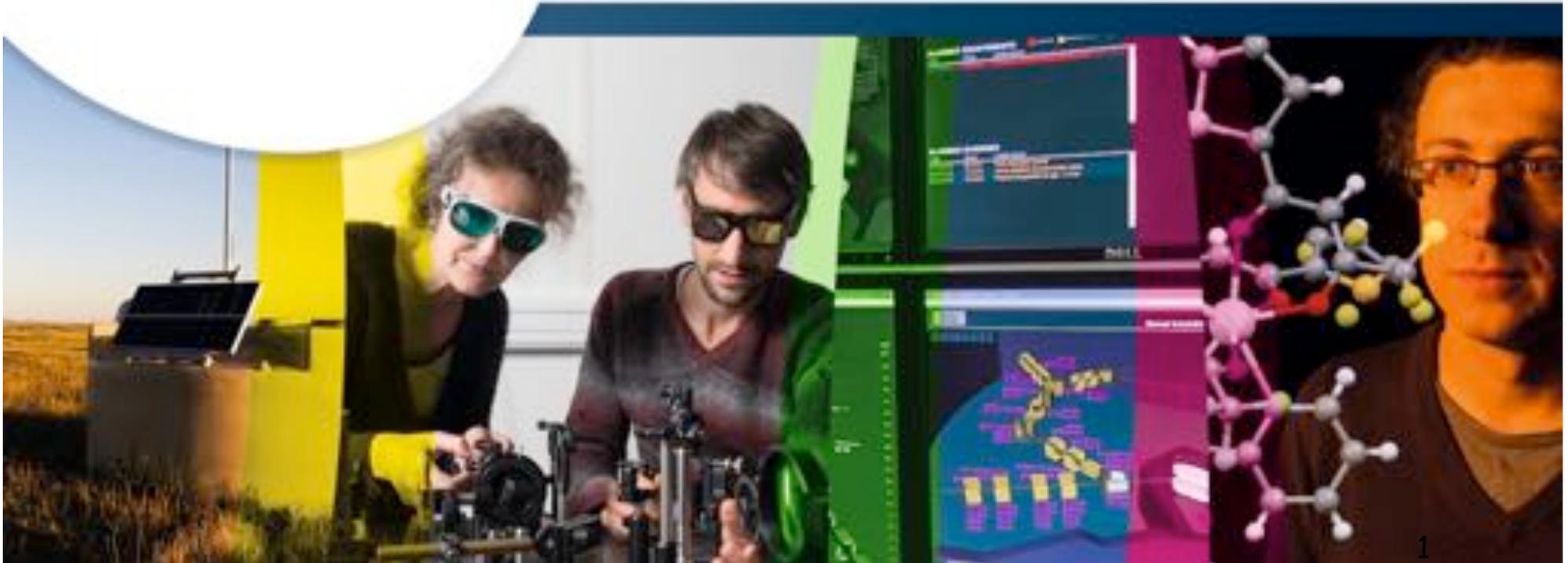




www.cnrs.fr

Où est passée l'antimatière ?

Gabriel Chardin, CNRS

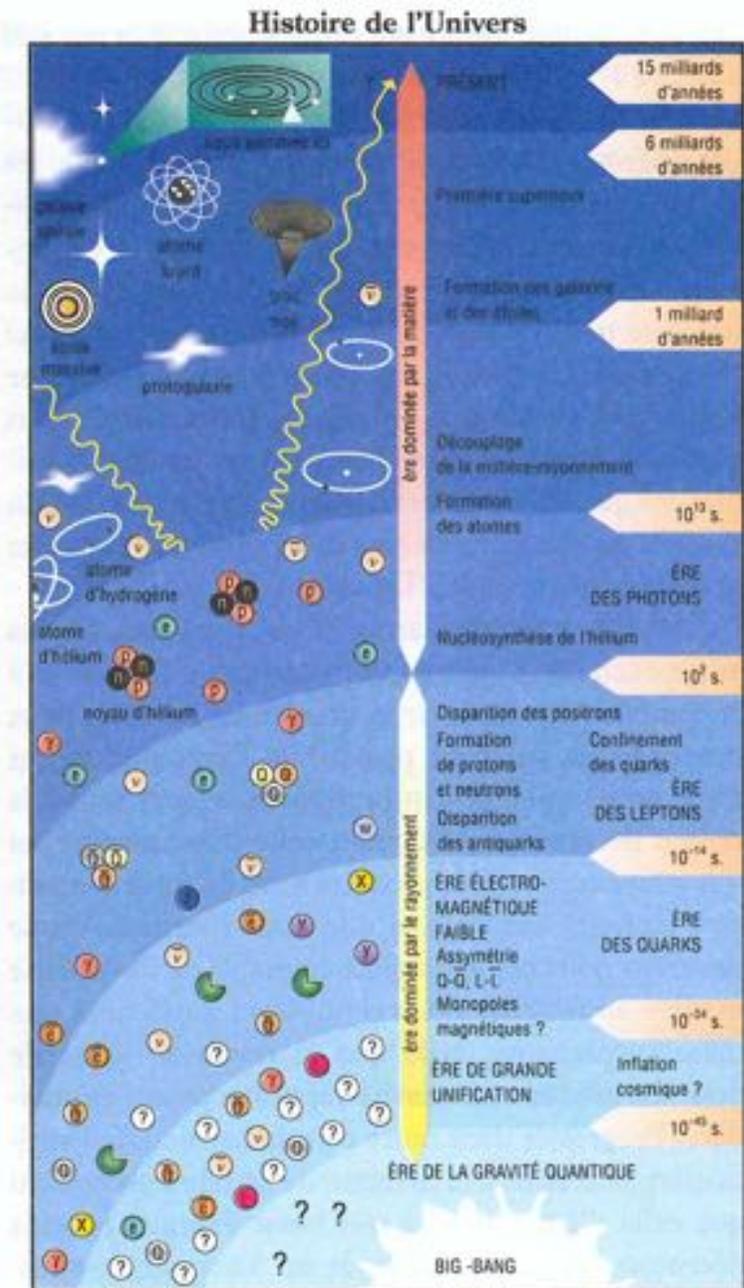


Un univers matière-antimatière

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

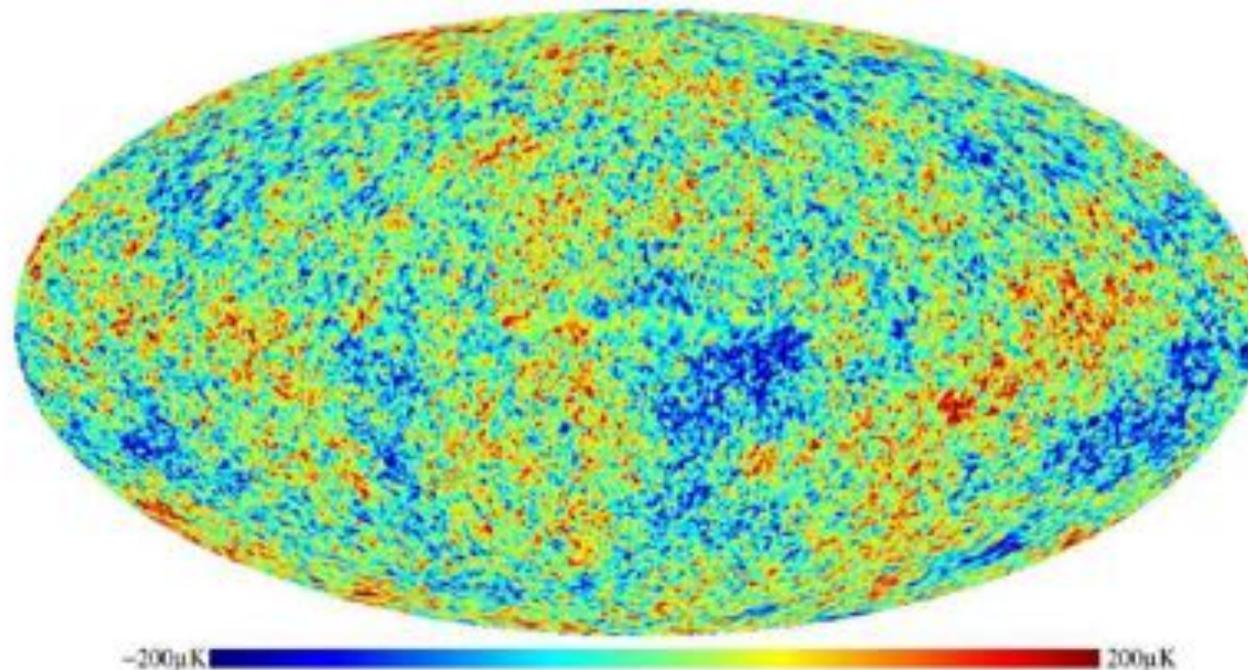
Brève histoire de l'univers

- 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 (environ un milliardième de la matière initiale)
- Pourquoi cette dissymétrie ?



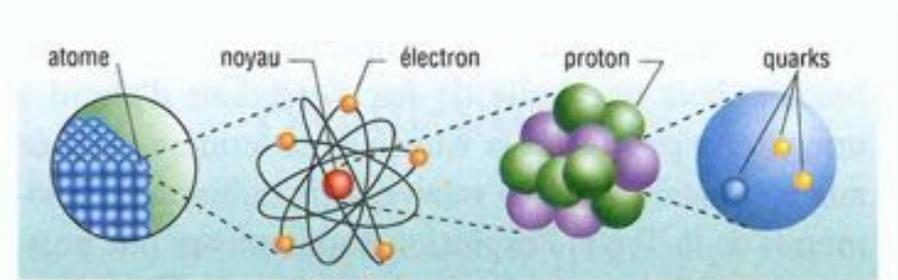
Brève histoire de l'univers

- Plus on est proche du Big-Bang, plus matière et antimatière sont présentes en quantités égales
- Notez que nous savons que notre univers a été chaud dans le passé, car nous pouvons le voir quand il était aussi chaud que la surface du Soleil



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	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 $-\frac{2}{3}$; 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					

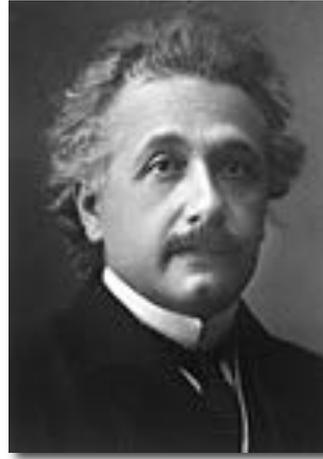
Petite histoire de l'antimatière



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

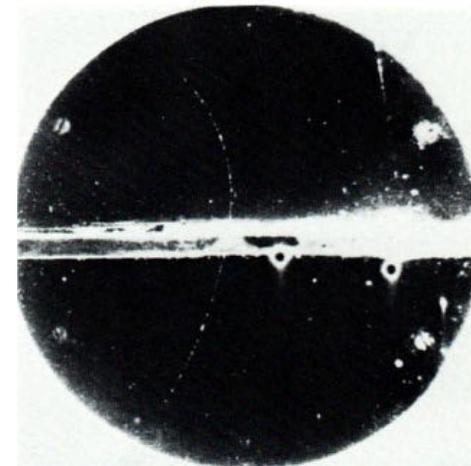


e^-
électron

e^+
positron

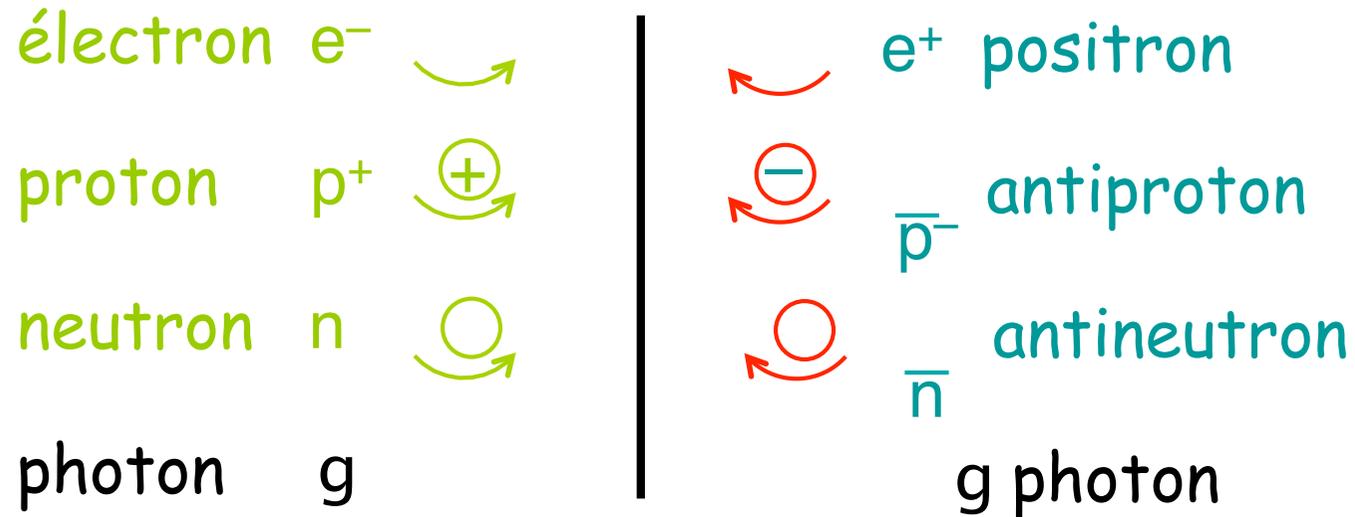


1932 : Anderson découvre le positron
dans les rayons cosmiques



Plomb

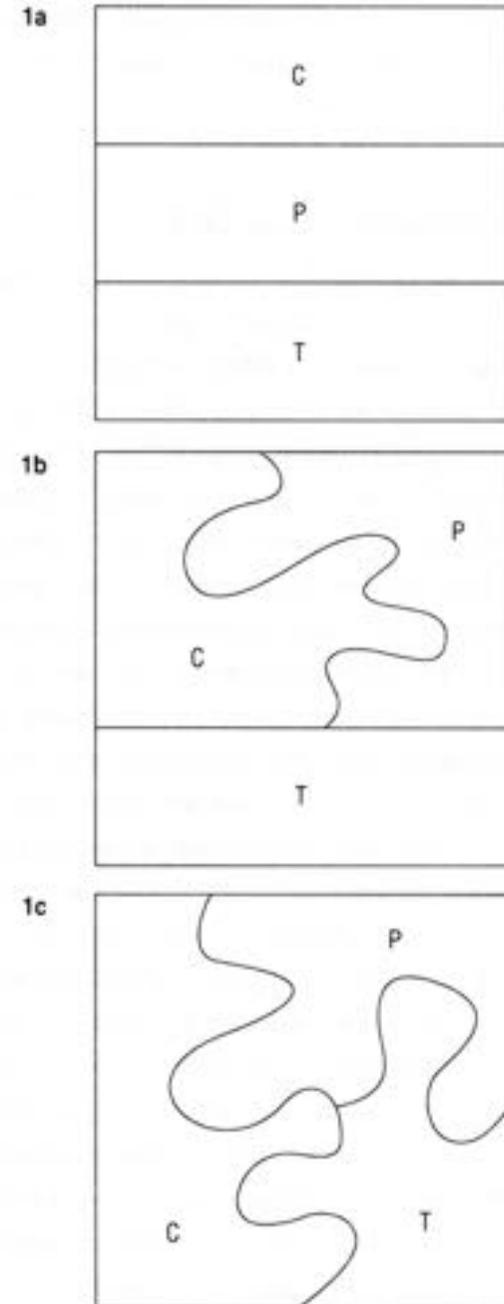
L'antimatière



même masse
même durée de vie
charge opposée
etc.

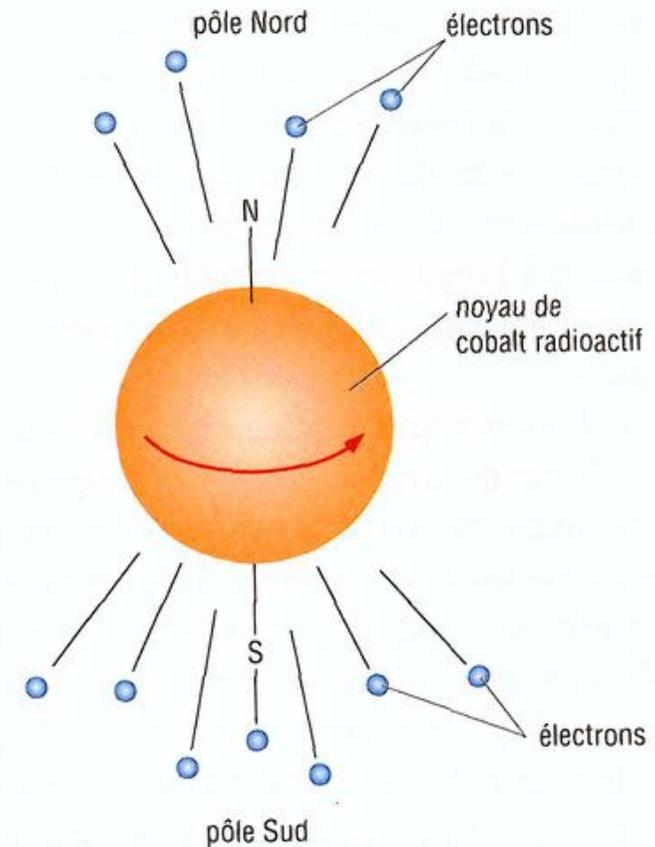
Le théorème CPT

- Les 3 symétries miroir C , P et T
- Pauli, Lüders, Bell : la symétrie CPT doit être respectée (en espace-temps plat...)
- 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

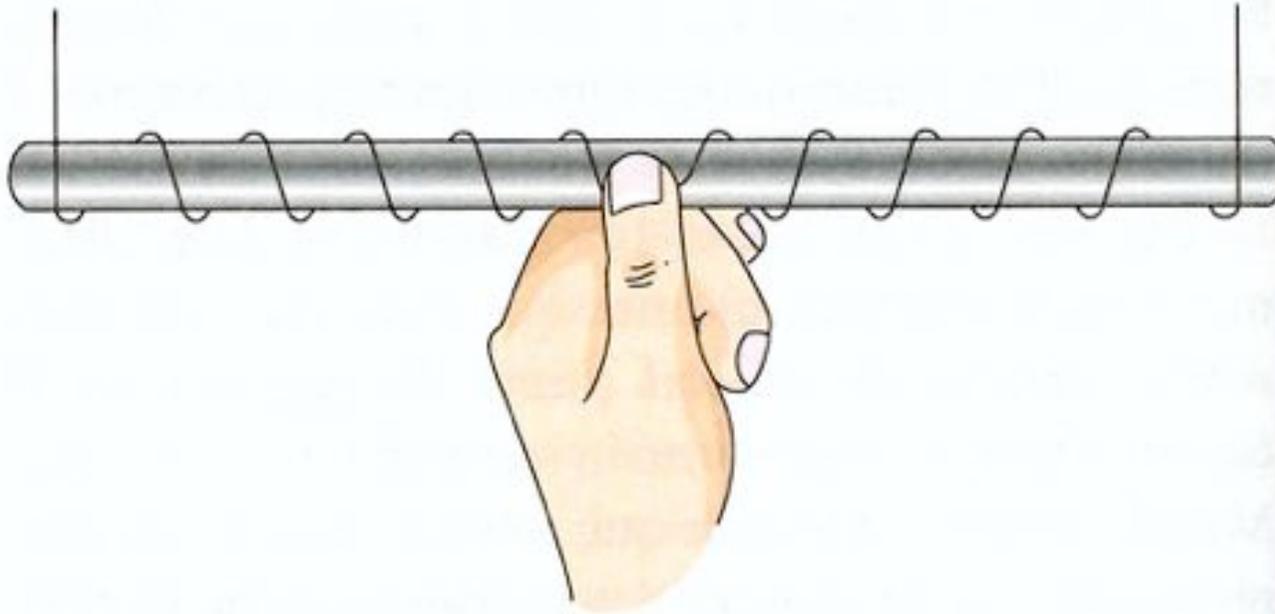


1956 : découverte de la violation de la parité

- 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.

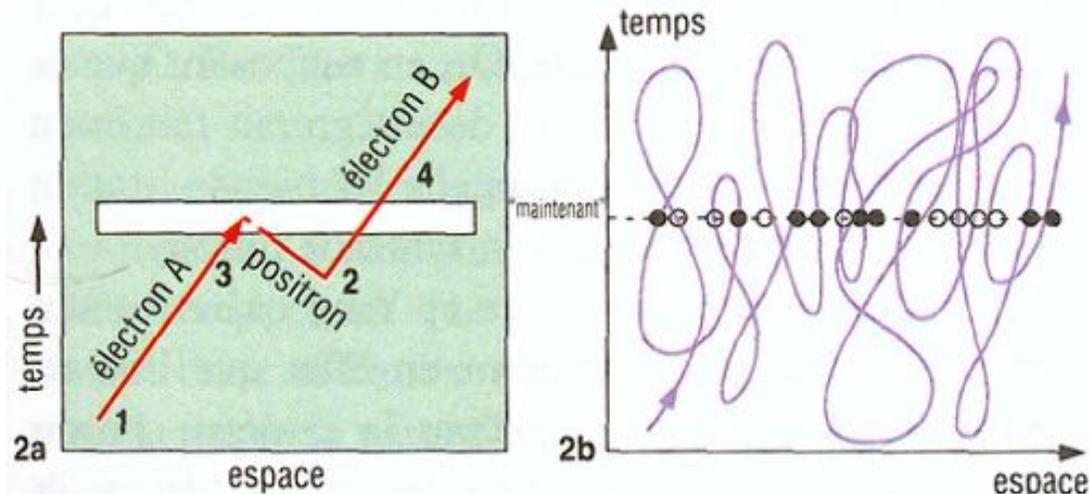
Dans un modèle étonnamment prescient, Charles Hinton se représentait particules et antiparticules comme des enroulements d'hélicité opposée

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

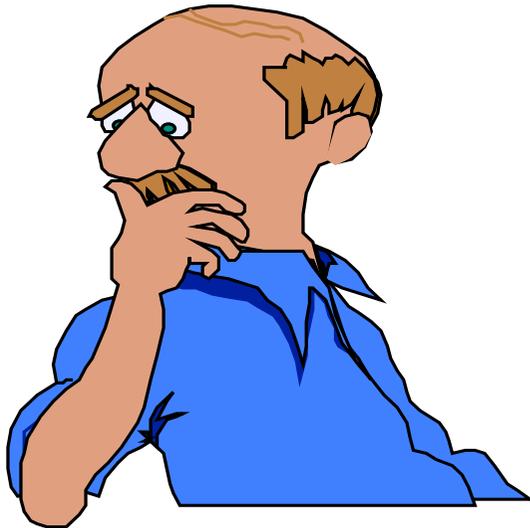
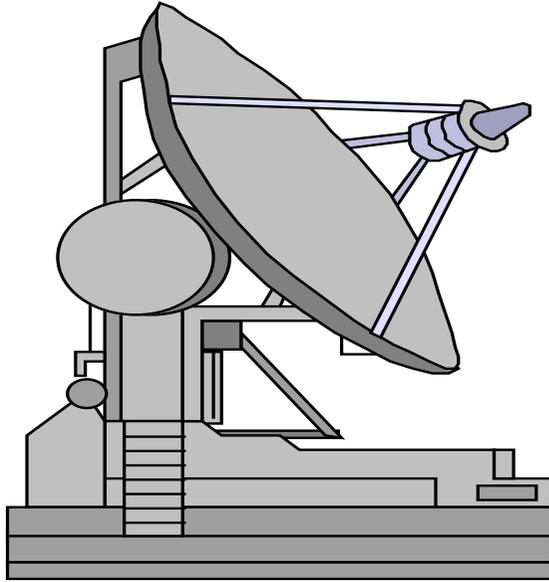
- quarks et antiquarks se désintègrent
ex. $p \rightarrow e^+ + \pi^0$ $\bar{p} \rightarrow e^- + \pi^0$
☺ théories de grande unification
- dissymétrie matière - antimatière
☺ observée pour le kaon neutre (CPLEAR) et le B (expérience Babar)
- déséquilibre thermodynamique
☺? mais très faible près du big-bang?



A. Sakharov

- Production d'un léger déséquilibre :
1 000 000 000
antiprotons
ou antineutrons...
mais
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 (des photons, leur propre antiparticule)
- 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 ?

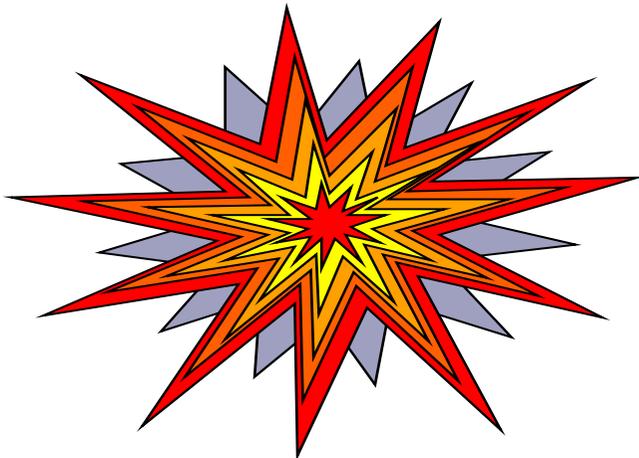
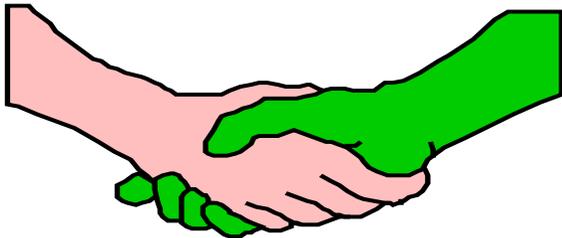


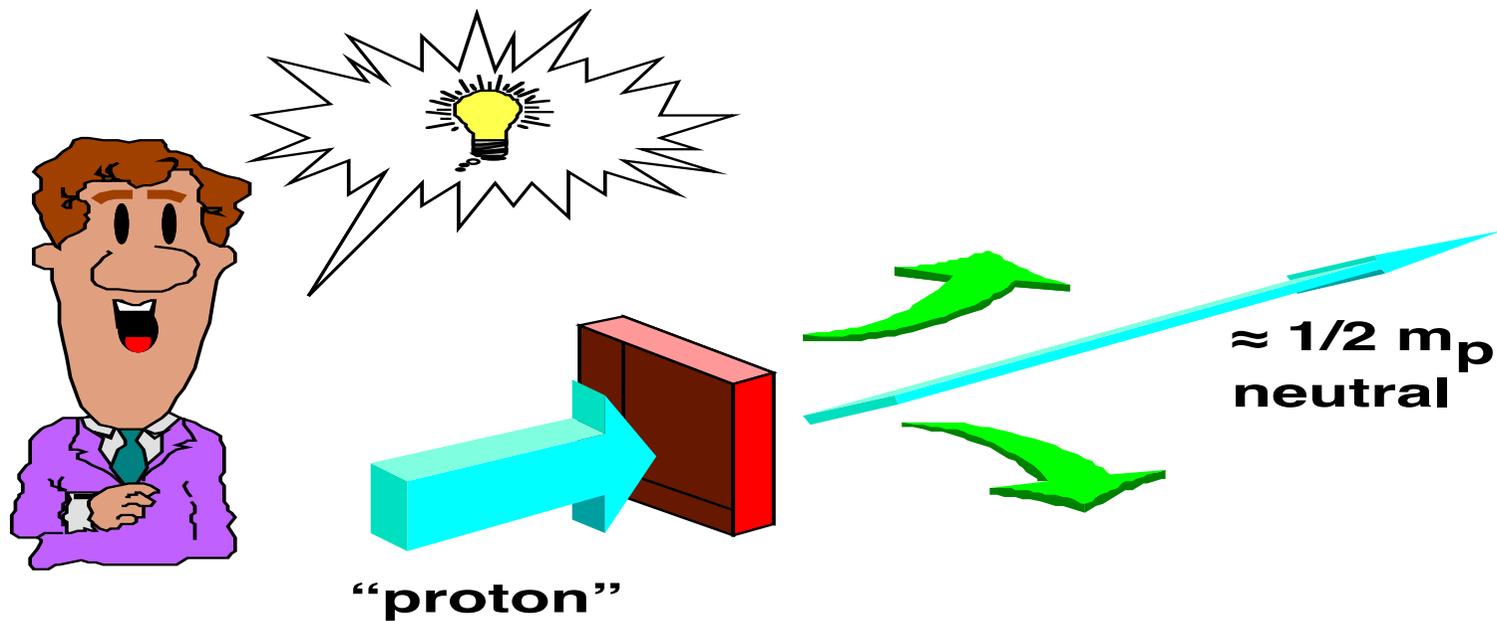
When Harry meets anti-Alien...

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



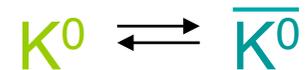


Le physicien des particules: "Etudions les désintégrations de la particule **kaon neutre**"

- 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

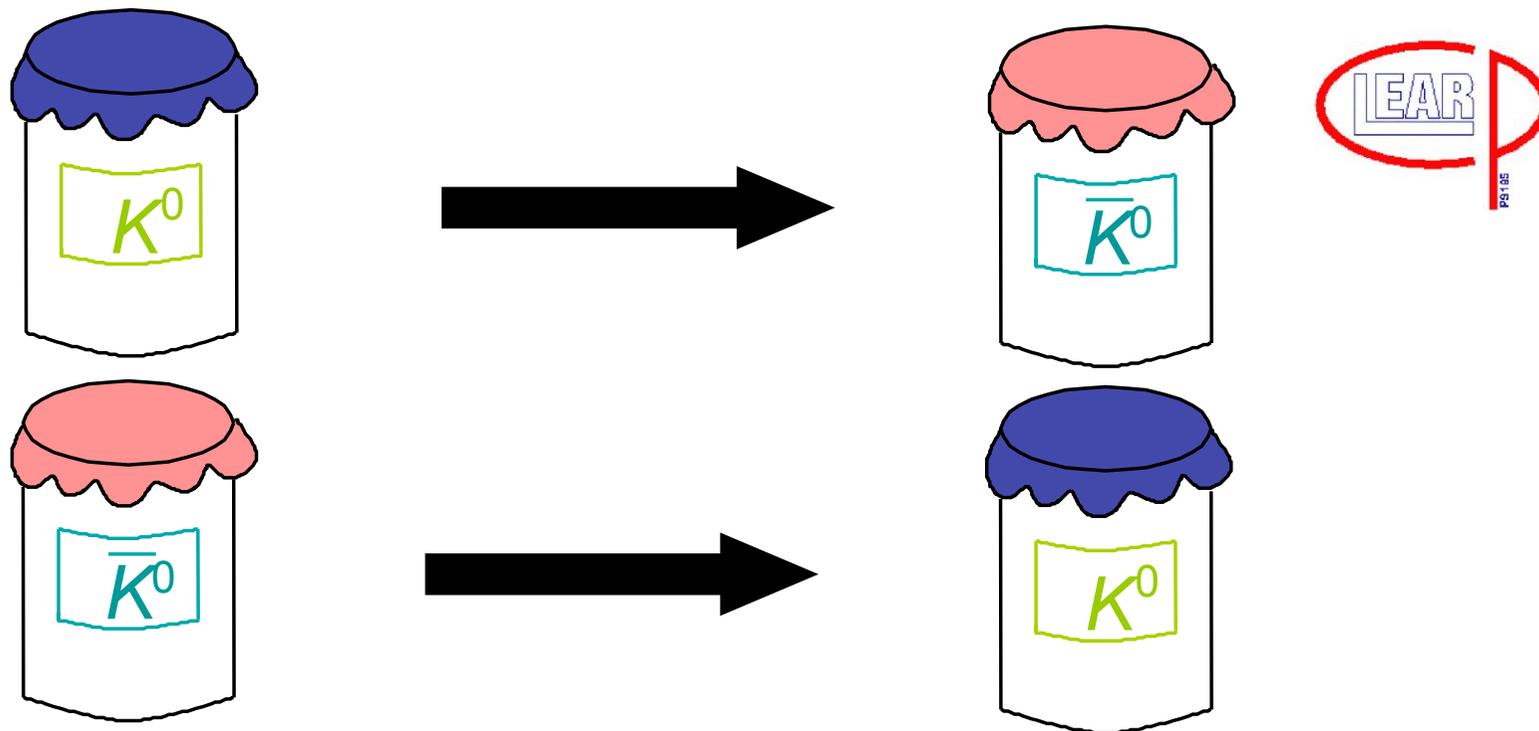
Le kaon neutre peut osciller entre matière et antimatière :



En fonction du temps, on peut comparer :

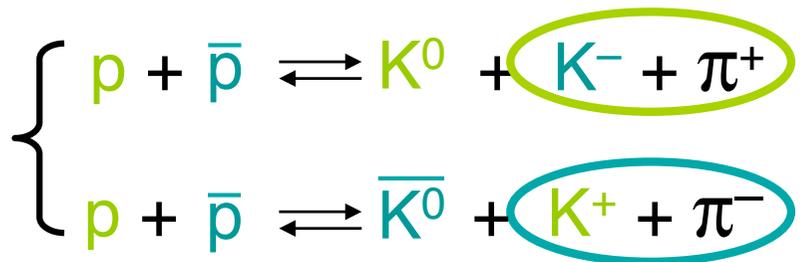


CLEAR étiquette les K^0 et les \bar{K}^0



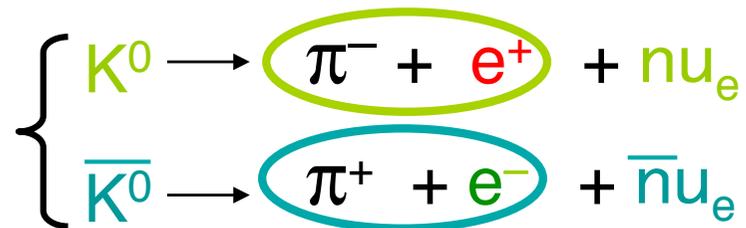
Instant 0 :

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



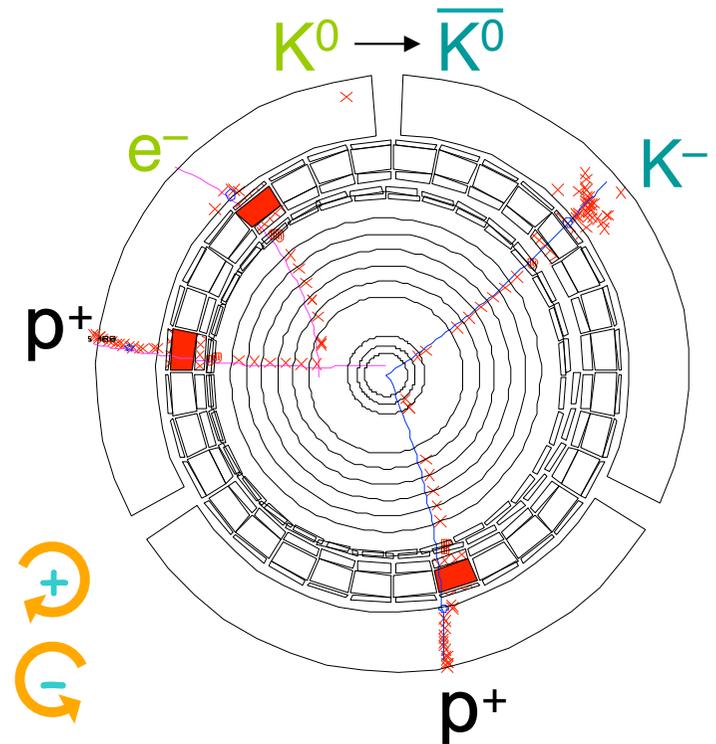
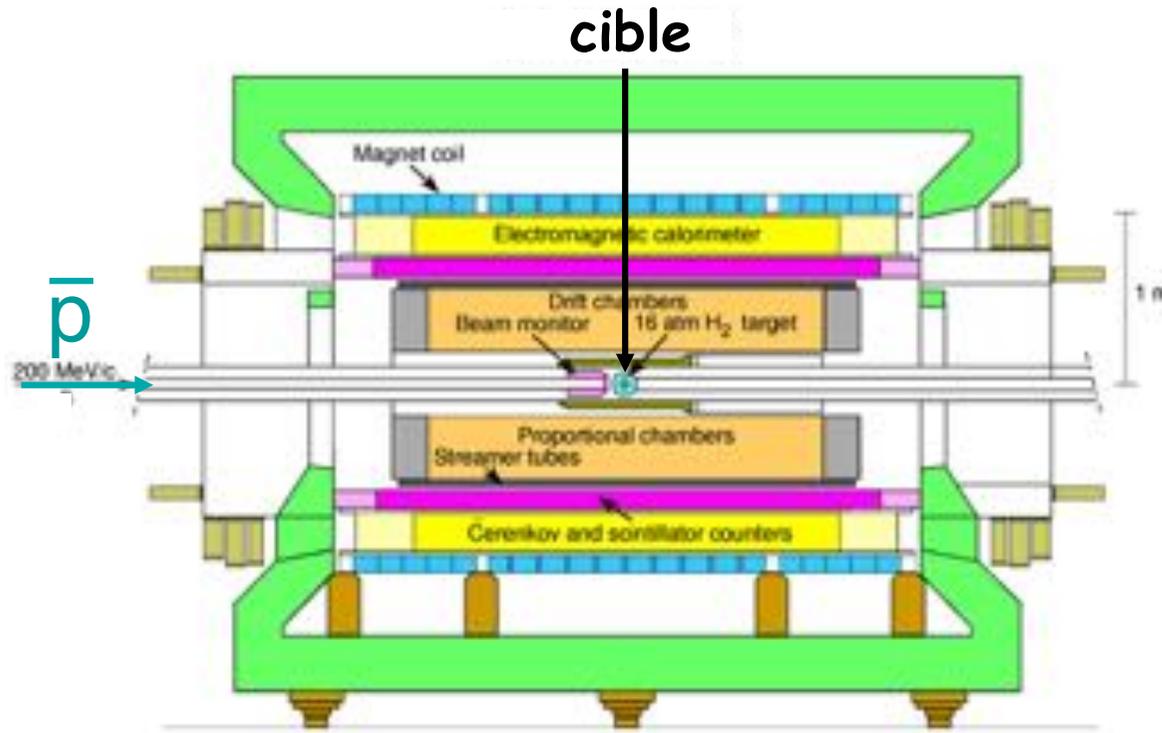
Instant t :

K^0 ou \bar{K}^0 se désintègre :

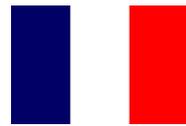




Le détecteur CPLEAR



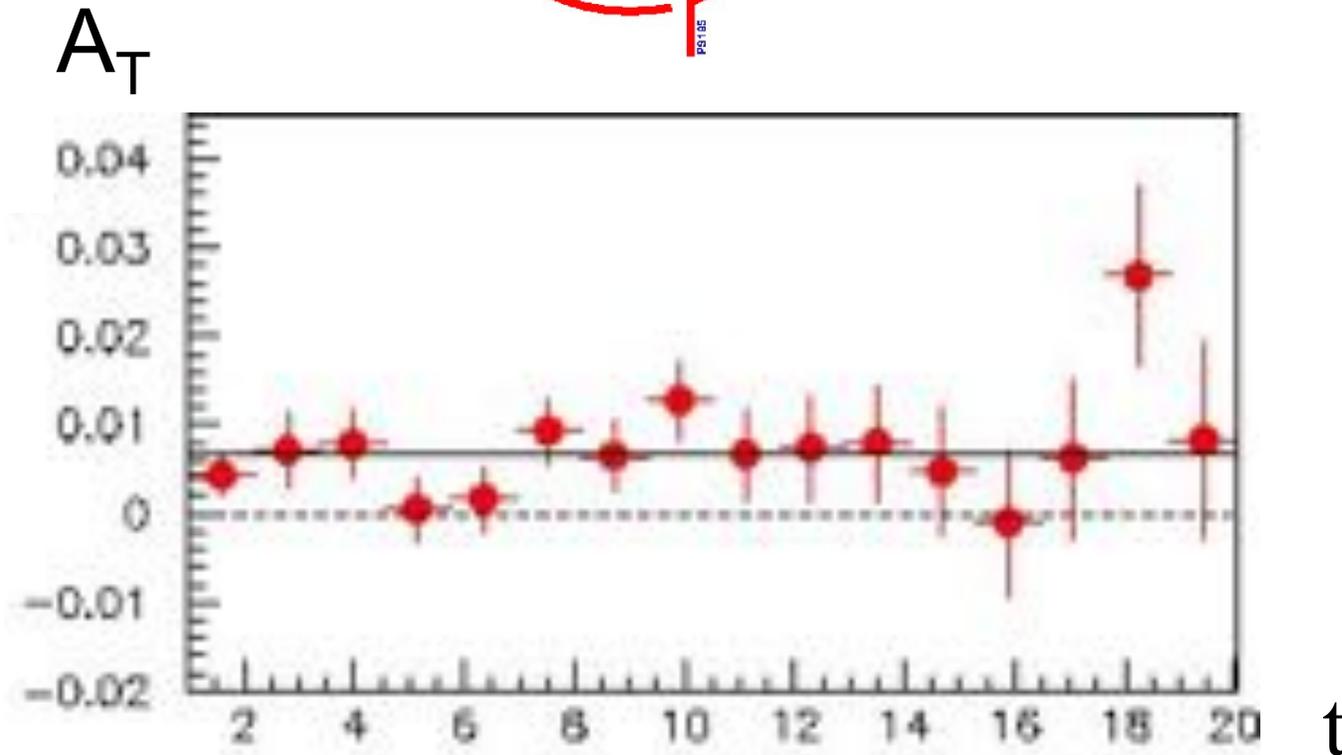
La collaboration CPLEAR : 100 physiciens de 9 pays
 États-Unis, France, Grande Bretagne, Grèce, Pays-Bas,



Portugal, Slovénie, Suède, Suisse



Le résultat de CPLEAR

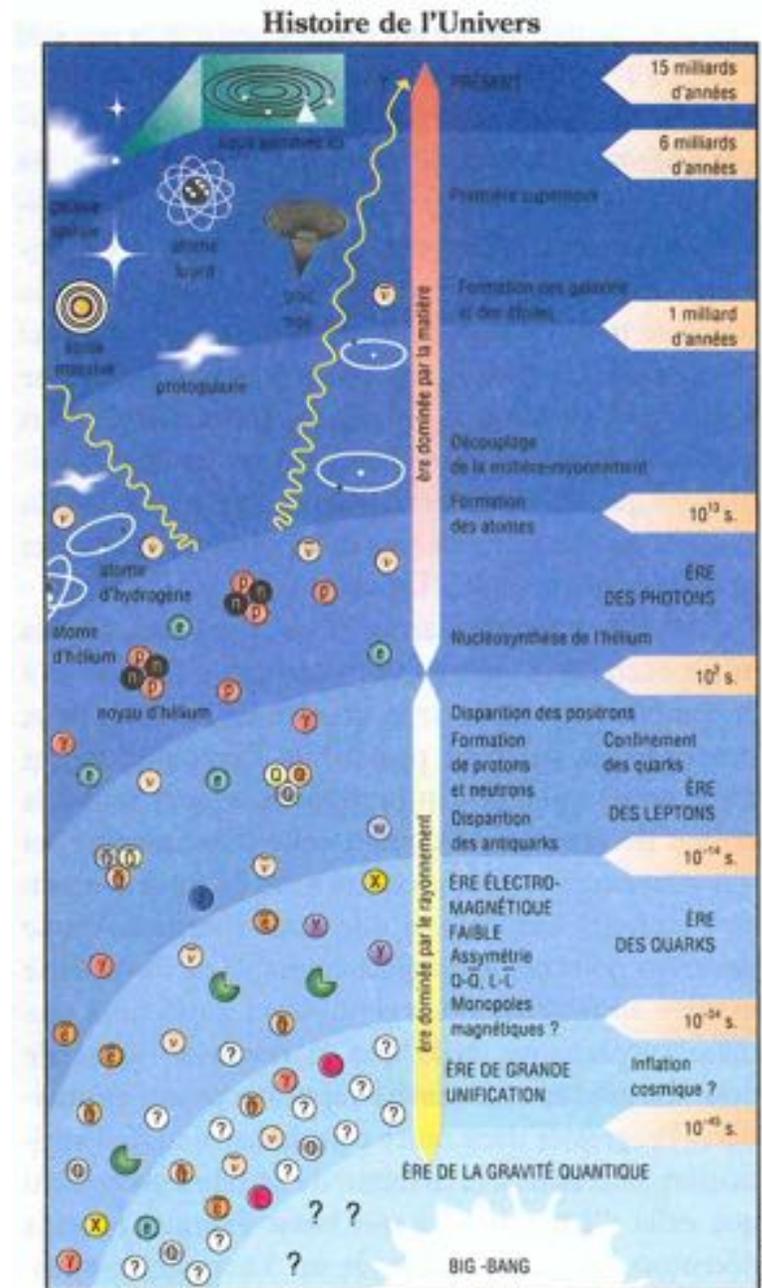


Asymétrie $A_T = 0,0066 \pm 0,0013_{\text{stat}} \pm 0,0010_{\text{syst}}$

Les processus microscopiques ne sont pas **réversibles**

Les batailles matière-antimatière

- On cherche des lieux de combats passés entre matière et antimatière au voisinage des transitions, changements majeurs dans le comportement des interactions
- Quelles transitions ?
 - Grande unification (10^{16} GeV)
 - électrofaible (1 TeV)
 - QCD (170 MeV)

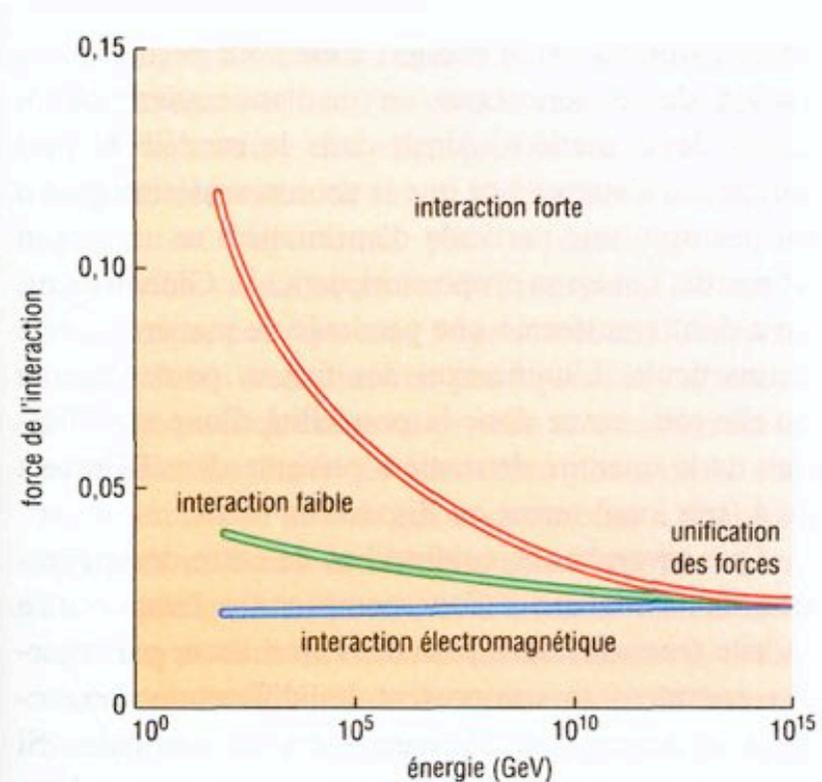


Désintégration de la matière

- 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.

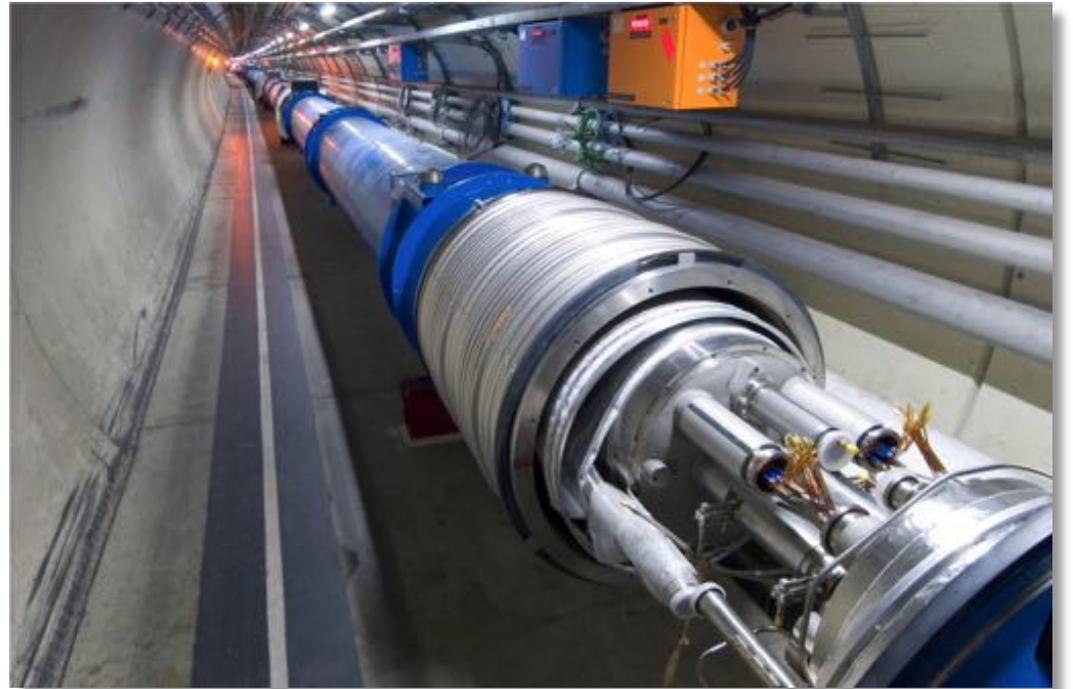
La façon dont la force des trois interactions faible, forte et électromagnétique converge lorsque l'énergie augmente suggère

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

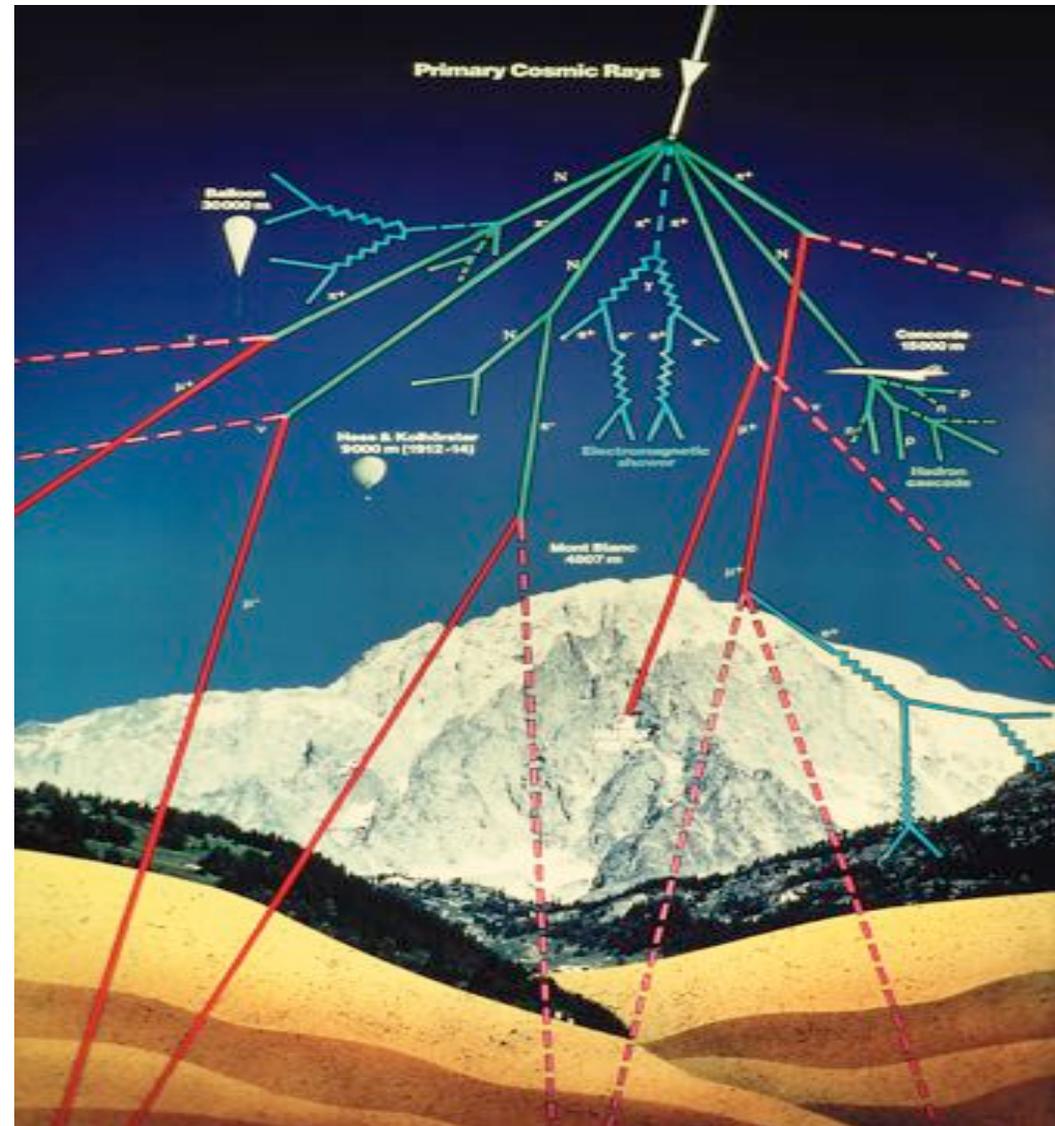
- Convergence des forces d'interaction)
- Pour obtenir au moyen d'un accélérateur l'énergie nécessaire à l'unification des forces faible, forte et électromagnétique, il faudrait un accélérateur plus grand que le système solaire



Le LHC et ses 27 km de circonférence

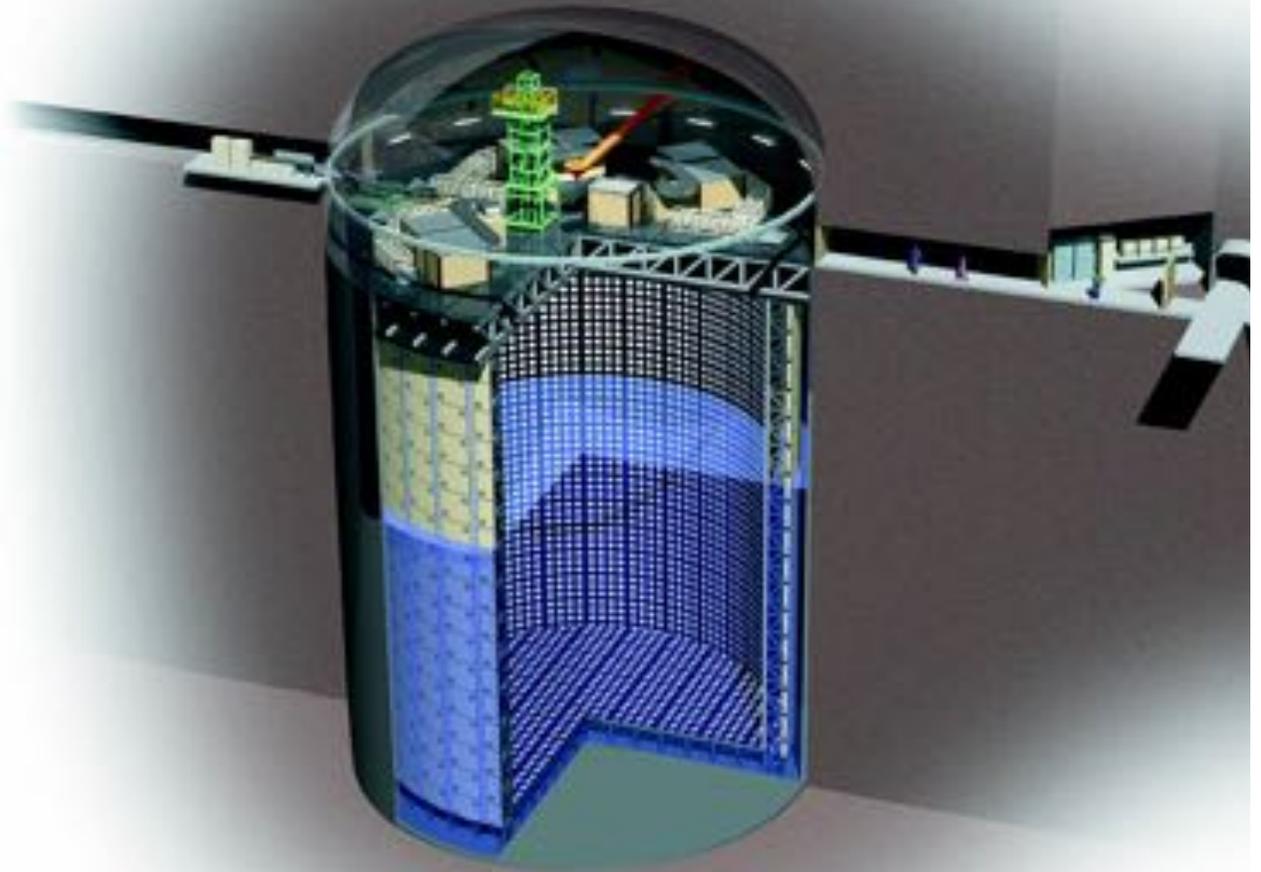
Observer la désintégration de la matière

- 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)



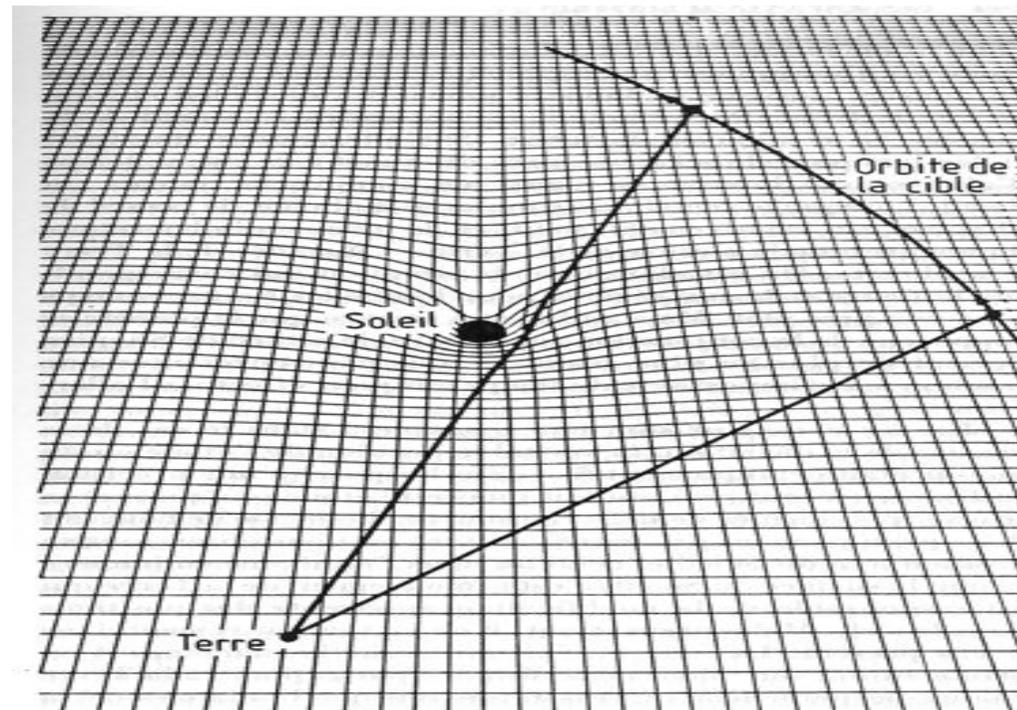
Observer la désintégration de la matière

- ...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



Gravitation et antimatière...

- Expression usuelle de 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 et antimatière...**



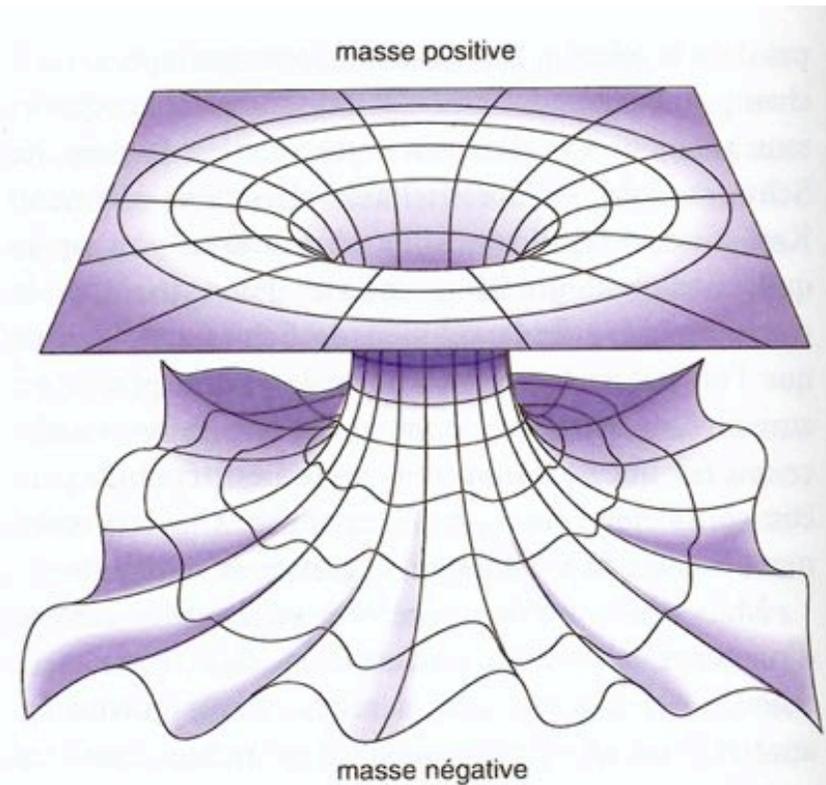
Des trous « noirs » qui ressemblent fort à des particules

- 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** gravitationnellement **répulsif** !
- Mais a-t-on déjà vu de la **gravité répulsive** ?



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 ».

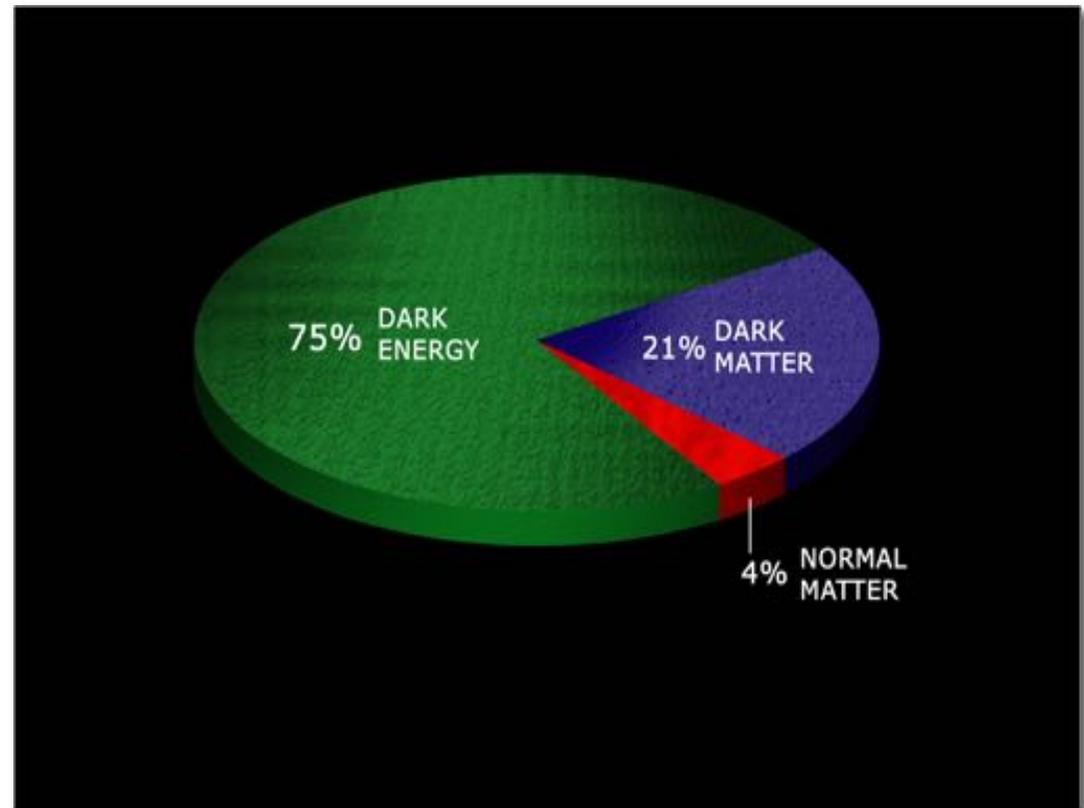
La gravité répulsive observée en 1998 !

- Dans un univers symétrique matière-antimatière, où particules et antiparticules se repoussent, l'univers apparaît gravitationnellement vide à grande distance
- Deux groupes, dirigés par Saul Perlmutter, Brian Schmidt et Adam Riess (prix Nobel 2011) ont **observé en 1998**, et confirmé par de nouvelles observations depuis, une expansion accélérée de l'univers grâce aux **observations de supernovae SN1a**
- Un univers symétrique matière-antimatière telle que défini ci-dessus apparaît comme un univers **vide à grande échelle, sans décélération**, et il ressemble beaucoup à notre univers !
- Notez qu'il y a deux univers, où les rôles de matière et d'antimatière sont échangés

"Un univers extravagant"

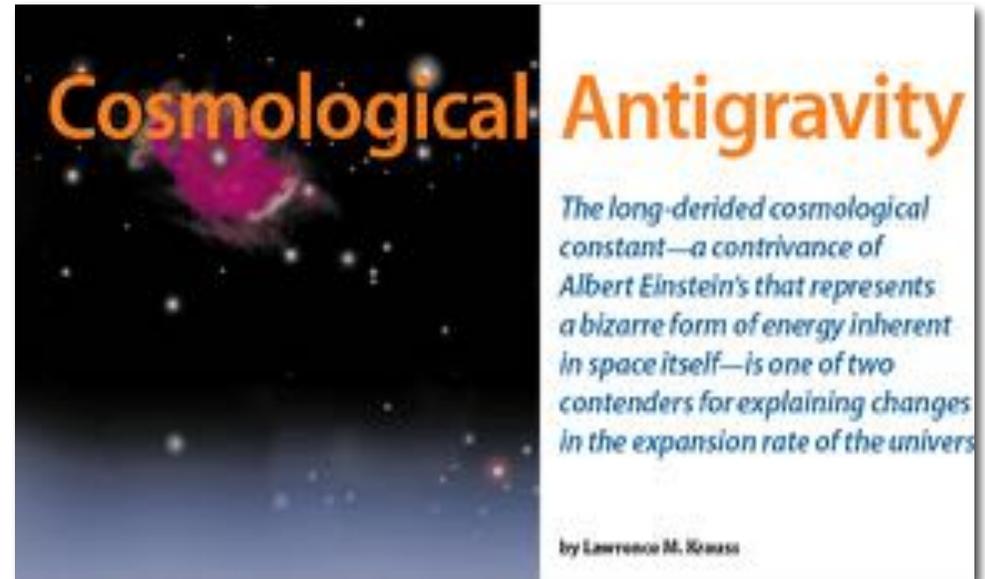
"Le modèle de concordance"

- Univers critique ou presque (au bord de l'effondrement)
- Matière ordinaire: seulement 4% du contenu énergétique de l'Univers
- Matière Noire + Matière Ordinaire: environ 25% du total
- Energie Noire (répulsive): environ 75% du total



L'énergie noire

- L'énergie noire, véritable antigravité cosmologique, est aujourd'hui l'une des principales questions scientifiques actuelles
- Des centaines de physiciens travaillent à étudier ses propriétés et à comprendre sa nature



ADAM RIESS

Adventures in Antigravity

By Michael D. Lemonick

Hard as it is for earthlings to imagine, astronomers have known for some time that the universe is expanding. They've never been able to figure out, though, whether it will balloon outward forever or slow under the combined gravity of its 100 billion galaxies, stop and fall back in on itself. Thanks in large part to Adam Riess, they're a lot closer to an answer—and it's not what they expected.

Riess was only 25 when he joined a prestigious group of scientists who set out in 1995 to measure what was expected would be a post Big Bang cosmic slowdown. The idea was to compare the expansion rate today with the rate billions of years ago by gauging the speeds of exploding stars called supernovas—Riess's grad-school specialty. But in January 1998, Riess saw something weird: the number he was getting for the slowdown kept coming out negative. The universe wasn't slowing down; it was speeding up! "This seemed to imply," he says, "that some force is acting against gravity." Crazy as antigravity sounds, the idea was originally suggested by Einstein as a kind of add-on to his General Theory of Relativity.

His calculations show that the universe seems to be expanding ever faster, suggesting the existence of the antigravity force first proposed, then abandoned, by Einstein.

112

Surprise : la gravité répulsive !

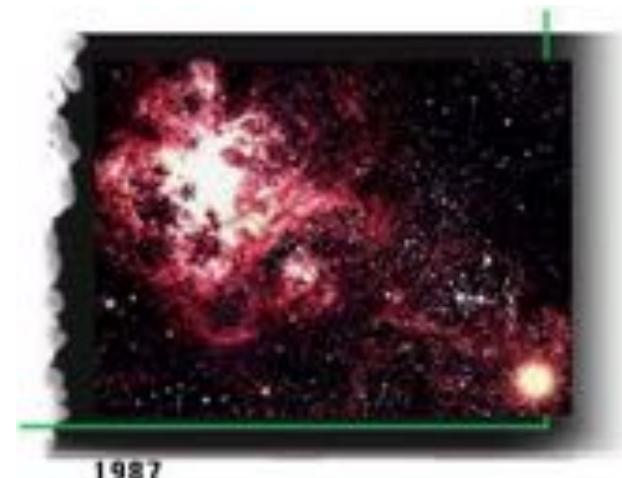
Les supernovae sont des explosions d'étoiles extrêmement violentes, visibles à plusieurs centaines de millions d'années-lumière : elles peuvent servir d'**étalon de lumière**.

En les utilisant, on a découvert en 1998 que **l'expansion de l'Univers s'accélère sous l'effet d'une gravité répulsive** dans laquelle plus des **2/3 de l'énergie de l'Univers** semblent résider.

Mais qu'est-ce que cette gravité répulsive ?



1984



1987

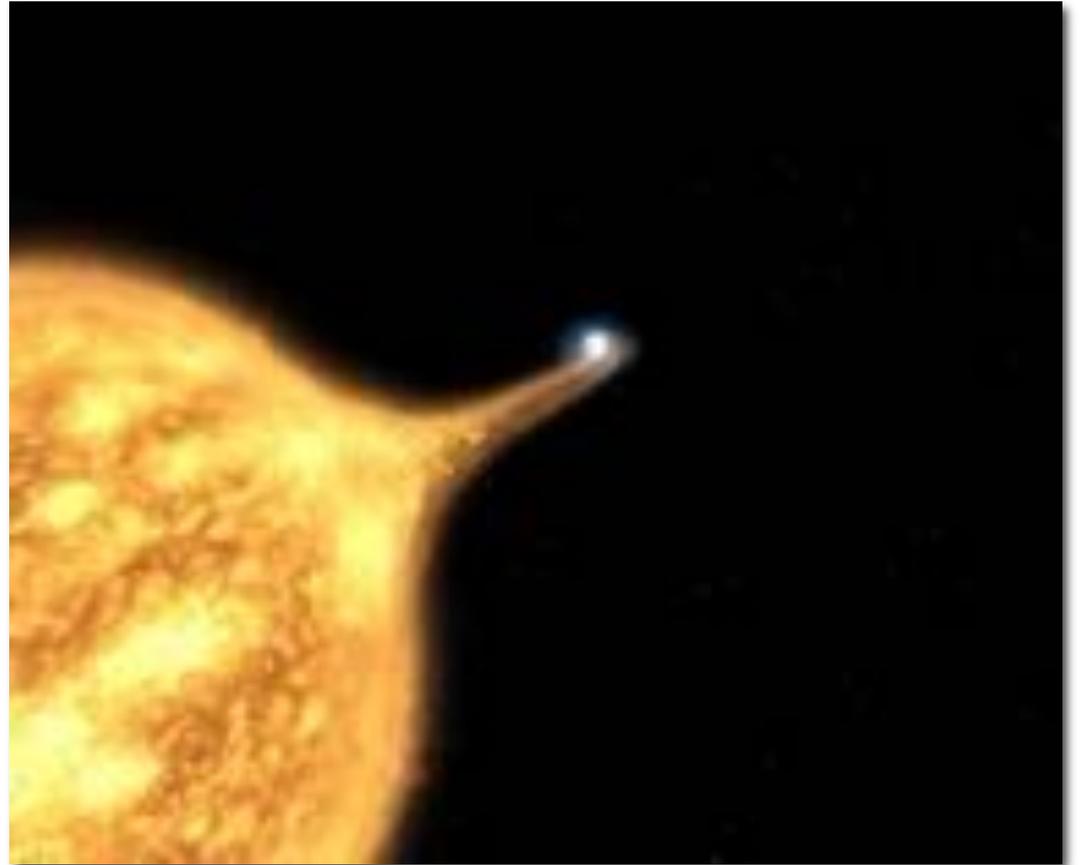
La dernière explosion proche de supernova, dans le nuage de Magellan, a été observée en 1987

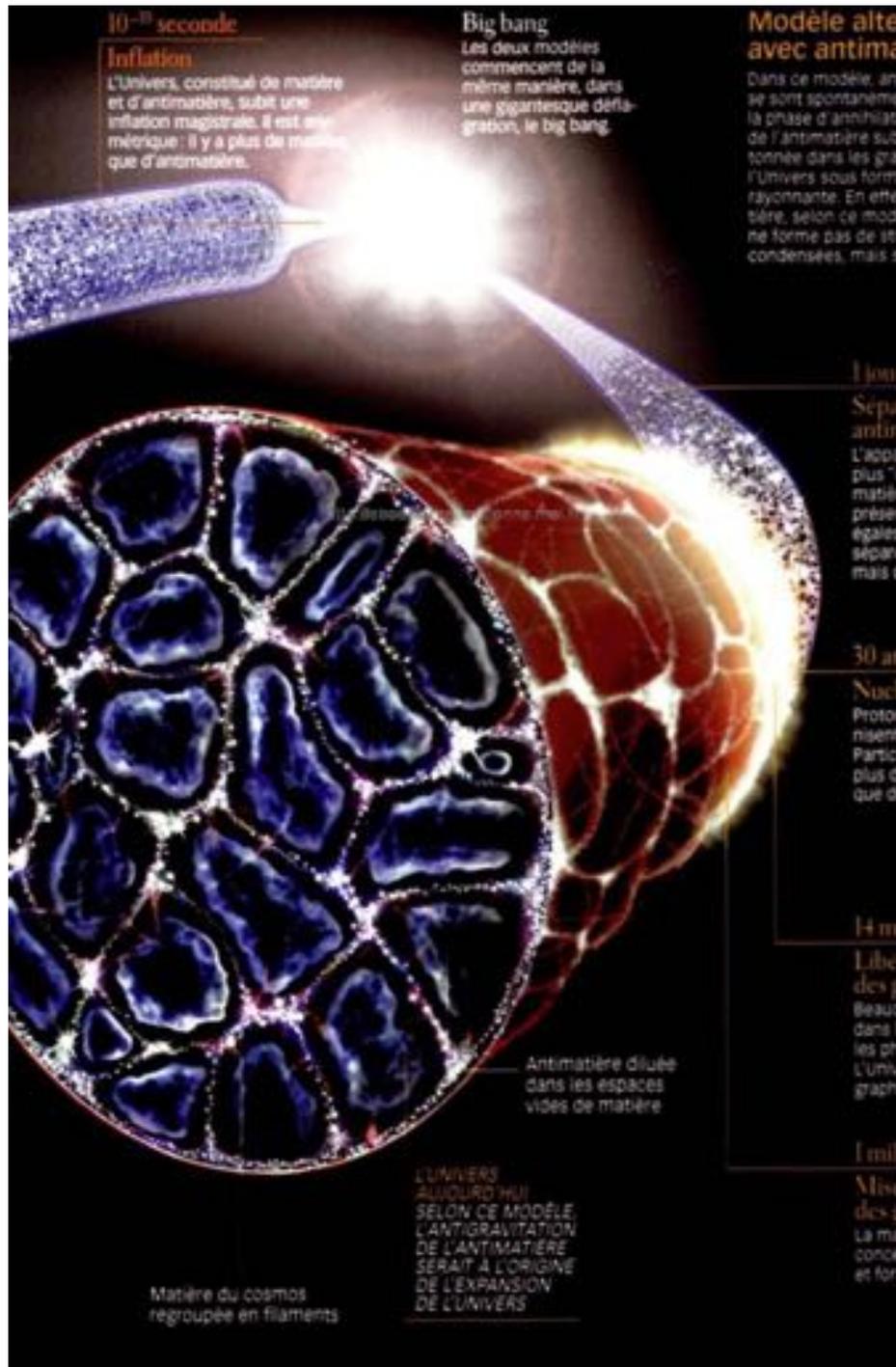
Surprise : la gravité répulsive !

Les supernovae sont des explosions d'étoiles extrêmement violentes.

Les supernovae de **type 1a** (cf. ci-contre) ont une luminosité très reproductible.

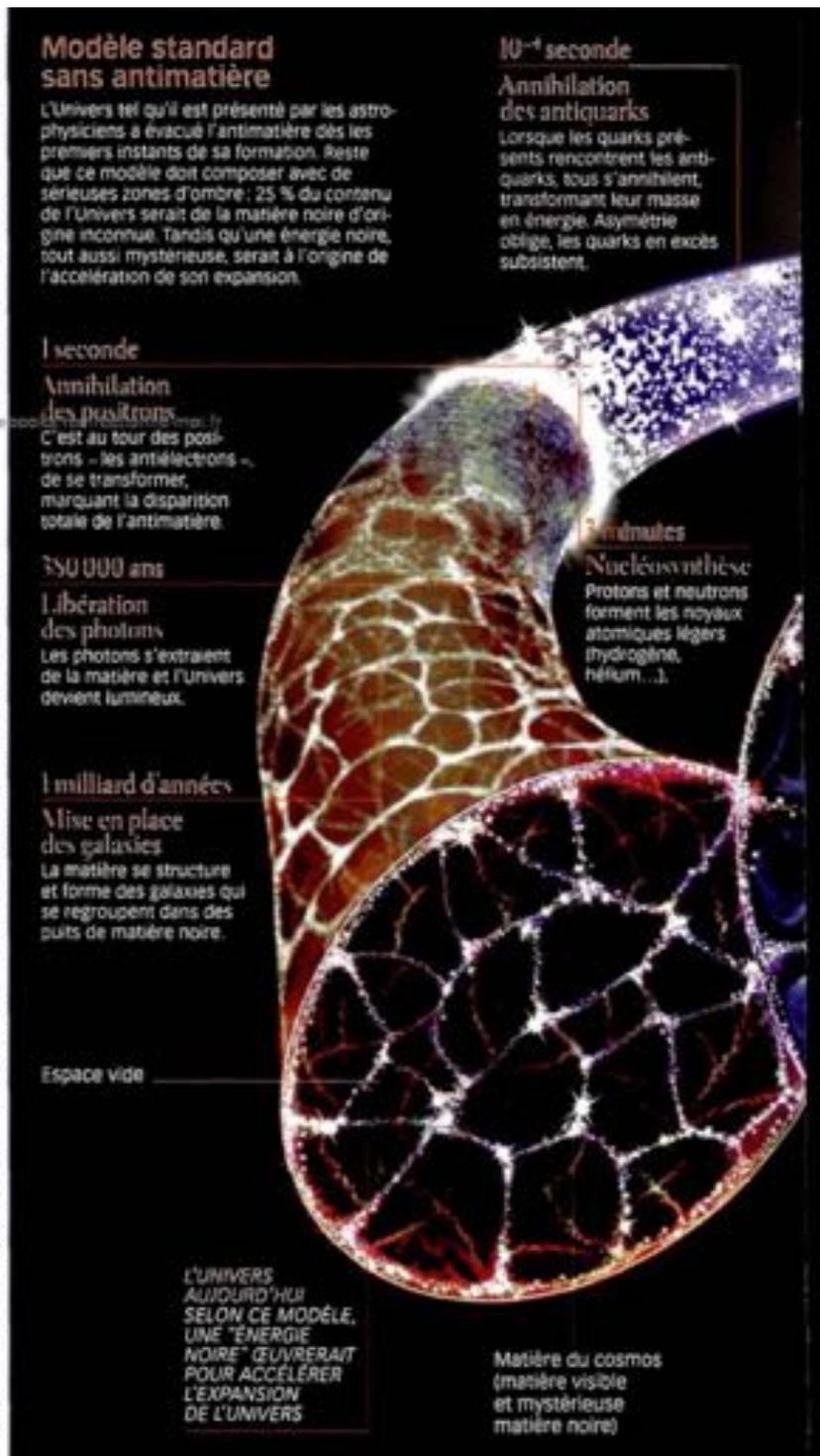
Cela permet de les utiliser comme des « **chandelles-standard** » jusqu'à des distances de plusieurs milliards d'années-lumière...





L'Univers du Modèle Standard

- 10⁻¹¹ s Les forces faible et électromagnétique se séparent
- 10⁻⁴ s Annihilation des antiquarks
- Entre l'âge de 20 s et 200 s (≈ 3 mn), les éléments nucléaires légers se forment
- 380 000 ans, l'Univers devient transparent, les photons peuvent se propager à l'infini
- 14 milliards d'années, aujourd'hui



L'Univers du modèle standard

- 10⁻¹¹ s Les forces faible et électromagnétique se séparent
- 10⁻⁴ s Annihilation des antiquarks
- Entre l'âge de 20 s et 200 s (\approx 3 mn), les éléments nucléaires légers se forment
- 380 000 ans, l'Univers devient transparent, les photons peuvent se propager à l'infini
- 14 milliards d'années, aujourd'hui

L'Univers symétrique matière-antimatière

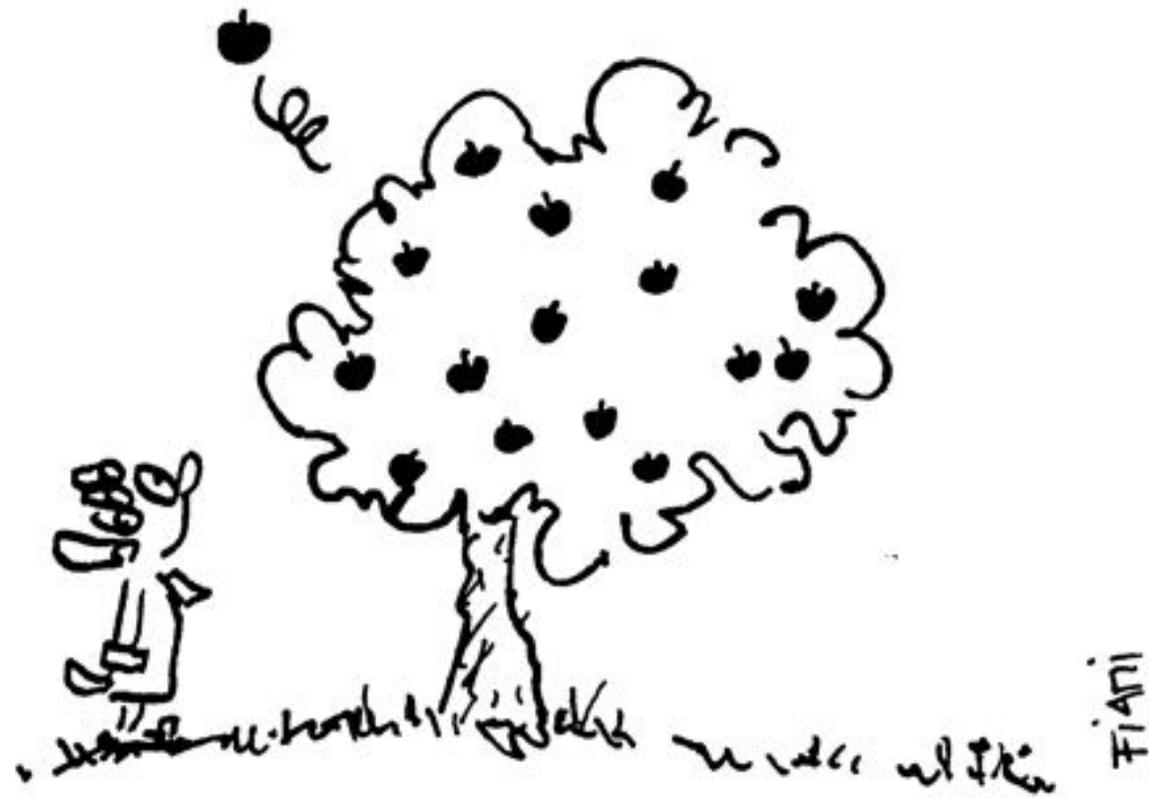
- Il apparaît vide à grande distance (autant de masses positives que négatives)
- Son taux d'expansion observé (≈ 70 km/s/Mpc) lui donne le même âge que notre univers (≈ 14 milliards années)
- Il peut fabriquer les éléments nucléaires (He, Li, D) en quantités adéquates (mais trop d'hélium-3)
- Il est extrêmement proche d'expliquer l'affaiblissement de la luminosité des supernovae
- Son "horizon" acoustique (le « son » de l'univers primordial) fournit des oscillations à environ 1 degré, comme cela est observé dans la réalité
- Il ne requiert ni matière noire, ni énergie noire...

L'Univers symétrique matière-antimatière: tensions...

- Trop d'hélium-3 produit: mais mesuré seulement dans la galaxie
- Supernovae: pour que cela marche bien avec les observations, il faut qu'on se soit trompé de quelques pourcent au plus sur la luminosité des supernovae proches
- On ne sait pas si matière et antimatière arrivent à former des domaines séparés, soit lors de la formation de la matière nucléaire (170 MeV), soit lors de la transition électrofaible (TeV = 10^{12} eV)
- Une étude complète du fond diffus cosmologique reste à effectuer
- Son primordial observé dans la structure des galaxies: qu'en est-il dans l'univers matière-antimatière ?

Mesure directe peser l'antimatière...

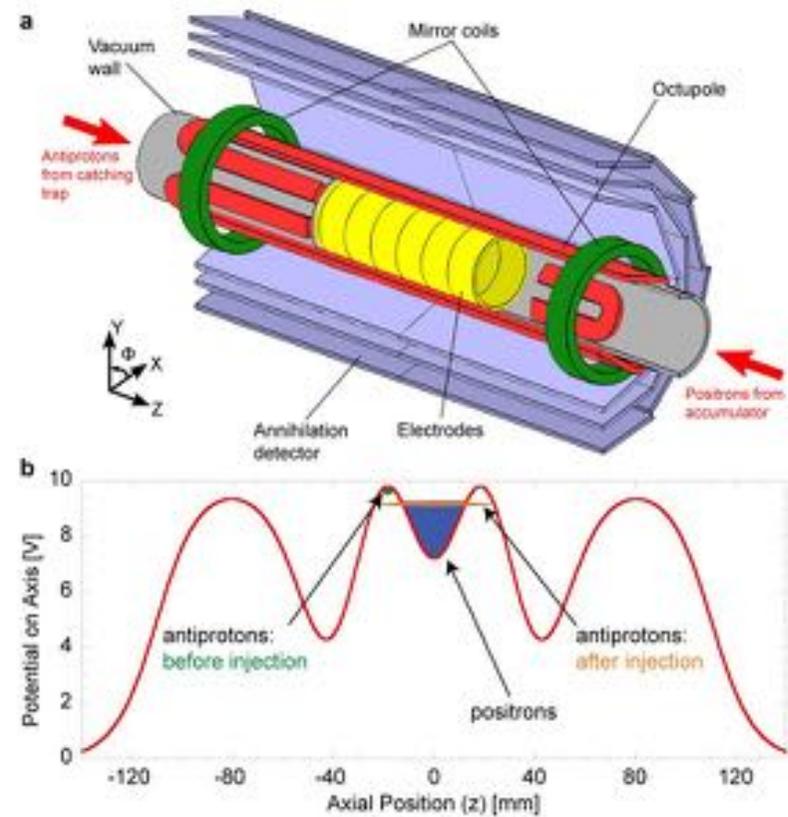
ISAAC NEWTON ET L'ANTIPOMME



Peser l'antimatière, cela semble simple...

- 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 l'antihydrogène auprès du AD au CERN
J. Walzl et T.W. Hänsch, *Gen. Relat. and Grav.* **36** (2004) 561
- Expérience Gbar au CERN

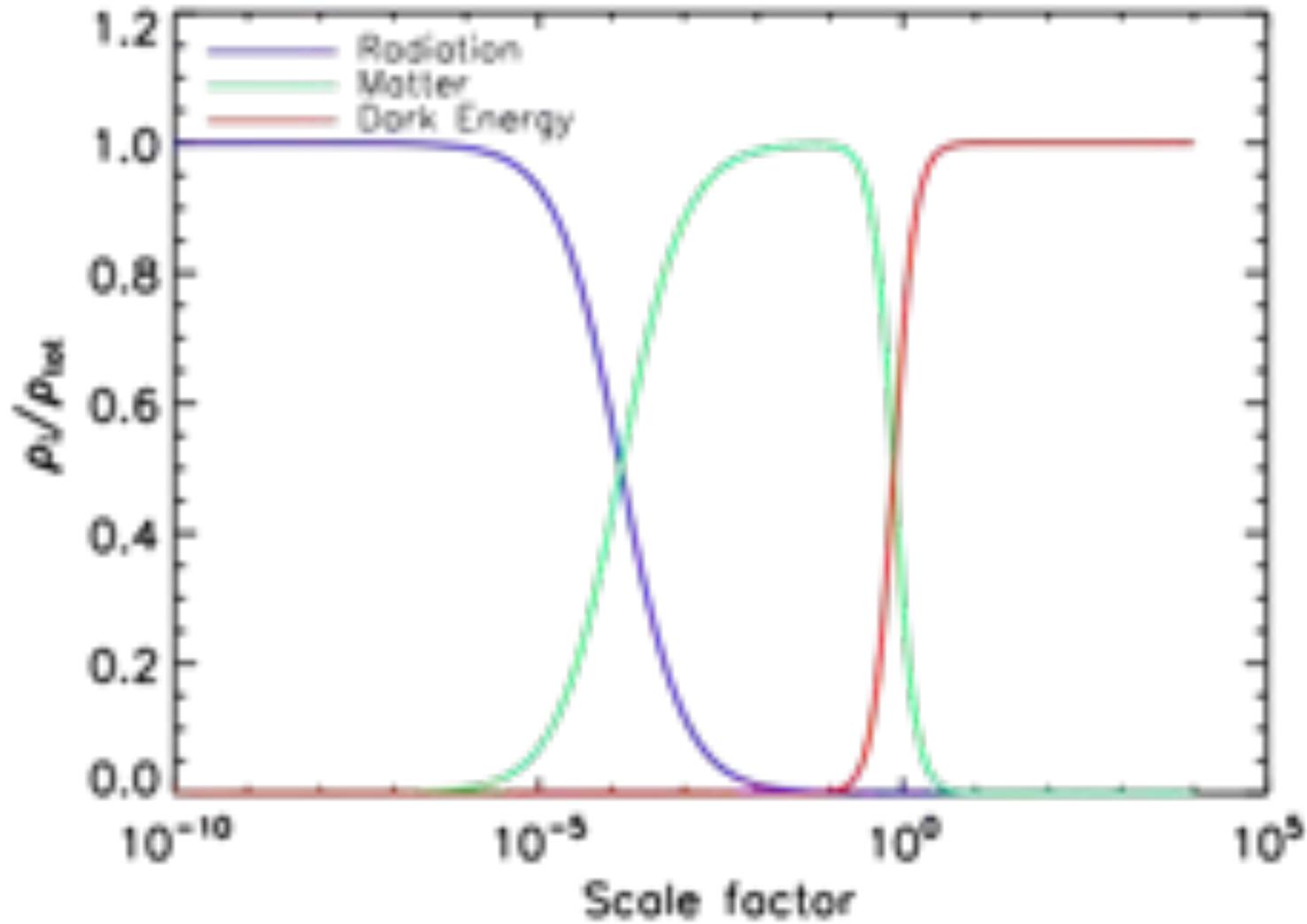
Peser l'antihydrogène (Gbar, AEGIS)



Conclusions

- L'antimatière apparaît en Physique comme la "matière qui remonte le temps", ou encore la matière d'énergie négative
- Il semble exister des voies de passage (grande unification, gravitation) entre matière et antimatière
- Pour la gravitation, un "électron" apparaît plutôt comme une paire "électron-positron", masse positive et masse négative
- Une gravité répulsive semblait jusqu'à récemment impossible
- Mais elle est maintenant observée et confirmée (prix Nobel 2011)
- Cette "antigravité" pourrait permettre une explication élégante de l'Energie Noire qui se manifeste à grande distance dans notre univers
- Explication pas encore admise, mais assez élégante et économique...
- Vérification la plus directe: peser l'antihydrogène

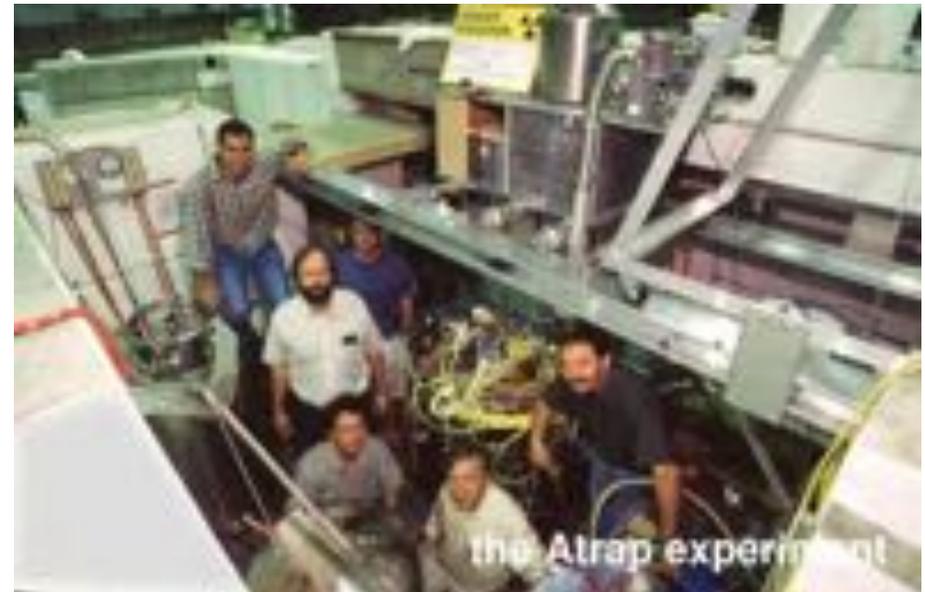
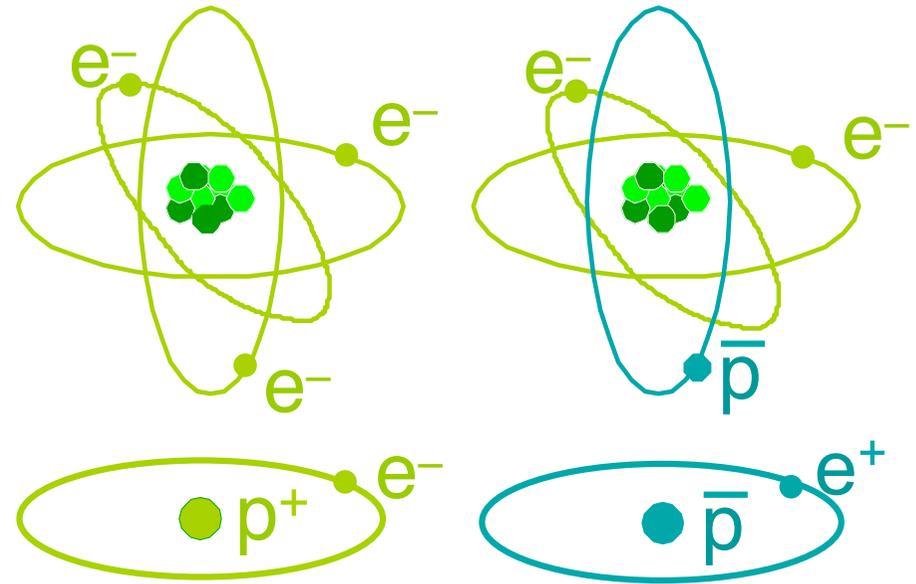
Un univers standard très peu naturel...



Fabriquer de l'antihydrogène froid

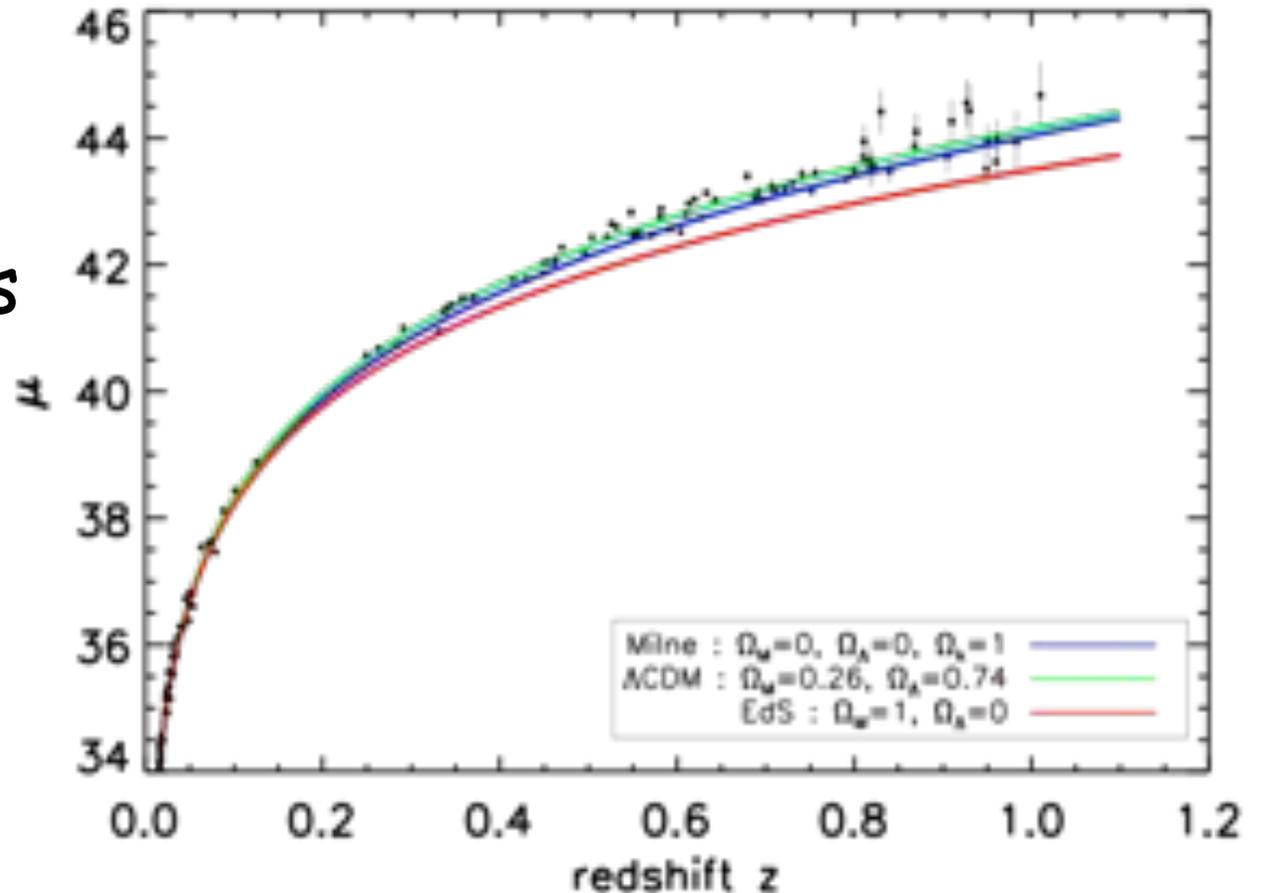
En remplaçant un électron par un antiproton : 1990...

En fabriquant des antiatomes d'hydrogène : 1995-2012...



Les supernovae SN1a

- Visibles à des distances énormes, elles sont de très bonnes « chandelles standard »



- Courbe rouge: univers Einstein-de Sitter “standard”
- Courbe verte et bleue: univers de “concordance” et univers symétrique Dirac-Milne, très semblables