

Symétries

Une symétrie permet de modifier quelque chose sans impact mesurable sur le système physique modifié

1. Symétries physiques :

- 📷 Des personnes sont (à peu près) bilatéralement symétriques
- 📷 Une sphère est symétrique par rapport aux rotations

2. Les lois de la nature sont symétriques par rapport à des opérations mathématiques (un observateur ne peut distinguer si l'opération a été effectuée)

Pollen of the hollyhock exhibits spherical symmetry (magnification x 100,000)

Symétries et lois de conservation

- ☀ En effet, à toute symétrie continue peut être attribuée une constante du mouvement et une loi de conservation (théorème profond de A.E. Noether, 1915)

Symétrie :	Homogénéité de l'espace	Isotropie de l'espace	Invariance sous mouvement en temps
Transformation :	Translation	Rotation	Translation dans le temps
Quantité conservée :	Impulsion	Moment cinétique	Energie



Il n'existe aucun signal de violation d'une de ces lois de conservation

- ☀ Toutes ces symétries se réfèrent à des transformations géométriques de l'espace-temps (→ similaires aux transformations « de jauge » – à rencontrer plus tard ...)

Symétries discrètes

En physique des particules, les symétries suivantes sont fondamentales :

☀ Parité « P »

Réflexion de l'espace autour d'un centre arbitraire

Invariance : nous ne pouvons pas distinguer ce monde du monde reflété dans le miroir

☀ Transformation de particule en antiparticule « C »

Multiplication par -1 de (par ex.) la charge d'une particule
(« conjugaison de charge »)

☀ Renversement du temps « T »

Le signe du temps dans les équations est renversé

Invariance : les mouvements dans une direction et son opposé sont indistinguables
[l'invariance sous T ne correspond certainement pas à notre expérience quotidienne]

Les particules sous
 P, C, T :

$$P|e_L^-\rangle = |e_R^-\rangle$$

$$P|\pi^0\rangle = -|\pi^0\rangle$$

$$P|n\rangle = +|n\rangle$$

$$C|e_L^-\rangle = |e_L^+\rangle$$

$$C|u\rangle = |\bar{u}\rangle$$

$$C|d\rangle = |\bar{d}\rangle$$

$$C|\pi^0\rangle = +|\pi^0\rangle$$

Symétries discrètes

En physique des particules, les symétries suivantes sont fondamentales :

☀ Parité « P »

Les particules sous

P C T :

Ces symétries sont intéressantes car auparavant il n'était pas clair si les interactions sont invariantes sous même une seule de ces transformations discrètes ...

(« conjugaison de charge »)

☀ Renversement du temps « T »

Le signe du temps dans les équations est renversé

Invariance : les mouvements dans une direction et son opposé sont indistinguable

[l'invariance sous T ne correspond certainement pas à notre expérience quotidienne]

$$C|e_L^- \rangle = |e_L^+ \rangle$$

$$C|u \rangle = |\bar{u} \rangle$$

$$C|d \rangle = |\bar{d} \rangle$$

$$C|\pi^0 \rangle = +|\pi^0 \rangle$$

En effet ... La parité est souvent brisée dans le monde macroscopique

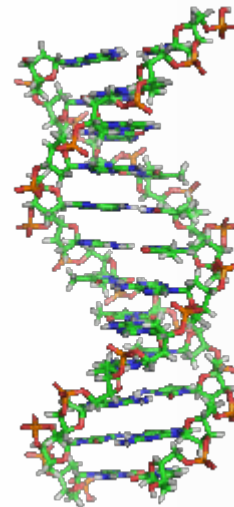
	Gauchers	Droitiers	Ambidextres
Mains	5%	72%	22%
Pieds	4%	46%	50% (?)
Yieux	5%	54%	41%
Oreilles	15%	35%	60%
Porac C & Coren S. Lateral preferences and human behavior. New York: Springer-Verlag, 1981			

~ 25% des populations roulent à gauche ...

Dans les sociétés anciennes, les hommes (droitiers) préféraient marcher à gauche pour positionner leur épée au milieu du chemin en cas d'attaque

L'ADN est une double hélice droite

Deux chaînes de polynucleotide avec chiralité droite



Et dans le monde microscopique ?

- ☀ Les interactions **électromagnétiques (EM)** et fortes **respectent** C , P and T
- 🖥 Exemple: désintégration d'un π^0 par l'interaction EM : $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma$ observé, mais **pas** : $\pi^0 \rightarrow \gamma\gamma\gamma$
les états initial (π^0) et final ($\gamma\gamma$) ont $C = +1$: $\rightarrow$ **C est conservé**

Mais, en 1956 T.D. Lee et C.N. Yang argumentaient ...
afin d'expliquer l'observation de désintégrations d'une apparemment
même particule « K » en 2π ($P = +1$) et en 3π ($P = -1$)
... que l'invariance sous P n'a pas encore été testé dans
l'interaction faible et ils proposaient une expérience pour le
faire ...

- 🖥 Et – en effet – une expérience de désintégration radioactive de ^{60}Co en 1957 démontrait une préférence (nette !) des électrons d'être émis en direction opposée du spin du ^{60}Co polarisé $\rightarrow$ **P est brisé !**



Yang



Lee

[illegible]

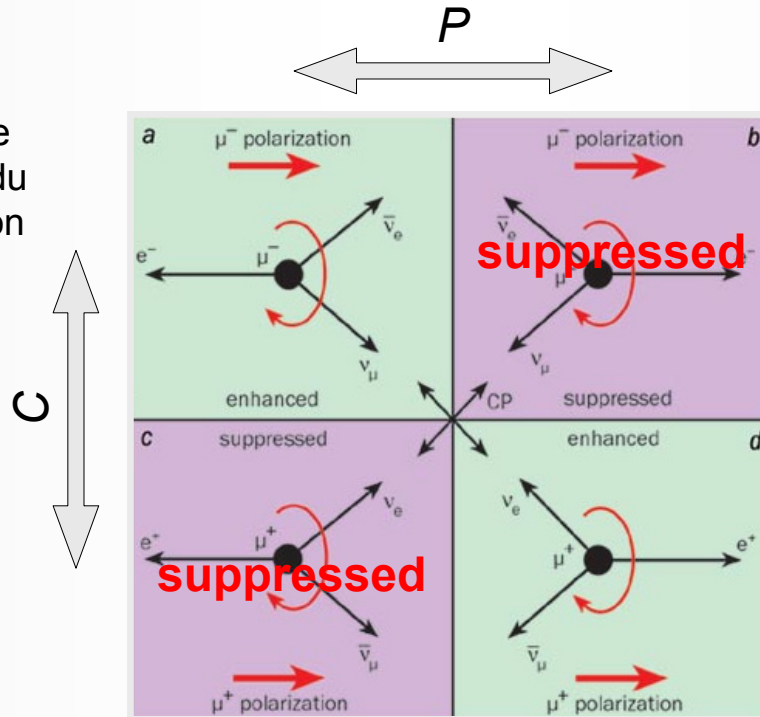
Grenoble, 25 fév, 2009

P et C sont violés maximalement par l'interaction faible

☀ Considérons la désintégration d'un muon polarisé: $\mu^-_{\text{polarized}} \rightarrow e^- + \nu_\mu + \bar{\nu}_e$

La direction **préférée** de l'électron est **l'opposé** du vecteur de spin du muon

Similaire pour la transformation de **C** (remplaçant toutes les particules par leurs antiparticules).



Transformation de **P** (renversement de toutes les directions dans l'espace) engendre une configuration supprimée dans la nature

Appliquant **C** et **P**, on obtient un antimuon émettant un positron dans la même direction que son spin – ce qui est **observé dans la nature** !

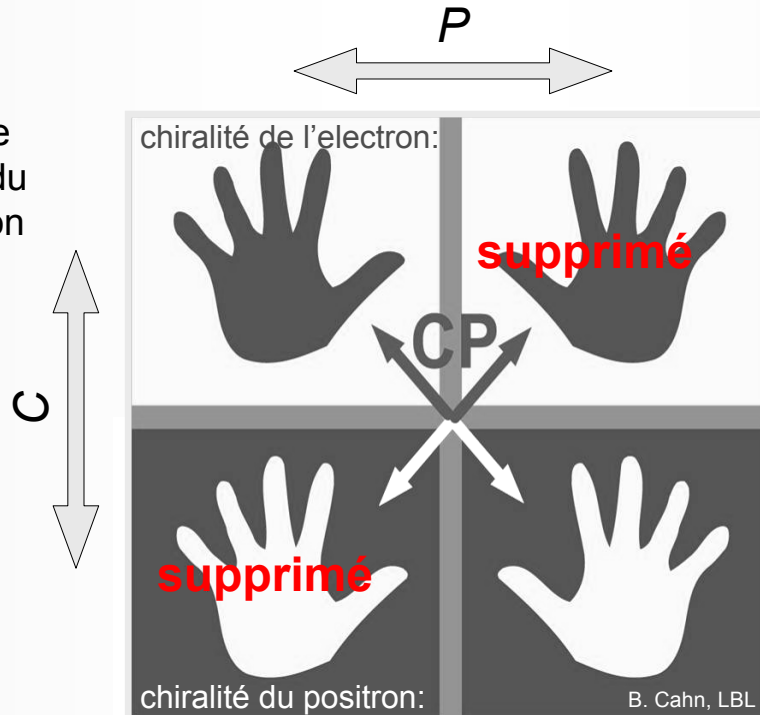
☀ C et $P = CP$ est donc une symétrie respectée en physique des particules ?

P et C sont violés maximalement par l'interaction faible

☀ Considérons la désintégration d'un muon polarisé: $\mu_{\text{polarized}}^- \rightarrow e^- + \nu_{\mu} + \bar{\nu}_e$

La direction **préférée** de l'électron est **l'opposé** du vecteur de spin du muon

Similaire pour la transformation de **C** (remplaçant toutes les particules par leurs antiparticules).

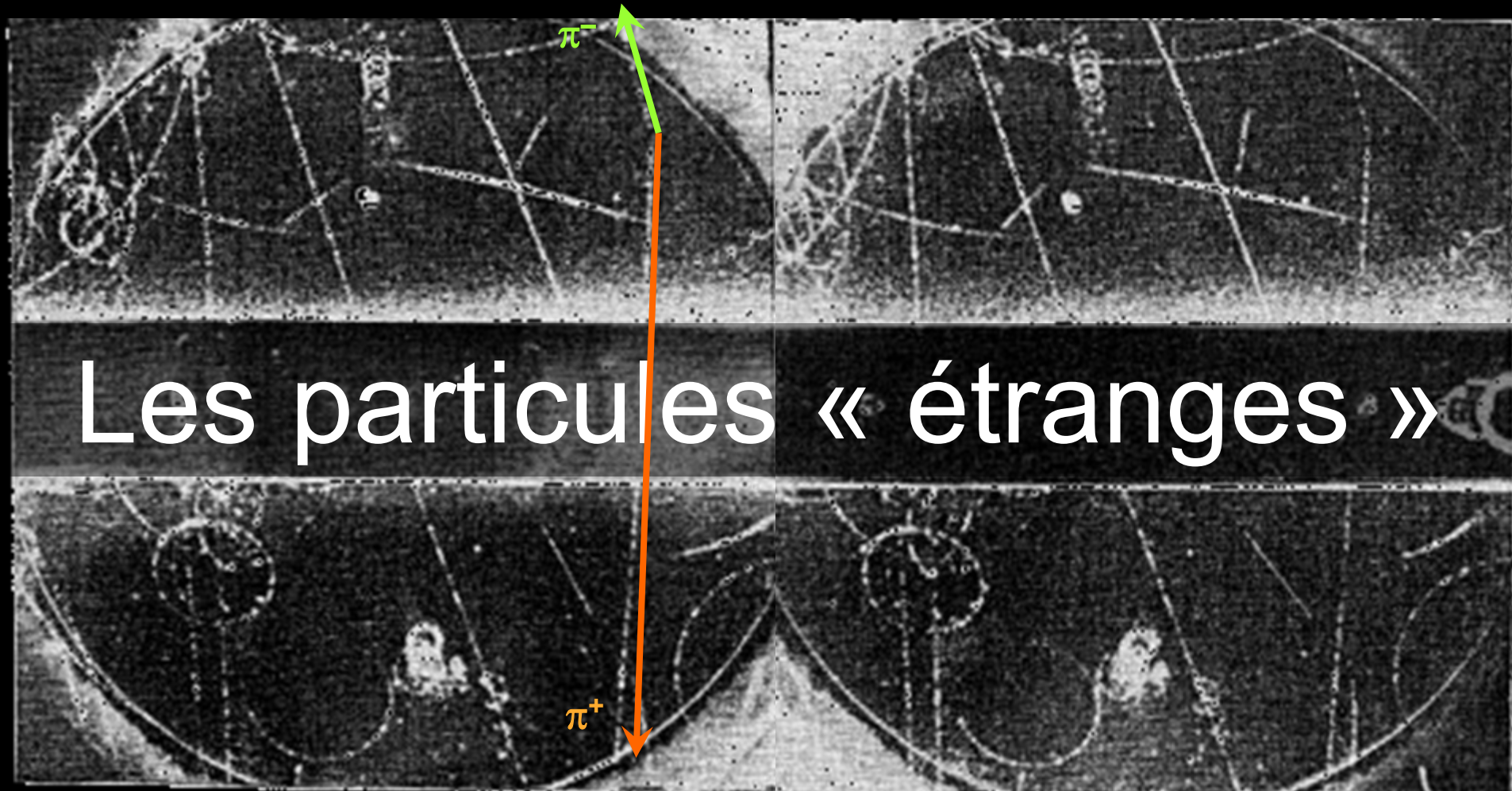


Transformation de **P** (renversement de toutes les directions dans l'espace) engendre une configuration supprimée dans la nature

Appliquant **C** et **P**, on obtient un antimuon émettant un positron dans la même direction que son spin – ce qui est **observé dans la nature** !

☀ C et $P = CP$ est donc une symétrie respectée en physique des particules ?

En 1946, Rochester et Butler (Manchester) observaient dans une chambre à bulle deux traces provenant du néant, c-à-d, de la désintégration d'une particule neutre



Les particules « étranges »

Ces particules « K » existent en forme neutre et chargée, et ont été appelées « étrange » en raison de leurs longues durées de vie

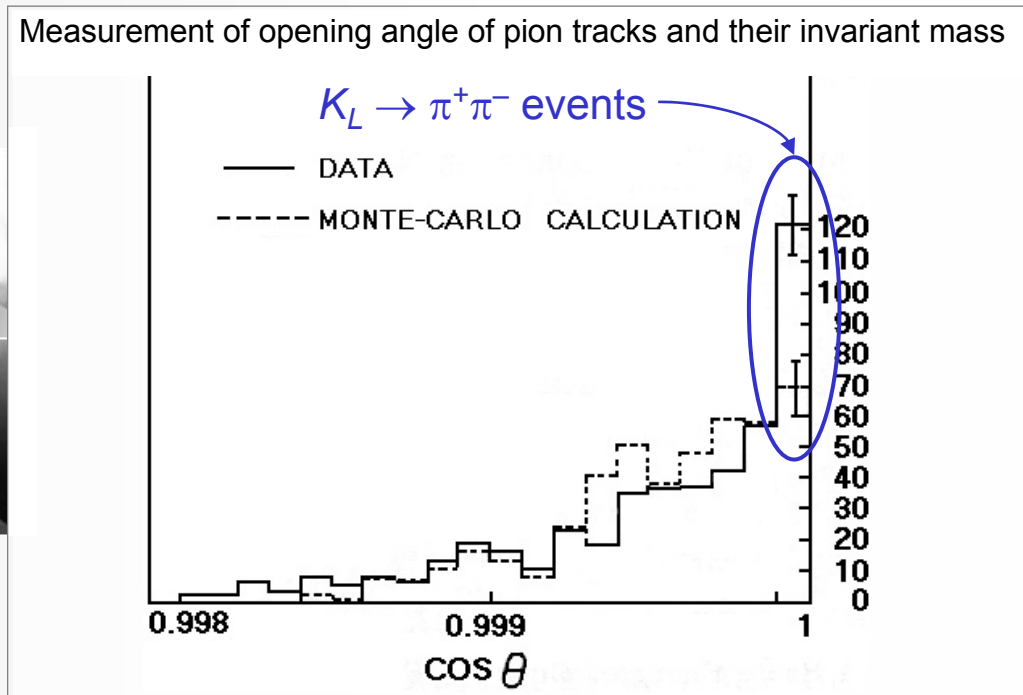
La découverte de **violation de CP**

☀ il y a deux types de K neutres : l'un avec « longue » (51 ns) durée de vie (K_L) et l'autre avec courte (~ 0.1 ns) durée de vie (K_S)

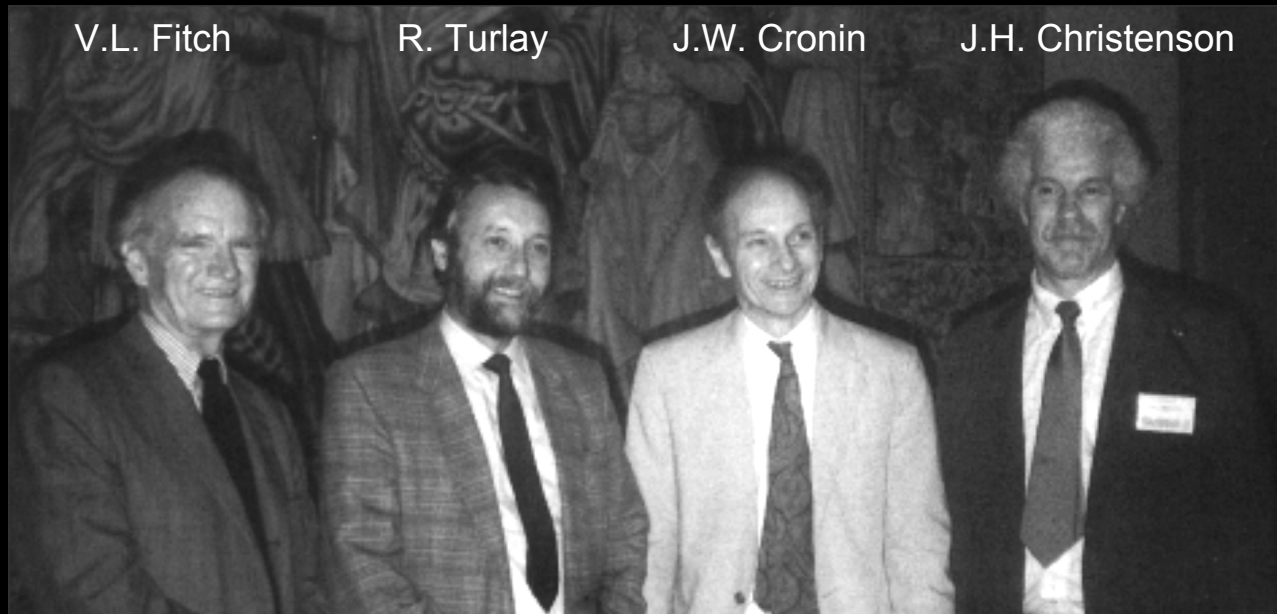
🖼 Leurs désintégrations sont : $K_S \rightarrow 2\pi$ et $K_L \rightarrow 3\pi$

🖼 Et l'on croyait que : $CP|K_S\rangle = +|K_S\rangle$ et $CP|K_L\rangle = -|K_L\rangle$

☀ **Mais**, Cronin, Fitch *et al.* (BNL) découvrirent en 1964 des désintégrations : $K_L \rightarrow \pi^+\pi^-$



Découverte de violation de CP (dans système de « kaons », 1964):



PRL 13, 138 (1964)

Evolution des conditions de travail (collaboration de BABAR, découverte de violation de CP dans système de B , 2001) :



... 623 physiciens (en 2005).

Violation de CP

1. A cause du « théorème *CPT* », la violation de *CP* implique la violation de *T*
2. Ces violations nous permettent de distinguer entre **particules et antiparticules** et entre **futur et passé** de manière absolue !



Envie d'embrasser l'extraterrestre ?

Attends d'abord le résultat d'une mesure de violation de *CP* avant de t'avancer !

Il a l'air gentil – mais est-il fait de matière ou d'antimatière ?



Dessin montré en 1966 par N. Cabibbo ... depuis, les travaux (entres autres) de Kobayashi-Maskawa ont permis de comprendre le phénomènes de la violation de CP dans le Modèle Standard