



# Les quasars les plus lointains révèlent l'Univers à l'époque de sa réionisation

Lucette Bottinelli

LES POTINS DE LA VOIE LACTÉE

Une nouvelle avancée en cosmologie : la spectroscopie à haute résolution de quasars de décalage spectral relatif  $z$  supérieur à 5,5 permet de mettre en évidence pour la première fois l'effet Gunn-Peterson prédit il y a plus de 35 ans et de cerner l'époque où les objets primordiaux de l'Univers se sont formés et ont enclenché une nouvelle phase d'ionisation du milieu intergalactique d'hydrogène neutre.

En 1965, deux ans après la découverte des quasars et la reconnaissance de leur grand éloignement (déduit de leur grand décalage spectral  $z$ ), James Gunn et Bruce Peterson avaient attiré l'attention sur une particularité qui devrait être observée dans leur spectre au voisinage de l'intense raie en émission Lyman alpha qu'ils émettent dans l'ultraviolet ; on rappelle que cette raie correspond à la transition de l'atome d'hydrogène neutre entre le niveau fondamental et le premier niveau excité (longueur d'onde au repos  $\lambda_e = 121,6$  nm). Compte tenu de la présence d'un milieu intergalactique constitué essentiellement d'hydrogène neutre entre le quasar et l'observateur, le rayonnement du quasar doit être affecté par une absorption continue tout au long de son trajet et l'intensité du rayonnement du quasar devrait montrer une nette diminution au-delà de la raie Lyman alpha du côté des plus courtes longueurs d'onde ( $\lambda < 121,6$  nm). On désigne cette propriété du nom : "effet Gunn-Peterson". Or depuis 35 ans que l'on observe des spectres de quasars, un tel effet n'a jamais été décelé, ce qui conduit à penser que l'hydrogène intergalactique est en fait essentiellement sous forme ionisée. Des observations toutes récentes de quasars, les plus éloignés connus à ce jour, viennent de mettre en évidence pour la première fois, l'effet Gunn-Peterson tant recherché et de préciser que l'époque de réionisation se situe au voisinage de  $z = 6$ .

## Evolution de l'Univers et phase de réionisation

Rappelons la définition du décalage spectral relatif  $z$  (ou "redshift") dont il est question. Compte tenu de l'expansion de l'Univers, un rayonnement émis par un quasar à une longueur d'onde  $\lambda_e$  (mesurée dans un système lié à l'astre émetteur) est perçu par l'observateur à une longueur d'onde  $\lambda_o$  (mesurée dans un système lié à l'observateur) et le décalage spectral relatif est défini par la relation :  $z = (\lambda_o - \lambda_e) / \lambda_e$ . La valeur de  $z$  est d'autant plus élevée que l'époque d'émission est reculée dans le temps, si l'on compte à partir de l'époque actuelle ( $z = 0$ ) en remontant dans le temps. Cela signifie aussi qu'observer à des  $z$  plus élevés, conduit à observer l'Univers à une époque plus proche du début (le "big bang") de son histoire. Rappelons également les grandes lignes de l'évolution de l'Univers depuis le big bang, à mesure que l'expansion se poursuit : formation des particules élémentaires, puis des noyaux d'hydrogène et d'hélium, phase d'un Univers (matière ionisée) dominé par le rayonnement, transition vers un Univers dominé par la matière neutre et transparent au rayonnement, au voisinage de  $z = 1100$  (c'est de cette époque que nous parvient le rayonnement cosmologique de fond de ciel à 2,7 K), enfin formation des structures de l'Univers et des galaxies avec formation des étoiles dans les galaxies. On estime

que l'époque de formation de la première génération de galaxies et de quasars, se situe dans le domaine de  $z$  entre 6 et 15 environ. C'est alors qu'entrent en action les premières sources de rayonnement UV qui permet d'ioniser de nouveau le milieu intergalactique ; il s'agit là d'une nouvelle transition - on parle de phase de "réionisation"- avec passage d'un Univers neutre à un Univers essentiellement ionisé. On comprend que la mise en évidence de l'effet Gunn-Peterson nécessite que l'on puisse observer des quasars assez lointains, ayant un  $z$  supérieur à celui  $z_r$  correspondant à la phase de réionisation.

### La chasse aux quasars lointains

Les possibilités des grands télescopes ont permis depuis 1999, de reculer la frontière observationnelle vers les grands décalages spectraux ; ainsi les détections toutes récentes de spectres de quasars présentant les décalages suivants :  $z = 5,73 ; 5,82 ; 5,99 ; 6,28$ . Les décalages sont si importants que l'émission de la raie Lyman alpha qui se produit dans l'UV est observée dans le spectre optique du côté du proche infrarouge ; pour les quasars cités cela se situe de  $\lambda_o = 818$  à  $885$  nm environ. La limite de la série de Lyman ( $\lambda_e = 91,2$  nm) est observée dans le spectre optique de  $\lambda_o = 613$  à  $664$  nm environ. Un premier travail de fond a consisté à découvrir des nouveaux quasars à grand  $z$  avant d'en faire l'analyse spectrale détaillée. Depuis 2 ans a été mené un relevé systématique du ciel (appelé SDSS pour "Sloan Digital Sky Survey") en utilisant un télescope de  $2,5$  m (dédié à cette tâche) et une caméra CCD grand format pour réaliser des images dans 5 bandes (centrées à  $\lambda = 355,1 ; 468,6 ; 616,6 ; 748,0 ; 893,2$  nm), couvrant  $10\,000$  degrés carrés sur le ciel et à haute latitude galactique ; ce télescope est situé au Nouveau Mexique (Apache Point Observatory). L'extraction des quasars potentiels parmi toutes les sources recensées se fait par une analyse des magnitudes et des couleurs, des observations photométriques et enfin par des observations spectroscopiques pour mesurer le décalage spectral. Ainsi plus de 200 quasars ayant des  $z$  supérieurs à 3,5 ont été

découverts jusqu'à présent, notamment les 4 quasars à grand  $z$  cités précédemment, et en principe cette technique devrait permettre de découvrir des quasars jusqu'à  $z = 6,5$  environ. Par ailleurs, des spectres à haute résolution ont été obtenus à partir de spectrographes associés au télescope Keck dans le domaine couvrant  $550$  à  $950$  nm.

### Absorption Lyman alpha

Un Univers en expansion rempli d'hydrogène neutre constituerait une barrière opaque aux photons émis avec une longueur d'onde  $\lambda$  inférieure à  $121,6$  nm (ce qui correspond à des énergies supérieures à la valeur  $10,2$  eV, énergie associée à la transition de la raie Lyman alpha). Même un petit résidu d'hydrogène neutre sur le trajet entre la lumière intense en Lyman alpha émise par le quasar et l'observateur est une barrière d'absorption efficace. Sur la ligne de visée on rencontre, compte tenu de l'expansion, de l'hydrogène neutre présentant tous les décalages  $z$  compris entre  $z_q$  (le "redshift" du quasar) et  $z = 0$  (l'observateur) ; ainsi le résultat global de cette absorption affectera toutes les longueurs d'onde plus courtes que  $121,6$  nm observées dans le spectre du quasar. C'est ce que prédit l'effet Gunn-Peterson : on s'attend à une chute brutale du niveau de flux au-delà de raie Lyman alpha du côté des plus petites longueurs d'onde.

Par ailleurs, les photons ultraviolets d'énergie supérieure à la limite de la série de Lyman (soit  $13,6$  eV) peuvent ioniser les atomes d'hydrogène neutre. Comme cela a été dit précédemment le phénomène sera efficace dès la formation des premières protogalaxies et quasars, marquant l'époque de réionisation de l'Univers (repérée par  $z_r$ ). Le milieu intergalactique étant alors devenu essentiellement ionisé, l'absorption par l'hydrogène neutre décrite précédemment ne sera plus efficace et l'effet Gunn-Peterson sera négligeable pour les émetteurs avec  $z$  inférieur à  $z_r$ .

### Spectre des quasars

La spectroscopie détaillée des quatre quasars cités précédemment met en évidence pour la première fois le

phénomène attendu (chute brutale de flux) mais révèle aussi une situation plus complexe sur la structure du milieu intergalactique.

La première étude faite avec le quasar dont  $z = 5,73$ , à partir d'une pose de  $5,5$  h avec le télescope de  $10$  m Keck II (situé sur le Mauna Kea à Hawaii) indique un flux pratiquement nul pour  $\lambda_o$  supérieur à  $755$  nm, alors que l'émission du quasar est nettement détectée au voisinage de la raie Lyman alpha (noter que cette raie en émission du quasar est centrée à  $\lambda_o = 818$  nm). La région d'absorption ( $\lambda_o$  supérieur à  $755$  nm) correspond à  $z > z_{abs}$  avec  $z_{abs} = (755 - 121,6) / 121,6 = 5,3$ . Compte tenu de la présence d'un très petit nombre de régions étroites non absorbées dans la partie  $\lambda_o > 755$  nm du spectre, les auteurs concluent qu'il s'agit là de la signature de la fin de l'époque de réionisation ; cette phase s'étendrait en fait de  $z = 6$  environ à  $z = 5,3$ .

La seconde étude concerne les 3 autres quasars, de plus grands décalages et montre clairement la présence d'un effet Gunn-Peterson à part entière, causé par l'absorption par l'hydrogène neutre pour le quasar dont  $z = 6,28$ . Dans ce cas l'absorption totale apparaît pour  $\lambda_o > 845$  nm (ce qui correspond à  $z_{abs} = 5,95$ ). Un autre résultat important est qu'il y a une évolution rapide de l'absorption moyenne dans ces quasars à grands  $z$  avec une augmentation très brutale de celle-ci au-delà de  $z = 5,8$ . L'interprétation des auteurs est que l'ionisation diminue significativement entre  $z = 5$  et  $z = 6$ , l'Univers doit être très proche de l'époque de réionisation à  $z = 6$ .

Cette étape marque une découverte très importante pour la cosmologie et ouvre la voie à l'étude observationnelle de l'Univers à l'époque de réionisation, à partir de quasars de décalages encore plus élevés et de l'analyse à haute résolution de leur spectre. Ainsi le relevé SDSS devrait permettre de découvrir une vingtaine de quasars de  $z$  supérieur à 6. Un autre aspect important sera aussi la détection directe des sources lumineuses responsables de la réionisation à ces décalages élevés et la détermination de leurs caractéristiques. ■