



Αστροφυσική

Ενότητα # 8: Pulsars

Νικόλαος Στεργιούλας
Τμήμα Φυσικής



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



Άδειες Χρήσης

Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό υπόκειται σε άδειες χρήσης Creative Commons.

Για εκπαιδευτικό υλικό, όπως εικόνες, που υπόκειται σε άλλου τύπου άδειας χρήσης, η άδεια χρήσης αναφέρεται ρητώς.



Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στα πλαίσια του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Αριστοτέλειο Πανεπιστήμιο Θεσσαλονίκης» έχει χρηματοδοτήσει μόνο τη αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗ

ΝΙΚΟΛΑΟΣ ΣΤΕΡΓΙΟΥΛΑΣ

ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ



5/10/2011

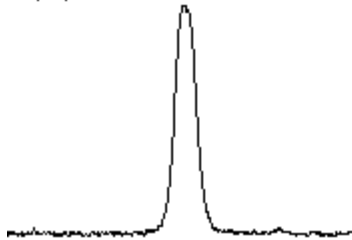
ΠΑΛΣΑΡ

- Οι πάλσαρ είναι περιστρεφόμενοι αστέρες νετρονίων που εκπέμπουν ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία με περιοδικό τρόπο. Η περιοδική εκπομπή γίνεται κυρίως στα ραδιοφωνικά κύματα, αλλά και στο υπόλοιπο φάσμα (ορατό, ακτίνες-Χ, ακτίνες-γ).
- Ο κάθε παλμός είναι διαφορετικός και συνήθως υπάρχουν και υποπαλμοί. Εάν ολοκληρώσουμε ένα μεγάλο αριθμό παλμών (>100) τότε το ολοκληρωμένο προφίλ είναι αναλλοίωτο στο χρόνο και χαρακτηρίζει με μοναδικό τρόπο έναν πάλσαρ.
- Η ονομασία ενός πάλσαρ βασίζεται στις ουρανογραφικές του συντεταγμένες.
- Η ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που ανιχνεύεται από πάλσαρ έχει έντονη πόλωση (μέχρι και 60% γραμμική) που υποδηλώνει την ύπαρξη έντονου μαγνητικού πεδίου. Πράγματι, εάν θεωρήσουμε διατήρηση της μαγνητικής ροής, $BR^2 = \text{σταθ.}$, κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης ενός άστρου τότε προκύπτει ένα μαγνητικό πεδίο της τάξης 10^{12} G.

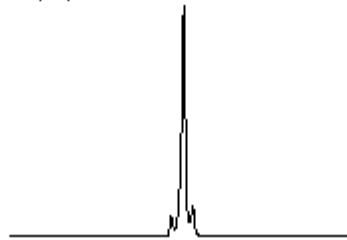
ΠΑΛΣΑΡ

- Ολοκληρωμένα προφίλ για διάφορους πάλσαρ:

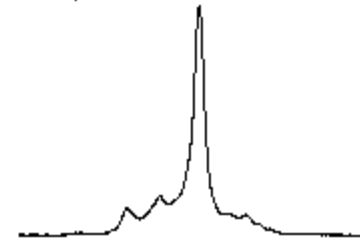
(a) B0031-07



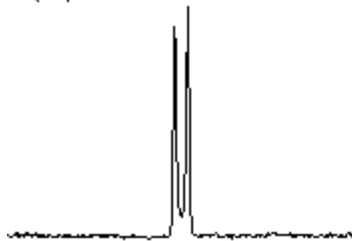
(b) B0329+54



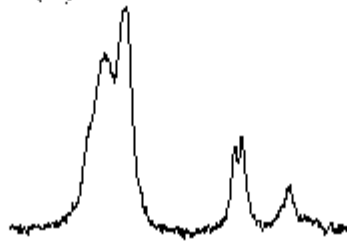
(c) J0437-4715



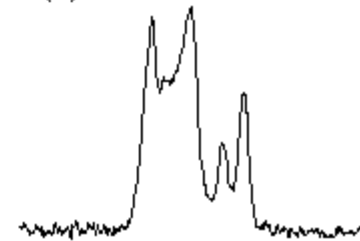
(d) B0525+21



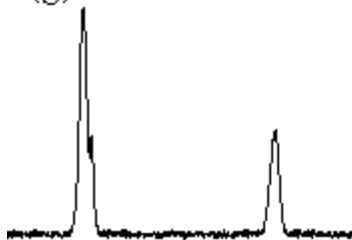
(e) J1012+5307



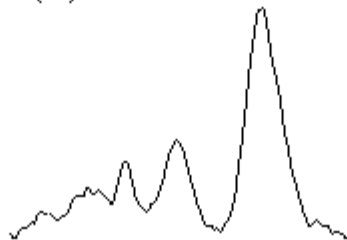
(f) B1831-04



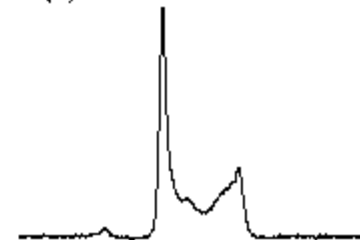
(g) B1937+21



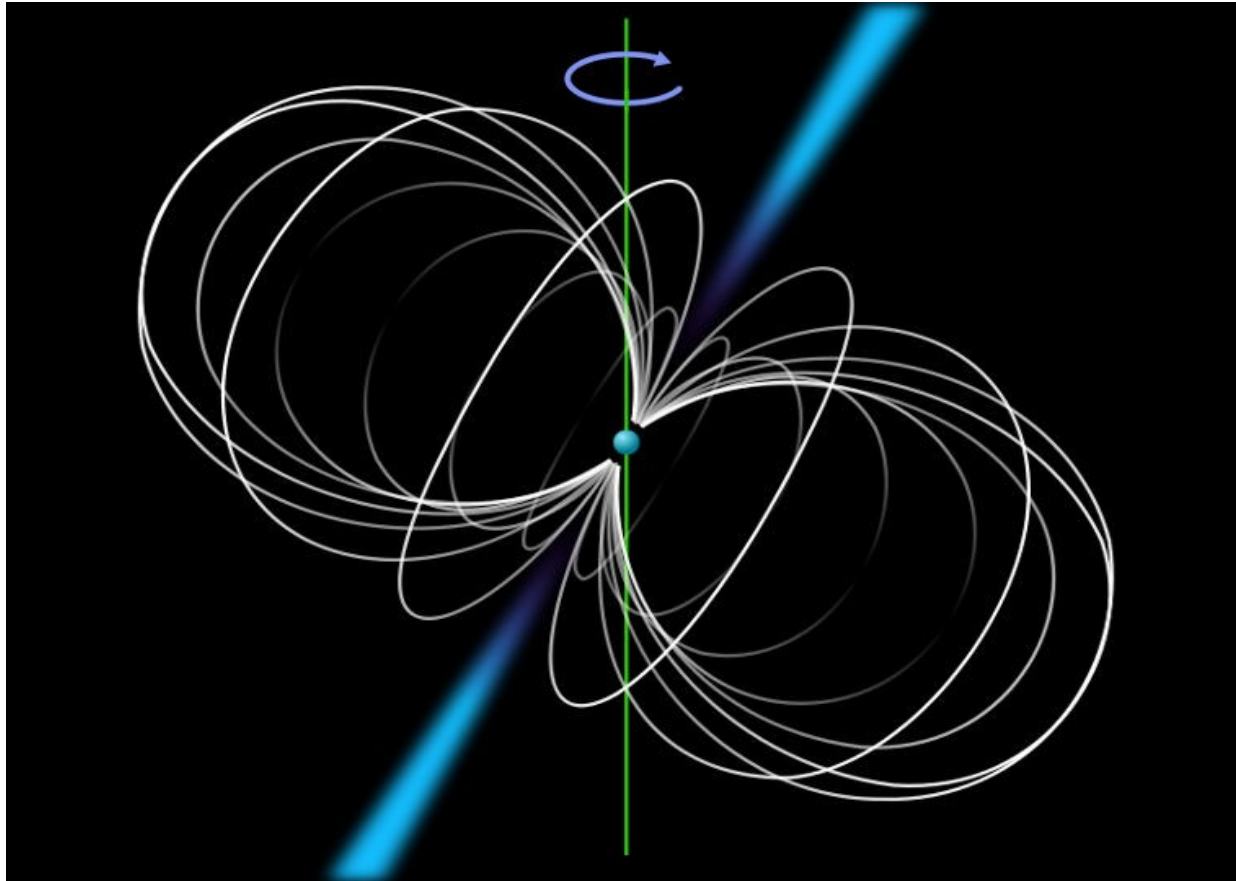
(h) J2124-3358



(i) J2145-0750



ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΚΕΝΟΥ



Εικόνα 1: Σχηματική αναπαράσταση πάλσαρ [1].

Υποθέτουμε ότι ο πάλσαρ είναι ένα μαγνητικό δίπολο, με μαγνητική διπολική ροπή \vec{m} , το διάνυσμα της οποίας σχηματίζει μια γωνία θ με τον άξονα περιστροφής του αστέρα, ο οποίος περιβάλλεται από κενό.

ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΚΕΝΟΥ

- Εάν B είναι η ένταση της μαγνητικής επαγωγής και R η ακτίνα του αστέρα, τότε το μέτρο της μαγνητικής διπολικής ροπής είναι

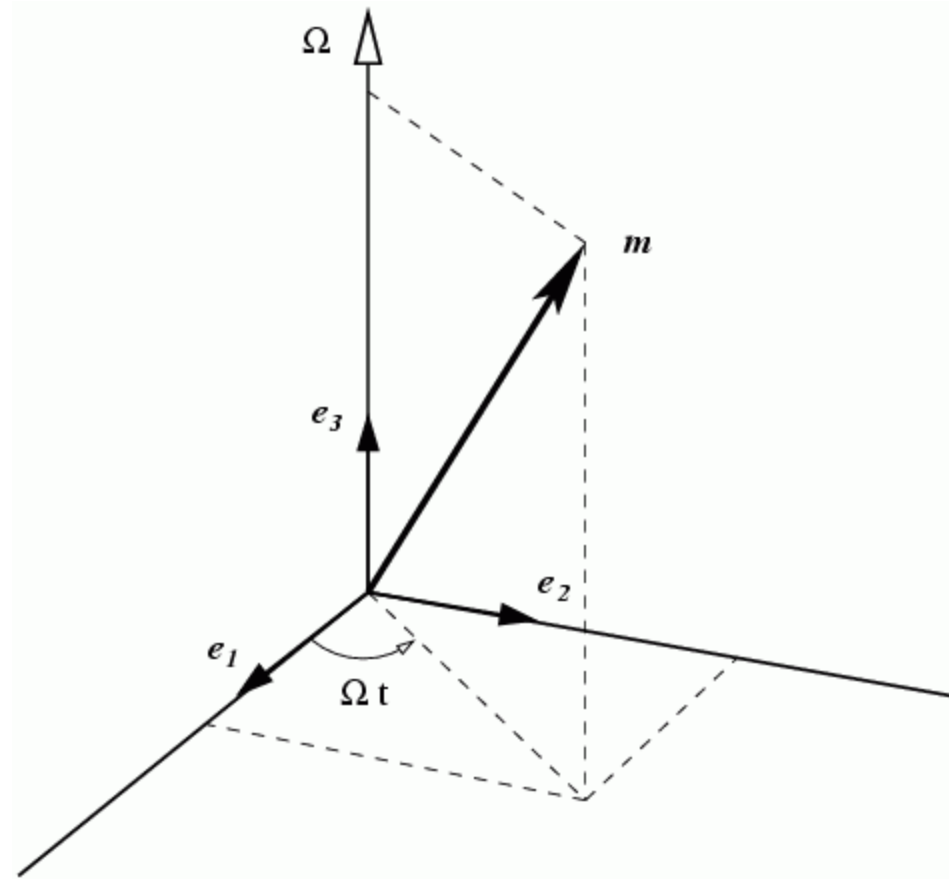
$$|\vec{m}| = \frac{1}{2} BR^3$$

- Ο ρυθμός με τον οποίο το μαγνητικό δίπολο ακτινοβολεί ενέργεια είναι

$$\dot{E} = -\frac{2|\ddot{\vec{m}}|^2}{3c^3}$$

(όπου κάθε τελεία είναι και μια χρονική παράγωγος). Με βάση τη γεωμετρία του διπλανού σχήματος βρίσκουμε ότι

$$\dot{E} = -\frac{1}{6c^3} B^2 R^6 \Omega^4 \sin^2 \theta$$



ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΠΟΜΠΗΣ ΚΕΝΟΥ

- Εάν υποθέσουμε πως η εκπομπή ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας προέρχεται εξ' ολοκλήρου από την απώλεια κινητικής ενέργειας περιστροφής, τότε οι δυο ρυθμοί ταυτίζονται:

$$\dot{E} = \dot{E}_{\text{κιν}}$$

$$\Rightarrow -\frac{1}{6c^3} B^2 R^6 \Omega^4 \sin^2 \theta = I \Omega \dot{\Omega}$$

όπου I είναι η ροπή αδράνειας του αστέρα. Με $\Omega=2\pi/P$ (όπου πλέον εδώ P είναι η περίοδος του αστέρα), βρίσκουμε

$$B = \frac{\sqrt{6c^3 I}}{2\pi R^3 \sin \theta} \sqrt{P \dot{P}}$$

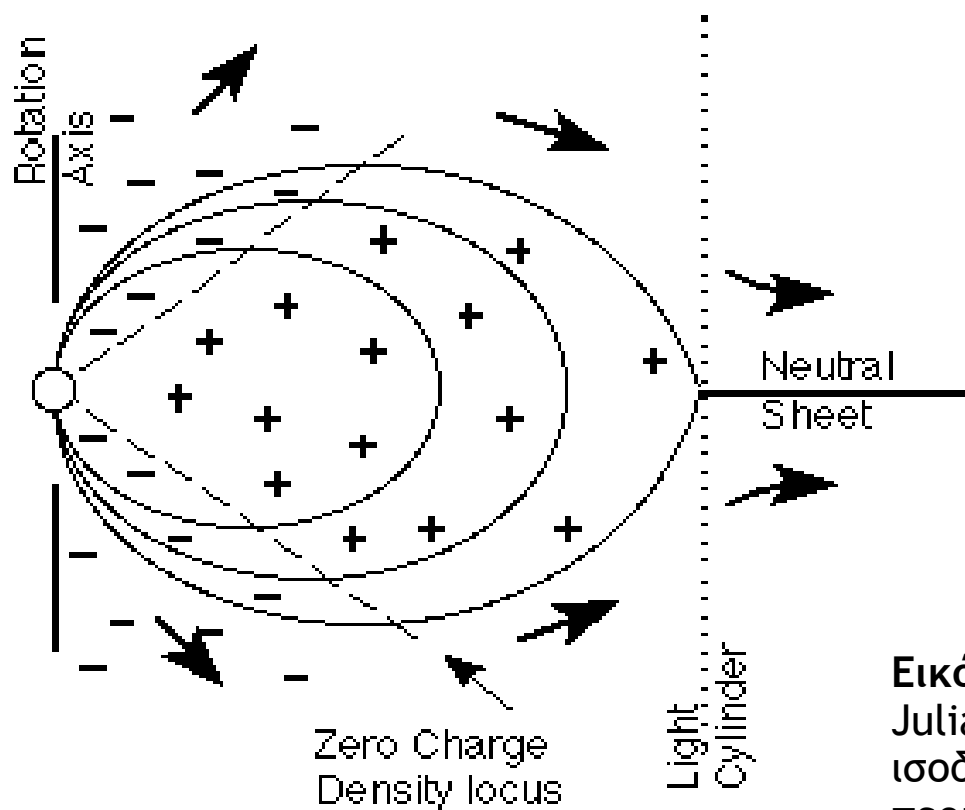
Για έναν τυπικό αστέρα νετρονίων, με $R \sim 10$ km και $I \sim 10^{45}$ gcm²

$$B = 6.4 \times 10^{19} \sqrt{P \dot{P}} \text{ G}$$

όπου θέσαμε ενδεικτικά $\theta = 90^\circ$ και η περίοδος είναι σε δευτερόλεπτα.

ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΠΟΜΠΗΣ GOLDREICH-JULIAN

Οι Goldreich και Julian έδειξαν ότι το προηγούμενο μοντέλο εκπομπής κενού δεν ευσταθεί, διότι το περιστρεφόμενο μαγνητικό πεδίο δημιουργεί ένα ισχυρό ηλεκτρικό πεδίο, το οποίο “ξεριζώνει” ηλεκτρικά φορτία από την επιφάνεια του αστέρα και δημιουργεί μια μαγνητόσφαιρα, η οποία περιστρέφεται (μέχρι μια απόσταση) ως στερεό σώμα μαζί με τον αστέρα.



Εικόνα 2: Μοντέλο Εκπομπής Goldreich - Julian (οι μαγνητικές γραμμές είναι ισοδυναμικές). Η κατανομή φορτίων περιστρέφεται μαζί με τον αστέρα ως στερεό σώμα [2].

ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΠΟΜΠΗΣ GOLDREICH-JULIAN

- Στη μαγνητόσφαιρα η αγωγιμότητα είναι τόσο μεγάλη που μπορεί να θεωρηθεί πρακτικώς άπειρη, $\sigma \rightarrow \infty$. Ο νόμος του Ohm είναι

$$\vec{J} = \sigma \vec{E}'$$

όπου \vec{J} είναι το ηλεκτρικό ρεύμα και $\vec{E}' = \vec{E} + \vec{v} \times \vec{B}$ είναι το ηλεκτρικό πεδίο σε ένα αδρανειακό σύστημα αναφοράς. Για ομογενή περιστροφή, η ταχύτητα της μαγνητόσφαιρας είναι

$$\vec{v} = \vec{\Omega} \times \vec{r}$$

Για να είναι το ηλεκτρικό ρεύμα πεπερασμένο καθώς $\sigma \rightarrow \infty$, θα πρέπει:

$$\vec{E}' \rightarrow 0 \Rightarrow \vec{E} = -\vec{v} \times \vec{B}$$

Το στάσιμο ηλεκτρικό πεδίο στο περιστρεφόμενο σύστημα αναφοράς δίνεται από ένα ηλεκτρικό δυναμικό:

$$\vec{E} = \nabla \Phi_e$$

ενώ σχετίζεται με την πυκνότητα φορτίων ρ_e μέσω της $\nabla \cdot \vec{E} = 4\pi\rho_e$

ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΠΟΜΠΗΣ GOLDREICH-JULIAN

- Στη μαγνητόσφαιρα τελικά αναπτύσσεται μια πυκνότητα ηλεκτρικών φορτίων

$$\rho_e = -\frac{\vec{\Omega} \cdot \vec{B}}{2\pi c}$$

το πρόσημο της οποίας αλλάζει όπου μηδενίζεται το δυναμικό Φ_e . Στην πράξη, το δυναμικό έχει τετραπολική δομή κι έτσι εάν υπάρχουν αρνητικά ηλεκτρικά φορτία στους πόλους, τότε έχουμε θετικά φορτία στον ισημερινό (βλ. προηγούμενο σχήμα).

Η αντίστοιχη αριθμητική πυκνότητα φορτίων στην επιφάνεια είναι

$$n_e \approx 7 \times 10^{10} \frac{B_{12}}{P} \text{ cm}^{-3}$$

όπου $B_{12} = B/(10^{12} \text{ G})$. Το ηλεκτρικό πεδίο που αναπτύσσεται στην επιφάνεια (παράλληλα προς τις μαγνητικές γραμμές) είναι

$$E \sim \frac{\Omega R B}{c} \sim 2 \times 10^8 \frac{B_{12}}{P} \text{ V/m}$$

ΜΟΝΤΕΛΟ ΕΚΠΟΜΠΗΣ GOLDREICH-JULIAN

- Έτσι, π.χ. για πρωτόνια:

$$\frac{\text{ηλεκτρική δύναμη}}{\text{βαρυτική δύναμη}} \sim \frac{eE}{GMm_p / R^2} \sim 10^9$$

και η τεράστια αυτή δύναμη γεμίζει τον περιβάλλοντα χώρο με ηλεκτρικά φορτία, δημιουργώντας τη μαγνητόσφαιρα. Η μαγνητόσφαιρα μπορεί και περιστρέφεται με την ίδια γωνιακή ταχύτητα όπως ο αστέρας μέχρι την απόσταση

$$R_L = \frac{c}{\Omega} = 5 \times 10^9 P \text{ cm}$$

η οποία ορίζει τον κύλινδρο φωτός, πέρα από τον οποίο η γραμμική ταχύτητα περιστροφής θα ξεπερνούσε την ταχύτητα του φωτός. Μαγνητικές γραμμές που εξέρχονται με γωνία μικρότερη από

$$\theta_p \sim \sqrt{\frac{R}{R_L}}$$

κοντά στους μαγνητικούς πόλους, δε μπορούν να κλείσουν εντός της μαγνητόσφαιρας, αλλά είναι ανοικτές μαγνητικές γραμμές.

ΠΑΡΑΓΩΓΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ

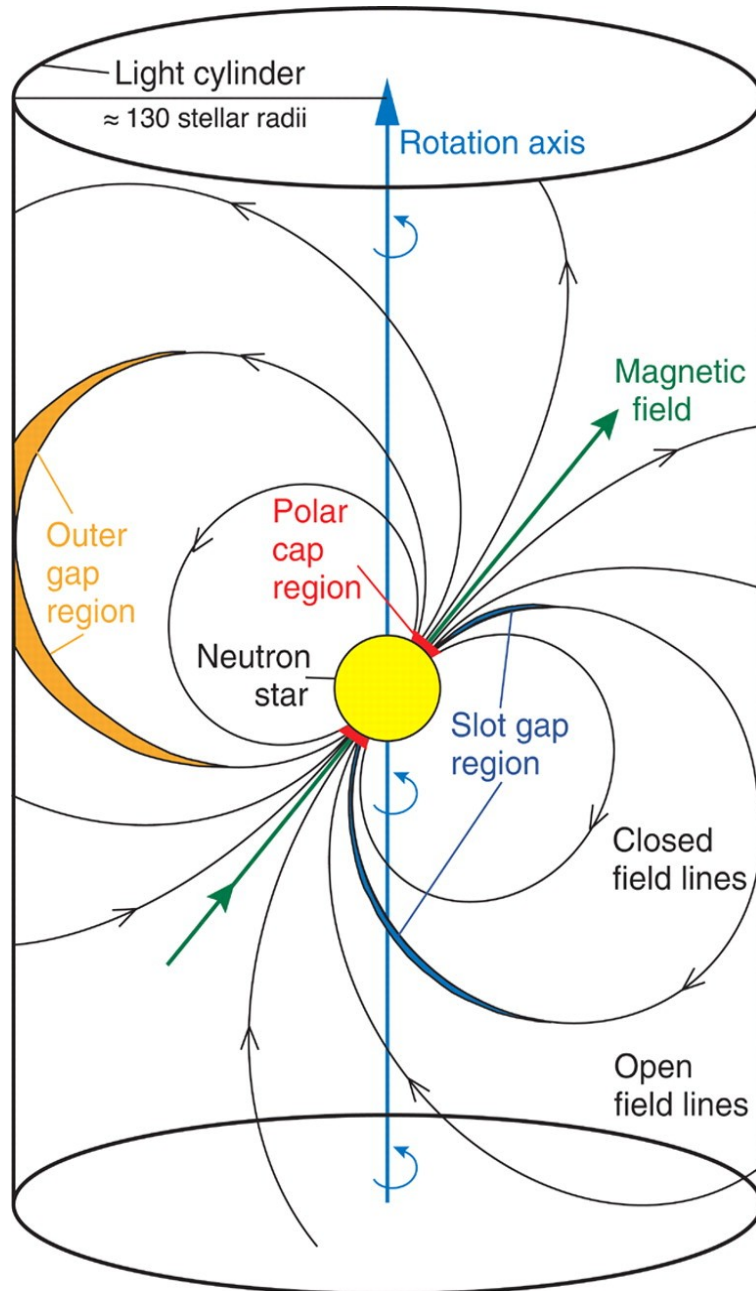
Υπάρχουν διάφοροι μηχανισμοί παραγωγής ακτινοβολίας σε διάφορα μήκη κύματος, οι οποίοι εντοπίζονται σε διαφορετικές περιοχές της μαγνητόσφαιρας.

Ο κύριος τρόπος παραγωγής ακτινοβολίας- γ είναι μέσω αρχικά της επιτάχυνσης σωματιδίων κατά μήκος των μαγνητικών γραμμών και στη συνέχεια μέσω διάσπασης των παραγόμενων φωτονίων γ σε ζεύγη ηλεκτρονίων-ποζιτρονίων, τα οποία με τη σειρά τους επιταχύνονται κ.ο.κ.

Εξετάζονται κυρίως δύο περιοχές όπου θα μπορούσε να συμβεί αυτό:

- α) η περιοχή ακριβώς πάνω από τους μαγνητικούς πόλους (polar cap model)
- β) η περιοχή όπου οι τελευταίες κλειστές μαγνητικές γραμμές “ακουμπούν” στον κύλινδρο φωτός (outer gap model).

ΚΥΛΙΝΔΡΟΣ ΦΩΤΟΣ



Εικόνα 3: Ηλεκτρόνια παγιδεύονται και επιταχύνονται κατά μήκος των μαγνητικών γραμμών του Πάλσαρ, εκπέμποντας H/M ακτινοβολία.

Φαίνονται οι δύο περιοχές όπου τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται σε πολύ υψηλές ενέργειες (polar cap region, outer gap region) [3].

ΠΗΓΕΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

1. Pulsar Schematic

Author: Mysid (user)

Licence: Creative Commons Attribution-Share Alike 3.0 Unported

2. Goldreich - Julian Model (figure 2),

F. Curtis Michel: How Pulsars Really (perhaps) Work (maybe),

Rice University Houston, Texas

<http://psr.rice.edu/hpw.html>

3. A sketch of the Crab pulsar's magnetosphere,

Observation of Pulsed γ -Rays Above 25 GeV from the Crab Pulsar with MAGIC,

The MAGIC Collaboration,

<http://arxiv.org/ftp/arxiv/papers/0809/0809.2998.pdf>



Τέλος Ενότητας

Επεξεργασία: Νικόλαος Τρυφωνίδης
Θεσσαλονίκη, 31 Μαρτίου 2014



Ευρωπαϊκή Ένωση
Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο



ΥΠΟΥΡΓΕΙΟ ΠΑΙΔΕΙΑΣ & ΘΡΗΣΚΕΥΜΑΤΩΝ, ΠΟΛΙΤΙΣΜΟΥ & ΑΘΛΗΤΙΣΜΟΥ
ΕΙΔΙΚΗ ΥΠΗΡΕΣΙΑ ΔΙΑΧΕΙΡΙΣΗΣ

Με τη συγχρηματοδότηση της Ελλάδας και της Ευρωπαϊκής Ένωσης



ΕΣΠΑ
2007-2013
πρόγραμμα για την ανάπτυξη
ΕΥΡΩΠΑΪΚΟ ΚΟΙΝΩΝΙΚΟ ΤΑΜΕΙΟ

