

# ΑΣΤΕΡΕΣ ΝΕΤΡΟΝΙΩΝ

ΕΚΠΟΜΠΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΓΑΜΜΑ



ΑΡΙΣΤΟΤΕΛΕΙΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΘΕΣΣΑΛΟΝΙΚΗΣ  
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΤΟΜΕΑΣ ΠΥΡΗΝΙΚΗΣ ΦΥΣΙΚΗΣ ΚΑΙ ΣΤΟΙΧΕΙΩΔΩΝ ΣΩΜΑΤΙΔΙΩΝ

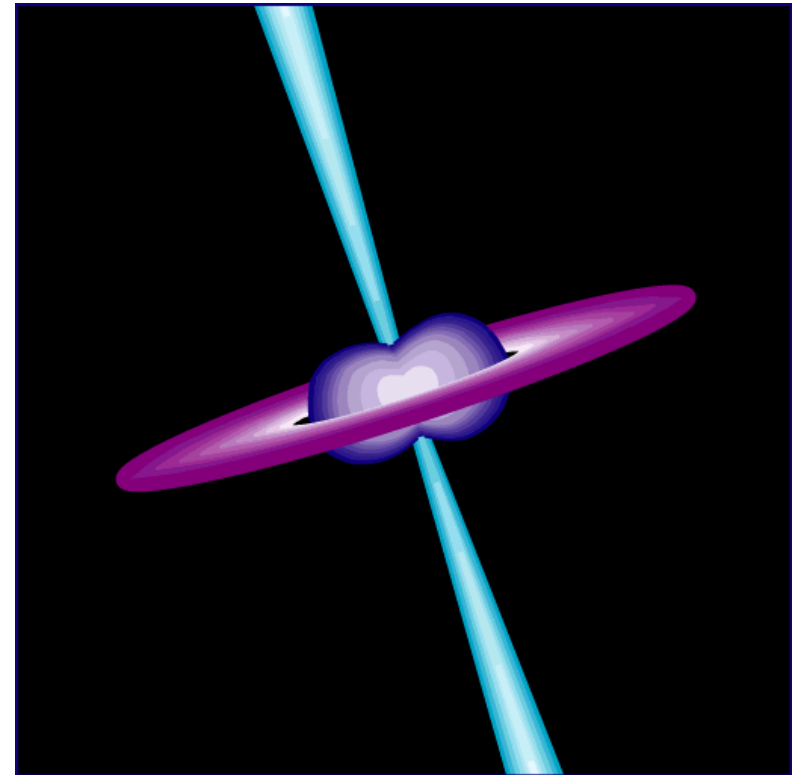
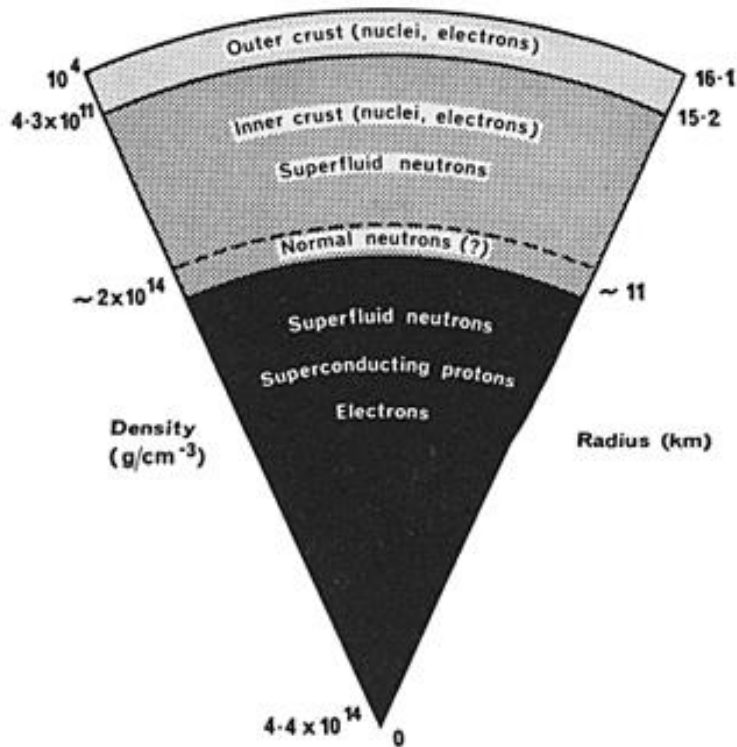
Ατρείδης Γιώργος  
Δρ Αστροσωματιδιακής φυσικής

# Αστέρες νετρονίων - Pulsars

## Pulsars

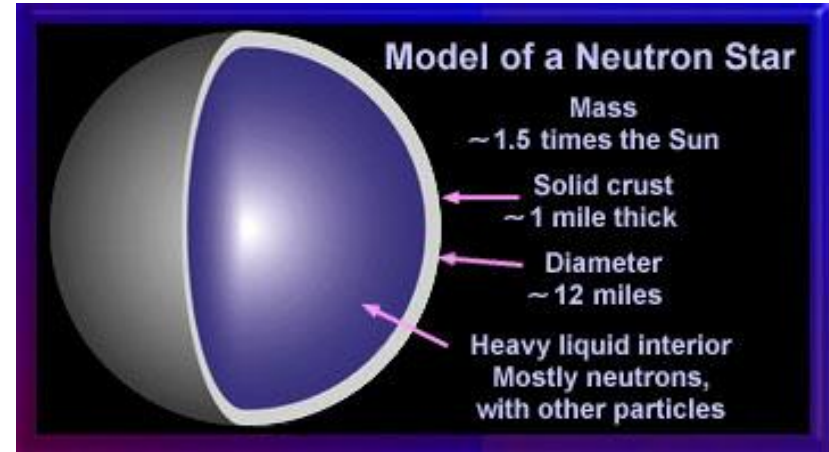
Δομή ενός αστέρα νετρονίων

Ανακαλύφθηκαν από την  
Jocelyn Bell το 1967



# Γενικά στοιχεία

- Εναπομείναντας πυρήνας από supernova τύπου II.
- Μια πολύ πυκνή σφαίρα νετρονίων.
- Διάμετρος 20 Km
- Μάζα 1,4 - 3 της μάζας του Ήλιου.
- Πυκνότητα τάξης  $10^{14}$  g/cm<sup>3</sup>.
- Επιφανειακή βαρύτητα  $10^{12}$  φορές υψηλότερη της Γης.
- Ταχύτητα διαφυγής 0,6c.
- Υψηλές συχνότητες περιστροφής.
- Μαγνητικό πεδίο  $10^{14}$  φορές μεγαλύτερο της Γης.

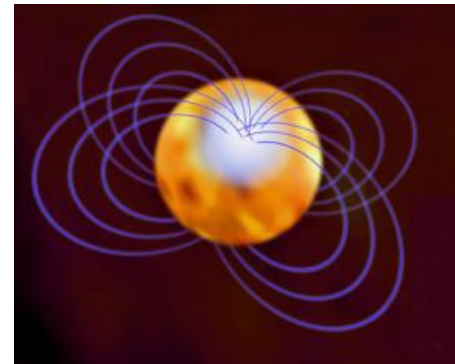
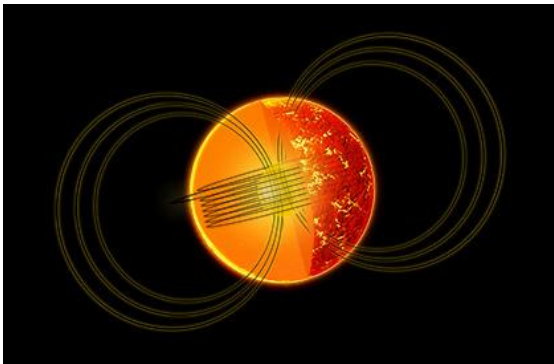


# Πολύ μεγάλες πυκνότητες

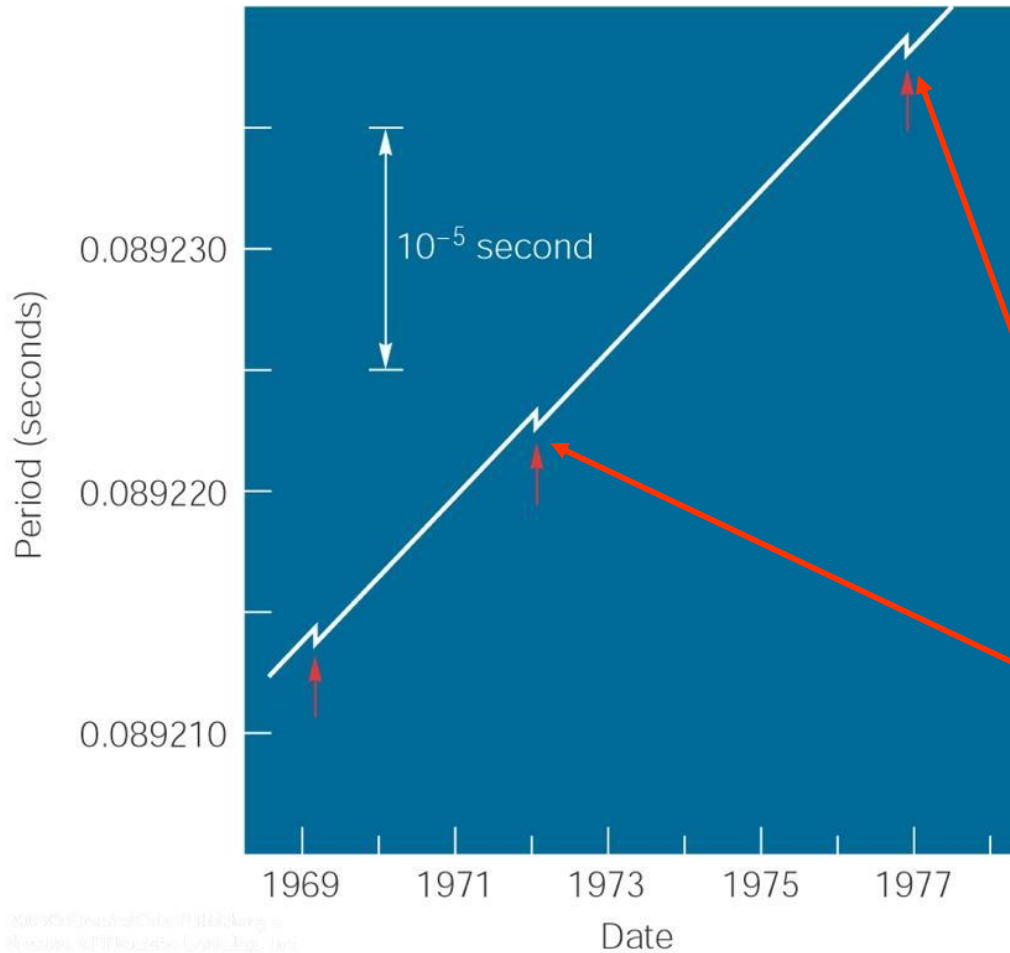
- Για να υπάρχει ένας περιστρεφόμενος αστέρας πρέπει η βαρυτική δύναμη στην επιφάνειά του να υπερβαίνει την κεντρομόλο δύναμη.

$$G \frac{Mm}{r^2} > m\omega^2 r \Rightarrow G \frac{M}{r^3} > \frac{4\pi^2 v = \frac{4}{3}\pi r^3}{T^2} \rightarrow G \frac{4\pi M}{3 V} > \frac{4\pi^2 \rho = \frac{M}{V}}{T^2} \rightarrow \rho > \frac{3\pi}{GT^2}$$

- Για τον pulsar crab η περίοδος είναι  $T=33\text{ms}$  επομένως η πυκνότητα πρέπει να είναι μεγαλύτερη από  $1,3 \times 10^{11} \text{ g/cm}^3$ .



# Περίοδοι των pulsar



- Με τον καιρό οι Pulsars χάνουν ενέργεια και στροφορμή
- Η περιστροφή τους σταδιακά επιβραδύνεται με ρυθμό  
 $dT/dt \sim 10^{-15}$
- Ασυνέχειες στην περίοδο

$$dT/T \sim 10^{-7} - 10^{-8}$$

# Περιστροφή ενός αστέρα νετρονίων

- Η στροφορμή του αστέρα είναι  $L = I\omega = \frac{2}{5}MR^2 2\pi\nu = \frac{4}{5}\pi MR^2\nu$
- Όπου  $M$  είναι η μάζα,  $R$  η ακτίνα και  $\nu$  η συχνότητα περιστροφής του αστέρα.
- Έστω ένας Ήλιος που περιστρέφεται με ρυθμό  $1/25$  days και έχει ακτίνα  $7 \times 10^8$  m. Αν αυτός καταρρεύσει σε έναν αστέρα νετρονίων ακτίνας  $12$  Km, τότε εφαρμόζοντας τη διατήρηση της στροφορμής βρίσκουμε τη συχνότητα περιστροφής του.

$$L_{Sun} = L_{Star} \Rightarrow \frac{4}{5}\pi MR_{Sun}^2 \nu_{Sun} = \frac{4}{5}\pi MR_{Star}^2 \nu_{Star}$$

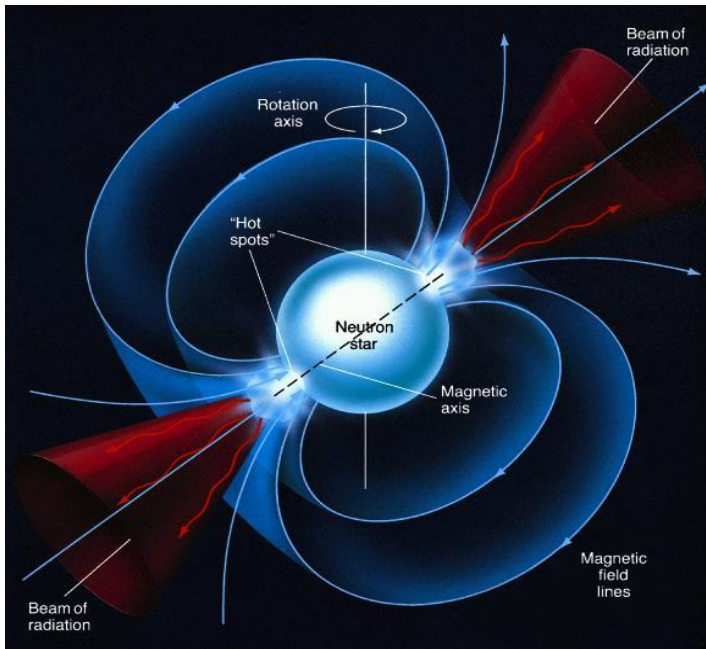
$$\nu_{Star} = \frac{R_{Sun}^2}{R_{Star}^2} \nu_{Sun} = 1.6 \times 10^5 \text{ s}^{-1}$$

- Αυτή είναι μεγαλύτερη από οποιαδήποτε συχνότητα αστέρα νετρονίων.
- Δηλαδή ένα τμήμα της μάζας και της στροφορμής χάνονται κατά την κατάρρευση του αστέρα.

# Μαγνητικό πεδίο

- Όταν ένα αστέρι ηλιακού τύπου καταρρέει για να δημιουργηθεί ένας αστέρας νετρονίων από τη διατήρηση της μαγνητικής ροής παίρνουμε.

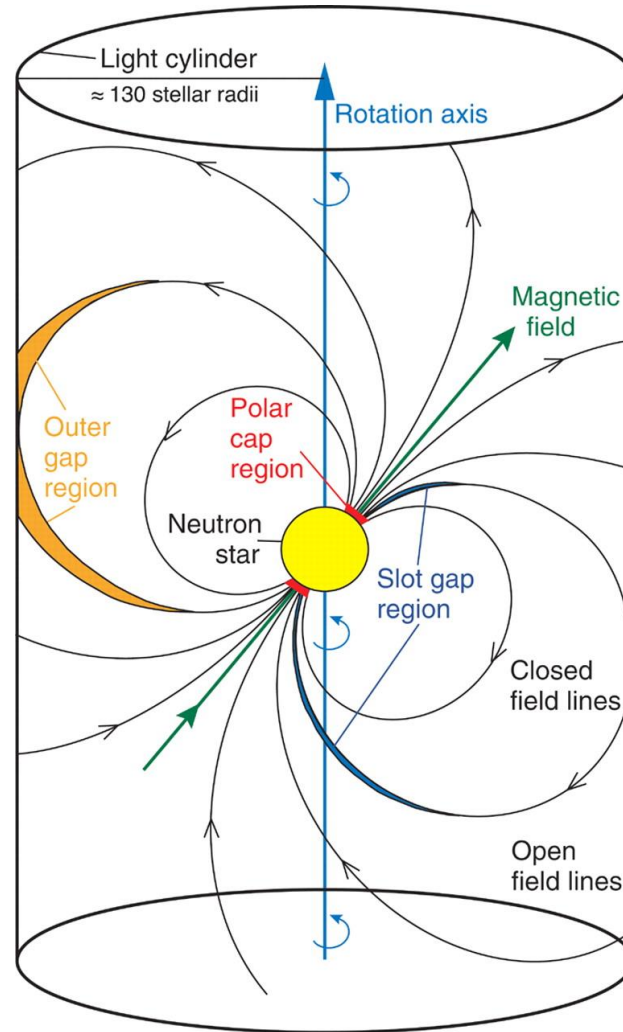
$$R_{Sun}^2 B_{Sun} = R_{Star}^2 B_{Star} \Rightarrow \frac{B_{Star}}{B_{Sun}} = \frac{R_{Sun}^2}{R_{Star}^2} \Rightarrow \frac{B_{Star}}{B_{Sun}} = \left( \frac{7 \times 10^{10}}{10^6} \right)^2 = 5 \times 10^9$$



- Αν πάρουμε για τον Ήλιο  $B_{sun}=100$  G, ο αστέρας νετρονίων θα είχε ένα πεδίο της τάξης  $10^{11} - 10^{12}$  G.
- Από τη μεταβολή του μαγνητικού πεδίου δημιουργείται ηλεκτρικό πεδίο στο εξωτερικό του αστέρα νετρονίων.

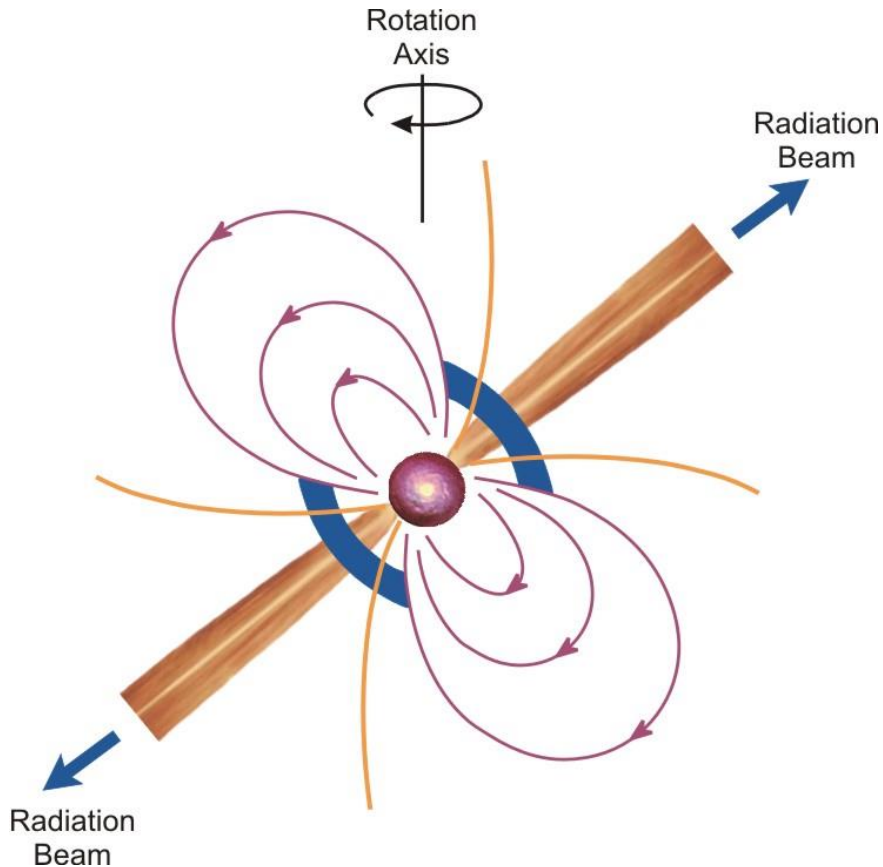


# Η μαγνητόσφαιρα του crab pulsar



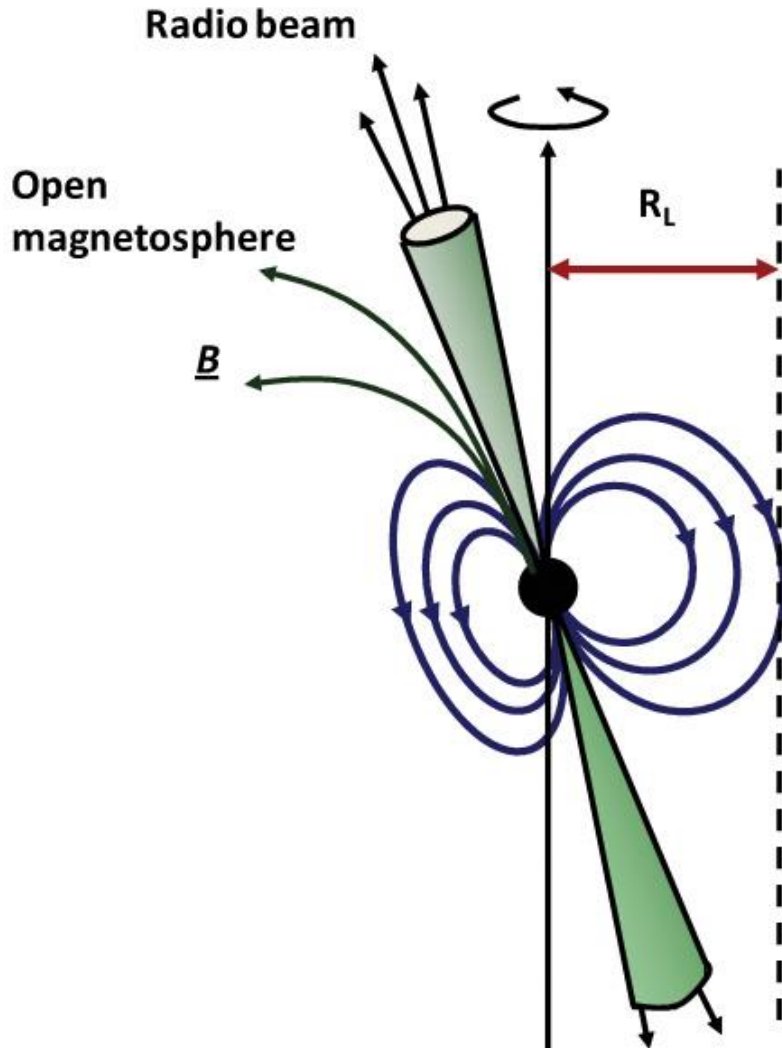


# Εκπομπή ακτινοβολίας



- Η ακτινοβολία προέρχεται από την περιοχή των μαγνητικών πόλων
- Η κωνική δέσμη ακτινοβολίας του κάθε πόλου του pulsar σαρώνει έναν κοίλο κώνο με κορυφή τον pulsar
- Αν η Γη τυχαίνει να βρίσκεται στο εσωτερικό του κοίλου κώνου, τότε σε κάθε περίοδο περιστροφής του αστέρα παρατηρούμε έναν παλμό ακτινοβολίας η διάρκεια του οποίου είναι ανάλογη προς το εύρος της κωνικής δέσμης

# Κύλινδρος φωτός

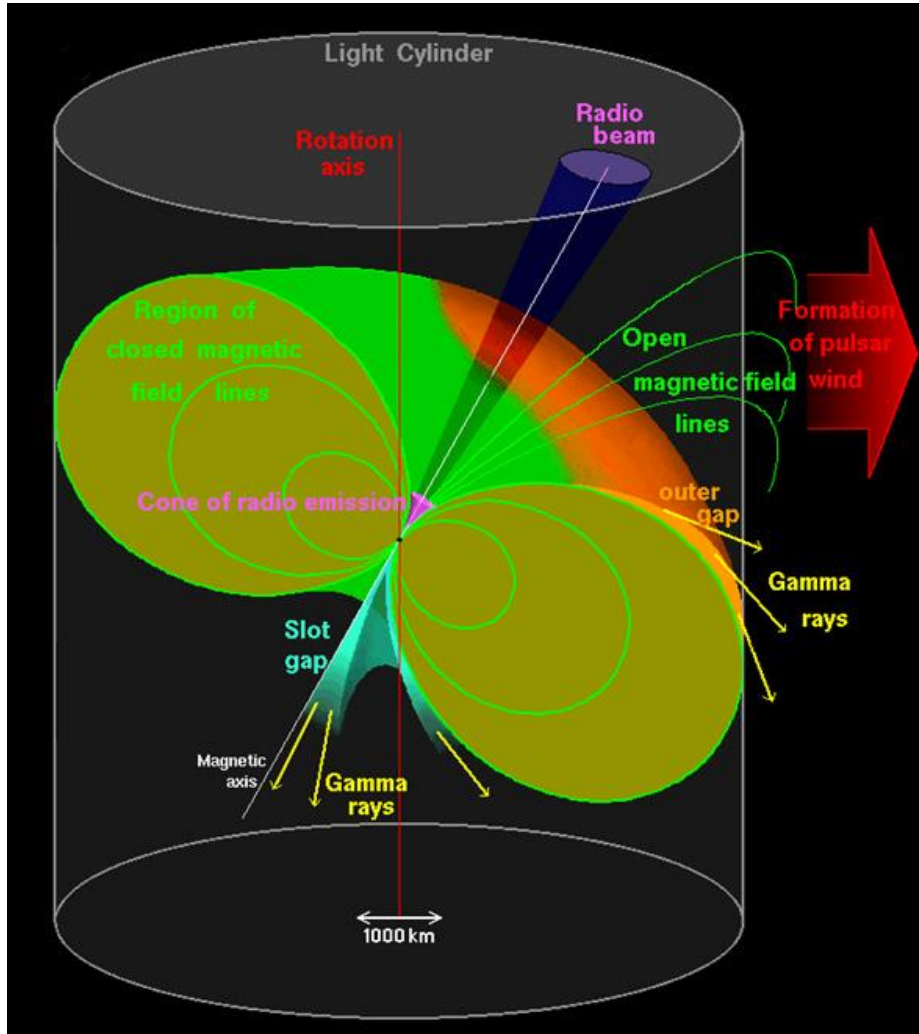


Light cylinder

$$c = \frac{2\pi R_L}{T} \Rightarrow R_L = \frac{c}{\Omega}$$

- Οι γραμμές του μαγνητικού πεδίου μέσα στον κύλινδρο φωτός είναι κλειστές, ενώ αυτές που περνούν από έξω είναι ανοιχτές.
- Τα σωματίδια ρέουν κατά μήκος των ανοιχτών γραμμών.

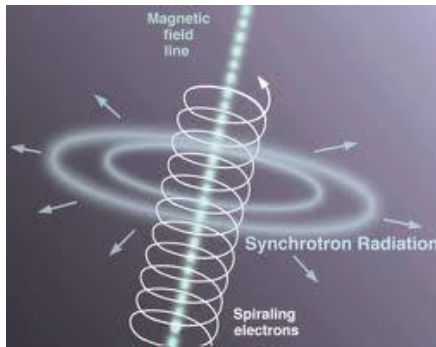
# Σχηματική παράσταση



- Άξονας περιστροφής διαφορετικός από τον μαγνητικό άξονα.
- Ανοιχτές και κλειστές μαγνητικές γραμμές.
- Κώνος εκπομπής ακτινοβολίας.
- Εκπομπή ακτινοβολίας από ραδιοκύματα μέχρι ακτινοβολία γάμμα.
- Εκπομπή ακτινοβολίας από τους πόλους και από το εξωτερικό τμήμα.

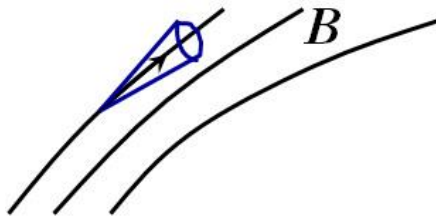
# Διαδικασίες εκπομπής ακτινοβολίας

Τρόποι εκπομπής ακτινοβολίας γάμμα στο μαγνητικό πεδίο του αστέρα νετρονίων.



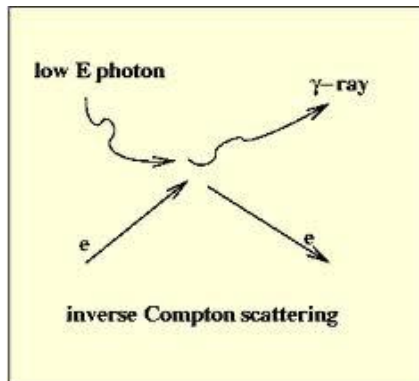
## ➤ Ακτινοβολία synchrotron

- Σχετικιστικά σωματίδια  $e^\pm$  που κινούνται σε ελικοειδή τροχιά μέσα σε μαγνητικό πεδίο εκπέμπουν ακτινοβολία synchrotron.



## ➤ Curvature radiation

- Σε ένα πολύ ισχυρό μαγνητικό πεδίο, τα ηλεκτρόνια ακολουθούν τις μαγνητικές γραμμές πολύ κοντά σε μία γωνία περίπου  $0^\circ$ .

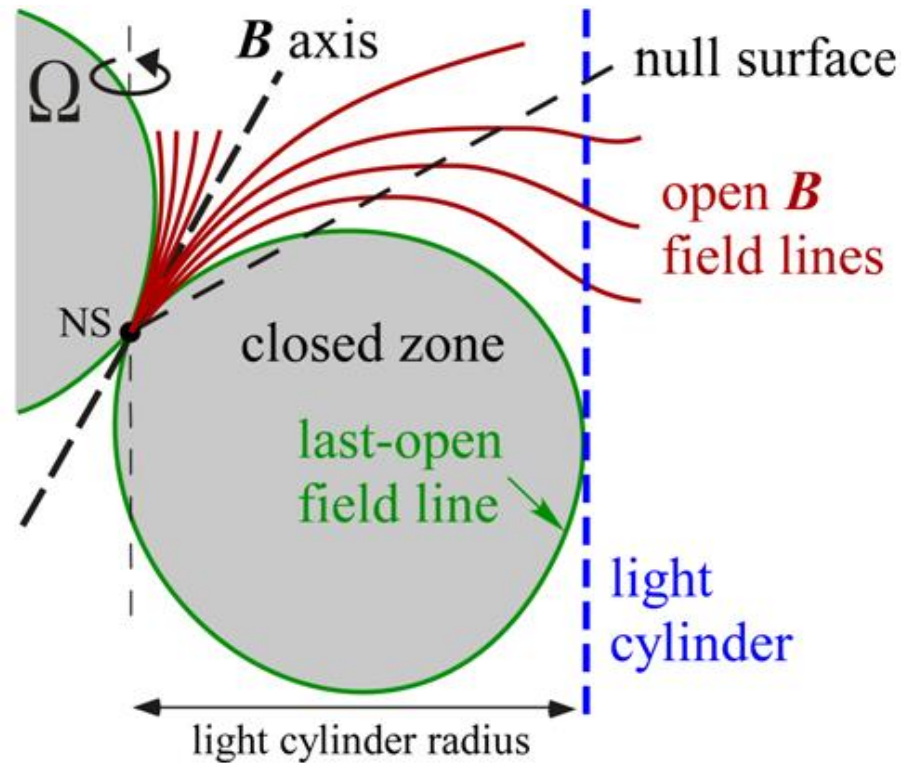


## ➤ Αντίστροφο φαινόμενο Compton

- Σύγκρουση φωτονίων χαμηλής ενέργειας με ηλεκτρόνια υψηλής ενέργειας. Έτσι τα φωτόνια αυξάνουν την ενέργειά τους.

# Βασικός μηχανισμός εκπομπής

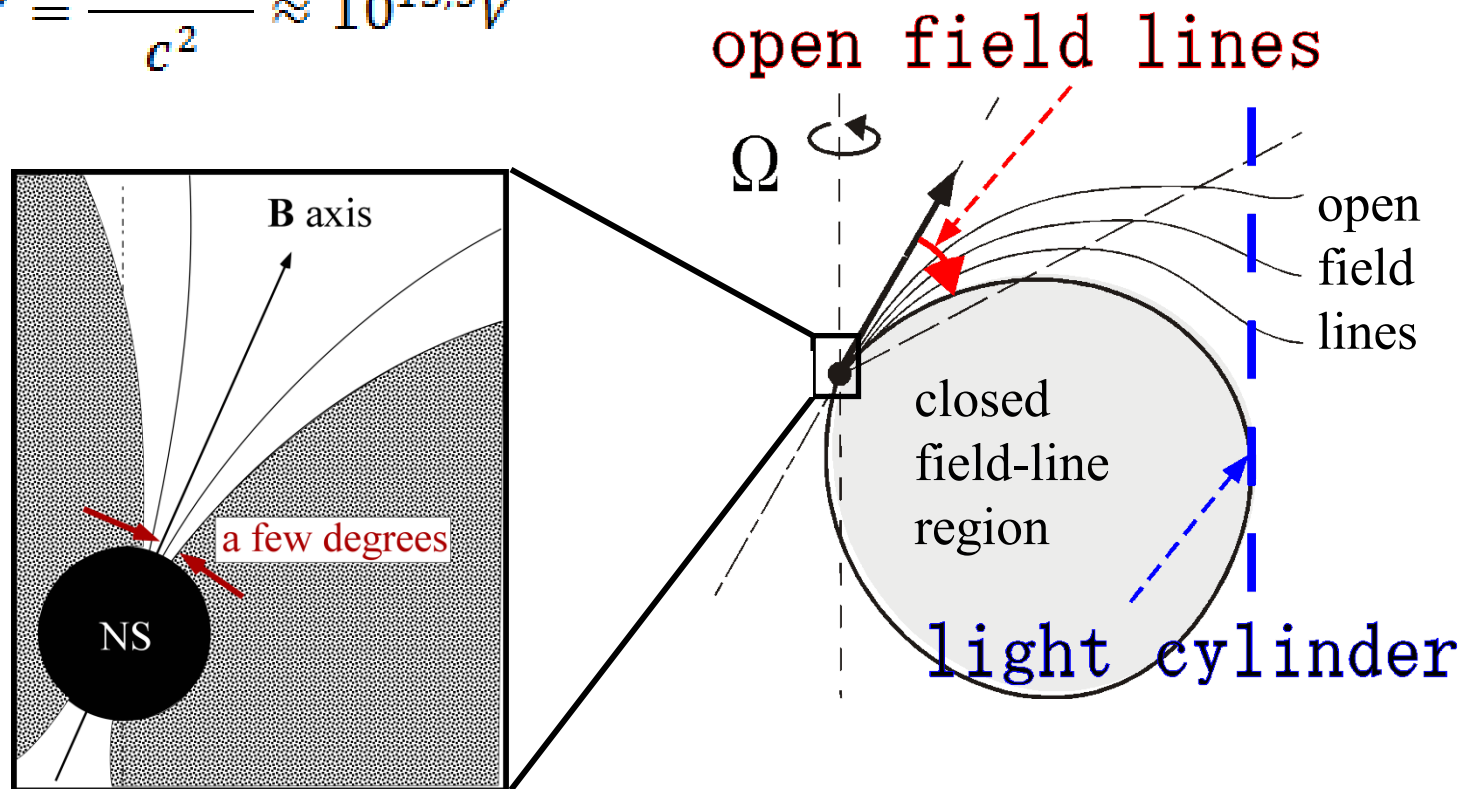
- Σε ένα περιστρεφόμενο αστέρα νετρονίων η μαγνητόσφαιρα μπορεί να χωριστεί σε ανοιχτές και κλειστές ζώνες.
- Οι τελευταίες ανοιχτές γραμμές του πεδίου καθορίζουν τα όρια.
- Στην ανοιχτή ζώνη τα  $e^\pm$  διαφεύγουν διαμέσω του κυλίνδρου φωτός σαν άνεμος του pulsar.
- Στην κλειστή ζώνη ένα πεδίο  $E_{\parallel}$  μπορεί να δημιουργηθεί πολύ γρήγορα από το πυκνό πλάσμα.
- Έτσι σε όλα τα μοντέλα εκπομπής, η επιτάχυνση των σωματιδίων γίνεται μέσα στην ανοιχτή ζώνη.



# Βασικός μηχανισμός εκπομπής

- Για τυπικούς Pulsars υψηλής ενέργειας, η ανοιχτή ζώνη εκτείνεται μόνο σε μερικές μοίρες από τον άξονα B στην επιφάνεια του αστέρα.
- Η διαθέσιμη διαφορά δυναμικού στην ανοιχτή ζώνη είναι

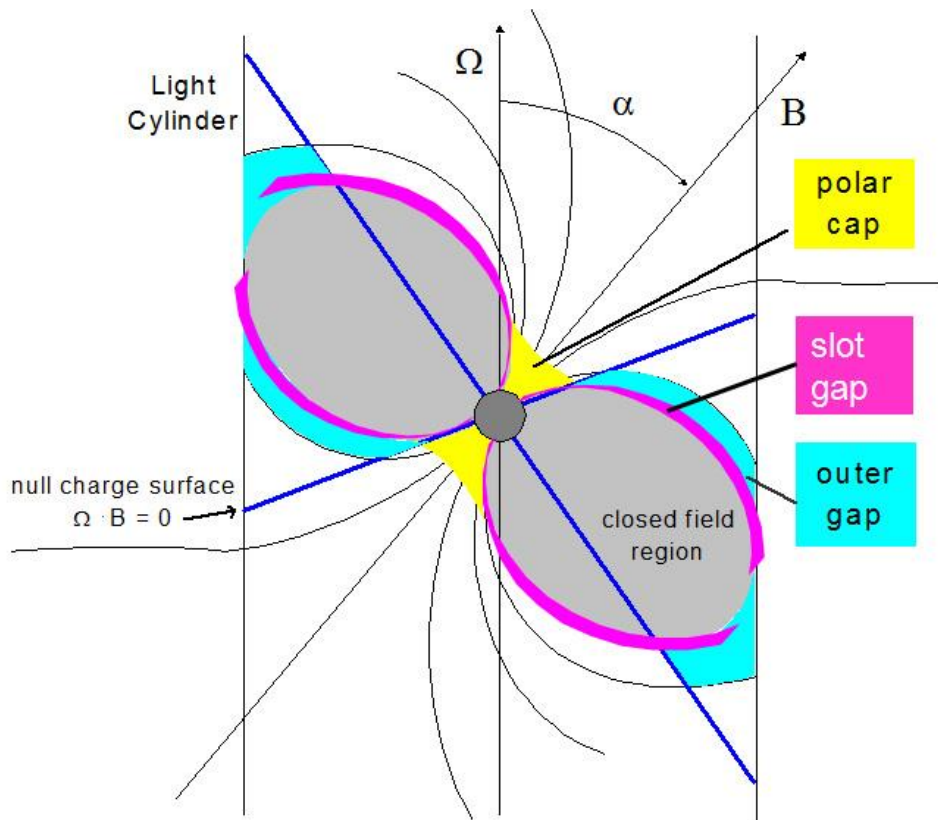
$$dV = \frac{\Omega^2 B r^3}{c^2} \approx 10^{15.5} V$$





# Διαδικασία επιτάχυνσης - εκπομπής

- Φυσικές διεργασίες που λαμβάνουν μέρος κατά την επιτάχυνση ζεύγους  $e^\pm$ .



Τα  $e^\pm$  επιταχύνονται από το  $E_{\parallel}$

Σχετικιστικά  $e^+/e^-$  εκπέμπουν ακτίνες  $\gamma$  με ακτινοβολία synchrotron, Curvature radiation και αντίστροφη σκέδαση Compton.

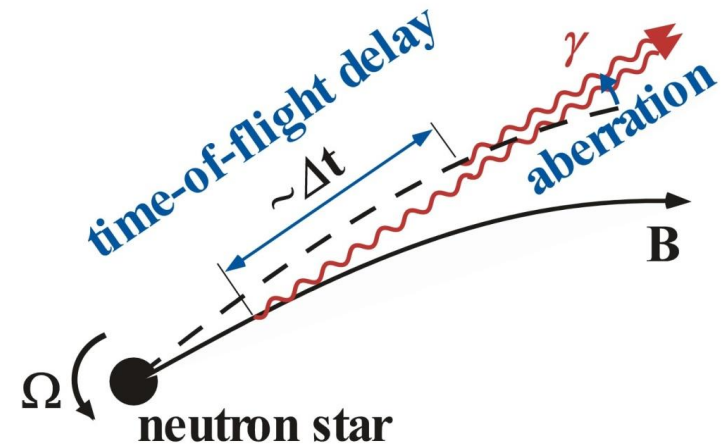
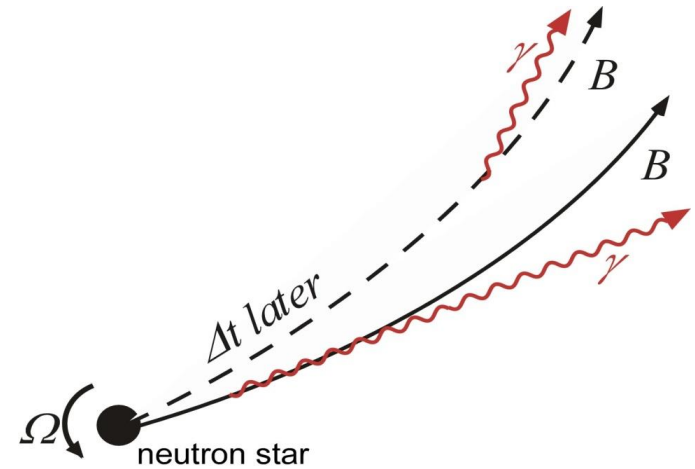
Οι ακτίνες  $\gamma$  συγκρούονται με φωτόνια μέσα στο μαγνητικό πεδίο και δημιουργούν ζεύγη  $e^\pm$ .



# Εξωτερική μαγνητόσφαιρα

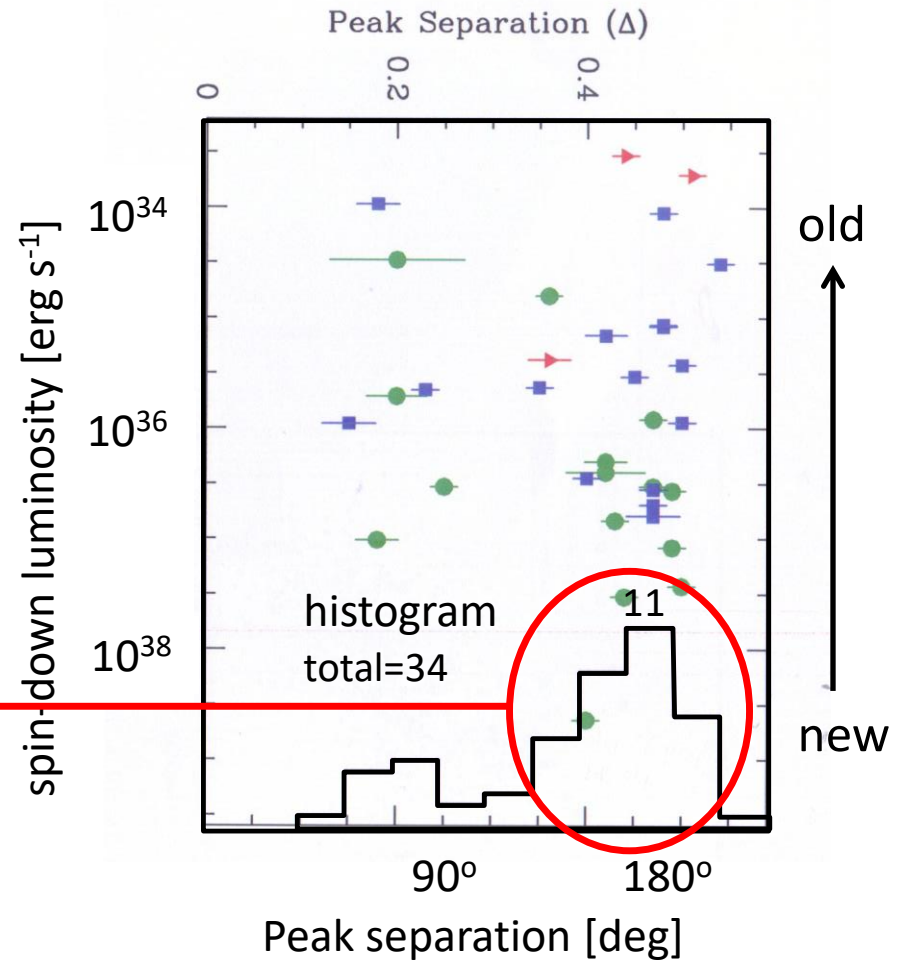
## Εκπομπή στην εξωτερική μαγνητόσφαιρα

- Στην πάνω πλευρά, εξαιτίας της διαφοράς φάσης (χρονική καθυστέρηση) τα φωτόνια εκπέμπονται σε διάφορα ύψη και με γωνιακό άνοιγμα πάνω από  $140^\circ$ .
- Στην πίσω πλευρά, τα φωτόνια εκπέμπονται νωρίτερα σε χαμηλότερα ύψη, φθάνουν αυτά που εκπέμπονται αργότερα σε ψηλότερα ύψη και επικεντρώνονται σε μια μικρή φάση εμβέλειας  $30^\circ$ , σχηματίζοντας περιοχές μεγάλης πυκνότητας.

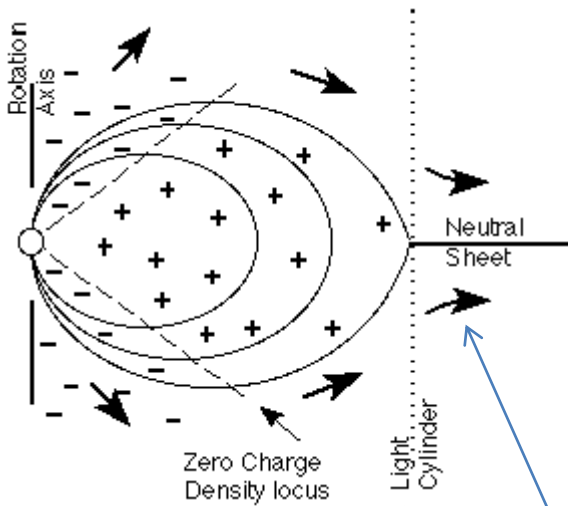


# Παρατηρήσεις ακτινοβολίας γάμμα

- Πολύ συχνά υπάρχουν παλμοί με δυο κορυφές.  
(34 μεταξύ 46 *LAT* pulsars)
- Ο διαχωρισμός των κορυφών είναι μεταξύ  $100^\circ$  and  $180^\circ$ .
- Ο διαχωρισμός των κορυφών είναι ανεξάρτητος από την ηλικία του pulsar.



# Μοντέλο aligned pulsar

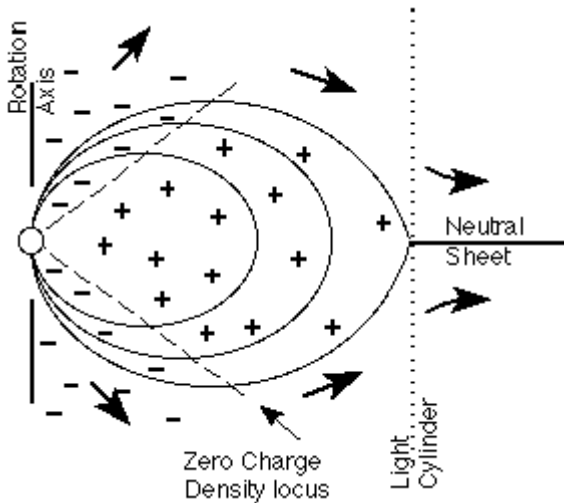


- Όριο της περιστροφής της μαγνητόσφαιρας.

$$R_L = c/\Omega$$

- Το απλοποιημένο αυτό μοντέλο δεν διαφέρει πολύ από την πραγματικότητα.
- Ο άξονας περιστροφής είναι παράλληλος με τον άξονα του μαγνητικού πεδίου.
- Οι μαγνητικές γραμμές παρασέρνονται με την ταχύτητα του φωτός.
- Οι μαγνητικές γραμμές που τέμνουν τον κύλινδρο φωτός δεν επιστρέφουν στην επιφάνεια του αστέρα (open field lines).

# Μοντέλο aligned pulsar

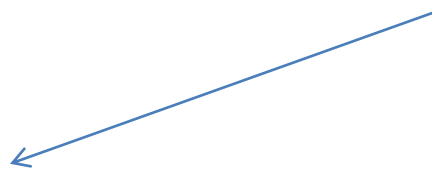


- Από το νόμο του Ohm σε εξωτερικό μαγνητικό πεδίο παίρνουμε.

$$\mathbf{J} = \sigma(\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B})$$

- Για να είναι η αγωγιμότητα ( $\sigma$ ) άπειρη πρέπει.

$$\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B} = 0$$



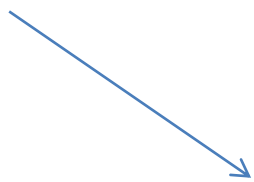
- Και καταλήγουμε στη σχέση.

$$\mathbf{E} + \frac{1}{c}(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}) \times \mathbf{B} = 0 \quad (1)$$

- Η οποία μας δίνει μια πυκνότητα ηλεκτρικού φορτίου

$$\rho_{GJ} = \frac{\Omega B}{2\pi c} \frac{1}{1 - |\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r} / c|^2}$$

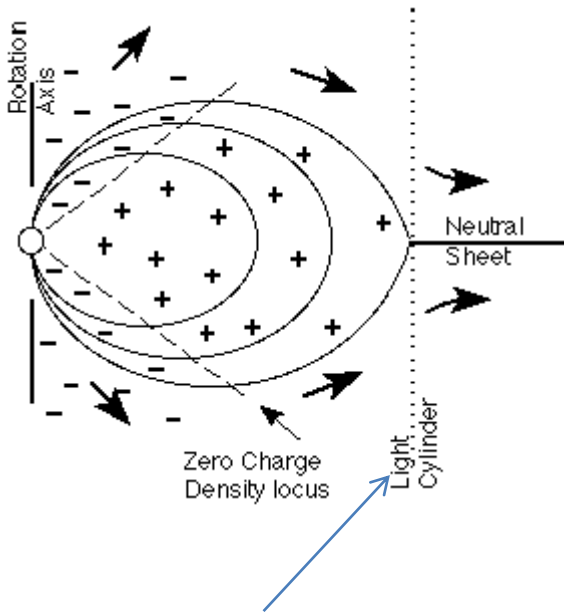
που ονομάζεται  
πυκνότητα φορτίου  
Goldreich – Julian.



- Επιφάνειες μηδενικής πυκνότητας  $\longrightarrow \boldsymbol{\Omega} \cdot \mathbf{B} = 0$

# Μοντέλο aligned pulsar

## Η επιτάχυνση των σωματιδίων



- Το ηλεκτρικό πεδίο που δημιουργείται είναι συμμετρικό και επιταχύνει τα φορτισμένα σωματίδια μακριά από την επιφάνεια του αστέρα.
- Δημιουργία αρχικού ρεύματος.

$$\dot{N}_{\text{GJ}} \approx \pi r_{\text{pc}}^2 (\rho_c / e) c \approx \frac{\Omega^2 R^3 B_s}{2ec}$$

Όπου  $B_s$  είναι το μαγνητικό πεδίο της επιφάνειας του αστέρα και  $R$  η ακτίνα του αστέρα.

- Από τις σχέσεις (1) και (2) υπολογίζουμε τη διαφορά δυναμικού μεταξύ του κέντρου και της άκρης του της περιοχής επιτάχυνσης.

$$\Delta\Phi = \int E \cdot ds \approx \frac{\Omega^2 B_s R^3}{2c^2} \quad (3)$$

- Θεωρητικά οι ακτίνες  $\gamma$  από ένα pulsar παράγονται από την ακτινοβολία που εκπέμπουν τα φορτισμένα σωματίδια, που επιταχύνονται από μια διαφορά δυναμικού όπως η (3).

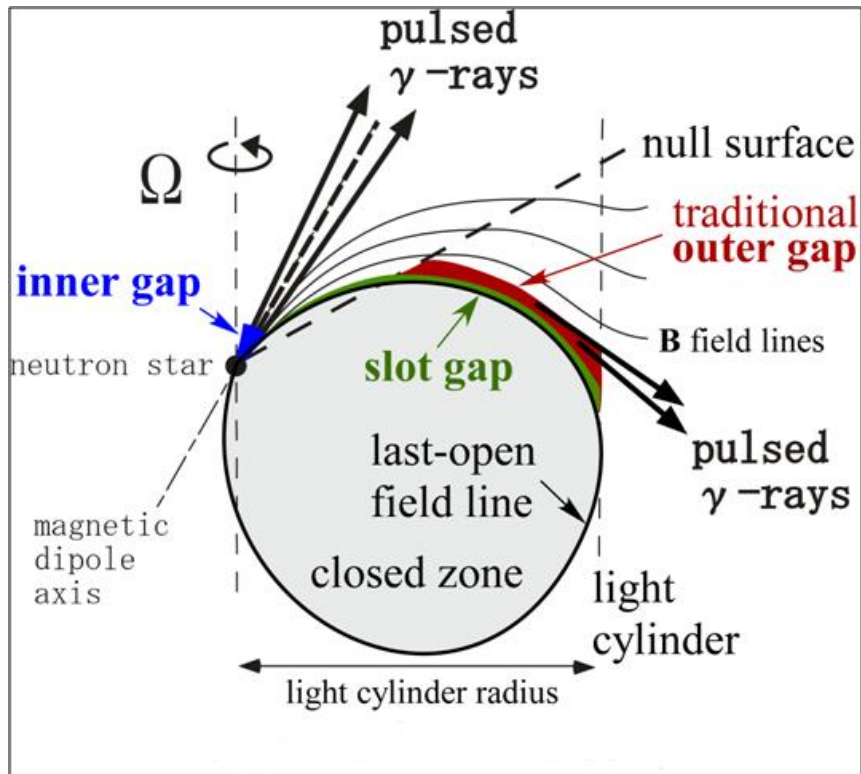
- Η άκρη του polar cap καθορίζεται από το σημείο της τελευταίας κλειστής μαγνητικής γραμμής.

$$r_{\text{pc}} = R \sin \theta_{\text{pc}}$$

$$\sin \theta_{\text{pc}} = (R/R_L)^{1/2} \quad (2)$$

# Μοντέλα εκπομπής ακτινοβολίας

➤ Τρία μοντέλα εκπομπής ακτινοβολίας



- **Polar-cap Model**

- Προτάθηκε στις αρχές της δεκαετίας του 80.

- Ύψος εκπομπής  $< 3R_{\text{Star}}$

- **Slot-gap Model**

- Προτάθηκε το 2003.

- Βρίσκεται στην περιοχή των κλειστών μαγνητικών γραμμών.

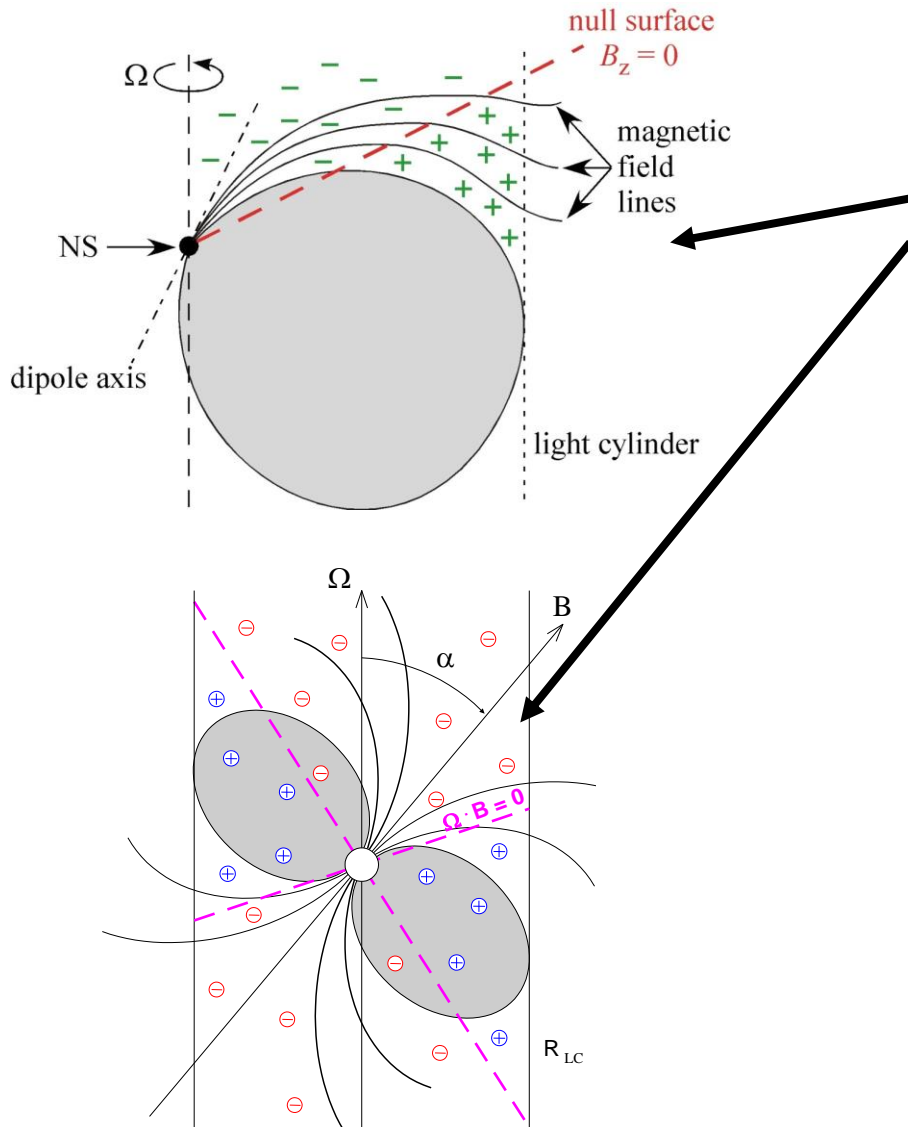
- **Outer-gap Model**

- Προτάθηκε στα μέσα της δεκαετίας του 80.

- Ύψος εκπομπής  $> 100R_{\text{Star}}$

- Μπόρεσε να εξηγήσει τους παλμούς με τις διπλές κορυφές.

# Polar-cap Slot-gap Model

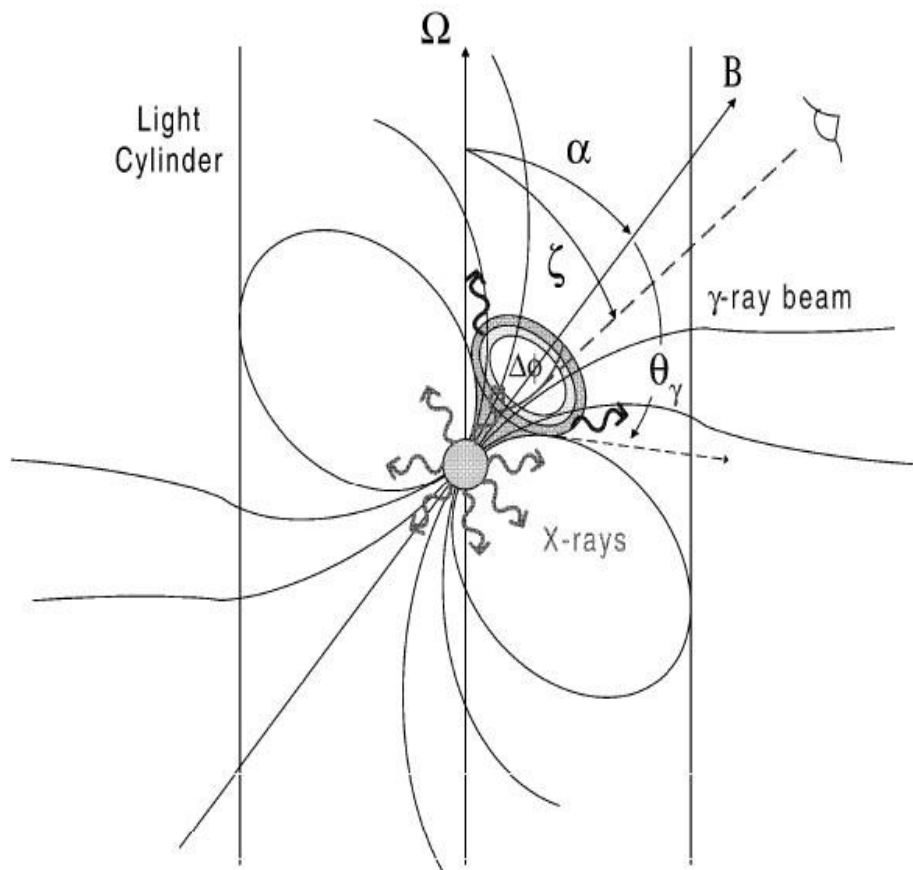


- Το ηλεκτρικό πεδίο είναι κυκλικό για ύψη  $h < r_{pc}$  και εγκάρσιο για ύψη  $h > r_{pc}$ .
- Τα αρχικά φορτισμένα σωματίδια επιταχύνονται σε μια μικρή ζώνη πάνω από την επιφάνεια polar cap.
- Η αρχική περιοχή εκπομπής περιορίζεται στις ανοιχτές γραμμές του διπόλου.
- Η διαφορά δυναμικού μεταξύ του κέντρου και της άκρης του polar cap είναι

$$\Delta\Phi \sim (\Omega B_s / 2c) h^2$$



# Polar-cap Model

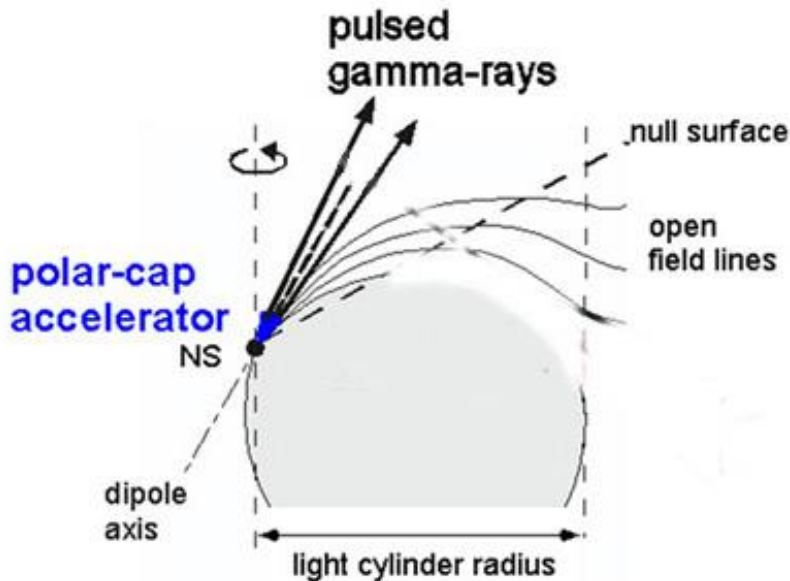


- Τα φορτισμένα σωματίδια επιταχύνονται στην περιοχή κενού (vacuum gap) που ισχύει  $E \cdot B \neq 0$
- Αυτό σημαίνει ότι στην περιοχή αυτή οι μαγνητικές γραμμές δεν αναγκάζονται σε περιστροφή.
- Πάνω από την περιοχή (vacuum gap) η μαγνητόσφαιρα περιστρέφεται μαζί με τον pulsar

# Εκπομπή ακτινοβολίας γάμμα

## Polar-cap Model

- Η διαφορά δυναμικού βγάζει τα φορτισμένα σωματίδια από την επιφάνεια του αστέρα και τα επιταχύνει σε σχετικιστικές ταχύτητες κατά μήκος των μαγνητικών γραμμών.



- Οι κάθετες ενέργειες των σωματιδίων εκπέμπονται αμέσως με ακτινοβολία synchrotron .
- Οι διαμήκεις ενέργειες των σωματιδίων εκπέμπονται σαν ακτίνες – γ υψηλής ενέργειας με μηχανισμό Curvature radiation.
- Οι ακτίνες – γ υψηλής ενέργειας καθώς κινούνται εγκάρσια στο ισχυρό μαγνητικό πεδίο παράγουν ζεύγη  $e^{\pm}$ .
- Τα παραπάνω επαναλαμβάνονται και δημιουργείται ένας καταιγισμός.

# Εκπομπή ακτινοβολίας γάμμα

## Polar-cap Model

- Η διαφορά δυναμικού μεταξύ του κέντρου και της άκρης στο polar cap είναι.

$$\Delta\Phi = \int E \cdot ds \approx \frac{\Omega^2 B_s R^3}{2c^2}$$

- Με την παραπάνω διαφορά δυναμικού το ηλεκτρικό πεδίο  $E_{\parallel}$  επιταχύνει τα φορτία.
- Στην περιστρεφόμενη μαγνητόσφαιρα του αστέρα η πυκνότητα φορτίου κατά Goldreich-Julian προκαλείται για ένα στατικό παρατηρητή.
- Από τις εξισώσεις του Maxwell παίρνουμε.

$$-\nabla^2\Phi = \nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi(\rho - \rho_{GJ})$$

$$\rho = e(n_+ - n_-)$$

$$\rho_{GJ} \approx -\frac{\Omega \cdot B}{2\pi c} \begin{cases} < 0 \text{ ηλεκτρόνια} \\ > 0 \text{ ποζιτρόνια} \end{cases}$$

# Εκπομπή ακτινοβολίας γάμμα

## Polar-cap Model

- Η παραπάνω διαφορά δυναμικού είναι αρκετή για να ξεσηκώσει τα φορτισμένα σωματίδια από την επιφάνεια του αστέρα και να τα επιταχύνει σε σχετικιστικές ταχύτητες κατά μήκος των μαγνητικών γραμμών. Τα φορτισμένα σωματίδια επιταχύνονται στην περιοχή κενού που ισχύει

$$\mathbf{E} \cdot \mathbf{B} \neq 0$$

- Αυτά κινούμενα στο μαγνητικό πεδίο εκπέμπουν ακτινοβολία γάμμα με τυπικές ενέργειες.

$$E_\gamma \approx \frac{3h\gamma_e^3}{4\pi s}$$

Όπου  $\gamma_e$  είναι ο συντελεστής Lorentz και  $s$  η τυπική ακτίνα καμπυλότητας.

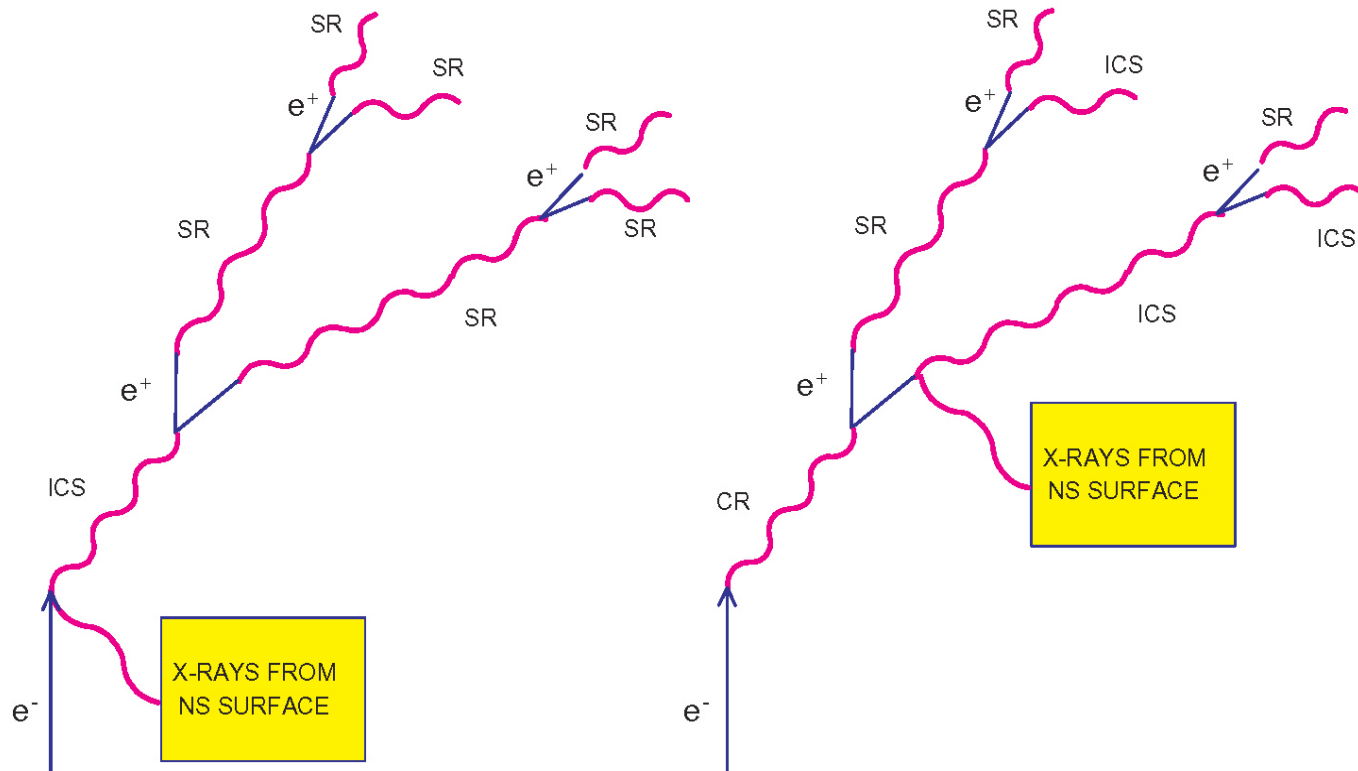
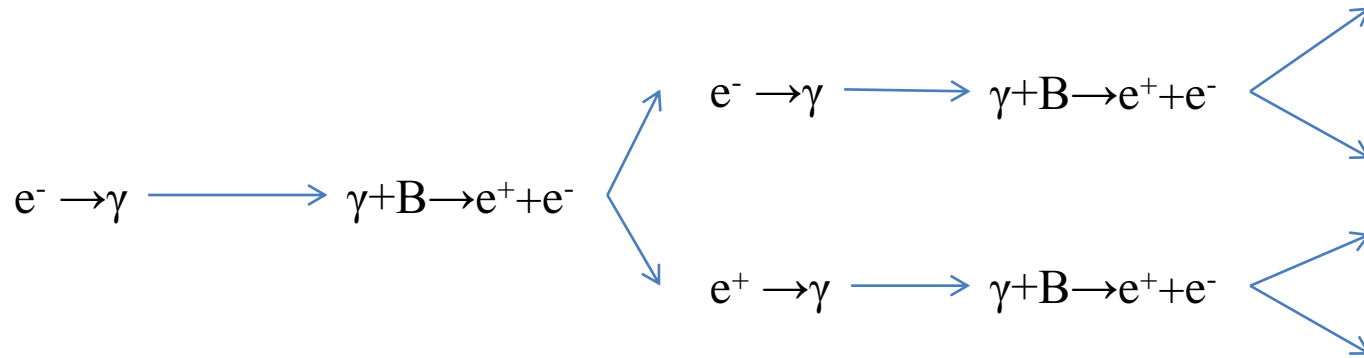
- Τα φωτόνια (πολύ υψηλής ενέργειας) κινούμενα στο μαγνητικό πεδίο παράγουν ζεύγη  $e^\pm$ .

$$\gamma + \mathbf{B} \rightarrow e^+ + e^-$$

Τα οποία στη συνέχεια επιταχύνονται παράγοντας ακτίνες  $-\gamma$  και ούτω καθεξής.

Έτσι δημιουργείται ένας καταγισμός σωματιδίων (pair cascade).

# Καταιγισμός στην περιοχή polar cap



# Δυο τύποι επιτάχυνσης στο polar cap

- Τα σωματίδια είναι ελεύθερα μόνο αν η θερμοκρασία της επιφάνειας είναι μεγαλύτερη από την θερμοκρασία θερμοϊονικής εκπομπής.

$$T_e \approx 3,6 \times 10^5 \text{K} \longrightarrow \text{Θερμοκρασία ηλεκτρονίων}$$

$$T_i \approx 3,5 \times 10^5 \text{K} \longrightarrow \text{Θερμοκρασία ιόντων}$$

$$T_s \longrightarrow \text{Θερμοκρασία επιφάνειας}$$

**i)**  $T_s < T_{i,e}$  Vacuum Gap

**ii)**  $T_s > T_{i,e}$  Space Charge Gap

Τα σωματίδια παγιδεύονται στην επιφάνεια κενού όπου υπάρχει το ηλεκτρικό πεδίο

$$E_{\parallel} = \Omega B_0 R$$

Συνθήκες επιφάνειας

$$\rho(R) = 0$$

$$E_{\parallel}(R) \neq 0$$

Τα σωματίδια βράζουν στην επιφάνεια και στη συνέχεια ρέουν κατά μήκος των ανοιχτών μαγνητικών γραμμών. Το ηλεκτρικό πεδίο το οποίο μεγαλώνει με το ύψος είναι

$$\nabla \cdot E_{\parallel} = (\rho - \rho_{GJ}) / \epsilon_0$$

Συνθήκες επιφάνειας

$$\rho(R) = \rho_{GJ}$$

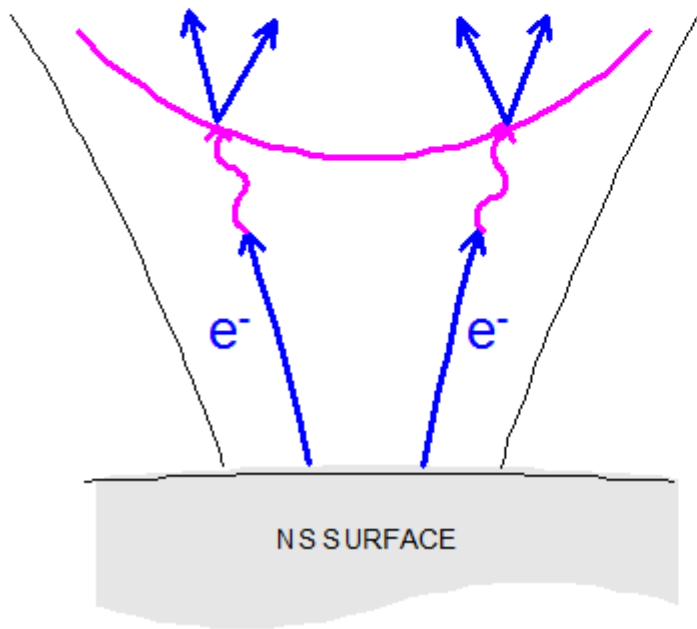
$$E_{\parallel}(R) = 0$$

# Δυο τύποι επιτάχυνσης στο polar cap

**SPACE CHARGE "GAP"**

$$T_s > T_{e,i}$$

$$\Omega \cdot B > 0$$

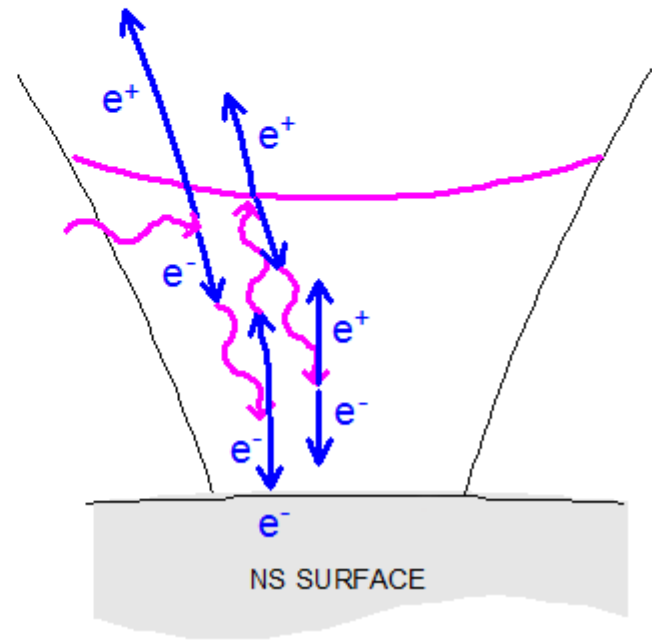


$$\nabla \cdot E = -4\pi(\rho - \rho_{GJ})$$

**VACUUM GAP**

$$T_s < T_{e,i}$$

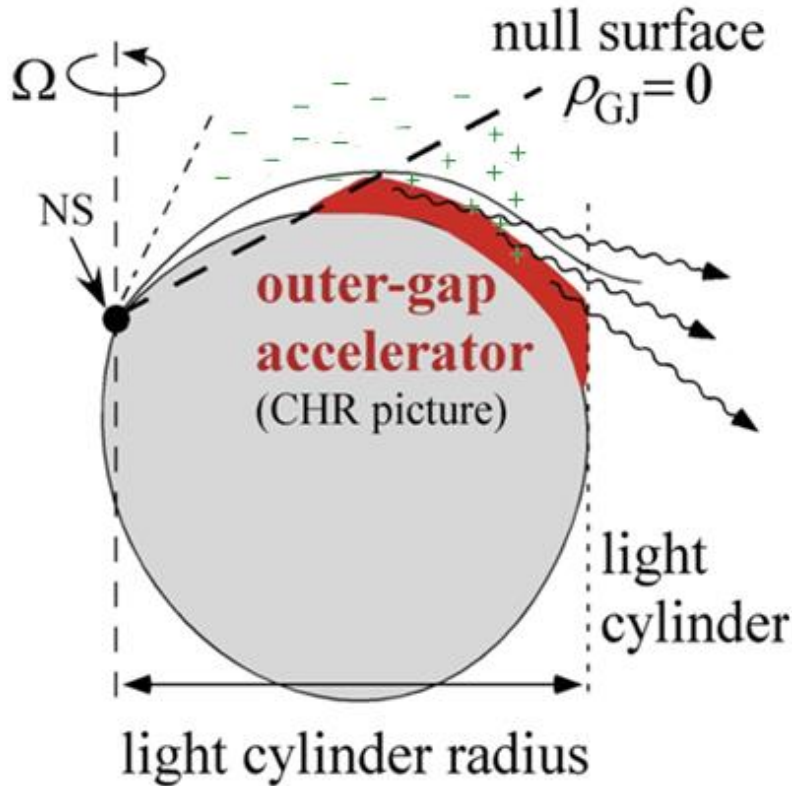
$$\Omega \cdot B < 0$$



$$\nabla \cdot E = 4\pi\rho_{GJ}$$



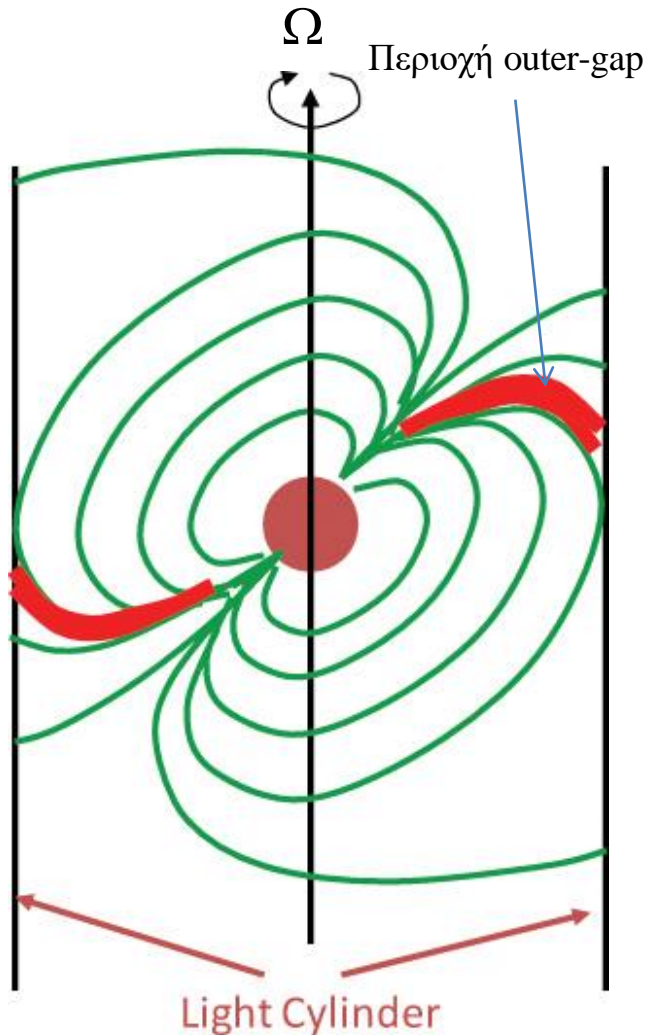
# Outer-gap Model



- Δημιουργία περιοχών (στην εξωτερική μαγνητόσφαιρα), με πολλά ηλεκτρικά φορτία εξαιτίας της περιστροφής του αστέρα.
- Ισχυρά ηλεκτρικά πεδία κατά μήκος των μαγνητικών γραμμών ( $E \cdot B \neq 0$ ).
- Δημιουργία μηχανισμών όπως η αντίστροφη σκέδαση Compton και η παραγωγή ζεύγους  $e^\pm$ .
- Τα  $e^\pm$  δημιουργούν μια μακρόστενη περιοχή (outer gap).

# Εκπομπή ακτινοβολίας γάμμα

## Outer-gap Model



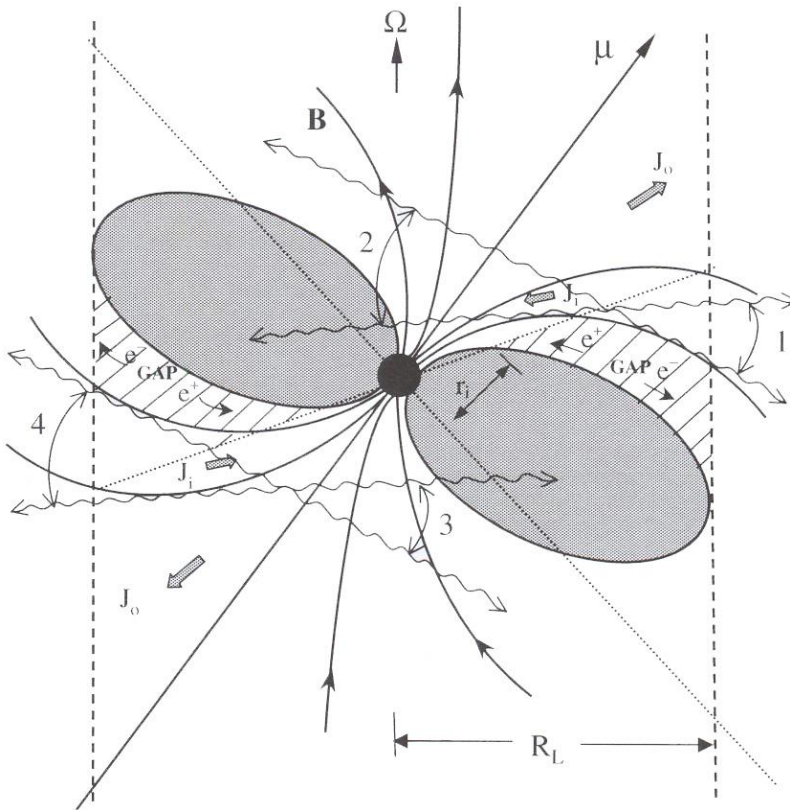
- Τα ηλεκτρόνια δεσμεύονται σε μαγνητικά πεδία και περιστρέφονται μαζί με τον pulsar.
- Σε ακτίνα  $r=c/\Omega$  η περιστροφή γίνεται με την ταχύτητα του φωτός (light cylinder).
- Τα σωματίδια κινούνται διαμέσω των μαγνητικών πεδίων.
- Εκπομπή ακτινοβολίας synchrotron.
- Curvature radiation.

# Εκπομπή ακτινοβολίας γάμμα

## Outer-gap Model

➤ Δυο είδη pulsar.

- Crab – type
- Vela – type

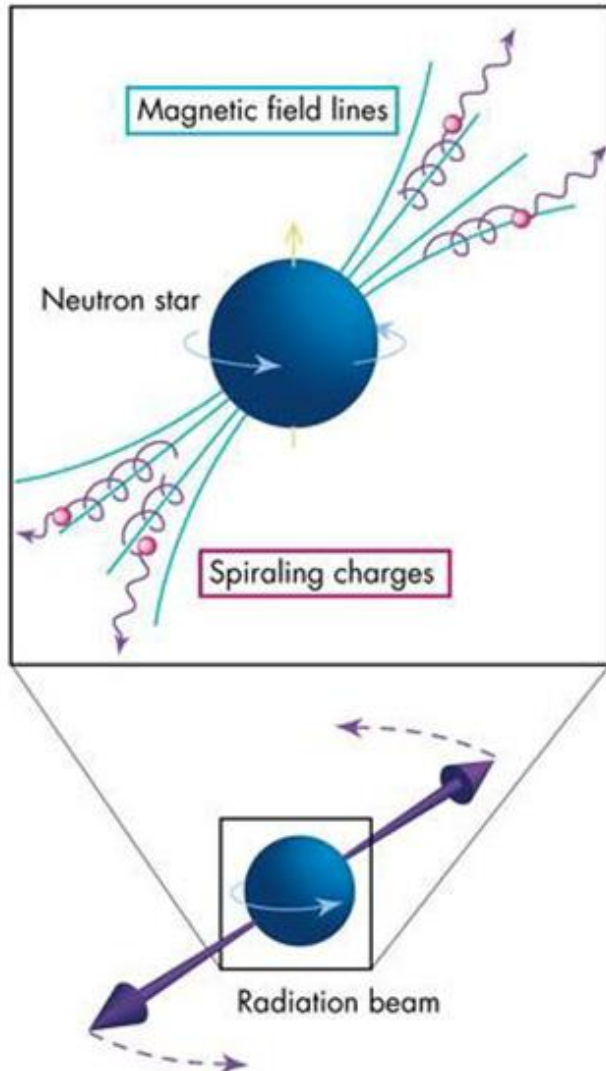


➤ Στο Crab μοντέλο η περιοχή παράγει φωτόνια (GeV) με Curvature radiation και στη συνέχεια παράγονται  $e^\pm$  τα οποία εκπέμπουν ακτινοβολία synchrotron και φωτόνια από αντίστροφη σκέδαση Compton.

➤ Στο Crab μοντέλο τα αρχικά  $e^\pm$  χάνουν την περισσότερη από την ενέργειά τους με Curvature radiation, σε αντίθεση με το Vela μοντέλο που η περισσότερη ενέργειά τους χάνεται με ακτινοβολία synchrotron.

# Εκπομπή ακτινοβολίας γάμμα

## Outer-gap Model



➤ Δυο είδη pulsar.

- Crab – type
- Vela – type

➤ Στο Vela μοντέλο τα  $e^\pm$  επιταχύνονται σε αντίθετες κατευθύνσεις σε πολύ μεγάλες σχετικιστικές ενέργειες. Τα σωματίδια αυτά παράγουν ακτίνες  $\gamma$  με αντίστροφη σκέδαση Compton.

➤ Οι αρχικές ακτίνες  $\gamma$  έχοντας αρκετή ενέργεια παράγουν ζεύγη  $e^\pm$ .

➤ Τα δευτερεύοντα ζεύγη  $e^\pm$  με ακτινοβολία synchrotron παράγουν δευτερεύουσες ακτίνες  $\gamma$  που κινούνται ελικοειδώς στο μαγνητικό πεδίο.

# Διαδικασία εκπομπής ακτινοβολίας γάμμα

➤ Το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο είναι διαθέσιμο κατά μήκος των ανοιχτών μαγνητικών γραμμών λίγες μοίρες από τον άξονα του μαγνητικού πεδίου.

➤ Η διαφορά δυναμικού στην περιοχή των ανοιχτών μαγνητικών γραμμών είναι

$$dV = \frac{\Omega^2 B r^3}{c^2} \approx 10^{15.5} V$$

➤ Μια διαφορά δυναμικού της τάξης  $10^{14}$ - $10^{16}$  μπορεί να επιταχύνει τα φορτισμένα σωματίδια.

➤ Αναλύοντας την ένταση  $E$  του ηλεκτρικού πεδίου στις συνιστώσες  $E_{\parallel}$  και  $E_{\perp}$  παίρνουμε την παρακάτω εξίσωση του Maxwell.

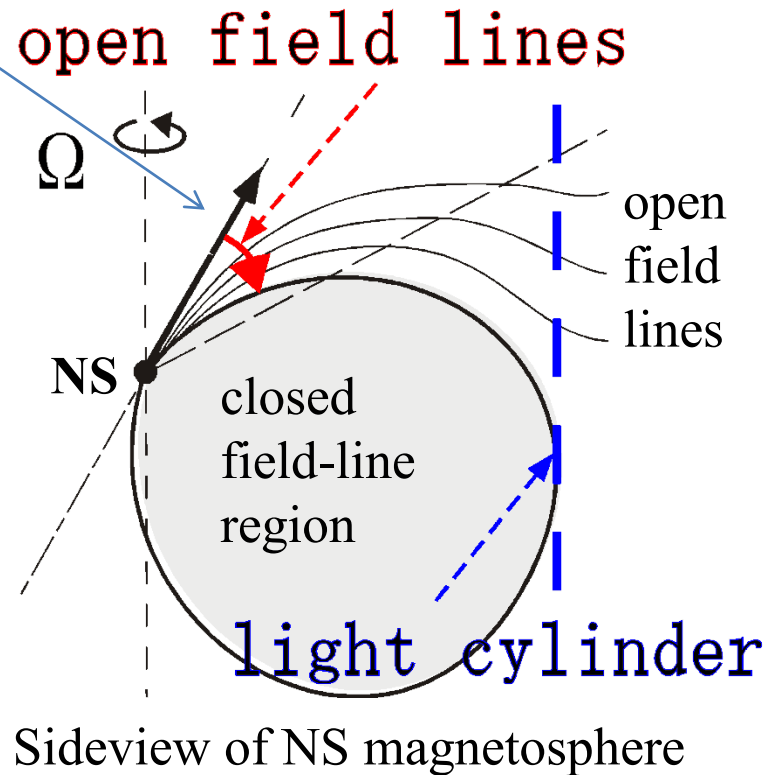
$$\nabla \cdot [\mathbf{E}_{\parallel} + \mathbf{E}_{\perp}] = \nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi\rho_e$$

$$\mathbf{E} = -\frac{1}{c}(\boldsymbol{\Omega} \times \mathbf{r}) \times \mathbf{B}$$

όπου

$$\rho_e = e(n_+ - n_-)$$

πραγματική πυκνότητα φορτίου



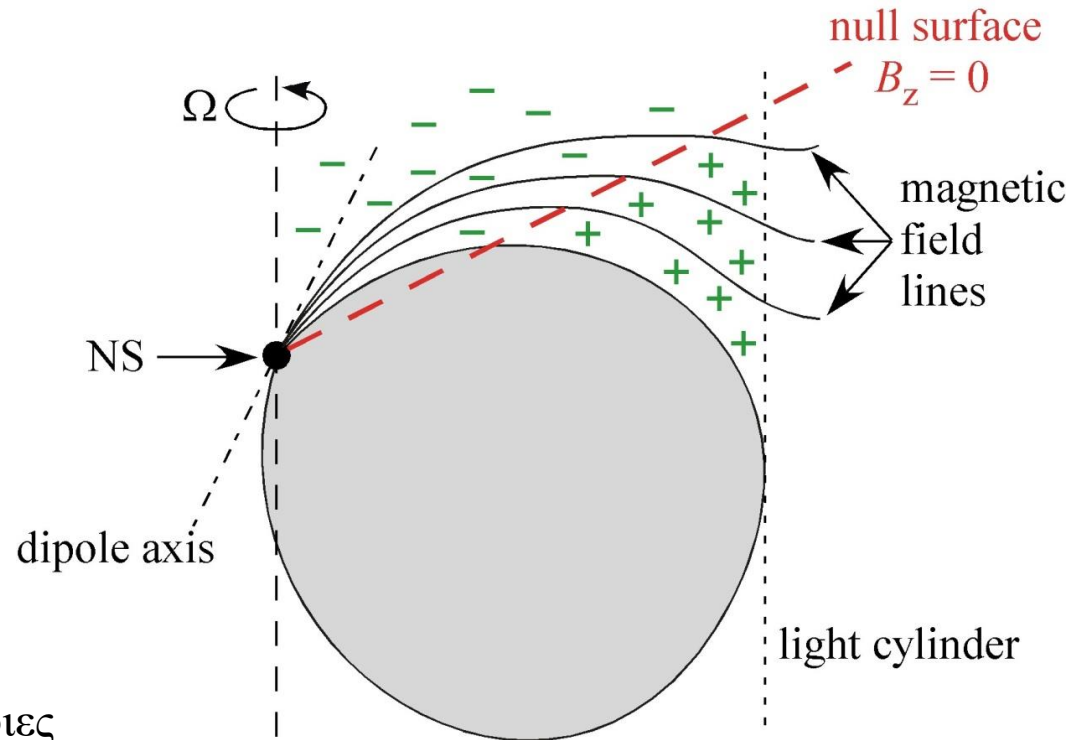
# Διαδικασία εκπομπής ακτινοβολίας γάμμα

- Η  $\mathbf{E}_\perp$  είναι κάθετη στο μαγνητικό πεδίο  $\mathbf{B}$ . Η πρώτη εξίσωση του Maxwell δίνει.

$$\nabla \cdot \mathbf{E} = 4\pi(\rho_e - \rho_{GJ})$$

όπου

$$\rho_{GJ} = \frac{1}{4\pi} \nabla \cdot \mathbf{E}_\perp = -\frac{\Omega B_s}{2\pi c} \quad B_s = \mathbf{\Omega} \cdot \mathbf{B} / \Omega$$



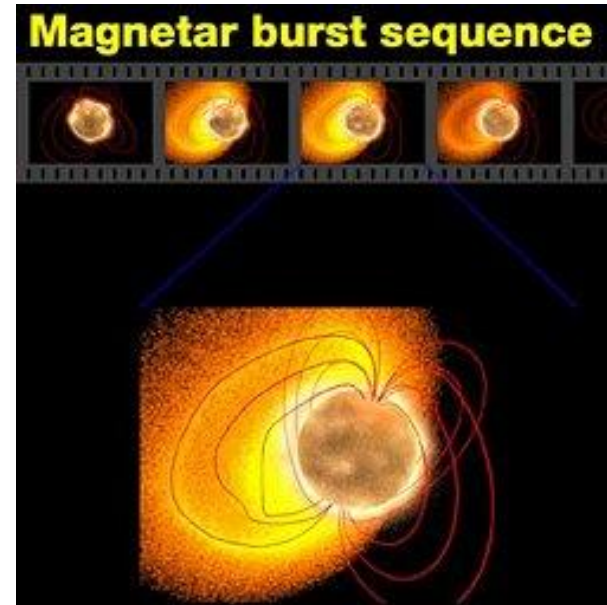
- Η  $\rho_{GJ}$  αλλάζει πρόσημο στην null surface.

- Αν η  $\rho_e$  αποκλίνει από την  $\rho_{GJ}$  σε κάποιες περιοχές, ένα ηλεκτρικό πεδίο επιτάχυνσης  $E_\parallel$  ασκείται κατά μήκος των μαγνητικών γραμμών  $\mathbf{B}$ .



# Magnetars

- Αστέρες νετρονίων με ασυνήθιστα ισχυρό μαγνητικό πεδίο –  $10^{14}$ - $10^{15}$  G.
- Το ισχυρό μαγνητικό πεδίο προκαλεί σεισμούς στην επιφάνεια του αστέρα.
- Αυτοί οι σεισμοί παράγουν μεγάλες ποσότητες αναλαμπών ακτίνων X και ακτίνων γάμμα.
- Η πηγή ενέργειας είναι το μαγνητικό πεδίο.



## Δυο είδη magnetars

• Soft Gamma-ray Repeaters

• Anomalous X-ray Pulsars



# Δυο τύποι αστέρων νετρονίων

**1** Most neutron stars are thought to begin as massive but otherwise ordinary stars, between eight and 20 times as heavy as the sun.

**2** Massive stars die in a type II supernova explosion, as the stellar core implodes into a dense ball of subatomic particles.

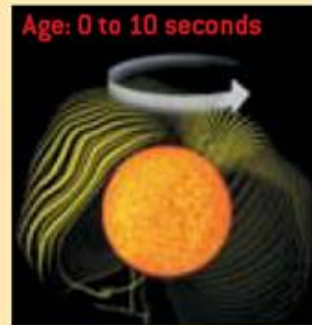


NEWBORN NEUTRON STAR

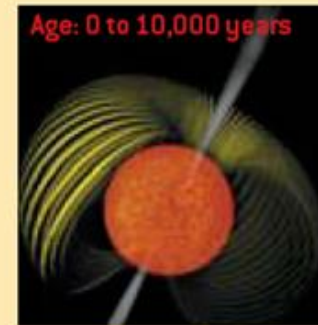
MAGNETAR

ORDINARY PULSAR

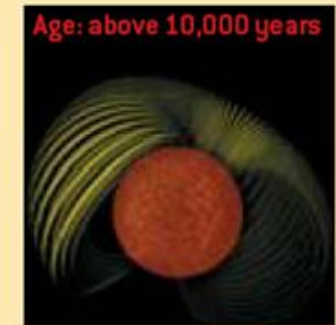
**3A:** If the newborn neutron star spins fast enough, it generates an intense magnetic field. Field lines inside the star get twisted.



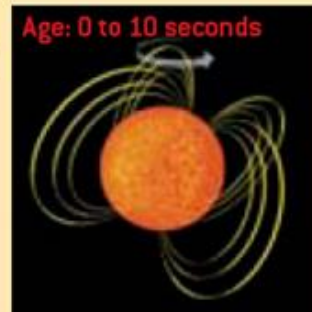
**4A:** The magnetar settles into neat layers, with twisted field lines inside and smooth lines outside. It might emit a narrow radio beam.



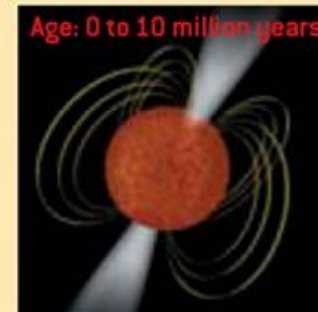
**5A:** The old magnetar has cooled off, and much of its magnetism has decayed away. It emits very little energy.



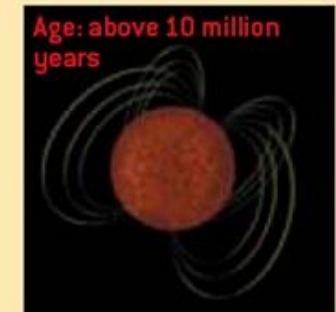
**3B:** If the newborn neutron star spins slowly, its magnetic field, though strong by everyday standards, does not reach magnetar levels.



**4B:** The mature pulsar is cooler than a magnetar of equal age. It emits a broad radio beam, which radio telescopes can readily detect.



**5B:** The old pulsar has cooled off and no longer emits a radio beam.



# Soft Gamma-Ray Repeaters

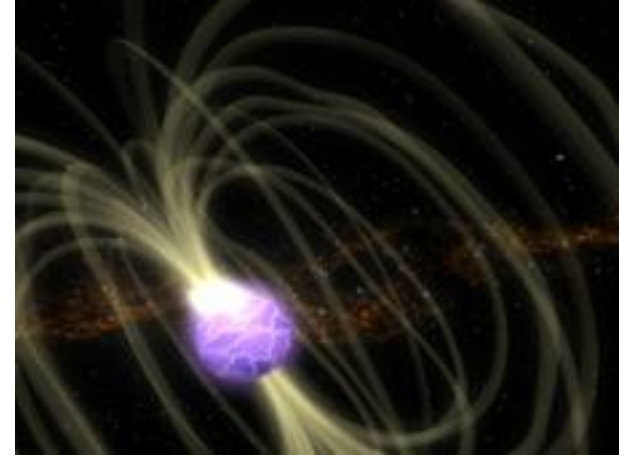
➤ Εκρήξεις με τρομερή απελευθέρωση ενέργειας  $10^{41}$ - $10^{46}$  erg/s.

➤ Οι ενέργειες προέρχονται από το μαγνητικό πεδίο.

➤ Το ισχυρό μαγνητικό πεδίο διαπερνά το στερεό φλοιό του αστέρα. Έτσι εμφανίζονται δυνάμεις που δεν μπορεί να αντέξει ο φλοιός, με αποτέλεσμα να γίνονται ισχυρές εκρήξεις.

➤ Το ισχυρό μαγνητικό πεδίο αναδιατάσσεται σε μια κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας. Έτσι έχουμε την απελευθέρωση ενέργειας.

➤ Η μαγνητική ενέργεια που απελευθερώνεται δημιουργεί συνοδευτικά ένα πυκνό νέφος  $e^\pm$  καθώς και μια έκρηξη μαλακών ακτίνων γάμμα.

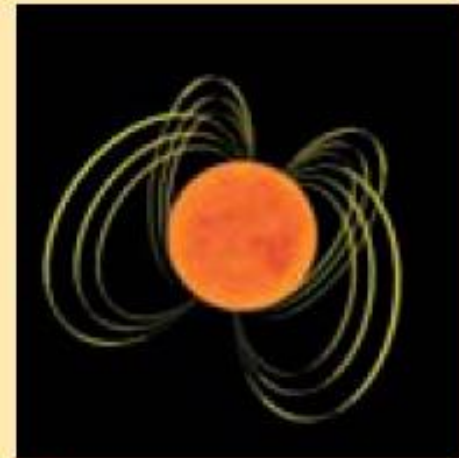


Ακτίνες  $\gamma$  εκπέμπονται από τον αστέρα SGR J1550-5418 όταν η επιφάνειά του καταρρέει απελευθερώνοντας ενέργεια

# Εκρήξεις στους magnetars

## HOW MAGNETAR BURSTS HAPPEN

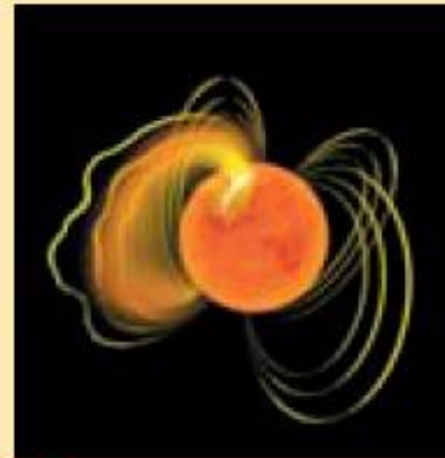
THE MAGNETIC FIELD OF THE STAR is so strong that the rigid crust sometimes breaks and crumbles, releasing a huge surge of energy.



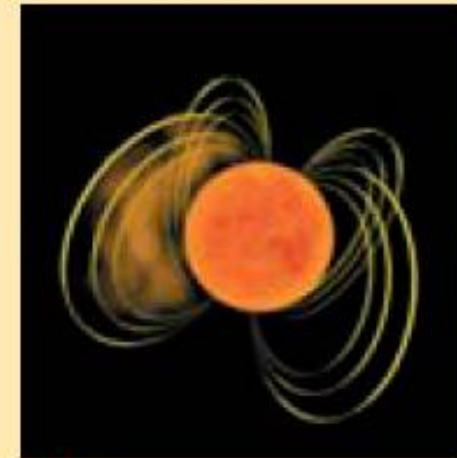
**1** Most of the time the magnetar is quiet. But magnetic stresses are slowly building up.



**2** At some point the solid crust is stressed beyond its limit. It fractures, probably into many small pieces.



**3** This "starquake" creates a surging electric current, which decays and leaves behind a hot fireball.



**4** The fireball cools by releasing x-rays from its surface. It evaporates in minutes or less.

# Βιβλιογραφία - Αναφορές

## Βιβλία - Εργασίες

Neutron Stars and Pulsars – Werner Becker

Particle Astrophysics – Donald Perkins

Αστροφυσική Τόμος I (Αστέρες) – Shu H. Frank

Ανάλυση Μεμονωμένων Παλμών από Αστέρες Νετρονίων – Διπλωματική  
εργασία Αναστασίου Μαγδαληνή

## Ιστοσελίδες

[http://panda.unm.edu/101lab/lab7/lab7\\_F\\_1.html](http://panda.unm.edu/101lab/lab7/lab7_F_1.html)

<http://phobos.physics.uiowa.edu/~kaaret/specastro06f/>

<http://www.aire.org.cn/>

<http://www.astro.umd.edu/>

<http://fermi.gsfc.nasa.gov/>

<http://www.phys.utk.edu/index.html>

<http://www.mpi-hd.mpg.de/personalhomes/hirotani/>

[http://science.gsfc.nasa.gov/sed/index.cfm?fuseAction=home.main&&navOrgCode=600&navTab=nav\\_epo](http://science.gsfc.nasa.gov/sed/index.cfm?fuseAction=home.main&&navOrgCode=600&navTab=nav_epo)

[http://zmtt.bao.ac.cn/index\\_en.html](http://zmtt.bao.ac.cn/index_en.html)