#### ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ



#### ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

#### TOMEAS $\Phi \Upsilon \Sigma I K H \Sigma$

#### **ΣΤΑΥΡΟΠΟΥΛΟΣ ΔΗΜΗΤΡΙΟΣ** ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

Μελέτη εξάρτησης της συχνότητας ανίχνευσης ατμοσφαιρικών μιονίων απο το θαλάσσιο βάθος με τον ανιχνευτή ARCA του υποβρύχιου τηλεσκόπιου νετρίνων KM3NeT

ΕΠΙΒΛΕΠΩΝ: ΤΣΙΠΟΛΙΤΗΣ ΓΕΩΡΓΙΟΣ, ΚΑΘΗΓΗΤΗΣ ΕΜΠ

AΘHNA, ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ 2017

## Ευχαριστίες

Η παρούσα εργασία εκπονήθηκε στο Ινστιτούτο Πυρηνικής και Σωματιδιακής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. 'Δημόκριτος' κατά το ακαδημαϊκό έτος 2016-17, στο πλαίσιο της διπλωματικής εργασίας που απαιτείται απο τη Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών (Σ.Ε.Μ.Φ.Ε) του Εθνικού Μετσόβιου Πολύτεχνειου, για την απόκτηση του πτυχίου. Επιβλέπων της εργασίας αυτής ήταν ο Καθηγητής της Σ.Ε.Μ.Φ.Ε. κος Τσιπολίτης Γεώργιος, τον οποίο και θα ήθελα να ευχαριστήσω για τις συμβουλές του, όπως και για την ευκαιρία που μου έδωσε να πραγματοποιήσω την εργασία αυτή στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. 'Δημόκριτος'.

Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω την Ερευνήτρια Δρ. Τζαμαριουδάχη Αικατερίνη, η οποία ήταν επιβλέπουσα της εργασίας αυτής στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. ΄Δημόκριτος΄. Χωρίς την συνεχή καθοδήγηση και τη βοήθεια που μου προσέφερε, αυτή η εργασία δεν θα μπορούσε να πραγματοποιηθεί.

Αχόμα, πολλές ευχαριστίες οφείλω στον Δρ Μάρχου Χρήστο, για την υποστήριξη χαι την αρωγή του χαθ΄ όλη τη διάρχεια της αχαδημαϊχής χρονιάς, χαθώς χαι σε όλα τα υπόλοιπα μέλη της ομάδας του Ινστιτούτου Πυρηνιχής χαι Σωματιδιαχής Φυσιχής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. ΄Δημόχριτος΄ που δραστηριοποιούνται στο πείραμα KM3NeT, για το άριστο χλίμα συνεργασίας που έχουν δημιουργήσει. Ιδιαίτερα ευχαριστώ τον υποψήφιο διδάχτορα Πιχούνη Κωνσταντίνο, για την άμεση ανταπόχριση σε οποιαδήποτε βοήθεια του έχω ζητήσει.

Τέλος, θα ήθελα να ευχαριστήσω την οικογένεια μου, για την υποστήριξη και την αμέριστη συμπαράσταση που μου έχει προσφέρει στη διάρκεια όλων αυτών των ετών. 

## Περίληψη

Η εργασία αυτή πραγματεύεται την ανάλυση δεδομένων που έχουν ληφθεί από τον ανιχνευτή ARCA του KM3NeT. Ο ανιχνευτής αυτός, στην πλήρη μορφή του θα αποτελέσει ένα τηλεσκόπιο για την ανίχνευση νετρίνων υψηλών ενεργειών. Αρχικά γίνεται μια αναφορά στο νετρίνο, και δικαιολογείται γιατί αυτό το στοιχειώδες σωματίδιο είναι κατάλληλο για να χρησιμοποιηθεί στην αστρονομία. Κατόπιν, αναφερόμαστε σε ανιχνευτές νετρίνων, και πιο συγκεκριμένα στους ανιχνευτές τύπου Cherenkov, και στις συνήθεις μορφές υποβάθρου που ανιχνεύουν. Ακόμη, γίνεται αναφορά στη δομή του υποβρύχιου τελεσκοπίου νετρίνων KM3NeT, όπως και στα δεδομένα που αυτό λαμβάνει.

Στο κομμάτι της ανάλυσης, γίνεται προσπάθεια να μελετηθεί το πόσο συχνά ανιχνεύονται ατμοσφαιρικά μιόνια σε σχέση με το θαλάσσιο βάθος. Για αυτό το λόγο αρχικά ελέγχεται η ομαλή λειτουργία του ανιχνευτή. Αμέσως μετά, διασαφηνίζεται πότε έχουμε ανίχνευση ατμοσφαιρικών μιονίων, χωρίς να γίνεται στην παρούσα φάση ανακατασκευή της τροχιάς αλλα χρησιμοποιώντας μόνο την πληροφορία κάθε οπτικού στοιχείου. Στη συνέχεια, εξετάζεται η χρονική παραδοχή που κάνουμε για τις συμπτώσεις που τα σηματοδοτούν. Τέλος, αφού γίνει μια μελέτη των συχνοτήτων ανίχνευσης συμπτώσεων ως συνάρτηση του χρόνου λήψης των δεδομένων, παρουσιάζονται τα αποτελέσματα για τις συχνότητες ανίχνευσης ατμοσφαιρικών μιονίων σε σχέση με το θαλάσσιο βάθος. 

### Abstract

The subject of this thesis deals with the analysis of the data taken from the KM3NeT-ARCA detector. When this detector is fully constructed, it will operate as a telescope using high energy neutrinos. At first, a reference is made about neutrino explaining why this particle is appropriate to be used for astronomy. Furthermore, the Cherenkov detectors and the usual backround radiation sources are presented. Moreover, the structure of the KM3NeT underwater neutrino telescope is described and there is a mention to the form of data that it concieves.

Concerning the data analysis, a study of the detection frequency of atmospheric muons as a function of the sea depth is carried out. At this stage there is no track reconstruction performed. Instead, using the advantages of the multi pmt Digital Optical Modules of the KM3NeT detector, atmospheric muon detection can be achieved by using time coincidences between the pmts hit. It is also checked how appropriate the selected coincidence time window is. Additionally, a study is made about the frequency of detected coincidences as a function of the detector's operation time. Finally, the detection rate of atmospheric muons as a function of depth is presented, which is the purpose of this study. 

## Περιεχόμενα

1	Το νετρίνο και ο ρόλος του στην αστρονομία	11
	1.1 Το νετρίνο και οι αλληλεπιδράσεις του	. 11
	1.2 Κοσμική ακτινοβολία και πηγές νετρίνο	. 14
	1.3 Γιατί αστρονομία νετρίνο;	. 21
<b>2</b>	Ανίχνευση νετρίνων	25
	2.1 Ανιχνευτές Cherenkov	. 25
	2.2 Ακτινοβολία υποβάθρου	. 27
3	Το υποβρύχιο τηλεσκόπιο νετρίνων ΚΜ3ΝeT	<b>29</b>
	3.1 Ο ανιχνευτής ARCA του KM3NeT	. 29
	3.2 Συλλογή δεδομένων στο KM3NeT	. 33
4	Ανάλυση δεδομένων από τον ανιχνευτή ARCA-KM3NeT	35
	4.1 Έλεγχος λειτουργίας των Ψηφιακών Οπτικών Στοιχείων (DOMs	s) 35
	4.2 Καθορισμός του επίπεδου τοπικής	
	σύμπτωσης για την ανίχνευση ατμοσφαιριχών μιονίων	. 44
	4.3 Έλεγχος ορθότητας του επιλεγόμενου για συμπτώσεις χρονι-	
	κού παραθύρου	. 48
	4.4 Μελέτη συχνοτήτων ανίχνευσης	
	συμπτώσεων ως συνάρτηση του χρόνου λήψης δεδομένων	52
	4.5 Μελέτη της συχνότητας ανίχνευσης	
	ατμοσφαιρικών μιονίων ως συνάρτηση του θαλάσσιου βάθους.	56
<b>5</b>	$\Sigma$ υμπεράσματα	61

### Κεφάλαιο 1

## Το νετρίνο και ο ρόλος του στην αστρονομία

#### 1.1 Το νετρίνο και οι αλληλεπιδράσεις του

Τα συστατικά της ύλης καθώς και οι φορείς των τριών απο τις τέσσερις θεμελιώδεις αλληλεπιδράσεις της φύσης, περιγράφονται απο ένα θεωρητικά πολύ κομψό και πειραματικά ακριβές μαθηματικό μοντέλο, που οναμάζεται καθιερωμένο πρότυπο. Απο τις αλληλεπιδράσεις απουσιάζει η βαρύτητα, η οποία όμως απέχει πολύ από το να παίξει καθοριστικό ρόλο σε υποατομικό επίπεδο. Το μοντέλο αυτό των στοιχειωδών σωματιδίων, χωρίζεται σε δύο βασικές κατηγορίες, τα Φερμιόνια και τα Μποζόνια. Τα Φερμιόνια έχουν ημιακέραιο αριθμό spin και αποτελούν τα συστατικά της ύλης, ενώ τα Μποζόνια έχουν αχέραιο αριθμό spin και είναι οι φορείς των στοιχειωδών αλληλεπιδράσεων. Τα Φερμιόνια, διαχρίνονται σε quarks και λεπτόνια (Σχήμα 1.1). Το καθιερωμένο πρότυπο, ολοκληρώνεται εάν συνυπολογίσουμε και τα αντισωματίδια των στοιχειωδών σωματιδίων, δηλαδή σωματίδια τέτοια ωστε να έχουν την ίδια μάζα, αλλα αντίθετους όλους τους άλλους χβαντιχούς αριθμούς. Αξίζει ωστόσο να αναφερθεί, πως ενώ το χαθιερωμένο πρότυπο είναι η πιο αχριβής φυσιχή θεωρία που έχουμε, δεν ερμηνεύει φαινόμενα όπως οι ταλαντώσεις νετρίνο και η σκοτεινή ύλη. Συνεπώς, θα πρέπει να υπάρχει μια ολοκληρωμένη θεωρία ερμηνείας του κόσμου, η οποία προς το παρόν μας είναι άγνωστη.

Το σωματίδιο στο οποίο θα αναφερθούμε, είναι το νετρίνο. Το νετρίνο ανήχει στην χατηγορία των λεπτονίων στο χαθιερωμένο πρότυπο. Τα λεπτόνια αποτελούνται απο τρείς γενιές. Η πρώτη γενιά περιέχει το ηλεχτρόνιο χαι το νετρίνο του ηλεχτρονίου  $(e, \nu_e)$ , η δεύτερη το μιόνιο χαι το νετρίνο του μιονίου  $(\mu, \nu_\mu)$  χαι η τρίτη με τη σειρά της το ταύ χαι το αντίστοιχο νετρίνο του  $(\tau, \nu_\tau)$ 

 $(\Sigma \chi ή μ \alpha \ 1.1)$  . [1]



Σχήμα 1.1: Το Καθιερωμένο Πρότυπο.

Ιστορικά, το νετρίνο ήταν υπόθεση του Wolfgang Pauli το 1930, με σκοπό τη διατήρηση Ενέργειας και Ορμής στη β-διάσπαση:

$$n^o \to p^+ + e^- + \bar{\nu}_e$$

Αρχικά το ονόμασε Νετρόνιο, αλλά μετά απο την ανακάλυψη του γνωστού Αδρονίου το 1932, ο Enriko Fermi το ονόμασε νετρίνο ('κάτι μικρό και ουδέτερο'). Εξαιτίας της μάζας του νετρίνο αλλα και της αλληλεπίδρασης του με την ύλη, αφού αλληλεπιδρά μόνο μέσω της ασθενούς αλληλεπίδρασης που έχει μικρή εμβέλεια, ο ίδιος ο Pauli ανησυχούσε πιστεύοντας πως εξήγησε τη β-διάσπαση εισάγοντας σωματίδια που δεν θα μπορούσαν να ανιχνευθούν ποτέ πειραματικα! Ωστόσο, η πρώτη ανίχνευση πραγματοποιήθηκε απο τους Fred Reines και Clyde Cowan στο Los Alamos των Η.Π.Α. (οι οποίοι εκμεταλεύτηκαν τα νετρίνα που παράγονταν απο τις δοκιμές πυρηνικών όπλων) και δημοσιεύτηκε το 1956, ενώ για αυτήν τους απονεμήθηκε το βραβείο Νόμπελ Φυσικής το 1995. [2]

Το νετρίνο είναι ένα λεπτόνιο χωρίς φορτίο. Όπως προαναφέρθηκε επομένως, μπορεί να αλληλεπιδράσει μόνο μεσω της ασθενούς πυρηνικής αλληλεπίδρασης, αφού η βαρύτητα θεωρείται αμελητέα σε υποατομικό επίπεδο. Φορείς της ασθενούς αλληλεπίδρασης είναι τα μποζόνια  $W^+, W^-$  που είναι φορτισμένα, και το μποζόνιο  $Z^o$  που είναι αφόρτιστο. Κατα συνέπεια, τα νετρίνα αλληλεπιδρούν με τους παρακάτω πιθανούς τρόπους [1],[2]:

 Αλληλεπιδράσεις φορτισμένου ρεύματος (Charged Current Interactions - CC), δηλαδή αλληλεπιδράσεις με την ανταλλαγή των φορτισμένων μποζονίων W<sup>+</sup>, W<sup>-</sup>. Σε αυτή την αλληλεπίδραση, ένα νετρίνο μπορεί να διασπαστεί σε ένα μποζόνιο W<sup>+</sup> και σε ένα ίδιας γενιάς με το νετρίνο λεπτόνιο, ή ένα λεπτόνιο να διασπαστεί σε ένα νετρίνο της ίδιας γενιάς και ένα μποζόνιο W<sup>-</sup> (Σχήμα 1.2). Ακόμα, ένα W μποζόνιο μπορεί να διασπαστεί σε ένα ζεύγος λεπτονίου και στο αντίστοιχο αντινετρίνο του, είτε σε ζεύγος αντιλεπτονίου και στο αντίστοιχο νετρίνο του, έτσι ώστε να διατηρούνται όλοι οι κβαντικοί αριθμοί.



Σχήμα 1.2: Αλληλεπίδραση φορτισμένου ρεύματος.

Γνωστό παράδειγμα μιας αλληλεπίδρασης φορτισμένου ρεύματος είναι η αντίστροφη β-διάσπαση,  $p^+ + \bar{\nu}_e \to n^o + e^+$  στην οποία το αντινετρίνο δίνει ένα  $W^-$  μποζόνιο και ένα ποζιτρόνιο,  $\bar{\nu}_e \to e^+ + W^-$ , ενώ το μποζόνιο αυτό απορροφάται απο το πρωτόνιο, το οποίο γίνεται νετρόνιο.

 Αλληλεπιδράσεις ουδέτερου ρεύματος (Neutral Current Interactions - NC), δηλαδή αλληλεπιδράσεις που πραγματοποιούνται με την ανταλλαγή του ουδέτερου μποζονίου Z<sup>o</sup>. Σε αυτό το είδος, το νετρίνο εναποθέτει μέρος της ενέργειας του σε κάποιο σωματίδιο με το οποίο αλληλεπιδρά, μεσω ενός μποζονίου Z<sup>o</sup> (Σχήμα1.3).



Σχήμα 1.3: Αλληλεπίδραση ουδέτερου ρεύματος. Εδώ με e<sup>-</sup>.

#### 1.2 Κοσμική ακτινοβολία και πηγές νετρίνο

Οι κοσμικές ακτίνες είναι σωματίδια διαφόρων ειδών, που παράγονται σε κάποιο μέρος του σύμπαντος. Στην πλειονότητα τους είναι πρωτόνια και πυρήνες ηλίου (85% και 12% αντίστοιχα), αλλα μπορουν να είναι και ακτίνες-γ, ηλεκτρόνια ή και νετρίνα. Η ενέργεια τους έχει μια αρκετά μεγάλη διακύμανση, ξεκινώντας απο  $10^9 eV$  και φτάνοντας μέχρι και  $10^{20} eV$ ! Μια περικοπή της ροής αναμένεται σε αυτή την τάξη μεγέθους εξαιτίας του ορίου GZK (GZK-cutoff). Το όριο αυτό εξηγεί το ότι δεν μπορούμε να δούμε σωματίδια μεγαλύτερης ενέργειας, εξαιτίας των αλληλεπιδράσεων τους με το κοσμικό μικροκυματικό υπόβαθρο (cosmic microwave background), το οποίο είναι απομεινάρι μιας πρώιμης φάσης στην εξέλιξη του σύμπαντος. Η ροή της κοσμικής ακτινοβολίας, προσεγγίζεται ικανοποιητικά απο τον εκθετικό νόμο [3]:

$$\frac{dN}{dE} \propto E^{-\gamma}$$

όπου:

$$\gamma \approx 2.7, \quad E \leq E_{knee} = 4.5 \times 10^{15} eV$$
  
 $\gamma \approx 3, \quad E_{knee} < E < E_{second \ knee} = 4.5 \times 10^{17} eV$   
 $\gamma \approx 2.7, \quad E_{second \ knee} < E < E_{ankle} = 10^{19} eV$ 

Εύχολα είναι παρατηρήσιμη η αλλαγή της χλίσης για τις ενέργειες  $4.5 \times 10^{15} eV$  (knee),  $4.5 \times 10^{17} eV$  (second knee), χαι  $10^{19} eV$  (ankle) (Σχήμα 1.4).

Όπως αναφέρθηκε, στην κοσμική ακτινιβολία ανήκουν κατά ένα ποσοστό και τα νετρίνα. Όμως, πηγές νετρίνων μπορούν να είναι και ο Ήλιος, η αλληλεπίδραση της κοσμικής ακτινιβολίας με τα στρώματα της ατμόσφαιρας, αλλα ακόμα και ανθρώπινες δραστηριότητες στη Γή. Μερικές απο τις χαρακτηριστικές πηγές νετρίνων είναι [2] :



Σχήμα 1.4: Ροή κοσμικής ακτινοβολίας.

Υπερκαινοφανείς αστέρες (Supernovas - SNs): Αποτελεί την κατάσταση στην οποία το άστρο εκρήγνυται, και σηματοδοτεί το τέλος της ζωής του. Η ενέργεια που εκλύεται κατα την έκρηξη είναι πολύ μεγάλη και μπορεί να ξεπεράσει την ενέργεια που ακτινοβολείται απο το αστέρι κατα τη διάρκεια ολόκληρης της ζωής του. Το παραγόμενο φώς, μπορεί να υπερκαλύψει το φώς του γαλαξία στον οποίο βρίσκεται το άστρο για χρονικό διάστημα εβδομάδων ή ακόμα και μηνών!

Τα άστρα, λόγω της τεράστιας μάζας τους, χρειάζεται να παράγουν συνεχώς μεγάλα ποσά ενέργειας ώστε να μην καταρρεύσουν εξαιτίας του ίδιου τους του βάρους. Η ενέργεια αυτή προέρχεται απο την σύντηξη πυρήνων, αρχικά υδρογόνου και ηλίου, μέχρι να γίνει σύντηξη σε πυρήνες σιδήρου ή και νικελίου. Κάποια άστρα ωστόσο συντήκουν τους πυρήνες τους μέχρι να μετατραπούν σε πυρήνες ηλίου, και ύστερα επέρχεται πτώση της θερμοκρασίας τους μέχρι να γίνουν λευκοί νάνοι. Αν αυτοί οι λευκοί νάνοι είναι μέρος ενός διπλού αστέρα, τότε μπορούν να αποσπάσουν ύλη απο το άλλο άστρο του ζεύγους. Όταν η μάζα τους ξεπεράσει το όριο Chandrasekhar, το οποίο ισοδυναμεί με 1.44 φορές την ηλιαχή μάζα, τα άστρα αυτά καταλήγουν σε υπερκαινοφανή έκρηξη τύπου Ια (Type Ia supernova). Η έχρηξη αυτή, δεν αναμένεται να παράξει μεγάλο αριθμό νετρίνων. Τα μεγάλα άστρα ωστόσο, θα φτάσουν σε ένα πλήρη χύχλο νουχλεοσύνθεσης να συντήξουν αχόμη χαι πυρήνες σιδήρου χαι νιχελίου, τα οποία θα δημιουργήσουν ένα πυρήνα στο άστρο, το οποίο θα φτάσει να καταρρεύσει σε supernova (υπερκαινοφανείς καταρρέοντος πυρήνα). Σε αυτά τα άστρα η εκλυόμενη ενέργεια θα είναι κατα 99% σε μορφή νετρίνων μέσω δύο μηχανισμών παραγωγής. Του μηχανισμού θερμιχής παραγωγής, ο οποίος παράγει νετρίνα όλων των γενεών, και του μηχανισμού ηλεκτρονιαχής σύλ<br/>ληψης,  $p^+ + e^- \rightarrow n^o + \nu_e,$ ο οποίος παράγει μόνο νετρίνα ηλεκτρονίου.



Σχήμα 1.5: SN1604. Η πιο πρόσφατη επιβεβαιωμένη υπερκαινοφανής έκρηξη, ορατή με γυμνό μάτι στη Γή.

• Εκλάμψεις ακτίνων γ (Gamma Ray Bursts - GRBs): Οι εκλάμψεις ακτίνων γ είναι παλμοί ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας υψηλής ενέργειας, στο φάσμα των ακτίνων αυτών. Ανακαλήφθηκαν τυχαία τη δεκαετία του '60 απο κατασκοπευτικούς δορυφόρους. Σύντομα οι επιστήμονες κατάλαβαν πως οι GRBs δεν προέρχονται απο τη Γή ή απο τον Ήλιο. Τα σήματα αυτά ήταν κοσμικής προέλευσης, η ένταση τους μεταβαλλόταν με το χρόνο, ενώ η διάρχεια τους χυμαινόταν απο μεριχά χιλιοστά του δευτερολέπτου μέχρι δεκάδες λεπτά. Επίσης δεν συσχετίζονταν χρονικά με καμία γνωστή έκρηξη supernova. Ενώ η επικρατέστερη αντίληψη ήταν πως οι GRBs προέρχονται απο το γαλαξία μας, η χαρτογράφηση που έκανε το 1991 η αποστολή BATSE της NASA έδειξε ισότροπη χατανομή των GRBs που καταγράφηκαν, και όχι κάποια συγκέντρωση στο επίπεδο του γαλαξία (Σχήμα 1.6). Ακόμη παρατηρήθηκε ότι οι εκλάμψεις ακτίνων γ αχολουθούνται απο εκπομπή ακτίνων Χ. Υπολογίζοντας την μετατόπιση τους προς το ερυθρό, ανακαλύφθηκε πως οι GRBs προέρχονται απο γαλαξίες που απέχουν δισεχατομμύρια έτη φωτός απο τη Γή. Αξίζει να σημειωθεί ότι μια τυπική ποσότητα ενέργειας που εκλύεται απο μια GRB είναι της τάξης των  $10^{44}J$ , που ισοδυναμεί με το 1/2000 της ηλιαχής μάζας.



Σχήμα 1.6: Οι καταγεγραμμένες GRBs απο την αποστολή BATSE.

Ενώ διαφέρουν σε πολλά χαρακτηριστικά τους, χρονικα οι GRBs χωρίζονται σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη αφορά αυτές που έχουν διάρκεια μικρότερη των 2 sec. Αυτές αποτελούν περίπου το 30% των παρατηρήσιμων GRBs. Χωρίς να είναι ακόμη γνωστό απο που προέρχονται, πιστεύεται ότι οφείλονται στη συγχώνευση διπλών αστέρων νετρονίων. Η δεύτερη κατηγορία, αφορά τις GRBs μεγαλύτερης διάρκειας, οι οποίες είναι σαφώς περισσότερες σε αριθμό. Αυτές παρατηρούνται σε γαλαξίες που συμβαίνει γέννεση άστρων, ενώ προέρχονται απο υπερκαινοφανείς καταρρέοντος πυρήνα. Όπως αναφέρθηκε, οι υπερκαινοφανείς αυτής της μορφής εκλύουν ενέργεια κατά 99% σε μορφή νετρίνων.

 Ενεργοί γαλαξιαχοί πυρήνες (Active Galactic Nuclei - AGNs): Πολλοί γαλαξίες έχουν στο χέντρο τους μια περιοχή που η φωτεινότητα της ξεπερνά την φωτεινότητα των άστρων όλου του υπόλοιπου γαλαξία συνολιχά. Η υψηλής φωτεινότητας περιοχή αυτή ονομάζεται Ενεργός Γαλαξιαχός Πυρήνας (AGN)[4]. Στο χέντρο αυτής της περιοχής που συμπίπτει με το χέντρο του γαλαξία, βρίσχεται μια μαύρη τρύπα πολύ μεγάλης μάζας (supermassive black hole - SMBH). Ο Ενεργός Γαλαξιαχός Πυρήνας, ο οποίος τροφοδοτείται με την άπορρόφηση ύλης απο την μαύρη τρύπα, είναι η πηγή ηλεχτρομαγνητιχής αχτινοβολίας με τη μεγαλύτερη μόνιμη φωτεινότητα σε ολόχληρο το σύμπαν. Το φάσμα της ηλεχτρομαγνητιχής αχτινοβολίας που εχπέμπεται απο έναν AGN ξεχινάει απο τα ραδιοχύματα χαι φτάνει μέχρι τις αχτίνες X. Οι Ενεργοί Γαλαξιαχοί Πυρήνες βρίσχονται στο επίχεντρο του ενδιαφέροντος χαθώς αποτελούν επιταχυντές χοσμιχών αχτινών υψηλής ενέργειας.



Σχήμα 1.7: Ο γαλαξίας IC<br/>3639. Η φωτεινή περιοχή στο κέντρο του είναι ένας AGN.

 Ηλιακά νετρίνα: Τα νετρινα στον Ήλιο παράγονται σύμφωνα με την αλυσιδωτή αντίδραση πρωτονίου-πρωτονίου, ώστε να γίνει σύντηξη και να παραχθεί ενέργεια για το άστρο (Σχήμα 1.8). Όπως μπορούμε να διακρίνουμε στο παρακάτω διάγραμμα, σε αρκετές αντιδράσεις της αλυσίδας παράγονται νετρίνα. Υπολογίζεται ότι απο κάθε τετραγωνικό εκατοστό της επιφάνειας του Ήλιου η ροή είναι 6 × 10<sup>10</sup> νετρίνα ανά δευτερόλεπτο.

Το φαινόμενο των ηλιαχών νετρίνο έδωσε σημαντιχό έρεισμα για την πρόοδο στη φυσιχή. Αρχετές έρευνες έγιναν για την μελέτη των νετρίνων που προέρχονται απο τον Ήλιο, όμως υπήρξε το παράδοξο της ανίχνευσης ενός ποσοστού απο 1/3 εώς 1/2 των αναμενόμενων σωματιδίων. Αυτό ερμηνεύεται αν συνυπολογίσουμε το φαινόμενο της ταλάντωσης νετρίνων. Κάθε νετρίνο είναι υπέρθεση των τριών λεπτονιχών γενεών που υπάρχουν. Έτσι, ο Ήλιος παράγει ηλεχτρονιαχά νετρίνα, χάποια απο τα οποία μετατρέπονται σε μιονιχά χαι ταύ μέχρι να φτάσουν στη Γή. Συνεπώς, οι ερευνητές ετοίμαζαν διατάξεις μόνο για ηλεχτρονιαχά νετρίνα, ανίχανες να ανιχνεύσουν τα υπόλοιπα.



Σχήμα 1.8: Η αλυσίδα  $p^+ - p^+$  στην αστρική πυρηνοσύνθεση.

 Ατμοσφαιρικά νετρίνα: Η ατμόσφαιρα της Γής βομβαρδίζεται και αυτή απο την κοσμική ακτινοβολία. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα κάποιες κοσμικές ακτίνες να αλληλεπιδρούν με μόρια της ατμόσφαιρας, παράγοντας κυρίως νετρόνια και πιόνια που αποτελούν την δευτερεύουσα κοσμική ακτινοβολία. Τα τελευταία παράγουν μιόνια και μιονικά νετρίνο. Τα μιόνια αυτά μπορούν να διασπαστούν δίνοντας μιονικά νετρίνα και ηλεκτρονιακά αντινετρίνα (Σχήμα 1.9). Έτσι, προκύπτει ένας μεγάλος αριθμός ατμοσφαιρικών νετρίνων, ο οποίος αποτελεί υπόβαθρο στα πειράματα νετρίνων και είναι δύσκολο να αφαιρεθει. Αξίζει να σημειωθεί, ότι στην ανίχνευση ατμοσφαιρικών νετρίνων, υπήρξε το ίδιο παράδοξο με την ανίχνευση των ηλιακών, το οποίο ερμηνεύτηκε και αυτό μέσω της ταλάντωσης νετρίνο.



Σχήμα 1.9: Καλλιτεχνική απεικόνιση δευτερεύουσας κοσμικής ακτινοβολίας.

Πηγές νετρίνων μπορούν να αποτελέσουν στη Γη, οι β-διασπάσεις στις αλυσίδες κάποιων ραδιενεργών ισοτόπων στη φύση. Ακόμη, τα παραγόμενα εντός της Γής νετρίνα μπορούν να οφείλονται και στην ανθρώπινη δραστηριότητα, όπως στην παραγωγή ενέργειας μέσω σχάσης και στους επιταχυντές πρωτονίων.

#### 1.3 Γιατί αστρονομία νετρίνο;

Ο πρώτος ανιχνευτής στην ιστορία της ανθρωπότητας είναι το ανθρώπινο μάτι. Έτσι, όταν ο άνθρωπος σήκωσε το κεφάλι ψηλά και κοίταξε τον ουρανό, είχε την ικανότητα να δεί όλα εκείνα τα σώματα που εκπέμπουν φωτόνια στο φάσμα του ορατού. Με την πάροδο του χρόνου και την πρόοδο των φυσικών επιστημών, οι αστρονόμοι ξεκίνησαν να χαρτογραφούν το διάστημα. Τεράστια ώθηση στην αστρονομία έδωσε η επινόηση του τηλεσκοπίου απο τον Γαλιλαίο τον 17ο αιώνα, ξεκινώντας μια εποχή παρατήρησης ουρανίων σωμάτων που δεν ήταν ορατά με γυμνό μάτι. Όμως, η χρήση των φωτονίων στο ορατό ηλεκτρομαγνητικό φάσμα ως το μόνο μέσο μεταφοράς πληροφορίας περιόριζε τις δυνατότητες εξερεύνησης του διαστήματος. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι οι αστέρες νετρονίων (Pulsars) οι οποίοι εκπέμπουν παλμούς στο μήκος κύματος των ραδιοχυμάτων, αλλά και σε μορφή ακτίνων X και γ. Έτσι οι αστρονόμοι ανέπτυξαν τις υποδομές και τις τεχνικές τους ώστε να μελετήσουν φωτόνια σε όλο το μήκος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος.

Αχόμα χαι έτσι όμως, το φωτόνιο θέτει αχομα περιορισμούς στην παρατήρηση. Φαινόμενα όπως οι Υπερχαινοφανείς Εχρήξεις (SN) ή οι Ενεργοί Γαλαξιαχοί Πυρήνες (Active Galactic Nuclei-AGNs) ήταν δύσχολο να μελετηθούν χαθώς είναι αδιαφανή για τα φωτόνια. Επίσης, η ροή των φωτονίων στις υψηλές ενέργειες είναι πολύ μιχρή, ενώ αχόμη αλληλεπιδρούν σε αυτές τις ενέργειες με τα ανώτερα στρώματα τις ατμόσφαιρας, χαθιστώντας δύσχολη την παρατήρηση της αρχιχής τους χατεύθυνσης.

Τη λύση σε αυτά τα προβλήματα έρχεται να δώσει η αστρονομία νετρίνο. Όπως προαναφέρθηκε τα νετρίνα είναι αφόρτιστα λεπτόνια που ταξιδεύουν με την ταχύτητα του φωτός, και αλληλεπιδρούν μόνο μέσω της ασθενούς πυρηνικής αλληλεπίδρασης. Έτσι, οι τροχιές τους δεν εκτρέπονται απο τα μαγνητικά πεδία που θα συναντήσουν στην πορεία τους, και επίσης κάθε μορφή ύλης είναι σχεδόν διαφανής για αυτά. Ενώ για ένα φωτόνιο διαρχεί εχατοντάδες χιλιάδες χρόνια ωστε να φτάσει στην επιφάνεια του Ήλιου απο το εσωτερικό του, και να φτάσει στη Γή, για ένα νετρίνο διαρχεί μολις οχτώ λεπτά, δηλαδή μόνο όσο χρειάζεται για να καλύψει την απόσταση Ήλιου-Γής! Τα πρωτόνια με τη σειρά τους, αν και αποτελούν μεγάλο μέρος της κοσμικής ακτινοβολίας, είναι φορτισμένα σωματίδια και ως εκ τούτου εκτρέπονται απο τα κοσμικα μαγνητικά πεδία. Ωστόσο, όλα αυτά τα πλεονεχτήματα των νετρίνων συνοδεύονται απο το μειονέχτημα της δυσχολίας ανίχνευσης τους. Η αποδοτιχότητα (efficiency) για την ανίχνευση νετρίνων είναι της τάξης του  $10^{-15}$ , ενώ για την ανίχνευση φωτονίων είναι  $\sim 0.5$ . Παρά τη δυσκολία ανίχνευσης των νετρίνων αφού απαιτεί την κατασκευή πολύ μεγάλων ανιχνευτικών διατάξεων, το γεγονός ότι μπορούν να δώσουν πληροφορίες για την προέλευση τους, δηλαδή τις χοσμικές

πηγές απο τις οποίες εκπέμπονται (Κεφ. 1.2), τα καθιστά μοναδικούς φορείς πληροφορίας στην αστρονομία (Σχήμα 1.10).



Σχήμα 1.10: Το νετρίνο ως φορέας πληροφορίας στην αστρονομία.

Τέλος, αξίζει να σημειωθεί ότι από την υπερκαινοφανή έκρηξη που ανιχνεύθηκε το 1987 (Σχήμα 1.11) και της οποίας η παρατήρηση επιβεβαίωσε την θεωρία της SN καταρρέοντος πυρήνα, έφτασαν εκλάμψεις νετρίνων στους ανιχνευτές της Γής ώρες πρίν το φώς φτάσει και ανιχνευθεί, επικυρώνοντας έτσι την ιδέα για αστρονομία νετρίνο.[2],[5]



Σχήμα 1.11: SN1987Aπριν και μετά την έκρηξη.

## Κεφάλαιο 2

## Ανίχνευση νετρίνων

#### 2.1 Ανιχνευτές Cherenkov

Τα πειράματα για αστρονομία μέσω ανίχνευσης νετρίνων υψηλών ενεργειών, χρησιμοποιούν για τη λειτουργία τους ανιχνευτές Cherenkov. Οι ανιχνευτές αυτοί παίρνουν το όνομα τους απο την αρχή λειτουργίας τους, την ανίχνευση της ακτινοβολίας Cherenkov. Όταν ένα φορτισμένο σωματίδιο διέρχεται απο ένα μέσο, και η ταχύτητα του είναι μεγαλύτερη απο την ταχύτητα διάδοσης του φωτός στο μέσο αυτό, τότε ακτινοβολεί. Η ακτινοβολία αυτή είναι γνωστή ως ακτινοβολία Cherenkov. Εφόσον το σωματίδιο κινείται με ταχύτητα μεγαλύτερη του φωτός στο μέσο αυτό, τα φωτόνια της ακτινοβολίας Cherenkov δεν μπορούν ποτέ να προηγηθούν του σωματιδίου στη διεύθυνση κίνησης του. Έτσι σχηματίζεται ένας κώνος φωτός, γνωστός και ως κώνος Cherenkov (Σχήμα 2.1). [2],[6]



Σχήμα 2.1: Κώνος και γωνία Cherenkov.

Ορίζοντας την φασική ταχύτητα του φωτός στο μέσο ω<br/>ς $v_{ph}$ και την ταχύτητα του σωματιδίου ως <br/> v,έχουμε μέσω απλής τριγωνομετρίας για ένα χρονικό

διάστημα t (Σχήμα 2.2):

$$\cos \theta_c = \frac{v_{ph}t}{vt} = \frac{\left(\frac{c}{n}\right)t}{\beta ct} = \frac{1}{\beta n}$$



Σχήμα 2.2: Κάθετη τομή χώνου Cherenkov.

αφού γνωρίζουμε απο τη σχετικότητα ότι  $\beta = \frac{v}{c}$  και ότι ο συντελεστής διάθλασης του μέσου ορίζεται ως  $n = \frac{c}{v_{ph}}$ . Εξαιτιας του συνημιτόνου υπάρχει η συνθήκη  $\beta n > 1$ , και επειδή ο δείκτης διάθλασης σχετίζεται με την τιμή της συχνότητας της ακτιοβολίας ( $n = \frac{c}{f\lambda}$ ), υπάρχει μια συχνότητα αποκοπής στο φάσμα των ακτίνων-Χ. Πάντως, το μεγαλύτερο ποσοστό ακτινοβολίας βρίσκεται στο υπεριώδες, ενώ εμφανίζεται και ορατή μπλέ ακτινοβολία για φορτισμένα σωματίδια υψηλής ενέργειας. Στο νερό, που έχει συντελεστή διάθλασης  $n_w = 1.33$ , μόνο σωματίδια με v > 0.75c μπορούν να παράξουν ακτινοβολία Cherenkov. Υπάρχουν δύο κατηγορίες πειραμάτων με ανιχνευτές Cherenkov. Στην πρώτη κατηγορία, μια μεγάλη δεξαμενή γεμίζει με νερό υψηλής καθαρότητας, ενώ σε όλη την επιφάνεια των τοιχωμάτων τοποθετούνται φωτοπολλαπλασιαστές. Σε αυτό το είδος ανιχνεύονται οι τομές του κώνου Cherenkov με τις επιφάνειες των τοιχωμάτων. Έχουν ενεργειακό κατώφλι τάξης μεγέθους MeV που σημαίνει ότι μπορούν να ανιχνεύσουν μέχρι και νετρίνα απο τον Ήλιο. Χαρακτηριστικό παράδειγμα είναι ο ανιχνευτής Super-Kamiokande στην Ιαπωνία (Εικόνα 2.3).



Σχήμα 2.3: Άποψη του εσωτερικού της δεξαμενής του ανιχνευτή Super-Kamiokande.

Στην άλλη κατηγορία, γραμμικές συστοιχίες φωτοπολλαπλασιαστών τοποθετούνται σε κάποιο μέσο (θάλασσα, λίμνη, πάγος) με σκοπό να ανιχνεύσουν όχι δακτύλιους Cherenkov, αλλά τροχιές σωματιδίων υψηλών ενεργειών. Το μιόνιο είναι το ιδανικό σωματίδιο, μιάς και για την περιοχή ενεργειών που συγκεντρώνει το ενδιαφέρον, η τροχιά του είναι της τάξης των km. Το ενεργειακό τους κατώφλι, ανάλογα με την πυκνότητα των φωτοπολλαπλασιαστών κυμαίνεται σε τάξη μεγέθους GeV.

Στη συνέχεια θα αναφερθούμε σε ανιχνευτές γραμμικών συστοιχειών που ποντίζονται σε μεγάλα βάθη.

#### 2.2 Ακτινοβολία υποβάθρου

Όπως είναι προφανές, τα υποβρύχια τηλεσχόπια νετρίνων έχουν ως χύριο σχοπό τους την αχτινοβολία που προέρχεται απο νετρίνα παραγόμενα σε χοσμιχούς επιταχυντές. Συνεπώς, οποιαδήποτε άλλη αχτινοβολία αποτελεί υπόβαθρο, το οποίο πρέπει να μελετηθεί χαι να αφαιρεθεί προσεχτιχά απο τους ερευνητές.

Το υπόβαθρο για τους ανιχνευτές, μπορεί να χωριστεί σε δύο κατηγορίες. Η πρώτη, αφορά τα σωματίδια τα οποία προέρχονται απο την αλληλεπίδραση των κοσμικών ακτίνων με τα μόρια της ατμόσφαιρας. Η δεύτερη κατηγορία περιλαμβάνει την ακτινοβολία απο το θαλασσινό νερό και τους έμβιους οργανισμούς.

 Ατμοσφαιρικά νετρίνα και μιόνια: Όπως αναφέρθηκε στο πρώτο κεφάλαιο, η ατμόσφαιρα βομβαρδίζεται απο κοσμική ακτινοβολία, παράγοντας δευτερεύουσα κοσμική ακτινοβολία, δηλαδή νετρίνα, μιόνια και ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια είναι βραχύβια, αφου καταλήγουν να κάνουν ηλεκτρομαγνητικό καταιγισμό, δηλαδή συνεχείς ανεξέλεγτες ηλεκτρομαγνητικές αλληλεπιδράσεις, και συνεπώς δεν φτάνουν στη γή ωστε να ανιχνευθούν. Έτσι, οι υποθαλάσσιοι ανιχνευτές νετρίνων, ανιχνεύουν ανεπιθύμητα υψηλοενεργειαχά μιόνια ατμοσφαιριχής προέλευσης. Το γεγονός ότι οι ανιχνευτές βρίσχονται σε μεγάλο θαλάσσιο βάθος, αν και αποτελεί μια πρώτη θωράχιση, δεν λύνει αυτό το πρόβλημα. Για το λόγο αυτό κατά την επεξεργασία των δεδομένων, συχνά γίνονται αποδεκτά ως νετρίνα μόνο σωματίδια που έχουν ανοδιχή πορεία ως προς τον ανιχνευτή, δηλαδή σωματίδια τα οποία φτάνουν στον ανιχνευτή έχοντας διασχίσει το εσωτερικό της Γής. Αυτό είναι ένα εύλογο τέχνασμα, αφού το νετρίνο είναι το μόνο σωματίδιο που μπορεί να διαπεράσει τη Γή. Αυτή η χρήση της Γης ως φίλτρο, έχει ως συνέπεια τη διενέργεια αστρονομικών παρατηρήσεων στον αντίθετο ουράνιο θόλο απο αυτόν που βρίσκεται ο ανιχνευτής. Όμως, επειδή για υψηλοενεργειαχά νετρίνα ενέργειας μεγαλύτερης απο μερικά PeV η Γή είναι σχεδόν αδιαφανής, θα πρέπει να αυξηθεί η ζενιθιαχή αποδοχή. Τα ατμοσφαιρικά νετρίνα μπορούν μόνο να εντοπιστουν μόνο απο την αναχατασχευή της τροχιάς χαι ενέργειας των μιονίων που παράγουν, αφού τα υψηλοενεργειαχά μιόνια είναι πιό πιθανό να έχουν εξωγήινη προέλευση. Παρ΄ όλα τα αρνητικά της, η ροή της αχτινοβολίας υποβάθρου είναι ένα χαλό μέσο ωστε να υπολογιστεί η απόδοση του ανιχνευτή.

 Θαλάσσια ραδιενέργεια και βιοφωταύγεια: Το ραδιενεργό στοιχείο K<sup>40</sup> συναντάται παντού στη φυση. Ειδικότερα στο θαλασσινό νερό, η πυκνότητα της ενεργότητας του είναι 12 kBq/m<sup>3</sup>. Το K<sup>40</sup>, έχει δύο κανάλια αποδιέγερσης με ενέργειες ~ 1MeV:

$${}^{40}Ka \to {}^{40}Ca + e^- + \bar{\nu}_e,$$
$${}^{40}Ka \to {}^{40}Ar^* + e^+ + \nu_e \to {}^{40}Ar + \gamma + e^+ + \nu_e$$

Τα ηλεκτρόνια που παράγονται, συνήθως πληρούν τις προυποθέσεις για να δημιουργήσουν ακτινοβολία Cherenkov η οποία αντιμετωπίζεται σαν υπόβαθρο. Ωστόσο, η ακτινοβολία αυτή μπορεί να χρησιμεύσει στους ερευνητές ωστε να κάνουν βαθμονόμηση του ανιχνευτή.

Μια άλλη πηγή υποβάθρου είναι η βιοφωταύγεια. Αυτή ορίζεται ως η ικανότητα των έμβιων οργανισμών να παράγουν φώς. Οι αιτίες του φαινομένου ποικίλουν. Μπορεί να προκληθεί απο βακτήρια, που εκπέμπουν σταθερά ακτινοβολία στο πέρασμα του χρόνου, ή απο μεγαλύτερα πλάσματα της θάλασσας, που εκπέμπουν εκλάμψεις μικρότερης χρονικής διάρκειας.

### Κεφάλαιο 3

## Το υποβρύχιο τηλεσκόπιο νετρίνων KM3NeT

#### 3.1 Ο ανιχνευτής ARCA του KM3NeT

Το υποβρύγιο τηλεσκόπιο νετρίνων KM3NeT<sup>[7][8]</sup> είναι ένα υπο κατασκευή πειραματικό εγχείρημα στο οποίο συμμετέχουν πολλά ερευνητικά κέντρα και πανεπιστήμια χυρίως από την Ευρώπη. Το ΚΜ3ΝeT έχει δύο στόχους. Ο ένας είναι να μελετήσει τη δομή της ύλης, και πιό συγκεκριμένα το πρόβλημα της "ιεραρχίας των μαζών των νετρίνων" (neutrino mass hierarchy) μέσω ατμοσφαιρικών νετρίνων. Για αυτό γίνεται εγκατάσταση του ανιχνευτή ORCA (Oscillation Research with Cosmics in the Abyss)  $\sigma \tau \eta \Gamma \alpha \lambda \lambda (\alpha, 40 \ km \pi \alpha \rho \alpha \varkappa \tau \alpha)$ της Τουλόν. Ο άλλος στόχος είναι να επιτύχει αστρονομία νετρίνο. Το πλάνο είναι να εγκατασταθούν ανιχνευτές σε τρία διαφορετικά σημεία της Μεσογείου, συνολικού ενεργού όγκου περίπου 6 km<sup>3</sup>. Μία απο αυτές τις τοποθεσίες είναι παράχτια της Τουλόν, εχεί δηλαδη που θα εγχατασταθεί και ο ORCA ανιχνευτής (KM3NeT-Fr). Το άλλο σημείο είναι 100 km παράχτια μίας μιχρής Σιχελιχής πόλης, του Portopalo di Capo Passero (KM3NeT-It). Η τρίτη τοποθεσία, βρίσκεται λιγο έξω απο την Πύλο, στην Ελλάδα, στο πιο βαθύ σημείο της Μεσογείου (KM3NeT-Gr). Οι ανιχνευτές αυτοί ονομάζονται ARCA (Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss) ( $\Sigma \chi \eta \mu \alpha 3.1$ ). Augótepou οι ανιχνευτές ARCA και ORCA είναι ανιχνευτές τύπου Cherenkov. Αυτή η εργασία πραγματεύεται τη δραστηριότητα του υπάρχοντος ανιχνευτή ARCA (ο υπάρχων ανιχνευτής ARCA αποτελείται απο δύο γραμμικές συστοιχίες οπτικών στοιχείων).



Σχήμα 3.1: Τοποθεσίες ανιχνευτή ARCA.

Ο ενεργός όγχος των ανιχνευτικών δομών, δημιουργείται απο ανιχνευτικές μονάδες (Detection Units - DUs) (Σχήμα 3.2), οι οποίες είναι γραμμικές συστοιχίες που συγκρατούν τα Ψηφιακά Οπτικά Στοιχεία (Digital Optical Modules - DOMs). Τα οπτικά στοιχεία σε κάθε ανιχνευτική μονάδα είναι 18, και ισαπέχουν, όντας τοποθετημένα ανά 36 m. Επομένως μια ανιχνευτική μονάδα έχει μηκος περίπου 700 m. Στο τελικό στάδιο του KM3NeT, κάθε μια απο τις τρείς περιοχές εγκατάστασης θα έχει έναν ανιχνευτικό όγκο αποτελούμενο απο δύο blocks, καθένα απο τα οποία θα έχει 115 τέτοιες ανιχνευτικές μονάδες. Οι Ανιχνευτικές Μονάδες, συνδέονται απευθείας με τη στεριά όπου και στέλνουν άμεσα τα δεδομένα, μέσω ενός Καλωδίου Βαθείας Θαλάσσης (Seabed Cable).

Τα Ψηφιαχά Οπτικά Στοιχεία ή DOMs, είναι γυάλινες σφαίρες που περιέχουν τους φωτοπολλαπλασιαστές (Photomultiplier Tubes - PMTs) για την ανίχνευση φωτονίων απο την ακτινοβολία Cherenkov. Οι γυάλινες αυτές σφαίρες έχουν κατάλληλο πάχος, ώστε να αντέχουν την πολύ ισχυρή πίεση στο βάθος στο οποίο θα ποντιστούν. Έχουν διάμετρο 17 ίντσες, ενώ φιλοξενούν 31 φωτοπολλαπλασιαστές (PMTs), που ο χαθένας έχει διάμετρο 3 ίντσες.



Σχήμα 3.2: Η ανιχνευτική μονάδα του KM3NeT (Detection Unit - DU). Ανοδικά απο αριστερά προς τα δεξιά.

Εκτός απο τα PMTs, τα DOMs περιέχουν τα ηλεκτρονικά για την καταγραφή της πληροφορίας απο κάθε "χτύπημα" (ανίχνευση φωτονίου) πριν την αποστολή των δεδομένων στον παράκτιο σταθμό. Ακόμη, περιέχουν μία ψηφιακή πυξίδα, ώστε να υπάρχει η γνώση σχετικά με το πού είναι στραμμένα αλλά και ένα σύστημα sonar για την καταγραφή της ακριβούς θέσης τους. Τέλος, το σφαιρικό οπτικό στοιχείο δέχεται τα καλώδια του ρεύματος αλλα και τις οπτικές ίνες με τις οποίες αποστέλλει τα δεδομένα, μέσω ενός εξαρτήματος που ονομάζεται Penetrator. Στην παρούσα φάση, ο ανιχνευτής είναι σε πρώιμη φάση κατασκευής, καθώς έχουν εγκατασταθεί δύο DUs τα οποία συλλεγουν δεδομένα στην περιοχή του Portopalo di Capo Passero (KM3NeT-It).



Σχήμα 3.3: Το Ψηφιακό Οπτικό Στοιχείο (DOM).



Σχήμα 3.4: Το εσωτερικό ενός DOM.

#### 3.2 Συλλογή δεδομένων στο KM3NeT

Το KM3NeT αχολουθεί την ταχτιχή της άμεσης αποστολής δεδομένων στον παράχτιο σταθμό συλλογής τους. Εχεί, γίνεται περαιτέρω επεξεργασία χαι αποθήχευση τους. Αχόμα χαι ο σχανδαλισμός (triggering) πραγματοποιείται στη στεριά. Ο σχανδαλισμός ενός ανιχνευτή είναι η εχχίνηση της χατάστασης στην οποία ο ανιχνευτής χαταγράφει χαι ομαδοποιεί συγχεχριμένα δεδομένα μέσα σε ένα χρονιχό παράθυρο, τα οποία θεωρούνται υποψήφιο γεγονός. Η χαλωδίωση όλων των ανιχνευτιχών μονάδων στο KM3NeT γίνεται με τη χρήση ορισμένων χουτιών που ονομάζονται junction boxes. Αυτά βρίσχονται στον πυθμένα της θάλασσας, χαι εχεί συγχεντρώνονται όλα τα χαλώδια απο τις ανιχνευτιχές μονάδες, τα οποία μεταφέρουν ρεύμα χαι δεδομένα. Για την μεταφορά των δεδομένων αχολουθείται η εξής τεχνιχή. Κάθε ένα οπτιχό στοιχείο μεταφέρει σήμα με τη διχή του χαθορισμένη συχνότητα. Κάθε οπτιχή ίνα μεταφέρει την πληροφορία απο τέσσερις ανιχνευτιχές μονάδες, επομένως απο 72 DOMs. Έτσι, στον παράχτιο σταθμό λαμβάνεται ένα σήμα για χάθε DOM ξεχωριστά αφού πραγματοποιηθεί ανάλυση για τον διαχωρισμό των συχνοτήτων [7].

Τα "χτυπήματα" (hits), δηλαδή τα φωτόνια που ανιχνεύουν τα PMTs του ανιχνευτή, χωρίζονται σε τρείς κατηγορίες [10]:

- L0 hits: Αυτα είναι όλα τα hits που καταγράφει ο ανιχνευτής
- L1 hits: Η συγκεκριμένη κατηγορία περιλαμβάνει τα hits που βρίσκονται μεταξύ τους σε μια "τοπική σύμπτωση" (local coincidence). Αυτή ορίζεται ως η περίπτωση όπου καταγράφονται τουλάχιστον 2 hits στο ίδιο DOM σε ένα χρονικό παράθυρο μικρότερο απο 25 ns.
- L2 hits: Αυτά προυποθέτουν μεγαλύτερο βαθμό συσχετισμού απο τα L1 hits μεταξύ τους, αφού πρέπει να υπάρχουν τοπικές σύμπτωσεις σε περισσότερα απο ένα οπτικά στοιχεία.

Τα δεδομένα απο την λειτουργία του ανιχνευτή διαμερίζονται χρονικά σε πακέτα που ονομάζονται runs. Κάθε τέτοιο run διαρκεί 6 ώρες. Τα δεδομένα σε κάθε run χωρίζονται σε τρείς κατηγορίες. Στα summary slices και τα time slices, τα οποία περιέχουν πληροφορίες για κάθε 0.1 sec του run, δηλαδή λειτουργούν χωρίς κάποιας μορφής triggering, και σε triggered, που περιέχουν δεδομένα που ικανοποιούν τουλάχιστον μια απο τις συνθήκες σκανδαλισμού που έχουν τεθεί. Αναλυτικά [10]:

 Summary Slices: Αυτά καταγράφονται κάθε 0.1 sec και περιέχουν πληροφορία για 0.1 sec για όλο τον ανιχευτή. Χωρίζονται σε Summary Frames, όπου κάθε ένα περιέχει την πληροφορία για ένα DOM στο 0.1 sec του Summary Slice. Κάθε Summary Frame, περιέχει τη μέση συχνότητα ανίχνευσης για κάθε PMT του DOM. Εκτός απο αυτό, περιέχει και κάποια άλλα στοιχεία της κατάστασης του DOM, όπως μεταξύ άλλων το άν υπήρξε HRV (High Rate Veto), δηλαδή απόρριψη των δεδομένων εξαιτίας πολύ υψηλής μέσης τιμής συχνότητας ανίχνευσης, κατα πάσα πιθανότητα λόγω βιοφωταύγειας.

- Time Slices: Η πληροφορία για αυτή την κατηγορία δεδομένων συλλέγεται αντίστοιχα με τα Summary Slices. Ένα Time Slice αποτελείται απο Frames, ένα για κάθε DOM. Κάθε Frame, περιέχει τα hits στο DOM που εκπροσωπεί. Για την ακρίβεια, περιέχει τρείς πληροφορίες για κάθε hit. Πρώτον, την χρονική στιγμή που συνέβη η ανίχνευση ( για το χρονικό συσχετισμό είναι απαραίτητη η χρονική βαθμονόμηση του ανιχνευτή ). Δεύτερον, ποιός φωτοπολλαπλασιαστής (PMT) πραγματοποίησε την ανίχνευση. Τρίτον, η χρονική διάρκεια κατα την οποία η ενέργεια του ανιχνευόμενου φωτονίου είναι πάνω απο το ενεργειαχό κατώφλι που απαιτείται για ανίχνευση ( Time over Threshold ToT ). Ακόμη, πρέπει να αναφέρουμε ότι το είδος των hits που αποθηκεύουν τα Time Slices ποικίλει, ανάλογα με το τι θέλουμε να κάνει ο ανιχνευτής ( δοκιμαστική λήψη δεδομένων για έλεγχο λειτουργίας, ανίχνευση γνωστού υποβάθρου για βαθμονόμηση, κλπ ). Μπορεί να είναι L1 ή L0 hits, ή ακόμα και τα δεδομένα μας να μην περιέχουν καθόλου Time Slices.
- Events: Αυτα περιλαμβάνουν τα L1 hits ή τα L2 hits, στα γεγονότα τα οποία ικανοποιούν τουλάχιστον μία από τις συνθήκες σκανδαλισμού. Επομένως, σε αντίθεση με τις δύο προηγούμενες κατηγορίες, τα Events δεν καταγράφονται συνεχώς. Σε αυτά περιέχονται τα hits τα οποία προκάλεσαν το triggering, καθώς και ένα άλλο σύνολο hits, τα snapshot hits, δηλαδη όλα τα hits στον ανιχνευτή για ένα χρονικό διάστημα λιγο πρίν και λίγο μετά το triggering. Τα Events χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση νετρίνων και μιονίων μέσω της ανακατασκευής (reconstruction) της τροχιάς τους.

## Κεφάλαιο 4

# Ανάλυση δεδομένων από τον ανιχνευτή ARCA-KM3NeT

Στο παρόν κεφάλαιο θα πραγματοποιηθεί ανάλυση δεδομένων του υπάρχοντος ανιχνευτή ARCA-KM3NeT, με τελικό σκοπό τη μελέτη της συχνότητας ανίχνευσης μιονίων, και την εξάρτηση της απο το θαλάσσιο βάθος. Τα δεδομένα που θα χρησιμοποιηθούν για ανάλυση είναι τα runs 5009-5046 που αντιστοιχούν σε 9.5 ημέρες λειτουργίας του ανιχνευτή, και συλλέχθηκαν απο τις ανιχνευτικές μονάδες απο τις 23-12-2016 στις 12:00 το μεσημέρι, εως και τα μεσάνυχτα της 1-1-2017 [11]. Για τα δεδομένα αυτά έχει πραγματοποιηθεί χρονική βαθμονόμηση μέσω της φυσικής ραδιενέργειας του <sup>40</sup>K (K40 time calibration) και είναι έτοιμα για ανάλυση. Η ανάλυση θα πραγματοποιηθεί με τη χρήση του στατιστικού πακέτου ROOT, σε συνδυασμό με την γλώσσα αντικειμενοστραφούς προγραμματισμού C++.

#### 4.1 Έλεγχος λειτουργίας των Ψηφιακών Οπτικών Στοιχείων (DOMs)

Πριν γίνει οποιαδήποτε ανάλυση των δεδομένων, θα πρέπει να ελεγχθεί η ομαλή λειτουργία των οπτικών στοιχείων (DOMs) που στελεχώνουν τις ανιχνευτικές μονάδες (DUs). Για αυτό το λόγο, θα χρησιμοποιήσουμε την κατηγορία δεδομένων summary slices, η οποία όπως προαναφέρθηκε περιέχει τη μέση συχνότητα ανίχνευσης για κάθε PMT ανα δευτερόλεπτο, για hits χωρίς απαίτηση κάποιας σύμπτωσης (coincidence). Επομένως, ο έλεγχος περιλαμβάνει τον σχεδιασμό αυτής της μέσης συχνότητας ως συνάρτηση του χρόνου. Ο έλεγχος λειτουργίας θα γίνει για κάθε DOM ξεχωριστά. Στη παρούσα φάση του ανιχνευτή, λειτουργούν 2 ανιχνευτικές μονάδες. Η αρίθμηση των DOM ξεκινάει απο αυτό που είναι πιο κάτω (δηλαδή σε μεγαλύτερο βάθος) σε κάθε DU. Ακολουθούν τα διαγράμματα για τα 36 (2 × 18) DOMs:



Σχήμα 4.1: Έλεγχος λειτουργίας για τα DU1.DOM1 - DU1.DOM6



Σχήμα 4.2: Έλεγχος λειτουργίας για τα DU1.DOM7 - DU1.DOM14



Σχήμα 4.3: Έλεγχος λειτουργίας για τα <br/>  $\rm DU1.DOM15$  -  $\rm DU2.DOM4$ 



Σχήμα 4.4: Έλεγχος λειτουργίας για τα  $\rm DU2.DOM5$  -  $\rm DU2.DOM12$ 



Σχήμα 4.5: Έλεγχος λειτουργίας για τα DU2.DOM13 - DU2.DOM18

Η πρώτη πληροφορία που παίρνουμε απο τα παραπάνω διαγράμματα, είναι ότι η πλειονότητα των οπτικών στοιχείων λειτουργεί σε μια συχνότητα ~ 210 kHz. Αυτό δικαιολογείται απόλυτα, αν συνυπολογίσουμε ότι κάθε PMT καταγράφει μια συχνότητα ~ 7 kHz [12][13]. Παρατηρούμε επίσης ότι το οπτικό στοιχείο DU1.DOM18 (Σχήμα 4.3), καθώς και τα DU2.DOM2 (Σχήμα 4.3), DU2.DOM11 (Σχήμα 4.4), DU2.DOM12 (Σχήμα 4.4), δεν λειτουργούν καθ΄ όλη τη διάρκεια των runs με τα οποία θα ασχοληθούμε. Τέλος, παρατηρούμε ότι η μέση συχνότητα για το DU1.DOM17 (Σχήμα 4.3) κυμαίνεται στα ~ 180 kHz, δηλαδή κατά ένα ποσοστό 10% λιγότερο απο τα υπόλοιπα οπτικά στοιχεία του ανιχνευτή. Αυτό, γνωρίζουμε ότι οφείλεται στην μειωμένη απόδοση (efficiency) κάποιων εκ των 12 φωτοπολλαπλασιαστών που βρίσκονται στο άνω ημισφαίριο του συγκεκριμένου οπτικού στοιχειου, και των οποίων τα διαγράμματα ακολουθούν (Σχήμα 4.6, Σχήμα 4.7).

Εκτός απο τις παραπάνω παρατηρήσεις, μπορούμε να εξάγουμε και δύο πολύ σημαντικά συμπεράσματα για την συνέχεια της ανάλυσης. Πρώτον, ότι το ποσοστό των εν λειτουργία οπτικών στοιχείων του ανιχνευτή είναι 89%, γεγονός που μας επιτρέπει να έχουμε πληροφορία για όλο το βάθος της έκτασης του ανιχνευτή. Δεύτερον, ότι η λειτουργία αυτή πραγματοποιήθηκε σταθερά και χωρίς διακοπές καθ΄ όλη τη διάρκεια των 9.5 ημερών, γεγονός που κάνει τα συγκεκριμένα δεδομένα κατάλληλα για περαιτέρω ανάλυση.



Σχήμα 4.6: Έλεγχος λειτουργίας για τους φωτοπολλαπλασιαστές DU1.DOM17.PMT1 - DU1.DOM17.PMT6



Σχήμα 4.7: Έλεγχος λειτουργίας για τους φωτοπολλαπλασιαστές DU1.DOM17.PMT7 - DU1.DOM17.PMT12

# 4.2 Καθορισμός του επίπεδου τοπικής σύμπτωσης για την ανίχνευση ατμοσφαι ρικών μιονίων

Αφού πραγματοποιήθηκε ο έλεγχος λειτουργίας του ανιχνευτή και εντοπιστηκαν οι φωτοπολλαπλασιαστές και τα οπτικά στοιχεία με μειωμένη απόδοση, επιβεβαιώθηκε η ικανοποιητική λειτουργία του. Θα πρέπει τώρα να αναλύσουμε τα δεδομένα στοχεύοντας στην ανίχνευση ατμοσφαιρικών μιονίων. Γνωρίζουμε πως στον ανιχνευτή KM3NeT, ένα και μόνο DOM είναι ικανό να διακρίνει πότε ένα μιόνιο πέρασε απο κοντά του [13]. Αυτό είναι κάτι αξιοσημείωτο, και οφείλεται στην αρχιτεκτονική του οπτικού στοιχείου, και συγκεκριμένα στην ύπαρξη πολλών φωτοπολλαπλασιαστών τοποθετημένων σε όλη την έκταση της επιφάνειας του.

Όπως προαναφέρθηκε, τοπική σύμπτωση (local coincidence) είναι η καταγραφή τουλάχιστον 2 hits στο ίδιο DOM σε χρονικό παράθυρο μικρότερο απο 25 ns απο την χρονική στιγμή ανίχνευσης του πρώτου hit. Τα hits των συμπτώσεων αυτών αποτελούν τα L1 hits, και τα time slices στα δεδομένα που έχουμε περιλαμβάνουν τέτοιου είδους hits.

Αρχικά θεωρούμε το επίπεδο σύμπτωσης, δηλαδή ποιός είναι ο ελάχιστος αριθμός φωτοπολλαπλασιαστών που πραγματοποίησαν ανίχνευση σε σύμπτωση, ώστε να έχουμε ανιχνεύσει ατμοσφαιρικό μιονίο. Για το λόγο δημιουργούμε ένα διάγραμμα δείχνει τη συχνότητα στην οποία έχουμε έναν αριθμό απο PMTs σε σύμπτωση (m, όπου m = 2, ..., 31), χρησιμοποιώντας τα διαθέσιμα δεδομένα των 9.5 ημερών. Το αποτέλεσμα φαίνεται παρακάτω για έναν ενδεικτικό αριθμό οπτικών στοιχείων για τις δυο ανιχνευτικές μονάδες. Θα πρέπει να γίνει ξεκάθαρο ότι στα διαγράμματα δεν έχει γίνει κανενός είδους προσέγγιση στα δεδομένα (fitting), και πως οι διακεκομμένες γραμμές έχουν σχεδιαστεί απλά για να τονιστούν οι δύο διαφορετικές κλίσεις που υπάρχουν σε αυτά.

Τα οπτικά στοιχεία που επιλέχθηκαν καλύπτουν όλο το βυθομετρικό φάσμα που έχουμε απο τις ανιχνευτικές μονάδες, απο βάθος  $\sim 2750~m$  μέχρι  $\sim 3400~m$ , ενώ οι μεταξύ τους αποστάσεις είναι  $\sim 220~m$ .



Σχήμα 4.8: Συχνότητα εμφάνισης <br/> κάθε επιπέδου τοπικής σύμπτωσης (m)για ενδεικτικά <br/>οπτικά στοιχεία της πρώτης ανιχνευτικής μονάδας.

Κατ΄ αρχάς, παρατηρούμε ότι στα ιστογράμματα εμφανίζονται δυο ειδών περιοχές. Η πρώτη περιοχή αφορά τα επίπεδα σύμπτωσης  $2 \le m \le 6$ , ενώ η δεύτερη περιοχή περιλαμβάνει τα επίπεδα σύμπτωσης  $8 \le m \le 26$ . Για επίπεδα σύμπτωσης m > 26 αναμένουμε να έχουμε την ίδια κλίση με την δεύτερη περιοχή, όμως η στατιστικη μας δεν αρκεί για να δώσει ξεκάθαρη εικόνα.

Παρατηρούμε ότι στην περιοχή της πρώτης χλίσης  $(2 \le m \le 6)$  οι συχνότητες όλων των οπτικών στοιχείων συμπίπτουν. Αφού συνυπολογίσουμε ότι τα επιλεχθέντα οπτικά στοιχεία έχουν εκατοντάδες μέτρα διαφορά στην απόσταση τους απο την επιφάνεια της θάλασσας, θα πρέπει να αποφανθούμε ότι το υπόβαθρο το οποίο χυριαρχεί σε αυτά τα επίπεδα σύμπτωσης είναι ανεξάρτητο του βυθομέτρου, και επομένως οφείλεται στη φύση του θαλασσινού νερού. Το υπόβαθρο αυτό οφείλεται στο ραδιενεργό ισότοπο <sup>40</sup>K, που συναντάται άφθονο στο θαλασσινό νερό (Kεφ. 2.2).

Στη δεύτερη περιοχή κλίσης ( $m \ge 8$ ), παρατηρούμε ότι οι συχνότητες σύμπτωσης για κάθε οπτικό στοιχείο διαφέρουν, όμως όλες έχουν την ίδια κλίση σε όλο το φάσμα όπου έχουμε ικανή στατιστική. Μπορούμε να διακρίνουμε σε αυτή την περιοχή, πως οι συχνότητες κάθε οπτικού στοιχείου είναι αντιστρόφως ανάλογες με το βυθόμετρο του. Επομένως όσο πιο βαθιά είναι ποντισμένο το οπτικό στοιχείο, τόσο εξασθενεί η αιτία που προκαλεί αυτά τα επίπεδα σύμπτωσης. Αυτή η αιτία δεν μπορεί να είναι άλλη απο την κοσμική ακτινοβολία, και συγκεκριμένα απο τα ατμοσφαιρικά μιόνια, αφού είναι τα μόνα σωματίδια που η τροχιές τους μπορούν να διανύσουν τέτοιες αποστάσεις, και να παράξουν ακτινοβολία Cherenkov. Επομένως καταλήγουμε στο γεγονός ότι αποδεχόμενοι επίπεδα σύμπτωσης  $m \ge 8$ , εξαλείφουμε τη συνεισφορά του υποβάθρου που οφείλεται στο ραδιενεργό ισότοπο <sup>40</sup>K και ανιχνεύουμε ατμοσφαιρικά μιόνια, κάλυση.

Τέλος, θα πρέπει να τονίσουμε τη συμπεριφορά του DU1.DOM17, το οποίο γνωρίζουμε πως έχει χαμηλότερο efficiency σε κάποια PMTs του άνω ημισφαιρίου του (Κεφ. 4.1). Πάντως, εκτιμούμε πως με εφαρμογή κανονικοποίησης θα έδινε και αυτό τις ίδιες τιμές, αφού παρατηρούμε μια ομοιόμορφη συμπεριφορά σε όλο το φάσμα των συμπτώσεων με τα υπόλοιπα DOMs.



 $\Sigma$ χήμα 4.9: Συχνότητα εμφάνισης <br/> κάθε επιπέδου τοπικής σύμπτωσης (m)για ενδεικτικά <br/>οπτικά στοιχεία της δεύτερης ανιχνευτικής μονάδας.

## 4.3 Έλεγχος ορθότητας του επιλεγόμενου για συμπτώσεις χρονικού παραθύρου

Το χρονικό παράθυρο μέσα στο οποίο θα πρέπει να έχουμε "σήμα", δηλαδή πληροφορία απο κάποια PMTs ώστε να θεωρήσουμε ότι υπάρχει σύμπτωση είναι 25 ns απο το πρώτο PMT που "χτυπήθηκε". Πόσο επαρκής όμως είναι η επιλογή αυτή του χρονικού παραθύρου; Μήπως απο την επιλογή αυτή χάνουμε σημαντική πληροφορία; Αυτο είναι κάτι που θα πρέπει να ελέγχθεί.

Για να ελέγξουμε την ορθότητα επιλογής του χρονικού παραθύρου εξετάζουμε όλες τις συμπτώσεις που περιέχουν τουλάχιστον 8 "χτυπημένα" PMTs. Όμως, αυτή τη φορά επεκτείνουμε το χρονικό παράθυρο, τόσο ώστε να φτάσει στα 100 ns. Αυτό γίνεται με σκοπό να υπολογίσουμε τις χρονικές διαφορές μεταξύ των hits που ανίχνευσαν τα PMTs σε κάθε σύμπτωση. Εξετάζουμε αυτές τις χρονικές διαφορές σε διαμέριση του 1 ns, και ελέγχουμε την ποσοστιαία κατανομή. Ακολουθούν τα παρακάτω ιστογράμματα για ενδεικτικά οπτικά στοιχεία των δυο ανιχνευτικών μονάδων.

Αυτό που παρατηρούμε στα σχήματα 4.10, 4.11 είναι ότι η κατανομή είναι ίδια στα επιλεγμένα οπτικά στοιχεία και των δύο ανιχνευτικών μονάδων. Η κάθετη διακεκομμένη γραμμή τονίζει το χρονικό παράθυρο που έχουμε θεωρήσει για την ύπαρξη σύμπτωσης, στα 25 ns. Ακόμη, παρατηρούμε αλλαγή της κλίσης στα 25 ns και στα δυο διαγράμματα. Το ποσοστό των χρονικών διαφορών που βρίσκονται εντός του επιλεγμένου (25 ns) χρονικού παραθύρου, επι του συνόλου των χρονικών διαφορών για κάθε οπτικό στοιχείο, φαίνονται στον ακόλουθο πίνακα:

Οπτικό Στοιχείο	Ποσοστό Χρονιχών Διαφορών $\leq 25~ns$
DU1.DOM1	83.1 %
DU1.DOM6	82.5 %
DU1.DOM12	82.0 %
DU1.DOM17	81.0 %
DU2.DOM1	82.8 %
DU2.DOM6	82.8 %
DU2.DOM13	82.1 %
DU2.DOM18	82.0 %

Πίνακας 4.1: Ποσοστά χρονικών διαφορών των hits επί του συνόλου, σε σύμπτωση εντός 100 ns για επιλεγμένα οπτικά στοιχεία.



Σχήμα 4.10: Ποσοστιαία κατανομή χρονικών διαφορών μεταξύ των hits σε σύμπτωση (100 ns), για την πρώτη ανιχνευτική μονάδα.



Σχήμα 4.11: Ποσοστιαία κατανομή χρονικών διαφορών μεταξύ των hits σε σύμπτωση (100 ns), για την δεύτερη ανιχνευτική μονάδα.

Ένας αχόμα τρόπος ώστε να υπολογίσουμε το ποσοστό των χρονιχών διαφορών που είναι μιχρότερο απο < 25 ns, είναι να δημιουργήσουμε τα αντίστοιχα συσσωρευτικά Cumulative ιστογράμματα, δηλαδή ιστογράμματα με κάθε bin να αποτελείται απο το άθροισμα των τιμών όλων των bins απο την αρχή του ιστογράμματος, μέχρι και το συγκεκριμένο bin. Έτσι λοιπόν, δημιουργούμε τα αντίστοιχα Cumulative ιστογράμματα για τα ποσοστιαία ιστογράμματα των σχημάτων 4.10 και 4.11. Επομένως, λαμβάνοντας την τιμή για το bin του ιστογράμματος που αντιστοιχεί στα 25 ns, έχουμε το συνολικό ποσοστό των χρονιχών διαφορών για το ζητούμενο χρονικό διάστημα, όπως φαίνεται στα σχήματα 4.12 και 4.13.

Το συμπέρασμα στο οποίο καταλήγουμε, είναι πως σε συμπτώσεις με τουλαχιστον 8 "χτυπημένα" PMTs, γεγονός που όπως δείξαμε σηματοδοτεί μιόνιο, έχουμε χρονικές διαφορές μικρότερες απο 25 ns μεταξύ των ανιχνεύσεων σε ποσοστό ~ 82.5% επί του συνόλου των χρονικών διαφορών, σε όλα τα επιλεχθέντα οπτικά στοιχεία. Το ποσοστό αυτό, σε συνδυασμό με την αλλαγή της κλίσης στα 25 ns στα σχήματα 4.10 και 4.11, αναδεικνύει την επάρκεια της επιλογής του συγκεκριμένου χρονικού παραθύρου.



Cumulative DU1

Σχήμα 4.12: Cumulative ιστόγραμμα για την ποσοστιαία κατανομή των χρονικών διαφορών μεταξύ των hits σε σύμπτωση (100 ns), για την πρώτη ανιχνευτική μονάδα.



Σχήμα 4.13: Cumulative ιστόγραμμα για την ποσοστιαία κατανομή των χρονικών διαφορών μεταξύ των hits σε σύμπτωση (100 ns), για την δεύτερη ανιχνευτική μονάδα.

# 4.4 Μελέτη συχνοτήτων ανίχνευσης συμπτώσεων ως συνάρτηση του χρόνου λήψης δεδομένων

Πριν φτάσουμε στο στόχο μας, ο οποίος είναι να μελετήσουμε την συχνότητα ανίχνευσης μιονίων ως συνάρτηση του θαλάσσιου βάθους, είναι ενδιαφέρον να κάνουμε αχόμα μια μελέτη. Αυτή η μελέτη, αφορά συχνότητες με τις οποίες ανιχνεύτηχαν δύο ειδών σωμπτώσεις. Πρώτον, συμπτώσεις στις οποίες είχαμε τουλάχιστον δύο PMTs να ανιχνεύουν εντός του χρονιχού παραθύρου ( $m \ge 2$ ), όπου χυριαρχεί η συνεισφορά του υποβάθρου απο το ραδιενεργό ισότοπο <sup>40</sup>K, και δεύτερον συμπτώσεις στις οποίες τουλάχιστον οχτός παραθύρου ( $m \ge 8$ ), όπου χυριαρχεί η συνεισφορά των ατμοσφαιριχών μιόνιων. Στη μελέτη αυτή υπολογίζεται μια μέση συχνότητα σε χάθε run (6 h λειτουργίας) για χάθε μια από τις δύο περιπτώσεις συμπτώσεων, και εξετάζεται ως συνάρτηση του χρόνου.

Ως ενδεικτικά οπτικά στοιχεία, διαλέγουμε τα δύο που βρίσκονται στα κατώτερα μέρη των ανιχνευτικών μονάδων ( DU1.DOM1, DU2.DOM1 ), και επίσης τα δεύτερα μετρώντας απο αυτά που βρίσκονται στην κορυφή τους ( DU1.DOM17, DU2.DOM17 ). Δεν συμπεριλαμβάνουμε αυτά που βρίσκονται στην κορυφή, καθώς το DU1.DOM18 δεν λειτουργεί. Ακολουθούν τα διαγράμματα για τις δυο περιπτώσεις στα σχήματα 4.14 και 4.15.

Στο διάγραμμα για συμπτώσεις με  $m \ge 2$ , παρατηρούμε πως οι συχνότητες όλων των οπτικών στοιχείων κυμαίνονται περίπου στα ~ 1600Hz. Εξαίρεση αποτελεί το οπτικό στιχείο DU1.DOM17 το οποίο όπως προαναφέρθηκε αντιμετωπίζει πρόβλημα με τα efficiencies των φωτοπολλαπλασιαστών του άνω ημισφαιρίου του. Αυτό δικαιολογείται απο το γεγονός ότι οι συμπτώσεις για  $m \ge 2$  υπερκαλύπτονται απο τις συμπτώσεις για  $2 \le m \le 6$  οι οποίες οφείλονται στο ραδιενεργό <sup>40</sup>K που βρίσκεται άφθονο στο θαλασσινό νερό.



Inclusive 2-fold coincidences per Run

Σχήμα 4.14: Συχνότητα ανίχνευσης για συμπτώσεις με  $m\geq 2,$ ως συνάρτηση του χρόνου λήψης δεδομένων.

Στο σχήμα 4.15 παρουσιάζεται το διάγραμμα που αφορά τις συμπτώσεις με  $m \ge 8$ . Η συχνότητα του αριθμού αυτού των συμπτώσεων στα οπτικά στοιχεία είναι μικρότερη κατα > 4 × 10<sup>4</sup> απο την αντίστοιχη για  $m \ge 2$ . Συγκρίνοντας τη συχνότητα ανίχνευσης για τα οπτικά στοιχεία που βρίσκονται πιο κοντά στον πυθμένα (κατώτερα) και πιο κοντά στην επιφάνεια της θάλασσας (ανώτερα), τα οποία έχουν βυθομετρική διαφορά ~ 600m, παρατηρούμε μια διαφορά των συχνοτήτων τους κατα ένα παράγοντα > 2. Αυτό είναι λογικό εαν λάβουμε υπόψιν ότι για συμπτώσεις με  $m \ge 8$  κυριαρχεί η συνεισφορά των ατμοσφαιρικών μιόνιων, και ως εκ τούτου τα υψηλότερα οπτικά στοιχεία είναι πιο εκτεθειμένα σε αυτή την περίπτωση πως το DU1.DOM17 δεν έχει τιμές συχνότητας παρόμοιες με του DU2.DOM17 λόγω του προβλήματος που αντιμετωπίζουν τα efficiencies των φωτοπολλαπλασιαστών του άνω ημισφαιρίου του.

Ένα συμπέρασμα που μπορούμε να βγάλουμε απο αυτή τη μελετη, είναι πως καθ΄ όλη τη διάρχεια της λήψης δεδομένων δεν έχουμε μεγάλες διαχυμάνσεις στην συχνότητα ανίχνευσης συμπτώσεων. Κάτι αντίστοιχο είδαμε χαι στο Κεφ.4.1, όμως εχεί ελέγχθηχαν συχνότητες ανιχνεύσεων χωρίς την απαίτηση κάποιας σύμπτωσης.



Σχήμα 4.15: Συχνότητα ανίχνευσης για συμπτώσεις με  $m\geq 8,$ ως συνάρτηση του χρόνου λήψης δεδομένων.

#### 4.5 Μελέτη της συχνότητας ανίχνευσης ατμοσφαιρικών μιονίων ως συνάρτηση του θαλάσσιου βάθους

Έχοντας μελετήσει την λειτουργία του ανιχνευτή για τα δεδομένα που επεξεργαζόμαστε, και αφου έχουμε ελέγξει τις παραδοχές που έγιναν, μπορούμε να προχωρήσουμε στο στόχο της μελέτης μας. Σε αυτό το σημείο, θα μελετήσουμε την εξάρτηση που έχει η συχνότητα ανίχνευσης των ατμοσφαιρικών μιονίων, απο το βάθος της θάλασσας. Για αυτό το σκοπό θα εκμεταλευτούμε όλο το διάστημμα των εκατοντάδων μέτρων σε βάθος που μας παρέχει ο ανιχνευτής ARCA, του οποίου τα οπτικά στοιχεία απέχουν μεταξύ τους 36 m.

Η μελέτη αυτή θα πραγματοποιηθεί με την εξής διαδικασία. Υπολογίζουμε για κάθε οπτικό στοιχείο του ανιχνευτή που λειτουργεί, τη μέση συχνότητα ανίχνευσης συμπτώσεων με  $m \ge 8$ , όπου m ο αριθμός των PMTs που ανιχνεύουν σε σύμπτωση. Όπως δείξαμε αυτές οι συμπτώσεις αντιστοιχούν σε ανίχνευση ατμοσφαιρικών μιονίων. Αρχικά, για κάθε συστοιχία χωριστά εξετάζουμε τη συχνότητα αντιστοιχίζοντας την με το θαλάσσιο βάθος του οπτικού της στοιχείου. Τα αποτελέσματα απεικονίζονται στα ακόλουθα διαγράμματα, για κάθε ανιχνευτική μονάδα χωριστά (Σχήμα 4.16, Σχήμα 4.17), και επιπλέον για όλα τα οπτικά στοιχεία του ανιχνευτή (Σχήμα 4.18).

Παρατηρούμε σε ολα τα διαγράμματα ότι η συχνότητα ανίχνευσης ατμοσφαιριχών μιονίων μειώνεται γραμμιχά σε σχέση με το βάθος. Συγχεχριμένα, απο τα ανώτερα οπτιχά στοιχεία που βρίσκονται ποντισμένα σε βάθος ~ 2750 m, μέχρι τα χατώτερα που βρίσκονται σε βάθος ~ 3400 m, δηλαδη σε μια βυθομετριχή διαφορά ~ 650 m, η συχνότητα ανίχνευσης μειώνεται χατά ένα παράγοντα του 2.5. Στο σχήμα 4.19 γίνεται σύγχριση με αποτελέσματα υποθαλάσσιων πειραμάτων απο τα οποία φαίνεται ότι ο ρυθμός ανίχνευσης ατμοσφαιριχών μιονίων για την ίδια βυθομετριχή διαφορά ελαττώνεται χατα παράγοντα 2.5, που συμφωνεί με το αποτέλεσμα αυτής της μελέτης.



inclusive 8-fold rate as a function of depth for DU1

Σχήμα 4.16: Συχνότητα ανίχνευσης ατμοσφαιρικών μιονίων ως συνάρτηση του θαλάσσιου βάθους για την πρώτη ανιχνευτική μονάδα.



inclusive 8-fold rate as a function of depth for DU2

Σχήμα 4.17: Συχνότητα ανίχνευσης ατμοσφαιρικών μιονίων ως συνάρτηση του θαλάσσιου βάθους για την δεύτερη ανιχνευτική μονάδα.



inclusive 8-fold rate as a function of depth for both DUs

Σχήμα 4.18: Συχνότητα ανίχνευσης ατμοσφαιρικών μιονίων ως συνάρτηση του θαλάσσιου βάθους για το σύνολο του ανιχνευτή ARCA.



Σχήμα 4.19: Πειραματικά αποτελέσματα σχετικά με τη συχνότητα ανίχνευσης ατμοσφαιρικών μιονίων απο το θαλάσσιο βάθος [14]. Οι κόκκινες διακεκομμένες γραμμές αντιστοιχούν στη βυθομετρική διαφορά του ανιχνευτή ARCA.

### Κεφάλαιο 5

## Συμπεράσματα

Στην παρούσα εργασία πραγματοποιήθηκε ανάλυση δεδομένων που συλλεχθηκαν απο τον ανιχνευτή ARCA του υποβρύχιου τηλεσκοπίου νετρίνων KM3NeT, το οποίο βρίσκεται στην αρχική φάση της κατασκευής του. Επιλέχθηκε μια περίοδος 9.5 ημερών (το πρώτο stable set of runs) ομαλής λειτουργίας του ανιχνευτή.

Αρχικά μελετήθηκε η λειτουργία των οπτικών στοιχείων του ανιχνευτή. Έτσι, είχαμε μια εικόνα για το πόσα και ποιά οπτικά στοιχεία λειτουργούν, αν υπάρχουν φωτοπολλαπλασιαστές με μειωμένη απόδοση, αλλά και για το αν λειτουργούν σωστα. Ελέγχοντας χρονικές συμπτώσεις στις οποίες είχαμε "χτυπημένα" PMTs, αποφανθήχαμε ότι η συνεισφορά του <sup>40</sup>K εξαλείφεται για μεγάλο αριθμό συμπτώσεων PMTs και ότι απαιτώντας τουλάχιστον οκτώ "χτυπημένα" PMTs  $(m \ge 8)$  σε ένα χρονικό παράθυρο μικρότερο των 25~nsανιχνεύουμε χυρίως ατμοσφαιριχά μιόνια. Στη συνέχεια, έγινε έλεγχος για την ορθότητα επιλογής του χρονικού παραθύρου σύμπτωσης. Η επιλογή αυτή φάνηκε ως ορθή αφού ανοίγοντας το χρονικό παράθυρο στα 100 ns, είδαμε ότι οι χρονικές διαφορές εντός της σύμπτωσης ήταν κατα  $\sim 82.5\%$  μικρότερες από 25 ns. Επιπλέον, μελετήσαμε την μέση συχνότητα ανίχνευσης για γενικό υπόβαθρο  $(2 \le m \le 6)$ , αλλά και για υπόβαθρο ατμοσφαιρικών μιονίων, και παρατηρήσαμε ότι υπάρχει μια σταθερότητα σε αυτές καθ΄ όλη τη διάρκεια των 9.5 ημερών που συλλέχθηκαν τα δεδομένα. Τέλος, καταφέραμε να μελετήσουμε την εξάρτηση της συχνότητας των ατμοσφαιρικών μιονίων απο το θαλάσσιο βάθος. Παρατηρήσαμε ότι τα ατμοσφαιρικά μιόνια που ανιχνεύονται μειώνονται περίπου κατα ένα παράγοντα του 2.5, απο τα <br/>  $\sim 2750~m,$ μέχρι τα  $\sim 3400~m,$ βάθη στα οποία μας επιτρέπει να κοιτάξουμε η ανιχνευτική διάταξη. Το αποτέλεσμα αυτό συγχρίθηχε με δημοσιευμένα αποτελέσματα υποθαλάσσιων πειραμάτων με τα οποία υπάρχει ικανοποιητική συμφωνία.

## Αναφορές σχημάτων

- 1.1 : http://www.neutrinoburst.gr/sm.html
- $1.2: \rm http://www.quantum$ diaries.org/2010/07/02/the-w-boson-mixing-things-up/
- 1.3 : http://www.neutrinoburst.gr/interactions.html
- 1.4: https://www.quantamagazine.org/ultrahigh-energy-cosmic-rays-traced-
- to-hotspot-20150514/
- 1.5: http://www.neutrinoburst.gr/sources.html
- 1.6: http://www.neutrinoburst.gr/grb.html
- 1.7 : https://www.jpl.nasa.gov/spaceimages/details.php?id=PIA21087
- 1.8 : http://www.neutrinoburst.gr/sources.html
- 1.9: http://www.pas.rochester.edu/pavone/particle-www/students/images/cosmic\_rays.jpg
- 1.10: https://astro.desy.de/
- 1.11: http://www.neutrinoburst.gr/introduction.html
- 2.1: https://www.researchgate.net/figure/41217589\_fig8\_Figure-212-The-cone-
- of-light-emitted-during-Cherenkov-ra-diation
- 2.2 : http://www.neutrinoburst.gr/cherenkov.html
- 2.3 : https://ecurrent.fit.edu/blog/panther-voices/subatomic-physics-super-
- k/

3.1, 3.2 : http://inspirehep.net/record/1310068/plots

- 3.3 : https://twitter.com/km3net/status/354006137215012864
- 3.4 : https://www.km3net.org/research/detector/sensors/

## Βιβλιογραφία

- D.Griffiths, Introduction to Elementary Particles, 46-48,317,322-323 (2004)
- [2] http://www.neutrinoburst.gr
- [3] Introduction to cosmic rays Biermann, Peter et al. Lect.Notes Phys. 576 (2001) 1-26 astro-ph/0202425
- [4] Active Galactic Nuclei as High-Energy Neutrino Sources, Kohta Murase, arXiv:1511.01590 [astro-ph.HE] (2016)
- [5] http://antares.in2p3.fr/Overview/why.html
- [6] Donald H. Perkins, Εισαγωγή στη Φυσική Υψηλών Ενεργειών, 77-78, Εκδόσεις τυπωθητω, (2001)
- [7] https://www.km3net.org/
- [8] The KM3NeT Multi-PMT Digital Optical Module Bruijn, R et al. PoS ICRC2015 (2016) 1157
- [9] S. Biagi, T. Chiarusi, P. Piatelli and D. Real. 2015. The data acquisition system of the KM3NeT detector, in proceedings of the 34th International Cosmic Ray Conference, 30 July - 6 August, The Hague, The Netherlands. PoS,ICRC2015,1172
- [10] http://www.km3net.de/index.php/Newbies
- [11] http://wiki.km3net.physik.uni-erlangen.de/index.php/HE\_Astrophysics/ARCA2\_Analysis
- [12] Adrián-Martínez et al. (KM3NeT Collaboration), The prototype detection unit of the KM3NeT detector, Eur. Phys. J. C (2016) 76: 54
- [13] Deep sea tests of a prototype of the KM3NeT digital optical module
   KM3NeT Collaboration (Adrián-Martínez, S. et al.) Eur.Phys.J. C74 (2014) no.9, 3056 arXiv:1405.0839 [astro-ph.IM]

[14] Atmospheric Muon Flux at Sea Level, Underground and Underwater , E. V. Bugaev, A. Misaki et al. , (2000), http://arXiv.org/abs/hepph/9803488v3