

Bulletin de l'Union des Physiciens

Association de professeurs de Physique et de Chimie

La Nébuleuse du Crabe

L'Astronomie est une science d'observation : à la différence d'autres physiciens, l'Astronome ne peut pas modifier au cours d'expérience, certains des paramètres conditionnant la structure de l'objet étudié.

Les informations à partir desquelles nous pouvons étudier l'Univers nous sont fournies par l'observation :

- du rayonnement électromagnétique,
- des rayons cosmiques (électrons, protons et particules lourdes),
- des neutrinos,
- des météorites.

Cependant, pour l'étude du système solaire, les progrès spectaculaires en technologie spatiale de ces 20 dernières années ont permis soit des analyses — *in situ* — de matériau (Lune, Mars), soit des mesures directes, par des sondes spatiales, de certains paramètres (température, pression, champ magnétique...) des atmosphères de quelques planètes.

Pour le reste de l'Univers, c'est essentiellement par l'analyse du rayonnement électromagnétique que nous pouvons en déduire sa structure.

Nous allons présenter une telle étude sur un exemple d'objet astronomique : la Nébuleuse du Crabe.

1. DECOUVERTE DE LA NEBULEUSE DU CRABE.

Les étoiles et les planètes ne sont pas les seuls objets du ciel. Même avant l'invention de la lunette ou du télescope, les astronomes avaient remarqué l'existence de régions diffuses, faiblement lumineuses qui furent appelées nébuleuses. On sait au-

jourd'hui que sous ce nom général furent identifiés des objets dont la nature est extrêmement variée : depuis les nuages de matière interstellaire jusqu'à des galaxies.

Un astronome anglais, J. BEVIS, décida de publier au XVIII^{me} siècle un nouvel atlas d'étoiles. Au cours de ses observations systématiques, il découvrit en 1731, une nébuleuse au voisinage de l'étoile Zeta Tauri. L'atlas où est représentée cette nébuleuse ne fut publié qu'en 1786 (fig. 1).

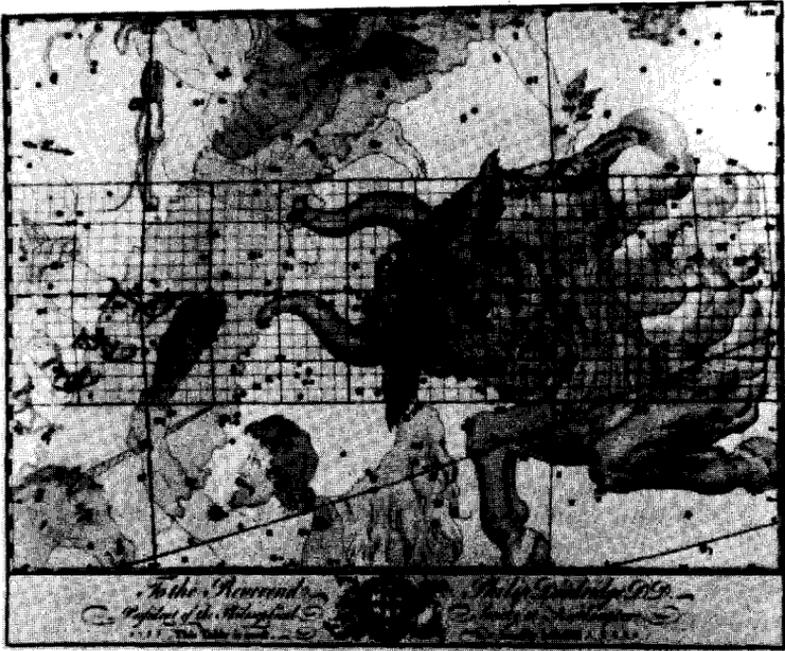


Fig. 1. — Planche XXIII de l'atlas de John BEVIS représentant la constellation du Taureau. La Nébuleuse est figurée par une petite tache circulaire au voisinage de l'étoile Zeta Tauri (tiré de : *Sky and Telescope* - November 1977 - page 378).

J. BEVIS fit part de sa découverte à l'astronome français Ch. MESSIER qui la découvrit en 1758, lors de ses observations cométaires. La publication par Ch. MESSIER d'un catalogue de nébuleuses, en 1711, stimule les observations de tels objets.

W. HERSCHEL pensait que l'aspect nébulaire de cet objet résultait de l'accumulation d'étoiles en un amas ; ne réussissant pas à résoudre cette nébuleuses en étoiles, il estima que son télescope n'était pas assez puissant. C'est Lord ROSS qui décrivit le pre-

mier la structure filamenteuse de cette nébuleuse. Il publia en 1844 un dessin (fig. 2) de cette nébuleuse telle qu'il l'observait dans son télescope de 1,80 m de diamètre et en 1848, il la désigna sous le nom de « *Nébuleuse du Crabe* » d'après son aspect visuel.



Fig. 2. — Dessin de la Nébuleuse du Crabe fait par Lord Ross en 1844 (tiré de : *The Crab Nebula* - S. Mitton - ed. Faber & Faber).

A la fin du XIX^{me} siècle, de nombreuses autres observations visuelles prouvèrent que cette nébuleuse ne pouvait pas être résolue en étoiles, comme c'était le cas pour d'autres nébuleuses qui n'étaient en réalité que des amas d'étoiles. Il s'agissait donc d'une masse gazeuse étendue. En 1882, fut prise la première photographie de cette nébuleuse. Les premiers spectres de Slipher (1913-1915) révélèrent des différences fondamentales par rapport à d'autres objets. En 1921, C.-O. LAMPLAND compara des photogra-

phies de la Nébuleuse du Crabe prises sur un intervalle de 8 ans et remarqua des modifications de structure. J.-C. DUNCAN, la même année, à partir de deux photographies prises à 11,5 années d'intervalle, montra que cette masse gazeuse était en expansion et que cette expansion se faisait radialement. En 1921 également, LUNDMARK faisait remarquer que cette nébuleuse était au voisinage de l'endroit où les chroniques chinoises font mention de l'apparition d'une étoile en 1054. En effet, le 4 juillet 1054, l'astronome chinois Yang WEI-TÊ remarquait dans la constellation du Taurcau, au voisinage de l'étoile Zeta, une étoile aussi brillante que la planète Vénus. Quand le Soleil se leva, l'étoile continua d'être visible et pourtant ce n'était pas la planète Vénus. Par ailleurs, les cartes célestes établies avec beaucoup de soin par les astronomes de l'empire chinois ne laissaient aucun doute : jusqu'à présent aucune étoile d'un tel éclat n'avait été observée dans cette direction. Elle resta observable durant le jour pendant plus de 3 semaines, puis son éclat diminua progressivement et au bout de 600 nuits, elle redevint invisible aux observations visuelles.

E. HUBBLE, en 1928, suggéra l'association de la nébuleuse avec cette observation chinoise. Il fit remarquer que la vitesse d'expansion déterminée actuellement pour la nébuleuse était compatible avec les 900 années qui s'étaient écoulées depuis 1054 en supposant que le phénomène alors observé était l'explosion d'une étoile et que la nébuleuse actuelle est constituée de la matière éjectée lors de cette explosion. C'est la quantité énorme d'énergie libérée au moment de l'explosion qui aurait rendu l'étoile visible en plein jour.

R. MINKOWSKI et W. BAADE, en 1942, identifièrent une étoile au voisinage du centre de la nébuleuse présentant un spectre continu, sans raies, caractéristique d'une étoile chaude et qui est donc source d'un rayonnement ultraviolet intense pouvant exciter le gaz environnant et le rendre lumineux. Ils supposèrent que c'était cette étoile qui avait explosé en 1054.

La Nébuleuse du Crabe est donc formée d'une étoile entourée par un nuage de gaz. L'origine et la structure de cet objet seront découvertes et comprises au fur et à mesure que des observations de son rayonnement seront disponibles dans tous les domaines spectraux : du domaine radio à celui du rayonnement gamma.

II. OBSERVATION DU RAYONNEMENT DE LA NEBULEUSE DU CRABE DANS LE DOMAINE VISIBLE.

Les premières analyses du rayonnement de la Nébuleuse du Crabe ont évidemment été faites dans le domaine visible : elles datent du début du siècle : 1913-1915. Le spectre de la Nébuleuse

du Crabe présente un fond continu sur lequel se superpose un spectre de raies en émission. Ces deux composants du rayonnement de la Nébuleuse du Crabe peuvent être séparés par des observations faites au travers de filtres : l'un ne laissant passer que le rayonnement continu c'est-à-dire centré sur un domaine spectral contenant peu de raies en émission et un autre centré au contraire sur un domaine riche en raies d'émission. Dès 1930, W. BAADE prit des photographies de la nébuleuse au travers de tels filtres. La fig. 3 montre une photographie dans le domaine spectral de la raie H_{α} de l'hydrogène et la fig. 4 dans une région qui ne contient pas de raies en émission. Les différences entre ces deux photographies sont remarquables : alors que la fig. 4 présente essentiellement un aspect diffus, la fig. 3 montre une structure filamenteuse très développée, ce qui prouve que les raies en émission ne sont pas formées dans les mêmes régions que le rayonnement continu. Des observations récentes montrent que la Nébuleuse du Crabe est plus étendue, d'environ 20 %, sur une photographie prise dans le continuum, que sur celle prise dans le domaine spectral des raies.



Fig. 3. — Photographie de la Nébuleuse du Crabe prise avec un filtre centré sur la raie H_{α} de l'hydrogène (tiré de : *Stars, their birth, life and death* - I. Shklovskii - ed. Freeman and co).



Fig. 4. — Photographie de la Nébuleuse du Crabe dans le continuum (tirée de : *Stars, their birth, life and death* - I. Shklovskii - ed. Freeman and co).

A. Le rayonnement continu.

R. MINKOWSKI, en 1942, interpréta le rayonnement continu de la nébulosité, comme étant d'origine thermique, par un gaz fortement ionisé. L'ionisation du gaz de la nébuleuse est produit par le rayonnement de l'étoile centrale. Celle-ci ayant une température superficielle élevée — estimée à 500 000 K par R. MINKOWSKI — son rayonnement ultraviolet est très intense. Les photons de longueur d'onde inférieure à 912 Å sont capables d'ioniser l'hydrogène, puisque pour séparer l'électron du proton, il faut une énergie de 13,6 électron-volt. Ainsi, le rayonnement de l'étoile centrale produit-il l'ionisation de la nébuleuse. Les électrons libres ainsi créés interagissent de différentes façons avec les atomes du gaz de la nébuleuse produisant son rayonnement. En particulier, l'électron subit une accélération dans le voisinage de l'ion, ce qui produit le rayonnement continu observé. Ce rayonnement — breemstrahlung thermique — est encore appelé « rayonnement free-free ».

Pour qu'un tel processus puisse expliquer l'intensité du rayonnement de la nébuleuse, il était nécessaire qu'elle soit constituée par un gaz de densité électronique importante : 10 cm^{-3} , ce qui impliquait pour l'ensemble de la nébuleuse une masse de 20 à 50 fois celle du Soleil.

De telles conditions étaient relativement incompatibles avec les intensités observées pour les raies en émission (voir ci-après),

mais à ce moment-là, aucune autre interprétation ne pouvait être formulée.

B. Le spectre de raies en émission.

Les raies en émission observées sont principalement les raies de la série de BALMER : H_α , H_β , H_γ , les raies de l'hélium 4471 Å (HeI) et 4686 Å (HeII) ainsi que de nombreuses raies interdites de l'oxygène [OIII] : 4959 Å et 5007 Å, de l'azote [NII] : 6548 Å, 6583 Å et du soufre [SII] : 6716 Å, 6731 Å. Le mécanisme de formation des raies en émission résulte aussi de l'excitation du gaz de la nébulosité par le rayonnement ultraviolet de l'étoile centrale. Ce spectre de raies en émission n'est pas une caractéristique propre à la Nébuleuse du Crabe, mais se rencontre par exemple : dans les nébuleuses interplanétaires, dans les régions HII.

L'énergie des photons émis par l'étoile centrale n'est pas rigoureusement égale à 13,6 électrons-volts. Les photons de longueur d'onde inférieure à 912 Å sont plus énergétiques et l'excès d'énergie est gardé par l'électron une fois qu'il est séparé du noyau, sous forme d'énergie cinétique. Il se produit des collisions avec transfert d'énergie, entre les électrons libres, ce qui a pour conséquence de répartir l'énergie cinétique acquise par les électrons dans tout un volume de gaz produisant un état thermodynamique qu'on peut caractériser par une température électronique correspondant à une vitesse moyenne d'agitation des électrons. Dans les filaments de la Nébuleuse du Crabe, cette température électronique varie de 8 000 K à 27 000 K. Mais ces électrons libres se recombinaient avec les protons et reforment ainsi un atome neutre d'hydrogène. Lors de cette recombinaison, l'atome se trouve d'abord dans un état très excité, mais la durée la vie de ces états étant très brève, l'électron retombe par cascade vers des états d'énergie moindre pour atteindre le niveau fondamental qui correspond à l'état d'énergie minimum de l'atome, mais aussi la configuration la plus stable. Lors du passage de l'électron d'un niveau à un autre d'énergie moindre, l'atome perd de l'énergie en émettant un photon dont l'énergie est égale à la différence d'énergie entre ces deux niveaux. La différence d'énergie entre les niveaux supérieurs étant faible, le photon émis aura une faible fréquence ($h\nu$ petit), il sera donc situé dans le domaine des ondes radio, puis au fur et à mesure que l'électron se rapproche du niveau fondamental, il y aura émission de photons dans le domaine infrarouge puis dans le domaine visible : raies de la série de BALMER, et enfin dans l'ultraviolet : raies de la série de LYMAN qui correspondent aux transitions entre les premiers niveaux de l'atome (fig. 5).

Les électrons libres entrent également en collisions avec les autres atomes du gaz et, au cours de cette collision, ils cèdent à

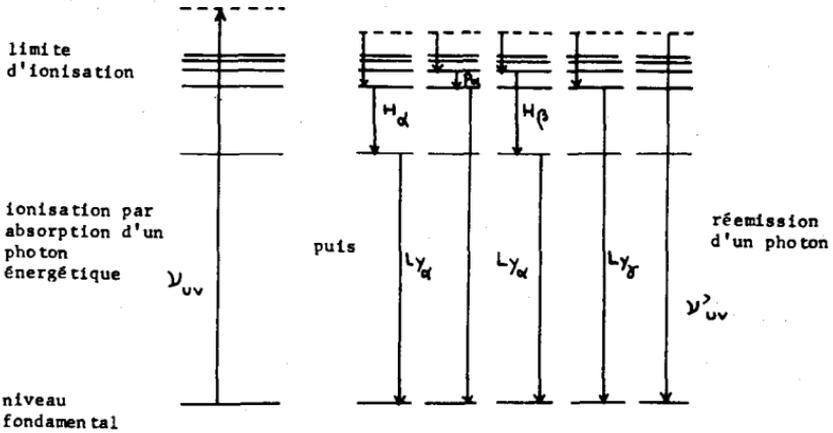


Fig. 5. — Après ionisation, quelques recombinaisons possibles de l'atome d'hydrogène avec création de différentes raies en émission : Ly_α : 1216 Å - P_α : 18751 Å - Ly_γ : 973 Å - H_α : 6563 Å - H_β : 4861 Å ou bien d'un photon (mais n'ayant pas nécessairement la même énergie que le photon incident).

l'atome une partie de leur énergie. L'énergie d'un électron libre vaut $(h\nu - E_0)$ où $h\nu$ est l'énergie du photon ultraviolet qui a provoqué l'ionisation de l'atome d'hydrogène libérant ainsi l'électron et E_0 est l'énergie nécessaire pour ioniser l'atome d'hydrogène, soit 13,6 électrons-volts. En moyenne, l'électron libre gardera une énergie égale à $3/2 K T_e$ où T_e est la température électronique et il cédera l'excès lors d'une collision avec un atome. Cet excès vaut quelques électrons-volts, ce qui est suffisant pour exciter par exemple OIII. L'oxygène 2 fois ionisé (OIII) se trouve dans l'état le plus probable qui est celui du niveau fondamental : la différence d'énergie entre le niveau fondamental et le premier niveau excité est de l'ordre de 2,5 électrons-volts (pour l'atome d'hydrogène, elle est de 10 électrons-volts (fig. 6).

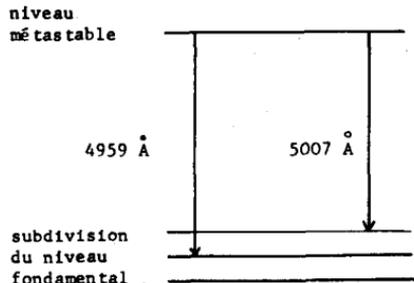


Fig. 6. — Raies interdites de OIII. fondamental

Ainsi, les électrons libres peuvent avoir suffisamment d'énergie pour, au cours d'une collision, transférer une partie de cette

énergie aux ions et les placer dans un état excité voisin du niveau fondamental. Mais ces niveaux sont des niveaux métastables, et leur désexcitation vers un niveau inférieur ne se fera pas immédiatement, mais seulement au bout de quelques minutes alors qu'habituellement un niveau se désexcite en 10^{-8} secondes. Lors de cette désexcitation, l'ion émet un photon. Cette transition est appelée raie interdite et elle est usuellement notée en mettant le nom de l'atome entre []. Cette transition est rendue possible parce que les collisions sont suffisamment rares pour que le niveau métastable ne soit pas dépeuplé avant la production de la raie interdite et parce qu'elles sont cependant suffisamment fréquentes pour peupler le niveau métastable. Ces raies ne peuvent pas être détectées dans les laboratoires terrestres car les densités gazeuses y sont encore beaucoup trop importantes, d'où le nom de ces raies : « *raies interdites* », dont la nature n'a été connue que par l'observation de milieux astrophysiques. De telles raies furent observées pour la première fois en 1927 par BOWEN, et attribuées alors à un élément inconnu sur Terre, qui fut appelé « *nébulum* ».

L'analyse de l'intensité des raies permet de déterminer les conditions physiques dans les « *filaments* » de la nébuleuse où elles se forment : composition chimique, densité électronique, température... ; la densité électronique est de l'ordre de 10^9 électrons par m^3 ; la température électronique varie d'une région à l'autre de la nébuleuse et en moyenne cette température est plus élevée vers l'extérieur de la nébuleuse qu'au centre. Ces conditions physiques variables d'un filament à l'autre font qu'il est difficile d'estimer leur composition chimique. Cependant, l'hélium semble surabondant par rapport à ce qu'on connaît par ailleurs dans le Soleil. Des progrès restent encore à faire dans la détermination de ces paramètres qui sont liés à une bonne connaissance des mécanismes capables de produire ces photons très énergétiques donnant naissance à ces raies d'émission. Rappelons que ces raies en émission ne sont pas observées dans le volume entier de la nébuleuse mais seulement dans les régions qui présentent une structure filamenteuse. Ce processus de formation de raies en émission est également celui qu'on rencontre dans les Nébuleuses planétaires.

C. Conclusion relative aux observations dans le visible.

Les observations dans le visible et les interprétations que nous venons d'en donner ne permettent pas de comprendre le lien existant entre les filaments et la région diffuse de la nébuleuse. Une théorie classique de rayonnement thermique de la région diffuse donne une température très élevée pour cette région

et on ne comprend pas comment les filaments, qui ont une température notablement inférieure, peuvent exister au milieu d'un plasma chaud : la pression de radiation de ce plasma devrait les faire se contracter indéfiniment ! D'autre part, quelle est la source de l'énergie pouvant exciter des électrons susceptibles de produire les raies en émissions aussi intenses que celles qui sont observées dans la Nébuleuse du Crabe ? L'hypothèse adoptée jusqu'en 1950, d'une source produite par le rayonnement ultraviolet d'une étoile chaude centrale entraîne de nombreuses contradictions. C'est seulement lorsqu'on disposera d'observations dans le domaine radio que ces ambiguïtés pourront être levées quant à la nature de la source d'énergie excitatrice des électrons de la nébuleuse.

III. STRUCTURE DYNAMIQUE DE LA NEBULEUSE DU CRABE.

La structure dynamique de la Nébuleuse du Crabe a pu être établie grâce aux observations dans le domaine visible faites à grande résolution, indépendamment de toute hypothèse quant à la nature du rayonnement. Il a été possible de remarquer :

- a) l'existence d'un mouvement d'expansion d'ensemble de la nébuleuse,
- b) des modifications de structure extrêmement rapide au voisinage de l'étoile centrale.

Ce second caractère se révélera très important, car en connexion avec la nature même de l'étoile centrale.

A. Expansion de la nébuleuse.

Le mouvement d'expansion de la nébuleuse est mis en évidence en comparant l'étendue de la nébuleuse sur deux photographies prises à quelques dizaines d'années d'intervalle.

L'aspect des raies en émission est une preuve supplémentaire de ce mouvement d'expansion. En effet, si on considère un atome au repos qui émet un rayonnement de longueur d'onde λ_0 , l'effet Doppler-Fizeau exprime que, lorsque cet atome est animé d'une vitesse radiale V_r par rapport à un observateur, ce dernier le reçoit à une longueur d'onde λ telle que :

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{V_r}{c}$$

où c désigne la vitesse de la lumière dans le vide. Cette relation est en fait une première approximation valable pour $V_r \ll c$ d'une relation plus générale obtenue dans le cadre de la relativité restreinte. Si tous les atomes qui contribuent à la formation

d'une raie ont la même vitesse radiale, la raie est déplacée en longueur d'onde. Par contre, si ces atomes n'ont pas tous la même vitesse radiale, la raie résultant du rayonnement émis par ces atomes est composée d'un ensemble de raies élémentaires émises chacune par des atomes ayant même vitesse radiale : ceci se traduit par un élargissement de la raie autour de la longueur d'onde λ_0 . Les raies en émission présentent un aspect fuselé car, comme le montre la fig. 7, l'observateur reçoit des photons à la fois de régions qui s'approchent de lui et d'autres qui s'en éloignent. On peut donc déterminer la vitesse linéaire d'expansion des filaments : en moyenne elle est de $1\,200\text{ km s}^{-1}$.

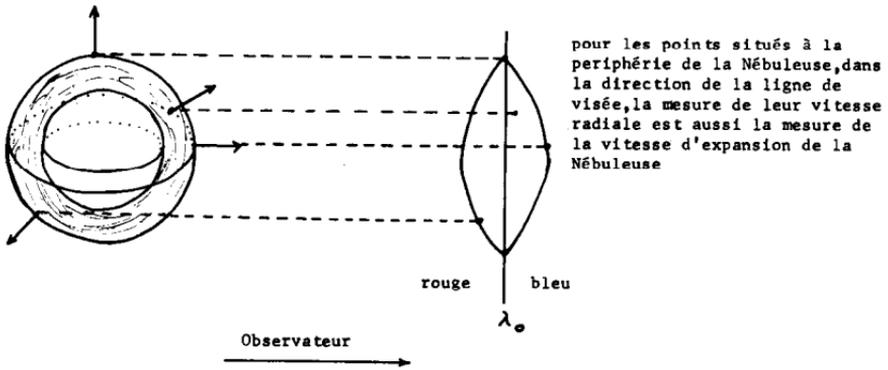
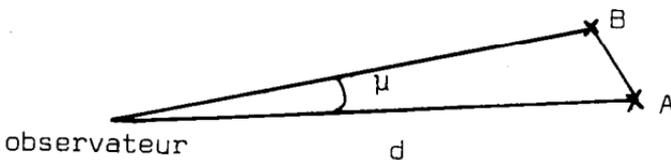


Fig. 7. — Nuage de gaz en expansion radiale. Les différentes régions de cette masse gazeuse sphérique contribuent à la formation de la raie en fonction de leur vitesse radiale.

Par ailleurs, en comparant les variations de position des filaments sur des photographies prises à plusieurs années d'intervalle, on peut déterminer la valeur de la projection de la vitesse d'expansion sur un plan perpendiculaire à la ligne de visée. La combinaison de ces deux résultats permet d'en déduire la distance à laquelle est située la Nébuleuse du Crabe. Ce paramètre est fondamental pour le calcul de l'énergie rayonnée à partir de la mesure de son éclat apparent.

Sur deux photographies prises à un an d'intervalle, supposons qu'un filament se soit déplacé de A en B. La mesure de leur



séparation angulaire, vaut en moyenne $0''.23$. Si v est la vitesse linéaire d'expansion, la distance parcourue de A à B est égale à : $v \times (1 \text{ an})$. Cette distance étant petite devant la distance de la Nébuleuse du Crabe à la Terre, on peut écrire que $AB = d \times \mu$.

Si v est exprimé en km s^{-1} , $AB = v \times \pi \times 10^7$ car il y a environ $\pi \times 10^7$ secondes par an. Dans cette relation, μ est exprimé en radian, donc :

$$\mu = \frac{0,23}{3\,600} \times \frac{2\pi}{360}$$

d'où la distance de la Terre à la Nébuleuse du Crabe :

$$d = 3,3 \cdot 10^{16} \text{ km.}$$

En considérant les mouvements propres et les vitesses d'expansion de divers filaments, un modèle à trois dimensions de la Nébuleuse du Crabe a pu être développé où celle-ci a la forme d'une ellipsoïde. Le réseau de filaments qui émettent les raies d'émission semble former une sorte de cage, à plusieurs parois imbriquées les unes dans les autres et qui se trouverait plutôt vers la périphérie (fig. 8). Le diamètre de ces filaments est estimé être de l'ordre de $2,5 \cdot 10^{11}$ km. La Nébuleuse du Crabe, dans le domaine visible, semble être bordée par ce système de filaments.

Les photos les plus posées montrent que la nébuleuse présente une surface de séparation relativement nette avec le milieu interstellaire. Il n'y a pas de lente pénétration d'un des milieux dans l'autre par dilution progressive de la densité au fur et à mesure qu'on s'éloigne du centre de la nébuleuse. Etant donnée la vitesse d'expansion des filaments, ceci implique l'existence de collisions avec les particules du milieu interstellaire ; cette interface entre deux milieux de température très différente : l'un chaud (de l'ordre de 10 à 20 000 K pour la nébuleuse) et l'autre froid (quelques centaines de degrés Kelvin pour le milieu interstellaire) est certainement le siège de mouvements turbulents. Si on suppose que la valeur actuellement mesurée du mouvement propre est celle communiquée au moment de l'explosion de l'étoile centrale, on trouve comme date probable de l'explosion 1148, compte tenu de l'extension actuelle de la nébuleuse. L'écart de 94 ans avec 1054 est interprété comme résultant d'une accélération de la vitesse d'expansion. Cette accélération est estimée à 0.0016 cm s^{-2} .

B. Activité au voisinage de l'étoile centrale.

Dès 1921, C.-O. LAMPLAND remarquait que des changements, sur quelques années, intervenaient dans la distribution locale de



Fig. 8. — Représentation du réseau de filaments (tiré de : *Stars, their birth, life and death* - I. Shklovskii - ed. Freeman and co).

l'intensité du rayonnement continu : certaines régions de la Nébuleuse du Crabe devenaient par exemple beaucoup plus brillantes, ou bien d'autres régions semblaient s'être déplacées.

En 1969, on observa qu'une petite région au voisinage du centre semblait, en quelques mois s'être déplacée de 2 secondes d'arc, ce qui, compte tenu de la distance de la nébuleuse, implique une vitesse qui est le $1/5^e$ de celle de la lumière.

Nous verrons ultérieurement comment ces mouvements sont associés à la nature de l'étoile centrale.

IV. OBSERVATIONS DANS LE DOMAINE RADIO DU RAYONNEMENT DE LA NEBULEUSE DU CRABE.

Les ondes électromagnétiques sont appelées ondes radio, si leur longueur d'onde est supérieure à 1 mm. Historiquement, la radioastronomie a débuté en 1931 avec la découverte de l'émission galactique par JANSKY, mais elle n'a réellement démarré qu'après la seconde guerre mondiale en bénéficiant des techniques radar alors développées. Les premières observations en radioastronomie se sont faites à de grandes longueurs d'onde, pour lesquelles les récepteurs étaient plus faciles à construire. Un radiotélescope permet donc de mesurer la densité de flux d'énergie qui nous provient d'un astre, dans la bande de fréquence à laquelle l'instrument est sensible.

C'est en 1948, que les astronomes BOLTON et STANLEY détectèrent un rayonnement radio en provenance de la Nébuleuse du Crabe. La première carte montrant la distribution de l'intensité du rayonnement vers 100 MHz dans la nébuleuse fut réalisée en 1953. On remarque que les contours de l'émission radio suivent le contour optique de la nébuleuse (fig. 9). Or, cette émission



Fig. 9. — Distribution du rayonnement radio de la Nébuleuse du Crabe superposé à une photographie de la Nébuleuse (tiré de : *The Crab Nebula* - K.-M.-V. Apparao - 1973 - *Astrophysics and Space Science*, vol. 25, page 3).

radio présente une densité de flux beaucoup plus grande que dans le visible. Il devenait alors impossible d'expliquer ce rayonnement par l'émission thermique d'un gaz ionisé.

C'est alors que l'astrophysicien SHKLOVSKY propose en 1959 le processus du rayonnement synchrotron pour expliquer ce flux radio ainsi que le rayonnement continu du domaine optique. Ce type de rayonnement peut être produit dans les cyclotron ou synchrotron par des électrons circulant à des vitesses non relativistes ou bien relativistes autour des lignes de force d'un champ magnétique. Les propriétés de ce rayonnement étaient bien connues en 1953 ; dès 1950, les physiciens H. ALFVEN et N. HERLOFSON ainsi que l'astrophysicien K.-O. KIÉPENHEUER ont suggéré d'expliquer l'émission radio observée dans les restes d'explosion de supernova et d'autres sources radiocosmiques par un rayonnement synchrotron.

V. LE RAYONNEMENT SYNCHROTRON DE LA NEBULEUSE DU CRABE.

On sait qu'un électron circulant à une vitesse non relativiste, sur une orbite circulaire autour de la ligne de force d'un champ magnétique, émet un rayonnement dont la fréquence est

$$\nu = \frac{eB}{2\pi m_e} \quad \text{où } B \text{ est l'intensité du champ magnétique, } e \text{ la}$$

charge de l'électron, m_e sa masse au repos. Si la vitesse de l'électron est relativiste, la plus grande partie du rayonnement émis par l'électron est concentrée, pour l'observateur, dans un cône de faible angle d'ouverture dont la direction coïncide instantanément avec celle du vecteur vitesse de l'électron. Dans ce cas, le rayonnement émis n'est plus monochromatique, mais présente un maximum d'intensité pour la fréquence :

$$\nu_m = \frac{eB}{4\pi m_e} \left(\frac{E}{m_e c^2} \right)^2$$

où E est l'énergie de l'électron ; ce rayonnement est formé d'un ensemble de raies voisines telles qu'on peut dire qu'il a un caractère continu. Ce rayonnement est perçu par un observateur comme une pulsation par suite de sa directivité et du mouvement de l'électron. Par ailleurs, la trajectoire de l'électron autour de la ligne de force du champ magnétique n'est pas un cercle mais une spirale, car la vitesse initiale de l'électron n'est pas nécessairement perpendiculaire à la ligne de force du champ magnétique (fig. 10).

Calculons le domaine de fréquence dans lequel rayonnent des électrons relativistes circulant dans un champ magnétique faible.

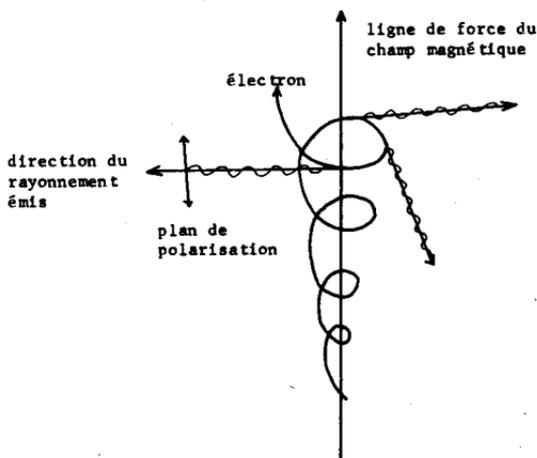


Fig. 10. — Electron relativiste spiralant dans un champ magnétique.

Soient $B = 2 \times 10^{-5}$ gauss, intensité moyenne du champ magnétique interstellaire, $E = 10^9$ eV, donc $v_m \approx 100$ MHz soit une longueur d'onde de 3 m qui est effectivement observable. Par contre, si l'électron avait été non relativiste, on aurait trouvé une fréquence de 50 Hz soit une longueur d'onde de 600 km, inobservable depuis la Terre puisque l'ionosphère terrestre réfléchit les rayonnements dont la longueur d'onde est supérieure à 30 mètres.

Nous avons jusqu'ici considéré le rayonnement synchrotron d'un seul électron relativiste. Si on considère un ensemble d'électrons relativistes, le rayonnement observé dépendra du spectre d'énergie de ces électrons, et l'énergie reçue par l'observateur sera la somme des rayonnements émis par les électrons de différente énergie, à différentes fréquences. Le résultat est donc un rayonnement continu qui s'étend sur un intervalle spectral dont l'extension dépend du spectre d'énergie des électrons. Si on suppose que les vitesses de ces particules sont orientées de façon aléatoire vis-à-vis du champ magnétique, le rayonnement résultant perd sa directivité.

L'hypothèse du rayonnement synchrotron permet d'expliquer la distribution d'énergie de la Nébuleuse dans le domaine radio ainsi que dans le domaine visible, tout au moins pour le rayonnement continu. Mais une telle hypothèse implique l'existence d'électrons relativistes. Ainsi en 1953, a-t-on éliminé l'ambiguïté du bremsstrahlung thermique pour expliquer le rayonnement continu visible mais un nouveau problème était posé : celui de l'origine des électrons relativistes.

A. La polarisation du rayonnement optique de la nébuleuse.

Une preuve de la validité de cette hypothèse du rayonnement synchrotron fut apportée dès 1954 par l'observation faite indépendamment par V.-M. DOMBROVSKI et M.-A. VASHAKIDZE de la polarisation du rayonnement optique continu. On peut représenter mathématiquement le rayonnement comme la propagation d'une onde le long de la ligne de visée. On dit que le rayonnement n'est pas polarisé si le plan de vibration de cette onde n'a pas de direction privilégiée. Au contraire, on dit que le rayonnement est polarisé si ce plan a une direction privilégiée. Or, le rayonnement synchrotron est fortement polarisé c'est-à-dire que le plan de vibration de l'onde est préférentiellement contenu dans un plan perpendiculaire au champ magnétique.

Il est très aisé de mettre en évidence la polarisation d'un rayonnement : il suffit de l'observer au travers d'un filtre polarisant c'est-à-dire un filtre qui coupe tous les rayonnements sauf ceux dont le plan de vibration de l'onde a une direction bien précise par rapport à la ligne de visée.

La fig. 11 montre l'aspect de la nébuleuse lorsqu'elle est photographiée avec des filtres polaroids orientés de différentes façons. L'aspect de la nébuleuse change radicalement avec l'angle d'observation. D'une photo à l'autre, lorsque le filtre polarisant est tourné de 90° , certaines régions disparaissent complètement, ce qui indique une polarisation linéaire voisine de 100 % dans ces régions. L'analyse de la polarisation permet de définir la direction du champ magnétique tout au moins dans les régions fortement polarisées puisque celle-ci est perpendiculaire au plan de polarisation ; elle montre également que le champ magnétique est partout présent dans la nébuleuse.

B. Le champ magnétique dans la nébuleuse.

L'interprétation du rayonnement continu de la nébuleuse par un rayonnement synchrotron nécessite l'existence d'un champ magnétique relativement intense. Mais la densité d'énergie des particules relativistes ne peut pas être supérieure à la densité d'énergie du champ magnétique qui est égale à $B^2/2\mu_0$, autrement, les particules relativistes s'échapperaient du milieu. On peut ainsi en faisant l'hypothèse de l'équipartition entre ces deux densités d'énergie, estimer l'ordre de grandeur du champ magnétique.

Il faut donc déterminer l'énergie des particules relativistes. Le rayonnement synchrotron dans le domaine optique et radio est produit par les électrons relativistes, mais, il est naturel de supposer qu'il existe d'autres particules relativistes dans ce milieu comme des protons ou des particules α . Ces particules, trop

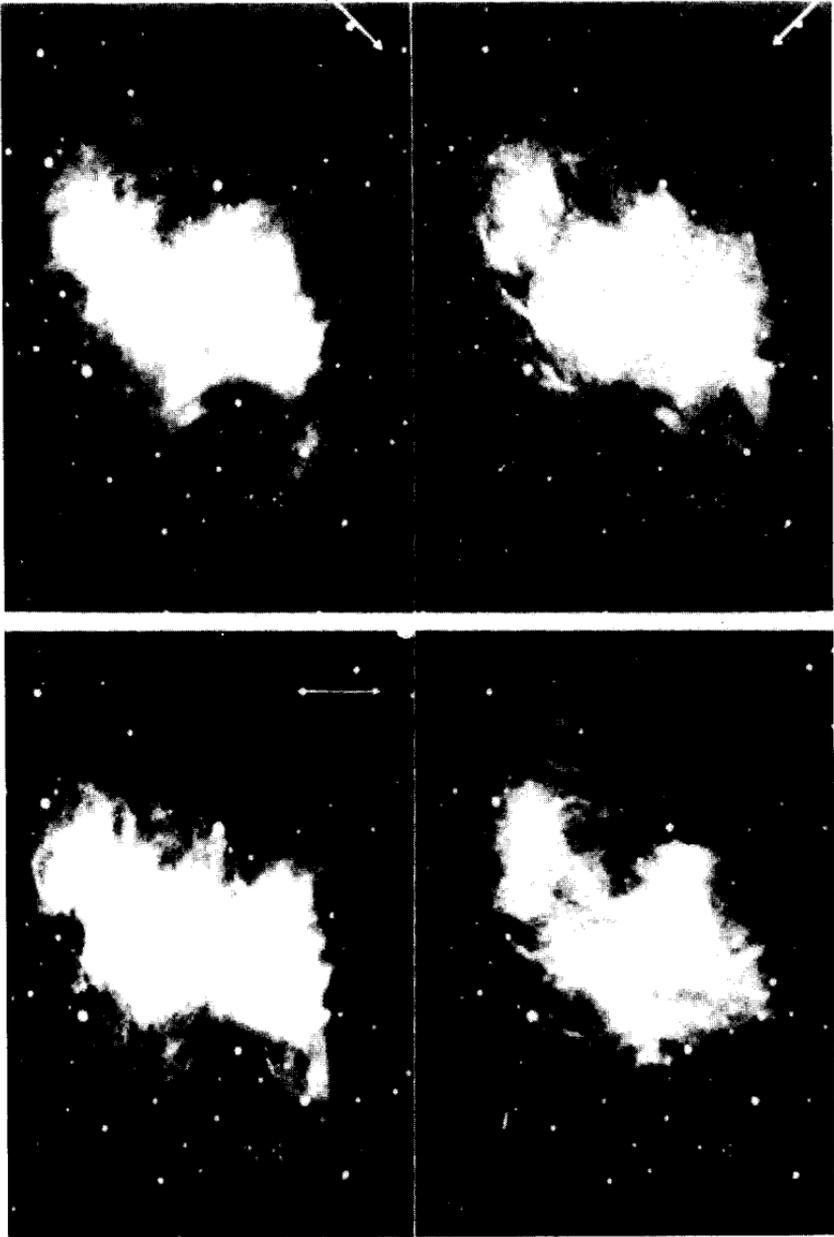


Fig. 11. — Photographie de la Nébuleuse du Crabe prise au travers de filtres polarisants pour 4 orientations différentes, données par les fleches en bas et à droite (tiré de : *Stars, their birth, life and death* - I. Shklovskii - ed. Freeman and co).

lourdes, rayonnent très peu d'énergie dans ce domaine spectral. Mais on ne connaît pas le rapport qui existe entre le nombre d'électrons relativistes et celui des autres particules relativistes. On se contente donc d'une estimation qui sera en fait une limite inférieure de l'énergie des particules relativistes en attribuant aux électrons seuls, toute l'énergie.

Le calcul de l'énergie des électrons est fait à partir de l'observation du rayonnement synchrotron dont on somme l'intensité pour toutes les fréquences observées : on l'estime à 2×10^{48} ergs (*).

On écrit ensuite que cette énergie est égale à $\frac{B^2}{2\mu_0}$ d'où une intensité du champ magnétique de $2,5 \times 10^{-4}$ gauss(*). Par contre, si on essaie d'estimer l'énergie des autres particules relativistes présentes dans la nébuleuse, on peut définir une limite supérieure de leur abondance par le raisonnement suivant : si ces particules étaient très abondantes, elles exerceraient une pression considérable sur les filaments car ces particules ne perdraient pas leur énergie, au contraire des électrons, par rayonnement synchrotron. Ainsi la source qui injecte des électrons relativistes dans la nébuleuse, doit être relativement pauvre en autres particules. A partir de l'abondance relative entre ces particules lourdes et les électrons dans les rayons cosmiques observés au voisinage de la Terre, on déduit une autre valeur limite pour l'énergie des particules relativistes dans la nébuleuse : 10^{49} ergs d'où un champ magnétique de 10^{-3} gauss environ. Ainsi, l'ordre de grandeur du champ magnétique est de 10^{-4} à 10^{-3} gauss. Cette valeur est cohérente avec l'accord trouvé entre l'intensité du rayonnement prédite par la théorie du rayonnement synchrotron et celle qui est effectivement observée. L'origine de ce champ magnétique pose évidemment un nouveau problème.

Ce champ magnétique exerce une pression sur le réseau des filaments et doit certainement contribuer à l'accélération de leur expansion.

On peut calculer la masse de matière contenue dans les filaments en écrivant l'équation d'équilibre mécanique entre les forces de pression due au champ magnétique, aux particules relativistes et à l'accélération qu'elles provoquent :

$$\text{masse (filament)} \times g \simeq 4\pi R^2 \left(\frac{B^2}{2\mu_0} + Pr \right)$$

où R est le rayon moyen de la nébuleuse (env. $3 \cdot 10^{13}$ km); la pression Pr exercée par les particules relativistes est estimée à $\frac{B^2}{2\mu_0}$ également.

(*) *N.D.L.R.* : 1 Joule = 10^7 ergs ; 1 Tesla = 10^4 Gauss.

On trouve ainsi que la masse des filaments est environ égale au quart de la masse du Soleil. Actuellement, à partir de modèles détaillés décrivant l'excitation du gaz dans les filaments, on estime que leur masse est de l'ordre de grandeur de celle du Soleil, soit $2 \cdot 10^{33}$ g. Cette valeur nous donne un ordre de grandeur pour l'estimation de la masse totale de la nébuleuse car, il existe très peu de matière dans la nébuleuse diffuse. En effet, la densité des particules relativistes nécessaire pour produire le rayonnement continu (synchrotron) observé est très faible : un électron dans 100 m^3 . Ainsi la masse totale de la nébuleuse diffuse peut-elle être prise égale à 10^{27} g en supposant l'existence d'un proton relativiste pour chaque électron. Cette masse est du même ordre que celle de la Terre : on voit ainsi quelle est l'efficacité du mécanisme du rayonnement des électrons relativistes circulant dans un champ magnétique. Si on estime la masse de gaz nécessaire pour produire un rayonnement de la même intensité à partir de processus thermiques, on trouve 10^{35} g, (10^8 fois plus).

C. Durée de vie des électrons relativistes.

Le rayonnement synchrotron se fait aux dépens de l'énergie des électrons. La durée de vie des électrons est inversement proportionnelle à leur énergie rayonnée. Les électrons d'énergie 10^{11} ev produisent un rayonnement synchrotron dans le domaine du visible. Au bout de 1 000 ans environ, ces électrons auront perdu suffisamment d'énergie pour ne plus créer de rayonnement dans ce domaine spectral : en conséquence, l'intensité du rayonnement continu dans le domaine optique devrait diminuer. Or, rien de tel n'a été observé.

Dans le domaine des ondes radio où l'énergie des électrons est moindre, de l'ordre de 10^9 ev, cette durée est beaucoup plus longue : environ 6 000 ans.

Il est donc nécessaire d'alimenter au cours du temps la nébuleuse en électrons relativistes très énergétiques pour produire le rayonnement visible observé : mais d'où viennent-ils ? Cette question est restée insoluble jusqu'en 1969. Avant de montrer par quel extraordinaire hasard, la nature de cette source a été découverte, nous allons récapituler les mesures du rayonnement de la Nébuleuse du Crabe pour différents domaines spectraux.

VI. LE SPECTRE ELECTROMAGNETIQUE DE LA NEBULEUSE DU CRABE DU DOMAINE RADIO AUX RAYONS GAMMA.

La fig. 12 résume l'ensemble des observations faites sur la Nébuleuse du Crabe.

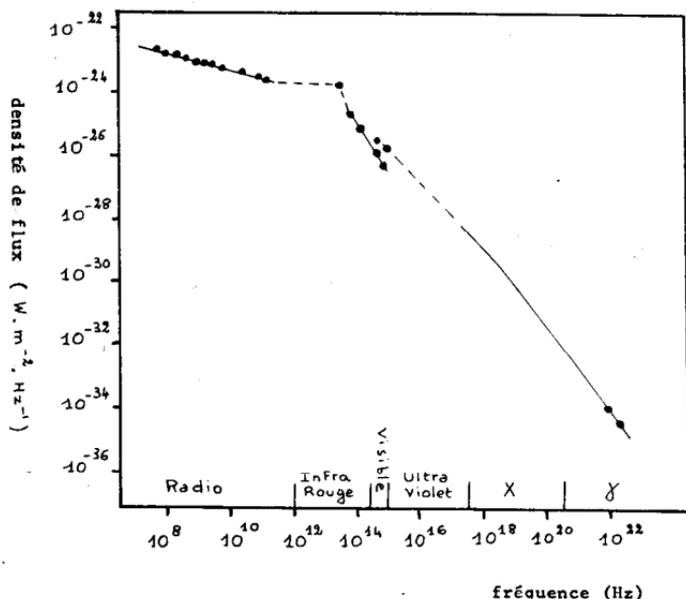


Fig. 12. — Mesures du flux de la Nébuleuse du Crabe.

Dans le domaine optique, celles-ci s'étendent du domaine visible à l'infrarouge soit de $6 \cdot 10^{13}$ Hz à 10^{15} Hz. Les observations dans l'infrarouge n'ont débuté qu'en 1968, étant donné les importants problèmes techniques posés par l'observation dans le domaine spectral 1 mm à 1 micron.

La distribution d'énergie dans ce domaine spectral exprimée par le logarithme de l'énergie reçue en fonction du logarithme de la fréquence est représenté par une portion de droite de pente -0.9 .

Les valeurs du flux de la nébuleuse observée dans le domaine visible doivent être corrigées de l'absorption que subit ce rayonnement dans le milieu interstellaire et qui peut atteindre 1 magnitude. De même, les observations à 10 microns qui semblent montrer l'existence d'un flux intense pour cette fréquence peuvent être perturbées par l'émission infrarouge des poussières contenues dans la nébuleuse.

La valeur de la pente dépend donc de la façon dont la correction interstellaire a été faite.

Le rayonnement infrarouge observé est également produit par un rayonnement synchrotron. Les observations du domaine

radio couvrant l'intervalle de fréquence entre 10^7 et $2.5 \cdot 10^{11}$ Hz soit de 10 MHz à 100 GHz. Ici encore, cette énergie exprimée comme ci-dessus peut être représentée par une portion de droite, mais de pente différente : -0.26 .

Lors des premières observations radio de la Nébuleuse du Crabe, on ne disposait que d'instruments ayant un très faible pouvoir de résolution. Or, la Nébuleuse du Crabe est localisée près de l'écliptique, ainsi est-elle occultée de temps par la Lune pour un observateur terrestre. Ces occultations lunaires qui ne résultent que de la combinaison des mouvements de la Lune et de la Terre sur leurs orbites respectives, se produisent tous les 10 ans environ. Lorsqu'une occultation se produit, elle permet de localiser avec beaucoup de précision la région émettrice à la surface de la nébuleuse. C'est ainsi que durant l'occultation de 1964, une observation à 25 MHz (longueur d'onde voisine de 12 m) montre que l'énergie, pour cette fréquence, provenait pour plus de 30 % d'une très petite région dont le diamètre angulaire ne dépassait pas $0",1$ et qui était localisée au voisinage de l'étoile ayant explosé en 1054.

Le rayonnement radio présente, quelle que soit la fréquence à laquelle il est observé, une polarisation, ce qui est bien conforme à l'origine d'un rayonnement synchrotron.

En 1963, un nouveau domaine de fréquence était exploré : celui des rayons X. Cette année-là, une fusée équipée d'un détecteur de rayons X mesure le flux rayonné par la nébuleuse dans le domaine de longueur d'onde : $1,5$ à 8 \AA . Le flux mesuré dans ce domaine était d'environ $1,5 \times 10^{-8} \text{ erg cm}^{-2} \text{ s}^{-1}$. Evidemment, le problème de l'origine de ce rayonnement se posa immédiatement. Mais tout d'abord comment se répartit ce rayonnement dans la nébuleuse ? Les détecteurs de rayons X ayant un très faible pouvoir de résolution, ici encore la période d'occultation par la Lune était le moment favorable pour localiser cette source de rayons X. Si cette source était concentrée en une région de faible étendue, dès qu'elle se trouverait derrière la Lune, le flux mesuré en X devrait être nul, tandis que si cette région est étendue, on verrait l'intensité du flux décroître au fur et à mesure que la Lune occulte la source. Lors de l'occultation du 7 juillet 1964, il fut ainsi démontré que la source des rayons X était étendue sur au moins 1 minute d'arc, mais par contre qu'elle était considérablement moins étendue que dans le domaine optique ou radio, puisque dans ces domaines, elle s'étend environ sur $7' \times 5'$. D'autres observations en rayons X succédèrent à celle-ci permettant de mesurer le flux aussi bien à quelques KeV qu'à une centaine de KeV. Les observations lors de l'occultation de 1974 permirent de préciser que l'image, en rayons X de la

Nébuleuse du Crabe, s'étendait sur environ $80''$ dans le domaine $0,5$ à 16 kev alors qu'elle n'était plus que de $50''$ à 50 kev. Le centre de ces émissions en X ne coïncide pas avec l'étoile ayant explosé en 1054, mais est déplacé de 10 à $20''$. La polarisation du rayonnement X fut établie en 1976. L'énergie rayonnée dans cet intervalle spectral, présentait la même variation en fonction de la fréquence que le rayonnement radio ou bien visible, mais avec une pente légèrement différente de celle du visible. Son origine pouvait donc être encore celle d'un rayonnement synchrotron. Les électrons relativistes responsables de l'émission dans le domaine des rayons X sont très énergétiques : de l'ordre de 10^{14} ev. Ces électrons perdent très rapidement leur énergie et leur durée de vie est très brève ; ainsi pour $\nu = 10^{20}$ Hz, la durée de vie est-elle seulement de 10 semaines. Ceci explique la faible étendue de la région présentant une émission de rayons X, les électrons n'ont pas le temps d'atteindre la périphérie de la Nébuleuse, ce qui demanderait plusieurs années. Ayant perdu une partie de leur énergie, ces électrons rayonnent ensuite dans le domaine visible. Les électrons responsables du rayonnement X ne peuvent pas avoir été créés au moment de l'explosion en 1054 ; il doit donc exister au sein de la nébuleuse, soit une création continue d'électrons très énergétiques, soit un mécanisme d'accélération des électrons à de très grandes vitesses

Cette propriété du rayonnement synchrotron dans le domaine X est à rapprocher des observations faites par LAMPLAND dès 1921 concernant les modifications de la structure de la nébuleuse diffuse au voisinage de l'étoile centrale. Ces régions présentaient en effet, sur un intervalle de quelques mois, d'importantes variations d'intensité alors que de petites régions où la matière semblait se condenser, se déplaçaient à des vitesses atteignant $40\,000$ km s $^{-1}$.

Si nous faisons des observations à une fréquence de 10^{22} Hz, nous sommes dans le domaine des rayons gamma. L'énergie mesurée à cette fréquence est de 2×10^{15} ev. L'origine de ce rayonnement a été identifiée à la diffusion par l'effet Compton inverse : lorsqu'un électron très relativiste entre en collision avec un photon de plus faible énergie (domaine radio ou visible), il lui transfère une partie de son moment et le transforme en photon de haute énergie.

Ainsi, le rayonnement de la Nébuleuse du Crabe a-t-il été exploré sur un domaine spectral considérable de 10^7 Hz à 10^{22} Hz. L'allure de la variation de l'intensité de son rayonnement en fonction de la fréquence, indique clairement que ce rayonnement n'est pas d'origine thermique mais synchrotron. L'origine du champ magnétique et des électrons relativistes nécessaires à ce

rayonnement se pose. Il y a seulement 15 ans, ce problème n'avait pas encore de solution.

Depuis 1945, l'astronomie des régions invisibles du spectre s'est développée à un rythme impressionnant. L'essor considérable de l'astronomie spatiale permet entre autres d'étudier les rayonnements X et γ qui reflètent souvent l'existence de phénomènes extrêmement violents et les progrès réalisés dans la connaissance de la Nébuleuse du Crabe ont largement bénéficié de cet essor.

L'énergie totale présente dans la nébuleuse peut être ainsi estimée à environ 10^{42} joules. Cette énergie est égale à celle rayonnée par le Soleil pendant 100 millions d'années, avec sa luminosité actuelle ! Quelle est l'origine de cette énergie ? Comment est-elle entretenue ? Le fait d'avoir pu répondre à cette question en 1968 représente un des jalons importants de l'histoire de l'Astronomie.

Mais auparavant, nous allons brièvement rappeler les conditions qui ont provoqué l'explosion d'une étoile observée en 1054.

VII. POURQUOI UNE ÉTOILE EXPLOSE-T-ELLE ?

Pour comprendre l'origine de la source d'énergie dans la Nébuleuse du Crabe, nous devons tout d'abord rappeler les conditions qui ont conduit l'étoile à exploser. Pour cela, nous décrivons brièvement l'évolution d'une étoile.

L'origine de l'énergie rayonnée par le Soleil a longtemps intrigué les hommes. Or, l'étude des fossiles trouvés sur Terre nous a prouvé que l'activité solaire était restée stable pendant plusieurs millions d'années. Quel combustible est capable de brûler si longtemps en libérant autant d'énergie ?

Certainement pas le charbon ni tout autre combustion chimique. Mais le Soleil était initialement une énorme masse gazeuse qui s'est contractée en une sphère sous l'action des interactions gravitationnelles entre les particules formant ce gaz. Cette contraction gravitationnelle a eu pour effet d'augmenter la température interne. Dans les régions centrales, celle-ci est devenue très grande : de l'ordre de 10 millions de degrés. Le Soleil est constitué à 80 % d'hydrogène qui, à une telle température, est dissocié sous forme d'un proton et d'un électron libre. A cette température, toutes les particules sont animées de très grandes vitesses qui permettent aux protons de fusionner. Cette fusion de protons se traduit finalement par la formation de noyaux d'hélium et s'accompagne de la libération d'une grande quantité d'énergie qui s'échappe du Soleil sous forme de rayonnement

électromagnétique que nous observons. Ainsi le Soleil, les étoiles, sont-ils de gigantesques réacteurs thermonucléaires.

Ces réacteurs ont la propriété de s'autostabiliser ; si l'énergie est libérée par les réactions thermonucléaires à une allure trop rapide pour pouvoir être dissipée par le rayonnement, l'étoile se dilate, transformant cet excès d'énergie en énergie potentielle. Au contraire, si le taux de production d'énergie thermonucléaire est insuffisant, l'étoile se contracte, augmentant ainsi sa densité centrale, donc la température et en conséquence modifiant les réactions thermonucléaires. Ainsi quand une fraction importante de l'hydrogène aura été transformée en hélium dans le noyau du Soleil, la contraction gravitationnelle reprendra, elle augmentera à nouveau la température des régions centrales qui atteindra alors plusieurs dizaines de millions de degrés. A une telle température, de nouvelles réactions thermonucléaires se produiront : celles de la fusion de l'hélium qui donne naissance, entre autres, au béryllium et au carbone. Toute la vie d'une étoile traduit un combat entre les actions gravitationnelles qui tendent à produire une contraction de l'étoile et les actions tendant à l'expansion, produites par le réacteur nucléaire central. A chaque étape, l'étoile se trouve en équilibre sous l'action contraire de ces deux phénomènes.

Cette lutte entre l'énergie gravitationnelle et l'énergie thermonucléaire se termine en définitive par la victoire de la première. En effet, lorsque l'étoile a épuisé son combustible nucléaire, elle perd la source d'énergie capable de contrebalancer les forces gravitationnelles. La contraction reprend donc. S'arrêtera-t-elle ? Cela dépend de la masse de l'étoile. En réalité, on ne sait pas encore très bien décrire toutes les phases de l'évolution d'une étoile. En résumé, nous dirons que si la masse de l'étoile est inférieure à 1,4 fois la masse du Soleil, la phase ultime de la vie de l'étoile sera une contraction qui réduira l'étoile en un objet beaucoup plus compact, de rayon de l'ordre de 7 000 km et où la densité ρ est très élevée : quelques tonnes par cm^3 . Dans cet état, la matière est complètement ionisée et tous les électrons sont arrachés du noyau ; mais la contraction gravitationnelle ne se poursuivra pas indéfiniment à de telles densités, les électrons sont si serrés que les effets quantiques deviennent prépondérants. Il en résulte que les électrons ont en moyenne une grande énergie qui peut s'opposer à l'énergie gravitationnelle et rendre l'étoile stable. Un tel état de la matière est appelé « état dégénéré ». Une telle étoile est appelée « naine blanche ».

Si la masse de l'étoile est supérieure à 1,4 fois la masse du Soleil, mais toutefois inférieure à 2 ou 3 fois la masse du Soleil, cette phase ultime de la contraction gravitationnelle se pro-

duira à un rythme accéléré, ce qui aura pour effet d'amener brutalement au contact des régions centrales très chaudes la matière de régions externes à la température moins élevée. Il se produira alors une explosion au cours de laquelle une fraction de la masse de l'étoile sera éjectée alors que le reste forme une étoile à neutron qui est une configuration stable. Au cours de cette explosion, une quantité énorme d'énergie sera libérée. Nous pouvons estimer cette quantité, pour la Nébuleuse du Crabe, étant donné qu'au moment de l'explosion l'étoile devint visible en plein jour, sa magnitude devant être de -5 . Connaissant la distance à laquelle est située la Nébuleuse du Crabe, on en déduit qu'au moment de l'explosion, l'énergie libérée était équivalente à celle de 500 millions de Soleil ! Ce phénomène est désigné sous le nom de « *Supernova* ».

Par contre, si la masse de l'étoile est supérieure à une certaine masse critique (de l'ordre de 2 à 3 fois la masse du Soleil), la contraction de la masse de l'étoile restant après l'explosion, se poursuivra pratiquement indéfiniment, la force gravitationnelle n'étant compensée par aucune autre force, mais alors pour comprendre la nature d'un tel objet appelé « *trou noir* », il faut faire intervenir la théorie de la relativité générale.

Nous allons décrire brièvement les propriétés des étoiles à neutrons. Au fur et à mesure que l'étoile se contracte, après l'explosion de type supernova, la densité devenant de plus en plus grande, les protons se combinent aux électrons produisant ainsi des neutrons. Dans des conditions physiques normales, un neutron se désintègre en un proton et un électron, car la combinaison proton-électron est moins énergétique qu'un neutron. Mais ici ce n'est pas possible car tous les états d'énergie possibles des électrons sont occupés. En effet, les électrons forment déjà un gaz dégénéré c'est-à-dire que les électrons se sont répartis entre tous les états quantiques possibles en ayant d'abord occupé ceux qui ont la plus faible énergie. On appelle « *énergie de Fermi* » la plus grande valeur de l'énergie effectivement possédée par un électron. Plus le nombre d'électrons dans un volume donné est grand, plus l'énergie de Fermi est élevée. Si on veut ajouter un électron supplémentaire dans un groupe d'électrons ayant une certaine énergie de Fermi, il faut pour que cet électron puisse se placer dans une « *case* » quantique, qu'il ait une énergie supérieure à l'énergie de Fermi, toutes les autres cases étant déjà occupées. Les neutrons ainsi formés restent stables car l'électron n'aurait pas une énergie suffisante pour se placer dans une case quantique libre. Ainsi les régions centrales de l'étoile s'enrichissent-elles progressivement en neutrons. Mais alors que la densité continue d'augmenter, car la contraction se poursuit, au-delà de 4×10^{11} g cm⁻³ environ, les neutrons commencent à ne plus

être énergétiquement liés aux noyaux mais forment un gaz de neutrons libres, soumis aux mêmes effets quantiques que le gaz d'électrons libres. Pour une densité de l'ordre de 10^{14} g cm⁻³, les noyaux sont entièrement dissociés et un gaz de Fermi de neutrons se forme. Un état d'équilibre peut alors s'établir pour une valeur de la densité centrale de l'ordre de 10^{14} à 10^{16} g cm⁻³ pour laquelle la gravitation est équilibrée essentiellement par le gradient de pression du gaz de Fermi des neutrons. Une telle étoile s'appelle « étoile à neutrons » parce qu'elle est essentiellement constituée d'un gaz de Fermi de neutrons et d'un petit nombre de protons et d'électrons. Elle a un rayon d'une dizaine de kilomètres.

Mais jusqu'en 1968, ces étoiles n'avaient qu'une existence théorique, au contraire des naines blanches qui avaient été observées bien avant que les théoriciens ne modélisent leur structure interne. Les neutrons furent découverts en 1932 par les physiciens du laboratoire Cavendish à Cambridge. Il semble qu'alors le physicien Lev LANDAU suggéra l'existence d'étoiles très denses composées essentiellement de neutrons. Les astronomes W. BAADFÉ et F. ZWICKY proposèrent en 1934 le modèle d'étoile à neutrons comme pouvant se former après l'explosion de type supernovae. La structure d'une étoile à neutrons fut calculée pour la première fois par J.-R. OPPENHEIMER et G.-M. VOLHOFF en 1939.

Les conditions physiques que l'on rencontre dans une étoile à neutrons ou à sa surface correspondent à des conditions extrêmes. Les modèles théoriques prédisent que dans le noyau d'un tel objet, avec des densités dépassant 10^{15} g cm⁻³, les énergies de Fermi des électrons et des neutrons sont si grandes que des muons et des hyperons sont créés. Mais par quelles observations vérifier l'existence d'un tel objet ? Jusqu'alors, les études portaient essentiellement sur la description de la structure interne de ces objets, captivante pour un spécialiste en particules élémentaires, mais peu d'hypothèses étaient formulées quant au rayonnement émis par ces étoiles. Puis quelques astronomes commencèrent à suggérer que les étoiles à neutrons avaient des champs magnétiques superficiels très intenses. En 1968, PACINI montre qu'une étoile à neutrons, en rotation, émettait des ondes électromagnétiques à très faible fréquence permettant d'accélérer des particules chargées, créant ainsi en particulier des électrons relativistes nécessaires pour expliquer la luminosité de la Nébuleuse du Crabe. Mais cette conclusion ne permettait toujours pas d'assimiler l'étoile centrale de la nébuleuse à une étoile à neutrons. La solution à ce problème fut trouvée tout à fait fortuitement en 1968.

VIII. LA DECOUVERTE DES PULSARS.

C'est par une série d'observations accidentelles que les pulsars furent découverts permettant ensuite de confirmer l'existence des étoiles à neutrons.

L'équipe du Professeur HEWISH (Cavendish Laboratory - Université de Cambridge) découvrit les pulsars en étudiant la scintillation interplanétaire. La scintillation interplanétaire est un phénomène de réfraction aléatoire des ondes radio due aux inhomogénéités du milieu interplanétaire ionisé par le rayonnement solaire : les ondes électromagnétiques qui traversent ces inhomogénéités dans des directions voisines de celle du Soleil, subissent des différences de trajet optique et produisent entre elles des interférences. L'effet de scintillation ne se produit que si la source du rayonnement radio est de petite dimension angulaire. L'échelle de temps de ces fluctuations est de l'ordre de la seconde. Dans le domaine optique, ce phénomène est bien connu mais il a une autre origine : c'est celui de la scintillation des étoiles dû à l'atmosphère terrestre, alors que les planètes ne scintillent pas.

L'étude de la scintillation permet donc, soit de mesurer le diamètre de la source radio, soit si celui-ci est connu, d'obtenir des informations sur le milieu qui produit la diffraction. Ainsi un programme d'observations systématiques des radio-sources avait-il été élaboré ? En juillet 1967, J. BELL, étudiante en astronomie, chargée du dépouillement de ces observations, découvrit une source de rayonnement radio qui présentait de brusques fluctuations d'intensité. Cette source étant observée pendant la nuit, cet effet ne pouvait pas être dû à la scintillation interplanétaire. Le rayonnement radio de cet objet était caractérisé par une émission périodique (ou « *pulse* ») de très courte durée. Une telle émission n'est facilement mise en évidence que si le récepteur utilisé possède une bonne résolution temporelle. Comme les interférences subies par les émissions radio astronomiques avec les multiples émissions radio terrestres provoquent des fluctuations rapides, en radio astronomie, on intègre les signaux reçus sur des échelles de temps relativement longues (de l'ordre de la seconde). De telles constantes de temps ont pour effet de noyer toute émission brève. La scintillation interplanétaire étant un phénomène rapide, il était nécessaire de construire pour de telles observations un récepteur radio avec une brève constante de temps.

Des observations systématiques faites au cours des mois suivants permirent de préciser les caractères de ces pulses et même découvrir de nouvelles sources.

Ce rayonnement radio se présentait comme une succession d'émissions, dont l'intensité était variable, mais qui se répé-

taient avec une périodicité constante, d'environ 1 seconde, la durée de chacune de ces émissions étant extrêmement brève, de l'ordre de 50 millisecondes. Avant de publier cette découverte, les radio-astronomes de Cambridge s'assurèrent que cette émission ne provenait pas d'une source terrestre. Ces sources qui, à cause de l'aspect de leur rayonnement, furent appelés « *pulsars* » ne pouvaient pas appartenir au système solaire, car aucun effet d'aberration dû au mouvement de la Terre sur son orbite, ne pouvait être mis en évidence. Par ailleurs, la durée extrêmement courte de l'émission permet de montrer que l'objet émetteur était nécessairement de très petite dimension ; la durée de l'émission ne peut être inférieure au temps de propagation à l'intérieur de la source, à la vitesse de la lumière, ce qui donne quelques centaines de kilomètres.

Ainsi fût publiée en février 1968, l'annonce de la découverte d'objets situés hors du système solaire, de petite dimension, émettant un rayonnement par intermittence, durant un très court intervalle de temps, mais avec une très grande régularité. Ces objets furent appelés « *pulsars* ».

Dans les mois qui suivirent, de nombreux autres pulsars furent découverts. En novembre 1968, on découvrit un pulsar de période égale à 33 millisecondes dans la Nébuleuse du Crabe.

A. Le pulsar de la Nébuleuse du Crabe.

Dès l'annonce de la découverte d'un pulsar dans la Nébuleuse du Crabe, les observations vont se multiplier dans tous les domaines spectraux. Ainsi, en janvier 1969, des observations dans le domaine optique de l'étoile centrale de la Nébuleuse du Crabe, suspectée depuis 1942 d'être le reste de l'explosion de la supernova observée en 1054 permet de mettre en évidence de brusques variations de l'intensité de cette étoile, avec la même fréquence que dans le domaine radio. Quelques mois plus tard, à l'occasion d'un lancement de fusée emportant un détecteur de rayons X, il fut montré que le rayonnement X du pulsar du Crabe présentait la même forme d'émission brève avec la même période de 0,033 s. En 1970, le même résultat fut obtenu dans le domaine du rayonnement γ (0,6 à 9 M ev).

Il est bien évident que cette brusque augmentation de l'énergie rayonnée par l'étoile centrale était comptabilisée dans les observations antérieures, en particulier dans le domaine du rayonnement X puisque la séparation angulaire des détecteurs était trop faible pour séparer l'émission de la nébuleuse proprement dite de celle du pulsar, mais le manque de résolution temporelle ne permettait pas de détecter ces pulses. La contribution de ces

brèves émissions à l'émission de la nébuleuse dans le domaine du rayonnement X ne dépasse pas 6 %.

La fig. 13 représente l'émission du pulsar du Crabe pour différentes fréquences. Entre les pulses, il semble qu'il subsiste une émission, d'intensité très faible.

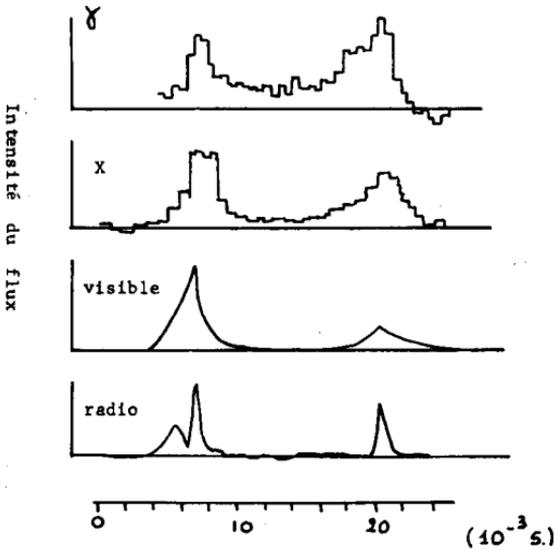


Fig. 13. — Emission du pulsar du Crabe dans différents domaines.

C'est le seul pulsar pour lequel on dispose d'observations sur un aussi grand intervalle spectral, et dont le rayonnement présente le même caractère dans tous les domaines. Le pulsar du Crabe est celui qui a la plus petite période. On a détecté actuellement environ 300 pulsars.

La fig. 14 représente le rayonnement du pulsar et de la nébuleuse. On remarque la différence d'aspect entre ces deux rayonnements. Une estimation de l'énergie rayonnée par ce pulsar est de 10^{36} erg s^{-1} , ce qui est mille fois plus que le Soleil. La plupart de cette énergie est concentrée dans le domaine du rayonnement X.

Tous les pulsars connus ont une période très précise, mais modulée par une augmentation régulière, quoique faible de cette période. Ainsi, la période du pulsar du Crabe augmente-t-elle de 36,5 nanosecondes par jour.

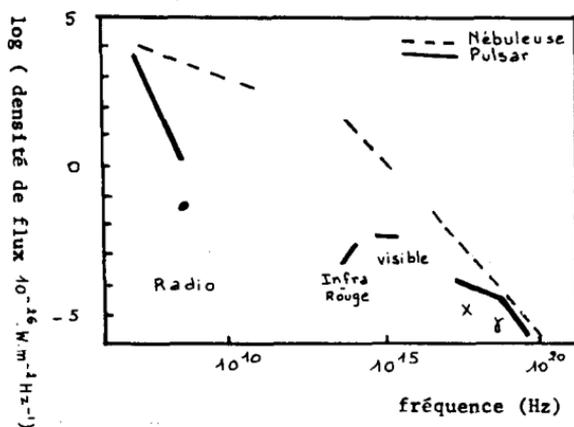


Fig. 14. — Densité de flux du pulsar et de la Nébuleuse.

On a observé par ailleurs, et en particulier pour le pulsar du Crabe, de brusques variations de la période ainsi que de petites variations aléatoires ; la variation de la période dans ces cas semble ne pas excéder 10^{-8} fois la valeur de la période. Rappelons que la précision atteinte dans la détermination de la période est de l'ordre de 10^{-13} .

A partir des propriétés observationnelles des pulsars et en particulier de celles du pulsar du Crabe, nous allons montrer comment des études théoriques ont permis de décrire la nature d'un pulsar, d'expliquer la production de ces brusques émissions à un rythme aussi régulier mais sur un intervalle de temps aussi bref.

B. La nature des pulsars.

Rappelons les propriétés observationnelles que devront vérifier ces modèles, et qui sont communes à tous les pulsars observés :

- brièveté de l'émission, ce qui implique une grande directivité pour le rayonnement émis (semblable au faisceau émis par un phare),
- grande stabilité du profil de cette émission d'où une structure stable pour cette région émissive,
- polarisation en général linéaire des émissions,

- une analyse détaillée du spectre d'un pulsar montre de très grandes variations dans le profil des émissions : chaque émission a son propre caractère,
- les périodes observées pour ces émissions vont de 33 milli-secondes à 3,75 secondes ; celles-ci se ralentissent régulièrement mais il n'y a pas de relation entre la période et le taux de ralentissement,
- les pulsars sont détectés par leur émission dans le domaine des ondes radio, seul le pulsar du Crabe présente des émissions dans tous les domaines spectraux.

C'est GOLD qui, dès 1968, à la suite des travaux de PACINI proposa la première structure du pulsar en tant qu'étoile à neutrons rayonnant comme un phare.

Nous allons brièvement exposer les étapes qui ont permis de comprendre la nature physique des pulsars.

Tout d'abord comment expliquer cette régularité extrême dans l'apparition des émissions qui atteint presque celle des horloges atomiques ?

Trois mécanismes sont bien connus en astronomie pour donner naissance à des phénomènes périodiques : un mouvement, soit d'oscillation, soit de révolution, soit encore de rotation.

La période d'un mouvement d'oscillation est inversement proportionnelle à la racine carrée de la densité moyenne de l'étoile. On connaît certaines catégories d'étoiles comme les céphéides qui subissent de telles oscillations dont les périodes se mesurent en jours. Si cette méthode est appliquée aux naines blanches, on trouve une période de quelques secondes qui est nettement plus longue que les périodes observées. Par contre, une étoile à neutrons donnerait une période trop courte, de l'ordre de 10^{-4} s. Ainsi l'hypothèse d'une oscillation ne peut pas être retenue.

On envisage également l'hypothèse d'un système d'étoiles doubles : au cours de son mouvement orbital, l'une des étoiles serait éclipsée par l'autre, ce qui provoquerait la variation de luminosité observée.

Pour avoir des périodes aussi courtes que celles observées pour les pulsars, il est nécessaire que ces objets soient très petits : dans le cas de deux naines blanches, on a trouvé une période d'environ 1,7 s. Pour obtenir de plus petites périodes, il faut faire appel aux étoiles à neutrons. Mais alors, de tels objets aussi proches l'un de l'autre auraient une perte très importante d'énergie sous forme d'onde gravitationnelle, ce qui aurait pour effet de ralentir leur période très rapidement, ce qui ne correspond pas aux observations.

Une dernière hypothèse fut envisagée où l'un des composants du système binaire serait une planète, par analogie avec les perturbations que le satellite IO apporte à l'émission radio de Jupiter. Cette hypothèse s'est avérée rapidement irréaliste car l'attraction gravitationnelle exercée par l'étoile à neutrons sur la planète suffirait à la disloquer par l'effet de marée.

La seule hypothèse qui permettrait d'expliquer les observations du rayonnement des pulsars est qu'un pulsar est une étoile de très petite dimension en rotation rapide sur elle-même dont la surface possède une région émissive : lorsque cette région fait face à l'observateur, on perçoit une émission, mais comme pour un phare, la durée de cette émission est très brève. Ce modèle impose nécessairement une densité limite pour que ce corps en rotation très rapide ne se disloque pas sous l'effet de la force centrifuge ; on trouve ainsi pour le pulsar du Crabe, une limite inférieure pour la densité de 10^{15} g cm⁻³. Il faut remarquer que dans cette interprétation, c'est la période du mouvement qui a imposé une densité, donc le modèle d'étoile à neutrons n'est plus une hypothèse *a priori*. Mais quelle est l'origine de la rotation rapide de cette étoile ? Nous avons vu que les étoiles à neutrons pouvaient être le résultat de la contraction gravitationnelle d'une étoile de quelques masses solaires. Au cours de cette contraction, la conservation du moment angulaire entraîne nécessairement une augmentation de la vitesse de rotation de l'étoile sur elle-même. Le rapport entre les deux périodes est égal au carré du rapport des rayons : ainsi, on trouve une étoile à neutrons en rotation sur elle-même avec une période de l'ordre de quelques millisecondes.

C. Origine du rayonnement du pulsar.

Le modèle d'étoile à neutrons en rotation rapide permet d'expliquer la périodicité des émissions, mais notre connaissance des processus qui produisent cette émission dans une région très localisée de l'étoile est encore embryonnaire. Quoiqu'il en soit, le pulsar du Crabe, de par la grande quantité d'informations rassemblées sur son rayonnement dans un large intervalle spectral, sert de test aux modèles proposés.

Une des hypothèses importantes, relative à l'origine de ce rayonnement, est liée à l'existence d'un champ magnétique superficiel intense.

Nous pouvons estimer l'intensité de ce champ magnétique, qui n'est pas directement observable à partir de la loi de conservation du flux magnétique au cours de la contraction de l'étoile.

Il semble que toutes les étoiles aient un champ magnétique superficiel. Supposons qu'une étoile dont le champ superficiel

d'intensité 1 gauss se contracte, sans perte de masse : le flux magnétique à sa surface doit être conservé ; $BR^2 = \text{constant}$ (R est le rayon de l'étoile); ainsi, partant d'une étoile similaire au Soleil, on trouve que l'étoile à neutrons aurait un champ magnétique de l'ordre de 10^{10} gauss, intensité fantastique qu'on ne sait pas réaliser dans un laboratoire terrestre. Or, l'environnement du pulsar du Crabe est un milieu ionisé : celui de la nébuleuse, et on sait que lorsqu'un champ magnétique est en mouvement dans un milieu conducteur, une force de freinage magnétique se développe.

Estimons la variation d'énergie cinétique qui résulte de ce freinage en supposant que la variation au cours du temps de la période, observée pour tous les pulsars, corresponde justement à cette perte d'énergie cinétique de rotation :

$$\frac{dE}{dt} = \frac{4\pi^2}{P^4} \left(\frac{2}{5} MR^2 \right) \left(P \frac{dP}{dt} \right)$$

Dans le cas du pulsar du Crabe, la période P est 0,033 s et $\frac{dP}{dt} = 3,58 \times 10^{-15} \times P^{-1.4}$; si pour le calcul du moment d'inertie

$I = \frac{2}{5} MR^2$, nous prenons pour M la masse du Soleil et pour le rayon R 10^6 cm, nous trouvons $I = 1,6 \times 10^{44}$ d'où une énergie cinétique de rotation qui est égale à $E = \frac{1}{2} I \left(\frac{2\pi}{P} \right)^2$

et qui conduit à : $\frac{dE}{dt} = 0,7 \cdot 10^{38}$ erg s^{-1} ; cette valeur correspond en ordre de grandeur, à l'énergie rayonnée par la nébuleuse.

On peut montrer que le champ magnétique superficiel, intense, calculé précédemment permet d'engendrer un tel ralentissement. Mais ceci n'est certainement qu'une description extrêmement simplifiée des processus physiques intervenant au voisinage de l'étoile à neutron.

Le modèle suivant pour un pulsar a donc été proposé : c'est une étoile à neutrons en rotation rapide dont le champ magnétique superficiel engendre un rayonnement dipolaire, l'axe polaire étant différent de l'axe de rotation.

La grande intensité du champ magnétique et la rotation rapide créent un rayonnement électromagnétique à basse fréquence qui permet d'accélérer des particules qui sont nécessaires pour

rendre compte du rayonnement synchrotron de la nébuleuse. Les mécanismes qui permettent à l'étoile à neutrons de dissiper cette énergie sont encore très mal connus.

Un conducteur en rotation ayant un champ magnétique à sa surface, induit dans son voisinage la création d'un champ magnétique qui est perpendiculaire à la surface du conducteur et qui exerce une force d'attraction considérable sur les ions et les électrons des régions voisines. Ainsi l'espace à proximité de l'étoile à neutrons, est-il rempli par des particules chargées en mouvement le long des lignes de force du champ magnétique : cette région est appelée magnétosphère. Elle est le siège de phénomènes électrodynamiques intenses car ces particules chargées ont été accélérées à des vitesses relativistes et elles quittent la magnétosphère en circulant le long des lignes de force ouvertes du champ magnétique ; ainsi, une partie de l'énergie perdue par le pulsar l'est sous forme d'un courant de particules relativistes.

Ce modèle permet donc de comprendre l'origine des particules nécessaires pour créer le rayonnement synchrotron de la nébuleuse, ainsi que l'excitation du gaz dans les filaments. Quant à l'émission sous forme de « *pulse* » qui doit trouver son origine en une région très petite, elle serait probablement émise par un seul des pôles magnétiques, essentiellement sous forme de rayonnement radio, très directif, ce qui explique l'effet de phare observé.

Mais si on veut expliquer l'émission radio du pulsar du Crabe dont l'intensité est de l'ordre de 10^{31} erg s⁻¹ par un mécanisme d'émission cohérente du rayonnement, ceci ne rend pas compte des observations aux autres longueurs d'onde. Par contre, un rayonnement de type synchrotron permettrait d'expliquer le rayonnement du pulsar dans les domaines optiques, X et gamma. La diminution d'intensité qui semble se manifester (voir fig. 14) pour le rayonnement dans le proche infrarouge est caractéristique d'un milieu où la densité des particules relativistes est très grande : le milieu cesse alors d'être transparent à son propre rayonnement synchrotron à partir d'une certaine longueur d'onde, d'où la diminution d'intensité observée dans le proche infrarouge.

Le modèle que nous venons de décrire pour expliquer le rayonnement des pulsars et plus précisément celui du pulsar du Crabe, explique l'origine des particules relativistes nécessaires au rayonnement synchrotron de la Nébuleuse. Mais nous devons préciser qu'il n'existe pas encore de modèle unique permettant de prédire le flux qui sera émis par un pulsar. Ce problème théorique est d'une grande difficulté et on n'a pas encore répondu à la question fondamentale : pourquoi les étoiles à neutrons rayonnent-elles ainsi ? Une partie des difficultés proviennent de

ce qu'il n'est pas possible de tester en laboratoire terrestre les conditions physiques régnant dans ces étoiles.

D. Relation entre le Pulsar du Crabe et la Nébuleuse.

Comment se produit le transfert d'énergie du pulsar à la nébuleuse : le modèle de rotation oblique — axe de rotation décentré par rapport à l'axe du champ magnétique dans le modèle dipolaire — engendre dans la magnétosphère de l'étoile à neutrons un flux de particules relativistes (de l'ordre de 10^{36} à 10^{40} particules par seconde), qui n'est pas affecté par la présence de la nébuleuse. On pense que les modifications d'aspect de la nébuleuse observées au voisinage de l'étoile centrale, sont une conséquence de ce flot de particules. Mais le champ magnétique qui est si intense dans la magnétosphère de l'étoile à neutrons, décroît très rapidement avec la distance, à une année de lumière il n'est plus que de 10^{-4} gauss, ce qui est du même ordre de grandeur que le champ magnétique observé dans la nébuleuse. Ainsi suppose-t-on que le champ magnétique dans la nébuleuse trouve son origine dans celui du pulsar.

Mais ce flux continu de particules, se fait aux dépens de l'énergie du pulsar. En particulier, le ralentissement de la vitesse de rotation qui se produit, va diminuer très rapidement les énergies et le nombre de particules émises. Ce qui expliquerait que le pulsar du Crabe, qui est de formation très récente, présente encore toute une gamme de rayonnement, alors qu'il a la période de rotation la plus courte, l'autre pulsar pour lequel on ait enregistré des émissions dans le domaine optique et dans le domaine des rayonnements gamma, mais avec des intensités bien moindres que dans le cas du pulsar du Crabe est celui qui, après le Crabe, a la plus courte période : 0,084 s. Il semble donc qu'au fur et à mesure que la vitesse de rotation du pulsar se ralentit, l'émission dans les domaines de haute fréquence cesse. L'émission radio peut durer beaucoup plus longtemps car elle nécessite des particules moins énergétiques et un champ magnétique beaucoup moins intense. Il est possible de définir un temps caractéristique

pour les pulsars par la relation : $\tau = \frac{P}{\frac{dP}{dt}}$ où P est la période

du pulsar et $\frac{dP}{dt}$ sa variation au cours du temps.

Ce temps caractéristique semble être au maximum d'un million d'années, ce qui nous montre que le phénomène pulsar est très certainement une structure éphémère. Or, les étoiles à neu-

trons, pour l'instant, ne semblent être détectables que par l'observation du phénomène pulsar et leur détection est limitée par la directivité de leur émission qui implique une sélection observationnelle très grande (détection possible d'un pulsar sur 30).

E. Relation entre les pulsars et les Supernovae.

En dépit de la difficulté d'expliquer dans tous ses détails l'émission d'un pulsar, il n'y a aucun doute quant à l'identification d'un pulsar avec une étoile à neutrons. Par ailleurs, l'étoile à neutrons ne peut se former qu'au cours d'un événement catastrophique : son effondrement gravitationnel ne peut pas être engendré au cours d'un processus normal. D'autre part, les observations suggèrent fortement que les pulsars se forment lors d'explosion de supernovae. Parmi les 20 restes de supernovae observées dans notre galaxie, deux pulsars se trouvent sûrement associés aux nébulosités correspondantes.

Ce nombre correspond bien à ce qu'on s'attendait à trouver, compte tenu de la sélection observationnelle. Mais réciproquement, il existe de nombreux pulsars autour desquels aucun reste de supernova n'est observable, ceci semble indiquer que la dissolution de la nébuleuse dans l'espace interstellaire est plus rapide que la durée de la rotation du pulsar, mais est-ce la seule raison ?

IX. CONCLUSION.

Au cours de cette brève analyse des propriétés de la Nébuleuse du Crabe et de sa relation avec l'évolution stellaire, nous avons vu comment peu à peu, était mis en évidence, grâce aux observations dans un domaine étendu de fréquences, un extraordinaire laboratoire de physique où, sur une immense échelle, interagissent la matière et le rayonnement.

La Nébuleuse du Crabe qui, par bien des aspects, semble être un objet unique, et ne peut pas servir de modèle universel à l'évolution stellaire, a permis par sa proximité et par l'intensité de son rayonnement dans tous les domaines spectraux, de tester la théorie du rayonnement synchrotron en observant son application sur une vaste échelle.

La Nébuleuse du Crabe a également joué un rôle fondamental dans la compréhension de la nature des pulsars. Mais elle a surtout permis de définir des mécanismes permettant de comprendre comment pouvait être produite une quantité aussi fabuleuse d'énergie : 10^{31} watts dans un aussi petit volume que celui d'une étoile à neutrons.

Un astronome contemporain G. BURBIDGE a résumé l'importance de la Nébuleuse du Crabe pour l'astrophysicien, par ces termes : « *Vous pouvez diviser l'Astronomie en deux domaines, l'Astronomie de la Nébuleuse du Crabe et l'Astronomie de tout le reste* ».

M. GERBALDI,

(*Institut d'Astrophysique - Paris*)
et (*Université de Paris XI*).

BIBLIOGRAPHIE

- K.-M.-V. APPAREO. — *The Crab Nebula*, 1973, *Aastrophysics and Space science*, vol. 25, page 3.
- W. BAADE. — *Astrophysical Journal*, 1942, vol. 96, page 188.
- D. GINGERICH. — *Sky and Telescope*, Nov. 1977, page 378.
- R.-N. MANCHESTER, J.-H. TAYLOR. — *Pulsars*, 1977, ed. Freeman Comp.
- R. MINKOWSKI. — *Astrophysical Journal*, 1942, vol. 96, page 199.
- S. MITTON. — *The Crab Nebulae*, 1979, ed. Faber & Faber.
- I.-S. SHKLOVSKII. — *Stars, their birth, life and death*, 1978, ed. Freeman Comp.
- F.-G. SMITH. — *Pulsars*, 1977, ed. Cambridge University Press.
- Symposium N° 46. — *International Astronomical Union*, ed. Reidel, 1971.
-