

A la recherche du monde perdu: l'antimatière

ou

Invitation au voyage dans l'infiniment petit

- Introduction
- Histoire de l'univers
- Qu'est ce que la matière et l'antimatière ?
- Y-a-t-il de l'antimatière dans l'univers ?
- A quoi sert ou peut servir l'antimatière ?
- Comment fabrique-t-on de l'antimatière ?
- La nature fait-elle une différence entre matière et antimatière ?
- Est-on prêt de déceler le mystère de la matière dans l'univers ?

Nos vérités d'aujourd'hui seront peut-être nos erreurs de demain !!!

Que se soit chez nous

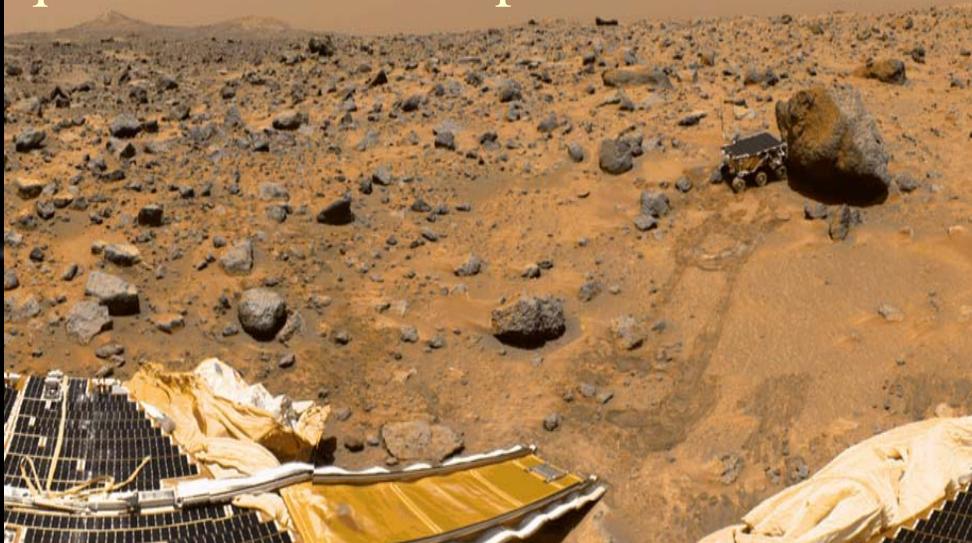


... que se soit à notre porte



Mission Appolo sur la lune

que se soit dans la proche banlieue...



Mission Pathfinder sur Mars

ou la banlieue lointaine



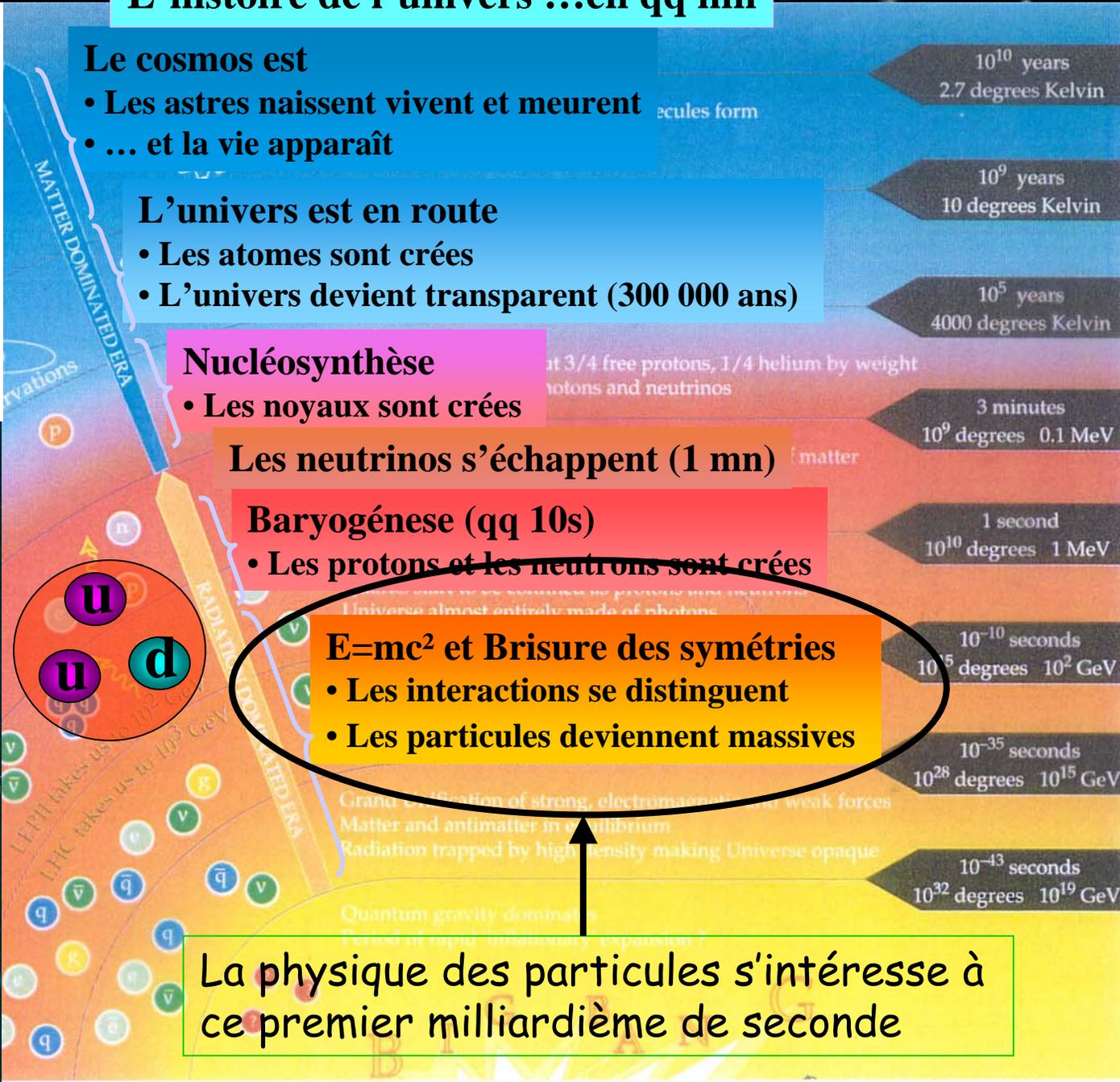
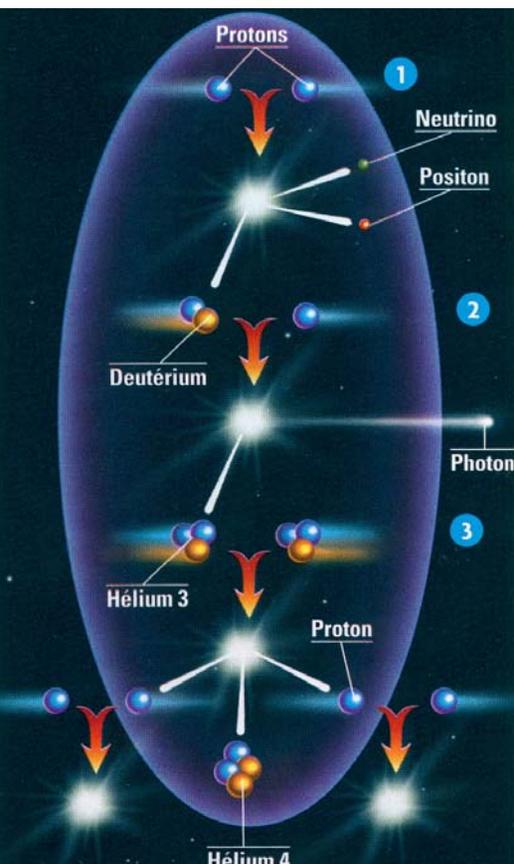
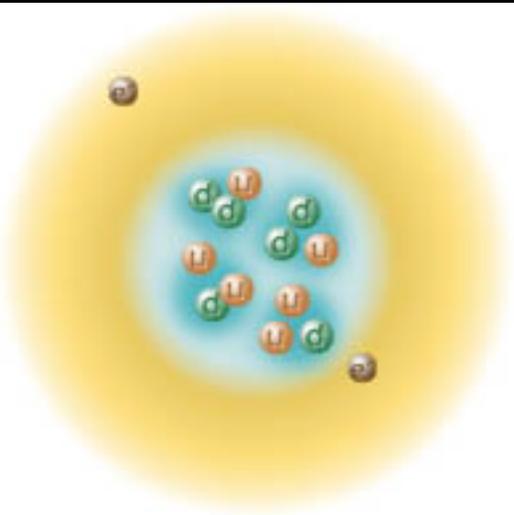
l'univers est fait de matière

The Small Magellanic Cloud

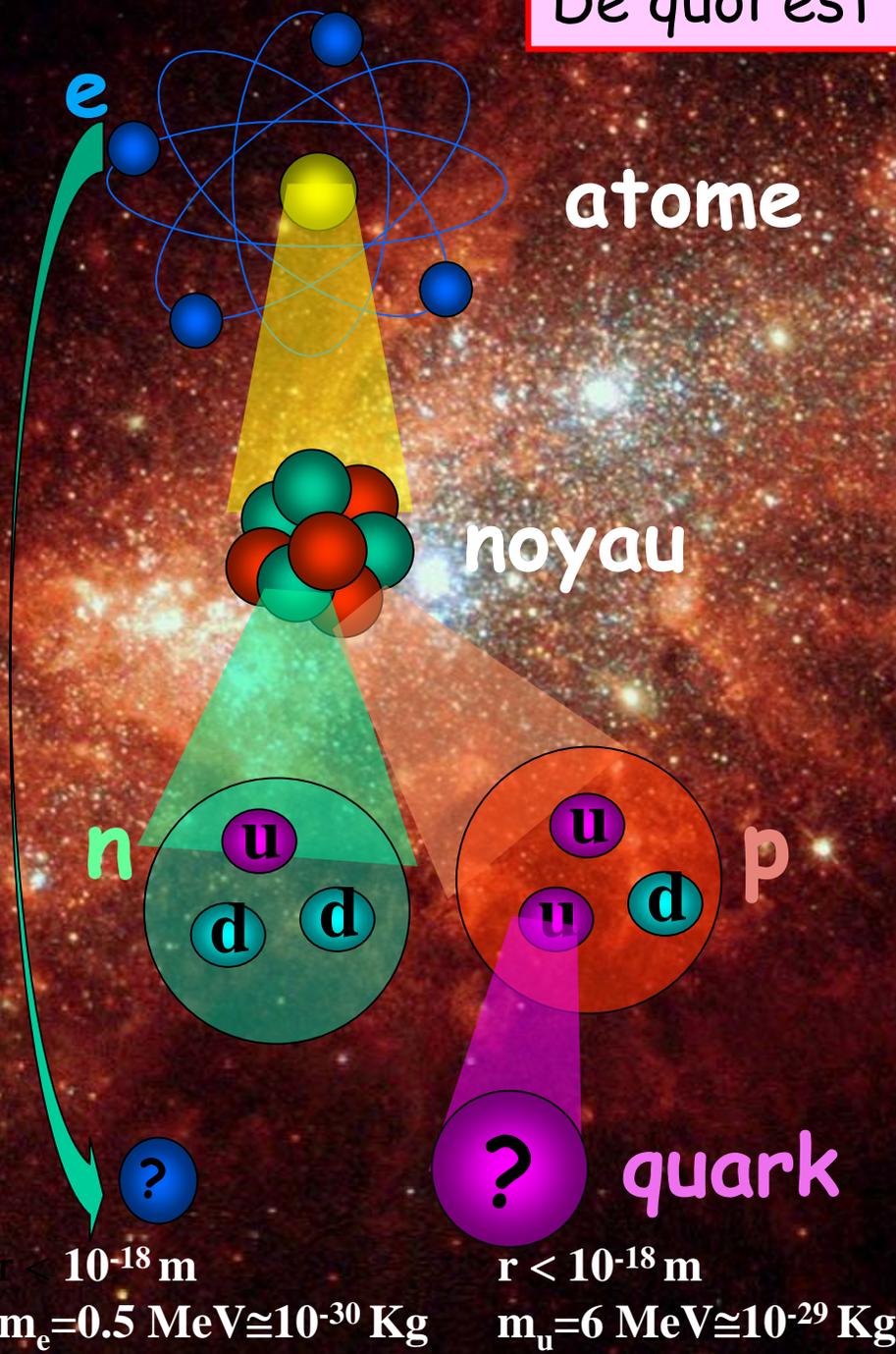
L'antimatière n'est pas
une ressource naturelle

Comment en est-on arrivé là?

L'histoire de l'univers ...en qq mn



De quoi est constituée la matière ?



atome $r \approx 10^{-10} \text{ m} = 1 \text{ angström}$

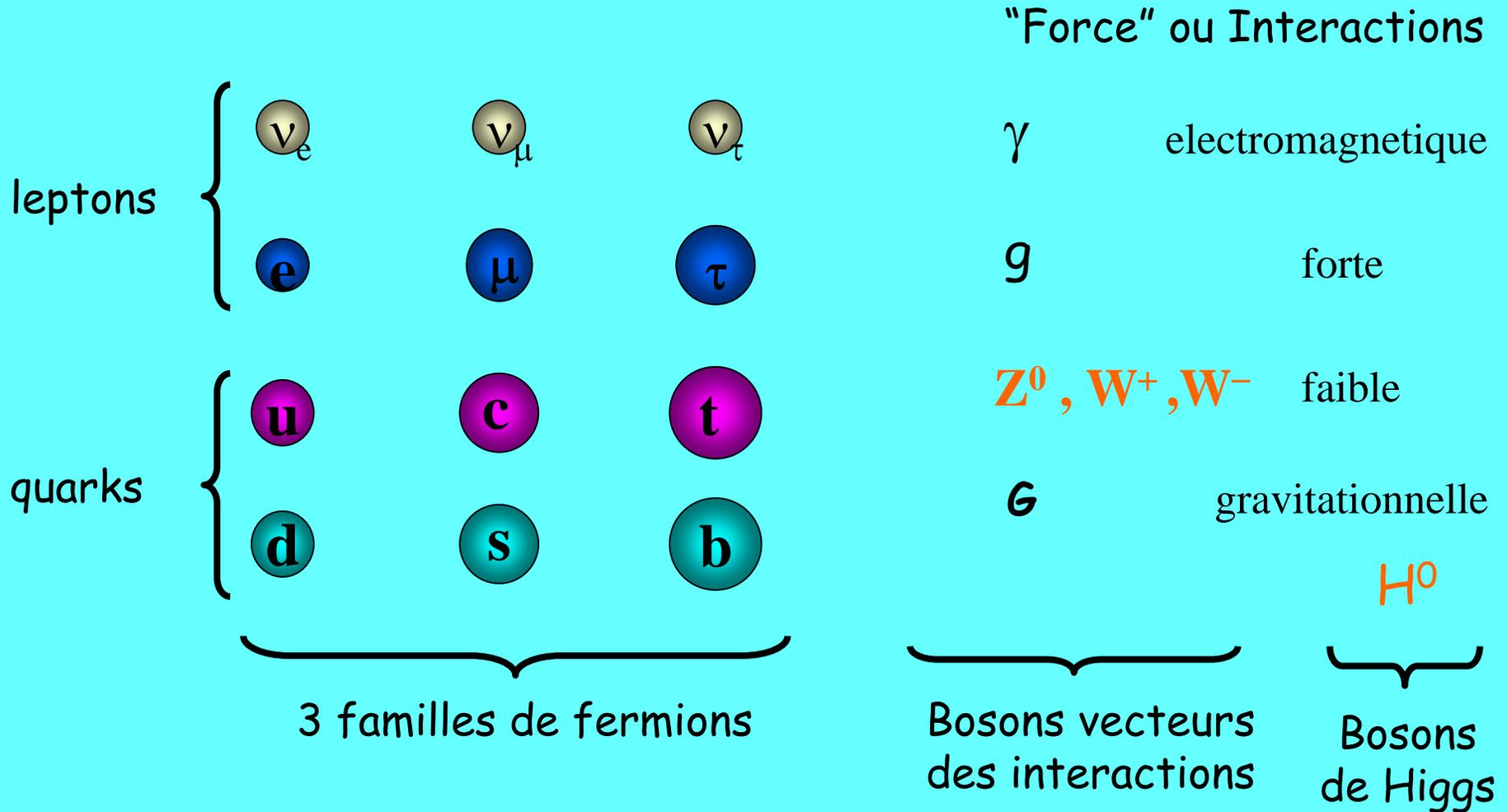
noyau $r \approx 10^{-15} - 10^{-14} \text{ m} \approx 1-10 \text{ femto m}$

$r \approx 10^{-15} \text{ m} \approx 1 \text{ femto m}$

$m_p \approx 1 \text{ GeV} \approx 2 \times 10^{-27} \text{ Kg} \approx 2000 m_e$

Seuls l'électron et les quarks u et d sont élémentaires
... la matière ordinaire est constituée de quarks et d'électrons

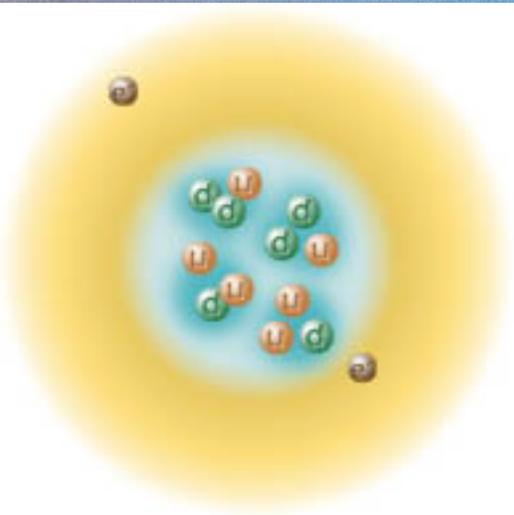
Le monde des constituants fondamentaux et de leurs interactions



... mais pourquoi y-a-t-il 3 familles se différenciant notamment par la masse de leur constituants?

... mais pourquoi des vecteurs massifs de l'interaction faibles

L'histoire de l'univers



Le cosmos est

- Les astres naissent vivent et meurent
- ... et la vie apparaît

L'univers est en route

- Les atomes sont créés
- L'univers devient transparent (300 000 ans)

Nucléosynthèse

- Les noyaux sont créés

Les neutrinos s'échappent (1 mn)

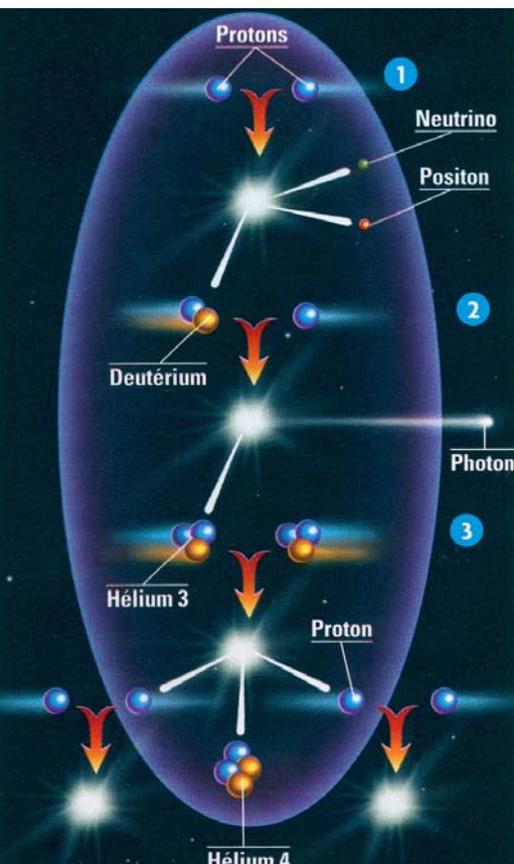
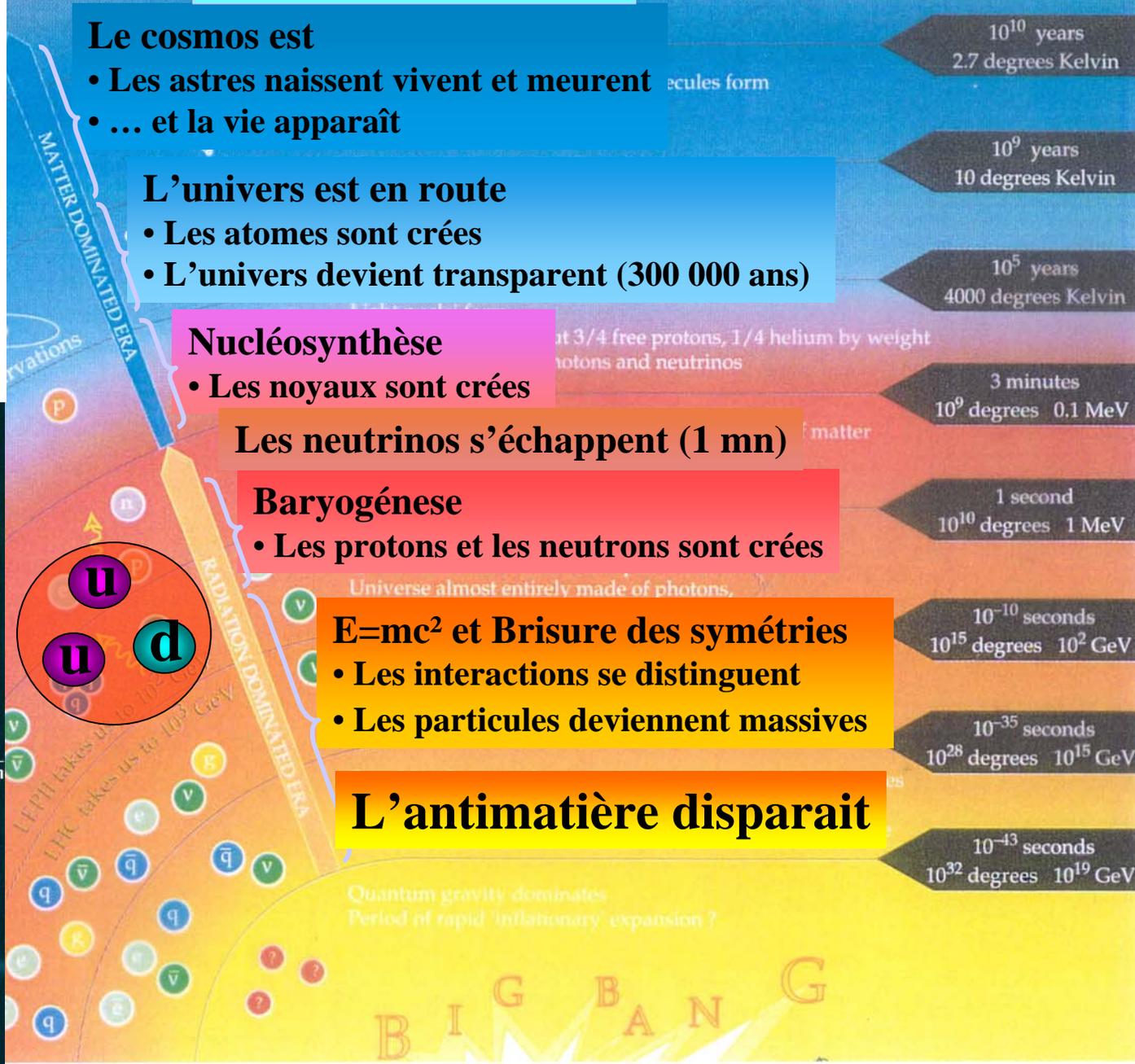
Baryogénèse

- Les protons et les neutrons sont créés

$E=mc^2$ et Brisure des symétries

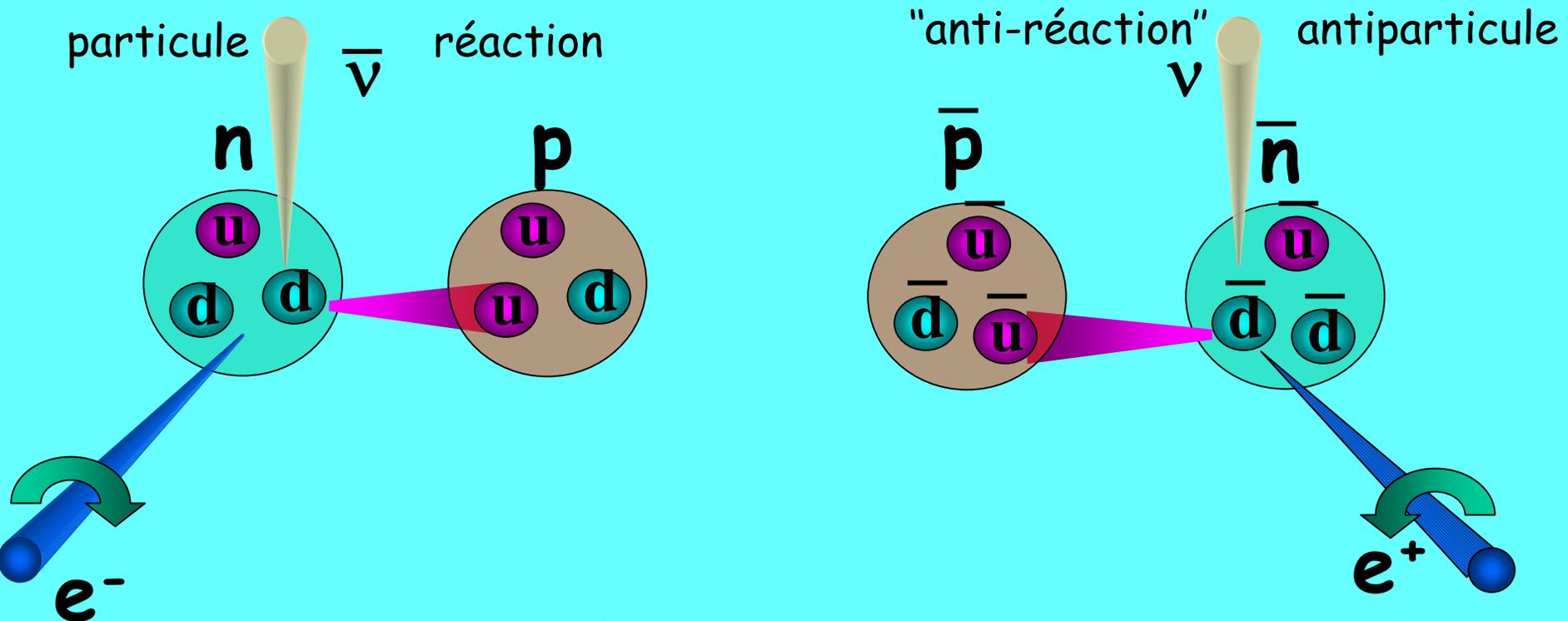
- Les interactions se distinguent
- Les particules deviennent massives

L'antimatière disparaît



Qu'appelle t-on vraiment antiparticule ?

Un objet dont la masse est égale à la masse de sa « particule-sœur »
dont la durée de vie est égale à celle de sa « particule-sœur »
mais dont toutes les propriétés quantiques sont opposées
à celle de sa « particule-sœur »



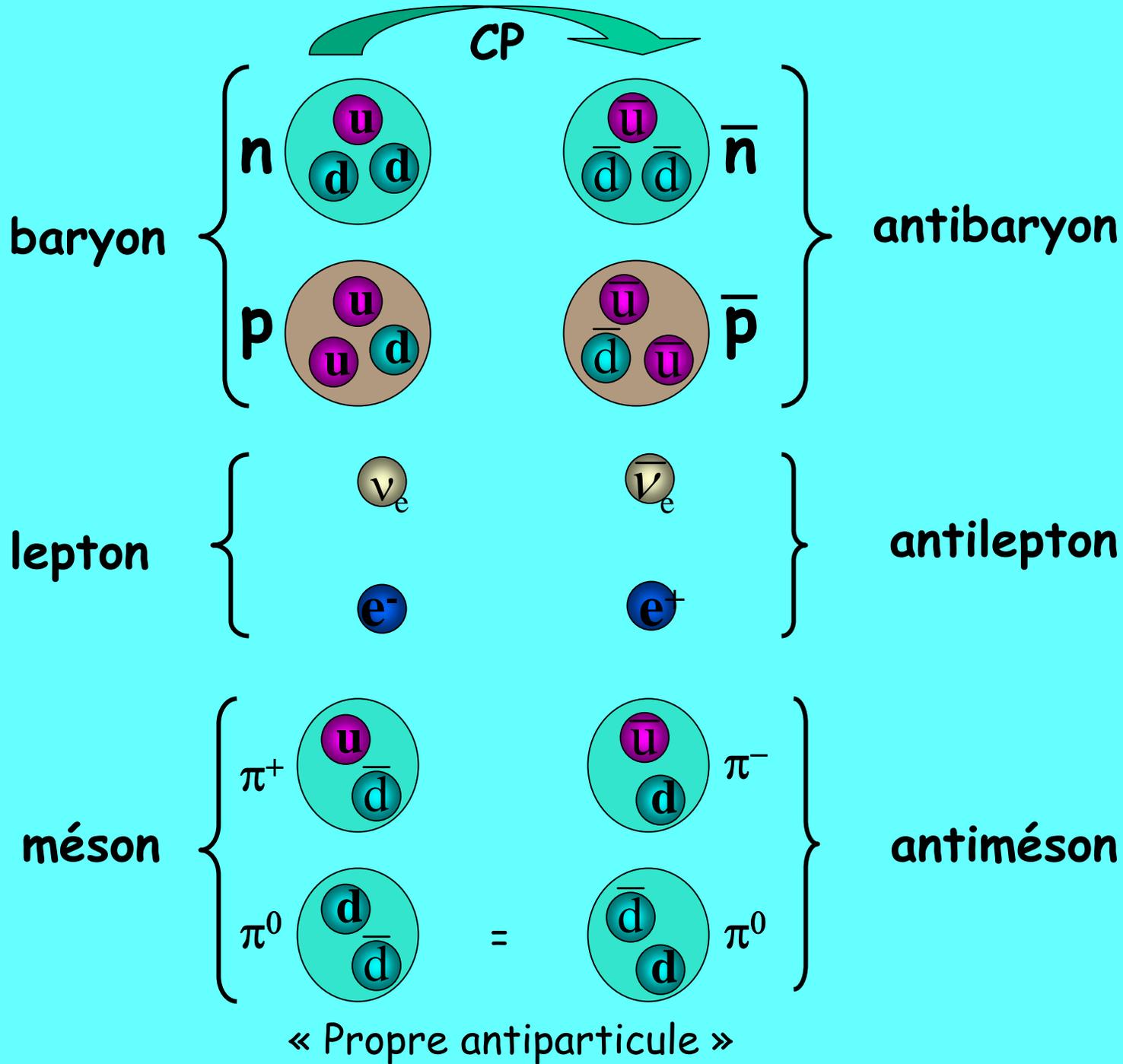
Symétrie de charge (C) (on inverse toutes les charges)

Symétrie d'espace (P) (on inverse les directions spatiales)

L'antiparticule est le symétrique C de la particule

L'«antiréaction» est le symétrique CP de la réaction

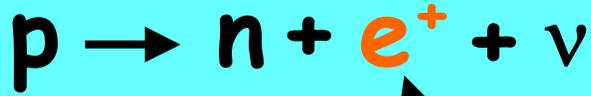
Le proton et le neutron ont un nombre baryonique



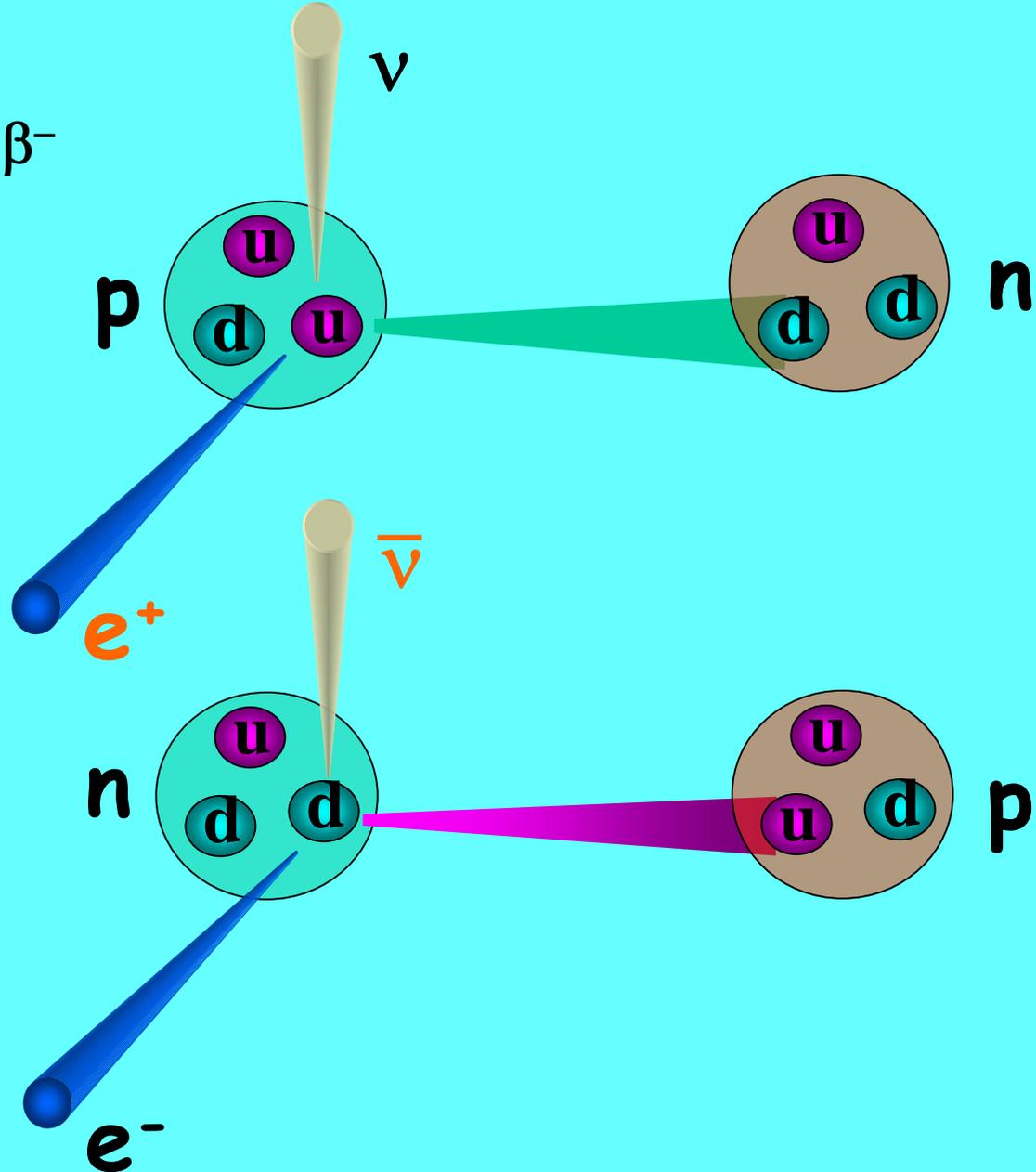
Y-a-t-il de l'antimatière dans notre monde de tous les jours?

Réponse: Oui

Ex: Radioactivité β^+ et β^-

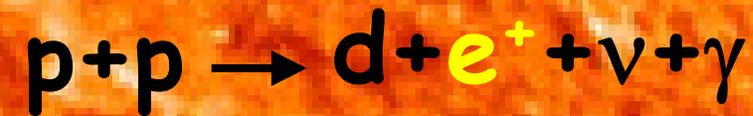


antiparticule



... a-t-elle une utilité dans notre vie ?

Ex. 1: Elle permet de faire briller le Soleil



La vie n'existerait pas sans l'antimatière

... a-t-elle une utilité dans notre vie ? (suite)

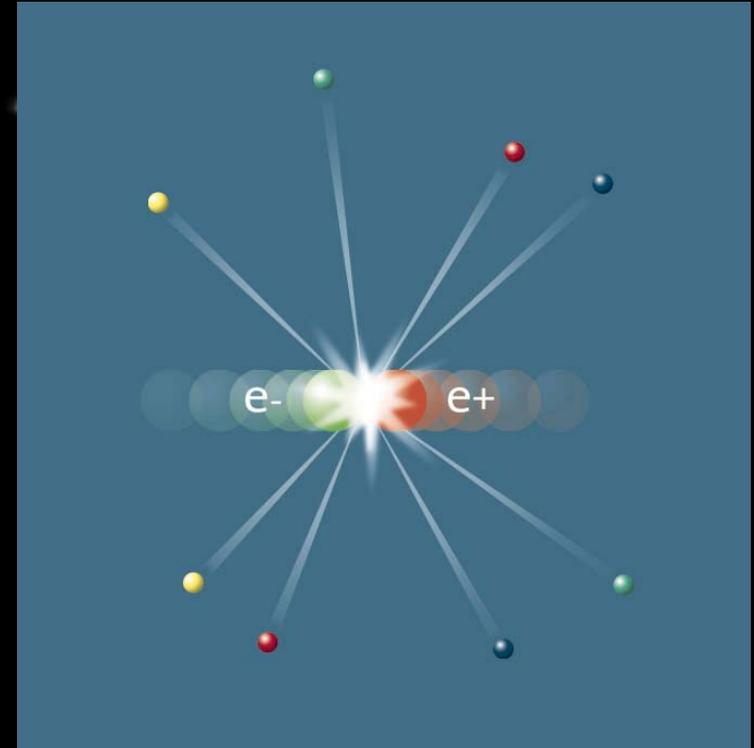
Ex. 2: Elle permet de nous chauffer...



Cette réaction joue un rôle important dans les centrales nucléaires car elle alimente la divergence du réacteur avec un temps de réaction suffisamment long pour permettre la contrôler.

Que se passe-t-il quand l'antimatière rencontre la matière?

Elles s'annihilent en produisant une énergie égale à leur énergie sous forme d'autres particules et de photons.



Libération importante d'énergie
 $E=mc^2$

... mais ENORMEMENT d'énergie !!!

mecanisme	Energie	Energie par Kg (anti)matière
Chimique	10^{-7} MeV/nucléon	
Fission	$\sim 0,7$ MeV/nucléon	~ 20 Kt TNT (Hiroshima)
Fusion	~ 3 MeV/nucléon	~ 100 Kt TNT
Annihilation $p\bar{p}$	~ 940 MeV/nucléon	~ 20 Mt TNT

Heureusement il n'a pas d'antimatière autour de nous
... et cela demande énormément d'énergie pour en produire

... Il faut au minimum autant d'énergie pour produire 1g que
ce que ce gramme fournirait d'énergie (en pratique: > million fois)

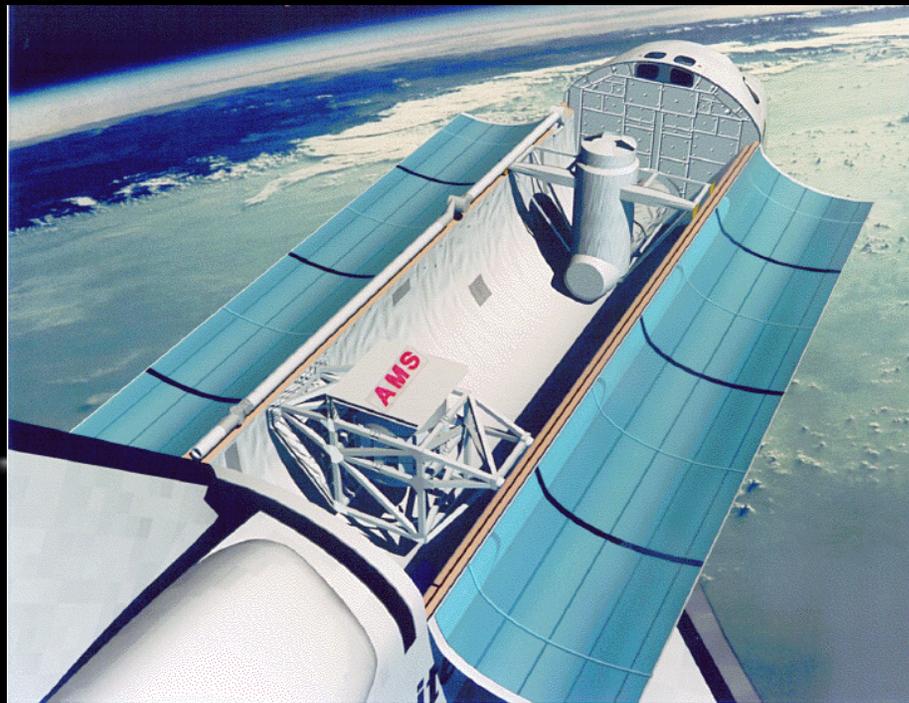
En principe, une tonne d'antimatière propulserait votre vaisseau spatial à des vitesses pharamineuses au delà de notre galaxie !



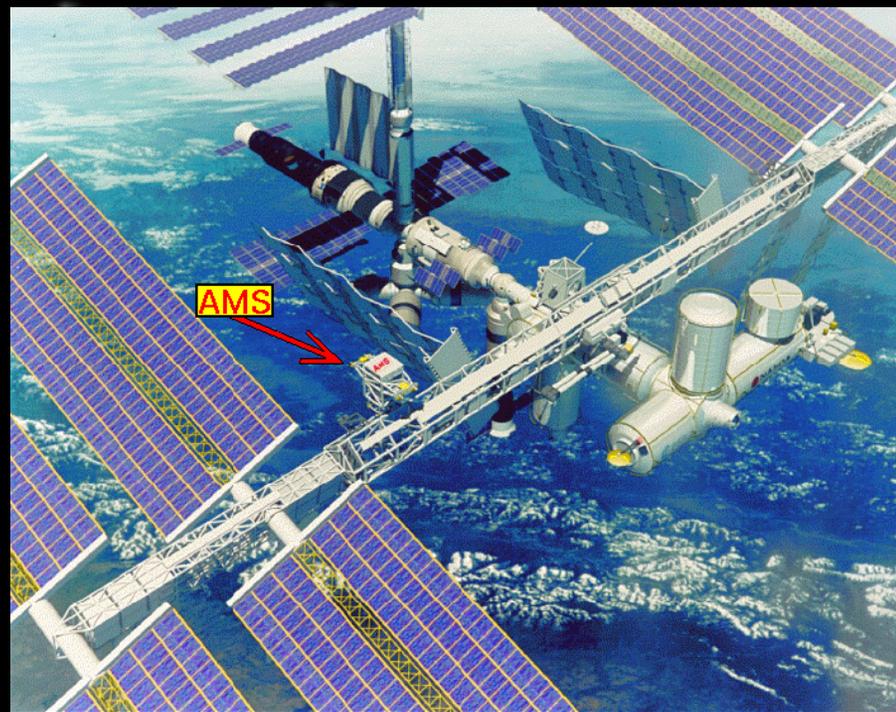
Malheureusement, il est totalement invraisemblable de produire des quantités significatives d'antimatière

Aucune observation d'antiHelium dans l'espace

Vers 2007...



$\bar{\text{He}}/\text{He} < 10^{-6}$

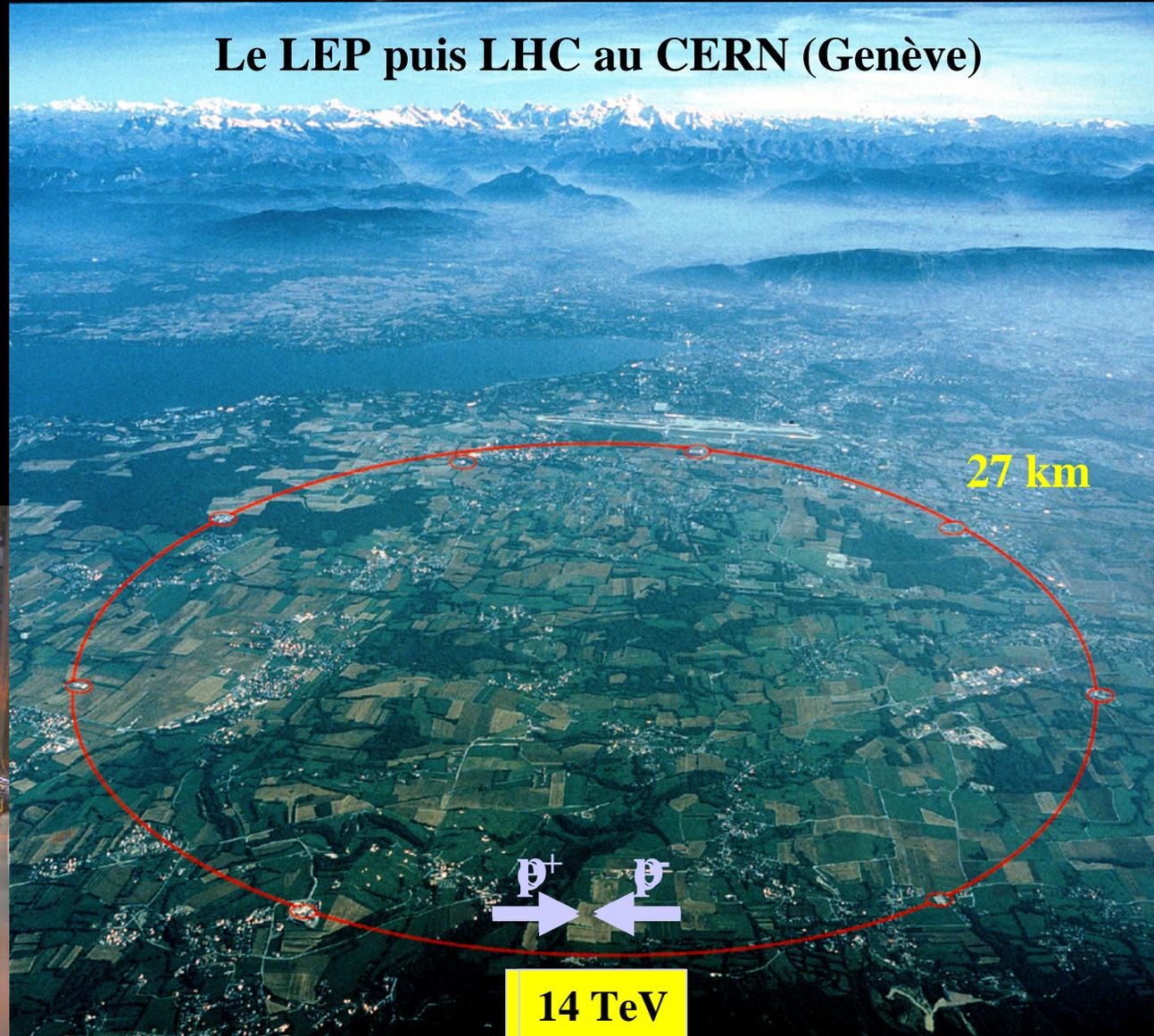


...Installation d'un nouveau détecteur sur la Station Spatiale Internationale

Que se passe-t-il quand l'antimatière rencontre la matière?

Les accélérateurs

Le LEP puis LHC au CERN (Genève)



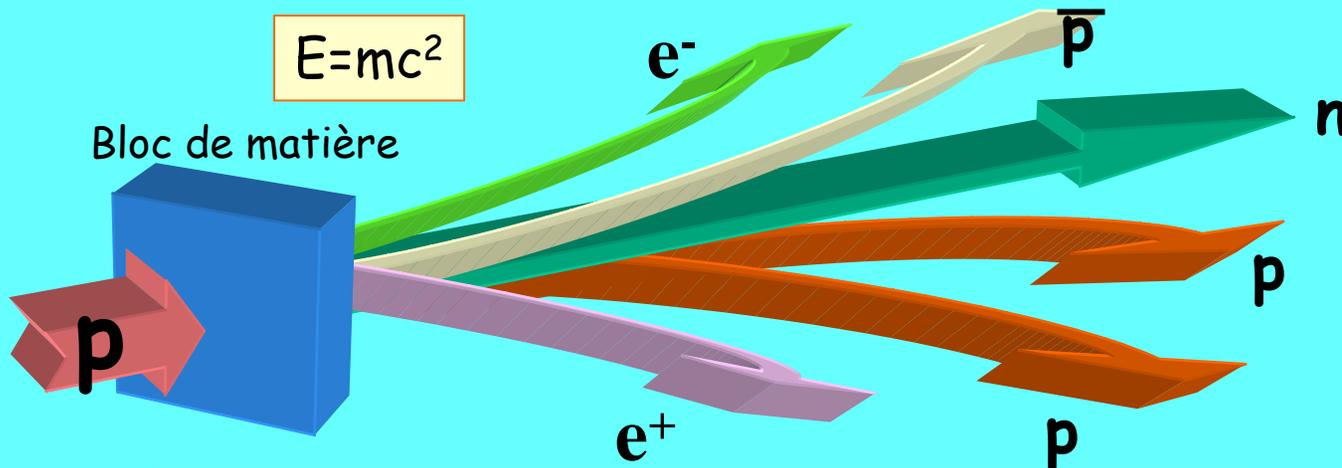
27 km

p^+ p^-

14 TeV

...mais l'antimatière n'est pas une ressource naturelle
c.à.d, dans notre univers, il faut la fabriquer

Comment produit-on de l'antimatière



1 fois sur 1 million
une paire $p\bar{p}$ et
1 fois sur 100
une paire e^+e^- sont
créées

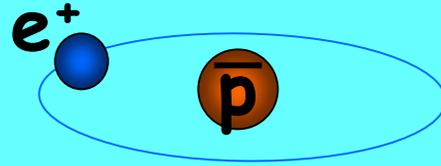
Création de paires particule-antiparticules

Séparation, focalisation et confinement magnétique
permettent le stockage dans un anneau de stockage

On peut ainsi garder jusqu'à 10^{14} e^+ ou 10^{13} \bar{p} pendant des heures !

Pour former des atomes d'antimatière, c'est une autre histoire !!!

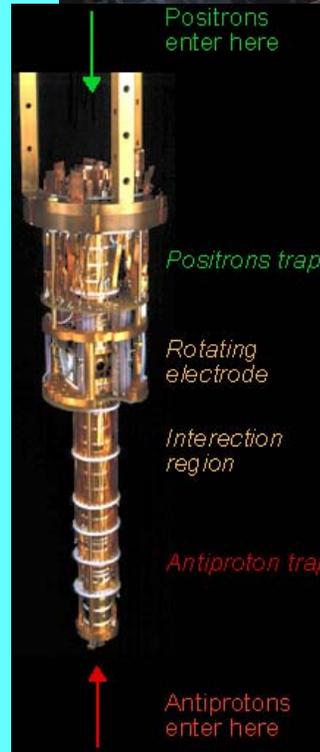
Pour former un atome d'antihydrogène



Il faut :

- Ralentir suffisamment les antiprotons pour les capturer grâce à une combinaison de champs électriques et magnétiques
- Refroidir encore les antiprotons en les mettant dans un bain d'électron
- Stocker des positons venant de désintégration β^+
- Mettre ensemble antiproton et positon et attendre la capture du positon par l'antiproton

On peut ainsi former plusieurs millions d'atomes d'antihydrogène ...



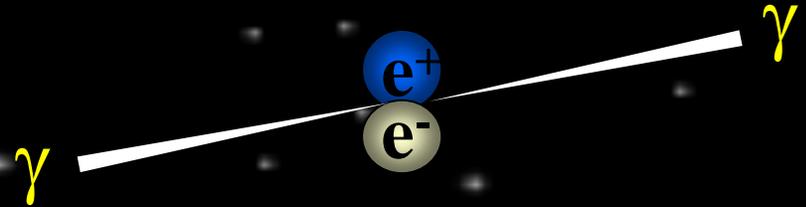
... et étudier leurs propriétés



Y-a-t-il un moyen plus simple d'obtenir des antiparticules?

Oui: en utilisant la radioactivité naturelle ($p \Rightarrow n e^+ \nu$)

Si le positon est au repos, il rencontrera un électron et l'énergie produite (2γ) sera égale à la masse totale : $E=mc^2$



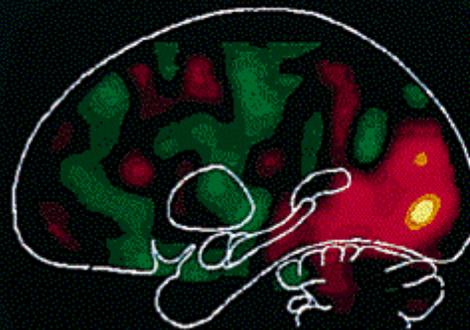
Que peut-on faire avec ces annihilations?

1) Chercher de l'antimatière dans l'univers

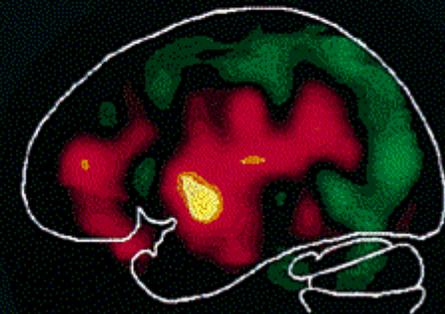
Aucune observation d'annihilation e^+e^- sous forme de photon de 0.511 MeV venant du cosmos

2) Faire de l'imagerie biomédicale

Imagerie médicale par tomographie par émission de positron



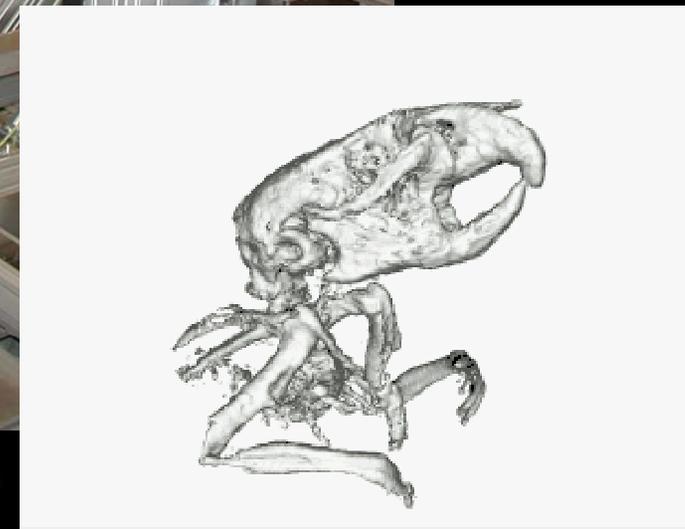
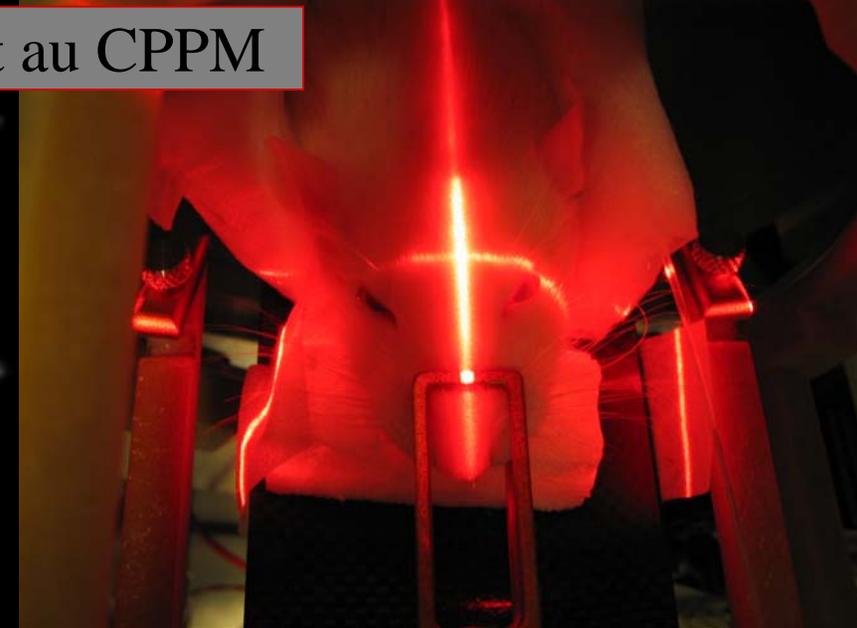
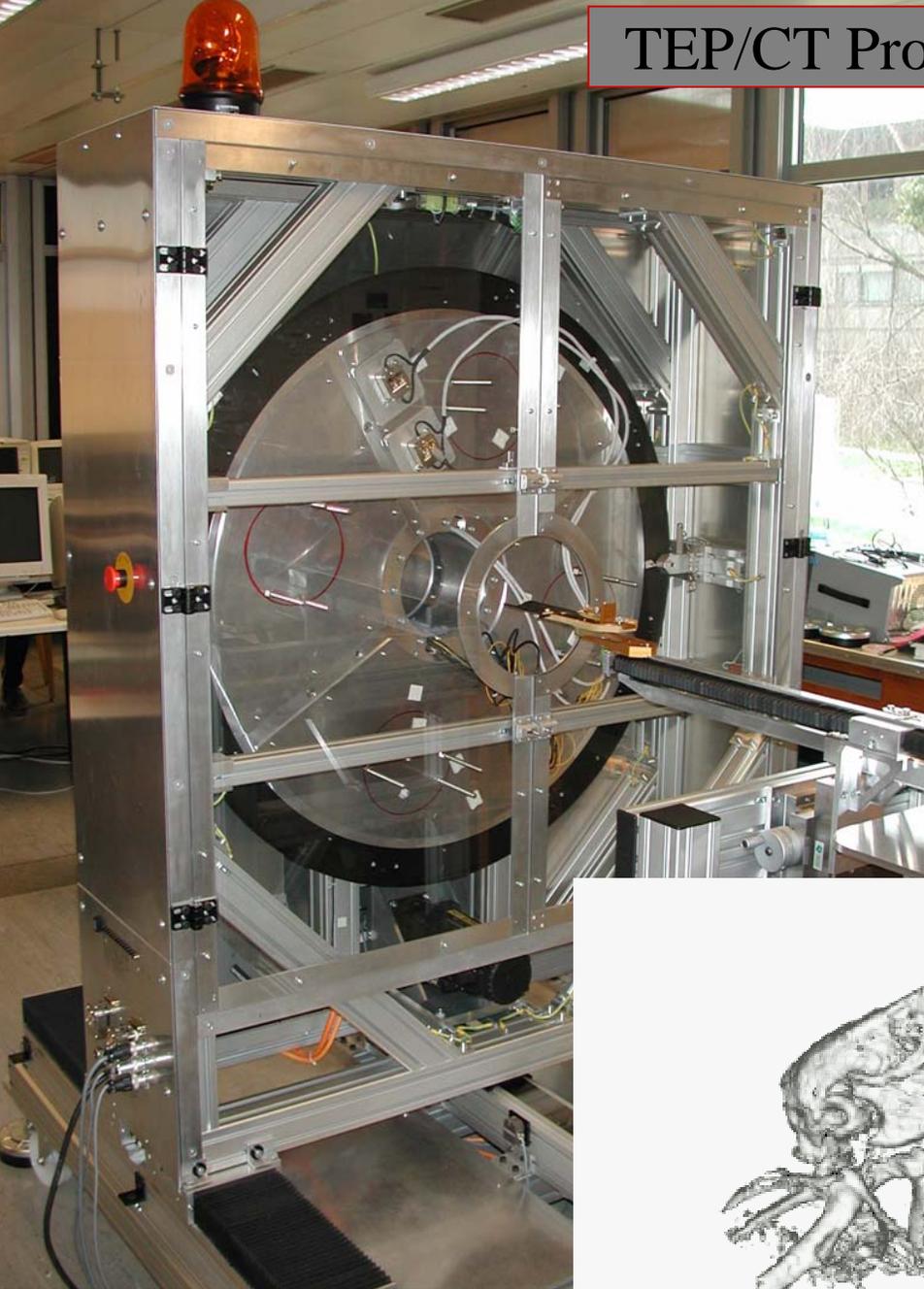
SEEING WORDS



HEARING WORDS



TEP/CT Project au CPPM



Activité dans les glandes de Harder

Il ne semble pas y avoir d'antimatière dans l'univers ; est-ce étonnant ?

Oui car à l'origine $M = \bar{M}$ si l'hypothèse du Big Bang est exacte (et toutes les observations semblent confirmer cette hypothèse).

$$N_B / N_\gamma \approx 10^{-10}$$

L'univers semble essentiellement constitué de photon « fossile », reliquat du Big Bang. Est possible de perdre \bar{M} en chemin ?

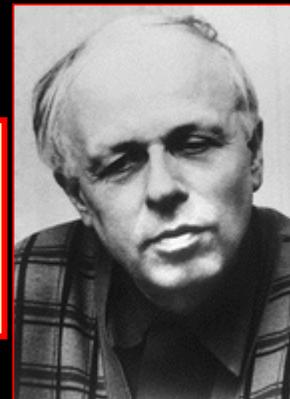
Soit la gravité a séparé la matière et l'antimatière, ou bien « certaines conditions doivent être remplies » A. Sakharov (1967)

Il faut :

La violation du nombre baryonique

La violation de la symétrie CP

Il faut un univers en déséquilibre thermodynamique



Existe-t-il des interactions différenciant matière et antimatière ?

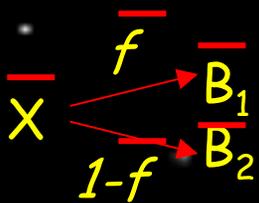
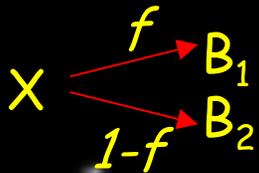
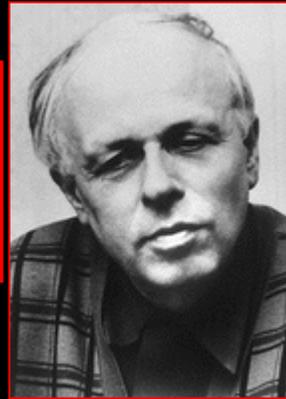
Il ne semble pas y avoir d'antimatière dans l'univers ; est-ce étonnant?

Il faut :

La violation du nombre baryonique

La violation de la symétrie CP

Il faut un univers en déséquilibre thermodynamique



$$[f \times B_1 + (1-f) \times B_2] + [\bar{f} \times \bar{B}_1 + (1-\bar{f}) \times \bar{B}_2] = 0$$

Mais les antiparticules ont tous les nombres quantiques opposés

$$B_1 = -\bar{B}_1$$
$$B_2 = -\bar{B}_2$$



$$(f - \bar{f}) \times (B_1 - B_2) = 0$$

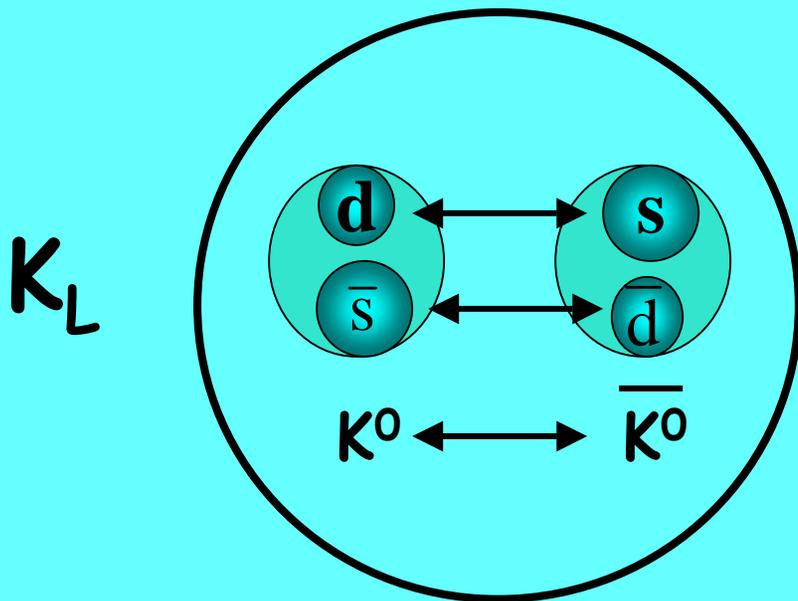
Existe-t-il des interactions différenciant matière et antimatière ?



Oscillation matière-antimatière

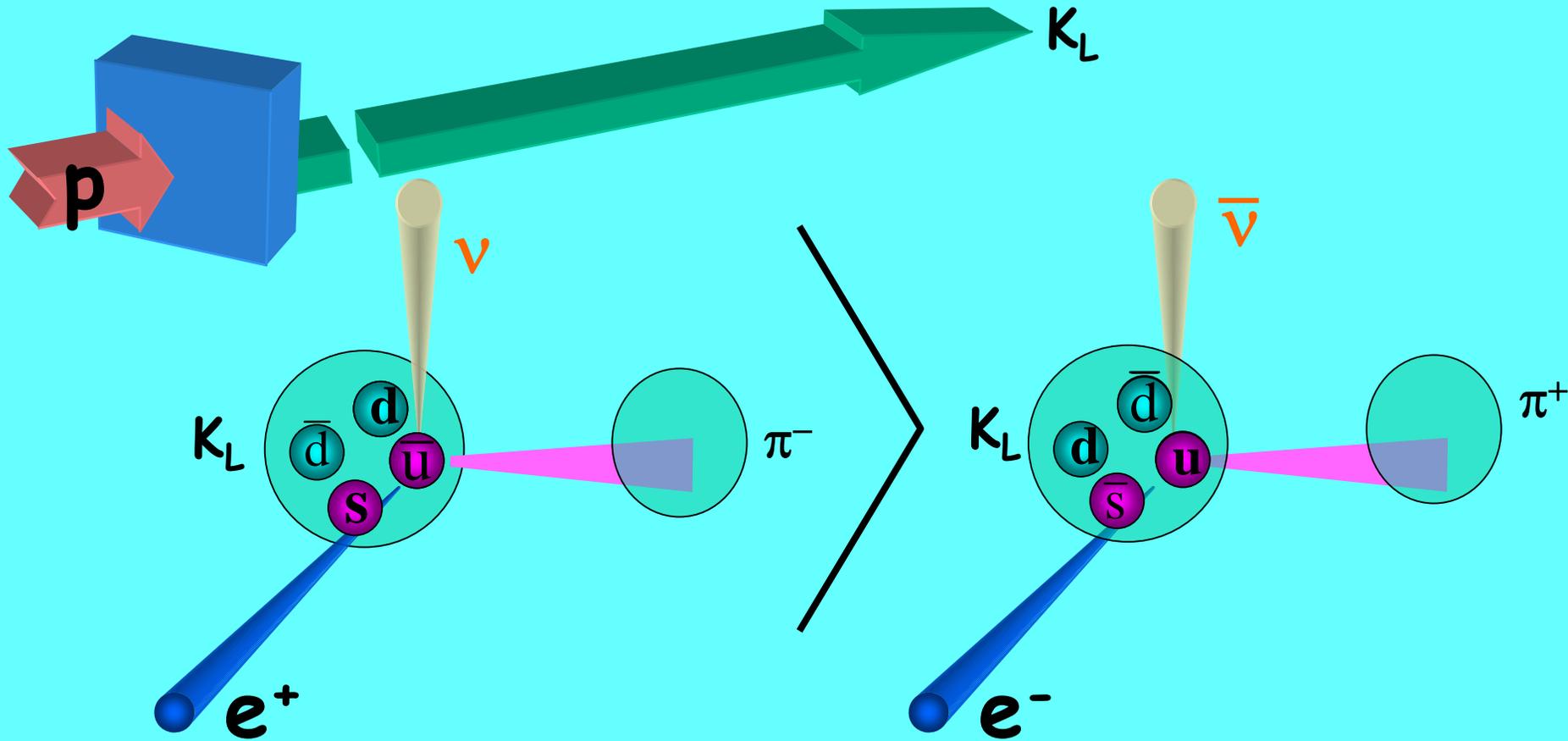
Le K_L avait été découvert au début les années 50
... et on trouvait son comportement « étrange »

Cette particule neutre de durée de vie « longue »
se comporte, au cours du temps,
parfois comme une particule et
parfois comme son antiparticule



elle est un mélange
« particule-antiparticule »

En 1964 on découvre que la nature fait une toute petite distinction entre matière et antimatière (la nature ne respecte pas la symétrie CP)



L'interaction faible viole la symétrie CP

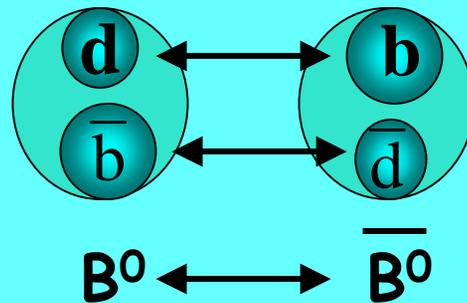
Si le signe des « e » en excès est opposé au signe de la charge des noyaux alors nous avons un monde opposé au notre !!!

... en 1973, 2 théoriciens japonais (Kobayashi et Maskawa) montrent que l'interaction faible peut être à l'origine de la violation de CP

... mais avec 2 familles, il est mathématiquement impossible de produire ce phénomène : la théorie est trop contrainte

Il faut au moins 3 familles

Depuis peu, la violation de CP est observée avec d'autres particules.



$$M_B \approx 5 \times M_{\text{proton}}$$

... et si la nature avait eu besoin de créer 3 familles pour que l'on puisse exister !?

Est ce la fin de l 'histoire ?

Tous les ingrédients sont là expliquer la disparition de l'antimatière !!!

Mais malheureusement, cette explication n'est pas la bonne pour expliquer quantitativement:

$$N_B / N_\gamma \approx 10^{-10}$$

Il doit exister une autre force et/ou d'autres constituants élémentaires se manifestant à plus haute énergie et ayant des propriétés similaires à l'interaction faible

Rendez-vous et réponse dans ~ 3 ans avec les résultats du LHC

En attendant ...

<http://voyage.in2p3.fr/>

<http://public.web.cern.ch/Public/Content/Chapters/Spotlight/SpotlightAandD-fr.html>

<http://livefromcern.web.cern.ch/livefromcern/antimatter/index.html>

Quelques événements/dates importantes

1896 : découverte de la radio-activité de l'uranium par Becquerel.

1897 : découverte de l'électron par Thomson.

1905 : naissance de la relativité restreinte par Einstein.

1915 : naissance de la relativité générale d'Einstein.

1929-30: Theorie décrivant l'électron relativiste et prediction de l'antielectron par Dirac

1930 : hypothèse du neutrino par Pauli.

1932 : découverte du neutron par Chadwick.

1932 : Découverte de l'anti-électron dans le rayonnement cosmique par Anderson.

1933 : baptême du neutrino et théorie de l'interaction faible de Fermi.

1934 : découverte de la radio-activité artificielle par Irène et Frédéric Joliot-Curie.

1937 : découverte du muon.

1947 : découverte des premières particules étranges.

1955 : découverte de l'anti-proton par Chamberlain.

1956 : découverte de l'anti-neutron par Chamberlain.

1956 : preuve expérimentale de l'existence du neutrino par Reines et Cowan.

1965 : découverte de l'anti-deutérium (antiproton+antineutron)

1967 : introduction du mécanisme de Higgs dans la théorie électrofaible par Weinberg et Salam.

1970 : découverte de l'anti-³He(2 antiprotons+antineutron) et anti-tritium(antiprotons+2 antineutron)

1973 : découverte de l'interaction faible par courant neutre.

1974 : découverte du quark c et du lepton tau.

1975 : preuve expérimentale de l'existence des quarks.

1977 : découverte du quark b.

1983 : découverte des W⁺, W⁻ et Z⁰.

1994 : découverte du quark t.

1996 : réalisation d'anti-atome d'hydrogène.

1998 : découverte d'une masse non-nulle de neutrino ?

Epilogue

Le coté obscur de la force



... mais la majeure partie de ce qui constitue l'univers nous échappe



La voie lactee

