ΚΟΣΜΙΚΗ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑ
ΠΕΙΡΑΜΑ EUSO - Η βασική Ιδέα

Vincent Van Gogh, "The starry night"

Ευστάθιος Κ. Στεφανίδης

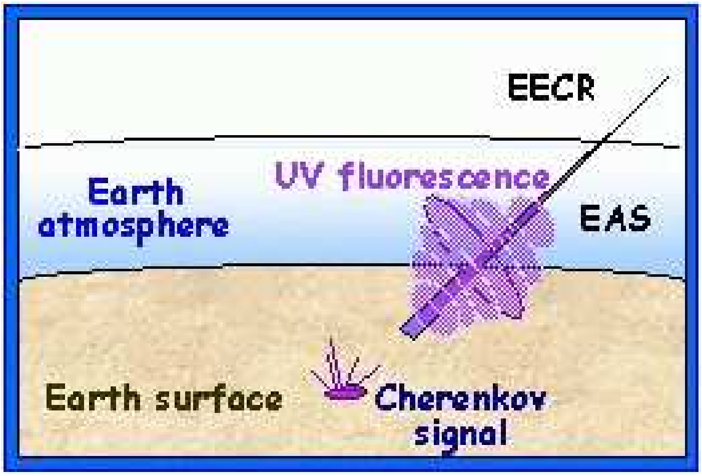
Ιούνιος, 2002

Εξώφυλλο: Ο Van Gogh ζωγράφισε την έναστρη νύχτα με τα μεγάλα, στροβιλίζοντα άστρα, τα οποία φαίνεται να εκφράζουν τα συναισθήματά του για την μεγάλη κοσμική ενέργεια, η οποία κυβερνά τις ανθρώπινες ζωές με κακία και καλωσύνη ταυτόχρονα. Η θέα των αστεριών είχε μεγάλη απήχηση πάνω του: τον έκανε να σκεφτεί για το αν 'ολόκληρη η ζωή ήταν ορατή σε μας ή γνωρίζουμε στην πραγματικότητα μόνο το ένα ημισφαίριο πριν πεθάνουμε·' Το όραμα του Van Gogh εκφράζει τον αγώνα να φτάσει κανείς πέρα από το συμβατικό.

1 Εισαγωγή

Η ύπαρξη των σωματιδίων με ενέργειες μεγαλύτερες από $10^{20}eV$ και τα νετρίνο με παρόμοιες ενέργειες εγείρουν θεμελιώδη ερωτήματα για την παραγωγή και τη διάδοσή τους στον ενδογαλαξιακό και ενδοπλανητικό χώρο. Οι Κοσμικές Ακτίνες Ακρότατης Ενέργειας (ΚΑΑΕ) παράγονται και επιταχύνονται με άγνωστους τρόπους στο Διάστημα και μια ακριβής μέτρηση του ενεργειακού φάσματος των ΚΑΑΕ στην περιοχή πάνω από την αλλαγή του φασματικού δείκτη στα περίπου $5x10^8eV$ (ο αποκαλούμενος ¨αστράγαλος¨) μπορεί να δώσει πολύτιμες πληροφορίες για τους μηχανισμούς προέλευσης και επιτάχυνσης, για τη διάδοση στο διάστημα ή ακόμα για την αλλαγή στους μηχανισμούς αλληλεπίδρασης των που οδηγούν στην ανίχνευσή τους στη Γη. Μια συγκεκριμένη θεώρηση για τη διάδοση δίδεται από τον μηχανισμό απώλειας ενέργειας κατά την παραγωγή πιονίων-φωτονίων από την αλληλεπίδραση των αδρονικών σωματιδίων με κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου στους 2.7^oK. Με τον τρόπο αυτό οδηγούμαστε στο όριο των Greisen-Zatsepin- Kusmin (GZK ˜ $2x10^{19}eV$). Το φαινόμενο αυτό περιορίζει την απόσταση των πηγών των πρωτογενών ΚΑΑΕ σε μικρότερη από 50-100 Mpc. Η γήινη ατμόσφαιρα αποτελεί τον ιδανικό ανιχνευτή για τις Κοσμικές Ακτίνες Ακρότατης Ενέργειας και τα συνοδεύοντα κοσμικά νετρίνο. Οι John Linslely και Livio Scarsi πρωτοπόρησαν στην μελέτη των ΚΑΑΕ στο Volcano Ranch, στο Νέο Μεξικό, το 1957. Τα σωματίδια των ΚΑΑΕ, αλληλεπιδρώντας με την ατμόσφαιρα, προκαλούν διαδιδόμενους Εκτεταμένους Ατμοσφαιρικούς Καταιγισμούς (ΕΑΚ), οι οποίοι συνοδεύονται από ισοτροπική εκπομπή Υπεριώδους Ακτινοβολίας φθορισμού, που αντιστοιχεί σε μήκος κύματος λίγο πριν το μπλε, δηλαδή στα 300-400 nm (βλέπε σχήμα 1.1).

Η υπεριώδης αυτή ακτινοβολία φθορισμού προκαλείται από το άζωτο της ατμόσφαιρας από τα παραγόμενα φορτισμένα σωματίδια των ΕΑΚ, ως αποτέλεσμα μιας σύνθετης διαδικασίας σχετικιστικής διάσπασης των πρωτογενών σωματιδίων. Οι ΕΑΚ, οι οποίοι προέρχονται από πρωτογενή σωμάτια με ενέργειες μεγαλύτερες των $10^{19}eV$, σχηματίζουν μια σημαντική λωρίδα από ακτινοβολία φθορισμού σε μήκος 10-100 km κατά τη διάδοσή τους μέσα στην ατμόσφαιρα. Η ένταση και η έκταση του φαινομένου εξαρτάται από τα πρωτογενή σωμάτια και από τη γωνία που σχηματίζει η διεύθυνση του προσπίπτοντος σωματιδίου με την κάθετο στην επιφάνεια της γης. Η υπερβολικά μικρή τιμή της ροής των ΚΑΑΕ (1 γεγονός ανά km^2 και ανά αιώνα, για ενέγεια μεγαλύτερη των $10^{20}eV$) και η υπερβολικά μικρή τιμής της ενεργού διατομής αλληλεπίδρασης των νετρίνων, έχουν ως αποτέλεσμα να παρατηρούνται δύσκολα οι προαναφερθέντες διεργασίες, εκτός και αν χρησιμοποιηθεί ανιχνευτής με υψηλές τιμές ενεργούς επιφάνειας και μάζας του στόχου. Η ολοκληρωμένη έκθεση (περίπου $2x10^3km^2.yr.str$), η οποία είναι διαθέσιμη σήμερα για τις ακτινοβολίες που φτάνουν στο έδαφος της γης, είναι αρκετή μόνο για να αναδείξει την ύπαρξη του χαρακτηριστικού του «αστραγάλου» γύρω στα $5x10^8eV$ στο ενεργειακό φάσμα των κοσμικών ακτίνων. Είναι χαρακτηριστικό ότι με τη σύγχρονη ολική έκθεση μόνο 10 γεγονότα είναι αυτά που ξεπερνούν τα $10^{20}eV$. Η περιορισμένη στατιστική των διαθέσιμων δεδομένων αποκλείει την πιθανότητα παρατήρησης σημαντικών περιοχών στο ενεργειακό φάσμα (μεγάλες ενέργειες). Ακόμα και σύγχρονα πειράματα που χαρακτηρίζονται από την τελευταία γενιά των επίγειων ανιχνευτών (HiRes, Auger) θα περιορίζονται ακόμα από τις πρακτικές δυσκολίες που συνδέονται με την σχετικά μικρή περιοχή συλλογής ($< 10^4km.sr$) και από την μέτρια τιμή της μάζας του στόχου αλληλεπίδρασης για την ανίχνευση των νετρίνων. Η στατιστική που προβλέπουν τα σύγχρονα πειράματα δεν είναι μεγαλύτερη από περίπου 1 γεγονός το έτος). Για να ξεπεραστούν όλες αυτές οι δυσκολίες, προτείνεται η παρατήρηση από το διάστημα της παραγόμενης ακτινοβολίας φθορισμού στην γήινη ατμόσφαιρα, επιτρέποντας κατ΄ αυτόν τον τρόπο την εκμετάλλευση εκατομμυρίων $km^2.sr$ για την επιφάνεια συλλογής και μέχρι 10^{13} τόνων



Σχήμα 1.1: Αλληλεπίδραση των κοσμικών ακτίνων κατά τη διελεύσή τους μέσα στα ατμοσφαιρικά στρώματα

για την αλληλεπίδραση των νετρίνων. Τότε, η παρατήρηση της παραγώμενης ακτινοβολίας φθορισμού με έναν ανιχνευτή σε απόσταση από τον άξονα του καταιγισμού είναι ο καλύτερος τρόπος για να ελέγξει κανείς τους ΕΑΚ.

2 Το πείραμα EUSO

Η παραπάνω φιλοσοφία αποτελεί το πρόγραμμα 'AirWatch' της Ευρωπαϊκής Εταιρίας Διαστήματος (ESA) (σχήμα 2.1), του οποίου η πρώτη διαστημική αποστολή είναι το πείραμα EUSO.

Ο ανιχνευτής EUSO , -ακρονύμιο του Extreme Universe Space Observatory- (σχήμα 2.2)είναι το πείραμα που θα ανιχνεύσει και θα αναλύσει τις ΚΑΑΕ και τα νετρίνο.

Το κύριο καινοτομικό χαρακτηριστικό βασίζεται στην πρόταση από τον J. Linsley στις αρχές του 1980 και στη συνέχεια από τον Y. Takahashi. Η πρόταση στηρίζεται στο γεγονός ότι η παρατήρηση γίνεται από ανιχνευτές που βρίσκονται πλέον σε τροχιά γύρω από τη Γη, σε ύψος 380 km, εγκατεστημένοι στο ευρωπαϊκό τμήμα Columbus, του Διεθνούς Διαστημικού Σταθμού (ISS, International Space Agency), που βρίσκεται υπό κατασκευή. Η χρονική διάρκεια των μετρήσεων υπολογίζεται στα τρία χρόνια με ημερομηνία έναρξης τα μέσα του 2007.

Ο κύριος στόχος του πειράματος EUSO είναι να συλλέξει μια σημαντική στατιστική γεγονότων ΚΑΑΕ (περίπου 1000 γεγονότα/έτος για ενέργειες μεγαλύτερες των $3x10^9eV$).

Η αρχή λειτουργίας του EUSO στηρίζεται στην ανίχνευση ακτινοβολίας φθορισμού (στο υπεριώδες φάσμα), η οποία παράγεται στον αέρα από τη διέλευση ηλεκτρικώς φορτισμένων σωματιδίων, τα οποία παράγονται από την αλληλεπίδρασση των ΚΑΑΕ με την ατμόσφαιρα, κυρίως με το άζωτο.

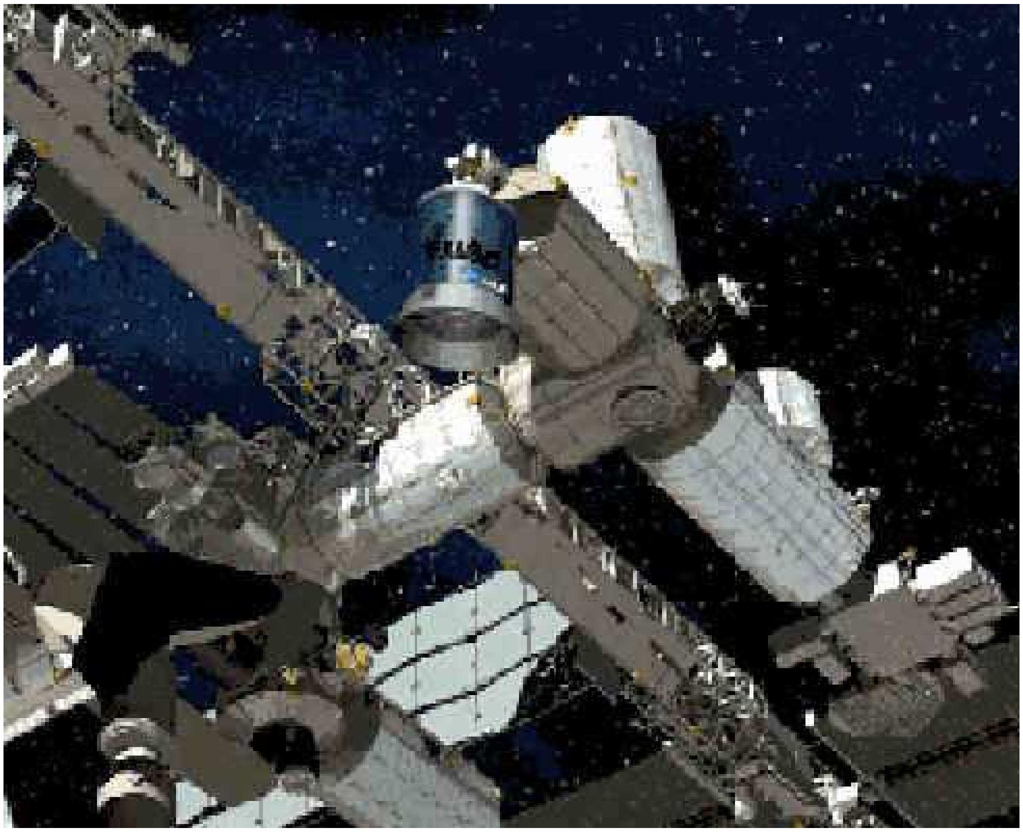
Τα σωματίδια των υπό μελέτη κοσμικών ακτίνων έχουν ενέργειες 10^6 φορές μεγαλύτερες από την μέγιστη ενέργεια που επιτυγχάνεται από τα επιταχυνόμενα σωματίδια στο LHC-CERN. Οι ενέργειες αυτές είναι ακόμα μεγαλύτερες από το ενεργειακό κατώφλι των πρωτονίων που έρχονται από μακρινές περιοχές του διαστήματος, σύμφωνα με τα πραγματικά μοντέλα προέλευσης-επιτάχυνσης των κοσμικών ακτίνων. Συνεπώς, δεν υπάρχουν αρκετά κοντά μας ανιχνευθείσες πηγές προέλευσης ή επιτάχυνσης, οι οποίες θα μπορούσαν να δικαιολογήσουν το ενεργειακό φάσμα και τις χωρικές κατανομές αυτών μεγάλης ενέργειας σωματιδίων. Με το EUSO ανοίγεται ένα νέο παράθυρο για να κοιτάξουμε και να παρατηρήσουμε το Διάστημα και τις ιδιότητές του.

Το EUSO θα παρατηρήσει το σήμα φθορισμού κοιτώντας κάτω από το διάστημα στην σκοτεινή μεριά της γήινης ατμόσφαιρας υπό γωνία 60^0 (ολοκληρωμένο πεδίο όρασης-σχήμα 2.3).

Η ακτινοβολία φθορισμού θα καταγράφεται από μεγάλους οπτικούς φακούς Fresnel, τοποθετημένοι σε μεγάλη εστιακή επιφάνεια αποτελούμενη από χιλιάδες μικρούς φωτοσωλήνες. Ο μεγάλος αριθμός των ανιχνευτών και η χρονική διακριτική ικανότητα θα επιτρέψουν την ανακατασκευή της διεύθυνσης του καταιγισμού και την ενέργεια με μεγάλη ακρίβεια.

Όταν το αντικείμενο παρατηρείται σε κάποια στιγμή, ο ΕΑΚ φαίνεται σαν ένα στενό φωτεινό αντικείμενο σε σχήμα δίσκου. Όταν παρατηρείται συνεχώς φαίνεται να κινείται πάνω σε μια ευθεία γραμμή με την ταχύτητα του φωτός. Το τελικό αποτέλεσμα του γεγονότος το οποίο βλέπει ο ανιχνευτής είναι η

Σχήμα 2.1: Ο λογότυπος του προγράμματος AirWatch



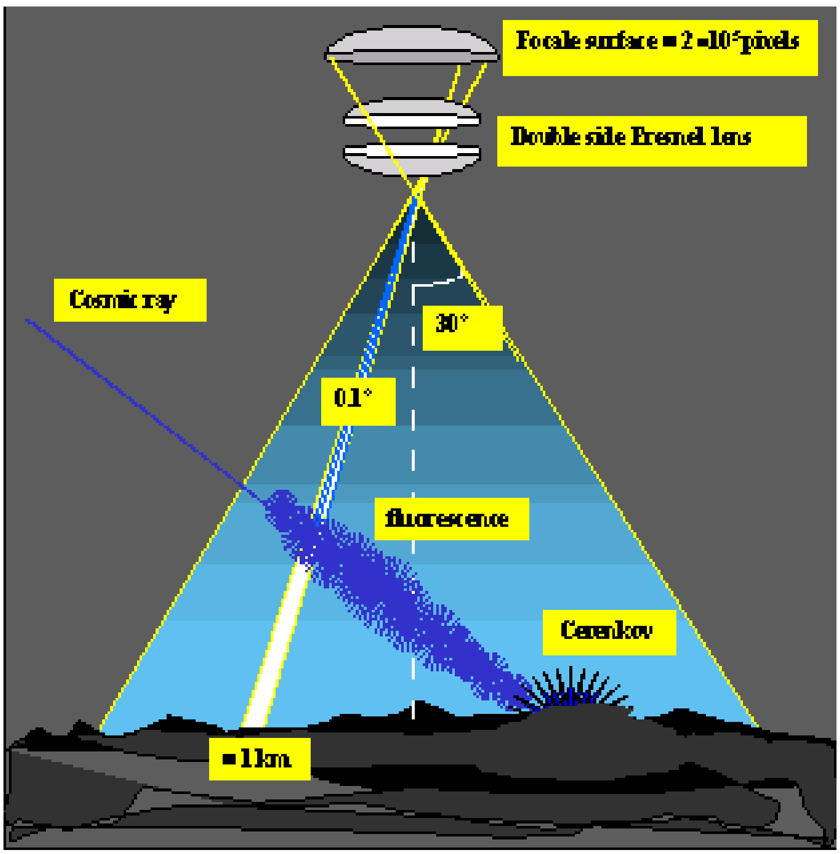
Σχήμα 2.2: Ο ανιχνευτής EUSO στον διεθνή διαστημικό σταθμό

αλλαγή στην τιμή της φωτεινότητας του δίσκου από σχεδόν μηδενική (οπότε δύσκολα ανιχνεύεται) μέχρι μιας μέγιστης, η οποία ακολουθείται από μια σταδιακή μείωση.

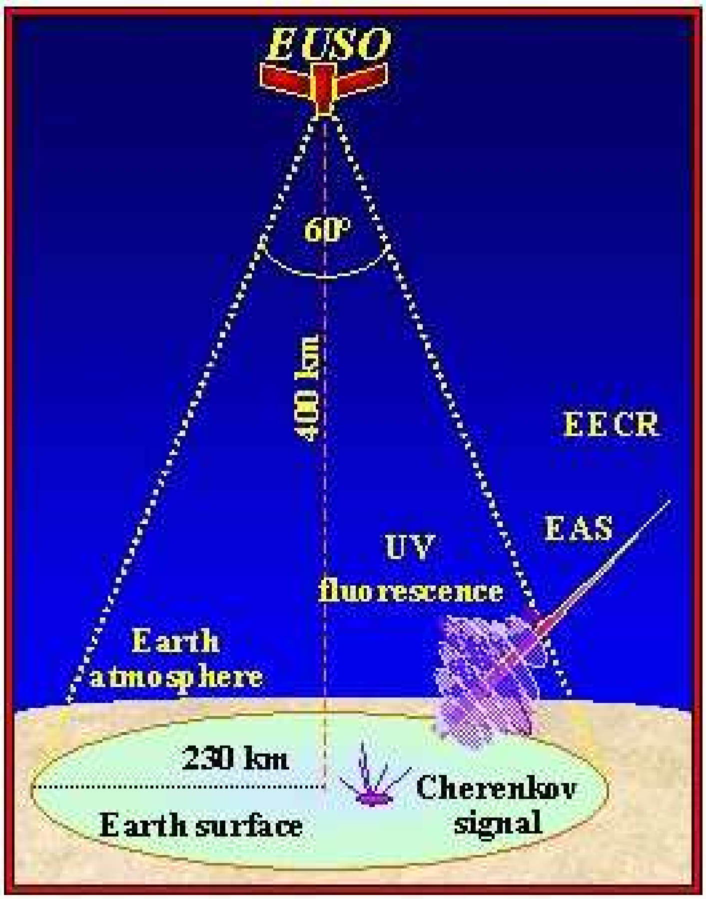
Επειδή η ποσότητα της υπεριώδους ακτινοβολίας είναι σχετικά μικρή, απαιτείται μεγάλη επιφάνεια συλλογής του οπτικού συστήματος. Επιπλέον, οι ατμοσφαιρικοί καταιγισμοί συμβαίνουν σε απρόβλεπτες κατευθύνσεις και με χαμηλό ρυθμό. Οπότε είναι απαραίτητο ένα ευρύ πεδίο παρατήρησης, ώστε να ανιχνευθεί στατιστικά μεγαλός αριθμός γεγονότων.

Ένα ακόμα σημαντικό θέμα συνδέεται με τα χαρακτηριστικά μετάβασης στην ατμόσφαιρα και την ανάκλαση/διάχυση πάνω στο έδαφος και στα σύνεφα της ακτινοβολίας Cerenkov, η οποία παράγεται από τους ΕΑΚ. Η εκπεμπόμενη ακτινοβολία είναι ανάλογη του μεγέθους του καταιγισμού σε διάφορα βάθη διείσδυσης στην ατμόσφαιρα. Το σήμα μαζί με τις βοηθητικές πληροφορίες του ύψους θα επιτρέψει την μέτρηση του ατμοσφαιρικού βάθους του μέγιστου καταιγισμού (X_{max}) με ακρίβεια μερικών δεκάτων gr/cm^2,δίνοντας με τον τρόπο αυτόν τη δυνατότητα να διαχωρίσουμε τα ισχυρώς διευσδυτικά νετρίνο από τα πρωτογενεί αδρονικά σωματίδια που αλληλεπιδρούν γρήγορα, ενώ παράλληλα θα ανιχνεύεται και η ακτινοβολία από τους βαρείς πυρήνες. (σχήμα 2.4) .

Παράλληλα, μπορούν να παρατηρηθούν και αλλα φαινόμενα, όπως μετεωρήτες, διαστημικά υπολλείματα, φωτισμός και ατμοσφαιρικές εκλάμψεις. Η φωτεινότητα όμως που προέρχεται από τους ΕΑΚ που παράγονται από τις Κοσμικές ακτίνες μπορεί να διαχωριστεί αφαιρώντας αυτό το γενικό ατμοσφαιρικό υπόβαθρο που υπάρχει στο αντίστοιχο κυματικό εύρος που θα λειτουργήσει το EUSO.



Σχήμα 2.3: Η γεωμετρία παρατήρησης του ανιχνευτή EUSO



Σχήμα 2.4: Λειτουργία του ανιχνευτή.

Βιβλιογραφία

[1] http://www.ifcai.pa.cnr.it/~EUSO

[2] http://www.dfg.unito.it/euso

[3] http://hep.fi.infn.it/AIRWATCH

[4] http://www.lip.pt/~euso