

L'énigme de l'antimatière

Marco Zito

LPNHE (IN2P3/CNRS, Sorbonne Université, UPC)
et DPhP/IRFU (CEA Saclay)

Société Astronomique de Montgeron

14 décembre 2024

Sommaire

- Introduction
- Antimatière et particules élémentaires
- Où est passé l'antimatière primordiale ?
- Des applications ?

Le moment philo

- « Pourquoi il y a plutôt quelque chose que rien ? Car le rien est plus simple et plus facile que quelque chose. De plus, supposé que des choses doivent exister, il faut qu'on puisse rendre raison pourquoi elles doivent exister ainsi, et non autrement. »
- Gottfried Wilhelm Leibniz (1646-1716), Principes de la nature et de la grâce, 1714.

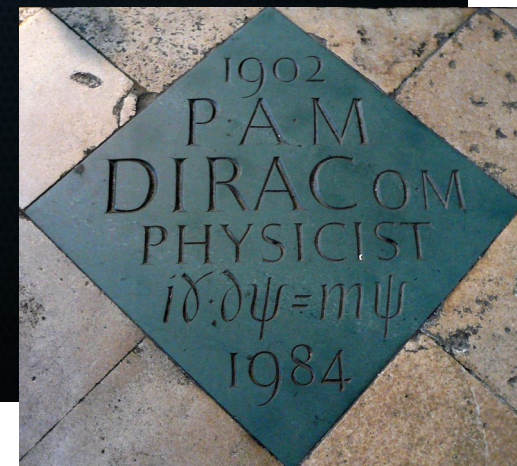


Étonnante antimatière

- Le lien de l'antimatière avec la grande question philosophique sera plus clair par la suite
- De l'antimatière dans cette pièce ?
- Antimatière et imagerie médicale

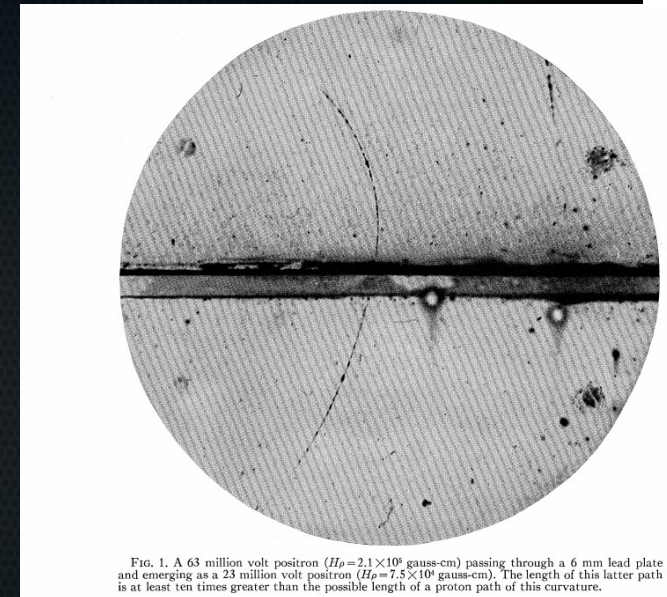
Dirac : une équation, plusieurs découvertes

- 1928 : le physicien anglais Paul Dirac essaie de décrire l'électron dans le cadre de la mécanique quantique et de la relativité
- Il obtient une nouvelle équation qui a 4 solutions : deux décrivent un électron (charge $-e$) avec deux états de spin (haut ou bas)
- Et une autre particule de même masse mais de charge $+e$. Embarrassé par ces nouvelles solutions, il les écarte comme « non-physiques »
- Il continue d'y travailler les années suivantes et comprend qu'il s'agit en fait d'un « anti-électron »
- . '... [they] would be a new kind of particle, unknown to experimental physics, having the same mass and opposite charge to an electron. We may call such a particle an anti-electron. We should not expect to find any of them in nature, on account of their rapid rate of recombination with electrons, but if they could be produced experimentally in vacuum they would be quite stable and amenable to observation.' (Dirac 1931)

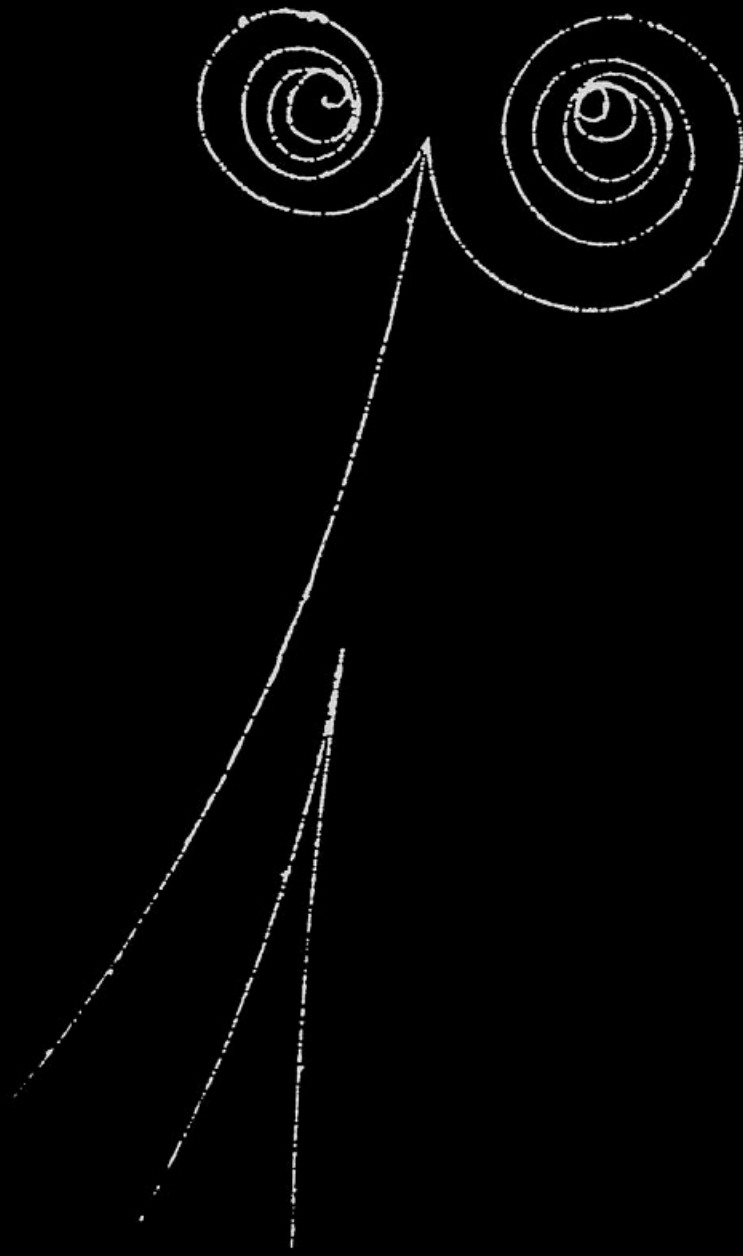


1933, découverte dans les rayons cosmiques

- En 1933 Carl Anderson observe des clichés de rayons cosmiques avec une chambre de Wilson. Il observe des traces dues à des particules de charge électrique positive et de masse proche de celle de l'électron. La découverte expérimentale du positron et donc de l'antimatière
- Les rayons cosmiques : des particules de hautes énergie (produites par des supernovas, des trous noirs ...) qui arrivent sur la haute atmosphère terrestre et y interagissent. Au sol $\sim 100/\text{m}^2/\text{s}$
- Chambre de Wilson (ou chambre à brouillard) : dispositif qui permet de visualiser les trajectoires des particules chargées (comme des gouttelettes dans un gaz).



Irène Curie et Frédéric Joliot ont failli découvrir le positron. Ils auront le prix Nobel pour la découverte de la radioactivité « artificielle » (bombardement par alpha de noyaux atomiques) notamment avec production d'isotopes émetteurs beta+

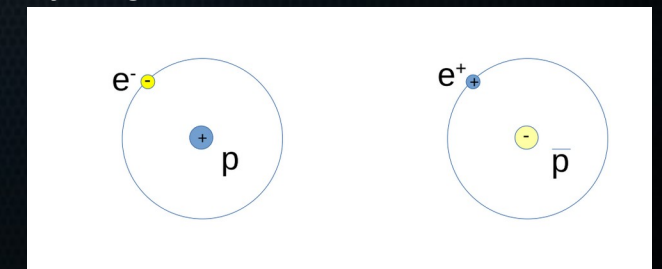


Antimatière

- L'antimatière est une forme de la matière. Il s'agit de particules ayant une charge électrique opposée à celle des particules « normales » (dont nous sommes constitués)
- L'antimatière pourrait former un monde miroir du nôtre, avec anti-atomes, anti-molécules etc. aux propriétés (presque) identiques
- L'antimatière en soi est stable (aussi stable que la matière). Toutefois si matière et antimatière se rencontrent elles s'annihilent. $e^+ e^- \rightarrow 2 \text{ gamma}$
- Autant qu'on puisse voir notre univers est formé seulement de matière

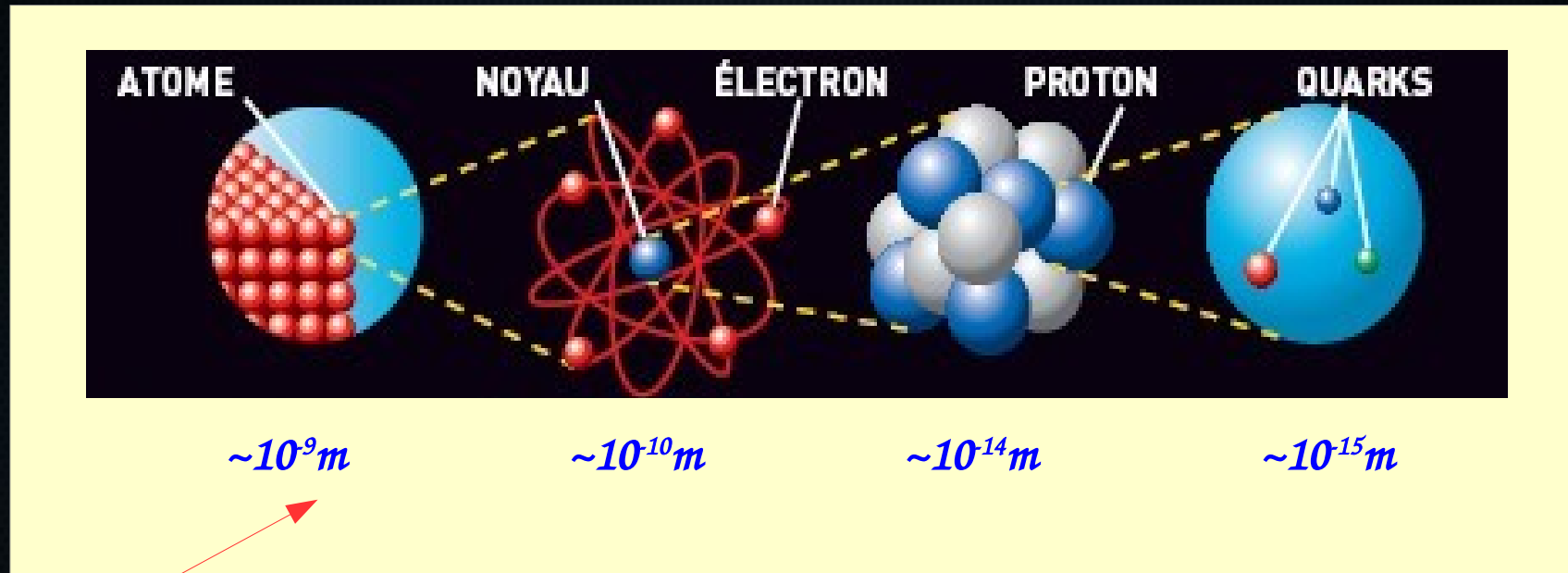
Particule de matière	Symbole	Charge électrique (e)	Particule antimatière	Symbole	Charge électrique
électron	e^-	-1	positron	e^+	+1
proton	p	+1	antiproton	$\bar{p}$	-1
photon	γ	0	photon	γ	0
quark up	u	+2/3	anti-up	$\bar{u}$	-2/3
quark down	d	-1/3	anti-down	$\bar{d}$	+1/3

Hydrogène



anti-hydrogène

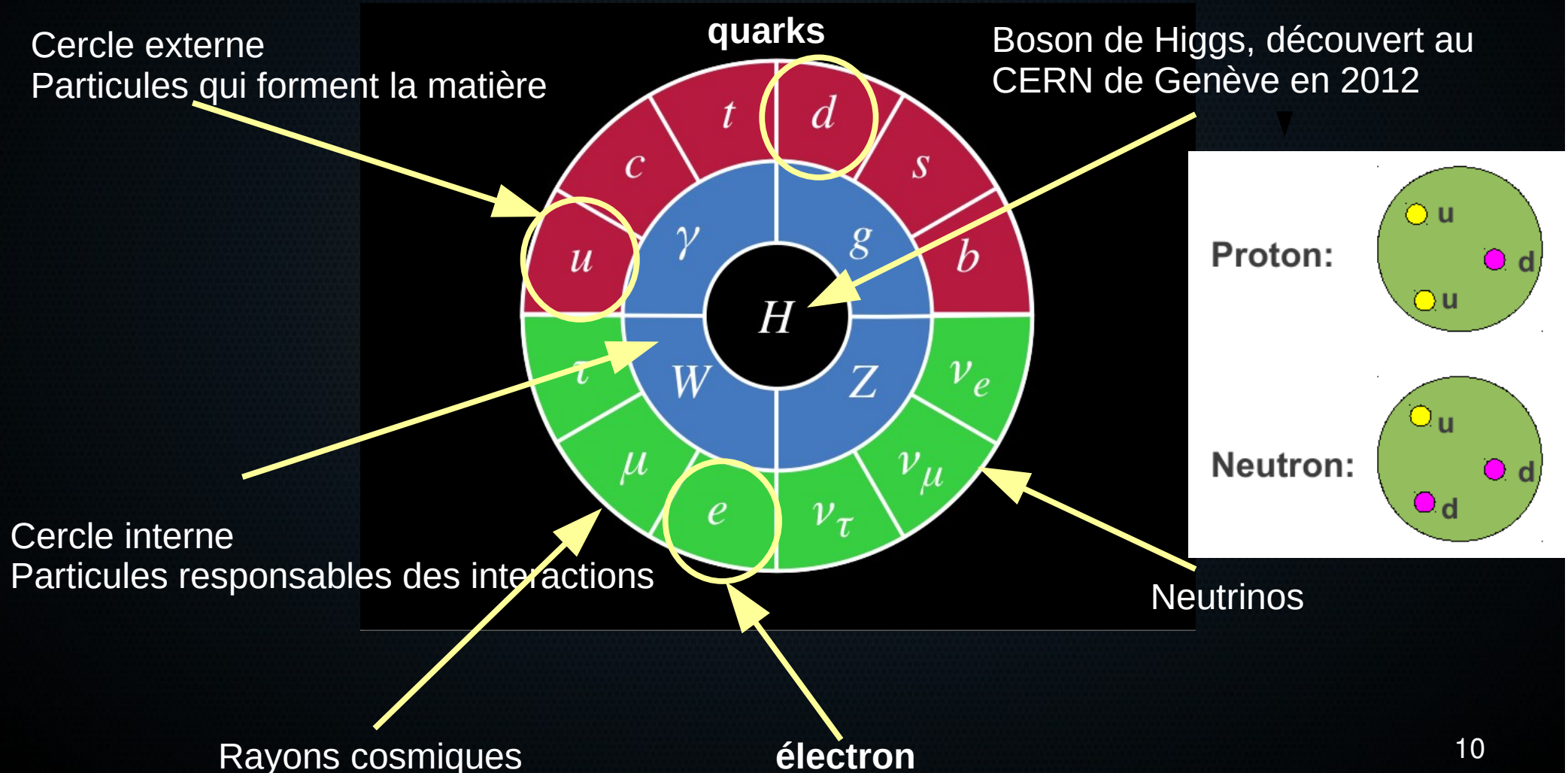
Le monde des particules élémentaires

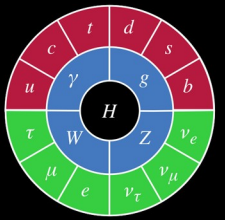


Un milliardième de mètre !

Les particules élémentaires n'ont pas de structure observée jusqu'à une échelle de $10^{-18}m$

Les particules élémentaires selon le Modèle Standard

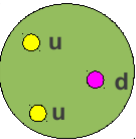




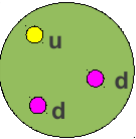
Les interactions fondamentales

Type d'interaction	Intensité	Médiateur	Exemple
Forte	1	gluons	noyau
Électromagnétique	10^{-2}	photon	atome
Faible	10^{-5}	W, Z	neutrinos
Gravitation	10^{-42}	graviton	planètes

Proton:



Neutron:

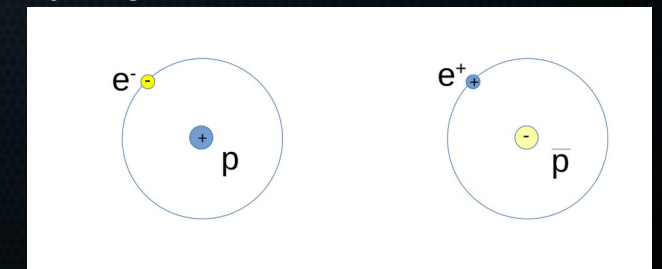


Antimatière

- L'antimatière est une forme de la matière. Il s'agit de particules ayant une charge électrique opposée à celle des particules « normales » (dont nous sommes constitués)
- L'antimatière pourrait former un monde miroir du nôtre, avec anti-atomes, anti-molécules etc. aux propriétés (presque) identiques
- L'antimatière en soi est stable (aussi stable que la matière). Toutefois si matière et antimatière se rencontrent elles s'annihilent. $e^+ e^- \rightarrow 2 \text{ gamma}$
- Autant qu'on puisse voir notre univers est formé seulement de matière

Particule de matière	Symbole	Charge électrique (e)	Particule antimatière	Symbole	Charge électrique
électron	e^-	-1	positron	e^+	+1
proton	p	+1	antiproton	$\bar{p}$	-1
photon	γ	0	photon	γ	0
quark up	u	+2/3	anti-up	$\bar{u}$	-2/3
quark down	d	-1/3	anti-down	$\bar{d}$	+1/3

Hydrogène



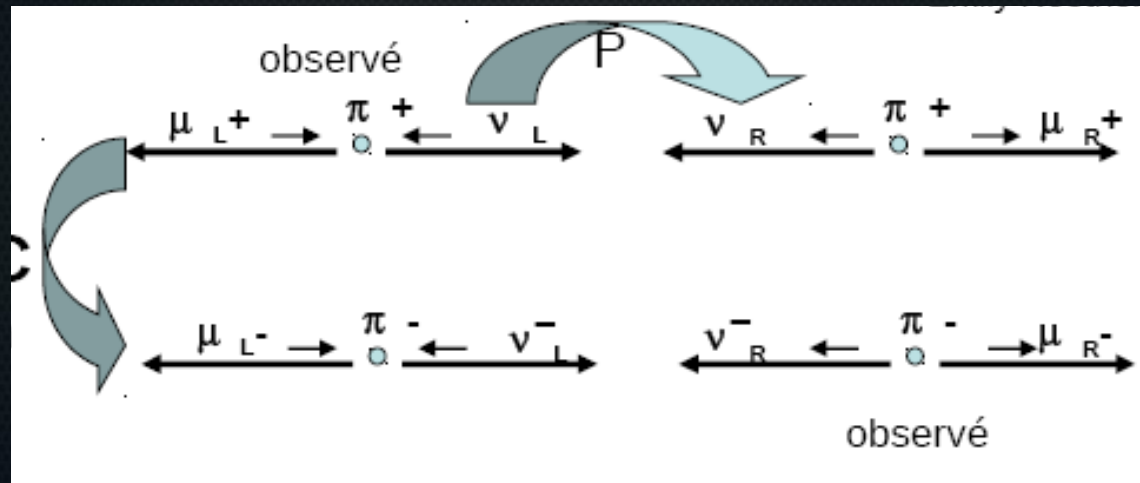
anti-hydrogène

Matière antimatière particules

Transformation	Nom	Effet	Exemples
C	Conjugaison de charge	Particule $\rightarrow$ anti-particule	$e^- \rightarrow e^+$
P	Transformation de parité (Inversion spatiale)	Système physique $\rightarrow$ système miroir	
T	Inversion temporelle	$t \rightarrow -t$	
CP	Charge-parité		$e^-_L \rightarrow e^+_R$

Les interactions faibles et les symétries C et P

- La transformation de charge-parité CP apparaît plus naturelle que C pour passer de la matière à l'antimatière. En effet, pour les interactions faibles, l'état e^+_R ($\sim$ spin//impulsion) interagit par le courant faible tout comme e^-_L . L'état e^+_L est lui un singlet de SU(2) comme e^-_R .



- Les interactions faibles violent de façon maximale C et P, et sont presque invariantes de CP

HISTORY OF THE UNIVERSE

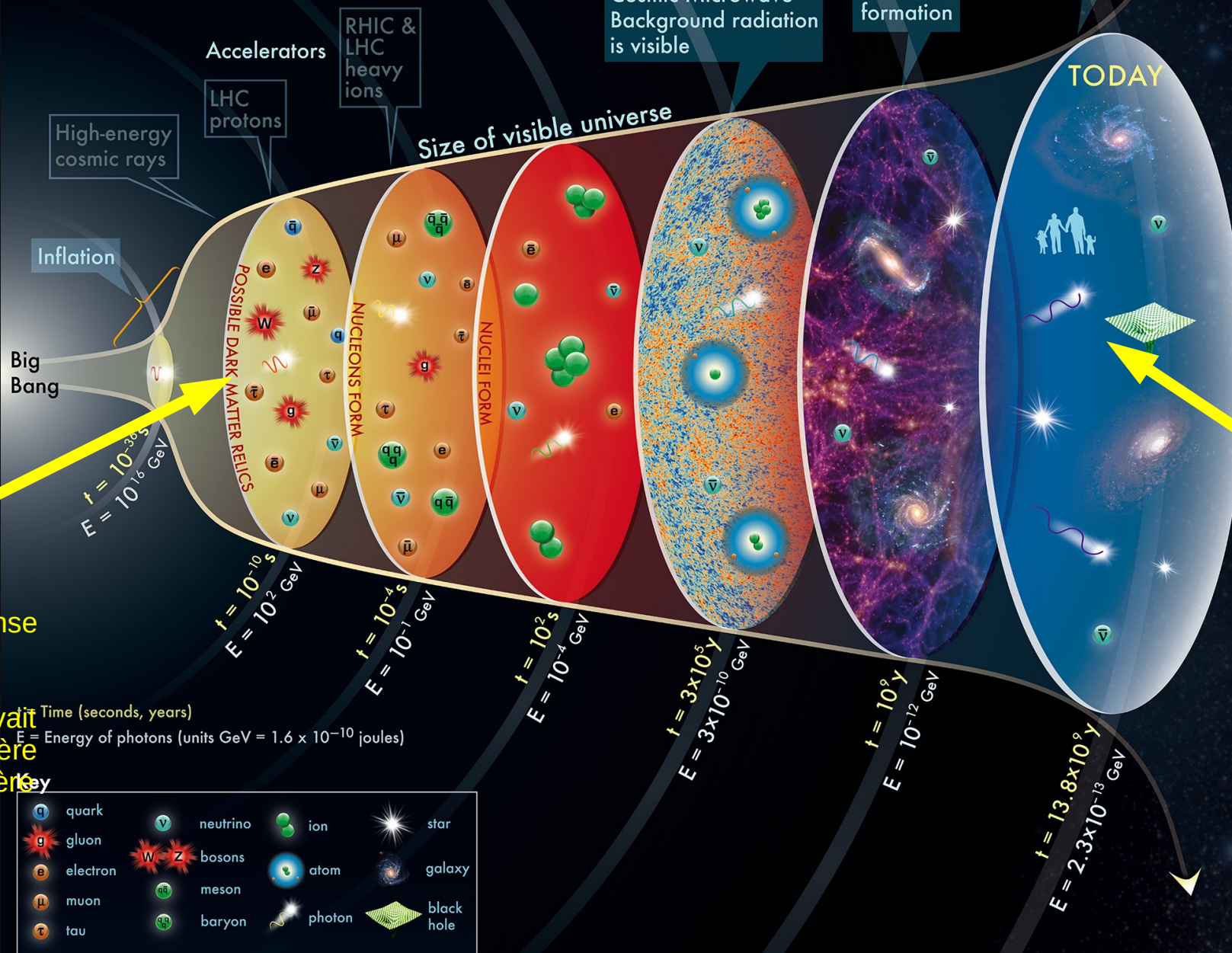
Nos connaissances actuelles

Dark energy
accelerated
expansion

Cosmic Microwave
Background
radiation is visible

Structure
formation

TODAY



Une phase
initiale très dense
et chaude
Tout porte à
croire qu'il y avait
autant de matière
que d'antimatière

L'univers actuel
est dominé par la
matière.

The concept for the above figure originated in a 1986 paper by Michael Turner.

Particle Data Group, LBNL © 2015

Supported by DOE

Matière et antimatière

- Les mesures cosmologiques (dont celles du satellite Planck) confirment le modèle Λ CDM $\rightarrow$ l'Univers a connu une phase initiale très chaude. Il est plausible que dans cette phase il y avait autant d'antimatière que de matière.
- Aujourd'hui : on n'observe pas d'antimatière primordiale
- Est-il possible qu'il y a eu une évolution spontanée d'un état symétrique (autant d'antimatière que de matière) à l'état actuel ? Cela nous encourage à étudier les différences entre matière et antimatière au niveau des constituants élémentaires
-
- Matière $\rightarrow$ noyaux atomiques $\rightarrow$ protons et neutrons
- On compte la matière en comptant le nombre de protons et neutrons (appelé baryons)
-

Expliquer la matière dans l'Univers

En 1967 le physicien soviétique Andreï Sakharov explique les trois conditions nécessaires pour engendrer dynamiquement un univers dominé par la matière.

- On peut les résumer ainsi : il faut qu'il y ait des différences entre la matière et l'antimatière dans leurs interactions, et aussi que l'Univers soit passé par des phases hors de l'équilibre thermique.
 - Violation du nombre baryonique B
- 1) - Violation de C et CP (== différence entre matière et antimatière)
- 2) - Processus hors équilibre thermique



Un scénario plausible

- L'Univers primordial était très chaud et dense. Matière et antimatière y coexistaient dans un état d'équilibre.
- Une petite différence entre matière et antimatière produit un petit excès de matière (par exemple une particule très massive, encore inconnue, qui se désintègre en produisant un peu plus de la matière que d'antimatière)
- Une grande annihilation détruit la plus part de la matière et de l'antimatière, seulement ce petit excès survit (le « quelque chose » de Leibniz)
- Quand l'Univers se refroidit, il n'est plus capable de produire de l'antimatière. L'excès de matière donne lieu à l'univers visible (galaxies, étoiles, etc.)

On appelle ce scénario baryogénèse (ou leptogénèse, un scénario alternatif)

Y a-t-il des « indices » ?

- Oui. On sait compter le nombre de protons et neutrons dans l'Univers par rapport au nombre de photons.
- Nous avons deux mesures précises de ce rapport à deux moments clé : la production des premiers noyaux atomiques (les premiers trois minutes), la radiation fossile (CMB, 380 000 ans)
- Ces deux mesures sont en bon accord :

$$\eta_{\text{BBN}} = n_{\text{B}}/n_{\gamma} = 5.6 \pm 0.5 \cdot 10^{-10} \quad \eta_{\text{CMB}} = 6.3 \pm 0.2 \cdot 10^{-10}.$$

- Il y a 1.5 milliard de photons pour chaque baryon. Ce nombre très petit est le témoin d'une grande annihilation (très ancienne) entre protons et antiprotons etc.

Nucléosynthèse primordiale

- Pendant les trois premières minutes l'univers se comporte comme un réacteur de fusion nucléaire et forme les premiers noyaux (H, He, Li)
- $p + n \leftrightarrow D + \gamma$
- $D + p \rightarrow 3\text{He} + \gamma$
- $3\text{He} + D \rightarrow 4\text{He} + p$
- Cette nucléosynthèse ne va pas très loin parce qu'il n'y a pas de noyaux stables avec 5 et 8 nucléons. De plus à cause de l'expansion le temps est compté pour ces processus
- En mesurant le rapport He/H on peut remonter au rapport $\eta_{\text{BBN}} = n_{\text{B}}/n_{\gamma}$

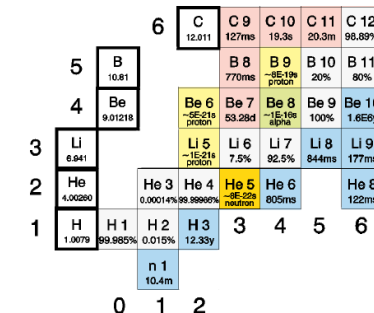


Figure 3.3: Lower-left section of the nuclide chart, showing the nuclei relevant for Big Bang nucleosynthesis. White squares are stable isotopes, coloured isotopes are unstable with the mode of decay and half-life as indicated (blue: β^- unstable; pink: β^+ unstable). Note that all nuclei with $A = 5$ and $A = 8$ are violently unstable, due to the vicinity of the very tightly bound ${}^4\text{He}$ nucleus.

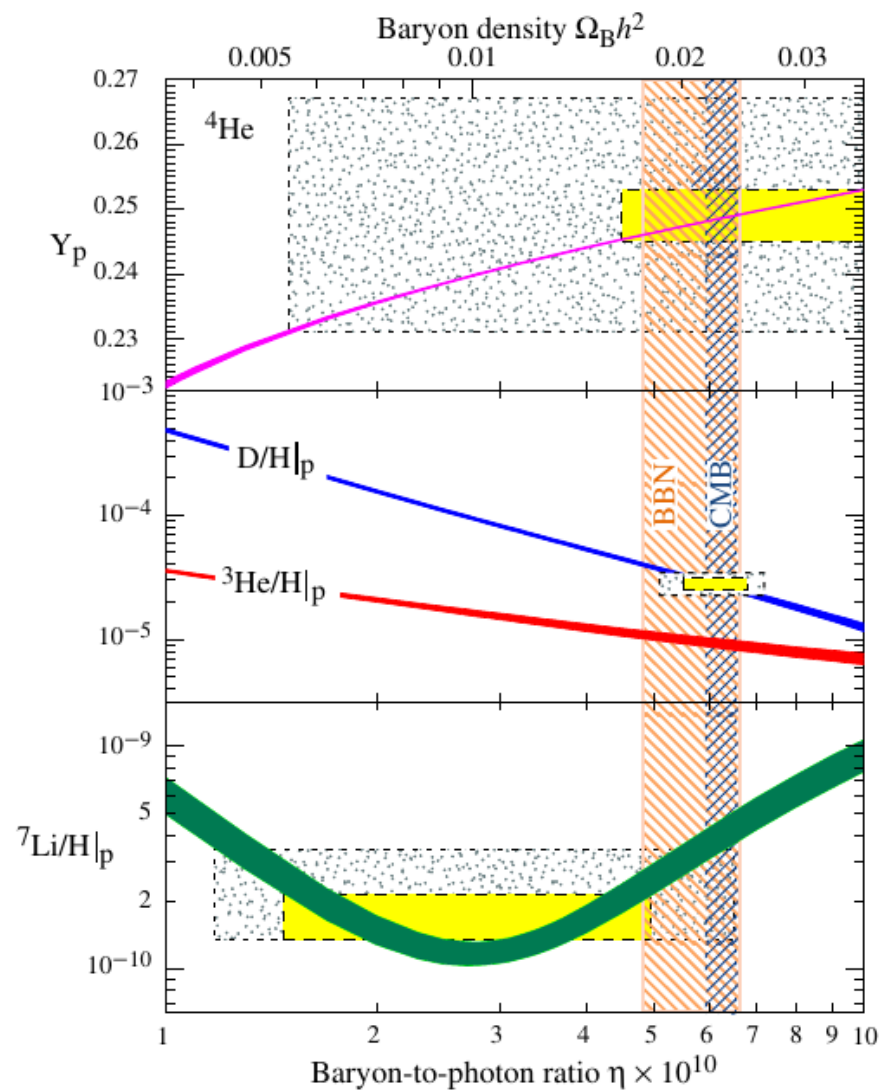
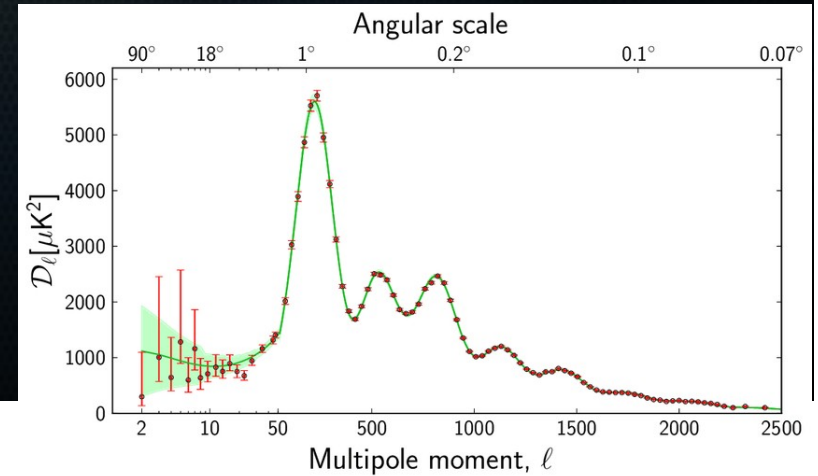
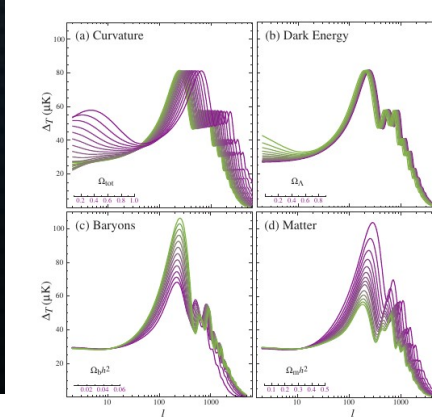
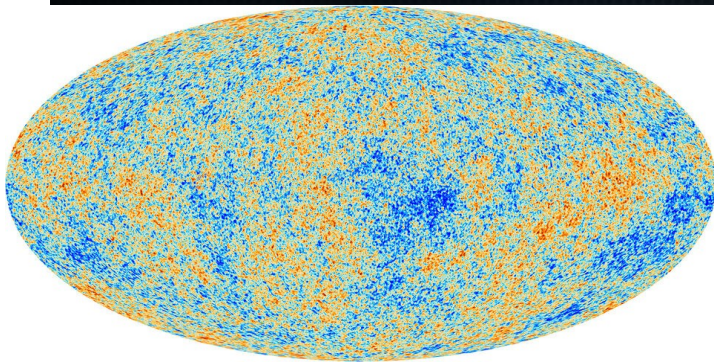


FIG. 1: The abundances of ${}^4\text{He}$, D, ${}^3\text{He}$, and ${}^7\text{Li}$ as predicted by the standard model of big bang nucleosynthesis – the bands show the 95% CL range. Boxes indicate the observed light element abundances (smaller boxes: $\pm 2\sigma$ statistical errors; larger boxes: $\pm 2\sigma$ statistical and systematical errors). Taken from Ref. [5].

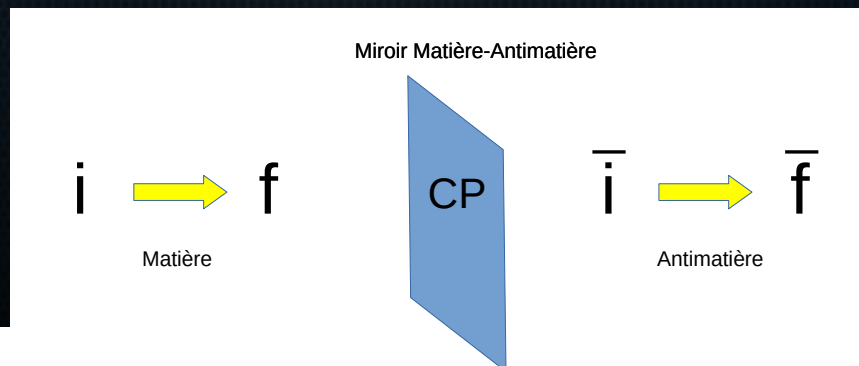
CMB – fond diffus cosmologique

- Radiation émise quand se forment les premiers atomes neutres. L'Univers, qui était dans un état de plasma, devient transparent.
- Ces photons ($T=2.7$ K) ont été observés depuis 1964 (Penzias et Wilson)
- Les très petites anisotropies de température (10^{-5}) nous renseignent sur les oscillations acoustiques dans le plasma.



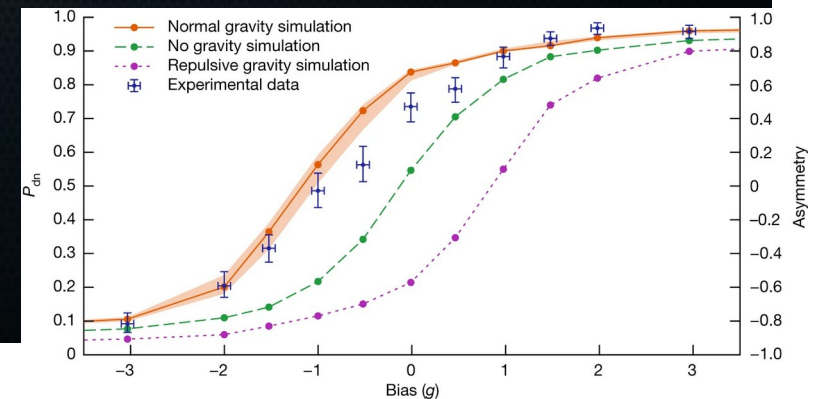
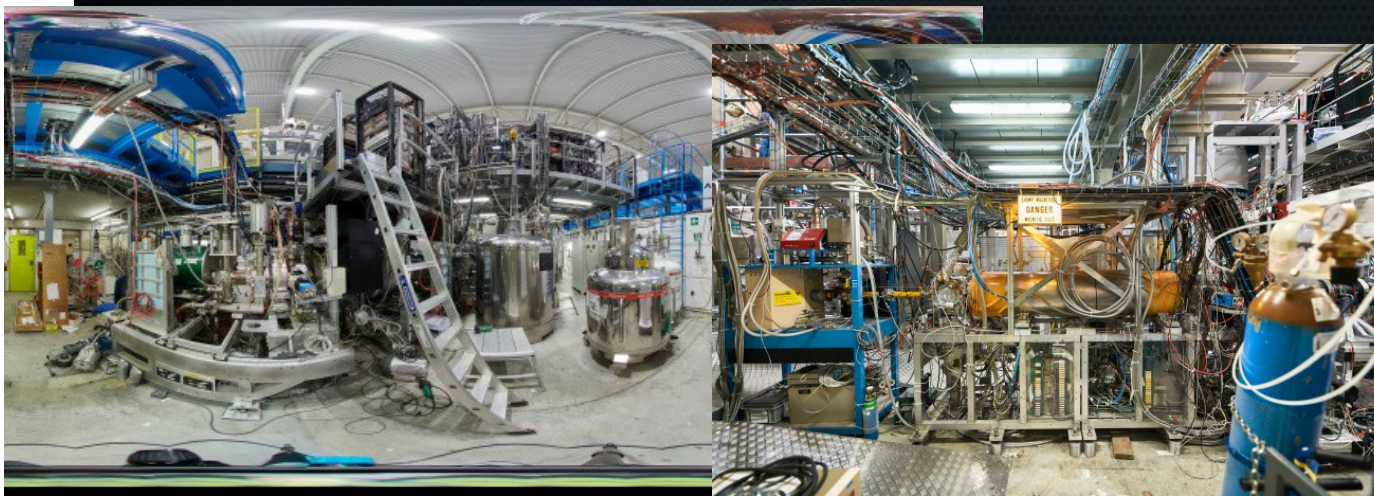
Différences matière-antimatière

- Depuis les années 1960, les physiciens étudient les différences entre matière et antimatière.
 $\text{Prob}(i \rightarrow f) = \text{Prob}(\bar{i} \rightarrow \bar{f})$?
- Ces différences (petites $\sim 10^{-3}$) ont été observées depuis 1964 dans les systèmes des kaons neutres et pour les mésons B (violation de la symétrie de charge-parité)
- Toutefois, les différences connues sont trop faibles pour expliquer l'histoire de l'univers
- On recherche des différences de même type pour les neutrinos



Tests matière-antimatière au CERN

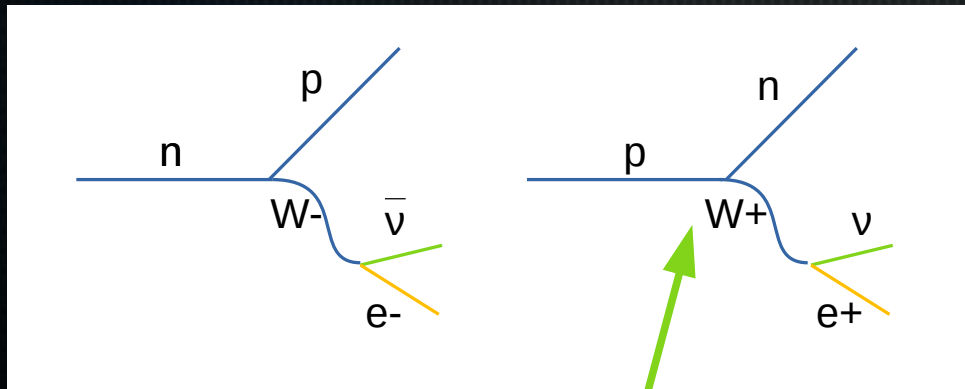
- Production d'antiprotons ($7.5 \cdot 10^6$ par minute): $p+p \rightarrow p+p+p+\bar{p}$
- Décélération des antiprotons ($3.5 \text{ GeV} \rightarrow 5.3 \text{ MeV}$)
- Production d'anti-hydrogène (avec des positrons)
- Un piège magnétique pour les accumuler (100 en 4 h)
- Mesure des propriétés de l'antihydrogène
- Dernier résultat en 2023: les atomes d'anti-hydrogène « tombent » comme l'hydrogène (pas de gravité répulsive) (expérience ALPHA)



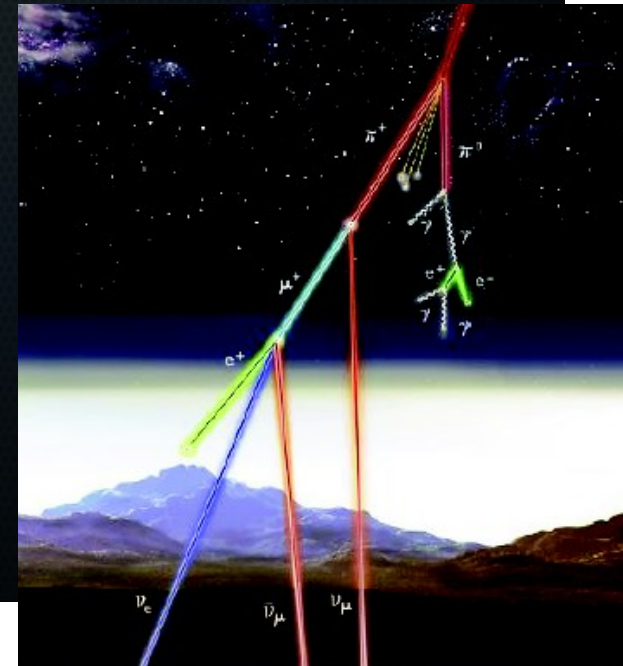
L'antimatière aujourd'hui

Production naturelle d'antimatière

- L'antimatière autour de nous est naturellement produite par les interactions des rayons cosmiques
- Et par les désintégrations beta+
- Chacun de nous produit un positron tous les 20 s à cause du potassium 40 (un émetteur beta+)

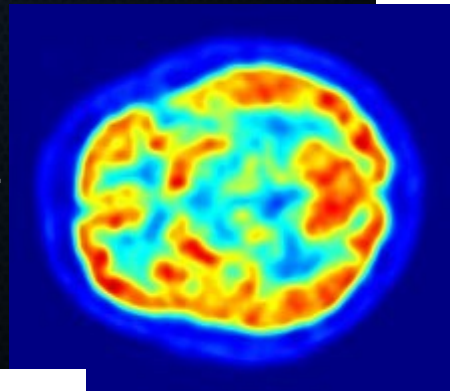
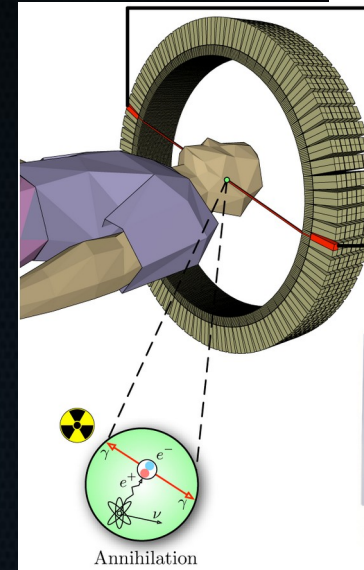


Dans un noyau atomique



Tomographie par émission de positrons

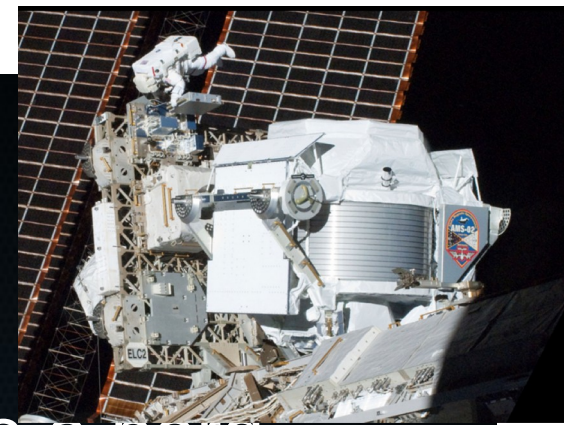
- Une méthode d'imagerie médicale largement utilisée comme outil diagnostique
- On administre à un patient une substance contenant du fluor 18
- $F^{18} \rightarrow O^{18} + e^+ + \nu$ (désintégration beta⁺ , $p \rightarrow n + e^+ + \nu$)
- $e^+ + e^- \rightarrow \gamma + \gamma$
- Les deux photons gamma sont détectés en coïncidence temporelle. Ils ont été émis « dos à dos » et donc pointent vers la région où l'annihilation a été produite



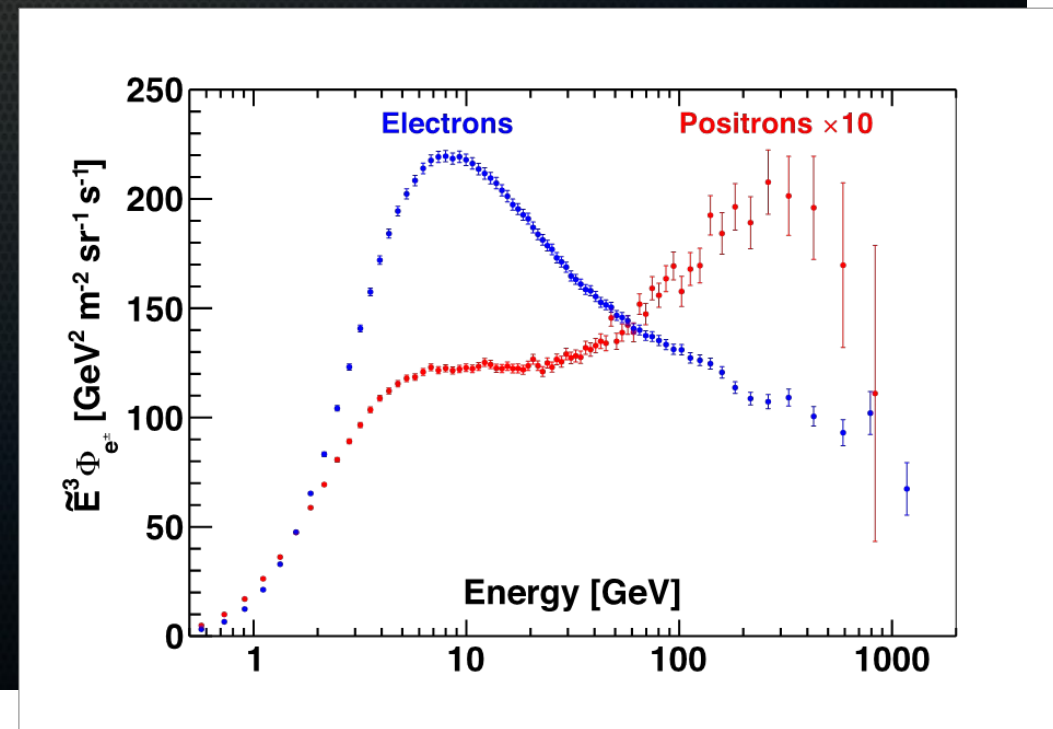
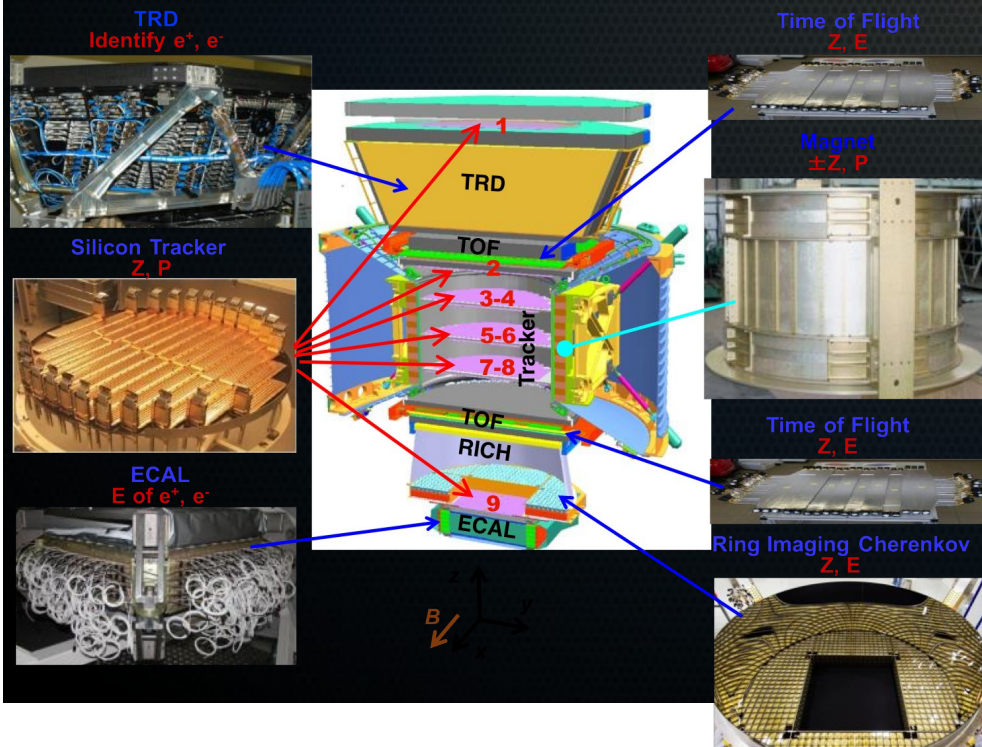
Isotopes used in PET scans

Isotope	¹¹ C	¹³ N	¹⁵ O	¹⁸ F	⁶⁸ Ga	⁶⁴ Cu	⁵² Mn	⁵⁵ Co	⁸⁹ Zr	⁸² Rb
Half-life	20 min	10 min	2 min	110 min	67.81 min	12.7 h	5.6 d	17.5 h	78.4 h ^[48]	1.3 min

AMS



- Alpha Magnetic Spectrometer : expérience a bord de la station spatiale ISS
- Dédiee à l'étude des rayons cosmiques, capable de distinguer la matière de l'antimatière



Stockage d'énergie ?

- L'énergie par unité de masse de l'antimatière est très élevée ($9 \cdot 10^{16}$ J/kg)
- Trois ordres de grandeurs mieux que l'énergie nucléaire ($8 \cdot 10^{13}$ J/kg)
- Dix ordres de grandeurs mieux que l'énergie chimique
- Mais on en produit très peu (des nanogrammes !), elle est très coûteuse, difficile à stocker (piège magnétique), et aussi difficile à utiliser
- La propulsion à la Star Trek est encore lointaine

Conclusion

- L'antimatière reste une énigme majeure à la fois dans le domaine de la physique des particules et de la cosmologie
- Elle continue à être activement étudiée
- Elle est utilisée quotidiennement en médecine !

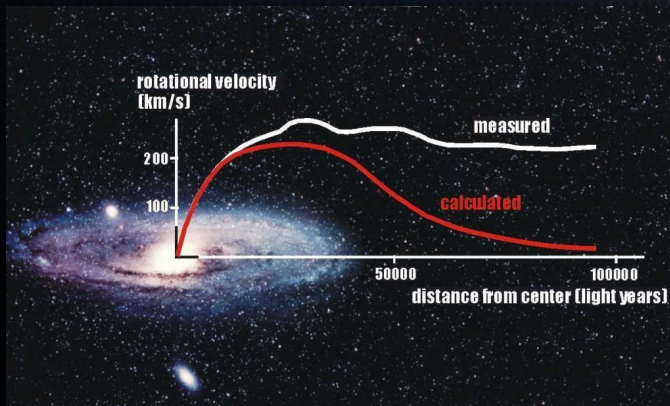
Reserve

Des matières inconnues dans l'Univers

- L'observation des courbes de rotations dans les galaxies et des amas de galaxies indique l'existence d'une nouvelle composante, « vue » par ses effets gravitationnels, dite matière noire
- Il est possible que nous ne connaissons pas les lois de la physique
- Ou alors nous ne savons rien de 95 % de ce qui existe dans l'Univers actuel !



Coma Cluster



Matière connue

