

Baryon number violation at the TeV scale

Gauthier Durieux

Octobre 2014

Université catholique de Louvain
Institut de Recherche en Mathématique et Physique
Centre for Cosmology, Particle Physics and Phenomenology



Baryon number violation at the TeV scale

Nombre baryonique

Symétries de *saveur*

Violation au TeV

Nombre baryonique

Pourquoi une matière si stable ?

Pourquoi si peu d'antimatière ?

Nombre baryonique

Pourquoi une matière si stable ?

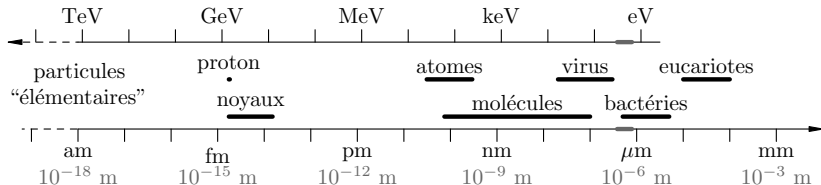
Pourquoi serait-elle instable ?

Pourquoi si peu d'antimatière ?

Pourquoi y aurait-il de l'antimatière ?

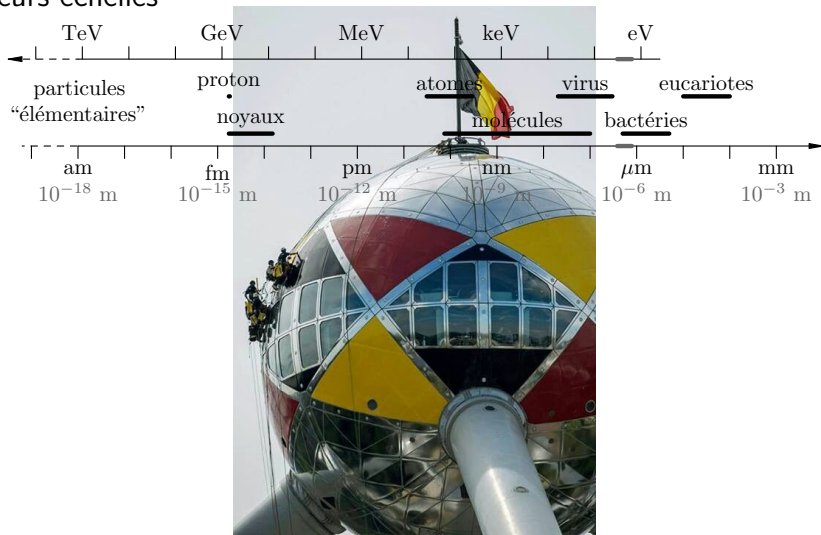
Les particules

Leurs échelles



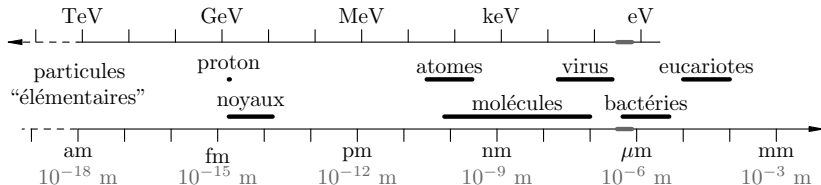
Les particules

Leurs échelles



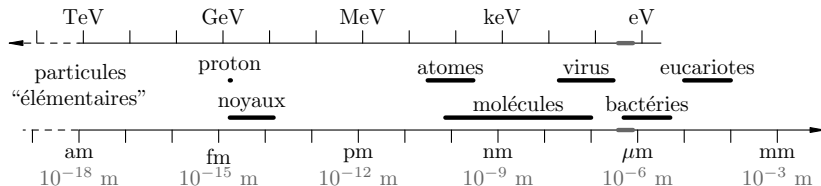
Les particules

Leurs échelles



Les particules

Leurs échelles



Notre résolution

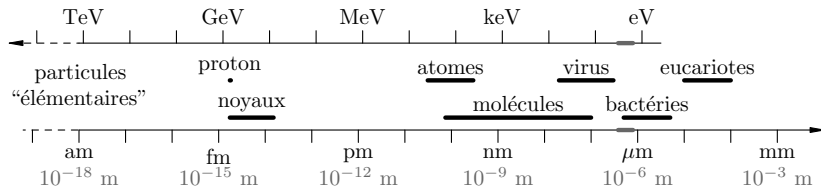
Un proton sondé
à 100 MeV



Un proton
sondé à 10 GeV

Les particules

Leurs échelles



Notre résolution

Un proton sondé
à 100 MeV

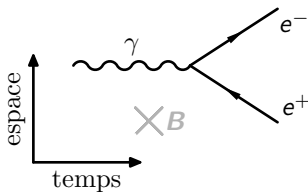


Trois *quarks* ("fromages blancs")
colorés !

... et antiparticules

Naissent de l'union de la relativité avec la mécanique quantique

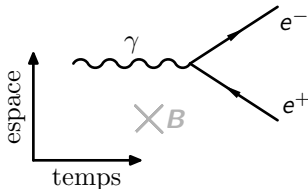
[Dirac 1928]



... et antiparticules

Naissent de l'union de la relativité avec la mécanique quantique

[Dirac 1928]



Le positron, antiparticule de l'électron, est découvert en 1932.

[Anderson 1932]

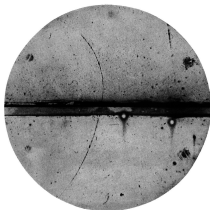
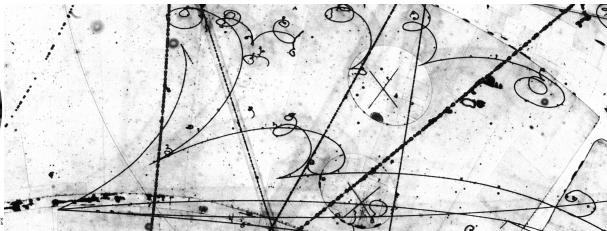


Fig. 1. A 63 million volt positron ($H=2.1 \times 10^6$ gauss/cm) passing through a 6 mm lead plate and emerging at a 23 million volt positron ($H=2.5 \times 10^6$ gauss/cm). The length of this linear path is at least ten times greater than the possible length of a photon path of the curvature.



Le *modèle standard*

La description quantique des interactions entre particules

[70']

électromagnétisme ✓ électricité, magnétisme et optique

interaction *faible* ✓ radioactivité β

interaction *forte* ✓ cohésion du proton

interaction de Higgs ✓ masses des particules élémentaires

la gravitation ✗ attraction des corps

... incroyablement efficace

Le *modèle standard*

La description quantique des interactions entre particules

[70']

électromagnétisme ✓ électricité, magnétisme et optique

interaction *faible* ✓ radioactivité β

interaction *forte* ✓ cohésion du proton

interaction de Higgs ✓ masses des particules élémentaires

la gravitation ✗ attraction des corps

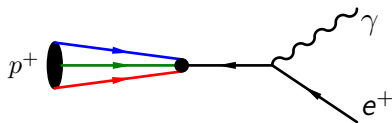
... incroyablement efficace ... mais incomplète !

Comment la compléter ?

Pourquoi une matière si stable ?

Un proton (deux mille fois plus lourd qu'un électron)
ne pourrait-il pas se désintégrer ?

[Wigner 1949]



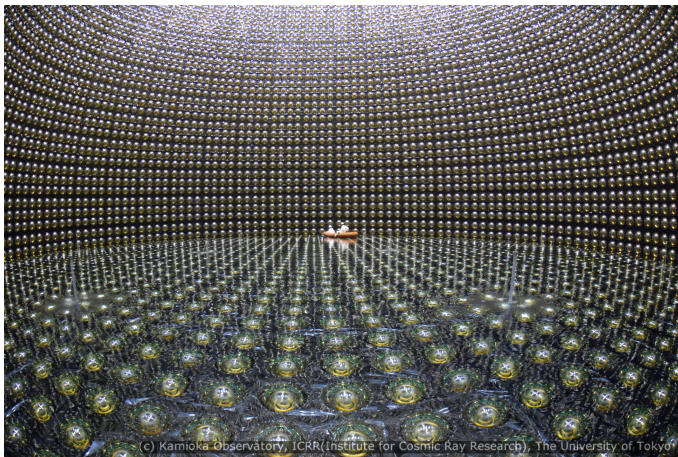
"You would feel it in your bones !"

[Goldhaber 1977]

Pourquoi une matière si stable ?

Un proton (deux mille fois plus lourd qu'un électron)
ne pourrait-il pas se désintégrer ?

[SuperK 2006]

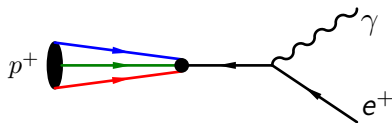


Prenez un proton, attendez un million de (milliards)³ d'années,
il aura moins de 0,22% de chance de s'être désintégré !

Pourquoi une matière si stable ?

Un proton (deux mille fois plus lourd qu'un électron)
ne pourrait-il pas se désintégrer ?

[Wigner 1949]



... pas si l'on introduit une nouvelle *règle* :

Le nombre baryonique B est conservé.

Un **quark** aura $B = +1/3$, un antiquark $B = -1/3$.

Pourquoi si peu d'antimatière ?

Si matière et antimatière sont si similaires,
pourquoi tant de baryons et si peu d'antibaryons ?

Pourquoi si peu d'antimatière ?

Si matière et antimatière sont si similaires,
pourquoi tant de baryons et si peu d'antibaryons ?

- a. Il y avait plus de baryons au départ...
... mais pourquoi ?

Pourquoi si peu d'antimatière ?

Si matière et antimatière sont si similaires,
pourquoi tant de baryons et si peu d'antibaryons ?

a. Il y avait plus de baryons au départ...
... mais pourquoi ?

b. Des baryons se sont créés.
Des antibaryons se sont désintégrés.

[Sakharov 1967]

Le nombre baryonique n'est pas conservé.

Le nombre baryonique

Une énigme :

- Un proton extrêmement stable
qui semble indiquer une excellente **conservation**
- L'absence d'antimatière
qui semble indiquer la nécessité d'une **violation**
(et des violations · non-perturbative dans le SM
· en GUT, SUSY, ou physique des trous noirs)

Symétries de *saveur*

Symétrie : l'évolution d'un concept

[Brading, Castellani 2003]

- Relation de proportion : $\sigma\nu\nu$ (avec) et $\mu\epsilon\tau\rho\nu$ (mesure)

Symétrie : l'évolution d'un concept

[Brading, Castellani 2003]

- Relation de proportion : $\sigma\upsilon\nu$ (avec) et $\mu\epsilon\tau\rho\omicron\nu$ (mesure)

Beauté, harmonie entre éléments différents au sein d'un tout unitaire

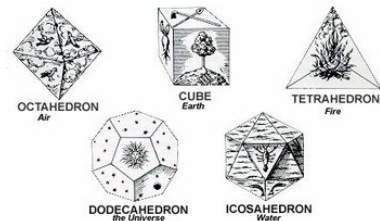
Symétrie : l'évolution d'un concept

[Brading, Castellani 2003]

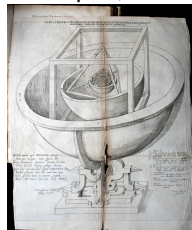
- Relation de proportion : $\sigma\upsilon\nu$ (avec) et $\mu\epsilon\tau\rho\omicron\nu$ (mesure)

Beauté, harmonie entre éléments différents au sein d'un tout unitaire

Timée,
Platon, 360 av. J.C.



Mysterium Cosmographicum,
J. Kepler, 1596



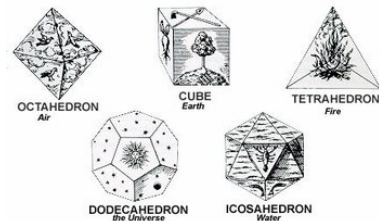
Symétrie : l'évolution d'un concept

[Brading, Castellani 2003]

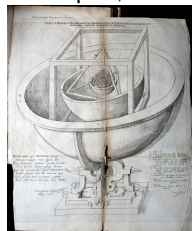
- Relation de proportion : $\sigma\upsilon\nu$ (avec) et $\mu\epsilon\tau\rho\omicron\nu$ (mesure)

Beauté, harmonie entre éléments différents au sein d'un tout unitaire

Timée,
Platon, 360 av. J.C.



Mysterium Cosmographicum,
J. Kepler, 1596



- XVIII^e : invariance sous une opération géométrique (réflexion, rotation,...)

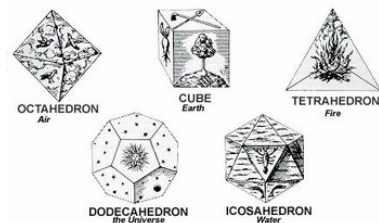
Symétrie : l'évolution d'un concept

[Brading, Castellani 2003]

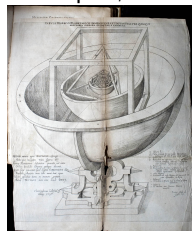
- Relation de proportion : $\sigma\upsilon\nu$ (avec) et $\mu\epsilon\tau\rho\omicron\nu$ (mesure)

Beauté, harmonie entre éléments différents au sein d'un tout unitaire

Timée,
Platon, 360 av. J.C.



Mysterium Cosmographicum,
J. Kepler, 1596



- XVIII^e : invariance sous une opération géométrique (réflexion, rotation,...)
- XIX^e : mathématisation en termes de théorie des *groupes*

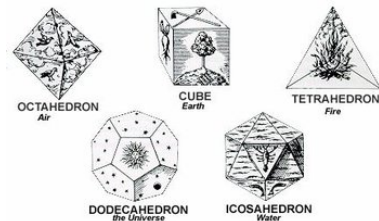
Symétrie : l'évolution d'un concept

[Brading, Castellani 2003]

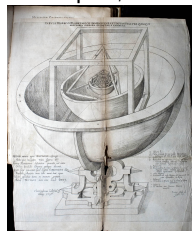
- Relation de proportion : $\sigma\upsilon\nu$ (avec) et $\mu\epsilon\tau\rho\omicron\nu$ (mesure)

Beauté, harmonie entre éléments différents au sein d'un tout unitaire

Timée,
Platon, 360 av. J.C.



Mysterium Cosmographicum,
J. Kepler, 1596



- XVIII^e : invariance sous une opération géométrique (réflexion, rotation,...)
- XIX^e : mathématisation en termes de théorie des *groupes*

Invariance d'objets abstraits sous un groupe de transformations

Symétries : la révolution du XX^e

Les symétries dictent leurs formes
aux équations dynamiques.

[Einstein 1905]

Construction du modèle standard

- Matière

$$\text{fermions} \begin{cases} \text{quarks : } \mathbf{q}, & \mathbf{u}, & \mathbf{d} \\ \text{leptons : } & \mathbf{l}, & \mathbf{e} \end{cases}$$

- Symétries imposées

Groupe de Poincarré

d'espace-temps

translations, rotations, *boosts* ex.

Groupe de jauge

$$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

d'espace *interne*

rotations internes (complexes)

Construction du modèle standard

- Matière

$$\text{fermions} \begin{cases} \text{quarks : } \mathbf{q}, & \mathbf{u}, & \mathbf{d} \\ \text{leptons : } & \mathbf{l}, & \mathbf{e} \end{cases}$$

- Symétries imposées

Groupe de Poincaré

Groupe de jauge

$$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

d'espace-temps

d'espace *interne*

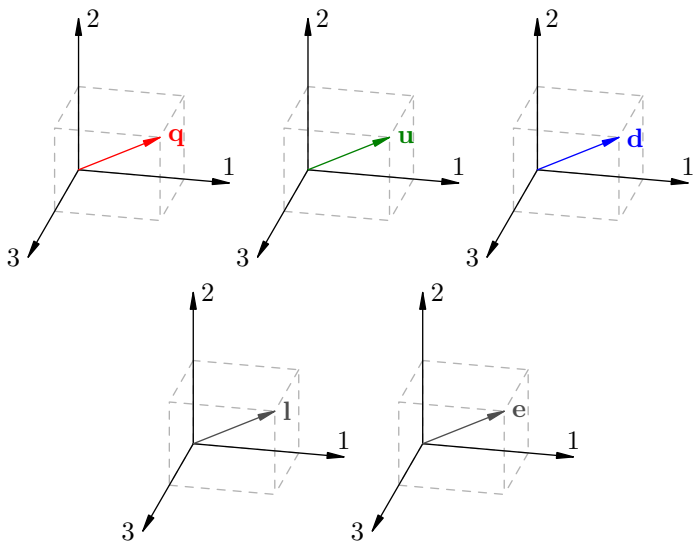
translations, rotations, *boosts* ex. rotations internes (complexes)

- Interactions obtenues “renormalisables”

$$\begin{aligned} \mathcal{L}^{\text{SM}} = & \delta \bar{\mathbf{q}} i \not{D} \mathbf{q} + \delta \bar{\mathbf{u}} i \not{D} \mathbf{u} + \delta \bar{\mathbf{d}} i \not{D} \mathbf{d} + \delta \bar{\mathbf{l}} i \not{D} \mathbf{l} + \delta \bar{\mathbf{e}} i \not{D} \mathbf{e} \\ & - Y_u \bar{\mathbf{q}} \phi \mathbf{u} - Y_d \bar{\mathbf{q}} \tilde{\phi} \mathbf{d} - Y_e \bar{\mathbf{l}} \tilde{\phi} \mathbf{e} \dots \end{aligned}$$

Symétries accidentelles

Un fermion a trois composantes : ses *saveurs*



Symétries accidentelles

Les cinq interactions “de jauge”

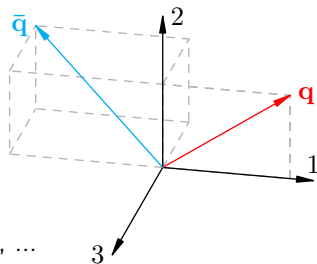
$$\delta \bar{\mathbf{q}} i \not{D} \mathbf{q}, \quad \delta \bar{\mathbf{u}} i \not{D} \mathbf{u}, \quad \delta \bar{\mathbf{d}} i \not{D} \mathbf{d}, \quad \delta \bar{\mathbf{l}} i \not{D} \mathbf{l}, \quad \delta \bar{\mathbf{e}} i \not{D} \mathbf{e}$$

Symétries accidentelles

Les cinq interactions “de jauge”

$$\delta \bar{\mathbf{q}} \mathbf{q}, \quad \delta \bar{\mathbf{u}} \mathbf{u}, \quad \delta \bar{\mathbf{d}} \mathbf{d}, \quad \delta \bar{\mathbf{l}} \mathbf{l}, \quad \delta \bar{\mathbf{e}} \mathbf{e}$$

où δ extrait la **projection** de $\bar{\mathbf{q}}$ sur $\mathbf{q}$, de $\bar{\mathbf{u}}$ sur $\mathbf{u}$, ...

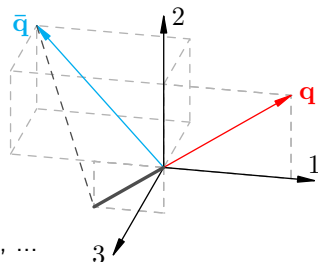


Symétries accidentelles

Les cinq interactions “de jauge”

$$\delta \bar{\mathbf{q}} \mathbf{q}, \quad \delta \bar{\mathbf{u}} \mathbf{u}, \quad \delta \bar{\mathbf{d}} \mathbf{d}, \quad \delta \bar{\mathbf{l}} \mathbf{l}, \quad \delta \bar{\mathbf{e}} \mathbf{e}$$

où δ extrait la **projection** de $\bar{\mathbf{q}}$ sur $\mathbf{q}$, de $\bar{\mathbf{u}}$ sur $\mathbf{u}$, ...

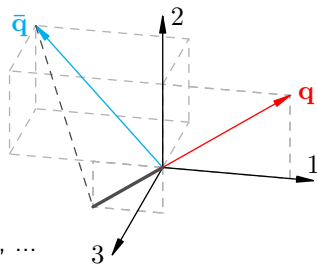


Symétries accidentelles

Les cinq interactions “de jauge”

$$\delta \bar{\mathbf{q}} \mathbf{q}, \quad \delta \bar{\mathbf{u}} \mathbf{u}, \quad \delta \bar{\mathbf{d}} \mathbf{d}, \quad \delta \bar{\mathbf{l}} \mathbf{l}, \quad \delta \bar{\mathbf{e}} \mathbf{e}$$

où δ extrait la **projection** de $\bar{\mathbf{q}}$ sur $\mathbf{q}$, de $\bar{\mathbf{u}}$ sur $\mathbf{u}$, ...
sont invariantes sous les rotations de saveur

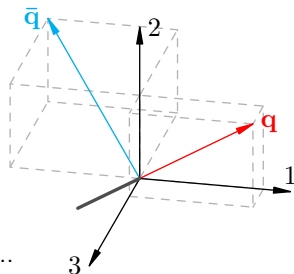


Symétries accidentelles

Les cinq interactions “de jauge”

$$\delta \bar{q} q, \quad \delta \bar{u} u, \quad \delta \bar{d} d, \quad \delta \bar{l} l, \quad \delta \bar{e} e$$

où δ extrait la **projection** de $\bar{q}$ sur q , de $\bar{u}$ sur u , ...
sont invariantes sous les rotations de saveur

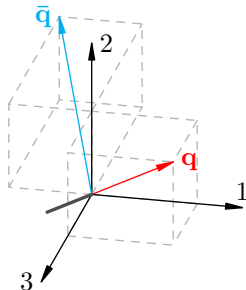


Symétries accidentelles

Les cinq interactions “de jauge”

$$\delta \bar{\mathbf{q}} \mathbf{q}, \quad \delta \bar{\mathbf{u}} \mathbf{u}, \quad \delta \bar{\mathbf{d}} \mathbf{d}, \quad \delta \bar{\mathbf{l}} \mathbf{l}, \quad \delta \bar{\mathbf{e}} \mathbf{e}$$

où δ extrait la **projection** de $\bar{\mathbf{q}}$ sur $\mathbf{q}$, de $\bar{\mathbf{u}}$ sur $\mathbf{u}$, ...
sont invariantes sous les rotations de saveur



Symétries accidentelles

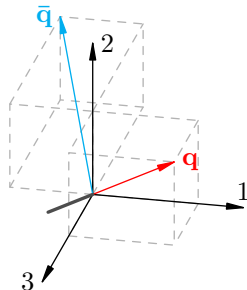
Les cinq interactions “de jauge”

$$\delta \bar{\mathbf{q}} \mathbf{q}, \quad \delta \bar{\mathbf{u}} \mathbf{u}, \quad \delta \bar{\mathbf{d}} \mathbf{d}, \quad \delta \bar{\mathbf{l}} \mathbf{l}, \quad \delta \bar{\mathbf{e}} \mathbf{e}$$

où δ extrait la **projection** de $\bar{\mathbf{q}}$ sur $\mathbf{q}$, de $\bar{\mathbf{u}}$ sur $\mathbf{u}$, ...
sont invariantes sous les rotations de saveur

Une symétrie de saveur :

$$SU(3)_{\mathbf{q}} \times SU(3)_{\mathbf{u}} \times SU(3)_{\mathbf{d}} \times SU(3)_{\mathbf{l}} \times SU(3)_{\mathbf{e}}$$



Symétries accidentelles

Les cinq interactions “de jauge”

$$\delta \bar{q} q, \quad \delta \bar{u} u, \quad \delta \bar{d} d, \quad \delta \bar{l} l, \quad \delta \bar{e} e$$

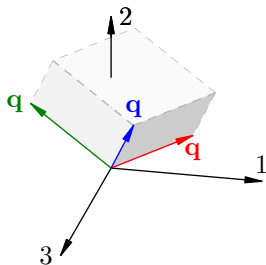
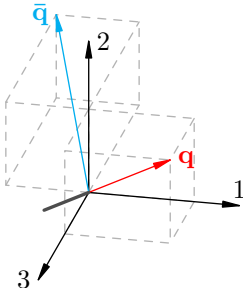
où δ extrait la **projection** de $\bar{q}$ sur q , de $\bar{u}$ sur u , ...
sont invariantes sous les rotations de saveur

Une symétrie de saveur :

$$SU(3)_q \times SU(3)_u \times SU(3)_d \times SU(3)_l \times SU(3)_e$$

Une autre quantité invariante sous cette symétrie
est le **volume** ϵ délimité par trois vecteurs :

$$\begin{aligned} \epsilon q q q, \quad \epsilon u u u, \quad \epsilon d d d, \quad \epsilon l l l, \quad \epsilon e e e \\ \epsilon \bar{q} \bar{q} \bar{q}, \quad \epsilon \bar{u} \bar{u} \bar{u}, \quad \epsilon \bar{d} \bar{d} \bar{d}, \quad \epsilon \bar{l} \bar{l} \bar{l}, \quad \epsilon \bar{e} \bar{e} \bar{e} \end{aligned}$$



... et leur brisure

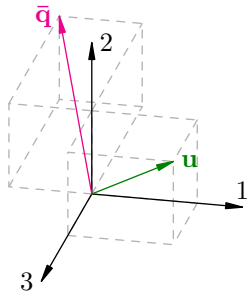
$$\mathcal{L}^{\text{SM}} = \delta \bar{\mathbf{q}} i \not{D} \mathbf{q} + \delta \bar{\mathbf{u}} i \not{D} \mathbf{u} + \delta \bar{\mathbf{d}} i \not{D} \mathbf{d} + \delta \bar{\mathbf{l}} i \not{D} \mathbf{l} + \delta \bar{\mathbf{e}} i \not{D} \mathbf{e} \\ - Y_u \bar{\mathbf{q}} \phi \mathbf{u} - Y_d \bar{\mathbf{q}} \tilde{\phi} \mathbf{d} - Y_e \bar{\mathbf{l}} \tilde{\phi} \mathbf{e} \dots$$

... et leur brisure

Les trois interactions “de Yukawa”

$$Y_u \bar{q} u, \quad Y_d \bar{q} d, \quad Y_e \bar{l} e$$

ne sont pas invariantes
sous les rotations de q , u , d , l et e .



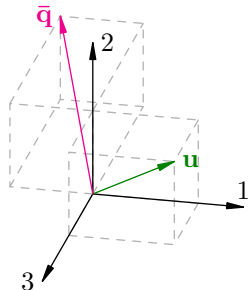
... et leur brisure

Les trois interactions “de Yukawa”

$$Y_u \bar{q} u, \quad Y_d \bar{q} d, \quad Y_e \bar{l} e$$

ne sont pas invariantes
sous les rotations de q , u , d , l et e .

La symétrie de saveur est brisée.



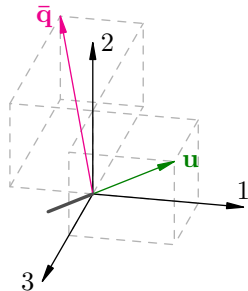
... et leur brisure

Les trois interactions “de Yukawa”

$$\delta \bar{q} u, \quad \delta \bar{q} d, \quad \delta \bar{l} e$$

ne sont pas invariantes
sous les rotations indépendantes de q , u , d , l et e .

La symétrie de saveur est brisée.



$$\text{Si } Y_u \propto \delta, \quad Y_d \propto \delta, \quad Y_e \propto \delta,$$

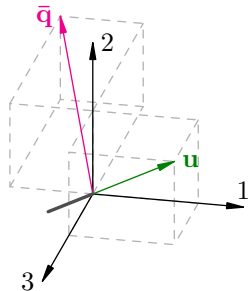
... et leur brisure

Les trois interactions “de Yukawa”

$$\delta \bar{q} u, \quad \delta \bar{q} d, \quad \delta \bar{l} e$$

ne sont pas invariantes
sous les rotations indépendantes de q , u , d , l et e .

La symétrie de saveur est brisée.



$$\text{Si } Y_u \propto \delta, \quad Y_d \propto \delta, \quad Y_e \propto \delta,$$

La symétrie de saveur résiduelle est :

$$SU(3)_{q+u+d} \times SU(3)_{l+e}$$

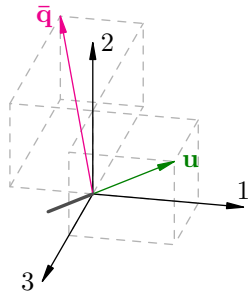
... et leur brisure

Les trois interactions “de Yukawa”

$$\delta \bar{q} u, \quad \delta \bar{q} d, \quad \delta \bar{l} e$$

ne sont pas invariantes
sous les rotations indépendantes de q , u , d , l et e .

La symétrie de saveur est brisée.



$$\text{Si } Y_u \propto \delta, \quad Y_d \propto \delta, \quad Y_e \propto \delta,$$

La symétrie de saveur résiduelle est :

$$SU(3)_{q+u+d} \times SU(3)_{l+e}$$

les volumes sont aussi invariants :

$$\epsilon_{qqd}, \quad \epsilon_{udd}, \quad \epsilon_{lle}, \quad \dots$$

... et leur brisure [pour les spécialistes]

$$\mathcal{L}^{\text{SM}} = \delta \bar{\mathbf{q}} i \not{D} \mathbf{q} + \delta \bar{\mathbf{u}} i \not{D} \mathbf{u} + \delta \bar{\mathbf{d}} i \not{D} \mathbf{d} + \delta \bar{\mathbf{l}} i \not{D} \mathbf{l} + \delta \bar{\mathbf{e}} i \not{D} \mathbf{e} \\ - Y_u \bar{\mathbf{q}} \phi \mathbf{u} - Y_d \bar{\mathbf{q}} \tilde{\phi} \mathbf{d} - Y_e \bar{\mathbf{l}} \tilde{\phi} \mathbf{e} \dots$$

Avec les Y_u , Y_d et Y_e du modèle standard,
on utilise la prescription de “*violation de saveur minimale*” (MFV)

en élevant les Yukawas au rang de champs fictifs “*spurions*”
pour restaurer formellement la symétrie de saveur :

$$\in \mathbf{q}\mathbf{q}(Y_d \mathbf{d}), \quad \in (Y_d^\dagger Y_u \mathbf{u}) \mathbf{d}\mathbf{d}, \quad \in \mathbf{l}\mathbf{l}(Y_e \mathbf{e}), \quad \dots$$

Nombre baryonique et symétries de saveur

Violation du nombre baryonique

- Matière

$$\text{fermions} \begin{cases} \text{quarks : } \mathbf{q}, & \mathbf{u}, & \mathbf{d} \\ \text{leptons : } & \mathbf{l}, & \mathbf{e} \end{cases}$$

- Symétries imposées

Groupe de Poincaré

Groupe de jauge
 $SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$

- Interactions obtenues “non-renormalisables”

$$\mathcal{L}^{\text{BNV}} = \frac{1}{\Lambda^2} \left[\mathbf{qqql} + \mathbf{qqqe} + \mathbf{udql} + \mathbf{udue} + \dots \right]$$

Violation du nombre baryonique

- Matière

$$\text{fermions} \begin{cases} \text{quarks : } \mathbf{q}, & \mathbf{u}, & \mathbf{d} \\ \text{leptons : } & \mathbf{l}, & \mathbf{e} \end{cases}$$

- Symétries imposées

Groupe de Poincaré

Groupe de jauge

$$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

Groupe de saveur

$$SU(3)_q \times SU(3)_u \times SU(3)_d \times SU(3)_l \times SU(3)_e$$

- Interactions obtenues “non-renormalisables”

$$\mathcal{L}^{\text{BNV}} = \frac{1}{\Lambda^{14}} \left[\epsilon \mathbf{qqq} \epsilon \mathbf{qqq} \epsilon \mathbf{qqq} \epsilon \mathbf{l} \mathbf{l} \mathbf{l} \right. \\ \left. + \epsilon \mathbf{qqq} \epsilon \mathbf{qqq} \epsilon \mathbf{uuu} \epsilon \mathbf{eee} + \dots \right]$$

Violation du nombre baryonique

- Matière

$$\text{fermions} \begin{cases} \text{quarks : } \mathbf{q}, & \mathbf{u}, & \mathbf{d} \\ \text{leptons : } & \mathbf{l}, & \mathbf{e} \end{cases}$$

- Symétries imposées

Groupe de Poincaré

Groupe de jauge

$$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

Groupe de saveur

$$SU(3)_{q+u+d} \times SU(3)_{l+e}$$

- Interactions obtenues “non-renormalisables”

$$\mathcal{L}^{\text{BNV}} = \frac{1}{\Lambda^5} \left[\epsilon \mathbf{uuu} \epsilon \mathbf{ell} + \epsilon \mathbf{quu} \epsilon \mathbf{lll} + \epsilon \mathbf{udd} \epsilon \mathbf{udd} + \dots \right]$$

Violation du nombre baryonique

- Matière

$$\text{fermions} \begin{cases} \text{quarks : } \mathbf{q}, & \mathbf{u}, & \mathbf{d} \\ \text{leptons : } & \mathbf{l}, & \mathbf{e} \end{cases}$$

- Symétries imposées

Groupe de Poincaré

Groupe de jauge

$$SU(3)_C \times SU(2)_L \times U(1)_Y$$

Groupe de saveur

brisé suivant MFV

[Nikolidakis Smith 2007]

[Smith 2011]

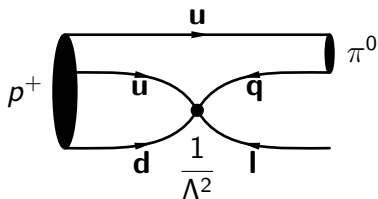
- Interactions obtenues “non-renormalisables”

$$\mathcal{L}^{\text{BNV}} = \frac{1}{\Lambda^5} \left[\epsilon \mathbf{u}\mathbf{u}\mathbf{u} \quad \epsilon (Y_e \mathbf{e}) \mathbf{l}\mathbf{l} \quad + \epsilon (Y_u^\dagger \mathbf{q}) \mathbf{u}\mathbf{u} \quad \epsilon \mathbf{l}\mathbf{l}\mathbf{l} \right. \\ \left. + \epsilon (Y_d^\dagger Y_u \mathbf{u}) \mathbf{d}\mathbf{d} \quad \epsilon (Y_u \mathbf{u}) (Y_d \mathbf{d}) (Y_d \mathbf{d}) \quad + \dots \right]$$

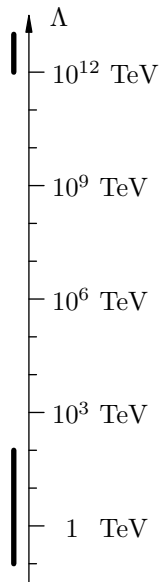
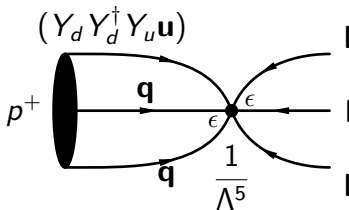
Stabilité du proton

[Nikolidakis Smith 2007]
[Smith 2011]

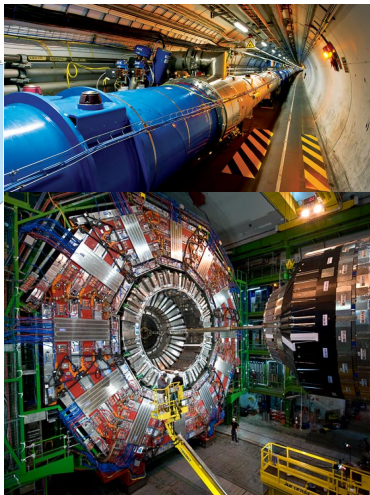
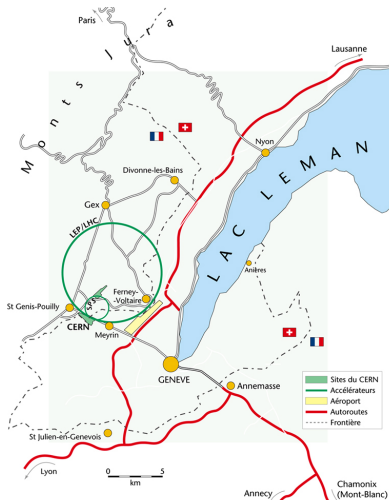
Sans saveur



Avec saveur



Violation du nombre baryonique au TeV



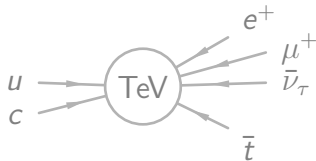
Le LHC explore aujourd'hui la physique du TeV.

Violation du nombre baryonique
à l'échelle du TeV

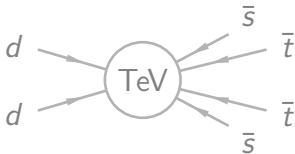
Violation du nombre baryonique au TeV

*En transposant à la violation du nombre baryonique
le schéma de brisure des symétries de saveur du modèle standard,
on a, au TeV :*

des transitions *résonnantes*
compatibles avec la stabilité du proton,



la présence favorisée des trois saveurs de fermions,
quark *top* inclus,



des leptons de mêmes signes
et des asymétries $--/++$ au LHC.