

LES SYSTEMES DE RAIES D'ABSORPTION DES QUASARS (suite)

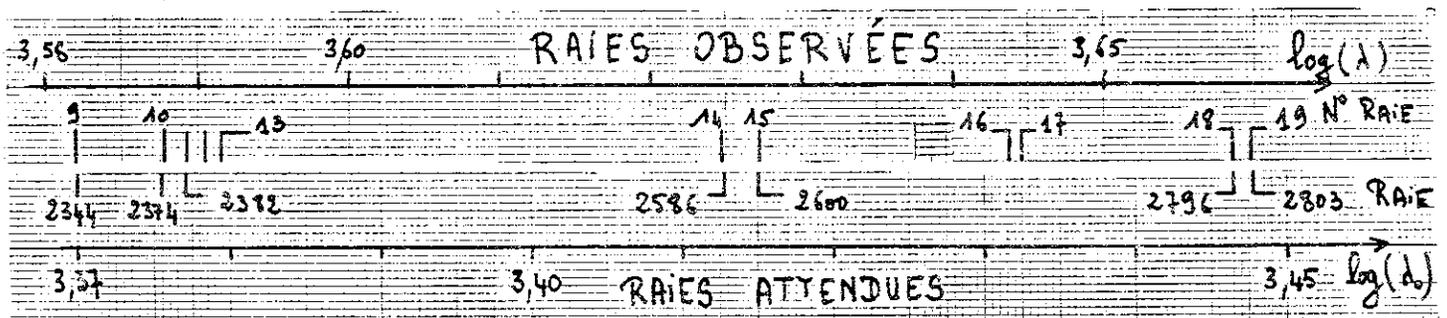
L'identification des raies détectées dans le spectre de Q1209+107 (voir précédent N°) est la suivante:

- raies en émission: il s'agit dans l'ordre de H (1215), N⁴⁺ (1240), Si³⁺ (1399) et C³⁺ (1549)

- raies en absorption: les 8 premières ne peuvent être regroupées et appartiennent donc à des systèmes différents; pour les autres, les auteurs donnent:

N°	Identification	Z _a	N°	Identification	Z _a
9	Fe ⁺ (2344)	0,6295	15	Fe ⁺ (2600)	0,6295
10	Fe ⁺ (2374)	0,6297	16	C ³⁺ (1548)	1,8434
11	Fe ⁺ (2382)	0,6302	17	C ³⁺ (1550)	1,8433
12	Mg ⁺ (2796)	0,3930	18	Mg ⁺ (2796)	0,6293
13	Mg ⁺ (2803)	0,3929	19	Mg ⁺ (2803)	0,6294
14	Fe ⁺ (2586)	0,6295			

On obtient ces résultats facilement en recherchant systématiquement les doublets de C³⁺ et Mg⁺ par exemple. Une autre façon d'opérer consiste à porter sur une échelle logarithmique les longueurs d'onde mesurées d'une part et attendues (sans décalage) d'autre part; en faisant glisser ces deux échelles l'une sur l'autre, on recherche la position relative qui donne simultanément plusieurs coïncidences (la multiplication par (1+Z) se traduisant alors, graphiquement, par une translation de log(1+Z)). Le schéma ci-dessous reproduit la position correspondant au système à Z_a=0,629 (raies 9,10,11,14,15,18 et 19).



Cette méthode est bien appropriée à la recherche de systèmes ne présentant pas, dans le domaine spectral observé, de doublet aisément identifiable.

DISTRIBUTION DES DECALAGES ET NATURE DES OBJETS INTERPOSES.

Une fois le problème de la reconnaissance des systèmes de raies résolu, la principale question qui se pose concerne la nature des objets responsables des raies d'absorption? S'agit-il de nuages de gaz éjectés par le quasar, de galaxies ou de nuages intergalactiques intersectés par la ligne de visée ?

Avant de présenter les éléments de réponse apportés jusqu'à maintenant, une première constatation s'impose lorsqu'on examine l'ensemble des données disponibles actuellement (relatives à environ 50 QSOs): les systèmes qui apparaissent dans le spectre d'un quasar donné ont toujours un décalage inférieur ou égal à son décalage d'émission. Cela indique très clairement que le redshift croît de façon monotone avec la distance car des objets situés au delà du quasar ne sauraient modifier le spectre de la lumière perçue de la part de celui-ci. L'interprétation cosmologique du redshift (expansion de l'univers) trouve donc là un argument supplémentaire en sa faveur.

La distribution statistique observée pour les redshifts d'absorption a été analysée en détail: elle s'avère compatible avec ce qu'on attendrait de la part d'objets répartis au hasard dans l'espace. On note toutefois une tendance à trouver plusieurs systèmes groupés avec des écarts ΔZ impliquant des vitesses relatives ΔV inférieures à 2000 Km/s ($\Delta V = c \Delta Z / (1+Z)$ pour de faibles ΔZ). Ceci n'est pas sans rappeler la distribution des galaxies fréquemment associées en amas dont la dispersion de vitesse interne est précisément de l'ordre de grandeur mentionné. Quantitativement, dans l'intervalle $1 < Z < 2$ par exemple, on dénombre en moyenne 2 doublets 1548-1551 Å de C^{3+} . On peut alors se demander, en admettant que les galaxies soient effectivement responsables de la formation des raies, combien de systèmes sont attendus en moyenne dans un domaine de redshift donné. Ce nombre est directement proportionnel au produit $n \cdot S$ ou n désigne le nombre de galaxies par unité de volume et S la surface projetée de celles-ci. n et S peuvent être estimés en observant les galaxies proches: dans notre environnement "proche" n est de l'ordre de $0,01 \text{ Mpc}^{-3}$ et la valeur de S correspond approximativement à la surface d'un disque de rayon 15 kpc. A un redshift Z quelconque, l'utilisation d'un modèle cosmologique permet d'extrapoler pour obtenir $n(Z)$ à partir de $n(Z=0)$; pour ce qui est de S , on peut admettre que les dimensions sont indépendantes du temps donc de Z (mais c'est une hypothèse discutable, comme nous le verrons plus loin). Le résultat obtenu est le suivant: le nombre de doublets C^{3+} observés est de 10 à 20 fois supérieur à ce que l'estimation précédente laisserait attendre. Toutefois, nous avons admis que les limites de visibilité optique des galaxies coïncident avec celles des régions occupées par le gaz ionisé qui produit les raies d'absorption. Cela n'est en rien évident car la lumière enregistrée sur les plaques est celle des étoiles; la matière qui nous intéresse ne se manifeste quant à elle, par aucune émission perceptible. Pour l'hydrogène atomique par exemple, on sait à partir des observations de la raie à 21cm, que l'extension du gaz est nettement supérieure à celle des étoiles dans les galaxies spirales. Les elliptiques, en revanche, s'avèrent en moyenne très pauvres en gaz. Aussi est-il difficile d'apprécier si le désaccord constaté suffit à remettre en question l'idée selon laquelle les objets absorbants sont bien des

galaxies. Si en fin de compte il s'avérait que cette hypothèse est valable cela signifierait que les galaxies sont en général entourées de halos gazeux dont le diamètre est environ 4 fois plus grand que le diamètre optique; pour l'instant, aucune indication n'a été trouvée permettant d'affirmer qu'il en est ainsi dans les galaxies proches.

L'importance du désaccord mentionné doit encore être relativisée car il dépend en fait des raies choisies pour détecter et dénombrer les systèmes. La plupart des raies identifiées ne sont pas très au delà des limites de détection et on conçoit que le choix d'une transition particulière influe (via l'abondance de l'élément concerné, la force de cette transition, l'état d'ionisation de la matière...) sur les résultats statistiques finalement obtenus. Ainsi, pour les systèmes présentant le doublet 2796-2803 Å de Mg^+ , le nombre observé vaut 4 fois la valeur attendue ce qui correspond à des dimensions seulement deux fois supérieures à celles optiques.

Il faut également souligner le fait que des résultats obtenus à partir de raies différentes ne se rapportent, en général, pas au même domaine de redshift. En effet, le domaine spectral accessible au sol est sévèrement limité d'une part à 3100 Å par l'atmosphère qui absorbe très efficacement l'ultraviolet et d'autre part vers 6500 Å par la sensibilité des détecteurs qui décroît rapidement au delà. Dès lors, une raie donnée de longueur d'onde λ_0 ne permet d'échantillonner qu'un domaine relativement étroit ($(3100/\lambda_0)-1 < Z < (6500/\lambda_0)-1$). Par exemple, pour les deux doublets les plus communément utilisés de C^{3+} et Mg^+ les intervalles correspondants sont $1,0 < Z < 3,2$ et $0,11 < Z < 1,32$. Nous avons déjà mentionné quelques raisons permettant de comprendre la différence constatée entre les nombres de doublets Mg^+ et C^{3+} . Néanmoins, cet écart pourrait aussi être dû en partie à ce que les premiers systèmes correspondent à des galaxies plus proches de nous et donc vues à un âge plus avancé. Si une telle évolution cosmologique (variation systématique avec Z) de la taille des halos gazeux était effectivement présente la contradiction ne serait plus alors qu'apparente. Il resterait alors à expliquer pourquoi à $Z \approx 0,7$ (décalage moyen pour les doublets Mg^+ observés) et à $Z \approx 2$ (pour C^{3+}) l'extension du gaz ionisé est respectivement 2 et 4 fois celle des étoiles.

Pour mieux comprendre la nature des objets absorbants il est nécessaire d'obtenir davantage d'informations sur des systèmes de faible redshift ($Z \approx 0,5$)-domaine dans lequel, n et S étant déterminés de façon directe, il est facile de comparer le nombre de systèmes observé avec celui attendu de la part des galaxies. C'est avec les systèmes identifiés par leur doublet C^{3+} - de loin les plus fréquemment rencontrés- que cet objectif peut être atteint le plus aisément en observant le spectre de quelques dizaines de QSOs entre 1550 et 2500 Å. Un tel programme nécessite l'emploi d'un observatoire hors atmosphère fonctionnant dans

l'UV; sa réalisation par le télescope spatial (en principe mis en orbite dans les années à venir par la navette) est déjà prévue. On pourrait penser que pour dénombrer les systèmes proches il est plus simple de rechercher des raies visibles telles celles du doublet $3934-3969\text{Å}$ de Ca^+ plutôt que des raies ultraviolettes; il n'en est rien car cette espèce est trop peu abondante pour être détectée même lorsque les raies de Mg^+ ou C^{3+} sont fortes.

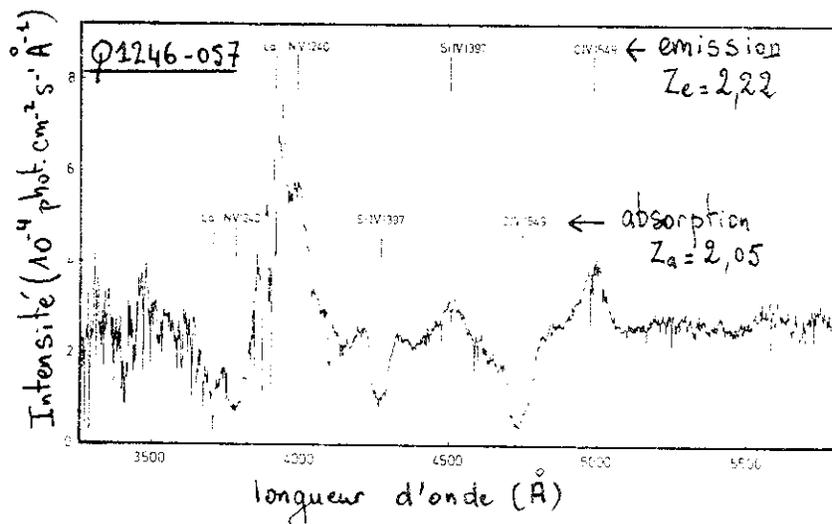
LES SYSTEMES DE FAIBLE DECALAGE: VOIR LA GALAXIE INTERPOSEE.

Un autre moyen permettant de préciser l'origine des systèmes consiste à étudier en détail des cas précis bien choisis pour rechercher directement la galaxie contenant le gaz où se forment les raies. Pour que ce test soit concluant il faut que a) l'image obtenue révèle la présence d'une galaxie, très proche de la ligne de visée du quasar (distance projetée inférieure à 50 - 60 kpc), b) que le redshift de cette galaxie (déterminé à partir de ses raies d'émission) coïncide avec celui du système d'absorption. Ces objectifs ne sont accessibles que pour des systèmes de faible décalage, c'est à dire identifiés par leur doublet Mg^+ . Au delà, des galaxies normales deviendraient indétectables. De plus, lorsque Z augmente, les objets absorbants potentiels deviennent de plus en plus difficile à séparer de l'image du quasar car, à distance projetée constante, l'écart angulaire décroît. Pour fixer les idées, précisons que la turbulence atmosphérique impose une limite inférieure de quelques secondes d'arc pour la taille des images et que 10kpc vus à $Z=0,25$ correspondent environ à 3". Plusieurs essais de ce type ont été entrepris et jusqu'à maintenant deux cas concluants ont pu être mis en évidence. L'entrée en service du télescope spatial devrait également permettre un progrès considérable de ces observations; avec ses 2m de diamètre, il fournira des images, non dégradées par l'atmosphère, d'une grande finesse (résolution de quelques 0,01"), ce qui permettra un examen détaillé de l'environnement immédiat du quasar. De plus, comme on l'a vu précédemment, le spectroscopie du télescope spatial devrait permettre d'identifier de nombreux systèmes faiblement décalés et apportera ainsi de nouveaux candidats (rares à l'heure actuelle) pour ce genre d'étude.

L'HYPOTHESE D'UNE ORIGINE INTRINSEQUE DES SYSTEMES.

Une autre façon d'expliquer la présence des raies d'absorption réside dans l'existence de nuages de gaz éjectés par le quasar le long de la ligne de visée et dans la direction de l'observateur. Cette hypothèse, qu'on peut qualifier d'intrinsèque puisqu'elle met en jeu de la matière associée au quasar lui même, a connu une grande faveur lorsque les premiers systèmes de raies furent découverts. Aujourd'hui, elle a été largement abandonnée, du moins en ce qui concerne la majorité des systèmes de raies étroites. Les raisons de ce retournement sont

multiples. D'abord, lorsque les décalages d'absorption, Z_a , et d'émission, Z_e , sont très différents, la vitesse d'éjection nécessaire est très grande (voisine de c); il paraît alors impossible de concilier un mouvement d'ensemble quasi-relativiste avec une dispersion de vitesse interne, déduite de la largeur des raies, aussi faible que 10 à 20 Km/s. De plus, on voit mal comment le mécanisme d'éjection pourrait reproduire la distribution uniforme observée pour la vitesse relative des nuages par rapport aux QSOs; il semble plutôt qu'un tel phénomène devrait se traduire par une déficience de systèmes associés à de grandes vitesses d'éjection ou par l'existence d'une valeur typique. Enfin, les conditions physiques au sein du gaz telles qu'elles peuvent être déduites de l'analyse des raies, apparaissent assez voisines de celles régnant autour de notre propre galaxie; il est hautement improbable qu'un évènement aussi énergétique que l'éjection à quelques $0,1c$ n'ait pas laissé de traces spécifiques (présence d'éléments très fortement ionisés par exemple...). Ainsi, malgré certaines difficultés, l'hypothèse d'une origine galactique des raies reste pour l'instant la plus vraisemblable. Elle présente l'avantage d'être la plus naturelle, de conduire à un ordre de grandeur grossièrement correct pour le nombre de systèmes et de bien rendre compte de la distribution des redshifts observés. Ceci étant, il reste possible que certains systèmes à $Z_a \approx Z_e$ soient dus à des nuages éjectés par le QSO car les vitesses requises sont alors beaucoup plus réalistes. Il existe du reste une classe de systèmes dont nous n'avons pas parlé jusqu'à maintenant - dits à raies d'absorption larges (plusieurs fois 100 \AA typiquement)- et toujours observés à Z_a proche de Z_e pour laquelle l'interprétation intrinsèque est très probablement correcte. Le spectre d'un quasar présentant un système de ce type est représenté dans la figure ci-dessous.



LES SYSTEMES SANS RAIES DE METAUX: DES GALAXIES AVORTEES ?

Revenons maintenant aux raies qui n'ont pu être identifiées dans le spectre de Q1331+170 et 1229+107. Il est remarquable que toutes soient situées à

une longueur d'onde inférieure ou égale à celle de la raie Ly α en émission; la même constatation est d'ailleurs faite pour la grande majorité des quasars. D'où l'idée qu'il s'agit simplement de raies Ly α (1215 \AA) sans raies d'éléments métalliques associées (en astrophysique, tout élément autre que H ou He est dit métallique). Cette interprétation est également fondée sur le fait qu'on peut parfois trouver, associées aux plus fortes d'entre elles et au même redshift, d'autres raies de l'hydrogène appartenant à la série de Lyman, Ly β à 1025 \AA et Ly γ à 972 \AA . Les raies Ly α "seules" (on parle alors de "systèmes Ly α ") sont très nombreuses (au point qu'on désigne par "forêt Ly α " la région du spectre où elles apparaissent) et vraisemblablement formées dans des objets intergalactiques distribués au hasard dans l'espace. Ces nuages ne contiennent pas (ou très peu) d'éléments lourds (C, N, O, Si...); ils pourraient correspondre à des entités trop peu massives pour avoir donné naissance, au début de l'évolution de l'univers, à des galaxies normales formant des étoiles et par suite synthétisant les éléments métalliques habituellement rencontrés. L'observation au sol ne permet la mise en évidence que des systèmes Ly α de grand redshift ($Z > (3100/1215-1)$ soit $Z > 1,6$). Y a-t-il de tels nuages dans notre voisinage ? Encore une question qui nécessite l'obtention de spectres dans l'UV et à laquelle le télescope spatial pourra apporter une réponse.

Comme on le voit, l'étude des systèmes de raies d'absorption est un domaine riche d'avenir. Cela tient en partie au principe même de l'observation: la possibilité de détecter un système est limitée uniquement par la magnitude apparente du quasar servant de sonde et non par la distance nous séparant du nuage absorbant. Si comme on peut l'espérer, de nouveaux QSOs de très grand redshift ($Z > 4$) sont bientôt découverts, il sera possible par l'analyse de leur spectre de préciser certaines propriétés des galaxies interposées sur la ligne de visée; de telles distances correspondent à une époque reculée de l'histoire de l'univers et on peut s'attendre à ce que des effets évolutifs très intéressants se manifestent (moindre abondance des éléments lourds, état d'ionisation plus élevé lié à un champ de rayonnement plus intense...). Par ailleurs, lorsque certains nuages responsables des systèmes Ly α auront pu être étudiés plus en détail, il sera très important de voir dans quelle mesure les théories actuelles décrivant l'évolution de l'univers à ses débuts (fragmentation de la matière primitive, formation des galaxies, des amas...) sont capables de rendre compte de l'existence et des propriétés de ces objets énigmatiques.

PATRICK BOISSÉ