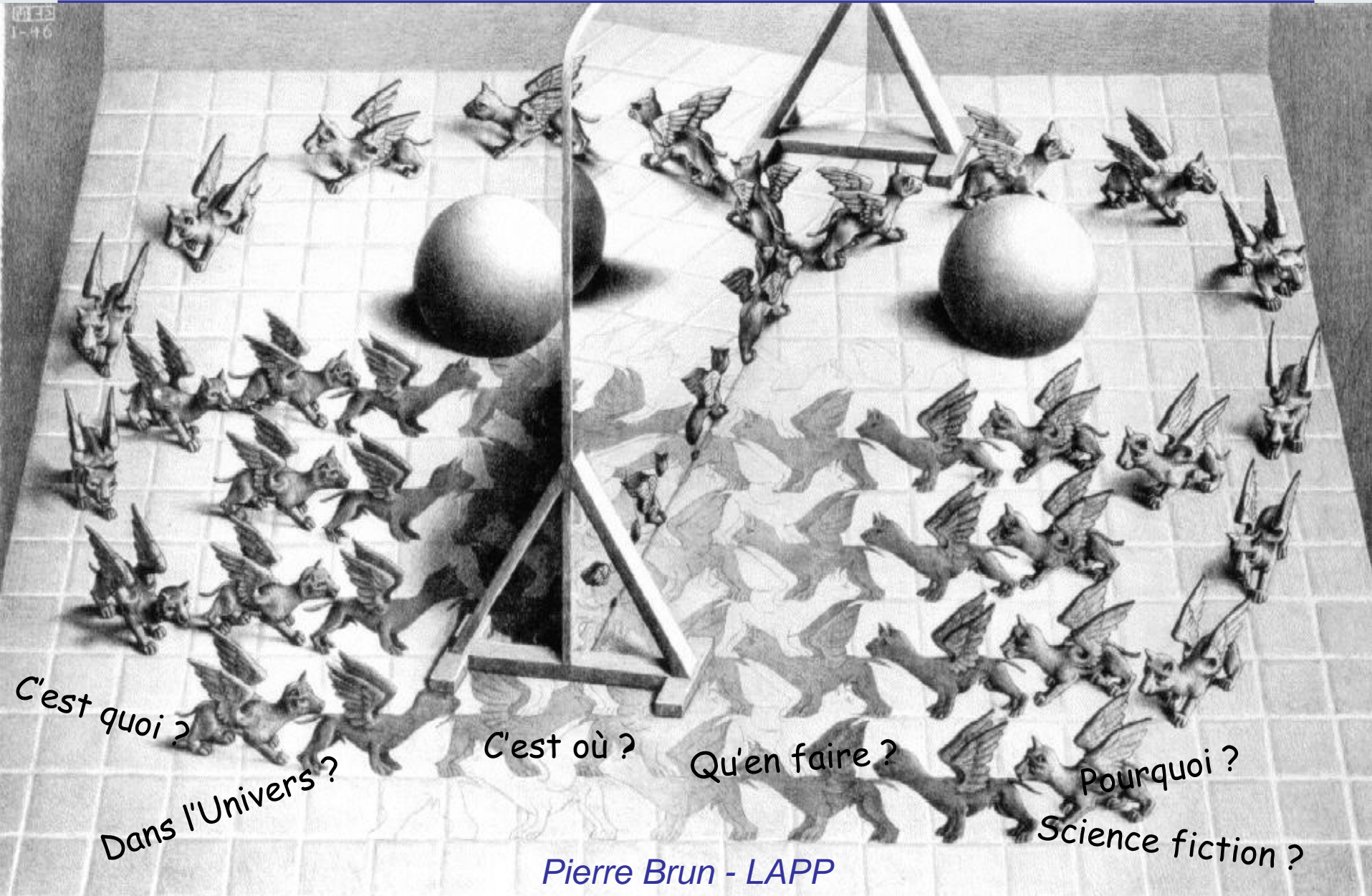


L'antimatière

1-46



C'est quoi ?

Dans l'Univers ?

C'est où ?

Qu'en faire ?

Pourquoi ?

Science fiction ?

Pierre Brun - LAPP

Plan de cet exposé

- Historique:
 - Deux grandes théories donnent naissance à un étrange monde parallèle
 - Découverte de l'anti-électron
- Un peu plus sur les propriétés de l'antimatière
 - Symétries en physique des particules
 - Rencontre du 3^{ème} type
 - Finalement, c'est pas bien différent de la matière
- Mais alors :
 - Pourquoi notre Univers semble-t-il asymétrique
 - L'est-il vraiment ?
- Des application ?
 - Pour la santé
 - Pour la recherche fondamentale : - nouvelles particules
- sondes de l'Univers

Naissance de l'idée

C'est Dirac qui réussit en 1928 à unifier
la mécanique quantique (Planck, Bohr, Eisenberg, Pauli, ...)
et la relativité restreinte (Einstein, Poincaré)



P.M. Dirac

Tout d'abord, une petite explication

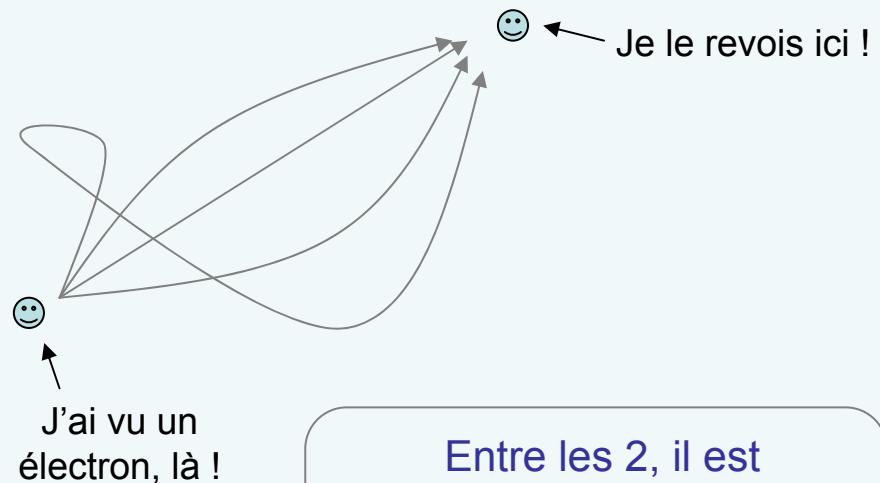
La mécanique quantique

Un électron, peut être vu comme une particule,
mais aussi comme une onde

Monde habituel !



Monde quantique !



Entre les 2, il est
intrinsèquement impossible
de savoir exactement où
est la particule

L'électron entre les 2 observations ?

- La mécanique quantique permet de prévoir les probabilités de chaque chemin
- En cela l'électron « est » une onde.
→ en réalité il suit une onde de probabilités
- L'équation de Schrödinger décrit sa propagation :

$$i\hbar \frac{d}{dt} |\psi\rangle = H \cdot |\psi\rangle$$

$H = E + U$: décrit le système
 $|\Psi\rangle$: fonction d'onde = nombre

$$E = \frac{1}{2} mv^2 = p^2 / 2m : \text{énergie cinétique}$$

Théorie de la relativité restreinte

- 1905, principalement due à Einstein
- Révolutionne les concepts de temps et d'espace
 - Leurs mesures sont relatives aux observateurs
- Implication sur la notion d'énergie :

$$E = p^2 / 2m \rightsquigarrow E^2 = p^2c^2 + m^2c^4$$

Remarque : pour une particule au repos (vitesse nulle, $v=p=0$)

$$E^2 = m^2c^4 \Rightarrow E=mc^2$$

Une mécanique quantique relativiste

- Nouvelle définition de l'énergie dans l'équation de la mécanique quantique :

$$ih \frac{d}{dt} |\psi\rangle = (E + U) \cdot |\psi\rangle \quad \rightarrow \quad (i\gamma^\mu \partial_\mu - m) \cdot \psi = 0$$

- $|\Psi\rangle$ ne peut plus être un simple nombre

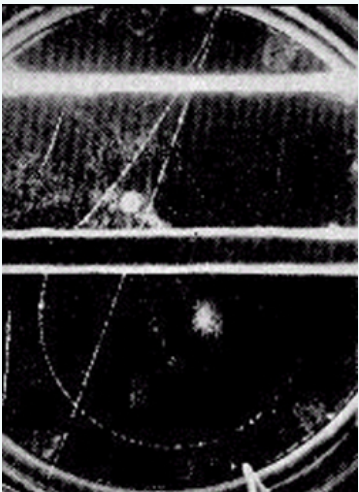
$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4 \quad \Rightarrow \quad \begin{cases} E = + \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} \\ E = - \sqrt{p^2 c^2 + m^2 c^4} \end{cases}$$

- Dirac **prévoit** donc l'existence d'un partenaire de l'électron de charge opposée

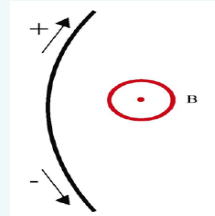
La découverte du positon

- Dans les années 30, les particules connues sont :
 - L'électron *négatif*
 - Le proton *positif*
 - Le neutron *neutre*
- Les physiciens étudient alors les rayons cosmiques, des particules qui viennent de l'espace

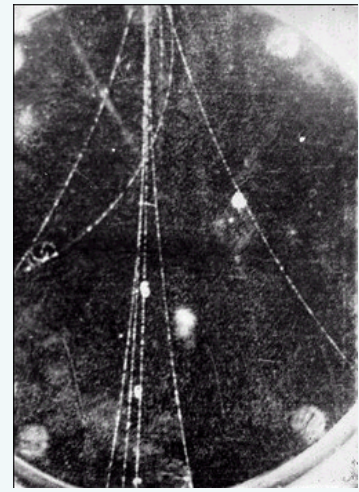
Tout ceci suffit à construire toute la matière ordinaire



Clichés obtenus par C. Anderson dans un chambre à brouillard en 1933



On y voit une particule de même masse que l'électron mais déviée dans le sens inverse !

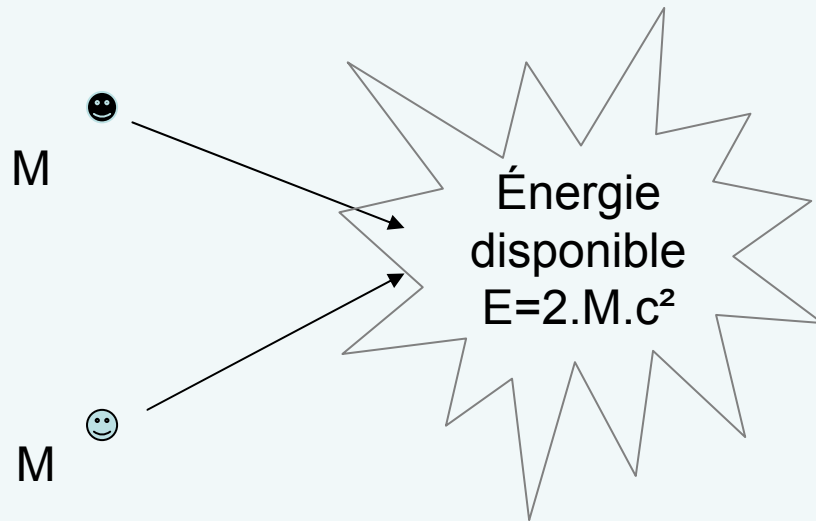


Tout un monde parallèle

Toutes les particules connues ont leur analogue en antimatière :

- Protons / antiprotons
- Neutrons / antineutrons
- Pions, kaons, neutrinos, quarks, ... / anti -tout ça !

La rencontre de la matière et de l'antimatière conduit à
la conversion totale de la masse en énergie



Pour un paire e^\pm au repos,
il y a création de 2 photons.

Chacun emporte la moitié
de l'énergie

Petit résumé historique

- 1932 : positon
- 1956 : antiproton
- 1960 : antineutron
- 1965 : antideuton (D=pn)
- 1996 : Synthèse de l'atome d'anti-Hydrogène ($\bar{p}+e^+$)

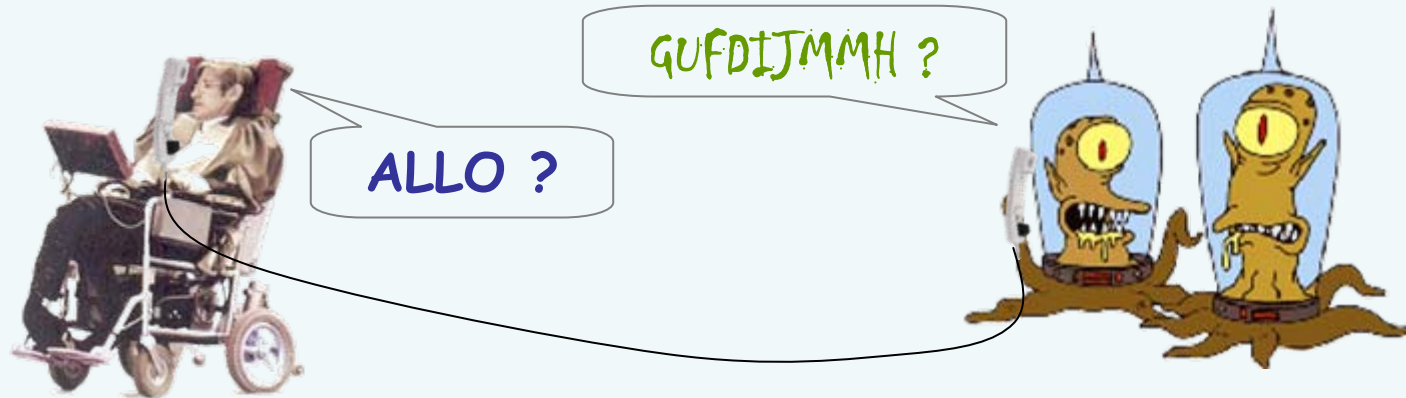
Ce que l'on a appris :

- même masse
- même spin
- mêmes interactions
- charge opposée

- 3029 : Rencontre avec une intelligence extra-terrestre
 - Besoin de comprendre parfaitement les propriétés de l'AM
 - Nécessité d'être sûrs de savoir s'ils sont constitués de matière
 - 1 chance sur 2 qu'ils soient en antimatière (?)

Dialogues du 3^{ème} type : cf. cours de Feynman

Supposons que nous ayons en ligne un être d'ailleurs ...



Afin d'être sûrs de ne pas s'annihiler avec nos nouveaux amis, un éminent physicien serait désigné pour échanger nos information

Nous communiquerions :

- notre taille
- notre masse
- une description de notre aspect
- ...

Aucune référence commune



Recherche d'étalons communs

Dialogues du 3^{ème} type

- Combien mesurez vous ?

- Environ 1m70

→ 17.000.000.000 (= $1,7 \cdot 10^{10}$) de fois la taille d'un atome d'Hydrogène

- Quelle est typiquement votre masse ?

- De l'ordre de la dizaine de kilogrammes

→ 10^{28} fois plus qu'un atome d'Hydrogène

- Votre aspect ?

- 2 sphères au milieu de la figure, des excroissances avec 5 renflements aux extrémités, ...

- Comment êtes-vous faits, à l'intérieur ?

- Le cœur a telle forme, il est sur la gauche

Problème :

La gauche ?

Les symétries dans les lois physique

- Symétrie de translation dans l'espace

Une expérience de physique des lasers

Sur terre :



Dans une galaxie lointaine,
dans les mêmes conditions



- Symétrie de translation dans le temps

Aujourd'hui :



Dans plus de mille ans,
dans les mêmes conditions



L'expérience donne
les mêmes résultats

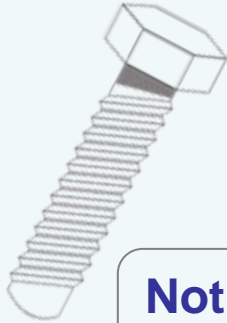
- Symétrie par rapport à la réflexion dans un miroir : Parité



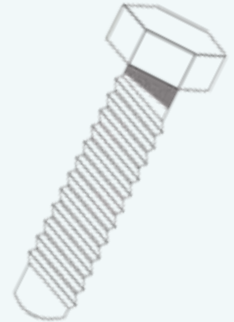
Cette symétrie est elle effective dans la Nature ?
Est il possible de définir de façon
absolue la droite et la gauche ?
Lien étroit avec l'antimatière

Réflexion dans un miroir : la parité d'espace

Si l'on construisait 2 horloges images l'une de l'autre dans un miroir



Notre intuition nous dit qu'elles vont fonctionner à l'identique



En fait beaucoup des lois de la physique sont invariantes par parité

La gravitation

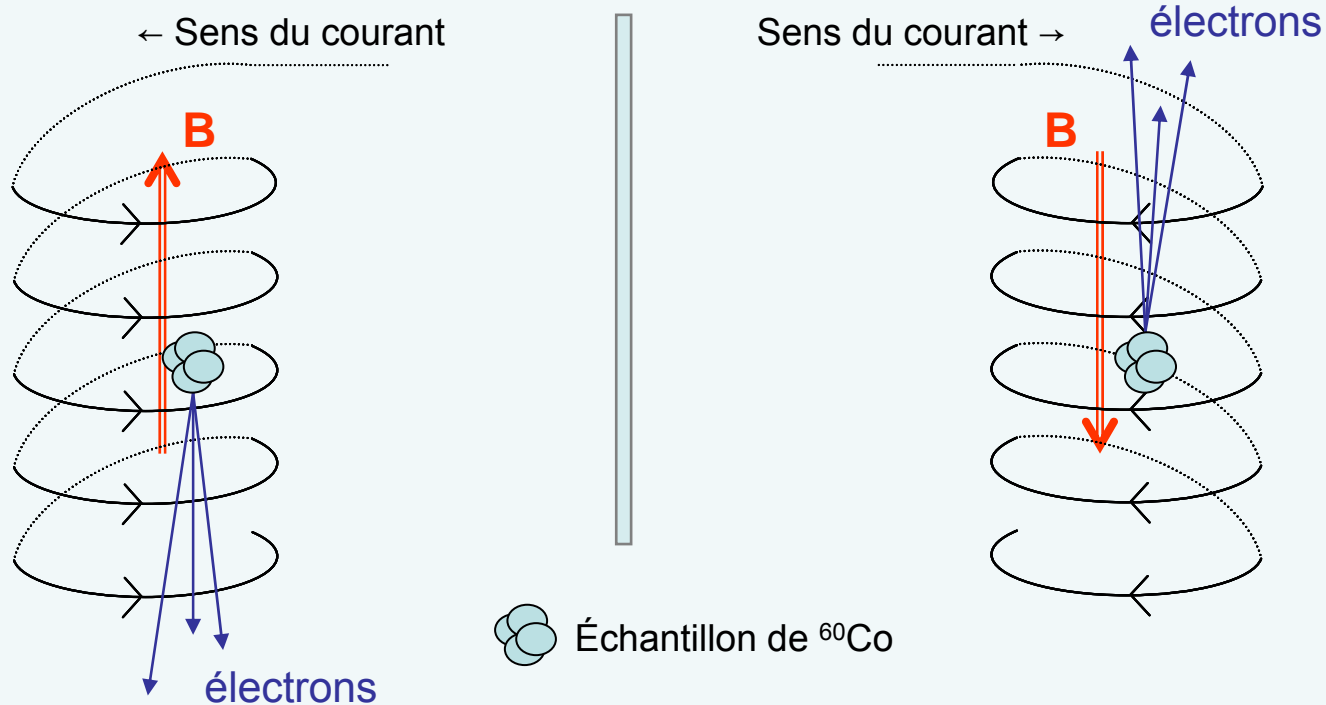
L'électricité et le magnétisme

L'interaction forte à l'œuvre dans les noyaux

Toutes les lois ? Non !

Violation de la parité (P)

Expérience de M^{elle} Wu (1956), suggérée par T.D. Lee et C.N. Yang avec des noyaux ^{60}Co qui émettent des électrons par radioactivité

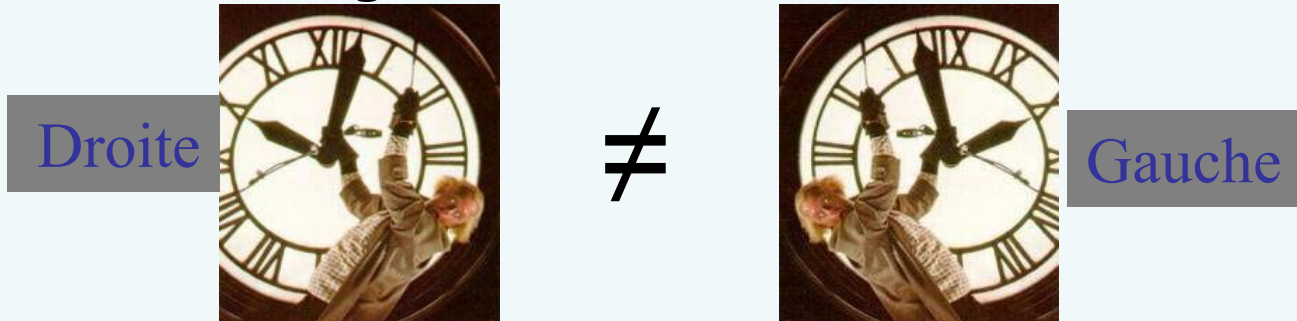


Il y a violation de la parité dans tous les processus où intervient l'interaction faible

Cette expérience permet de définir la droite et la gauche de façon absolue

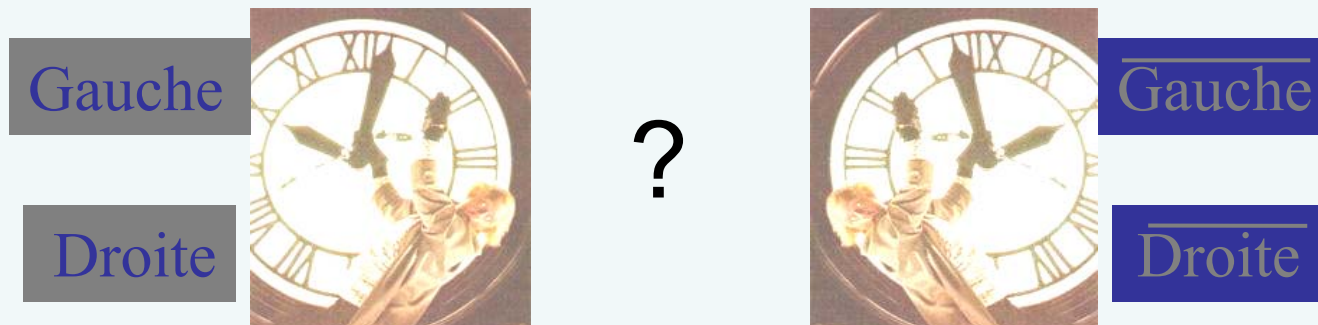
Symétrie de charge C

- Retour aux horloges :



- D'autres symétries sont-elles violées ?

La symétrie *matière* \leftrightarrow *antimatière* ?



avant de découvrir que la Nature ne respectait pas P,
on pensait que les 4 horloges fonctionneraient à l'identique

Symétrie CP

- La symétrie gauche/droite est restaurée en considérant également la symétrie C (matière/antimatière)
- Les expériences sur l'interaction faible montrent :

Droite $\Leftrightarrow \overline{\text{Gauche}}$

Gauche $\Leftrightarrow \overline{\text{Droite}}$

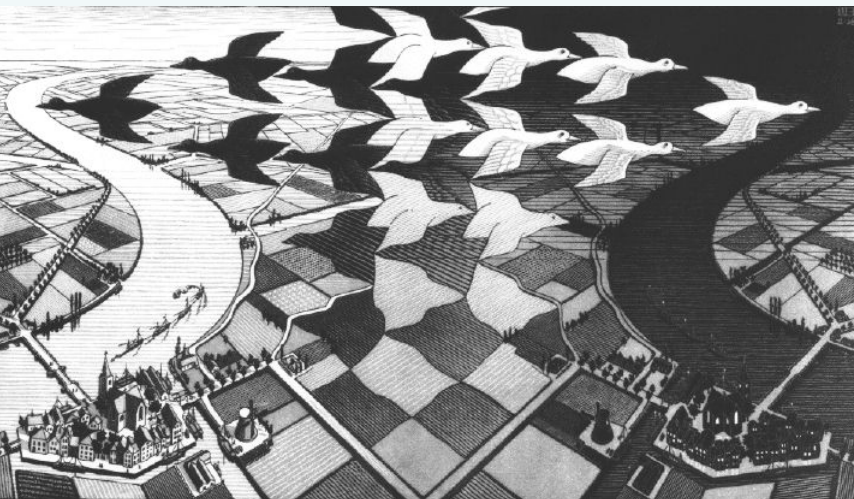
- La symétrie effective (?) est donc plutôt la combinaison

- De la parité d'espace P

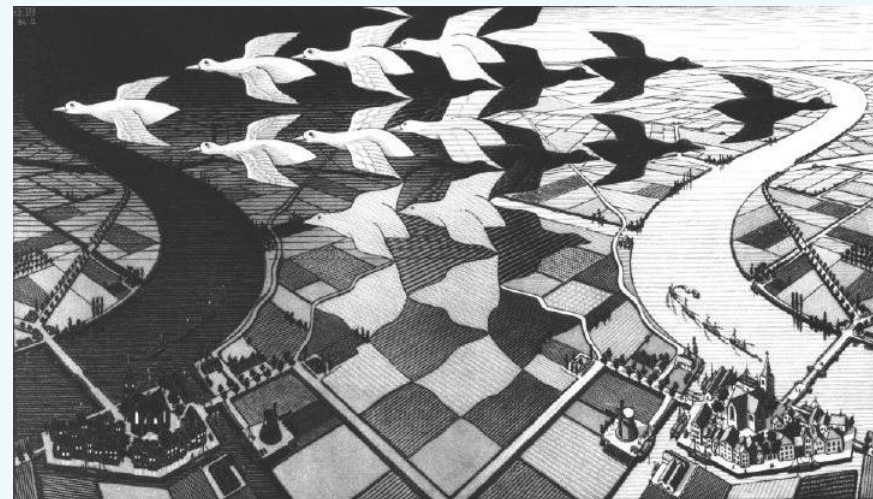
- De la conjugaison de charge C

Symétrie CP

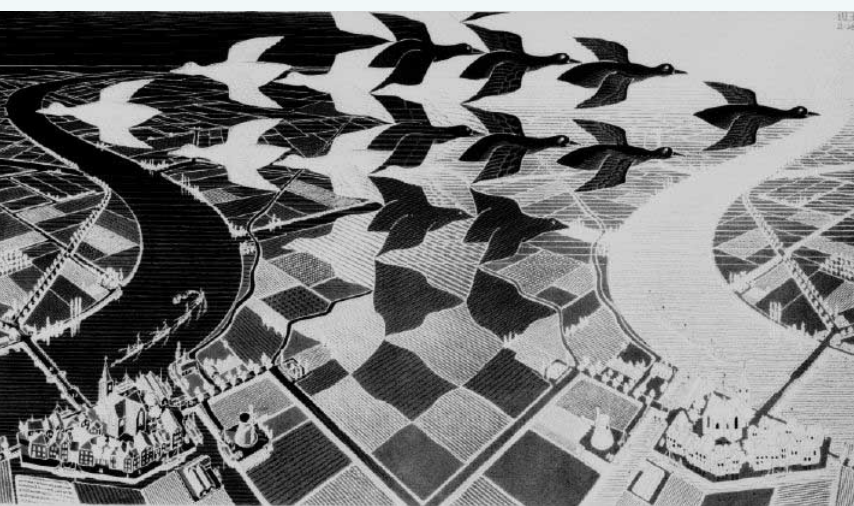
Escher et la symétrie CP



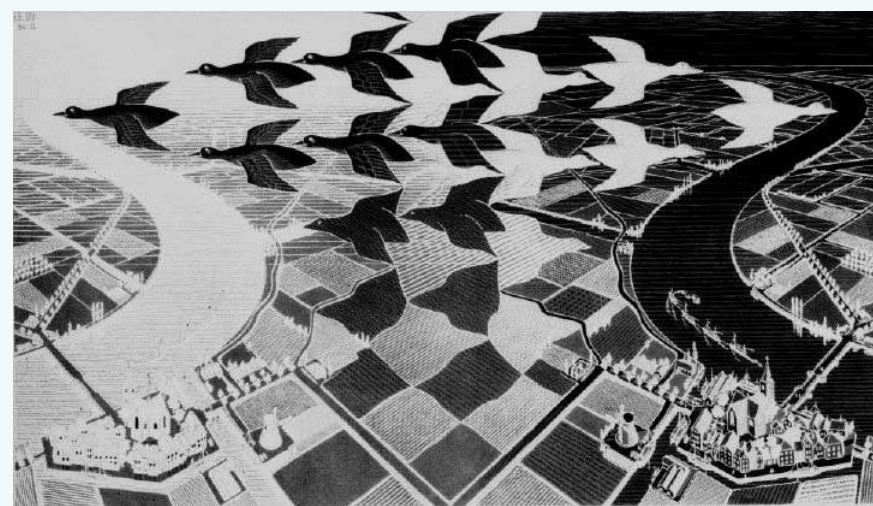
P



C

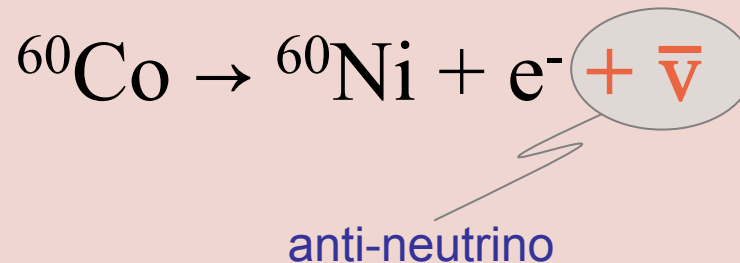


CP



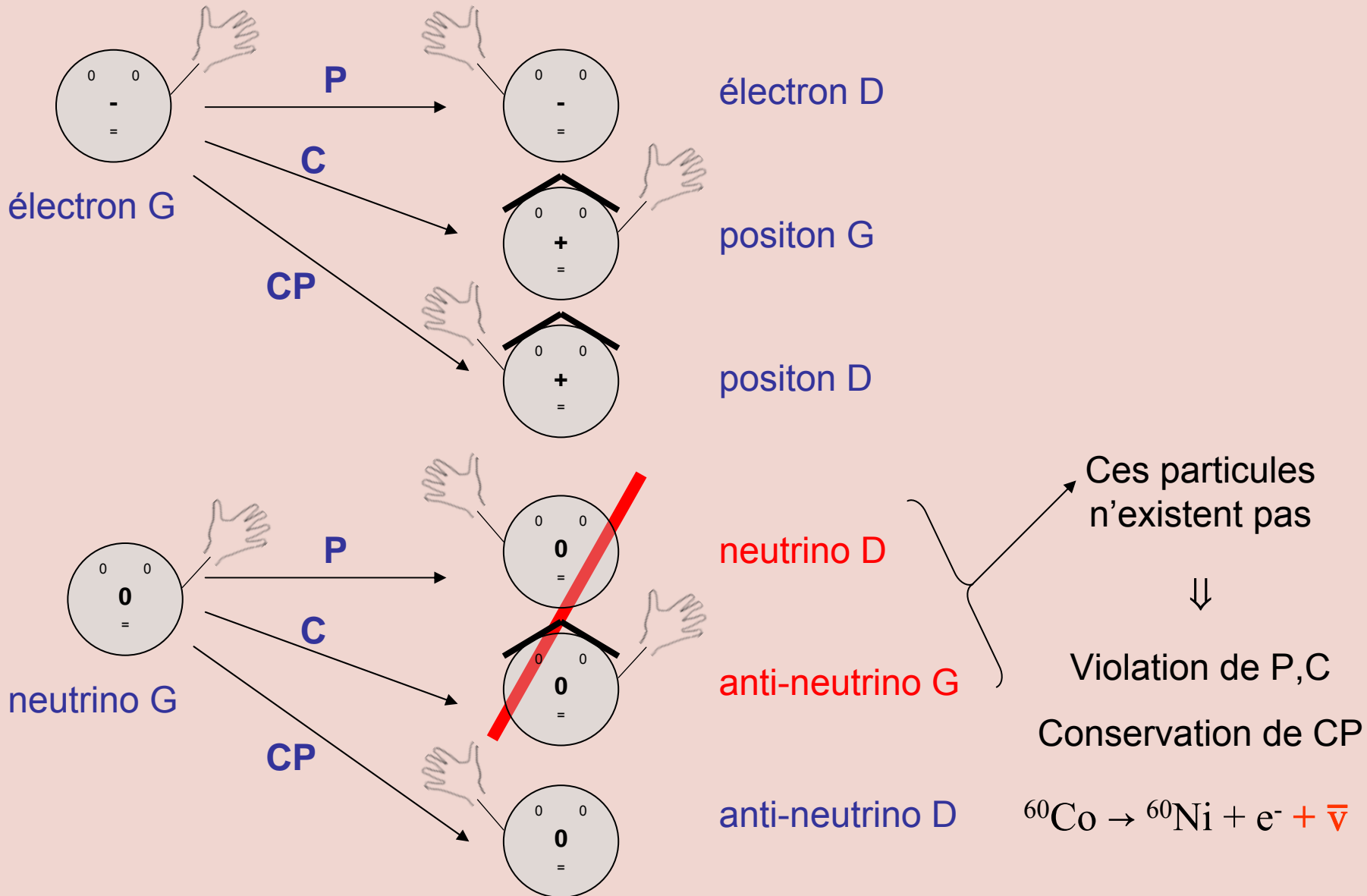
Les « raisons » de la violation de P

- Lorsque des électrons sont produits, ils sont accompagnés de neutrinos



- Les neutrinos sont des particules élémentaires :
 - Neutres
 - Très (très très) peu massives
 - N'interagissent que par l'interaction faible

Les neutrinos sont gauchers!



Rencontre du 3^{ème} type



Nous aurions défini la droite et la gauche

à partir de l'expérience du Cobalt par exemple

Un lieu de rendez-vous serait convenu

quelque part dans le vide interstellaire

En signe d'amitié, nous nous serrons la « main »

la main droite !



**Alors attention : s'il
tend la main gauche,
prudence !!!**

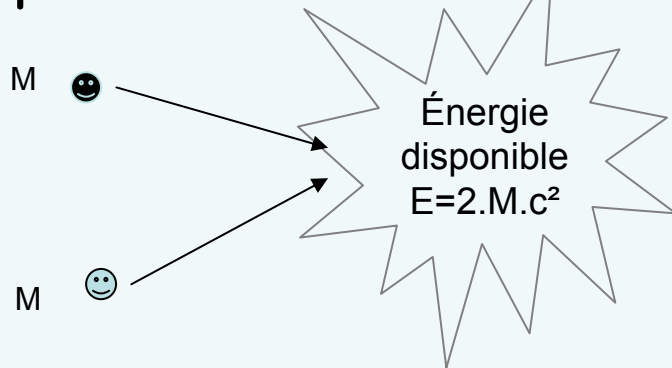


A présent nous savons distinguer le cas où nos amis sont faits de matière de celui où ils sont faits d'antimatière

Mais y a-t-il réellement 1 chance sur 2 pour qu'ils soient d'un type ou de l'autre ?

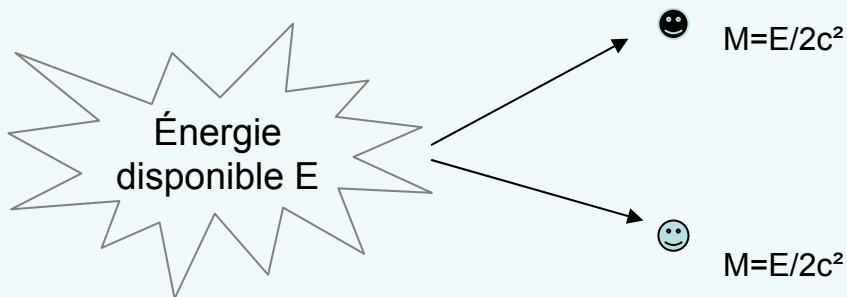
Production d'antimatière

- Rappel : l'annihilation matière - antimatière



Le processus inverse est aussi possible !

- Production d'antimatière au laboratoire :

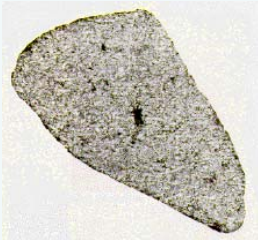


Chaque particule d'antimatière produite est toujours accompagnée d'une particule de matière

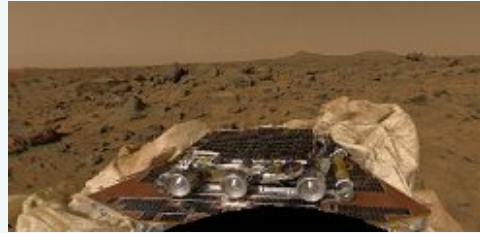
Cela pose un problème en cosmologie

Notre monde de matière

- **Tout ce qui constitue notre système solaire est fait de matière**



Les météorites sont faits de matière

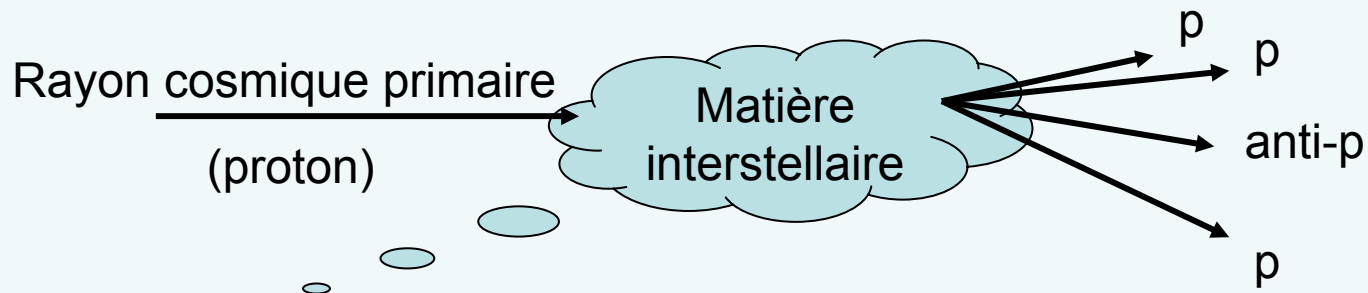


Les sondes martiennes sont intactes



Les américains ne se sont pas annihilés sur la lune

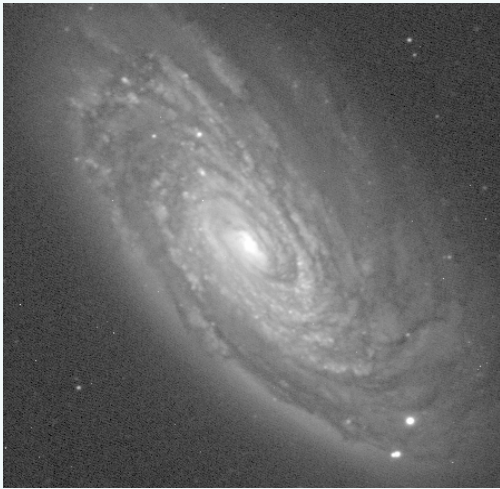
- **Les rayons cosmiques sont en majorité des particules de matière**
Les particules d'antimatière sont vraisemblablement secondaires



Lumière sur le Cosmos

- **Le photon est sa propre antiparticule**

→ en observant une galaxie lointaine, on ne sait pas si elle est constituée de matière ou d'antimatière



- **Mais alors :**

- Sont elles en antimatière ?
- Pourquoi dit-on que l'on sait qu'elles sont faites de matière ?
- Finalement, où est le problème du point de vue cosmologique ?

Le Big Bang

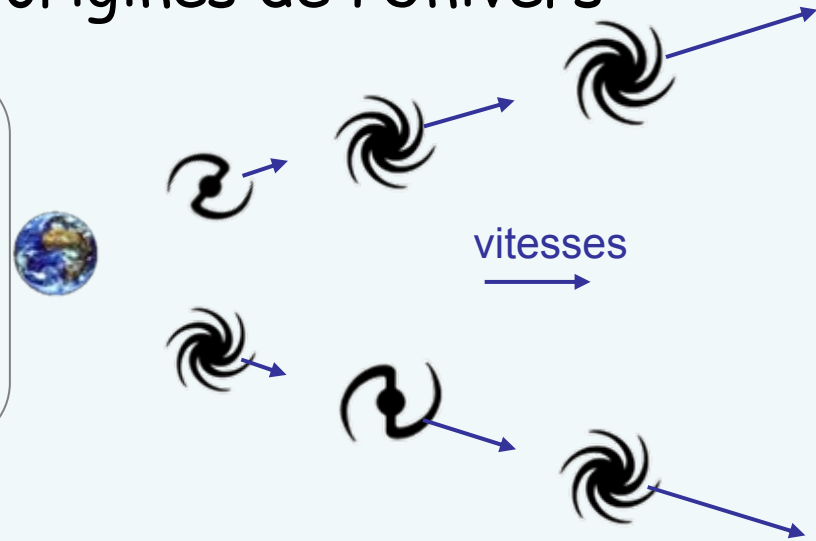
Le « problème » est lié aux origines de l'Univers

Loi de Hubble :

Tous les objets s'éloignent de nous

Dans toutes les directions

Leur vitesse est proportionnelle à leur distance



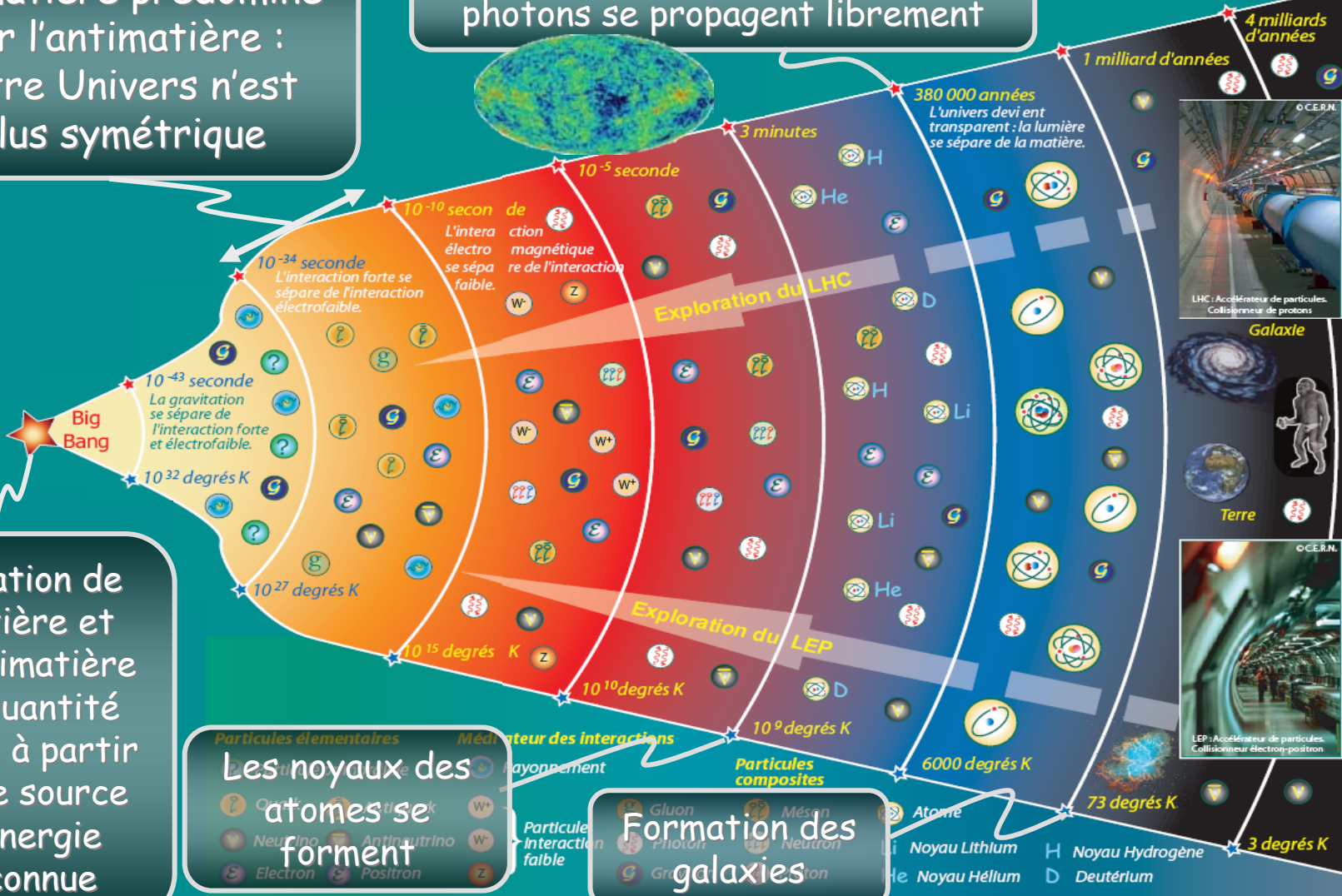
Il semble donc que tout l'Univers fut petit il y a longtemps
toute la matière (et l'antimatière?) était alors
confinée dans un Univers très dense et chaud

**Si aujourd'hui les galaxies sont éloignées les unes des autres,
cela n'a pas toujours été le cas**

Le scénario standard

La matière prédomine sur l'antimatière : notre Univers n'est plus symétrique

Les atomes se forment : les photons se propagent librement



Création de matière et d'antimatière en quantité égale à partir d'une source d'énergie inconnue

Particules élémentaires

Les noyaux des atomes se forment

- Quark
- Neutrino
- Electron
- Antiquark
- Antineutrino
- Positron
- W⁺
- Z

Médiateur des interactions

Formation des galaxies

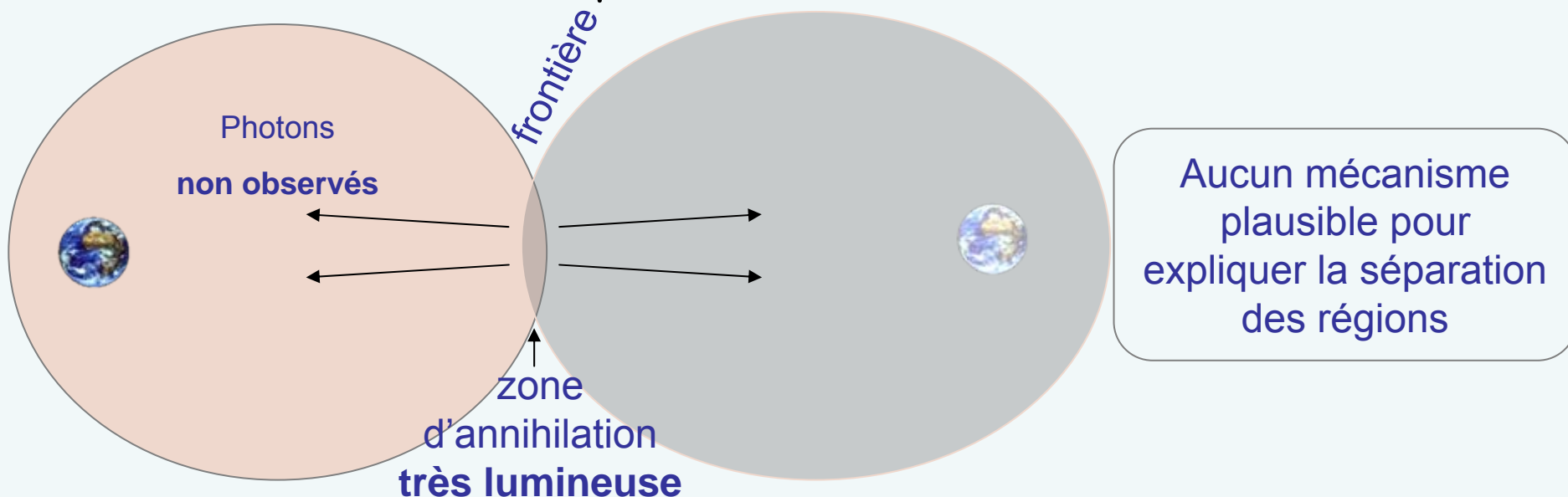
- Photon
- Gluon
- Mésion
- Neutron
- Graviton

Particules composites

- Proton
- Neutron
- Mésion
- Neutron
- Atom
- Noyau Lithium
- Noyau Hydrogène
- Noyau Hélium
- Deutérium

Alternatives

- L'asymétrie est primordiale : le big bang n'a pas créé d'AM
 - Grande contradiction avec les observations au labo
 - Conceptuellement insatisfaisant :
le degré de symétrie augmente en remontant vers les origines
- L'antimatière existe toujours dans des régions séparées
 - Mais : on observe pas les résidus d'annihilations



La prédominance de la matière

Si tout s'était annihilé **sauf** quelques particules de matière...

Quelle est la taille de l'asymétrie ?

Aujourd'hui dans l'Univers,

$$R = \frac{n_{\text{matière}} - n_{\text{antimatière}}}{n_{\text{photons}}} \approx \frac{n_{\text{matière}}}{n_{\text{photons}}} \approx 5 \times 10^{-10}$$

- Fond diffus cosmologique
- Modèles de nucléosynthèse primordiale
- Nombre d'étoiles

En tenant compte de l'évolution de l'Univers, ce rapport était dans le passé:

$$A \approx 6 \times R \approx 3 \times 10^{-9}$$

A l'origine, pour 1 milliard de particules d'antimatière, il devait y avoir 1 milliard et 3 particules de matière

Prédominance de la matière : comment ?

- C'est un problème encore irrésolu
- Elle a eu lieu entre $t=10^{-34}s$ et $t=10^{-10}s$: domaine inaccessible
- 4 conditions sont nécessaires

Les conditions de Sakharov

- Évolution de l'Univers hors équilibre
- Violation du nombre baryonique
- Violation des la symétries C et CP



A. Sakharov

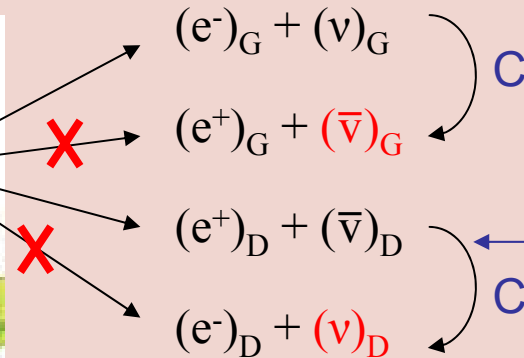
C'est-à-dire que les réactions n'ont pas le temps de s'équilibrer : envisageable avec l'expansion

Jamais observé, mais systématiquement prédit par les théories spéculatives GUT

La violation de CP est observée dans les accélérateurs

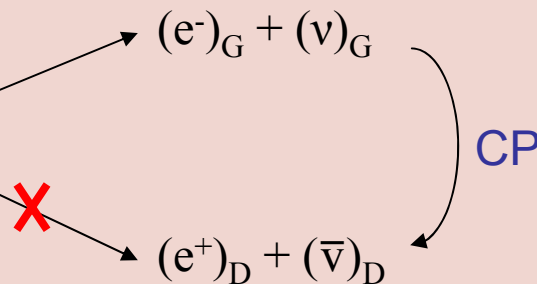
Violation de C et CP

- La violation de la charge n'est pas suffisante :



Ce processus doit être défavorisé

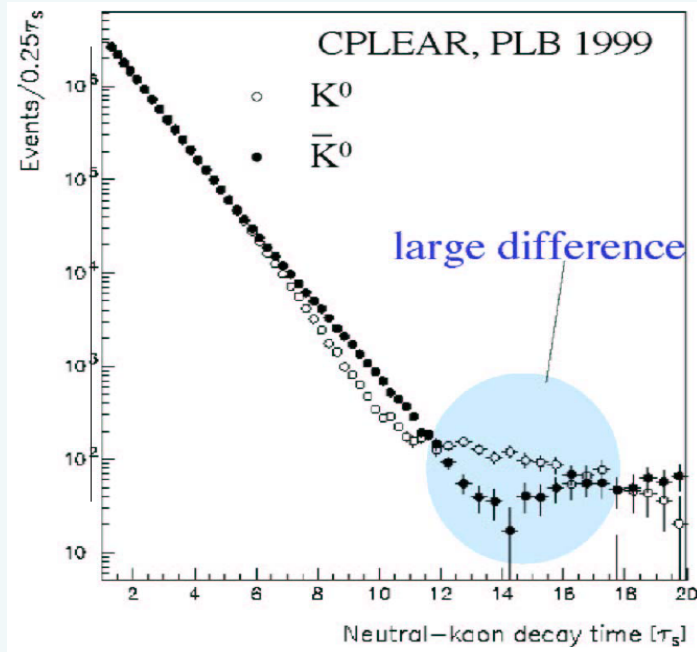
- La violation de la symétrie **CP** est aussi nécessaire à notre existence



La violation de CP dans les interactions entre particules est observée depuis 1964

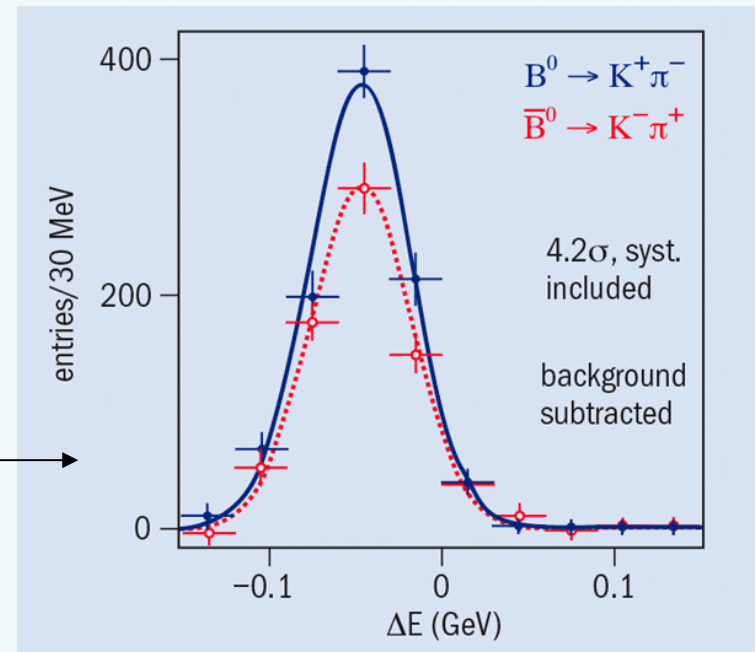
La violation de CP dans les accélérateurs

En 1964, la violation de CP est observée avec des particules : les kaons



Plus récemment : BaBar à Stanford observe la violation de CP dans le système des B (implication du LAPP)

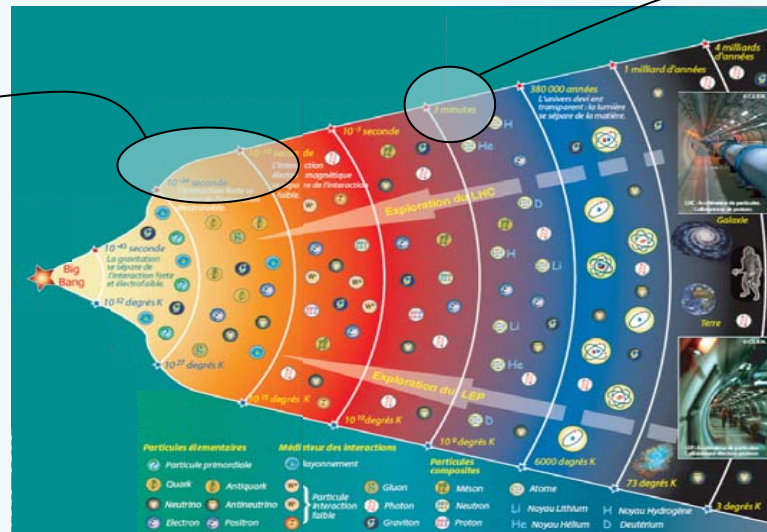
Effet très rare :
Trop faible pour résoudre le problème cosmologique



Traces d'antimatière cosmique

- L'observation d'anti-Hélium prouverait que l'antimatière était présente lors de la formation des noyaux

Disparition de l'antimatière



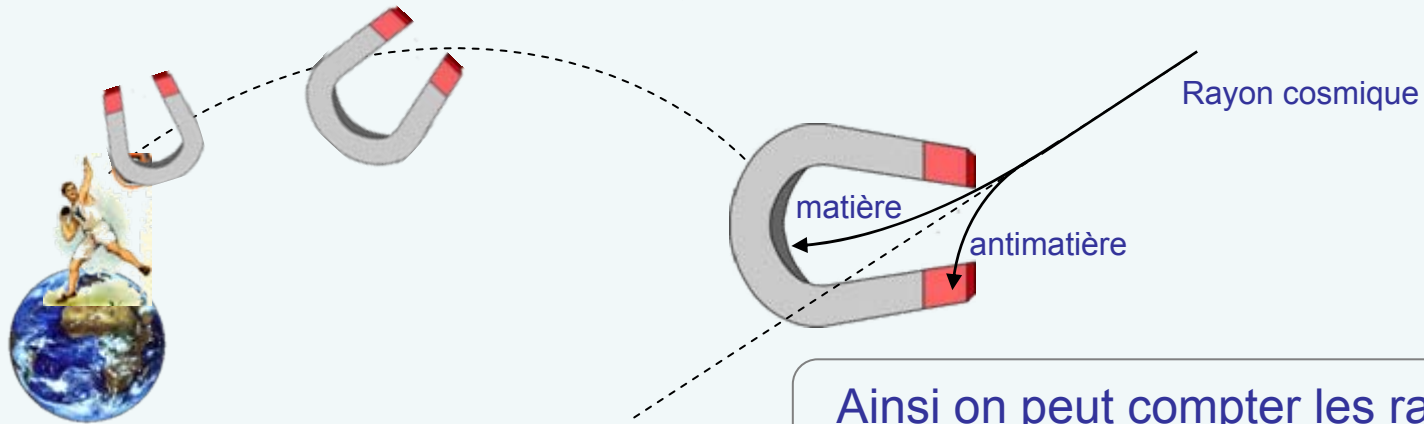
Formation des noyaux

- Un anti-Carbone ne pourrait être produit que dans une anti-étoile

L'observation d'un seul noyau d'anti-Carbone prouverait l'existence d'anti-Galaxies !

La recherche d'antimatière cosmique

- Les rayons cosmiques interagissent avec l'atmosphère
 - il faut se placer au dessus !
 - Ballons, satellites
- Pour observer de l'AM dans l'espace, il « suffit » d'y envoyer un aimant



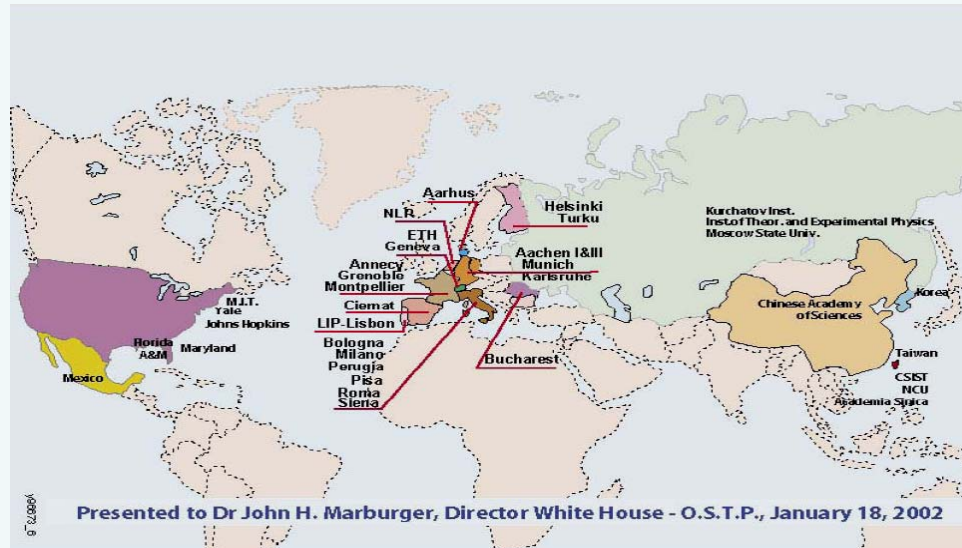
Ainsi on peut compter les rayons cosmiques et les trier par types

- C'est ce que l'on fait !

L'expérience **AMS** (**A**lpha **M**agnetic **S**pectrometer) à laquelle participe le LAPP est conçue pour l'observation de l'antimatière cosmique

La collaboration AMS

- Collaboration internationale d'une vingtaine de pays



En France : Ancey, Grenoble, Montpellier
Implication importante des industries

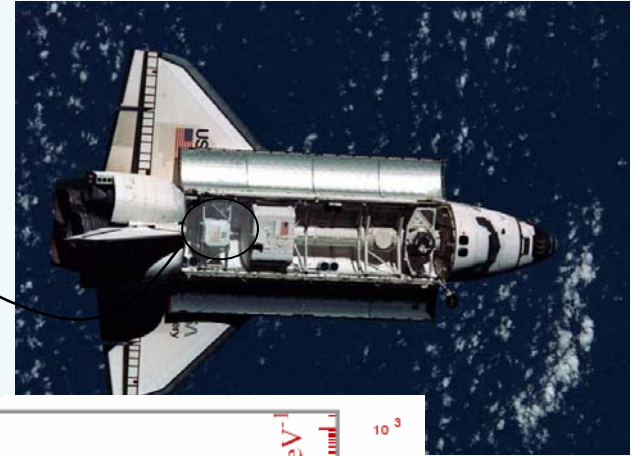
- Lancement et orbite assurés par la NASA
 - AMS01 : 10 jours en 1998
 - AMS02 : 3 ans sur la Station Spatiale Internationale en 2008

AMS-01 : vol prototype

- Juin 1998 : vol de 10 jours à bord de Discovery



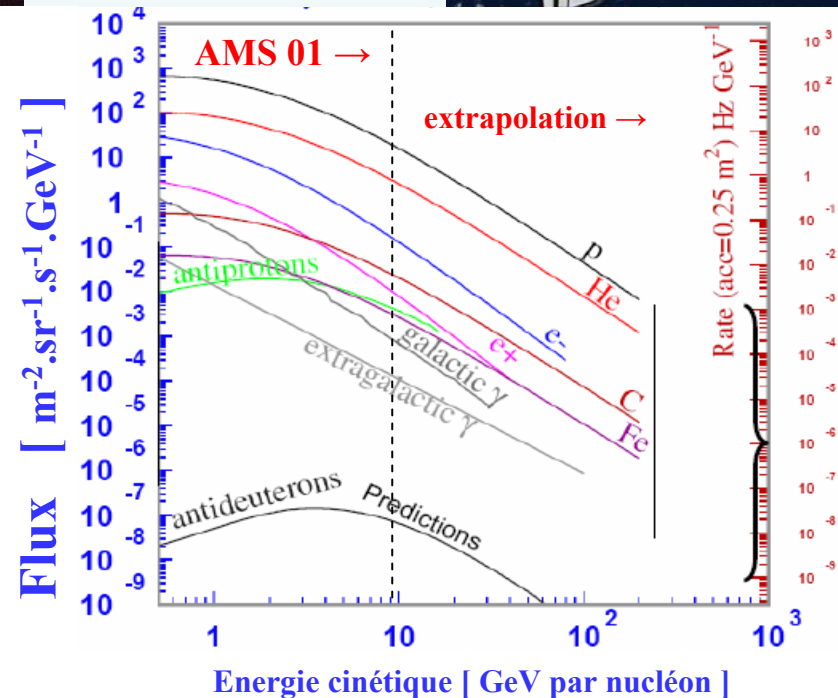
AMS01



La mission fut un succès :

Résultats sur la population de rayons cosmiques →

Présence d'antimatière en quantité compatible avec une production secondaire

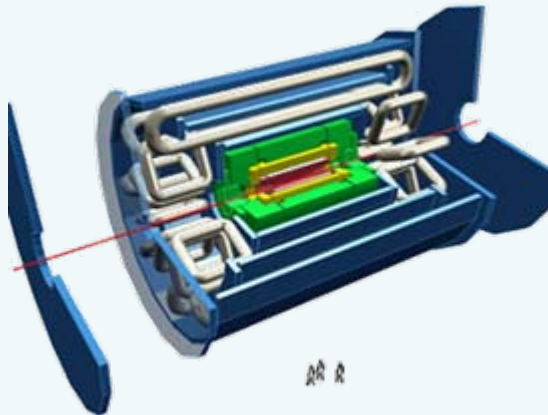


AMS-02

Un simple aimant ne suffit pas :
il faut un détecteur de physique des particules

ATLAS pour le LHC

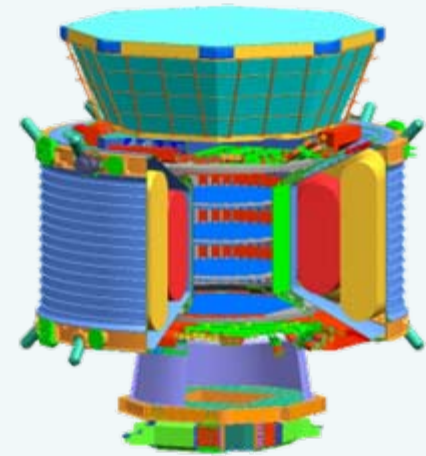
- Plus de 7000 t
- 44 m x 20 m
- > MW
- Ne bouge pas à 100 m en sous-sol



AMS 02

Contraintes spatiales

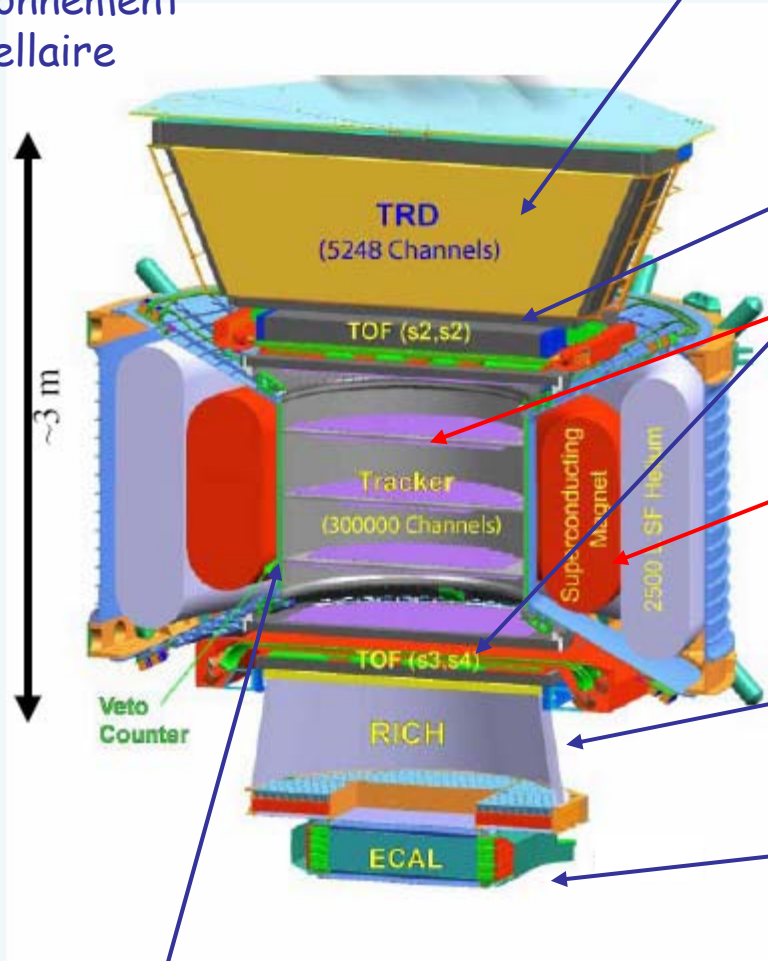
- Poids < 7 t
- 3 m x 3 m
- Consommation < 2 kW
- Résistance :
 - Température -50° / $+50^{\circ}$
 - Vide
 - Vibrations



Tests
drastiques

AMS-02

+ Caméra de positionnement stellaire



Scintillateurs véto

Detecteur à rayonnement de transition

Identification e/p

Scintillateurs

Mesure du temps de vol

Trajectographe (tracker)

Mesure de l'impulsion, signe de la charge

Aimant supra-conducteur

Génération du champ magnétique

Imageur Cherenkov

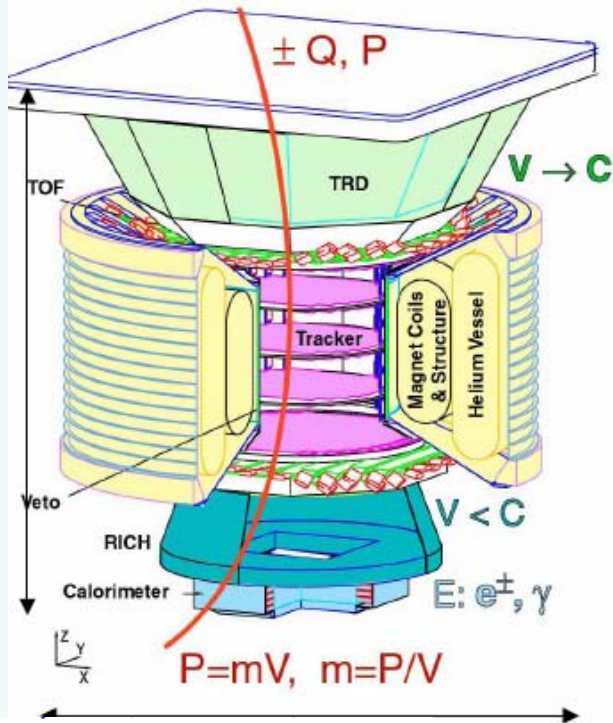
Mesure de la charge

Calorimètre électromagnétique

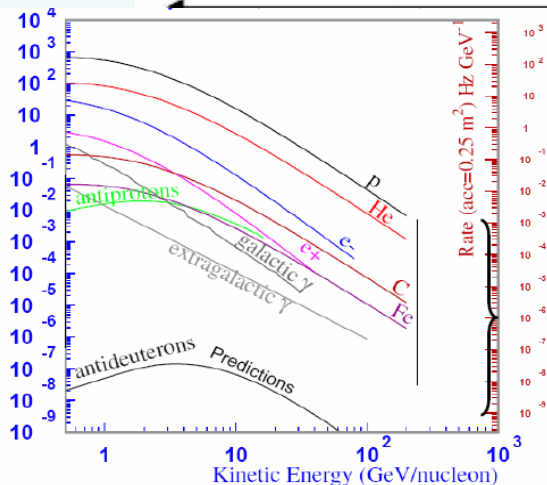
Identification e/p,

Mesure de l'énergie des e^{\pm}, γ

Identification des particules dans AMS



300 GeV	e^-	e^+	P	\bar{He}	γ	γ
TRD						
TOF						
Tracker						
RICH						
Calorimeter						

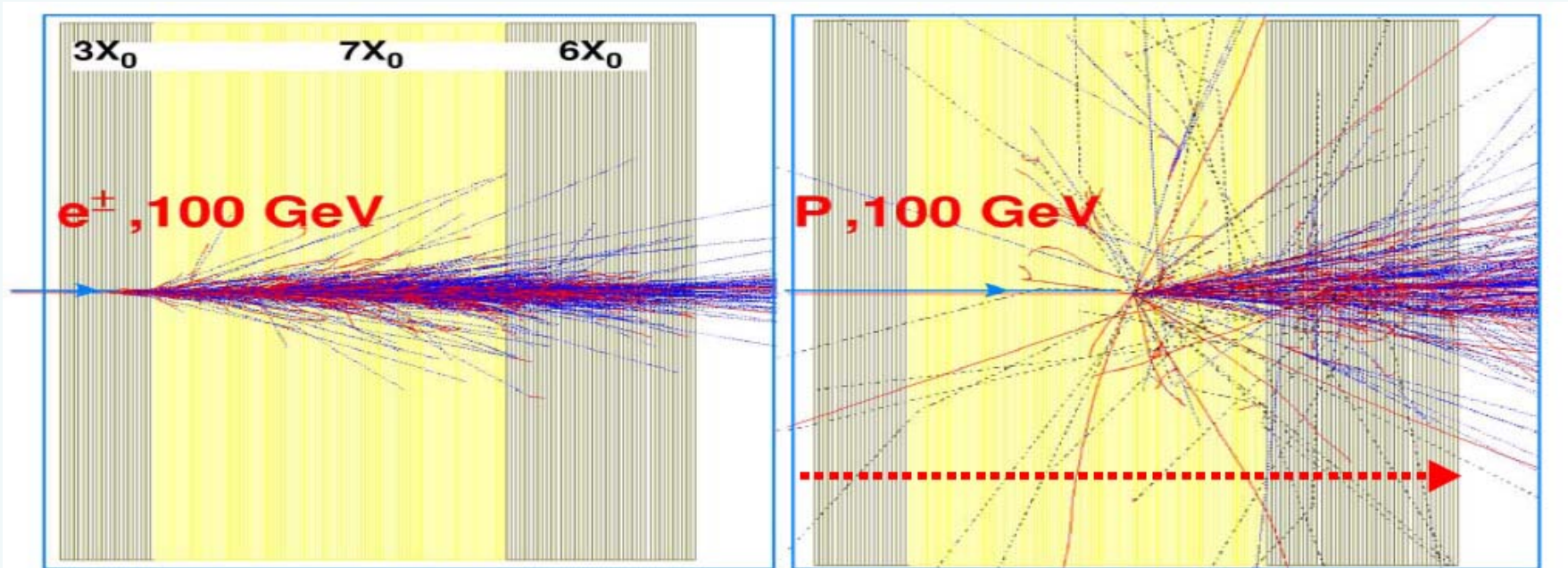


Les sous-détecteurs doivent être très précis, on veut être capables de rejeter :

- 1 proton dans 10^4 positons
- 1 Helium dans 10^3 positons
- 1 électron dans 10^2 positons
- 1 proton dans 10^6 photons

Quelques mots sur le calorimètre

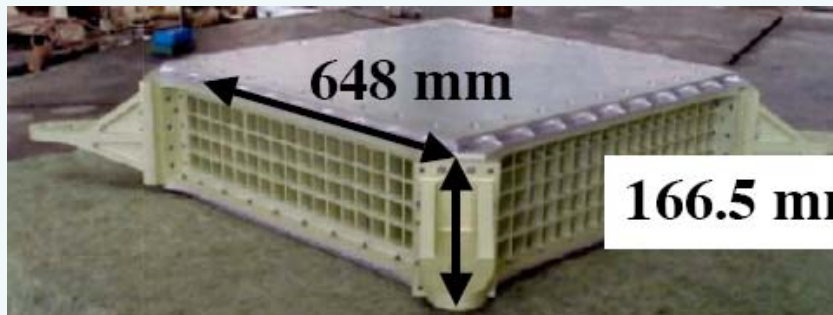
Les électrons, positons, photons y forment une gerbe électromagnétique



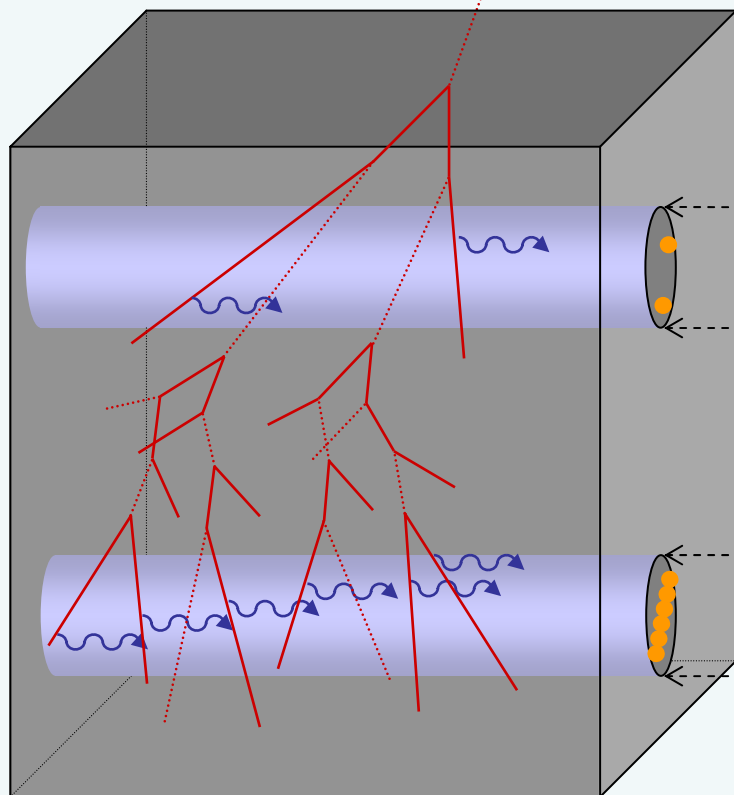
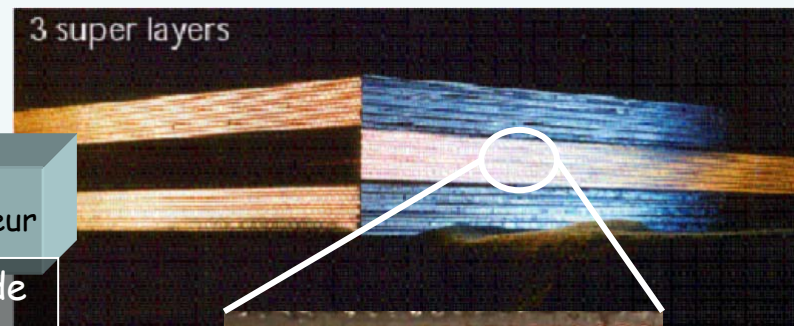
- séparation positons/proton (ou électron/antiproton)
- mesure de l'énergie des photons et e^\pm
- déclenchement de l'acquisition au passage d'un photon

Le calorimètre électromagnétique

- photon (HE)
- électron ou positon (HE)
- ~~~~~ photon de scintillation



9 plans alternés en X et Y :



photomultiplicateur

Quantité de lumière

α

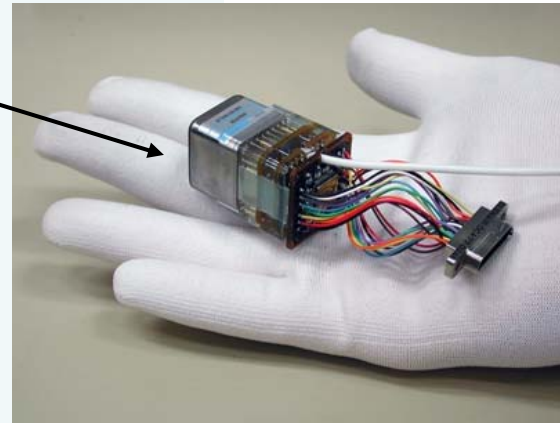
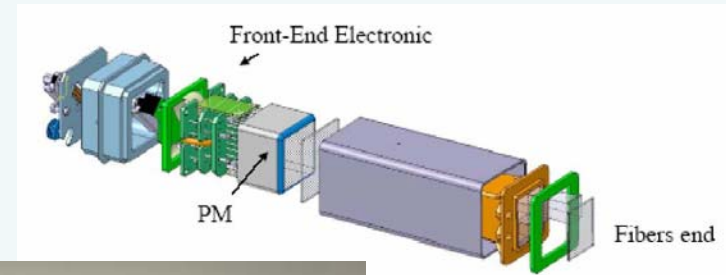
Quantité d'énergie

photomultiplicateur

plomb

fibre scintillante

Le calorimètre électromagnétique



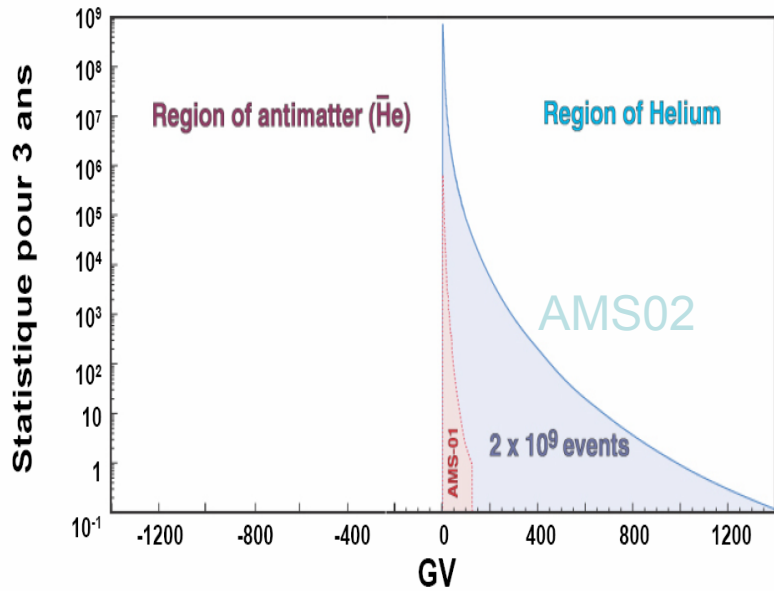
Chaque composant électronique est qualifié pour résister aux radiations

Toutes les parties du détecteur passent sur un pot vibrant

L'électronique d'acquisition est testée dans le vide et soumise à des variations de t°

Les performances de l'appareil sont testées avec des faisceaux de particules au CERN

L'antimatière et la physique avec AMS



Mesure du rapport $\bar{\text{He}} / \text{He}$ à 10^{-9}

Rappel :

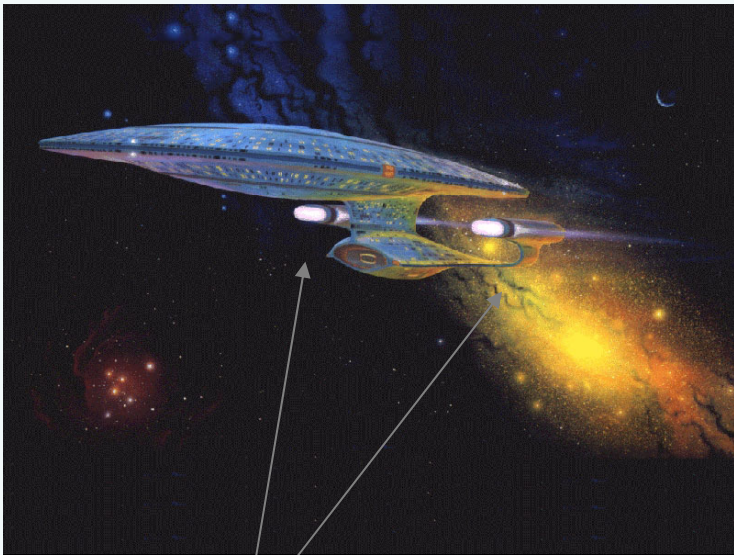
- $\bar{\text{He}}$ \rightarrow existence de bulles d'antimatière !
- $\bar{\text{C}}$ \rightarrow existence d'anti-étoiles !

La recherche d'antimatière primordiale n'est pas *-du tout-* le seul objectif d'AMS :

- Mesure précise du rayonnement cosmique
- Recherche de :
 - *matière noire*
 - *matière exotique*
 - *trous noirs primordiaux*
 - *surprises*
- Astronomie γ de haute énergie
- Propagation des rayons cosmiques
- Propriétés de notre galaxie

Applications ?

Le moteur à antimatière ?

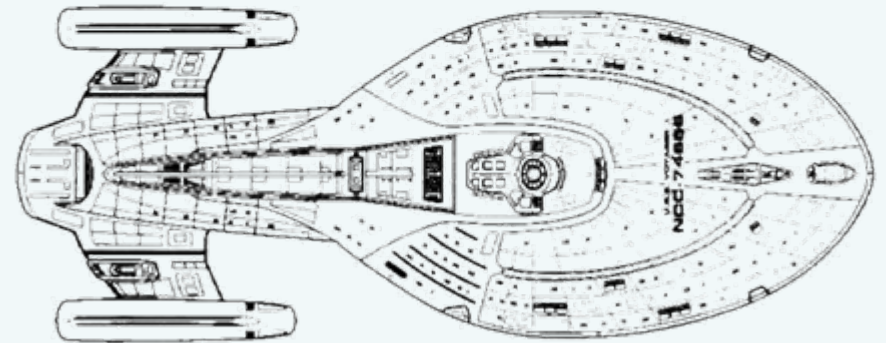


Moteurs à antimatière

USS VOYAGER
NCC-74656



Designed by Rick Sternbach
Orthographic Views by Doug Cramer
© 1994 Paramount Pictures Corp.



Avec la technologie actuelle :

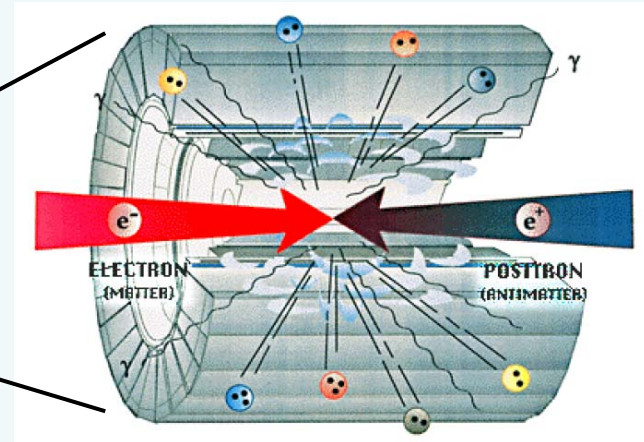
- Efficacité :
- production : 0.00000001 %
 - stockage : 1 %

Encore du travail :

Tous les antiprotons
produits au CERN
permettraient d'allumer
une ampoule de 100 W
pendant 3 s

Pour la recherche de nouvelles particules

- De 1989 à 2000, le LEP produit des particules instables



→ de nombreux résultats d'une précision inégalée

- Au TeVatron (Chicago)



→ Découverte du dernier quark en 1996 : le top dans des collisions protons-antiprotons

Bientôt le LHC au CERN !

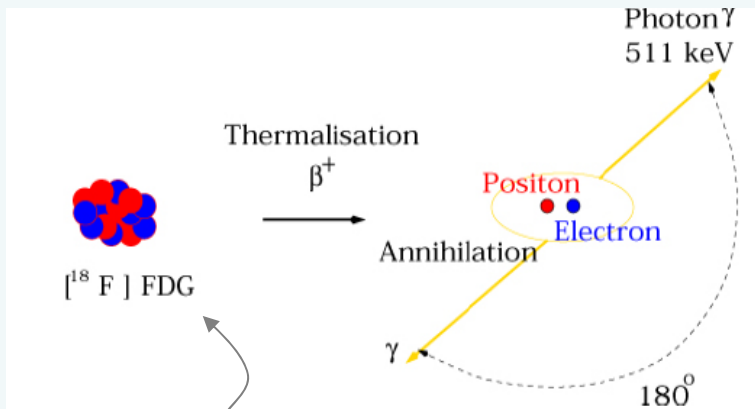
Collisions proton-proton

41°50' N

88°15' O

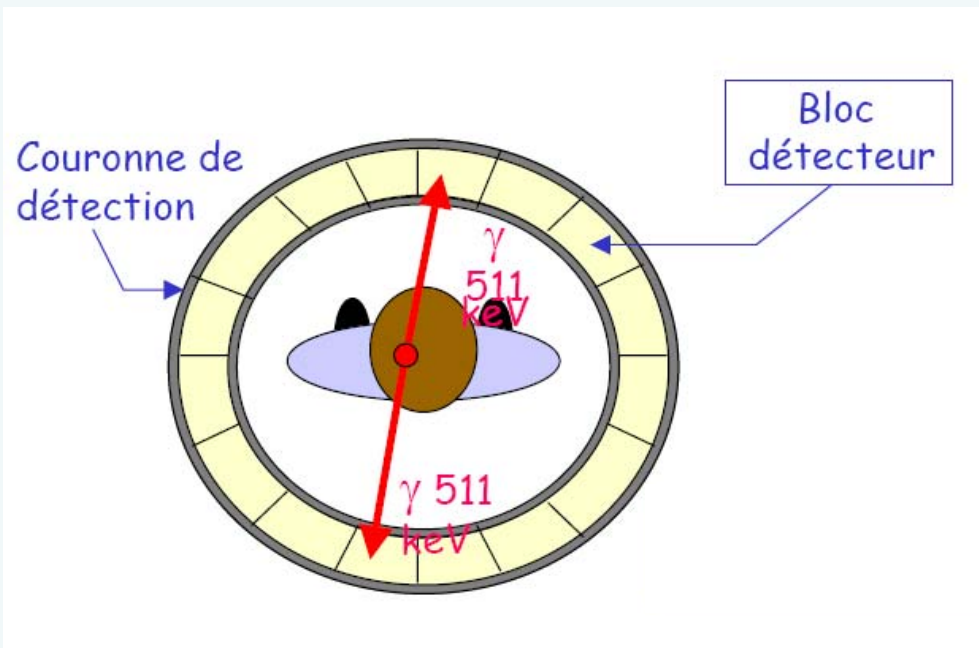
Applications médicales

La Tomographie à Émission de Positons



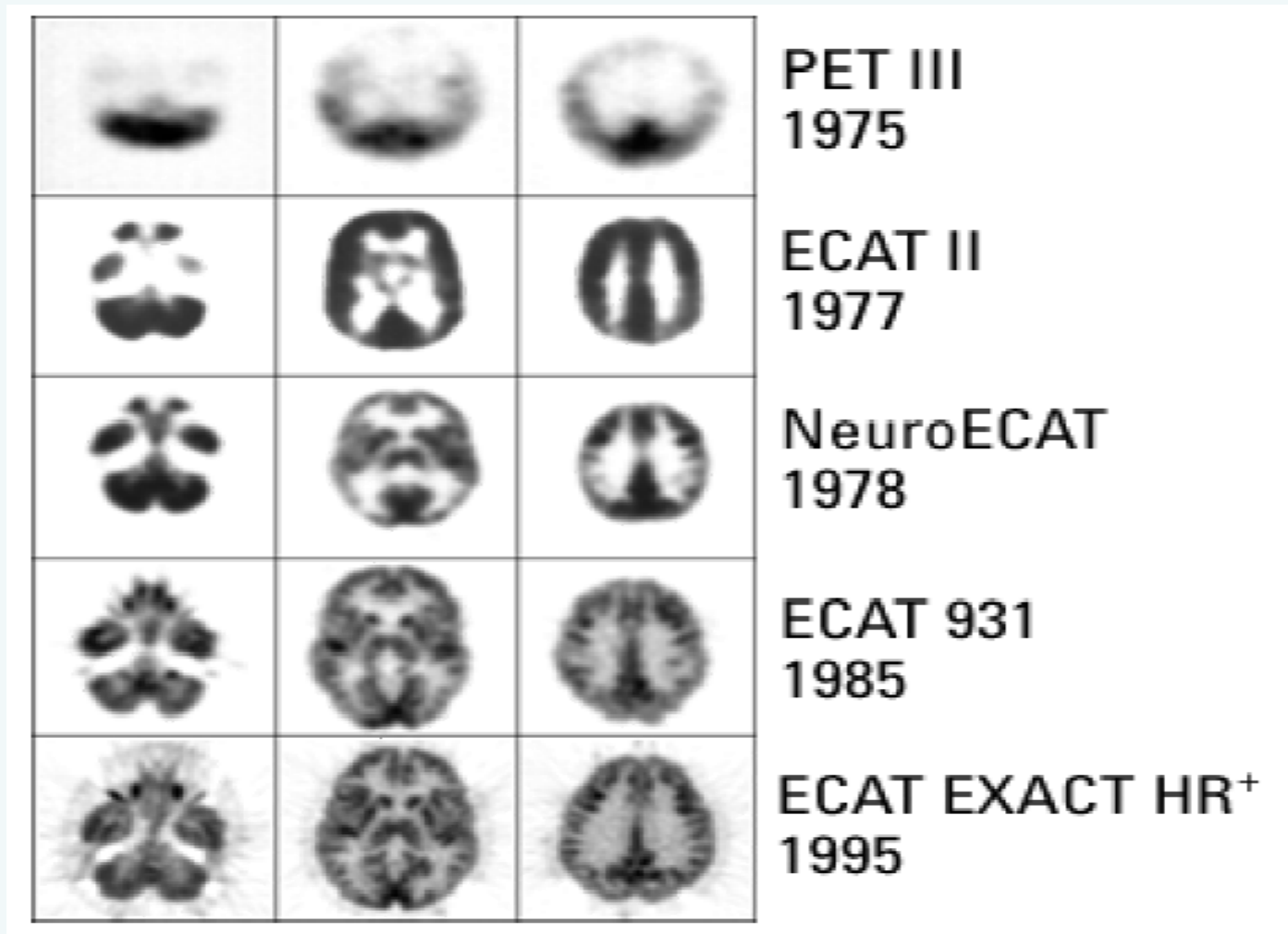
On observe des photons en coïncidence à l'énergie de masse de l'électron (= du positon)

Produit radioactif : se désintègre en produisant des positons



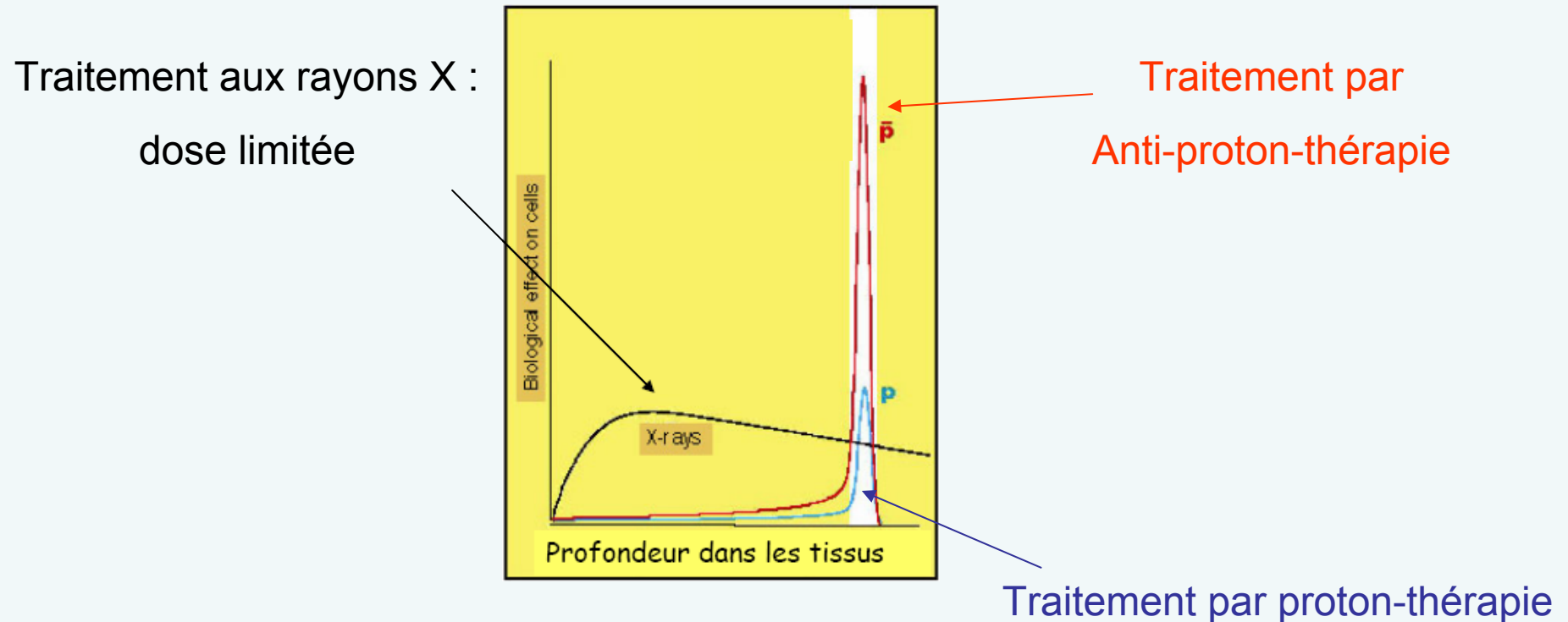
Applications médicales

On cartographie ainsi l'activité du produit introduit



Applications médicales

- Hadronthérapie avec des antiprotons



Comme les protons, le dépôt d'énergie est très local

Annihilation \rightarrow plus d'énergie déposée

L'antimatière comme traceur de la matière noire

Quelque part ici, la matière prédomine sur l'antimatière: notre Univers n'est plus symétrique (lien avec la violation de la symétrie CP)

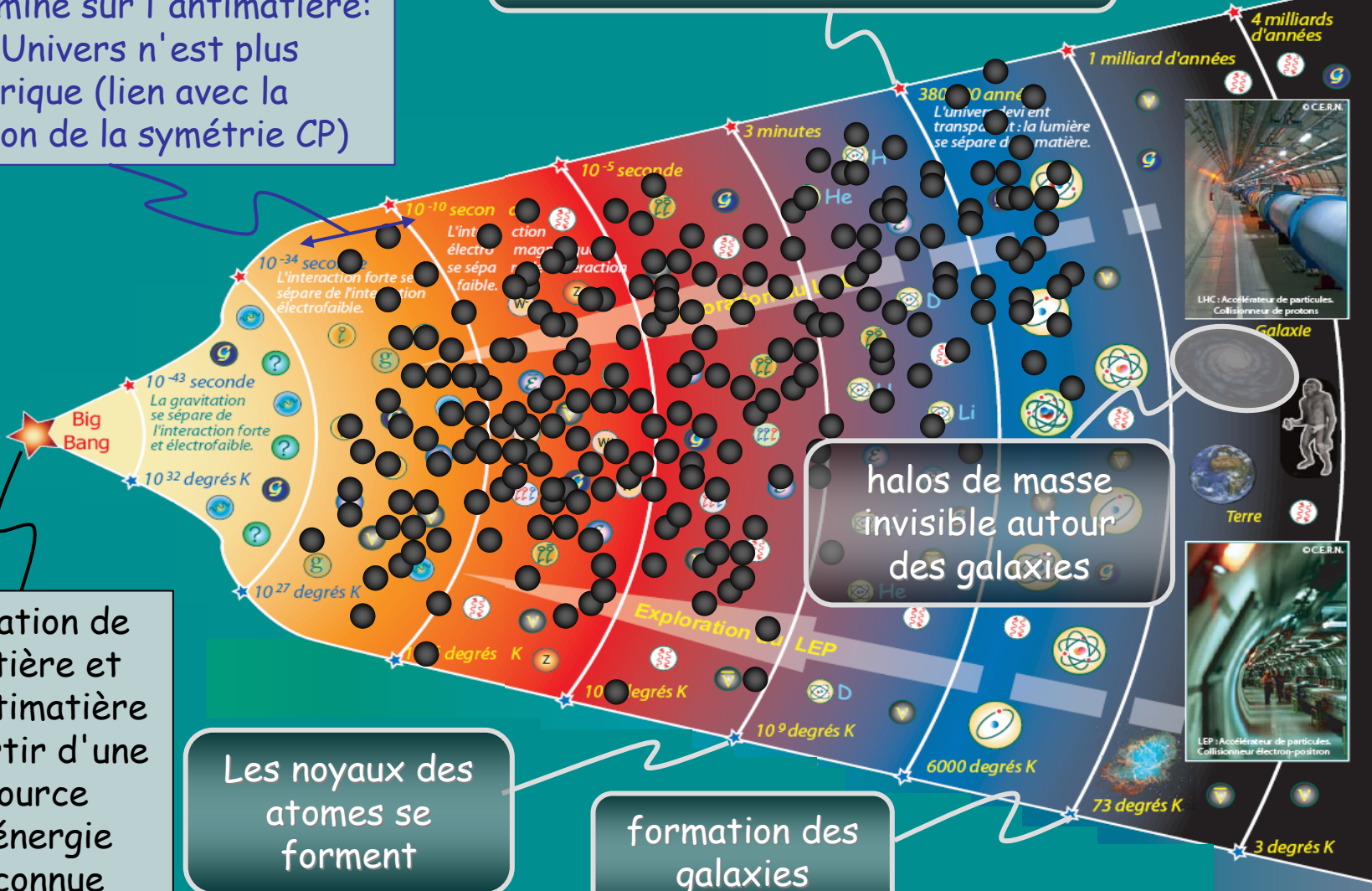
Les atomes se forment : les photons se propagent librement

Création de matière et d'antimatière à partir d'une source d'énergie inconnue

Les noyaux des atomes se forment

formation des galaxies

halos de masse invisible autour des galaxies



La matière noire

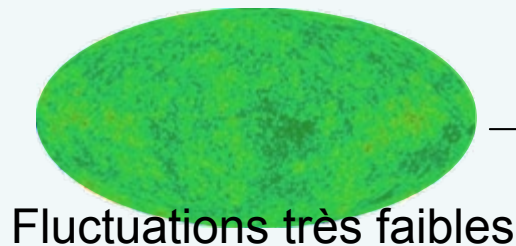
Les mesures actuelles pointent que 84% de la matière est

- non lumineuse
- faite d'un type de matière inconnu

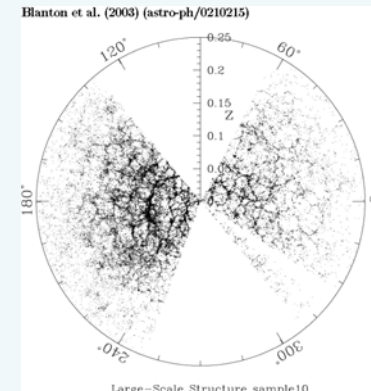
Ce chiffre vient :

- du mouvement étrange des étoiles dans les galaxies
- de l'observation du fond diffus cosmologique
- de la répartition des galaxies dans l'Univers
- des modèles de formation des structures
- de notre compréhension des réactions lors du Big-Bang

Exemple :

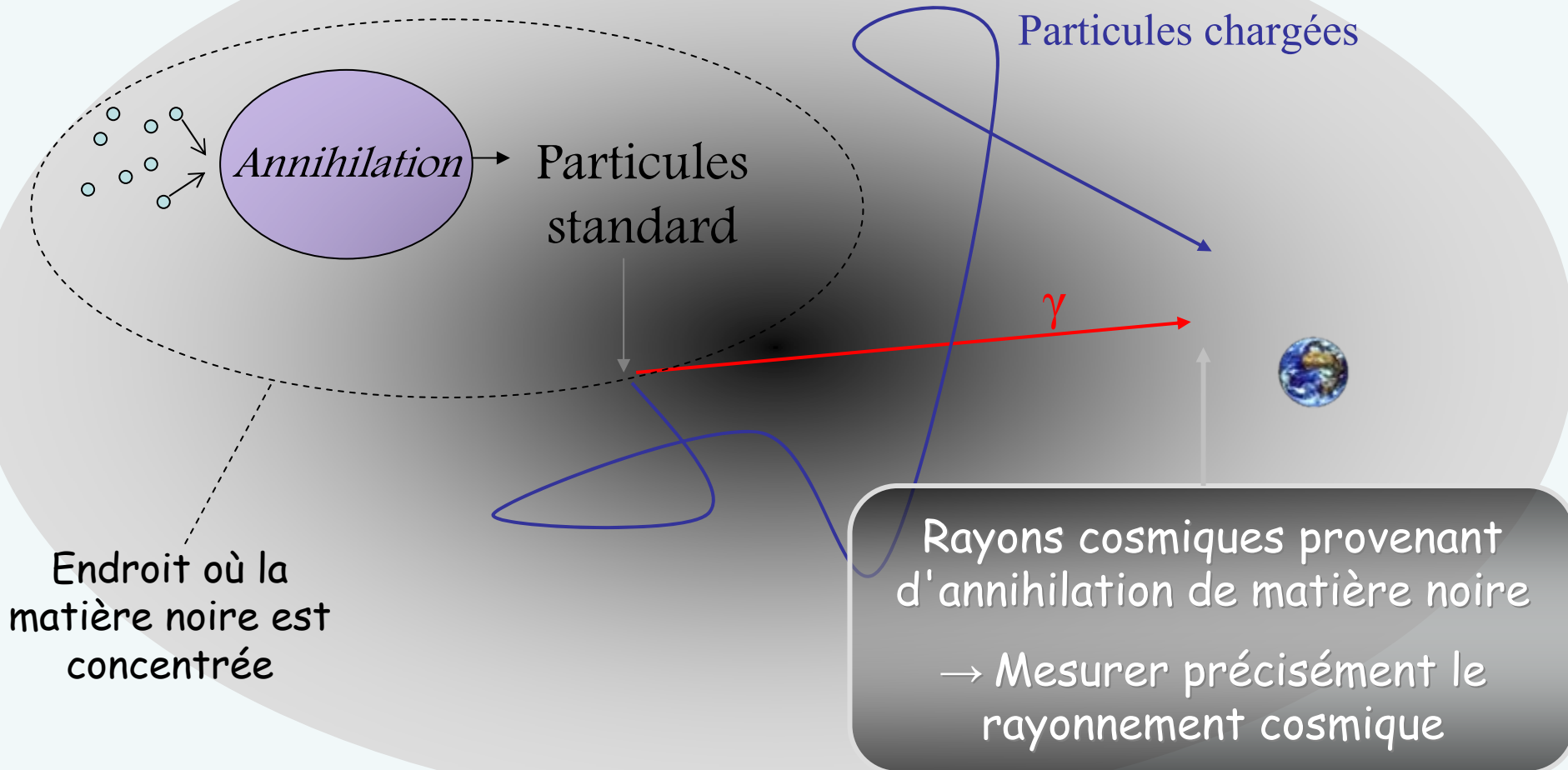


Observation du
même Univers



Matière noire et rayons cosmiques

Les particules de matière noire sont peut-être leur propres anti-particules : elles pourraient s'annihiler !



Endroit où la matière noire est concentrée

Rayons cosmiques provenant d'annihilation de matière noire

→ Mesurer précisément le rayonnement cosmique

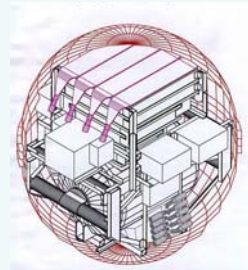
On regarde l'excès d'antimatière car le bruit de fond est bien plus faible

Excès de positons : matière noire ?

Résultats de l'expérience HEAT : excès de positons

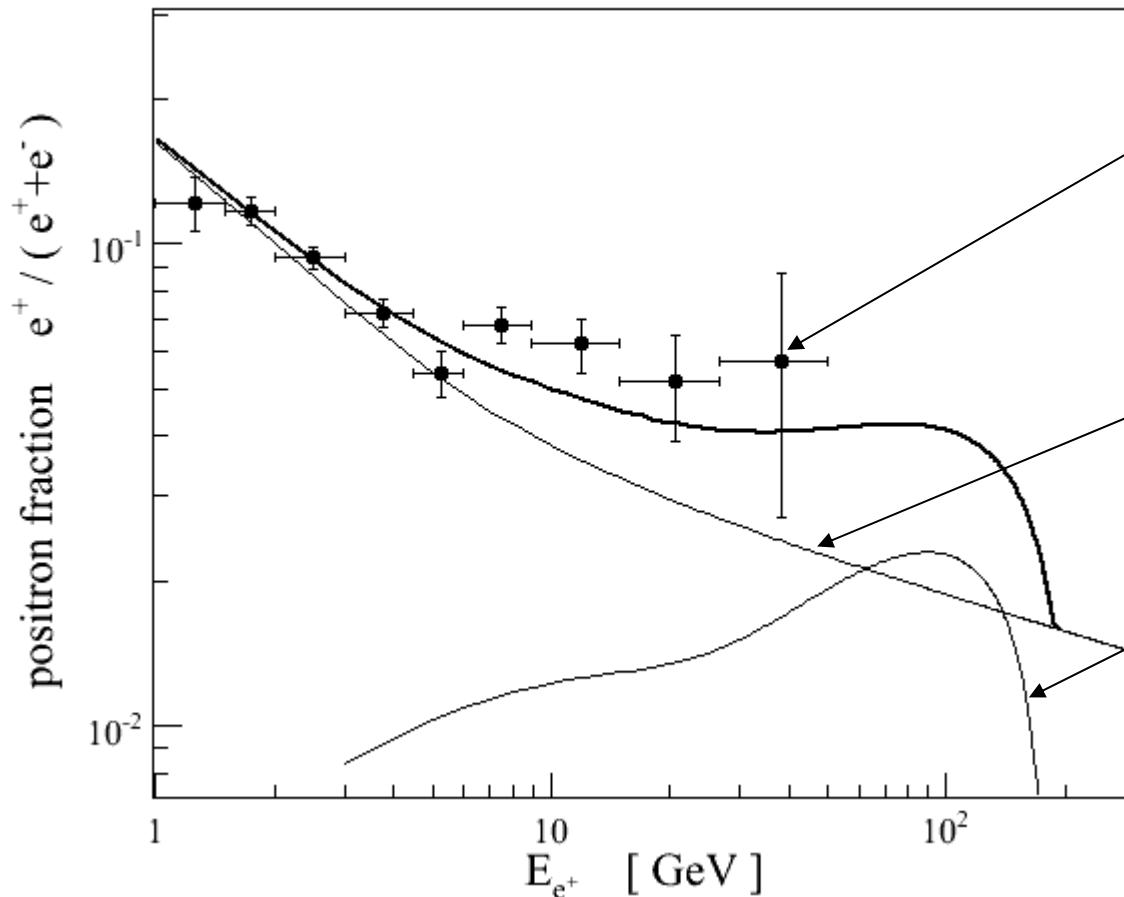


Mesure de l'expérience HEAT



Signal standard

Prédiction :
Signal de matière noire



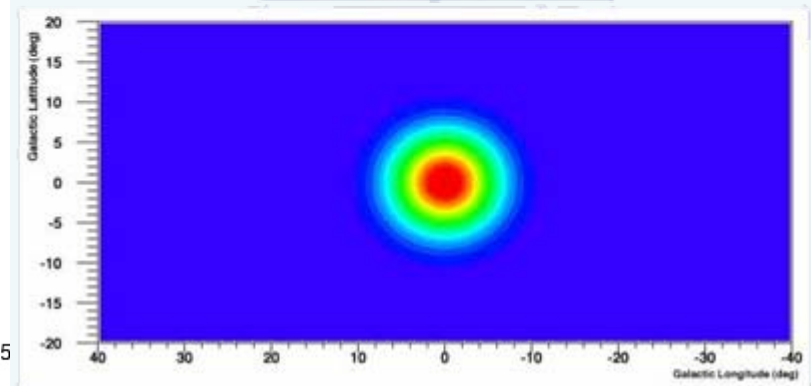
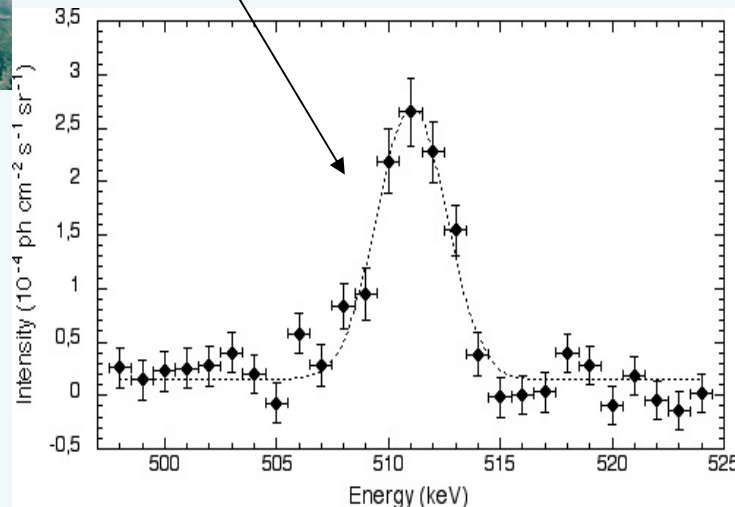
AMS améliorera sensiblement la mesure

Mystère au centre galactique

Le satellite INTEGRAL observe le CG en 2003 :



511 keV : l'énergie de masse de l'électron !



Il y a donc des positon (un peu) au centre de la galaxie !

Mystère sur leur origine : matière noire légère, explosion d'étoile ?

Conclusions

L'antimatière n'est pas de la science fiction

Elle n'en est pas moins fascinante

- découverte théoriquement puis observée
- utilisée pour
 - l'imagerie médicale
 - le traitement des tumeurs
 - la recherche de nouvelles particules
- elle pourrait apporter des réponses aux grandes questions de la physique moderne