

3 • Un détecteur de particules dans l'espace

Installée sur la Station spatiale internationale, une nouvelle expérience, aux instruments très sophistiqués, va traquer les particules d'antimatière qui sillonnent le cosmos.



PAR Aurélien Barrau et Laurent Derome, enseignants-chercheurs au laboratoire de physique subatomique et de cosmologie de Grenoble et à l'université Joseph-Fourier.

Dans quelques semaines, à 400 kilomètres au-dessus de nos têtes, débutera une mission de détection d'antimatière sans précédent. L'expérience AMS (acronyme anglais pour spectromètre magnétique alpha) s'envolera à bord de la navette américaine Endeavour pour son dernier vol à destination de la Station spatiale internationale. Installée sur la station, elle traquera les antiparticules voyageant dans l'espace. Si la mission a joué de malchance ces dernières années, elle a aussi su tirer parti des retards pour optimiser ses instruments (lire « Une expérience à suspens »). Elle est donc maintenant fin prête pour répondre à la question de l'existence ou non d'antigalaxies.

Que savons-nous de l'antimatière dans l'espace ? De façon claire et mesurable, il en existe une faible quantité dans les rayons cosmiques, ces particules énergétiques qui sillonnent l'espace interstellaire. Ce sont essentiellement des antiprotons et des antiélectrons (positons). Leur présence n'est pas mystérieuse et provient de processus dit « secondaires » : lorsqu'un proton du rayonnement cosmique, animé d'une grande vitesse par rapport à la galaxie, entre en collision avec la matière du milieu interstellaire, il peut

former un antiproton. Les lois de la physique nucléaire permettent de calculer la probabilité associée à ce phénomène tout à fait standard et d'expliquer sans difficulté les flux d'antiprotons observés. Ces antiparticules représentent environ un dix-millième des particules. C'est une proportion très faible mais une quantité néanmoins non négligeable. Pour autant, cette antimatière « secondaire » n'a aucun lien avec d'éventuelles antigalaxies, c'est juste une petite composante de la masse et de l'énergie de la Voie lactée.

Univers cloisonné ? Pour les « antimondes », l'énigme reste entière. Selon la théorie du Big Bang, il serait naturel que matière et antimatière aient été produites en quantités identiques au début de l'Univers. Par ailleurs, les lois qui les régissent sont quasiment les mêmes. Pourtant, l'Univers apparaît composé essentiellement de matière ! Pourquoi ? Par quel mécanisme la matière l'a-t-elle donc emporté sur l'antimatière ? Manifestement, Neil Armstrong ne s'est pas annihilé en marchant sur la Lune : celle-ci est bien faite d'atomes et non pas d'anti-atomes ! Nous savons avec certitude que toute notre galaxie, hormis donc ces infimes traces dans le rayonnement cosmique que nous venons d'évoquer, est bien composée de matière. L'antimatière est-elle « absente » de tout l'Univers ou est-elle « autre part » ? Aujourd'hui, la première hypothèse est la plus prisée. Mais, il n'est pas totalement exclu que l'Univers soit scindé en vastes domaines : les uns de matière et les autres d'antimatière. Ces derniers seraient alors composés d'antigalaxies, dotées d'antiétoiles abritant leurs antiplanètes, voire leurs antiastrophysiciens ! L'Univers se serait donc cloisonné en zones de matière et zones d'antimatière. La détection d'un seul antinoyau lourd dans le rayonnement cosmique – par exemple un anticarbone – corroborerait cette hypothèse. Il est, en effet, impossible de



Le détecteur AMS (cercle blanc) s'arrimera à la Station spatiale internationale pour observer directement les rayons cosmiques. Il examinera avec une précision inégalée un nombre immense de particules.

synthétiser ce type de noyau autrement que dans une antiétoile. Une telle détection serait donc la preuve de l'existence de ces antiétoiles ! Ce serait une découverte majeure.

Si la découverte n'a pas lieu, l'image d'un Univers fondamentalement asymétrique – ayant favorisé la matière contre l'antimatière – s'en trouvera renforcée. C'est le scénario le plus vraisemblable car si l'Univers était scindé en zone de matière et zone d'antimatière, il est probable que des annihilations auraient lieu aux frontières de ces domaines et aucun signal associé à ces processus n'a été clairement détecté. Pour expliquer

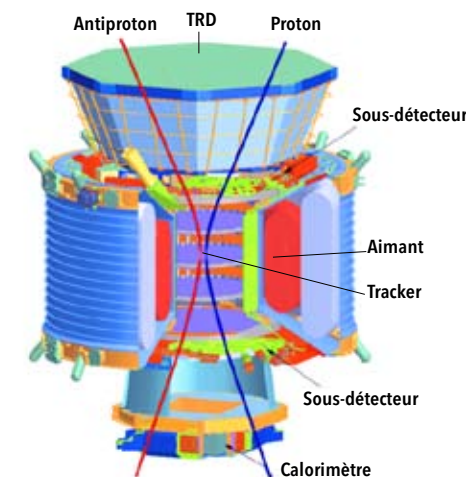
ce grand mystère de la cosmologie, il n'y aurait alors d'autre choix que de recourir à une physique plus complexe que celle de l'actuel « modèle standard » qui synthétise notre connaissance des particules élémentaires.

L'étude de l'antimatière céleste ne se résume pas à la seule recherche d'antiétoiles. D'autres enjeux, au moins tout aussi importants, y sont associés. Le fait qu'elle soit peu abondante (moins de 0,01% des particules dans le rayonnement cosmique de la galaxie) peut être tourné en avantage : un très léger excédent est bien plus aisé à repérer. Un petit nombre de protons en plus, parmi les >>>

Un assemblage de détecteurs

Pour identifier les particules tout en mesurant leur énergie, le détecteur AMS est constitué de sous-détecteurs spécifiques. Il est construit autour d'un élément central composé d'un aimant permanent qui va courber la trajectoire du rayon cosmique et d'un « tracker » qui va mesurer la trace, et donc la courbure de la particule dans le champ magnétique. C'est ce dernier qui permet de distinguer la matière de l'antimatière. En effet, le sens de la courbure de la trajectoire change selon le signe de la charge de la particule. Par ailleurs, plus la particule est éner-

gétique, moins sa trajectoire sera courbée en traversant l'aimant : la mesure du rayon de courbure permet donc d'estimer l'énergie de la particule. Les autres sous-détecteurs, au-dessus et au-dessous de l'aimant, ont chacun un rôle précis permettant d'identifier le rayon cosmique. Par exemple, les électrons et les antiprotons, ayant la même charge, auront la même trace dans le « tracker ». Or les électrons sont 1 000 à 10 000 fois plus abondants que les antiprotons ! Pour distinguer les antiprotons, on combine les mesures du détecteur à rayonnement



de transition (TDR) et du calorimètre électromagnétique.

L'essentiel

- > AU-DESSUS DE L'ATMOSPHÈRE, AMS, un nouvel instrument, observera les particules et les antiparticules qui voyagent dans l'espace.
- > LA DÉTECTION d'un seul noyau d'anticarbone, le noyau miroir de celui de carbone, serait la preuve de l'existence d'un « antimonde ».
- > SI AMS n'observe aucun noyau lourd, la thèse d'un monde asymétrique sera confortée.

Un détecteur de particules dans l'espace

du peu d'antiparticules provenant des processus secondaires. Or, précisément, des phénomènes très intéressants pourraient engendrer un faible excès d'antimatière : au premier rang desquels, l'annihilation des particules de matière noire.

On touche donc ici à un autre problème central tant en astrophysique qu'en physique des particules : la matière noire. L'essentiel de la masse, quelque 99,5 %, de l'Univers est invisible ! Pis : on sait qu'une grande partie de cette masse qui nous échappe n'est pas constituée de particules connues, en tout cas d'aucune de celles prédites par le modèle standard de la physique des particules. Cette matière noire n'est pas directement liée à l'antimatière, mais elle l'est indirectement car elle pourrait en émettre ! En effet, le meilleur « candidat matière noire » dont nous disposons aujourd'hui est une particule dite « supersymétrique »*. Or, ces particules supersymétriques, quand elles se rencontrent, par exemple dans les régions denses comme le centre galactique, vont s'annihiler et émettre une quantité égale de matière et d'antimatière. Traquer l'excédent d'antimatière produit par cette annihilation est aujourd'hui une voie privilégiée de détection de la matière noire. Plusieurs expériences explorent actuellement cette piste (en particulier la mission spa-

***LA SUPER-SYMMÉTRIE** est une extension du modèle standard de la physique des particules, qui suppose qu'à chaque particule de matière (fermion) est associée une particule d'interaction (boson) et réciproquement.

>>> rayons cosmiques passerait complètement inaperçu. *A contrario*, le même nombre d'antiprotons excédentaires pourrait être facilement décelable, compte tenu

tiale Pamela). L'expérience AMS va également s'y atteler, avec une précision inégalée, puisque c'est, avec la recherche très spéculative d'antigalaxies, l'un de ses autres objectifs majeurs.

Installée sur la Station spatiale internationale – sans doute hélas trop peu utilisée à des fins scientifiques –, l'expérience va tirer profit de l'avantage considérable qu'offre cet environnement : observer directement les particules avant qu'elles n'entrent dans l'atmosphère terrestre. Dans la longue histoire de l'astronomie, c'est le rayonnement électromagnétique qui a été utilisé pour sonder le cosmos. Mais les photons ne sont pas les seuls médiateurs de l'Univers. Les particules chargées auxquelles s'intéresse le détecteur AMS sont aussi très riches d'informations. AMS vise à devenir une expérience « définitive » dans son domaine, c'est-à-dire que la qualité de la mesure et la quantité de données engrangées seront telles qu'il ne sera vraisemblablement ni utile ni possible de tenter de les améliorer.

Quantité de données. Encore faut-il être capable d'identifier les particules précisément pour les distinguer les unes des autres et ne jamais confondre matière et antimatière. Rien ne ressemble plus à un rayon cosmique qu'un autre rayon cosmique ! La précision requise est très élevée car les antiparticules sont très rares : il faut parvenir à en trouver quelques-unes parmi les dizaines de milliards de particules qui seront détectées durant une dizaine d'années. Pour parvenir à cette précision, l'expérience AMS joue sur deux tableaux. Premièrement, l'instrument est composé de nombreux sous-détecteurs qui vont multiplier les mesures indépendantes des différentes caractéristiques fondamentales des rayons cosmiques : énergie, charge électrique et masse. Deuxièmement, la grande taille du détecteur pour un instrument spatial (typiquement un mètre carré de surface active) permettra de collecter un nombre immense de particules. C'est grâce à cette quantité de données, combinée à la redondance des mesures de haute précision, qu'il sera possible de détecter les composantes les plus rares, dont l'antimatière.

Par-delà la recherche d'antiétoiles hypothétiques et la quête de la matière noire, AMS fournira une analyse très détaillée et approfondie du rayonnement cosmique « classique ». L'antimatière n'est qu'une infime partie du rayonnement cosmique et les particules de matière ne sont pas que du bruit de fond ! Bien au contraire, elles apportent de précieuses informations astrophysiques sur notre galaxie, et celles-ci constitueront évidemment l'un des apports les plus importants d'AMS. ■

Une expérience à suspens

Après un vol test réussi en 1998 dans la navette Discovery, le détecteur AMS aurait dû être mis en place quelques années plus tard. L'explosion de la navette Columbia en 2003 en a décidé autrement. Tout le planning de la NASA a été remis en question. Et l'avenir d'AMS sérieusement compromis, suspendu longtemps aux difficultés techniques liées à la fiabilisation de la

navette, ainsi qu'aux choix politiques de l'Administration américaine. Au vu de l'investissement financier et humain d'ores et déjà consenti, la situation était assez désespérante. Fort heureusement, ce délai a été mis à profit pour procéder à une amélioration du détecteur AMS. Certaines pistes ont été très fructueuses. En particulier, chaque instrument a été peaufiné et

exhaustivement testé, en particulier sur faisceau à l'aide d'accélérateurs de particules. D'autres pistes, comme la tentative d'utilisation d'un aimant supraconducteur, se sont révélées inadaptées. Aujourd'hui, réinscrit au planning officiel de la NASA, le détecteur est entièrement assemblé, testé et prêt au lancement.