

Origine et conséquence du champ magnétique au sein des Pulsars

ROBIN KUBLER, ILAN ABITBOL, ALEXANDRE AIMINI, ALAIN TRAN

Samedi 18 Avril 2015

Abstract

Lorsqu'une étoile massive arrive en fin de vie, et donc que son énergie potentielle d'interaction forte s'épuise, elle produit une supernova de type II* à condition que sa masse soit comprise entre $8M_{\odot}$ et $20M_{\odot}$. Cette dernière peut produire divers objets cosmiques et le coeur résiduel de l'étoile s'effondre sur lui même en se transformant ainsi en étoile à neutron ou en trou noir. Lorsque le champ magnétique naissant est très puissant et que la jeune étoile à neutron est dotée d'une vitesse de rotation très importante, elle émet le long de son axe magnétique diverses radiations à la façon d'un phare sur la côte. On nomme cette étoile à neutron un Pulsar.

*LES SUPERNOVAS DE TYPE II POSSÈDENT DE L'HYDROGÈNE CONTRAIREMENT À CELLE DE TYPE I

1 Présentation : Decouverte du Pulsar et champ magnétique majeur.

A. Histoire :

Les premiers contacts de l'Homme avec les pulsars a eu lieu il y a plus de 1000 ans lorsque les astronomes chinois ont vu dans le ciel une étoile plus lumineuse que toutes les autres astres auparavant observées. Ils rapportèrent qu'elle était visible à l'œil nu et en plein de jours pendant 23 jours et 23 nuits.

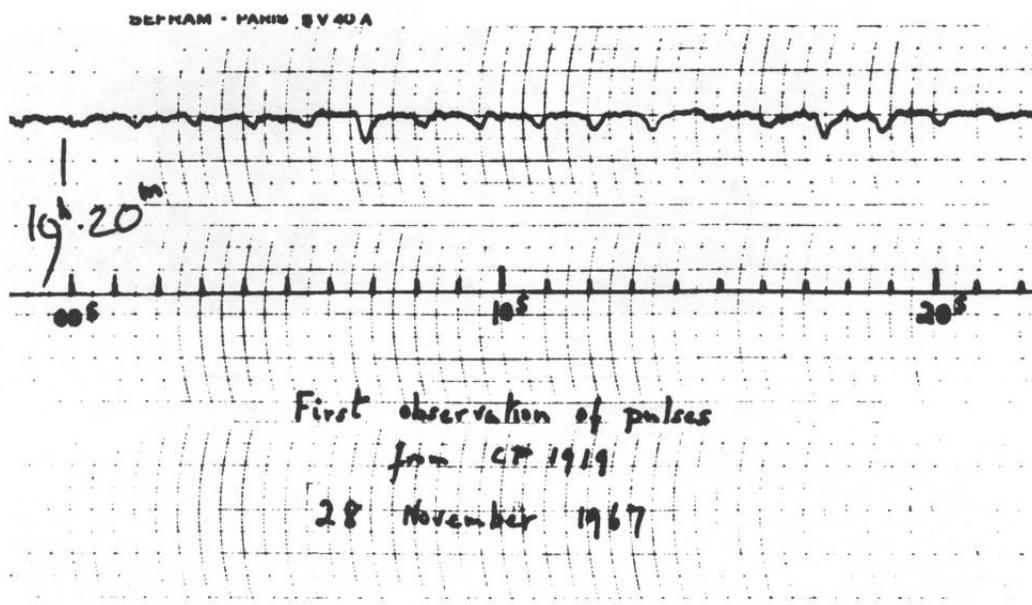
Cette étoile resta visible dans le ciel nocturne pendant près de deux ans.

Parmi les archives d'astronomes chinois, nous pouvons trouver :

« Ère Zhihe du règne, première année, cinquième mois lunaire, jour jichou. Une étoile invitée est apparue au sud-est de Tianguan, peut-être à plusieurs pouces de distance. Après plus d'une année, elle s'est dispersée et a disparu. »

L'illumination du ciel décrite par les astronomes chinois au 10^{ème} siècle était due à l'explosion de la supernova historique de type II : SN 1054 de la nébuleuse du Crabe donnant ainsi une étoile à neutron avec un champ magnétique très intense responsable des jets de rayonnement cosmique hautement énergétique et d'ondes radio captées depuis la Terre, à 6000 années-lumière.

Il faudra attendre près de dix siècles pour que, en juillet 1967, A. Hewish de l'Université de Cambridge lance un programme consistant à étudier les radio-sources extragalactiques. Une de ses étudiantes, Jocelyn Bell, enregistra en août un signal se répétant toutes les 1.3 secondes au rythme d'un tambour cosmique.



"I got it on a fast recording. As the chart flowed under the pen I could see that the signal was a series of pulses . . . 1½ seconds apart." (Deflections are down).

Table 1: Enregistrement de Jocelyn Bell

Elle appela cet enregistrement "LGM-1" pour : *Little Green Men-1*. Car dans les années 70, la découverte d'une vie d'origine extraterrestre était un sujet majeur.

En effet, l'extrême stabilité de la période poussa les chercheurs à croire en un signal d'origine extraterrestre.

Finalement, la communauté scientifique conclue que ce signal ne pouvait provenir que d'une étoile à neutron en rotation rapide, appelée le pulsar. Cette découverte devait valoir le prix Nobel de Physique à Hewish en 1974. Plus massive que le Soleil, les pulsars ont un rayon d'environ une dizaine de kilomètres et une masse volumique colossale, par exemple pour le pulsar du Crabe :

$$\rho_{pulsarCrabe} = \frac{1.3M_{\odot}}{V} = \frac{1.3M_{\odot}}{\frac{4}{3}\pi * r^3} \sim 1.9 * 10^{17} kg/m^3 \quad (1)$$

Aujourd'hui, on dénombre plus de 2000 pulsars.

B. La puissance unique de son champ magnétique :

Le champ magnétique d'un pulsar est si puissant qu'il serait capable d'effacer les données d'une carte de crédit à une distance de plus de 50 000 km. Il est capable d'altérer les atomes du corps humain à environ 600 km et un tremblement d'étoile se produisant à 10 années-lumières provoquerait de graves conséquences sur notre système solaire.

Le responsable du fort champ magnétique est : la contraction de l'étoile d'origine augmentant d'un facteur 10^{10} le champ, due à la conservation du moment cinétique. Il traduit l'effet dynamo qui va augmenter la valeur de ce champ magnétique puis le maintenir.

2 Explication : Mécanisme à l'origine du champ et phénomène le décrivant.

L'ensemble des calculs seront effectués pour le pulsar du Crabe.

A. L'origine du champ magnétique :

La vitesse de rotation du pulsar s'explique par la conservation du moment cinétique comparable au mouvement d'une patineuse écartant puis resserrant les bras près de son corps :

$$\mathcal{L}_{SN1054} = \mathcal{L}_{pulsarCrabe}$$

$$I_i * \omega_i = I_f * \omega_f$$

$$\omega_f = \frac{I_i * \omega_i}{I_f}$$

$$\omega_f = \frac{\frac{2}{5} * 8M_{\odot} R_{SN1054}^2 \omega_i}{\frac{2}{5} * 1.3M_{\odot} R_{pulsarCrabe}^2}$$

$$\omega_f \sim 4.32^{-7} \omega_i R_{\odot}^2$$

Or, $I_f \ll I_i$ ce qui explique l'apparition d'une importante vitesse de rotation avec la naissance du pulsar. Egalement, si on suppose que SN1054 avait un rayon de $4R_{\oplus}$:

$$\omega_f \sim \omega_i 2.1 * 10^{11}$$

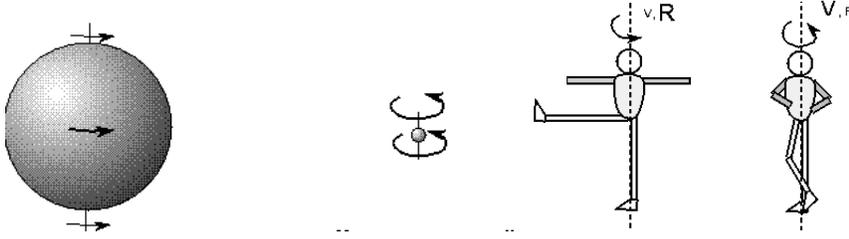


Figure 1: équivalence des modèles

Ainsi, au moment de sa naissance, le résidu de supernova est conducteur car il contient des particules chargées telles que des électrons ou des protons. La vitesse de rotation du pulsar est alors suffisamment élevée pour que la croûte interne constituée de noyaux riches en neutrons et d'un gaz d'électron, parcourue par un courant, déclenche l'effet dynamo, ce qui est suffisant pour augmenter le champ magnétique à des valeurs environ 1000 fois supérieures.

L'effet dynamo traduit le processus par lequel un corps en rotation va créer et maintenir un champ magnétique et cela lorsqu'il est composé de fluides conductibles électriques dont les moments magnétiques microscopiques s'alignent. Ici, la croûte interne.

B. modélisation du champ \vec{B} pulsar :

Pour comprendre l'allure des lignes de champ du pulsar on peut approcher le cœur du pulsar par une bobine parcourue par un courant i composé de n spires

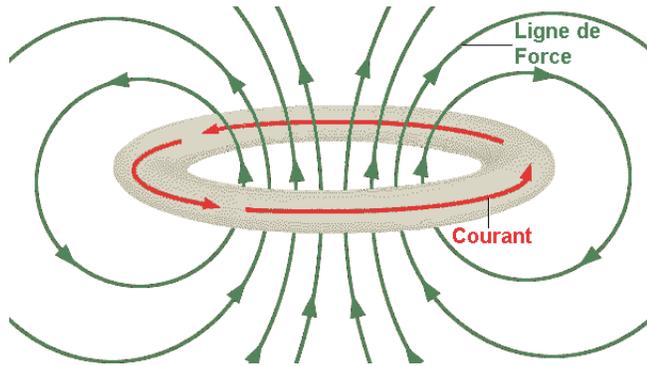
élémentaires : un solénoïde. Cette structure a pour but de canaliser les lignes du champ magnétique.

Pour une spire on avait déjà vue l'orientation du champ magnétique le long de l'axe, \vec{B} est orienté selon \vec{u}_z , le vecteur de la base cartésienne $(\vec{u}_x, \vec{u}_y, \vec{u}_z)$.

Alors il en va de même, pour le solénoïde et cela par superposition.

Comme pour une spire simple, les lignes de \vec{B} s'échappent du pôle Nord pour reboucler au pôle sud du solénoïde, nous avons là un dipôle magnétique.

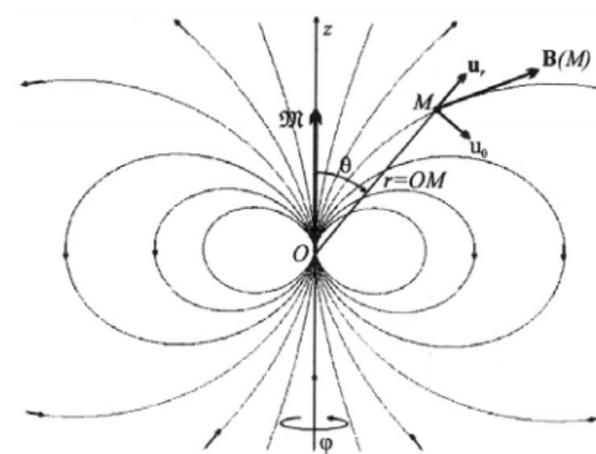
Alors les lignes de champs sont représentées ci dessous :



(a) repartition du vecteur \vec{B} dans l'espace

Figure 2: schemas explicatifs de la spire

Maintenant, si on sort de cette approximation on retrouve une similitude certaine avec la distribution du champ magnétique du pulsar.



(a) repartition du vecteur \vec{B} dans l'espace

Figure 3: schemas explicatifs du pulsar

Ainsi, le pulsar se comporte comme un dipôle magnétique en rotation que nous pouvons approximer par un autre modèle de spire concentrique permettant de comprendre l'orientation des lignes de champ.

On remarque que même si le champ magnétique du pulsar est extrêmement puissant, la répartition de ce dernier dans l'espace est tout à fait semblable aux autres astres magnétisés tels que la Terre.

Ce champ magnétique représente une énergie gigantesque qui accélère les particules chargées que sont les protons et les électrons. Le long des lignes de champ, ces particules ne décrivent pas des droites mais des hélices dont le rayon est d'autant plus petit que le champ est intense.

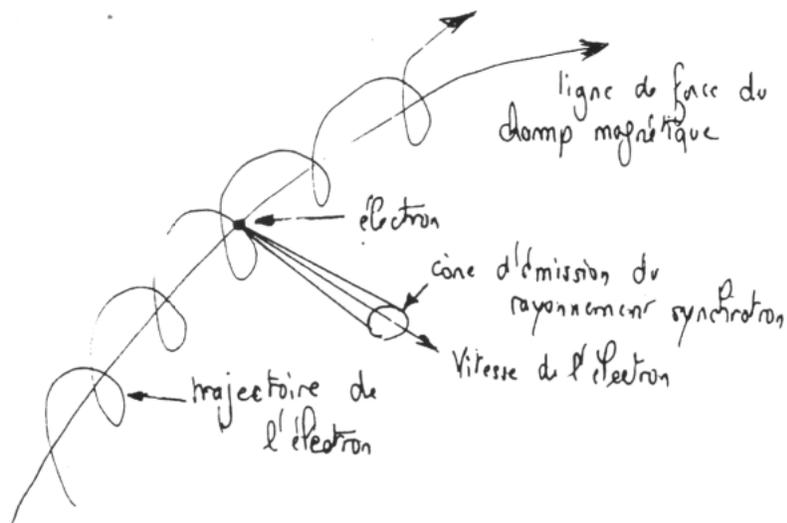


Figure 4: rayonnement synchrotron

L'accélération des particules produit un rayonnement synchrotron*: la lumière du phare cosmique.

*Rayonnement synchrotron : rayonnement émis par des particules chargées et accélérées par un champ \vec{B} et se déplaçant à une vitesse proche de celle de la lumière.

C. Calcul du champ \vec{B} du Pulsar de la nébuleuse du Crabe :

Données du problème :

SN1054 de surface S_0	Pulsar du Crabe de surface S
Masse : $M_{SN1054} = 8M_{\odot}$	Masse : $M_{PulsarCrabe} = 1.4M_{\odot}$
Rayon : $R_0 = 4R_{\odot}$	Rayon : $R = 15km$
Champ magnétique : $B_0 \sim 0.01T$	Champ magnétique : $B = 3.8 * 10^8T$
Masse volumique : $\rho_0 = 175.4kg/m^3$	Masse volumique : $\rho = 1.9 * 10^{17}kg/m^3$

- Estimation de l'ordre de grandeur de \vec{B} :

Nous allons considerer la conservation du flux magnétique Φ : Le produit du champ magnétique par la surface de l'étoile doit rester constant, soit :

$$\Phi_0 = \Phi$$

$$\iint_{S_0} \vec{B}_0 \cdot d\vec{S}_0 = \iint_S \vec{B} \cdot d\vec{S}$$

$$B_0 4\pi R_0^2 = B 4\pi R^2$$

$$B = B_0 \frac{R_0^2}{R^2}$$

$$B = 0.01 * \frac{16R_{\odot}^2}{R^2}$$

$$B \sim 3.4 * 10^8 T$$

Le résultat trouvé est du même ordre de grandeur que la donnée du champ.

L'étude des différents paramètres du champ magnétique du pulsar nous permettent de mieux comprendre son origine et le fonctionnement de ce dernier.

3 Application : Utilité dans les sciences.

A. Plaque Pioneer:

Cette plaque a été embarquée à bord de Pioneer 10 et Pioneer 11, sur laquelle un ensemble de données est gravé dans l'optique d'être lu par d'éventuelles civilisations extraterrestres. Elle est comparable à une "bouteille à la mer interstellaire"⁽¹⁾.

Sur la partie gauche de la plaque, on trouve une représentation en binaire du Soleil par rapport au centre de La voie Lactée et ainsi que par rapport à 14 pulsars car chacun d'entre eux possède une pulsation qui leur est propre, on peut assimiler leur utilité à celle d'un phare sur la côte pour un bateau désirant se repérer en mer avec la lumière du phare correspondant au rayonnement synchrotron des particules accélérées au niveau des lignes du champ \vec{B} . On peut utiliser les pulsars comme point de repère, et créer une « carte » pour pouvoir se localiser dans l'espace. Leurs pulsations sont représentées par chacune des lignes binaires et la longueur des lignes la distance relative par rapport au Soleil.⁽²⁾

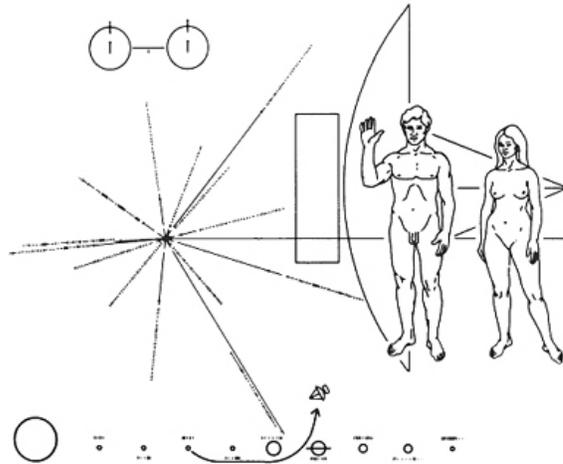


Figure 5: Plaque Pioneer

B. Physique des particules : ⁽³⁾

Les étoiles à neutrons sont uniques, la densité des étoiles à neutrons est plus importante que celle du noyau d'un atome. Les interactions nucléaires fortes sont responsables de cette pression si importante. Ces étoiles sont tellement denses que l'on ne peut pas recréer les paramètres de l'expérience en laboratoire. Ainsi, les pulsars sont un lieu unique d'observation de la matière dans un état extrêmement condensé, impossible à reproduire avec nos moyens en laboratoire.

C.Plus précis que des horloges atomiques :

Les pulsars sont les horloges les plus précises que l'on connaisse. En effet, cette précision vient de la stabilité de la rotation des pulsars due à leur très faible ralentissement. Comme nous l'avons déjà vu, nous pouvons nous servir de cette propriété de ces astres car nous pouvons capter les ondes radios et le rayonnement synchrotron des particules chargées accélérées par \vec{B} .

Par exemple, pour un Pulsar d'une période $T = 1$ s le ralentissement serait de $\frac{1}{300}$ ^{ème} de seconde par million d'année.

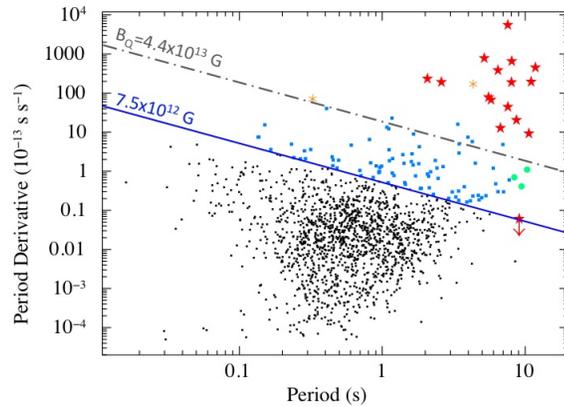


Figure 6: Distribution des périodes de rotation en fonction de leur ralentissement. L'échelle des y représente 10⁴ nanosecondes perdu par seconde. Les points noirs et bleus sont les pulsars et en rouge, les magnétars.

Annexe

Il existe des sous catégories de pulsar car leur comportement peut différer dans certain cas.

A. Pulsar milliseconde

Ce sont des pulsars avec une vitesse de rotation plus élevée dont la période est inférieure à 30 ms. Ces types de pulsar accélèrent en rotation. En effet, les pulsars millisecondes sont composés d'une paire de pulsar. L'accélération est due à l'absorption du premier pulsar par le deuxième.

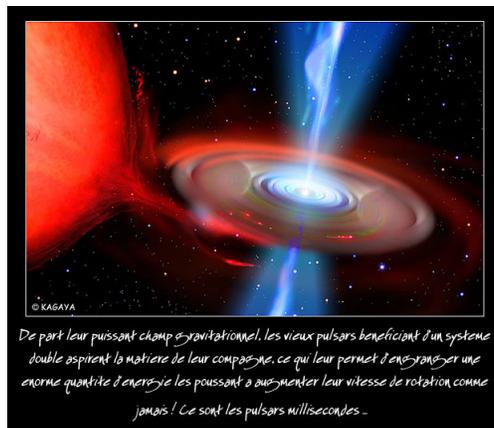


Figure 7: Modèle théorique

B. Pulsar gamma

Son domaine d'émission est les rayons gamma. Les émissions gamma sont dues à l'accélération des particules par les pulsars dans leurs magnétosphères. Les pulsars gammas ont des champs magnétiques importants et une vitesse de rotation élevée.

C. Les magnétars

Ce sont des étoiles à neutrons possédant un champ magnétique encore plus puissant que celui des pulsars, qui peut s'élever jusqu'à 10^{11} Teslas. Par exemple, le 27 décembre 2004, à 30 000 années-lumières de la Terre, un tremblement d'étoile de magnétar a émis des rayons gamma et X d'une intensité telle qu'ils ont altéré l'atmosphère supérieure de la Terre et altéré partiellement le champ magnétique terrestre. C'est l'explosion la plus puissante jamais enregistrée par des satellites.

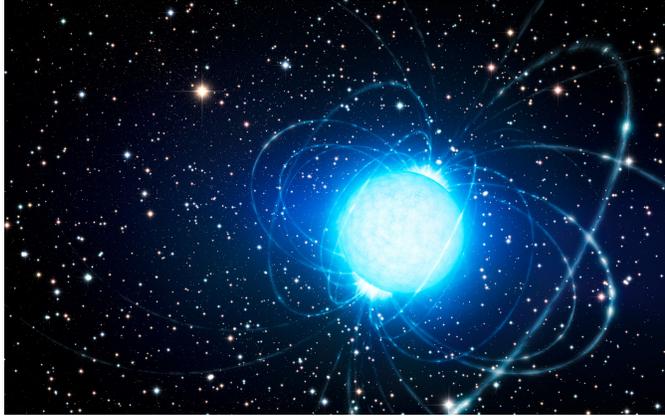


Figure 8: Illustration artistique d'un magnétar

References

- [1] <http://www.cosmovisions.com/pu.htm>
- [2] <http://www.aanda.org/>
- [3] http://www.aanda.org/articles/aa/full_html/2011/11/aa18047-11/aa18047-11.html. De INAF – Osservatorio Astrofisico di Catania, via S. Sofia 78, 95123 Catania, Italy e-mail: vadim.urpin@uv.es
- [4] <https://www.youtube.com/watch?v=rKpFFTGbaDc> : Pulsars, Magnetars, Black Holes (Oh My!): The Wickedly Cool Stellar Undead
- [5] Enregistrement de Jocelyn Bell
- [6] <http://www.groupeastronomiespa.be/supernova1054.pdf>
- [7] <http://www.sciences-fictions-histoires.com/blog/sciences/histoires-de-la-science-les-pulsars.html>
- [8] THÈSE présentée par : Antoine LASSUS : Méthode de Détection de Sources Individuelles d'Ondes Gravitationnelles par Chronométrie d'un Réseau de Pulsars
- [9] THÈSE présentée par : Vincent Luset : Analyse différée des données de SNLS : mesure des paramètres cosmologiques et du taux d'explosion des supernovas de type Ia.
- [10] http://luth2.obspm.fr/~luthier/gourgoulhon/fr/master/obj_compacts.pdf : Recherches d'Eric Gourgoulhon de LUTH
- [11] (1) : citation inconnue de http://fr.wikipedia.org/wiki/Plaque_de_Pioneer

- [12] <http://www.futura-sciences.com/magazines/matiere/infos/actu/d/physique-peu-moins-mysteres-coeur-etoiles-neutrons-25866/>
- [13] <http://www.eso.org/public/france/news/eso1415/> : L'énigme du magnétar