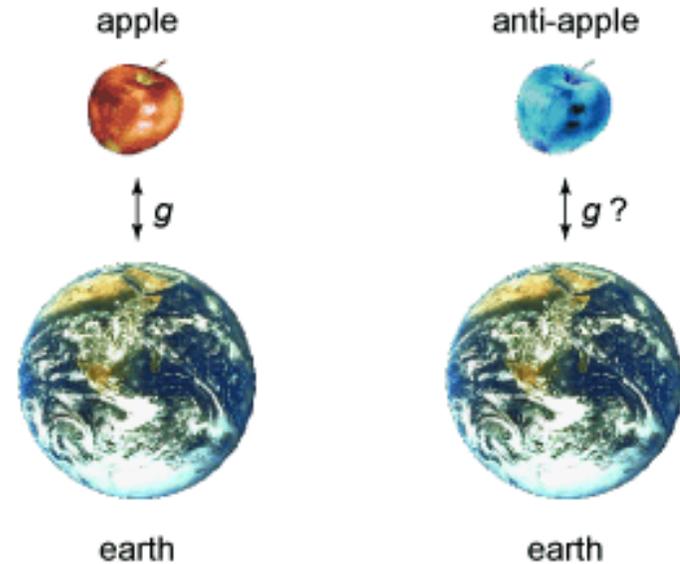


AEgIS & GBAR

Mesure de l'accélération de la pesanteur sur l'antihydrogène



- Motivation
- Limites indirectes
- Principe de la mesure
- AEgIS (Merci à P. Nedelec pour sa contribution)
- GBAR
- Conclusions

Motivation

Test direct du Principe d'Equivalence avec l'antimatière

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)

$$(\Delta a / a)_{\text{Be/Ti}} = (0.3 \pm 1.8) \times 10^{-13} \quad \text{S.Schlaminger et al, Phys Rev Lett 100 (2008) 041101}$$

Principe d'équivalence fort (Lunar Laser Ranging)

$$(\Delta a / a)_{\text{Terre/Lune}} = (-1.0 \pm 1.4) \times 10^{-13} \quad \text{J.G.Williams et al, Phys Rev Lett 93 (2004) 261101}$$

Jamais testé directement avec l'antimatière !

Considérations théoriques

- **Antigravité en Relativité Générale → violation de la conservation de l'énergie**
- **$m_G \neq \bar{m}_G$ possible si on ajoute des interactions (supergravité...)**
- **Pas d'antimatière dans l'univers visible →
répulsion matière antimatière ?**
- **Accélération de l'expansion de l'univers
+ matière noire + inflation → théorie de la gravitation OK ?**

Limites sur $(\bar{g}-g)/g$

Limites indirectes :

- Contenu en antimatière de la matière ordinaire : $\sim 10^{-9}$
- Mesures η^{\pm} et Φ^{\pm} en fonction du temps par CPLEAR : qqs 10^{-9}
- Mesure fréquences cyclotron p (H^-) et \bar{p} dans un même champ B : $\sim 10^{-6}$

Limite directe ?

- Temps d'arrivée d'1 neutrino (?) & 18 antineutrinos de SN1987a : $\sim 10^{-6}$

Pourquoi l'antihydrogène ?

-**positrons** : *F. Witteborn and W. Fairbank, Phys Rev Lett 19 (1967) 1049)*

-**antiprotons** : *PS200 Proposal Los Alamos Report LA-UR 86-260*

-*Systématiques trop grandes :*

$m_e g / e = 5.6 \times 10^{-11} \text{ V / m}$ (une charge élémentaire à 5 m)

-**antineutrons** : difficile de les ralentir suffisamment

T. Brando et al, Nucl. Instrum. Methods 180 (1981) 461

-**positronium** : temps de vie très court (142 ns) si $n = 1$

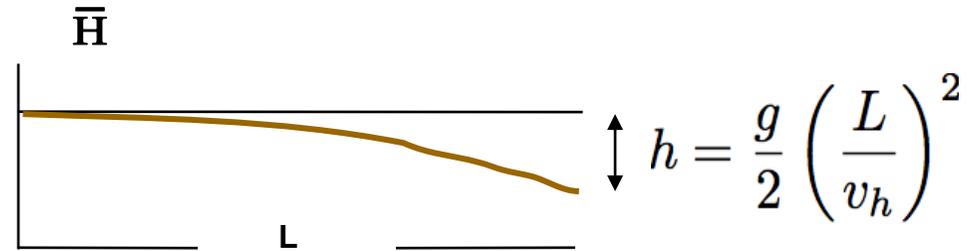
possibilité discutée s'il est excité $n \gg 1$ ($\tau \approx (n / 25)^{5.236} \times 2.25 \text{ ms}$)

Pbs : refroidissement, polarisabilité, ionisation par rayonnement...

A.P. Mills, M. Leventhal, Nucl. Instrum. Meth. in Phys. Research. B192 (2002) 102

Deux expériences en préparation

Principe de la mesure:
Vol parabolique des \bar{H}
déflectomètre, chute libre



- $L \sim 1 \text{ m}$ et $v_h \sim 500 \text{ m/s} \rightarrow h \sim 20 \mu\text{m}$ ($T(\bar{H}) \sim 100 \text{ mK} \sim 7 \mu\text{eV}$)

\rightarrow *AEGIS* : expérience CERN - *atomes \bar{H} (neutres) très froids*

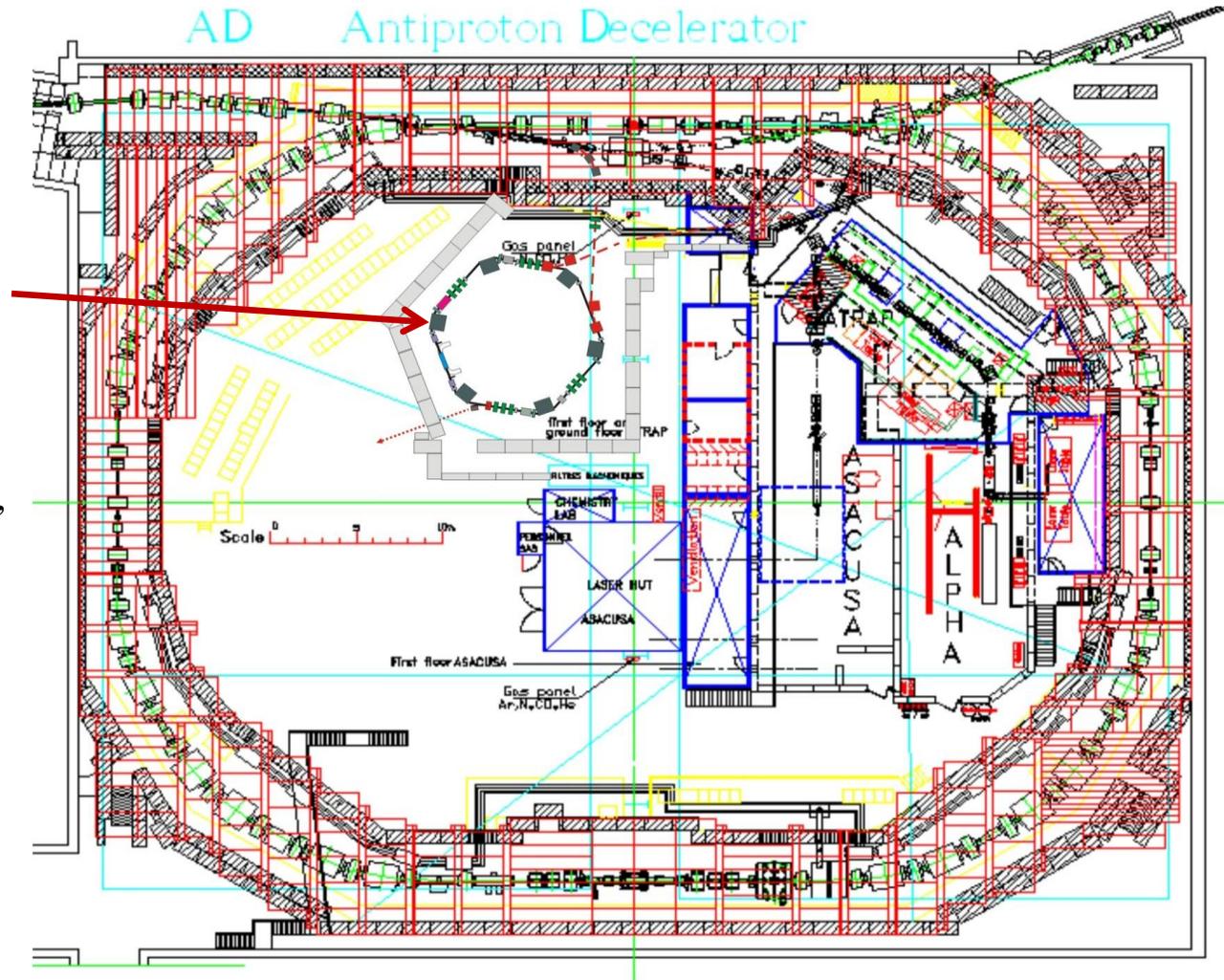
- $L \sim 0.1 \text{ m}$ et $v_h \sim 0.5 \text{ m/s} \rightarrow h \sim 20 \text{ cm}$ ($T(\bar{H}) \sim 10 \mu\text{K} \sim 1 \text{ neV}$)

\rightarrow *GBAR* : *ions \bar{H}^+ ultra-refroidis $\rightarrow \bar{H}$ quasi au repos*
proposition d'expérience recommandée par le SPSC

Le HALL expérimental de l'AD au CERN



Bientôt ELENA (Extra Low ENergy Antiproton ring)



- **Nouvel anneau** en projet pour décélérer encore plus les antiprotons de l'AD (**gain d'efficacité ~10** suivant les expériences)
- **AD:**
 - \bar{p} 5,5MeV, 1 ligne à la fois pendant 6, 12, 24h...
- **ELENA:**
 - \bar{p} **100 keV** en continu
 - possibilité de distribuer plusieurs lignes
 - **Nouvelles lignes possibles**
- **Premiers faisceaux : 2016**

The *AE \bar{g} IS* experiment at AD

Antimatter Experiment: Gravity, Interferometry, Spectroscopy

Primary goal:

measurement of the Earth gravity acceleration on antihydrogen

Precision :

first goal : 1% with 10^5 antihydrogen atoms

higher accuracy in the future

Other physics :

high precision antihydrogen spectroscopy (CPT tests)

positronium physics (as by product)

The *AEgIS* collaboration

(~50 physiciens)

 <p>Bologne</p> <p>M. Prevedelli</p>	 <p>Gênes</p> <p>G. Testera, V.Lagomarsino, Z.Zavatarelli, R. Vaccarone</p>	 <p>Milan</p> <p>M.Giammarchi, S.Cialdi, R.Ferragut, G.Consolati, F.Moia, F.Castelli, F.Prelz</p>	 <p>Pavie</p> <p>Bonomi, A. Fontana, L. Dassa, A. Rotondi, C. Riccardi</p>
 <p>Trento</p> <p>R. Brusa, S. Mariazzi, G. Nebbia, G. Ferrari</p>	 <p>CERN <u>M. Doser</u></p> <p>J.Bremer, A. Dudarev, S. Haider, G. Burkhart</p>	 <p>Zurich</p> <p>F. Merkt, S. Hogan</p>	 <p>Univ. Zurich</p> <p>C. Amsler, C. Canali, C. Regenfus, J. Storey</p>
 <p>Heidelberg Univ.</p> <p>A. Kellerbauer</p>	 <p>Heidelberg MPI-K</p> <p>M. Oberthaler</p>	 <p>Prague</p> <p>V. Petracek</p>	 <p>Bergen Univ. Olso Univ.</p> <p>H. Sandaker, J. P. Hansen O. Rohne</p>
 <p>Moscou</p> <p>S. Gninenko, A. Belov, V. Matveev</p>	 <p>IPNL UNIVERSITÉ DE LYON</p> <p>H. El Mamouni P. Lebrun P. Nedelec</p>	 <p>Lab. A. Cotton Orsay</p> <p>L. Cabaret D. Comparat</p>	

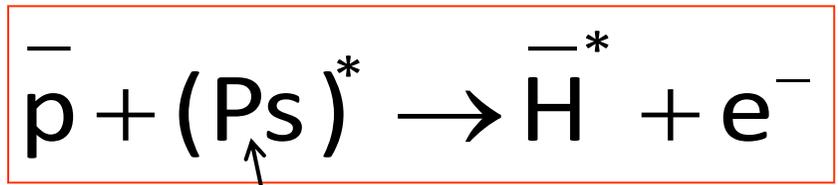
AEgIS METHOD :

- **Collect 10^4 - 10^5 extremely cold antiprotons ($T \sim 0.1\text{K}$) in a trap**
- **Accumulate 10^8 (or more) positrons in a trap in ~ 1 minute**
- **Produce very slow oPs sending the e^+ into a nanoporous target**
- **Produce Rydberg positronium via laser excitation**
- **Form cold (100 mK) antihydrogen atoms by the charge exchange process**

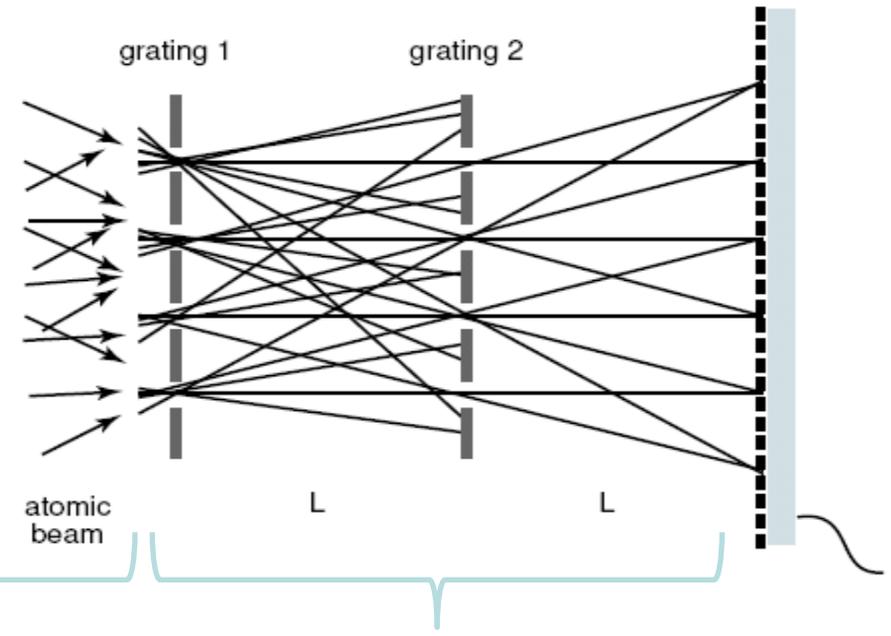
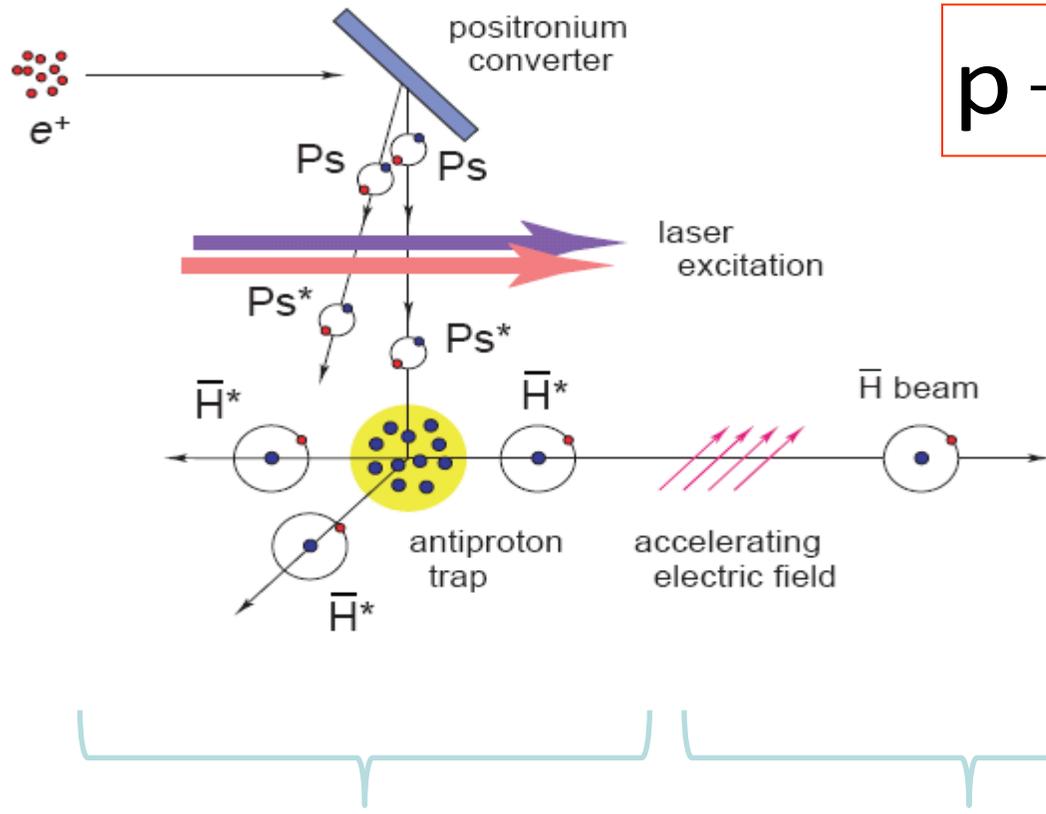
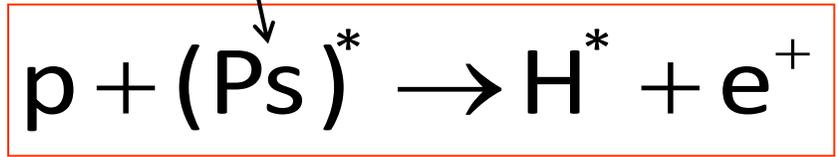


- **Accelerate the $\bar{\text{H}}^*$ to \sim few 100 m/s using Stark Effect**
- **Get \bar{g} through a measurement of the $\bar{\text{H}}$ beam deflection with a Moiré deflectometer**

Experimental Principle



$e^+ e^-$

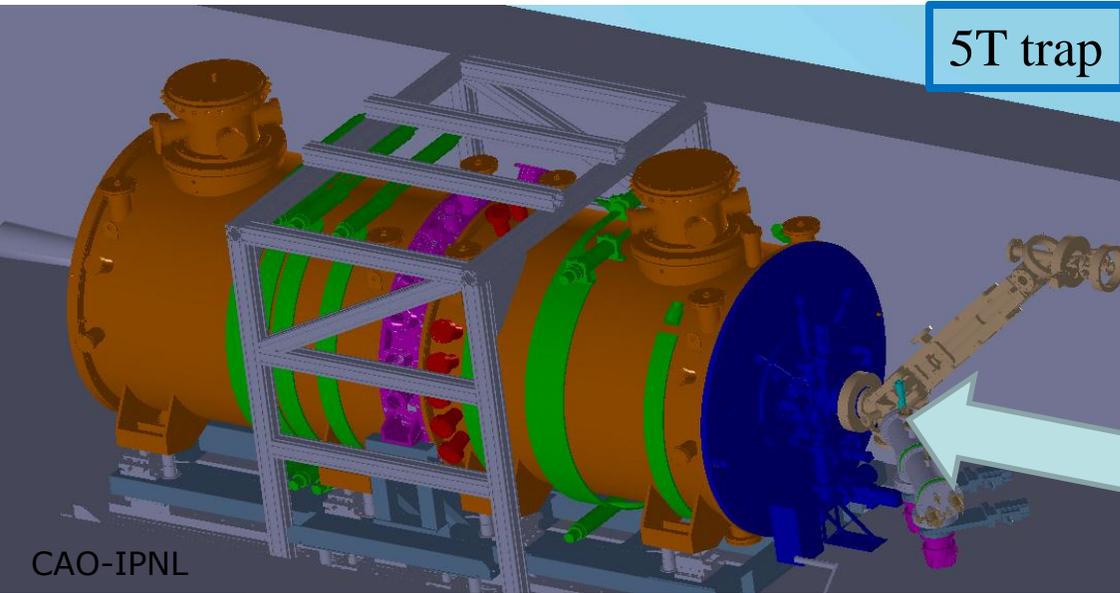


1) \bar{H} formation

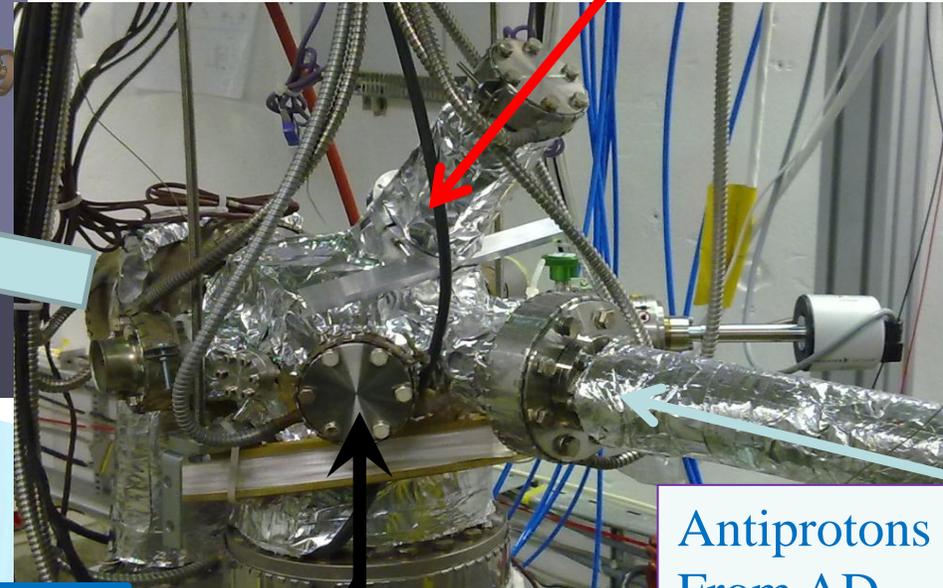
2) beam formation

3) Trajectory measurement

Des protons dans AEgIS



5T trap

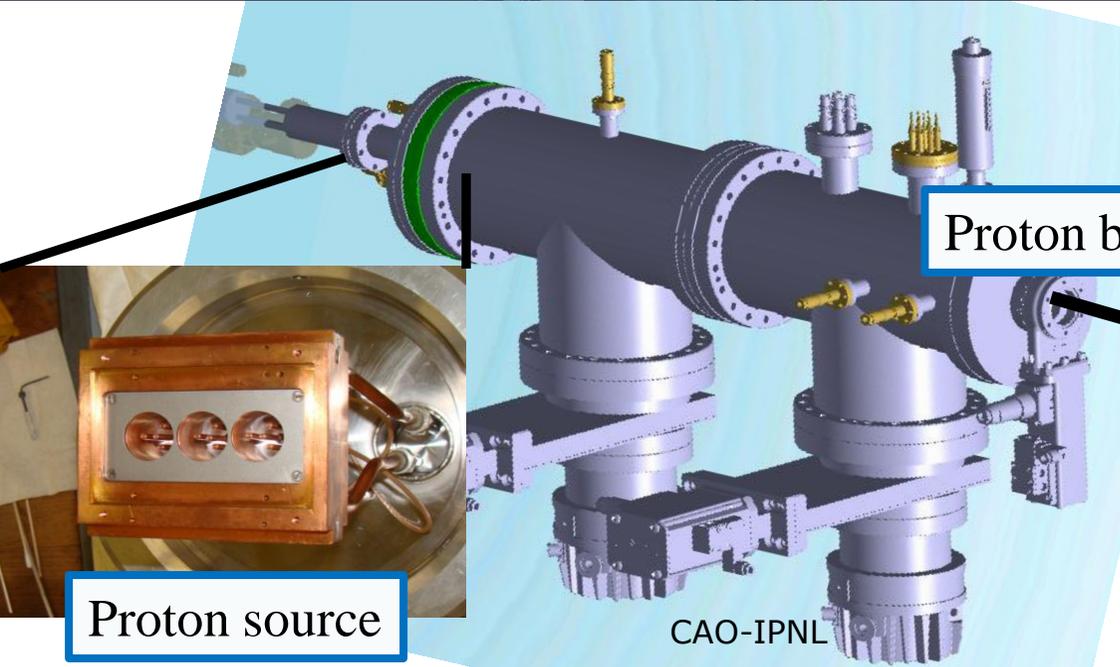


e^+ line

Antiprotons From AD

Protons to mixing chamber (MC)

Les protons suivent le même chemin dans AEgIS que les \bar{p}



Proton beam

Proton source

CAO-IPNL

Responsabilité/Activités

- **IN2P3 – IPNL – UCBL**
 - **Réalisation de la source de protons**
 - 2012 : étude/réalisation/installation sur site
 - 2013 : Production de H via l'oPS (capture d'e⁻)
 - **Construction mécanique :**
 - cheminées 5T & 1T (arrivées fluides)
 - **Intégration CAO mécanique**
 - responsabilité BE
 - **Participation aux runs/Analyse**
 - 2012-2016
- **Budget : 60 k€**

Calendrier AEgIS

- **2012 : installation 5T & 1T dans la zone au CERN**
 - Premier piégeage de \bar{p}
 - Premiers \bar{H} observés
- **2013 (\bar{p} beam Off) : Premiers H**
 - Installation du faisceau de protons
 - Production d'oPs
 - Capture/production de H sur oPs
- **2014 : Premiers \bar{H}**
 - Cooling 100mK, production de \bar{H}
- **2015 : première mesure gravitationnelle**
 - Installation déflectomètre, mesures
- **>2016 : ELENA, AEgIS upgrade**

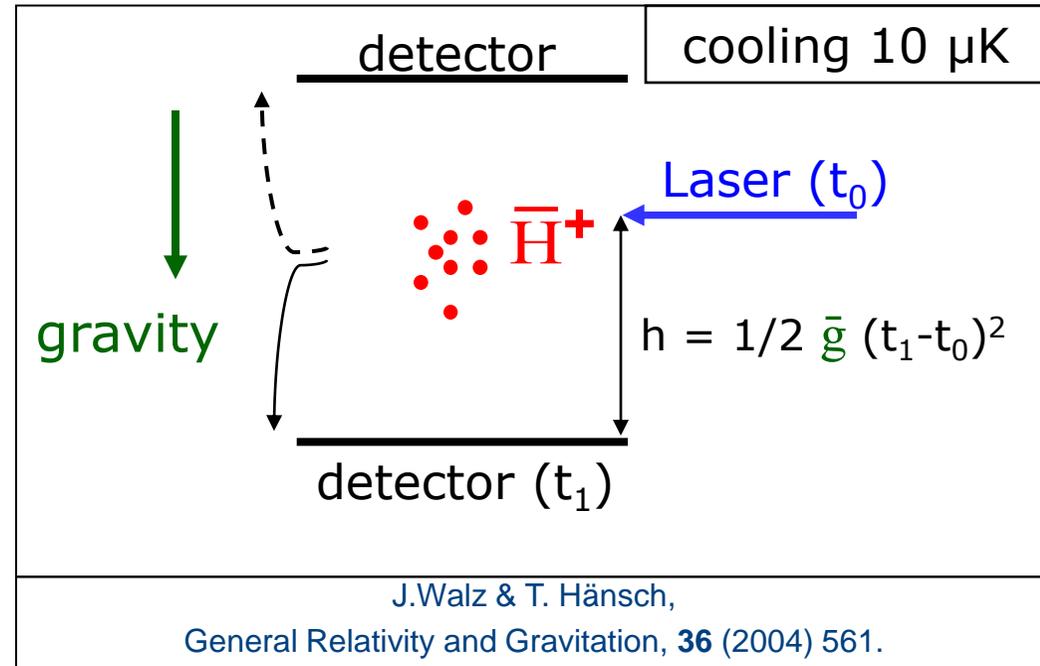
GBAR : \bar{g} experiment using \bar{H}^+ to get \bar{H} atoms

- Production ion \bar{H}^+
- Capture ion \bar{H}^+
- **Sympathetic cooling $10 \mu\text{K}$**
- Photodétachement du e^+
- Temps de vol

Erreur dominée par la température des \bar{H}^+

Précision sur \bar{g} :

\bar{H}^+ in ion trap	$\Delta g/g$
150 000	0.001
15 000	0.003
1500	0.01



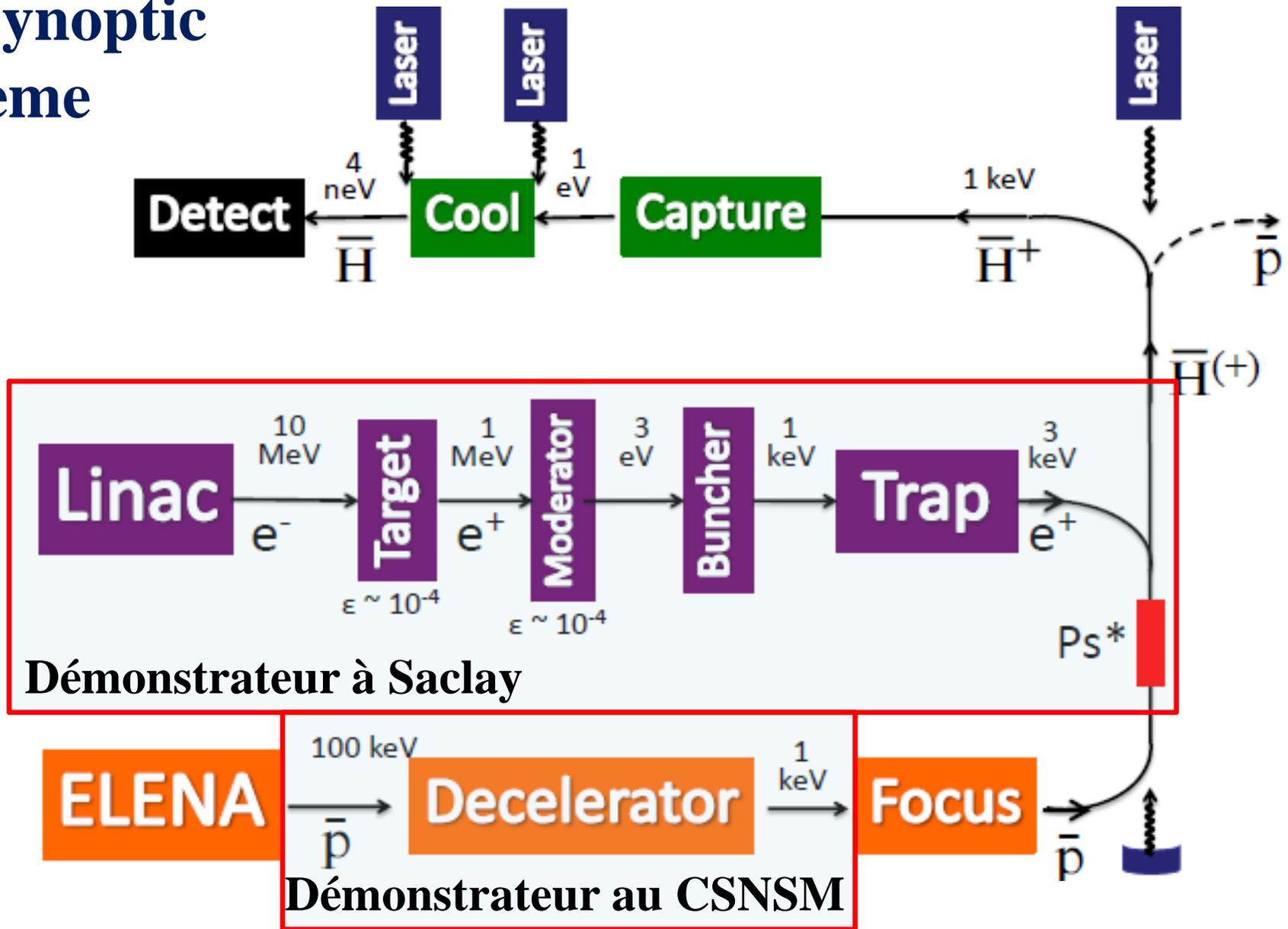
$$h = 20 \text{ cm} \rightarrow \Delta t = 175 \text{ ms}$$

Perspective :

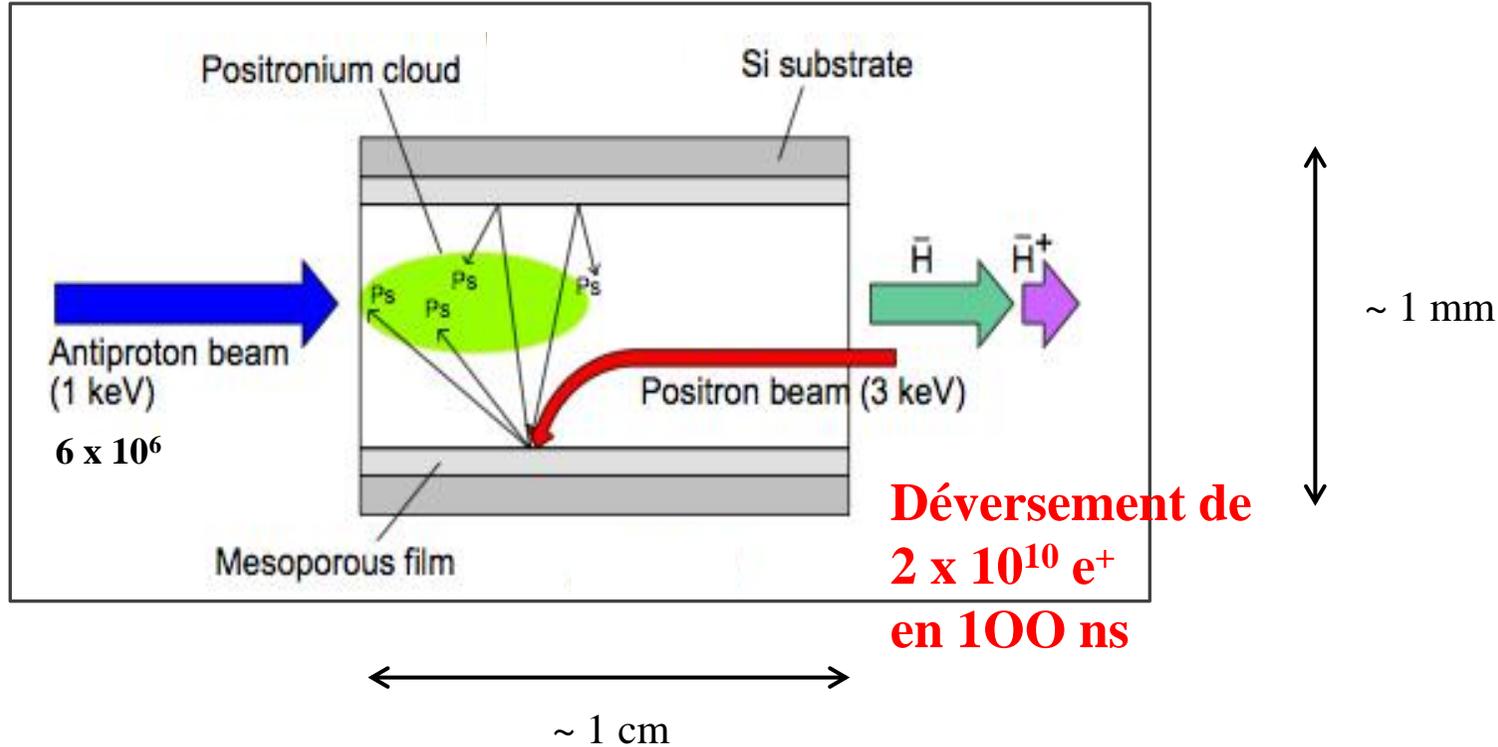
$$\Delta g/g < 10^{-3}$$

Spectroscopie des niveaux gravitationnels

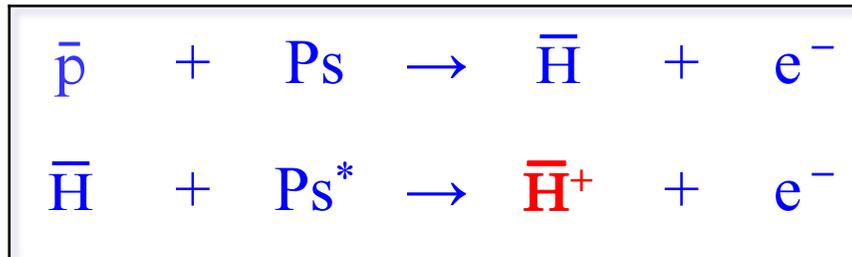
GBAR synoptic scheme



Production des \bar{H}^+

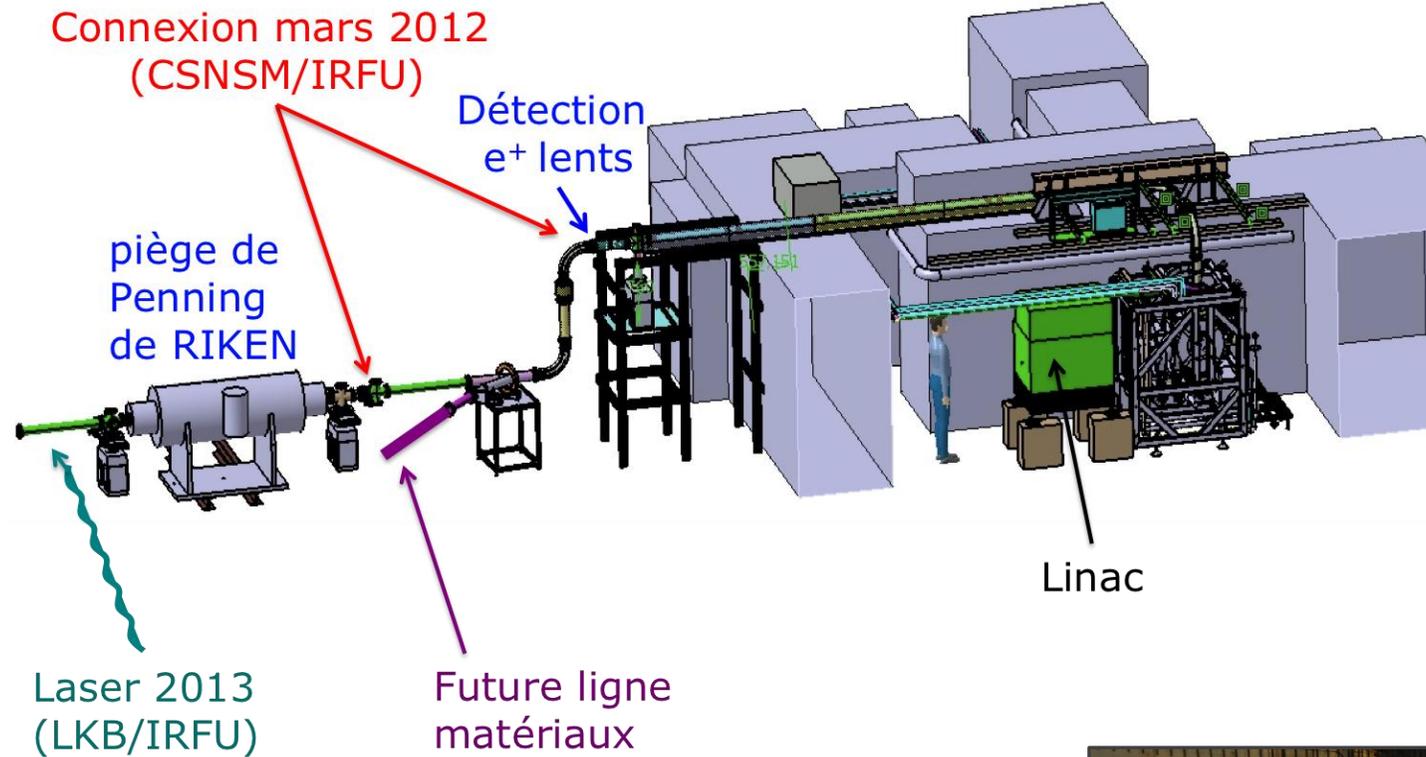


**Déversement de
 $2 \times 10^{10} e^+$
en 100 ns**



~ 0.3 \bar{H}^+ / pulse (~2 minutes)

Démonstrateur à Saclay



Prochaines étapes



Collaboration Gbar

14 instituts, ~ 40 physiciens

Porte-parole : P. Pérez

Laboratoires français :

IRFU(7)

P. Comini, P. Debu, L. Liskay, B. Mansoulié, P. Pérez, Y. Sacquin,
B. Vallage

CSNSM(5)

G. Chardin, P. Dupré, P. Grandemange, D. Lunney, V. Manea

LKB(13)

ILL(1)

IPCMS(2)

Expérience Recommandée par le SPSC
pour approbation par le Research Board
en mai 2012

Work Package	Institutes (<i>coordinator in bold</i>)	PI
1 - Management	IRFU , All	IRFU
2- Fast e^+	NCBJ, IRFU	
3- Slow e^+	IRFU , Swansea, TUS	
4- e^+ accumulation	RIKEN , IRFU , CSNSM	LKB
5- Positronium	LKB , IRFU, ETHZ	
6- Antiproton deceleration	CSNSM , IRFU, LKB, Tokyo	Mainz
7- H & H^+	Swansea, IRFU, LKB	
8- H^+ cooling	Mainz , LKB, ILL	
9- Detector	ETHZ , IRFU, Mainz	IRFU
10- Theory	IPCMS , Lebedev, Uppsala	
11- Slow control, DAQ	IRFU , all	IRFU
12- CERN installation	Swansea, All	

Gbar : état et perspectives

Présent

Démonstrateur à Saclay : linac 4.3 MeV \rightarrow $\sim 4 \cdot 10^6$ e⁺ lents /s
(objectif $\sim 3 \cdot 10^8 \leftrightarrow$ linac de plus haute énergie, modération néon solide)

2012-1013

- Accumulation des positrons dans le piège de Penning-Malmberg
- Décélération des (anti)protons
- Ralentissement des (anti)protons
- Excitation du positronium
- Conception piège/refroidissement \bar{H}^+ et photodétachement
- Conception du dispositif de mesure de chute.

2014

- Installation au CERN

2016

- Premiers faisceaux... et démarrage de la mesure de \bar{g}

2018

- Spectroscopie gravitationnelle

Gbar : coût

Coût complet GBAR : 18 M€ - coût « marginal » : 10 M€

Part IRFU souhaitée ~15 % (MoU en discussion)

Besoins : passage en phase projet

- **Chef de projet**

- **budget annuel ~100 k€ (fonctionnement du démonstrateur à Saclay, missions, plus tard installation CERN)**

en complément des investissements internes ou externes à trouver

Historique des financements externes obtenus :

CG de l'Essone, ANR SOPHI, P2I, ANR POSITRAP, IFRAF RESIMA, P2IO

Demandes en cours :

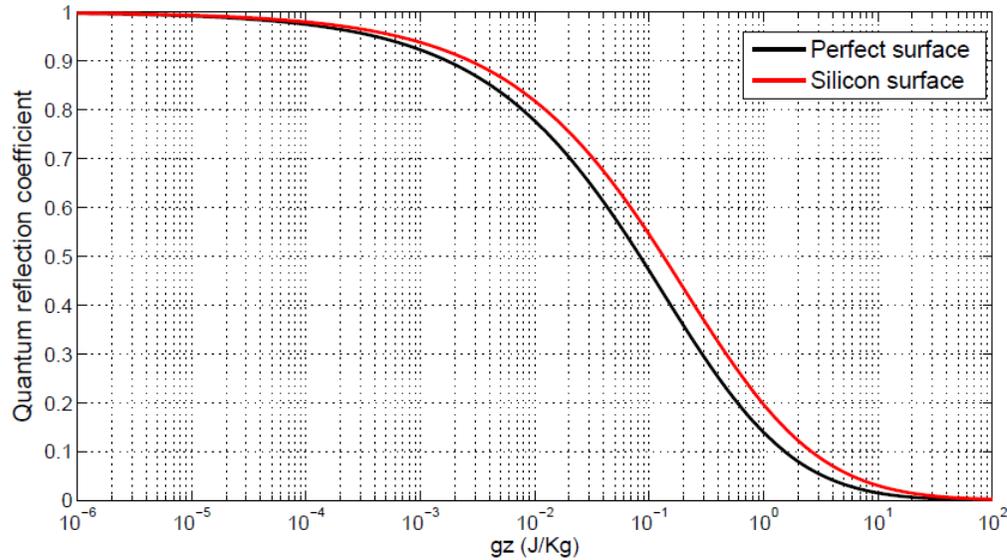
ERC synergie, ANR SCOPE, demande post-doc P2IO

Conclusions

- **Une mesure de la chute libre d'atomes d'antihydrogène serait le premier test direct du principe d'équivalence avec de l'antimatière.**
- **AEgIS et GBAR proposent des méthodes très différentes.**
- **Ces expériences pluridisciplinaires ont une taille et un coût matériel modestes (hors production des \bar{H}), mais leur mise au point est longue et délicate (physique atomique, lasers, pièges, accélérateurs, science des matériaux, physique des particules).**
- **Perspectives et retombées : sciences des matériaux, physique du Ps (dimensions supplémentaires...), spectroscopie \bar{H} , condensat de Bose-Einstein de Ps...**

Perspective : spectroscopie des niveaux gravitationnels

Effet Casimir



Taux d'annihilation sur un plan

$$\Delta z \sim \text{qqqs } \mu\text{m}$$

Précision : $\Delta g/g < 10^{-3}$

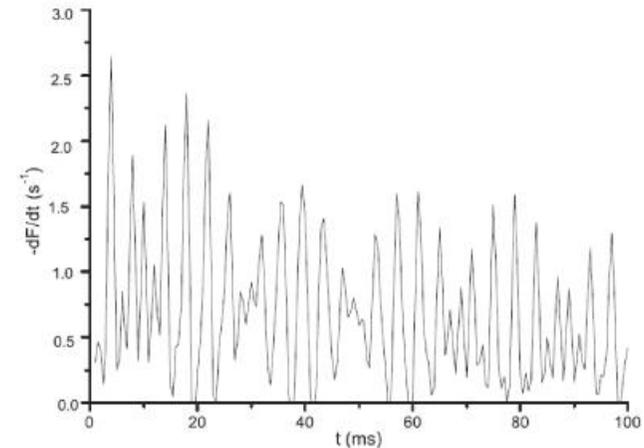


Figure 53: Evolution of the annihilation rate of $\bar{\text{H}}$ atoms for a superposition of the 3 lowest gravitational states.