



# Les symétries ...

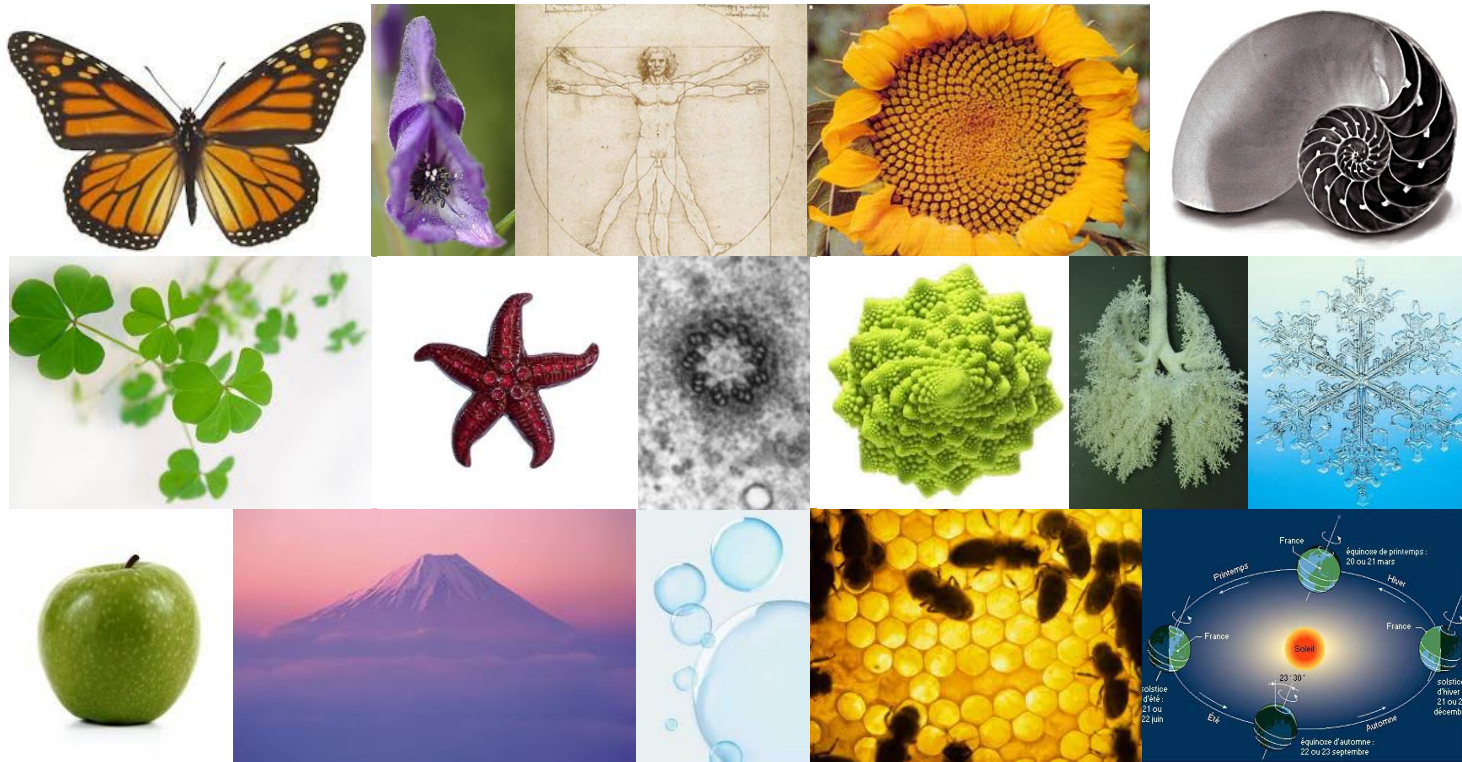
❖ « rien ne se perd, rien ne se crée, tout se transforme »

Lavoisier (1743-1794)

# Aperçu

- ❖ Principes généraux
- ❖ Les symétries de jauge
- ❖ Les symétries discrètes
  - C,P,T
- ❖ Le non-respect des symétries
  - violation
  - brisure

# Omniprésence des symétries dans la nature



révolution      symétrie axiale      rotation  
 bilatérale      miroir      conforme  
 sphérique      rotations discrètes      rotations continues  
 périodique      symétries d'échelle  
 invariance par translation      symétrie temporelles

➤ Que nous apprenent-elles ?

# Pourquoi s'intéresser aux symétries ?

---

Symétrie = propriété d'un système

- ne survient pas par hasard
- découle des lois qui gouvernent la formation ou l'évolution des systèmes
  - permet d'inférer les mécanismes sous-jacents  
la forme du Fuji-san suggère une poussée verticale (éruption)
- simplifie la description / l'étude d'un système
  - symétrie bilatérale : la même information est utilisée 2 fois  
la nature est économe !

En physique

- propriété d'une loi de la nature
- méthode théorique de génération de nouvelles solutions des équations du mouvement
  - Toute la physique fondamentale est basée sur l'étude des symétries

# Principes généraux

- ❖ Symétries et lois de conservation
- ❖ Symétries d'espace-temps

# Le rôle fondamental des symétries en physique

## Symétrie :

→ transformation laissant invariante les lois de la physique



## Grandeur non-observable

→ dont on ne peut mesurer qu'une valeur relative

→ dont la valeur absolue n'est qu'une convention



## Quantité conservée

→ quantité non modifiée par les lois de la physique

### Théorème de Noether\* (1915) :

*Supposons qu'une loi décrivant un phénomène physique soit invariante par rapport à une symétrie.*

*Alors, il existe une quantité physique associée qui est conservée.*

*La réciproque est vraie :*

*si une quantité physique est conservée dans un phénomène physique, alors il existe une symétrie dans les lois régissant ce phénomène.*

\* Emmy Noether (1882-1935), brillante mathématicienne contemporaine d'Einstein.

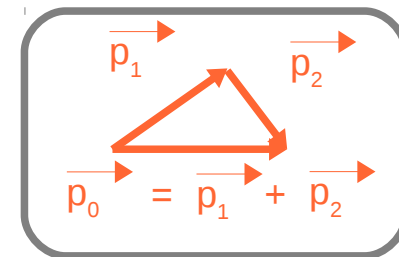
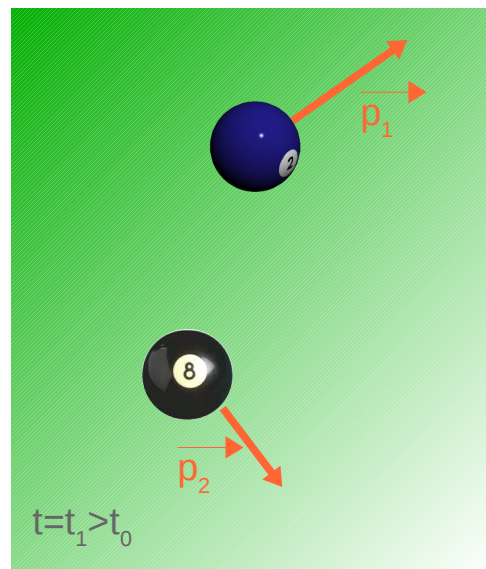
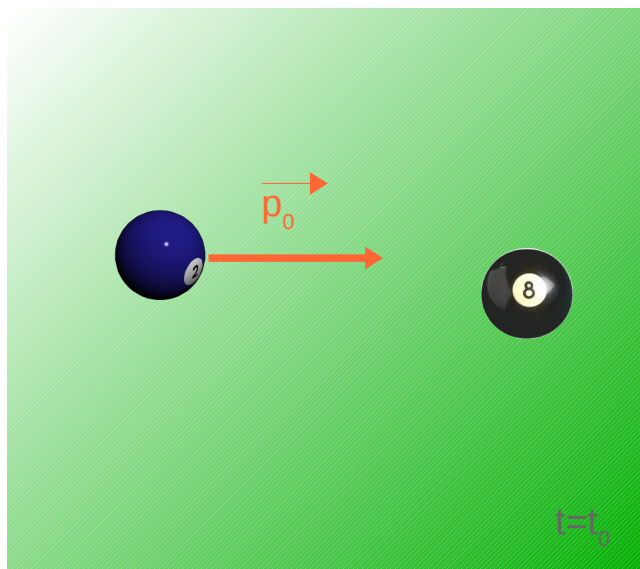


# Petit rappel : la conservation de l'impulsion



L'impulsion (la quantité de mouvement) d'un système isolé est une quantité conservée

- principe de l'action-réaction
- mais aussi
- une conséquence de l'invariance par translation dans l'espace



# Quelques symétries remarquables

Invariance	Non observable $\Leftrightarrow$ Symétrie par :	$\Leftrightarrow$ Loi de conservation
les résultats d'une expérience ne dépendent pas du lieu de sa réalisation	position absolue	translation dans l'espace conservation de l'impulsion
les résultats d'une expérience ne dépendent pas de la date de sa réalisation	temps absolu	translation dans le temps conservation de l'énergie
les résultats d'une expérience ne dépendent pas de la direction de sa réalisation	orientation absolue	rotation dans l'espace conservation du moment cinétique
les résultats d'une expérience sont inchangés si on élève le potentiel électrique en tout point (par exemple de 100 V)	potentiel absolu	<i>transformation de jauge</i> : redéfinition du potentiel électrique conservation de la charge électrique

↘ transformation de jauge ? ...



# Les symétries de jauge

- ❖ Préambule : qu'est-ce c'est ?
- ❖ Symétries de jauge et interaction

# Préambule

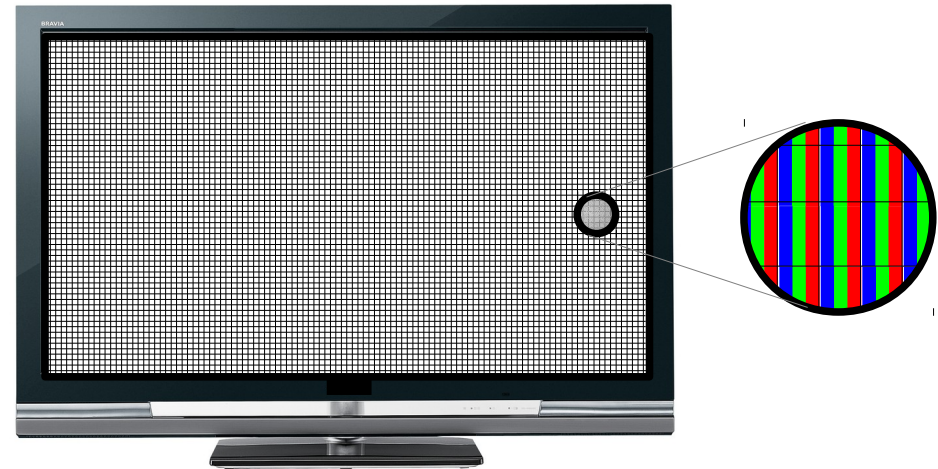
- ❖ Les transformations de jauge  
... appliquées au téléviseur

# Transformation de jauge du téléviseur

(1/3)

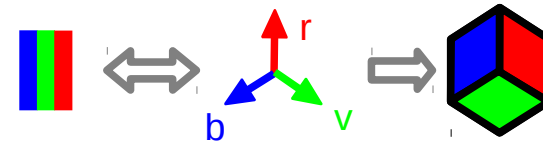
Ecran :

- matrice de pixels
- ⇔ un *champ*



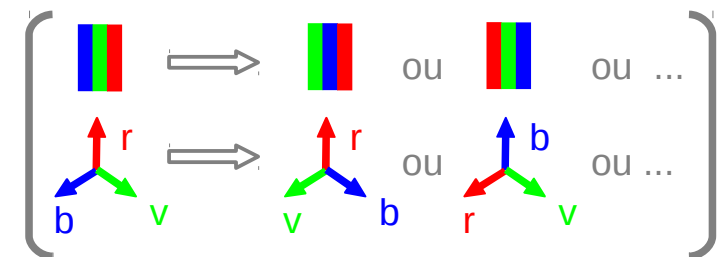
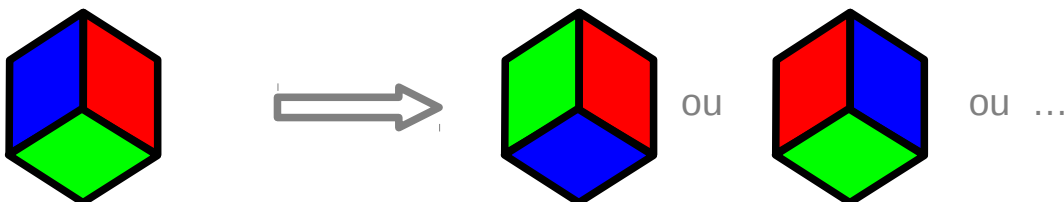
Pixel :

- superposition de 3 couleurs
- ⇔ un *vecteur*

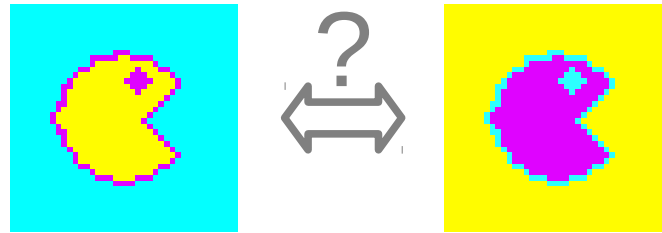
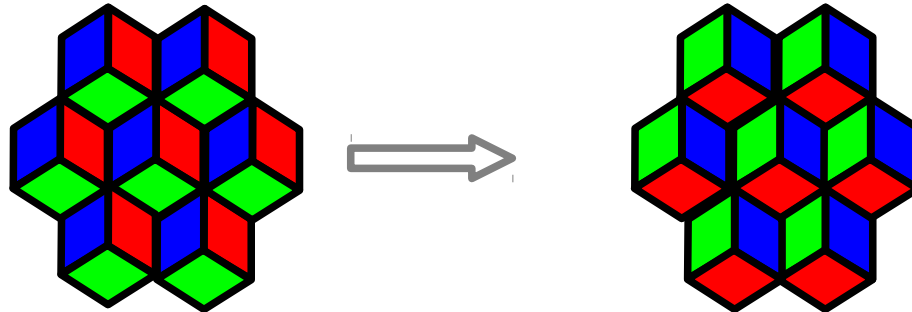


Transformation de jauge :

- modification de l'ordre de couleurs ⇔ *changement de base*



Transformation de jauge globale :  $\equiv$  changement de base identique en chaque point

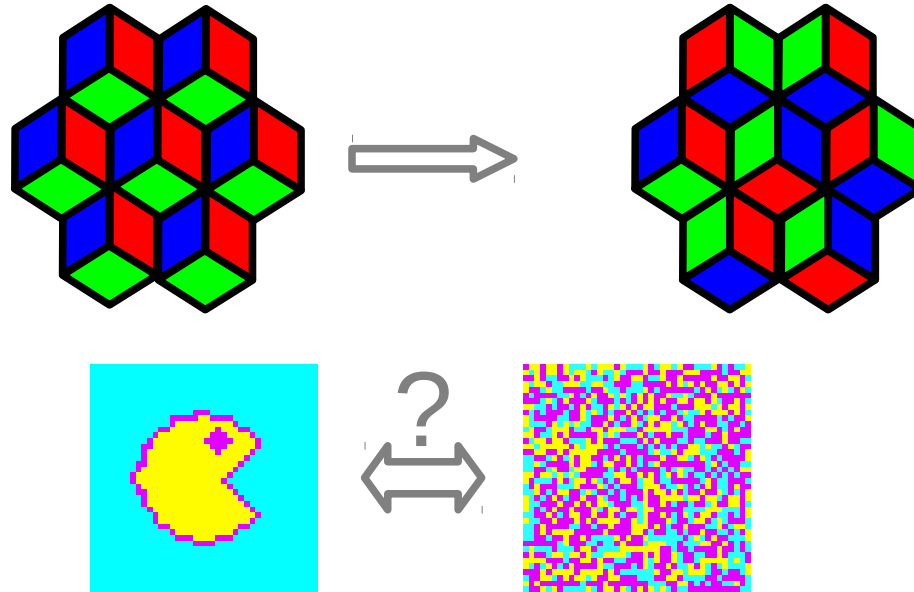


↘ Symétrie de jauge globale ?

L'image est modifiée, mais :

- elle est encore visible
- simple changement de convention pour les couleurs

Transformation de jauge locale :  $\equiv$  changement de base indépendant en chaque point



↘ Symétrie de jauge locale ?

L'image est modifiée, et :

→ elle est encodée

→ il faut un champs supplémentaire pour la décoder

↘ Sans décodeur, la télé n'est pas invariante par transformation de jauge locale

# Symétries de jauge et interactions

- ❖ Principes
- ❖ Exemples :
  - Gravitation
  - Chromodynamique

# Des symétries aux interactions fondamentales

## ① Théorie sans interaction :

- description des particules libres
- respecte les symétries d'espace-temps

↘  $\mathcal{L}_0 = f(x)$

## ② Choix de la symétrie

## ③ Prise en compte de la symétrie :

↘  $\mathcal{L}_0 \rightarrow \mathcal{L}'_0; \mathcal{L}'_0 \neq \mathcal{L}_0$

- modification des équations pour les rendre invariantes

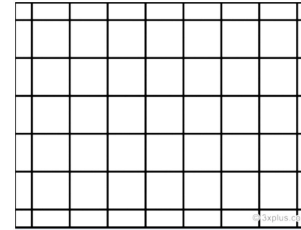
↘  $\mathcal{L} = \mathcal{L}_0 + \mathcal{L}_{int}$

↘  $\mathcal{L} \rightarrow \mathcal{L}'$  avec  $\mathcal{L}' = \mathcal{L}$

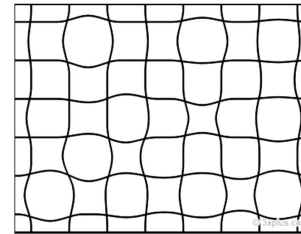
- apparition de nouveaux termes  
⇒ termes dus à l'interaction

↘  $\mathcal{L}_{int}$  exprime le potentiel d'interaction

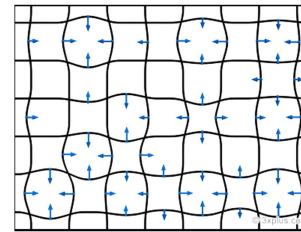
exemple : membrane en caoutchouc



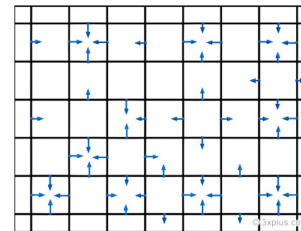
on trace un quadrillage  
⇔ la théorie libre



les transformations de jauge locales déforment la membrane  
⇔ la symétrie est détruite



Introduction de forces locales pour tendre la membrane  
⇒ la symétrie est restaurée





# Principe d'inertie et gravitation

Dans le référentiel (Oxyz) fixe (lié au sol) :

- le manège tourne
- une boule de billard va tout droit
  - ⇔ l'impulsion est conservée

Dans le référentiel (O'x'y'z') lié au manège :

- le manège ne tourne pas
- la boule de billard ne va pas tout droit
  - ⇒ elle est soumise à une force :

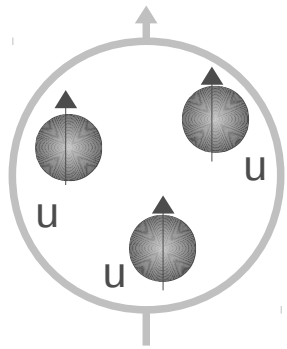
la **force d'inertie**



- ↘ les lois de la nature sont indifférentes au référentiel choisi pour les décrire
- ↘ Einstein : forces d'inertie ⇔ forces gravitationnelles
  - force gravitationnelle = force d'inertie dans un référentiel particulier
  - le champ gravitationnel est un champ de jauge : il apparaît pour rétablir la symétrie qui serait brisée par un système de coordonnées particulier.

# Chromodynamique

Principe d'exclusion de Pauli :  
 2 fermions\* d'un système ne peuvent pas être dans le même état quantique.  
 (\* fermion = particule de spin 1/2, c.à.d. particule de matière)



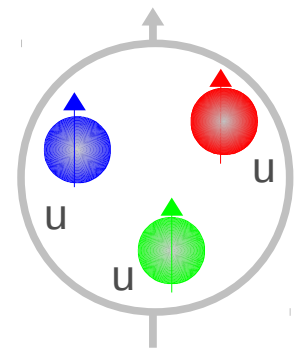
$\Lambda^{++}$  (spin 3/2)

Baryon  $\Lambda^{++}$  : 3 quarks u dans un état de spin 1/2

→ contradiction avec le *principe de Pauli*

Pour résoudre cette difficulté :

→ ajout d'un nouveau type de charge pour les différencier : la **couleur**



Propriétés de la **couleur** :

- 6 valeurs :

**rouge, vert, bleu** (r,v,b)

**anti-rouge, anti-vert, anti-bleu** ( $\bar{r}, \bar{v}, \bar{b}$ )

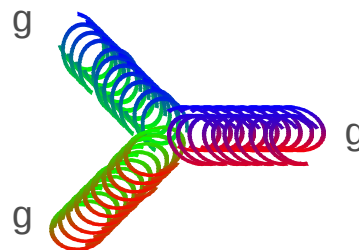
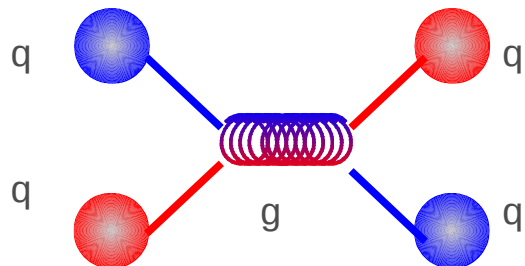
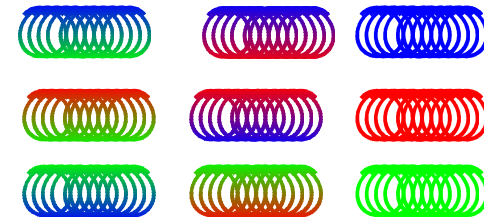
- combinaisons blanches :  $rvb = r\bar{r} = v\bar{v} = b\bar{b} = \text{BLANC}$

La transformation respectant la symétrie de couleur fait apparaître 8 termes d'interaction : **les gluons**

- chaque gluon porte une couleur et une anti-couleur

- 9 combinaisons possibles mais seulement 8 indépendantes

- les gluons étant porteur de couleur, ils interagissent entre eux!



temps →

# Symétries de jauge : résumé

## Interactions fondamentales

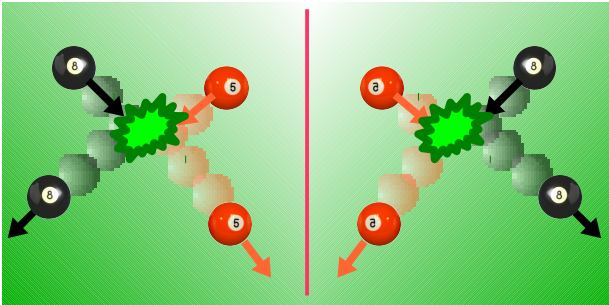
- interaction forte
- interaction électro-faible
- interaction gravitationnelle
- découlent toutes d'une invariance de jauge
- ces symétries de jauge font apparaître de nouveaux champs qui sont les vecteurs des interactions

Interaction	Groupe de symétrie	Bosons vecteurs
forte	SU(3)	8 gluons
électro-faible	SU(2)×U(1)	W <sup>+</sup> , W <sup>-</sup> , Z, γ
gravitation	<i>Diff(M) ?</i>	<i>graviton ?</i>

# Les symétries discrètes ...

- ❖ ... une classe de symétries particulières
  - P : la parité
  - C : la conjugaison de charge
  - T : le renversement du temps
- ❖ La parité et la conjugaison de charge en physique des particules

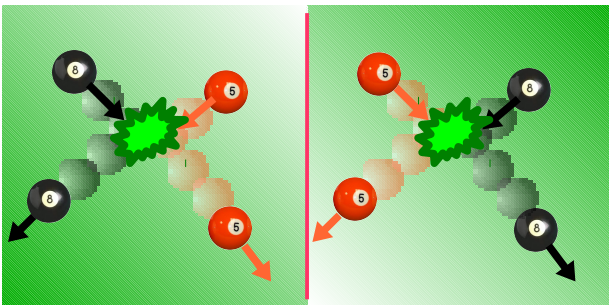
# Les symétries C,P,T



**P** <sup>def</sup> renversement de l'espace

-  $x,y,z \Leftrightarrow -x,-y,-z$

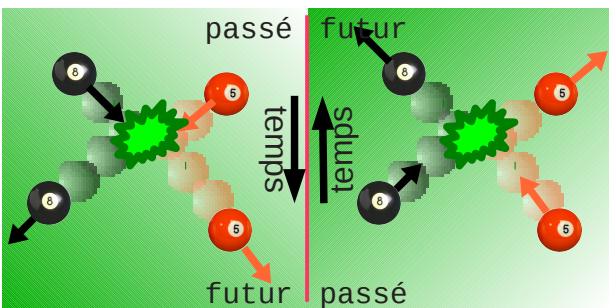
→ De quel côté du miroir sommes-nous ?



**C** <sup>def</sup> renversement des charges

-  $+ \Leftrightarrow -$  (ici : noir(8)  $\Leftrightarrow$  orange (5))

→ Où est la charge positive ?



**T** <sup>def</sup> renversement du temps

-  $\mathbf{p} \Leftrightarrow -\mathbf{p}$  (renversement du sens du mouvement)

→ Quel film est passé à l'endroit ?

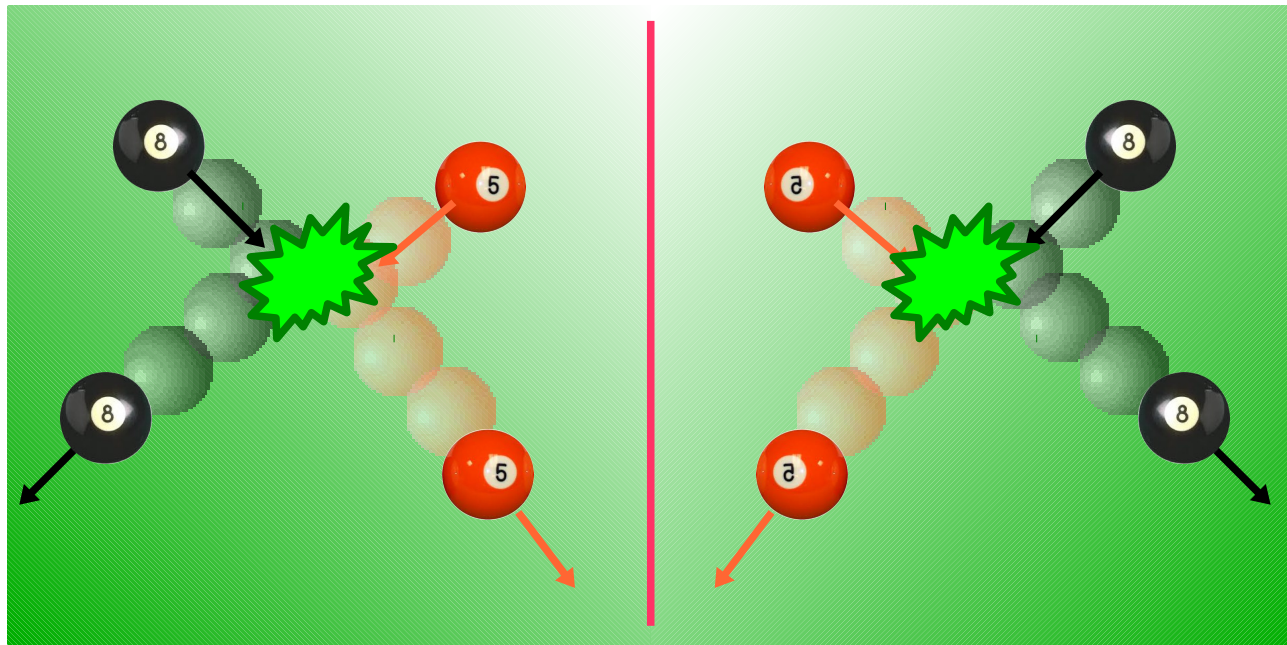
Gauche ou droite :

➤ Quelle est l'image originale ?

➤ Quels sont les situations où le reflet ne respecte pas les lois de la physique ?

# La parité : P

$P \triangleq$  renversement de l'espace :  $x, y, z \rightarrow -x, -y, -z$   
( $\equiv$  miroir+ rotation)



## Gauche ou droite

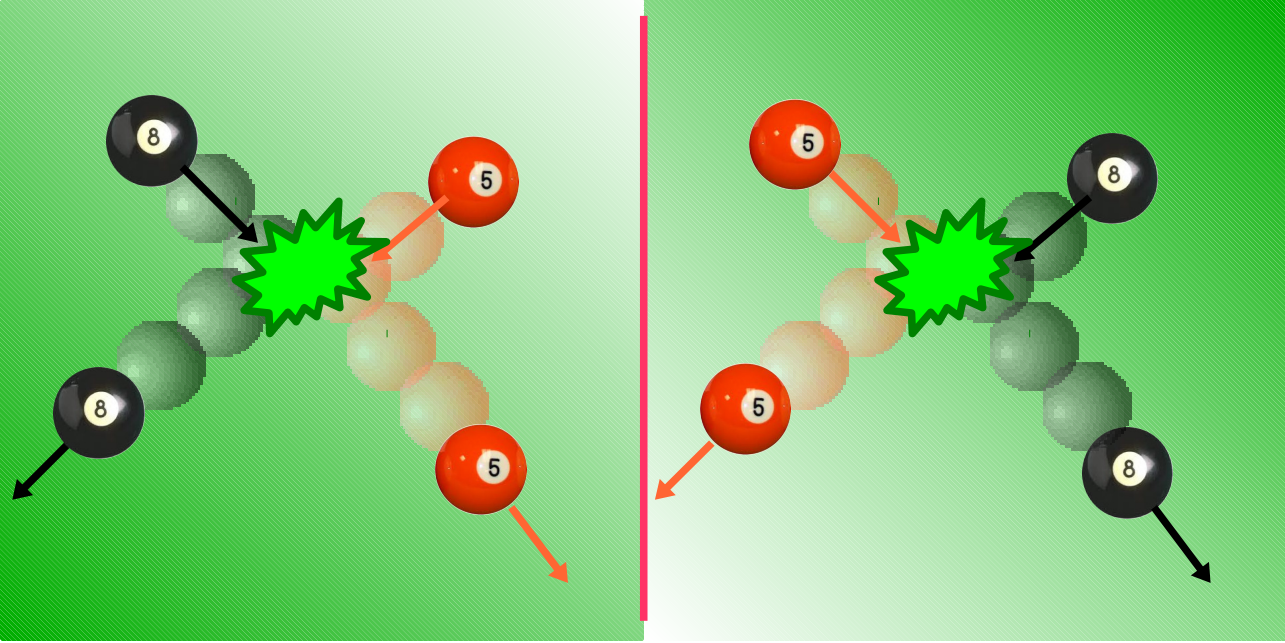
- Quelle est l'image originale ?
- De quel côté du miroir sommes-nous ?

↘ Quels sont les situations où le reflet ne respecte pas les lois de la physique ?



# La conjugaison de charge : C

C  $\triangleq$  renversement des charges :  $+ \rightarrow -$  ;  $- \rightarrow +$   
 (ici noir(8)  $\rightarrow$  orange(5); orange(5)  $\rightarrow$  noir(8))



## Gauche ou droite

- Quelle est l'image originale ?
- Où est la charge positive ?

↘ Quels conséquences si on inverse le signe de toutes les charges ?

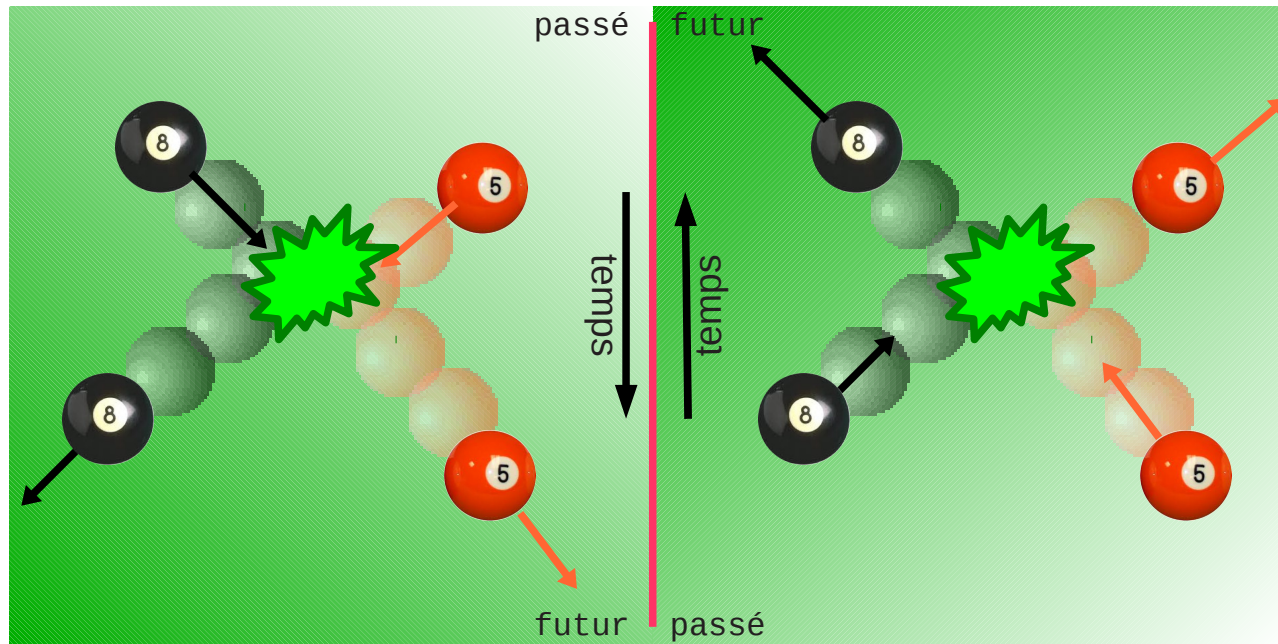
rappel : interaction entre 2 boules chargés électriquement (potentiel coulombien)

$F_5 \propto -q^2 / r n$        $F_8 \propto q^2 / r n$   
 $+q$        $-q$



# Le renversement du temps : T

$T \triangleq$  renversement de la flèche du temps  
( $\equiv$  on renverse le sens du mouvement :  $p \rightarrow -p$ )



## Gauche ou droite

- Quelle est l'image originale ?
- Peut-on distinguer le film passé à l'endroit ou à l'envers ?

↘ Qu'est-ce qui imprime la flèche du temps ?

# La flèche du temps

Les lois élémentaires de la physique semble insensible au sens du temps

- en connaissant les conditions initiales, on peut calculer les trajectoires
- on peut faire de même à partir des conditions finales !

Pourtant :

- nous faisons l'expérience quotidienne de la flèche du temps.


↘ Origine de la flèche du temps ?

- 2<sup>ème</sup> principe de la thermodynamique :  
augmentation de l'entropie avec le temps ?
- décohérence quantique ?
- seulement psychologique ?

Question non triviale !

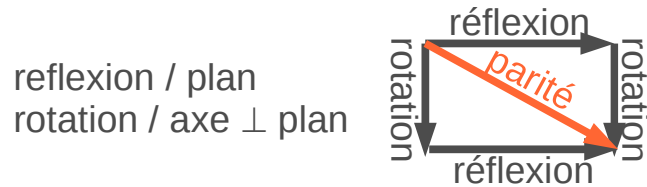


# Retour sur la parité

 le bras gauche d'une personne placé sur la bobine le courant entrant par ses pied regardant le centre de la bobine indique la direction du champ magnétique.

## Transformation de parité :

→ équivalente à : réflexion  $\otimes$  rotation



→ renverse les vecteurs (*vrais* ou *polaires*)

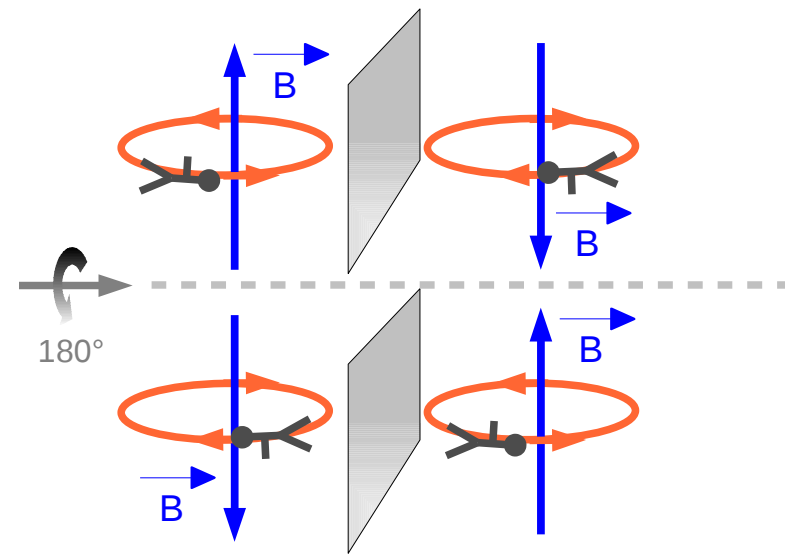
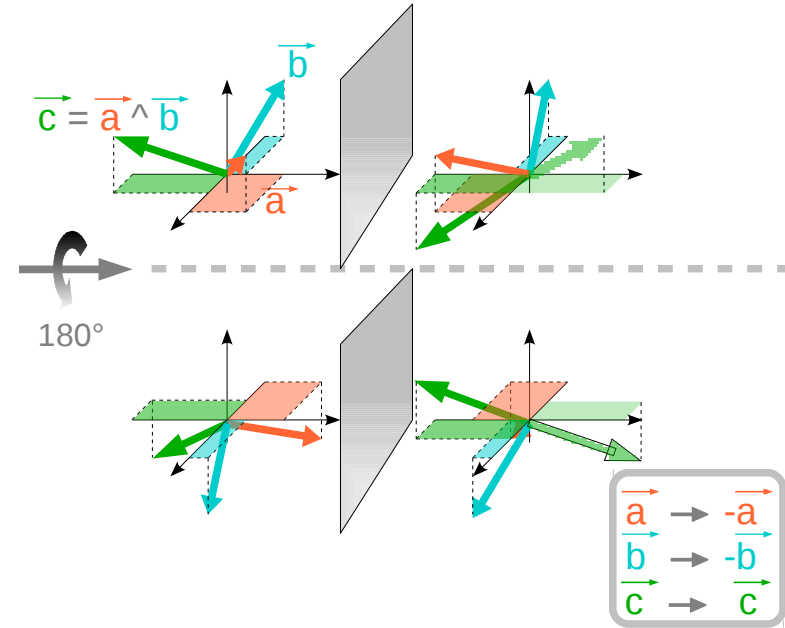
- $\mathbf{v} \rightarrow -\mathbf{v}$
- impulsions :  $\mathbf{p} \rightarrow -\mathbf{p}$
- champs électriques :  $\mathbf{E} \rightarrow -\mathbf{E}$

→ conserve les pseudovecteur (*axiaux*)


$\mathbf{c} = \mathbf{a} \wedge \mathbf{b}$  ;  $\mathbf{a}$  &  $\mathbf{b}$  vecteurs  $\Rightarrow$   $\mathbf{c}$  pseudovecteur

- $\mathbf{c} \rightarrow -\mathbf{c}$
- moments angulaires et spins :  $\mathbf{L} \rightarrow \mathbf{L}$  ;  $\mathbf{S} \rightarrow \mathbf{S}$
- champs magnétiques :  $\mathbf{B} \rightarrow \mathbf{B}$

↘ électromagnétisme respecté dans le miroir

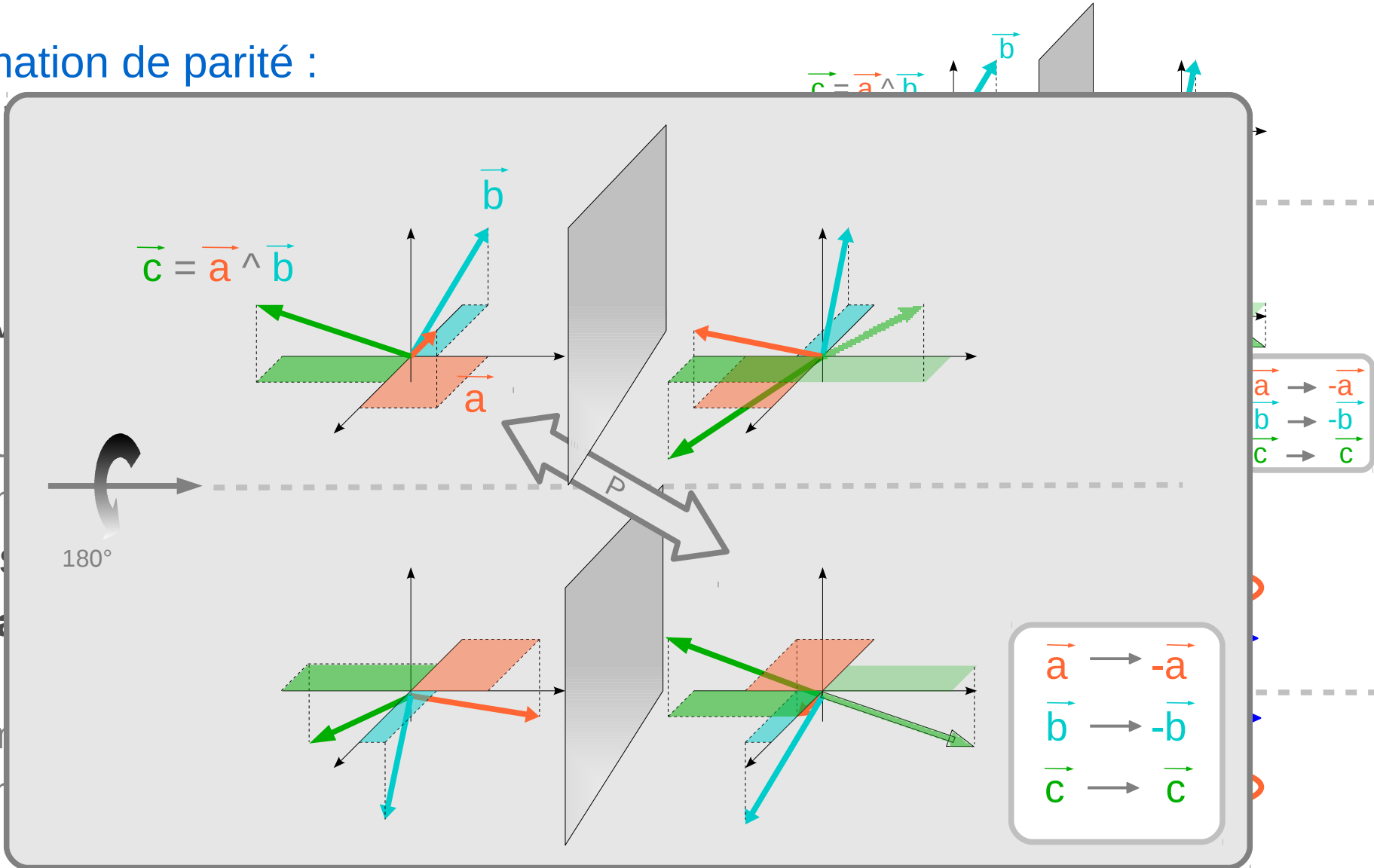


# Retour sur la parité :

 le bras gauche d'une personne placé sur la bobine le courant entrant par ses pied regardant le centre de la bobine indique la direction du champ magnétique.

## Transformation de parité :

- équ
- renv
- $v \rightarrow$
- impu
- char
- cons
- $\mathbf{c} = \mathbf{a} \wedge \mathbf{b}$
- $\mathbf{c} \rightarrow$
- mon
- char



respecté dans le miroir

# La parité en physique des particules

Les particules possèdent des **parités intrinsèques** :

→ paire ( $P=+1$ ) ( $\equiv$  *pseudovecteur*)

ou

→ impaire ( $P=-1$ ) ( $\equiv$  *vecteur*)

-  $P(\psi) = \eta\psi \rightarrow P^2(\psi) = \eta^2\psi = \psi \rightarrow \eta = \pm 1$

Les fermions et les anti-fermions ont des parités opposés

Par **convention**, on attribue une parité +1 au quarks

→ on ne peut pas mesurer la parité absolue d'un quark

→  $P(\text{anti-quark}) = -1$

Parité d'un système de plusieurs particules ( $q_i$ ) :  $P(q_0) \times \dots \times P(q_n) \times (-1)^L$

→ L est le moment cinétique orbitale des particules

(en mécanique quantique, L est entier)

→ mésons :  $P(q\bar{q}) = (-1)^{L+1}$

→ baryons :  $P(qqq) = (-1)^L$

# Le problème de la parité en physique des particules

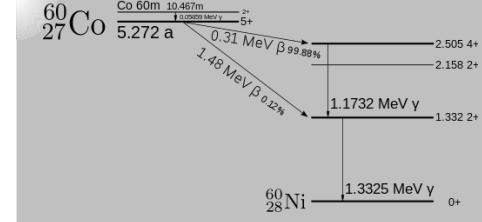
## Le puzzle $\theta$ - $\tau$ (~1950)

- 2 particules avec des masses, spin, temps de vie, ... identiques se désintègrent (par int. faible) dans des états de parités opposés
  - $\theta \rightarrow \pi^+\pi^- \quad \Leftrightarrow \quad P = +1$
  - $\tau \rightarrow \pi^+\pi^0\pi^0$  ou  $\pi^+\pi^-\pi^+ \quad \Leftrightarrow \quad P = -1$
- 2 possibilités :
  - 2 particules semblables mais distinctes avec des parités intrinsèques opposées
  - une seule et même particule et la **parité n'est pas conservée** dans les interactions faibles (parités différentes dans l'état initial et dans l'état final)

A l'époque, l'**invariance par P** est un a priori fort mais Lee and Yang en épluchant en détail la littérature scientifique montre qu'elle n'est étayée par aucune mesure expérimentale et proposent des expériences pour la vérifier.

↘ *Question of Parity Conservation in Weak Interactions,*  
The Physical Review 106 vol. 1, (1956)

# L'expérience de Mme Wu (1956)



Mise en œuvre d'une proposition de Lee & Yang

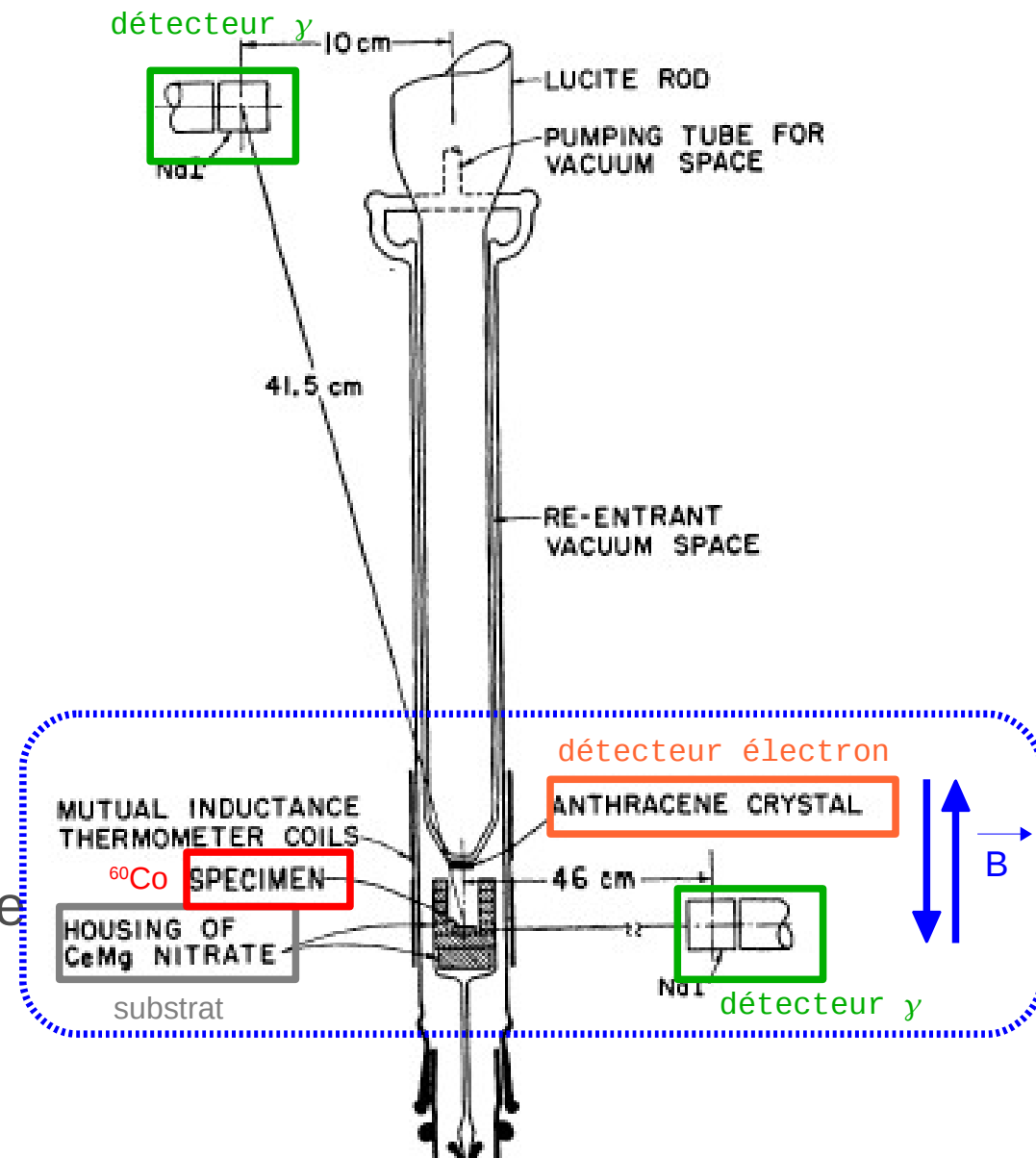
- conceptuellement simple
- défi expérimentale

Etude de la désintégration  $\beta$  de l'atome de Cobalt polarisé

- ${}^{60}\text{Co} \rightarrow {}^{60}\text{Ni} + \bar{e} + \nu + 2\gamma$
- fine couche de  ${}^{60}\text{Co}$  sur un substrat de CeMg nitrate

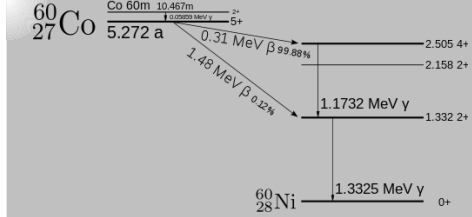
Polarisation du Cobalt

- à ultra basse température
  - refroidissement à Hélium liquide
  - démagnétisation du substrat
- champ magnétique
- mesure de la polarisation avec la détection des photons





# L'expérience de Mme Wu (1956)



## Mise en œuvre d'une proposition de Lee & Yang

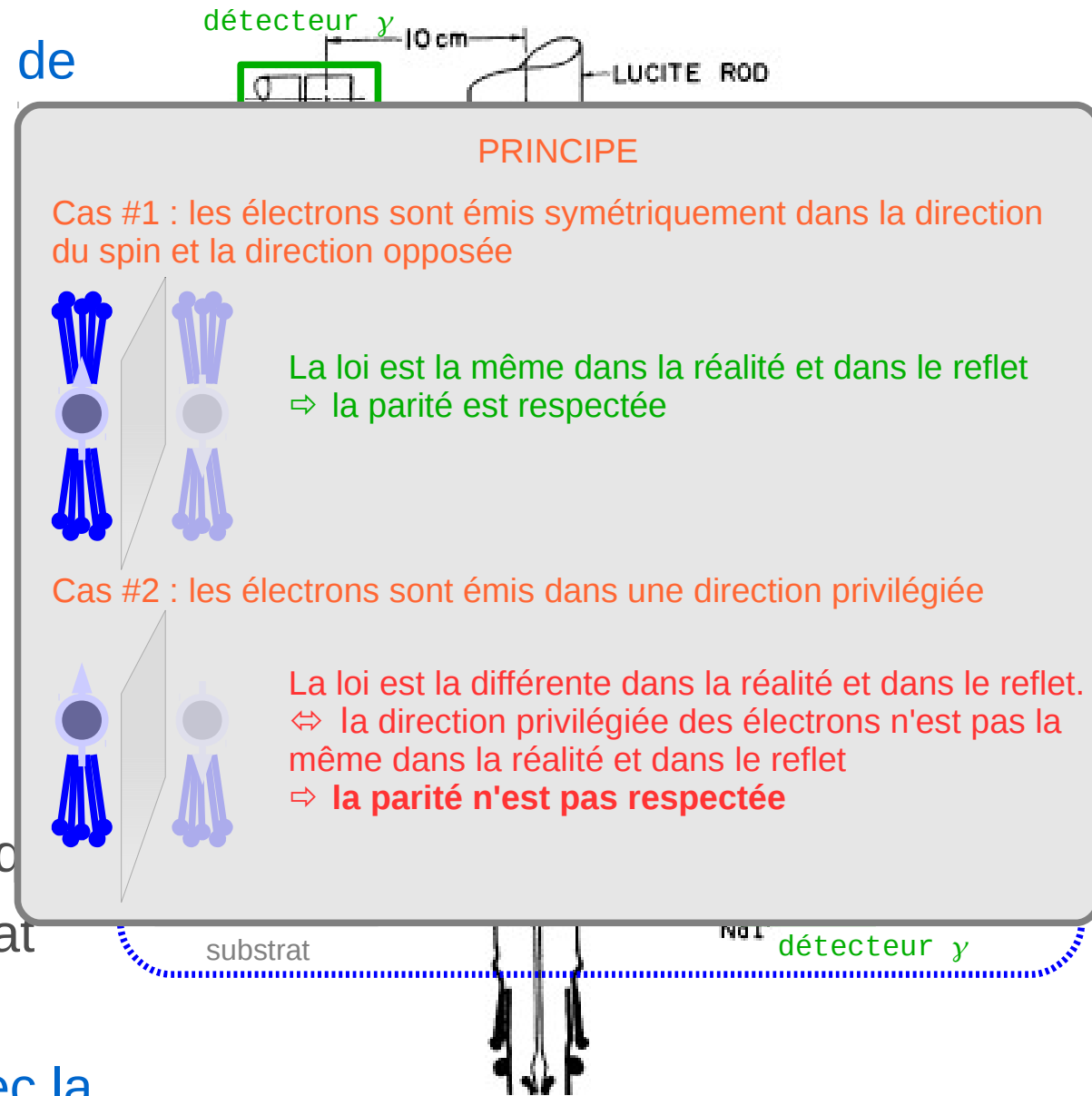
- conceptuellement simple
- défi expérimentale

## Etude de la désintégration $\beta$ de l'atome de Cobalt polarisé

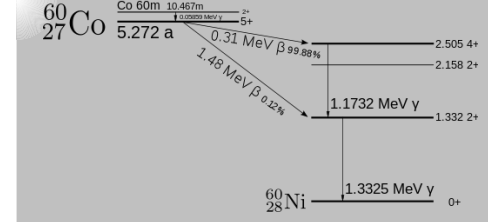
- ${}^{60}\text{Co} \rightarrow {}^{60}\text{Ni} + \bar{e} + \nu + 2\gamma$
- fine couche de  ${}^{60}\text{Co}$  sur un substrat de CeMg nitrate

## Polarisation du Cobalt

- à ultra basse température
  - refroidissement à Hélium liq
  - démagnétisation du substrat
- champ magnétique
- mesure de la polarisation avec la détection des photons



# L'expérience de Mme Wu (1956)



Mise en œuvre d'une proposition de Lee & Yang

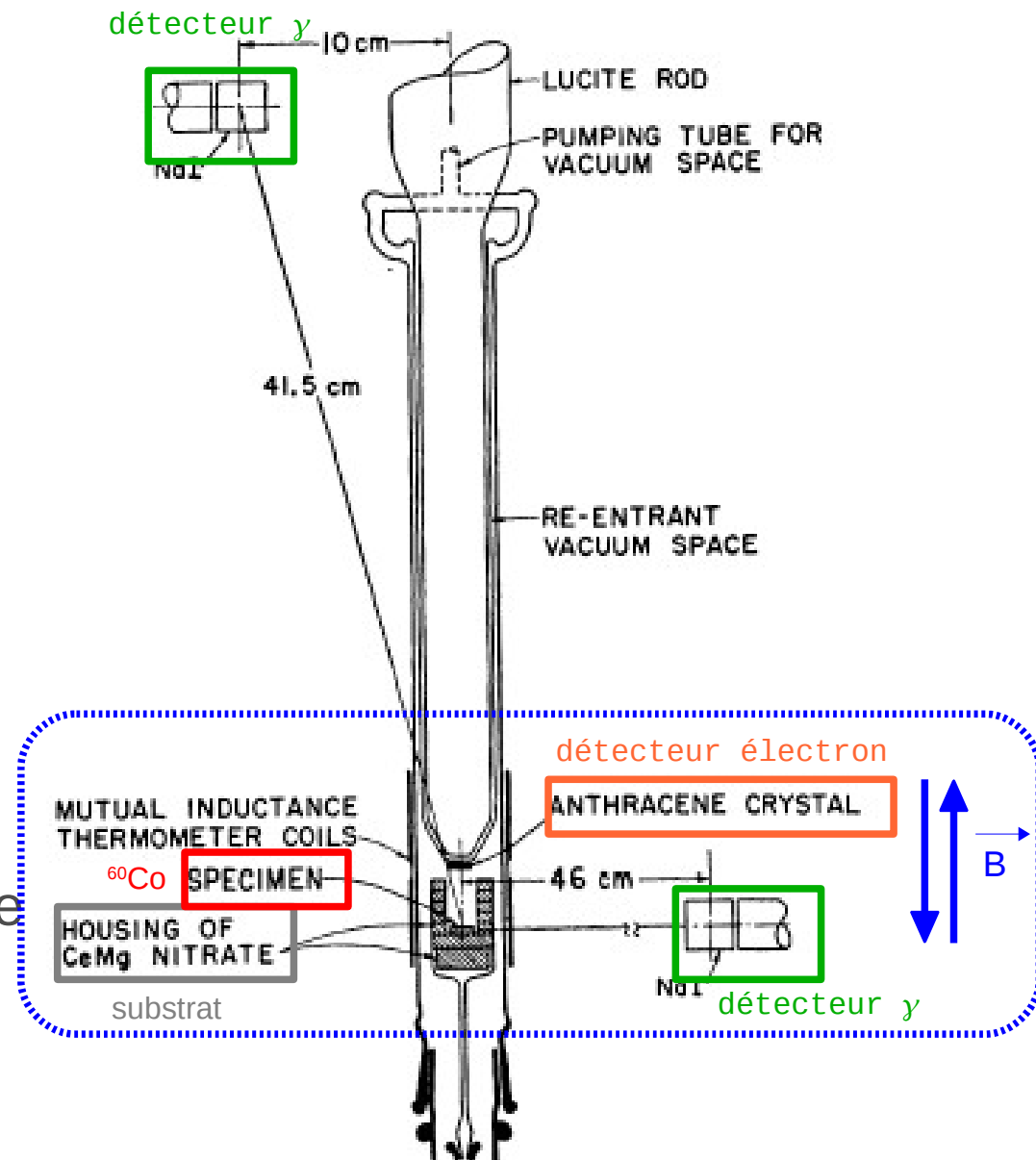
- conceptuellement simple
- défi expérimentale

Etude de la désintégration  $\beta$  de l'atome de Cobalt polarisé

- ${}^{60}\text{Co} \rightarrow {}^{60}\text{Ni} + \bar{e} + \nu + 2\gamma$
- fine couche de  ${}^{60}\text{Co}$  sur un substrat de CeMg nitrate

Polarisation du Cobalt

- à ultra basse température
  - refroidissement à Hélium liquide
  - démagnétisation du substrat
- champ magnétique
- mesure de la polarisation avec la détection des photons



# Première observation !

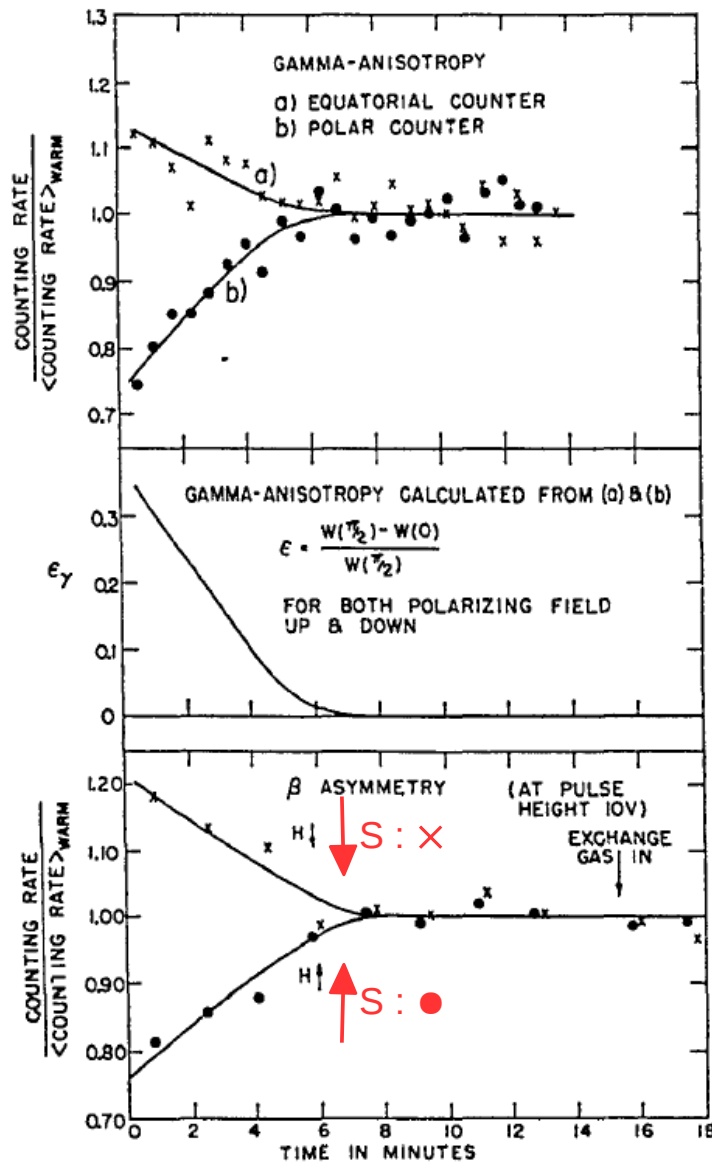


FIG. 2. Gamma anisotropy and beta asymmetry for polarizing field pointing up and pointing down.

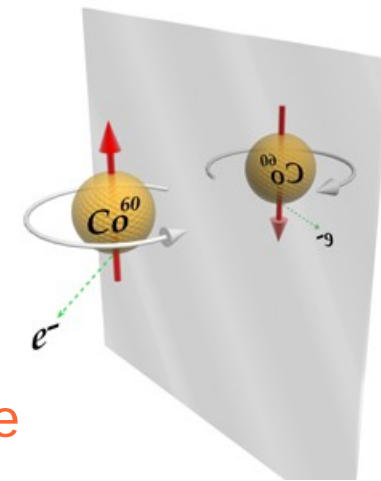
réchauffement  
dépolarisation

## Observation

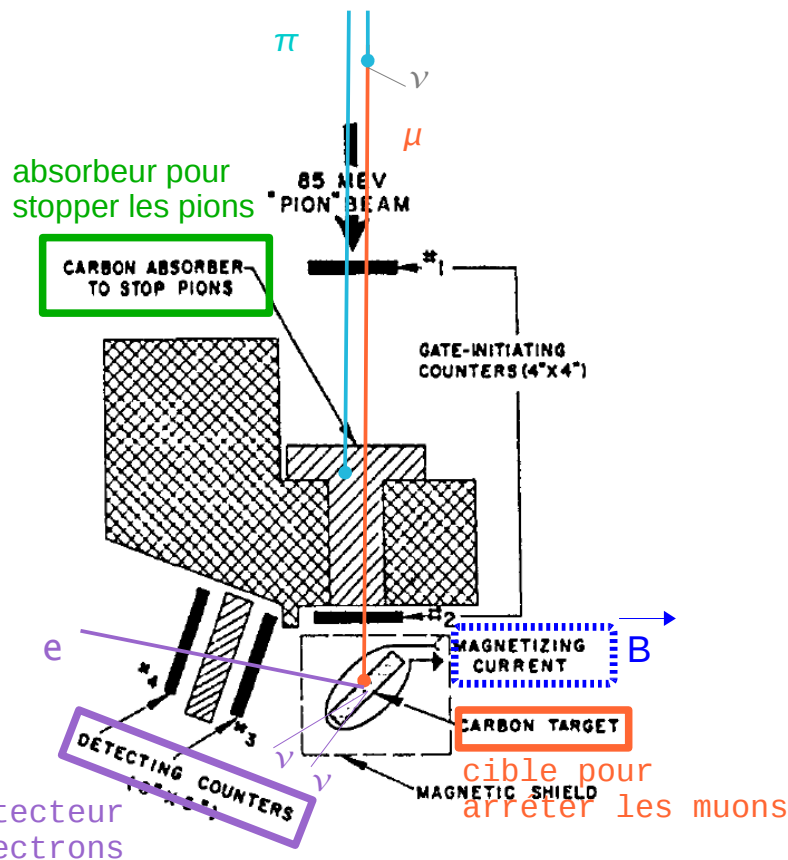
- mesure de la polarisation
- mesure de l'asymétrie  $\beta$  : nombre relatif d'électrons émis selon une direction donnée (le long de l'axe de polarisation)
- corrélation entre polarisation et asymétrie  $\beta$

## Interprétation

- dans le reflet
- corrélation opposée
- l'interaction faible se comporte différemment
- la parité n'est pas conservée



# Confirmation par Lederman (1957)



Etude de la polarisation des muons issus de la désintégration de pions

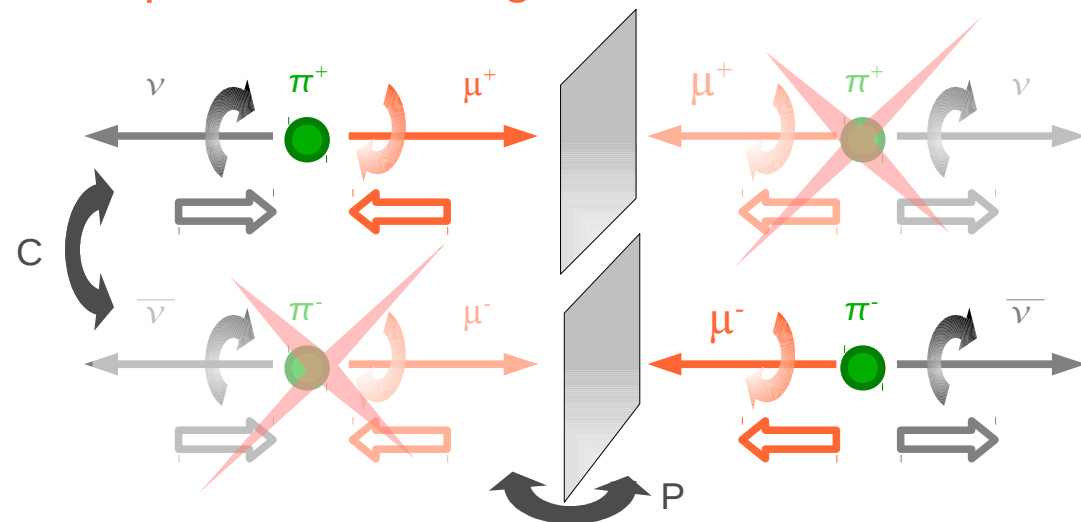
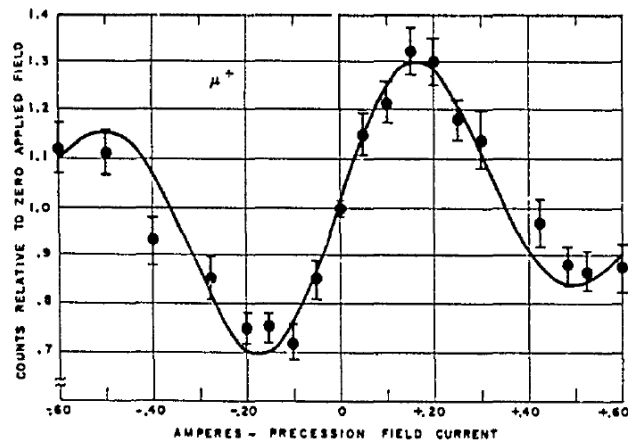
$$\rightarrow \pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu$$

$$\hookrightarrow e^{\pm} + 2 \nu$$

→ distribution angulaire des électrons dépend de la polarisation des muons

Résultat :

↘ polarisation longitudinale des muons



# Conséquence : la symétrie CP

L'interaction faible ne conserve pas :

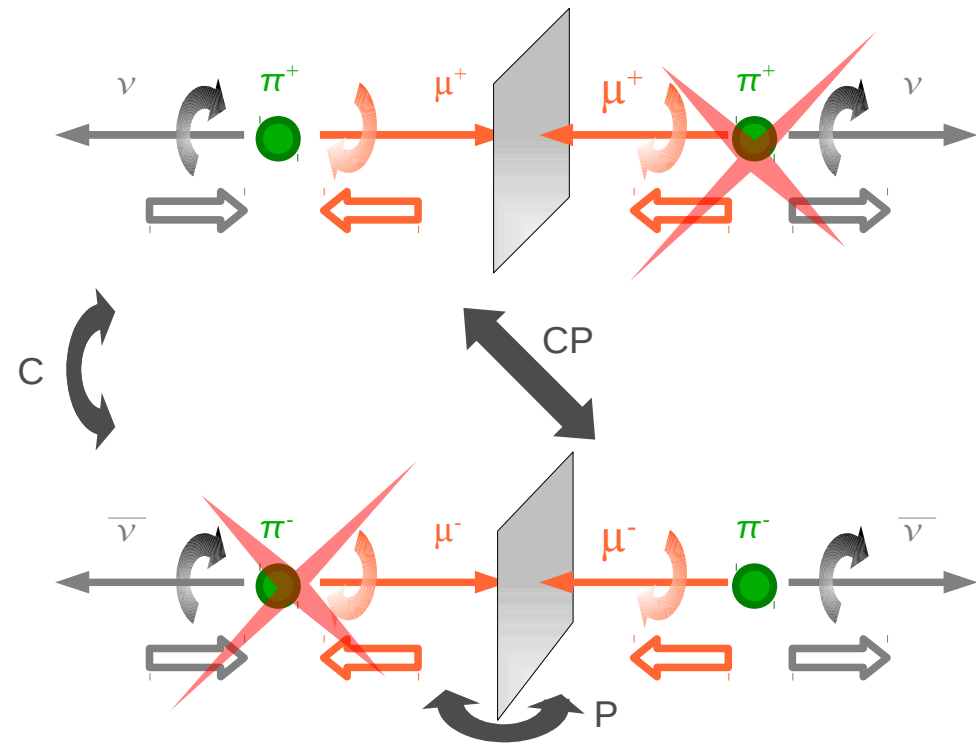
- la parité
- la conjugaison de charge
- cette violation est « maximale »  
(hélicité du neutrino)

↘ la nature a choisie entre la droite et la gauche ! entre  $\oplus$  et  $\ominus$  !

Mais :

↘ l'interaction faible semble conserver la combinaison CP  
(parité x conjugaison de charge)

- l'anti-matière se comporte comme la matière vue dans un miroir



# Interlude

❖ Le système  $K^0-\bar{K}^0$

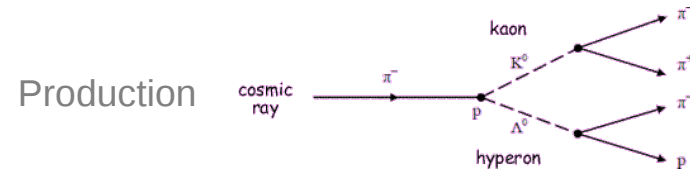
# Les kaons, ces mésons étranges

1947 : découverte du kaon neutre

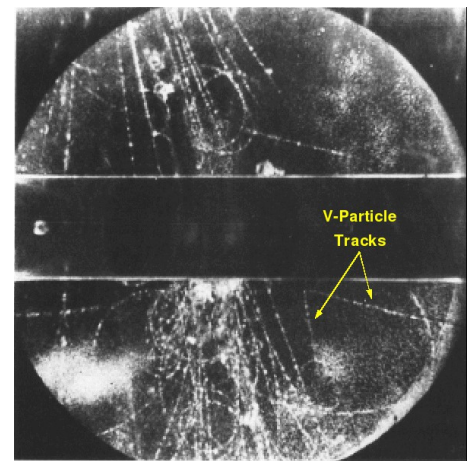
→ *V-particle*

Les kaons : particules étranges

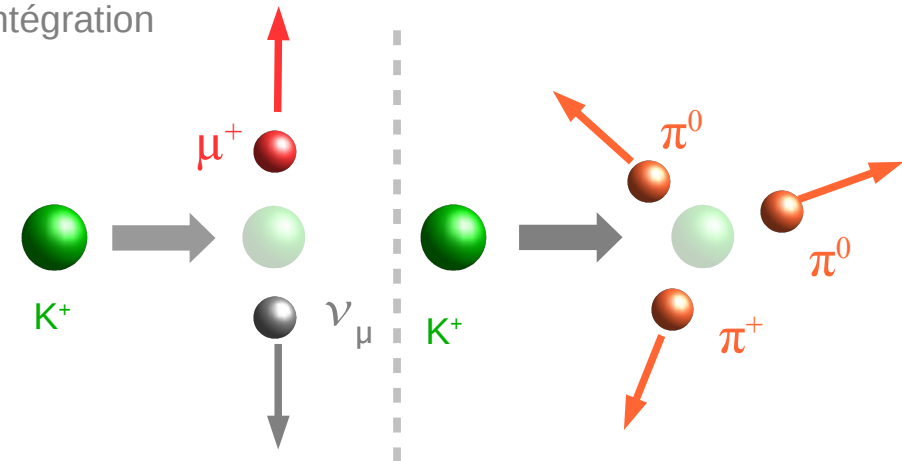
- produites par pair (étrange ?)
- production par interaction forte
- contiennent un quark *s* (*strange*)
- $K^0(\bar{d}s)$ ,  $\bar{K}^0(d\bar{s})$ ,  $K^-(\bar{u}s)$ ,  $\bar{K}^+(u\bar{s})$
- relativement légères
- $M(K) = \sim 500 \text{ MeV}/c^2$
- instables, se désintègrent par interaction faible en donnant :
  - pions ( $\pi^0, \pi^\pm$ ):  $M = \sim 140 \text{ MeV}$
  - muons ( $\mu^\pm$ ):  $M = \sim 105 \text{ MeV}$
  - électrons ( $e^\pm$ ):  $M = 0.5 \text{ MeV}$
  - neutrino ( $\nu_{e,\mu}$ ):  $M = \sim 0$



1<sup>ère</sup> observation



Désintégration



# Les kaons, ces mésons étranges

1947 : découverte du kaon neutre

→ *V-particle*

Les kaons : particules étranges

→ produites par pair (étrange ?)

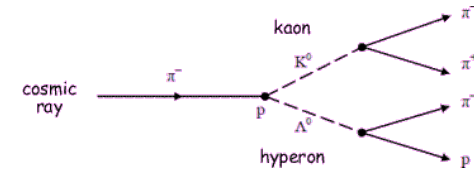
### Lois de transformation

$$\left. \begin{array}{l} \rightarrow K_0 \text{ et } \bar{K}_0 \text{ sont anti-particules} \\ C(K_0) = \bar{K}_0 \\ C(\bar{K}_0) = K_0 \\ \rightarrow K_0 \text{ et } \bar{K}_0 \text{ sont impaires} \\ P(K_0) = -K_0 \\ P(\bar{K}_0) = -\bar{K}_0 \end{array} \right\} \Rightarrow \left[ \begin{array}{l} CP(K_0) = -\bar{K}_0 \\ CP(\bar{K}_0) = -K_0 \end{array} \right]$$

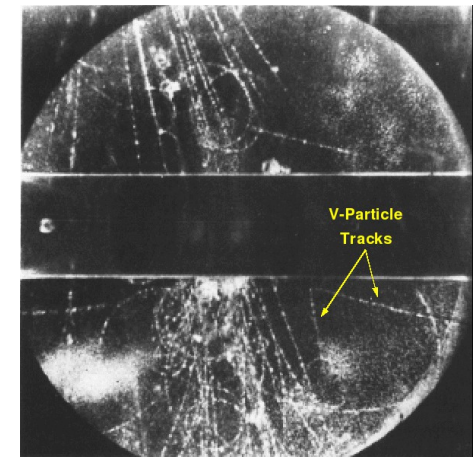
→ instables, se désintègrent par interaction faible en donnant :

- pions ( $\pi^0, \pi^\pm$ ):  $M \approx 140$  MeV
- muons ( $\mu^\pm$ ):  $M \approx 105$  MeV
- électrons ( $e^\pm$ ):  $M = 0.5$  MeV
- neutrino ( $\nu_{e,\mu}$ ):  $M \approx 0$

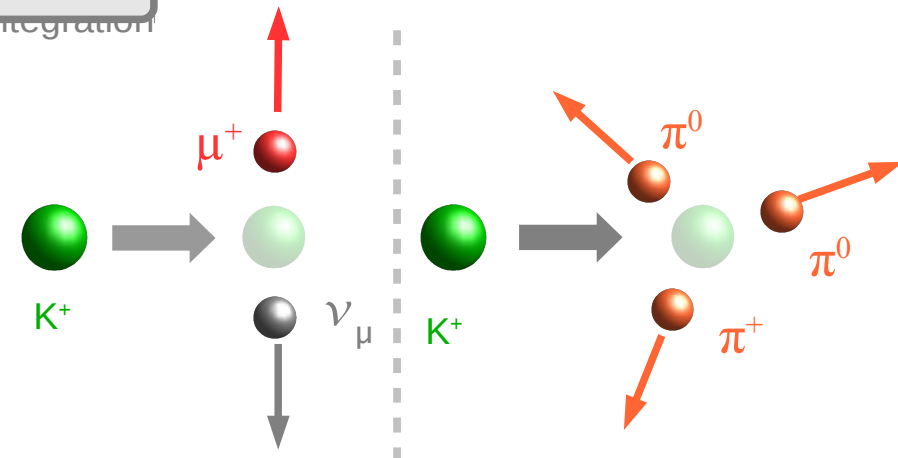
Production



1ère observation



Désintégration





# Le système $K^0-\bar{K}^0$ : l'interaction faible en action

L'interaction faible entre les quarks  $s$  et  $d$  autorise les transitions :

→  $K^0 \rightarrow \bar{K}^0$  et  $\bar{K}^0 \rightarrow K^0$

⇒ le système  $K^0-\bar{K}^0$  oscille :

→ passage  $K^0 \rightarrow \bar{K}^0 \rightarrow K^0 \rightarrow \dots$

- avec une certaine probabilité
- caractérisé par une fréquence

Evolution temporelle :

→  $t=t_0$  :

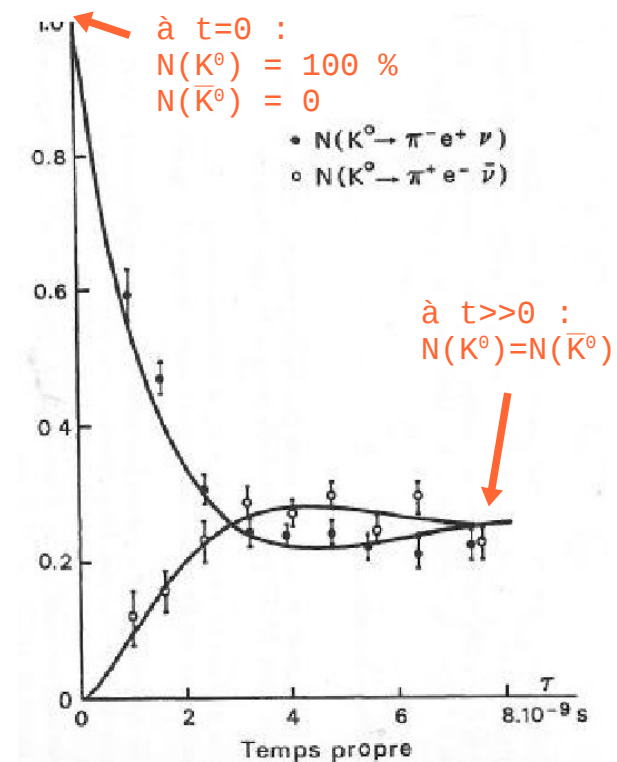
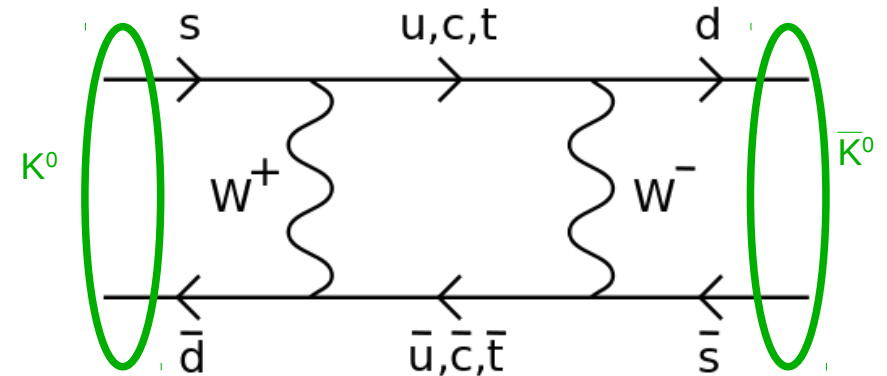
- $K^0$  produit par int. forte

→  $t>t_0$  :

- $K^0$  ou  $\bar{K}^0$  ?

⇒ une **superposition d'états** (mélange)

$$K_0(t) = \alpha(t)K^0 + \beta(t)\bar{K}^0$$



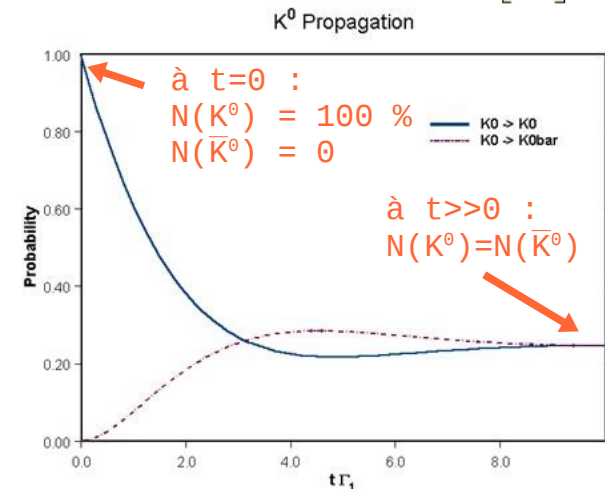
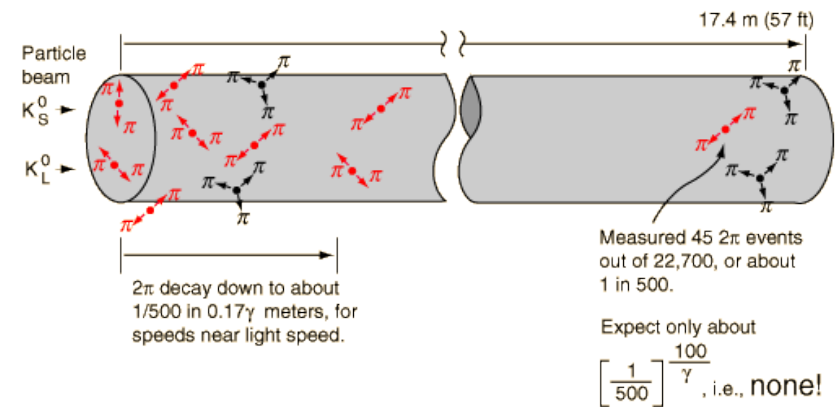
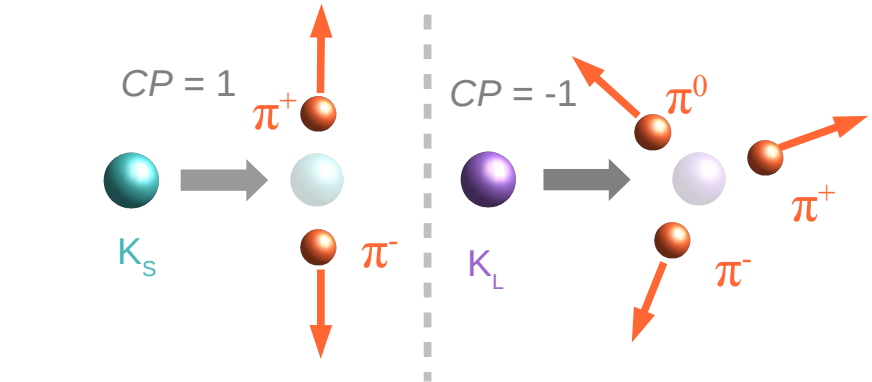
# Observations : $K_L$ et $K_S$

Note : temps de vie et état final  
 Plus difficile de produire 3  $\pi$  que 2  $\pi$   
 (espace de phase restreint)  
 → temps de vie plus long

## 2 kaons neutres : $K_S$ et $K_L$

- produits en proportion égal
- temps de vie :  $\tau(K_S) \ll \tau(K_L)$ 
  - $c\tau(K_S) = 2.7 \text{ cm} \Leftrightarrow S = \text{short}$
  - $c\tau(K_L) = 15.3 \text{ m} \Leftrightarrow L = \text{long}$
- différentes désintégrations
  - $K_S \rightarrow \pi\pi$  (99%)  $\Rightarrow CP = +1$
  - $K_L \rightarrow \pi^\pm \mu^\mp / e^\mp \nu$  (68%)  
 et  $K_L \rightarrow \pi\pi\pi$  (32%)  $\Rightarrow CP = -1$
- identifiés comme :
  - $K_S = (K^0 - \bar{K}^0) / \sqrt{2} \Rightarrow CP = +1$
  - $K_L = (K^0 + \bar{K}^0) / \sqrt{2} \Rightarrow CP = -1$

$\hookrightarrow CP(K_L) = CP(K^0 + \bar{K}^0)$   
 $= CP(K^0) + CP(\bar{K}^0) = -\bar{K}^0 - K^0 = -K_L$



fin de l'interlude

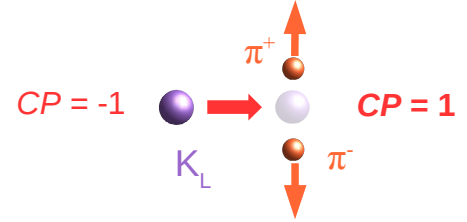
# Le non-respect des symétries

- ❖ Violation
- ❖ Brisure spontanée

# Découverte de la violation de CP

1964 : Christenson, Cronin, Fitch et Turlay observe la d

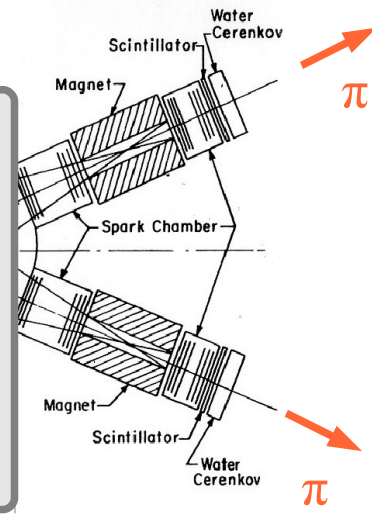
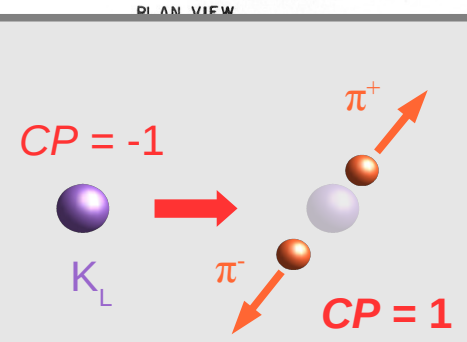
- BR( $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-$ )
- ↳ La symétrie CP est violée
- Les états propres de la masse ne sont pas les mêmes que les états propres de la charge
- $K_1 = (K^0 - \bar{K}^0)/\sqrt{2}$
- $K_2 = (K^0 + \bar{K}^0)/\sqrt{2}$
- ne sont pas des états propres de la charge
- on observe la violation de CP
- $K_S = (K^0 + \bar{K}^0)/\sqrt{2}$
- $K_L = (K^0 - \bar{K}^0)/\sqrt{2}$
- ↳ Les  $K_S$  &  $K_L$  sont des états propres de la masse qui se propagent librement
- ↳ Proba( $K^0 \rightarrow \pi^+\pi^-$ )
- ↳ matière et anti-matière ne se reflètent pas exactement !



**LE PRINCIPE**

Si on observe  $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-$   
 $\Rightarrow$  CP(état initial)  $\neq$  CP(état final)  
 $\Rightarrow$  la symétrie CP n'est pas respectée !

Note : meilleure limite à l'époque :  $BR(K_L \rightarrow \pi^+\pi^-) < 0.003$

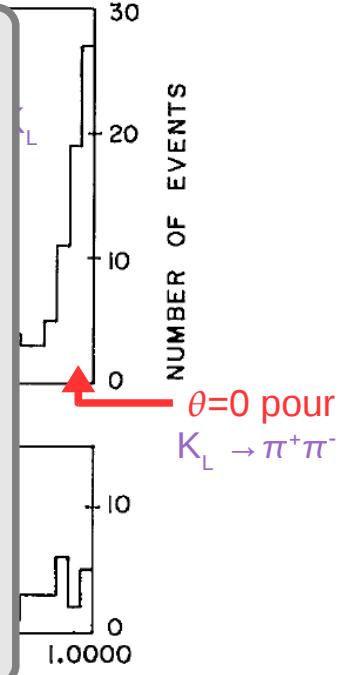


**LA MESURE**

$\theta$  : l'angle entre la direction du  $K_L$  et  $\vec{p}_{tot} = \vec{p}_{\pi^-} + \vec{p}_{\pi^+}$

Désintégration autorisée :  $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-\pi^0$   
 état final partiellement reconstitué  
 $\Rightarrow \theta$  est grand

Désintégration interdite :  $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-$   
 état final complètement reconstitué  
 $\Rightarrow \theta = 0$



# Effets d'interférence

## Exemple

- un faisceau contenant  $K_L$  et  $K_S$
- désintégration :  $K \rightarrow \pi^+\pi^-$ 
  - peuvent provenir des  $K_L$  ou des  $K_S$
  - indiscernable  $\Rightarrow$  effet d'interférence

↘ l'observation de cette interférence est la véritable preuve de la violation de CP

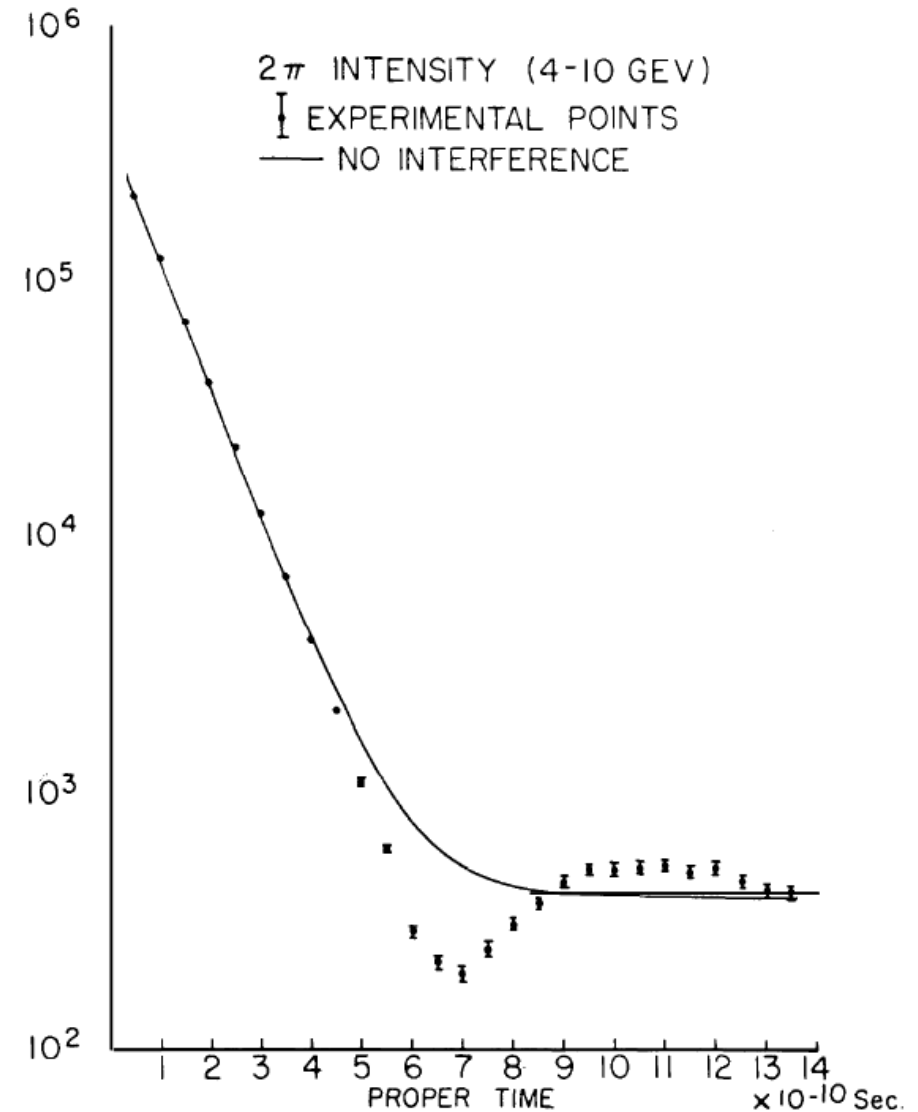


Fig. 2. Yield of  $\pi^+\pi^-$  events as a function of proper time downstream from an 81 cm carbon regenerator placed in a  $K_L$  beam.

# Effets d'interférence

## Exemple

- un faisceau contenant  $K_L$  et  $K_S$
- désintégration :  $K \rightarrow \pi^+\pi^+$ 
  - peuvent provenir des  $K_L$  ou des  $K_S$
  - indiscernable  $\Rightarrow$  effet d'interférence

## CONSEQUENCES THEORIQUES

1973 : seules 2 familles de quarks sont connues  
 la violation de CP a conduit les théoriciens à prédire l'existence d'une 3ème famille

- quark b (beau) : découvert en 1977
- quark (top) : découvert en 1995

La violation de CP est intégrée dans le modèle standard en introduisant une unique phase complexe dans une matrice jusque là composée d'éléments réels

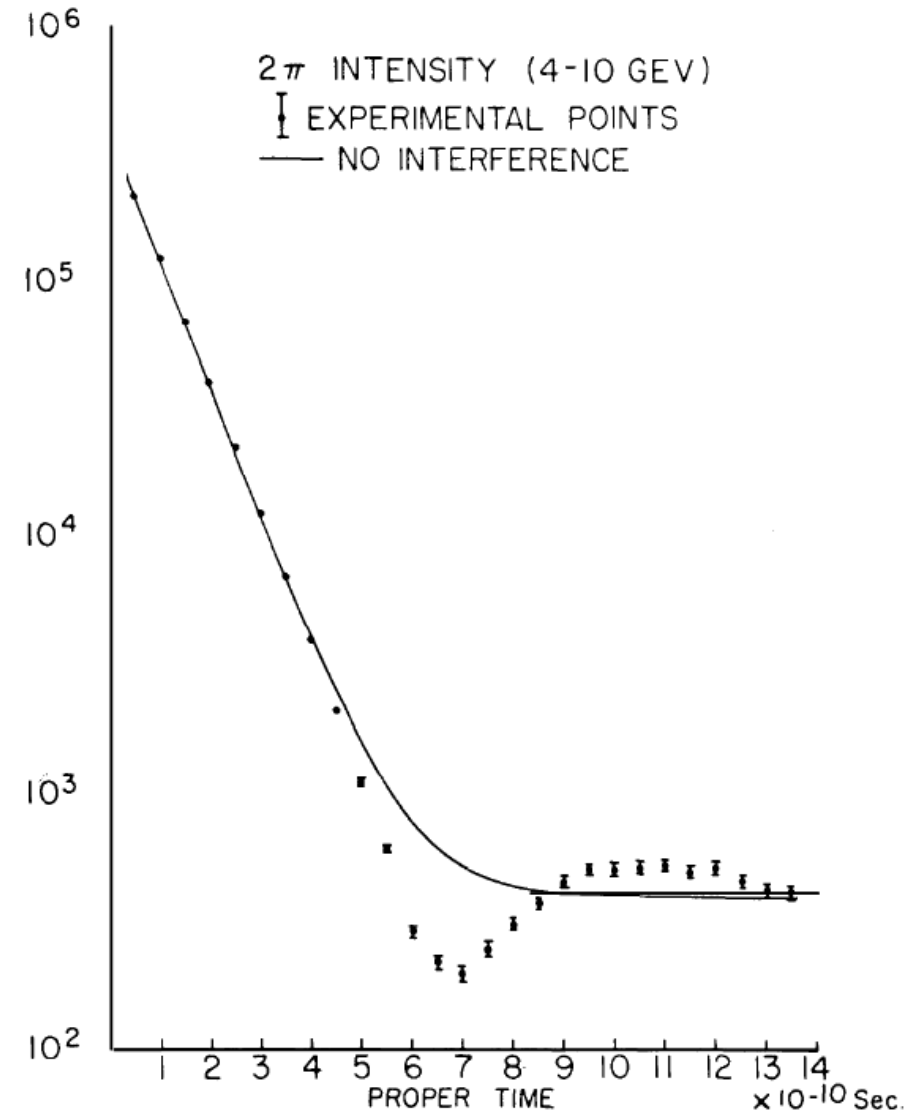


Fig. 2. Yield of  $\pi^+\pi^-$  events as a function of proper time downstream from an 81 cm carbon regenerator placed in a  $K_L$  beam.

# La violation de CP : un sujet toujours d'actualité

## Violation dans les mésons beaux

→ Babar & Belle (2004)

## Violation dans les mésons charmés

→ LHCb (2011)

## Les enjeux :

→ Comprendre en détail les mécanismes

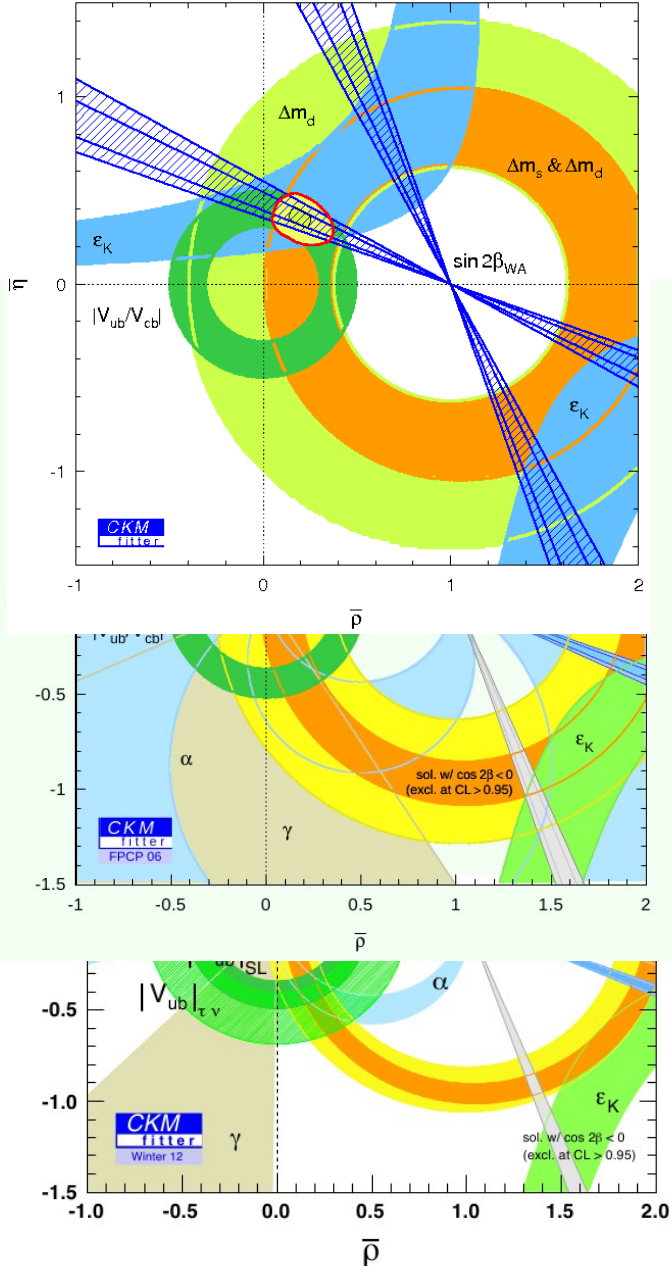
Confronter les prédictions théoriques

### CONSEQUENCES THEORIQUES

Les études précises des paramètres dans le secteur sensible à la violation de CP permettent de d'invalidier des modèles de nouvelles physiques ou de permettront de mettre en évidence leur existence.  
 ⇒ secteur très sensible et très actif

conformerait-ils ?

→ sujet d'étude actif





# La violation de T

---

T : renversement de la flèche du temps.

→ pas facile expérimentalement !

CPLear (Cern - 1998)

→ mise en évidence de la violation de T dans le domaine de kaons neutres

BaBar (SLAC – 2012) :

→ mise en évidence de la violation de T dans le domaine des méson beaux

↘ pas de rapport direct avec la flèche du temps

↘ lié à la symétrie CPT

# Symétries discrètes : qu'est-ce qui est conservé ?

---

L'interaction forte et électromagnétique conserve C,P et T

L'interaction faible brise

- maximale C et P
- marginalement CP et T

La symétrie CPT est toujours conservée

- a priori théorique fort
- jusqu'à preuve du contraire !

- ↘ Un outil formidable pour
- ↘ invalider la théorie actuelle
- ↘ invalider les théories concurrentes

# Symétries discrètes : qu'est-ce qui est conservé ?

## SYMETRIES DISCRETES : CONCLUSIONS

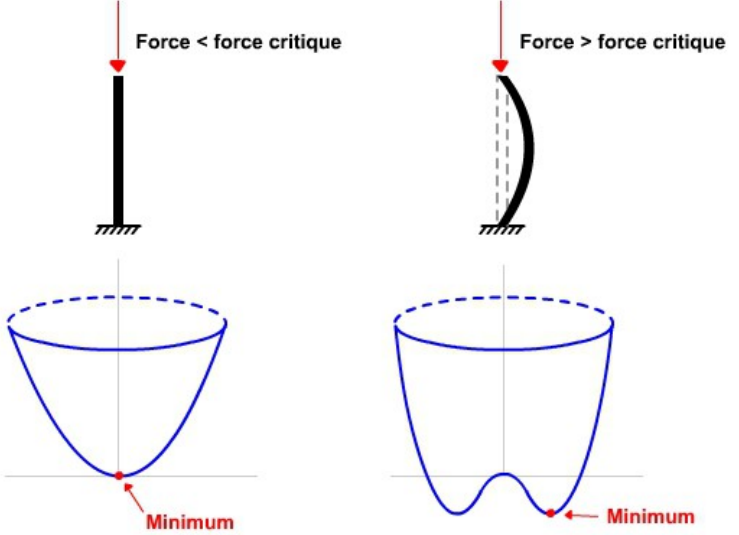
Asymétrie CP : une des conditions nécessaires pour expliquer la disparition de l'anti-matière dans l'univers

La violation de CP dans le modèle standard

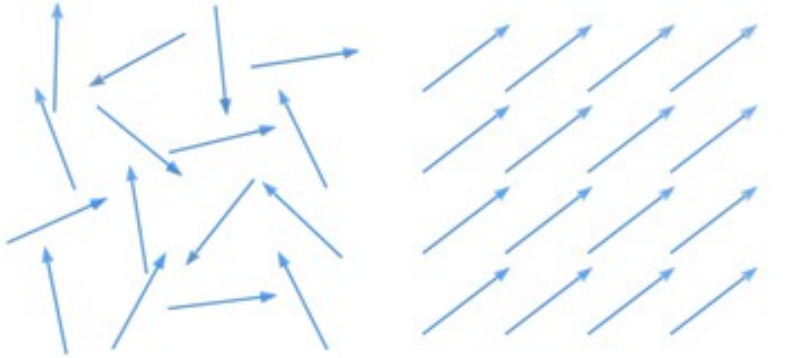
- paraît trop faible pour expliquer l'absence d'anti-matière
- sa description en fait une sonde extrêmement sensible aux processus non prévus (nouvelle physique)
- activement étudié : **LHCb**

- ↘ U
- ↘ in
- ↘ in

# Brisure spontanée de symétrie



Flambage d'une barre d'acier



Transition de phase para → ferromagnétique

Brisure spontanée : la solution des équations ne reflète pas la symétrie initiale

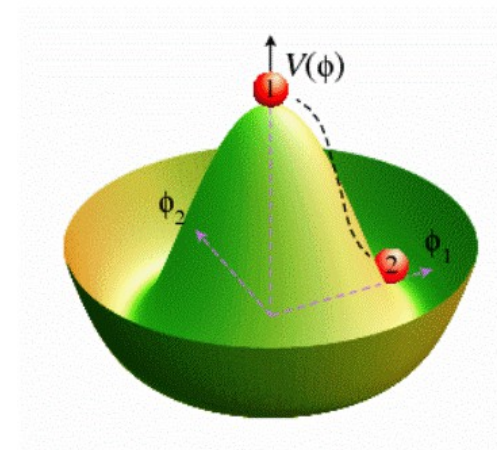
# Le mécanisme de Higgs

Symétrie de jauge de l'interaction électrofaible fait apparaître 4 bosons

- identifiés aux :  $W^+$ ,  $W^-$ ,  $Z^0$  et  $\gamma$
- dans la théorie ces bosons sont de masse nulle
- dans la nature :  $W^+$ ,  $W^-$  et  $Z^0$  sont massifs  
( $\Leftrightarrow$  l'interaction faible est de courte portée)  
 $\Rightarrow$  la symétrie est brisée

Mécanisme de Higgs :

- ajout d'un champ (le champ de Higgs) pour briser la symétrie
- en interagissant avec le champ de Higgs, les particules acquièrent une masse  
 $\rightarrow$  la masse n'est pas une propriété intrinsèque  
 $\rightarrow$  c'est la résultante d'une interaction !



# Résumé

---

Les lois de la physique obeissent à certaines symétries

Grandeur absolue non observable  $\Leftrightarrow$  invariance par transformation  $\Leftrightarrow$  quantité conservée

- symétries d'espace-temps
- symétries de jauge
- symétries discrètes

Ces symétries peuvent être violées ou spontanément brisées

De nouvelles symétries restent à découvrir