

Pourquoi et comment peser l'antimatière ?

Yves Sacquin⁽¹⁾ et Laurent Hilico⁽²⁾

(1) Département de physique des particules, IRFU (CEA, Université Paris-Saclay), CEA/Saclay, 91191 Gif-sur-Yvette Cedex

(2) Laboratoire Kastler Brossel (Sorbonne Université, CNRS, ENS-Paris, Collège de France), 4 place Jussieu, BP 74, 75252 Paris Cedex 05

Au Cern, trois expériences (ALPHA-g, AEGIS et GBAR) sont en concurrence pour mesurer le comportement gravitationnel de l'antimatière. Ces collaborations rassemblent des chercheurs et ingénieurs aux compétences extrêmement variées en physique des particules, détection, physique atomique, lasers, ions froids, accélérateurs, ultravide, cryogénie...

Au-delà de la prouesse technique, l'enjeu de cette mesure est considérable pour notre compréhension de l'Univers.

Motivation

L'antimatière a-t-elle des propriétés inconnues ?

L'exploration des propriétés de l'antimatière représente un secteur de recherches très actif. Depuis la fabrication des premiers atomes d'antihydrogène au Cern en 1995, la maîtrise de ce premier anti-élément a fait de rapides progrès : les expériences de l'AD (*Antiproton Decelerator*) le fabriquent et le piègent de manière routinière, si bien qu'il est devenu envisageable de l'utiliser pour des tests de physique fondamentale.

Le modèle cosmologique standard implique une création égale de matière et d'antimatière, mais dans la nature on ne trouve pas trace de cette dernière, ce qui est une des énigmes de la physique moderne : l'explication avancée pour la survivance de la matière par la violation de l'invariance CP (inversion de la charge et de la parité) n'est pas satisfaisante. Il est tout aussi possible que l'antimatière ait des propriétés inconnues, qui violeraient partiellement ou totalement d'autres principes fondamentaux de la physique.

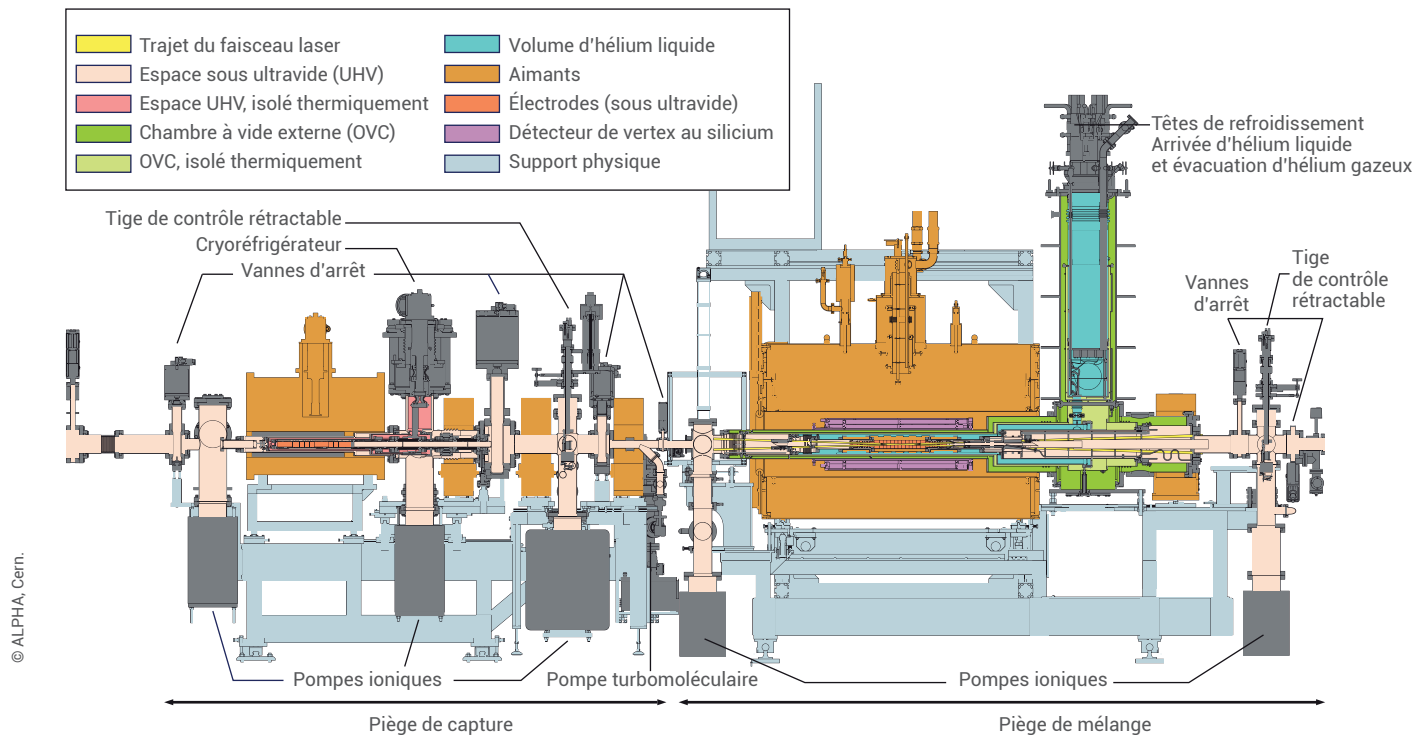
Le premier test envisageable est celui du principe d'équivalence d'Einstein, qui découle de l'équivalence stricte entre masse inertielle et masse pesante : l'accélération d'un corps soumis à une force gravitationnelle est indépendante de la composition de ce corps (principe d'équivalence faible). Ce principe fondamental, au cœur de la relativité générale, a été vérifié avec une très grande précision (jusqu'à la treizième décimale), mais jamais avec de l'antimatière. Citons les expériences avec des pendules de torsion, les mesures laser de la distance Terre-Lune [1] et, plus récemment, l'expérience spatiale Microscope [2].

La validité du principe d'équivalence pour l'antimatière est une question d'autant plus fondamentale que l'observation de l'accélération de l'expansion de l'Univers conduit également à s'interroger sur la théorie de la gravitation : cette accélération est attribuée à une « énergie noire » qui s'opposerait à la gravitation. D'autre part, des anomalies gravitationnelles (vitesse de rotation d'étoiles dans les galaxies, de galaxies dans des amas...) sont interprétées comme la présence d'une « matière noire », qui serait la principale composante de matière dans l'Univers, sans qu'on ait pu la caractériser autrement que par ses effets gravitationnels. Ces deux énigmes suggèrent que notre compréhension de la gravitation est loin d'être satisfaisante ; l'antimatière y joue-t-elle un rôle ?

Pourquoi utiliser l'antihydrogène pour des tests fondamentaux ?

Les premières tentatives de mesures directes de la gravitation avec de l'antimatière ont été faites avec des positons ou des antiprotons, particules chargées, et se sont heurtées au fait qu'il est quasiment impossible de s'abstraire, dans un dispositif expérimental, des forces électromagnétiques résiduelles auxquelles ces charges sont soumises : il existe un champ électromagnétique aléatoire associé au mouvement thermique des électrons de la matière environnante. Ce champ, appelé « bruit Johnson », constitue un obstacle rédhibitoire pour une mesure de la gravitation, la force électromagnétique étant beaucoup plus forte que cette dernière.

Il faut donc utiliser de l'antimatière neutre. Les antineutrons ne peuvent être manipulés dans ce but, car on ne sait pas les piéger et les ralentir suffisamment. C'est pourquoi les expériences se tournent



1. Pièges de l'expérience ALPHA. Les aimants sont en orange, les zones d'ultravide en rose. Le premier piège (à gauche) capture les antiprotons qui sont ensuite transférés dans le second piège, dit de mélange, où sont également stockés des positons (injectés par la droite). Les puits de potentiel des antiprotons et des positons sont ensuite rapprochés pour créer des antihydrogènes.

observée expérimentalement. Les mesures de CPLEAR peuvent être considérées comme une confirmation, avec une remarquable précision, de l'invariance CPT. En revanche, les contraintes sur une accélération différente entre quarks et anti-quarks dépendent fortement des hypothèses utilisées [5].

Un autre test proposé passe par la mesure à très haute précision de la fréquence de résonance cyclotron^(c) des antiprotons, confrontée à celle des protons, ce qui permet de comparer cette fois-ci leurs masses inertielles. L'égalité de ces fréquences pour les protons et antiprotons est vérifiée à nouveau avec une excellente précision, dans un repère soumis à la gravitation terrestre. Des contraintes sur les masses gravitationnelles peuvent en être déduites, mais elles dépendent à nouveau fortement des hypothèses, et notamment de la possibilité de définir un potentiel gravitationnel absolu, plutôt que de simples différences de potentiel [6].

Les antineutrinos de la supernova SN1987A, observés par les détecteurs Kamiokande au Japon et IMB aux USA,

ont fait l'objet d'une estimation de l'effet de la gravitation sur l'antimatière : dix-neuf interactions d'antineutrinos ont été détectées, mais l'analyse des traces dans les détecteurs laisse la possibilité que l'une des interactions soit due à un neutrino. Comme ces interactions ont été enregistrées dans une fenêtre de temps assez étroite (quelques heures), après 150 000 ans de voyage, on peut en déduire une limite sur la différence relative entre g et \bar{g} (la valeur de la constante de gravitation ressentie par l'antimatière) située autour de 10^{-6} .

Une première estimation directe de \bar{g} a été présentée par l'expérience ALPHA en 2013, en analysant les positions spatiales des atomes d'antihydrogène lors de leurs annihilations dans le piège de l'expérience. La distribution observée ne permet pas de conclure en raison de l'agitation résiduelle des atomes dans le piège, et ne put donner qu'une limite extrêmement large à la valeur de \bar{g} : entre -75 fois g et +100 fois g ! ALPHA poursuit actuellement ce travail avec un nouveau détecteur dédié, ALPHA-g.

Fabriquer de l'antihydrogène

Pour observer l'effet de la gravitation sur des atomes d'antihydrogène, différentes approches sont proposées. Compte tenu de la très grande faiblesse de la force gravitationnelle comparée aux autres forces, tous les projets ont besoin d'obtenir des antihydrogènes extrêmement lents : on assiste donc à une « course à la lenteur ».

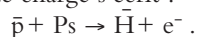
Les antiprotons sont fabriqués au Cern, en faisant interagir sur une cible des protons accélérés à une énergie de 26 GeV par le synchrotron PS (*Proton Synchrotron*). Les antiprotons produits sont collectés et injectés, à 3,6 GeV, dans l'anneau de l'AD (*Antiproton Decelerator*) de 100 m de diamètre environ. Dans cet anneau, les antiprotons sont ralentis grâce à des techniques mises au point pour les grands collisionneurs proton-antiproton dans les années 1970-1980 (refroidissement stochastique^(d) pour l'impulsion longitudinale, et par un plasma d'électrons pour les impulsions transverses), jusqu'à une énergie cinétique^(e) de 5 MeV. C'est à cette énergie que les antiprotons

sont actuellement guidés jusqu'aux expériences, qui ont besoin de les ralentir à nouveau pour les piéger, au prix de pertes parfois importantes. C'est pourquoi un nouvel anneau plus petit, ELENA (*Extremely Low ENergy Antiprotons*), a été construit et a commencé ses tests de fonctionnement en 2018 : les antiprotons y sont ralentis à 100 keV et sont donc beaucoup plus faciles à manipuler pour faire de l'antihydrogène.

Pour fabriquer et piéger de l'antihydrogène, la technique la plus utilisée actuellement consiste à confiner des antiprotons et des positons à l'intérieur d'un même piège où sont créés deux puits de potentiels électriques inversés. Dans l'exemple de l'expérience ALPHA, ce piège du type Penning-Malmberg^(f) (le piège de mélange, à droite sur la figure 1), est formé d'une enceinte à vide tubulaire baignant dans un champ magnétique uniforme intense (1 tesla), aligné sur l'enceinte, qui piège radialement les particules chargées. À l'intérieur de l'enceinte, des électrodes annulaires sous tension créent des puits de potentiel électrique juxtaposés qui assurent le piégeage longitudinal d'un paquet d'antiprotons et d'un paquet de positons. Ces puits sont ensuite rapprochés, de sorte que des antiprotons peuvent capturer des positons et produire des antihydrogènes. Ceux-ci, neutres, ne sont alors plus piégés par les champs électriques, mais par un deuxième champ magnétique non uniforme (octupolaire dans l'expérience ALPHA), qui se superpose au champ principal : c'est le couplage du moment magnétique de l'anti-atome au champ qui permet de piéger les antihydrogènes les plus lents, en les attirant vers l'axe du piège où le champ est le plus faible. Le piégeage des antihydrogènes nécessite des antiprotons déjà assez « froids » (énergies de l'ordre du milli-électronvolt, soit quelques kelvins en unité de température), en raison du faible moment magnétique des atomes. Pour l'expérience ALPHA, seuls les antihydrogènes d'énergie inférieure à 0,5 K (ce qui correspond à des vitesses d'agitation de l'ordre de 100 m/s) peuvent être piégés. Tout refroidissement ultérieur devient très difficile.

Une deuxième technique de fabrication d'atomes d'antihydrogène passe par la production, à partir d'un faisceau de positons, d'atomes de positronium Ps, état lié électron-positon, e^-e^+ . Cet atome très instable possède, dans son état orthopositronium o-Ps (*spins* parallèles pour e^+ et e^-)

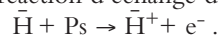
une durée de vie dans le vide de 142 ns, suffisante pour qu'on puisse le faire interagir avec des antiprotons. La réaction d'échange de charge s'écrit :



L'antihydrogène qui est fabriqué, $\bar{\text{H}}$ (un antiproton et un positon), a approximativement l'énergie de l'antiproton. Cette voie de production a été choisie par les expériences AEgIS et GBAR.

AEgIS a fait le choix de refroidir les antiprotons avant la réaction, et espère obtenir des antihydrogènes avec des énergies équivalentes à un dixième de kelvin (environ 10 microélectronvolts).

GBAR a choisi de passer par une deuxième étape en produisant des ions $\bar{\text{H}}^+$ (un antiproton et deux positons, l'équivalent en antimatière de l'ion H^-), en utilisant une deuxième réaction d'échange de charge :



L'ion ainsi créé peut alors être guidé vers un piège pour son refroidissement ultérieur jusqu'à 10 microkelvins, avant d'être « neutralisé » pour redevenir antihydrogène.

Pour AEgIS comme pour GBAR, le défi majeur réside dans ce refroidissement (voir encadré, p. 17).

Mesure de la gravitation

Nous présentons maintenant le travail des trois collaborations qui se sont lancées dans cette mesure. Les autres expériences du décélérateur d'antiprotons, qui se consacrent à l'étude des niveaux atomiques de l'antihydrogène et aux comparaisons à très haute précision entre protons et antiprotons, ne sont pas décrites ici.

ALPHA-g (Antihydrogen Laser Physics Apparatus)

La collaboration ALPHA au Cern a une grande expérience de la capture d'antihydrogène dans un piège standard, et a pu mesurer son spectre hyperfin et sa transition $1S - 2S$. Pour mesurer le comportement gravitationnel de l'antihydrogène, le projet ALPHA-g comportera un piège vertical dans lequel le gradient de champ magnétique, qui confine les antihydrogènes, sera contrôlé avec une grande précision. Ce nouveau piège, d'axe vertical, sera alimenté en antiprotons et positons par les pièges de la figure 1 pour fabriquer des antihydrogènes selon le même principe. Ces antihydrogènes piégés sont suffisamment rapides pour osciller entre le haut et le bas du piège (environ 1 m), et

ont au point bas un supplément d'énergie d'environ 1,2 mK (traduit en température), si on considère qu'ils subissent la même attraction gravitationnelle que la matière. Dans les conditions de piégeage choisies, il faut un gradient de champ de 18 G/m pour contrebalancer la force gravitationnelle. Il suffit de diminuer graduellement l'intensité de ce gradient pour que certains antihydrogènes puissent s'échapper, si leur gain en énergie gravitationnelle le leur permet, par l'extrémité (haute ou basse) où leur énergie sera suffisante. La longueur du piège et le temps de décroissance du gradient de champ magnétique seront ajustés pour qu'à chaque rebond dans le piège le gradient diminue de 5 G/m, de sorte que les antihydrogènes les plus énergiques ne soient plus confinés et sortent du piège. Dans un premier temps, la simple observation de l'extrémité du piège d'où s'échappent majoritairement les antiatomes permettra de déduire le signe de \bar{g} . Puis des mesures statistiques du nombre d'antiatomes s'échappant par le haut et le bas devraient permettre, avec une accumulation de données suffisantes, de fournir une mesure de \bar{g} avec une précision de 1%.

L'expérience est en cours de construction depuis 2016 ; elle a effectué ses premiers tests avec antiprotons en 2018.

AEgIS (Antihydrogen Experiment : Gravity, Interferometry, Spectroscopy)

L'expérience AEgIS se propose de mesurer la déviation verticale, due à la gravitation, de la trajectoire (initialement horizontale) d'antihydrogènes, déviation de quelques microns sur des distances de quelques mètres. Pour cette mesure, AEgIS se propose de ralentir d'abord des antiprotons à des énergies équivalentes de l'ordre de 100 mK (correspondant à des vitesses de 50 m/s). Une fois « refroidis », ces antiprotons interagissent avec du positronium pour produire des atomes d'antihydrogène. Les atomes de positronium étant produits dans des états très excités par irradiation laser (états de Rydberg, dont les durées de vie sont nettement plus longues que les 142 ns de l'état fondamental), les antihydrogènes seront aussi produits dans des états excités et pourront être dirigés, par effet Stark, dans un gradient de champ électrique, vers un déflectomètre de Moiré à double grille. Dans ce dispositif, les anti-

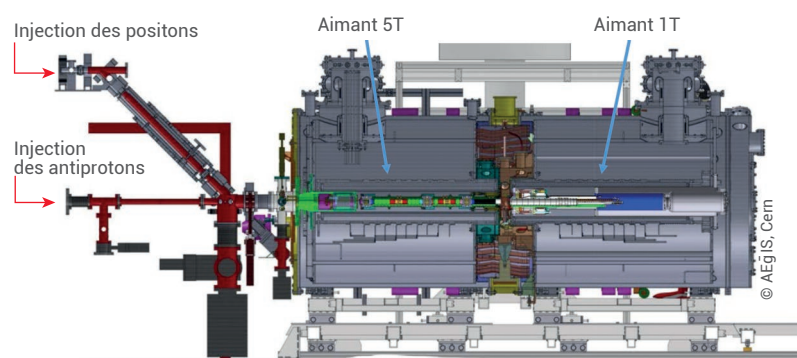
hydrogènes traversent deux grilles séparées de 50 cm, et leurs impacts produisent une structure périodique dans des détecteurs de haute précision constitués de plaques d'émulsion. Selon la vitesse à laquelle les antiatomes ont été accélérés, leurs trajectoires sont plus ou moins affectées par la gravitation, et leurs impacts à la sortie du déflecteur sont décalés verticalement de quelques dizaines de microns. La mesure des positions de ces impacts avec une précision de 1 micron permet d'estimer cette déviation. Combinée avec le temps de vol des antihydrogènes, cela permet d'en déduire la force de gravitation ressentie par les anti-atomes. Par exemple, sur 1 m de parcours et pour une vitesse de 500 m/s, la gravitation standard déplace les impacts de 19,6 μm . Une précision de 1 % sur la mesure de \bar{g} est envisagée, avec de possibles améliorations jusqu'à 0,1 %

Les tests se poursuivent au Cern depuis 2011. Le piège à antiprotons et la ligne de positons sont en place (fig. 2). Les études sur le ralentissement des antiprotons et l'excitation du positronium se poursuivent.

GBAR (Gravitational Behaviour of Antihydrogen at Rest)

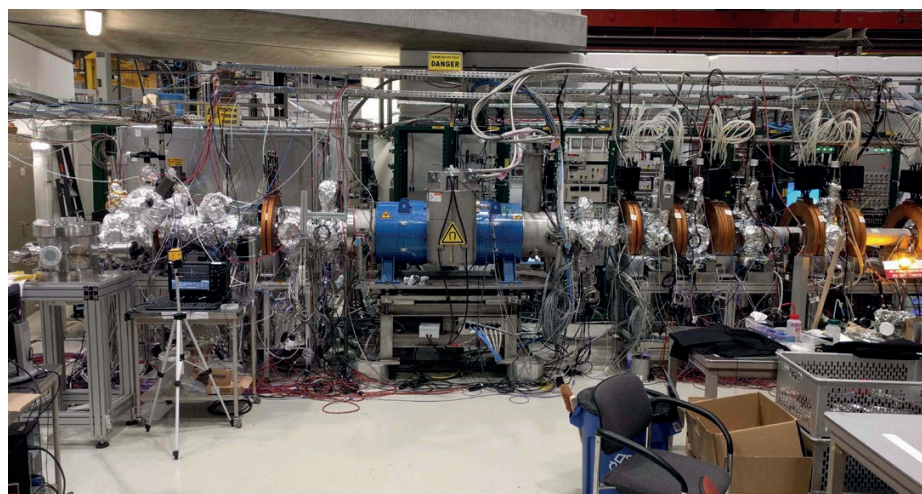
La voie choisie par GBAR passe par la production d'ions H^+ à partir d'antiprotons \bar{p} et de positronium Ps par les réactions d'échange de charges $\bar{p} + \text{Ps} \rightarrow \bar{\text{H}} + e^-$ et $\bar{\text{H}} + \text{Ps} \rightarrow \text{H}^+ + e^-$ (voir p. 15). Pour cela, des paquets d'antiprotons \bar{p} délivrés par l'anneau ELENA ($5 \cdot 10^7$ antiprotons toutes les 110 secondes) sont tout d'abord ralentis de 100 keV à 5 keV grâce à un décélérateur formé d'une électrode tubulaire dont le potentiel est rapidement augmenté de -95 kV à 0 V lorsque les antiprotons le traversent.

Les antiprotons sont alors dirigés vers un nuage dense de positronium ($10^{12} \text{Ps}/\text{cm}^2$, intégré sur l'épaisseur du nuage) créé par l'impact d'un paquet intense de positons ($10^{10} e^+$) sur un convertisseur en silice microporeuse de grande efficacité (~30%). Ces positons sont obtenus par un accélérateur linéaire (*linac*) (contrairement aux autres expériences qui utilisent des sources radioactives de ^{22}Na) qui envoie des électrons de 9 MeV sur une cible de tungstène, ce qui produit des rayons gamma qui se matérialisent en paires électron-positon. Les positons sont guidés et rassemblés pour former un faisceau de très basse énergie (50 eV), puis ralentis dans un premier piège, dit *Buffer Gas*, et injectés dans un



2. Schéma du dispositif de production d'antihydrogène de l'expérience AEGIS.

Les antiprotons sont piégés dans le premier aimant et viennent interagir, dans le deuxième aimant, avec les atomes de positronium créés par le faisceau de positons qui traverse le premier piège le long d'une trajectoire décentrée.



3. Pièges à positons de GBAR en cours d'installation au Cern. À droite : le piège *Buffer Gas* (avec les grosses bobines de cuivre), où les positons sont ralentis par des molécules d'azote à très faible pression. Au centre : le piège Malmberg-Penning (en bleu) pour le stockage intense dans un champ magnétique de 5 teslas. À gauche : la chambre d'interaction où est produit le positronium qui sert de cible aux antiprotons.

deuxième piège de type Penning^(f) pour le stockage de haute intensité (fig. 3). Ces opérations ont lieu entre deux déversements d'antiprotons. Comme pour AEGIS, le positronium est également excité par laser, car cela accroît la section efficace de production des antihydrogènes.

Une fois produit, l'ion antihydrogène $\bar{\text{H}}^+$ est guidé dans des pièges où il est ralenti (voir l'encadré, p. 17), avant d'être neutralisé par photodétachement de son positon excédentaire. L'atome d'antihydrogène $\bar{\text{H}}$ entre alors en chute libre dans une enceinte entourée de détecteurs. Il s'annihile sur les parois de l'enceinte, produisant quelques mésons π neutres ou chargés. Les trajectoires des particules chargées sont reconstruites grâce à des plans de détecteurs, permettant de localiser le point d'annihilation sur la paroi de l'enceinte (fig. 4). La durée de la chute libre est déterminée

par la mesure du temps de l'annihilation avec une précision meilleure qu'une microseconde. Pour une chute de 20 cm, cette durée pour la matière est de 200 ms.

Dans une première phase, la mesure de \bar{g} se fera à mieux que 1%. Des améliorations ultérieures sont envisagées, pour atteindre une précision relative meilleure que 0,1%. La géométrie de l'enceinte et la disposition des pièges et des détecteurs sont optimisées pour une mesure de chute libre correspondant à une valeur de \bar{g} égale ou très proche de g ; cependant, une valeur très différente, voire opposée, sera aisément mesurée, mais avec une précision un peu moins bonne.

L'installation de l'expérience GBAR a débuté en 2016 ; elle a pu tester en 2018 son système de décélération avec les premiers antiprotons délivrés par l'anneau ELENA, ainsi que la production de positronium.

Refroidissement de l'antimatière

GBAR : refroidissement des ions \bar{H}^+

Le grand intérêt des ions \bar{H}^+ est qu'il est possible de les piéger et de les refroidir à quelques μK , température à laquelle leur dispersion de vitesse Δv est assez faible pour que l'étude de la chute libre des atomes d'antihydrogène \bar{H} obtenus par photodétachement permette de déterminer \bar{g} .

Les lois de la mécanique quantique montrent que pour \bar{H} (de masse $m = 1,66 \cdot 10^{-27}$ kg), une aussi faible dispersion de vitesse ne peut être obtenue que pour l'état quantique fondamental d'un oscillateur harmonique de pulsation ω , pour lequel $\Delta v_z = (\hbar\omega/2m)^{1/2}$ dans une direction de l'espace. Le tableau ci-dessous donne la dispersion de vitesse Δv_z et la température correspondante T en fonction de la fréquence $\omega/2\pi$ de l'oscillateur harmonique, pour des valeurs de fréquence typiquement obtenues dans les pièges de Paul, dont la raideur $m\omega^2$ est ajustée en variant les tensions radiofréquence appliquées aux électrodes du piège.

$\omega/2\pi$ (kHz)	Δv_z (m/s)	T (μK)
1000	0,63	3×16
100	0,20	$3 \times 1,6$
10	0,06	$3 \times 0,16$

La température des ions \bar{H}^+ produits par les deux collisions d'échange de charge, $\bar{p} + \text{Ps} \rightarrow \bar{H} + e^-$ et $\text{H} + \text{Ps} \rightarrow \text{H}^+ + e^-$, est déterminée par la dispersion en énergie cinétique des antiprotons incidents. Le piège radiofréquence utilisé pour les capturer a une profondeur de quelques électronvolts, soit quelques 10 000 K.

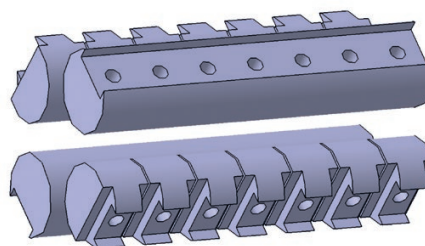
La première étape du refroidissement sympathique⁽⁹⁾ – dite Doppler – consiste à injecter l'ion \bar{H}^+ dans un gros nuage contenant un mélange d'ions HD^+ et d'ions Be^+ (fig. E1). L'interaction coulombienne entre \bar{H}^+ et les ions HD^+ , qui eux-mêmes interagissent avec les ions Be^+ refroidis par un laser à 313 nm, conduit à la thermalisation de l'ion \bar{H}^+ aux environs de 0,47 mK (limite Doppler du refroidissement de Be^+).

L'ion \bar{H}^+ est alors extrait du nuage de Be^+ et transféré dans un second piège (représenté en jaune sur la figure 4) plus raide et de géométrie plus ouverte, contenant un ion Be^+ unique. La seconde étape de refroidissement de la paire d'ions Be^+/\bar{H}^+ est appelée *Raman sideband cooling*. Elle permet d'atteindre l'état quantique vibrationnel fondamental de la paire d'ions dans le piège.

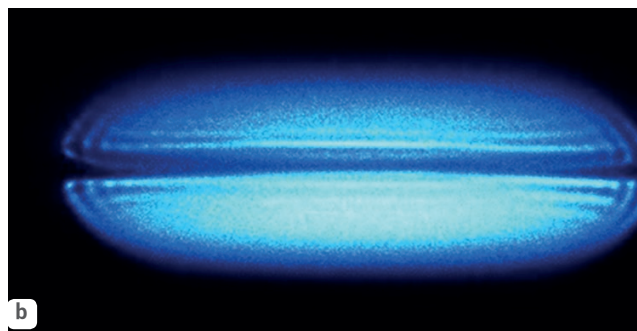
Comme la dispersion de vitesse de l'ion \bar{H}^+ dépend directement de la raideur du piège, diminuer adiabatiquement la raideur de 1 MHz à 30 kHz permettra d'atteindre une température de l'ordre du μK et une incertitude sur la vitesse de l'ion \bar{H}^+ de l'ordre de 10 cm/s.

AEgIS : refroidissement des antiprotons

Dans le cas de la collaboration AEgIS, la température de l'antihydrogène est déterminée par celle des antiprotons, et l'objectif est d'atteindre 100 mK. En piège de Penning, il est possible de refroidir des antiprotons jusqu'à 4 K par interaction avec des électrons refroidis radiativement et en équilibre thermodynamique avec une résistance à 4 K, ce qui correspond à une vitesse quadratique moyenne de 180 m/s environ. Pour atteindre des températures plus basses, une possibilité est d'utiliser le refroidissement sympathique⁽⁹⁾ des antiprotons par des ions négatifs refroidis par laser à quelques mK. Contrairement aux ions positifs, il n'existe que très peu d'anions ayant une structure de niveaux permettant le refroidissement laser : citons le lanthane La^- , l'osmium Os^- ou l'ion moléculaire C_2^- , pour lesquels des travaux expérimentaux sont en cours.



a



© Thomas Louvradoux et Johannes Heinrich.

E1. Refroidissement des ions \bar{H}^+ par échange de charge avec des ions ultrafroids dans un piège radiofréquence.

(a) Piège à ions pour la capture de \bar{H}^+ . Une tension radiofréquence (300-500 V à 10-20 MHz) est appliquée aux électrodes longues pour assurer le piégeage transverse des ions. Des tensions continues sont appliquées aux électrodes segmentées pour créer le potentiel de piégeage selon l'axe du piège. Le diamètre des électrodes est de 8 mm, la longueur des segments est 4,8 mm.

(b) Nuage mixte contenant quelque milliers d'ions Be^+ et une centaine d'ions H_2^+ observé au Laboratoire Kastler Brossel dans un piège similaire à celui présenté dans la figure E1a, qui pourra être utilisé pour capturer et refroidir l'ion \bar{H}^+ . Aux extrémités du nuage, on distingue des points brillants correspondant à des ions Be^+ localisés en une structure quasicristalline.

La construction et la mise en place des lasers et des pièges de refroidissement sont en cours.

Une question bientôt résolue ?

Arriver à mesurer le comportement gravitationnel de l'antimatière est un défi technologique sur lequel travaillent activement les trois collaborations citées, rivales mais dans une saine émulation.

Le hasard du calendrier fait que le Cern arrête ses faisceaux pour deux ans, en 2019 et 2020, pour le grand programme d'amélioration du LHC et de l'AD (le décélérateur d'antiprotons). Chaque groupe a pour objectif d'être prêt pour le retour des antiprotons en 2021.

Les résultats de ces mesures sont attendus avec un grand intérêt, d'une part pour la compréhension des lois fondamentales de la physique, et aussi en raison de leurs implications possibles en cosmologie. Le premier objectif est de déterminer si la gravitation agit dans le même sens pour l'antimatière que pour la matière. Puis il s'agira de vérifier à quel niveau d'égalité g et \bar{g} se trouvent (en valeur absolue). Même une faible différence impliquerait de revoir le principe d'équivalence, et donc de modifier la relativité générale. ■

(a) La **supersymétrie** est une théorie qui permet d'étendre le modèle standard des particules, en supposant une symétrie complète entre les fermions (*spin* demi-entier) et les bosons (*spin* entier). Dans ce cadre, chaque fermion est associé à un « superpartenaire » de *spin* entier, alors que chaque boson est associé à un superpartenaire de *spin* demi-entier. Aucun de ces superpartenaires n'a été découvert à ce jour.

(b) Le concept cosmologique d'**inflation** (expansion très brutale de l'Univers) offre une solution aux problèmes de l'homogénéité à très grande échelle et de platitude de l'Univers.

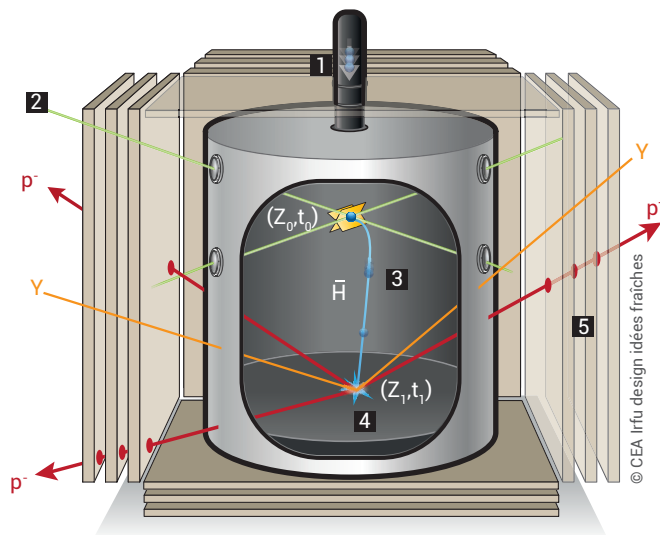
(c) La **fréquence de résonance cyclotron** caractérise la rotation d'une particule chargée qui se déplace dans un champ magnétique uniforme ; elle est proportionnelle au rapport q/m de la charge sur la masse de la particule et, de ce fait, est très utilisée pour comparer des particules (protons, antiprotons) entre elles.

(d) Le **refroidissement stochastique** est un système rétroactif destiné à comprimer un paquet de particules circulant dans un anneau. Un détecteur (*pick-up*) mesure la position du paquet de particules et un correcteur, le *kicker*, lui applique une impulsion électrique pour corriger l'écart mesuré. Le refroidissement est dit stochastique (c.-à-d. aléatoire), car il s'applique à toutes les particules du paquet et se répète à chaque tour dans l'anneau ; il le recentre autour de l'orbite choisie, aboutissant ainsi à un refroidissement de l'ensemble.

(e) Pour caractériser l'état des particules au-delà de quelques GeV, on utilise l'énergie totale (comprenant donc l'énergie de masse), très proche de l'énergie cinétique. Aux énergies de l'ordre de quelques MeV et en dessous, on utilise l'**énergie cinétique**, l'énergie totale étant dominée par celle de la masse. Aux très basses énergies, on utilise souvent l'équivalent en température ($1 \text{ eV} \Leftrightarrow 11605 \text{ K}$).

(f) Les **pièges de Penning** permettent de stocker des particules chargées, grâce à la combinaison d'un champ magnétique uniforme et, à l'origine, d'un champ électrique quadripolaire constant. Les pièges actuels utilisent des champs électriques formant des puits de potentiel pour le piégeage longitudinal, les particules étant piégées radialement par le champ magnétique.

(g) L'idée du **refroidissement sympathique** est (i) de confiner plusieurs espèces d'ions de même signe dans un piège de Penning ou un piège radiofréquence qui les oblige à rester ensemble ; (ii) d'utiliser le refroidissement par laser pour retirer de l'énergie cinétique à l'une des espèces d'ions ; (iii) d'utiliser l'interaction coulombienne entre les ions pour redistribuer l'énergie cinétique des ions rapides vers celle des ions lents afin d'obtenir des nuages d'ions mixtes et froids.



- 1 Arrivée des ions antihydrogène $\bar{\text{H}}$
- 2 Tir laser pour chasser le positon
- 3 Chute de l'atome d'antihydrogène $\bar{\text{H}}$
- 4 Annihilation
- 5 Détection et mesures

4. **Vue d'artiste de la chambre de chute libre de l'expérience GBAR.** L'enceinte est formée d'un cylindre d'environ 50 cm de côté. Elle est entourée par des plans de détecteurs. Les nombreux systèmes de service (câbles, pompes, miroirs, supports, cryogénie, etc.) ne sont pas représentés. Les ions antihydrogène viennent du premier piège de capture et sont guidés dans le piège ultime (en jaune) pour le refroidissement final à quelques microkelvins.

Références

- 1• J.G. Williamson *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **93** (2004) 261101.
- 2• <https://microscope.cnes.fr/fr/premiers-resultats-de-la-gravite-au-microscope>
- 3• L. Blanchet, « Dossier antimatière », *La Recherche*, n°522 (2017).
B. Famaey et L. Blanchet, « Les composantes obscures de l'Univers », *La Recherche hors série*, n°16 (décembre 2015-janvier 2016).
L. Blanchet, *Class. Quantum Grav.* **24** (2007) 3529-3540 et 3541-3570.
- 4• G. Chardin, *L'insoutenable gravité de l'Univers*, Le Pommier, Paris (2018).
- 5• A. Apostolakis *et al.*, *Phys. Lett. B* **452** (1999) 425-433.
- 6• G. Gabrielse *et al.*, *Phys. Rev. Lett.* **82** (1999) 3198.