

La Violation CP

David London

Université de Montréal

PHY2601

PDF: <http://www.lps.umontreal.ca/~london/london.html>

Le Big Bang et l'antimatière

Début de l'univers: le Big Bang a libéré énormément d'énergie, ce qui s'est converti en quantités égales de matière et d'antimatière. Ensuite l'univers s'est refroidi et les étoiles, les galaxies, etc. ont été formées. Cependant, ces choses sont constituées presque exclusivement de matière.

Où est allée toute l'antimatière?

Explication: la symétrie qui relie la matière et l'antimatière est CP (conjugaison de charge – parité). Lorsque l'univers se refroidit, les particules collisionnent entre elles, formant ainsi d'autres particules. Si la symétrie CP est brisée de sorte que les processus produisant la matière sont favorisés par rapport aux processus produisant l'antimatière, à la longue, l'antimatière disparaît.

Quelle est l'origine de cette violation CP?

Nous observons la violation CP à basses énergies, dans des processus impliquant les kaons ou les mésons B et D . Ce phénomène s'explique dans le cadre du modèle standard (MS) de la physique des particules. Mais l'effet dans le MS est trop faible pour expliquer la violation CP dans l'évolution de l'univers. Donc il doit y avoir de nouvelles contributions à la violation CP – la *nouvelle physique*.

La recherche de cette nouvelle physique est un des buts de toutes les expériences actuelles ou planifiées en physique des particules. Dans cette conférence je décrirai les résultats actuels de la violation CP, ainsi que les pistes de recherche pour la nouvelle violation CP.

Modèle Standard – Résumé

3 forces sont décrites par le MS: l'électromagnétisme (échange de photons), la force forte (échange de gluons) et la force faible (échange de bosons faibles, W^\pm, Z^0).

∃ 12 fermions fondamentaux de spin $\frac{1}{2}$. Deux types: leptons (ne ressentent pas la force forte) et quarks (ressentent la force forte). On peut diviser ces 12 fermions en 3 familles (3 répliques du même patron):

$$\begin{array}{l} \text{Leptons : } \left(\begin{array}{c} \nu_e \\ e^- \end{array} \right), \quad \left(\begin{array}{c} \nu_\mu \\ \mu^- \end{array} \right), \quad \left(\begin{array}{c} \nu_\tau \\ \tau^- \end{array} \right) \\ \text{Quarks : } \left(\begin{array}{c} u \\ d \end{array} \right), \quad \left(\begin{array}{c} c \\ s \end{array} \right), \quad \left(\begin{array}{c} t \\ b \end{array} \right) \end{array} \quad \begin{array}{l} Q_{em} = 0 \\ Q_{em} = -1, \\ Q_{em} = \frac{2}{3} \\ Q_{em} = -\frac{1}{3}. \end{array}$$

Dans chaque paire de fermions, on peut transformer celui en haut en celui en bas (ou vice-versa) avec l'échange d'un W^\pm .

Kaons: K^0 et \bar{K}^0

La paire de particules "étranges" $K^0\bar{K}^0$ est produite dans des interactions électromagnétique ou forte. Les K^0 et \bar{K}^0 se désintègrent via la force faible en particules non-étranges.

Système des kaons: 2 états observés:

$$K_S : \quad \tau_S \sim 10^{-10} \text{ sec ,}$$

$$K_L : \quad \tau_L \sim 10^{-7} \text{ sec .}$$

Désintégrations:

$$K_S \rightarrow \pi\pi \quad CP = + ,$$

$$K_L \rightarrow \pi\pi\pi \quad \pi^0\pi^0\pi^0 : CP = - .$$

Donc, K_S est CP +, K_L est CP -, et CP est conservé par la force faible.

Cependant: 1964: la désintégration $K_L \rightarrow 2\pi$ observée. Petit rapport d'embranchement ($\simeq 10^{-3}$), mais violation de CP.

\Rightarrow On définit

$$K_1 \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} [K^0 + \bar{K}^0] \quad (CP = +),$$

$$K_2 \equiv \frac{1}{\sqrt{2}} [K^0 - \bar{K}^0] \quad (CP = -).$$

États physiques sont des combinaisons linéaires de CP + et CP -:

$$K_S \equiv \frac{1}{1 + |\epsilon|^2} [K_1 - \epsilon K_2],$$

$$K_L \equiv \frac{1}{1 + |\epsilon|^2} [K_2 + \epsilon K_1],$$

avec $|\epsilon| = 2.26 \times 10^{-3}$.

Comment comprendre ce résultat?

Rappel: addition de deux spins $\frac{1}{2}$ en mécanique quantique. Les états $|s_1 s_{1z}\rangle |s_2 s_{2z}\rangle = |\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}\rangle |\frac{1}{2} \pm \frac{1}{2}\rangle$ sont des états propres de \vec{S}_1^2 , S_{1z} , \vec{S}_2^2 , S_{2z} . Si on considère la somme des deux spins, $\vec{S} = \vec{S}_1 + \vec{S}_2$, quels sont les états propres de \vec{S}^2 et S_z ?

Solution: le spin total peut prendre les valeurs 0 ou 1. Les états propres sont

$$\begin{aligned}
 |11\rangle &= |++\rangle & , & & |10\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}[|+-\rangle + |-+\rangle] , \\
 |1-1\rangle &= |--\rangle & , & & |00\rangle &= \frac{1}{\sqrt{2}}[|+-\rangle - |-+\rangle] ,
 \end{aligned}$$

où nous avons défini $|s_1 s_{1z}\rangle |s_2 s_{2z}\rangle \rightarrow |s_{1z} s_{2z}\rangle \equiv |\pm\pm\rangle$.

Donc il y a une matrice de transformation entre les deux ensembles d'états propres. Les éléments de cette matrice sont les coefficients de Clebsch-Gordan. Ils sont réels.

Dans le système des kaons, on a une situation semblable. Les états $\{K^0, \bar{K}^0\}$ sont les états propres des interactions électromagnétique et forte, tandis que $\{K_S, K_L\}$ sont les états physiques (états propres de l'hamiltonien total). Les deux ensembles d'états sont reliés par une matrice de transformation avec l'élément inconnu ϵ .

On peut comprendre l'origine d' ϵ en examinant les matrices desquelles $\{K^0, \bar{K}^0\}$, $\{K_1, K_2\}$ et $\{K_S, K_L\}$ sont des états propres.

Théorie: (1) pas d'interaction faible: K^0 et \bar{K}^0 sont des états propres de H :

$$\begin{pmatrix} m_0 & 0 \\ 0 & m_0 \end{pmatrix} .$$

K^0 et \bar{K}^0 ont la même masse.

(2) On ajoute les interactions faibles. K^0 et \bar{K}^0 ne sont pas des états propres $\implies \exists$ un mélange $K^0-\bar{K}^0$. Si CP conservé:

$$\begin{pmatrix} m_0 & \Delta \\ \Delta & m_0 \end{pmatrix} .$$

États propres: K_1 et K_2 (états propres de CP).

(3) On ajoute la violation CP:

$$\begin{pmatrix} m_0 & \Delta \\ \Delta^* & m_0 \end{pmatrix} , \quad \frac{1 + \epsilon}{1 - \epsilon} = \sqrt{\frac{\Delta}{\Delta^*}} .$$

Remarque: si Δ est réel, $\epsilon = 0$ (conservation de CP).

Donc, la matrice de transformation entre $\{K^0, \bar{K}^0\}$ et $\{K_S, K_L\}$ est complexe

\implies la violation CP est due aux *phases* dans les interactions faibles.

Explication du MS de la Violation CP

Interactions faibles:

$$(\bar{u}^0 \quad \bar{c}^0 \quad \bar{t}^0) \begin{pmatrix} 1 & & \\ & 1 & \\ & & 1 \end{pmatrix} \begin{pmatrix} d^0 \\ s^0 \\ b^0 \end{pmatrix} W ,$$

où les q^0 sont les états qui participent dans les interactions faibles. Mais ils ne sont pas les états physiques (comme $\{K^0, \bar{K}^0\}$ et $\{K_S, K_L\}$). En fait, les états physiques u, c, t sont des combinaisons linéaires de u^0, c^0, t^0 , ainsi que d, s, b et d^0, s^0, b^0 .

Ceci implique que \exists transitions entre tous les quarks avec $Q_{em} = \frac{2}{3}$ (u, c, t) et ceux avec $Q_{em} = -\frac{1}{3}$ (d, s, b). On paramétrise ces couplages avec la matrice Cabibbo-Kobayashi-Maskawa (CKM):

$$(\bar{u} \quad \bar{c} \quad \bar{t}) V_{CKM} \begin{pmatrix} d \\ s \\ b \end{pmatrix} W , \quad V_{CKM} = \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & V_{ub} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ V_{td} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} .$$

V_{CKM} est unitaire. Paramétrisation: 3 angles (réels) et une phase (complexe). Point: avec 3 générations, les interactions faibles comprennent automatiquement une phase. Cette phase est responsable de la violation CP dans le système des kaons.

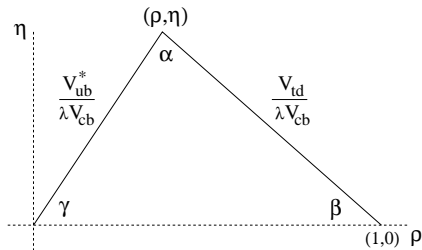
Selon les données expérimentales, c'est seulement les éléments dans les coins qui possèdent des phases importantes:

$$V_{CKM} \simeq \begin{pmatrix} V_{ud} & V_{us} & |V_{ub}|e^{-i\gamma} \\ V_{cd} & V_{cs} & V_{cb} \\ |V_{td}|e^{-i\beta} & V_{ts} & V_{tb} \end{pmatrix} .$$

1^{ère} et 3^{ième} colonnes orthogonales:

$$V_{ud} V_{ub}^* + V_{cd} V_{cb}^* + V_{td} V_{tb}^* = 0 = |V_{ud}| |V_{ub}| e^{i\beta} + |V_{cd}| |V_{cb}| + |V_{td}| |V_{tb}| e^{-i\gamma} .$$

Relation triangulaire dans le plan complexe: *triangle unitaire*:

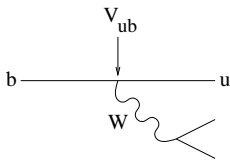
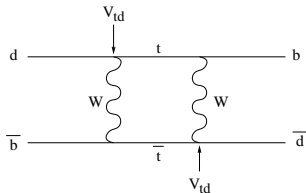


Les angles α , β et γ sont tous proportionnels à la phase paramétrisant V_{CKM} , et impliquent la violation CP. On a $\alpha + \beta + \gamma = \pi$ (test du MS!).

B_d^0 , \bar{B}_d^0 et B^\pm

Point: on peut mesurer ces angles dans le système des mésons B sans incertitude hadronique.

Les désintégrations des B comprennent les deux phases dans les coins de la matrice V_{CKM} . On trouve la phase β dans le mélange $B_d^0-\bar{B}_d^0$ et la phase γ apparaît dans la transition $b \rightarrow u$:



Dans les années 1990, les “usines aux mésons B ” BaBar (SLAC, Californie, É.-U.) et Belle (KEK, Japon) [collisionneurs e^+e^-] ont été construits afin de mesurer cette violation CP.

Voici comment:

- $|A(B \rightarrow f)|^2 \neq |A(\bar{B} \rightarrow \bar{f})|^2 \implies$ violation CP. Pour ceci, il faut qu'il y ait au moins 2 contributions aux amplitudes, avec une phase faible relative.
- \exists un mélange $B^0-\bar{B}^0 \implies$ une particule "née" comme B^0 deviendra dans le temps une combinaison de B^0 et \bar{B}^0 : $B^0(t)$.
Le $B^0(t)$ se désintègre comme B^0 ou \bar{B}^0 . Si on considère un état final auquel B^0 et \bar{B}^0 peuvent se désintégrer, le processus $B^0(t) \rightarrow f$ a deux voies: $B^0 \rightarrow f$ ou $\bar{B}^0 \rightarrow f$. On peut avoir interférence entre ces deux amplitudes.

\implies on peut mesurer tous les angles du triangle unitaire dans des désintégrations des mésons B . De plus, on peut utiliser différents états finaux f :

- α : $B_d^0(t) \rightarrow \pi\pi, \rho\pi, \rho\rho$, etc.
- β : $B_d^0(t) \rightarrow J/\psi K_S, \phi K_S$, etc.
- γ : $B \rightarrow DK$, etc.

2001: Belle et BaBar mesurent $\sin 2\beta$ dans $B_d^0(t) \rightarrow J/\psi K_S$. Première observation de la violation CP en dehors du système des mésons K !

Dernières valeurs des angles:

$$\alpha = (85.4_{-3.9}^{+4.0})^\circ, \quad \beta = (21.38_{-0.77}^{+0.79})^\circ, \quad \gamma = (68.0_{-8.5}^{+8.0})^\circ.$$

Remarque: $\alpha + \beta + \gamma \simeq 180^\circ$.

La violation CP a maintenant été mesurée dans plusieurs désintégrations des B_d^0/\bar{B}_d^0 et B^\pm . Cependant, nous n'avons pas observé de désaccord avec le MS. Il y a eu quelques suggestions, mais rien de significatif.

\Rightarrow Cherchons ailleurs pour des signaux de la nouvelle physique. Voici quelques exemples.

B_s^0 et \bar{B}_s^0

2010: L'expérience DØ au TeVatron [collisionneur hadronique $p\bar{p}$] a mesuré l'asymétrie violant CP

$$A_{\text{sl}}^b \equiv \frac{N_b^{++} - N_b^{--}}{N_b^{++} + N_b^{--}},$$

où $N_b^{\pm\pm}$ est le nombre d'évènements du type $b\bar{b} \rightarrow \mu^\pm \mu^\pm X$. La dernière mesure est en désaccord avec le MS au niveau 3.9σ .

2012: L'expérience LHCb au LHC [collisionneur hadronique pp] a mesuré la phase du mélange $B_s^0 - \bar{B}_s^0$, β_s , dans $B_s^0(t) \rightarrow J/\psi\phi$:

$$\beta_s = (-0.06 \pm 5.77 \text{ (stat)} \pm 1.54 \text{ (syst)})^\circ.$$

Ceci est consistant avec le MS, qui prédit $\beta_s \simeq 0$. Mais les erreurs sont assez grandes qu'on ne peut pas exclure la nouvelle physique.

L'analyse du résultat $D\bar{D}$ a été mise à jour, tenant compte des dernières mesures de LHCb. Le MS est encore défavorisé, par 2.4σ . On peut éliminer le désaccord s'il y a de la nouvelle physique dans le mélange $B_d^0-\bar{B}_d^0$ et/ou $B_s^0-\bar{B}_s^0$, mais l'effet ne peut pas être trop grand.

2013: dernières mesures de β_s par LHCb:

$$\begin{aligned}\beta_s(B_s^0(t) \rightarrow J/\psi\phi) &= (-2.0 \pm 2.6 \text{ (stat)} \pm 0.3 \text{ (syst)})^\circ, \\ \beta_s(B_s^0(t) \rightarrow J/\psi\pi^+\pi^-) &= (-0.3 \pm 2.0 \text{ (stat)} \pm 0.3 \text{ (syst)})^\circ.\end{aligned}$$

Autres mesures de la violation CP avec B_s^0 et \bar{B}_s^0 :

- D'autres désintégrations:

- $B_s^0(t) \rightarrow K^{(*)0} \bar{K}^{(*)0}$, $B_s^0(t) \rightarrow D_s^+ D_s^-$, etc.: on mesure $2\beta_s$,
- $B_s^0(t) \rightarrow D_s^\pm K^\mp$: on mesure $(2\beta_s + \gamma)$.

- Produits triples: $B_s^0 \rightarrow V_1 V_2$ (les V_i sont des mésons vectoriels – spin 1). Dans le référentiel où le B_s^0 est au repos, le produit triple (PT) prend la forme $\vec{q} \cdot (\vec{\epsilon}_1 \times \vec{\epsilon}_2)$ (q est la différence des impulsions finales, $\vec{\epsilon}_1$ et $\vec{\epsilon}_2$ sont les polarisations du V_1 et V_2). Le PT est impair sous P et T (inversement du temps) \implies signal potentiel de la violation CP (car le produit CPT doit être conservé). Désintégrations possibles: $B_s^0 \rightarrow \phi\phi$, $B_s^0 \rightarrow K^{*0} \bar{K}^{*0}$, etc.

D^0 , \bar{D}^0 et D^\pm

2011/2012: les expériences CDF [TeVatron] et LHCb ont mesuré les asymétries directes violant CP de $D^0 \rightarrow K^+K^-$ et $D^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ ($A_{CP}^{dir}(f) \propto B(D^0 \rightarrow f) - B(\bar{D}^0 \rightarrow \bar{f})$), ainsi que leur différence. On définit

$$\Delta A_{CP}^{dir} \equiv A_{CP}^{dir}(K^+K^-) - A_{CP}^{dir}(\pi^+\pi^-) .$$

Mettant toutes les mesures ensemble, on trouve

$$\Delta A_{CP}^{dir} = (-0.67 \pm 0.18)\% ,$$

ce qui est non-nul à 3.6σ . Une estimée naïve de ΔA_{CP}^{dir} dans le MS est $O(10^{-4})$. La valeur mesurée est donc un ordre de grandeur plus grande \implies nouvelle physique?

Peut-être, mais LHCb a récemment mis à jour sa mesure. Il trouve maintenant

$$\Delta A_{CP}^{dir} = (-0.15 \pm 0.16)\% ,$$

ce qui n'est plus en désaccord avec le MS.

t

Dans le MS, on prédit que la violation CP dans les désintégrations du quark t est négligeable. Donc, l'observation de la violation CP dans une désintégration du $t \implies$ nouvelle physique. Cependant, pour avoir un signal raisonnablement grand, il faut que les 2 amplitudes qui contribuent à une désintégration soient de grandeur à peu près égale. Pas possible pour $t \rightarrow bW$ (la désintégration dominante).

Une exception: l'amplitude pour $t \rightarrow bW(\rightarrow c\bar{b})$ n'est pas grande à cause du couplage $Wc\bar{b}$: $|V_{cb}| = 0.04$. Donc on peut avoir des amplitudes de la nouvelle physique qui sont du même ordre de grandeur que le MS. Si ces nouvelles amplitudes ont une phase faible, on peut avoir la violation CP.

Signaux possibles: (i) asymétrie directe: $B(t \rightarrow bc\bar{b}) \neq B(\bar{t} \rightarrow \bar{b}c\bar{b})$, (ii) produit triple: $\vec{\epsilon}_t \cdot (\vec{p}_1 \times \vec{p}_1)$ ($p_{1,2}$: impulsions finales). Les effets de la violation CP peuvent être aussi grands que 10-20%.

Un groupe ici à UdeM, mené par J.-F. Arguin qui travaille sur ATLAS, étudiera la violation CP dans $t \rightarrow bc\bar{b}$.

Il y a 3 neutrinos produits dans des interactions faibles, ν_e , ν_μ , ν_τ . Il y a 3 neutrinos massifs, ν_1 , ν_2 , ν_3 . Mais il n'y a rien qui nous dit que ces états sont les mêmes – il peut y avoir un mélange:

$$\begin{array}{c} \nu_1 \quad \nu_2 \quad \nu_3 \\ \nu_e \left[\begin{array}{ccc} U_{11} & U_{21} & U_{13} \\ U_{21} & U_{22} & U_{23} \\ U_{31} & U_{32} & U_{33} \end{array} \right] \\ \nu_\mu \\ \nu_\tau \end{array}$$

En présence de ce mélange, il peut y avoir oscillations des neutrinos, i.e. $P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta}(x) \neq 0$. Les mesures d'oscillations des neutrinos indiquaient que les U_{ij} sont non-nuls, sauf pour U_{13} , qui pouvait être nul.

On peut écrire $U_{13} \equiv \sin \theta_{13} e^{i\delta_{CP}}$, où δ_{CP} est la phase faible qui pourrait donner lieu à des effets violant CP. Si $U_{13} = 0$, il n'y a pas de violation CP.

2012: L'expérience Daya Bay, qui étudie les oscillations des neutrinos des réacteurs, a mesuré le taux de disparition des neutrinos $\bar{\nu}_e$ et a trouvé que

$$\sin^2 2\theta_{13} = 0.092 \pm 0.016 \text{ (stat)} \pm 0.005 \text{ (syst)} ,$$

ce qui implique une valeur non-nulle pour θ_{13} à 5.2σ .

Comme θ_{13} est non-nul, on a la possibilité de la violation CP dans le secteur des neutrinos. Signal: $P_{\nu_\alpha \rightarrow \nu_\beta} \neq P_{\bar{\nu}_\alpha \rightarrow \bar{\nu}_\beta}$. Toutes les expériences actuelles qui étudient les oscillations des neutrinos (Daya Bay, Double Chooz, Minerva, etc.) chercheront cette violation CP. Peut-être c'est là où on verra des signes de la nouvelle physique.

Conclusions

Même si le Big Bang a produit des quantités égales de matière et d'antimatière, actuellement nous n'observons que très peu d'antimatière dans l'univers. Lors de l'évolution de l'univers, il a dû y avoir de la violation CP favorisant la production de matière par rapport à l'antimatière. La question de l'origine de cette violation CP est un des problèmes les plus fondamentaux en physique.

Nous avons mesuré la violation CP à basses énergies dans des processus impliquant les K , B_d^0 ou B^\pm . Toutes les mesures sont consistantes avec l'explication du Modèle Standard. Mais le MS ne peut pas expliquer la violation CP tôt dans la vie de l'univers \implies il doit y avoir de la physique violant CP au-delà du MS.

Il y a plusieurs possibilités où chercher cette nouvelle physique – dans des processus impliquant les B_s^0 , les mésons D , le quark t et/ou les neutrinos. Ceci est un des buts de toutes les expériences en physique des particules, actuelles et futures. La nouvelle physique doit être là, la question est où.