

Prospective pour la recherche de brisure CPT avec le quark top au LHC

Stage de M1 Physique subatomique à l'IPNL, sous la direction de CHANON
Nicolas et HANSEN Hubert.

Sane Le Troadec, Université Claude Bernard Lyon 1

6 septembre 2019



- ▷ I - Introduction au modèle standard et au modèle standard étendu
- ▷ II - Premier résultat : modulation temporelle de la section efficace de production de top.
- ▷ III - Deuxième résultat : étude de faisabilité
- ▷ IV - Conclusion

Introduction au modèle standard

- Le modèle standard de la physique des particules :
 - ▷ 3 interactions fondamentales
 - ▷ Matière définie en 17 particules élémentaires : 12 fermions (et leur antiparticule) , 4 bosons de jauge et le boson de Higgs.

[illegible]

Figure – Tableau du modèle standard des particules élémentaires

Symétrie CPT et brisure dans le domaine du top

- Motivation de l'étude :
 - ▷ La symétrie de Lorentz → pilier de la physique moderne et au coeur de la relativité restreinte.
 - ▷ La symétrie CPT → Symétrie des lois de la physique par inversion miroir, de charge et de temps.
 - ▷ Brisure de CPT → une hypothèse alternative pouvant expliquer l'asymétrie matière/antimatière dans l'univers.
- Pourquoi faire l'étude dans le domaine du top ?
 - ▷ La recherche de brisure CPT n'a jamais été menée dans le domaine du top en utilisant le modèle standard étendu.
 - ▷ Nous avons à disposition la seule usine de production de top aujourd'hui en fonctionnement, le LHC.
 - ▷ L'étude est focalisée sur la production de top solitaire car la production $t\bar{t}$ n'est pas sensible à la brisure CPT.

Le quark top dans le SME

- Les motivations derrière la création du SME :

- ▷ Théories de gravité quantique \Rightarrow possible brisure de Lorentz et de CPT
- ▷ Nous supposons que ces phénomènes sont perceptibles à un certain degré à l'échelle d'énergie du LHC
- ▷ Nous utilisons le modèle standard étendu (SME), qui a été construit pour inclure la violation de Lorentz et CPT dans son Lagrangien. V.A. Kostelecký, Phys. Rev. D **69**, 105009 (2004)

- SME pour le quark top :

- ▷ Théorie des champs effective.
- ▷ Addition de tous les termes qui violent Lorentz et CPT au lagrangien du SM.

$$\mathcal{L}^{CPT-} \supset (1 - \gamma^5) b_\mu t \bar{t} \gamma^\mu + \dots$$

- ▷ b_μ vecteur constant dans un référentiel donné, le référentiel centré sur le soleil.

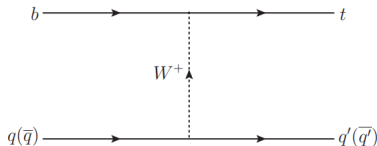


Figure – Diagramme de Feynman de production de top par t-canal

b_μ : coefficient gouvernant la brisure de CPT pour la production de quark top. (Berger, et al, Phys. Rev. D 93, 036005 (2016))

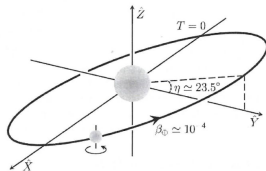


Figure – Référentiel centré sur le soleil

Production de top solitaire dans le SME

- w : rapport des sections efficaces de création de top du SME et du SM.

$$w = \frac{\sigma_{SME}}{\sigma_{SM}} = 1 + b_\mu \frac{\delta P^\mu}{P}$$

avec δP^μ : correction due à la violation de CPT (Kostelecky, et al. :arXiv :1509.08929v1).

P : facteur de production de top.

- Changement de référentiel, du référentiel de CMS au référentiel centré sur le soleil :

$$R^\mu{}_\nu(t) = R_{\hat{z}}(\omega t) R_{\hat{y}}(\lambda) R_{\hat{x}}(\theta) R_z\left(\frac{\pi}{2}\right) =$$

$$\begin{pmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\cos \omega t \sin \lambda \sin \theta + \sin \omega t \cos \theta & \cos \omega t \cos \lambda & -\cos \omega t \sin \lambda \cos \theta + \sin \omega t \sin \theta \\ 0 & -\sin \omega t \sin \lambda \sin \theta - \cos \omega t \cos \theta & \sin \omega t \cos \lambda & -\sin \omega t \sin \lambda \cos \theta - \cos \omega t \sin \theta \\ 0 & \cos \lambda \sin \theta & \sin \lambda & \cos \lambda \cos \theta \end{pmatrix}$$

- On définit alors $f(t) = b_\mu R^\mu{}_\nu(t) \frac{\delta P^\nu}{P}$: modulation temporelle de la section efficace de top solitaire due à la brisure CPT.

Evaluation du changement de section efficace dans le SME

- On étudie le changement dû à la brisure de CPT dans la section efficace top solitaire au LHC.

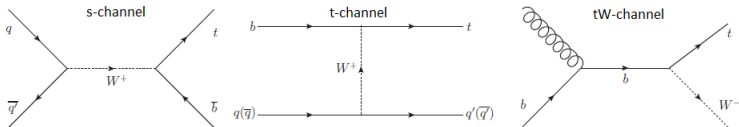


Figure – Diagrammes de Feynman de production de top solitaire

$$\sigma_{s-channel} = 10.32 \text{ pb}$$

$$\sigma_{t-channel} = 216.99 \text{ pb}$$

$$\sigma_{tW-channel} = 71.7 \text{ pb}$$

- Nous évaluons le poids w dans une simulation d'événements du LHC avec le générateur Madgraph. → Génération de 10^6 événements pour chaque diagramme à laquelle on applique les coupures suivantes.

$$\text{t-channel : } P_{t,\mu} > 26 \text{ GeV, } P_{t,e} > 35 \text{ GeV, } |\eta_{\mu}| < 2.4 \text{ et } |\eta_e| < 1.479$$

$$\text{tW-channel } P_t > 20 \text{ GeV et } |\eta| < 2.4$$

- Nous moyennons les rapports $\frac{\delta P^\mu}{P}$ calculés sur le nombre d'événements après coupure.

$$\begin{aligned} \left\langle \frac{\delta P^\mu}{P} \right\rangle_{t\text{-channel},t} &= \begin{pmatrix} 0.0086 \text{ GeV} \\ 10^{-7} \text{ GeV} \\ -10^{-7} \text{ GeV} \\ 0.0081 \text{ GeV} \end{pmatrix} & \left\langle \frac{\delta P^\mu}{P} \right\rangle_{t\text{-channel},\bar{t}} &= \begin{pmatrix} -0.0071 \text{ GeV} \\ 10^{-7} \text{ GeV} \\ 10^{-7} \text{ GeV} \\ -0.0074 \text{ GeV} \end{pmatrix} \\ \left\langle \frac{\delta P^\mu}{P} \right\rangle_{tW\text{-channel},t} &= \begin{pmatrix} 0.03 \text{ GeV} \\ -10^{-5} \text{ GeV} \\ 10^{-6} \text{ GeV} \\ -0.006 \text{ GeV} \end{pmatrix} & \left\langle \frac{\delta P^\mu}{P} \right\rangle_{tW\text{-channel},\bar{t}} &= \begin{pmatrix} -0.03 \text{ GeV} \\ -10^{-5} \text{ GeV} \\ -10^{-6} \text{ GeV} \\ 0.006 \text{ GeV} \end{pmatrix} \end{aligned}$$

- On applique le changement de référentiel.

$$R^\mu{}_\nu(t) \frac{\delta P^\mu}{P} = \left(\frac{\delta P^0}{P}, -\frac{\delta P^3}{P} (c_{\omega t} s_\lambda c_\theta + s_{\omega t} s_\theta), \frac{\delta P^3}{P} (c_{\omega t} s_\theta - s_{\omega t} s_\lambda c_\theta), \frac{\delta P^3}{P} c_\lambda c_\theta \right)$$

Pour l'expérience CMS

- ▷ Azimut : $\theta = 101.2790 \pm 0.0001^\circ$
- ▷ Latitude : $\lambda = 46.309 \pm 0.003^\circ$
- ▷ Longitude : $l = 6.0766 \pm 0.0001^\circ$
- ▷ Vitesse angulaire sidérale : $\Omega = 7.29 \cdot 10^{-5} \text{ rad.s}^{-1}$

Résultats pour les modulations temporelles pour le top et l'antitop dans le t-channel

$$f(t) = b_0 \frac{\delta P^0}{P} - \frac{\delta P^3}{P} (b_1(\xi_1 \cos(\omega t) + \xi_2 \sin(\omega t)) + b_2(\xi_2 \cos(\omega t) - \xi_1 \sin(\omega t)) + b_3 \xi_3)$$

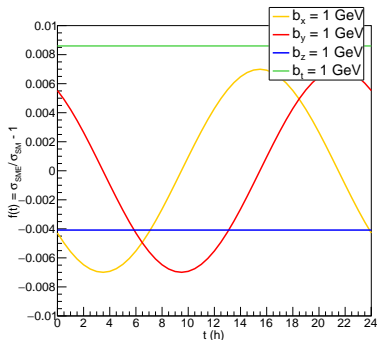


Figure – Modulation temporelle de la production de top par t-channel

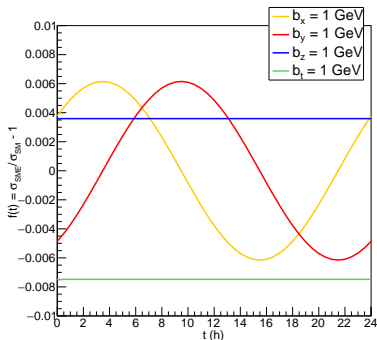


Figure – Modulation temporelle de la production d'antitop par t-channel

- Les modulations temporelles sont presque opposées pour le t-channel.

Modulation temporelle pour le tw-channel

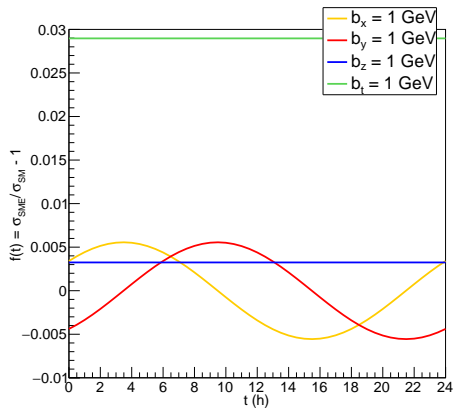


Figure – Modulation temporelle de la production de top par tw-channel

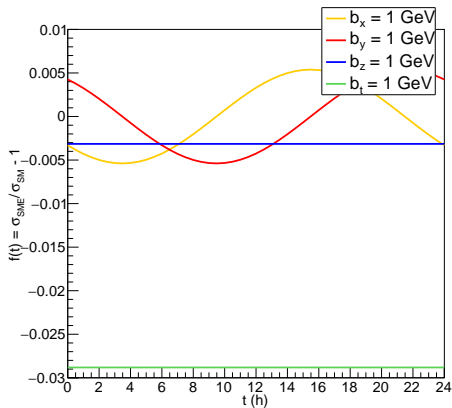


Figure – Modulation temporelle de la production d'antitop par tw-channel

- Les modulations temporelles sont strictement opposées pour le tw-channel.

Comptage d'événements pour l'étude de faisabilité

- Nous estimons la sensibilité attendue de l'expérience CMS sur b_μ pour le Run 2 du LHC (150 fb^{-1}).
- CMS a déjà analysé la production de top et antitop solitaire dans le t-channel dans le SM à 36 fb^{-1} (2016) (CMS PAS TOP-17-023)

Nous projettons le nombre d'événements à 150 fb^{-1}

Process	N_{event}	ΔN_{stats}	$\%_{stats}$	ΔN_{syst}	$\%_{syst}$
$W/Z/\gamma + jets$	439167 ± 31313	663	0.15%	31305	7.1%
$t\bar{t}/tW$	945416 ± 11576	972	0.1%	11535	1.2%
<i>Multijet</i>	202708 ± 4754	450	0.22%	4732	2.3%
t channel	217166 ± 7123	466	0.21%	7108	3.3%

Figure – Comptage des événements bruits de fond pour la production de top

Process	N_{event}	ΔN_{stats}	$\%_{stats}$	ΔN_{syst}	$\%_{syst}$
$W/Z/\gamma + jets$	389584 ± 26087	624	0.16%	26079	6.7%
$t\bar{t}/tW$	950833 ± 12147	975	0.1%	12107	1.3%
<i>Multijet</i>	201709 ± 5234	449	0.22%	5215	2.6%
\bar{t} channel	137750 ± 7609	371	0.27%	7600	5.5%

Figure – Comptage des événements bruits de fond pour la production d'antitop

Calcul de l'incertitude statistique de l'étude de faisabilité

- Nous déterminons notre sensibilité sur b_μ sous la forme :

$$b_\mu = 0 \pm x \text{ (stats)} \pm y \text{ (syst)} \text{ GeV}.$$

- Nous effectuons un ajustement avec la méthode du χ^2 entre le signal + bruit de fond et la projection des données CMS à 150 fb^{-1} .

$$\chi^2 = \frac{1}{N_{bin}} \sum_{i=1}^{N_{bin}} \frac{[N_i - \mathcal{L}((bf(t) + 1)n_{Sig} + n_{tt/tW} + n_{EW} + n_{Multijet}))]^2}{\sigma_{stats,i}^2}$$

- Nous ne pouvons pas inclure l'erreur systématique dans l'expression du $\chi^2 \rightarrow$ calculs effectués dans un second temps.

- On mesure l'incertitude statistique en considérant la production de top et antitop en représentant $\chi_{tot}^2 = \chi_t^2 + \chi_{\bar{t}}^2$.

\Rightarrow On en déduit que $\Delta b_{\mu,stats} = 5.3 \text{ GeV}$.

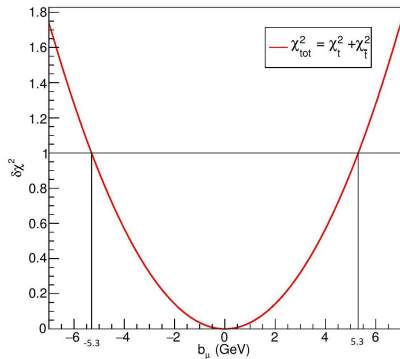


Figure – $\delta\chi_{tot}^2$ en fonction de l'intensité de b_μ

Résultat de l'étude de faisabilité

- Nous faisons varier par le haut et par le bas les contributions du bruit de fond et de la luminosité par leur incertitude.
 \Rightarrow Nous regardons l'impact sur le χ^2 .

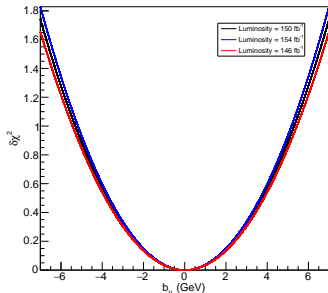


Figure – $\delta\chi^2_{\text{tot}}$ en fonction de l'intensité de b_μ en imposant une variation de 2.5% de la luminosité

Processus	$\Delta b_{\mu,\text{syst}}$ (GeV)
\mathcal{L} (2.5%)	0.85
$W/Z/\gamma + \text{jets}$ (5%)	0.58
$t\bar{t}/tW$ (0.9%)	0.37
<i>Multijet</i> (2%)	0.23
$\bar{t} + t$ channel (5.5% + 3.3%)	1.68

$$\Delta b_{\mu,\text{syst,tot}} = \sqrt{\sum_i \Delta b_{\mu,i,\text{max}}^2} = 2.3 \text{ GeV}$$

La précision attendue de l'expérience CMS sur le paramètre b_μ de brisure de CPT, pour le Run 2 du LHC (150 fb^{-1}) est :

$$\Delta b_\mu = \pm 5.3 \text{ (stats)} \pm 2.3 \text{ (syst)} \text{ GeV}$$

La précision attendue de l'expérience CMS sur le paramètre b_μ de brisure de CPT, au HL-LHC (14 TeV) à 3000 fb^{-1} est :

$$\Delta b_\mu = \pm 1.08 \text{ (stats)} \pm 0.39 \text{ (syst) GeV}$$

La précision attendue de l'expérience CMS sur le paramètre b_μ de brisure de CPT, au HE-LHC (27 TeV) à 15000 fb^{-1} est :

$$\Delta b_\mu = \pm 0.275 \text{ (stats)} \pm 0.099 \text{ (syst) GeV}$$

La précision attendue de l'expérience CMS sur le paramètre b_μ de brisure de CPT, au FCC (100 TeV) à 15000 fb^{-1} est :

$$\Delta b_\mu = \pm 0.123 \text{ (stats)} \pm 0.045 \text{ (syst) GeV}$$

Conclusion

- Calcul de la variation de la section efficace du top solitaire due à la violation de CPT au LHC.
- Première étude de faisabilité pour cette recherche au LHC.
- La recherche de brisure CPT avec le top solitaire n'a jamais été réalisé dans aucun collisionneur.

⇒ Bilan personnel :

- ▷ Découverte de la phénoménologie.
- ▷ Découverte du milieu de la recherche en physique des particules et nouveaux modèles.
- ▷ Découverte du sujet de la brisure de CPT pour le top solitaire et envie de faire la recherche dans les données de CMS.

Asymmetry

$$A_{Charge} = \frac{R - \bar{R}}{R + \bar{R}} \text{ with } R = \sigma_{SME} \mathcal{L}$$

$$\text{So } A_{Charge} = \mathcal{L} \frac{\sigma_{SME} - \bar{\sigma}_{SME}}{\sigma_{SME} + \bar{\sigma}_{SME}}$$

Where

$$\sigma_{SME} = \sigma_{SM} + \sigma_{SM} f(t) = \sigma_{SM}(1 + f(t))$$

And $w(t) = 1 + f(t)$, in the end

$$A_{Charge} = \frac{\sigma_{SM} w(t) - \bar{\sigma}_{SM} \bar{w}(t)}{\sigma_{SM} w(t) + \bar{\sigma}_{SM} \bar{w}(t)}$$

$$A_{Charge}^{tw} = \frac{\sigma_{tw} w_{tw} - \sigma_{\bar{tw}} w_{\bar{tw}}}{\sigma_{tw} w_{tw} + \sigma_{\bar{tw}} w_{\bar{tw}}}$$

With $\sigma_{tw} = \sigma_{\bar{tw}}$, we can simplify :

$$A_{Charge}^{tw} = \frac{w_{tw} - w_{\bar{tw}}}{w_{tw} + w_{\bar{tw}}}$$

and as $w_{tw} = (1 + f(t))$

We can rewrite the expression such as :

$$A_{Charge}^{tw} = \frac{1 + f_{tw}(t) - 1 - f_{\bar{tw}}(t)}{1 + f_{tw}(t) + 1 + f_{\bar{tw}}(t)}$$

We know that $f_{tw}(t) = -f_{\bar{tw}}(t)$, this leads us to :

$$A_{Charge}^{tw} = \frac{2f_{tw}(t)}{2} = f_{tw}(t)$$

tw-channel asymmetry

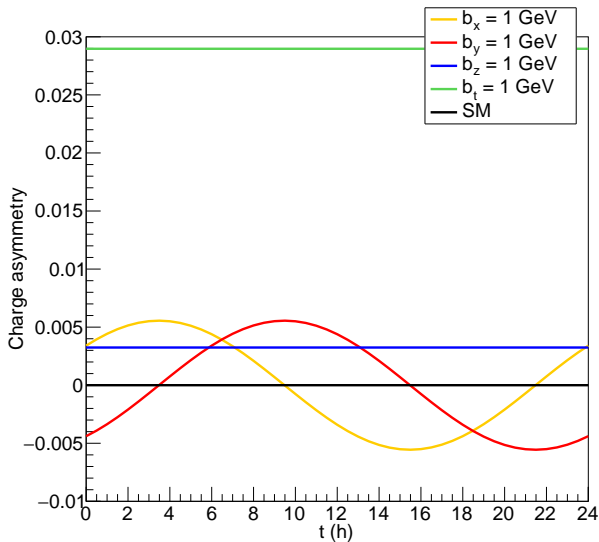


Figure – Time modulation of the asymmetry for the *tw*-channel at 13 TeV

t -channel asymmetry

In the case of the t -channel, the cross-section of the t et \bar{t} productions are different.

We find that $\sigma_t \neq \sigma_{\bar{t}}$

This leads us to this expression of the asymmetry :

$$A_{Charge}^t = \frac{\sigma_t(1 + f_t) - \sigma_{\bar{t}}(1 - f_{\bar{t}})}{\sigma_t(1 + f_t) + \sigma_{\bar{t}}(1 - f_{\bar{t}})}$$

$$A_{Charge}^t = \frac{(\sigma_t - \sigma_{\bar{t}}) + f_t(t)\sigma_t - f_{\bar{t}}(t)\sigma_{\bar{t}}}{(\sigma_t + \sigma_{\bar{t}}) + f_t(t)\sigma_t + f_{\bar{t}}(t)\sigma_{\bar{t}}}$$

t -channel asymmetry

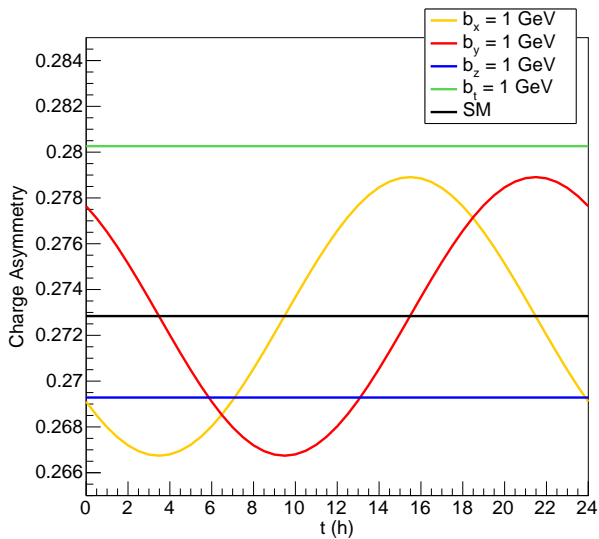


Figure – Time modulation of the asymmetry for the t -channel at 13 TeV

Energy dependency

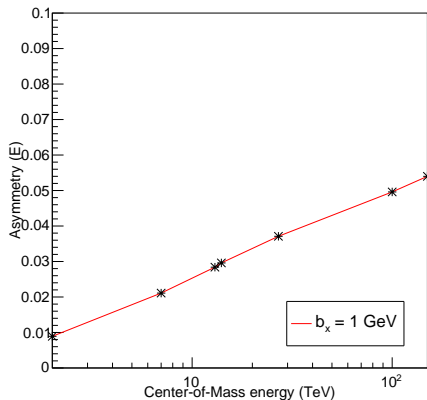


Figure – Dependency on energy of the asymmetry for the tw -channel in function of time

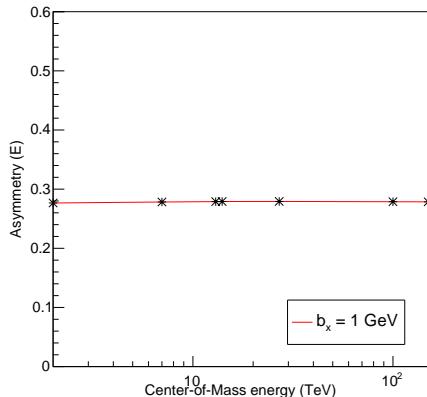


Figure – Dependency on energy of the asymmetry for the t -channel