

Prospectives concernant la physique de l'antimatière à (très) basse énergie

Rapport

13-10-2017

Introduction

Les progrès des 15 dernières années sur la décélération et le piégeage d'antiprotons d'abord, puis d'atomes neutres d'antihydrogène ont rendu possible l'étude précise de l'antimatière. Ces mesures de précision visent à comparer les propriétés de l'antimatière à celle de la matière en fournissant des tests très contraignant du théorème CPT ou pour la QED, par exemple. La motivation scientifique est grande : malgré l'observation de brisure de la symétrie CP (dont une mesure récente de LHCb [1]), la dominance de la matière dans un univers qui, selon le modèle du Big Bang, aurait dû produire symétriquement matière et antimatière, n'est toujours pas pleinement expliquée. Grâce au décélérateur d'antiprotons (AD) du CERN et son prolongement, ELENA, qui fournira en grande quantité des antiprotons encore plus lents (c'est-à-dire quelques 10^7 \bar{p} de 100 keV toutes les 110 s), l'étude du comportement de systèmes atomiques d'antimatière vis-à-vis de la gravitation est devenue envisageable.

Après quelques rappels sur GBAR, le projet porté par le DPhP, et une présentation succincte des autres expériences en cours à l'AD, nous évoquerons les évolutions prévues par ces expériences au cours des 10 prochaines années, ainsi que la future construction d'un nouveau pourvoyeur d'antiprotons lents et les idées d'expériences sur des systèmes purement leptoniques.

I- Projet actuel au DPhP : GBAR

Le département est actuellement impliqué dans la collaboration GBAR, menée par Patrice Pérez (DPhP). L'expérience GBAR vise à déterminer l'accélération de la pesanteur terrestre pour l'antimatière, notée \bar{g} . Une telle expérience constitue un test direct du principe d'équivalence faible pour l'antimatière. Pour ce faire, GBAR mesurera le temps de chute libre, sur une hauteur de 20 cm, d'un atome d'antihydrogène ralenti à des vitesses de l'ordre du m.s^{-1} . De telles vitesses peuvent être obtenues par refroidissement laser. Ces techniques sont déjà bien éprouvées, notamment sur des ions de ${}^9\text{Be}^+$. [2] C'est ainsi que le béryllium sera utilisé dans GBAR pour refroidir des ions $\bar{\text{H}}^+$; cette méthode est nommée « refroidissement sympathique ». La production de $\bar{\text{H}}^+$ (par collision d'antiprotons sur une cible de positronium) est donc un point crucial de GBAR, pour lequel le groupe GBAR de Saclay est le principal instigateur et acteur. [3] L'autre partie faisant appel aux compétences du département est la conception du détecteur permettant de reconstruire les vertex d'annihilation des atomes d'antihydrogène au bout de leur chute libre.

GBAR procède actuellement à son installation au CERN. À ce jour, la source de positrons lents, basée sur un linac d'électrons, est en cours de mise en service. Le déménagement des pièges à positrons du CEA vers le CERN a débuté ; les pièges devraient être opérationnels pour la fin 2017. GBAR bénéficiera des antiprotons d'ELENA, le nouveau décélérateur de l'AD. La ligne d'extraction des antiprotons entre ELENA et le décélérateur de GBAR est en place, les tests devant également commencer sous peu. En parallèle de l'installation, les prototypes des détecteurs sont en phase d'essai (avec cosmiques, puis pions chargés issus de l'annihilation d'antiprotons) à l'AD. La chambre de chute libre est en cours de conception, tandis que les tests de refroidissement sympathique (Be^+/H_2^+ et Ca^+/Be^+) se poursuivent au laboratoire Kastler-Brossel à Paris et à l'université de Mayence.

Le programme à court terme, c'est-à-dire durant les trois années à venir, va de la formation d'une cible dense de positronium (et les premiers tests d'excitation laser de ce dernier) à la détection du premier $\bar{\text{H}}^+$, en passant par une première mesure de section efficace de production de $\bar{\text{H}}$. La longue période d'arrêt de 2019-2020 sera l'occasion d'installer la chambre de chute libre, ses lasers et les détecteurs. Si les conditions le permettent, le dispositif expérimental pourra être testé jusqu'à l'étape de refroidissement avec des protons. L'objectif étant d'être prêt à observer la première chute libre d'antihydrogène froid au redémarrage en 2021. Les perspectives pour la suite sont détaillées dans la partie III.

II- Autres expériences en cours au CERN

AEGIS :

AEGIS est le concurrent direct de GBAR, l'objectif premier étant le même : faire une mesure au pourcent de \bar{g} . Pour y parvenir, AEGIS utilisera un défectomètre de moiré, couplé avec un détecteur à émulsion. Cet ensemble a été testé avec des antiprotons, démontrant une précision micrométrique. [4] Pour réaliser l'expérience avec des atomes d'antihydrogène, AEGIS doit d'abord former un faisceau collimé à partir de ses antiatomes produits dans un piège. La méthode retenue est une accélération par effet Stark d'antihydrogène formé dans des états de Rydberg. [5] Ces derniers sont obtenus lors de collisions entre les antiprotons préalablement piégés et un faisceau de positroniums excités dans un état de Rydberg. Actuellement, AEGIS se concentre sur la réalisation de ce faisceau de positronium excité [6] et recherche une solution (de type refroidissement sympathique) pour refroidir plus avant leurs antiprotons. Une mesure de \bar{g} en 2018 semble exclue.

ALPHA :

L'expérience ALPHA est devenue maître dans le piégeage [7] et l'étude d'atomes d'antihydrogène, en particulier la spectroscopie de ces antiatomes. ALPHA utilise un octupole magnétique pour piéger les \bar{H} formé lors du mélange d'un nuage d'antiprotons et d'un plasma de positrons dans un piège de Penning. Ces antiatomes sont ensuite amenés à des températures sous 500 mK par refroidissement évaporatif. Une cavité micro-onde ou laser complète l'appareillage pour les expériences de spectroscopie. ALPHA a ainsi à son actif la mesure de transitions hyperfines [8] et celle de la transition 1S-2S [9]. La collaboration a également publié une mesure de la charge d'un atome d'antihydrogène [10], ainsi qu'un encadrement large de \bar{g} [11]. L'expérience se réoriente d'ailleurs vers une mesure plus précise de \bar{g} , comme il sera évoqué dans la partie suivante.

ASACUSA :

ASACUSA est une autre expérience dédiée à la spectroscopie de l'antimatière, travaillant à la fois sur l'antihydrogène et sur un hybride plus exotique : l'hélium antiprotonique. Le montage expérimental d'ASACUSA comprend un RFQD pour décélérer les antiprotons de l'AD, qui sont ensuite piégés et refroidis avec d'être transférés vers un piège magnétique (*cusp*) à très fort gradient où sont produits les atomes d'antihydrogène ; un faisceau polarisé d'antiatomes est alors extrait pour la spectroscopie en vol. [12] Le but est de mesurer le *splitting* hyperfin de l'état fondamental (GS-HFS) de \bar{H} ; la collaboration conduit d'ailleurs en parallèle l'expérience équivalente sur l'hydrogène et a obtenu la mesure la plus précise du GS-HFS à ce jour. [13] Grâce à la spectroscopie de l'hélium antiprotonique, ASACUSA a publié une comparaison de la masse de l'antiproton à celle de l'électron à une précision de 8.10^{-10} . [14]

ATRAP :

Successeur de TRAP, ATRAP fait partie des pionniers des mesures de précision sur l'antimatière, notamment en étudiant le mouvement cyclotron des antiprotons piégés, et de la formation d'atomes d'antihydrogène à partir de ces derniers. [15] L'objectif d'ATRAP est également de faire la spectroscopie de \bar{H} . La collaboration dernièrement a fait face à un important problème technique, retardant ce projet. Parmi les derniers résultats d'ATRAP, une mesure du moment magnétique de l'antiproton comparé à celui du proton donnant une égalité à une précision de 4,4 ppm. [16]

BASE :

L'expérience BASE se consacre à la comparaison entre protons et antiprotons dans un double piège de Penning. Une des particularités de BASE est de nécessiter très peu d'antiprotons et de pouvoir les interroger longtemps. L'expérience est quasiment indépendante des cycles de l'AD et détient le record de temps de piégeage d'antiprotons : plus d'un an ! La collaboration a récemment publié la mesure la plus précise à l'heure actuel du rapport charge sur masse de l'antiproton [17] et une amélioration significative de la mesure d'ATRAP du moment magnétique de l'antiproton. [18]

III- Expériences à venir ou *upgrades*

Concurrents de GBAR :

Forte de ses succès, la collaboration ALPHA s'est elle-aussi décidée à tenter la mesure de \bar{g} au pourcent avec son projet ALPHA-g. Cet *upgrade* nécessite l'installation d'un piège vertical (dans le prolongement de leur ligne actuelle). Le principe, après piégeage et refroidissement évaporatif des atomes d'antihydrogène, est de baisser le champ magnétique qui les confine verticalement et d'observer l'annihilation des antiatomes qui, grâce à la vitesse supplémentaire acquise par la chute libre, franchiraient alors la barrière de potentiel. En février dernier, la collaboration ALPHA estimait qu'il lui faudrait un an pour obtenir le signe de \bar{g} et pourrait atteindre une précision de 1 % d'ici 4 ou 5 ans. [19] Pour l'heure, le projet est financé, et le piège en cours de développement à TRIUMF au Canada, mais son installation n'a pas encore commencé dans la zone expérimentale de l'AD. Cette réorientation d'ALPHA se fera très probablement au détriment de leur programme de spectroscopie, les deux expériences pouvant difficilement se faire en parallèle. Pour aller plus loin que le pourcent (la possibilité d'atteindre 1 ppm en précision est même avancée), une expérience d'interférométrie dans le piège vertical a été proposée. Cela requiert auparavant de réaliser le refroidissement laser d'atomes d'antihydrogène pour ensuite faire une fontaine atomique. [20]

Récemment, le *spokesman* d'AEgIS a affirmé qu'il y a également des idées pour améliorer la précision sur \bar{g} dans AEgIS dans le futur. Il s'est toutefois montré éluif à ce sujet. [21]

GBAR :

En 2021, GBAR peut espérer publier rapidement une première détermination du signe de \bar{g} , qui ne nécessitera qu'un nombre restreint d'évènements. Pour atteindre une précision de 1 %, les simulations faites par les collaborateurs GBAR indiquent que 1500 à 2000 événements seront requis. Une telle statistique peut être obtenue en quelques mois de prise de données une fois le piège à antiprotons opérationnel.

En parallèle de la mesure de \bar{g} , la collaboration peut également tirer avantage de son faisceau d'antihydrogène neutre pour faire de la spectroscopie en vol. Une première proposition de mesure du décalage de Lamb a été faite ; intéressante en soi, cette mesure permettrait également d'en déduire une valeur du rayon de charge de l'antiproton à 10 % pour commencer. [22]

Ce programme scientifique amènera l'expérience GBAR jusqu'en 2022-2023. Pour gagner en précision sur la mesure de \bar{g} , un *upgrade* de l'expérience est déjà prévu. Il exploitera la très faible vitesse des \bar{H} qui, à l'approche d'une surface très lisse, rencontre une barrière de potentiel (Casimir-Polder) et peuvent être réfléchis. Piégés entre le potentiel de Casimir-Polder et le potentiel gravitationnel, les antiatomes se retrouveront dans des états quantiques gravitationnels, correspondant à des hauteurs quantifiées. Ceci a déjà été observé dans le cas de neutrons ultrafroids. [23] La sélection de l'état fondamental pourra permettre dans un premier temps de réduire la vitesse verticale des \bar{H} , et donc d'améliorer la précisions sur \bar{g} (100 événements suffiraient pour descendre à 10^{-3}). Ensuite, la spectroscopie de ces états permettrait d'atteindre une précision de 10^{-4} . Pour aller plus loin, il est également envisageable de préparer des superpositions d'états et d'observer une figure d'interférence (répartition spatiale des vertex d'annihilations). [24] La préparation des atomes d'antihydrogène dans des états quantiques gravitationnels donnés sacrifie beaucoup de statistique, mais le gain en précision sur la mesure surpasse cet inconvénient : nul doute que ces expériences occuperont GBAR pour les cinq années suivantes...

FLAIR :

Pour le moment, le CERN est le seul endroit où des antiprotons de basse énergie sont disponibles. Ceci est amené à changer avec la construction de FAIR à Darmstadt et son extension FLAIR. FLAIR prévoit plusieurs lignes d'antiprotons à basses énergies, dont une ligne à 300 keV et une à 20 keV, avec un flux d'antiprotons attendu légèrement supérieur à celui d'ELENA (supposément à 300 keV). Parmi les programmes scientifiques proposés, une expérience de mesure de \bar{g} est évoquée, faisant là aussi appel à une fontaine antiatomique (donc refroidissement laser de \bar{H}), avec une précision espérée de 10^{-9} ! Hormis une mention d'une fin de construction pour 2025, le planning de FLAIR est difficilement trouvable.

Systèmes purement leptoniques :

Les systèmes purement leptoniques offrent la possibilité de tests très contraignants de QED, libres de corrections hadroniques. Des programmes de spectroscopie de précision du positronium (Ps) et du muonium (μ^+/e^-) existent déjà. Il en va de même pour tester le principe d'équivalence faible et obtenir une mesure directe de \bar{g} . La possibilité de faire une expérience d'interférence sur le Ps avait déjà été avancée par A. Mills *et al.* [25]. Récemment, cette idée a été reprise et semble réalisable expérimentalement. Un schéma expérimental s'inspirant du sélecteur de vitesses de l'*upgrade* de GBAR a d'ailleurs été proposé. [26] L'idée d'une expérience similaire utilisant du muonium a pris corps avec la réalisation de la seule ligne de muons lents au monde, au PSI. Avec l'aide d'un interféromètre à réseau, une première mesure à 10 % paraît faisable en quelques mois de données. [27] Etant donné le rapport de masse entre l'électron et l'antimuon, cette mesure constituerait de plus le premier test du principe d'équivalence sur un fermion de la deuxième génération. A noter enfin que les atomes de muonium peuvent être produits de la même manière que le positronium l'est dans GBAR.

Conclusion :

L'avenir des expériences à basse énergie avec l'antimatière passe par des méthodes de spectroscopie et d'interférométrie. Si ces techniques sont peu communes pour le DPhP, les résultats fondamentaux qu'elles permettent d'obtenir sur l'antimatière, et les méthodes de détection nécessaires font que ces expériences ont toute leur place au département.

GBAR se tient déjà prêt à prendre ce tournant, profitant de ses atomes d'antihydrogène qui, certes peu nombreux, seront les plus froids disponibles au CERN. Ainsi, même si la concurrence est rude sur la mesure de \bar{g} à 1 %, GBAR offre la meilleure opportunité pour améliorer cette précision, raisonnablement jusqu'à 100 ppm, et des possibles développements sur la spectroscopie des niveaux atomiques. Qui plus est, l'expérience acquise par les membres de GBAR sur le positronium permet d'envisager une collaboration sur les expériences de gravitation avec du positronium et du muonium.

Références

- [1] The LHCb collaboration, *Measurement of matter–antimatter differences in beauty baryon decays*, Nature Physics **13**, 391–396 (2017)
- [2] C. Monroe *et al.*, *Resolved-Sideband Raman Cooling of a Bound Atom to the 3D Zero-Point Energy*, Phys. Rev. Lett **75**, 4011-4014 (1995)
- [3] P. Pérez and A. Rosowsky, *A new path toward gravity experiments with antihydrogen*, Nucl. Instrum. Methods A **545**, 20-30 (2005)
- [4] C. Pistillo *et al.*, *Emulsion detectors for the antihydrogen detection in AEGIS*, Hyperfine Interact **233**, 29–34 (2015)
- [5] E. Vliegen and F. Merkt, *Stark deceleration of hydrogen atoms*, J. Phys. B: At. Mol. Opt. Phys. **39**, L241-L247 (2006)
- [6] S. Aghion *et al.*, *Laser excitation of the n=3 level of positronium for antihydrogen production*, Phys. Rev. A **94**, 012507 (2016)
- [7] The ALPHA Collaboration, *Confinement of antihydrogen for 1000 seconds*, Nature Physics **7**, 558–564 (2011)
- [8] M. Ahmadi *et al.*, *Observation of the hyperfine spectrum of antihydrogen*, Nature **548**, 66–69 (2017)
- [9] M. Ahmadi *et al.*, *Observation of the 1S–2S transition in trapped antihydrogen*, Nature **541**, 506–510 (2017)

- [10] C. Amole *et al.*, *An experimental limit on the charge of antihydrogen*, Nature Communications **5**, 3955 (2014)
- [11] The ALPHA Collaboration & A.E. Charman, *Description and first application of a new technique to measure the gravitational mass of antihydrogen*, Nature Communications **4**, 1785 (2013)
- [12] N. Kuroda *et al.*, *A source of antihydrogen for in-flight hyperfine spectroscopy*, Nature Communications **5**, 3089 (2014)
- [13] M. Diermaier *et al.*, *In-beam measurement of the hydrogen hyperfine splitting and prospects for antihydrogen spectroscopy*, Nature Communications **8**, 15749 (2017)
- [14] M. Hori *et al.*, *Buffer-gas cooling of antiprotonic helium to 1.5 to 1.7 K, and antiproton-to-electron mass ratio*, Science **354**, Issue 6312, 610-614 (2016)
- [15] G. Gabrielse *et al.*, *Driven Production of Cold Antihydrogen and the First Measured Distribution of Antihydrogen States*, Phys. Rev. Lett. **89**, 233401 (2002)
- [16] J. DiSciaccia *et al.*, *One-Particle Measurement of the Antiproton Magnetic Moment*, Phys. Rev. Lett. **110**, 130801 (2013)
- [17] S. Ulmer *et al.*, *High-precision comparison of the antiproton-to-proton charge-to-mass ratio*, Nature **524**, 196–199 (2015)
- [18] H. Nagahama *et al.*, *Sixfold improved single particle measurement of the magnetic moment of the antiproton*, Nature Communications **8**, 14084 (2017)
- [19] W. Bertsche, séminaire à l'ETHZ (14-02-2017)
- [20] P. Hamilton *et al.*, *Antimatter Interferometry for Gravity Measurements*, Phys. Rev. Lett. **112**, 121102 (2014)
- [21] M. Doser, présentation à la conférence “Antimatter Physics in the ELENA Era” (05-09-2017)
- [22] P. Crivelli *et al.*, *Antiproton charge radius*, Phys. Rev. D **94**, 052008 (2016)
- [23] V.V. Nesvizhevsky *et al.*, *Quantum states of neutrons in the Earth's gravitational field*, Nature **415**, 297-299 (2002)
- [24] G. Dufour *et al.*, *Prospects for Studies of the Free Fall and Gravitational Quantum States of Antimatter*, Advances in High Energy Physics **2015**, 379642 (2014)
- [25] A. P. Mills Jr. and M. Leventhal, *Can we measure the gravitational free fall of cold Rydberg state positronium?*, Nucl. Instrum. Methods B, **192**, 102–106 (2002).
- [26] P. Crivelli *et al.*, *Can We Observe the Gravitational Quantum States of Positronium?*, Advances in High Energy Physics **2015**, 173572 (2014)
- [27] D.M. Kaplan *et al.*, *Measuring antimatter gravity with muonium*, EPJ Web of conferences **95**, 05008 (2015)