

# Les amas de galaxies

Florence Durret, I.A.P.

Les amas de galaxies sont les plus grandes structures connues dans l'Univers qui soient liées par la gravitation. A ce titre, ils intéressent les astronomes, à la fois en ce qui concerne leur étude particulière, et aussi pour les applications qu'ils peuvent avoir en cosmologie (étude de l'Univers dans son ensemble). Nous allons présenter leurs principales propriétés, telles que les puissants instruments d'observation nous les révèlent aujourd'hui.

## Aperçu historique

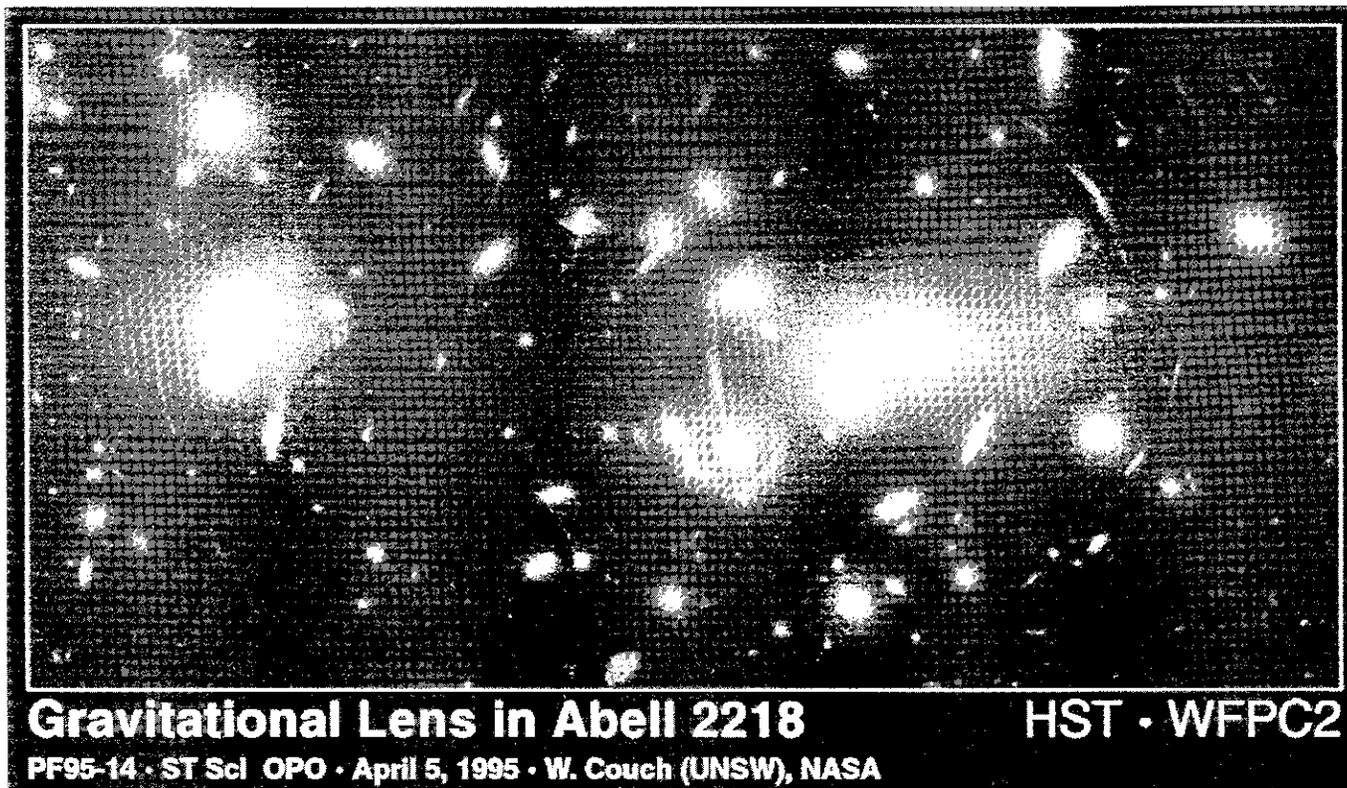
C'est l'astronome suisse Zwicky qui a découvert les amas de galaxies dans les années 1930. Il a tout d'abord constaté que dans certaines régions du ciel les galaxies semblaient se regrouper par dizaines, voire par centaines. Bien sûr, il pouvait s'agir de superpositions fortuites dans le ciel, mais l'obtention de leur décalage spectral a révélé que dans la majorité des cas la plupart des galaxies d'une concentration - ou amas - avaient le même décalage spectral. Ceci a conduit à définir un amas comme un ensemble de galaxies situées toutes à la même distance de nous, et donc interagissant les unes sur les autres par l'attraction gravitationnelle. Zwicky a ensuite découvert que les décalages spectraux des galaxies d'un même amas étaient presque égaux, mais pas tout à fait. Ceci a été interprété comme dû au fait que les galaxies étaient en mouvement les unes par rapport aux autres à l'intérieur de l'amas. Mais les vitesses relatives mesurées étaient alors beaucoup trop grandes pour que l'amas garde sa cohésion. Il devait donc exister dans les amas de la matière invisible dont on ne pouvait deviner l'existence que par ses effets gravitationnels : la matière dite noire ou sombre.

En 1958, Abell a publié le premier grand catalogue d'amas de galaxies, obtenu en observant à la loupe les plaques du re-

levé photographique du ciel du Mont Palomar. Certains des amas d'Abell sont en fait des superpositions sur le plan du ciel de galaxies sans rapport entre elles, mais en majorité ce sont des amas réels, et ce catalogue est encore très utile à l'heure actuelle.

Dans la fin des années 1960 ont été lancés les premiers satellites d'observations en rayons X. Comme ce type de rayonnement est absorbé par l'atmosphère terrestre, il n'était jusqu'alors pas accessible aux astronomes. Et là, surprise : on a détecté des rayons X en provenance de l'amas de galaxies Coma, un amas très riche et relativement proche ! Ce rayonnement X a ensuite été étudié par des satellites de plus en plus perfectionnés : Ariel V, Einstein, ROSAT, ASCA, et tout récemment Chandra et XMM-Newton, pour citer quelques exemples. On a pu obtenir des images de plus en plus détaillées des amas, ainsi que des spectres : ces derniers ont permis d'interpréter physiquement ce type de rayonnement comme provenant d'un gaz très chaud et très peu dense. Nous y reviendrons ci-dessous.

L'image des amas de galaxies depuis les années 1970 est donc la suivante : quelques dizaines à quelques centaines de galaxies, distribuées dans du gaz chaud, et de la matière noire, nécessaire pour que les amas gardent leur cohésion. Nous allons



## Gravitational Lens in Abell 2218

HST · WFPC2

PF95-14 · ST ScI OPO · April 5, 1995 · W. Couch (UNSW), NASA

**Fig1: Image de la région centrale de l'amas de galaxies Abell 2218 prise avec le télescope spatial Hubble.**

On peut y voir un grand nombre de galaxies, ainsi qu'une multitude de petits arcs plus ou moins centrés sur la galaxie la plus brillante vers la droite de la photo.

maintenant préciser les modes d'étude et les propriétés physiques de chacune de ces composantes.

### Les galaxies

L'image de la région centrale de l'amas de galaxies Abell 2218 prise avec la caméra à grand champ du Télescope Spatial Hubble est montrée dans la figure 1 ci-dessus. On y voit de nombreuses galaxies, ainsi que des structures en forme d'arcs sur lesquelles nous reviendrons par la suite.

Comme nous l'avons mentionné ci-dessus, si ce sont des images du ciel qui ont permis la découverte des amas de galaxies, l'apport de la spectroscopie a été crucial dans leur étude. En effet, des galaxies situées à des distances très différentes peuvent apparaître dans des directions très voisines dans le ciel, sans pour autant avoir de rapport physique les unes avec les autres. On doit donc obtenir des spectres de toutes les

galaxies pour s'assurer qu'elles sont bien au même décalage spectral.

Le principe de la mesure du décalage spectral  $z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$ , où  $\lambda$  est la longueur d'onde d'une raie mesurée dans le spectre de la galaxie et  $\lambda_0$  celle de la même raie au repos est le suivant.

Si le spectre de la galaxie présente des raies d'émission comme c'est le cas du spectre montré figure 4, on peut mesurer la position de ces raies sur le spectre et par comparaison avec la longueur d'onde  $\lambda_0$ , on détermine ainsi  $z$ .

Pour les galaxies les plus nombreuses, dont les spectres ne présentent que des raies d'absorption, on mesure de combien on doit décaler le spectre obtenu pour pouvoir le superposer au spectre d'une galaxie proche de décalage spectral bien connu, par exemple celui de M31 utilisé comme référence. On peut constater que ces deux spectres se ressemblent beaucoup, mais que les raies d'absorption du premier sont décalées vers la droite (c'est à dire vers le rouge) par rapport au second. Ceci per-

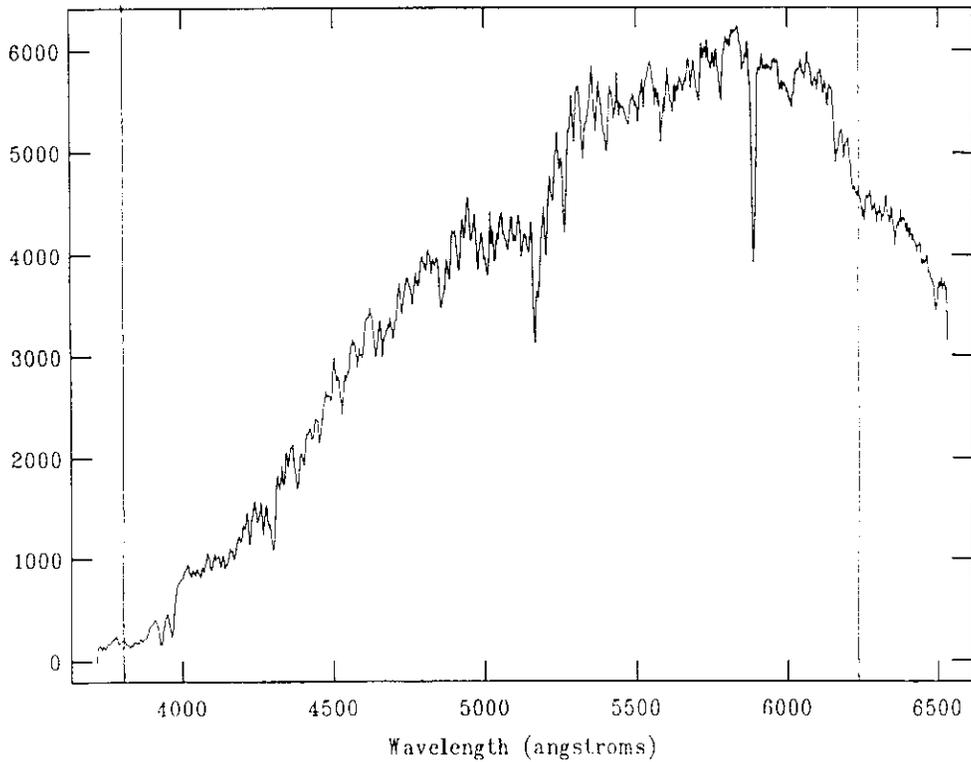
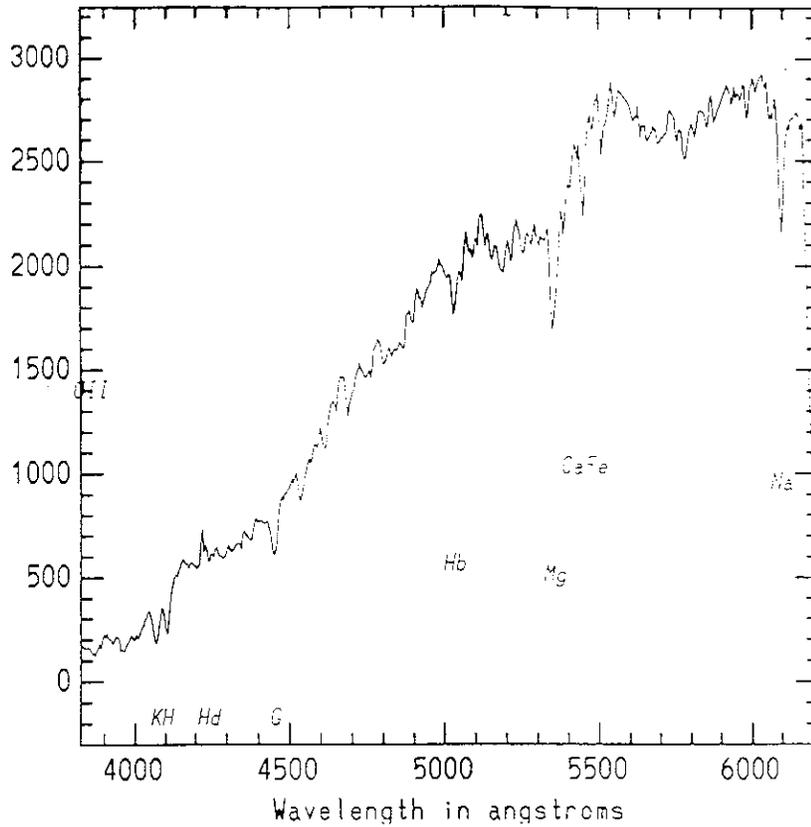
met de mesurer la différence des décalages spectraux et d'en déduire celui de la galaxie considérée. Ce décalage  $z$  est lié à la composante radiale de la vitesse de la galaxie par la relation suivante :  $v = c ((1+z)^2 - 1) / ((1+z)^2 + 1)$ , où  $c$  est la vitesse de la lumière, relation qui est établie dans le cas où la composante radiale de la vitesse n'est pas petite devant  $c$  alors que la composante transverse est petite devant  $c$ .

Notons que dans le cas où  $z$  est petit devant 1, la relation devient simplement  $v = cz$  ; on retrouve la formule utilisée dans le cas où la vitesse radiale est petite devant  $c$ .

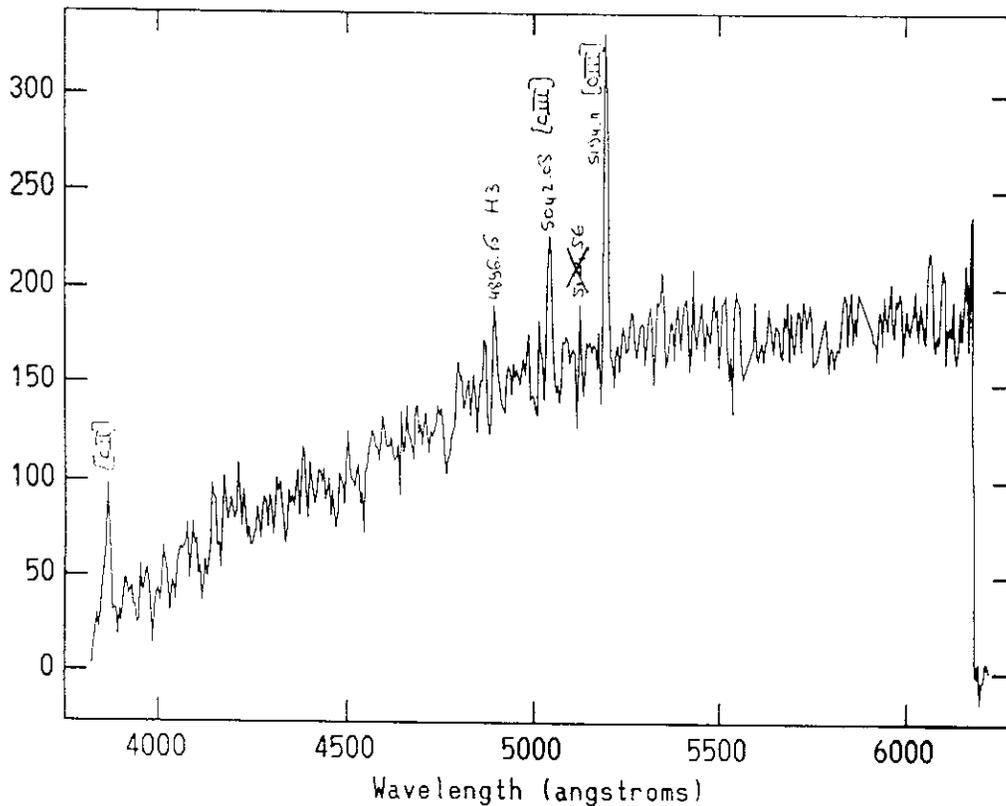
La composante radiale de la vitesse de la galaxie est la somme de sa vitesse dite "cosmologique", qui traduit l'expansion de l'Univers, et de la composante radiale de sa vitesse particulière.

L'intérêt de la spectroscopie des galaxies n'est pas seulement de confirmer leur appartenance à l'amas parce que les  $z$  sont voisins, mais aussi de pouvoir

**Fig. 2 : spectre d'une galaxie de l'amas Abell 85 dont on cherche à déterminer le décalage spectral.**  
 On constate que les raies d'absorption notées H et K se placent de part et d'autre de la longueur d'onde 4100 Å  
 $cz(\text{galaxie}) - cz(\text{M31}) = 10\,583 \pm 20 \text{ km/s}$ .



**Fig.3 : spectre de référence de la galaxie M 31, qui n'est pas décalée vers le rouge.**  
 Cette fois, les raies H et K tombent en dessous de 4000 Å.



**Fig. 4 : spectre d'une galaxie à raies d'émission.**

On a identifié 4 raies : de gauche à droite une raie de [OII] (oxygène une fois ionisé), la raie de Balmer H $\beta$  de l'hydrogène et deux raies de [OIII] (oxygène deux fois ionisé)

étudier leurs mouvements les unes par rapport aux autres. C'est ainsi que l'on a pu soupçonner l'existence de matière noire dans les amas.

On peut également étudier la manière dont se distribuent les galaxies à raies d'émission par rapport à celles dont le spectre ne présente que des raies d'absorption. On s'aperçoit ainsi que les galaxies à raies d'émission, qui sont le plus souvent des galaxies spirales, sont souvent situées à la périphérie des amas. Au contraire, les galaxies elliptiques, qui ne présentent quasiment jamais de raies d'émission, sont davantage concentrées au centre des amas. Ceci peut s'expliquer de manière naturelle dans l'hypothèse où les galaxies elliptiques sont formées par fusion de galaxies spirales. Les rencontres de galaxies étant plus probables dans les régions centrales plus denses des amas, il est alors normal d'y observer plus de galaxies elliptiques, tandis que les galaxies spirales sont plutôt dans les régions périphériques.

Depuis une dizaine d'années des spectrographes dits "multi-objets" sont disponibles sur plusieurs télescopes de la classe des 4 mètres (et vont l'être sur celle des 8 mètres). Ils permettent d'obtenir non plus le spectre d'une galaxie à la fois, mais ceux de plusieurs dizaines, voire maintenant de plusieurs centaines de galaxies à la fois. L'étude observationnelle des propriétés dynamiques des amas s'est donc considérablement développée depuis dix ans.

Il ne faut pas pour autant oublier l'imagerie (toujours en lumière visible). En effet, on dispose maintenant depuis une vingtaine d'années de détecteurs très sensibles, numérisés (fournissant donc des données pouvant être traitées directement par ordinateur) et linéaires (c'est à dire donnant une mesure directement proportionnelle à la quantité de lumière reçue) : les CCD (Charged Coupled Devices). Ces détecteurs sont utilisés à la fois en imagerie et en spectroscopie.

Des images obtenues avec des ca-

méras CCD lors de poses courtes avec des télescopes de taille modeste, de l'ordre de 2 mètres de diamètre, permettent grâce à l'emploi de filtres d'analyser les propriétés des galaxies et leur distribution dans l'amas. Si par exemple on fait une pose avec un filtre bleu, puis une pose avec un filtre rouge, on pourra déterminer quelles galaxies sont plus riches en étoiles bleues (chaudes et relativement jeunes) et quelles galaxies sont plutôt riches en étoiles rouges (plus froides et plus vieilles). Ceci peut nous renseigner sur la formation d'étoiles dans les diverses galaxies, et éventuellement sur l'influence que peut avoir le gaz chaud sur cette formation d'étoiles.

L'imagerie est un moyen d'obtenir des catalogues de galaxies susceptibles d'appartenir à des amas ; ce type de catalogue sert ensuite de base pour des observations spectroscopiques.

Avec un catalogue de galaxies dans la direction d'un amas, il est possible par exemple, de tracer la "fonction de luminosité", ce qui consiste à compter

le nombre de galaxies par intervalle de magnitude. C'est un moyen important de connaître la distribution des galaxies dans les amas.

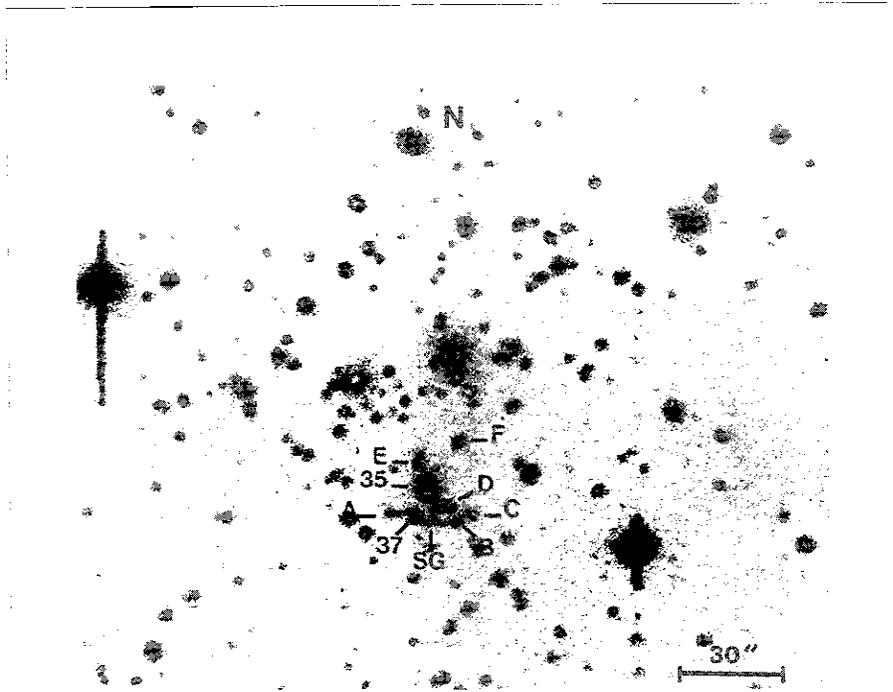
On peut en particulier comparer la forme des fonctions de luminosité pour différents amas, et aussi la comparer à celle des galaxies dites "de champ" (c'est à dire n'appartenant pas à un amas).

Enfin, l'imagerie dite "profonde", c'est à dire obtenue avec des télescopes de la classe des 4 mètres avec des temps de pose de l'ordre d'une à plusieurs heures, permet d'observer des galaxies beaucoup plus faibles, membres ou non de l'amas. C'est aussi un moyen privilégié de déterminer la distribution de la matière noire, par l'intermédiaire des arcs gravitationnels. Cette méthode va être décrite ci-dessous.

### Les arcs gravitationnels et la matière noire

La première image de l'amas Abell 370, obtenue par Geneviève Soucaïl et ses collaborateurs en 1987, est présentée dans la figure 5. Outre de nombreuses galaxies, on y voit une grande structure en forme d'arc. Celle-ci a été interprétée comme due à une galaxie d'arrière-plan dont l'image est déformée et amplifiée par l'amas de galaxies situé presque exactement dans la même direction. Cette interprétation a été inspirée par une théorie d'Einstein selon laquelle toute concentration de masse défléchit les rayons lumineux. Si une galaxie très lointaine est située exactement derrière un amas, la masse considérable de l'amas va alors être capable de défléchir, et aussi d'amplifier les rayons lumineux provenant de la galaxie, dont l'image apparaîtra alors déformée en un, voir plusieurs arcs. Le schéma figure 6 résume la forme des différents arcs selon l'alignement plus ou moins parfait entre la galaxie lointaine, l'amas de galaxies jouant le rôle de lentille et l'observateur.

A partir de la forme de l'arc (ou des arcs, s'il y en a plusieurs), il est possible par des calculs mathématiques assez complexes, de remonter à la distribution de matière dans l'amas. Comme il s'agit essentiellement de matière



**Fig 5 : première image de l'arc gravitationnel géant dans l'amas Abell 370.**

Cet arc est en fait l'image d'une galaxie d'arrière plan déformée et amplifiée par la masse contenue dans l'amas de galaxies situé entre elles et nous.

noire, on a alors une estimation de la distribution de matière noire dans l'amas.

### Le gaz émetteur X

Une image de l'amas Abell 85 en rayons X est montrée figure 7. On voit que la structure est à peu près sphéroïdale, avec une sous-structure vers le bas et une sorte de long filament orienté vers le coin inférieur gauche de l'image. La plupart des amas en rayons X présentent une structure relativement homogène et régulière.

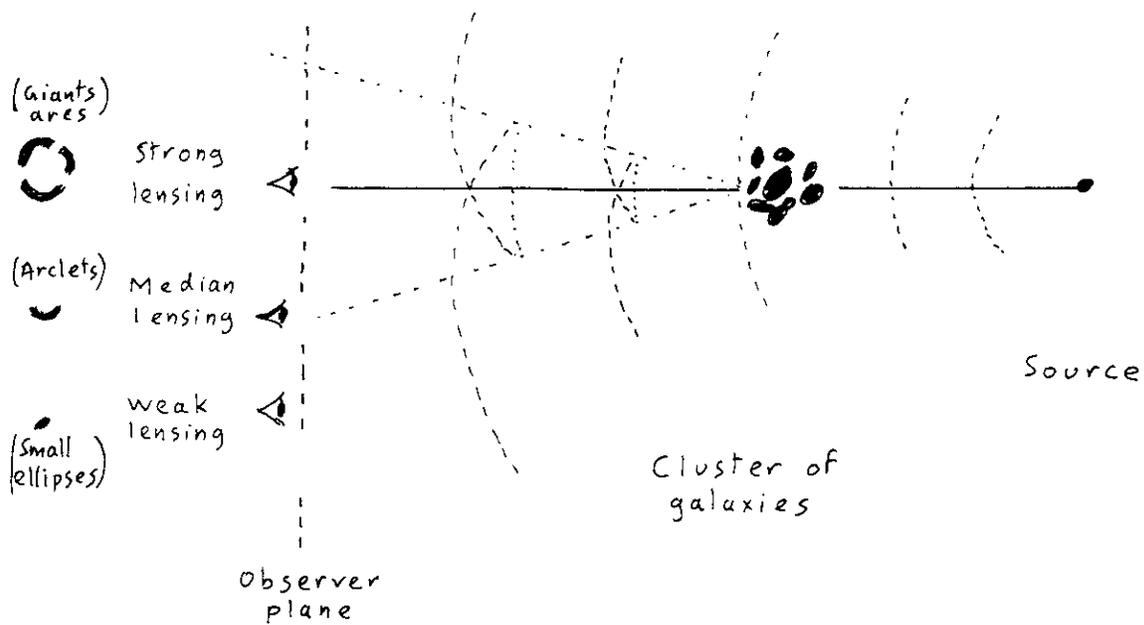
Tout comme en lumière visible, il est également possible d'obtenir des spectres en rayons X. Ceux-ci ont pu être interprétés comme dus au rayonnement dit de freinage qu'émettent les électrons lorsqu'ils passent au voisinage des protons ou autres ions chargés positivement. Un tel mécanisme implique l'existence d'un milieu très chaud (des dizaines de millions de degrés) et très peu dense ( $10^{-3}$  à  $10^{-2}$  particules par  $\text{cm}^3$ ), où tous les atomes sont entièrement ionisés. Les images obtenues ces vingt dernières années par le satellite Einstein et ceux qui l'ont

suivi ont confirmé qu'en rayons X les amas de galaxies apparaissent comme des halos de gaz émetteur X dans lesquels sont incluses des dizaines, voire quelques centaines de galaxies, ce qui est en accord avec l'hypothèse que les amas de galaxies sont bien des structures liées par la gravitation.

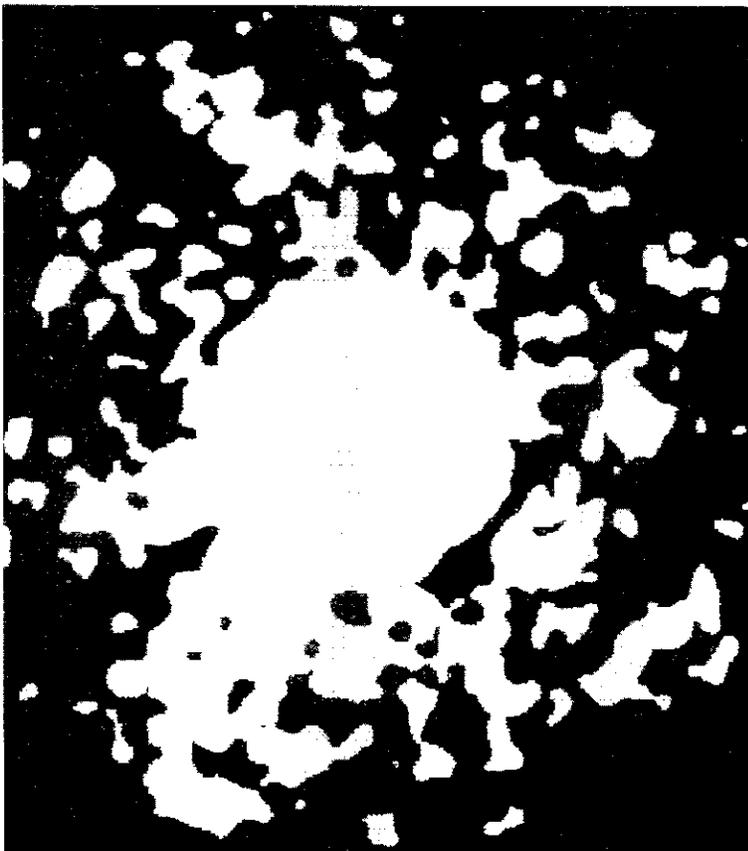
Si l'on suppose que le gaz émetteur X est en équilibre dans le potentiel gravitationnel de l'amas, dominé par la matière noire, on peut alors considérer que le gaz X est un traceur de la distribution de matière dans l'amas. Il devient alors possible d'estimer la distribution de matière (essentiellement noire) dans l'amas, et de comparer celle-ci à celle obtenue grâce à la méthode des arcs gravitationnels. L'accord est en général excellent.

### Conclusions

Nous avons vu que les amas de galaxies constituaient un champ d'étude passionnant, du fait des nombreux phénomènes physiques dont ils sont le siège. Des instruments de plus en plus performants viennent d'être mis en service : le VLT (Very Large Telescope)



**Fig. 6 : schéma montrant comment l'image d'une galaxie d'arrière-plan peut-être déformée** selon que l'alignement entre cet objet, l'amas de galaxies jouant le rôle lentille et l'observateur est plus ou moins grand. Les angles ont évidemment été grossis.



**Fig. 7. Image de l'amas de galaxies Abell 85 en rayons X,** prise avec le Compteur Proportionnel du Satellite ROSAT.

de l'Observatoire Européen Austral, au Chili, ensemble de quatre télescopes fonctionnant dans les domaines visible et infrarouge, les satellites américain Chandra et européen XMM-Newton fonctionnant en rayons X. Et n'oublions pas la puissance sans cesse accrue des ordinateurs qui permettent à la fois de traiter des volumes considérables de données observationnelles, mais aussi de réaliser des simulations numériques avec des précisions de plus en plus grandes, ce qui permet de cerner de mieux en mieux la réalité. On notera que les amas sont aussi des traceurs de la structure de l'Univers à plus grande échelle encore, mais ceci fera peut-être l'objet d'un autre article.

#### Quelques chiffres.

Dimension typique d'un amas : 2 ou 3 Mpc de rayon (1 Mpc vaut environ 3 millions d'années lumière).

Masse totale d'un amas : environ  $10^{15}$  fois la masse du Soleil, les galaxies (en général quelques centaines) représentant quelque % de cette masse, le gaz chaud émetteur X environ 15 à 20%, et la matière noire le reste de la masse.