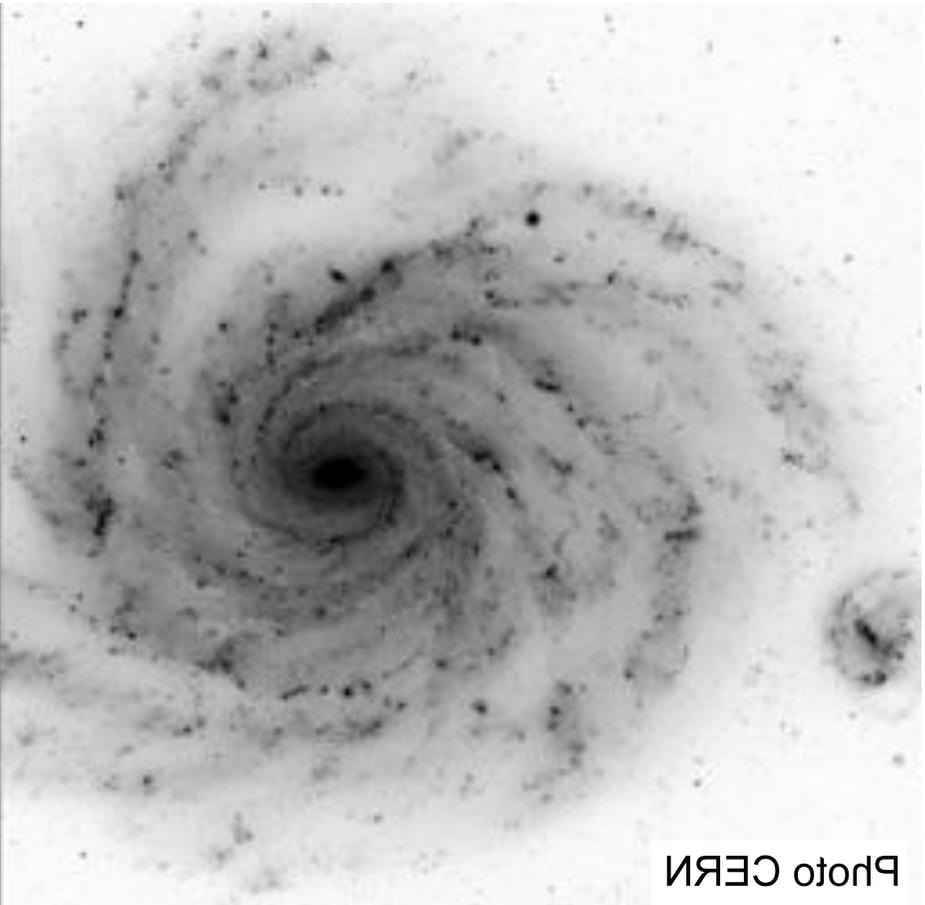
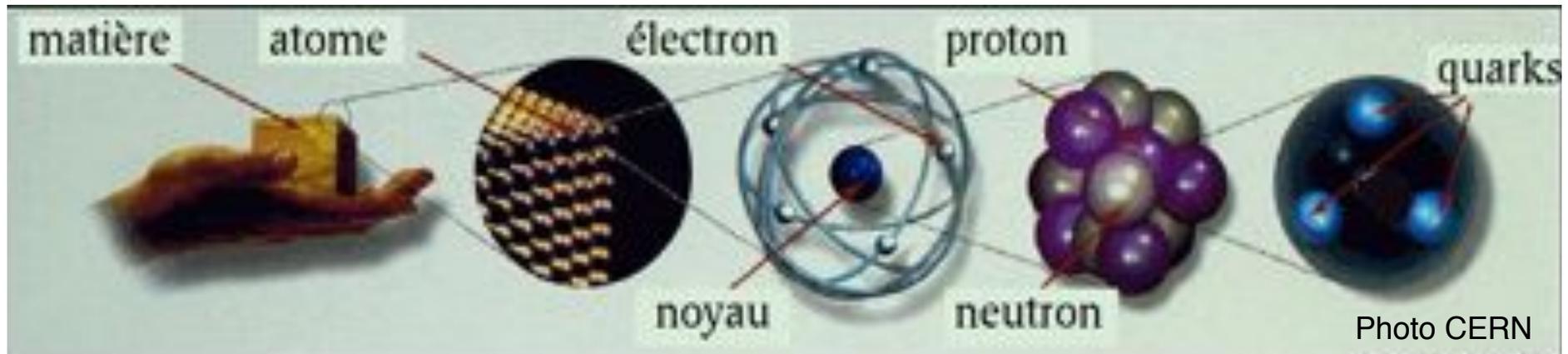


# Comprend-on aujourd'hui l'asymétrie matière-antimatière ?



**Gabriel CHARDIN, CSNSM, CNRS/IN2P3 et Univ Paris-Sud**

# Structure de la matière



## Modèle Standard

- composants élémentaires fermions: quarks et leptons
- reliés entre eux par des interactions via des bosons intermédiaires (photon, gluon, bosons intermédiaires W et Z)
- en apparence trois interactions séparées (outre la gravitation non traitée par le Modèle Standard): interactions électromagnétiques, faibles et fortes
- en réalité, probablement une seule interaction (les deux premières sont déjà unifiées dans l'interaction électrofaible avec succès)
- énergie de la convergence apparaît très haute ( $10^{15} - 10^{16}$  GeV) sauf si unification plus proche par dimensions supplémentaires cachées

# Symétrie Matière-Antimatière

L'équation de Dirac a 2 solutions !

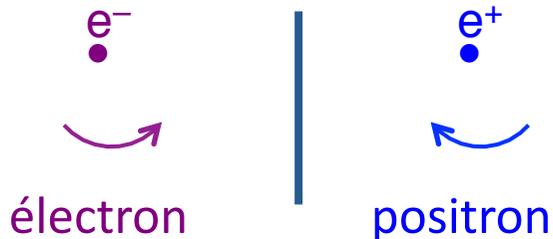
{ l'électron  
????

Que signifie la deuxième solution ?

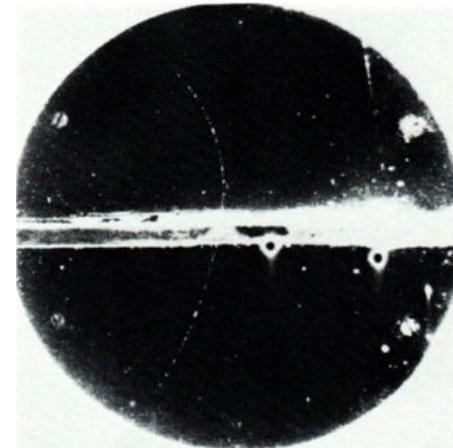
- Rien ?
- Électron d'énergie négative ...
- Une particule de charge +1 ???
- Le proton ? Mais sa masse est 2000 fois plus grande



Dirac invente  
l'antiélectron  
en 1930

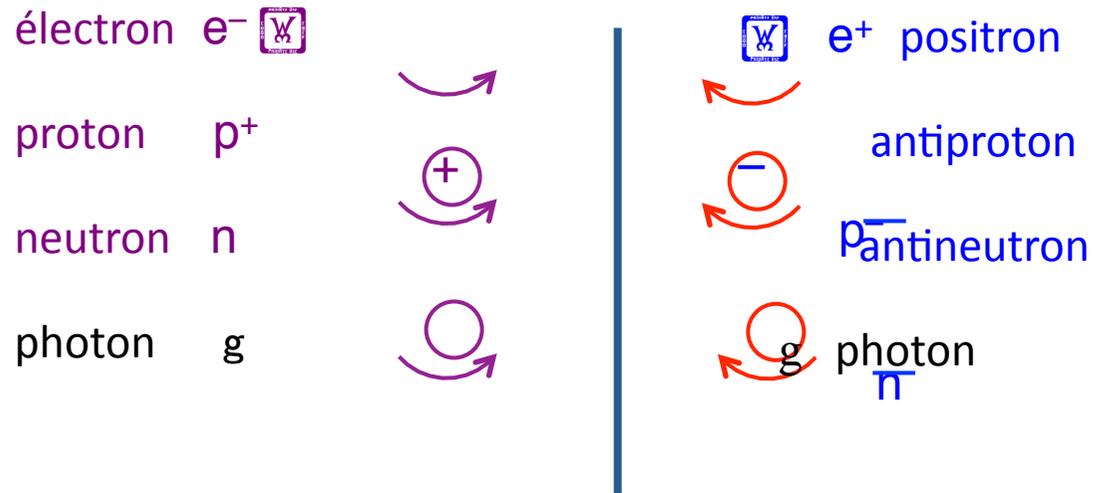


1932 : Anderson découvre le positron  
dans les rayons cosmiques



Plomb

# L'antimatière



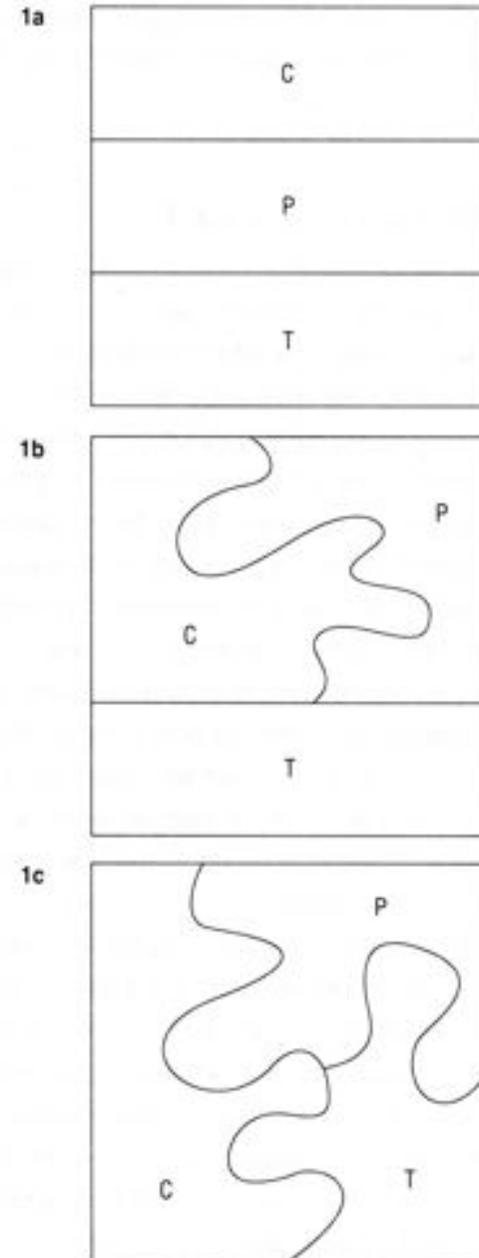
## Théorème CPT

Particule et antiparticule ont:

- même masse
- même durée de vie totale
- charge opposée
- même moment magnétique
- etc.

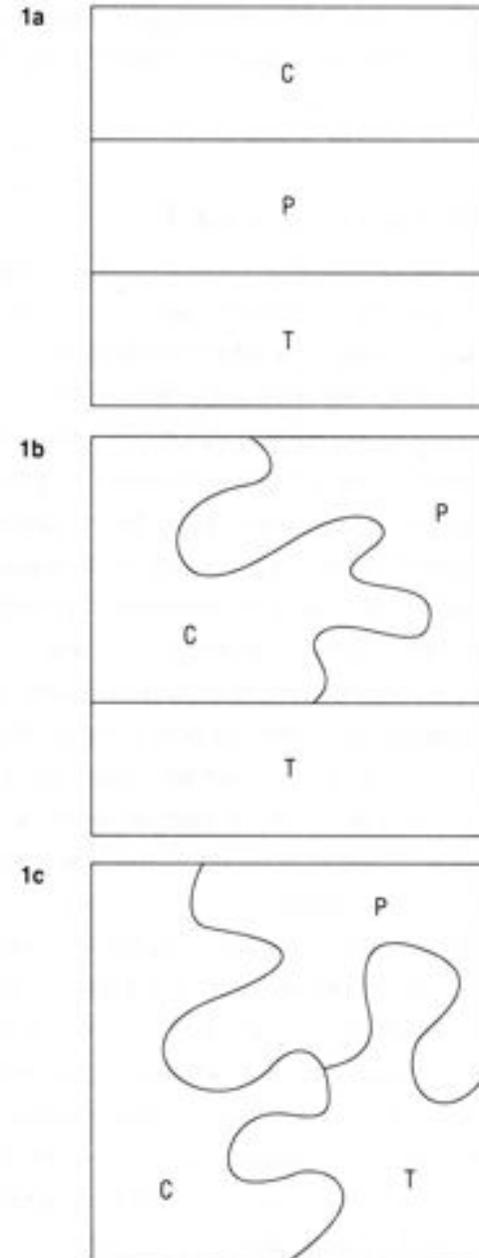
# Le théorème CPT

- Les 3 symétries miroir C, P et T
- Pauli, Lüders, Bell : la symétrie CPT doit être respectée
- Initialement, les physiciens pensaient que les symétries C, P et T étaient respectées séparément
- 1956 : découverte violation de P
- 1964 : découverte violation de CP par V. Fitch, J. Cronin, R. Turlay et J. Christenson



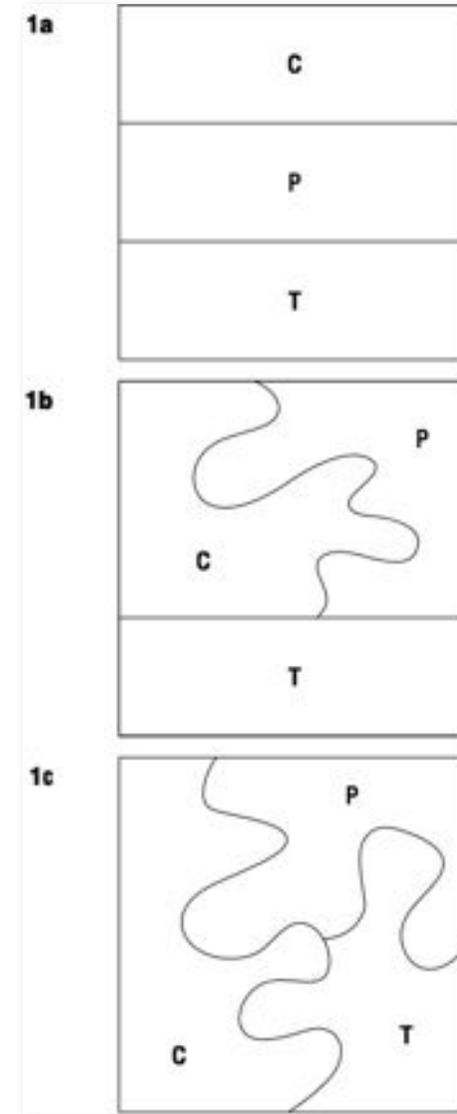
# Le théorème CPT

- Théorème CPT, symétries discrètes, signification du théorème CPT
- CPT comme théorème sacrosaint (invariance de Lorentz, unitarité, espace-temps plat)
- Cas de la gravitation qui pourrait violer CPT (en tout cas, on ne sait pas démontrer le théorème en espace courbe, violation connue de CPT dans le cas d'une topologie non triviale F. Klinkhammer)



# L'antimatière : la matière qui remonte le temps

- Pourquoi considère-t-on que le monde de l'antimatière ressemble extrêmement fort à celui de la matière ?
- Wheeler et Feynman: un positron est en fait un **électron qui remonte le temps**
- Wheeler a même envisagé la possibilité qu'il n'existe d'un seul électron dans l'univers...
- Dans cette optique, nous nous attendrions à un univers symétrique entre matière et antimatière, qui n'est PAS observé (domaines matière antimatière > Gpc s'ils existaient)
- **Violation par contre dans l'interaction faible (et attendue mais non observée dans les interactions fortes)**



# Les trois conditions de Sakharov



A. Sakharov

Il peut y avoir asymétrie entre matière et antimatière si

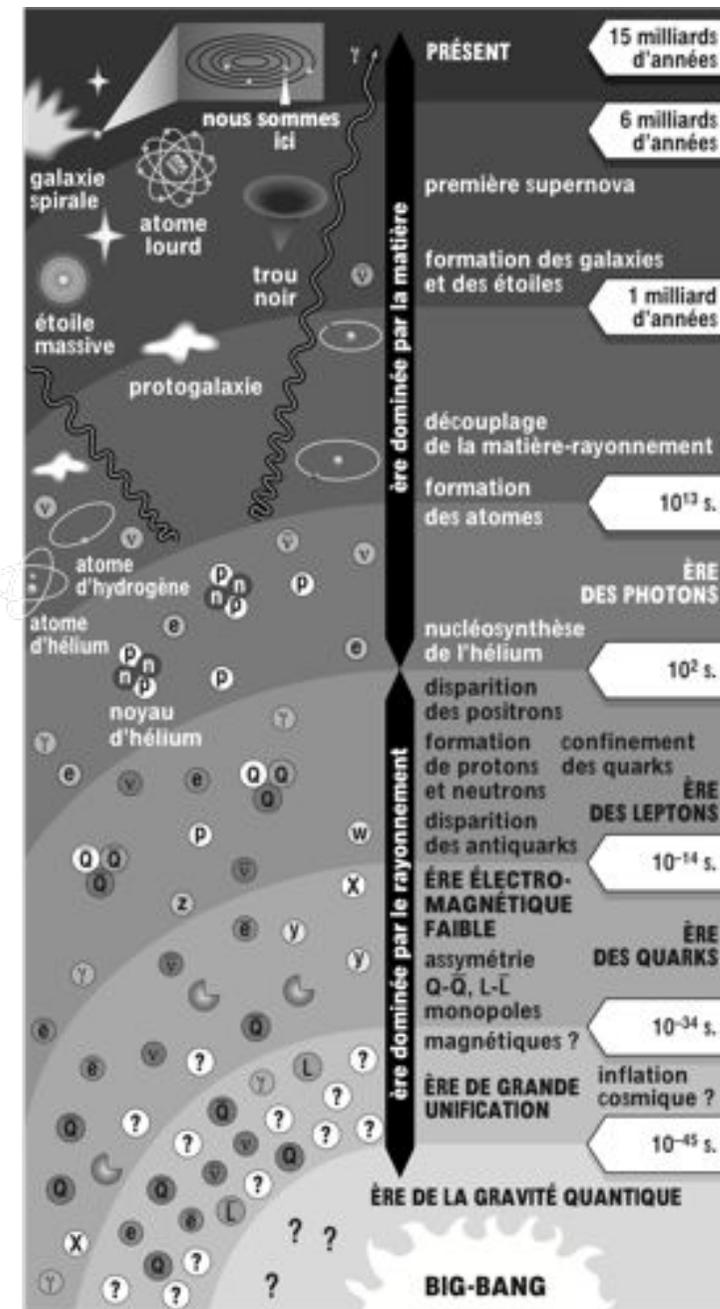
- Violation du nombre baryonique  
→ se produit dans les théories de grande unification  
Par exemple :  $p \rightarrow e^+ \pi_0$
- Il existe une violation de CP  
(dissymétrie matière – antimatière)  
observée pour le kaon neutre  
(CPLEAR) et le B neutre (expérience Babar)
- Il y a eu un déséquilibre thermodynamique  
thermodynamique suffisant au moment des processus violant  
la symétrie CP

Condition finalement assez contraignante

- Production d'un léger déséquilibre :  
1 000 000 000  
antiprotons  
ou antineutrons...  
pour  
1 000 000 001  
protons  
ou neutrons...

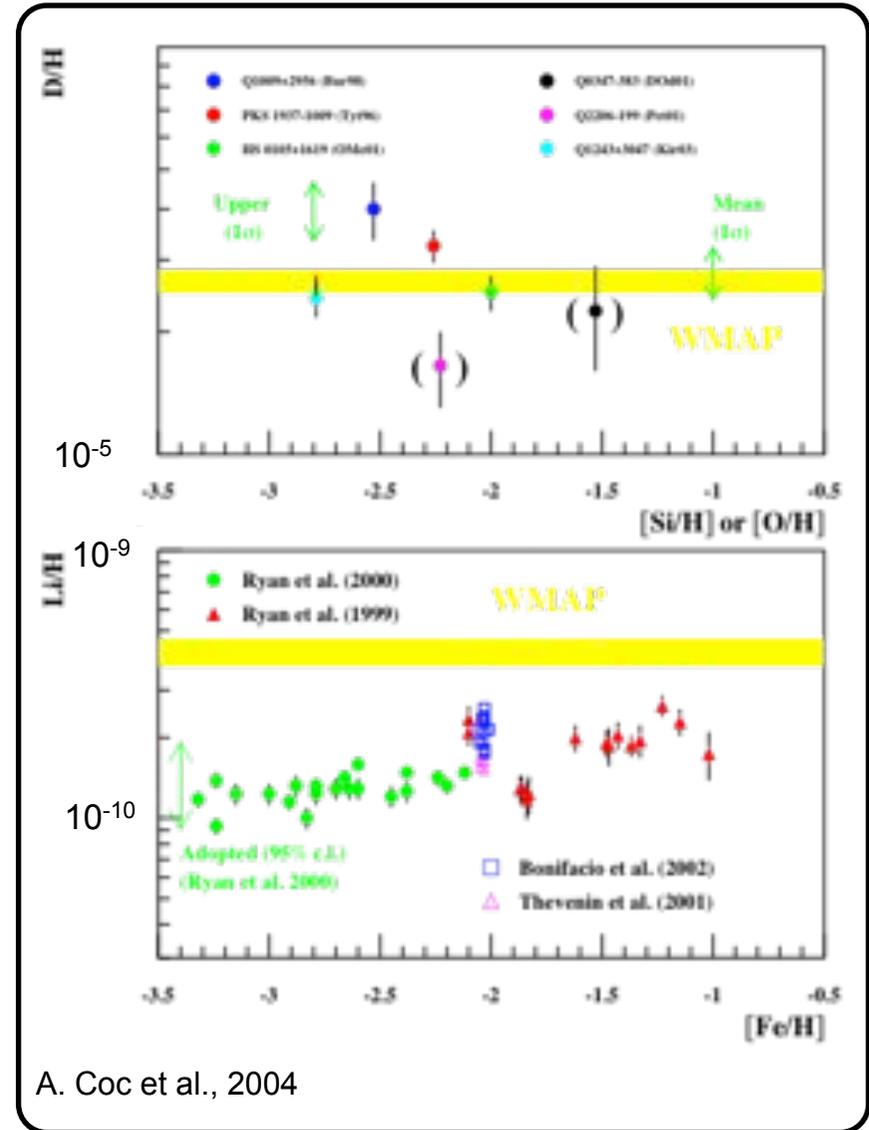
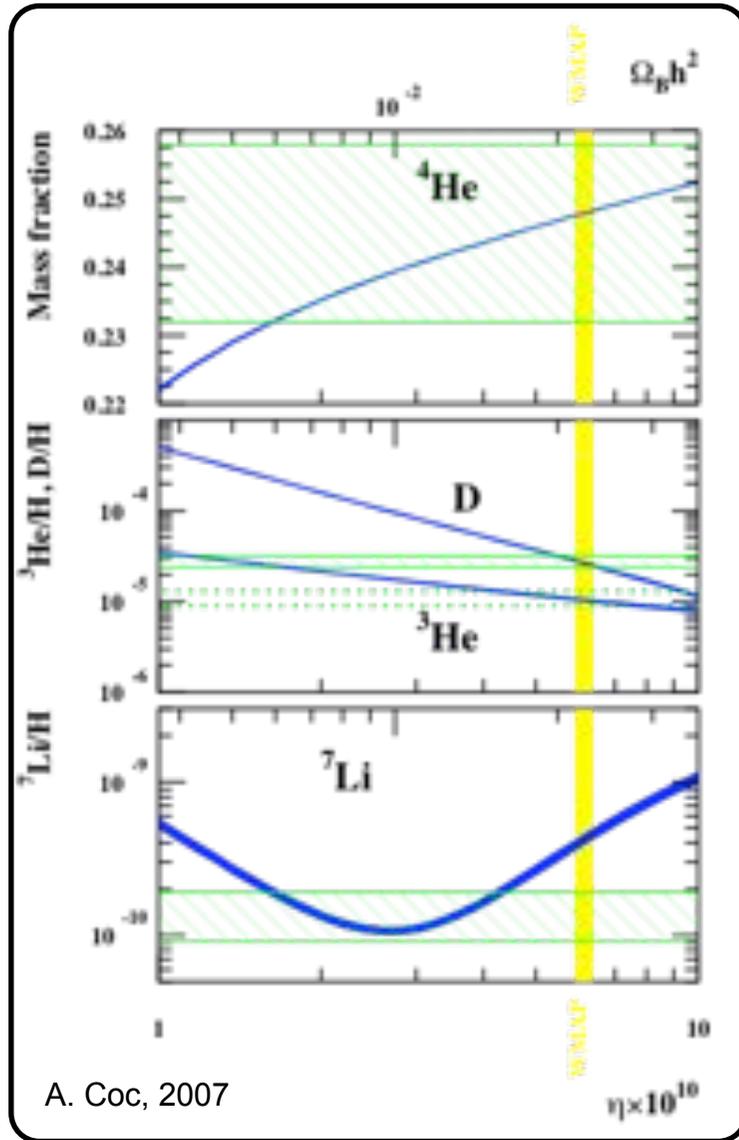
# Histoire thermique de l'univers

- Plus on est proche du Big-Bang, plus matière et antimatière sont présentes en quantités égales
- Quand la température baisse, matière et antimatière s'annihilent
- Dans notre environnement, il n'y a pratiquement plus que de la matière
- Pourquoi cette dissymétrie ?
- Quelle est la transition où se construit l'asymétrie (GUT, EW, QCD ?)
- (B-L) ou (B+L) conservés: l'asymétrie d'une transition peut être détruite par la suivante



Dessins d'après documents du CERN.

Predictions and observational status



# Weak interactions decoupling

Example of important changes induced by linear scale factor

Weak interactions decoupling:

Standard model: 1 MeV  
Dirac-Milne: 80 keV

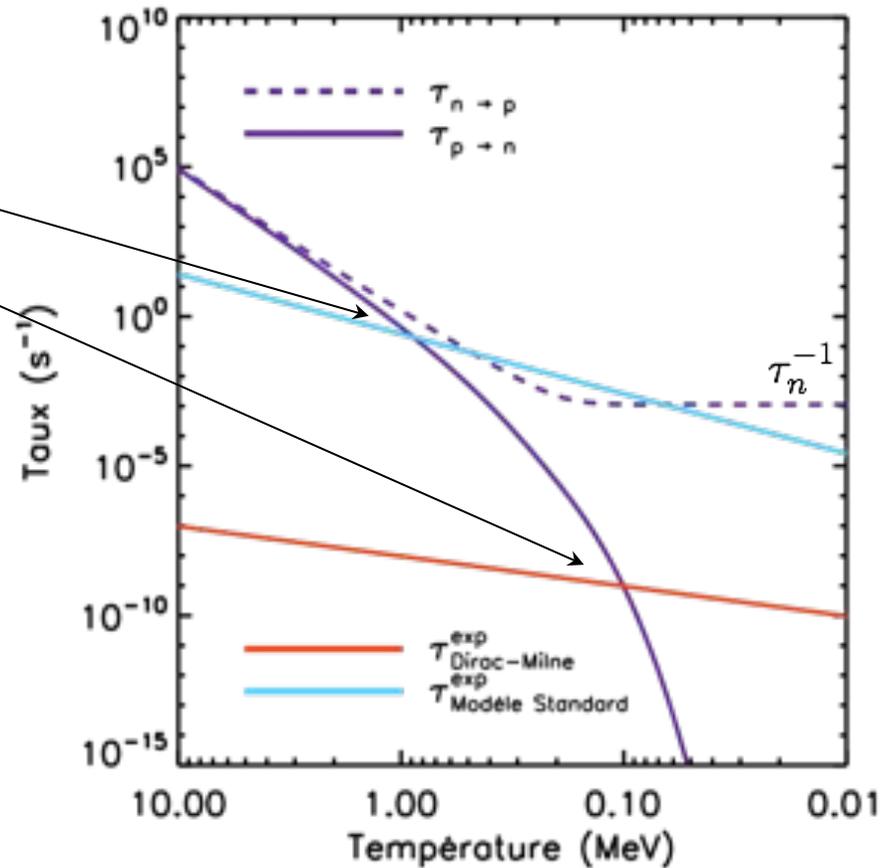
Neutrinos decoupling after  $e^+e^-$  annihilation



Neutrino background temperature same as CMB (Lohiya et al. 98)

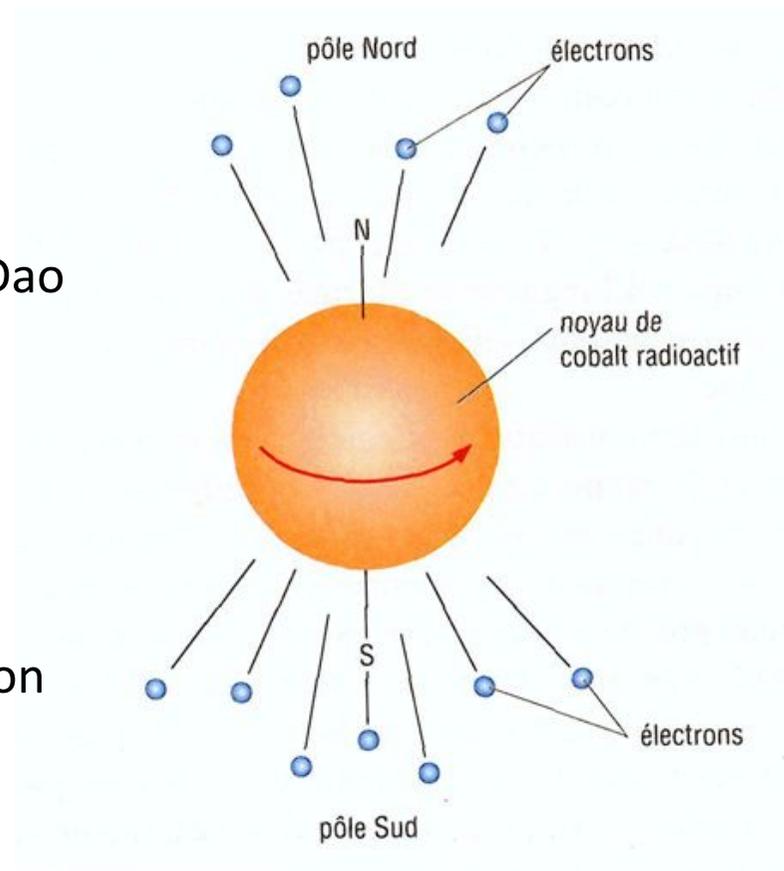
Standard mode  $T_\nu = 1.94$  K

Dirac-Milne  $T_\nu = T_{CMB} = 2.725$  K



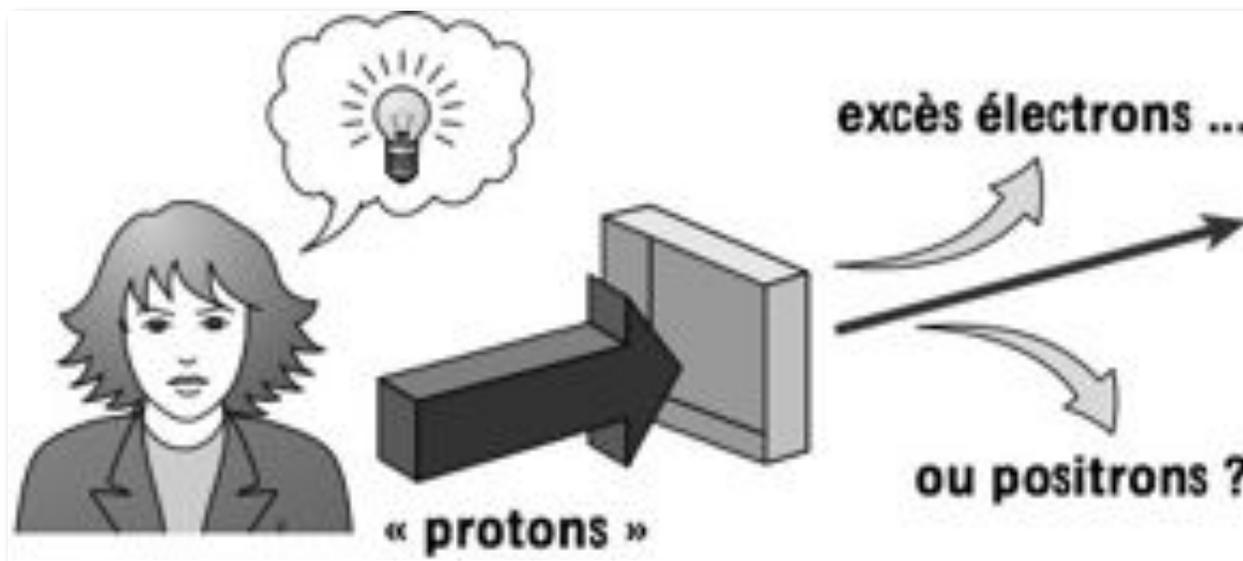
# 1956 : découverte de la violation de la parité

- On pensait initialement que la symétrie miroir (P) était respectée
- Les théoriciens Chen Ning Yang et Tsung-Dao Lee proposent en 1956 l'idée que les interactions faibles ne respectent pas la symétrie miroir
- Peu après, Chien-Shiung Wu, physicienne chinoise, réalise une expérience qui démontre de façon éclatante cette violation



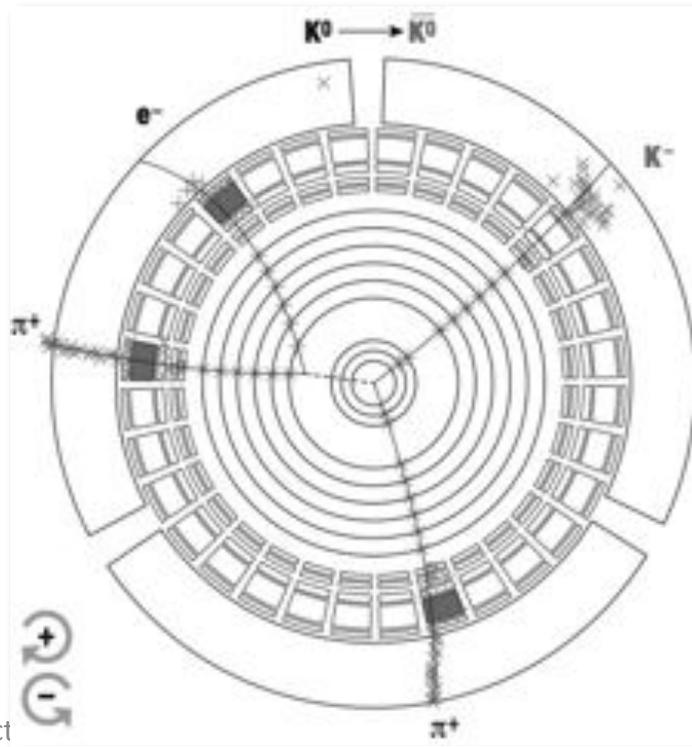
# L'antimatière : la matière qui remonte le temps

- En raison du sacro-saint théorème CPT, on s'attend à ce qu'une différence de comportement entre matière et antimatière soit associée à une différence du même ordre dans la réversibilité temporelle



# Violation de T dans les processus microscopiques

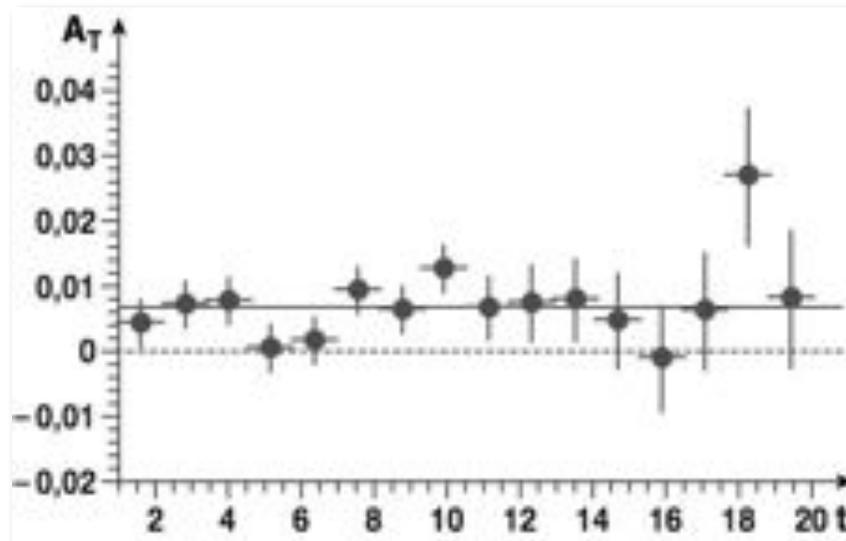
- Violation de CP observée dès 1964 (Fitch, Cronin, Turlay)
- Première observation de la violation de T dans un processus microscopique en 1998  
(34 ans après la découverte de l'asymétrie matière-antimatière !)



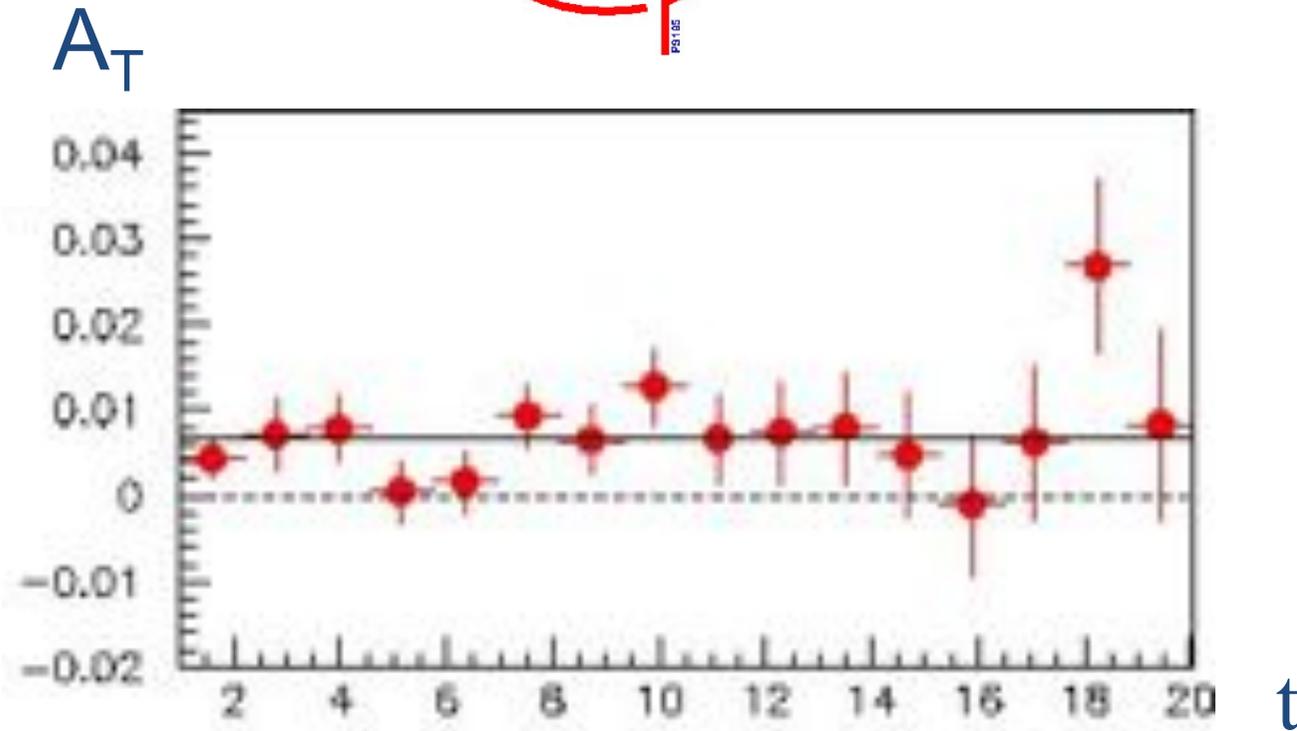
# Violation de T dans les processus microscopiques

- Première observation de la violation de T dans un processus microscopique en 1998  
(34 ans après la découverte de l'asymétrie matière-antimatière !)

$$A_T = \frac{R(\bar{K}^0 \rightarrow K^0) - R(K^0 \rightarrow \bar{K}^0)}{R(\bar{K}^0 \rightarrow K^0) + R(K^0 \rightarrow \bar{K}^0)} = 4\Re e \epsilon_T$$



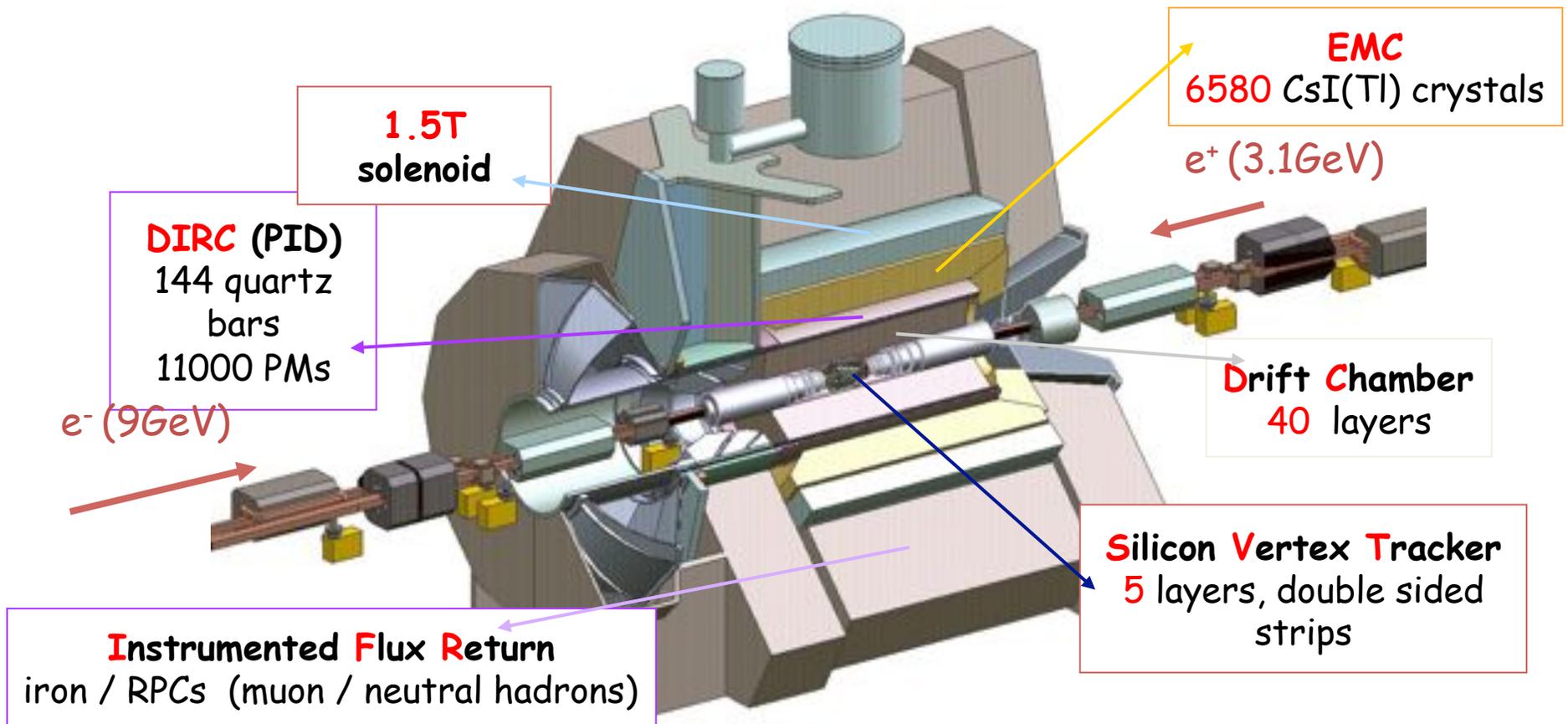
# Le résultat de CPLEAR



Asymétrie  $A_T = 0,0066 \pm 0,0013_{\text{stat}} \pm 0,0010_{\text{syst}}$

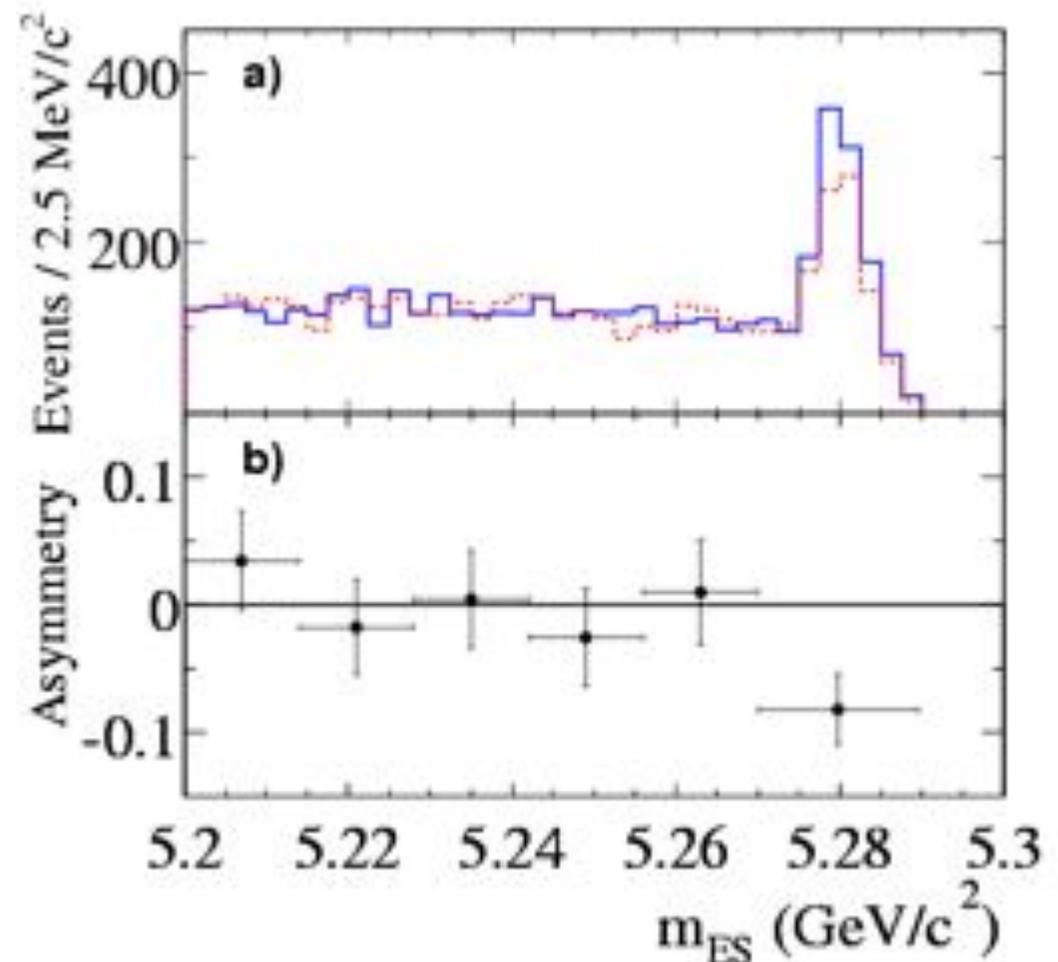
Les processus microscopiques ne sont pas réversibles

# BABAR Detector



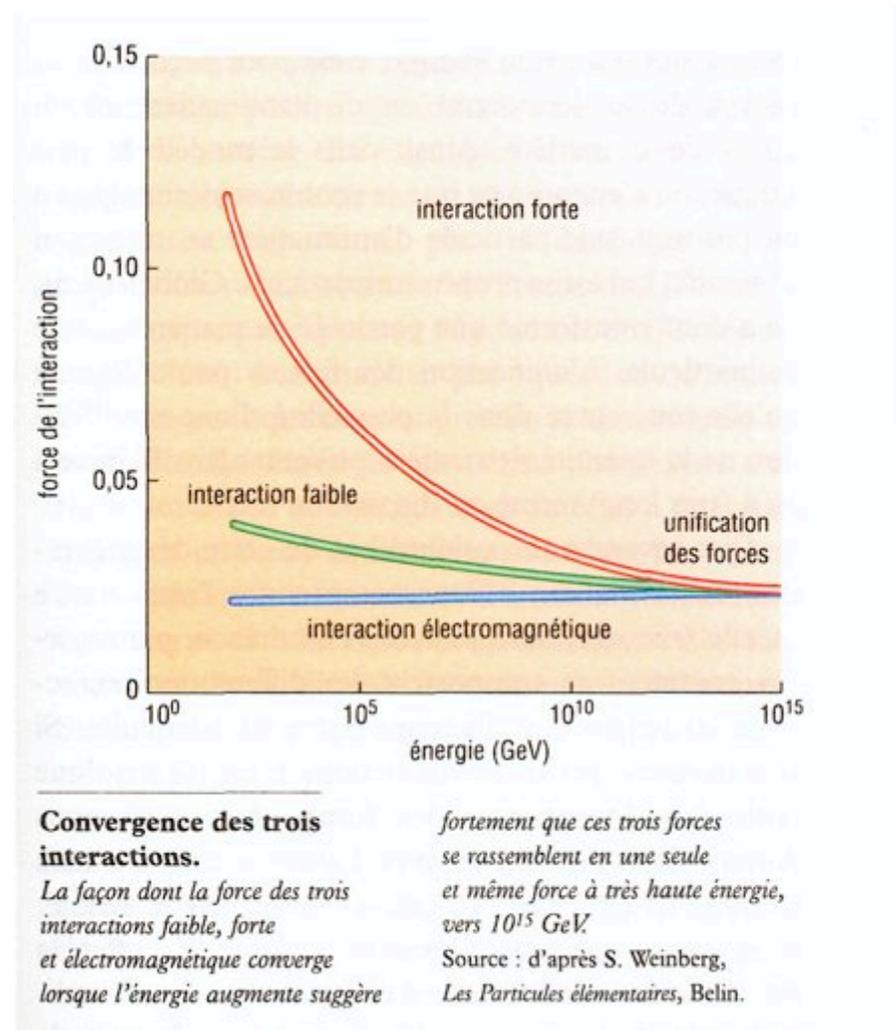
## Un 2ème exemple d'asymétrie matière-antimatière

- Produire des mésons et antimésons B mesons
  - Compter les désintégrations en paires  $K\pi$  pairs (kaon + pion)
  - Même charge pour le kaon le plus courant que pour les "électrons" des atomes de l'observateur ?
  - "Oui" : alors vous êtes constitués d'antimatière
  - Demi-tour !



# Désintégration de la matière

- Convergence des forces d'interaction)
- L'unification des forces prévoit des modes de désintégration du proton et du neutron (lié) car elle autorise par nature des passages entre quarks et leptons

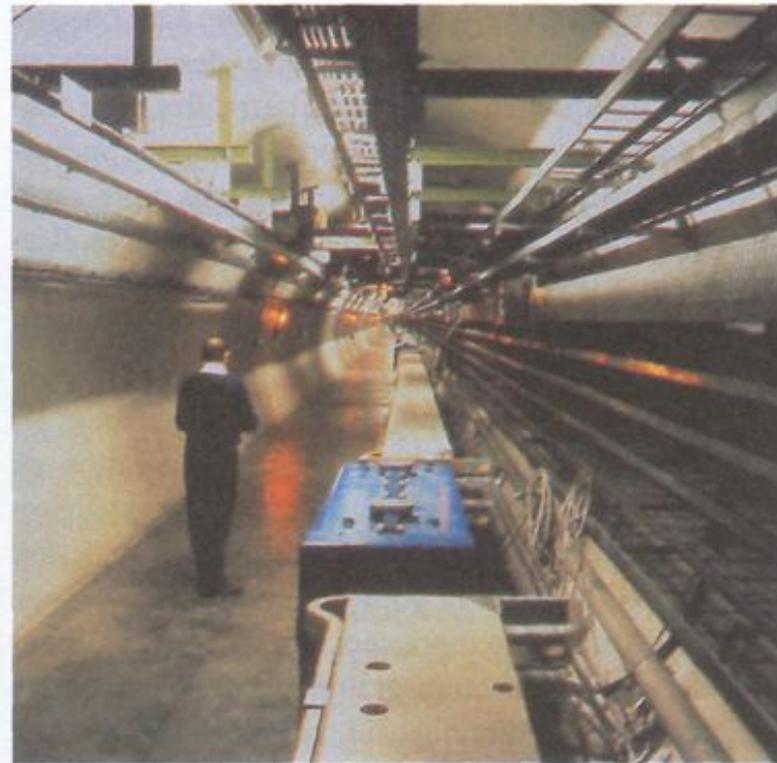


# Désintégration de la matière

- On a classifié les constituants de la matière en quarks et leptons.
- Indications qu'il existe un « passage » entre eux (charge électrique identique, convergence des forces d'interaction)
- L'unification des forces prévoit des modes de désintégration du proton et du neutron
- Exemple:  $p \rightarrow e^+ + \pi^0$
- La « matière » se désintègre en « antimatière » !

# Unification des forces

- Convergence des forces d'interaction)
- Pour obtenir au moyen d'un accélérateur **l'énergie nécessaire à l'unification des forces** faible, forte et électro-magnétique, il faudrait un **accélérateur plus grand que le système solaire**



## **Le LEP.**

*Long de 27 kilomètres, le tunnel du LEP (Large Electron Positron Accelerator), à Genève, abrite le plus grand instrument au monde utilisé par les physiciens*

*des particules. Les collisions entre électrons et positrons, à une énergie de près de 200 GeV, permettent d'étudier avec une très grande précision l'interaction électrofaible.*  
Ph. © CERN.

# Observer la désintégration de la matière

- ...puis regarder pendant quelques années toute désintégration dans quelques milliers de tonnes de matière...
- ...par exemple, les **50 000 tonnes d'eau** ultra-pure du détecteur **Superkamiokande** au Japon

