

Αστρονομία ακτίνων γ

Όλα τα άλλα πεδία της αστρονομίας εξετάζουν τα αντικείμενα του σύμπαντος κυρίως βάσει της κατάστασης της θερμοδυναμικής ισορροπίας τους. Ενώ λοιπόν εξετάζουν βασικά τις καταστάσεις ερεθισμού ατόμων και μορίων, η αστρονομία ακτίνων γ ασχολείται με μη θερμικά φαινόμενα. Έχει να κάνει με την ιδιομορφία των φωτονίων, λόγω της μεγάλης ενέργειάς τους. Ταυτόχρονα η αστρονομία ακτίνων γ είναι συνδεδεμένη με τη αστρονομία σε όλα τα μήκη κύματος και δεν εξετάζεται μεμονομένα από αυτά.

Το νέο πεδίο της αστρονομίας γ από το έδαφος εξετάζει τα δευτερεύοντα σωματίδια που δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση των κοσμικών φωτονίων γ με την ατμόσφαιρα. Παρά την επίδραση της ατμόσφαιρας πετυχαίνουμε με αυτήν την μέθοδο την ανάλυση της κατεύθυνσης και της διασποράς ενέργειας των κοσμικών φωτονίων.

Οι εκτροπές αυτές των κβάντων γ είναι γενικά αξιόπιστες, άρα μας δείχνουν την αρχική πηγή. Όπως όλα τα μήκη κύματος, οι ακτίνες γ μας πληροφορούν για την κατάσταση στην οποία βρίσκεται η εκπέμπουσα ύλη και τις φυσικές διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα σε αυτήν, αλλά και την αλληλεπίδραση των φωτονίων με την ύλη που μεσολαβεί ανάμεσα στην πηγή και τον παρατηρητή (μεσοαστρική ύλη).

Γραμμές εκπομπής ακτίνων γ των ατομικών πυρήνων.

Το κατώτατο όριο της αστρονομίας γ είναι η ενέργεια των φωτονίων στα 500 keV, άρα περιλαμβάνει μεταβολές σε ερεθισμένους πυρήνες ατόμων (μέχρι μερικές δεκάδες MeV). Έτσι μας επιτρέπει την εξέταση της πυρηνικής σύντηξης σε αστέρια μεγάλης μάζας και φαινομένων όπως οι Νόβα και οι σουπερνόβα, καθώς και τις ραδιενεργές διασπάσεις που συνδέονται με αυτές τις εκρήξεις, όπως και τον καθορισμό της θέσης των γαλαξιακών πηγών. Ιδίως η χαρτογράφηση της γραμμής του (^{26}Al) (και των (^{60}Fe), (^{44}Ti)) στον Γαλαξία μας συνδέεται με την διασπορά των αστέρων μεγάλης μάζας, που δημιουργούν τέτοια βραχύβια ισότοπα.

Αστρονομία ακτίνων γ μεγάλης ενέργειας (>30 MeV)

Είναι μεγαλύτερης ενέργειας από την ενέργεια της δημιουργίας ζευγών στους ατομικούς πυρήνες. Είναι πολύ σπάνιες, στα όρια του στατιστικού λάθους των δορυφορικών ανιχνευτών.

Από αυτές τις μεγάλης ενέργειας εκπομπές συμπεραίνουμε τις πηγές και την διασπορά της κοσμικής ακτινοβολίας στον Γαλαξία μας και έξω από αυτόν, τις ιδιότητες των διακριτών πηγών ακτίνων γ στον Γαλαξία μας (υπολείμματα σουπερνόβα, πάλσαρ, διπλοί ακτίνων X, νεαρά σμήνη μεγάλης μάζας και άγνωστες πηγές) και τέλος τις μη θερμικές διαδικασίες εκπομπής από ενεργούς γαλαξιακούς πυρήνες.

Διάχυτες γαλαξιακές εκπομπές ακτίνων γ .

Η κατηγορία αυτή κυριαρχείται από μια στενή λωρίδα εντατικής εκπομπής στο επίπεδο του Γαλαξία. Η εκπομπή είναι πιο ισχυρή στο εσωτερικό του Γαλαξία μας (σε γαλαξιακό πλάτος 100 μοίρες προς το κέντρο) και επηρεάζεται από γαλαξιακές δομές όπως οι συμπυκνώσεις στους βραχίονες, αλλά και από την οπτική γωνιά του ηλιακού μας συστήματος.

Κοσμική ακτινοβολία.

Η κοσμική ακτινοβολία είναι ένα γενικό φαινόμενο του Γαλαξία και δεν περιορίζεται στην τοπική περιοχή ενός αστρικού συστήματος.

Η κύρια πηγή των ακτίνων με ενέργεια μεγαλύτερη από τα 100 MeV είναι συγκρούσεις σχετικιστικών σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας με πυρήνες ατόμων του μεσοαστρικού αερίου κατά τις οποίες δημιουργούνται μεσόνια, που διασπώνται άμεσα σε 2 κβάντα ακτίνων γ , αναδεικνύοντας έτσι (στις ακτίνες γ) περιοχές μεγάλης πυκνότητας αερίων. Δευτερεύουσες πηγές ακτίνων γ είναι οι ακτίνες επιβράδυνσης (φαινόμενο Compton από ηλεκτρόνια της κοσμικής ακτινοβολίας σε πυρήνες ατόμων της μεσοαστρικής ύλης).

Απλοποιημένο φαινομενολογικό μοντέλο.

Η κοσμική ακτινοβολία (ως σχετικιστικό, άρα πολύ καυτό <αέριο>) μπορεί να αιχμαλωτιστεί στον Γαλαξία μας μόνο από το μαγνητικό του πεδίο (τα φορτισμένα σωματίδια είναι εγκλωβισμένα στις μαγνητικές γραμμές). Το μαγνητικό πεδίο είναι με τη σειρά του <παγωμένο> στο ηλεκτρικά φορτισμένο μεσοαστρικό αέριο και συγκρατείται σε χαμηλά ύψη γύρω από το μέσο επίπεδο προς την επιφανειακή πυκνότητα της μεσοαστρικής ύλης. Σε μικρές κλίμακες <1 kpc η σχέση αυτή δεν είναι τόσο δυνατή λόγω της διάχυσης των ενεργειακών σωματιδίων. Σε μεγάλα ύψη σχετικά με το πλάτος του γαλαξιακού δίσκου αερίων η κοσμική ακτινοβολία διαφεύγει του Γαλαξία. Τότε παρασέρνει μαγνητικό πεδίο και αέριο από τον Γαλαξία. Θεωρητικά αυτό πρέπει να δημιουργήσει έναν γαλαξιακό άνεμο, που όμως είναι εμφανής μόνο σε μεγάλες αποστάσεις (> μερικών kpc).

Όμως αυτός ο άνεμος επηρεάζει την μάζα και την στροφορμή του Γαλαξία κατά τη διάρκεια της ζωής του (όπως ο αστρικός άνεμος το αστέρι). Δεν υπάρχουν αυξομειώσεις του ενεργειακού φάσματος των σωματιδίων σε τοπικό επίπεδο, όπως δείχνουν άμεσες μετρήσεις στο ηλιακό μας σύστημα. Η ένταση του ρεύματος ισοτόπων σωματιδίων μειώνεται στο 1/3 σε απόσταση 15 kpc από το κέντρο του Γαλαξία.

Συνολικά οι εικόνες της εκπομπής διαχέουσας ακτινοβολίας γ μας δείχνουν ότι η κοσμική ακτινοβολία είναι ένας ισοδύναμος σύντροφος του θερμικού αερίου και του γαλαξιακού μαγνητικού πεδίου, τουλάχιστον σε κλίμακα kpc. Το βαρυντικό ελαφρύ (αραιό, αλλά πολύ καυτό) ρεύμα αερίου κοσμικής ακτινοβολίας εμποδίζεται από το μεσοαστρικό αέριο, που εξαπλώνεται λόγω της πίεσης σε μεγαλύτερα γαλαξιακά ύψη. Αυτή η αλληλεπίδραση συνηγορεί στο ότι η ισορροπία είναι ασταθής, και το μαγνητικό πεδίο έχει σημαντικό ρόλο σε αυτήν. Αυτή η μαγνητική ανισορροπία επιτρέπει στο θερμικό αέριο να ψυχθεί και να βυθίζεται, ώστε σε συγκεκριμένες περιοχές του γαλαξιακού επιπέδου να δημιουργούνται μεγάλα μοριακά νέφη.

Αυτό οδηγεί στην αστρογέννηση. Επίσης έτσι επιτρέπεται στην κοσμική ακτινοβολία να ανεβεί σε περιοχές της άλως. Το αποτέλεσμα αυτής της διαδικασίας είναι η ροή κοσμικής ακτινοβολίας από τον Γαλαξία που παρασέρνει αέριο και μαγνητικό πεδίο, ο γαλαξιακός άνεμος. Αντίθετα όμως, πραγματοποιείται μια μαγνητική επανένωση των περιοχών της άλως που επηρεάστηκαν από τη ροή, που μέσω του φαινομένου του δυναμικού αναγεννάει το μαγνητικό πεδίο του Γαλαξία, με αποτέλεσμα η κοσμική ακτινοβολία να χάνεται χωρίς να σημειώνεται απώλεια μάζας στην άλω.

Διακριτές πηγές ακτίνων γ στις ενεργειακές περιοχές μέτρησης των δορυφορικών τηλεσκοπίων.

Μετά από ανάλυση των περιοδικών πηγών ακτίνων γ έχουμε τα εξής αντικείμενα.

87 παλσαρ, 5 νέφη αερίων γύρω από παλσαρ, 44 υπολείμματα σουπερνόβα, 8 σφαιρωτά σμήνη, 1 μικροκβάζαρ, 2 άλλοι διπλοί αστέρες ακτίνων X, 295 blazar BI Lac, 274 blazar FSRQ (flat spectrum radio quasar), 28 ενεργοί γαλαξιακοί πυρήνες που δεν είναι blazar, 92 ενεργοί γαλαξιακοί πυρήνες διαφορετικών τύπων, 6 κανονικοί γαλαξίες, 2 γαλαξίες αστρογέννησης (οι starburst NGC 253 και M82) και 630 μη αναγνωρίσιμες πηγές! (έτος 2010).

Ο μεγάλος αριθμός αγνώστων πηγών εξηγείται με την μικρή γωνιακή ανάλυση του Fermi LAT, που χρησιμοποιήθηκε για την παραπάνω έρευνα. Μεγάλο μέρος των αναγνωρισμένων πηγών είναι χρονικά μεταβλητές. Εξαιρέσεις αποτελούν τα Μαγγελανικά νέφη και οι γαλαξίες αστρογέννησης. Στους ενεργούς γαλαξίες, ειδικά τα blazar έχουν χαρακτηριστικό σχετικιστικό πίδακα που είναι προσανατολισμένος προς το ηλιακό μας σύστημα. Λόγω του φαινομένου Ντόπλερ, αυτή η ροή των ακτίνων είναι πολύ ενισχυμένη για τον παρατηρητή και σχετικά εύκολα μετρήσιμη. Μέσα στον Γαλαξία μας οι κύριες πηγές είναι τα πάλσαρ, λόγω απουσίας ενεργού γαλαξιακού πυρήνα, έντονης αστρογέννησης ή πολλών εκρήξεων σουπερνόβα.

Πηγές ακτινοβολίας γ στα TeV.

Σε πολύ υψηλές ενέργειες (VHE >0,1 TeV) οι ροές ακτινοβολίας γ είναι τόσο μικρές, ώστε να μην μπορούν οι δορυφόροι να δώσουν ικανά αποτελέσματα. Έτσι έχουμε επίγεια τηλεσκόπια που μετράνε την ακτινοβολία Τσερένκοφ, δηλαδή δευτερεύοντα ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια από σύγκρουση της ακτινοβολίας γ με την ατμόσφαιρα. Λόγω μικρού πεδίου, τα τηλεσκόπια

αυτά δεν είναι κατάλληλα για την διάχυτη ακτινοβολία γ . Με μόλις 100 ανιχνευμένες πηγές, έχουμε πολύ πιο φτωχά αποτελέσματα από αυτά των δορυφόρων. Από αυτήν την μέθοδο έχουμε όμως μεγάλη ποικιλία πηγών. Ανιχνεύσαμε λοιπόν άνεμους νεφών σε πάλασαρ, που είναι ο μεγαλύτερος πληθυσμός πηγών γ στον Γαλαξία μας. Τα πάλασαρ αυτά είναι νεαρά, <10000 ετών, και μεγάλης ενέργειας. Ακόμα μετρήσαμε ακτινοβολία γ από πάλασαρ σε διπλά συστήματα, από μεγάλα μοριακά νέφη στην περιοχή του κέντρου του Γαλαξία μας, από το ίδιο το γαλαξιακό κέντρο, καλής ανάλυσης υπολείμματα σουπερνόβα, υπολείμματα σουπερνόβα σε αλληλεπίδραση με γειτονικά μοριακά νέφη, διπλοί ακτίνων X, νεαρά σμήνη με αστέρια μεγάλης μάζας καθώς και μια σειρά από ανεξακρίβωτες πηγές του Γαλαξία μας. Οι περισσότερες γαλαξιακές πηγές έχουν ισχυρή μη θερμική εκπομπή, με εξαίρεση τα άστρα που δεν δείχνουν απώλεια μάζας.

Εξωγαλαξιακές πηγές.

Εκτός από τις 2 πηγές γαλαξιών αστρογέννησης, ως εξωγαλαξιακές πηγές έχουμε εκπομπές ακτίνων γ από σουπερνόβα, ανάλογες αυτών του Γαλαξία μας. Υπάρχει μεγάλος αριθμός blazar και 2 ραδιογαλαξίες, που δείχνουν μεγάλη μεταβλητότητα, όπως και στη περιοχή των GeV.

Η μορφολογία των πηγών γ .

Ο χαρακτηρισμός της μορφολογίας των πηγών γ είναι σημαντικός. Σε πολλές περιπτώσεις έχουμε αναλύσει χωρικά τα νέφη που δημιουργούνται από τους ανέμους των πάλασαρ. Συμπεραίνουμε ότι σε χαμηλότερες ενέργειες των ακτίνων γ παρατηρούμε μεγαλύτερη χωρική διασπορά των νεφών.

Τα ηλεκτρόνια και τα ποζιτρόνια, που αποτελούν τα συστατικά των νεφών των πάλασαρ, είναι μακροβιότερα σε πιο χαμηλές ενέργειες. Έτσι υποστηρίζεται η θεωρία ότι η στροφορμή ενός πάλασαρ μετασηματίζεται σε σχετικιστικό πλάσμα ηλεκτρονίων/ ποζιτρονίων, με αποτέλεσμα την επιτάχυνση των σωματιδίων αυτών. Ενώ οι μεγάλης μάζας διπλοί ακτίνων X εξηγούνται ως ακτινοβολία του πίδακα μιας μαύρης τρύπας ή ένα νέφος πάλασαρ που χάνει μάζα από έναν συνοδό, η εκπομπή γ από σμήνη αστερών μεγάλης μάζας οφείλεται σε περισσότερα σώματα που εκπέμπουν ακτινοβολία γ . Τα μεγάλα μοριακά νέφη στην περιοχή του Γαλαξιακού κέντρου είναι μάλλον μέλη σύγκρουσης, με αυξημένη πυκνότητα σε αέρια στην περιβάλλουσα <θάλασσα> της κοσμικής ακτινοβολίας. Τα νέφη αυτά εκπέμπουν λόγω ανελαστικών συγκρούσεων των σχετικιστικών πρωτονίων με άτομα του αερίου, μέσω δημιουργίας και εξαύλωσης σωματιδίων που παράγονται κατά την σύγκρουση. Αυτού του είδους <φάροι> πρέπει να υπάρχουν σε όλον τον γαλαξιακό δίσκο αερίων.

Υπολείμματα σουπερνόβα.

Τα χωρικά αναλυμένα υπολείμματα σουπερνόβα έχουν ιδιαίτερο ενδιαφέρον. Θεωρούμε ότι αποτελούν πηγές της κοσμικής ακτινοβολίας στους γαλαξίες. Μέχρι τώρα έχουμε αναγνωρίσει 5 τέτοια κελύφη ως πηγές ακτίνων γ . Αυτό αποδεικνύει την επιτάχυνση των σωματιδίων στα εξωτερικά κρουστικά κύματα αυτών των υπολειμμάτων. Αυτή η δραστηριότητα έχει παρατηρηθεί και συνδέεται με πρωτόνια που αποκαλύπτονται από ένα διαφορικό ενεργειακό φάσμα, όπως προβλέπει η θεωρία της διαχέουσας επιτάχυνσης κατά την σύγκρουση, ιδίως αν λάβουμε υπόψη μη γραμμικά φαινόμενα. Το πλάτος του παρατηρήσιμου φάσματος στις ακτίνες γ είναι σχετικό με μια μετατροπή περίπου του 10 % της υδροδυναμικής ενέργειας έκρηξης της κάθε σουπερνόβα σε ενέργεια των πολύ σχετικιστικών, μεγάλης ταχύτητας ατομικών πυρήνων. Αυτό εκφράζει την προσδοκώμενη ποσότητα ενέργειας της γαλαξιακής κοσμικής ακτινοβολίας.

Επίσης δεν αποκλείεται να υπάρχει ένα φάσμα των ακτίνων γ που κυριαρχείται από το αντίστροφο φαινόμενο Compton επιταχυνόμενων ηλεκτρονίων σε φωτόνια του διάχυτου μεσοαστρικού πεδίου εκπομπής. Αυτή η ηλεκτρομαγνητική διαδικασία είναι πολύ πιο αποτελεσματική από την δημιουργία σωματιδίων (π) μέσω πυρηνικών σωματιδίων, λόγω της μικρής μάζας των ηλεκτρονίων και το μέγεθος του ηλεκτρικού φορτίου τους. Βέβαια πρέπει η επιτάχυνση των πυρηνικών σωματιδίων και ηλεκτρονίων να επιτυγχάνονται παράλληλα και να οδηγούν τα άτομα σε πολύ μεγαλύτερες ενέργειες από ότι τα ηλεκτρόνια. Αυτό μας το δείχνουν οι λιγότερο ισχυρές σχετικιστικές ακτινοβολίες των υπολειμμάτων σουπερνόβα, που

προέρχονται μόνο από ηλεκτρόνια, καθώς και τα συνολικά παρατηρήσιμα φαινόμενα των επιταχυνόμενων σωματιδίων στην υδροδυναμική δομή των υπολειμμάτων σουπερνόβα. Δεν είναι εύκολο να υπάρξει άμεση απόδειξη, που να αποκλείει την εναλλακτική λύση της αποκλειστικής επιτάχυνσης ηλεκτρονίων. Εκτός αν πραγματοποιηθεί κάποιο πείραμα, στο οποίο να μπορέσουμε να ανιχνεύσουμε μεγάλης ενέργειας νετρίνα με αρκετή πυκνότητα ροής. Η τυπική διάρκεια ζωής ενός υπολείμματος σουπερνόβα είναι 10 με 100 χιλιάδες έτη. Η περιοχή με θερμική ακτινοβολία είναι κυρίως πηγή εκπομπής σωματιδίων και σε δεύτερη γραμμή πηγή ακτίνων γ.

Blazar, διάχυτο έξω- γαλαξιακό πεδίο ακτινοβολίας.

Τα επίγεια τηλεσκόπια ακτίνων γ στα TeV έχουν ανακαλύψει μια σειρά από Μπλαζαρ. Αυτά τα TeV Μπλαζαρ πρέπει να δείχνουν σημαντικά μικρότερη πυκνότητα ακτινοβολίας από τα EGRET Μπλαζαρ (που ανιχνεύουν τα διαστημικά τηλεσκόπια), αλλιώς η απορρόφηση ακτίνων γ μέσα στην πηγή της εκπομπής θα υποβάθμιζε την εκπομπή στα TeV. Η περιορισμένη απορρόφηση της ακτινοβολίας γ πολύ μεγάλης ενέργειας των ενεργών αυτών γαλαξιακών πυρήνων μας επιτρέπει τον καθορισμό του ανώτερου ορίου των πεδίων εκπομπής στο ορατό/ υπέρυθρο.

Μαζί με την μέτρηση γαλαξιών σε περιοχές μήκους κύματος όπου μας δίνουν ένα ελάχιστο του πλάτους του πεδίου εκπομπής, πετυχαίνουμε να καθορίσουμε ένα σημαντικό πλαίσιο του πεδίου εκπομπής. Αυτό μας βοηθάει στην κατανόηση του ιστορικού της δημιουργίας των δομών στο σύμπαν.

Τα τηλεσκόπια στα TeV μπορούν να μετρήσουν μεταβολές των Μπλαζαρ σε πολύ μικρές χρονικές κλίμακες (μέχρι μερικά λεπτά). Αυτό μας δείχνει ότι η εκπομπή γίνεται από περιοχή κοντά σε μαύρη τρύπα (μικρή έκταση της πηγής εκπομπής). Από την άλλη η μέτρηση της διακύμανσης του χρόνου τόσο μακρινών αντικειμένων δείχνει ανεξαρτησία από την ενέργειά τους, κάτι που αποκλείει μια εξάρτηση της ταχύτητας του φωτός από την ενέργεια. Το κατά πόσο οι ενεργοί γαλαξιακοί πυρήνες και οι πίδακές τους είναι οι πηγές της μέγιστης ενέργειας της κοσμικής ακτινοβολίας είναι ένα ερώτημα που δεν μπορεί να απαντηθεί ακόμα.

Ανακεφαλαίωση.

Μετά από δεκαετίες η αστρονομία ακτίνων γ υψηλής ενέργειας καθιερώθηκε ως κλάδος της αστρονομίας. Τα αποτελέσματά της μας φανερώνουν το μη θερμικό σύμπαν, τις μη θερμικές πηγές της κοσμικής ακτινοβολίας. Αυτές συνυπάρχουν με τις μεσοαστρικές και μεσογαλαξιακές μορφές ύλης, σε τοπική θερμική ισορροπία.

Λόγω της συγκρίσιμης ενεργειακής πυκνότητας της θερμικής και μη κατάστασης της ύλης, υπάρχει και σε μεγαλύτερη χωρική κλίμακα ισορροπία. Ένα παράδειγμα είναι η κοσμική ακτινοβολία στον Γαλαξία μας. Η κοσμική ακτινοβολία καθορίζει σημαντικά την δομή και την δυναμική μεγάλης κλίμακας της μεσοαστρικής ύλης. Μετά την ανακάλυψή της σε 2 άλλους γαλαξίες αστρογέννησης δεν είναι πια μόνο υποθετικό να περιμένουμε αυτό να ισχύει για όλους τους γαλαξίες και τις γειτονιές τους, όπου η εσωτερική δυναμική κυριαρχείται από την αστρογέννηση, και αυτό ισχύει χρονικά από την δημιουργία των πρώτων γαλαξιών στο σύμπαν.

