

LES SYSTEMES DE RAIES D'ABSORPTION DES QUASARS

Les quasars ou QSOs pour "quasi-stellar objects" sont à bien des égards des objets tout à fait remarquables. D'abord, il s'agit des sources les plus lointaines actuellement connues comme l'indique la grande valeur du décalage vers le rouge de leurs raies d'émission. Ce décalage ou redshift, Z_e , est défini par $\lambda_{\text{obs}} = (1 + Z_e) \lambda_0$ où λ_{obs} et λ_0 désignent les longueurs d'onde observée et au repos pour la raie considérée. La plus grande valeur connue égale 3,8, ce qui, interprété dans le cadre des modèles cosmologiques standards (expansion de l'Univers), correspond à une distance telle que le temps de propagation de la lumière est voisin de 7 milliards d'années et devient comparable à l'âge de l'Univers lui-même (15 à 20 milliards d'années). Les quasars permettent donc d'observer un Univers "plus jeune" que celui qui nous entoure. De plus, leur luminosité (puissance totale rayonnée) est extrêmement grande et peut atteindre 1000 fois celle d'une galaxie typique. C'est ainsi qu'en dépit de leur éloignement, ils restent accessibles à l'observation. Récemment, les techniques modernes de traitement des images ont permis de montrer qu'un quasar apparaît généralement entouré d'une faible nébulosité, attribuée à l'émission d'une galaxie ordinaire dont le quasar occupe le centre. Ces résultats confirment l'hypothèse d'une continuité entre les galaxies dont le noyau est très brillant et les quasars; ces derniers correspondent simplement à une plus grande activité du noyau relativement au reste de la galaxie. Les phénomènes qui aboutissent à la production de la gigantesque luminosité observée restent pour une grande part mystérieux, même si, parmi tous les scénarios proposés, certains apparaissent plus vraisemblables que d'autres, tel celui invoquant l'existence d'un trou noir massif entouré d'un disque dont il accrète la matière. Nous laisserons de côté les propriétés des quasars relatives à leur émission radio, variabilité, à la polarisation du rayonnement émis... (on pourra se reporter pour cela à l'article de S. Collin N° 7 des CC) pour nous intéresser par la suite davantage à ce que peuvent nous révéler ces objets sur l'espace qui nous en sépare, qu'à leurs caractéristiques propres.

La présence de raies d'absorption dans le spectre des étoiles de notre galaxie est un phénomène très commun et observé depuis longtemps. Parfois les raies se forment dans l'atmosphère même de l'étoile; c'est le cas en particulier pour les raies de Fraunhofer présentes dans le spectre solaire. Mais l'absorption peut également être due à des nuages de gaz interstellaire situés par hasard sur la ligne de visée, l'étoile jouant alors le rôle d'une sonde vis à vis du milieu traversé. Ainsi dans le voisinage solaire l'étude spectroscopique de quelques étoiles choisies parmi les plus lumineuses (ζ Ophiucus, ζ Persei...) a permis de préciser les propriétés de la matière gazeuse locale (état d'ionisation du gaz, densité, température...). A l'échelle de l'Univers les quasars peuvent être utilisés

de façon identique, leur spectre apportant alors des informations sur les objets intersectés par la ligne de visée : galaxies, nuages de gaz intergalactiques ou associés à la galaxie qui contient le quasar.

C'est en 1966 que la présence de fines raies sombres a été remarquée pour la première fois par Burbidge dans le spectre du quasar 3C191 (il s'agit d'une radio-source, la 191ème du 3ème catalogue de Cambridge). Jusqu'à maintenant seules des raies brillantes - dites d'émission - avaient été observées. Pour illustrer notre discussion nous allons décrire le spectre du quasar Q1331+170 (cette notation rappelle en abrégé les coordonnées de l'objet : $\alpha = 13\text{h } 31\text{mn}$, $\delta = 17,0^\circ$), obtenu en 1982 par Young, Sargent et Boksenberg (figure 1).

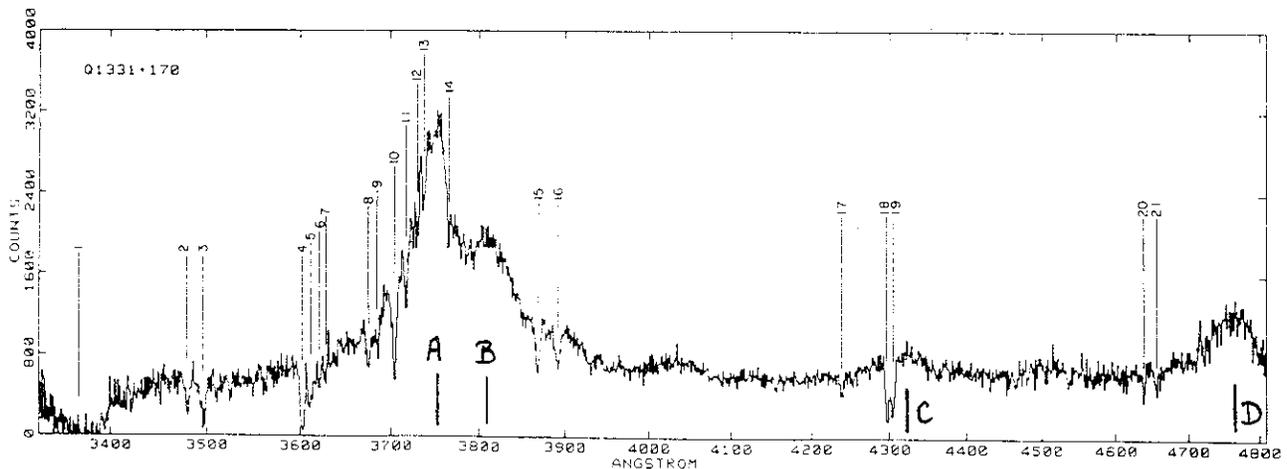


Fig.1: spectre du quasar Q1331+170

On peut y distinguer quatre raies en émission, notées A, B, C, D centrées aux longueurs d'onde $\lambda_A = 3747\text{Å}$, $\lambda_B = 3819\text{Å}$, $\lambda_C = 4319\text{Å}$, $\lambda_D = 4765\text{Å}$ (à environ 3Å près)

A l'époque de la découverte des quasars, l'identification de ces raies posait un problème car les longueurs d'onde mentionnées ne correspondent pas à des transitions connues au laboratoire. Compte tenu de nos connaissances en physique atomique, il n'est pas difficile de prédire la séquence de raies susceptibles d'apparaître en émission qui est la suivante (nous indiquons l'espèce concernée et la longueur d'onde en Angström) :

Espèce	$\lambda_0(\text{Å})$	Espèce	$\lambda_0(\text{Å})$
H	1215 (Ly α)	Mg ⁺	2800
N ⁴⁺	1240	H	4861 (H β)
Si ³⁺	1399	O ²⁺	4959
C ³⁺	1549	O ²⁺	5007
C ²⁺	1909	H	6562 (H α)

C'est Schmidt qui, en 1965, réalisa qu'en fait cette séquence était effectivement présente dans les spectres observés mais notablement décalée vers le rouge. Ainsi, contrairement aux habitudes héritées du travail en laboratoire ou

de l'astronomie galactique, la longueur d'onde à laquelle apparait une raie ne permet plus à elle seule l'identification de la transition mise en jeu dans le cas des quasars. En revanche les rapports des longueurs d'onde pour deux raies distinctes (par exemple celle d'un doublet, paire de raies très voisines d'un même élément) restent inchangés puisque

$$\lambda_1 / \lambda_2 = \lambda_{01} (1+Z) / \lambda_{02} (1+Z) = \lambda_{01} / \lambda_{02}$$

Ce sont donc des rapports de ce type qui constituent la signature permettant l'identification des transitions et par suite la détermination du décalage Z. Deux raies au minimum sont nécessaires ; si une troisième (ou davantage) est observée, elle fournit une vérification. Pour les deux raies les plus nettes (A et D) du quasar Q1331+170, le rapport λ_D / λ_A égale 1.272, valeur qui correspond au rapport 1549 / 1215 des raies de C⁴⁺ et de H (Lyman α). Le redshift de Q1331+170 est donc donné par :

$$1 + Z = \lambda_A / 1215 = \lambda_D / 1549 \text{ soit } Z = 2,08.$$

Il est ensuite facile de vérifier cette détermination en cherchant à identifier les autres raies B et C. La table précédente laisse prévoir deux raies entre A et D; celle de N⁴⁺ à $\lambda = 1240 * 3,08 = 3819 \text{ \AA}$ et de Si³⁺ à $\lambda = 1399 * 3,08 = 4309 \text{ \AA}$ ce qui correspond bien, aux incertitudes de mesure près, aux raies B et C.

Comme on peut le voir sur la figure 1 de nombreuses raies d'absorption beaucoup plus étroites que les précédentes, sont également présentes. Leur présence traduit le fait qu'une fraction de la lumière émise par le QSO est prélevée par des nuages gazeux situés quelque part sur la ligne de visée et ce, à des longueurs bien précises, déterminées à la fois par la nature des atomes ou ions mis en jeu et par le décalage des nuages qui les contiennent. Les auteurs ont dénombré en tout 21 raies et donnent la longueur d'onde mesurée pour chacune d'entre elles (l'incertitude est de l'ordre de 0,2 \AA):

N°	λ (\AA)	N°	λ (\AA)	N°	λ (\AA)
1	3370,5	8	3676,3	15	3869,6
2	3481,2	9	3686,2	16	3893,0
3	3497,8	10	3705,0	17	4239,8
4	3603,5	11	3718,4	18	4298,5
5	3613,0	12	3730,7	19	4305,6
6	3622,5	13	3738,3	20	4639,4
7	3628,5	14	3766,5	21	4656,5

De la même façon que précédemment nous dressons ci-dessous la liste des raies qu'on peut raisonnablement attendre en absorption dans le domaine ultraviolet, compte tenu de l'abondance relative des éléments et des probabilités de transition mesurées au laboratoire. Comme, cette fois, les raies sont intrinsèquement fines, il est nécessaire de distinguer des raies voisines

appartenant par exemple à un même doublet (dans la table des raies en émission nous les avons confondues car elles ne pouvaient être observées séparément).

Espèce	$\lambda_0(\text{Å})$	Espèce	$\lambda_0(\text{Å})$
H	1215,7	Al ⁺	1670,8
N ⁴⁺	1238,8	Al ²⁺	1854,7
N ⁴⁺	1242,8	Al ²⁺	1862,8
Si ⁺	1260,4	Fe ⁺	2344,2
Si ⁺	1304,4	Fe ⁺	2374,5
O	1304,9	Fe ⁺	2382,8
C ⁺	1334,5	Fe ⁺	2586,6
Si ³⁺	1393,8	Fe ⁺	2600,2
Si ³⁺	1402,8	Mg ⁺	2796,3
Si ⁺	1526,7	Mg ⁺	2803,5
C ³⁺	1548,2	Mg	2853,0
C ³⁺	1550,8		

Toutes ces raies appartiennent au domaine ultraviolet. Le domaine visible est, quant à lui, beaucoup moins riche en transitions facilement détectables et présente principalement deux doublets, ceux de Ca⁺ dans le bleu (à 3934,8 et 3969,6 Å) et de Na dans le rouge (à 5889,9 et 5895,9 Å). Cela provient de ce que a) dans les conditions physiques rencontrées au sein des nuages, les ions sont quasiment tous dans leur état fondamental et b) pour la plupart des espèces l'écart d'énergie entre le fondamental et le niveau supérieur voisin est supérieur à 4eV ce qui correspond à une longueur d'onde inférieure à 3100 Å (limite pour l'observation au sol; en deçà, l'atmosphère cesse d'être transparente)

Une démarche identique à celle utilisée pour les raies d'émission peut maintenant être appliquée pour identifier les raies d'absorption. Dans la suite on appellera système de raies un ensemble de raies de divers éléments correspondant à un même décalage et donc à un même nuage absorbant. Notre but est de déterminer ceux qui apparaissent dans le spectre de Q1331+170 ainsi que leur redshift. Par rapport aux raies d'émission, le travail est facilité dans la mesure où maintenant, on peut choisir comme couple de raies celles d'un même doublet, pour autant que la résolution instrumentale permette de les séparer (c'est le cas pour Q1331+170 et pour les doublets mentionnés dans la table). Par contre, une complication peut survenir si plusieurs objets absorbants sont présents (mais avec des décalages distincts) sur la ligne de visée : plusieurs systèmes se chevaucheront alors, rendant plus difficile les identifications.

Pour notre exemple, commençant par les raies 18 et 19 qui appartiennent vraisemblablement à un même doublet, le rapport $\lambda_{19} / \lambda_{18}$

=1,00165 approche bien la valeur $1550,8 / 1548,2 = 1,00168$ du doublet de C^{3+} . Le redshift correspondant vaut $Z_a = 1,776$. La recherche des autres raies de ce système confirme son redshift et fournit l'identification des N° 1,3,5,6,10,15,16,17 et 20. Voici les résultats présentés par les auteurs :

N°	Identification	Z_a	N°	Identification	Z_a
1	H (1215)	1,7726	16	Si ³⁺ (1402)	1,7752
3	Si ⁺ (1260)	1,7751	17	Si ⁺ (1526)	1,7771
5	O (1302)	1,7746	18	C ³⁺ (1548)	1,7765
6	Si ⁺ (1304)	1,7772	19	C ³⁺ (1550)	1,7764
10	C ⁺ (1334)	1,7762	20	Al ⁺ (1670)	1,7768
15	Si ³⁺ (1393)	1,7764			

Ainsi dans notre exemple un seul système a été trouvé. Nous reviendrons dans la suite de cet article sur les raies qui demeurent non identifiées. Nous proposons maintenant un second exemple (emprunté aux mêmes auteurs déjà cités) et soumettons à la perspicacité du lecteur l'identification des raies dans le spectre du quasar Q1209+107 (figure 2):

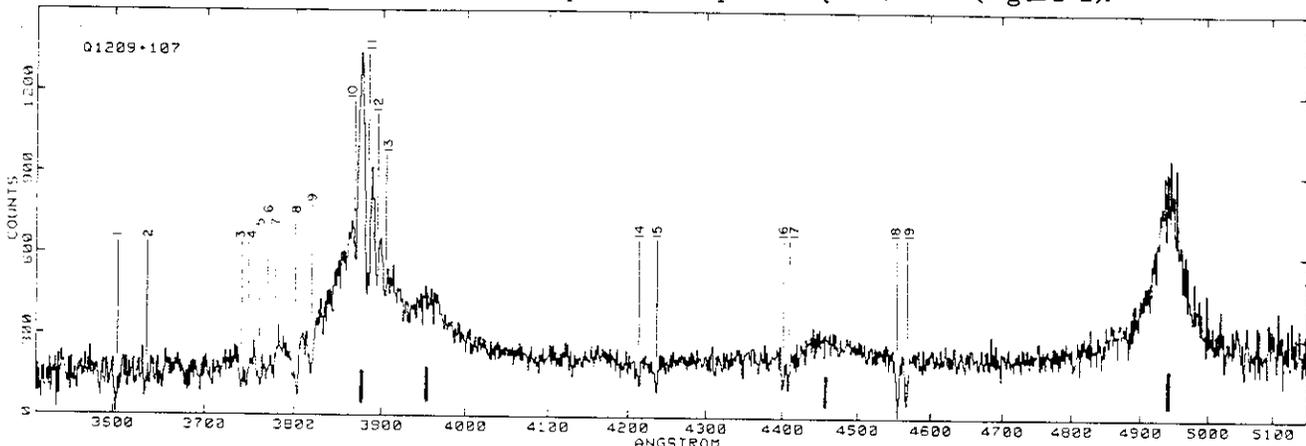


Fig.2: spectre du quasar Q1209+107

Quatre raies en émission, centrées à 3879, 3962, 4459 et 4942 Å sont visibles. Voici la liste des longueurs d'onde pour les 19 raies d'absorption détectées :

N°	λ (Å)	N°	λ (Å)	N°	λ (Å)
1	3604,6	8	3802,6	15	4237,0
2	3636,5	9	3819,8	16	4402,1
3	3742,3	10	3869,6	17	4409,3
4	3748,1	11	3884,0	18	4556,2
5	3761,6	12	3895,3	19	4568,1
6	3769,4	13	3905,1		
7	3777,5	14	4214,9		

Dans le prochain numéro, une solution sera proposée ainsi qu'une discussion concernant l'origine des systèmes de raies en général.

(A suivre)

PATRICK BOISSÉ