

Lepton Flavour Violation et la Leptogénèse

Sacha Davidson

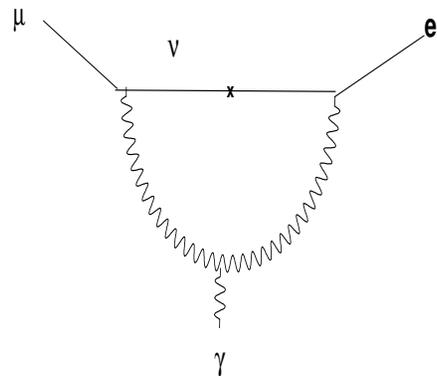
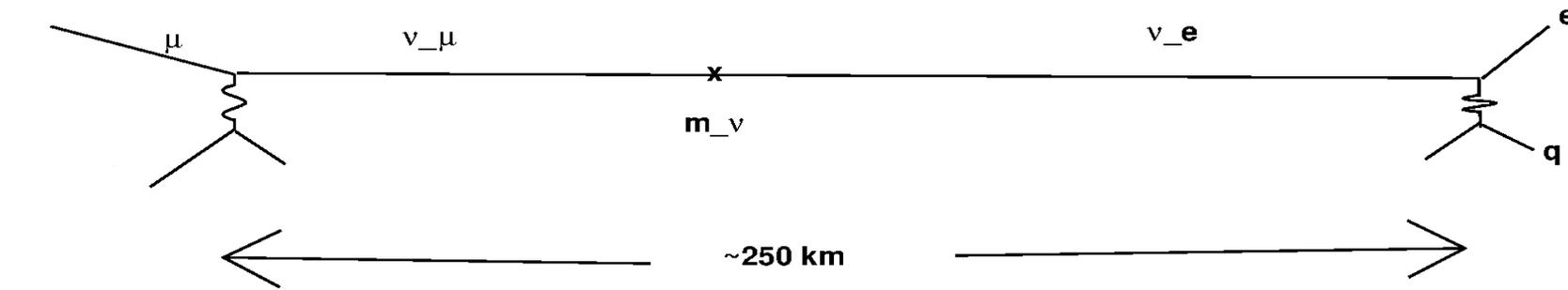
IN2P3/CNRS, France

1. Faut de la “Nouvelle Physique” pour obtenir $[m_\nu]$ observée (S Lavignac)
 - donne obligatoirement interactions changeant la saveur des leptons chargés (LFV)
 - ca *peut* être responsable de l’excès de matière de l’Univers
2. Lepton Flavour Violation
 - C’est quoi?
 - Quel lien avec les masses de neutrinos?
 - Comment détecter?
 - Qu’est ce qu’on peut apprendre?
3. leptogénèse : fabriquer l’excès de matière de l’Univers
 - Fabriquer... quoi exactement? Et comment?
 - est-ce que ca se vérifie?
 - il faut de la CPV—y’a quel lien avec la CPV observable en oscillations?
4. Sommaire

(Charged) Lepton Flavour Violation \equiv changement locale (à un point) de la saveur d'un lepton chargé ($\mu \rightarrow e\gamma, \tau \rightarrow 3\mu, B \rightarrow K\tau\bar{\mu}, \dots$)
 \equiv FCNC pour leptons chargés

(Charged) Lepton Flavour Violation \equiv changement locale (à un point) de la saveur d'un lepton chargé ($\mu \rightarrow e\gamma$, $\tau \rightarrow 3\mu$, $B \rightarrow K\tau\bar{\mu}, \dots$)
 \equiv FCNC pour leptons chargés

Conséquence automatique d'oscillations de neutrinos:



diagrammes avec LFV par échange
de ν léger $\propto m_\nu^2/m_W^2 \lesssim 10^{-24}$ (par GIM)
 $\Rightarrow BR(\mu \rightarrow e\gamma) \lesssim 10^{-48}$



Mais, si $\delta\mathcal{L}_{m_\nu}$ contient plus que $\bar{\nu}_R \not{D} \nu_R + Y_\nu \bar{\ell} H \nu_R$, y'aura d'autres diagrammes!

\Leftrightarrow LFV = autre fenêtre sur le mécanisme de masse des ν !

LFV = Nouvelle Physique qui *existe!* Comment et ou trouver?

1. Supposons Nouvelle Physique lourde ($m_{NP} \gg m_W$) \Rightarrow apparait à l'intérieure de diagrammes \Leftrightarrow nouvelles interactions de contact de particules MS (à énergie $E \ll m_{NP}$)
2. et si la Nouvelle Physique est légère? ?? (axions, alps, Z' sombres, wisps...)
 \Rightarrow NP peut être produite en état finale
?? de quoi a l'aire un modèle avec NP légère qui ne laisse pas de trace?
...pensez à Modèle Standard sans ν ...

Bornes aujourd'hui et sensibilités à venir

processus	borne	sensibilité à venir
$BR(\mu \rightarrow e\gamma)$	$< 4.2 \times 10^{-13}$	$\sim 10^{-14}$ (MEG)
$BR(\mu \rightarrow e\bar{e}e)$	$< 1.0 \times 10^{-12}$	$\sim 10^{-14} \rightarrow 10^{-16}$ (PSI)
$\frac{\sigma(\mu + Au \rightarrow e + Au)}{\sigma(\mu \text{ capture})}$	$< 7 \times 10^{-13}$	$\sim 10^{-16} \rightarrow 10^{-18}$ (Mu2e, COMET)...
$BR(K^+ \rightarrow \pi^\pm \mu^\pm e^\mp)$	$\lesssim \text{few} \times 10^{-10}$	0.7×10^{-12} (NA62)
$BR(K^+ \rightarrow \pi^+ \bar{\nu}\nu)$	$= 1.7 \pm 1.1 \times 10^{-10}$ ($2 \times \text{SM}$)	NA62, (KOTO, K^0)
$BR(\tau \rightarrow 3\ell)$	$< 1.5 - 2.7 \times 10^{-8}$	
$BR(\tau \rightarrow e\phi)$	$< 3.1 \times 10^{-8}$	
$BR(\tau \rightarrow \ell\gamma)$	$< 3.3, 4.4 \times 10^{-8}$	
$BR(B^+ \rightarrow K^+ \tau \bar{\ell})$	$< 4.8 \times 10^{-5}$	
$BR(Z \rightarrow \tau^\pm \ell^\mp)$	$< 1.2, 0.98 \times 10^{-5}$	LHC
$BR(\tau \rightarrow \ell + X_{m \lesssim m_\pi})$	$< 2.7 - 5 \times 10^{-3}$	

Quel est le canal le plus prometteur pour trouver LFV?:

μ : sensibilité plus impressionnante!

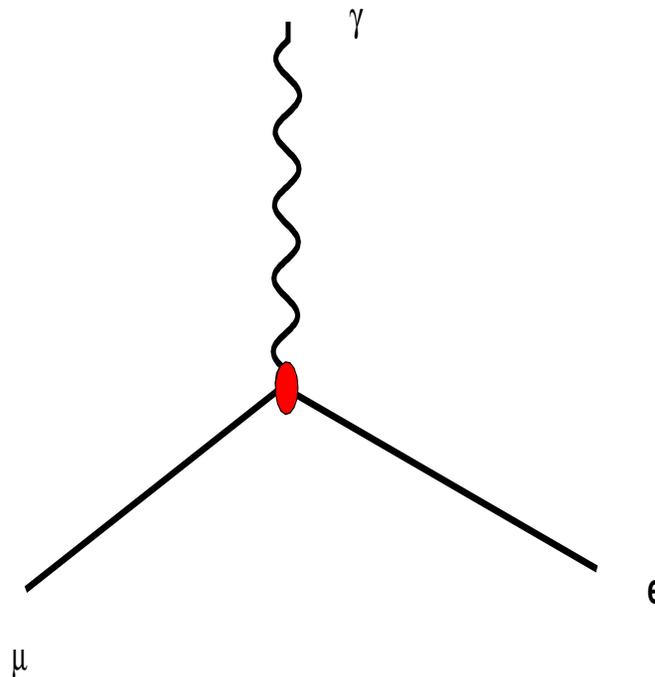
τ : couplages NP plus importantes en 3ieme génération?

Qu'est ce qu'un théoricien fait de ces chiffres?

but: connaitre le modèle/Lagrangien responsable de m_ν /NP leptonique

... ..mais elle peut être à haute énergie, écranté par boucles :

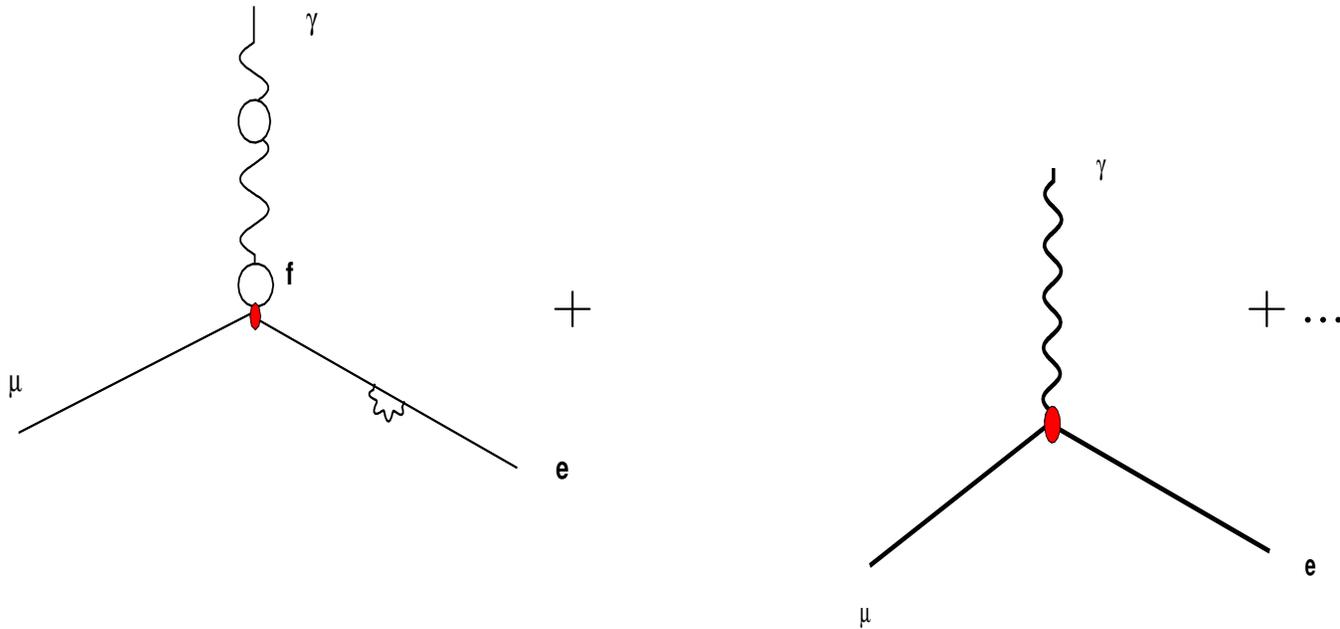
Imaginons découvrir $\mu \rightarrow e\gamma$ — on observe, à l'énergie m_μ :



Qu'est ce qu'un théoricien fait de ces chiffres?

but: connaitre le modèle/Lagrangien responsable de m_ν /NP leptonique

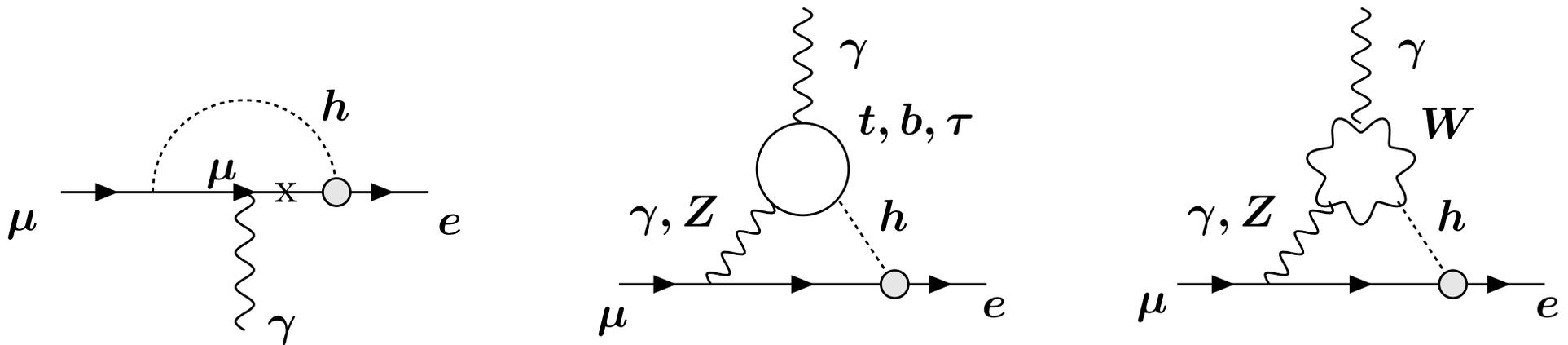
...mais si on pourrait voir à l'énergie m_W , peut-etre c'est:



Qu'est ce qu'un théoricien fait de ces chiffres?

but: connaitre le modèle/Lagrangien responsable de m_ν /NP leptonique

...et au-delà de m_W , ca pourrait être:



et on est pas encore à l'échelle de la Nouvelle Physique.

⇒ la Nouvelle Physique peut être embrouillé/intriqué avec des boucles Modèle Standard...comment l'identifier?

Qu'est ce qu'on fait de ces chiffres?

but: connaitre le modèle/Lagrangien responsable de m_ν /NP leptonique

1^{er} perspective: top-down (très populaire depuis décennies)

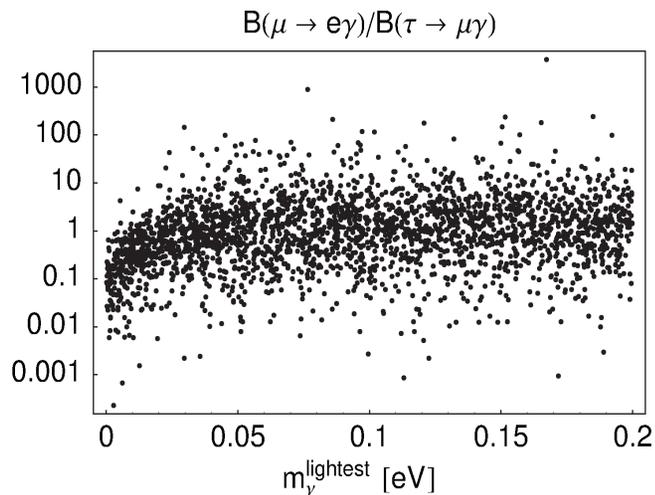
1. sélectionner un modèle
2. calculer observables
3. estimer conséquences = scan paramètres \Rightarrow prédictions et corrélations probables

Qu'est ce qu'on fait de ces chiffres?

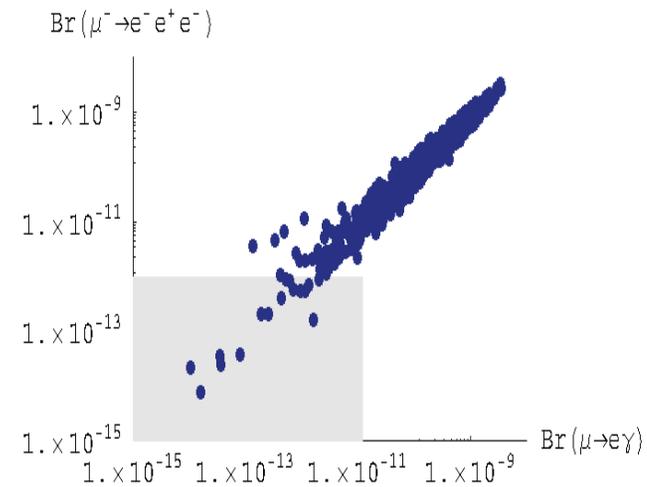
but: connaitre le modèle/Lagrangien responsable de m_ν /NP leptonique

1^{er} perspective: top-down (très populaire depuis décennies)

1. sélectionner un modèle
2. calculer observables
3. estimer conséquences = scan paramètres \Rightarrow prédictions et corrélations probables



gauche: modele seesaw "MLFV" (0609067).



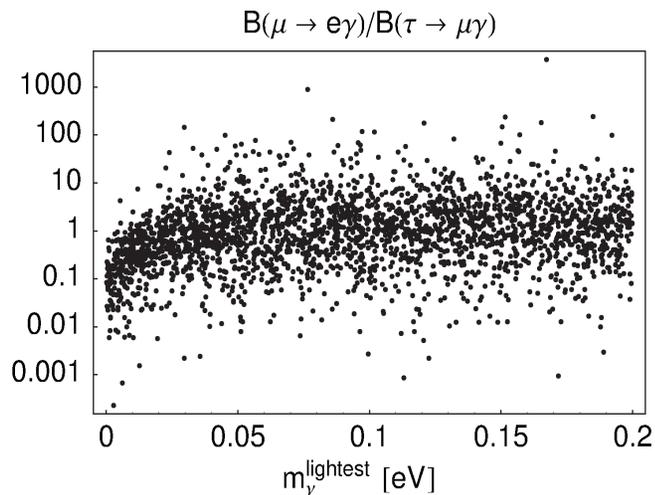
droite: Littlest Higgs (0702136)

Qu'est ce qu'on fait de ces chiffres?

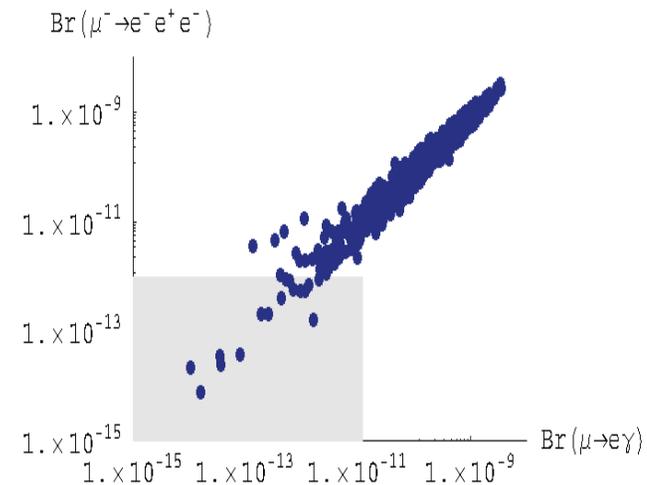
but: connaitre le modèle/Lagrangien responsable de m_ν /NP leptonique

1^{er} perspective: top-down (très populaire depuis décennies)

1. sélectionner un modèle
2. calculer observables
3. estimer conséquences = scan paramètres \Rightarrow prédictions et corrélations probables



gauche: modele seesaw "MLFV" (0609067).



droite: Littlest Higgs (0702136)

+ claire, recette de calcul bien connue, incertitudes quantifiables

— on part du but = le modèle

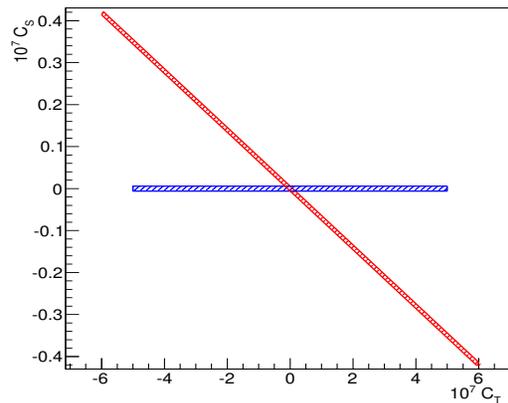
— les corrélations supposent que la vérité est un modèle probable selon les priors des auteurs

2^{ieme} perspective: bottom-up avec théories effectives (chantier maintenant)

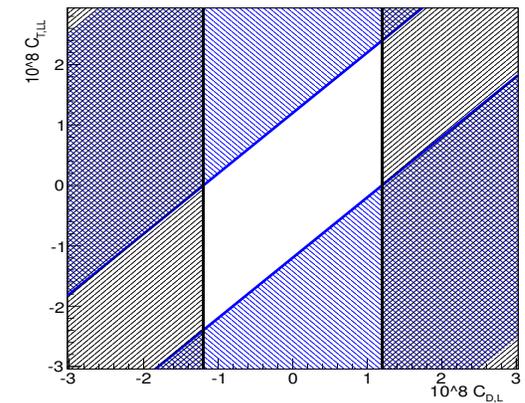
1. supposer NP lourd ($m_{NP} \gg m_W$), paramétriser données avec operateurs effectifs
2. boucles MS mélangent coeff.s d'opérateurs (\approx ctes de couplage) entre eux
 \Rightarrow eqns du groupe de renormalisation pour transporter bornes exptales vers m_{NP} .

2^{ieme} perspective: bottom-up avec théories effectives (chantier maintenant)

1. supposer NP lourd ($m_{NP} \gg m_W$), paramétriser données avec operateurs effectifs
2. boucles MS mélangent coeff.s d'opérateurs (\approx ctes de couplage) entre eux
 \Rightarrow eqns du groupe de renormalisation pour transporter bornes exptales vers m_{NP} .



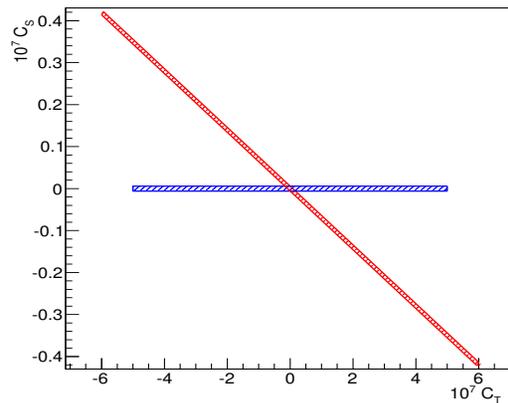
bornes à m_p et m_W : de $\mu - e$ conv. sur coeffs scalaires et tenseurs



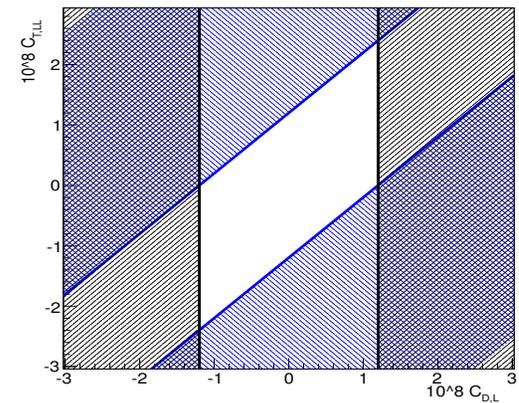
de $\mu \rightarrow e\gamma$ sur coeffs dipole(hor.) vs tenseur(vert.)

2^{ieme} perspective: bottom-up avec théories effectives (chantier maintenant)

1. supposer NP lourd ($m_{NP} \gg m_W$), paramétriser données avec operateurs effectifs
2. boucles MS mélangent coeff.s d'opérateurs (\approx ctes de couplage) entre eux
 \Rightarrow eqns du groupe de renormalisation pour transporter bornes exptales vers m_{NP} .



bornes à m_p et m_W : de $\mu - e$ conv. sur coeffs scalaires et tenseurs



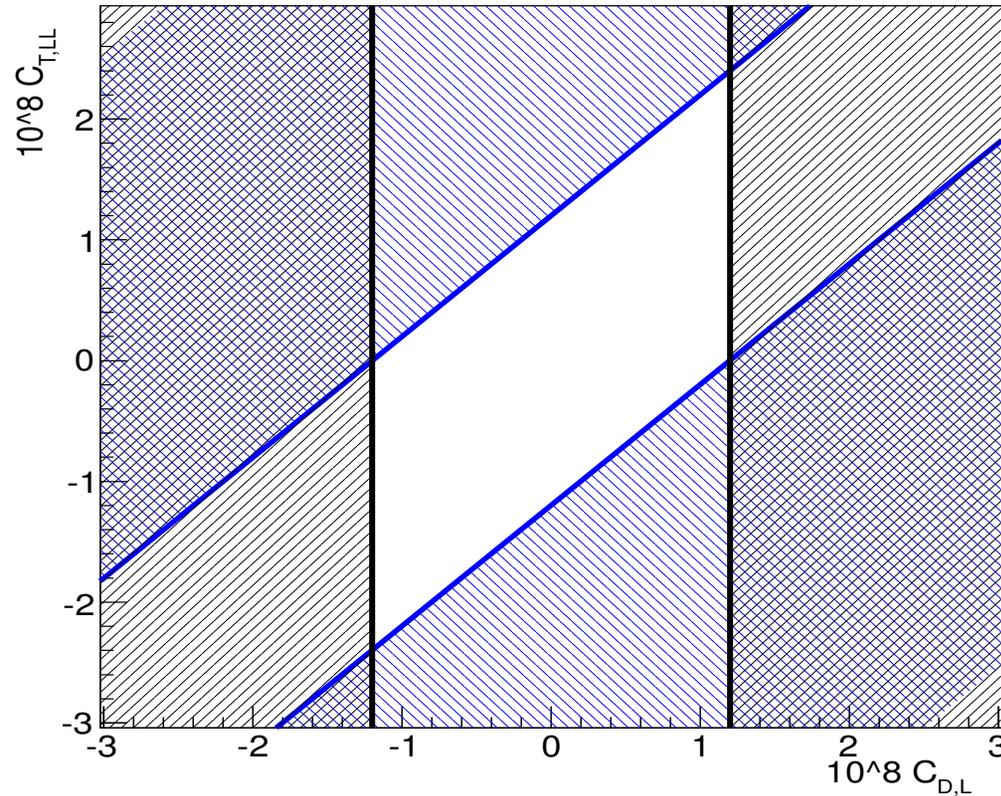
de $\mu \rightarrow e\gamma$ sur coeffs dipole(hor.) vs tenseur(vert.)

3. (?) identifier quels modèles correspondent aux coefficients à l'échelle m_{NP}

+ simplification: ne faire évolution de $\Lambda_{expt} \rightarrow m_{NP}$ qu'une fois

\Leftrightarrow plus facile, dans modèle, de calculer coeff d'op à m_{NP} qu'observables à Λ_{expt}

- réalité = calculs compliqués (inclure tout les boucles pertinent dans tout les modèles?)
- il faut quand-même faire du model-building à m_{NP}
... ..mais esperer que nouvelle perspective sera utile?



Bornes à l'arbre de $\mu \rightarrow e\gamma$ sur opérateur dipole (axe horizontal) et opérateur à-4-fermions tenseur
 Memes contrainte, mais avec boucles.

Supposons un modèle qui donne opérateur tenseur à une énergie m_{NP} . $BR(\mu \rightarrow e\gamma)$ est *sensible* à ce modèle (par boucles).

Mais faudrait mesurer un autre observable *complémentaire* pour identifier l'opérateur.

(mais en réalité, y'a pas que 2 opérateurs, y'en a foule ...)

Sommaire — LFV

oscillation de neutrinos \Rightarrow la violation de la saveur leptonique *existe!*

(mais on connaît pas les taux)

\Rightarrow perspective complémentaire sur le mécanisme de masse des ν

Certaines sensibilités exptales vont s'améliorer dans les prochaines années, par deux ($\mu \rightarrow e\bar{e}e$, $\mu \rightarrow e\gamma$) \rightarrow quatre+ ($\mu-e$ conv.) ordres de grandeur!

Deux approches théoriques:

- 1) construire modèles motivés/élégantes, puis calculer prédictions d'observables
- 2) supposer NP lourde (= paramétrisé par interactions de contact entre particules MS), et transporter les bornes exptales jusqu'au modèles (on se déplace vers les distances plus courtes)

Dans l'approche "bottom-up" 2), avec EFT, distinguer

1) *sensibilité* d'un observable à une interaction (top \rightarrow down en EFT= mettre une interaction, quelle observable est le plus sensible?), VS

2) *complémentarité* des observables, qui contraignent divers combo. linéaires de coeff.s d'opérateurs (pour reconstruire NP, faut identifier coeff.s d'opérateurs une-à-une, faut tout les bornes possibles)

Leptogénèse

tout ca, c'est de la matière...

1 quel rapport aux masses de neutrinos?

2 est-ce un conte de phée, ou peut-on falsifier/vérifier?

Quel rapport entre m_ν et l'excès de matière de l'U?

Tout ce qu'on *voit* (avec γ) dans l'Univers est *matière* (pas anti-matière). (et y'a 95% de l'U qu'on voit pas)

Matière = atomes = $\{n, p, e\}$, donc il y a un excès de baryons par rapport à anti-baryons (Asymétrie Baryonique de l'U = BAU):
 $\sim 6 \text{ baryons}/10^{10} \gamma$ aujourd'hui (PLANCK).

(On sait pas s'il y a une asymétrie chez les leptons: y' a un fond cosmologique de ν et $\bar{\nu}$, pas mesuré...)

Quel rapport entre m_ν et l'excès de matière de l'U?

Tout ce qu'on voit (avec γ) dans l'Univers est *matière* (pas anti-matière). (et y'a 95% de l'U qu'on voit pas)

Matière = atomes = $\{n, p, e\}$, donc il y a un excès de baryons par rapport à anti-baryons (Asymétrie Baryonique de l'U = BAU):
 $\sim 6 \text{ baryons}/10^{10} \gamma$ aujourd'hui (PLANCK).

(On sait pas s'il y a une asymétrie chez les leptons: y' a un fond cosmologique de ν et $\bar{\nu}$, pas mesuré...)

Ingrédients de Sakarov, pour fabriquer BAU:

1. violation de $\#$ baryonique B (pour évoluer d'état avec $B = 0 \rightarrow$ état avec $B \neq 0$)
2. violation C,CP (faut que particules et anti-part se comportent différemment)
3. hors-équilibre thermo (fabriquer = dynamique = pas-equilibre)

Tous présent dans MS! (mais on a pas encore trouvé moyen de fabriquer l'BAU dans le MS)

...mais, en ajoutant la violation du nombre/saveur leptonique au Modèle Standard, on peut fabriquer suffisamment de baryons!

Comment faire des baryons avec la violation du nombre/saveur leptonique

B, L^e, L^μ, L^τ paraissent conservés (si on néglige les oscillations de ν)

Mais dans le MS (QFT chirale), $B_L + L_L$ est "anormale" = pas-conservé

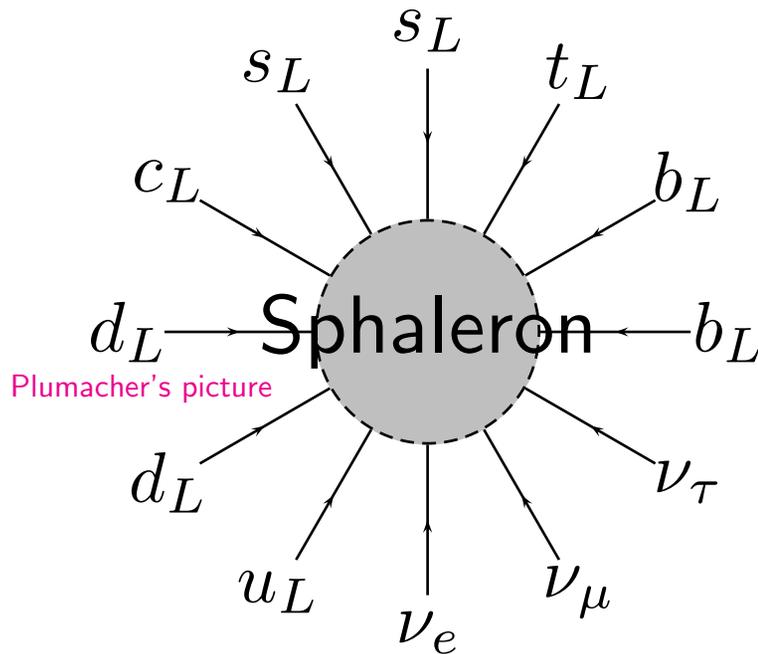
\Leftrightarrow dans l'U primordiale, à $T \gtrsim m_W$, violation rapide de $B_L + L_L$ ($\tau_{B+L} \ll \tau_U$)

Comment faire des baryons avec la violation du nombre/saveur leptonique

B, L^e, L^μ, L^τ paraissent conservés (si on néglige les oscillations de ν)

Mais dans le MS (QFT chirale), $B_L + L_L$ est "anormale" = pas-conservé

\Leftrightarrow dans l'U primordiale, à $T \gtrsim m_W$, violation rapide de $B_L + L_L$ ($\tau_{B+L} \ll \tau_U$)



$$\Gamma_{B+L} \sim \alpha^5 T \quad , \quad \text{à } T \gtrsim m_W \text{ dans l'U primordiale}$$

à LHC? $E \nearrow, \rho \searrow$, hors-équil. = calculs difficile... $\Gamma \approx 0$

Rubakov +?

Donc, leptogénèse = faire asym en $\{L_L^\alpha\}$ ($\alpha \in \{e, \mu, \tau\}$) à $T > m_W$

.... sera transformé en ΔB par "sphalerons" du MS.

fysique ou conte de phée?

un observable: 6 baryons pour 10^{10} photons dans l'U actuel...

... vs les multiples parametres de modèles NP

Que faire?

1. imposer que modèle-pour- m_ν produit ΔB
2. essayer de falsifier par d'autres observations...

physique ou conte de phée?

un observable: 6 baryons pour 10^{10} photons dans l'U actuel...

... vs les multiples parametres de modèles NP

Que faire?

1. imposer que modèle-pour- m_ν produit ΔB
2. essayer de falsifier par d'autres observations...

2 exemples avec le seesaw, type 1: ajouter 3 (ou2) singlets N au MS

base de masse des leptons chargés et des N , a échelle d'énergie $> M_i$:

$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + \mathbf{Y}_{j\alpha} \bar{N}_j \ell_\alpha \cdot \phi - \frac{1}{2} \bar{N}_j M_j N_j^c$$

M_I inconnus et Majorana (χ). CP dans phases.

add 18 parameters:

M_1, M_2, M_3

18 - 3 (ℓ phases) in λ



$$[m_\nu] = \mathbf{Y} M^{-1} \mathbf{Y}^T v^2$$

pour $Y \sim h_t, \quad M \sim 10^{15} \text{ GeV}$
 $M \sim \text{GeV} \quad Y \sim 10^{-7} \quad \sim .05 \text{ eV}$

9 parameters:

m_1, m_2, m_3

6 in U_{MNS}

Cas 1: $\text{TeV} \ll M_1 \ll M_{2,3} \dots \simeq$ conte de fée

Interactions/ désintégrations de N_1 , majorana, produisent ΔL (et asyms saveurs)

$M_{2,3} \gg M_1 \Rightarrow$ propagateurs_{2,3} \rightarrow interaction de contact, dont la partie imaginaire est $= \text{Im}[m_\nu]$.

$$\Delta B \propto N_1 \xrightarrow{Y} l_\alpha \quad N_1 \xrightarrow{Y^*} l_\alpha \quad \propto \frac{1}{8\pi} \kappa M_1 \quad , \quad \kappa \equiv [m_\nu]/v^2$$

pour $M_1 \ll M_{2,3}$, faut $M_1 \gtrsim 10^9$ pour obtenir ΔB assez grand

Cas 1: $\text{TeV} \ll M_1 \ll M_{2,3} \dots \simeq$ conte de fée

Interactions/ désintégrations de N_1 , majorana, produisent ΔL (et asyms saveurs)

$M_{2,3} \gg M_1 \Rightarrow$ propagateurs_{2,3} \rightarrow interaction de contact, dont la partie imaginaire est $= \text{Im}[m_\nu]$.

$$\Delta B \propto N_1 \xrightarrow{Y} \ell_\alpha \quad N_1 \xrightarrow{Y^*} \ell_\alpha \quad \propto \frac{1}{8\pi} \kappa M_1 \quad , \quad \kappa \equiv [m_\nu]/v^2$$

pour $M_1 \ll M_{2,3}$, faut $M_1 \gtrsim 10^9$ pour obtenir ΔB assez grand

Pour confirmer/falsifier:

(* faudrait mesurer masses, interactions des $N_i \dots$)

* peut-on connaitre la temperature de l'Univers après l'inflation (T_{reheat}) à partir de CMB (tens/scal) ou ondes gravitationnelles?

Martin+Ringeval

Pour conforter:

BuchmullerDomckeKamadaSchmitz

* trouver CPV dans les oscillations de ν (démontre qu'il y a phases chez les leptons)

Pour inconforter:

— contributions à une boucle de N_i à m_ϕ sont $> 125 \text{ GeV}$ pour $M_i > 10^8 \text{ GeV}$

— si on découvre que m_ν est Dirac (eg: pas de $0\nu 2\beta$ et IH?)

Cas 2: $M_2 \simeq M_3 \sim \text{GeV}$ (oublier N_1) = le νMSM

inconnus: M_3, M_2 , 2 phases PMNS, 1 yukawa complex

Cas 2: $M_2 \simeq M_3 \sim \text{GeV}$ (oublier N_1) = le νMSM

inconnus: M_3, M_2 , 2 phases PMNS, 1 yukawa complex

Yukawas infimes (responsable de production), \Rightarrow population de $N_{2,3}$ se développe vers $T \sim m_W$

Oscillations entre N et ν_L en U primordial: $\propto m^2$ (=pas de LNV), mais avec CP et TE on peut faire asymys savoureuses en L_L^α , (asym assez grand: prendre $M_3 - M_2 \lesssim 10^{-3}M$) transformées en ΔB par sphalerons.

Cas 2: $M_2 \simeq M_3 \sim \text{GeV}$ (oublier N_1)

inconnus: M_3, M_2 , 2 phases PMNS, 1 yukawa complex

Yukawas infimes (responsable de production), \Rightarrow population de $N_{2,3}$ se développe vers $T \sim m_W$

Oscillations entre N et ν_L en U primordial: $\propto m^2$ (=pas de LNV), mais avec \mathcal{CP} et \mathcal{TE} on peut faire asymys savoureuses en L_L^α , (asym assez grand: prendre $M_3 - M_2 \lesssim 10^{-3}M$).
Transformées en ΔB par sphalerons.

Parametres N_j :

eg SHiP (beam dump au CERN) pour $M \lesssim \text{GeV}$, chercher desintégrations N_j , \Leftrightarrow mesurer M_j , et Yukawa complexe (de melange vers e, μ)
Aussi contributions de N_j dans $0\nu 2\beta \dots$

Avec IH, observations de désintégrations N_j , $0\nu 2\beta$ et δ , on peut calculer ΔB

HernandezKevic et al

Sommaire

Les oscillations de neutrinos imposent qu'aussi les leptons chargés peuvent changer de saveur.

De telles interactions “Lepton Flavour Violating” n'ont pas encore été observées...mais les sensibilités exptales aux transitions $\mu \leftrightarrow e$ vont s'améliorer par $10^{-2} \rightarrow 10^{-4}$ (exp. en construction), et $\tau \leftrightarrow \ell$ par $\lesssim 10^{-1}$ (SuperBelle).

LFV = Nouvelle Physique qui existe, découverte donnerait nouvelle perspective sur le modèle responsable des masses des ν .

Faut Nouvelle Physique pour fabriquer l'asym. baryonique de l'U... mais ce n'est qu'un chiffre :(

* trouver modèle NP motivé \Leftrightarrow leptogénèse (m_ν) (évite aussi borne de durée de vie du p)

Beaucoup de modèles...certaines plus vérifiables que d'autres. (possibilité de calculer asym B à partir d'observables, certains plages de paramètres du ν MSM).

Backup

The (type I) Seesaw

3 singlet N to the SM in the charged lepton and N mass bases, at energy scale $> M_i$:

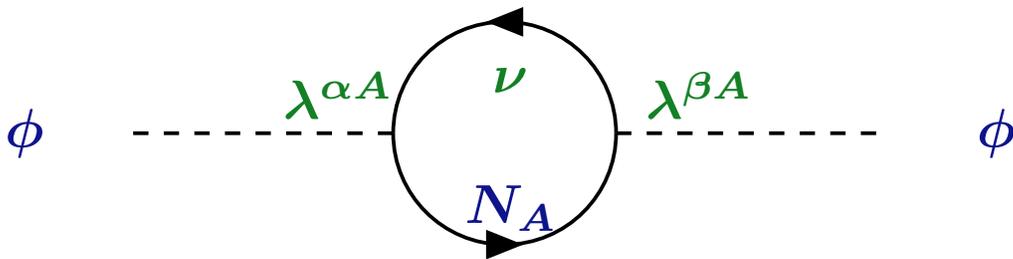
$$\mathcal{L} = \mathcal{L}_{SM} + \lambda_{\alpha J} \bar{N}_J \ell_\alpha \cdot \phi - \frac{1}{2} \bar{N}_J M_J N_J^c$$

add 18 par
 M_1, \dots

18 - 3 (ℓ phas

known ($\langle \phi \rangle = \langle \phi^0 \rangle$), and \mathcal{L} . CP in $\lambda_{\alpha J}$.

low scale, Higgs mass contribution

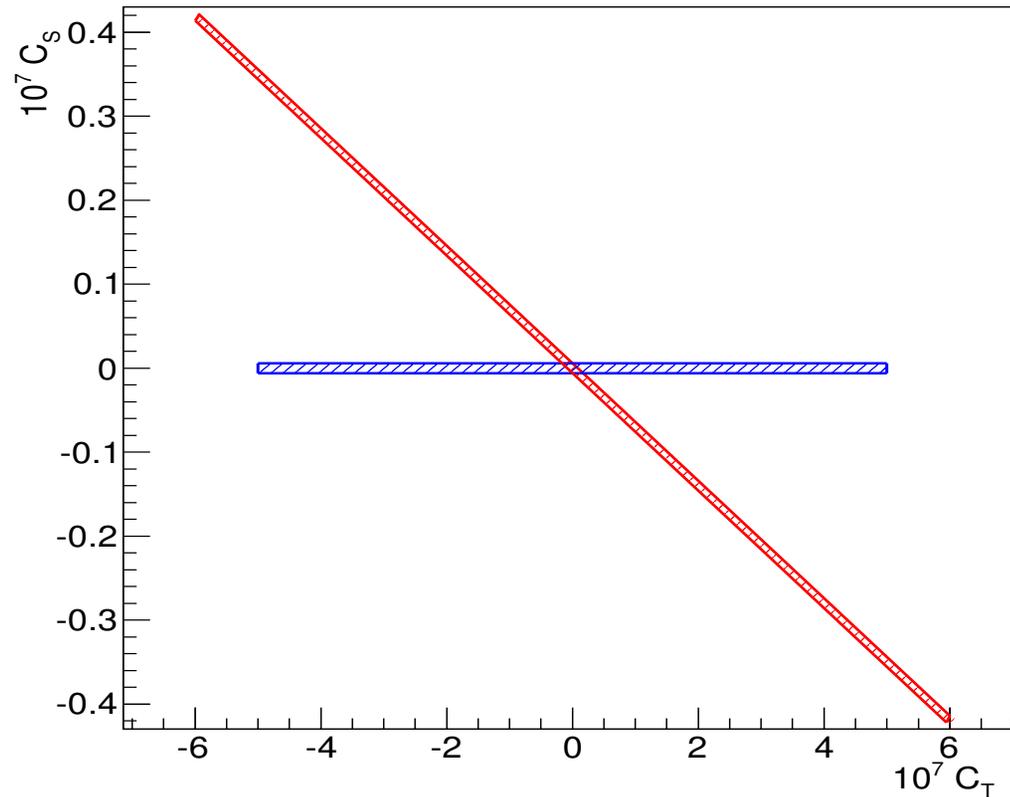


$$\delta m_\phi^2 \simeq - \sum_I \frac{[\lambda^\dagger \lambda]_{II}}{8\pi^2} M_I^2 \sim \frac{m_\nu M_I^3}{8\pi^2 v^4} v^2$$

for $M \gtrsim 10^7$ GeV $> v^2$

cancel at 1 loop by adding particles) \Rightarrow do seesaw with $M_I \lesssim 10^8$ GeV?
 symmetry (SUSY?) to cancel at ≥ 2 loop? ...

(in this talk, $\phi = \text{Higgs}$, $H = \text{Hubble}$)



Supposons $BR(Al + \mu \rightarrow Al + e) < 10^{-14}$. Contraintes sur coefficients d'opérateur scalaire (spin-independent, sur verticale) et tenseur (spin-dependent, horizontale)

Memes contraintes, mais sur coefficients à l'échelle m_W .

Supposons un modèle qui donne opérateur tenseur à m_W . La conversion $\mu \rightarrow e$ SpinIndep a une meilleure *sensibilité* à ce modèle que la conversion SpinDep...mais observations *complémentaires*= faut mesurer les deux, pour identifier l'opérateur.

(mais en réalité, y'a pas que 2 opérateurs, y'en a foule ...)