

PESER L'ANTIMATIÈRE



EricGrelet.posterous.com

On va tous y passer - 14 mars 2013

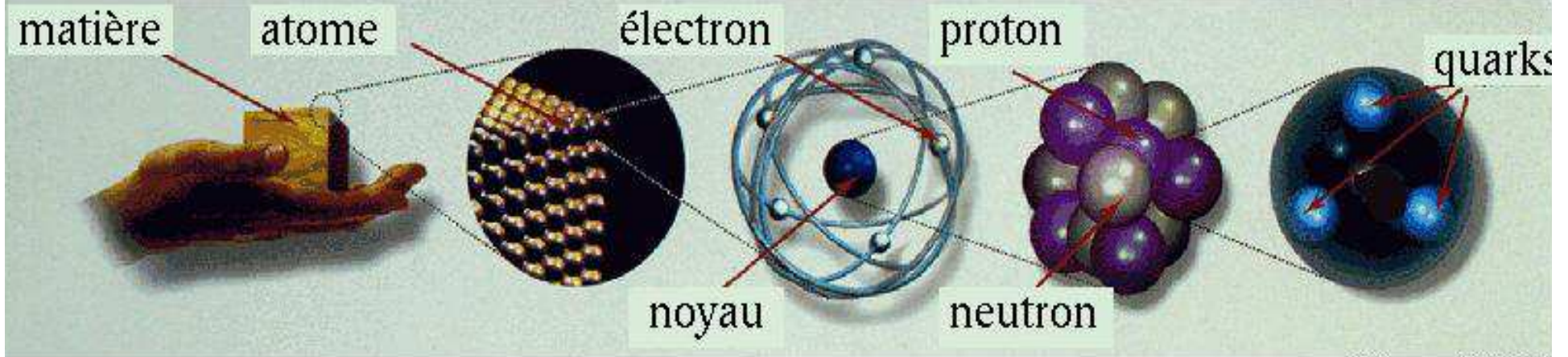
- **L'antimatière, c'est quoi ?**
- **À quoi ça sert ?**
- **De l'antihydrogène au CERN, pourquoi ?**
- **La pesée : l'expérience GBAR**

Pascal Debu

*Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers
Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives*

- **Découverte et propriétés de l'antimatière**
- À quoi ça sert ?
- De l'antihydrogène au CERN, pourquoi ?
- La pesée : l'expérience GBAR

Au fait, qu'est-ce que la matière ?

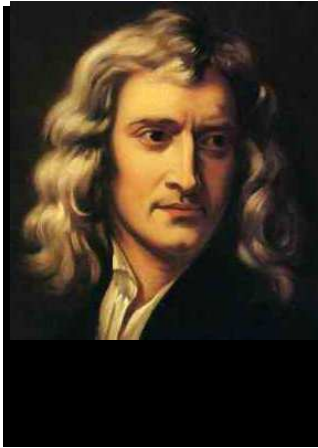


Crédit CERN

- La matière est faite d'atomes, eux-mêmes constitués d'électrons, de protons et de neutrons
- Les protons et les neutrons sont faits de quarks
- La matière est donc constituée de particules élémentaires, électrons et quarks, soudées par les forces électromagnétiques et nucléaires

Pas besoin d'antimatière dans tout cela !

Petite histoire de l'antimatière



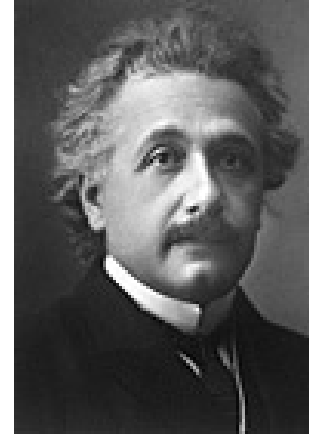
1687 Newton

*Mécanique
classique*



1865 Maxwell

*Électro-
magnétisme*



1906 Einstein

*Relativité
restreinte*



1926 Schrödinger

*Mécanique
quantique*

électron

relativiste

dans les atomes



1928 Dirac

Formulation de l'évolution d'un électron
dans un cadre quantique et relativiste :

l'équation de Dirac.

$$(i\gamma^\mu \partial_\mu - m)\psi = 0$$

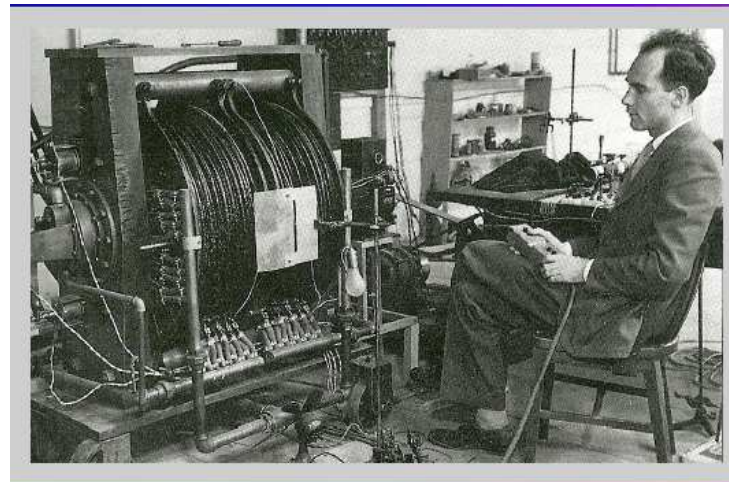
Petit problème : l'équation de Dirac a deux solutions...

La première correspond à l'électron, mais la deuxième a une masse négative !

- La rejeter ?
- Électron d'énergie négative : mer de Dirac ???
- Le proton ? Mais sa masse est 2000 fois plus grande
- Une nouvelle particule de charge +1 ???

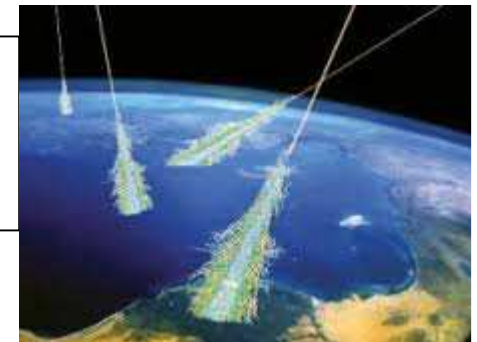
En 1931, Dirac formule l'hypothèse d'un « anti-électron »

Indépendamment (!) en 1932, Anderson découvre le positron en étudiant les rayons cosmiques



Anderson, Caltech, 1932

Particules de haute énergie qui circulent dans le vide interstellaire (protons, noyaux d'atomes, électrons, rayons γ , neutrinos...) qui produisent des gerbes de particules en interagissant dans l'atmosphère



Les antiparticules sont « nées » !

- La découverte d'Anderson est confirmée à Cambridge
 - L'hypothèse de Dirac est enfin acceptée
 - Dans le même papier il avait aussi prédit l'existence de l'antiproton
 - Se souvenir qu'en 1931, on ne connaissait que l'électron et le proton !
- Plus tard, la théorie des champs permettra de rétablir la cohérence de la théorie et de donner une masse positive aux antiparticules

Pour en savoir plus

Fil noir sur l'équation de Dirac jeudi 13 :

Objectifs :

montrer comment la tentative de Dirac de réconcilier l'équation de Schrödinger et la relativité permet d'introduire naturellement le spin de l'électron et l'a conduit à la prédiction de l'existence du positron, antiparticule de l'électron, et de l'antiproton

Prérequis :

Notions de mécanique quantique et sur l'équation de Schrödinger
Notions de relativité restreinte et sur les quadrivecteurs

$$i\hbar \frac{\partial \psi}{\partial t} = \left(-\frac{\hbar^2}{2m} \Delta + V \right) \psi$$

$$E^2 = p^2 c^2 + m^2 c^4$$

Comment se fabrique l'antimatière ?

Par « matérialisation » :

Interactions des rayons cosmiques dans l'atmosphère

Collisions de particules dans les accélérateurs

$E = M c^2$
Collision \rightarrow énergie \rightarrow matière + antimatière



Masse du proton = 2000 fois la masse de l'électron

\rightarrow L'énergie nécessaire pour créer **proton p** + **antiproton \bar{p}**
est au moins 2000 fois plus grande que l'énergie nécessaire pour créer **e^-** + **e^+**

À la conquête de l'antimatière

			<u>Antiparticules</u>		
1932	} 23 ans		e^+	Rayons cosmiques	
1955			\bar{p}	Berkeley (USA) (6,5 GeV)	
1956	} 9 ans		\bar{n}	Berkeley (USA) (6,5 GeV)	
1965			<u>Antinoyaux</u> ${}^2\bar{H} (\bar{p} + \bar{n})$	Brookhaven (USA) (30 GeV)	
1970	} 25 ans		${}^3\bar{He} (2\bar{p} + \bar{n})$	Serpukhov (URSS) (76 GeV)	
1978			${}^3\bar{H}$	CERN (Europe) (200 GeV)	
				${}^4\bar{He} (2\bar{p} + 2\bar{n})$ 2011	Brookhaven (USA) <i>(collisions or + or à 62 GeV/nucléon)</i>
	} 15 ans		<u>Antiatomes</u>		
1995			antihydrogène ($\bar{p} + e^+$) libre	CERN (Europe)	
2010			antihydrogène ($\bar{p} + e^+$) piégé	CERN (Europe)	

L'antimatière...c'est quoi ?

particules		antiparticules
électron e^-	•	• e^+ positon
proton p	⊕	⊖ \bar{p} antiproton
neutron n	○	○ \bar{n} antineutron

↑
Même masse **inertielle**
Même durée de vie
Charge opposée

Antimatière :
assemblage d'antiparticules soudées par les forces électromagnétiques et nucléaires

Semblable à la matière ? Oui !

MAIS

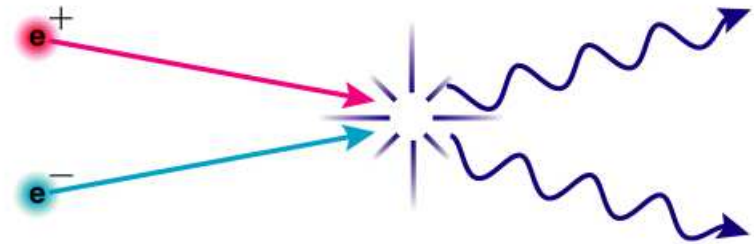
certaines désintégrations d'antiparticules instables se font à un taux différent de leur homologue en matière

Il y a de toutes petites différences entre matière et antimatière

Que devient l'antimatière ?

« Annihilation » :

$$\left[\begin{array}{l} M c^2 = E \\ \text{matière} + \text{antimatière} \rightarrow \text{énergie} \rightarrow \dots \end{array} \right.$$



L'antimatière dans l'Univers

Au moment du big-bang, la matière serait apparue avec autant d'antimatière :

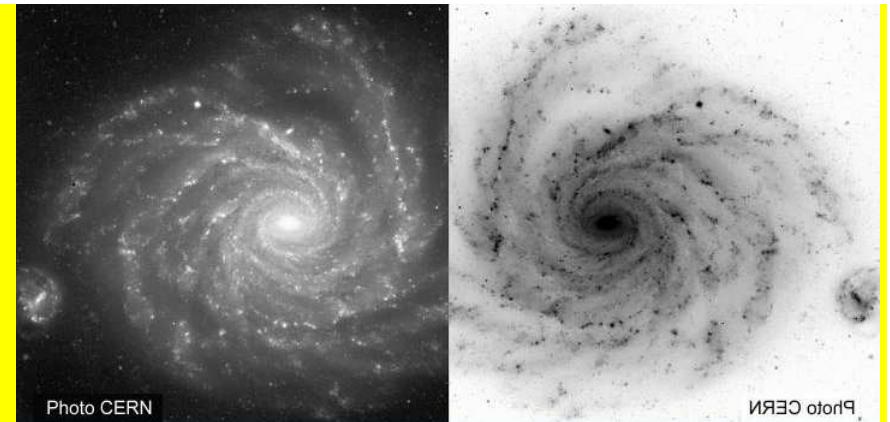
équilibre : énergie \Leftrightarrow matière + antimatière

Expansion et refroidissement de l'Univers : matière + antimatière \rightarrow énergie \rightarrow γ 's

Il devrait rester autant d'antimatière que de matière...
ou seulement de l'énergie sous forme de rayonnement

MAIS

Autour de nous,
Dans notre galaxie,
Dans les autres galaxies,



**On ne voit pas de rayonnement γ signalant
une frontière avec de l'antimatière primordiale**

À ne pas manquer !
conférence de H. Reeves
Mardi 11

Qu'est devenue l'antimatière ???

- Possibilité théorique :

On ne sait pas !

Comme énoncé par A. Sakharov en 1967,
il est possible en principe de favoriser la matière
dans le bilan des annihilations.

La matière dans l'Univers actuel représente ce qui reste
(un milliardième !!!) de la matière produite lors du big-bang
et toute l'antimatière a disparu.



A. Sakharov

**Mais cet excès de matière est trop grand pour être expliqué
dans le cadre du modèle standard de la physique des particules**

- Autre possibilité:

L'antimatière est quelque part, et la question est de comprendre pourquoi on ne la détecte pas :

répulsion matière antimatière ???

...voir suite de l'exposé...



- Découverte et propriétés de l'antimatière
- **À quoi ça sert ?**
- De l'antihydrogène au CERN, pourquoi ?
- La pesée : l'expérience GBAR

De l'antimatière dans la radioactivité

radioactivité β^- neutron \rightarrow proton + électron e^- + antineutrino

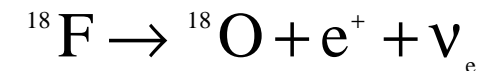
radioactivité β^+ proton \rightarrow neutron + positron e^+ + neutrino

Deux exemples particulièrement utiles :

- source de positrons pour l'imagerie médicale :

fluor 18

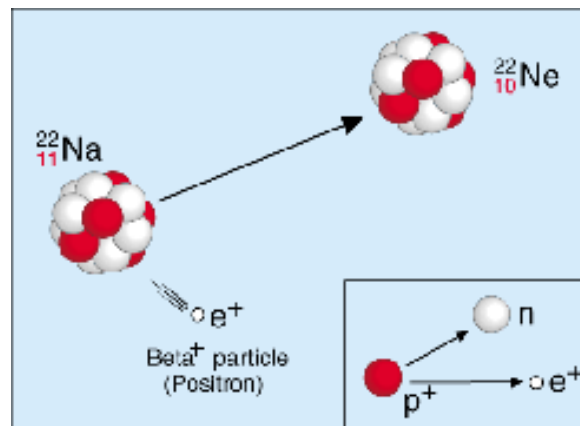
demi vie : 110 minutes



- source de positrons pour la science des matériaux :

sodium 22

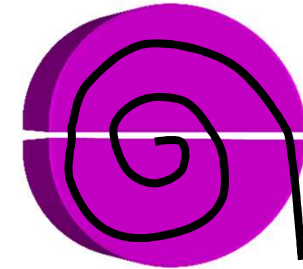
demi vie : deux ans et demi



Principe de l'imagerie médicale

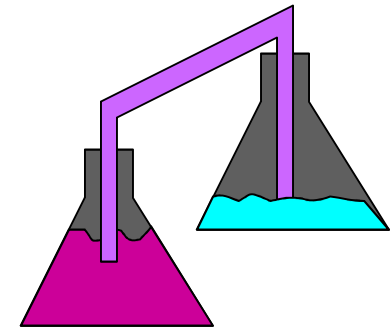
Production d'isotopes radioactifs avec un cyclotron

^{11}C ^{13}N ^{15}O ^{18}F ^{55}Co ^{76}Br
qui ont des demi-vies de quelques heures

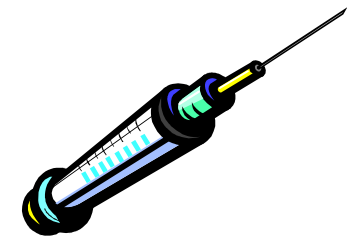


Préparation d'un composé chimique adapté

exemple : Fluoro Desoxy Glucose avec ^{18}F



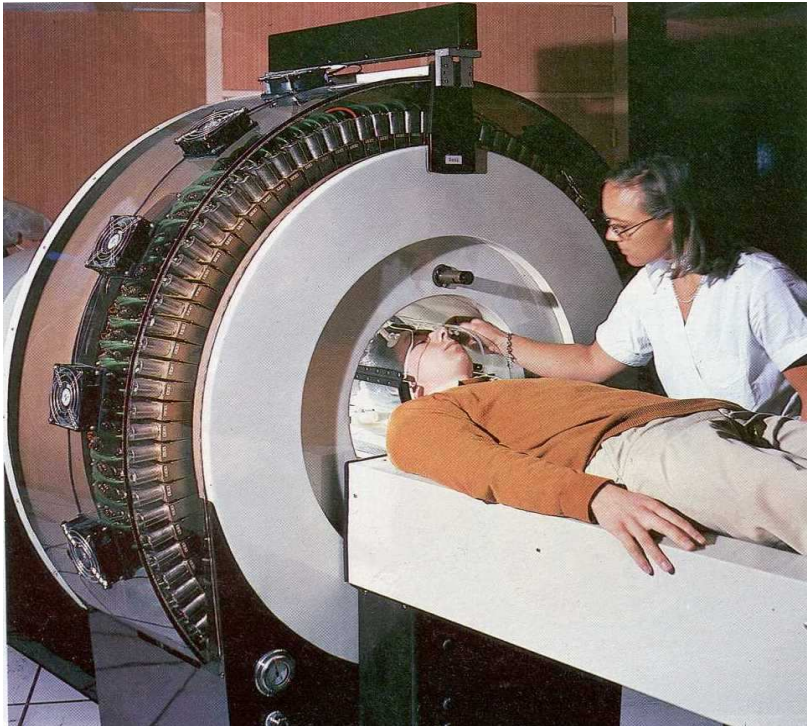
Injection du composé radioactif par voie intraveineuse



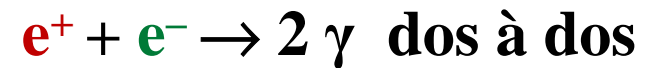
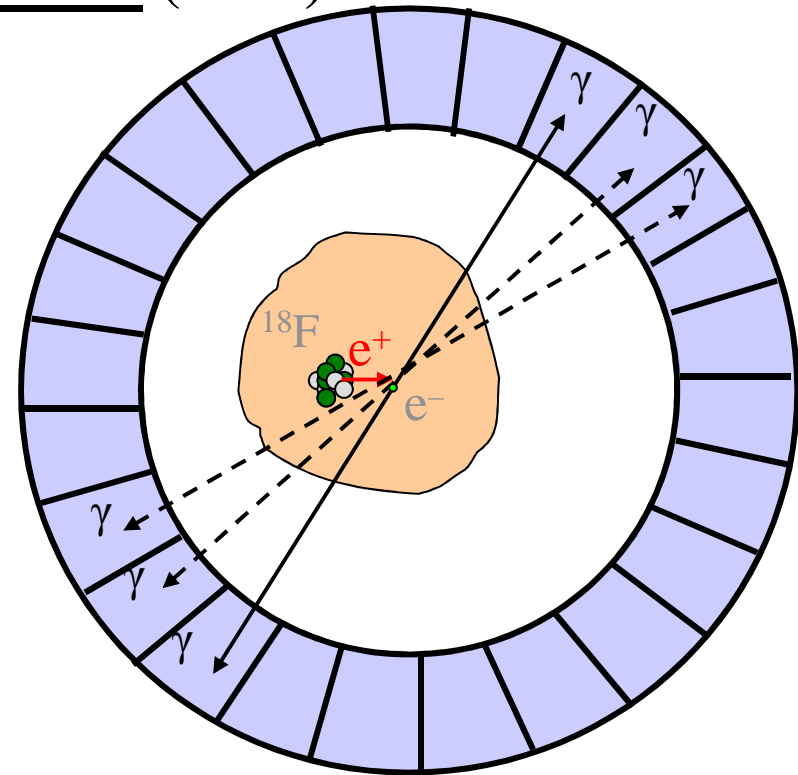
Utilisation des positrons pour l'imagerie médicale

La tomographie par émission de positrons (TEP)

Un corps radioactif β^+ est injecté dans le patient
(exemple : FluoroDesoxyGlucose avec ^{18}F)

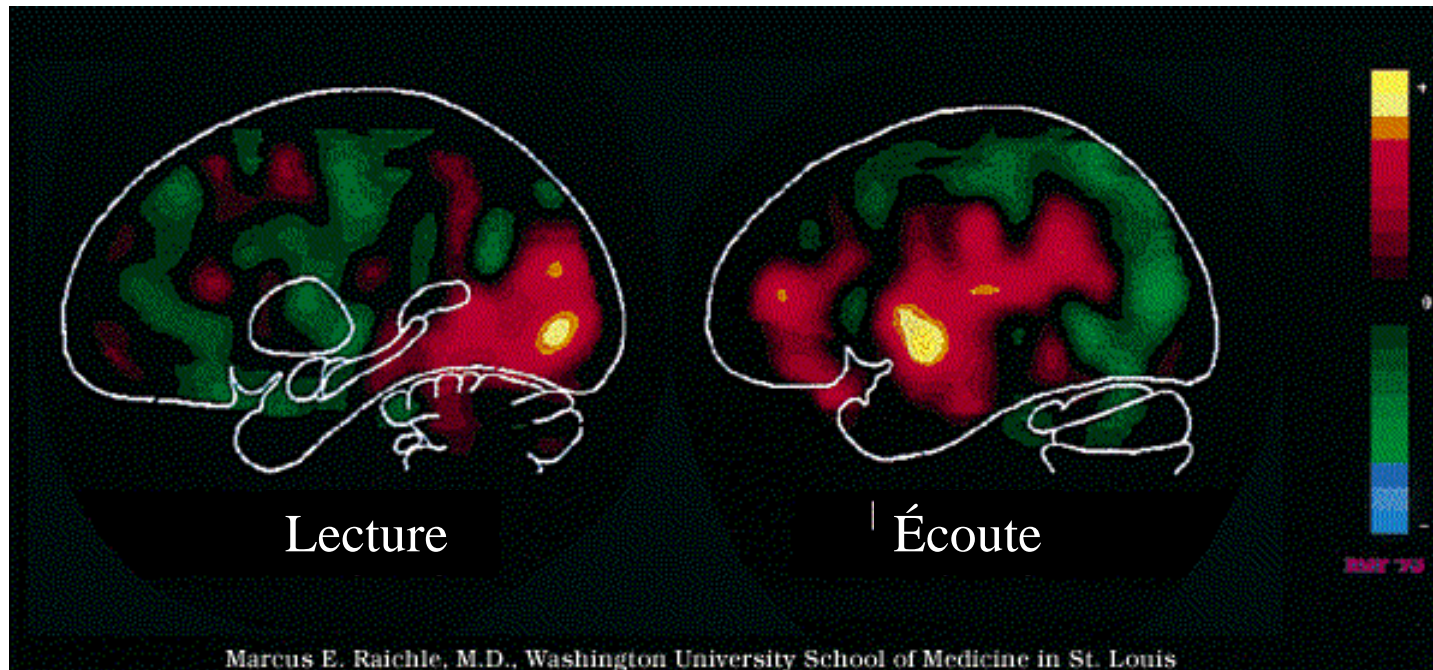


Prototypé développé au CEA en 1983



Couronne de détecteurs + coïncidence

Etude du fonctionnement du cerveau

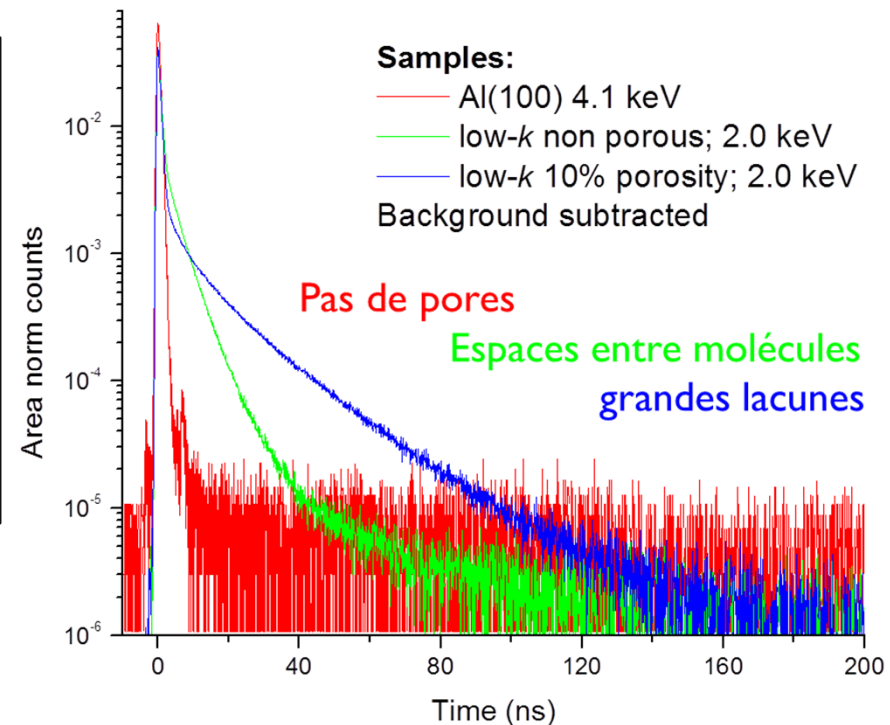


La lecture et l'écoute ne font pas travailler les mêmes zones du cerveau

Avantage de la TEP : rapidité de la réponse → étude en temps réel

Utilisation des positrons : science des matériaux

- **Envoi d'un faisceau de positrons sur un échantillon de matériau à étudier**
- **Mesure du temps mis par des positrons pour s'annihiler dans la matière :**
→ **détection et caractérisation des lacunes et porosités à l'échelle nanométrique**

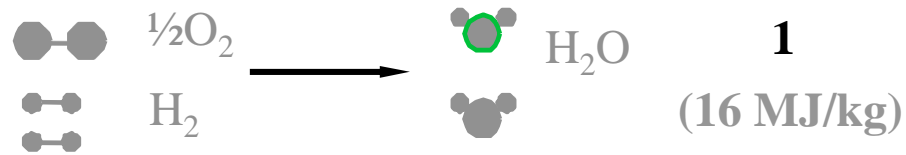


Applications :

- **États de surfaces, corrosion, vieillissement, des aciers, alliages.**
- **Porosité: filtres, membranes, verres**
- **Caractérisation des substrats en silicium (électronique rapide)**

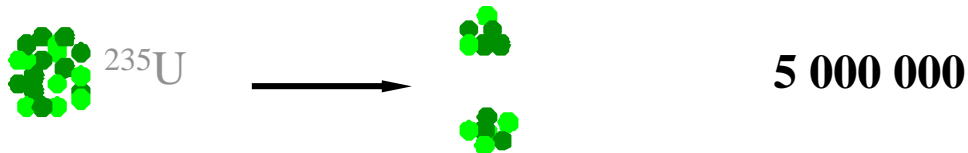
De l'énergie avec de l'antimatière ?

chimique



Comparaison
des énergies libérées
par kg

fission



fusion



annihilation



Conversion masse → énergie TRÈS efficace... mais pas de gisements d'antiprotons !

Stocker l'énergie avec de l'antimatière ?

Stockage d'énergie !?

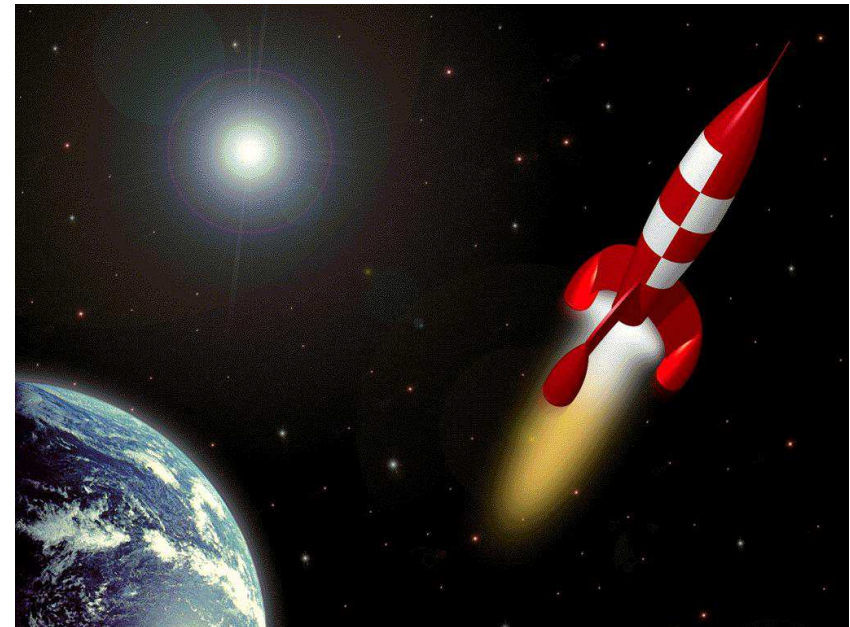
Problème : rendement $\sim 1/100\ 000\ 000$!!!

Carburant ultraléger !?

**Des μg pour les fusées pour aller
au centre de la Galaxie
temps de production :
 $\sim 100\ 000$ ans pour $1\ \mu\text{g}$ ($\Leftrightarrow 50\text{kg TNT}$)**

Arme très puissante !?

**$\sim 100\ 000\ 000$ ans pour $1\ \text{mg}$
(\sim bombe A)**

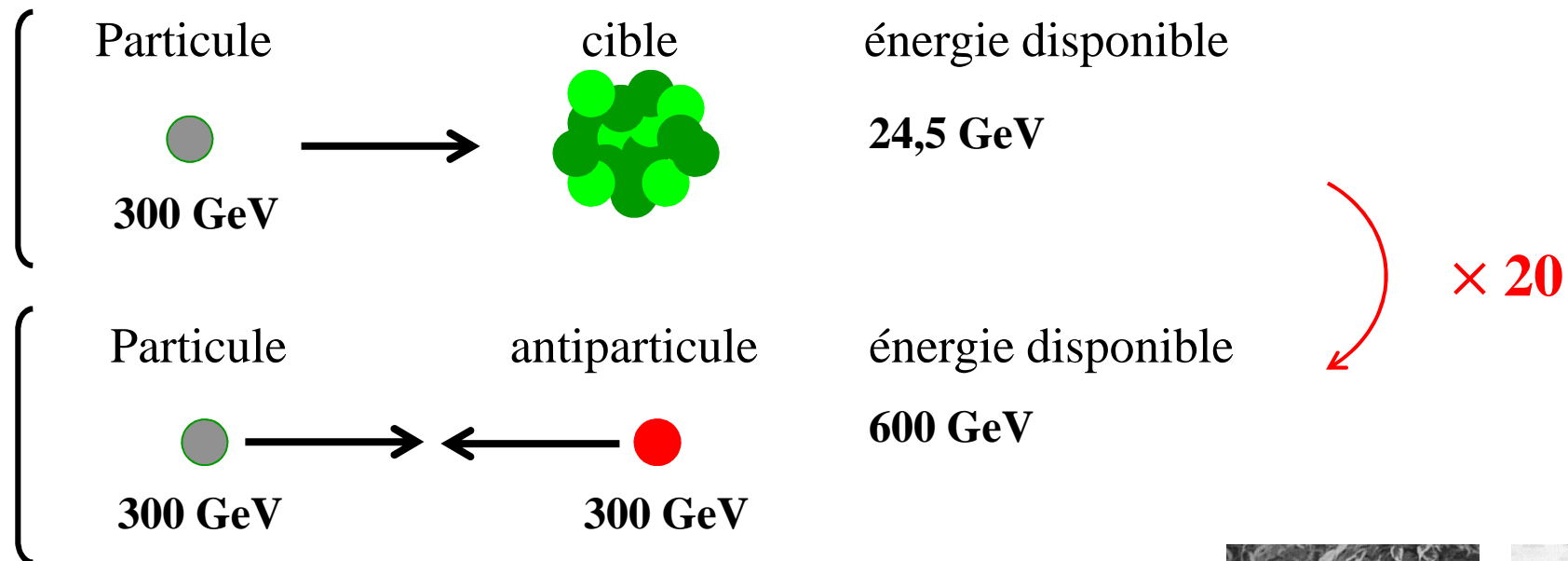


Antimatière : un outil pour les physiciens

Les expériences du CERN Laboratoire européen de physique des particules



Collisionneurs de particules : protons/antiprotons ou électrons/positrons



Les protons et les antiprotons peuvent circuler en sens inverse dans le même anneau

**CERN 1983 :
découvertes de nouvelles particules fondamentales
grâce à un collisionneur protons-antiprotons**



C. Rubbia



S. Van der Meer

- Découverte et propriétés de l'antimatière
- À quoi ça sert ?
- **De l'antihydrogène au CERN, pourquoi ?**
- La pesée : l'expérience GBAR

**Le hall du
décélérateur
d'antiprotons
au CERN**



L'antimatière pour tester la théorie

Cadre théorique du modèle standard → « **Théorème CPT** »



matière et antimatière associées ont :

- La même masse inertielle
- Le même moment magnétique
- ...
- L'atome d'hydrogène et l'atome d'antihydrogène doivent avoir les mêmes propriétés

$$\frac{m(e^+) - m(e^-)}{m(e^-)} < \frac{8}{1000000000}$$

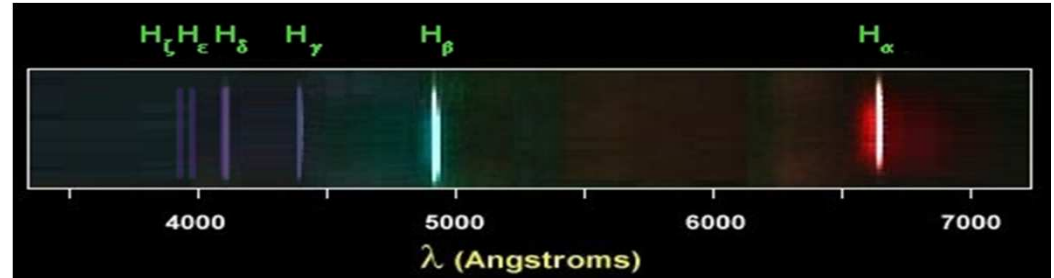
Mais

- Pas de théorie quantique établie de la gravitation
- Disparition inexpiquée de l'antimatière primordiale

→ **il est fondamental de tester le théorème CPT**

Spectres atomiques

- Les atomes émettent et absorbent la « lumière » à des longueurs d'onde λ ou des fréquences f bien déterminées ($\lambda = c/f$) : chaque atome a ainsi sa signature particulière comme un code barre !



- L'atome d'hydrogène est un système très simple : 1 proton + 1 électron

- On peut calculer et mesurer très précisément les fréquences de son spectre

- Exemple 1 :

Raie de 21 cm qui permet aux astronomes de détecter l'hydrogène froid interstellaire :

$$f = 1\,420\,405\,751,767 \pm 0,001 \text{ Hz}$$

précision 6 / 10¹³ !!!

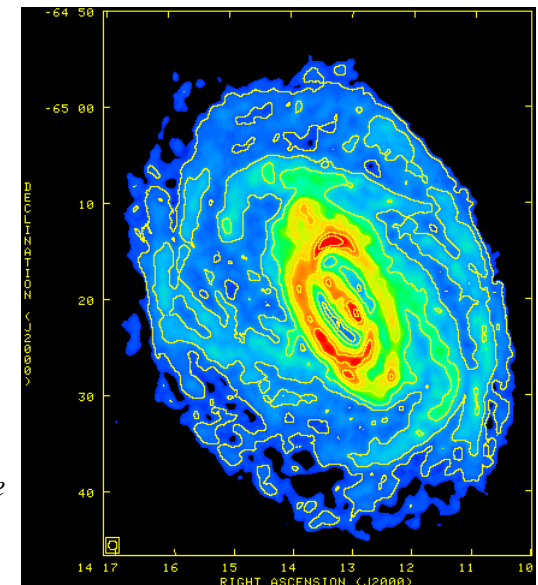
- Exemple 2 :

Transition à deux photons 1S-2S

$$f = 2\,466\,061\,413\,187\,035 \pm 10 \text{ Hz}$$

précision 4 / 10¹⁵ !!!

Distribution de l'hydrogène dans la galaxie de Circinus



L'antihydrogène



Théorème CPT \Rightarrow spectre antihydrogène = spectre hydrogène

Objectif à long terme des expériences :
test de CPT avec une précision de quelques 10^{-15}
par spectroscopie

Fabriquer l'antihydrogène



Fabriquer des atomes d'antihydrogène est beaucoup plus difficile que de fabriquer des antiparticules ou des antinoyaux car l'énergie de liaison atomique est ~ 1 million de fois plus faible que l'énergie de liaison nucléaire

Premiers atomes d'antihydrogène produits **en vol** au CERN en 1995 :
antiproton + noyau de xénon
→ création d'une paire électron positron
→ antihydrogène

W. Oelert

Probabilité 10^{-19} :
0.000 000 000 000 000 01 % !!!

Pb : antihydrogène trop rapide pour être étudié avec précision il faut le ralentir

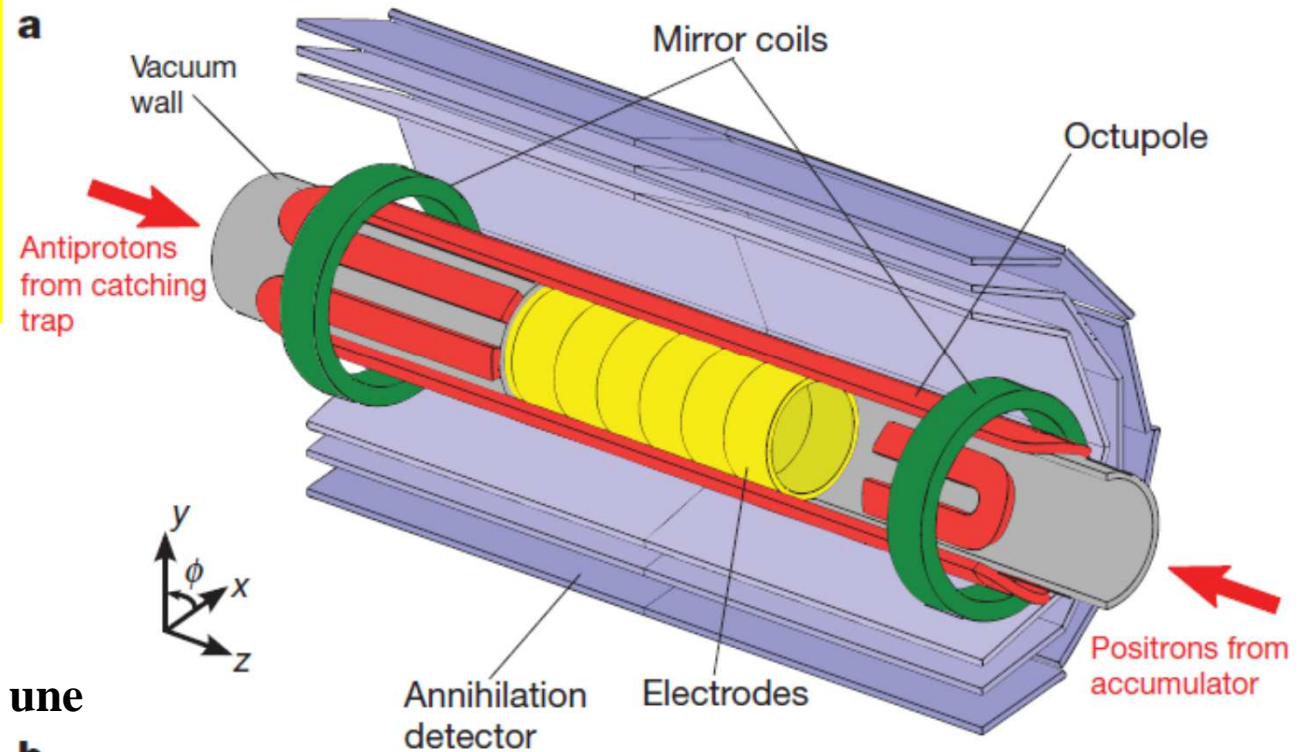


Stockage de l'antihydrogène

Exemple de l'expérience
ALPHA

première expérience
à avoir réussi
le piégeage de $\bar{\text{H}}$

- Antiprotons ralentis et stockés dans un piège
- Positrons produits par une source ^{22}Na et stockés
- Mélangés dans un piège magnétique \Rightarrow



- Refroidissement des antiprotons
- Création et stockage d'antihydrogène

Les expériences en fonctionnement

ATRAP



G. Gabrielse

ASACUSA



ALP̄HA



1999 :
Mesure précise de la masse inertielle de l'antiproton...

2001 :
Premier refroidissement des antiprotons avec des positrons

2002 :
Production d'antihydrogène

2011 :
Record mondial de refroidissement d'antiprotons : 3,5 K (~250 m/s)

2013 :
mesure du moment magnétique de l'antiproton
 $\mu(\bar{p}) / \mu(p) = -1,000\,000 \pm 0,000\,005$

2007 :
Record de stockage d'antiprotons, 10 800 000 \bar{p}

2011:
Mesure précise de la masse inertielle de l'antiproton avec l'hélium antiprotonique...

2014 :
Premier faisceau d'atomes d'antihydrogène : première étape pour une spectroscopie de précision

2010 :
ALP̄HA est la première à piéger de l'antihydrogène

2011 :
Stockage d'antihydrogène pendant 1000 s

2012 :
Première mesure spectroscopique de l'antihydrogène

2013 :
Première limite sur la masse pesante de l'antihydrogène

Quelle masse pour les antiprotons ? (1)

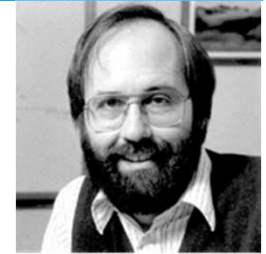
Mesure de la **masse inertielle** de l'antiproton:



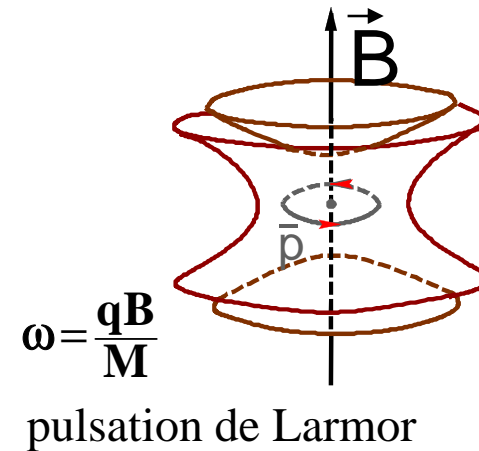
(masse donnée par le boson de Higgs)

piégeage dans un champ magnétique intense

mesure de sa fréquence de rotation



G. Gabrielse



1999 :

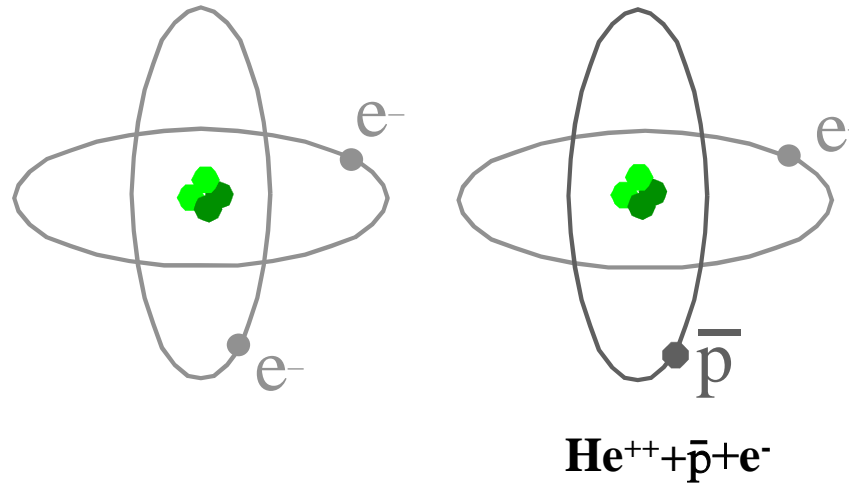
$$\frac{M(p)/q(p)}{M(\bar{p})/|q(\bar{p})|} = 0,999\,999\,999\,91 \pm 0,000\,000\,000\,09$$

Précision meilleure que 1 / 10 milliards !

Quelle masse pour les antiprotons ? (2)



On remplace un électron
par un antiproton
dans un atome d'hélium !



$$\frac{M(p)/q^2(p)}{M(\bar{p})/q^2(\bar{p})} = 0,999\,999\,999\,37 \pm 0,000\,000\,001\,30$$

Précision d'environ 1/ 1 milliard !



- Découverte et propriétés de l'antimatière
- À quoi ça sert ?
- De l'antihydrogène au CERN, pourquoi ?
- **La pesée : l'expérience GBAR**

Peser l'antimatière, pourquoi ? Cela n'a jamais été fait !

- L'antimatière est-elle repoussée par la matière : antigravité ?
- La gravité est-elle seulement modifiée légèrement, ou bien pas du tout ?

Tester la gravité pour l'antimatière : un enjeu pour la cosmologie :

- L'antigravité, cause de l'absence d'antimatière dans l'Univers visible ???
- Problème avec la théorie de la gravitation ?

Il faut introduire de la matière noire et de l'énergie noire de composition inconnue pour expliquer les mouvements des étoiles et des galaxies

cf Peter von Ballmoos ce matin !

- Un Univers avec antigravité n'aurait peut-être plus besoin de matière noire ni d'énergie noire ?

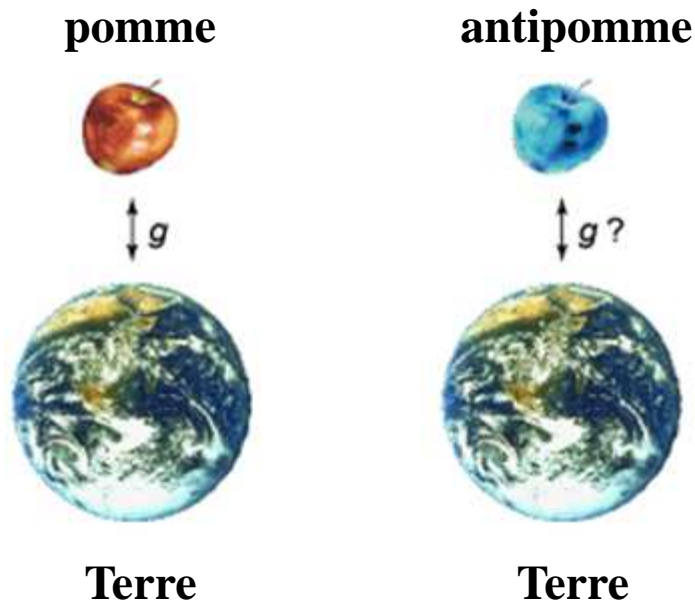
Remise en cause d'un fondement de la Relativité : principe d'équivalence

Le principe d'équivalence, fondement de la Relativité Générale

“Si un corps est placé en un point de l'espace-temps avec une vitesse initiale, alors sa trajectoire sera indépendante de sa structure interne et de sa composition s'il n'est soumis qu'aux forces de gravitation.”

⇔ Simultanéité de la chute des corps

⇔ Égalité masse inerte et masse pesante



**EST-CE VRAI AUSSI
POUR L'ANTIMATIÈRE ???**

masse inerte et masse pesante

Principe fondamental de la dynamique $\vec{F} = m_i \times \vec{a}$

Force exercée par la gravitation pour la matière $\vec{F} = m_g \times \vec{g}$

Principe d'équivalence $\vec{a} = \vec{g} \Rightarrow m_i = m_g = m$

théorème CPT + mesures : $m_i = \bar{m}_i$

Et pour l'antimatière ?

$$\left\{ \begin{array}{l} \text{P.F.D. : } \vec{F} = \bar{m}_i \times \vec{a} = m_i \times \vec{a} \\ \text{Pesanteur : } \vec{F} = \bar{m}_g \times \vec{g} = m_i \times \frac{\bar{m}_g}{m_i} \times \vec{g} \Rightarrow \vec{a} = \frac{\bar{m}_g}{m_i} \times \vec{g} \equiv \vec{g} \end{array} \right.$$

Notre objectif : mesurer l'accélération de la pesanteur pour l'antimatière

On la note : \vec{g}_i

Comment peser l'antimatière?

Faire une expérience de chute libre !

Quelle antimatière peser ?

Antiparticules chargées ? positons, antiprotons ? Non !!

Les forces électrostatiques sont des milliards de fois plus importantes que la gravité (une seule charge élémentaire à 5 m compense l'attraction de la Terre entière sur un électron)

Antiparticules neutres : oui, mais il les faut « au repos ».

Les antineutrons produits sont trop rapides, on ne sait pas les ralentir...
Vitesse initiale > 1 milliard km/heure !!!

Peser l'antihydrogène ?

Oui !

MAIS

Les antihydrogènes piégés les plus lents ont quand même des vitesses encore beaucoup trop élevées à cause de l'agitation thermique :

record actuel de refroidissement : 3,5 K \Leftrightarrow 900 km/h !!!

→ nouvelles méthodes nécessaires

Deux expériences sont en préparation au CERN :

- ▶ L'une avec de l'antihydrogène « très froid » (100 millikelvins \sim 50 m/s) → **AEgIS**
- ▶ L'autre avec de l'antihydrogène « ultra froid » (10 microkelvins \sim 50 cm/s) → **GBAR**



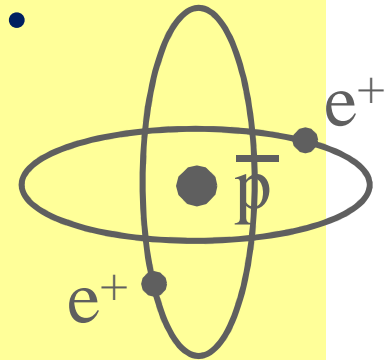
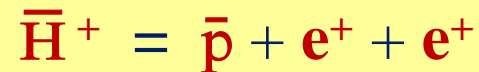
antiproton + positron
= antihydrogène



Nouvelle méthode pour la mesure du temps de chute libre

Astuce (Walz & Hänsch 2004) :

Produire d'abord un ion chargé, l'ion



Ralentir et piéger l'ion

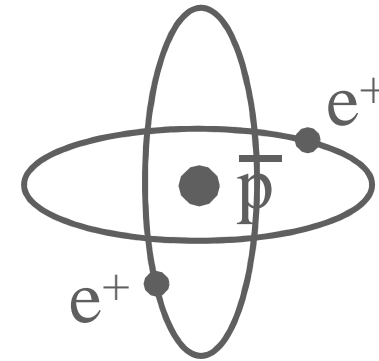
Un ion chargé est beaucoup plus « facile » à ralentir et à piéger qu'un atome neutre

Se débarrasser du positron de trop avec un tir laser

On obtient un antiatome neutre qui tombe alors librement

Production des ions \bar{H}^+ :

Antiproton + 2 positons

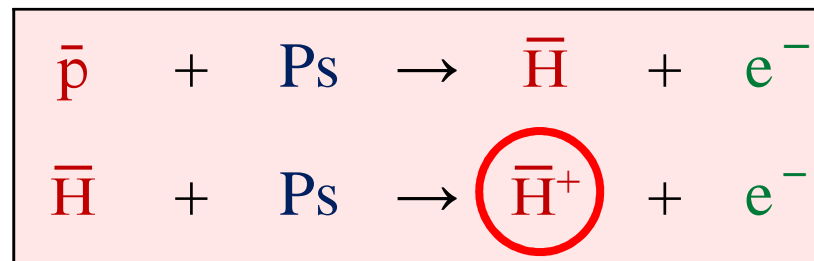


- On prend un nuage de **positronium** : « atome » $e^+ - e^-$, noté **Ps**

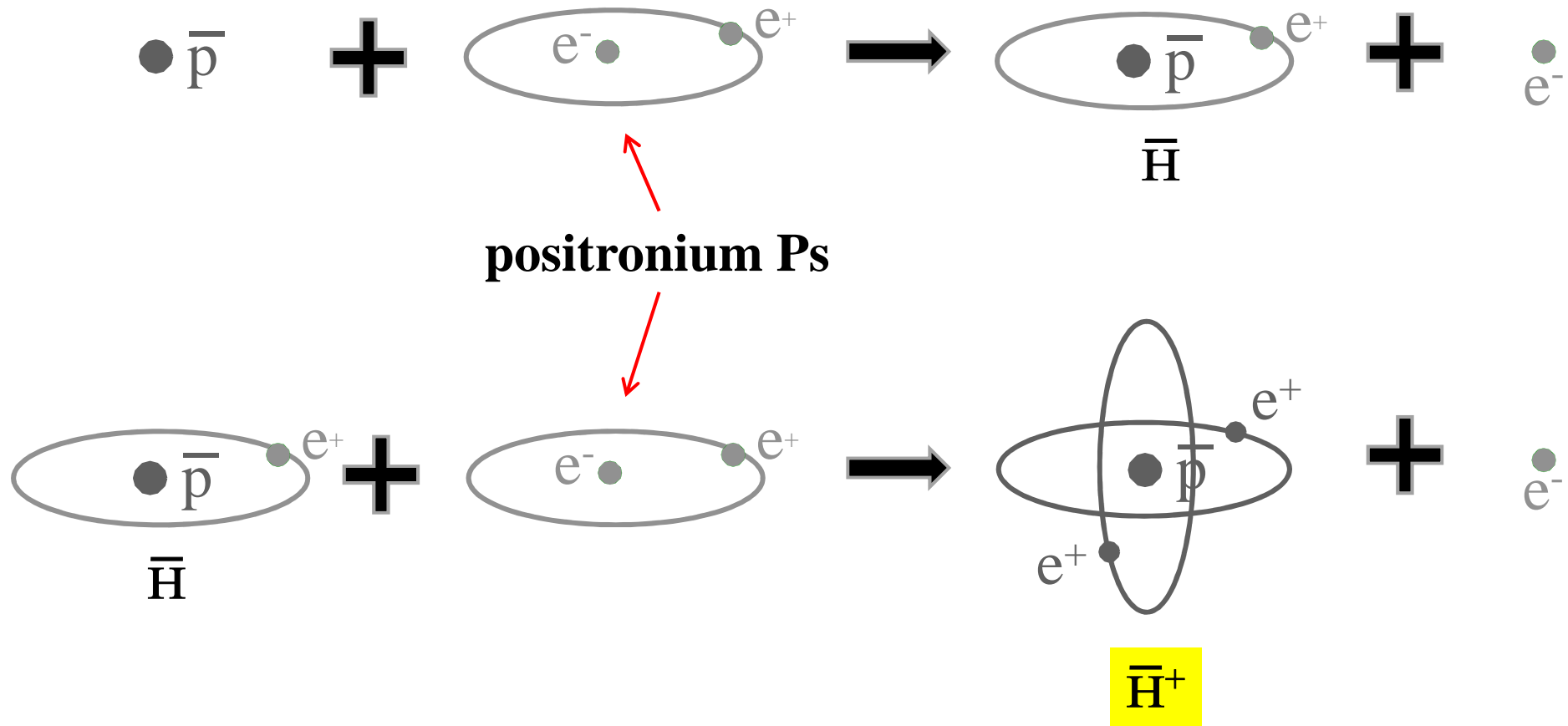


- Et on fait une double interaction d'**antiprotons** produits au CERN
- avec le nuage de positronium

→ antiatomes \bar{H} et ions \bar{H}^+

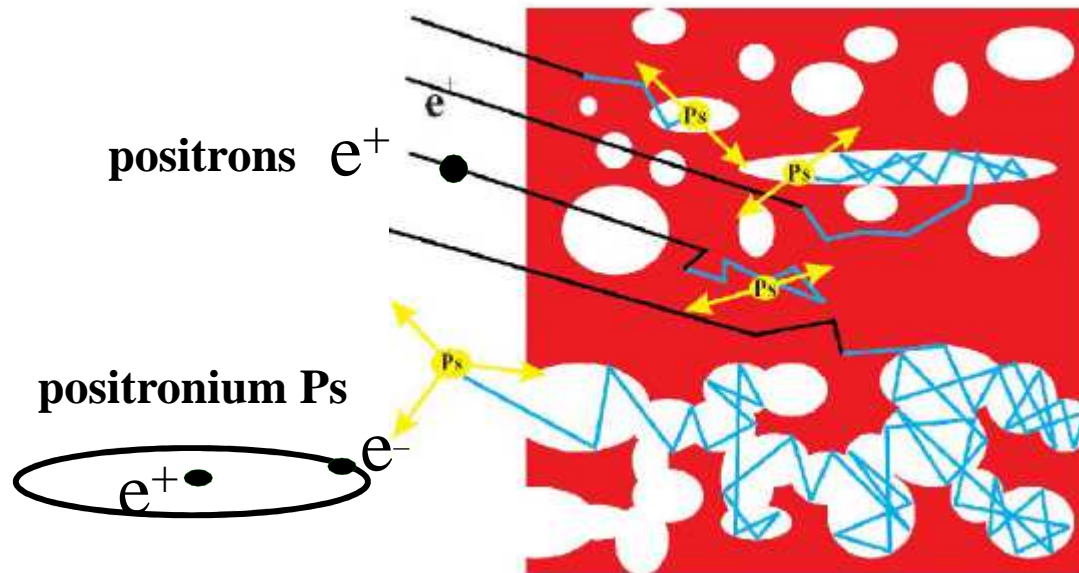


En dessins...



Création d'un nuage de positronium

Déversement de 20 milliards de positrons
préalablement stockés
sur un film de silice poreuse
environ 30 % ressortent sous forme de positronium !

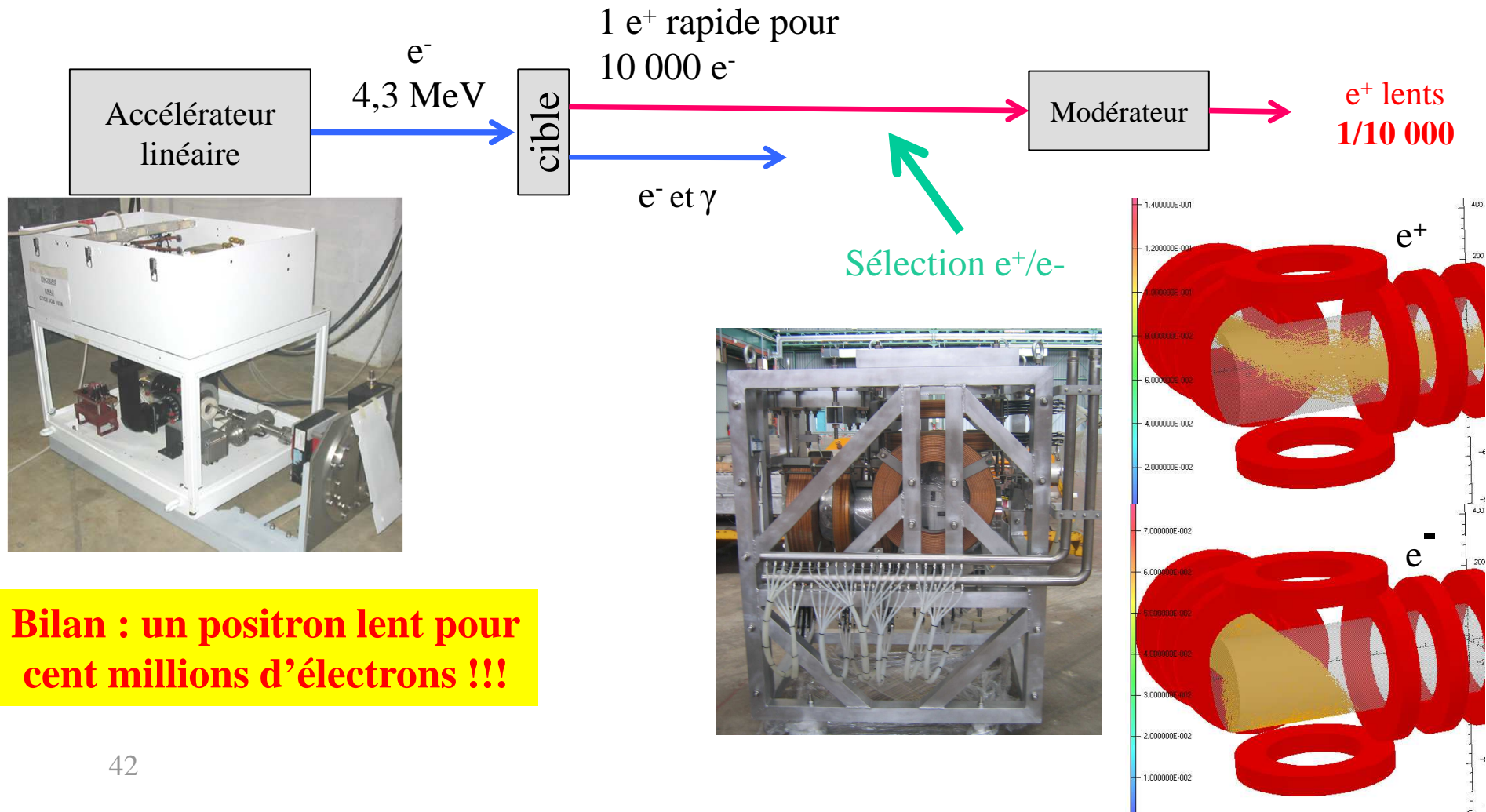


Mais durée de vie : 142 milliardièmes de secondes !!!

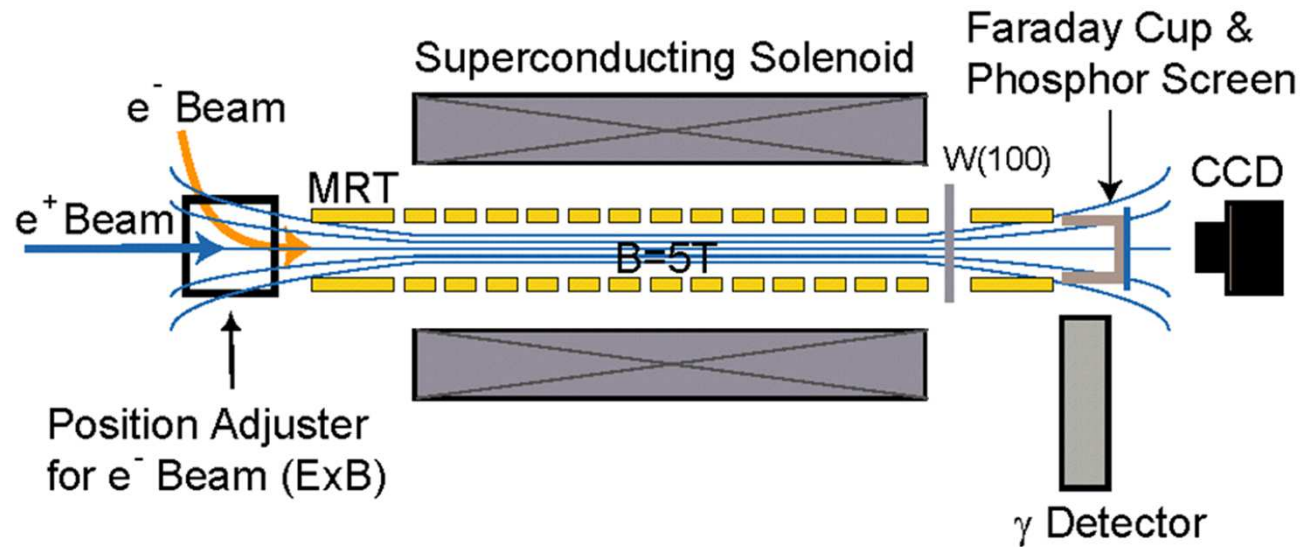
Il faut se dépêcher un peu pour les utiliser !!!

Production de positrons à l'aide d'un petit accélérateur d'électrons

Prototypé au CEA Saclay



Accumulation des positrons



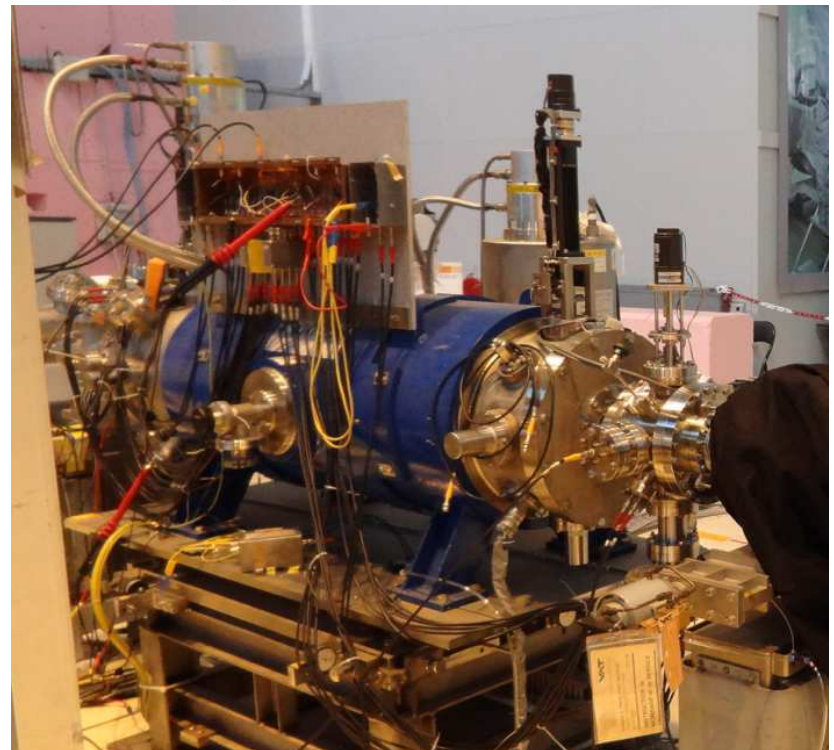
Piège de Penning Malmberg :

Aimant supraconducteur +
Électrodes circulaires

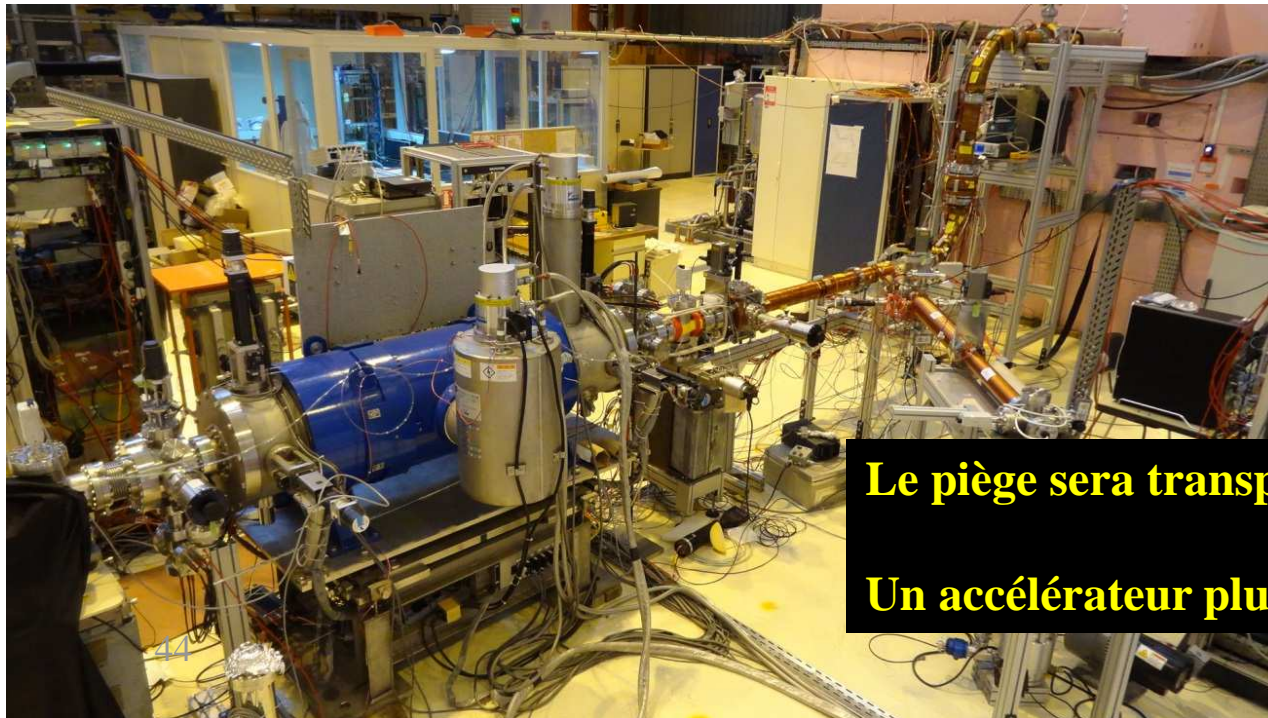
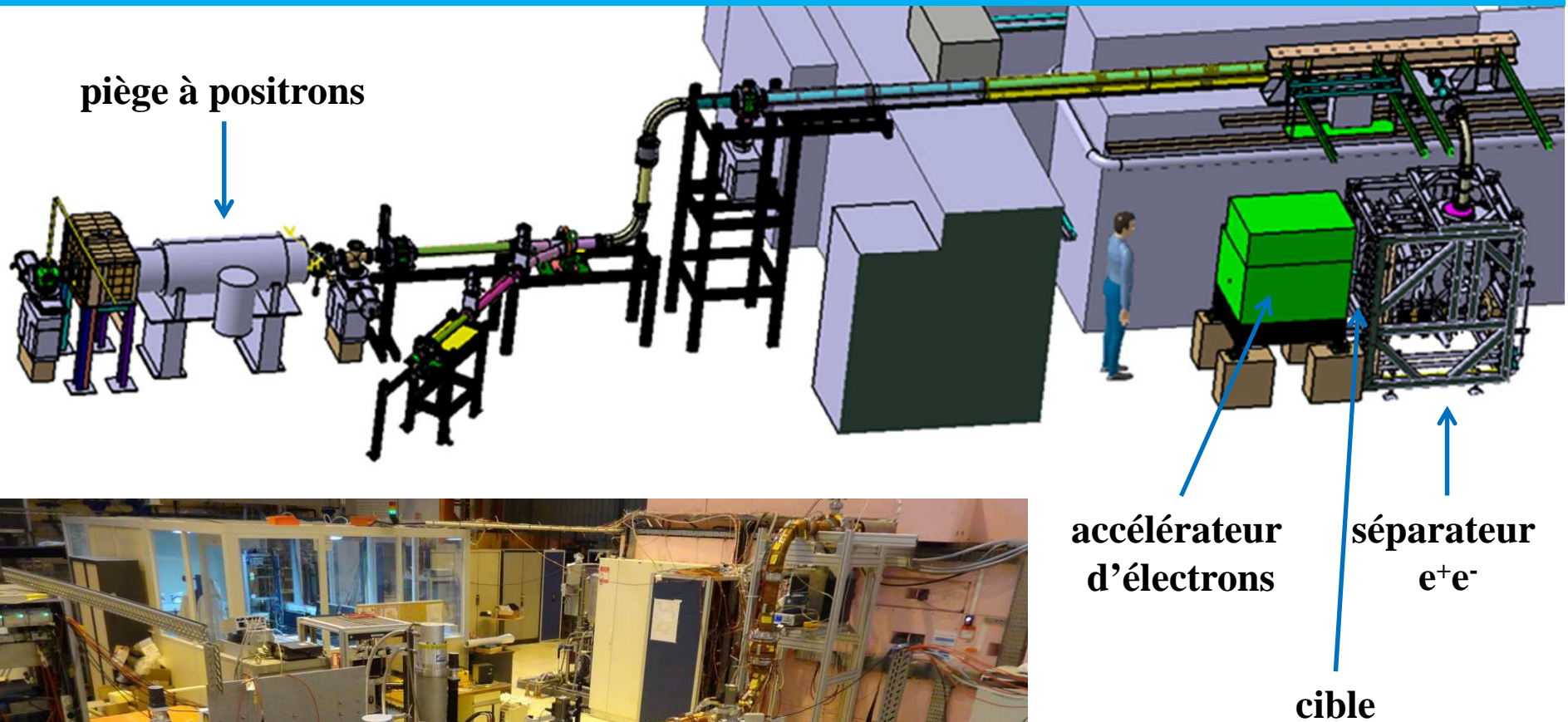


Confinement des particules chargées :

- transversal par champ magnétique
- longitudinal par champ électrique



Installation prototype au CEA Saclay

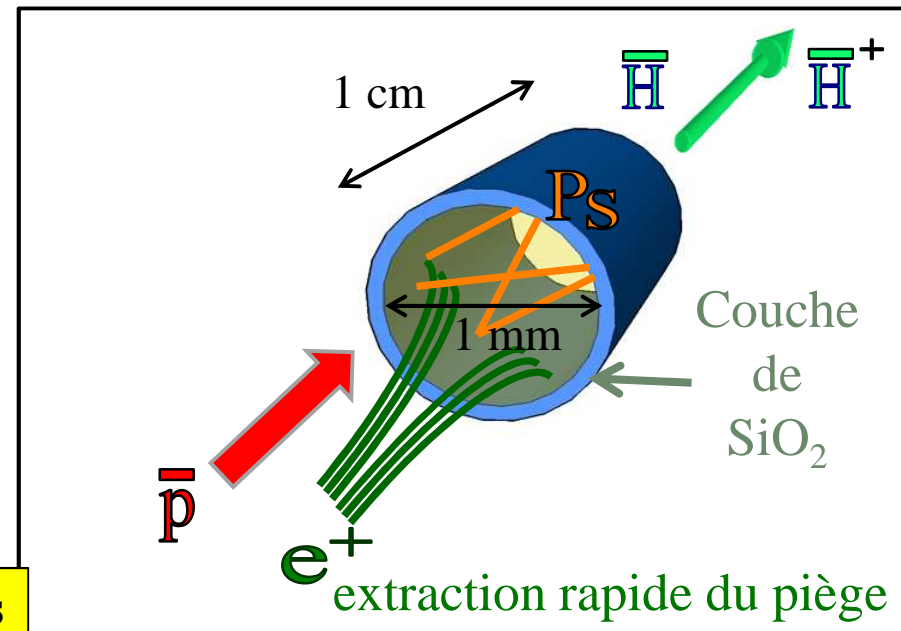
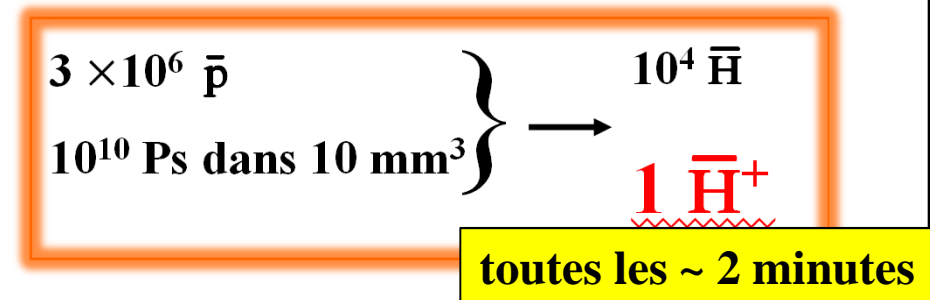
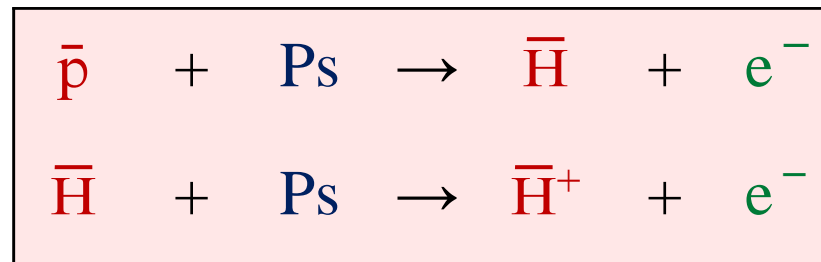


Le piège sera transporté au CERN

Un accélérateur plus puissant est en construction

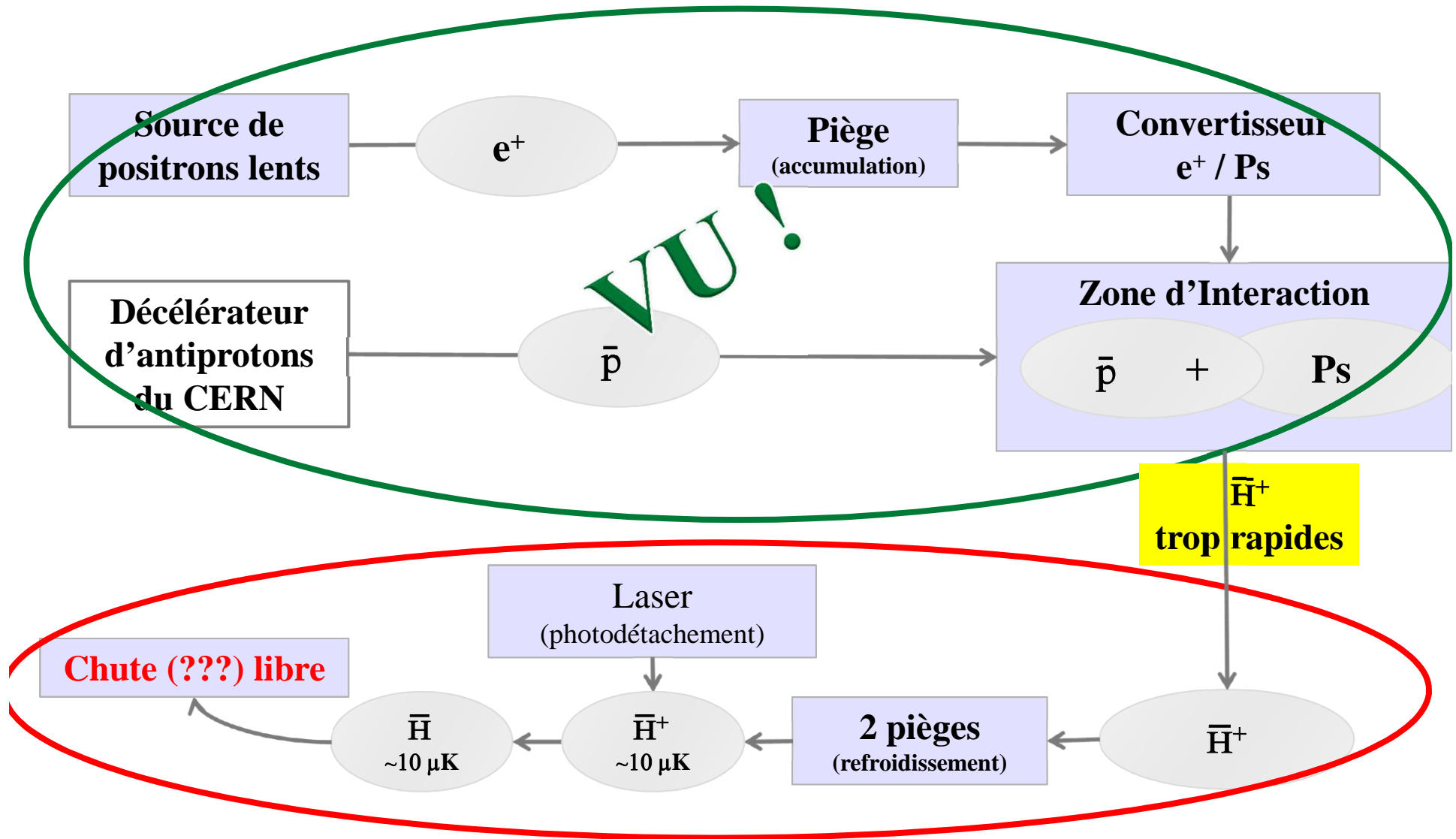
Taux de production des ions \bar{H}^+ ?

Double interaction d'**antiprotons** produits dans les accélérateurs du CERN avec le positronium



Zone d'interaction

Encore un petit effort !

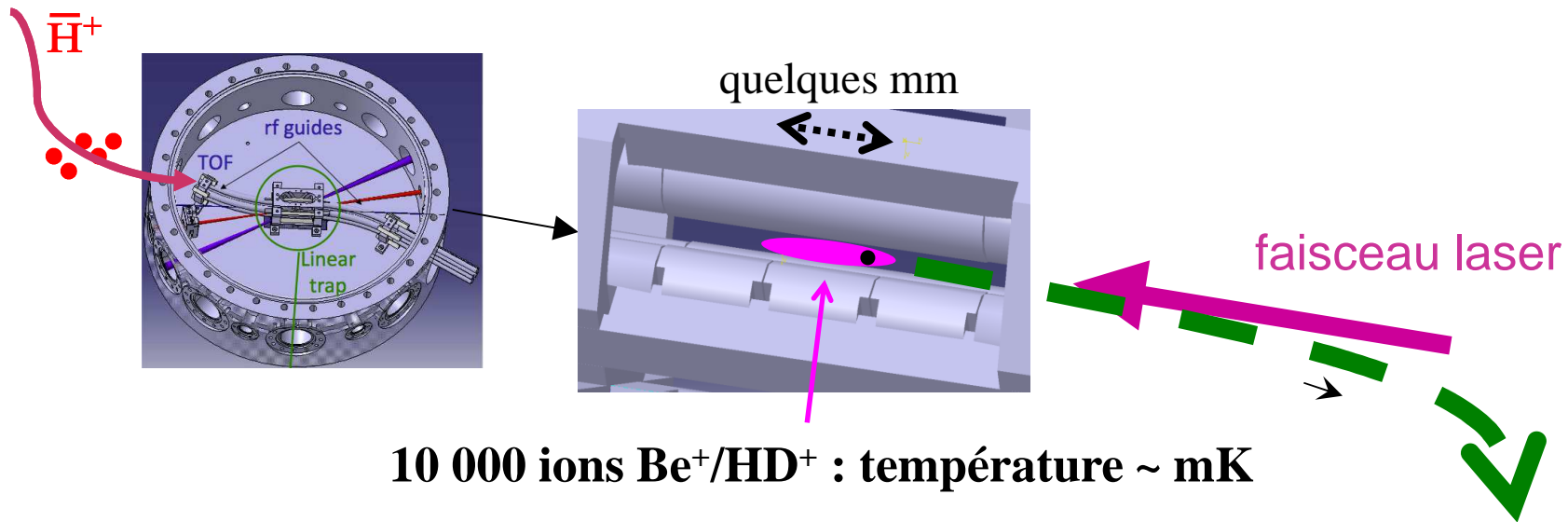


\bar{H}^+ : de 1 000 000 K à 0,000 010 K !

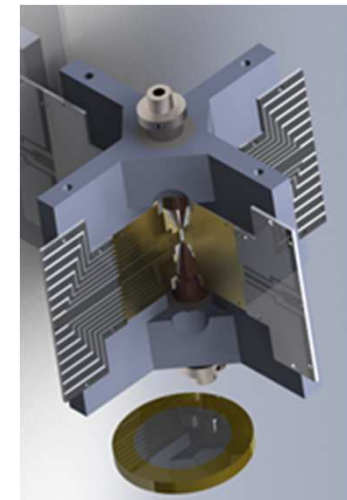
ou de 100 km/s à 0,5 m/s

2 étapes

1) Capture and refroidissement « sympathique » avec des ions Be^+ et HD^+ froids



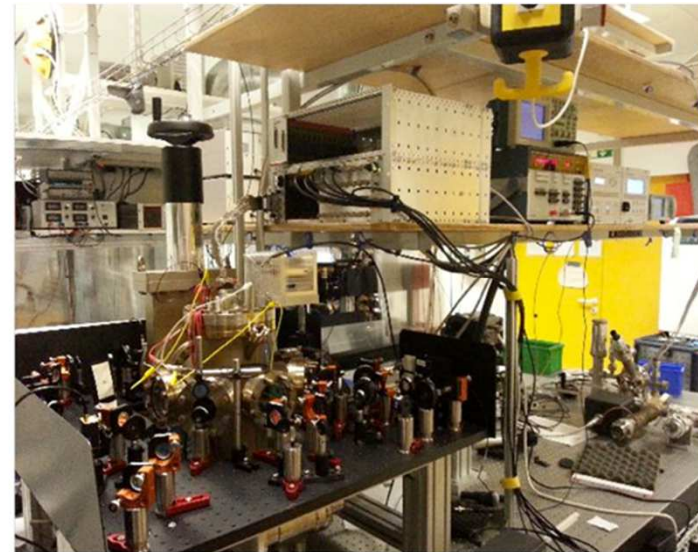
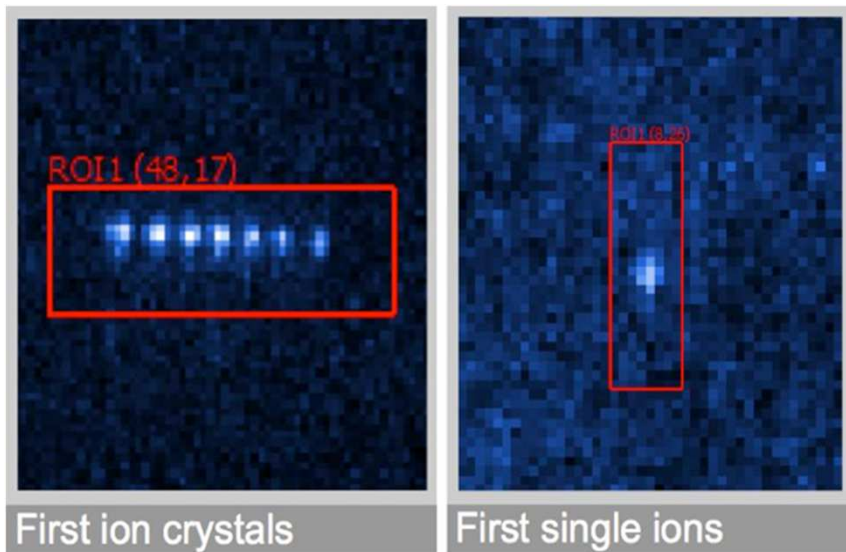
2) Transfert et refroidissement d'une paire Be^+/\bar{H}^+ dans le piège de précision : température ~ 10 μ K



Essais à Mayence

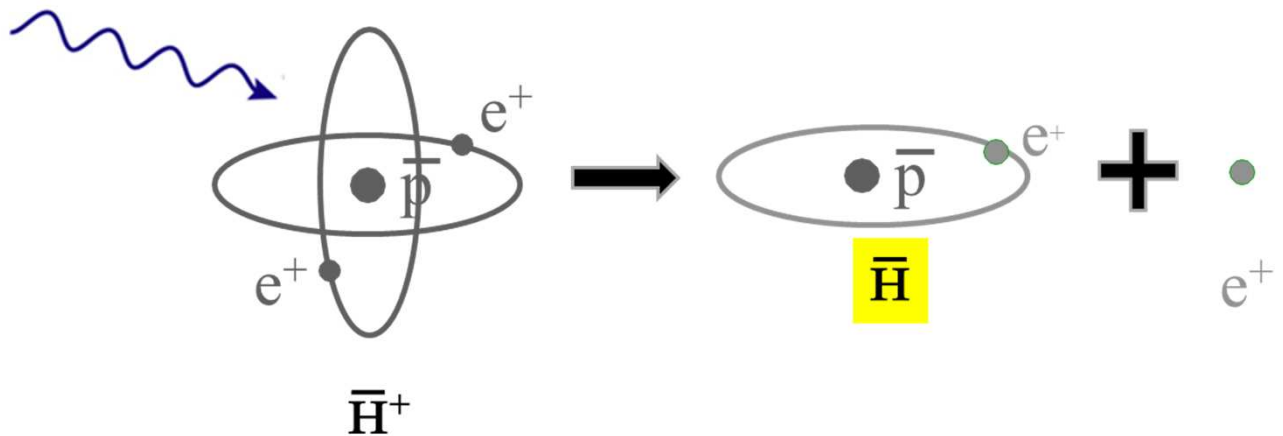
Refroidissement d'ions Ca^+ avec des ions Be^+

Les premiers ions Ca^+ ions cristallisés et piégés



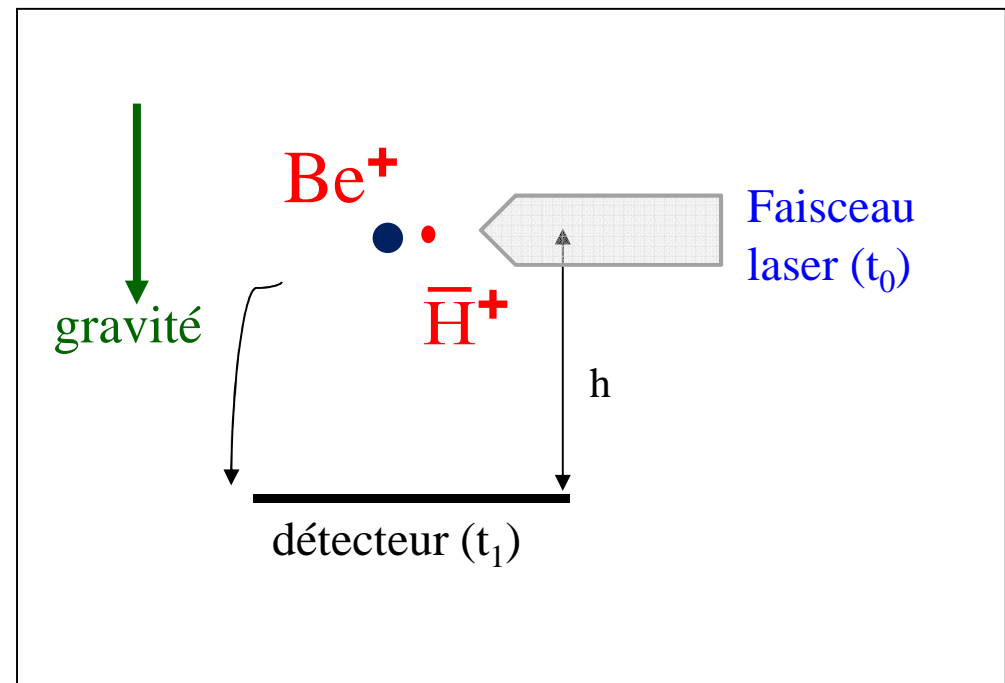
La dernière étape

Neutralisation de l'ion $\bar{\text{H}}^+$
avec un tir laser



- l'atome $\bar{\text{H}}$, neutre, « tombe ? »...
- Il se désintègre et donne des particules chargées que l'on peut détecter
- On mesure le temps de chute, on en déduit \bar{g}

$$h = \frac{1}{2} \bar{g} (t_1 - t_0)^2 + v_{z0} (t_1 - t_0)$$



Mesure de la chute libre

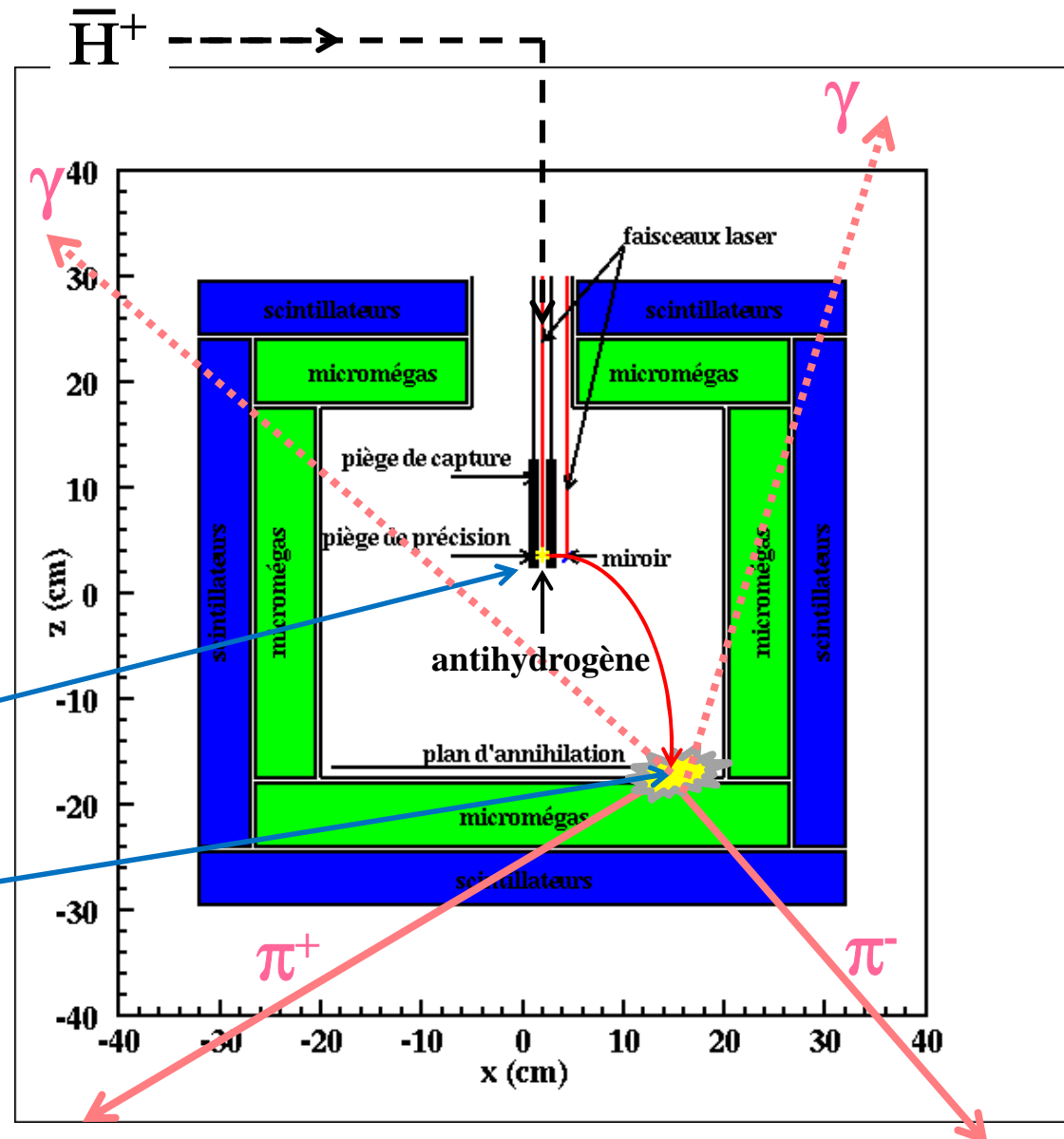
Enfin !!!

Objectif :
mesure de \bar{g} à 1 % près
(première phase)
~ 1500 chutes

hauteur de chute
 $h = 20 \text{ cm}$

tir laser
 t_0
annihilation
 t_1

$$h = \frac{1}{2} \bar{g} (t_1 - t_0)^2 + v_{z0} (t_1 - t_0)$$



Le planning de l'expérience **GBAR**

Collaboration internationale de 14 laboratoires, 45 physiciens

2005-2008 : Études préliminaires

2008-2011 : Mise au point de la source de positrons

2012-2016 : Piégeage des positrons et production de positronium

2013-2016 : Refroidissement des ions par laser

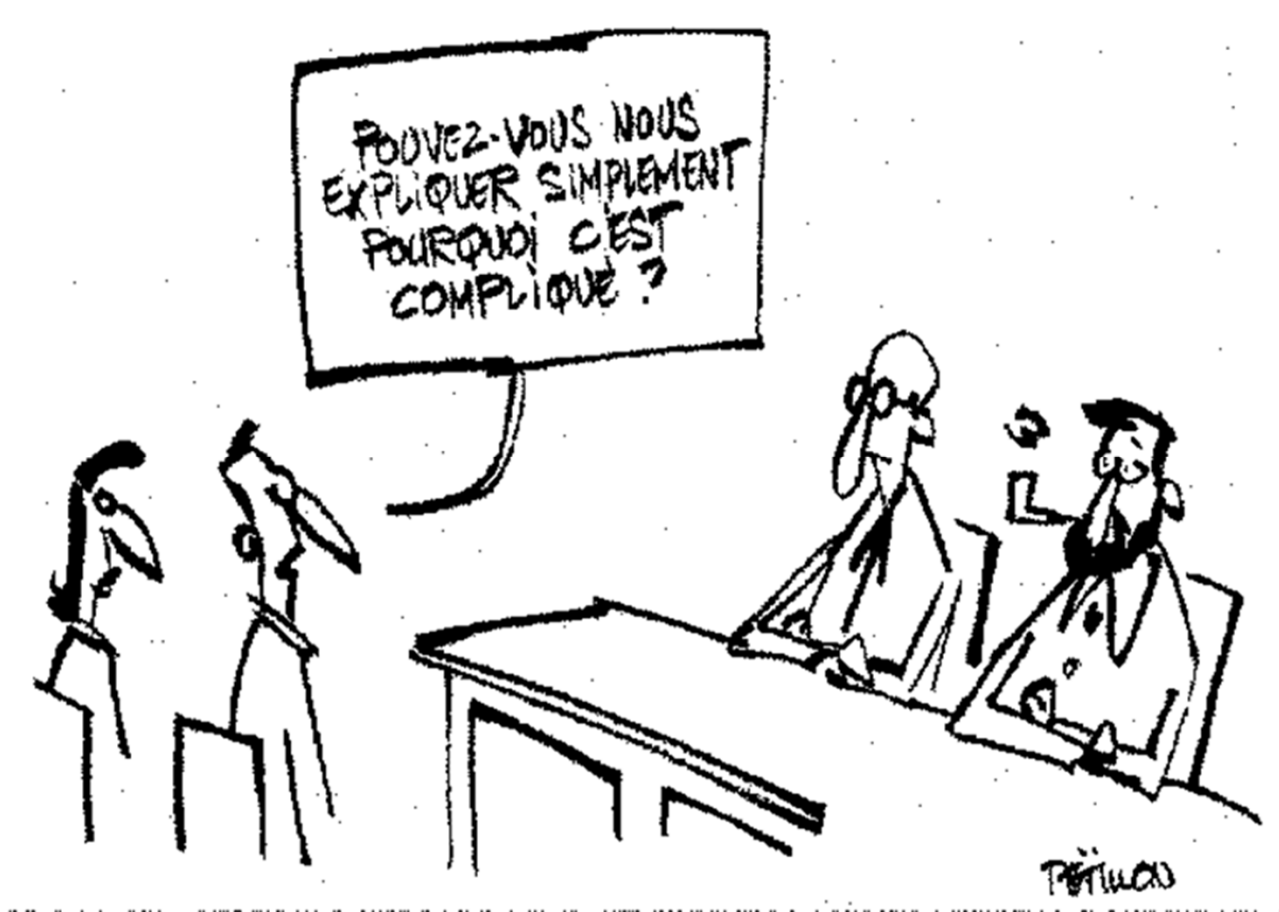
2016-2017 : Installation au CERN et démarrage de l'expérience



En résumé ...

- **L'existence de l'antimatière a été prédite théoriquement en 1931 avant sa découverte en 1932**
- **Elle ressemble à la matière, à d'infimes différences près dans la désintégration de certaines antiparticules**
- **On ne sait pas pourquoi il n'y a pas trace d'antimatière primordiale dans l'Univers**
- **L'antimatière est produite naturellement par les rayons cosmiques et la radioactivité, et de façon routinière avec les accélérateurs de particules**
- **L'antimatière est couramment utilisée en médecine et dans les sciences des matériaux**
- **L'étude détaillée des propriétés de l'antimatière se fait au CERN à Genève, seul laboratoire où elle est produite de façon contrôlée sous forme d'antihydrogène**
- **On n'a jamais pesé l'antimatière, mais l'expérience GBAR au CERN propose une nouvelle méthode pour fabriquer des antiatomes pratiquement au repos pour faire cette mesure**

Antimatière: une affaire à suivre.....



MERCI POUR VOTRE ATTENTION !