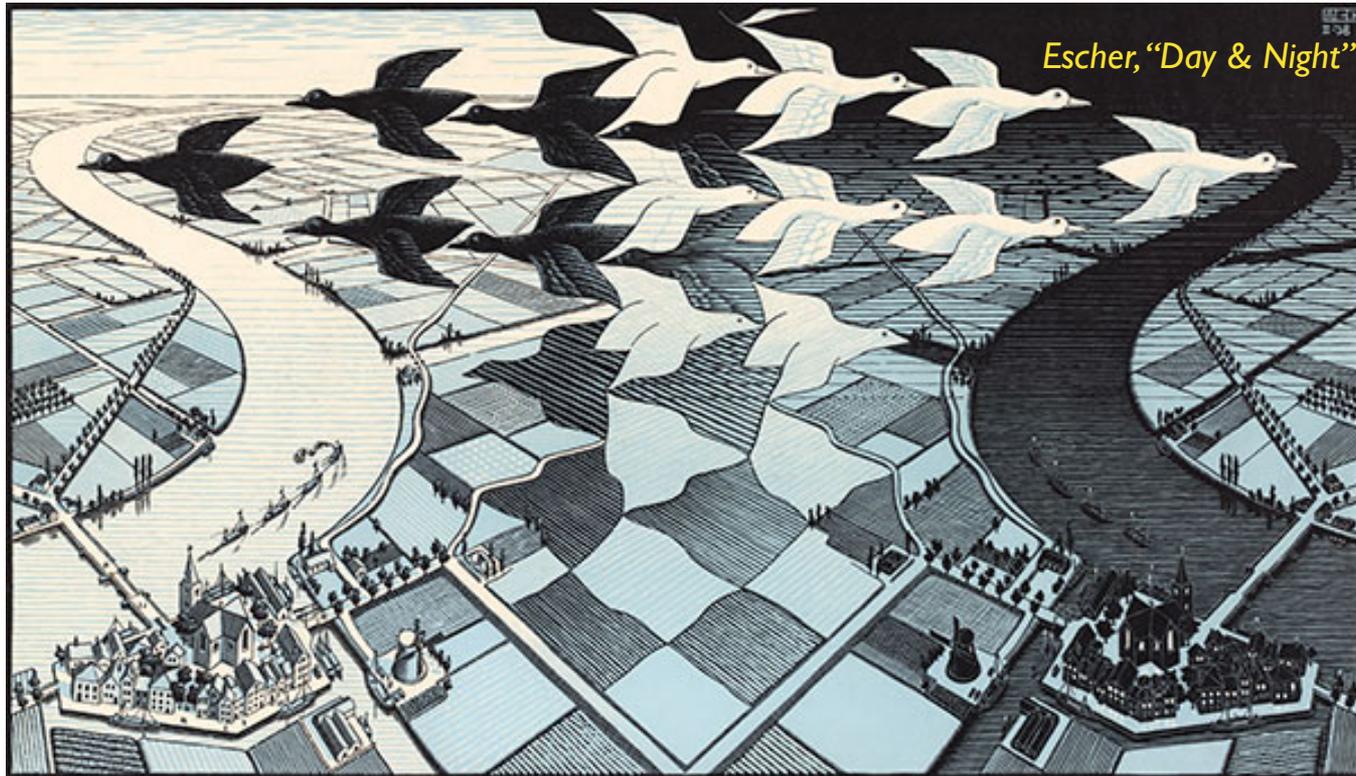


Un (anti)voyage dans l'antimatière



Pasquale Dario Serpico

LAFPT_h

*La nuit de l'antimatière, 1 Avril 2019
site d'Annecy*



Plan

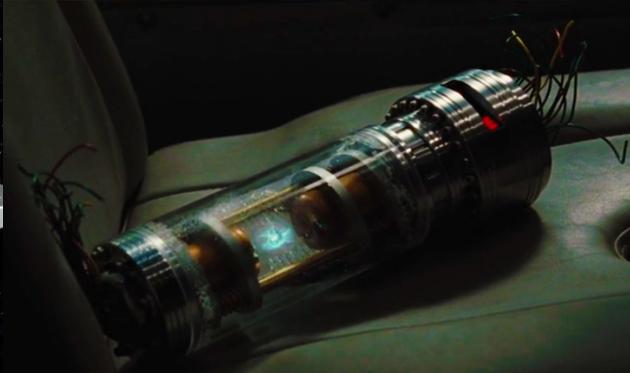
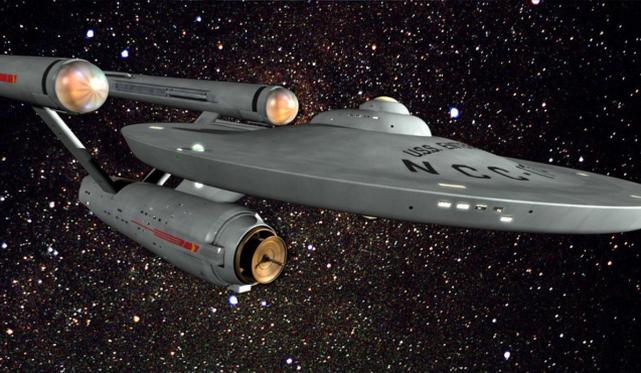
- ▶ Définition et découverte de l'antimatière
- ▶ Sources d'antimatière
- ▶ L'antimatière dans l'univers
- ▶ L'antimatière pour quoi faire ...

- ▶ **Définition et découverte de l'antimatière**
- ▶ Sources d'antimatière
- ▶ L'antimatière dans l'univers
- ▶ L'antimatière pour quoi faire ...

Antimatière, vous avez dit Antimatière ?

Le mot "antimatière" est entouré d'une certaine aura de mystère, et suscite bon nombre de questions aux curieux des sciences.

Je suis sûr que vous avez entendu ce mot, au moins au cinéma ou à la télé !



Antimatière, vous avez dit Antimatière ?

Le mot "antimatière" est entouré d'une certaine aura de mystère, et suscite bon nombre de questions aux curieux des sciences.

Je suis sûr que vous avez entendu ce mot, au moins au cinéma ou à la télé !

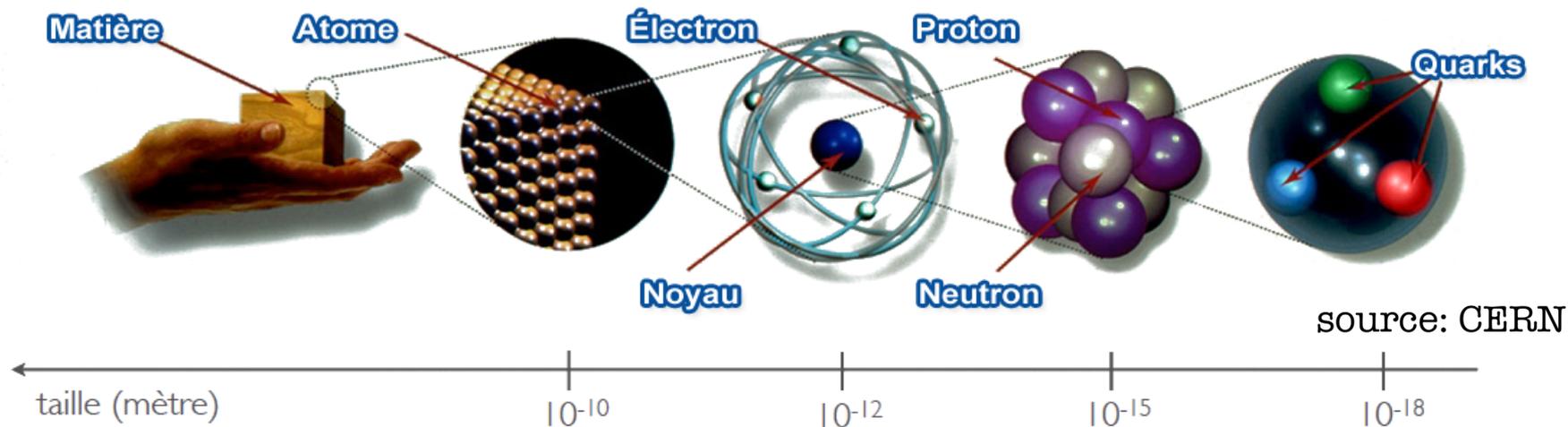
C'est quoi, l'antimatière ?

probablement moins bizarre que vous ne le croyez !

L'antimatière c'est de l'**anti**-matière.

Pour comprendre l'**anti**, il faut comprendre quelques notions sur la **matière** ...

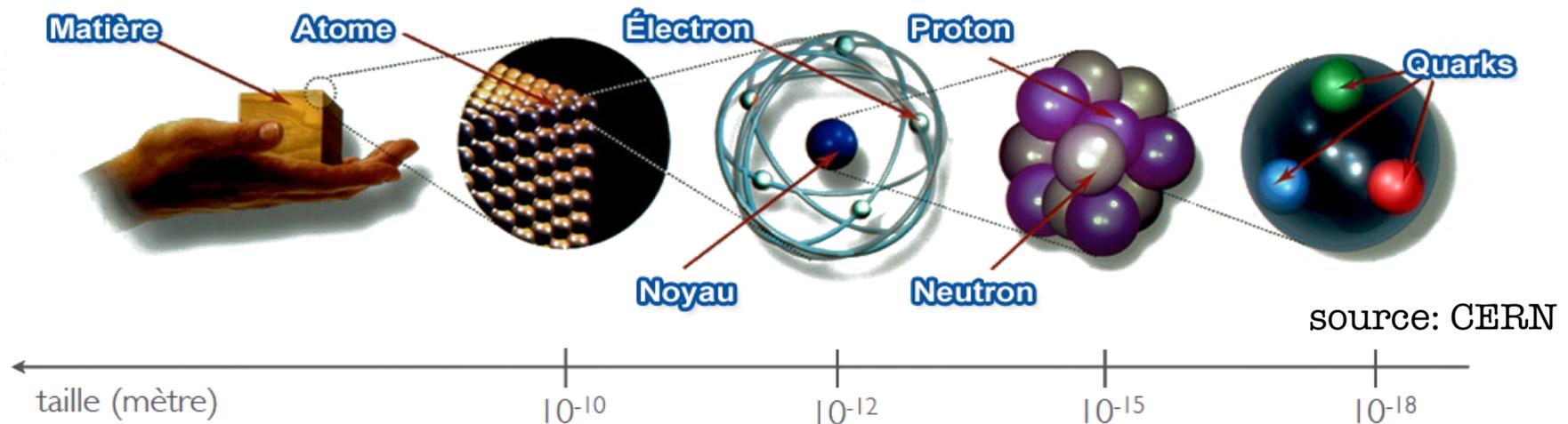
Les constituants élémentaires de la matière



Matière → Atome → Electron + Noyau → Proton, Neutron → Quark

Particules : électron, quark mais aussi muon (μ), photon (γ), neutrino (ν)...

Les constituants élémentaires de la matière



Matière → Atome → Electron + Noyau → Proton, Neutron → Quark

Particules : électron, quark mais aussi muon (μ), photon (γ), neutrino (ν)...

Elles peuvent **interagir** entre elles = elles sont soumises à des forces (4)
→ ex: charges électriques +- ou -+ s'attirent, ++ ou -- se repoussent

Elles peuvent se transformer en d'autres particules : désintégrations radioactives

Radioactivité : ensemble des processus par lesquels un noyau se transforme en un autre, en émettant des particules

Prédiction de l'antimatière

Particules élémentaires : très **petites** et peuvent aller très **vite**

2 nouvelles “théories” sont inventées au début du XX^e siècle :

→ petit : mécanique quantique

→ vite : relativité restreinte (Einstein “ $E=mc^2$ ”)

Prédiction de l'antimatière

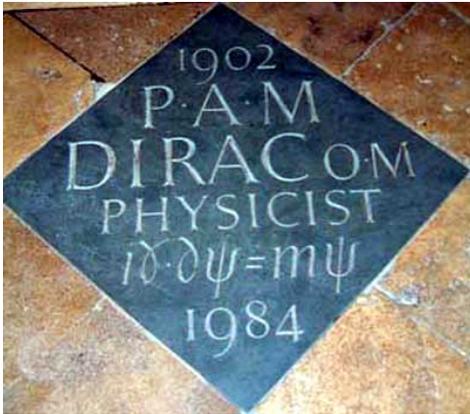
Particules élémentaires : très **petites** et peuvent aller très **vite**

2 nouvelles “théories” sont inventées au début du XX^e siècle :

→ petit : mécanique quantique

→ vite : relativité restreinte (Einstein “ $E=mc^2$ ”)

En 1928 Paul Dirac (à 26 ans) écrit l'équation du mouvement d'une particule chargée **quantique** et **relativiste (TQC)**



première (seule?) équation jamais écrite dans l'église de Westminster



...il trouve 2 solutions à son équation. La première solution correspond à l'électron. La deuxième solution est identique à l'électron mais avec une énergie négative !!!

Prédiction de l'antimatière

Lorsqu'on résout des équations, on peut trouver plusieurs solutions
(exemple : $x^2=4 \rightarrow x=+2$ et $x=-2$)

c'est le cas de l'équation de Dirac!

Souvent, des modèles mathématiques utilisés pour décrire la nature admettent plusieurs solutions, dont *souvent* seulement une a un sens physique ; les autres sont donc négligées.

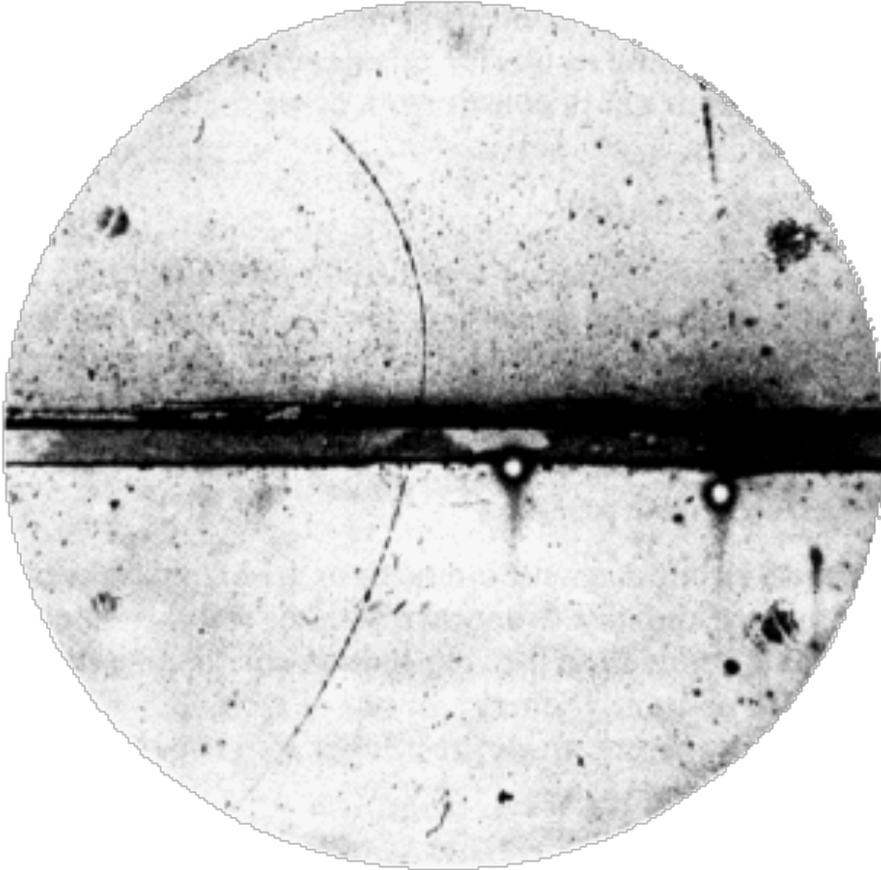
Mais le génie de Paul Dirac fut d'insister :
toutes les solutions de son équation avaient un sens physique !
l'une décrit **l'électron**, l'autre **l'anti-électron**.

Découverte de l'antimatière

En 1932, parmi des particules énergétiques qu'on trouve dans l'atmosphère (et qu'on appelle les rayons cosmiques), Anderson observe la particule suivante :

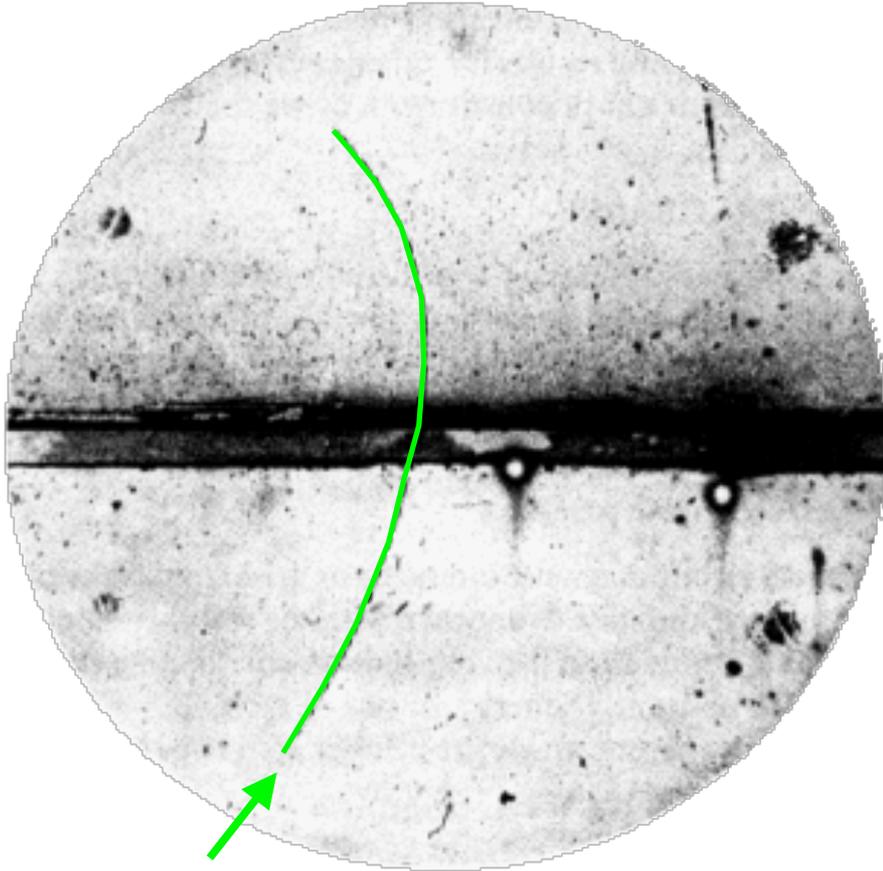
Découverte de l'antimatière

En 1932, parmi des particules énergétiques qu'on trouve dans l'atmosphère (et qu'on appelle les rayons cosmiques), Anderson observe la particule suivante :



Découverte de l'antimatière

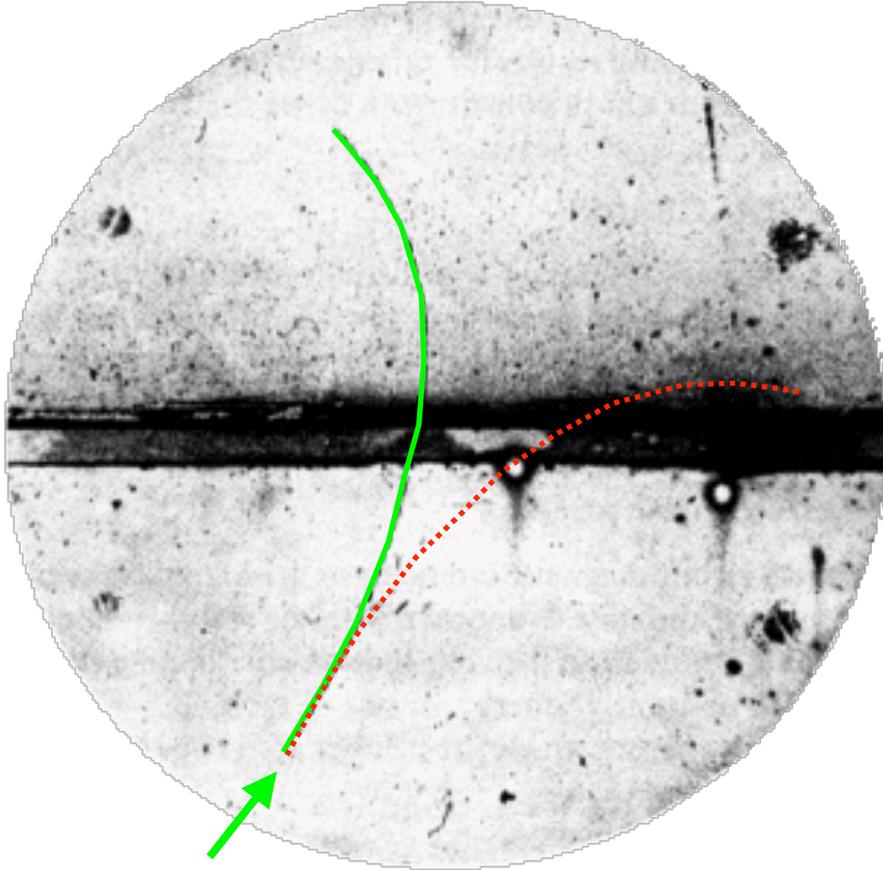
En 1932, parmi des particules énergétiques qu'on trouve dans l'atmosphère (et qu'on appelle les rayons cosmiques), Anderson observe la particule suivante :



- arrive du bas

Découverte de l'antimatière

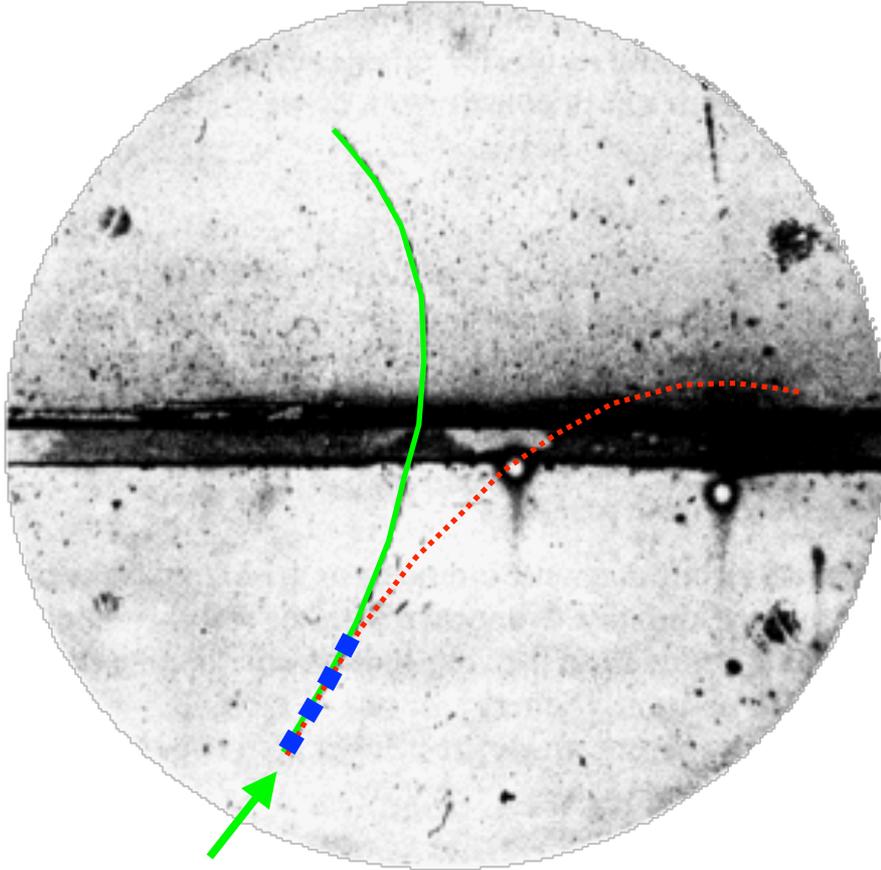
En 1932, parmi des particules énergétiques qu'on trouve dans l'atmosphère (et qu'on appelle les rayons cosmiques), Anderson observe la particule suivante :



- arrive du bas
- n'est pas un électron

Découverte de l'antimatière

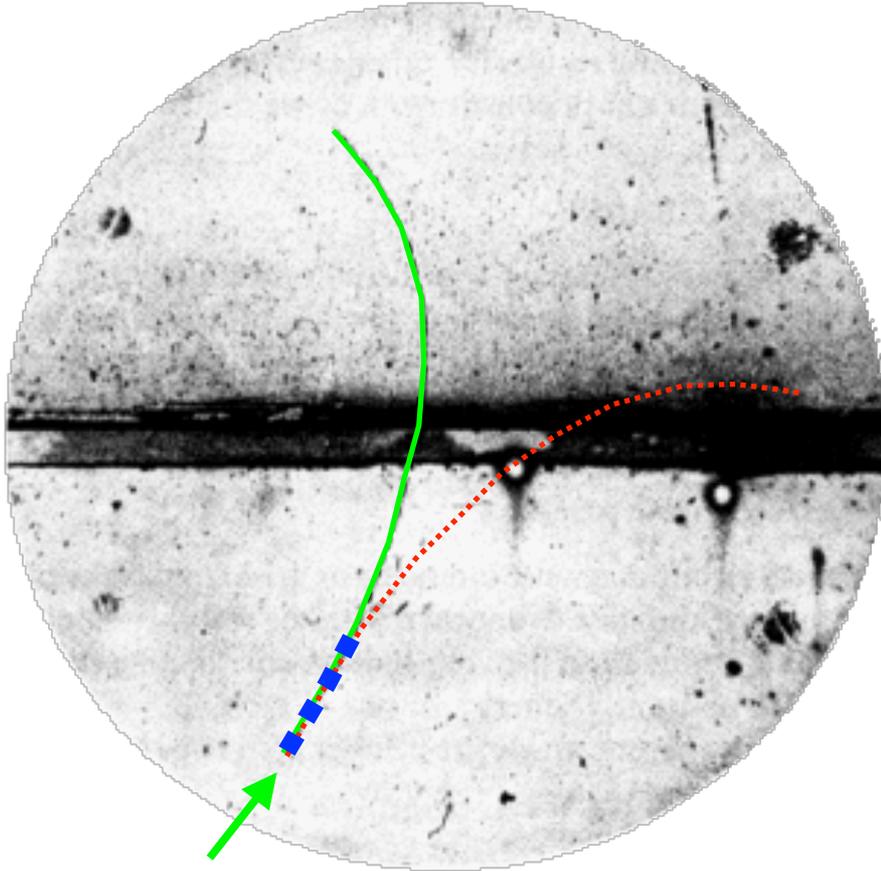
En 1932, parmi des particules énergétiques qu'on trouve dans l'atmosphère (et qu'on appelle les rayons cosmiques), Anderson observe la particule suivante :



- arrive du bas
- n'est pas un électron
- n'est pas un proton

Découverte de l'antimatière

En 1932, parmi des particules énergétiques qu'on trouve dans l'atmosphère (et qu'on appelle les rayons cosmiques), Anderson observe la particule suivante :



- arrive du bas
- n'est pas un électron
- n'est pas un proton
- c'est la 2^{ème} solution de l'équation de Dirac
- c'est la 1^{ère} antiparticule

le **Positron**

Le résultat mathématique de Dirac correspond donc à quelque chose de réel (Prix Nobel 1933 pour Dirac, 1936 pour Anderson) !

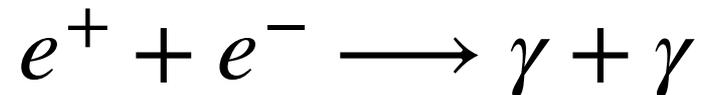
La propriété cruciale de l'AM : annihilation

Les antiparticules ressemblent souvent aux particules dans leur comportement.

La **propriété** qui fait qu'on les qualifie parfois de mystérieuses et qui leur vaut leur préfixe "anti", est la suivante : *quand une particule rencontre son antiparticule, une réaction peut avoir lieu, qui conduit à l'annihilation des deux, c'est-à-dire leur disparition, avec apparition d'autres particules.*

Souvent, des photons de haute énergie, plus précisément des rayons γ

La réaction de ce type la plus célèbre est:



Généralisation

La cohérence des TQC (*Escher...*) demande que pour chaque particule il y ait une antiparticule, avec toutes ses charges (ex. électrique) opposées. Pour des particules neutres, comme le photon, les deux *peuvent* coïncider

électron (e^-)	←→	positron (e^+)
muon (μ^-)	←→	antimuon (μ^+)
neutrino (ν)	←→	antineutrino ($\bar{\nu}$)
quarks (q)	←→	antiquarks (\bar{q})
photon (γ)	←→	photon (γ)

Ces antiparticules peuvent interagir entre elles et se lier pour former des anti-noyaux ainsi que de l'antimatière à proprement parler:

proton (p)	←→	antiproton (\bar{p})
hydrogène (H)	←→	anti-hydrogène (\bar{H})
...		...

- ▶ Définition et découverte de l'antimatière
- ▶ **Sources d'antimatière**
- ▶ L'antimatière dans l'univers
- ▶ L'antimatière pour quoi faire ...

La radioactivité

C'est un phénomène naturel

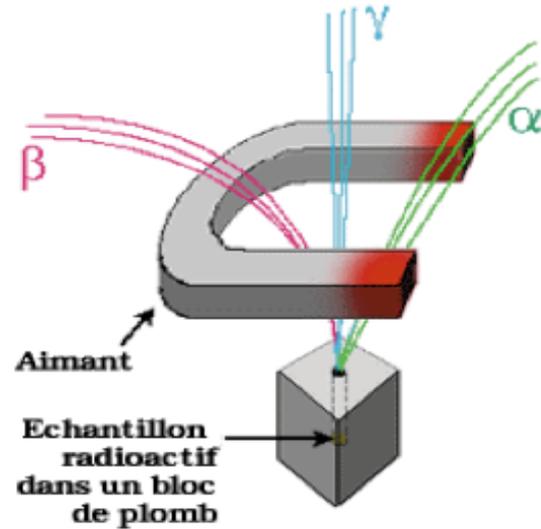
Il y a dans la nature des atomes (des noyaux) instables = radioactifs

Il existe 3 types de radioactivité : α, β, γ

La radioactivité β correspond à la désintégration, dans le noyau, d'un neutron (β^-) ou d'un proton (β^+) :



Exemple (pas au hasard ...) : ${}_{15}^{30}\text{P} \rightarrow {}_{15}^{30}\text{Si} + e^+ + \nu$
(P : Phosphore, Si : Silicium)

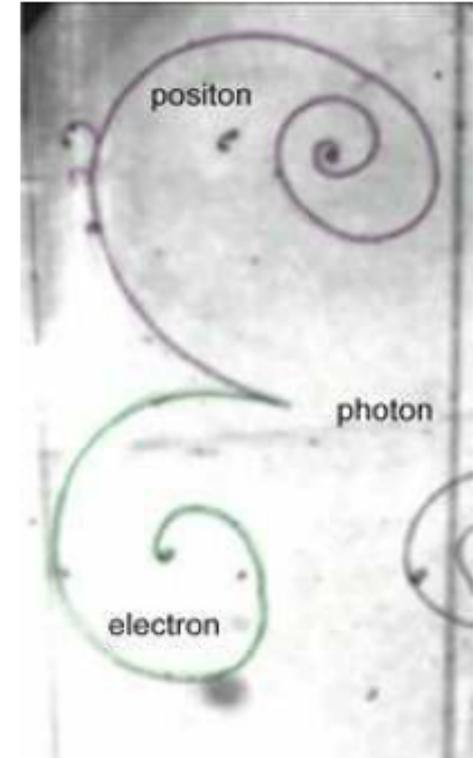
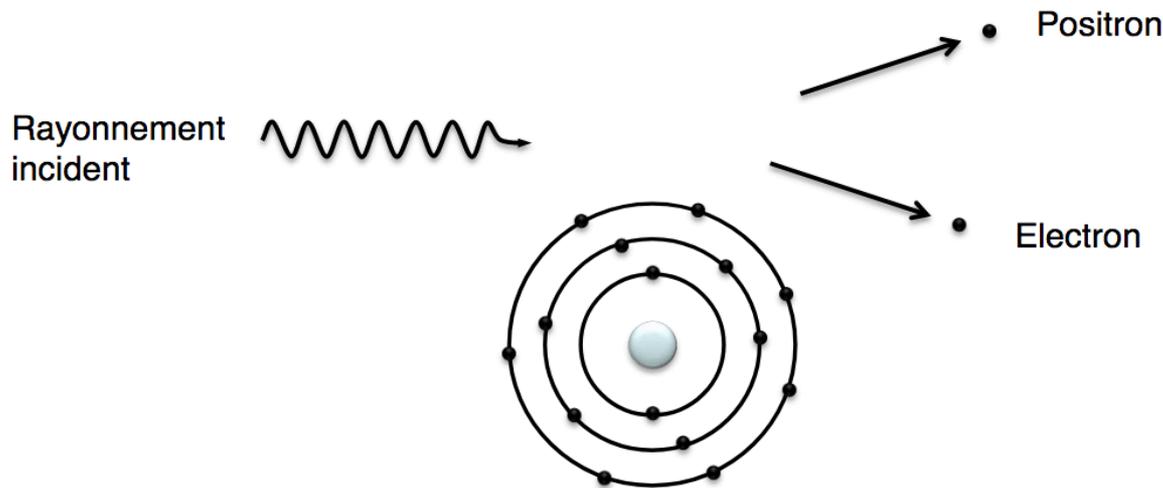


Les collisions de haute énergie

Lorsqu'une particule subit un choc avec une autre particule, (une partie de) l'énergie du choc peut se convertir en masse : c'est l'une des conséquences de la formule $E=mc^2$... (c : vitesse de la lumière)

...hem, pas exactement, car elle ne prend en compte que la "masse au repos" !

Exemple: création de paires par "conversion" de gamma

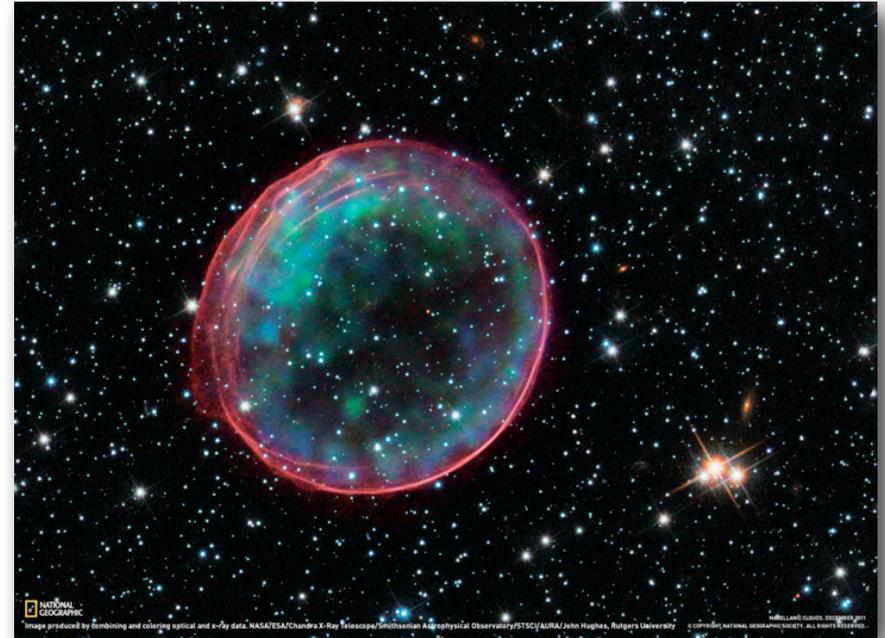
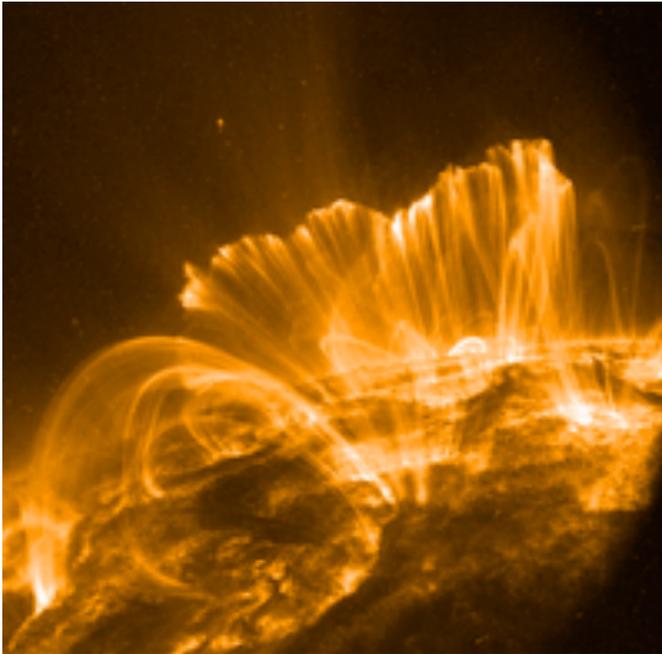


Création d'une paire e^-e^+ par conversion d'un γ incident

Option I : les rayons cosmiques (RC)

La Nature a ses propres accélérateurs de particules !

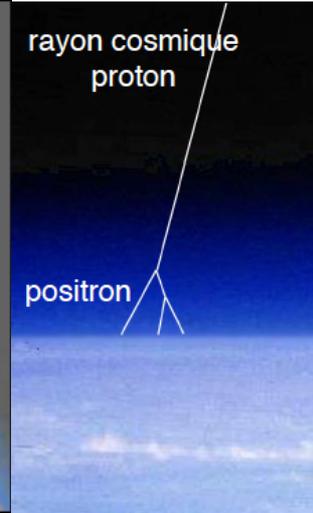
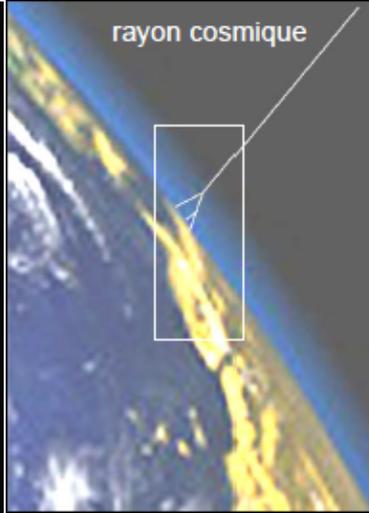
“Particules”* d’énergie “relativiste” ($v \sim c$) qui proviennent d’événements astrophysiques violents (tempêtes magnétiques solaires, explosions d’étoiles dans notre Galaxie...)



*surtout protons, $\sim 10\%$ de noyaux d'He, traces ($\sim 1\%$) de noyaux plus lourds et d'e-

Les précurseurs

Ce qu'on a commencé par détecter il y a un siècle étaient les particules “secondaires” produites lorsque des particules “primaires” tapent sur les atomes de l’atmosphère



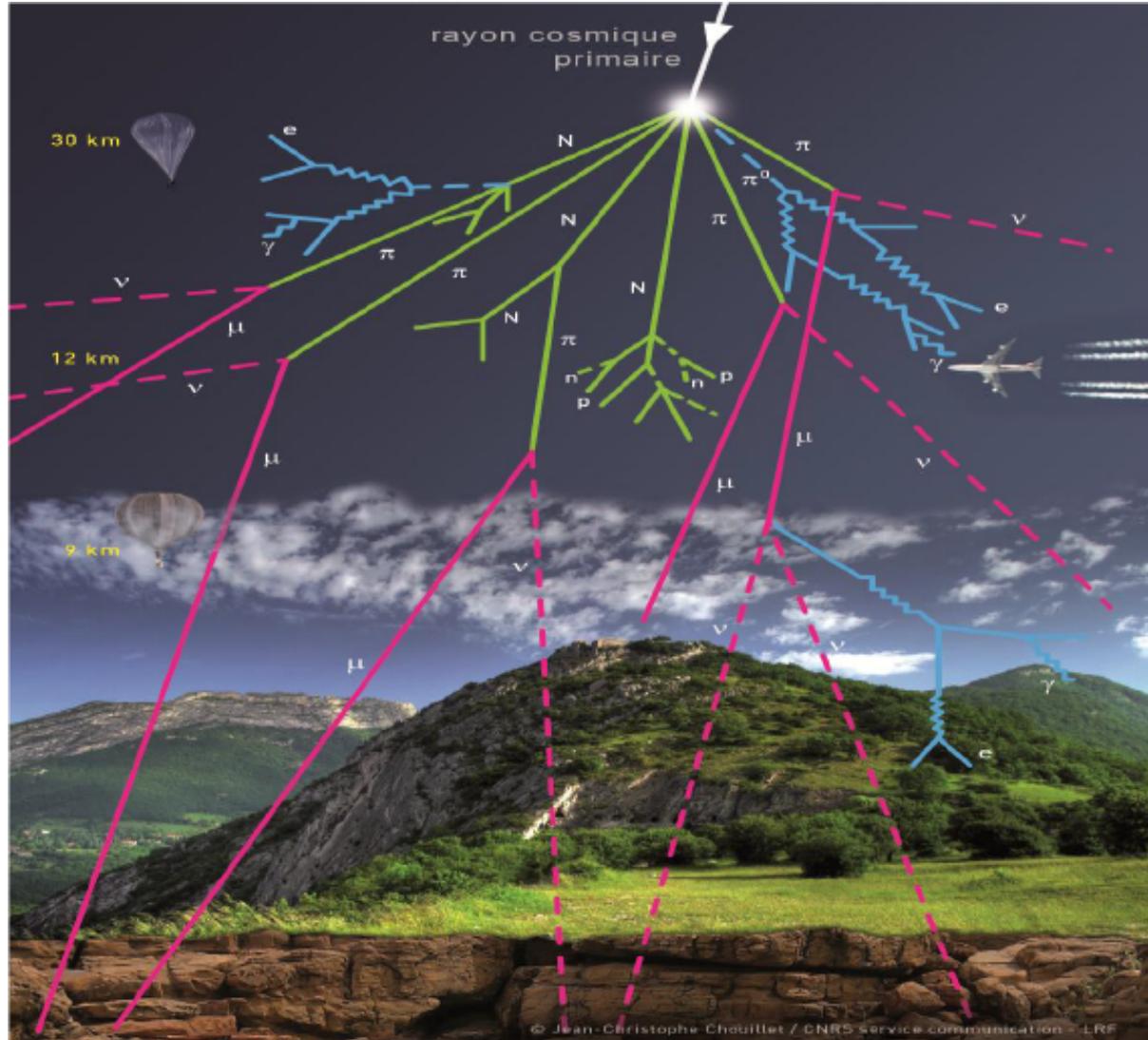
parfois des noyaux radioactifs sont créés, comme le ^{14}C utilisé pour les datations

Victor F. Hess part au boulot:

à la chasse aux Rayons Cosmiques dans la “banlieue” de Vienne (Autriche), environ 1911

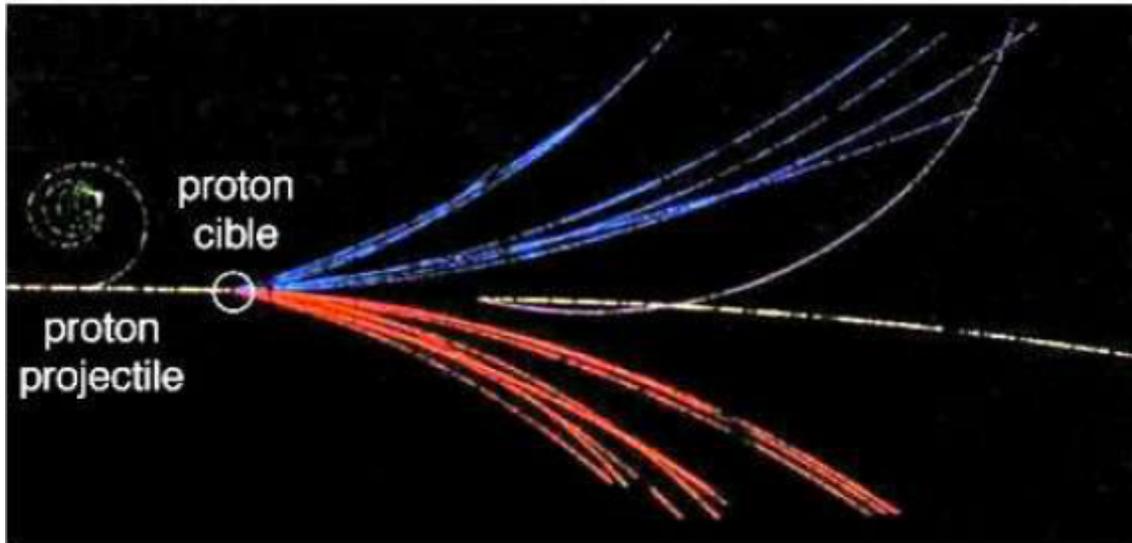


Les Rayons Cosmiques “sur Terre”



~1932-53: “Zoo” de particules dans le *rayonnement cosmique*, dont le *positron* e^+ mais aussi μ , π , particules étranges (K , Λ , Ξ , Σ) et l’antiproton raté de peu ...

Option II : Des collisionneurs “artificiels”



Création de particules et antiparticules par collision d'un proton sur un autre proton au repos



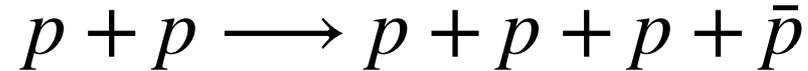
CERN, anneau du LHC (souterrain !)

Raison principale:

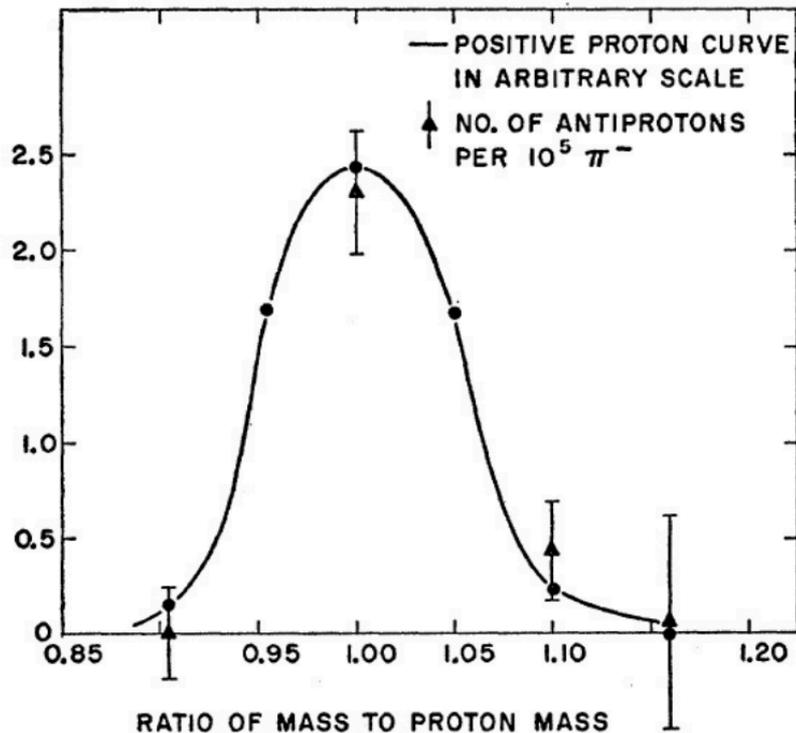
plus d'énergie implique la possibilité de créer des particules (et antiparticules) de plus en plus massives (“lourdes”) !

Des collisionneurs de plus en plus énergétiques

Exemple: en 1955 au “Bevatron” de Berkeley, USA on a produit la réaction



Chamberlain *et al.* “Observation of Antiprotons” *Phys. Rev.* 100, 947, 24/10/1955
Prix Nobel à Chamberlain & Segrè en 1959.



À présent, le LHC au CERN
atteint une énergie plus
que 2000 fois supérieure !

Production d'anti-hydrogène au CERN

- ▶ En 1995 au CERN des positrons ont été combinés avec des antiprotons pour former quelques atomes d'anti-hydrogène au LEAR
- ▶ En 2011, l'expérience ALPHA a réussi à piéger des atomes d'anti-hydrogène pendant 16 minutes ... pas simple, car ils sont neutres!
- ▶ Aujourd'hui, des études spectroscopiques de précision sont menées

- *Le spectre de raies des antiatomes est-il le même que celui des atomes ?*
- *Chutent-ils de la même manière dans la pesanteur terrestre ?*

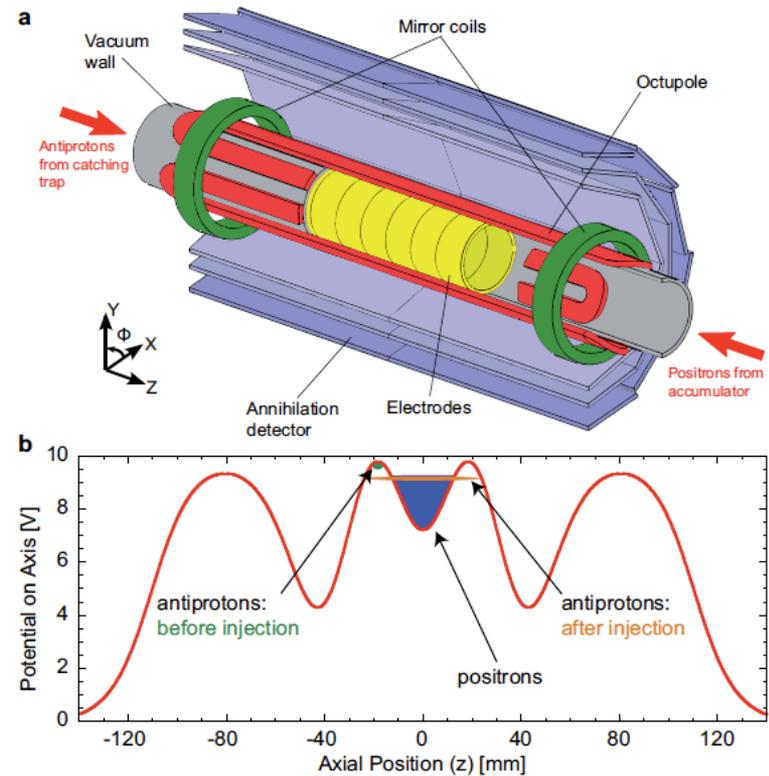


schéma d'un piège à antihydrogène



- ▶ Définition et découverte de l'antimatière
- ▶ Sources d'antimatière
- ▶ **L'antimatière dans l'univers**
- ▶ L'antimatière pour quoi faire ...

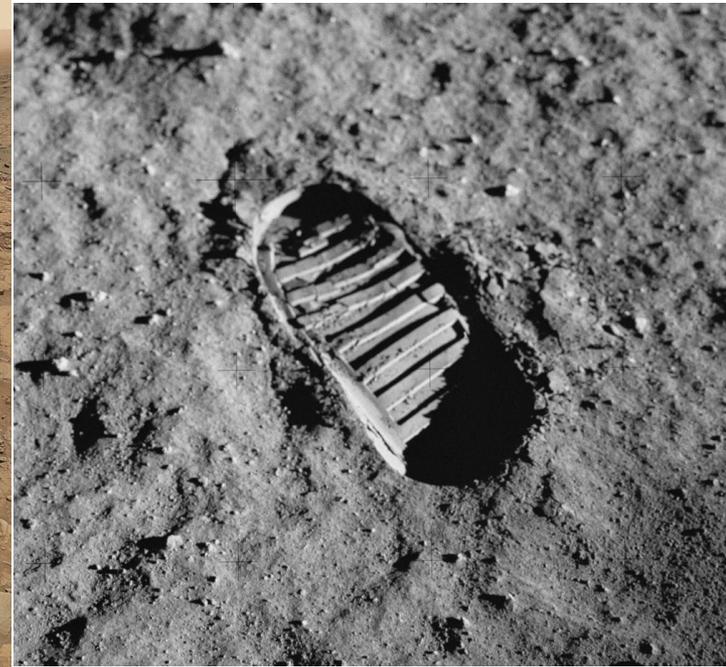
Une observation ... qui devrait vous étonner !



Cassini, Titan



autoportrait de Curiosity, Mars



Apollo 11, Lune

**Le système solaire (terre incluse !)
ne semble être fait que de matière...**

Que quelques traces dans le Rayonnement Cosmique...

Seulement une particule d'antimatière sur ~10000 (e^+ , \bar{p})

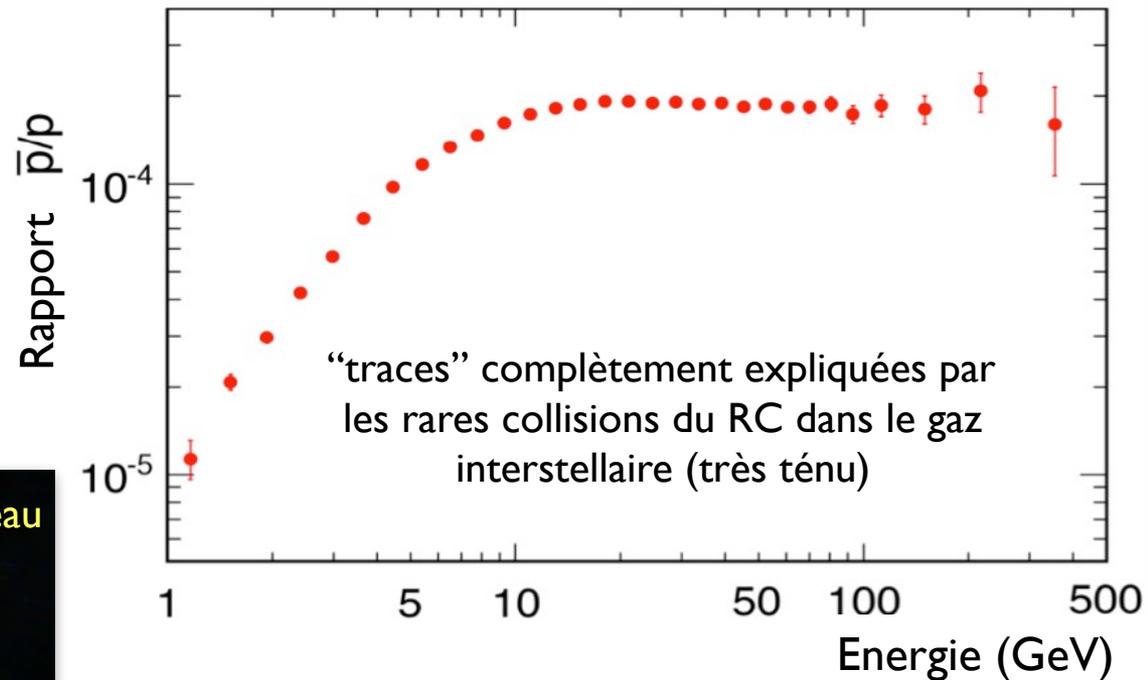
AMS-02

détecteur embarqué sur la station spatiale internationale, pour mesurer les RC "primaires" avant qu'ils interagissent avec l'atmosphère



présenté par V. Poireau

AMS \bar{p}/p results



S'il y avait autant d'étoiles que d'anti-étoiles dans la Galaxie, on devrait recevoir un flux d'anti-p semblable à celui des p, de noyaux d'antihélium semblable à celui de hélium, etc.

Un univers fait ... que de matière ?

plus en général, la cosmologie nous dit qu'il n'y a pas de traces significatives d'antimatière *dans l'univers observable*

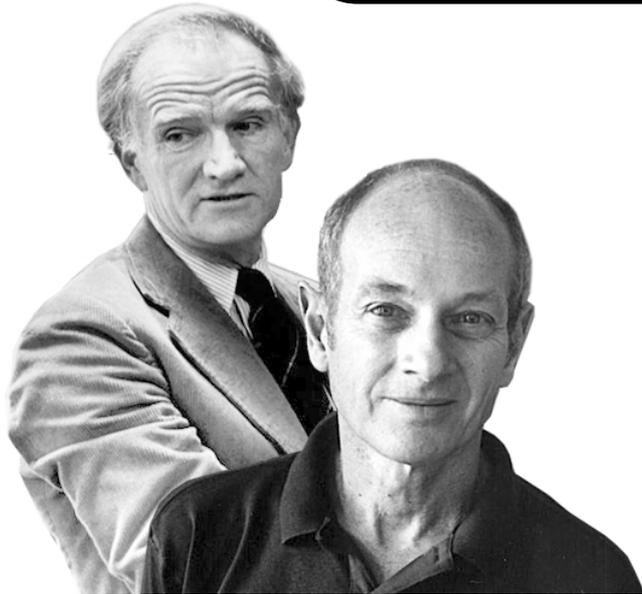
Mais les réactions qui créent de l'antimatière créent en même temps de la matière... Comment comprendre alors que nous vivons dans un Univers apparemment constitué presque exclusivement de matière ?



**C'est l'un des plus grands mystères de la physique contemporaine !
l'Asymétrie matière-antimatière**

La bonne nouvelle...

matière et antimatière ne se comportent pas exactement de la même manière !



découverte dans l'expérience conduite par Cronin & Fitch en 1964 (Prix Nobel 1980)



Comment expliquer cette petite différence dans le Modèle Standard (1973, Kobayashi & Maskawa...)
...mécanisme confirmé depuis aux "Usines à B"...

prix Nobel 2008



La mauvaise (?) nouvelle & pistes de solution

les processus connus sont loins d'expliquer quantitativement le niveau d'asymétrie observé.

Il faut appeler à contribution de la nouvelle physique !

C'est l'une des motivations les plus fortes pour continuer à sonder des différences entre les propriétés des particules et des antiparticules

Ex.:



ainsi que pour des développements théoriques

- ▶ Définition et découverte de l'antimatière
- ▶ Sources d'antimatière
- ▶ L'antimatière dans l'univers
- ▶ **L'antimatière pour quoi faire ...**

Quelques... utilisations pratiques de l'antimatière

- ▶ L'industrie de la science-fiction (cinéma, littérature...) : \$\$\$\$\$
- ▶ analyse de (défauts dans les) solides par annihilation de positrons
- ▶ scanners à tomographie par émission de positrons (TEP/PET) comme outil diagnostique ou pour la recherche biomédicale

E. Masson va vous présenter ce dernier

Pour l'intro, c'est fini !

Les 4 choses à retenir :

L'antimatière ...

- existe en traces dans la nature : radioactivité β^+ , RC
- s'annihile rapidement avec la matière
- n'a pas l'air d'exister dans l'Univers ... (mystère !)
- est utile pour plein de choses (physique fondamentale, médecine, matériaux, etc ...)