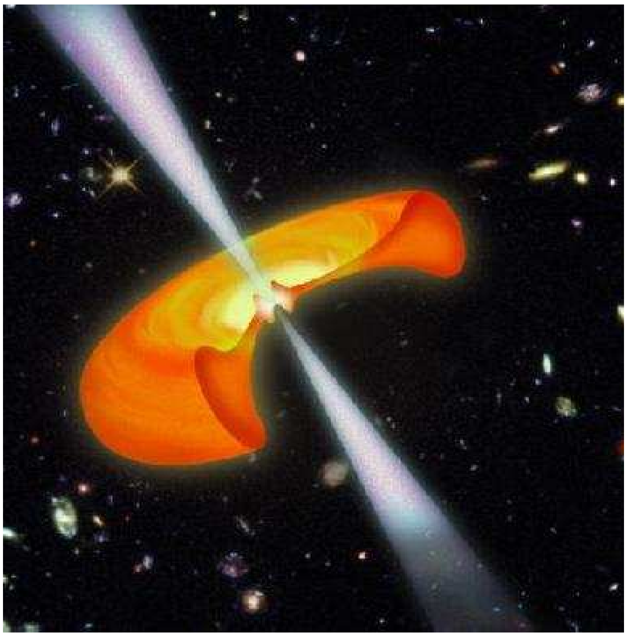
Εκλάμψεις Ακτίνων Γάμμα
(Gamma-Ray Bursts-GRB)



Ευστάθιος Κ. Στεφανίδης

Ιούλιος, 2002

Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Οι εκλάμψεις των ακτίνων γάμμα (Gamma-ray bursts - GRB) αποτελούν ένα από τα μεγαλύτερα μυστήρια της σύγχρονης αστρονομίας. Περίπου μια φορά την ημέρα, ο ουρανός φωτίζεται από μια έκρηξη, ή έκλαμψη, ακτίνων γάμμα. Συχνά, αυτή η λάμψη επισκιάζει όλες τις άλλες πηγές των κοσμικών ακτίνων γάμμα. Η πηγή της λάμψης χάνεται μετά από λίγο, ξαφνικά. Κανείς δεν μπορεί να προβλέψει πότε θα γίνει η επόμενη έκρηξη ή από ποια διεύθυνση του ουρανού θα γίνει. Προς το παρόν, δεν γνωρίζουμε καν τι προκαλεί αυτές τις εκρήξεις ή πόσο μακριά είναι!

Η πρώτη έκρηξη των ακτίνων γάμμα παρατηρήθηκε το έτος 1967 (παρ΄ όλο που δεν αναφέρθηκε επισήμως μέχρι το 1973) από δορυφόρους-ανιχνευτές που είχαν ως σκοπό την παρατήρηση τυχόν παραβιάσεων της Συμφωνίας Απαγόρευσης των Πυρηνικών Δοκιμών. Αυτό που παρατήρησε ο Ray Klebesadel και οι συνεργάτες του στο Los Alamos, ήταν μια απρόσμενη, μεγάλη αύξηση στον αριθμό των ακτίνων γάμμα που παρατηρούσαν οι ανιχνευτές σε διαφορετικούς δορυφόρους, οι οποίοι βρίσκονταν σε μεγάλη απόσταση. Τα δεδομένα έδειξαν ότι η πηγή της εκπομπής των ακτίνων γάμμα δεν ήταν κοντά στην περιοχή της Γης, αλλά μακριά από τη Γη και τον Ήλιο, δηλαδή ήταν κοσμικά συστήματα ακτίνων γάμμα. Στην αναφορά τους επισήμαναν την ανίχνευση 16 τέτοιων γεγονότων κατά το χρονικό διάστημα από τον Ιουλίο 1969 μέχρι τον Ιούλιο 1972. Δεν υπήρχε αμφιβολία ότι τα φαινόμενα που ανέφεραν ήταν πραγματικά και ότι κανείς δεν είχε την εύλογη δικαιολογία γι΄ αυτά. Τώρα, τριάντα χρόνια μετά και με δεδομένα από διάφορες εκαντοντάδες εκλάμψεις, οι επιστήμονες ακόμα δεν έχουν μια ξεκάθαρη εξήγηση για τα παράξενα γαλαξιακά αύτα φαινόμενα των GRB.

Οι επιστήμονες δείχνουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον για τις GRB. Συγκαταλέγονται στις πιο φωτεινές πηγές στον ουρανό, σ'ολη την περιοχή των μηκών κύματος. Ενδέχεται να έρχονται από τις απομακρυσμένες περιοχές του Γαλαξία μας ή μπορεί να αντιπροσωπεύουν έναν ολοκαίνουργιο τύπο αντικειμένου κοντά στην άκρη του παρατηρήσιμου Σύμπαντος. Αν είναι σωστή η πρώτη εκδοχή, τότε βλέπουμε κάτι στα απομακρυσμένα τμήματα του Γαλαξία μας, τα οποία είναι προς το παρόν μη παρατηρήσιμα με άλλα μέσα. Αν είναι σωστή η δεύτερη εκδοχή, τότε οι GRB θα μπορούσαν να μας βοηθήσουν να καταλάβουμε τη δομή και την εξέλιξη του Σύμπαντός μας. Θα μπορούσαν να αποτελέσουν ένα καινούργιο στοιχείο για τους κοσμολόγους. Με οποιονδήποτε τρόπο, η απάντηση στο ερώτημα 'Ποια είναι η πηγή των GRB' θα επιφέρει μια σημαντική πρόοδο για την επιστήμη της αστρονομίας.

Κεφάλαιο 2

Χρονικά φάσματα - Τοπολογία των GRB

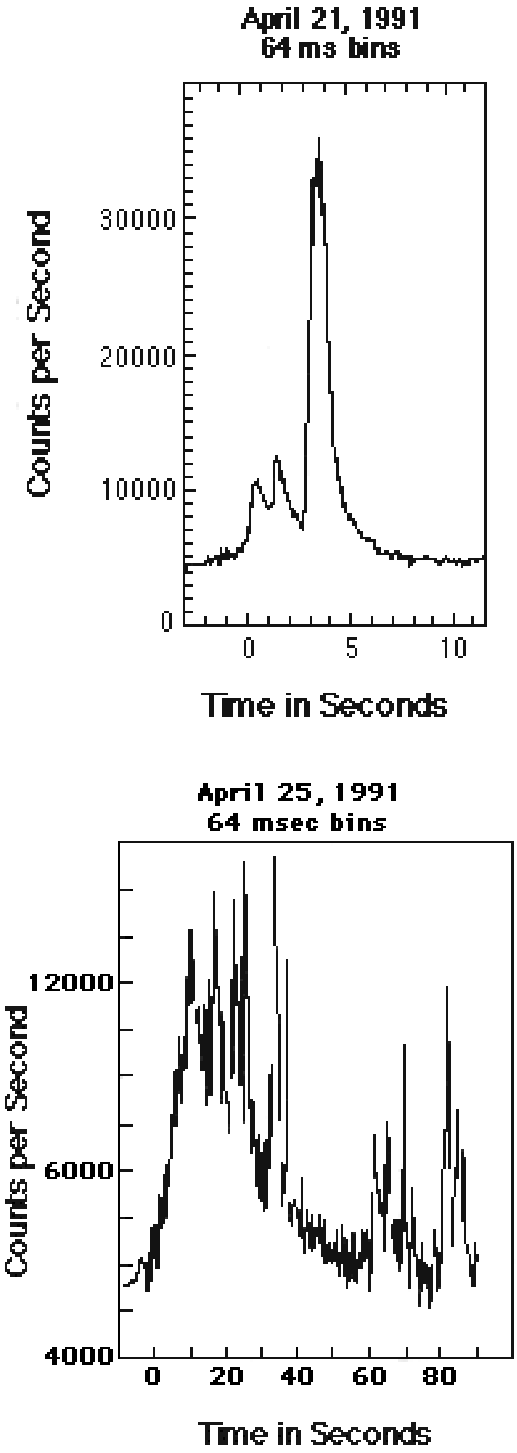
Ίσως το πιο ενδιαφέρον χαρακτηριστικό των χρονικών φασμάτων των GRB είναι η απόκλιση από τις χρονικές δομές τους. Μερικές καμπύλες των εκλάμψεων εμφανίζουν έντονες κορυφές με μεγάλες διακυμάνσεις σ΄ όλο το χρονικό εύρος, ενώ άλλες εμφανίζουν μάλλον ομαλή δομή με μερικές κορυφές. Ωστόσο, μερικές εκλάμψεις είναι ορατές και δίνουν χρονικά φάσματα που συνδυάζουν και τα δύο παράπανω χαρακτηριστικά. Σε μερικές περιπτώσεις, οι πηγές των GRB έχουν επαναλάβει την εμφάνισή τους. Παρ΄ όλα αυτά, μέχρι στιγμής, δεν έχει παρατηρηθεί κάποια αυστηρά περιοδική συμπεριφορά των GRB .

Στο σχήμα 2.1 παρουσιάζονται δύο χρονικά φάσματα GRB. Το πάνω παρουσιάζει την ομαλοποιημένη μορφή, ενώ το κάτω παρουσιάζει μια συμπεριφορά με μεγάλες και έντονες διακυμάνσεις.

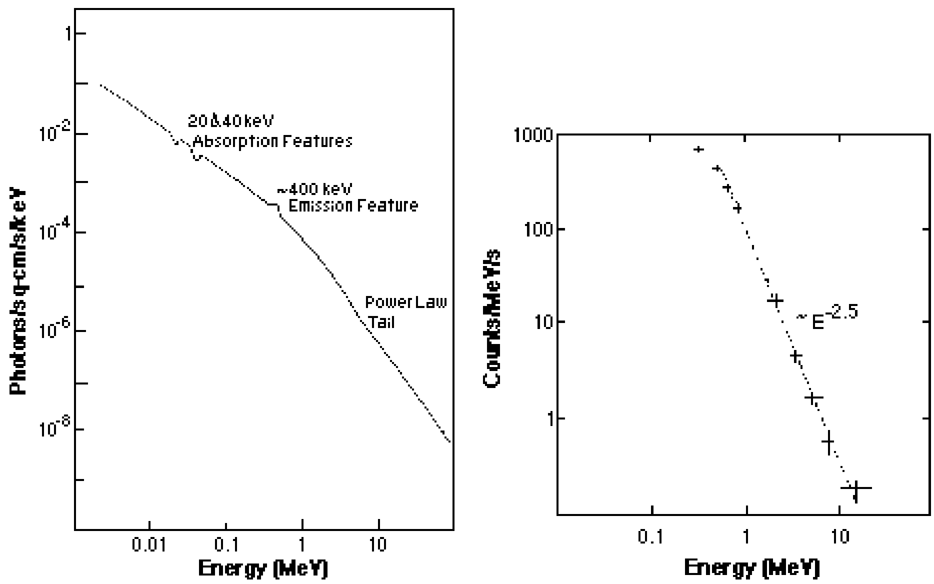
Η χρονική διάρκεια των GRB ποικίλει μεταξύ 30 msec μέχρι 1000 sec. Ωστόσο, η διάρκεια των εκλάμψεων είναι δύσκολο να εκφραστεί ποσοτικά, αφού εξαρτάται τόσο από την ευαισθησία όσο και από τη διακριτική ικανότητα του πειράματος που παρατηρεί το γεγονός.

Ένα μοναδικό χαρακτηριστικό των GRB είναι η εκπομπή μεγάλης ενέργειας: σχεδόν όλη η ισχύς εκπέμπεται πάνω από τα 50 keV. Έχει παρατηρηθεί ταυτόχρονη εκμπομπή μαλακών ακτίνων-X σε μερικές περιπτώσεις, αλλά η ισχύς στις ακτίνες-X ήταν μερικά επί τοις εκατό της ισχύος των ακτίνων-γ (σχήμα 2.2). Τα ενεργειακά φάσματα μπορούν συνήθως να προσαρμοστούν με μια μορφή ακτινοβολίας πέδησης (bremsstrahlung).

Η πιο άμεση πληροφορία για την τρισδιάστατη χωρική κατανομή των πηγών των GRB προέρχεται από την παρατηρούμενη ένταση και τις κατανομές αυτών στον ουρανό. Η γωνιακή (ουράνια) κατανομή παρέχει δύο από τις διαστάσεις της χωρικής κατανομής, ενώ η κατανομή της έντασης είναι μια συνένωση της άγνωστης συνάρτησης της φωτεινότητας και της γωνιακής κατανομής. Ακόμα



Σχήμα 2.1: Ομαλό (πάνω-GRB910421) και έντονο (κάτω-GRB910425) χρονικό φάσμα GRB



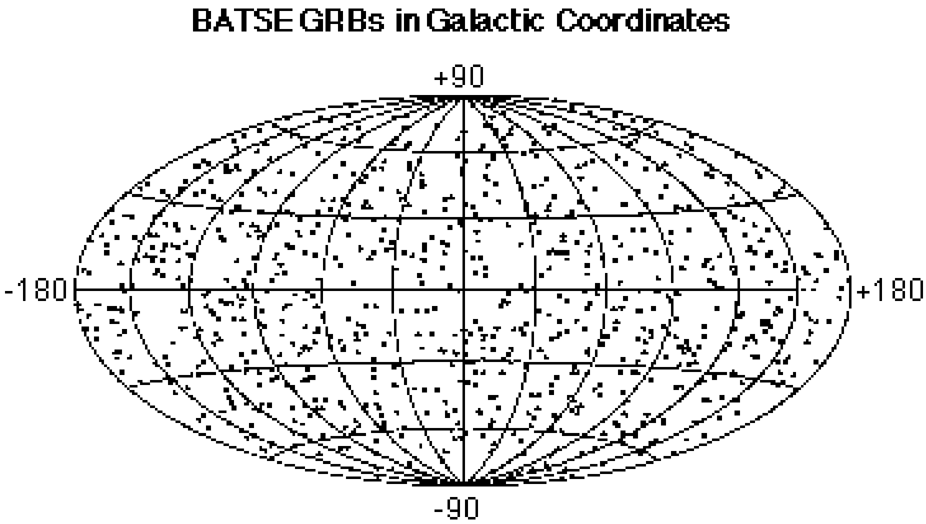
Σχήμα 2.2: Ενεργειακά φάσματα των GRB

και αν η συνάρτηση της φωτεινότητας είναι άγνωστη, η κατανομή της έντασης μπορεί να δώσει τα όρια στις επιτρεπόμενες χωρικές κατανομες των πηγών των GRB.

Στην πραγματικότητα, δεν μπορούμε να πούμε με βεβαιότητα πόσο μακριά βρίσκονται οι GRB. Από τις αρχές του 1970, ήταν φανερό ότι οι GRB έρχονται απ' όλες τις περιοχές του ουρανού με περίπου ίδια πιθανότητα.

Από τη στιγμή που άλλα χαρακτηριστικά των GRB (όπως ο γρήγορος χρονος ανόδου - rise time - [που σε μερικές περιπτώσεις φτάνει τα 1 ms] και οι μεγάλες ενέργειες των φωτονίων) έδειχναν συνεπή με την προέλευση από αστέρες νετρονίων, οι περισσότεροι άνθρωποι, πριν το 1991, πίστευαν ότι οι GRB προέρχονται από γαλαξιακούς αστέρες νετρονίων και ότι απλώς τα όργανα δεν είχαν τη δυνατότητα να εισχωρήσουν βαθύτερα για να δουν μια προτιμητέα διεύθυνση στο γαλαξιακό κέντρο και επίπεδο. Ωστόσο, από το 1991, το πείραμα BATSE (Burst and Transient Source Experiment) παρατήρησε σχεδόν μια έκρηξη ακτίνων γάμμα την ημέρα και όλες αυτές ήταν τρομακτικά ισότροπες, όπως φαίνεται στο σχήμα 2.3. Πιστεύεται ότι, αν οι γαλαξιακοί αστέρες νετρονίων είναι πραγματικά οι πηγές των GRB, το BATSE θα μπορούσε να τις δει και η κατανομή δεν θα ήταν πλέον σφαιρική.

Ένα άλλο στοιχείο προέρχεται από τον αριθμό των πηγών που παρατηρούνται με ροή μεγαλύτερη από μια δεδομένη. Εάν το Σύμπαν ήταν ευκλείδιο και οι πηγές εκτείνονταν ομοιόμορφα, τότε, μέχρι κάποια απόσταση r θα υπήρχε ένας αριθμός πηγών ανάλογος του r^3 και οι αμυδρές πηγές θα είχαν ροές ανάλογες



Σχήμα 2.3: Η γωνιακή κατανομή των GRB όπως παρατηρήθηκε από το BATSE. Είναι φανερή η ισοτροπία τους.

με το $1/r^2$. Οπότε, σε ένα ευκλείδιο Σύμπαν με ομοιόμορφη κατανομή των πηγών με μια δεδομένη εσωτερική φωτεινότητα, η γραφική παράσταση του $logN$, με N να είναι ο αριθμός των πηγών με ροή μεγαλύτερη του S, ως προς το $logS$ θα έπρεπε να έχει κλίση -3/2. Στις υψηλές ροές, παρατηρείται αυτή η κλίση, αλλά στις μικρότερες η κλίση γίνεται μικρότερη, καταλήγοντας στο -0.8, στις πολύ μικρότερες ροές που μπορεί να δει το BATSE.

Τι σημαίνει αυτό· Η πτώση στις μικρότερες ροές, η οποία ανταποκρίνεται σε μεγαλύτερες αποστάσεις αν η εσωτερική φωτεινότητα είναι σταθερή, σημαίνει ότι υπό μία έννοια, υπάρχει μια κορυφή στην κατανομή. Για παράδειγμα, αν οι πηγές ήταν κατανεμημένες σε ένα λεπτό επίπεδο αντί σε σφαίρα, η κλίση θα ήταν -1 και για πηγές σε μια ευθεία η κλίση θα ήταν -0.5. Ακόμα και αν η κατανομή των πηγών είναι σφαιρική, η κλίση θα μεταβάλλεται, αν οι πηγές γίνονται λιγότερο έντονες σε μεγαλύτερες αποστάσεις ή αν η ροή μειώνεται γρηγορότερα από ότι $1/r^2$. Εξαιτίας της ισότροπης κατανομής, πολλοί άνθρωποι πίστεψαν ότι οι πηγές των GRB είναι κοσμολογικές σε τυπικές ερυθρομετατοπίσεις z=1, όπου η ερυθρομετατόπιση θα μείωνε τη ροή, έτσι ώστε να ακολουθήσει την πορεία της κλίσης στο διάγραμμα log N - log S.

Κεφάλαιο 3

Η οπτική εκπομπή που συνοδεύει μια GRB

Μέχρι πρόσφατα, το μεγάλο πρόβλημα ήταν ότι δεν έχουν παρατηρηθεί εκλάμψεις ακτίνων γάμμα σε μήκη κύματος μεγαλύτερα από αυτά των ακτίνων-X και δεν έχει παρατηρηθεί ήρεμο ταίρι (quiescent counterpart). Το γεγονός αυτό εμποδίζει την μελέτη των GRB, αφού δεν γνωρίζουμε σε ποια αντικείμενα να επικεντρώσουμε τη θεωρία μας. Στις μέρες μας όμως, αποτέλεσματα παρατηρήσεων από τηλεσκόπια στη Γη και στο Διάστημα δείχνουν ότι οι εκλάμψεις προέρχονται από πηγές σε αποστάσεις δισεκατομμυρίων ετών φωτός από τη Γη.

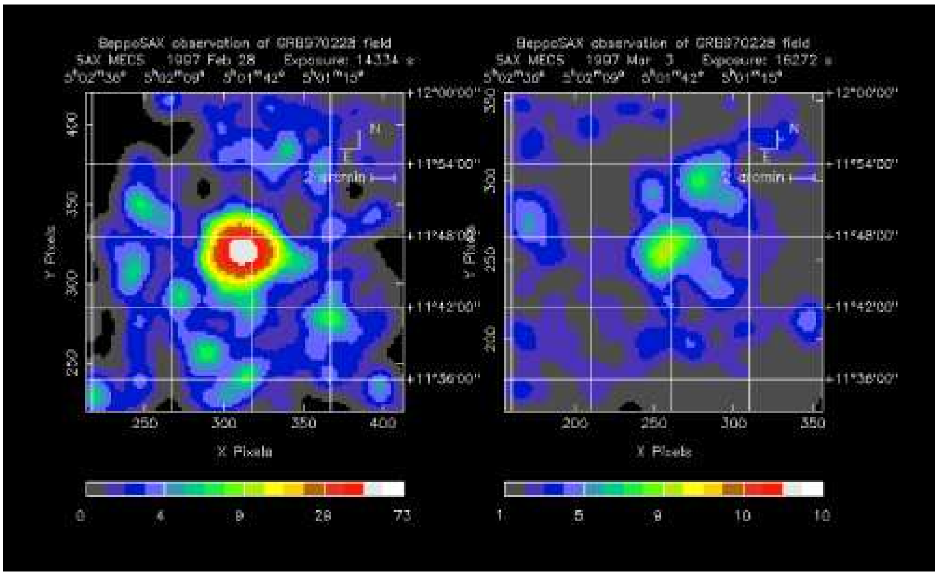
Με τη λειτουργία του δορυφόρου BeppoSAX και του τηλεσκοπίου Hubble μπορούν να προσδιοριστούν με μεγαλύτερη ακρίβεια οι θέσεις των GRB στα μήκη κύματος των ακτίνων-X. Τα δεδομένα από αυτά τα τηλεσκόπια δείχνουν ότι οι GRB προέρχονται από πολύ μακριά από τον Γαλαξία μας.

Η πρώτη ένδειξη για εξασθενούμενη πηγή ακτίνων X ήλθε στις 28 Φεβρουαρίου 1997. Μέσα σε λίγες ώρες από την ανίχνευση της έκλαμψης (με το όνομα GRB970228) από τον δορυφόρο BeppoSAX, οι αστρονόμοι άρχισαν την αναζήτηση στον ουρανό την πηγή των ακτίνων-X με οπτικά τηλεσκόπια. Τελικά, ανταμείφθηκαν με τις πρώτες **οπτικές** εικόνες μιας GRB (σχήμα 3.1).

Πιο συγκεκριμένα, η συγκεκριμένη έκλαμψη είχε φασματικό δείκτης -1.07, διάρκεια 80 sec, ολοκληρωμένη ροή $2x10^{-6} erg.cm^{-2}$ στα 40-100 keV και $8x10^{-6}$ $erg.cm^{-2}$στα 100-700 keV και μέγιστο ροής $4x10^{-6}$ $erg.cm^{-2}.sec^{-1}$ (για 1 sec από 40-600 keV).

Η ανάλυση των εικόνων από το τηλεσκόπιο Hubble στις 28 Φεβρουαρίου δείχνουν ότι η έκλαμψη συσχετίζεται με μια αμυδρή, συγκεχυμένη εκπομπή φωτός που επισκιάζεται από την φωτεινότερη εκπομπή της πηγής της GRB (σχήμα 3.2).

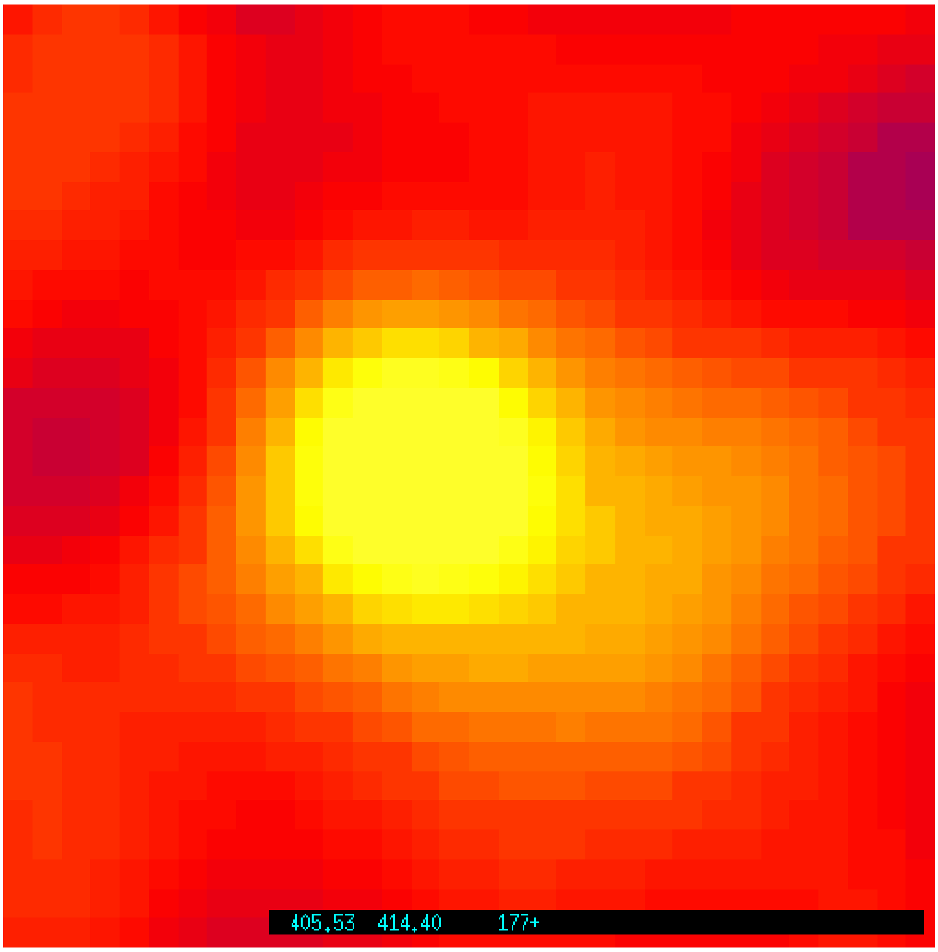
Αυτή η εκτεταμένη αμυδρή εκπομπή πιστεύεται από πολλούς επιστήμονες ότι



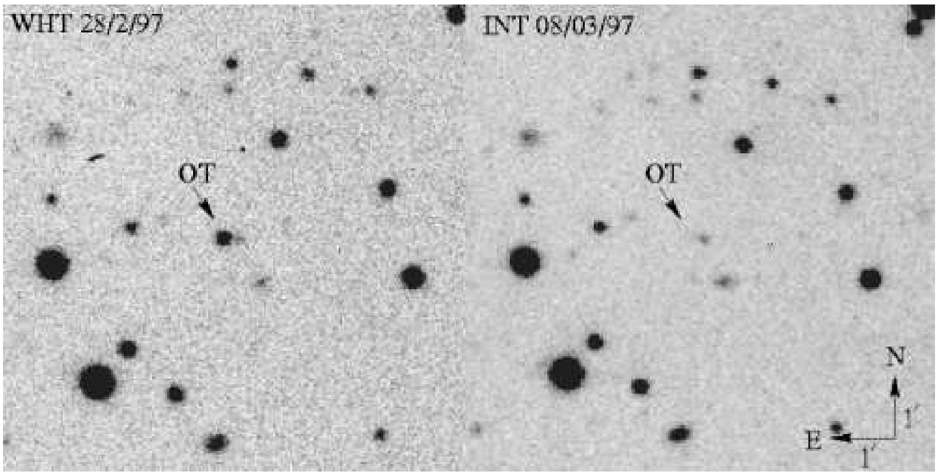
Σχήμα 3.1: Οι παρατηρήσεις της GRB970228 από το BeppoSAX. Στα αριστερά είναι η αρχική παρατήρηση της έκλαμψης στις 28 Φεβρουαρίου. Στα δεξιά είναι η ίδια περιοχή του ουρανού, στον αστερισμό του Ωρίωνα, στις 3 Μαρτίου, όπου φαίνεται ότι το αντικείμενο της έκλαμψης έχει γίνει αμυδρότερο.

είναι ένας γαλαξίας μέσα από τον οποίο, μερικά κατακλυσμικά γεγονότα οδηγούν σε GRB. Η διακριτική ικανότητα του τηλεσκοπίου επέτρεψε στους αστρονόμους να συμπεράνουν ότι η πηγή της έκλαμψης δεν βρίσκεται στο κέντρο του αμυδρού γαλαξία, αλλά πιθανότερα στον πληθυσμό του δίσκου των φυσιολογικών αστέρων. Αυτό φαίνεται να απομακρύνει την πιθανότητα οι εκλάμψεις να ενισχύονται από βαριές μαύρες οπές στο κέντρο των γαλαξιών και προτείνει ως υποψηφίους για τις GRB τα προϊόντα της τυπικής αστρικής εξέλιξης, όπως την σύγκρουση αστέρων νετρονίων. Ένας γαλαξίας όπως ο δικός μας, θα μπορούσε να παράγει μια έκλαμψη κάθε μερικά χιλιάδες χρόνια, η οποία, κατά τη μικρή διάρκειά της, θα φώτιζει ολόκληρο το γαλαξία.

Μέσα σε μια εβδομάδα, η έκλαμψη GRB970228 έχει χαθεί από το πεδίο όρασης (σχήμα 3.3). Από τότε, παρουσιάστηκαν δύο νέες εκλάμψεις, οι GRB970508 και GRB990123, οι οποίες έδωσαν εκπομπή στο ορατό. Με τις παραπάνω ανακαλύψεις ενισχύεται το πρότυπο της εξωγαλαξιακής προέλευσης (πρότυπο Fireball), σύμφωνα με το οποίο μια μεγάλη ποσότητα ενέργειας εκλύεται ξαφνικά σε μικρό όγκο. Αρχικά, η ενέργεια που αποτίθεται είναι οπτικά πυκνή στην παραγωγή ζευγών ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου ($\gamma \to e^- e^+$) και με αυτόν τον τρόπο η πίεση της ακτινοβολίας προκαλεί απότομη διαστολή. Η διαστολή αυτή ψύχει τα ηλεκτρόνια και όλη η ενέργεια εμφανίζεται σαν κινητική



Σχήμα 3.2: Η εικόνα της GRB970228 από το τηλεσκόπιο Hubble. Η συγκεχυμένη εκπομπή φωτός κάτω αριστερά από την φωτεινή έκλαμψη έχει αναγνωριστεί ως ένας μακρινός γαλαξίας.



Σχήμα 3.3: Στις 8 Μαρτίου η έκλαμψη GRB970228 είχε χαθεί από το πεδίο όρασης.

ενέργεια των βαρυονίων σε μια έντονη φάση προς τα έξω ροής. Όταν το κέλυφος αυτό συναντήσει την μεσοαστρική ύλη το προκύπτον ωστικό κύμα παράγει εκπομπή σε ευρεία περιοχή. Στο πρότυπο αυτό, η αρχική εκπομπή ακτίνων γ αναμένεται να ακολουθείται από εκρήξεις σε μήκη κύματος των ακτίνων X, του οπτικού και των ραδιοκυμάτων, όπως έγινε στην περίπτωση της GRB970228.

Κεφάλαιο 4

Πρότυπα για τις GRB

4.1 Εισαγωγή

Μια θεωρητική κατανόηση των εκλάμψεων των ακτίνων γάμμα θα πρέπει να λαμβάνει υπόψιν διάφορες συνιστώσες: την τοποθεσία, την πηγή της ενέργειας και τον μηχανισμό εκπομπής. Η τοποθεσιά πρέπει να συμφωνεί με την παρατηρούμενη ισοτροπία και ανομοιογένεια, η πηγή της ενέργειας πρέπει να είναι αρκετή για να παράγει τις παρατηρούμενες εντάσεις για τις υποτιθέμενες αποστάσεις και ο μηχανισμός εκπομπής πρέπει να είναι ικανός να αναπαράγει τις χρονικές κλίμακες και τα φάσματα που παρατηρούνται στις εκλάμψεις. Η ικανοποίηση ακόμα και αυτών των ελαχίστων παρατηρήσιμων προδιαγραφών έχει αποδειχθεί δύσκολη. Καμιά από τις προτεινόμενες θεωρίες δεν έχει δώσει πλήρεις λεπτομέρειες για όλες τις συνιστώσες.

Το συγκεκριμένο γαλαξιακό μοντέλο, το οποίο μελετάται στις μέρες μας από πολλούς επιστήμονες, παρακινείται από την πρόσφατη ανακάλυψη ότι πολλοί αστέρες νετρονίων γεννώνται με μεγαλύτερη ταχύτητα απ΄ ότι εθεωρείτο προηγουμένως ($> 500\, km/sec$ αντί για $< 200\, km/sec$). Το γεγονός αυτό θα μπορούσε να τα επιτρέψει να αποδράσουν από τον δίσκο και να κινηθούν μέσα στην άλω ή στην κορώνα γύρω από τον γαλαξία σε απόσταση περίπου 100 kpc. Αυτή η απομακρυσμένη κορώνα περιέχει έναν άφθονο πληθυσμό πηγών, οι οποίες εμφανίζονται ισοτροπικές, όταν παρατηρούνται από τη Γη και γι΄ αυτό μπορούν εύκολα να ληφθούν υπόψιν στις γωνιακές και φωτεινές συνεισφορές των εκλάμψεων που παρατήρησε το BATSE. Το μοντέλο της γαλαξιακής κορώνας έχει το ελκυστικό χαρακτηριστικό ότι μπορεί εύκολα να εξηγήσει τον γρήγορο χρόνο ενναλαγής, τις γραμμές κύκλοτρον, την επαναληπτικότητα και την απουσία φωτεινών, οπτικών ζευγαριών.

Από την άλλη όμως μεριά, πρόσφατες παρατηρήσεις ζευγών σε άλλα μέρη του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος φαίνεται να υπονοούν ότι μερικές, αν όχι όλες, GRB συμβαίνουν σε άλλους γαλαξίες, πέρα του δικού μας. Η παρατηρούμενη ισοτροπία είναι επίσης μια απαραίτητη προϋπόθεση για τα κοσμολογικά μοντέλα. Η φαινόμενη ανομοιογένεια θα μπορούσε να προκληθεί από φαινόμενα μετατοπίσεων του ερυθρού. Εάν οι GRB είναι κοσμολογικές, ωστόσο, η έκλυση ενέργειας θα πρέπει να είναι γιγαντιαία. Για τις πιο φωτεινές εκλάμψεις, εάν η εσωτερική εκμπομπή είναι ισοτροπική, η ολική ενέργεια των ακτίνων γάμμα πρέπει να είναι από 10^{53} erg εώς 10^{54} erg, η οποία είναι συγκρίσιμη με την ενέργεια που εκλύεται από υπερκαινοφανείς αστέρες. Η διαφορά, φυσικά, είναι ότι στους υπερκαινοφανείς, μόνο $10^{51} erg$ είναι κινητική ενέργεια και ορατό φως και σχεδόν όλα τα φωτόνια έχουν ενέργειες κάτω από τις ακτίνες-X.

Μερικά από τα πρότυπα για την ερμηνεία των GRB είναι:

1. Πρότυπο ήρεμων Pulsar.
2. Θερμοπυρηνικό πρότυπο.
3. Πρότυπο ξαφνικής συσσώρευσης.
4. Πρότυπο αστρικού σεισμού στους αστέρες νετρονίων.
5. Πρότυπα εκλάμψεων και άλλα.

Θα περιοριορίσουμε την αναφορά μας στα δύο πρώτα πρότυπα, τα οποία φαίνονται να κερδίζουν όλο και περισσότερο έδαφος.

4.2 Πρότυπο ήρεμων Pulsar.

Τα πρότυπα των ήρεμων/λανθάνοντων παλλόμενων αστέρων (pulsar) βασίζονται στην παρατήρηση ότι μερικοί από τους pulsar με πολύ μικρή περίοδο, οι οποίοι παίρνουν την ενέργειά τους από την περιστροφή τους, εκπέμπουν το μεγαλύτερο μέρος της λαμπρότητάς τους σε ακτίνες γάμμα (π.χ. ο pulsar Vela) και κατά ένα μικρότερο ποσοστό σε ραδιοκύματα, οπτικά φωτόνια και ακτίνες X. Ο μηχανισμός εκπομπής βασίζεται στην παρουσία χασμάτων στην εξωτερική μαγνητόσφαιρα, όπου παράγονται ζεύγη ηλεκτρονίων-ποζιτρονίων, λόγω διασταυρούμενων δεσμών ακτινοβολίας σύγχροτρον και επιταχύνονται στα ηλεκτρικά πεδία του χάσματος, αποτελώντας έτσι την πηγή των ακτίνων γάμμα και άλλων ζευγών ηλεκτρονίων - ποζιτρονίων. Υπάρχει ένα λεπτό σημείο σ΄ αυτήν την περίπτωση: σαν συνέπεια της αναπόφευκτης επιμήκυνσης της περιόδου των pulsar, όπως ο Vela, αυτές οι πηγές τείνουν να αποδώσουν τη λαμπρότητά τους όλο και περισσότερο στην περιοχή των ακτίνων γάμμα μέχρις ότου σβήσουν τους εαυτούς τους. Τότε, ακολουθεί μια σχετικά ταχεία ευθυγράμμιση του μαγνητικού άξονα με τον άξονα περιστροφής. Ο αριθμός τέτοιων σβησμένων pulsar των οποίων το μαγνητικό πεδίο εξακολουθεί να είναι ισχυρό, υποθέτωντας μια χρονική κλίμακα απόσβεσης του πεδίου περίπου στα 10^7 χρόνια, είναι περίπου 10^5 στο Γαλαξία ή περισσότερα, αν η απόσβεση επιβραδυνθεί. Ο αριθμός αυτός είναι κατάλληλος για την ερμηνεία των GRB. Αυτοί οι ήρεμοι pulsar μπορούν να επαναφλεγούν σε τυχαία χρονικά διαστήματα από μια ξαφνική διαταραχή, για παράδειγμα φλας ακτίνων X από μια θερμοπυρηνική έκρηξη διαμέσου της μαγνητόσφαιρας ή από έναν διερχόμενο κομήτη ή αστεροειδή. Το φάσμα της επακόλουθης μαγνητοσφαιρικής εκπομπής θα μπορούσε να μοιάζει μ' εκείνο ενός ακραίου pulsar τύπου Vela, εξηγώντας τα τραχιά χαρακτηριστικά του φάσματος των ακτίνων γάμμα και τη χαμηλή εκπομπή των ακτίνων X. Η ενεργειακή πηγή σ' αυτή την περίπτωση είναι η περιστροφή του αστέρα νετρονίων. Η λαμπρότητα των ακτίνων γάμμα είναι $L_\gamma \sim 10^{35} \div 10^{36}\, erg.sec^{-1}$.

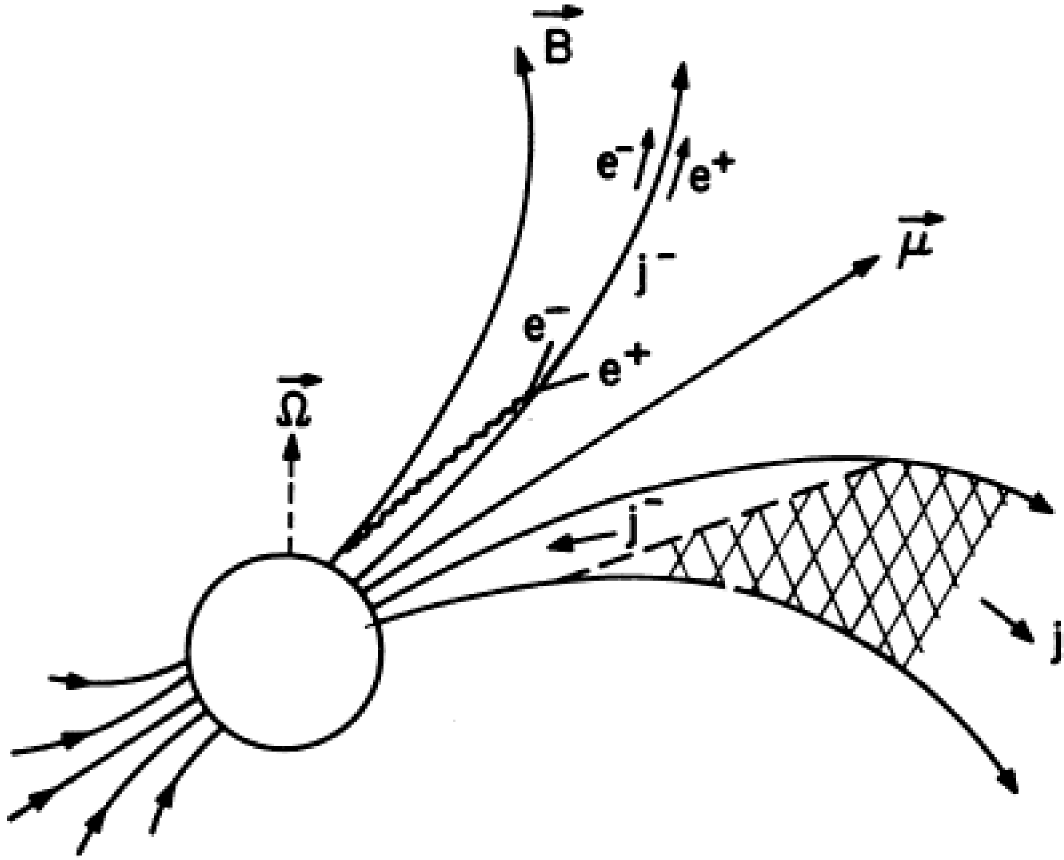
Ένα από τα προβλήματα με αυτό το πρότυπο είναι η εξήγηση των στενών γραμμών κυκλότρου που παρατηρούνται σε μερικές GRB, μια και αυτές εμφανίζονται σε ισχυρά μαγνητικά πεδία σε απορρόφηση. Οι γραμμές θα απαιτούσαν σκέδαση ή εκπομπή του συνεχούς φάσματος (που δημιουργείται στα εξωτερικά χάσματα, κοντά στον κύλινδρο του φωτός) από αέριο κοντά στις πολικές περιοχές ενός αστέρα νετρονίων, κάτι το οποίο έχει μικρή πιθανότητα να συμβεί.

Στο σχήμα 4.1 παρουσιάζεται η δομή ενός διπολικού μαγνητικού πεδίου και η ροή του ρεύματος (j) και των $e^{\pm}$ όπως αναμένεται από την παραγωγή ζευγών, πάνω από την πολική περιοχή. Η γραμμοσκιασμένη περιοχή είναι αυτή στην οποία η μαγνητοσφαιρική παραγωγή ζεύγους $e^{\pm}$ είναι αναγκαία για τη διατήρηση της ροής του ρεύματος.

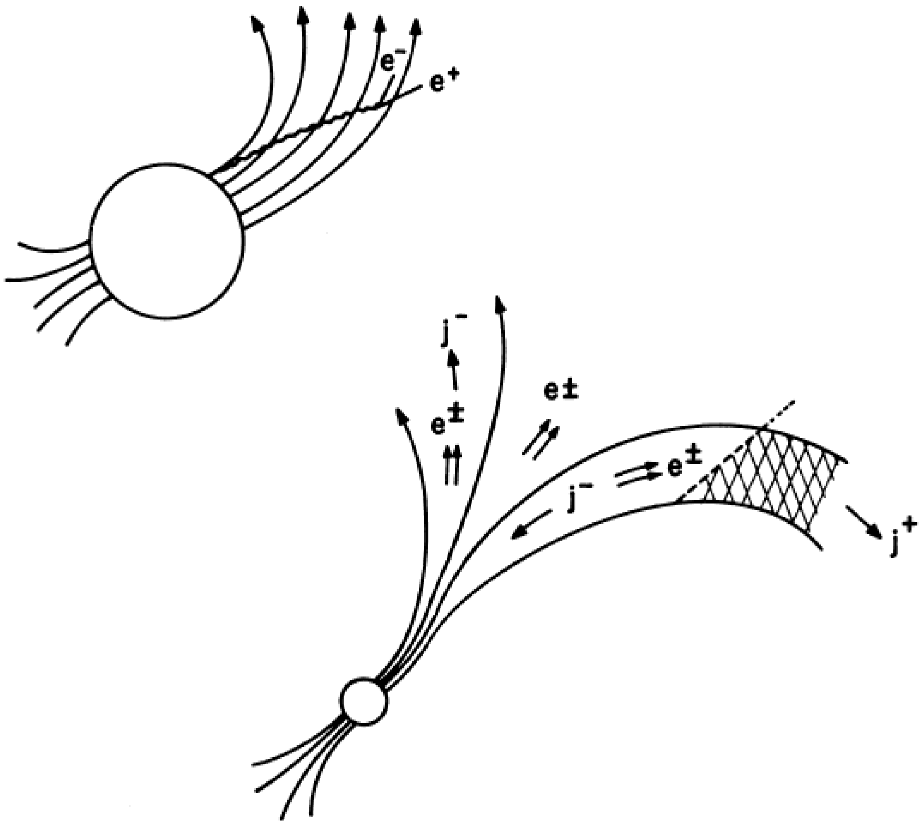
Τέλος στο σχήμα 4.2 υπάρχει διαφοροποίηση από την εικόνα 4.1 στην ροή των ζευγών $e^{\pm}$ που παράγονται πάνω από την πολική περιοχή, όταν το μαγνητικό πεδίο έχει πολυπολική δομή, ώστε οι ανοιχτές δυναμικές γραμμές κοντά στην πολική περιοχή να καμπυλώνουν προς τα πάνω. Στην περίπτωση αυτή, η παραγωγή ζεύγους $e^{\pm}$ και η εξωτερική ροή συμβαίνουν σ' όλες τις ανοιχτές δυναμικές γραμμές, συμπεριλαμβανομένων και εκείνων που φτάνουν την γραμμοσκιασμένη περιοχή. Ο διαχωρισμός του ζεύγους $e^{\pm}$ τότε μπορεί να αντικαταστήσει την παραγωγή ζεύγος, η οποία απαιτείται στην περιοχή αυτή.

4.3 Θερμοπυρηνικό Πρότυπο

Το θερμοπυρηνικό πρότυπο αποδίδει την ενέργεια της έκρηξης στην ξαφνική ανάφλεξη του καυσίμου, το οποίο συσσωρεύτηκε αργά στην πολική περιοχή ενός **μαγνητισμένου αστέρα νετρονίων**. Η έκρηξη παράγεται με φλας ηλίου που πυροδοτείται από ένα αρχικό φλας υδρογόνου, μόνο αν η θερμοκρασία στη βάση της στήλης συσσώρευσης είναι αρκετά χαμηλή ή αν ο ρυθμός συσσώρευ-



Σχήμα 4.1: Ο μηχανισμός παραγωγής ακτίνων γάμμα σ′ έναν παλλόμενο αστέρα. Η μαγνητική διπολική ροπή είνα μ και το spin είναι Ω.[2]



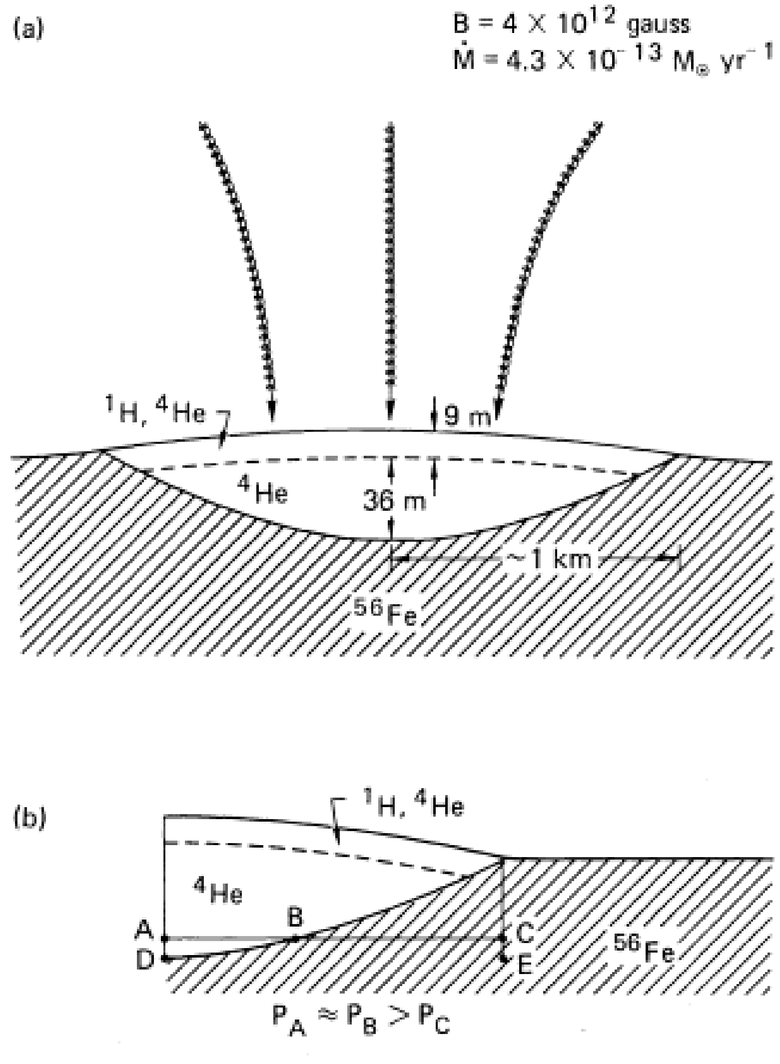
Σχήμα 4.2: Διαφοροποίηση από την εικόνα 4.1 στην ροή των ζευγών $e^{\pm}$. [2]

σης είναι αρκετά μικρός πάνω από έναν περιορισμένο χώρο της μαγνητισμένης πολικής περιοχής. Από την άλλη μεριά, για υψηλούς ρυθμούς συσσώρευσης αλλά πολύ χαμηλά μαγνητικά πεδία, όπου η συσσώρευση εμφανίζεται πάνω απ΄ όλη την επιφάνεια, τα θερμοπυρηνικά φλας οδηγούν σε εκρήξεις ακτίνων X. Ο ρυθμός συσσώρευσης που χρειάζεται για να οδηγήσει σε θερμοπυρηνική έκρηξη, εξαρτάται από την εσωτερική θερμοκρασία που έχει υποτεθεί για τον άστερα. Για $T < 3x10^7\,^oK$ ο απαιτούμενος ρυθμός είναι $M \sim 10^{-15} \div 10^{-16} M_{\bigodot}\,yrs^{-1}$ και οδηγεί σε φλας υδρογόνου με σύλληψη ηλεκτρονίων από πρωτόνια, αφού έχει επιτευχθεί μια ακρετά μεγάλη πυκνότητα (τυπική απαιτούμενη συσσώρευση $\sim 10^{23}\,gr$). Αυτή η διαδικασία θερμαίνει το υλικό πάνω από το κατώφλι της αντίδρασης 3α κάτι που οδηγεί σε μια θερμοπυρηνική πυροδότηση του ηλίου. Από την άλλη μεριά, αν η εσωτερική θερμοκρασία είναι υψηλότερη από $3x10^7\,^oK$, μπορεί να εμφανιστεί νωρίτερα ένα φλας υδρογόνου, για συσσώρευση τόσο μικρή όσο $\sim 10^{19} gr$. Η ενέργεια που απελευθερώνεται τότε δεν είναι ικανή να αυξήσει τη θερμοκρασία στην τιμή που απαιτείται για να αναφλεγεί το ήλιο, έτσι ώστε μετά το αρχικό φλας το συσσωρευθέν υδρογόνο να καίγεται ήρεμα και σταθερά σε ήλιο. Αφού το συσσωρευθέν ήλιο τώρα φθάσει μια μάζα μεγαλύτερη από $10^{20} - 10^{21}\,gr$ και με πυκνότητα $10^7 - 10^8\,gr/cm^3$ γίνεται πιθανή η αντίδραση 3α. Η ακριβής θερμοκρασία του ηλίου προσδιορίζεται από το ρυθμό συσσώρευσης, οδηγώντας είτε σε deflagration του ηλίου ή πυροδότηση για $M \sim 10^{-13} \div 10^{-14} M_{\bigodot} yrs^{-1}$. Αυτοί οι χαμηλοί ρυθμοί συσσώρευσης είναι οριακά συμβατοί με τα όρια των ακτίνων X σε μια σταθερή λαμπρότητα, αλλά τα οπτικά όρια επιβάλλουν έναν περιορισμό στον τύπο του διπλού συνοδού, ο οποίος προμηθεύει το αέριο. Διαφορετικά, ένας αστέρας νετρονίων μόνος του, θα μπορούσε να συσσωρεύει σ΄ αυτό το ρυθμό από το μεσοαστρικό αέριο υπό τον όρο να κινείται με σχετικά μικρές ταχύτητες ($U < 30\,km/sec$). Στο σχήμα 4.3α παρουσιάζεται το ρεύμα που περιορίζεται μαγνητικά μέσα σε έναν αστέρα νετρονίων και δημιουργεί μια φουσκάλα από υδρογόνο και ήλιο με τις διαστάσεις που παρουσιάζονται. Η καμπύλη της επιφάνειας της φουσκάλας έχει μεγεθυνθεί για εποπτικούς λόγους. Στο σχήμα 4.3β φαίνεται η επιφάνεια του σιδήρου του αστέρα νετρονίου που έχει αποδοθεί περίπου με ένα επίπεδο και έχει πάλι μεγεθυνθεί η καμπύλη της φουσκάλας. Οι πιέσεις στα ισοβαθή σημεία στο επίπεδο του ηλίου (σημεία A και B) είναι σχεδόν ίσες και οι μικρές διαφορές προκύπτουν από την μεταβολή στο πάχος της φουσκάλας. Η πίεση στα ισοδύναμα βάθη στο επίπεδο το σιδήρου είναι σημαντικά μικρότερη εξαιτίας. Η βαθμίδα της πίεσης από το σημείο B στο σημείο C πρέπει να ισορροπείται από τις μαγνητικές και επιφανειακές δυνάμεις. Οι πιέσεις στα σημεία D και E είναι ίσες.

Οι ολικές ενέργειες των εκρήξεων, οι χρόνοι αύξησης, η διάρκεια και οι πιθανοί ρυθμοί επανάληψης, φαίνεται να ταιριάζουν λογικά καλά στα αντίστοιχα που παρατηρήθηκαν σε τυπικές GRB. Φυσικά, η εναπόθεση θερμοπυρηνικής ενέργειας εμφανίζεται σε μεγάλα οπτικά βάθη στι πολικές περιοχές, οπότε από μόνη της δεν θα οδηγούσε σε εκπομπή ακτίνων γ, αλλά μάλλον σε εκπομπή ακτίνων X σε τυπική ενέργεια μερικών keV ($\hbar\omega \sim KT_{eff}$). Την ίδια στιγμή, το μεγάλο αυτό οπτικό βάθος σημαίνει, για τη θερμοπυρηνικής προέλευσης GRB, μεγαλύτερης διάρκειας και χαμηλής λαμπρότητας εκπομπή ακτίνων X μετά την έκρηξη, που φαίνεται να συμφωνεί με τις παρατηρήσεις και ερμηνεύεται σαν επιχείρημα που υποστηρίζει αυτό το πρότυπο. Δύο ακόμα προβλέψεις του προτύπου είναι ότι η ενέργεια της έκρηξης θα πρέπει να είναι ανάλογη του χρόνου επανεμφάνισης και ότι ο χρόνος επανεμφάνισης της έκρηξης θα είναι αντιστρόφως ανάλογος της σταθερής λαμπρότητας της συσσώρευσης, χαρακτηριστικά, τα οποία δεν θεμελιώνονται βάσιμα από τα πειραματικά δεδομένα.

Η μετατροπή της ενέργειας σε ακτίνες γ απαίτει έναν επιπρόσθετο μηχανισμό για τη διάδοση του συνόλου της ενέργειας με μικρή διάχυση, σε περιοχή μικρότερης αδιαφάνειας, όπου κατά προτίμηση θα μπορεί να μετατραπεί με μεγαλύτερη αποτελεσματικότητα σε ακτινοβολία γάμμα. Δύο τέτοιοι πιθανοί μηχανισμοι είναι η μαγνητική αγωγή και τα κύματα Alfven. Η ενέργεια που μεταφέρεται μ΄ αυτόν τον τρόπο στη μαγνητόσφαιρα θεωρείται ότι οδηγεί σε διαταραχές του μαγνητικού πεδίου μεγάλου πλάτους, επανασύνδεσης και/ή κατάρρευση του κενού που παράγει και επιταχύνει ζεύγη ηλεκτρονίων-ποζιτρονίων, τα οποία, ευρισκόμενα τώρα στη χαμηλότερης πυκνότητας εξωτερική μαγνητόσφαιρα, είναι ικανά να παράγουν ακτίνες γάμμα, όπως περιγράφηκε.

Οι ακτίνες X μικρότερης λαμπρότητας θα παράγονται από διαδικασίες στην αστρική επιφάνεια.



Σχήμα 4.3: Οι διεργασίες παραγωγής ακτίνων γάμμα, σύμφωνα με το θερμοπυρηνικό πρότυπο. [3]

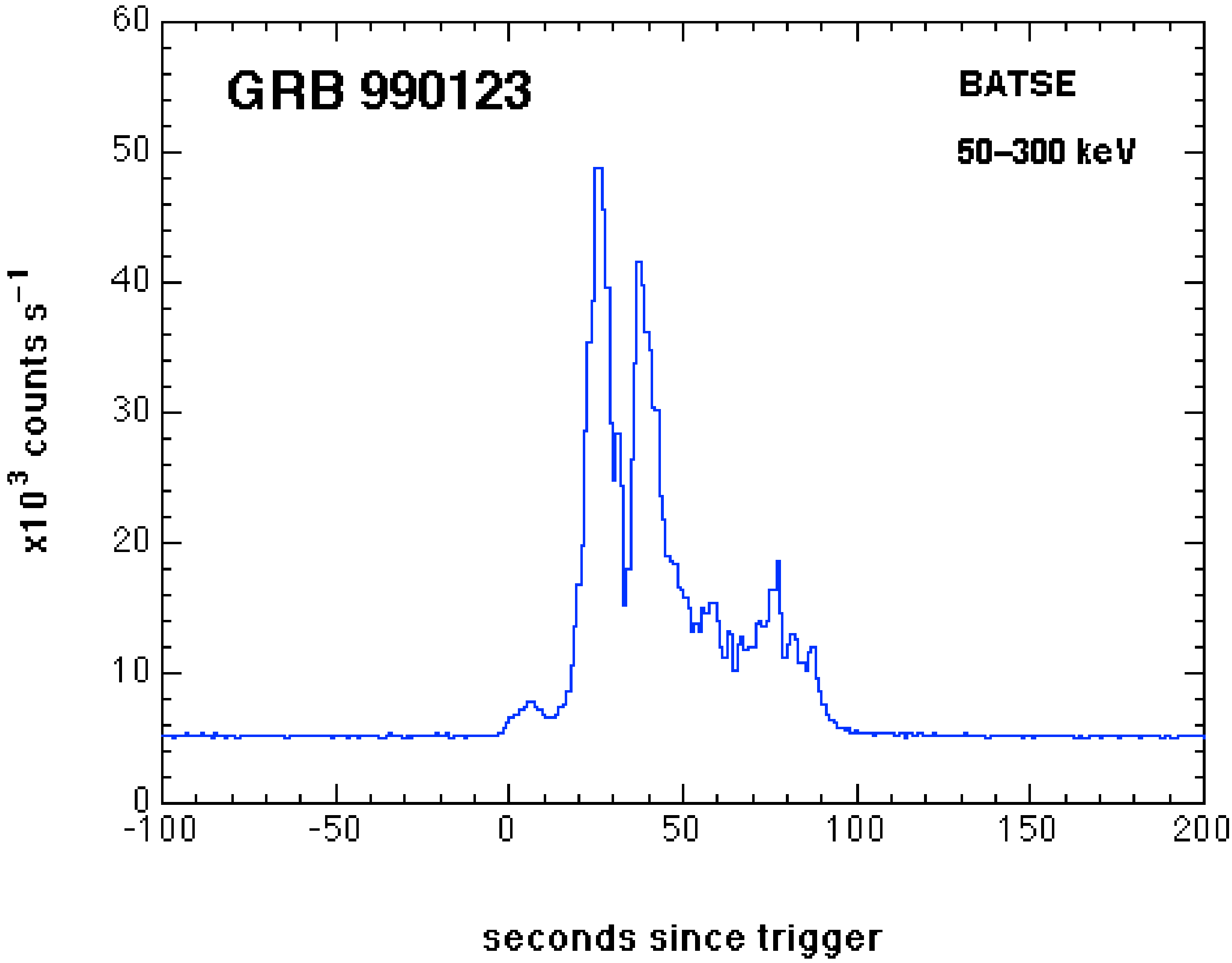
Κεφάλαιο 5

Το γεγονός GRB990123

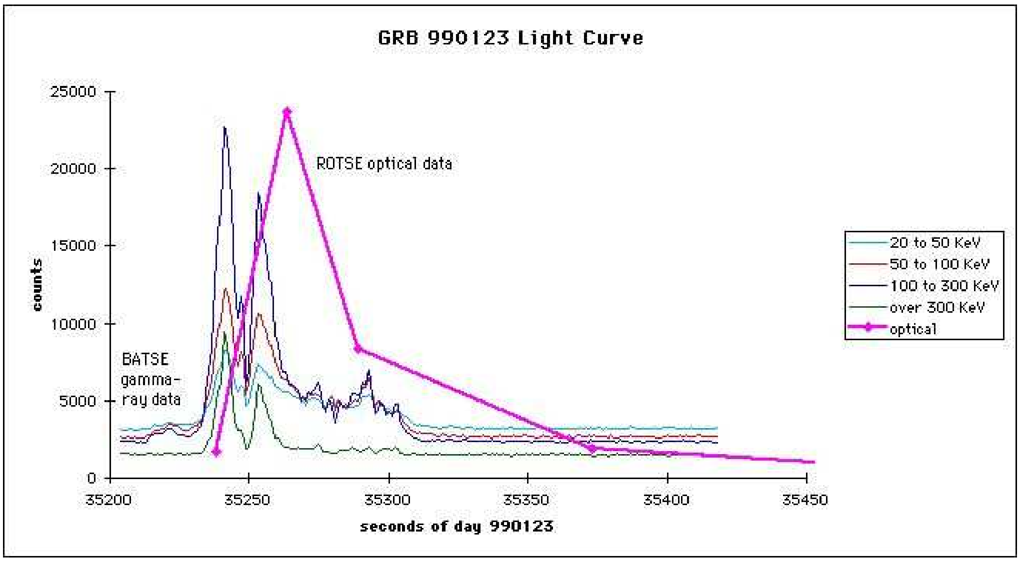
Στο σχήμα 5.1 φαίνεται το χρονικό φάσμα της GRB990123 , ενώ η καμπύλη φωτός του συγκεκριμένου γεγονότος παρουσιάζεται στο σχήμα 5.2, όπου φαίνεται το οπτικό ανάλογο των εκρήξεων των ακτίνων γάμμα. Το γεγονός διήρκησε περίπου 20 sec και είχε φαινόμενο μέγεθος m=9 (ορατό από τη Γη ακόμα και με απλά κυάλια). Εκτός από το οπτικό φάσμα, ανιχνεύθηκαν επίσης και υπεριώδεις ακτινοβολίες, ραδιοακτινοβολίες καθώς επίσης και έντονη ακτινοβολία X, η οποία ξεπέρασε τα όρια που θέτουν τα μέχρι τώρα πρότυπα. Η ολική εκπεμπόμενη ενέργεια της συγκεκριμένης έκλαμψης ξεπερνούσε τα $3.10^{54}\, ergs (\sim 1.9x10^{66}\, eV)$. Μάλιστα, η ισχύς της ξεπέρασε την ισχύ που θα εξέπεμπαν 10^9 Ήλιοι. Η ερυθρομετατόπιση της πηγής ήταν $z \sim 1.6$, που την τοποθετεί σε απόσταση περίπου 9 δισεκατομμύρια έτη φωτός από τη Γη.

Η έκρηξη GRB990123 ήταν ιδαίτερα σημαντική για δύο λόγους. Αρχικά, δεν μπορούσε να εξηγηθεί η εκπομπή των ορατών ακτινοβολιών και κατά δεύτερον γεννήθηκε η ερώτηση εάν η εκπομπή του φωτός έγινε σε δέσμη. Ως απάντηση στο πρώτο ερώτημα, αναπτύχθηκε η θεωρία των αντιστρόφων κυμάτων κρούσης ως πηγές των ορατών ακτινοβολιών, ενώ στο δεύτερο ερώτημα βοήθησε το χρονικό φάσμα, όπου κανείς παρατηρεί γρήγορη ελάττωση. Αυτό σημαίνει ότι το φως σε δέσμη φαίνεται να μειώνεται σε ένταση, απ΄ ότι το ισοτροπικό φως. Με αυτόν τον τρόπο εξηγείται ίσως η μεγάλη ποσότητα ενέργειας που ανιχνεύθηκε, γιατί, αν οι GRB εκπέμπονται σε δέσμη τότε οι ενέργειες που ανιχνεύουμε είναι μικρότερες απ΄ ό,τι νομίζουμε, αλλά ταυτόχρονα αυτό σημαίνει ότι υπάρχουν πολλές εκρήξεις τις οποίες δεν βλέπουμε. Μπορεί με άλλα λόγια, να γίνονται εκρήξεις ακτίνων γάμμα σε δέσμη, αλλά είναι ορατές σε εμάς μόνο οι δέσμες που εκπέμπονται προς την κατεύθυνση της Γης.

Η αφορμή για την έκλαμψη πιστεύεται ότι είναι η συννένωση δύο αστέρων νετρονίων, η οποία και προκάλεσε την έκλυση των τεραστίων ποσοτήτων ενέργειας.



Σχήμα 5.1: Χρονικό φάσμα της GRB990123



Σχήμα 5.2: Η καμπύλη φωτός της GRB990123 σε διάφορα εύρη ενεργειών καθώς επίσης και στο οπτικό

Κεφάλαιο 6

Επίλογος

Όπως έχει ήδη γίνει φανερό απ΄ όλα όσα αναφέρθηκαν στο κυρίως κείμενο, οι εκλάμψεις των ακτίνων γάμμα μάλλον προκαλούν συνεχώς μεγάλα ερωτηματικά. Δεν έχει δωθεί ακόμα η πλήρης ερμηνεία για την προέλευσή τους, η οποία και θα ανταποκρίνεται σε όλα τα χαρακτηριστικά τους. Με την βελτίωση της επίγειας και διαστημικής τεχνολογίας, οι επιστήμονες έχουν κάνει σημαντικά άλματα στην απάντηση των ερωτημάτων. Η πορεία προς την βαθύτερη μελέτη τους και, εν τέλει, την ερμηνεία τους συνδέεται άμεσα με τα ερωτήματα τόσο της γέννεσης, όσο και της κατάρρευσης του σύμπαντος.

Βιβλιογραφία

[1] http://imagine.gsfc.nasa.gov/

[2] M. Ruderman, K.S. Cheng: Astrophysical Journal, **335**:306-318, 1988 December 1

[3] S.E. Woosley, R.K. Wallace: Astrophysical Journal, **258**:716-732, 1982 July 15

[4] Στασινός Γιαννέας: Εκρηξεις Ακτινων γαμμα (Παρατηρησιακα Δεδομενα, Θεωρητικα Προτυπα για τη Δομη και το Φασμα).