

## Au menu, un chaud-froid de matière mitonné par l'Irfu

En entrée, Alice (pages 2-3) étudie l'existence et les propriétés du plasma de quarks et de gluons dont la préparation, nécessitant des températures de l'ordre de mille milliards de kelvins comparables à celles de l'Univers juste après le Big Bang, requiert des collisions d'ions très lourds comme les noyaux de plomb accélérés par le LHC.

En plat de résistance, attention au choc thermique : les sources intenses de positons de GBAR (pages 4-5) permettront la création de quelques antiatomes d'hydrogène refroidis à quelques millièmes de kelvin afin qu'ils puissent tomber sous le regard scrutateur des conquérants de l'antigravité.

En guise de trou normand, nous accompagnerons Herschel au point de Lagrange L2 (pages 6-7), loin de notre bouillonnante étoile, pour détecter les rayonnements infrarouges qui correspondent à des températures clémentes mais nécessitent des détecteurs refroidis à 300 millièmes de kelvin.

Et en dessert, crème glacée de l'Antarctique : les hivernants de la base Concordia nous racontent leur expérience (page 8).

Bon appétit !

*Nathalie Besson*



Encart :  
À propos de Marc

# Un nouveau pour le plasma de q



L'expérience Alice a accumulé des données de collisions d'ions lourds pendant les trois premières années d'opération du Large Hadron Collider (LHC) du Cern. Elle a permis de faire un premier pas dans la compréhension du plasma de quarks et de gluons (QGP) aux énergies les plus élevées jamais atteintes. Les prises de données vont se poursuivre jusqu'au prochain arrêt de la machine en 2018, date après laquelle une nouvelle ère commencera avec une intensité accrue d'un ordre de grandeur pour les faisceaux de plomb du LHC. Cela permettra d'atteindre une précision sans précédent pour les signaux de physique déjà étudiés et d'accéder à d'autres signaux encore plus rares.

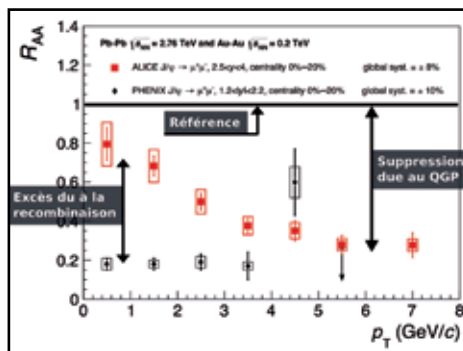
## Les quarkonia, sondes du plasma

Les quarks et les gluons sont les constituants des protons, neutrons et autres hadrons. Dans des conditions normales, ils ne peuvent pas être observés de façon isolée : lorsqu'un hadron est cassé, les quarks et les gluons le constituant se recombinent pour en former d'autres au lieu de se libérer. À des températures très élevées au contraire, on s'attend à la formation d'un plasma de quarks et de gluons dans lequel ces derniers seraient libres.

Environ une microseconde après le Big Bang la température de l'Univers était 100000 fois supérieure à celle du centre du Soleil. Les conditions nécessaires à la présence du QGP y étaient réunies. L'Univers s'est ensuite refroidi et le plasma a laissé place aux hadrons observés aujourd'hui. Depuis trente ans, des expériences cherchent à reproduire ces conditions en laboratoire afin de vérifier l'existence du QGP et d'en étudier les propriétés. C'est notamment le cas de l'expérience Alice, sur l'accélérateur LHC au Cern. Des noyaux d'atomes lourds, de plomb (Pb) par exemple, y sont accélérés à une vitesse proche de celle de la lumière, de façon à former un QGP lorsqu'ils sont mis en collision. Celui-ci est si petit (environ la taille d'un noyau atomique,  $10^{-15}$  m) et se refroidit si vite (environ  $10^{-23}$  s) qu'il est impossible de l'observer directement. On observe plutôt les particules produites par recombinaison des quarks et des gluons au cours de son refroidissement ainsi que celles produites avant la formation du plasma et qui l'auront traversé.

Les quarkonia sont un exemple de telles particules. Rares et lourdes, elles sont constituées de deux quarks charme (c) pour le  $J/\psi$ , ou beauté (b) pour le  $\Upsilon$ . Leurs nombre, vitesse et orientation contiennent des informations sur le QGP, par exemple sa température. L'Irfu/SPHN s'intéresse plus particulièrement à leur production, mesurée dans le spectromètre à muons d'Alice.

Dans le QGP, les quarkonia seraient supprimés par écran-

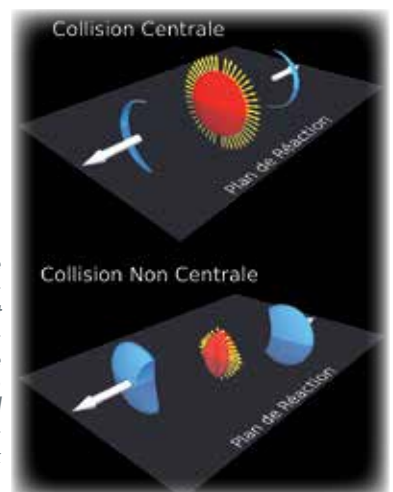


$R_{AA}$  du  $J/\psi$  en fonction de l'impulsion transverse (liée à la vitesse) de la particule. Alice observe une suppression du  $J/\psi$  moindre que celle observée par Phénix dans des collisions d'énergie 14 fois plus faible.

tage : les nombreux quarks et gluons du plasma délieraient la paire de quarks lourds, ces quarks se lient ensuite avec des quarks légers. Une telle suppression est quantifiée par le rapport  $R_{AA}$ , entre le nombre de quarkonia mesuré en collision Pb-Pb et celui mesuré en collision proton-proton (p-p), sans formation de QGP. Des collisions p-Pb, fournissent une mesure de contrôle afin de mettre en évidence d'éventuels effets nucléaires supplémentaires, mais toujours en l'absence de QGP.

Alice a observé une suppression du  $J/\psi$  ( $R_{AA} < 1$ ) plus importante dans les collisions Pb-Pb centrales que dans les collisions p-Pb, ce qui montre la formation d'un QGP, mais moins grande que celle observée par d'autres expériences pour des collisions d'énergie moindre (figure ci-dessus). Cela indiquerait l'existence d'une production additionnelle de  $J/\psi$  attribuable au QGP et venant contrebalancer la suppression par écrantage. Une possibilité est la production de  $J/\psi$  non plus au début de la collision mais dans le QGP, par recombinaison aléatoire des quarks c présents dans celui-ci. Le nombre de tels  $J/\psi$  augmente avec le nombre de quarks c présents dans le

Vue schématique d'une collision centrale (en haut) et d'une collision non-centrale (en bas). Le volume du QGP, en rouge, correspond à la zone de recouvrement des deux noyaux.



# détecteur quarks et de gluons

Par Hugo Pereira, Fabienne Orsini, Javier Castillo, Alberto Baldisseri

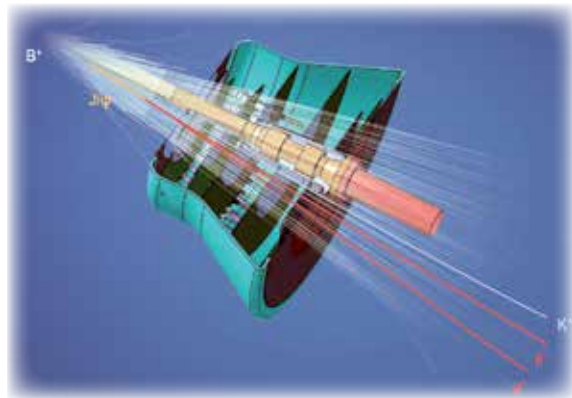
plasma et donc avec l'énergie de la collision, ce qui justifierait qu'ils n'aient pas été observés auparavant.

Pour valider l'existence de ce mécanisme de recombinaison, Alice a réalisé en 2012 la première mesure du flot elliptique du  $J/\psi$  au LHC. Le flot elliptique correspond à une asymétrie angulaire de l'orientation des  $J/\psi$ , mesurée dans le plan perpendiculaire à l'axe des faisceaux. Pour des collisions non centrales, la zone de recouvrement entre les deux noyaux possède une forme d'amande et n'est pas symétrique par rotation autour de l'axe des faisceaux (figure du bas de page 2). Contrairement aux particules produites au début de la collision, celles produites dans le QGP gardent trace de cette asymétrie. Bien que les incertitudes expérimentales soient grandes, une asymétrie non nulle est observée pour certains intervalles de vitesse, ce qui confirmerait l'existence de  $J/\psi$  formés par recombinaison.

Javier Castillo et Hugo Pereira (SPhN)

## Alice en lice pour la haute intensité

L'augmentation de l'intensité des faisceaux du LHC prévue après l'arrêt de 2018 nécessitera une mise à niveau de l'électronique de lecture du détecteur Alice pour faire face à un taux de déclenchement plus important. C'est le cas en particulier du spectromètre à muons dans lequel l'Irfu est très impliqué et pour lequel toute l'électronique frontale ainsi que le système de lecture et de transfert de

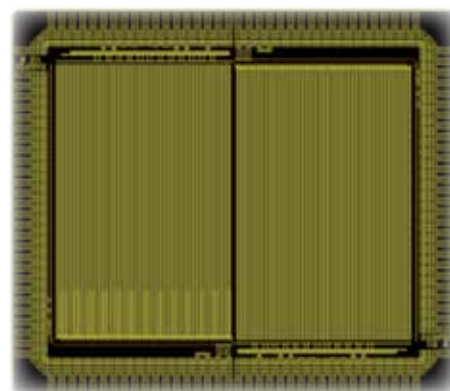


Vue d'ensemble d'une moitié du détecteur MFT autour du tube du faisceau.

données devront être remplacés. Par ailleurs, afin d'augmenter le potentiel de ce spectromètre, un nouveau détecteur, le Muon Forward Tracker (MFT) a été proposé par la collaboration Alice et accepté par le Cern. Ce détecteur est constitué de 6 plans de trajectographie recouverts de capteurs pixels monolithiques CMOS placés très près du point d'interaction des faisceaux du LHC afin de mesurer avec précision le point d'origine et la direction des particules produites par milliers dans les collisions Pb-Pb (figure ci-dessus). L'Irfu, fort de son expertise dans la conception de ce type de pixels, est responsable de la conception du capteur (voir encadré). La reconstruction des trajectoires des particules par le MFT, associée à celle venant du spectromètre, gagnera considéra-

ment en précision et permettra l'étude de nouveaux canaux de physique, comme par exemple la mesure des mésons lourds D et B, composés d'un quark c ou b associé à un quark léger (u ou d). Cette mesure, inaccessible aux détecteurs actuels, fournira des renseignements précieux sur les propriétés du QGP et contribuera à contraindre les modèles de production et de recombinaison des quarks c et b. Le MFT rendra aussi possible l'étude précise du premier état excité  $\Psi(2s)$  du charmonium, particule formée d'une paire quark-antiquark charmés, dont le  $J/\psi$  est l'état fondamental. L'étude de cette particule très rare bénéficiera grandement de l'augmentation de l'intensité prévue pour les faisceaux de plomb après 2018. Les comportements du  $J/\psi$  et du  $\Psi(2s)$  étant différents dans le QGP, leur étude simultanée en fonction de la violence de la collision permettra de mieux comprendre les mécanismes de suppression et régénération du charmonium récemment observés par Alice pour le  $J/\psi$ . Le MFT permettra enfin de détecter, parmi les  $J/\psi$  produits dans la collision, ceux provenant de la désintégration de mésons B et dont les propriétés sont différentes de celles des  $J/\psi$  produits de façon directe. La détection de tels  $J/\psi$  constitue une façon alternative d'étudier la production des mésons B et complète l'étude réalisée dans les autres canaux. Le MFT, associé au spectromètre à muons, dotera Alice d'un appareillage performant qui permettra grâce à l'étude des mésons formés des quarks c ou b d'élucider certains des derniers mystères du QGP produit au LHC à l'horizon 2020.

Alberto Baldisseri (SPhN)



Capteur prototype RSBPIX2 de l'Irfu avec discriminateur dans chaque pixel.

## Capteur CMOS du MFT

Utiliser les capteurs CMOS monolithiques, qui peuvent répondre au cahier des charges exigeant du MFT en termes de vitesse de lecture, de granularité et de tenue aux radiations, est aujourd'hui devenu réalisable. En effet, les efforts de R&D conjoints de l'Irfu/Sedi et de l'IPHC ont permis de faire évoluer les premiers capteurs purement analogiques (imageurs) vers des capteurs tout numériques pour la détection de particules chargées notamment par la réalisation d'un grand nombre de prototypes sur des technologies submicroniques nouvelles. Suite à une phase de prototypage et l'obtention de récents résultats prometteurs sur le prototype RSBPIX2, le Sedi prépare à présent la soumission d'un capteur CMOS monolithique de grande taille (73 728 pixels), appelé Pixam, pour Alice-MFT.

Fabienne Orsini (Sedi)

# GBAR : l'antimatière

**L'expérience GBAR veut produire au Cern des atomes et des ions d'antihydrogène dans le but d'observer l'effet de la gravitation terrestre sur l'antihydrogène. Depuis plusieurs années, l'équipe de Saclay travaille à la production intense de positronium, passage obligé de cette expérience. Pauline Comini fait sa thèse sur l'amélioration de la production de l'antihydrogène grâce à l'excitation de ce positronium.**



« Alors Sezal désarrima son esquif d'antimatière et celui-ci chut à travers l'atmosphère, direction l'espace. »

Paula C. Homin, *La Colonisation d'Ys'tenn*.

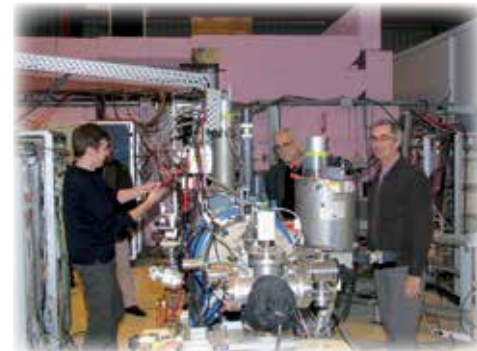
## L'antimatière antitombe-t-elle ?

L'antigravité ? Rien de plus simple lorsqu'on est auteur de science-fiction. Et quoi de mieux que l'antimatière pour accomplir cette prouesse ? Si l'on en revient à la dure réalité du laboratoire, les choses se corsent quelque peu. Car nul ne connaît le comportement de l'antimatière dans le champ de gravitation de la Terre, et il est fort probable qu'il ne diffère en rien de celui de la matière ordinaire. C'est pour trancher la question que s'est formée la collaboration GBAR (*Gravitational Behaviour of Antihydrogen at Rest*). L'idée de l'expérience GBAR est simple et s'inspire d'un de nos tracas quotidiens : la chute libre des masses. Tenez, la tasse à café (pleine, évidemment, mais ceci est un autre problème) qui vient de vous échapper des mains. Comme tout brave objet massif fait de matière, on peut prédire son sort : elle se sentira irrémédiablement attirée par la très large masse gravitationnelle de la Terre et finira par éclater joyeusement à vos pieds. À quelque chose, malheur est bon : le mouvement de votre tasse pendant sa chute permet d'étudier la gravitation à l'échelle terrestre et d'en déduire l'accélération de la pesanteur. Il suffit de reproduire l'expérience avec de l'antimatière. Qu'on me passe une anti-tasse !

Voilà que les choses se gâtent : l'antimatière est rare. Il faudra se contenter de fabriquer quelques antiatomes d'hydrogène. Pour cela, le Cern fournit les antiprotons ; à GBAR de leur greffer chacun un antiélectron (positon). La façon la plus efficace est de les faire passer dans un nuage de positronium, un atome très particulier puisqu'il est temporairement constitué d'un positon dansant avec un électron. Le positon se sépare facilement de son partenaire si un séduisant antiproton vient à le frôler. À Saclay, le rôle de l'équipe GBAR est de parvenir à produire un nuage très dense de positronium. Pour cela, une intense source de positons a été mise au point (cf. encadré Posithôt). Utilisant un petit accélérateur d'électrons, elle alimente de ses  $3 \cdot 10^6$  positons par seconde un piège d'accumulation qui confine ceux-ci dans un champ magnétique de 5 teslas. Les positons sont ensuite éjectés et implantés dans le matériau qui les convertit en positronium. Pour l'expérience au Cern, il faudra atteindre  $10^{10}$  atomes de positronium.

Malheureusement, les antiatomes ainsi produits sont encore bien trop véloces pour qu'on puisse espérer les voir tomber. Pour les refroidir à quelques millièmes de degré

au-dessus du zéro absolu (ce qui correspond à des vitesses de l'ordre du mètre par seconde), il est nécessaire d'utiliser des ions, et non des atomes neutres. À la sortie du nuage de positronium, on va donc sélectionner les quelques chanceux antiprotons qui auront charmé non pas un mais deux positons. Le congélateur choisi spécialement pour eux est un cristal d'ions Béryllium refroidis par lasers. Après qu'ils y ont perdu quasiment toute leur énergie, il faut libérer l'antihydrogène du piège : pour cela, d'un petit tir de laser on ôte aux ions leur positon excédentaire. À nouveau neutres, les antiatomes ne sont plus soumis qu'à la gravité, prêts pour la chute libre... et il adviendra ce que l'expérience dira ! Rendez-vous en 2017.



Une partie de l'équipe GBAR autour du piège de Penning (en bleu). Au premier plan, la chambre dans laquelle est créé le positronium.

## Comment faire tomber un trou dans le vide ?

Cet apparent « non-sense » traduit la manière la plus profonde de qualifier l'antimatière : Dirac lui-même a proposé de considérer les énergies négatives des solutions de son équation comme des électrons du vide qui seraient à des énergies en-dessous du niveau fondamental, conventionnellement d'énergie nulle. De sorte qu'en sortant un de ces électrons (en lui donnant de l'énergie) il subsiste un « trou » qui apparaît comme une charge positive, et qui est aussi doté d'une mobilité et d'une énergie : c'est le positon, ou antiélectron. En physique moderne les particules et leurs antiparticules sont symétriques l'une de l'autre par la conjugaison de charge : des jumelles de même masse, même temps de vie, même spin mais dont toutes les charges sont opposées (électrique, de couleur, faible...) Chaque particule a une antiparticule qui peut être... elle-même ! Comme GBAR veut observer la chute libre d'atomes d'antihydrogène dans le champ gravitationnel terrestre, on est bien dans le cas d'une chute d'un « trou dans le vide ».

Yves Sacquin (SPP)



## Lumière sur le positronium

Pour créer ses atomes et ions d'antihydrogène, l'expérience GBAR aura recours au positronium, l'état lié électron-antiélectron. Cette façon de procéder est beaucoup plus efficace que de mélanger simplement antiprotons et positons. L'astuce supplémentaire consiste à exciter le positronium. En effet, grâce au calcul théorique des sections efficaces des deux réactions conduisant à la formation des ions positifs d'antihydrogène, il a été déterminé que les premiers niveaux excités du positronium, comparés à son niveau fondamental, peuvent décupler la production d'antihydrogène ainsi que la production des ions. Les meilleurs candidats sont les niveaux nommés 2p et 3d. C'est ce dernier qui a été choisi.

Le positronium ressemble à un atome d'hydrogène : il lui emprunte sa structure atomique tout en ayant les énergies de ses niveaux divisées par deux et les temps de vie de ses états excités multipliés par deux. Autre particularité : contrairement à l'incroyable hydrogène, le positronium a la fâcheuse habitude de s'annihiler. Quelques centaines de nanosecondes après avoir été créé, il est déjà totalement détruit.

Dans l'hydrogène, la transition entre le niveau fondamental (1s) et le niveau 3s (même énergie environ que le 3d) a été largement utilisée en métrologie (mesure de la constante de Rydberg, déplacement de Lamb du fondamental ou encore rayon du proton dans l'hydrogène). Cette transition est obtenue par l'absorption de deux photons ultraviolets à 205 nm. Dans le positronium, puisque les énergies des niveaux sont deux fois moindres, les longueurs d'ondes nécessaires sont donc deux fois plus grandes, soit dans notre cas 410 nm. Un des moyens d'arriver à 205 nm est de fabriquer un laser ultrastable à 820 nm (longueur d'onde obtenue grâce à un cristal de saphir dopé au titane) et d'en doubler la fréquence deux fois ; le 410 nm est donc réalisé avec le même type de laser mais en s'arrêtant au premier étage de doublage. Afin d'exciter simultanément le plus large nombre d'atomes de positronium avant que ceux-ci ne s'annihilent, le laser se doit de fournir des impulsions intenses, de l'ordre de 10 mJ, et courtes, en l'occurrence de moins

de 20 ns, sans que sa finesse spectrale en soit pour autant trop dégradée.

Ce laser d'excitation du positronium a été construit et est actuellement testé au laboratoire Kastler-Brossel, sur le site de Jussieu, avant d'être déplacé à Saclay dans les mois qui viennent pour débiter l'étude sur le positronium.

Pauline Comini (SPP)



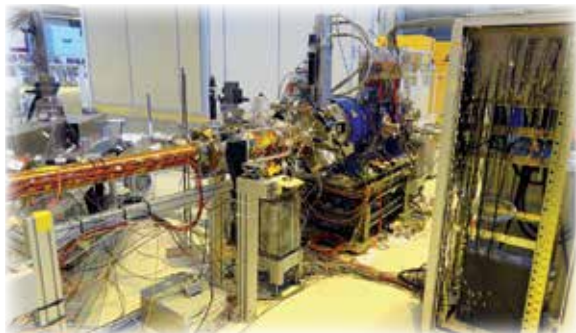
## La manufacture d'antimatière

Une des retombées de l'expérience GBAR est le développement de générateurs de positons non radioactifs à très forte disponibilité. Destinés aux laboratoires souhaitant s'affranchir des sources radioactives  $^{22}\text{Na}$ , ils permettent d'améliorer la productivité des équipements de recherche utilisant l'annihilation de positons pour la caractérisation des matériaux. Une start-up, POSITHÔT, est en cours de création. Les positons sont la sonde ultime des défauts dans la matière, permettant de mesurer la densité de défauts lacunaires et la taille des amas de lacunes. L'utilisation de ces générateurs permettra de développer l'analyse des matériaux et des surfaces par spectrométrie d'annihilation de positons, technique non destructive particulièrement adaptée pour le développement des substrats et dopages spéciaux dans l'industrie des semi-conducteurs, les couches minces et interfaces, la caractérisation des techniques de porosification, l'étude des défauts d'irradiation et la caractérisation des effets de fatigue des matériaux avant l'apparition des fissures. Une collaboration active existe déjà avec le laboratoire CEMHTI<sup>1</sup> du CNRS à Orléans pour assurer la construction d'un premier générateur et permettre le lancement de la start-up. Les générateurs POSITHÔT auront de nombreuses qualités : un débit intense, continu et ajustable avec précision et une longue durée de vie. Le coût du milliard de positons produits par un générateur est par ailleurs 4 fois inférieur à celui produit par les sources radioactives. La technologie brevetée peut fonctionner 24 heures sur 24 et sept jours sur sept, couvre la gamme de production de positons d'énergies allant de la source  $^{22}\text{Na}$  quasiment jusqu'au réacteur nucléaire de recherche et génère un débit de positons de 10 à 100 fois plus important que les sources radioactives. Ces dernières sont par ailleurs difficiles à acquérir et nécessitent une gestion contraignante à cause du contexte réglementaire relatif aux éléments radioactifs et à leur élimination en fin de vie.



(1) Conditions Extrêmes et Matériaux : Haute Température et Irradiation

Jean-Michel Rey (SACM/LEAS)



Ligne de positons de GBAR.

Le satellite Herschel a cessé d'observer le ciel le 29 avril 2013 suite à l'épuisement de cette aventure, cette étape est loin de marquer la fin du potentiel de découvertes du

**Un bilan Herschel ?** Avril et mai 2014 vont résonner un peu particulièrement pour tous ceux qui comme moi ont eu quelque chose à voir avec cette expérience. D'abord, nous célébrerons la première année passée sans Herschel qui a réalisé sa dernière observation le 29 avril 2013 (voir encadré ci-contre), et puis, deux semaines plus tard nous fêterons le cinquième anniversaire du lancement, le 14 mai 2009. Incidemment, ces deux dates permettent aisément de réaliser qu'en totalisant pratiquement 4 ans d'opération, Herschel a fait plus que remplir son contrat qui n'était au départ que de 3 ans et demi, et cela malgré l'oubli dans la modélisation thermique d'une gaine de câble sur la paroi du cryostat, qui a élevé sa température d'équilibre extérieure de quelques fâcheux kelvins...

On peut aussi s'amuser de constater que, bien qu'étant un observatoire, et donc dédié à des observations pointées sur des régions précises du ciel, Herschel a malgré tout réussi à cartographier presque 10% de la voute céleste, principalement grâce aux deux photomètres Spire<sup>1</sup> et Pacs<sup>2</sup>. Un chiffre modeste certes par rapport à Planck lancé en même temps et qui a réalisé plusieurs couvertures complètes du ciel, mais un chiffre appréciable étant donnée la différence de résolution angulaire entre ces deux satellites (un facteur 10 en faveur d'Herschel).

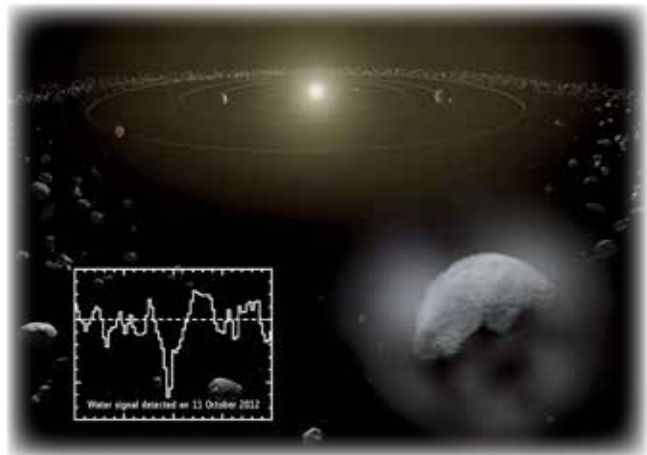
Alors malgré tous ces anniversaires et ces chiffres pourquoi ne pas en profiter pour faire le bilan ? Tout simplement parce que les opérations du satellite ne sont qu'une partie de l'aventure, et que l'exploitation des observations se poursuit à un rythme toujours aussi élevé. Il suffit pour s'en convaincre de regarder le rythme d'apparition de résultats associés à Herschel dans la littérature, qui ne faiblit pas avec pratiquement 1000 publications recensées à ce jour, et qui fait d'Herschel la mission ESA la plus productive quatre ans après son lancement. Il est donc compliqué de déterminer aujourd'hui quelles sont les avancées scientifiques principales réalisées par Herschel, et il sera peut-être toujours compliqué de le faire, étant donné que la recherche ne s'arrête jamais et que les investigations initiées avec Herschel se combinent maintenant aux programmes menés avec l'interféromètre Alma<sup>3</sup>.

Alors plutôt qu'un bilan, je propose de parler pour une fois de résultats spectaculaires en spectroscopie pour sortir un peu des questions de formation stellaire et autre évolution de galaxies...

## De l'eau sur une planète naine du système solaire...

La question de l'eau dans le système solaire entretient un rapport étroit avec son origine. On pense en effet que dans le système solaire jeune, les planètes situées à l'intérieur d'une orbite passant par la ceinture

d'astéroïdes actuelle (quelque part entre l'orbite de Mars et celle de Jupiter) étaient trop près du Soleil pour contenir de l'eau et que la limite de transition gaz-solide devait se trouver justement quelque part au niveau de la ceinture d'astéroïdes. Dans cette hypothèse, la présence d'eau sur Terre (ou sur Mars...) s'expliquerait alors comme le résultat du bombardement par des comètes venues des confins glacés du système solaire. Détecter de l'eau sur des corps de la ceinture d'astéroïdes devient ainsi un enjeu important dans l'établissement d'un scénario cohérent de formation de notre système planétaire. C'est cette première qu'a accompli Herschel à l'aide du spectromètre à très haute résolution spectrale Hifi<sup>4</sup>. Cérès est une planète naine (un corps sphérique de 950 km de diamètre) qui orbite dans la ceinture d'astéroïdes et Herschel a détecté des raies de la vapeur d'eau dans sa direction (voir figure). Qui plus est, la période de rotation de la planète étant connue, Herschel a pu démontrer que cette vapeur provient de deux sites à la surface de la planète, accréditant l'hypothèse d'un cryo-volcanisme à la surface de la planète, surface elle-même essentiellement constituée d'une couche de glace. La détection de l'eau sous forme vapeur est du domaine exclusif d'Herschel, car ses raies ne se situent que dans l'infrarouge lointain, et nous sommes encore loin d'avoir entièrement exploité les observations que les spectromètres d'Herschel ont réalisées.



Vue d'artiste de la planète naine Cérès, de sa surface gelée et de son atmosphère. Superposé à cette image, un des spectres où la vapeur d'eau s'imprime en absorption. (Crédit : ESA/ATG medialab/Küppers et al.).

## La part d'ombre du gaz interstellaire...

Le sombre est à la mode, et pas seulement en haute-couture ! Énergie noire, matière noire, l'astrophysique moderne est dominée par des composantes mystérieuses, ne se laissant voir que par leur ombre portée. Le milieu interstellaire de notre galaxie n'est pas en reste. Ce milieu, principalement gazeux puisque la poussière en constitue moins d'1% en masse, est surtout fait d'hydrogène. C'est la partie moléculaire qui intéresse plus particulièrement l'astrophysique de par son lien intime

# et au-delà !

Par Marc Sauvage

de son fluide cryogénique. Mais comme nous l'explique Marc Sauvage, acteur de projet.

avec le processus de formation des étoiles. Or recenser ce gaz moléculaire est très complexe car la molécule  $H_2$  ne présente que peu de raies d'émission exploitables aux températures qui règnent dans le milieu interstellaire, elle reste en quelque sorte invisible. C'est pourquoi on a recours à des traceurs indirects, comme l'émission de la molécule de CO, la molécule la plus abondante après  $H_2$ . Mais qui dit traceur indirect dit nécessité d'étalonner la relation entre l'abondance de ces deux molécules et c'est là que les choses se compliquent. En effet, malgré plus de 30 ans d'observations de CO, nous sommes encore loin de bien comprendre les relations entre les abondances respectives de CO et  $H_2$ . C'est là qu'interviennent les observations rapportées par J. Pineda et ses collaborateurs : ils ont sondé l'ensemble du plan galactique avec la raie de  $C^+$  à  $158 \mu m$  précisément parce que cette phase du carbone (atomique, une fois ionisé) peut se trouver dans des nuages de gaz  $H_2$  diffus où le CO a été dissocié par le rayonnement UV. Ces observations permettent donc de mettre en évidence des nuages de gaz moléculaire que le traceur CO ne peut pas détecter : du gaz moléculaire sombre. Quantitativement, ce relevé, impossible à réaliser depuis le sol du fait de notre atmosphère, a montré que 30% du gaz moléculaire de notre galaxie était resté jusqu'ici invisible, et que dans les régions externes de notre galaxie, au-delà du rayon occupé par le système solaire, la moitié du gaz moléculaire est effectivement « sombre » (voir figure ci-dessous). D'autres observations Herschel dans cette même raie sont encore à exploiter dans les galaxies proches de la

Voie lactée, pour mieux comprendre la physique du milieu interstellaire.

Voilà donc, au lieu d'un bilan, deux résultats qui illustrent la façon dont Herschel fait évoluer nos représentations de l'Univers. On en trouvera bien d'autres dans les présentations du colloque qui s'est tenu en octobre 2013 aux Pays-Bas, et qui sont disponibles à l'adresse suivante : <http://herschel.esac.esa.int/TheUniverseExploredByHerschel.shtml>

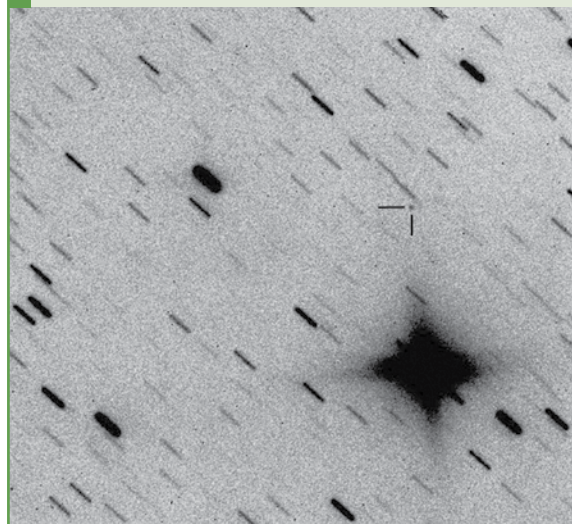
#### Références :

Kuppers *et al.*, 2014, Nature, 505, 525.  
J. L. Pineda *et al.*, 2013, Astronomy & Astrophysics, 554, A103.



Marc Sauvage, astrophysicien et responsable du projet Herschel au SAO.

## Position et voyage du satellite



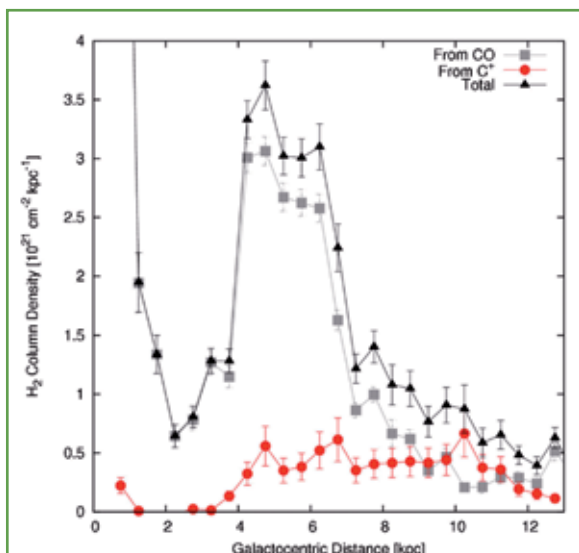
Ce petit point marqué d'une croix, c'est une des dernières vues d'Herschel, observé avec le télescope de Faulkes depuis Hawaï le 27 juin 2013, alors qu'il quittait son orbite en L2 pour s'enfoncer dans l'espace interplanétaire. Après la fin des opérations, une série de manœuvres effectuées avec les fusées de propulsion qui servaient à le maintenir en orbite autour du point de Lagrange a « éjecté » Herschel loin de L2, sur une trajectoire qui ne l'amène pas dans le voisinage terrestre dans les 300 prochaines années (du fait de la forme complexe du satellite, le jeu de la pression de radiation et du vent solaire sur le satellite rend sa trajectoire à long terme impossible à prévoir). Puis le carburant restant a été expulsé et le satellite entièrement désactivé. Herschel n'est donc plus maintenant qu'une machine inerte, captive du système Terre-Soleil, possible destination de futurs archéologues spatiaux, intéressés par le moyen âge de la conquête spatiale... (crédit image : ESA/N. Howes/E. Guido/Faulkes Telescope/LCOGT).

1- Spire (spectral and Photometric Imaging Receiver) effectuée des observations à plus grande longueur d'onde que Pacs, entre 200 et 600 micromètres.

2- Pacs (Photodetector array camera & spectromètre) est une caméra fonctionnant entre 60 et 200 micromètres.

3- Alma (Atacama Large Millimeter Array) : est un interféromètre de plus de 60 antennes situé sur les hauts plateaux de la cordillère des Andes au Chili, fonctionnant dans le domaine sub-millimétrique.

4- Hifi (Heterodyne instrument for the far infrared) est un spectrographe à haute résolution spectrale.



Profil de la densité de surface d'hydrogène moléculaire dans le disque galactique en fonction de la distance au centre galactique. En gris la densité déduite du traceur CO, en rouge la densité déduite du traceur  $C^+$  révélée par Herschel. Le pic situé entre 4 et 7 kpc correspond à un anneau de gaz moléculaire, dense et riche en CO, mais au-delà de cette structure une fraction importante voire parfois dominante du gaz moléculaire était restée dans l'obscurité jusqu'à aujourd'hui. Le système solaire se situe à environ 8,5 kpc du centre galactique. (Crédits : ESA/Herschel/Hifi/J. Pineda *et al.* (2013)).

# Retour des hivernants

Par Yann Reinert

Nouveau laboratoire IPEV (dédié à l'astronomie)



Hivernants franco-italiens

1- L'Institut polaire français Paul-Emile Victor. Agence de moyens et compétences pour la recherche en régions polaires.

2- Agence nationale italienne pour les nouvelles technologies, l'énergie et le développement économique durable.

3- International Robotic Antarctic Infrared Telescope. Miroir primaire de 80 cm de diamètre et focale de f/20.

4- Camistic : Caméra infrarouge submillimétrique antarctique.

Concordia est la station de recherche franco-italienne (IPEV<sup>1</sup> + ENEA<sup>2</sup>) située en Antarctique au Dôme C. Dans le cadre du projet Irait<sup>3</sup>, télescope italien conçu pour observer le rayonnement infrarouge (IR), l'Irfu a intégré la collaboration en 2008. Il a développé Camistic<sup>4</sup>, constituée d'une matrice de bolomètres pour l'observation de l'infrarouge lointain (200 et 350  $\mu\text{m}$ ). Ma première intervention à Concordia date de 5 ans. A 15 000 km de mon Paname, avec mes collègues du SAp, Gilles Durand et Pascal Tremblin, nous avons intégré à la glace du pôle sud le télescope Irait puis préparé l'un des deux détecteurs associés en vue de son installation durant la campagne 2012-2013. Ce fut le coup d'envoi d'une campagne de test d'un an et le début d'un hivernage pour 15 personnes.

Départ pour le Dôme C : 29/11/2012, retour au chaud : 21/12/2013, délai de route : 2 semaines. Au sein du labo construit pour le projet, Christophe Leroy Dos-Santos (ENEA) et moi-même avions la responsabilité des tests de Camistic, d'Amica (caméra

italienne, IR proche 2-28  $\mu\text{m}$ ), d'Irait et du prototype de récupération de chaleur du labo.

Nous avons pu observer Vénus à 350  $\mu\text{m}$  et en IR proche. Un succès ! À mon retour, Gilles Durand et le nouvel hivernant Xavier Joffrin ont poursuivi les tests sur les éruptions solaires.

La journée est rythmée par les heures de repas puis travail, tâches collectives et quelques loisirs. Dehors la température descend vite, pour s'installer en moyenne à  $-65^\circ\text{C}$ . Le soleil commence à se coucher fin février pour disparaître complètement début mai et ne revenir que vers mi-septembre, donnant 3 mois de nuit totale, étoilée. Durant cette année, « la tête en bas », nous nous sommes enrichis techniquement, mais nous en avons principalement appris sur nous-mêmes.

Yann Reinert (SIS)



Yann Reinert et Christophe Leroy Dos-Santos au près du télescope

## Va-et-vient

Ce va-et-vient couvre la période décembre 2013 - décembre 2014

### Tu vas...

Ursula BASSLER rejoint l'INzP3

Mutations : Lise BOUVET à la DAM/DIF/P2l, Philippe REBOURGEARD à SRE/DSPg, Delphine DROUET-BOTTE au SPAS/BF, Fabrice BOUTY à la DEN/MAR/UG-UST, Guillaume ADROIT à la DEN/DANS/DRSN, Corine SALMON à la DEN/MAR/DPAP et Nathalie GROUAS à la DEN/CAD/DEC.

Démissions : Marie LEGENDRE, MOHAMED Azath

Départs à la retraite : Jean-François GOURNAY, Lionel LATRON, Jean-Michel FAUCHER, Françoise AUGER, René LEBOEUF

Décès : Marc ANFREVILLE

### ... et tu viens

Mutations internes Irfu : Hervé DZITKO de DAM/DIF/DCRE au SACM/LIDC2, Marcel JACQUEMET du GANIL à la DIR, Armelle LE NOA de DSM/DIR au SACM/DIR et Nicolas BERTON de DSM/SAC/UCG/SC au SIS/LRI. Et le LARSIM rejoint l'Irfu : Etienne KLEIN, Alexei GRINBAUM et Vincent BONTEMS.

Recrutements : Cyril BOULCH au SACM/LIDC2, Nadia SELLAMI et Fabien LESEIGNEUR au SIS/LCAP, Sophie FERRY au SEDI/LIS, Vittorio SOMA au SPhN, Anaëlle MAURY au SAP/LFEMI et Sarah BOLOGNESI au SPP.

Directeur de la publication : Philippe Chomaz    Directeur scientifique : Vanina Ruhlmann-Kleider    Secrétariat : Marlyne Besson

Rédacteur en chef : Nathalie Besson

Mise en page : Christine Marteau    Impression : Idées fraîches

Comité éditorial : Marlyne Besson, Frédéric Déliot, Mylène Donnat-Barrail, Étienne Burtin, Christian Gouiffès, Fabien Jeanneau, François-Paul Juster, Sophie Kerhoas-Cavata, Marie-Odile Levallant, Ange Lotodé, Pierre Manil, Jacques Marroncle, Emmanuel Moulin, Vanina Ruhlmann-Kleider, Yves Sacquin, Marie-Delphine Salsac, Angèle Séné, Didier Vilanova.

Crédits photo : Google Images, Imag'In Irfu (Alain Porcher), ESA/ATG medialab/Küppers et al., ESA/Herschel/Hifi/J. Pineda et al. (2013), ESA/N. Howes/É. Guido/Faulkes Telescope/LCOGT), Cern. Antonio Saba for CERN.

Abonnement : Sophie Durand    Tél : 01 69 08 75 57 ou sophie.durand@cea.fr    Dépôt légal : mai 2014

ISSN 1268-7855