

Les deux thèses en présence sont donc également intéressantes et doivent être mises sur un pied d'égalité.

Un modèle de quasar ?

Le gaz interstellaire est extrêmement sensible à toute variation du champ gravitationnel. Quand un objet perturbateur (la mini-galaxie passant au voisinage de la célèbre galaxie des Chiens de chasse, M 51, déjà montrée dans la première partie de l'ouvrage) s'approche d'une galaxie, il en résulte un « effet de marée », comparable à celui qu'exerce la Lune sur la Terre. Dans ce dernier cas, ce sont les masses liquides qui réagissent¹. Comme l'avait montré le Néo-Zélandais Alar Toomre dans ses simulations, cela est susceptible d'engendrer une perturbation spirale dans la galaxie. En fait c'est surtout le gaz interstellaire qui réagirait à cette sollicitation. Des ondes de densité apparaissent. Dans les régions où la densité du gaz interstellaire croît, sa température s'élève. Les collisions entre atomes s'accompagnent d'un processus dissipatif, d'émission de rayonnement. Cela refroidit les masses gazeuses comprimées et les déstabilise, comme déjà évoqué plus haut. C'est ce phénomène qui donne naissance à l'apparition, dans ce gaz, de nouvelles étoiles, raison pour laquelle les étoiles jeunes se situent dans les bras spiraux des galaxies. Le rayonnement ultraviolet qu'elles émettent ionise les masses gazeuses environnantes.

La moindre perturbation dans le champ de confinement de la galaxie, liée à son environnement de matière-ombre, engendrerait une réaction importante dans le gaz interstellaire. Le modèle matière - matière-ombre prévoit de possibles perturbations du champ gravitationnel, dues à l'interaction entre les deux univers, qui seraient d'ailleurs liées à des variations corres-

1. Ce qu'on sait moins, c'est qu'il existe aussi des « marées terrestres », de plus faible amplitude. Lors de son passage, la Lune déforme la surface de la Terre.

pondantes du red shift des objets concernés, sujet qui sera abordé plus loin.

Si la force de confinement, due à l'environnement de matière-ombre, croît, cet effet sera plus sensible à la périphérie du disque galactique. Le gaz interstellaire sera alors projeté vers le centre de la galaxie, et il y aura naissance d'une onde de densité centripète, convergeant vers le centre galactique.

La vitesse d'agitation thermique des masses gazeuses¹, dans le gaz interstellaire, est faible : quelques kilomètres par seconde seulement. La vitesse de cheminement de cette onde de densité étant plus élevée², il y aura formation d'une onde de choc.

Les bras spiraux, dans les galaxies, présentent aussi une structure d'onde de choc. En effet la structure spirale est une onde de densité qui chemine à une vitesse bien supérieure à la « vitesse du son » dans le gaz interstellaire, c'est-à-dire à la vitesse moyenne d'agitation des masses gazeuses les unes par rapport aux autres (un kilomètre par seconde).

Le passage d'une onde de choc dans un gaz s'accompagne d'une brusque montée de la densité et de la température, sur une distance très faible (quelques libres parcours moyens moléculaires). L'onde de choc (annulaire) perturbant le gaz interstellaire aurait une épaisseur de quelques milliers d'années-lumière, dimension faible devant le diamètre de la galaxie elle-même (cent mille années-lumière). On a représenté ici la distorsion du champ gravitationnel, de confinement, liée à une variation positive de la masse volumique de la matière-ombre environnante, dont la cause sera évoquée par la suite. En noir, l'onde de choc centripète (fig. 77).

Cette onde de choc, de compression, échauffant le gaz, engen-

1. Le gaz interstellaire n'est pas homogène. Il se distribue en « nuages » de tailles et de masses variées (cent à dix mille fois la masse du Soleil). Ce sont des nébulosités qui constituent les « molécules » de gaz interstellaire et qui sont animées de vitesses aléatoires d'« agitation thermique », de l'ordre du kilomètre par seconde.

2. Dans un milieu « assimilable à un gaz », la vitesse d'agitation thermique des « éléments » tient lieu de « vitesse du son ». L'onde de densité, « supersonique », serait donc une « onde de choc ».

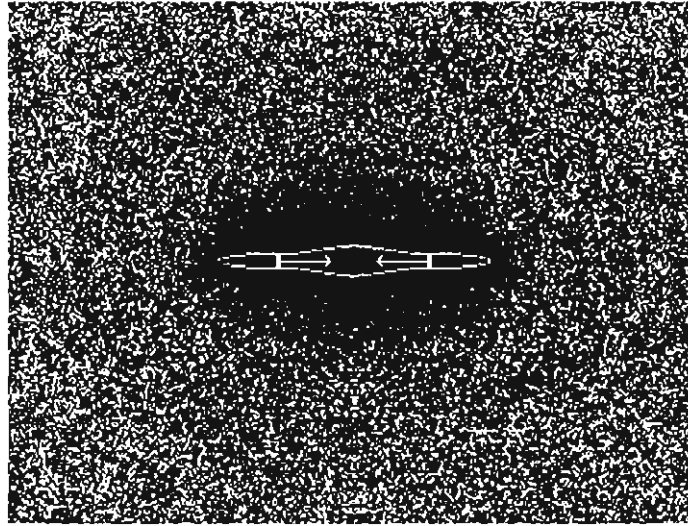


Fig. 77 : Départ d'une onde de densité centripète dans le gaz interstellaire.

drera sur son passage la naissance de jeunes étoiles, très émissives. Ces étoiles vont fortement ioniser le gaz¹.

Il existe toujours un faible champ magnétique dans une galaxie, bien que sa géométrie soit mal connue. Le gaz ionisé ainsi créé constitue ce qu'on appelle un plasma. Dans de telles conditions, dites « à nombre de Reynolds magnétique élevé », la convergence de ce plasma vers le centre géométrique de la galaxie entraînera ce champ magnétique avec lui, en le renforçant considérablement. On dit alors que le champ magnétique est « gelé » dans le plasma (en anglais, *frozen in*).

Avant qu'elles ne se transforment en supernovæ, les étoiles massives ont un noyau de fer². Elles possèdent aussi un champ magnétique interne, bien que nous ne sachions ni l'évaluer, ni en décrire la géométrie. Lorsque l'étoile explose, ce cœur de fer est comprimé et c'est à l'issue de cette compression que se constituera l'étoile à neutrons résiduelle. On sait que ces objets possèdent un très puissant champ magnétique (100 millions de teslas).

1. En créant ce qu'on appelle, en langage de spécialiste, des « régins H II » – H I désignant l'hydrogène à l'état neutre.

2. Point d'aboutissement de cascades de réactions de fusion, le fer, plus lourd, « tombe » au centre de l'étoile.

Une brève digression sur le phénomène de la supernova. Les étoiles massives, dont la masse est par exemple de l'ordre de vingt fois celle du Soleil, ont une vie brève : 10 millions d'années « seulement ». Leur hydrogène fusionne d'abord pour donner de l'hélium. Puis, quand tout l'hydrogène disponible a été consommé, cet hélium entre à son tour en fusion pour produire du carbone. Suit toute une chaîne de réactions produisant du néon, du magnésium, de l'oxygène, du silicium, du soufre. Dans les derniers jours de la vie de l'étoile, la fusion du silicium et du soufre produit du fer qui, n'étant pas susceptible de fusionner à son tour, s'accumule au centre de l'étoile, comme une scorie. L'étoile « tombe alors en panne de carburant de fusion », très brutalement, et s'effondre sur elle-même en quelques dixièmes de seconde à la vitesse hallucinante de 80 000 km/s. Le noyau de fer est écrasé et ses atomes se transforment en neutrons au contact. Ce phénomène s'accompagne de l'émission d'une fantastique bouffée de neutrinos (99 % de l'énergie dégagée dans l'opération), qui traversent sans encombre les couches successives de l'étoile. Le gaz « rebondit » sur le noyau de fer et une « onde de détonation » centrifuge parcourt l'étoile, entraînant de nouvelles fusions et sa dispersion. Ci-après, très schématiquement (les échelles ne sont pas respectées), l'étoile, son cœur de fer avant compression, et les lignes de champ magnétique :

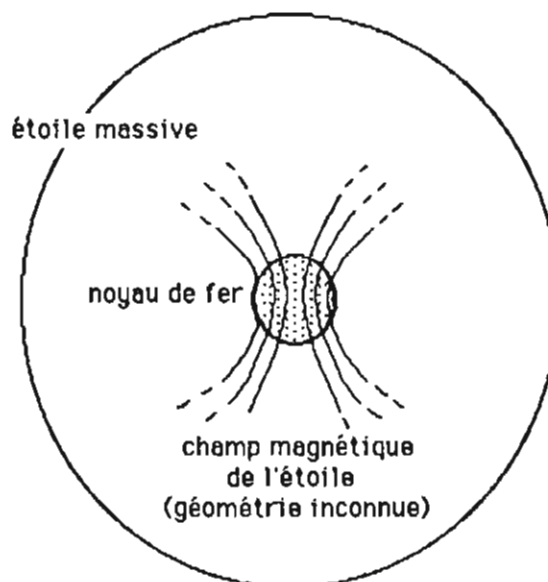
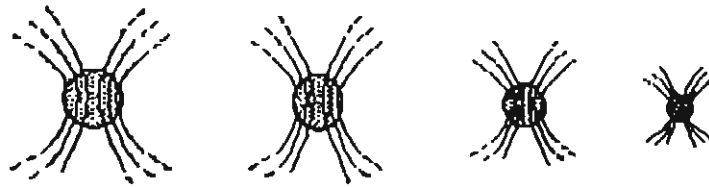


Fig. 78 : L'étoile massive, avant compression de son cœur de fer, et son champ magnétique (schématique).



*Fig. 79 : Compression du cœur de fer.
Les lignes du champ magnétique sont entraînées.*

Quand le noyau de fer est brutalement comprimé, les lignes de force du champ magnétique qui y règne se trouvent entraînées, comme des épis de blé qu'on serrerait ensemble à l'aide d'un lacet. Il s'ensuit un accroissement très important de la valeur de celui-ci. C'est ainsi qu'on explique l'origine et la très forte valeur du champ magnétique des étoiles à neutrons.

Cette liaison étroite entre un plasma (gaz ionisé) et son champ magnétique est un phénomène courant en astrophysique. Le Soleil possède son propre champ magnétique. Les éruptions solaires sont des émissions de plasma. On sait qu'elles ont l'allure d'immenses arches de gaz chaud. En fait ces masses gazeuses épousent la forme des lignes du champ magnétique. Elles sont canalisées par lui et en même temps affectent sa géométrie. On pourrait comparer les lignes du champ magnétique à des cheveux, et le plasma à des peignes. Les « peignes » (émissions de gaz ionisé) suivent les directions imposées par les « cheveux », mais en même temps modifient la géométrie de cette « masse capillaire ».

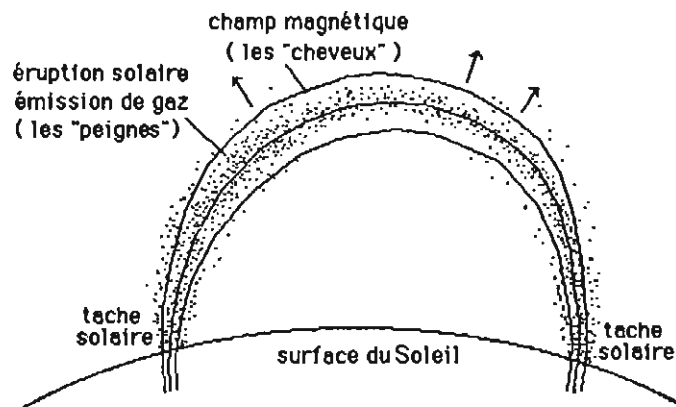


Fig. 80 : Schéma d'une éruption solaire.

De même l'anneau de plasma que représente cette onde de densité, qui converge vers le centre géométrique de la galaxie, va entraîner avec lui les « cheveux », c'est-à-dire les lignes du champ magnétique préexistant dans la galaxie. Même si celui-ci est très faible, son renforcement, lorsque ces lignes se trouveront serrées au centre de la galaxie, pourra lui permettre d'atteindre une valeur importante. Schématiquement, voir figures 81 à 84.

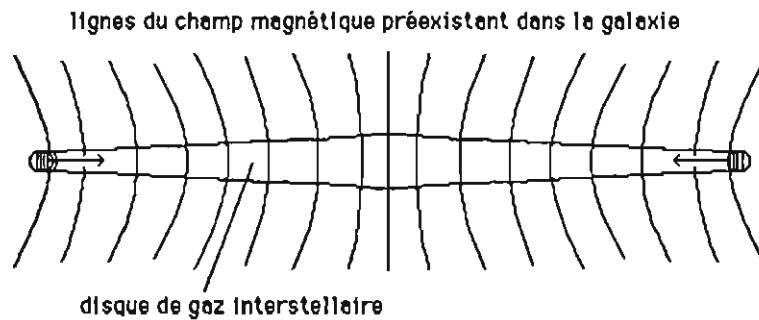


Fig. 81 : L'onde de densité centripète se forme à la périphérie de la galaxie, dans le gaz.

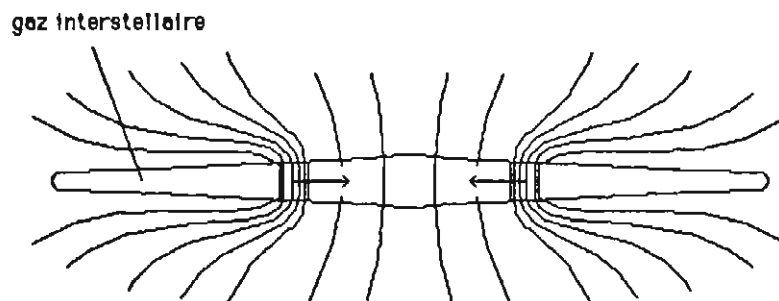


Fig. 82 : L'anneau de gaz ionisé ramasse sur son passage les lignes de champ. Le champ magnétique s'intensifie.

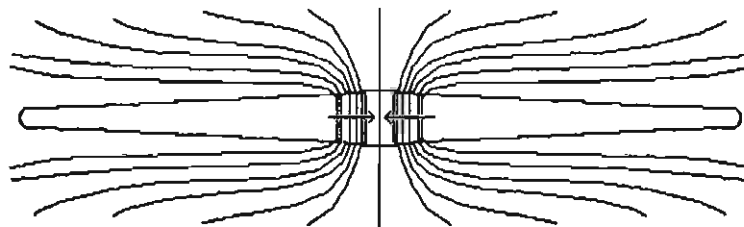


Fig. 83 : L'anneau de plasma converge vers le centre géométrique de la galaxie.

Lorsque l'anneau de gaz ionisé parvient au centre de la galaxie, il constitue une boule de plasma :

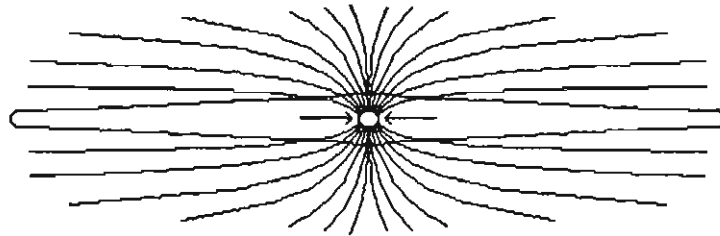


Fig. 84 : Le « noyau de galaxie actif », formé de gaz comprimé, sous haute température, entre en fusion : modèle de quasar.

Ces masses gazeuses, se précipitant les unes vers les autres, charrient une énergie cinétique considérable. Lors du choc central, la densité et la température vont monter très brutalement dans cette « quasi-étoile », et l'ensemble de cette masse entrera en fusion, qui débutera dès que la température de cette boule de plasma excédera 700 000 degrés (et non pas seulement le cœur, comme c'est le cas pour une véritable étoile). On dispose alors d'une énergie d'une puissance émissive qui permette de rendre compte de celle qui se trouve émise par un quasar (cent milliards de fois celle d'une étoile ordinaire).

Ainsi le modèle matière - matière-ombre engendre un modèle de quasar intéressant. D'où viendrait l'énergie ? De cette fluctuation de densité de la masse matière-ombre environnante. Une fluctuation relativement faible peut alors créer un objet aussi déconcertant.

Mais revenons à notre affaire de champ magnétique entraîné par ce plasma. En fin de compression, les lignes de force se trouvent serrées les unes contre les autres, et le champ atteint des valeurs considérables.

On sait que l'émission de plasma, de particules porteuses de charges électriques, se fait préférentiellement dans la direction des lignes de force du champ magnétique, donc ici selon les pôles de l'objet (on suppose que le champ magnétique de la galaxie était grossièrement dipolaire). Cette sphère de plasma en fusion va donc émettre des jets, diamétralement opposés.

De plus le champ magnétique décroît au fur et à mesure que

l'on s'éloigne de l'objet, ce qui a pour effet d'accélérer les particules chargées (qui tendent systématiquement à gagner au plus vite les régions où celui-ci est moins intense). C'est ainsi que l'on procède dans les accélérateurs de particules : on « pince » le champ magnétique et les particules chargées sont expulsées comme des noyaux de cerise, à très grande vitesse, à vitesse relativiste, c'est-à-dire proche de celle de la lumière. L'objet central de la figure 85 se comporte comme un accélérateur de particules naturel, avec éjection de deux jets à vitesse relativiste.

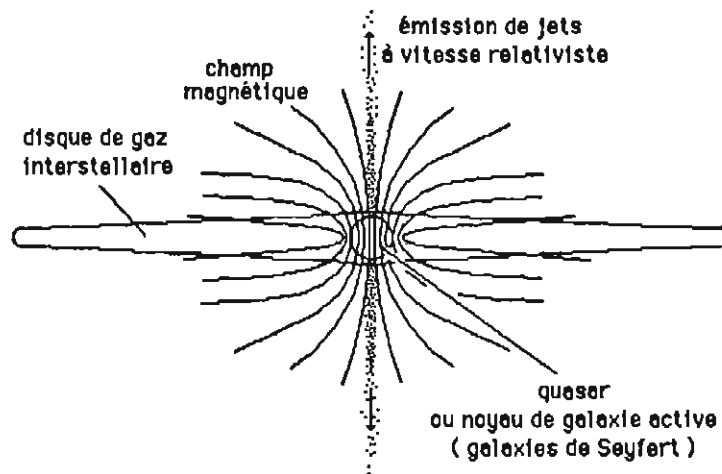


Fig. 85 : Modèle schématique de quasar.

L'image correspondrait à une description très schématique, vis-à-vis des échelles, puisqu'on sait qu'un quasar est un objet très petit, par rapport à la galaxie elle-même (de la taille du Système solaire, c'est-à-dire d'une grosse étoile).

Il existe des quasars ayant des géométries variées, de même qu'un pulsar (étoile à neutrons en rotation rapide, jusqu'à mille tours par seconde) peut émettre selon deux lobes ou selon un ensemble plus complexe de lobes. On peut interpréter cela de la manière suivante. La géométrie magnétique initiale de la galaxie, de même que la géométrie initiale du champ magnétique à l'intérieur du noyau de fer d'une étoile massive, se trouvent « mémorisées » lors de la condensation du plasma dans la galaxie, ou de la compression ultime du noyau de fer de l'étoile. Si celui-ci est dipolaire, il y aura émission selon deux lobes, sinon la géométrie d'émission pourra être plus complexe.

En 3d la galaxie et son quasar auraient cette allure :

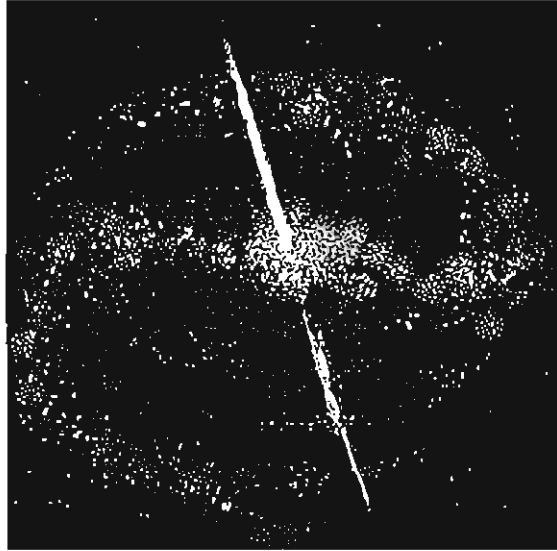


Fig. 86 : A quoi pourrait ressembler un quasar « vu de près ».

Et c'est bien ainsi que se l'imaginent les astronomes. Evidemment, pour arriver à ce modèle de quasar, il faut mettre en œuvre beaucoup d'hypothèses : modifier de fond en comble la géométrie de l'univers, opter pour une matière-ombre répulsive, etc. Mais ce modèle de quasar présente un intérêt : il est actuellement le seul en course.

Autres perspectives offertes par le modèle de la matière-ombre

Le modèle de la matière sombre, chaude ou froide, selon les options retenues par les astrophysiciens, reste somme toute assez conventionnel, bien qu'il permette de rendre compte de différents problèmes jusqu'ici laissés en suspens. Celui de la matière-ombre semble en comparaison bien « exotique », pour reprendre le qualificatif utilisé dans les cénacles scientifiques. On a vu qu'il engendrait des choses intéressantes, comme par exemple ce modèle de quasar (qui pourrait alors être l'observable clef de cette théorie).

Green, Schwarz et Abdus Salam, en proposant ce modèle,