

ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



**ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ
ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ**

ΤΟΜΕΑΣ ΦΥΣΙΚΗΣ

**Μελέτη της δυνατότητας ανίχνευσης νετρίνων πολύ υψηλής
ενέργειας με την πρωτότυπη αυτόνομη ανιχνευτική συστοιχία
GRBNeT**

**ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΗΣ
ANNAΣ ΣΙΝΟΠΟΥΛΟΥ**

Επιβλέπων: Τσιπολίτης Γεώργιος, Καθηγητής ΕΜΠ

ΑΘΗΝΑ, ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ 2016

Ευχαριστίες

Η εργασία πραγματοποιήθηκε το ακαδημαϊκό έτος 2015-2016 στο Ινστιτούτο Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε Δημόκριτος στα πλαίσια εκπόνησης της διπλωματικής εργασίας του 10^{ου} εξαμήνου για τους προπτυχιακούς φοιτητές της σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών (Σ.Ε.Μ.Φ.Ε) του Εθνικού Μετσοβίου Πολυτεχνείου. Οι επιβλέποντες της εργασίας μου είναι ο καθηγητής της Σ.Ε.Μ.Φ.Ε Τσιπολίτης Γεώργιος και η Δρ. Τζαμαριουδάκη Αικατερίνη ερευνήτρια στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε Δημόκριτος, στους οποίους οφείλω τις ευχαριστίες μου για την συνέχη βοήθεια και συμπαράσταση καθόλη τη διάρκεια αυτής της απαιτητικής χρονιάς καθώς και για την υπομονετική καθοδήγηση τους όχι μόνο για την διπλωματική εργασία αλλά και για τα βήματα μου ως νέα επιστήμονας. Δουλεύοντας μαζί τους έλαβα πολλές γνώσεις και εμπειρία που θα με ακολουθούν στη συνέχεια της καριέρας μου.

Στην εκπόνηση αυτής της εργασίας, οφείλω πολλά στους συνεργάτες της Δρ. Τζαμαριουδάκη στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε Δημόκριτος, τον Δρ. Μάρκου Χρήστο για την υποστήριξη, διδασκαλία και βοήθεια του, τον κ. Πικούνη Κωνσταντίνο για την τεράστια υπομονή και βοήθεια του, την Δρ. Ευαγγελία Δρακοπούλου για τη προθυμία της να με βοηθήσει ακόμα και όταν ήταν μακριά από το εργαστήριο καθώς και την υπόλοιπη ομάδα που εργάζεται στο πείραμα KM3NeT τον κ. Ανδρουλάκη Γεώργιο και τον κ. Μπαγατέλα Χρήστο.

Τελειώνοντας, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου για την στήριξη και τη κατανόηση τους σε όλη τη διάρκεια των σπουδών μου και τους φίλους μου που στάθηκαν δίπλα μου στα εύκολα και τα δύσκολα των τελευταίων ετών.

Abstract

The subject of this thesis is the study of the capability of detecting high energy neutrinos with the prototype autonomous detector GRBNeT and was carried out thanks to the contribution of the School of Applied Mathematical and Physical Sciences of the National Technical University of Athens and of the Institute of Nuclear and Particle Physics Research of Demokritos Research Center in Athens.

Firstly, the basics of high energy astroparticle physics are presented with a short reference to the efforts of humanity to explore the universe. Neutrino and its unique properties that make it ideal "explorer of the universe" are discussed, by mentioning its detection techniques and challenges which must be taken into account during the construction of neutrino telescopes. Additionally, neutrino telescopes that have already and will be constructed are presented.

Moreover, the GRBNeT project is presented whose goal is the design, construction and test deployment of an autonomous detection unit of Cherenkov type. The GRBNeT project's detector is meant to be used as an extension of already constructed neutrino telescopes in order to detect high energy neutrinos coming from gamma ray bursts and other extragalactic phenomena. The studies of this thesis are concentrated on the understanding and reduction of the background mainly coming from atmospheric muons and neutrinos at the trigger level and on the possible gain in terms of effective area of the KM3NeT configuration if it is extended with such autonomous detection strings.

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της δυνατότητας ανίχνευσης νετρίνων πολύ υψηλών ενεργειών με την πρωτότυπη αυτόνομη ανιχνευτική συστοιχία GRBNeT και πραγματοποιήθηκε χάρη στη συμβολή της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου και του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων Έρευνας Δημόκριτος Κέντρο Ερευνών στην Αθήνα.

Αρχικά, τα βασικά της αστροσωματιδιακής φυσικής υψηλών ενεργειών παρουσιάζονται με μια σύντομη αναφορά στις προσπάθειες της ανθρωπότητας για να εξερευνήσει το σύμπαν. Το νετρίνο και οι μοναδικές ιδιότητες που το καθιστούν ιδανικό «εξερευνητή του σύμπαντος» συζητούνται, αναφέροντας τις τεχνικές ανίχνευσης του και τις προκλήσεις που πρέπει να λαμβάνονται υπόψη κατά την κατασκευή των τηλεσκοπίων νετρίνων. Επιπλέον, παρουσιάζονται τα τηλεσκόπια νετρίνων που έχουν ήδη κατασκευαστεί.

Επιπλέον, παρουσιάζεται το ερευνητικό πρόγραμμα GRBNeT του οποίου στόχος είναι ο σχεδιασμός, η κατασκευή και η δοκιμαστική πόντιση μιας αυτόνομης μονάδας ανίχνευσης τύπου Cherenkov. Ο ανιχνευτής του προγράμματος GRBNeT μπορεί να αποτελέσει επέκταση των ήδη υπάρχοντων τηλεσκοπίων νετρίνων με σκοπό τον εντοπισμό υψηλής ενέργειας νετρίνων που προέρχονται από εκρήξεις ακτίνων γάμμα και άλλων εξωγαλαξιακών φαινομένων. Οι μελέτες αυτής της εργασίας επικεντρώθηκαν στην κατανόηση και τη μείωση του υποβάθρου που προέρχεται κυρίως από ατμοσφαιρικά μόνια και νετρίνα σε επίπεδο σκανδαλισμού και στο κέρδος όσον αφορά την ενεργό περιοχή του ανιχνευτή KM3NeT εάν επεκταθεί με τέτοιο αυτόνομο ανιχνευτικό σύστημα.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων	6
Κατάλογος Πινάκων	12
1 Εισαγωγή	13
1.1 Νετρίνα υψηλών ενεργειών	17
1.2 Ατμοσφαιρικά νετρίνα και μόνια	18
2 Τηλεσκόπια νετρίνων	20
2.1 Ανίχνευση νετρίνων	20
2.2 Υπόβαθρο σήματος στα υποθαλάσσια τηλεσκόπια νετρίνων	23
2.3 Τα βασικά τηλεσκόπια νετρίνων	25
2.3.1 Τηλεσκόπιο ANTARES	28
2.3.2 Τηλεσκόπιο ICECUBE	29
2.3.3 Τηλεσκόπιο KM3NeT	30
3 GRBNeT : Gamma Ray Burst Neutrino Telescope	32
3.1 Αρχή ανίχνευσης νετρίνων για το GRBNeT	35
3.2 Σχεδιασμός του ανιχνευτή GRBNeT	37
4 Μελέτες σκανδαλισμού ατμοσφαιρικών μιονίων	39
4.1 Γεγονότα ατμοσφαιρικών μιονίων ενέργειας μεγαλύτερης από 10 GeV	40
4.2 Γεγονότα ατμοσφαιρικών μιονίων ενέργειας μεγαλύτερης από 100 GeV	41
4.3 Γεγονότα ατμοσφαιρικών μιονίων ενέργειας μεγαλύτερης από 1 TeV	45
4.4 Γεγονότα ατμοσφαιρικών μιονίων ενέργειας μεγαλύτερης από 10 TeV	47
5 Μελέτες σκανδαλισμού γεγονότων νετρίνων αστροφυσικής προέλευσης	55
6 Διαμόρφωση του ανιχνευτή KM3NeT με την προσθήκη πρωτότυπων αυτόνομων ανιχνευτικών μονάδων	62
7 Συμπεράσματα	68

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Το παρατηρούμενο ενεργειακό φάσμα κοσμικών ακτίνων [2]	15
1.2	Σωματίδια-φορείς πληροφορίας για την αστροσωματιδιακή φυσική [4]	16
1.3	Αλληλεπίδραση πρωτονίων με περιβάλλουσα ύλη (πυρήνες και φωτόνια)	17
1.4	Ροή ατμοσφαιρικών νετρίνων και μιονίων συναρτήσει της ζενιθιακής γωνίας [7]	18
2.2	Αλληλεπιδράσεις νετρίνου ουδέτερου και φορτισμένου ρεύματος . .	21
2.3	Σχηματισμός του κώνου Cherenkov από την διάδοση φορτισμένων σωματιδίων σε μέσο με σχετικιστικές ταχύτητες	21
2.5	Τηλεσκόπιο νετρίνων της Βαϊκάλης	25
2.6	Η ανιχνευτική διάταξη του τηλεσκοπίου AMANDA	26
2.7	Σχηματική αναπαράσταση του ανιχνευτή NESTOR (αριστερά) και του ανιχνευτή NEMO (δεξιά)	27
2.8	Σχηματική αναπαράσταση του τηλεσκοπίου νετρίνων ANTARES . .	28
2.9	Ο ανιχνευτής νετρίνων IceCube	29
2.10	Κάλυψη του ουρανού σε γαλαξιακές συντεταγμένες για έναν ανιχνευτή τοποθετημένο στη Μεσόγειο και ένα στο Νότιο Πόλο. Η σκίαση δείχνει την ορατότητα ενός ανιχνευτή στη Μεσόγειο. Οι σκούρες (ανοιχτές) περιοχές είναι ορατές το λιγότερο 75% (25%) του χρόνου. Επίσης αναπαριστώνται οι τοποθεσίες των πρόσφατα παρατηρούμενων πηγών υψηλοενεργειακών ακτίνων γ [6]	30
2.11	Σχηματική αναπαράσταση του KM3NeT	31
2.12	Οπτικά στοιχεία του ανιχνευτή KM3NeT	31
3.1	Τοποθεσίες στον ουρανό όλων των GRBs που κατέγραψε η απόστολή BATSE	33
3.2	Σχηματική αναπαράσταση ενός ορόφου της αυτόνομης ανιχνευτικής μονάδας GRBNeT [16]	37
4.1	Ενεργειακό φάσμα δέσμης ατμοσφαιρικών μιονίων ενέργειας μεγαλύτερης από 10 GeV. Με μαύρο παρουσιάζεται η απόκριση του πρώτου ορόφου του ανιχνευτή ενώ με κόκκινο η απόκριση του δεύτερου ορόφου. Σε κάθε όροφο θεωρήθηκε σύμπτωση γεγονότων σε τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία με όριο αποδοχής σήματος τουλάχιστον 5 φωτονίων.	40

4.2	Το ενεργειακό φάσμα των δεσμών ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 100 GeV με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση με όριο αποδοχής 5 φωτονίων (μαύρη γραμμή), 10 φωτονίων (κόκκινη γραμμή), 20 φωτονίων (πράσινη γραμμή), 30 φωτονίων (μπλέ γραμμή) και 50 φωτονίων (φούξια γραμμή) στον πρώτο (αριστερά) και στον δεύτερο όροφο (δεξιά)	43
4.3	Το ενεργειακό φάσμα των δεσμών ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 100 GeV με τουλάχιστον 3 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση με όριο αποδοχής 5 φωτονίων (μαύρη γραμμή), 10 φωτονίων (κόκκινη γραμμή), 20 φωτονίων (πράσινη γραμμή), 30 φωτονίων (μπλέ γραμμή) και 50 φωτονίων (φούξια γραμμή) στον πρώτο (αριστερά) και στον δεύτερο όροφο (δεξιά)	44
4.4	Το ενεργειακό φάσμα των δεσμών ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 1 TeV με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση με όριο αποδοχής 20 φωτονίων (μαύρη γραμμή), 30 φωτονίων (κόκκινη γραμμή), και 50 φωτονίων (μπλέ γραμμή) στον πρώτο (αριστερά) και στον δεύτερο όροφο (δεξιά)	46
4.5	Το ενεργειακό φάσμα των δεσμών ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 1 TeV με τουλάχιστον 3 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση με όριο αποδοχής 20 φωτονίων (μαύρη γραμμή), 30 φωτονίων (κόκκινη γραμμή), και 50 φωτονίων (μπλέ γραμμή) στον πρώτο (αριστερά) και στον δεύτερο όροφο (δεξιά)	46
4.6	Το ενεργειακό φάσμα και η ζενιθιακή κατανομή των δεσμών ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10 TeV με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση με όριο αποδοχής 20 φωτονίων (μαύρη γραμμή), 30 φωτονίων (κόκκινη γραμμή), και 50 φωτονίων (μπλέ γραμμή) στον πρώτο όροφο	47
4.7	Το ενεργειακό φάσμα και η ζενιθιακή κατανομή των δεσμών ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10 TeV με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση με όριο αποδοχής 20 φωτονίων (μαύρη γραμμή), 30 φωτονίων (κόκκινη γραμμή), και 50 φωτονίων (μπλέ γραμμή) στον δεύτερο όροφο	48
4.8	Το ενεργειακό φάσμα και η ζενιθιακή κατανομή των δεσμών ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10 TeV με τουλάχιστον 3 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση με όριο αποδοχής 20 φωτονίων (μαύρη γραμμή), 30 φωτονίων (κόκκινη γραμμή), και 50 φωτονίων (μπλέ γραμμή) στον πρώτο όροφο	48
4.9	Το ενεργειακό φάσμα και η ζενιθιακή κατανομή των δεσμών ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10 TeV με τουλάχιστον 3 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση με όριο αποδοχής 20 φωτονίων (μαύρη γραμμή), 30 φωτονίων (κόκκινη γραμμή), και 50 φωτονίων (μπλέ γραμμή) στον δεύτερο όροφο	49
4.10	Το ενεργειακό φάσμα και η ζενιθιακή κατανομή των δεσμών ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10 TeV με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση με όριο αποδοχής 20 φωτονίων (μαύρη γραμμή), 30 φωτονίων (κόκκινη γραμμή), και 50 φωτονίων (μπλέ γραμμή) ταυτόχρονα και στους δύο ορόφους	49

- 4.11 Το ενεργειακό φάσμα και η ζενιθιακή κατανομή των δεσμών ατμοσφαιρικών μονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10 TeV με τουλάχιστον 3 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση με όριο αποδοχής 20 φωτονίων (μαύρη γραμμή), 30 φωτονίων (κόκκινη γραμμή), και 50 φωτονίων (μπλέ γραμμή) ταυτόχρονα και στους δύο ορόφους . . . 50
- 4.12 Ο λόγος των γεγονότων ατμοσφαιρικών μονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10 TeV με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση, με όριο αποδοχής 50 φωτονίων (μαύρη γραμμή), 20 φωτονίων (κόκκινη γραμμή) ως προς τα γεγονότα με σύμπτωση τουλάχιστον 2 οπτικών στοιχείων με όριο αποδοχής 5 φωτονίων για τον πρώτο όροφο . . . 50
- 4.13 Ο λόγος των γεγονότων ατμοσφαιρικών μονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 1 TeV με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση, με όριο αποδοχής 50 φωτονίων (μαύρη γραμμή), 20 φωτονίων (κόκκινη γραμμή) ως προς τα γεγονότα με σύμπτωση τουλάχιστον 2 οπτικών στοιχείων με όριο αποδοχής 5 φωτονίων για τον πρώτο όροφο . . . 51
- 4.14 Το ενεργειακό φάσμα των δεσμών ατμοσφαιρικών μονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10 TeV με 1 οπτικό στοιχείο (μαύρη γραμμή), 2 οπτικά στοιχεία (κόκκινη γραμμή), 3 οπτικά στοιχεία (πράσινη γραμμή) και 4 οπτικά στοιχεία (μπλέ γραμμή) σε σύμπτωση με όριο αποδοχής 20 φωτονίων στον πρώτο όροφο 51
- 4.15 Το ενεργειακό φάσμα και η ζενιθιακή κατανομή των γεγονότων των δεσμών ατμοσφαιρικών μονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10 TeV με τουλάχιστον 2 οπτικά σε σύμπτωση με όριο αποδοχής σήματος τουλάχιστον 20 φωτονίων για τον πρώτο (μαύρη γραμμή), δεύτερο (κόκκινη γραμμή) και τους δύο ορόφους (μπλέ γραμμή) . . 52
- 4.16 Το ενεργειακό φάσμα γεγονότων των δεσμών ατμοσφαιρικών μονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 1 TeV (αριστερά) και 10 TeV (δεξιά) με χρήση 2 οπτικών στοιχείων σε κάθε όροφο (μαύρη γραμμή), 5 συνολικά οπτικών στοιχείων και στους δύο ορόφους (κόκκινη γραμμή) και 3 οπτικών στοιχείων σε κάθε όροφο (μπλέ γραμμή) με όριο αποδοχής σήματος τουλάχιστον 20 φωτονίων 53
- 4.17 Το ενεργειακό φάσμα γεγονότων των δεσμών ατμοσφαιρικών μονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10 TeV με σύμπτωση τουλάχιστον 2 οπτικών στοιχείων με όριο αποδοχής σήματος τουλάχιστον 20 φωτονίων στον πρώτο όροφο (αριστερά) και τον δεύτερο όροφο (δεξιά). Η σύμπτωση του 1^{ου} με το 2^ο οπτικό στοιχείο αναπαριστάται με μαύρη γραμμή, του 1^{ου} με το 3^ο οπτικό στοιχείο αναπαριστάται με κόκκινη γραμμή, του 1^{ου} με το 4^ο οπτικό στοιχείο αναπαριστάται με μπλέ γραμμή, του 2^{ου} με το 3^ο οπτικό στοιχείο αναπαριστάται με φούξια γραμμή, του 2^{ου} με το 4^ο οπτικό στοιχείο αναπαριστάται με πράσινη γραμμή και του 3^{ου} με το 4^ο οπτικό στοιχείο αναπαριστάται με γκρι γραμμή 54

4.18	Οι λόγοι των γεγονότων των ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες των 10 TeV με σύμπτωση τουλάχιστον 2 οπτικών στοιχείων με όριο απόδοχής τουλάχιστον 20 φωτονίων στον πρώτο (αριστερά) και τον δεύτερο όροφο (δεξιά) μεταξύ του οπτικού στοιχείου με τα περισσότερα γεγονότα και του δεύτερου στοιχείου με τα αμέσως λιγότερα γεγονότα (μαύρη γραμμή), του οπτι-κού στοιχείου με τα περισσότερα γεγονότα με το τρίτο στοιχείο με τα αμέσως λιγότερα γεγονότα (μπλέ γραμμή) και του οπτικού στοιχείου με τα περισσότερα γεγονότα με το διαγώνιο του οπτικό στοιχείο (κόκκινη γραμμή) ως προς τα γεγονότα σε σύμπτωση τουλάχιστον 2 οπτικών στοιχείων στον ίδιο όροφο.	54
5.1	Το ενεργειακό φάσμα γεγονότων νετρίνων σε τουλάχιστον 1 οπτικό στοιχείο με όριο αποδοχής τουλάχιστον 5 (μαύρη γραμμή) και 20 φωτονίων (κόκκινη γραμμή) για κάθε όροφο συγκρίνεται με το ενεργειακό φάσμα γεγονότων νετρίνων με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση στον ίδιο όροφο (πρώτος αριστερά και δεύτερος δεξιά) για όριο αποδοχής σήματος τουλάχιστον 5 (πράσινη γραμμή) και 20 φωτονίων (μπλέ γραμμή)	56
5.2	Το ενεργειακό φάσμα γεγονότων νετρίνων με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση με όριο αποδοχής τουλάχιστον 5 (πράσινη γραμμή) και 20 φωτονίων (μπλέ γραμμή) για κάθε όροφο συγκρίνεται με το ενεργειακό φάσμα γεγονότων νετρίνων με τουλάχιστον 3 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση στον ίδιο όροφο (πρώτος αριστερά και δεύτερος δεξιά) για όριο αποδοχής σήματος τουλάχιστον 5 (φούξια γραμμή) και 20 φωτονίων (κυανή γραμμή)	57
5.3	Ο λόγος των γεγονότων νετρίνων με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση στον πρώτο όροφο, με όριο αποδοχής 50 φωτονίων (μαύρη γραμμή) και 20 φωτονίων (κόκκινη γραμμή) ως προς τα γεγονότα με σύμπτωση τουλάχιστον 2 οπτικών στοιχείων με όριο αποδοχής 5 φωτονίων συναρτήσει της ενέργειας μιονίων (αριστερά) και της ζενιθιακής γωνίας (δεξιά)	57
5.4	Ο λόγος των γεγονότων νετρίνων με τουλάχιστον 3 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση στον πρώτο όροφο, με όριο αποδοχής 50 φωτονίων (μαύρη γραμμή) και 20 φωτονίων (κόκκινη γραμμή) ως προς τα γεγονότα με σύμπτωση τουλάχιστον 2 οπτικών στοιχείων με όριο αποδοχής 5 φωτονίων συναρτήσει της ενέργειας μιονίων (αριστερά) και της ζενιθιακής γωνίας (δεξιά)	58
5.5	Ο αριθμός των γεγονότων νετρίνων με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση με όριο αποδοχής σήματος τουλάχιστον 20 φωτονίων συναρτήσει του λογαρίθμου της ενέργειας των νετρίνων για τον πρώτο (μαύρη γραμμή), δεύτερο (κόκκινη γραμμή) και τους δύο ορόφους (μπλέ γραμμή)	60

5.6	Ο αριθμός των γεγονότων νετρίνων με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε κάθε όροφο (μαύρη γραμμή), 3 οπτικά στοιχεία σε κάθε όροφο (μπλέ γραμμή) και 5 συνολικά οπτικά στοιχεία και στους δύο ορόφους (κόκκινη γραμμή) σε σύμπτωση με όριο αποδοχής σήματος τουλάχιστον 20 φωτονίων συναρτήσει του λογαρίθμου της ενέργειας των νετρίνων	60
6.1	Επέκταση του ανιχνευτή KM3NeT για αυξημένη ανιχνευτική ικανότητα γεγονότων νετρίνων από εκλάμψεις ακτίνων γάμμα	62
6.2	Η ενεργός περιοχή συναρτήσει του λογαρίθμου της ενέργειας νετρίνων για τη γεωμετρία του ανιχνευτή KM3NeT (μαύρη γραμμή), της επαυξημένης γεωμετρίας με τα 6 οπτικά στοιχεία σε κάθε string (κόκκινη γραμμή) και της πλήρους επαυξημένης γεωμετρίας (μπλέ γραμμή) με απαίτηση να έχουμε τουλάχιστον 8 παλμούς L1 σε τουλάχιστον 2 διαφορετικά strings σε κάθε ανιχνευτή	64
6.3	Ο λόγος της ενεργού περιοχής του ανιχνευτή επαυξημένης γεωμετρίας με τα 6 οπτικά στοιχεία σε κάθε επιπλέον string ως προς την ενεργό περιοχή του KM3NeT (κόκκινη γραμμή) και ο λόγος της ενεργού περιοχής του ανιχνευτή της πλήρους επαυξημένης γεωμετρίας ως προς την ενεργό περιοχή του KM3NeT (μαύρη γραμμή) με απαίτηση να έχουμε τουλάχιστον 8 παλμούς L1 σε τουλάχιστον 2 διαφορετικά strings σε κάθε ανιχνευτή	64
6.4	Η ενεργός περιοχή συναρτήσει του λογαρίθμου της ενέργειας νετρίνων για τη γεωμετρία του ανιχνευτή KM3NeT (μαύρη γραμμή), της επαυξημένης γεωμετρίας με τα 6 οπτικά στοιχεία σε κάθε string (κόκκινη γραμμή) και της πλήρους επαυξημένης γεωμετρίας (μπλέ γραμμή) των ανακατασκευασμένων γεγονότων	65
6.5	Η ενεργός περιοχή συναρτήσει του λογαρίθμου της ενέργειας νετρίνων για τη γεωμετρία του ανιχνευτή KM3NeT (μαύρη γραμμή), της επαυξημένης γεωμετρίας με τα 6 οπτικά στοιχεία σε κάθε string (κόκκινη γραμμή) και της πλήρους επαυξημένης γεωμετρίας (μπλέ γραμμή) για σύμπτωση παλμών L1 μεταξύ τουλάχιστον 12 οπτικών στοιχείων σε τουλάχιστον 2 strings	66
6.6	Ο λόγος της ενεργού περιοχής του ανιχνευτή επαυξημένης γεωμετρίας με τα 6 οπτικά στοιχεία σε κάθε επιπλέον string ως προς την ενεργό περιοχή του KM3NeT (κόκκινη γραμμή) και ο λόγος της ενεργού περιοχής του ανιχνευτή της πλήρους επαυξημένης γεωμετρίας ως προς την ενεργό περιοχή του KM3NeT (μαύρη γραμμή) για τα γεγονότα "αυστηρών" κριτηρίων σε επίπεδο παλμών L1	66
6.7	Η ενεργός περιοχή συναρτήσει του λογαρίθμου της ενέργειας νετρίνων κοσμικής προέλευσης για τη γεωμετρία του ανιχνευτή KM3NeT (μαύρη γραμμή), της επαυξημένης γεωμετρίας με τα 6 οπτικά στοιχεία σε κάθε string (κόκκινη γραμμή) και της πλήρους επαυξημένης γεωμετρίας (μπλέ γραμμή)	67

6.8 Η ενεργός περιοχή συναρτήσει του λογαρίθμου της ενέργειας νετρίνων από εκλάμψεις ακτίνων γάμμα για τη γεωμετρία του ανιχνευτή KM3NeT (μαύρη γραμμή), της επαυξημένης γεωμετρίας με τα 6 οπτικά στοιχεία σε κάθε string (κόκκινη γραμμή) και της πλήρους επαυξημένης γεωμετρίας (μπλέ γραμμή) 67

Κατάλογος Πινάκων

4.1	Ο αριθμός των γεγονότων που αναμένονται ανά ημέρα από ατμοσφαιρικά μίονια με ενέργεια δέσμης μεγαλύτερης των 100 GeV και με ενέργεια μεταξύ 100 GeV και 1 TeV, με χρονική σύμπτωση μεταξύ τουλάχιστον 2 οπτικών στοιχείων σε κάθε όροφο	41
4.2	Ο αριθμός των γεγονότων που αναμένονται ανά ημέρα από ατμοσφαιρικά μίονια με ενέργεια δέσμης μεγαλύτερης των 100 GeV και με ενέργεια μεταξύ 100 GeV και 1 TeV, με χρονική σύμπτωση μεταξύ τουλάχιστον 3 οπτικών στοιχείων σε κάθε όροφο	42
4.3	Ο αριθμός των γεγονότων που αναμένονται ανά μέρα από ατμοσφαιρικά μίονια με ενέργεια δέσμης μεγαλύτερης των 100 GeV και με ενέργεια μεταξύ 100 GeV και 1 TeV, με χρονική σύμπτωση μεταξύ τουλάχιστον 2 και 3 οπτικών στοιχείων και στους δύο ορόφους	42
4.4	Ο αριθμός των γεγονότων που αναμένονται ανά μέρα από ατμοσφαιρικά μίονια με ενέργεια δέσμης μεγαλύτερη του 1 TeV και με ενέργεια μεταξύ 1 TeV και 10 TeV, με χρονική σύμπτωση μεταξύ τουλάχιστον 2 οπτικών στοιχείων	45
4.5	Ο αριθμός των γεγονότων που αναμένονται ανά μέρα από ατμοσφαιρικά μίονια με ενέργεια δέσμης μεγαλύτερη του 1 TeV και με ενέργεια μεταξύ 1 TeV και 10 TeV, με χρονική σύμπτωση μεταξύ τουλάχιστον 3 οπτικών στοιχείων	45
5.1	Ο λόγος των γεγονότων που αναμένονται σε χρονική σύμπτωση για διαφορετικού αριθμού σύμπτωση οπτικών στοιχείων με διαφορετικά όρια αποδοχής σήματος ως προς τα γεγονότα νετρίνων τα οποία μπορούν να ανιχνευθούν από την αυτόνομη ανιχνευτική μονάδα	59
5.2	Η συνεισφορά των υψηλής ενέργειας γεγονότων νετρίνων προς τον συνολικό αριθμό γεγονότων που αναμένεται να ικανοποιούν διαφορετικές απαιτήσεις στην σύμπτωση οπτικών στοιχείων και στο όριο αποδοχής	59

Κεφάλαιο 1

Εισαγωγή

Η Αστρονομία είναι μία από τις αρχαιότερες επιστήμες. Οι πρώτοι πολιτισμοί, όπως οι Βαβυλώνιοι, οι Έλληνες, οι Ινδοί, οι Αιγύπτιοι, οι Ιρανοί, οι Κινέζοι, και οι Μάγιας πραγματοποιούσαν μεθοδικές παρατηρήσεις του νυχτερινού ουρανού. Ιστορικά, η αστρονομία έχει συμπεριλάβει διαφορετικούς κλάδους όπως αστρομετρία, ουράνια πλοήγηση και παρατηρησιακή αστρονομία.

Κατά τη διάρκεια του 20^{ου} αιώνα, το πεδίο της επαγγελματικής αστρονομίας χωρίζεται σε παρατηρησιακό και θεωρητικό κλάδο. Η παρατηρησιακή αστρονομία επικεντρώνεται στην απόκτηση δεδομένων από τις παρατηρήσεις των αστρονομικών αντικειμένων, τα οποία στη συνέχεια αναλύονται χρησιμοποιώντας τις βασικές αρχές της φυσικής. Η θεωρητική αστρονομία είναι προσανατολισμένη προς την ανάπτυξη αναλυτικών μοντέλων για τη περιγραφή αστρονομικών αντικειμένων και φαινομένων. Οι δύο τομείς αλληλοσυμπληρώνονται, με τη θεωρητική αστρονομία να επιδιώκει να εξηγήσει τα παρατηρησιακά αποτελέσματα και τη παρατηρησιακή να χρησιμοποιείται για να επιβεβαιώσει τα θεωρητικά μοντέλα.

Σήμερα, η γνώση των αστρονόμων για το σύμπαν και τα αντικείμενα που το αποτελούν αυξάνεται διαρκώς χάρη στη σημαντική βελτίωση των τεχνικών παρατήρησης του. Έτσι, η παρατήρηση φωτονίων στα οπτικά μήκη κύματος, που ήταν ο μόνος διαθέσιμος τρόπος παρατήρησης του ουρανού κατά τη διάρκεια του 20ού αιώνα, αντικαταστάθηκε από την ανάπτυξη τεχνικών παρατήρησης σε διάφορα μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, στις περιοχές των ραδιοκυμάτων, του υπέρυθρου, του οπτικού, του υπεριώδους, των ακτίνων X και των ακτίνων γ. Όμως, παρά τη σημαντική συνεισφορά του φωτονίου, ως φορέα πληροφορίας, στην αστρονομία υπήρχαν ορισμένοι περιορισμοί. Πολλά αντικείμενα όπως οι Σουπερνόβα (Supernovae) ή οι Ενεργοί Γαλαξιακοί Πυρήνες (Active Galactic Nuclei) ήταν δύσκολο να μελετηθούν καθώς ήταν αδιαφανή για τα φωτόνια. Επιπλέον, τα φωτόνια δεν αποτελούν καλούς φορείς “πληροφορίας” για τις υψηλές ενέργειες καθώς η ροή τους είναι μικρή και οι αλληλεπιδράσεις τους με την ατμόσφαιρα καθιστούν πολύ δύσκολο τον προσδιορισμό της κατεύθυνσης από την οποία προέρχονται. Το πρόβλημα παρατήρησης είναι εμφανές στις περιοχές πολύ υψηλών ενεργειών (μεγαλύτερες από 100 TeV) καθώς τα φωτόνια αλληλεπιδρούν με το κοσμικό υπόβαθρο στις περιοχές του υπε-

ρόθρου και των μικροκυμάτων με αποτέλεσμα τη μείωση της ροής σε σχέση με την ενέργειά τους.

Μια πρώτη προσπάθεια για να λυθεί το πρόβλημα της παρατήρησης των στοιχείων του ουρανού, η οποία συντέλεσε στην ανάπτυξη του κλάδου της αστροφυσικής, έγινε το 1912 με την ανακάλυψη των κοσμικών ακτίνων από τον Victor Hess. Οι κοσμικές ακτίνες (CRS) είναι υψηλής ενέργειας πρωτόνια ή βαρείς πυρήνες που εισέρχονται στην ατμόσφαιρα της Γης με ισοτροπική ροή. Το ενεργειακό τους φάσμα περιλαμβάνει περίπου 10 τάξεις μεγέθους και φτάνει έως και τα 300 EeV. Για ενέργειες μικρότερες από 10 TeV, η ροή των κοσμικών ακτίνων είναι αρκετά έντονη ώστε μπορεί να μετράται από μικρούς ανιχνευτές εγκαταστημένους σε δορυφόρους και αερόστατα. Η μικρή ροή των κοσμικών ακτίνων για μεγαλύτερες ενέργειες (>10 TeV) μετράται από ανιχνευτές που καλύπτουν πολλά τετραγωνικά χιλιόμετρα στην επιφάνεια της Γης. Η μέτρηση της ενέργειας των υψηλοενεργειακών σωματιδίων της κοσμικής ακτινοβολίας γίνεται εμμέσως με παρατήρηση των καταιονισμών που προκαλούνται από την αλληλεπίδραση τους με ατομικούς πυρήνες στα ανώτερα στρώματα της ατμόσφαιρας. Στις υψηλότερες ενέργειες (>1 EeV) η πολύ μικρή ροή απαιτεί την χρήση ανιχνευτών που καλύπτουν εκτάσεις μεγαλύτερες από 100 km^2 [1].

Το φάσμα των κοσμικών ακτίνων περιγράφεται ικανοποιητικά από τον εκθετικό νόμο μορφής :

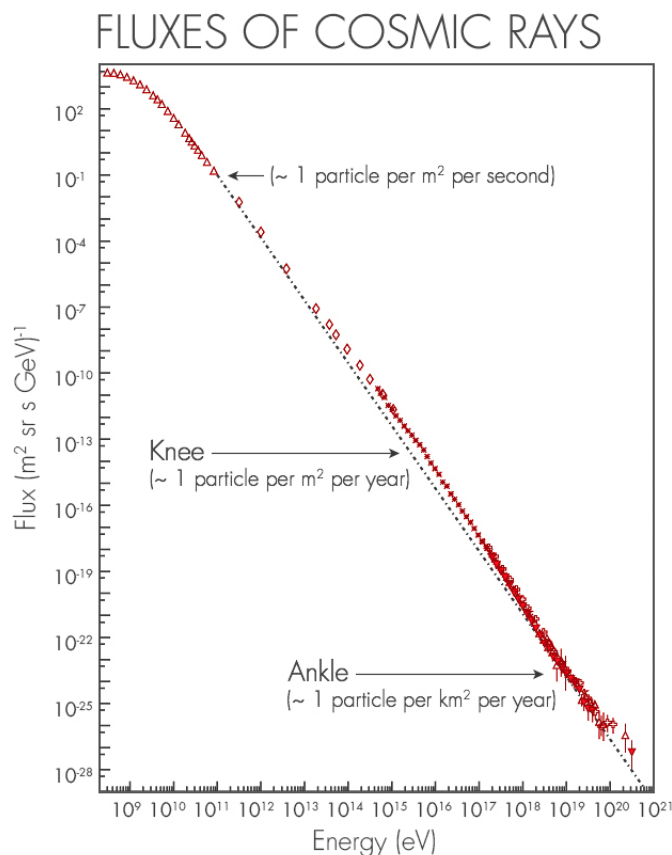
$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma} \quad (1.1)$$

όπου ο φασματικός δείκτης γ ισούται με :

$$\begin{aligned} \gamma &\approx 2.7 & E < E_{knee} &= 4.5 \times 10^{15} \text{ eV} \\ \gamma &\approx 3.0 & E_{knee} < E < E_{secondknee} &= 4.5 \times 10^{17} \text{ eV} \\ \gamma &\approx 2.7 & E_{secondknee} < E < E_{ankle} &= 10^{19} \text{ eV} \end{aligned}$$

Στο γαλαξιακό μαγνητικό πεδίο τα πρωτόνια με ενέργειες έως 10^{18} eV έχουν ακτίνα Larmor μικρότερη του μεγέθους του Γαλαξία και μένουν δέσμη σε αυτόν. Σαν αποτέλεσμα, σε ενέργειες μεγαλύτερες έως και την ενέργεια "γόνατος" οι κοσμικές ακτίνες έχουν ενδογαλαξιακή προέλευση. Με βάση μια σειρά θεωρητικών μοντέλων το "γόνατο" ορίζει την περιοχή στην οποία η σύνθεση των κοσμικών ακτίνων αλλάζει σταδιακά από ελαφρείς σε βαρείς πυρήνες. Αυτοί οι βαρείς πυρήνες έχουν μεγαλύτερα φορτία και κατά συνέπεια χρειάζεται να επιταχυνθούν σε υψηλότερες ενέργειες για να αποκτήσουν την ίδια ακτίνα με αυτή των πρωτονίων. Για ενέργειες μεγαλύτερες των 10^{18} eV ο εξωγαλαξιακός παράγοντας σταδιακά κυριαρχεί οδηγώντας σε πιο απότομο φάσμα κοσμικών ακτίνων. Η στατιστική για ενέργειες μεγαλύτερες των 10^{20} eV είναι πολύ περιορισμένη και δεν συμβαδίζει με τις υπάρχουσες θεωρίες.

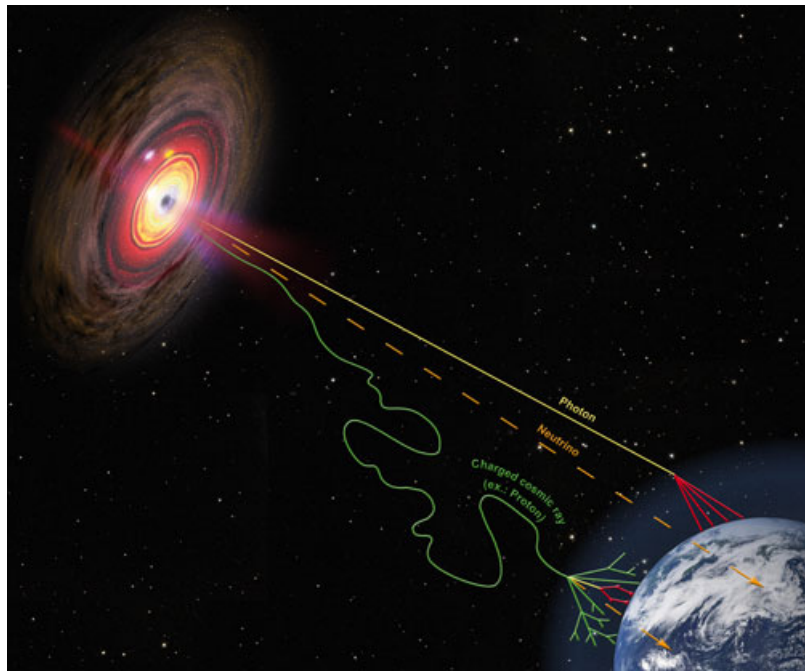
Πολλά πειράματα έχουν διεξαχθεί για την μελέτη των κοσμικών ακτίνων. Τα πειράματα αυτά διεξήχθησαν είτε με τη χρήση ανιχνευτών σε αερόστατα και δορυφόρους είτε με τη παρατήρηση από επίγειους ανιχνευτές. Στη πρώτη περίπτωση, πραγματοποιούνται απευθείας μετρήσεις σωματιδίων κοσμικών ακτίνων, οι οποίες περιορίζονται εξαιτίας της σημαντικής μείωσης της ροής των



Σχήμα 1.1: Το παρατηρούμενο ενεργειακό φάσμα κοσμικών ακτίνων [2]

σωματιδίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10^{15} eV καθώς και της μικρής επιφάνειας των αερόστατων και δορυφόρων (Voyager 1 / 2, BESS, TIGER) [3]. Στη δεύτερη περίπτωση, ανιχνευτές τοποθετούνται σε μια μεγάλη επιφάνεια της Γης με στόχο τη μελέτη των καταιονισμών που δημιουργούνται στην ατμόσφαιρα, όταν σωματίδια κοσμικών ακτίνων "συγκρουστούν" με τους πυρήνες που υπάρχουν σε αυτήν. Οι καταιονισμοί ηλεκτρομαγνητικού και αδρονικού χαρακτήρα μέσω της ανίχνευσης και μελέτης των σωματιδίων που περιέχουν, αντισταθμίζουν την αδυναμία της απευθείας μέτρησης των κοσμικών ακτίνων από το έδαφος.

Η παρατήρηση των σωματιδίων των κοσμικών ακτίνων δεν παρέχει πληροφορία για τη διεύθυνση της τροχιάς τους και τον προσδιορισμό των πηγών από τις οποίες προέρχονται, καθώς οι τροχιές των πρωτονίων, των πυρήνων και άλλων φορτισμένων σωματιδίων επηρεάζονται από τα διαγαλαξιακά μαγνητικά πεδία με αποτέλεσμα να μεταβάλλεται η αρχική τους κατεύθυνση. Επιπλέον, η ροή των σωματιδίων πολύ υψηλών ενεργειών, που μένουν ανεπηρέαστα από τα μαγνητικά πεδία είναι μικρή, ενώ τα σωματίδια αυτά προέρχονται από εξωγαλαξιακές πηγές. Επομένως, για την αναζήτηση των "επιταχυντικών πηγών" των σωματιδίων κοσμικών ακτίνων είναι απαραίτητη η χρήση άλλων σωματιδίων τα οποία θα μεταφέρουν περισσότερη πληροφορία για την προέλευση τους.

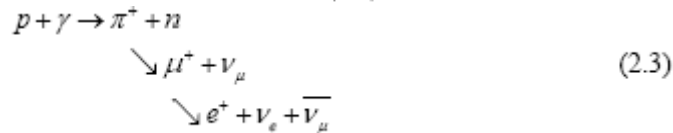
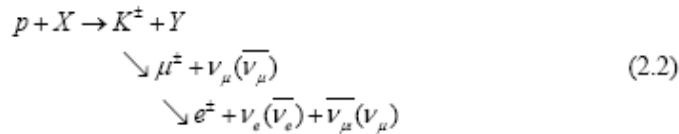
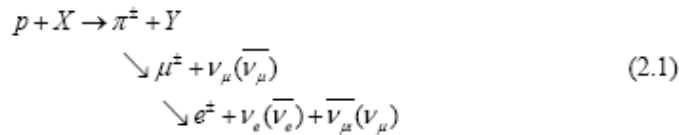


Σχήμα 1.2: Σωματίδια-φορείς πληροφορίας για την αστροσωματιδιακή φυσική [4]

1.1 Νετρίνα υψηλών ενεργειών

Τα νετρίνα είναι ηλεκτρικά ουδέτερα λεπτόνια τα οποία αλληλεπιδρούν μέσω της ασθενούς και της βαρυτικής αλληλεπίδρασης. Αυτή είναι μια ιδιότητα που τα κάνει ξεχωριστούς φορείς "κοσμικής πληροφορίας", σε αντίθεση με τα φορτισμένα σωματίδια, καθώς διαδίδονται στο Σύμπαν χωρίς να απορροφώνται ή να εκτρέπονται από την διαστρική ύλη ή από τα μαγνητικά πεδία παρά μόνο από το ασθενές βαρυτικό πεδίο του Γαλαξιακού και διαγαλαξιακού χώρου. Έτσι τα νετρίνα μπορούν να μας δώσουν πληροφορία για το σημείο παραγωγής τους. Η ασθενής αλληλεπίδραση τους με την ύλη ωστόσο καθιστά εξαιρετικά δύσκολη την ανίχνευση τους.

Έχει παρατηρηθεί εδώ και μισό αιώνα ότι πρωτόνια από κοσμικούς επιταχυντές παράγουν νετρίνα, μέσω φορτισμένων μεσονίων (κυρίως πιονίων) τα οποία συγκρούονται με την περιβάλλουσα ύλη και τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία. Τα μεσόνια έχοντας μικρή διάρκεια ζωής διασπώνται σε μόνια και ηλεκτρόνια με αντιδράσεις όπως :

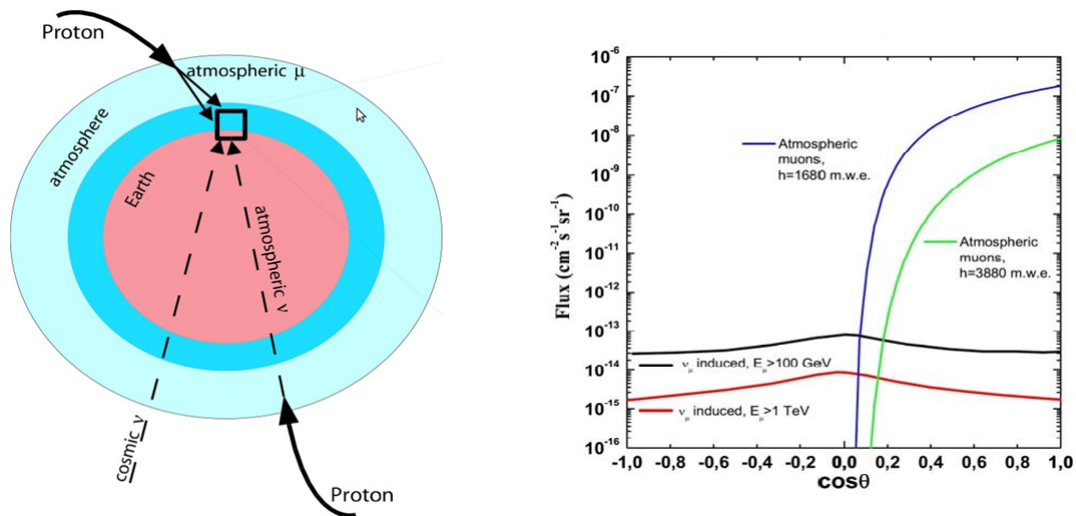


Σχήμα 1.3: Αλληλεπίδραση πρωτονίων με περιβάλλουσα ύλη (πυρήνες και φωτόνια)

Οι σχετικές εντάσεις της ροής των διαφορετικών ειδών νετρίνων είναι στενά συνδεδεμένες με τον μηχανισμό παραγωγής και διάδοσης των νετρίνων. Εντούτοις, ο λόγος των αναμενόμενων ροών για τα τρία γνωστά είδη των νετρίνων μπορεί να προβλεφθεί με καλή ακρίβεια. Μετρώντας τον αριθμό των νετρίνων στις αλληλεπιδράσεις που περιγράφονται από τις σχέσεις (2.1, 2.2, 2.3), βρίσκουμε ότι ο λόγος των ροών είναι: $N_{\nu_e} : N_{\nu_{\mu}} : N_{\nu_{\tau}} = 1 : 2 : 0$, ενώ μεταβολή αυτού του λόγου μπορεί να προέλθει από τη δυνατότητα ταλαντώσεων των νετρίνων κατά τη διάδοσή τους. Στην πηγή παραγωγής και επιτάχυνσης των κοσμικών πρωτονίων, το υλικό του στόχου αποτελείται από UV ή X-rays ή από αδρόνια. Από τις αλληλεπιδράσεις των πρωτογενών πρωτονίων με το υλικό του στόχου δημιουργούνται κυρίως πιόνια και σε μικρότερη έκταση καόνια. Η διάσπαση των φορτισμένων πιονίων και καονίων έχει ως συνέπεια την παραγωγή ροής νετρίνων. Τα ουδέτερα πιόνια διασπώνται ηλεκτρομαγνητικά σε δύο φωτόνια, και έτσι συνεισφέρουν στο υψηλοενεργειακό φάσμα ακτινών γ από την πηγή.

1.2 Ατμοσφαιρικά νετρίνα και μίονια

Τα ατμοσφαιρικά νετρίνα δημιουργούνται από καταιονισμούς που προκαλούνται από τις κοσμικές ακτίνες στην ατμόσφαιρα της Γης. Μεταξύ των σωματιδίων που παράγονται στους καταιονισμούς μόνο τα νετρίνα και τα μίονια μπορούν να φτάσουν στα υποθαλάσσια τηλεσκόπια νετρίνων. Τα ατμοσφαιρικά μίονια απορροφώνται από την Γη με αποτέλεσμα να μπορούν να φτάσουν στον ανιχνευτή μόνο από "πάνω" και όχι διαμέσου της Γης. Ωστόσο, εξαιτίας της αφθονίας τους εξακολουθούν να αποτελούν το βασικό παράγοντα υποβάθρου του σήματος στον ανιχνευτή όπως φαίνεται στο επόμενο διάγραμμα :



Σχήμα 1.4: Ροή ατμοσφαιρικών νετρίνων και μιονίων συναρτήσει της ζενιθιακής γωνίας [7]

Με σκοπό να μειώσουμε το υπόβαθρο από τα ατμοσφαιρικά μίονια, τα υποθαλάσσια τηλεσκόπια νετρίνων ποντίζονται σε βάθη πολλών χιλιομέτρων καθώς η ροή των ατμοσφαιρικών μιονίων μειώνεται σημαντικά με την αύξηση της μάζας νερού. Σε αντίθεση με τα ατμοσφαιρικά μίονια, τα ατμοσφαιρικά νετρίνα φτάνουν στον ανιχνευτή από όλες τις κατευθύνσεις αλλά ανιχνεύονται λιγότερο συχνά εξαιτίας της ασθενούς αλληλεπίδρασης τους με την ύλη. Τα ατμοσφαιρικά νετρίνα αποτελούν ένα σχεδόν αμείωτο υπόβαθρο καθώς τα ξεχωρίζουμε από τα αστροφυσικά νετρίνα κυρίως από το ενεργειακό τους φάσμα. Τα ατμοσφαιρικά νετρίνα έχουν ένα πιο ήπιο ενεργειακό φάσμα, ενώ τα αστροφυσικά νετρίνα φτάνουν μέχρι υψηλότερες ενέργειες.

Η ροή ατμοσφαιρικών νετρίνων αποτελείται από δύο συνιστώσες, την συμβατική, η οποία κυριαρχεί στις χαμηλές ενέργειες του φάσματος και την ταχεία, η οποία συνεισφέρει στη ροή σε υψηλότερες ενέργειες. Η συμβατική ροή νετρίνων αφορά τις διασπάσεις καονίων και φορτισμένων πιονίων κατά την αλληλεπίδραση τους με τα μόρια του αέρα.

Αυτή η ροή νετρίνων διαφέρει από την αυθεντική αστροφυσική ροή νετρίνων καθώς το ενεργειακό φάσμα είναι πιο απότομο (φτάνοντας περίπου $E^{-3.7}$) ενώ η ροή ενισχύεται προς τον ορίζοντα [8]. Η δεύτερη συνιστώσα της ροής των ατμοσφαιρικών νετρίνων οφείλεται σε διασπάσεις βαρέων, μικρής ζωής αδρονίων τα οποία περιέχουν charm ή bottom κουάρκ. Αυτά τα αδρόνια διασπώνται πριν προλάβουν να αλληλεπιδράσουν, δίνοντας την πιο απότομη συνιστώσα της ροής των ατμοσφαιρικών νετρίνων. Αυτή η ροή αναμένεται να ακολουθεί πιο στενά το φάσμα των κοσμικών ακτίνων, καθώς το ενεργειακό φάσμα φτάνει περίπου $E^{-2.7}$ με ισοτροπική ζενιθιακή κατανομή.

Κεφάλαιο 2

Τηλεσκόπια νετρίνων

Η ανίχνευση νετρίνων με τη χρήση υποθαλάσσιων τηλεσκοπίων βασίζεται στην ανίχνευση φωτός που εκπέμπεται κατά την διέλευση σωματιδίων που προέρχονται από νετρίνα στο νερό. Η αρχή ανίχνευσης των τηλεσκοπίων νετρίνων, οι αλληλεπιδράσεις νετρίνων με την Γη ή το θαλασσινό νερό και τα χαρακτηριστικά γεγονότα τα οποία ανιχνεύονται στα τηλεσκόπια νετρίνων περιγράφονται στις ακόλουθες ενότητες. Επιπλέον, περιγράφεται το βασικό υπόβαθρο για τα τηλεσκόπια αυτά και γίνεται μια σύντομη επισκόπηση στα υφιστάμενα τηλεσκόπια νετρίνων στο νερό και τον πάγο.

2.1 Ανίχνευση νετρίνων

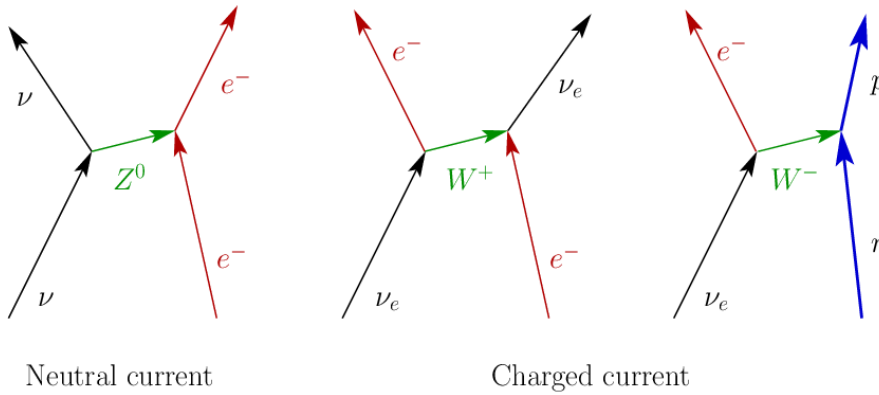
Το νετρίνο είναι ένα λεπτόνιο, πολύ μικρής μάζας και ηλεκτρικά ουδέτερο, που αλληλεπιδρά μόνο μέσω ασθενών και βαρυτικών αλληλεπιδράσεων, γεγονός που καθιστά την άμεση ανίχνευσή του δύσκολη, εξαιτίας των μικρών ενεργών διατομών των αντιδράσεών του με την ύλη. Επίσης, η ενεργός διατομή της αλληλεπίδρασης του εξαρτάται από την ενέργεια του αρχικού νετρίνου, γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στην κατασκευή τηλεσκοπίων νετρίνων. Οι αλληλεπιδράσεις των νετρίνων, στα πλαίσια του καθιερωμένου προτύπου, πραγματοποιούνται μόνο με ανταλλαγή Z και W μποζονίων βαθμίδος. Οι ανελαστικές αλληλεπιδράσεις ουδέτερου (Neutral Current) και φορτισμένου (Charged Current) ρεύματος του νετρίνου με τα νουκλεόνια παριστάνονται από τις αντιδράσεις:

$$\nu + N \rightarrow \nu + X.$$

$$\nu_l + N \rightarrow l + X.$$

όπου l αναπαριστά την γεύση του νετρίνου, $l = e, \mu, \tau$ και X είναι η τελική αδρονική κατάσταση.

Η αρχική ιδέα για την κατασκευή τηλεσκοπίων νετρίνων ανήκει στους Markov και Zheleznykh, οι οποίοι το 1961, πρότειναν την χρήση βαθέων λιμνών ή της θάλασσας ως μέσο ανίχνευσης δευτερογενών σωματιδίων (συγκεκριμένα μιονίων)

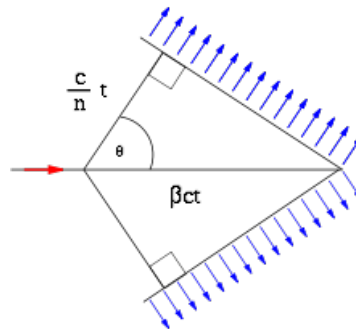


Σχήμα 2.2: Αλληλεπιδράσεις νετρίνου ουδέτερου και φορτισμένου ρεύματος

που δημιουργούνται στις αλληλεπιδράσεις φορτισμένων σωματιών των υψηλής ενέργειας νετρίνων με την Γη. Αυτά τα δευτερεύοντα σωματίδια ταξιδεύουν με σχετικιστικές ταχύτητες μέσα στο νερό και εκπέμπουν φωτόνια σε χαρακτηριστική γωνία σχηματίζοντας έναν κώνο φωτός, τον κώνο Cherenkov. Η γωνία Cherenkov θα δίνεται από τη σχέση :

$$\theta = \arccos \frac{1}{\beta n} \quad (2.1)$$

όπου β η ταχύτητα του σωματιδίου στο μέσο και n ο δείκτης διάθλασης του μέσου (νερού).



Σχήμα 2.3: Σχηματισμός του κώνου Cherenkov από την διάδοση φορτισμένων σωματιδίων σε μέσο με σχετικιστικές ταχύτητες

Λόγω της πολύ μικρής πιθανότητας αλληλεπίδρασης, είναι απαραίτητη η χρήση πολύ μεγάλου ανιχνευτικού όγκου για την ανίχνευση υψηλοενεργειακών νετρίνων. Για αυτό το λόγο χρησιμοποιούνται περιοχές του πλανήτη με φυσικές διαθέσιμες ποσότητες νερού - ωκεανών, λιμνών ή πάγου. Το νερό ή ο πάγος που περιβάλλει τις ανιχνευτικές διατάξεις δρα ως στόχος (δηλαδή υλικό με το οποίο αλληλεπιδρούν τα νετρίνα) και ως μέσο ανίχνευσης, δηλαδή υλικό μέσα στο οποίο παράγεται η ακτινοβολία Cherenkov από τα φορτισμένα προϊόντα της αλληλεπίδρασης του νετρίνου. Επιπλέον, με την τοποθέτηση του ανιχνευτή σε μεγάλο βάθος, ο υπερκείμενος όγκος νερού ή πάγου λειτουργεί και ως θωράκιση

η οποία «φιλτράρει» τη συντριπτική πλειοψηφία των σωματίων της κοσμικής ακτινοβολίας εκτός από τα υψηλής ενέργειας νετρίνα. Την ακτινοβολία Cherenkov ανιχνεύουν φωτοπολλαπλασιαστές οι οποίοι κατανέμονται ώστε να καλύπτουν ένα μεγάλο όγκο, τοποθετημένοι σε μεγάλο βάθος μέσα στον ωκεανό, σε λίμνες, ή στον πάγο και καταγράφουν το χρόνο άφιξης και το πλήθος των φωτονίων που προσπίπτουν σε αυτούς. Η πληροφορία αυτή χρησιμοποιείται στην ανακατασκευή της τροχιάς των φορτισμένων σωματίων ή των καταιονισμών σωματίων που δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση του νετρίνου με το μέσο. Στην συνέχεια η ανακατασκευασμένη τροχιά ή ο καταιονισμός μπορεί να μας δώσουν πληροφορίες για την διεύθυνση και την ενέργεια του αρχικού νετρίνου.

2.2 Υπόβαθρο σήματος στα υποθαλάσσια τηλεσκοπία νετρίνων

Το υπόβαθρο στα υποθαλάσσια τηλεσκοπία νετρίνων αποτελείται από το φυσικό υπόβαθρο των ατμοσφαιρικών νετρίνων και ατμοσφαιρικών μιονίων και το υπόβαθρο από περιβαλλοντικούς παράγοντες δηλαδή από την ραδιενέργεια και την βιοφωταύγεια.

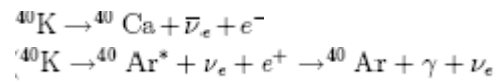
Ατμοσφαιρικά νετρίνα και μόνια

Όπως έχει προαναφερθεί τα ατμοσφαιρικά νετρίνα και ατμοσφαιρικά μόνια παράγονται κατά την αλληλεπίδραση των κοσμικών ακτίνων με την ατμόσφαιρα της Γης. Κατά τη διάρκεια αυτών των αλληλεπιδράσεων, τεράστιες ποσότητες υψηλοενεργειακών μιονίων δημιουργούνται σε εκτεταμένους καταιονισμούς. Τα ηλεκτρόνια λόγω της μικρής τους μάζας έχουν μικρή εμβέλεια και απορροφώνται από την ατμόσφαιρα πριν φτάσουν στον ανιχνευτή. Αντιθέτως, τα ατμοσφαιρικά νετρίνα και μόνια είναι πιο διεισδυτικά και φτάνουν τον ανιχνευτή αποτελώντας "ανεπιθύμητο" σήμα. Η πόντιση των τηλεσκοπίων νετρίνων σε μεγάλα βάθη (2-5 km) στο νερό ή τον πάγο αποτελεί την πρώτη θωράκιση από ατμοσφαιρικά μόνια. Ωστόσο αυτή η θωράκιση δεν είναι επαρκής και τα τηλεσκοπία νετρίνων ψάχνουν κυρίως για μόνια με ανοδική πορεία ως προς τον ανιχνευτή. Τέτοια μόνια μπορούν να προέρχονται μόνο από νετρίνα καθώς τα νετρίνα είναι τα μόνα γνωστά σωματίδια που μπορούν να διαπεράσουν την Γη χωρίς να απορροφηθούν. Αυτό σημαίνει ότι τα τηλεσκοπία νετρίνων που βρίσκονται στο νότιο ημισφαίριο της Γης έχουν "ορατότητα" σε φαινόμενα του βόρειου μέρους του ουρανού και αντιστρόφως. Παρόλα αυτά, η Γη είναι σχεδόν αδιαφανής για τα νετρίνα με ενέργειες μεγαλύτερες από μερικά PeV με αποτέλεσμα να χρειάζεται να μεγαλώσει η ζενιθιακή απόδοσή ώστε να μελετηθούν σωστά τα υψηλοενεργειακά νετρίνα. Οι υψηλότερες ενέργειες των μιονίων από εξωγήινες πηγές βοηθούν στο διαχωρισμό τους από τα καθοδικής πορείας ατμοσφαιρικά μόνια. Τα ατμοσφαιρικά νετρίνα δεν μπορούν να διαχωριστούν μέσω γωνιακών ή ζενιθιακών ορίων από τα υψηλών ενεργειών νετρίνα και μπορούν μόνο να διαχωριστούν με την ανακατασκευή της ενέργειας και της τροχιάς των μιονίων που παράγουν. Η ακριβής γνώση της ροής των ατμοσφαιρικών νετρίνων και μιονίων αποτελεί ένα μέσο βαθμονόμησης της απόδοσης ενός ανιχνευτή παρόλο που αποτελούν το βασικό υπόβαθρο των τηλεσκοπίων νετρίνων.

Ραδιενέργεια και βιοφωταύγεια

Οι διασπάσεις ραδιενεργών στοιχείων στο θαλασσινό νερό δημιουργούν φορτισμένα σωματίδια. Η διάδοση αυτών των σωματιδίων στο θαλασσινό νερό μπορεί να οδηγήσει σε παραγωγή φωτός Cherenkov το οποίο μιμείται το φως που παράγουν σωματίδια που προέρχονται από τα νετρίνα. Το ραδιενεργό στοιχείο K^{40} διασπάται σε δύο κυρίως κανάλια που δίνουν είτε ηλεκτρόνια είτε ακτίνες γάμμα με ενέργεια περίπου στο 1 MeV και είναι άφθονο στο θαλασσινό νερό. Τα ηλεκτρόνια που παράγονται συνήθως πληρούν τις προϋποθέσεις για τη παραγωγή φωτός Cherenkov, το οποίο μπορεί να εκτελέσει πολλαπλές σκεδάσεις Coulomb στα περιβάλλοντα νερά. Οι παλμοί φωτός στους φωτοπολ-

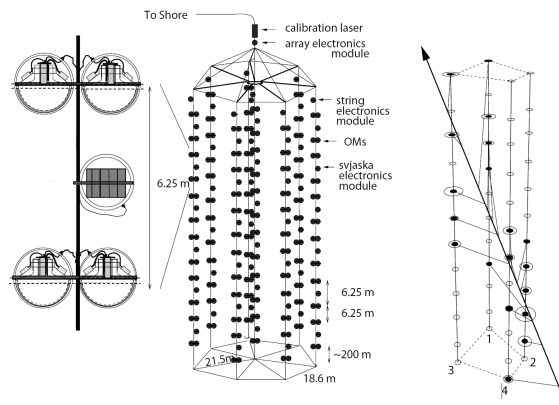
λαπλασιαστές που παράγονται εξαιτίας των διασπάσεων του K^{40} μπορούν να μειωθούν σημαντικά απαιτώντας συμπτώσεις παλμών μεταξύ γειτονικών φωτοπολλαπλασιαστών.



Η βιοφωταύγεια αναφέρεται στη φωταύγεια που προκαλείται από έμβιους οργανισμούς που ζουν στα βάθη της θάλασσας. Η ένταση του φωτός που παράγεται λόγω βιοφωταύγειας και η διάρκεια του φαινομένου διαφέρει. Παραδείγματος χάριν, τα βακτήρια εκπέμπουν φως σταθερά στο πέρασμα των ωρών ενώ μεγαλύτερου μεγέθους οργανισμοί εκπέμπουν φώς με εκλάμψεις μικρότερης διάρκειας (μερικών δευτερολέπτων).

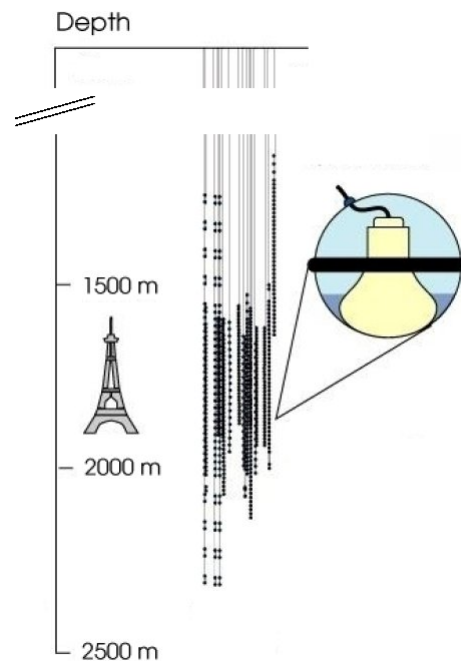
2.3 Τα βασικά τηλεσκόπια νετρίνων

Τα πρώτα σχέδια και η επίλυση των τεχνικών προκλήσεων σε σχέση με την πόντιση και τη λειτουργία των τηλεσκοπίων νετρίνων απαιτήσαν πολλές δεκαετίες. Το πρώτο υποθαλάσσιο τηλεσκόπιο νετρίνων ήταν ο ανιχνευτής DUMAND (Deep Underwater Muon and Neutrino Detection project), ο οποίος ποντίστηκε στην ακτή του μεγάλου νησιού της Χαβάης σε βάθος 4800 m. Η επιτυχία αυτού του πειράματος ήταν η τοποθέτηση μιας συστοιχίας (string) με φωτοπολλαπλασιαστές, που έφερε όργανα για περιβαλλοντικές μετρήσεις και ενός κιβωτίου συνδέσεων (junction box) που συνδέει τα παραπάνω μέρη στο βυθό της θάλασσας [5]. Ακολούθησε το τηλεσκόπιο νετρίνων της Βαϊκάλης, το οποίο ξεχωρίζει για τις μοναδικές της ιδιότητες καθώς παρουσιάζει μειωμένο θόρυβο από το K^{40} ενώ κατά τους χειμερινούς μήνες η επιφάνειά της παγώνει βοηθώντας στις διαδικασίες συντήρησης. Όμως, το μήκος απόρροφησης των σωματιδίων στο νερό της λίμνης είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με το θαλασινό νερό και η τοποθέτηση του τηλεσκοπίου σε μικρό βάθος (περίπου 1100 m) δημιουργεί μεγάλο ποσοστό υποβάθρου από ατμοσφαιρικά μόνια. Το πρώτο μέρος του ανιχνευτή αποτελούταν από 3 strings με 36 οπτικά στοιχεία (OMs-optical modules δηλαδή ανθεκτικές γυάλινες σφαίρες υπό πίεση στις οποίες εμπεριέχονται οι φωτοπολλαπλασιαστές) ενώ αργότερα το μέγεθος του ανιχνευτή αυξήθηκε σε 192 οπτικά στοιχεία τοποθετημένα σε 8 strings και προστέθηκαν 3 επιπλέον strings σε απόσταση 100 m από το κέντρο του ανιχνευτή με 36 φωτοπολλαπλασιαστές το καθένα.



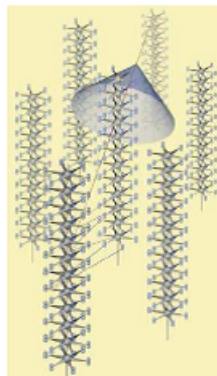
Σχήμα 2.5: Τηλεσκόπιο νετρίνων της Βαϊκάλης

Το τηλεσκόπιο AMANDA (Antarctic Muon And Neutrino Detector Array) είναι το πρώτο σε λειτουργία τηλεσκόπιο τοποθετημένο βαθιά στον πάγο του Νότιου Πόλου μελετώντας τις ιδιότητες των νετρίνων που προέρχονται από το βόρειο τμήμα του ουρανού. Το πρώτο σημαντικό επίτευγμα ήταν η τοποθέτηση 10 strings με 32 φωτοπολλαπλασιαστών σε βάθος 1500 – 2000 m, το 1997. Κατά τη διάρκεια του 2000, 9 strings προστέθηκαν, 3 εκ των οποίων είχαν οπτικά στοιχεία που βρίσκονταν σε βάθος μεγαλύτερο από 2000 m. Τελικά, 700 οπτικά στοιχεία τοποθετήθηκαν σε 19 strings μήκους 2000 m ενώ τα ηλεκτρικά καλώδια κατέληγαν στην επιφάνεια του πάγου απ' όπου συνδέονταν με το σύστημα υπολογιστών. Η λήψη δεδομένων από το πείραμα Amanda ξεκίνησε από το 1997 με σειρά ερευνών για σημειακές πηγές [5].



Σχήμα 2.6: Η ανιχνευτική διάταξη του τηλεσκοπίου AMANDA

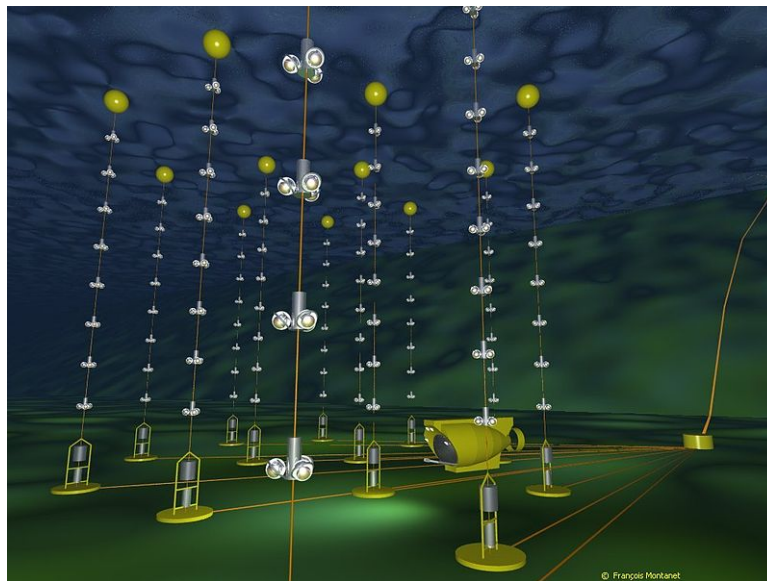
Μετά την πρώτη πόντιση του DUMAND (Deep Underwater Muon and Neutrino Detection), ευρωπαϊκές ομάδες ξεκίνησαν να δουλεύουν για την δημιουργία τηλεσκοπίων νετρίνων στη Μεσόγειο. Σε αυτά τα πλαίσια δημιουργήθηκαν οι ομάδες των NESTOR και NEMO που πόντισαν πρότυπους ανιχνευτές ανοιχτά της ακτής της Πύλου και ανοιχτά της ακτής του Capo Passero στην Ιταλία αντίστοιχα. Το τηλεσκόπιο NESTOR (Neutrino Extended Submarine Telescope with Oceanographic Research) αποτελείται από μια διάταξη σε σχήμα αστεριού που συνδεόταν με καλώδια αντί για τα ευλίγιστα strings που χρησιμοποιούσαν οι άλλες διατάξεις. Το 2003 πραγματοποιήθηκαν οι πρώτες δοκιμές για τη βύθιση μιας "πρότυπης" διάταξης που αποτελούνταν από ένα μόνο "αστέρι". Αξίζει να σημειωθεί πως με τον ανιχνευτή NESTOR ανακατασκευάστηκε για πρώτη φορά η κατεύθυνση των ατμοσφαιρικών μιονίων με μέση ακρίβεια λιγότερη από 10° . Παράλληλα, η ίδια ομάδα εκτέλεσε διάφορες μετρήσεις για την διάδοση φωτός σε μεγάλο βάθος υπολογίζοντας τις επιπτώσεις του βάθους του νερού σε διαφορετικά μέρη του Ιονίου [11].



Σχήμα 2.7: Σχηματική αναπαράσταση του ανιχνευτή NESTOR (αριστερά) και του ανιχνευτή NEMO (δεξιά)

2.3.1 Τηλεσκόπιο ANTARES

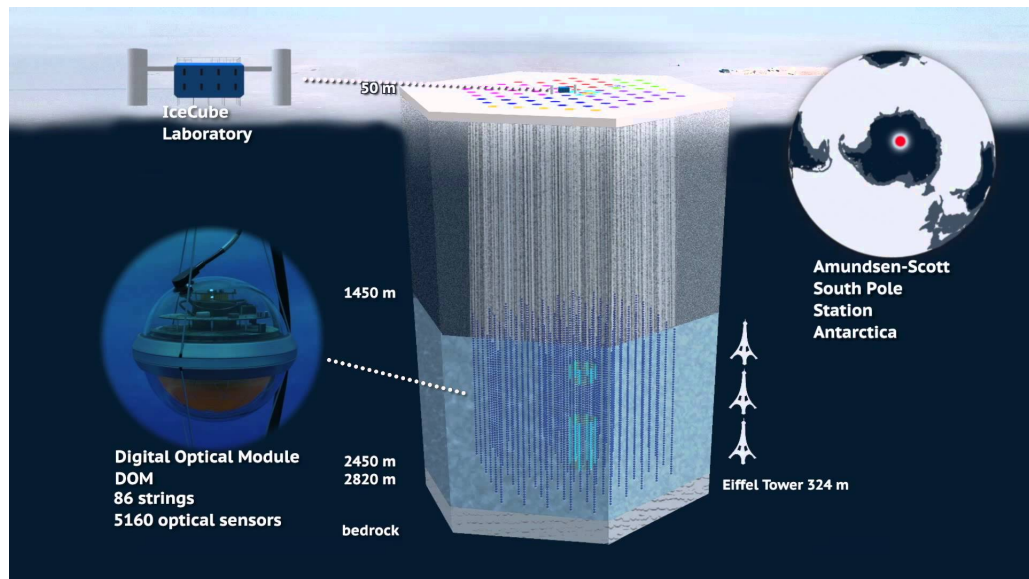
Ο ανιχνευτής ANTARES, ο οποίος ολοκληρώθηκε το 2008, είναι το μεγαλύτερο τηλεσκόπιο νετρίνο στο βόρειο ημισφαίριο. Τοποθετημένος σε βάθος 2500 m στη Μεσόγειο θάλασσα και 40 km από την ακτή της Τουλόν στη Γαλλία, έχει στόχο την αναζήτηση αστροφυσικών νετρίνων. Ο ανιχνευτής αποτελείται από 12 strings, καθένα από τα οποία έχει ύψος 450 m και συγκρατείται σε σχεδόν κατακόρυφη θέση από το βυθό της θάλασσας. Κάθε string περιλαμβάνει συνολικά 75 οπτικά στοιχεία εντός των οποίων περιέχεται ένας φωτοπολλαπλασιαστής και τα οποία είναι διατεταγμένα σε γωνία 45 μοιρών “κοιτώντας προς τα κάτω” και τοποθετημένα σε βάθος μεταξύ 2000 m και 2400 m. Στην τελική του μορφή ο ανιχνευτής, έχει συνολικά 900 οπτικά στοιχεία κατανομημένα σε πλάτος 150 m και ύψος 300 m [12]. Η μεταφορά των δεδομένων στην ακτή γίνεται μέσω ενός δικτύου οπτικών καλωδίων ενώ ηλεκτρικό ρεύμα μεταφέρεται μέσω ηλεκτρικών καλωδίων. Ο μεγαλύτερος, μέχρι στιγμής ανιχνευτής, που παρατηρεί το νότιο τμήμα του ουρανού, έχει ήδη καταγράψει αρκετές εκατοντάδες ατμοσφαιρικών νετρίνων και είναι έτοιμος για τη μελέτη νετρίνων από “εξωτικές πηγές” [13].



Σχήμα 2.8: Σχηματική αναπαράσταση του τηλεσκοπίου νετρίνων ANTARES

2.3.2 Τηλεσκόπιο ICECUBE

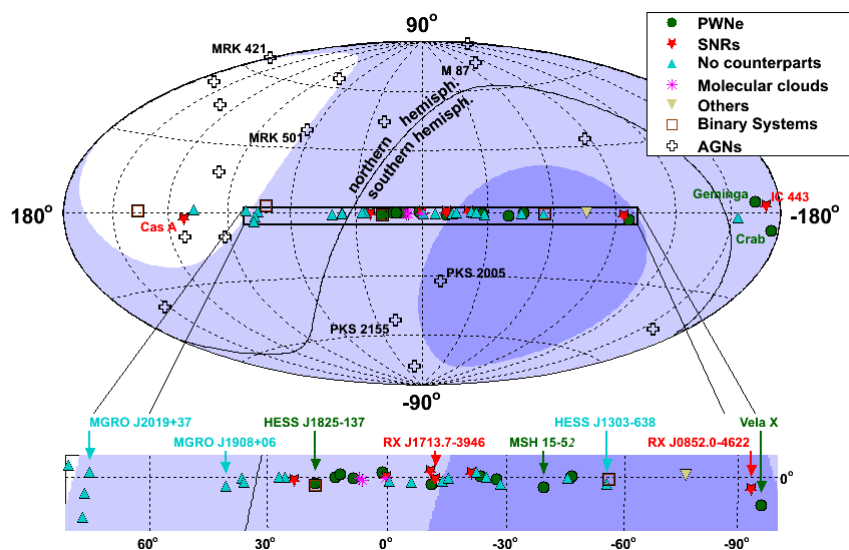
Το τηλεσκόπιο IceCube είναι ανιχνευτής νετρίνων ενός κυβικού χιλιομέτρου τοποθετημένος στον νότιο γεωγραφικό πόλο σε βάθος μεταξύ 1450 - 2450 m. Η κατασκευή του ανιχνευτή ξεκίνησε το 2005 και τελείωσε το 2010. Ήδη πριν την ολοκλήρωση του ανιχνευτή, είχαν ξεκινήσει να λαμβάνουν δεδομένα περίπου 40 strings τον Απρίλιο του 2008, 59 strings από τον Μάιο του 2009 και 79 strings από τον Μάιο του 2010 ενώ από τον Μάιο του 2011 ήταν πλήρως λειτουργικός. Πλέον το IceCube αποτελείται από 5160 ψηφιακά οπτικά στοιχεία (OMs) με απόσταση 17 m, εγκατεστημένα σε 86 strings με απόσταση 125 m μεταξύ τους στον πάγο. Οκτώ από αυτά τα strings είναι πιο πυκνά εγκατεστημένα στο κέντρο του ανιχνευτή που ονομάζεται βαθύς πυρήνας (deep core) και αποτελείται από 5 φορές πιο πυκνό από διάταξη όγκο (instrumented volume) απ' ότι η κλασική διάταξη του IceCube. Ο βαθύς πυρήνας βρίσκεται στα 2100 m κάτω από την επιφάνεια του πάγου και κατά συνέπεια αξιοποιείται η υψηλή καθαρότητα του πάγου σε αυτά τα βάθη. Χρησιμοποιείται κυρίως ως επέκταση του IceCube για χαμηλής ενέργειας νετρίνα.



Σχήμα 2.9: Ο ανιχνευτής νετρίνων IceCube

2.3.3 Τηλεσκόπιο KM3NeT

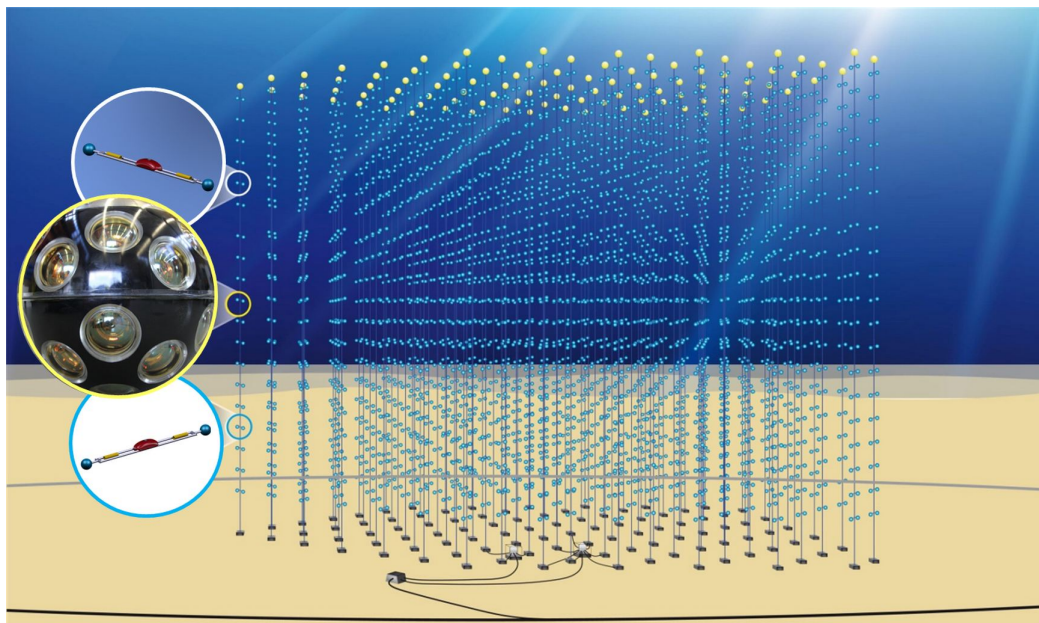
Για περισσότερο από μια δεκαετία ο σχεδιασμός και η κατασκευή τριών “πυλοτικών προγραμμάτων”, ANTARES, NEMO και NESTOR, με χρήση διαφορετικών τεχνικών και διατάξεων το καθένα, απέδειξαν τη δυνατότητα κατασκευής τηλεσκοπίων νετρίνων στην περιοχή της Μεσογείου. Η ανάγκη κατασκευής ενός τηλεσκοπίου νετρίνων στο βόρειο ημισφαίριο έγκειται στο γεγονός ότι ένας ανιχνευτής κλίμακας κυβικού χιλιομέτρου θα πρέπει να κατασκευαστεί για να συμπληρώσει τα μέρη του ουρανού που δεν μπορεί να “δεί” ο ανιχνευτής IceCube στο Νότιο Πόλο. Αυτή η αναγκαιότητα οδήγησε την επιστημονική κοινότητα στην απόφαση σχεδιασμού και κατασκευής του τηλεσκοπίου KM3NeT που θα τοποθετηθεί στη θαλάσσια περιοχή της Μεσογείου. Επίσης το μεγαλύτερο μέρος του γαλαξιακού επιπέδου, συμπεριλαμβανομένου του γαλαξιακού κέντρου, θα είναι ορατό το μεγαλύτερο διάστημα της “αστρικής” (sidereal) μέρας. Το τηλεσκόπιο ICECUBE είναι “ευαίσθητο” σε θετικές κλίσεις οπότε τα δύο τηλεσκόπια θα έχουν μια περιοχή αλληλοεπικάλυψης που θα χρησιμεύει για σύγκριση των αποτελεσμάτων (περίπου 1.5π sr). Τα δύο τηλεσκόπια ICECUBE και KM3NeT θα παρέχουν από κοινού τη δυνατότητα παρατήρησης ολόκληρου του ουρανού [14].



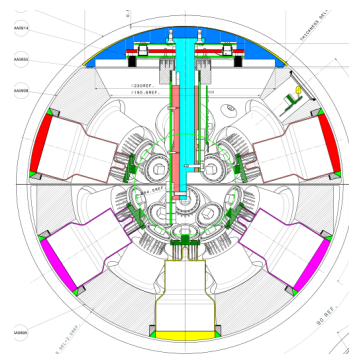
Σχήμα 2.10: Κάλυψη του ουρανού σε γαλαξιακές συντεταγμένες για έναν ανιχνευτή τοποθετημένο στη Μεσόγειο και ένα στο Νότιο Πόλο. Η σκίαση δείχνει την ορατότητα ενός ανιχνευτή στη Μεσόγειο. Οι σκούρες (ανοιχτές) περιοχές είναι ορατές το λιγότερο 75% (25%) του χρόνου. Επίσης αναπαριστώνται οι τοποθεσίες των πρόσφατα παρατηρούμενων πηγών υψηλοενεργειακών ακτίνων γ [6]

Το KM3NeT αποτελείται από δύο διαφορετικές ανιχνευτικές διατάξεις, τους ανιχνευτές ARCA και ORCA. Ο ανιχνευτής ARCA είναι ένα τηλεσκόπιο νετρίνων μερικών κυβικών χιλιομέτρων που αποσκοπεί στην αναζήτηση υψηλής ενέργειας νετρίνων (ενεργειακή περιοχή TeV) εξωγίνης και εξωγαλαξιακής προέλευσης. Ο ανιχνευτής ORCA καλύπτει έναν όγκο μερικών εκατοντάδων κυβικών μέτρων και στοχεύει στην μελέτη της ιεραρχίας των μαζών των νετρίνων χρησιμοποιώντας

τις ταλαντώσεις των ατμοσφαιρικών νετρίνων (ενεργειακή περιοχή GeV) μέσω της Γης. Από τη στιγμή που η εργασία αυτή πραγματοποιείται την μελέτη των νετρίνων υψηλών ενεργειών θα περιγραφεί λίγο πιο αναλυτικά ο ανιχνευτής ARCA. Η πρώτη φάση του ανιχνευτή θα αποτελείται από δύο βασικά μέρη που θα καλύπτουν συνολικά έναν όγκο ενός κυβικού χιλιόμετρου και θα τοποθετηθεί στη περιοχή του Capo Passero στην Ιταλία σε βάθος 3500 m. Κάθε μέρος θα είναι σχεδόν κυλινδρικού σχήματος και θα αποτελείται από 115 ανιχνευτικές μονάδες που αναφέρουμε ως strings με 18 οπτικά στοιχεία η καθεμία. Κάθε οπτικό στοιχείο θα αποτελείται από 31 φωτοπολλαπλασιαστές 3" όπως φαίνεται στο σχήμα 2.12. Στη τελική φάση κατασκευής του ARCA, αυτός θα αποτελείται από 6 τέτοια μέρη καταλήγοντας σε έναν όγκο κάποιων κυβικών χιλιομέτρων. Δύο πιθανές τοποθεσίες έχουν προταθεί για την τοποθέτηση των υπόλοιπων μερών του ανιχνευτή, αυτές της Τουλον στη Γαλλία σε βάθος περίπου 2475 m και της Πύλου (στο βαθύτερο σημείο της Μεσογείου) σε βάθος 3750 - 5200 m [15].



Σχήμα 2.11: Σχηματική αναπαράσταση του KM3NeT



Σχήμα 2.12: Οπτικά στοιχεία του ανιχνευτή KM3NeT

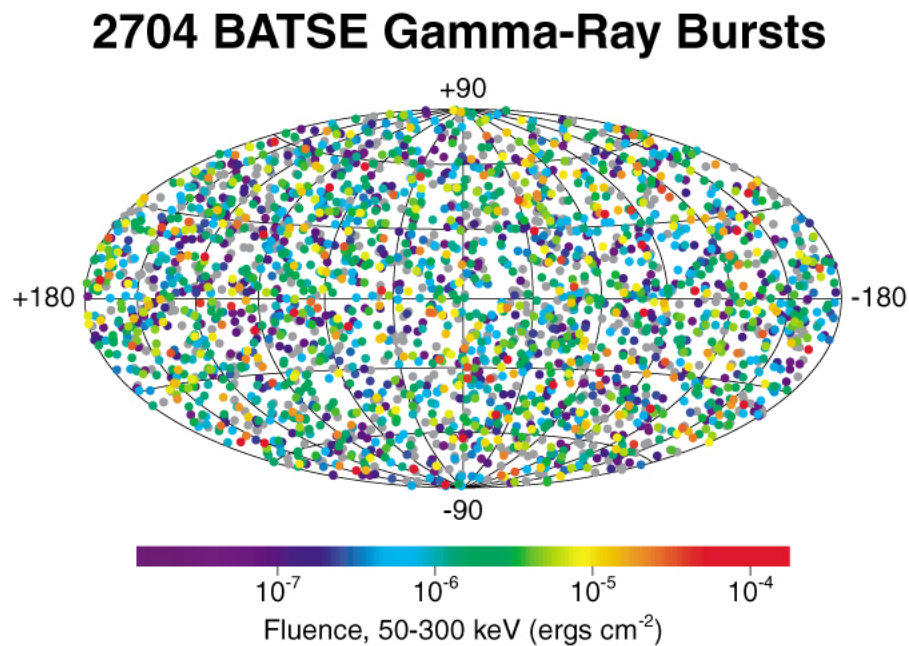
Κεφάλαιο 3

GRBNeT : Gamma Ray Burst Neutrino Telescope

Οι εκλάμψεις ακτίνων γάμμα (Gamma Ray Bursts) είναι σύντομες εκλάμψεις πολύ υψηλής συχνότητας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας - ακτίνων γάμμα. Πα-ρατηρήθηκαν για πρώτη φορά το 1960 από δορυφόρους των Ηνωμένων Πολιτειών, οι οποίοι είχαν σκοπό να ελέγξουν εάν η ΕΣΣΔ διεξήγαγε μυστικά εξωγήινα πυρηνικά πειράματα. Οι καταγραφηθείσες εκλάμψεις δεν ταίριαζαν με οποιοδήποτε γνωστό πυρηνικό όπλο ακτίνων γάμμα και περαιτέρω μελέτες έδειξαν ότι δεν ήταν γίνης ή ηλιακής προέλευσης. Το συμπέρασμα ήταν ότι οι εκλάμψεις είχαν κοσμική προέλευση, με διαφορετική χρονική διάρκεια και ένταση και δεν μπορούσαν να συσχετιστούν χωροχρονικά με τις ήδη γνωστές υπερκαινοφανείς (supernovae).

Μόλις το 1991, μπήκε σε τροχιά το παρατηρητήριο Compton Gamma Ray Observatory μέρος των παρατηρητηρίων της NASA και έδωσε έναν πλήρη χάρτη των θέσεων των εκλάμψεων ακτίνων γάμμα που συνέβησαν κατά τη διάρκεια της αποστολής (BATSE mission). Η κατανομή τους έδειχνε ισοτροπική, χωρίς ιδιαίτερη συγκέντρωση στο επίπεδο του Γαλαξία μας. Αργότερα, βρέθηκε ότι οι εκλάμψεις ακολουθούνται από μια επιπλέον λάμψη σε μεγαλύτερα μήκη κύματος - κατά κύριο λόγο στη περιοχή των ακτίνων Χ. Μετρώντας την μετατόπιση του ερυθρού από την οπτική λάμψη, διαπιστώθηκε ότι οι εκλάμψεις ακτίνων γάμμα προέρχονται από πολύ μακρινούς γαλαξίες, δισεκατομμύρια έτη φωτός μακριά από τη Γη. Παρά την τεράστια απόστασή τους, οι εκλάμψεις ακτίνων γάμμα φαίνεται να έχουν λαμπρότητα συγκρίσιμη με εκείνη ενός φωτεινού αστέρα του γαλαξία μας. Μια τυπική απελευθέρωση ενέργειας είναι της τάξης των 1044 Joules, η οποία ισοδυναμεί με 1/2000 της ηλιακής μάζας.

Παρά τις τελευταίες μελέτες για τις εκλάμψεις ακτίνων γάμμα ακόμα δεν υπάρχει κάποιο ικανοποιητικό μοντέλο για την εκπομπή τους. Δεδομένης της τεράστιας απόστασης μεταξύ των γεννητόρων τους και των τηλεσκοπίων μας, αναμένεται ότι η περαιτέρω παρατήρηση τους στο ηλεκτρομαγνητικό φάσμα είναι σχεδόν απίθανο να μας παρέχει νέες πληροφορίες. Αυτό καθώς και το γεγονός ότι τα περισσότερα μοντέλα εκλάμψεων ακτίνων γάμμα προβλέπουν ταυτόχρονη εκπομπή νετρίνων, υποδεικνύουν ότι η ανίχνευση νετρίνων συσχετιζόμενη με την εκπομπή εκλάμψεων ακτίνων γάμμα μπορεί να παρέχει νέες πληροφορίες σχετικά με τον μηχανισμό δημιουργίας τους [16].



Σχήμα 3.1: Τοποθεσίες στον ουρανό όλων των GRBs που κατέγραψε η απόστολή BATSE

Η κοινοπραξία του GRBNeT πρέπει να θεωρηθεί σαν αρχικό βήμα προς την μελέτη του μηχανισμού δημιουργίας των εκλάμψεων ακτίνων γάμμα. Το πρόγραμμα GRBNeT είναι μια ελληνική συνεργασία μεταξύ του Ινστιτούτου Πυρηνικής Φυσικής και Στοιχειωδών Σωματιδίων του ΕΚΕΦΕ Δημόκριτος, του Τμήματος Φυσικής του Πανεπιστημίου Αθήνας και του Ελληνικού Κέντρου Θαλασσίων Ερευνών. Είναι συγχρηματοδοτούμενο από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο ΕΚΤ) και τα ελληνικά εθνικά κονδύλια μέσω του Επιχειρη-σιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» του Εθνικού Στρατηγι-κού Πλαισίου Αναφοράς Πρόγραμμα Χρηματοδότησης (ΕΣΠΑ) Έρευνα: THALES. Ο στόχος του GRBNeT είναι ο σχεδιασμός, η υλοποίηση και η δοκιμαστική βύθιση μιας πρωτότυπης αυτόνομης μονάδας ανιχνευτή νετρίνων τύπου Cherenkov-ον. Η ανάπτυξη τέτοιας συσκευής υπαγορεύεται από τα ακόλουθα γεγονότα :

- Μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεις όπως το IceCube και το KM3NeT δεν είναι σχεδιασμένα ώστε να έχουν ευαισθησία σε εξωγαλαξιακά νετρίνα

από πηγές εκλάμψεων ακτίνων γάμμα. Οι προδιαγραφές τους είχαν τεθεί πριν τις εξελίξεις στην φυσική των εκλάμψεων ακτίνων γάμμα και σαν αποτέλεσμα εστιάζουν στην ανίχνευση ενδογαλαξιακών νετρίνων. Παρόλα αυτά, η ευαισθησία τους σε πολύ υψηλής ενέργειας νετρίνα μπορεί να αυξηθεί με την τοποθέτηση σε μεγαλύτερες αποστάσεις ανιχνευτών όπως αυτόν του προγράμματος GRBNeT. Αυτή η επέκταση θα αυξήσει τον όγκο του τηλεσκοποίου νετρίνων σε μερικά κυβικά χιλιόμετρα, το οποίο είναι απαραίτητο για την ανίχνευση νετρίνων από εκλάμψεις ακτίνων γάμμα.

- Ο ανιχνευτής του GRBNeT είναι αυτόνομος, δηλαδή δεν χρειάζεται καλωδική σύνδεση από την ακτή. Αυτό μεταφράζεται σε πολύ μικρότερο κόστος ανά μονάδα ή συλλογικά και αποτελεί μια οικονομικά απόδοτική επέκταση των μεγάλης κλίμακας εγκαταστάσεων.
- Όντας κατά κάποιο τρόπο ο διάδοχος του NESTOR, το σχέδιο GRBNeT δεν θα ξεκινάει από το μηδέν. Έχοντας εργαζόμενους που δούλευαν στο NESTOR, θα αξιοποιηθεί η υπάρχουσα εμπειρία στη κατασκευή και πόντιση υποθαλάσσιων Cherenkov ανιχνευτών νετρίνων. Επιπλέον, ένας σημαντικός αριθμός τεχνολογικού και επιστημονικού εξοπλισμού, συμπεριλαμβάνοντας και τους φωτοπολλαπλασιαστές, υπάρχει σαν απομένον κομμάτι του NESTOR, το οποίο μειώνει ακόμα πιο πολύ το κόστος του προγράμματος GRBNeT.
- Η τοποθεσία πόντισης έχει επιλεγεί να είναι η βάση του ιστιούτου NESTOR, ανοιχτά της ακτής της Πύλου. Οι υποθαλάσσιοι ανιχνευτές Cherenkov απαιτούν βαθιά και καθαρά νερά για να φιλτράρουν τα ατμοσφαιρικά μόνια, για την καλή διάδοση του φωτός αντίστοιχα και για τη μικρή ταχύτητα του νερού ώστε να ελαχιστοποιηθεί η μηχανική καταπόνηση στις μονάδες του ανιχνευτή. Η θάλασσα της Πύλου συνδυάζει μοναδικά όλα αυτά τα χαρακτηριστικά έχοντας βάθος μέχρι και 5.2 km σε απόσταση περίπου 48 km ανοιχτά της ακτογραμμής της Πύλου με διάδοση φωτός μεγαλύτερη από 50 m για βάθος μεγαλύτερο των 3 km.

3.1 Αρχή ανίχνευσης νετρίνων για το GRBNeT

Τα υψηλής ενέργειας νετρίνα αλληλεπιδρούν με τον πυρήνα των ατόμων στις πέτρες ή το νερό με ρυθμό που εξαρτάται από την ενέργεια και την γωνία του εισερχόμενου νετρίνου όπως και την ποσότητα του υλικού που λειτουργεί ως στόχος για το νετρίνο. Στη περίπτωση των αλληλεπιδράσεων φορτισμένου ρεύματος, παράγονται λεπτόνια ως εξής :



Για υψηλής ενέργειας νετρίνα, τα θυγατρικά λεπτόνια θα έχουν κατεύθυνση πολύ κοντινή σε αυτή που είχε το αρχικό νετρίνο. Εάν το θυγατρικό λεπτόνιο είναι νετρίνο, για τις προβλεπόμενες ενέργειες, θα ταξιδέψει αρκετά χιλιόμετρα στο θαλασσινό νερό. Αυτό σημαίνει ότι τα μόνια σήματος (αυτά που προέρχονται από νετρίνα πηγής εκλάμψεων ακτίνων γάμμα) μπορούν να ανιχνευτούν ακόμα και εάν δεν δημιουργηθούν στο εσωτερικό του ανιχνευτή, αφού για υψηλής ενέργειας μόνια, ο ενεργός ανιχνευτικός όγκος είναι πολύ μεγαλύτερος από τον όγκο του ανιχνευτή που περιέχει τις ανιχνευτικές μονάδες (instrumented volume).

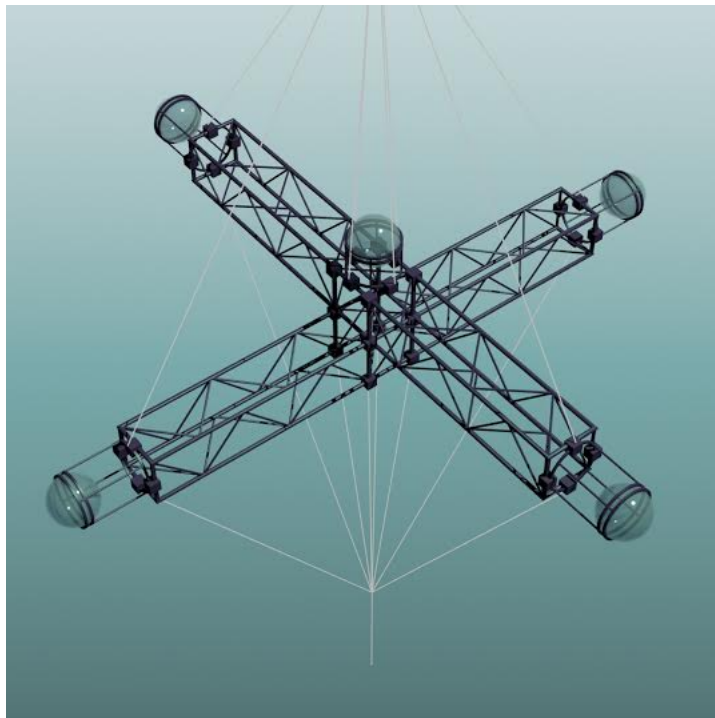
Από την στιγμή που ο στόχος μας είναι η ανίχνευση υψηλής ενέργειας νετρίνων με προέλευση από εκλάμψεις ακτίνων γάμμα, το όριο αποδοχής για κάθε οπτική μονάδα θα πρέπει να ρυθμιστεί καταλλήλως έτσι ώστε να εγγυάται την όσο το δυνατόν καλύτερη καταστολή του υποβάθρου το οποίο έρχεται όπως αναφέρθηκε από ραδιενεργές διασπάσεις από το K^{40} και την βιοφωταύγεια στο θαλασσινό νερό χωρίς ταυτόχρονα να έχουμε σημαντική μείωση του "πραγματικού" σήματος των μιονίων υψηλών ενεργειών που προέρχονται από τα νετρίνα υψηλών ενεργειών. Ένα υψηλότερο όριο αποδοχής για τις οπτικές μονάδες βοηθάει επίσης στην ελαχιστοποίηση του υποβάθρου από ατμοσφαιρικά μόνια τα οποία παράγονται από καταιονισμούς στην ατμόσφαιρα και έχουν χαμηλότερες ενέργειες από τα μόνια ενδιαφέροντος. Με τη πόντιση του αυτόνομου string σε μεγάλο υποθαλάσσιο βάθος (περίπου στα 3000 m στη περιοχή της Πύλου), μια σημαντική μείωση του υποβάθρου από ατμοσφαιρικά μόνια επιτυγχάνεται φυσικά, από τη στιγμή που τα μόνια χρειάζεται να έχουν μεγάλη ενέργεια για να διεισδύσουν στο βάθος πόντισης.

Αναλυτικές μελέτες έγιναν για την απόρριψη του σήματος υποβάθρου από ατμοσφαιρικά μόνια, το οποίο μπορεί να επιτευχθεί στο επίπεδο σκανδαλισμού έτσι ώστε να πετύχουμε μια λογική ροή δεδομένων και να κρατήσουμε υψηλή απόδοση καταγραφής γεγονότων. Για αυτό, δέσμες ατμοσφαιρικών μιονίων δημιουργήθηκαν, χρησιμοποιώντας το πρόγραμμα MUPAGE [17] έτσι ώστε να διαδίδονται μέσα από τον ανιχνευτή. Η απόκριση του ανιχνευτή προσομοιώθηκε χρησιμοποιώντας τα πιο πρόσφατα εργαλεία που ανέπτυξε η συνεργασία KM3NeT. Επιπλέον, το υπόβαθρο λόγω διασπάσεων του K^{40} στο θαλασσινό νερό έχει προστεθεί. Για να μελετηθεί αυτή η συνεισφορά στο σήμα, γεγονότα αποκλειστικά και μόνο με "θόρυβο" προσομοιώθηκαν αφαιρώντας τα πραγματικά γεγονότα από τα παραχθέντα και κρατώντας μόνο την συνεισφορά από το K^{40} .

Ο αντίστοιχος χρόνος ζωής ήταν περίπου μια ώρα (64 λεπτά). Από αυτή τη δοκιμασία καταλήξαμε, όπως αναμέναμε, στο γεγονός ότι ένα επαρκές όριο αποδοχής σήματος στα οπτικά στοιχεία του ανιχνευτή (OMs) παραδείγματος χάριν, ο αριθμός των φωτονίων να είναι μεγαλύτερος του 10 για να θεωρηθεί κάποιο σήμα πραγματικό γεγονός, μπορεί να αποκλείσει την συνεισφορά στο υπόβαθρο από τις ραδιενεργές διασπάσεις του K^{40} . Αυτές οι μελέτες είναι απαραίτητες καθώς το σήμα από ατμοσφαιρικά μόνια είναι πολλές φορές μεγαλύτερο από το σήμα από τα νετρίνα. Αυτό σημαίνει ότι ο αριθμός των ατμοσφαιρικών μονίων είναι τόσο υψηλός ώστε αν και το νερό δρα ως φίλτρο, ένας σημαντικός αριθμός από αυτά επιβιώνουν σε βάθος 3000 m θαλασσινού νερού. Τέλος, υπόβαθρο στο σήμα προσθέτει και η ροή ατμοσφαιρικών νετρίνων τα οποία παράγονται από αλληλεπιδράσεις των κοσμικών ακτίνων με τα μόρια της ατμόσφαιρας. Το ενεργειακό φάσμα των ατμοσφαιρικών νετρίνων φτάνει σε χαμηλότερες ενέργειες από αυτό που αναμένουμε από νετρίνα με γεννήτορες τις εκλάμπεις ακτίνων γάμμα. Άρα, απαιτώντας υψηλές ενέργειες μονίων (ή νετρίνων) η συνεισφορά των ατμοσφαιρικών νετρίνων μειώνεται σημαντικά [18]. Επιπροσθέτως, η απαίτηση χρονικής σύμπτωσης και σύμπτωσης κατεύθυνσης μεταξύ των γεγονότων νετρίνων που καταγράφονται από τον ανιχνευτή και των γεγονότων από εκλάμπεις ακτίνων γάμμα που καταγράφονται από άλλα πειράματα (παραδείγματος χάριν από το Fermi LAT) θα ενισχύσει την υπόθεση ότι αυτά τα νετρίνα προέρχονται από εκλάμπεις ακτίνων γάμμα.

3.2 Σχεδιασμός του ανιχνευτή GRBNeT

Η ανιχνευτική μονάδα του προγράμματος GRBNeT αποτελείται από 2 επίπεδα - ορόφους σε σχήμα σταυρού από τιτάνιο, καθένα εκ των οποίων αποτελείται από 4 οπτικά στοιχεία (OMs) τα οποία είναι στραμμένα προς τον ορίζοντα και όχι προς το εσωτερικό του ανιχνευτή. Μετά απο μελέτες που προηγήθηκαν αυτής της εργασίας, αποδείχτηκε ότι αυτή είναι η βέλτιστη τοποθέτηση των οπτικών στοιχείων (να "κοιτούν" οριζόντια και "προς τα έξω") παρά σε οποιαδήποτε διαφορετική διεύθυνση. Τα 4 οπτικά στοιχεία συνδέονται στην μονάδα ελέγχου κάθε ορόφου, η οποία βρίσκεται σε μια ξεχωριστή σφαίρα στο κέντρο κάθε σταυρού. Η σφαίρα στεγάζει όλα τα απαραίτητα ηλεκτρονικά για την ψηφιοποίηση, τον σκανδαλισμό και την απόκτηση δεδομένων. Κάθε οπτικό στοιχείο αποτελείται από ένα φωτοπολλαπλασιαστή 13" Hamamatsu R8055, ο οποίος περιβάλλεται από ένα ημιμεταλλικό πλέγμα και τοποθετείται στο εσωτερικό μιας σφαίρας 17" [19]. Οι 2 όροφοι έχουν απόσταση 40 m, συνδέονται με ένα σκοινί και κατά συνέπεια η σχετική τους αξιμούθια θέση διαφέρει. Δεν υπάρχει κάποια καλωδιακή σύνδεση μεταξύ των ορόφων συνεπώς ο καθένας τους λειτουργεί ξεχωριστά. Ο ανιχνευτής είναι αγκυροβολημένος στο βυθό της θάλασσας μέσω ειδικού βάρους και κρατιέται κάθετα από μια σημαδούρα στην κορυφή. Για αυτή την εργασία, η μελέτη έγινε με βάση τη παραπάνω γεωμετρία. Η αυτόνομη ανιχνευτική μονάδα θα έχει τη δυνατότητα να ενεργοποιείται από γεγονός όταν το όριο αποδοχής σήματος για κάθε οπτικό στοιχείο (OM) ικανοποιείται και θα καταγράφει γεγονότα ενδιαφέροντος όταν υπάρχει σύμπτωση μεταξύ των οπτικών στοιχείων.



Σχήμα 3.2: Σχηματική αναπαράσταση ενός ορόφου της αυτόνομης ανιχνευτικής μονάδας GRBNeT [16]

Η ιδέα πίσω από το σχεδιασμό του ανιχνευτή GRBNeT είναι η αυτονομία του. Για το σκοπό αυτόν χρησιμοποιήθηκαν χαμηλής ισχύος ηλεκτρονικά, τα οποία σχεδιάστηκαν και τοποθετήθηκαν. Ισχύς παρέχεται από τύπου D Varta αλκαλικές μπαταρίες διατεταγμένες σε συσσωματώματα 13 μπαταριών σε σειρά. Για κάθε όροφο, χρησιμοποιήθηκαν 43 συσσωματώματα παράλληλα παρέχοντας ενέργεια αρκετή για τουλάχιστον 6 μήνες. Οι μπαταρίες έχουν τοποθετηθεί σε 2 πλαστικά δοχεία (ένα για κάθε όροφο), στα οποία εμπεριέχεται και λάδι παραφίνης ως κατάλληλος μονωτής (λόγω ασυμπιεστότητας) εξαιτίας της υψηλής πίεσης λόγω βάρους. Διάφοροι έλεγχοι έλαβαν χώρα για την απόδοση και συντήρηση των ανιχνευτών [19].

Κεφάλαιο 4

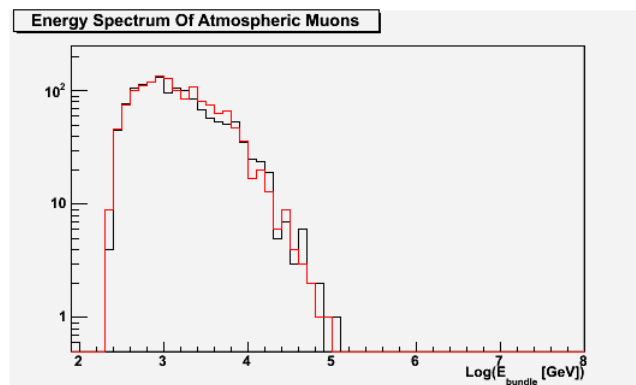
Μελέτες σκανδαλισμού ατμοσφαιρικών μιονίων

Δεδομένης της μικρής ανιχνευτικής επιφάνειας του πρότυπου ανιχνευτή καθώς και της μικρής χρονικής περιόδου που θα είναι ποντισμένος, αναμένουμε να λάβουμε κυρίως γεγονότα ατμοσφαιρικών μιονίων. Από την στιγμή που ενδιαφερόμαστε για τον σκανδαλισμό γεγονότων υψηλής ενέργειας μιονίων και για να επιτύχουμε μια ροή γεγονότων χαμηλή έτσι ώστε να μπορούμε να την χειριζόμαστε με ασφάλεια, η μείωση της ροής γεγονότων ερευνάται για διαφορετικά όρια αποδοχής σήματος στους φωτοπολλαπλασιαστές. Η συνεισφορά των ατμοσφαιρικών μιονίων (η οποία θα μελετηθεί κατά κύριο λόγο σε αυτή την εργασία) στο υπόβαθρο του σήματος, μελετήθηκε με δέσμες ατμοσφαιρικών μιονίων δημιουργημένες από το πρόγραμμα MUPAGE (όπως έχει ήδη αναφερθεί), οι οποίες προσομοιώθηκαν λαμβάνοντας ταυτόχρονα υπόψιν την συνεισφορά από τις ραδιενεργές διασπάσεις του K^{40} . Όπως αναφέραμε προηγουμένως, ο αριθμός ατμοσφαιρικών μιονίων είναι αρκετές τάξεις μεγέθους υψηλότερος από τον αριθμό των μιονίων που προέρχονται από νετρίνα. Έτσι, είναι σύνηθες να προσομοιώνονται ατμοσφαιρικά μίονια με αντίστοιχο χρόνο ζωής μερικών ωρών ή ημερών (το οποίο εξαρτάται από την ενέργεια των δεσμών των ατμοσφαιρικών μιονίων) και αργότερα να ανάγουμε τα γεγονότα στον επιθυμητό χρόνο ζωής.

Προκειμένου να καταστείλουμε την υψηλή ροή που αναμένεται από τα ατμοσφαιρικά μίονια και για να είμαστε σε θέση να λαμβάνουμε γεγονότα κυρίως από υψηλής ενέργειας μίονια, αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε υψηλά όρια αποδοχής σήματος. Επιπροσθέτως, απαιτούμε τοπικές συμπτώσεις στο επίπεδο σκανδαλισμού με σκοπό να μειώσουμε περισσότερο το υπόβαθρο από χαμηλής ενέργειας μίονια. Δοκιμάστηκαν αρκετές απαιτήσεις τοπικής σύμπτωσης στο πρώτο επίπεδο σκανδαλισμού και αποφασίστηκε ότι μια χρονική σύμπτωση γεγονότων μέσα σε χρονικό "παράθυρο" 200 ns μεταξύ τουλάχιστον 2 οπτικών στοιχείων (OMs) είναι ικανοποιητική.

4.1 Γεγονότα ατμοσφαιρικών μιονίων ενέργειας μεγαλύτερης από 10 GeV

Σε βάθος 3000 m, στο οποίο είναι ποντισμένος ο ανιχνευτής, και με όριο αποδοχής ακόμα και 5 φωτονίων ανά οπτικό στοιχείο, μόνια με ενέργεια μικρότερη των 100 GeV δεν αναμένεται να συνεισφέρουν σημαντικά στο σήμα. Για να επιβεβαιώσουμε την θεώρηση αυτή, αρχικά δημιουργήσαμε και προσομοιώσαμε ένα δείγμα από δέσμες ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες των 10 GeV με αντίστοιχο χρόνο ζωής 5.5 ωρών. Για αυτό το σήμα, 1398 γεγονότα με ταυτόχρονη (ταυτόχρονη θεωρούμε την ανταπόκριση στο χρονικό παράθυρο των 200 ns που θέσαμε νωρίτερα) ανταπόκριση σε τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία με όριο αποδοχής 5 φωτονίων και άνω σε κάθε οπτικό στοιχείο σημειώθηκαν για τον πρώτο όροφο του ανιχνευτή. Αντίστοιχα, με τις ίδιες απαιτήσεις σημειώθηκαν 1470 γεγονότα για τον δεύτερο όροφο. Τα γεγονότα που καταγράφηκαν είχαν όλα ενέργεια δέσμης μιονίων μεγαλύτερη των 100 GeV και δεν υπήρξε κανένα γεγονός με ενέργεια μικρότερη από τα 100 GeV.



Σχήμα 4.1: Ενεργειακό φάσμα δέσμης ατμοσφαιρικών μιονίων ενέργειας μεγαλύτερης από 10 GeV. Με μαύρο παρουσιάζεται η απόκριση του πρώτου ορόφου του ανιχνευτή ενώ με κόκκινο η απόκριση του δεύτερου ορόφου. Σε κάθε όροφο θεωρήθηκε σύμπτωση γεγονότων σε τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία με όριο αποδοχής σήματος τουλάχιστον 5 φωτονίων.

4.2 Γεγονότα ατμοσφαιρικών μιονίων ενέργειας μεγαλύτερης από 100 GeV

Θεωρώντας ότι μόνια ενέργειας μικρότερης από 100 GeV δεν δίνουν σήμα ώστε να καταγραφούν, δείγμα με δέσμες ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες ($E_{\delta\epsilon\sigma\mu\eta\varsigma}$) μεγαλύτερες από 100 GeV δημιουργήθηκε και προσομοιώθηκε με αντίστοιχο χρόνο ζωής 16.7 ωρών. Ο αριθμός των γεγονότων από ατμοσφαιρικά μόνια (λαμβάνοντας πάντα υπόψιν το υπόβαθρο από τις διασπάσεις του K^{40}) που αναμένονται για 24 ώρες παρουσιάζεται στους πίνακες 4.1 και 4.2 για ταυτόχρονη σύμπτωση γεγονότων σε τουλάχιστον 2 και τουλάχιστον 3 οπτικά στοιχεία στον ίδιο όροφο αντίστοιχα.

Ατμοσφαιρικά μόνια ανά ημέρα	$E_{\delta\epsilon\sigma\mu\eta\varsigma} \geq 100\text{GeV}$	$100\text{GeV} \leq E_{\delta\epsilon\sigma\mu\eta\varsigma} \leq 1\text{TeV}$
1ος όροφος $N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\iota\omega\nu} \geq 5$	6426	3114
2ος όροφος $N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\iota\omega\nu} \geq 5$	6534	3248
1ος όροφος $N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\iota\omega\nu} \geq 10$	2092	763
2ος όροφος $N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\iota\omega\nu} \geq 10$	2095	810
1ος όροφος $N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\iota\omega\nu} \geq 20$	650	148
2ος όροφος $N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\iota\omega\nu} \geq 20$	606	157
1ος όροφος $N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\iota\omega\nu} \geq 30$	315	75
2ος όροφος $N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\iota\omega\nu} \geq 30$	301	69
1ος όροφος $N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\iota\omega\nu} \geq 50$	144	35
2ος όροφος $N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\iota\omega\nu} \geq 50$	151	27

Πίνακας 4.1: Ο αριθμός των γεγονότων που αναμένονται ανά ημέρα από ατμοσφαιρικά μόνια με ενέργεια δέσμης μεγαλύτερης των 100 GeV και με ενέργεια μεταξύ 100 GeV και 1 TeV, με χρονική σύμπτωση μεταξύ τουλάχιστον 2 οπτικών στοιχείων σε κάθε όροφο

Ατμοσφαιρικά μόνια ανά ημέρα	$E_{\delta\epsilon\sigma\mu\eta\varsigma} \geq 100\text{GeV}$	$100\text{GeV} \leq E_{\delta\epsilon\sigma\mu\eta\varsigma} \leq 1\text{TeV}$
1ος όροφος $N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\omega\nu} \geq 5$	827	216
2ος όροφος $N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\omega\nu} \geq 5$	807	196
1ος όροφος $N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\omega\nu} \geq 10$	246	43
2ος όροφος $N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\omega\nu} \geq 10$	262	49
1ος όροφος $N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\omega\nu} \geq 20$	78	9
2ος όροφος $N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\omega\nu} \geq 20$	75	9
1ος όροφος $N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\omega\nu} \geq 30$	42	4
2ος όροφος $N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\omega\nu} \geq 30$	35	0
1ος όροφος $N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\omega\nu} \geq 50$	14	4
2ος όροφος $N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\omega\nu} \geq 50$	10	0

Πίνακας 4.2: Ο αριθμός των γεγονότων που αναμένονται ανά ημέρα από ατμοσφαιρικά μόνια με ενέργεια δέσμης μεγαλύτερης των 100 GeV και με ενέργεια μεταξύ 100 GeV και 1 TeV, με χρονική σύμπτωση μεταξύ τουλάχιστον 3 οπτικών στοιχείων σε κάθε όροφο

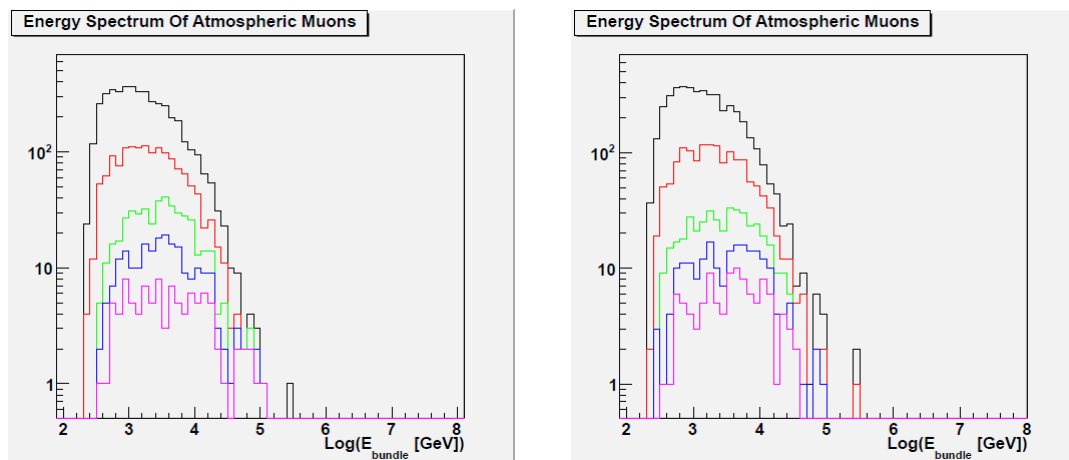
Θεωρώντας ότι κατά την επεξεργασία των δεδομένων (offline analysis) μπορούμε να αξιοποιήσουμε τη πληροφορία και από τα δύο επίπεδα και από τη στιγμή που ενδιαφερόμαστε για γεγονότα υψηλών ενεργειών, λαμβάνουμε υπόψιν και την περίπτωση να έχουμε σύμπτωση γεγονότων μεταξύ των δύο ορόφων με τουλάχιστον 2 ή 3 οπτικά στοιχεία όπως παρουσιάζεται στον πίνακα 4.3.

Ατμοσφαιρικά μόνια ανά ημέρα	$E_{\delta\epsilon\sigma\mu\eta\varsigma} \geq 100\text{GeV}$	$100\text{GeV} \leq E_{\delta\epsilon\sigma\mu\eta\varsigma}$
Για τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία στους 2 ορόφους		
$N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\omega\nu} \geq 5$	1204	317
$N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\omega\nu} \geq 10$	248	19
$N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\omega\nu} \geq 20$	59	3
$N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\omega\nu} \geq 30$	24	1
$N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\omega\nu} \geq 50$	9	0
Για τουλάχιστον 3 οπτικά στοιχεία στους 2 ορόφους		
$N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\omega\nu} \geq 5$	115	9
$N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\omega\nu} \geq 10$	30	0
$N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\omega\nu} \geq 20$	4	0
$N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\omega\nu} \geq 30$	1	0
$N_{\varphi\omega\tau\omicron\nu\omega\nu} \geq 50$	1	0

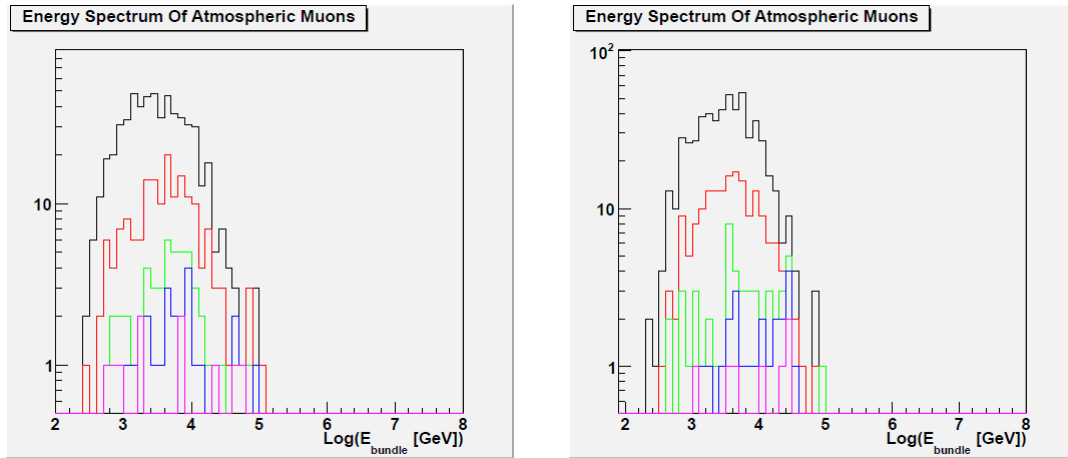
Πίνακας 4.3: Ο αριθμός των γεγονότων που αναμένονται ανά μέρα από ατμοσφαιρικά μόνια με ενέργεια δέσμης μεγαλύτερης των 100 GeV και με ενέργεια μεταξύ 100 GeV και 1 TeV, με χρονική σύμπτωση μεταξύ τουλάχιστον 2 και 3 οπτικών στοιχείων και στους δύο ορόφους

Από την παραπάνω ανάλυση των γεγονότων των ατμοσφαιρικών μιονίων αντιλαμβανόμαστε ότι μπορούμε να απαιτήσουμε την σύμπτωση γεγονότων μεταξύ τουλάχιστον 2 οπτικών στοιχείων σε κάθε όροφο και να χρησιμοποιήσουμε την σύμπτωση γεγονότων με τουλάχιστον 3 οπτικά στοιχεία σε κάθε όροφο για την ανάλυση δεδομένων. Αυτή είναι μια συντηρητική αντιμετώπιση που μας εγγυάται ότι στην ατυχή περίπτωση που κάποιο οπτικό στοιχείο δεν λειτουργήσει, ο σκανδαλισμός γεγονότων μιονίων δεν θα επηρεαστεί. Επιπλέον, επιλέχθηκε ως κατώτερο όριο αποδοχής σήματος αυτό των 20 φωτονίων ανά οπτικό στοιχείο, αφού η συνεισφορά των γεγονότων με ενέργεια $100 \text{ GeV} \leq E_{\text{δεσμής}} \leq 1 \text{ TeV}$ πάνω από αυτό το όριο παραμένει σχεδόν σταθερή (περίπου 49% για $N_{\text{φωτονίων}} > 5$, 38% για $N_{\text{φωτονίων}} > 10$, 24% για $N_{\text{φωτονίων}} > 20, 30, 50$). Τέλος, αξίζει να παρατηρηθεί ότι οι συμπτώσεις μεταξύ των 2 ορόφων μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανάλυση δεδομένων καθώς φαίνεται να μειώνουν σημαντικά την συνεισφορά των γεγονότων χαμηλών ενεργειών όπως φαίνεται στον τελευταίο πίνακα. Έτσι, εάν 2 οπτικά στοιχεία έχουν σήμα μεγαλύτερο από το όριο αποδοχής τότε ενεργοποιείται ο σκανδαλισμός - έχουμε γεγονός και πληροφορία από όλα τα οπτικά στοιχεία του ορόφου, η οποία αποθηκεύεται.

Παρουσιάζονται τα σχετικά φάσματα της ενέργειας δέσμης των ατμοσφαιρικών μιονίων με $E_{\text{δεσμής}} \geq 100 \text{ GeV}$ για σύμπτωση γεγονότων μεταξύ τουλάχιστον 2 και 3 οπτικών στοιχείων αντίστοιχα στον ίδιο όροφο.



Σχήμα 4.2: Το ενεργειακό φάσμα των δεσμών ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 100 GeV με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση με όριο αποδοχής 5 φωτονίων (μαύρη γραμμή), 10 φωτονίων (κόκκινη γραμμή), 20 φωτονίων (πράσινη γραμμή), 30 φωτονίων (μπλέ γραμμή) και 50 φωτονίων (φούξια γραμμή) στον πρώτο (αριστερά) και στον δεύτερο όροφο (δεξιά)



Σχήμα 4.3: Το ενεργειακό φάσμα των δεσμών ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 100 GeV με τουλάχιστον 3 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση με όριο αποδοχής 5 φωτονίων (μαύρη γραμμή), 10 φωτονίων (κόκκινη γραμμή), 20 φωτονίων (πράσινη γραμμή), 30 φωτονίων (μπλέ γραμμή) και 50 φωτονίων (φούξια γραμμή) στον πρώτο (αριστερά) και στον δεύτερο όροφο (δεξιά)

Όπως μπορούμε να παρατηρήσουμε από τις γραφικές παραστάσεις $N_{\text{φωτονίων}} > 30, 50$ η στατιστική είναι περιορισμένη ακόμα και με την απαίτηση τουλάχιστον 2 οπτικών στοιχείων σε σύμπτωση στον ίδιο όροφο.

Όπως αναμένεται, και γίνεται φανερό από τους πίνακες 4.1, 4.2, 4.3 η συνεισφορά ατμοσφαιρικών μιονίων χαμηλής ενέργειας $E_{\text{δεσμής}} \geq 1 \text{ TeV}$ μειώνεται από 24% σε 12% και 5%, όταν απαιτηθεί σήμα σε χρονική σύμπτωση σε τουλάχιστον 3 οπτικά στοιχεία στον ίδιο όροφο ή σήμα σε χρονική σύμπτωση σε τουλάχιστον 3 οπτικά στοιχεία στους 2 ορόφους.

4.3 Γεγονότα ατμοσφαιρικών μιονίων ενέργειας μεγαλύτερης από 1 TeV

Από την στιγμή που έχουμε επιλέξει το κατώτερο όριο αποδοχής σήματος $N_{\text{φωτονίων}} > 20$ ένα νέο δείγμα δεσμών ατμοσφαιρικών μιονίων δημιουργήθηκε με ενέργειες μεγαλύτερες του 1 TeV και με χρόνο ζωής 4.6 ημερών. Ο αριθμός των γεγονότων ατμοσφαιρικών μιονίων, λαμβάνοντας υπόψιν και το σήμα από θόρυβο, σε διάστημα 24 ωρών λειτουργίας παρουσιάζεται στους πίνακες 4.4 και 4.5 για σύμπτωση γεγονότων μεταξύ τουλάχιστον 2 και 3 οπτικών στοιχείων σε κάθε όροφο αντίστοιχα.

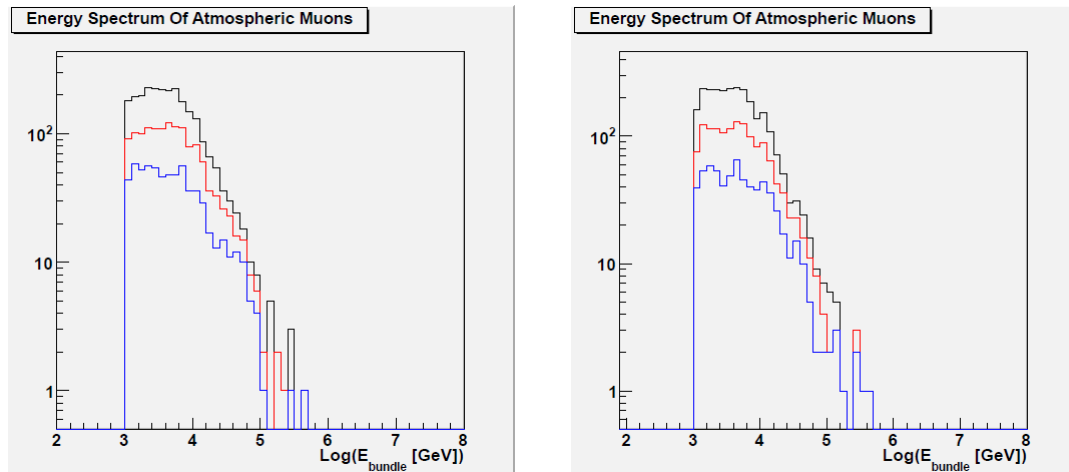
Ατμοσφαιρικά μίονια ανά ημέρα	$E_{\text{δέσμης}} \geq 1\text{TeV}$	$1\text{TeV} \leq E_{\text{δέσμης}} \leq 10\text{TeV}$
1ος όροφος $N_{\text{φωτονίων}} \geq 20$	543	487
2ος όροφος $N_{\text{φωτονίων}} \geq 20$	575	517
και στους 2 ορόφους $N_{\text{φωτονίων}} \geq 20$	65	48
1ος όροφος $N_{\text{φωτονίων}} \geq 30$	297	258
2ος όροφος $N_{\text{φωτονίων}} \geq 30$	308	269
και στους 2 ορόφους $N_{\text{φωτονίων}} \geq 30$	29	19
1ος όροφος $N_{\text{φωτονίων}} \geq 50$	142	123
2ος όροφος $N_{\text{φωτονίων}} \geq 50$	144	123
και στους 2 ορόφους $N_{\text{φωτονίων}} \geq 50$	10	6

Πίνακας 4.4: Ο αριθμός των γεγονότων που αναμένονται ανά μέρα από ατμοσφαιρικά μίονια με ενέργεια δέσμης μεγαλύτερη του 1 TeV και με ενέργεια μεταξύ 1 TeV και 10 TeV, με χρονική σύμπτωση μεταξύ τουλάχιστον 2 οπτικών στοιχείων

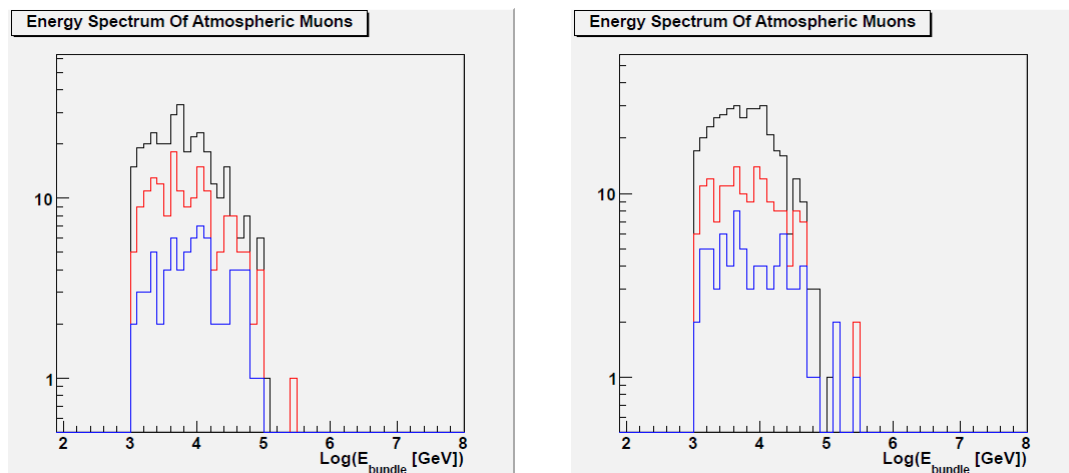
Ατμοσφαιρικά μίονια ανά ημέρα	$E_{\text{δέσμης}} \geq 1\text{TeV}$	$1\text{TeV} \leq E_{\text{δέσμης}} \leq 10\text{TeV}$
1ος όροφος $N_{\text{φωτονίων}} \geq 20$	72	59
2ος όροφος $N_{\text{φωτονίων}} \geq 20$	82	71
και στους 2 ορόφους $N_{\text{φωτονίων}} \geq 20$	4	2
1ος όροφος $N_{\text{φωτονίων}} \geq 30$	38	30
2ος όροφος $N_{\text{φωτονίων}} \geq 30$	36	30
και στους 2 ορόφους $N_{\text{φωτονίων}} \geq 30$	2	1
1ος όροφος $N_{\text{φωτονίων}} \geq 50$	16	12
2ος όροφος $N_{\text{φωτονίων}} \geq 50$	17	13
και στους 2 ορόφους $N_{\text{φωτονίων}} \geq 50$	0	0

Πίνακας 4.5: Ο αριθμός των γεγονότων που αναμένονται ανά μέρα από ατμοσφαιρικά μίονια με ενέργεια δέσμης μεγαλύτερη του 1 TeV και με ενέργεια μεταξύ 1 TeV και 10 TeV, με χρονική σύμπτωση μεταξύ τουλάχιστον 3 οπτικών στοιχείων

Τα αντίστοιχα φάσματα των ενεργειών των δεσμών των ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες του 1 TeV παρουσιάζονται για σύμπτωση γεγονότων σε τουλάχιστον 2 και 3 οπτικά στοιχεία στον ίδιο όροφο. Στα σχήματα 4.4 και 4.5 είναι εμφανές ότι η συνεισφορά των μιονίων με ενέργειες $1 \text{ TeV} \leq E_{\text{δεσμής}} \leq 10 \text{ TeV}$ είναι περίπου σταθερή με την αύξηση του ορίου αποδοχής (όπως έχει προαναφερθεί). Η συνεισφορά των γεγονότων χαμηλών ενεργειών μειώνεται σημαντικά εάν απαιτήσουμε σύμπτωση γεγονότων ταυτόχρονα στους δύο ορόφους όπως ακριβώς αναμένεται από την κλίση του φάσματος των ατμοσφαιρικών μιονίων.



Σχήμα 4.4: Το ενεργειακό φάσμα των δεσμών ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 1 TeV με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση με όριο αποδοχής 20 φωτονίων (μαύρη γραμμή), 30 φωτονίων (κόκκινη γραμμή), και 50 φωτονίων (μπλέ γραμμή) στον πρώτο (αριστερά) και στον δεύτερο όροφο (δεξιά)

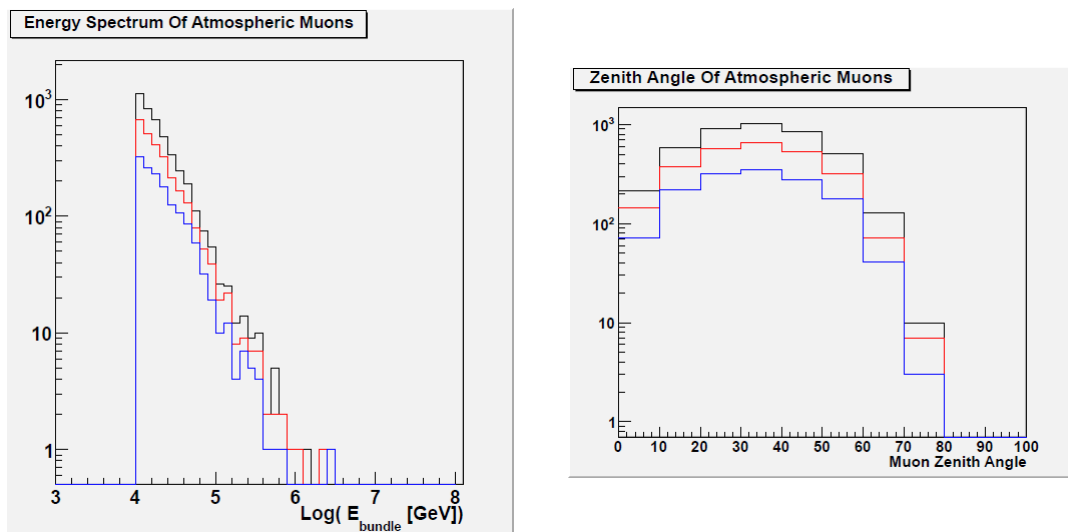


Σχήμα 4.5: Το ενεργειακό φάσμα των δεσμών ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 1 TeV με τουλάχιστον 3 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση με όριο αποδοχής 20 φωτονίων (μαύρη γραμμή), 30 φωτονίων (κόκκινη γραμμή), και 50 φωτονίων (μπλέ γραμμή) στον πρώτο (αριστερά) και στον δεύτερο όροφο (δεξιά)

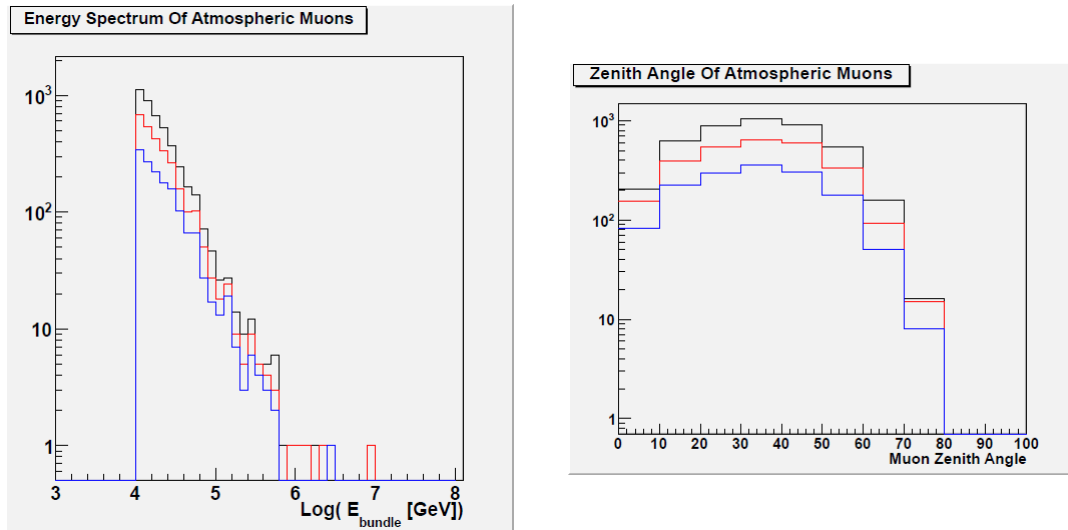
4.4 Γεγονότα ατμοσφαιρικών μιονίων ενέργειας μεγαλύτερης από 10 TeV

Από τη στιγμή που ο σκανδαλισμός γεγονότων είναι κατανοητός και έχει επιβεβαιωθεί ο μηχανισμός λειτουργίας του, συμπτώσεις μεταξύ τουλάχιστον 3 οπτικών στοιχείων στον ίδιο όροφο και ταυτόχρονα και στους δύο μπορούν να χρησιμοποιηθούν για ανάλυση δεδομένων όπως έχει ήδη αναφερθεί. Μεγαλύτερη στατιστική σε υψηλότερες ενέργειες είναι απαραίτητη για τον στόχο της εργασίας. Για το σκοπό αυτό, δείγμα δεσμών ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες των 10 TeV, με αντίστοιχο χρόνο ζωής 41 ημέρων, δημιουργήθηκαν και προσομοιώθηκαν. Από αυτό το σημείο και στην συνέχεια της εργασίας αναφερόμαστε μόνο σε δείγματα ατμοσφαιρικών μιονίων ενέργειας μεγαλύτερης από 10 TeV καθώς αυτή είναι και η ενεργειακή περιοχή ενδιαφέροντος για τον έλεγχο της απόκρισης του ανιχνευτή GRBNeT.

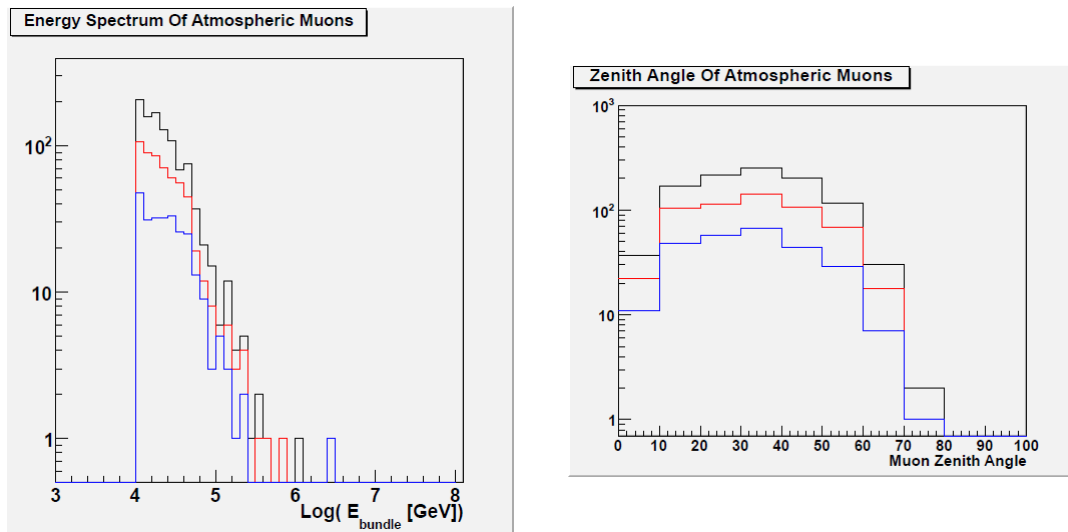
Τα αντίστοιχα φάσματα των ενεργειών των δεσμών των ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες των 10 TeV παρουσιάζονται στα σχήματα 4.6 - 4.9 για σύμπτωση γεγονότων σε τουλάχιστον 2 και 3 οπτικά στοιχεία στον ίδιο όροφο. Επιπλέον παρουσιάζεται η ζενιθιακή κατανομή των ατμοσφαιρικών μιονίων θεωρώντας ζενιθιακή γωνία 0° τη κάθετη πρόπτωση στον πρώτο (επάνω) όροφο του ανιχνευτή.



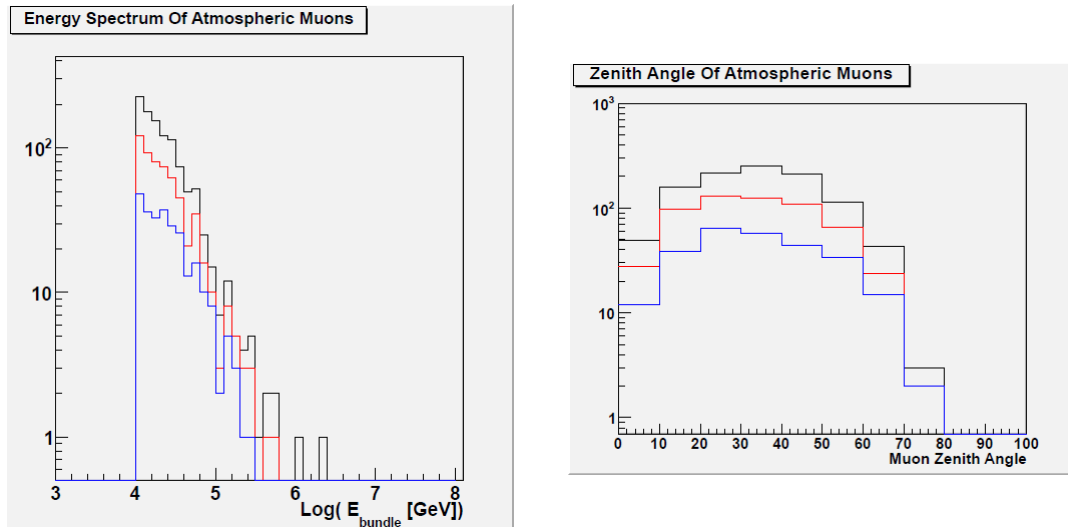
Σχήμα 4.6: Το ενεργειακό φάσμα και η ζενιθιακή κατανομή των δεσμών ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10 TeV με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση με όριο αποδοχής 20 φωτονίων (μαύρη γραμμή), 30 φωτονίων (κόκκινη γραμμή), και 50 φωτονίων (μπλέ γραμμή) στον πρώτο όροφο



Σχήμα 4.7: Το ενεργειακό φάσμα και η ζενιθιακή κατανομή των δεσμών ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10 TeV με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση με όριο αποδοχής 20 φωτονίων (μαύρη γραμμή), 30 φωτονίων (κόκκινη γραμμή), και 50 φωτονίων (μπλέ γραμμή) στον δεύτερο όροφο

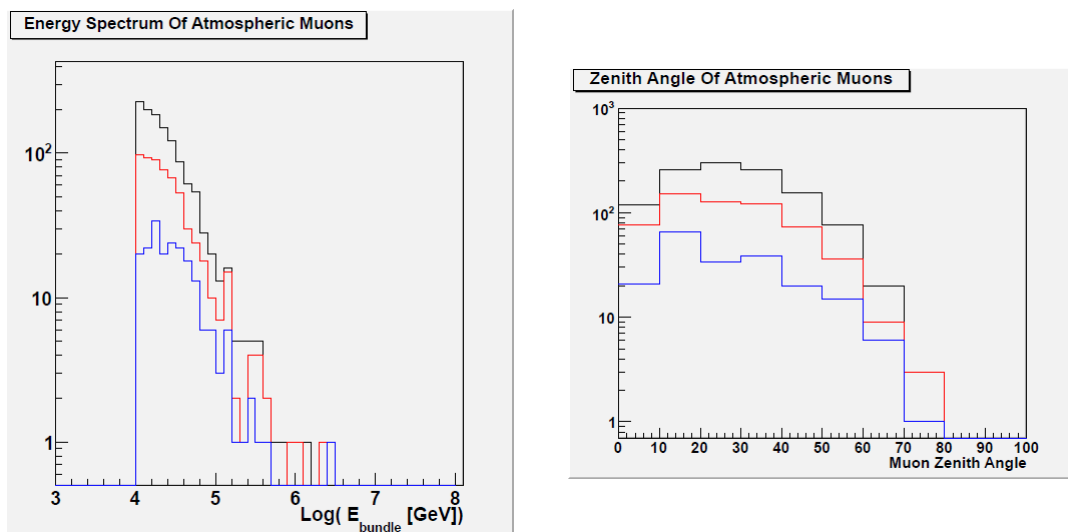


Σχήμα 4.8: Το ενεργειακό φάσμα και η ζενιθιακή κατανομή των δεσμών ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10 TeV με τουλάχιστον 3 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση με όριο αποδοχής 20 φωτονίων (μαύρη γραμμή), 30 φωτονίων (κόκκινη γραμμή), και 50 φωτονίων (μπλέ γραμμή) στον πρώτο όροφο

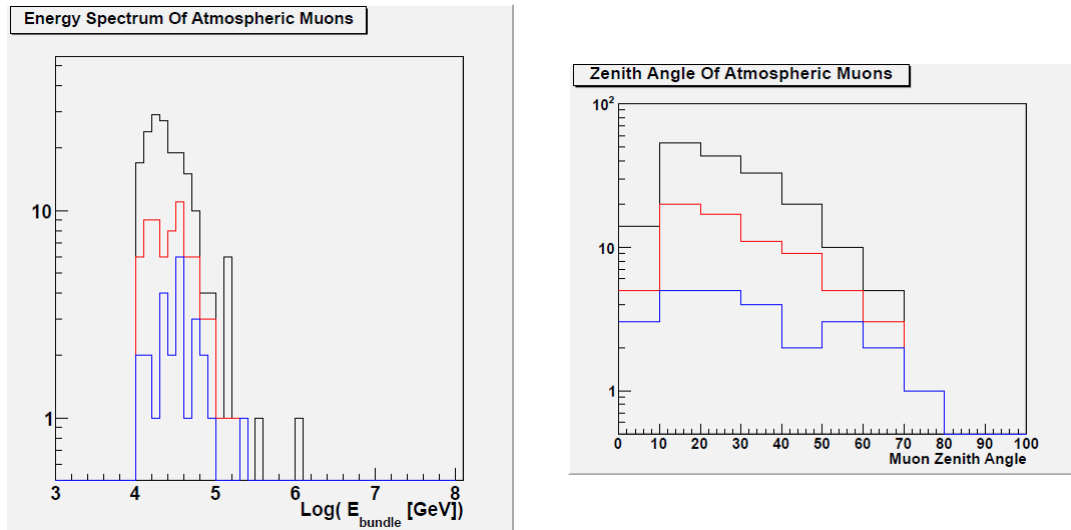


Σχήμα 4.9: Το ενεργειακό φάσμα και η ζενιθιακή κατανομή των δεσμών ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10 TeV με τουλάχιστον 3 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση με όριο αποδοχής 20 φωτονίων (μαύρη γραμμή), 30 φωτονίων (κόκκινη γραμμή), και 50 φωτονίων (μπλέ γραμμή) στον δεύτερο όροφο

Σε αυτές τις ενέργειες, είναι σημαντικό να παρουσιαστούν οι αντίστοιχες γραφικές παραστάσεις (σχήματα 4.10 και 4.11) για την σύμπτωση γεγονότων σε τουλάχιστον 2 και 3 οπτικά στοιχεία ταυτόχρονα και στους δύο ορόφους για τα διαφορετικά όρια αποδοχής που έχουν τεθεί.

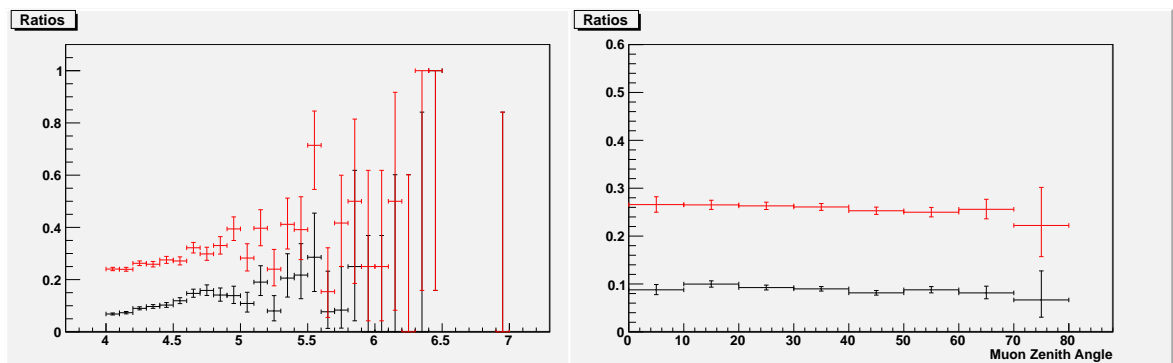


Σχήμα 4.10: Το ενεργειακό φάσμα και η ζενιθιακή κατανομή των δεσμών ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10 TeV με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση με όριο αποδοχής 20 φωτονίων (μαύρη γραμμή), 30 φωτονίων (κόκκινη γραμμή), και 50 φωτονίων (μπλέ γραμμή) ταυτόχρονα και στους δύο ορόφους

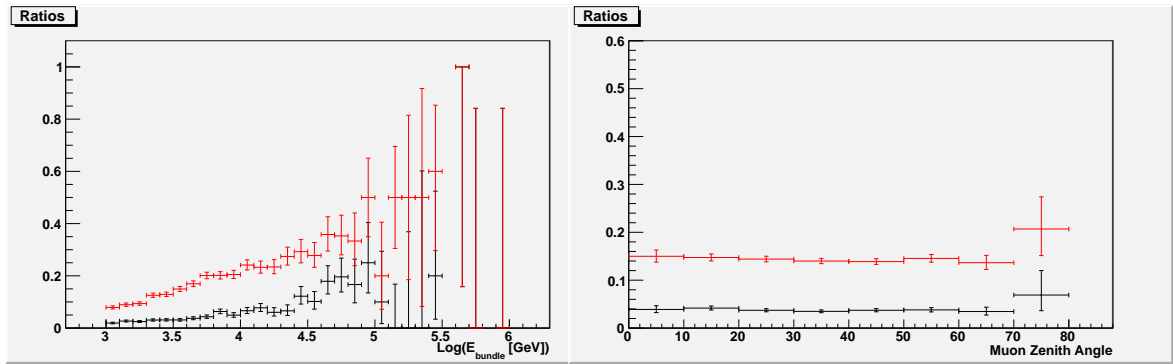


Σχήμα 4.11: Το ενεργειακό φάσμα και η ζενιθιακή κατανομή των δεσμών ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10 TeV με τουλάχιστον 3 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση με όριο αποδοχής 20 φωτονίων (μαύρη γραμμή), 30 φωτονίων (κόκκινη γραμμή), και 50 φωτονίων (μπλέ γραμμή) ταυτόχρονα και στους δύο ορόφους

Το ποσοστό των γεγονότων που έχουν σύμπτωση τουλάχιστον 2 οπτικών στοιχείων με όριο αποδοχής 20 και 50 φωτονίων ως προς τα γεγονότα που θα μπορούσε ο ανιχνευτής να ανιχνεύσει - δηλαδή των γεγονότων που έχουν σύμπτωση σε τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία με όριο αποδοχής σήματος 5 φωτονίων - παρουσιάζεται ως συνάρτηση της ενέργειας των δεσμών των ατμοσφαιρικών μιονίων (για ενέργειες μεγαλύτερες από 10 TeV και ξεχωριστά για σύγκριση για ενέργειες μεγαλύτερες του 1 TeV) και της ζενιθιακής γωνίας για τον πρώτο όροφο (σχήματα 4.12 και 4.13). Παρατηρείται ότι το ποσοστό των γεγονότων που λαμβάνουμε διατηρείται αυξάνοντας το όριο αποδοχής και ακολουθεί το φάσμα της ενέργειας ενώ ταυτόχρονα είναι ανεξάρτητο της ζενιθιακής γωνίας.

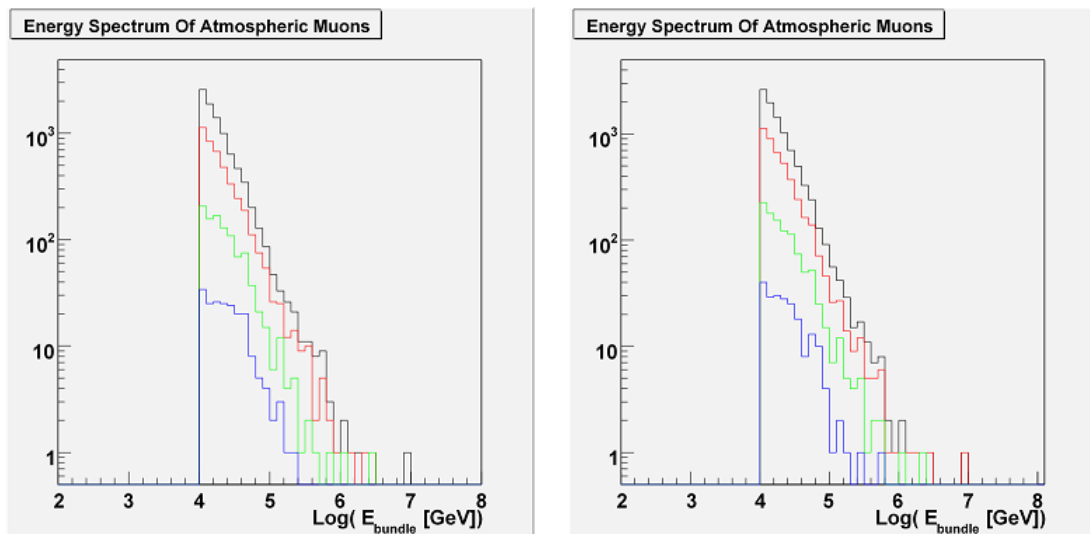


Σχήμα 4.12: Ο λόγος των γεγονότων ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10 TeV με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση, με όριο αποδοχής 50 φωτονίων (μαύρη γραμμή), 20 φωτονίων (κόκκινη γραμμή) ως προς τα γεγονότα με σύμπτωση τουλάχιστον 2 οπτικών στοιχείων με όριο αποδοχής 5 φωτονίων για τον πρώτο όροφο



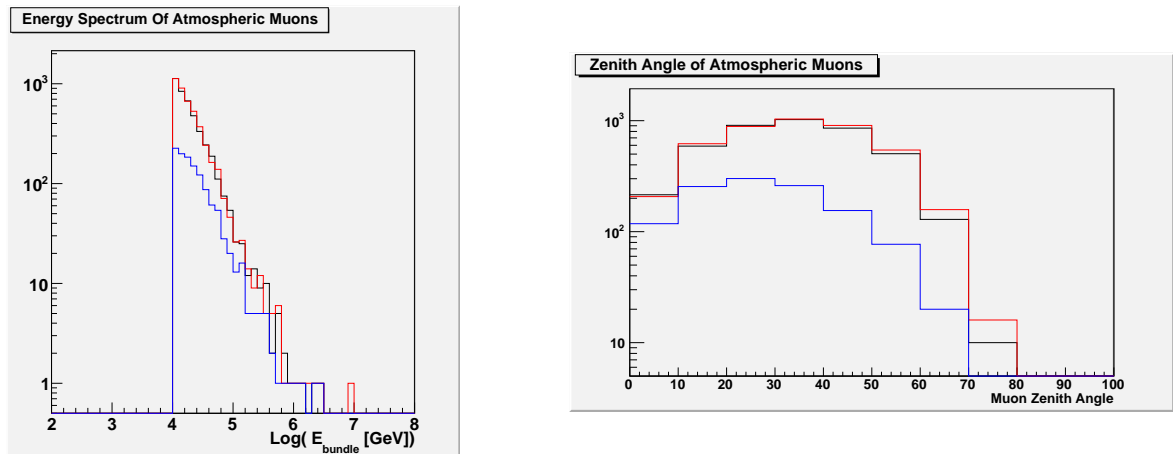
Σχήμα 4.13: Ο λόγος των γεγονότων ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 1 TeV με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση, με όριο αποδοχής 50 φωτονίων (μαύρη γραμμή), 20 φωτονίων (κόκκινη γραμμή) ως προς τα γεγονότα με σύμπτωση τουλάχιστον 2 οπτικών στοιχείων με όριο αποδοχής 5 φωτονίων για τον πρώτο όροφο

Για περαιτέρω συγκρίση και ανάλυση παρουσιάζονται στο σχήμα 4.14 τα ενεργειακά φάσματα για το ελάχιστο όριο αποδοχής σήματος ($N_{\text{φωτονίων}} > 20$) και συμπτώσεις γεγονότων σε 1,2,3 και 4 οπτικά στοιχεία στον πρώτο όροφο (αντίστοιχη εικόνα επικρατεί και στον δεύτερο όροφο).



Σχήμα 4.14: Το ενεργειακό φάσμα των δεσμών ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10 TeV με 1 οπτικό στοιχείο (μαύρη γραμμή), 2 οπτικά στοιχεία (κόκκινη γραμμή), 3 οπτικά στοιχεία (πράσινη γραμμή) και 4 οπτικά στοιχεία (μπλέ γραμμή) σε σύμπτωση με όριο αποδοχής 20 φωτονίων στον πρώτο όροφο

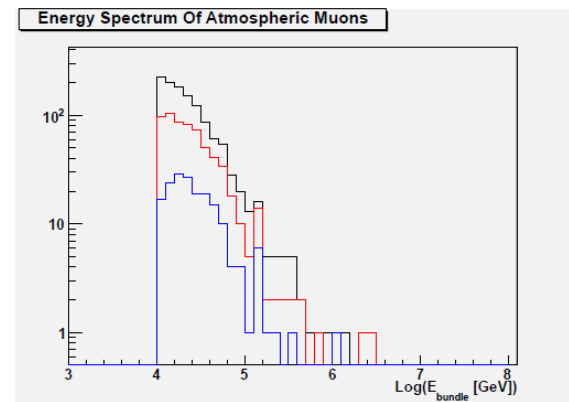
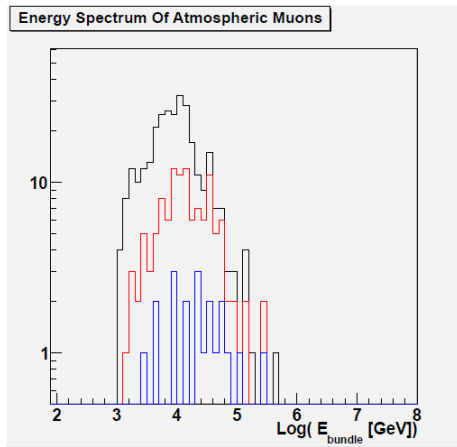
Ενδιαφέρουσα είναι η μελέτη της απόκρισης του ανιχνευτή για απαίτηση σύμπτωσης γεγονότων ταυτόχρονα και στους 2 ορόφους. Για τα γεγονότα που αναμένεται να ανιχνευθούν από την αυτόνομη ανιχνευτική μονάδα κατά τη διάρκεια της πόντισης, καταλήξαμε ότι απαιτώντας σύμπτωση μεταξύ οπτικών στοιχείων ταυτόχρονα και στους δύο ορόφους (και όχι αποκλειστικά σε έναν) λαμβάνουμε έντονη μείωση της συνεισφοράς των ατμοσφαιρικών μιονίων χαμηλής ενέργειας κρατώντας υψηλή ανιχνευτική ικανότητα για τα μόνια υψηλών ενεργειών. Αυτό έχει ήδη παρουσιαστεί στους πίνακες των προηγούμενων παραγράφων για χαμηλότερες ενέργειες. Στις γραφικές παραστάσεις του σχήματος 4.15 παρουσιάζεται η σύγκριση των ενεργειακών φασμάτων και των ζενιθιακών κατανομών των γεγονότων που έχουν σύμπτωση τουλάχιστον 2 οπτικών στοιχείων στον πρώτο, στον δεύτερο και ταυτόχρονα στους δύο ορόφους με όριο αποδοχής σήματος το χαμηλότερο που έχουμε θέσει ($N_{\text{φωτονίων}} > 20$). Οι παραπάνω παρατηρήσεις επιβεβαιώνονται καθώς έχουμε υψηλή ανιχνευτική ικανότητα για ενέργειες μεγαλύτερες των 50 TeV που αποτελεί και την περιοχή ενδιαφέροντος για τα νετρίνα που προέρχονται από εκλάμψεις ακτίνων γάμμα.



Σχήμα 4.15: Το ενεργειακό φάσμα και η ζενιθιακή κατανομή των γεγονότων των δεσμών ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10 TeV με τουλάχιστον 2 οπτικά σε σύμπτωση με όριο αποδοχής σήματος τουλάχιστον 20 φωτονίων για τον πρώτο (μαύρη γραμμή), δεύτερο (κόκκινη γραμμή) και τους δύο ορόφους (μπλέ γραμμή)

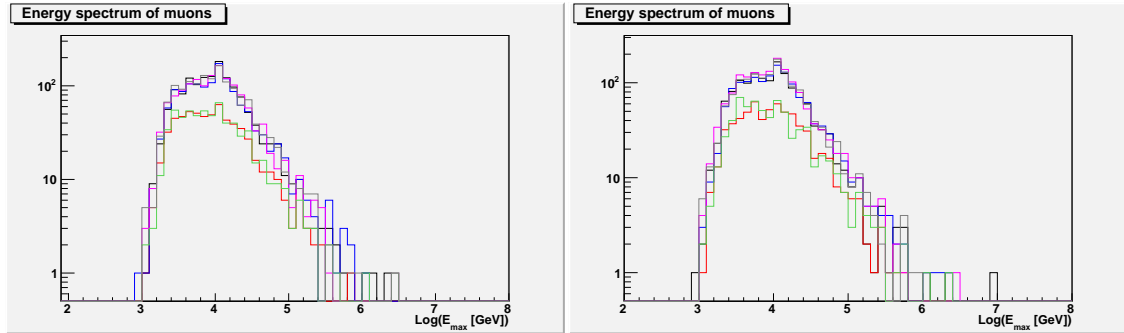
Επιπλέον συνδυασμοί για τις συμπτώσεις γεγονότων ταυτόχρονα και στους 2 ορόφους μελετήθηκαν. Στις γραφικές παραστάσεις του σχήματος 4.16 μελετήθηκε η απαίτηση να βρίσκονται σε σύμπτωση τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε κάθε όροφο, 3 οπτικά στοιχεία σε κάθε όροφο και 5 συνολικά οπτικά στοιχεία και στους δύο ορόφους.

Η σύγκριση των ρυθμών καταγραφής με τους προβλεπόμενους ρυθμούς γεγονότων και συμπτώσεων μεταξύ τουλάχιστον 2 ή 3 οπτικών στοιχείων σε έναν ή δύο ορόφους, θα χρησιμοποιηθεί για την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με τη λειτουργία της αυτόνομης συστοιχίας GRBNeT.

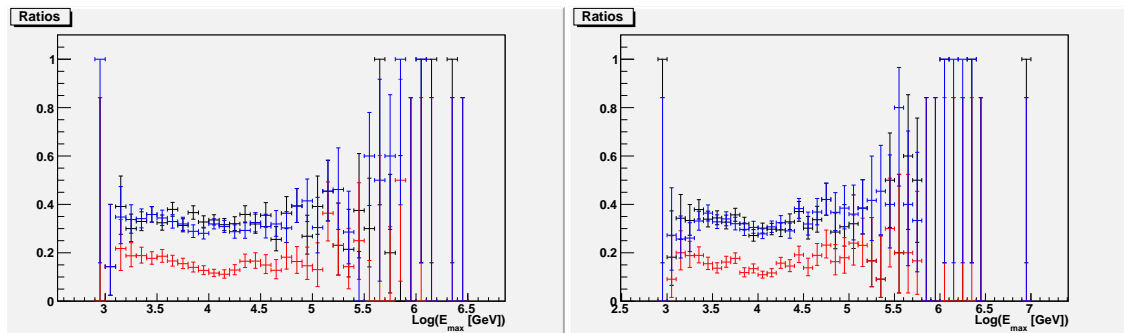


Σχήμα 4.16: Το ενεργειακό φάσμα γεγονότων των δεσμών ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 1 TeV (αριστερά) και 10 TeV (δεξιά) με χρήση 2 οπτικών στοιχείων σε κάθε όροφο (μαύρη γραμμή), 5 συνολικά οπτικών στοιχείων και στους δύο ορόφους (κόκκινη γραμμή) και 3 οπτικών στοιχείων σε κάθε όροφο (μπλέ γραμμή) με όριο αποδοχής σήματος τουλάχιστον 20 φωτονίων

Τέλος, μελετήθηκε η συχνότητα με την οποία υπάρχει σύμπτωση μεταξύ των οπτικών στοιχείων σε κάθε όροφο και παρουσιάζεται στις γραφικές παραστάσεις του σχήματος 4.17, για σύμπτωση τουλάχιστον 2 οπτικών στοιχείων στον πρώτο (αριστερά) και στον δεύτερο όροφο αντίστοιχα (δεξιά). Παρατηρείται ότι τα κοντινότερα μεταξύ τους οπτικά στοιχεία έρχονται σε σύμπτωση περισσότερες φορές από ότι τα διαγώνια στοιχεία μεταξύ τους. Ο λόγος για τον οποίο συμβαίνει το παραπάνω δεν είναι σαφής. Η υπάρχουσα στατιστική σε ενέργειες δέσμης $E_{\delta\epsilon\sigma\mu\eta\varsigma} \geq 50$ TeV είναι περιορισμένη και δεν επιτρέπει την εξαγωγή συμπερασμάτων σχετικά με την εξάρτηση από την ενέργεια των μιονίων. Για περαιτέρω σύγκριση παρουσιάζεται στο σχήμα 4.18, ο λόγος των γεγονότων μεταξύ των οπτικών στοιχείων τα οποία ήταν σε σύμπτωση τις περισσότερες φορές ως προς το συνολικό αριθμό γεγονότων σε σύμπτωση τουλάχιστον 2 οπτικών στοιχείων για τον πρώτο (αριστερά) και τον δεύτερο όροφο (δεξιά). Τα διαγώνια στοιχεία φαίνεται να έχουν λιγότερα γεγονότα σε σύμπτωση.



Σχήμα 4.17: Το ενεργειακό φάσμα γεγονότων των δεσμών ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10 TeV με σύμπτωση τουλάχιστον 2 οπτικών στοιχείων με όριο αποδοχής σήματος τουλάχιστον 20 φωτονίων στον πρώτο όροφο (αριστερά) και τον δεύτερο όροφο (δεξιά). Η σύμπτωση του 1^{ου} με το 2^ο οπτικό στοιχείο αναπαριστάται με μαύρη γραμμή, του 1^{ου} με το 3^ο οπτικό στοιχείο αναπαριστάται με κόκκινη γραμμή, του 1^{ου} με το 4^ο οπτικό στοιχείο αναπαριστάται με μπλέ γραμμή, του 2^{ου} με το 3^ο οπτικό στοιχείο αναπαριστάται με φούξια γραμμή, του 2^{ου} με το 4^ο οπτικό στοιχείο αναπαριστάται με πράσινη γραμμή και του 3^{ου} με το 4^ο οπτικό στοιχείο αναπαριστάται με γκρι γραμμή



Σχήμα 4.18: Οι λόγοι των γεγονότων των ατμοσφαιρικών μιονίων με ενέργειες μεγαλύτερες των 10 TeV με σύμπτωση τουλάχιστον 2 οπτικών στοιχείων με όριο απόδοχής τουλάχιστον 20 φωτονίων στον πρώτο (αριστερά) και τον δεύτερο όροφο (δεξιά) μεταξύ του οπτικού στοιχείου με τα περισσότερα γεγονότα και του δεύτερου στοιχείου με τα αμέσως λιγότερα γεγονότα (μαύρη γραμμή), του οπτικού στοιχείου με τα περισσότερα γεγονότα με το τρίτο στοιχείο με τα αμέσως λιγότερα γεγονότα (μπλέ γραμμή) και του οπτικού στοιχείου με τα περισσότερα γεγονότα με το διαγώνιο του οπτικό στοιχείο (κόκκινη γραμμή) ως προς τα γεγονότα σε σύμπτωση τουλάχιστον 2 οπτικών στοιχείων στον ίδιο όροφο.

Κεφάλαιο 5

Μελέτες σκανδαλισμού γεγονότων νετρίνων αστροφυσικής προέλευσης

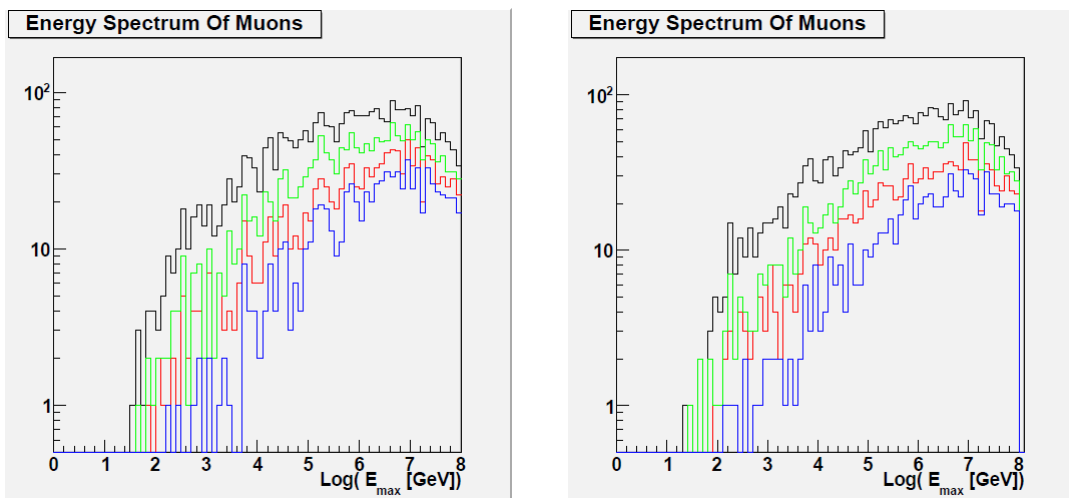
Το ενεργειακό φάσμα των μιονίων που προέρχονται από νετρίνα των εκλάμψεων ακτίνων γάμμα (GRBs) είναι πιο απότομο από το ενεργειακό φάσμα των ατμοσφαιρικών μιονίων. Όπως φαίνεται στις προηγούμενες γραφικές παραστάσεις, η αύξηση του ορίου αποδοχής σήματος για τα οπτικά στοιχεία βοηθά στην εξάλειψη γεγονότων με ενέργειες μικρότερες των 50 TeV περίπου. Η στατιστική στις υψηλότερες ενέργειες (μεγαλύτερες των 100 TeV) είναι μικρή, αλλά το ενδιαφέρον αυτής της εργασίας συγκεντρώνεται στην μείωση της συνεισφοράς στο σήμα από ατμοσφαιρικά μόνια, δηλαδή σε χαμηλότερες ενέργειες. Καθώς το φάσμα γίνεται όλο και πιο απότομο με την αύξηση της ενέργειας, θέτοντας το όριο αποδοχής σήματος για κάθε οπτικό στοιχείο στα τουλάχιστον 20 φωτόνια, κερδίζουμε μεγάλη μείωση της συνεισφοράς των ατμοσφαιρικών μιονίων κρατώντας παράλληλα ένα "λογικό" ποσοστό γεγονότων για περαιτέρω ανάλυση.

Για την μελέτη της επιρροής των απαιτήσεων στο επίπεδο σκανδαλισμού στα μόνια που προέρχονται από νετρίνα από εκλάμψεις ακτίνων γάμμα και που ακολουθούν το φάσμα E^{-2} και από υψηλής ενέργειας νετρίνα, γεγονότα νετρίνων παρήχθησαν με ενεργειακό φάσμα $E^{-1.4}$ και προσομοιώθηκαν για τον αυτόνομο πρότυπο ανιχνευτή. Οι αναμενόμενες τιμές για υψηλής ενέργειας νετρίνα υπολογίστηκαν επανασταθμίζοντας τα γεγονότα με βάση τη σχετιζόμενη ροή (σε bins ενέργειας). Με αυτόν τον τρόπο, έχουμε αξιόπιστες εκτιμήσεις τόσο για τη περιοχή υψηλών ενεργειών (που είναι για εμάς η περιοχή ενδιαφέροντος) αλλά και λιγότερες αβεβαιότητες λόγω της μικρής στατιστικής.

Για έναν ανιχνευτή πλήρους μεγέθους είναι σύνηθες να απαιτείται το μόνιο να διαπερνά το εσωτερικό του όγκου που περιέχει ανιχνευτικές μονάδες με σκοπό να αποφευχθούν συνεισφορές από Cherenkov φωτόνια που εκπέμπονται από μόνια που είναι είτε πολύ κοντά στις άκρες είτε στο εξωτερικό του ανιχνευτή. Για την παρούσα μελέτη, επικεντρωθήκαμε σε προσομοιώσεις της αυτόνομης ανιχνευτικής μονάδας και ως αποτέλεσμα ο όγκος που εμπεριέχει διάταξη είναι πολύ μικρός. Για αυτόν τον λόγο δεν εφαρμόζουμε περαιτέρω απαιτήσεις για

την κατεύθυνση του μιονίου και ως εκ τούτου, μόνια οποιασδήποτε προέλευσης πολύ μακριά από την αυτόνομη ανιχνευτική μονάδα μπορεί να δώσουν σήμα σε κάποιο οπτικό στοιχείο.

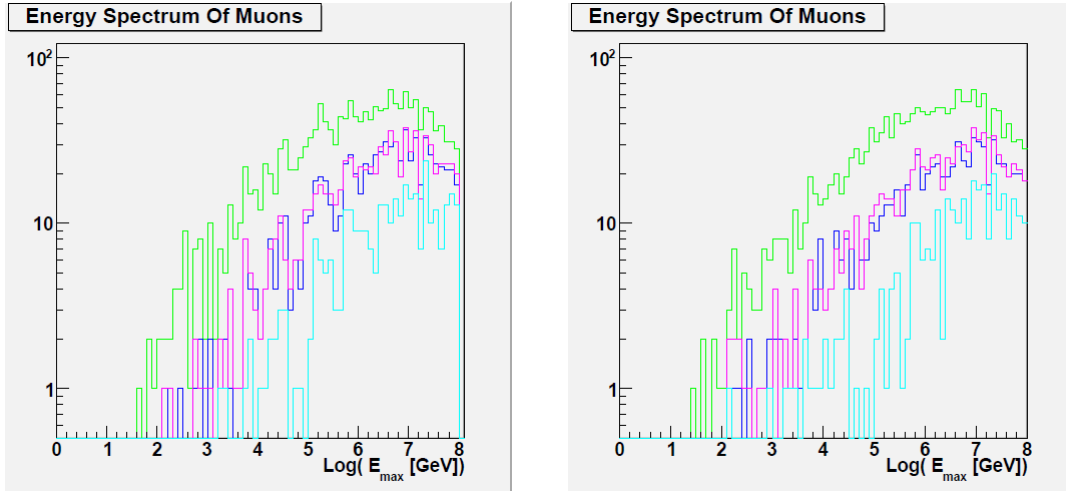
Όπως μελετήσαμε τα δείγματα ατμοσφαιρικών μιονίων, απαιτούμε στο επίπεδο σκανδαλισμού μια τοπική σύμπτωση γεγονότων σε 2 οπτικά στοιχεία στον ίδιο όροφο. Στις γραφικές παραστάσεις του σχήματος 5.1, για όλα τα γεγονότα που παρήχθησαν με φάσμα $E^{-1.4}$, παρουσιάζεται ο αριθμός των γεγονότων σε τουλάχιστον 1 οπτικό στοιχείο με όριο αποδοχής σήματος τουλάχιστον 5 φωτονίων και 20 φωτονίων σαν συνάρτηση της ενέργειας των μιονίων για τον πρώτο και τον δεύτερο όροφο. Τα παραπάνω συγκρίνονται με τον αριθμό των γεγονότων με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση στον ίδιο όροφο με όριο αποδοχής τουλάχιστον 5 και 20 φωτονίων.



Σχήμα 5.1: Το ενεργειακό φάσμα γεγονότων νετρίνων σε τουλάχιστον 1 οπτικό στοιχείο με όριο αποδοχής τουλάχιστον 5 (μαύρη γραμμή) και 20 φωτονίων (κόκκινη γραμμή) για κάθε όροφο συγκρίνεται με το ενεργειακό φάσμα γεγονότων νετρίνων με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση στον ίδιο όροφο (πρώτος αριστερά και δεύτερος δεξιά) για όριο αποδοχής σήματος τουλάχιστον 5 (πράσινη γραμμή) και 20 φωτονίων (μπλέ γραμμή)

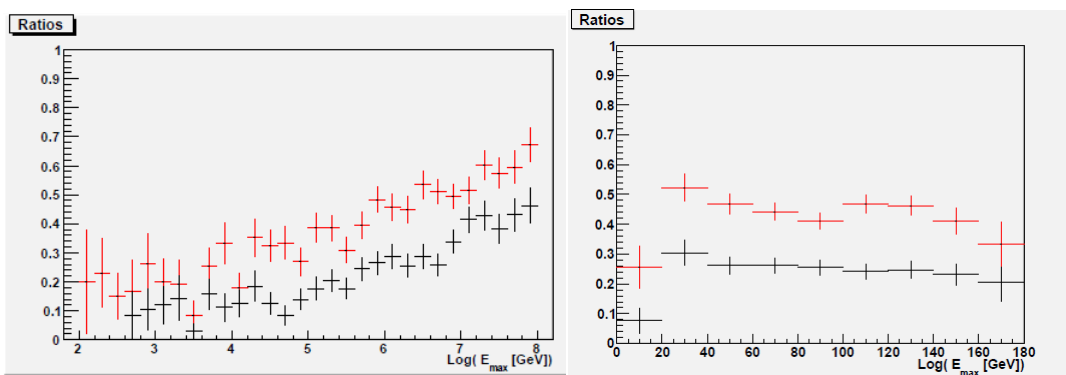
Στο σχήμα 5.1, το μαύρο ιστόγραμμα αναπαριστά όλα τα γεγονότα νετρίνων τα οποία μπορεί να ανιχνεύσει η αυτόνομη ανιχνευτική μονάδα ενώ το πράσινο ιστόγραμμα αναπαριστά έναν "ρεαλιστικό" αριθμό γεγονότων που θα μπορούσαν να χρησιμοποιηθούν για περαιτέρω ανάλυση.

Στη συνέχεια, ο αριθμός των γεγονότων με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση, στον ίδιο όροφο με όριο αποδοχής τουλάχιστον 5 και 20 φωτονίων συγκρίνεται με τον αριθμό των γεγονότων με τουλάχιστον 3 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση, στον ίδιο όροφο με όριο αποδοχής τουλάχιστον 5 και 20 φωτονίων, όπως παρουσιάζεται στις γραφικές παραστάσεις του σχήματος 5.2.

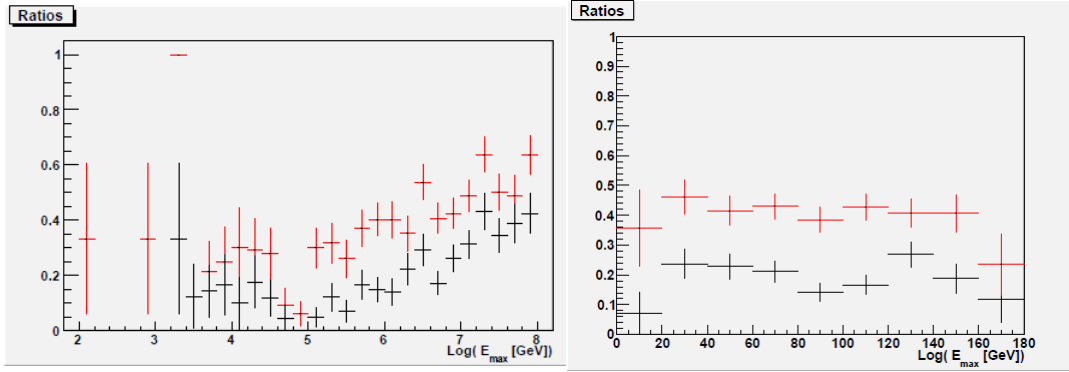


Σχήμα 5.2: Το ενεργειακό φάσμα γεγονότων νετρίνων με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση με όριο αποδοχής τουλάχιστον 5 (πράσινη γραμμή) και 20 φωτονίων (μπλέ γραμμή) για κάθε όροφο συγκρίνεται με το ενεργειακό φάσμα γεγονότων νετρίνων με τουλάχιστον 3 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση στον ίδιο όροφο (πρώτος αριστερά και δεύτερος δεξιά) για όριο αποδοχής σήματος τουλάχιστον 5 (φούξια γραμμή) και 20 φωτονίων (κυανή γραμμή)

Για να διευκολυνθούν οι συγκρίσεις, η ίδια πληροφορία παρουσιάζεται υπό μορφή αναλογίας στις γραφικές παραστάσεις των σχημάτων 5.3 και 5.4. Ο λόγος του αριθμού των γεγονότων με τουλάχιστον 2 και 3 οπτικά στοιχεία με όριο αποδοχής τουλάχιστον 20 και 50 φωτονίων ως προς τον αριθμό των γεγονότων με τουλάχιστον 2 και 3 οπτικά στοιχεία με όριο αποδοχής τουλάχιστον 5 φωτονίων παρουσιάζεται συναρτήσει της ενέργειας των παραχθέντων μιονίων και της ζενιθιακής γωνίας. Όπως αναμενόταν, ο λόγος των γεγονότων αυξάνεται καθώς αυξάνεται η ενέργεια και είναι ανεξάρτητος της ζενιθιακής γωνίας.



Σχήμα 5.3: Ο λόγος των γεγονότων νετρίνων με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση στον πρώτο όροφο, με όριο αποδοχής 50 φωτονίων (μαύρη γραμμή) και 20 φωτονίων (κόκκινη γραμμή) ως προς τα γεγονότα με σύμπτωση τουλάχιστον 2 οπτικών στοιχείων με όριο αποδοχής 5 φωτονίων συναρτήσει της ενέργειας μιονίων (αριστερά) και της ζενιθιακής γωνίας (δεξιά)



Σχήμα 5.4: Ο λόγος των γεγονότων νετρίνων με τουλάχιστον 3 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση στον πρώτο όροφο, με όριο αποδοχής 50 φωτονίων (μαύρη γραμμή) και 20 φωτονίων (κόκκινη γραμμή) ως προς τα γεγονότα με σύμπτωση τουλάχιστον 2 οπτικών στοιχείων με όριο αποδοχής 5 φωτονίων συναρτήσει της ενέργειας μιονίων (αριστερά) και της ζενιθιακής γωνίας (δεξιά)

Με σκοπό να εξάγουμε ευκολότερα συμπεράσματα, γεγονότα νετρίνων επανασταθμίζονται σε ενεργειακό φάσμα E^{-2} και ο αριθμός των γεγονότων νετρίνων σε τουλάχιστον 1 οπτικό στοιχείο με όριο αποδοχής τουλάχιστον 5 φωτονίων θεωρείται ως το δείγμα όλων των γεγονότων νετρίνων τα οποία "αφήνουν" ανιχνεύσιμο σήμα στην αυτόνομη ανιχνευτική μονάδα. Το ποσοστό των γεγονότων νετρίνων που καταφέρνουν να περάσουν από επιπλέον απαιτήσεις που θέτουμε στον αριθμό των οπτικών στοιχείων σε σύμπτωση και στο όριο αποδοχής σήματος παρουσιάζεται στον πίνακα 5.1 για ενέργειες μεγαλύτερες των 100 TeV. Με τις ίδιες απαιτήσεις και ξεχωριστά για κάθε όροφο και για την ταυτόχρονη σύμπτωση γεγονότων και στους δύο ορόφους παρουσιάζονται τα ποσοστά των υψηλής ενέργειας γεγονότων νετρίνων με ενέργειες μεγαλύτερες των 100 TeV στον πίνακα 5.2.

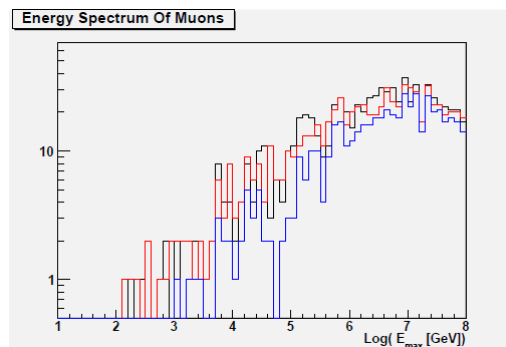
Φάσμα E^{-2} για $E_\mu > 100TeV$	Αναλογία γεγονότων νετρίνων
Συγκριτικά με $\geq 1 OM$ με $N_{\text{φωτονων}} \geq 5$	
$\geq 2OMs$ με $N_{\text{φωτονων}} \geq 5$	66%
$\geq 3OMs$ με $N_{\text{φωτονων}} \geq 5$	30%
$\geq 1OM$ με $N_{\text{φωτονων}} \geq 20$	43%
$\geq 2OMs$ με $N_{\text{φωτονων}} \geq 20$	31%
$\geq 3OMs$ με $N_{\text{φωτονων}} \geq 20$	13%

Πίνακας 5.1: Ο λόγος των γεγονότων που αναμένονται σε χρονική σύμπτωση για διαφορετικού αριθμού σύμπτωση οπτικών στοιχείων με διαφορετικά όρια αποδοχής σήματος ως προς τα γεγονότα νετρίνων τα οποία μπορούν να ανιχνευθούν από την αυτόνομη ανιχνευτική μονάδα

Αναλογία γεγονότων νετρίνων με φάσμα E^{-2} για $E_\mu > 100TeV$	1ος όροφος	2ος όροφος	και οι 2 όροφοι
$\geq 1OM$ με $N_{\text{φωτονων}} \geq 5$	66%	69%	77%
$\geq 2OMs$ με $N_{\text{φωτονων}} \geq 5$	74%	74%	84%
$\geq 3OMs$ με $N_{\text{φωτονων}} \geq 5$	82%	81%	87%
$\geq 1OM$ με $N_{\text{φωτονων}} \geq 20$	76%	74%	86%
$\geq 2OMs$ με $N_{\text{φωτονων}} \geq 20$	84%	81%	90%
$\geq 3OMs$ με $N_{\text{φωτονων}} \geq 20$	92%	90%	93%

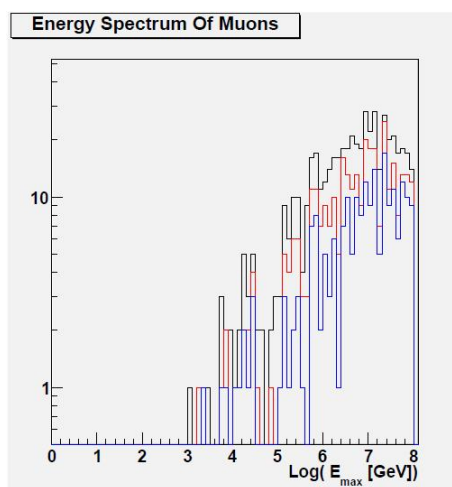
Πίνακας 5.2: Η συνεισφορά των υψηλής ενέργειας γεγονότων νετρίνων προς τον συνολικό αριθμό γεγονότων που αναμένεται να ικανοποιούν διαφορετικές απαιτήσεις στην σύμπτωση οπτικών στοιχείων και στο όριο αποδοχής

Όπως και για τα γεγονότα ατμοσφαιρικών μιονίων έτσι και για τα γεγονότα νετρίνων μελετήσαμε την διαφορά στην ανιχνευτική ικανότητα αλλά και στην μείωση του υποβάθρου απαιτώντας σύμπτωση γεγονότων σε τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία με όριο αποδοχής σήματος τουλάχιστον 20 φωτονίων όπως παρουσιάζεται στην γραφική παράσταση του σχήματος 5.5. Τα συμπεράσματα είναι κοινά με τα συμπεράσματα για τα ατμοσφαιρικά μίονια καθώς σε υψηλές ενέργειες (κυρίως άνω των 50 TeV που είναι και η περιοχή ενδιαφέροντος) διατηρείται υψηλή ανιχνευτική ικανότητα στα γεγονότα νετρίνων.



Σχήμα 5.5: Ο αριθμός των γεγονότων νετρίνων με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε σύμπτωση με όριο αποδοχής σήματος τουλάχιστον 20 φωτονίων συναρτίζει του λογαρίθμου της ενέργειας των νετρίνων για τον πρώτο (μαύρη γραμμή), δεύτερο (κόκκινη γραμμή) και τους δύο ορόφους (μπλέ γραμμή)

Επιπλέον συνδυασμοί για τις συμπτώσεις γεγονότων και στους δύο ορόφους ταυτόχρονα μελετήθηκαν. Στην γραφική παράσταση 5.6 μελετήθηκε η απαίτηση να βρίσκονται σε σύμπτωση τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε κάθε όροφο, 3 οπτικά στοιχεία σε κάθε όροφο και 5 συνολικά οπτικά στοιχεία και στους δύο ορόφους.



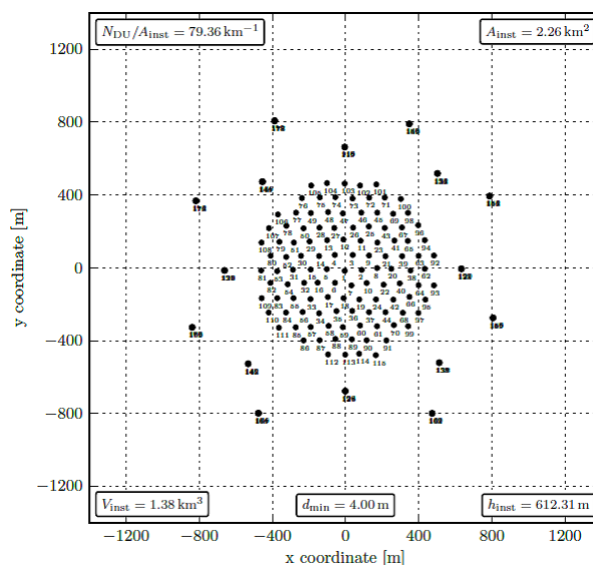
Σχήμα 5.6: Ο αριθμός των γεγονότων νετρίνων με τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία σε κάθε όροφο (μαύρη γραμμή), 3 οπτικά στοιχεία σε κάθε όροφο (μπλέ γραμμή) και 5 συνολικά οπτικά στοιχεία και στους δύο ορόφους (κόκκινη γραμμή) σε σύμπτωση με όριο αποδοχής σήματος τουλάχιστον 20 φωτονίων συναρτίζει του λογαρίθμου της ενέργειας των νετρίνων

Ολοκληρώνοντας τις μελέτες για την αυτόνομη ανιχνευτική μονάδα, επισημαίνουμε ότι για έναν πλήρους μεγέθους ανιχνευτή η απαίτηση σύμπτωσης, μέσα σε ένα χρονικό πλαίσιο, με την παρατήρηση εκλάμψεων ακτίνων γάμμα είτε από δορυφόρο είτε από επίγειο τηλεσκόπιο αναμένεται να παρέχει ένα ισχυρό μέσο διαχείρισης και διαχωρισμού ταυτόχρονα των ατμοσφαιρικών νετρίνων και των ατμοσφαιρικών μιονίων. Σε αυτή την εργασία έχουμε επικεντρωθεί στην διαχείριση των εισερχομένων ροών μειώνοντας το υπόβαθρο από ατμοσφαιρικά μίονια και την συνεισφορά μιονίων χαμηλών ενεργειών, προσπαθώντας να επιτύχουμε διαχειρίσιμους ρυθμούς καταγραφής γεγονότων και συγχρόνως να διατηρήσουμε υψηλή απόδοση του ρυθμού καταγραφής μιονίων πολύ υψηλής ενέργειας.

Κεφάλαιο 6

Διαμόρφωση του ανιχνευτή KM3NeT με την προσθήκη πρωτότυπων αυτόνομων ανιχνευτικών μονάδων

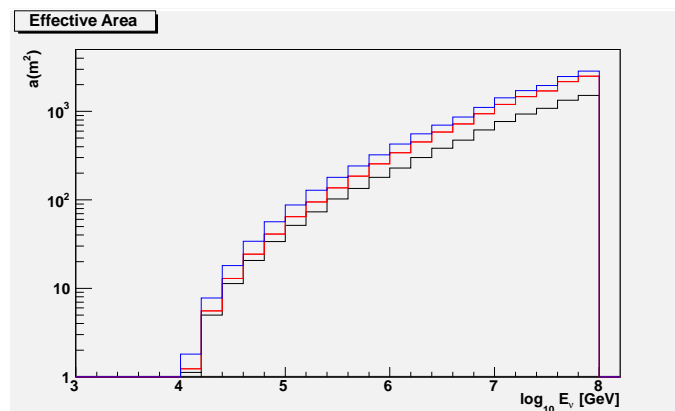
Στο επόμενο μέρος της εργασίας, μελετήθηκε η πιθανή επέκταση της γεωμετρίας του ανιχνευτή KM3NeT έτσι ώστε να μπορεί να ανιχνεύσει πολύ υψηλής ενέργειας μόνια προερχόμενα από νετρίνα εκλάμψεων ακτίνων γάμμα. Μια διαμόρφωση για αυτόν τον σκοπό θα μπορούσε να είναι η ακόλουθη. Στα 115 strings της τυπικής γεωμετρίας του KM3NeT έχουν προστεθεί 2 σειρές από 8 τετράδες πρωτότυπων ανιχνευτικών strings όπως της γεωμετρίας του GRBNeT με 18 οπτικά στοιχεία σε κάθε string όπως και στο KM3NeT. Η απόσταση των πρωτότυπων strings είναι μεγαλύτερη μεταξύ τους από ότι η απόσταση των strings του KM3NeT και απέχουν το λιγότερο 200 m από τη γεωμετρία του KM3NeT.



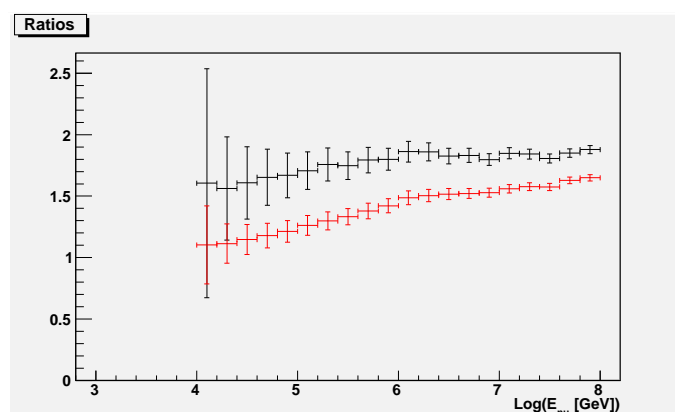
Σχήμα 6.1: Επέκταση του ανιχνευτή KM3NeT για αυξημένη ανιχνευτική ικανότητα γεγονότων νετρίνων από εκλάμψεις ακτίνων γάμμα

Γεγονότα νετρίνων με ενέργειες μεγαλύτερες από 10 TeV παρήχθησαν ακολουθώντας ενεργειακό φάσμα $E^{-1.4}$ και προσομοιώθηκαν με σκοπό τη μελέτη της απόκρισης της επαυξημένης γεωμετρίας του ανιχνευτή KM3NeT. Σε όλες τις προσομοιώσεις που χρησιμοποιήθηκαν, χρησιμοποιείται η τυπική γεωμετρία του KM3NeT και τα τυπικά οπτικά στοιχεία με τους 31 3" φωτοπολλαπλασιαστές. Για τη σύγκριση της απόκρισης του επαυξημένου ανιχνευτή KM3NeT (με τα αυτόνομα strings ανίχνευσης) με την τυπική γεωμετρία του KM3NeT αποφασίσαμε να χρησιμοποιήσουμε το μέγεθος της ενεργού περιοχής (effective area). Για δεδομένη ροή νετρίνων, η αναμενόμενη ροή γεγονότων στο τηλεσκόπιο νετρίνων είναι η συνέλιξη της ροής των νετρίνων με μια ποσότητα που ονομάζεται ενεργός περιοχή. Η ενεργός περιοχή αντιπροσωπεύει την περιοχή που είναι 100% επαρκής για την ανίχνευση διαπερνώντων νετρίνων. Με άλλα λόγια, καταδεικνύει την ανιχνευτική ικανότητα του ανιχνευτή, δηλαδή το ποσοστό των εισερχόμενων νετρίνων τα οποία ο ανιχνευτής μπορεί να αναγνωρίσει.

Πριν την ανακατασκευή των τροχιών και λόγω του υποβάθρου από το K^{40} το οποίο συνεισφέρει στο σήμα και κάνει την ανακατασκευή πιο δύσκολη, θέτουμε κάποιες απαιτήσεις για την συλλογή των σημάτων. Συγκεκριμένα, απαιτούμε να έχουμε L1 απλή σύμπτωση μεταξύ 2 φωτοπολλαπλασιαστών στο ίδιο οπτικό στοιχείο σε ένα χρονικό παράθυρο 10 nsec (η χαμηλή σκέδαση φωτός σε τέτοιο υποθαλάσσιο βάθος επιτρέπει τόσο μικρό χρονικό παράθυρο). Κάθε παλμός του σήματος μας που προέρχεται από την απαίτηση L1 ονομάζεται παλμός L1. Στο επίπεδο του πρώιμου σκανδαλισμού (παλμοί τύπου L1), για τη σύγκριση της απόκρισης του επαυξημένου ανιχνευτή KM3NeT (με τα αυτόνομα strings ανίχνευσης) με την τυπική γεωμετρία του KM3NeT αποφασίσαμε να συγκρίνουμε τις ενεργές περιοχές των ανιχνευτών με απαίτηση να έχουμε τουλάχιστον 8 παλμούς L1 σε τουλάχιστον 2 διαφορετικά strings σε κάθε ανιχνευτή. Για να κατανοήσουμε την "επίδραση" των επιπλέον strings στη τυπική γεωμετρία του ανιχνευτή KM3NeT λάβαμε υπόψιν και μια ακόμα γεωμετρία παρόμοια με αυτή του επαυξημένου ανιχνευτή μόνο που σε κάθε αυτόνομο string αντί για 18 υπάρχουν 6 οπτικά στοιχεία. Αυτό προσθέτει περίπου 19% ανιχνευτικά στοιχεία (αύξηση του instrumented volume) στα ήδη υπάρχοντα του KM3NeT ενώ η επαυξημένη γεωμετρία προσθέτει περίπου 56%. Στην γραφική παράσταση του σχήματος 6.2 παρουσιάζεται η ενεργός περιοχή για κάθε ανιχνευτική γεωμετρία που περιγράψαμε παραπάνω. Παρατηρούμε την αύξηση της ενεργού περιοχής με την πλήρη επαυξημένη γεωμετρία περίπου στο 70% στη περιοχή ενδιαφέροντος (1-10 PeV) ενώ με την μικρότερη επαυξημένη γεωμετρία παρατηρούμε μια συνεισφορά γύρω στο 40% στη περιοχή ενδιαφέροντος σε σχέση με τη τυπική γεωμετρία του KM3NeT. Αξίζει να επισημάνουμε ότι όπως αναμέναμε στις χαμηλές ενέργειες η μικρότερη επαυξημένη γεωμετρία φαίνεται να "ακολουθεί" την απόκριση του ανιχνευτή KM3NeT ενώ στις υψηλότερες ενέργειες ακολουθεί αυτήν της πλήρους επαυξημένης γεωμετρίας.

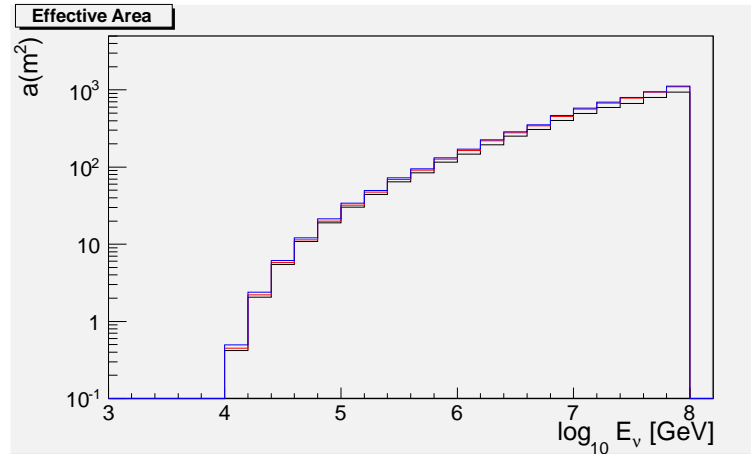


Σχήμα 6.2: Η ενεργός περιοχή συναρτάσει του λογαρίθμου της ενέργειας νετρίων για τη γεωμετρία του ανιχνευτή KM3NeT (μαύρη γραμμή), της επαυξημένης γεωμετρίας με τα 6 οπτικά στοιχεία σε κάθε string (κόκκινη γραμμή) και της πλήρους επαυξημένης γεωμετρίας (μπλέ γραμμή) με απαίτηση να έχουμε τουλάχιστον 8 παλμούς L1 σε τουλάχιστον 2 διαφορετικά strings σε κάθε ανιχνευτή



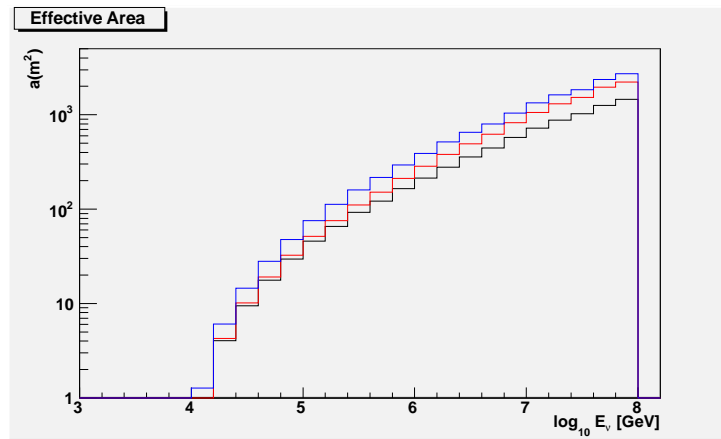
Σχήμα 6.3: Ο λόγος της ενεργού περιοχής του ανιχνευτή επαυξημένης γεωμετρίας με τα 6 οπτικά στοιχεία σε κάθε επιπλέον string ως προς την ενεργό περιοχή του KM3NeT (κόκκινη γραμμή) και ο λόγος της ενεργού περιοχής του ανιχνευτή της πλήρους επαυξημένης γεωμετρίας ως προς την ενεργό περιοχή του KM3NeT (μαύρη γραμμή) με απαίτηση να έχουμε τουλάχιστον 8 παλμούς L1 σε τουλάχιστον 2 διαφορετικά strings σε κάθε ανιχνευτή

Στη συνέχεια, ανακατασκευάστηκαν τροχιές μονίων με σκοπό τη σύγκριση της απόκρισης του ανιχνευτή με την απόκριση του ανιχνευτή με την επαυξημένη γεωμετρία.

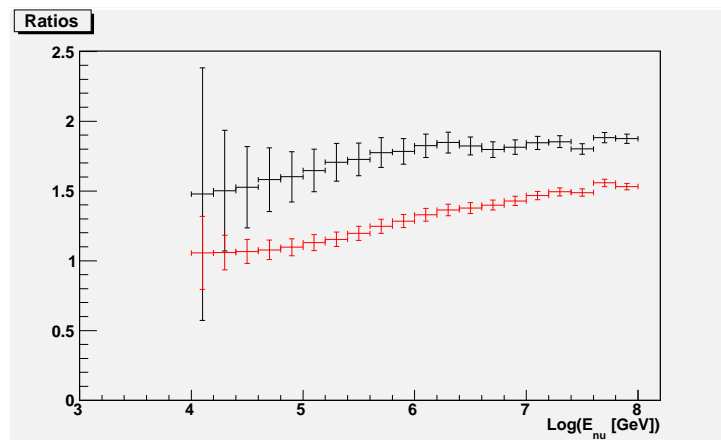


Σχήμα 6.4: Η ενεργός περιοχή συναρτίζει του λογαρίθμου της ενέργειας νετρίνων για τη γεωμετρία του ανιχνευτή KM3NeT (μαύρη γραμμή), της επαυξημένης γεωμετρίας με τα 6 οπτικά στοιχεία σε κάθε string (κόκκινη γραμμή) και της πλήρους επαυξημένης γεωμετρίας (μπλέ γραμμή) των ανακατασκευασμένων γεγονότων

Πρέπει εδώ να σημειωθεί ότι η μέθοδος ανακατασκευής τροχιών που έχει χρησιμοποιηθεί σε αυτή την εργασία είναι προσαρμοσμένη για τα χαρακτηριστικά του ανιχνευτή KM3NeT και δεν έχει γίνει προσπάθεια προσαρμογής και βελτίωσης για να ληφθούν υπόψη οι ιδιαιτερότητες της επαυξημένης γεωμετρίας (παραδείγματος χάριν 4 οπτικών στοιχείων σε έναν όροφο). Για το λόγο αυτό, και για να καταδειχτεί καλύτερα η δυνατότητα της διάταξης στην ανάλυση μας θεωρήσαμε δοκιμάσαμε να κάνουμε πιο "αυστηρές" τις απαιτήσεις μας στο επίπεδο σκανδαλισμού, απαιτώντας σύμπτωση παλμών L1 σε τουλάχιστον 12 οπτικά στοιχεία σε τουλάχιστον 2 strings. Η ενεργός περιοχή για τις γεωμετρίες που αναφέραμε παραπάνω παρουσιάζεται και με τον νέο περιορισμό. Παρατηρούμε ότι η μικρότερη αυξημένη γεωμετρία ακολουθεί την ίδια πορεία όπως και στον προηγούμενο περιορισμό (στις χαμηλές ενέργειες ακολουθεί το KM3NeT ενώ στις υψηλές την πλήρη επαυξημένη γεωμετρία).

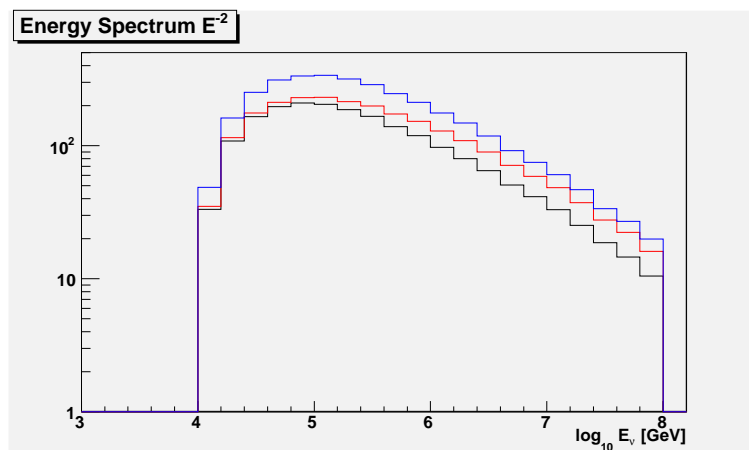


Σχήμα 6.5: Η ενεργός περιοχή συναρτίζει του λογαρίθμου της ενέργειας νετρίνων για τη γεωμετρία του ανιχνευτή KM3NeT (μαύρη γραμμή), της επαυξημένης γεωμετρίας με τα 6 οπτικά στοιχεία σε κάθε string (κόκκινη γραμμή) και της πλήρους επαυξημένης γεωμετρίας (μπλέ γραμμή) για σύμπτωση παλμών L1 μεταξύ τουλάχιστον 12 οπτικών στοιχείων σε τουλάχιστον 2 strings

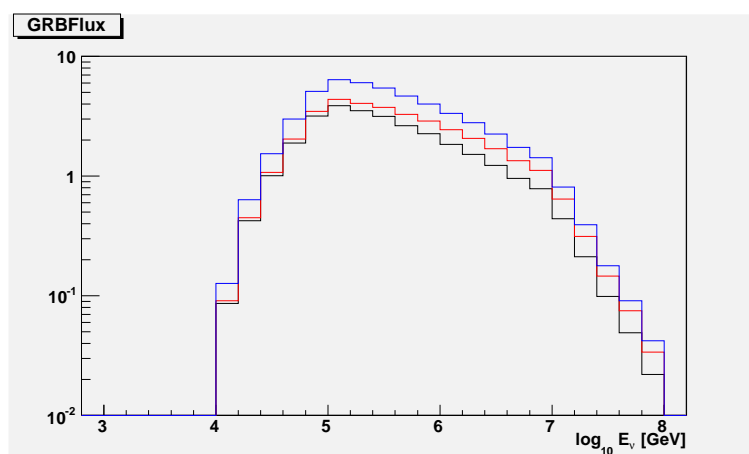


Σχήμα 6.6: Ο λόγος της ενεργού περιοχής του ανιχνευτή επαυξημένης γεωμετρίας με τα 6 οπτικά στοιχεία σε κάθε επιπλέον string ως προς την ενεργό περιοχή του KM3NeT (κόκκινη γραμμή) και ο λόγος της ενεργού περιοχής του ανιχνευτή της πλήρους επαυξημένης γεωμετρίας ως προς την ενεργό περιοχή του KM3NeT (μαύρη γραμμή) για τα γεγονότα "αυστηρών" κριτηρίων σε επίπεδο παλμών L1

Όπως έχει αναφερθεί σε άλλο μέρος της εργασίας, το ενεργειακό φάσμα των κοσμικών νετρίνων ακολουθεί μια κατανομή E^{-2} στην οποία ανάγαμε τα γεγονότα παλμών L1 (αυστηρών κριτηρίων) έτσι ώστε να υπολογίσουμε την ενεργό περιοχή των διαφορετικών ανιχνευτών μας για νετρίνα κοσμικής προέλευσης. Πιο συγκεκριμένα για νετρίνα που προέρχονται από εκλάμψεις ακτίνων γάμμα, ανάγουμε πάλι τα γεγονότα παλμών L1 (αυστηρών κριτηρίων) στο κατάλληλο ενεργειακό φάσμα (GRB flux). Οι ενεργές περιοχές των διαφορετικών ανιχνευτών για αυτά τα ενεργειακά φάσματα παρουσιάζονται στις γραφικές παραστάσεις των σχημάτων 6.7 και 6.8.



Σχήμα 6.7: Η ενεργός περιοχή συναρτίζει του λογαρίθμου της ενέργειας νετρίνων κοσμικής προέλευσης για τη γεωμετρία του ανιχνευτή KM3NeT (μαύρη γραμμή), της επαυξημένης γεωμετρίας με τα 6 οπτικά στοιχεία σε κάθε string (κόκκινη γραμμή) και της πλήρους επαυξημένης γεωμετρίας (μπλέ γραμμή)



Σχήμα 6.8: Η ενεργός περιοχή συναρτίζει του λογαρίθμου της ενέργειας νετρίνων από εκλάμψεις ακτίνων γάμμα για τη γεωμετρία του ανιχνευτή KM3NeT (μαύρη γραμμή), της επαυξημένης γεωμετρίας με τα 6 οπτικά στοιχεία σε κάθε string (κόκκινη γραμμή) και της πλήρους επαυξημένης γεωμετρίας (μπλέ γραμμή)

Κεφάλαιο 7

Συμπεράσματα

Τα εν λειτουργία τηλεσκόπια νετρίνων έχουν περιορισμένη δυνατότητα καταγραφής γεγονότων εξωγαλαξιακής προέλευσης και ειδικότερα γεγονότων νετρίνων προερχόμενων από εκλάμψεις ακτίνων γάμμα. Στα πλαίσια της ανάγκης για μελέτη βίαιων εξωγαλαξιακών φαινομένων απόφασίστηκε η δημιουργία πρωτότυπων ανιχνευτών που θα μπορούν να "συμπληρώσουν" τα υπάρχοντα τηλεσκόπια με σκοπό την ανίχνευση τέτοιων νετρίνων πολύ υψηλών ενεργειών. Ένα πρόγραμμα σχεδιασμού, μελέτης και πόντισης μιας τέτοιας ανιχνευτικής διάταξης είναι το GRBNeT (Gamma Ray Neutrino Telescope).

Σε αυτήν την εργασία ασχοληθήκαμε με την μελέτη των συνεισφορών από το σήμα και το υπόβαθρο που αναμένονται στους ρυθμούς γεγονότων που θα καταγραφούν από την πρωτότυπη ανιχνευτική μονάδα που σχεδιάστηκε, μελετήθηκε και ποντίστηκε στα πλαίσια του προγράμματος GRBNeT. Μελέτες σε επίπεδο σκανδαλισμού έλαβαν χώρα με σκοπό να επιλεγεί ο κατάλληλος τρόπος καταστολής του υποβάθρου κυρίως από τις διασπάσεις του K^{40} και των ατμο-σφαιρικών μιονίων. Μέσα από την επεξεργασία των προσομοιωμένων γεγονότων για ατμοσφαιρικά μόνια συμπεράναμε ότι η κατάλληλη απαίτηση χρονικών και τοπικών συμπτώσεων γεγονότων σήματος μεταξύ των οπτικών στοιχείων αλλά και ο ορισμός ενός κατώτατου ορίου αποδοχής σήματος σε κάθε οπτικό στοιχείο (φωτοπολλαπλασιαστή), καταστέλλουν σημαντικά το υπόβαθρο, επιτρέποντας ταυτόχρονα την καταγραφή ικανοποιητικού αριθμού γεγονότων για περαιτέρω επεξεργασία. Καταλήξαμε ότι μια "ασφαλής" διαμόρφωση στον σκανδαλισμό απαιτεί σύμπτωση γεγονότων σε τουλάχιστον 2 οπτικά στοιχεία με ελάχιστο όριο αποδοχής τα 20 φωτόνια. Αυτή η επιλογή είναι επιτυχής στην καταστολή του υποβάθρου και στην καταγραφή ικανοποιητικού αριθμού γεγονότων ενώ αποφασίστηκε και η χρήση συμπτώσεων γεγονότων σε τουλάχιστον 3 οπτικά στοιχεία με ελάχιστο όριο αποδοχής τα 20 φωτόνια για περαιτέρω ανάλυση των ληφθέντων σημάτων. Η παραπάνω διαμόρφωση στο επίπεδο του σκανδαλισμού επιβεβαιώθηκε ως λειτουργική σε επόμενο μέρος της εργασίας στο οποίο προσομοιώθηκαν γεγονότα νετρίνων αστροφυσικής προέλευσης. Ελέγχθηκε εκ νέου το όριο αποδοχής σήματος και οι κατάλληλες χρονικές και χωρικές συμπτώσεις των γεγονότων στα οπτικά στοιχεία, όπου προέκυψαν τα αναμενόμενα αποτελέσματα.

Στο τελευταίο μέρος της εργασίας μελετήθηκε η επέκταση της ήδη υπάρχουσας γεωμετρίας του ανιχνευτή KM3NeT με τη προσθήκη 2 σειρών από 8 αυτόνομες πρωτότυπες διατάξεις τύπου GRBNeT (τετράδων stings) με 18 και με 6 οπτικά στοιχεία σε κάθε string αντίστοιχα. Με σκοπό να διερευνήσουμε τη σύγκριση της απόκρισης της επαυξημένης γεωμετρίας χρησιμοποιώντας 6 ορόφους, με την καθιερωμένη του KM3NeT και με την επαυξημένη γεωμετρία χρησιμοποιώντας 18 ορόφους, η μελέτη έγινε σε επίπεδο ενεργού περιοχής (effective area). Τα γεγονότα νετρίνων δημιουργήθηκαν με φάσμα $E^{-1.4}$. Για την εξαγωγή συμπερασμάτων έγινε αναγωγή των γεγονότων σε φάσμα E^{-2} αστροφυσικής φύσης και σε φάσμα εκλάμψεων ακτίνων γάμμα (GRB flux). Παρατηρήθηκε αύξηση της ενεργού περιοχής στην περιοχή ενδιαφέροντος. Πιο συγκεκριμένα, για την πλήρως επαυξημένη γεωμετρία έχουμε αύξηση $\sim 80\%$ της ενεργού περιοχής για ενέργειες $E > 1$ PeV και αύξηση $\sim 86\%$ σε ενέργειες $E > 10$ PeV. Αντίστοιχα για την μερικώς επαυξημένη γεωμετρία, έχουμε αύξηση $\sim 40\%$ της ενεργού περιοχής σε ενέργειες $E > 1$ PeV και $\sim 50\%$ σε ενέργειες $E > 10$ PeV.

Βιβλιογραφία

- [1] C. Cesarsky, Cosmic Ray Confinement in the Galaxy, *Ann. Rev. Astron.Astrophys.* 18, (1980), 289-319
- [2] M. Nagano, Search for the end of the energy spectrum of primary cosmic rays, *New Journal of Physics*, Volume 11, June 2009
- [3] http://en.wikipedia.org/wiki/Cosmic_ray/Research_and_experiments
- [4] <http://www.hap-astroparticle.org/index.php>
- [5] U.F. Katz, Ch. Spiering, High-Energy Neutrino Astrophysics: Status and Perspectives, *Prog.Part.Nucl.Phys.* 67 (2012) 651-704
- [6] E. Drakopoulou, Muon and Neutrino Energy Reconstruction for KM3NeT, Doctoral Thesis, February 2016
- [7] B. Baret, V. Van Elewyck, High-energy neutrino astronomy: detection methods and first achievements, *Rep. Prog. Phys.* 74 046902, (2011), 35
- [8] T. Gaisser, *Cosmic Rays and Particle Physics*, 296, (1990)
- [9] *Physics Today* 54 (8), 13
- [10] R. Gandhi, C. Quigg, M.H. Reno and I. Sarcevic, Neutrino interactions at ultrahigh energies, *Phys. Rev. D* 58, 093009, (1998)
- [11] E. Anassontzis, A. Ball, A. Belias, A. Fotiou, G. Grammatikakis, H. Kontogiannis, P. Koske, S. Koutsoukos, V. Lykoussis, E. Markopoulos, A. Psallidas, L. Resvanis, I. Siotis, S. Stavrakakis, G. Stavropoulos, V. Zhukov, Water transparency measurements in the deep Ionian Sea, *Astrop. Phys.* Vol. 34, 4, (2010), 187197
- [12] The ANTARES collaboration, 34TH INTERNATIONAL COSMIC RAY CONFERENCE, THE HAGUE 2015
- [13] THE ANTARES NEUTRINO TELESCOPE - A STATUS REPORT, Baret, B.1 on behalf of the ANTARES Collaboration
- [14] The High Energy Neutrino Astrophysics Panel, E. Fernandez et al., High energy neutrino observatories (2002)
- [15] www.km3net.org

- [16] <http://neutrinoburst.gr>
- [17] G. Carminati, et al, Nuclear Instruments and Methods A 567, 492, 2006
- [18] Phys. Rev. D38 (2003) 083001
- [19] K. Pikounis and GRBNeT collaboration, GRBNeT – A prototype for an autonomous underwater neutrino detector, EPJ Web of Conferences 116, 09004 (2016)
- [20] A.Trovato, Development of reconstruction algorithms for large volume neutrino telescopes and their application to the KM3NeT detector, Doctoral Thesis, 2013