

Trous noirs galactiques

Les trous noirs et les galaxies seraient liés dès leur formation.

L'explication de l'évolution des étoiles est l'un des grands accomplissements scientifiques du xx^e siècle. Malgré l'étonnante variété de ces objets, toutes les étoiles traversent le même type de cycles, résultats de l'effet combiné de quelques mécanismes fondamentaux, tels l'effondrement gravitationnel ou la fusion nucléaire. Aujourd'hui, les astronomes sont sur le point d'unifier notre connaissance des galaxies. De la Voie lactée aux lointains quasars des confins de l'espace connu, toutes les galaxies connaissent les mêmes phénomènes : les interactions galactiques, et, selon les derniers résultats, l'action de trous noirs supermassifs.

Les trous noirs sont connus pour leur pouvoir destructeur «étoilophage», mais leur potentiel créateur n'est apparu que progressivement. Dans les années 1960 et 1970, la mesure de l'énergie émise par les quasars indiquait que des trous noirs massifs se trouvaient en leur centre : seuls ces monstres de millions, voire de milliards de masses solaires, pouvaient fournir suffisamment d'énergie pour expliquer la luminosité des quasars. Dans les années 1980, les astrophysiciens invo-

quent ces trous noirs géants pour rendre compte de l'énergie de toutes sortes de galaxies anormalement lumineuses. Grâce à des observations conjointes du Télescope *Hubble* et d'interférométrie radio à très longue base, les astronomes ont découvert que les étoiles et les nuages interstellaires situés près du centre de nombreuses galaxies se déplaçaient anormalement vite, comme si la gravité d'un astre géant et invisible les entraînait.

Les astronomes supposent que cet astre est un trou noir supermassif, même si d'autres objets plus prosaïques (des amas denses d'étoiles) ou exotiques (des boules de neutrinos) n'ont pas été écartés. Le nombre de ces trous noirs supermassifs s'élève aujourd'hui à 34 et deux tendances ont émergé. D'abord, ces trous noirs n'apparaissent pas seulement dans les quasars et affiliés, mais dans des galaxies normales. La seule contrainte semble être une forme elliptique : soit une galaxie elliptique, soit un bulbe dans une galaxie spirale, comme la Voie lactée. Ensuite, le trou noir a une masse d'environ 0,15 pour cent de celle de son hôte elliptique, galaxie ou bulbe galactique.

Une troisième caractéristique vient d'être annoncée par deux équipes américaines qui ont remarqué que la masse du trou noir dépendait de la vitesse moyenne des étoiles à l'intérieur de leur hôte elliptique, même dans les régions situées au-delà de l'influence directe du

trou noir. La corrélation entre vitesse et masse est si parfaite qu'on a l'impression que chaque trou noir est «taillé» pour son hôte. Quel mécanisme a-t-il pu produire pareille corrélation ? Le trou noir est-il apparu d'abord, ce qui a déterminé la masse de l'ellipsoïde ?

Selon John Kormendy, de l'Université du Texas, la masse de trou noir ne dépend pas seulement de la masse de l'ellipsoïde, mais aussi de sa taille : plus l'ellipsoïde est petit, plus les étoiles se meuvent rapidement. Pour obtenir un trou noir supermassif, une galaxie ou un bulbe galactique doit, en plus d'être très massif, être particulièrement petit et dense. En d'autres termes, la masse du trou noir est déterminée par ce qui fixe la taille du bulbe. On pense que cette taille est fixée au cours de la formation du bulbe ; lorsque le gaz s'est condensé en étoiles, la taille est fixée. Ainsi, ni le trou noir ni le bulbe ne naissent en premier : ils se développent ensemble, limités par la quantité de matériau disponible.

Cette nouvelle corrélation corrobore la théorie selon laquelle les quasars sont des trous noirs et des bulbes en interactions. Les épisodes d'interactions, pas toujours aussi intenses que ceux des quasars, seraient alors des moments normaux de la vie de la plupart des galaxies, engendrés par des interactions ou des coalescences avec d'autres galaxies. La phase de quasar coïnciderait avec l'époque de naissance des premières étoiles dans le bulbe. Ensuite, certaines galaxies s'aplatiraient, comme celle dans laquelle nous nous trouvons. D'autres galaxies naîtraient en tant que disques et acquerraient ensuite un bulbe et un trou noir.

Certains astronomes estiment que ce scénario contredit les observations selon lesquelles un intervalle de temps important existe entre le moment où l'activité de quasar démarre et celui de formation des premières étoiles. En tout cas, personne ne sait encore comment se crée le «germe» de trou noir qui grossit ensuite dans de telles proportions. On ignore aussi comment le matériau tombe sur le trou noir ou comment le monstre arrête de dévorer les alentours.

Afin d'améliorer les données, les astronomes testent la corrélation aux points faibles de la théorie : les galaxies massives et celles de faibles masses. De nombreux instruments continueront d'étudier les trous noirs au centre des galaxies et, dans les prochaines décennies, de nouveaux satellites, comme le NGST, successeur du Télescope spatial, étudieront les toutes premières galaxies. D'ici là, les trous noirs auront peut-être perdu leur réputation d'objets étranges.



Le trou noir, au cœur de la galaxie d'Andromède, a une masse équivalente à 30 millions de fois celle du Soleil. L'observatoire de rayons X Chandra a repéré des spirales de gaz englouties (flèches dans le cartouche ci-contre).

NASA, S. Murray et M. García

La longévité des batteries «solaires»

Les causes de la durée de vie limitée des batteries solaires sont désormais élucidées.

Les piles photovoltaïques, qui transforment l'énergie solaire en électricité, équipent des sites isolés, où le raccordement au réseau électrique est difficile et la consommation faible, tels les refuges de montagne. Ces piles sont onéreuses : au prix d'achat des panneaux solaires s'ajoute le coût de remplacement des batteries, qui stockent l'électricité fournie par les panneaux, pendant la nuit et durant les jours sans soleil. Ces batteries durent 5 à 15 ans, selon les sites. Comment augmenter leur durée de vie ?

Philippe Malbranche, Florence Matterna et leurs collègues du groupement énergétique de Cadarache (CEA Cadarache-ADEME) ont étudié les phénomènes qui limitent la durée de vie des batteries pour automobiles utilisées dans des applications solaires. En analysant des dizaines de batteries usagées, ils ont identifié la cause de la mort des batteries : des dépôts de sulfate de plomb rendent les électrodes isolantes.

Ces batteries sont des accumulateurs plomb-acide : les électrodes, qui contiennent toutes deux du plomb, plongent dans une solution aqueuse d'acide sulfurique. Au cours de leur fonctionnement (lors de la décharge), du sulfate de plomb se dépose sur les deux électrodes, selon une

réaction de «double sulfatation», qui consomme de l'acide sulfurique. Pendant la phase de charge, la réaction inverse se produit : le sulfate de plomb précédemment formé se dissocie, et l'acide sulfurique est libéré.

Les électrochimistes de Cadarache ont mis de l'acide sulfurique contenant du soufre radioactif dans une batterie neuve, afin de le suivre à la trace. Ils ont découvert que, pendant la charge, l'acide sulfurique relargué s'accumule au fond du bac : la batterie ne se charge pas uniformément. La solution étant très concentrée en acide sulfurique vers le bas, une partie du sulfate de plomb accumulé sur les électrodes ne se dissocie pas, ce qui les rend isolantes. À mesure des cycles de charge et de décharge de la batterie, l'acide sulfurique s'accumule et monte dans le bac, tandis que le sulfate de plomb se dépose de plus en plus haut sur les électrodes. Finalement, il les recouvre entièrement : comme il est isolant, la batterie ne fonctionne plus.

Dans les voitures, ce phénomène n'apparaît pas, car la quantité d'acide relargué est faible (la batterie se recharge en permanence) et le mouvement du véhicule mélange l'eau et l'acide. Toutefois cette agitation est absente dans les batteries couplées aux panneaux solaires.

Ph. Malbranche et ses collègues envisagent de limiter l'accumulation d'acide sulfurique dans la partie inférieure du bac à l'aide de membranes ou de gels, qui réduiraient les sédimentations dans la solution. Quand les batteries sont en service, on pourrait les forcer à se surcharger, ce qui provoquerait la formation d'hydrogène et d'oxygène : les bulles, en s'échappant vers le haut, brasseraient la solution.

Repérage dans l'espace

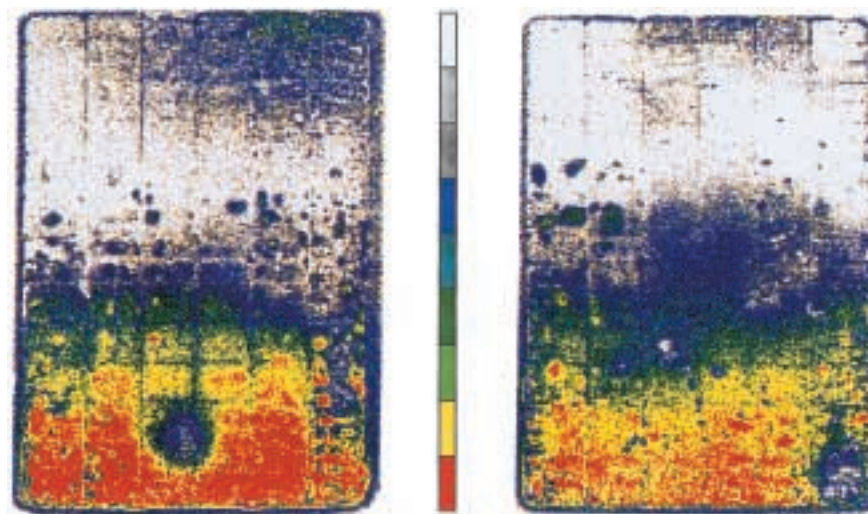
Des caméras intelligentes pour l'orientation des satellites par rapport aux étoiles.

Dans l'espace, comment distinguer le haut du bas, la droite de la gauche, bref comment s'orienter ? Si la plupart des satellites utilisent le Soleil et la Terre comme points de repère, les étoiles sont une meilleure référence. Réparties en grand nombre sur la voûte céleste, elles sont cependant difficiles à utiliser pour un satellite. L'apparition des capteurs numériques (CCD) et les progrès des calculateurs de bord ont conduit à la mise au point de systèmes d'orientation précis, autonomes et peu encombrants.

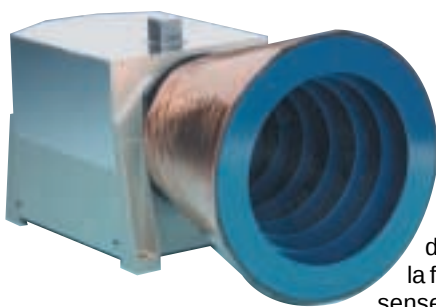
Orienter une caméra ou une antenne vers la Terre, pointer les panneaux solaires vers le Soleil ou commander la direction du jet d'une tuyère sont autant d'opérations qui nécessitent la connaissance de l'orientation du satellite, encore nommée attitude. Or, dans l'espace, les points de repère, compléments indispensables aux précieuses informations des centrales inertielles (gyroscopes), ne sont pas légions. Le Soleil et la Terre sont des repères évidents, mais pas suffisamment précis pour toutes les missions, notamment celles d'observation de la Terre.

Peut-on orienter les satellites par rapport aux étoiles, comme le font les navigateurs depuis des siècles ? Malgré les difficultés liées à leur faible luminosité des étoiles et à leur identification, des instruments spéciaux, nommés senseurs stellaires, ont été mis au point dès le début de l'ère spatiale. Toutefois, leur masse importante, leur absence d'autonomie ainsi que l'utilisation de tensions élevées limitaient leur utilisation.

Au début des années 1970, l'invention du capteur CCD, qui équipe aujourd'hui les caméscopes et les appareils photographiques numériques, change le domaine de l'imagerie : la lumière reçue par le capteur libère des électrons contenus dans une mince couche de silicium, lesquels sont ensuite capturés. Périodiquement, on compte le nombre d'électrons piégés, qui est proportionnel à l'intensité lumineuse reçue. On reconstitue ainsi une image. L'intérêt de cette technique réside dans sa capacité à accumuler les électrons, ce qui autorise la détection de signaux très faibles. De surcroît, les capteurs CCD, petits et peu gourmands en énergie, forment des images de qualité.



Les électrodes des batteries plomb-acide qui stockent l'énergie solaire se recouvrent de quantités croissantes de sulfate de plomb (du rouge au blanc selon l'échelle de couleur au centre), lors des cycles de charge et de décharge (après 10 cycles à droite et 20 à gauche), ce qui finit par les rendre isolantes et entraîne la mort des batteries.



Dès 1975, le Laboratoire pour la propulsion spatiale américain à Pasadena envisage la fabrication des

capteurs stellaires à base de matrices CCD. Le premier de ces capteurs vole sur la Navette spatiale dès 1985 et la précision est meilleure que dix secondes d'angle. Toutefois, ces lourds appareils sont incapables d'identifier eux-mêmes les étoiles, d'où la nécessité d'une intervention d'opérateurs au sol ou l'utilisation d'autres instruments de bord.

Rapidement, grâce aux progrès des ordinateurs, on envisage une nouvelle génération de capteurs stellaires, nés du couplage d'un CCD avec un ordinateur muni d'une carte du ciel. On agrandit le champ d'observation du capteur afin qu'il observe simultanément plusieurs étoiles, au minimum trois. Le ordinateur compare alors les distances entre les étoiles observées à celles qui sont obtenues à l'aide du catalogue embarqué, ce qui permet leur identification et, par suite, le calcul de l'attitude.

Le premier capteur de ce type est mis au point par le laboratoire américain Lawrence Livermore et vole avec succès en 1994 sur la mission expérimentale *Clementine*, validant ainsi le concept. Muni de la fonction *lost in space* («perdu dans l'espace»), ce capteur s'oriente de manière autonome quel que soit l'endroit où il se trouve.

Dès lors, de nombreuses sociétés, notamment européennes, se lancent dans la mise au point de ce type de capteurs. La plupart des produits fabriqués pèsent moins de quatre kilogrammes et consomment moins de 15 watts. La Société française SODERN fabrique un capteur SED16, qui volera en 2002 à bord du satellite SPOT 5. Ses mesures stellaires, combinées avec des mesures gyroscopiques, permettront de localiser les images du sol avec une précision meilleure que 50 mètres.

L'étape suivante ? Des capteurs à base de nouveaux capteurs (APS) dont chaque pixel dispose d'une interface de conversion charge/courant. Ainsi, plus besoin de transfert de charge comme c'est le cas avec les CCD, ce qui simplifie beaucoup l'électronique, d'où une réduction de l'énergie consommée et de la taille. La masse d'un capteur stellaire chutera alors à quelques centaines de grammes.

Thomas SCHIRMANN,
Société Astrium, Toulouse

Capilliculture raisonnée

Des chimistes reproduisent la croissance d'une chevelure.

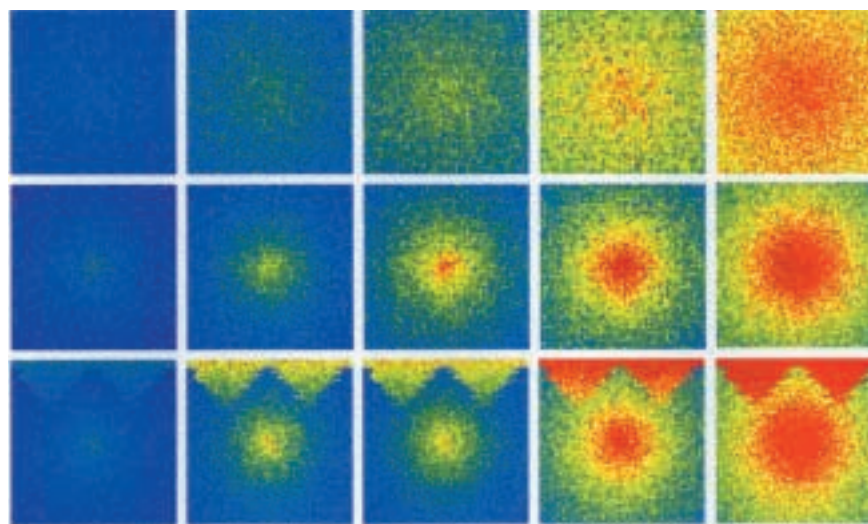
Au cours de notre vie, nos cheveux chutent et repoussent environ 25 fois. La dynamique de ces cycles pileux est imposée par le fonctionnement des follicules. De petits sacs tubulaires, enfouis sous le derme, qui contiennent la base et la racine du cheveu. José Halloy et Albert Goldbeter, deux chimistes et biomathématiciens de l'Université Libre de Bruxelles, et Bruno Bernard et Geneviève Loussouarn de la Société L'Oréal, viennent de publier le premier modèle prédictif de la croissance de la chevelure. Ce dernier est fondé sur les données recueillies par des chercheurs de la société pendant dix ans. Régulièrement, on surveillait les follicules de un centimètre carré du crâne de dix volontaires. Il servira à l'étude des effets probables de l'application de molécules préventives de la chute.

Le modèle utilise des automates cellulaires, dont un modèle célèbre est le jeu de la vie : on considère un quadrillage sur lequel sont posés des jetons. La configuration évolue par «génération» successives selon des règles telles que : un jeton naît sur une case quand cette dernière est entourée de trois jetons, à la génération précédente ; ou encore, un jeton meurt quand il est entouré de quatre autres jetons. Le formalisme des automates cellulaires est similaire : un

ensemble d'individus interconnectés évolue d'étape en étape. Lorsque le système passe d'une étape à la suivante, le nouvel état de chaque individu est déterminé par l'application d'une règle de transition.

Dans le cas du réseau folliculaire, les chercheurs ont supposé que chaque «individu» (chaque follicule) est indépendant. Dès lors, la règle de transition qui gouverne l'évolution de chaque automate folliculaire était particulièrement simple : elle découle seulement de la structure du cycle folliculaire, que l'on décompose en trois étapes principales. La première est la phase anagène, une phase de croissance, d'une durée moyenne comprise entre quelques mois et quelques années. La seconde, la phase télogène, est un repos d'une durée moyenne de trois mois. Elle se termine par la chute du cheveu. Puis s'enchaîne une phase de latence de quelques mois. Ces phases sont suivies par la reprise d'un nouveau cycle. La règle de transition stipule seulement qu'un follicule modélisé passe à la phase suivante de son cycle lorsque la phase dans laquelle on se trouve s'est terminée. Or, les observations de 10 000 cycles accomplis par 930 follicules montrent que les durées des trois phases sont très variables. Pour tenir compte de cette variabilité, il fallait introduire une forme de hasard dans le modèle.

Les biomathématiciens font fonctionner leurs automates sur ordinateur. Ils partent d'une population initiale, la font évoluer de mois en mois. Pour cela, ils utilisent un générateur de nombres aléatoires qui modélise la distribution dans la chevelure des durées des trois phases observées par l'entreprise de cosmétique. Le meilleur



Divers motifs d'évolution de la calvitie prédits par le modèle d'automate folliculaire. Fondé sur les données recueillies sur quelque 10 000 cycles folliculaires humains, les simulations que livre ce modèle illustrent comment la calvitie se propage sur 30 ans (en rouge). En haut, le cas de la femme, chez qui la calvitie est toujours diffuse. La deuxième rangée montre le cas d'une perte de cheveux au sommet du crâne. On reconnaît dans la troisième rangée un autre motif de calvitie typiquement masculine.