

Universalité de la saveur leptonique

Les trois leptons ont-ils réellement les mêmes propriétés ?

Damir Becirevic⁽¹⁾, **Olivier Leroy**⁽²⁾ (olivier.leroy@in2p3.fr), **Francesco Polci**⁽³⁾ et **Guy Wormser**⁽¹⁾

(1) Laboratoire de Physique des deux infinis Irène Joliot-Curie (Université Paris-Saclay, CNRS), Faculté des sciences, Bât. 100, 91405 Orsay Cedex.

(2) CPPM (Aix-Marseille Univ., CNRS/IN2P3), 163 avenue de Luminy, 13288 Marseille Cedex 09.

(3) LPNHE (Sorbonne Université, CNRS/IN2P3), Campus Pierre et Marie Curie, 4 place Jussieu, 75252 Paris Cedex 05.

Des résultats récents semblent suggérer que les trois leptons chargés (l'électron, le muon et le tau) ne se comporteraient pas de la même façon vis-à-vis de l'interaction faible, l'une des quatre forces fondamentales. S'ils sont confirmés, ces soupçons pourraient être une indication de nouveaux phénomènes fondamentaux.

Cet article fait le point sur ce questionnement qui intrigue et excite le monde de la physique des particules aujourd'hui, en testant l'universalité de la saveur des leptons dans la désintégration des mésons B.

L'universalité de la saveur leptonique

La théorie qui décrit le monde de l'infiniment petit porte le nom de « Modèle Standard » (MS) de la physique des particules. Cette théorie comporte douze particules élémentaires « de matière » : les six quarks u, d, s, c, b, t , et les six leptons $e, \mu, \tau, \nu_e, \nu_\mu, \nu_\tau$ (trois leptons chargés : l'électron, le muon, le tau, et leurs trois neutrinos associés), auxquelles il faut ajouter les douze antiparticules correspondantes^(a). Leur comportement est régi par trois interactions, chacune véhiculée par des particules médiatrices : le photon pour l'interaction électromagnétique, les bosons W^+, W^- et Z^0 pour l'interaction faible, et les gluons pour l'interaction forte.

Ce modèle a connu de remarquables succès, mais souffre de plusieurs manques. Par exemple, il n'inclut pas l'interaction gravitationnelle, il ne fournit aucune explication de l'asymétrie entre matière et antimatière que l'on observe dans l'Univers, ni de l'existence de la matière noire et de l'énergie noire dont on a des indications *via* les observations astronomiques. Ainsi, le MS n'explique finalement qu'environ 5% du contenu de l'Univers et ne peut donc constituer le modèle ultime. C'est pourquoi les physiciens recherchent de nouvelles particules ou des phénomènes en désaccord avec les prédictions du Modèle

Standard. Cela permettrait de compléter notre connaissance des composants et interactions fondamentales de l'Univers, et nous amènerait à construire une théorie plus complète.

Ce défi est relevé par la plus grande machine accélératrice de particules au monde : le grand collisionneur de hadrons (*Large Hadron Collider* ou LHC) du Cern, situé sous la frontière franco-suisse à côté de Genève. Une de ses quêtes consiste à tester les propriétés fondamentales des leptons. Dans le Modèle Standard, les propriétés des trois types, ou *saveurs*, de leptons (électron, muon ou tau) sont identiques, à part leur masse^(b) : on parle de l'**universalité de la saveur leptonique** (LFU en anglais pour *Lepton Flavor Universality*). Cette universalité est assurée par construction dans le Modèle Standard : le couplage des bosons W à un lepton chargé et à son neutrino ne dépend pas de la saveur du lepton. De plus, ce couplage est le même que celui du boson Z^0 aux paires de leptons identiques. Une façon de vérifier cette propriété est de mesurer le rapport entre les taux de désintégration d'une particule dans deux états finaux contenant des couples de leptons de saveurs différentes, et de comparer le résultat avec la prédiction du Modèle Standard^(c). L'universalité des couplages entre électrons, muons et taus a été testée pendant de nombreuses années en utilisant des désintégrations de hadrons contenant



© CERN (photo : Maximilien Brice)

L'expérience LHCb au Cern. Située sur l'anneau de collision proton-proton du LHC, l'expérience LHCb explore les légères différences qui existent entre matière et antimatière, grâce à l'étude des quarks *b* issus de la désintégration des mésons *B*.

des quarks légers (essentiellement des pions et kaons), ainsi que des désintégrations des bosons *W* et *Z*⁰. Dans cet article, l'universalité des saveurs est testée dans les désintégrations de mésons beaux (mésons *B*, composés d'un quark *b* et d'un antiquark \bar{u} ou \bar{d}) en leptons.

Anomalies dans les transitions $b \rightarrow c \ell \nu$

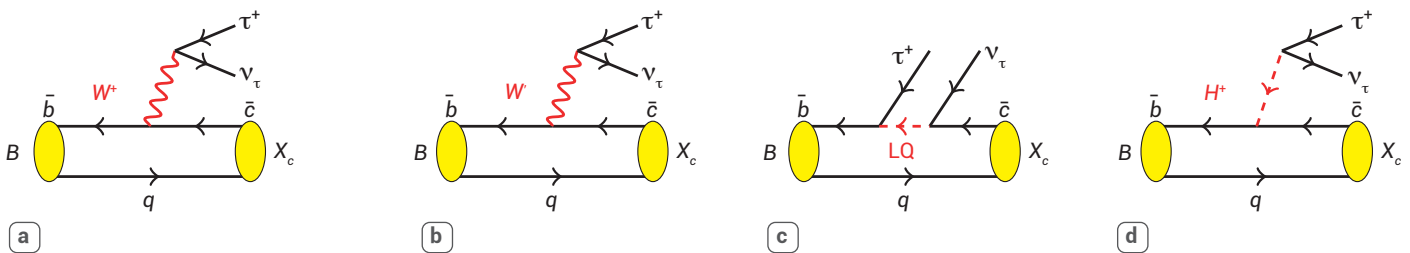
Une manière de vérifier l'universalité de la saveur leptonique est de mesurer le rapport : $R(D) = \mathcal{B}(B \rightarrow D \tau \nu_\tau) / \mathcal{B}(B \rightarrow D \ell \nu_\ell)$ (1), où ℓ est un lepton chargé μ ou e .

Au numérateur, on trouve le taux de désintégration (\mathcal{B}) du meson *B* en un méson *D*, un lepton τ et son neutrino taonique ν_τ , tandis qu'au dénominateur

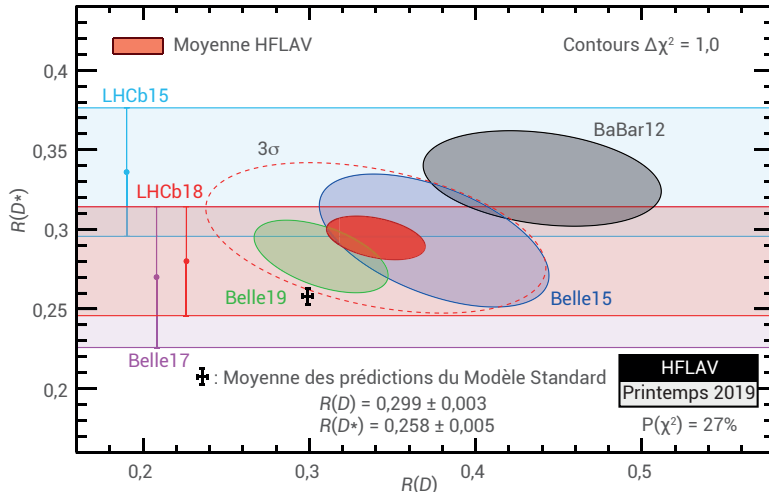
on trouve le taux de la même désintégration avec cette fois des leptons de saveur différente dans l'état final, e ou μ (l'égalité des taux de désintégration \mathcal{B} en électrons et en muons a été vérifiée expérimentalement à mieux que 1 %). Le méson *D* est une particule contenant un quark *c* et un antiquark \bar{u} ou \bar{d} , alors que le méson *B* contient un quark *b* au lieu du quark *c* (et les mêmes antiquarks). Le même type de rapport a été mesuré pour des mésons excités *D*^{*}. Le diagramme de Feynman de la désintégration (dite « semi-leptonique ») $B \rightarrow D \tau \nu_\tau$ est représenté sur la figure 1a. On observe qu'en terme de quarks le processus de désintégration fondamental est $b \rightarrow c \ell \nu$, via l'émission d'un boson *W*, un processus calculable avec une bonne précision dans le Modèle Standard.

La première mesure expérimentale des rapports $R(D)$ et $R(D^*)$, faite dans l'expérience BaBar aux USA en 2012, était plus grande que la valeur prédite dans le Modèle Standard. Peu après, les mesures similaires faites dans l'expérience Belle au Japon ont indiqué des déviations dans la même direction. Enfin, deux mesures de $R(D^*)$ effectuées par l'expérience LHCb au Cern ont conduit au même constat. Il faut noter que les expériences BaBar et Belle sont conduites auprès d'anneaux de collision électron-positon, donc dans un environnement expérimental très différent de celui du LHC, qui est un collisionneur de protons. En tout, ce sont donc huit mesures, provenant de trois expériences différentes qui présentent des valeurs supérieures à celles attendues.

>>>



1. Diagrammes dits « de Feynman » pour une désintégration $B \rightarrow X_c \tau \nu_\tau$ dans le Modèle Standard (a), et pour trois modèles hypothétiques prévoyant de nouvelles particules qui n'ont jamais été observées : *W*' (b), leptoquark LQ (c) et Higgs chargé *H*⁺ (d). *X_c* représente un méson *D*, *D*^{*} ou *J/ψ*. Le quark *q* peut être un *u*, un *d* ou un *c*.



2. Quantités $R(D^*)$ et $R(D)$ mesurées par les collaborations BaBar, Belle et LHCb (ref. [1], p. 180). La valeur moyenne mondiale calculée par la collaboration HFLAV^(d) est indiquée par l'ellipse rouge, tandis que la prédiction du Modèle Standard est représentée par le point avec les barres d'incertitudes situées à environ trois déviations standard (3σ , contour elliptique en tirets rouges). La figure suppose que le dénominateur de la formule (1) est identique pour les muons et les électrons, aussi bien pour les mesures que pour la prédiction du Modèle Standard. Les deux leptons légers (électrons et muons) ont été combinés dans les mesures effectuées par BaBar et Belle, alors que LHCb n'a utilisé que les muons.

>>>

L'ensemble de ces résultats est résumé sur la figure 2, sur laquelle $R(D)$ est en abscisse et $R(D^*)$ en ordonnée. La prédiction théorique du MS est représentée par le point avec les incertitudes ($R(D) = 0,299 \pm 0,003$, $R(D^*) = 0,258 \pm 0,005$). Les mesures expérimentales sont représentées, soit par des ellipses (39 % de degré de confiance) lorsque les expériences mesurent simultanément $R(D)$ et $R(D^*)$, soit par des bandes colorées horizontales (68 % de degré de confiance) lorsque l'expérience ne mesure que $R(D^*)$. L'ellipse rouge représente leur moyenne [1] : $R(D) = 0,340 \pm 0,040$, $R(D^*) = 0,295 \pm 0,019$, où les incertitudes incluent une part systématique et une part statistique. La prédiction du MS se situe donc aujourd'hui à environ trois déviations standard (3σ) de la mesure expérimentale, comme l'indique le contour elliptique en tirets rouges. Elle suggère une possible violation de la saveur leptonique dans le processus $b \rightarrow c \ell \nu$.

Le principal défi expérimental rencontré par ces analyses est la présence de plusieurs neutrinos dans l'état final. Un premier neutrino provient de la désintégration du boson W dans la transition $b \rightarrow c \ell \nu$. Un ou plusieurs autres neutrinos proviennent de la désintégration du lepton τ . Ces particules échappent à la détection directe. On doit donc utiliser l'ensemble des informations disponibles dans le détecteur pour inférer leurs propriétés.

Anomalies dans les transitions $b \rightarrow s \ell \ell$

Un autre indice de violation de l'universalité de la saveur leptonique provient du processus $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$, très différent du précédent et dans lequel un quark b se transforme en quark s en émettant un couple de leptons ℓ (fig. 3a). Ce processus est responsable, par exemple, des désintégrations $B \rightarrow K \mu^+ \mu^-$, où le méson K est une particule qui contient un quark u et un antiquark \bar{s} . En 2014, grâce à un nombre de mésons B collectés sans précédent, l'expérience LHCb a réussi à mesurer le rapport : $R_K = \mathcal{B}(B \rightarrow K \mu^+ \mu^-) / \mathcal{B}(B \rightarrow K e^+ e^-)$ (2), obtenant une valeur d'environ 0,69, située à $2,6 \sigma$ en-dessous de celle prédite par le Modèle Standard ($R_K \simeq 1$) [3]. L'écart provenait du déficit d'événements dans le canal avec des muons. Cette observation a été confirmée en 2019 avec plus du double de mésons B analysés, ainsi qu'en 2017 par la mesure du rapport R_{K^*} , semblable à R_K , mais dans lequel le kaon K est remplacé par un méson excité, K^* .

Pour mieux apprécier le défi expérimental relevé dans ces mesures, il faut considérer que les processus relevant de $b \rightarrow s \ell^+ \ell^-$ sont très rares : sur 10 millions de mésons B , un seul se désintègre en $K^* \ell^+ \ell^-$. Une difficulté encore plus grande pour LHCb venait du choix du canal de désintégration avec électrons. En effet, le calorimètre de

LHCb, instrument dédié à l'identification des électrons et à la mesure de leur énergie, couvre un petit angle géométrique autour des faisceaux, où la multiplicité des particules produites dans les collisions du LHC est élevée, ce qui rend plus grande la contamination par des particules de nature différente. De plus, lors du passage à travers la matière du détecteur, les électrons perdent une partie de leur énergie sous forme de rayonnement de freinage. Cette radiation n'est pas toujours enregistrée par le détecteur, et cela a un impact sur la précision de la mesure de l'énergie des électrons. Cependant, les physiciens de LHCb ont réussi à maîtriser ces problèmes et à effectuer la meilleure mesure à ce jour.

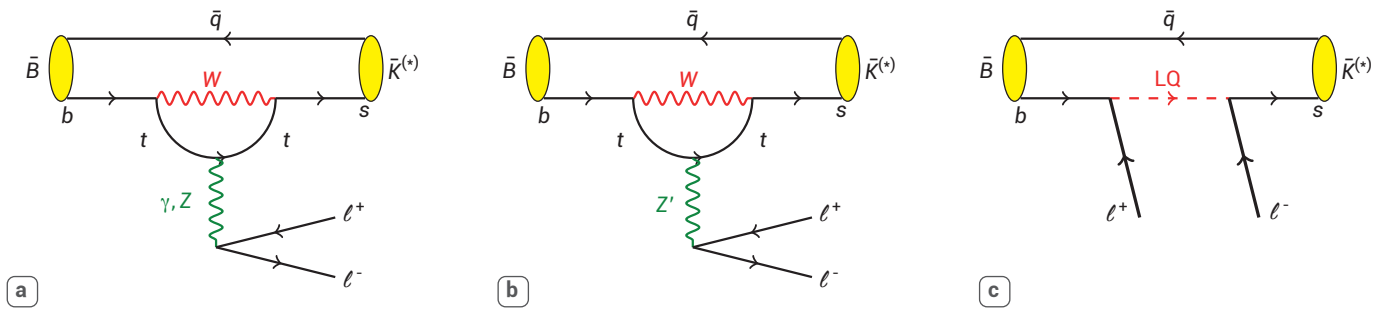
Ces complications ne seront pas présentes dans le cas de l'expérience Belle II au Japon, faite sur un collisionneur $e^+ e^-$, qui a commencé à collecter des données, et qui répètera les mesures des rapports R_K et R_{K^*} en profitant d'un environnement plus favorable. En effet, grâce à des collisions moins denses en nombre de particules produites, à l'étanchéité des détecteurs autour du point de collision et à une quantité de matière traversée plus faible, l'identification des électrons sera plus simple et la mesure de leur énergie plus précise.

Interprétations phénoménologiques des anomalies de saveurs

Les anomalies observées dans les tests de l'universalité leptonique utilisant les désintégrations des mésons B ont excité la communauté des physiciens. Pour l'instant il ne s'agit que d'indices, et il n'est pas possible d'affirmer qu'un nouveau phénomène a été observé. Cependant, les théoriciens se sont mis rapidement au travail pour présenter des interprétations de ces résultats, en proposant des classes de nouveaux modèles qui, en plus d'expliquer les anomalies observées, doivent aussi tenir compte des contraintes provenant de toutes les autres mesures effectuées dans le domaine.

Les mesures des rapports $R(D)$ et $R(D^*)$ suggèrent les scénarios suivants :

- Un ou plusieurs nouveaux bosons, dits leptoquarks (LQs), pourraient se coupler directement aux quarks et aux leptons, comme dans le diagramme 1c. La masse de ces nouveaux bosons serait voisine de $1 \text{ TeV}^{(e)}$.



3. Exemples de diagrammes de Feynman pour la désintégration $\bar{B} \rightarrow \bar{K}^* \ell^+ \ell^-$ dans le Modèle Standard (a) et pour deux modèles avec de nouvelles particules Z' (b) ou un leptoquark (c) [4]. L'antiquark q peut être un \bar{u} ou un d .

- Une nouvelle interaction véhiculée par un nouveau boson W' pourrait être en œuvre, comme dans le diagramme 1b. Ce boson aurait une masse très élevée pour assurer la compatibilité avec la fréquence d'oscillation entre les mésons K^0 et leurs antiparticules \bar{K}^0 , un phénomène très précisément mesuré. De plus, de nouvelles particules, des neutrinos massifs, seraient nécessaires dans cette classe de modèles.
- Un nouveau boson de Higgs, différent de celui du MS et avec une charge non nulle, pourrait jouer le rôle de médiateur entre les quarks et les leptons, comme dans le diagramme 1d. Cela demanderait une structure très particulière des interactions des quarks et leptons avec les bosons de Higgs neutres et chargés.

Parmi les modèles les plus étudiés pour expliquer les mesures des rapports R_K et R_{K^*} , on trouve les suivants :

- Des modèles où l'on introduit une nouvelle interaction transmise par un nouveau boson neutre, Z' , avec une masse autour de 1 TeV, accompagné par l'existence d'au moins un quark dit *vectorlike* de très grande masse, ce qui complexifie la construction de ce type de modèle. Un exemple de diagramme est donné en figure 3b.
- À nouveau, des modèles qui entraînent un ou plusieurs états de leptoquarks légers [O (1 TeV)], comme dans le diagramme 3c.

Il faut noter que les modèles avec leptoquarks sont les seuls scénarios qui peuvent fournir une explication simultanée des mesures actuelles de $R(D)$, $R(D^*)$, R_K et R_{K^*} , et accommoder un grand nombre de contraintes provenant des processus à basses et hautes énergies, tout en assurant que le nombre de nouveaux paramètres reste minimal.

Conclusion et perspectives

Ainsi que l'on a pu le constater, il semblerait que la comparaison de la désintégration de mésons B en différents types de leptons (électron, muon, tau) présente des anomalies qui mettent à mal le principe de l'universalité leptonique. Mais, même si les théoriciens sont d'ores et déjà au travail pour expliquer cette brisure de l'universalité, il est encore trop tôt pour se prononcer.

Actuellement en arrêt technique, l'expérience LHCb recommencera la prise de données en 2021. En attendant, la collaboration met à jour ses analyses en utilisant toutes les données collectées entre 2011 et 2018, et en mesurant d'autres rapports de désintégrations de la même nature que ceux qui ont été présentés dans cet article. De son côté, l'expérience Belle II vient de démarrer au Japon et pourra mesurer ces rapports de façon indépendante et dans des conditions totalement différentes. Les résultats des deux expériences seront

comparés et, si les anomalies sont confirmées, on aura démontré que la violation de l'universalité de la saveur leptonique est une propriété fondamentale de la physique au-delà du Modèle Standard. On aura alors à disposition des processus pour étudier sa nature.

Nous aurons ainsi fait un nouveau pas en avant dans la compréhension de notre Univers. ■

En savoir plus

- 1• Heavy Flavor Averaging Group (HFLAV), Y. Amhis *et al.*, "Averages of b -hadron, c -hadron, and τ -lepton properties as of 2018", *ArXiv:1909.12524* (2019).
- 2• R. Aaij *et al.* (LHCb Collaboration), "Measurement of the ratio of branching fractions $\mathcal{B}(B_c^+ \rightarrow J/\psi \tau^+ \nu_\tau) / \mathcal{B}(B_c^+ \rightarrow J/\psi \mu^+ \nu_\mu)$ ", *Phys. Rev. Lett.* **120** (2018) 121801.
- 3• R. Aaij *et al.* (LHCb Collaboration), "Test of lepton universality using $B^+ \rightarrow K^+ \ell^+ \ell^-$ decays", *Phys. Rev. Lett.* **113** (2014) 151601.
- 4• The LHCb Collaboration, R. Aaij, B. Adeva, M. Adinolfi *et al.*, "Test of lepton universality with $B^0 \rightarrow K^{*0} \ell^+ \ell^-$ decays", *J. High Energ. Phys.* **2017**, 8 (2017) 55.

(a) Une particule d'antimatière est indiquée avec une barre surmontant le symbole attribué à la particule de matière correspondante.
 (b) Le muon est un « cousin » en tous points semblable à l'électron, mais il est environ 200 fois plus massif. De même, le tau est un cousin 3500 fois plus massif que l'électron.
 (c) La prédiction du MS tient compte des différences de masse entre les leptons.
 (d) HFLAV (Heavy Flavor Averaging Group) est une association internationale de physiciens, fondée en 2002, qui mesurent les propriétés des hadrons (essentiellement les mésons B et D) contenant des quarks b et c et des leptons τ . HFLAV (<https://hflav.web.cern.ch>) calcule et publie les valeurs moyennes de quantités telles que les temps de vie, les violations de parité CP et les tests d'universalité de la saveur leptonique.
 (e) En physique des particules, on utilise l'électronvolt (eV) comme mesure de masse, grâce à la relation d'Einstein $E = mc^2$. Ainsi $1 \text{ eV} / c^2 = 1,78 \times 10^{-36} \text{ kg}$, et on écrit $c = 1$ par convention. $1 \text{ TeV} = 10^{12} \text{ eV}$.