PESER L'ANTIMATIÈRE

- **La découverte**
- **La maîtrise**
- **La pesée**

Pascal Debu
Institut de recherche sur les lois fondamentales de l'Univers
Direction des sciences de la matière
Commissariat à l'énergie atomique et aux énergies alternatives
Centre de Saclay

- **La découverte**
- **La maîtrise**
- **La pesée**

Au fait, qu'est-ce que la matière ?

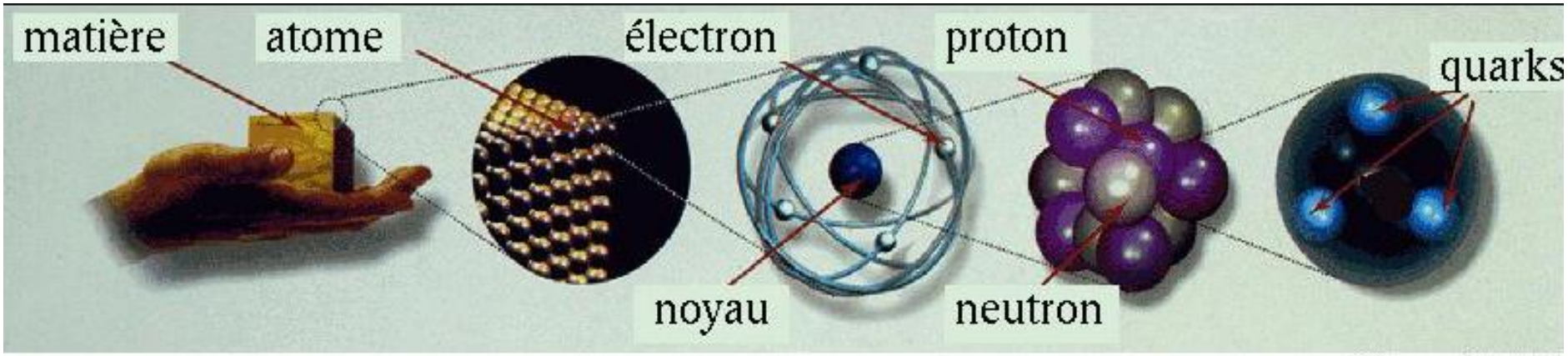
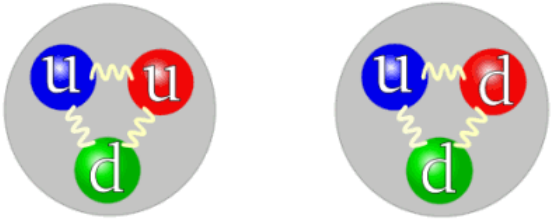


Photo CERN

- **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 :**

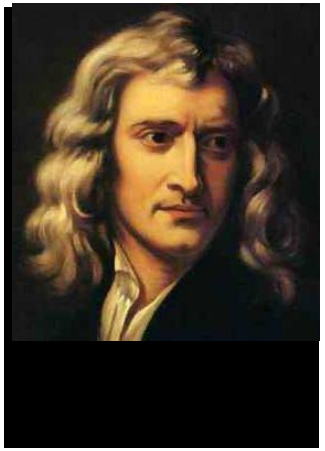


p **n**

- **La matière est donc constituée de particules élémentaires, les électrons et les quarks, soudées par les forces électromagnétiques et nucléaires**

Pas besoin d'antimatière dans tout cela !

Petite histoire de l'antimatière

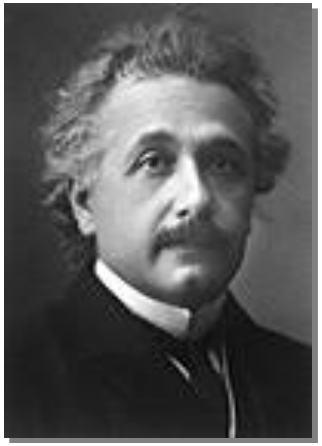


1687 Newton

Mécanique classique

1865 Maxwell

Électro-magnétisme



1906 Einstein

Relativité restreinte

1926 Schrödinger

Mécanique quantique

électron — relativiste — dans les atomes

1929 Dirac

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

l'équation de Dirac.

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

Succès de l'équation de Dirac :
spin et rapport gyromagnétique de l'électron

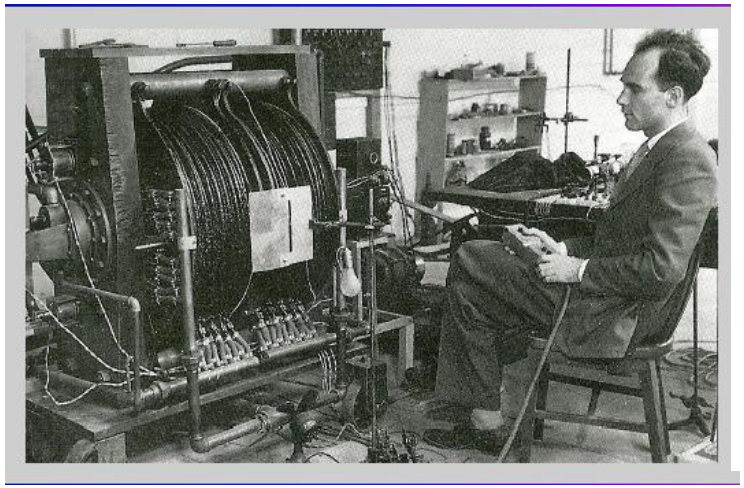
Petit problème : deux solutions…

La première correspond à l'électron, mais la deuxième?

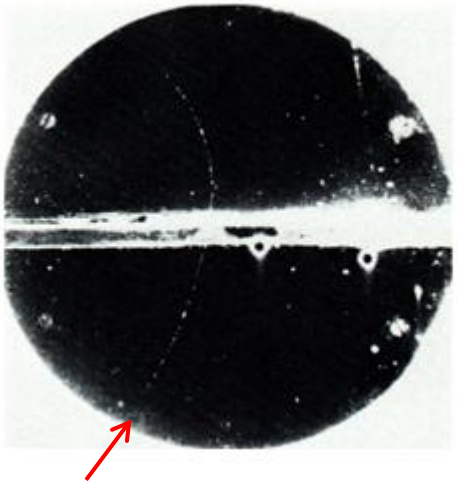
- **Rien ?**
- **Électron d'énergie négative ??? (mer de Dirac …)**
- **Le proton ? Mais sa masse est 2000 fois plus grande**
- **Une nouvelle particule de charge +1 ???**

En 1930, Dirac formule l'hypothèse d'un « anti-électron »

Indépendamment (!) en 1932, Anderson découvre le positon en étudiant les <u>rayons cosmiques</u>



Caltech, 1932



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 ➔ énergie ➔ matière + antimatière

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

➔ L'énergie nécessaire pour créer p + $\bar{p}$
est 2000 fois plus grande que l'énergie nécessaire pour créer e^- + e^+

au minimum 2 x 1 GeV

1 GeV = 1 milliard d'électron-volts
1 eV = 1,6 x 10^{-19} J

À la découverte de l'antimatière

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

L'antimatière…c'est quoi ?

particules			antiparticules		
électron	e^-	•	•	e^+	positon/positron
proton	p	+	-	$\bar{p}$	antiproton
neutron	n	○	○	$\bar{n}$	antineutron
photon	γ	•	•	γ	photon

Même masse **inertielle**
Même durée de vie
<u>Charges et nombres quantiques opposés</u>

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 particule associée ➔ ∃ toute petite dissymétrie matière-antimatière
découverte fondamentale de la violation de CP en 1964 (J. Christenson, J. Cronin, V. Fitch, R. Turlay)

Que devient l'antimatière ?

« Annihilation » :

$$M c^2 = E$$

matière + antimatière → énergie → …

$e^- + e^+ \rightarrow 2\gamma$ …

$p + \bar{p} \rightarrow$ **plusieurs π …**

L'antimatière dans l'Univers

Au moment du big-bang, la matière serait apparue avec autant d'antimatière :
Équilibre : matière + antimatière ⇔ énergie ⇔ γ's

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

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

MAIS

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

On ne voit pas de photons γ signalant une frontière avec de l'antimatière

Qu'est devenue l'antimatière ???

Qu'est devenue l'antimatière ???

On ne sait pas !

• **<u>Possibilité théorique</u>**

Sous trois conditions énoncées par A . Sakharov en 1967 :

- **Violation de C et CP (dissymétrie dans les désintégrations des particules et des antiparticules -observée en 1964-)**
- **Violation du nombre baryonique (➔ instabilité du proton)**
- **Déséquilibre thermodynamique (expansion de l'univers > taux des réactions)**

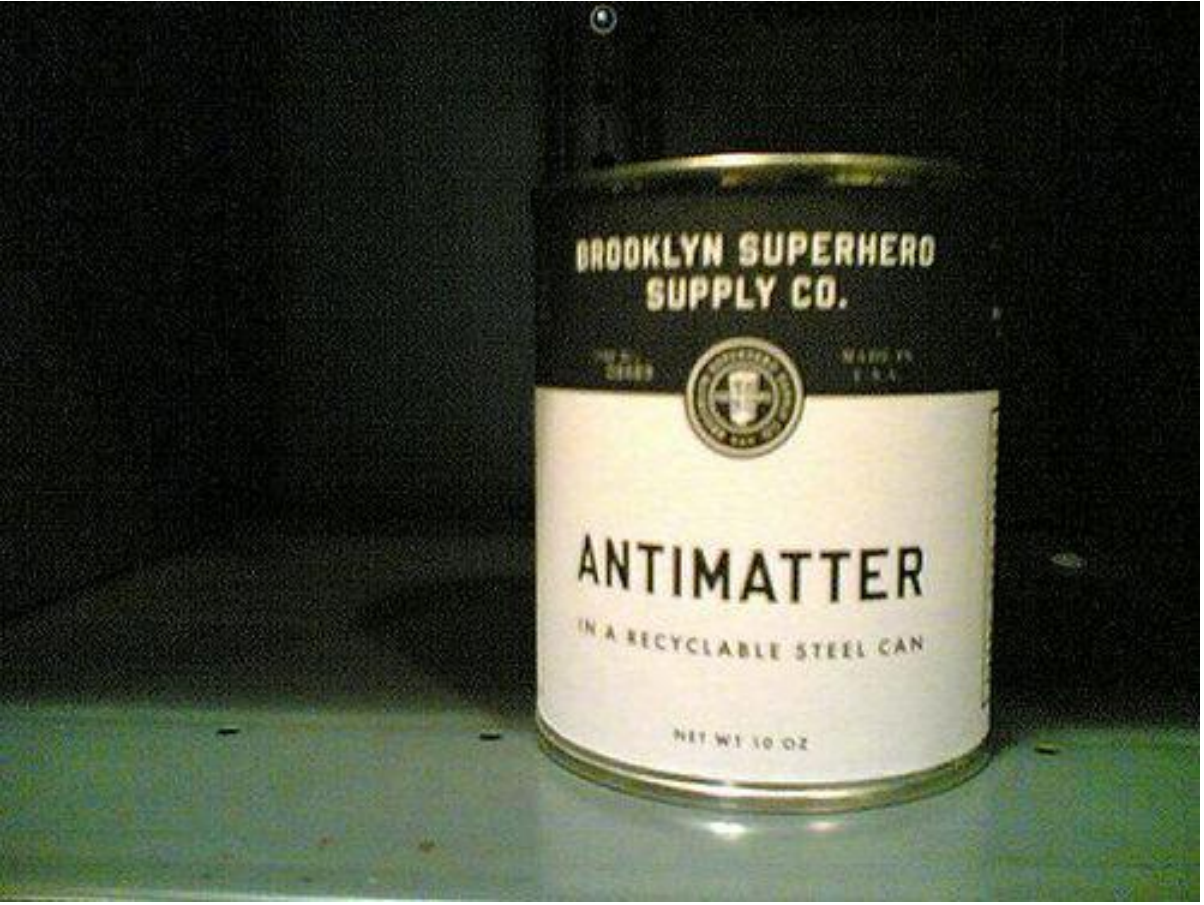
il est possible <u>en principe</u> de favoriser la matière dans le bilan des annihilations.

La matière dans l'Univers actuel représente le milliardième de la matière produite lors du big-bang, toute l'antimatière a disparu.

Mais ce petit excès est beaucoup trop grand pour être expliqué dans le cadre du modèle standard de la physique des particules.

• **<u>Il y a beaucoup d'autres possibilités envisagées</u>**
(leptogenèse, baryogenèse spontanée, SUSY baryogenèse …)

• ***<u>Ou encore …</u>***
L'antimatière est quelque part, et la question est de comprendre pourquoi on ne la détecte pas (répulsion matière antimatière ??? voir troisième partie de l'exposé)

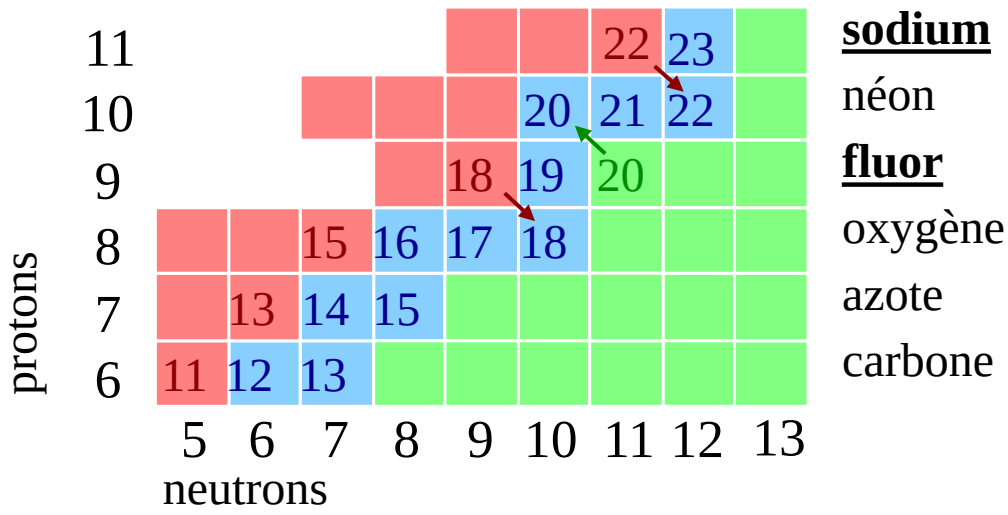


- La découverte
- **La maîtrise**
- La pesée

De l'antimatière dans la radioactivité

radioactivité β^- **neutron → proton + électron e^- + antineutrino**

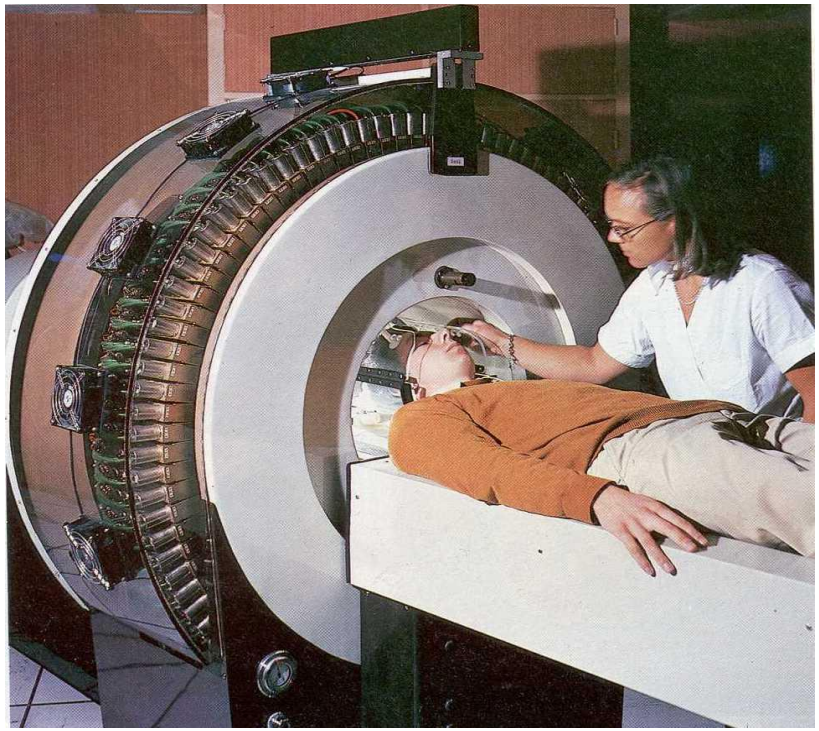
radioactivité β^+ **proton → neutron + positon e^+ + neutrino**



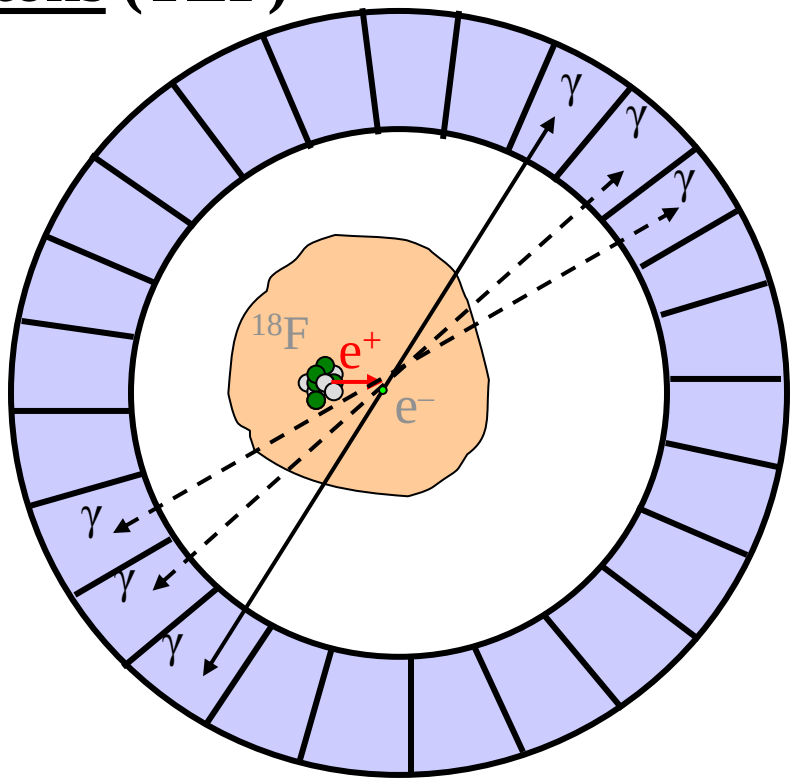
Utilisation des positons : imagerie médicale

La tomographie par émission de positons (TEP)

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



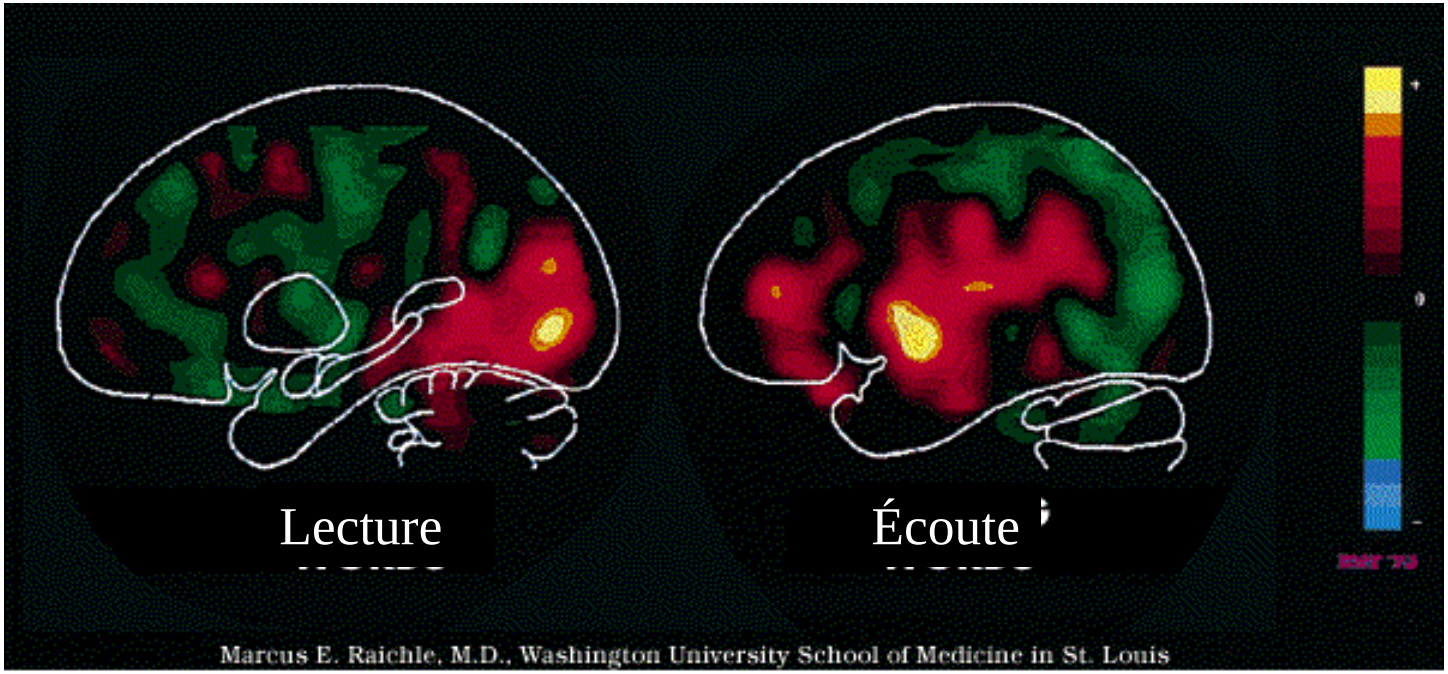
Prototype développé au CEA en 1983



$$e^+ + e^- \rightarrow 2\,\gamma \text{ dos à dos}$$

Couronne de détecteurs + coïncidence

Étude 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 positons : science des matériaux

- **Envoi d'un faisceau de positons sur un échantillon de matériau à étudier**

- **Mesure du temps mis par des positons 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 ?

Comparaison des énergies libérées par kg

chimique $\frac{1}{2}O_2$ + H_2 → H_2O **1**

fission ^{235}U → **5 400 000**

fusion d + d → He **35 000 000**

annihilation p + $\bar{p}$ → **6 700 000 000**

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

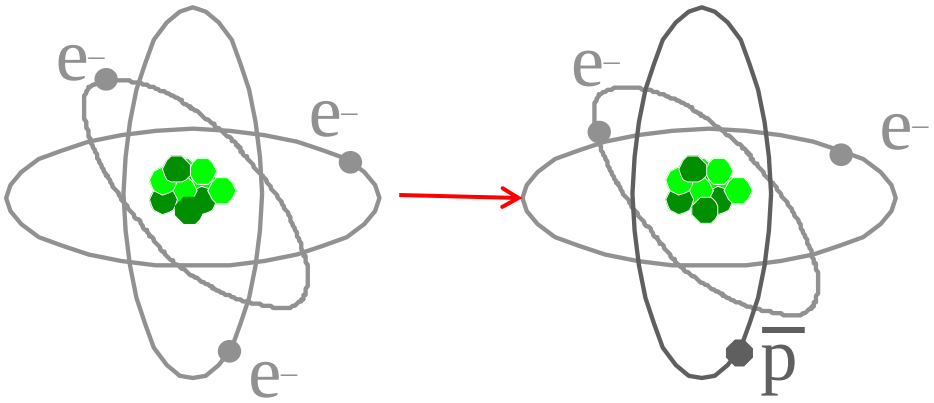
<u>Stockage d'énergie</u> !? Problème : rendement ~ 1/100 000 000 !!!,

temps de production : qqs 100 000 ans pour 1 µg

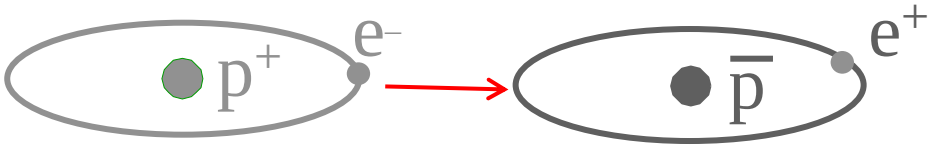
Un sujet d'étude pour les physiciens

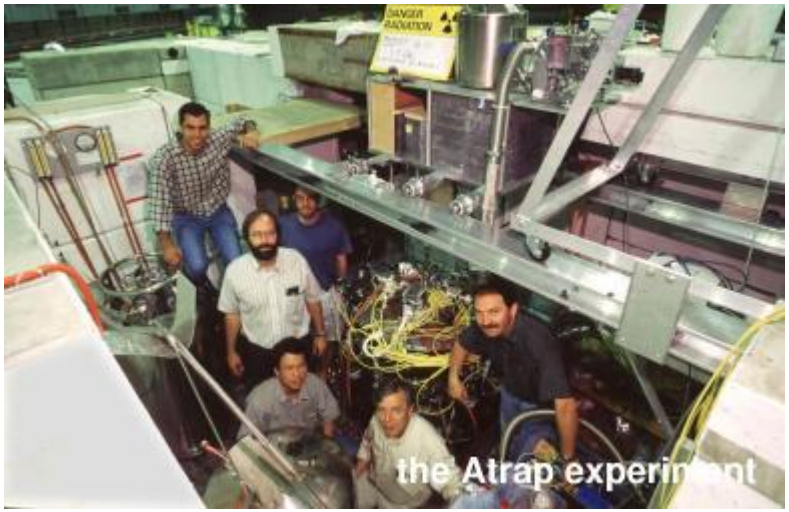
1990 …
En remplaçant un électron par un antiproton dans un atome :

<u>atomes antiprotoniques</u>



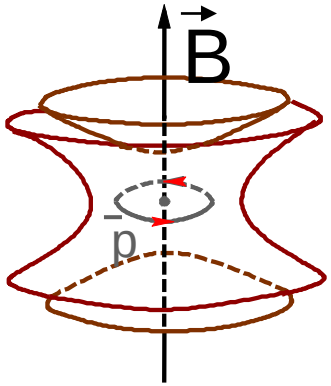
1995 …
En fabriquant des <u>atomes d'antihydrogène</u> :
Beaucoup plus difficile que de fabriquer les antiparticules et antinoyaux car l'énergie de liaison atomique est ~ 1 million de fois plus faible que l'énergie de liaison nucléaire





Quelle masse pour les antiprotons ?

Mesure de la masse inertielle de l'antiproton: piégeage dans un champ magnétique intense, mesure de sa fréquence de rotation



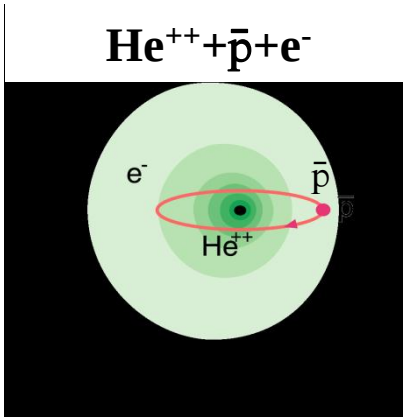
$\omega = \frac{qB}{M}$:

pulsation de Larmor

À champ magnétique constant, la fréquence de rotation varie comme q/M :

1999 CERN :

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



2011 CERN : avec un hélium antiprotonique:

$M(p)/q^2(p) = 1836.15267245(75)\ m_e/e^2$

$M(\bar{p})/q^2(\bar{p}) = 1836.1526736(23)\ m_e/e^2$

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

- La découverte
- La maîtrise
- **La pesée**

Les expériences du CERN

Laboratoire européen de physique des particules

Stockage d'antihydrogène

Expérience ATRAP

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

Expérience ASACUSA

- **Novembre 2010 :**
  Maîtrise de la fabrication d'un faisceau contrôlé d'antihydrogène

- **Juillet 2011:**
  Mesure précise de la masse inertielle de l'antiproton avec l'hélium antiprotonique

Expérience

- **Novembre 2010 :**
  ALPHA est la première à piéger de l'antihydrogène:

- **Juin 2011 :**
  Stockage d'antihydrogène pendant 1000 s

- **Mars 2012 :**
  Première spectroscopie de l'antihydrogène

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

Questions :

- **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 est un enjeu pour la cosmologie :

- **L'antigravité, cause de l'absence d'antimatière dans l'Univers visible ???**

- **Problème avec la théorie de la gravitation : nécessité d'introduire de la matière noire et de l'énergie noire pour expliquer les mouvements des étoiles et des galaxies**

Contenu énergétique de l'Univers dans le « modèle de concordance de la cosmologie » :
- **4 % de matière ordinaire**
- **22 % de matière noire ???**
- **74 % d'énergie noire ???**

- **Un Univers avec antigravité n'aurait peut-être plus besoin d'énergie noire dont la nature est complétement inconnue ???**

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

Le principe d'équivalence

<u>Principe d'équivalence</u> de la Relativité Générale

"Si un corps neutre de test 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."

⇔ Simultanéité de la chute des corps

⇔ Égalité masse inerte et masse pesante

$$\vec{P} = m\vec{g}$$
$$\vec{F} = m\vec{a}$$

Dans le référentiel géocentrique :

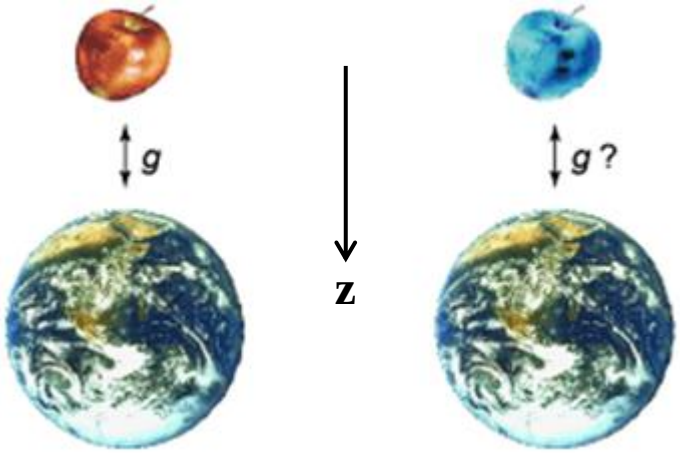
$$F_z = G\frac{M_T}{R_T^2}m_p$$
$$F_z = m_i a$$
$$g \equiv a = \frac{F_z}{m_i} = G\frac{M_T}{R_T^2} = 9{,}81\, m/s^2$$

↑

$$\boxed{m_p = m_i}$$

Principe d'équivalence

pomme **antipomme**



Terre **Terre**

$$\bar{F}_z = G\frac{M_T}{R_T^2}\bar{m}_p$$
$$\bar{F}_z = \bar{m}_i\bar{a}$$
$$\boxed{\bar{g}} \equiv \bar{a} = \frac{\bar{F}_z}{\bar{m}_i} = G\frac{M_T}{R_T^2}\frac{\bar{m}_p}{\bar{m}_i} = g\frac{\bar{m}_p}{\bar{m}_i}$$

$$\boxed{??? \ \bar{m}_p = \bar{m}_i \ ???}$$

Comment peser l'antimatière?

Faire une expérience de chute libre !

Quelle antimatière peser ?

Antiparticules chargées ? positons, antiprotons ?

Deux échecs ! 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 : <u>oui, mais il les faut « au repos »</u>.

Les antineutrons produits sont trop rapides, on ne sait pas les ralentir…

Les antihydrogènes les plus lents jamais produits sont à des vitesses encore trop élevées (agitation thermique : 3,5 K ~ 250 m/s) ➔ nouvelles méthodes nécessaires

Deux expériences sont en préparation au CERN :

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

Nouvelle méthode pour la mesure du temps de chute libre: GBAR

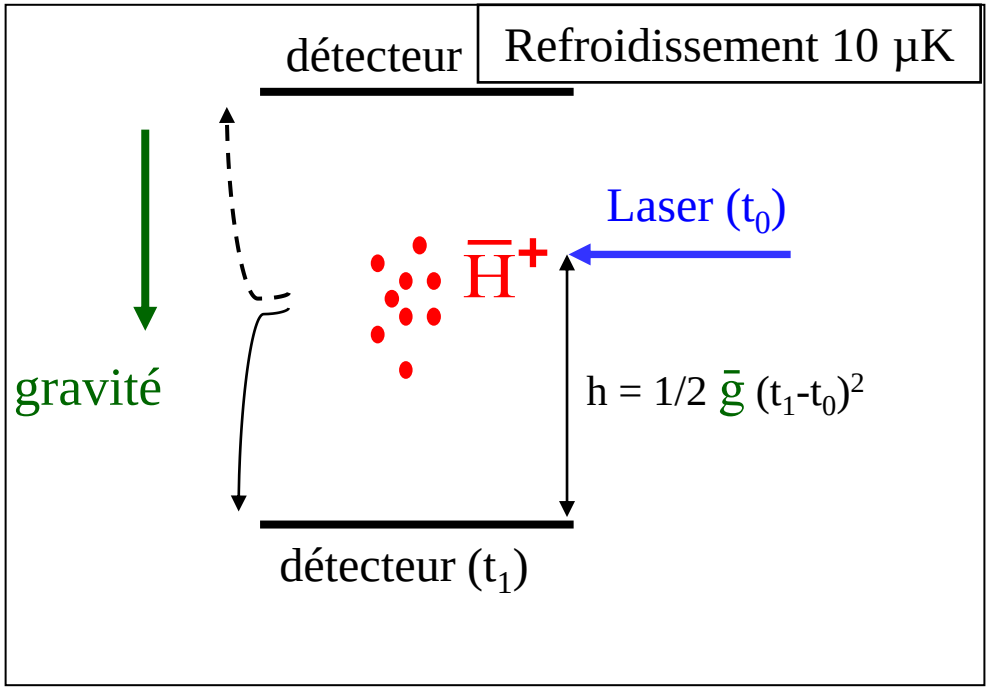
Le ralentissement des atomes d'antihydrogène passe par une étape supplémentaire, l'ion $\bar{H}^+$ ($\bar{p}$ + e^+ + e^+).
Un ion est plus « facile » à ralentir qu'un atome neutre

Capture des ions $\bar{H}^+$ dans un piège électromagnétique (Piège de Paul)

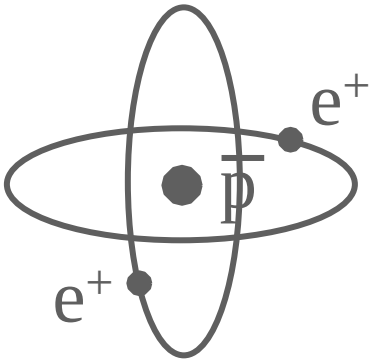
Refroidissement des ions $\bar{H}^+$ avec des ions Be^+ refroidis par laser à 10 microkelvins (soit 1 neV ou 50 cm/s)

Neutralisation d'un ion $\bar{H}^+$ refroidi avec un tir laser

➔ l'atome $\bar{H}$, neutre, « tombe »…



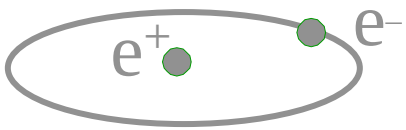
Production des ions $\bar{H}^+$:



•Production de positons rapides (1 MeV) à l'aide d'un petit accélérateur d'électrons

•Modération des positons (quelques eV)

•Accumulation des positons dans un piège (~20 milliards de e^+ toutes les 2 minutes)



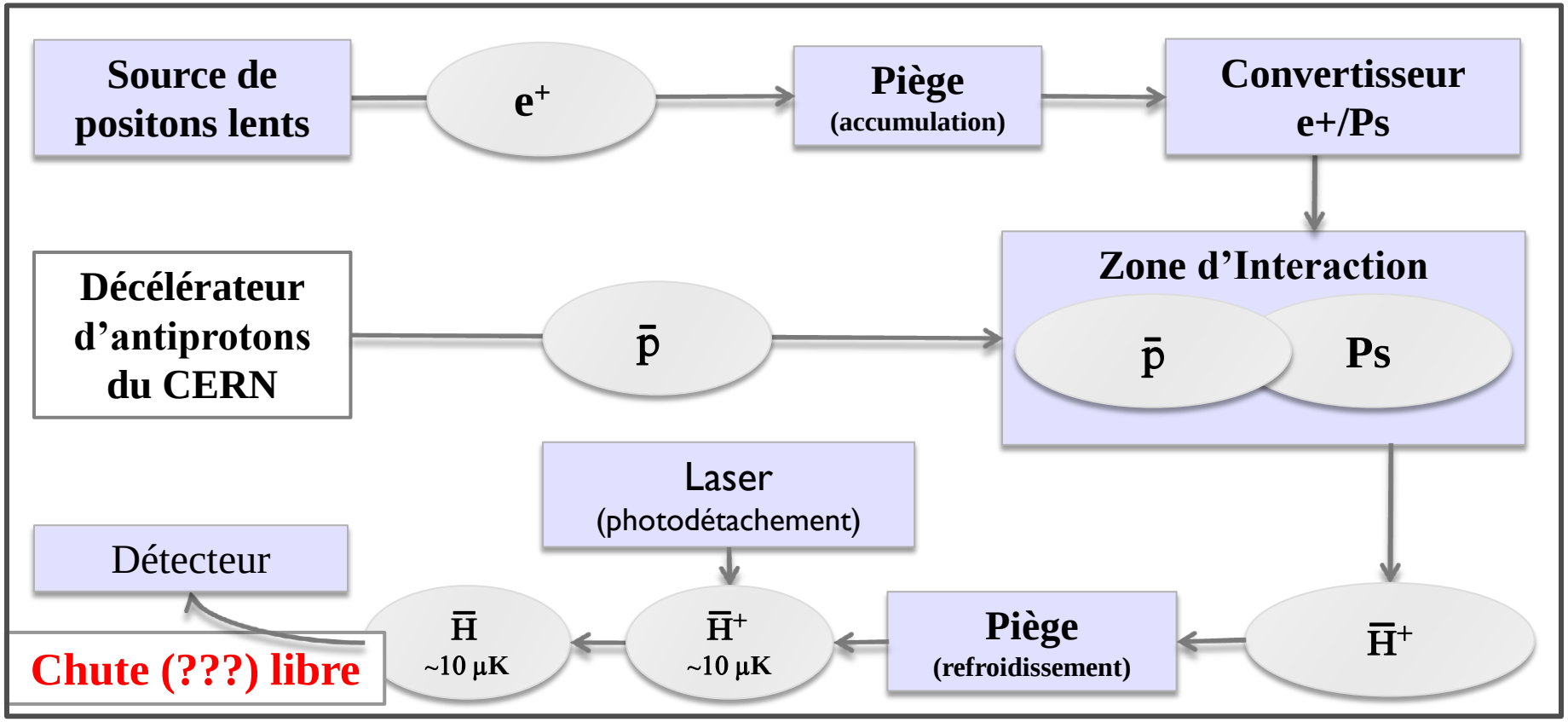
• Création d'un nuage de **positronium** (atome e^+-e^-, noté Ps) confiné dans un petit volume

•Double interaction d'**antiprotons** produits au CERN avec le positronium ➔ antiatomes $\bar{H}$ et ions $\bar{H}^+$

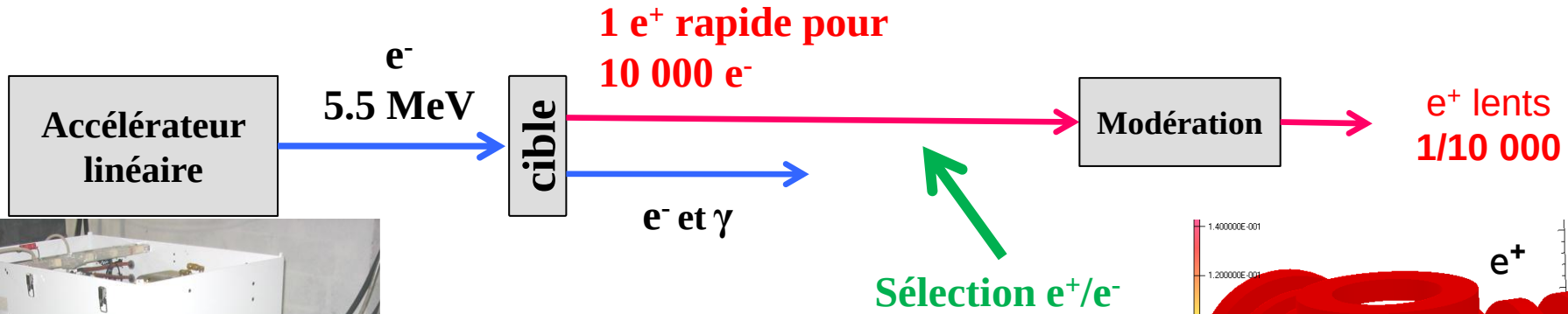
$$\bar{p} + Ps \rightarrow \bar{H} + e^-$$

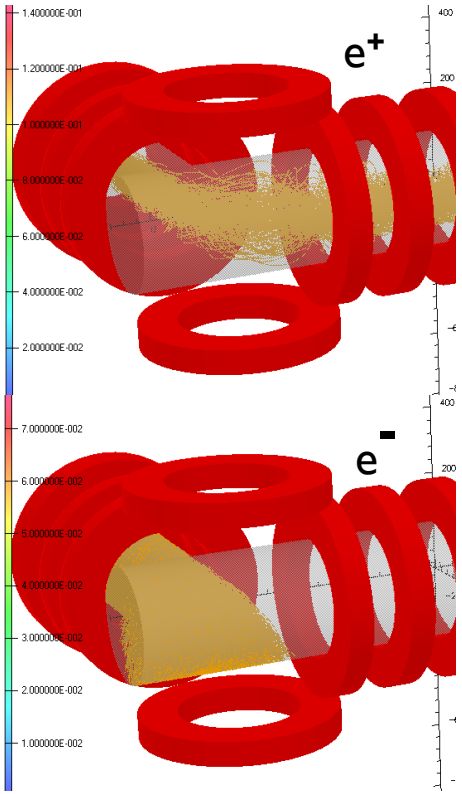
$$\bar{H} + Ps \rightarrow \bar{H}^+ + e^-$$

Schéma de principe de GBAR



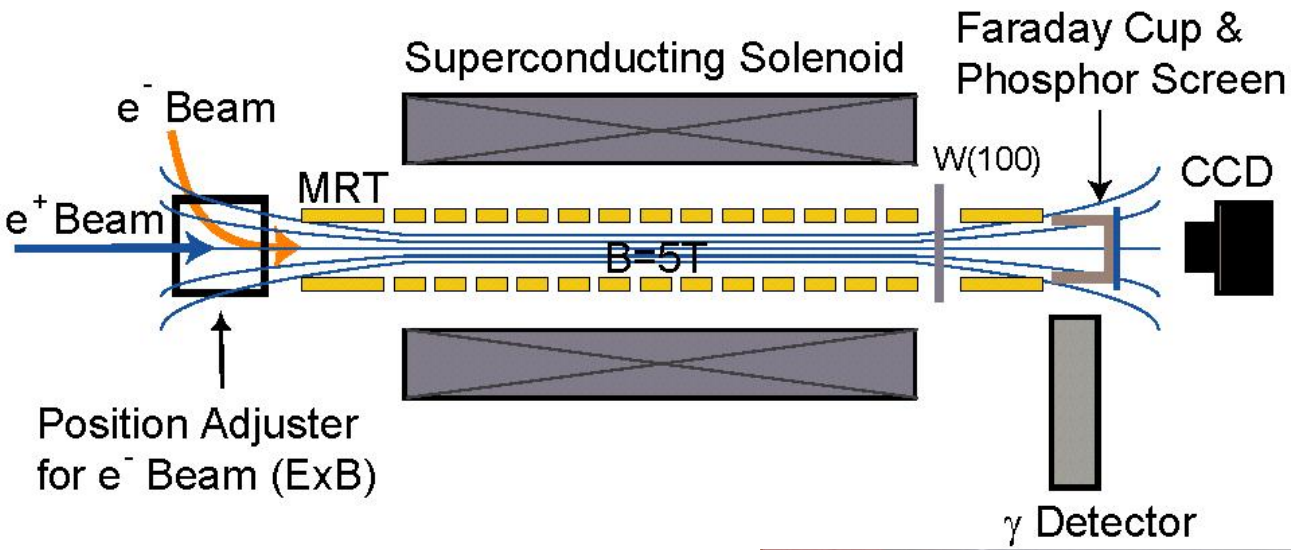
Production de positons
à l'aide d'un petit accélérateur d'électrons





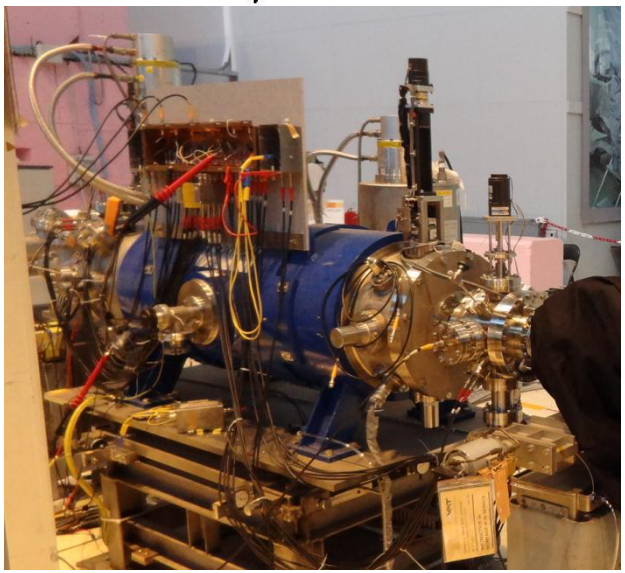
Bilan : un positon lent pour cent millions d'électrons !!!

Accumulation des positons



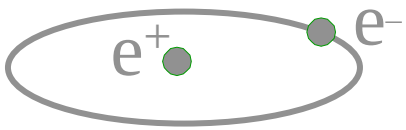
Piège de Penning Malmberg :

Aimant supraconducteur +
Électrodes circulaires
↓
Confinement des particules chargées :
- **transversal par champ magnétique**
- **longitudinal par champ électrique**



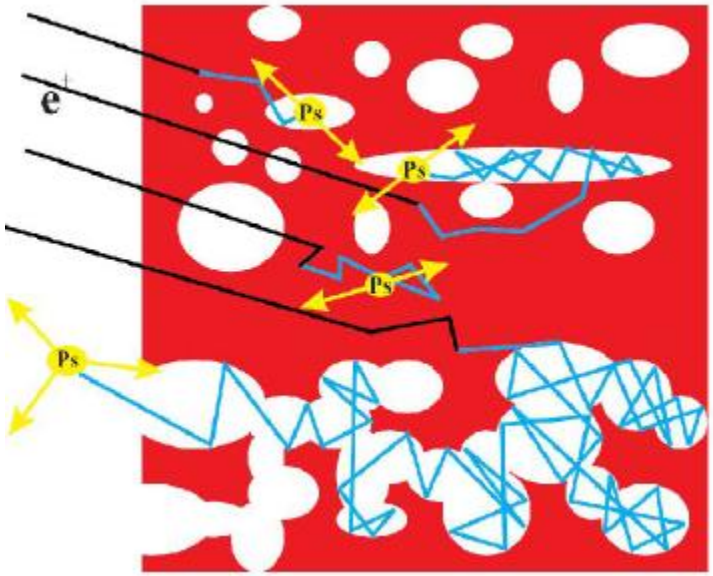
Création d'un nuage de positronium

Ps = positronium = atome e^+-e^-



Mais durée de vie : 142 ns !!!

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



Création des ions $\bar{H}^+$

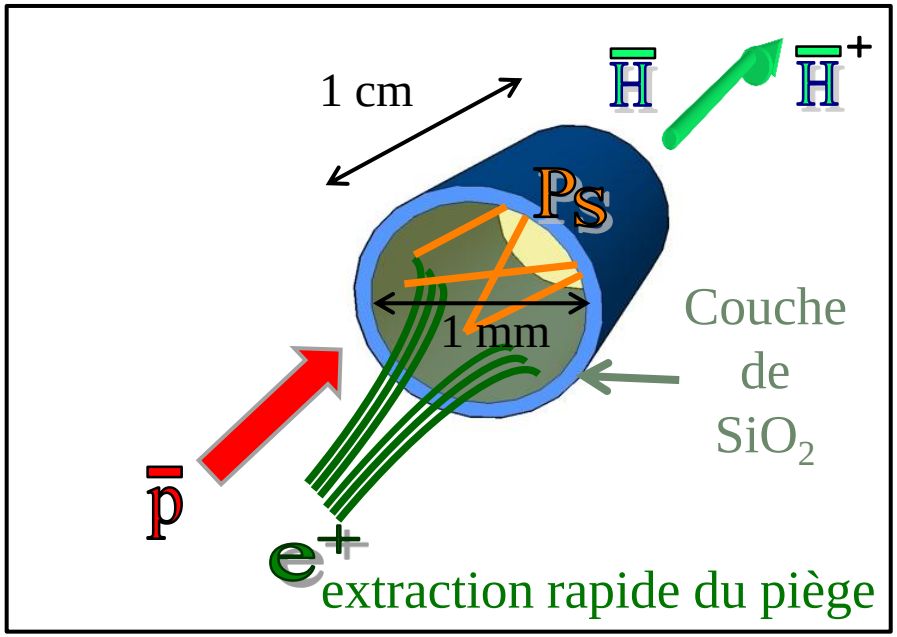
Double interaction d'antiprotons produits dans les accélérateurs du CERN avec le positronium

$$\bar{p} + Ps \rightarrow \bar{H} + e^-$$

$$\bar{H} + Ps \rightarrow \bar{H}^+ + e^-$$

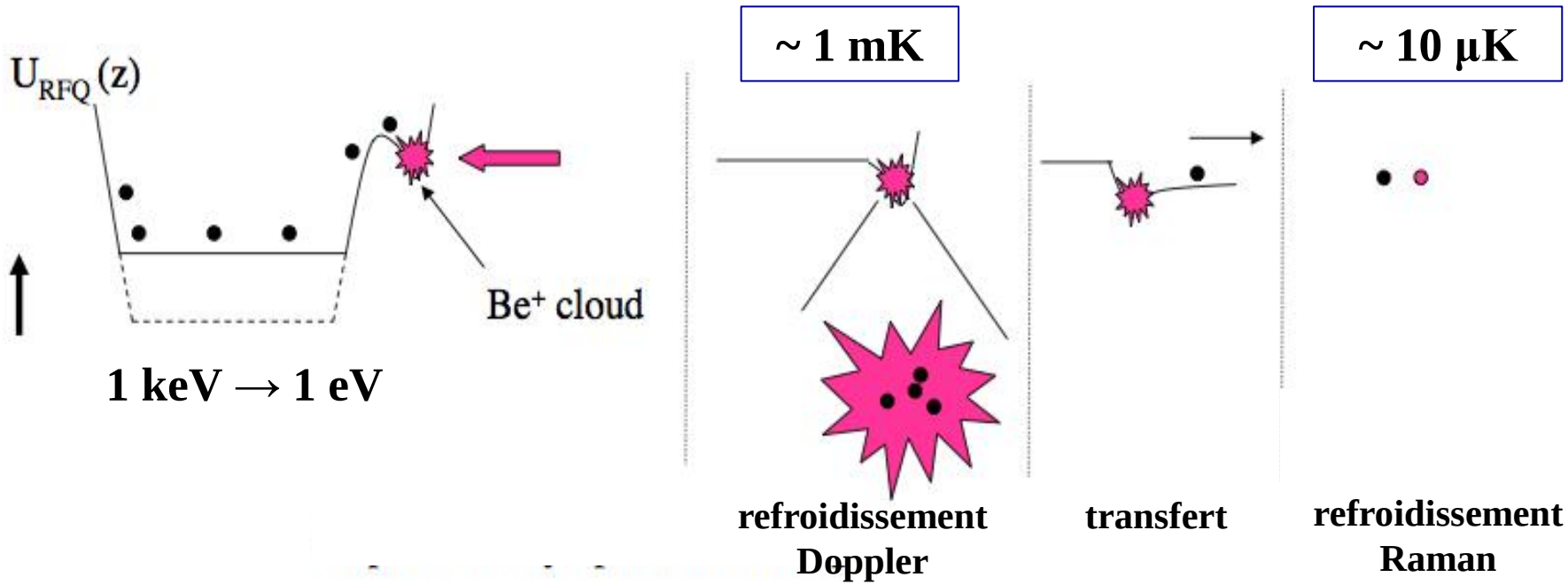
10^7 $\bar{p}$
10^{10} Ps dans 10 mm^3 } → **10^4 $\bar{H}$**
1 $\bar{H}^+$

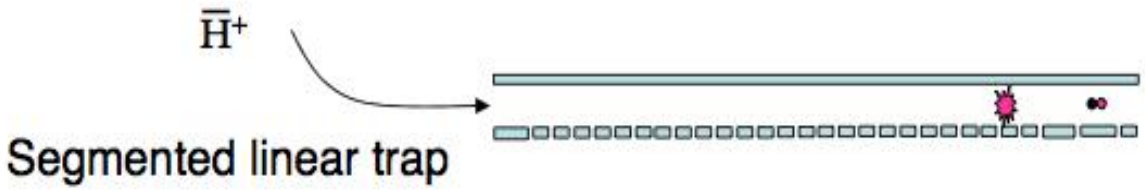
(toutes les ~ 5 minutes)



Zone d'interaction

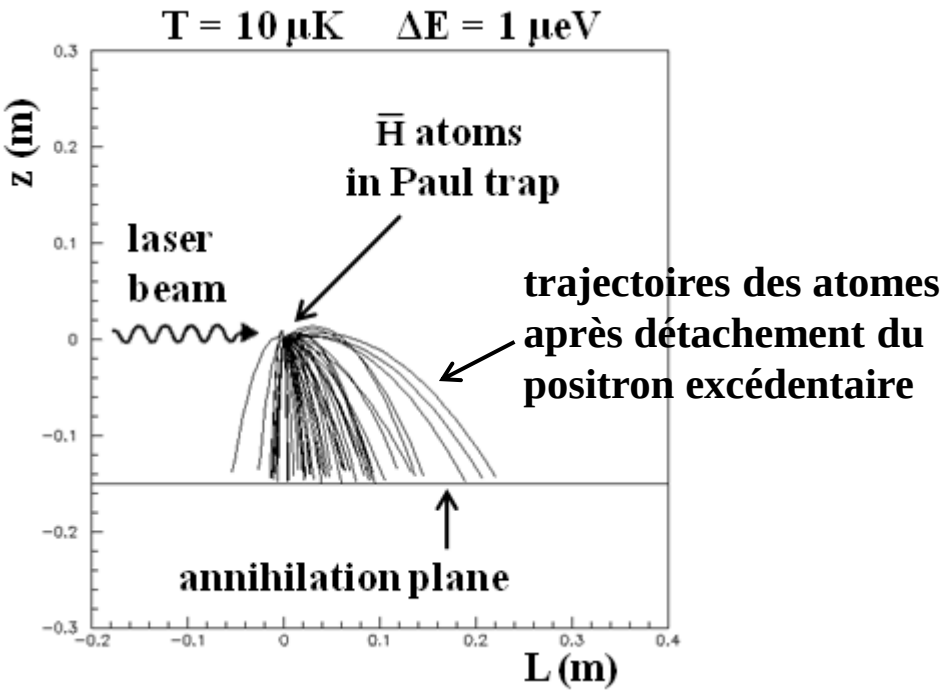
Refroidissement des $\bar{H}^+$

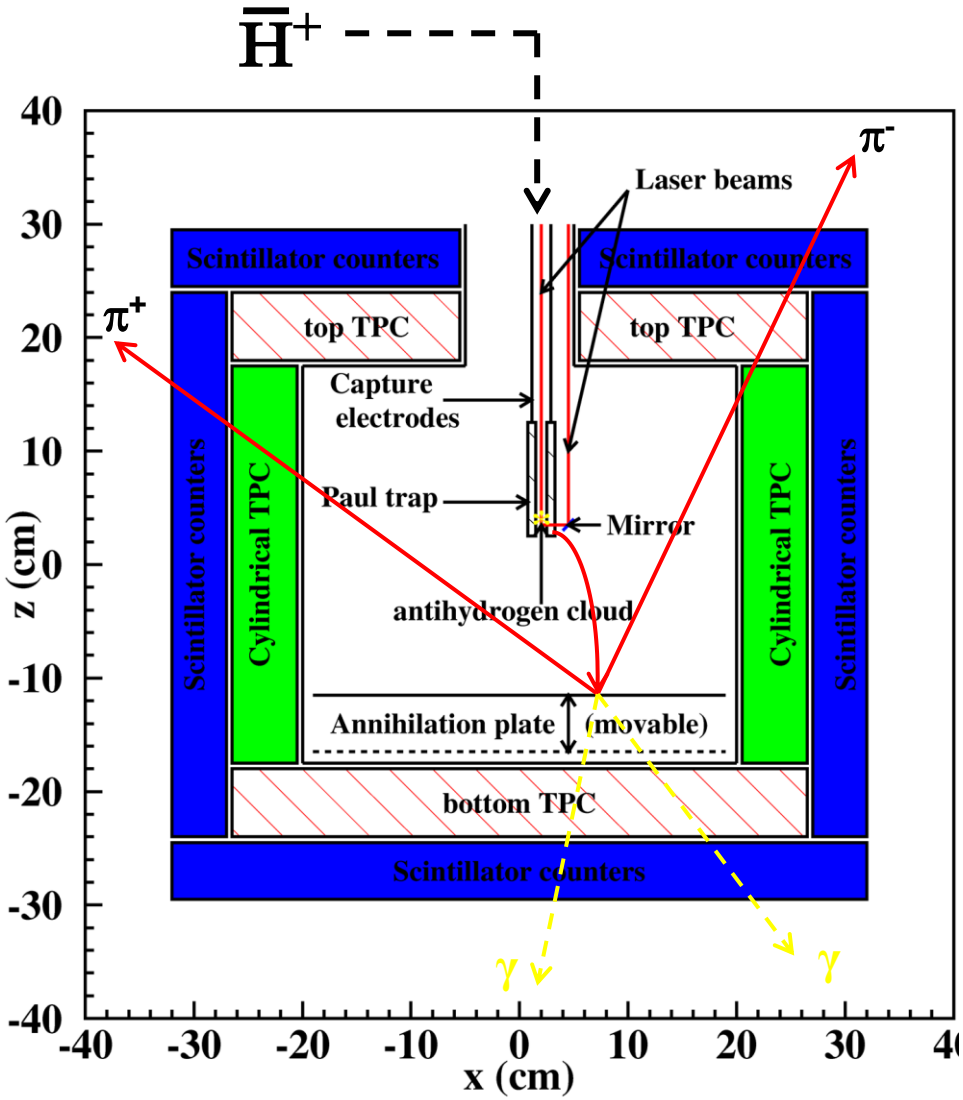




NIST group
M. D. Barrett, …, D. Wineland, PRA ***68****, 042302 (2003)*
Sympathetic cooling of $^{9}Be^+$ *and* $^{24}Mg^+$ *for quantum logic*

Mesure de la chute libre





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

Objectif : mesure de $\bar{g}$ à 1 % près (première étape)

Le planning de **GBAR**

(collaboration internationale de 14 laboratoires, ~ 45 physiciens)

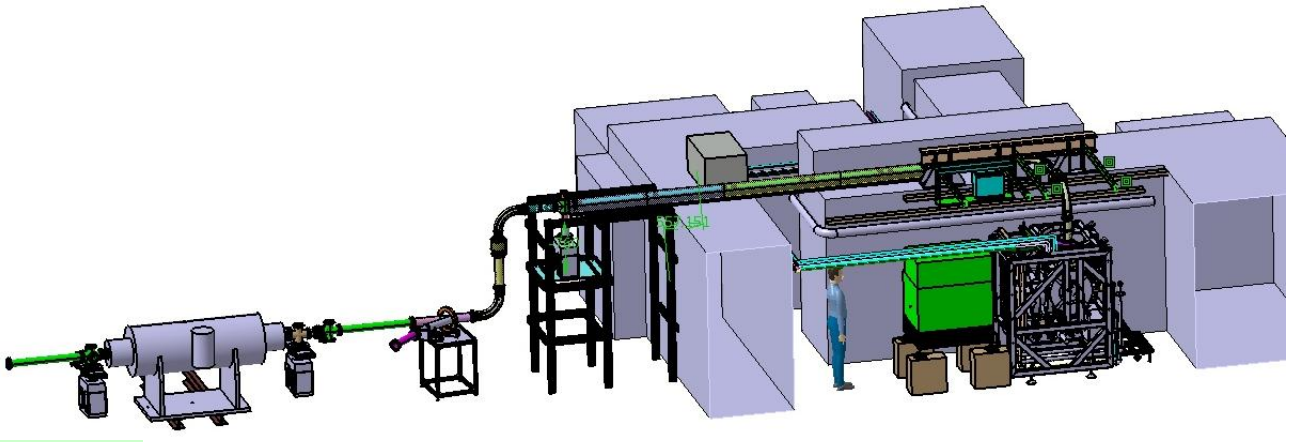
2005-2008
Études préliminaires

2008-2011
Mise au point de la source de positons à Saclay

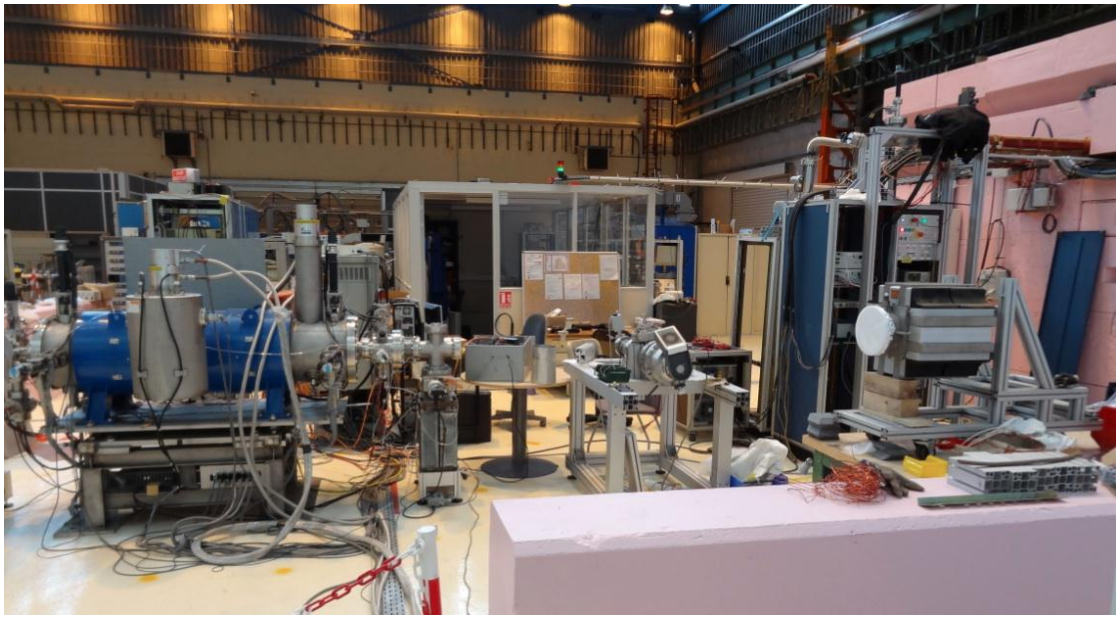
2012-2013
Piégeage des positons et production de positronium

2012-2015
Refroidissement des ions par laser

2015-2016
Installation au CERN et démarrage de l'expérience



Installation au CEA Saclay

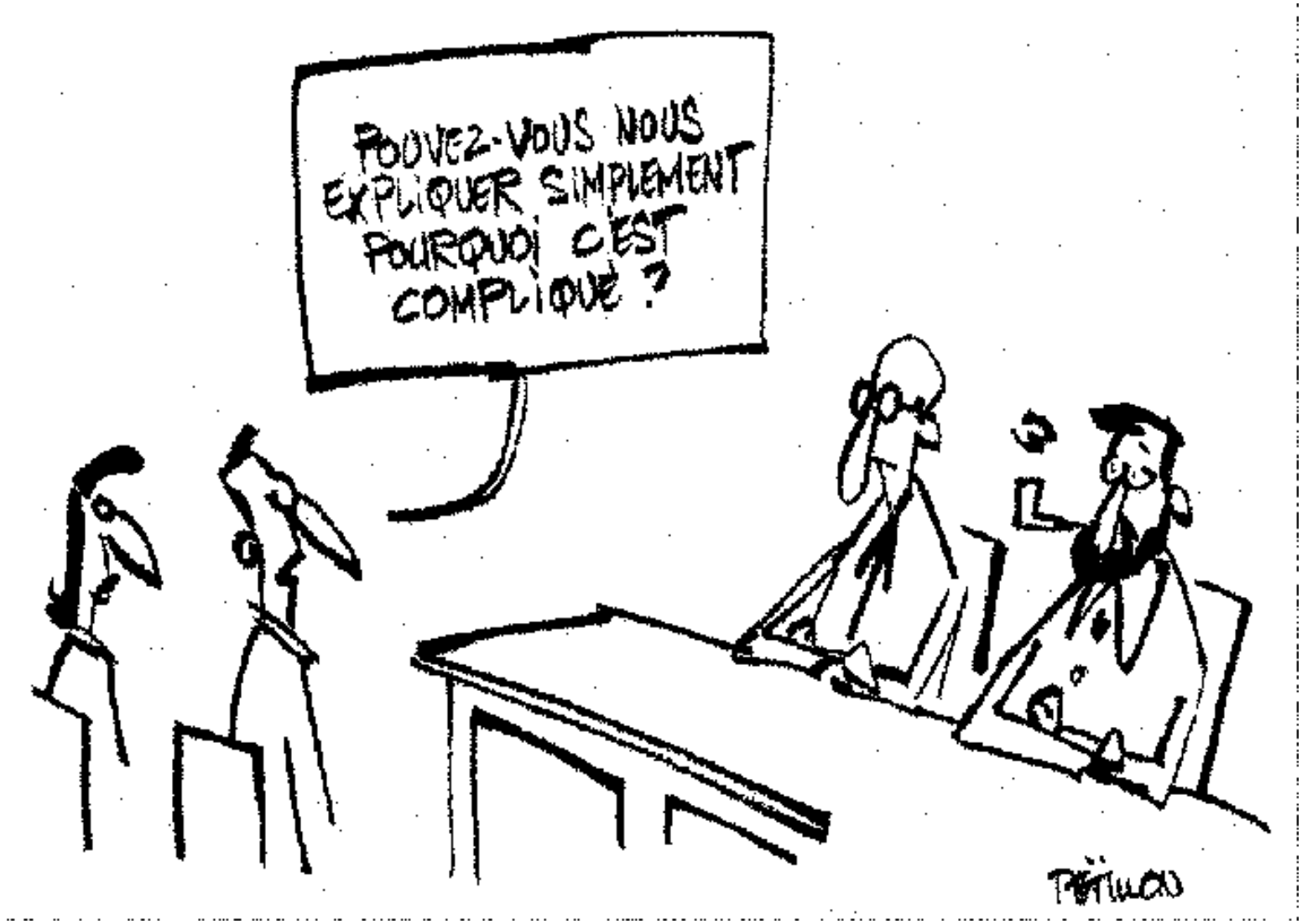


Conclusions

- **L'antimatière a été prédite théoriquement en 1930 avant sa découverte en 1932**
- **Elle ressemble à la matière, à d'infimes différences près dans la désintégration de certaines antiparticules (violation de CP)**
- **On ne sait pas pourquoi il y a si peu d'antimatière 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 utilisée en médecine et en sciences des matériaux**
- **L'étude détaillée des propriétés de l'antihydrogène se fait au CERN à Genève, le seul laboratoire où il est produit**
- **<u>On n'a jamais « pesé » l'antimatière</u>, mais deux projets, AEḡIS et GBAR, sont en préparation au CERN pour tenter cette mesure**
- **Le projet GBAR propose une <u>nouvelle méthode</u> pour fabriquer des antiatomes pratiquement au repos et observer leur chute libre…**

Rendez-vous en 2016 pour la pesée de l'antihydrogène ?!?

Antimatière: une affaire à suivre…..



Principe d'Equivalence

L'accélération transmise à un corps par un champ gravitationnel est indépendante de sa masse et de sa composition

masse inertielle = masse gravitationnelle

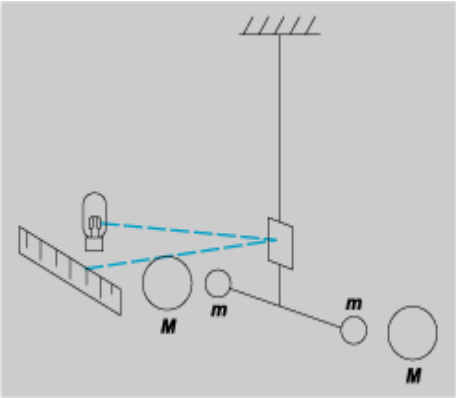
Testé pour la matière avec une très grande précision avec de nombreux matériaux

Principe d'équivalence faible (balance de torsion)

$$\left(\Delta a / a\right)_{Be/Ti} = \left(0.3 \pm 1.8\right) x10^{-13}$$ S.Schlamminger et al, Phys Rev Lett 100 (2008) 041101

Principe d'équivalence fort (Lunar Laser Ranging)

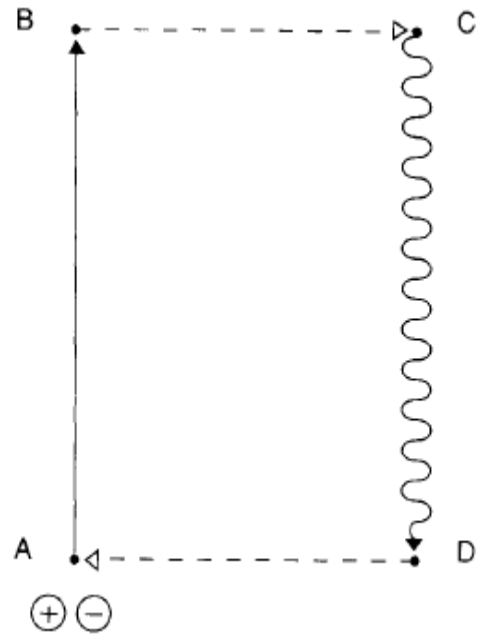
$$\left(\Delta a / a\right)_{Terre/Lune} = \left(-1.0 \pm 1.4\right) x10^{-13}$$ J.G.Williams et al, Phys Rev Lett 93 (2004) 261101



Limites indirectes

Considérations théoriques et limites indirectes sur une violation du principe d'équivalence par l'antimatière

-Argument de Morrison (1958) :
antigravité en RG →
violation de la conservation de l'énergie



si $m_G(+) = -m_G(-)$:

$$E_A = E_B = 2m_I c^2 = h\nu_C$$

$$h\Delta\nu_{CD} = h\nu_C (gL/c^2) = 2m_I gL$$

$$E_D = E_A + 2m_I gL$$

Limites indirectes

→ *pas exclu ? voir :*
G. Chardin et J.M. Rax, Phys Lett B282 (1992) 256
G. Chardin, Hyperfine Interactions 109 (1997) 83

→ introduire des champs gravi-vecteurs et gravi-scalaires non couplés aux photons pour différencier m_G et $\overline{m}_G$

(voir par exemple : J. Scherk, Phys. Lett. B (1979) 265)

$$V = -G\frac{mm'}{r}(1\underbrace{\mp a\,\exp(-r/v) + b\,\exp(-r/s)}_{\text{supergravité : une contribution répulsive}})$$

Les tests avec la matière contraignent seulement ~ |b-a|

Limites indirectes

- Contenu en antimatière de la matière ordinaire (« argument de Schiff ») mais :

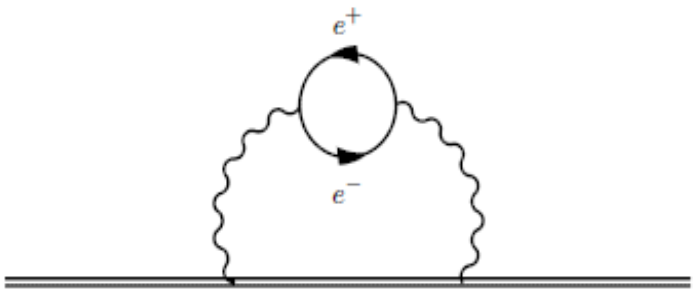


FIG. 2: Loop contribution to the electrostatic self-energy of the nucleus

$$\rho_{vide} = \int_0^{\Lambda} \sqrt{k^2 + m^2}\, \frac{4\pi k^2}{2(2\pi)^3} dk \approx \frac{\Lambda}{16\pi^2} \sim 10^{73} \cdot \mathrm{GeV}^4 \text{ pour } \Lambda = E_p$$

$$\rho_{critique} \sim 10^{-47}\,\mathrm{GeV}^4$$

$$\left|\frac{g - \bar{g}}{g}\right| \sim \left|\frac{g - g_{\Delta Erad}}{g}\right| \Rightarrow$$

Scenario	Argument	Bound on $\lvert g_H - g_{\overline{H}} \rvert / g_H$
Modification of GR	Lamb shift	$\lesssim 10^{-2}$
	Electrostatic self-energies of nuclei	$\lesssim 10^{-7}$
	Antiquarks in nucleons	$\lesssim 10^{-9}$
Scalar-vector	Radiative damping of binary systems	$\lesssim 10^{-4}$
	Scalar charges are not vector charges	$\lesssim 10^{-8}$
	Velocity dependence	$\lesssim 10^{-7}$

- Compensation exacte scalaire/vecteur impossible *(D.S.M.Alves et al SU-ITP-09/36)*

Limites indirectes

-Mesures de $\eta^{\pm}$ et $\Phi^{\pm}$ en fonction du temps par CPLEAR

Oscillations K^0-$\overline{K}^0$ dépendent de $$\delta m_{eff} = M_{K^0}\left(g-\bar{g}\right)\frac{U}{c^2}\exp\left(-r/r_I\right)f(I)$$

A. Apostolakis et al., Phys Lett B 452 (1999) 425

Variation du potentiel en fonction du temps

Introduction d'un potentiel absolu →

Summary of limits on $|g-\bar{g}|$ for spin 0, 1 and 2 interactions

Source	Spin 0	Spin 1	Spin 2
Earth	6.4×10^{-5}	4.1×10^{-5}	1.7×10^{-5}
Moon	1.8×10^{-4}	7.4×10^{-5}	4.8×10^{-5}
Sun	6.5×10^{-9}	4.3×10^{-9}	1.8×10^{-9}
Galaxy	1.4×10^{-12}	9.1×10^{-13}	3.8×10^{-13}
Supercluster	7.0×10^{-14}	4.6×10^{-14}	1.9×10^{-14}

Limites indirectes

-Mesure des fréquences cyclotron p (H^-) et $\bar{p}$ dans un même champ B
R. Hughes and M. Holzscheiter, Phys Rev Lett 66 (1991) 854
G. Gabrielse et al. Phys Rev Lett 82 (1999) 3198

$$\omega = qB/2\pi m + \alpha U/c^2 \quad |\omega - \bar{\omega}|/\omega = (9 \pm 9)\,x10^{-11} \rightarrow |g - \bar{g}|/g \leq 10^{-6}$$

Limite directe ?

-Temps d'arrivée d'1 (? : 90 % CL) neutrino et de 18 antineutrinos de la SN1987a

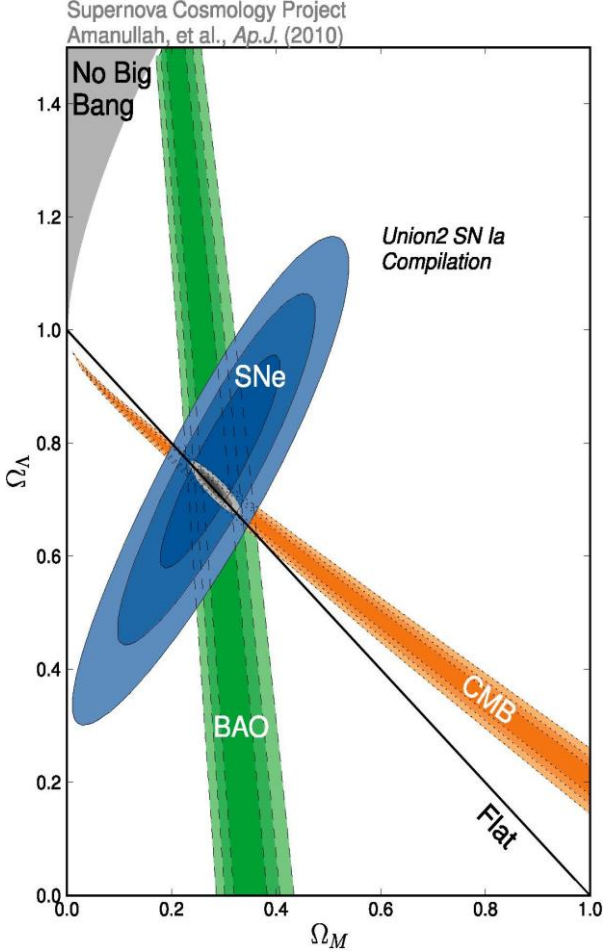
délai gravitationnel : $\delta t = MG\left[-R/\sqrt{R^2+b^2} + \left(1+\boxed{\gamma}\right)\ln\left|R+\sqrt{R^2+b^2}/b\right|\right]$

$$|\delta t(\upsilon_e) - \delta t(\bar{\upsilon}_e)|/\delta t(\bar{\upsilon}_e) < 10^{-6} \rightarrow |\gamma(\upsilon_e) - \gamma(\bar{\upsilon}_e)|/\gamma(\bar{\upsilon}_e) < 10^{-6}$$

(S. Paksava et al. Phys Rev D 39 (1989) 1761)

Cosmologie

-Asymétrie matière antimatière
-Accélération de l'expansion de l'univers
+ Matière noire + inflation
Y a-t-il une répulsion matière antimatière ?



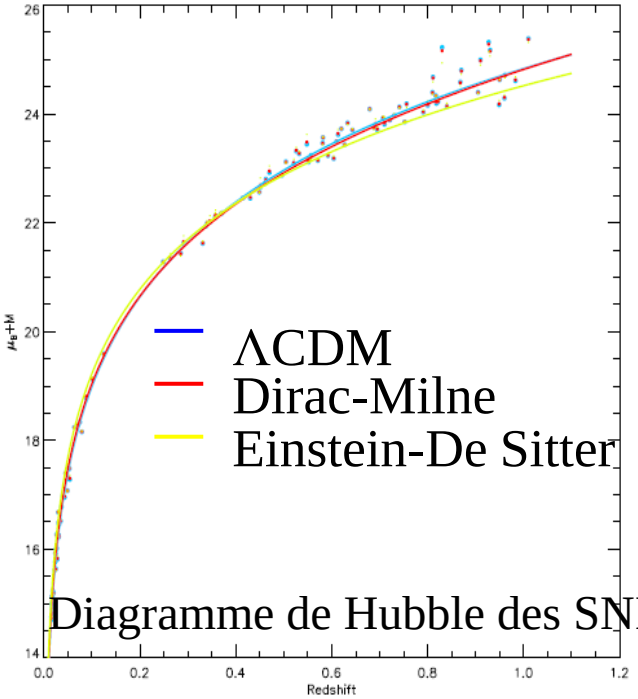


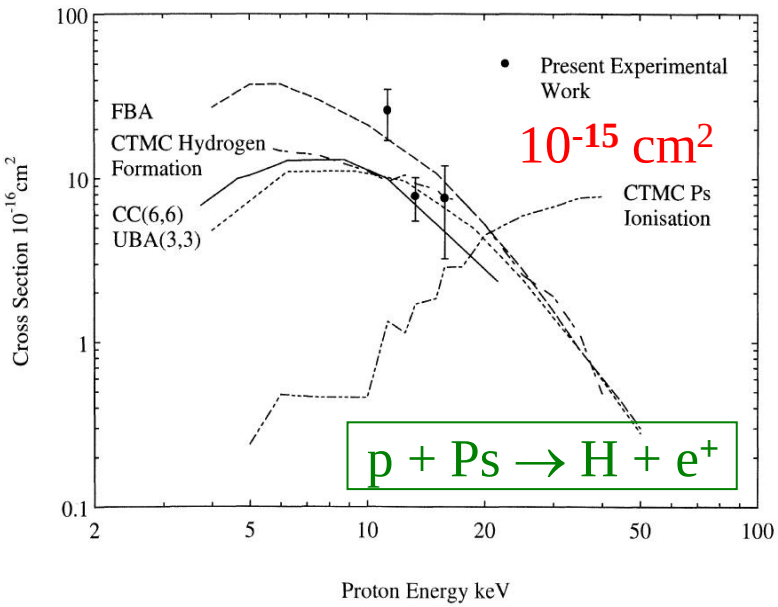
Diagramme de Hubble des SNIa

→ Univers de Dirac Milne
-Tentative de construire une cosmologie avec :
Symétrie matière-antimatière
Mécanisme séparant matière et antimatière

(Thèse Paris XI d'A. Benoît-Lévy – dir G. Chardin - 2009)

Cross-sections on PS

J. P. Merrison et al., Phys. Rev. Lett. **78**, 2728 (1997)

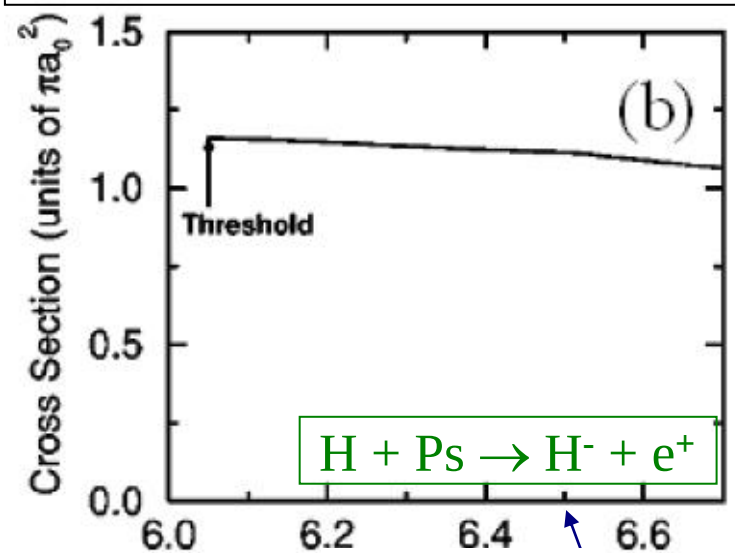


10^{-15} cm^2

$p + Ps \rightarrow H + e^+$

E_p [keV]

H.R.J. Walters and C. Starett, Phys. Stat. Sol. **C**, 1-8 (2007)



10^{-16} cm^2

$H + Ps \rightarrow H^- + e^+$

E_{Ps} [eV]

E_H = 6 keV in Ps frame

10^7 $\bar{p}$

10^{12} P_S /cm^2

} → 10^4 $\bar{H}$

1 $\bar{H}^+$

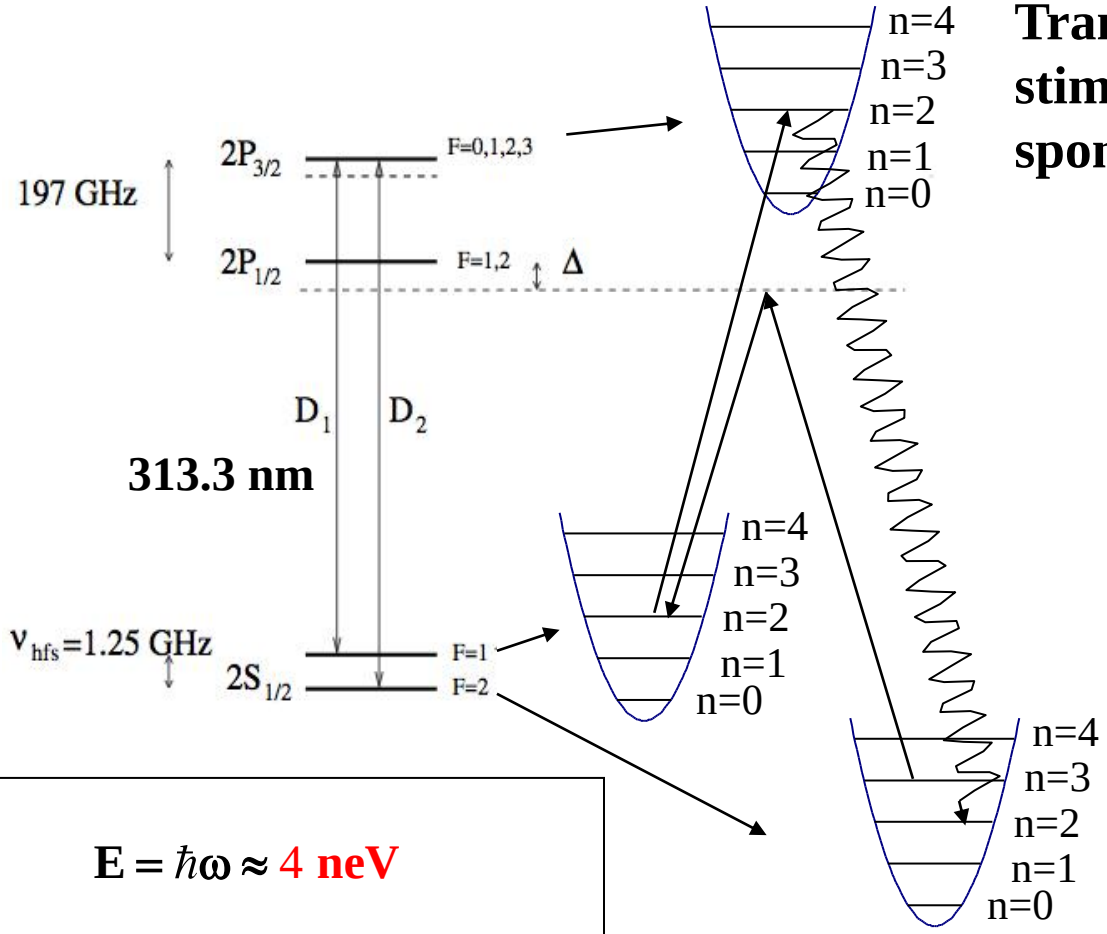
cross-section $\propto n^4$

Excite fraction of Ps to n=3

↓

10 $\bar{H}^+$ *?*

Refroidissement Raman



Transitions Raman stimulées et spontanées

Séquence :

F = 2, n

→ F = 1, n-1

→ F = 2, n-1

…

→ F = 2, n=0

Régime quantique d'oscillateurs harmoniques couplés

$$E = \hbar\omega \approx 4 \text{ neV}$$

$$\Delta v = \sqrt{\frac{\hbar\omega}{2m}} \approx 0.44 \text{ ms}^{-1}$$