

# Úhlové korelace v rozpadu Higgsových bosonů

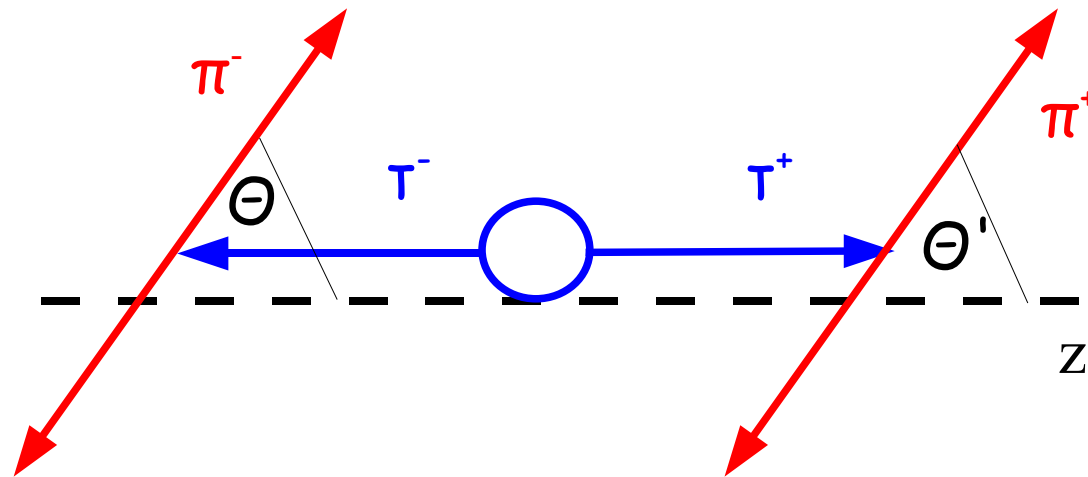
T. Davídek, R. Leitner, V. Shmakova

# Motivace

- Úhlové rozdělení v rozpadech  $H/A \rightarrow \tau\tau$ :
  - lze použít pro výběrová pravidla k odlišení H a Z při rekonstrukci rozpadů H
  - úhlové korelace jsou citlivé např. na CP Higgsových bosonů  
=> určení  $CP(H)$ ,  $CP(A)$
  
- Zatím se zabýváme jednoduchými rozpady  $\tau$ , kde je v koncovém stavu jedno neutrino:
  - $\tau \rightarrow \pi\nu$
  - $\tau \rightarrow \rho\nu$

# Definice úhlů

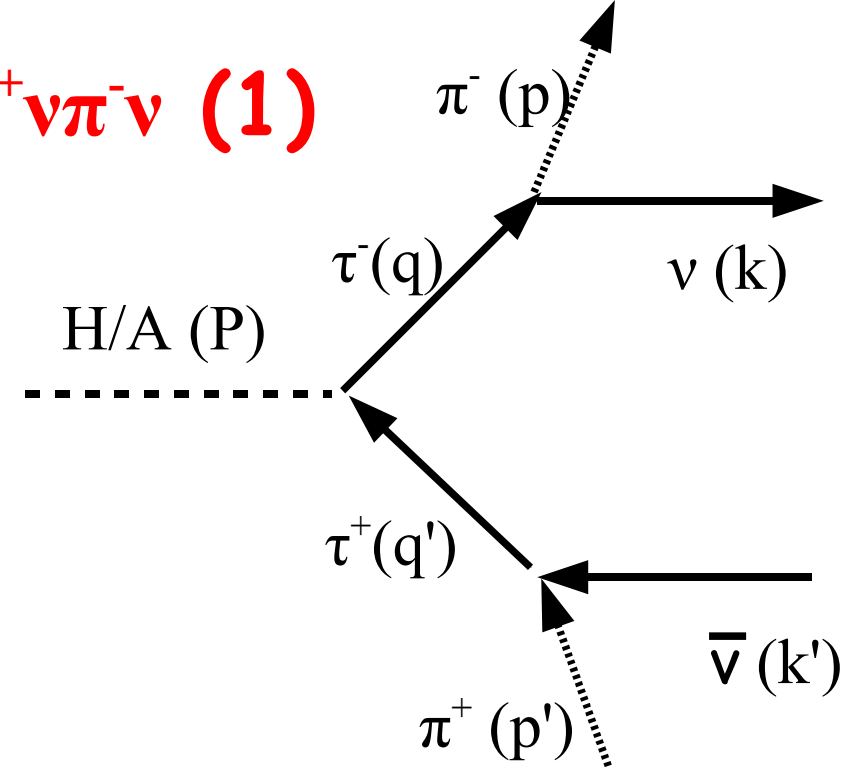
- Soustava souřadnic a proměnné:
  - $\tau$ -leptony vylétají v ose  $z$
  - úhly  $\Theta, \varphi, \Theta', \varphi'$  měříme v soustavách, kde je příslušný  $\tau$ -lepton v klidu
  - označme  $\Delta\varphi = \varphi - \varphi'$ . Úhel v rovině kolmé k  $z$  mezi nabitými hadrony, v soustavě kdy Higgs je v klidu (není ovlivněn Lorenz-boostem)



$$\mathbf{H} \rightarrow \boldsymbol{\tau}^+ \boldsymbol{\tau}^- \rightarrow \boldsymbol{\pi}^+ \nu \boldsymbol{\pi}^- \bar{\nu} \quad (1)$$

- Výpočet a la SM:

- Lagrangian SM pro rozpad  $H \rightarrow \tau\tau$
- efektivní Lagrangian pro rozpady  $\tau \rightarrow \pi\nu$



- Rozpad  $H \rightarrow \tau\tau \rightarrow \pi\nu\pi\nu$ :

$$i\mathcal{M}_{\text{fi}} = \bar{u}(k) \left( -i \frac{G_F}{\sqrt{2}} \cos \theta_c F_\pi \right) \gamma_\mu (1 - \gamma_5) \not{p}^\mu \frac{i}{\not{q} - m_\tau} \left( \frac{-igm_\tau}{2m_W} \right) \frac{i}{\not{q}' - m_\tau} \left( -i \frac{G_F}{\sqrt{2}} \cos \theta_c F_\pi \right) \gamma_\nu (1 - \gamma_5) \not{p}'^\nu v(k')$$

$$|\mathcal{M}_{\text{fi}}|^2 \propto \sum_{\text{pol}} \bar{u}(k) \not{p} (1 - \gamma_5) (\not{q} + m_\tau) (\not{q}' + m_\tau) \not{p}' (1 - \gamma_5) v(k') \bar{v}(k') (1 + \gamma_5) \not{p}' (\not{q}' + m_\tau) (\not{q} + m_\tau) (1 + \gamma_5) \not{p} u(k) = 32m_\tau^6 [2(k \cdot P)(k' \cdot P) - M^2(k \cdot k')]$$

## $H \rightarrow \tau^+ \tau^- \rightarrow \pi^+ \nu \pi^- \bar{\nu} \quad (2)$

- Přímočaré vyjádření v úhlech  $\theta, \theta', \Delta\varphi$  je velmi obtížné, takže jiný postup:
  - máme 6 stupňů volnosti  $\Rightarrow$  6 nezávislých proměnných  
 $k \cdot (k' + p'), k' \cdot (k + p), (k + p)^2, (k' + p')^2, (k + p) \cdot (k' + p'), (k - p) \cdot (k' - p')$
  - členy z maticového elementu vyjádříme pomocí našich 6 proměnných:

$$k \cdot P = k \cdot (k' + p') + k \cdot p = k \cdot (k' + p') + \frac{1}{2} (m_\tau^2 - m_\pi^2)$$

$$k' \cdot P = k' \cdot (k + p) + k' \cdot p' = k' \cdot (k + p) + \frac{1}{2} (m_\tau^2 - m_\pi^2)$$

$$k \cdot k' = \frac{1}{2} \left[ k \cdot (k' + p') + k' \cdot (k + p) - \frac{1}{2} (k + p) \cdot (k' + p') + \frac{1}{2} (k - p) \cdot (k' - p') \right]$$

## H $\rightarrow$ $\tau^+ \tau^- \rightarrow \pi^+ \nu \pi^- \bar{\nu}$ (3)

- díky Lorenz-invarianci skalárního součinu lze každý s výhodou počítat v jiné soustavě. Příklad pro  $k \cdot (k' + p')$

$$k|_{\tau^-} = |\vec{k}| (1, \cos \varphi \sin(\pi - \theta), \sin \varphi \sin(\pi - \theta), \cos(\pi - \theta))$$

$$(k' + p')|_H = \left( \frac{1}{2}M, 0, 0, \sqrt{\frac{1}{4}M^2 - m_\tau^2} \right)$$

$$(k' + p')|_{\tau^-} = \frac{M^2}{2m_\tau} \left( 1 - \frac{2m_\tau^2}{M^2}, 0, 0, \sqrt{1 - \frac{4m_\tau^2}{M^2}} \right)$$

$$k \cdot (k' + p')|_{\tau^-} = \frac{m_\tau^2 - m_\pi^2}{4m_\tau^2} \left( M^2 - 2m_\tau^2 + M \sqrt{M^2 - 4m_\tau^2} \cos \theta \right)$$

- podobně spočítáme ostatní členy, po dosazení a náročných úpravách:

$$|\mathcal{M}_{\text{fi}}|^2 \propto 8M^2 m_\tau^4 (m_\tau^2 - m_\pi^2) [1 + \cos \theta \cos \theta' + \cos \Delta\varphi \sin \theta \sin \theta']$$

$$\mathbf{H} \rightarrow \boldsymbol{\tau}^+ \boldsymbol{\tau}^- \rightarrow \boldsymbol{\pi}^+ \nu \boldsymbol{\pi}^- \bar{\nu} \quad (4)$$

- Fázový objem lze jednoduše rozdělit na 3 části:

$$\begin{aligned} d\text{LIPS}(\mathbf{H} \rightarrow \tau\tau \rightarrow \pi\nu\pi\nu) &= d\text{LIPS}(\mathbf{H} \rightarrow \tau\tau) \times d\text{LIPS}(\tau \rightarrow \pi\nu) \times \\ &\times d\text{LIPS}(\tau \rightarrow \pi\nu) \end{aligned}$$

- každý fázový objem má v našich soustavách jednoduchý tvar:  $d\text{LIPS} \sim (p_{\text{CMS}}/M) d\Omega$ , proto je úhlové závislost dána jen maticovým elementem

- Výsledek:

$$\frac{1}{\Gamma} \frac{d\Gamma(\mathbf{H} \rightarrow \tau\tau \rightarrow \pi\nu\pi\nu)}{d\cos\theta d\cos\theta' d\Delta\varphi} = \frac{1}{8\pi} (1 + \cos\theta \cos\theta' + \sin\theta \sin\theta' \cos\Delta\varphi)$$

$$\mathbf{H} \rightarrow \boldsymbol{\tau}^+ \boldsymbol{\tau}^- \rightarrow \boldsymbol{\rho}^+ \nu \boldsymbol{\rho}^- \bar{\nu}$$

- Stejnou technikou lze spočítat úhlové rozdělení rozpadu  $\mathbf{H} \rightarrow \tau\tau \rightarrow \rho\nu\rho\nu$ , maticový element je složitější:

$$i\mathcal{M}_{\text{fi}} = \bar{u}(k) \left( -i \frac{G_F}{\sqrt{2}} \cos \theta_c F_\rho \right) \gamma_\mu (1 - \gamma_5) \epsilon^\mu(p) \frac{i}{\not{q} - m_\tau} \left( \frac{-igm_\tau}{2m_W} \right) \\ \frac{i}{\not{q}' - m_\tau} \left( -i \frac{G_F}{\sqrt{2}} \cos \theta_c F_\rho \right) \gamma_\nu (1 - \gamma_5) \epsilon^{*\nu}(p') v(k')$$

$$|\mathcal{M}_{\text{fi}}|^2 \propto \left[ \sum_{\text{pol}} \bar{u}(k) \gamma_\mu (1 - \gamma_5) (\not{q} + m_\tau) (\not{q}' + m_\tau) \gamma_\nu (1 - \gamma_5) v(k') \bar{v}(k') \right. \\ \left. (1 + \gamma_5) \gamma_\alpha (\not{q}' + m_\tau) (\not{q} + m_\tau) (1 + \gamma_5) \gamma_\beta u(k) \right] \\ \left( -g^{\mu\beta} + \frac{p^\mu p^\beta}{m_\rho^2} \right) \left( -g^{\nu\alpha} + \frac{p'^\nu p'^\alpha}{m_\rho^2} \right) = \\ = 32 \frac{m_\tau^6}{m_\rho^4} \left[ 2(k \cdot P)(k' \cdot P) - M^2(k \cdot k') \right] + 64 \frac{m_\tau^2}{m_\rho^2} (m_\tau^2 - m_\rho^2) \\ \left[ 2(k \cdot P)(p' \cdot P) - M^2(k \cdot p') + 2(p \cdot P)(k' \cdot P) - M^2(p \cdot k') \right]$$



$$A \rightarrow \tau^+ \tau^- \rightarrow \pi^+ \nu \pi^- \bar{\nu}$$

- MSSM Higgs  $A$  ( $CP=-1$ ) má ve vrcholu navíc  $\gamma_5$ , což výrazně ovlivní strukturu maticového elementu:

$$i\mathcal{M}_{\text{fi}} = \bar{u}(k) \left( -i \frac{G_F}{\sqrt{2}} \cos \theta_c F_\pi \right) \gamma_\mu (1 - \gamma_5) \not{p} \frac{i}{\not{q} - m_\tau} \left( \frac{igm_\tau \tan \beta}{2m_W} \right) \gamma_5 \frac{i}{\not{q}' - m_\tau} \left( -i \frac{G_F}{\sqrt{2}} \cos \theta_c F_\pi \right) \gamma_\nu (1 - \gamma_5) \not{p}' v(k')$$

$$\begin{aligned} |\mathcal{M}_{\text{fi}}|^2 &\propto \sum_{\text{pol}} \bar{u}(k) \not{p} (1 - \gamma_5) (\not{q} + m_\tau) \gamma_5 (\not{q}' + m_\tau) \not{p}' (1 - \gamma_5) v(k') \bar{v}(k') \\ &\quad (1 + \gamma_5) \not{p}' (\not{q}' + m_\tau) (-\gamma_5) (\not{q} + m_\tau) (1 + \gamma_5) \not{p} u(k) = \\ &= 32m_\tau^6 \left[ 2 (k \cdot (q - q')) (k' \cdot (q - q')) - (q - q')^2 (k \cdot k') \right] \end{aligned}$$

Podobně pro ostatní rozpady....

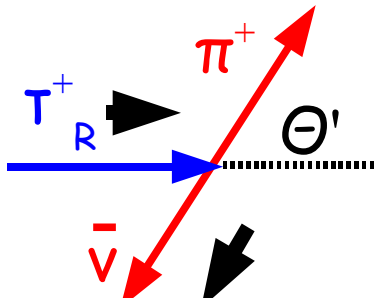
# Shrnutí výsledků

- Metodou Feynmanových pravidel jsme získali:

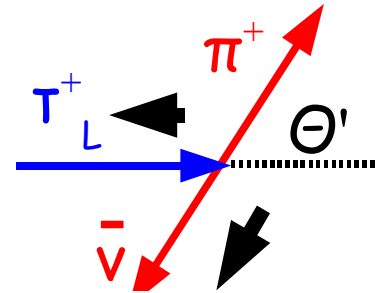
$$\begin{aligned}\frac{1}{\Gamma} \frac{d\Gamma(\text{H/A} \rightarrow \tau\tau \rightarrow \pi\nu\pi\nu)}{d\cos\theta d\cos\theta' d\Delta\varphi} &= \frac{1}{8\pi} [1 + \cos\theta \cos\theta' \pm \sin\theta \sin\theta' \cos\Delta\varphi] \\ \frac{1}{\Gamma} \frac{d\Gamma(\text{H/A} \rightarrow \tau\tau \rightarrow \pi\nu\rho\nu)}{d\cos\theta d\cos\theta' d\Delta\varphi} &= \frac{1}{8\pi} \left[ 1 + \frac{m_\tau^2 - 2m_\rho^2}{m_\tau^2 + 2m_\rho^2} (\cos\theta \cos\theta' \pm \sin\theta \sin\theta' \cos\Delta\varphi) \right] \\ \frac{1}{\Gamma} \frac{d\Gamma(\text{H/A} \rightarrow \tau\tau \rightarrow \rho\nu\rho\nu)}{d\cos\theta d\cos\theta' d\Delta\varphi} &= \frac{1}{8\pi} \left[ 1 + \frac{(m_\tau^2 - 2m_\rho^2)^2}{(m_\tau^2 + 2m_\rho^2)^2} (\cos\theta \cos\theta' \pm \sin\theta \sin\theta' \cos\Delta\varphi) \right]\end{aligned}$$

# Jiný způsob (1)

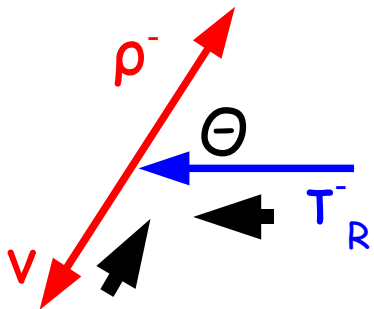
- Kontrola  $H \rightarrow \pi\pi \rightarrow \pi\nu\rho\nu$  jiným způsobem
  - úhlové rozdělení určíme přes rotace spinů:



$$\mathcal{A} \propto \mathcal{D}_{-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} = e^{i\varphi'/2} \sin \frac{\theta'}{2}$$

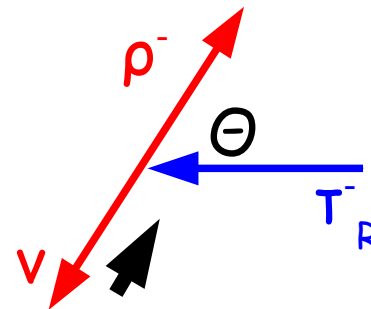


$$\mathcal{A} \propto \mathcal{D}_{-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} = e^{-i\varphi'/2} \cos \frac{\theta'}{2}$$



$$\mathcal{A}_0: J_z(\rho)=0$$

$$\mathcal{A}_1: J_z(\rho)=-1$$



$$\mathcal{A}_0 \propto \mathcal{D}_{\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} = -e^{-i\varphi/2} \sin \frac{\theta}{2}$$

$$\mathcal{A}_0 \propto \mathcal{D}_{\frac{1}{2}, \frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} = e^{i\varphi/2} \cos \frac{\theta}{2}$$

$$\text{CZ } \mathcal{A}_1 \propto \mathcal{D}_{-\frac{1}{2}, -\frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} = e^{-i\varphi/2} \cos \frac{\theta}{2}$$

$$\text{mas David, } \mathcal{A}_1 \propto \mathcal{D}_{-\frac{1}{2}, \frac{1}{2}}^{\frac{1}{2}} = e^{i\varphi/2} \sin \frac{\theta}{2}$$

## Jiný způsob (2)

- $CP(H)=1$ , proto  $|H\rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} (|\tau_L^+ \tau_L^- \rangle - |\tau_R^+ \tau_R^- \rangle)$
- z toho lze určit jednotlivé maticové elementy:

$$\mathcal{M}_{\bar{\nu}}^{(0)} = \langle \rho \nu \pi \bar{\nu} | H \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \mathcal{A}_0 e^{-i(\varphi' - \varphi)/2} \left[ \cos \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta'}{2} + e^{i(\varphi' - \varphi)} \sin \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta'}{2} \right]$$

$$\mathcal{M}_{\bar{\nu}}^{(-1)} = \langle \rho \nu \pi \bar{\nu} | H \rangle = \frac{1}{\sqrt{2}} \mathcal{A}_1 e^{-i(\varphi' - \varphi)/2} \left[ \sin \frac{\theta}{2} \cos \frac{\theta'}{2} - e^{i(\varphi' - \varphi)} \cos \frac{\theta}{2} \sin \frac{\theta'}{2} \right]$$

- stavy s různou projekcí spinu  $\rho$  jsou rozlišitelné, proto

$$\begin{aligned} |\mathcal{M}_{\bar{\nu}}|^2 &= |\mathcal{M}_{\bar{\nu}}^{(0)}|^2 + |\mathcal{M}_{\bar{\nu}}^{(-1)}|^2 = \\ &= \frac{1}{4} [|\mathcal{A}_0|^2 + |\mathcal{A}_1|^2 + (|\mathcal{A}_0|^2 - |\mathcal{A}_1|^2) (\cos \theta \cos \theta' + \sin \theta \sin \theta' \cos \Delta\varphi)] \end{aligned}$$

- uvážíme-li vztah mezi oběma amplitudami dostaneme stejný vztah jako v první metodě  $\left| \frac{\mathcal{A}_1}{\mathcal{A}_0} \right| = \frac{\sqrt{2} m_\rho}{m_\tau}$

# Závěr, další kroky

- Dvě nezávislé metody určení úhlové korelace v rozpadu Higgsových bosonů daly stejné výsledky
- Úhlové korelace v principu umožňují určit CP stav rozpadajícího se Higgsova bosonu
- Další kroky:
  - kontrola úhlových korelací v generátoru (Tauola)
  - aplikace výběrových pravidel podle úhlových korelací na potlačení pozadí  $Z \rightarrow \tau\tau$  při studiu  $H @ ATLAS$
  - zkoumání měření úhlových korelací v ATLAS