

L'antimatière

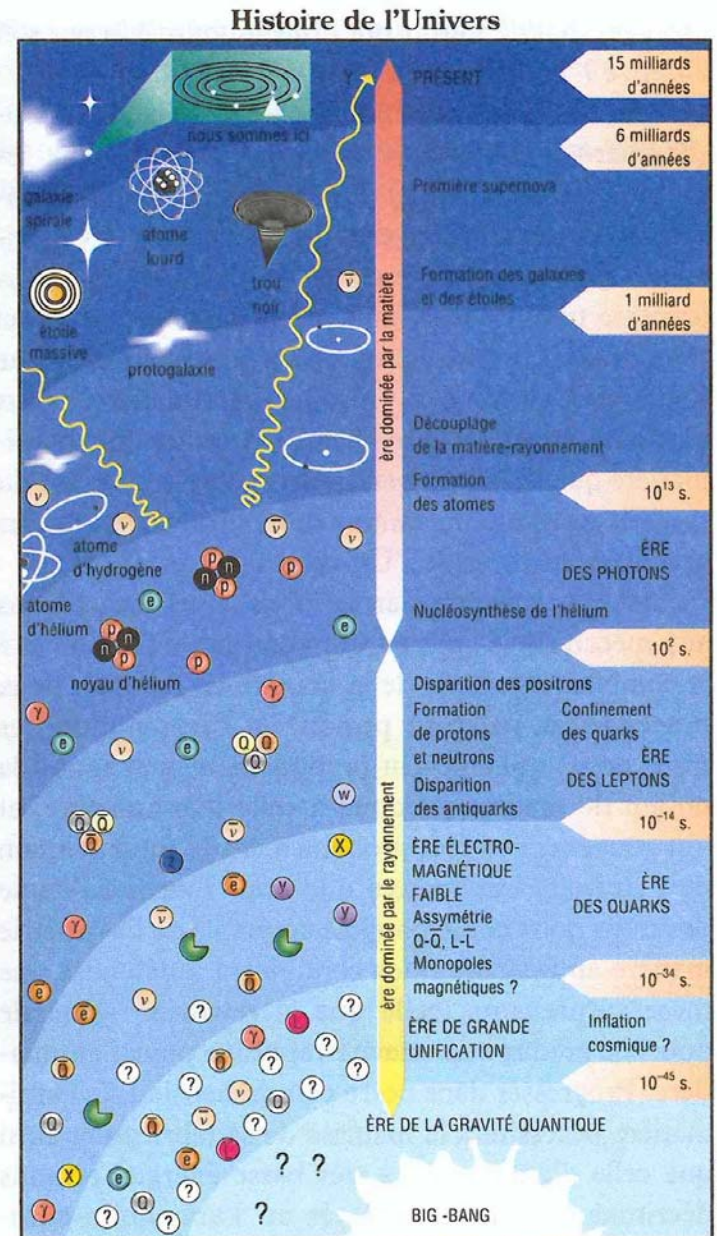
Gabriel CHARDIN
DAPNIA, CEA/Saclay

L'antimatière

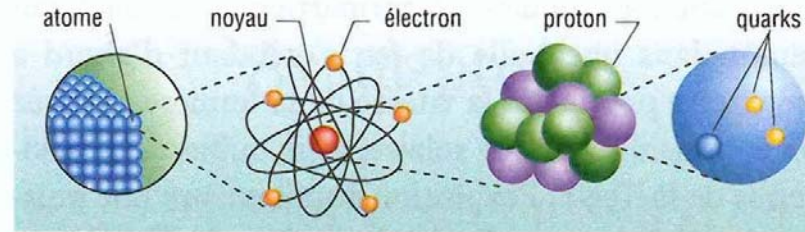
- Brève histoire de l'Univers
- Où est passée l'antimatière ?
- La violation de CP (asymétrie matière-antimatière)
- Passages entre matière et antimatière
- Quel est le poids de l'antimatière ?
- Energie noire et gravité répulsive
- Conclusions

Brève histoire 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 ?



La famille des particules



- La description des particules s'est grandement simplifiée au fil des années
- Quarks, leptons et bosons messagers suffisent à classifier l'ensemble des particules
- A chaque particule correspond une antiparticule de même masse, de charge opposée et de moment magnétique opposé

leptons peuvent se déplacer librement

quarks prisonniers de particules plus grandes ils ne sont pas observés individuellement

fermions

la matière ordinaire est composée de particules de ce groupe

pour la plupart, ces particules étaient présentes juste après le Big Bang. Aujourd'hui on ne les trouve que dans les rayons cosmiques et auprès des accélérateurs

première famille	électron responsable de l'électricité et des réactions chimiques. Sa charge est -1	neutrino de l'électron sans charge électrique et interagissant très rarement avec le milieu environnant	bas sa charge électrique est $-\frac{1}{3}$; le proton en contient un, le neutron deux	haut sa charge électrique est $+\frac{2}{3}$; le proton en contient deux, le neutron un
deuxième famille	muon un compagnon plus massif de l'électron	neutrino du muon propriétés similaires à celles du neutrino électron	étrange un compagnon plus lourd du "bas"	charme un compagnon plus lourd du "haut"
troisième famille	tau encore plus lourd	neutrino du tau propriétés similaires à celles du neutrino électron	beauté encore plus lourd	top découvert en 1995

bosons

particules fondamentales qui assurent la transmission des forces de la nature

photon grain élémentaire de la lumière, porteur de la force électromagnétique	gluon porteur de la force forte entre quarks	bosons vecteurs porteurs de la force faible, responsables de certaines formes de désintégration radioactive	graviton pas encore observé, mais sensé véhiculer la force de gravité
---	--	---	---

antimatière

à chaque particule fermion correspond une antiparticule, espèce d'image miroir

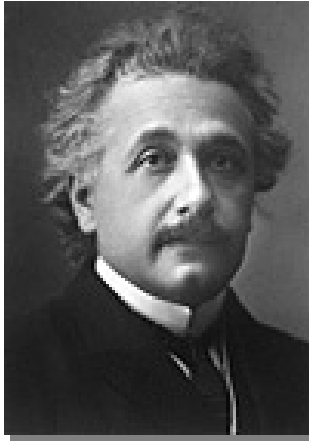
Petite histoire de l'antimatière



Maxwell

Électromagnétisme

électron



1905 : Einstein

Relativité restreinte

relativiste



1926 : Schrödinger

Mécanique Quantique

avec spin



1929 : Dirac

Problème...

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



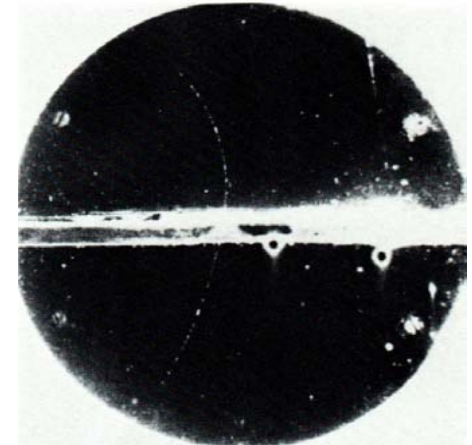
e^-

électron

e^+

positron











1932 : Anderson découvre le positron
dans les rayons cosmiques



Plomb

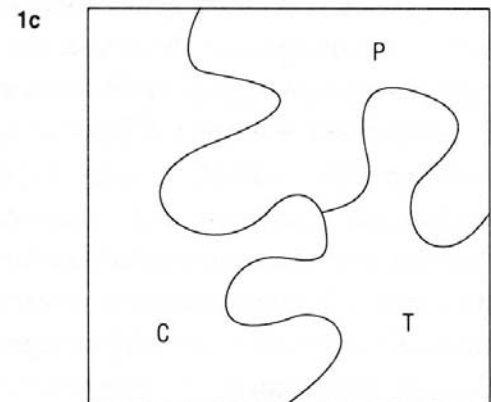
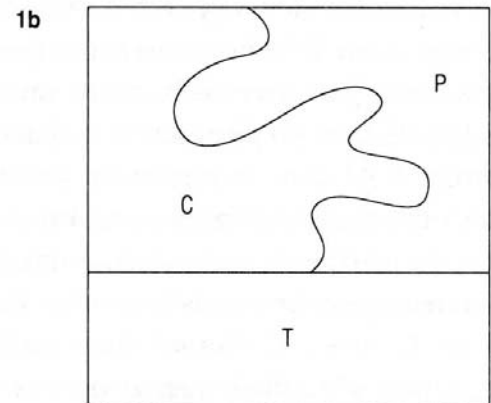
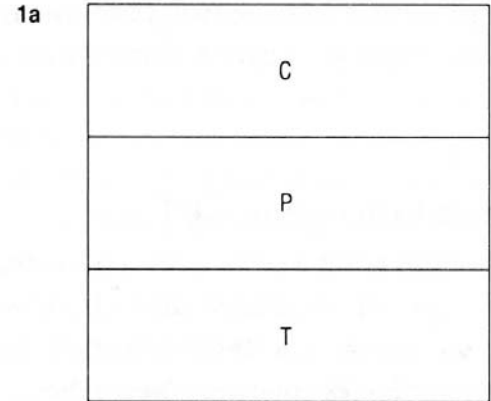
L'antimatière

électron	e^-				e^+	positron
proton	p^+				\bar{p}^-	antiproton
neutron	n				\bar{n}	antineutron
photon	γ				γ	photon

même masse
même durée de vie
charge opposée
etc.

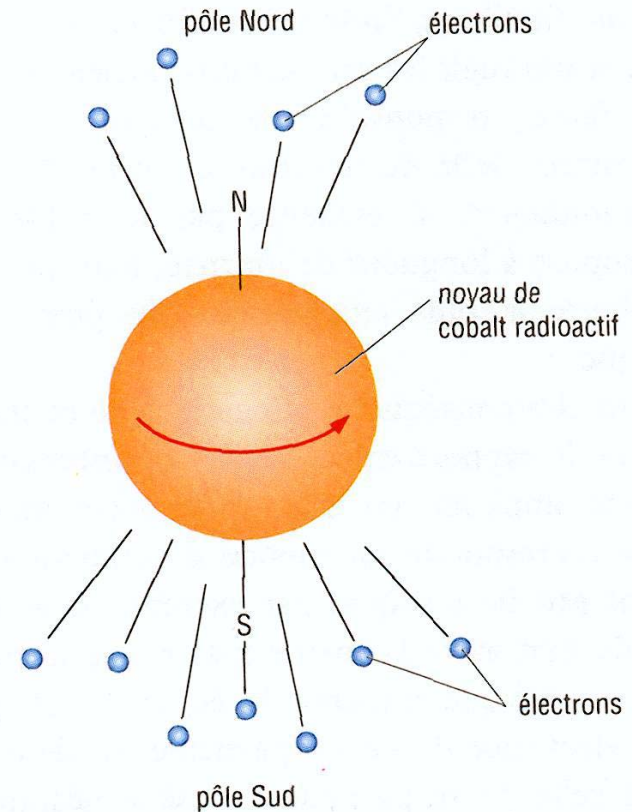
Le théorème CPT

- 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

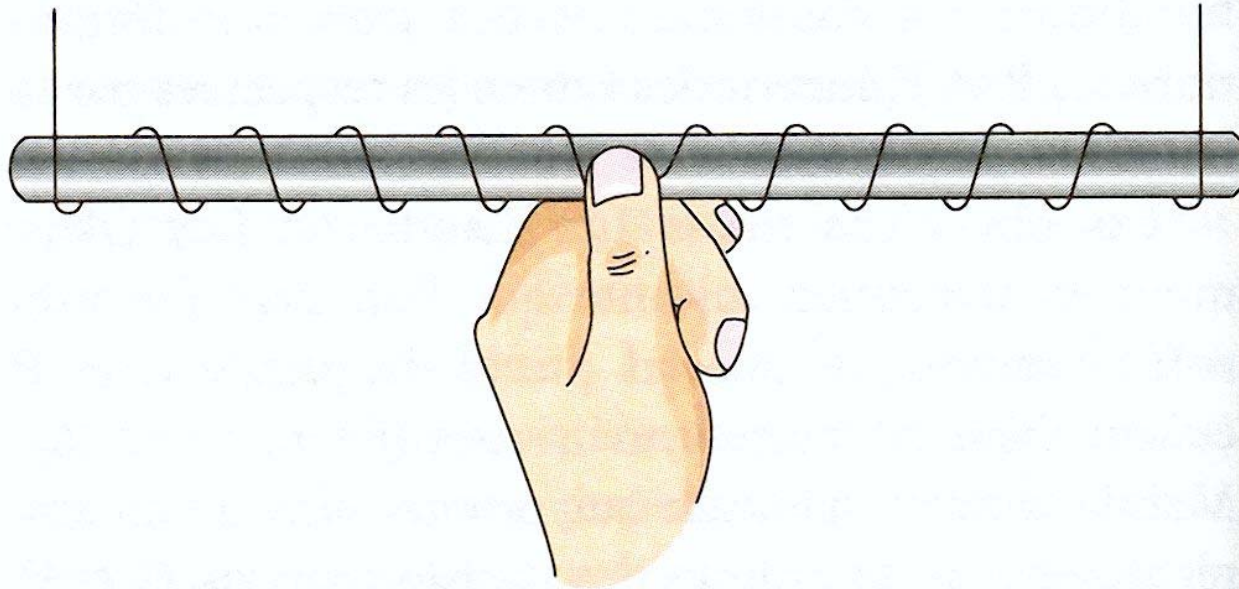


1956 : découverte de la violation de la parité

- 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



La représentation de Charles Hinton



La corde de Charles Hinton.

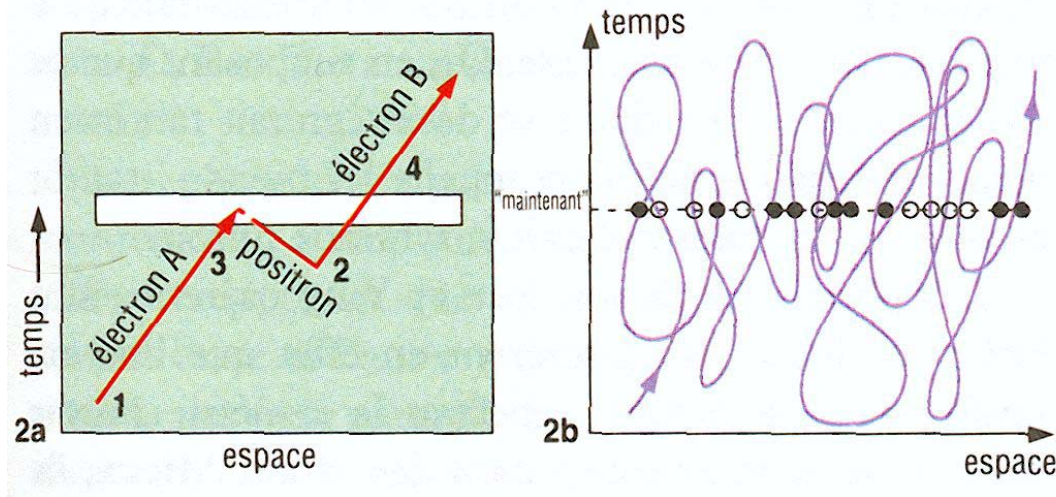
Dans un modèle étonnamment prescient, Charles Hinton se représentait particules et antiparticules comme des enroulements d'hélicité opposée

qui s'annihilent l'un l'autre si on permet aux deux enroulements de se rencontrer.

Source : d'après Martin Gardner, *The New Ambidextrous Universe*, Freeman, 1990.

Matière vs. antimatière

- Antimatière: "la matière qui remonte le temps" (Wheeler, 1957), électrodynamique, théorème CPT



- Violation de la symétrie matière-antimatière (et violation du renversement du temps observée finalement en 1998 par l'expérience CP-LEAR au CERN): possibilité de définir de façon absolue la matière par rapport à l'antimatière
- L'asymétrie matière-antimatière (violation de CP): peut-on la comprendre et prédire sa valeur dans la théorie actuelle (Modèle Standard)

Qu'est devenue l'antimatière ?

Il peut y avoir disparition de l'antimatière si



A. Sakharov

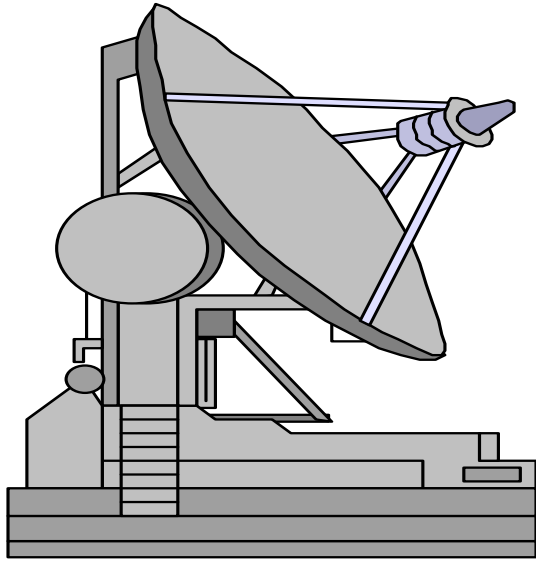
quarks et antiquarks se désintègrent
ex. $p \rightarrow 2 e^+ + e^-$ $\bar{p} \rightarrow 2 e^- + e^+$
☺ théories de grande unification

• dissymétrie matière - antimatière
☺ observée pour le kaon neutre (CPLEAR) et le B (expérience Babar)

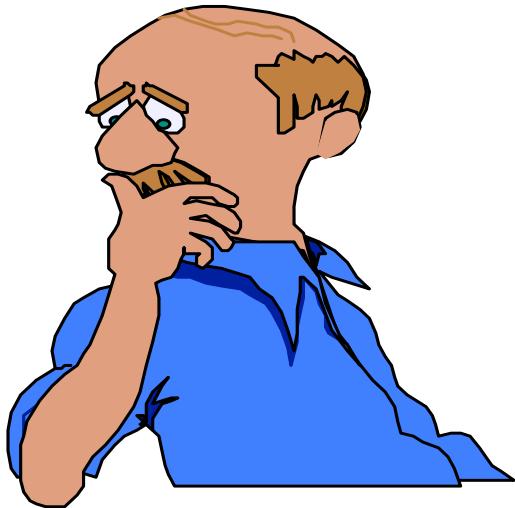
• déséquilibre thermodynamique
☺ possible au tout début du big-bang

⇒ Production d'un léger déséquilibre
1 000 000 000 antiprotons ou antineutrons...
↓
1 000 000 001 protons ou neutrons...

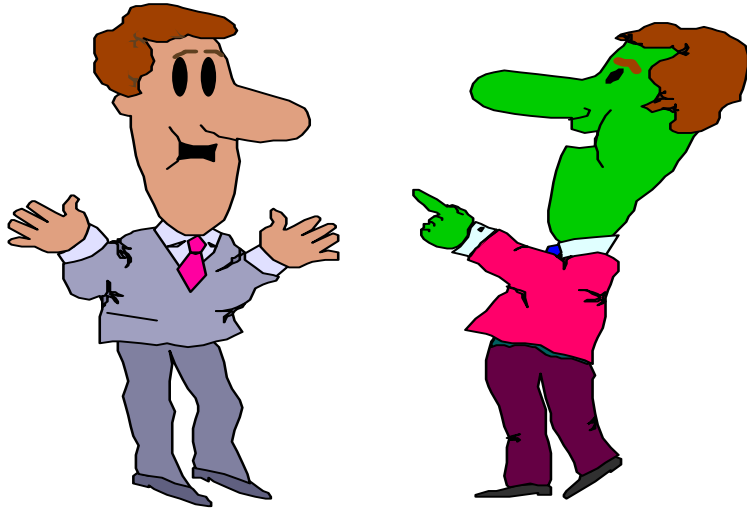
Que nous apprend la violation de CP ?



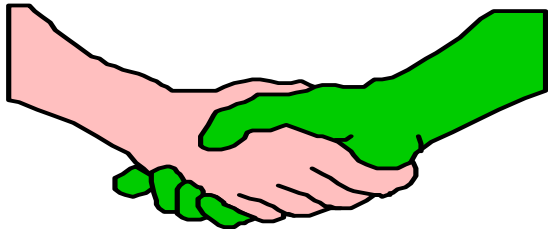
- Supposons que le programme SETI découvre finalement une autre (?) espèce intelligente dans la galaxie
- Jusqu'à présent, les discussions se sont prudemment limitées à des échanges de messages radio (photons)
- Bientôt, les physiciens se demandent s'il serait ou pas dangereux de rencontrer les aliens et d'aller leur serrer la main
- Matière ou antimatière ?



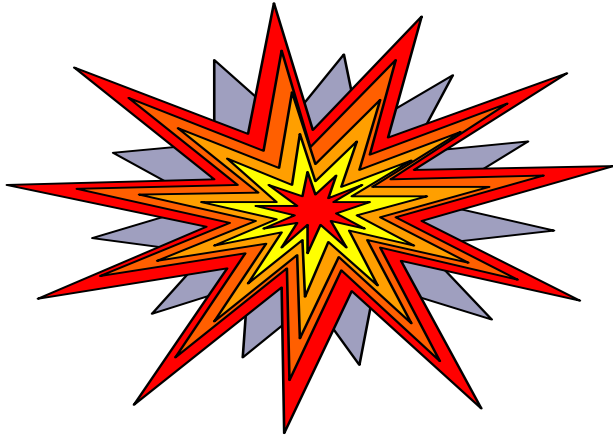
When Harry meets anti-Alien...



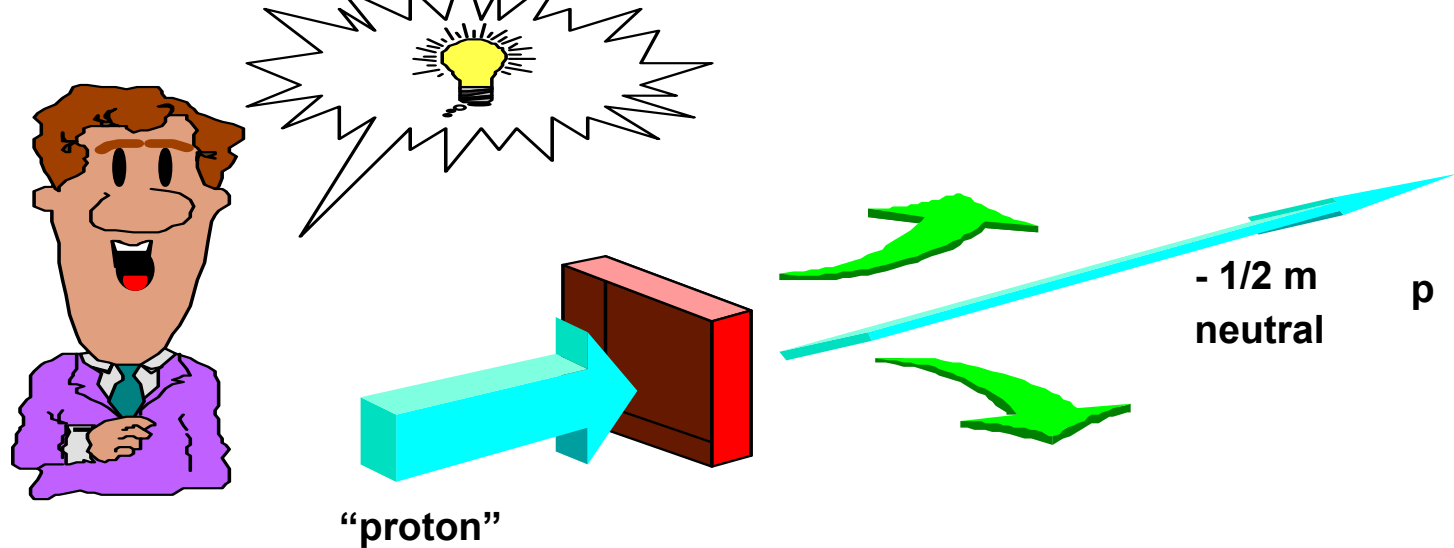
La rencontre peut se révéler...



...finalement assez anodine s'ils sont comme nous composés de matière...



...ou un désastre majeur si les aliens sont constitués d'antimatière

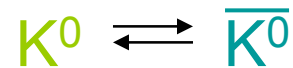


Le physicien des particules: "Étudions les désintégrations de la particule **kaon neutre**"

- Réalisons l'expérience suivante : chacun bombarde une cible avec ce qui est pour lui des "protons" de haute énergie (en fait des antiprotons s'il est fait d'antimatière).
- Dans les particules produites, on ne garde que celles qui ont à peu près 50% de la masse du proton.
- Un sur deux de ces kaons se désintègre de façon très lente.
- Dans ses produits de désintégration, voit-on un excès de **positrons** ou un excès **d'électrons** ?

Une dissymétrie matière-antimatière

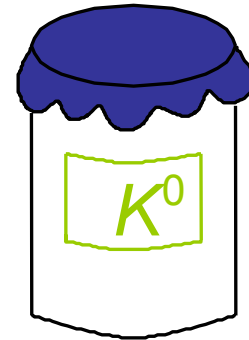
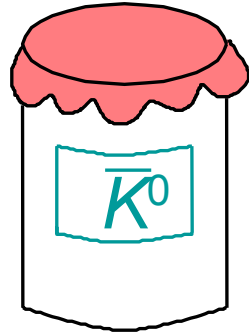
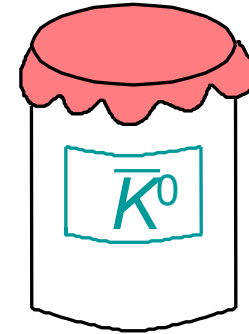
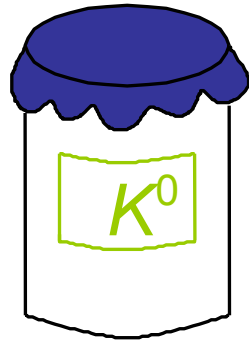
Le kaon neutre peut osciller entre matière et antimatière :



En fonction du temps, on peut comparer :



CPLEAR étiquette les K^0 et les \bar{K}^0



Instant 0 :

annihilation $p\bar{p} \rightarrow K^0$ ou \bar{K}^0

$$\begin{cases} p + \bar{p} \rightarrow K^0 + K^- + \pi^+ \\ p + \bar{p} \rightarrow \bar{K}^0 + K^+ + \pi^- \end{cases}$$

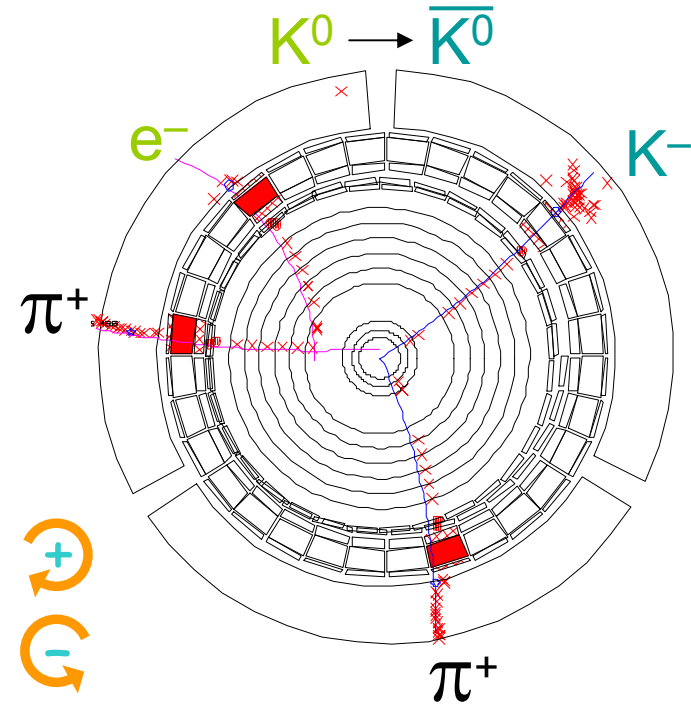
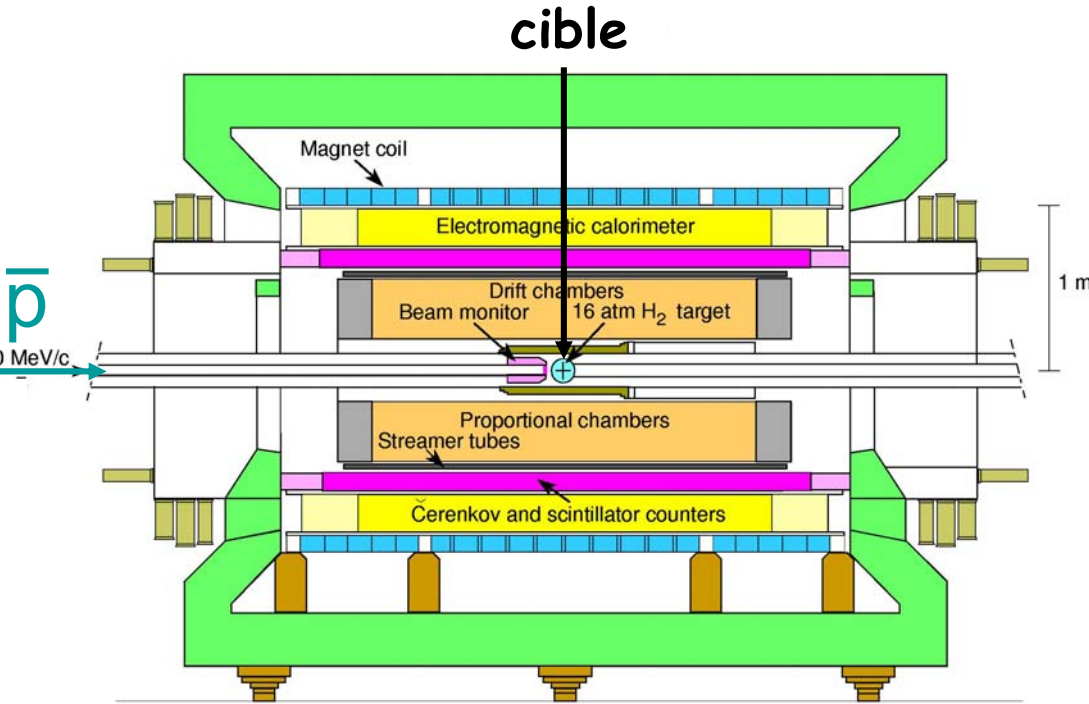
Instant t :

K^0 ou \bar{K}^0 se désintègre :

$$\begin{cases} K^0 \rightarrow \pi^- + e^+ + \nu_e \\ \bar{K}^0 \rightarrow \pi^+ + e^- + \bar{\nu}_e \end{cases}$$



Le détecteur CPLEAR



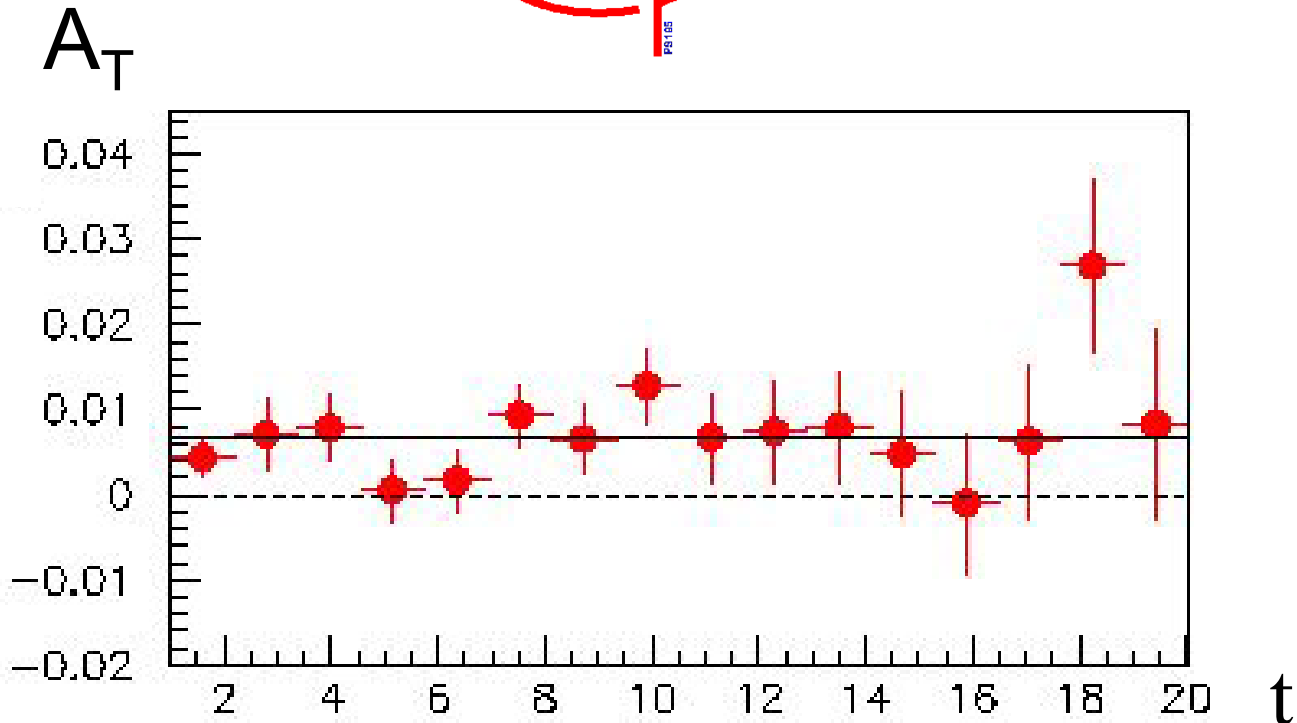
La collaboration CPLEAR : 100 physiciens de 9 pays
 États-Unis, France, Grande Bretagne, Grèce, Pays-Bas,



Portugal, Slovénie, Suède, Suisse



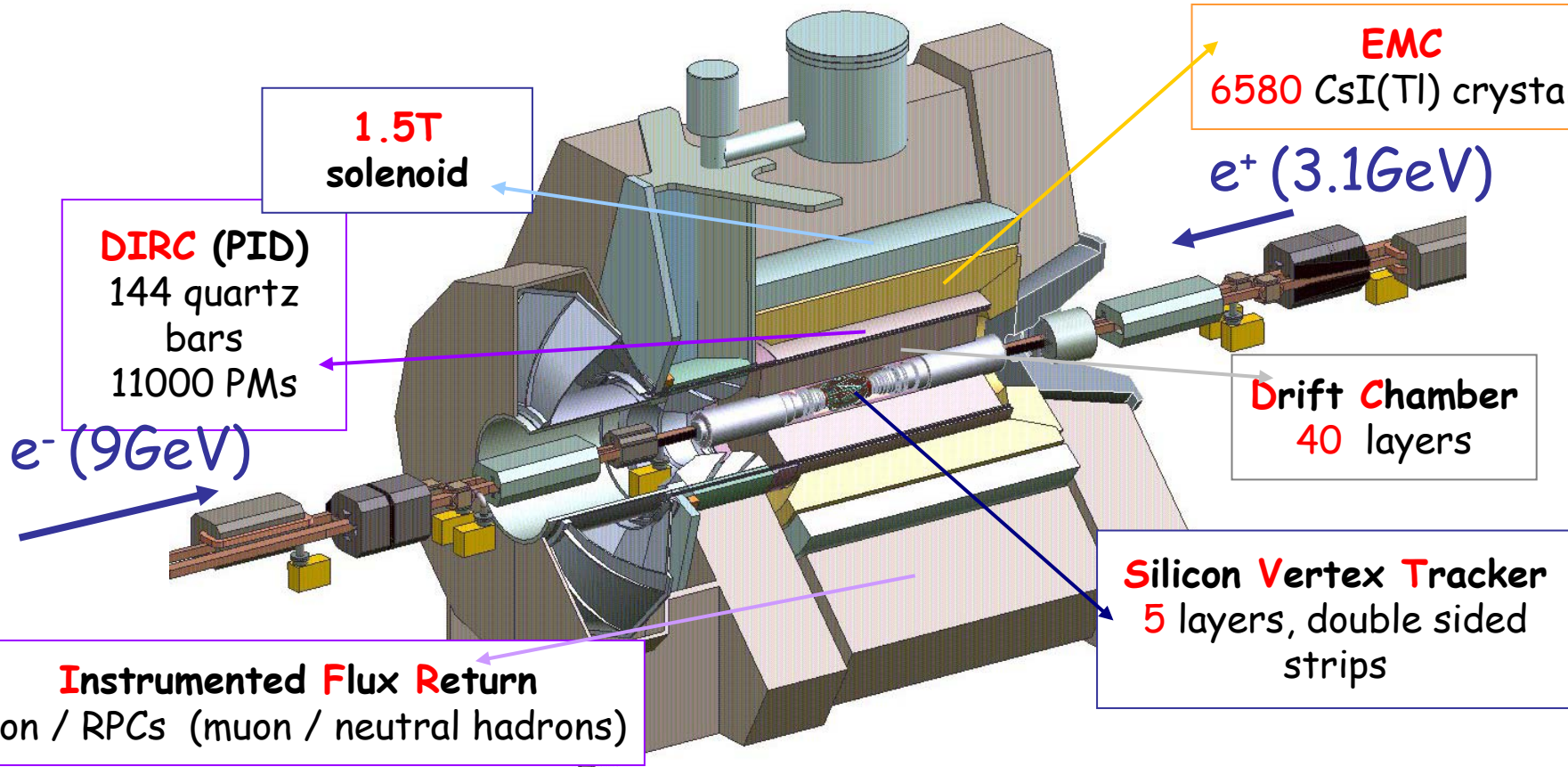
Le résultat de CPLEAR



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

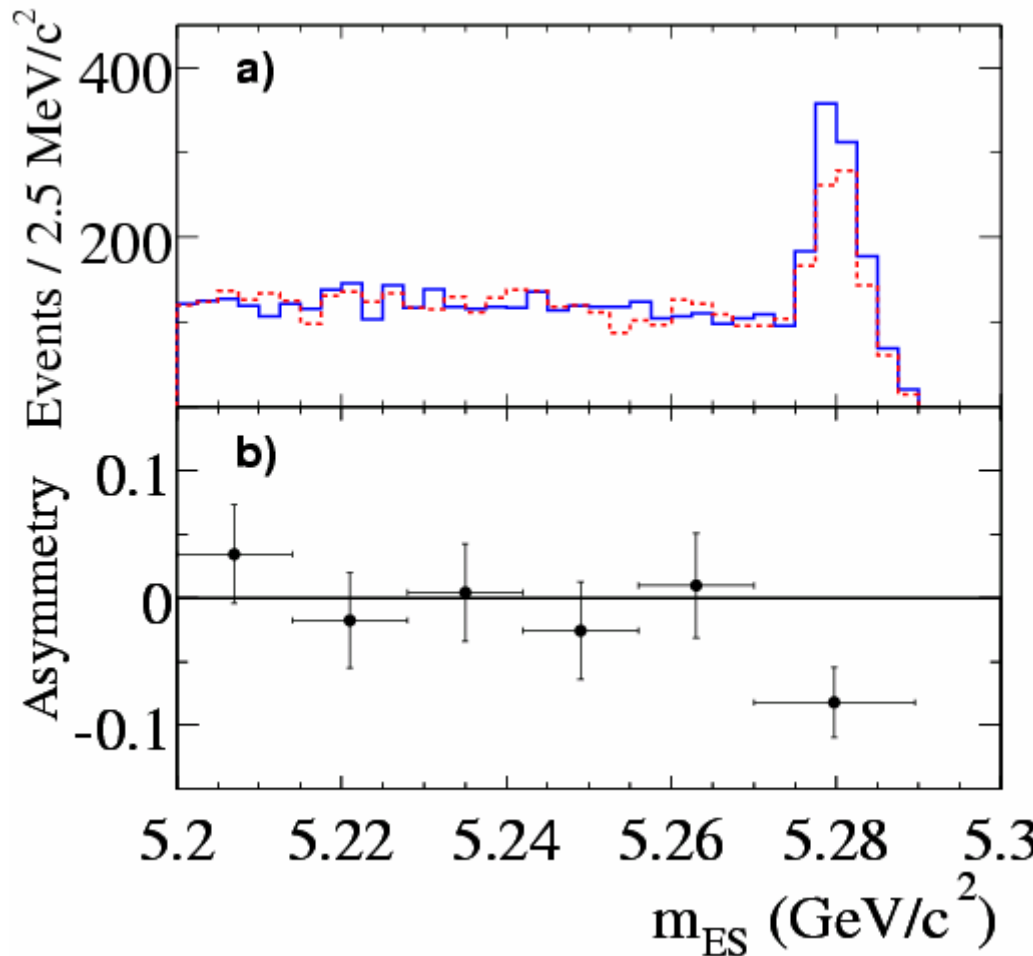
Les processus microscopiques ne sont pas réversibles

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 !

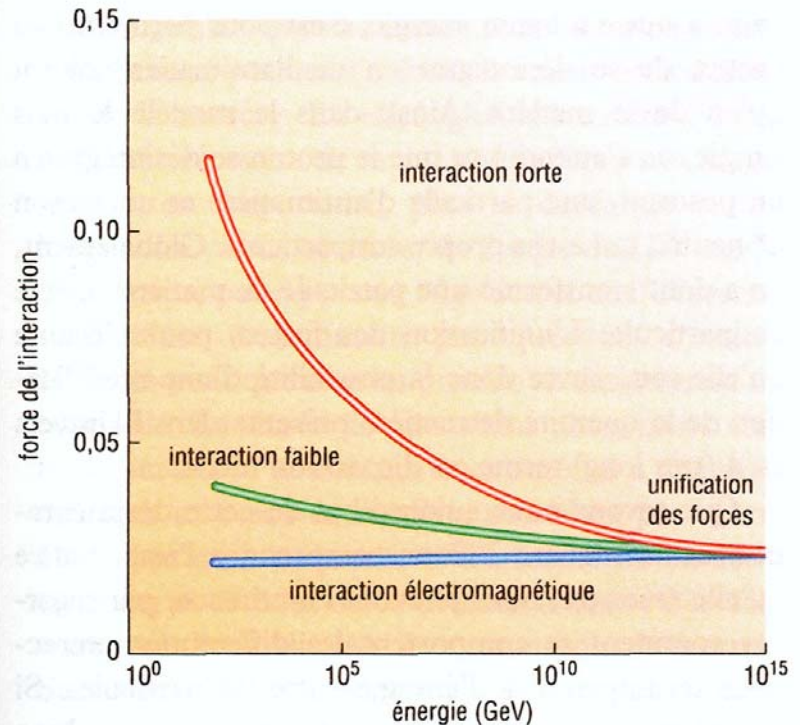


Désintégration de la matière

- 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 » !

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



Convergence des trois interactions.

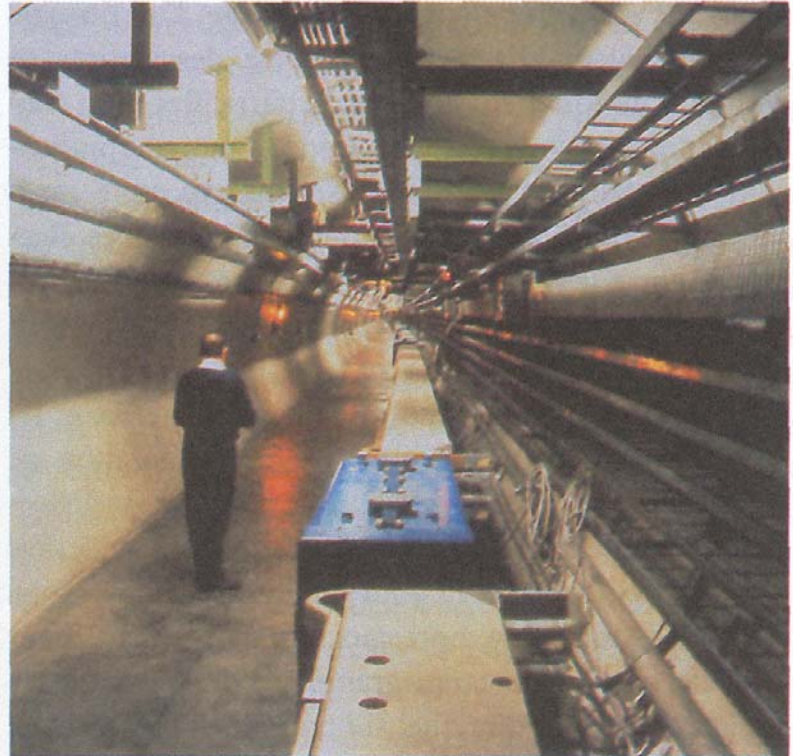
La façon dont la force des trois interactions faible, forte et électromagnétique converge lorsque l'énergie augmente suggère

fortement que ces trois forces se rassemblent en une seule et même force à très haute énergie, vers 10^{15} GeV

Source : d'après S. Weinberg, *Les Particules élémentaires*, Belin.

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 électromagnétique, il faudrait un accélérateur plus grand que le système solaire



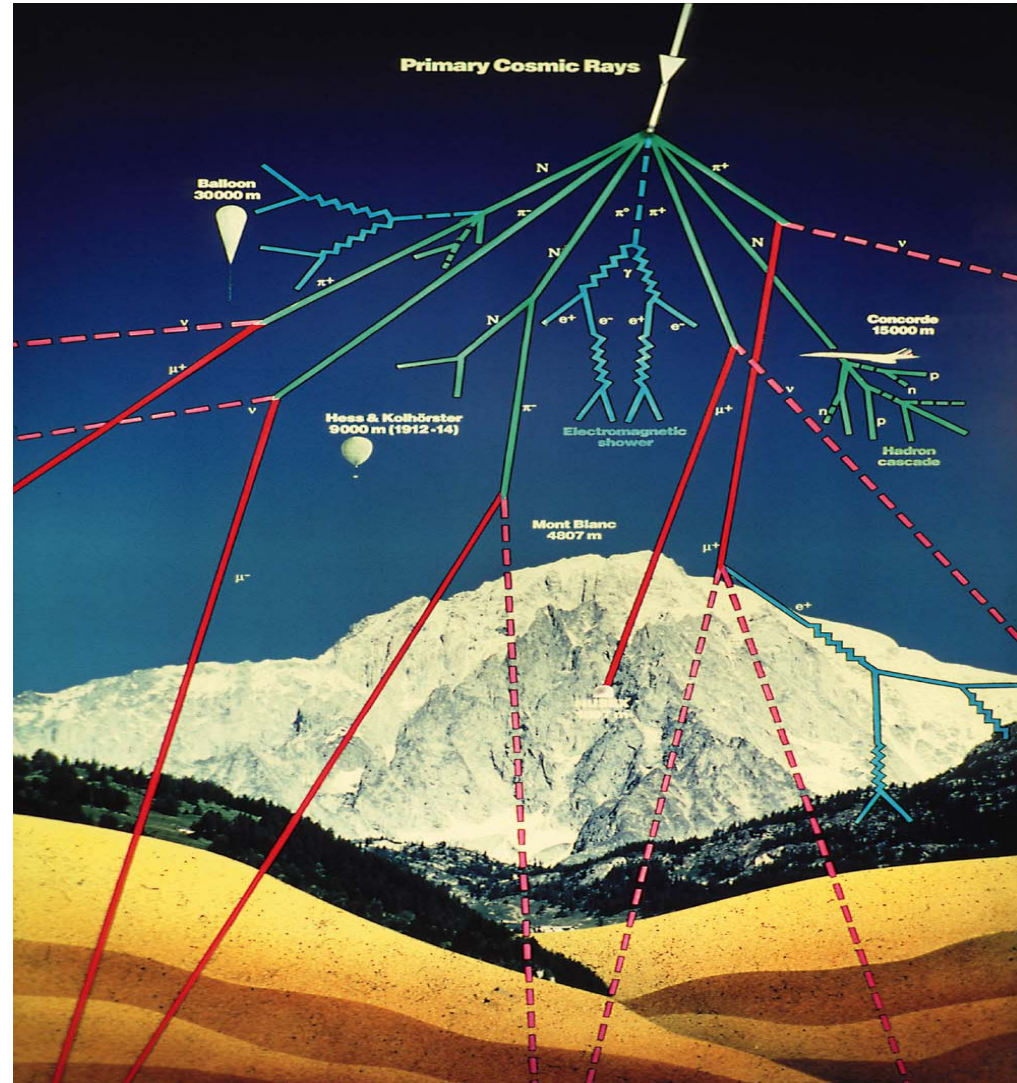
Le LEP.

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

- Commencer par se cacher sous une montagne ou au fond de la mer...
- ...afin de se protéger des rayons cosmiques (≈ 100 par seconde dans votre corps au niveau de la mer)



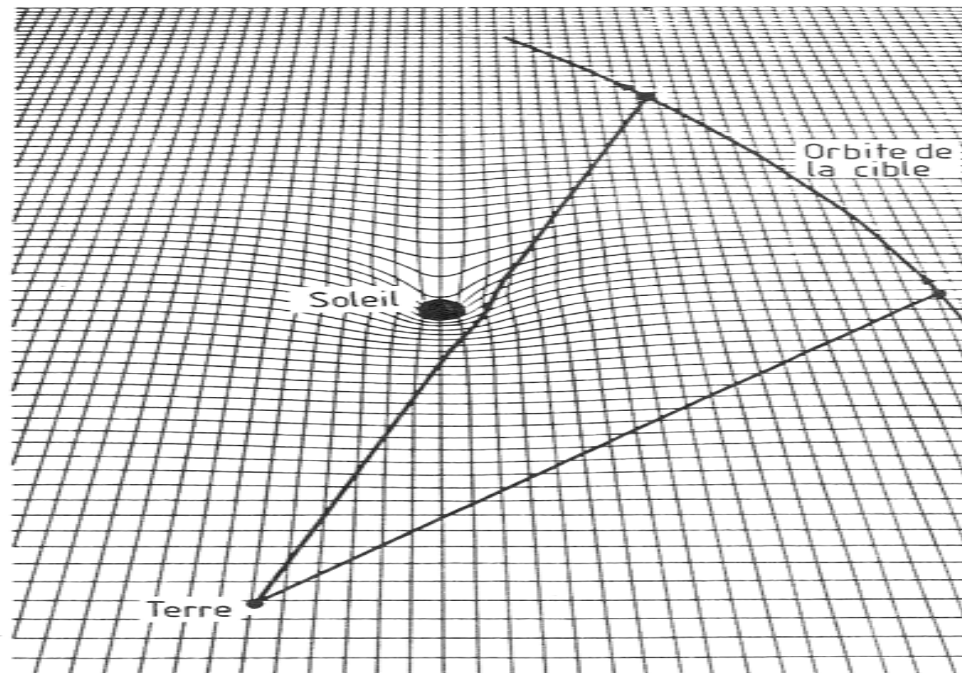
Observer la désintégration de la matière

- ...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

QuickTime™ et un décompresseur TIFF (non compressé) sont requis pour visionner cette image.

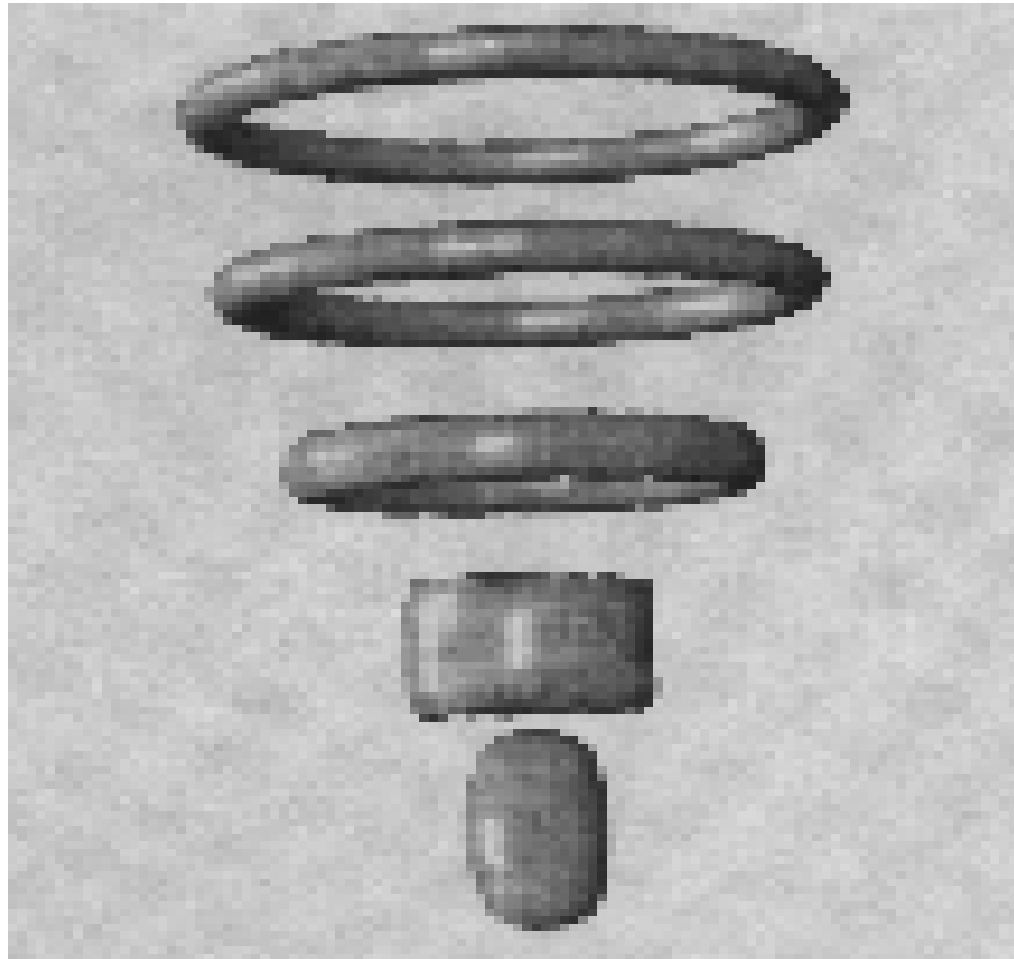
Gravitation et antimatière...

- Dans la théorie d'Einstein de la gravitation, la trajectoire d'une particule est complètement déterminée par sa position et sa vitesse et par la géométrie de l'espace là où elle se trouve (**principe d'équivalence**)
- De ce fait, il **semble** donc totalement **impossible** que la **gravitation permette de distinguer matière d'antimatière...**



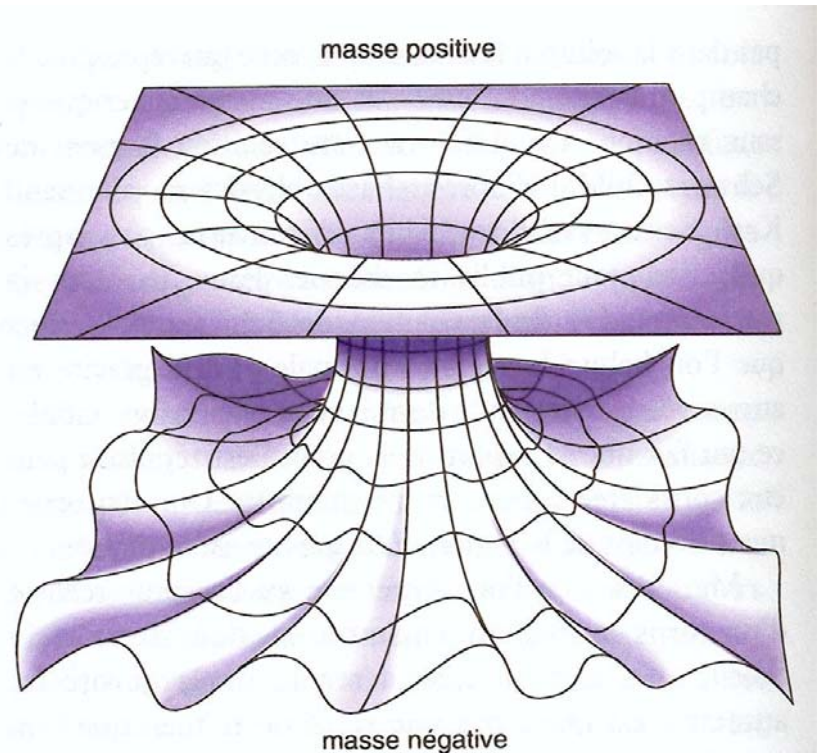
Des trous « noirs » qui ressemblent fort à des particules

- Quand un objet s'effondre en un trou noir en ayant un mouvement de rotation, il prend une forme annulaire, et non pas ponctuelle comme on pourrait le supposer.
- Que se passe-t-il quand on traverse l'anneau ?



Des trous noirs qui ressemblent fort à des particules

- Quand on traverse l'anneau d'un trou « noir » chargé, sa charge change de signe
- La masse gravitationnelle change également de signe
- Un électron apparaît de l'autre côté de l'anneau comme un positron répulsif gravitationnellement
- Comment les 2 espaces communiquent-ils ?



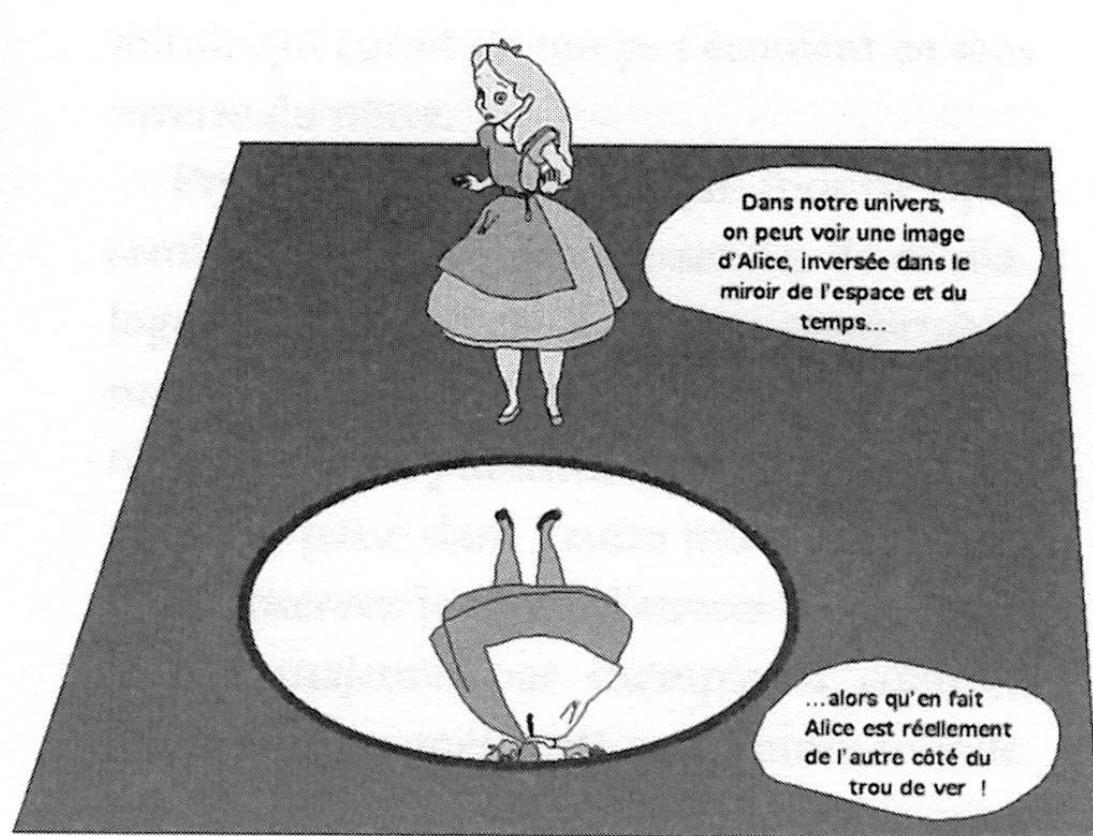
La géométrie de Kerr.

Cette représentation (très simplifiée) d'un trou noir en rotation, ou trou noir de Kerr, permet de voir les deux parties de l'espace, l'une représentée dans le haut

de la figure où la gravitation est attractive, l'autre, représentée au bas de la figure, où la gravitation est répulsive. Les deux espaces sont reliés par une sorte de tunnel que l'on appelle un « trou de ver ».

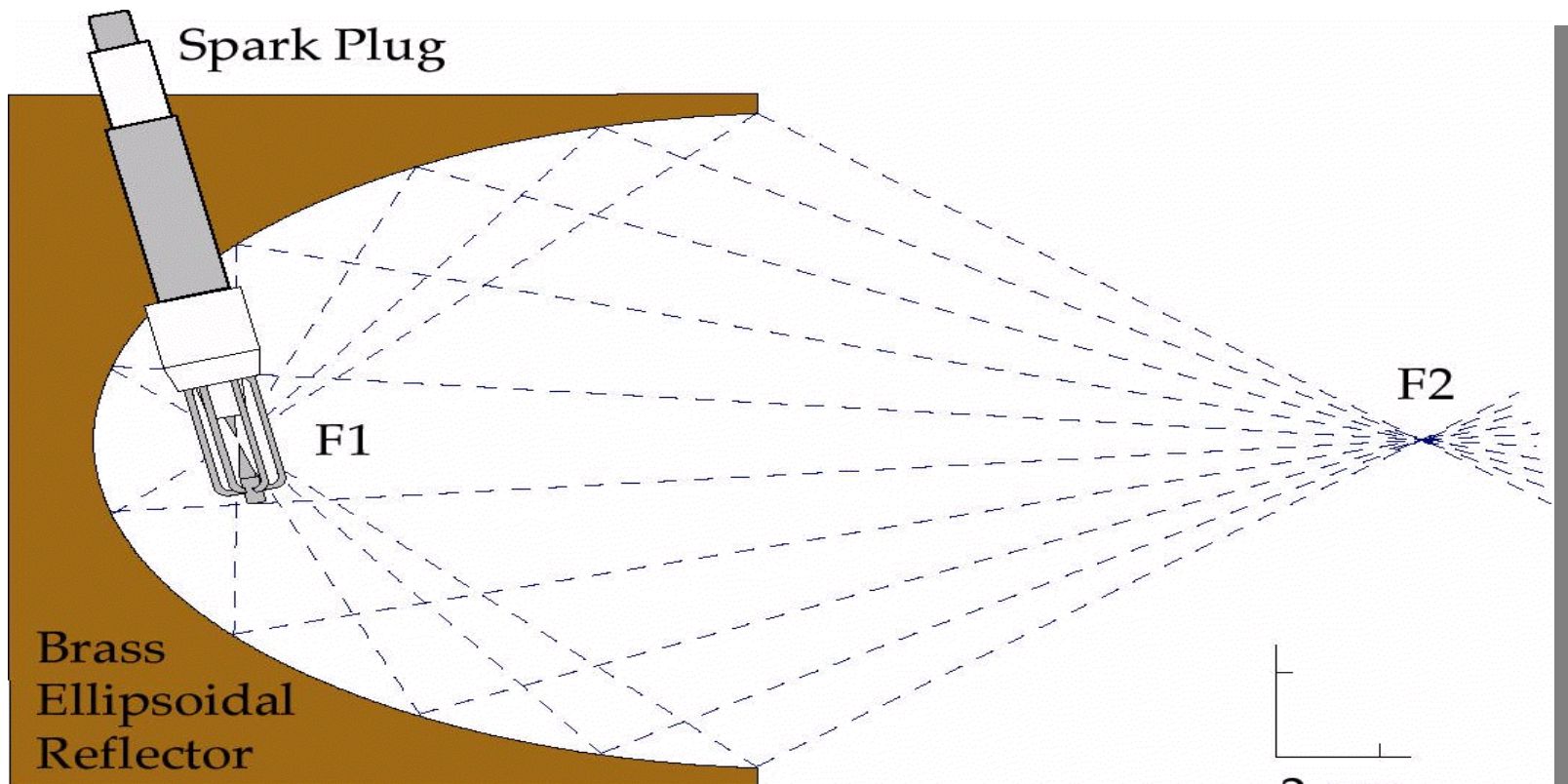
Deux espaces conjugués

- Comment les 2 espaces **communiquent-ils** ?
- Ils voient **le même objet** avec une **charge** et une **masse gravitationnelle opposées**
- Les objets ne disparaissent pas quand ils passent de l'autre côté d'un « trou de ver »
- Dans plusieurs cas simples, on peut montrer qu'il **existe effectivement des points « conjugués »**

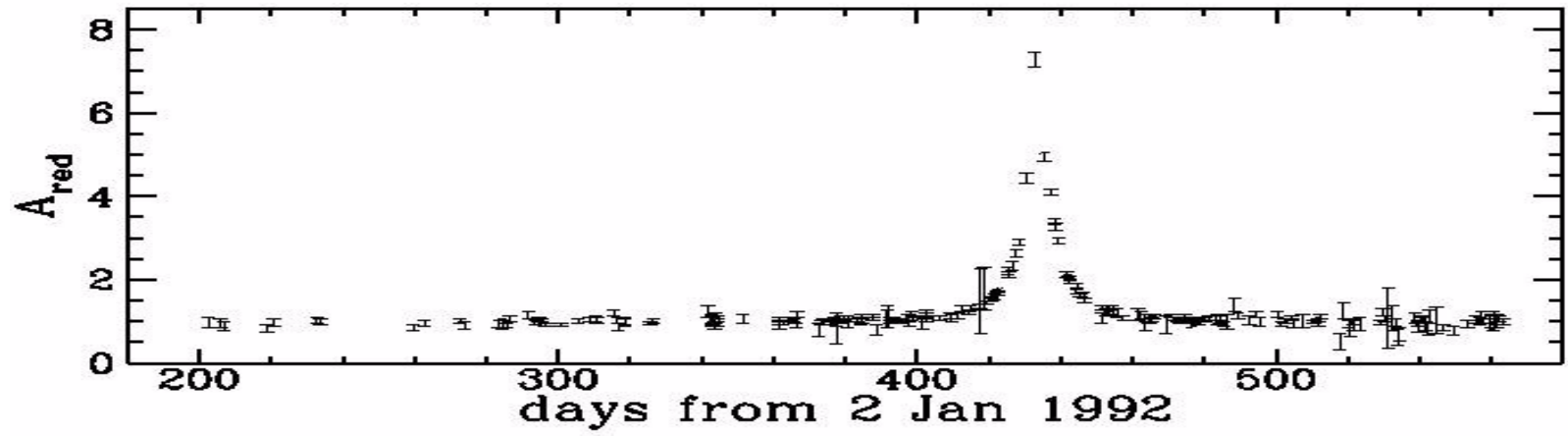
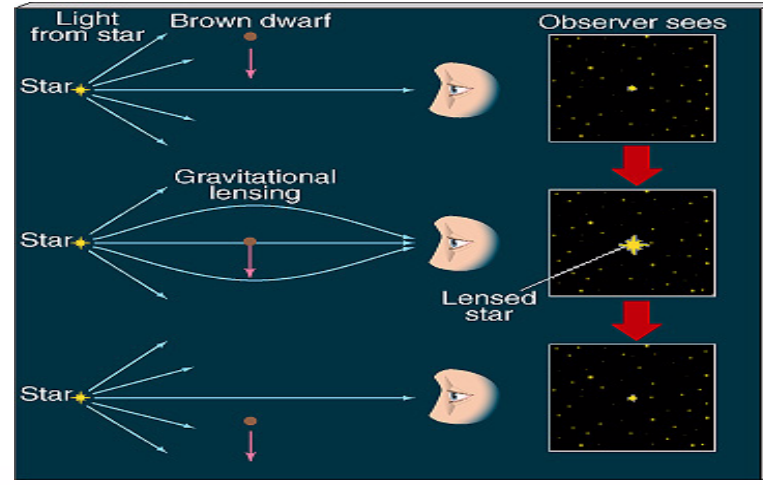
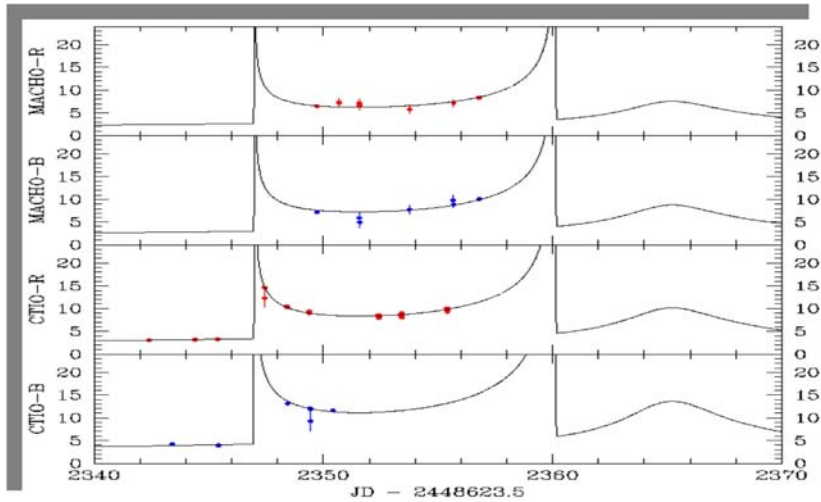


Exemples de stigmatisme

- Situations où un objet nous trompera sur la position où il se trouve réellement:
 - Points conjugués sous un dôme
 - Destruction des calculs rénaux à distance par une source d'ultrasons en un point conjugué



En gravitation, les situations d'amplification infinie sont monnaie courante (génériques)



On trouve toujours des situations où la magnification d'une étoile (augmentation de son éclat) devient infinie. L'étoile apparaît alors infiniment plus proche qu'elle ne l'est réellement.

Explication naturelle

$$\rho_{\Lambda} \text{ apparent} \approx 2 \rho_m$$

- Dans un univers symétrique matière-antimatière, où particules et antiparticules se repoussent, on observe une répulsion gravitationnelle à grande distance que l'on peut interpréter comme une constante cosmologique de densité $\rho_{\Lambda} \approx \rho_m$ (ce qui semble bien être le cas dans les observations de supernovae SN1a)
- En effet: dans l'hypothèse $\Lambda \neq 0$, le paramètre de décélération q (où a est le facteur d'échelle) dans un univers où la matière domine le rayonnement, avec $p \approx 0$ (dust), s'écrit :

$$q \equiv - \frac{a \ddot{a}}{\dot{a}^2} = \frac{1}{2} \Omega_M - \Omega_{\Lambda}$$

- Un univers symétrique matière-antimatière telle que défini ci-dessus vérifie en 1ère approximation $\Omega \approx 0$

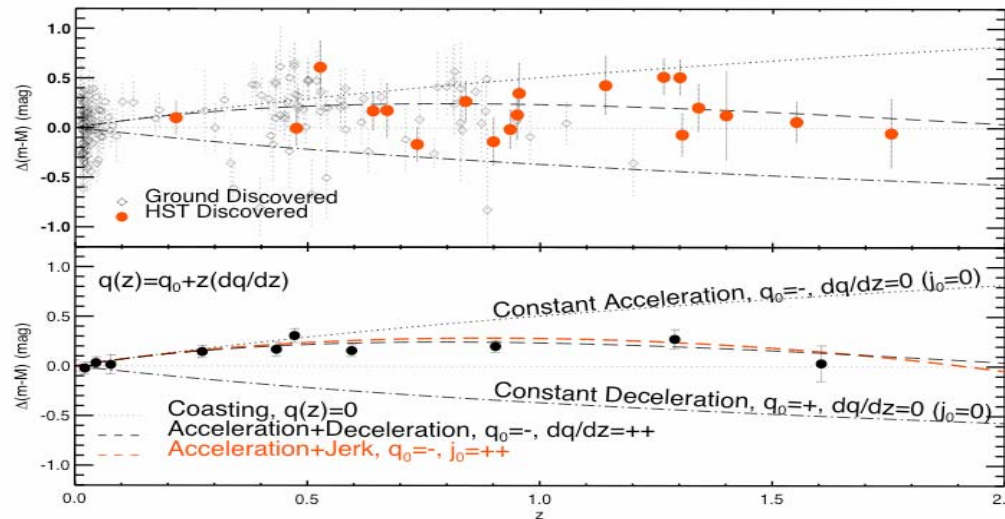
Explication naturelle de $\rho_{\Lambda} \approx 2 \rho_m$

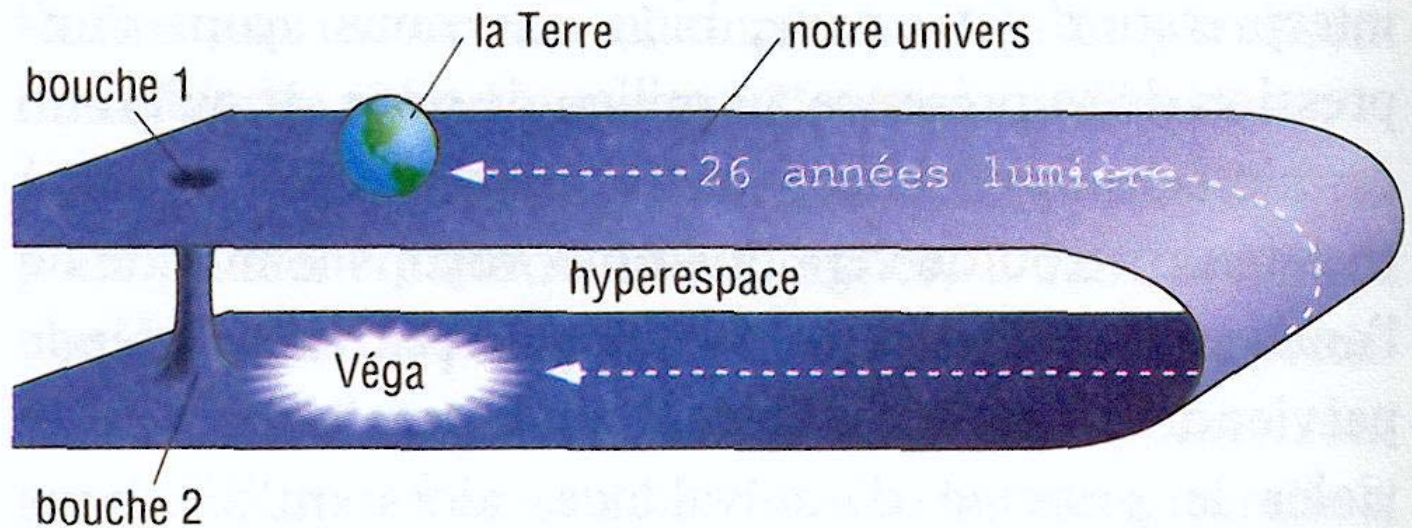
χ^2 Comparison of Gold Set Data to Models

Model	χ^2 (for 157 SNe Ia)
$\Omega_M = 0.27, \Omega_{\Lambda} = 0.73$	178
$\Omega_M = 1.00, \Omega_{\Lambda} = 0.00$	325
$\Omega_M = 0.00, \Omega_{\Lambda} = 0.00$	192
High-redshift gray dust (with $\Omega_M = 1.00, \Omega_{\Lambda} = 0.00$)	307
Replenishing dust (with $\Omega_M = 1.00, \Omega_{\Lambda} = 0.00$)	175
Dimming $\propto z$ (with $\Omega_M = 1.00, \Omega_{\Lambda} = 0.00$)	253

A. G. Riess et al.
astro-
ph/0402512

- Ajustement univers vide proche du meilleur ajustement des données





Le « trou de ver » de Kip Thorne.

Un « trou de ver » qui relierait la Terre à Véga conduirait à la géométrie suivante de l'espace. Deux chemins permettent d'effectuer le voyage vers Véga : d'une part en effectuant un voyage

de vingt-six années-lumière à travers l'espace-temps ordinaire, d'autre part en passant presque instantanément à travers le raccourci du « trou de ver ».

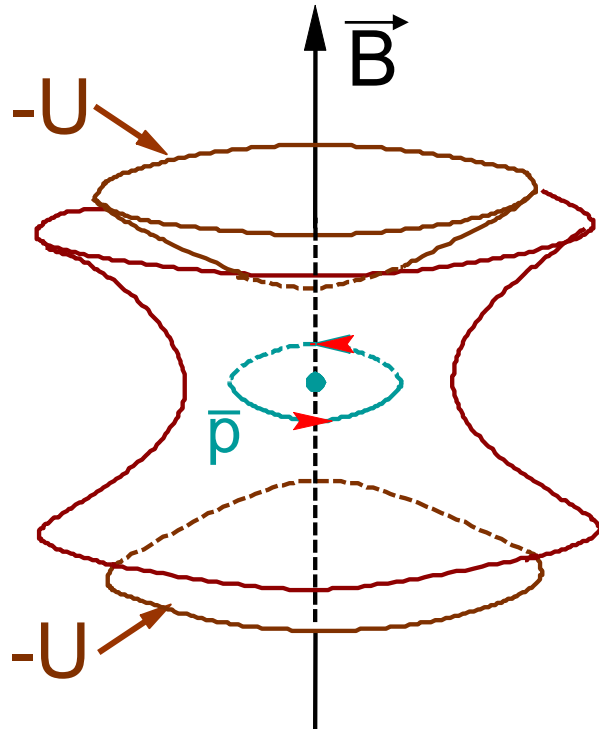
Source : d'après Kip Thorne, *Black holes and time warps*, Picador, 1994.

Tests expérimentaux: peser l'antimatière

- Peser un antiproton ou un positron : énorme problème des champs électriques résiduels
- Gravité $\approx 10^{-7}$ V/m pour antiproton, qqs 10^{-11} V/m pour un électron ...
- Expérience historique de Witteborn et Fairbank (électrons) complètement fausse
- Peut-être possible pour des antiprotons froids en utilisant l'électronique quantique (Single Electron Transistor):
V. Bouchiat, G. Chardin, M.H. Devoret and D. Estève, *Hyperfine Interactions* **109** (1997) 345
- Peser le positronium $e^+ e^-$ grâce à une source refroidie:
A.P. Mills, M. Leventhal, *NIM B* **192** (2002) 102
- Peser l'antihydrogène auprès du AD au CERN
J. Walzl et T.W. Hänsch, *Gen. Relat. and Grav.* **36** (2004) 561

Des antiprotons en bouteille

masse de $p \equiv$ masse de \bar{p} ?



À champ magnétique constant,
la fréquence de rotation
varie comme $1/M$



G. Gabrielse

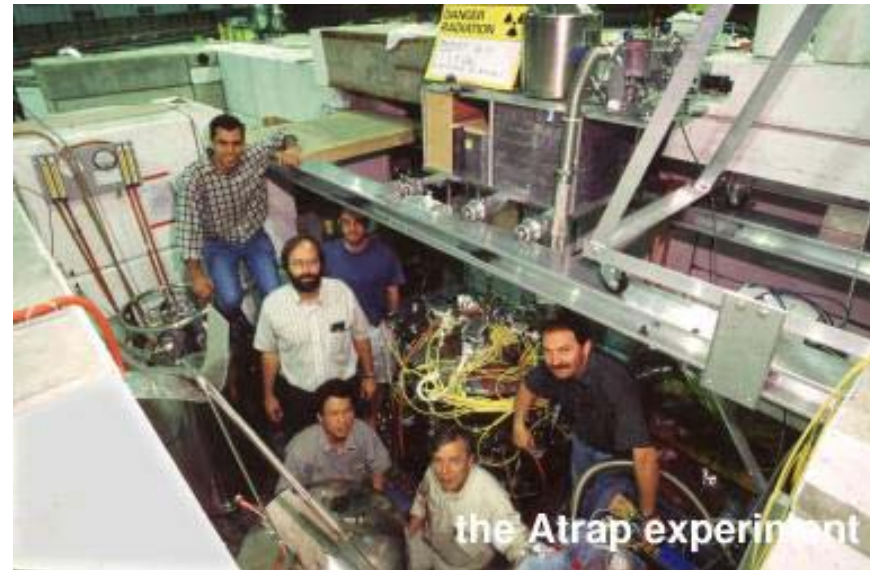
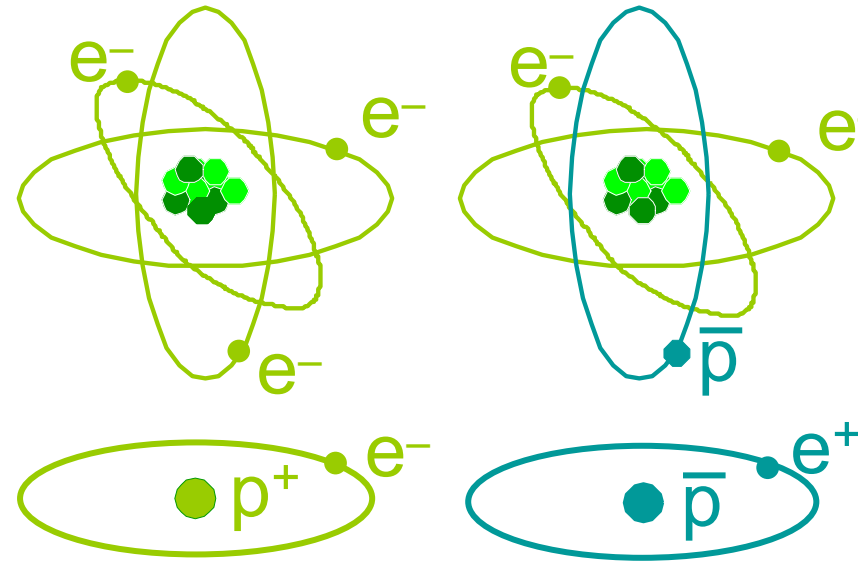
1999 CERN

$$\frac{M(p)}{M(\bar{p})} = 1,000\,000\,000\,09 \pm 0,000\,000\,000\,09$$

Un sujet d'étude pour les physiciens

En remplaçant un électron
par un antiproton : 1990...

En fabriquant des antiatomes
d'hydrogène : 1995-2002...



Quelques références

- G. Chardin, *L'antimatière*, Flammarion, 1996
- G. Chardin, *Hyperfine Interactions* **109** (1997) 83
- G. Chardin, *AIP Conf. Proc.* **643** (2002) 385
- H.I. Arcos and J.G. Pereira, hep-th/0210103
- A. Burinskii, *Phys. Rev. D* **52** (1995) 5826; *Phys. Rev. D* **57** (1998) 2392
- B. O'Neill, "The geometry of Kerr black holes", (A. K. Peters, Wellesley, Massachusetts, 1995)
- Matt Visser, "Lorentzian wormholes: From Einstein to Hawking", (Springer, New York, 1995), notamment chapitre 7
- B. Carter, *Phys. Rev.* **141** (1966) 1242
- B. Carter, *Phys. Rev.* **174** (1968) 1559

Conclusions

- L'antimatière apparaît comme la "matière qui remonte le temps" en théorie des champs et en Mécanique Quantique
- Il semble exister des voies de passage (grande unification, gravitation) entre matière et antimatière
- La relativité générale présente des propriétés de renversement de charge et du temps qui évoquent très fortement la transformation matière-antimatière
- Une particule d'antimatière en un point P pourrait n'être l'image renversée dans le temps (et renversée de charge) d'une particule située en un point conjugué P^*
- La symétrie entre matière et antimatière serait restaurée
- L'antigravité semble permettre une **explication élégante de la valeur de la gravité répulsive** observée dans les observations cosmologiques (et sans doute également de la violation de CP...)