

ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ

ΣΧΟΛΗ ΘΕΤΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Μελέτη Κοσμικών Σωματιδίων Υπερυψηλών Ενεργειών

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ

Κουτσοκώστα Δήμητρα

ΑΘΗΝΑ

ΜΑΡΤΙΟΣ 2014

ΔΙΔΑΚΤΟΡΙΚΗ ΔΙΑΤΡΙΒΗ

Μελέτη Κοσμικών Σωματιδίων Υπερυψηλών Ενεργειών
Study of Ultra High Energy Cosmic Rays

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ

Κουτσοκώστα Δήμητρα

Α.Μ.: 2008505

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ

Αθανάσιος Γεράνιος, Αναπληρωτής Καθηγητής

ΤΡΙΜΕΛΗΣ ΕΠΙΤΡΟΠΗ ΠΑΡΑΚΟΛΟΥΘΗΣΗΣ

Αθανάσιος Γεράνιος, Αναπληρωτής Καθηγητής
Απόστολος Μαστιχιάδης, Αναπληρωτής Καθηγητής
Ξενοφών Μουσάς, Καθηγητής

ΕΠΤΑΜΕΛΗΣ ΕΞΕΤΑΣΤΙΚΗ ΕΠΙΤΡΟΠΗ

Γεώργιος Βούλγαρης, Αναπληρωτής Καθηγητής
Αναστάσιος Λιόλιος, Αναπληρωτής Καθηγητής
Παναγιώτα Πρέκα-Παπαδήμα, Επίκουρη Καθηγήτρια
Ελένη Χριστοπούλου – Μαυρομιχαλάκη, Καθηγήτρια

Ημερομηνία Υποστήριξης: 10 Μαρτίου 2014

ΠΕΡΙΛΗΨΗ

Σε αυτή τη διατριβή μελετάται η Κοσμική Ακτινοβολία στην περιοχή των Υπερυψηλών Ενεργειών. Παρουσιάζονται αρχικά τα μοντέλα προέλευσης και διάδοσης των κοσμικών ακτίνων στις ενέργειες αυτές και στη συνέχεια το φαινόμενο των Εκτεταμένων Ατμοσφαιρικών Καταιγισμών που αποτελεί το βασικό μηχανισμό που επιτρέπει τη μελέτη των εξαιρετικά σπάνιων αυτών ενεργητικών σωματιδίων. Γίνεται κατόπιν αναφορά στις τεχνικές και τα πειράματα ανίχνευσής τους με επίκεντρο το Παρατηρητήριο Pierre Auger που λειτουργεί στην Αργεντινή.

Βασικό αντικείμενο της μελέτης αποτελεί η εκτίμηση της ενέργειας του πρωτογενούς σωματιδίου που δημιουργεί τον καταιγισμό. Για τον σκοπό αυτό προτείνεται μια μέθοδος με εφαρμογή στο Παρατηρητήριο Auger που εκτιμά την πρωτογενή ενέργεια μέσω της πυκνότητας φορτισμένων σωματιδίων που καταγράφει ο ανιχνευτής επιφανείας και αφορά πρωτογενή σωματίδια πρωτόνια, πυρήνες διαφόρων ατομικών αριθμών και φωτόνια ακτίνων γ. Στη συνέχεια προτείνεται μια παρόμοια μεθοδολογία με γενική εφαρμογή που στηρίζεται στην ακτινοβολία Cherenkov που καταγράφεται από ατμοσφαιρικά τηλεσκόπια. Η μέθοδος αυτή μπορεί να εφαρμοστεί με δεδομένα πειραμάτων που μελετούν την κοσμική ακτινοβολία φωτονίων γ χαμηλών ενεργειών και χρησιμοποιούνται για τη χαρτογράφηση του ουρανού, όπως το πείραμα Cherenkov Telescope Array που βρίσκεται στη φάση του σχεδιασμού.

ΘΕΜΑΤΙΚΗ ΠΕΡΙΟΧΗ: Κοσμική Ακτινοβολία

ΛΕΞΕΙΣ ΚΛΕΙΔΙΑ: Κοσμική Ακτινοβολία Υπερυψηλών Ενεργειών, εκτίμηση ενέργειας, Εκτεταμένοι Ατμοσφαιρικοί Καταιγισμοί, πλευρική κατανομή, ακτινοβολία Cherenkov

ABSTRACT

The work described in this thesis concerns the estimation of the primary energy of an Ultra High Energy Cosmic Rays' particle, creating an Extensive Air Shower in the atmosphere of the Earth. Firstly, the origin and propagation models for cosmic rays in this energy range are presented and the phenomenology of Extensive Air Showers is described. After a brief presentation of the current experiments in the field, two empirical methods based in Monte Carlo simulations are presented: the first method estimates the primary energy using observational data from the surface detector of the Pierre Auger Observatory. The method refers to various types of primary particles (protons, nuclei and photons). The second method is based on the Cherenkov radiation recorded by Cherenkov telescope arrays and estimates the primary energy of the shower using Cherenkov photons' density at a given radius from the core of the shower. This method can make use of the data recorded by low energy γ-ray photons' experiments, used for sky mapping.

SUBJECT AREA: Cosmic Rays

KEYWORDS: Ultra High Energy Cosmic Rays, energy estimation, Extensive Air Showers, lateral distribution, Cherenkov radiation

Στη μητέρα και την αδελφή μου
που με στηρίζουν πάντα

… «Ελάτε τώρα», είπε ο Γουλιέλμος, «είναι φανερό ότι ψάχνετε τον Μελάνιο, το αγαπημένο άλογο του Ηγουμένου, τον καλύτερο δρομέα των στάβλων σας, με μαύρο τρίχωμα, με ύψος πέντε ποδιών, φουντωτή ουρά, μικρές και στρογγυλές οπλές, με καλπασμό κανονικό, μικρό κεφάλι, ευαίσθητα αυτιά και μεγάλα μάτια. Πήγε δεξιά, σας λέω, και τέλος πάντων, βιαστείτε!»…

… «Και τώρα, πέστε μου», δεν κατάφερα τελικά να κρατηθώ, «πώς το ξέρατε;»

«Καλέ μου Άντσο», είπε ο δάσκαλος. «Σε ολόκληρο το ταξίδι σε μάθαινα να αναγνωρίζεις τα ίχνη του κόσμου που μας μιλά σαν μεγάλο βιβλίο. Ο Αλανός των Νήσων έλεγε ότι:

omnis mundi creatura	*όλη η δημιουργία του κόσμου*
quasi liber et pictura	*σαν βιβλίο και εικόνα*
nobis est in speculum	*μπροστά μας καθρεφτίζεται*

και είχε κατά νου το ανεξάντλητο απόθεμα των συμβόλων, με τα οποία ο Θεός μας μιλά για την αιώνια ζωή μέσα από τα δημιουργήματά Του. Το Σύμπαν, όμως, είναι πολύ πιο εύγλωττο απ' ότι πίστευε ο Αλανός, και δεν μιλά μόνο για τα υπέρτατα πράγματα (οπότε, ο τρόπος του είναι ασαφής), αλλά και για τα πλησιέστερα, και τότε είναι σαφέστατο. Ντρέπομαι σχεδόν να σου επαναλάβω αυτά που θα έπρεπε να γνωρίζεις. Στο τρίστατο, πάνω στο φρέσκο χιόνι, διαγράφονταν ολοκάθαρα τα ίχνη από τις οπλές του αλόγου, που οδηγούσαν στο μονοπάτι αριστερά μας. Σε κανονική και ίδια απόσταση το ένα από το άλλο, τα ίχνη εκείνα μας έλεγαν ότι η οπλή του ήταν μικρή και στρογγυλή και ο καλπασμός του πολύ κανονικός˙ έτσι συμπεραίνουμε τη φύση του αλόγου και το γεγονός ότι δεν έτρεχε άτακτα, σαν αφηνιασμένο. Εκεί όπου τα πεύκα σχηματίζουν μια φυσική σκεπή, υπήρχαν μερικά φρεσκοσπασμένα κλαδιά ως το ύψος των πέντε ποδιών. Ένας θάμνος βατομουριάς, εκεί όπου το ζώο, κουνώντας περήφανα την όμορφη ουρά, έστριψε για να μπει στο δεξιό του μονοπάτι, κρατούσε ακόμα στ' αγκάθια του μερικές μακριές κατάμαυρες τρίχες.»…

… «Ναι», είπα, «αλλά το μικρό κεφάλι, τα μυτερά αυτιά, τα μεγάλα μάτια…».

«Δεν ξέρω αν τα 'χει, αλλά σίγουρα οι μοναχοί το πιστεύουν ακράδαντα…Αν το άλογο, … δεν ήταν όντως το καλύτερο των στάβλων, θα ήταν αδύνατο να μου εξηγήσεις γιατί δεν το έψαχναν μόνο οι σταβλίτες, αλλά επιστρατεύτηκε και ο ίδιος ο αποθηκάριος. Και ένας μοναχός που θεωρεί ένα άλογο εξαιρετικό, όποια κι αν είναι η φυσική μορφή του, δεν μπορεί παρά να το βλέπει όπως του το περιέγραψαν οι αυθεντίες.»…

… «Εντάξει», είπα, «αλλά γιατί Μελάνιος;».

«Μακάρι το Άγιο Πνεύμα να βάλει λίγο ακόμα αλάτι στην κολοκύθα σου, γιέ μου!» αναφώνησε ο δάσκαλος. «Ποιο άλλο όνομα μπορούσαν να του δώσουν αφού μέχρι και ο μεγάλος Βουριδανός, που πρόκειται να γίνει πρύτανης στο Παρίσι, όταν έπρεπε να μιλήσει για ένα ωραίο άλογο, δεν βρήκε καλύτερο όνομα απ' αυτό;».

Ουμπέρτο Έκο
«Το Όνομα του Ρόδου»

ΕΥΧΑΡΙΣΤΙΕΣ

Για τη διεκπεραίωση της παρούσας διατριβής, θα ήθελα να ευχαριστήσω θερμά τον επιβλέποντα μου πρ. Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Αθανάσιο Γεράνιο για τη συνεργασία και την εμπιστοσύνη που μου έδειξε. Ευχαριστώ επίσης τα άλλα δύο μέλη της Τριμελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, τον Καθηγητή κ. Ξενοφώντα Μουσά για τις πολύτιμες υποδείξεις του και τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Απόστολο Μαστιχιάδη οι αυστηρές παρατηρήσεις του οποίου άλλαξαν τον προσανατολισμό αυτής της εργασίας.

Θερμά ευχαριστώ και τα μέλη της Επταμελούς Εξεταστικής Επιτροπής, την Καθηγήτρια κ. Ελένη Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη για τη συμπαράσταση σε δύσκολες στιγμές, τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Αναστάσιο Λιόλιο για την εξ' αποστάσεως συνεργασία μας, τον Αναπληρωτή Καθηγητή κ. Γεώργιο Βούλγαρη και την Επίκουρη Καθηγήτρια κ. Παναγιώτα Πρέκα-Παπαδήμα για την καθοδήγηση και φυσικά την Επίκουρη Καθηγήτρια κ. Ευγενία Αντωνοπούλου-Χαραλαμποπούλου για την πολύχρονη στήριξη, συμπαράσταση και ενθάρρυνση.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω με όλη μου την καρδιά την κ. Σοφία Ζαρμπούτη, γραμματέα και ψυχή του Τομέα Αστροφυσικής, που με κράτησε σε τροχιά διδακτορικού όταν οι παρατηρήσεις των αγαπητών μου καθηγητών γίνονταν πολύ αυστηρές…

ΠΕΡΙΕΧΟΜΕΝΑ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΚΟΣΜΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ 23

1.1 Εισαγωγή 23
1.2 Ανακάλυψη των Κοσμικών Ακτίνων 24
1.3 Ενεργειακό Φάσμα 25
1.4 Προέλευση και επιτάχυνση των UHECR 26
1.4.1 Μοντέλα προέλευσης και επιτάχυνσης των UHECR 29
I. Μοντέλα bottom-up 29
II. Μοντέλα top-down 35
III. Υβριδικά μοντέλα 37
1.5 Διάδοση των UHECR 37
1.5.1 Διάδοση UHECR και μαγνητικά πεδία 41
1.5.2 Παραγωγή δευτερογενών σωματιδίων κατά τη διάδοση 42
1.6 Μικροκυματική Ακτινοβολία Υποβάθρου – όριο GZK 43

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΟΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΙ ΚΑΤΑΙΓΙΣΜΟΙ 47

2.1 Εισαγωγή 47
2.2 Ανακάλυψη 50
2.3 Φαινομενολογία 53
2.4 Μελέτη 55

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΟΣΜΙΚΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ ΥΠΕΡΥΨΗΛΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ 61

3.1 Εισαγωγή 61
3.2 Παλαιότερα Πειράματα 67
I. Haverah Park 68
II. Fly's Eye - HiRes 69
III. AGASA 70
IV. Telescope Array 72
V. JEM – EUSO 73
3.3 Το Παρατηρητήριο Pierre Auger 75
3.3.1 Περιγραφή των ανιχνευτών επιφανείας 78
3.3.2 AMIGA (Auger Muons and Infill for Ground Array) 80
3.3.3 Περιγραφή των ανιχνευτών φθορισμού 82

3.3.4 HEAT (High Elevation Auger Telescopes) 83
3.4 Συνάρτηση Πλευρικής Κατανομής 85
3.5 Χαρακτηριστικά του καταιγισμού που σχετίζονται με τον τύπο του πρωτογενούς σωματίου 86
3.6 Ενεργειακό Φάσμα κοσμικών ακτίνων από το Παρατηρητήριο Pierre Auger 88
3.7 Σύνθεση UHECR από το Auger 90
3.8 Εντοπισμός Πηγών από το Auger 92
3.9 Προσομοιώσεις Monte Carlo 94
3.10 Το πρόγραμμα AIRES 97
3.11 Το πρόγραμμα CORSIKA 98

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΟΥ ΜΕΣΩ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ 101

4.1 Εισαγωγή 101
4.2 Διαμήκης ανάπτυξη καταιγισμού 102
4.3 Πλευρική ανάπτυξη καταιγισμού 104
4.3.1 Παράμετρος εκτίμησης ενέργειας του πρωτογενούς 104
4.3.2 Υπολογισμός της κατακόρυφης πυκνότητας S(1000) 105
4.3.3 Υπολογισμός της ενέργειας του πρωτογενούς 107
4.4 Κοσμική Ακτινοβολία φωτονίων γ 110
4.4.1 Υπολογισμός της ενέργειας του πρωτογενούς φωτονίου 114
I. Καταιγισμοί χωρίς πρόδρομα φαινόμενα 114
II. Καταιγισμοί με πρόδρομα φαινόμενα 119
4.5 Διάκριση πρωτογενών σωματιδίων 122
4.6 Σύγκριση με πραγματικά γεγονότα 124
4.7 Υπέρθεση στους καταιγισμούς υπερυψηλών ενεργειών 132
4.8 Συμπεράσματα 140

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΥΠΕΡΥΨΗΛΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ ΜΕΣΩ ΤΗΛΕΣΚΟΠΙΩΝ CHERENKOV 143

5.1 Εισαγωγή 143
5.2 Πειράματα Ατμοσφαιρικών Τηλεσκοπίων 146
I. VERITAS 146
II. H.E.S.S. 148
III. MAGIC 148
IV. CANGAROO-III 149
V. CTA 149

5.3 Ανακατασκευή των χαρακτηριστικών του Εκτεταμένου Ατμοσφαιρικού Καταιγισμού ……153
5.4 Ανάπτυξη του καταιγισμού 159
5.5 Εκτίμηση Ενέργειας..... 175
5.6 Μετατροπή επικλινούς πυκνότητας 178
5.7 Έλεγχος των αποτελεσμάτων 180
5.8 Χρήση της προτεινόμενης μεθόδου 193
5.9 Χρήση αποτελεσμάτων του Cherenkov Telescope Array για τη μελέτη Κοσμικών Ακτίνων Υπερυψηλών Ενεργειών..... 196
5.10 Συμπεράσματα..... 197

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ 201

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ 207

I. Η σημασία του στατιστικου Thinning στις προσομοιωσεις Monte Carlo 207
II. Οι Προσομοιώσεις με το Πρόγραμμα AIRES 208
III. Οι προσομοιώσεις με το πρόγραμμα CORSIKA..... 215

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ 227

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΣΧΗΜΑΤΩΝ

Σχήμα 1: Το φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας πάνω από 100 GeV. 25

Σχήμα 2: Το διάγραμμα του Hillas (Hillas plot) 31

Σχήμα 3: Μήκος απώλειας ενέργειας για πρωτόνια σε αλληλεπίδραση με την Μικροκυματική και την Υπέρυθρη Ακτινοβολία Υποβάθρου 39

Σχήμα 4: Κατανομή ενέργειας ποζιτρονίων που δημιουργούνται από αλληλεπιδράσεις δίδυμης γένεσης πρωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας με τη Μικροκυματική Ακτινοβολία Υποβάθρου 40

Σχήμα 5: Περιορισμός της απόστασης που διανύουν τα πρωτόνια λόγω του ορίου GZK 44

Σχήμα 6: Εκτροπή σωματιδίου αρχικής ενέργειας 10^{18} eV και 10^{20} eV από μαγνητικό πεδίο 1nG. 45

Σχήμα 7: Εκτεταμένος ατμοσφαιρικός καταιγισμός που δημιουργείται από πρωτόνιο που αλληλεπιδρά με πυρήνα της ατμόσφαιρας. 48

Σχήμα 8: Απλοποιημένη απόδοση της άφιξης του μετώπου του καταιγισμού. 52

Σχήμα 9: Γραφική απεικόνιση του μοντέλου του Heitler. 58

Σχήμα 10: Η γεωμετρία της ακτινοβολίας Cherenkov 64

Σχήμα 11: Εικόνα δύο καταιγισμών στην κάμερα του φωτοπολλαπλασιαστή (Πείραμα Pierre Auger). 65

Σχήμα 12: Το Haverah Park Array. 68

Σχήμα 13: Η διάταξη των ανιχνευτών του AGASA. 70

Σχήμα 14: Τα καταγεγραμμένα από το AGASA γεγονότα πάνω από το όριο GZK. 72

Σχήμα 15: Διάταξη ανιχνευτών του Telescope Array. 73

Σχήμα 16: Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας του JEM-EUSO 74

Σχήμα 17: Υβριδική παρατήρηση καταιγισμού – ταυτόχρονη καταγραφή με ανιχνευτή φθορισμού και διάταξη εδάφους. 75

Σχήμα 18: Προσομοίωση με τον κώδικα CORSIKA υβριδικού γεγονότος από το Παρατηρητήριο Pierre Auger. 76

Σχήμα 19: Η θέση των δύο Παρατηρητηρίων στον Παγκόσμιο χάρτη 76

Σχήμα 20: Το Νότιο Παρατηρητήριο στην Αργεντινή. 77

Σχήμα 21: Σύγκριση μεγεθών για τους επιφανειακούς ανιχνευτές των μεγαλύτερων πειραμάτων 77

Σχήμα 22: Σχηματική αναπαράσταση ενός τηλεσκοπίου φθορισμού 83

Σχήμα 23: Περιορισμός στην ανίχνευση του μεγίστου ενός κοντινού καταιγισμού από το κλασικό τηλεσκόπιο φθορισμού..... 84

Σχήμα 24: Ένα γεγονός που παρατηρήθηκε τόσο από το HEAT όσο και από το παλαιότερο τηλεσκόπιο του λόφου Coihueco και το ανακατασκευασμένο προφίλ του..... 85

Σχήμα 25: Πυκνότητα μιονίων για κατακόρυφους καταιγισμούς αρχικής ενέργειας 100 EeV που δημιουργούνται από φωτόνια ακτίνων γ, πυρήνες σιδήρου και πρωτόνια. 86

Σχήμα 26: Το ενεργειακό φάσμα του Auger από τον ανιχνευτή επιφανείας βαθμονομημένο με βάση τα δεδομένα του ανιχνευτή φθορισμού. 88

Σχήμα 27: Το φάσμα των κοσμικών ακτίνων υπερυψηλών ενεργειών από το HiRes και το Auger. 90

Σχήμα 28: Τα δεδομένα των HiRes/MIA, HiRes και Auger συγκρινόμενα με τις προβλέψεις τριών μοντέλων επιτάχυνσης και διάδοσης UHECR..... 90

Σχήμα 29: Η εικόνα που έδωσε το Auger για την προέλευση των μεγαλύτερων γεγονότων το 2007 και το 2010..... 94

Σχήμα 30: Το βάθος του μέγιστου του καταιγισμού σαν συνάρτηση της ενέργειας του πρωτογενούς σωματιδίου για διαφορετικά πρωτογενή. 103

Σχήμα 31: Διακυμάνσεις του μεγίστου του καταιγισμού X_{max} σαν συνάρτηση της ενέργειας του πρωτογενούς για διαφορετικά πρωτογενή σωματίδια. 103

Σχήμα 32: Γραφική απεικόνιση του $\ln(S_\theta/S_0)$ συναρτήσει της γωνίας για καταιγισμούς διαφόρων ζενιθιακών γωνιών και πρωτογενών σωματιδίων με αρχική ενέργεια 100 EeV… 106

Σχήμα 33: Ενέργεια πρωτογενούς σωματιδίου σαν συνάρτηση του σήματος σε απόσταση 1000 m από τον πυρήνα του καταιγισμού για διαφορετικούς τύπους πρωτογενούς. 108

Σχήμα 34: Λόγος μιονίων προς e^+/e^- στο επίπεδο του εδάφους για κατακόρυφους καταιγισμούς πρωτονίου, σιδήρου και φωτονίου ακτίνων γ αρχικής ενέργειας 100 EeV. 112

Σχήμα 35: Λόγος μιονίων προς e^+/e^- στο επίπεδο του εδάφους για καταιγισμούς ζενιθιακής γωνίας 60º πρωτονίου, σιδήρου και φωτονίου ακτίνων γ αρχικής ενέργειας 100 EeV. 112

Σχήμα 36: Το ατμοσφαιρικό βάθος του μεγίστου του καταιγισμού σαν συνάρτηση της ζενιθιακής γωνίας για καταιγισμούς αρχικής ενέργειας 100 EeV διαφορετικών πρωτογενών σωματιδίων. 113

Σχήμα 37: Μεταβολή του βάθους μεγίστου X_{max} σαν συνάρτηση της αρχικής ενέργειας για κατακόρυφους καταιγισμούς. 113

Σχήμα 38: Διακυμάνσεις της πυκνότητας σωματιδίων ανά μονάδα μήκους σαν συνάρτηση της απόστασης από το ίχνος του άξονα του καταιγισμού στην επιφάνεια του εδάφους, για καταιγισμούς διαφορετικών ζενιθιακών γωνιών, αρχικής ενέργειας 100 EeV..... 115

Σχήμα 39: Γραφική απεικόνιση του $\ln(S_\theta/S_0)$ συναρτήσει της γωνίας για καταιγισμούς διαφόρων ζενιθιακών γωνιών φωτονίου γ με αρχική ενέργεια 100 EeV χωρίς πρόδρομα φαινόμενα. 116

Σχήμα 40: Ενέργεια πρωτογενούς σωματιδίου σαν συνάρτηση του σήματος σε απόσταση 1000 m από τον πυρήνα του καταιγισμού για πρωτογενές φωτόνιο γ..... 117

Σχήμα 41: Γραφική απεικόνιση του $\ln(S_\theta/S_0)$ συναρτήσει της γωνίας για καταιγισμούς διαφόρων ζενιθιακών γωνιών φωτονίου γ με αρχική ενέργεια 100 EeV που δημιουργεί πρόδρομους καταιγισμούς..... 119

Σχήμα 42: Ενέργεια πρωτογενούς σωματιδίου σαν συνάρτηση του σήματος σε απόσταση 1000 m από τον πυρήνα του καταιγισμού για πρωτογενές φωτόνιο γ που δημιουργεί πρόδρομους καταιγισμούς..... 121

Σχήμα 43: Αριθμός φορτισμένων σωματιδίων στην επιφάνεια του εδάφους και σε απόσταση 1000 m από το ίχνος του άξονα του καταιγισμού σαν συνάρτηση του ατμοσφαιρικού βάθους του μεγίστου X_{max} για κατακόρυφους καταιγισμούς φωτονίων, πρωτονίων και πυρήνων σιδήρου αρχικής ενέργειας 100 EeV. 122

Σχήμα 44: Αριθμός φορτισμένων σωματιδίων στην επιφάνεια του εδάφους και σε απόσταση 1000 m από το ίχνος του άξονα του καταιγισμού σαν συνάρτηση του ατμοσφαιρικού βάθους του μεγίστου X_{max} για καταιγισμούς φωτονίων, πρωτονίων και πυρήνων σιδήρου ζενιθιακής γωνίας 40^o και αρχικής ενέργειας 100 EeV. 123

Σχήμα 45: Αριθμός φορτισμένων σωματιδίων στην επιφάνεια του εδάφους και σε απόσταση 1000 m από το ίχνος του άξονα του καταιγισμού σαν συνάρτηση του ατμοσφαιρικού βάθους του μεγίστου X_{max} για καταιγισμούς φωτονίων, πρωτονίων και πυρήνων σιδήρου ζενιθιακής γωνίας 60^o και αρχικής ενέργειας 100 EeV. 123

Σχήμα 46: Πλήθος φορτισμένων σωματιδίων σε απόσταση 1000 μέτρων από τον άξονα του καταιγισμού στο επίπεδο του εδάφους σαν συνάρτηση του ατμοσφαιρικού βάθους X_{max} για κατακόρυφους καταιγισμούς αρχικής ενέργειας 10 EeV, 50 EeV και 100 EeV με πρωτογενή πρωτόνια, πυρήνες σιδήρου και φωτόνια ακτίνων γ. 124

Σχήμα 47: Πυκνότητα φορτισμένων σωματιδίων στο επίπεδο του εδάφους για κατακόρυφους καταιγισμούς πρωτονίου, zirconium, tellurium και platinum αρχικής ενέργειας 100 EeV. 138

Σχήμα 48: Πυκνότητα μιονίων στο επίπεδο του εδάφους για κατακόρυφους καταιγισμούς πρωτονίου, zirconium, tellurium και platinum αρχικής ενέργειας 100 EeV. 139

Σχήμα 49: Συναρτήσεις πλευρικής κατανομής Cherenkov για κατακόρυφο φωτόνιο και πρωτόνιο αρχικής ενέργειας 1 TeV και κατακόρυφο πρωτόνιο και φωτόνιο (με πρόδρομα φαινόμενα και χωρίς αυτά) αρχικής ενέργειας 100 EeV. 155

Σχήμα 50: Ενεργοποιούμενοι ανιχνευτές για πρωτόνιο και φωτόνιο ενέργειας 10^{20} eV και πρωτόνιο και φωτόνιο ενέργειας 10^{12} eV. Η προσομοίωση έχει γίνει για υψόμετρο 1800 m στην περιοχή Khomas Highland της Namibia και για πλέγμα 101x101 τηλεσκοπίων διαμέτρου 1 m με απόσταση πλέγματος 100 m. 155

Σχήμα 51: Συναρτήσεις LDF των καταιγισμών πρωτονίων με αρχική ενέργεια από 1 TeV έως και 100 EeV. 160

Σχήμα 52: Το ατμοσφαιρικό βάθος μεγίστου (X_{max}) για επικλινείς καταιγισμούς διαφορετικών ζενιθιακών γωνιών. Όλοι οι καταιγισμοί παρατηρούνται μετά το μέγιστό τους. 161

Σχήμα 53: Το ατμοσφαιρικό βάθος μεγίστου (X_{max}) για κατακόρυφους καταιγισμούς διαφορετικών αρχικών ενεργειών. Όλοι οι καταιγισμοί παρατηρούνται μετά το μέγιστο της ανάπτυξής τους. 161

Σχήμα 54: Το ατμοσφαιρικό βάθος μεγίστου (X_{max}) για επικλινείς καταιγισμούς διαφορετικών ζενιθιακών γωνιών στο Hanle. Πάνω από το έδαφος παρουσιάζουν μέγιστη ανάπτυξη μόνον οι καταιγισμοί με $\theta \geq 40$ deg. 162

Σχήμα 55: Το ατμοσφαιρικό βάθος μεγίστου (X_{max}) για κατακόρυφους καταιγισμούς διαφορετικών αρχικών ενεργειών στο Hanle. Μετά το μέγιστό τους παρατηρούνται μόνο οι καταιγισμοί με $E \leq 10^{15}$ eV. 162

Σχήμα 56: Χρονική εξέλιξη κατακόρυφων καταιγισμών πρωτονίων και φωτονίων (με και χωρίς πρόδρομα φαινόμενα), αρχικής ενέργειας 100 EeV σε διαφορετικές αποστάσεις από τον πυρήνα του καταιγισμού..... 163

Σχήμα 57: Χρονική εξέλιξη καταιγισμών πρωτονίων και φωτονίων (με πρόδρομα φαινόμενα) ζενιθιακής γωνίας 60°, αρχικής ενέργειας 100 EeV σε διαφορετικές αποστάσεις από τον πυρήνα του καταιγισμού..... 164

Σχήμα 58: Παλμοί που δημιουργούνται στα 1200 m από καταιγισμούς ζενιθιακής γωνίας 0° και 60° πρωτονίου και φωτονίου αρχικής ενέργειας 10^{20} eV..... 165

Σχήμα 59: Παλμός για κατακόρυφο πρωτονικό καταιγισμό σε απόσταση 1200 m από τον πυρήνα του καταιγισμού..... 166

Σχήμα 60: Παλμός για πρωτονικό καταιγισμό ζενιθιακής γωνίας 60° σε απόσταση 1200 m από τον πυρήνα του καταιγισμού..... 167

Σχήμα 61: Παλμός για κατακόρυφο φωτονικό καταιγισμό σε απόσταση 1200 m από τον πυρήνα του καταιγισμού..... 168

Σχήμα 62: Παλμός για φωτονικό καταιγισμό ζενιθιακής γωνίας 60° σε απόσταση 1200 m από τον πυρήνα του καταιγισμού..... 169

Σχήμα 63: Διαμήκης ανάπτυξη των κατακόρυφων καταιγισμών ως προς τα ηλεκτρόνια, μιόνια και φωτόνια Cherenkov που παράγονται σε διαφορετικά ατμοσφαιρικά βάθη..... 169

Σχήμα 64: Διαμήκης ανάπτυξη των καταιγισμών 60° ως προς τα ηλεκτρόνια, μιόνια και φωτόνια Cherenkov που παράγονται σε διαφορετικά ατμοσφαιρικά βάθη..... 170

Σχήμα 65: Η δομή του μετώπου του καταιγισμού..... 172

Σχήμα 66: Το πλάτος του μετώπου του καταιγισμού για τα διάφορα πρωτογενή αρχικής ενέργειας 10^{20} eV με τρεις τύπους προσαρμογής..... 173

Σχήμα 67: Το μέτωπο του καταιγισμού για κατακόρυφο πρωτόνιο και φωτόνιο αρχικής ενέργειας 10^{20} eV..... 175

Σχήμα 68: Ενέργεια πρωτογενούς σωματιδίου συναρτήσει της πυκνότητας φωτονίων Cherenkov σε απόσταση 1200 m από τον πυρήνα του καταιγισμού για κατακόρυφους καταιγισμούς πρωτονίων..... 176

Σχήμα 69: $\ln(\rho_\theta/\rho_0)$ συναρτήσει του cosθ για επικλινείς καταιγισμούς πρωτονίων αρχικής ενέργειας 10 EeV - 100 EeV. Οι πυκνότητες ρ_0 και ρ_θ αφορούν απόσταση R=1200 m από τον πυρήνα του καταιγισμού..... 178

Σχήμα 70: Η πυκνότητα φωτονίων Cherenkov σαν συνάρτηση του ατμοσφαιρικού βάθους στο επίπεδο του εδάφους για ζενιθιακές γωνίες από 0 έως 60 μοίρες. 196

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΕΙΚΟΝΩΝ

Εικόνα 1: Η εξωτερική μορφή ενός σταθμού του ανιχνευτή επιφανείας. 79

Εικόνα 2: Τα μέρη ενός σταθμού επιφανείας. 79

Εικόνα 3: Χάρτης του AMIGA. 81

Εικόνα 4: Η τοποθέτηση του μετρητή μιονίων και του ανιχνευτή νερού Cherenkov του AMIGA 82

Εικόνα 5: Τα τρία τηλεσκόπια HEAT σε θέση ανάκλισης τον Ιανουάριο του 2009. 84

Εικόνα 6: Παρουσίαση των τριών γεγονότων με την υψηλότερη ενέργεια από την ιστοσελίδα του Παρατηρητηρίου Auger. 126

Εικόνα 7: Στερεοσκοπική παρατήρηση καταιγισμού από συστοιχία τηλεσκοπίων Cherenkov 147

Εικόνα 8: Φωτονικός και αδρονικός καταιγισμός και η εικόνα που δίνουν σε ένα τηλεσκόπιο Cherenkov 153

Εικόνα 9: Ο κατακόρυφος πρωτονικός καταιγισμός αρχικής ενέργειας 10^{20} eV και οι διάφορες συνιστώσες του σε απεικόνιση στους άξονες x,z. 222

Εικόνα 10: Ο κατακόρυφος πρωτονικός καταιγισμός αρχικής ενέργειας 10^{20} eV και οι διάφορες συνιστώσες του σε απεικόνιση στους άξονες x,y. 223

Εικόνα 11: Ο κατακόρυφος φωτονικός καταιγισμός αρχικής ενέργειας 10^{20} eV και οι διάφορες συνιστώσες του σε απεικόνιση στους άξονες x,z. 224

Εικόνα 12: Ο κατακόρυφος φωτονικός καταιγισμός αρχικής ενέργειας 10^{20} eV και οι διάφορες συνιστώσες του σε απεικόνιση στους άξονες x,y. 225

ΚΑΤΑΛΟΓΟΣ ΠΙΝΑΚΩΝ

Πίνακας 1: Παράμετροι βέλτιστης προσαρμογής για την εξίσωση (2) και για διαφορετικά πρωτογενή σωματίδια. 106

Πίνακας 2: Το σήμα σε απόσταση 1000 μέτρων από το ίχνος του άξονα του καταιγισμού για ζενιθιακή γωνία θ $S_\theta(1000)$ και το διορθωμένο σήμα για κατακόρυφο καταιγισμό $S_0(1000)$ για διαφορετικά πρωτογενή αρχικής ενέργειας 100 EeV. 107

Πίνακας 3: Παράμετροι βέλτιστης προσαρμογής για την εξίσωση (3) και για διαφορετικά πρωτογενή σωματίδια. 109

Πίνακας 4: Διορθωμένο κατακόρυφο σήμα και ενέργεια υπολογισμένη μέσω της σχέσης για επικλινείς καταιγισμούς διαφορετικών ζενιθιακών γωνιών και πρωτογενών σωματιδίων αρχικής ενέργειας 100 EeV. 109

Πίνακας 5: Ποσοστό της κοσμικής ακτινοβολίας υπερυψηλών ενεργειών που οφείλεται σε φωτόνια ακτίνων γ διαφορετικών ενεργειών όπως προσδιορίστηκε από το Auger (Ros et al., 2013)..... 111

Πίνακας 6: Λόγος μιονίων προς e^+/e^- στο επίπεδο του εδάφους (σε απόσταση 1000 m από το ίχνος του άξονα του καταιγισμού) για καταιγισμούς διαφορετικών πρωτογενών και ζενιθιακών γωνιών, αρχικής ενέργειας 100 EeV. 111

Πίνακας 7: Το σήμα σε απόσταση 1000 m από το ίχνος του άξονα του καταιγισμού για ζενιθιακή γωνία θ $S_\theta(1000)$ και το διορθωμένο σήμα για κατακόρυφο καταιγισμό $S_0(1000)$ για πρωτογενή φωτόνια ακτίνων γ αρχικής ενέργειας 100 EeV που δημιουργούν καταιγισμό μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα..... 117

Πίνακας 8: Διορθωμένο κατακόρυφο σήμα και ενέργεια υπολογισμένη μέσω της σχέσης (6) για επικλινείς καταιγισμούς φωτονίων ακτίνων γ αρχικής ενέργειας 100 EeV. 118

Πίνακας 9: Το σήμα σε απόσταση 1000 m από το ίχνος του άξονα του καταιγισμού για ζενιθιακή γωνία θ $S_\theta(1000)$ και το διορθωμένο σήμα για κατακόρυφο καταιγισμό $S_0(1000)$ για πρωτογενή φωτόνια ακτίνων γ αρχικής ενέργειας 100 EeV που δημιουργούν πρόδρομα φαινόμενα στη μαγνητόσφαιρα της Γης..... 120

Πίνακας 10: Διορθωμένο κατακόρυφο σήμα και ενέργεια υπολογισμένη μέσω της σχέσης (9) για επικλινείς καταιγισμούς φωτονίων ακτίνων γ αρχικής ενέργειας 100 EeV. 122

Πίνακας 11: Στοιχεία των πραγματικών γεγονότων από τη βάση δεδομένων του Auger και προσέγγιση της αρχικής τους ενέργειας μέσω των εμπειρικών τύπων της παρούσης εργασίας. 127

Πίνακας 12: Επί τοις εκατό απόκλιση της ενέργειας που υπολογίζεται με την προτεινόμενη μεθοδολογία από την ενέργεια που υπολογίζει για κάθε γεγονός το πείραμα Auger. Στην τελευταία στήλη φαίνεται ποιος τύπος πρωτογενούς παρουσιάζει τη μικρότερη απόκλιση μεταξύ των δύο τιμών. 131

Πίνακας 13: Σωματίδια στην επιφάνεια του εδάφους για καταιγισμό νετρονίου αρχικής ενέργειας $E = E_0/56 = 1,78$ EeV. 133

Πίνακας 14: Σωματίδια στην επιφάνεια του εδάφους για κατακόρυφο καταιγισμό πρωτονίου αρχικής ενέργειας $E = E_0/56 = 1,78$ EeV. 134

Πίνακας 15: Σωματίδια στην επιφάνεια του εδάφους για κατακόρυφο καταιγισμό πυρήνα σιδήρου αρχικής ενέργειας E_0 = 100 EeV. 135

Πίνακας 16: Χαρακτηριστικά βάθους μεγίστου για κατακόρυφο καταιγισμό νετρονίου με αρχική ενέργεια E = E_0/56 = 1,78 EeV. 136

Πίνακας 17: Χαρακτηριστικά βάθους μεγίστου για κατακόρυφο καταιγισμό πρωτονίου με αρχική ενέργεια E = E_0/56 = 1,78 EeV. 136

Πίνακας 18: Χαρακτηριστικά βάθους μεγίστου για κατακόρυφο καταιγισμό σιδήρου με αρχική ενέργεια E_0 = 100 EeV. 137

Πίνακας 19: Αριθμός πρωτονίων και νετρονίων στους πυρήνες των βαρέων στοιχείων zirconium, tellurium και platinum και η ενέργεια που αντιστοιχεί σε κάθε νουκλεόνιο..... 138

Πίνακας 20: Οι τιμές των παραμέτρων A και B της εξίσωσης (11) για τις διάφορες περιοχές. 177

Πίνακας 21: Οι τιμές των παραμέτρων της σχέσης (14) για τις επιλεγμένες τοποθεσίες.... 179

Πίνακας 22: Εκτίμηση ενέργειας μέσω των σχέσεων (11) – (18) για την Κοπεγχάγη στη Δανία 181

Πίνακας 23: Εκτίμηση ενέργειας μέσω των σχέσεων (11) – (18) για την Αθήνα στην Ελλάδα. 182

Πίνακας 24: Εκτίμηση ενέργειας μέσω των σχέσεων (11) – (18) για την τοποθεσία Jamestown στην Αγία Ελένη του Νότιου Ατλαντικού 183

Πίνακας 25: Εκτίμηση ενέργειας μέσω των σχέσεων (11) – (18) για την τοποθεσία Canberra στην Αυστραλία..... 184

Πίνακας 26: Εκτίμηση ενέργειας μέσω των σχέσεων (11) – (18) για την τοποθεσία San Jose στην Κόστα Ρίκα. 185

Πίνακας 27: Εκτίμηση ενέργειας μέσω των σχέσεων (11) – (18) για την τοποθεσία του Παρατηρητηρίου Auger στην Αργεντινή.. 186

Πίνακας 28: Εκτίμηση ενέργειας μέσω των σχέσεων (11) – (18) για την τοποθεσία Khomas Highland στη Ναμίμπια. 187

Πίνακας 29: Εκτίμηση ενέργειας μέσω των σχέσεων (11) – (18) για την τοποθεσία Tenerife που ανήκει στην Ισπανία 188

Πίνακας 30: Εκτίμηση ενέργειας μέσω των σχέσεων (11) – (18) για την τοποθεσία La Silla στην Χιλή. 189

Πίνακας 31: Εκτίμηση ενέργειας μέσω των σχέσεων (11) – (18) για την τοποθεσία San Pedro Martir στο Μεξικό. 190

Πίνακας 32: Εκτίμηση ενέργειας μέσω των σχέσεων (11) – (18) για την τοποθεσία La Puna στην Αργεντινή. 191

Πίνακας 33: Εκτίμηση ενέργειας μέσω των σχέσεων (11) – (18) για την τοποθεσία Hanle στην Ινδία. 192

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1: ΚΟΣΜΙΚΕΣ ΑΚΤΙΝΕΣ

1.1 Εισαγωγή

Η μελέτη των Κοσμικών Ακτίνων Υπερυψηλών Ενεργειών αποτελεί έναν από τους πιο ενδιαφέροντες τομείς τόσο της Σωματιδιακής Φυσικής όσο και της Αστροφυσικής. Τα σωματίδια αυτά, που είναι ίσως τα μόνα δείγματα εξωγαλαξιακής ύλης που μπορούμε να παρατηρήσουμε άμεσα, είναι εξαιρετικά σπάνια και οι μηχανισμοί δημιουργίας και επιτάχυνσής τους είναι ακόμα άγνωστοι. Πίσω από τις εξαιρετικά υψηλές τους ενέργειες μπορεί να κρύβονται άγνωστοι φυσικοί μηχανισμοί καθώς και εξωτικά σωματίδια που σχηματίστηκαν στα πρώτα στάδια δημιουργίας του Σύμπαντος (Nagano & Watson, 2000). Οι κοσμικές ακτίνες είναι εξαιρετικά σημαντικές για την κατανόηση της δομής του Σύμπαντος καθώς η προέλευσή τους σχετίζεται με τις βασικές διαδικασίες και τη δυναμική του σχηματισμού των αστέρων, την αστρική εξέλιξη και τις συνθήκες που επικρατούν στη μεσοαστρική ύλη και το διαγαλαξιακό χώρο.

Όταν αναφερόμαστε γενικά σε Κοσμικές Ακτίνες εννοούμε σωματίδια ή φωτόνια ακτίνων γ πολύ υψηλών ενεργειών που προέρχονται από εξωγήινες πηγές. Τα τηλεσκόπια κοσμικών ακτίνων καταγράφουν πρωτόνια, ηλεκτρόνια, και τα αντισωμάτιά τους καθώς και πυρήνες μέχρι πολύ μεγάλες μάζες (καθώς πιστεύεται ότι εμφανίζονται όλοι οι σταθεροί πυρήνες σε διαφορετικούς βαθμούς), ενώ στην επιφάνεια της Γης παρατηρούνται πιόνια και μιόνια που δημιουργούνται από τις κοσμικές ακτίνες μέσω της αλληλεπίδρασής τους με τη γήινη ατμόσφαιρα. Παρόντα στη σύσταση των κοσμικών ακτίνων είναι ακόμα ουδέτερα σωματίδια καθώς και σωματίδια που παράγονται στον Ήλιο όπως τα ηλιακά νετρίνα που παρέχουν την απόδειξη των πυρηνικών διαδικασιών που συμβαίνουν στο εσωτερικό του.

Το κυριότερο πρόβλημα που σχετίζεται με τις κοσμικές ακτίνες είναι αυτό της προέλευσης και της επιτάχυνσής τους. Αν και γνωρίζουμε ότι το μεγαλύτερο ποσοστό των κοσμικών ακτίνων που παρατηρούμε είναι γαλαξιακής προέλευσης με ένα μικρό μέρος να σχετίζεται με έντονα φαινόμενα στον Ήλιο, είναι επίσης ξεκάθαρο ότι τα πολύ μεγάλης ενέργειας

σωματίδια είναι εξωγαλαξιακής προέλευσης. Καθώς οι ενέργειες των σωματιδίων αυτών είναι πολύ μεγαλύτερες από αυτές που μπορούν να επιτύχουν οι επιταχυντές σωματιδίων στη Γη, η ύπαρξή τους δίνει τη δυνατότητα συλλογής δεδομένων για φαινόμενα που δεν θα μπορούσαν να παρατηρηθούν διαφορετικά αλλά ταυτόχρονα προβληματίζει σχετικά με το ποιοι μηχανισμοί του Σύμπαντος θα μπορούσαν να παράγουν τόσο ενεργητικά σωματίδια.

1.2 Ανακάλυψη των Κοσμικών Ακτίνων

Οι κοσμικές ακτίνες ανακαλύφθηκαν από τους Hess και Kolhörster στις αρχές του περασμένου αιώνα μέσω του φαινομένου ιονισμού σε γυάλινους αεροστεγείς θαλάμους που περιείχαν δύο ηλεκτρόδια με μεγάλη διαφορά δυναμικού ανάμεσά τους.

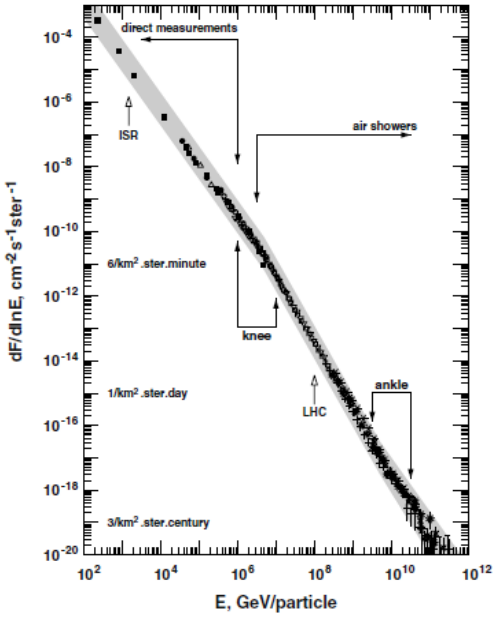
Μετά την ανακάλυψη της ραδιενέργειας πιστεύονταν πως ο ιονισμός του αέρα οφείλονταν στα ραδιενεργά στοιχεία του εδάφους. Κάτι τέτοιο σήμαινε πως ο ιονισμός θα έπρεπε να μειώνεται όσο απομακρύνονταν κάποιος από την επιφάνεια του εδάφους. Το 1912 ο Hess πέταξε με αερόστατο σε ύψος 5 km και ανακάλυψε ότι ο ιονισμός του αέρα αντί να μειώνεται αυξάνονταν με το ύψος. Η μόνη εξήγηση που μπόρεσε να δώσει ήταν ότι «μια ακτινοβολία ιδιαίτερα διεισδυτική εισέρχεται στην ατμόσφαιρα από επάνω». Ο όρος «Κοσμικές Ακτίνες» εισήχθη από τον Millikan ο οποίος προσπαθώντας να διαψεύσει τους Hess και Kolhörster ανέπτυξε νέες μεθόδους ανίχνευσης και προσπάθησε να μελετήσει το φαινόμενο σε άλλα υλικά πέραν της γήινης ατμόσφαιρας. Ο Hess βραβεύτηκε για την ανακάλυψή του με το βραβείο Nobel το 1936. Πριν το 1950, η ανακάλυψη των νέων σωματιδίων υψηλών ενεργειών γίνονταν με τη μελέτη των αλληλεπιδράσεων των κοσμικών ακτίνων.

Οι κοσμικές ακτίνες μετρώνται με πτήσεις αερόστατων, δορυφόρους, με όργανα όπως το AMS (Alpha Magnetic Spectrometer) (Aguilar et al., 2013) στο Διεθνή Διαστημικό Σταθμό και με Διατάξεις Εδάφους (Ground Arrays). Το όργανο που θα επιλεγεί εξαρτάται απόλυτα από το τί αναζητείται και την ενέργεια του αρχικού σωματιδίου. Αυτό οφείλεται στο γεγονός ότι τα

σωματίδια διαφορετικών ενεργειών έχουν πολύ διαφορετική συχνότητα άφιξης στην επιφάνεια της Γης, με τα σωματίδια υπερυψηλών ενεργειών (ενέργεια μεγαλύτερη από 10^{18} eV) να είναι σπάνια (1 σωματίδιο ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο ανά έτος) και τα σωματίδια με ενέργεια πάνω από 10^{20} eV να έχουν συχνότητα άφιξης 1 σωματίδιο ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο ανά αιώνα και άρα να είναι ανέφικτος ο απευθείας εντοπισμός τους από διατάξεις σε δορυφόρους.

1.3 Ενεργειακό Φάσμα

Το φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας πάνω από 100 GeV φαίνεται στο σχήμα 1. Το φάσμα περιγράφεται καλά από νόμο δύναμης (όπου $J \propto E^{-\gamma}$) με μεταβλητό δείκτη γ από ~ 2,7 μέχρι ~ 3 για ενέργεια ~ 10^6 GeV («γόνατο») και πάλι ~ 2,7 για ενέργεια ~ $3 \cdot 10^9$ GeV («αστράγαλος»). Η απότομη πτώση του φάσματος σημαίνει ότι η ροή των κοσμικών ακτίνων μειώνεται γρήγορα από 1/m^2s στο γόνατο σε 1/m^2yr στον αστράγαλο και μόλις 1/km^2century στα 10^{20}eV.



Σχήμα 1: Το φάσμα της κοσμικής ακτινοβολίας πάνω από 100 GeV (Stanev, 2010).

Το ακραίο τμήμα του φάσματος που φαίνεται στο σχήμα 1 για ενέργειες μεγαλύτερες από 10^9 GeV είναι οι κοσμικές ακτίνες υπερυψηλών ενεργειών (Ultra High Energy Cosmic Rays – UHECR), ενώ πάνω από τα 10^{20} eV έχουμε τις κοσμικές ακτίνες εξαιρετικά υψηλών ενεργειών (Extremely High Energy Cosmic Rays – EHECR) (Bhattacharjee & Sigl, 1999). Θεωρητικά, τίθεται ένα όριο στην ενέργεια των κοσμικών ακτίνων στα $5 \cdot 10^{19}$ eV, όμως τα πειραματικά δεδομένα φαίνεται να εκτείνονται μέχρι ενέργεια $3 \cdot 10^{20}$ eV.

Οι εξηγήσεις που έχουν δοθεί για τη δομή του φάσματος θεωρούν πως υπάρχουν αλλαγές στο μηχανισμό επιτάχυνσης, την προέλευση και τις αλληλεπιδράσεις της κοσμικής ακτινοβολίας. Οι κοσμικές ακτίνες με ενέργειες κάτω από 10^{15} eV πιστεύεται γενικά ότι είναι γαλαξιακής προέλευσης επιταχυνόμενες σε υπολείμματα υπερκαινοφανών. Αν και δεν υπάρχουν παρατηρησιακά δεδομένα για επιτάχυνση πυρήνων οπουδήποτε στο Γαλαξία, οι πυρήνες μπορεί να επιταχύνονται μέχρι και τα 10^{15} eV στα υπολείμματα υπερκαινοφανών (SNRs). Μετρήσεις της σύνθεσης κάτω από το γόνατο δείχνουν ότι είναι παρόντα όλα τα χημικά στοιχεία αλλά στο γόνατο η ροή των ελαφρών πυρήνων πέφτει γρήγορα με τη σύνθεση να κυριαρχείται από βαρείς πυρήνες. Μετά το γόνατο γίνεται η υπόθεση ότι ένα μέρος των κοσμικών ακτίνων επανεπιταχύνεται με κάποιο τρόπο και πάνω από τον αστράγαλο πιστεύεται ότι η αλλαγή στην κλίση μπορεί να οφείλεται σε μετάβαση από γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες σε εξωγαλαξιακές καθώς οι διαστάσεις της γυροακτίνας των σωματιδίων είναι συγκρίσιμες με τις διαστάσεις του Γαλαξία.

1.4 Προέλευση και επιτάχυνση των UHECR

Οι μηχανισμοί επιτάχυνσης των κοσμικών ακτίνων ταξινομούνται σε τρεις κατηγορίες:

- Δυναμικοί, με την επιτάχυνση να προκύπτει από τη σύγκρουση των σωματιδίων με μαγνητισμένα νέφη.
- Ηλεκτρομαγνητικοί, με σωματίδια να επιταχύνονται από ηλεκτρικά πεδία όπως neutral sheets, ηλεκτρομαγνητικά κύματα πλάσματος και μαγνητόσφαιρες αστέρων νετρονίων.

- Υδρομαγνητικοί, με την επιτάχυνση στρωμάτων του πλάσματος σε υψηλές ταχύτητες.

Ο σημαντικότερος δυναμικός μηχανισμός επιτάχυνσης είναι ο μηχανισμός Fermi 1^{ου} είδους που προτάθηκε το 1949 σαν μια στοχαστική θεωρία όπου φορτισμένα σωματίδια ανακλώνται από «μαγνητικούς καθρέφτες» που σχετίζονται με ανωμαλίες στο γαλαξιακό μαγνητικό πεδίο. Οι καθρέφτες αυτοί κινούνται σε πρώτη προσέγγιση τυχαία και τα σωματίδια σ' αυτές τις εκτροπές στατιστικά κερδίζουν ενέργεια. Το μέσο ενεργειακό κέρδος ανά κρούση είναι:

$$\langle \frac{\Delta \mathrm{E}}{\mathrm{E}} \rangle = \frac{8}{3} (\frac{V}{c})^2$$

Αυτό σημαίνει ότι η αύξηση της ενέργειας του σωματιδίου είναι εκθετική, αφού η ίδια ποσοστιαία αύξηση συμβαίνει σε κάθε κρούση. Ο μέσος χρόνος μεταξύ των συγκρούσεων είναι 2L/c όπου L η μέση ελευθέρα διαδρομή, οπότε ο ρυθμός αύξησης της ενέργειας είναι:

$$\frac{dE}{dt} = \frac{4}{3} (\frac{V^2}{cL}) E \Rightarrow E(t) = E_i \exp[\frac{4}{3} (\frac{V^2}{cL})]$$

όπου V η ταχύτητα του νέφους και E_i η ενέργεια έκχυσης (injection energy), δηλαδή η αρχική ενέργεια του σωματιδίου. Η ενέργεια έγχυσης που είναι η ελάχιστη απαιτούμενη ενέργεια για να αρχίσει η διαδικασία Fermi είναι 200 MeV για τα πρωτόνια, αλλά για τους βαρύτερους πυρήνες εξαιτίας των μεγάλων ρυθμών ιονισμού απαιτούνται ενέργειες της τάξης των 20 GeV για το οξυγόνο και 300 GeV για το σίδηρο.

Ο μηχανισμός αυτός αντιμετωπίζει κάποια προβλήματα. Οι ταχύτητες των νεφών στον Γαλαξία μας είναι πολύ μικρές σε σύγκριση με την ταχύτητα του φωτός, οπότε χρειάζονται $3 \cdot 10^8$ χρόνια παραμονής των κοσμικών ακτίνων στο Γαλαξία για να επιτευχθεί η παρατηρούμενη ενέργεια ενώ στην πραγματικότητα ο χρόνος αυτός είναι 100 φορές μικρότερος. Επιπλέον, ο αριθμός των συγκρούσεων στο ενδοαστρικό μέσο είναι 1/έτος, άρα το ενεργειακό κέρδος είναι πολύ μικρό. Τέλος στο μηχανισμό αυτό δεν έχει συμπεριληφθεί η απώλεια ενέργειας λόγω ιονισμού που εμποδίζει την επιτάχυνση των σωματιδίων από τις χαμηλότερες ενέργειες.

Ο σημαντικότερος υδροδυναμικός μηχανισμός επιτάχυνσης είναι η επιτάχυνση σωματιδίων σε ισχυρά κρουστικά κύματα, ο μηχανισμός Fermi $2^{ου}$ είδους. Στην περίπτωση αυτή τα σωματίδια αντιδρούν με διαφόρους τύπους κυμάτων του πλάσματος και κερδίζουν ενέργεια αφού σκεδαστούν στοχαστικά από αυτά τα κύματα.

Η βασική εικόνα της διαδικασίας επιτάχυνσης δίνεται από την ύπαρξη ενός ισχυρού ωστικού κύματος που διαδίδεται στο ενδοαστρικό μέσο και το οποίο ήδη περιέχει μερικά σωματίδια υψηλής ενέργειας. Με τον όρο ωστικό κύμα εννοούμε ότι η διαταραχή διαδίδεται μέσα στο ενδοαστρικό αέριο με μια ταχύτητα πολύ μεγαλύτερη από την ταχύτητα του ήχου. Αυτή είναι σίγουρα η περίπτωση εκτόξευσης μάζας σε εκρήξεις των υπερκαινοφανών όπου οι ταχύτητες είναι περίπου 10^4 km/s και οι ταχύτητες ήχου και Alfven του ενδοαστρικού αερίου είναι περίπου 10 km/s.

Μπροστά από το μέτωπο κρούσης η κατανομή των σωματιδίων είναι ισοτροπική. Μερικές από τις κοσμικές ακτίνες περνούν μέσα από το μέτωπο και στη συνέχεια αποκτούν ισοτροπία λόγω σκέδασης εξαιτίας των ανωμαλιών που υπάρχουν πίσω από το μέτωπο. Μερικά από τα σωματίδια ακολουθούν το αέριο πίσω από το μέτωπο ενώ άλλα κινούνται κατά αντίθετη διεύθυνση από το ρεύμα και διασχίζουν πάλι το μέτωπο κρούσης. Αυτή η αντίθετη ροή των κοσμικών ακτίνων σταματά λόγω των συνήθων διαδικασιών σκέδασης και η κοσμική ακτινοβολία γίνεται και πάλι ισότροπη. Τα σωματίδια που συμμετείχαν σ' αυτό τον κύκλο έχουν αποκτήσει ορισμένο ποσό ενέργειας λόγω της πρώτης τάξης επιτάχυνσης του Fermi. Το μέτωπο προλαβαίνει τα σωματίδια και ο κύκλος ξαναρχίζει.

Η μέση αύξηση της ενέργειας σε ένα κύκλο εμπρός και πίσω από το μέτωπο κρούσης είναι

$$\langle \frac{\Delta E}{E} \rangle = \frac{4}{3} \cdot \frac{V}{c}$$

όπου V η ταχύτητα του μετώπου με V<<c.

1.4.1 Μοντέλα προέλευσης και επιτάχυνσης των UHECR

Καθώς οι ενέργειες των UHECR είναι πολύ υψηλές, το θέμα της προέλευσης και επιτάχυνσής τους είναι ιδιαίτερα πολύπλοκο. Έχουν προταθεί διάφορα μοντέλα που περιστρέφονται γύρω από δύο κύριους άξονες: «συνηθισμένα» σωματίδια που επιταχύνονται στις ενέργειες αυτές από ειδικά αστροφυσικά περιβάλλοντα (μοντέλα bottom-up) και διάσπαση μεγάλης μάζας σωματιδίων (όπως τα σωμάτια X) σε σωματίδια με τις ενέργειες των UHECR (μοντέλα top-down).

I. Μοντέλα bottom-up

Μια αποδεκτή θεωρία για την επιτάχυνση κοσμικών ακτίνων με ενέργεια κάτω από το «γόνατο» του φάσματος (10^{15} eV) σε γαλαξιακά υπολείμματα υπερκαινοφανών προτάθηκε για πρώτη φορά από τους Ginzburg και Syrovatskii τη δεκαετία του 1960. Η εκτίμηση ήταν πως ένα μικρό μέρος (5-10%) της κινητικής ενέργειας των γαλαξιακών υπολειμμάτων υπερκαινοφανών επαρκεί για τη διατήρηση της ενέργειας που μεταφέρουν οι γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες. Η διαδικασία επιτάχυνσης είχε υποτεθεί σταθμισμένη, τύπου Fermi, που αργότερα αντικαταστάθηκε με την πιο αποδοτική επιτάχυνση σε αστροφυσικά κύματα κρούσης.

Η υπόθεση αυτή ισχύει ακόμα, αλλά δεν εφαρμόζεται σε όλες τις κοσμικές ακτίνες. Πολύ πιο ακριβείς πρόσφατες εκτιμήσεις και υπολογισμοί δείχνουν ότι η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να επιτευχθεί με επιτάχυνση στα κρουστικά κύματα υπολειμμάτων υπερκαινοφανών δεν είναι μεγαλύτερη από 10^{15} eV. Αυτό το όριο αφήνει εκτός όχι μόνο τις UHECR αλλά και τις υψηλότερης ενέργειας γαλαξιακές κοσμικές ακτίνες που απαιτούν υπολείμματα υπερκαινοφανών σε ειδικό περιβάλλον. Υπάρχουν κάποιες ενδιαφέρουσες προτάσεις σχετικά με ενίσχυση κρουστικών μαγνητικών πεδίων από κοσμικές ακτίνες που οδηγούν σε μεγαλύτερες ενέργειες επιτάχυνσης και πιο επίπεδο φάσμα. Πάντως προς το παρόν η επιτάχυνση φορτισμένων πυρήνων σε υπολείμματα υπερκαινοφανών είναι κυρίως μια θεωρητική προσέγγιση. Τα υπολείμματα υπερκαινοφανών έχουν υψηλότερη πυκνότητα ύλης από τον μεσοαστρικό χώρο και αναμένεται ότι οι

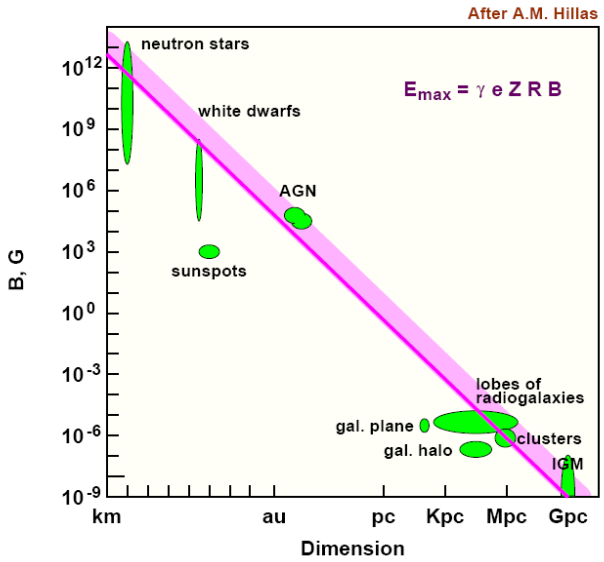
επιταχυνόμενοι πυρήνες αλληλεπιδρούν με την ύλη και δημιουργούν υψηλής ενέργειας ακτίνες γ.

Αν και τηλεσκόπια Cherenkov ακτίνων γ έχουν παρατηρήσει υπολείμματα υπερκαινοφανών με εκπομπή ακτίνων γ ενέργειας της τάξεως των TeV (10^{12} eV), δεν υπάρχει απόδειξη ότι οι ακτίνες γ με ενέργειες της τάξεως αυτής και μεγαλύτερες παράγονται σε αδρονικές αλληλεπιδράσεις. Από την άλλη πλευρά παρατηρήσεις σε πολλά μήκη κύματος δείχνουν την παρουσία πολύ ισχυρών κυμάτων κρούσης σε υπολείμματα υπερκαινοφανών με εκπομπή ακτίνων γ ενέργειας της τάξεως των TeV.

Για να ελέγξουμε την προέλευση κοσμικών ακτίνων με ενέργειες που ξεπερνούν τα 10^{20} eV θα πρέπει να επεκτείνουμε τα μοντέλα που εξηγούν την επιτάχυνση των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων αναζητώντας μεγαλύτερα και λαμπρότερα εξωγαλαξιακά αστροφυσικά αντικείμενα. Ελάχιστες απαιτήσεις στην αναζήτηση αυτή είναι η περιοχή επιτάχυνσης να περιέχει τα επιταχυνόμενα κοσμικά σωματίδια και να μην βρίσκεται πολύ μακριά μιας και σε αυτή την περίπτωση οι απαιτήσεις σε λαμπρότητα θα μεγάλωναν υπερβολικά λόγω της απώλειας ενέργειας κατά τη διάδοση. Η κλίμακα για τέτοια επιτάχυνση δόθηκε από τον Hillas με βάση διαστατικά επιχειρήματα. Η πρώτη απαίτηση για την επιτάχυνση φορτισμένων πυρήνων σε αντικείμενο οποιουδήποτε τύπου είναι ότι το μαγνητικό πεδίο του αντικειμένου συγκρατεί τον επιταχυνόμενο πυρήνα μέσα στο ίδιο το πεδίο. Έτσι μπορεί κάποιος να υπολογίσει μια μέγιστη θεωρητική ενέργεια επιτάχυνσης $E_{max} \leq \gamma eZBR$ όπου γ ο παράγοντας Lorentz της ύλης στο κρουστικό κύμα, Z το φορτίο του πυρήνα και B η μέση τιμή του μαγνητικού πεδίου. Ο Hillas ανέπτυξε αυτές τις προϋποθέσεις περιλαμβάνοντας το φαινόμενο της μέσης ταχύτητας των κέντρων σκέδασης b_{sc} παίρνοντας τη συνθήκη:

$$\left(\frac{B}{G}\right)\left(\frac{R}{pc}\right) \succ \frac{0.2}{b_{sc}Z}\left(\frac{E}{10^{20}eV}\right)$$

όπου Z είναι το φορτίο του επιταχυνόμενου σωματιδίου. Από τη σχέση αυτή προκύπτει το διάγραμμα του Hillas (σχήμα 2).



Σχήμα 2: Το διάγραμμα του Hillas (Hillas plot) που δίνει τις διαστάσεις και το μαγνητικό πεδίο αντικειμένων που μπορούν να επιταχύνουν πρωτόνια (στην κορυφή της σκιασμένης περιοχής) και πυρήνες σιδήρου σε ενέργεια 10^{20} eV (Stanev, 2007).

Υπάρχουν μόνο τέσσερις τύποι συστημάτων που μπορούν να προσεγγίσουν αυτές τις ενέργειες: ισχυρά μαγνητισμένοι αστέρες νετρονίων με μαγνητικό πεδίο επιφανείας που ξεπερνά τα 10^{13} G και γραμμική διάσταση 10 km, ενεργοί γαλαξιακοί πυρήνες, λοβοί γιγαντιαίων ραδιογαλαξιών και πιθανόν κρουστικά κύματα της τάξεως των Gpc στον εξωγαλαξιακό χώρο από τον σχηματισμό δομών. Άλλες πιθανές περιοχές επιτάχυνσης όπως οι εκλάμψεις ακτίνων γ δεν περιλαμβάνονται στο σχήμα εξαιτίας της εξάρτησης του μαγνητικού πεδίου και των διαστάσεων τους από το χρόνο.

Πιθανές Αστροφυσικές πηγές των UHECRs (Stanev, 2010):

- **Κρουστικά κύματα μεγέθους της τάξης των Gpc από το σχηματισμό δομών:** Πρόκειται για πολύ μεγάλης κλίμακας κρουστικά κύματα διαστάσεων που ξεπερνούν τα 10 Mpc που μπορεί να υπάρχουν λόγω του σχηματισμού δομών εξαιτίας της βαρυτικής έλξης. Τέτοια κρουστικά κύματα που σχηματίζονται στις ροές προσαύξησης (accretion flows) μπορούν θεωρητικά να δημιουργήσουν μαγνητικά πεδία. Η μέγιστη ενέργεια που μπορεί να επιτευχθεί σε τέτοια κρουστικά κύματα εξαρτάται από το μέγεθος τους. Για διαστάσεις από 50 Mpc και πάνω, η μέγιστη ενέργεια μπορεί να ξεπεράσει τα 10^{20} eV αν η μέση ένταση του

εξωγαλαξιακού μαγνητικού πεδίου είναι 10^{-9} G και τα ίδια τα κρουστικά κύματα δημιουργούν πεδία της τάξης των μG. Ένα από τα προβλήματα με την επιτάχυνση σε αυτές τις δομές είναι ότι η διαδικασία είναι αργή και η απώλεια ενέργειας στη δίδυμη γέννεση και τη φωτοπαραγωγή (photoproduction - αλληλεπίδραση των πρωτονίων με φωτόνια – $\gamma+p\rightarrow n+\pi^+$ ή $\gamma+p\rightarrow p+\pi^0$) κατά την επιτάχυνση περιορίζουν τη μέγιστη ενέργεια που μπορεί να επιτευχθεί.

- **Παλλόμενες Ραδιοπηγές (Pulsars)**: Οι pulsars είναι τα μικρότερα αντικείμενα στο διάγραμμα του Hillas που μπορούν να επιταχύνουν σωματίδια σε ενέργειες πάνω από 10^{20} eV. Πρόκειται για νεαρούς μαγνητισμένους αστέρες νετρονίων με επιφανειακά μαγνητικά πεδία της τάξης των 10^{13} Gauss. Η διαδικασία επιτάχυνσης δεν περιλαμβάνει αστροφυσικά κρουστικά κύματα καθώς πρόκειται για άμεση επιτάχυνση στο ισχυρό ηλεκτροστατικό δυναμικό που δημιουργείται στην επιφάνεια του αστέρα νετρονίων. Ένα άλλο πολύ ενδιαφέρον μοντέλο (Blasi et al., 2000) προβλέπει ότι ιόντα σιδήρου από την επιφάνεια ενός νεαρού αστέρα νετρονίων επιταχύνονται από μαγνητοϋδροδυναμικούς (MHD) ανέμους. Το μοντέλο αυτό απαιτεί συγκεκριμένη ένταση του μαγνητικού πεδίου του pulsar και το φάσμα επιτάχυνσης είναι επίπεδο, ανάλογο του 1/E. Είναι πιθανό ένα μεγάλο μέρος των παρατηρούμενων UHECR να επιταχύνεται μέσα στα όρια του Γαλαξία, οπότε η πρόταση αυτή εξουδετερώνει όλα τα προβλήματα που σχετίζονται με τη διάδοση σε εξωγαλαξιακές αποστάσεις. Υπάρχουν ακόμα μοντέλα για επιτάχυνση UHECR σε magnetars, αστέρες νετρονίων με επιφανειακά μαγνητικά πεδία μέχρι 10^{15} Gauss.

- **Ενεργοί Γαλαξιακοί Πυρήνες (Active Galactic Nuclei)**: Όλοι οι AGN μπορούν να είναι κατ' αρχήν πηγές των υψηλότερων ενεργειών κοσμικών ακτίνων. Το κεντρικό τους μέρος (engine) με μαγνητικό πεδίο της τάξης των 5 G και γραμμική διάσταση 0,02 pc μπορεί να περιέχει σωματίδια μέχρι 10^{20} eV, όμως τα πυκνά πεδία ακτινοβολίας στην περιοχή αυτή προκαλούν απώλειες ενέργειας. Οι Norman et al. (1995) θεωρούν ότι κανένα πρωτόνιο δεν μπορεί να διαφύγει από την περιοχή αυτή χωρίς

μεγάλη απώλεια ενέργειας και το φαινόμενο γίνεται ακόμα πιο έντονο για βαρύτερους πυρήνες. Μια πιθανή περίπτωση είναι ότι νετρόνια που δημιουργούνται κατά την φωτοπαραγωγή διαφεύγουν από την περιοχή του AGN εφόσον δεν περιορίζονται μαγνητικά και διασπώνται σε πρωτόνια όταν βρεθούν αρκετά μακριά. Για να διαφύγει ένα νετρόνιο, η ενέργειά του δεν χρειάζεται να είναι μεγαλύτερη από 10^{18} eV. Οι πίδακες των Ενεργειακών Γαλαξιακών Πυρήνων από την άλλη πλευρά έχουν το πλεονέκτημα ότι η επιτάχυνση στο πλαίσιο του πίδακα μπορεί να έχει μέγιστη ενέργεια μικρότερη αυτής που παρατηρείται στις UHECR κατά 1/γ, όπου γ ο παράγοντας Lorentz του πίδακα. Το βασικό πρόβλημα με αυτά τα μοντέλα είναι η αδιαβατική επιβράδυνση των σωματιδίων όταν η ταχύτητα του πίδακα αρχίζει να μειώνεται.

- **Εκλάμψεις Ακτίνων γ (Gamma Ray Bursts)**: Οι εκλάμψεις ακτίνων γ είναι οι υψηλότερης ενέργειας διαδικασίες που γνωρίζουμε. Πρόκειται για σύντομες εκτοξεύσεις ακτίνων γ κυρίως ενέργειας της τάξης των MeV. Τα φάσματά τους εκτείνονται και σε υψηλότερες ενέργειες με το υψηλότερης ενέργειας φωτόνιο από GRB που έχει παρατηρηθεί να έχει ενέργεια 20 GeV. Η διάρκεια της έκλαμψης κυμαίνεται από κλάσματα του δευτερολέπτου μέχρι εκατοντάδες δευτερόλεπτα. Έχει αποδειχθεί ότι οι GRB είναι αντικείμενα κοσμολογικής προέλευσης με μέσο redshift $Z=(\lambda_{obs}-\lambda_{emit})/\lambda_{emit}=1$. Η ολική τους λαμπρότητα είναι 10^{53} – 10^{54} erg στην περίπτωση ισοτροπικής εκπομπής, ενώ για την περίπτωση πίδακα ο αριθμός αυτός πρέπει να μειωθεί ανάλογα με την γωνία ανοίγματος (opening angle) του πίδακα. Οι παράγοντες Lorentz των πιδάκων που χρειάζονται για να μοντελοποιηθεί η εκπομπή από GRB είναι της τάξης του 100 έως 1000. Αυτά τα μοντέλα έγιναν δημοφιλή με τη διαπίστωση ότι οι διευθύνσεις άφιξης των δύο πιο ενεργητικών κοσμικών ακτίνων που έχουν καταγραφεί συνέπιπταν με την περιοχή δύο ισχυρών GRB. Διαφορετικές θεωρίες τοποθετούν την περιοχή επιτάχυνσης στο εσωτερικό ή το εξωτερικό κρουστικό κύμα του GRB. Για να εξηγηθούν οι παρατηρούμενες UHECR με τη θεωρία των GRB χρειάζεται έντονη τρέχουσα δραστηριότητα GRB και οι αμφιβολίες σχετικά με αυτή τη θεωρία σχετίζονται με τις κοσμολογικές αποστάσεις των αντικειμένων αυτών

καθώς πολύ απομακρυσμένες GRB δεν μπορούν να συνεισφέρουν στις παρατηρούμενες κοσμικές ακτίνες πάνω από 10^{19} eV και κοντινές GRB δεν συμβαίνουν αρκετά συχνά για να πετύχουν την λαμπρότητα που απαιτείται για τις πηγές των UHECR.

- **Γιγαντιαίοι Ραδιογαλαξίες (Giant Radio Galaxies):** Ένα από τα πρώτα ισχυρά μοντέλα για την επιτάχυνση των UHECR ήταν αυτό των Rachen και Biermann που αφορούσε την επιτάχυνση σε γαλαξίες Fanaroff-Riley (FR) τύπου II. Οι γαλαξίες FR τύπου II είναι γιγαντιαίοι ραδιογαλαξίες που παρουσιάζουν δύο πίδακες που κατευθύνονται σε αντίθετες κατευθύνσεις. Οι κοσμικές ακτίνες επιταχύνονται στα “hot-spots”, τα κύματα κρούσης στο σημείο τερματισμού των πιδάκων που εκτείνονται σε αποστάσεις μεγαλύτερες από 100 Kpc. Τα μαγνητικά πεδία μέσα στα “hot-spots” δεν μπορούν να μετρηθούν άμεσα αλλά εκτιμάται ότι ξεπερνούν τα 10 μG οπότε φαίνεται να είναι επαρκή για επιτάχυνση μέχρι 10^{20} eV. Οι απώλειες ενέργειας δεν αναμένονται να είναι σοβαρό πρόβλημα μιας και αυτά τα κρουστικά κύματα είναι ήδη μέσα στον εξωγαλαξιακό χώρο και έτσι δεν υπάρχει αδιαβατική απώλεια κατά την έγχυση των επιταχυνόμενων σωματιδίων μέσα τους. Πιθανά κοσμολογικά κοντινά αντικείμενα περιλαμβάνουν το Cen A (σε απόσταση 5 Mpc) και το M87 στο σμήνος της Παρθένου (σε απόσταση 18 Mpc).

- **Μελανές Οπές χωρίς ραδιεκπομπή (Quiet Black Holes):** Πρόκειται για πολύ μεγάλης μάζας μελανές οπές, υπολείμματα quasars που λειτουργούν σαν περιοχές επιτάχυνσης. Η πρόταση είναι ότι πρωτόνια πολύ υψηλής ενέργειας μπορεί να επιταχυνθούν στον ορίζοντα γεγονότων περιστρεφόμενων μελανών οπών που σχετίζονται με μη ενεργούς γαλαξίες και αποσυνδέει την περιοχή επιτάχυνσης των UHECR από την κοσμολογική περιοχή μας. Τέτοια αντικείμενα μπορεί να βρίσκονται σε απόσταση μέχρι 50 Mpc από τον Γαλαξία μας και δεν είναι ενεργά στις ραδιοσυχνότητες αλλά αν έχουν αρκετή μάζα μπορούν να επιταχύνουν τις κοσμικές ακτίνες. Επιτάχυνση μέχρι τα 10^{20} eV απαιτεί μάζα της τάξης των 10^9 M_O.

- **Συγκρουόμενοι Γαλαξίες (Colliding Galaxies):** Τα συστήματα συγκρουόμενων γαλαξιών προτείνονται λόγω των κυμάτων κρούσης και των μαγνητικών πεδίων της τάξης των 20μG που έχουν παρατηρηθεί σε αυτά. Τα κρουστικά αυτά κύματα είναι εύκολα ορατά στις ραδιοσυχνότητες και με μέγεθος 30 kpc παρέχουν τις συνθήκες για επιτάχυνση πάνω από 10^{20} eV.

- **Σμήνη Γαλαξιών (Clusters of Galaxies):** Μαγνητικά πεδία της τάξεως των 5μG έχουν παρατηρηθεί σε κλίμακες αποστάσεων της τάξεως των 500 Kpc. Αυτή η ένταση μαγνητικού πεδίου σε τόσο τεράστιο όγκο επιτρέπει την επιτάχυνση σε ενέργειες πάνω από 10^{20} eV, όμως οι μεγάλες διαστάσεις του συστήματος και οι σχετιζόμενες με αυτές απώλειες ενέργειας περιορίζουν τη μέγιστη επιτάχυνση περίπου στα 10^{19} eV ενώ το μεγαλύτερο μέρος των χαμηλότερης ενέργειας κοσμικών ακτίνων εγκλωβίζεται για πάντα στο σμήνος γαλαξιών και μόνον οι υψηλότερης ενέργειας μπορούν να διαφύγουν.

II. Μοντέλα top-down

Αφότου έγινε κατανοητό ότι η αστροφυσική επιτάχυνση μέχρι ενέργεια 10^{20} eV και πάνω από αυτή είναι πολύ δύσκολη καθώς απαιτεί εξαιρετικά ευνοϊκές παραμέτρους και πολύ αποδοτικούς μηχανισμούς, αναπτύχθηκαν ένα πλήθος θεωρίες σωματιδιακής φυσικής για να εξηγηθεί η προέλευση των UHECR. Για να διαχωριστούν αυτές από τις διαδικασίες επιτάχυνσης (bottom-up), ονομάστηκαν θεωρίες top-down. Η βασική ιδέα είναι ότι πολύ μεγάλης μάζας X σωματίδια διασπώνται και η διαδικασία κατακερματισμού ελαττώνει την ενέργεια για να δημιουργήσει τις παρατηρούμενες UHECR. Μια και οι παρατηρούμενες κοσμικές ακτίνες έχουν ενέργειες τάξεις μεγέθους χαμηλότερες από τη μάζα του σωματιδίου X, δεν υπάρχει πρόβλημα στο να επιτευχθεί η απαιτούμενη κλίμακα ενέργειας. Το ενεργειακό περιεχόμενο των UHECR δεν είναι πολύ υψηλό και τα σωματίδια X δεν χρειάζεται να είναι μεγάλο ποσοστό της σκοτεινής ύλης. Όλα τα top-down μοντέλα των UHECR

έχουν δύο βασικά χαρακτηριστικά: επίπεδο φάσμα έγχυσης των κοσμικών ακτίνων (injection spectrum) και διαφορετική σύσταση σωματιδίων από τα μοντέλα επιτάχυνσης bottom-up.

Υπάρχουν δύο ξεχωριστοί κλάδοι αυτών των θεωριών. Ο ένας από αυτούς περιλαμβάνει την εκπομπή σωματιδίων Χ από τοπολογικές ατέλειες. Αυτά τα μοντέλα ακολουθούν την εργασία του C. T. Hill (Hill et al., 1987) που περιέγραψε την εκπομπή από καταστροφή ζεύγους μονοπόλου/αντιμονοπόλου που σχηματίζει ένα μετασταθές monopolonium. Η εκπομπή σωματιδίων Χ μεγάλης μάζας είναι πιθανή μέσω υπεραγώγιμων βρόχων κοσμικών χορδών καθώς και από cusp evaporation σε κανονικές κοσμικές χορδές και τεμνόμενες κοσμικές χορδές. Τα σωματίδια Χ διασπώνται σε quarks και λεπτόνια. Τα quarks αδρονοποιούνται σε βαρυόνια και μεσόνια που με τη σειρά τους διασπώνται ανάλογα με το είδος τους και το τελικό αποτέλεσμα είναι ένας αριθμός νουκλεονίων και ένας πολύ μεγαλύτερος αριθμός ακτίνων γ και νετρίνων (περίπου στις ίδιες ποσότητες, μέχρι και 30 φορές περισσότερα από τα νουκλεόνια ανάλογα με το μοντέλο αδρανοποίησης).

Ένα μονόπολο είναι περίπου 40 φορές βαρύτερο από ένα σωματίδιο Χ, έτσι κάθε monopolium μπορεί να εκπέμψει 80 από αυτά. Χρησιμοποιώντας αυτό τον αριθμό μπορεί να εκτιμηθεί ο αριθμός των διασπάσεων που παρέχουν τις παρατηρούμενη ροή UHECR που προκύπτει μικρότερη από 1 ανά χρόνο ανά μονάδα όγκου, όσο και αυτή του Γαλαξία. Μια άλλη πιθανότητα είναι η εκπομπή σωματιδίων Χ από cosmic necklaces, κλειστούς βρόχους κοσμικών χορδών που περιλαμβάνουν μονόπολα.

Η άλλη εκδοχή είναι ότι τα ίδια τα σωματίδια Χ είναι απομεινάρια από το νεαρό Σύμπαν. Ο χρόνος ζωής τους πρέπει να είναι πολύ μεγάλος, πιθανόν μεγαλύτερος από την ηλικία του Σύμπαντος. Μπορεί να είναι ακόμα σημαντικό μέρος της ψυχρής σκοτεινής ύλης. Καθώς είναι υπερ-βαρέα (superheavy) αυτά τα σωματίδια θα έλκονται βαρυτικά από τον Γαλαξία και το τοπικό υπερσμήνος που η πυκνότητά τους μπορεί να ξεπερνά τη μέση πυκνότητα του Σύμπαντος.

Υπάρχουν δύο κύριες διαφορές μεταξύ των μοντέλων προέλευσης των UHECR bottom-up και top-down. Η αστροφυσική επιτάχυνση δημιουργεί φορτισμένους πυρήνες ενώ τα top-down μοντέλα δημιουργούν κυρίως

φορτισμένους πυρήνες και ακτίνες γ καθώς και έναν σχετικά μικρό αριθμό πρωτονίων. Το ενεργειακό φάσμα των κοσμικών ακτίνων που δημιουργείται με τη διάσπαση των σωματιδίων Χ είναι σχετικά επίπεδο, σαν φάσμα νόμου δύναμης με δείκτη α=1,5 ενώ το στάνταρ φάσμα επιτάχυνσης έχει δείκτη ίσο ή μεγαλύτερο από 2.

Τα σενάρια αυτά παραμερίστηκαν αφού, όπως θα αναφερθεί αναλυτικά στη συνέχεια, το Auger (Abraham et al., 2008) χρησιμοποίησε τα διαμήκη προφίλ και άλλα χαρακτηριστικά των καταιγισμών για να περιορίσει το πιθανό ποσοστό καταιγισμών που οφείλονται σε ακτίνες γ σε 2% για αρχική ενέργεια πάνω από 10^{19} eV και 31% για αρχική ενέργεια πάνω από $4 \cdot 10^{19}$ eV λόγω χαμηλότερης στατιστικής. Αν και είναι ακόμα δυνατόν τα υψηλότερης ενέργειας γεγονότα να είναι ακτίνες γ, κάτι τέτοιο δεν είναι πια πολύ πιθανό.

III. Υβριδικά μοντέλα

Υπάρχουν και κάποια μοντέλα που συνδυάζουν στοιχεία και από τις δύο ομάδες. Το πιο επιτυχημένο από αυτά είναι το Z-burst model. Η βασική ιδέα είναι ότι κάπου στο Σύμπαν δημιουργούνται νετρίνα. Τα σωματίδια αυτά αλληλεπιδρούν με κοσμολογικά νετρίνα στην γειτονιά μας και δημιουργούν Z_0 μποζόνια που διασπώνται δημιουργώντας μια τοπική ροή νουκλεονίων, πιονίων, φωτονίων και νετρίνων. Η ενέργεια που αντιστοιχεί στην παραγωγή Z_0 είναι $4 \cdot 10^{21}$ eV/m_ν (eV), όπου m_ν είναι η μάζα των κοσμολογικών νετρίνο. Όσο υψηλότερη είναι η μάζα αυτή, τόσο χαμηλότερη είναι η αντίστοιχη ενέργεια που απαιτείται. Επιπλέον τα κοσμολογικά νετρίνα έλκονται βαρυτικά από συγκεντρώσεις μάζας και η πυκνότητά τους αυξάνεται στην κοντινή μας κοσμολογική περιοχή. Αν οι μάζες των νετρίνο είναι μικρές, της τάξης μεγέθους της διαφοράς μάζας που προκύπτει από τις ταλαντώσεις των νετρίνων, η ενέργεια των υψηλής ενέργειας νετρίνων θα πρέπει να αυξάνεται.

1.5 Διάδοση των UHECR

Σωματίδια ενέργειας 10^{20} eV μπορούν να αλληλεπιδράσουν με σχεδόν οποιοδήποτε στόχο. Ο πιο κοινός και περισσότερο γνωστός στόχος είναι η

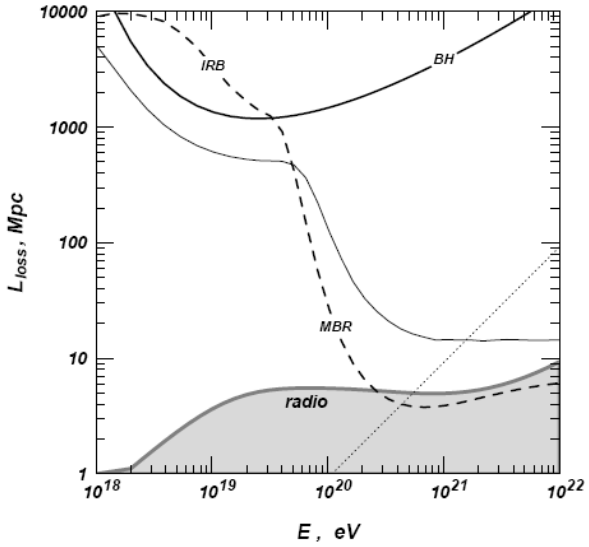
Μικροκυματική Ακτινοβολία Υποβάθρου (Microwave Background Radiation – MBR) που γεμίζει όλο το Σύμπαν και η αριθμητική της πυκνότητα είναι 400 cm^{-3}, τιμή σχετικά υψηλή. Επίσης σημαντικές είναι οι αλληλεπιδράσεις με το υπόβαθρο στα ραδιοκύματα και το υπέρυθρο (IRB).

Οι κύριες διαδικασίες αλληλεπίδρασης πρωτονίων με τα φωτόνια του υποβάθρου είναι η παραγωγή πιονίων $p+\gamma \rightarrow n+\pi^+$, $p+\gamma \rightarrow p+\pi^0$ και η παραγωγή ζεύγους ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου (δίδυμη γένεση) $p+\gamma \rightarrow p+e^++e^-$. Η ενεργειακή απώλεια ανά αλληλεπίδραση από την παραγωγή πιονίων είναι 20% ενώ η αντίστοιχη απώλεια λόγω της δίδυμης γένεσης είναι της τάξης του 0,1%.

Η ελάχιστη ενέργεια κέντρου μάζας για την φωτοπαραγωγή είναι $\sqrt{s_{thr}} = m_p + m_{\pi^0} \approx 1{,}08$ GeV. Αφού $s = m_p^2 + 2(1-\cos\theta)\mathrm{E}_p\varepsilon$ (όπου θ είναι η γωνία μεταξύ των δύο σωματιδίων), είναι δυνατόν να εκτιμηθεί το κατώφλι ενέργειας πρωτονίου για φωτοπαραγωγή στην αλληλεπίδραση με τη MBR (μέση ενέργεια $\varepsilon = 6{,}3\cdot10^{-4}$ eV). Για θ = 0 η ενέργεια κατωφλίου προκύπτει $E_{thr} = 2{,}3\cdot10^{20}$ eV. Εξαιτίας του ότι έχουμε μετωπικές συγκρούσεις και το ακραίο τμήμα του ενεργειακού φάσματος της MBR συνεχίζεται σε μεγαλύτερες ενέργειες, η ενεργός διατομή είναι μη μηδενική για ενέργεια πρωτονίων $3\cdot10^{19}$ eV.

Η ενεργός διατομή της φωτοπαραγωγής έχει μελετηθεί πολύ καλά σε πειράματα επιταχυντών και είναι κατανοητή σε βάθος. Μια άλλη σημαντική παράμετρος είναι η ανελαστικότητα των πρωτονίων k_{inel}, το ποσοστό δηλαδή της ενέργειας που χάνει ένα πρωτόνιο σε μια αλληλεπίδραση. Η ποσότητα αυτή εξαρτάται από την ενέργεια. Στο κατώφλι τα πρωτόνια χάνουν περίπου 18% της ενέργειάς τους. Με τον αύξηση της ενέργειας αυτή η ποσοστιαία ενεργειακή απώλεια αυξάνεται και φτάνει ασυμπτωτικά το 50%.

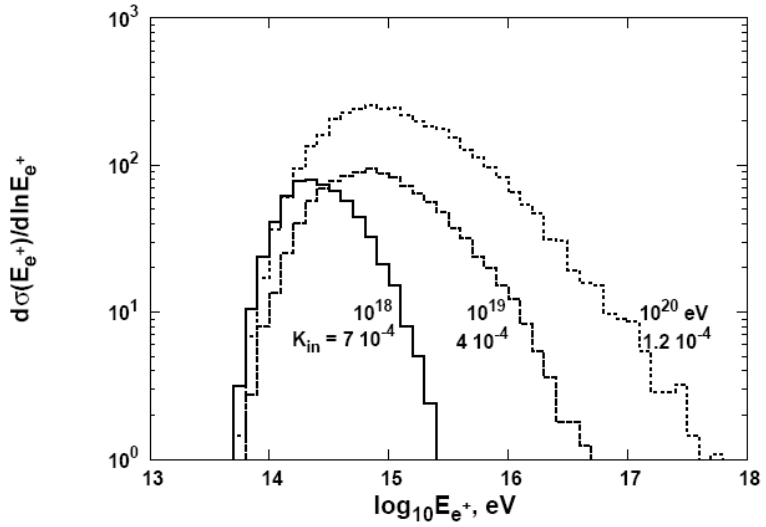
Η πρωτονική δίδυμη γένεση $p+\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ *είναι* η ίδια διαδικασία στην οποία υπόκεινται όλα τα φορτισμένα σωματίδια σε πυρηνικά πεδία. Η ενεργός διατομή είναι μεγάλη αλλά η απώλεια ενέργειας είναι της τάξης $m_e/m_p \approx 4\cdot10^{-4}\mathrm{E}$. Το σχήμα 3 δείχνει το μήκος απώλειας ενέργειας $L_{loss} = \lambda/k_{inel}$ (ο λόγος του μήκους αλληλεπίδρασης προς τον συντελεστή ανελαστικότητας) των πρωτονίων σε αλληλεπιδράσεις με τα υπόβαθρα μικροκυματικής και υπέρυθρης ακτινοβολίας.



Σχήμα 3: Μήκος απώλειας ενέργειας για πρωτόνια σε αλληλεπίδραση με την Μικροκυματική και την Υπέρυθρη Ακτινοβολία Υποβάθρου (Stanev, 2007).

Η διακεκομμένη γραμμή δείχνει το μήκος αλληλεπίδρασης πρωτονίου. Η συνεισφορά της δίδυμης γένεσης φαίνεται με τη λεπτή γραμμή. Το μήκος απώλειας ενέργειας ποτέ δεν ξεπερνά τα 4000 Mpc που είναι η αδιαβατική απώλεια ενέργειας λόγω της διαστολής του Σύμπαντος για H_0 = 75km/s/Mpc. Η γραμμή με τις κουκίδες δείχνει το μήκος διάσπασης νετρονίων. Νετρόνια με ενέργεια μικρότερη από περίπου $3 \cdot 10^{20}$ eV διασπώνται πάντα και μόνο τα υψηλότερης ενέργειας νετρόνια αλληλεπιδρούν.

Στο σχήμα 4 φαίνεται το φάσμα ποζιτρονίου που παράγεται κατά τις αλληλεπιδράσεις δίδυμης γένεσης πρωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας. Δίπλα στην ενέργεια των πρωτονίων φαίνεται και ο συντελεστής ανελαστικότητας των αντιδράσεων. Η ενεργός διατομή της δίδυμης γένεσης αυξάνεται με την αύξηση της ενέργειας των πρωτονίων ενώ ο συντελεστής ανελαστικότητας μειώνεται. Ο συνδυασμός των δύο αυτών παραμέτρων δημιουργεί το μήκος απώλειας ενέργειας που παρουσιάζει ελάχιστο περίπου στα $2 \cdot 10^{19}$ eV.



Σχήμα 4: Κατανομή ενέργειας ποζιτρονίων που δημιουργούνται από αλληλεπιδράσεις δίδυμης γένεσης πρωτονίων συγκεκριμένης ενέργειας με τη Μικροκυματική Ακτινοβολία Υποβάθρου (Stanev, 2007).

Οι βαρύτεροι πυρήνες χάνουν ενέργεια εξαιτίας μιας διαφορετικής διαδικασίας, της φωτοδιάσπασης (photodisintegration), της απώλειας δηλαδή νουκλεονίων κυρίως στο γιγαντιαίο διπολικό συντονισμό. Μια και η σχετική ενέργεια στο πυρηνικό πλαίσιο είναι της τάξης των 20 MeV, η διαδικασία ξεκινά σε χαμηλότερη ενέργεια. Το πυρηνικό μόρφωμα που προκύπτει μπορεί να μην είναι σταθερό οπότε διασπάται και επιταχύνει την ενεργειακή απώλεια ολόκληρου του πυρήνα. Οι υπερ-υψηλής ενέργειας βαρείς πυρήνες, όπου η ενέργεια ανά νουκλεόνιο είναι υψηλότερη από την ενέργεια παραγωγής φωτονίων, υπόκεινται επίσης σε απώλειες λόγω παραγωγής φωτονίων. Το μήκος απώλειας ενέργειας για έναν πυρήνα He στην φωτοδιάσπαση είναι περίπου 10 Mpc για ενέργεια 10^{20} eV. Βαρύτεροι πυρήνες φτάνουν αυτή την απόσταση με υψηλότερη ολική ενέργεια.

Οι υπερυψηλής ενέργειας ακτίνες γ αλληλεπιδρούν επίσης με τη Μικροκυματική Ακτινοβολία Υποβάθρου. Η κύρια διαδικασία είναι $\gamma+\gamma \rightarrow e^+ + e^-$ Για αλληλεπιδράσεις με την MBR το ελάχιστο μήκος αλληλεπίδρασης επιτυγχάνεται στα 10^{15} eV. Το μήκος αλληλεπίδρασης μειώνεται σε υψηλότερες ενέργειες ακτίνων γ και θα ήταν περίπου 50 Mpc στα 10^{20} eV αν δεν υπήρχε το υπόβαθρο ραδιοκυμάτων. Το υπόβαθρο ραδιοκυμάτων υπάρχει αλλά η αριθμητική του πυκνότητα δεν είναι γνωστή με ακρίβεια. Στο σχήμα 3 το υπόβαθρο ραδιοκυμάτων φαίνεται σαν σκιασμένη περιοχή.

Η κατάληξη των ηλεκτρονίων που παράγονται στην γγ σύγκρουση (collision) εξαρτάται από τον ένταση των μαγνητικών πεδίων μέσα στα οποία τα ηλεκτρόνια υπερυψηλών ενεργειών χάνουν ενέργεια πολύ γρήγορα. Η ενέργεια των φωτονίων υποβαθμίζεται πολύ γρήγορα και το μήκος αλληλεπίδρασης γγ γίνεται πολύ κοντινό με το μήκος απώλειας ενέργειας ακτίνων γ. Στην περίπτωση πολύ ασθενών μαγνητικών πεδίων (0,01 nG) η απώλεια ενέργειας λόγω ακτινοβολίας σύγχροτρον είναι χαμηλή (ανάλογη του $E^2_eB^2$) και η αντίστροφη σκέδαση Compton (με ενεργό διατομή πολύ κοντινή σε αυτή του γγ) είναι πιθανή. Τότε το μήκος απώλειας ακτινοβολίας των ακτίνων γ θα είναι μεγαλύτερο.

Το γενικό συμπέρασμα είναι ότι αυτά τα υπερυψηλής ενέργειας σωματίδια δεν μπορούν να επιβιώσουν σε αποστάσεις μεγαλύτερες από μερικές δεκάδες Mpc και έτσι οι πηγές των κοσμικών ακτίνων που ανιχνεύονται πρέπει να βρίσκονται στην κοσμολογική μας περιοχή. Κάθε μικρή αύξηση της απόστασης μεταξύ της πηγής και του παρατηρητή θα απαιτούσε αύξηση της μέγιστης ενέργειας στην επιτάχυνση (η οποιοδήποτε άλλο μηχανισμό παραγωγής) και θα επιδρούσε καθοριστικά στην απαιτούμενη ενέργεια για τις πηγές των UHECR.

1.5.1 Διάδοση UHECR και μαγνητικά πεδία

Η πιθανή ύπαρξη εξωγαλαξιακών πεδίων που δεν μπορούν να αγνοηθούν θα μεταβάλει τη διάδοση των UHECR ανεξάρτητα από τη φύση και την προέλευσή τους. Υπάρχουν λίγα μόνο παρατηρησιακά δεδομένα για τέτοια πεδία. Η εκτίμηση για τη μέση ένταση αυτών των πεδίων στο Σύμπαν είναι 10^{-9} Gauss (1nG). Από την άλλη πλευρά, μαγνητικά πεδία έντασης της τάξης των μG έχουν ανιχνευτεί σε σμήνη γαλαξιών και στο τόξο ανάμεσα σε δύο μέρη του σμήνους Coma.

Ακόμα και πεδία με ένταση μερικών nG μπορούν να επηρεάσουν τη διάδοση των κοσμικών ακτίνων υπερυψηλών ενεργειών. Αν οι κοσμικές αυτές ακτίνες είναι πρωτόνια ή βαρύτεροι πυρήνες, θα υποστούν σκέδαση σε αυτά τα πεδία. Αυτή η σκέδαση οδηγεί σε απόκλιση από τη διεύθυνση της πηγής και σε αύξηση του μήκους διαδρομής από την πηγή στον παρατηρητή. Έτσι η

θέση της πηγής θα γίνει λιγότερο προφανής και θα δημιουργηθεί ένας μαγνητικός ορίζοντας για εξωγαλαξιακά πρωτόνια με ενέργεια κάτω από 10^{19} eV καθώς ο χρόνος διάδοσής τους από την πηγή στον παρατηρητή ξεκινά να ξεπερνά τον χρόνο Hubble. Όταν ο ορίζοντας επιτευχθεί, το φάσμα των κοσμικών ακτίνων εμφανίζεται πιο επίπεδο απ' ό,τι είναι στην πραγματικότητα.

Η χρονική καθυστέρηση λόγω της σκέδασης στο τυχαίο εξωγαλαξιακό μαγνητικό πεδίο ορίζεται σαν η διαφορά ανάμεσα στο χρόνο διάδοσης των κοσμικών ακτίνων στο μαγνητικό πεδίο και στο χρόνο διάδοσης του φωτός. Για μια πηγή σε απόσταση 70 Mpc η χρονική καθυστέρηση ξεπερνά τα 10^5 χρόνια. Κάτι τέτοιο δημιουργεί προβλήματα στην ταυτοποίηση των πηγών των UHECR γιατί αυτός είναι περίπου ο χρόνος έντονης δράσης των AGN. Είναι λοιπόν πιθανό μια πηγή να ήταν ενεργή πριν από 10^5 χρόνια, να επιτάχυνε σωματίδια σε υψηλές ενέργειες και τώρα να μην μπορεί να αναγνωριστεί. Χειρότερη είναι η κατάσταση για UHECR που επιταχύνονται σε GRB. Ακόμα και για μαγνητικά πεδία έντασης $0{,}1 \cdot 10^{-9}$ G η χρονική καθυστέρηση των 1500 ετών κάνει αδύνατη την αναγνώριση της πηγής (μια και η έκλαμψη έχει διάρκεια της τάξης των δευτερολέπτων).

1.5.2 Παραγωγή δευτερογενών σωματιδίων κατά τη διάδοση

Ένα ενδιαφέρον χαρακτηριστικό που μπορεί να χρησιμοποιηθεί για τον έλεγχο του τύπου και της κατανομής των πηγών κοσμικών ακτίνων υπερυψηλών ενεργειών είναι η παραγωγή δευτερογενών σωματιδίων κατά τη διάδοση των ακτίνων. Η ενεργειακή απώλεια των πρωτογενών πρωτονίων και ακτίνων γ μετατρέπεται σε δευτερογενείς ακτίνες γ και νετρίνα (στην περίπτωση πρωτογενούς πυρήνα). Οι ακτίνες γ παράγονται σε διαδικασίες πυρηνικής παραγωγής φωτονίων και σε συγκρούσεις γγ. Στην περίπτωση ομογενούς και ισοτροπικής κατανομής πηγών, η ενέργεια των ακτίνων γ μειώνεται και τελικά καταλήγει σε διάχυτη ισοτροπική ροή της τάξεως των MeV/GeV.

Τα πιο ενδιαφέροντα σωματίδια που παράγονται είναι τα κοσμογενή νετρίνα που προτάθηκαν πρώτη φορά από τους Berezinsky & Zatsepin. Κάθε

φορτισμένο πιόνιο που παράγεται σε μια αλληλεπίδραση παραγωγής φωτονίου δημιουργεί τρία νετρίνα μέσα από την αλυσίδα διάσπασής του. Το φάσμα των κοσμογενών νετρίνων εξαρτάται από το φάσμα των UHECR, την κατανομή των πηγών τους και πολύ ισχυρά από την κοσμολογική εξέλιξη των πηγών αυτών. Η ευαισθησία στην κοσμολογική εξέλιξη των πηγών είναι πολύ υψηλή λόγω της έλλειψης ενεργειακών απωλειών (εκτός από τις αδιαβατικές απώλειες) των δημιουργούμενων νετρίνων.

Έχει σημασία να επισημανθεί ότι η Μικροκυματική Ακτινοβολία Υποβάθρου δεν είναι ο μόνος στόχος για την παραγωγή νετρίνων. Ο δεύτερος πιο σημαντικός στόχος είναι η ισοτροπική υπέρυθρη και οπτική ακτινοβολία υποβάθρου (IBR). Η αριθμητική της πυκνότητα είναι φυσικά πολύ πιο χαμηλή αλλά τα χαμηλότερης ενέργειας πρωτόνια αλληλεπιδρούν με αυτή και ακόμα και στην περίπτωση επίπεδου φάσματος επιτάχυνσης, ο αριθμός των αλληλεπιδρώντων πρωτονίων αντισταθμίζει σε μεγάλο βαθμό την μικρότερη πυκνότητα του στόχου.

1.6 Μικροκυματική Ακτινοβολία Υποβάθρου – όριο GZK

Από το 1946 ο G. Gamow (Gamow, 1946) προέβλεψε ότι κατά την πρώιμη περίοδο ζωής του Σύμπαντος αυτό ήταν εξαιρετικά θερμό και βρίσκονταν σε κατάσταση θερμοδυναμικής ισορροπίας. Ο Gamow θεώρησε ότι ακόμα και σήμερα θα έπρεπε να δεχόμαστε από κάθε κατεύθυνση μια ισότροπα κατανεμημένη ακτινοβολία η οποία θα ήταν το υπόλειμμα της Μεγάλης Έκρηξης.

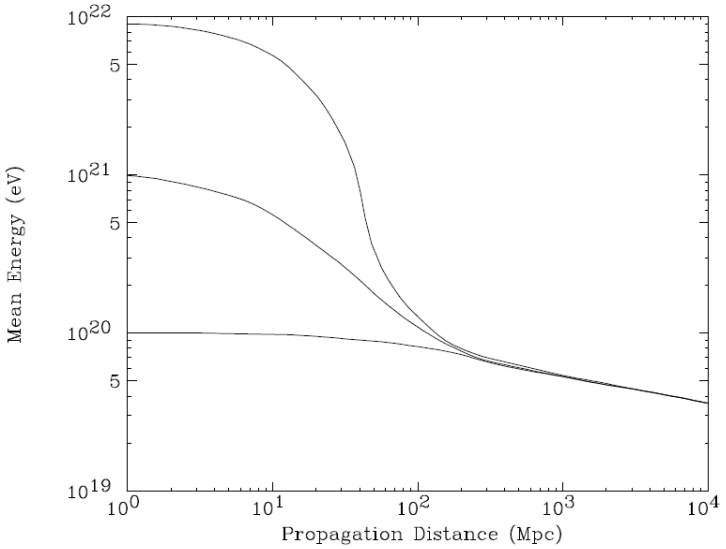
Το 1965 οι A. Penzias και R.W. Wilson (Penzias and Wilson, 1965) ανίχνευσαν μια διάχυτη ακτινοβολία η οποία έφτανε ομοιόμορφα από όλα τα σημεία του διαστήματος και αντιστοιχούσε σε ακτινοβολία μέλανος σώματος θερμοκρασίας ~2,7 K. Η ισοτροπία της ακτινοβολίας αυτής υπήρξε εντυπωσιακή εφόσον η ένταση κατά τις διάφορες διευθύνσεις παρουσίαζε μεταβολή της τάξης ~1%, ενώ δεν φαίνονταν να έχει σαν πηγή κάποιο φαινόμενο στη Γη ή κάποιο αστρικό σώμα. Έτσι θεωρήθηκε ότι ήταν απόηχος της Μεγάλης Έκρηξης. Η διάχυτη αυτή ακτινοβολία αυτή ονομάστηκε

Μικροκυματική Ακτινοβολία Υποβάθρου (Cosmic Microwave Background – CMB).

Οι αλληλεπιδράσεις των κοσμικών ακτίνων καθώς διαδίδονται από την πηγή τους έχουν σοβαρό αντίκτυπο στις υψηλότερες ενέργειες. Η βασικότερη αλληλεπίδραση είναι αυτή με την Μικροκυματική Ακτινοβολία Υποβάθρου που οδηγεί στο κατώφλι Greisen-Zatsepin-Kuzmin (GZK). Περίπου σε ενέργεια $4 \cdot 10^{19}$eV, τα πρωτόνια των κοσμικών ακτίνων παράγουν ένα συντονισμό όταν αλληλεπιδρούν με τα μικροκυματικά φωτόνια των 2,7K. Από το συντονισμό αυτό προκύπτει η παραγωγή ενός πιονίου μέσω της αντίδρασης:

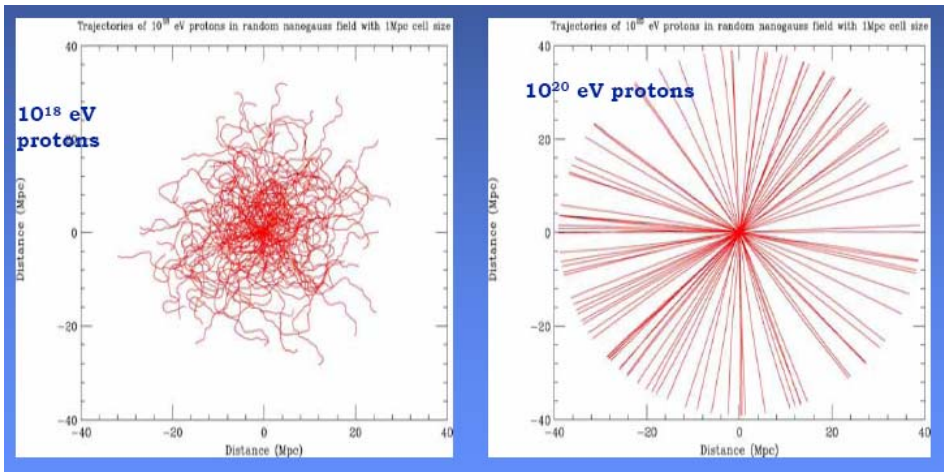
$$\gamma + p \rightarrow \Delta^{+} \rightarrow p + \pi^{0}$$
$$\rightarrow n + \pi^{+}$$

με την κοσμική ακτινοβολία να χάνει περίπου το 1/6 της αρχικής ενέργειας. Η σημασία αυτού είναι ότι ένα σωματίδιο κοσμικής ακτινοβολίας υπερυψηλής ενέργειας που παρατηρείται στη Γη πρέπει να προέρχεται από μια σχετικά κοντινή πηγή. Ένας πρόσφατος υπολογισμός δείχνει ότι κοσμικές ακτίνες με ενέργεια πάνω από 10^{20} eV θα έχουν ενέργεια κάτω από $4 \cdot 10^{19}$ eV μετά από ταξίδι 100 Mpc, ανεξάρτητα από την αρχική τους ενέργεια. Στο σχήμα 5 φαίνεται πώς τα σωματίδια που ξεκινούν με πολύ διαφορετικές ενέργειες, μετά από ταξίδι 100 Mpc θα φτάσουν στη Γη με κοινή ενέργεια. Το γεγονός αυτό δημιουργεί μια συσσώρευση γεγονότων στην ακραία περιοχή του φάσματος των κοσμικών ακτίνων.



Σχήμα 5: Περιορισμός της απόστασης που διανύουν τα πρωτόνια λόγω του ορίου GZK (Cronin, 2004).

Η εκτροπή φορτισμένων σωματιδίων στα εξωγαλαξιακά μαγνητικά νέφη θα μπορούσε να εξηγήσει την παρατηρούμενη ανισοτροπία των κοσμικών ακτίνων. Αν υποθέσουμε την ύπαρξη πεδίου έντασης 1nG, κοσμική ακτινοβολία στα 10^{18}eV θα εμφανιστεί με εντελώς τυχαία διεύθυνση άφιξης μετά από ταξίδι 20Mpc. Στα 10^{20} eV όμως το πρωτογενές θα έχει εκτραπεί μόνο κατά 3° κάνοντας δυνατό τον προσδιορισμό των πηγών αυτών των ακτίνων αν υπάρχουν αρκετά στατιστικά στοιχεία (σχήμα 6).



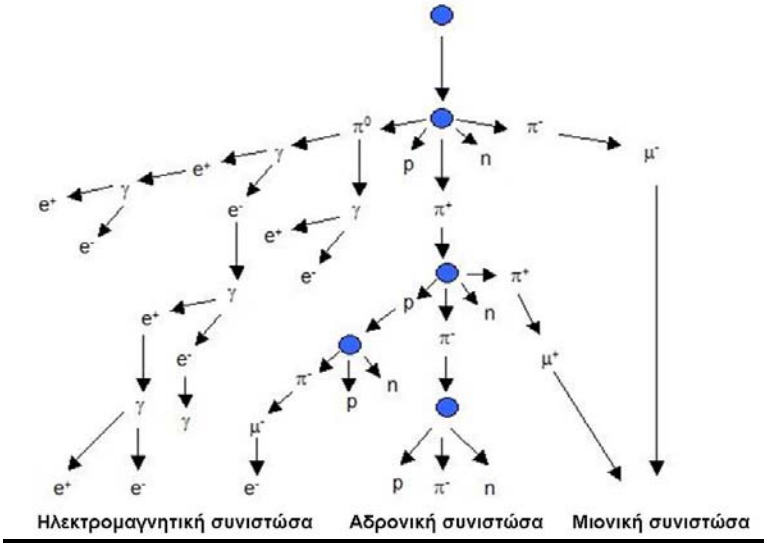
Σχήμα 6: Εκτροπή σωματιδίου αρχικής ενέργειας 10^{18} eV (αριστερά) και 10^{20} eV (δεξιά) από μαγνητικό πεδίο 1nG.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2: ΕΚΤΕΤΑΜΕΝΟΙ ΑΤΜΟΣΦΑΙΡΙΚΟΙ ΚΑΤΑΙΓΙΣΜΟΙ

2.1 Εισαγωγή

Στην περιοχή ενεργειών πάνω από τα 10^{14} eV η ροή των κοσμικών ακτίνων μειώνεται τόσο που η άμεση ανίχνευση των πρωτογενών σωματιδίων δεν είναι στατιστικά δυνατή. Πάνω από την ενέργεια αυτή οι κοσμικές ακτίνες πρέπει να ανιχνευθούν έμμεσα, με την παρατήρηση των αλληλεπιδράσεών τους με την γήινη ατμόσφαιρα.

Ο Εκτεταμένος Ατμοσφαιρικός Καταιγισμός – Extensive Air Shower (EAS) είναι ένα μεγάλης κλίμακας φαινόμενο που συμβαίνει στην ατμόσφαιρα κάθε φορά που ένα πρωτογενές σωματίδιο κοσμικής ακτινοβολίας πολύ υψηλής ενέργειας (πρωτόνιο ή βαρύς πυρήνας), που προέρχεται από το μακρινό διάστημα, εισέρχεται σε αυτή. Το πρωτογενές σωμάτιο όταν είναι αδρόνιο αλληλεπιδρά με τους πυρήνες του αέρα αρκετές φορές καθώς ταξιδεύει προς τα κάτω και κάθε φορά μέσω της ισχυρής αλληλεπίδρασης παράγει έναν μεγάλο αριθμό φορτισμένων και ουδέτερων πιονίων, καονίων, ζευγών νουκλεονίων – αντινουκλεονίων κλπ. τα οποία, επειδή είναι αδρόνια, αλληλεπιδρούν περαιτέρω και δημιουργούν ένα πυρηνικό καταιγισμό. Κάποια από τα ασταθή αδρόνια διασπώνται αντί να αλληλεπιδράσουν και δημιουργούν πολύ διαπεραστικά σωματίδια – μιόνια και νετρίνα – επιπρόσθετα στα αδρόνια, ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια. Τα π^0 μεσόνια που παράγονται στις διάφορες αλληλεπιδράσεις διασπώνται σχεδόν στιγμιαία σε υψηλής ενέργειας ακτίνες γ που ξεκινούν τεράστιους ηλεκτρομαγνητικούς καταιγισμούς. Έτσι, μέχρι τη στιγμή που ο καταιγισμός, εμπλουτισμένος με διαφόρων ειδών σωματίδια, φτάνει το ύψος των βουνών ή το επίπεδο της θάλασσας, το μοναδικό πρωτογενές σωματίδιο έχει πολλαπλασιαστεί σε χιλιάδες μέχρι δισεκατομμύρια σωματίδια ανάλογα με την ενέργεια του με κυρίαρχα σωματίδια τα ηλεκτρόνια και τα ποζιτρόνια.



Σχήμα 7: Εκτεταμένος ατμοσφαιρικός καταιγισμός που δημιουργείται από πρωτόνιο που αλληλεπιδρά με πυρήνα της ατμόσφαιρας.

Σε αυτή την εξέλιξη και οι τρεις δυνάμεις της φύσης έχουν παίξει σημαντικό ρόλο. Ακόμα και η βαρύτητα παίζει ρόλο στην ανάπτυξη του καταιγισμού και τον κάνει ένα σημαντικό εργαλείο στην μελέτη των πολύ υψηλής ενέργειας κοσμικών ακτίνων. Λόγω της φύσης των αερίων της ατμόσφαιρας και της βαρύτητας της Γης η ατμοσφαιρική πυκνότητα ελαττώνεται με το ύψος με εκθετικό τρόπο και κλίμακα ύψους περίπου 7 km. Αυτός ο εκθετικός χαρακτήρας έχει δύο σημαντικές επιδράσεις στην ανάπτυξη του καταιγισμού. Εφόσον η απόσταση ανάμεσα σε διαδοχικές συγκρούσεις μεγαλώνει σε μεγαλύτερα ύψη στην ατμόσφαιρα, τα ασταθή σωματίδια έχουν την ευκαιρία να διασπαστούν και επιπλέον αυτό τα χαρακτηριστικό της ατμόσφαιρας επιτρέπει στα δευτερεύοντα σωματίδια να διασκορπιστούν πλευρικά. Τα χαμηλότερης ενέργειας σωματίδια θα διασκορπιστούν περισσότερο από τα σωματίδια υψηλότερης ενέργειας. Έτσι θα υπάρχει ένας πυκνός πυρήνας υψηλής ενέργειας σωματιδίων και μια χαρακτηριστική μείωση της πυκνότητας καθώς απομακρυνόμαστε από αυτόν.

Η διεύθυνση του πυρήνα ορίζει τη γωνία εισόδου του πρωτογενούς σωματίου στην κορυφή της ατμόσφαιρας. Η πλευρική κατανομή της πυκνότητας των σωματιδίων, που είναι διαφορετική για τα διαφορετικά είδη, γίνεται μια σημαντική παράμετρος προς μέτρηση. Η εκτεταμένη φύση της ατμόσφαιρας εισάγει επιπλέον μια χαρακτηριστική χρονική δομή στους χρόνους άφιξης των σωματιδίων του καταιγισμού στο επίπεδο παρατήρησης.

Μια και το πάχος του δίσκου ηλεκτρονίων – φωτονίων είναι μόνο μερικά μέτρα στην καλύτερη περίπτωση, τα βαρύτερα σωματίδια εξαιτίας των χαμηλότερων ταχυτήτων τους μένουν πίσω. Τα μεσόνια ακολουθούν το μέτωπο του καταιγισμού και τα νουκλεόνια – αντινουκλεόνια μένουν πίσω από τα μεσόνια.

Όλα αυτά τα χαρακτηριστικά των EAS, η σύνθεση των σωματιδίων, η πλευρική τους κατανομή, η χρονική τους δομή, ανακαλύφθηκαν με την εγκατάσταση ειδικά σχεδιασμένων διατάξεων που αποτελούνται από ανιχνευτικά συστήματα που κατά προτίμηση ανταποκρίνονται στα διαφορετικά συστατικά. Τις τελευταίες δεκαετίες δύο ακόμα ηλεκτρομαγνητικές ακτινοβολίες που ακολουθούν την κυρίαρχη ακτινοβολία ηλεκτρονίου – ποζιτρονίου των καταιγισμών χρησιμοποιήθηκαν στη μελέτη τους. Η μια είναι η ακτινοβολία Cherenkov που παράγεται κυρίως από τα ηλεκτρόνια και τα ποζιτρόνια που έχουν τόσο υψηλές ενέργειες, που οι ταχύτητές τους στις περιοχές χαμηλής πυκνότητας της ατμόσφαιρας είναι μεγαλύτερες από την ταχύτητα του φωτός στην περιοχή αυτή. Η άλλη είναι η ακτινοβολία φθορισμού που παράγεται από πυρήνες αζώτου λόγω της διέγερσης – αποδιέγερσής τους από υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια στον πυρήνα του καταιγισμού.

Αν και η μέθοδος των EAS είναι έμμεση, ο εύστροφος τρόπος με τον οποίο οι διάφορες παράμετροι του καταιγισμού μετρώνται, αναλύονται και σχετίζονται με τα χαρακτηριστικά της πρωτογενούς ακτινοβολίας έχει αποδειχθεί εξαιρετικά επιτυχημένος και συνεχώς εξελίσσονται νέες μεθοδολογίες με τεχνολογικά πλεονεκτήματα. Σε αυτή την προσπάθεια, οι προσομοιώσεις Monte Carlo που έγιναν εφικτές με την ανάπτυξη των υπολογιστών είναι εξαιρετικά πολύτιμες και προσθέτουν μια νέα διάσταση αξιοπιστίας σε αυτή την έμμεση μέθοδο. Αφού ο ατμοσφαιρικός καταιγισμός είναι το τελικό προϊόν ενός μεγάλου αριθμού συγκρούσεων υψηλής ενέργειας, τα χαρακτηριστικά των συγκρούσεων όπως η ενεργός διατομή, η πολλαπλότητα των δευτερογενών σωματιδίων, η σύνθεσή τους, η κατανομή της εγκάρσιας ορμής παίζουν πολύ σημαντικό ρόλο. Αν και παλιότερα πολλές από αυτές τις παραμέτρους εξάγονταν από την ίδια τη μελέτη των κοσμικών ακτίνων, τις τελευταίες δεκαετίες τα πειράματα επιταχυντών παρέχουν τα απαραίτητα δεδομένα για μεγαλύτερη ακρίβεια.

Ο κύριος σκοπός της μελέτης των ατμοσφαιρικών καταιγισμών είναι να προσδιοριστεί το φάσμα, η σύνθεση και η ανισοτροπία ως προς τη διεύθυνση άφιξης των πρωτογενών σωματιδίων μέχρι τις μεγαλύτερες ανιχνεύσιμες ενέργειες της κοσμικής ακτινοβολίας. Από αυτές τις μελέτες μπορούν να εντοπιστούν πιθανές πηγές και τρόποι επιτάχυνσης των κοσμικών ακτίνων σε τόσο υψηλές ενέργειες.

2.2 Ανακάλυψη

Τα πειράματα που πραγματοποιήθηκαν στο επίπεδο της θάλασσας και σε υψόμετρο βουνών έδειξαν ότι η δευτερογενής κοσμική ακτινοβολία, η ακτινοβολία δηλαδή που προέρχονταν από την αλληλεπίδραση του πρωτογενούς κοσμικού σωματίου με την γήινη ατμόσφαιρα, είχε δύο συνιστώσες: μια μαλακή συνιστώσα που εύκολα απορροφούνταν σε μερικά χιλιοστά μολύβδου και μια διεισδυτική συνιστώσα που διαπερνούσε αρκετά μέτρα μολύβδου και ακόμα έφτανε σε μεγάλα βάθη κάτω από την επιφάνεια της γης και της θάλασσας. Τα πειράματα σε διαφορετικά γεωγραφικά πλάτη έδειξαν ότι το μαγνητικό πεδίο της Γης επηρεάζει την πυκνότητα της ακτινοβολίας που αυξάνεται από τον ισημερινό προς μεγαλύτερα γεωγραφικά πλάτη. Τα χαρακτηριστικά απορρόφησης της διεισδυτικής ακτινοβολίας ήταν επίσης περίπλοκα. Η απορρόφηση όπως μετριέται από την εξαφάνιση των σωματιδίων ήταν μεγαλύτερη σε ένα αραιό μέσο όπως ο αέρας απ’ ότι σε μια ίδια ποσότητα συμπυκνωμένης ύλης όπως το νερό ή ο μόλυβδος. Η μαλακή συνιστώσα σε κάποιες περιπτώσεις εμφανίζονταν σαν ένας καταιγισμός αρκετών ταυτόχρονων σωματιδίων με σημαντική πλευρική διασπορά. Με βάσει τις παρατηρήσεις αυτές έγινε προσπάθεια ανακατασκευής των γεγονότων που συμβαίνουν στην ατμόσφαιρα.

Ακολουθεί μια συνοπτική περιγραφή τους:

Το πρωτογενές σωματίδιο πολύ υψηλής ενέργειας, ένα πρωτόνιο ή βαρύς πυρήνας που έρχεται έξω από το ηλιακό σύστημα, με την είσοδό του στην ατμόσφαιρα συγκρούεται με έναν ατμοσφαιρικό πυρήνα (αζώτου, οξυγόνου κλπ.) και παράγει ένα μεγάλο αριθμό πιονίων. Τα φορτισμένα πιόνια καθώς ταξιδεύουν προς τα κάτω είτε αλληλεπιδρούν με άλλους

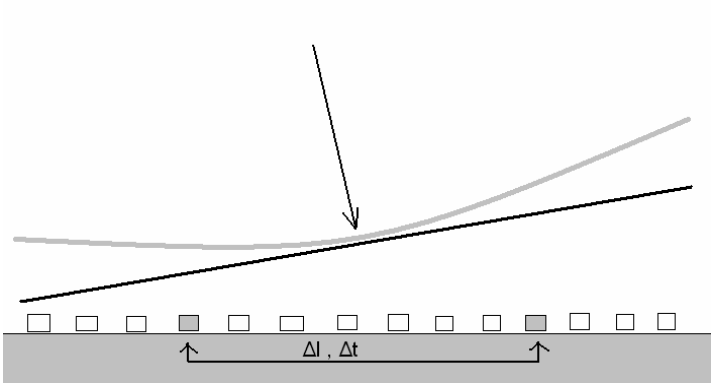
πυρήνες και παράγουν περισσότερα δευτερογενή σωμάτια είτε διασπώνται σε μιόνια και νετρίνα που αποτελούν τη διεισδυτική φορτισμένη και ουδέτερη συνιστώσα του καταιγισμού. Τα ουδέτερα πιόνια διασπώνται σε ακτίνες γ κι αυτές με τη σειρά τους ξεκινούν μεγάλους ηλεκτρομαγνητικούς καταιγισμούς και δημιουργούν τη μαλακή συνιστώσα που παρατηρείται στη χαμηλότερη ατμόσφαιρα. Ένα ποσοστό της μαλακής συνιστώσας προέρχεται και από τη διάσπαση χαμηλής ενέργειας μιονίων.

Καθώς η ενέργεια του πρωτογενούς σωματίου αυξάνεται, αυξάνεται όχι μόνο ο αριθμός σωματιδίων που παράγονται στις λίγες πρώτες συγκρούσεις αλλά και ο αριθμός των δημιουργούμενων σωματίων που συνεισφέρει στον πυρηνικό καταιγισμό. Εξαιτίας της εκθετικής πτώσης της ατμοσφαιρικής πυκνότητας καθώς κινούμαστε σε όλο και μεγαλύτερα υψόμετρα, τα δευτερογενή σωματίδια διασκορπίζονται πλευρικά καθώς η διαμήκης ανάπτυξη των συνδυασμένων πυρηνικών και ηλεκτρομαγνητικών καταιγισμών εξελίσσεται προς τα κάτω. Σε υψηλές ενέργειες ($>10^{14}$ eV) η ανάπτυξη του καταιγισμού έχει σαν αποτέλεσμα την ταυτόχρονη πρόσπτωση ενός πολύ μεγάλου αριθμού σωματιδίων – ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια, φωτόνια, π μεσόνια, νουκλεόνια, αντινουκλεόνια, μιόνια, νετρίνα κλπ. – με τον αριθμό τους να φτάνει αρκετές χιλιάδες απλωμένα σε εκατοντάδες τετραγωνικά μέτρα στα παρατηρησιακά επίπεδα σε υψόμετρο βουνών και στην επιφάνεια της θάλασσας. Για αρχικές ενέργειες της τάξης των 10^{19} eV μπορεί να έχουμε ένα δισεκατομμύριο σωματίδια απλωμένα σε αρκετά τετραγωνικά χιλιόμετρα.

Ήταν ο Bruno Rossi (Rossi, 1934) που παρατήρησε συμπτώσεις ανάμεσα σε αρκετούς καταμετρητές τοποθετημένους σε ένα οριζόντιο επίπεδο, πολύ συχνότερες από τυχαίες. Σημείωνε σε κάποια από τις εργασίες του: «φαίνεται ότι περιστασιακά πολύ εκτεταμένες ομάδες σωματιδίων φτάνουν στον εξοπλισμό». Η πιο συστηματική έρευνα σε αυτούς τους καταιγισμούς έγινε από τον Pierre Auger και τους συνεργάτες του (Auger et al., 1939). Αυτοί κατέγραψαν ταυτόχρονα γεγονότα σε καταμετρητές τοποθετημένους σε οριζόντια απόσταση μέχρι 75 μέτρα. Ενώ ο ρυθμός καταμέτρησης έπεφτε απότομα από τα 10cm μέχρι τα 10m, μειώνονταν πολύ αργά σε μεγαλύτερες αποστάσεις.

Η μελέτη των καταιγισμών στην ατμόσφαιρα προσέλαβε αυξανόμενη σημασία από τα μέσα της δεκαετίας του 1940, όταν έγινε κατανοητό ότι τα

πρωτογενή σωματίδια που ήταν υπεύθυνα για τη δημιουργία τους είχαν πολύ μεγαλύτερη ενέργεια από αυτή που μπορούσε να παρατηρηθεί στους επιταχυντές σωματιδίων. Ξεκίνησαν λοιπόν να λειτουργούν μεγάλες διατάξεις καταμετρητών. Στην αρχή επρόκειτο για διατάξεις μετρητών Geiger–Müller (GM). Αυτοί αντικαταστάθηκαν αργότερα από υγρούς και πλαστικούς σπινθηριστές. Μια νέα διάσταση δόθηκε στην έρευνα των ατμοσφαιρικών καταιγισμών όταν παρατηρήθηκε από τους Bassi, Clark και Rossi (Bassi et al., 1953) ότι το πάχος του δίσκου του καταιγισμού ήταν αρκετά μικρό και τα σωματίδια διαπερνούσαν τον ανιχνευτή σε λιγότερο από μερικά ns. Αυτό τους οδήγησε στο να υποθέσουν ότι καταγράφοντας τους χρόνους άφιξης των σωματιδίων του καταιγισμού σε διαφορετικούς σπινθηριστές της διάταξης θα ήταν δυνατό να προσδιοριστεί η διεύθυνση άφιξης των σωματιδίων με ακρίβεια ~5°. Ο προσδιορισμός της διεύθυνσης άφιξης μαζί με τη μέτρηση της πυκνότητας των σωματιδίων που διασχίζουν διαφορετικούς σπινθηριστές της διάταξης παρέχουν μια κομψή μέθοδο προσδιορισμού των παραμέτρων του καταιγισμού, την θέσης του πυρήνα, του μεγέθους του καταιγισμού και της διεύθυνσης αφίξεως.



Σχήμα 8: Απλοποιημένη απόδοση της άφιξης του μετώπου του καταιγισμού. Το μέτωπο προβάλλεται στο επίπεδο που ορίζεται από τη ζενιθιακή γωνία του καταιγισμού και υποτίθεται ότι είναι επίπεδο.

Μαζί με άλλους τύπους ανιχνευτών στη διάταξη που είναι σε θέση να ξεχωρίσουν τα σωματίδια της μαλακής συνιστώσας και τα διεισδυτικά σωματίδια, τα ενεργά πυρηνικά σωματίδια και τις χρονικές καθυστερήσεις ανάμεσα στα διάφορα συστατικά, η μελέτη των ατμοσφαιρικών καταιγισμών έγινε ένα ισχυρό εργαλείο για τη μελέτη των χαρακτηριστικών των

αλληλεπιδράσεων σε υπερυψηλές ενέργειες και ακόμα για τον προσδιορισμό του πρωτογενούς φάσματος, της σύνθεσης και της ανισοτροπίας σε αυτές τις πολύ υψηλές ενέργειες. Το ιδιαίτερο πλεονέκτημα που πρόσφερε η μελέτη των ατμοσφαιρικών καταιγισμών είναι ότι η ενεργός επιφάνεια ανίχνευσης μπορεί να είναι τάξεις μεγέθους μεγαλύτερη από τις συμπαγείς διατάξεις που μπορούν να μεταφερθούν με μπαλόνια ή να τοποθετηθούν σε δορυφόρους. Η σημασία και η χρησιμότητα των μεθόδων μελέτης εκτεταμένων ατμοσφαιρικών καταιγισμών μπορεί να υπολογιστεί αν κανείς συνειδητοποιήσει ότι η ροή πρωτογενών σωματίων σε ενέργειες $>10^{14}$ eV είναι περίπου ένα ανά τετραγωνικό μέτρο ανά ώρα.

2.3 Φαινομενολογία

Όταν ένα πρωτογενές πρωτόνιο ή πυρήνας κοσμικής ακτινοβολίας εισέρχεται στη γήινη ατμόσφαιρα, αλληλεπιδρά ισχυρά με έναν πυρήνα του αέρα (αζώτου, οξυγόνου, κλπ.). Το σημείο στο οποίο το σωματίδιο αλληλεπιδρά στην ατμόσφαιρα είναι φυσικά τυχαίο και αποφασίζεται στατιστικά από την ανελαστική ενεργό διατομή του πυρήνα-στόχου. Η ανελαστική ενεργός διατομή $\sigma_{p\text{-}air}$ πρωτονίων με έναν ατμοσφαιρικό πυρήνα (μέσο Z=7,5 , μέσο A=14,5) είναι περίπου 290mb που αντιστοιχεί σε μέση ελεύθερη διαδρομή περίπου 80g/cm^2 για ενέργεια της τάξης των 10^{14}eV. Έτσι, η αλληλεπίδραση συμβαίνει περίπου στα 80g/cm^2 από την κορυφή της ατμόσφαιρας. Σε συγκρούσεις τόσο υψηλής ενέργειας μέρος της ενέργειας του πρωτογενούς σωματίου χάνεται στην παραγωγή των δευτερογενών σωματίων. Αυτά τα δευτερογενή σωμάτια είναι μεσόνια, βαρυόνια, υπερόνια κλπ. Το κλάσμα της ενέργειας που χάνεται από το πρωτογενές σωματίδιο ονομάζεται ανελαστικότητα.

Η ενέργεια που χάνεται από το πρωτογενές σωματίδιο μοιράζεται στα δευτερογενή. Ο αριθμός των δευτερογενών που ονομάζεται συνολική πολλαπλότητα αυξάνεται αργά με την ενέργεια της αλληλεπίδρασης.

Η πλειονότητα των σωματιδίων που παράγονται στην πρώτη αλληλεπίδραση είναι πιόνια. Καόνια και ζεύγη βαρυονίου - αντιβαρυονίου παράγονται επίσης αν η ενέργεια είναι αρκετά υψηλή αλλά σε μικρότερους

αριθμούς. Αυτά τα σωματίδια συνεχίζουν να αλληλεπιδρούν με την ατμόσφαιρα καθώς κινούνται προς τα κάτω. Κάποια από αυτά όπως τα πιόνια και τα καόνια είναι ασταθή και έτσι κάποιες φορές διασπώνται. Αν η διασταλμένη λόγω σχετικιστικού χρόνου μέση ελεύθερη διαδρομή διάσπασης είναι μεγαλύτερη από την μέση ελεύθερη διαδρομή αλληλεπίδρασης, κυριαρχεί η διαδικασία αλληλεπίδρασης και το αντίστροφο. Τα σωματίδια που παράγονται σ' αυτές τις αλληλεπιδράσεις είναι του ίδιου τύπου όπως και στην πρώτη αλληλεπίδραση αλλά με χαμηλότερες ενέργειες. Αυτά τα σωματίδια με τη σειρά τους αλληλεπιδρούν ή διασπώνται όλο και πιο χαμηλά στην ατμόσφαιρα και έτσι αυτός ο πυρηνικός καταιγισμός αναπτύσσεται προς τα κάτω.

Τα φορτισμένα μεσόνια δημιουργούν μιόνια όταν διασπώνται:

$$\pi^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu$$

$$K^{\pm} \rightarrow \mu^{\pm} + \nu$$
$$\pi^{\pm} + \pi^{0}$$

Τα καόνια ακολουθούν τον πρώτο τρόπο διάσπασης κατά 63,5% και τον δεύτερο τρόπο κατά 21,2%. Αυτά τα μιόνια σχηματίζουν τη μιονική συνιστώσα του ατμοσφαιρικού καταιγισμού. Τα νετρίνα που αλληλεπιδρούν ασθενώς, διαφεύγουν μεταφέροντας ένα υπολογίσιμο μέρος της αρχικής ενέργειας.

Τα αδρόνια (υπακούουν στην ισχυρή αλληλεπίδραση: πιόνια, καόνια, βαρυόνια) που θα επιβιώσουν σχηματίζουν την αδρονική συνιστώσα.

Η ηλεκτρομαγνητική συνιστώσα του ατμοσφαιρικού καταιγισμού είναι το αποτέλεσμα μιας σειράς ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων ηλεκτρονίων και φωτονίων με τους ατμοσφαιρικούς πυρήνες. Τα φωτόνια αλληλεπιδρούν με την ύλη μέσω του φωτοηλεκτρικού φαινομένου, του φαινομένου Compton και της δίδυμης γένεσης.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο είναι η διαδικασία με την οποία ένα φωτόνιο χάνει εντελώς την ενέργειά του ξοδεύοντας μέρος της στην απελευθέρωση ενός ηλεκτρονίου από το άτομο και το υπόλοιπο δίνοντας στο απελευθερωμένο ηλεκτρόνιο κινητική ενέργεια. Αυτή η διαδικασία είναι σημαντική μόνο για πολύ χαμηλές ενέργειες συγκριτικά με τις ενέργειες σύνδεσης των ατομικών ηλεκτρονίων. Σε υψηλότερες ενέργειες, η ενεργός

διατομή του φωτοηλεκτρικού φαινομένου είναι μικρή σε σύγκριση με άλλες διαδικασίες.

Το φαινόμενο Compton είναι η διαδικασία με την οποία το φωτόνιο αλληλεπιδρά με ένα ελεύθερο ηλεκτρόνιο ή σε αρκετά υψηλές ενέργειες ώστε τα τροχιακά ηλεκτρόνια ενός ατόμου να μπορούν να θεωρούνται ελεύθερα. Σε αυτή τη διαδικασία το φωτόνιο μεταφέρει μέρος της ενέργειας και της ορμής του στο ελεύθερο ηλεκτρόνιο που βρίσκεται αρχικά σε ηρεμία και εξέρχεται με μειωμένη ενέργεια. Και αυτή η διαδικασία είναι σημαντική μόνο σε χαμηλές ενέργειες μερικών δεκάδων MeV. Πάνω από τις ενέργειες αυτές παίζει σημαντικό ρόλο μόνο η δίδυμη γένεση. Για το λόγο αυτό, για τους ηλεκτρομαγνητικούς καταιγισμούς που δημιουργούνται από υψηλής ενέργειας φωτόνια ή ηλεκτρόνια, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και το φαινόμενο Compton μπορούν να αγνοηθούν.

Δίδυμη γένεση είναι η διαδικασία με την οποία το φωτόνιο αλληλεπιδρά με το πεδίο Coulomb ενός πυρήνα. Σε αυτή την αλληλεπίδραση, το φωτόνιο εξαφανίζεται και δημιουργείται ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου. Γι' αυτό, αυτή η διαδικασία μπορεί να προκύψει μόνο σε ενέργειες υψηλότερες από το άθροισμα των μαζών ηρεμίας ηλεκτρονίου και ποζιτρονίου και μέσα σε ένα δυναμικό πεδίο πυρήνα. Η υπόλοιπη ενέργεια μοιράζεται στα δύο σωματίδια με τη μορφή κινητικής ενέργειας. Η ορμή διατηρείται μέσω του πυρήνα.

Καθώς ο καταιγισμός αναπτύσσεται προς τα κάτω στην ατμόσφαιρα, η αδρονική και η ηλεκτρομαγνητική συνιστώσα αυξάνουν σε μέγεθος, αγγίζουν ένα μέγιστο και έπειτα μειώνονται ενώ η μιονική συνιστώσα δεν παρουσιάζει σημαντική εξασθένιση μετά το μέγιστο αφού τα μιόνια χάνουν ενέργεια μόνο μέσω του ιονισμού και ένα μικρό μόνο μέρος τους χάνεται λόγω διάσπασης.

2.4 Μελέτη

Οι ιδιότητες των διαφόρων συστατικών των EAS μελετώνται θεωρητικά για ένα δεδομένο αδρονικό μοντέλο αλληλεπίδρασης με την επίλυση μιας ομάδας εξισώσεων διάχυσης που περιγράφουν την ανάπτυξη αυτών των συστατικών. Η διαμήκης ανάπτυξη μπορεί να μελετηθεί με την αριθμητική επίλυση αυτών των εξισώσεων. Αυτή η αριθμητική μέθοδος είναι χρήσιμη

μόνο στη μελέτη των μέσων ιδιοτήτων των ατμοσφαιρικών καταιγισμών. Οι εξισώσεις αυτές γίνονται πολύ περίπλοκες αν γίνει προσπάθεια υπολογισμού της μέσης πλευρικής δομής του καταιγισμού. Έτσι οι διακυμάνσεις και οι συσχετισμοί των διαφόρων συστατικών μελετώνται μέσω μεθόδων Monte Carlo. Με τη μέθοδο αυτή προκύπτει εύκολα η πλευρική δομή.

Η **αδρονική συνιστώσα** είναι η ραχοκοκαλιά του καταιγισμού. Τροφοδοτεί συνεχώς με ενέργεια την ηλεκτρονική συνιστώσα μέσω της διάσπασης των π^0 μεσονίων που παράγονται στις πυρηνικές αντιδράσεις του αδρονικού καταιγισμού. Σ' αυτήν ανήκουν το 1% των σωματιδίων του καταιγισμού. Αποτελείται από πιόνια, καόνια και βαρυόνια. Λόγω των εγκάρσιων ορμών που αποκτούν αυτά τα σωματίδια κατά την παραγωγή τους, η αδρονική συνιστώσα έχει πλευρική διασπορά. Η συνιστώσα αυτή μεταφέρει σημαντικές πληροφορίες για τα χαρακτηριστικά των αλληλεπιδράσεων υψηλής ενέργειας.

Η **μιονική συνιστώσα** προκύπτει από τη διάσπαση πιονίων και καονίων. Σε πολύ υψηλές ενέργειες όπου υπάρχει άφθονη παραγωγή charm και beauty μεσονίων και βαρυονίων, η διάσπασή τους συνεισφέρει επίσης στη μιονική συνιστώσα, ειδικά με μιόνια υψηλής ενέργειας. Η μιονική συνιστώσα αποτελείται από το 10% περίπου του συνολικού αριθμού σωματιδίων του καταιγισμού. Μια και τα μιόνια δεν αλληλεπιδρούν ισχυρά και οι μόνες απώλειες είναι λόγω ιονισμού ή διάσπασης, ταξιδεύουν σχεδόν σε ευθείες γραμμές μέχρι το επίπεδο παρατήρησης. Η πλευρική διασπορά των μιονίων οφείλεται ουσιαστικά στις εγκάρσιες ορμές των μητρικών πιονίων όπως στην περίπτωση των αδρονίων, αλλά είναι πολύ μεγαλύτερη καθώς τα μιόνια ταξιδεύουν σε μεγαλύτερες αποστάσεις σε σύγκριση με τα αδρόνια. Πολλαπλές σκεδάσεις και εκτροπές στο γεωμαγνητικό πεδίο συμβάλλουν επίσης στην πλευρική διασπορά αλλά σε μικρότερο βαθμό, κάτι που εισάγει επίσης ασύμμετρες αζιμουθιακές κατανομές. Τα υψηλής ενέργειας μιόνια καθώς και τα χαμηλής ενέργειας μιόνια σε μεγάλες αποστάσεις από τον πυρήνα, παράγονται σε πολύ μεγάλα υψόμετρα και για το λόγο αυτό κουβαλούν πολύ σημαντικές πληροφορίες για τις αλληλεπιδράσεις στις μεγαλύτερες ενέργειες του καταιγισμού καθώς και για τη φύση του πρωτογενούς σωματιδίου.

Η πλευρική κατανομή των μιονίων εξαρτάται ξεκάθαρα από την ενέργειά τους αφού οι γωνίες μετά την αλληλεπίδραση των μητρικών πιονίων είναι μικρότερες για χαμηλότερες ενέργειες καθώς η εγκάρσια ορμή είναι σχεδόν ανεξάρτητη της ενέργειας. Όσο υψηλότερη είναι η ενέργεια των μιονίων τόσο πιο απότομη είναι η κατανομή. Τα μιόνια διασκορπίζονται σε πολύ μεγαλύτερες αποστάσεις από τα ηλεκτρόνια. Σε πολύ μεγάλες αποστάσεις, μεγαλύτερες από 1 km, τα μιόνια συνεισφέρουν σημαντικά στις πυκνότητες σωματιδίων.

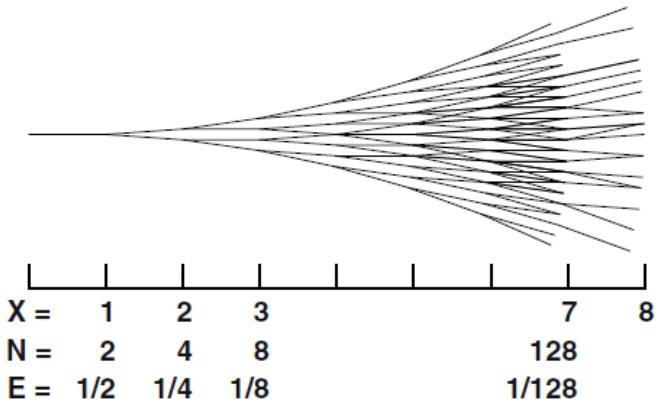
Σημαντικό χαρακτηριστικό της μιονικής συνιστώσας είναι η εξάρτηση από τη ζενιθιακή γωνία. Οι επικλινείς καταιγισμοί αναπτύσσονται σε πιο αραιή ατμόσφαιρα όπου τα πιόνια και άλλα μεσόνια είναι πιο πιθανό να διασπαστούν παρά να αλληλεπιδράσουν. Έτσι δημιουργούνται πάντα περισσότερα μιόνια ανεξάρτητα από την ενέργεια των μιονίων. Παρ' όλα αυτά, τα χαμηλής ενέργειας μιόνια έχουν περισσότερες πιθανότητες διάσπασης στο αυξημένο μήκος της διαδρομής και γι' αυτό οι επικλινείς καταιγισμοί έχουν λιγότερα μιόνια με ενέργεια της τάξης των GeV από τους κατακόρυφους καταιγισμούς ίδιας αρχικής μάζας και ενέργειας. Σε ενέργεια περίπου 10 GeV η παραγωγή και η διάσπαση εξισορροπούν η μια την άλλη και ο αριθμός των μιονίων παύει να εξαρτάται ισχυρά από τη ζενιθιακή γωνία. Σε ακόμα υψηλότερες ενέργειες, η επιρροή της διάσπασης μιονίων είναι ελάχιστη και οι επικλινείς καταιγισμοί είναι πλουσιότεροι σε μιόνια.

Τα ηλεκτρόνια αλληλεπιδρούν με την ύλη μέσω του ιονισμού και της ακτινοβολίας πέδης (bremsstrahlung). Η ακτινοβολία πέδης είναι η διαδικασία με την οποία ένα υψηλής ενέργειας ηλεκτρόνιο εκπέμπει ένα φωτόνιο όταν αλληλεπιδρά με το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο ενός πυρήνα του μέσου.

Η **ηλεκτρομαγνητική συνιστώσα** του καταιγισμού δημιουργείται όταν ένα υψηλής ενέργειας φωτόνιο που εισέρχεται ή δημιουργείται στην ατμόσφαιρα, σύντομα αλληλεπιδρά με τους πυρήνες του ατμοσφαιρικού αέρα και δημιουργεί ένα ζεύγος ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου (δίδυμη γένεση). Τα σωματίδια αυτά που έχουν επίσης υψηλές ενέργειες μέσω του φαινομένου της ακτινοβολίας πέδης εκπέμπουν υψηλής ενέργειας φωτόνια. Τα φωτόνια αυτά δημιουργούν ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια και έτσι, καθώς τα σωματίδια προχωρούν προς τα κάτω, όλο και περισσότερα ηλεκτρόνια και φωτόνια

δημιουργούνται. Σε κάθε στάδιο ο αριθμός τους αυξάνεται και η ενέργειά τους μειώνεται.

Το μοντέλο του Heitler (Heitler, 1944) θεωρεί σωματίδια του ίδιου τύπου που αλληλεπιδρούν σε μήκος λ. Δύο νέα σωματίδια δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση που το καθένα φέρει το μισό της πρωτογενούς ενέργειας.



Σχήμα 9: Γραφική απεικόνιση του μοντέλου του Heitler (Stanev, 2010).

Σε βάθος X=N·λ ο καταιγισμός αποτελείται από 2^N σωματίδια. Η αύξηση συνεχίζεται μέχρι η ενέργεια να φτάσει μια κρίσιμη τιμή E_C κάτω από την οποία η ενεργός διατομή της αλληλεπίδρασης είναι μηδέν. Ο αριθμός των σωματιδίων του καταιγισμού παύει να μεγαλώνει και κατόπιν αρχίζει να μειώνεται λόγω απώλειας ενέργειας.

Στο μοντέλο αυτό, ο μέγιστος αριθμός σωματιδίων στον καταιγισμό είναι $N_{max} = E_0/E_C$. Το βάθος του μεγίστου είναι ανάλογο του λογαρίθμου του λόγου της ενέργειας του πρωτογενούς και της κρίσιμης ενέργειας: $X_{max} = \lambda \log(E_0/E_C)$.

Το μοντέλο του Heitler τελειώνει στο μέγιστο του καταιγισμού. Παρ' ότι είναι απλό, περιγράφει ποιοτικά σωστά την ανάπτυξη τόσο του ηλεκτρομαγνητικού καταιγισμού όσο και του αδρονικού μέχρι το μέγιστο της ανάπτυξής του. Ο αριθμός των σωματιδίων στο μέγιστο είναι πάντα ανάλογος της αρχικής ενέργειας, κάποιες φορές υψωμένης σε κάποια δύναμη α και το βάθος του μεγίστου X_{max} είναι ανάλογο του λογαρίθμου της αρχικής ενέργειας.

Ένας ατμοσφαιρικός καταιγισμός μπορεί να δημιουργηθεί και από έναν πυρήνα. Οι καταιγισμοί αυτοί διαφέρουν από αυτούς που δημιουργούνται από νουκλεόνια σε δύο σημεία: η ενεργός διατομή της αλληλεπίδρασης των πυρήνων είναι μεγαλύτερη αυτής των νουκλεονίων και έτσι οι πρώτες αλληλεπιδράσεις συμβαίνουν ψηλότερα στην ατμόσφαιρα και τα προϊόντα της αλληλεπίδρασης στην περίπτωση αυτή εξαρτώνται σε πρώτη προσέγγιση από την ενέργεια ανά νουκλεόνιο και όχι από τη συνολική ενέργεια. Ένας καταιγισμός που δημιουργείται από βαρύτερο πυρήνα μάζας A και ολικής ενέργειας E_0 αντικαθίσταται σύμφωνα με την αρχή της υπέρθεσης από A καταιγισμούς νουκλεονίων με ενέργεια E_0/A. Οι καταιγισμοί αυτοί δημιουργούν περισσότερα μιόνια από τους καταιγισμούς πρωτονίων. Αν και έχουν τον ίδιο αριθμό ηλεκτρονίων στο μέγιστο N_e^{max}, αυτοί οι καταιγισμοί απορροφώνται ισχυρά μέχρι να φτάσουν στο επίπεδο παρατήρησης και το μέγεθός τους στο επίπεδο αυτό είναι μικρότερο από το αντίστοιχο των καταιγισμών πρωτονίων. Τέλος, οι καταιγισμοί βαρύτερων πυρήνων εμφανίζουν μικρότερες διακυμάνσεις στην ανάπτυξή τους από τους πρωτονικούς.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3: ΑΝΙΧΝΕΥΣΗ ΚΟΣΜΙΚΩΝ ΑΚΤΙΝΩΝ ΥΠΕΡΥΨΗΛΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ

3.1 Εισαγωγή

Υπάρχουν αρκετοί λόγοι για τους οποίους είναι πολύ σημαντική η λεπτομερής μελέτη του ακραίου μέρους του φάσματος της κοσμικής ακτινοβολίας. Σε αυτές τις πολύ υψηλές ενέργειες υπάρχει περίπτωση να διαφοροποιούνται τα χαρακτηριστικά των αλληλεπιδράσεων. Επιπλέον, αν η μικροκυματική ακτινοβολία των 3 K είναι παγκόσμια, όπως δείχνουν όλα τα μέχρι τώρα στοιχεία, τότε θα πρέπει να υπάρχει μια απότομη μεταβολή του φάσματος της πρωτογενούς ενέργειας πέρα από τα 10^{19} eV λόγω των αλληλεπιδράσεων των πρωτογενών σωματιδίων με τα φωτόνια της μικροκυματικής ακτινοβολίας. Το κατώφλι αυτό θα είναι χαμηλότερο στην περίπτωση βαρύτερων πρωτογενών σωματίων, αν είναι παρόντα σε τέτοιες ενέργειες. Αυτή η απότομη αλλαγή στο φάσμα μπορεί να μην είναι ορατή αν οι πηγές αυτών των πολύ υψηλής ενέργειας κοσμικών ακτίνων βρίσκονται μέσα στο Υπερσμήνος Γαλαξιών. Είναι σημαντικό τέλος να διευκρινιστεί αν σ' αυτές τις ενέργειες μπορούν τα πρωτογενή σωματίδια να είναι κάτι άλλο εκτός από πρωτόνια, όπως για παράδειγμα πυρήνες της ομάδας του σιδήρου και αν θα γίνει δυνατό να ανιχνευτούν τα πολύ υψηλής ενέργειας νετρίνα που αναμένεται να δημιουργούνται στα περιβάλλοντα των ενεργών γαλαξιακών πυρήνων (Active Galactic Nuclei – AGNs) ως οριζόντιοι καταιγισμοί ή σε υπόγειους και υποβρύχιους ανιχνευτές.

Είναι φανερό ότι η μόνη μέθοδος για την ανίχνευση του φάσματος, της σύνθεσης και της ανισοτροπίας των κοσμικών ακτίνων καθώς και για τα χαρακτηριστικά των αλληλεπιδράσεων σε ενέργειες πάνω από 10^{17}eV είναι η μέθοδος των εκτεταμένων ατμοσφαιρικών καταιγισμών (EAS) που με την εξέλιξη της τεχνολογίας μπορεί να ενσωματώνει νέες μεθόδους ανίχνευσης και ανάλυσης. Η ανίχνευση μέσω των εκτεταμένων καταιγισμών μπορεί να γίνει με διατάξεις επιφανείας και με τηλεσκόπια ακτινοβολίας Cherenkov και ακτινοβολίας φθορισμού που βρίσκονται τοποθετημένα είτε στην επιφάνεια του εδάφους είτε (μελλοντικά) σε τροχιά γύρω από τη Γη.

Οι ανιχνευτές επιφανείας είναι μεγάλες διατάξεις που καταμετρούν σωματίδια στην επιφάνεια της Γης και μελετούν την πλευρική ανάπτυξη του καταιγισμού. Για την ανίχνευση καταιγισμών ενέργειας 10^{14} – 10^{15} eV προτιμώνται τοποθεσίες με μεγάλο υψόμετρο έτσι ώστε ο καταιγισμός να παρατηρείται πιο κοντά στο μέγιστο με τις μικρότερες δυνατές διακυμάνσεις. Αντιθέτως, όταν σκοπός του πειράματος είναι να μελετήσει UHE καταιγισμούς επιλέγονται περιοχές με χαμηλότερο υψόμετρο ώστε να είναι σίγουρο ότι ο ανιχνευτής θα παρατηρήσει τον καταιγισμό μετά το μέγιστό του. Μιας και τα σωματίδια που φτάνουν στην επιφάνεια του εδάφους σε μεγαλύτερους αριθμούς είναι τα ηλεκτρόνια, συνήθως αυτή η συνιστώσα χρησιμοποιείται για την ενεργοποίηση του ανιχνευτή και την καταγραφή του καταιγισμού.

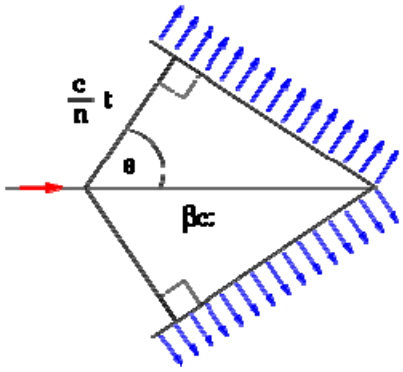
Οι μετρητές που έχουν κατά καιρούς χρησιμοποιηθεί σε ανιχνευτικές διατάξεις χωρίζονται σε αυτούς που η απόκρισή τους είναι ανεξάρτητη από τον αριθμό των σωματιδίων που τους διαπερνούν, οπότε δίνουν σήμα μόνο για το αν τους διαπέρασε ένα ή περισσότερα σωματίδια (μετρητές YES/NO) και σε εκείνους που η απόκρισή τους είναι ανάλογη της ενέργειας που τους εναποτίθεται. Στην πρώτη κατηγορία ανήκουν οι ανιχνευτές Geiger – Muller που χρησιμοποιήθηκαν στα παλαιότερα πειράματα ανίχνευσης (Harwell, Cornell, Moscow State University) και δεν είχαν την ικανότητα ανίχνευσης της διεύθυνσης του καταιγισμού. Για να προσδιοριστεί η πυκνότητα των σωματιδίων σε μονάδες particles/m^2 χρειάζονταν πολύ μεγάλος αριθμός μετρητών. Στην δεύτερη κατηγορία ανήκουν οι ανιχνευτές σπινθηρισμού και οι ανιχνευτές νερού Cherenkov που χρησιμοποιούνται στα σύγχρονα πειράματα. Οι μεγάλες ποσοτικές έρευνες ξεκίνησαν με το Volcano Ranch Array με μεγάλης επιφάνειας ανιχνευτές σπινθηρισμού που προσδιόριζαν την διεύθυνση του καταιγισμού και την θέση του πυρήνα με μεγάλη ακρίβεια και επίσης επιβεβαίωσαν αναμφίβολα την παρουσία πρωτογενών σωματιδίων με ενέργειες το λιγότερο 10^{20} eV.

Ο **ανιχνευτής σπινθηρισμού** αποτελείται βασικά από ένα υλικό που εκπέμπει φως με της διέλευση ενός φορτισμένου σωματιδίου και από έναν φωτοπολλαπλασιαστή που ανιχνεύει το φως και το μετατρέπει σε ηλεκτρικό παλμό. Στην αρχή χρησιμοποιούνταν υγροί σπινθιριστές με έναν διαλύτη, συνήθως οργανικό, που με τη διέλευση φορτισμένου σωματιδίου απέδιδε φως φθορισμού. Για να ανιχνευτεί αυτό το υπεριώδες φως από τον

φωτοπολλαπλασιαστή έπρεπε να μεσολαβήσει ένας μετατροπέας όπως το terphenyl που απορροφά το φως και το επανεκπέμπει σε χαμηλότερη συχνότητα. Τα υγρά αυτά είναι τοξικά, εύφλεκτα και δύσχρηστα, για το λόγο αυτό οι μετρητές αυτοί αντικαταστάθηκαν από τους πλαστικούς σπινθιριστές.

Οι **πλαστικοί σπινθιριστές** (plastic scintillators) έχουν σαν κύριο υλικό πολυστυρόλιο ή ακρυλικό και όπως και στην περίπτωση του υγρού σπινθιριστή προστίθεται ένας μετατροπέας και μεταθέτης του μήκου κύματος. Οι πλαστικοί σπινθηριστές μπορούν να διαμορφωθούν σε οποιοδήποτε σχήμα και μέγεθος, και είναι σταθεροί και εύκολοι στο χειρισμό. Τα φύλλα του υλικού που τοποθετούνται το ένα πάνω από το άλλο παρακολουθούνται από έναν φωτοπολλαπλασιαστή και η γεωμετρία της κατασκευής πρέπει να είναι τέτοια ώστε το ίδιο ποσό φωτός να φτάνει στον φωτοπολλαπλασιαστή από οποιοδήποτε σημείο του σπινθιριστή. Ανιχνευτές σπινθηρισμού χρησιμοποίησε το πείραμα AGASA (Rao & Sreekantan, 1998).

Οι **ανιχνευτές νερού Cherenkov** στηρίζουν τη λειτουργία τους στο **φαινόμενο Cherenkov**: πρόκειται για την ακτινοβολία που εκπέμπεται όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο κινείται μέσα σε ένα μέσο με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός στο μέσο αυτό. Κανένα σωματίδιο δεν μπορεί να υπερβεί κατά την κίνησή του την ταχύτητα του φωτός στο κενό (c), αλλά σε υλικά με δείκτη διάθλασης n η ταχύτητα του σωματιδίου v θα είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός αν $v>c/n$. Για υλικά με δείκτη διάθλασης n στην συνηθισμένη περιοχή μεταξύ 1,3 και 1,8 αυτή η σχέση ταχυτήτων αντιστοιχεί σε μια ελάχιστη κινητική ενέργεια πολλών εκατοντάδων MeV για βαριά φορτισμένα σωματίδια. Σε αντίθεση με την ισοτροπικά εκπεμπόμενη ακτινοβολία σπινθηρισμού, η ακτινοβολία Cherenkov εκπέμπεται κατά μήκος της επιφάνειας ενός κώνου που δημιουργείται γύρω από το διάνυσμα της ταχύτητας του σωματιδίου (σχήμα 10). Το μήκος κύματος του φωτός είναι μετατοπισμένο προς τα μικρά μήκη κύματος (μπλε). Η ολική ένταση της ακτινοβολίας Cherenkov είναι πολύ μικρότερη από την ακτινοβολία που εκπέμπεται από την ίδια απώλεια ενέργειας σε ένα καλό σπινθηριστή και μπορεί να είναι μόλις μερικές εκατοντάδες φωτόνια ή και λιγότερο για ένα ηλεκτρόνιο 1 MeV. Το πλεονέκτημα όμως των ανιχνευτών νερού Cherenkov είναι η αυξημένη ευαισθησία στην ηλεκτρομαγνητική συνιστώσα και η αυξημένη ευαισθησία σε ζενιθιακές γωνίες που αυξάνουν το ενεργό άνοιγμα.



Σχήμα 10: Η γεωμετρία της ακτινοβολίας Cherenkov (β=1/n=v/c).

Το σήμα στους ανιχνευτές νερού Cherenkov είναι ένα μέτρο της πλευρικής κατανομής και του ενεργειακού φάσματος όλων των σωματιδίων του καταιγισμού. Στη δεξαμενή νερού Cherenkov δεν μετριέται η πυκνότητα των σωματιδίων αλλά το ποσό της ενέργειας που εναποτίθεται στη δεξαμενή από τα σωματίδια του καταιγισμού. Σήμα δίνουν και τα φωτόνια ακτίνων γ καθώς η δεξαμενή είναι αρκετά βαθιά ώστε να πραγματοποιηθεί δίδυμη γένεση. Η ενέργεια που εναποτίθεται στους ανιχνευτές Cherenkov έχει επίσης μικρότερες διακυμάνσεις αφού περιλαμβάνει όλα τα σωματίδια του καταιγισμού.

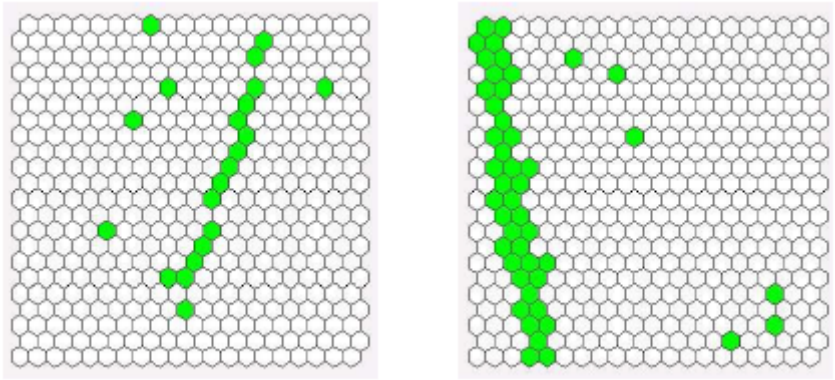
Οι επιφανειακές διατάξεις ανιχνευτών συνήθως ενεργοποιούνται όταν αρκετοί ανιχνευτές δώσουν σήμα μέσα σε ένα μικρό χρονικό διάστημα Δt. Η ακριβής τιμή του Δt εξαρτάται από το μέγεθος της διάταξης και τον τρόπο με τον οποίο δουλεύει το σύστημα καταγραφής δεδομένων. Αν ένα πείραμα πρέπει να είναι ευαίσθητο σε καταιγισμούς ζενιθιακής γωνίας μέχρι θ, τότε Δt = (dcosθ)/c όπου d είναι η διάμετρος της διάταξης και c η ταχύτητα του φωτός. Μόλις ενεργοποιηθεί η διάταξη, οι πυκνότητες των σωματιδίων και ο χρόνος άφιξής τους σε όλους τους ανιχνευτές καταγράφονται.

Η δεύτερη μέθοδος ανίχνευσης, αυτή τη φορά κατά μήκος του ατμοσφαιρικού καταιγισμού, είναι οπτική. Η μέθοδος αυτή βασίζεται στη μέτρηση του φωτός που παράγεται κατά την ανάπτυξη του καταιγισμού στην ατμόσφαιρα και μπορεί να είναι είτε ακτινοβολία Cherenkov που εκπέμπεται από τα ηλεκτρόνια του καταιγισμού είτε ακτινοβολία φθορισμού που εκπέμπεται από την διέγερση των ατόμων του αζώτου της ατμόσφαιρας με το πέρασμα του καταιγισμού. Οι δύο τύποι εκπεμπόμενης ακτινοβολίας είναι χρήσιμοι σε διαφορετικές ενεργειακές περιοχές. Και στις δύο περιπτώσεις η

μέθοδος απαιτεί καθαρό ασέληνο ουρανό και στεγνή ατμόσφαιρα και ο κύκλος εργασιών των ανιχνευτών αυτών είναι πολύ χαμηλός.

Ο φθορισμός του μοριακού αζώτου αποδίδει τέσσερα φωτόνια ανά μέτρο τροχιάς του ιονίζοντος σωματιδίου κατά μήκος του άξονα του καταιγισμού. Καθώς αναπτύσσεται ο καταιγισμός, τα εκπεμπόμενα υπεριώδη φωτόνια που περνούν από το πεδίο των ανιχνευτών δημιουργούν χρονικά εξαρτώμενα σήματα. Αυτά δημιουργούν ένα ίχνος μέσα στην ατμόσφαιρα από το οποίο μπορεί να ανακατασκευαστεί το διάμηκες προφίλ του καταιγισμού. Έτσι για έναν ανιχνευτή φθορισμού ο καταιγισμός φαίνεται σαν ένα σημείο που κινείται στον ουρανό με την ταχύτητα του φωτός. Ο ανιχνευτής φθορισμού αποτελείται από κάτοπτρα που συγκεντρώνουν το φώς σε ομάδες φωτοπολλαπλασιαστών (σχήμα 11).

Το ολοκλήρωμα του ανακατασκευασμένου προφίλ είναι ευθέως ανάλογο της ενέργειας του πρωτογενούς σωματιδίου που δημιούργησε τον καταιγισμό. Η μέθοδος είναι ουσιαστικά θερμιδομετρική αφού συνίσταται στη μέτρηση της ολικής απόθεσης ενέργειας στην ατμόσφαιρα από τα φορτισμένα σωμάτια. Η ταυτοποίηση του πρωτογενούς σωματιδίου γίνεται μέσω της εξέτασης του διαμήκους προφίλ του καταιγισμού. Το ατμοσφαιρικό βάθος του μεγίστου του καταιγισμού (X_{max}) είναι καλή παράμετρος γι' αυτή την ταυτοποίηση. Η εκτίμηση της αρχικής ενέργειας βασίζεται στην γεωμετρική ανακατασκευή του παρατηρούμενου γεγονότος καθώς η ένταση του σήματος καθορίζεται από την απόσταση του σημείου (κατά μήκος του άξονα του καταιγισμού) στο οποίο έχουμε φθορισμό από τον ανιχνευτή.



Σχήμα 11: Εικόνα δύο καταιγισμών σε κάμερα αποτελούμενη από ομάδα φωτοπολλαπλασιαστών (Πείραμα Pierre Auger). Και οι δύο έχουν ενέργεια 2,2 EeV και οι πυρήνες τους βρίσκονται σε απόσταση 10,5 km (αριστερά) και 4,5 km (δεξιά). Η διαφορά στην καταγραφή είναι προφανής.

Ένας πολύ εκτεταμένος καταιγισμός θα δώσει πολύ ασθενή σήματα αν είναι πολύ μακριά από τον ανιχνευτή σε αντίθεση με τις διατάξεις εδάφους όπου όσο πιο έντονο είναι ένα γεγονός τόσο μακρύτερα στην επιφάνεια του ανιχνευτή θα αφήσει σημάδια. Γι' αυτό η ακρίβεια της γεωμετρικής ανακατασκευής είναι σημαντική όχι μόνο για τη μελέτη της διεύθυνσης άφιξης αλλά και για τον αξιόπιστο προσδιορισμό της ενέργειας. Έτσι γίνεται προσπάθεια να επιτευχθεί στερεοσκοπική άποψη του προφίλ του καταιγισμού. Αυτό γίνεται με την εγκατάσταση δύο ή περισσότερων σταθμών οπτικών ανιχνευτών σε απόσταση 10−40 km. Για να παραχθεί αρκετό φως ώστε να διακρίνεται στο υπόβαθρο του νυχτερινού ουρανού, ο καταιγισμός πρέπει να είναι εξαιρετικά υψηλής ενέργειας.

Για να προκύψει η ολική ενέργεια του πρωτογενούς, πρέπει να προστεθεί η «χαμένη» ενέργεια (missing energy). Πρόκειται για την ενέργεια που μεταφέρεται στα αδρόνια, τα μιόνια και τα νετρίνα. Το ποσοστό της χαμένης ενέργειας εξαρτάται από την αρχική ενέργεια και την ατομική μάζα του πρωτογενούς καθώς και το αδρονικό μοντέλο που χρησιμοποιείται στην ανάλυση. Τα αδρόνια και τα μιόνια φέρουν πολύ μεγαλύτερη ενέργεια από τα ηλεκτρόνια ενώ τα νετρίνα δεν ανιχνεύονται καθόλου.

Με την αύξηση της ενέργειας του πρωτογενούς, το ποσοστό της χαμένης ενέργειας μειώνεται. Αυτό συμβαίνει γιατί η ενέργεια των δευτερογενών μεσονίων στις αδρονικές αλληλεπιδράσεις αυξάνεται και είναι πιο πιθανό αυτά να αλληλεπιδράσουν από το να διασπαστούν. Όταν όμως αλληλεπιδρούν, μέρος της ενέργειάς τους περνά στην ηλεκτρομαγνητική συνιστώσα του καταιγισμού.

Οι βαρύτεροι πυρήνες επίσης έχουν μεγαλύτερο ποσοστό χαμένης ενέργειας από τα πρωτόνια. Λόγω της χαμηλότερης ενέργειας ανά νουκλεόνιο, τα δευτερογενή μεσόνια σ' αυτούς τους καταιγισμούς τείνουν να διασπώνται αυξάνοντας έτσι το ποσοστό της χαμένης ενέργειας. Το ποσοστό αυτό εξαρτάται επίσης από το αδρονικό μοντέλο: μοντέλα που παράγουν πολλά χαμηλής ενέργειας δευτερογενή αυξάνουν το ποσοστό της χαμένης ενέργειας.

Στις πολύ υψηλές ενέργειες όπου χρησιμοποιούνται οι ανιχνευτές φθορισμού, η ηλεκτρομαγνητική ενέργεια είναι μια πολύ καλή προσέγγιση της ολικής ενέργειας του καταιγισμού και αυτό απλοποιεί την ανακατασκευή των παραμέτρων του.

Η τρίτη και πιο πρόσφατη μέθοδος ανίχνευσης μετατοπίζει την τοποθέτηση της ανιχνευτικής διάταξης σε τροχιά γύρω από τη Γη. Και στην περίπτωση αυτή θα ανιχνεύεται φως φθορισμού και ακτινοβολία Cherenkov από τηλεσκόπιο τοποθετημένο στον Διεθνή Διαστημικό Σταθμό.

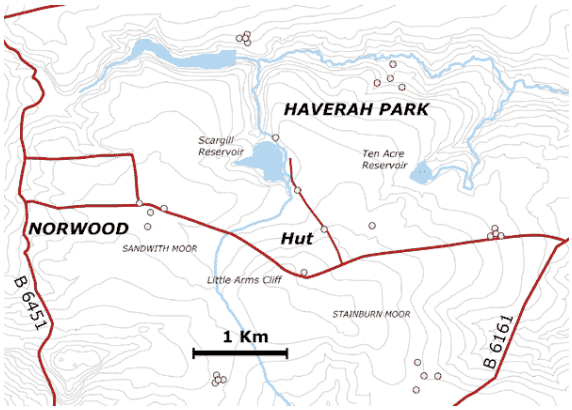
Η ανακατασκευή των παραμέτρων του καταιγισμού βασίζεται σε προσομοιώσεις της ανάπτυξης του καταιγισμού και της διαδικασίας ανίχνευσης. Αυτές οι προσομοιώσεις δίνουν τη σχέση ανάμεσα στην ενέργεια και τον τύπο του πρωτογενούς σωματιδίου και τις παρατηρούμενες παραμέτρους στο συγκεκριμένο υψόμετρο και για τον συγκεκριμένο τύπο του ανιχνευτή. Πριν γίνει η ανάλυση με όρους του πρωτογενούς κοσμικού σωματιδίου, θα πρέπει να αναλυθούν οι παρατηρούμενες πυκνότητες σωματιδίων και να εξαχθούν οι ίδιες οι παράμετροι του καταιγισμού. Η διαδικασία ανακατασκευής είναι πολύ διαφορετική για τους διαφορετικούς τύπους των ανιχνευτών.

3.2 Παλαιότερα Πειράματα

Η πρώτη μεγάλης κλίμακας διάταξη ανιχνευτών εδάφους ήταν το Volcano Ranch Array που δημιουργήθηκε από τον John Linsley στο Νέο Μεξικό στα τέλη της δεκαετίας του 1950. Οι ανιχνευτές που χρησιμοποιήθηκαν ήταν 19 πλαστικοί σπινθηριστές επιφάνειας 3,3 m^2 που κάλυπταν μια περιοχή 8,1 km^2. Αυτή η διάταξη ήταν η πρώτη που ανίχνευσε κοσμικές ακτίνες με ενέργειες πάνω από 10^{18} eV και άνοιξε το δρόμο για μεγαλύτερα πειράματα όπως το Haverah Park (12 km^2, 1967), το Yakutsk (18 km^2, 1974), το SUGAR (~100 km^2, 1974) και το AGASA (100 km^2, 1990). Το Haverah Park ήταν πρωτοποριακό γιατί χρησιμοποίησε ανιχνευτές νερού Cherenkov (deep-water Cherenkov detectors) αντί για σπινθηριστές.

I. Haverah Park

Η ομάδα του Haverah Park (Lawrence et al., 1991) λειτούργησε από το 1967 έως το 1987 μια από τις μεγαλύτερες ανιχνευτικές διατάξεις για να μελετήσει το πρωτογενές ενεργειακό φάσμα σε ενέργειες μεγαλύτερες από 10^{17} eV μετά το πρωτοποριακό πείραμα του Volcano Ranch. Το Haverah Park Array (σχήμα 12) αποτελούνταν από 200 ανιχνευτές νερού Cherenkov με την κεντρική του περιοχή να περιλαμβάνει 30 ανιχνευτές επιφανείας 1 m^2 σε απόσταση περίπου 100 m ο ένας από τον άλλο. Οι υπόλοιποι ανιχνευτές διαφορετικής επιφάνειας βρίσκονταν διασκορπισμένοι από 150 m μέχρι 2 km από το κέντρο. Οι έξι πιο μακρινοί σταθμοί ήταν ομάδες τεσσάρων ανιχνευτών επιφανείας 13,5 m^2 ο καθένας.



Σχήμα 12: Το Haverah Park Array. Οι ανιχνευτές σημειώνονται με κύκλους και στο κέντρο φαίνεται ο κεντρικός σταθμός (Hut).

Ο ανιχνευτής νερού Cherenkov αντιδρά σε μιόνια και φωτόνια επιπρόσθετα στα ηλεκτρόνια. Ένα μιόνιο που προσπίπτει κάθετα αποθέτει 240 MeV στον ανιχνευτή. Οι πυκνότητες σωματιδίων μετρώνται με βάση αυτή την απώλεια ενέργειας. Η πλευρική κατανομή της σωματιδιακής πυκνότητας ρ για το Haverah Park βρέθηκε πειραματικά ότι είναι:

$$\rho(r) = kr^{-(n+r/r_0)}$$

όπου r η απόσταση από τον πυρήνα του καταιγισμού, r_0 = 4000 m και

$$n = 3.78 - 1.44\sec\theta$$

για 100<r<1000 m και θ≤60°. Η συνάρτηση αυτή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της θέσης του πυρήνα και του μεγέθους του καταιγισμού. Η παράμετρος που χρησιμοποιείται για την εκτίμηση της αρχικής ενέργειας είναι η πυκνότητα ηλεκτρονίων και μιονίων ρ(600) σε απόσταση 600 m από τον

πυρήνα που προκύπτει με παρεμβολή στις παρατηρούμενες πυκνότητες. Αυτή η παράμετρος βρέθηκε από τους Hillas et al. (Hillas et al., 1971) ότι συνδέεται άμεσα με την αρχική ενέργεια E_0, σχεδόν ανεξάρτητα από μια μεγάλη πληθώρα μοντέλων αλληλεπίδρασης με τη σχέση:

$$E_0 = 7.04 \times 10^{17} \rho_v(600)^{1.018}$$

όπου $\rho_v(600)$ η πυκνότητα που μετριέται σε κάθετο καταιγισμό. Χρησιμοποιώντας την πειραματικά υπολογισμένη τιμή λ=760±40 g/cm^2 για το μήκος εξασθένισης (attenuation length), η πυκνότητα για επικλινείς καταιγισμούς διορθώνεται μέσω της σχέσης:

$$\rho_v(600) = \rho_u(600) \exp(\frac{1018}{\lambda}(\sec\theta - 1))$$

όπου 1018 g/cm^2 είναι το ατμοσφαιρικό βάθος στο Haverah Park Array. Για αρχικές ενέργειες μικρότερες από $4 \cdot 10^{18}$ eV χρησιμοποιείται η πυκνότητα στα 500 m.

Το ενεργειακό φάσμα που προκύπτει δεν μπορεί να προσεγγιστεί με νόμο δύναμης με μια μοναδική κλίση για όλο το ενεργειακό εύρος. Η κλίση αλλάζει και δεν υπάρχει ένδειξη για ύπαρξη κατωφλίου μέχρι τα 10^{20} eV. Από το Haverah Park ανιχνεύτηκαν οκτώ γεγονότα πάνω από 10^{20} eV τέσσερα από τα οποία σε ζενιθιακές γωνίες >45° ή έξω από την περιφέρεια της διάταξης.

II. Fly's Eye - HiRes

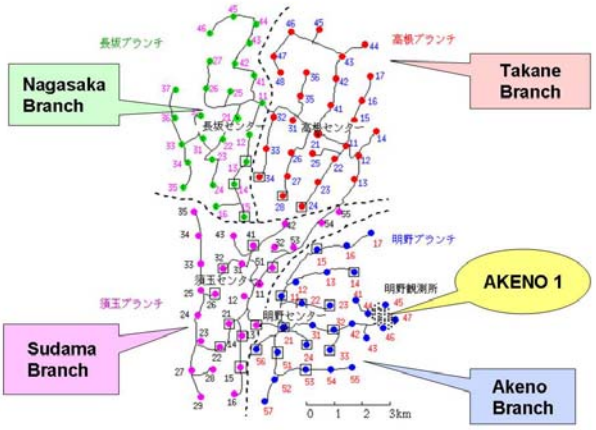
Ο πρωτοποριακός ανιχνευτής φθορισμού ήταν ο ανιχνευτής Fly's Eye (Baltrusaitis et al., 1985) που βρίσκεται στη Utah, κατασκευάστηκε το 1981 και λειτούργησε για 11 χρόνια. Αποτελούνταν από δύο ανιχνευτές (FEI και FEII) που απείχαν 3,4 km. Ο FEI παρατηρούσε όλο τον ουρανό και ο FEII τον μισό στην κατεύθυνση του FEI, επιτρέποντας έτσι τη στερεοσκοπική παρατήρηση των καταιγισμών που είναι ορατοί και από τους δύο ανιχνευτές. Αν και οι παρατηρήσεις που γίνονταν μόνο από τον FEI έχουν έκθεση περίπου 7 φορές των στερεοσκοπικών, η ακρίβεια των μετρήσεων είναι πολύ μεγαλύτερη με την στερεοσκοπική δομή. Το Fly's Eye έχει καταγράψει και το υψηλότερης

ενέργειας σωματίδιο μέχρι σήμερα: στις 15 Οκτωβρίου 1991 ανιχνεύθηκε καταιγισμός στον οποίο αποδόθηκε αρχική ενέργεια (3,2 ± 0,9) x 10^{20} eV. Από το 1998 το HiRes, διάδοχος του πειράματος Fly's Eye λαμβάνει στοιχεία από την ίδια τοποθεσία.

Το HiRes αποτελείται από δύο ανιχνευτές φθορισμού τοποθετημένους σε λόφους πάνω από την έρημο της Utah σε απόσταση 12,6 km. Τα κάτοπτρα των ανιχνευτών έχουν ενεργή επιφάνεια 3,8 m^2 και 256 φωτοπολλαπλασιαστές. Ο κύκλος εργασιών του ανιχνευτή, λόγω των περιορισμών της ανίχνευσης φθορισμού είναι 10%.

III. AGASA

Η ομάδα του Παρατηρητηρίου Akeno του Πανεπιστημίου του Τόκιο πραγματοποίησε μια σειρά πειραμάτων με διαφορετικές διατάξεις σε διαφορετικές χρονικές στιγμές για να προσδιορίσει το πρωτογενές ενεργειακό φάσμα από 10^{14} eV μέχρι 10^{20} eV. Η μικρότερη διάταξη, επιφάνειας 1 km^2 (1km^2 Array – Array 1) χρησιμοποιήθηκε για να προσδιορίσει το φάσμα μέχρι περίπου 10^{17} eV. Οι άλλες διατάξεις είναι η Akeno 20km^2 Array (Array 20) και το επιφανείας 100km^2 Akeno Giant Air Shower Array (AGASA) (Chiba et al., 1992).



Σχήμα 13: Η διάταξη των ανιχνευτών του AGASA. Φαίνονται αριθμημένοι οι ανιχνευτές στους τέσσερις τομείς του πειράματος.

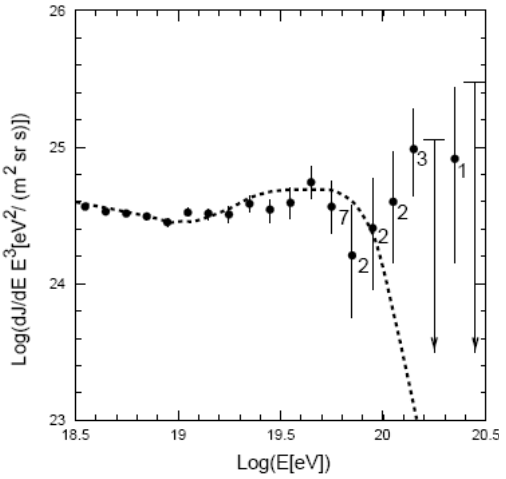
Το AGASA ήταν την εποχή που δημιουργήθηκε (1990) η μεγαλύτερη στον κόσμο διάταξη ανίχνευσης ατμοσφαιρικών καταιγισμών με έκταση

100km^2 στα τέλη του 1995. Το μεγαλύτερο γεγονός που έχει καταγράψει ήταν στις 3 Δεκεμβρίου 1993, με ενέργεια που υπολογίστηκε στα $2 \cdot 10^{20}$ eV.

Η ομάδα του AGASA αν και χρησιμοποίησε συμβατικούς ανιχνευτές σπινθηρισμού για τη μέτρηση ηλεκτρονίων, χρησιμοποίησε την παράμετρο S(600), την πυκνότητα σωματιδίων σε απόσταση 600 m από τον πυρήνα για να εκτιμήσει την αρχική ενέργεια αντί του συνήθως χρησιμοποιούμενου μεγέθους του καταιγισμού όπως στις χαμηλότερες ενέργειες. Κι αυτό γιατί η απόσταση μεταξύ των ανιχνευτών είναι πολύ μεγάλη για να επιτευχθεί μεγάλη επιφάνεια συλλογής απαραίτητη αφού η ροή των μεγάλων καταιγισμών είναι πολύ μικρή. Έτσι τα μεγέθη του καταιγισμού δεν μπορούν να προσδιοριστούν με ικανοποιητική ακρίβεια μιας και τα περισσότερα σωματίδια συγκεντρώνονται κοντά στον πυρήνα και οι μετρήσεις γίνονται μόνο σε μεγάλες αποστάσεις. Η ποσότητα S(600) χρησιμοποιήθηκε σαν μέσο εκτίμησης της ενέργειας του πρωτογενούς σωματίου και από την ομάδα του Yakutsk.

Οι διευθύνσεις αφίξεως προσδιορίζονται από τους σχετικούς χρόνους άφιξης σε διαφορετικούς ανιχνευτές θεωρώντας μια προσέγγιση επίπεδου μετώπου και η θέση του πυρήνα προσδιορίζεται με προσαρμογή των παρατηρούμενων πυκνοτήτων στην συνάρτηση πλευρικής κατανομής (Lateral Distribution Function - LDF) που έχει προκύψει πειραματικά.

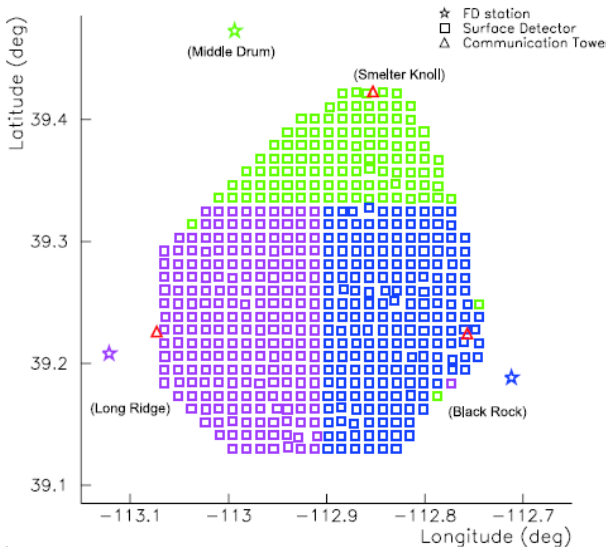
Το πιο ενδιαφέρον αποτέλεσμα του AGASA ήταν η παρατήρηση αρκετών γεγονότων πέρα από το όριο GZK, που φαίνονται στο σχήμα 14. Το πείραμα σταμάτησε να λειτουργεί το 2003.



Σχήμα 14: Τα καταγεγραμμένα από το AGASA γεγονότα πάνω από το όριο GZK. Οι αριθμοί δίπλα στα σημεία αντιπροσωπεύουν το πλήθος των γεγονότων σε κάθε ενέργεια ενώ οι διακεκομμένη καμπύλη αποδίδει το ενεργειακό φάσμα από ομοιόμορφα κατανεμημένες στο Σύμπαν εξωγαλαξιακές πηγές (Lemoine & Sigl, 2001).

IV. Telescope Array

Το Telescope Array (Nonaka, 2009) είναι μια πειραματική διάταξη ανίχνευσης κοσμικών ακτίνων υπερυψηλών ενεργειών που έχει κατασκευαστεί στη Utah των Ηνωμένων Πολιτειών με τη συνεργασία πανεπιστημίων και ερευνητικών κέντρων από την Ιαπωνία, την Κορέα, τη Ρωσία, τις Ηνωμένες Πολιτείες και το Βέλγιο. Πρόκειται για μια υβριδική διάταξη που αποτελείται από τον ανιχνευτή επιφανείας (SD-Surface Detector) και τρεις ανιχνευτές φθορισμού (FD-Fluorescence Detector). Ο ανιχνευτής επιφανείας αποτελείται από 507 ανιχνευτές σπινθηρισμού επιφάνειας 3 m^2 σε απόσταση 1,2 km ο ένας από τον άλλο. Η ολική επιφάνεια του ανιχνευτή εδάφους είναι περίπου 700 km^2. Το πείραμα άρχισε να λειτουργεί πλήρως σε υβριδικό mode τον Μάρτιο του 2008.



Σχήμα 15: Διάταξη ανιχνευτών του Telescope Array (Nonaka, 2009).

Το Telescope Array έχει σχεδιαστεί για τη μελέτη των κοσμικών ακτίνων με ενέργεια πάνω από 10^{19} eV. Για να μελετηθούν καταιγισμοί χαμηλότερης ενέργειας σχεδιάστηκε μια προσθήκη με τον ανιχνευτή TALE (Telescope Array Low Energy Extension) που ανιχνεύει κοσμικές ακτίνες με ενέργεια πρωτογενούς από $3 \cdot 10^{16}$ eV μέχρι 10^{19} eV. Όπως και στην περίπτωση του Auger που θα παρουσιαστεί παρακάτω, η επέκταση γίνεται με ένα επιπλέον τηλεσκόπιο φθορισμού με δυνατότητα ανάκλισης από 3° μέχρι 72° και από ένα πυκνότερο δίκτυο ανιχνευτών εδάφους.

V. JEM – EUSO

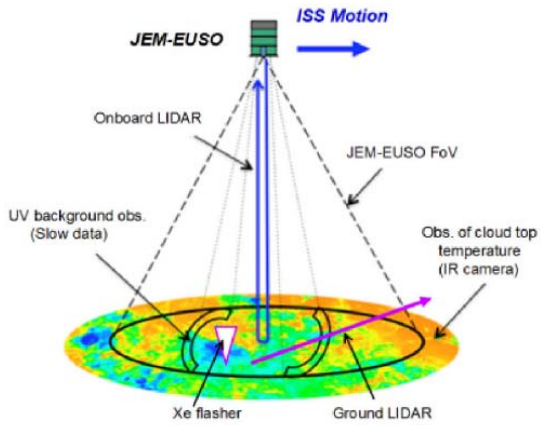
Το πρόγραμμα JEM-EUSO (Extreme Universe Space Observatory on Japanese Experiment Module) είναι η πρώτη προσπάθεια ανίχνευσης των κοσμικών ακτίνων υπερυψηλών ενεργειών όχι από την επιφάνεια της Γης αλλά από το διάστημα. Πρόκειται για ένα ευρείας γωνίας τηλεσκόπιο που θα προσαρμοστεί στο Διεθνή Διαστημικό Σταθμό σε ύψος 400 km από την επιφάνεια της Γης και θα ανιχνεύει φωτόνια Cherenkov και φθορισμού που παράγονται στη γήινη ατμόσφαιρα κατά τη διάρκεια των εκτεταμένων ατμοσφαιρικών καταιγισμών (Kajino, 2009). Το σύστημα αυτό θα χρησιμοποιεί ολόκληρη τη γήινη ατμόσφαιρα σαν ανιχνευτή κοσμικών ακτίνων. Το τηλεσκόπιο αποτελείται από φακούς Fresnel υψηλής

μεταβίβασης με διάμετρο 2,5 m και τα αντίστοιχα ηλεκτρονικά και συστήματα ενεργοποίησης.

Η εικόνα του καταιγισμού για το JEM-EUSO θα είναι ένα φωτεινό σημείο που κινείται σχεδόν με την ταχύτητα του φωτός. Όταν το σημείο αυτό φτάσει στο έδαφος ή σε ένα σύννεφο, τα ανακλώμενα φωτόνια Cherenkov θα ανιχνεύονται σαν ένα ισχυρό σήμα Cherenkov. Το εύρος παρατήρησης του τηλεσκοπίου (± 30°) αντιστοιχεί σε εμβαδόν ανιχνευτή στο έδαφος μεγαλύτερο από $1{,}9 \cdot 10^5$ km^2.

Η δημιουργία του JEM-EUSO βρίσκεται σε εξέλιξη και το όργανο αναμένεται να λειτουργήσει το 2017. Με την ολοκλήρωσή του θα εκτοξευθεί με τη χρήση πυραύλου H28 και με τη χρήση του H-II Transfer Vehicle (HTV) θα μεταφερθεί στο Διεθνή Διαστημικό Σταθμό όπου θα προσαρμοστεί σε μια από τις θύρες του Exposure Facility (EF) του Japanese Experiment Module (JEM).

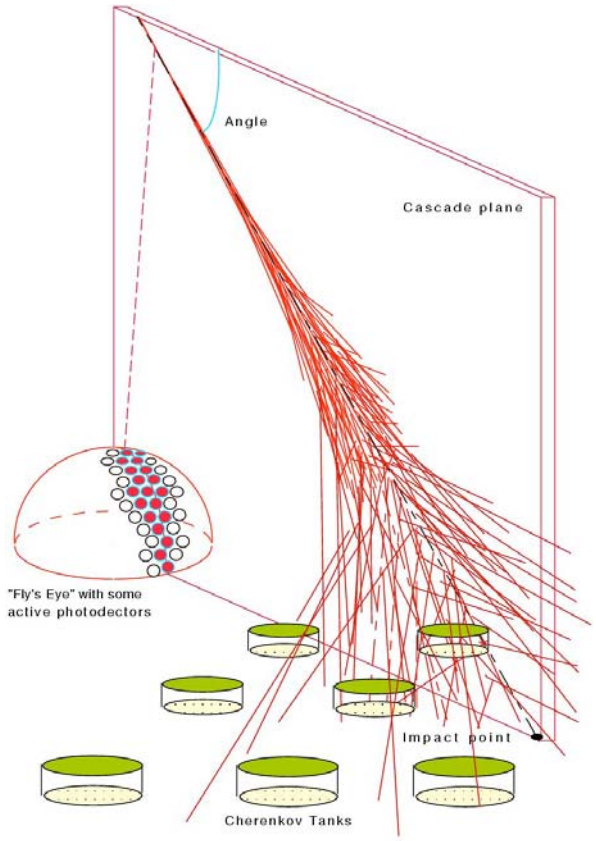
Το πρόγραμμα EUSO ξεκίνησε σαν ευρωπαϊκό πρόγραμμα της ESA, αλλά λόγω έλλειψης χρηματοδότησης το έργο αυτό σταμάτησε. Η ιαπωνική εκδοχή είναι παρόμοια με την ευρωπαϊκή, με μικρές μόνο διαφορές στο σχεδιασμό του εξοπλισμού.



Σχήμα 16: Σχηματική απεικόνιση της λειτουργίας του JEM-EUSO (Kajino, 2009).

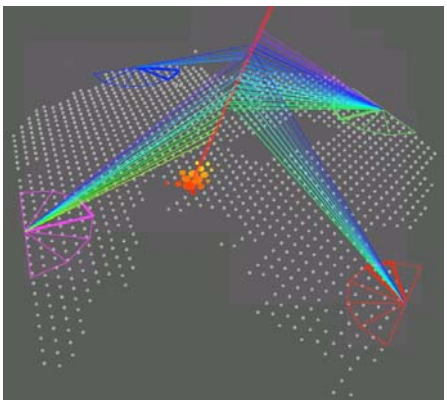
3.3 Το Παρατηρητήριο Pierre Auger

Το Παρατηρητήριο Pierre Auger (Abraham et al., 2004) κατασκευάστηκε στην Αργεντινή και είναι σχεδιασμένο για να παρατηρεί εκτεταμένους ατμοσφαιρικούς καταιγισμούς που ξεκινούν από πρωτογενή σωματίδια με ενέργεια πάνω από 10^{18} eV, να μετρά τη ροή τους, τη διεύθυνση αφίξεως και τη σύνθεσή τους με μεγάλη στατιστική ακρίβεια. Οι προηγούμενες διατάξεις χρησιμοποιώντας είτε ανιχνευτές επιφανείας είτε ανιχνευτές φθορισμού ανέφεραν τιμές για τη ροή των κοσμικών ακτίνων πολύ υψηλής ενέργειας που διέφεραν κατά ένα παράγοντα περίπου 2 στα 10^{19} eV. Το Παρατηρητήριο Pierre Auger συνδυάζει τις δύο τεχνικές ανίχνευσης ατμοσφαιρικών καταιγισμών που δουλεύουν ταυτόχρονα παρέχοντας ένα ισχυρό υβριδικό παρατηρητήριο (σχήμα 17). Τα αποτελέσματα που προκύπτουν αναμένεται να είναι ανώτερα σε ποιότητα από αυτά που προκύπτουν με τις δύο μεθόδους ανεξάρτητα.



Σχήμα 17: Υβριδική παρατήρηση καταιγισμού – ταυτόχρονη καταγραφή με ανιχνευτή φθορισμού και διάταξη εδάφους.

Η ταυτόχρονη παρατήρηση καταιγισμών (σχήμα 18) με τις δύο διαφορετικές μεθόδους μας επιτρέπει την ξεκάθαρη ταυτοποίηση των πηγών των συστηματικών αβεβαιοτήτων σε κάθε τεχνική και τα ξεχωριστά δυνατά σημεία κάθε οργάνου συμπληρώνουν το ένα το άλλο. Τα κύρια πλεονεκτήματα του ανιχνευτή επιφανείας είναι ο 100% κύκλος εργασίας και το ξεκάθαρο άνοιγμα που είναι ανεξάρτητο της ενέργειας πάνω από $3 \cdot 10^{18}$ eV ενώ το δυνατό σημείο του ανιχνευτή φθορισμού είναι η απευθείας μέτρηση της διαμήκους ανάπτυξης του καταιγισμού και μια θερμιδομετρική μέτρηση της ενέργειας του καταιγισμού (η ενέργεια που δεν ανιχνεύεται και μεταφέρεται από μιόνια και νετρίνα εισάγει μια συστηματική αβεβαιότητα μόνο 5% λόγω της έλλειψης γνώσης της σύνθεσης του πρωτογενούς σωματίου).



Σχήμα 18: Προσομοίωση με τον κώδικα CORSIKA υβριδικού γεγονότος από το Παρατηρητήριο Pierre Auger.

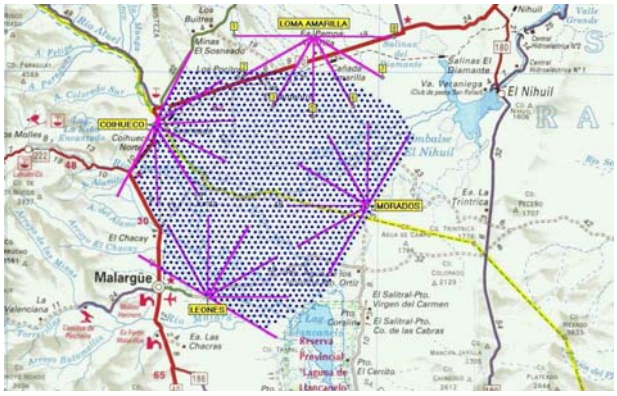
Το Παρατηρητήριο Pierre Auger σχεδιάστηκε σαν ένα ζεύγος διατάξεων ανιχνευτών (ένας σε κάθε ημισφαίριο) καθένας με εμβαδόν 3000km^2 (σχήμα 19). Με τον τρόπο αυτό θα είναι δυνατή η παρατήρηση όλου του ουρανού.



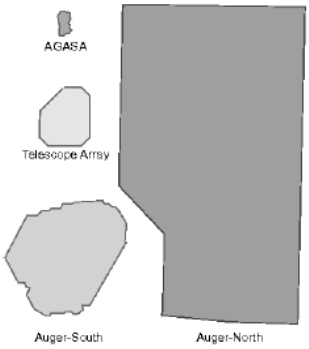
Σχήμα 19: Η θέση των δύο Παρατηρητηρίων στον Παγκόσμιο χάρτη

Το Βόρειο Παρατηρητήριο (Northern Observatory) σχεδιάζεται στο Colorado των ΗΠΑ. Η κατασκευή του δεν έχει ξεκινήσει ακόμα καθώς η ομάδα βρίσκεται ακόμα σε αναζήτηση πόρων και οικονομικών σχεδιαστικών λύσεων.

Το Νότιο Παρατηρητήριο (Southern Observatory) βρίσκεται στην Pampa Amarilla κοντά στην πόλη Malargue στην επαρχία Mendoza της Αργεντινής σε υψόμετρο 1400 m. Το μέρος αυτό είναι σχετικά επίπεδο (η υψομετρική διαφορά για ολόκληρη τη διάταξη είναι κάτω από 20 m), με καθαρό ουρανό και μεγάλο ποσοστό καθαρού νυχτερινού ουρανού – πρόκειται ουσιαστικά για έρημο στη σκιά των Άνδεων. Οι 1660 ανιχνευτές είναι τοποθετημένοι σε τριγωνικής δομής πλέγμα με απόσταση 1,5 km και η διάταξη παρατηρείται από ψηλά από τέσσερις σταθμούς φθορισμού (τοποθετημένους στα άκρα της διάταξης) καθένας από τους οποίους περιλαμβάνει έξι τηλεσκόπια φθορισμού (σχήμα 20).



Σχήμα 20: Το Νότιο Παρατηρητήριο στην Αργεντινή. Οι κουκίδες αντιστοιχούν στους ανιχνευτές Cerenkov ενώ η περιοχή της διάταξης εδάφους περιβάλλεται από τους τέσσερις ανιχνευτές φθορισμού.



Σχήμα 21: Σύγκριση μεγεθών για τους επιφανειακούς ανιχνευτές των μεγαλύτερων πειραμάτων (Haton, 2009).

3.3.1 Περιγραφή των ανιχνευτών επιφανείας

Οι ανιχνευτές επιφανείας που χρησιμοποιούνται στο Παρατηρητήριο Auger είναι ανιχνευτές νερού Cherenkov (Water Cherenkov Detectors – WCDs). Πριν από τη δημιουργία του Παρατηρητηρίου εξετάστηκαν εναλλακτικές τεχνικές ανίχνευσης για τη διάταξη εδάφους και τελικά προτιμήθηκαν οι ανιχνευτές νερού Cherenkov για την εγγενή τους απλότητα, την προηγούμενη αποτελεσματική τους χρησιμοποίηση σε παλιότερα πειράματα και την υπεροχή τους στο θέμα της ευαισθησίας στα διαφορετικά συστατικά του καταιγισμού.

Το υψόμετρο της περιοχής όπου εγκαταστάθηκε το Παρατηρητήριο είναι 1400m από την επιφάνεια της θάλασσας. Αυτό σημαίνει ότι η διάταξη εδάφους βρίσκεται κάτω από 880 g/cm^2 ατμόσφαιρας που είναι κοντά στο μέγιστο του καταιγισμού για κάθετες διαδρομές στο ενεργειακό εύρος του πειράματος. Μια και η ποσότητα ατμόσφαιρας που διασχίζει ο καταιγισμός πριν φτάσει στο έδαφος αυξάνεται με την αύξηση της ζενιθιακής γωνίας, οι περισσότεροι καταιγισμοί θα βρίσκονται μετά το μέγιστό τους όταν φτάνουν στο έδαφος. Σε αυτό το καθεστώς, ο πληθυσμός σωματιδίων του καταιγισμού μπορεί να προσεγγιστεί με μια εκθετική μείωση στην οποία η ηλεκτρομαγνητική συνιστώσα εξασθενεί πολύ πιο γρήγορα από τη μιονική. Σαν αποτέλεσμα, διαφορετικοί τύποι ανιχνευτών παράγουν διαφορετικά μήκη εξασθένισης (attenuation lengths) σε συνάρτηση με τις σχετικές τους ευαισθησίες στις δύο αυτές συνιστώσες του καταιγισμού. Για το Haverah Park με τους ανιχνευτές νερού Cherenkov ο συντελεστής εξασθένισης πυκνότητας στα 600 m από τον πυρήνα του καταιγισμού βρέθηκε να είναι 760 ± 40 g/cm^2 ενώ για το πείραμα Yakutsk με τη διάταξη σπινθηριστών προέκυψε 500 ± 40 g/cm^2 (και οι δύο περιοχές είναι κοντά στο επίπεδο της θάλασσας). Αυτά τα αποτελέσματα δείχνουν ότι η διάταξη ανιχνευτών Cherenkov είναι λιγότερο ευαίσθητη στο ατμοσφαιρικό βάθος και άρα στη ζενιθιακή γωνία από τη διάταξη σπινθηριστών.

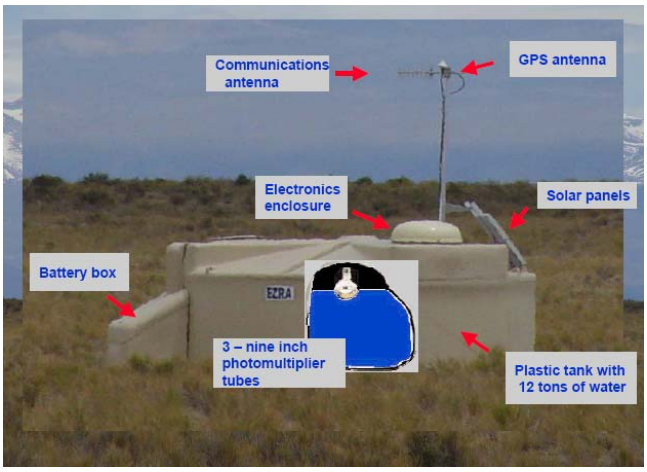
Ένας ανιχνευτής με μεγάλο λόγο βάθους προς πλευρική διάσταση όπως ο ανιχνευτής νερού Cherenkov έχει ένα ακόμα πλεονέκτημα: η προβαλλόμενη περιοχή στο επίπεδο που είναι κάθετο στον άξονα του καταιγισμού μειώνεται πολύ πιο αργά με την αύξηση της ζενιθιακής γωνίας

απ' ότι η αντίστοιχη περιοχή σε έναν λεπτό ανιχνευτή. Αυτό το γεωμετρικό φαινόμενο σε συνδυασμό με την ελάττωση της ευαισθησίας στη ζενιθιακή γωνία έχει σαν αποτέλεσμα μεγαλύτερη ικανότητα ανίχνευσης και πιο ομοιόμορφη κάλυψη του ουρανού.



Εικόνα 1: Η εξωτερική μορφή ενός σταθμού του ανιχνευτή επιφανείας.

Κάθε ανιχνευτής Cherenkov αποτελείται από μια κυλινδρική δεξαμενή από πολυαιθυλένιο, ύψους 1,2 m και διαμέτρου 3,6 m που περιέχει 12.000 λίτρα εξαιρετικά καθαρού νερού (εικόνα 1). Όλος ο όγκος του νερού παρακολουθείται από τρεις ανεστραμμένους φωτοπολλαπλασιαστές Photonis Photomultipliers των 9'' και προκύπτουν δύο σήματα από κάθε φωτοπολλαπλασιαστή. Τα μέρη κάθε σταθμού του ανιχνευτή επιφανείας φαίνονται στην εικόνα 2.



Εικόνα 2: Τα μέρη ενός σταθμού επιφανείας.

Τα έξι σήματα από κάθε δεξαμενή ψηφιοποιούνται με τη χρήση μετατροπέων Flash Analogue to Digital Converters (FADCs) που λειτουργούν στα 40 MHz δίνοντας ανάλυση 25 ns και στέλνονται σε ένα Programmable Logic Device που χρησιμοποιείται για την εκτέλεση των αλγορίθμων της τοπικής ενεργοποίησης. Η χρονική στιγμή κατά την οποία ενεργοποιείται ο τοπικός σταθμός είναι κρίσιμη για τον προσδιορισμό της διεύθυνσης του καταιγισμού και μετριέται χρησιμοποιώντας μια μονάδα GPS που παρέχει το χρόνο του γεγονότος με ακρίβεια 8 ns μετρημένο σε δύο διαδοχικούς ανιχνευτές. Η ενεργειακή κατανάλωση των ηλεκτρονικών για κάθε δεξαμενή είναι λιγότερη από 10 W και η ενέργεια αυτή προέρχεται από δύο μπαταρίες των 12 V που επαναφορτίζονται μέσω ηλιακών πάνελ.

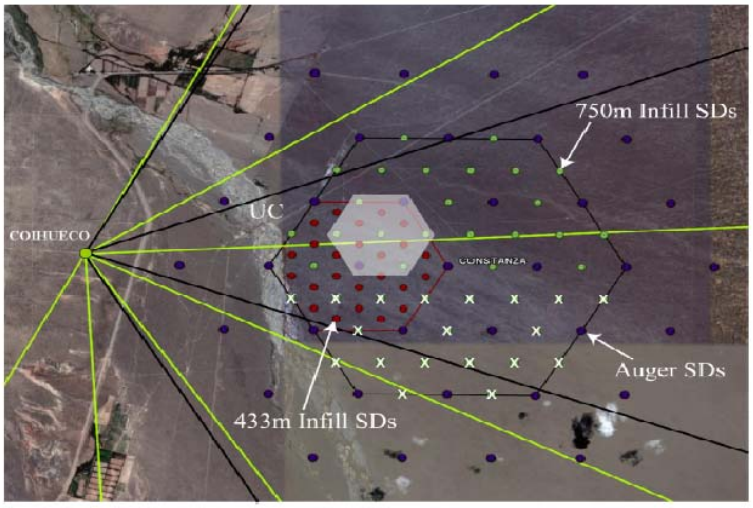
Κάθε επιφανειακός ανιχνευτής έχει σχεδιαστεί για να λειτουργεί αυτόνομα και μπορεί να επικοινωνεί και να στέλνει δεδομένα σε έναν τοπικό πύργο τηλεπικοινωνιών ασύρματα μέσω ενός radio link. Ένας πύργος τηλεπικοινωνιών είναι τοποθετημένος σε κάθε περιοχή ανιχνευτή φθορισμού και συντονίζει την κίνηση από κάθε ανιχνευτή χρησιμοποιώντας τεχνολογία κινητών τηλεφώνων πριν στείλει τα δεδομένα στο κεντρικό παρατηρητήριο για ανάλυση.

3.3.2 AMIGA (Auger Muons and Infill for Ground Array)

Πρόκειται για μια από τις τελευταίες προσθήκες στον ανιχνευτή επιφανείας του Παρατηρητηρίου Auger. Αποτελείται από μια πυκνή διάταξη επιφανειακών ανιχνευτών και μετρητών μιονίων με σκοπό να επεκταθεί το ενεργειακό φάσμα ανίχνευσης του πειράματος μέχρι τα 10^{17} eV. Η επέκταση αυτή σε χαμηλότερες ενέργειες θα δώσει τη δυνατότητα μελέτης της περιοχής στην οποία γίνεται η μετάβαση από γαλαξιακές σε εξωγαλαξιακές πηγές και επιπλέον πληροφορίες για τη σύσταση των κοσμικών ακτίνων.

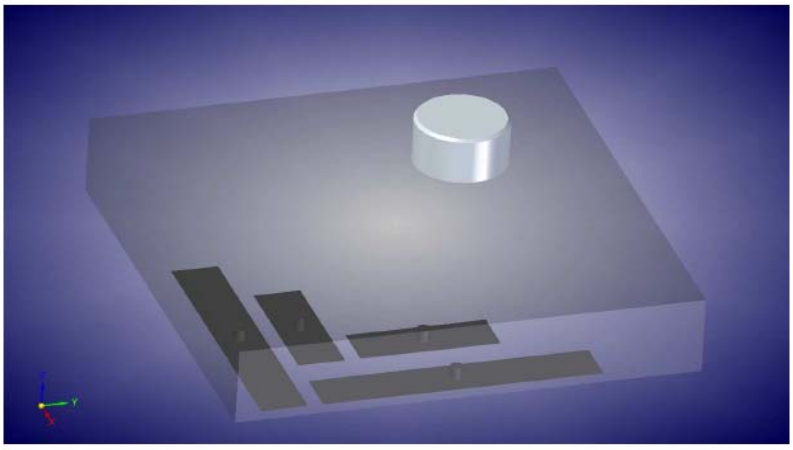
Το σύστημα AMIGA (εικόνα 3) επεκτείνει τις ενέργειες στις οποίες έχει απόκριση το Auger με δύο τρόπους: με τη δημιουργία ενός πυκνότερου δικτύου επιφανειακών ανιχνευτών και με την εγκατάσταση κοντά στους ανιχνευτές νερού Cherenkov αυτού του πυκνότερου πλέγματος ανιχνευτών μιονίων που θάβονται στο έδαφος.

Κοντά στον σταθμό Cerro Coihueco του ανιχνευτή φθορισμού θα εγκατασταθούν επιπλέον ανιχνευτές νερού Cherenkov, έτσι ώστε το πλέγμα των δεξαμενών να πυκνώσει. Δημιουργούνται έτσι δύο εξάγωνα επιφάνειας 5,9 και 23,5 km^2 με απόσταση των ανιχνευτών στο τριγωνικό πλέγμα 433 και 750 m αντίστοιχα (ενώ στον υπόλοιπο ανιχνευτή επιφανείας η απόσταση των δεξαμενών Cherenkov στο τριγωνικό πλέγμα είναι 1500 m). Η επιφάνεια που καλύπτει αυτή η πυκνότερη δομή δεν χρειάζεται να είναι μεγάλη καθώς η ροή των κοσμικών ακτίνων αυξάνεται πολύ γρήγορα με την πτώση της ενέργειας του πρωτογενούς σωματιδίου. Από την άλλη πλευρά το πλέγμα πρέπει να είναι πυκνότερο καθώς οι χαμηλότερης αρχικής ενέργειας καταιγισμοί έχουν μικρότερο αποτύπωμα στο έδαφος (Platino, 2009).



Εικόνα 3: Χάρτης του AMIGA. Η σκιασμένη εξαγωνική περιοχή έχει τεθεί ήδη σε λειτουργία.

Σε κοντινή απόσταση σε κάθε δεξαμενή στη διάταξη αυτή θα τοποθετηθεί κάτω από την επιφάνεια του εδάφους ένας ανιχνευτής μιονίων. Ο ανιχνευτής μιονίων αποτελείται από 4 μετρητές (δύο με μήκος 4,8 m και δύο με μήκος 8,8 m) με συνολική επιφάνεια 30 m^2 και βρίσκεται θαμμένος σε βάθος 2,25 m για να θωρακίζεται από την ηλεκτρομαγνητική συνιστώσα του καταιγισμού (εικόνα 4).



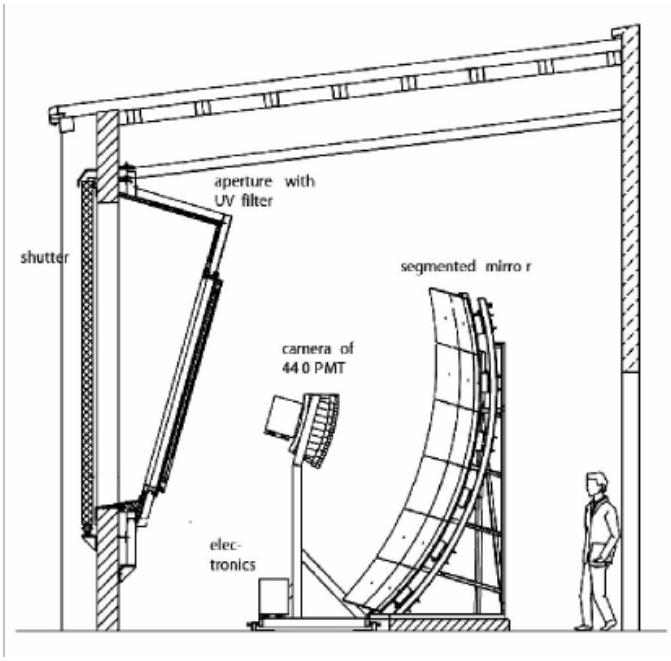
Εικόνα 4: Η τοποθέτηση του μετρητή μιονίων και του ανιχνευτή νερού Cherenkov του AMIGA (Sidelnik).

Από τον Αύγουστο του 2008 έχει εγκατασταθεί η μισή πυκνή διάταξη (infilled array) και ήδη δίνει δεδομένα. Η ανακατασκευή αυτών των καταιγισμών γίνεται όπως και για τον κανονικό ανιχνευτή επιφανείας, με κάποιες μικρές προσαρμογές λόγω των μικρότερων αποστάσεων ανάμεσα στις δεξαμενές. Για τη διάταξη ανίχνευσης μιονίων, έχει γίνει η εγκατάσταση ενός μετρητή 5 m^2 που δίνει δεδομένα και ελέγχεται τεχνικά ώστε να προχωρήσει η διαδικασία.

3.3.3 Περιγραφή των ανιχνευτών φθορισμού

Το διάμηκες προφίλ ενός εκτεταμένου καταιγισμού μπορεί να μετρηθεί μέσω της παρατήρησης του φωτός φθορισμού που εκπέμπεται από τον απιονισμό του ατμοσφαιρικού αζώτου καθώς η ηλεκτρομαγνητική συνιστώσα του καταιγισμού διασχίζει την ατμόσφαιρα. Στο Παρατηρητήριο Auger η επιφανειακή διάταξη περιβάλλεται από τέσσερις σταθμούς φθορισμού καθένας από τους οποίους αποτελείται από 6 πανομοιότυπα τηλεσκόπια φθορισμού (σχήμα 22). Το φως φθορισμού εισέρχεται στο τηλεσκόπιο μέσω ενός διαφράγματος 0,85 m. Ένα φίλτρο UV αφαιρεί αρκετή από την ακτινοβολία υποβάθρου του νυχτερινού ουρανού και ένας διορθωτικός δακτύλιος έχει προστεθεί στο διάφραγμα αυξάνοντας την ενεργό ακτίνα στα 1,1 m και διπλασιάζοντας την ενεργό επιφάνεια συλλογής διατηρώντας παράλληλα το οπτικό spot size των 0,5°. Το φως εστιάζεται από ένα σφαιρικό κάτοπτρο σε μια κάμερα 440 φωτοπολλαπλασιαστών. Κάθε

φωτοπολλαπλασιαστής καλύπτει 1,5'' του ουρανού και το πεδίο κάθε ανεξάρτητου τηλεσκοπίου είναι 30° σε αζιμούθιο και 28,6° σε ύψος.



Σχήμα 22: Σχηματική αναπαράσταση ενός τηλεσκοπίου φθορισμού (Arqueros, 2006).

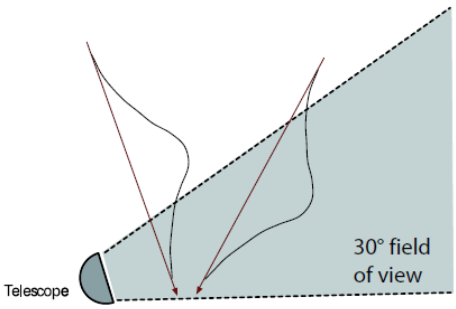
3.3.4 HEAT (High Elevation Auger Telescopes)

Πρόκειται για τη βελτίωση του ανιχνευτή φθορισμού που θα επιτρέψει την επέκταση σε χαμηλότερες ενέργειες ώστε να μελετηθεί η περιοχή μετάβασης από γαλαξιακές σε εξωγαλαξιακές κοσμικές ακτίνες και να δοθεί δυνατότητα στο σύστημα AMIGA να δώσει και υβριδικά αποτελέσματα.

Τα αρχικά τηλεσκόπια φθορισμού του Παρατηρητηρίου Auger έχουν πεδίο από περίπου 1,5° μέχρι 30° υψομετρικά (σχήμα 23). Έτσι για κοντινούς καταιγισμούς είναι ορατά μόνο τα τελευταία χιλιόμετρα της ανάπτυξης του καταιγισμού στην ατμόσφαιρα με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η παρατήρηση του μεγίστου του καταιγισμού. Τα τρία επιπλέον τηλεσκόπια HEAT που στηρίζονται σε άξονα έχουν πεδίο από 30° έως 58° (εικόνα 5). Έχουν έτσι τη δυνατότητα να παρατηρήσουν κοντινούς καταιγισμούς σε συνδυασμό με τα υπάρχοντα τηλεσκόπια και να λειτουργήσουν ταυτόχρονα με το AMIGA για υβριδική καταγραφή (σχήμα 24).

Ο σχεδιασμός των τηλεσκοπίων HEAT είναι παρόμοιος με τα παλαιότερα τηλεσκόπια φθορισμού με μόνη διαφορά τη στήριξη σε άξονα που

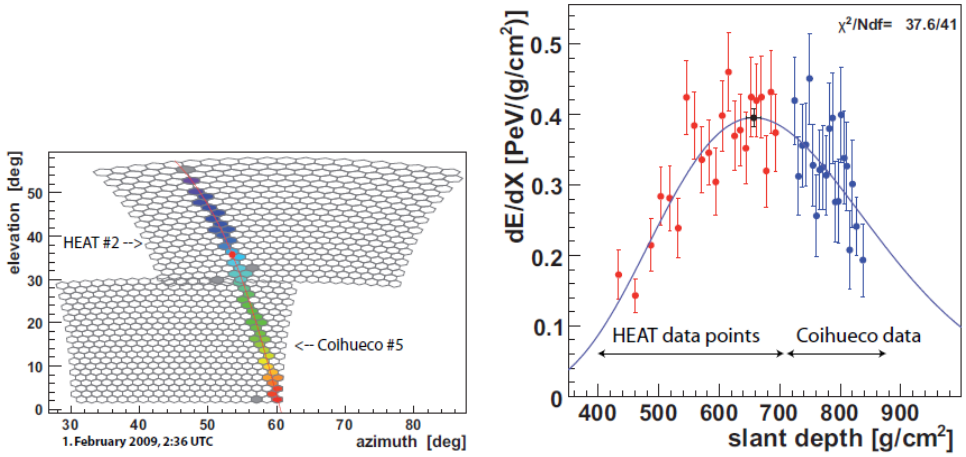
επιτρέπει την ανάκλισή τους κατά 29°. Ενώ τα αρχικά τηλεσκόπια βρίσκονται τοποθετημένα σε τσιμεντένια κτήρια, τα τηλεσκόπια HEAT είναι τοποθετημένα σε ειδικά κουβούκλια με ελαφρά μονωτικά τοιχώματα και ατσάλινο σκελετό. Ένας ηλεκτρικός κινητήρας μπορεί να μετακινεί την κατασκευή αυξάνοντας την κλίση της κατά 29° σε δύο λεπτά.



Σχήμα 23: Περιορισμός στην ανίχνευση του μεγίστου ενός κοντινού καταιγισμού από το κλασικό τηλεσκόπιο φθορισμού.



Εικόνα 5: Τα τρία τηλεσκόπια HEAT σε θέση ανάκλισης τον Ιανουάριο του 2009.



Σχήμα 24: Ένα γεγονός που παρατηρήθηκε τόσο από το HEAT όσο και από το παλαιότερο τηλεσκόπιο του λόφου Coihueco και το ανακατασκευασμένο προφίλ του. Είναι φανερό πως μόνο με τη χρήση και των δύο τηλεσκοπίων είναι δυνατός ο σωστός προσδιορισμό του μεγίστου του κα καταιγισμού (Kleifges, 2009).

3.4 Συνάρτηση Πλευρικής Κατανομής

Η συνάρτηση πλευρικής κατανομής (Lateral Distribution Function – LDF) χρησιμοποιείται για να περιγράψει πώς τα παρατηρούμενα από την διάταξη των ανιχνευτών επιφανείας σήματα μεταβάλλονται σαν συνάρτηση της απόστασης από τον πυρήνα του καταιγισμού. Το κεντρικό στοιχείο για την ανακατασκευή και ανάλυση των ατμοσφαιρικών καταιγισμών με τη χρήση ανιχνευτών επιφανείας είναι η προσαρμογή της συνάρτησης πλευρικής κατανομής στις σωματιδιακές πυκνότητες.

Για το Haverah Park που χρησιμοποιούσε ανιχνευτές νερού Cerenkov η LDF με την καλύτερη προσαρμογή ήταν

$$\rho(r) = kr^{-(n+\frac{r}{4000})}$$

όπου r η απόσταση από τον πυρήνα του καταιγισμού σε μέτρα, k παράμετρος κανονικοποίησης και το n δίνεται από τη σχέση

$$n = 3.49 - 1.29\sec\theta + 0.165\log(\frac{E}{10^{17}\,eV})$$

με θ τη ζενιθιακή γωνία και E την ενέργεια του καταιγισμού.

Οι παράμετροι n και k ελέγχουν αντίστοιχα το σχήμα και την κανονικοποίηση. Αντιπροσωπευτικές τιμές τους είναι n ≈ 2.5 και k ≈ $3.5 \cdot 10^8$

για κάθετους καταιγισμούς ενέργειας 10^{19} eV. Η πυκνότητα σήματος ρ(r) εκφράζεται σε μονάδες VEM·m^{-2}.

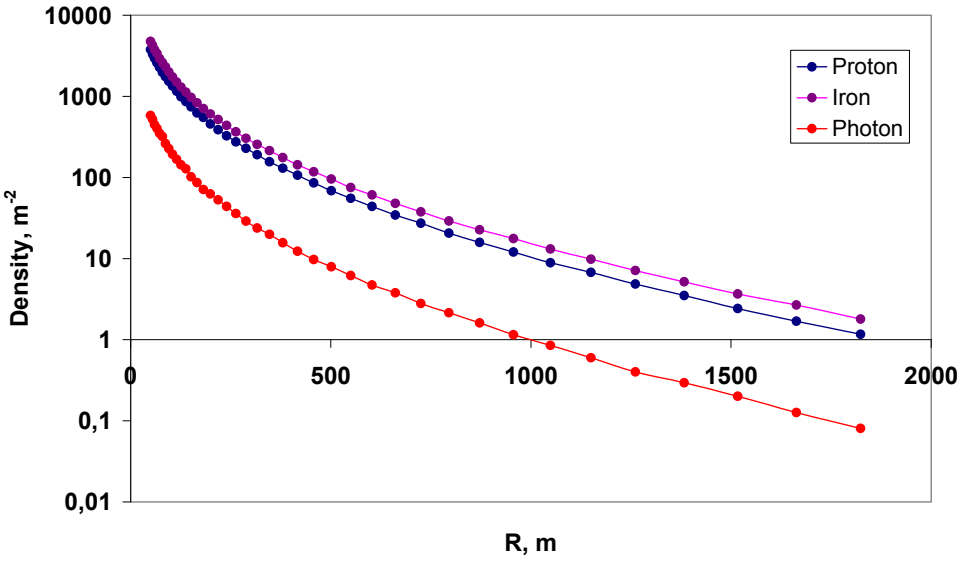
Για το Παρατηρητήριο Auger, μετά από έλεγχο LDF διαφόρων τύπων, προέκυψε ότι η καλύτερη προσαρμογή απαιτούσε συνάρτηση της μορφής NKG (Nishimura-Kamata-Greisen):

$$S(r) = A \cdot [(\frac{r}{r_s}) \cdot (1 + \frac{r}{r_s})]^{-\beta}$$

με A = S(1000)·3.47^{β} , β = α + b(secθ-1) και r_s = 700 m. Επιπλέον β(E) = α(E) + b(secθ-1) με α(E) = 2,26 + 0,195log(E/EeV) και b = -0,98.

3.5 Χαρακτηριστικά του καταιγισμού που σχετίζονται με τον τύπο του πρωτογενούς σωματίου

Τα μιόνια στους ατμοσφαιρικούς καταιγισμούς αναμένεται να παρουσιάζουν ιδιαίτερη ευαισθησία στη φύση του πρωτογενούς σωματιδίου. Οι καταιγισμοί που ξεκινούν από πυρήνες σιδήρου έχουν σημαντικά περισσότερα μιόνια από αντίστοιχης ενέργειας καταιγισμούς που δημιουργούνται από πρωτόνια.



Σχήμα 25: Πυκνότητα μιονίων για κατακόρυφους καταιγισμούς αρχικής ενέργειας 100 EeV που δημιουργούνται από φωτόνια ακτίνων γ, πυρήνες σιδήρου και πρωτόνια.

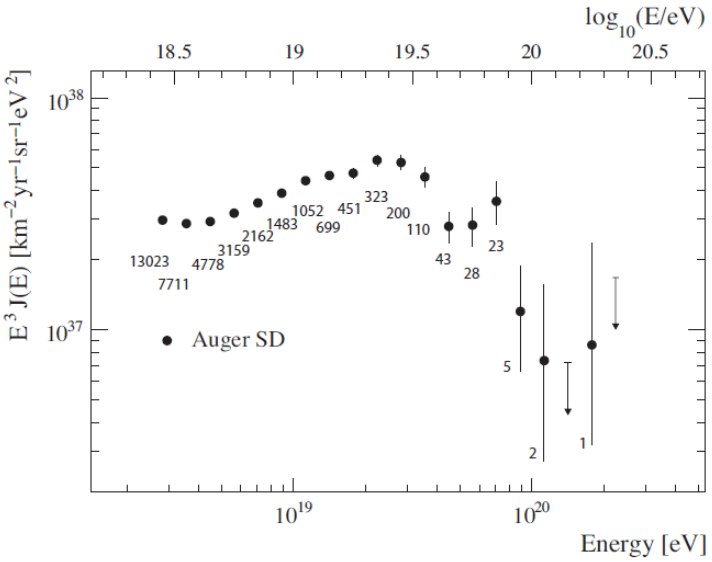
Στο επίπεδο του εδάφους οι διαφορές μεταξύ καταιγισμών που δημιουργούνται από πυρήνες σιδήρου και πρωτόνια, πέρα από τον ολικό αριθμό μιονίων, είναι μικρές. Οι ηλεκτρομαγνητικές πυκνότητες είναι παρόμοιες αλλά στις αποστάσεις από τον πυρήνα πάνω από 1km, στον καταιγισμό του σιδήρου τα μιόνια είναι σαφώς περισσότερα. Αν και ο απόλυτος αριθμός μιονίων για έναν καταιγισμό δεδομένης ενέργειας και τύπου πρωτογενούς σωματίου εξαρτάται από τις λεπτομέρειες του μοντέλου αδρονικής αλληλεπίδρασης, ο λόγος των πυκνοτήτων καταιγισμών σιδήρου και πρωτονίου εξαρτάται πολύ λιγότερο από το μοντέλο.

Η ποσότητα της ακτινοβολίας Cherenkov που παράγεται ανά μιόνιο είναι πολύ διαφορετική από την ποσότητα που παράγεται ανά ηλεκτρόνιο. Σε βάθος νερού 1,2 m ένα μεγάλο μέρος των μιονίων θα διαπεράσει τον όγκο του ανιχνευτή. Παρ' όλα αυτά η πλειοψηφία (≥ 90%) της ηλεκτρομαγνητικής ενέργειας θα απορροφηθεί. Επιπλέον η ακτινοβολία Cherenkov που παράγεται είναι μόνο ανάλογη με την ενεργειακή απώλεια για σωματίδια πλήρως σχετικιστικά, κάτι που δεν συμβαίνει για το μεγαλύτερο μέρος της διαδρομής στον ανιχνευτή. Για τους λόγους αυτούς η ερμηνεία των ενδείξεων για το φως που καταγράφεται από μια διάταξη ανιχνευτών Cherenkov πρέπει να βασίζεται σε σύγκριση με προσομοιώσεις καταιγισμών και ανιχνευτών για να υπολογίζεται τελειωτικά η ενέργεια του καταιγισμού. Σε μια πρώτη εκτίμηση, το σήμα πυκνότητας ενός ανιχνευτή Cherenkov είναι ανάλογο του αθροίσματος της αριθμητικής πυκνότητας μιονίων (πολλαπλασιασμένης με τη μέση απώλεια ενέργειας ανά μιόνιο) και την ηλεκτρομαγνητική ενεργειακή πυκνότητα.

Ο λόγος των μιονίων προς τα ηλεκτρομαγνητικά σωματίδια είναι χρήσιμος για τη μελέτη της αρχικής σύνθεσης του καταιγισμού. Ο προσδιορισμός του κλάσματος του σήματος λόγω των μιονίων έχει πρακτική εφαρμογή μόνο σε μεγάλες αποστάσεις από τον πυρήνα του καταιγισμού, όπου η πυκνότητα των ηλεκτρομαγνητικών σωματιδίων δεν είναι τόσο μεγάλη που να καταπνίγει τα σήματα λόγω μιονίων. Η δυνατότητα για ακριβή προσδιορισμό του κλάσματος των μιονίων ανάμεσα σε όλα τα σωματίδια που φτάνουν στον ανιχνευτή εξαρτάται επίσης από την αναλογικότητα της

απόκρισης του ανιχνευτή: το σήμα από κάθε σωματίδιο πρέπει να είναι ανάλογο της ακτινοβολίας Cherenkov που απελευθερώνει.

3.6 Ενεργειακό Φάσμα κοσμικών ακτίνων από το Παρατηρητήριο Pierre Auger



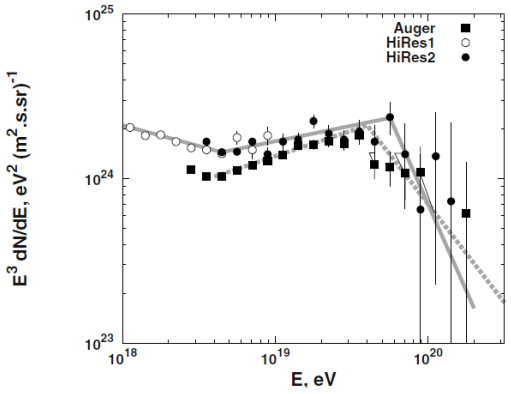
Σχήμα 26: Το ενεργειακό φάσμα του Auger από τον ανιχνευτή επιφανείας βαθμονομημένο με βάση τα δεδομένα του ανιχνευτή φθορισμού. Οι αριθμοί δίπλα στα σημεία αναφέρονται στο πλήθος των γεγονότων σε κάθε ενέργεια (Pierre Auger Collaboration, 2010).

Το Auger έχει αναφέρει τρία ενεργειακά φάσματα που προκύπτουν με διαφορετικό τρόπο: ένα από τη διάταξη ανιχνευτών επιφανείας που κανονικοποιείται με τις μετρήσεις των τηλεσκοπίων φθορισμού (σχήμα 26), ένα άλλο που αντιστοιχεί στις υβριδικές παρατηρήσεις και προέρχεται από καταιγισμούς που παρατηρούνται τόσο από τη διάταξη επιφανείας όσο και από τους ανιχνευτές φθορισμού και ένα τρίτο που προέρχεται από καταιγισμούς που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα με ζενιθιακές γωνίες πάνω από 60°. Και τα τρία φάσματα βρίσκονται σε συμφωνία μεταξύ τους μέσα στα όρια των στατιστικών αβεβαιοτήτων. Σε αυτή την ομάδα αποτελεσμάτων υπάρχουν μόνο τρία γεγονότα με ενέργεια πάνω από 10^{20} eV, έτσι υποστηρίζεται το συμπέρασμα του HiRes ότι το φάσμα των κοσμικών ακτίνων δεν συνεχίζεται πάνω από τα 10^{20} eV με τον ίδιο φασματικό δείκτη ~ $E^{-2,7}$

όπως βρήκε το πείραμα AGASA. Υπάρχει μια προφανής απότομη αλλαγή στο φάσμα που μπορεί να σχετίζεται με το όριο GZK.

Υπάρχουν καλοί λόγοι για να θεωρηθούν αξιόπιστα τα φάσματα που προκύπτουν από τις μετρήσεις του Auger. Η ανάλυση περιλαμβάνει μόνο καταιγισμούς που πληρούν την προϋπόθεση ο ανιχνευτής με τη μεγαλύτερη ένδειξη να περιβάλλεται από έξι ενεργούς ανιχνευτές. Αυτή η απαίτηση εγγυάται επίσης ότι θα υπάρχουν αρκετά στοιχεία για τη σωστή ανάλυση του καταιγισμού. Μια άλλη προϋπόθεση είναι ο πυρήνας του καταιγισμού όπως προκύπτει από την ανάλυση των στοιχείων να βρίσκεται μέσα στην περιοχή των 3000 km^2 που καταλαμβάνει η διάταξη. Για το λόγο αυτό η έκθεση του Auger είναι πολύ καλά γνωστή. Μόνο γεγονότα με υπολογισμένη ενέργεια πάνω από $3 \cdot 10^{18}$ eV όπου η απόδοση είναι 100% περιλαμβάνονται στην ανάλυση. Η αβεβαιότητα στην εκτίμηση της ενέργειας αναφέρεται ότι είναι 22% και οφείλεται κυρίως στην απόδοση του ανιχνευτή φθορισμού.

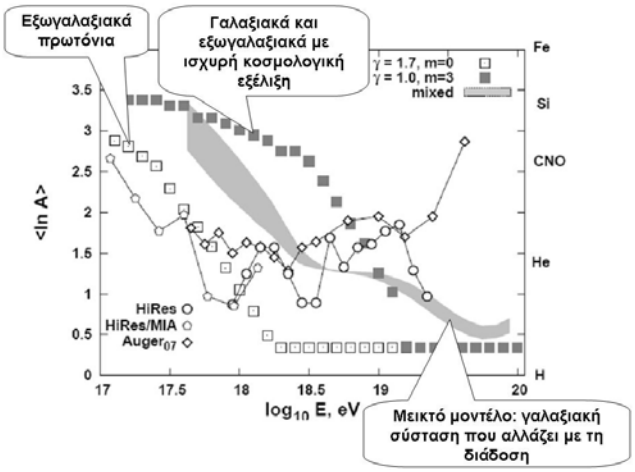
Ο αριθμός των γεγονότων πάνω από 10^{20} eV είναι ένα από τα βασικότερα σημεία που διαφοροποιούν τα αποτελέσματα των πειραμάτων. Έντεκα από τα συνολικά δεκαοχτώ γεγονότα σε αυτές τις ενέργειες προέρχονται από το AGASA. Χρησιμοποιώντας την ολική έκθεση 1460 km^2 yr sr προκύπτει ένα περίπου γεγονός ανά 130 km^2 yr sr, ένας αριθμός συνεπής με το ρυθμό από τη νέα ανάλυση κεκλιμένων καταιγισμών του Haverah Park με δύο γεγονότα σε 280 km^2 yr sr. Από την άλλη πλευρά το HiRes I με έκθεση που εκτιμάται στα 2200 km^2 yr sr για γεγονότα πάνω από 10^{20} eV έχει καταγράψει ένα μόνο γεγονός πάνω από 10^{20} eV. Το ίδιο και το Fly's Eye σε monocular mode με έκθεση 870 km^2 yr sr. Το Auger που το 2009 ανακοίνωσε έκθεση 12790 km^2 yr sr θα έπρεπε να έχει καταγράψει 98 γεγονότα, ενώ στην πραγματικότητα έχουν καταγραφεί μόλις τρία. Αν οι υπολογισμοί ενέργειας του Auger είναι σωστοί, το πείραμα θα καταγράψει όχι περισσότερα από 20 γεγονότα πάνω από 10^{20} eV ανά 1000 km^2 sr century.



Σχήμα 27: Το φάσμα των κοσμικών ακτίνων υπερυψηλών ενεργειών από το HiRes και το Auger. (Stanev, 2010).

3.7 Σύνθεση UHECR από το Auger

Το Auger παρέχει στοιχεία για το μέσο βάθος του μεγίστου του καταιγισμού (X_{max}) σαν συνάρτηση της ενέργειας του καταιγισμού. Το μέσο X_{max} είναι το μέτρο της χημικής σύστασης των κοσμικών ακτίνων που μπορεί να προέλθει από τους ανιχνευτές φθορισμού. Τα υβριδικά γεγονότα περιλαμβάνονται σ' αυτή την ομάδα δεδομένων καθώς ακόμα και ένας ανιχνευτής στο έδαφος που ενεργοποιείται ταυτόχρονα με την ενεργοποίηση του ανιχνευτή φθορισμού, βελτιώνει θεαματικά την ανακατασκευή του καταιγισμού. Το σχήμα 28 συγκρίνει τις μετρήσεις των HiRes, HiRes Prototype/MIA και Auger που έχουν μετατραπεί σε <lnA> με τη χρήση του αδρονικού μοντέλου Sibyll 2.1.



Σχήμα 28: Τα δεδομένα των HiRes/MIA, HiRes και Auger συγκρινόμενα με τις προβλέψεις τριών μοντέλων επιτάχυνσης και διάδοσης UHECR (Stanev, 2007).

Οι δύο ομάδες τετραγώνων και η σκιασμένη περιοχή του σχήματος απεικονίζουν τις τιμές <lnA> που προέρχονται από τρεις τύπους μοντέλων: τα κενά τετράγωνα αντιστοιχούν στο μοντέλο των Berezinsky et al (2007), τα γεμάτα στο μοντέλο των Bahcall & Waxman (2003) και η σκιασμένη περιοχή στο μοντέλο μεικτής αρχικής σύνθεσης.

Το μοντέλο των Berezinsky et al αναφέρει ότι όλες οι κοσμικές ακτίνες πάνω από 10^{18} eV είναι εξωγαλαξιακής προέλευσης και πρόκειται κυρίως για πρωτόνια. Το φάσμα επιτάχυνσης είναι απότομο με κλίση 1,7. Το βύθισμα οφείλεται σε απώλειες λόγω δίδυμης γένεσης. Το σχήμα του φάσματος μετά το βύθισμα καθορίζεται από τη μετάβαση σε καθαρά αδιαβατική απώλεια ενέργειας. Δεν υπάρχει ανάγκη για ισχυρή κοσμολογική εξέλιξη των πηγών των κοσμικών ακτίνων. Το μέγιστο ποσοστό He και βαρύτερων πυρήνων είναι περίπου 15%.

Οι Bahcall & Waxman υποθέτουν ότι το βύθισμα βρίσκεται στο σημείο όπου η επίπεδη ροή εξωγαλαξιακών UHECR (γ = 1) διασταυρώνεται με τη ροή των γαλαξιακών ακτίνων. Τα μοντέλα επίπεδου φάσματος επιτάχυνσης απαιτούν ισχυρή κοσμολογική εξέλιξη για να προσαρμοστούν στα πειραματικά δεδομένα. Στο μοντέλο των Berezinsky et al δεν απαιτείται η ύπαρξη γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων με ενέργεια πάνω από 10^{18} eV, ενώ στα άλλα μοντέλα ο Γαλαξίας μας πρέπει να επιταχύνει σωματίδια σε ενέργειες μεγαλύτερες κατά μια τάξη μεγέθους.

Το μοντέλο μεικτής σύστασης των UHECR θεωρεί ότι τα σωματίδια αφήνουν τις πηγές τους με σύσταση παρόμοια με αυτή των γαλαξιακών κοσμικών ακτίνων ενέργειας της τάξης των GeV. Η σύσταση αλλάξει κατά τη διάδοση και πάνω από τα $10^{19,5}$ eV γίνεται πολύ ελαφρά. Το φάσμα εισόδου στην ατμόσφαιρα είναι σχετικά επίπεδο με γ = 1,2 - 1,3. Μια και το φάσμα στη Γη εξαρτάται τόσο από την πρωταρχική σύνθεση όσο και από το φάσμα επιτάχυνσης, η προσαρμογή στις παρατηρήσεις μπορεί να γίνει με πολλούς τρόπους. Τα παρατηρησιακά δεδομένα που υπάρχουν μέχρι αυτή τη στιγμή δεν φαίνεται να υποστηρίζουν κανένα από τα προτεινόμενα μοντέλα (Stanev, 2007).

Υπάρχει ωστόσο και ένα πρόβλημα στην κατανόηση της εξέλιξης του καταιγισμού μέσα στην ατμόσφαιρα. Αν τα δεδομένα του Auger αναλύονταν με τη χρήση των υπαρχουσών προσομοιώσεων καταιγισμών χωρίς

κανονικοποίηση με τους ανιχνευτές φθορισμού, η εκτίμηση της ενέργειας ανεβαίνει κατά 20 - 25% και η σύνθεση εμφανίζεται βαρύτερη. Το μόνο μοντέλο αδρονικής αλληλεπίδρασης που προβλέπει παρόμοιο X_{max} και επιφανειακή πυκνότητα μιονίων είναι το EPOS (Pierog, 2009) που δεν έχει μελετηθεί ακόμα ικανοποιητικά. Οι διαφορές στην εκτίμηση ενέργειας από τον ανιχνευτή επιφανείας και τους ανιχνευτές φθορισμού του Auger είναι παρόμοια με τις τρέχουσες διαφορές ανάμεσα στο φάσμα του AGASA και του HiRes αφότου η εκτίμηση ενέργειας του AGASA μειώθηκε κατά 10 - 15% με τη χρήση του σύγχρονου μοντέλου αδρονικής αλληλεπίδρασης.

3.8 Εντοπισμός Πηγών από το Auger

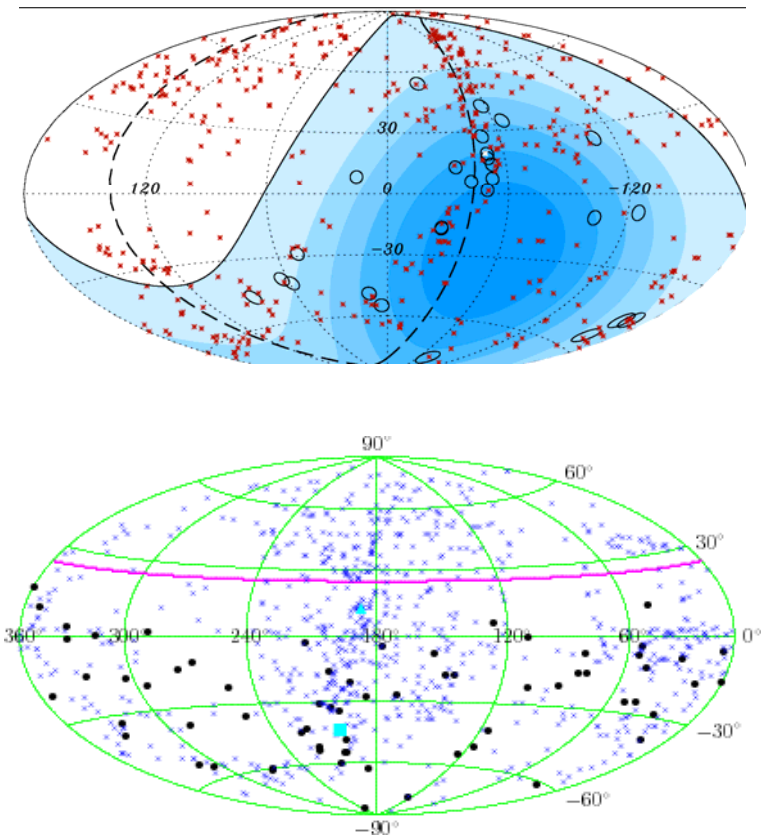
Η αστρονομία των κοσμικών ακτίνων υπερυψηλών ενεργειών δημιουργείται ουσιαστικά από την απάντηση στο ερώτημα που βρίσκονται οι πηγές που επιταχύνουν σωματίδια σε τόσο μεγάλες ενέργειες. Το πείραμα AGASA παρατήρησε το 1999 κάποια ομαδοποίηση των 47 υψηλότερης ενέργειας γεγονότων με ενέργεια πάνω από $4 \cdot 10^{19}$ eV σε τρείς ομάδες των δύο και μια ομάδα των τριών γεγονότων που φτάνουν από παρόμοιες διευθύνσεις. Παρ' ότι δεν υπήρχε κάποια προφανής σύνδεση των ομάδων αυτών με μια πιθανή αστρονομική πηγή, κοντά σε κάποιες από αυτές τις ομάδες υπάρχουν ένας AGN και δύο συγκρουόμενοι γαλαξίες. Το 2000 έγινε μια κοινή ανάλυση 92 γεγονότων από το AGASA, το Haverah Park, το Yakutsk και το Volcano Ranch Array. Αυτή η ανάλυση έδωσε ομαδοποίηση σε έξι ομάδες των δύο και δύο ομάδες των τριών. Το HiRes δεν παρατήρησε τέτοια ομαδοποίηση.

Στις 8 Νοεμβρίου 2007 ανακοινώθηκε από τους επιστήμονες του Παρατηρητηρίου Auger ότι οι πηγές των υψηλότερης ενέργειας σωματιδίων που έχουν ανιχνευθεί δεν κατανέμονται ομοιόμορφα στον ουρανό (Pierre Auger Collaboration, Science, 2007). Στο άρθρο αυτό γίνεται η συσχέτιση των διευθύνσεων άφιξης των 27 γεγονότων με την υψηλότερη ενέργεια (πάνω από $5{,}7 \cdot 10^{19}$ eV) με AGN με redshift μικρότερο από 0,018 από τους καταλόγους Vèron-Cetty και Vèron (σχήμα 29). Δεκαεννιά από τα 27 γεγονότα

προέρχονται από διευθύνσεις λιγότερο από 3,1° από κάποιον AGN ενώ μόνο 5 συμπτώσεις αναμένονται από ισοτροπική κατανομή των διευθύνσεων άφιξης. Πέντε από τα γεγονότα που δεν σχετίζονται με AGN προέρχονται από γαλαξιακό πλάτος λιγότερο από 12° οπότε η μη σύμπτωση δικαιολογείται από τη μεγαλύτερη γωνία σκέδασης των κοσμικών ακτίνων στο ισχυρό μαγνητικό πεδίο του γαλαξιακού επιπέδου.

Η ομάδα του Auger δεν ισχυρίστηκε ότι οι συσχετιζόμενοι AGN είναι όντως πηγές των γεγονότων υψηλότερης ενέργειας. Το κύριο στοιχείο που αναδεικνύεται είναι η έντονη ανισοτροπία και η συσχέτιση με αστροφυσικά αντικείμενα που μπορεί να έχουν την ίδια δομή μεγάλης κλίμακας με τις πραγματικές πηγές.

Από το 2007 έως το 2009 η έκθεση του Auger (για ανάλυση διευθύνσεων άφιξης) αυξήθηκε κατά 91,7% από 8.890 σε 17.040 km^2 sr yr. Ο αριθμός των γεγονότων υπερυψηλής ενέργειας (πάνω από 57 EeV) αυξήθηκε από 27 σε 58 γεγονότα. 26 από τα γεγονότα αυτά εξακολουθούν να συσχετίζονται με τους AGN του καταλόγου VC. Το αποτέλεσμα αυτό μειώνει το λόγο συσχέτισης από 0,704 σε 0,448 και θεωρήθηκε από τους επιστήμονες του Auger απογοητευτικό αν και δεν έρχεται σε αντίθεση με το προηγούμενο.



Σχήμα 29: Η εικόνα που έδωσε το Auger για την προέλευση των μεγαλύτερων γεγονότων το 2007 (επάνω) και το 2010 (κάτω). Στην πρώτη περίπτωση η ουράνια σφαίρα παρουσιάζεται σε γαλαξιακές συντεταγμένες και με κύκλους σημειώνονται τα σημεία προέλευσης των 27 γεγονότων με την υψηλότερη ενέργεια (πάνω από 57 x 10^{18} eV). Με κόκκινο αστερίσκο σημειώνονται οι θέσεις 472 AGN ενώ με μπλε χρώμα οι περιοχές που καλύπτει το πεδίο του Auger. Στη δεύτερη περίπτωση Η ουράνια σφαίρα παρουσιάζεται σε ισημερινές συντεταγμένες και η γραμμή αποτελεί το όριο του πεδίου παρατήρησης του Auger. Με μαύρες τελείες σημειώνονται τα γεγονότα με ενέργεια E ≥ 55 EeV που έδωσε το Auger το 2010. με μπλε σταυρό σημειώνονται οι AGN με απόσταση d≤100Mpc. Το γαλάζιο τετράγωνο υποδεικνύει τη θέση του Centaurus A και το γαλάζιο τρίγωνο τη θέση του Messier 87 (γιγαντιαίοι ραδιογαλαξίες).

3.9 Προσομοιώσεις Monte Carlo

Οι αλληλεπιδράσεις σωματίων που οδηγούν την εξέλιξη των εκτεταμένων ατμοσφαιρικών καταιγισμών προκύπτουν σε ενέργειες αρκετές τάξεις μεγέθους μεγαλύτερες από αυτές που μελετώνται στους γήινους επιταχυντές σωματιδίων. Οι ιδιότητες του πρωτογενούς σωματιδίου κοσμικών ακτίνων πρέπει να εξαχθούν από τα παρατηρούμενα χαρακτηριστικά των δευτερογενών σωματιδίων και η εξάρτηση των παρατηρησιακών δεδομένων του καταιγισμού από τη φύση του πρωτογενούς σωματιδίου μπορεί στις περισσότερες περιπτώσεις να βρεθεί μόνο μέσα από τη μελέτη μοντέλων

προσομοίωσης των αλληλεπιδράσεων των σωματίων. Οι σύνθετες αλληλεπιδράσεις και οι τεράστιοι αριθμοί δευτερογενών σωματιδίων που εμφανίζονται στον καταιγισμό αποκλείουν απλή αναλυτική προσομοίωση και έτσι είναι απαραίτητες οι τεχνικές Monte Carlo για να μοντελοποιήσουν τις αλληλεπιδράσεις σωματιδίων και το πέρασμά τους μέσα από την ατμόσφαιρα. Τα πακέτα μοντέλων προσομοίωσης προσπαθούν να περιγράψουν τις αλληλεπιδράσεις χρησιμοποιώντας είτε υπολογισμούς που βασίζονται στην τρέχουσα θεωρία είτε φαινομενολογική παραμετρικοποίηση συντονισμένη με τα πειραματικά δεδομένα είτε συχνά ένα μείγμα και των δύο.

Η μέθοδος Monte Carlo περιλαμβάνει τη δημιουργία χωρικών συντεταγμένων και ταχυτήτων των διαφόρων σωματιδίων που παράγονται στις αλληλεπιδράσεις με βάση το αποδεκτό μοντέλο αλληλεπιδράσεων. Στο μοντέλο αυτό προσδιορίζονται η ενεργός διατομή για κάθε τύπο σωματιδίου, η ενεργειακή εξάρτηση της μέσης τιμής της ανελαστικότητας και η κατανομή της στις αλληλεπιδράσεις διαφόρων τύπων σωματιδίων, η ενεργειακή εξάρτηση των μέσων τιμών της πολλαπλότητας των διαφόρων σωματιδίων που παράγονται στις διάφορες αλληλεπιδράσεις και η κατανομή τους καθώς και διάφορα άλλα χαρακτηριστικά όπως η παραγωγή βαρέων πυρήνων κλπ.

Ο αλγόριθμος ενός τυπικού προγράμματος Monte Carlo αποτελείται από δύο μέρη: τη δημιουργία των ξεχωριστών αλληλεπιδράσεων και των διαφόρων συνεισφορών των παραγόμενων σωματιδίων όπως ο τύπος, η ενέργεια, η ορμή κλπ και τη διασπορά των σωματιδίων αυτών προς τα κάτω μέσα στην ατμόσφαιρα μέσω αλληλεπίδρασης ή διάσπασης.

Οι αδρονικές αλληλεπιδράσεις που προκύπτουν σε έναν ατμοσφαιρικό καταιγισμό δημιουργούν τη μεγαλύτερη πηγή αβεβαιότητας στα σημερινά μοντέλα. Παρ' όλα αυτά η συντριπτική πλειοψηφία των αλληλεπιδράσεων είναι «μαλακές» αλληλεπιδράσεις που παράγουν σωματίδια με χαμηλή εγκάρσια ορμή και δεν παρατηρούνται εύκολα στα γήινα πειράματα. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις είναι σημαντικές στους EAS καθώς τα σωματίδια μπορεί να δραπετεύσουν την περιοχή αλληλεπίδρασης με μικρή εκτροπή, κουβαλώντας ένα μεγάλο μέρος της ενέργειάς τους βαθιά στην ατμόσφαιρα και οδηγώντας σε εξέλιξη του καταιγισμού. Η περιγραφή αυτών των αλληλεπιδράσεων βασίζεται στην επέκταση των δεδομένων επιταχυντών σε πολύ μεγαλύτερες ενέργειες και σε θεωρητικές εικασίες για το πώς μπορεί να εξελίσσονται οι

αλληλεπιδράσεις με την ενέργεια. Ιδιαίτερης σημασίας στις αδρονικές αλληλεπιδράσεις είναι οι ανελαστικές ενεργές διατομές των σωματιδίων και η ανελαστικότητά τους – το μέρος της διαθέσιμη ενέργειας που μεταφέρεται στα δευτερογενή σωμάτια κατά τη διάρκεια της αλληλεπίδρασης. Μια μικρότερη ενεργός διατομή ή μεγαλύτερη ανελαστικότητα θα οδηγήσουν σε «μακρύτερους» καταιγισμούς με μεγαλύτερο βάθος μεγίστου X_{max}.

Δύο από τα πιο χρησιμοποιούμενα μοντέλα αλληλεπίδρασης υψηλών ενεργειών είναι τα QGSJET και SIBYLL. Η επιλογή του ποιό μοντέλο θα χρησιμοποιηθεί μπορεί να εισάγει μεγάλες συστηματικές αβεβαιότητες στο τελικό αποτέλεσμα λόγω διαφορετικών προβλέψεων, ειδικά στην ενεργό διατομή, την ανελαστικότητα και την πολλαπλότητα των αδρονικών αλληλεπιδράσεων. Οι ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις θεωρούνται γενικά καλά κατανοητές και μπορούν να υπολογιστούν με μεγάλη ακρίβεια από τη κβαντοηλεκτροδυναμική θεωρία (QED).

Δύο πακέτα είναι αυτή τη στιγμή διαθέσιμα για την προσομοίωση εκτεταμένων ατμοσφαιρικών καταιγισμών: το CORSIKA και το AIRES. Και τα δύο πακέτα ακολουθούν τα σωματίδια στην ατμόσφαιρα υπολογίζοντας τις διασπάσεις, την ενεργειακή απώλεια, τις ανακλάσεις και την αλληλεπίδραση με άλλα σωματίδια και το μαγνητικό πεδίο της Γης, παράγοντας τελικά έναν πίνακα με όλα τα σωματίδια που φτάνουν στο έδαφος. Στατιστικό thinning χρησιμοποιείται και από τα δύο πακέτα για να μειωθεί δραστικά ο χρόνος προσομοίωσης και ο χώρος αποθήκευσης που απαιτείται για να διατηρηθούν πληροφορίες για τον τεράστιο αριθμό σωματιδίων που παράγεται στους ατμοσφαιρικούς καταιγισμούς. Στη διαδικασία αυτή μόνο ένα μικρό αλλά αντιπροσωπευτικό δείγμα των σωματιδίων που παράγονται καταγράφεται σαφώς ενώ τα υπόλοιπα μένουν στην άκρη. Η πιθανότητα ένα σωματίδιο να καταγραφεί ή να παραγκωνιστεί εξαρτάται από την ενέργειά του και τα σωματίδια που παρακολουθούνται είναι σταθμισμένα ώστε να αντιπροσωπεύουν και αυτά που δεν υπολογίζονται. Συγκρίσεις με καταιγισμούς που δεν έχουν υποστεί thinning δείχνουν ότι η διαδικασία αυτή δεν αλλάζει τις μέσες τιμές των ιδιοτήτων της προσομοίωσης (όπως η πυκνότητα σωματιδίων στο έδαφος) αλλά αυξάνει τεχνητά τις διακυμάνσεις τους.

3.10 Το πρόγραμμα AIRES

Το όνομα AIRES (AIR-shower Extended Simulations) αφορά ένα σύνολο προγραμμάτων και υπορρουτινών που χρησιμοποιούνται για την προσομοίωση σωματιδιακών καταιγισμών που προκύπτουν μετά την είσοδο υψηλής ενέργειας κοσμικών ακτίνων στην ατμόσφαιρα της Γης και τον χειρισμό όλων των σχετικών εξαγόμενων δεδομένων.

Το πακέτο δημιουργήθηκε από τον S. J. Sciutto του Πανεπιστημίου της La Plata στην Αργεντινή και στις προσομοιώσεις που έχουν πραγματοποιηθεί για την παρούσα εργασία έχει χρησιμοποιηθεί η έκδοση 2.8.2b.

Το AIRES παρέχει στοιχεία για την πλήρη χωρική και χρονική ανάπτυξη του καταιγισμού σε ένα ρεαλιστικό περιβάλλον όπου τα χαρακτηριστικά της ατμόσφαιρας, το γεωμαγνητικό πεδίο και η καμπυλότητα της Γης λαμβάνονται επαρκώς υπ' όψιν. Όταν ο αριθμός σωματιδίων στον καταιγισμό είναι υπερβολικά μεγάλος χρησιμοποιείται η στατιστική διαδικασία λήψης δείγματος που ονομάζεται thinning. Οι αλγόριθμοι thinning που χρησιμοποιούνται στο AIRES είναι unbiased, δηλαδή η στατιστική δειγματοληψία δεν αλλάζει ποτέ τις μέσες τιμές των παρατηρούμενων μεγεθών.

Τα σωματίδια που λαμβάνονται υπ' όψιν στις προσομοιώσεις του AIRES είναι φωτόνια ακτίνων γ, ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια, μιόνια, πιόνια, καόνια, η μεσόνια, λ βαρυόνια, νουκλεόνια, αντινουκλεόνια και πυρήνες μέχρι Z = 36. Τα νετρίνα ηλεκτρονίων και μιονίων που παράγονται σε συγκεκριμένες διαδικασίες καταμετρώνται για τον υπολογισμό της ενέργειας αλλά δεν διαδίδονται. Το πρωτογενές σωματίδιο μπορεί να είναι οποιοδήποτε από τα προαναφερθέντα με ενέργεια που κυμαίνεται από λιγότερο από 1 GeV μέχρι περισσότερο από 1 ZeV (10^{21} eV). Είναι ακόμα δυνατόν να προσομοιωθούν καταιγισμοί που δημιουργούνται από ειδικά πρωτογενή σωματίδια αν δοθεί από τον χρήστη ένας ειδικός συντελεστής χειρισμού της πρώτης αλληλεπίδρασης του πρωτογενούς σωματίου.

Ανάμεσα σε όλες τις φυσικές διεργασίες στις οποίες υπόκεινται τα σωματίδια του καταιγισμού, οι πιο σημαντικές από την άποψη των

πιθανοτήτων είναι αυτές που λαμβάνονται υπ' όψιν στις προσομοιώσεις. Αυτές είναι:

i. Οι ηλεκτροδυναμικές διαδικασίες όπως η δίδυμη γένεση και η εξαΰλωση ηλεκτρονίου - ποζιτρονίου, η ακτινοβολία πέδης για ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια και μιόνια, η μιονική δίδυμη γένεση, το φαινόμενο Compton, το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο και η διηλεκτρική καταστολή.
ii. Αδρονικές διαδικασίες: ανελαστικές συγκρούσεις αδρονίου - πυρήνα και φωτονίου - πυρήνα που κάποιες φορές προσομοιώνονται με τη χρήση εξωτερικού πακέτου που πραγματοποιεί ένα δεδομένο μοντέλο αδρονικής αλληλεπίδρασης όπως τα μοντέλα SIBYLL και QGSJET, φωτοπυρηνικές αντιδράσεις, ελαστική και ανελαστική σχάση πυρήνα.
iii. Διασπάσεις ασταθών σωματιδίων όπως τα μιόνια και τα πιόνια.
iv. Διάδοση φορτισμένων σωματιδίων: ενεργειακές απώλειες στο μέσο διάδοσης (ιονισμός), πολλαπλή σκέδαση Coulomb και γεωμαγνητικές εκτροπές.

Το AIRES χρησιμοποιεί τη γλώσσα προγραμματισμού Input Directive Language (IDL), μια ομάδα απλών εντολών που επιτρέπουν την εισαγωγή των παραμέτρων της προσομοίωσης. Τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων είναι δυνατόν να εισαχθούν στη συνέχεια σε άλλα προγράμματα όπως το GEANT4 για την πραγματοποίηση προσομοίωσης της απόκρισης συγκεκριμένου ανιχνευτή στον καταιγισμό (Agostinelli et al., 2003).

3.11 Το πρόγραμμα CORSIKA

Το CORSIKA (Cosmic Ray Simulations for KAscade) είναι ένα ακόμα πρόγραμμα προσομοιώσεων Monte Carlo που αναπτύχθηκε για το πείραμα KASCADE για τη μελέτη κοσμικών σωματιδίων με ενέργειες από $3 \cdot 10^{14}$ eV μέχρι 10^{18} eV (μετά την αναβάθμισή του σε KASCADE – Grande).

Ένα σοβαρό πρόβλημα του CORSIKA, του AIRES και κάθε προγράμματος προσομοίωσης ατμοσφαιρικών καταιγισμών υπερυψηλών ενεργειών είναι η εξεύρεση του κατάλληλου μοντέλου αδρονικών αλληλεπιδράσεων για τις ενέργειες αυτές. Σε αυτές τις περιοχές δεν υπάρχουν

παρατηρήσεις, και τα δεδομένα των πειραμάτων επιταχυντών δεν καλύπτουν ενέργειες αυτών των τάξεων μεγέθους. Για το λόγο αυτό επεκτείνονται τα αποτελέσματα των παρατηρήσεων σε χαμηλές ενέργειες, με τους κινδύνους που κρύβει μια τέτοια παραδοχή.

Το CORSIKA, που είναι ένα ολοκληρωμένο πακέτο ρουτίνων FORTRAN και δεν χρησιμοποιεί εξωτερικές βιβλιοθήκες για την πραγματοποίηση της προσομοίωσης, μπορεί να διαχειριστεί τις αλληλεπιδράσεις υψηλών ενεργειών των αδρονίων μέσω των μοντέλων DPMJET, HDPM, QGSJET, SIBYLL, VENUS, NEXUS και EPOS. Οι χαμηλής ενέργειας αδρονικές αλληλεπιδράσεις προσομοιώνονται με τη χρήση των κωδίκων FLUKA, GHEISHA και UrQMD. Οι αλληλεπιδράσεις των ηλεκτρομαγνητικών σωματιδίων παρακολουθούνται μέσω του κώδικα EGS4 που ακολουθεί κάθε σωματίδιο και τις αντιδράσεις του ξεχωριστά ή μέσω της αναλυτικής σχέσης NKG που αποδίδει ηλεκτρονικές πυκνότητες σε συγκεκριμένα σημεία και ολικούς αριθμούς ηλεκτρονίων σε διάφορα επίπεδα παρατήρησης. Το πρόγραμμα μπορεί ακόμα να δημιουργήσει ακτινοβολία Cherenkov στην ατμόσφαιρα και να χειριστεί νετρίνα και αντινετρίνα μιονίου και ηλεκτρονίου τόσο στην εξέλιξη του καταιγισμού όσο και σαν πρωτογενή σωματίδια.

Για τον περιορισμό του χρόνου που απαιτείται για μια προσομοίωση και του μεγέθους των αρχείων που εξάγονται, το CORSIKA χρησιμοποιεί όπως και το AIRES τη διαδικασία thinning. Στην περίπτωση αυτή παρακολουθείται κατά την εξέλιξη του καταιγισμού μόνο ένα μέρος των παραγόμενων σωματιδίων.

Σκοπός του προγράμματος πέρα από την πρόβλεψη σωστών μέσων τιμών των παρατηρούμενων μεγεθών είναι και η ακριβής πρόβλεψη των διακυμάνσεων γύρω από τη μέση τιμή που αποτελούν επίσης ένα πολύτιμο εργαλείο ανάλυσης. Για το λόγο αυτό περιλαμβάνονται σε κάθε βήμα της προσομοίωσης όλες οι γνωστές φυσικές διεργασίες που μπορεί να επηρεάζουν αξιοσημείωτα τις παρατηρούμενες ποσότητες, τόσο κατά τη διέλευση ενός σωματιδίου από την ατμόσφαιρα όσο και κατά την αλληλεπίδραση με τα μόρια της ατμόσφαιρας.

Το πρόγραμμα αναγνωρίζει 50 στοιχειώδη σωματίδια. Μεταξύ αυτών φωτόνια ακτίνων γ, ηλεκτρόνια, ποζιτρόνια, μιόνια, πιόνια, καόνια, η μεσόνια,

λ βαρυόνια, νουκλεόνια, αντινουκλεόνια και πυρήνες μέχρι A = 56. Επιπλέον μπορεί να χειριστεί νετρίνα και αντινετρίνα μιονίου και ηλεκτρονίου που προκύπτουν από διάσπαση πιονίων, καονίων και μιονίων. Προσδιορίζονται στο πρόγραμμα από τον κωδικό σωματιδίου, τον παράγοντα Lorentz, τη ζενιθιακή και αζιμουθιακή γωνία της τροχιάς τους, το χρόνο που έχει περάσει από την πρώτη αλληλεπίδραση και τις τρεις χωρικές συντεταγμένες x, y, z. Οι πυρήνες θεωρούνται πλήρως απογυμνωμένοι με το φορτίο τους να προσδιορίζεται από τον ατομικό αριθμό Z.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4: ΕΚΤΙΜΗΣΗ ΕΝΕΡΓΕΙΑΣ ΠΡΩΤΟΓΕΝΟΥΣ ΣΩΜΑΤΙΔΙΟΥ ΜΕΣΩ ΔΕΔΟΜΕΝΩΝ ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΥ ΑΝΙΧΝΕΥΤΗ

4.1 Εισαγωγή

Οι ανιχνευτικές διατάξεις των μεγάλων πειραμάτων ανίχνευσης των κοσμικών ακτίνων όπως το Παρατηρητήριο Pierre Auger καταγράφουν δεδομένα πυκνότητας σωματιδίων στην επιφάνεια του εδάφους και αριθμού σωματιδίων κατά μήκος της ανάπτυξης του καταιγισμού μέσα στην ατμόσφαιρα. Επιπλέον, καταγράφεται η χρονική εξέλιξη της ενεργοποίησης των ανιχνευτών. Με τη χρήση διαφόρων αλγορίθμων, από τα δεδομένα αυτά μπορούν να προκύψουν οι παράμετροι του καταιγισμού, όπως η ενέργεια και το είδος του πρωτογενούς σωματιδίου όπως και η γωνία με την οποία αυτό εισέρχεται στην ατμόσφαιρα για να δημιουργήσει τον καταιγισμό. Το Auger, όντας υβριδικό πείραμα, συνδυάζει τις δύο τεχνικές ανίχνευσης (ανιχνευτής επιφανείας και ανιχνευτής φθορισμού) για να πετύχει ακριβέστερες μετρήσεις (Hörandel, 2010).

Στην εργασία αυτή γίνεται μια προσπάθεια προσδιορισμού της ενέργειας του πρωτογενούς σωματιδίου με τη χρήση προσομοιώσεων Monte Carlo. Μέσω αυτών παράγεται ένας εμπειρικός τύπος που δίνει την ενέργεια του πρωτογενούς σωματιδίου σαν συνάρτηση της πυκνότητας σωματιδίων σε απόσταση 1000 μέτρων από το ίχνος του άξονα του καταιγισμού στην επιφάνεια του εδάφους. Η μέθοδος βασίζεται σε προσομοιώσεις της πλευρικής κατανομής του πειράματος Pierre Auger καθώς τα μόνα δεδομένα του πειράματος που είναι προσβάσιμα από το κοινό και με τα οποία μπορεί να γίνει μια σύγκριση είναι επιλεγμένα γεγονότα του ανιχνευτή επιφανείας.

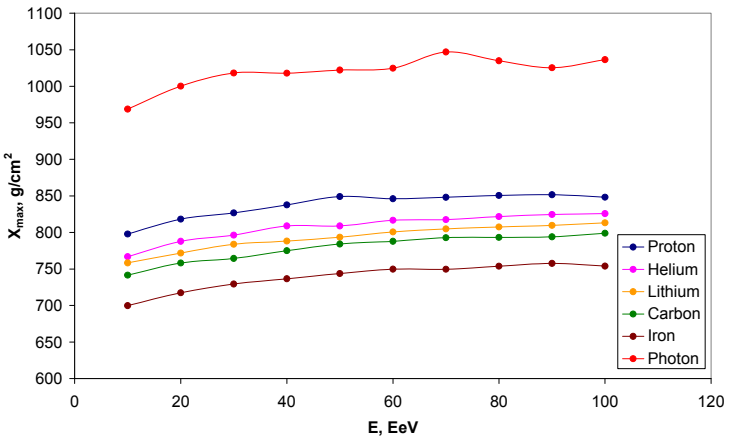
Για την εργασία αυτή πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις Monte Carlo με τη χρήση του προγράμματος AIRES (version 2.8.2b). Η γνωστή σύσταση της κοσμικής ακτινοβολίας υπερυψηλών ενεργειών είναι: 85% πρωτόνια, 5% He, 0,1% του L-group (Li, Be, B), 0.42% του M-group (C, N, O, F), 0,04% Fe και 1–2% ηλεκτρόνια, φωτόνια, νετρόνια. Έτσι έγιναν προσομοιώσεις για

πρωτόνια, πυρήνες ηλίου, λιθίου, άνθρακα και σιδήρου[1]. Οι προσομοιώσεις έχουν γίνει για την τοποθεσία του πειράματος Pierre Auger (site ElNihuil – Latitude 35,20° S, Longitude 69,20° W, Altitude 1400 m) με ατμοσφαιρικό βάθος επιφανείας 875,5 g/cm^2 , injection altitude 100 km (1,28 · 10^{-3} g/cm^2), γεωμαγνητικό πεδίο που υπολογίζεται μέσω του International Geomagnetic Reference Field (IGRF) για τη δεδομένη περιοχή και ημερομηνία. Το ατμοσφαιρικό μοντέλο είναι η Extended Linsley's standard atmosphere και το μοντέλο αδρονικής αλληλεπίδρασης το SIBYLL. Για κάθε διαφορετικό πρωτογενές, διαφορετικής αρχικής ενέργειας και ζενιθιακής γωνίας πραγματοποιήθηκαν 100 καταιγισμοί με thinning level 10^{-6}.

4.2 Διαμήκης ανάπτυξη καταιγισμού

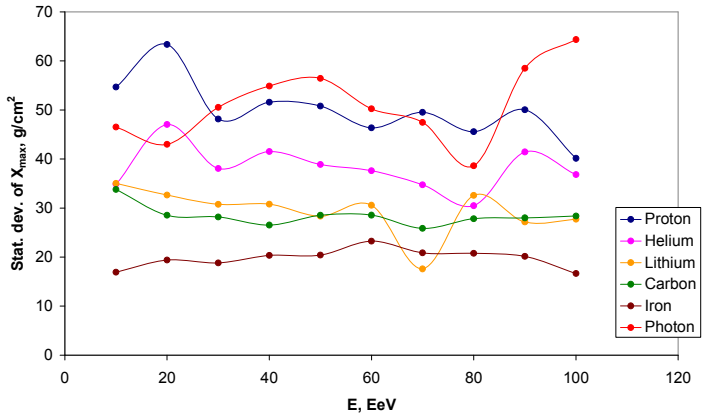
Λόγω των τυχαίων διακυμάνσεων του σημείου της πρώτης αλληλεπίδρασης του σωματιδίου με τους ατμοσφαιρικούς πυρήνες, δύο διαφορετικοί πυρήνες της ίδιας ενέργειας μπορεί να μην διακρίνονται μεταξύ τους. Έτσι, μεμονωμένοι καταιγισμοί δεν μπορούν να δώσουν στοιχεία για τη φύση του πρωτογενούς σωματιδίου. Από την άλλη πλευρά, μια στατιστική μελέτη μπορεί να αποκαλύψει την κατανομή των παραμέτρων που σχετίζονται με την ταχύτητα της ανάπτυξης του καταιγισμού όπως η παραγωγή μιονίων και το βάθος του μεγίστου $X_{max.}$

[1] Στο εξής όπου γίνεται αναφορά σε κάποιο στοιχείο, υπονοείται ο απογυμνωμένος από ηλεκτρόνια πυρήνας.



Σχήμα 30: Το βάθος του μέγιστου του καταιγισμού σαν συνάρτηση της ενέργειας του πρωτογενούς σωματιδίου για διαφορετικά πρωτογενή. Κάθε σημείο αναπαριστά τη μέση τιμή X_{max} 100 καταιγισμών. Η στατιστική διακύμανση κάθε σειράς φαίνεται στο σχήμα 31.

Το σχήμα 30 δείχνει το βάθος του μεγίστου του καταιγισμού X_{max} σαν συνάρτηση της πρωτογενούς ενέργειας για διαφορετικά πρωτογενή. Είναι ξεκάθαρο ότι το βάθος του μεγίστου εξαρτάται από τη φύση του πρωτογενούς. Βαρύτεροι πυρήνες αλληλεπιδρούν με τους πυρήνες της ατμόσφαιρας ψηλότερα εμφανίζοντας έτσι το μέγιστό τους σε μικρότερα ατμοσφαιρικά βάθη. Οι διακυμάνσεις στο X_{max} ελέγχονται από τις διακυμάνσεις στο σημείο της πρώτης αλληλεπίδρασης και άρα από τη μέση ελεύθερη διαδρομή των πρωτογενών μέσα στην ατμόσφαιρα. Οι διακυμάνσεις αυτές μειώνονται με την αύξηση της ενέργειας και της ατομικής μάζας, όπως φαίνεται στο σχήμα 31.



Σχήμα 31: Διακυμάνσεις του μεγίστου του καταιγισμού X_{max} σαν συνάρτηση της ενέργειας του πρωτογενούς για διαφορετικά πρωτογενή σωματίδια. Είναι ξεκάθαρο ότι για ελαφρύτερη σύνθεση η στατιστική διακύμανση για 100 καταιγισμούς είναι μεγαλύτερη.

4.3 Πλευρική ανάπτυξη καταιγισμού

Ο ανιχνευτής επιφανείας σε μεγάλες αποστάσεις από τον πυρήνα στο επίπεδο του εδάφους καταγράφει τα μιόνια νωρίτερα από τα e^+ / e^- (Pryke, 1997). Οι καταιγισμοί που δημιουργούνται από βαρύτερους πυρήνες έχουν περισσότερα μιόνια, οπότε χρησιμοποιώντας την shape parameter που ορίζεται σαν ο λόγος του “early signal” προς το “late signal” (Cronin, 2003) μπορεί να γίνει διάκριση μεταξύ διαφορετικών πρωτογενών. Η μέθοδος δεν δίνει τόσο καλά αποτελέσματα σε μεγάλες ζενιθιακές γωνίες, οπότε το ηλεκτρομαγνητικό περιεχόμενο του καταιγισμού μειώνεται.

Οι ανιχνευτές νερού Cherenkov της διάταξης επιφανείας δίνουν δεδομένα για τα φωτόνια Cherenkov που παράγονται όταν φορτισμένα σωματίδια διαπερνούν τη δεξαμενή. Ο αριθμός των φωτονίων Cherenkov που συλλέγονται από τους φωτοπολλαπλασιαστές είναι ανάλογος της ενέργειας που εναποτίθεται στη δεξαμενή. Το σήμα (μέση τιμή των σημάτων που παράγονται από τους τρεις φωτοπολλαπλασιαστές της κάθε δεξαμενής) (Roth, 2009) βαθμονομείται σε μονάδες VEM (Vertical Equilevant Muons). Η μονάδα VEM μετράει την ενέργεια που αποθέτει στον ανιχνευτή ένα μιόνιο που εισέρχεται κάθετα στο κέντρο του. Ισοδυναμεί με 240 MeV και για τους ανιχνευτές του AUGER που έχουν εμβαδόν 10 m^2 η αντιστοιχία προκύπτει 1 VEM = 0,1 particle/m^2 (Bauleo et al., 2001). Η ενέργεια αυτή παρ’ όλα αυτά προέρχεται τόσο από μιόνια όσο και από ηλεκτρόνια που διαπερνούν τη δεξαμενή (Barnhill et al., 2005).

4.3.1 Παράμετρος εκτίμησης ενέργειας του πρωτογενούς

Το 1971 ο Hillas (Hillas et al., 1971) θεώρησε πως η συνάρτηση πλευρικής κατανομής σε αποστάσεις από μερικές εκατοντάδες μέτρα μέχρι ένα χιλιόμετρο θα είναι ένας καλός δείκτης της αρχικής ενέργειας. Μέσω προσομοιώσεων Monte Carlo έχει δειχθεί ότι η πυκνότητα μακριά από τον πυρήνα είναι αρκετά σταθερή, ανάλογη της αρχικής ενέργειας και εξαρτάται πολύ λίγο από τη διαδικασία αδρονικής αλληλεπίδρασης και την αρχική σύσταση των πολύ υψηλής ενέργειας σωματιδίων κοσμικών ακτίνων

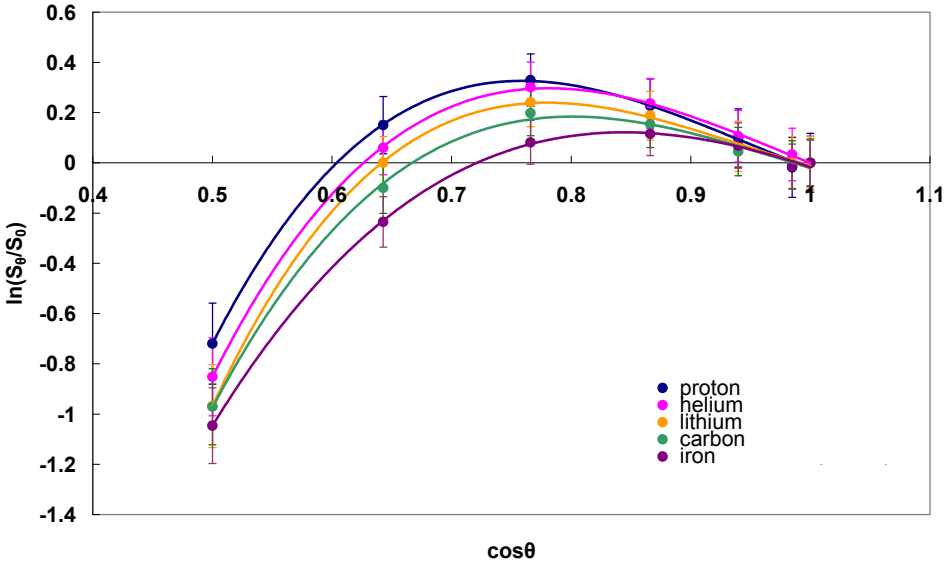
(UHECR). Αυτό συμβαίνει γιατί τα σωματίδια που βρίσκονται μακριά από τον πυρήνα παράγονται σε ένα αρχικό στάδιο του καταιγισμού και σκεδάζονται προς τα έξω μέσω της αλληλεπίδρασης Coulomb που είναι καλά κατανοητή.

Ο Hillas πρότεινε σαν μέτρο εκτίμησης της αρχικής ενέργειας την πυκνότητα σωματιδίων σε απόσταση 600 μέτρων από τον πυρήνα του καταιγισμού S(600) αναφερόμενος στο πείραμα του Haverah Park που χρησιμοποιούσε ανιχνευτές νερού Cherenkov. Για το Auger έχει προκύψει από προσομοιώσεις Monte Carlo ότι η απόσταση στην οποία πρέπει να γίνονται οι μετρήσεις είναι τα 1000 m από τον πυρήνα του καταιγισμού (Ridky, 2007). Εκεί η διακύμανση της πυκνότητας των σωματιδίων που καταγράφεται από τον ανιχνευτή ελαχιστοποιείται. Αυτή η απόσταση θα χρησιμοποιηθεί στην παρούσα εργασία σαν παράμετρος εκτίμησης της αρχικής ενέργειας.

4.3.2 Υπολογισμός της κατακόρυφης πυκνότητας S(1000)

Σύμφωνα με τα παραπάνω, η ποσότητα S(1000), δηλαδή το σήμα σε απόσταση 1000 m από το ίχνος του πυρήνα του καταιγισμού, χρησιμοποιείται σαν παράμετρος εκτίμησης της ενέργειας. Λόγω της εξασθένισης στην ατμόσφαιρα, η παράμετρος αυτή εξαρτάται από την ζενιθιακή γωνία. Ένας καταιγισμός που δημιουργείται από πρωτογενές σωματίδιο που εισέρχεται στην ατμόσφαιρα κατακόρυφα παράγει διαφορετικό σήμα από έναν επικλινή καταιγισμό που δημιουργείται από ένα σωματίδιο του ίδιου τύπου και της ίδιας ενέργειας.

Έτσι, το πρώτο βήμα για να χρησιμοποιηθεί η S(1000) για την εκτίμηση της ενέργειας είναι να βρεθεί η σχέση που διορθώνει το φαινόμενο της διαφοροποίησης λόγω της ζενιθιακής γωνίας. Για τον λόγο αυτό πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις καταιγισμών διαφόρων ζενιθιακών γωνιών με ενέργεια πρωτογενούς 100 EeV. Αναζητάμε τον τύπο που θα μετατρέπει το επικλινές σήμα $S_\theta(1000)$ στο αντίστοιχο κατακόρυφο σήμα $S_0(1000)$. Παριστάνουμε λοιπόν γραφικά το $\ln(S_\theta/S_0)$ σαν συνάρτηση του $\cos\theta$ (σχήμα 32) για τους διαφορετικούς τύπους πρωτογενών.



Σχήμα 32: Γραφική απεικόνιση του $\ln(S_\theta/S_0)$ συναρτήσει της γωνίας για καταιγισμούς διαφόρων ζενιθιακών γωνιών και πρωτογενών σωματιδίων με αρχική ενέργεια 100 EeV.

Οι γραμμές τάσης με την καλύτερη προσέγγιση είναι πολυωνυμικές τρίτου βαθμού, οπότε προκύπτουν τύποι της μορφής

$$\ln(S_\theta / S_0) = D_3 \cdot \cos^3\theta + D_2 \cdot \cos^2\theta + D_1 \cdot \cos\theta + D_0 \quad (1)$$

και επιλύοντας αυτή τη σχέση ως προς $S_0(1000)$ προκύπτει

$$S_0 = \frac{S_\theta}{\exp\{D_3 \cdot \cos^3\theta + D_2 \cdot \cos^2\theta + D_1 \cdot \cos\theta + D_0\}} \quad (2)$$

με παραμέτρους D_3, D_2, D_1 και D_0 που φαίνονται στον πίνακα 1 και σφάλμα:

$$\delta S_0 = [(\delta S_\theta)^2 + \rho_\theta^2 \cdot (\delta\theta)^2 \cdot [\cos^6\theta \cdot (\delta D_3)^2 + \cos^4\theta \cdot (\delta D_2)^2 + \cos^2\theta \cdot (\delta D_1)^2 + (\delta D_0)^2 + \sin^2\theta \cdot (3\cos^2\theta \cdot D_3 + 2\cos\theta \cdot D_2 + D_1)^2]^{1/2} \cdot \exp^{-1}\{D_3 \cdot \cos^3\theta + D_2 \cdot \cos^2\theta + D_1 \cdot \cos\theta + D_0\}$$

Πίνακας 1: Παράμετροι βέλτιστης προσαρμογής για την εξίσωση (2) και για διαφορετικά πρωτογενή σωματίδια.

Πρωτογενές σωματίδιο	D_3	D_2	D_1	D_0
πρωτόνιο	19,36 ± 1,10	-54,69 ± 3,05	49,55 ± 2,73	-14,24 ± 0,90
ήλιο	16,73 ± 1,13	-49,06 ± 3,08	46,02 ± 2,73	-13,69 ± 0,89
λίθιο	20,50 ± 1.58	-57,65 ± 4.19	52,51 ± 3,64	-15,38 ± 1,14
άνθρακας	15,26 ± 1,48	-44,87 ± 3,86	42,51 ± 3,31	-12,92 ± 1,03
σίδηρος	8,37 ± 1,14	-28,17 ± 3,08	29,67 ± 2,76	-9,89 ± 0,90

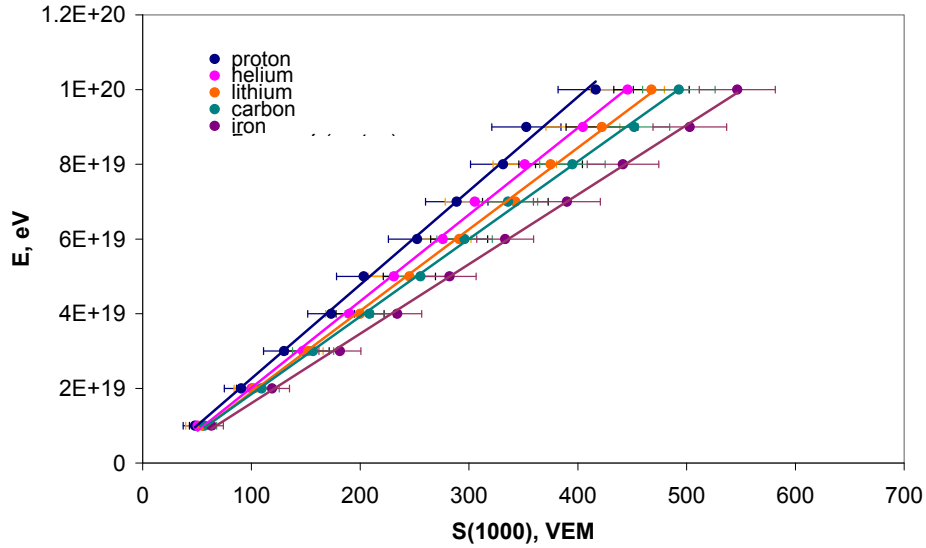
Χρησιμοποιώντας τις τιμές αυτές μπορούμε να υπολογίσουμε το σήμα $S_0(1000)$ χρησιμοποιώντας τις τιμές σήματος $S_\theta(1000)$ που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις (Πίνακας 2).

Πίνακας 2: Το σήμα σε απόσταση 1000 μέτρων από το ίχνος του άξονα του καταιγισμού για ζενιθιακή γωνία θ $S_\theta(1000)$ και το διορθωμένο σήμα για κατακόρυφο καταιγισμό $S_0(1000)$ για διαφορετικά πρωτογενή αρχικής ενέργειας 100 EeV.

θ(deg)	πρωτόνιο		ήλιο		λίθιο		άνθρακας		σίδηρος	
	S_θ (VEM)	S_0 (VEM)	S_θ (VEM)	S_0 (VEM)	S_θ (VEM)	S_0 (VEM)	S_θ (VEM)	S_0 (VEM)	S_θ (VEM)	S_0 (VEM)
0	416,50	424,91	445,80	445,8	467,70	472,87	492,90	502,86	546,60	555,69
10	409,00	406,08	461,00	447,68	468,40	464,05	489,00	487,95	538,90	535,38
20	459,90	419,01	495,60	441,33	499,60	463,07	515,60	482,04	585,60	548,79
30	522,80	416,35	564,80	445,78	564,40	471,05	574,90	492,97	613,40	545,11
40	579,00	418,20	603,10	448,78	594,90	469,12	601,00	505,27	593,00	550,37
50	483,90	415,30	473,20	443,28	468,00	465,96	446,00	483,84	432,20	544,13
60	202,81	416,87	190,27	446,11	177,65	468,28	186,70	494,.79	192,08	547,22

4.3.3 Υπολογισμός της ενέργειας του πρωτογενούς

Εφόσον έχει διορθωθεί η διαφοροποίηση λόγω της ζενιθιακής γωνίας μπορούμε τώρα να προχωρήσουμε στην εκτίμηση της ενέργειας μέσω του σήματος του ανιχνευτή επιφανείας. Για να εξάγουμε την αντίστοιχη σχέση παριστάνουμε γραφικά την ενέργεια του πρωτογενούς σωματιδίου συναρτήσει του σήματος του ανιχνευτή (σχήμα 33).



Σχήμα 33: Ενέργεια πρωτογενούς σωματιδίου σαν συνάρτηση του σήματος σε απόσταση 1000 m από τον πυρήνα του καταιγισμού για διαφορετικούς τύπους πρωτογενούς.

Στο σχήμα 33 φαίνεται ότι υπάρχει γραμμική εξάρτηση μεταξύ της αρχικής ενέργειας E και του σήματος S(1000) για κάθε πρωτογενές. Η ίδια συμπεριφορά επαναλαμβάνεται και στο αντίστοιχο διάγραμμα της αρχικής ενέργειας σαν συνάρτηση της πυκνότητας σωματιδίων σε απόσταση 1000 m από τον πυρήνα του καταιγισμού (ρ(1000)). Από τη γραμμική προσέγγιση των σημείων του διαγράμματος μπορεί να προκύψει ο εμπειρικός τύπος υπολογισμού της ενέργειας του πρωτογενούς σωματιδίου με δεδομένο το σήμα που καταγράφουν οι ανιχνευτές επιφανείας.

Προκύπτει λοιπόν μια σχέση της μορφής

$$E = A \cdot S(1000) - B \quad (3)$$

με παραμέτρους A και B για τα διαφορετικά πρωτογενή που φαίνονται στον Πίνακα 3.

Το σφάλμα στον υπολογισμό της ενέργειας δίνεται από τη σχέση:

$$\delta E = \sqrt{S^2(1000) \cdot \delta^2 \mathrm{A} + \mathrm{A}^2 \delta^2 [S(1000)] + \delta^2 \mathrm{B}}$$

όπου δA, δB και δ[S(1000)] είναι τα σφάλματα στον υπολογισμό των A, B και S(1000). Το σφάλμα στον υπολογισμό του S(1000) εξαρτάται από την προσαρμογή της LDF στα δεδομένα του ανιχνευτή και από τον ακριβή εντοπισμό του πυρήνα του καταιγισμού.

Πίνακας 3: Παράμετροι βέλτιστης προσαρμογής για την εξίσωση (3) και για διαφορετικά πρωτογενή σωματίδια.

Πρωτογενές σωματίδιο	A	B
πρωτόνιο	$(2,51 \pm 0,15)\cdot 10^{17}$	$(2,41 \pm 2,24)\cdot 10^{18}$
ήλιο	$(2,32 \pm 0,13)\cdot 10^{17}$	$(3,06 \pm 2,31)\cdot 10^{18}$
λίθιο	$(2,18 \pm 0,13)\cdot 10^{17}$	$(2,93 \pm 2,24)\cdot 10^{18}$
άνθρακας	$(2,08 \pm 0,11)\cdot 10^{17}$	$(2,27 \pm 2,20)\cdot 10^{18}$
σίδηρος	$(1,86 \pm 0,10)\cdot 10^{17}$	$(2,59 \pm 1,86)\cdot 10^{18}$

Φαίνεται επίσης ότι καθώς οι γραμμές τάσης τουλάχιστον για το πρωτόνιο και το σίδηρο είναι διακρίσιμες μεταξύ τους, το γράφημα αυτό μπορεί να χρησιμοποιηθεί και για τον προσδιορισμό του είδους του πρωτογενούς εφόσον είναι γνωστό το σήμα στον ανιχνευτή επιφανείας και η αρχική ενέργεια έχει υπολογιστεί με κάποια άλλη μέθοδο (π.χ. μέσω του ανιχνευτή φθορισμού σε ένα υβριδικό γεγονός).

Χρησιμοποιώντας αυτή τη σχέση και τα δεδομένα του πίνακα 3 μπορούμε τώρα να υπολογίσουμε την ενέργεια των καταιγισμών της προσομοίωσης και να την συγκρίνουμε με την αρχική ενέργεια της προσομοίωσης ώστε να ελέγξουμε την ισχύ των σχέσεων μας. Όπως φαίνεται από τον πίνακα 4 η απόκλιση από την αρχική ενέργεια της προσομοίωσης (100 EeV) κινείται στο επίπεδο του 1,3 %.

Πίνακας 4: Διορθωμένο κατακόρυφο σήμα και ενέργεια υπολογισμένη μέσω της σχέσης για επικλινείς καταιγισμούς διαφορετικών ζενιθιακών γωνιών και πρωτογενών σωματιδίων αρχικής ενέργειας 100 EeV.

θ(deg)	πρωτόνιο		ήλιο		λίθιο		άνθρακας		σίδηρος	
	S_0(1000) (VEM)	E_{calc} (EeV)	S_0(1000) (VEM)	E_{calc} (EeV)	S_0(1000) (VEM)	E_{calc} (EeV)	S_0(1000) (VEM)	E_{calc} (EeV)	S_0(1000) (VEM)	E_{calc} (EeV)
0	424,91	104,24	445,8	100,36	472,87	100,16	502,86	102,32	555,69	100,77
10	406,08	99,51	447,68	100,80	464,05	98,23	487,95	99,22	535,38	96,99
20	419,01	102,76	441,33	99,33	463,07	98,02	482,04	97,99	548,79	99,48
30	416,35	102,09	445,78	100,36	471,05	99,76	492,97	100,27	545,11	98,80
40	418,20	102,56	448,78	101,05	469,12	99,34	505,27	102,82	550,37	99,78
50	415,30	101,83	443,28	99,78	465,96	98,65	483,84	98,37	544,13	98,62
60	416,87	102,22	446,11	100,44	468,28	99,15	494,79	100,64	547,22	99,19
Μέση απόκλιση	**2,31%**		**0,56%**		**1%**		**1,5%**		**1,13%**	

4.4 Κοσμική Ακτινοβολία φωτονίων γ

Τα φωτόνια ακτίνων γ που αποτελούν ένα μικρό κλάσμα των κοσμικών ακτίνων είναι εξαιρετικά σημαντικά στην κατανόηση της προέλευσης των κοσμικών ακτίνων μιας και, εφόσον δεν φέρουν ηλεκτρικό φορτίο, φτάνουν στη Γη χωρίς να επηρεάζονται από το γαλαξιακό μαγνητικό πεδίο.

Σε ενέργειες της τάξης των EeV τα φωτόνια ακτίνων γ πιστεύεται ότι παράγονται σε περιοχές μεγάλης παραγωγής φωτονίων με διαδικασίες αλληλεπίδρασης με την μικροκυματική ακτινοβολία υποβάθρου (GZK processes) ή μέσω των μοντέλων top-down. Σε τόσο υψηλές ενέργειες τα φωτόνια ακτίνων γ μπορεί να αλληλεπιδράσουν στο γεωμαγνητικό πεδίο δημιουργώντας πρόδρομους καταιγισμούς (pre-showers) στα όρια της γήινης μαγνητόσφαιρας. Στην περίπτωση αυτή ο καταιγισμός που δημιουργείται στην ατμόσφαιρα προκύπτει από υπέρθεση των καταιγισμών που δημιουργούνται από φωτόνια και ηλεκτρόνια χαμηλότερης ενέργειας και οι διακυμάνσεις του βάθους του μεγίστου X_{max} είναι μικρότερες από ό,τι για μεμονωμένα φωτόνια της ίδιας ολικής ενέργειας. (Abraham et al., 2007)

Η διάκριση καταιγισμών που δημιουργούνται από φωτόνια ακτίνων γ και καταιγισμών που δημιουργούνται από αδρόνια είναι πειραματικά ευκολότερη από τη διάκριση πρωτονικών καταιγισμών και καταιγισμών βαρύτερων πυρήνων που μπορεί να γίνει μόνο σε στατιστική βάση. Επιπλέον, οι φωτονικοί καταιγισμοί που είναι σχεδόν αποκλειστικά ηλεκτρομαγνητικοί, δεν επηρεάζονται από τις περιορισμένες γνώσεις μας για τα μοντέλα αδρονικών αλληλεπιδράσεων που εισάγουν αβεβαιότητες στη μελέτη των καταιγισμών πρωτονίων και βαρύτερων πυρήνων.

Ένα σημαντικό σημείο στη μελέτη των κοσμικών ακτίνων υπερυψηλών ενεργειών είναι το ποσοστό τους που μπορεί να συνδεθεί με φωτόνια ακτίνων γ μιας και αυτό μπορεί να μειώσει τις αντίστοιχες συστηματικές αβεβαιότητες σε διάφορες αναλύσεις των δεδομένων των εκτεταμένων καταιγισμών. Το Παρατηρητήριο Auger έχει θέσει τα ποσοστιαία όρια που φαίνονται στον πίνακα 5 χρησιμοποιώντας σαν παράμετρο εκτίμησης το βάθος του μεγίστου του καταιγισμού X_{max}.

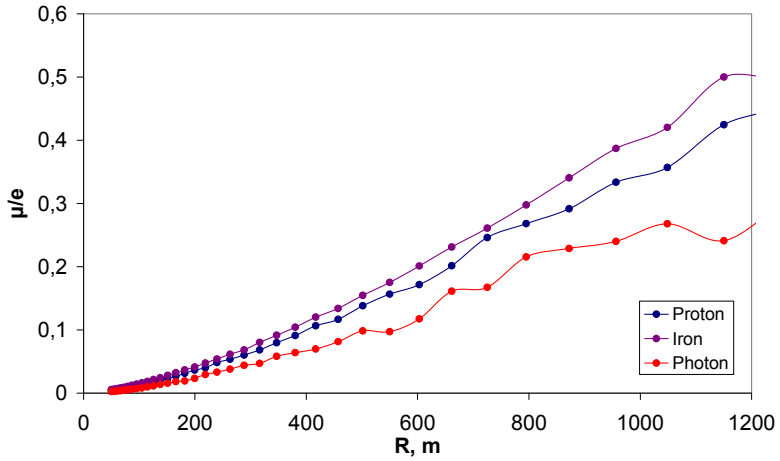
Πίνακας 5: Ποσοστό της κοσμικής ακτινοβολίας υπερυψηλών ενεργειών που οφείλεται σε φωτόνια ακτίνων γ διαφορετικών ενεργειών όπως προσδιορίστηκε από το Auger (Ros et al., 2013).

	Ποσοστό κοσμικής ακτινοβολίας που οφείλεται σε φωτόνια ακτίνων γ	**Ενέργεια πρωτογενούς φωτονίου γ**
Υβριδικά γεγονότα	0,4 %	1 EeV
	0.5 %	2 EeV
	1.0 %	3 EeV
	2.6 %	5 EeV
	8.9 %	10 EeV
Επιφανειακός Ανιχνευτής	2.0 %	10 EeV
	5.1 %	20 EeV
	31 %	40 EeV

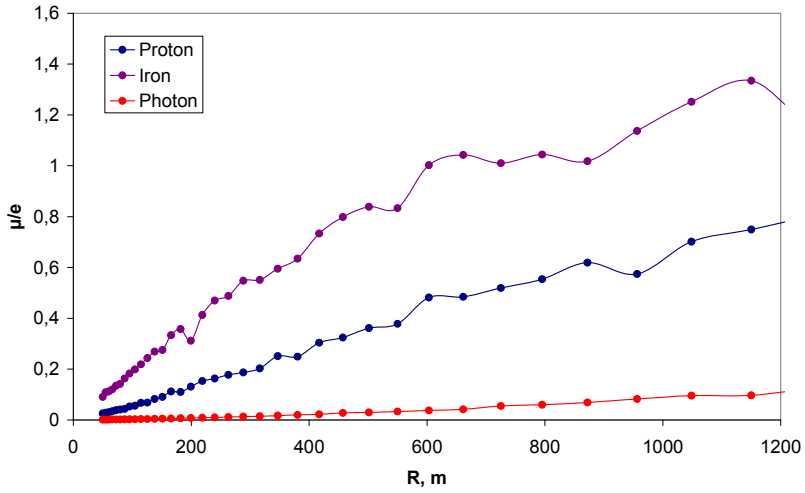
Οι καταιγισμοί που δημιουργούνται από φωτόνια ακτίνων γ είναι σχεδόν απόλυτα ηλεκτρομαγνητικοί λόγω της μικρής ενεργού διατομής για τη φωτοπαραγωγή μεσονίων σε πυρήνες σε σύγκριση με τη δίδυμη γένεση. Σε αυτή την περίπτωση ο λόγος μιονίων προς e^+/e^- στο επίπεδο του εδάφους θα είναι μικρότερος από ό,τι σε καταιγισμούς πυρήνων όπως φαίνεται στον πίνακα 6 για διαφορετικά πρωτογενή σωματίδια αρχικής ενέργειας 100 EeV που δημιουργούν καταιγισμούς διαφορετικών ζενιθιακών γωνιών. Στα σχήματα 34 και 35 απεικονίζεται αυτό το γεγονός για καταιγισμούς 0° και 60°. Κατά μια έννοια, τα φωτόνια συμπεριφέρονται σαν πυρήνες ελαφρύτεροι από τα πρωτόνια: δημιουργούν καταιγισμούς με λιγότερα μιόνια, μεγαλύτερο βάθος μεγίστου X_{max} και μεγαλύτερη καμπυλότητα μετώπου (Billoir and Sommers, 2004).

Πίνακας 6: Λόγος μιονίων προς e^+/e^- στο επίπεδο του εδάφους (σε απόσταση 1000 m από το ίχνος του άξονα του καταιγισμού) για καταιγισμούς διαφορετικών πρωτογενών και ζενιθιακών γωνιών, αρχικής ενέργειας 100 EeV.

Πρωτογενές σωματίδιο	**θ=0°**	**θ=10°**	**θ=20°**	**θ=30°**	**θ=40°**	**θ=50°**	**θ=60°**
πρωτόνιο	0,39	0,33	0,37	0,29	0,32	0,34	0,65
σίδηρος	0,44	0,44	0,38	0,39	0,43	0,55	1,14
φωτόνιο	0,25	0,21	0,23	0,16	0,14	0,13	0,04



Σχήμα 34: Λόγος μιονίων προς e^+/e^- στο επίπεδο του εδάφους για κατακόρυφους καταιγισμούς πρωτονίου, σιδήρου και φωτονίου ακτίνων γ αρχικής ενέργειας 100 EeV.

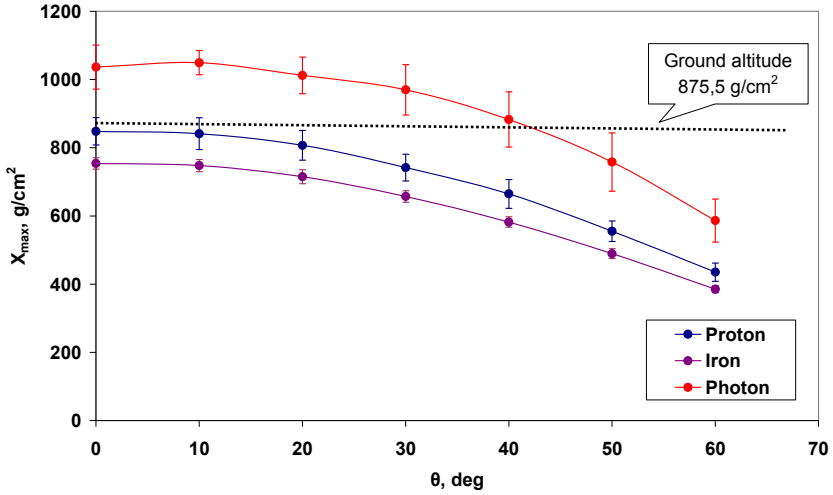


Σχήμα 35: Λόγος μιονίων προς e^+/e^- στο επίπεδο του εδάφους για καταιγισμούς ζενιθιακής γωνίας 60º πρωτονίου, σιδήρου και φωτονίου ακτίνων γ αρχικής ενέργειας 100 EeV.

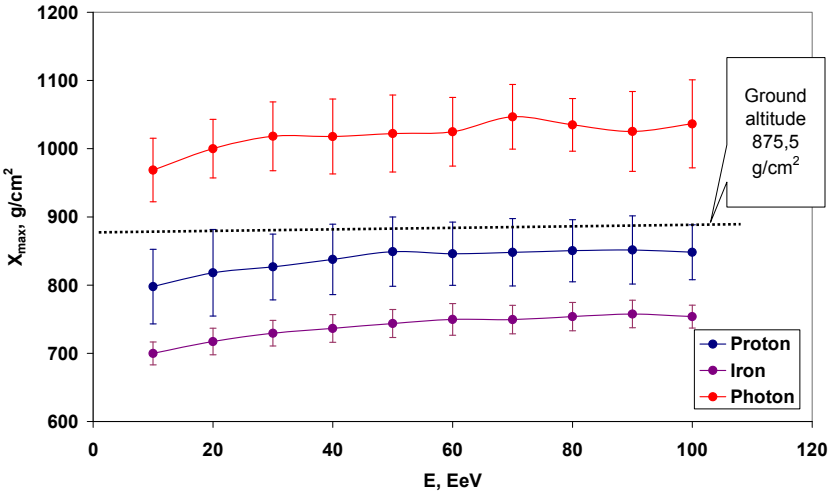
Για αρχική ενέργεια 10^{20} eV το βάθος του μεγίστου του καταιγισμού X_{max} είναι της τάξεως του 1050 g/cm^2 για καταιγισμούς που δημιουργούνται από φωτόνια, σε αντίθεση με τα 800-900 g/cm^2 που είναι το βάθος για αδρονικούς καταιγισμούς. Αυτό σημαίνει ότι ένα πείραμα όπως το Auger που αναπτύσσεται σε υψόμετρο 1400 m από την επιφάνεια της θάλασσας και κατά συνέπεια σε ατμοσφαιρικό βάθος 875,5 g/cm^2, ένας καταιγισμός φωτονίου δεν φτάνει στο μέγιστο της ανάπτυξής του πριν να συναντήσει την επιφάνεια του εδάφους για μικρές ζενιθιακές γωνίες. Όπως φαίνεται στο σχήμα 36, το μέγιστο ενός τέτοιου καταιγισμού βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του

εδάφους μόνον εφόσον η ζενιθιακή του γωνία είναι μεγαλύτερη από 40º, αφού στην περίπτωση αυτή το αυξημένο μήκος του άξονα του καταιγισμού (slant depth) δίνει το περιθώριο πλήρους ανάπτυξής του.

Αντίστοιχα στο σχήμα 37 φαίνεται η μεταβολή του βάθους μεγίστου X_{max} με την αρχική ενέργεια για κατακόρυφους καταιγισμούς. Είναι φανερό πως ένας κατακόρυφος καταιγισμός που δημιουργείται από φωτόνιο ακτίνων γ δεν είναι δυνατόν να παρατηρηθεί στο μέγιστο της ανάπτυξης του για οποιαδήποτε ενέργεια από 10^{19} eV έως 10^{20} eV.



Σχήμα 36: Το ατμοσφαιρικό βάθος του μεγίστου του καταιγισμού σαν συνάρτηση της ζενιθιακής γωνίας για καταιγισμούς αρχικής ενέργειας 100 EeV διαφορετικών πρωτογενών σωματιδίων.



Σχήμα 37: Μεταβολή του βάθους μεγίστου X_{max} σαν συνάρτηση της αρχικής ενέργειας για κατακόρυφους καταιγισμούς.

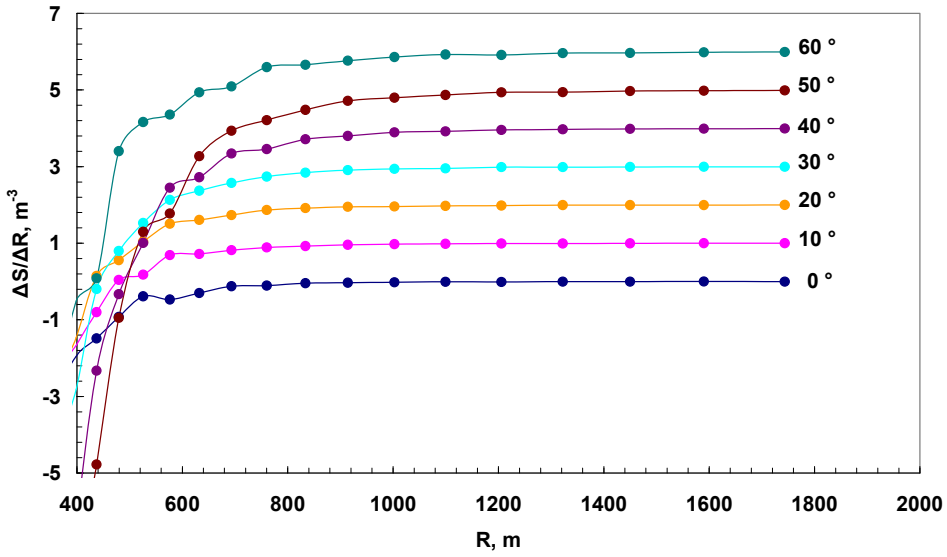
4.4.1 Υπολογισμός της ενέργειας του πρωτογενούς φωτονίου

Για να εκτιμήσουμε την ενέργεια του πρωτογενούς φωτονίου γ που δημιουργεί έναν εκτεταμένο καταιγισμό θα χρησιμοποιήσουμε την ίδια μέθοδο με παραπάνω, με μια μόνο διαφοροποίηση: όπως ήδη αναφέρθηκε, στην περίπτωση φωτονίων υπερυψηλών ενεργειών είναι δυνατόν να έχουμε τη δημιουργία πρόδρομων καταιγισμών στα όρια της γήινης μαγνητόσφαιρας. Το πρόγραμμα AIRES αντιμετωπίζει αυτή την περίπτωση με τη χρησιμοποίηση ενός επιπλέον module, του TIERRAS. Στην παρούσα εργασία θα χρησιμοποιήσουμε εναλλακτικά το πρόγραμμα CORSIKA (version 6.990) που έχει τη δυνατότητα αυτή ενσωματωμένη μέσω του option PRESHOWER.

Για λόγους σύγκρισης θα πραγματοποιηθούν προσομοιώσεις καταιγισμών φωτονίων με αρχική ενέργεια πάνω από 10^{19} eV τόσο με πρόδρομο καταιγισμό όσο και χωρίς αυτόν. Το αδρονικό μοντέλο που επελέγει είναι το SIBYLL. Για κάθε γεγονός διαφορετικής ενέργειας και ζενιθιακής γωνίας πραγματοποιήθηκαν 100 καταιγισμοί με thinning 10^{-4}.

I. Καταιγισμοί χωρίς πρόδρομα φαινόμενα

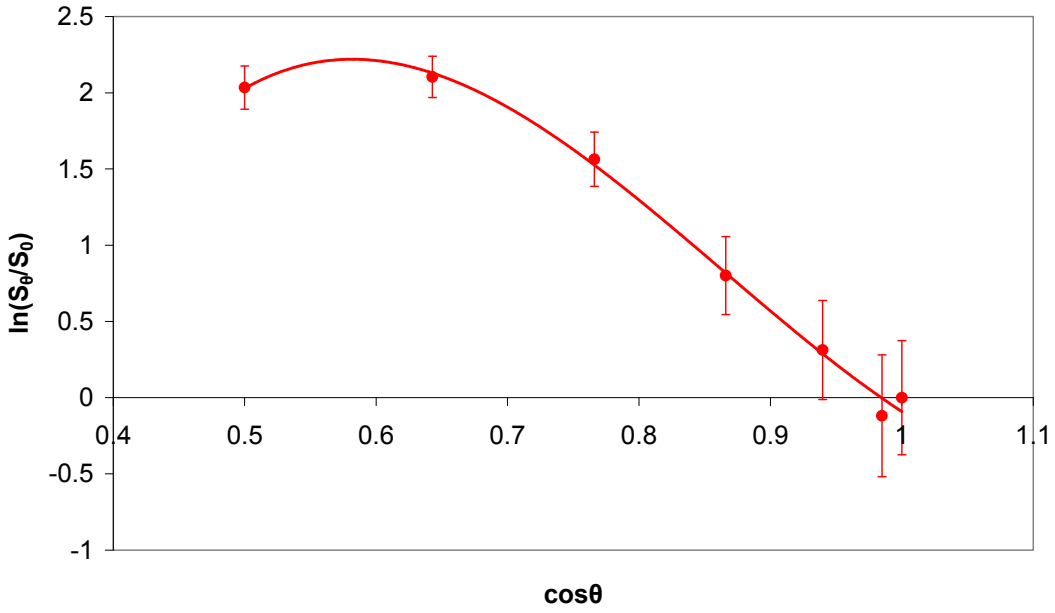
Ξεκινώντας, θεωρούμε φωτόνιο ακτίνων γ που δημιουργεί τον καταιγισμό μέσα στην ατμόσφαιρα της Γης, χωρίς πρόδρομα φαινόμενα. Για άλλη μια φορά θεωρούμε σαν παράμετρο εκτίμησης της ενέργειας το σήμα του ανιχνευτή εδάφους σε απόσταση 1000 m από το ίχνος του άξονα του καταιγισμού. Η επιλογή της απόστασης των 1000 m έχει γίνει και πάλι λόγω της μείωσης των διακυμάνσεων που παρατηρούνται πέραν της απόστασης αυτής, σύμφωνα με την πρόταση του Hillas (Hillas et al., 1971). Στο σχήμα 38 φαίνεται η διακύμανση του αριθμού των σωματιδίων σαν συνάρτηση της ακτινικής απόστασης για καταιγισμούς φωτονίων που επιβεβαιώνει τη χρήση του σήματος στα 1000 m, S(1000) για τον υπολογισμό της αρχικής ενέργειας.



Σχήμα 38: Διακυμάνσεις της πυκνότητας σωματιδίων ανά μονάδα μήκους σαν συνάρτηση της απόστασης από το ίχνος του άξονα του καταιγισμού στην επιφάνεια του εδάφους, για καταιγισμούς διαφορετικών ζενιθιακών γωνιών, αρχικής ενέργειας 100 EeV. Επειδή οι καμπύλες συμπίπτουν, για να είναι πιο καθαρό το διάγραμμα έχει γίνει μετατόπιση των καμπυλών των 10º, 20º, 30º, 40º, 50º και 60º προς τα επάνω κατά μήκος του άξονα y κατά 0,5 , 1, 1,5 , 2, 2,5 και 3 μονάδες αντίστοιχα.

Διόρθωση επικλινούς πυκνότητας

Για να εξαχθεί η σχέση υπολογισμού της ενέργειας θα πρέπει και πάλι να διορθωθεί το σήμα επικλινών καταιγισμών για την εξασθένιση που εισάγει η ζενιθιακή γωνία. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις καταιγισμών που δημιουργούνται από φωτόνια διαφορετικών ζενιθιακών γωνιών, αρχικής ενέργειας 100 EeV μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα. Αναζητάμε τον τύπο που θα μετατρέπει το επικλινές σήμα $S_\theta(1000)$ στο αντίστοιχο κατακόρυφο σήμα $S_0(1000)$. Παριστάνουμε λοιπόν γραφικά το $\ln(S_\theta/S_0)$ σαν συνάρτηση του cosθ (σχήμα 39).



Σχήμα 39: Γραφική απεικόνιση του $\ln(S_\theta/S_0)$ συναρτήσει της γωνίας για καταιγισμούς διαφόρων ζενιθιακών γωνιών φωτονίου γ με αρχική ενέργεια 100 EeV χωρίς πρόδρομα φαινόμενα.

Η γραμμή τάσης με την καλύτερη προσέγγιση είναι και πάλι πολυωνυμική τρίτου βαθμού, οπότε προκύπτει

$$\ln(S_\theta / S_0) = 30{,}85 \cdot \cos^3\theta - 79{,}95 \cdot \cos^2\theta + 61{,}70 \cdot \cos\theta - 12{,}69 \quad (4)$$

και επιλύοντας αυτή τη σχέση ως προς $S_0(1000)$ προκύπτει

$$S_0 = \frac{S_\theta}{\exp\{D_3 \cdot \cos^3\theta + D_2 \cdot \cos^2\theta + D_1 \cdot \cos\theta + D_0\}} \quad (5)$$

με $D_3 = 30{,}85 \pm 0{,}64$

$D_2 = -79{,}95 \pm 0{,}49$

$D_1 = 61{,}70 \pm 0{,}10$

$D_0 = -12{,}69 \pm 0{,}49$

και σφάλμα

$$\delta S_0 = [(\delta S_\theta)^2 + \rho_\theta^2 \cdot (\delta\theta)^2 \cdot [\cos^6\theta \cdot (\delta D_3)^2 + \cos^4\theta \cdot (\delta D_2)^2 + \cos^2\theta \cdot (\delta D_1)^2 + (\delta D_0)^2 + \sin^2\theta \cdot (3\cos^2\theta \cdot D_3 + 2\cos\theta \cdot D_2 + D_1)^2]^{1/2} \cdot \exp^{-1}\{D_3 \cdot \cos^3\theta + D_2 \cdot \cos^2\theta + D_1 \cdot \cos\theta + D_0\}$$

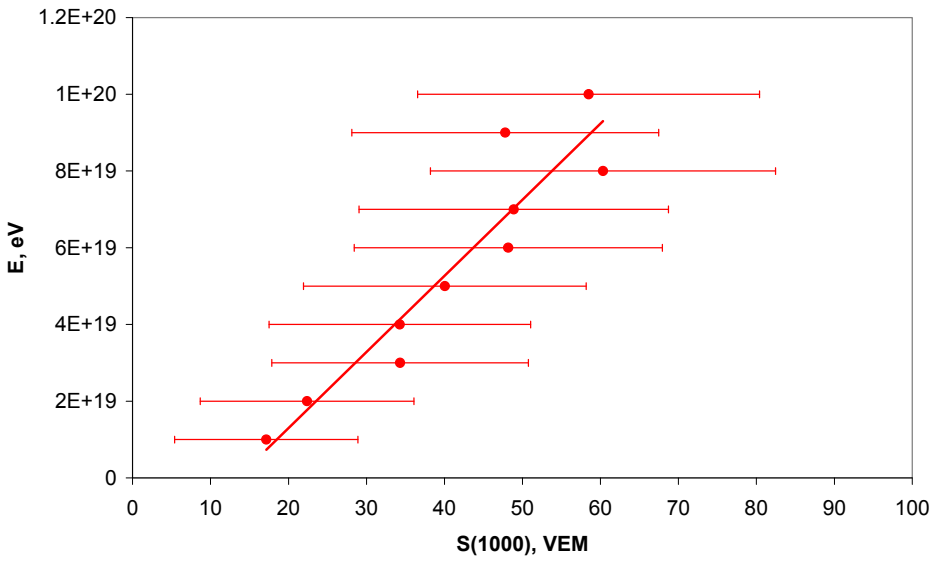
Χρησιμοποιώντας τη σχέση (5) μπορούμε να υπολογίσουμε το σήμα $S_0(1000)$ χρησιμοποιώντας τις τιμές σήματος $S_\theta(1000)$ που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις μας (πίνακας 7).

Πίνακας 7: Το σήμα σε απόσταση 1000 m από το ίχνος του άξονα του καταιγισμού για ζενιθιακή γωνία θ $S_{\theta}(1000)$ και το διορθωμένο σήμα για κατακόρυφο καταιγισμό $S_0(1000)$ για πρωτογενή φωτόνια ακτίνων γ αρχικής ενέργειας 100 EeV που δημιουργούν καταιγισμό μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα.

θ(deg)	S_{θ} (VEM)	S_0 (VEM)
0	58,48	63,99
10	51,90	51,97
20	79,96	59,84
30	130,31	57,45
40	279,22	60,68
50	479,50	56,99
60	447,02	58,78

Εκτίμηση Ενέργειας πρωτογενούς

Εφόσον έχει διορθωθεί η εξασθένιση λόγω της ζενιθιακής γωνίας μπορούμε να προχωρήσουμε στην εκτίμηση της ενέργειας μέσω του σήματος του ανιχνευτή επιφανείας. Για να εξάγουμε την αντίστοιχη σχέση παριστάνουμε και πάλι γραφικά την ενέργεια του πρωτογενούς σωματιδίου συναρτήσει του σήματος του ανιχνευτή (σχήμα 40).



Σχήμα 40: Ενέργεια πρωτογενούς σωματιδίου σαν συνάρτηση του σήματος σε απόσταση 1000 m από τον πυρήνα του καταιγισμού για πρωτογενές φωτόνιο γ.

Στο σχήμα 40 φαίνεται ότι η γραμμική εξάρτηση μεταξύ της αρχικής ενέργειας E και του σήματος S(1000) δεν είναι τόσο ξεκάθαρη για το φωτόνιο ακτίνων γ όσο για τα υπόλοιπα πρωτογενή. Αυτό οφείλεται εν πολλοίς στο γεγονός ότι ο καταιγισμός παρατηρείται πριν την επίτευξη του μεγίστου όπως επισημάνθηκε παραπάνω. Τα σφάλματα είναι σημαντικά καθώς, αν και έχουν πραγματοποιηθεί 100 showers για κάθε γεγονός, το thinning έχει επιλεγεί στο 10^{-4}. Αν παρ' όλα αυτά θεωρήσουμε γραμμική προσέγγιση των σημείων του διαγράμματος προκύπτει εμπειρικός τύπος υπολογισμού της ενέργειας του πρωτογενούς σωματιδίου της μορφής

$$E = A \cdot S(1000) + B \quad (6)$$

με A = $(1{,}98 \pm 0{,}49)\cdot 10^{18}$

και B = $(-2{,}67 \pm 0{,}51)\cdot 10^{19}$

Το σφάλμα στον υπολογισμό της ενέργειας δίνεται από τη σχέση:

$$\delta E = \sqrt{S^2(1000)\cdot \delta^2 \mathrm{A} + \mathrm{A}^2 \delta^2 [S(1000)] + \delta^2 \mathrm{B}}$$

όπου δA, δB και δ[S(1000)] είναι τα σφάλματα στον υπολογισμό των A, B και S(1000).

Χρησιμοποιώντας αυτή τη σχέση και τα δεδομένα του πίνακα 8 μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια των καταιγισμών της προσομοίωσης και να την συγκρίνουμε με την αρχική ενέργεια της προσομοίωσης. Όπως φαίνεται, η μέση απόκλιση από την αρχική ενέργεια της προσομοίωσης (100 EeV) είναι 10,81 %.

Πίνακας 8: Διορθωμένο κατακόρυφο σήμα και ενέργεια υπολογισμένη μέσω της σχέσης (6) για επικλινείς καταιγισμούς φωτονίων ακτίνων γ αρχικής ενέργειας 100 EeV.

θ (deg)	**S_0(1000) (VEM)**	**E_{calc} (eV)**
0	63,99	$1{,}00\cdot 10^{20}$
10	51,97	$7{,}62\cdot 10^{19}$
20	59,84	$9{,}18\cdot 10^{19}$
30	57,45	$8{,}71\cdot 10^{19}$
40	60,68	$9{,}34\cdot 10^{19}$
50	56,99	$8{,}61\cdot 10^{19}$
60	58,78	$8{,}97\cdot 10^{19}$
Μέση απόκλιση		**10,81%**

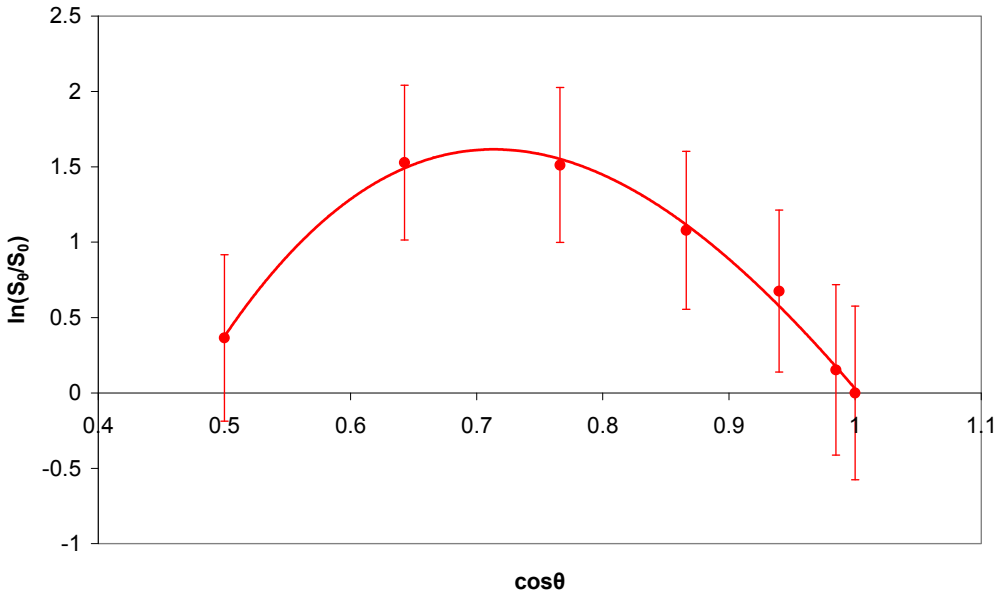
II. Καταιγισμοί με πρόδρομα φαινόμενα

Επαναλαμβάνουμε τη διαδικασία για καταιγισμούς που παρουσιάζουν πρόδρομα φαινόμενα, πραγματοποιώντας τις προσομοιώσεις για ενέργειες ≥ 10^{19} eV με την επιλογή PRESHOWER κατά την εξαγωγή του κώδικα CORSIKA.

Διόρθωση επικλινούς πυκνότητας

Αναζητάμε και πάλι τον τύπο που θα μετατρέπει το επικλινές σήμα $S_\theta(1000)$ στο αντίστοιχο κατακόρυφο σήμα $S_0(1000)$. Για το σκοπό αυτό πραγματοποιήθηκαν προσομοιώσεις καταιγισμών που δημιουργούνται από φωτόνια διαφορετικών ζενιθιακών γωνιών, αρχικής ενέργειας 100 EeV στο όριο της γήινης μαγνητόσφαιρας. Μέσα στη γήινη ατμόσφαιρα οι καταιγισμοί που προκύπτουν αποτελούν υπέρθεση πολλαπλών καταιγισμών φωτονίων και ηλεκτρονίων χαμηλότερης ενέργειας.

Παριστάνουμε γραφικά το $\ln(S_\theta/S_0)$ σαν συνάρτηση του cosθ (σχήμα 41). Τα σφάλματα είναι σημαντικά καθώς, αν και έχουν πραγματοποιηθεί 100 showers για κάθε γεγονός, το thinning έχει επιλεγεί στο 10^{-4}.



Σχήμα 41: Γραφική απεικόνιση του $\ln(S_\theta/S_0)$ συναρτήσει της γωνίας για καταιγισμούς διαφόρων ζενιθιακών γωνιών φωτονίου γ με αρχική ενέργεια 100 EeV που δημιουργεί πρόδρομους καταιγισμούς.

Η γραμμή τάσης με την καλύτερη προσέγγιση είναι και πάλι πολυωνυμική τρίτου βαθμού, οπότε προκύπτει

$$\ln(S_\theta / S_0) = 15{,}81 \cdot \cos^3\theta - 57{,}71 \cdot \cos^2\theta + 58{,}214 \cdot \cos\theta - 16{,}28 \quad (7)$$

και επιλύοντας αυτή τη σχέση ως προς $S_0(1000)$ προκύπτει

$$S_0 = \frac{S_\theta}{\exp\{D_3 \cdot \cos^3\theta + D_2 \cdot \cos^2\theta + D_1 \cdot \cos\theta + D_0\}} \quad (8)$$

με $D_3 = 15{,}81 \pm 0{,}54$

$D_2 = -57{,}71 \pm 0{,}37$

$D_1 = 58{,}21 \pm 0{,}35$

$D_0 = -16{,}28 \pm 0{,}75$

και σφάλμα:

$$\delta S_0 = [(\delta S_\theta)^2 + \rho_\theta^2 \cdot (\delta\theta)^2 \cdot [\cos^6\theta \cdot (\delta D_3)^2 + \cos^4\theta \cdot (\delta D_2)^2 + \cos^2\theta \cdot (\delta D_1)^2 + (\delta D_0)^2 + \sin^2\theta \cdot (3\cos^2\theta \cdot D_3 + 2\cos\theta \cdot D_2 + D_1)^2]^{1/2} \cdot \exp^{-1}\{D_3 \cdot \cos^3\theta + D_2 \cdot \cos^2\theta + D_1 \cdot \cos\theta + D_0\}$$

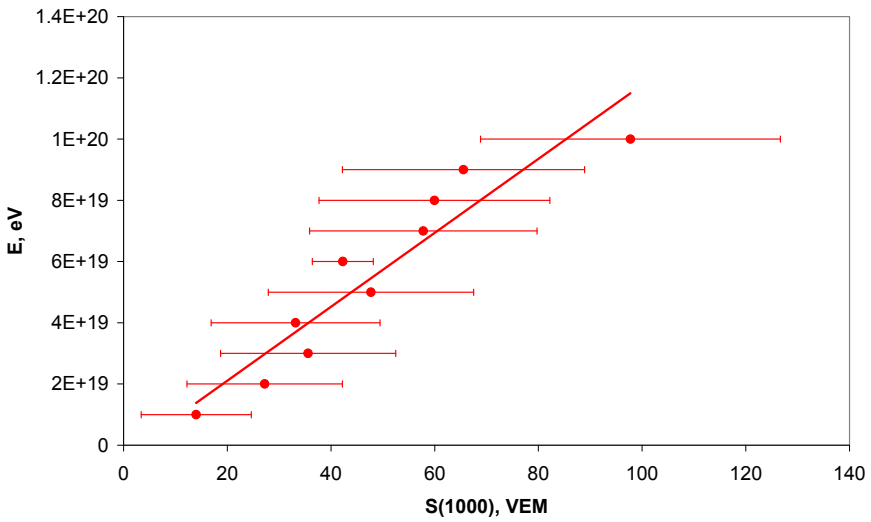
Χρησιμοποιώντας αυτή τη σχέση μπορούμε να υπολογίσουμε το σήμα $S_0(1000)$ χρησιμοποιώντας τις τιμές σήματος $S_\theta(1000)$ που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις μας (Πίνακας 9).

Πίνακας 9: Το σήμα σε απόσταση 1000 m από το ίχνος του άξονα του καταιγισμού για ζενιθιακή γωνία θ $S_\theta(1000)$ και το διορθωμένο σήμα για κατακόρυφο καταιγισμό $S_0(1000)$ για πρωτογενή φωτόνια ακτίνων γ αρχικής ενέργειας 100 EeV που δημιουργούν πρόδρομα φαινόμενα στη μαγνητόσφαιρα της Γης.

θ (deg)	**S_θ (VEM)**	**S_0 (VEM)**
0	97,74	94,85
10	113,92	95,52
20	192,10	107,67
30	287,57	94,04
40	443,20	93,79
50	450,76	101,47
60	140,81	96,90

Εκτίμηση Ενέργειας πρωτογενούς

Μετά τη διόρθωση της εξασθένισης λόγω της ζενιθιακής γωνίας μπορούμε να προχωρήσουμε στην εκτίμηση της ενέργειας μέσω του σήματος του ανιχνευτή επιφανείας. Για να εξάγουμε την αντίστοιχη σχέση παριστάνουμε και πάλι γραφικά την ενέργεια του πρωτογενούς σωματιδίου συναρτήσει του σήματος του ανιχνευτή (σχήμα 42).



Σχήμα 42: Ενέργεια πρωτογενούς σωματιδίου σαν συνάρτηση του σήματος σε απόσταση 1000 m από τον πυρήνα του καταιγισμού για πρωτογενές φωτόνιο γ που δημιουργεί πρόδρομους καταιγισμούς.

Και πάλι φαίνεται ότι η γραμμική εξάρτηση μεταξύ της αρχικής ενέργειας E και του σήματος S(1000) δεν είναι αρκετά ξεκάθαρη. Θεωρώντας παρ' όλα αυτά γραμμική προσέγγιση προκύπτει εμπειρικός τύπος υπολογισμού της ενέργειας του πρωτογενούς σωματιδίου της μορφής

$$E = A \cdot S(1000) + B \quad (9)$$

με A = (1,21 ± 0,30)·10^{18}

και B = (3.12 ± 2.63)·10^{18}

Το σφάλμα στον υπολογισμό της ενέργειας δίνεται από τη σχέση:

$$\delta E = \sqrt{S^2(1000) \cdot \delta^2 \mathrm{A} + \mathrm{A}^2 \delta^2 [S(1000)] + \delta^2 \mathrm{B}}$$

όπου δA, δB και δ[S(1000)] είναι τα σφάλματα στον υπολογισμό των A, B και S(1000).

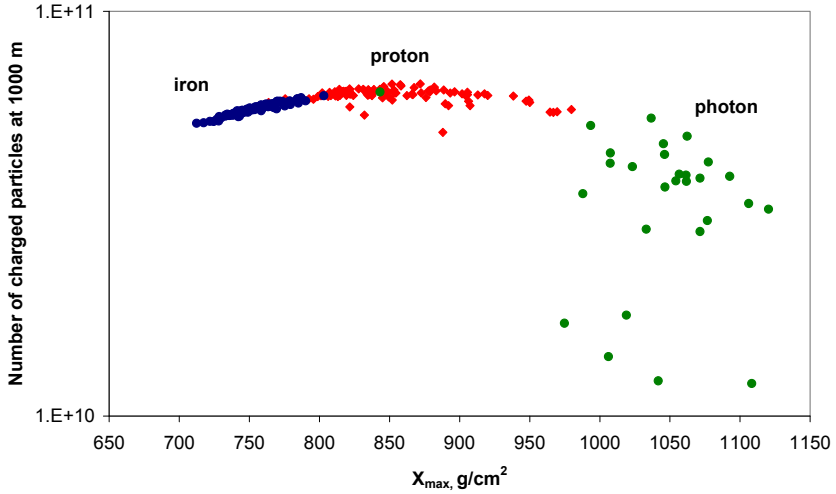
Χρησιμοποιώντας αυτή τη σχέση και τα δεδομένα του πίνακα 9 μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια των καταιγισμών της προσομοίωσης και να την συγκρίνουμε με την αρχική ενέργεια της προσομοίωσης. Όπως φαίνεται από τον πίνακα 10 η μέση απόκλιση από την αρχική ενέργεια της προσομοίωσης (100 EeV) είναι 15,16 %.

Πίνακας 10: Διορθωμένο κατακόρυφο σήμα και ενέργεια υπολογισμένη μέσω της σχέσης (9) για επικλινείς καταιγισμούς φωτονίων ακτίνων γ αρχικής ενέργειας 100 EeV.

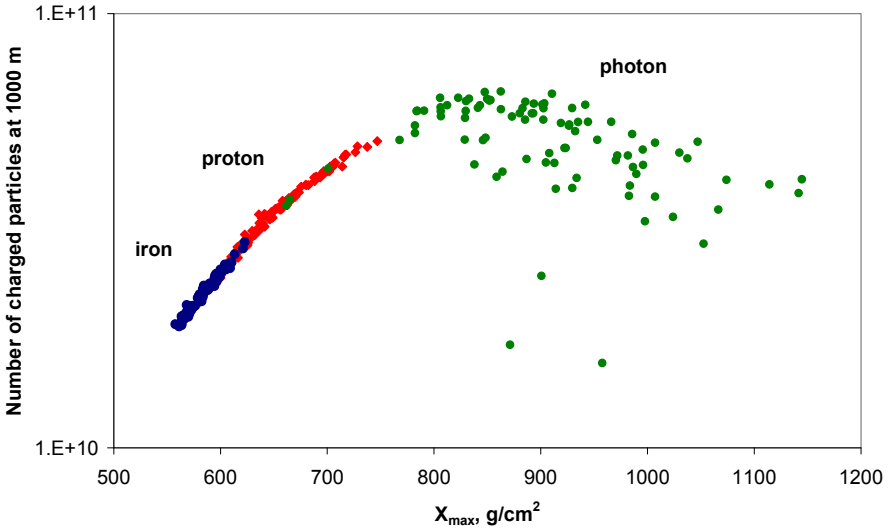
θ (deg)	S_0(1000) (VEM)	E_{calc} (eV)
0	94,85	$1{,}12 \cdot 10^{20}$
10	95,52	$1{,}12 \cdot 10^{20}$
20	107,67	$1{,}27 \cdot 10^{20}$
30	94,04	$1{,}11 \cdot 10^{20}$
40	93,79	$1{,}10 \cdot 10^{20}$
50	101,47	$1{,}20 \cdot 10^{20}$
60	96,90	$1{,}14 \cdot 10^{20}$
Μέση απόκλιση		**15,16%**

4.5 Διάκριση πρωτογενών σωματιδίων

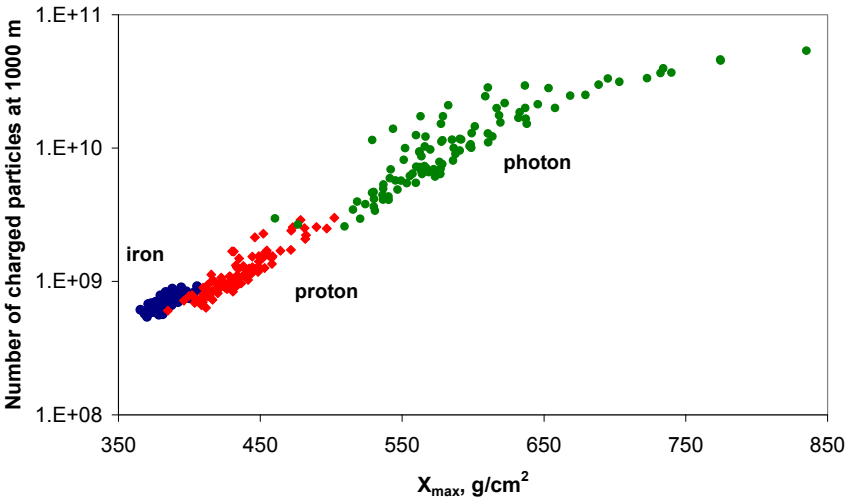
Τα δεδομένα των προσομοιώσεων που πραγματοποιήθηκαν στα πλαίσια αυτής της εργασίας μπορούν να χρησιμοποιηθούν και για τη μελέτη της πρωτογενούς σύστασης της κοσμικής ακτινοβολίας υπερυψηλών ενεργειών με δεδομένη την ύπαρξη υβριδικών γεγονότων. Χρησιμοποιώντας τον αριθμό των φορτισμένων σωματιδίων σε απόσταση 1000 μέτρων από τον πυρήνα του καταιγισμού (μέσω του ανιχνευτή επιφανείας) και το βάθος μεγίστου του καταιγισμού X_{max} (μέσω του ανιχνευτή φθορισμού) μπορούν να δημιουργηθούν τα διαγράμματα 43, 44 και 45 στα οποία είναι ξεκάθαρη η διάκριση των διαφορετικών πρωτογενών σωματιδίων.



Σχήμα 43: Αριθμός φορτισμένων σωματιδίων στην επιφάνεια του εδάφους και σε απόσταση 1000 m από το ίχνος του άξονα του καταιγισμού σαν συνάρτηση του ατμοσφαιρικού βάθους του μεγίστου X_{max} για κατακόρυφους καταιγισμούς φωτονίων, πρωτονίων και πυρήνων σιδήρου αρχικής ενέργειας 100 EeV.



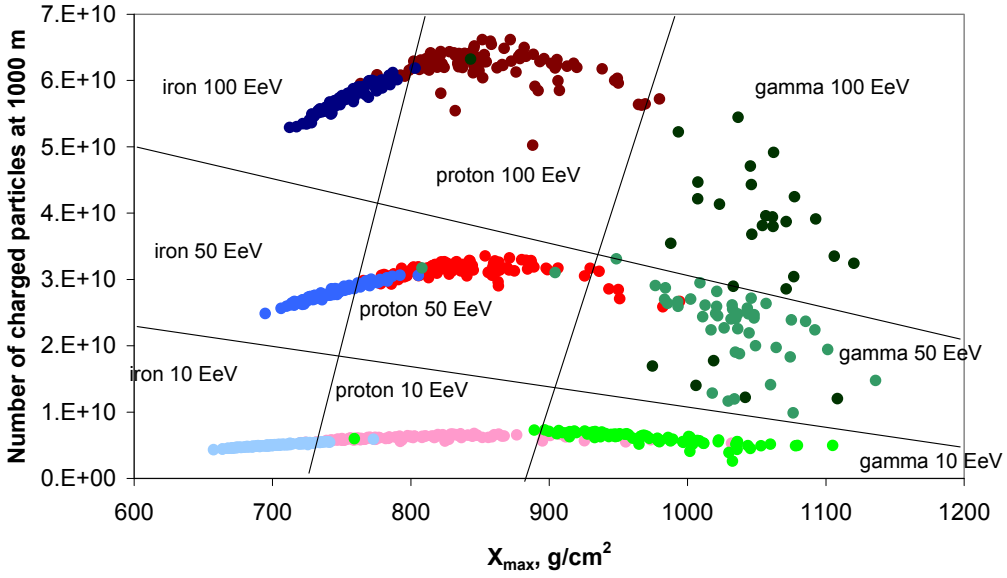
Σχήμα 44: Αριθμός φορτισμένων σωματιδίων στην επιφάνεια του εδάφους και σε απόσταση 1000 m από το ίχνος του άξονα του καταιγισμού σαν συνάρτηση του ατμοσφαιρικού βάθους του μεγίστου X_{max} για καταιγισμούς φωτονίων, πρωτονίων και πυρήνων σιδήρου ζενιθιακής γωνίας 40º και αρχικής ενέργειας 100 EeV.



Σχήμα 45: Αριθμός φορτισμένων σωματιδίων στην επιφάνεια του εδάφους και σε απόσταση 1000 m από το ίχνος του άξονα του καταιγισμού σαν συνάρτηση του ατμοσφαιρικού βάθους του μεγίστου X_{max} για καταιγισμούς φωτονίων, πρωτονίων και πυρήνων σιδήρου ζενιθιακής γωνίας 60º και αρχικής ενέργειας 100 EeV.

Στο σχήμα 46 φαίνεται ο αριθμός των φορτισμένων σωματιδίων στα 1000 m σαν συνάρτηση του X_{max} για κατακόρυφους καταιγισμούς διαφορετικών ενεργειών. Είναι φανερό ότι κάθε ομάδα καταιγισμών έχει μια διαφορετική θέση στο διάγραμμα, καθιστώντας το ένα εργαλείο διάκρισης των

πρωτογενών σωματιδίων στην περίπτωση υβριδικών παρατηρήσεων που προσφέρουν δεδομένα επιφανείας και ατμοσφαιρικά.



Σχήμα 46: Πλήθος φορτισμένων σωματιδίων σε απόσταση 1000 μέτρων από τον άξονα του καταιγισμού στο επίπεδο του εδάφους σαν συνάρτηση του ατμοσφαιρικού βάθους X_{max} για κατακόρυφους καταιγισμούς αρχικής ενέργειας 10 EeV, 50 EeV και 100 EeV με πρωτογενή πρωτόνια, πυρήνες σιδήρου και φωτόνια ακτίνων γ.

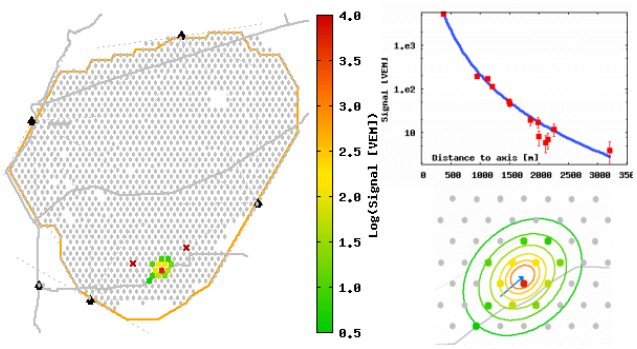
4.6 Σύγκριση με πραγματικά γεγονότα

Ιδανικά στο σημείο αυτό θα έπρεπε να χρησιμοποιηθούν υβριδικά γεγονότα από το Παρατηρητήριο Auger ώστε να ελεγχθούν τα παραπάνω αποτελέσματα. Όμως η πολιτική του πειράματος δεν επιτρέπει τη διάθεση δεδομένων σε ερευνητές εκτός των χωρών και ιδρυμάτων που είναι μέλη της διεθνούς συνεργασίας του Παρατηρητηρίου Pierre Auger. Για το λόγο αυτό η σύγκριση γίνεται με κάποια γεγονότα διαθέσιμα για το κοινό από την ιστοσελίδα του πειράματος και τα οποία προέρχονται μόνον από τον ανιχνευτή επιφανείας και είναι χαμηλής ενέργειας.

Το σετ των διαθέσιμων γεγονότων περιλαμβάνει αυτή τη στιγμή 27597 γεγονότα με ενέργειες από 0,1 έως 49,9 EeV. Θα ελέγξουμε εδώ τα 27 γεγονότα με τη μεγαλύτερη ενέργεια. Στην εικόνα 6 δίνονται τα τρία ενεργητικότερα γεγονότα όπως παρουσιάζονται στην ιστοσελίδα του πειράματος Auger.

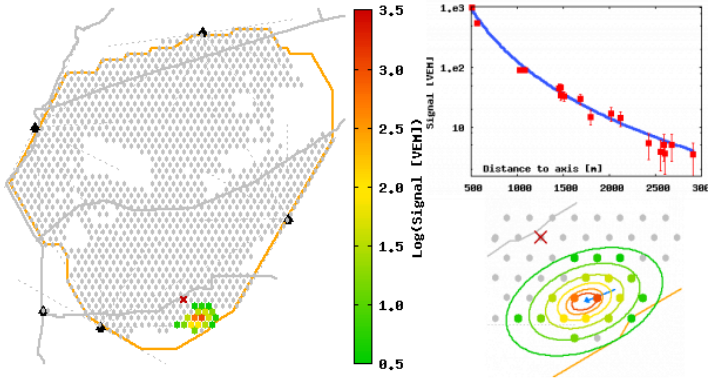
10485600

Generic Information	
Id / Date	10485600 / Tue Oct 26 17:39:16 2010
Nb. of stations	13
Energy	49.9 ± 1.9 EeV
Theta	40.3 ± 0.1 deg
Phi	-139.5 ± 0.2 deg
Curvature	12.2 ± 0.6 km
Core Easting	476051 ± 19 m
Core Northing	6079247 ± 12 m
Reduced Chi^2	3.69



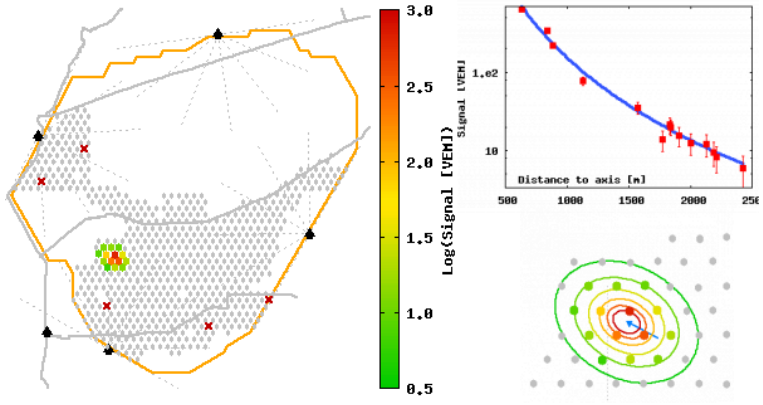
4128900

Generic Information	
Id / Date	4128900 / Tue Oct 30 11:14:14 2007
Nb. of stations	18
Energy	41.1 ± 1.4 EeV
Theta	54.5 ± 0.1 deg
Phi	20.9 ± 0.1 deg
Curvature	19.0 ± 0.9 km
Core Easting	479789 ± 14 m
Core Northing	6073404 ± 25 m
Reduced Chi^2	1.68



1234800

Generic Information	
Id / Date	1234800 / Sat Mar 5 15:54:48 2005
Nb. of stations	14
Energy	37.3 ± 1.2 EeV
Theta	43.3 ± 0.1 deg
Phi	-27.3 ± 0.2 deg
Curvature	15.8 ± 0.9 km
Core Easting	460207 ± 21 m
Core Northing	6089924 ± 11 m
Reduced Chi^2	2.02



Εικόνα 6: Παρουσίαση των τριών γεγονότων με την υψηλότερη ενέργεια από την ιστοσελίδα του Παρατηρητηρίου Auger.

Χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα Plot Digitizer (έκδοση 2.5.0), ψηφιοποιήθηκαν οι LDF των γεγονότων αυτών και με δεδομένο το σήμα $S_\theta(1000)$ υπολογίστηκαν το διορθωμένο σήμα και η ενέργεια του πρωτογενούς σωματίου. Προκύπτουν τα αποτελέσματα του πίνακα 11.

Πίνακας 11: Στοιχεία των πραγματικών γεγονότων από τη βάση δεδομένων του Auger και προσέγγιση της αρχικής τους ενέργειας μέσω των εμπειρικών τύπων της παρούσης εργασίας.

				πρωτόνιο		**ήλιο**		**λίθιο**	
Event id	**S_θ (VEM)**	**θ (deg)**	**E_{AUGER} (eV)**	**$S_0(1000)$ (VEM)**	**E (eV)**	**$S_0(1000)$ (VEM)**	**E (eV)**	**$S_0(1000)$ (VEM)**	**E (eV)**
10485600	205,82	40,3	$4{,}99\cdot10^{19}$	148,34	$3{,}48\cdot10^{19}$	201,08	$4{,}36\cdot10^{19}$	163,70	$3{,}28\cdot10^{19}$
4128900	85,96	54,5	$4{,}11\cdot10^{19}$	96,67	$2{,}19\cdot10^{19}$	142,26	$2{,}99\cdot10^{19}$	117,60	$2{,}27\cdot10^{19}$
1234800	154,84	43,3	$3{,}73\cdot10^{19}$	112,77	$2{,}59\cdot10^{19}$	155,43	$3{,}30\cdot10^{19}$	126,40	$2{,}46\cdot10^{19}$
11728200	250	26,3	$3{,}41\cdot10^{19}$	209,65	$5{,}02\cdot10^{19}$	270,48	$5{,}97\cdot10^{19}$	219,07	$4{,}48\cdot10^{19}$
1673300	125	32,3	$3{,}31\cdot10^{19}$	96,36	$2{,}18\cdot10^{19}$	126,18	$2{,}62\cdot10^{19}$	102,77	$1{,}95\cdot10^{19}$
2126300	100	53,4	$3{,}28\cdot10^{19}$	103,58	$2{,}36\cdot10^{19}$	151,57	$3{,}21\cdot10^{19}$	124,73	$2{,}43\cdot10^{19}$
3637800	110	24,7	$3{,}05\cdot10^{19}$	94,33	$2{,}13\cdot10^{19}$	121,40	$2{,}51\cdot10^{19}$	98,09	$1{,}85\cdot10^{19}$
8042100	110	15,6	$2{,}59\cdot10^{19}$	104,83	$2{,}39\cdot10^{19}$	134,21	$2{,}81\cdot10^{19}$	106,57	$2{,}03\cdot10^{19}$
7985000	100	32,5	$2{,}54\cdot10^{19}$	76,89	$1{,}69\cdot10^{19}$	100,75	$2{,}03\cdot10^{19}$	82,06	$1{,}50\cdot10^{19}$
10882200	100	42,9	$2{,}54\cdot10^{19}$	72,60	$1{,}58\cdot10^{19}$	99,84	$2{,}01\cdot10^{19}$	81,20	$1{,}48\cdot10^{19}$
4105300	75	53,6	$2{,}28\cdot10^{19}$	78,79	$1{,}74\cdot10^{19}$	115,42	$2{,}37\cdot10^{19}$	95,05	$1{,}78\cdot10^{19}$
3005800	100	41,2	$2{,}22\cdot10^{19}$	72,09	$1{,}57\cdot10^{19}$	98,19	$1{,}97\cdot10^{19}$	79,91	$1{,}45\cdot10^{19}$
9765800	100	16,8	$2{,}19\cdot10^{19}$	94,24	$2{,}12\cdot10^{19}$	120,65	$2{,}49\cdot10^{19}$	96,03	$1{,}80\cdot10^{19}$
10998100	110	5,2	$2{,}17\cdot10^{19}$	111,41	$2{,}56\cdot10^{19}$	142,97	$3{,}01\cdot10^{19}$	111,62	$2{,}14\cdot10^{19}$
7969100	75	41,3	$2{,}08\cdot10^{19}$	54,08	$1{,}12\cdot10^{19}$	73,70	$1{,}40\cdot10^{19}$	59,97	$1{,}01\cdot10^{19}$
4407700	75	43,4	$1{,}98\cdot10^{19}$	54,67	$1{,}13\cdot10^{19}$	75,40	$1{,}44\cdot10^{19}$	61,31	$1{,}04\cdot10^{19}$
1904700	100	35,5	$1{,}87\cdot10^{19}$	74,22	$1{,}62\cdot10^{19}$	98,35	$1{,}98\cdot10^{19}$	80,16	$1{,}45\cdot10^{19}$
10097600	60	47,6	$1{,}8\cdot10^{19}$	47,16	$9{,}43\cdot10^{18}$	66,71	$1{,}24\cdot10^{19}$	54,27	$8{,}90\cdot10^{18}$
4404100	75	40,6	$1{,}79\cdot10^{19}$	54,05	$1{,}12\cdot10^{19}$	73,38	$1{,}40\cdot10^{19}$	59,73	$1{,}01\cdot10^{19}$
11935600	60	42	$1{,}77\cdot10^{19}$	43,35	$8{,}47\cdot10^{18}$	59,31	$1{,}07\cdot10^{19}$	48,25	$7{,}59\cdot10^{18}$
6228900	40	59,1	$1{,}69\cdot10^{19}$	72,53	$1{,}58\cdot10^{19}$	108,66	$2{,}21\cdot10^{19}$	92,77	$1{,}73\cdot10^{19}$
10388800	75	34,8	$1{,}66\cdot10^{19}$	56,08	$1{,}17\cdot10^{19}$	74,10	$1{,}41\cdot10^{19}$	60,39	$1{,}02\cdot10^{19}$
7485300	75	22,3	$1{,}64\cdot10^{19}$	66,40	$1{,}43\cdot10^{19}$	85,23	$1{,}67\cdot10^{19}$	68,58	$1{,}20\cdot10^{19}$
4699800	50	49,0	$1{,}6\cdot10^{19}$	41,13	$7{,}91\cdot10^{18}$	58,68	$1{,}06\cdot10^{19}$	47,80	$7{,}49\cdot10^{18}$
7529700	75	17,6	$1{,}54\cdot10^{19}$	70,11	$1{,}52\cdot10^{19}$	89,78	$1{,}78\cdot10^{19}$	71,58	$1{,}27\cdot10^{19}$
8275000	50	45,6	$1{,}51\cdot10^{19}$	37,53	$7{,}01\cdot10^{18}$	52,44	$9{,}11\cdot10^{18}$	42,64	$6{,}36\cdot10^{18}$
9819400	75	34,6	$1{,}51\cdot10^{19}$	56,21	$1{,}17\cdot10^{19}$	74,21	$1{,}42\cdot10^{19}$	60,48	$1{,}03\cdot10^{19}$

Πίνακας 11 (συνέχεια)

				άνθρακας		**σίδηρος**	
Event id	**S_θ (VEM)**	**θ (deg)**	**E_{AUGER} (eV)**	**$S_0(1000)$ (VEM)**	**E (eV)**	**$S_0(1000)$ (VEM)**	**E (eV)**
10485600	205,82	40,3	$4{,}99\cdot10^{19}$	173,40	$3{,}38\cdot10^{19}$	192,68	$3{,}32\cdot10^{19}$
4128900	85,96	54,5	$4{,}11\cdot10^{19}$	125,31	$2{,}38\cdot10^{19}$	144,71	$2{,}43\cdot10^{19}$
1234800	154,84	43,3	$3{,}73\cdot10^{19}$	135,38	$2{,}59\cdot10^{19}$	153,45	$2{,}60\cdot10^{19}$
11728200	250	26,3	$3{,}41\cdot10^{19}$	221,08	$4{,}37\cdot10^{19}$	226,34	$3{,}95\cdot10^{19}$
1673300	125	32,3	$3{,}31\cdot10^{19}$	105,50	$1{,}97\cdot10^{19}$	111,19	$1{,}81\cdot10^{19}$
2126300	100	53,4	$3{,}28\cdot10^{19}$	133,74	$2{,}55\cdot10^{19}$	155,27	$2{,}63\cdot10^{19}$
3637800	110	24,7	$3{,}05\cdot10^{19}$	98,68	$1{,}83\cdot10^{19}$	100,46	$1{,}61\cdot10^{19}$
8042100	110	15,6	$2{,}59\cdot10^{19}$	106,33	$1{,}98\cdot10^{19}$	106,44	$1{,}72\cdot10^{19}$
7985000	100	32,5	$2{,}54\cdot10^{19}$	84,30	$1{,}53\cdot10^{19}$	88,95	$1{,}40\cdot10^{19}$
10882200	100	42,9	$2{,}54\cdot10^{19}$	86,85	$1{,}58\cdot10^{19}$	98,20	$1{,}57\cdot10^{19}$
4105300	75	53,6	$2{,}28\cdot10^{19}$	101,82	$1{,}89\cdot10^{19}$	118,11	$1{,}94\cdot10^{19}$
3005800	100	41,2	$2{,}22\cdot10^{19}$	84,94	$1{,}54\cdot10^{19}$	94,97	$1{,}51\cdot10^{19}$
9765800	100	16,8	$2{,}19\cdot10^{19}$	95,85	$1{,}77\cdot10^{19}$	96,04	$1{,}53\cdot10^{19}$
10998100	110	5,2	$2{,}17\cdot10^{19}$	111,55	$2{,}09\cdot10^{19}$	111,51	$1{,}82\cdot10^{19}$
7969100	75	41,3	$2{,}08\cdot10^{19}$	63,77	$1{,}10\cdot10^{19}$	71,35	$1{,}07\cdot10^{19}$
4407700	75	43,4	$1{,}98\cdot10^{19}$	65,69	$1{,}14\cdot10^{19}$	74,50	$1{,}13\cdot10^{19}$
1904700	100	35,5	$1{,}87\cdot10^{19}$	83,28	$1{,}51\cdot10^{19}$	89,54	$1{,}41\cdot10^{19}$
10097600	60	47,6	$1{,}8\cdot10^{19}$	58,72	$9{,}94\cdot10^{18}$	68,04	$1{,}01\cdot10^{19}$
4404100	75	40,6	$1{,}79\cdot10^{19}$	63,34	$1{,}09\cdot10^{19}$	70,53	$1{,}05\cdot10^{19}$
11935600	60	42	$1{,}77\cdot10^{19}$	51,44	$8{,}43\cdot10^{18}$	57,82	$8{,}16\cdot10^{18}$
6228900	40	59,1	$1{,}69\cdot10^{19}$	94,15	$1{,}73\cdot10^{19}$	103,30	$1{,}66\cdot10^{19}$
10388800	75	34,8	$1{,}66\cdot10^{19}$	62,57	$1{,}07\cdot10^{19}$	66,97	$9{,}87\cdot10^{18}$
7485300	75	22,3	$1{,}64\cdot10^{19}$	68,74	$1{,}20\cdot10^{19}$	69,51	$1{,}03\cdot10^{19}$
4699800	50	49	$1{,}6\cdot10^{19}$	51,76	$8{,}50\cdot10^{18}$	60,22	$8{,}61\cdot10^{18}$
7529700	75	17,6	$1{,}54\cdot10^{19}$	71,46	$1{,}26\cdot10^{19}$	71,67	$1{,}07\cdot10^{19}$
8275000	50	45,6	$1{,}51\cdot10^{19}$	45,96	$7{,}29\cdot10^{18}$	52,79	$7{,}23\cdot10^{18}$
9819400	75	34,6	$1{,}51\cdot10^{19}$	62,61	$1{,}08\cdot10^{19}$	66,93	$9{,}86\cdot10^{18}$

Πίνακας 11 (συνέχεια)

				φωτόνιο (χωρίς πρόδρομα φαινόμενα)		**φωτόνιο (με πρόδρομα φαινόμενα)**	
Event id	**S_θ (VEM)**	**θ (deg)**	**E_{AUGER} (eV)**	**$S_0(1000)$ (VEM)**	**E (eV)**	**$S_0(1000)$ (VEM)**	**E (eV)**
10485600	205,82	40,3	$4{,}99\cdot10^{19}$	43,76	$5{,}99\cdot10^{19}$	43,22	$4{,}92\cdot10^{19}$
4128900	85,96	54,5	$4{,}11\cdot10^{19}$	9,34	*[2]	27,01	$2{,}96\cdot10^{19}$
1234800	154,84	43,3	$3{,}73\cdot10^{19}$	26,65	$2{,}61\cdot10^{19}$	30,90	$3{,}43\cdot10^{19}$
11728200	250	26,3	$3{,}41\cdot10^{19}$	137,80	$2{,}46\cdot10^{20}$	100,16	$1{,}18\cdot10^{20}$
1673300	125	32,3	$3{,}31\cdot10^{19}$	47,31	$6{,}70\cdot10^{19}$	36,22	$4{,}07\cdot10^{19}$
2126300	100	53,4	$3{,}28\cdot10^{19}$	10,92	*	28,30	$3{,}11\cdot10^{19}$
3637800	110	24,7	$3{,}05\cdot10^{19}$	66,14	$1{,}04\cdot10^{20}$	48,13	$5{,}51\cdot10^{19}$
8042100	110	15,6	$2{,}59\cdot10^{19}$	96,23	$1{,}64\cdot10^{20}$	75,56	$8{,}83\cdot10^{19}$
7985000	100	32,5	$2{,}54\cdot10^{19}$	37,33	$4{,}72\cdot10^{19}$	28,68	$3{,}16\cdot10^{19}$
10882200	100	42,9	$2{,}54\cdot10^{19}$	17,69	$8{,}32\cdot10^{18}$	20,03	$2{,}11\cdot10^{19}$
4105300	75	53,6	$2{,}28\cdot10^{19}$	8,17	*	21,61	$2{,}30\cdot10^{19}$
3005800	100	41,2	$2{,}22\cdot10^{19}$	19,93	$1{,}28\cdot10^{19}$	20,57	$2{,}18\cdot10^{19}$
9765800	100	16,8	$2{,}19\cdot10^{19}$	84,22	$1{,}40\cdot10^{20}$	65,22	$7{,}58\cdot10^{19}$
10998100	110	5,2	$2{,}17\cdot10^{19}$	117,57	$2{,}06\cdot10^{20}$	102,55	$1{,}21\cdot10^{20}$
7969100	75	41,3	$2{,}08\cdot10^{19}$	14,84	$2{,}68\cdot10^{18}$	15,40	$1{,}55\cdot10^{19}$
4407700	75	43,4	$1{,}98\cdot10^{19}$	12,82	*	14,96	$1{,}50\cdot10^{19}$
1904700	100	35,5	$1{,}87\cdot10^{19}$	30,20	$3{,}31\cdot10^{19}$	24,88	$2{,}70\cdot10^{19}$
10097600	60	47,6	$1{,}8\cdot10^{19}$	7,95	*	12,37	$1{,}19\cdot10^{19}$
4404100	75	40,6	$1{,}79\cdot10^{19}$	15,60	$4{,}20\cdot10^{18}$	15,63	$1{,}58\cdot10^{19}$
11935600	60	42	$1{,}77\cdot10^{19}$	11,30	*	12,16	$1{,}16\cdot10^{19}$
6228900	40	59,1	$1{,}69\cdot10^{19}$	4,95	*	23,43	$2{,}52\cdot10^{19}$
10388800	75	34,8	$1{,}66\cdot10^{19}$	23,82	$2{,}05\cdot10^{19}$	19,25	$2{,}02\cdot10^{19}$
7485300	75	22,3	$1{,}64\cdot10^{19}$	50,77	$7{,}38\cdot10^{19}$	37,34	$4{,}21\cdot10^{19}$
4699800	50	49	$1{,}6\cdot10^{19}$	6,19	*	10,78	$9{,}92\cdot10^{18}$
7529700	75	17,6	$1{,}54\cdot10^{19}$	61,47	$9{,}50\cdot10^{19}$	47,17	$5{,}40\cdot10^{19}$
8275000	50	45,6	$1{,}51\cdot10^{19}$	7,42	*	9,98	$8{,}95\cdot10^{18}$
9819400	75	34,6	$1{,}51\cdot10^{19}$	24,16	$2{,}11\cdot10^{19}$	19,43	$2{,}04\cdot10^{19}$

[2] Τα πεδία με αστερίσκο έδωσαν αρνητική τιμή για την ενέργεια.

Στον πίνακα 12 παρουσιάζονται οι αποκλίσεις των ενεργειών που υπολογίστηκαν με την προτεινόμενη μεθοδολογία από την ενέργεια που έχει προσδιορίσει το πείραμα Auger για κάθε γεγονός. Σύμφωνα με τα στοιχεία αυτά, προκύπτει πως ένα στα τρία γεγονότα δημιουργείται από φωτόνιο που έχει υποστεί πρόδρομα φαινόμενα πριν εισέλθει στην ατμόσφαιρα. Το Auger, δίνει 31% φωτόνια ακτίνων γ για ενέργειες πάνω από 40 EeV, επομένως το αποτέλεσμα δεν είναι απόλυτα ασύμβατο με τις γνωστές εκτιμήσεις σύνθεσης των UHECRs. Παρ' όλα αυτά, στην εκτίμηση του πίνακα 12 παρουσιάζεται πληθώρα φωτονικών γεγονότων και για χαμηλότερες ενέργειες. Πρέπει όμως να τονιστεί πως τα γεγονότα που εξετάστηκαν δεν είναι τυχαία, μιας και το δείγμα μας δεν είναι προέρχεται από το σύνολο των γεγονότων που κατεγράφησαν, αλλά από μια ομάδα γεγονότων, τα κριτήρια επιλογής των οποίων δεν είναι γνωστά.

Πίνακας 12: Επί τοις εκατό απόκλιση της ενέργειας που υπολογίζεται με την προτεινόμενη μεθοδολογία από την ενέργεια που υπολογίζει για κάθε γεγονός το πείραμα Auger. Στην τελευταία στήλη φαίνεται ποιος τύπος πρωτογενούς παρουσιάζει τη μικρότερη απόκλιση μεταξύ των δύο τιμών.

Event id	πρωτόνιο	ήλιο	λίθιο	άνθρακας	σίδηρος	φωτόνιο PRESHOWER	φωτόνιο απλό	ΚΑΛΥΤΕΡΗ ΠΡΟΣΕΓΓΙΣΗ
10485600	30,21	12,64	34,36	32,27	33,37	1,45	20,14	**φωτόνιο PRESHOWER**
4128900	46,83	27,14	44,75	42,10	40,81	28,09	119,99	**λίθιο**
1234800	30,58	11,53	33,98	30,59	30,43	8,12	30,10	**φωτόνιο PRESHOWER**
11728200	47,25	75,05	31,46	28,20	15,86	246,26	621,84	**σίδηρος**
1673300	34,21	20,81	41,17	40,56	45,35	22,99	102,32	**ήλιο**
2126300	28,08	2,12	26,04	22,11	19,85	5,10	115,49	**ήλιο**
3637800	30,27	17,69	39,49	40,15	47,23	80,70	241,80	**ήλιο**
8042100	7,71	8,41	21,62	23,37	33,56	240,96	532,61	**πρωτόνιο**
7985000	33,51	20,03	41,11	39,90	45,06	24,37	85,88	**ήλιο**
10882200	37,74	20,85	41,84	37,81	38,29	16,86	67,23	**φωτόνιο PRESHOWER**
4105300	23,83	4,02	21,97	17,07	15,01	0,99	146,13	**φωτόνιο PRESHOWER**
3005800	29,35	11,17	34,73	30,64	32,10	1,93	42,53	**φωτόνιο PRESHOWER**
9765800	3,00	13,84	17,78	19,33	30,25	246,08	539,55	**πρωτόνιο**
10998100	17,76	38,75	1,37	3,53	16,36	457,48	849,70	**λίθιο**
7969100	46,33	32,51	51,23	47,14	48,65	25,43	87,10	**φωτόνιο PRESHOWER**
4407700	42,87	27,11	47,29	42,46	43,10	24,36	106,62	**φωτόνιο PRESHOWER**
1904700	13,26	5,65	22,22	19,51	24,79	44,29	76,94	**ήλιο**
10097600	47,62	31,01	50,55	44,76	44,08	34,14	160,86	**ήλιο**
4404100	37,68	21,99	43,63	39,08	41,18	11,75	76,55	**φωτόνιο PRESHOWER**
11935600	52,14	39,55	57,13	52,37	53,87	34,48	124,46	**φωτόνιο PRESHOWER**
6228900	6,54	31,06	2,34	2,44	1,63	49,29	199,96	**σίδηρος**
10388800	29,72	14,87	38,34	35,27	40,56	21,53	23,25	**ήλιο**
7485300	13,07	1,91	26,70	26,66	36,96	156,50	350,18	**ήλιο**
4699800	50,54	34,04	53,19	46,90	46,18	37,98	190,24	**ήλιο**
7529700	1,37	15,38	17,70	18,22	30,26	250,39	516,97	**πρωτόνιο**
8275000	53,58	39,69	57,85	51,72	52,13	40,71	179,51	**ήλιο**
9819400	22,53	6,25	32,09	28,78	34,71	35,03	39,99	**ήλιο**

4.7 Υπέρθεση στους καταιγισμούς υπερυψηλών ενεργειών

Στο άρθρο τους με τίτλο «Heavy nuclei synthesized in gamma-ray burst outflows as the source of ultrahigh energy cosmic rays» οι Metzger, Giannios και Horiuchi αναφέρουν ότι τα πρωτογενή σωματίδια που δημιουργούνται στις εκλάμψεις ακτίνων γ μπορεί να είναι βαρύτερα του σιδήρου και να προσεγγίζουν ατομικές μάζες της τάξης του 90 (zirconium), 130 (telluriun) μέχρι και 195 (platinum). Εδώ γίνεται μια προσπάθεια να ελεγχθεί τι είδους καταιγισμούς θα δημιουργήσουν στην ατμόσφαιρα αυτά τα πρωτογενή σωματίδια και αν αυτοί είναι διακρίσιμοι από τους καταιγισμούς πρωτονίων ή συμβατικών πυρήνων (μέχρι τον σίδηρο). Εξετάζεται δηλαδή ουσιαστικά η αρχή της υπέρθεσης που εφαρμόζεται για όλους τους πυρήνες.

Γενικότερα, για τη δημιουργία καταιγισμών από ατομικούς πυρήνες είναι αποδεκτή η αρχή της υπέρθεσης: ο καταιγισμός που δημιουργείται από έναν πυρήνα μάζας A και ενέργειας E_0 αποτελεί υπέρθεση A καταιγισμών νουκλεονίων ενέργειας E_0/A (Stanev, 2010). Στην περίπτωση που θέλουμε να ελέγξουμε χρειαζόμαστε προσομοιώσεις καταιγισμών βαρέων πυρήνων. Όμως ο βαρύτερος πυρήνας που μπορεί να χρησιμοποιήσει σαν πρωτογενές σωματίδιο το πρόγραμμα AIRES για να δημιουργήσει ατμοσφαιρικούς καταιγισμούς είναι ο πυρήνας του σιδήρου. Επομένως θα πρέπει να ελέγξουμε την αρχή της υπέρθεσης για το συγκεκριμένο πρόγραμμα και κατόπιν να συνθέσουμε τους καταιγισμούς.

Για τον έλεγχο της αρχής της υπέρθεσης θα χρησιμοποιήσουμε το σίδηρο. Πραγματοποιούμε κατακόρυφους καταιγισμούς σιδήρου αρχικής ενέργειας E_0 = 100 EeV στη θέση του Παρατηρητηρίου Auger με thinning 10^{-6}. Κατόπιν δημιουργούμε κατακόρυφους καταιγισμούς πρωτονίων και νετρονίων με αρχική ενέργεια $E = E_0/56$ = 1,78 EeV. Οι πίνακες 13 και 14 δίνουν τον αριθμό των σωματιδίων που ανιχνεύονται στο επίπεδο του εδάφους για τον καταιγισμό του νετρονίου και του πρωτονίου αντίστοιχα.

Πίνακας 13: Σωματίδια στην επιφάνεια του εδάφους για καταιγισμό νετρονίου αρχικής ενέργειας $E = E_0/56 = 1{,}78$ EeV.

>>>> PARTICLES REACHING GROUND LEVEL

All particle numbers are expressed in units of 10^9 particles.

	Mean	RMS Err.	Stddv.	Min.	Max.
Gamma rays	8.647668	0.06572	0.65723	7.45509	9.95871
Electrons	0.636529	0.00601	0.06012	0.52492	0.76491
Positrons	0.371342	0.00383	0.03835	0.30578	0.45890
Electr & positr	1.007871	0.00983	0.09825	0.83501	1.22329
Muons (+)	0.005094	0.00008	0.00084	0.00259	0.00663
Muons (-)	0.004999	0.00008	0.00082	0.00241	0.00635
All muons	0.010093	0.00016	0.00165	0.00499	0.01290
Pions (+)	0.000229	0.00001	0.00006	0.00010	0.00044
Pions (-)	0.000218	0.00001	0.00006	0.00009	0.00040
All pions	0.000447	0.00001	0.00012	0.00019	0.00084
Kaons (+)	0.000005	0.00000	0.00000	0.00000	0.00002
Kaons (-)	0.000004	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001
All kaons	0.000009	0.00000	0.00000	0.00000	0.00002
Neutrons	0.001193	0.00002	0.00016	0.00075	0.00161
Protons	0.000562	0.00001	0.00009	0.00032	0.00082
Anti-protons	0.000014	0.00000	0.00001	0.00000	0.00003
Nuclei	0.000000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
All charged	1.018997	0.00976	0.09756	0.84838	1.23269
All neutral	8.648885	0.06572	0.65722	7.45635	9.95995
All particles	9.667882	0.07516	0.75157	8.30473	11.18627

Πίνακας 14: Σωματίδια στην επιφάνεια του εδάφους για κατακόρυφο καταιγισμό πρωτονίου αρχικής ενέργειας $E = E_0/56 = 1{,}78$ EeV.

>>>> PARTICLES REACHING GROUND LEVEL

All particle numbers are expressed in units of 10^9 particles.

	Mean	RMS Err.	Stddv.	Min.	Max.
Gamma rays	8.643727	0.06467	0.64674	7.16498	10.20886
Electrons	0.637361	0.00613	0.06127	0.49905	0.78983
Positrons	0.372246	0.00395	0.03953	0.28751	0.47073
Electr & positr	1.009607	0.01007	0.10065	0.78705	1.26056
Muons (+)	0.005096	0.00008	0.00077	0.00272	0.00678
Muons (-)	0.004972	0.00007	0.00074	0.00260	0.00654
All muons	0.010068	0.00015	0.00151	0.00532	0.01325
Pions (+)	0.000225	0.00001	0.00006	0.00011	0.00052
Pions (-)	0.000217	0.00001	0.00006	0.00011	0.00049
All pions	0.000442	0.00001	0.00013	0.00022	0.00101
Kaons (+)	0.000005	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001
Kaons (-)	0.000003	0.00000	0.00000	0.00000	0.00001
All kaons	0.000008	0.00000	0.00000	0.00000	0.00002
Neutrons	0.001174	0.00002	0.00016	0.00078	0.00172
Protons	0.000562	0.00001	0.00010	0.00038	0.00093
Anti-protons	0.000015	0.00000	0.00001	0.00000	0.00005
Nuclei	0.000000	0.00000	0.00000	0.00000	0.00000
All charged	1.020703	0.01003	0.10027	0.79858	1.26741
All neutral	8.644926	0.06468	0.64677	7.16603	10.20991
All particles	9.665629	0.07433	0.74328	7.96903	11.47731

Επομένως για το σίδηρο θα πρέπει να έχουμε στο επίπεδο του εδάφους:

All charged : $(30 \cdot 1{,}018997 + 26 \cdot 1{,}020703) \cdot 10^9 = 57{,}108188 \cdot 10^9$ particles

All neutral : $(30 \cdot 8{,}648885 + 26 \cdot 8{,}644926) \cdot 10^9 = 484{,}234626 \cdot 10^9$ particles

All particles: $(30 \cdot 9{,}667882 + 26 \cdot 9{,}665629) \cdot 10^9 = 541{,}342814 \cdot 10^9$ particles

Από την προσομοίωση του σιδήρου προκύπτει ο πίνακας 15:

Πίνακας 15: Σωματίδια στην επιφάνεια του εδάφους για κατακόρυφο καταιγισμό πυρήνα σιδήρου αρχικής ενέργειας $E_0 = 100$ EeV.

>>>> PARTICLES REACHING GROUND LEVEL

All particle numbers are expressed in units of 10^9 particles.

	Mean	RMS Err.	Stddv.	Min.	Max.
Gamma rays	488.8956	1.168	11.679	465.441	516.148
Electrons	36.0398	0.121	1.205	33.343	39.399
Positrons	21.0586	0.075	0.747	19.492	23.150
Electr & positr	57.0984	0.193	1.931	53.092	62.549
Muons (+)	0.2868	0.001	0.009	0.262	0.309
Muons (-)	0.2821	0.001	0.009	0.263	0.307
All muons	0.5689	0.002	0.016	0.525	0.616
Pions (+)	0.0130	0.000	0.001	0.010	0.017
Pions (-)	0.0123	0.000	0.001	0.010	0.015
All pions	0.0254	0.000	0.002	0.021	0.031
Kaons (+)	0.0003	0.000	0.000	0.000	0.001
Kaons (-)	0.0002	0.000	0.000	0.000	0.000
All kaons	0.0005	0.000	0.000	0.000	0.001
Neutrons	0.0661	0.000	0.004	0.056	0.077
Protons	0.0317	0.000	0.002	0.026	0.038
Anti-protons	0.0008	0.000	0.000	0.000	0.002
Nuclei	0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000
All charged	57.7257	0.194	1.940	53.741	63.194
All neutral	488.9631	1.168	11.681	465.507	516.222
All particles	546.6888	1.358	13.577	519.249	579.416

Όπως φαίνεται από τα παραπάνω στοιχεία, προκύπτει μεταξύ της υπέρθεσης καταιγισμών και του καταιγισμού σιδήρου απόκλιση 1,07% για τα φορτισμένα σωματίδια, 0,97% για τα ουδέτερα σωματίδια και 0,98% για το σύνολο των σωματιδίων. Επομένως μπορούμε με ασφάλεια να πούμε ότι στο ζήτημα του αριθμού των σωματιδίων ισχύει η αρχή της υπέρθεσης.

Επόμενο θέμα είναι το ατμοσφαιρικό βάθος όπου τοποθετείται το μέγιστο του καταιγισμού. Η προσέγγιση της υπέρθεσης δίνει (Stanev 2010):

$$X_{\max}^{A} = X_{\max}^{p} - X_0 \ln A \quad (10)$$

όπου $X_{\max}^{A}$ είναι το ατμοσφαιρικό βάθος μεγίστου για τον βαρύ πυρήνα μαζικού αριθμού A, $X_{\max}^{p}$ είναι το ατμοσφαιρικό βάθος μεγίστου για πρωτονικό καταιγισμό τη ίδιας ενέργειας και X_0 είναι το radiation length για την ατμόσφαιρα (αποδεκτή τιμή 37,1 g/cm^2, Stanev 2010).

Από την προσομοίωση του σιδήρου προκύπτει X_{max} = 753,885 g/cm^2. Η παραπάνω σχέση δίνει X_{max} = 848,185 - 37,1·ln56 = 698,84g/cm^2 που δεν αποτελεί και πολύ καλή προσέγγιση (απόκλιση 7,3%). Χρησιμοποιώντας τις προσομοιώσεις νετρονίου και πρωτονίου προκύπτουν οι πίνακες 16, 17 και 18.

Πίνακας 16: Χαρακτηριστικά βάθους μεγίστου για κατακόρυφο καταιγισμό νετρονίου με αρχική ενέργεια E = E_0/56 = 1,78 EeV.

```
Shower maximum estimation:
                                Mean   RMS Err.   Stddv.
Min.     Max.
 Vt. depth of max. (g/cm2):   754.280     5.52    55.21
679.53  1004.34
 Sl. depth of max. (g/cm2):   754.280     5.52    55.21
679.53  1004.34
 Charged pcles. at maximum:  1226.509     5.13    51.31
996.73  1312.54
              (Times 10^6)
```

Πίνακας 17: Χαρακτηριστικά βάθους μεγίστου για κατακόρυφο καταιγισμό πρωτονίου με αρχική ενέργεια E = E_0/56 = 1,78 EeV.

```
Shower maximum estimation:
                                 Mean   RMS Err.   Stddv.    Min.
Max.
 Vt. depth of max. (g/cm2):   756.287     6.02    60.15   662.03
972.80
 Sl. depth of max. (g/cm2):   756.287     6.02    60.15   662.03
972.80
 Charged pcles. at maximum:  1228.686     4.31    43.06  1035.82
1303.26
              (Times 10^6)
```

Πίνακας 18: Χαρακτηριστικά βάθους μεγίστου για κατακόρυφο καταιγισμό σιδήρου με αρχική ενέργεια E_0 = 100 EeV.

```
Shower maximum estimation:
                                Mean    RMS Err.    Stddv.     Min.
Max.
 Vt. depth of max. (g/cm2):   753.885      1.67     16.65   723.15
815.54
 Sl. depth of max. (g/cm2):   753.885      1.67     16.65   723.15
815.54
 Charged pcles. at maximum:  67.16412    0.0684    0.6837  64.9374
68.6130
              (Times 10^9)
```

Από τους πίνακες 16, 17 και 18 προκύπτει ότι το βάθος του μεγίστου του καταιγισμού της υπέρθεσης είναι

$(30 \cdot 754{,}280\ \text{g/cm}^2 + 26 \cdot 756{,}287\ \text{g/cm}^2)/56 = 755{,}21\ \text{g/cm}^2$

που αποκλίνει από την αντίστοιχη τιμή του καταιγισμού κατά 0,17% .

Ο αριθμός των φορτισμένων σωματιδίων στο επίπεδο του μεγίστου είναι

$(30 \cdot 1226{,}509 + 26 \cdot 1228{,}686) \cdot 10^6 = 68741{,}106 \cdot 10^6 = 68{,}741106 \cdot 10^9$ particles

που αποκλίνει από την τιμή του καταιγισμού σιδήρου κατά 2,35% .

Επομένως το AIRES παράγει όντως τους καταιγισμούς πυρήνων με βάση την υπόθεση της υπέρθεσης. Αυτό σημαίνει ότι μπορούμε από εδώ και πέρα να χρησιμοποιήσουμε για την επεξεργασία μας καταιγισμούς πρωτονίων και νετρονίων αντίστοιχων ενεργειών για να συνθέσουμε καταιγισμούς βαρύτερων του σιδήρου πυρήνων.

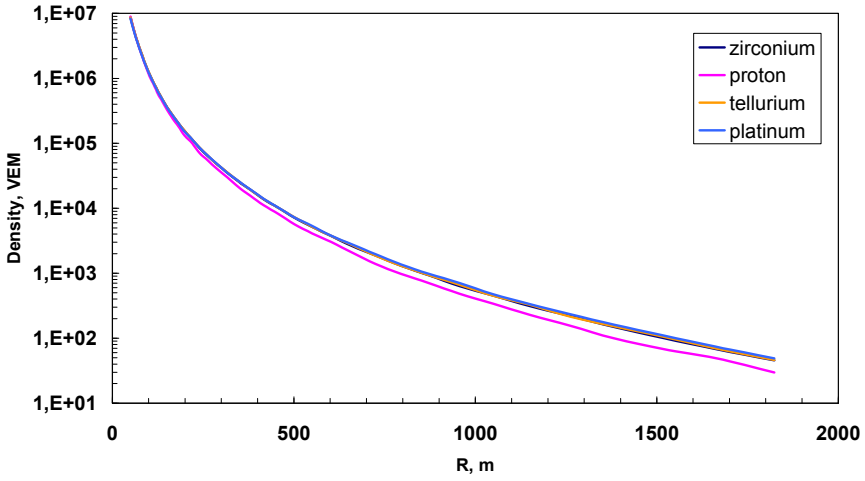
Ελέγχουμε την πυκνότητα φορτισμένων σωματιδίων και μιονίων στην επιφάνεια του εδάφους για τα στοιχεία zirconium, tellurium και platinum. Θεωρούμε κατακόρυφους καταιγισμούς με ενέργεια πρωτογενούς σωματιδίου αρχικής ενέργειας 100 EeV. Η ενέργεια αυτή διαμοιράζεται σε νετρόνια και πρωτόνια σύμφωνα με τον πίνακα 19.

Πίνακας 19: Αριθμός πρωτονίων και νετρονίων στους πυρήνες των βαρέων στοιχείων zirconium, tellurium και platinum και η ενέργεια που αντιστοιχεί σε κάθε νουκλεόνιο.

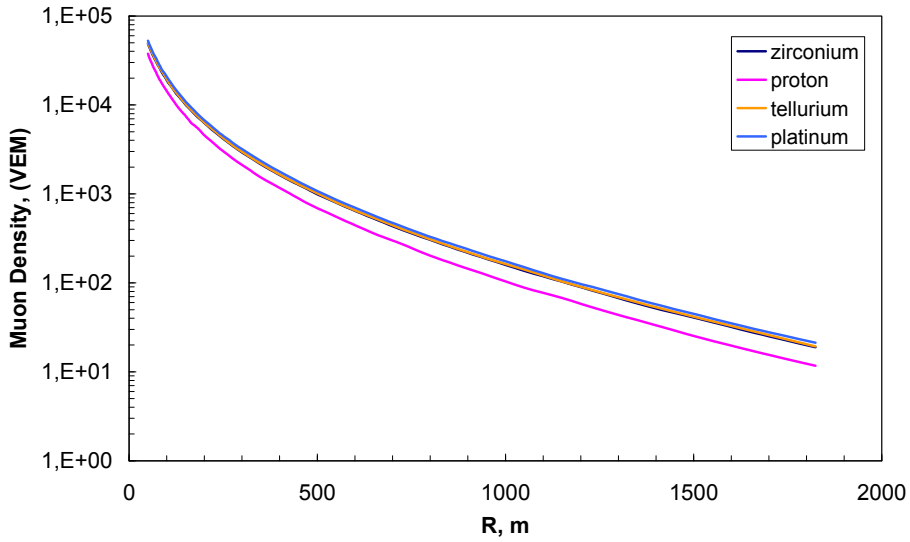
Στοιχείο	Πρωτόνια	Νετρόνια	Ενέργεια ανά νουκλεόνιο (EeV)
zirconium	40	50	1,11
tellurium	52	70	0,82
platinum	78	117	0,51

Πραγματοποιούμε λοιπόν προσομοιώσεις πρωτονίων και νετρίνων με ζενιθιακή γωνία 0 deg και αρχική ενέργεια την ενέργεια ανά νουκλεόνιο του παραπάνω πίνακα. Η πυκνότητα σωματιδίων στην επιφάνεια του εδάφους προκύπτει σαν το άθροισμα της πυκνότητας που δίνει η προσομοίωση του πρωτονίου πολλαπλασιασμένη με τον αριθμό των πρωτονίων και της πυκνότητας που δίνει η προσομοίωση του νετρονίου επί τον αριθμό των νετρονίων.

Στα σχήματα 47 και 48 φαίνονται οι πυκνότητες (σε μονάδες VEM) φορτισμένων σωματιδίων και μιονίων στο έδαφος για τα παραπάνω στοιχεία και για κατακόρυφο πρωτόνιο αρχικής ενέργειας 100 EeV για λόγους σύγκρισης.



Σχήμα 47:Πυκνότητα φορτισμένων σωματιδίων στο επίπεδο του εδάφους για κατακόρυφους καταιγισμούς πρωτονίου, zirconium, tellurium και platinum αρχικής ενέργειας 100 EeV.



Σχήμα 48: Πυκνότητα μιονίων στο επίπεδο του εδάφους για κατακόρυφους καταιγισμούς πρωτονίου, zirconium, tellurium και platinum αρχικής ενέργειας 100 EeV.

Αυτό που μπορούμε να παρατηρήσουμε από τα γραφήματα είναι ότι οι καταιγισμοί των βαρέων πυρήνων δεν απέχουν τόσο πολύ από τους πρωτονικούς αντίστοιχης ενέργειας. Η διαφοροποίηση γίνεται λίγο πιο εμφανής στα μιόνια κάτι που σημαίνει ότι για ένα πείραμα όπως το Auger θα μπορούσε να χρησιμοποιηθεί για τη διάκρισή τους το σύστημα AMIGA.

Το ατμοσφαιρικό βάθος στο οποίο εμφανίζεται το μέγιστο του καταιγισμού (X_{max}) προκύπτει από τους καταιγισμούς πρωτονίων και νετρονίων. Για το zirconium μπορούμε να πούμε ότι ένα μέσο X_{max} προκύπτει:

$$(747{,}291 \cdot 40 + 743{,}837 \cdot 50) / 90 = 745{,}372 \text{ g/cm}^2$$

Για το tellurium:

$$(734{,}727 \cdot 52 + 750{,}430 \cdot 70) / 122 = 743{,}737 \text{ g/cm}^2$$

Τέλος, για το platinum έχουμε:

$$(728{,}797 \cdot 78 + 730{,}000 \cdot 117) / 195 = 729{,}519 \text{ g/cm}^2$$

Για το πρωτόνιο αρχικής ενέργειας 100 EeV το μέσο ατμοσφαιρικό βάθος του μεγίστου προκύπτει από την προσομοίωση $X_{max} = 848{,}185$ g/cm^2. Επομένως είναι προφανές ότι ο καταιγισμός πρωτονίου αναπτύσσεται βαθύτερα στην ατμόσφαιρα από τους καταιγισμούς πυρήνων.

Για ένα υβριδικό παρατηρητήριο όπως το Auger είναι δυνατόν να γίνει διάκριση καταιγισμών που δημιουργούνται από πρωτόνια και καταιγισμών

βαρύτερων πυρήνων μέσω του ανιχνευτή φθορισμού. Από την άλλη, η διάκριση πυρήνων σιδήρου και βαρύτερων πυρήνων δεν φαίνεται να είναι εφικτή.

4.8 Συμπεράσματα

Στο τμήμα αυτό της εργασίας παρουσιάστηκε μια μέθοδος προσδιορισμού της ενέργειας πρωτογενούς σωματιδίου υπερυψηλών ενεργειών που δημιουργεί καταιγισμό στη γήινη ατμόσφαιρα με βάση τα δεδομένα του ανιχνευτή επιφανείας του πειράματος Pierre Auger. Μελετήθηκαν καταιγισμοί πρωτονίου, ηλίου, λιθίου, άνθρακα και σιδήρου καθώς και καταιγισμοί φωτονίων ακτίνων γ με πρόδρομα φαινόμενα πριν την εισαγωγή τους στην ατμόσφαιρα αλλά και χωρίς αυτά.

Με δεδομένη την πυκνότητα σωματιδίων που καταγράφει η ανιχνευτική διάταξη σε απόσταση 1000 m από τον πυρήνα του καταιγισμού και τη ζενιθιακή γωνία, όπως αυτή προκύπτει μέσα από τον χρονισμό ενεργοποίησης των ανιχνευτών, υπολογίζεται η κατακόρυφη πυκνότητα σωματιδίων και από αυτήν η ενέργεια του πρωτογενούς σωματιδίου.

Η προτεινόμενη μέθοδος προσφέρει διαφορετικούς τύπους για τα διαφορετικά πρωτογενή. Είναι σαφές από τους πίνακες 2 και 3 πως οι παράμετροι των σχέσεων αυτών εξαρτώνται από τον ατομικό αριθμό του πρωτογενούς πυρήνα, όμως η μεταξύ τους διάκριση φαίνεται να έχει σημασία στις ακραίες περιπτώσεις των πρωτονίων και πυρήνων σιδήρου. Τα φωτόνια συμπεριφέρονται σαν πυρήνες ελαφρύτεροι από πρωτόνιο, όμως εκεί τα πράγματα δεν είναι απόλυτα ξεκάθαρα λόγω και της ύπαρξης πρόδρομων φαινομένων πριν την κορυφή της ατμόσφαιρας.

Η ακρίβεια με την οποία υπολογίζεται η ενέργεια του πρωτογενούς με τη μέθοδο που προτείνεται είναι πολύ καλή, καθώς τα όποια σφάλματα αφορούν τη στατιστική των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων. Κατά τον υπολογισμό της ενέργειας η μέση απόκλιση από την ενέργεια της προσομοίωσης κυμαίνεται από 0,56% (ήλιο) μέχρι 2,31% (πρωτόνιο) για τους αδρονικούς καταιγισμούς, ενώ στα φωτόνια η απόκλιση φτάνει στο 11% όταν

δεν υπάρχουν πρόδρομα φαινόμενα και στο 15% όταν αυτά λαμβάνονται υπ' όψιν.

Στο τελευταίο κομμάτι του κεφαλαίου αυτού εξετάστηκε μια πρόταση σύμφωνα με την οποία τα πρωτογενή σωματίδια που δημιουργούνται στις εκλάμψεις ακτίνων γ μπορεί να είναι βαρύτερα του σιδήρου και να προσεγγίζουν ατομικές μάζες της τάξης του 90 (zirconium), 130 (telluriun) μέχρι και 195 (platinum). Με τη βοήθεια προσομοιώσεων ελέγχθηκε ουσιαστικά η αρχή της υπέρθεσης και βρέθηκε ότι αυτή ισχύει. Μια ανιχνευτική διάταξη όπως το Auger θα μπορούσε να παρατηρήσει μέσω του ανιχνευτή φθορισμού καταιγισμούς που δημιουργούνται από τόσο βαρείς πυρήνες και να τους διακρίνει μέσω του ατμοσφαιρικού βάθους του μεγίστου από καταιγισμούς πρωτονίων, η διάκριση όμως πυρήνων σιδήρου και βαρύτερων πυρήνων δεν φαίνεται να είναι εφικτή.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5: ΜΕΛΕΤΗ ΤΗΣ ΚΟΣΜΙΚΗΣ ΑΚΤΙΝΟΒΟΛΙΑΣ ΥΠΕΡΥΨΗΛΩΝ ΕΝΕΡΓΕΙΩΝ ΜΕΣΩ ΤΗΛΕΣΚΟΠΙΩΝ CHERENKOV

5.1 Εισαγωγή

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, η ατμόσφαιρα της Γης λειτουργεί σαν ένας γιγαντιαίος ανιχνευτής σωματιδίων όταν οι κοσμικές ακτίνες υψηλών ενεργειών εισέρχονται σε αυτή δημιουργώντας εκτεταμένους καταιγισμούς. Η παρατήρηση αυτών των καταιγισμών δίνει δύο οπτικά φαινόμενα που καταγράφονται από αντίστοιχα τηλεσκόπια, την ακτινοβολία φθορισμού (fluorescence radiation) και την ακτινοβολία Cherenkov.

Η ακτινοβολία φθορισμού δημιουργείται από την αποδιέγερση μορίων της ατμόσφαιρας από τα ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια του ατμοσφαιρικού καταιγισμού. Η μέθοδος εκτίμησης της ενέργειας του πρωτογενούς κοσμικού σωματιδίου μέσω της μεθόδου φθορισμού χρησιμοποιεί την ατμόσφαιρα σαν θερμιδόμετρο. Η ακρίβεια της μεθόδου εξαρτάται σε μεγάλο βαθμό από τη σχέση της διαδρομής (path length) στην ατμόσφαιρα ενός σωματιδίου δεδομένης ενέργειας και του φωτός φθορισμού που εκπέμπεται.

Από την άλλη πλευρά, η ακτινοβολία Cherenkov παράγεται στην ατμόσφαιρα όταν τη διασχίζουν φορτισμένα σωματίδια με ταχύτητα μεγαλύτερη της ταχύτητας του φωτός στο μέσο αυτό. Τα φωτόνια Cherenkov σχηματίζουν μια «λίμνη» στο μέτωπο του καταιγισμού με πάχος περίπου 1/200 της διαμέτρου της. Η παραγωγή των φωτονίων Cherenkov οφείλεται σε όλα τα φορτισμένα σωματίδια του καταιγισμού που έχουν αρκετή ενέργεια για να ταξιδεύουν με ταχύτητα μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός στην ατμόσφαιρα. Για κάθε ηλεκτρόνιο έχει υπολογιστεί ότι παράγονται 10,8 φωτόνια ανά μέτρο διαδρομής. Τα τηλεσκόπια Cherenkov ανιχνεύουν και καταγράφουν αυτά τα φωτόνια για να προσδιορίσουν τη διεύθυνση άφιξης και την ενέργεια του πρωτογενούς σωματιδίου.

Η ατμοσφαιρική ακτινοβολία Cherenkov χρησιμοποιείται για την ανίχνευση από το έδαφος των ακτίνων γ, μέσω των ατμοσφαιρικών τηλεσκοπίων Cherenkov (Imaging Atmospheric Cherenkov Telescopes –

IACTs). Στην περίπτωση αυτή χρησιμοποιούνται και ανιχνευτές νερού Cherenkov, με την ενεργειακή περιοχή στην οποία επιτυγχάνεται η μεγαλύτερη ευαισθησία να είναι ανάμεσα στα 30 GeV και 100 TeV και τις δύο τεχνικές να δρουν συμπληρωματικά η μια στην άλλη. Τα ατμοσφαιρικά τηλεσκόπια επιτυγχάνουν μεγάλη ευαισθησία σε ένα περιορισμένο πεδίο παρατήρησης καθώς και εξαιρετική διακριτική ικανότητα στις γωνίες διεύθυνσης και στις ενέργειες για λεπτομερείς μελέτες κοσμικών αντικειμένων. Από την άλλη πλευρά οι ανιχνευτές νερού Cherenkov μπορούν να ενεργοποιήσουν τα ατμοσφαιρικά τηλεσκόπια για τα λαμπρότερα πρόσκαιρα φαινόμενα και εμφανίζουν υψηλή ευαισθησία για εκτεταμένες σταθερές πηγές και για ενέργειες πάνω από 10 TeV.

Και στις δύο περιπτώσεις η μελέτη των ακτίνων γ γίνεται μέσω της παρατήρησης των δευτερογενών σωματιδίων του καταιγισμού που δημιουργείται στην ατμόσφαιρα λόγω της αλληλεπίδρασης του φωτονίου γ με τα σωματίδια της ατμόσφαιρας. Τα ατμοσφαιρικά τηλεσκόπια Cherenkov ανιχνεύουν τα ευρείας ζώνης φωτόνια Cherenkov με λ > 300 nm που δημιουργούνται από την ηλεκτρονική συνιστώσα του καταιγισμού (ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια) και φτάνουν στην επιφάνεια του εδάφους χωρίς σημαντική εξασθένιση. Τα φωτόνια Cherenkov δημιουργούνται καθώς τα δευτερογενή ηλεκτρόνια και ποζιτρόνια κινούνται με ταχύτητες μεγαλύτερες από την ταχύτητα του φωτός στην ατμόσφαιρα. Για σχεδόν κατακόρυφους καταιγισμούς αυτό το γαλαζωπό φως φωτίζει έναν κύκλο με διάμετρο περίπου 250 μέτρα στο έδαφος. Για μεγαλύτερες ζενιθιακές γωνίες αυτή η περιοχή είναι σημαντικά μεγαλύτερη. Η τεχνική χρησιμοποιεί μεγάλα κάτοπτρα για να συγκεντρώσει τα φωτόνια σε μια κάμερα πολλών pixel που λειτουργεί με έκθεση μερικών nanoseconds. Όταν ανακατασκευαστεί ο άξονας του καταιγισμού μπορεί να προσδιοριστεί το σημείο του ουρανού από το οποίο προέρχεται το φωτόνιο γ. Τα ατμοσφαιρικά τηλεσκόπια λειτουργούν με χαμηλό ενεργειακό κατώφλι και εξαιρετικές θερμιδομετρικές ικανότητες αλλά με περιορισμό τη χρήση τους τις καθαρές νύχτες χωρίς φεγγάρι. Οι διατάξεις νερού μπορούν να λειτουργούν συνεχώς, καταγράφοντας απευθείας τα σωματίδια του καταιγισμού αλλά απαιτούν σημαντικά υψηλότερες ενέργειες κοσμικών φωτονίων ώστε ο καταιγισμός να φτάσει στο έδαφος για να ανιχνευθεί.

Μέσω των ατμοσφαιρικών τηλεσκοπίων όπως το VERITAS, το MAGIC και το H.E.S.S. μπορούν να ανιχνευθούν σημειακές πηγές με ευαισθησία ροής μέχρι και 1% του Crab Nebula (που ήταν η πρώτη πηγή υψηλής ενέργειας ακτίνων γ που ανακαλύφθηκε το 1989 και αποτελεί από τότε μονάδα μέτρησης της ροής ακτίνων γ). Με περιοχή συλλογής 10^5 m^2, γωνιακή διακριτική ικανότητα 5 arcminutes ενεργειακή κάλυψη από 100 GeV μέχρι 10 TeV και 99,999% ικανότητα απόρριψης του υποβάθρου κοσμικής ακτινοβολίας, τα σύγχρονα ατμοσφαιρικά τηλεσκόπια έχουν σαν μοναδικούς περιορισμούς το μικρό πεδίο παρατήρησης και τον μικρό κύκλο εργασιών (10%). Από την άλλη πλευρά οι διατάξεις επιφανείας αν και με 150 φορές μικρότερη ευαισθησία διαθέτουν ευρύτατο πεδίο παρατήρησης και κύκλο εργασιών που αγγίζει το 100 %. Είναι έτσι ιδανικές για μελέτες ολόκληρου του ουρανού και ανίχνευση εκπομπής από εκτεταμένες πηγές. Περιορισμός τους είναι το υψηλό ενεργειακό κατώφλι (10 TeV) και η διακριτική ικανότητα των 30 arcmin.

Τα πειράματα τηλεσκοπίων Cherenkov για την ανίχνευση κοσμικών φωτονίων γ δέχονται ακτινοβολία Cherenkov και από αδρονικούς καταιγισμούς που δημιουργούνται στην ατμόσφαιρα της Γης από UHECR και θα μπορούσαν να καταγράψουν τα αποτελέσματα αυτά πριν τα απορρίψουν ως θόρυβο του περιβάλλοντος.

Είναι ξεκάθαρο πια πως οι κοσμικές ακτίνες υπερυψηλών ενεργειών και οι καταιγισμοί που δημιουργούν είναι φαινόμενα ιδιαίτερα σπάνια. Ένα σωματίδιο ενέργειας 10^{18} eV προσπίπτει σε ένα τετραγωνικό χιλιόμετρο στην επιφάνεια της Γης ανά έτος, ενώ στις ενέργειες της τάξης των 10^{20} eV η συχνότητα αυτή πέφτει στο ένα σωματίδιο ανά τετραγωνικό χιλιόμετρο ανά αιώνα. Για το λόγο αυτό οι διατάξεις που δημιουργήθηκαν για τη μελέτη του φαινομένου των UHECR έχουν πολύ μεγάλη έκταση (π.χ. το Auger με έκταση 3000 km^2).

Από την άλλη πλευρά, διατάξεις που λειτουργούν ήδη (όπως το VERITAS, το MAGIC και το Milagro) καθώς και πειράματα που τώρα σχεδιάζονται, όπως το CTA δέχονται ακτινοβολία Cherenkov και από αδρονικούς καταιγισμούς, την αξιολογούν ως τέτοια και την απορρίπτουν σαν θόρυβο υποβάθρου. Τα δεδομένα από τα τηλεσκόπια αυτά θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για την ανακατασκευή καταιγισμών εξαιρετικά υψηλών

ενεργειών, αν υπάρξει παραμετρικοποίηση των χαρακτηριστικών της ακτινοβολίας Cherenkov που δημιουργείται στο επίπεδο του εδάφους από Εκτεταμένους Ατμοσφαιρικούς Καταιγισμούς σωματιδίων υπερυψηλής ενέργειας.

5.2 Πειράματα Ατμοσφαιρικών Τηλεσκοπίων

Αυτή τη στιγμή βρίσκονται σε λειτουργία τέσσερα πειράματα ατμοσφαιρικών τηλεσκοπίων για την μελέτη των φωτονίων ακτίνων γ στην περιοχή των GeV έως TeV, ενώ στη φάση του σχεδιασμού βρίσκεται το πιο ολοκληρωμένο πείραμα, το Cherenkov Telescope Array.

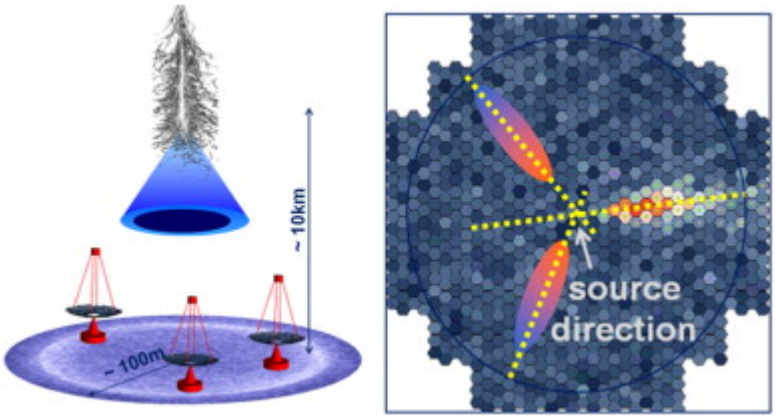
I. VERITAS

Το Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System (VERITAS) αποτελείται από τέσσερα τηλεσκόπια που χρησιμοποιούνται για την παρατήρηση πολύ υψηλής ενέργειας φωτονίων γ. Το VERITAS βρίσκεται στο Αστεροσκοπείο Fred Lawrence Whipple στην Αριζόνα των Ηνωμένων Πολιτειών. Το πείραμα χειρίζεται μια ομάδα 100 επιστημόνων από 20 διαφορετικά ινστιτούτα των Ηνωμένων Πολιτειών, της Ιρλανδίας, της Αγγλίας και του Καναδά (Weekes et al., 2002).

Το VERITAS βρίσκεται σε υψόμετρο 1268 μέτρων από την επιφάνεια της θάλασσας. Κάθε τηλεσκόπιο είναι ένας ανακλαστήρας 12 μέτρων τύπου Davies-Cotton (f/1,0) με κάμερα πεδίου υψηλής ανάλυσης 3,5 deg που αποτελείται από 499 ξεχωριστούς φωτοπολλαπλασιαστές. Τα τηλεσκόπια απέχουν μεταξύ τους από 35 m έως 109 m. Ξεκίνησε τη λειτουργία του τον Απρίλιο του 2007.

Το VERITAS χρησιμοποιεί τέσσερα τηλεσκόπια προσπαθώντας να πετύχει στερεοσκοπική απεικόνιση του καταιγισμού. Όταν μια πηγή ακτίνων γ κεντράρεται στο πεδίο του τηλεσκοπίου, οι εικόνες που συλλέγονται μετά την παρατήρηση πολλών καταιγισμών ακτίνων γ θα έχουν όλες κατεύθυνση προς το κέντρο της κάμερας, σε αντίθεση με τους καταιγισμούς κοσμικών ακτίνων

που εμφανίζουν τυχαίες κατευθύνσεις. Στην εικόνα ενός καταιγισμού φωτονίων από ένα μόνο τηλεσκόπιο μπορούμε να τοποθετήσουμε το σημείο προέλευσης του καταιγισμού σε μια γραμμή μέσα στο μήκος της εικόνας. Αν όμως χρησιμοποιηθεί μια ομάδα τηλεσκοπίων, καθένα από αυτά θα παρατηρήσει τον καταιγισμό από λίγο διαφορετική γωνία και οι εικόνες που θα προκύψουν θα έχουν διαφορετικούς προσανατολισμούς. Αν υπερθέσουμε εικόνες του ίδιου καταιγισμού όπως παρατηρήθηκε από διαφορετικά τηλεσκόπια, η θέση της πηγής των ακτίνων γ θα προσδιοριστεί σαν το σημείο τομής των γραμμών κατά μήκος κάθε εικόνας (εικόνα 7).



Εικόνα 7: Στερεοσκοπική παρατήρηση καταιγισμού από συστοιχία τηλεσκοπίων Cherenkov (Naumann et al., 2012).

Επιπλέον η παρατήρηση του ίδιου καταιγισμού από περισσότερα από ένα τηλεσκόπια προσφέρει βελτιωμένη ακρίβεια στον υπολογισμό της ενέργειας του φωτονίου γ και αυξημένη ευαισθησία. Οι ερευνητές του VERITAS προσδιορίζουν την ενέργεια του αρχικού φωτονίου γ μετρώντας το μέγεθος του καταιγισμού και εκτιμώντας από αυτό τη συνολική ακτινοβολία Cherenkov που παράγεται. Όσο μεγαλύτερη είναι η ενέργεια του φωτονίου γ τόσο μεγαλύτερο είναι και το μέγεθος του καταιγισμού. Η ύπαρξη τεσσάρων τηλεσκοπίων εξασφαλίζει ότι θα είναι ορατοί μικρότεροι καταιγισμοί και επομένως χαμηλότερης ενέργειας φωτόνια γ. Επιπλέον, με μέτρηση του μεγέθους του καταιγισμού ταυτόχρονα από τέσσερα τηλεσκόπια αυξάνεται η ακρίβεια με την οποία προσδιορίζεται η ενέργεια του πρωτογενούς φωτονίου.

II. H.E.S.S.

Το High Energy Stereoscopic System (H.E.S.S.) βρίσκεται στη Ναμίμπια της Αφρικής σε υψόμετρο 1800 m από την επιφάνεια της θάλασσας (Hinton, 2004). Ξεκίνησε να λειτουργεί τον Δεκέμβριο του 2003. Πρόκειται κι εδώ για ένα στερεοσκοπικό παρατηρητήριο που αποτελείται από τέσσερα ατμοσφαιρικά τηλεσκόπια Cherenkov των 13 m (f/1,2). Οι κάμερες των τηλεσκοπίων με πεδίο 5 deg περιέχουν 960 φωτοπολλαπλασιαστές. Τα τηλεσκόπια που υπάρχουν αυτή τη στιγμή είναι διαταγμένα στις γωνίες ενός τετραγώνου με πλευρά 120 m. Η τοποθέτηση αυτή αποτελεί ένα συμβιβασμό ανάμεσα στην ανάγκη της μεγάλης απόστασης που απαιτείται για την καλή στερεοσκοπική μελέτη ενός γεγονότος και την απαίτηση δύο ή και περισσότερα τηλεσκόπια να μπορούν να ενεργοποιηθούν από το φως ενός καταιγισμού. Οι καταιγισμοί εκπέμπουν την ακτινοβολία Cherenkov σε ένα ύψος περίπου 10 km και σε αντίστοιχη απόσταση από τα τηλεσκόπια. Έτσι, ακόμα και τα 120 μέτρα απόστασης δίνουν μικρές γωνίες μεταξύ των διαφορετικών εικόνων των τηλεσκοπίων. Από την άλλη πλευρά, επειδή η ατμοσφαιρική δεξαμενή μέσα στην οποία εμφανίζεται η ακτινοβολία Cherenkov έχει διάμετρο 250 m, μεγαλύτερη απόσταση θα είχε σαν αποτέλεσμα να μην παρατηρούν περισσότερα του ενός τηλεσκόπια ταυτόχρονα έναν καταιγισμό.

Στη νεώτερη φάση του προγράμματος H.E.S.S.–II έχει ήδη προστεθεί στο κέντρο της διάταξης ένα κάτοπτρο διαμέτρου 28 m^2 που αυξάνει την ευαισθησία και τη διακριτική ικανότητα του συστήματος. Το ενεργειακό κατώφλι αναμένεται να κατέβει στα 20 GeV και η ευαισθησία θα αυξηθεί πάνω από τα 100 GeV.

III. MAGIC

Το MAGIC είναι ένα σύστημα δύο ατμοσφαιρικών τηλεσκοπίων Cherenkov (Baixeras, 2003). Το MAGIC-I ξεκίνησε να λειτουργεί το 2004 και το δεύτερο τηλεσκόπιο MAGIC-II ολοκληρώθηκε το 2009. Βρίσκεται στο La Palma των Καναρίων Νήσων σε υψόμετρο 2200 m από την επιφάνεια της θάλασσας. Το MAGIC-I είναι ένα παραβολικό κάτοπτρο με διάμετρο 17 m (f/1,2) και η κάμερά του αποτελείται από 396 φωτοπολλαπλασιαστές

μεγέθους 0,1 deg και 180 φωτοπολλαπλασιαστές 0,2 deg. Το κατώφλι για την ανίχνευση ακτίνων γ είναι 60-70 GeV. Το MAGIC-II είναι ένα δεύτερο τηλεσκόπιο με την ίδια διάμετρο, τοποθετημένο σε απόσταση 85 m από το πρώτο. Η προσθήκη του βελτιώνει τη δυνατότητα φιλτραρίσματος του υποβάθρου και αυξάνει την ενεργειακή διαχωριστική ικανότητα.

IV. CANGAROO-III

Το CANGAROO (**C**ollaboration of **A**ustralia and **N**ippon (Japan) for a **GA**mma **R**ay **O**bservatory in the **O**utback) αποτελεί μια συνεργασία της Αυστραλίας και της Ιαπωνίας με σκοπό τη μελέτη των κοσμικών φωτονίων ακτίνων γ υψηλών ενεργειών (Mori, 2001). Βρίσκεται στην Νότια Αυστραλία, στην περιοχή Woomera και σε υψόμετρο 160 m από την επιφάνεια της θάλασσας και αποτελείται από τέσσερα ατμοσφαιρικά τηλεσκόπια Cherenkov διαμέτρου 10 m (f/0,8). Η κάμερα του τηλεσκοπίου αποτελείται από 552 φωτοπολλαπλασιαστές των 0,2 deg. Τα τέσσερα τηλεσκόπια είναι τοποθετημένα στις κορυφές ρόμβου με πλευρά 100 m.

Πρόγονος του πειράματος αυτού ήταν το CANGAROO-I με κάτοπτρο διαμέτρου 3,8 m και κάμερα με 256 μικρούς φωτοπολλαπλασιαστές.

V. CTA

Το Cherenkov Telescope Array – CTA σχεδιάζεται σαν το επόμενο πείραμα ανίχνευσης των κοσμικών φωτονίων στην ενεργειακή περιοχή των GeV έως TeV (CTA Consortium, 2010). Γίνεται προσπάθεια η διάταξη αυτή να είναι πρωτοποριακή σε πολλούς τομείς: θα αποτελείται από διατάξεις στο βόρειο και το νότιο ημισφαίριο, κάθε μια από τις οποίες θα περιλαμβάνει μεγάλο πλήθος τηλεσκοπίων διαφορετικών μεγεθών. Επιπλέον θα λειτουργεί σαν ένα Ανοιχτό Παρατηρητήριο δίνοντας τη δυνατότητα σε όλη την επιστημονική κοινότητα να καταθέτει προτάσεις για παρατήρηση και να χρησιμοποιεί τα δεδομένα που συλλέγονται.

Το CTA θα δημιουργηθεί με τη συνεργασία ευρωπαϊκών και διεθνών ερευνητικών ιδρυμάτων. Θα παρέχει κάλυψη όλου του ουρανού με ευαισθησία, κάλυψη ενεργειακών περιοχών με χρονική και χωρική διακριτική

ικανότητα που δεν συγκρίνονται με τις υπάρχουσες διατάξεις. Θα είναι περίπου 10 φορές πιο ευαίσθητο από τα υπάρχοντα πειράματα επιτρέποντας την ανίχνευση και σε βάθος μελέτη μεγάλων δειγμάτων γνωστών τύπων πηγών αλλά και υποψήφιων πηγών. Θα καλύπτει τρεις με τέσσερις τάξεις μεγέθους στο ενεργειακό φάσμα. Σε συνδυασμό με την αυξημένη ακρίβεια και τα πολύ μικρότερα στατιστικά σφάλματα, θα δώσει τη δυνατότητα να ξεκαθαριστούν πολλές λεπτομέρειες εξαιρετικά σημαντικών θεμάτων όπως η λεπτονική ή αδρονική προέλευση των ακτίνων γ. Επιπλέον, μέσω της εξαιρετικής διακριτικής του ικανότητας θα μελετηθούν πέρα από τις εκτεταμένες πηγές και οι λεπτές δομές που είναι ορατές σε άλλα μήκη κύματος. Η χρονική διακριτική ικανότητα του CTA θα επιτρέψει τη μελέτη χρονικά μεταβαλλόμενων εκπομπών με ακρίβεια μικρότερη του λεπτού. Αυτό θα έχει σαν αποτέλεσμα και τον υπολογισμό της περιοχής που δημιουργεί τον παλμό ακτινοβολίας καθώς για περιοδικές πηγές το μέγεθος της περιοχής εκπομπής σχετίζεται με την περίοδο του παλμού.

Αν και οι διατάξεις τηλεσκοπίων Cherenkov που χρησιμοποιούνται σήμερα αποτελούνται από έναν μικρό αριθμό τηλεσκοπίων (μέχρι τέσσερα) σε μια περιορισμένη περιοχή για να μελετούν στερεοσκοπικά τους καταιγισμούς που δημιουργούν τα φωτόνια γ, οι περισσότεροι καταιγισμοί παρατηρούνται από δύο μέχρι τρία τηλεσκόπια. Μία διάταξη δεκάδων τηλεσκοπίων θα επέτρεπε την ανίχνευση καταιγισμών σε μια εκτεταμένη περιοχή αυξάνοντας δραματικά τους παρατηρούμενους καταιγισμούς αλλά και τις διαφορετικές όψεις του κάθε καταιγισμού. Αυτό θα αύξανε τη διακριτική ικανότητα της διάταξης και θα επέτρεπε την καλύτερη απόρριψη γεγονότων του υποβάθρου. Επιπλέον, μια διάταξη πολλών τηλεσκοπίων μπορεί να χρησιμοποιηθεί και σε διαφορετικούς συνδυασμούς λειτουργίας επιτρέποντας την ταυτόχρονη παρατήρηση πολλών στόχων. Έτσι, είναι δυνατόν να γίνουν εκτεταμένες χαρτογραφήσεις του ουρανού με υψηλή ευαισθησία σε περιορισμένο χρονικό διάστημα. Ο αριθμός των αντικειμένων που θα μελετηθούν αναμένεται να φτάσει από μερικές δεκάδες που είναι σήμερα σε περίπου 1000 αντικείμενα.

Ένα τηλεσκόπιο Cherenkov συγκεκριμένου μεγέθους καλύπτει μια ενεργειακή περιοχή 1,5 έως 2 δεκάδων. Επομένως, για να καλυφθεί η ενεργειακή περιοχή από μερικές δεκάδες GeV μέχρι πάνω από 100 TeV

χρειάζονται τηλεσκόπια τριών διαφορετικών μεγεθών. Έτσι το CTA σχεδιάζεται να περιλαμβάνει τα παρακάτω μεγέθη τηλεσκοπίων:
Small size telescopes – SST: διάμετρος κατόπτρου 5-8 m.
Medium size telescopes – MST: διάμετρος κατόπτρου 10-12 m.
Large size telescopes – LST: διάμετρος κατόπτρου 20-30m.

Για τη διάταξη του νοτίου ημισφαιρίου που θα παρατηρεί το γαλαξιακό επίπεδο και τις περισσότερες γαλαξιακές πηγές θα χρησιμοποιηθούν και οι τρεις τύποι ενώ στο βόρειο ημισφαίριο όπου η διάταξη θα χρησιμοποιηθεί για την παρατήρηση εξωγαλαξιακών πηγών υψηλότερης ενέργειας θα χρησιμοποιηθούν μόνο οι δύο τύποι των μεγαλύτερων τηλεσκοπίων.

Ανεξάρτητα από το μέγεθος του κάθε τηλεσκοπίου και τις λεπτομέρειες του σχεδιασμού του, κύριο χαρακτηριστικό και ζητούμενο αποτελεί η ικανότητά του να συγκεντρώνει το φως, το οπτικό του πεδίο και το μέγεθος των φωτοστοιχείων (pixels) της κάμεράς του. Τα ηλεκτρονικά του συστήματα θα πρέπει να ταιριάζουν με το εύρος των παλμών Cherenkov που είναι της τάξης των nanoseconds και το σύστημα ενεργοποίησής του (triggering) να είναι σε θέση σε πραγματικό χρόνο να διακρίνει την ακτινοβολία Cherenkov που δημιουργείται από καταιγισμούς από το φωτεινό υπόβαθρο του νυχτερινού ουρανού. Το τελευταίο σημείο είναι εξαιρετικά σημαντικό καθώς λόγω του πολύ μεγάλου όγκου των δεδομένων, δεν είναι αποδεκτό να καταγράφονται λανθασμένα στοιχεία.

Καθώς γίνεται προσπάθεια να καλυφθεί μια μεγάλη ενεργειακή περιοχή, μια διάταξη ομοιόμορφα τοποθετημένων τηλεσκοπίων δεν εξυπηρετεί. Επομένως τα διαφορετικά μεγέθη των τηλεσκοπίων θα διαταχθούν με διαφορετικό τρόπο για να αποδώσουν το καλύτερο δυνατό αποτέλεσμα.

Στη χαμηλή ενεργειακή περιοχή κάτω από 100 GeV η περιοχή που θα καλυφθεί δεν χρειάζεται να είναι μεγάλη. Έτσι θα χρησιμοποιηθεί μια περιοχή της τάξης των 10^4 m^2. Εδώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν είτε λίγα μεγάλα τηλεσκόπια είτε μεγαλύτερος αριθμός μικρότερων τηλεσκοπίων με το κόστος να παίζει σημαντικό ρόλο στο σχεδιασμό. Για τα μεγάλα τηλεσκόπια σημαντικό παράγοντα κόστους αποτελούν τα κάτοπτρα ενώ για τα μικρότερα το κόστος αυξάνεται λόγω των ηλεκτρονικών και των φωτοστοιχείων. Επιπλέον πρόβλημα σε μια διάταξη πολλών μικρών τηλεσκοπίων αποτελεί το

σύστημα ενεργοποίησης καθώς κανένα τηλεσκόπιο δεν θα είναι αρκετά μεγάλο ώστε να καταγράψει τον απαιτούμενο αριθμό φωτονίων για να ενεργοποιήσει αξιόπιστα τη διάταξη. Υπάρχουν μέθοδοι για να ξεπεραστεί το πρόβλημα αυτό με την υπέρθεση εικόνων από πολλά τηλεσκόπια, όμως τότε δημιουργούνται δεδομένα τεράστιου όγκου. Επομένως η λύση που προκρίνεται είναι ένας μικρός αριθμός πολύ μεγάλων τηλεσκοπίων με διάμετρο από 20 έως 30 m.

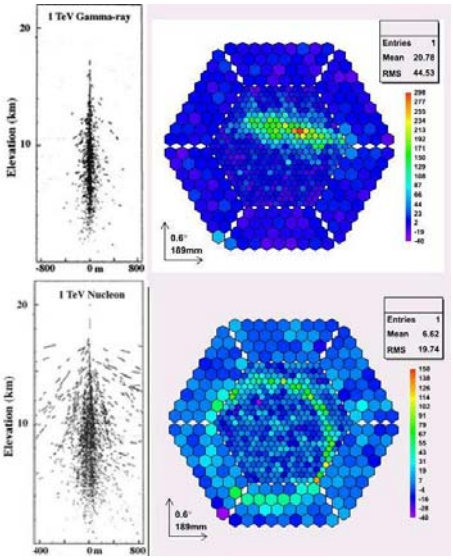
Στην ενεργειακή περιοχή από 100 GeV μέχρι 10 TeV μπορεί να χρησιμοποιηθεί η τεχνογνωσία από πειράματα που ήδη λειτουργούν. Προκρίνεται λοιπόν η χρήση τηλεσκοπίων μεσαίου μεγέθους με διάμετρο από 10 έως 15 μέτρα που θα τοποθετηθούν σε πλέγμα με απόσταση 100 m. Η μεγάλη περιοχή που θα καλυφθεί και η καλύτερη ανακατασκευή του καταιγισμού που θα παρατηρείται ταυτόχρονα από πολλά τηλεσκόπια αποδίδουν στη διάταξη μεγαλύτερη ευαισθησία. Για πρώτη φορά η έκταση της διάταξης θα είναι μεγαλύτερη από τη δεξαμενή Cherenkov εξασφαλίζοντας ότι θα υπάρχουν εικόνες από την περιοχή κοντά στον άξονα του καταιγισμού.

Στην περιοχή πάνω από 10 TeV η διάταξη θα πρέπει να καλύπτει περιοχή πολλών τετραγωνικών χιλιομέτρων. Σε τόσο υψηλές ενέργειες η παραγωγή φωτός είναι μεγαλύτερη και έτσι ο καταιγισμός μπορεί να καταγραφεί από αποστάσεις μεγαλύτερες από 150 m. Εδώ μπορούν να χρησιμοποιηθούν δύο διαφορετικές διατάξεις: ένας μεγάλος αριθμός μικρών τηλεσκοπίων με κάτοπτρα επιφάνειας μερικών τετραγωνικών μέτρων και αποστάσεις από 100 έως 200 m ή ένας μικρότερος αριθμός μεσαίου μεγέθους τηλεσκοπίων επιφάνειας 10 m^2 που μπορούν να διακρίνουν τους καταιγισμούς σε απόσταση 500 μέτρων και έτσι είναι δυνατόν να τοποθετηθούν σε αποστάσεις εκατοντάδων μέτρων μεταξύ τους ή σε μικρές ομάδες με μεγαλύτερες αποστάσεις μεταξύ των ομάδων. Μάλλον προκρίνεται αυτή τη τελευταία διάταξη των υποομάδων μιας και παρέχει επιπλέον υψηλής ποιότητας παρατήρηση σε χαμηλότερες ενέργειες για καταιγισμούς που συμβαίνουν στην περιοχή τους.

5.3 Ανακατασκευή των χαρακτηριστικών του Εκτεταμένου Ατμοσφαιρικού Καταιγισμού

Η εικόνα που δίνουν οι αδρονικοί και οι φωτονικοί καταιγισμοί στο τηλεσκόπιο Cherenkov είναι διαφορετική και εύκολα διακρίσιμη. Και στις δύο περιπτώσεις, η εικόνα αυτή αποτελεί μια γεωμετρική προβολή του καταιγισμού στον ανιχνευτή, καθώς όμως η μορφή του καταιγισμού διαφέρει από αδρονικούς σε φωτονικούς καταιγισμούς, διαφέρει και η καταγραφή.

Οι φωτονικοί καταιγισμοί αναπτύσσονται κοντά στον άξονά τους με μικρές γωνιακές εκτροπές, είναι πιο συμπαγείς και έτσι η ακτινοβολία Cherenkov που συλλέγεται στον ανιχνευτή τείνει να έχει ελλειψοειδές σχήμα ευθυγραμμισμένο με την διεύθυνση του πρωτογενούς φωτονίου. Από την άλλη πλευρά οι αδρονικοί καταιγισμοί δίνουν πολύ πιο εκτεταμένες και λιγότερο ευθυγραμμισμένες εικόνες. Στη διαφορά αυτή βασίζεται και η τεχνική διάκρισης και απόρριψης των αδρονικών καταιγισμών από τα πειράματα ανίχνευσης ακτίνων γ (εικόνα 8).



Εικόνα 8: Φωτονικός και αδρονικός καταιγισμός και η εικόνα που δίνουν σε ένα τηλεσκόπιο Cherenkov (η εικόνα του τηλεσκοπίου προέρχεται από το MAGIC).

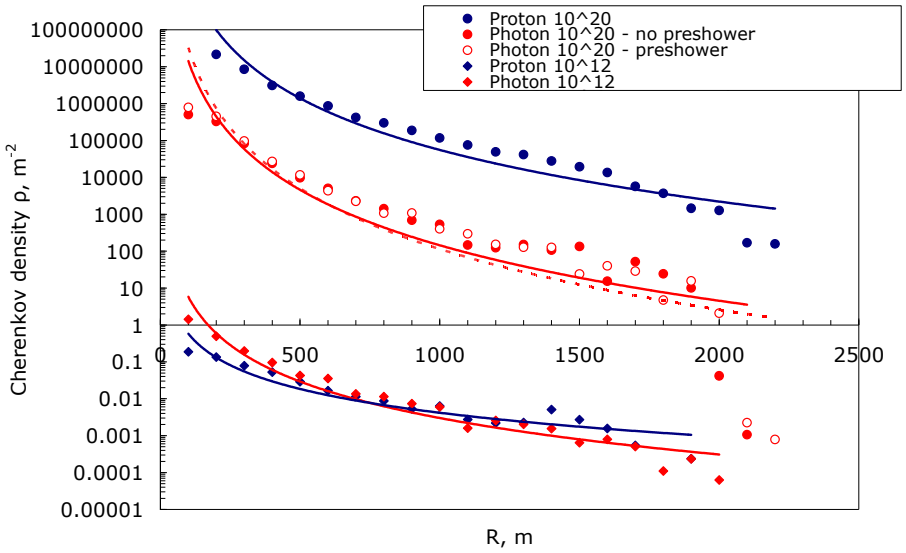
Για την ανακατασκευή των χαρακτηριστικών ενός καταιγισμού UHECR από τον ανιχνευτή επιφανείας του Auger χρησιμοποιείται η συνάρτηση πλευρικής κατανομής (Lateral Distribution Function – LDF) που περιγράφει πώς τα παρατηρούμενα σήματα από την διάταξη των ανιχνευτών επιφανείας

μεταβάλλονται σαν συνάρτηση της απόστασης από τον πυρήνα του καταιγισμού. Το κεντρικό στοιχείο για την ανακατασκευή και ανάλυση των ατμοσφαιρικών καταιγισμών με τη χρήση ανιχνευτών επιφανείας είναι η προσαρμογή της συνάρτησης πλευρικής κατανομής στις σωματιδιακές πυκνότητες.

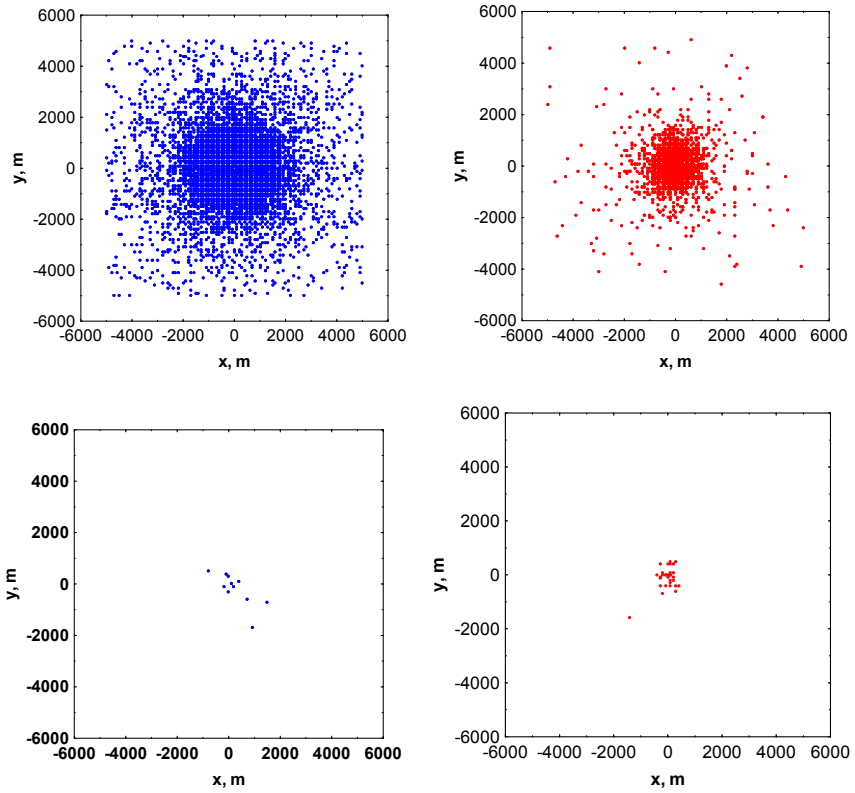
Τα σωματίδια που παράγουν παλμούς στις δεξαμενές του ανιχνευτή επιφανείας του Auger είναι τα ηλεκτρόνια/ποζιτρόνια και τα μιόνια που φτάνουν στο επίπεδο παρατήρησης. Σε μια διάταξη ατμοσφαιρικών τηλεσκοπίων Cherenkov θα μπορούσε να προσδιοριστεί μια LDF φωτονίων Cherenkov και να χρησιμοποιηθεί αυτή για τον προσδιορισμό των χαρακτηριστικών του καταιγισμού.

Ήδη έχουν δημοσιευθεί κάποιες εργασίες για την παράλληλη χρήση τηλεσκοπίων Cherenkov με διατάξεις όπως το Auger (Burton – Covault, 2009) και το Tunka-25 (Al-Rubaiee, 2011), βασισμένες στην ανάλυση της LDF των φωτονίων Cherenkov που φτάνουν στο επίπεδο παρατήρησης. Σε αυτές γίνεται προσπάθεια να εξαχθεί μια σχέση που να αντιπροσωπεύει την πλευρική ανάπτυξη των φωτονίων Cherenkov του καταιγισμού. Μέτρο εκτίμησης της ενέργειας του πρωτογενούς σωματιδίου θεωρείται εδώ η πυκνότητα σωματιδίων σε απόσταση 1200 m από τον πυρήνα του καταιγισμού ρ(1200) (Burton – Covault, 2009) σε αντίθεση με το S(1000) που χρησιμοποιείται για μιόνια και ηλεκτρόνια.

Στο σχήμα 49 φαίνονται οι Cherenkov LDFs για ένα κατακόρυφο φωτόνιο αρχικής ενέργειας 10^{12} eV (που αποτελεί στόχο του πειράματος CTA) και για ένα κατακόρυφο πρωτόνιο αρχικής ενέργειας 10^{20} eV, ενώ στο σχήμα 50 οι ανιχνευτές της διάταξης που καταγράφουν φωτόνια Cherenkov σε καθεμία από τις δύο περιπτώσεις. Είναι προφανής η τεράστια διαφορά μεγεθών που θα αποτελέσει και το κριτήριο διαφοροποίησης μεταξύ των δύο γεγονότων.



Σχήμα 49: Συναρτήσεις πλευρικής κατανομής Cherenkov για κατακόρυφο φωτόνιο και πρωτόνιο αρχικής ενέργειας 1 TeV και κατακόρυφο πρωτόνιο και φωτόνιο (με πρόδρομα φαινόμενα και χωρίς αυτά) αρχικής ενέργειας 100 EeV. Τα στατιστικά σφάλματα είναι πολύ μικρά για να φανούν στο γράφημα.



Σχήμα 50: Ενεργοποιούμενοι ανιχνευτές για πρωτόνιο (επάνω αριστερά) και φωτόνιο (επάνω δεξιά) ενέργειας 10^{20} eV και πρωτόνιο (κάτω αριστερά) και φωτόνιο (κάτω δεξιά) ενέργειας 10^{12} eV. Η προσομοίωση έχει γίνει για υψόμετρο 1800 m στην περιοχή Khomas Highland της Namibia και για πλέγμα 101x101 τηλεσκοπίων διαμέτρου 1 m με απόσταση πλέγματος 100 m.

Εδώ θα προσπαθήσουμε να προσδιορίσουμε τις σχέσεις από τις οποίες μπορεί να προκύψει η ενέργεια του πρωτογενούς σωματιδίου από την πυκνότητα των φωτονίων Cherenkov στην επιφάνεια του εδάφους. Για τους υπολογισμούς χρησιμοποιούνται χαρακτηριστικά της σχεδιαζόμενης διάταξης του CTA όπως τα ενεργειακά κατώφλια και κάποιες προτεινόμενες τοποθεσίες.

Οι προσομοιώσεις των καταιγισμών πραγματοποιήθηκαν με το πρόγραμμα CORSIKA με την επιλογή Cherenkov. Ο ανιχνευτής θεωρείται επίπεδος με τηλεσκόπια τοποθετημένα σε ορθογώνιο πλέγμα. Έχει χρησιμοποιηθεί μια διάταξη 31x31 τηλεσκοπίων διαμέτρου 5m σε ορθογώνιο πλέγμα με απόσταση 100 m. Τα ενεργειακά κατώφλια για την παρακολούθηση σωματιδίων έχουν επιλεγεί στις τιμές που χρησιμοποιούνται για το CTA: για αδρόνια 0,3 GeV, για μιόνια 0,1 GeV, για ηλεκτρόνια 0,020 GeV και για φωτόνια 0,020 GeV.

Το πρόγραμμα CORSIKA διαθέτει επίσης την επιλογή thinning για τη διαχείριση του τεράστιου αριθμού σωματιδίων που προκύπτουν κατά την προσομοίωση του καταιγισμού. Όλα τα σωματίδια με ενέργεια κάτω από μια τιμή που καθορίζεται μέσω του επιπέδου thinning ($\varepsilon_{thin}=E/E_0$) αντιπροσωπεύονται από ένα σωματίδιο που παρακολουθείται η εξέλιξή του και στο οποίο αποδίδεται ένα στατιστικό βάρος (weight) που εκφράζει το πλήθος των υπολοίπων σωματιδίων τα οποία δεν παρακολουθούνται. Εδώ έχουμε χρησιμοποιήσει την επιλογή με $\varepsilon_{thin}=10^{-6}$ και weight $w_{max}= \varepsilon_{thin}\cdot E_0(GeV)$.

Μια άλλη επιλογή σχετίζεται με το bunch size των φωτονίων Cherenkov που το πρόγραμμα μπορεί να διαχειριστεί σαν ένα φωτόνιο. Αυτό καθορίζεται μέσω της επιλογής CERSIZ στο input αρχείο της προσομοίωσης και συνήθως επιλέγεται μια τιμή από 5 έως 10. Εδώ έχει επιλεγεί η τιμή 500 για να προκύψουν διαχειρίσιμα σε μέγεθος αρχεία.

Τέλος, κατά την εξαγωγή του κώδικα του προγράμματος έχει χρησιμοποιηθεί η επιλογή Cherenkov Light Reduction Option (CEFFIC) που ενσωματώνει φαινόμενα απορρόφησης των φωτονίων Cherenkov στην ατμόσφαιρα, ανακλαστικότητας των κατόπτρων και κβαντικής απόδοσης των φωτοπολλαπλασιαστών. Τα δεδομένα που χρησιμοποιούνται προέρχονται

από το ίδιο το πρόγραμμα και αφορούν συγκεκριμένες διατάξεις (Whipple telescope, Sept. 1993, Hamatsu R1398HA photomultipliers).

Στην εργασία αυτή έχουν πραγματοποιηθεί προσομοιώσεις για τις παρακάτω τοποθεσίες σε διαφορετικά σημεία του πλανήτη, με διαφορετικά υψόμετρα και μαγνητικά πεδία:

Στη Δανία: Copenhagen (55,68° N, 12,57° E)

Υψόμετρο: 0 m

Ατμοσφαιρικό βάθος στην επιφάνεια του εδάφους: 1036 g/cm^2

Μαγνητικό Πεδίο: North component: 17,01 μT

Vertical component: 47,19 μT

Total magnetic field: 50,20 μT

Στην Ελλάδα: Αθήνα (37,98° N , 23,72° E)

Υψόμετρο: 153 m

Ατμοσφαιρικό βάθος στην επιφάνεια του εδάφους: 1017 g/cm^2

Μαγνητικό Πεδίο: North component: 26,52 μT

Vertical component: 37,32 μT

Total magnetic field: 45,83 μT

Στην Αγία Ελένη (Νότιος Ατλαντικός) : Jamestown (15,92° S, 5,72° W)

Υψόμετρο: 292 m

Ατμοσφαιρικό βάθος στην επιφάνεια του εδάφους: 1000 g/cm^2

Μαγνητικό Πεδίο: North component: 15,38 μT

Vertical component: -24,07 μT

Total magnetic field: 28,97 μT

Στην Αυστραλία: Canberra (35,28° S, 149,13° E)

Υψόμετρο: 605 m

Ατμοσφαιρικό βάθος στην επιφάνεια του εδάφους: 964 g/cm^2

Μαγνητικό Πεδίο: North component: 23,21 μT

Vertical component: -53,05 μT

Total magnetic field: 58,13 μT

Στην Κόστα Ρίκα: San Jose (9,94° N, 84,10° W)

Υψόμετρο: 1146 m

Ατμοσφαιρικό βάθος στην επιφάνεια του εδάφους: 903 g/cm^2

Μαγνητικό Πεδίο: North component: 27,77 μT

Vertical component: 20,70 μT

Total magnetic field: 34,81 μT

Στην Αργεντινή: Malargüe (Auger) (35,46° S, 69,58° W)

Υψόμετρο: 1400 m

Ατμοσφαιρικό βάθος στην επιφάνεια του εδάφους: 875 g/cm^2

Μαγνητικό Πεδίο: North component: 16,62 μT

Vertical component: -14,32 μT

Total magnetic field: 25,31 μT

Στη Ναμίμπια: Khomas Highland (22,67° S, 16,33° W)

Υψόμετρο: 1800 m

Ατμοσφαιρικό βάθος στην επιφάνεια του εδάφους: 833 g/cm^2

Μαγνητικό Πεδίο: North component: 12,88 μT

Vertical component: -21,98 μT

Total magnetic field: 25,47 μT

Στη Χιλή: La Silla (29,25° S, 70,73° W)

Υψόμετρο: 2400 m

Ατμοσφαιρικό βάθος στην επιφάνεια του εδάφους: 774 g/cm^2

Μαγνητικό Πεδίο: North component: 20,65 μT

Vertical component: -11,37 μT

Total magnetic field: 23,57 μT

Στην Ισπανία: Tenerife (28,3° N, 16,51° W)

Υψόμετρο: 2400 m

Ατμοσφαιρικό βάθος στην επιφάνεια του εδάφους: 774 g/cm^2

Μαγνητικό Πεδίο: North component: 30,56 μT

Vertical component: 23,26 μT

Total magnetic field: 38,40 μT

Στο Μεξικό: San Pedro Martir, Baja California (30,75° N, 115,25° W)

Υψόμετρο: 2800 m

Ατμοσφαιρικό βάθος στην επιφάνεια του εδάφους: 736 g/cm^2

Μαγνητικό Πεδίο: North component: 24,88 μT

Vertical component: 38,19 μT

Total magnetic field: 45,58 μT

Στην Αργεντινή: La Puna (29,32° S, 69,65° W)

Υψόμετρο: 3700 m

Ατμοσφαιρικό βάθος στην επιφάνεια του εδάφους: 656 g/cm^2

Μαγνητικό Πεδίο: North component: 20,43 μT

Vertical component: -11,39 μT

Total magnetic field: 23,39 μT

Στην Ινδία: Hanle (32,9° N, 78,9° E)

Υψόμετρο: 4500 m

Ατμοσφαιρικό βάθος στην επιφάνεια του εδάφους: 590 g/cm^2

Μαγνητικό Πεδίο: North component: 31,67 μT

Vertical component: 38,97 μT

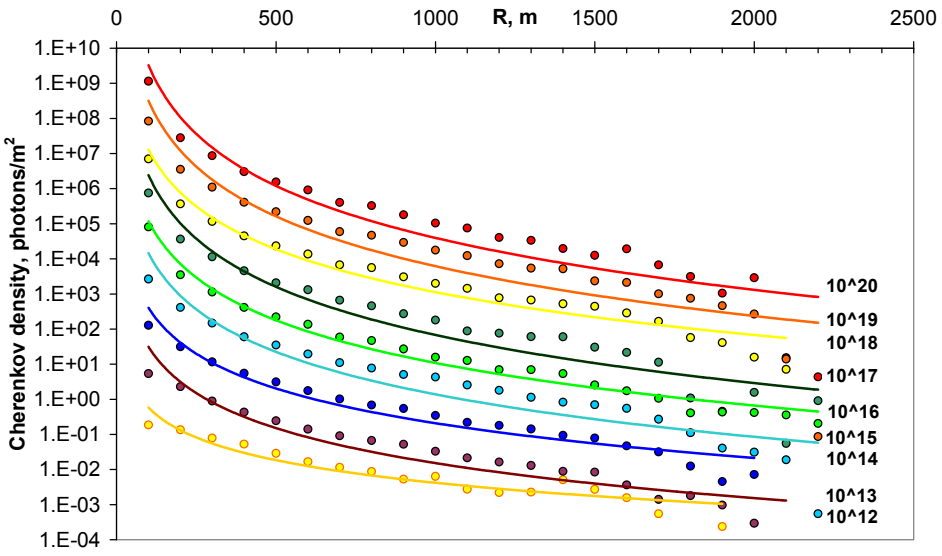
Total magnetic field: 50,22 μT

Τα μαγνητικά πεδία υπολογίστηκαν με τη χρήση του Magnetic Field Calculator του National Geophysical Data Center (http://www.ngdc.noaa.gov/geomag-web)

5.4 Ανάπτυξη του καταιγισμού

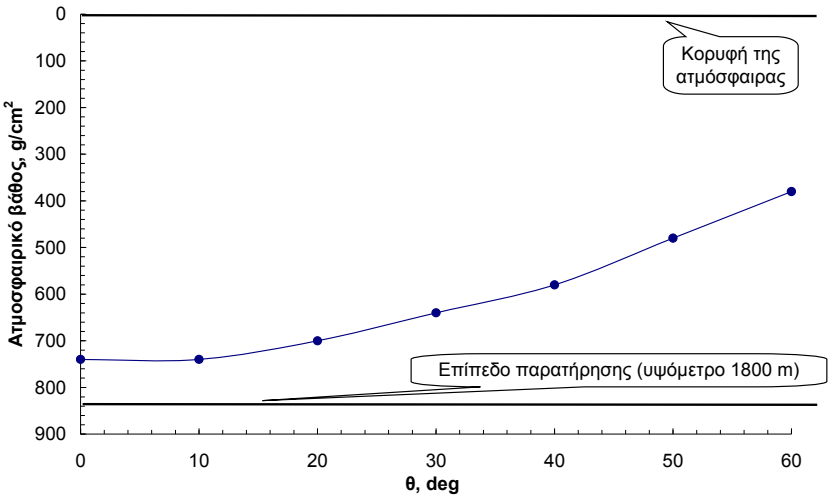
Σαν τοποθεσία για μια πρώτη εικόνα έχει επιλεγεί η Namibia και συγκεκριμένα η περιοχή Khomas Highland με υψόμετρο 1800 m. Πραγματοποιούνται λοιπόν για την περιοχή αυτή προσομοιώσεις καταιγισμών

πρωτονίων με ενέργειες από 10^{12} eV μέχρι και 10^{20} eV (UHECR). Οι συναρτήσεις LDF των καταιγισμών αυτών φαίνεται στο σχήμα 51.

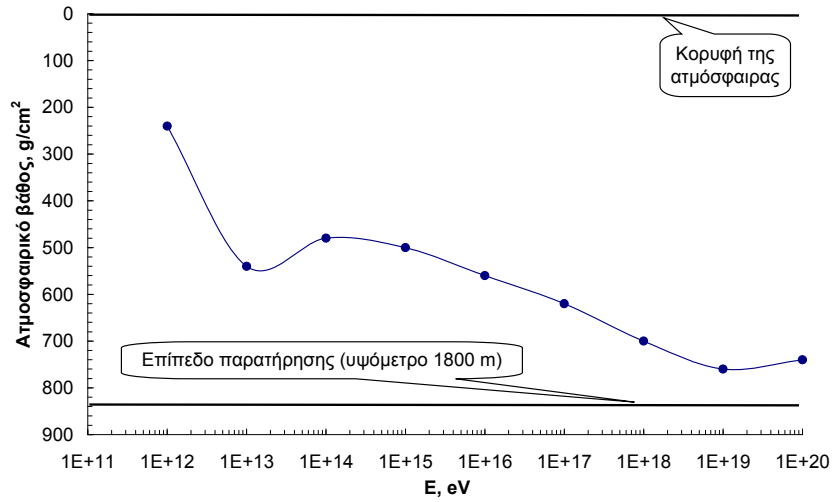


Σχήμα 51: Συναρτήσεις LDF των καταιγισμών πρωτονίων με αρχική ενέργεια από 1 TeV έως και 100 EeV.

Λόγω του υψομέτρου της περιοχής (1800 m) τίθεται το ερώτημα αν οι καταιγισμοί παρατηρούνται μετά το μέγιστό τους, αφού δηλαδή έχουν αναπτυχθεί πλήρως. Σύμφωνα με τα αποτελέσματα των προσομοιώσεων κάτι τέτοιο συμβαίνει όντως, οπότε αναμένεται η προσέγγισή μας να παρουσιάζει αρκετά μεγάλη ακρίβεια. Στα σχήματα 52 και 53 φαίνεται το ατμοσφαιρικό βάθος του μεγίστου του καταιγισμού σαν συνάρτηση της ζενιθιακής γωνίας και της αρχικής ενέργειας.

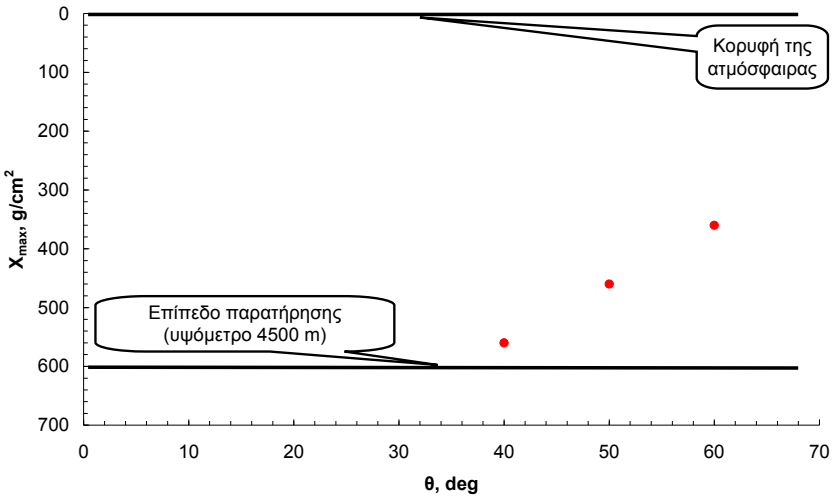


Σχήμα 52: Το ατμοσφαιρικό βάθος μεγίστου (X_{max}) για επικλινείς καταιγισμούς διαφορετικών ζενιθιακών γωνιών. Όλοι οι καταιγισμοί παρατηρούνται μετά το μέγιστό τους.

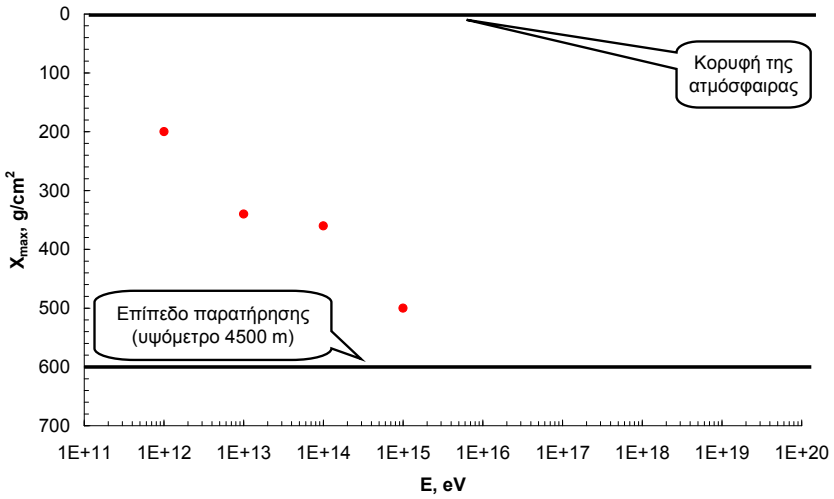


Σχήμα 53: Το ατμοσφαιρικό βάθος μεγίστου (X_{max}) για κατακόρυφους καταιγισμούς διαφορετικών αρχικών ενεργειών. Όλοι οι καταιγισμοί παρατηρούνται μετά το μέγιστο της ανάπτυξής τους.

Μια ακόμα περιοχή πολύ μεγάλου υψομέτρου που αποτελεί και υποψήφια περιοχή του CTA Consortium βρίσκεται σε υψόμετρο 4500 m, στα Δυτικά Ιμαλάια. Εδώ, το υπερβολικά μεγάλο υψόμετρο εμποδίζει την παρατήρηση καταιγισμών εξαιρετικά υψηλών ενεργειών μετά την πλήρη ανάπτυξή τους. Από τις προσομοιώσεις για τη συγκεκριμένη περιοχή προκύπτουν τα σχήματα 54 και 55. Οι μόνοι καταιγισμοί των οποίων το μέγιστο βρίσκεται πάνω από την επιφάνεια του εδάφους είναι οι καταιγισμοί ενέργειας 10^{15} eV ή χαμηλότερης και ζενιθιακής γωνίας 40° ή μεγαλύτερης.



Σχήμα 54: Το ατμοσφαιρικό βάθος μεγίστου (X_{max}) για επικλινείς καταιγισμούς διαφορετικών ζενιθιακών γωνιών στο Hanle. Πάνω από το έδαφος παρουσιάζουν μέγιστη ανάπτυξη μόνον οι καταιγισμοί με θ ≥ 40 deg.



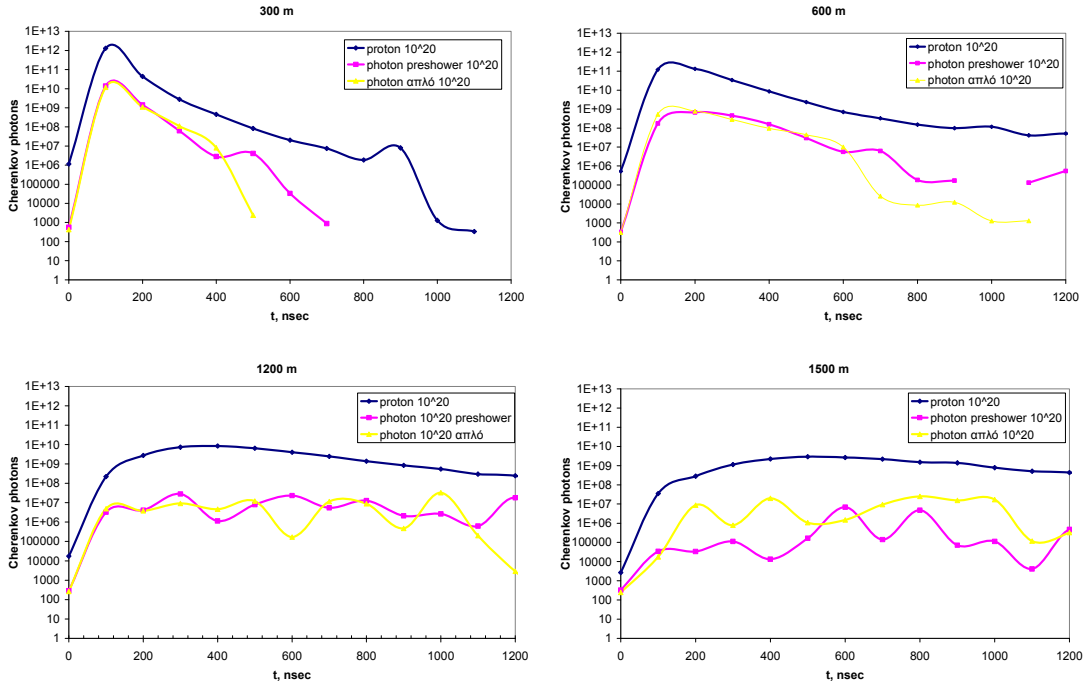
Σχήμα 55: Το ατμοσφαιρικό βάθος μεγίστου (X_{max}) για κατακόρυφους καταιγισμούς διαφορετικών αρχικών ενεργειών στο Hanle. Μετά το μέγιστό τους παρατηρούνται μόνο οι καταιγισμοί με $E \leq 10^{15}$ eV.

Ένα ακόμα θέμα σχετικά με την ανάπτυξη του καταιγισμού είναι η χρονική εξέλιξή του. Κάθε ανιχνευτής ενεργοποιείται από κάποιο γεγονός, συλλέγει σωματίδια για κάποιο συγκεκριμένο χρονικό διάστημα και σταματά να καταγράφει. Το χρονικό αυτό διάστημα ονομάζεται time gate και είναι σημαντικό να προσδιοριστεί ώστε να καταγράφονται όλα τα σωματίδια του καταιγισμού αλλά και να μην καταγράφονται πολλά σωματίδια υποβάθρου, ώστε ο λόγος σήματος προς θόρυβο να παραμένει υψηλός (Podgrudkov et

al., 2009). Αυτό προφανώς αφορά συγκεκριμένους ανιχνευτές. Οι προσομοιώσεις (που δεν καταγράφουν υπόβαθρο) μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να προσδιοριστεί η χρονική ανάπτυξη του μεμονωμένου καταιγισμού.

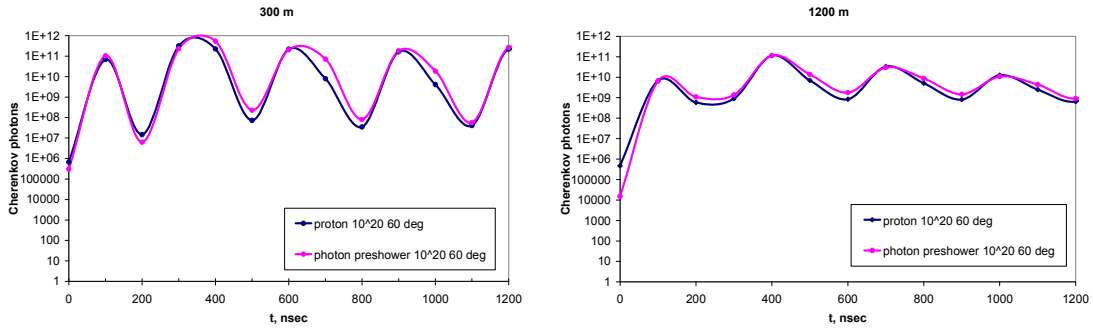
Το πρόγραμμα CORSIKA κατά την καταγραφή φωτονίων Cherenkov δίνει τον χρόνο που μεσολαβεί μεταξύ της πρώτης αλληλεπίδρασης και της καταγραφής των φωτονίων στο επίπεδο παρατήρησης. Με βάση αυτή την τιμή για κάθε Cherenkov photons' bunch μπορούμε να προσδιορίσουμε τη χρονική εξέλιξη του φαινομένου. Θεωρούμε σημείο μηδέν τη χρονική στιγμή άφιξης του πρώτου bunch.

Τα διαφορετικά πρωτογενή δίνουν διαφορετική εικόνα σε διαφορετικές αποστάσεις από τον πυρήνα του καταιγισμού. Όπως φαίνεται στο σχήμα 56, στα 1200 m και 1500 m οι παλμοί κατακόρυφων φωτονίων και πρωτονίων διαφοροποιούνται. Ο παλμός του πρωτονικού καταιγισμού είναι απλός, ενώ ο φωτονικός καταιγισμός, είτε υπάρχει είτε δεν υπάρχει πρόδρομος καταιγισμός, είναι πολλαπλός. Χρησιμοποιώντας το στοιχείο αυτό μπορούμε να διακρίνουμε τους αδρονικούς από τους φωτονικούς κατακόρυφους καταιγισμούς.



Σχήμα 56: Χρονική εξέλιξη κατακόρυφων καταιγισμών πρωτονίων και φωτονίων (με και χωρίς πρόδρομα φαινόμενα), αρχικής ενέργειας 100 EeV σε διαφορετικές αποστάσεις από τον πυρήνα του καταιγισμού.

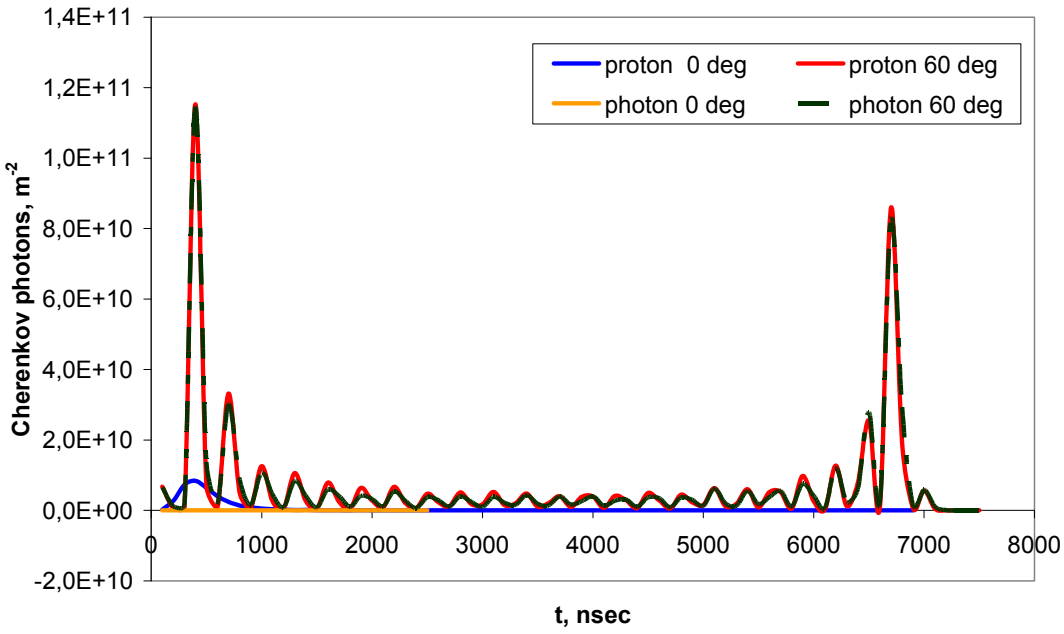
Καθώς η ζενιθιακή γωνία αυξάνεται, η δυνατότητα διάκρισης γίνεται όλο και μικρότερη. Φτάνοντας στις 60° το φαινόμενο του διαχωρισμού εξαφανίζεται εντελώς και έχουμε πολλαπλούς παλμούς σε πλήρη ταύτιση τόσο για πρωτονικό όσο και για φωτονικό καταιγισμό, όπως φαίνεται στο σχήμα 57.



Σχήμα 57: Χρονική εξέλιξη καταιγισμών πρωτονίων και φωτονίων (με πρόδρομα φαινόμενα) ζενιθιακής γωνίας 60°, αρχικής ενέργειας 100 EeV σε διαφορετικές αποστάσεις από τον πυρήνα του καταιγισμού.

Θα μελετήσουμε από πιο κοντά την εικόνα του καταιγισμού στα 1200 m, την απόσταση που χρησιμοποιούμε για την εκτίμηση της ενέργειας του πρωτογενούς. Όπως φαίνεται στο σχήμα 56 στην απόσταση αυτή μπορεί για κατακόρυφους καταιγισμούς να γίνει διάκριση πρωτονικού και φωτονικού καταιγισμού.

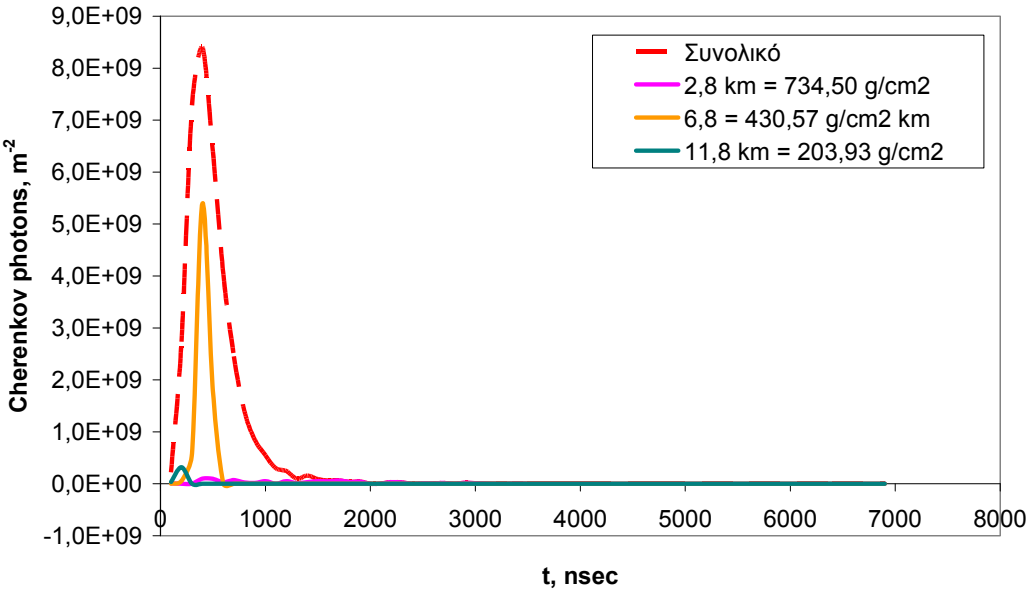
Στο σχήμα 58 φαίνονται οι παλμοί που δημιουργούνται στα 1200 m από κατακόρυφους και επικλινείς (60 deg) καταιγισμούς πρωτονίου και φωτονίου αρχικής ενέργειας 10^{20} eV.



Σχήμα 58: Παλμοί που δημιουργούνται στα 1200 m από καταιγισμούς ζενιθιακής γωνίας 0° και 60° πρωτονίου και φωτονίου αρχικής ενέργειας 10^{20} eV.

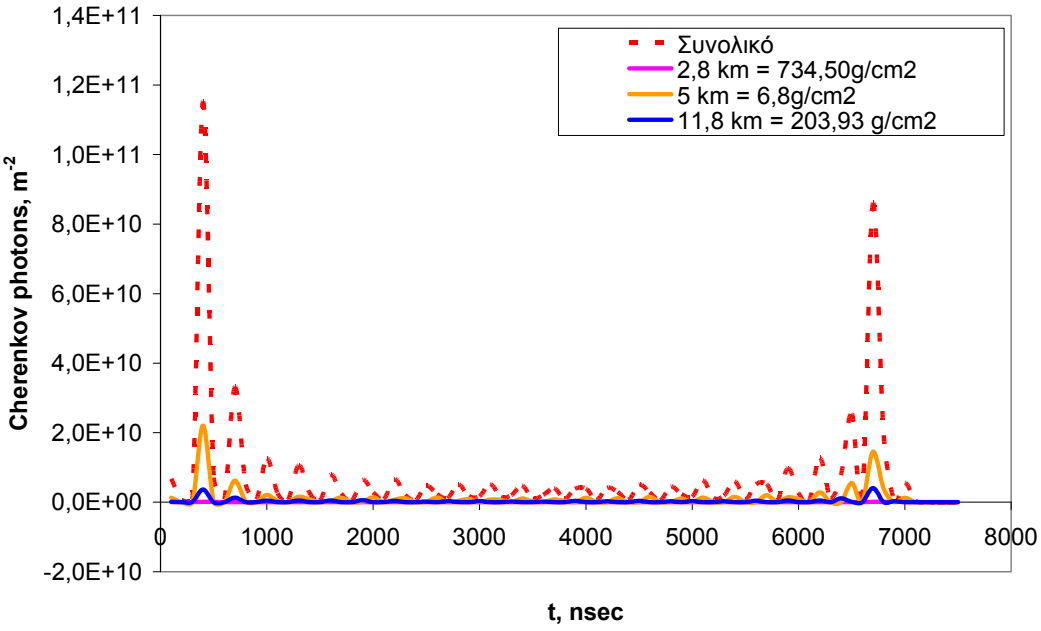
Άμεσα μπορούν να γίνουν οι παρακάτω παρατηρήσεις:

Το κατακόρυφο πρωτόνιο δίνει έναν μοναδικό ξεκάθαρο παλμό με μέγιστο στα 300 – 400 nsec. Αν παραστήσουμε τον παλμό αυτό και τις συνιστώσες του από τα διάφορα ύψη από το επίπεδο παρατήρησης στο οποίο δημιουργούνται (σχήμα 59), παρατηρούμε ότι οι παλμοί που δημιουργούνται στα διαφορετικά ύψη ακολουθούν την ίδια μορφή, με μέγιστα σε κοντινές χρονικές περιοχές. Ο συνολικός αριθμός φωτονίων Cherenkov που καταγράφονται στο επίπεδο του εδάφους (1800 m) είναι $3{,}55 \cdot 10^{10}$, πολύ μικρότερος από αυτόν του επικλινούς καταιγισμού πρωτονίου και φωτονίου.



Σχήμα 59: Παλμός για κατακόρυφο πρωτονικό καταιγισμό σε απόσταση 1200 m από τον πυρήνα του καταιγισμού.

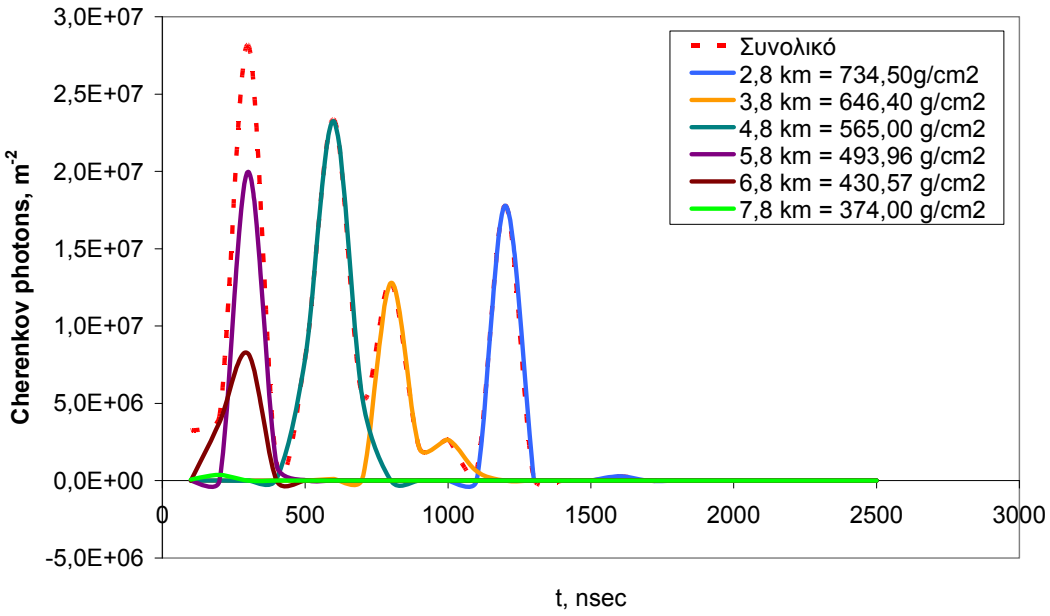
Το επικλινές πρωτόνιο ζενιθιακής γωνίας 60° δημιουργεί έναν διπλό παλμό (σχήμα 60) με πρωτεύον μέγιστο στα 400 – 500 nsec και δευτερεύον μέγιστο στα 6700 – 6800 nsec. Ο διπλός παλμός εξηγείται από τη γεωμετρία του μετώπου: καθώς το παραβολικό μέτωπο φτάνει στο επίπεδο του εδάφους, θα δώσει σήμα στα 1200 m στην μια πλευρά του ίχνους του καταιγισμού. Αργότερα, τα φωτόνια Cherenkov θα φτάσουν και στην διαμετρικά αντίθετη θέση με R = 1200 m. Λόγω της αζιμουθιακής ασυμμετρίας που δημιουργεί η μεγάλη κλίση, το early signal θα είναι μεγαλύτερο από το late signal. Ο συνολικός αριθμός φωτονίων Cherenkov που καταγράφονται στο επίπεδο του εδάφους είναι $5{,}02 \cdot 10^{11}$. Επομένως ο επικλινής καταιγισμός πρωτονίου δημιουργεί περισσότερα φωτόνια Cherenkov στο έδαφος, γεγονός αναμενόμενο καθώς δημιουργείται ψηλότερα στην ατμόσφαιρα και τα παραγόμενα σωματίδια επιβραδύνονται για μεγαλύτερο διάστημα, παράγοντας φωτόνια Cherenkov. Παρατηρώντας τις συνισταμένες του καταιγισμό γίνεται ξκάθαρο πως σημαντικά συνισφέρουν τα φωτόνια που δημιουργούνται σε ύψος από 5 έως 10 km.



Σχήμα 60: Παλμός για πρωτονικό καταιγισμό ζενιθιακής γωνίας 60° σε απόσταση 1200 m από τον πυρήνα του καταιγισμού.

Το κατακόρυφο φωτόνιο δημιουργεί έναν πολαπλό παλμό (σχήμα 61) με εξαιρετικά ενδιαφέροντα χαρακτηριστικά: ενώ στην περίπτωση του κατακόρυφου πρωτονίου δημιουργούνται σε διαφορετικά υψόμετρα παλμοί διαφορετικού ύψους, που αθροιζόμενοι δίνουν τον ομαλό μοναδικό συνολικό παλμό, στην περίπτωση του φωτονίου οι παλμοί ανά υψόμετρο είναι συγκρίσιμου ύψους, σε διακριτές χρονικές στιγμές, με αποτέλεσμα να δημιουργείται από την υπέρθεσή τους ο πολλαπλός παλμός.

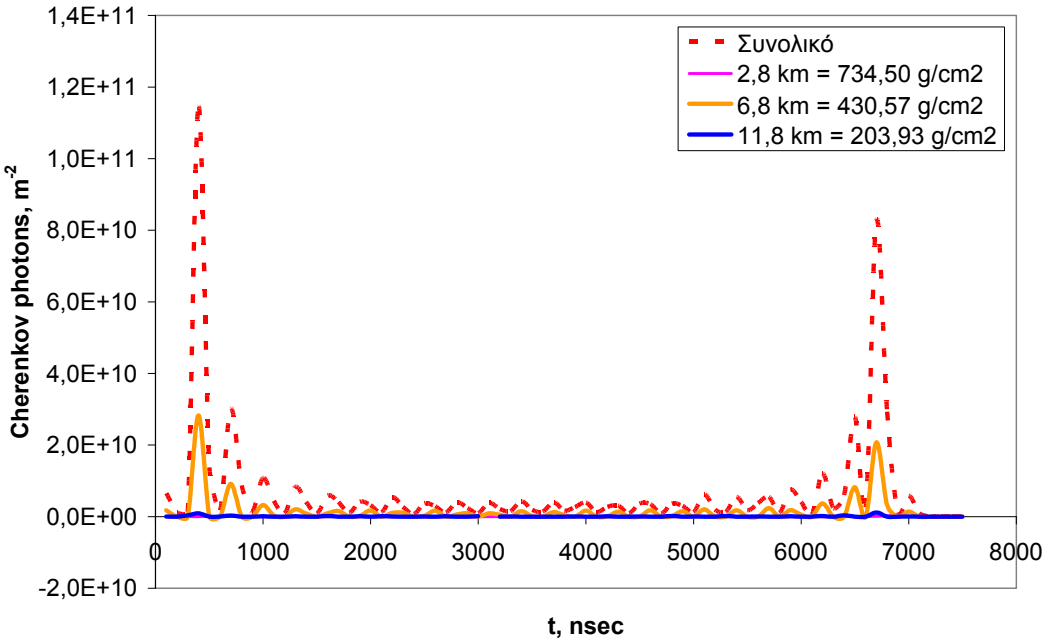
Αυτό σημαίνει ότι δημιουργούνται μεγάλοι αριθμοί φωτονίων Cherenkov σε διαφορετικές στιγμές σε κάθε υψόμετρο, με αυτά που δημιουργούνται ψηλότερα να φτάνουν γρηγορότερα στο έδαφος. Συνολικά το φαινόμενο εξελίσσεται σε χρόνο παρόμοιο με τον κατακόρυφο πρωτονικό καταιγισμό και πολύ γρηγορότερα από τους επικλινείς καταιγισμούς. Ο συνολικός αριθμός φωτονίων Cherenkov στο επίπεδο του εδάφους είναι $1{,}10 \cdot 10^8$, σαφώς λιγότερα από αυτά του κατακόρυφου πρωτονικού καταιγισμού.



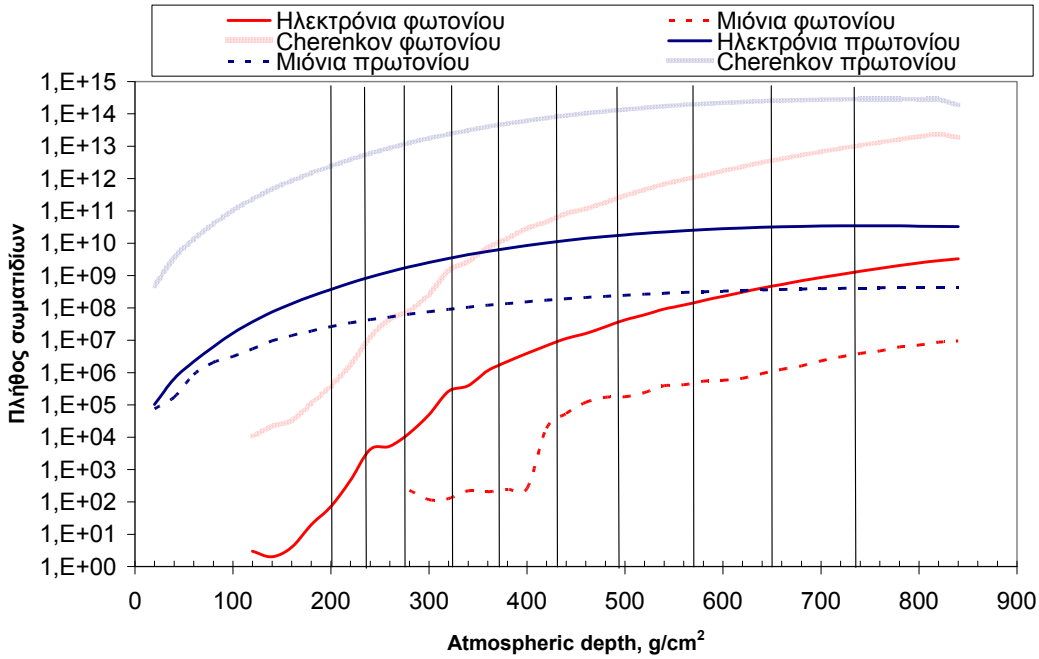
Σχήμα 61: Παλμός για κατακόρυφο φωτονικό καταιγισμό σε απόσταση 1200 m από τον πυρήνα του καταιγισμού.

Το επικλινές φωτόνιο (σχήμα 62) συμπεριφέρεται ταυτόσημα με το επικλινές πρωτόνιο. Προκύπτει και πάλι διπλός παλμός με μέγιστα στα ίδια ακριβώς σημεία. Η γεωμετρία του μετώπου του καταιγισμού παίζει και πάλι βασικό ρόλο στο σχήμα του παλμού. Ο συνολικός αριθμός φωτονίων Cherenkov στο επίπεδο του εδάφους είναι $5{,}14 \cdot 10^{11}$.

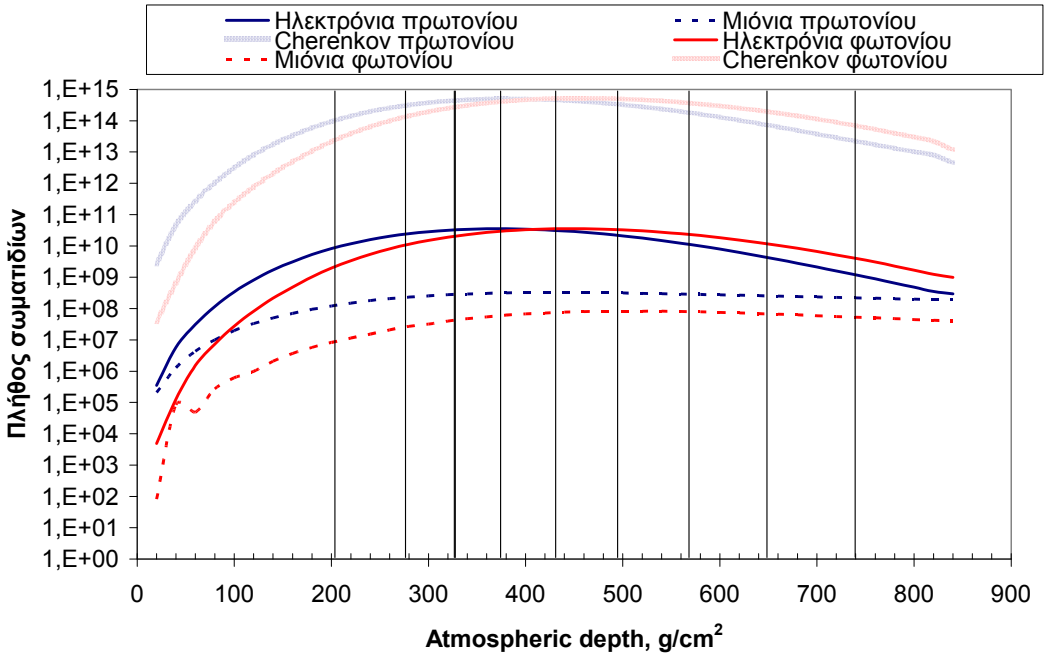
Συνολικά, η χρονική εξέλιξη του καταιγισμού σχετίζεται με τη διαμήκη ανάπτυξή του. Οι επικλινείς καταιγισμοί δημιουργούν πολύ νωρίτερα το μέγιστό τους (σωματιδιακό και φωτονίων Cherenkov), με τον φωτονικό καταιγισμό να έπεται του πρωτονικού. Οι επικλινείς καταιγισμοί καθώς και ο κατακόρυφος πρωτονικός έχουν αναπτυχθεί πλήρως ενώ ο κατακόρυφος φωτονικός παρατηρείται στα 1800 m πριν ολοκληρώσει την ανάπτυξή του.



Σχήμα 62: Παλμός για φωτονικό καταιγισμό ζενιθιακής γωνίας 60° σε απόσταση 1200 m από τον πυρήνα του καταιγισμού.



Σχήμα 63: Διαμήκης ανάπτυξη των κατακόρυφων καταιγισμών ως προς τα ηλεκτρόνια, μιόνια και φωτόνια Cherenkov που παράγονται σε διαφορετικά ατμοσφαιρικά βάθη. Οι κάθετες γραμμές αντιστοιχούν σε υψόμετρα από την επιφάνεια της θάλασσας (από δεξιά) 2,8 έως 11,8 km ανά 1 km ή ύψη από το επίπεδο παρατήρησης 1 έως 10 km.



Σχήμα 64: Διαμήκης ανάπτυξη των καταιγισμών 60° ως προς τα ηλεκτρόνια, μιόνια και φωτόνια Cherenkov που παράγονται σε διαφορετικά ατμοσφαιρικά βάθη. Οι κάθετες γραμμές αντιστοιχούν σε υψόμετρα από την επιφάνεια της θάλασσας (από δεξιά) 2,8 έως 11,8 km ανά 1 km ή ύψη από το επίπεδο παρατήρησης 1 έως 10 km.

Η πυκνότητα του αέρα και επομένως ο δείκτης διάθλασης αλλάζει με το ύψος μέσα στην ατμόσφαιρα, με αποτέλεσμα το κατώφλι για την παραγωγή φωτονίων Cherenkov από τα δευτερογενή σωματίδια του καταιγισμού και η γωνία εκπομπής τους να μεταβάλλονται επίσης. Σε υψόμετρο 30 km το κατώφλι για ηλεκτρόνια βρίσκεται στα 175 MeV και η γωνία εκπομπής στις 0,17°, ενώ στα 2 km γίνονται 24 MeV και 1,2° αντίστοιχα (Λιόλιος, 2012).

Η μεταβολή του δείκτη διάθλασης και επομένως και της ταχύτητας του φωτός είναι γραμμική σε υψόμετρα κάτω από 1 km και γίνεται εκθετική από εκεί και μετά. Αυτό σημαίνει πως ψηλά στην ατμόσφαιρα η ταχύτητα του φωτός αλλάζει έντονα ανάμεσα στις διαφορετικές υψομετρικές ζώνες, ενώ χαμηλότερα η αλλαγή αυτή είναι πιο ομαλή. Επομένως, φωτόνια Cherenkov που δημιουργούνται ψηλότερα έχουν μεγαλύτερες ταχύτητες και φτάνουν συντομότερα στο επίπεδο παρατήρησης. Για τον ίδιο λόγο και στα φάσματα των επικλινών καταιγισμών, φωτόνια από διαφορετικά υψόμετρα φτάνουν στο επίπεδο παρατήρησης την ίδια χρονική στιγμή.

Ο πρωτονικός καταιγισμός των 10^{20} eV δημιουργείται σύμφωνα με τις προσομοιώσεις μας σε υψόμετρο 17,68 km ενώ ο αντίστοιχος φωτονικός σε

υψόμετρο 13,75 km. Επιπλέον, σύμφωνα με το σχήμα 63 ο αριθμός φωτονίων Cherenkov που παράγονται στα διαφορετικά ατμοσφαιρικά βάθη αυξάνεται ομαλότερα για τον πρωτονικό καταιγισμό, με αποτέλεσμα να έχουν δημιουργηθεί στην αραιή υψηλότερη ατμόσφαιρα πολύ περισσότερα φωτόνια με μεγαλύτερη ταχύτητα. Η μετάβαση από το ένα στρώμα στο άλλο θα μειώνει έντονα την ταχύτητα με αποτέλεσμα τα φωτόνια από διαδοχικά υψόμετρα να φτάνουν στο έδαφος σχεδόν ταυτόχρονα. Αντιθέτως, στην περίπτωση του φωτονικού καταιγισμού τα φωτόνια Cherenkov δημιουργούνται χαμηλότερα. Η μετάβαση από ένα ατμοσφαιρικό στρώμα στο επόμενο μεταβάλλει την ταχύτητα ομαλότερα με αποτέλεσμα τα φωτόνια από διαφορετικά υψόμετρα να φτάνουν στο επίπεδο του εδάφους σε διαφορετικούς χρόνους, δημιουργώντας τον πολλαπλό παλμό.

Όπως έχει αναφερθεί παραπάνω, η ζενιθιακή γωνία του καταιγισμού μπορεί να προσδιοριστεί μέσω της παρατηρούμενης διαφοράς στο χρόνο άφιξης σε τρία ή περισσότερα σημεία στο επίπεδο παρατήρησης, με την αποδοχή ενός επίπεδου μετώπου κύματος. Η πραγματική όμως μορφή του μετώπου δεν είναι επίπεδη αλλά μάλλον παραβολική.

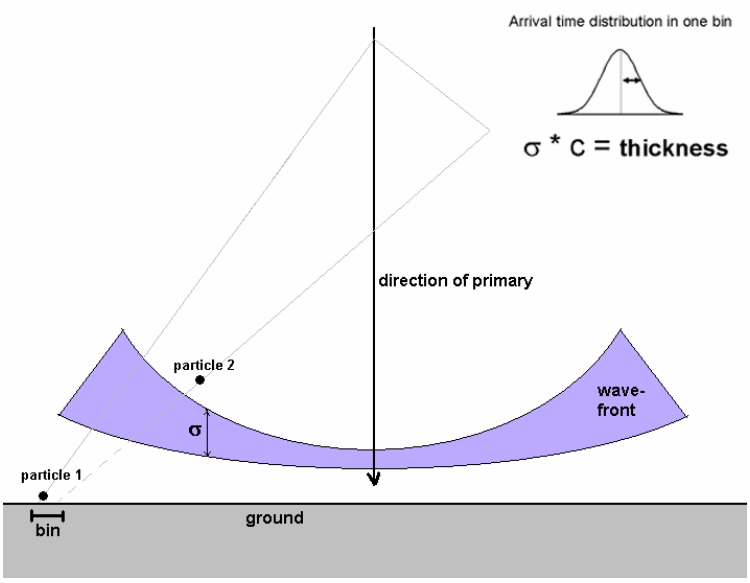
Ο υπολογισμός της ακριβούς μορφής μπορεί να πραγματοποιηθεί με τα δεδομένα των προσομοιώσεων του CORSIKA που δίνει τον χρόνο που μεσολαβεί από την πρώτη αλληλεπίδραση του πρωτογενούς σωματιδίου μέχρι την καταγραφή στο επίπεδο παρατήρησης τόσο των δευτερογενών σωματιδίων του καταιγισμού όσο και των φωτονίων Cherenkov.

Το σχήμα 65 παρουσιάζει τη δομή του σωματιδιακού μετώπου του καταιγισμού. Σε κάθε απόσταση από τον πυρήνα οι χρόνοι άφιξεις θεωρούνται κατανεμημένοι κανονικά (Haverhoek, 2006). Το πάχος του μετώπου σε μονάδες χρόνου δίνεται από τη σχέση:

$$\sigma = \sqrt{\frac{\sum (w_i (t_i - \mu)^2)}{\sum w_i}}$$

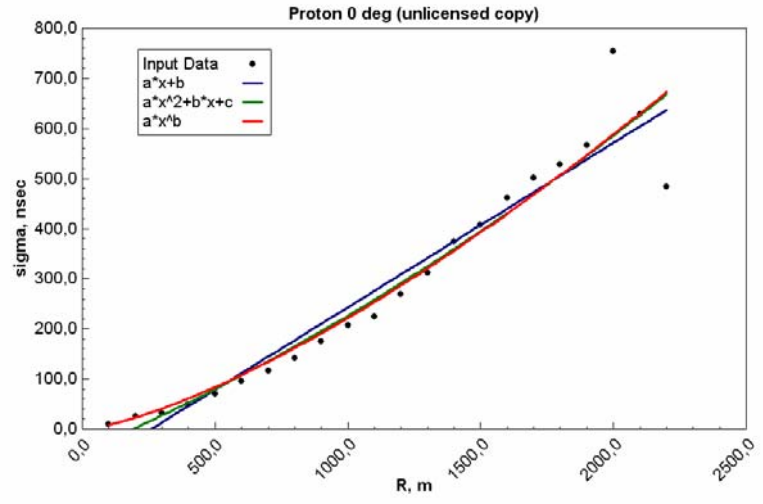
με t_i τον χρόνο άφιξης και w_i το στατιστικό βάρος του σωματιδίου i και μ τον μέσο χρόνο άφιξης των σωματιδίων στην απόσταση αυτή:

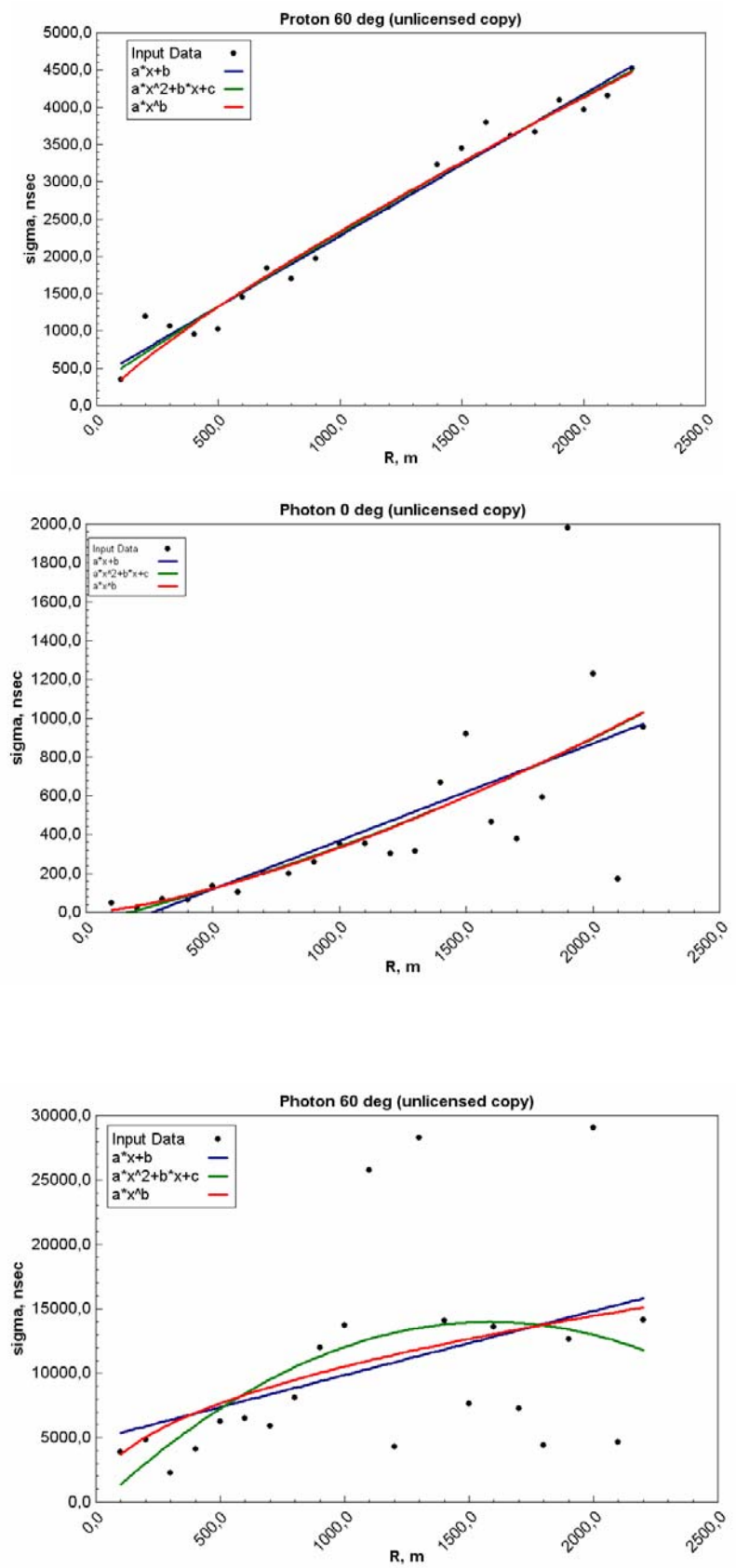
$$\mu = \frac{\sum (t_i w_i)}{\sum w_i}$$



Σχήμα 65: Η δομή του μετώπου του καταιγισμού (Haverhoek, 2006).

Εδώ θα προσδιοριστεί η μορφή του μετώπου φωτονίων Cherenkov για κατακόρυφους και επικλινείς (60 deg) καταιγισμούς πρωτονίων και φωτονίων αρχικής ενέργειας 10^{20} eV. Στο σχήμα 66 φαίνονται τα αποτελέσματα των υπολογισμών μας.



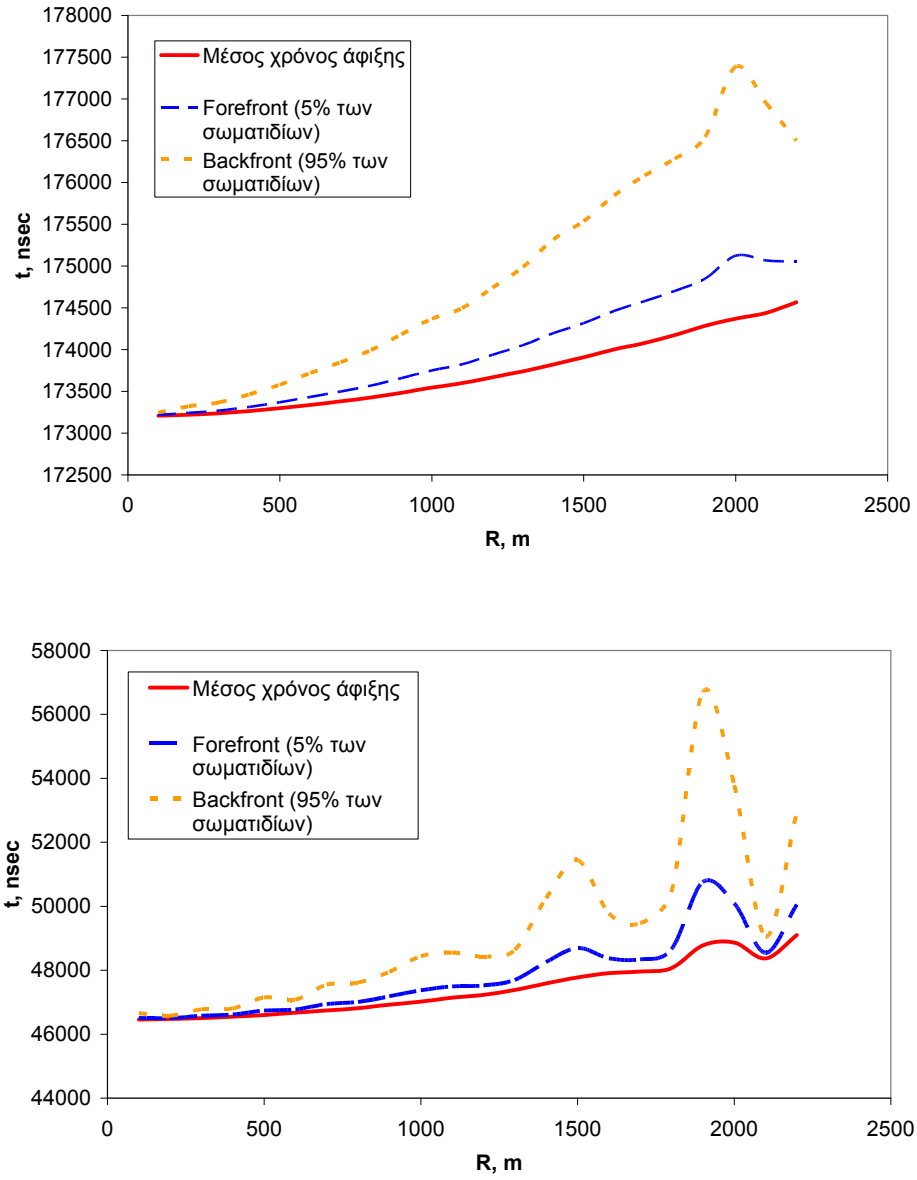


Σχήμα 66: Το πλάτος του μετώπου του καταιγισμού για τα διάφορα πρωτογενή αρχικής ενέργειας 10^{20} eV με τρεις τύπους προσαρμογής.

Η προσαρμογή έχει γίνει μέσω του προγράμματος DataFit 9. Παρουσιάζονται η γραμμική προσαρμογή, η παραβολική μορφή και η μορφή νόμου δύναμης που προτείνεται από τους Podgrudkov et al., 2009. Αξίζει να σημειωθεί ότι οι συγγραφείς αυτοί υπολογίζουν τη μορφή του μετώπου Cherenkov σε αποστάσεις 0 – 1000 m από τον πυρήνα του καταιγισμού. Οι δικές μας προσομοιώσεις ξεκινούν από τα 100 m (καθώς έχει εφαρμοστεί επιπλέον thinning κοντά στον πυρήνα) και φτάνουν στα 2000 m όπου προφανώς ο πολύ μικρός αριθμώς φωτονίων διαταράσσει τη μορφή του μετώπου.

- Για το κατακόρυφο πρωτόνιο: η γραμμική προσαρμογή (a=0,33, b=-85,31, R^2=0.9259), η παραβολική μορφή (a=4.40·10^{-5}, b=0,23, c=-44,83, R^2=0,9313) και η μορφή νόμου δύναμης (a=1,32·10^{-2}, b=1,41, R^2=0.9324)
- Για το επικλινές πρωτόνιο: η γραμμική προσαρμογή (a=1,90, b=377,86, R^2=0.9755), η παραβολική μορφή (a=-9,43·10^{-5}, b=2,12, c=291,11, R^2=0,9763) και η μορφή νόμου δύναμης (a=7,96, b=0,82, R^2=0.9737)
- Για το κατακόρυφο φωτόνιο: η γραμμική προσαρμογή (a=0,50, b=-130,56, R^2=0,4758), η παραβολική μορφή (a=8,27·10^{-5}, b=0,31, c=-54,44, R^2=0,4800) και η μορφή νόμου δύναμης (a=1,66·10^{-2}, b=1,43, R^2=0,4815)
- Για το επικλινές φωτόνιο: η γραμμική προσαρμογή (a=4,96, b=4897,43, R^2=0,1652), η παραβολική μορφή (a=-5,73·10^{-3}, b=18,14, c=-371,93, R^2=0,2356) και η μορφή νόμου δύναμης (a=448,58, b=0,46, R^2=0.1933)

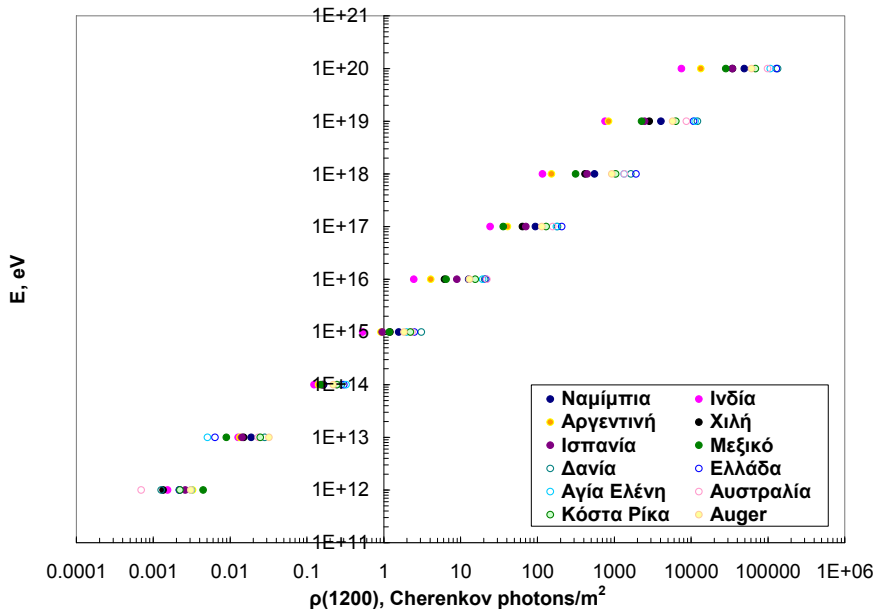
Τόσο από τα σχήματα όσο και από τις τιμές για το R^2 (πολυδιάστατος συντελεστής παλινδρόμησης είναι προφανές πως η προσαρμογή είναι πολύ καλύτερη για τα πρωτόνια. Έτσι κι αλλιώς έχει ήδη επισημανθεί πως οι φωτονικοί καταιγισμοί παρουσιάζουν εντονώτερες διακυμάνσεις από τους πρωτονικούς λόγω της επικράτησης της ηλεκτρομαγνητικής συνιστώσας. Στο σχήμα 67 φαίνεται το χρονικό μέτωπο των κατακόρυφων καταιγισμών.



Σχήμα 67: Το μέτωπο του καταιγισμού για κατακόρυφο πρωτόνιο (επάνω) και φωτόνιο (κάτω) αρχικής ενέργειας 10^{20} eV.

5.5 Εκτίμηση Ενέργειας

Όπως έχει ήδη αναφερθεί, μέτρο εκτίμησης της ενέργειας του πρωτογενούς σωματιδίου θεωρείται εδώ η πυκνότητα σε απόσταση 1200 m από τον πυρήνα του καταιγισμού ρ(1200). Προκειμένου να εξαχθεί η σχέση υπολογισμού της ενέργειας πρωτογενούς, παριστάνουμε γραφικά την ενέργεια συναρτήσει της ποσότητας ρ(1200) (σχήμα 68).



Σχήμα 68: Ενέργεια πρωτογενούς σωματιδίου συναρτήσει της πυκνότητας φωτονίων Cherenkov σε απόσταση 1200 m από τον πυρήνα του καταιγισμού για κατακόρυφους καταιγισμούς πρωτονίων.

Από την παραπάνω γραφική παράσταση προκύπτει γραμμική εξάρτηση της ενέργειας από την πυκνότητα Cherenkov που εκφράζεται μέσω μιας εμπειρικής σχέσης της μορφής

$$E = A \cdot \rho(1200) + B \quad (11)$$

για τον υπολογισμό της ενέργειας (σε eV) με δεδομένη την πυκνότητα φωτονίων Cherenkov σε απόσταση 1200 m από τον πυρήνα του καταιγισμού (σε photons/m^2).

Το σφάλμα στον υπολογισμό της ενέργειας δίνεται από τη σχέση:

$$\delta E = \sqrt{\rho^2(1200) \cdot \delta^2 \mathrm{A} + \mathrm{A}^2 \delta^2 [\rho(1200)] + \delta^2 \mathrm{B}}$$

όπου δA, δB και δ[ρ(1200)] είναι τα σφάλματα στον υπολογισμό των A, B και ρ(1200). Το σφάλμα στον υπολογισμό του ρ(1200) εξαρτάται από την προσαρμογή της LDF στα δεδομένα του ανιχνευτή και από τον ακριβή εντοπισμό του πυρήνα του καταιγισμού.

Οι τιμές των παραμέτρων A και B για τις διαφορετικές περιοχές δίνονται στον πίνακα 20.

Πίνακας 20: Οι τιμές των παραμέτρων A και B της εξίσωσης 11 για τις διάφορες περιοχές.

Περιοχή	Υψόμετρο (m)	Ατμοσφαιρικό βάθος το επίπεδο του εδάφους X_g (g·cm^{-2})	A (eV·m^2)	B (eV)
Δανία	0	1036	(7,46±0,10)·10^{14}	(7,53±0) ·10^{16}
Ελλάδα	153	1017	(7,75±0,11)·10^{14}	(1,21±0) ·10^{17}
Αγία Ελένη	292	1000	(9,23±0,24)·10^{14}	(-1,02±0) ·10^{17}
Αυστραλία	605	964	(1,01±0,02)·10^{15}	(8,48±0) ·10^{16}
Κόστα Ρίκα	1146	903	(1,46±0,02)·10^{15}	(1,50±0) ·10^{16}
Auger	1400	875	(1,64±0,02)·10^{15}	(-1,16±0) ·10^{16}
Ναμίμπια	1800	833	(2,03±0,03)·10^{15}	(1,78±0)·10^{17}
Ισπανία	2400	774	(2,90±0,04)·10^{15}	(2,77±0)·10^{17}
Χιλή	2400	774	(2,90±0,04)·10^{15}	(1,64±0)·10^{17}
Μεξικό	2800	736	(3,53±0,05)·10^{15}	(2,11±0,01)·10^{17}
Αργεντινή	3700	656	(7,47±0,11)·10^{15}	(1,78±0)·10^{17}
Ινδία	4500	590	(1,34±0,02)·10^{16}	(-1,23±0)·10^{17}

Οι παράμετροι A και B μπορούν να συσχετιστούν με το ατμοσφαιρικό βάθος στο επίπεδο του εδάφους (X_g) και το ολικό μαγνητικό πεδίο (M) της περιοχής. Με τον τρόπο αυτό μπορεί να παραχθεί η σχέση 11 και για περιοχές πέρα από αυτές για τις οποίες πραγματοποιήθηκε προσομοίωση.

Τα A και B σαν συνάρτηση των X_g και M δίνονται από τις σχέσεις 12 και 13:

$$A = -2.54\cdot 10^{16} + \frac{7.14\cdot 10^{19}}{X_g} - \frac{7.21\cdot 10^{22}}{X_g^2} + \frac{2.53\cdot 10^{25}}{X_g^3} + 15.74\cdot 10^{13}\cdot M - 44.22\cdot 10^{11}\cdot M^2 + 37.70\cdot 10^{9}\cdot M^3 \quad (12)$$

$$B = 2.28\cdot 10^{19} - \frac{5.89\cdot 10^{22}}{X_g} + \frac{4.73\cdot 10^{25}}{X_g^2} - \frac{1.24\cdot 10^{28}}{X_g^3} + 9.92\cdot 10^{16}\cdot M - 2.64\cdot 10^{15}\cdot M^2 + 22.47\cdot 10^{12}\cdot M^3 \quad (13)$$

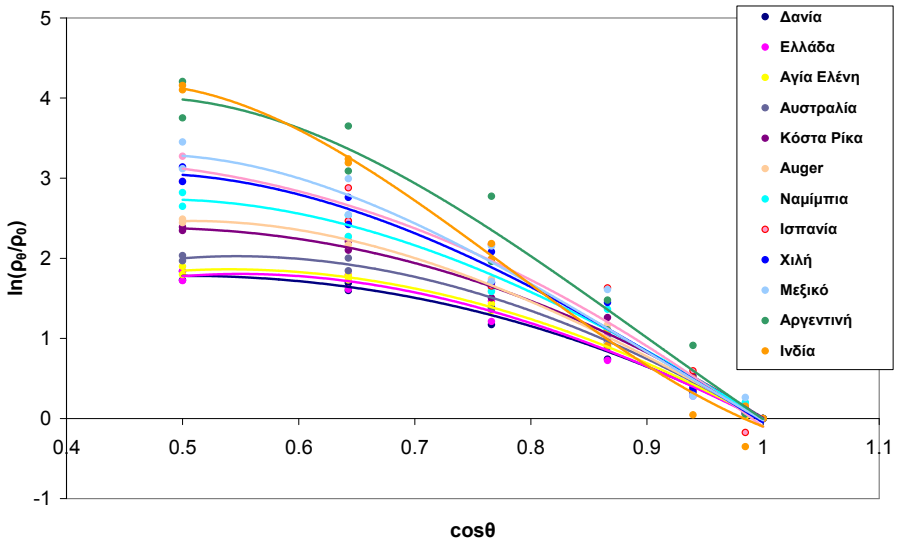
Για μια ολοκληρωμένη μελέτη της ακτινοβολίας Cherenkov που παράγεται από καταιγισμούς UHECRs θα πρέπει να μελετηθούν επιπλέον διαφορετικοί τύποι πρωτογενών (διάφοροι πυρήνες και φωτόνια), οπότε να

παραχθούν σχέσεις σαν τις παραπάνω σαν συνάρτηση και του τύπου του πρωτογενούς. Είναι σαφές επίσης ότι η σχέση (11) χρησιμοποιεί την κατακόρυφη πυκνότητα ρ(1200), οπότε χρειάζεται να εξαχθεί η εμπειρική σχέση που μετατρέπει την επικλινή πυκνότητα σε κατακόρυφη για να μπορεί να χρησιμοποιηθεί η σχέση για κάθε καταιγισμό.

5.6 Μετατροπή επικλινούς πυκνότητας

Για τη μετατροπή της τιμής $\rho_\theta(1200)$ του επικλινούς καταιγισμού (με ζενιθιακή γωνία θ) στην τιμή $\rho_0(1200)$ που θα χρησιμοποιηθεί στη σχέση (11) για τον υπολογισμό της ενέργειας του πρωτογενούς, θα χρησιμοποιηθεί μια εμπειρική σχέση που προκύπτει μέσω προσομοιώσεων καταιγισμών.

Πραγματοποιούμε λοιπόν προσομοιώσεις καταιγισμών αρχικής ενέργειας 10^{19} eV - 10^{20} eV με ζενιθιακές γωνίες από 0° έως 60°. Χρησιμοποιώντας τις τιμές πυκνότητας φωτονίων Cherenkov σε απόσταση 1200 m από τον πυρήνα του καταιγισμού δημιουργούμε τη γραφική παράσταση $\ln(\rho_\theta/\rho_0)$ συναρτήσει του συνημιτόνου της γωνίας θ (σχήμα 69).



Σχήμα 69: $\ln(\rho_\theta/\rho_0)$ συναρτήσει του cosθ για επικλινείς καταιγισμούς πρωτονίων αρχικής ενέργειας 10 EeV - 100 EeV. Οι πυκνότητες ρ_0 και ρ_θ αφορούν απόσταση R=1200 m από τον πυρήνα του καταιγισμού.

Η σχέση που προκύπτει είναι της μορφής

$$\rho_0 = \frac{\rho_\theta}{\exp(D_3 \cos^3\theta + D_2 \cos^2\theta + D_1 \cos\theta + D_0)} \quad (14)$$

με σφάλμα

$$\delta\rho_0 = [(\delta\rho_\theta)^2 + \rho_\theta^2 \cdot (\delta\theta)^2 \cdot [\cos^6\theta \cdot (\delta D_3)^2 + \cos^4\theta \cdot (\delta D_2)^2 + \cos^2\theta \cdot (\delta D_1)^2 + (\delta D_0)^2 + \sin^2\theta \cdot (3\cos^2\theta \cdot D_3 + 2\cos\theta \cdot D_2 + D_1)^2]^{1/2} \cdot \exp^{-1}\{D_3 \cdot \cos^3\theta + D_2 \cdot \cos^2\theta + D_1 \cdot \cos\theta + D_0\}$$

Οι τιμές των παραμέτρων D_0, D_1, D_2, D_3 φαίνονται στον πίνακα 21.

Πίνακας 21: Οι τιμές των παραμέτρων της σχέσης 14 για τις επιλεγμένες τοποθεσίες.

Τοποθεσία	υψόμετρο (m)	Ατμοσφαιρικό βάθος στο επίπεδο του εδάφους X_g (g·cm^{-2})	Ολικό μαγνητικό πεδίο M (μT)	D_3	D_2	D_1	D_0
Δανία	0	1036	50,20	-0,90	-5,42	6,12	0,19 ± 0,02
Ελλάδα	153	1017	45,83	3,99	-17,41	15,52	-2,13 ± 0,02
Αγία Ελένη	292	1000	28,97	1,50 ± 1,2	-12,03 ± 2,57	11,68 ± 1,96	-1,17 ± 0,34
Αυστραλία	605	964	58,13	3,27 ± 1,67	-16,77 ± 3,89	15,40 ± 2,74	-1,92 ± 0,5
Κόστα Ρίκα	1146	903	34,81	-0,02 ± 1,69	-8,54 ± 3,79	8,11 ± 2,42	0,45 ± 0,32
Auger	1400	875	24,31	8,19 ± 1,99	-26,81 ± 4,35	20,93 ± 2,74	-2,32 ± 0,37
Ναμίμπια	1800	833	25,47	5,93	-21,83	16,88	-0,99 ± 0,15
Ισπανία	2400	774	38,40	-0,02	-9,02	7,11	1,82 ± 0,02
Χιλή	2400	774	23,57	8,75	-27,69	20,05	-1,15 ± 0,02
Μεξικό	2800	736	45,58	15,70	-42,48	29,65	-2,89 ± 0,02
Αργεντινή	3700	656	23,39	18,68	-50,25	34,71	-3,14 ± 0,02
Ινδία	4500	590	50,21	34,29	-80,26	51,94	-6,07 ± 0,02

Χρησιμοποιώντας τις τιμές του πίνακα 21 μπορούμε να εξαγάγουμε την εξάρτηση των παραμέτρων D_0, D_1, D_2, D_3 από το ατμοσφαιρικό βάθος στο επίπεδο του εδάφους X_g και το ολικό μαγνητικό πεδίο M. Μέσω προσαρμογής προκύπτουν οι σχέσεις (15) – (18):

$$D_3 = 10.54 \cdot 10^2 - 3.08 \cdot X_g + 3.65 \cdot 10^{-3} \cdot X_g^2 - 1.44 \cdot 10^{-6} \cdot X_g^3 - 14.99 \cdot M + 0.39 \cdot M^2 - 3.15 \cdot 10^{-3} \cdot M^3 \quad (15)$$

$$D_2 = -21.82 \cdot 10^2 + 6.32 \cdot X_g - 7.49 \cdot 10^{-3} \cdot X_g^2 + 2.96 \cdot 10^{-6} \cdot X_g^3 + 31.30 \cdot M - 0.80 \cdot M^2 + 6.50 \cdot 10^{-3} \cdot M^3 \quad (16)$$

$$D_1 = 14.38 \cdot 10^2 - 4.16 \cdot X_g + 4.96 \cdot 10^{-3} \cdot X_g^2 - 1.97 \cdot 10^{-6} \cdot X_g^3 - 21.00 \cdot M + 0.53 \cdot M^2 - 4.30 \cdot 10^{-3} \cdot M^3 \quad (17)$$

$$D_0 = -31.07 \cdot 10^2 + 0.93 \cdot X_g - 1.13 \cdot 10^{-3} \cdot X_g^2 + 4.52 \cdot 10^{-7} \cdot X_g^3 + 4.66 \cdot M - 0.12 \cdot M^2 + 9.46 \cdot 10^{-4} \cdot M^3 \quad (18)$$

5.7 Έλεγχος των αποτελεσμάτων

Χρησιμοποιώντας τις σχέσεις 11-18 και τα δεδομένα των προσομοιώσεων μπορούμε να υπολογίσουμε την ενέργεια του πρωτογενούς σωματιδίου που δημιουργεί καταιγισμό μέσω της επικλινούς πυκνότητας των φωτονίων Cherenkov σε απόσταση 1200 m από τον πυρήνα του καταιγισμού και να τη συγκρίνουμε με την ενέργεια της προσομοίωσης, για να επιβεβαιώσουμε την ισχύ της προτεινόμενης μεθόδου. Στους πίνακες 22 έως 33 φαίνονται τα αποτελέσματα της σύγκρισης αυτής.

Πίνακας 22: Εκτίμηση ενέργειας μέσω των σχέσεων (11) – (18) για την Κοπεγχάγη στη Δανία. Η ενέργεια E στην πρώτη στήλη και το $\rho_\theta(1200)$ παρέχονται από την προσομοίωση, ενώ το $\rho_0(1200)$ έχει υπολογιστεί από τη σχέση (14) με χρήση των σχέσεων (15) – (18). Τέλος, μέσω της σχέσης (11), με τη χρήση των (12) και (13) υπολογίζεται η ενέργεια $E_{(11)}$. Στο δεύτερο μέρος του πίνακα παρουσιάζεται ο αντίστοιχος υπολογισμός για ενέργειες της τάξης των 10^{18} eV

E (eV)	θ (deg)	$\rho_\theta(1200)$ (m^{-2})	$\rho_0(1200)$ (m^{-2})	$E_{(11)}$ (eV)	% απόκλιση
10^{20}	0	133959,48	135305,79	$9{,}30\cdot10^{19}$	6,96
10^{20}	10	146756,62	132967,56	$9{,}14\cdot10^{19}$	8,56
10^{20}	20	194539,54	129929,35	$8{,}93\cdot10^{19}$	10,65
10^{20}	30	281132,32	121128,21	$8{,}33\cdot10^{19}$	16,70
10^{20}	40	432605,17	116719,39	$8{,}03\cdot10^{19}$	19,73
10^{20}	50	660822,75	124661,85	$8{,}57\cdot10^{19}$	14,27
10^{20}	60	840731,08	146279,89	$1{,}01\cdot10^{20}$	0,58
10^{19}	0	12122,49	12244,32	$8{,}50\cdot10^{18}$	15,01
10^{19}	10	13260,78	12014,81	$8{,}34\cdot10^{18}$	16,58
10^{19}	20	17471,26	11668,73	$8{,}10\cdot10^{18}$	18,96
10^{19}	30	32832,95	14146,35	$9{,}81\cdot10^{18}$	1,94
10^{19}	40	48494,82	13084,19	$9{,}08\cdot10^{18}$	9,24
10^{19}	50	65665,91	12387,64	$8{,}60\cdot10^{18}$	14,02
10^{19}	60	68173,55	11861,60	$8{,}24\cdot10^{18}$	17,64
Μέση απόκλιση			**12,20%**		
10^{18}	0	1647,96	1664,52	$1{,}23\cdot10^{18}$	23,09
10^{18}	10	2116,95	1918,04	$1{,}40\cdot10^{18}$	40,51
10^{18}	20	2350,83	1570,07	$1{,}17\cdot10^{18}$	16,60
10^{18}	30	3729,10	1606,71	$1{,}19\cdot10^{18}$	19,12
10^{18}	40	5112,84	1379,47	$1{,}03\cdot10^{18}$	3,51
10^{18}	50	6560,11	1237,54	$9{,}38\cdot10^{17}$	6,24
10^{18}	60	6487,17	1128,71	$8{,}63\cdot10^{17}$	13,71
Μέση απόκλιση			**17,54%**		

Πίνακας 23: Εκτίμηση ενέργειας μέσω των σχέσεων (11) – (18) για την Αθήνα στην Ελλάδα. Η ενέργεια Ε στην πρώτη στήλη και το $\rho_\theta(1200)$ παρέχονται από την προσομοίωση, ενώ το $\rho_0(1200)$ έχει υπολογιστεί από τη σχέση (14) με χρήση των σχέσεων (15) – (18). Τέλος, μέσω της σχέσης (11), με τη χρήση των (12) και (13) υπολογίζεται η ενέργεια $E_{(11)}$. Στο δεύτερο μέρος του πίνακα παρουσιάζεται ο αντίστοιχος υπολογισμός για ενέργειες της τάξης των 10^{18} eV.

E (eV)	**θ (deg)**	**$\rho_\theta(1200)$ (m^{-2})**	**$\rho_0(1200)$ (m^{-2})**	**$E_{(11)}$ (eV)**	**% απόκλιση**
10^{20}	0	128949,69	130245,65	$1{,}00\cdot10^{20}$	0,34
10^{20}	10	136042,77	123821,02	$9{,}54\cdot10^{19}$	4,61
10^{20}	20	170389,6	115452,07	$8{,}89\cdot10^{19}$	11,05
10^{20}	30	266319,98	117115,51	$9{,}02\cdot10^{19}$	9,77
10^{20}	40	432811,36	118350,92	$9{,}12\cdot10^{19}$	8,82
10^{20}	50	647324,81	121021,67	$9{,}32\cdot10^{19}$	6,76
10^{20}	60	719700,41	120763,61	$9{,}30\cdot10^{19}$	6,96
10^{19}	0	10773,16	10881,43	$8{,}43\cdot10^{18}$	15,71
10^{19}	10	12313,60	11207,38	$8{,}68\cdot10^{18}$	13,21
10^{19}	20	15638,55	10596,32	$8{,}21\cdot10^{18}$	17,91
10^{19}	30	31552,64	13875,43	$1{,}07\cdot10^{19}$	7,34
10^{19}	40	46694,13	12768,37	$9{,}88\cdot10^{18}$	1,19
10^{19}	50	64674,27	12091,28	$9{,}36\cdot10^{18}$	6,40
10^{19}	60	67899,02	11393,26	$8{,}82\cdot10^{18}$	11,77
Μέση απόκλιση			**8,70%**		
10^{18}	0	1921,14	1940,44	$1{,}54\cdot10^{18}$	54,39
10^{18}	10	1626,02	1479,94	$1{,}19\cdot10^{18}$	18,94
10^{18}	20	1972,33	1336,41	$1{,}08\cdot10^{18}$	7,88
10^{18}	30	3402,87	1496,43	$1{,}20\cdot10^{18}$	20,20
10^{18}	40	4941,58	1351,26	$1{,}09\cdot10^{18}$	9,03
10^{18}	50	6385,25	1193,77	$9{,}69\cdot10^{17}$	3,10
10^{18}	60	6491,65	1089,28	$8{,}89\cdot10^{17}$	11,15
Μέση απόκλιση			**17,81%**		

Πίνακας 24: Εκτίμηση ενέργειας μέσω των σχέσεων (11) – (18) για την τοποθεσία Jamestown στην Αγία Ελένη του Νότιου Ατλαντικού. Η ενέργεια Ε στην πρώτη στήλη και το $\rho_\theta(1200)$ παρέχονται από την προσομοίωση, ενώ το $\rho_0(1200)$ έχει υπολογιστεί από τη σχέση (14) με χρήση των σχέσεων (15) – (18). Τέλος, μέσω της σχέσης (11), με τη χρήση των (12) και (13) υπολογίζεται η ενέργεια $E_{(11)}$. Στο δεύτερο μέρος του πίνακα παρουσιάζεται ο αντίστοιχος υπολογισμός για ενέργειες της τάξης των 10^{18} eV.

E (eV)	θ (deg)	$\rho_\theta(1200)$ (m^{-2})	$\rho_0(1200)$ (m^{-2})	$E_{(11)}$ (eV)	% απόκλιση
10^{20}	0	107383,33	109552,62	$1,13\cdot10^{20}$	12,91
10^{20}	10	124246,61	111211,19	$1,15\cdot10^{20}$	14,62
10^{20}	20	168591,95	105398,51	$1,09\cdot10^{20}$	8,63
10^{20}	30	263101,52	100390,87	$1,03\cdot10^{20}$	3,47
10^{20}	40	413055,03	95899,23	$9,88\cdot10^{19}$	1,15
10^{20}	50	639905,76	103755,19	$1,07\cdot10^{20}$	6,94
10^{20}	60	717405,38	105045,24	$1,08\cdot10^{20}$	8,27
10^{19}	0	11310,28	11538,77	$1,20\cdot10^{19}$	19,55
10^{19}	10	11585,32	10369,84	$1,08\cdot10^{19}$	7,51
10^{19}	20	15931,17	9959,68	$1,03\cdot10^{19}$	3,28
10^{19}	30	28997,45	11064,47	$1,15\cdot10^{19}$	14,66
10^{19}	40	47263,69	10973,24	$1,14\cdot10^{19}$	13,72
10^{19}	50	63757,56	10337,74	$1,07\cdot10^{19}$	7,18
10^{19}	60	68278,93	9997,66	$1,04\cdot10^{19}$	3,67
Μέση απόκλιση			**8,97%**		
10^{18}	0	1339,64	1366,70	$1,48\cdot10^{18}$	47,75
10^{18}	10	1706,59	1527,55	$1,64\cdot10^{18}$	64,32
10^{18}	20	1997,93	1249,04	$1,36\cdot10^{18}$	35,63
10^{18}	30	3424,99	1306,86	$1,42\cdot10^{18}$	41,59
10^{18}	40	4850,42	1126,13	$1,23\cdot10^{18}$	22,97
10^{18}	50	6463,42	1047,99	$1,15\cdot10^{18}$	14,92
10^{18}	60	6574,07	962,60	$1,06\cdot10^{18}$	6,13
Μέση απόκλιση			**33,33%**		

Πίνακας 25: Εκτίμηση ενέργειας μέσω των σχέσεων (11) – (18) για την τοποθεσία Canberra στην Αυστραλία. Η ενέργεια Ε στην πρώτη στήλη και το $\rho_\theta(1200)$ παρέχονται από την προσομοίωση, ενώ το $\rho_0(1200)$ έχει υπολογιστεί από τη σχέση (14) με χρήση των σχέσεων (15) – (18). Τέλος, μέσω της σχέσης (11), με τη χρήση των (12) και (13) υπολογίζεται η ενέργεια $E_{(11)}$. Στο δεύτερο μέρος του πίνακα παρουσιάζεται ο αντίστοιχος υπολογισμός για ενέργειες της τάξης των 10^{18} eV.

E (eV)	θ (deg)	$\rho_\theta(1200)$ (m^{-2})	$\rho_0(1200)$ (m^{-2})	$E_{(11)}$ (eV)	% απόκλιση
10^{20}	0	98913,48	101925,84	$1,03 \cdot 10^{20}$	3,02
10^{20}	10	108506,11	98729,32	$9,98 \cdot 10^{19}$	0,21
10^{20}	20	149854,82	96147,48	$9,72 \cdot 10^{19}$	2,81
10^{20}	30	240832,43	93477,33	$9,45 \cdot 10^{19}$	5,51
10^{20}	40	386513,76	87651,14	$8,86 \cdot 10^{19}$	11,39
10^{20}	50	624857,33	93894,70	$9,49 \cdot 10^{19}$	5,09
10^{20}	60	708213,24	96930,60	$9,80 \cdot 10^{19}$	2,02
10^{19}	0	8692,81	8957,55	$9,13 \cdot 10^{18}$	8,75
10^{19}	10	9643,98	8775,02	$8,94 \cdot 10^{18}$	10,59
10^{19}	20	13628,05	8743,82	$8,91 \cdot 10^{18}$	10,91
10^{19}	30	26099,63	10130,38	$1,03 \cdot 10^{19}$	3,10
10^{19}	40	44716,74	10140,58	$1,03 \cdot 10^{19}$	3,20
10^{19}	50	64323,42	9665,61	$9,84 \cdot 10^{18}$	1,60
10^{19}	60	66443,82	9093,93	$9,26 \cdot 10^{18}$	7,37
Μέση απόκλιση			**5,40%**		

10^{18}	0	1352,01	1393,19	$1,49 \cdot 10^{18}$	48,52
10^{18}	10	1436,44	1307,02	$1,40 \cdot 10^{18}$	39,82
10^{18}	20	1363,47	874,81	$9,62 \cdot 10^{17}$	3,83
10^{18}	30	3028,96	1175,67	$1,27 \cdot 10^{18}$	26,55
10^{18}	40	4835,79	1096,63	$1,19 \cdot 10^{18}$	18,57
10^{18}	50	6478,17	973,45	$1,06 \cdot 10^{18}$	6,13
10^{18}	60	6413,68	877,82	$9,65 \cdot 10^{17}$	3,53
Μέση απόκλιση			**20,99%**		

Πίνακας 26: Εκτίμηση ενέργειας μέσω των σχέσεων (11) – (18) για την τοποθεσία San Jose στην Κόστα Ρίκα. Η ενέργεια Ε στην πρώτη στήλη και το $\rho_\theta(1200)$ παρέχονται από την προσομοίωση, ενώ το $\rho_0(1200)$ έχει υπολογιστεί από τη σχέση (14) με χρήση των σχέσεων (15) – (18). Τέλος, μέσω της σχέσης (11), με τη χρήση των (12) και (13) υπολογίζεται η ενέργεια $E_{(11)}$. Στο δεύτερο μέρος του πίνακα παρουσιάζεται ο αντίστοιχος υπολογισμός για ενέργειες της τάξης των 10^{18} eV.

E (eV)	θ (deg)	$\rho_\theta(1200)$ (m^{-2})	$\rho_0(1200)$ (m^{-2})	$E_{(11)}$ (eV)	% απόκλιση
10^{20}	0	68725,14	70818,13	$9,92 \cdot 10^{19}$	0,83
10^{20}	10	82234,55	74640,42	$1,05 \cdot 10^{20}$	4,52
10^{20}	20	109200,23	69222,58	$9,69 \cdot 10^{19}$	3,06
10^{20}	30	178276,54	66796,99	$9,35 \cdot 10^{19}$	6,46
10^{20}	40	309920,23	64713,82	$9,06 \cdot 10^{19}$	9,38
10^{20}	50	561594,63	71385,90	$1,00 \cdot 10^{20}$	0,04
10^{20}	60	717515,86	72388,33	$1,01 \cdot 10^{20}$	1,37
10^{19}	0	6316,48	6508,85	$9,14 \cdot 10^{18}$	8,63
10^{19}	10	7165,38	6503,68	$9,13 \cdot 10^{18}$	8,70
10^{19}	20	10738,87	6807,43	$9,56 \cdot 10^{18}$	4,45
10^{19}	30	22285,27	8349,89	$1,17 \cdot 10^{19}$	17,15
10^{19}	40	34458,48	7195,21	$1,01 \cdot 10^{19}$	0,98
10^{19}	50	57647,09	7327,69	$1,03 \cdot 10^{19}$	2,83
10^{19}	60	68866,58	6947,77	$9,75 \cdot 10^{18}$	2,48
Μέση απόκλιση			**5,06%**		
10^{18}	0	1041,56	1073,28	$1,59 \cdot 10^{18}$	59,17
10^{18}	10	859,15	779,81	$1,16 \cdot 10^{18}$	16,32
10^{18}	20	1053,18	667,62	$9,99 \cdot 10^{17}$	0,06
10^{18}	30	2623,48	982,97	$1,46 \cdot 10^{18}$	45,98
10^{18}	40	4156,76	867,97	$1,29 \cdot 10^{18}$	29,19
10^{18}	50	5828,44	740,87	$1,11 \cdot 10^{18}$	10,64
10^{18}	60	6577,27	663,56	$9,94 \cdot 10^{17}$	0,65
Μέση απόκλιση			**23,14%**		

Πίνακας 27: Εκτίμηση ενέργειας μέσω των σχέσεων (11) – (18) για την τοποθεσία του Παρατηρητηρίου Auger στην Αργεντινή. Η ενέργεια Ε στην πρώτη στήλη και το $\rho_\theta(1200)$ παρέχονται από την προσομοίωση, ενώ το $\rho_0(1200)$ έχει υπολογιστεί από τη σχέση (14) με χρήση των σχέσεων (15) – (18). Τέλος, μέσω της σχέσης (11), με τη χρήση των (12) και (13) υπολογίζεται η ενέργεια $E_{(11)}$. Στο δεύτερο μέρος του πίνακα παρουσιάζεται ο αντίστοιχος υπολογισμός για ενέργειες της τάξης των 10^{18} eV.

E (eV)	**θ (deg)**	**$\rho_\theta(1200)$ (m^{-2})**	**$\rho_0(1200)$ (m^{-2})**	**$E_{(11)}$ (eV)**	**% απόκλιση**
10^{20}	0	61008.15	61621,29	$1,00 \cdot 10^{20}$	0,46
10^{20}	10	72646.97	64891,06	$1,06 \cdot 10^{20}$	5,79
10^{20}	20	96327.95	60241,21	$9,82 \cdot 10^{19}$	1,78
10^{20}	30	155594.30	56375,72	$9,19 \cdot 10^{19}$	8,09
10^{20}	40	299130.25	57184,78	$9,32 \cdot 10^{19}$	6,77
10^{20}	50	532920.17	57939,67	$9,45 \cdot 10^{19}$	5,54
10^{20}	60	703285,00	60310,86	$9,83 \cdot 10^{19}$	1,67
10^{19}	0	5745.47	5803,22	$9,48 \cdot 10^{18}$	5,19
10^{19}	10	6316.08	5641,76	$9,22 \cdot 10^{18}$	7,82
10^{19}	20	8296.80	5188,62	$8,48 \cdot 10^{18}$	15,21
10^{19}	30	18519.12	6709,94	$1,10 \cdot 10^{19}$	9,59
10^{19}	40	32830.28	6276,17	$1,03 \cdot 10^{19}$	2,52
10^{19}	50	55646.94	6050,00	$9,88 \cdot 10^{18}$	1,17
10^{19}	60	69217.10	5935,78	$9,70 \cdot 10^{18}$	3,03
Μέση απόκλιση			**5,33%**		
10^{18}	0	927.47	936,79	$1,55 \cdot 10^{18}$	54,89
10^{18}	10	1043.25	931,87	$1,54 \cdot 10^{18}$	54,08
10^{18}	20	697.23	436,03	$7,33 \cdot 10^{17}$	26,74
10^{18}	30	2242.58	812,54	$1,35 \cdot 10^{18}$	34,63
10^{18}	40	3863.66	738,62	$1,23 \cdot 10^{18}$	22,58
10^{18}	50	5761.49	626,40	$1,04 \cdot 10^{18}$	4,29
10^{18}	60	6552.09	561,88	$9,38 \cdot 10^{17}$	6,22
Μέση απόκλιση			**29,06%**		

Πίνακας 28: Εκτίμηση ενέργειας μέσω των σχέσεων (11) – (18) για την τοποθεσία Khomas Highland στη Ναμίμπια. Η ενέργεια E στην πρώτη στήλη και το $\rho_\theta(1200)$ παρέχονται από την προσομοίωση, ενώ το $\rho_0(1200)$ έχει υπολογιστεί από τη σχέση (14) με χρήση των σχέσεων (15) – (18). Τέλος, μέσω της σχέσης (11), με τη χρήση των (12) και (13) υπολογίζεται η ενέργεια $E_{(11)}$. Στο δεύτερο μέρος του πίνακα παρουσιάζεται ο αντίστοιχος υπολογισμός για ενέργειες της τάξης των 10^{18} eV.

E (eV)	θ (deg)	$\rho_\theta(1200)$ (m^{-2})	$\rho_0(1200)$ (m^{-2})	$E_{(11)}$ (eV)	% απόκλιση
10^{20}	0	49180,03	50173,53	$1,02 \cdot 10^{20}$	2,45
10^{20}	10	56151,10	49910,06	$1,02 \cdot 10^{20}$	1,91
10^{20}	20	74041,45	44285,26	$9,04 \cdot 10^{19}$	9,56
10^{20}	30	132590,65	43617,53	$8,91 \cdot 10^{19}$	10,93
10^{20}	40	239806,25	39484,55	$8,06 \cdot 10^{19}$	19,36
10^{20}	50	476009,58	42291,88	$8,64 \cdot 10^{19}$	13,63
10^{20}	60	694381,60	45343,72	$9,26 \cdot 10^{19}$	7,40
10^{19}	0	4939,41	4390,41	$9,05 \cdot 10^{18}$	9,49
10^{19}	10	6157,49	3682,88	$7,61 \cdot 10^{18}$	23,93
10^{19}	20	15812,11	5201,61	$1,07 \cdot 10^{19}$	7,06
10^{19}	30	29546,99	4864,97	$1,00 \cdot 10^{19}$	0,19
10^{19}	40	51067,33	4537,16	$9,35 \cdot 10^{18}$	6,50
10^{19}	50	67851,80	4430,78	$9,13 \cdot 10^{18}$	8,67
10^{19}	60	4041,73	4123,38	$8,51 \cdot 10^{18}$	14,94
Μέση απόκλιση			**9,71%**		
10^{18}	0	551,87	563,02	$1,24 \cdot 10^{18}$	24,30
10^{18}	10	914,46	812,82	$1,75 \cdot 10^{18}$	75,26
10^{18}	20	643,95	385,16	$8,80 \cdot 10^{17}$	11,99
10^{18}	30	1976,95	650,34	$1,42 \cdot 10^{18}$	42,11
10^{18}	40	3472,82	571,81	$1,26 \cdot 10^{18}$	26,09
10^{18}	50	5338,79	474,33	$1,06 \cdot 10^{18}$	6,20
10^{18}	60	6493,76	424,05	$9,59 \cdot 10^{17}$	4,05
Μέση απόκλιση			**27,14%**		

Πίνακας 29: Εκτίμηση ενέργειας μέσω των σχέσεων (11) – (18) για την τοποθεσία Tenerife που ανήκει στην Ισπανία. Η ενέργεια Ε στην πρώτη στήλη και το $\rho_\theta(1200)$ παρέχονται από την προσομοίωση, ενώ το $\rho_0(1200)$ έχει υπολογιστεί από τη σχέση (14) με χρήση των σχέσεων (15) – (18). Τέλος, μέσω της σχέσης (11), με τη χρήση των (12) και (13) υπολογίζεται η ενέργεια $E_{(11)}$. Στο δεύτερο μέρος του πίνακα παρουσιάζεται ο αντίστοιχος υπολογισμός για ενέργειες της τάξης των 10^{18} eV.

E (eV)	θ (deg)	$\rho_\theta(1200)$ (m^{-2})	$\rho_0(1200)$ (m^{-2})	$E_{(11)}$ (eV)	% απόκλιση
10^{20}	0	34476,93	35883,96	$1,01 \cdot 10^{20}$	1,06
10^{20}	10	37141,60	32989,88	$9,29 \cdot 10^{19}$	7,08
10^{20}	20	49025,97	27723,01	$7,81 \cdot 10^{19}$	21,88
10^{20}	30	91850,43	26529,26	$7,48 \cdot 10^{19}$	25,23
10^{20}	40	179885,56	24052,99	$6,78 \cdot 10^{19}$	32,19
10^{20}	50	406928,03	27025,87	$7,62 \cdot 10^{19}$	23,83
10^{20}	60	667071,99	29017,47	$8,18 \cdot 10^{19}$	18,24
10^{19}	0	2484,66	2586,07	$7,49 \cdot 10^{18}$	25,10
10^{19}	10	2086,02	1852,84	$5,43 \cdot 10^{18}$	45,71
10^{19}	20	4500,68	2545,03	$7,37 \cdot 10^{18}$	26,25
10^{19}	30	12686,06	3664,13	$1,05 \cdot 10^{19}$	5,19
10^{19}	40	21841,89	2920,54	$8,43 \cdot 10^{18}$	15,70
10^{19}	50	44203,02	2935,72	$8,47 \cdot 10^{18}$	15,28
10^{19}	60	65666,26	2856,47	$8,25 \cdot 10^{18}$	17,50
Μέση απόκλιση			**20,02%**		
10^{18}	0	443,26	461,35	$1,52 \cdot 10^{18}$	51,94
10^{18}	10	405,44	360,12	$1,23 \cdot 10^{18}$	23,49
10^{18}	20	592,28	334,92	$1,16 \cdot 10^{18}$	16,41
10^{18}	30	1480,50	427,62	$1,42 \cdot 10^{18}$	42,46
10^{18}	40	2621,27	350,50	$1,21 \cdot 10^{18}$	20,79
10^{18}	50	4794,81	318,44	$1,12 \cdot 10^{18}$	11,78
10^{18}	60	6506,30	283,02	$1,02 \cdot 10^{18}$	1,83
Μέση απόκλιση			**24,10%**		

Πίνακας 30: Εκτίμηση ενέργειας μέσω των σχέσεων (11) – (18) για την τοποθεσία La Silla στην Χιλή. Η ενέργεια E στην πρώτη στήλη και το $\rho_\theta(1200)$ παρέχονται από την προσομοίωση, ενώ το $\rho_0(1200)$ έχει υπολογιστεί από τη σχέση (14) με χρήση των σχέσεων (15) – (18). Τέλος, μέσω της σχέσης (11), με τη χρήση των (12) και (13) υπολογίζεται η ενέργεια $E_{(11)}$. Στο δεύτερο μέρος του πίνακα παρουσιάζεται ο αντίστοιχος υπολογισμός για ενέργειες της τάξης των 10^{18} eV.

E (eV)	θ (deg)	$\rho_\theta(1200)$ (m^{-2})	$\rho_0(1200)$ (m^{-2})	$E_{(11)}$ (eV)	% απόκλιση
10^{20}	0	34528,35	34875,37	$1,02 \cdot 10^{20}$	2,04
10^{20}	10	36647,34	32116,68	$9,40 \cdot 10^{19}$	6,01
10^{20}	20	50463,44	29189,04	$8,54 \cdot 10^{19}$	14,56
10^{20}	30	92923,69	28119,95	$8,23 \cdot 10^{19}$	17,68
10^{20}	40	188501,83	26073,87	$7,63 \cdot 10^{19}$	23,66
10^{20}	50	388742,40	25766,29	$7,54 \cdot 10^{19}$	24,56
10^{20}	60	665107,36	29405,99	$8,61 \cdot 10^{19}$	13,93
10^{19}	0	2853,47	2882,15	$8,62 \cdot 10^{18}$	13,79
10^{19}	10	3265,42	2861,72	$8,56 \cdot 10^{18}$	14,39
10^{19}	20	3954,44	2287,33	$6,88 \cdot 10^{18}$	31,16
10^{19}	30	12136,72	3672,73	$1,09 \cdot 10^{19}$	9,29
10^{19}	40	22857,61	3161,70	$9,44 \cdot 10^{18}$	5,63
10^{19}	50	45162,53	2993,42	$8,95 \cdot 10^{18}$	10,54
10^{19}	60	65956,15	2916,08	$8,72 \cdot 10^{18}$	12,80
Μέση απόκλιση			**14,29%**		

10^{18}	0	416,71	420,90	$1,43 \cdot 10^{18}$	43,40
10^{18}	10	511,22	448,02	$1,51 \cdot 10^{18}$	51,32
10^{18}	20	784,97	454,04	$1,53 \cdot 10^{18}$	53,08
10^{18}	30	1563,97	473,28	$1,59 \cdot 10^{18}$	58,70
10^{18}	40	2612,34	361,34	$1,26 \cdot 10^{18}$	26,01
10^{18}	50	4889,51	324,08	$1,15 \cdot 10^{18}$	15,13
10^{18}	60	6420,94	283,89	$1,03 \cdot 10^{18}$	3,39
Μέση απόκλιση			**35,86%**		

Πίνακας 31: Εκτίμηση ενέργειας μέσω των σχέσεων (11) – (18) για την τοποθεσία San Pedro Martir στο Μεξικό. Η ενέργεια Ε στην πρώτη στήλη και το $\rho_\theta(1200)$ παρέχονται από την προσομοίωση, ενώ το $\rho_0(1200)$ έχει υπολογιστεί από τη σχέση (14) με χρήση των σχέσεων (15) – (18). Τέλος, μέσω της σχέσης (11), με τη χρήση των (12) και (13) υπολογίζεται η ενέργεια $E_{(11)}$. Στο δεύτερο μέρος του πίνακα παρουσιάζεται ο αντίστοιχος υπολογισμός για ενέργειες της τάξης των 10^{18} eV.

E (eV)	θ (deg)	$\rho_\theta(1200)$ (m^{-2})	$\rho_0(1200)$ (m^{-2})	$E_{(11)}$ (eV)	% απόκλιση
10^{20}	0	28277,43	29431,45	$1,08 \cdot 10^{20}$	7,71
10^{20}	10	30783,92	28012,63	$1,03 \cdot 10^{20}$	2,54
10^{20}	20	37224,07	22682,74	$8,31 \cdot 10^{19}$	16,92
10^{20}	30	71841,40	22907,89	$8,39 \cdot 10^{19}$	16,10
10^{20}	40	156652,86	22005,72	$8,06 \cdot 10^{19}$	19,39
10^{20}	50	360117,06	22279,62	$8,16 \cdot 10^{19}$	18,39
10^{20}	60	639220,12	23458,87	$8,59 \cdot 10^{19}$	14,09
10^{19}	0	2021,93	2104,45	$7,97 \cdot 10^{18}$	20,29
10^{19}	10	2628,06	2391,47	$9,02 \cdot 10^{18}$	9,81
10^{19}	20	2697,09	1643,49	$6,29 \cdot 10^{18}$	37,11
10^{19}	30	10103,80	3221,77	$1,20 \cdot 10^{19}$	20,49
10^{19}	40	17399,05	2444,12	$9,21 \cdot 10^{18}$	7,89
10^{19}	50	40356,95	2496,79	$9,40 \cdot 10^{18}$	5,97
10^{19}	60	63874,50	2344,14	$8,85 \cdot 10^{18}$	11,54
Μέση απόκλιση			**14,87%**		
10^{18}	0	313,81	326,62	$1,48 \cdot 10^{18}$	48,22
10^{18}	10	403,12	366,83	$1,63 \cdot 10^{18}$	62,89
10^{18}	20	414,51	252,58	$1,21 \cdot 10^{18}$	21,19
10^{18}	30	1272,81	405,86	$1,77 \cdot 10^{18}$	77,14
10^{18}	40	2176,38	305,73	$1,41 \cdot 10^{18}$	40,59
10^{18}	50	4424,41	273,73	$1,29 \cdot 10^{18}$	28,91
10^{18}	60	6346,66	232,92	$1,14 \cdot 10^{18}$	14,01
Μέση απόκλιση			**41,85%**		

Πίνακας 32: Εκτίμηση ενέργειας μέσω των σχέσεων (11) – (18) για την τοποθεσία La Puna στην Αργεντινή. Η ενέργεια E στην πρώτη στήλη και το $\rho_\theta(1200)$ παρέχονται από την προσομοίωση, ενώ το $\rho_0(1200)$ έχει υπολογιστεί από τη σχέση (14) με χρήση των σχέσεων (15) – (18). Τέλος, μέσω της σχέσης (11), με τη χρήση των (12) και (13) υπολογίζεται η ενέργεια $E_{(11)}$. Στο δεύτερο μέρος του πίνακα παρουσιάζεται ο αντίστοιχος υπολογισμός για ενέργειες της τάξης των 10^{18} eV.

E (eV)	θ (deg)	$\rho_\theta(1200)$ (m^{-2})	$\rho_0(1200)$ (m^{-2})	$E_{(11)}$ (eV)	% απόκλιση
10^{20}	0	13365,39	13910,85	$1,03 \cdot 10^{20}$	3,44
10^{20}	10	15138,15	13678,75	$1,02 \cdot 10^{20}$	1,72
10^{20}	20	21512,66	12595,41	$9,37 \cdot 10^{19}$	6,31
10^{20}	30	40404,41	11374,42	$8,46 \cdot 10^{19}$	15,36
10^{20}	40	95018,16	10133,30	$7,54 \cdot 10^{19}$	24,56
10^{20}	50	293378,58	11407,30	$8,49 \cdot 10^{19}$	15,11
10^{20}	60	570302,93	11544,02	$8,59 \cdot 10^{19}$	14,10
10^{19}	0	840,55	874,85	$6,84 \cdot 10^{18}$	31,60
10^{19}	10	887,03	801,52	$6,30 \cdot 10^{18}$	37,04
10^{19}	20	2092,78	1225,30	$9,44 \cdot 10^{18}$	5,64
10^{19}	30	3687,28	1038,02	$8,05 \cdot 10^{18}$	19,51
10^{19}	40	13458,07	1435,25	$1,10 \cdot 10^{19}$	9,92
10^{19}	50	32358,28	1258,17	$9,68 \cdot 10^{18}$	3,20
10^{19}	60	56514,47	1143,96	$8,83 \cdot 10^{18}$	11,66
Μέση απόκλιση			**14,23%**		

10^{18}	0	151,96	158,16	$1,53 \cdot 10^{18}$	52,90
10^{18}	10	186,51	168,53	$1,61 \cdot 10^{18}$	60,58
10^{18}	20	193,05	113,03	$1,19 \cdot 10^{18}$	19,45
10^{18}	30	572,98	161,30	$1,55 \cdot 10^{18}$	55,22
10^{18}	40	1444,44	154,04	$1,50 \cdot 10^{18}$	49,85
10^{18}	50	3009,45	117,02	$1,22 \cdot 10^{18}$	22,41
10^{18}	60	6023,04	121,92	$1,26 \cdot 10^{18}$	26,04
Μέση απόκλιση			**40,92%**		

Πίνακας 33: Εκτίμηση ενέργειας μέσω των σχέσεων (11) – (18) για την τοποθεσία Hanle στην Ινδία. Η ενέργεια E στην πρώτη στήλη και το $\rho_\theta(1200)$ παρέχονται από την προσομοίωση, ενώ το $\rho_0(1200)$ έχει υπολογιστεί από τη σχέση (14) με χρήση των σχέσεων (15) – (18). Τέλος, μέσω της σχέσης (11), με τη χρήση των (12) και (13) υπολογίζεται η ενέργεια $E_{(11)}$. Στο δεύτερο μέρος του πίνακα παρουσιάζεται ο αντίστοιχος υπολογισμός για ενέργειες της τάξης των 10^{18} eV.

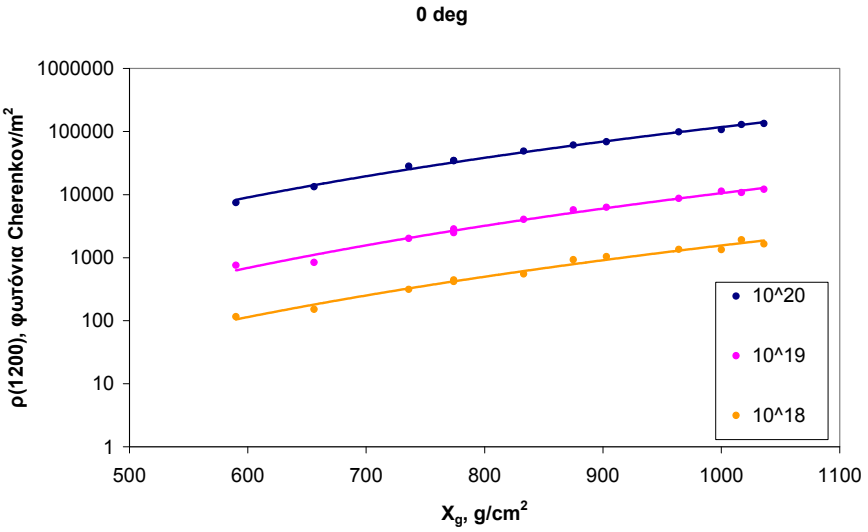
E (eV)	θ (deg)	$\rho_\theta(1200)$ (m^{-2})	$\rho_0(1200)$ (m^{-2})	$E_{(11)}$ (eV)	% απόκλιση
10^{20}	0	7469,48	8091,59	$1,08 \cdot 10^{20}$	8,31
10^{20}	10	8715,38	8588,04	$1,15 \cdot 10^{20}$	14,96
10^{20}	20	12303,93	8668,43	$1,16 \cdot 10^{20}$	16,04
10^{20}	30	22300,83	7948,04	$1,06 \cdot 10^{20}$	6,39
10^{20}	40	54804,55	6781,81	$9,08 \cdot 10^{19}$	9,24
10^{20}	50	181527,35	6562,59	$8,78 \cdot 10^{19}$	12,18
10^{20}	60	477726,99	7456,15	$9,98 \cdot 10^{19}$	0,20
10^{19}	0	760,04	823,34	$1,09 \cdot 10^{19}$	9,18
10^{19}	10	534,89	527,07	$6,95 \cdot 10^{18}$	30,52
10^{19}	20	793,88	559,31	$7,38 \cdot 10^{18}$	26,20
10^{19}	30	1892,25	674,40	$8,92 \cdot 10^{18}$	10,78
10^{19}	40	6755,55	835,97	$1,11 \cdot 10^{19}$	10,87
10^{19}	50	19390,33	701,00	$9,28 \cdot 10^{18}$	7,22
10^{19}	60	45947,37	717,13	$9,49 \cdot 10^{18}$	5,06
Μέση απόκλιση			**11,94%**		
10^{18}	0	116,14	125,81	$1,57 \cdot 10^{18}$	57,09
10^{18}	10	133,48	131,53	$1,65 \cdot 10^{18}$	64,75
10^{18}	20	132,38	93,27	$1,13 \cdot 10^{18}$	13,48
10^{18}	30	201,93	71,97	$8,49 \cdot 10^{17}$	15,06
10^{18}	40	1018,38	126,02	$1,57 \cdot 10^{18}$	57,37
10^{18}	50	2680,83	96,92	$1,18 \cdot 10^{18}$	18,37
10^{18}	60	5115,93	79,85	$9,55 \cdot 10^{17}$	4,50
Μέση απόκλιση			**32,94%**		

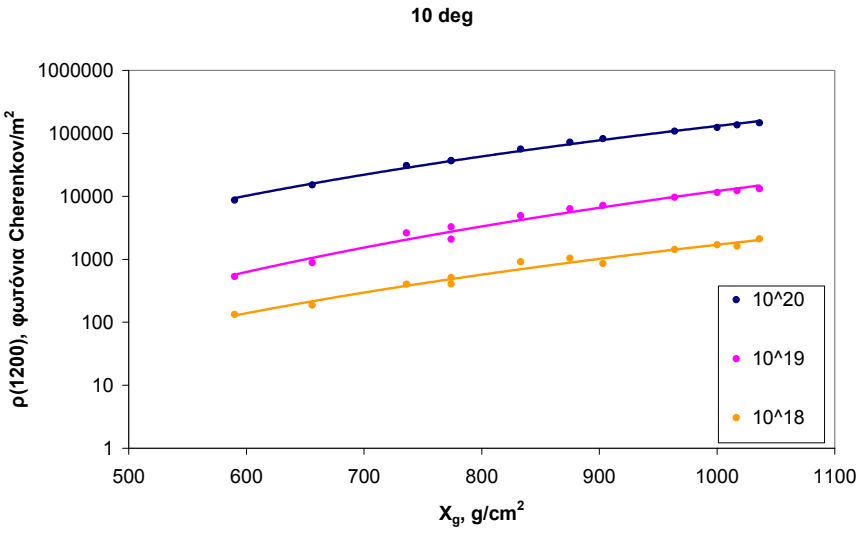
Σύμφωνα με τους παραπάνω πίνακες, η μέση απόκλιση της ενέργειας που υπολογίζεται με τη μέθοδο αυτή από την ενέργεια της προσομοίωσης υπολογίζεται στο 10,15% για πρωτονικά γεγονότα υπερυψηλών ενεργειών (10^{19} - 10^{20} eV). Αν η αρχική ενέργεια είναι της τάξης των EeV (10^{18} eV) η μέση απόκλιση υπολογίζεται στο 26,05%. Συνολικά, η απόκλιση για την περιοχή 10^{18} – 10^{20} eV κυμαίνεται στο 18,11%. Επομένως, η μέθοδος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για μια πρώτη εκτίμηση της ενέργειας του πρωτογενούς σωματιδίου που δημιουργεί καταιγισμό με βάση την ακτινοβολία Cherenkov που παράγεται από τα δευτερογενή σωματίδια στην ατμόσφαιρα.

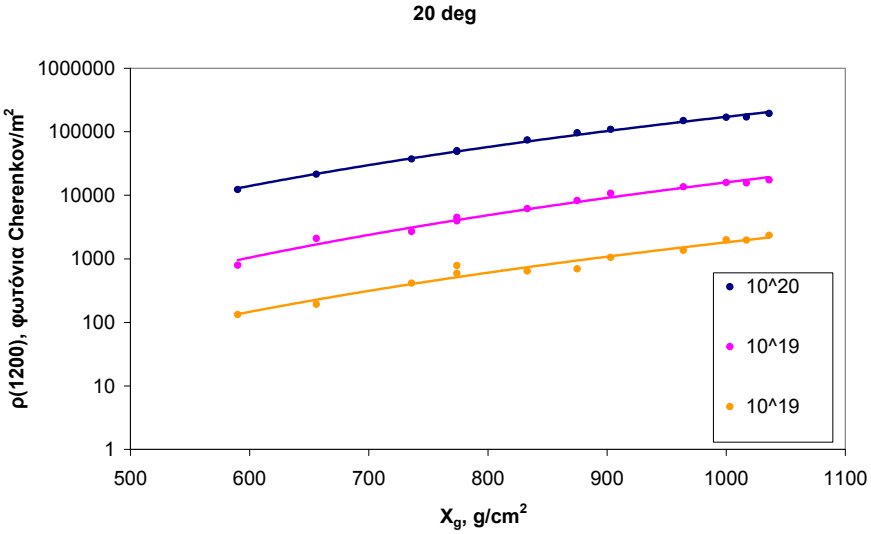
5.8 Χρήση της προτεινόμενης μεθόδου

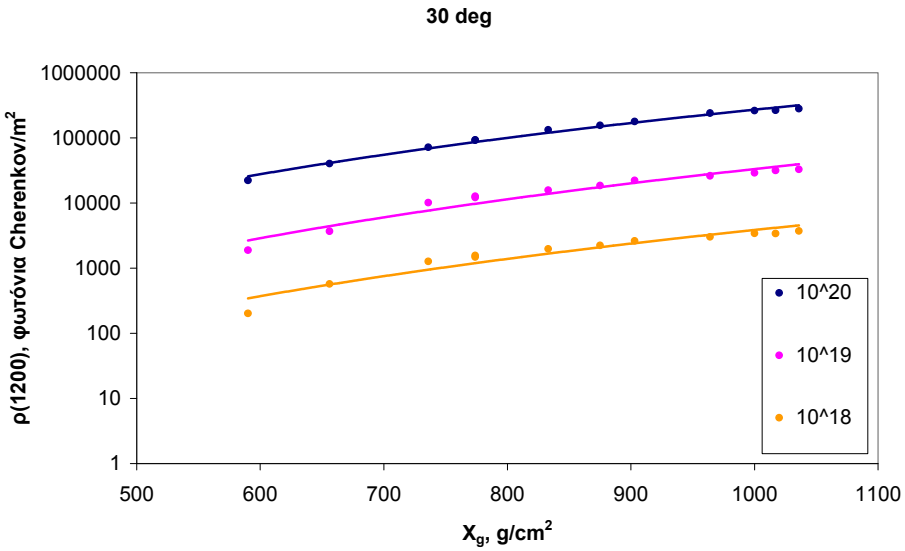
Η μέθοδος που προτάθηκε παραπάνω μπορεί να εφαρμοστεί σε διατάξεις ατμοσφαιρικών τηλεσκοπίων Cherenkov που ανιχνεύουν την ακτινοβολία Cherenkov στο επίπεδο του εδάφους. Η διάταξη των τηλεσκοπίων ανιχνεύει την πυκνότητα φωτονίων Cherenkov, ενώ η ζενιθιακή γωνία μπορεί να εξαχθεί μέσω του χρονισμού απόκρισης των διαφορετικών τηλεσκοπίων. Με προσαρμογή της Cherenkov LDF (Al-Rubaiee et al. 2005) στις μετρήσεις προκύπτει η πυκνότητα φωτονίων σε απόσταση 1200 m από τον πυρήνα του καταιγισμού, $\rho_\theta(1200)$.

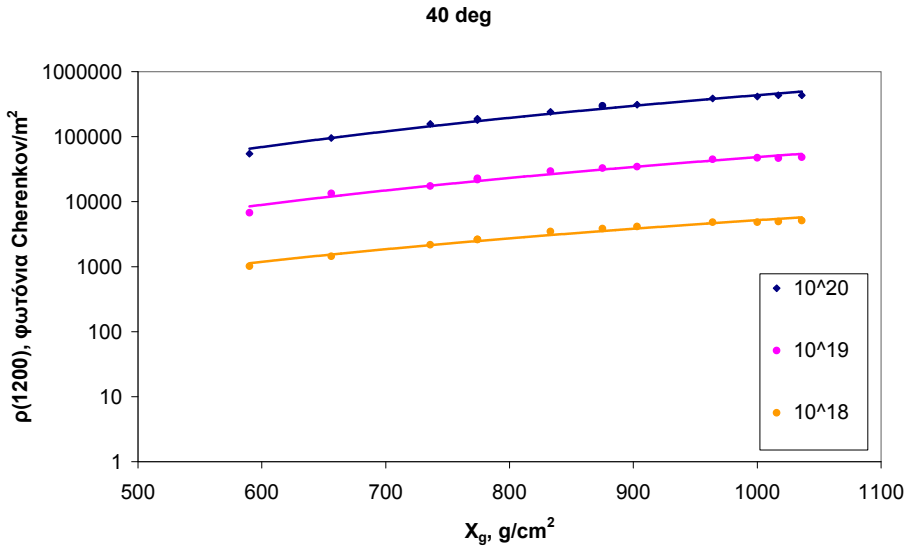
Θα πρέπει να εξεταστεί τώρα αν η ενέργεια του πρωτογενούς σωματιδίου επιτρέπει τη χρήση της προτεινόμενης μεθόδου, αν δηλαδή ανήκει στην περιοχή των UHECR. Ανάλογα με την πυκνότητα φωτονίων και τη ζενιθιακή γωνία, χρησιμοποιώντας τις γραφικές παραστάσεις του σχήματος 60 είναι δυνατόν να υπολογιστεί η τάξη μεγέθους της πρωτογενούς ενέργειας και κατόπιν, αν το γεγονός εμπίπτει στην ενεργειακή περιοχή της προτεινόμενης μεθόδου, να γίνει ο ακριβής υπολογισμός της ενέργειας του πρωτογενούς σωματιδίου.

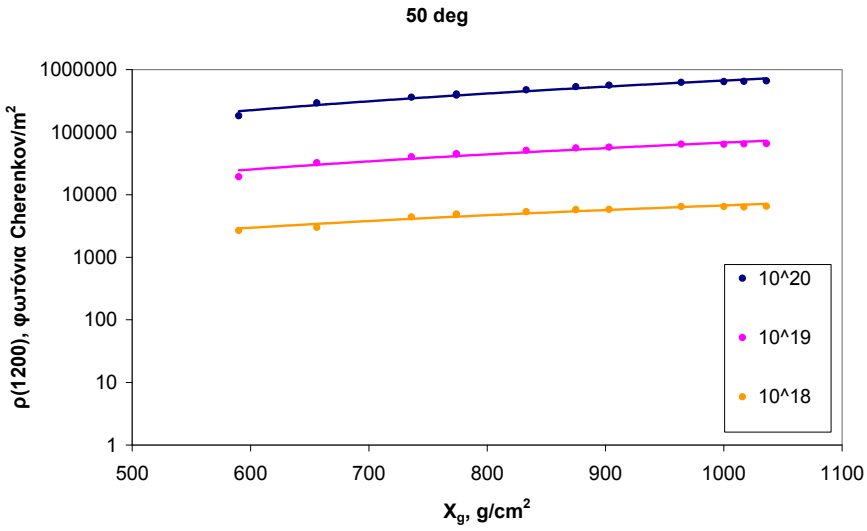

0 deg
1000000
100000
10000
1000
100
10
1
500
600
700
800
900
1000
1100
ρ(1200), φωτόνια Cherenkov/m²
X_g, g/cm²
10^20
10^19
10^18

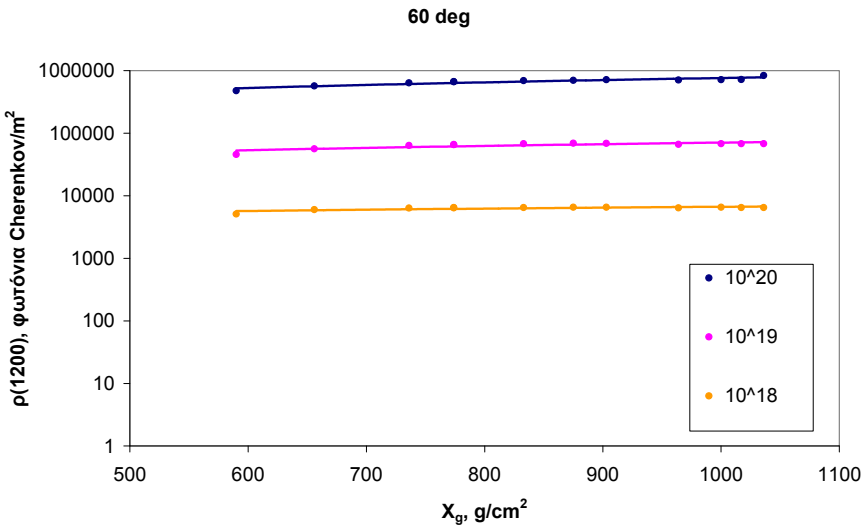

10 deg
1000000
100000
10000
1000
100
10
1
500
600
700
800
900
1000
1100
ρ(1200), φωτόνια Cherenkov/m²
X_g, g/cm²
10^20
10^19
10^18


20 deg
1000000
100000
10000
1000
100
10
1
500
600
700
800
900
1000
1100
ρ(1200), φωτόνια Cherenkov/m²
X_g, g/cm²
10^20
10^19
10^19


30 deg
ρ(1200), φωτόνια Cherenkov/m²
1000000
100000
10000
1000
100
10
1
500
600
700
800
900
1000
1100
X_g, g/cm²
10^20
10^19
10^18


40 deg
ρ(1200), φωτόνια Cherenkov/m²
1000000
100000
10000
1000
100
10
1
500
600
700
800
900
1000
1100
X_g, g/cm²
10^20
10^19
10^18


50 deg
ρ(1200), φωτόνια Cherenkov/m²
1000000
100000
10000
1000
100
10
1
500
600
700
800
900
1000
1100
X_g, g/cm²
10^20
10^19
10^18



Σχήμα 70: Η πυκνότητα φωτονίων Cherenkov σαν συνάρτηση του ατμοσφαιρικού βάθους στο επίπεδο του εδάφους για ζενιθιακές γωνίες από 0 έως 60 μοίρες.

Προφανώς, μετά την προσομοίωση περισσότερων καταιγισμών χαμηλότερων ενεργειών και διαφορετικών πρωτογενών, η μέθοδος μπορεί να εμπλουτιστεί. Οι σχέσεις 14 έως 18 μπορούν να εξαχθούν για τις περιπτώσεις αυτές και οι γραφικές παραστάσεις του σχήματος 70 να συμπληρωθούν. Έτσι, οι καταγραφές σε ανιχνευτικές διατάξεις ατμοσφαιρικών τηλεσκοπίων Cherenkov θα μπορούν να χρησιμοποιούνται για τον προσδιορισμό της ενέργειας αδρονικών καταιγισμών.

5.9 Χρήση αποτελεσμάτων του Cherenkov Telescope Array για τη μελέτη Κοσμικών Ακτίνων Υπερυψηλών Ενεργειών

Οι κοσμικές ακτίνες υπερυψηλών ενεργειών μελετώνται ατμοσφαιρικά κυρίως μέσω της ακτινοβολίας φθορισμού. Διατάξεις όπως το Pierre Auger Observatory συνδυάζουν δύο τεχνικές ανίχνευσης ατμοσφαιρικών καταιγισμών που δουλεύουν ταυτόχρονα παρέχοντας ένα ισχυρό υβριδικό παρατηρητήριο: ανιχνεύεται η ακτινοβολία φθορισμού στην ατμόσφαιρα και ακτινοβολία Cherenkov που παράγεται στο εσωτερικό δεξαμενών νερού στον ανιχνευτή επιφανείας. Με τον τρόπο αυτό μελετώνται το διάμηκες προφίλ

(ανιχνευτής φθορισμού) και το πλευρικό προφίλ (ανιχνευτής επιφανείας) του καταιγισμού.

Το CTA είναι ένα πείραμα τηλεσκοπίων Cherenkov για την ανίχνευση κοσμικών φωτονίων γ με ενέργειες της τάξης των GeV έως TeV. Παρ' όλα αυτά, καθώς η διάταξη των τηλεσκοπίων δέχεται ακτινοβολία Cherenkov και από αδρονικούς καταιγισμούς που δημιουργούνται στην ατμόσφαιρα της Γης από UHECR, θα μπορούσε να καταγράψει τα αποτελέσματα αυτά πριν τα απορρίψει ως θόρυβο του περιβάλλοντος.

Στην εργασία αυτή προτάθηκε ουσιαστικά μια μέθοδος για τη μελέτη των δεδομένων αυτών που απορρίπτονται από πειράματα μελέτης κοσμικών ακτίνων φωτονίων γ. Μιας και το πείραμα CTA βρίσκεται ακόμα στη διαδικασία του σχεδιασμού, ελήφθη αυτό σαν πρότυπο για συγκεκριμένα χαρακτηριστικά των προσομοιώσεων, όπως το μέγεθος των τηλεσκοπίων και τα ενεργειακά κατώφλια. Επίσης, έξι από τις δώδεκα συνολικά περιοχές του πλανήτη που μελετήθηκαν είναι υποψήφιες τοποθεσίες για την εγκατάσταση του πειράματος.

Το πρόβλημα είναι πως τα πειράματα ατμοσφαιρικών τηλεσκοπίων Cherenkov έχουν σχεδιαστεί για τη μελέτη φαινομένων που δεν χαρακτηρίζονται από σπανιότητα, έτσι η έκτασή τους δεν είναι ιδιαίτερα μεγάλη. Αυτό έχει σαν αποτέλεσμα οι UHECRs να παρατηρούνται σπάνια από αυτά. Επομένως τα παρεχόμενα δεδομένα για την εφαρμογή της προτεινόμενης μεθόδου δεν θα είναι πολλά. Από την άλλη πλευρά, πρόκειται για μια μέθοδο που δεν απαιτεί τεχνικές τροποποιήσεις στο σχεδιασμό του πειράματος, δεν επηρεάζει την «κανονική» λειτουργία του και απλώς χρησιμοποιεί δεδομένα που απορρίπτονται, όσο λίγα κι αν είναι αυτά, για τη μελέτη ενός φαινομένου τόσο σπάνιου που ακόμα και η παραμικρή συνεισφορά ίσως έχει μεγάλη σημασία.

5.10 Συμπεράσματα

Σε αυτό το μέρος της εργασίας προτάθηκε μια μέθοδος για τον προσδιορισμό της ενέργειας του πρωτογενούς σωματιδίου που δημιουργεί

Εκτεταμένο Ατμοσφαιρικό Καταιγισμό μέσω της ακτινοβολίας Cherenkov που παράγεται στην ατμόσφαιρα από τα δευτερογενή σωματίδια του καταιγισμού.

Τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν για τον υπολογισμό της αρχικής ενέργειας θα προέρχονται από διατάξεις ατμοσφαιρικών τηλεσκοπίων Cherenkov. Προαπαιτούμενο αποτελεί η γνώση πρώτον της ζενιθιακής γωνίας του καταιγισμού που προκύπτει από φαινόμενα χρονισμού της ενεργοποίησης των τηλεσκοπίων και δεύτερον της πυκνότητας φωτονίων Cherenkov σε απόσταση 1200 μέτρων από τον πυρήνα του καταιγισμού, που προκύπτει μέσω της προσαρμογής των καταγραφών στη συνάρτηση πλευρικής κατανομής Cherenkov (Cherenkov LDF). Με τα δεδομένα αυτά και με τη γνώση του ολικού μαγνητικού πεδίου και του ατμοσφαιρικού βάθους στο σημείο της καταγραφής, γίνεται μετατροπή της επικλινούς πυκνότητας ρ(1200) σε κατακόρυφη πυκνότητα $\rho_0(1200)$ και η τιμή αυτή χρησιμοποιείται για τον προσδιορισμό της ενέργειας του πρωτογενούς.

Η ακρίβεια της μεθόδου είναι μεγάλη καθώς στους υπολογισμούς έχουν ληφθεί υπ' όψιν μόνο τα στατιστικά σφάλματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις των φαινομένων. Η μέση απόκλιση στον προσδιορισμό της ενέργειας για γεγονότα με πρωτογενές σωματίδιο πρωτόνιο στην ενεργειακή περιοχή των UHECRs (10^{19} – 10^{20} eV) είναι 10,15%. Αν χρησιμοποιηθούν οι προτεινόμενες σχέσεις για γεγονότα στην περιοχή των 10^{18} eV η απόκλιση φτάνει στο 26,05%, ενώ η μέση απόκλιση στην περιοχή 10^{18} – 10^{20} eV κυμαίνεται στο 18,11%.

Η μέθοδος που προτείνεται μπορεί να βελτιωθεί και να επεκταθεί. Προσομοιώσεις μεγαλύτερης ακρίβειας θα μειώσουν τα στατιστικά σφάλματα, είναι όμως εξαιρετικά χρονοβόρες και προκύπτουν προς επεξεργασία ιδιαίτερα μεγάλα αρχεία. Επιπλέον προσομοιώσεις για χαμηλότερες ενέργειες θα κατεβάσουν το ενεργειακό κατώφλι, παράγοντας σχέσεις παρόμοιες με τις 14 έως 18 για άλλες ενεργειακές περιοχές. Είναι σημαντικό να επισημανθεί ότι οι προσομοιώσεις που έχουν γίνει αφορούν πρωτογενή πρωτόνια. Μια επέκταση σε διαφορετικά πρωτογενή, κυρίως πυρήνες σιδήρου και φωτόνια ακτίνων γ θα ολοκλήρωνε τη μέθοδο.

Τέλος, για άλλη μια φορά αναγνωρίζεται η σπανιότητα του φαινομένου και η συνακόλουθη ελαχιστοποίηση του πεδίου χρήσης της μεθόδου που προτείνεται. Παρ' όλα αυτά, καθώς η μελέτη των Κοσμικών Ακτίνων

Υπερυψηλών Ενεργειών είναι το κατεξοχήν πεδίο των σπανίων γεγονότων, ίσως και η πιο μικρή συνεισφορά να έχει τη σημασία της, ειδικά όταν δεν απαιτείται δημιουργία νέων εγκαταστάσεων μεγάλου κόστους και απλώς χρησιμοποιούνται δεδομένα υπαρχουσών διατάξεων που διαφορετικά θα χάνονταν σαν θόρυβος της παρατήρησης.

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ

Στην εργασία αυτή μελετήθηκε η Κοσμική Ακτινοβολία στην περιοχή των Υπερυψηλών Ενεργειών, στην περιοχή δηλαδή με ενέργειες κοσμικού σωματιδίου πάνω από 10^{19} eV. Πρόκειται για αδρόνια και φωτόνια εξωγαλαξιακής προέλευσης που φτάνουν στην κορυφή της γήινης ατμόσφαιρας με εξαιρετικά χαμηλούς ρυθμούς. Είναι χαρακτηριστικό πως ενώ σε ένα τετραγωνικό χιλιόμετρο της κορυφής της ατμόσφαιρας προσκρούει ένα σωματίδιο ενέργειας 10^{18} eV ανά έτος, μόλις ένα σωματίδιο ενέργειας 10^{20} eV θα φτάσει στην ίδια περιοχή μέσα σε έναν αιώνα. Στο πρώτο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται οι επικρατούσες θεωρίες για την προέλευση και διάδοση αυτών των τόσο ενεργητικών σωματιδίων.

Λόγω της σπανιότητας των σωματιδίων αυτών, είναι προφανές ότι η μελέτη τους δεν μπορεί να γίνει με απευθείας παρατήρηση. Ευτυχώς για τους ερευνητές, τα σωματίδια αυτά αλληλεπιδρώντας με την ατμόσφαιρα της Γης δημιουργούν Εκτεταμένους Ατμοσφαιρικούς Καταιγισμούς δευτερογενών σωματιδίων που απλώνονται σε εκτάσεις της τάξεως των 1 – 10 τετραγωνικών χιλιομέτρων. Έτσι, με εκτεταμένες ανιχνευτικές διατάξεις ανιχνεύονται αρκετά γεγονότα, χωρίς και πάλι να ξεπερνούν τις μερικές χιλιάδες, από το 1950, οπότε και ξεκίνησε η αναζήτησή τους. Στο δεύτερο και τρίτο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζονται τα χαρακτηριστικά των Εκτεταμένων Ατμοσφαιρικών Καταιγισμών και τα πειράματα που έχουν πραγματοποιηθεί για την μελέτη τους.

Η μελέτη των Κοσμικών Ακτίνων Υπερυψηλών Ενεργειών είναι εξαιρετικά σημαντική, καθώς τα ιδιαίτερα χαρακτηριστικά τους δίνουν πληροφορίες τόσο για τις αστροφυσικές πηγές τους και τους μηχανισμούς που παράγουν σωματίδια τόσο μεγάλης ενέργειας, όσο και για την κατάσταση του τμήματος του Σύμπαντος που διασχίζουν, αλληλεπιδρώντας με ύλη και ακτινοβολία και επιταχυνόμενα σε ακόμα υψηλότερες ενέργειες. Έτσι, κατά την παρατήρησή τους στη Γη έχει εξαιρετικά μεγάλη σημασία ο προσδιορισμός της φύσης τους και της ενέργειάς τους.

Στην εργασία αυτή γίνεται προσπάθεια προσδιορισμού της ενέργειας Κοσμικών Σωματιδίων Υπερυψηλών Ενεργειών με δύο παρόμοιες μεθόδους,

που χρησιμοποιούν όμως διαφορετικά δεδομένα. Οι προτεινόμενες μέθοδοι βασίζονται στην πραγματοποίηση προσομοιώσεων Monte Carlo των καταιγισμών με τη χρήση των προγραμμάτων AIRES και CORSIKA. Τα προγράμματα αυτά ακολουθούν το πρωτογενές σωματίδιο που εισέρχεται στη γήινη ατμόσφαιρα προσδιορίζοντας την εξέλιξή του, την αλληλεπίδρασή του με τα συστατικά της ατμόσφαιρας και τη διάσπαση ή επιβίωσή του μέχρι το επίπεδο της επιφάνειας της Γης.

Έτσι, στο τέταρτο κεφάλαιο εξάγονται σχέσεις μέσω του AIRES και του CORSIKA για τον προσδιορισμό της ενέργειας πρωτογενούς σωματιδίου με τη χρήση των δεδομένων επιφανειακών ανιχνευτών που καταμετρούν τα δευτερογενή φορτισμένα σωματίδια του καταιγισμού που φτάνουν στην επιφάνεια του εδάφους. Η μελέτη είναι προσαρμοσμένη στα χαρακτηριστικά του Παρατηρητηρίου Pierre Auger που λειτουργεί (πλήρως) από το 2004 στην Αργεντινή και με έκταση 3000 km^2 είναι το μεγαλύτερο και πιο σύγχρονο πείραμα του είδους του. Μελετώνται διαφορετικά πρωτογενή σωματίδια (πρωτόνια, πυρήνες ηλίου, λιθίου, άνθρακα και σιδήρου καθώς και φωτόνια ακτίνων γ) και εξάγονται σχέσεις που προσδιορίζουν την ενέργεια του πρωτογενούς σαν συνάρτηση της κατακόρυφης πυκνότητας φορτισμένων σωματιδίων που θα καταγράφονταν από έναν επιφανειακό ανιχνευτή.

Για να είναι δυνατή η χρήση της μεθόδου για καταιγισμούς διαφορετικών ζενιθιακών γωνιών, εξάγεται επίσης μια σχέση μετατροπής της επικλινούς πυκνότητας που καταγράφει ο ανιχνευτής στην κατακόρυφη πυκνότητα που απαιτείται για την εκτίμηση της ενέργειας. Η διαδικασία επαναλαμβάνεται για τα διαφορετικά πρωτογενή και αναδεικνύει τη δυνατότητα διαχωρισμού των πρωτονίων από τους πυρήνες σιδήρου και των αδρονίων γενικότερα από τα φωτόνια ακτίνων γ.

Η ακρίβεια εκτίμησης της ενέργειας με την προτεινόμενη μέθοδο είναι πολύ καλή, καθώς τα όποια σφάλματα αφορούν τη στατιστική των αποτελεσμάτων των προσομοιώσεων και προφανώς δεν λαμβάνονται υπόψιν συστηματικά σφάλματα της πειραματικής διάταξης που αφορούν στην καταγραφή των δεδομένων. Κατά τον υπολογισμό της ενέργειας η μέση απόκλιση από την ενέργεια της προσομοίωσης κυμαίνεται από 0,56% (ήλιο) μέχρι 2,31% (πρωτόνιο) για τους αδρονικούς καταιγισμούς, ενώ στα φωτόνια

η απόκλιση φτάνει στο 11% όταν δεν υπάρχουν πρόδρομα φαινόμενα και στο 15% όταν αυτά λαμβάνονται υπ' όψιν.

Μια σύγκριση των αποτελεσμάτων της μεθόδου με διαθέσιμα από την ιστοσελίδα του Παρατηρητηρίου Auger γεγονότα οδηγεί σε συμπεράσματα που συμφωνούν με τις κοινώς αποδεκτές απόψεις για τη σύσταση των Κοσμικών Ακτίνων Υπερυψηλών Ενεργειών. Οι υπολογισμοί αποδίδουν έναν στους τρεις καταιγισμούς σε φωτόνιο με πρόδρομα φαινόμενα, παρατήρηση συμβατή με τα ποσοστά φωτονικών καταιγισμών που προβλέπει το Auger στην περιοχή $E \geq 40$ EeV (Ros et al., 2013). Η επέκταση της αναλογίας αυτής και σε χαμηλότερες ενέργειες προφανώς οφείλεται στην ποιότητα του δείγματος: τα γεγονότα που διατίθενται δημόσια είναι χαμηλής σχετικά ενέργειας και τα λοιπά κριτήρια με τα οποία επιλέγονται δεν είναι γνωστά. Επίσης, δεν γίνεται από το πείραμα διαχωρισμός με βάση τη φύση του πρωτογενούς.

Η προτεινόμενη στην εργασία αυτή μέθοδος δεν μπορεί σε καμία περίπτωση να υποκαταστήσει την χρησιμοποιούμενη από το πείραμα μέθοδο εκτίμησης της ενέργειας. Θα μπορούσε όμως μετά από έλεγχο και επιβεβαίωσή της μέσω πραγματικών γεγονότων να λειτουργήσει συμπληρωματικά ή να επεκταθεί σε πειράματα που πιθανόν να σχεδιαστούν στο μέλλον.

Στο πέμπτο κεφάλαιο της εργασίας παρουσιάζεται μια παρόμοια μέθοδος εκτίμησης της ενέργειας πρωτογενούς σωματιδίου Κοσμικής Ακτινοβολίας Υπερυψηλών Ενεργειών που είναι όμως γενικότερη και βασίζεται στην ακτινοβολία Cherenkov που παράγουν τα δευτερογενή σωματίδια του καταιγισμού καθώς διασχίζουν την ατμόσφαιρα. Και εδώ η μέθοδος βασίζεται σε προσομοιώσεις καταιγισμών με το πρόγραμμα CORSIKA, ενώ τα πρωτογενή που μελετήθηκαν είναι αποκλειστικά πρωτόνια.

Η ακτινοβολία Cherenkov χρησιμοποιείται αυτή τη στιγμή σε διατάξεις παρατήρησης κοσμικών ακτίνων φωτονίων γ χαμηλότερων ενεργειών, έχει γίνει όμως προσπάθεια να επεκταθούν τα αποτελέσματα προς υψηλότερες ενέργειες. Το πρόβλημα με τις πειραματικές διατάξεις που ήδη υπάρχουν για τη μελέτη φωτονίων γ είναι ότι έχουν πολύ μικρή έκταση για να καταγράψουν επαρκή δεδομένα υπερυψηλών ενεργειών. Παρ' όλα αυτά το φαινόμενο

υπάρχει και σήμερα οι όποιες καταγραφές απορρίπτονται ως ανεπιθύμητος αδρονικός θόρυβος.

Η προτεινόμενη μέθοδος συνίσταται σε σχέσεις εκτίμησης της ενέργειας μέσω αυτή τη φορά της πυκνότητας ακτινοβολίας Cherenkov που καταγράφεται από διατάξεις ατμοσφαιρικών τηλεσκοπίων Cherenkov. Για τον υπολογισμό της ενέργειας χρησιμοποιείται και πάλι η κατακόρυφη πυκνότητα, οπότε παρέχεται τύπος για τη μετατροπή επικλινών πυκνοτήτων σε κατακόρυφες. Οι παράμετροι των παρεχόμενων σχέσεων έχουν συσχετιστεί με το ατμοσφαιρικό βάθος και το μαγνητικό πεδίο στην περιοχή παρατήρησης, δίνοντας τη δυνατότητα χρήσης της μεθόδου σε οποιοδήποτε σημείο του πλανήτη.

Η ακρίβεια της μεθόδου είναι μεγάλη καθώς στους υπολογισμούς έχουν ληφθεί υπ' όψιν μόνο τα στατιστικά σφάλματα που προκύπτουν από τις προσομοιώσεις των φαινομένων. Η μέση απόκλιση στον προσδιορισμό της ενέργειας στην περιοχή των UHECRs (10^{19} – 10^{20} eV) είναι 10,15%. Αν χρησιμοποιηθούν οι προτεινόμενες σχέσεις για γεγονότα στην περιοχή των 10^{18} eV η απόκλιση φτάνει στο 26,05%, ενώ η μέση απόκλιση στην περιοχή 10^{18} – 10^{20} eV κυμαίνεται στο 18,11%. Η μέθοδος επιδέχεται βελτίωσης, μέσω λεπτομερέστερων προσομοιώσεων που θα μείωναν τα στατιστικά σφάλματα αλλά και επέκτασης σε διαφορετικά πρωτογενή, όπως πυρήνες σιδήρου και φωτόνια.

Αφορμή για την ανάπτυξη της μεθόδου αυτής αποτέλεσε ο σχεδιασμός του πειράματος Cherenkov Telescope Array για τη μελέτη της κοσμικής ακτινοβολίας φωτονίων γ στην ενεργειακή περιοχή των GeV έως TeV και η συνειδητοποίηση ότι το πείραμα αυτό όπως και άλλα παρόμοια μπορεί να καταγράφει τους εξαιρετικά σπάνιους καταιγισμούς Υπερυψηλών Ενεργειών και απλώς να τους απορρίπτει ως θόρυβο. Φυσικά, λόγω της μικρής του έκτασης, το CTA δεν θα καταγράψει κατά τη λειτουργία του μεγάλο αριθμό τέτοιων φαινομένων. Αυτό όμως δεν σημαίνει ότι δεν χρειάζεται αυτά να μελετηθούν, καθώς η σπανιότητά τους τα κάνει πολύτιμα. Επιπλέον, η υιοθέτηση μιας παρόμοιας μεθόδου θα μπορούσε να μετατρέψει και το Pierre Auger σε ένα τριπλό Παρατηρητήριο (σήμερα λειτουργεί παρατηρώντας με τον επιφανειακό ανιχνευτή και τον ανιχνευτή φθορισμού), βελτιώνοντας την

απόδοσή του. Κάτι τέτοιο φυσικά θα είχε μεγάλο χρηματικό κόστος, καθώς θα απαιτούσε εγκατάσταση τηλεσκοπίων Cherenkov σε μέρος της έκτασής του.

Και οι δύο μέθοδοι που προτείνονται στην παρούσα εργασία επιδέχονται βελτίωση και επέκταση. Οι περιορισμένες τεχνικές δυνατότητες, καθώς οι προσομοιώσεις στις ενέργειες αυτές απαιτούν μεγάλη υπολογιστική ισχύ και πολύ χρόνο αλλά και η έλλειψη συνεργασίας με ομάδες που να εργάζονται για τα πραγματικά πειράματα που θα μπορούσαν να προσφέρουν καθοδήγηση, τεχνογνωσία και πραγματικά δεδομένα για τον έλεγχό τους καθιστούν τις μεθόδους αυτές απλώς σημεία εκκίνησης και όχι σημεία τερματισμού. Σε κάθε περίπτωση, η εργασία σε έναν τομέα στην αιχμή της αστροφυσικής έρευνας, όπου παρατηρήσεις και συμπεράσματα αλλάζουν διαρκώς, ήταν εξαιρετικά ενδιαφέρουσα, με απογοητεύσεις αλλά και μικρές επιτυχίες.

ΠΑΡΑΡΤΗΜΑ: ΣΧΕΤΙΚΑ ΜΕ ΤΙΣ ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΕΙΣ

I. Η σημασία του στατιστικου Thinning στις προσομοιωσεις Monte Carlo

Όπως έχει ήδη αναφερθεί στο κεφάλαιο 3, τα προγράμματα προσομοιώσεων Monte Carlo χρησιμοποιούν αλγόριθμους στατιστικής επιλογής αντιπροσωπευτικών σωματιδίων ώστε να είναι δυνατή η διαχείριση των εκτεταμένων ατμοσφαιρικών καταιγισμών και των εκατομμυρίων αλληλεπιδράσεων και σωματιδίων που αυτοί δημιουργούν.

Ο χρόνος που απαιτείται για να πραγματοποιηθεί μια πλήρης προσομοίωση ατμοσφαιρικού καταιγισμού, καθώς και ο χώρος που απαιτείται για την αποθήκευση του αποτελέσματος αυξάνεται γραμμικά με την αύξηση της ενέργειας. Στην περιοχή των 10^{16} eV η διαδικασία του thinning διευκολύνει την κατάσταση, ενώ σε ενέργειες της τάξης των 10^{20} eV γίνεται απαραίτητη καθώς ένας και μόνο καταιγισμός απαιτεί γύρω στον ένα χρόνο για να αναπτυχθεί πλήρως και χρειάζονται αρκετά TB αποθηκευτικού χώρου για να διατηρηθεί.

Στη διαδικασία του thinning μόνο ένα μικρό αλλά αντιπροσωπευτικό δείγμα των σωματιδίων που παράγονται καταγράφεται σαφώς ενώ τα υπόλοιπα παραγκωνίζονται. Στα σωματίδια που διατηρούνται αποδίδεται ένα στατιστικό βάρος και είναι αυτά στα οποία επιτρέπεται να αλληλεπιδράσουν και να καταγραφούν. Όλα τα σωματίδια με ενέργεια κάτω από μια τιμή που καθορίζεται μέσω του επιπέδου thinning ($\varepsilon_{thin} = E/E_0$) αντιπροσωπεύονται από το σωματίδιο που παρακολουθείται και το στατιστικό του βάρος που εκφράζει το πλήθος των υπολοίπων σωματιδίων τα οποία δεν παρακολουθούνται εκφράζεται μέσω της σχέσης $w_{max}= \varepsilon_{thin}\cdot E_0(GeV)$.

Το στατιστικό βάρος δεν επηρεάζει σημαντικά τις μέσες τιμές των παρατηρούμενων μεγεθών, εισάγει όμως στα αποτελέσματα της προσομοίωσης τεχνητές διακυμάνσεις. Επομένως το επίπεδο thinning χαρακτηρίζει και την ποιότητα της προσομοίωσης: ανάλογα με το μέγεθος

που μελετάται θα πρέπει να γίνεται επιλογή τέτοιου thinning που θα μετριάζει τις διακυμάνσεις χωρίς να απαιτεί απαγορευτικούς χρόνους επεξεργασίας.

Στην εργασία αυτή, για την εξαγωγή των εμπειρικών τύπων εκτίμησης της ενέργειας του πρωτογενούς σωματιδίου που δημιουργεί καταιγισμό, απαιτήθηκε ένα πολύ μεγάλο πλήθος προσομοιώσεων πολλαπλών καταιγισμών. Για τη μέθοδο του κεφαλαίου 4 χρειάστηκαν προσομοιώσεις περίπου 100 γεγονότων, καθένα από τα οποία περιελάμβανε 100 καταιγισμούς και απαιτούσε περίπου 25 ώρες σε έναν υπολογιστή Intel Core2 Duo, 3.00GHz με 2,00 GB RAM. Για την μέθοδο που προτείνεται στο κεφάλαιο 5 απαιτήθηκαν 200 περίπου γεγονότα, καθένα από τα οποία χρειάζονταν 3 ώρες στον ίδιο υπολογιστή και έδινε σαν αποτέλεσμα αρχείο μέσου μεγέθους 130 MB. Είναι προφανές ότι χωρίς την εφαρμογή των αλγορίθμων thinning η εργασία δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί.

II. Οι Προσομοιώσεις με το Πρόγραμμα AIRES

Παράδειγμα του input για τις προσομοιώσεις που πραγματοποιήθηκαν με το AIRES

Task proton_0_100 # Καταιγισμός πρωτονίου με ζενιθιακή γωνία 0 deg και ενέργεια 100 EeV#
TotalShowers 100 # Πλήθος καταιγισμών #
PrimaryParticle proton # Τύπος πρωτογενούς #
PrimaryEnergy 100 EeV # Αρχική Ενέργεια #
GeomagneticField On # Λαμβάνεται υπ' όψιν το μαγνητικό πεδίο της Γης #
PrimaryZenAngle 0 deg # Ζενιθιακή γωνία πρωτογενούς #
Thinning 1.e-6 Relative # Δείκτης thinning ε_{thin}. Εξετάζονται σωματίδια με ενέργεια ε_{thin}*$E_{primary}$ #
Site ElNihuil # Τοποθεσία του πειράματος – ElNihuil το site του Auger #
ObservingLevels 500 # Επίπεδα παρατήρησης για την διαμήκη παρατήρηση του καταιγισμού #
PrintTable 1001 1008 # Πίνακες που περιλαμβάνονται στο αρχείο εξόδου (.sry) #
PrintTable 1021 1022
PrintTable 1041
PrintTable 1205 1207
PrintTable 1293
PrintTable 1307 1308
PrintTable 1321 1322
PrintTable 1341
PrintTable 1405 1407
PrintTable 1491 1508
PrintTable 1521 1522
PrintTable 1541 1591
PrintTable 1705 1707
PrintTable 1791 1793
PrintTable 2001 2008 Opt d # Η επιλογή Opt d αποδίδει τις τιμές του πίνακα σε πυκνότητα αντί για την default

επιλογή σε πλήθος σωματιδίων #

```
PrintTable 2021 2022 Opt d
PrintTable 2041 Opt d
PrintTable 2205 2207 Opt d
PrintTable 2291 2308 Opt d
PrintTable 2321 2322 Opt d
PrintTable 2405 2407 Opt d
PrintTable 2491 2493 Opt d
PrintTable 2501 2508
PrintTable 2521 2522
PrintTable 2541
PrintTable 2705 2707
PrintTable 2791 2808
PrintTable 2821 2822
PrintTable 2841
PrintTable 2905 2907
PrintTable 2991 3293
PrintTable 5207
PrintTable 5291 5513
PrintTable 7801 7993
End                          # Τέλος του αρχείου εισαγωγής #
```

Το αρχείο που θα προκύψει από την προσομοίωση με τους πίνακες που θα ζητηθούν είναι ένα αρχείο τύπου Task_Name.sry

Πρόκειται για ένα πολύ μεγάλο αρχείο περίπου 200Kb και 70 σελίδων. Σε αυτό εμφανίζονται δεδομένα για την έκδοση του προγράμματος και τον υπολογιστή, τα χαρακτηριστικά της προσομοίωσης, τη διάρκειά της, περίληψη των ευρημάτων και ξεχωριστά οι πίνακες που ζητήθηκαν στο αρχείο εισόδου. Παρακάτω δίνεται ένα μέρος του αρχείου .sry για μια προσομοίωση πρωτονίου αρχικής ενέργειας 100 EeV, με ζενιθιακή γωνία 5°.

```
>>>>
>>>>
>>>>       AAAAA    IIII  RRRRRR   EEEEEEE   SSSSS       \
>>>>      AAAAAAA   IIII  RRRRRRR  EEEEEEE  SSSSSSS      A
>>>>      AA   AA     II   RR    RR  EE       SS     SS     I
>>>>      AAAAAAA    II   RRRRRR   EEEE      SSS          R-shower
>>>>      AAAAAAA    II   RRRRR    EEEE        SSS        Extended
>>>>     AA     AA   II   RR  RR    EE       SS   SS      Simulations
>>>>    AA       AA  IIII  RR   RR  EEEEEEE  SSSSSSS       |
>>>>   AA         AA IIII  RR   RR  EEEEEEE   SSSSS       / \
>>>>
>>>>
>>>>     Departamento de Fisica, Universidad de La Plata, ARGENTINA.
>>>>
>>>>
>>>> This is AIRES version 2.8.2b (21/Dec/2005)
>>>> (Compiled by user@acer-pezl9xgwu7, date: 13/Nov/2006) **
>>>> USER: , HOST: acer-pezl9xgwu7, DATE: 06/Jan/2007
>>>>


                Task Name: Proton_5_100_-6

          Current date and time: 06/Jan/2007 14:41:49

        Processing started at date: 03/Jan/2007 09:03:01
```

```
          Processing ended at date: 06/Jan/2007 14:40:11

           Total number of showers:        100

              Number of processes:          2

                  Number of runs:          1

               Total CPU time: 50 hr 41 min 09.00 sec


         Avg. CPU time per shower: 30 min 24.69 sec


>>>>                    SUMMARY OF INPUT DATA
>>>>                    ---------------------
>>>>
>>>>         PARAMETERS AND OPTIONS IN EFFECT.
>>>>
>>>> "(D)" indicates that the corresponding default value is being used.
>>>>

                      Task Name: Proton_5_100_-6

    RUN CONTROL:
          Total number of showers:        100
    (D)           Showers per run:   Infinite
    (D)          Runs per process:   Infinite
    (D)          CPU time per run:   Infinite


    FILE NAMES:
                     Log file: Proton_5_100_-6.lgf
               Binary dump file: Proton_5_100_-6.idf
            Compressed data file: Proton_5_100_-6.grdpcles
             Output summary file: Proton_5_100_-6.sry

    BASIC PARAMETERS:

    (D)                    Site: Site00
                             (Lat:   0.00 deg. Long:    0.00 deg.)
    (D)                    Date: 03/Jan/2007

                Primary particle: Proton
                  Primary energy: 100.00 EeV
              Primary zenith angle:     5.00 deg
    (D)       Primary azimuth angle:     0.00 deg
    (D)      Zero azimuth direction: Local magnetic north
                 Thinning energy: 1.0000E-06 Relative
    (D)          Injection altitude: 100.00 km (1.2829219E-03 g/cm2)
    (D)            Ground altitude: 0.0000 m  (1036.100 g/cm2)
         First obs. level altitude: 42.969 km (2.069344 g/cm2)
          Last obs. level altitude: 16.830 m  (1034.032 g/cm2)
        Obs. levels and depth step:        500     2.068 g/cm2
    (D)           Geomagnetic field: Off
    (D)         Table energy limits: 10.000 MeV to 75.000 EeV
    (D)         Table radial limits: 50.000 m  to 2.0000 km
    (D)   Output file radial limits: 250.00 m  to 12.000 km (grdpcles)


    ADDITIONAL PARAMETERS:
    (D)       Individual shower data: Brief
    (D)        Cut energy for gammas: 80.000 keV
    (D)         Cut energy for e+ e-: 80.000 keV

    (D)       Cut energy for mu+ mu-: 10.000 MeV
    (D)        Cut energy for mesons: 60.000 MeV
    (D)      Cut energy for nucleons: 120.00 MeV
    (D)     Record special primaries: On
    (D)            Resampling ratio: 10.00000
    (D)     Hadronic Mean Free Paths: SIBYLL
    (D)              SIBYLL switch: On
```

```
   MISCELLANEOUS:
   (D)   Seed of random generator: Automatic
   (D)         Atmospheric model: Extended Linsley's std. atmosphere.

>>>>

>>>>                    OUTPUT SUMMARY
>>>>                    --------------

>>>>        STACK DESCRIPTION: Names and average sizes (entries, KB).

   1  Gamma rays                        11361.19     2397
   2  Electron-Positron                 10785.66     2275
   3  Neutral particles                 764.41       161
   4  Heavy charged particles                796.74       168


>>>>        PER SHOWER BALANCE OF PARTICLES

All particle numbers are expressed in units of 10^12 particles.

                Item     Mean   RMS Err.   Stddv.    Min.     Max.

Stack 1
       Particles stacked:   7.08371   0.0603   0.6026   4.8934   8.0076
         Particles lost:   0.00000   0.0000   0.0000   0.0000   0.0000
        Low-E particles:   5.23637   0.0497   0.4975   3.4588   6.0233
 Pcles. that reached gnd.:   0.41930   0.0033   0.0330   0.3515   0.5045

Stack 2
       Particles stacked:  14.79847   0.1377   1.3767   9.8625  16.9688
         Particles lost:   0.00000   0.0000   0.0000   0.0000   0.0000
        Low-E particles:  41.19255   0.3888   3.8882  27.2837  47.3431
 Pcles. that reached gnd.:   0.04786   0.0005   0.0047   0.0382   0.0599


Stack 3
       Particles stacked:   0.00192   0.0000   0.0002   0.0013   0.0023
         Particles lost:   0.00000   0.0000   0.0000   0.0000   0.0000
        Low-E particles:   0.00075   0.0000   0.0001   0.0005   0.0009
 Pcles. that reached gnd.:   0.00005   0.0000   0.0000   0.0000   0.0001


Stack 4
       Particles stacked:   0.00492   0.0001   0.0005   0.0031   0.0059
         Particles lost:   0.00000   0.0000   0.0000   0.0000   0.0000
        Low-E particles:   0.00095   0.0000   0.0001   0.0006   0.0011

 Pcles. that reached gnd.:   0.00044   0.0000   0.0001   0.0003   0.0006


Totals:
       Particles stacked:  21.88902   0.1980   1.9796  14.7750  24.9837
         Particles lost:   0.00000   0.0000   0.0000   0.0000   0.0000
        Low-E particles:  46.43062   0.4386   4.3858  30.7438  53.3682
 Pcles. that reached gnd.:   0.46765   0.0038   0.0377   0.3902   0.5649


Other particles not processed in stacks.


           Neutrinos:   0.00386   0.0000   0.0004   0.0024   0.0047
    Unphysical particles:   0.00000   0.0000   0.0000   0.0000   0.0000


>>>>        PER SHOWER BALANCE OF ENERGY

All energies are expressed in units of the average primary
energy: 100.00 EeV (1.0000000E+20 eV).

                Item     Mean   RMS Err.   Stddv.    Min.     Max.

Stack 1
        Medium losses:  0.0003245  0.00000  0.00002  0.00025  0.00037
         Particles lost:  0.0000003  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000
```

```
        Low-E particles:  0.0038043  0.00004  0.00036  0.00251  0.00438
 Pcles. that reached gnd.:  0.1718510  0.00357  0.03566  0.11681  0.29743

 Stack 2
         Medium losses:  0.6463446  0.00554  0.05538  0.44579  0.73103
        Particles lost:  0.0000000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000
        Low-E particles:  0.0182473  0.00017  0.00172  0.01210  0.02096
 Pcles. that reached gnd.:  0.0979121  0.00251  0.02507  0.06155  0.19639

 Stack 3

         Medium losses:  0.0012779  0.00002  0.00017  0.00073  0.00158
        Particles lost:  0.0000001  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000
        Low-E particles:  0.0003416  0.00000  0.00003  0.00023  0.00039
 Pcles. that reached gnd.:  0.0015414  0.00004  0.00037  0.00082  0.00281

 Stack 4
         Medium losses:  0.0085177  0.00011  0.00113  0.00458  0.01065
        Particles lost:  0.0000000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000
        Low-E particles:  0.0005753  0.00001  0.00006  0.00038  0.00067
 Pcles. that reached gnd.:  0.0357624  0.00050  0.00497  0.01864  0.04500

 Totals:

         Primary energy:  1.0000000  0.00000  0.00000  1.00000  1.00000
         Medium losses:  0.6564647  0.00562  0.05620  0.45250  0.74217
        Particles lost:  0.0000004  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000
        Low-E particles:  0.0229684  0.00021  0.00215  0.01531  0.02630
 Pcles. that reached gnd.:  0.3070669  0.00597  0.05966  0.21604  0.52335


 Other particles not processed in stacks.

           Neutrinos:  0.0166532  0.00023  0.00232  0.00885  0.02074
    Unphysical particles:  0.0000000  0.00000  0.00000  0.00000  0.00000


>>>>      PARTICLES REACHING GROUND LEVEL


    All particle numbers are expressed in units of 10^9 particles.

                    Mean   RMS Err.   Stddv.    Min.     Max.

    Gamma rays       419.3034    3.298   32.978  351.464  504.450
    Electrons         30.2817    0.293    2.928   24.257   38.044
    Positrons         17.5755    0.179    1.792   13.992   22.273
    Electr & positr   47.8572    0.471    4.712   38.249   59.940
    Muons (+)          0.2072    0.003    0.027    0.120    0.263
    Muons (-)          0.2024    0.003    0.026    0.116    0.254
    All muons          0.4096    0.005    0.052    0.237    0.517
    Pions (+)          0.0073    0.000    0.001    0.004    0.011
    Pions (-)          0.0070    0.000    0.001    0.004    0.011
    All pions          0.0143    0.000    0.003    0.009    0.023
    Kaons (+)          0.0001    0.000    0.000    0.000    0.000
    Kaons (-)          0.0001    0.000    0.000    0.000    0.000
    All kaons          0.0002    0.000    0.000    0.000    0.000
    Neutrons           0.0469    0.001    0.006    0.038    0.063
    Protons            0.0200    0.000    0.003    0.014    0.034
    Anti-protons       0.0004    0.000    0.000    0.000    0.001
    Nuclei             0.0000    0.000    0.000    0.000    0.000
    All charged       48.3017    0.471    4.713   38.680   60.431
    All neutral      419.3509    3.298   32.981  351.508  504.506
    All particles    467.6527    3.765   37.652  390.187  564.913

>>>>      UNWEIGHTED GROUND PARTICLE ENTRIES


    All particle entry numbers are expressed in units of 10^3 entries.

                    Mean   RMS Err.   Stddv.    Min.     Max.
    Gamma rays       748.6502   15.223  152.233  512.731 1259.566
    Electrons         79.4771    1.809   18.086   52.433  145.105
    Positrons         65.0159    1.586   15.863   41.781  125.142
    Electr & positr  144.4929    3.394   33.944   94.214  270.247
```

Muons (+)	12.1224	0.149	1.487	6.970	15.020
Muons (-)	11.3229	0.140	1.402	6.394	14.007
All muons	23.4453	0.289	2.885	13.364	29.027
Pions (+)	1.9365	0.045	0.447	1.154	3.572
Pions (-)	1.8731	0.044	0.438	1.208	3.495
All pions	3.8096	0.088	0.883	2.362	7.067
Kaons (+)	0.2871	0.008	0.078	0.173	0.605
Kaons (-)	0.1724	0.005	0.049	0.091	0.340
All kaons	0.4595	0.013	0.125	0.266	0.945
Neutrons	1.1131	0.016	0.158	0.790	1.548
Protons	0.6868	0.012	0.118	0.461	1.053
Anti-protons	0.1165	0.003	0.031	0.059	0.229
Nuclei	0.0000	0.000	0.000	0.000	0.000
All charged	173.0106	3.276	32.756	123.368	292.482
All neutral	750.1815	15.232	152.319	513.999	1261.053
All particles	923.1922	18.495	184.948	637.367	1553.535

>>>> ENERGY OF GROUND LEVEL PARTICLES

All energies are expressed in PeV.

	Mean	RMS Err.	Stddv.	Min.	Max.
Gamma rays	17185.1032	356.60	3565.97	11681.36	29742.79
Electrons	5016.0268	126.77	1267.66	3157.37	9956.47
Positrons	4775.1849	124.00	1239.97	2997.18	9682.57
Electr & positr	9791.2116	250.73	2507.31	6154.55	19639.04
Muons (+)	1381.1356	19.32	193.16	723.84	1763.70
Muons (-)	1280.3966	18.19	181.95	654.70	1590.52
All muons	2661.5322	37.41	374.09	1378.54	3354.22
Pions (+)	372.9800	9.33	93.28	195.15	713.90
Pions (-)	360.0438	9.42	94.18	195.93	702.84
All pions	733.0238	18.67	186.74	391.08	1416.73
Kaons (+)	58.1717	1.72	17.16	27.34	124.97
Kaons (-)	35.4744	1.08	10.79	18.75	68.17
All kaons	93.6462	2.73	27.25	46.33	193.14
Neutrons	71.6033	1.41	14.07	42.40	111.73
Protons	65.6592	1.50	14.96	36.20	113.30
Anti-protons	22.3741	0.65	6.54	11.80	44.36
Nuclei	0.0000	0.00	0.00	0.00	0.00
All charged	13367.4470	240.87	2408.69	9813.52	22444.44
All neutral	17339.2437	358.18	3581.78	11790.17	29904.16
All particles	30706.6908	596.63	5966.31	21603.69	52335.15

>>>> OTHER SHOWER PARAMETERS

	Mean	RMS Err.	Stddv.	Min.	Max.
Vt. first interact. depth:	33.117	2.92	29.19	1.01	148.25
Sl. first interact. depth:	33.243	2.93	29.30	1.02	148.82

(Depths in g/cm2)

Shower maximum estimation:

Vt. depth of max. (g/cm2):	851.928	4.45	44.47	777.93	1000.13
Sl. depth of max. (g/cm2):	855.182	4.46	44.64	780.90	1003.95
Charged pcles. at maximum:	64.87793	0.2698	2.6976	48.8053	68.1953

(Times 10^9)

Estimation on the "average shower":

Vt. depth of max. (g/cm2):	849.571
Charged pcles. at maximum:	63.91015

(Times 10^9)

The fits were done with the Levenberg-Marquardt
nonlinear least-squares fitting algorithm, modelling
shower profiles with a 4-parameter Gaisser-Hillas function.

Number of showers with converged fits: 100

.....

……
……
……

TABLE 2291: Lateral distribution: All charged particles.

All particle numbers are expressed in units of 10^6 particles.

Bin	R (m)	Mean	Std. dev.	1.00E+02 | 1.00E+03 LOG-SCALE
1	50.0	1094.22	93.51	-o-
2	54.8	1025.08	86.32	o-
3	60.1	961.86	84.06	-o
4	65.9	887.50	71.86	-o-
5	72.3	821.69	65.68	-o
6	79.3	749.30	59.84	-o
7	87.0	693.98	58.68	-o-
8	95.4	624.30	57.03	o-
9	104.6	575.20	47.55	-o
10	114.7	530.08	46.47	-o-
11	125.7	474.94	44.25	-o-
12	137.9	435.18	41.06	o-
13	151.2	392.16	32.41	-o
14	165.8	356.21	33.62	-o-
15	181.8	325.26	36.06	-o-
16	199.4	288.89	28.52	-o-
17	218.7	255.83	29.77	-o-
18	239.8	231.16	26.92	-o-
19	263.0	208.57	26.79	--o
20	288.4	181.09	22.73	-o-
21	316.2	161.94	22.16	-o--
22	346.8	141.12	20.90	-o-
23	380.3	122.32	18.95	-o-
24	417.0	109.10	18.47	-o--
25	457.3	89.72	13.27	--o-
26	501.5	79.83	16.78	--o-
27	549.9	66.93	11.12	-o--
28	603.1	56.87	11.70	--o--
29	661.3	48.19	11.28	--o-
30	725.2	41.61	9.11	--o-
31	795.3	34.23	8.64	--o--
32	872.1	28.71	8.14	---o--
33	956.4	23.49	6.96	---o--
34	1048.7	19.98	5.34	---o--
35	1150.1	16.61	5.11	--o--
36	1261.2	12.48	3.70	o--
37	1383.0	11.11	3.55	--
38	1516.6	9.16	3.07	-
39	1663.1	7.04	2.69	|
40	1823.8	5.98	2.62	|
<	50.0	36087.14	4228.98	
>	2000.0	15.68	3.81	

……
……
……
……

>>>> END OF SUMMARY.

III. Οι προσομοιώσεις με το πρόγραμμα CORSIKA

Το πρόγραμμα παρουσιάζει την εξής ιδιομορφία: κάθε φορά που πρέπει να αλλάξει κάποια ρύθμιση μπορεί να γίνει compile με διαφορετικές επιλογές. Οι εντολές που περιλαμβάνονται στο αρχείο input διαφοροποιούνται ανάλογα με το compile που έχει προηγηθεί.

Οι διαφορετικές επιλογές που προσφέρει το πρόγραμμα σχετίζονται με το αδρονικό μοντέλο για τις υψηλής ενέργειας αλληλεπιδράσεις που θα χρησιμοποιηθεί (στην μελέτη φωτονίων του Auger έχει χρησιμοποιηθεί το SIBYLL που χρησιμοποιήθηκε και στο AIRES – στη μελέτη των Cherenkov καταιγισμών του CTA χρησιμοποιείται το QGSJETII), το αδρονικό μοντέλο αλληλεπιδράσεων χαμηλής ενέργειας (έχει χρησιμοποιηθεί το μοντέλο GHEISHA), το μοντέλο ηλεκτρομαγνητικών αλληλεπιδράσεων (NKG και EGS4), η παραγωγή ακτινοβολίας Cherenkov που ανιχνεύεται από επίπεδο ανιχνευτή (CERENKOV), η δυνατότητα δημιουργίας πρόδρομων φαινομένων για καταιγισμούς φωτονίων (PRESHOWER), η επιλογή για τη δημιουργία γραφικών απεικονίσεων του καταιγισμού (PLOTSH), η δυνατότητα στατιστικής επιλογής (THINNING).

Παρακάτω δίνεται σαν παράδειγμα το αρχείο εισόδου στο πρόγραμμα CORSIKA για κατακόρυφο καταιγισμό πρωτονίου 100 EeV. Εδώ μας ενδιαφέρει η παραγόμενη ακτινοβολία Cherenkov οπότε ορίζεται στο αρχείο input μια διάταξη τηλεσκοπίων (31x31 τηλεσκόπια διαμέτρου 5 m σε ορθογώνιο πλέγμα με απόσταση 100 m) Cherenkov.

*** Proton shower - 10^20 eV - La Silla - vertical***
*** CTA cuts ***

RUNNR 5000 # run number: μοναδικός αριθμός για κάθε προσομοίωση #
EVTNR 1 # αριθμός του πρώτου γεγονότος #
NSHOW 1 # πλήθος καταιγισμών #
PRMPAR 14 # τύπος του πρωτογενούς #
ERANGE 1.E11 1.E11 # ενεργειακή περιοχή – για συγκεκριμένη ενέργεια τα όρια ταυτίζονται #
THETAP 0 0 # περιοχή ζενιθιακών γωνιών – για συγκεκριμένη γωνία τα όρια ταυτίζονται #
PHIP 0 0 # περιοχή αζιμουθιακών γωνιών – για συγκεκριμένη γωνία τα όρια ταυτίζονται #
CERARY 31 31 10000 10000 500 500 # διάταξη τηλεσκοπίων Cherenkov #
ARRANG 0. # στροφή της διάταξης ως προς το Βορρά #

```
SEED   1   0   0              # seed for 1. random number sequence
                                  - γεννήτριες τυχαίων αριθμών #
SEED   2   0   0              # seed for 2. random number sequence
                                  - γεννήτριες τυχαίων αριθμών #
OBSLEV  2400.E2    # επίπεδο παρατήρησης σε cm -εδώ για την περιοχή LA SILLA
                                  στη Χιλή #
FIXCHI  0.     # ατμοσφαιρικό βάθος σημείου εισόδου στην ατμόσφαιρα σε g/cm^2 #
THIN    1.E-6 1.E5 2.E4 # επίπεδο thinning, στατιστικό βάρος και ακτίνα πλευρικού
                                  thinning #
CERSIZ 500          # μέγεθος bunch φωτονίων Cherenkov #
CWAVLG 250. 700.          # Cherenkov Wavelenght Band #
MAGNET  20.65  -11.37  # μαγνητικό πεδίο στο σημείο του πειράματος -  εδώ στη
                                  LA SILLA, Χιλή #
HADFLG  0  0  0  0  0  2      # δείκτες για το αδρονικό μοντέλο #
ECUTS   0.3 0.1 0.020 0.020   # ενεργειακά κατώφλια σε GeV για αδρόνια, μιόνια,
                                  ηλεκτρόνια και φωτόνια #
MUADDI  T                     # δείκτης για επιπλέον πληροφορίες για μιόνια #
MUMULT  T                     # δείκτης για πολλαπλές σκεδάσεις μιονίων #
ELMFLG  T   T                 # δείκτες για ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις #
STEPFC  1.0                   # multiple scattering step length factor #
RADNKG  2000.E2               # εξωτερική ακτίνα σε cm για την καταγραφή της
                                  πλευρικής κατανομής #
LONGI   T  20.  T  T          # δείκτες για τη διαμήκη κατανομή #
ECTMAP  1.E6                  # όριο για την καταγραφή φωτονίων γ #
MAXPRT  100                   # μέγιστος αριθμός γεγονότων που εκτυπώνονται #
DIRECT  ./                    # output directory #
DATBAS  T                     # δείκτης για δημιουργία αρχείου .dbase #
PAROUT  T T                   # δείκτης για δημιουργία αρχείου DAT #
USER    you                   # χρήστης #
DEBUG   F  6  F  1000000      # δείκτες για εκτύπωση στοιχείων για debugging #
CERFIL T            # δείκτης για τη δημιουργία ξεχωριστού αρχείου για τα φωτόνια
                                  Cherenkov #
EXIT                          # τέλος εντολών προσομοίωσης #
```

Το CORSIKA δίνει διαφορετικά αρχεία στην έξοδο ανάλογα με την επιλογή στο input αρχείο. Σε κάθε περίπτωση προκύπτει το αρχείο control printout στη μορφή output.txt. Επιπλέον, προκύπτουν τα αρχεία DAT και CER με δεδομένα για τις επιλογές της προσομοίωσης και τα σωματίδια που καταγράφονται. Στα αρχεία αυτά, που για να διαβαστούν απαιτείται ένα επιπλέον πρόγραμμα (corsikaread), δίνονται αναλυτικά η θέση, η ορμή, ο χρόνος καταγραφής για κάθε σωματίδιο ή ομάδα σωματιδίων (Cherenkov bunch). Τα αρχεία αυτά είναι εξαιρετικά μεγάλα (128 MB ή 1.200.000 γραμμές δεδομένων) και για να εξαχθεί το αρχείο CER των φωτονίων Cheenkov, πρέπει να ζητηθεί αυτό στο αρχείο εισόδου. Σε αντίθετη περίπτωση τα φωτόνια Cherenkov ενσωματώνονται στο αρχείο DAT. Παρακάτω δίνεται ένα παράδειγμα του αρχείου output.txt.

```
AAAA
```

```
CERARY  31 31 10000 10000 500 500
ARRANG  0.                      rotation of array to north

SEED    1   0   0               seed for 1. random number sequence
SEED    2   0   0               seed for 2. random number sequence
OBSLEV  2400.E2                 observation level (in cm) LA SILLA
FIXCHI  0.                      starting altitude (g/cm**2)

THIN    1.E-6 1.E5 2.E4


CERSIZ 500
CWAVLG 250. 700.


MAGNET  20.65  -11.37           magnetic field LA SILLA
HADFLG  0  0  0  0  0  2        flags hadr.interact.&fragmentation
ECUTS   0.3 0.1 0.020 0.020     energy cuts for particles CTA
MUADDI  T                       additional info for muons
MUMULT  T                       muon multiple scattering angle
ELMFLG  T   T                   em. interaction flags (NKG,EGS)
STEPFC  1.0                     mult. scattering step length fact.
RADNKG  2000.E2                 outer radius for NKG lat.dens.distr.

LONGI   T  20.  T  T            longit.distr. & step size & fit & out
ECTMAP  1.E6                    cut on gamma factor for printout
MAXPRT  100                     max. number of printed events
DIRECT  ./                      output directory
DATBAS  T                       write .dbase file
PAROUT  T T                     write DAT file
USER    you                     user
DEBUG   F  6  F  1000000        debug flag and log.unit for out
CERFIL T
EXIT                        terminates input

 END OF DATACARD INPUT


 ========== START OF RUN ============================================================

 PRESENT TIME : 15.01.2013  15:45:40
 RANDOM NUMBER GENERATOR AT BEGIN OF RUN :
 SEQUENCE =  1  SEED =        1  CALLS =        0  BILLIONS =        0
 SEQUENCE =  2  SEED =        2  CALLS =        0  BILLIONS =        0
 SEQUENCE =  3  SEED =        3  CALLS =        0  BILLIONS =        0

 PARTICLE OUTPUT TO FILE : ./DAT005000

 TABLE OUTPUT TO FILE : ./DAT005000.tab
   ENERGY : 40 BINS, RANGE :  1.00E-04  1.00E+04 GEV
   TIME   : 30 BINS, RANGE :  1.00E+01  1.00E+04 NS
   RADIUS : 20 BINS, RANGE :  5.00E+03  5.00E+05 CM
 LONGITUDINAL OUTPUT TO FILE: ./DAT005000.long
 CHERENKOV OUTPUT TO FILE : ./CER005000

 DBASE OUTPUT TO FILE : ./DAT005000.dbase


 ========== INTERACTION MODELS ==================================================
 QGSJET TREATS HIGH ENERGY HADRONIC INTERACTIONS

 QGSJET CROSS-SECTIONS ARE TAKEN
 ================================================
 |                                |
 |       QUARK GLUON STRING JET -II MODEL        |
 |                                |
 |       HADRONIC INTERACTION MONTE CARLO        |
 |                  BY                  |
 |              S. OSTAPCHENKO                |
 |                                |
 |          e-mail: serguei@ik.fzk.de           |
 |                                |
 |                Version II-03               |
```

```
|                                        |
| Publication to be cited when using this program: |
| S.Ostapchenko, Phys.Lett. B636 (2006) 40         |
| S. Ostapchenko, Phys.Rev. D 74 (2006) 014026     |
|                                        |
| last modification:  26.04.2006                   |
|                                        |
| Any modification has to be approved by the author|
================================================

NUCLEUS PROJECTILES FRAGMENT REALISTICALLY IN THE FIRST INTERACTION
FRAGMENTATION WITH EVAPORATION (PT AFTER JACEE)

GHEISHA TREATS LOW ENERGY HADRONIC INTERACTIONS
HIGH ENERGY INTERACTION MODEL USED ABOVE    80.000 GEV LAB ENERGY   OR
                                12.324 GEV CM  ENERGY
MUON/TAU MULTIPLE SCATTERING AFTER MOLIERE

ELECTROMAGNETIC COMPONENT SIMULATED WITH NKG
##############################################
#  W A R N I N G  NKG IS WITHOUT LPM EFFECT #
##############################################


START EGS4  AIR SHOWER SUBROUTINE VERSION

ELECTROMAGNETIC COMPONENT SIMULATED WITH EGS4

DATASET EGSDAT6_3. AVAILABLE
DATA FOR MEDIUM #  1, WHICH IS: MEDIUM=AIR-NTP               ,STERNCID=AIR-NTP
MIXT,RHO= 6.1250E-09,NE= 4,COMPOSITION IS :
ASYM=N ,Z= 7.,A=   14.007,PZ= 5.39228E-02,RHOZ= 7.55280E-01
ASYM=O ,Z= 8.,A=   15.999,PZ= 1.44793E-02,RHOZ= 2.31660E-01
ASYM=AR,Z=18.,A=   39.948,PZ= 3.20917E-04,RHOZ= 1.28200E-02
ASYM=C ,Z= 6.,A=   12.011,PZ= 3.33024E-06,RHOZ= 4.00000E-05
EGS SUCCESSFULLY 'HATCHED' FOR ONE MEDIUM.
ELECTRONS CAN BE CREATED AND ANY ELECTRON FOLLOWED DOWN TO
                                0.00300 GEV KINETIC ENERGY
GAMMAS CAN BE CREATED AND ANY GAMMA FOLLOWED DOWN TO
                                0.00300 GEV ENERGY
ELECTRON HISTORIES ARE TERMINATED AT       0.02051 GEV
GAMMA HISTORIES ARE TERMINATED AT          0.02000 GEV


……
……..
……
……..
……
……..


 ========== ATMOSPHERE ============================================================

 ( US STANDARD ATMOSPHERE PARAMETRIZED BY LINSLEY )
 HEIGHT H IN KM GIVES THICKNESS OF ATMOSPHERE T IN G/CM**2
H =  -5.8...  4.0 KM ---> T = -1.86556E+02 + 1.2227E+03 * EXP( -H / 9.9419E+00)
H =   4.0... 10.0 KM ---> T = -9.49190E+01 + 1.1449E+03 * EXP( -H / 8.7815E+00)
H =  10.0... 40.0 KM ---> T =  6.12890E-01 + 1.3056E+03 * EXP( -H / 6.3614E+00)
H =  40.0...100.0 KM ---> T =  0.00000E+00 + 5.4018E+02 * EXP( -H / 7.7217E+00)
H = 100.0...112.8 KM ---> T =  1.12829E-02 - H / 1.0000E+04


========== SHOWER PARAMETERS ==================================================
PRIMARY PARTICLE IDENTIFICATION IS          14
PRIMARY ENERGY IS FIXED AT           1.000E+11 GEV
THETA OF INCIDENCE IS FIXED TO       0.00 DEGREES
PHI   OF INCIDENCE IS FIXED TO       0.00 DEGREES
HEIGHT OF FIRST INTERACTION IS CHOSEN RANDOMLY
TARGET OF FIRST INTERACTION IS AT RANDOM
STARTING ALTITUDE AT     11282920.00 CM (=      0.00 G/CM**2)
              WHICH IS AT TOP OF ATMOSPHERE

OBSERVATION LEVEL # IN  CM    AND IN   G/CM**2
        1       2.40000000E+05       7.73870396E+02
```

```
 LONGITUDINAL SHOWER DEVELOPMENT:
    SHOWER IS SAMPLED IN   39 STEPS OF   20.0 G/CM**2
    FIT TO CHARGED PARTICLE LONG. DISTRIBUTION   ENABLED

 ENERGY FRACTION FOR EM THINNING =  1.0000E-06
      AND FOR HADRONIC THINNING =  1.0000E-06
HAD.WEIGHTS ARE LIMITED TO MAX.   100000.00
EM  WEIGHTS ARE LIMITED TO MAX.   100000.00
RADIAL THINNING FOR RADIUS  <    20000.000      CM

 PARTICLES WITH LORENTZ FACTOR LARGER THAN     1.0000E+06 ARE PRINTED OUT
 SHOWER PARTICLES ENERGY CUT :
    FOR HADRONS   :      3.0000E-01 GEV
    FOR MUONS     :      1.0000E-01 GEV
    FOR ELECTRONS :      2.0000E-02 GEV
    FOR GAMMAS    :      2.0000E-02 GEV


 EARTH MAGNETIC FIELD STRENGTH IS    23.573277      MICROTESLA
    WITH INCLINATION ANGLE        -28.837414      DEGREES

 CHERENKOV ARRAY:
    CHERENKOV STATIONS ARE     500.00  *      500.00 CM**2 LARGE
    THE GRID SPACING IS     10000.00 AND   10000.00 CM
    THERE ARE  31 *  31 STATIONS IN X/Y DIRECTIONS
    THE CHERENKOV ARRAY IS CENTERED AROUND (0., 0.)

 CHERENKOV WAVELENGTH BAND FROM    250.00000      TO    700.00000      NANOMETER
 CHERENKOV BUNCH SIZE IS SET TO    500.00000000000000
 CHERENKOV PHOTONS ARE WRITTEN TO SEPARATE FILE
 DEFINE MULTIPLE CHERENKOV ARRAYS TO USE EACH SHOWER SEVERAL TIMES
 USE EACH EVENT  1 TIMES
 THE EVENTS ARE SCATTERED QUASI RANDOMLY IN THE RANGE
                X =  +-       0.00    Y = +-       0.00 CM

 ADDITIONAL INFORMATION ON MUON ORIGIN IS WRITTEN TO PARTICLE TAPE

 NUMBER OF SHOWERS TO GENERATE =           1


 ========== SHOWER NO         1 ================================================

 PRESENT TIME : 15.01.2013  15:45:43
 AND RANDOM NUMBER GENERATOR AT BEGIN OF EVENT :       1
 SEQUENCE =  1  SEED =         1  CALLS =         0  BILLIONS =         0
 SEQUENCE =  2  SEED =         2  CALLS =         0  BILLIONS =         0
 SEQUENCE =  3  SEED =         3  CALLS =         0  BILLIONS =         0
 CORE OF EVENT     1 (SCATT#  1) AT        -0.00                0.00 CM
.....
.....
.....
                ENERGY SUM =   9.9816922E+10 GEV
 FIT OF THE HILLAS CURVE   N(T) = P1*((T-P2)/(P3-P2))**((P3-P2)/(P4+P5*T+P6*T**2)) * EXP((P3-
T)/(P4+P5*T+P6*T**2))
 TO LONGITUDINAL DISTRIBUTION OF       AVERAGE ALL CHARGED PARTICLES
 PARAMETERS         =   3.5000E+10 -2.1378E+01  7.5054E+02  1.1475E+02 -1.3309E-01  1.3750E-04
 CHI**2/DOF         =  2.8930E+05
 AV. DEVIATION IN % =  1.5464E+02


 PRESENT TIME : 15.01.2013  17:21:03

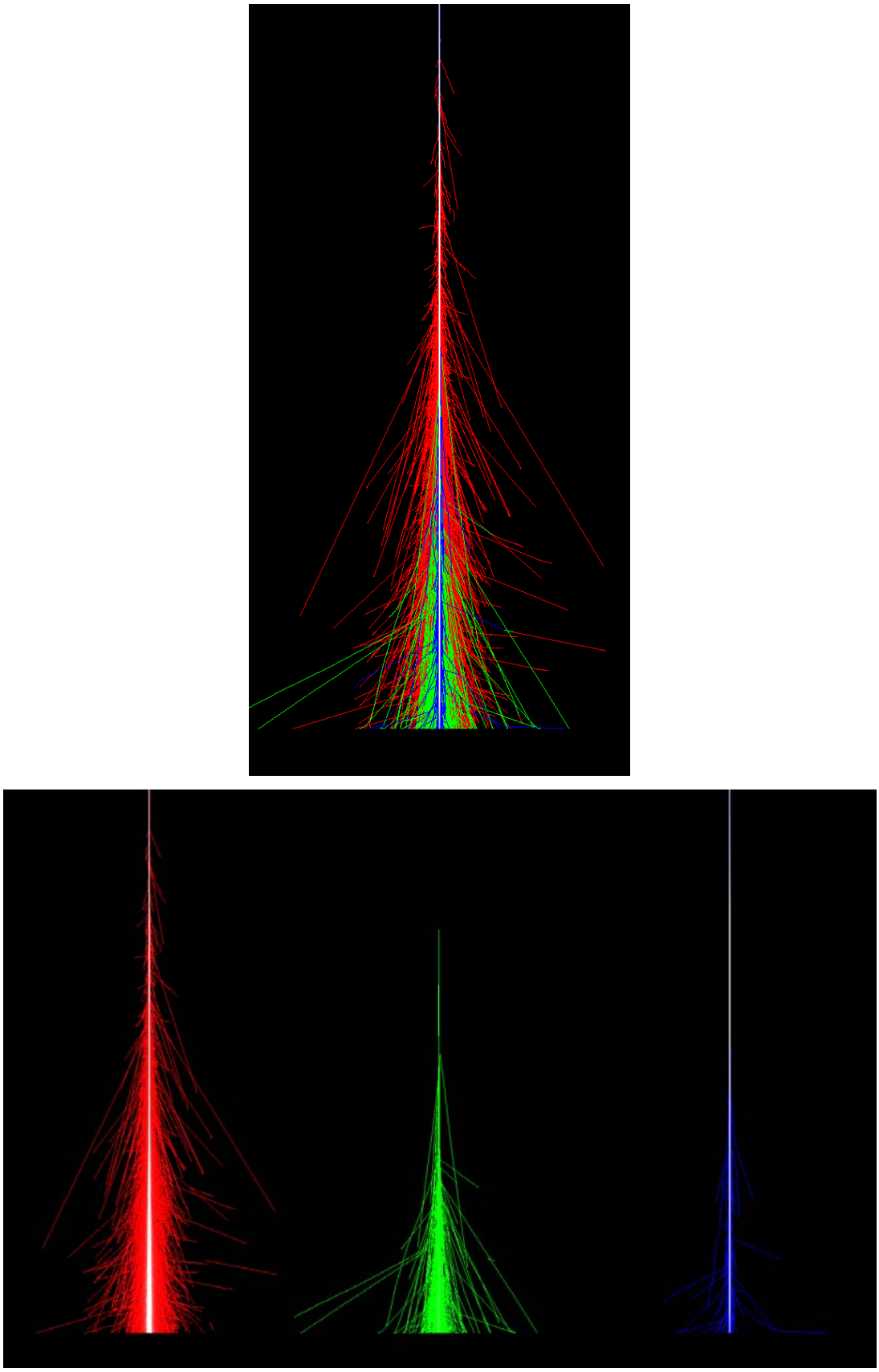
 ========== END OF RUN ============================================
```

IV. Η δημιουργία απεικονίσεων καταιγισμών με το πρόγραμμα CORSIKA

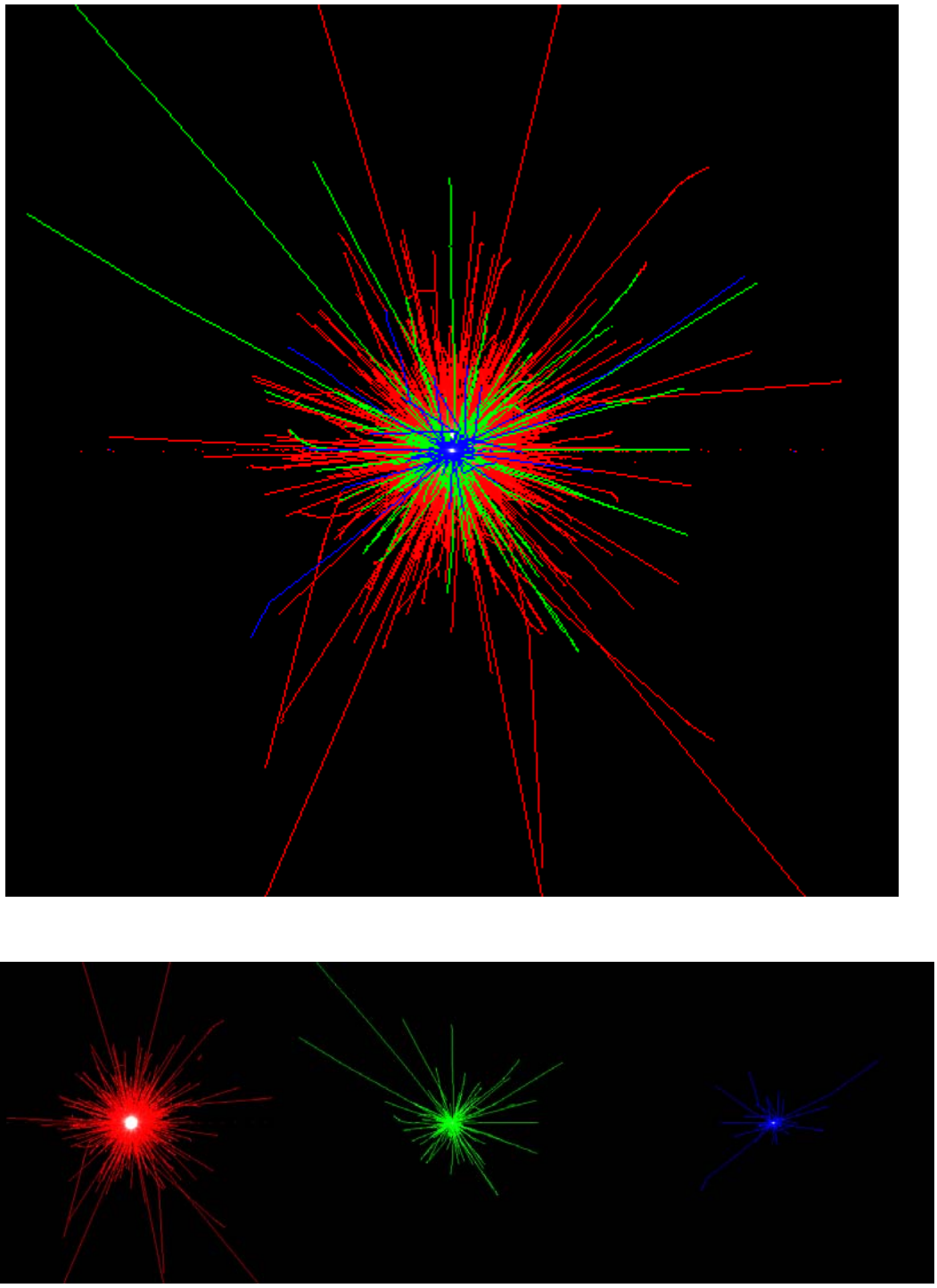
Μια από τις εξαιρετικές δυνατότητες που παρέχει το CORSIKA είναι η «εικονοποίηση» των καταιγισμών που προσομοιώνονται με τη δημιουργία απεικονίσεων των μιονίων, ηλεκτρονίων και αδρονίων του καταιγισμού σε δύο διαστάσεις. Για να προκύψουν οι απεικονίσεις αυτές το πρόγραμμα δημιουργεί ένα επιπλέον αρχείο στο οποίο καταγράφονται το αρχικό και το τελικό σημείο της τροχιάς των σωματιδίων. Το αρχείο περιλαμβάνει το είδος του σωματιδίου, την ενέργεια του (σε GeV), τα Xstart, Ystart και Zstart (σε cm), τον χρόνο Tstart (σε sec), τα Xend, Yend, Zend (σε cm), τον χρόνο Tend (σε sec) και το στατιστικό βάρος του σωματιδίου σε περίπτωση που έχει υπάρξει thinning. Το αρχείο αυτό αυξάνει σημαντικά σε μέγεθος με την αύξηση της ενέργειας. Ενδεικτικά, απαιτούνται 314 MB για τα αρχεία που χρειάζονται για να απεικονιστεί ένας κατακόρυφος πρωτονικός καταιγισμός 10^{20} eV με thinning 10^{-3}.

Τα σχήματα δημιουργούνται από τα δεδομένα αυτά μέσω του προγράμματος plottracks. Για να παραχθούν τα απαραίτητα αρχεία πρέπει να γίνει η επιλογή PLOTSH κατά την εξαγωγή του κώδικα και να περιληφθεί η εντολή PLOTSH στο αρχείο εισόδου.

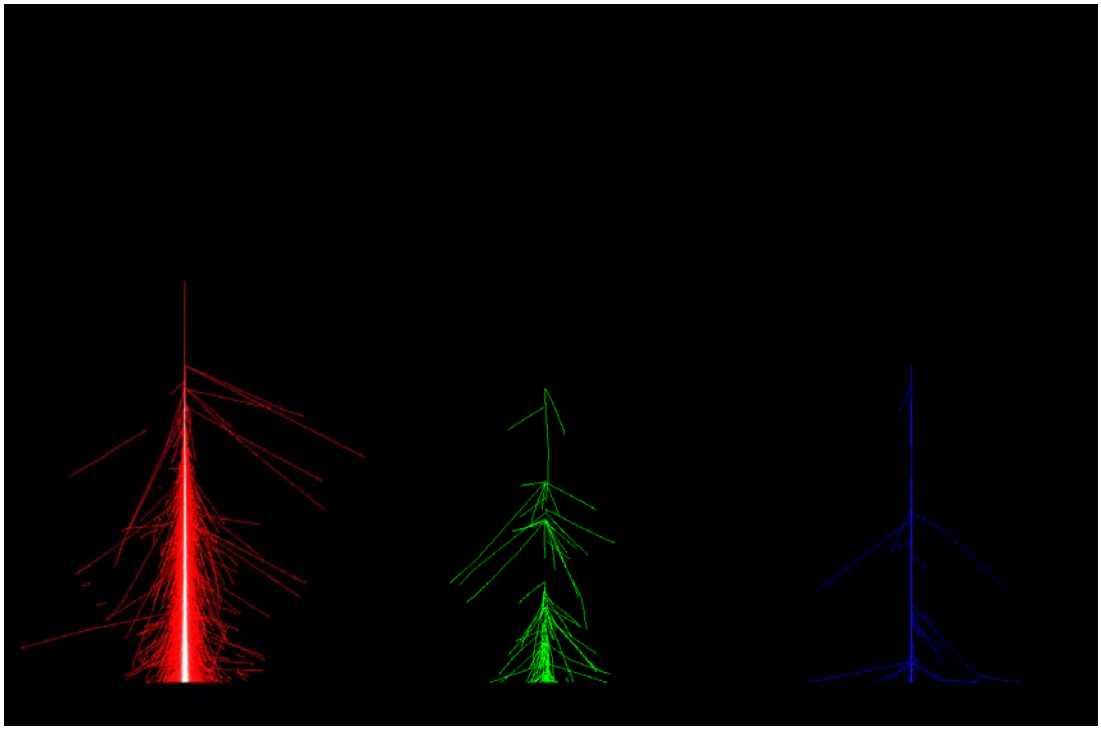
Το αποτέλεσμα της χρήσης της ενολής είναι εντυπωσιακό. Παρακάτω δίνονται διαφορετικές απεικονίσεις ενός πρωτονικού και ενός φωτονικού κατακόρυφου καταιγισμού 10^{20} eV στη Namibia (υψόμετρο 1800 m). Τα ενεργειακά κατώφλια είναι αυτά του πειράματος CTA (0.02 GeV για ηλεκτρόνια, 0,1 GeV για μιόνια, 0,3 GeV για αδρόνια).



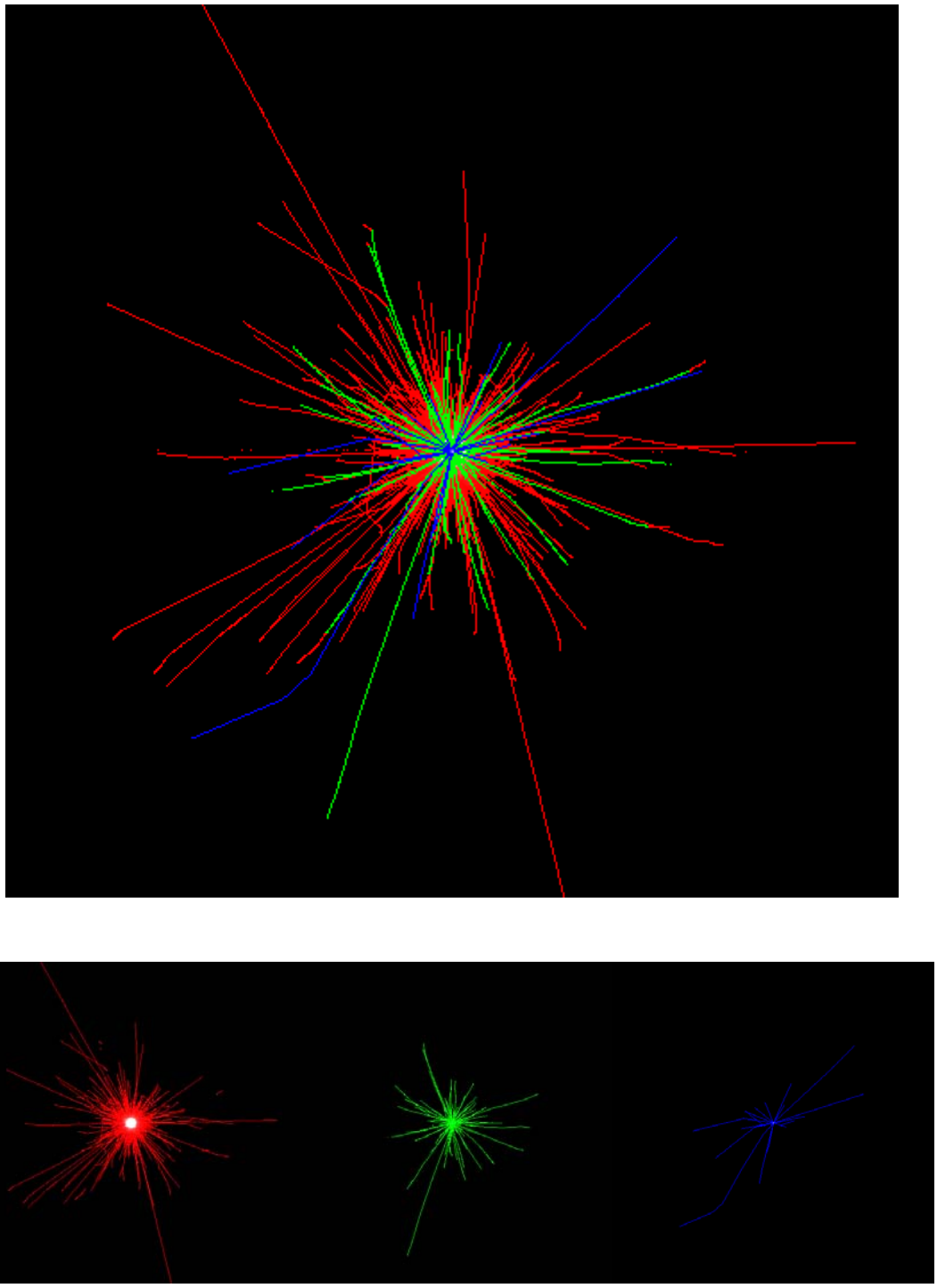
Εικόνα 9: Ο κατακόρυφος πρωτονικός καταιγισμός αρχικής ενέργειας 10^{20} eV και οι διάφορες συνιστώσες του σε απεικόνιση στους άξονες x,z. Με κόκκινο απεικονίζονται τα ηλεκτρόνια, με πράσινο τα μιόνια και με μπλε τα αδρόνια. Το πλάτος κάθε εικόνας αντιστοιχεί σε 5 km και το ύψος σε 28 km.



Εικόνα 10: Ο κατακόρυφος πρωτονικός καταιγισμός αρχικής ενέργειας 10^{20} eV και οι διάφορες συνιστώσες του σε απεικόνιση στους άξονες x,y. Με κόκκινο απεικονίζονται τα ηλεκτρόνια, με πράσινο τα μιόνια και με μπλε τα αδρόνια. Η λευκή περιοχή στο κέντρο της ηλεκτρονικής συνιστώσας έχει προκύψει από την επιλογή ακτινικού thinning σε απόσταση 200 m από τον άξονα του καταιγισμού. Το πλάτος και το ύψος κάθε εικόνας αντιστοιχεί σε 5 km.



Εικόνα 11: Ο κατακόρυφος φωτονικός καταιγισμός αρχικής ενέργειας 10^{20} eV και οι διάφορες συνιστώσες του σε απεικόνιση στους άξονες x,z. Με κόκκινο απεικονίζονται τα ηλεκτρόνια, με πράσινο τα μιόνια και με μπλε τα αδρόνια. Το πλάτος κάθε εικόνας αντιστοιχεί σε 5 km και το ύψος σε 28 km.



Εικόνα 12: Ο κατακόρυφος φωτονικός καταιγισμός αρχικής ενέργειας 10^{20} eV και οι διάφορες συνιστώσες του σε απεικόνιση στους άξονες x,y. Με κόκκινο απεικονίζονται τα ηλεκτρόνια, με πράσινο τα μιόνια και με μπλε τα αδρόνια. Η λευκή περιοχή στο κέντρο της ηλεκτρονικής συνιστώσας έχει προκύψει από την επιλογή ακτινικού thinning σε απόσταση 200 m από τον άξονα του καταιγισμού. Το πλάτος και το ύψος κάθε εικόνας αντιστοιχεί σε 5 km.

ΒΙΒΛΙΟΓΡΑΦΙΑ

1. Α. Γεράνιος, *Σημειώσεις στο μεταπτυχιακό μάθημα Κοσμική Ακτινοβολία*, Αθήνα, 1996.
2. Α. Λιόλιος, Εισαγωγή στις Κοσμικές Ακτίνες, Θεσσαλονίκη, 2012.
3. Ε. Χριστοπούλου-Μαυρομιχαλάκη, *Κοσμική Ακτινοβολία*, Αθήνα, 2005.
4. J. Abraham et al., "Properties and performance of the prototype instrument for the Pierre Auger Observatory", Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol 523, Issues 1–2, pp. 50–95, 2004.
5. J. Abraham et al., "Anisotropy studies around the galactic centre at EeV energies with the Auger Observatory", *Astropart.Phys*. 27, pp. 244-253, 2007.
6. J. Abraham et al., "Upper limit on the cosmic-ray photon fraction at EeV energies from the Pierre Auger Observatory", *Astropart. Phys*. 31, pp.399-406, 2009.
7. S. Agostinelli et al., "Geant4: A Simulation Toolkit", *NIM A* vol. 506, no. 3, pp. 250- 303, 2003.
8. M. Aguilar et al., (AMS Collaboration), "First Result from the Alpha Magnetic Spectrometer on the International Space Station: Precision Measurement of the Positron Fraction in Primary Cosmic Rays of 0.5–350 GeV", Phys. Rev. Lett. 110, 141102, 2013.
9. A.A. Al-Rubaiee, "Cherenkov light Extrapolation at Ultra High Energy Cosmic Rays in Extensive Air Showers".
10. A.A. Al-Rubaiee, O.A. Gress, A.A. Kochanov, K.S. Lokhtin, Y.V. Parfenov and S.I Sinegovsky, "Parametrization for Cherenkov light lateral distribution function in Extensive Air Showers", *29th ICRC*, pp. 249-252, 2005.
11. I.A. Anchordoqui et al., "Simulation of Water Cerenkov Detectors Using GEANT4", *Nucl. Phys. Proc. Suppl*. 97, pp.196-198, 2001.
12. F. Arqueros, "The Pierre Auger Observatory: Status and first results", *36th COSPAR Scientific Assembly*, 2006.

13. P. Auger et al., “Extensive Cosmic-Ray Showers”, Rev. Mod. Phys. 11, pp. 288-291, 1939.
14. M. Ave et al., “Cosmic ray energy spectrum above $3x10^{17}$ eV measured with the Haverah Park Array”, *27th ICRC*, Under the auspices of the International Union of Pure and Applied Physics (IUPAP), p.381, 2001.
15. J.N. Bahcall, E. Waxman, “Haw the GZK suppression been discovered?”, Physics Letters B, vol. 556, Issues 1-2, pp. 1-6, 2003.
16. C. Baixeras, “The MAGIC Telescope”, Nucl.Phys.B (Proc.Suppl.) 114, pp. 247-252, 2003.
17. R.M. Baltrusaitis et al., “The Utah Fly's Eye detector”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol 240, Issue 2, pp. 410–428, 1985.
18. D. Barnhill et al., “Measurement of the Lateral Distribution Function of UHECR Air Showers with the Pierre Auger Observatory”, *29th ICRC*, p.291, 2005.
19. P. Bassi, G. Clark and B. Rossi, “Distribution of Arrival Times of Air Shower Particles”, Phys. Rev. 92, pp. 441-451, 1953.
20. P. Bauleo et al, “Remote particle density calibration of a water Cerenkov detector using crossing-through muons”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A 463, p. 175, 2001.
21. V. Berezinsky, A. Gazizov, S. Grigorieva, “On the status of the dip in UHECR spectrum”, 30th ICRC, 2007.
22. P. Billoir and P. Sommers, “Identification of the Primary Cosmic Ray”, *C. R. Acad. Sci. Paris t.4*, Serie IV, pp. 1–11, 2004.
23. R.E. Burton and C.E. Covault, “The Application of Sampling Cherenkov Detectors to the Highest Energy Cosmic Rays”, *31st ICRC*, 2009.
24. N. Chiba et al., “Akeno Giant Air Shower Array (AGASA) covering 100 km^2 area”, Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment, vol. 311, Issues 1–2, pp. 338–349, 1992.
25. J. W. Cronin, “Particle discrimination using the FADC traces from the Auger Observatory surface detectors”, *GAP-Note 2003-076*, 2003.

26. J. W. Cronin, “The highest-energy cosmic rays”, Talk presented at TAUP 2003, arXiv:astro-ph/0402487, 2003.
27. CTA Consortium, “Design Concepts for the Cherenkov Telescope Array – CTA”, 2010.
28. V. De Souza et al., “Analysis of shower size as estimator of extensive air shower energy”, *29th ICRC*, p.101, 2005.
29. M.T Dova. for the Pierre Auger Collaboration, “Asymmetries Observed In Giant Air Showers Using Water Cerenkov Detectors”, *28th ICRC*, p. 369, 2003.
30. G. Gamow, “Expanding Universe and the Origin of Elements”, Phys. Rev. 70 572, 1946.
31. A. Geranios et al., “AIRES EAS Simulations for the Energy Estimation of UHECR”, *29th ICRC*, 2005.
32. A. Geranios et al., “Lateral Distribution Function of Extensive Air Showers”, *30th ICRC*, 2007.
33. A. Geranios et al., “Energy Estimation of Ultra High Energy Cosmic Particles by Lateral Distribution Functions of Extensive Air Showers”, *International Journal of Modern Physics A,* Vol. 23, No. 29, pp. 4687-4694, 2008.
34. A. Geranios et al., “Energy Estimation of Ultra High Energy Cosmic Hadrons and Gamma Rays by Lateral Distribution Functions of Extensive Air Showers”, *31th ICRC*, 2009.
35. A. Geranios et al., “Energy Estimation of Ultra High Energy Cosmic Ray Hadrons by Monte Carlo Simulations of Extensive Air Showers”, *International Journal of Modern Physics A*, Vol. 25, No. 12, pp. 2561–2571, 2010.
36. A. Geranios et al., “Energy Estimation of Ultra High Energy Cosmic Ray Photons by Monte Carlo Simulations of Extensive Air Showers”, *International Journal of Modern Physics A*, Vol. 25, No. 20, pp. 3953–3964, 2010.
37. J. D. Haverhoek, “Ultra High Energy Cosmic Ray Extensive Air Shower simulations using CORSIKA”, University of Leiden, 2006
38. J. Harton., “Progress with the Northern Part of the Pierre Auger Observatory”, *31st ICRC*, 2009.

39. W. Heitler, “Quantum Theory of Radiation”, Oxford University Press, 1944.
40. C.T. Hill, D.N. Schramm and T.P. Walker, “Ultra-high-energy cosmic rays from superconductive cosmic strings”, Phys. Rev. D, Vol. 36, 1987.
41. A. M. Hillas et al., Proc. 12th Int. Cosmic Ray Conf. (Hobart), 3, pp. 1001-1006, 1971.
42. J. A. Hinton, “The Status of the H·E·S·S· Project”, arXiv:astro-ph/0403052, 2004.
43. J. R. Hörandel, “Cosmic Rays at the highest energies”, *Progress in Particle and Nuclear Physics* 64, pp. 351-359, 2010.
44. E. Kajino et al., “Overview of the JEM-EUSO Instruments”, *31st ICRC*, 2009.
45. M. Kleifges, “Extension of the Pierre Auger Observatory using high-elevation fluorescence telescopes (HEAT)”, *31st ICRC*, 2009.
46. M. A. Lawrence, R. J. O’Reid, A. A. Watson, “The cosmic ray energy spectrum above 4*10^{17} eV as measured by the Haverah Park array”, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 17, p.733, 1991.
47. M. Lemoine and G. Sigl, ed., *Physics and Astrophysics of Ultra-High-Energy Cosmic Rays*, Springer, 2001.
48. B. D. Metzger, D. Giannios and S. Horiuchi, “Heavy nuclei synthesized in gamma-ray burst outflows as the source of ultrahigh energy cosmic rays”, *Mon. Not. R. Astron. Soc.*, Vol. 415, Issue 3, pp. 2495-2504, 2011.
49. M. Mori et al., “The CANGAROO-III Project: Status report”, arXiv:astro-ph/0106346, 2001.
50. M. Nagano and A.A. Watson, “Observations and Implications of the ultrahigh-energy cosmic rays”, *Reviews of Modern Physics*, 72, 3, p. 689, 2000.
51. C.L. Naumann et al., “New electronics for the Cherenkov Telescope Array (NECTAr)”, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research Section A: Accelerators, Spectrometers, Detectors and Associated Equipment*, Volume 695, pp. 44-51, 2012.
52. D.W. Newton, *Measuring the Lateral Distribution of Extensive Air Showers to characterize properties of Cosmic Rays above 1 EeV*,

doctoral dissertation, School of Physics & Astronomy, University of Leeds, 2005.

53. M. Nishant and T. Helio, “Simulations and Detection of Extensive Air Showers”, Brookhaven National Laboratory, 2003.
54. T. Nonaka et al., “The present status of the Telescope Array experiment”, 31st ICRC, 2009.
55. A. A. Penzias, R.W. Wilson, “Measurement of the flux density of CAS A at 4080 Mc/s”, Astrophysical Journal, vol. 142, p.1149, 1965.
56. T. Pierog, K. Werner, “EPOS Model and Ultra High Energy Cosmic Rays”, Nuclear Physics B – Proceeding Supplements, vol. 196, pp. 102-105, 2009.
57. Pierre Auger Collaboration, “Statistical and systematic uncertainties in the event reconstruction and S(1000) determination by the Pierre Auger surface detector”, 29th ICRC, 2005.
58. Pierre Auger Collaboration, “Correlation of the Highest-Energy Cosmic Rays with Nearby Extragalactic Objects”, Science, Nov. 2007, pp. 938-943, 2007.
59. Pierre Auger Collaboration, “Measurement of the energy spectrum of cosmic rays above 10^{18} eV using the Pierre Auger Observatory”, Physics Letters B, vol. 685, Issues 4-5, pp. 239-246, 2010.
60. M. Platino, “AMIGA – Auger Muons and Infill for the Ground Array of the Pierre Auger Observatory”, *31st ICRC*, 2009.
61. C. Pryke, “Chemical composition studies with a hybrid detector”, *GAP-Note 1997-022*, 1997.
62. D.A. Podgrudkov et al., “The time-space structure of pulses in Cherenkov light detectors”, *31st ICRC*, 2009.
63. M.V.S. Rao and B.V Sreekantan, *Extensive Air Showers*, World Scientific, 1998.
64. J. Ridky for the Pierre Auger Collaboration, “Measurement of the Cosmic Ray Energy with Pierre Auger Observatory”, *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)* 165, p. 45, 2007.
65. G. Ros et al., “Improving photon-hadron discrimination based on cosmic ray surface detector data”, arXiv:1305.7439v1, 2013.

66. B. Rossi, “Directional Measurements on the Cosmic Rays Near the Geomagnetic Equator”, Phys. Rev. 45, pp. 212-214, 1934.
67. M. Roth, “Measurement of the energy spectrum of cosmic rays from the Pierre Auger Observatory”, *Nuclear Physics B (Proc. Suppl.)* 190, pp. 12-19, 2009.
68. N. Sakaki et al., “Cosmic Ray Energy Spectrum above $3x10^{18}$ eV observed with AGASA”, 27^{th} ICRC, 2001.
69. S.J. Sciutto, “AIRES: A System for Air Shower Simulations”, arXiv:asrto-ph/9911331.
70. I.P. Sidelnik, “AMIGA: An Enhancement of the Pierre Auger Observatory”, http://fisica.cab.cnea.gov.ar/particulas/html/icfa/wiki/images/2/29/Sidelnik.pdf
71. P. Sommers, “First Estimate of the Primary Cosmic Ray Energy Spectrum above 3 EeV from the Pierre Auger Observatory”, *29^{th} ICRC*, 2005.
72. T. Stanev, “Ultra High Energy Cosmic Rays: origin and propagation”, arXiv:astro-phys/0711.2282v1, 2007.
73. T. Stanev, *High Energy Cosmic Rays*, Second Edition, Springer, 2010.
74. R.M. Tennent, “The Haverah Park extensive air shower array”, *Proc. Phys. Soc.*, Vol. 92, 1967.
75. T. C. Weekes et al., “VERITAS: the Very Energetic Radiation Imaging Telescope Array System”, Astroparticle Physics 17 pp. 221–243, 2002.
76. S. Yoshida, “Energy Determination of trans-EeV cosmic rays”, *C.R. Physique* 5, p. 483, 2004.
77. www.auger.org