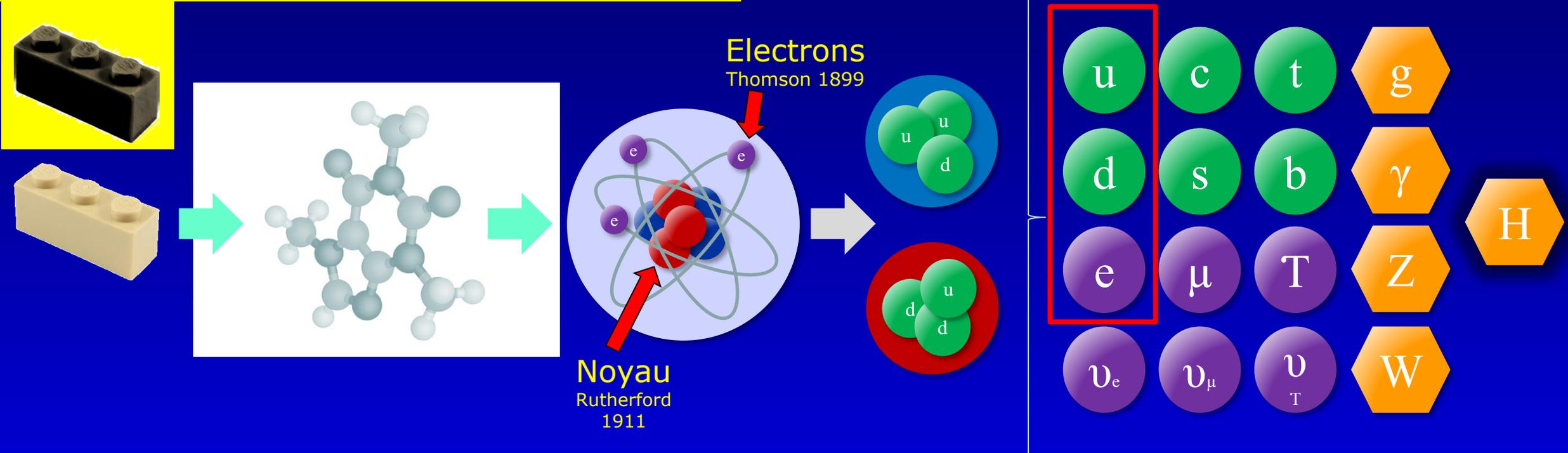


# LE PARADOXE de l'ANTIMATIERE

**Une relation compliquée...**

# La matière, c'est quoi ?

Et l'antimatière alors ???



**Matière**

**Molécules**

Avogadro 1811

**Atomes**

Démocrite -450  
Thomson 1897

**Protons  
Neutrons**

Rutherford 1919  
Chadwick 1932

**Quarks  
Leptons**

Gell-Mann, Zweig 1964

**Bosons**

Glashow, Salam 196,  
Rubia, Van der Meer 1983.  
Ellis 1976,  
Brout Englert Higgs  
1964 -2012

# Antimatière: les origines

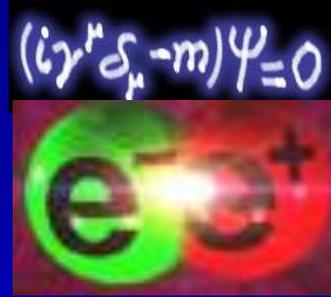


Paul A. M. Dirac  
Prix Nobel 1933

**Paul Dirac : Relativité + mécanique quantique**

⇒ **Charge électrique électron : +1 or -1 !**

⇒ **De même pour protons et autres particules**

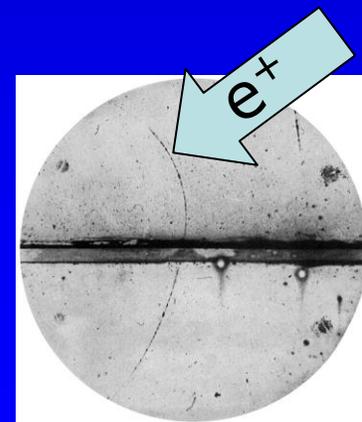


Carl D. Anderson  
Prix Nobel 1936

**Carl Anderson: chambre à brouillard magnétique et rayons cosmiques**

⇒ **Observation d'électrons avec charge +1 !**

⇒ **Découverte «anti-électron» (positon)**



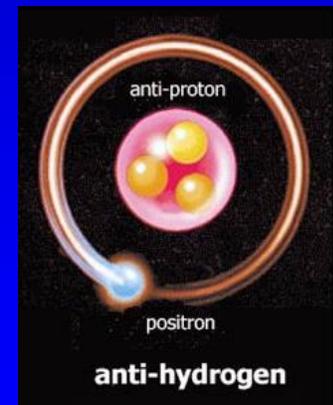
# Antimatière: les origines



**Owen Chamberlain découvre l'Antiproton ( $p\bar{}$  ou  $\bar{p}$ ) au Bevatron en Californie dans des collisions de protons sur cibles**



O. Chamberlain au Bevatron, LBNL  
Prix Nobel 1959



**Mario Macri et Walter Oelert réussissent à associer antiprotons + positons : anti-hydrogène au CERN en 1995**



W. Oelert au LEAR, CERN

# Antimatière: les propriétés

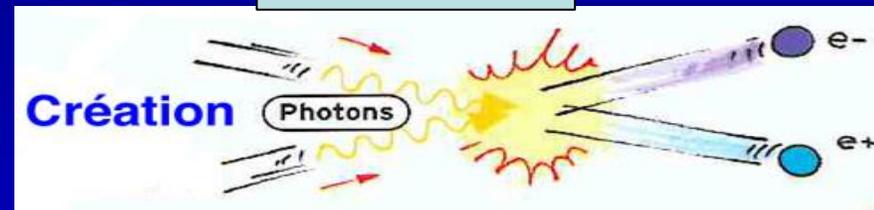
A chaque particule correspond une anti-particule

Seule différence : la charge électrique (opposée)

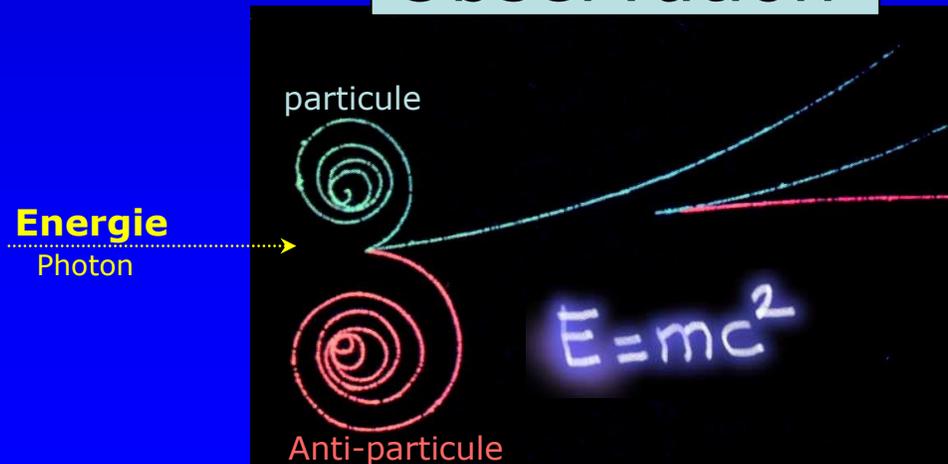
**Exemple:**      **Electron:** Masse = 0.511 (MeV) Charge = -1  
                  **Positon:** Masse = 0.511 (MeV) Charge = +1

Particules et anti-particules sont  
générées en quantités égales à partir de  
condensation d'énergie pure en masse  
( $E=mc^2$ )

## Théorie



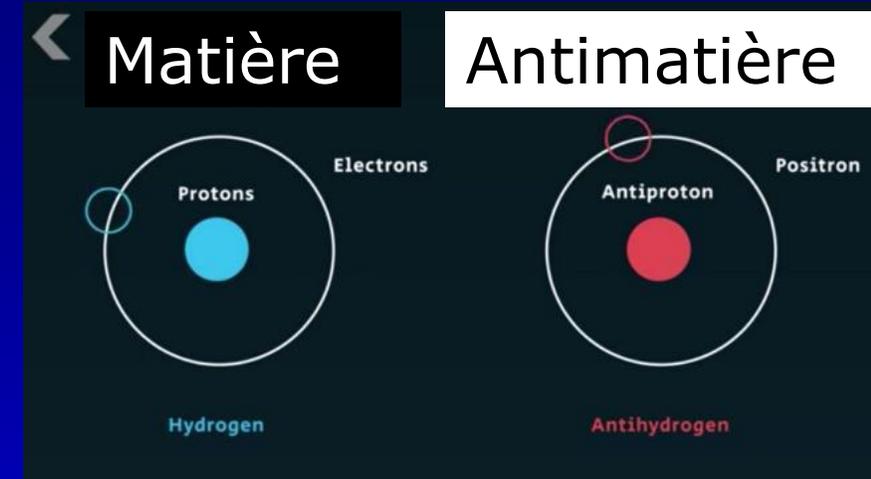
## Observation



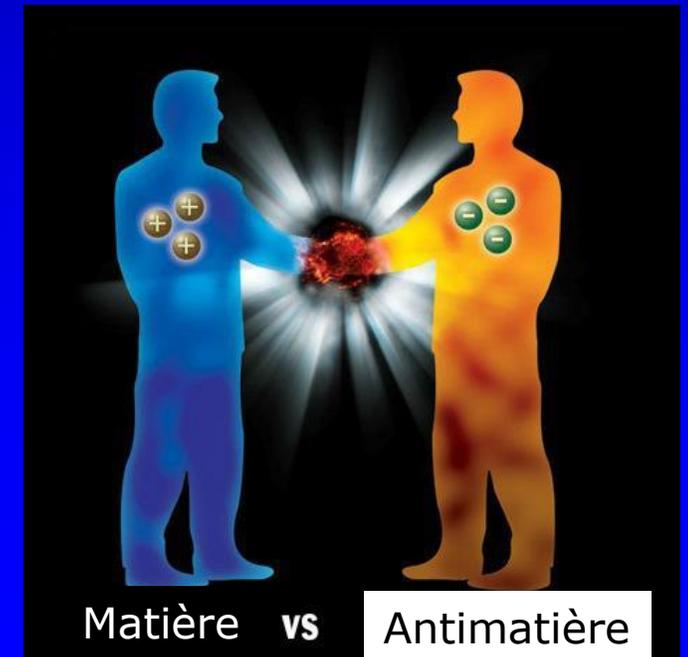
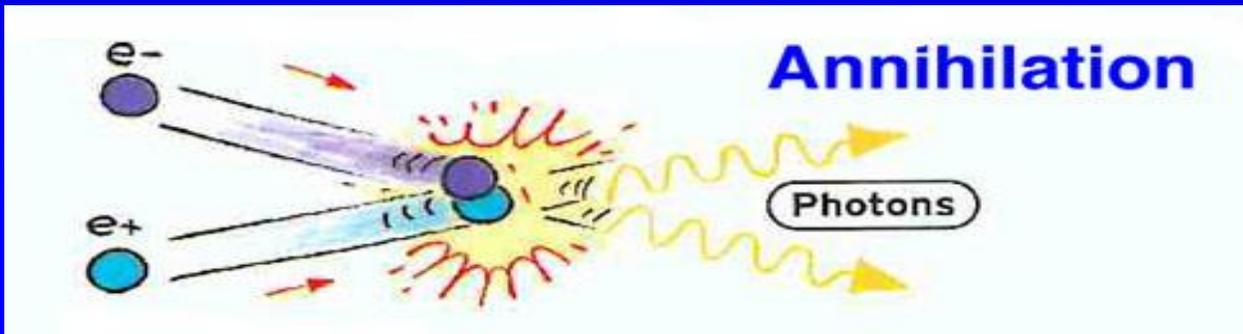
# Antimatière: les propriétés

Les anti-particules ont des propriétés identiques aux particules "normales" (sauf la charge électrique)

=> l'antimatière doit être aussi stable que la matière



Particules et antiparticules s'annihilent lorsqu'elles entrent en contact, et se transforment en énergie pure !

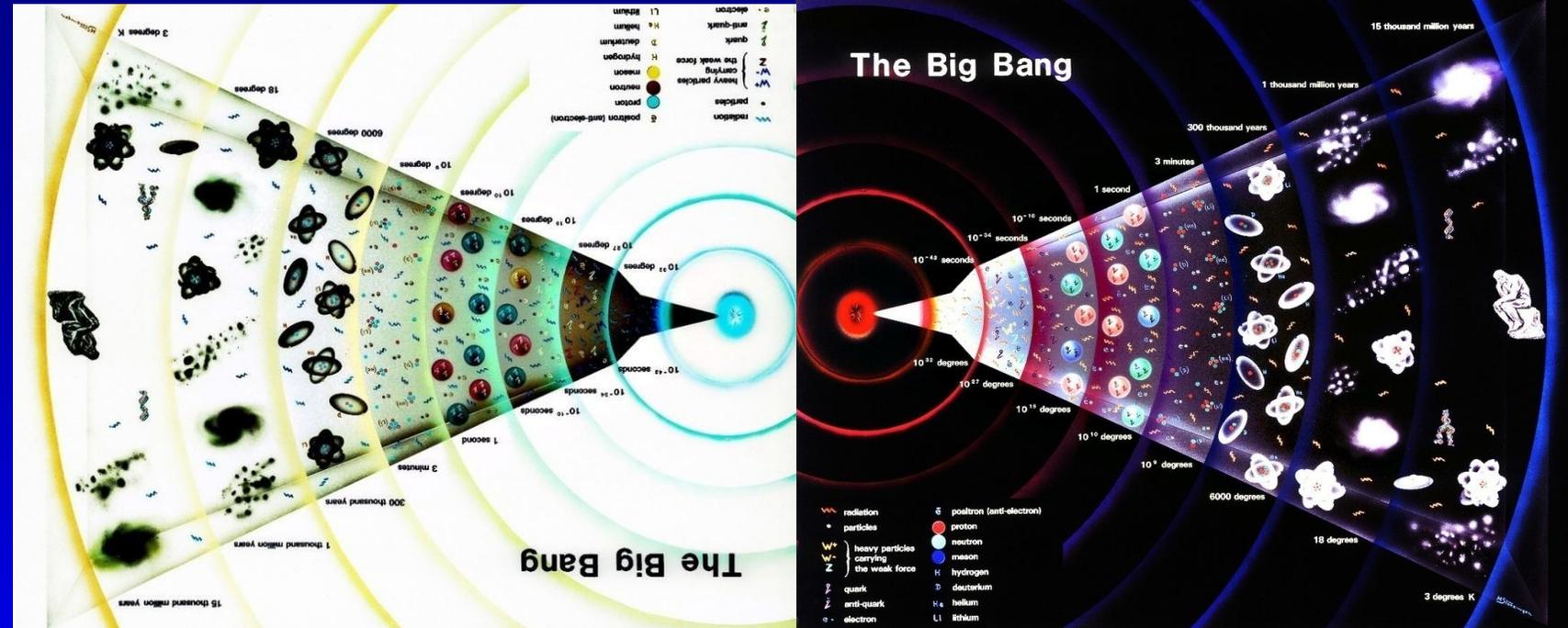


# Antimatière et théorie du Big Bang

## Big Bang

Il y a 13.7 milliards d'années

Energie transformée en masse  
Particules, atomes, étoiles, planètes...



Théorie et expérience nous révèlent:

Big Bang généré 50% Matière / 50 % Antimatière

Matière + Antimatière doivent

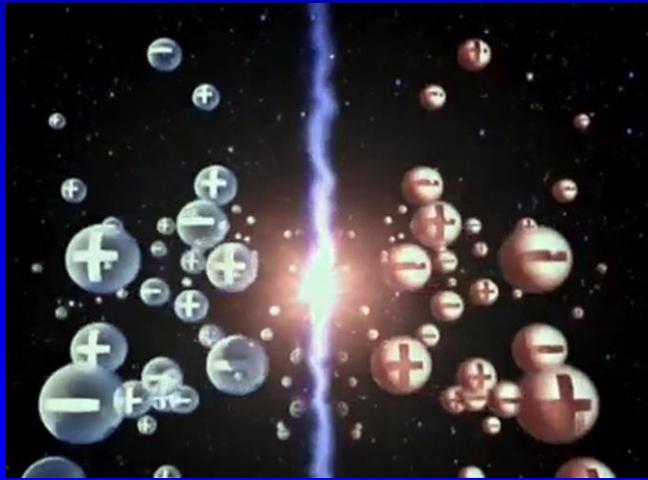
Soit s'être mutuellement annihilées !

Soit encore exister en quantités égales !

# Antimatière: Un univers symétrique ?

Paul Dirac (extrait de l'allocution pour le prix Nobel de 1933)

«Nous devons considérer comme un hasard le fait que la Terre (et probablement l'ensemble du système solaire), contienne une prépondérance d'électrons négatifs et de protons positifs.» \*



???



“Il est tout à fait possible que ce soit l'opposé pour d'autres étoiles, qui seraient alors constituées de positons et d'antiprotons.  
En fait, il est possible qu'il existe la moitié d'étoiles de chaque sorte...” \*

# Antimatière: Où la chercher ?

## Observations:

La Terre est constituée de matière.



De même pour notre système solaire, notre galaxie et les galaxies voisines.

(sinon des échanges de poussières causeraient de vastes zones d'interface, sources de rayons gamma... ce que nous n'observons pas)



Plus compliqué pour les galaxies lointaines...

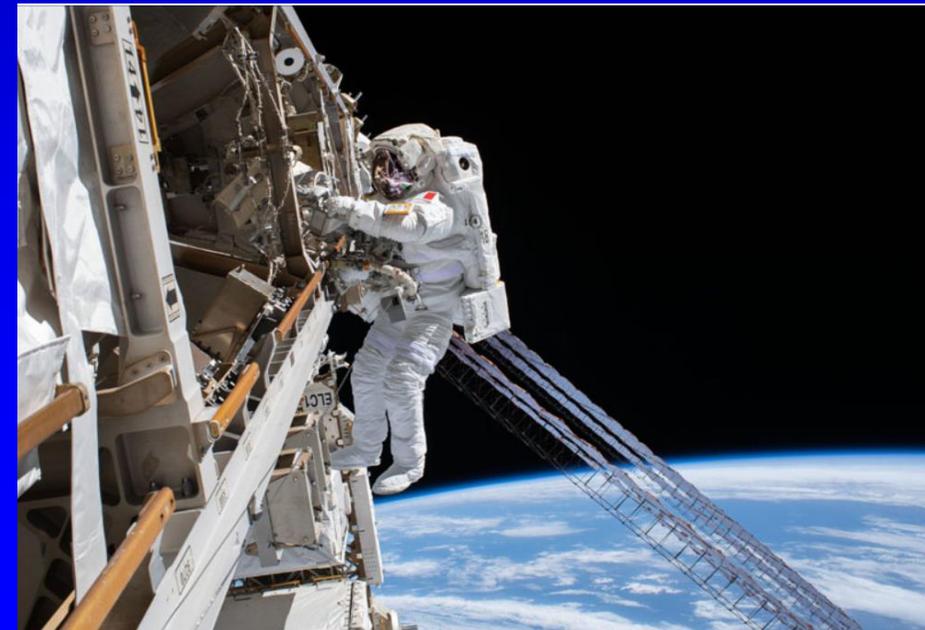
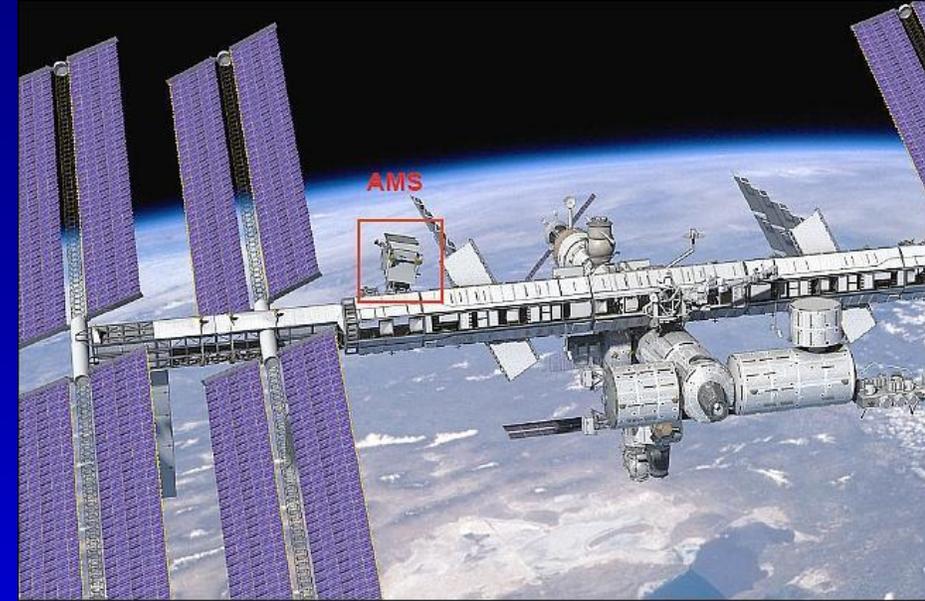
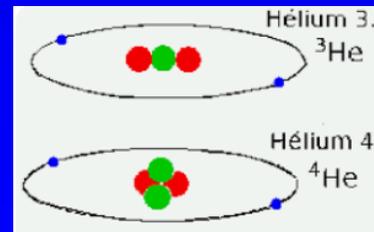
Certaines pourraient-elles être constituées d'antimatière ?

# Antimatière: la recherche dans l'espace

**Hypothèse:** si de grandes quantité d'antimatière existent dans l'univers, des anti-atomes doivent atteindre la terre...

**Le satellite AMS** (conçu, assemblé et testé au CERN) identifie les rayons cosmiques depuis 2011.

- $10^{11}$  particules mesurées (jusqu'en 2021)
- $10^5$  antiprotons et positons identifiés (origine dans des collisions ou soleil)
- 8 candidats Antihélium 3 et 4 détectés, origine encore débattue: Matière noire, anti-étoiles ??
- Nécessite plus de statistique (2024 ?)



# Antimatière: comment aurait-elle pu disparaître ?

Constatation: Nous existons! => Pas d'annihilation complète matière / antimatière

Proposition de A. Sakharov:

- Un très petit déséquilibre (1 partie par milliard) est apparu pendant le refroidissement de l'univers
- La plupart des particules se sont annihilées avec la totalité des anti-particules
- Galaxies, étoiles, planètes, nous = 'les particules survivantes'



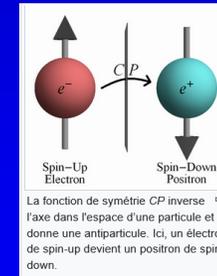
A.D.Sakharov  
Prix Nobel 1975

Conséquence: Quelle est la nature de la dissymétrie à l'origine du déséquilibre ?

Physique fondamentale: "pas de dissymétrie" !

Physique expérimentale: "voyons voir..." !

Violation CP trop petite pour expliquer la dissymétrie observée



Comparons les propriétés: masse - charge - moment magnétique- stabilité – gravitation  
Faisons le au CERN !

# L'histoire de l'antimatière au CERN

- **Le CERN produit des antiprotons depuis ~1980, initialement pour des collisions à haute énergie proton-antiproton**

- **1980-1986: AA (Antiproton Accumulator)**

- 3.57 GeV/c Anneau d'accumulation d'antiprotons

- **1982-1996: LEAR (and Low Energy Antiproton Ring) et AAC (Antiproton Accumulator and Collector)**

- Taux de production augmenté par 10:  $6 \cdot 10^{10}$  pbars/h
- $10^{12}$  pbars stockés au maximum pour des collisions p/pbar au SPS
- expériences à basse énergie au LEAR

- **1998 – 2018: AD (Antiproton Decelerator)**

- AC converti en décélérateur :  $5 \cdot 10^7$  pbars décélérée à 5.3 MeV
- Les expériences (ALPHA, ASACUSA, AEGIS, ATRAP, BASE, GBAR, PUMA) mesurent les antiprotons et pour certaines étudient l'anti-hydrogène

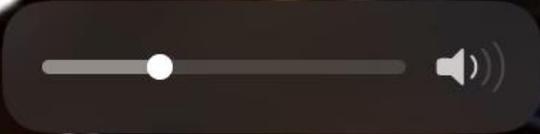
- **2018 – 2040 (?): Usine à Antimatière: AD + ELENA (Extra Low ENergy Antiproton ring)**

- ELENA est ajouté pour réduire l'énergie jusqu'à 0.1 MeV. 100 fois plus d'antiprotons peuvent être capturés par les expériences pour la production intense d'anti-hydrogène et améliorer l'analyse des propriétés des pbars

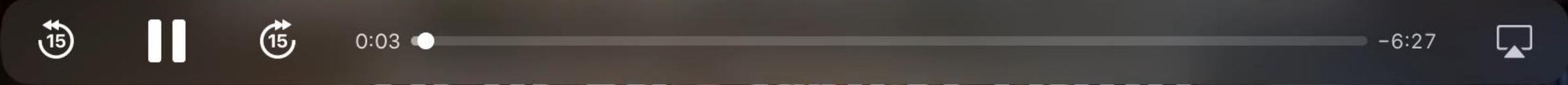


# La vision de Dan Brown et Ron Howard sur la production d'antimatière au CERN...

Extrait de «Anges et Demons»  
Avec Tom Hanks et Ayelet Zurer, 2009

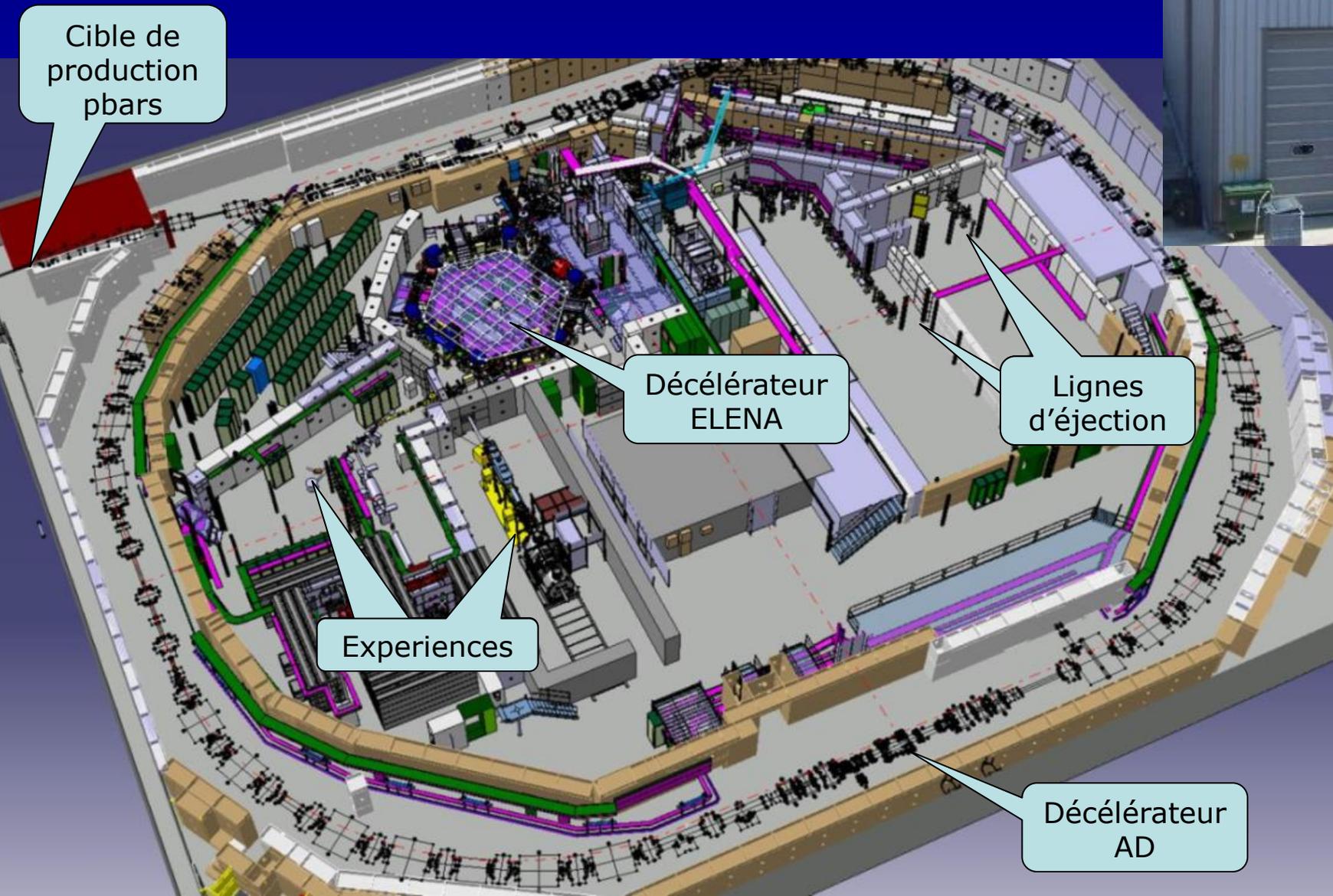


# CERN - Large Hadron Collider



Geneva, Switzerland

# La VRAIE usine à antimatière du CERN

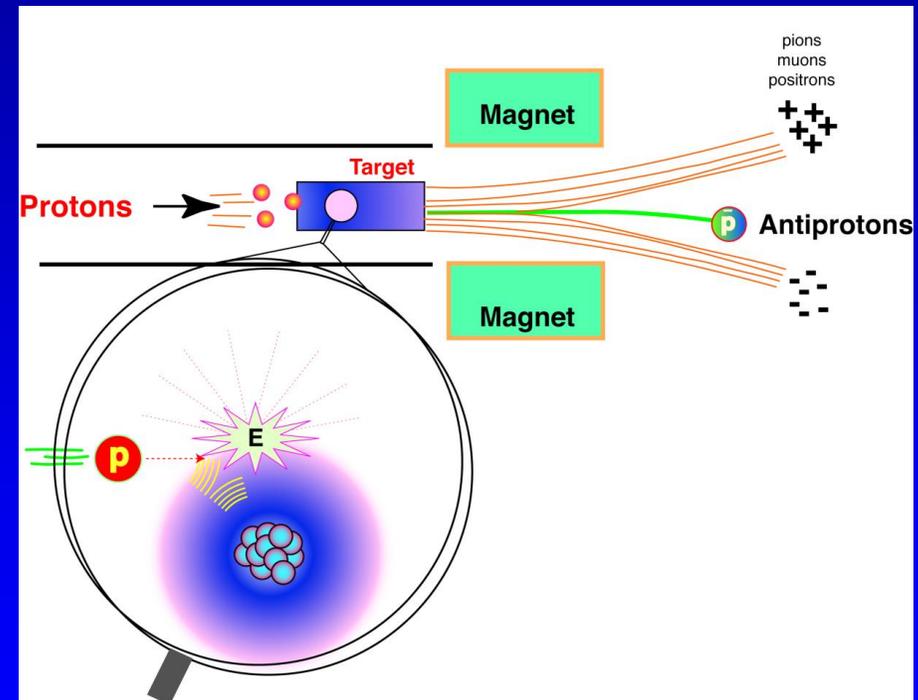
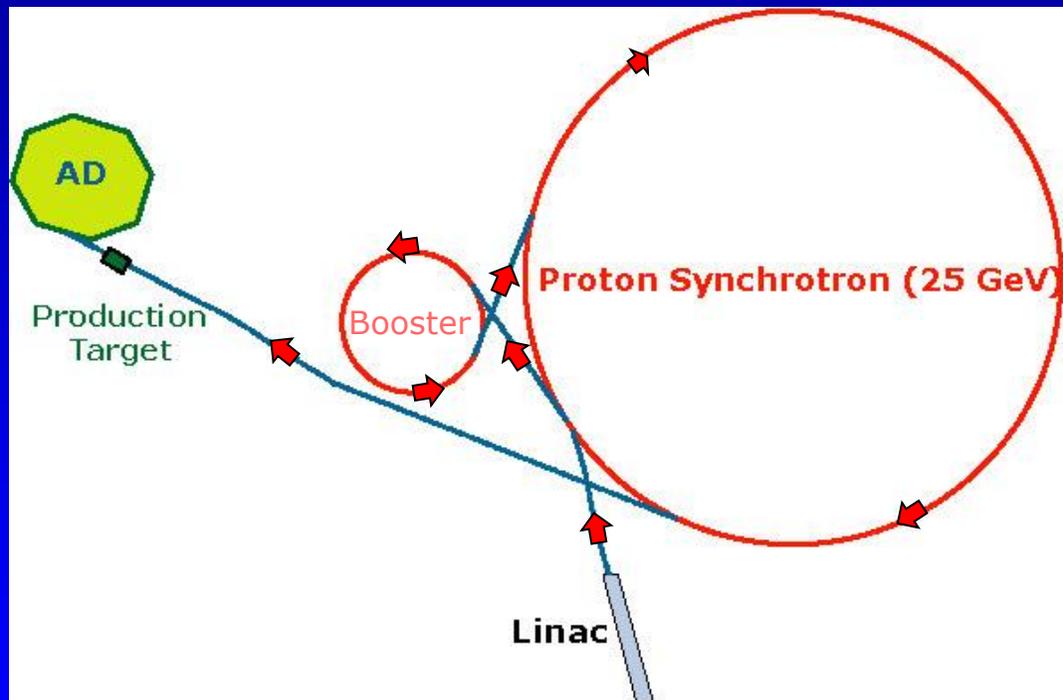




# Production des antiprotons

Il faut au moins une énergie de 6.2 GeV pour produire des antiprotons

25 GeV protons du PS (Proton Synchrotron) disponibles dans la chaine d'injection du LHC (Large Hadron Collider)

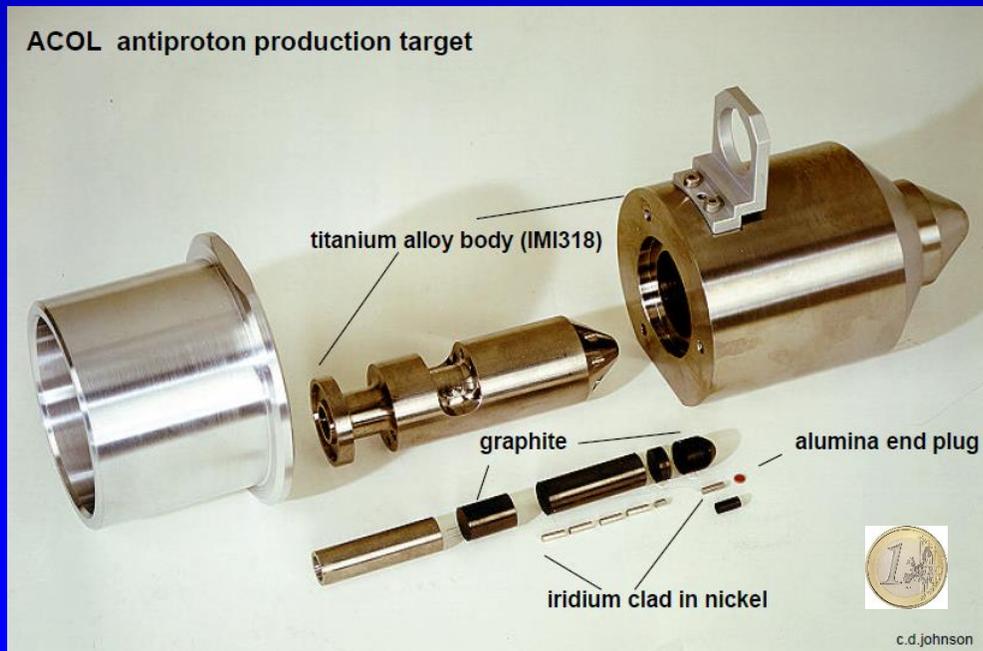


Toutes les 2 minutes, 50 millions d'antiprotons produits, ralentis et refroidis sont distribués aux expériences

# Production des antiprotons

## Cible de production:

- Cylindre Iridium (2<sup>ème</sup> matériau à plus haute densité, haute température fusion)
- Revêtement en nickel et graphite
- Corps en titane refroidi à l'air
- Limite la quantité de pbars produits



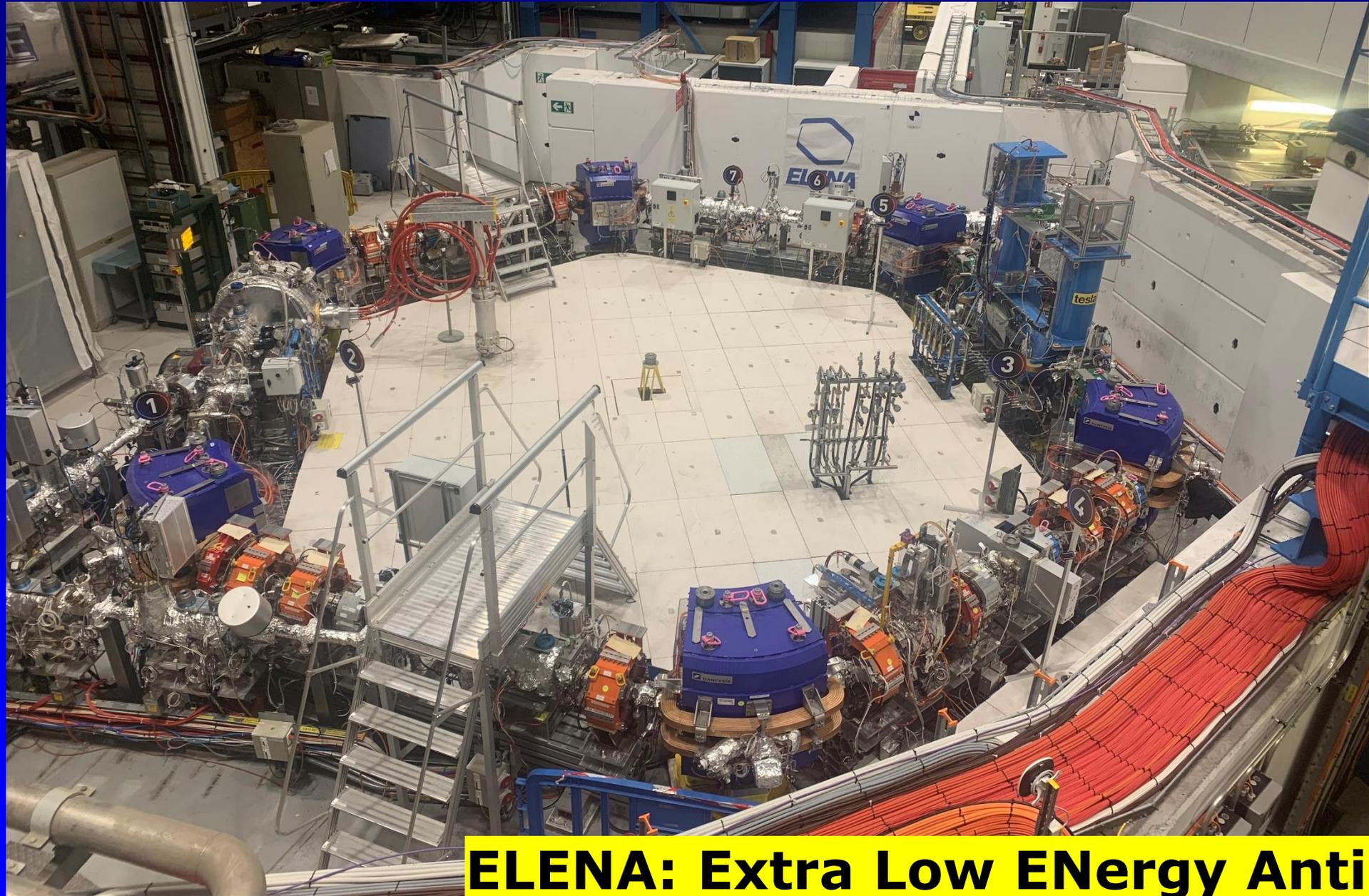
Faisceau



Cible test après un impact d'un paquet de  $1,7 \times 10^{12}$  protons à 500 GeV...

Décélération des antiprotons

**Synchrotron ELENA**

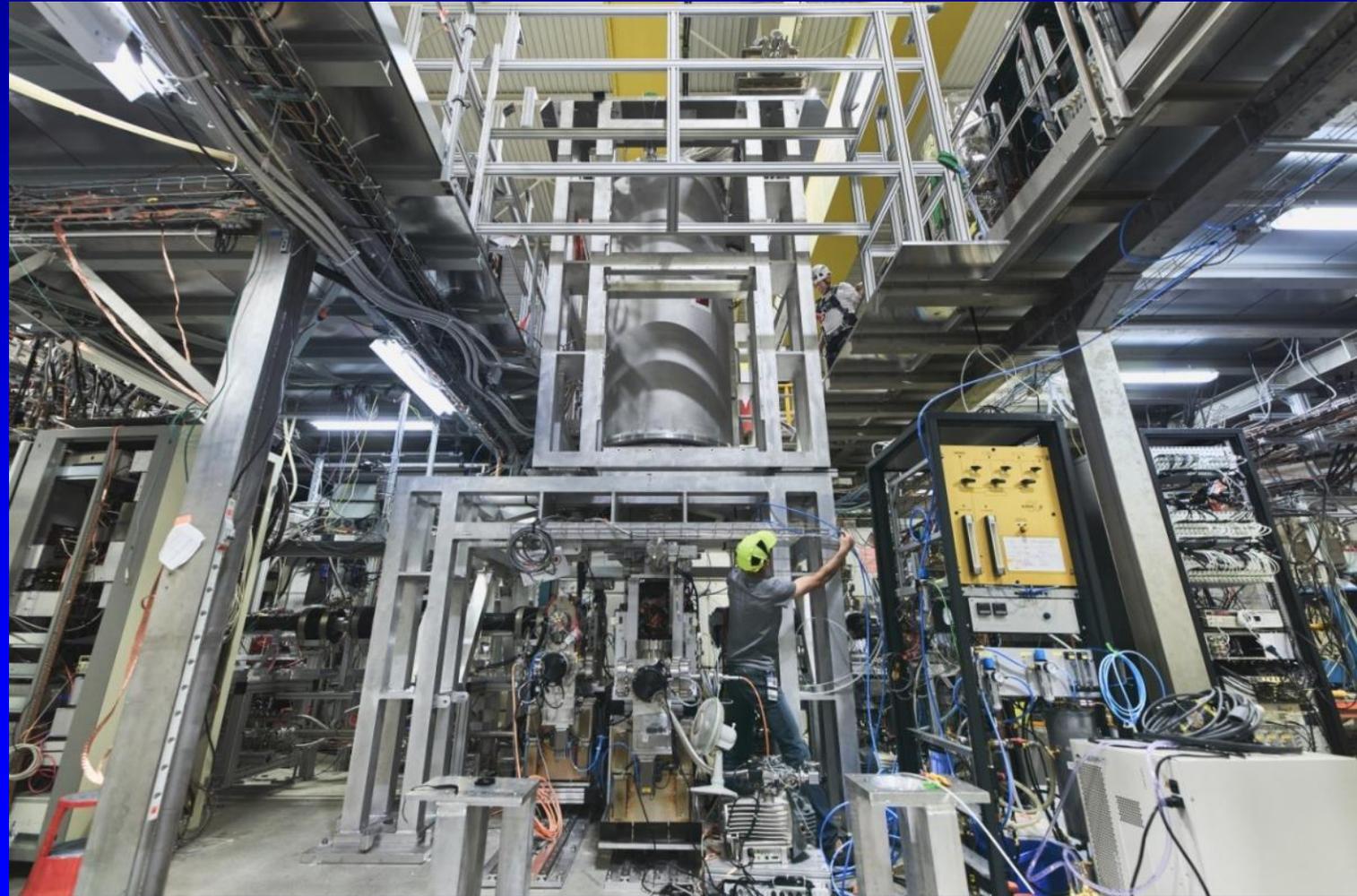


**ELENA: Extra Low ENergy Antiprotons**

# Production d'anti-hydrogène par l'expérience ALPHA

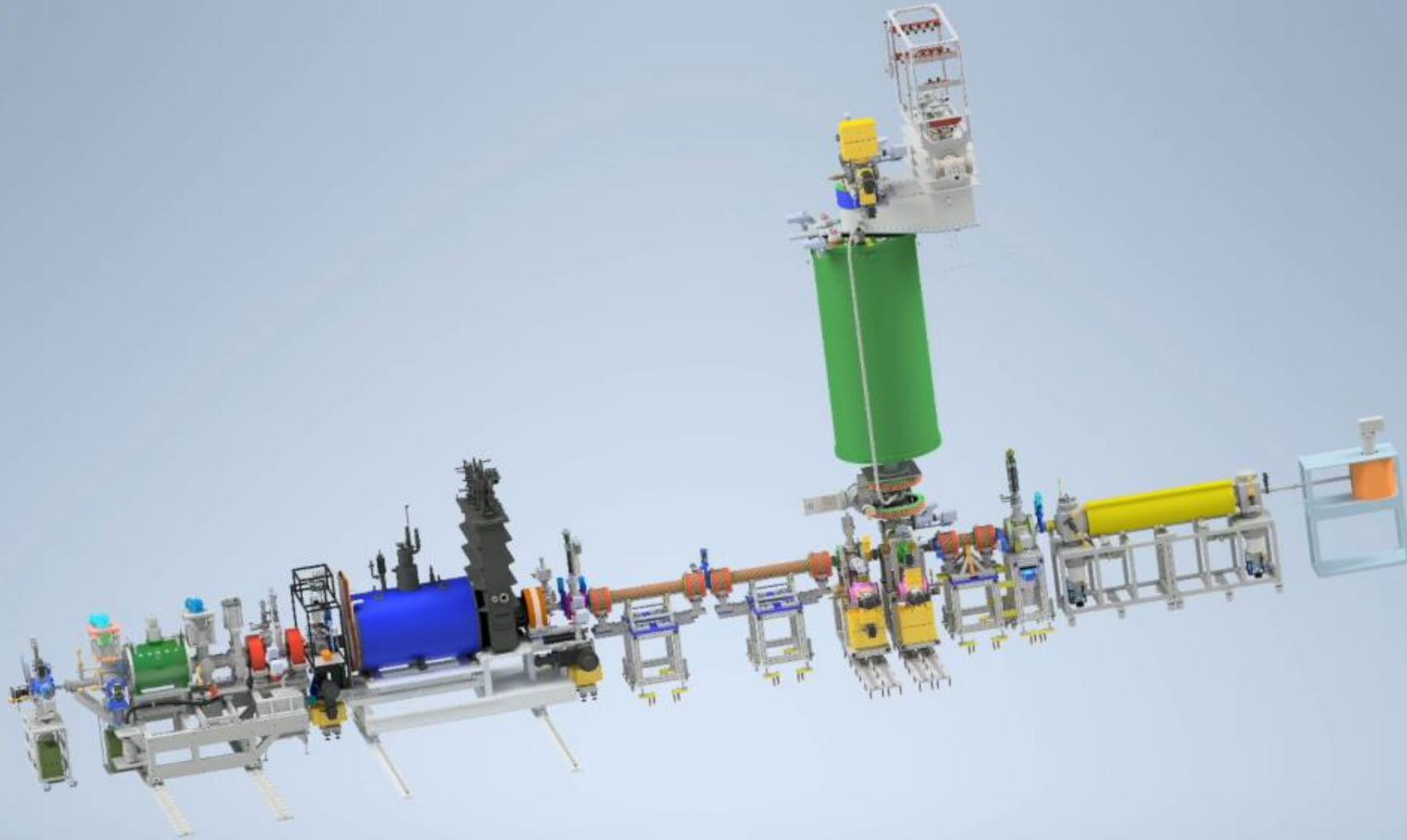


← Piège de Penning



Expérience ALPHA au CERN AD →

# Produire et piéger de l'Antihydrogène (expérience ALPHA)



# Transporter des antiprotons par camion:

# Expériences PUMA et BASE-STEP

## Au Cern, un transport sous haute tension

Afin de s'éloigner au maximum des champs magnétiques générés par l'Antimatter Factory, l'équipe de Base veut déplacer l'expérience, pesant 1 t, de quelques centaines de mètres grâce à une camionnette.

Pour l'expérience Puma, les scientifiques doivent la déplacer jusqu'à Isolde, à 2 km. Le dispositif pèsera 10 t et nécessitera de recourir à un poids lourd.

### 3 DESTINATION ENCORE INCONNUE

Le tracé n'est pas encore décidé, les scientifiques cherchent un lieu assez grand pour accueillir leurs expériences. Contrairement à Puma, Base n'a besoin de s'éloigner que de quelques centaines de mètres.

### 4 ATTENTION AUX VIBRATIONS

Pour éviter toute vibration, le camion devra rouler à environ 5 km/h. Il sera muni d'un système de nivelage afin que Puma reste à l'horizontale.

### 5 UN TRAJET DE PLUS DE 3 HEURES

Pour rejoindre Isolde, le camion est obligé de faire un détour. En effet, une pente trop importante se trouve sur le chemin le plus court, qui risquerait de perturber le plasma.

### 1 STABILISER LE PLASMA

Pour stabiliser le plasma d'antiprotons, Puma sera sous vide à la température atteindra  $-269^{\circ}\text{C}$  grâce à du  $\text{He}^4$  liquide, et un aimant géant générera un fort champ magnétique.

### 2 POIDS LOURD

Grâce à un pont élévateur allant à une vitesse maximale de 3 m/min, Puma sera chargée sur un camion muni d'un groupe électrogène.

### 3 SOUS TENSION ÉLECTRIQUE

Puma devra toujours être alimentée en électricité. Le dispositif sera muni d'un *uninterruptible power supply*, une batterie avec une autonomie de 5 minutes en cas d'urgence.

### 2 UN SIMPLE FOURGON SUFFIRA

Un pont élévateur transportera Base jusqu'à un fourgon, également muni d'un groupe électrogène.

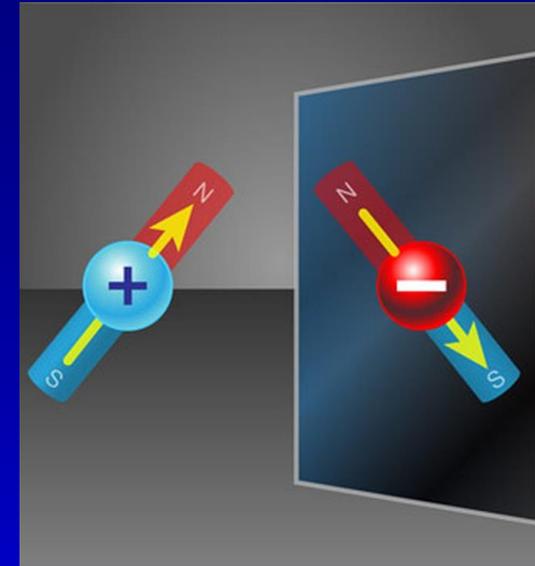
### 1 UN DISPOSITIF PLUS STABLE

Base ne contiendra que quelques milliers d'antiprotons, bien plus stables que dans Puma. L'expérience sera mise sous vide à  $-269^{\circ}\text{C}$  et contiendra un aimant moins gros.

Si ces missions réussissent, le transport d'antimatière pourrait se "démoder" afin que les universités du monde entier puissent se doter d'un échantillon.

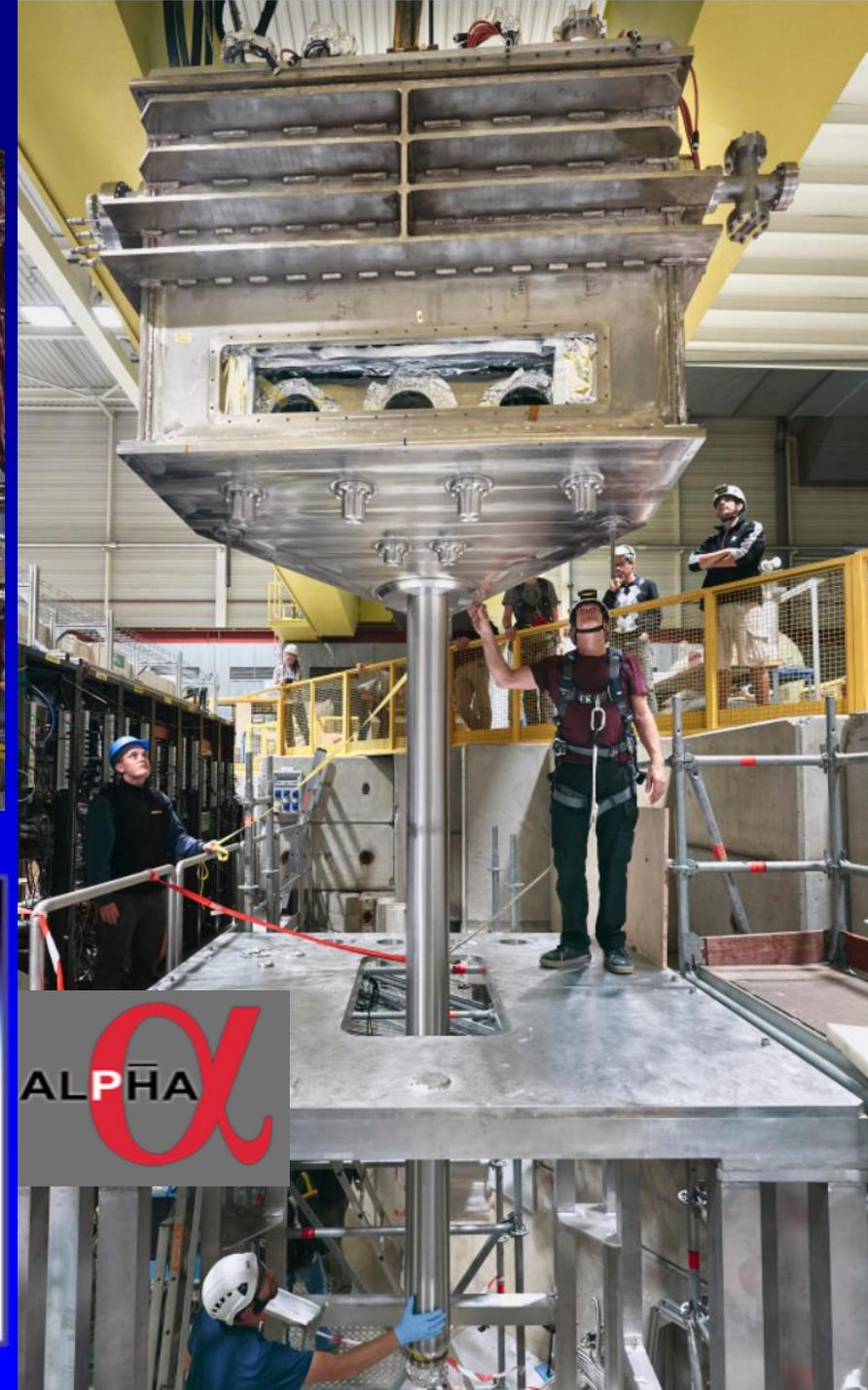
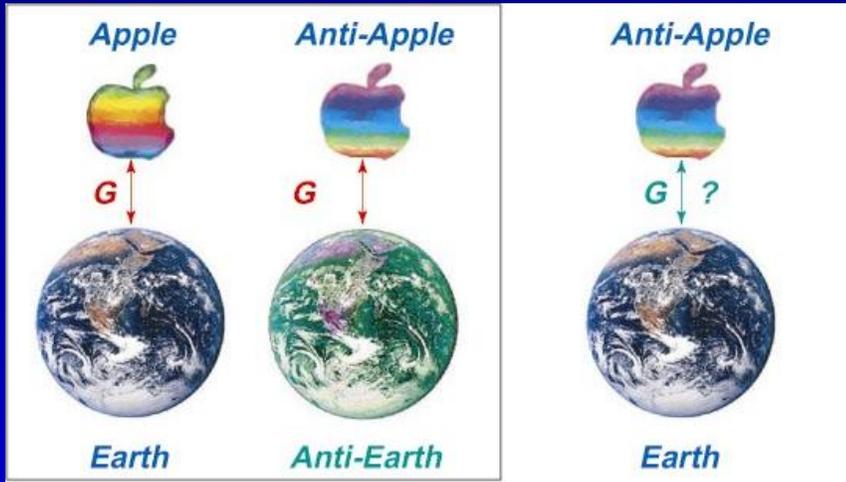
# Résumons: Le PARADOXE de l' ANTIMATIÈRE

- A l'échelle **microscopique**, au mieux de la théorie et des observations:  
**STRICTEMENT IDENTIQUES** (sauf la charge électrique)
- A l'échelle **macroscopique**, au mieux des observations:  
**ASSYMETRIE COMPLETE** (Antimatière quasi absente)



# Prochaine étape: mesure de l'Anti-Gravité !

$\bar{H}$  AEgIS



Objectif : Mesurer la chute libre de l'anti-hydrogène

Force gravitation vers le haut ou vers le bas ?  
Intensité identique ?



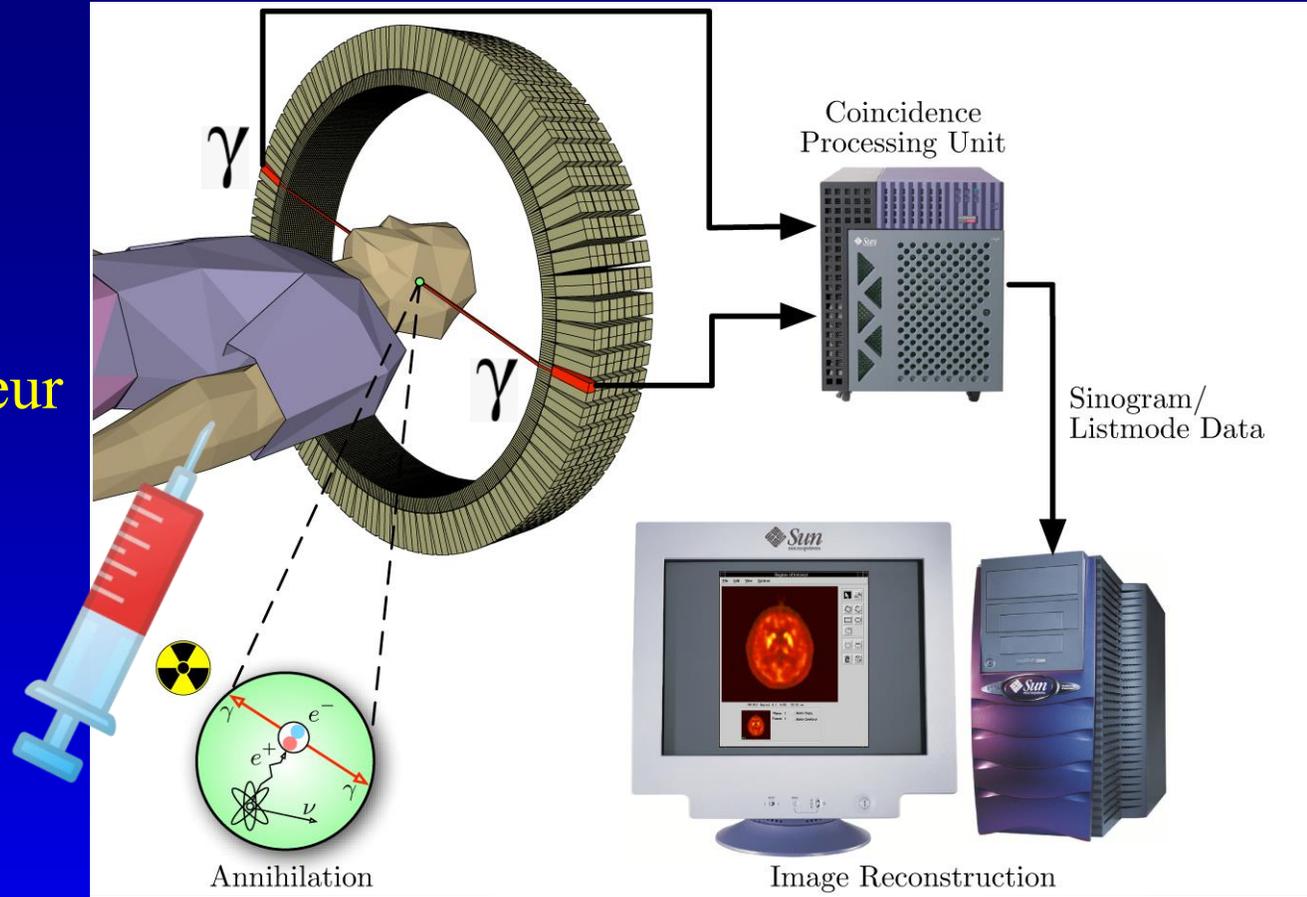
Résultats attendus très bientôt !

Un bureau au CERN après la découverte de l'antigravité...



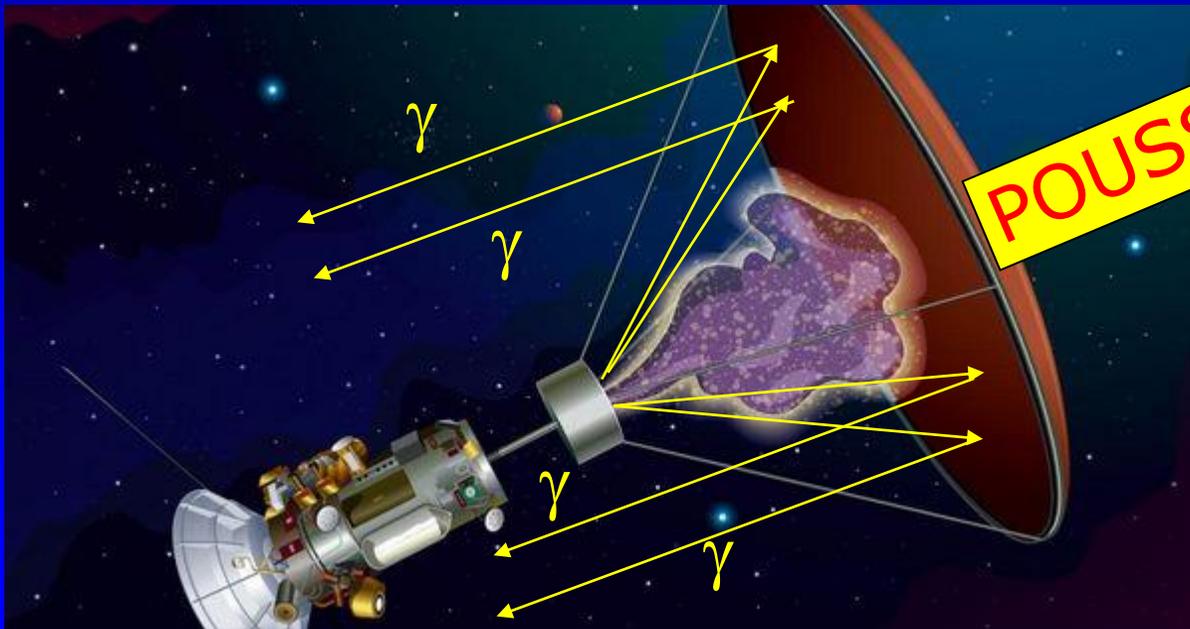
# Les usages de l'antimatière

- Positron Emission Tomography (PET Scan) pour localiser les tumeurs
- Injection de glucose marqué avec  $F^{18}$  (émetteur de positons): s'accumule dans tumeurs



# Les usages de l'antimatière (bientôt, ou plus tard... ?)

- Pour lancer une navette de 68 t: 1570 t de  $O_2 + H_2$  ( $2 \cdot 10^{13}$  Joules)  
Equivalent à l'annihilation de 0.1g antimatière + 0.1g matière  
(Annihilation convertit 100% de masse en énergie :  $E=mc^2$ )
- Question: comment convertir cette énergie en poussée ?



Orbiter:  
68 t

Carburant:  
1570 t

- Problème: il faut 200 millions d'années à l'AD pour produire 0.1g d'antimatière...

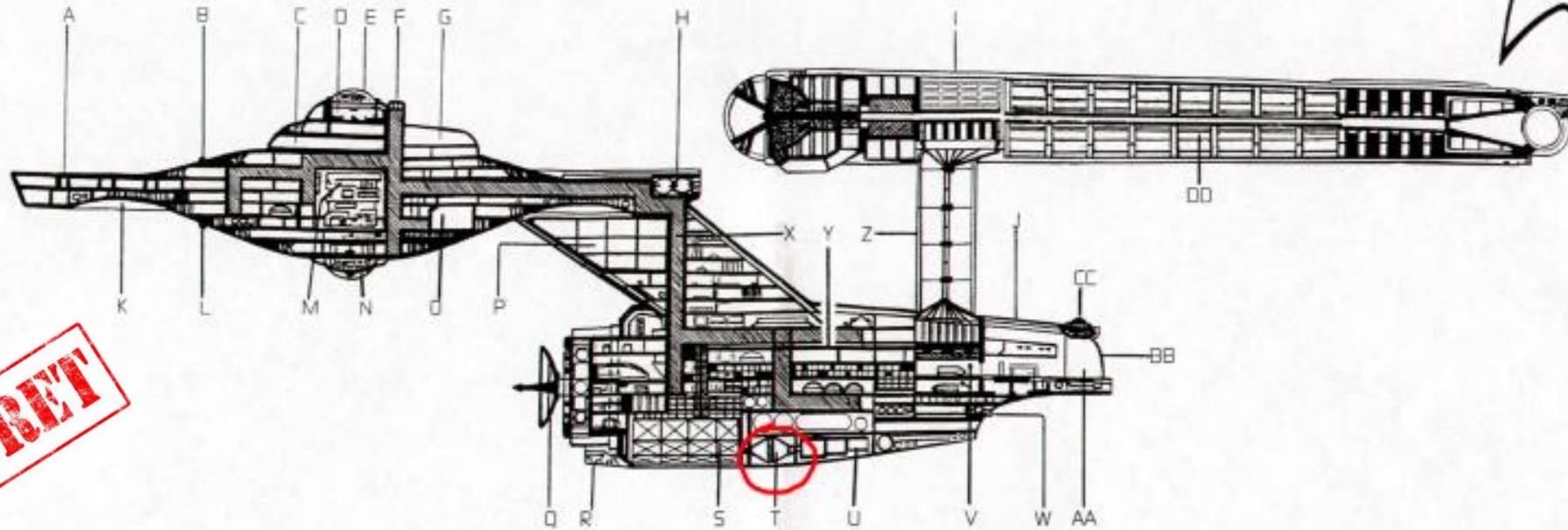


Certains y ont pensé dans les années 1960...

A detailed image of the USS Enterprise Starship (NCC-1701) from Star Trek, shown in a three-quarter view against a starry space background. The ship's saucer section is prominent at the top, with the hull number 'NCC-1701' visible. The nacelles and secondary hull are positioned below and to the right. The ship is illuminated with various lights, including a bright blue glow from the primary engine nacelle.

**STAR TREK**  
USS Enterprise Starship

CONSTITUTION CLASS STARSHIP U.S.S. ENTERPRISE NCC-1701  
 PORT SIDE ELEVATION/PROFILE VIEW MID-LINE INTERNAL ARRANGEMENT



**TOP SECRET**

- |   |   |   |                                 |    |                                   |
|---|---|---|---------------------------------|----|-----------------------------------|
| A | PRIMARY HULL  | J | SECONDARY/ENGINEERING HULL      | U  | EMERGENCY POWER SYSTEMS           |
| B | UPPER PHASER ARRAY (TYP)                                    | K | PRIMARY HULL UNDERCUT           | V  | SHUTTLE WORK BAYS                 |
| C | FWD TORPEDO BAY   | L | LOWER PHASER ARRAY (TYP)        | W  | AFT TRACTOR BEAM EMITTER          |
| D | MAIN BRIDGE   | M | MAIN COMPUTER CORE              | X  | TURBO LIFT TUBE (TYP)             |
| E | UPPER SENSOR ARRAY  | N | LOWER SENSOR ARRAY              | Y  | MAIN ENGINE FLUX TRANSFER CONDUIT |
| F | TURBO LIFT TUBE DOCKING<br>PASS-THROUGH CONNECTION<br>POINT | O | CARGO HOLD (TYP)                | Z  | WARP ENGINE SUPPORT NACELLE (2)   |
| G | AFT TORPEDO BAY   | P | DEUTERIUM TANKAGE               | AA | MAIN SHUTTLE LANDING BAY          |
| H | IMPULSE ENGINES   | Q | PRIMARY SCANNER ARRAY           | BB | SHUTTLE BAY DOORS                 |
| I | WARP ENGINE NACELLE   | R | PRIMARY DOCKING HARD POINTS (3) | CC | AFT SENSOR ARRAY                  |
|   |   | S | ANTI-MATTER CONTAINMENT VESSELS | DD | WARP COILS                        |
|   |   | T | MAIN M/AM POWER TAPS            |    |                                   |



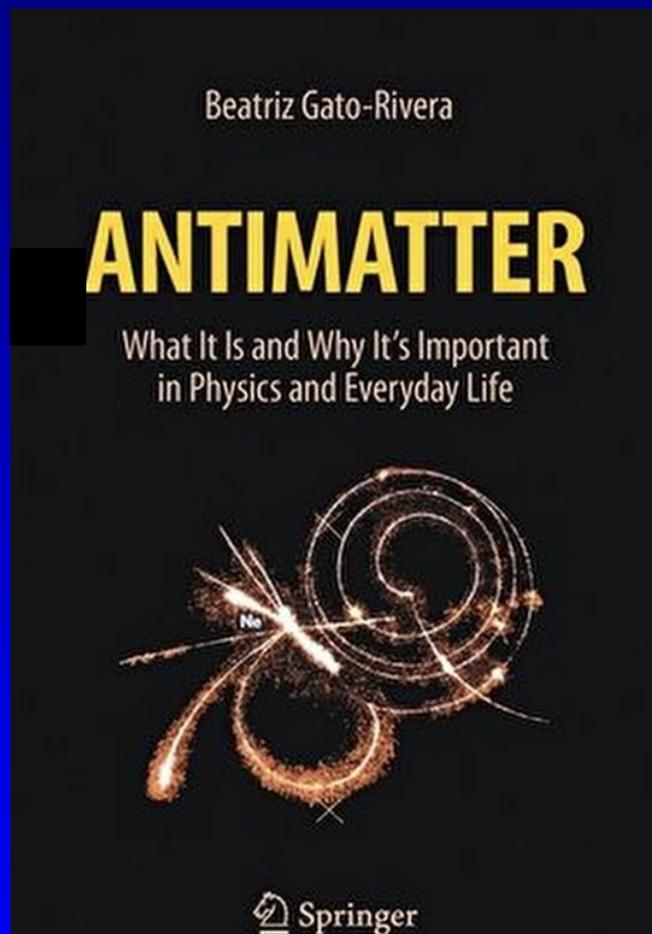


Pour aller plus loin...

Piégez de  
l'antihydrogène sur  
votre smart phone !!!



François BUTIN - CERN



**"Antimatter: What It Is and Why It's  
Important in Physics and Everyday Life"**  
**Beatriz Gato-Rivera**

Visite virtuelle de  
l'expérience ALPHA



Et venez visiter l'usine à antimatière au CERN <https://visit.cern/fr/guided-tours>