

moment de l'émission et celui de l'observation, et plus le décalage vers le rouge est important.

Ces spectres de quasars ont été observés pour la première fois au milieu des années 1960, et, à la fin des années 1970, on disposait de spectres de très bonne qualité. Alec Boksenberg, de l'Université de Londres, et Wallace Sargent, de l'Institut de technologie de Californie, constatèrent que ces spectres contiennent des centaines de raies d'absorption formant, sur les graphiques d'enregistrement, d'épaisses futaies de lignes verticales, qui furent nommées «forêts Lyman-alpha». Lyman-alpha est le nom de la raie d'absorption de l'hydrogène neutre qui est responsable de cette «forêt». Le fait que cette raie apparaisse à différents endroits du spectre montre que l'espace entre nous et le quasar est rempli de centaines de nuages d'hydrogène, chacun situé à une distance différente et, par conséquent, subissant un décalage vers le rouge différent (voir l'encadré ci-dessous).

Le gaz neutre absorbe naturellement des raies plus ou moins larges en fréquence, car l'agitation thermique aléatoire des atomes décale chacun de leurs spectres par effet Doppler. Les raies d'absorption qui devraient être des lignes mathématiques idéalement fines sont élargies et acquièrent une largeur notable. En 1965, James Gunn et Bruce Peterson, de l'Institut de technologie de Californie, calculèrent la largeur théorique de l'absorption Lyman-alpha à partir de la densité du gaz intergalactique. Ils montrèrent qu'elle était suffisante pour que les raies de la forêt Lyman-alpha se recouvrent et, par conséquent, que l'on devrait observer un large domaine continu d'absorption plutôt qu'une série de raies distinctes. Ils en déduisirent que la densité de l'hydrogène neutre responsable de l'absorption était

beaucoup plus faible que la densité totale du milieu intergalactique : les atomes d'hydrogène ne sauraient constituer plus d'une partie par million dans le milieu intergalactique, le reste étant formé d'hydrogène et d'hélium ionisés, transparents dans ce domaine de fréquence.

Ainsi, la simple présence de la forêt Lyman-alpha montre que le gaz intergalactique est en grande partie ionisé, et ceci depuis fort longtemps, puisqu'on l'observe jusqu'à des décalages vers le rouge très importants. Le milieu froid et neutre qui s'est formé après l'émission du fond de rayonnement cosmologique et qui a présidé à la formation des galaxies a dû avoir une existence très brève. Quelque chose a reionisé ce gaz avant que les premiers quasars ne se forment. L'année dernière, les astronomes ont fait une importante découverte en observant le quasar SDSSJ103027.10+052455.0, l'un des plus anciens que l'on connaisse. Robert Becker et ses collègues de l'Université de Californie ont constaté que son spectre contient un domaine d'absorption Lyman-alpha continu qui est peut-être le premier exemple de la bande d'absorption prédite par J. Gunn et B. Peterson. On pense que cette bande d'absorption nous donne un aperçu de cette période reculée au cours de laquelle la reionisation n'était pas encore achevée.

Les spectres des quasars nous renseignent sur la densité et sur l'état d'ionisation du milieu intergalactique, mais aussi sur la répartition de la matière dans ce milieu. On peut considérer chaque forêt Lyman-alpha comme une «carotte» creusée dans l'Univers à la façon dont on prélève une carotte de glace dans la banquise. En comparant les carottes obtenues dans différentes directions et en les confrontant à des simulations numériques qui tentent de reproduire la

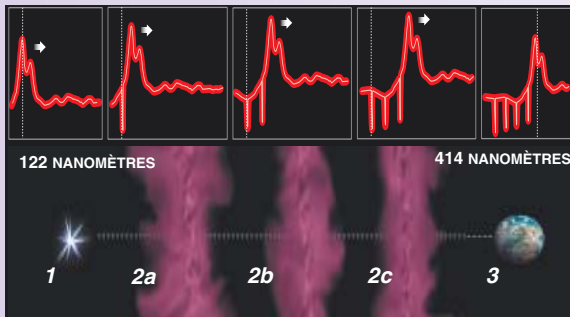
## La forêt Lyman-alpha

Aussi tenu soit-il, le gaz intergalactique trahit sa présence en absorbant la lumière des objets éloignés, notamment les quasars qui sont les sources lumineuses les plus puissantes de l'Univers. Comme les verres teintés, les nuages de gaz absorbent certaines longueurs d'onde, mais laissent passer le reste. Le mécanisme se manifeste par une série de lignes d'absorption dans les spectres des quasars. Sur ces spectres, les lignes d'absorption sont si nombreuses que les astronomes parlent de «forêt Lyman-alpha».

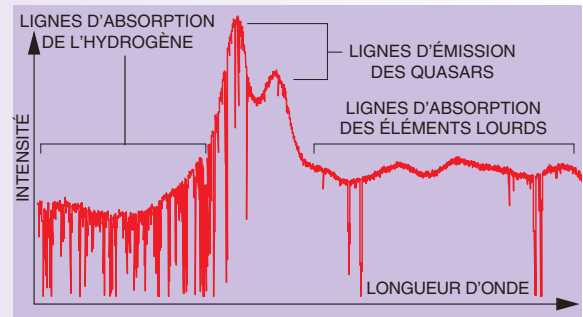
La lumière émise par le quasar a initialement un spectre à peu près continu (courbe en rouge). Son pic d'intensité correspond à une raie produite par l'hydrogène neutre à 122 nanomètres de longueur d'onde, nommée raie Lyman-alpha. Tandis que la lumière traverse l'Univers vers la Terre (de 1 à 3), deux effets modifient son spectre. Tout d'abord,

l'expansion cosmique le décale vers les grandes longueurs d'onde. Ensuite, chaque nuage d'hydrogène intergalactique y imprime une nouvelle raie d'absorption (2a, 2b et 2c). Chacune de ces raies est initialement absorbée à 122 nanomètres avant d'être à son tour décalée avec le reste du spectre.

Lorsque la lumière arrive sur Terre, le spectre du quasar est marqué par des centaines de raies dues à l'hydrogène et, occasionnellement, à quelques éléments plus lourds. Le pic de ce spectre, issu du quasar HE 1122-1628, a été décalé de sa position originelle à 122 nanomètres jusqu'à une longueur d'onde de 414 nanomètres. Ce décalage vers le rouge indique une distance de l'ordre de dix milliards d'années-lumière. Les lignes d'absorption de la forêt Lyman-alpha indiquent le nombre de nuages traversés sur ce parcours.



**LE SPECTRE D'UN QUASAR** est décalé vers le rouge à mesure que sa lumière progresse vers la Terre. Chaque nuage d'hydrogène rencontré sur son trajet imprime une raie d'absorption



tion à 122 nanomètres qui est ensuite décalée avec le reste du spectre. Ainsi, on observe une forêt de raies correspondant au nombre de nuages traversés.