

T0042
1969/DS

1969. 6
(043)DE
(2)

Deuxième Thèse

présentée

A la Faculté des Sciences de l'Université de Grenoble

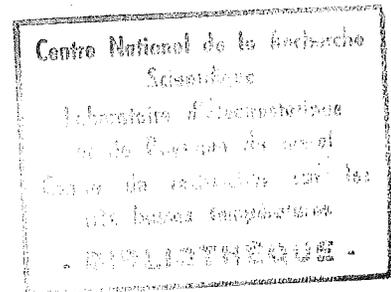
pour obtenir

le grade de Docteur ès-Sciences Physiques

par

Pierre BOUTRON

"LES PULSARS"



Soutenue le 25 juin 1969

Devant la Commission d'Examen

MM. L. NÉEL

Président

J. FRIEDEL

D. BLOCH

R. PAUTHENET

Examineurs

I N T R O D U C T I O N

Les pulsars sont des radio sources célestes qui émettent des impulsions avec une régularité de l'ordre de 10^{-7} , comparable à celle d'une horloge atomique. L'intervalle entre deux impulsions varie de 0,033 secondes à quelques secondes selon les pulsars. Il croît très lentement d'année en année. Le premier pulsar a été découvert en novembre 1967, mais l'on connaît maintenant plus d'une trentaine de pulsars. Ils sont tous situés dans notre galaxie. Les plus proches sont à plus de 100 années lumières du soleil; la plupart des pulsars sont à moins de 50 000 années lumière du soleil. Les pulsations émises ont été observées dans le domaine des ondes métriques à l'aide de radiotélescopes. Mais ces pulsations semblent couvrir toutes les longueurs d'ondes. Les pulsations du pulsar NP 532, situé dans la nébuleuse du Crabe, ont aussi été observées dans le domaine visible. L'intervalle séparant les impulsions successives est le même dans le domaine visible et le domaine radiofréquence. Ces impulsions ont une forme aléatoire, mais elles sont polarisées.

De nombreuses hypothèses ont été émises sur la nature des pulsars. Mais on pense actuellement que ces radio sources sont des étoiles à neutrons. Les étoiles à neutrons sont des étoiles dont l'existence a été postulée depuis une trentaine d'années; mais on n'en avait jamais observées jusqu'ici. Certaines sources de rayons X sont peut être des étoiles à neutrons, mais on n'a pas pu l'affirmer avec certitude. Les étoiles à neutrons auraient des densités de l'ordre de dix millions de tonnes par centimètre cube, c'est-à-dire

des densités comparables à celle du noyau atomique. On pense que leurs masses seraient comprises entre 0,5 et 2 fois la masse du soleil. Leurs rayons seraient de l'ordre d'une dizaine de kilomètres.

On connaît depuis longtemps des étoiles très denses, quoique beaucoup moins denses que les étoiles à neutrons : les naines blanches, dont la densité peut atteindre dix tonnes par centimètre cube. Les naines blanches sont constituées d'une matière dégénérée dont les électrons sont tous délocalisés mais dont les noyaux sont encore localisés. Une des naines blanches les plus célèbres est Pup, le compagnon de Sirius. Dans les étoiles à neutrons, les noyaux eux-mêmes ont disparu.

Les étoiles à neutrons se formeraient lors de l'apparition de supernovae de type II, c'est-à-dire lors d'explosions d'étoiles très massives. On a découvert un pulsar au centre de la nébuleuse du Crabe, qui est le vestige d'une supernova observée en 1054, et un autre au centre de la radio source Vela X, qui serait le vestige d'une supernova préhistorique.

I - DECOUVERTE ET PROPRIETES DES PULSARS

Le premier pulsar a été découvert en novembre 1967 à l'observatoire de radio astronomie Mullard à Cambridge. Les résultats des observations ont été publiés en février 1968 dans la revue Nature [1]. Les chercheurs de l'observatoire de Cambridge poursuivaient un tout autre but : ils voulaient rechercher des radio sources de petites dimensions angulaires par la méthode dite des scintillations [2]. L'espace interplanétaire est tout entier emplie par des nuages de particules électrisées qui s'évaporent du soleil : le vent solaire. Lorsque les ondes radio en provenance des astres traversent ce milieu, elles subissent des distorsions, il se crée un bruit de fond. S'il s'agit d'une source de très petites dimensions, par exemple moins d'une seconde d'arc, le faisceau est très étroit. Le caractère discontinu des vents solaires a pour conséquence de provoquer des scintillations. En effet, le faisceau parviendra tantôt sans avoir été perturbé, tantôt sera fortement dévié par une couche électrisée et ne sera plus convenablement focalisé au foyer du radiotélescope. Au total, le signal perçu présente des variations rapides et aléatoires dans le temps. Si la source est très étendue, le faisceau intercepte un grand nombre de nuages électrisés et le signal ne subira pas de fluctuations.

Pour enregistrer ces scintillations, il faut un appareil ayant une rapidité de réponse suffisante. Un appareil ayant une constante de temps de 1/10 de seconde par exemple n'est pas difficile à construire. Mais il n'en avait pas été construit jusque là, car on pensait alors qu'il n'existait pas de sources de variation aussi rapide.

En juillet 1967, le nouveau radiotélescope de Mullard, spécialement conçu pour étudier les scintillations, est entré en fonctionnement. Sa constante de temps n'était que de 0,2 seconde. Les antennes se répartissent sur une surface de 470 m x 45 m. L'observation se faisait dans la gamme d'ondes métriques à 81,5 MHz. Peu après le début des opérations les astronomes enregistrèrent des signaux qui apparaissaient au premier abord comme de faibles interférences sporadiques. Ces signaux étaient toujours observés à la même déclinaison et la même ascension droite. La source n'était donc pas d'origine terrestre. Le premier pulsar venait d'être découvert. Il est situé dans la constellation du Petit Renard et a été baptisé CP 1919; les chiffres désignent l'ascension droite de l'astre 19 heures 19 minutes, et CP veut dire Cambridge Pulsating Source. Les signaux émis par ce pulsar furent étudiés systématiquement en novembre 1967.

En avril 1968, quatre pulsars étaient connus, et leurs signaux avaient été étudiés à Cambridge. Ces pulsars se nomment CP 1919, CP 0834, CP 0950 et CP 1133 [3]. Depuis, les astronomes du monde entier se sont mis à la recherche des pulsars; on en connaît une trentaine actuellement. Les plus remarquables et les plus étudiés sont NP 532, situé dans la nébuleuse du Crabe, et dont la découverte a été annoncée en décembre 1968 [4], et PSR 0833-45, au centre de la radio source Vela X [5]. Il existe un deuxième pulsar dans la nébuleuse du Crabe, NP 527, situé à environ 1° du centre de cette nébuleuse [6].

Le pulsar NP 532 a la plus courte période parmi les pulsars connus; elle est de 0,03309 seconde actuellement; NP 0833-45 a actuellement une période de 0,089209 seconde. Les autres pulsars ont des périodes plus longues. Les pulsars CP 1919, CP 0834, CP 950 et CP 1133 ont respectivement des périodes voisines de 1,33, 1,27, 0,253 et 1,19 seconde [3]; NP 527 une période assez longue, de 3,74 seconde approximativement.

Les périodes de tous les pulsars augmentent très lentement. C'est la période de NP 532 qui augmente le plus rapidement. Elle augmente d'environ $1,35 \cdot 10^{-5}$ seconde par an [7,8]. Les périodes de la plupart des pulsars augmentent d'environ 10^{-7} seconde par an [9,10].

Le flux d'énergie par pulsation est sur la terre de l'ordre de $0,5 \cdot 10^{-19}$ erg par m^2 et par Hertz pour les quatre premiers pulsars découverts [3,11]; elle est d'environ $0,2 \cdot 10^{-19}$ erg/ m^2 Hz $^{-1}$ pour NP 532 [12]. Le pulsar NP 532 serait, comme la nébuleuse du Crabe, à environ 6000 années lumière de la terre [13], et son émission radio serait de l'ordre de 10^{31} erg par seconde [14].

Nous avons reproduit, figure 1, les profils de plusieurs pulsations consécutives de trois des premiers pulsars découverts, d'après A.G. Lyne et B.J. Rickett [15]. Le profil d'une pulsation varie d'une pulsation à la suivante, mais le profil moyen d'un pulse sur plusieurs minutes semble bien défini pour chaque source ([15], et figure 2). Une pulsation dure en moyenne de 5 à 50 millisecondes. La forme d'une pulsation semble être assez semblable à différentes fréquences. L'amplitude des pulsations varie largement, d'une pulsation à la suivante, et sur des intervalles de temps plus grands. Cette variation d'amplitude peut provenir de la source, mais elle provient aussi des scintillations dues à la réfraction irrégulière du milieu interstellaire entre la source et la terre. L'étude de ces variations pourrait permettre de mesurer certains paramètres de ces scintillations [16].

Les signaux radiofréquence de tous les pulsars connus sont polarisés linéairement [17]. Le signal émis par le pulsar associé à la radio source Vela X a un très haut degré de polarisation linéaire [18]. La polarisation des pulsations radiofréquence du pulsar CP 0328 a été particulièrement étu-

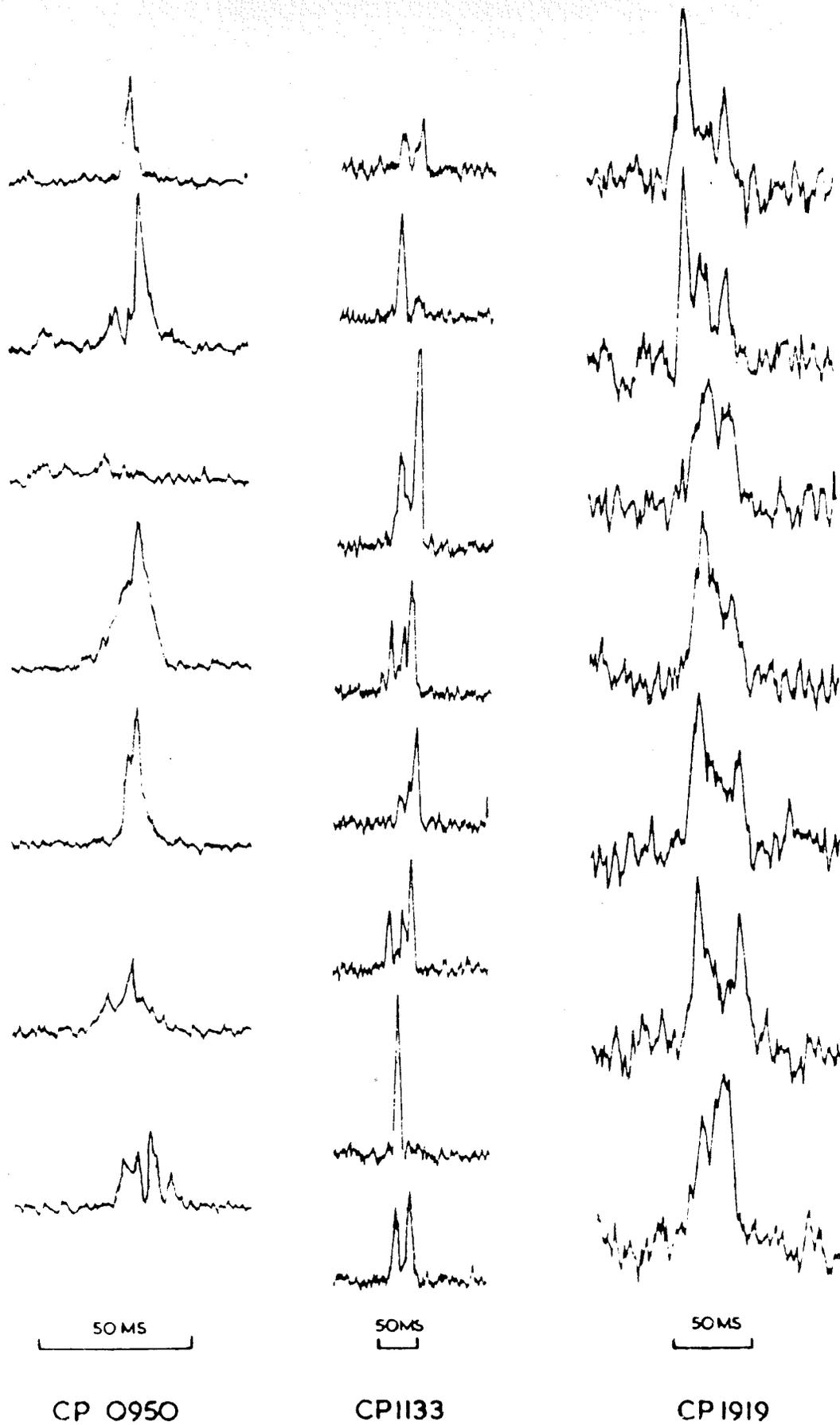
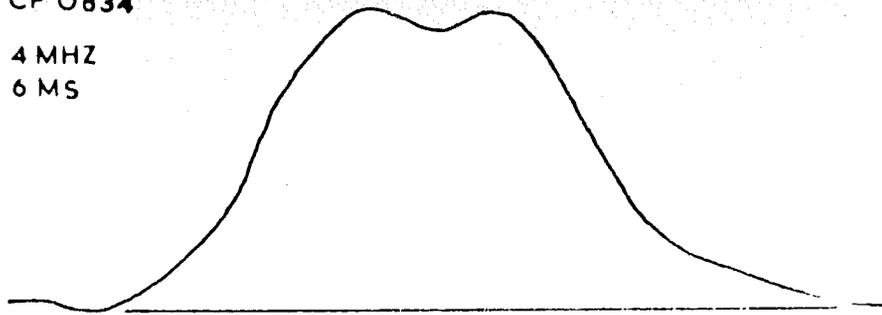


Fig. 1. Series of consecutive pulses recorded directly at 408 MHz.
 (Bandwidth 4 MHz, time constant 1 ms.)

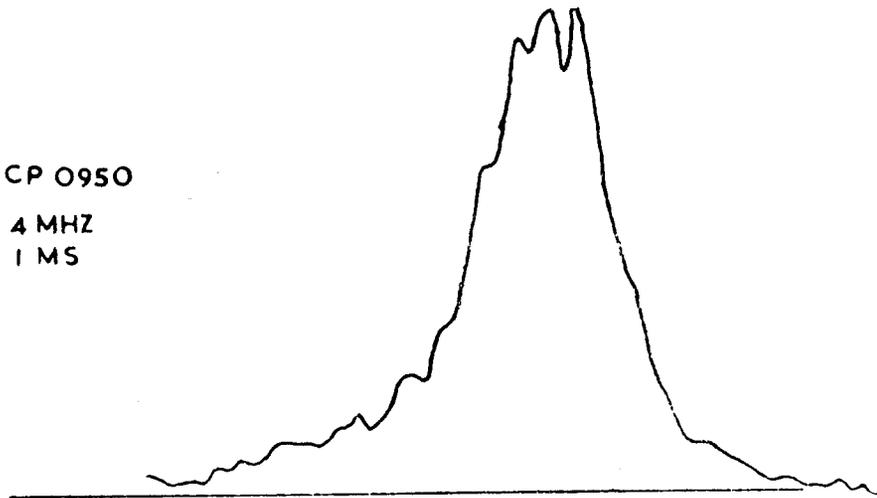
CP 0834

4 MHz
6 MS



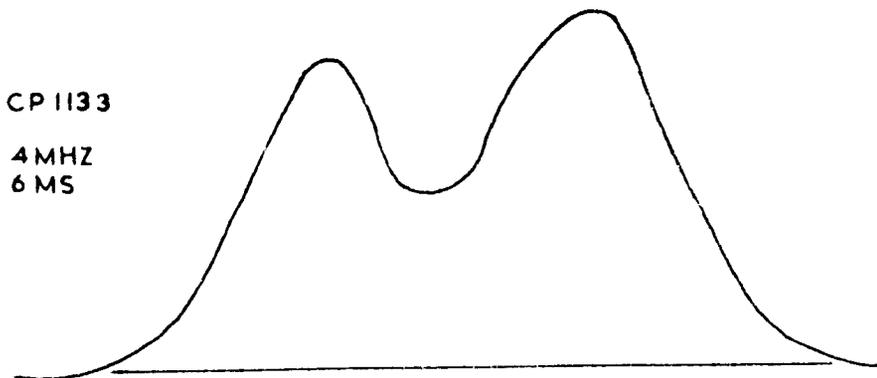
CP 0950

4 MHz
1 MS



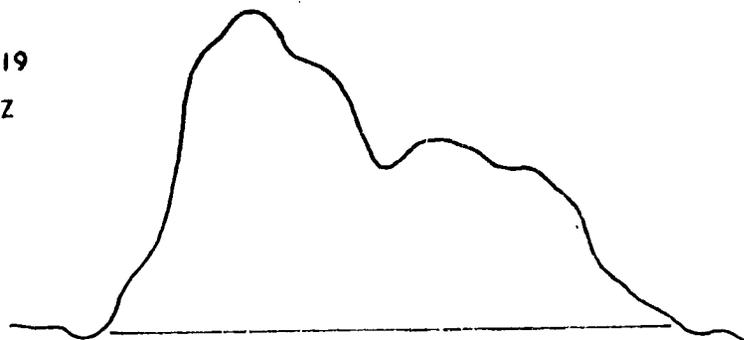
CP 1133

4 MHz
6 MS



CP 1919

1 MHz
2 MS



50 MS

Fig. 2. Mean pulse profiles averaged over 8 min at 408 MHz for the four sources. The receiver bandwidths and effective time resolutions are indicated.

diée par Clark et Smith [19]. Pendant la durée d'une pulsation, la polarisation change plusieurs fois de direction. D'une pulsation à l'autre, la polarisation varie de la même façon.

Les astronomes se sont demandés si les pulsars émettaient aussi des signaux dans le domaine visible. Cocke, Disney et Taylor [20] ont ainsi découvert que le pulsar NP 532, de la nébuleuse du Crabe, émet de forts signaux lumineux. Ce pulsar a pu ainsi être identifié avec une étoile que Baade [21] et Minkovski [22] avaient supposé être le reste de la supernova de 1054 qui est à l'origine de la Nébuleuse du Crabe. Cette étoile est en effet située au centre de cette nébuleuse et se déplace avec la même vitesse. La luminosité de cette étoile est en fait la moyenne de ses pulsations successives. Le flux optique de NP 532 est environ 100 fois plus grand que le flux émis dans le domaine radiofréquence [20]. La période du pulsar est la même dans le domaine optique et le domaine des ondes radiofréquence. La lumière émise est rougeâtre [23]. Nous reproduisons figure 3 la courbe de lumière moyenne de NP 532. L'image de ce pulsar a été obtenue sur un écran de télévision. Pour cela une caméra de télévision a été placée au foyer du télescope de l'observatoire de Lick, en Californie. Nous reproduisons figure 4 les images ainsi obtenues, lorsque la luminosité du pulsar est maximale et lorsqu'elle est minimale. Il semble qu'un peu moins de 25 % de la lumière émise par NP 532 est polarisée circulairement [24].

Jusqu'à présent, il n'a pas été possible de déceler les signaux lumineux émis par les autres pulsars. Des astronomes ont en particulier essayé de découvrir des signaux lumineux émis par le pulsar de Vela X, mais sans résultat. Par contre, on a constaté que les pulsars émettent des rayons γ de très haute énergie [25, 26, 27].

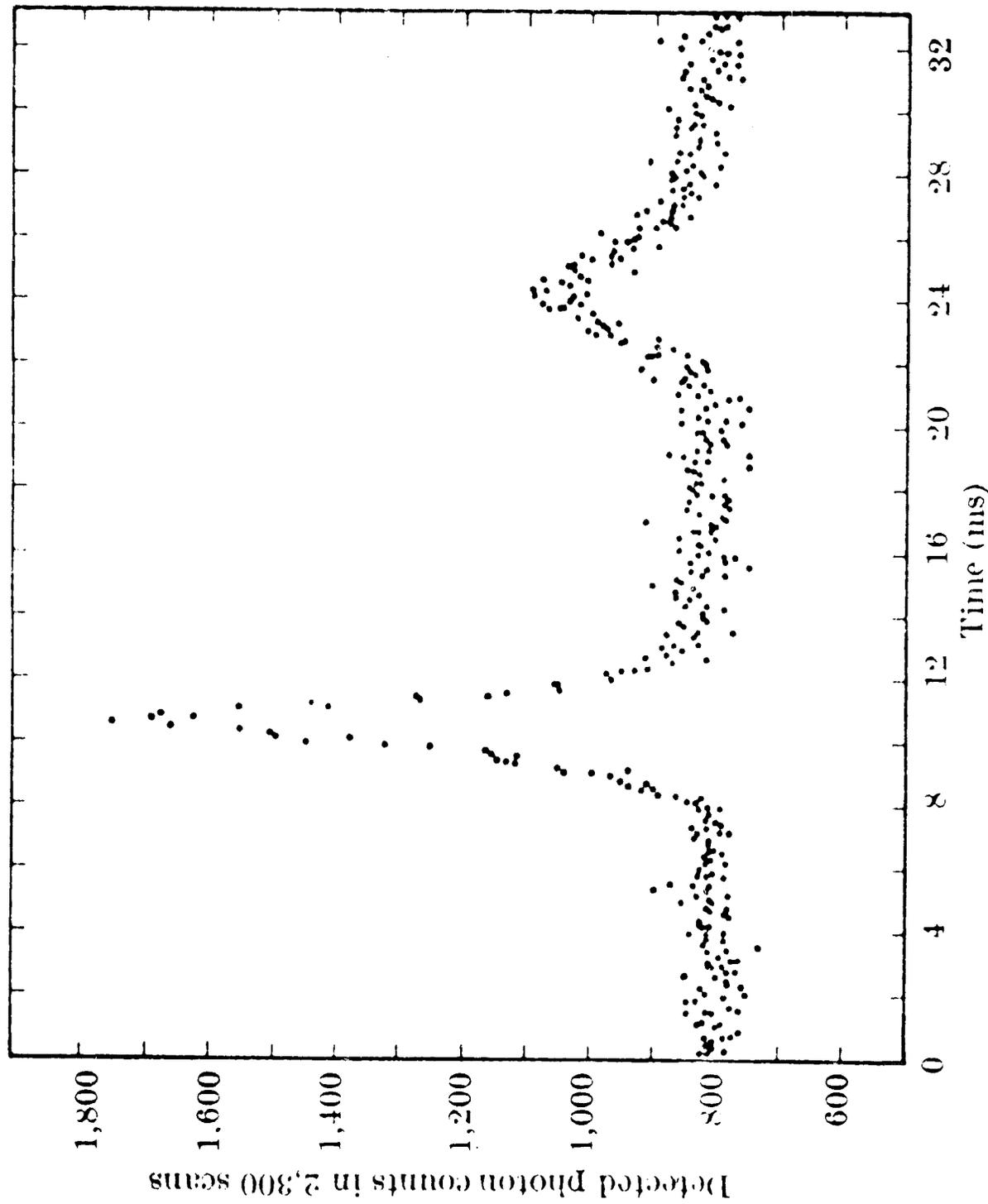
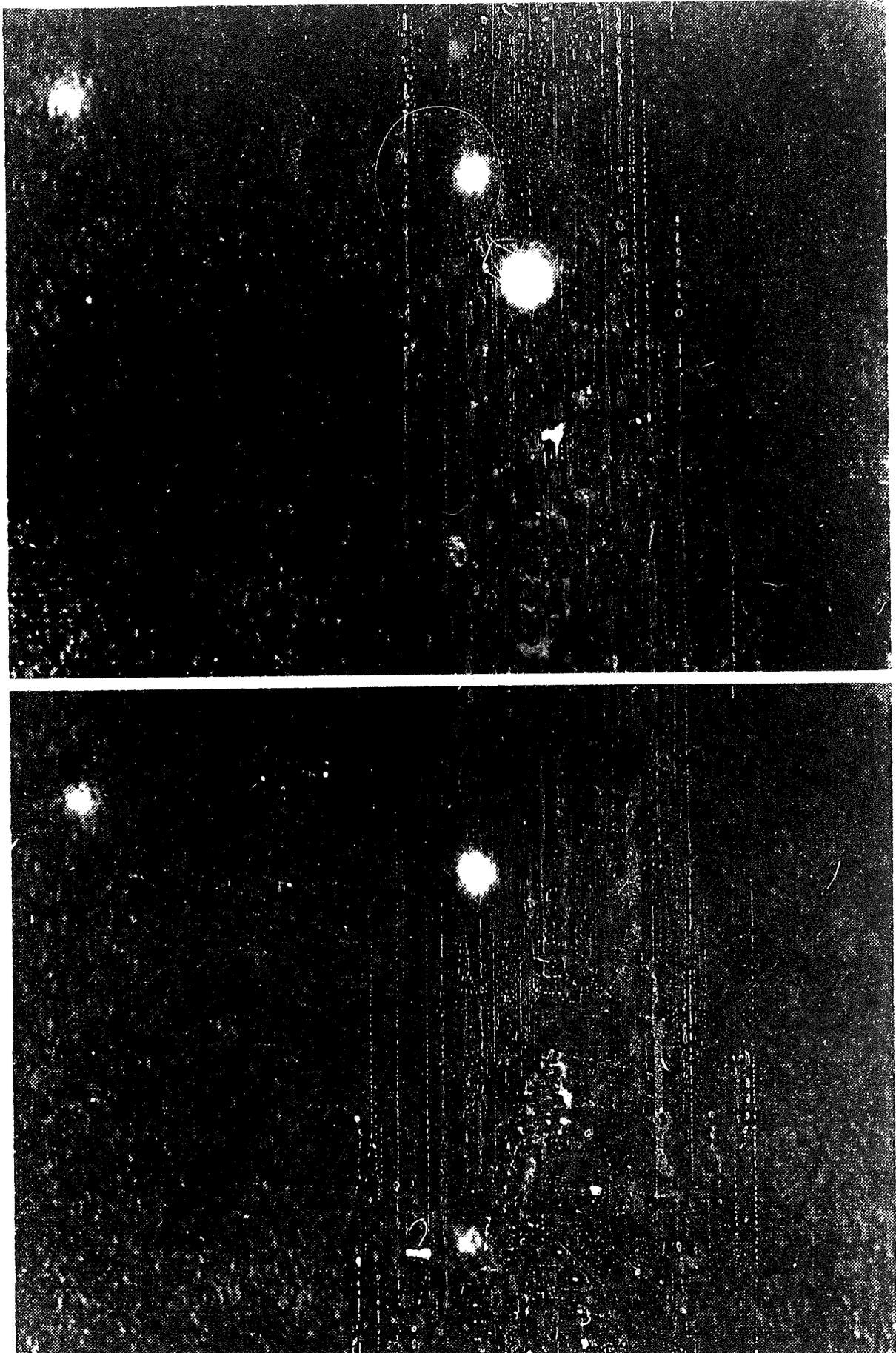


Fig. 3. Composite pulsar light curve. The complete cycle of 33.095 ms duration is shown.

Fig 4. : Le pulsar de la nébuleuse du Crabe au minimum
et au maximum de luminosité .



La distance qui nous sépare des pulsars peut être calculée de plusieurs façons. Le temps d'arrivée du signal n'est pas le même aux différentes fréquences. Conformément à la théorie, la différence $t_1 - t_2$ entre les temps d'arrivée du signal aux fréquences f_1 et f_2 est proportionnel à $\frac{1}{f_1^2} - \frac{1}{f_2^2}$ [15]. Le coefficient de proportionnalité est lui-même proportionnel à la densité moyenne d'électrons libres entre le pulsar et la terre. Par ailleurs, le signal est partiellement absorbé sur la longueur d'onde 21 cm qui est une longueur d'onde caractéristique de l'hydrogène neutre. A partir de ces informations, on peut évaluer la distance des pulsars [28].

Nous reproduisons tableau I les distances en parsecs de 14 pulsars obtenues par plusieurs méthodes [28]. Un parsec est égal à 3,26 années lumière. Rappelons pour mémoire que l'étoile la plus proche de nous, proxima du Centaure, est à environ 4 années lumière du soleil, et que le diamètre de notre galaxie est d'environ 100 000 années lumière.

Table 1. DISTANCE ESTIMATES OF FOURTEEN PULSARS

Object	l	b	l_d (pc)	l_{\min} (pc) from equation 4	l_{\max} (pc) from equations 6 and 7	l (pc) for $n_e=0.1$		
CP 0328	145	-1	5,710	2,900	8,165	5,700	8,300	180
NP 0527	184	-6.0	957	490	3,800	2,900	16,200	513
NP 0532	184.6	-5.4	1,064	620	4,800	3,250	18,300	578
CP 0808	140	34	179	70	225	100	560	100
AP 0823	197	32	189	145	320	320	1,820	192
PSR 0833	264	-3	1,911	325	2,540	2,800	15,800	500
CP 0834	220	26	228	135	294	215	1,210	128
CP 0950	230	44	144	30	65	50	280	294
CP 1133	240	70	106	35	75	80	160	487
HP 1506	90	53	125	300	650	340	1,900	200
PSR 1749	1.6	-1	5,710	370	7,500	2,800	16,100	509
CP 1919	56	4	1,434	703	1,800	3,970	5,800	126
JP 1938	52	-2	2,865	1,950	15,180	8,040	42,250	1,430
PSR 2045	30.5	-33.1	184	50	110	190	1,080	114

II - MODELES THEORIQUES

A - NATURE DES PULSARS

De nombreuses hypothèses ont été émises sur la nature des pulsars. Certains astronomes ont cru qu'il s'agissait de naines blanches pulsantes. Mais cette hypothèse a été abandonnée. En effet, les naines blanches tournent beaucoup trop lentement pour que la périodicité du signal soit le reflet de leur rotation. Si une naine blanche avait une période de rotation comparable à la période des pulsars, elle serait désintégrée par les forces centrifuges [14]. La période fondamentale de vibration d'une naine blanche est supérieure à la seconde, de peu cependant [29,30]. On pouvait penser que les signaux sont émis par une naine blanche vibrant à la fréquence d'un harmonique supérieur; cette hypothèse est peu compatible avec la structure des signaux [31], et il serait difficile de comprendre pourquoi la période du fondamental ne serait pas dominante [1]. On n'a pas trouvé de naine blanche sur l'emplacement des pulsars que l'on connaît; les naines blanches émettent une lumière d'intensité constante.

On n'a pas pu mesurer le rayon des pulsars. Mais une limite supérieure de ce diamètre est imposée par la forme du signal, la vitesse de la lumière étant finie. On trouve ainsi une limite supérieure de l'ordre de 10 000 km [11,32]. Cette limite est déjà bien inférieure au rayon des naines blanches, qui est comparable au rayon de Saturne [33].

On admet actuellement que les pulsars sont des étoiles à neutrons. Des oscillations, de très courte période (10^{-4} seconde) ont été observées à l'intérieur de la structure principale des pulsations [34]. Si cette observation est confirmée, il en résulterait que la dimension du pulsar serait inférieure à $10^{-4} c \sim 30$ km, c désignant la vitesse de la lumière. La dimension du pulsar serait donc au plus du même ordre que les dimensions d'une étoile à neutrons, puisque la théorie prévoit que les étoiles à neutrons ont un rayon de l'ordre de 10 km [14]. Ces oscillations sont à peu près ce que l'on pourrait attendre d'une étoile à neutrons animée d'un mouvement de rotation et de légères vibrations [14].

L'émission radio d'un pulsar est d'environ 10^{31} erg par seconde [14]. L'émission par unité de volume doit donc être très élevée. Une telle concentration d'énergie ne peut provenir que d'un astre de masse importante dont le volume est considérablement réduit par un champ de gravitation très intense [31].

La période des pulsars a reçu plusieurs interprétations successives. On a pensé que cette période pouvait être celle d'une planète tournant autour d'une étoile à neutrons, ou celle de deux étoiles à neutrons tournant l'une autour de l'autre. Mais les forces de marée détruiraient une telle planète, et une paire d'étoiles à neutrons faisant trente tours par seconde émettrait suffisamment d'ondes de gravitation pour que la décroissance de la période soit suffisante pour être mesurable en moins d'un jour [14]. La période d'oscillation d'une étoile à neutrons est très supérieure à la période des pulsars [30]. Il résulte du théorème du Viriel que le mode d'oscillation fondamental d'une étoile doit toujours avoir une période du même ordre de grandeur que la période du plus rapide mouvement de rotation dont

peut être animée une étoile sans se rompre. Des périodes de 0,5 à 1,5 seconde sont toutes plus longues que les périodes du mode le plus bas des étoiles à neutrons [31].

On pense actuellement qu'un pulsar est une étoile à neutrons dont la période de rotation est égale à la période des signaux émis. Une vitesse de rotation de 30 tours à la seconde a un effet négligeable sur sa structure; l'écart à la sphéricité serait de moins d'un millième [14]. La stabilité relative de l'ordre de 10^{-8} de la période des signaux émis par les pulsars ne peut s'interpréter que par la rotation d'un objet massif. L'étoile à neutrons émettrait un faisceau de lumière tournant comme le faisceau d'un phare; le signal serait émis quand la terre se trouve sur le trajet du faisceau [31].

La période des pulsars décroît en général très lentement, et double en un million d'années environ. Un tel comportement est à prévoir d'une étoile à neutrons animée d'un mouvement de rotation et perdant lentement de l'énergie, car il est probable que l'étoile à neutrons possède un moment magnétique très élevé [31,35]. Ce rythme de croissance de la période ne pourrait pas s'expliquer par la diminution d'un mouvement de vibration ou d'un mouvement orbital. On remarque que les pulsars dont les périodes sont les plus courtes sont associés aux restes d'explosions récentes de supernovae. Il s'agit du pulsar de la nébuleuse du Crabe et du pulsar de Vela X dont la vitesse de rotation ralentit beaucoup plus rapidement. La période du pulsar du Crabe aura doublé dans 2000 ans seulement. Or on pense que c'est précisément lors d'explosions de supernovae qu'apparaissent les étoiles à neutrons. Les pulsars tournant le plus lentement seraient les plus anciens et la nébulosité résultant de l'explosion aurait depuis longtemps disparu.

B - MECANISME D'EMISSION

L'intensité des ondes électromagnétiques émises par les pulsars est extrêmement grande; le mécanisme d'émission doit être cohérent. La température de brillance des pulsars, c'est-à-dire la température d'un corps noir émettant avec la même intensité aurait une valeur invraisemblablement élevée. Même si l'on donnait aux pulsars les dimensions d'une naine blanche, on trouverait déjà une température de l'ordre de 10^{21} °K [15,17]. Il semble qu'il serait difficile d'expliquer la polarisation des ondes radiofréquence par un mécanisme d'émission incohérent.

Plusieurs mécanismes d'émission ont été proposés. Certains astronomes, Gold en particulier, pensent que l'énergie des ondes électromagnétiques émises proviendrait surtout de l'énergie de rotation de l'étoile à neutrons [31]. On pense actuellement que les étoiles à neutrons possèdent un champ magnétique très intense, de l'ordre de 10^8 à 10^{10} oersted à la surface de l'étoile. La matière dégénérée de l'étoile à neutrons serait bonne conductrice de l'électricité; des champs magnétiques si intenses seraient engendrés lorsqu'une étoile normale se transformerait en étoile à neutrons en passant par des phases non turbulentes pendant lesquelles la conductivité serait toujours suffisante pour conserver le flux magnétique à travers l'étoile [36]; le champ serait alors inversement proportionnel au carré du rayon de l'étoile et serait multiplié approximativement par 10^{10} [14]. Ce champ magnétique intense serait ainsi engendré de la même manière que les champs intenses que l'on obtient en laboratoire en resserrant les lignes de flux par une implosion. Du ralentissement de la période d'un pulsar, on peut déduire la variation de son énergie cinétique de rotation, si l'on considère que son rayon varie peu. Si l'on considère que la masse du pulsar du Crabe est voisine

de celle du soleil, et que son rayon est de l'ordre de 10 km, on trouve que son énergie cinétique est de l'ordre de 10^{49} erg [37], et qu'elle diminue d'une quantité de l'ordre de 10^{38} erg/sec. Un pulsar est un dipôle magnétique qui, en tournant, émet un rayonnement électromagnétique de très basse fréquence. L'énergie rayonnée est donnée [38] par l'expression

$$\dot{E} = - \frac{2 m^2 \sin^2 \theta \Omega^4}{3c^2} \quad (1)$$

où

$$m^2 = \frac{\phi^2 a^2}{4 \pi^2} = \frac{B_p^2 a^6}{4} \quad (2)$$

B_p est l'intensité du champ magnétique au niveau du pôle, ϕ le flux magnétique sortant de la demi-sphère centrée sur le pôle et m le moment dipolaire, faisant l'angle θ avec l'axe de rotation. Ω est la vitesse de rotation, c la vitesse de la lumière et a le rayon de l'étoile. En adoptant pour les paramètres les valeurs $\Omega = 10 \text{ sec}^{-1}$, $\theta = \frac{\pi}{4}$, $a = 10 \text{ km}$,

$B_p = 10^{12}$ gauss (correspondant à 100 gauss pour une étoile de la séquence principale), on trouve une perte d'énergie de $3 \cdot 10^{31}$ erg/sec. [37]. Cette perte d'énergie est très inférieure à la perte d'énergie cinétique du pulsar de la nébuleuse du Crabe. L'émission radio est de l'ordre de 10^{31} erg/sec.; elle est du même ordre de grandeur que l'émission dipolaire magnétique; l'émission dans le visible est environ 10 fois plus grande.

Le ralentissement du pulsar s'expliquerait de la manière suivante. Dans une onde électromagnétique suffisamment intense, une particule chargée est accélérée dans la direction de propagation et atteint une vitesse proche de la vitesse de la lumière en une petite fraction de longueur d'onde, et ensuite suit l'onde en étant pratiquement en phase avec elle, empruntant lentement de l'énergie à l'onde électro-

magnétique [37]. L'étoile à neutrons émettrait de cette manière des électrons et des protons de très haute énergie. Cette énergie serait comparable à celle des rayons cosmiques. La lumière visible, polarisée, et les rayons X émis par la nébuleuse du Crabe seraient une émission synchrotron de ces électrons et de ces protons dans le faible champ magnétique ($H \sim 3 \cdot 10^{-4}$ oersted) de la nébuleuse. Or la puissance émise dans le visible et dans le domaine des rayons X par la nébuleuse du Crabe est de l'ordre de 10^{38} erg/sec. On en déduit que l'énergie des rayons cosmiques émis par le pulsar est aussi de l'ordre de 10^{38} erg/sec. C'est justement l'ordre de grandeur de la vitesse à laquelle l'énergie cinétique du pulsar diminue. Le moment cinétique de l'étoile à neutrons serait ainsi communiqué aux rayons cosmiques émis [14].

On remarque que, bien que la vitesse de rotation des pulsars soit élevée, leur moment cinétique est très inférieur à celui des étoiles de la séquence principale. Aussi, on pense que lors de l'explosion d'une supernova, il apparaît une étoile à neutrons tournant très rapidement. Le moment cinétique de cette étoile diminuerait rapidement, puis plus lentement. Peu après sa formation, elle émettrait encore bien plus de rayons cosmiques que le pulsar de la nébuleuse du Crabe actuellement. Les pulsars seraient ainsi peut être à l'origine de l'ensemble des rayons cosmiques [14]. Les rayons γ émis par les pulsars seraient produits par une interaction proton-proton à l'intérieur des rayons cosmiques qu'ils émettent [39].

Un mécanisme d'émission des ondes radiofréquence et éventuellement de lumière visible a été proposé par Hong-Yee Chiu, Vittorio Canuto et Laura Fassio-Canuto [40,41].

Dans un champ magnétique les électrons décrivent des orbites circulaires dont le rayon (le rayon de Larmor) est déterminé par l'intensité du champ et l'énergie de l'électron. Lorsque le rayon de Larmor de l'électron s'approche de la longueur d'onde de De Broglie, cependant, l'énergie de l'électron dans un plan perpendiculaire au champ \vec{H} (pris parallèle à l'axe des z) est quantifiée et la théorie classique de la magnétohydrodynamique cesse d'être valable. L'expression non relativiste des niveaux d'énergie de l'électron est [40,42]

$$E = \frac{p_z^2}{2m} + 1,16 M H_8 \text{ (eV)} \quad (3)$$

où p_z est la composante du moment orbital de l'électron suivant l'axe Oz (le moment de l'électron dans la direction du champ n'est pas quantifié) et M est un nombre quantique prenant des valeurs entières entre 0 et ∞ (M décrit la forme de l'orbite de l'électron et la direction du spin). H_8 est le champ magnétique exprimé en 10^8 oersted. Pour $H_8 = 1$ et une température de 10^5 °K, la plupart des électrons sont dans le niveau fondamental.

Les électrons peuvent émettre un photon de deux manières.

1 - Bremsstrahlung

La valeur de p_z peut varier sans que la valeur de M soit changée. Ceci peut se produire par exemple lors d'une collision de l'électron avec un noyau. Les électrons se comportent comme des particules à une dimension.

2 - Radiation synchrotron quantifiée

Le nombre quantique M change de valeur. Les fréquences des photons émis forment un spectre discret, qui devient un spectre continu si le champ magnétique n'est pas homogène.

Nous avons rappelé plus haut que les pulsars devaient émettre de la lumière par un mécanisme cohérent. Une telle émission peut se produire lorsque des particules ne sont pas en équilibre thermodynamique, et qu'il y a inversion de population.

Il en sera ainsi si l'étoile à neutrons oscille dans la direction du champ. Durant une oscillation, les températures des électrons et des ions changent adiabatiquement. Les ions sont des particules classiques, et se comportent comme un gaz parfait; $T_i \propto \rho^{\frac{2}{3}}$, T_i désignant la température des ions et ρ leur densité. Si le nombre quantique des électrons ne change pas, ils se comportent comme un gaz à une dimension, et $T_e \propto \rho^2$, où T_e désigne la température des ions. Si les électrons sont initialement en équilibre avec les ions, pendant la phase d'expansion les électrons deviennent plus froids que les ions. Les niveaux magnétiques supérieurs sont surpeuplés, il y a une inversion de population. Une émission stimulée fait tomber simultanément les électrons dans des états de nombre quantique inférieur, en un processus analogue à celui du laser, avec un très haut flux d'énergie.

Pendant la phase de contraction, ces électrons sont à une température supérieure à celle des ions. Pour atteindre l'équilibre, quelques électrons peuvent retourner à des niveaux d'énergie supérieur, mais des électrons perdent de l'énergie par bremsstrahlung. Ceci donne lieu à une émission radio, qui peut être cohérente.

La densité de surface d'une étoile à neutrons serait de l'ordre de 1 g/cm^3 . Compte tenu du degré d'opacité des couches externes, en supposant que les oscillations sont de l'ordre de quelques cm, que $\frac{1}{10}$ ème de l'étoile participe à l'émission, et que le champ magnétique est de l'ordre de 10^8 oersted, Chiu, etc... retrouvent par le mécanisme

ci-dessus la valeur expérimentale du flux radiofréquence et du flux de lumière visible émis par le pulsar du Crabe. Ils retrouvent l'indice spectral expérimental des ondes radiofréquence. Les ondes radiofréquence doivent être 100 % polarisées linéairement, conformément à l'expérience. La lumière visible devrait être 100 % polarisée circulairement, mais expérimentalement elle l'est à moins de 25 % [24]. Enfin, ils trouvent que la lumière ne peut être émise que dans la direction du champ; ceci expliquerait que l'étoile à neutrons émet un faisceau lumineux qui tourne avec elle.

D'autre part, si le mécanisme qu'ils proposent entre seul en jeu, la forme du spectre visible ne dépend que de l'intensité du champ magnétique. Elle serait de $2 \cdot 10^8$ oersted pour le pulsar de la nébuleuse du Crabe. Pour des champs magnétiques différents, l'émission visible se déplacerait dans l'ultraviolet ou l'infrarouge. Ceci expliquerait pourquoi on n'a pas réussi à détecter d'émission visible de la part de nombreux pulsars.

Le mécanisme de Chiu, etc.... est donc séduisant et interprète un bon nombre de faits expérimentaux.

III - ETOILES A NEUTRONS ET SUPERNOVAE

Nous avons exposé dans le chapitre précédent les raisons pour lesquelles les astronomes pensent actuellement que les pulsars seraient des étoiles à neutrons. Aussi, il nous a semblé utile de rappeler, dans ce chapitre, dans quelles conditions se formerait une étoile à neutrons, et de situer cet évènement par rapport à l'évolution générale des étoiles.

On pense actuellement que les étoiles se forment par condensation locale des gaz et des poussières interstellaires de densité extrêmement faible qui se trouvent dans les galaxies. Cette condensation se produirait sous l'effet des forces de gravitation. La nouvelle étoile serait constituée surtout d'hydrogène, comme les gaz interstellaires. Les autres éléments sont aussi présents, mais en beaucoup plus faible quantité. Lors de la formation de l'étoile, l'énergie de gravitation est transformée en chaleur. L'intérieur de l'étoile serait ainsi porté à une température suffisante pour amorcer des réactions thermonucléaires entre les noyaux d'hydrogène. L'hydrogène se transforme en hélium. Cette réaction thermonucléaire stabilise la température de l'étoile, qui brille d'un éclat très stable généralement pendant plusieurs milliards d'années. Dans les étoiles dont les masses sont comparables à celle du soleil, la température intérieure est inférieure à 20 000 000 d°; l'hydrogène se transforme en hélium surtout par l'intermédiaire de ce qu'on appelle le cycle proton-proton. Les protons interagissent directement entre eux. Dans les étoiles un peu plus massives la température est plus éle-

vée. Le cycle de Bethe, qui est une transformation de l'hydrogène en hélium par l'intermédiaire de réactions nucléaires avec le carbone, l'azote et l'oxygène devient plus rapide et devient de ce fait dominant. L'étoile étant à très haute température, la pression due à l'agitation thermique et la pression de radiation du rayonnement émis équilibrent les forces de gravitation. Bien que la masse d'une étoile soit gigantesque, sa densité moyenne, à ce stade de son évolution, est comparable à celle de l'eau.

Si l'étoile a une masse comparable ou inférieure à celle du soleil, lorsque la proportion d'hydrogène devient insuffisante, les réactions nucléaires ralentissent, l'étoile se contracte, la matière devient dégénérée; les électrons deviennent très fortement délocalisés, et la densité de l'étoile atteint une valeur de l'ordre de 10 tonnes par cm^3 : l'étoile se transforme en naine blanche, qui se refroidit progressivement.

Lorsque l'étoile se contracte, la température intérieure s'élève, l'énergie potentielle de gravitation étant transformée en chaleur. Si l'étoile est suffisamment massive pour que la température atteigne 10^8 degrés, alors, les noyaux d'hélium interagissent à leur tour, et se transforment en carbone. La température intérieure de l'étoile continuant à s'élever, et atteignant plusieurs milliards de degrés, des noyaux de plus en plus lourds peuvent se former successivement. La température diminue du centre vers la surface de l'étoile et les réactions nucléaires sont à un stade d'autant moins avancé que l'on est plus près de la surface de l'étoile. De la surface vers le centre on rencontrera successivement des couches constituées principalement d'hydrogène, d'hélium, de carbone, d'oxygène, de magnésium, de silicium, etc..., jusqu'au fer, qui est l'élément le plus stable. L'évolution de l'étoile est d'autant plus rapide que l'étoile est plus massive. A

certaines stades de son évolution, une étoile peut être animée d'oscillations : c'est ce qu'on appelle une céphéide. Elle peut être secouée d'explosions superficielles : elle devient une nova. Une étoile peut devenir plusieurs fois une nova. Il en a été ainsi de la nova RS Ophiuchi qui s'est manifestée en 1898, 1933, 1958. Les couches superficielles sont projetées à très grande vitesse : celles de V 603 Aquilae (Nova 1918) étaient animées d'une vitesse de 1700 km/sec.

L'évolution de l'étoile se termine soit par un refroidissement progressif, soit par une fantastique explosion volatilisant toute l'étoile ou une proportion importante de l'étoile. L'étoile devient une supernova. Pendant un certain temps, l'énergie lumineuse émise par l'étoile est plusieurs milliards de fois plus grande que celle d'une étoile ordinaire. Sa luminosité devient comparable à celle d'une galaxie toute entière. Les dernières supernovae qui ont été observées dans notre galaxie sont la supernova de Kepler en 1604, la supernova de Tycho-Brahé en 1572 [43] et celle de 1054, dans le Taureau, qui est à l'origine de la nébuleuse du Crabe ([44] p. 508). Elles étaient visibles en plein jour. Les supernovae plus anciennes ont eu lieu en 1006, 902, 437, 396 et 185 [45]. Toutefois, l'étoile de l'an 1006 était peut être simplement une nova très proche [46]. Il existe deux types de supernovae [47]. Les supernovae de type I se rencontrent dans les populations de vieilles étoiles (population II). Leur éclat se maintient pendant environ 100 jours, puis décroît rapidement. La couleur initiale est très rouge. La matière émise par la supernova est animée d'une vitesse de l'ordre de 2000 km/sec.; elle contient très peu d'hydrogène. Les supernovae de type II se rencontrent seulement dans les bras des galaxies en spirale. Leurs caractéristiques sont plus variables. Leur couleur est très bleue. La masse des matériaux éjectés est égale à plusieurs fois la masse du soleil. Ils sont animés d'une vitesse de l'ordre de 5000 km à la seconde. La masse des supernovae

de type I serait peu supérieure à celle du soleil, alors que les supernovae de type II seraient des étoiles très massives, dont la masse serait de l'ordre de 30 fois celle du soleil. Les supernovae de type II seraient des étoiles très jeunes ayant évolué très rapidement.

L'étude théorique des supernovae a été faite en particulier par F. Hoyle et W.A. Fowler [48], S.A. Colgate et R. White [49], W.D. Arnett [50]. Il apparaît que l'explosion d'une supernova n'est pas due à la fusion à un rythme explosif de l'hydrogène (explosion du type bombe H), ou de l'hélium, car ces réactions sont trop lentes pour expliquer la rapidité de l'explosion. L'intervalle caractéristique associé à la plupart des explosions stellaires est en effet de 1 à 100 secondes [48]. Mais une explosion cataclysmique peut se produire à d'autres stades de l'évolution d'une étoile. Par exemple, dans une étoile suffisamment massive, les réactions nucléaires entre les atomes de carbone s'amorcent dès que l'hélium a fini de brûler. Elles ne prennent pas un caractère explosif. Dans une étoile moins massive, la température ne sera jamais assez haute pour que les réactions nucléaires entre noyaux de carbone soient amorcées, et l'étoile se transforme en naine blanche constituée surtout de carbone. Mais si l'étoile a une masse intermédiaire, les réactions nucléaires entre atomes de carbone s'amorcent alors que la matière des couches internes de l'étoile est déjà fortement dégénérée, et très dense. Dans ces conditions, une explosion se produirait, qui volatiliserait toute l'étoile [50]. Selon la masse de l'étoile, la réaction explosive serait celle du carbone, de l'oxygène, ou du silicium. Les étoiles dont la masse serait au moins un peu supérieure à celle du soleil finiraient toutes par exploser [50], en supernovae de type I. L'explosion de l'oxygène volatiliserait aussi toute l'étoile. Mais l'énergie dégagée par l'explosion du silicium n'est pas suffisante pour volatiliser l'étoile. La combustion de l'oxygène ne se ferait hydrosta-

tiquement que pour les étoiles de masse supérieure à 15 fois la masse du soleil. Ces étoiles brûleraient ainsi successivement leurs différents combustibles nucléaires sans être détruites par une explosion. Pendant la phase géante rouge elles perdent une partie de leur matière. Selon la valeur de sa masse finale, elle finirait par se transformer en une naine blanche, une étoile à neutrons, ou se transformerait en une singularité de Schwarzschild, c'est-à-dire deviendrait ponctuelle.

Mais les étoiles dont la masse dépasserait 20 à 30 fois la masse du soleil finiraient aussi par exploser et seraient à l'origine des supernovae de type II. Le mécanisme de l'explosion serait le suivant. Les couches internes de l'étoile, lorsque tous les combustibles ont été brûlés, sont constitués essentiellement de fer et d'éléments du groupe du fer, et leur température atteint 4 ou 5 milliards de degrés. A ce moment là, les réactions nucléaires cessent, faute de combustible, le centre de l'étoile se contracte, la température monte. Au-dessus de 5 milliards de degrés, les réactions nucléaires s'inversent : le fer se transforme en hélium et en neutrons. Cette réaction est très fortement endothermique, l'énergie est fournie par la gravitation : en un temps extrêmement court, de l'ordre d'une seconde [48], les couches internes de l'étoile s'effondrent : il y a implosion. Les couches externes tombent en chute libre vers le centre de l'étoile. Ces couches contiennent surtout des éléments légers. Leur température s'élevant brusquement, elles explosent et sont projetées dans l'espace. Les réactions nucléaires dont elles sont le siège produisent des neutrons qui sont absorbés par les éléments du groupe du fer; les éléments les plus lourds sont tous synthétisés, y compris les éléments instables situés en bas du tableau de Mendeleïeff, en particulier le Californium. On constate que la courbe de lumière des supernovae de type II possède une queue exponentielle, dont la période est juste égale à celle du Californium. Il resterait une étoile à neutrons, c'est-à-dire un pulsar.

Certaines étoiles à neutrons seraient donc créées lors des explosions de supernovae de type II, d'autres seraient la fin de l'évolution non violente d'étoiles de masse comprise entre 15 à 20 fois la masse du soleil, c'est-à-dire des étoiles de type 0 [50]. La masse d'une étoile à neutrons est comprise entre 0,5 et 2 fois la masse du soleil [35]. Une étoile à neutrons de masse supérieure se transformerait en une étoile ponctuelle (singularité de Schwarzschild). Jusqu'ici, on n'a découvert des étoiles à neutrons qu'à l'emplacement de la supernova de 1054 (nébuleuse du Crabe) et de Vela X. On n'a pas trouvé de pulsar à l'emplacement des autres supernovae connues. L'explication est probablement la suivante : le faisceau lumineux des pulsars étant relativement étroit, la terre reçoit seulement les signaux des pulsars qui sont correctement orientés.

C O N C L U S I O N

La découverte des pulsars représente un important pas en avant de l'astrophysique. Après la découverte des radiogalaxies, des quasars, cette découverte est un nouveau succès de la radio-astronomie. Les théories sur la nature des pulsars et de leur émission ne sont pas encore très sûres et restent encore très approximatives. Mais dès maintenant, il apparaît que les pulsars sont des étoiles à neutrons. Cette constatation permet de mieux comprendre l'évolution des étoiles. Les pulsars semblent être de puissants générateurs de rayons cosmiques, dont l'origine était jusqu'ici assez incertaine.

La régularité de l'émission des pulsars a en elle-même un grand intérêt scientifique. Les signaux émis nous donnent des informations sur la densité d'électrons dans la galaxie. Ils permettent de connaître avec précision l'orbite terrestre [51]. Les pulsars situés près du plan de l'écliptique permettent de faire nouvelles études de la couronne solaire et peuvent servir à tester la relativité générale [51].

B I B L I O G R A P H I E

- 1 - A. HEWISH, S.J. BELL, J.D.H. PILKINGTON, R.F. SCOTT
et R.A. COLLINS
Nature, 1968, 217, 709.
- 2 - A. HEWISH, P.F. SCOTT et D. WILLS
Nature, 1964, 203, 1214.
- 3 - J.D.H. PILKINGTON, A. HEWISH, S.J. BELL et T.W. COLE
Nature, 1968, 218, 126.
- 4 - D.H. STAELIN et E.C. REIFENSTEIN
Science, 1968, 162, 1481.
- 5 - M.I. LARGE, A.E. VAUGHAN et B.Y. MILLS
Nature, 1968, 220, 340.
- 6 - G.A. ZEISSIG et D.W. RICHARDS
Nature, 1969, 222, 150.
- 7 - D. RICHARD
IAU Circ. 1968, n° 2114.
- 8 - D.W. RICHARDS et J.M. COMELLA
Nature, 1969, 222, 551.
- 9 - J.G. DAVIES, G.C. HUNT et F.G. SMITH
Nature, 1969, 221, 27.
- 10 - T.W. COLE,
Nature, 1969, 221, 29.
- 11 - M. RYLE et J.A. BAILEY
Nature, 1968, 217, 907

- 12 - J.M. COMELLA, H.D. CRAFT, R.V.E. LOVELACE, J.M. SUTTON,
G.L. TYLER
Nature, 1969, 221, 453.
- 13 - V. TRIMBLE
Astrophys. J., 1968, 73, 535.
- 14 - M. RUDERMAN
Comments on Nuclear and Particle Physics, 1969, 3, 37.
- 15 - A.G. LINE et B.J. RICKETT
Nature, 1968, 218, 326.
- 16 - E.E. SALPETER
Nature, 1969, 221, 31.
- 17 - A.G. LINE et F.G. SMITH
Nature, 1968, 218, 124.
- 18 - V. RADHAKRISHNAN, D.J. COOKE, M.M. KAMESAROFF et D. MORRIS
Nature, 1969, 221, 443.
- 19 - R.R. CLARK et F.G. SMITH
Nature, 1969, 221, 724.
- 20 - W.J. COCKE, M.J. DISNEY et D.J. TAYLOR
Nature, 1969, 221, 525.
- 21 - W. BAADE,
Astrophys. J., 1942, 96, 188.
- 22 - R. MINKOVSKI
Astrophys. J., 1942, 96, 199.
- 23 - R.V. WILLSTROP
Nature, 1969, 221, 1023.
- 24 - K.C. FREEMAN, A.W. RODGERS, P.T. RUDGE et G. LYNKA
Nature, 1969, 222, 459.

- 25 - E.P. O'MONGAIN, N.A. PORTER, J. WHITE, D.J. FEGAN,
D.M. JENNINGS et B.G. LAWLESS
Nature, 1968, 219, 1348.
- 26 - W.N. CHARMAN, J.V. JELLEY, P.R. ORMAN, R.W.P. DREVER
et B. McBREEN
Nature, 1968, 220, 565.
- 27 - G.G. FAZIO, H.F. HELMKEN, G.H. RIEKE et T.C. WEEKES
Nature, 1968, 220, 592.
- 28 - M. GREWING, U. MEBOLD et K. ROHLFS
Nature, 1969, 221, 751.
- 29 - J. FAULKNER et J.R. GRIBBIN
Nature, 1968, 218, 734.
- 30 - D.W. MELTZER et K.S. THORNE
Astrophys. J., 1966, 145, 514.
- 31 - T. GOLD
Nature, 1968, 218, 731.
- 32 - F. HOYLE et J. NARLIKAR
Nature, 1968, 218, 123.
- 33 - F. HOYLE
L'astronomie, Editions du Pont Royal, Paris, 1963.
- 34 - F. DRAKE et H. CRAFT, Jr.
Nature, 1968, 220, 231.
- 35 - T. GOLD
Nature, 1969, 221, 25.
- 36 - L. WOLTJER
Astrophys. J., 1964, 140, 1309.
- 37 - J.E. GUNN et J.P. OSTRICKER
Nature, 1969, 221, 454.

- 38 - L. LANDAU et E. LIFCHITZ
Théorie du champ, Editions Mir, Moscou, 1966.
- 39 - M.V. KRISHNA APPARAO
Nature, 1969, 221, 645.
- 40 - H.Y. CHIU, V. CANUTO, et L. FASSIO CANUTO
Nature, 1969, 221, 529.
- 41 - H.Y. CHIU et V. CANUTO
Phys. Rev. Letters, 1969, 22, 9, 415.
- 42 - L. LANDAU et E. LIFCHITZ
Mécanique quantique, Editions Mir, Moscou, 1966.
- 43 - TYCHO-BRAHE
De Stella nova, 1573.
- 44 - Astronomie Populaire, C. Flammarion, Paris, 1955.
- 45 - C.S. SHEN
Nature, 1969, 221, 1039.
- 46 - C.M. BOTLEY
Nature, 1969, 222, 649.
- 47 - R. MINKOVSKI
Proc. Nat. Acad. Sci., 1960, 46, 13.
- 48 - F. HOYLE et W.A. FOWLER
Astrophys. J., 1960, 132, 565.
- 49 - S.A. COLGATE et R. WHITE
Astrophys. J., 1966, 143, 626.
- 50 - W.D. ARNETT
Nature, 1969, 222, 359.
- 51 - COUNSELMAN et I.I. SHAPIRO
Science, 1968, 162, 352.

TABLE DES MATIERES

	Pages
INTRODUCTION	1
I - DECOUVERTE ET PROPRIETES DES PULSARS	3
II - MODELES THEORIQUES	8
A - Nature des pulsars	8
B - Mécanisme d'émission	11
III - ETOILES A NEUTRONS ET SUPERNOVAE	17
CONCLUSION	23
BIBLIOGRAPHIE	24
TABLE DES MATIERES	28