

Les émissions radio électriques d'origine galactique ou extragalactique

Maurice Dufay

▶ To cite this version:

Maurice Dufay. Les émissions radioélectriques d'origine galactique ou extragalactique. Journal de Physique et le Radium, 1954, 15 (1), pp.50-57. 10.1051/jphysrad:0195400150105000 . jpa-00234847

HAL Id: jpa-00234847 https://hal.science/jpa-00234847

Submitted on 4 Feb 2008

HAL is a multi-disciplinary open access archive for the deposit and dissemination of scientific research documents, whether they are published or not. The documents may come from teaching and research institutions in France or abroad, or from public or private research centers. L'archive ouverte pluridisciplinaire **HAL**, est destinée au dépôt et à la diffusion de documents scientifiques de niveau recherche, publiés ou non, émanant des établissements d'enseignement et de recherche français ou étrangers, des laboratoires publics ou privés.

EXPOSÉS ET MISES AU POINT BIBLIOGRAPHIQUES

LES ÉMISSIONS RADIOÉLECTRIQUES D'ORIGINE GALACTIQUE OU EXTRAGALACTIQUE

Par MAURICE DUFAY,

Docteur ès sciences.

Sommaire. — Après un bref historique des premières observations du bruit radioélectrique galactique et un rappel des premières interprétations, on présente un résumé des travaux récents relatifs aux sources de bruit discrètes. Les résultats concernant l'identification de ces sources, leur diamètre apparent, leur spectre d'émission, leur distribution dans la galaxie sont successivement envisagés. On discute ensuite de l'origine du rayonnement galactique général : effet de sources discrètes multiples ou contribution du gaz interstellaire. Enfin on mentionne les observations de la radiation 1420 Mc/s de l'hydrogène neutre. La bibliographie des publications récentes est donnée.

I. — La découverte du rayonnement galactique général et des sources discrètes.

Le rayonnement galactique général, historique bref, premières théories. — Les premières observations du bruit radioélectrique d'origine galactique remarqué par Jansky en 1932, ont été effectuées sur des fréquences s'étendant de 9,5 à 162 Mc/s (Jansky, 20,6 Mc/s; Friis et Feldman, 9,5, 18,6 et 31 Mc/s; Reber, 162 Mc/s).

Les observations de Reber (1940) et celles de Hey, Parsons et Phillips (1946, 64 Mc/s) ont permis à ces auteurs de tracer une carte de l'intensité du bruit (radioisophotes) dans une zone assez étendue de la sphère céleste.

On observe sur celle-ci une concentration générale du rayonnement dans le plan galactique (avec un maximum principal dans le Sagittaire et un maximum secondaire dans le Cygne) et un gradient négatif prononcé vers les pôles.

La brillance (dans une direction déterminée) croît en même temps que la longueur d'onde et suit la loi de variation

$$B = KF^{\pm 0,4}$$
 ou $T_B = \frac{\lambda^2 B}{2K} = K'F^{\pm 2,4}$

(fréquence F, température de brillance T_B) établie par Moxon (1946), Herbstreit et Johler (1948).

Les premières suggestions émises concernant l'origine du bruit galactique – rayonnement thermique des étoiles les plus communes (Jansky); poussières interstellaires (Langer) – ont été rapidement abandonnées. La possibilité d'un rayonnement interstellaire (Reber) par un mécanisme d'absorptionémission par transitions free-free d'électrons dans un gaz d'hydrogène ionisé a été plus longuement discutée. En fait, si cette théorie permet de rendre compte des températures de brillance observées aux fréquences élevées (à 20 Mc/s, $T_{\rm B} = 20 000^{\circ}$ K), elle conduit (Townes) à des températures électroniques beaucoup trop fortes (150 000° K) aux fréquences basses ($\lambda = 20$ m).

Pour rendre compte des faits expérimentaux il est donc nécessaire d'abandonner ce mécanisme ou de lui en superposer un autre. Le développement des connaissances sur le radiobruit solaire a conduit certains auteurs à considérer le rayonnement galactique général comme dû à l'effet intégré d'un grand nombre de sources largement réparties dans la galaxie. Si, d'après Unsöld, Grenstein, Henyey et Keenan, ces sources ont une activité analogue à celle du Soleil perturbé, l'intensité de leur rayonnement devrait être 10¹¹ fois plus intense que celles observées au cours des flambes solaires.

La découverte de sources de bruit discrètes a remis en question toutes les idées émises et conduit à de nouveaux développements théoriques.

La découverte des sources discrètes, théories proposées. — C'est en 1946 que Hey, Parsons et Philipps observèrent dans le Cygne ($\lambda = 5$ m) une région de faible diamètre (< 2°) sujette à des fluctuations irrégulières de courte durée qui comme on le verra plus loin sont d'origine ionosphérique.

La découverte de la source du Cygne fut confirmée par Bolton et Stanley ($\lambda = 3$ m) (1948) qui observèrent également d'autres sources localisées, notamment Taurus A qu'ils identifièrent avec la nébuleuse du Crabe N.G.C. 1949. Une source dans Cassiopée, plus intense que celle du Cygne, fut observée en 1948 par Ryle et Smith (80 Mc/s).

Les parallaxes ne sont pas mesurables et le rayonnement n'est pas polarisé (Ryle et Smith, 1948).

Les sources discrètes ont été initialement considérées comme des objets galactiques ponctuels comme les étoiles, caractérisés par une forte émission radioélectrique et une faible émission lumineuse. La température apparente peut dans ces conditions atteindre 10¹¹ ⁰K (Soleil calme 10⁶ à 10^{10 °}K). Pour expliquer ces températures aussi élevées, on a proposé deux mécanismes déjà appliqués au rayonnement du Soleil (Ryle [1]) :

— un mécanisme par émission *thermique* (free-free) de particules à température cinétique très élevée, bien plus forte que celles que l'on trouve dans le Soleil;

— une émission non thermique par oscillation de plasma qui pour une température cinétique bien plus faible que la température de brillance est beaucoup plus intense que dans le cas d'une agitation électronique désordonnée.

Certains auteurs (Ryle [1], Unsöld [2], Alfven et Herlofson [3], Kiepenheuer [4]) ont établi une relation entre le rayonnement radioélectrique et les rayons cosmiques. La température observée de 10^{110} K correspond en effet à une énergie de 10^{10} eV qui peut être celle des électrons de rayons cosmiques. Le rayonnement pourrait être émis par ces électrons de grande énergie en déplacement spiral dans le champ magnétique d'un gaz ou d'une étoile.

Signalons d'autres hypothèses émises :

- celle de Swann : conversion de l'énergie par induction lors de la variation du flux produit par la variation de surface des taches émissives;

 celle de Babcook [5] : étoile à champ magnétique intense (10[,] gauss);

- celle de Haeff [6] : rotation différentielle de couches polaires et équatoriales.

En fait, ces divers mécanismes doivent être confrontés avec les résultats expérimentaux récents qui remettent en question la nature stellaire des sources. La détermination de la nature physique de celle-ci reste en effet le problème fondamental.

II. – Les sources discrètes.

Techniques expérimentales. — La découverte des sources localisées a conduit les expérimentateurs à améliorer le pouvoir de résolution de leurs instruments et à utiliser des techniques plus précises.

C'est ainsi que s'est développée la technique interférométrique qui a été utilisée sous deux formes :

— Aérien directif à une hauteur h au-dessus de la mer (méthode australienne, Bolton et ses collaborateurs utilisent un paraboloïde de 6 m). Le diagramme de rayonnement obtenu est analogue aux franges de Lloyd. La méthode est applicable aux faibles déclinaisons et introduit une importante correction de réfraction.

— Méthode interférométrique analogue à celle utilisée par Michelson pour la mesure du diamètre apparent des étoiles. Les deux systèmes d'aériens directifs identiques sont sur une ligne E. W. à la distance d et le diagramme de rayonnement est représenté par

$$\Phi = \frac{2\pi d}{\lambda} \sin H \cos \delta.$$

Les sources sont observées au voisinage de leur passage au méridien.

L'ascension droite est donnée par le temps de passage au méridien, la déclinaison par la périodicité $t=t_0$ sec \hat{o} obtenue sur l'enregistrement du passage. Les mesures de position sont sujettes aux erreurs d'orientation, de collimation, de fluctuations internes de l'enregistreur qui sont discutées dans un article récent de Smith [7]. Dans tous les cas, des erreurs peuvent être introduites du fait de sources voisines. Néanmoins la précision de relèvement obtenue aujourd'hui atteint la minute d'arc. Pour l'augmenter, en jouant sur la distance d, les australiens utilisent la technique des relais hertziens pour réunir au récepteur les deux aériens [8].

Le diamètre apparent d'une source se manifeste par la profondeur des minima observés. Des techniques spéciales (interféromètres doubles) ont été mises au point pour les mesures.

Pour augmenter la sensibilité en éliminant le fond continu dû au rayonnement général, on utilise aujourd'hui couramment la technique de Ryle [9] qui consiste à introduire une inversion de phase de 180° à la période 25 c/s sur l'un des aériens. On commute ainsi 25 fois par seconde les maxima et minima et la modulation 25 c/s obtenue passe dans un détecteur de phase et un ampli sélectif. L'intensité de la source discrète détectée peut dans ces conditions être très faible devant celle du fond continu.

Les mesures absolues d'intensité restent sujettes aux erreurs de calibration et la précision est limitée par le facteur de bruit du récepteur et sa stabilité.

Les appareils à faible résolution n'ont pas perdu leur intérêt et des progrès ont été obtenus également dans ce domaine.

La méthode de calibration continue du radiomètre de Dicke par commutation avec un générateur de bruit a été perfectionnée. Ryle et Vonberg [9] et Hanbury Brown et Hazard [10] ont utilisé une méthode de zéro dans laquelle un générateur de bruit est asservi de façon à limiter les effets des variations de gain et de réponse en fréquence. Steinberg [11] a réalisé une variante de ce sytème dans laquelle on mesure la différence du bruit de la source et du générateur.

Enfin on est conduit à augmenter la bande passante et la constante de temps pour obtenir une grande sensibilité. Celle-ci dépasse maintenant 10^{-25} W/m²/c/s.

Une méthode différentielle analogue a été utilisée par Piddington [12] entre 1000 et 24 000 Mc/s. Le générateur de bruit est alors remplacé par une antenne de référence et le radiomètre mesure la différence de température de brillance des deux régions pointées par les antennes.

A côté de ces perfectionnements dans les méthodes, on s'oriente également vers la construction de réflecteurs paraboliques géants qui, en ayant un pouvoir de résolution amélioré, peuvent être pointés en dehors du méridien. Un paraboloïde de plus de 80 m a été mis en chantier en Grande-Bretagne [13].

Enfin, l'observation de la radiation monochromatique de l'hydrogène a conduit à la mise au point d'une technique particulière permettant de comparer les bruits reçus sur deux bandes de fréquence étroites et rapprochées dont l'une est centrée sur la raie.

Origine des fluctuations. — Les fluctuations dans le Cygne ont été longtemps considérées comme propres à la source même, d'autant plus que les premières observations de la source de Cassiopée n'avaient pas révélé de phénomène analogue. Les travaux récents ont définitivement établi l'origine ionosphérique de ces fluctuations.

L'expérience cruciale (Little, Lowell et Smith [14] a consisté à étudier la corrélation entre les fluctuations enregistrées en deux stations d'observation à des distances variables. Ces auteurs constatent que sur $\lambda = 6,7$ m, la corrélation cesse d'être complète pour une distance supérieure à 20 km et est nulle pour 200 km, ce qui prouve l'origine locale des fluctuations.

Ryle et Hewish [15] ont étudié d'autre part, pour plusieurs sources, les variations de l'indice de fluc-

tuation $\frac{\Delta I}{I}$ en fonction du temps ($\lambda = 3,7$ et 6,7 m).

On constate ainsi un décalage entre les courbes relatives aux différentes sources suivant leur ascension droite. On n'observe pas de variation annuelle, mais on met en évidence une variation diurne avec un maximum marqué des fluctuations vers 1 h de temps local.

Les travaux plus récents sur des longueurs d'onde différentes ont confirmé l'origine ionosphérique des fluctuations du Cygne [16], [17], [18].

On admet que ces fluctuations sont produites dans des nuages irréguliers de la couche F agissant comme des réseaux de phase [19]. Tandis que la théorie habituelle de la scintillation optique fait intervenir la réfraction et exige des gradients élevés de densité, la théorie de Little repose sur la diffraction de densité et conduit à admettre l'existence de zones perturbées d'environ 5 km d'étendue. Le même phénomène explique également les fluctuations relevées dans la position des sources.

Une certaine corrélation entre les échos irréguliers sur F_2 et les fluctuations a été notée [20] et confirme la localisation de la perturbation dans la couche F.

Hewish [20] estime de $_2$ à 10 km l'étendue des zones irrégulières (forte densité électronique) de la couche F introduisant les variations locales de phase. L'observation des fluctuations sur une base de 1 km montrerait que ces zones se déplaceraient d'un mouvement uniforme de vitesse 100 à 300 M/s.

Quelques bizarreries subsistert néanmoins, ainsi des crochets observés simultanément à grande distance sur les enregistrements des fluctuations, et la question de leur origine solaire ou propre aux sources est encore discutée. Néanmoins, la constance presque permanente du flux émis par les sources discrètes est maintenant bien établie.

Identification des sources discrètes avec des objets connus. — Les travaux récents ont permis de confirmer certaines identifications déjà suggérées et d'en apporter d'autres. La plupart des objets reconnus sont des nébuleuses ou d'anciennes supernovæ. Ils peuvent se classer dans les trois catégories suivantes :

Obje's galactiques non usuels :

Taurus A : NGC 1952, nébuleuse du Crabe [21], [22], reste d'une supernova. Vitesse d'expansion, 1100 km/s. Distance, 1000 pc.

Supernova de Tycho-Brahé (Hanbury Brown [23]). Supernova de Képler (?) (Mills [23]).

D'autre part la source intense de Cassiopée coïncide,

d'après les observations de Baade [23], au télescope de 5 m du Mont Palomar avec un objet diffus considéré comme une nébuleuse à filaments à grande vitesse d'expansion analogue à la nébuleuse du Crabe.

Objets extragalactiques non usuels :

Centaurus A : NGC 5128 [21], [22], nébuleuse non résolue à bande noire (peut-être nuage galactique avec étoile centrale d'après Evans).

Virgo A : NGC 4486 [21], [22], nébuleuse elliptique; NGC 1275.

NGC 6451 (d'après Piddington et Minnett ??). Enfin Baade considère [23] l'intense source du Cygne comme due à deux galaxies en collision.

Galaxies relativement proches. — Le rayonnement de la nébuleuse d'Andromède a été détecté sur $\lambda = 1,89$ m par Hanbury Brown et Hazard [10]. L'intensité de cette source paraît être analogue à celle de notre galaxie. Les auteurs estiment que le rayonnement extragalactique total, extrapolé de celui mesuré pour Andromède ne doit représenter qu'une faible fraction (1/100^e) du rayonnement reçu.

Les chercheurs de Cambridge auraient également détecté le rayonnement des nébuleuses M $_33$, M $_51$ et M 101.

Le plus grand nombre des sources détectées reste néanmoins non identifié. Pour essayer de préciser la nature de ces objets, on mesure maintenant leurs diamètres angulaires et l'on étudie leur spectre et leur distribution statistique.

Diamètre apparent des sources discrètes. — L'étude des sources discrètes par une méthode analogue à celle utilisée pour étudier les sources de bruit associées aux taches solaires n'avait donné jusqu'ici qu'une limite supérieure de leurs dimensions. La scintillation ionosphérique limite d'ailleurs la précision. Une technique nouvelle reposant sur l'utilisation d'un interféromètre double (avec deux bases différentes) ou d'un interféromètre à trois antennes avec « phase switching » a permis aujourd'hui de mesurer des diamètres angulaires de l'ordre de la minute d'arc [22], [24], [25].

Par des méthodes assez semblables, Smith [24] en Angleterre et Mills [22] à Sidney ont ainsi pu au cours de l'année 1951 observer plusieurs sources ayant des diamètres apparents appréciables pouvant atteindre 0° ,5.

Des résultats très intéressants, la plupart encore inédits, ont été apportés sur ce sujet au dernier congrès de l'U.R.S.I. tenu à Sidney [23].

Ainsi Mills estime à 1 minute d'arc le diamètre de la source du Cygne (h = 3 m, interféromètre avec base de 10 km et câble hertzien), Smith à quelques minutes d'arc celui de la source de Cassiopée. La plupart des sources intenses ont des diamètres angulaires appréciables dépassant la minute.

Bolton, par une combinaison d'interféromètres horizontaux et verticaux, observe d'autre part un type de sources différentes plus étendues et diffuses dont le diamètre peut atteindre quelques degrés. Une trentaine de ces sources ont été reconnues. La distribution de brillance sur certains objets (tel Centaurus A) a pu être étudiée.

Signalons d'autre part que d'après les mesures de Piddington et Minnett [26] sur 1210 Mc/s, une source diffuse très étendue (dite Cygnus X) est voisine de Cygnus A et coïncide avec le maximum secondaire du rayonnement général observé par Bolton et Westfold [27]. Il est considéré par ces auteurs comme dû à un bras de la spirale galactique. D'après Piddington et Minnett, il s'agirait au contraire d'une source étendue ayant une répartition spectrale indépendante de la longueur d'onde et qui serait due à l'émission thermique d'un gaz ionisé optiquement mince ($n = 20^{\circ}$ cm³, $T = 10^{10}$ K). On le rapproche du nuage galactique voisin de γ Cygni.

Il est finalement de moins en moins évident que les sources discrètes soient des objets ayant la dimension d'étoiles. Les résultats récents tendent au contraire à montrer qu'il s'agit d'objets nébulaires. Le terme « radioétoile » primitivement employé est à proscrire et doit être remplacé par celui de « source discrète ».

Répartition spectrale de l'émission des sources discrètes. — La réduction des résultats obtenus par divers expérimentateurs permet d'étudier les



variations du flux S des sources les plus intenses entre 18 et 2 000 Mc/s. D'après Kerr et Shain [28], la plupart des sources suivent une loi de la forme

$$S = KF - \alpha$$
, avec $I < \alpha < I, 5$.

Mais la nébuleuse du Crabe (et peut-être Cygnus X comme on l'a vu plus haut) présente un flux sensiblement indépendant de la fréquence [29] (fig. 1).

Des mesures faites à 1210 et 3 000 Mc/s (Piddington et Minnett [12]) ont confirmé ces résultats en ce qui concerne les sources du Sagittaire-Scorpion et Taurus A.

Le cas de la nébuleuse du Crabe a été l'objet de plusieurs travaux dont les conclusions sont parfois divergentes.

Piddington et Minnett [12] considèrent qu'il s'agit du rayonnement thermique d'un gaz optiquement mince pour lequel à 1210 Mc/s, on a

$$S = \mathbf{I}, 8 \cdot \mathbf{10}^{-23} \text{ W} \cdot \mathbf{m}^{-2} \cdot \mathbf{c/s^{-1}},$$
$$T_B = \frac{S\lambda^2}{2K\Omega} = 2, 4 \cdot \mathbf{10}^{70} \text{ K}, \qquad T_e = \frac{T_B}{\mathbf{I} - e^{-\tau}} < 3, 8 \cdot \mathbf{10}^{70} \text{ K}.$$

On est ainsi conduit à des vitesses électroniques très élevées.

D'après Van de Hulst [C] et d'autres auteurs [30], [51] le rayonnement radioélectrique observé est 100 fois plus intense que ne le laisserait prévoir le mécanisme par transitions free-free expliquant l'émission optique de la même source. Un tel mécanisme conduit à une intensité de rayonnement bien trop faible si les électrons sont animés de vitesses thermiques.

D'autres auteurs [31] reprenant une hypothèse déjà émise, comme on l'a vu, font intervenir des particules d'énergie très élevée tels que les rayons cosmiques. D'après l'étude de la variation diurne et de la direction d'arrivée, ils suggèrent que la nébuleuse du Crabe peut être une source de rayons cosmiques.

Distribution des sources discrètes. — L'étude statistique de la distribution des sources discrètes peut être conduite de deux points de vue suivant que l'on étudie la répartition des sources discrètes détectées ou celle du rayonnement galactique général considéré au moins partiellement comme l'effet intégré de sources discrètes largement distribuées. Ces études conduisent à orienter leur identification sur un ou plusieurs types d'objets stellaires déterminés.

Un des premiers travaux notables sur la distribution des sources discrètes est celui de Ryle, Smith et Elsmore [32] qui bien que datant de 1950 porte sur 50 sources détectées. D'après ces auteurs, leur distribution ne montre pas de concentration galactique contrairement au rayonnement général. Ils en déduisent ou bien qu'elles se trouvent à des distances faibles du système solaire, ou bien qu'elles sont extragalactiques. Les auteurs penchent pour une origine galactique et estiment que ces « radioétoiles » sont distribuées de façon analogue aux étoiles visibles, bien que les essais d'identification avec des objets visibles soient peu concluants.

Bolton et Westfold [33] ont étudié également la distribution des sources discrètes et examiné l'hypothèse selon laquelle le rayonnement général est dû à des objets extragalactiques. D'après eux le rayonnement par transitions free-free interstellaire est négligeable.

Une étude plus récente de Mills [34] portant sur 77 sources largement distribuées conduit à des conclusions différentes. L'étude a été faite sur la fréquence 101 Mc/s par méthode interférométrique (trois aériens) et « phase switching ». Le classement des sources détectées d'après leur intensité conduit Mills aux résultats suivants :

Sources intenses $(S > 2.10^{-21} W.m^{-2}.c/s^{-1})$ présentant une forte concentration galactique $(lbl < 12^{\circ})$ sauf Virgo I.

Sources faibles sans concentration galactique, moins nombreuses près du plan galactique parce que masquées par le rayonnement général intense.

L'auteur en arrive ainsi à distribuer les sources dans les deux grandes classes suivantes :

Classe I. — Sources intenses assez rares, à forte concentration galactique, donc *éloignées* (1000 pc). Leur distribution est comparable à celle des novæ. Leur intensité moyenne serait 10^{16} fois celle du Soleil calme, mais leur rayonnement est insuffisant pour que le rayonnement galactique général leur soit attribué.

Cette classe pourrait être constituée de nébuleuses galactiques à grand diamètre angulaire. On serait en présence du rayonnement thermique d'un gaz optiquement mince, conformément aux vues de Piddington dont nous parlerons plus loin.

On a vu néanmoins que l'on trouve des différences dans le spectre de bruit de ces sources et dans leur diamètre qui peut varier de 1' à quelques degrés, ce qui fait présumer que le problème est en effet moins simples.

Classe II. — Sources faibles distribuées au hasard. Il peut s'agir soit d'émissions extragalactiques intenses, soit d'émissions galactiques faibles et rapprochées. Dans la deuxième hypothèse, on n'observe pas de corrélation marquée avec les rares objets ne présentant pas de concentration sur le plan galactique. On a par contre identifié quelques sources radioélectriques avec des nébulseuses extragalactiques. Aussi l'origine extragalactique paraît d'après Mills, plus plausible, bien que l'on n'observe pas de rapport net entre la distribution des sources de la classe II et celle des galaxies extérieures.

Dans ce cas les sources de la classe II pourraient contribuer au rayonnement galactique général, notamment près des pôles.

Néanmoins les identifications avec des objets connus ne sont pas encore assez nombreuses pour que l'on puisse se prononcer avec certitude.

On notera en outre que selon certains théoriciens (¹) — en particulier Ambarzumian — les sources discrètes pourraient constituer des « protoétoiles », corps à l'origine du processus de formation des étoiles jeunes que l'on rencontre dans les associations d'étoiles multiples. Aucun fait nouveau n'est venu à l'appui de cette hypothèse.

III. - Le rayonnement galactique général.

Répartition du rayonnement galactique dans la Voie Lactée. — La répartition de l'intensité du rayonnement de la Voie lactée en fonction des coordonnées galactiques, connue par les travaux antérieurs de

Reber	$\int 167 \text{ Mc/s} [\lambda = 1,8 \text{ m}]$	(1944)]
	(489 Mc/s [$\lambda = 63$ cm	(1948)]
Hey, Parsons et Phillips	64 Mc/s [$\lambda = 4,7$ m	(1948)]

a fait l'objet de plusieurs mesures plus récentes dont les plus importantes sont celles de :

Bolton et ses coll. [27]... 100 Mc/s [$\lambda = 3 \text{ m}$ (1950)] Allen et Gum [35]... 200 Mc/s [$\lambda = 1,5 \text{ m}$ (1950)] I. Atanasijévic [36]... 255 Mc/s | $\lambda = 1,14 \text{ m}$ (1952)]

Des cartes de radioisophotes ont pu ainsi être tracées avec plus de précision dans une gamme de fréquence plus étendue.

On notera que sur la plupart de ces cartes les isophotes ne sont plus symétriques par rapport au plan galactique pour les intensités faibles près de $l=0^{\circ}$.

Rayonnement général et sources discrètes. — Westerhout et Oort [37] ont procédé à une étude systématique de l'intensité de rayonnement radioélectrique à attendre (à 100 Mc/s) si l'on admet que le bruit galactique général est dû à un grand nombre d'étoiles de type déterminé et ont comparé les résultats théoriques obtenus avec les mesures de Bolton.

Les étoiles des classes O et B constituant la population I de Baade et celles de la population II (noyaux des spirales et amas globulaires contenant des variables RR Lyrae, hypothèse émise par Unsöld [2]) sont éliminées du fait de leur concentration galactique respectivement trop forte et trop faible. Si par contre on admet pour les étoiles naines K et G, objets les plus abondants de la Voie lactée, une répartition semblable à celle des masses de notre galaxie (modèle de Oort [38] : sphéroïdes et masse centrale avec concentration près du centre), Westerhout et Oort constatent que la distribution du bruit radioélectrique peut être reproduite de façon satisfaisante.

Ainsi, chose paradoxale, la répartition de ces « radioétoiles » serait analogue à celle des objets les plus communs de la galaxie alors que les identifications individuelles des sources détectées conduisent à des objets très singuliers.

Dans ce même travail, les auteurs en viennent à classer les sources discrètes en deux catégories analogues à celles des étoiles géantes et naines :

— sources « géantes » éloignées (> 1000 pc) à concentration galactique prononcée, qui peuvent être les plus brillantes si l'on admet une répartition gaussienne des magnitudes absolues;

- sources communes « naines », proches et sans concentration galactique.

Contribution possible des sources extragalactiques. — L'analyse de Westerhout et Oort [37] laisse subsister une température de brillance résiduelle de 600° K (100 Mc/s) de distribution sphérique. Van de Hulst [39] pense que l'effet combiné des galaxies externes peut donner une brillance mesurable contrairement à l'estimation de Hanbury Brown et Hazard [10] et explique ainsi le rayonnement résiduel loin du plan galactique, en particulier au voisinage de l'anticentre. Ce point de vue est à rapprocher de celui de Mills [34] qui comme on l'a signalé est tenté de considérer les sources de classe II comme des sources extragalactiques intenses.

On considère donc généralement que le rayonnement galactique général peut être attribué à l'effet d'un grand nombre de sources discrètes non détectées, galactiques ou extragalactiques, mais la contribution du gaz interstellaire n'est pas exclue.

Répartition spectrale, contribution du gaz interstellaire. — La répartition spectrale du rayonnement galactique général est connue dans la bande de fréquence 18,3 Mc/s (Shain [40]), 3 000 Mc/s (Piddington et Minnett [12], [41]) et dans la région du plan galactique la température de brillance passe de plus de 10⁵ degrés aux grandes longueurs d'onde (9,5 à 18,3 Mc/s) à quelques degrés absolus aux fréquences élevées (F = 200 Mc/s, $T = 1190^{\circ}$ K; F = 3 000 Mc/s, $T = 3^{\circ}$ K). La mesure du rayonnement à 1210 et 3 000 Mc/s a été faite récemment et a permis de constater que la loi $B = KF^{-0+}$ ou $T_{\rm B} = K'F^{-2,4}$ établie par. Herbstreit et Johler [42]

⁽¹⁾ Voir à ce sujet V. KOURGANOFF, Quelques documents sur la structure de la galaxie. Conférence à l'Institut d'Astrophysique de Paris.

entre 25 et 110 Mc/s reste à peu près valable (fig. 2)

L'étude du rayonnement thermique du gaz interstellaire (émission-absorption) par transitions hyperboliques « free-free » entre électrons et protons a été souvent discutée (Reber, Henyey et Keenan, Van de Hulst, etc.). Elle est délicate du fait que le calcul de la brillance spectrale énergétique $B(F) = \alpha N_e^2$ fait



intervenir l'épaisseur optique et la densité électronique N.

Îl apparaît [43] que si le rayonnement observé aux grandes longueurs d'onde ne peut être dû au gaz interstellaire seul du fait que la température de brillance $T_{\rm B}$ calculée par la loi de Rayleigh-Jeans est très supérieure à la température effective du gaz (on admet 10 000° K) dans les régions H II où l'hydrogène est ionisé, la contribution du milieu interstellaire devient prépondérante aux faibles longueurs d'onde.

En fait, l'étude théorique peut être compliquée dans l'un des cas suivants :

- Effet d'un champ magnétique. En fait le champ doit avoir une valeur élevée pour que la fréquence gyromagnétique soit atteinte.

 Milieu à constante diélectrique très différente de l'unité (cas de fortes concentrations électroniques).
 Emission thermique.

L'étude a été reprise plus récemment par Piddington [41] qui constate qu'à moins qu'on ne soit



dans l'un des trois cas énumérés plus haut, la température de brillance croît en même temps que la fréquence dans le cas de l'émission thermique d'un gaz ionisé. Dans le cas limite d'un gaz ionisé optiquement mince ($\tau < 1$) l'absorption est incomplète), les conditions du corps noir ne sont pas remplies et l'intensité du rayonnement, vite inférieure à celle d'un corps noir, devient indépendante de la fréquence (fig. 3).

Ce spectre de brillance étant contraire aux observations, force est de revenir à l'hypothèse stellaire ou nébulaire de l'émission tout au moins pour les grandes longueurs d'onde. Piddington considère que le rayonnement galactique général vient de la superposition du rayonnement des radiosources, prépondérant aux faibles fréquences, et de celui du gaz d'hydrogène ionisé interstellaire, prépondérant aux fréquences élevées,

— Pour 1000 Mc/s, le gaz serait à peu près entièrement responsable de l'émission et se comporterait comme un gaz optiquement mince ($T_e = 10\ 000^{\circ}$ K, $T_B = T_e$ ($1 - e^{-\tau}$) = 5°K, $N_0 = 20$ /cm³).

- Pour F < 50 Mc/s, le rayonnement des étoiles domine, celui du gaz (corps noir) est négligeable.

— Dans une zone 40-400 Mc/s on se trouverait d'après Piddington dans un des cas spéciaux cités : rayonnement stellaire ou nébulaire d'origine non thermique ou en présence d'un champ magnétique (fig. 4).

Aux basses fréquences, le gaz interstellaire se comporte comme un absorbant (1). L'existence de nuages de gaz concentrés sur le plan galactique expliquerait d'autre part qu'entre 18 et 1200 Mc/s l'intensité décroisse quand on s'éloigne du plan galactique et cela d'autant plus vite que la fréquence est élevée.



Piddington considère que la même interprétation est valable pour les sources à rayonnement constant. On a vu que cette théorie est très discutée dans le cas de Taurus A.

La radiation 1420 Mc/s de l'hydrogène neutre. — Alors que le bruit galactique considéré jusqu'ici possède un spectre de fréquence étendu, le rayonnement de l'hydrogène neutre interstellaire, découvert plus récemment, est monochromatique.

Ce rayonnement correspond à la structure du niveau normal de l'atome d'hydrogène neutre, divisé en deux niveaux hyperfins par renversement du spin de l'électron par rapport à celui du noyau (F = oet F = 1). Le moment total de l'atome est F = 1quand les spins de l'électron et du noyau sont de même sens, et F = o quand ils sont de sens contraire. Le passage de F = 1 à F = o (niveau dont la durée de vie est très grande) est accompagné d'une raie par rayonnement du dipôle magnétique. La décomposition par effet Zeeman du niveau F = 1 en trois sous-niveaux a été étudiée au laboratoire et a permis

(1) Scheuer et Ryle (M. N. R. A. S., 1953, 113, 3) ont étudié récemment à ce point de vue l'effet des régions H II au voisinage de l'équateur galactique et observé sur 1,5 et 210 Mc/s une région brillante d'environ 2°. Cette région devrait au contraire apparaître obscure aux basses fréquences. d'obtenir une valeur précise de la fréquence [44] :

$$F_{\rm H} = 1420,4051 \pm 0,0003 \,\,{\rm Me/s}$$
 ($\lambda = 21,1\,\,{\rm cm}$).

La possibilité d'observer cette raie, prévue par Van de Hulst bien avant sa découverte [39], [45] dans les régions H I, dépend de la différence entre la température du rayonnement continu pour la fréquence $F_{\rm H}$ et celle caractérisant la répartition des atomes H sur les niveaux F = I et F = 0. Suivant sa valeur, la raie peut être observée en absorption ou en émission.

Les observations [46], [47], [48] de la raie en émission ont confirmé ces prévisions. La technique généralement adoptée consiste à utiliser une antenne directive associée à un récepteur à bande passante étroite accordée sur les deux fréquences contrales $F_{\rm ff}$ et $F_{\rm fl}$ + 150 kc/s commutées à la fréquence 25 ou 30 c/s. La modulation B.F. obtenue passe dans un ampli à bande étroite et un détecteur de phase. On mesure ainsi directement la différence des températures de rayonnement reçues sur ces deux fréquences.

Un autre dispositif utilisé par Kerr [23] consiste à observer le spectre des fréquences reçues par un récepteur classique à double changement de fréquence suivi de filtres de bande.

Les températures mesurées vers le centre de la galaxie conduisent à un maximum supérieur de 25° à la température du fond continu, de l'ordre de 10° K à cette fréquence. D'après Even [46] la masse émissive paraissant opaque, la température cinétique du gaz dépasserait de peu la température de spin (35°) et l'émission serait due aux chocs entre atomes d'hydrogène.

Les premières observations ont montré que si le rayonnement présente une concentration générale au voisinage du plan galactique, l'intensité de la raie, son profil, sa largeur et sa position en fréquence sont très variables suivant la distance au centre de la voie lactée.

La rotation galactique, à la longitude l et à la latitude b introduit la vitesse radiale

$$v_r = A r \sin 2(l - l_0) \cos^2 b \, \mathrm{km/s},$$

où r est la distance au Soleil (en parsecs) et K la constante de Oort (\sim 0,017 km.s.⁻¹pc⁻¹). Cette formule simple n'est valable que pour les distances r petites par rapport à la distance du centre de rotation. Elle doit être complétée par d'autres termes pour les distances plus grandes.

Il en résulte un glissement de fréquence pouvant atteindre 1 Mc/s. D'autre part la largeur de la raie est affectée par l'épaisseur de la source émissive.

Christiansen et Hindmann [48] ont en outre observé le dédoublement de la raie sur une portion étendue de l'équateur galactique, dû à la présence de deux régions émissives ayant des vitesses radiales différentes (probablement deux bras de la spirale galactique).

Structure de la galaxie. — Il est inutile de souligner l'importance de l'observation de la raie 21 cm de l'hydrògène neutre dans l'étude de la structure de la galaxie. Les renseignements fournis concernent les nuages de gaz des régions H I qui occupent un volume bien plus grand que les régions H II (où l'hydrogène est ionisé) et ne donnent lieu à aucune émission dans le domaine optique; les observations ont donc bien plus d'intérêt que celles tirées de l'étude de la distribution du rayonnement galactique général.

On a en effet un moyen d'investigation si l'on



admet que le rayonnement reçu dans une certaine direction est en relation avec l'étendue de la matière galactique dans cette direction. Bolton et Westfold [27] ont ainsi déduit de leurs observations sur 100 Mc/s les coordonnées du centre de la galaxie $(l = 325^\circ, 4, b = -0^\circ 9)$, résultat en accord excellent avec ceux obtenus par les méthodes optiques.

Les mêmes auteurs estiment également que l'observation d'un maximum secondaire dans le Cygne (fig. 5) suggère que le Soleil se trouve dans un bras d'une galaxie spiralée ou tout au moins au voisinage d'un tel bras. Les observations seraient en faveur du sens de rotation « spires en avant » conforme à la théorie dynamique de Lindblad.

Ch. L. Seeger et R. E. Williamson [49] ont d'autre part essayé de tirer de mesures sur 205 Mc/s la position du pôle et du plan de symétrie de la galaxie. Leurs résultats ont été très discutés.

Bien entendu la possibilité d'un rayonnement d'origine partiellement extragalactique remet en question les résultats obtenus.

Les observations que Müller, Oort et Van de



Hulst [23], [52] ont exposés au Congrès de l'U.R.S.I. à Sidney à propos de la radiation 21 cm conduisent à des résultats particulièrement intéressants dans l'étude des régions H I, probablement concentrées le long des spires.

L'expérimentation a été faite à l'Observatoire de Leide avec un réflecteur parabolique de 7,5 m. Le contour de la raie, souvent double et même triple, a été relevé dans le plan galactique. Chaque maximum est considéré comme provenant d'une concentration H I distincte et l'échelle de fréquence est traduite en distance au moyen de la formule donnant la vitesse radiale.

Les premières mesures ont permis de tracer une carte du plan de l'équateur galactique (fig. 6). Sur celle-ci on n'a pu observer le secteur 135-160° pour lequel la rotation différentielle est trop petite et 220-315° non observable aux Pays-Bas.

Les résultats se rapportent à l'extérieur du grand cercle passant par le Soleil (rayon 9,4 kpc), la région intérieure étant bien plus difficile à interpréter. Les auteurs ont déterminé les points de concentration maximum, minimum et moitié pour des longitudes galactiques distantes de 5 en 5º.

Dans le secteur 160-210°, opposé au centre de la galaxie, on voit apparaître au moins trois bras de spirales dont l'un est tout proche du Soleil et l'autre distant de 2 000 pc. Le troisième bras spirale a pu être observé bien plus loin entre $l = 135^{\circ}$ et $l = 0^{\circ}$ jusqu'à une distance au Soleil de l'ordre de 20 000 pc. Une discontinuité importante apparaît vers $l = 50^{\circ}$ (fig. 6). Contrairement à la théorie de Lindblad et aux observations citées plus haut [27], la rotation se ferait « spires en arrière ».

On remarquera que le modèle de galaxie construit à partir des données plus fragmentaires des régions H II (par observation de Hz) par W.W. Morgan, Sharpless et Osterbrock [50] s'accorde assez bien avec la carte des astronomes néerlandais.

Manuscrit reçu le 8 juillet 1953.

BIBLIOGRAPHIE.

Pour la bibliographie des publications antérieures à 1950-1951, on pourra consulter les Ouvrages généraux suivants :

- [A] Bibliography of extraterrestrial radio noise. Commission V. Cornell University, 15 août 1950 (L'ouvrage donne un sommaire de tous les travaux cités).
- [B] Bruit radioélectrique solaire et galactique. Rapport spécial nº 1 de l'U.R.S.I., Bruxelles, 1950.
- [C] VAN DE HULST H. C. A course in Radio-Astronomy, Leiden, 1951 (ronéotypé).
- [D] LOVELL'B. and CLEGG J. A. Radio Astronomy, London, 1952.

En ce qui concerne l'étude théorique des transitions hyperboliques free-free, voir :

KRAMERS H. A. — Phil. Mag., 1923, 46, 836.

DENISSE J. F. — J. Physique Rad., 1950, 11, 164.

- [1] RYLE M. Proc. Phys. Soc., 1949, 62, 483 et 491.
- [2] UNSÖLD A. Nature, 1949, 163, 489.
- [3] ALFVEN H. et HERLOFSON N. Phys. Rev., 1950, 78, 616.
- [4] KIEPENHEUER K. O. Astron. J., 1950, 55, 172.
- [5] BABCOCK H. W. Phys. Rev., 1948, 74, 489.
- [6] HAEFF. Phys. Rev., 1949, 75, 1546.
- [7] SMITH F. G. M. N. R. A. S., 1952, 112, 497.
- [8] Research activities of the radiophysics laboratory C.S.I.R.O., août 1952.
- [9] RYLE M. et VONBERG D. D. Proc. Roy. Soc., 1948, **193,** 98.
- [10] HANBURY BROWN R. et HAZARD C. M.N.R.A.S., 1951, 3, 358.
- [11] STEINBERG J. L. L'Onde électrique, novembre-décembre 1952.
- [12] PIDDINGTON J. H. et MINNETT H. C. Aust. J. Sc. Res., A, 1951, 4, 459.
- [13] LOVELL A. C. B. London Calling, août 1952.
- [14] LiTTLE C. G. et LOVELL A. B. C. Nature, 1950, 165, 122.
- [15] RYLE M. et HEWISH A. M.N.R.A.S., 1950, 110, 382.
- [16] SEEGER Ch. L. J. Phys. Res., 1951, 56, 239.
- [17] HANBURY BROWN R. et HAZARD C. M.N.R.A.S., 1951, 3, 576. [18] MILLS B. Y. et THOMAS A. B. — Aust. J. Sc. Res., A,
- 1951, 4, 158.
- [19] LITTLE C. G. M.N.R.A.S., 1951, 111, 289.
- [20] HEWISH A. Proc. Roy. Soc., A. 1952, 214, 494.
- [21] BOLTON J. G. et STANLEY G. J. Aust. J. Soc. Res. A, 1949, 2, 139.

- [22] MILLS B. Y. Aust. J. Sc. Res., A, 1952, 5, 456.
- [23] Congrès de l'U.R.S.I. tenu à Sidney en 1952. On en trouvera un bref compte-rendu par J. F. KERR dans Sky and Telescope, 1953, 12, 59.
- [24] RYLE M. Proc. Roy. Soc., A, 1952, 211, 351.
- [25] SMITH F. G. Proc. Roy. Soc., B, 1952, 65, 971.
- [26] PIDDINGTON J. H. et MINNETT H. C. Aust. J. Sc. Res. A, 1952, 5, 17.
- [27] BOLTON J. G. et STANLEY G. J. Aust. J. S. Res., A, 1950, 3, 19 et 251. BOLTON J. G. et WESTFOLD K. G. — Nature, 1950,
- **165**, 251.
- [28] KERR et SHAIN. Proc. Inst. Rad. Eng., 1951, 39, 230.
 [29] STANLEY G. J. et SLEE O. B. Aust. J. Sc. Res., A,
- 1949, **2**, 139.
- [30] KAHN F. D. M.N.R.A.S., 1952, 112, 514.
 [31] SEKIDO Y., MASUDA T., YOSHIDA S. et WADA M. Phys. Rev., 1951, 83, 658.
- [32] RYLE, M., SMITH F. G. et ELSMORE B. M.N.R.A.S., 1950, 110, 508.
- [33] BOLTON J. G. et WESTFOLD K. C. Aust. J. Sc. Res. A, 1951, 4, 476. [34] MILLS B. Y. — Aust. J. Sc. Res., A, 1952, 5, 266.
- [35] ALLEN C. W. et GUM C. J. Aust. J. Sc. Res., A, 1950, 3, 224.
- [36] ATANASIJEVIC I. C. R. Acad. Sc., 1952, 235, 130.
- [37] WESTERHOUT G. et OORT J. H. --- B.A.N., 1951, 11, 323.
- [38] OORT H. J. B.A.N., nº 338, 1950.
- [39] VAN DE HULST H. C. Ned. Tidj. Voor. Natur., 1945, 11, 201.
- [40] SHAIN. Aust. J. Sc. Res., A, 1951, 42, 581.
- [41] PIDDINGTON J. H. M.N.R.A.S., 1951, 111, 45.
- [42] HERBSTREIT J. W. et JOHLER J. R. Nature, 1948, 161, 515.
- [43] TOWNES G. H. Astroph. J., 1947, 105, 235.
- [44] PRADELL A. G. et KUSCH P. Phys. Rev., 1950, 79, 1009. [45] SCHKLOVSKY I. S. — Astron. Zjourn. U.R.S.S.,
- 1949, **26**, 10.
- [46] EWEN H. I. et PURCELL E. M. Nature, 1951, 168, 356.
 [47] MULLER C. A. et OORT J. H. Nature, 1951, 168, 357.
 [48] CHRISTIANSEN W. N. et HINDMAN J. V. Aust. J. Sc. Res., A, 1952, 5, 437.
- [49] SEEGER Ch. L. et WILLIAMSON R. E. Astroph. J. 1951, 113, 21.
- [50] Sky and Telescope, 1952, 11, 138.
- [51] GREENSTEIN J. L. et MINKOWSKI R. Astroph. J., 1953, 118, 1.
- [52] VAN DE HULST H. C. The Observatory, 1953, 73, 129.