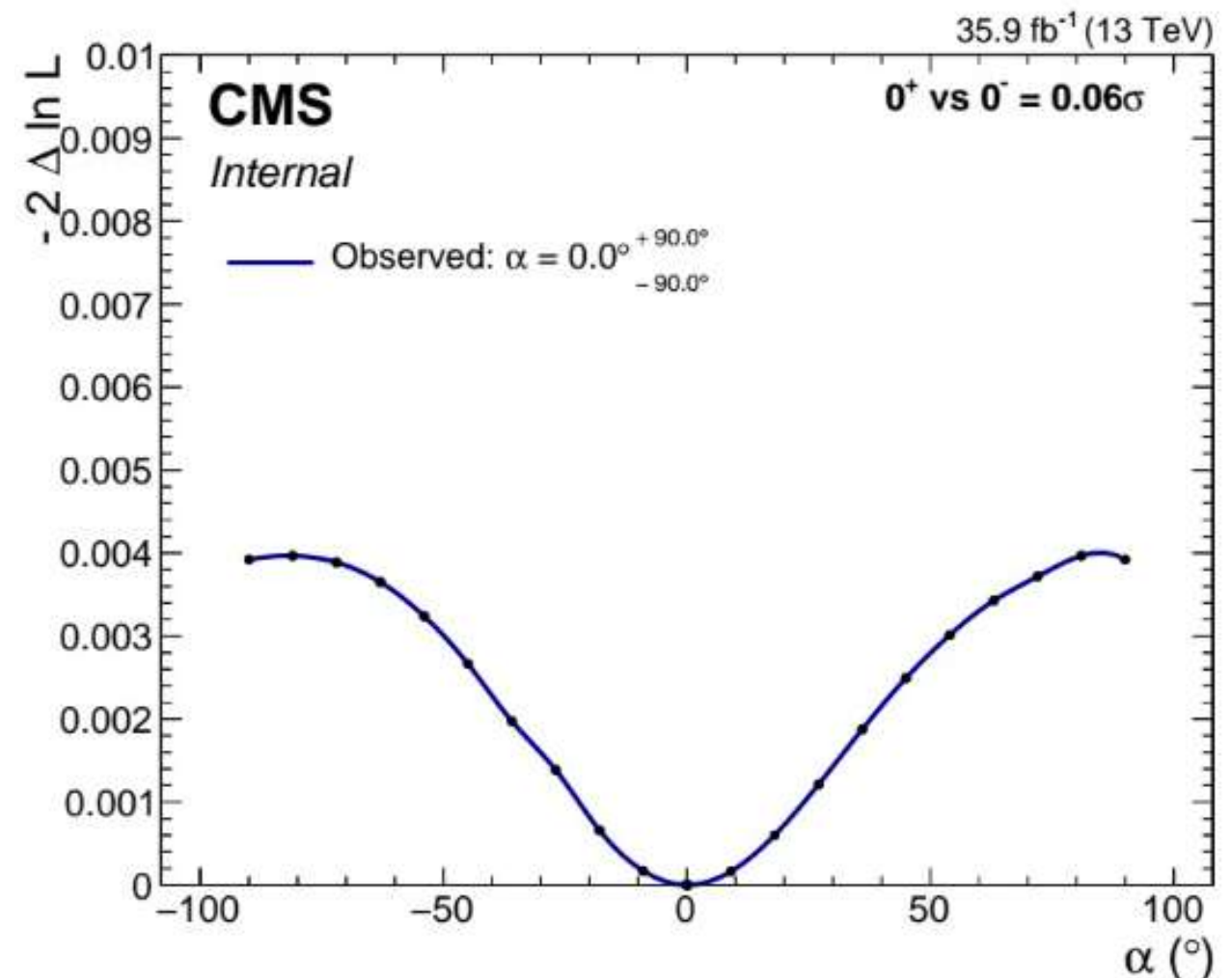
$$L(\vec{\sigma}, \mathcal{B}^{\tau\bar{\tau}}, \phi_{\tau\bar{\tau}}, \vec{\theta}) = \prod_j^{N_{\text{categories}}} \prod_i^{N_{\text{bin}}} P(n_{i,j} | \mathcal{L} \cdot \vec{\sigma} \cdot \mathcal{B}^{\tau\bar{\tau}} \cdot \vec{A}_{i,j}(\vec{\theta}, \phi_{\tau\bar{\tau}}) + B_{i,j}(\vec{\theta})) \times \prod_m^{N_{\text{nuisance}}} C_m(\vec{\theta})$$

$$-2\Delta \ln L = -2 \cdot \left(\ln(L\phi_{\tau\bar{\tau}}) - \ln(L\phi_{\tau\bar{\tau}}^{\text{best fit}}) \right),$$

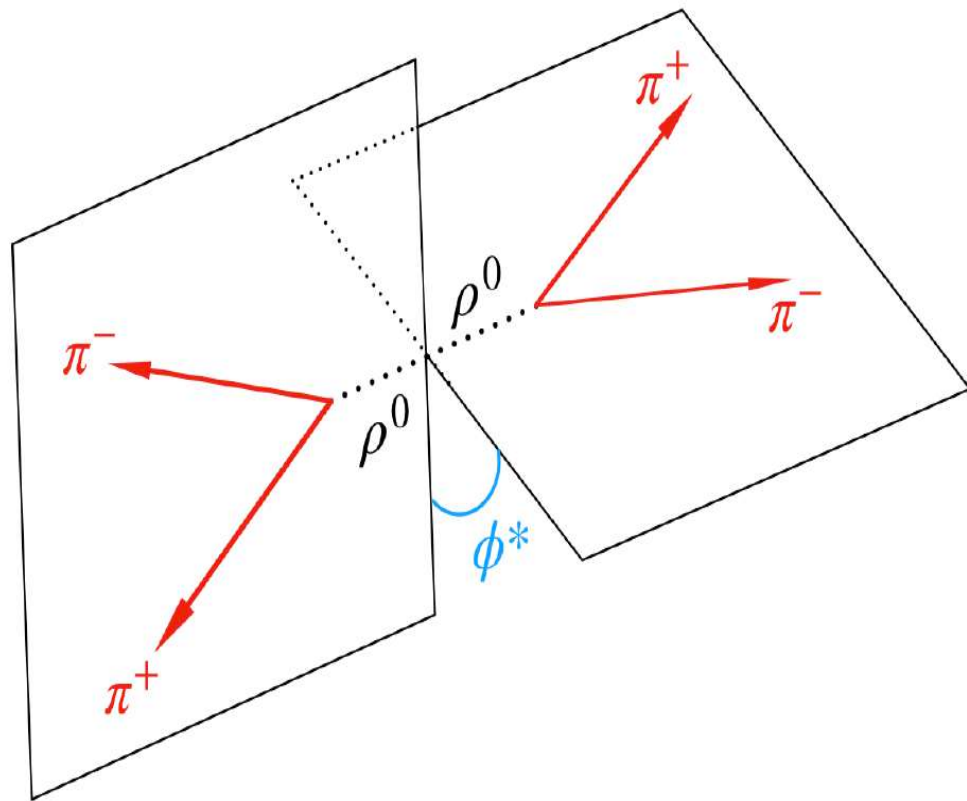
La convergence de la courbe donne la valeur de Φ_τ mesurée

$$1\sigma \equiv -2\Delta \ln L = 1$$

$$2\sigma \equiv -2\Delta \ln L = 4$$



Decay Plane Method



$$\phi^* = \arccos(\hat{\eta}_{\perp}^{*+} \cdot \hat{\eta}_{\perp}^{*-})$$

$$O^* = \hat{q}^{*-} \cdot (\hat{\eta}_{\perp}^{*+} \times \hat{\eta}_{\perp}^{*-}), \quad \phi_{CP} = \begin{cases} \phi^* & \text{if } O^* \geq 0 \\ 2\pi - \phi^* & \text{if } O^* < 0 \end{cases}$$

- $\eta_{\perp}^*$ donné par la normale du plan contenant l'impulsion des deux pions boostée dans le ZMF
- q^* donné par l'impulsion du pion chargé boostée dans le ZMF

$$y^{\tau^-} = \frac{E_{\pi^-} - E_{\rho^0}}{E_{\pi^-} + E_{\rho^0}},$$

$$y^{\tau^+} = \frac{E_{\pi^+} - E_{\rho^0}}{E_{\pi^+} + E_{\rho^0}},$$

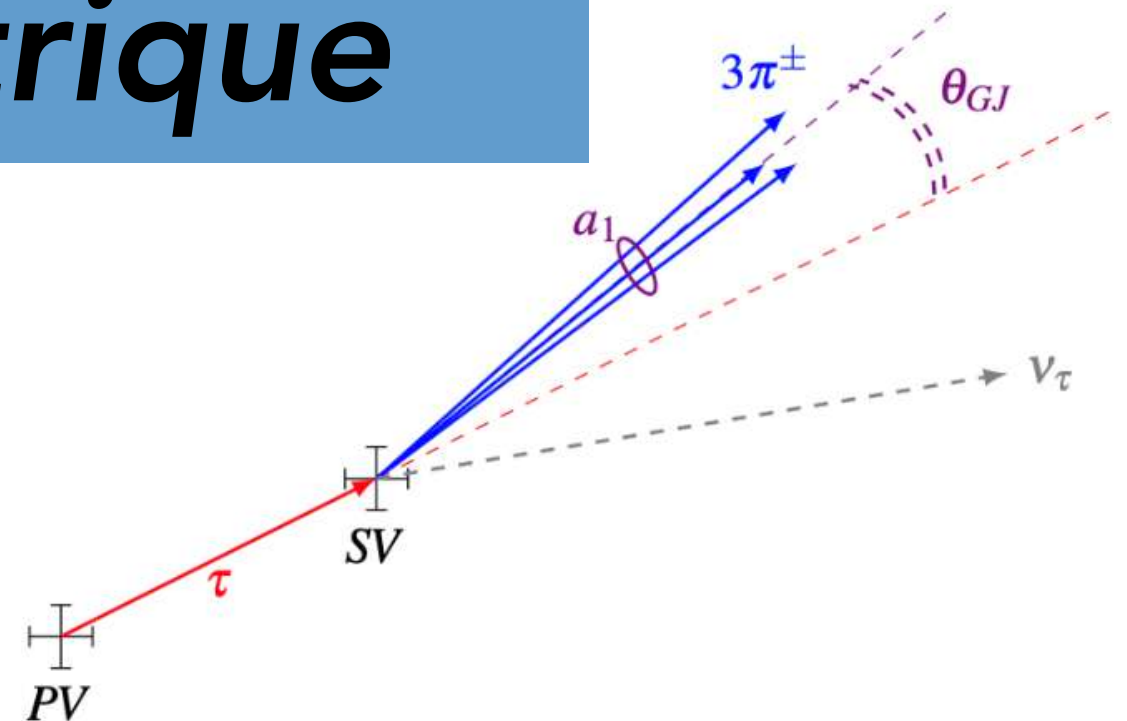
$$y^{\tau} = y^{\tau^-} y^{\tau^+}$$



si y^{τ} négatif, $\phi_{CP} = 2\pi - \phi_{CP}$

Vecteur polarimétrique

Le vecteur polarimétrique h est donné par la **direction la plus probable du spin du tau** dans son référentiel au repos



$$|\vec{p}_\tau|(m_{a_1}, |\vec{p}_{a_1}|, \theta_{GJ}) = \frac{(m_{a_1}^2 + m_\tau^2)|\vec{p}_{a_1}| \cos \theta_{GJ} \pm \sqrt{(m_{a_1}^2 + \vec{p}_{a_1}^2)[(m_{a_1}^2 - m_\tau^2)^2 - 4m_\tau^2 \vec{p}_{a_1}^2 \sin^2 \theta_{GJ}]}}{2(m_{a_1}^2 + \vec{p}_{a_1}^2 \sin^2 \theta_{GJ})},$$

$$\text{acos } \phi = \frac{\vec{k}_1 \cdot \vec{k}_2}{|\vec{k}_1 \cdot \vec{k}_2|},$$

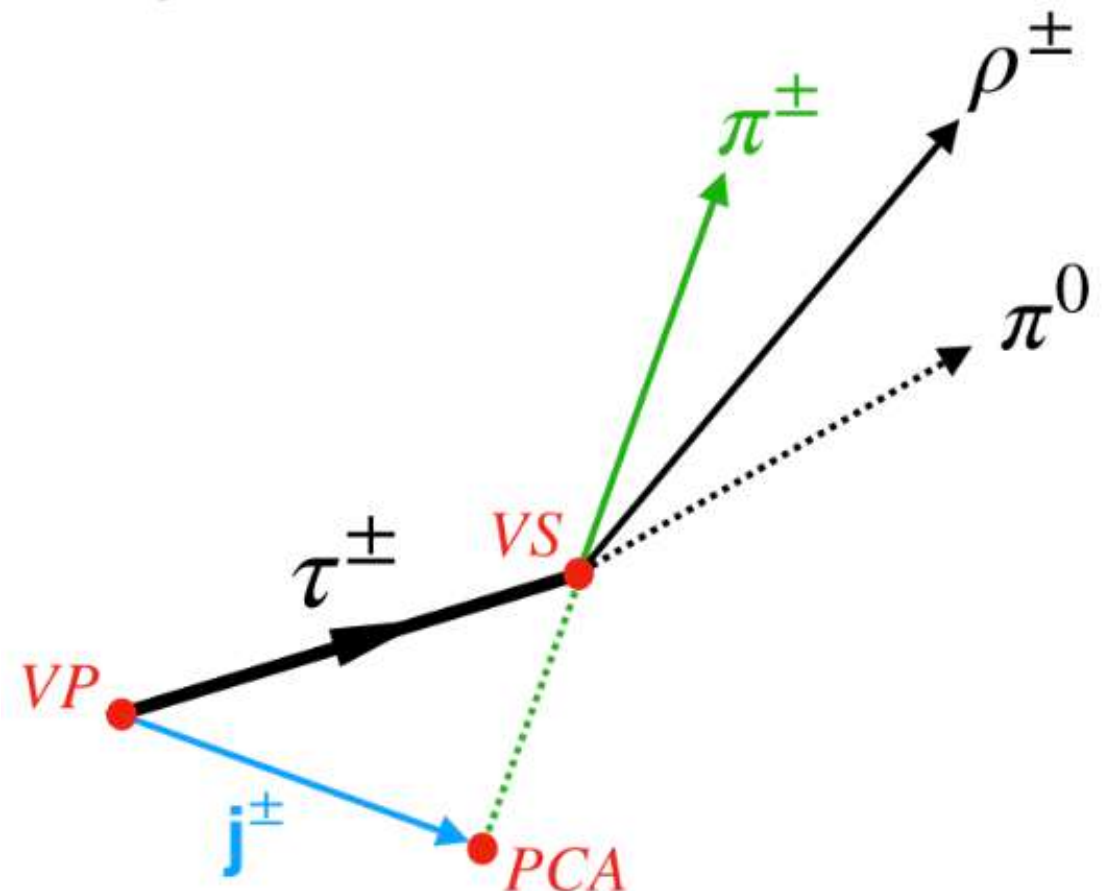
où $\vec{k}_{1,2} = \frac{\vec{h}_{1,2} \times \vec{n}_{1,2}}{|\vec{h}_{1,2} \times \vec{n}_{1,2}|}$ et $\vec{n}_{1,2}$ est le vecteur unitaire de la direction du tau dans le référentiel du boson de Higgs.

Impact Parameter Method

Même principe que **decay plane method** mais avec une définition différente des plans et **besoin de connaître le VP**

$$\phi^* = \arccos(\hat{\eta}_{\perp}^{*+} \cdot \hat{\eta}_{\perp}^{*-})$$
$$O^* = \hat{q}^{*-} \cdot (\hat{\eta}_{\perp}^{*+} \times \hat{\eta}_{\perp}^{*-}), \quad \phi_{CP} = \begin{cases} \phi^* & \text{if } O^* \geq 0 \\ 2\pi - \phi^* & \text{if } O^* < 0 \end{cases}$$

- $\eta_{\perp}^*$ donné par le vecteur $\vec{j}$ boosté dans le ZMF
- q^* donné par l'impulsion du pion chargé boostée dans le ZMF



Utilisation des méthodes

$\tau_h \tau_h$

1 = $\rho + \rho$ (DP-DP)

2 = $a_1(\rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^-) + \rho$ and $a_1(\rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^-) + a_1(\rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^-)$ (DP-DP)

3 = $a_1 + \rho$ (DP-IP)

4 = $a_1 + a_1$ (DP-DP)

5 = $\rho + \pi^-$ (DP-IP)

6 = $\pi^- \pi^-$ (IP-IP)

7 = $a_1 + \pi^-$ (DP-IP)

8 = $a_1(\rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^-) + \pi^-$ (DP-IP)

9 = $a_1 + a_1(\rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^-)$ (DP-DP)

$\mu \tau_h$

1 = $\mu + \rho$ (IP-DP)

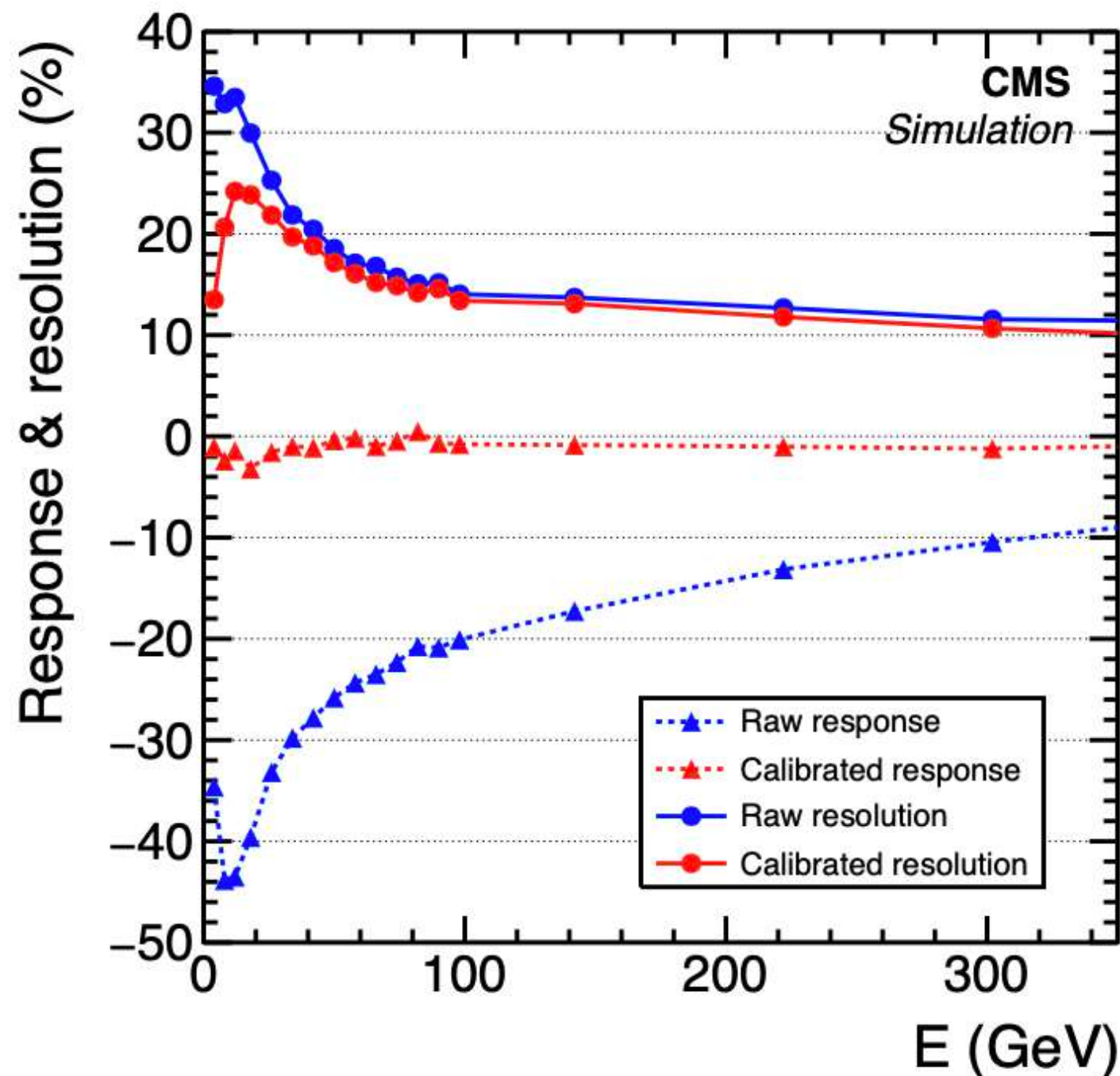
2 = $\mu + \pi^-$ (IP-IP)

3 = $\mu + a_1$ (IP-DP)

4 = $\mu + a_1(\rightarrow \pi^0 \pi^0 \pi^-)$ (IP-DP)

- DP : decay plane method
- IP : impact parameter method

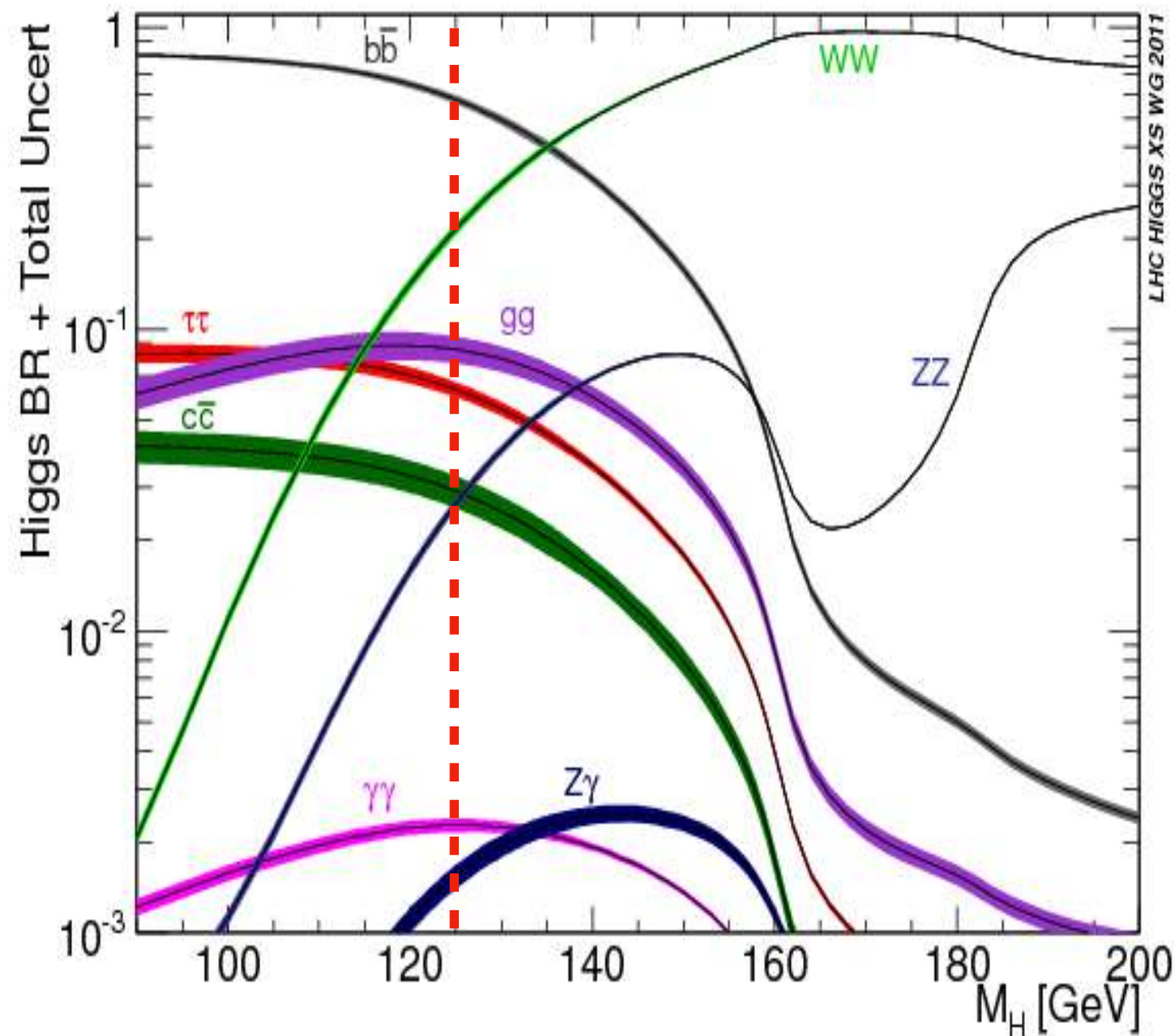
Résolution vs E (hadrons chargés)



$$\frac{\sigma_E}{E} \propto \frac{1}{\sqrt{E}}$$

La résolution est meilleure à **haute énergie**

Couplages du boson de Higgs

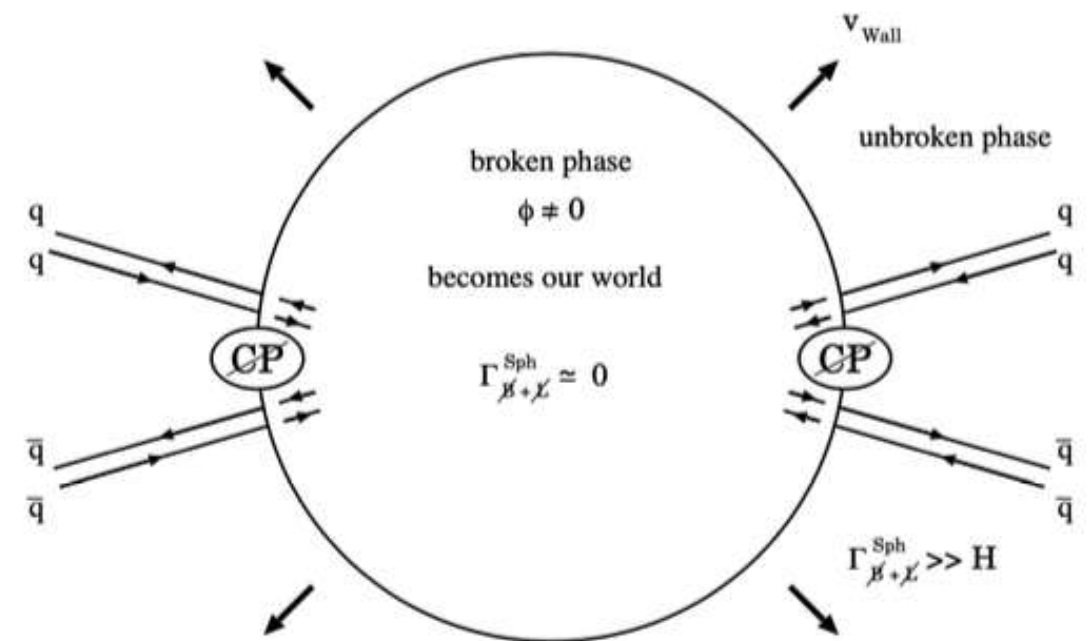
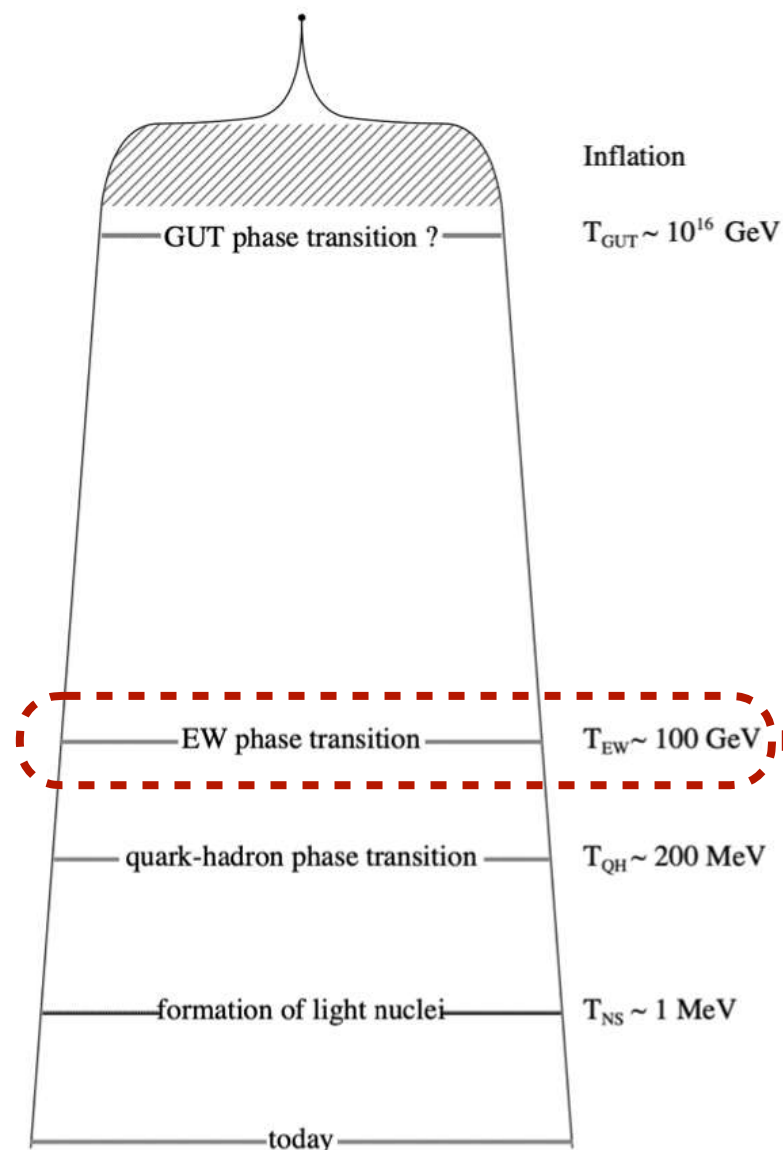


- **Couplage au quark b :** dominant mais information de spin effacée
- **W, γ, g :** bosons
- **Couplage au quark c :** non observé
- **Autres fermions :** BR trop faible

Implications cosmologiques

Conditions de Sakharov :

- Violation du nombre baryonique B
- Violation de C et de CP
- Rupture de l'équilibre thermique



Big Bang
Massless bosons

Shortly ($\sim 10^{-12} \text{ s}$) after
Spontaneous symmetry breaking
Bosons acquire mass
(nb. fermions too)

