



(a) Εθνικό Μετσόβιο
Πολυτεχνείο
Σχολή Εφαρμοσμένων
Μαθηματικών και Φυσικών
Επιστημών



(b) Εθνικό
Κέντρο Έρευνας
Φυσικών Επιστημών
"ΔΗΜΟΚΡΙΤΟΣ"
Ινστιτούτο Πυρηνικής και
Σωματιδιακής Φυσικής

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
" Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές "

Μελέτη βελτιστοποίησης του ανιχνευτή KM3NeT-ARCA
για την ανίχνευση νετρίνων υψηλών ενεργειών

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΔΙΠΛΩΜΑΤΙΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ
ΤΗΣ
ANNAΣ ΣΙΝΟΠΟΥΛΟΥ

Επιβλέποντες:

Τσιπολίτης Γεώργιος, Καθηγητής Ε.Μ.Π.
Τζαμαριουδάκη Αικατερίνη, Ερευνήτρια Β', Ε.Κ.Ε.Φ.Ε " Δημόκριτος "

ΑΘΗΝΑ, ΙΑΝΟΥΑΡΙΟΣ 2018

Αφιερωμένη στον κ.Γιώργο.

Ήσασταν ο πρώτος που με έκανε να αγαπήσω τη φυσική...

Ευχαριστίες

Η εργασία πραγματοποιήθηκε το ακαδημαϊκό έτος 2016-2017 στο Ινστιτούτο Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε Δημόκριτος στα πλαίσια εκπόνησης της μεταπτυχιακής εργασίας για το μεταπτυχιακό "Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές" 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 καθώς και την υπόλοιπη ομάδα που εργάζεται για το πείραμα KM3NeT. Σημαντικό ρόλο μέσα σε αυτή τη χρονιά είχαν και τα παιδιά (Άννα, Γιώργος, Κωνσταντίνα, Φανή, Φλώρα, Χαρά κ.λ.π.) με τα οποία διαβάζαμε, ανταλλάσαμε ιδέες αλλά και περνούσαμε όμορφες στιγμές στα γραφεία μας στη σχολή και τους οποίους ευχαριστώ πολύ για τη στήριξη, την αγάπη και τη φιλία τους.

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 (Σμαράγδα, Κωνσταντίνα, Θωδωρή, Νίκο, Μελπομένη, Χρήστο, Μαρίες, Αφροδίτη κ.λ.π.) που στάθηκαν δίπλα μου στα εύκολα και τα δύσκολα των τελευταίων ετών.

Abstract

The subject of this master thesis is the study of alternative detector configurations of the KM3NeT-ARCA detector focusing on detecting high energy neutrinos. It was carried out within the master studies (Msc) "Physics and technological applications" of the School of Applied Mathematical and Physical Sciences of the National Technical University of Athens, at 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 are presented.

Moreover, the KM3NeT experiment is presented whose goal is the discovery and observation of high energy (GeV to PeV) neutrino sources of cosmic origin (ARCA) and the determination of the neutrino mass hierarchy (neutrinos of tens of GeV) (ORCA). A brief description of the official software tools used from the KM3NeT collaboration is made.

The analysis consists of the study of the performance and the study of the sensitivity and discovery potential with each of the alternative detector configurations studied in comparison with the standard detector configuration of the KM3NeT-ARCA detector. Finally, the analysis was repeated with the newest (at the time of the thesis) version of the reconstruction package of the KM3NeT collaboration and the results were compared with those from the old version.

Περίληψη

Το αντικείμενο της παρούσας εργασίας είναι η μελέτη της δυνατότητας ανίχνευσης νετρίνων πολύ υψηλών ενεργειών με εναλλακτικές γεωμετρίες του ανιχνευτή KM3NeT-ARCA και πραγματοποιήθηκε στα πλαίσια του μεταπτυχιακού προγράμματος "Φυσική και τεχνολογικές εφαρμογές" της Σχολής Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου, στο Ινστιτούτο 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 νεutrίνο 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 πείραμα KM3NeT, του οποίου στόχος είναι η ανακάλυψη και παρατήρηση των νετρίνων υψηλής ενέργειας (GeV to PeV) κοσμικής προέλευσης (ARCA) και ο προσδιορισμός της ιεραρχίας μάζας νετρίνων (δεκάδων GeV) (ORCA). Παρουσιάζεται μια σύντομη περιγραφή των επίσημων εργαλείων λογισμικού που χρησιμοποιούνται από το πείραμα KM3NeT.

Η ανάλυση της εργασίας αποτελείται από τη μελέτη της απόδοσης και τη μελέτη της ευαισθησίας και της πιθανότητας ανακάλυψης με κάθε μία από τις εναλλακτικές γεωμετρίες του ανιχνευτή που μελετήθηκαν σε σύγκριση με την τυπική γεωμετρία του ανιχνευτή KM3NeT-ARCA. Τέλος, η ανάλυση επαναλήφθηκε με τη νεότερη έκδοση του λογισμικού ανακατασκευής (κατά τη διάρκεια της διατριβής) του πειράματος KM3NeT και τα αποτελέσματα της συγκρίθηκαν με τα αποτελέσματα με τη παλαιότερη έκδοση του λογισμικού.

Περιεχόμενα

Κατάλογος Σχημάτων	2
Κατάλογος Πινάκων	2
1 Κοσμικές ακτίνες και μηχανισμοί παραγωγής νετρίνων	7
1.1 Κοσμικές ακτίνες	7
1.2 Νετρίνα αστροφυσικής προέλευσης	10
1.3 Πιθανές πηγές προέλευσης αστροφυσικών νετρίνων	11
1.3.1 Εξωγαλαξιακές πηγές νετρίνων	11
1.3.2 Ενδογαλαξιακές πηγές νετρίνων	14
1.4 Ατμοσφαιρικά νετρίνα και μόνια	15
2 Τηλεσκόπια νετρίνων	17
2.1 Ανίχνευση νετρίνων	17
2.1.1 Τοπολογία γεγονότων	19
2.2 Υπόβαθρο σήματος στα υποθαλάσσια τηλεσκόπια νετρίνων	21
2.2.1 Ατμοσφαιρικά νετρίνα και μόνια	21
2.2.2 Ραδιενέργεια και βιοφωταύγεια	22
2.3 Τα κυριότερα εν λειτουργία τηλεσκόπια νετρίνων	23
2.3.1 Τηλεσκόπιο ANTARES	25
2.3.2 Τηλεσκόπιο IceCube	26
3 Η ερευνητική υποδομή KM3NeT	27
3.1 Ο ανιχνευτής ARCA	27
3.2 Ο ανιχνευτής ORCA	29
3.3 Ανιχνευτικές μονάδες Detection Units (DUs)	30
3.4 Ψηφιακά οπτικά στοιχεία Digital Optical Modules (DOMs)	32

4	Λογισμικό παραγωγής και προσομοίωσης γεγονότων	34
4.1	Η γεωμετρία του ανιχνευτή	35
4.2	Γεννήτρια γεγονότων νετρίνων GENHEN	38
4.3	Το λογισμικό προσομοίωσης KM3	39
4.4	Το λογισμικό σκανδαλισμού γεγονότων και δημιουργίας παλμών υποβάθρου : JTriggerEfficiency	40
4.5	Το λογισμικό ανακτασκειής γεγονότων JGandalf	41
5	Performance of the track reconstruction	44
6	Sensitivity and Discovery Potential	66
6.1	Sensitivity	67
6.2	Discovery Potential	68
6.3	Sensitivity and discovery potential for the standard KM3NeT- ARCA detector and the alternative geometries	69
6.4	Comparison between the different geometries of the KM3NeT- ARCA detector	71
7	Validation of the reconstruction performance and verification of the results (using the latest JPP package)	76
8	Συμπεράσματα	88
9	Conclusions	90
	Βιβλιογραφία	92
	Appendices	96
A	Sensitivity and discovery potential detailed analysis	96
A.0.1	Sensitivity and discovery potential for the standard KM3NeT-ARCA detector	96
A.0.2	Sensitivity and discovery potential for the 120 m alternative KM3NeT-ARCA detector	101
A.0.3	Sensitivity and discovery potential for the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector	105
A.0.4	Sensitivity and discovery potential for the 180 m alternative KM3NeT-ARCA detector	109

Κατάλογος Σχημάτων

1.1	Το παρατηρούμενο ενεργειακό φάσμα κοσμικών ακτίνων [2] . . .	8
1.2	Σωματίδια-φορείς πληροφορίας για την αστροσωματιδιακή φυσική [4]	9
1.3	Αλληλεπίδραση πρωτονίων με περιβάλλουσα ύλη (πυρήνες και φωτόνια)	10
1.4	Τοποθεσίες στον ουρανό όλων των GRBs που κατέγραψε η απο-στολή BATSE	13
1.5	Ροή ατμοσφαιρικών νετρίνων και μιονίων συναρτήσει της ζενιθιακής γωνίας [7]	16
2.2	Αλληλεπιδράσεις νετρίνου ουδέτερου και φορτισμένου ρεύματος	18
2.3	Σχηματισμός του κώνου Cherenkov από την διάδοση φορτισμένων σωματιδίων σε μέσο με σχετικιστικές ταχύτητες	18
2.4	Διαγράμματα Feynman και οπτικοποίηση της τοπολογίας γεγονότων στον ανιχνευτή ICECUBE. Η διαβάθμιση των χρωμάτων αποδίδει την χρονική εξέλιξη της εναπόθεσης φωτός στον ανιχνευτή (το κόκκινο δείχνει την πρώτη εμφάνιση φωτός και το μπλέ την τελευταία).	20
2.6	Σχηματική αναπαράσταση του ανιχνευτή NESTOR (αριστερά) και του ανιχνευτή NEMO (δεξιά)	24
2.7	Σχηματική αναπαράσταση του τηλεσκοπίου νετρίνων ANTARES	25
2.8	Ο ανιχνευτής νετρίνων IceCube	26
3.1	Οι προτεινόμενες τοποθεσίες των δομικών στοιχείων του ανιχνευτή ARCA.	29
3.2	Σχηματική αναπαράσταση του σχοινιού - string της ανιχνευτικής μονάδας του KM3NeT, καθώς ζετυλίγεται υποθαλάσσια.	31
3.3	Αριστερά : Το ψηφιακό οπτικό στοιχείο (DOM) του KM3NeT. Δεξιά : Σχηματική αναπαράσταση του εσωτερικού του ψηφιακού οπτικού στοιχείου.	33
4.1	Σειρά χρήσης εργαλείων λογισμικού στο KM3NeT.	35

4.2	Γραφική αναπαράσταση του βλοσκ του ανιχνευτή AP ^ν A για απόσταση 90 μέτρων (αριστερά) και 120 μέτρων (δεξιά) μεταξύ των ανιχνευτικών μονάδων.	36
4.3	Γραφική αναπαράσταση του βλοσκ του ανιχνευτή AP ^ν A για απόσταση 150 μέτρων (αριστερά) και 180 μέτρων (δεξιά) μεταξύ των ανιχνευτικών μονάδων.	37
4.4	Τα βήματα που ακολουθούνται στο πακέτο JGandalf για την ανακατασκευή της τροχιάς των μιονίων.	43
5.1	The effective area in m ² versus log ₁₀ E_ν GeV for the detector configurations with 90 m (black), 120 m (green), 150 m (red), 180 m (blue) distance between the strings.	45
5.2	The effective area in m ² versus log ₁₀ E_ν GeV with the reconstruction quality cuts applied, for the detector configurations with 90 m -standard geometry- (black), 120 m (green), 150 m (red), 180 m (blue) distance between the strings.	46
5.3	The efficiency versus log ₁₀ E_ν GeV for the detector configurations with 90 m (black), 120 m (green), 150 m (red), 180 m (blue) distance between the strings.	48
5.4	The quality versus log ₁₀ E_ν GeV for the detector configurations with 90 m (black), 120 m (green), 150 m (red), 180 m (blue) distance between the strings. The plot is zoomed in order to enable the identification of the quality differences.	48
5.5	The efficiency versus log ₁₀ E_ν GeV for the detector configurations with 90 m (black), 120 m (green), 150 m (red), 180 m (blue) distance between the strings using events that cross the detector.	49
5.6	The quality versus log ₁₀ E_ν GeV for the detector configurations with 90 m (black), 120 m (green), 150 m (red), 180 m (blue) distance between the strings using events that cross the detector. The plot is zoomed in order to enable the identification of the quality differences.	50
5.7	The median of the difference between the reconstructed and the simulated track direction ($\Delta\Omega$) as a function of the MC muon energy for the 90 m (black), 120 m (green), 150 m (red) and 180 m (blue) geometries. The plot is shown zoomed in order to facilitate the comparison.	50
5.8	The median of the difference between the reconstructed and the simulated track direction ($\Delta\Omega$) as a function of the MC muon zenith angle for the 90 m (black), 120 m (green), 150 m (red) and 180 m (blue) geometries. The plot is shown zoomed in order to facilitate the comparison.	51

5.9	The median of the difference between the reconstructed energy and the simulated energy of the muon as a function of the muon energy for the 90 m (black), 120 m (green), 150 m (red) and 180 m (blue) geometries. The plot is shown zoomed in order to facilitate the comparison.	52
5.10	The median of the difference between the reconstructed energy and the simulated energy of the muon as a function of the zenith angle for the 90 m (black), 120 m (green), 150 m (red) and 180 m (blue) geometries. The plot is shown zoomed in order to facilitate the comparison.	52
5.11	The reconstructed energy as a function of the MC muon energy for the standard KM3NeT geometry.	54
5.12	The reconstructed energy after applying the correction described in the text as a function of the MC muon energy for the standard KM3NeT geometry.	54
5.13	The reconstructed energy after applying the correction with respect to the can as described in the text as a function of the MC muon energy for the standard KM3NeT geometry.	55
5.14	The difference between the reconstructed energy and the MC muon energy as a function of the MC muon energy for the standard KM3NeT geometry.	55
5.15	The difference between the corrected reconstructed energy and the MC muon energy as a function of the MC muon energy for the standard KM3NeT geometry.	56
5.16	The difference between the reconstructed energy after the can correction and the MC muon energy as a function of the MC muon energy for the standard KM3NeT geometry.	56
5.17	The energy resolution after the correction for all reconstructed events with $E > 10\text{TeV}$ (left) and with $E > 100\text{TeV}$ (right) for the standard KM3NeT-ARCA geometry. The y axis is in arbitrary units.	57
5.18	The energy resolution after the can correction for all reconstructed events with $E > 10\text{TeV}$ (left) and with $E > 100\text{TeV}$ (right) for the standard KM3NeT-ARCA geometry. The y axis is in arbitrary units.	57
5.19	The correction function as applied for the 120m alternative geometry. The MC muon energy is shown as a function of the reconstructed energy.	58
5.20	The correction function as applied for the 150m alternative geometry. The MC muon energy is shown as a function of the reconstructed energy.	59
5.21	The correction function as applied for the 180m alternative geometry. The MC muon energy is shown as a function of the reconstructed energy.	59

5.22	The reconstructed energy (left plot) and the corrected reconstructed energy (right plot) as a function of the true muon energy for the alternative KM3NeT geometry of 120 m distance between the strings.	60
5.23	The difference of the reconstructed energy (left plot) and the corrected reconstructed energy (right plot) with the MC muon energy as a function of the MC muon energy for the alternative KM3NeT geometry of 120 m distance between the strings.	60
5.24	The reconstructed energy (left plot) and the corrected reconstructed energy (right plot) as a function of the true muon energy for the alternative KM3NeT geometry of 150 m distance between the strings.	60
5.25	The difference of the reconstructed energy (left plot) and the corrected reconstructed energy (right plot) with the MC muon energy as a function of the MC muon energy for the alternative KM3NeT geometry of 150 m distance between the strings.	61
5.26	The reconstructed energy (left plot) and the corrected reconstructed energy (right plot) as a function of the true muon energy for the alternative KM3NeT geometry of 180 m distance between the strings.	61
5.27	The difference of the reconstructed energy (left plot) and the corrected reconstructed energy (right plot) with the MC muon energy as a function of the MC muon energy for the alternative KM3NeT geometry of 180 m distance between the strings.	61
5.28	The energy resolution after the correction for all reconstructed events with $E > 10\text{TeV}$ (left) and with $E > 100\text{TeV}$ (right) for the alternative KM3NeT-ARCA geometry with 120 m distance between the strings. The y axis is in arbitrary units. . .	62
5.29	The energy resolution after the correction for all reconstructed events with $E > 10\text{TeV}$ (left) and with $E > 100\text{TeV}$ (right) for the alternative KM3NeT-ARCA geometry with 150 m distance between the strings. The y axis is in arbitrary units. . .	62
5.30	The energy resolution after the correction for all reconstructed events with $E > 10\text{TeV}$ (left) and with $E > 100\text{TeV}$ (right) for the alternative KM3NeT-ARCA geometry with 180 m distance between the strings.	63
5.31	The median of the difference between the corrected reconstructed energy and the simulated energy of the muon as a function of the true muon energy for the 90 m (black and light blue), 120 m (green), 150 m (red) and 180 m (blue) geometries. The plot is shown zoomed in order to facilitate the comparison.	64

5.32	The median of the difference between the corrected reconstructed energy and the simulated energy of the muon as a function of the muon zenith angle for the 90 m (black and light blue), 120 m (green), 150 m (red) and 180 m (blue) geometries.	65
6.1	The discovery potential as a function of the observation years using the LoI flux. The estimation of the discovery potential is represented with black for the standard KM3NeT geometry, with green for the 120 m alternative geometry, with red for the 150 m alternative geometry and with blue for the 180 m alternative geometry.	75
6.2	The discovery potential as a function of the observation years using the IceCube flux. The estimation of the discovery potential is represented with black for the standard KM3NeT geometry, with green for the 120 m alternative geometry, with red for the 150 m alternative geometry and with blue for the 180 m alternative geometry.	75
7.1	The difference of the reconstructed energy with the MC muon energy as a function of the MC muon energy (left plot) and the angular resolution as a function of the MC muon energy (right plot) are shown for the JPP package versions 6.1.5592 and 8.0.7290 respectively.	77
7.2	The difference of the reconstructed energy with the MC muon energy as a function of the MC muon energy (left plot) and the angular resolution as a function of the MC muon energy (right plot) are shown for JPP package version 4.0.4190.	77
7.3	The effective area in m^2 versus $\log_{10} E_\nu$ GeV for the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector configuration using the JPP version 8.2.7878 (purple) and 4.0.4190 (red).	78
7.4	The median of difference of the reconstructed and the MC track direction ($\Delta\Omega$) as a function of the MC muon energy for the 150m alternative KM3NeT-ARCA geometry using the JPP package version 4.0.4190 (red) and 8.2.7878 (purple).	79
7.5	The MC muon energy is shown as a function of the reconstructed energy for well reconstructed events ($\Delta\Omega < 1^\circ$).	80
7.6	The correction function as applied for the 150m alternative geometry using the JPP version 8.2.7878. The MC muon energy is shown as a function of the reconstructed energy.	80
7.7	The reconstructed energy (left plot) and the corrected reconstructed energy (right plot) as a function of the MC muon energy for the 150m alternative KM3NeT-ARCA geometry using the JPP package version 8.2.7878.	81

7.8	The difference of the reconstructed energy (left plot) and the corrected reconstructed energy (right plot) with the MC muon energy as a function of the MC muon energy for the 150m alternative KM3NeT-ARCA geometry using the JPP package version 8.2.7878.	81
7.9	The energy resolution after applying the correction function for all reconstructed events with $E > 10$ TeV (left) and with $E > 100$ TeV (right) for the 150m alternative KM3NeT-ARCA geometry using the JPP package version 8.2.7878.	82
7.10	The median of difference of the corrected reconstructed energy and the MC muon energy as a function of the MC muon energy for the 150m alternative KM3NeT-ARCA geometry using the JPP package version 4.0.4190 (red) and 8.2.7878 (purple).	82

Κατάλογος Πινάκων

6.1	The reconstructed muon energy at which the Model Rejection Factor (MRF) and the Model Discovery Potential (MDP) are minimized and the points of minimization using the astrophysical neutrino flux used for the LoI, for the different KM3NeT-ARCA detectors studied, are reported. The number of signal and background events at these points are calculated.	71
6.2	The sensitivity and the discovery potential for 1 year of operation of the different KM3NeT-ARCA detectors studied with 2 blocks using the astrophysical neutrino flux used for the LoI.	72
6.3	The reconstructed muon energy at which the Model Rejection Factor (MRF) and the Model Discovery Potential (MDP) are minimized and the points of minimization using the IceCube astrophysical neutrino flux, for the different KM3NeT-ARCA detectors studied, are reported. The number of signal and background events at these points are calculated.	73
6.4	The sensitivity and the discovery potential for 1 year of operation of the different KM3NeT-ARCA detectors studied with 2 blocks using the IceCube astrophysical neutrino flux.	73
7.1	The MC muon energy that minimizes the MRF and the MDP and the points of minimization using the astrophysical neutrino flux used for the LoI, for the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector, are reported for JPP versions 4.0.4190 and 8.2.7878.	83
7.2	The sensitivity and the discovery potential for 1 year of operation of the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector using the astrophysical neutrino flux used for the LoI, for JPP versions 4.0.4190 and 8.2.7878.	84

7.3	The reconstructed muon energy that minimizes the MRF and the MDP and the points of minimization using the astrophysical neutrino flux used for the LoI, for the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector, are reported for JPP versions 4.0.4190 and 8.2.7878.	84
7.4	The sensitivity and the discovery potential for 1 year of operation of the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector using the astrophysical neutrino flux used for the LoI, for JPP versions 4.0.4190 and 8.2.7878.	85
7.5	The MC muon energy that minimizes the MRF and the MDP and the points of minimization using the IceCube astrophysical neutrino flux, for the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector, are reported for JPP versions 4.0.4190 and 8.2.7878.	85
7.6	The sensitivity and the discovery potential for 1 year of operation of the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector using the IceCube astrophysical neutrino flux, for JPP versions 4.0.4190 and 8.2.7878.	86
7.7	The reconstructed muon energy that minimizes the MRF and the MDP and the points of minimization using the IceCube astrophysical neutrino flux, for the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector, are reported for JPP versions 4.0.4190 and 8.2.7878.	86
7.8	The sensitivity and the discovery potential for 1 year of operation of the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector using the IceCube astrophysical neutrino flux, for JPP versions 4.0.4190 and 8.2.7878.	86
A.1	The MC muon energy at which the MRF and the MDP are minimized as well as the points of minimization using the astrophysical neutrino flux used for the LoI, for the standard KM3NeT-ARCA detector, are reported.	96
A.2	Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the standard KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the astrophysical neutrino flux used for the LoI.	97
A.3	The reconstructed muon energy at which the MRF and the MDP are minimized as well as the points of minimization using the astrophysical neutrino flux used for the LoI, for the standard KM3NeT-ARCA detector, are reported.	97
A.4	Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the standard KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the astrophysical neutrino flux used for the LoI.	97

A.5	The reconstructed muon energy after applying the can correction, at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the astrophysical neutrino flux used for the LoI for the standard KM3NeT-ARCA detector, are reported.	98
A.6	Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the standard KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the astrophysical neutrino flux used for the LoI.	98
A.7	The MC muon energy at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the astrophysical neutrino flux using the IceCube flux for the standard KM3NeT-ARCA detector, are reported.	99
A.8	Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the standard KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the astrophysical neutrino flux from the IceCube.	99
A.9	The reconstructed muon energy at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the astrophysical neutrino flux using the IceCube flux for the standard KM3NeT-ARCA detector, are reported.	100
A.10	Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the standard KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the IceCube astrophysical neutrino flux.	100
A.11	The reconstructed muon energy after applying the can correction, at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the astrophysical neutrino flux using the IceCube flux for the standard KM3NeT-ARCA detector, are reported.	100
A.12	Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the standard KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the IceCube astrophysical neutrino flux.	100
A.13	The MC muon energy at which the MRF and the MDP are minimized as well as the points of minimization using the astrophysical neutrino flux used for the LoI, for the 120 m alternative KM3NeT-ARCA detector, are reported.	101
A.14	Sensitivity and the discovery potential for 1 year of operation of the 120 m alternative KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the astrophysical neutrino flux used for the LoI.	101
A.15	The reconstructed muon energy that minimizes the MRF and the MDP and the points of minimization using the astrophysical neutrino flux used for the LoI, for the 120 m alternative KM3NeT-ARCA detector, are reported.	102
A.16	Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the 120 m alternative KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the astrophysical neutrino flux used for the LoI.	102

A.17	The MC muon energy at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the IceCube astrophysical neutrino flux, for the 120 m alternative KM3NeT-ARCA detector, are reported.	103
A.18	Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the 120 m alternative KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the IceCube astrophysical neutrino flux.	103
A.19	The reconstructed muon energy at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the IceCube astrophysical neutrino flux, for the 120 m alternative KM3NeT-ARCA detector, are reported.	103
A.20	Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the 120 m alternative KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the IceCube astrophysical neutrino.	104
A.21	The MC muon energy at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the astrophysical neutrino flux used for the LoI, for the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector, are reported.	105
A.22	Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the astrophysical neutrino flux used for the LoI.	105
A.23	The reconstructed muon energy at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the astrophysical neutrino flux used for the LoI, for the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector, are reported.	106
A.24	Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the 150 m KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the astrophysical neutrino flux used for the LoI.	106
A.25	The MC muon energy at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the IceCube astrophysical neutrino flux, for the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector, are reported.	107
A.26	Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the IceCube astrophysical neutrino flux.	107
A.27	The reconstructed muon energy at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the IceCube astrophysical neutrino flux, for the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector, are reported.	108
A.28	Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the IceCube astrophysical neutrino flux.	108

A.29	The MC muon energy at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the astrophysical neutrino flux used for the LoI for the alternative 180 m KM3NeT-ARCA detector, are reported.	109
A.30	Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the alternative 180 m KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the astrophysical neutrino flux used for the LoI.	109
A.31	The reconstructed muon energy at which the MRF and the MDP are minimized as well as the points of minimization using the astrophysical neutrino flux used for the LoI for the alternative 180 m KM3NeT-ARCA detector are reported.	110
A.32	The sensitivity and the discovery potential for 1 year of operation of the alternative 180 m KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the astrophysical neutrino flux used for the LoI.	110
A.33	The MC muon energy at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the IceCube astrophysical neutrino flux, for the alternative 180 m KM3NeT-ARCA detector, are reported.	111
A.34	The sensitivity and the discovery potential for 1 year of operation of the 180 m alternative KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the IceCube astrophysical neutrino flux.	111
A.35	The reconstructed muon energy at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the IceCube astrophysical neutrino flux, for the alternative 180 m KM3NeT-ARCA detector, are reported.	112
A.36	The sensitivity and the discovery potential for 1 year of operation of the 180 m alternative KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the IceCube astrophysical neutrino flux.	112

Κεφάλαιο 1

Κοσμικές ακτίνες και μηχανισμοί παραγωγής νετρίνων

1.1 Κοσμικές ακτίνες

Μια πρώτη προσπάθεια για την παρατήρηση των στοιχείων του ουρανού πέραν της κλασικής μεθόδου με τα οπτικά τηλεσκόπια και 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 φάσμα των κοσμικών ακτίνων (σχήμα 1.1) περιγράφεται ικανοποιητικά από τον εκθετικό νόμο μορφής :

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

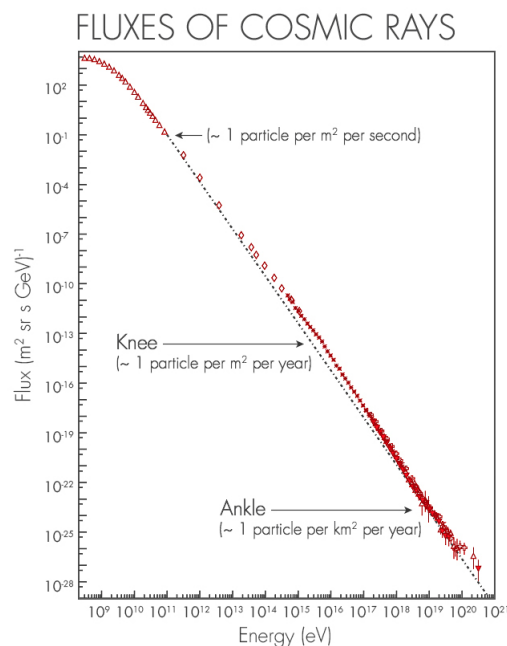
όπου ο φασματικός δείκτης γ ισούται με :

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

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 ($> 1 \text{ EeV}$) η πολύ μικρή ροή απαιτεί την χρήση ανιχνευτών που καλύπτουν εκτάσεις μεγαλύτερες από 100 km^2 [1].

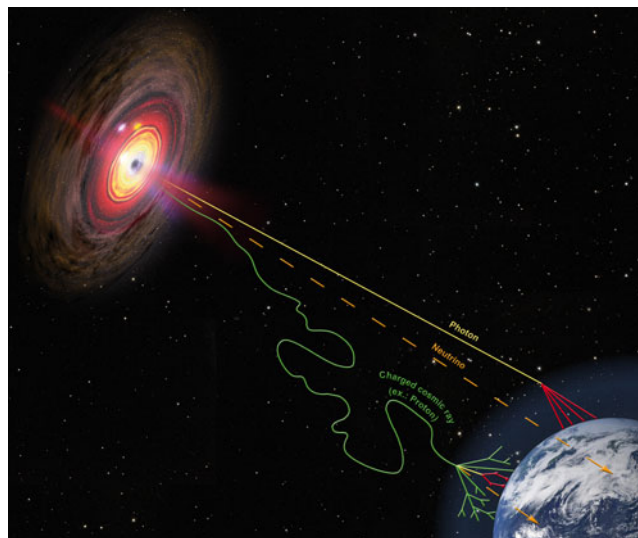
Στο γαλαξιακό μαγνητικό πεδίο τα πρωτόνια με ενέργειες που φτάνουν τα EeV έχουν ακτίνα Larmor μικρότερη του μεγέθους του Γαλαξία και μένουν δέσμα σε αυτόν. Σαν αποτέλεσμα, σε ενέργειες έως και την ενέργεια "γόνατος" οι κοσμικές ακτίνες έχουν ενδογαλαξιακή προέλευση. Με βάση μια σειρά θεωρητικών μοντέλων 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 EeV ο εξωγαλαξιακός παράγοντας σταδιακά κυριαρχεί οδηγώντας σε πιο απότομο φάσμα κοσμικών ακτίνων. Για ενέργειες μεγαλύτερες των 100 EeV το φάσμα των κοσμικών ακτίνων φαίνεται να μην συμβαδίζει με τις υπάρχουσες θεωρίες, αλλά η στατιστική είναι πολύ περιορισμένη για την εξαγωγή συμπερασμάτων.



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

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 σωματιδίων με ενέργειες μεγαλύτερες από μερικά PeV 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 και 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.

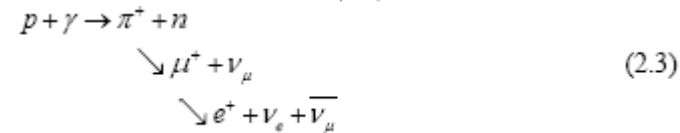
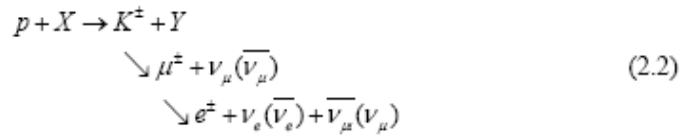
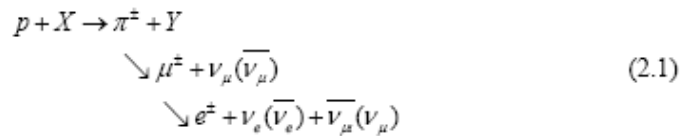


Σχήμα 1.2: Σωματίδια-φορείς πληροφορίας για την αστροσωματιδιακή φυσική [4]

1.2 Νετρίνα αστροφυσικής προέλευσης

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 μιονία και ηλεκτρόνια με αντιδράσεις όπως :



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

Σε μια πρώτη προσέγγιση, το ενεργειακό φάσμα των αστροφυσικών νετρίνων ακολουθεί εκείνο της κοσμικής ακτινοβολίας στις περιοχές επιτάχυνσης τους, ενώ διορθώσεις δεύτερης τάξης σε αυτή την προσέγγιση μπορεί να προκύψουν από την επιτάχυνση και τις απώλειες ενέργειας του μιονίου. Το χαμηλότερο μέρος του φάσματος των νετρίνων αποτελείται από νετρίνα του υποβάθρου κοσμικών νετρίνων (Cosmic ν -neutrino Background). Το CνB είναι μια ισοτροπική ροή νετρίνων που προέρχεται από νετρίνα που δημιουργήθηκαν στο πρώιμο σύμπαν. Η θερμοκρασία του φάσματος του μαύρου σώματος (black body spectrum) έχει πέσει σε $1.9K$ λόγω της διαστολής του Σύμπαντος

και η ροή κορυφώνεται σε ενέργειες τις τάξεις των MeV. Σε σύγκριση με το υπόβαθρο κοσμικών μικροκυμάτων (Cosmic Microwave Background), η ακτινοβολία CνB έχει χαμηλότερη θερμοκρασία διότι η εξαύλωση e^-e^+ που συνέβει στα επόμενα στάδια εξέλιξης του Σύμπαντος είχε σαν αποτέλεσμα την αύξηση του CMB. Παρ' όλα αυτά η ύπαρξη του CνB προβλέπεται θεωρητικά χωρίς να έχει μετρηθεί. Σε υψηλότερες ενέργειες (περίπου στην περιοχή ενέργειας των MeV) παρουσιάζονται νετρίνα που παράγονται από διεργασίες σύντηξης στον Ήλιο και νετρίνα από άλλες αστροφυσικές πηγές όπως αυτά από την Supernova 1987A. Νετρίνα από αυτές τις πηγές έχουν ανιχνευθεί, όπως και νετρίνα από το εσωτερικό της Γης. Το πειραματικό μετρηθέν ατμοσφαιρικό φάσμα νετρίνων, που αναφέρεται σε νετρίνα που παράγονται από αλληλεπιδράσεις κοσμικών ακτίνων στην ατμόσφαιρα της Γης, εμφανίζεται επίσης στις ενέργειες $E > 0.1\text{GeV}$. Σε υψηλότερες ενέργειες απεικονίζονται οι θεωρητικές προβλέψεις νετρίνων από αστροφυσικές πηγές, όπως αυτές των ενεργών γαλαξιακών πυρήνων (Active Galactic Nuclei) και κοσμιογονικά νετρίνα που παράγονται από αλληλεπιδράσεις πρωτονίων εξαιρετικά υψηλής ενέργειας με το CMB. Τα τηλεσκόπια νετρίνων με όγκους πολλών κυβικών χιλιομέτρων στοχεύουν στην ανίχνευση αυτών των υψηλής ενέργειας νετρίνων.

1.3 Πιθανές πηγές προέλευσης αστροφυσικών νετρίνων

Διάφορες κατηγορίες αστροφυσικών αντικειμένων προτάθηκαν σαν πιθανοί επιταχυντές σωματιδίων. Η ύπαρξη παρατηρησιακών δεδομένων σε ολόκληρο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα δεν έχει αποκαλύψει αν οι μη θερμικές διαδικασίες σε αυτά τα αντικείμενα είναι ηλεκτρονιακής ή αδρονικής φύσης. Η πιθανή παρατήρηση νετρίνων από αυτές τις πηγές αναμένεται να παρέχει περισσότερες πληροφορίες για τις διαδικασίες που λαμβάνουν χώρα στο εσωτερικό τέτοιων αστροφυσικών αντικειμένων. Οι πιθανές πηγές νετρίνων μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κατηγορίες : τις ενδογαλαξιακές και εξωγαλαξιακές πηγές.

1.3.1 Εξωγαλαξιακές πηγές νετρίνων

Η διάχυτη ροή νετρίνων αναμένεται από τη κοσμολογική κατανομή των εξωγαλαξιακών πηγών που είναι υπεύθυνες τόσο για το φάσμα των κοσμικών ακτίνων πάνω από τον "αστράγαλο" (ankle) όσο και το φάσμα των νετρίνων. Οι πιο πιθανοί υποψήφιοι για την εκπομπή νετρίνων υψηλών ενεργειών είναι :

- **Οι ενεργοί γαλαξιακοί πυρήνες (Active Galactic Nuclei).**

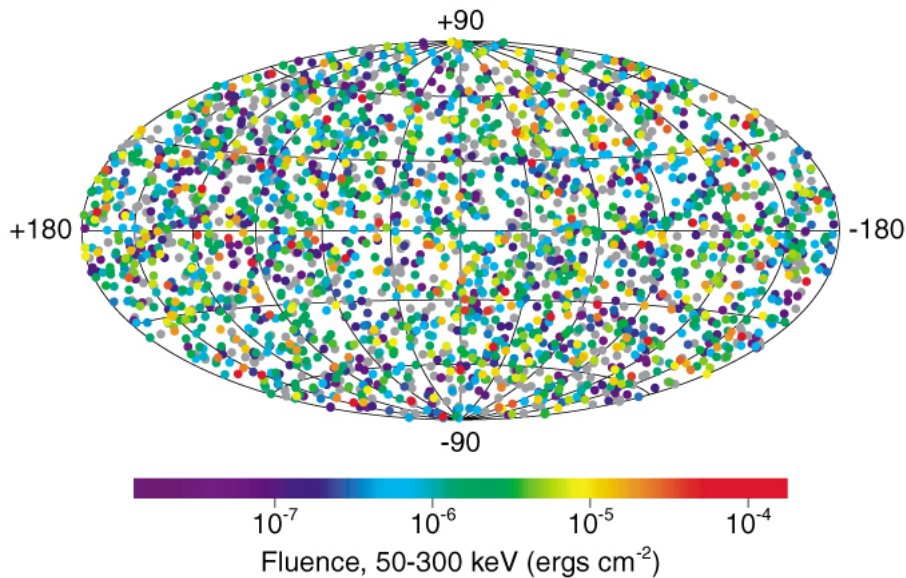
Οι ενεργοί γαλαξιακοί πυρήνες είναι συμπαγείς περιοχές στο κέντρο του Γαλαξία που έχουν πολύ πιο υψηλή φωτεινότητα από την κανονική σε έναν Γαλαξία, κάτι που υποδεικνύει ότι αυτή η περίσσεια φωτεινότητας δεν παράγεται από αστέρια. Ο Γαλαξίας που περιέχει έναν ενεργό πυρήνα ονομάζεται ενεργός Γαλαξίας. Η ακτινοβολία που παράγεται από έναν ενεργό πυρήνα πιστεύεται ότι είναι αποτέλεσμα της προσρόφησης ύλης από μια υπερμεγέθη μαύρη τρύπα στο κέντρο του εκάστοτε Γαλαξία. Οι ενεργοί γαλαξιακοί πυρήνες είναι οι πιο φωτεινές πηγές ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο σύμπαν και ως εκ τούτου μπορούν να χρησιμοποιηθούν ως μέσο ανακάλυψης μακρινών αντικειμένων. Οι ισχυρότεροι ενεργοί πυρήνες έχουν ονομαστεί quasars.

- **Οι εκλάμψεις ακτίνων γ (Gamma Ray Bursts).**

Οι εκλάμψεις ακτίνων γ είναι σύντομες εκλάμψεις πολύ υψηλής συχνότητας ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας - ακτίνων γάμμα. Οι καταγραφηθείσες εκλάμψεις δεν ταίριαζαν με οποιαδήποτε γνωστή-παρατηρηθείσα εκπομπή ακτίνων γ και περαιτέρω μελέτες έδειξαν ότι δεν ήταν γήινης 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). Η κατανομή τους έδειχνε ισοτροπική, χωρίς ιδιαίτερη συγκέντρωση στο επίπεδο του Γαλαξία μας (σχήμα 1.4). 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 γ φαίνεται να έχουν λαμπρότητα συγκρίσιμη με εκείνη ενός φωτεινού αστέρα του γαλαξία μας. Μια τυπική απελευθέρωση ενέργειας είναι της τάξης των 10^{44} 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].

2704 BATSE Gamma-Ray Bursts



Σχήμα 1.4: Τοποθεσίες στον ουρανό όλων των GRBs που κατέγραψε η αποστολή BATSE

- **Οι Starburst Γαλαξίες (Starburst Galaxies)**

Οι Γαλαξίες αυτού του τύπου έχουν εξαιρετικά υψηλό ρυθμό σχηματισμού αστεριών σε σχέση με το μέσο ρυθμό των άλλων Γαλαξιών και υψηλής πυκνότητας υπερκαινοφανείς. Κατά τη μεγάλη διάρκεια σχηματισμού αστεριών σε αυτούς τους Γαλαξίες, εκτοξεύεται από το εσωτερικό τους γαλαξιακός άνεμος από τη συνολική επίδραση των υπερκαινοφανών και των υπερμεγέθων αστέρων. Προβλέπεται ταυτόχρονη εκπομπή νετρίνων μέσω αδρονικών μηχανισμών. Η ροή των ακτίνων γάμμα σε ενέργειες πολλών εκατοντάδων GeV υποδεικνύει την δημιουργία κοσμικών ακτίνων με πυκνότητες δύο ακόμα και τριών τάξεων μεγέθους μεγαλύτερες από τις πυκνότητες των κοσμικών ακτίνων από τον δικό μας Γαλαξία κάτι που τις καθιστά πιθανές πηγές αστροφυσικών νετρίνων.

- **Τα νετρίνα κοσμογονικής προέλευσης (Cosmogenic Neutrinos).**

Οι πολύ υψηλής ενέργειας κοσμικές ακτίνες σε συνδυασμό με το διάχυτο φωτονικό υπόβαθρο στο Σύμπαν αποτελούν πιθανές πηγές προέλευσης των λεγόμενων κοσμογονικών (cosmogenic) νετρίνων. Η παραγωγή των GZK νετρίνων, όπως αλλιώς λέγονται λόγω του ορίου Greisen-Zatsepin-Kuzmin, αναμένεται λόγω αδρονικών διαδικασιών από την αλληλεπίδραση

πολύ ενεργητικών πρωτονίων με το CMB υπόβαθρο σε ενέργειες της τάξης ακόμα και 10^{19} eV. Η παρατήρηση τέτοιων ενεργειών αποτελεί πολύ ενδιαφέροντα κλάδο στη σύγχρονη κοσμολογία και θεωρητική φυσική καθώς θα απαιτούσε νέες θεωρίες για την κβαντική βαρύτητα και την κλίμακα Planck δημιουργώντας παράθυρα σε "καινούρια" φυσική.

1.3.2 Ενδογαλαξιακές πηγές νετρίνων

Εκτός από τις εξωγαλαξιακές πηγές νετρίνων, πολλά αντικείμενα στο εσωτερικό του δικού μας Γαλαξία παρουσιάζουν φάσματα μη θερμικών φωτονίων που υποδεικνύουν την επιτάχυνση σωματιδίων. Εάν αδρόνια επιταχύνονται εντός τέτοιων αντικειμένων φτάνουν σε ενέργειες που τα καθιστούν πηγές νετρίνων υψηλής ενέργειας. Πιθανές τέτοιες πηγές στο εσωτερικό του Γαλαξία αποτελούν :

- **Τα υπολείματα υπερκαινοφανών και τα νεφελώματα από άνεμο Pulsar (Supernovae Remnants and Pulsar Wind Nebulae)**

Οι υπερκαινοφανείς (ή αλλιώς Σουπερνόβες) μπορούν να αποτελέσουν το τελικό στάδιο εξέλιξης ενός αστέρα στο οποίο ολόκληρος ο αστέρας εκρήγνυται. Υπολείματα υπερκαινοφανών πιστεύεται ότι είναι υπεύθυνα για τη παραγωγή κοσμικών ακτίνων με ενέργειες ως και 10^{15} eV. Οι κοσμικές ακτίνες αργότερα αλληλεπιδρούν με την ύλη και οδηγούν στη παραγωγή νετρίνων και ακτίνων γάμμα μέσω διασπάσεων φορτισμένων και αφόρτιστων πιονίων. Κάποιες από τις πιο ενεργητικές υπερκαινοφανείς έχουν στο εσωτερικό τους τα λεγόμενα pulsars, δηλαδή μεγάλης ταχύτητας περιστροφής αστέρες νετρονίων. Τα pulsars μπορούν να παράγουν νεφελώματα στο εσωτερικό των υπερκαινοφανών, τα οποία επίσης αποτελούν υποψήφια πηγή νετρίνων.

- **Τα binaries ακτίνων X και Microquasars**

Τα binaries ακτίνων X αναφέρονται σε γαλαξιακά binary συστήματα τα οποία δείχνουν μορφολογικές ομοιότητες με τους ενεργούς γαλαξιακούς πυρήνες (AGNs) που αναφέρθηκαν παραπάνω. Επιπλέον, πιστεύεται ότι ακολουθούν τον ίδιο μηχανισμό με τους AGNs, συμπεριλαμβανομένης της αύξησης της ύλης από ένα γειτονικό αστέρι σε μια μαύρη τρύπα ή σε έναν αστέρα νετρονίων. Κατά τη διάρκεια αυτής της διαδικασίας, ενέργεια εκπέμπεται υπό τη μορφή ακτίνων X ενώ υψηλής ενέργειας νετρίνα αναμένεται να παραχθούν με μηχανισμούς ίδιους με αυτούς των AGNs. Τα microquasars είναι υποκατηγορία των binaries ακτίνων X

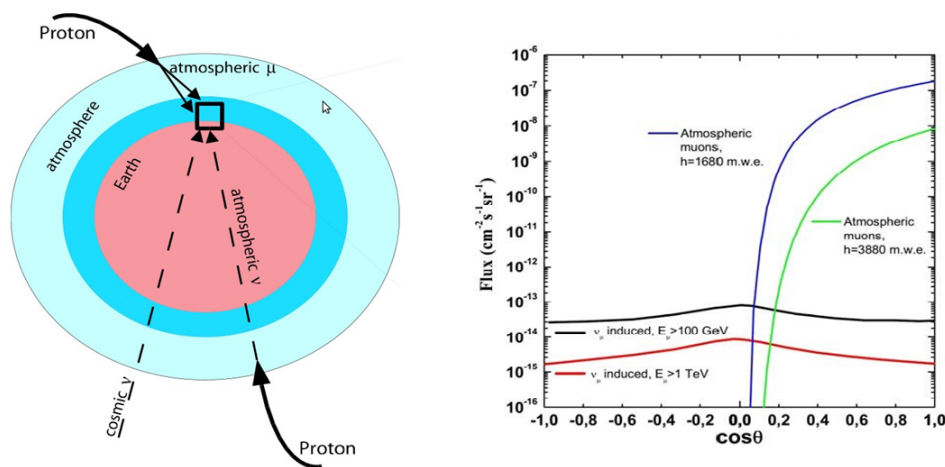
και παρουσιάζουν σχετικιστικούς πίδακες (jets) στην ζώνη των ραδιο-συχνοτήτων. Η αλληλεπίδραση των αδρονίων, και ιδιαίτερα των πρωτονίων, με τα φωτόνια τύπου synchrotron που παράγονται από επιταχυνόμενα ηλεκτρόνια, μπορούν να οδηγήσουν στην παραγωγή νετρίνων υψηλής ενέργειας της τάξεως των TeV.

- **Ο δίσκος του Γαλαξία**

Διάχυτες κοσμικές ακτίνες μπορούν να αλληλεπιδράσουν με τα διαστρικό μέσο στο εσωτερικό του Γαλαξία. Αυτές οι αλληλεπιδράσεις αναμένεται να παράγουν ακτίνες γάμμα και νετρίνα μέσω ουδέτερων και φορτισμένων αποδιεγέρσεων πιονίων. Λόγω αυτού, η αναμενόμενη ροή νετρίνων σχετίζεται με την πυκνότητα της ύλης στο εσωτερικό του Γαλαξία.

1.4 Ατμοσφαιρικά νετρίνα και μόνια

Τα ατμοσφαιρικά νετρίνα και μόνια δημιουργούνται από καταιονισμούς που προκαλούνται από τις κοσμικές ακτίνες στην ατμόσφαιρα της Γης. Για την μείωση του σήματος από τα ατμοσφαιρικά νετρίνα και μόνια, οι ανιχνευτές νετρίνων αστροφυσικής προέλευσης ενδείκνυται να τοποθετούνται υποθαλάσσια, καθώς μεταξύ των σωματιδίων που παράγονται στους καταιονισμούς μόνο τα υψηλής ενέργειας νετρίνα και μόνια μπορούν να διαπεράσουν την Γη. Επιπλέον, τα ατμοσφαιρικά μόνια απορροφώνται από την Γη με αποτέλεσμα να μπορούν να φτάσουν στον ανιχνευτή μόνο από "πάνω" και όχι διαμέσου αυτής, επιτρέποντας με αυτό τον τρόπο να τα ξεχωρίσουμε από μόνια προερχόμενα από νετρίνα αστροφυσικής προέλευσης. Εξαιτίας της αφθονίας τους, εξακολουθούν να αποτελούν το βασικό παράγοντα υποβάθρου του σήματος στον ανιχνευτή όπως φαίνεται στο σχήμα 1.5 :



Σχήμα 1.5: 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 2 έως 5 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 [5].

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 ανθεντική 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

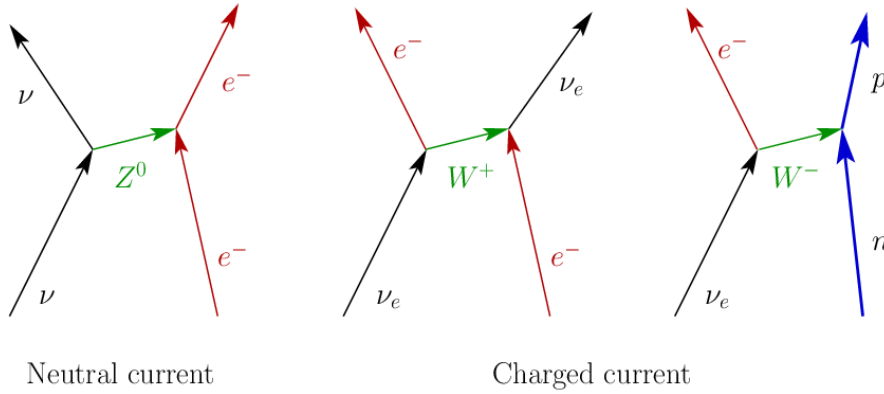
Η ανίχνευση νετρίνων με τη χρήση υποθαλάσσιων τηλεσκοπίων βασίζεται στην ανίχνευση φωτός που εκπέμπεται κατά την διέλευση σωματιδίων που προέρχονται από νετρίνα στο νερό. Η αρχή ανίχνευσης των τηλεσκοπίων νετρίνων, οι αλληλεπιδράσεις νετρίνων με την Γη ή το θαλασσινό νερό και τα χαρακτηριστικά γεγονότα 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 [7].

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, γεγονός που πρέπει να λαμβάνεται υπόψη στον σχεδιασμό των 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 :

$$\nu + N \rightarrow \nu + X, \quad \nu_l + N \rightarrow l + X.$$

όπου l αναπαριστά την γεύση του νετρίνου, $l = e, \mu, \tau$ και X είναι η τελική αδρονική κατάσταση. Γραφικά οι αλληλεπιδράσεις παρουσιάζονται στο σχήμα 2.2.



Neutral current

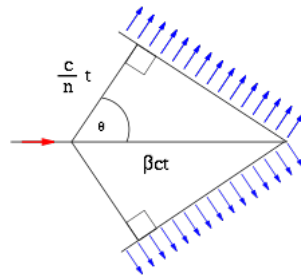
Charged current

Σχήμα 2.2: Αλληλεπιδράσεις νετρίνου ουδέτερου και φορτισμένου ρεύματος

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) που δημιουργούνται στις αλληλεπιδράσεις φορτισμένων σωματιδίων των υψηλής ενέργειας νετρίνων με την Γη. Αυτά τα δευτερεύοντα σωματίδια ταξιδεύουν με σχετικιστικές ταχύτητες μέσα από το νερό και εκπέμπουν φωτόνια σε χαρακτηριστική γωνία σχηματίζοντας έναν κώνο φωτός, τον κώνο Cherenkov (σχήμα 2.3). 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).



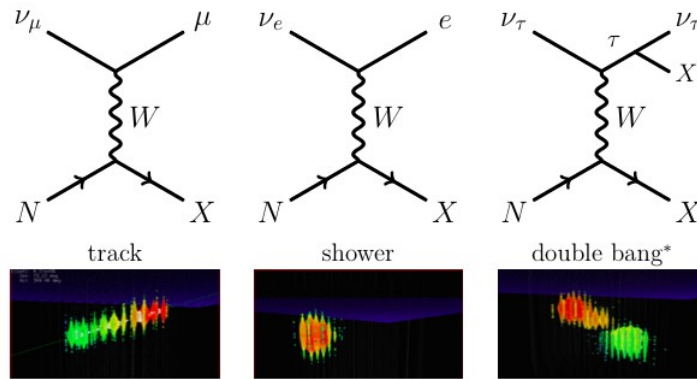
Σχήμα 2.3: Σχηματισμός του κώνου Cherenkov από την διάδοση φορτισμένων σωματιδίων σε μέσο με σχετικιστικές ταχύτητες

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 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.

2.1.1 Τοπολογία γεγονότων

Η τοπολογία των γεγονότων στα τηλεσκόπια νετρίνων διαφέρει και εξαρτάται από τον τύπο της αλληλεπίδρασης και την λεπτονική "γεύση" (e,μ,τ). Στην προηγούμενη παράγραφο, στο σχήμα 2.2 απεικονίζονται οι αλληλεπιδράσεις ουδέτερου και φορτισμένου ρεύματος για το παράδειγμα των ηλεκτρονίων. Στην περίπτωση των αλληλεπιδράσεων ουδέτερου ρεύματος, νετρίνα αλληλεπιδρούν με ένα νουκλεόνιο παράγοντας αδρονικό καταιονισμό ενώ το σχεδαζόμενο νετρίνο έχει μικρότερη ενέργεια. Η "υπογραφή" των γεγονότων ουδέτερου ρεύματος δεν εξαρτάται από την γεύση του νετρίνου. Αντιθέτως, η τοπολογία των γεγονότων φορτισμένου ρεύματος διαφέρει για κάθε γεύση. Οι φορτισμένου ρεύματος αλληλεπιδράσεις νετρίνων μιονίου παράγουν μακράς εμβέλειας μιονικές τροχιές και αδρονικό ή/και ηλεκτρομαγνητικό καταιονισμό, ενώ οι αλληλεπιδράσεις φορτισμένου ρεύματος νετρίνων ηλεκτρονίου παράγουν ηλεκτρόνια και επομένως ηλεκτρομαγνητικό καταιονισμό που επικαλύπτεται με αδρονικό καταιονισμό. Οι αλληλεπιδράσεις φορτισμένου ρεύματος νετρίνου του τ (ταυ λεπτονίου) παράγουν ένα τ ακολουθούμενο από έναν αδρονικό καταιονισμό. Ανάλογα με την αποδιέγερση του τ μπορεί να υπάρξει είτε υπογραφή τροχιάς (track) σωματιδίου είτε υπογραφή καταιονισμού. Πολλές φορές, τα τ λεπτόνια έχουν αρκετή ενέργεια ώστε να διανύσουν μεγάλο μέρος του ανιχνευτή με αποτέλεσμα όταν θα αντιδράσουν να δημιουργήσουν έναν δεύτερο καταιονισμό. Στη συγ-

κεκριμένη περίπτωση, η υπογραφή του γεγονότος ονομάζεται "double bang". Στο επόμενο σχήμα παρουσιάζονται οι διαφορετικές τοπολογίες για αλληλεπιδράσεις φορτισμένου ρεύματος όπως έχουν καταγραφεί από το πείραμα ICECUBE.



Σχήμα 2.4: Διαγράμματα Feynman και οπτικοποίηση της τοπολογίας γεγονότων στον ανιχνευτή ICECUBE. Η διαβάθμιση των χρωμάτων αποδίδει την χρονική εξέλιξη της εναπόθεσης φωτός στον ανιχνευτή (το κόκκινο δείχνει την πρώτη εμφάνιση φωτός και το μπλέ την τελευταία).

Το βασικό κλειδί για την αστρονομία νετρίνων με τη χρήση ανιχνευτών Cherenkov αποτελούν οι αλληλεπιδράσεις φορτισμένου ρεύματος νετρίνων μιονίου. Η ανίχνευση των "upgoing" μιονίων (δηλαδή των μιονίων που διαπερνούν την Γη και εισέρχονται από το "κάτω" μέρος του ανιχνευτή) εξασφαλίζει την προέλευση τους από τα νετρίνα καθώς κανένα άλλο γνωστό σωματίδιο δεν μπορεί να διαπεράσει την Γη χωρίς να αλληλεπιδράσει. Επιπλέον, τα μίονια υψηλής ενέργειας ταξιδεύουν σε μεγάλες αποστάσεις στην ύλη και πιο συγκεκριμένα στο νερό πριν απορροφηθούν. Αυτό μας επιτρέπει να ανιχνεύσουμε μίονια που δημιουργήθηκαν πολλά χιλιόμετρα μακριά από τον ανιχνευτή και οδηγεί στην μεγάλη αύξηση του ενεργού ανιχνευτικού όγκου. Η ανακατασκευή της τροχιάς και της ενέργειας των μιονίων βασίζεται στην ανακατασκευή του κώνου Cherenkov όπως προαναφέρθηκε, και μας παρέχει με πολύ μεγάλη ακρίβεια την κατεύθυνση των νετρίνων από τα οποία δημιουργήθηκαν. Τα παραπάνω καθιστούν ιδανικά τα νετρίνα μιονίου φορτισμένου ρεύματος για την αστρονομία νετρίνων. Για το λόγο αυτό, νετρίνα και αντι-νετρίνα μιονίου προσομοιώθηκαν όπως περιγράφεται στο κεφάλαιο 4 της παρούσας εργασίας. Η εκτίμηση της ενέργειας νετρίνων από αυτό το κανάλι αλληλεπίδρασης δεν είναι απλή αφού ένα σημαντικό μέρος της τροχιάς του μιονίου μπορεί να είναι εκτός του ανιχνευτή, με αποτέλεσμα τα φωτόνια του αδρονικού καταιονισμού και τα φωτόνια Cherenkov να μην ανιχνεύονται.

2.2 Υπόβαθρο σήματος στα υποθαλάσσια τηλεσκόπια νετρίνων

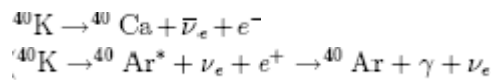
Το υπόβαθρο στα υποθαλάσσια τηλεσκόπια νετρίνων αποτελείται από το φυσικό υπόβαθρο των ατμοσφαιρικών νετρίνων και ατμοσφαιρικών μιονίων και το υπόβαθρο από περιβαλλοντικούς παράγοντες δηλαδή από την ραδιενέργεια και την βιοφωταύγεια.

2.2.1 Ατμοσφαιρικά νετρίνα και μίονια

Όπως έχει προαναφερθεί τα ατμοσφαιρικά νετρίνα και ατμοσφαιρικά μίονια 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 μίονια 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 μίονια. Ωστόσο αυτή η θωράκιση δεν είναι επαρκής και τα τηλεσκόπια νετρίνων ψάχνουν κυρίως για μίονια με ανοδική πορεία ως προς τον ανιχνευτή. Τέτοια μίονια 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 τηλεσκόπια 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 απόδοχή ώστε να γίνει εφικτή η μελέτη των υψηλο-ενεργειακών νετρίνων. Οι υψηλότερες ενέργειες των μιονίων από εξωγήινες πηγές βοηθούν στο διαχωρισμό τους από τα καθοδικής πορείας ατμοσφαιρικά μίονια. 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. Παρόλο που αποτελούν το βασικό υπόβαθρο των τηλεσκοπίων νετρίνων, η ροή των ατμοσφαιρικών νετρίνων και μιονίων είναι γνωστή με ακρίβεια και έτσι το υπόβαθρο αυτό χρησιμοποιείται ως ένα μέσο βαθμονόμησης της απόδοσης ενός ανιχνευτή.

2.2.2 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} είναι άφθονο στο θαλασσινό νερό και διασπάται σε δύο κυρίως κανάλια που δίνουν είτε ηλεκτρόνια είτε ακτίνες γ με ενέργεια περίπου στο 1 MeV. Τα ηλεκτρόνια που παράγονται συνήθως πληρούν τις προϋποθέσεις για τη παραγωγή φωτός Cherenkov, το οποίο μπορεί να υποστεί πολλαπλές σχεδιάσεις Coulomb στα περιβάλλοντα νερά. Οι παλμοί φωτός στους φωτοπολλαπλασιαστές που παράγονται εξαιτίας των διασπάσεων του K^{40} (όπως φαίνονται στις παρακάτω αντιδράσεις) μπορούν να μειωθούν σημαντικά απαιτώντας συμπτώσεις παλμών μεταξύ γειτονικών φωτοπολλαπλασιαστών στο ίδιο οπτικό στοιχείο (Optical Module - OM).



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 φως με εκλάμψεις μικρότερης διάρκειας (μερικών δευτερολέπτων) λόγω πρόσκρουσης με υποθαλάσσια αντικείμενα ή άλλους οργανισμούς. Η βιοφωταύγεια αποτελεί υπόβαθρο στο σήμα των τηλεσκοπίων νετρίνων καθώς η εκπομπή φωτός συμβαίνει συχνά κατά την σύγκρουση των έμβιων οργανισμών, για παράδειγμα με το τηλεσκόπιο. Είναι επομένως σημαντικό να γνωρίζουμε, ποιος είναι ο ρόλος της βιοφωταύγειας στις οπτικές ιδιότητες του νερού στο σημείο τοποθέτησης του τηλεσκοπίου νετρίνων και ποιές φωτεινές πηγές (εντάσεις) μπορεί να υπ-
άρχουν τοπικά [24].

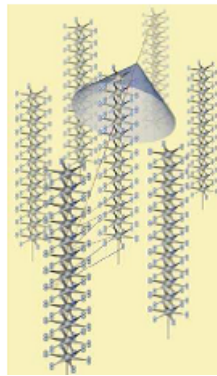
2.3 Τα κυριότερα εν λειτουργία τηλεσκόπια νετρίνων

Τα πρώτα σχέδια και η επίλυση των τεχνικών προκλήσεων σε σχέση με την πόντιση και τη λειτουργία των τηλεσκοπίων νετρίνων απαίτησαν 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 λίμνης παγώνει βοηθώντας στις διαδικασίες συντήρησης. Όμως, το μήκος απορρόφησης των σωματιδίων στο νερό της λίμνης είναι πολύ μικρότερο σε σχέση με το θαλασσινό νερό και η τοποθέτηση του τηλεσκοπίου σε μικρό βάθος (περίπου 1100 m) δημιουργεί μεγάλο ποσοστό υποβάθρου από ατμοσφαιρικά μύονια. 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 [14].

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 φωτοπολλαπλασιαστές 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].

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

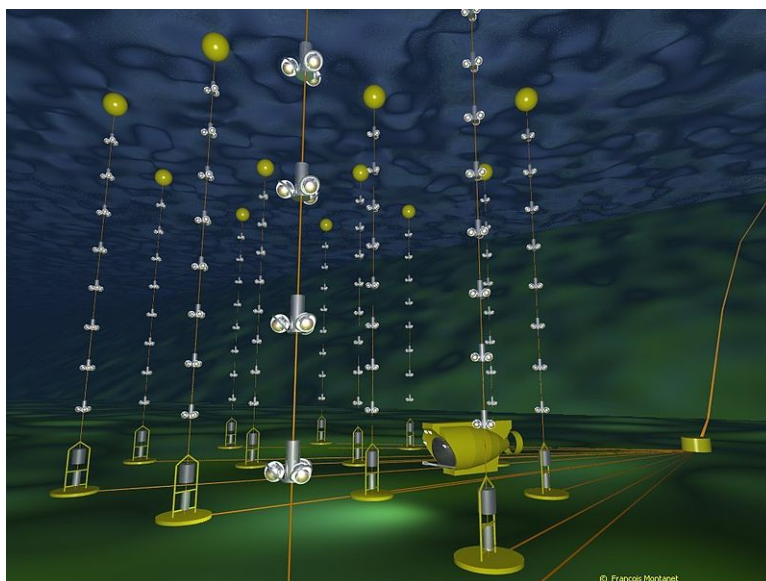
μια διάταξη σε σχήμα αστεριού που συνδεόταν με καλώδια αντί για τα ευλίσιστα strings που χρησιμοποιούσαν οι άλλες διατάξεις. Το 2003 πραγματοποιήθηκαν οι πρώτες δοκιμές για τη βύθιση μιας "πρότυπης" διάταξης που αποτελούνταν από ένα μόνο "αστέρι". Αξίζει να σημειωθεί πως με τον ανιχνευτή NESTOR ανακατασκευάστηκε 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 2.6: Σχηματική αναπαράσταση του ανιχνευτή NESTOR (αριστερά) και του ανιχνευτή NEMO (δεξιά)

2.3.1 Τηλεσκόπιο ANTARES

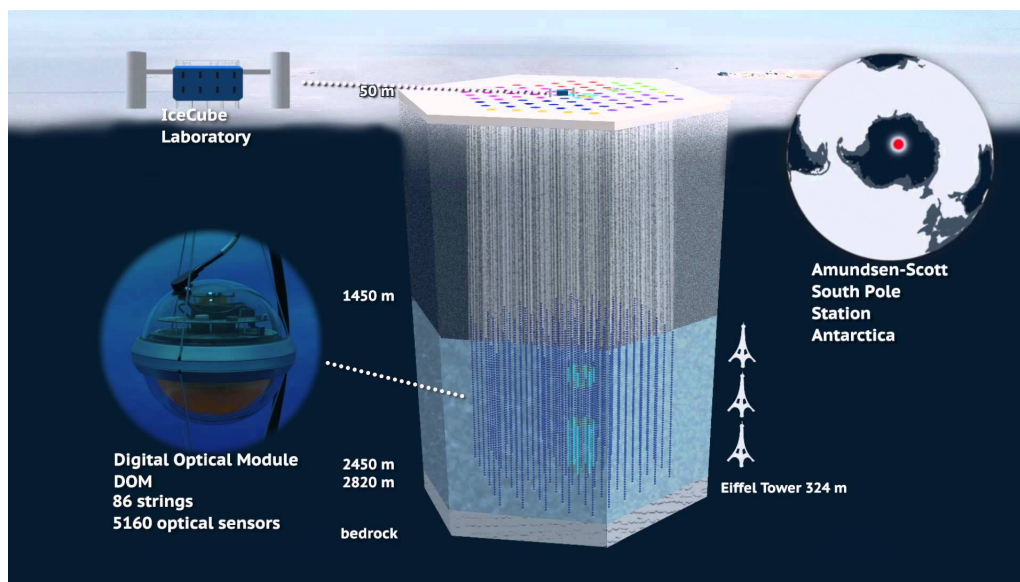
Ο ανιχνευτής ANTARES, ο οποίος ολοκληρώθηκε το 2008, είναι το μεγαλύτερο τηλεσκόπιο νετρίνο στο βόρειο ημισφαίριο. Τοποθετημένος σε βάθος 2500 m στη Μεσόγειο θάλασσα και 40 km από την ακτή της Τουλόν στη Γαλλία, έχει στόχο την αναζήτηση αστροφυσικών νετρίνων. Ο ανιχνευτής αποτελείται από 12 strings, 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 κατανεμημένα 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 καταγράψει αρκετές εκατοντάδες ατμοσφαιρικά νετρίνα. [13].



Σχήμα 2.7: 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) εγκατεστημένα σε 86 strings με απόσταση 125 m μεταξύ τους στον πάγο. Τα OMs έχουν απόσταση μεταξύ τους 17m σε κάθε string. 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. Πρόσφατα, από την αναζήτηση γεγονότων νετρίνων αστροφυσικής προέλευσης χρησιμοποιώντας δεδομένα λειτουργίας 6 ετών του IceCube, βρέθηκαν 80 γεγονότα υψηλής ενέργειας με το σημείο αλληλεπίδρασης στο εσωτερικό του ανιχνευτή κάτι που επιβεβαιώνει της ύπαρξη νετρίνων με εξωγαλαξιακή προέλευση.



Σχήμα 2.8: Ο ανιχνευτής νετρίνων IceCube

Κεφάλαιο 3

Η ερευνητική υποδομή KM3NeT

Το KM3NeT είναι μια ερευνητική υποδομή που θα αποτελείται από ένα δίκτυο υποβρύχιων τηλεσκοπίων νετρίνων τα οποία θα τοποθετηθούν στην Μεσόγειο θάλασσα. Με την ολοκλήρωση της υποδομής, τα τηλεσκόπια θα έχουν ανιχνευτικό όγκο μεγατόνων σε μερικά κυβικά χιλιόμετρα καθαρού θαλασσινού νερού. Το KM3NeT θα ανοίξει ένα νέο παράθυρο στο Σύμπαν αλλά ταυτόχρονα θα συνεισφέρει και στην έρευνα των αδιευκρίνιστων ιδιοτήτων των νετρίνων. Το KM3NeT θα αποτελείται από δύο διαφορετικές ανιχνευτικές υποδομές, τον ανιχνευτή ARCA και τον ανιχνευτή ORCA. Ο ανιχνευτής ARCA (Astroparticle Research with Cosmics in the Abyss) είναι ένα τηλεσκόπιο νετρίνων μερικών κυβικών χιλιομέτρων που σκοπεύει στην μελέτη των υψηλής ενέργειας νετρίνων (στη περιοχή των TeV) εξωγήινης προέλευσης. Ο ανιχνευτής ORCA (Oscillation Research with Cosmics in the Abyss) καλύπτει όγκο μερικών κυβικών μέτρων και σκοπεύει στη μέτρηση της ιεραρχίας της μάζας των νετρίνων χρησιμοποιώντας τις ταλαντώσεις ατμοσφαιρικών νετρίνων (στη περιοχή των GeV). Η παρούσα εργασία επικεντρώνεται στη χρήση του ανιχνευτή ARCA καθώς αποτελεί το βασικό εργαλείο για την αστρονομία νετρίνων. Η ερευνητική υποδομή του KM3NeT θα φιλοξενήσει επίσης εργαλεία για τις επιστήμες της Γης και της θάλασσας για μακροπρόθεσμες αλλά και απευθείας παρακολούθηση του περιβάλλοντος στο βάθος της θάλασσας [15].

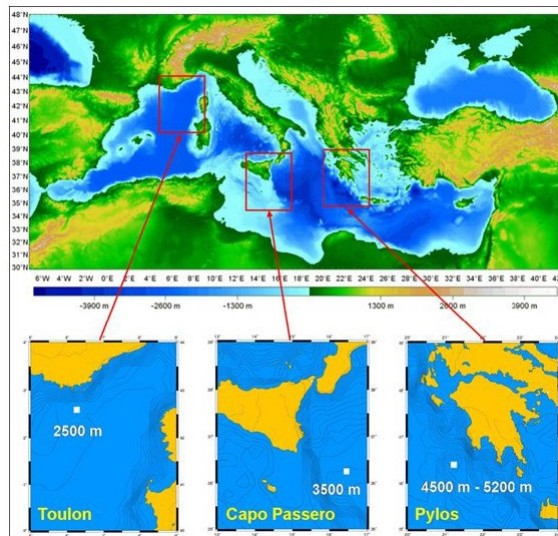
3.1 Ο ανιχνευτής ARCA

Ο ανιχνευτής ARCA θα χρησιμοποιηθεί για την αστροσωματιδιακή έρευνα αφού με την εξαιρετική διακριτική ικανότητα που αναμένεται να πετύχει [19], θα καταστήσει δυνατή τη μελέτη της ροής κοσμικών νετρίνων, παρέχοντας πολύ

σημαντικές πληροφορίες για την προέλευση της ροής, το ενεργειακό της φάσμα και την σύσταση της σε "γεύσεις" νετρίνων. Από την θέση του ανιχνευτή στη Μεσόγειο θάλασσα, θα μπορεί να χαρτογραφηθεί το 87% του ουρανού, στο οποίο θα εμπεριέχεται το κυριότερο μέρος του Γαλαξία και το γαλαξιακό κέντρο. Επιπρόσθετα, οι ιδιότητες του νερού της Μεσογείου (π.χ χαμηλή διάχυση) επιτρέπουν την ακριβή μέτρηση της κατεύθυνσης των νετρίνων, το οποίο είναι εξαιρετικής σημασίας καθώς θα μπορούν να προσδιοριστούν οι πηγές εκπομπής τους.

Ο ανιχνευτής ARCA θα τοποθετηθεί στην θέση KM3NeT-It, που βρίσκεται 100 χιλιόμετρα από την ακτή της μικρής πόλης Portofino στο Capo Passero στη Σικελία Ιταλίας. Οι ανιχνευτικές μονάδες του τηλεσκοπίου ARCA θα βυθιστούν σε βάθος 3500 μέτρων. Με τη κατάλληλη συστοιχία τρισδιάστατων ανιχνευτικών μονάδων, θα μπορούν να ανιχνευθούν κοσμικά νετρίνα ενεργειών από TeV έως και εκατοντάδες PeV.

Αρχικά, ο ανιχνευτής θα αποτελείται από δύο δομικά στοιχεία (building blocks) που θα καλύπτουν συνολικά όγκο ενός κυβικού χιλιομέτρου στο Capo Passero της Σικελικής ακτής, σε βάθος 3500 μέτρων. Κάθε δομικό στοιχείο είναι μια σχεδόν κυλινδρική ανιχνευτική διάταξη που αποτελείται από 115 ανιχνευτικές μονάδες (Detections Units - DUs), στις οποίες αναφερόμαστε ως strings. Σε μεταγενέστερο στάδιο, ο ανιχνευτής ARCA θα αποτελείται από τρία δομικά στοιχεία που θα δίνουν συνολικά ανιχνευτικό όγκο αρκετών κυβικών χιλιομέτρων - ο οποίος εξαρτάται από την απόσταση των ανιχνευτικών μονάδων μεταξύ τους. Για τη τοποθέτηση των δομικών στοιχείων του ανιχνευτή έχουν προταθεί δύο ακόμα θέσεις: η KM3NeT-Fr στην Toulon στη Λιγκυρία θάλασσα σε βάθος 2475 μέτρων και η KM3NeT-Gr στην Πύλο της Ιονίου θάλασσας σε τρία πιθανά βάθη των 3750, 4500 και 5200 μέτρων. Οι παραπάνω θέσεις έχουν επιλεγεί καθώς πληρούν τις απαιτήσεις του πειράματος λόγω των εξαιρετικών φυσικών, γαιοφυσικών και ωκεανογραφικών ιδιοτήτων τους. Πιο συγκεκριμένα, αυτές οι θέσεις παρέχουν πολύ καλές οπτικές ιδιότητες του νερού, χαμηλή βιοφωταύγεια και βακτηριακή σύσταση στις οπτικές επιφάνειες, χαμηλά υποθαλάσσια ρεύματα και χαμηλό ρυθμό καθίζησης και πιθανότητας σεισμικού ρήγματος. Οι θέσεις αυτές είναι επίσης επαρκώς κοντά στις ακτές διευκολύνοντας την ανάπτυξη του πειράματος και μειώνοντας αισθητά το κόστος σε συνδέσεις καλωδίων ισχύος και σήματος με την ακτή. Παράλληλα, τα βάθη της θάλασσας σε αυτές τις περιοχές βοηθούν στην μείωση του υποβάθρου του σήματος από τα ατμοσφαιρικά μόνια.



Σχήμα 3.1: Οι προτεινόμενες τοποθεσίες των δομικών στοιχείων του ανιχνευτή ARCA.

3.2 Ο ανιχνευτής ORCA

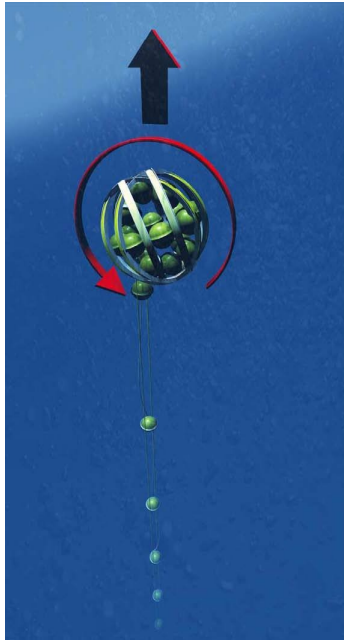
Παρ'όλο που η εργασία επικεντρώνεται στην αστροσωματιδιακή φυσική και πιο συγκεκριμένα στην αστρονομία νετρίνων με τη χρήση του ανιχνευτή ARCA, απαραίτητη είναι μια σύντομη αναφορά στον ανιχνευτή ORCA. Ο ανιχνευτής ORCA θα χρησιμοποιηθεί για την έρευνα στο τομέα της σωματιδιακής φυσικής αφού οι επιστήμονες του KM3NeT θα μελετήσουν τις βασικές ιδιότητες των νετρίνων, αξιοποιώντας τις άφθονες ροές νετρίνων που παράγονται από τις αλληλεπιδράσεις των κοσμικών ακτίνων με την ατμόσφαιρα της Γης. Η ροή ατμοσφαιρικών νετρίνων αντιμετωπίζεται παραδοσιακά ως υπόβαθρο στην ανίχνευση σήματος νετρίνων κοσμικής προέλευσης, παρ'όλα αυτά τα τελευταία χρόνια διαπιστώθηκε ότι στο εύρος μερικών GeV, η ροή νετρίνων μπορεί να "αποκαλύψει" τις απαντήσεις σε καιρία και βασικά ερωτήματα της σωματιδιακής φυσικής, όπως της σχετικής τάξης των μαζών των νετρίνων (ιεραρχία μάζας). Η επιρροή της ιεραρχία των μαζών στις ταλαντώσεις νετρίνων αφήνει αποτύπωμα στην ατμοσφαιρική ροή νετρίνων μέσω της χαρακτηριστικής εμφάνισης ή εξαφάνισης patterns των διαφορετικών γεύσεων των νετρίνων συναρτήσει της ενέργειας και της διαδρομής τους διαμέσου της Γης.

Η τοποθέτηση του ανιχνευτή ORCA στη θέση KM3NeT-Fr στην Toulon της Γαλλίας περίπου 40 χιλιόμετρα από την ακτή, θα επωφεληθεί από τις ιδιότητες του νερού για την επίτευξη πολύ καλής γωνιακής και ενεργειακής διακριτικής ικανότητας. Η τοποθέτησης του ανιχνευτή έχει ξεκινήσει και αποσκοπεί στην δημιουργία ενός πρωτοτύπου που θα αποτελείται από 7 ανιχνευτικές μονάδες σε απόσταση 20 μέτρων μεταξύ τους. Οι ανιχνευ-

τικές μονάδες χρησιμοποιούν την ίδια ακριβώς τεχνολογία με τις ανιχνευτικές μονάδες του ARCA, με τη διαφορά ότι η κατακόρυφη απόσταση των OMs είναι 9 μέτρα, πράγμα που έχει σαν αποτέλεσμα το συνολικό ύψος της ανιχνευτικής μονάδας του ORCA να είναι "μόνο" 160 μέτρα. Ο πλήρης ανιχνευτής ORCA θα αποτελείται επίσης από 115 ανιχνευτικές μονάδες.

3.3 Ανιχνευτικές μονάδες Detection Units (DUs)

Η ανιχνευτική μονάδα KM3NeT-ARCA αποτελείται από 18 ψηφιακά οπτικά στοιχεία (Digital Optical Modules - DOMs) κάθετα ευθυγραμμισμένα (ως προς τον βυθό της θάλασσας) σε ένα σχοινί (string). Κάθε DOM απέχει 36 μέτρα από τα γειτονικά του. Το ύψος του σχοινιού είναι 800 μέτρα ενώ η απόσταση του πρώτου DOM από το βυθό της θάλασσας είναι 100 μέτρα. Αυτά τα σχοινιά είναι αγκυροβολημένα στο βυθό και κρατούνται σχεδόν κάθετα με τη βοήθεια αντίβαρων στη κορυφή κάθε σχοινιού. Δύο επιπλέον σχοινιά κρατούν τα οπτικά στοιχεία μαζί σε κάθε string, ένας ηλεκτρο-οπτικός σκελετός παρέχει συνδέσεις μεταξύ των DOMs σε δύο αγωγούς ισχύος και δύο οπτικά καλώδια επιτρέπουν την επικοινωνία τους με την στεριά. Για να γίνει η βύθιση των strings χρησιμοποιείται ένα όχημα εκτόξευσης (launcher vehicle). Τα strings είναι τυλιγμένα στο εσωτερικό του οχήματος το οποίο οδηγείται στον πυθμένα της θάλασσας από ένα άλλο όχημα στην επιφάνεια της. Όταν το όχημα εκτόξευσης φτάσει στον πυθμένα, απελευθερώνεται το αντίβαρο (buoy) με ακουστική επικοινωνία και το string αναπτύσσεται κάθετα στο πλήρες ύψος του. Τέλος, ένα τηλεκατευθυνόμενο όχημα (Remotely Operated Vehicle - ROV) χρησιμοποιείται για να γίνει η σύνδεση μεταξύ του string με την υποθαλάσσια υποδομή και το όχημα εκτόξευσης συλλέγεται για επόμενες χρήσεις.

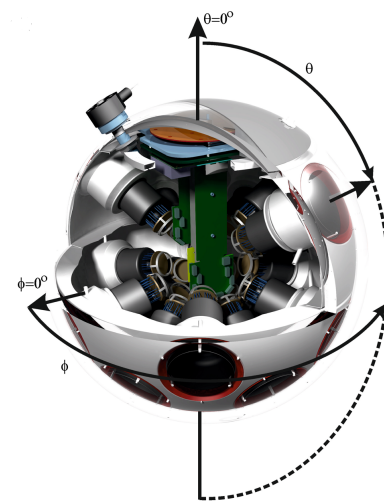


Σχήμα 3.2: Σχηματική αναπαράσταση του σχοινιού - string της ανιχνευτικής μονάδας του KM3NeT, καθώς ξετυλίγεται υποθαλάσσια.

3.4 Ψηφιακά οπτικά στοιχεία Digital Optical Modules (DOMs)

Τα ψηφιακά οπτικά στοιχεία αποτελούνται από μια γυάλινη σφαίρα 17 ιντσών με πάχος τέτοιο ώστε να μπορεί να αντέξει την τεράστια πίεση (ως και 350 φορές μεγαλύτερη από την ατμοσφαιρική πίεση) στο βυθό της θάλασσας. Σε κάθε σφαίρα βρίσκονται 31 φωτοπολλαπλασιαστές που έχουν τοποθετηθεί έτσι ώστε να "κοιτούν" προς όλες τις κατευθύνσεις για το φως Cherenkov. Οι φωτοπολλαπλασιαστές λειτουργούν σε υψηλή τάση του 1 kV που παρέχεται από ένα κύκλωμα στη βάση μέρος των φωτοπολλαπλασιαστών. Όταν ένα φωτόνιο "χτυπήσει" στον φωτοπολλαπλασιαστή δημιουργείται ένας μικρός ηλεκτρικός παλμός, ο οποίος ενισχύεται και μετασχηματίζεται σε τετραγωνικό παλμό με τη τεχνική time over threshold (TOT) - η ποσότητα φωτός μετατρέπεται σε ποσότητα φορτίου, που μεταφράζεται σε μήκος του τετραγωνικού παλμού - και αποστέλλεται στη κεντρική διαχείριση λογικής του FPGA (Field Programmable Gate Array). Εκεί αποθηκεύεται ο χρόνος άφιξης του παλμού και το μήκος του (TOT). Μέσα στο οπτικό στοιχείο υπάρχουν επίσης αισθητήρες για βαθμονόμηση, μια πυξίδα και επιταχυνσιόμετρα που επιτρέπουν τον εντοπισμό της κατεύθυνσης που "κοιτούν" οι φωτοπολλαπλασιαστές. Τέλος, ένας πιεζοηλεκτρικός αισθητήρας επιτρέπει τον προσδιορισμό της θέσης του οπτικού στοιχείου σε τρεις διαστάσεις με τη χρήση της τεχνικής sonar. Οι παραπάνω μετρήσεις είναι απαραίτητες καινάώς τα οπτικά στοιχεία κινούνται συνεχώς εξαιτίας των θαλάσσιων ρευμάτων.

Συνεπώς, τα οπτικά στοιχεία μπορούν να καταγράψουν τον χρόνο άφιξης του φωτός Cherenkov που παράγεται στο νερό όταν τα φορτισμένα σωματίδια (που προέρχονται από αλληλεπιδράσεις νετρίνων στο νερό) περνούν κοντά ή μέσα από τον ανιχνευτή. Με τα στοιχεία που αναφέρθηκαν μπορεί επίσης να μετρηθεί η φωτεινότητα (ένταση) του φωτός και η γεωμετρική του θέση. Οι καταγραφές αποστέλλονται σε υπολογιστές στους σταθμούς ξηράς μέσω δικτύου οπτικών ινών. Στους σταθμούς ξηράς, γίνεται επεξεργασία δεδομένων, εφαρμόζονται οι συνθήκες σκανδαλισμού και έτσι γίνεται μια πρώτη επιλογή γεγονότων που μας ενδιαφέρουν. Τα αποτελέσματα στέλνονται σε όλα τα KM3NeT κέντρα δεδομένων μέσω διαδικτύου για περαιτέρω ανάλυση. Η πληροφορία από όλα τα DOMs χρησιμοποιείται για την ανακατασκευή της τροχιάς των σωματιδίων.



Σχήμα 3.3: Αριστερά : Το ψηφιακό οπτικό στοιχείο (DOM) του KM3NeT. Δεξιά : Σχηματική αναπαράσταση του εσωτερικού του ψηφιακού οπτικού στοιχείου.

Κεφάλαιο 4

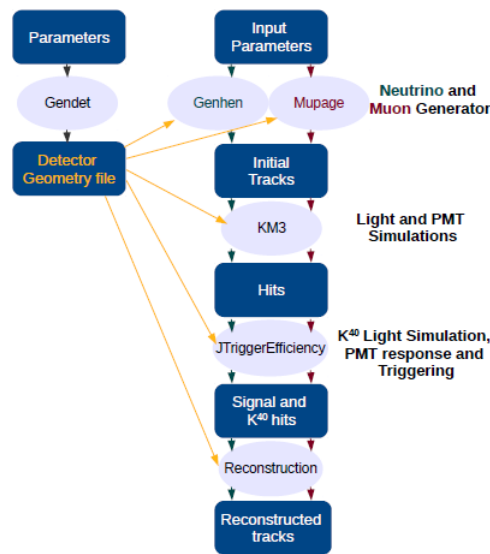
Λογισμικό παραγωγής και προσομοίωσης γεγονότων

Τα εργαλεία προσομοίωσης Monte Carlo [25] χρησιμοποιούνται εκτενώς στην πειραματική φυσική για την μελέτη των παραμέτρων που επηρεάζουν το πείραμα και για τις μελέτες βελτιστοποίησης που είναι απαραίτητες για τον τελικό σχεδιασμό του ανιχνευτή. Στο KM3NeT, η Monte Carlo παραγωγή και προσομοίωση γεγονότων χρησιμοποιείται για να ελεγχθεί και να βελτιστοποιηθεί ο σχεδιασμός του τηλεσκοπίου νετρίνων πριν την κατασκευή των ανιχνευτικών μονάδων και την βύθιση τους στο νερό, υπολογίζοντας τα προσδοκούμενα αποτελέσματα που μπορούν να επιτευχθούν με την εκάστοτε ανιχνευτική γεωμετρία.

Αρχικά, χρησιμοποιείται το Monte Carlo για την δημιουργία γεγονότων νετρίνων και ατμοσφαιρικών μιονίων καθώς και για την προσομοίωση της απόκρισης του ανιχνευτή. Επίσης, στα προσομοιωμένα γεγονότα εφαρμόζονται απαιτήσεις για τον "σκανδαλισμό" (triggering) γεγονότων και τέλος γίνεται η ανακατασκευή γεγονότων. Αρχικά, δημιουργείται το αρχείο γεωμετρίας του ανιχνευτή που περιέχει την ανιχνευτική υποδομή και τα χαρακτηριστικά της τοποθεσίας του ανιχνευτή (π.χ υποθαλάσσιο βάθος, αριθμός strings κ.λ.π). Στη συνέχεια, το αρχείο αυτό χρησιμοποιείται για τη παραγωγή γεγονότων νετρίνων χρησιμοποιώντας τον γεννήτορα GENHEN [26] ή ατμοσφαιρικών μιονίων χρησιμοποιώντας το γεννήτορα MUPAGE [27] για την αντίστοιχη ανιχνευτική

γεωμετρία. Οι αλληλεπιδράσεις των νετρίνων καθώς και η απόκριση του ανιχνευτή κατά το πέρασμα των παραγόμενων σωματιδίων στον ανιχνευτικό όγκο προσομοιώνονται (KM3 [28][29]). Η πληροφορία για τη κατανομή των γεγονότων και οι χρόνοι άφιξης τους στους πολλαπλασιαστές χρησιμοποιείται ως είσοδος στην επιλογή σκανδαλισμού γεγονότων (JTriggerEfficiency [30]). Ο κώδικας αυτός είναι μέρος ενός πακέτου αλγορίθμων, που προσομοιώνουν τα ηλεκτρονικά των φωτοπολλαπλασιαστών και δημιουργούν παράλληλα τυχαίους

παλμούς που προέρχονται από πηγές υποβάθρου. Επίσης, περιέχει ένα πακέτο κριτηρίων για να ελέγχει την θέση και την χρονική άφιξη των φωτονίων στους φωτοπολλαπλασιαστές, ώστε να απορρίπτει hits που έρχονται από πηγές υποβάθρου. Οι παλμοί που περνούν το επίπεδο σκανδαλισμού (triggering) χρησιμοποιούνται από τους αλγορίθμους ανακατασκευής (στη παρούσα εργασία τους αλγορίθμους του JGandalf) [19]. Η σειρά με την οποία χρησιμοποιούνται τα εργαλεία λογισμικού στο πείραμα KM3NeT φαίνεται σχηματικά :

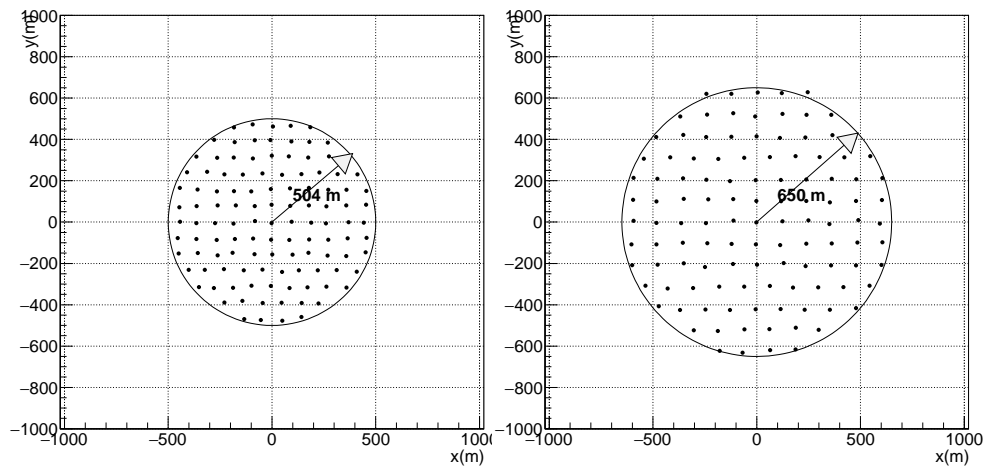


Σχήμα 4.1: Σειρά χρήσης εργαλείων λογισμικού στο KM3NeT.

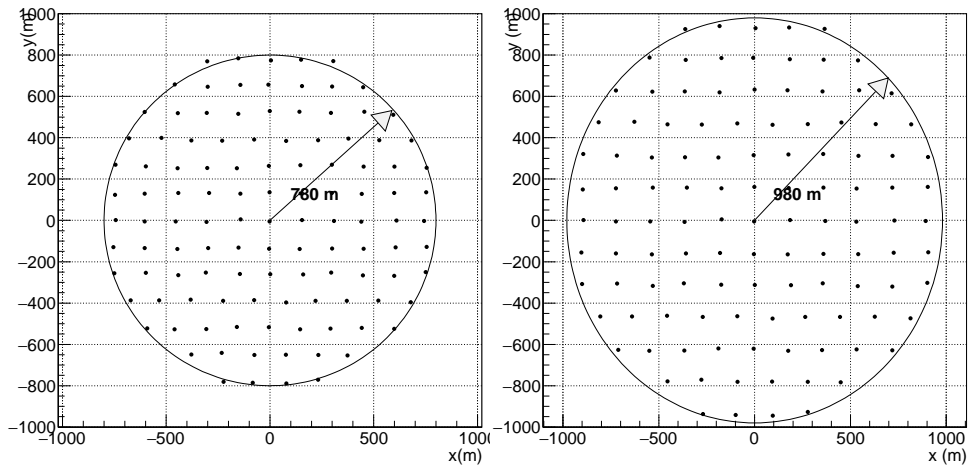
4.1 Η γεωμετρία του ανιχνευτή

Το αρχείο γεωμετρίας του ανιχνευτή δημιουργείται μέσω του κώδικα GENDET. Περιέχει πληροφορίες για την ανιχνευτική διάταξη, συμπεριλαμβάνοντας τη θέση των ανιχνευτικών μονάδων και των οπτικών στοιχείων, τον τύπο των φωτοπολλαπλασιαστών και τον προσανατολισμό τους. Επίσης περιλαμβάνεται, το γεωγραφικό μήκος, πλάτος και το βάθος της τοποθεσίας του ανιχνευτή. Η προσομοίωση του ανιχνευτή ARCA στην παρούσα εργασία έχει γίνει χρησιμοποιώντας τις αντίστοιχες τιμές για τη θέση του ανιχνευτή στο Capo Passero της Ιταλίας, για έναν κυλινδρικό ανιχνευτή σε βάθος 3500 μέτρων. Δημιουργήθηκαν τρεις εναλλακτικές γεωμετρίες του ανιχνευτή KM3NeT-ARCA, στις οποίες περιέχεται ο ίδιος αριθμός ανιχνευτικών μονάδων και οπτικών στοιχείων, ενώ

αλλάζει μόνο η απόσταση μεταξύ των ανιχνευτικών μονάδων σε 120 m, 150 m και 180 m. Η διάταξη για το κάθε block (από τα δυο που θα θεωρούνται στην μελέτη της εργασίας) του ανιχνευτή ARCA παρουσιάζεται στα σχήματα 4.2 έως 4.5 για την κάθε μια από τις γεωμετρίες που θα χρησιμοποιηθούν στην εργασία. Ο όγκος του κάθε block για τις γεωμετρίες που μελετώνται είναι : 0.5 km^3 , 0.65 km^3 , 0.78 km^3 και 0.98 km^3 .



Σχήμα 4.2: Γραφική αναπαράσταση του βλοκς του ανιχνευτή ARCA για απόσταση 90 μέτρων (αριστερά) και 120 μέτρων (δεξιά) μεταξύ των ανιχνευτικών μονάδων.



Σχήμα 4.3: Γραφική αναπαράσταση του βλοσκ του ανιχνευτή AP^A για απόσταση 150 μέτρων (αριστερά) και 180 μέτρων (δεξιά) μεταξύ των ανιχνευτικών μονάδων.

4.2 Γεννήτρια γεγονότων νετρίνων GENHEN

Το πρόγραμμα GENHEN [26] (GENerator of High Energy Neutrinos) είναι μια γεννήτρια Monte Carlo γεγονότων νετρίνων υψηλών ενεργειών που προσομοιώνει τις αλληλεπιδράσεις νετρίνων και αντινετρίνων με την ύλη. Η μέγιστη ενέργεια των νετρίνων (και των αντινετρίνων) που παρήχθησαν για αυτή την εργασία είναι 10^8 GeV. Ο ανιχνευτικός όγκος του ενός ARCA block (instrumented volume) αναπαριστάται με έναν κύλινδρο ακτίνας 504 μέτρων, για την τυπική γεωμετρία του KM3NeT με απόσταση μεταξύ των ανιχνευτικών μονάδων 90 μέτρων και ακτίνας 650, 780 και 980 μέτρων για τις γεωμετρίες με απόσταση μεταξύ των ανιχνευτικών μονάδων 120, 150 και 180 μέτρων που θα μελετηθούν στην παρούσα εργασία. Το ύψος του κυλίνδρου είναι σε όλες τις γεωμετρίες 612 μέτρα. Αυτός ο κύλινδρος εμπεριέχεται σε έναν μεγαλύτερο κύλινδρο, που ονομάζεται "δοχείο" (can) στον οποίο δημιουργούνται τα φωτόνια Cherenkov. Η ακτίνα και το ύψος του μεγαλύτερου αυτού κυλίνδρου είναι σχεδόν το μήκος απορρόφησης του φωτός στο θαλασσινό νερό μεγαλύτερα από τον ανιχνευτικό όγκο (περίπου 2,5 φορές μεγαλύτερος), άρα τα φωτόνια που παράγονται εκτός του μεγαλύτερου κυλίνδρου έχουν πολύ μικρή πιθανότητα να φτάσουν στους φωτοπολλαπλασιαστές και να "δώσουν" σήμα. Ο όγκος παραγωγής (generation volume) που αναπαριστά τον όγκο στον οποίο τα νετρίνα αλληλεπιδρούν με τα νουκλεόνια και τα ηλεκτρόνια τις ύλης, αντιστοιχεί στον όγκο που μπορεί να επεκταθεί το δοχείο-can στο μέγιστο εύρος διαδρομής του λεπτονίου στο μέσο (θάλασσα) για την μέγιστη τιμή της ενέργειας στην οποία έχει παραχθεί το σωματίδιο. Στη περίπτωση που τα νετρίνα έχουν αλληλεπιδράσει στο εσωτερικό του μεγαλύτερου κυλίνδρου, όλα τα σωματίδια προσομοιώνονται και καταγράφονται. Εάν τα νετρίνα έχουν αλληλεπιδράσει εκτός του μεγάλου κυλίνδρου, η μικρότερη απόσταση μεταξύ του σημείου αλληλεπίδρασης του νετρίνου και του μεγάλου κυλίνδρου μετράται, συγκρίνεται τότε με την μέγιστη διαδρομή του μιονίου και αν είναι μικρότερη μεταφέρεται στην επιφάνεια του δοχείου με τη χρήση κάποιων από τους κώδικες MUSIC, MUM και PropMu [28] [29]. Διαφορετικά το γεγονός απορρίπτεται καθώς το μόνιο δεν θα φτάσει τον ανιχνευτικό όγκο.

Τα νετρίνα παράγονται από το GENHEN με κάποιο φάσμα-ροή που μπορεί να ρυθμιστεί από τον χρήστη. Στην εργασία αυτή, μελετήθηκαν διαφορετικές ροές νετρίνων. Δημιουργήθηκαν νετρίνα μέσω του ενεργειακού φάσματος από τον προτεινόμενο θεωρητικά μηχανισμό επιτάχυνσης του Fermi (Fermi Shock Acceleration) που περιγράφει τη δημιουργία νετρίνων υψηλών ενεργειών και μετά τα γεγονότα επανακανονικοποιήθηκαν στα άλλα ενεργειακά φάσματα που χρησιμοποιήθηκαν στην μελέτη της εργασίας.

4.3 Το λογισμικό προσομοίωσης KM3

Η παραγωγή σωματίων γίνεται μέσω του κώδικα που περιγράφεται στη προηγούμενη παράγραφο. Η προσομοίωση των φωτονίων που εκπέμπονται κατά τη διάρκεια της διαδρομής των φορτισμένων σωματιδίων (που παρήχθησαν από αλληλεπιδράσεις νετρίνων) γίνεται με τη χρήση του λογισμικού προσομοίωσης KM3 [28] [29]. Το λογισμικό KM3 χρησιμοποιεί αποτελέσματα από πλήρεις προσομοιώσεις χρησιμοποιώντας το λογισμικό GEANT μιονίων και ηλεκτρομαγνητικών καταγισμών στο θαλασσινό νερό, για να δημιουργηθεί ένας αριθμός φωτονίων που θα φτάσουν στους φωτοπολλαπλασιαστές. Η πλήρης προσομοίωση όλων των αλληλεπιδράσεων των σωματιδίων στο θαλασσινό νερό και των φωτονίων που παράγονται από αυτές τις διαδικασίες είναι μια χρονοβόρα διαδικασία. Για να μειωθεί ο CPU χρόνος που είναι αναγκαίος για την προσομοίωση αυτών των γεγονότων, το πακέτο KM3 χρησιμοποιεί πίνακες που περιέχουν πληροφορίες για την πλήρη εξάρτηση της παραγωγής, διάδοσης, σκέδασης και απορρόφησης του φωτός Cherenkov στο θαλασσινό νερό, από το μήκος κύματος του φωτός. Επίσης, κατά τη προσομοίωση λαμβάνονται υπόψιν παράγοντες όπως η απόκριση των φωτοπολλαπλασιαστών, η απορροφητικότητα του γυαλιού και του οπτικού gel στο οπτικό στοιχείο, καθώς και η χβαντική ανιχνευτική ικανότητα των φωτοπολλαπλασιαστών και η μειωμένη ενεργός περιοχή για φωτόνια που φθάνουν εκτός άξονα (off-axis).

Το λογισμικό προσομοίωσης KM3 χρησιμοποιεί πληροφορίες από τρεις διαφορετικές κατηγορίες πινάκων. Αρχικά, "διαβάζονται" από το πακέτο, οι φωτονικοί πίνακες που περιέχουν την κατανομή των παραχθέντων φωτονίων από τα φορτισμένα σωματίδια στο θαλασσινό νερό για τμήματα των δύο μέτρων. Το φως από τα δευτερεύοντα σωματίδια περιέχεται και αυτό σε πίνακες. Στη συνέχεια, φωτονικοί πίνακες χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί η πιθανότητα ένα φωτόνιο να χτυπίσει έναν φωτοπολλαπλασιαστή, λαμβάνοντας υπόψιν τις περαμέτρους των φωτοπολλαπλασιαστών που χρησιμοποιούνται (απόκριση, χβαντική ανιχνευτική ικανότητα κλπ.). Τέλος, τα σωματίδια διαδίδονται μέσα στον όγκο του ανιχνευτή και δημιουργούνται κατανομές από hits για τους φωτοπολλαπλασιαστές, βασισμένες στη τοπολογία του κάθε γεγονότος και στους πίνακες πιθανότητας των hits που έχουν ήδη δημιουργηθεί.

4.4 Το λογισμικό σκανδαλισμού γεγονότων και δημιουργίας παλμών υποβάθρου : JTriggerEfficiency

Τα hits στους φωτοπολλαπλασιαστές που παρήχθησαν με το λογισμικό KM3 χρησιμοποιούνται σαν "είσοδος" (input) στο JTriggerEfficiency, για να ελεγχθεί εάν μπορούν να δώσουν ανιχνεύσιμους παλμούς στην "έξοδο" (output) των φωτοπολλαπλασιαστών λαμβάνοντας υπόψιν τα χαρακτηριστικά τους, όπως μετρήθηκαν στο εργαστήριο. Επομένως, η κατανομή του χρόνου διέλευσης ανά φωτόνιο που χρησιμοποιείται σε αυτή τη προσομοίωση, αντιστοιχεί σε μια Γκαουσιανή (Gaussian smearing) με 2 nsec σίγμα για τη πλειοψηφία των φωτονίων.

Ο χρόνος πάνω από το κατώφλι (Time over Threshold - ToT) υπολογίζεται επίσης σε αυτό το βήμα, χρησιμοποιώντας τον χρόνο έναρξης και τη διάρκεια του παλμού, ενώ έχει τεθεί το μέγιστο των 255 nsec. Επιπλέον, έχει συμπεριληφθεί ο κορεσμός των φωτοπολλαπλασιαστών από τα φωτοηλεκτρόνια που καταφτάνουν ταυτόχρονα και υπολογίζεται σε 40 φωτοηλεκτρόνια. Για να προσομοιωθεί το φως που θα συλλεχθεί από τους φωτοπολλαπλασιαστές στο θαλασσινό νερό, παράγονται hits από αποδιεγέρσεις του ^4OK . Αυτή η προσομοίωση συμπεριλαμβάνει hits τυχαίου θορύβου με ρυθμό 5kHz ανά φωτοπολλαπλασιαστή και hits από πολλαπλούς φωτοπολλαπλασιαστές του ίδιου οπτικού στοιχείου (2, 3, 4 συμπτώσεις γεγονότων με ρυθμούς 500, 50 και 5 Hz ανά οπτικό στοιχείο αντίστοιχα).

Μόλις ολοκληρωθεί η προσομοίωση του φωτός που ανιχνεύεται από τους φωτοπολλαπλασιαστές, ένα σύνολο αλγορίθμων για τον σκανδαλισμό γεγονότων δημιουργείται, προκειμένου να διαχωρισθούν τα hits σωματιδίων που προέρχονται από νετρίνα και εναποθέτουν φως στον ανιχνευτικό όγκο από τα hits υποβάθρου που δημιουργούν παλμούς στους φωτοπολλαπλασιαστές. Για να "αποθηκευτούν" ως επί το πλείστον hits από αλληλεπιδράσεις νετρίνων, οι αλγόριθμοι για τον σκανδαλισμό γεγονότων ψάχνουν για οπτικά στοιχεία με hits μεγάλου "πλάτους" ή hits σε πολλαπλούς φωτοπολλαπλασιαστές του ίδιου οπτικού στοιχείου. Το φίλτρο L1 απαιτεί την σύμπτωση δύο ή περισσότερων hits σε διαφορετικού φωτοπολλαπλασιαστές στο ίδιο οπτικό στοιχείο με ένα χρονικό παράθυρο 10 nsec (η χαμηλή σκέδαση φωτός σε τέτοια θαλάσσια βάθη επιτρέπει αυτό το μικρό χρονικό παράθυρο) και λαμβάνοντας υπόψιν φωτοπολλαπλασιαστές με γωνία μεταξύ των αξόνων τους λιγότερη των 90 μοιρών (L2 σκανδαλισμός). Επιπλέον, εφαρμόζεται ένα φίλτρο κατεύθυνσης, το οποίο χρησιμοποιεί μια σάρωση του ουρανού (με βήμα περίπου 10 μοιρών) και μια υποτιθέμενη κατεύθυνση του νετρίνου, έτσι ώστε να συνδεθούν αιτιολογικά οι χρόνοι μεταξύ μια σφαιρικής (καταιγισμός) ή κυλινδρικής (track) γεωμετρίας. Τέλος, εφαρμόζεται η απαίτηση τουλάχιστον 5 L1 παλμών, οδηγώντας στην σημαντική μείωση των τυχαίων συμπτώσεων γεγονότων υποβάθρου.

4.5 Το λογισμικό ανακατασκευής γεγονότων JGandalf

Δύο μεγάλες κλάσεις γεγονότων μπορούν να αναγνωρισθούν σε ένα τηλεσκόπιο νετρίνων : τα γεγονότα τύπου τροχιάς (track-like events) και τα γεγονότα τύπου καταγισμού (cascade-like events). Στην παρούσα εργασία, όπως προαναφέρθηκε, θα επικεντρωθούμε στην ανακατασκευή γεγονότων από tracks. Τέτοια γεγονότα παράγονται από μόνια που δημιουργούνται στην ύλη μέσα ή κοντά στον ανιχνευτή μέσω αλληλεπιδράσεων φορτισμένου ρεύματος νετρίνων και αντινετρίνων του μιονίου και του τ . Το νεutrino του τ παράγει μόνιο με πιθανότητα 17%.

Μιόνια με ενέργειες μεγαλύτερες του 1 TeV μπορούν να κάνουν δι-αδρομές μήκους αρκετών χιλιομέτρων και να έχουν διεύθυνση σχεδόν συνευθειακή με αυτή του αρχικού νετρίνου. Για την ανακατασκευή της κατεύθυνσης του μιονίου (και κατά αντιστοιχία του νετρίνου) χρησιμοποιείται στην εργασία αυτή, ο αλγόριθμος JGandalf. Για τη μεγιστοποίηση της πιθανότητας, ο παρατηρούμενος χώρος και χρόνος του hit ανιστοιχεί σε εκπομπή φωτός Cherenkov από την ανακατασκευασμένη τροχιά του μιονίου. Μια αρχική επιλογή στα hits εκμεταλλεύεται τις συμπτώσεις των γεγονότων στους φωτοπολλαπλασιαστές, με σκοπό να αφαιρεθούν τα hits υποβάθρου. Η ανακατασκευή της τροχιάς του μιονίου ξεκινά με μια γραμμική προσαρμογή (JPrefit [19]), ακολουθούμενη από διαδοχικά βήματα, καθένα εκ των οποίων χρησιμοποιεί σαν αρχικό σημείο αναφοράς το προηγούμενο βήμα. Στο βήμα του JPrefit, δεδομένης μιας μιονικής τροχιάς, ένα σύστημα συντεταγμένων μπορεί να οριστεί, τέτοιο ώστε, το μόνιο να ταξιδεύει κατά τον άξονα των z , διασχίζοντας το επίπεδο $z=0$ με συντεταγμένες x_0, y_0 σε χρόνο t_0 . Με την απουσία σκέδασης και διάχυσης φωτός, υπολογίζεται ο αναμενόμενος χρόνος (t_i) άφιξης των Cherenkov φωτονίων στον φωτοπολλαπλασιαστή και εκφράζεται ως :

$$\hat{t}_i = t_0 + \frac{z_i}{c} + \tan(\theta_c) \frac{\rho_i}{c}$$

$$\rho_i = \sqrt{(x_i - x_0)^2 + (y_i - y_0)^2}$$

όπου ρ_i είναι η ελάχιστη απόσταση προσέγγισης του μιονίου στον φωτοπολλαπλασιαστή, z_i είναι η απόσταση του φωτοπολλαπλασιαστή από το επίπεδο $z=0$, c είναι η ταχύτητα φωτός στο κενό και θ_c η χαρακτηριστική γωνία Cherenkov.

Λαμβάνοντας υπόψιν όλα τα ζεύγη διαδοχικών hits i, j το πρόβλημα ανάγεται σε έτοιμη επιλύσιμη εξίσωση πινάκων όπως :

$$\begin{aligned}
t_j'^2 - t_i'^2 - 2(t_j' - t_i')t_0 &= x_j^2 - x_i^2 - 2(x_j - x_i)x_0 \\
&+ y_j^2 - y_i^2 - 2(y_j - y_i)y_0 \\
t_i' &= t_i \cdot c / \tan(\theta_c) - z_i / \tan(\theta_c)
\end{aligned}$$

Η γραμμική προσαρμογή (linear fit) είναι ευαίσθητη σε αποκλίσεις από το οπτικό υπόβαθρο λόγω του ^{40}K , της βιοφωταύγειας και των σχεδαζόμενων φωτονίων. Με σκοπό να απορριφθούν γεγονότα υποβάθρου, ένα σύμπλεγμα αιτιατών hits επιλέγεται από τα δεδομένα (data). Για έναν συγκεκριμένο αριθμό αιτιατών hits, εφαρμόζεται linear fit. Η ποιότητα του linear fit ποσοτικοποιείται ως :

$$Q = \text{NDF} - 0.25 \times (\chi^2 / \text{NDF})$$

όπου το NDF αναφέρεται στον αριθμό βαθμών ελευθερίας του fit.

Ξεκινώντας από τις καλύτερα προσαρμοσμένες κατευθύνσεις του JPr-fit, ερευνάται η μέγιστη πιθανότητα με τη μέθοδο Levenberg-Marquardt κατά την οποία οι ανεξάρτητες παράμετροι (χρόνος, απόσταση κλπ.) υπολογίζονται ταυτόχρονα. Σε αυτό το σημείο, η απόκριση των φωτοπολλαπλασιαστών εκφράζεται από ένα σύνολο συναρτήσεων πυκνότητας πιθανότητας (Probability Density Functions - PDFs).

$$\frac{\partial P}{\partial t}(\rho_i, \theta_i, \phi_i, \Delta t)$$

όπου ρ_i είναι η μικρότερη απόσταση προσέγγισης του μιονίου στον φωτοπολλαπλασιαστή, i , θ_i και ϕ_i παράμετροι που εκφράζουν τον προσανατολισμό του φωτοπολλαπλασιαστή και Δt η διαφορά μεταξύ του αναμενόμενου και του μετρηθέντος χρόνου άφιξης του φωτός.

Το σύνολο των PDFs υπολογίζεται ημιανλυτικά για μη σχεδαζόμενα ή που έχουν υποστεί μια σκέδαση φωτόνια Cherenkov και από την μείωση ενέργειας του μιονίου (π.χ ακτινοβολία πέδησης). Σε αυτό το βήμα, συνυπολογίζονται τα αποτελέσματα διασποράς και κβαντικής απόδοσης, γωνιακής αποδοχής και χρόνου διέλευσης των φωτοπολλαπλασιαστών. Όταν πλέον έχει υπολογιστεί η τροχιά του μιονίου, η ενέργεια του προσαρμόζεται χρησιμοποιώντας την κατανομή των φωτοπολλαπλασιαστών με hits και χωρίς hits. Η πιθανότητα ένας φωτοπολλαπλασιαστής να έχει hits αποκτάται από τις ίδιες PDFs που προαναφέρθηκαν. Όλοι οι φωτοπολλαπλασιαστές, μέσα σε ένα προκαθορισμένο από τον χρήστη πλάτος διαδρομής (200-300 μέτρα σε αυτή την εργασία) γύρω από τη τροχιά του μιονίου, χρησιμοποιούνται για να υπολογιστεί η πιθανότητα των hits και να συγκριθεί με τα hits που πραγματοποιήθηκαν. Στη συνέχεια

της εργασίας θα παρουσιαστεί η ποιότητα ανακατασκευής τροχιών με το πακέτο JGandalf, για τις διαφορετικές γεωμετρίες του ανιχνευτή που μελετήθηκαν [18].



Σχήμα 4.4: Τα βήματα που ακολουθούνται στο πακέτο JGandalf για την ανακατασκευή της τροχιάς των μιονίων.

Κεφάλαιο 5

Performance of the track reconstruction

In order to test the performance of the track reconstruction, 10^8 neutrino events were generated with energies from 100 GeV to 10^8 GeV for the standard and for each of the alternative KM3NeT-ARCA detector configurations.

The different detector configurations are first compared in terms of effective area. The effective area is a quantity that describes the capability of a neutrino telescope to detect neutrinos from astrophysical sources. For a certain astrophysical neutrino flux, it is related to the number of detected events in a time interval by :

$$\frac{N_{events}}{T} = \int dE\nu \frac{d\Phi\nu}{dE\nu} A\nu^{eff}(E\nu) \quad (5.1)$$

where $A\nu^{eff}$ is the effective area, $\frac{d\Phi\nu}{dE\nu}$ is the astrophysical cosmic flux, T a time interval and N_{events} the number of detected events during the time interval (T). The effective area gives an estimate of the ratio of the number of reconstructed events (N_{rec}) to the number of generated events (N_{gen}) for a given neutrino flux and is calculated by the following formula :

$$A\nu^{eff}(E\nu, \theta\nu) = \frac{N_{rec}(E\nu, \theta\nu)}{N_{gen}(E\nu, \theta\nu)} V_{gen} * \sigma(E\nu) * \rho N_A * \exp(-\sigma(E\nu) \rho N_A z(\theta)) \quad (5.2)$$

where V_{gen} is the generation volume of the events, ρN_A is the target nucleon density, N_A the Avogadro number, $\sigma(E\nu)$ the neutrino cross section and $z(\theta)$ the neutrino path across the Earth in a direction ϑ .

Figure 5.1 shows the effective area as a function of the MonteCarlo (MC) neutrino energy, for the detector configurations with distance between the strings of 90 m (standard KM3NeT geometry), 120 m, 150 m and 180 m respectively. From figure 5.1, one can observe that as the distance

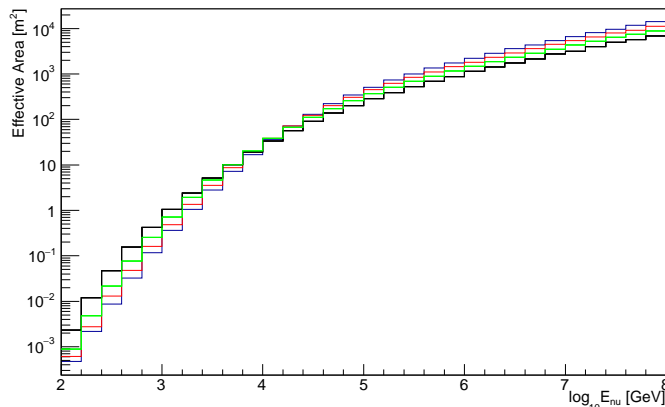


Figure 5.1: The effective area in m^2 versus $\log_{10} E_\nu$ GeV for the detector configurations with 90 m (black), 120 m (green), 150 m (red), 180 m (blue) distance between the strings.

between the detection units-strings increases, there is a significant increase in the effective area for energies larger than 20 TeV. At the energy of interest (1 PeV), there is an increase of 33% for the 120 m geometry, 58% for the 150 m geometry and 83% for the 180 m geometry with respect to the standard KM3NeT geometry of 90 m. The increase rises with energy, as expected; at 10 PeV energy there is an increase of 34% for the 120m geometry, 75% for the 150 m geometry and 113% for the 180 m geometry compared to the standard KM3NeT-ARCA geometry. As can be seen in figure 5.1, in the low energy range (less than 20 TeV) there is a decrease in effective area for the alternative geometries. Specifically, for the energy of 10 TeV there is a loss of 11% for the 120 m geometry, of 12% for the 150 m geometry and of 18% for the 180 m geometry compared to the standard KM3NeT geometry. For these comparisons on MC events, the selection criterion used is that there should be at least 5 OMs with L1s (trigger level condition) in order to be able to make a track reconstruction.

The quality cuts adopted for track selection in KM3NeT, which have been investigated in other analyses, were then added, in order to reject badly reconstructed tracks. Specifically, the quality parameters are :

- the likelihood of the reconstructed tracks
- the likelihood divided by the number of hits related to the track
- the first error on the track parameters as :

$$\sqrt{T_x^2 + T_y^2} \quad (5.3)$$

- the second error on the track parameters as :

$$\sqrt{T_x^2} \quad (5.4)$$

where T_x and T_y are the estimated uncertainties in the x and y direction cosines. Similar to figure 5.1, figure 5.2 shows the effective area versus $\log_{10} E_\nu$ after the quality cuts of the JGandalf reconstruction, for each of the detector geometries discussed.

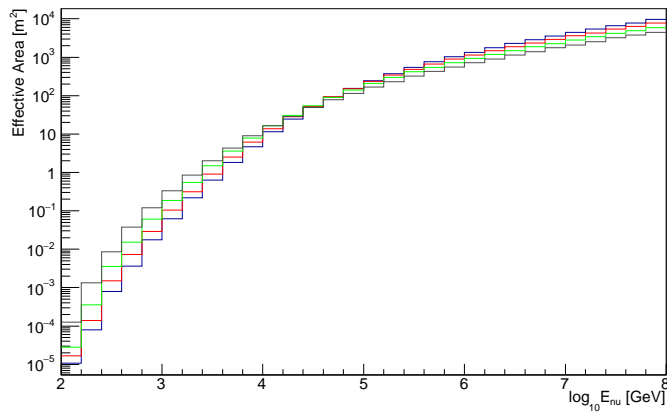


Figure 5.2: The effective area in m^2 versus $\log_{10} E_\nu$ GeV with the reconstruction quality cuts applied, for the detector configurations with 90 m -standard geometry- (black), 120 m (green), 150 m (red), 180 m (blue) distance between the strings.

From figure 5.2, it can be observed that, there is also - as expected - a significant increase in the effective area, above energies of 50 TeV. At the energy of interest (1 PeV), there is an increase of 32% for the 120 m geometry, 69% for the 150 m geometry and 97% for the 180 m geometry with respect to the standard KM3NeT geometry of 90 m. The increase rises with energy, as it can be seen; at 10 PeV energy the increase is 33% for the 120m geometry, 76% for the 150 m geometry and 114% for the 180 m geometry. In figure 5.2, a reduction of the effective area in the low energy range (with energies roughly less than 50 TeV) can be observed as most events in this energy regime fail to satisfy the JGandalf quality cuts that are not tuned for alternative detector geometries. No attempt has been made here to tune the quality cuts applied as it works fine for the high energy regime ($E > 1\text{TeV}$) in which we are interested.

The efficiency and the quality of the selected events after the reconstruction are shown in figures 5.3 and 5.4. The efficiency is defined as the ratio of the reconstructed events after the selection cuts to the simulated

events. The quality of the reconstruction is the ratio of the well reconstructed events to all reconstructed events satisfying the selection criteria. The events are referred to as well reconstructed if the difference between the reconstructed and the simulated track direction is less or equal to 1 degree ($\Delta\Omega \leq 1^\circ$).

One can observe that, the efficiency at 1 PeV is 63% for the standard detector and for the alternative geometries of 120 m and 150 m whereas for the geometry of 180 m it drops to 60%. At higher energies (10 PeV), there is a small increase of 2% for the standard geometry, of 8% for the 120 m and 150 m geometries and finally at 11% for the 180 m geometry comparing to the efficiencies at 1 PeV. For lower energies, due to the quality cuts of the reconstruction (as discussed previously), we can see a decrease in efficiency especially for the larger geometries. Specifically, the efficiency at 100 TeV is 59% for the standard KM3NeT-ARCA geometry and for the alternative geometries it drops to 56% for the 120 m, 52% for the 150 m and 48% for the 180 m. The efficiency at 10 TeV is 49% for the standard geometry and it drops to 43% for the 120 m, to 35% for the 150 m and to 31% for the 180 m alternative geometry.

At the energy of 1 PeV, the quality of the reconstruction is 99% for the standard geometry and the geometry of 120 m distance, 98% for the 150 m geometry and 97% for the 180 m geometry. At this point, it should be noted that, for the standard KM3NeT-ARCA geometry and the alternative geometry of 120 m, the quality decreases with increasing energy and reaches 97.5%, 98.5% respectively, whereas for the alternative geometry of 150 m it stays stable and for the alternative geometry of 180 m it increases at 98%. For energies lower than 800 TeV, the quality decreases for the alternative geometries (but remains larger than 88% for energies above 10 TeV), while the quality of the standard KM3NeT-ARCA detector is at its peak of 100%.

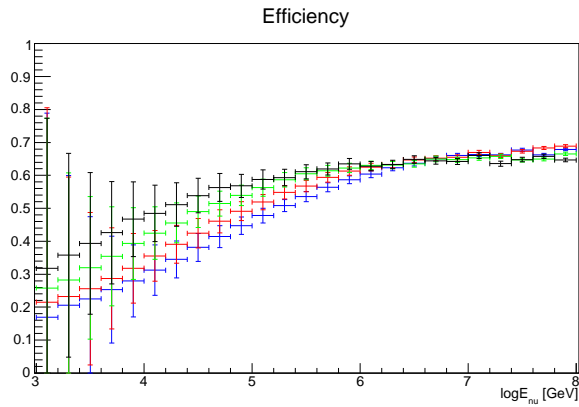


Figure 5.3: The efficiency versus $\log_{10} E_\nu$ GeV for the detector configurations with 90 m (black), 120 m (green), 150 m (red), 180 m (blue) distance between the strings.

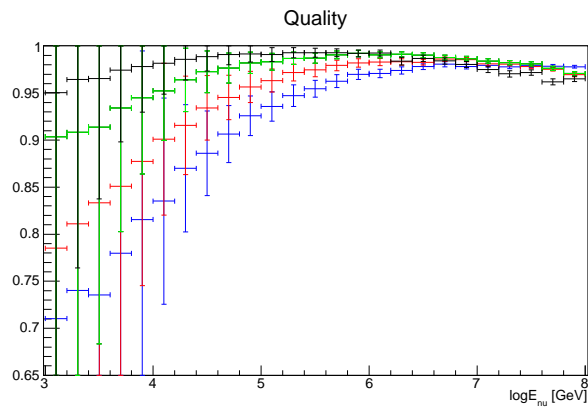


Figure 5.4: The quality versus $\log_{10} E_\nu$ GeV for the detector configurations with 90 m (black), 120 m (green), 150 m (red), 180 m (blue) distance between the strings. The plot is zoomed in order to enable the identification of the quality differences.

In order to investigate whether this decrease of the quality of the reconstruction at very high energies is due to tracks far from the instrumented volume, the quality and for completion the efficiency are checked for tracks crossing the detector and are presented in figures 5.5 and 5.6. The efficiency reaches 65% for the standard geometry, 63% for the 120 m and 150 m geometries and 59% for the 180 m geometry at the energy of 1 PeV. At 10 PeV, the efficiency is 72% for the standard geometry, 70 % for the 120 m and 150 m geometries and 68% for the 180 m geometry. At low energies (100 TeV), the efficiency drops to 62% for the standard KM3NeT-ARCA geometry and for the alternative geometries drops to 59% for the 120 m, 55% for the 150 m and 49% for the 180 m.

The quality for events with energies of 1 PeV, remains the same with the events without the restriction of crossing the detector for all geometries discussed and for events with energies of 10 PeV, the quality reaches 98% practically for every geometry. The quality at 100 TeV energy for the standard KM3NeT-ARCA geometry is at its peak of 99% whereas for the alternative geometries is 98,5% for the 120 m, 96,5% for the 150 m and 93,8% for the 180 m string distance. Additionally, for 10 TeV energy the quality of the standard KM3NeT-ARCA detector is 98% where for the alternative geometries drops to 95% for the 120 m, to 91% for the 150 m and to 85.5% for the 180 m.

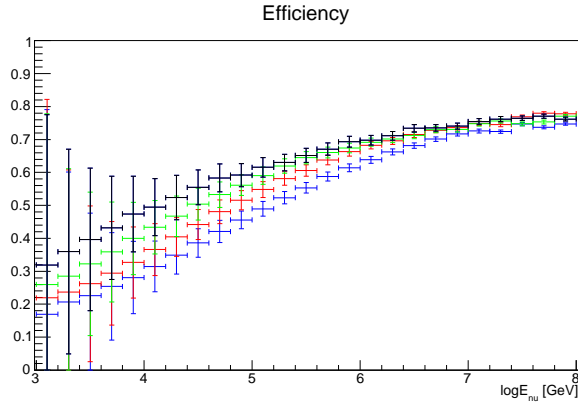


Figure 5.5: The efficiency versus $\log_{10} E_\nu$ GeV for the detector configurations with 90 m (black), 120 m (green), 150 m (red), 180 m (blue) distance between the strings using events that cross the detector.

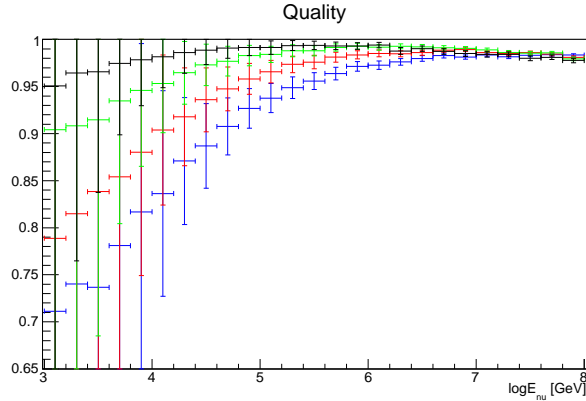


Figure 5.6: The quality versus $\log_{10} E_\nu$ GeV for the detector configurations with 90 m (black), 120 m (green), 150 m (red), 180 m (blue) distance between the strings using events that cross the detector. The plot is zoomed in order to enable the identification of the quality differences.

In order to test the performance of the different detector configurations, the medians of the difference between the reconstructed and the simulated track direction (diffangle or $\Delta\Omega$) as a function of the MC muon energy and the zenith angle, are compared in figures 5.7 and 5.8 respectively.

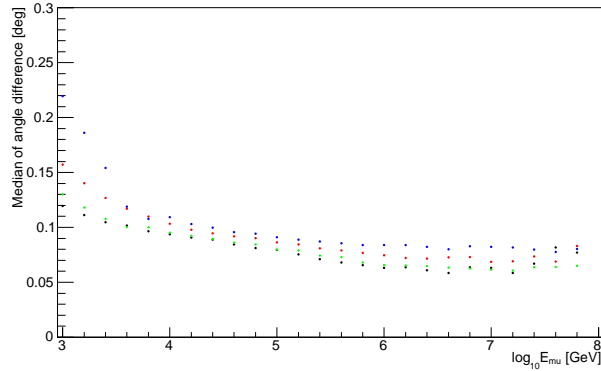


Figure 5.7: The median of the difference between the reconstructed and the simulated track direction ($\Delta\Omega$) as a function of the MC muon energy for the 90 m (black), 120 m (green), 150 m (red) and 180 m (blue) geometries. The plot is shown zoomed in order to facilitate the comparison.

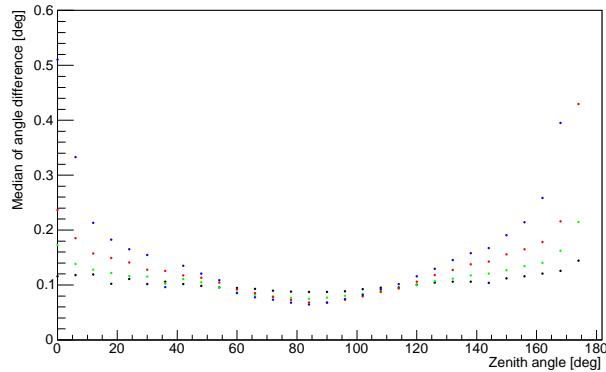


Figure 5.8: The median of the difference between the reconstructed and the simulated track direction ($\Delta\Omega$) as a function of the MC muon zenith angle for the 90 m (black), 120 m (green), 150 m (red) and 180 m (blue) geometries. The plot is shown zoomed in order to facilitate the comparison.

The median of $\Delta\Omega$ reaches the desirable 0.1° for energies greater than 1 TeV for the 90 m geometry and for energies greater than 6 TeV for the alternative geometries. A very good angular resolution is achieved in the very high energy regime with a median of 0.06° for the 90 m and 120 m geometries, a median of 0.075° for the 150 m geometry and a median of 0.09° for the 180 m geometry, at the energy range of interest (above 1 PeV). For muon energies above 50 PeV the calculation of the median is dominated by limited statistics. From figure 5.8, it can be observed that an excellent angular resolution (less than 0.1°) can be achieved for the zenith angle range of 65° to 115° for all the geometries tested. For vertical tracks the angular resolution deteriorates due to the limited height of the detector, as expected, however it is still better than 0.26° . It is important to note that for the standard KM3NeT geometry, the angular resolution seems almost independent of the zenith angle, in contrast with the alternative geometries where at low zenith angles (less than 60°) and high zenith angles (more than 120°) there is a strong effect and the median of the $\Delta\Omega$ reaches its highest values (0.23° to 0.26°).

Furthermore, the energy resolution is investigated. In figure 5.9 and 5.10 the medians of the difference between the reconstructed energy and the simulated energy of the muon are shown as a function of muon energy and zenith angle respectively.

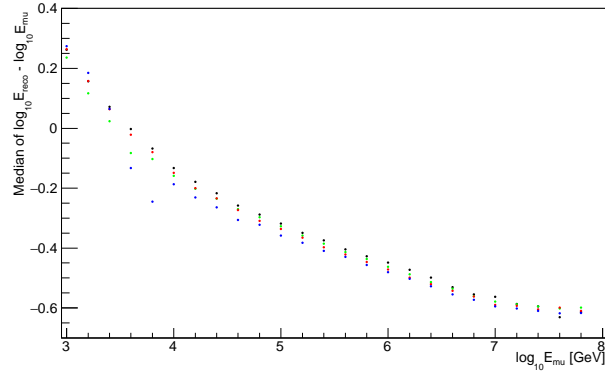


Figure 5.9: The median of the difference between the reconstructed energy and the simulated energy of the muon as a function of the muon energy for the 90 m (black), 120 m (green), 150 m (red) and 180 m (blue) geometries. The plot is shown zoomed in order to facilitate the comparison.

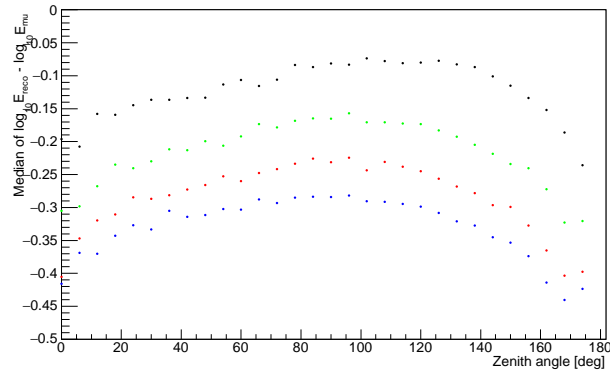


Figure 5.10: The median of the difference between the reconstructed energy and the simulated energy of the muon as a function of the zenith angle for the 90 m (black), 120 m (green), 150 m (red) and 180 m (blue) geometries. The plot is shown zoomed in order to facilitate the comparison.

In figure 5.9, it is observed that the median of the difference between the reconstructed energy and the simulated energy of the muon has a dependence on the "true"- MC muon energy. For all the geometries the performance is shown (90m with black, 120 m with light green, 150 m with red and 180

m with blue). For low energies ($E < 6$ TeV) there is a significant difference between the reconstructed and true muon energy but as the muon energy is increased the reconstructed energy tends to be underestimated, with the maximum difference of 60% at energies above 10 PeV. This is expected and it reflects the limited size of the instrumented volume. These observations apply to every geometry tested and it seems that there is no dependence as the distance between the strings is changed. In figure 5.10, the energy resolution is shown as a function of the MC muon zenith angle and a dependence on the distance between the strings of the detector is clearly visible. The median of the energy difference gets better as the distance between the strings gets smaller. For the geometry of 90 m the median fluctuates between the values of -0.22 to -0.1, while for the geometry of 180 m the median fluctuates between the values of -0.45 to -0.3. The negative values mean that the reconstructed energy is underestimated comparing with the true muon energy.

In previous analyses of the KM3NeT collaboration, the underestimation of the reconstructed energy was investigated for the KM3NeT-ARCA standard geometry. As a result, two different corrections on the reconstructed energy have been introduced. At first, neutrino events were reweighted to the E^{-2} energy spectrum and to the atmospheric flux spectrum. There were also atmospheric muon events considered in order to calculate and plot the medians of the MC muon energy as a function of the reconstructed energy. Then, for each energy interval of the reconstructed muon energy, a fitting was applied on the medians and a correction has been constructed and applied to the reconstructed energy. The second correction applied, was also made using weighted to E^{-2} neutrino events, as well as atmospheric neutrino and muon events. From the JEnergy part of the reconstruction, the reconstructed energy at the hit barycenter of the track of the muon is known and the MC muon energy at the can of the detector are known. The distance of the hit barycenter and the point at the can from which the muon passed is calculated. Using the Bethe-Bloch formula, a correction at the reconstructed energy of a muon has been calculated and adopted at the point where the muon's track intersects the can. In figure 5.11, the reconstructed energy before any correction is shown as a function of the MC muon energy while in figures 5.12 and 5.13, the corrected reconstructed energy is shown as a function of the MC muon energy, for the two different corrections. From figure 5.13 one can observe that the reconstructed energy is underestimated by 10% for all muon energies.

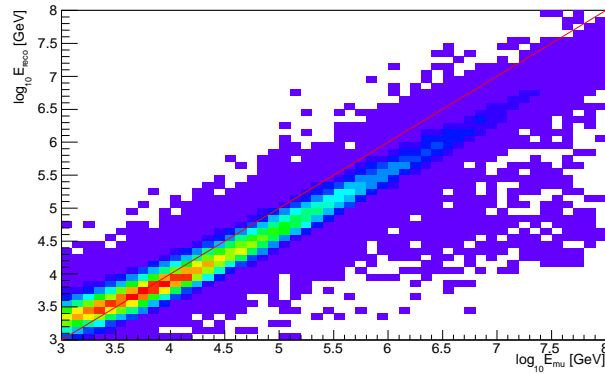


Figure 5.11: The reconstructed energy as a function of the MC muon energy for the standard KM3NeT geometry.

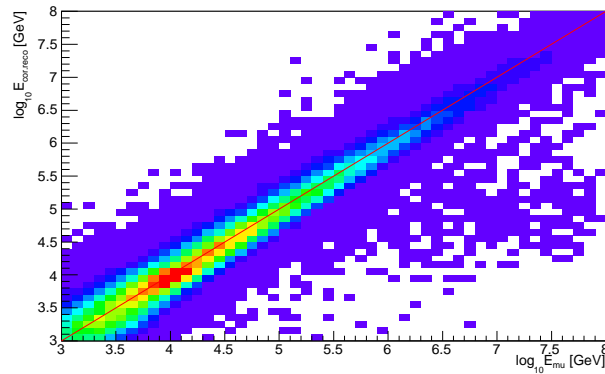


Figure 5.12: The reconstructed energy after applying the correction described in the text as a function of the MC muon energy for the standard KM3NeT geometry.

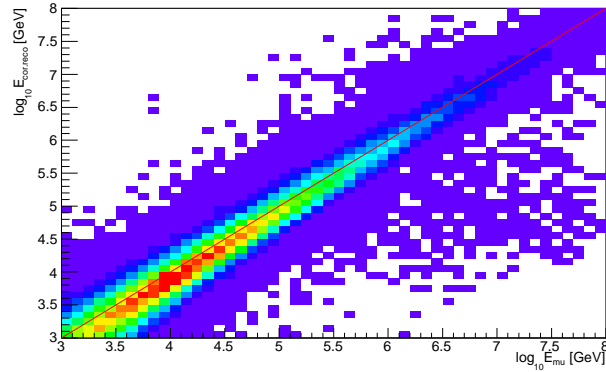


Figure 5.13: The reconstructed energy after applying the correction with respect to the can as described in the text as a function of the MC muon energy for the standard KM3NeT geometry.

In order to better understand the effectiveness of the correction in the reconstructed energy, the difference between the reconstructed energy and the MC muon energy as a function of the MC muon energy is presented before and after the two different corrections in figures 5.14, 5.15 and 5.16.

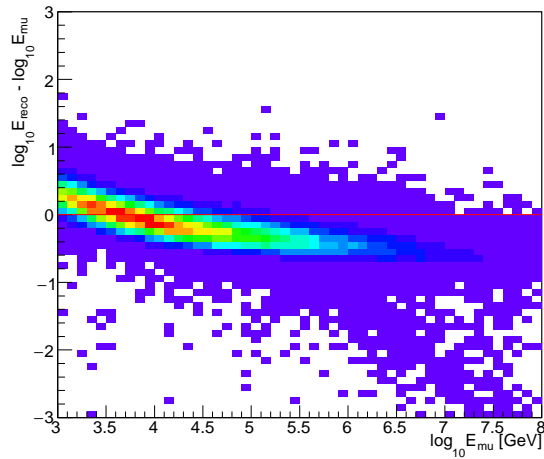


Figure 5.14: The difference between the reconstructed energy and the MC muon energy as a function of the MC muon energy for the standard KM3NeT geometry.

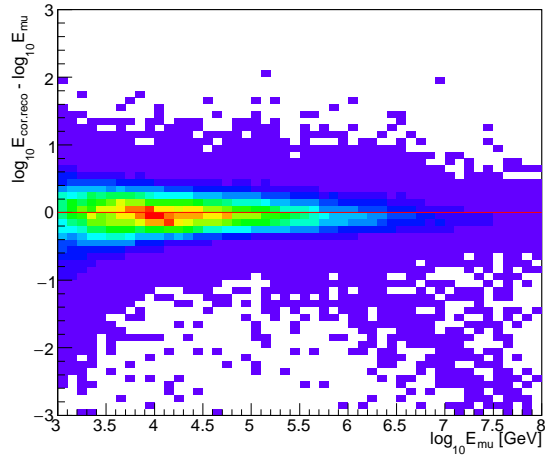


Figure 5.15: The difference between the corrected reconstructed energy and the MC muon energy as a function of the MC muon energy for the standard KM3NeT geometry.

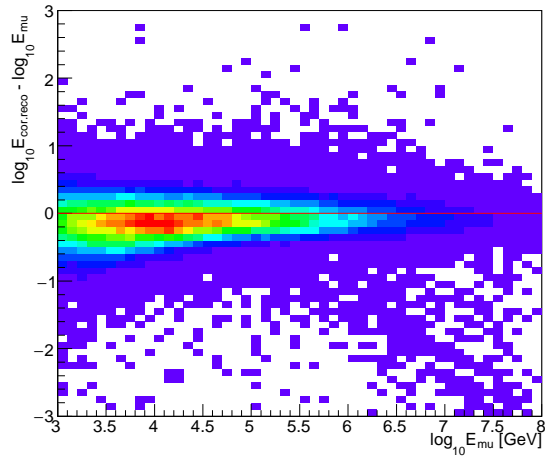


Figure 5.16: The difference between the reconstructed energy after the can correction and the MC muon energy as a function of the MC muon energy for the standard KM3NeT geometry.

Figures 5.17 and 5.18 show the energy resolution obtained after applying the corrections in the reconstructed energy for the standard KM3NeT-ARCA geometry. In the left plots of figures 5.17 and 5.18, the energy resolution is shown for all reconstructed events with $E > 10\text{TeV}$ whereas in the right plots the energy resolution is shown for all reconstructed events with $E > 100\text{TeV}$. In figure 5.17, one can observe that the energy resolution is 18% for $E > 10\text{TeV}$ and 17% for $E > 100\text{TeV}$ and that there is a shift of 4.1% and of 4.7% respectively. For completion, in figure 5.18, one can observe that the energy resolution is 19% for $E > 10\text{TeV}$ with a shift of 8.9% and 18% for $E > 100\text{TeV}$ with a shift of 7.5%.

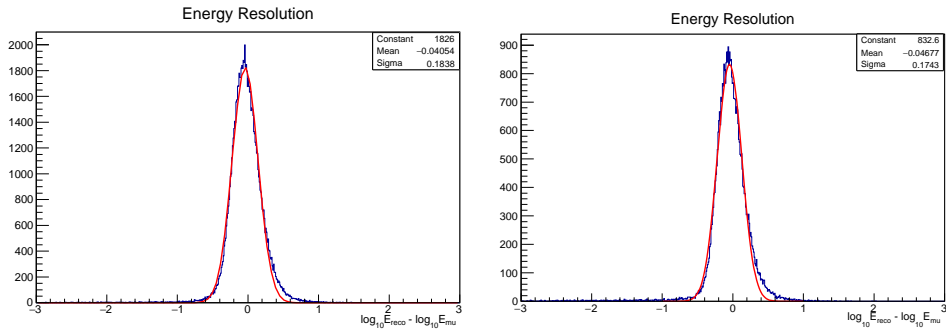


Figure 5.17: The energy resolution after the correction for all reconstructed events with $E > 10\text{TeV}$ (left) and with $E > 100\text{TeV}$ (right) for the standard KM3NeT-ARCA geometry. The y axis is in arbitrary units.

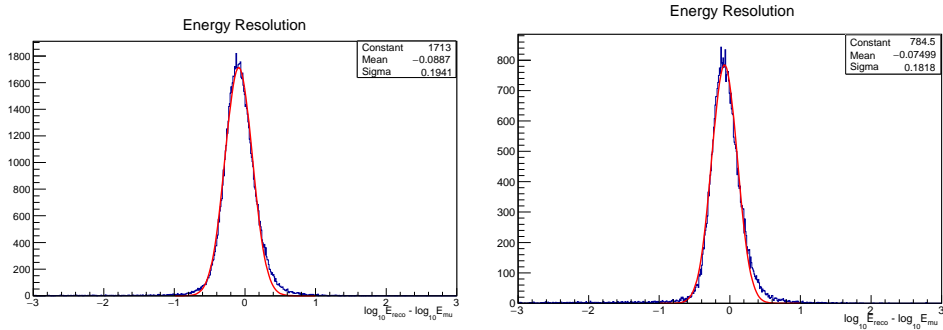


Figure 5.18: The energy resolution after the can correction for all reconstructed events with $E > 10\text{TeV}$ (left) and with $E > 100\text{TeV}$ (right) for the standard KM3NeT-ARCA geometry. The y axis is in arbitrary units.

Similar corrections should also be made for the alternative geometries of the KM3NeT-ARCA detector as can be seen in the left plots of the figures 5.22, 5.24 and 5.26, where the reconstructed energy as a function

of the MC muon energy is shown. For the purposes of this analysis, an energy correction was therefore made for each of the alternative geometries. It was decided that, the correction should be made to unweighted events, in order to avoid bias that might alter the results. Firstly, the means of the MC muon energy (with their error bars) were calculated and plotted as a function of the reconstructed energy. The reconstructed energy was divided in bins/intervals. For the events of each bin of the reconstructed energy, the mean of the MC muon energy and the 1σ dispersion was plotted. A fitting procedure was used and the correction function of the reconstructed energy was constructed to be applied to the reconstructed muon energy. The correction functions are shown in figures 5.19, 5.20 and 5.21, where the MC muon energy is presented as a function of the reconstructed energy. As a result, the effect of this correction can be seen on the right plots of figures 5.22, 5.24 and 5.26, where the corrected reconstructed energy is shown as a function of the MC muon energy for every alternative geometry discussed. For completeness, the difference between the reconstructed energy (before and after the correction) and the MC muon energy as a function of the MC muon energy is presented for each of the alternative geometries, in figures 5.23, 5.25 and 5.27. There is an artificial effect at low energies ($E < 800\text{GeV}$) and at really high energies ($E > 80\text{PeV}$) - as can be seen in figures 5.23, 5.25 and 5.27 - because of the constant value of the corrected energy that we applied at these energy regions.

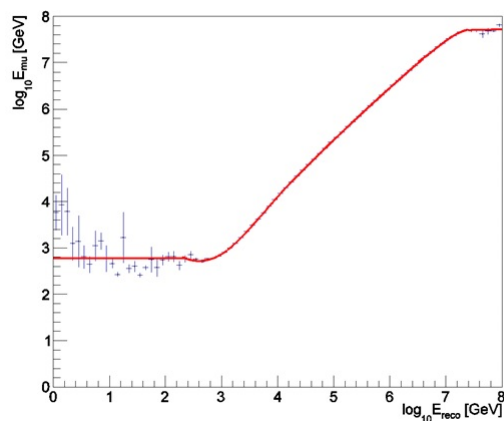


Figure 5.19: The correction function as applied for the 120m alternative geometry. The MC muon energy is shown as a function of the reconstructed energy.

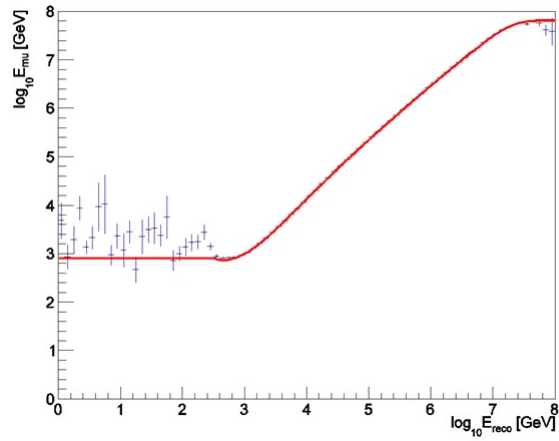


Figure 5.20: The correction function as applied for the 150m alternative geometry. The MC muon energy is shown as a function of the reconstructed energy.

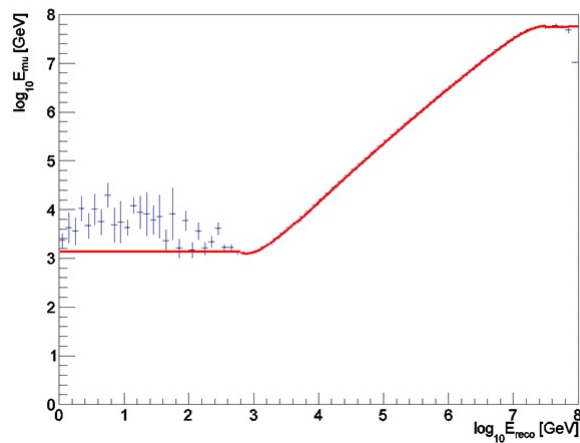


Figure 5.21: The correction function as applied for the 180m alternative geometry. The MC muon energy is shown as a function of the reconstructed energy.

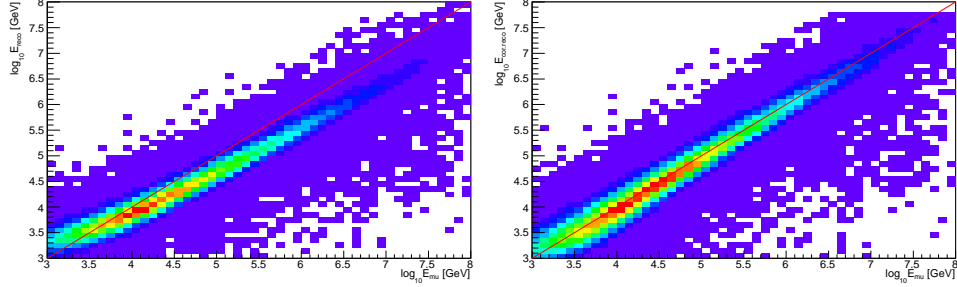


Figure 5.22: The reconstructed energy (left plot) and the corrected reconstructed energy (right plot) as a function of the true muon energy for the alternative KM3NeT geometry of 120 m distance between the strings.

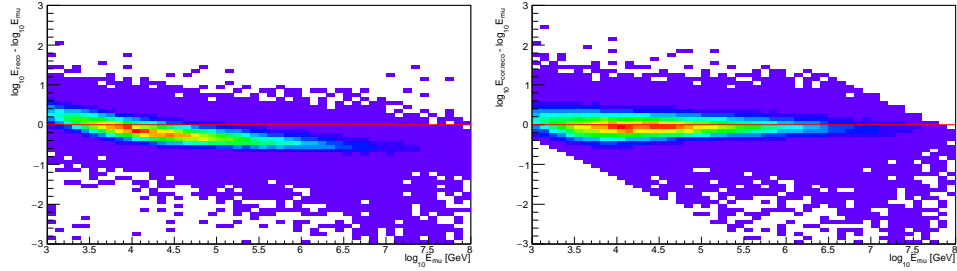


Figure 5.23: The difference of the reconstructed energy (left plot) and the corrected reconstructed energy (right plot) with the MC muon energy as a function of the MC muon energy for the alternative KM3NeT geometry of 120 m distance between the strings.

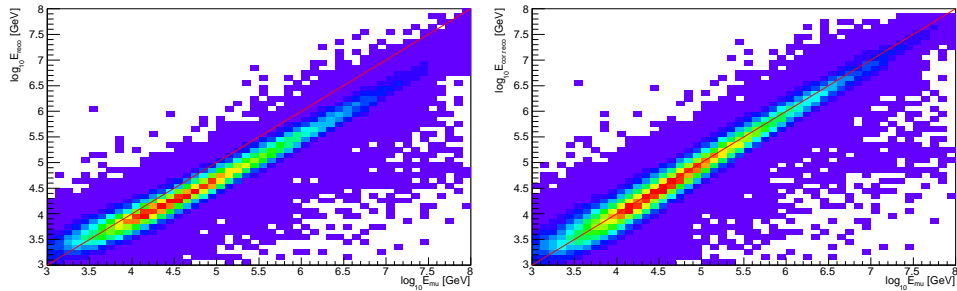


Figure 5.24: The reconstructed energy (left plot) and the corrected reconstructed energy (right plot) as a function of the true muon energy for the alternative KM3NeT geometry of 150 m distance between the strings.

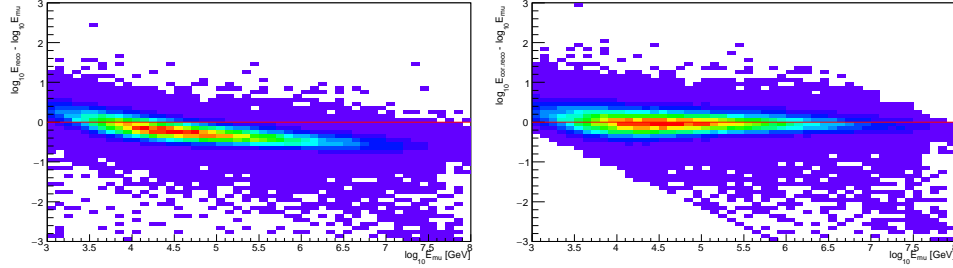


Figure 5.25: The difference of the reconstructed energy (left plot) and the corrected reconstructed energy (right plot) with the MC muon energy as a function of the MC muon energy for the alternative KM3NeT geometry of 150 m distance between the strings.

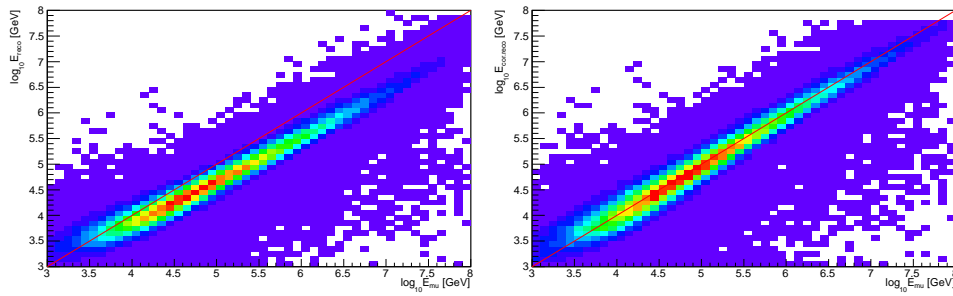


Figure 5.26: The reconstructed energy (left plot) and the corrected reconstructed energy (right plot) as a function of the true muon energy for the alternative KM3NeT geometry of 180 m distance between the strings.

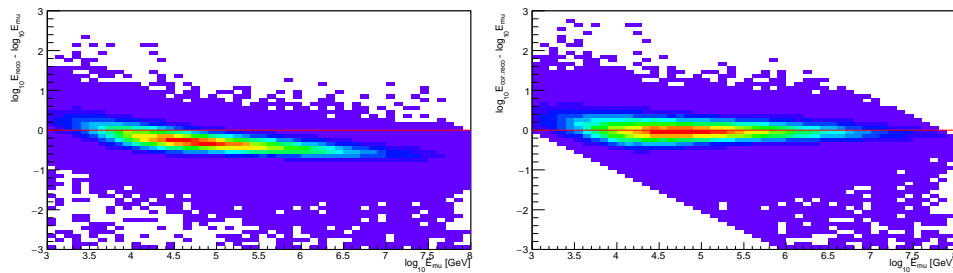


Figure 5.27: The difference of the reconstructed energy (left plot) and the corrected reconstructed energy (right plot) with the MC muon energy as a function of the MC muon energy for the alternative KM3NeT geometry of 180 m distance between the strings.

Figures 5.28, 5.29 and 5.30 show the energy resolution of the reconstructed energy after applying these corrections for the alternative KM3NeT-ARCA geometries with distance between the strings of 120 m, 150m and 180 m respectively.

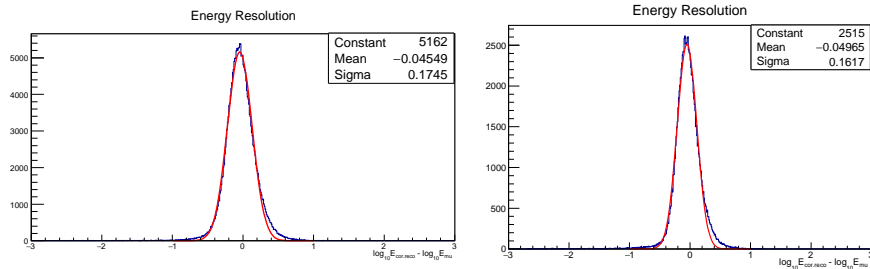


Figure 5.28: The energy resolution after the correction for all reconstructed events with $E > 10\text{TeV}$ (left) and with $E > 100\text{TeV}$ (right) for the alternative KM3NeT-ARCA geometry with 120 m distance between the strings. The y axis is in arbitrary units.

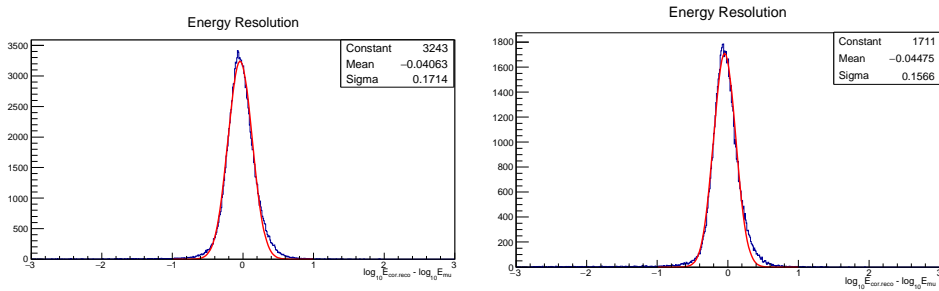


Figure 5.29: The energy resolution after the correction for all reconstructed events with $E > 10\text{TeV}$ (left) and with $E > 100\text{TeV}$ (right) for the alternative KM3NeT-ARCA geometry with 150 m distance between the strings. The y axis is in arbitrary units.

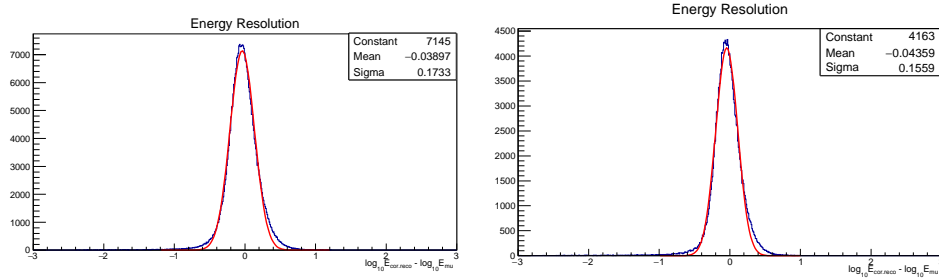


Figure 5.30: The energy resolution after the correction for all reconstructed events with $E > 10\text{TeV}$ (left) and with $E > 100\text{TeV}$ (right) for the alternative KM3NeT-ARCA geometry with 180 m distance between the strings.

After applying the correction in the reconstructed energy, an excellent energy resolution of 0.17 for $E > 10\text{TeV}$ and of 0.16 for $E > 100\text{TeV}$ is obtained for the alternative KM3NeT-ARCA geometries investigated here. There is a slight underestimation of the reconstructed energy of 4-5% for all the alternative geometries as it can also be observed from the figures of the reconstructed energy as a function of the true muon energy. Comparing with figures 5.17 and 5.18 for the standard KM3NeT-ARCA geometry, an energy resolution of 0.18 for $E > 10\text{TeV}$ and 0.17 for $E > 100\text{TeV}$ is observed for the first correction in reconstructed energy and the reconstructed energy is also underestimating the true energy by 4% and 5% respectively for the energies shown.

To conclude, in figures 5.31 and 5.32, the medians of the difference between the corrected reconstructed energy and the true muon energy are shown, as a function of the true muon energy and as a function of the zenith angle, respectively. The performance of the standard KM3NeT-ARCA geometry with the first correction is shown with black, with the can correction is shown with light blue and the alternative geometry with 120 m is shown with light green, with 150 m with red and with 180 m with blue. Comparing to figure 5.9, in figure 5.28, the improvement is easily noticeable, especially for the standard KM3NeT geometry where the median is close to zero for the range of 1 TeV to 10 PeV. Respectively, the alternative geometries follow the performance of the standard KM3NeT geometry for the range of $E > 6$ TeV.

Comparing figure 5.32 to figure 5.10, a significant improvement can be observed after applying the correction to the reconstructed energy. There is still a dependence of the energy median on the zenith angle. The median for the standard KM3NeT geometry with the correction on the can shows an almost linear decrease with increasing muon energy, indicating that better understanding of the energy correction applying this method is needed. The first energy correction for the standard KM3NeT geometry, shows a better performance as the logarithm of the muon energy is underestimated between 5% to 10% as can be seen in figure 5.23. Also for the alternative geometries, a significant improvement is achieved when applying the correction for the reconstructed energy as their medians range from 0.05 to -0.06.

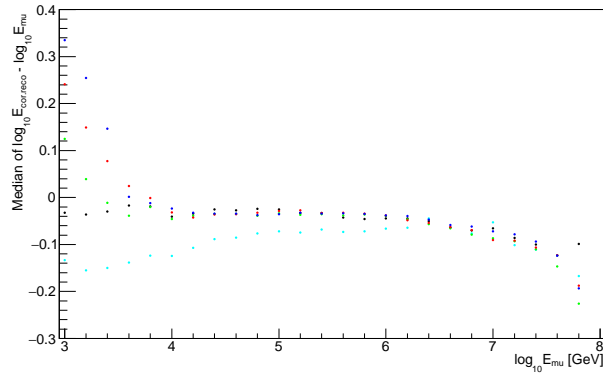


Figure 5.31: The median of the difference between the corrected reconstructed energy and the simulated energy of the muon as a function of the true muon energy for the 90 m (black and light blue), 120 m (green), 150 m (red) and 180 m (blue) geometries. The plot is shown zoomed in order to facilitate the comparison.

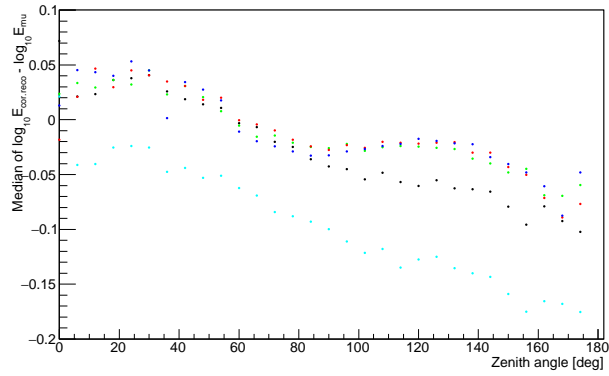


Figure 5.32: The median of the difference between the corrected reconstructed energy and the simulated energy of the muon as a function of the muon zenith angle for the 90 m (black and light blue), 120 m (green), 150 m (red) and 180 m (blue) geometries.

Κεφάλαιο 6

Sensitivity and Discovery Potential

The aim of the KM3NeT project is to search for high energy neutrinos of astrophysical origin. The detector's sensitivity to a neutrino signal and the potential for a discovery of extraterrestrial neutrinos are investigated using Monte Carlo simulations and the corresponding results are presented in this chapter for the standard KM3NeT-ARCA detector and the alternative KM3NeT-ARCA configurations, that were studied in this thesis.

The "binned" and the "unbinned" approaches are the main statistical methods used to search for a neutrino signal among background events and to calculate the sensitivity and the discovery potential of a detector. These approaches use the probability density functions (pdf) of the signal and background events in different ways [23]. The "binned" approach separates the energy distribution of the signal and background events in several bins and searches for an excess of signal over background events in each bin. In this way, all the events are either classified as events that pass the selection and are counted or as events that fail to pass the selection and are neglected. This results in a possible loss of signal events and consequently the loss of information that is contained in the event distribution and could indicate a relative agreement of the event with the signal or background hypothesis. Moreover, the selection that optimizes the sensitivity can generally be different than the selection that optimizes the discovery potential thus leading to a necessary sacrifice of one for the other. In order to overcome these problems, the "unbinned" approach for the calculation of the sensitivity and discovery potential can be used [22]. This approach takes full advantage of the shape of the pdf for signal and background, while it determines the relative contribution of the signal and background hypothesis to each event. Although this approach is more precise, it requires a significantly higher computing time. The "binned" method is used for the

calculation of the sensitivity and the discovery potential for the standard and alternative KM3NeT-ARCA detectors discussed previously.

6.1 Sensitivity

The sensitivity of the detector to a neutrino signal refers to the theoretical neutrino flux that can be excluded at a certain confidence level (e.g. 90%) if no neutrino signal is detected. A method for the unbiased sensitivity optimization for an analysis has been proposed by Feldman and Cousins [21]. This method was historically developed for experiments searching for neutrino oscillations and avoids non-physical confidence intervals in contrast to the classical constructions for upper limits [23].

The sensitivity of an experiment is determined by Monte-Carlo simulations and is independent from the experimental data of a neutrino telescope. The theoretical source flux, $\Phi(E, \vartheta)$, is convoluted with the detector's response and after the analysis cuts yields a number of events n_s , expected for the flux. The expected background for the same analysis and cuts is n_b . The experiment is performed and n_{obs} events are seen. In the experiment, the 90% confidence interval is :

$$\mu_{90}(n_{obs}, n_b) \tag{6.1}$$

The corresponding upper limit on the source spectrum $\Phi(E, \vartheta)$ (sensitivity flux) is found by scaling the source flux by the ratio of the upper limit to the signal expectation [2].

$$\Phi(E, \theta)_{90\%} = \Phi(E, \theta) \frac{\mu_{90}(n_{obs}, n_b)}{n_s} \tag{6.2}$$

In this study, the sensitivity flux, $\Phi_{90\%}$, is computed at 90% confidence level but it is possible to calculate it at other levels of confidence by computing the average maximum limits at these confidence levels. The ratio $\mu_{90}(n_{obs}, n_b)/n_s$ is called the Model Rejection Factor (MRF) and the optimal selection of cuts corresponds to the one that minimizes the MRF and sets the strongest constraint on the theoretically expected signal flux.

6.2 Discovery Potential

The discovery potential refers to the minimum number of events needed to be observed with a very small p-value. The p-value is used to provide the smallest level of significance at which the background only hypothesis would be rejected. The smaller the p-value, the stronger the evidence is in favor of the signal hypothesis resulting in a very small probability that these events originate purely from background fluctuations. Given that the background follows a Gaussian distribution, we consider a discovery if the minimum number of observed events, n_{obs} , corresponds to a p-value:

$$P(\geq n_{obs} | \langle n_b \rangle) < \alpha \quad (6.3)$$

where $\alpha = 5.73 \cdot 10^{-7}$ is the area in the two-sided Gaussian tails beyond 5σ and $\langle n_b \rangle$ is the expected number of background events. When a signal flux Φ is also taken into account, the probability to observe n_{obs} events and claim a discovery considering both the signal and background distributions is :

$$P(\geq n_{obs} | \langle n_s \rangle + \langle n_b \rangle) < \alpha \quad (6.4)$$

This probability represents the statistical power $1-\beta$ of the discovery potential calculation, while β is the false negative rate that refers to the failure to discover something that is present. As the statistical power increases the chances of a false negative rate are decreasing. Then, the minimum number of detected events $n_{\chi\sigma}^{X\%CL}$ that leads to p-value less than $\alpha(\chi\sigma)$ in a fraction of $1-\beta$ of the experiments can be determined. The $n_{\chi\sigma}^{X\%CL}$ depends only on the expected number of background events $\langle n_b \rangle$. The minimum number of detected events with a significance of 5σ at a confidence level of 50% $n_{5\sigma}^{50\%CL}$ will be calculated in this study.

Given the theoretical signal flux $\Phi_{5\sigma}^{theoretical}$ which results to a mean number of signal events $\langle n_s \rangle$, the signal flux $\Phi_{5\sigma}$ is calculated with a 5σ significance at a confidence level of 50% as :

$$\Phi_{5\sigma} = \Phi_{5\sigma}^{theoretical} \frac{n_{5\sigma}^{50\%CL}(\langle n_b \rangle)}{n_s} \quad (6.5)$$

where the ratio $n_{5\sigma}^{50\%CL}(\langle n_b \rangle)/n_s$ is called the Model Discovery Potential (MDP). The selection of cuts that minimize the MDP, minimizes the signal flux $\Phi_{5\sigma}$ that is required to obtain an observation without any original assumption of the signal scale.

6.3 Sensitivity and discovery potential for the standard KM3NeT-ARCA detector and the alternative geometries

In this section, the sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the standard and the alternative KM3NeT-ARCA detectors with 2 blocks are calculated. The astrophysical neutrino flux $\Phi(E_\nu)$ used in the Letter of Intent (LoI [19]) of the KM3NeT Collaboration follows from the assumption that the IceCube signal originates from an isotropic, flavor-symmetric neutrino flux following a power law spectrum with a cut-off at a few PeV. The cutoff -or a steeper spectrum- is implied by the first observations of events with a deposited energy exceeding 1 PeV and the absence of events at about 6.3 PeV associated with the Glashow resonance. The single flavor energy spectrum with the cutoff at 3 PeV has been parametrized as :

$$\Phi(E_\nu) = 1.2 \cdot 10^{-8} \cdot \left(\frac{E_\nu}{1\text{GeV}}\right)^{-2} \cdot \exp\left(\frac{-E_\nu}{3\text{PeV}}\right) [\text{GeV}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{s}^{-1} \text{cm}^{-2}] \quad (6.6)$$

where E_ν is the neutrino energy in GeV. The IceCube collaboration has reported solid evidence for an extraterrestrial flux of high energy neutrinos, performing a search for neutrino events with deposited energies greater than 30 TeV and interaction vertex inside the instrumented volume [11]. Assuming this neutrino flux to be isotropic and to consist of equal flavors at Earth, the single flavor spectrum with neutrino energies between 2.8 TeV and 25 PeV is well described by an unbroken power law with best-fit spectral index -2.50 ± 0.09 and a flux at 100 TeV parametrized as :

$$\Phi(E_\nu) = 2.2 \cdot 10^{-18} \cdot \left(\frac{E_\nu}{100\text{TeV}}\right)^{-2.5} [\text{GeV}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{s}^{-1} \text{cm}^{-2}] \quad (6.7)$$

where E_ν is the neutrino energy in GeV. The calculations of the sensitivity and discovery potential for each of the geometries discussed were repeated also for this flux.

Concerning the background, only atmospheric muon neutrinos (and anti-neutrinos) were assumed as the detector's background since they correspond to the irreducible background that mainly affects the calculations for the sensitivity and discovery potential, while the atmospheric muons were not considered as their contribution in the final event sample can be neglected in a first approximation. The flux of atmospheric neutrinos corresponds to the Honda flux with a prompt component as calculated by Enberg. The prompt component is assumed to be isotropic in the full solid angle while the Honda parameterization includes an anisotropy due to the magnetic field of the Earth.

Although this study does not take into account the background events coming from atmospheric muons in the calculation of the sensitivity

and the discovery potential, the conditions that reject atmospheric muons have been considered in order to get a realistic estimate of these quantities. To reject atmospheric muons, the Earth can be used as a shield that absorbs muons that come below the horizon while neutrinos can cross the Earth unaffected. The sensitivity and discovery potential have thus been calculated both for tracks with reconstructed zenith angle all over 2π and separately for upgoing and horizontal tracks with reconstructed angle, ϑ_{reco} less than 100° (corresponding to reconstructed zenith angle greater than 80°) in order to suppress the contribution of atmospheric muons. Nevertheless, atmospheric muons that have been mis-reconstructed may survive this selection. The events have been reconstructed with the JGandalf reconstruction algorithms and have survived the quality cuts, that were applied also for the analysis of the previous chapter, in order to consider events for which the track direction has been reliably reconstructed. In this way, we avoid taking into account poorly reconstructed events and specifically atmospheric muons that are reconstructed as upgoing (with reconstructed zenith angle greater than 80°).

6.4 Comparison between the different geometries of the KM3NeT-ARCA detector

To facilitate the comparison between the different geometries of the KM3NeT-ARCA detector, we present the reconstructed muon energy (after the correction) at which the Model Rejection Factor (MRF) and the Model Discovery Potential (MDP) are minimized, as well as the points of minimization in tables 6.1 and 6.3 for the astrophysical neutrino flux used in the LoI and for the astrophysical neutrino flux used by the IceCube respectively. The sensitivity and the discovery potential are reported in tables 6.2 and 6.4 for the two fluxes studied respectively.

ϑ_{reco}	MRF	MDP	ν_{sig}	ν_{atm}
90 m				
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.778 at $E_{reco}=10^{5.1}\text{GeV}$	2.314 at $E_{reco}=10^{5.1}\text{GeV}$	9.49	12.70
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.838 at $E_{reco.can}=10^{5.1}\text{GeV}$	2.506 at $E_{reco.can}=10^{5.1}\text{GeV}$	8.80	12.63
120 m				
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.642 at $E_{reco}=10^{5.1}\text{GeV}$	1.897 at $E_{reco}=10^{5.1}\text{GeV}$	9.49	12.70
150 m				
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.585 at $E_{reco}=10^{5.2}\text{GeV}$	1.758 at $E_{reco}=10^{5.2}\text{GeV}$	14.01	16.05
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.586 at $E_{reco}=10^{5.1}\text{GeV}$	1.739 at $E_{reco}=10^{5.1}\text{GeV}$	17.15	25.85
180 m				
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.553 at $E_{reco}=10^{5.3}\text{GeV}$	1.630 at $E_{reco}=10^{5.3}\text{GeV}$	13.93	13.96

Table 6.1: The reconstructed muon energy at which the Model Rejection Factor (MRF) and the Model Discovery Potential (MDP) are minimized and the points of minimization using the astrophysical neutrino flux used for the LoI, for the different KM3NeT-ARCA detectors studied, are reported. The number of signal and background events at these points are calculated.

ϑ_{reco}	$\Phi_{90}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$	$\Phi_{5\sigma}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$
90 m		
$[0^\circ - 100^\circ]$	$0.934 \cdot 10^{-8}$	$2.777 \cdot 10^{-8}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	$1.006 \cdot 10^{-8}$	$3.007 \cdot 10^{-8}$
120 m		
$[0^\circ - 100^\circ]$	$0.770 \cdot 10^{-8}$	$2.276 \cdot 10^{-8}$
150 m		
$[0^\circ - 100^\circ]$	$0.702 \cdot 10^{-8}$	$2.110 \cdot 10^{-8}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	$0.703 \cdot 10^{-8}$	$2.087 \cdot 10^{-8}$
180 m		
$[0^\circ - 100^\circ]$	$0.664 \cdot 10^{-8}$	$1.956 \cdot 10^{-8}$

Table 6.2: The sensitivity and the discovery potential for 1 year of operation of the different KM3NeT-ARCA detectors studied with 2 blocks using the astrophysical neutrino flux used for the LoI.

ϑ_{reco}	MRF	MDP	ν_{sig}	ν_{atm}
90 m				
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.587 at $E_{reco}=10^{4.6}\text{GeV}$	1.708 at $E_{reco}=10^{4.6}\text{GeV}$	35.93	131.31
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.604 at $E_{reco.can}=10^{4.1}\text{GeV}$	1.762 at $E_{reco.can}=10^{4.1}\text{GeV}$	81.13	760.70
120 m				
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.487 at $E_{reco}=10^{4.6}\text{GeV}$ 0.490 at $E_{reco}=10^{4.4}\text{GeV}$	1.434 at $E_{reco}=10^{4.6}\text{GeV}$ 1.426 at $E_{reco}=10^{4.4}\text{GeV}$	49.11	172.23
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.457 at $E_{reco}=10^{4.7}\text{GeV}$	1.332 at $E_{reco}=10^{4.7}\text{GeV}$	51.43	166.15
150 m				
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.428 at $E_{reco}=10^{4.8}\text{GeV}$ 0.431 at $E_{reco}=10^{4.7}\text{GeV}$	1.262 at $E_{reco}=10^{4.6}\text{GeV}$ 1.259 at $E_{reco}=10^{4.7}\text{GeV}$	50.29	137.20
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.431 at $E_{reco}=10^{4.7}\text{GeV}$	1.259 at $E_{reco}=10^{4.7}\text{GeV}$	62.41	220.10

Table 6.3: The reconstructed muon energy at which the Model Rejection Factor (MRF) and the Model Discovery Potential (MDP) are minimized and the points of minimization using the IceCube astrophysical neutrino flux, for the different KM3NeT-ARCA detectors studied, are reported. The number of signal and background events at these points are calculated.

ϑ_{reco}	$ \Phi_{90}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}] $	$ \Phi_{5\sigma}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}] $
90 m		
$[0^\circ - 100^\circ]$	$1.291 \cdot 10^{-18}$	$2.220 \cdot 10^{-18}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	$1.329 \cdot 10^{-18}$	$3.876 \cdot 10^{-18}$
120 m		
$[0^\circ - 100^\circ]$	$1.071 \cdot 10^{-18}$ $1.078 \cdot 10^{-18}$	$3.155 \cdot 10^{-18}$ $3.137 \cdot 10^{-18}$
150 m		
$[0^\circ - 100^\circ]$	$1.005 \cdot 10^{-18}$	$2.930 \cdot 10^{-18}$
180 m		
$[0^\circ - 100^\circ]$	$0.942 \cdot 10^{-18}$ $0.948 \cdot 10^{-18}$	$2.776 \cdot 10^{-18}$ $2.770 \cdot 10^{-18}$

Table 6.4: The sensitivity and the discovery potential for 1 year of operation of the different KM3NeT-ARCA detectors studied with 2 blocks using the IceCube astrophysical neutrino flux.

There are some general observations made, during the sensitivity and discovery potential analysis. Firstly, it is shown that for the same energy cut using the reconstructed muon energy, a small increase is observed to the number of signal events compared to using the MC muon energy (with a fluctuation of a maximum 10%). However there is a significant increase of background events (atmospheric neutrino events) using the reconstructed muon energy instead of the MC muon energy which can rise to 50%. It is also shown that as the detector configuration increases in size, the MRF and MDP are decreasing, leading to better sensitivity and discovery potential estimations for the larger geometries. It is expected that the required sensitivity for both fluxes investigated in the analysis will be reached well before the first year of operation. For the results using the LoI flux, with the reconstruction used for the analysis of this thesis, we can see that for the standard KM3NeT-ARCA detector of 2 building blocks a discovery of 5σ with 50% probability can be achieved in about 4.3 years. Using the largest configuration for the same flux, a discovery can be achieved in almost 2.5 years as can be seen from the figure 6.1. Concerning the discovery potential using the IceCube flux, it can be seen that using the 180 m alternative KM3NeT-ARCA detector a discovery of 5σ with 50% probability can be achieved in 37% less time than using the standard KM3NeT-ARCA detector. Specifically, with the 180 m alternative KM3NeT-ARCA detector a discovery can be achieved in 1.7 years while with the standard KM3NeT-ARCA detector it can be achieved in 2.7 years.

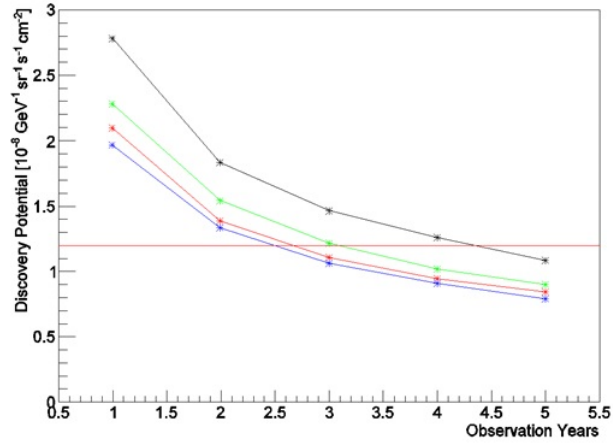


Figure 6.1: The discovery potential as a function of the observation years using the LoI flux. The estimation of the discovery potential is represented with black for the standard KM3NeT geometry, with green for the 120 m alternative geometry, with red for the 150 m alternative geometry and with blue for the 180 m alternative geometry.

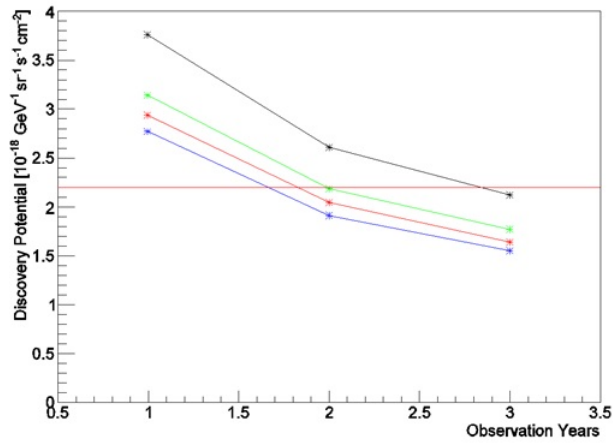


Figure 6.2: The discovery potential as a function of the observation years using the IceCube flux. The estimation of the discovery potential is represented with black for the standard KM3NeT geometry, with green for the 120 m alternative geometry, with red for the 150 m alternative geometry and with blue for the 180 m alternative geometry.

Κεφάλαιο 7

Validation of the reconstruction performance and verification of the results (using the latest JPP package)

During this analysis, a new JPP package version was released. The need for a new version came after locating some inconsistencies (to the previous versions) concerning the angular and/or the energy resolution. An example is shown in figure 7.1 for the energy resolution (left plot obtained using the JPP version 6.1.5592) where there is a "gap" of events with $E > 1$ PeV and the angular resolution (right plot using the JPP version 8.0.7290) which is worse than the official one ($\Delta\Omega \leq 1^\circ$ at 500 TeV). To avoid potential influence of these inconsistencies on our analysis, it was decided to use the latest, most stable version at the time of the analysis (JPP version 4.0.4190) as shown in figure 7.2. We have therefore used this stable version for which these problems did not occur to perform the comparisons of the different detector configurations. Since these problems have been identified and corrected leading to a new JPP release, it is important to validate the reconstruction performance for this new release and to verify that the results presented in the previous chapters are consistent with an analysis performed using the latest Jpp version. In this chapter, the newest version (at the time of writing) 8.2.7878 of the JPP package is compared to the previous stable version 4.0.4190 for the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector which was decided to be the most efficient one for the purposes of this analysis.

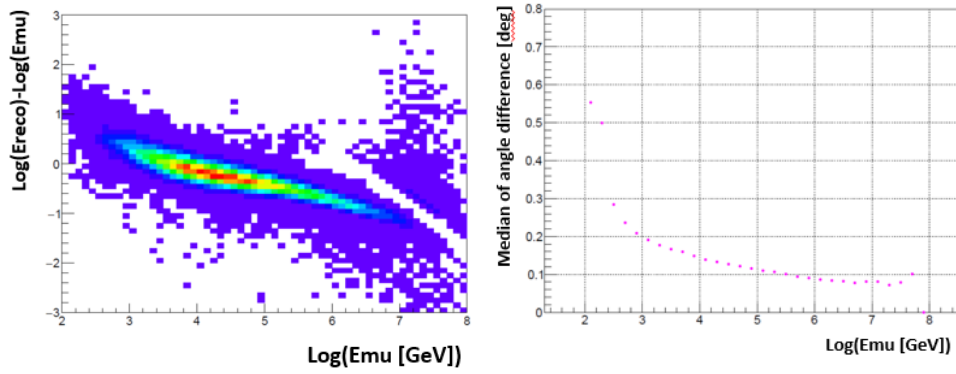


Figure 7.1: The difference of the reconstructed energy with the MC muon energy as a function of the MC muon energy (left plot) and the angular resolution as a function of the MC muon energy (right plot) are shown for the JPP package versions 6.1.5592 and 8.0.7290 respectively.

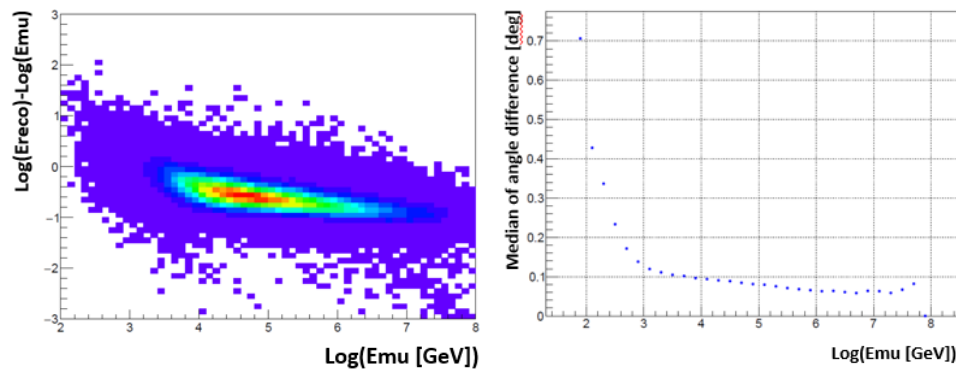


Figure 7.2: The difference of the reconstructed energy with the MC muon energy as a function of the MC muon energy (left plot) and the angular resolution as a function of the MC muon energy (right plot) are shown for JPP package version 4.0.4190.

Firstly the performance of the track reconstruction was checked following the steps described in chapter 5. The effective area is shown in figure 7.3 as a function of the MC muon energy for the 150 m alternative geometry using the old stable version (4.0.4190) and the newest stable version (8.2.7878 at the time of writing). The performance of the old version is shown with the red line and the performance of the new version is shown with the purple line. One can observe that for $E < 20$ TeV there is an underestimation of the effective area by 8% to 30% at low energies ($E < 800$ GeV) with the newest version comparing to the old one. The newest version provides us with more realistic results due to new information on the triggering and the PMT response (from the data obtained from the first deployed strings) that are applied to the MC calculations. The difference of the reconstructed and the MC muon track direction ($\Delta\Omega$) is shown in figure 7.4 for both JPP versions used. The color code remains the same. There is also a disagreement between the performance of the JPP versions coming from the more realistic results obtained with the new JPP version.

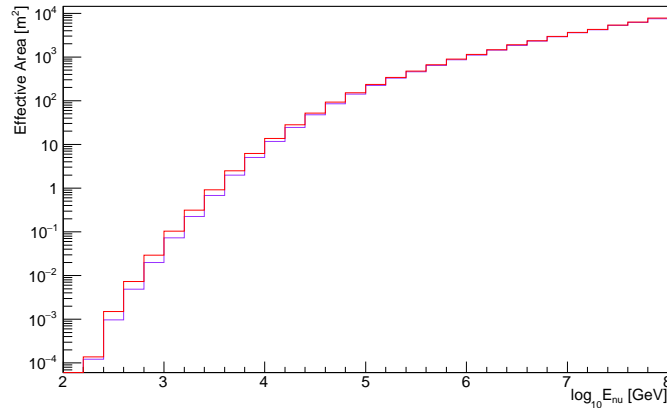


Figure 7.3: The effective area in m^2 versus $\log_{10} E_\nu$ GeV for the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector configuration using the JPP version 8.2.7878 (purple) and 4.0.4190 (red).

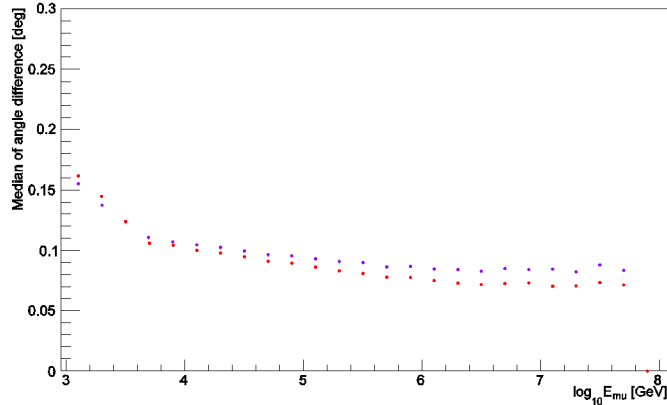


Figure 7.4: The median of difference of the reconstructed and the MC track direction ($\Delta\Omega$) as a function of the MC muon energy for the 150m alternative KM3NeT-ARCA geometry using the JPP package version 4.0.4190 (red) and 8.2.7878 (purple).

The reconstructed energy is shown as a function of the MC muon energy in the left plot of figure 7.7. As already discussed in chapter 5, a correction needs to be made and applied to the reconstructed energy. The means of the MC muon energy are calculated and plotted as a function of the reconstructed energy for unweighted events in order to avoid bias. The reconstructed energy is divided in intervals and for the events of each interval of the reconstructed energy the mean MC muon energy and the 1σ dispersion is plotted. A fitting procedure is used and a correction function is constructed and applied to the reconstructed energy. Comparing to the fitting method used for the correction functions of chapter 5, this time we did not apply a constant value of the corrected energy at low energies ($E < 800$ GeV) and at really high energies ($E > 80$ PeV) in order to avoid the artificial effect that it produced. We also investigated the regions of low energies ($E < 800$ GeV) and very high energies ($E > 80$ PeV) and we concluded that the underestimation of the energy originates from events which are badly reconstructed, as can be seen from figure 7.5. Therefore we decided to produce a correction function for the energy region between 600 GeV and 20 PeV and to not apply any correction at low and really high energies as it can be seen in figure 7.6.

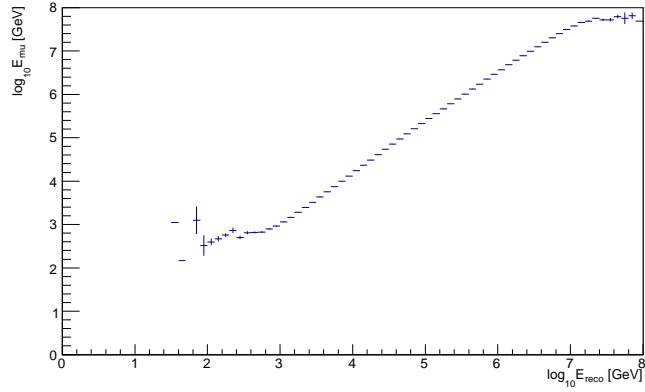


Figure 7.5: The MC muon energy is shown as a function of the reconstructed energy for well reconstructed events ($\Delta\Omega < 1^\circ$).

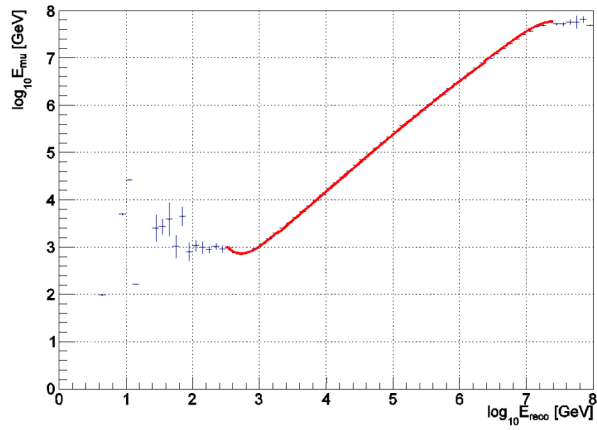


Figure 7.6: The correction function as applied for the 150m alternative geometry using the JPP version 8.2.7878. The MC muon energy is shown as a function of the reconstructed energy.

To compare the performance before and after applying the correction function, the reconstructed energy before (left plot) and after applying the correction function (right plot) as a function of the MC muon energy is shown in figure 7.7. For completeness, the difference of the reconstructed and the MC muon energy is shown in figure 7.8 before (left plot) and after applying the correction (right plot) to the reconstructed energy.

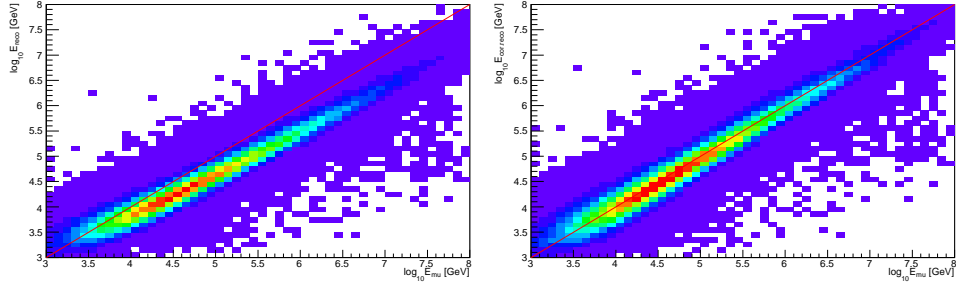


Figure 7.7: The reconstructed energy (left plot) and the corrected reconstructed energy (right plot) as a function of the MC muon energy for the 150m alternative KM3NeT-ARCA geometry using the JPP package version 8.2.7878.

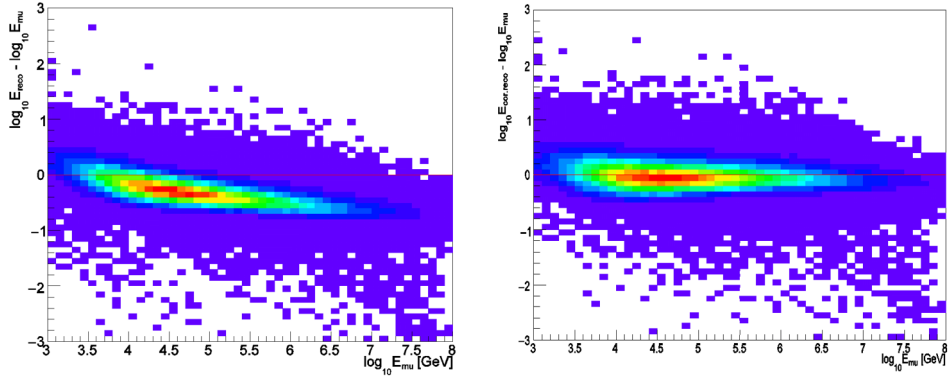


Figure 7.8: The difference of the reconstructed energy (left plot) and the corrected reconstructed energy (right plot) with the MC muon energy as a function of the MC muon energy for the 150m alternative KM3NeT-ARCA geometry using the JPP package version 8.2.7878.

Figure 7.9 shows the energy resolution of the reconstructed energy after applying the correction function. An energy resolution of 17% is obtained for reconstructed events with $E > 10\text{TeV}$ and an energy resolution of 16% is obtained for reconstructed events with $E > 100\text{ TeV}$. To conclude, in figure 7.10, the median of the difference between the corrected reconstructed energy and the MC muon energy as a function of the MC muon energy is shown when using the old JPP version (4.0.4190) and the new one (8.2.7878). The color code remains the same as before.

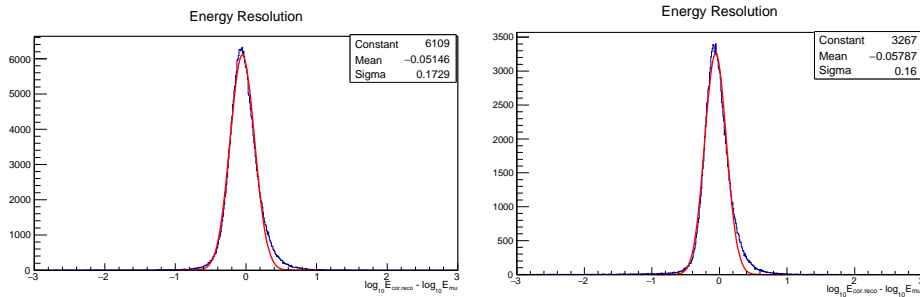


Figure 7.9: The energy resolution after applying the correction function for all reconstructed events with $E > 10\text{ TeV}$ (left) and with $E > 100\text{ TeV}$ (right) for the 150m alternative KM3NeT-ARCA geometry using the JPP package version 8.2.7878.

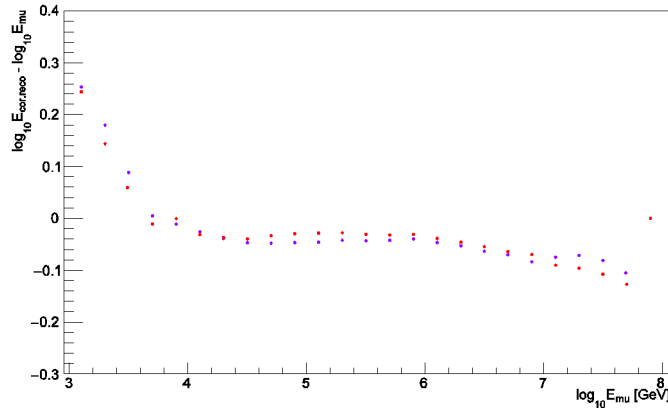


Figure 7.10: The median of difference of the corrected reconstructed energy and the MC muon energy as a function of the MC muon energy for the 150m alternative KM3NeT-ARCA geometry using the JPP package version 4.0.4190 (red) and 8.2.7878 (purple).

To complete the comparison between the JPP versions 4.04190 and 8.2.7878, we show the sensitivity and the discovery potential obtained for both fluxes used in chapter 6 using the alternative KM3NeT-ARCA geometry with 150 m distance between the strings. Details on the extraction of the sensitivity and the discovery potential have been given in chapter 6.

Prior to the estimation of the sensitivity and the discovery potential, the values of the MC muon energy that minimize the MRF and the MDP as well as the points of minimization, are calculated. The results for events that have been reconstructed for the alternative KM3NeT-ARCA detector with 150 m distance between the strings, with the astrophysical neutrino flux used for the LoI (equation 6.6), are reported in table 7.1 for the MC muon energy. In table 7.2 for the same events, the sensitivity at 90% CL and discovery potential with a significance of 5σ at 50% CL are calculated following the equations 6.2 and 6.5 respectively. To facilitate the comparison, the results for the events that have been reconstructed with the 4.0.4190 using the same detector configuration, are also demonstrated in tables 7.1 and 7.2.

ϑ_{reco}	MRF	MDP	ν_{sig}	ν_{atm}
JPP v4.0.4190				
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.250 at $E_\mu=10^{5.2}\text{GeV}$	0.743 at $E_\mu=10^{5.2}\text{GeV}$	31.23	14.48
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.455 at $E_\mu=10^{5.1}\text{GeV}$ 0.457 at $E_\mu=10^{5.2}\text{GeV}$	1.370 at $E_\mu=10^{5.1}\text{GeV}$ 1.327 at $E_\mu=10^{5.2}\text{GeV}$	17.32	14.82
JPP v8.2.7878				
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.253 at $E_\mu=10^{5.2}\text{GeV}$	0.766 at $E_\mu=10^{5.2}\text{GeV}$	30.61	14.23
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.461 at $E_\mu=10^{5.1}\text{GeV}$ 0.463 at $E_\mu=10^{5.2}\text{GeV}$	1.360 at $E_\mu=10^{5.1}\text{GeV}$ 1.359 at $E_\mu=10^{5.2}\text{GeV}$	16.99	14.56

Table 7.1: The MC muon energy that minimizes the MRF and the MDP and the points of minimization using the astrophysical neutrino flux used for the LoI, for the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector, are reported for JPP versions 4.0.4190 and 8.2.7878.

ϑ_{reco}	$\Phi_{90}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$	$\Phi_{5\sigma}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$
JPP v4.0.4190		
$[0^\circ - 180^\circ]$	$0.300 \cdot 10^{-8}$	$0.892 \cdot 10^{-8}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	$0.546 \cdot 10^{-8}$ $0.548 \cdot 10^{-8}$	$1.644 \cdot 10^{-8}$ $1.592 \cdot 10^{-8}$
JPP v8.2.7878		
$[0^\circ - 180^\circ]$	$0.304 \cdot 10^{-8}$	$0.919 \cdot 10^{-8}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	$0.553 \cdot 10^{-8}$ $0.556 \cdot 10^{-8}$	$1.632 \cdot 10^{-8}$ $1.631 \cdot 10^{-8}$

Table 7.2: The sensitivity and the discovery potential for 1 year of operation of the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector using the astrophysical neutrino flux used for the LoI, for JPP versions 4.0.4190 and 8.2.7878.

As in the previous chapter, both the MRF and the MDP are minimized at lower values when events that reach the detector from all the zenith angles are considered. The calculations are repeated for the corrected reconstruction energy values that minimize the MRF and MDP. The resulting MRF, MDP, the points of minimization and the number of signal and background events are reported in table 7.3 for the reconstructed muon energy. In table 7.4, for the same events, the sensitivity and discovery potential are shown.

ϑ_{reco}	MRF	MDP	ν_{sig}	ν_{atm}
JPP v4.0.4190				
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.305 at $E_\mu=10^{5.3}GeV$ 0.310 at $E_\mu=10^{5.2}GeV$	0.922 at $E_\mu=10^{5.3}GeV$ 0.919 at $E_\mu=10^{5.2}GeV$	26.79 32.10	15.97 25.17
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.585 at $E_\mu=10^{5.2}GeV$ 0.586 at $E_\mu=10^{5.1}GeV$	1.758 at $E_\mu=10^{5.2}GeV$ 1.739 at $E_\mu=10^{5.1}GeV$	14.01 17.15	16.05 25.85
JPP v8.2.7878				
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.298 at $E_\mu=10^{5.3}GeV$	0.882 at $E_\mu=10^{5.3}GeV$	26.23	14.53
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.571 at $E_\mu=10^{5.2}GeV$	1.688 at $E_\mu=10^{5.2}GeV$	13.70	14.54

Table 7.3: The reconstructed muon energy that minimizes the MRF and the MDP and the points of minimization using the astrophysical neutrino flux used for the LoI, for the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector, are reported for JPP versions 4.0.4190 and 8.2.7878.

ϑ_{reco}	$\Phi_{90}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$	$\Phi_{5\sigma}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$
JPP v4.0.4190		
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.366 $\cdot 10^{-8}$ 0.372 $\cdot 10^{-8}$	1.106 $\cdot 10^{-8}$ 1.103 $\cdot 10^{-8}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.702 $\cdot 10^{-8}$ 0.703 $\cdot 10^{-8}$	2.110 $\cdot 10^{-8}$ 2.087 $\cdot 10^{-8}$
JPP v8.2.7878		
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.358 $\cdot 10^{-8}$	1.058 $\cdot 10^{-8}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.685 $\cdot 10^{-8}$	2.026 $\cdot 10^{-8}$

Table 7.4: The sensitivity and the discovery potential for 1 year of operation of the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector using the astrophysical neutrino flux used for the LoI, for JPP versions 4.0.4190 and 8.2.7878.

To complete the analysis, the calculations are repeated for the MC muon energy and the corrected reconstruction energy values that minimize the MRF and MDP using the latest IceCube flux for extraterrestrial high-energy neutrinos with energies greater than 30 TeV (equation 6.8). The resulting MRF, MDP, points of minimization and the number of signal and background events are reported in tables 7.5 and 7.7 for the MC muon energy and the reconstructed muon energy respectively. In tables 7.6 and 7.8, for the same events, the sensitivity and discovery potential are shown.

ϑ_{reco}	MRF	MDP	ν_{sig}	ν_{atm}
JPP v4.0.4190				
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.221 at $E_\mu=10^5$ GeV	0.648 at $E_\mu=10^5$ GeV	52.77	36.48
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.370 at $E_\mu=10^{4.7}$ GeV 0.373 at $E_\mu=10^{4.6}$ GeV	1.097 at $E_\mu=10^{4.7}$ GeV 1.093 at $E_\mu=10^{4.6}$ GeV	49.50 61.20	97.39 155.79
JPP v8.2.7878				
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.224 at $E_\mu=10^5$ GeV	0.659 at $E_\mu=10^5$ GeV	51.57	35.68
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.374 at $E_\mu=10^{4.7}$ GeV	1.096 at $E_\mu=10^{4.7}$ GeV	48.15	93.88

Table 7.5: The MC muon energy that minimizes the MRF and the MDP and the points of minimization using the IceCube astrophysical neutrino flux, for the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector, are reported for JPP versions 4.0.4190 and 8.2.7878.

ϑ_{reco}	$\Phi_{90}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$	$\Phi_{5\sigma}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$
JPP v4.0.4190		
$[0^\circ - 180^\circ]$	$0.486 \cdot 10^{-18}$	$1.426 \cdot 10^{-18}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	$0.814 \cdot 10^{-18}$ $0.821 \cdot 10^{-18}$	$2.412 \cdot 10^{-18}$ $2.405 \cdot 10^{-18}$
JPP v8.2.7878		
$[0^\circ - 180^\circ]$	$0.493 \cdot 10^{-18}$	$1.450 \cdot 10^{-18}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	$0.823 \cdot 10^{-18}$	$2.411 \cdot 10^{-18}$

Table 7.6: The sensitivity and the discovery potential for 1 year of operation of the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector using the IceCube astrophysical neutrino flux, for JPP versions 4.0.4190 and 8.2.7878.

ϑ_{reco}	MRF	MDP	ν_{sig}	ν_{atm}
JPP v4.0.4190				
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.267 at $E_\mu=10^{5.1}\text{GeV}$ 0.267 at $E_\mu=10^5\text{GeV}$	0.791 at $E_\mu=10^{5.1}\text{GeV}$ 0.789 at $E_\mu=10^5\text{GeV}$	46.21 56.68	41.12 64.98
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.457 at $E_\mu=10^{4.7}\text{GeV}$	1.332 at $E_\mu=10^{4.7}\text{GeV}$	51.43	166.15
JPP v8.2.7878				
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.260 at $E_\mu=10^{5.1}\text{GeV}$	0.762 at $E_\mu=10^{5.1}\text{GeV}$	44.88	36.49
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.446 at $E_\mu=10^{4.8}\text{GeV}$	1.301 at $E_\mu=10^{4.8}\text{GeV}$	40.60	94.86

Table 7.7: The reconstructed muon energy that minimizes the MRF and the MDP and the points of minimization using the IceCube astrophysical neutrino flux, for the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector, are reported for JPP versions 4.0.4190 and 8.2.7878.

ϑ_{reco}	$\Phi_{90}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$	$\Phi_{5\sigma}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$
JPP v4.0.4190		
$[0^\circ - 180^\circ]$	$0.587 \cdot 10^{-18}$ $0.587 \cdot 10^{-18}$	$1.740 \cdot 10^{-18}$ $1.736 \cdot 10^{-18}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	$1.005 \cdot 10^{-18}$	$2.930 \cdot 10^{-18}$
JPP v8.2.7878		
$[0^\circ - 180^\circ]$	$0.572 \cdot 10^{-18}$	$1.676 \cdot 10^{-18}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	$0.981 \cdot 10^{-18}$	$2.862 \cdot 10^{-18}$

Table 7.8: The sensitivity and the discovery potential for 1 year of operation of the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector using the IceCube astrophysical neutrino flux, for JPP versions 4.0.4190 and 8.2.7878.

To conclude, one can observe a slight improvement (by 1-2%) of the sensitivity and the discovery potential when using the newest JPP package version 8.2.7878 for both fluxes studied. This does not influence the conclusion of our study.

Κεφάλαιο 8

Συμπεράσματα

Στα πλαίσια της μεταπτυχιακής αυτής εργασίας, πραγματοποιήθηκε μελέτη βελτιστοποίησης της διαμόρφωσης της γεωμετρίας του ανιχνευτή KM3NeT-ARCA για την ανίχνευση νετρίνων υψηλών ενεργειών. Η απόκριση του ανιχνευτή και η δυνατότητα ανακάλυψης ροής αστροφυσικών νετρίνων μελετήθηκαν για εναλλακτικές γεωμετρίες του ανιχνευτή KM3NeT-ARCA για το σκοπό αυτής της εργασίας και συγκρίθηκαν με την υπάρχουσα γεωμετρία του ανιχνευτή όπου η απόσταση μεταξύ των ανιχνευτικών μονάδων (DUs) είναι 90 m.

Αρχικά, παρήχθησαν τρεις διαφορετικές γεωμετρίες για τον ανιχνευτή KM3NeT-ARCA. Η διαφορά με την υπάρχουσα γεωμετρία ήταν η αύξηση της απόστασης μεταξύ των ανιχνευτικών μονάδων σε 120 m, 150 m και 180 m αντίστοιχα. Παρήχθησαν, προσομοιώθηκαν και ανακατασκευάστηκαν γεγονότα νετρίνων για κάθε μια από τις διαφορετικές γεωμετρίες που μελετήθηκαν με τη χρήση των επίσημων υπολογιστικών πακέτων του πειράματος KM3NeT.

Η απόκριση του ανιχνευτή για διαφορετικές γεωμετρίες ελέγχθηκε αρχικά με το μέγεθος της ενεργού περιοχής. Στην ενεργειακή περιοχή ενδιαφέροντος για την εργασία ($E > 100\text{TeV}$), η αύξηση της ενεργού περιοχής έφτανε ως το 114% για την πιο μεγάλη γεωμετρία που ελέγχθηκε συγκριτικά με την υπάρχουσα. Η απόδοση των εναλλακτικών γεωμετριών σε σχέση με την υπάρχουσα γεωμετρία είναι μικρότερη αλλά επαρκής, ενώ η ποιότητα ανακατασκευής γεγονότων είναι για όλες τις γεωμετρίες μεγαλύτερη από 90% για ενέργειες $E > 100\text{ TeV}$.

Στην συνέχεια δημιουργήθηκε και χρησιμοποιήθηκε συνάρτηση διόρθωσης για την ανακατασκευασμένη ενέργεια για κάθε εναλλακτική γεωμετρία που χρησιμοποιήθηκε ενώ για την ήδη υπάρχουσα γεωμετρία προπήρχαν συναρτήσεις διόρθωσης. Μετά τη διόρθωση της ενέργειας, επιτεύχθηκε εξαιρετική ενεργειακή και γωνιακή διακριτική ικανότητα, παρόμοια για όλες τις γεωμετρίες που μελετήθηκαν.

Για την ολοκλήρωση της σύγκρισης μεταξύ των διαφορετικών γεωμετριών μελετήθηκαν για κάθε γεωμετρία η ευαισθησία ανίχνευσης και η πι-

θανότητα ανακάλυψης διάχυτης ροής αστροφυσικών νετρίνων για τη ροή που χρησιμοποιείται επίσημα στο LoI του πειράματος και για τη πιο πρόσφατα υπολογισμένη ροή από το πείραμα IceCube για νετρίνα εξωγήινης προέλευσης. Σύμφωνα με τη μελέτη αυτή αναμένεται βελτίωση κατά 30% για την ευαισθησία ανίχνευσης καθώς και τη πιθανότητα ανακάλυψης με τη χρήση της μεγαλύτερης γεωμετρίας σε σύγκριση με την υπάρχουσα. Συνυπολογίζοντας την απόδοση όλων των γεωμετριών που μελετήθηκαν, αποφασίστηκε ότι η πιο "αποδοτική" γεωμετρία για την ανίχνευση νετρίνων πολύ υψηλών ενεργειών είναι η γεωμετρία με απόσταση 150 m μεταξύ των ανιχνευτικών μονάδων.

Κατά τη διάρκεια της μελέτης, βρέθηκαν σφάλματα σε διαφορετικές εκδόσεις του πακέτου ανακατασκευής του πειράματος και για το λόγο αυτό η εργασία ολοκληρώθηκε με την σύγκριση της πιο πρόσφατης έκδοσης του πακέτου ανακατασκευής JPP (8.2.7878) και αυτής που χρησιμοποιήθηκε (4.0.4190) για την εναλλακτική γεωμετρία KM3NeT-ARCA με 150 m απόσταση μεταξύ των ανιχνευτικών μονάδων. Τα αποτελέσματα για τις εκδόσεις το πακέτου ήταν συναφή, ενώ οι (μικρές) διαφορές των αποτελεσμάτων για τα διάφορα μεγέθη που μελετήθηκαν οφείλονται στη πιο ρεαλιστική απόδοση του νέου πακέτου ανακατασκευής.

Κεφάλαιο 9

Conclusions

Optimization studies of the KM3NeT-ARCA detector for the detection of high energy neutrinos are presented in this thesis. The detector response and the discovery potential for a diffuse astrophysical flux are studied for alternative geometries of the KM3NeT-ARCA detector for the purpose of this work and are compared to the existing geometry of the detector with 90 m distance between the detection units (DUs).

Initially, three different geometries were produced for the KM3NeT-ARCA detector. The difference with the existing geometry was an increase of the distance between the detection units at 120 m, 150 m and 180 m, respectively. We produced, simulated and reconstructed neutrino events for each of the different geometries studied using the KM3NeT computational packages.

The detector response for the different geometries was initially investigated in terms of effective area. In the region of interest ($E > 100\text{TeV}$), the increase in the effective area reached 114% for the largest geometry studied compared to the existing one. The efficiency for the alternative geometries in relation to the existing geometry is smaller but sufficient, while the quality of event reconstruction is for all geometries greater than 90% for $E > 100\text{TeV}$.

A correction function was produced and applied for the reconstructed energy for each alternative geometry studied, while for the 90 m geometry the existing correction functions were used. After applying the energy correction, excellent energy and angular resolution was achieved similarly for all the geometries studied.

To complete the comparison between the different geometries, the sensitivity and the discovery potential for each geometry were calculated using two astrophysical neutrino fluxes, one which is described in the LoI of the KM3NeT collaboration and the one published recently from the IceCube experiment. Our studies indicate that an improvement of 30% for the

sensitivity and the discovery potential is expected using the largest alternative KM3NeT-ARCA geometry compared to the existing one. Taking into account the detector response in all geometries studied, it was decided that the most "efficient" geometry for detecting very high energy neutrinos was the geometry with a distance of 150 m between the detection units.

During the study, inconsistencies were found in different versions of the reconstruction package (JPP) used by the collaboration. A comparison was therefore made between the most recent version of the reconstruction package (8.2.7878) and the version (4.0.4190) used for our study for the alternative KM3NeT-ARCA geometry with a distance of 150 m between the detector units. This was carried out in order to verify that the results of our study were not influenced when using the more realistic response of the new JPP package. Differences in results for the different quantities studied were quite small between the two packages (1-2%) and do not affect the results of this study.

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] The IceCube collaboration, Evidence for High-Energy Extraterrestrial Neutrinos at the IceCube Detector, arXiv:1311.5238v2 [astro-ph.HE] 16 Dec 2013
- [10] R. Gandhi, C. Quigg, M.H. Reno and I. Sarcevic, Neutrino interactions at ultrahigh energies, *Phys. Rev. D* 58, 093009, (1998)
- [11] Kevin J. Meagher, Neutrino Astronomy with IceCube and Beyond, arXiv:1705.00383v1 [astro-ph.HE] 30 Apr 2017
- [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] The IceCube collaboration, A COMBINED MAXIMUM-LIKELIHOOD ANALYSIS OF THE HIGH-ENERGY ASTROPHYSICAL NEUTRINO FLUX MEASURED WITH ICECUBE, The Astrophysical Journal, 809:98 (15pp), 2015 August 10
- [17] G. Carminati, et al, Nuclear Instruments and Methods A 567, 492, 2006
- [18] The KM3NeT collaboration, KM3NeT/ARCA Event Reconstruction Algorithms, 35th International Cosmic Ray Conference — ICRC 2017, 10–20 July, 2017
- [19] The KM3NeT collaboration, Letter of intent for KM3NeT 2.0, J. Phys. G: Nucl. Part. Phys. 43 (2016) 084001 (130pp)
- [20] A.Trovato, Development of reconstruction algorithms for large volume neutrino telescopes and their application to the KM3NeT detector, Doctoral Thesis, 2013
- [21] Gary J. Feldman, Robert D. Cousins, A Unified Approach to the Classical Statistical Analysis of Small Signals, arXiv:physics/9711021v2 [physics.data-an] 17 Dec 1999
- [22] Gary C. Hill and Katherine Rawlins, Unbiased cut selection for optimal upper limits in neutrino detectors: the model rejection potential technique, arXiv/astro-ph/0209350v1 18 Sep 2002
- [23] G.C. Hill, J. Hodges, B. Hughey, A.Karle and M.Stamatikos, EXAMINING THE BALANCE BETWEEN OPTIMIZING AN ANALYSIS FOR BEST LIMIT SETTING AND BEST DISCOVERY POTENTIAL, in Proc. PHYSTAT O5: Statistical Problems in Particle Physics. Oxford, United Kingdom, Sep, 2005.
- [24] Hans van Haren, Maarten de Jong, Paul Kooijman, "Yearlong moored bioluminescence and current data at KM3NeT neutrino telescope sites in the deep Ionian Sea", Astroparticle Physics Volume 67, July 2015, Pages 1-7
- [25] Nicholas Metropolis, Arianna W. Rosenbluth, Marshall N. Rosenbluth, and Augusta H. Teller, Equation of State Calculations by Fast Computing Machines, The Journal of Chemical Physics 21, 1087 (1953); <https://doi.org/10.1063/1.1699114>
- [26] ANTARES-SOFT-2014-001

- [27] G. Carminati et al., Computer Physics Communications 179, 12: 915-923 (2008)
- [28] ANTARES-SOFT-2002-006
- [29] ANTARES-SOFT-2012-007
- [30] <http://wiki.km3net.de/index.php/Jpp>

Appendices

Appendix A

Sensitivity and discovery potential detailed analysis

A.0.1 Sensitivity and discovery potential for the standard KM3NeT-ARCA detector

Prior to the estimation of the sensitivity and the discovery potential, the values of the MC muon energy at which the MRF and the MDP are minimized as well as the points of minimization, are calculated. In order to make it easier to compare with the expectations published at the LoI, the results for events that have been reconstructed for the standard KM3NeT-ARCA detector, with the astrophysical neutrino flux with the cutoff at 3 PeV (equation 6.6), are reported in table A.1 for the MC muon energy. The number of signal and background events are also shown in table A.1. In table A.2 for the same events, the sensitivity at 90% CL and the discovery potential with a significance of 5σ at 50% CL are evaluated following the equations 6.2 and 6.5 respectively.

ϑ_{reco}	MRF	MDP	ν_{sig}	ν_{atm}
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.356 at $E_\mu=10^{5.1}\text{GeV}$	1.062 at $E_\mu=10^{5.1}\text{GeV}$	20.33	12.06
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.649 at $E_\mu=10^{5.1}\text{GeV}$ 0.649 at $E_\mu=10^5\text{GeV}$	1.975 at $E_\mu=10^{5.1}\text{GeV}$ 1.915 at $E_\mu=10^5\text{GeV}$	9.22	7.45

Table A.1: The MC muon energy at which the MRF and the MDP are minimized as well as the points of minimization using the astrophysical neutrino flux used for the LoI, for the standard KM3NeT-ARCA detector, are reported.

ϑ_{reco}	$ \Phi_{90}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}] $	$ \Phi_{5\sigma}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}] $
$[0^\circ - 180^\circ]$	$0.427 \cdot 10^{-8}$	$1.274 \cdot 10^{-8}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	$0.779 \cdot 10^{-8}$ $0.779 \cdot 10^{-8}$	$2.370 \cdot 10^{-8}$ $2.298 \cdot 10^{-8}$

Table A.2: Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the standard KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the astrophysical neutrino flux used for the LoI.

The calculations were repeated for the reconstructed energy values after applying the correction described in chapter 5. The results are reported in table A.3, for the reconstructed muon energy. The sensitivity and discovery potential are estimated for the same events and are presented in table A.4.

ϑ_{reco}	MRF	MDP	ν_{sig}	ν_{atm}
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.418 at $E_{reco}=10^{5.2}GeV$	1.252 at $E_{reco}=10^{5.2}GeV$	17.96	13.18
	0.420 at $E_{reco}=10^{5.3}GeV$	1.224 at $E_{reco}=10^{5.3}GeV$	14.96	8.36
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.778 at $E_{reco}=10^{5.1}GeV$	2.314 at $E_{reco}=10^{5.1}GeV$	9.49	12.70

Table A.3: The reconstructed muon energy at which the MRF and the MDP are minimized as well as the points of minimization using the astrophysical neutrino flux used for the LoI, for the standard KM3NeT-ARCA detector, are reported.

ϑ_{reco}	$ \Phi_{90}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}] $	$ \Phi_{5\sigma}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}] $
$[0^\circ - 180^\circ]$	$0.502 \cdot 10^{-8}$ $0.504 \cdot 10^{-8}$	$1.502 \cdot 10^{-8}$ $1.469 \cdot 10^{-8}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	$0.934 \cdot 10^{-8}$	$2.777 \cdot 10^{-8}$

Table A.4: Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the standard KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the astrophysical neutrino flux used for the LoI.

For completeness, the same procedure was followed using the can correction (presented in the previous chapter) for the reconstructed energy for the standard KM3NeT-ARCA geometry. In tables A.5 and A.6, the results using the reconstructed energy after this correction are shown. The sensitivity at 90% CL and discovery potential with a significance of 5σ at 50% CL are calculated following the equations 6.2 and 6.5 respectively.

ϑ_{reco}	MRF	MDP	ν_{sig}	ν_{atm}
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.448 at $E_{reco.can}=10^{5.1}\text{GeV}$	1.324 at $E_{reco.can}=10^{5.1}\text{GeV}$	19.81	19.44
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.838 at $E_{reco.can}=10^{5.1}\text{GeV}$	2.506 at $E_{reco.can}=10^{5.1}\text{GeV}$	8.80	12.63

Table A.5: The reconstructed muon energy after applying the can correction, at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the astrophysical neutrino flux used for the LoI for the standard KM3NeT-ARCA detector, are reported.

ϑ_{reco}	$\Phi_{90}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$	$\Phi_{5\sigma}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$
$[0^\circ - 180^\circ]$	$0.538 \cdot 10^{-8}$	$1.589 \cdot 10^{-8}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	$1.006 \cdot 10^{-8}$	$3.007 \cdot 10^{-8}$

Table A.6: Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the standard KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the astrophysical neutrino flux used for the LoI.

The sensitivity and the discovery potential for the standard KM3NeT-ARCA detector, were also estimated using the IceCube flux for extraterrestrial high-energy neutrinos with energies greater than 30 TeV (equation 6.7). The MC energy and the reconstructed muon energy (using both corrections) at which the Model Rejection Factor (MRF) and the Model Discovery Potential (MDP) are minimized as well as the points of minimization are reported in tables A.7, A.9 and A.11. The number of signal and background events at these points are also shown in the previous tables. The sensitivity and the discovery potential for 1 year of operation of the standard KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks are calculated and demonstrated in tables A.8, A.10 and A.12 for the MC energy and for the two different corrections applied to the reconstructed energy respectively.

ϑ_{reco}	MRF	MDP	ν_{sig}	ν_{atm}
[0° - 180°]	0.301 at $E_\mu=10^{4.9}\text{GeV}$	0.907 at $E_\mu=10^{4.9}\text{GeV}$	35.73	30.27
	0.306 at $E_\mu=10^{4.6}\text{GeV}$	0.891 at $E_\mu=10^{4.6}\text{GeV}$	65.82	119.04
[0° - 100°]	0.501 at $E_\mu=10^{4.6}\text{GeV}$	1.461 at $E_\mu=10^{4.6}\text{GeV}$	33.49	80.74

Table A.7: The MC muon energy at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the astrophysical neutrino flux using the IceCube flux for the standard KM3NeT-ARCA detector, are reported.

ϑ_{reco}	$\Phi_{90}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$	$\Phi_{5\sigma}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$
[0° - 180°]	0.662 $\cdot 10^{-18}$	1.995 $\cdot 10^{-18}$
	0.672 $\cdot 10^{-18}$	1.960 $\cdot 10^{-18}$
[0° - 100°]	1.102 $\cdot 10^{-18}$	3.214 $\cdot 10^{-18}$

Table A.8: Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the standard KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the astrophysical neutrino flux from the IceCube.

ϑ_{reco}	MRF	MDP	ν_{sig}	ν_{atm}
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.345 at $E_{reco}=10^{4.9}\text{GeV}$	1.009 at $E_{reco}=10^{4.9}\text{GeV}$	39.92	52.41
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.587 at $E_{reco}=10^{4.6}\text{GeV}$	1.708 at $E_{reco}=10^{4.6}\text{GeV}$	35.93	131.31

Table A.9: The reconstructed muon energy at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the astrophysical neutrino flux using the IceCube flux for the standard KM3NeT-ARCA detector, are reported.

ϑ_{reco}	$ \Phi_{90}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}] $	$ \Phi_{5\sigma}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}] $
$[0^\circ - 180^\circ]$	$0.759 \cdot 10^{-18}$	$2.220 \cdot 10^{-18}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	$1.291 \cdot 10^{-18}$	$3.758 \cdot 10^{-18}$

Table A.10: Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the standard KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the IceCube astrophysical neutrino flux.

ϑ_{reco}	MRF	MDP	ν_{sig}	ν_{atm}
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.353 at $E_{reco.can}=10^{4.7}\text{GeV}$	1.042 at $E_{reco.can}=10^{4.7}\text{GeV}$	53.26	103.16
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.604 at $E_{reco.can}=10^{4.1}\text{GeV}$	1.762 at $E_{reco.can}=10^{4.1}\text{GeV}$	81.13	760.70

Table A.11: The reconstructed muon energy after applying the can correction, at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the astrophysical neutrino flux using the IceCube flux for the standard KM3NeT-ARCA detector, are reported.

ϑ_{reco}	$ \Phi_{90}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}] $	$ \Phi_{5\sigma}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}] $
$[0^\circ - 180^\circ]$	$0.777 \cdot 10^{-18}$	$2.292 \cdot 10^{-18}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	$1.329 \cdot 10^{-18}$	$3.876 \cdot 10^{-18}$

Table A.12: Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the standard KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the IceCube astrophysical neutrino flux.

A.0.2 Sensitivity and discovery potential for the 120 m alternative KM3NeT-ARCA detector

The calculations of the sensitivity and the discovery potential are presented for each of the alternative KM3NeT-ARCA geometries in the following subsections. The values of the MC muon energy at which the MRF and MDP are minimized and the points of minimization are calculated. The number of signal and background events at these points are also shown. The results for events that have been reconstructed for the 120 m alternative KM3NeT-ARCA detector, with the astrophysical neutrino used for the LoI, are reported in table A.13. In table A.14, for the same events, the sensitivity at 90% CL and discovery potential with a significance of 5σ at 50% CL are calculated following the equations 6.2 and 6.5 respectively.

ϑ_{reco}	MRF	MDP	ν_{sig}	ν_{atm}
[0° - 180°]	0.291 at $E_\mu=10^{5.2}\text{GeV}$	0.870 at $E_\mu=10^{5.2}\text{GeV}$	23.88	10.89
	0.295 at $E_\mu=10^{5.3}\text{GeV}$	0.852 at $E_\mu=10^{5.3}\text{GeV}$	19.72	6.88
[0° - 100°]	0.534 at $E_\mu=10^{5.1}\text{GeV}$	1.608 at $E_\mu=10^{5.1}\text{GeV}$	12.97	10.80
	0.540 at $E_\mu=10^5\text{GeV}$	1.590 at $E_\mu=10^5\text{GeV}$	15.76	17.61

Table A.13: The MC muon energy at which the MRF and the MDP are minimized as well as the points of minimization using the astrophysical neutrino flux used for the LoI, for the 120 m alternative KM3NeT-ARCA detector, are reported.

ϑ_{reco}	$\Phi_{90}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$	$\Phi_{5\sigma}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$
[0° - 180°]	0.349 $\cdot 10^{-8}$	1.044 $\cdot 10^{-8}$
	0.354 $\cdot 10^{-8}$	1.022 $\cdot 10^{-8}$
[0° - 100°]	0.641 $\cdot 10^{-8}$	1.930 $\cdot 10^{-8}$
	0.648 $\cdot 10^{-8}$	1.908 $\cdot 10^{-8}$

Table A.14: Sensitivity and the discovery potential for 1 year of operation of the 120 m alternative KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the astrophysical neutrino flux used for the LoI.

Both the MRF and the MDP are minimized at lower values when events that reach the detector from all the zenith angles are considered, as was the case with the standard KM3NeT-ARCA detector. The calculations were repeated for the corrected reconstruction energy values at which the MRF and the MDP are minimized. The results for events that have been reconstructed for the 120 m KM3NeT-ARCA detector with the astrophysical neutrino flux used for the LoI, are reported in table A.15 for the reconstructed muon energy. In table A.16, for the same events, the sensitivity and discovery potential are calculated as before.

ϑ_{reco}	MRF	MDP	ν_{sig}	ν_{atm}
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.338 at $E_{reco}=10^{5.3}\text{GeV}$	1.032 at $E_{reco}=10^{5.3}\text{GeV}$	20.38	10.64
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.642 at $E_{reco}=10^{5.1}\text{GeV}$	1.897 at $E_{reco}=10^{5.1}\text{GeV}$	12.84	16.31

Table A.15: The reconstructed muon energy that minimizes the MRF and the MDP and the points of minimization using the astrophysical neutrino flux used for the LoI, for the 120 m alternative KM3NeT-ARCA detector, are reported.

ϑ_{reco}	$\Phi_{90}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$	$\Phi_{5\sigma}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$
$[0^\circ - 180^\circ]$	$0.406 \cdot 10^{-8}$	$1.238 \cdot 10^{-8}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	$0.770 \cdot 10^{-8}$	$2.276 \cdot 10^{-8}$

Table A.16: Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the 120 m alternative KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the astrophysical neutrino flux used for the LoI.

The sensitivity and the discovery potential for the 120 m KM3NeT-ARCA detector is also estimated, using the IceCube flux for extraterrestrial high-energy neutrinos with energies greater than 30 TeV (equation 6.7). The MC energy and the reconstructed muon energy at which the Model Rejection Factor (MRF) and the Model Discovery Potential (MDP) are minimized and the points of minimization are reported in tables A.17 and A.19 respectively. The number of signal and background events at these points are also shown. Additionally, the sensitivity and the discovery potential for 1 year of operation of the 120 KM3NeT-ARCA detector are reported in tables A.18 and A.20.

ϑ_{reco}	MRF	MDP	ν_{sig}	ν_{atm}
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.252 at $E_\mu=10^{4.9}\text{GeV}$	0.738 at $E_\mu=10^{4.9}\text{GeV}$	50.25	43.58
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.423 at $E_\mu=10^{4.6}\text{GeV}$ 0.426 at $E_\mu=10^{4.4}\text{GeV}$	1.254 at $E_\mu=10^{4.6}\text{GeV}$ 1.243 at $E_\mu=10^{4.4}\text{GeV}$	47.31	117.48

Table A.17: The MC muon energy at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the IceCube astrophysical neutrino flux, for the 120 m alternative KM3NeT-ARCA detector, are reported.

ϑ_{reco}	$\Phi_{90}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$	$\Phi_{5\sigma}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$
$[0^\circ - 180^\circ]$	$0.554 \cdot 10^{-18}$	$1.623 \cdot 10^{-18}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	$0.931 \cdot 10^{-18}$ $0.937 \cdot 10^{-18}$	$2.759 \cdot 10^{-18}$ $2.735 \cdot 10^{-18}$

Table A.18: Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the 120 m alternative KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the IceCube astrophysical neutrino flux.

ϑ_{reco}	MRF	MDP	ν_{sig}	ν_{atm}
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.286 at $E_{reco}=10^5\text{GeV}$	0.845 at $E_{reco}=10^5\text{GeV}$	43.48	41.93
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.487 at $E_{reco}=10^{4.6}\text{GeV}$ 0.490 at $E_{reco}=10^{4.4}\text{GeV}$	1.434 at $E_{reco}=10^{4.6}\text{GeV}$ 1.426 at $E_{reco}=10^{4.4}\text{GeV}$	49.11	172.23

Table A.19: The reconstructed muon energy at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the IceCube astrophysical neutrino flux, for the 120 m alternative KM3NeT-ARCA detector, are reported.

ϑ_{reco}	$\Phi_{90}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$	$\Phi_{5\sigma}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$
$[0^\circ - 180^\circ]$	$0.629 \cdot 10^{-18}$	$1.859 \cdot 10^{-18}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	$1.071 \cdot 10^{-18}$ $1.078 \cdot 10^{-18}$	$3.155 \cdot 10^{-18}$ $3.137 \cdot 10^{-18}$

Table A.20: Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the 120 m alternative KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the IceCube astrophysical neutrino.

A.0.3 Sensitivity and discovery potential for the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector

Firstly, the estimation of the sensitivity and the discovery potential for the values of the MC muon energy at which the MRF and MDP are minimized, is made. The results for events that have been reconstructed for the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector using the astrophysical neutrino flux used for the LoI with the cutoff at 3 PeV, are reported in tables A.21 and A.22 for the MC muon energy. The number of signal and background events at these points are also shown.

ϑ_{reco}	MRF	MDP	ν_{sig}	ν_{atm}
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.250 at $E_\mu=10^{5.2}\text{GeV}$	0.743 at $E_\mu=10^{5.2}\text{GeV}$	31.23	14.48
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.455 at $E_\mu=10^{5.1}\text{GeV}$	1.370 at $E_\mu=10^{5.1}\text{GeV}$	17.32	14.82
	0.457 at $E_\mu=10^{5.2}\text{GeV}$	1.327 at $E_\mu=10^{5.2}\text{GeV}$	14.11	8.94

Table A.21: The MC muon energy at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the astrophysical neutrino flux used for the LoI, for the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector, are reported.

ϑ_{reco}	$\Phi_{90}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$	$\Phi_{5\sigma}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$
$[0^\circ - 180^\circ]$	$0.300 \cdot 10^{-8}$	$0.892 \cdot 10^{-8}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	$0.546 \cdot 10^{-8}$	$1.644 \cdot 10^{-8}$
	$0.548 \cdot 10^{-8}$	$1.592 \cdot 10^{-8}$

Table A.22: Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the astrophysical neutrino flux used for the LoI.

The calculations are repeated for the reconstruction energy values after the correction that minimize the MRF and MDP. The results for events of the MRF, MDP and the points of minimization are reported in table A.23 for the reconstructed muon energy. The number of signal and background events at these points are also shown. In table A.24, for the same events, the sensitivity and discovery potential are shown.

ϑ_{reco}	MRF	MDP	ν_{sig}	ν_{atm}
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.305 at $E_{reco}=10^{5.3}\text{GeV}$	0.922 at $E_{reco}=10^{5.3}\text{GeV}$	26.79	15.97
	0.310 at $E_{reco}=10^{5.2}\text{GeV}$	0.919 at $E_{reco}=10^{5.2}\text{GeV}$	32.10	25.17
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.585 at $E_{reco}=10^{5.2}\text{GeV}$	1.758 at $E_{reco}=10^{5.2}\text{GeV}$	14.01	16.05
	0.586 at $E_{reco}=10^{5.1}\text{GeV}$	1.739 at $E_{reco}=10^{5.1}\text{GeV}$	17.15	25.85

Table A.23: The reconstructed muon energy at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the astrophysical neutrino flux used for the LoI, for the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector, are reported.

ϑ_{reco}	$\Phi_{90}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$	$\Phi_{5\sigma}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$
$[0^\circ - 180^\circ]$	$0.366 \cdot 10^{-8}$	$1.106 \cdot 10^{-8}$
	$0.372 \cdot 10^{-8}$	$1.103 \cdot 10^{-8}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	$0.702 \cdot 10^{-8}$	$2.110 \cdot 10^{-8}$
	$0.703 \cdot 10^{-8}$	$2.087 \cdot 10^{-8}$

Table A.24: Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the 150 m KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the astrophysical neutrino flux used for the LoI.

The sensitivity and the discovery potential for the 150 m KM3NeT-ARCA detector using the IceCube flux for extraterrestrial high-energy neutrinos with energies greater than 30 TeV (equation 6.8) are calculated. The MC energy and the reconstructed muon energy at which the Model Rejection Factor (MRF) and the Model Discovery Potential (MDP) are minimized as well as the points of minimization are reported in tables A.25 and A.27 respectively. The number of signal and background events at these points are also shown. Additionally, the sensitivity and the discovery potential for 1 year of operation of the 150 m KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks are shown in tables A.26 and A.28 for the MC energy and the reconstructed energy respectively.

ϑ_{reco}	MRF	MDP	ν_{sig}	ν_{atm}
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.221 at $E_\mu=10^5\text{GeV}$	0.648 at $E_\mu=10^5\text{GeV}$	52.77	36.48
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.370 at $E_\mu=10^{4.7}\text{GeV}$	1.097 at $E_\mu=10^{4.7}\text{GeV}$	49.50	97.39
	0.373 at $E_\mu=10^{4.6}\text{GeV}$	1.093 at $E_\mu=10^{4.6}\text{GeV}$	61.20	155.79

Table A.25: The MC muon energy at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the IceCube astrophysical neutrino flux, for the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector, are reported.

ϑ_{reco}	$\Phi_{90}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$	$\Phi_{5\sigma}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$
$[0^\circ - 180^\circ]$	$0.486 \cdot 10^{-18}$	$1.426 \cdot 10^{-18}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	$0.814 \cdot 10^{-18}$	$2.412 \cdot 10^{-18}$
	$0.821 \cdot 10^{-18}$	$2.405 \cdot 10^{-18}$

Table A.26: Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the IceCube astrophysical neutrino flux.

ϑ_{reco}	MRF	MDP	ν_{sig}	ν_{atm}
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.267 at $E_{reco}=10^{5.1}\text{GeV}$	0.791 at $E_{reco}=10^{5.1}\text{GeV}$	46.21	41.12
	0.267 at $E_{reco}=10^5\text{GeV}$	0.789 at $E_{reco}=10^5\text{GeV}$	56.68	64.98
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.457 at $E_{reco}=10^{4.7}\text{GeV}$	1.332 at $E_{reco}=10^{4.7}\text{GeV}$	51.43	166.15

Table A.27: The reconstructed muon energy at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the IceCube astrophysical neutrino flux, for the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector, are reported.

ϑ_{reco}	$\Phi_{90}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$	$\Phi_{5\sigma}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$
$[0^\circ - 180^\circ]$	$0.587 \cdot 10^{-18}$	$1.740 \cdot 10^{-18}$
	$0.587 \cdot 10^{-18}$	$1.736 \cdot 10^{-18}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	$1.005 \cdot 10^{-18}$	$2.930 \cdot 10^{-18}$

Table A.28: Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the 150 m alternative KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the IceCube astrophysical neutrino flux.

A.0.4 Sensitivity and discovery potential for the 180 m alternative KM3NeT-ARCA detector

The sensitivity, the discovery potential, the values of the MC muon energy at which the MRF and MDP are minimized, as well as the points of minimization are calculated. The results for events that have been reconstructed for the 180 m alternative KM3NeT-ARCA detector with the astrophysical neutrino flux used for the LoI, are reported in table A.29 for the MC muon energy. The number of signal and background events at these points are also shown. In table A.30 for the same events, the sensitivity at 90% CL and the discovery potential with a significance of 5σ at 50% CL are calculated following the equations 6.2 and 6.5 respectively.

ϑ_{reco}	MRF	MDP	ν_{sig}	ν_{atm}
[0° - 180°]	0.221 at $E_\mu=10^{5.3}\text{GeV}$	0.658 at $E_\mu=10^{5.3}\text{GeV}$	32.18	11.49
	0.224 at $E_\mu=10^{5.4}\text{GeV}$	0.656 at $E_\mu=10^{5.4}\text{GeV}$	26.47	7.32
[0° - 100°]	0.398 at $E_\mu=10^{5.2}\text{GeV}$	1.163 at $E_\mu=10^{5.2}\text{GeV}$	17.62	11.19

Table A.29: The MC muon energy at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the astrophysical neutrino flux used for the LoI for the alternative 180 m KM3NeT-ARCA detector, are reported.

ϑ_{reco}	$\Phi_{90}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$	$\Phi_{5\sigma}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$
[0° - 180°]	$0.265 \cdot 10^{-8}$	$0.790 \cdot 10^{-8}$
	$0.269 \cdot 10^{-8}$	$0.787 \cdot 10^{-8}$
[0° - 100°]	$0.478 \cdot 10^{-8}$	$1.396 \cdot 10^{-8}$

Table A.30: Sensitivity and discovery potential for 1 year of operation of the alternative 180 m KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the astrophysical neutrino flux used for the LoI.

The calculations are repeated for the reconstruction energy values after the correction that minimize the MRF and MDP. The results for events that have been reconstructed for the alternative 180 m KM3NeT-ARCA detector with the astrophysical neutrino flux with the cutoff at 3 PeV used for the LoI, are reported in table A.31 for the reconstructed muon energy. In table A.32 for the same events, the sensitivity at 90% CL and discovery potential with a significance of 5σ at 50% CL are calculated following the equations 6.2 and 6.5 respectively.

ϑ_{reco}	MRF	MDP	ν_{sig}	ν_{atm}
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.284 at $E_{reco}=10^{5.4}\text{GeV}$	0.837 at $E_{reco}=10^{5.4}\text{GeV}$	27.11	13.96
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.553 at $E_{reco}=10^{5.3}\text{GeV}$	1.630 at $E_{reco}=10^{5.3}\text{GeV}$	13.93	13.96

Table A.31: The reconstructed muon energy at which the MRF and the MDP are minimized as well as the points of minimization using the astrophysical neutrino flux used for the LoI for the alternative 180 m KM3NeT-ARCA detector are reported.

ϑ_{reco}	$\Phi_{90}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$	$\Phi_{5\sigma}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$
$[0^\circ - 180^\circ]$	$0.341 \cdot 10^{-8}$	$1.004 \cdot 10^{-8}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	$0.664 \cdot 10^{-8}$	$1.956 \cdot 10^{-8}$

Table A.32: The sensitivity and the discovery potential for 1 year of operation of the alternative 180 m KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the astrophysical neutrino flux used for the LoI.

Finally, the sensitivity and the discovery potential for the alternative 180 m KM3NeT-ARCA detector are calculated, using the IceCube flux for extraterrestrial high-energy neutrinos (equation 6.7). The MC muon energy and the reconstructed muon energy at which the Model Rejection Factor (MRF) and the Model Discovery Potential (MDP) are minimized, as well as the points of minimization are reported in tables A.33 and A.35 respectively. The number of signal and background events at these points are also shown. The sensitivity and the discovery potential are reported in tables A.34 for the MC muon energy and A.36 for the reconstructed energy.

ϑ_{reco}	MRF	MDP	ν_{sig}	ν_{atm}
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.200 at $E_\mu=10^5\text{GeV}$ 0.201 at $E_\mu=10^{5.1}\text{GeV}$	0.591 at $E_\mu=10^5\text{GeV}$ 0.591 at $E_\mu=10^{5.1}\text{GeV}$	63.94 52.40	44.87 28.70
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.337 at $E_\mu=10^{4.9}\text{GeV}$ 0.338 at $E_\mu=10^{4.7}\text{GeV}$	0.992 at $E_\mu=10^{4.9}\text{GeV}$ 0.990 at $E_\mu=10^{4.7}\text{GeV}$	39.12 59.80	47.87 120.48

Table A.33: The MC muon energy at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the IceCube astrophysical neutrino flux, for the alternative 180 m KM3NeT-ARCA detector, are reported.

ϑ_{reco}	$\Phi_{90}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$	$\Phi_{5\sigma}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.440 $\cdot 10^{-18}$ 0.442 $\cdot 10^{-18}$	1.300 $\cdot 10^{-18}$ 1.300 $\cdot 10^{-18}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.741 $\cdot 10^{-18}$ 0.743 $\cdot 10^{-18}$	2.182 $\cdot 10^{-18}$ 2.613 $\cdot 10^{-18}$

Table A.34: The sensitivity and the discovery potential for 1 year of operation of the 180 m alternative KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the IceCube astrophysical neutrino flux.

ϑ_{reco}	MRF	MDP	ν_{sig}	ν_{atm}
$[0^\circ - 180^\circ]$	0.258 at $E_{reco}=10^{5.3}\text{GeV}$	0.755 at $E_{reco}=10^{5.3}\text{GeV}$	22.16	36.45
$[0^\circ - 100^\circ]$	0.428 at $E_{reco}=10^{4.8}\text{GeV}$ 0.431 at $E_{reco}=10^{4.7}\text{GeV}$	1.262 at $E_{reco}=10^{4.8}\text{GeV}$ 1.259 at $E_{reco}=10^{4.7}\text{GeV}$	50.29	137.20
			62.41	220.10

Table A.35: The reconstructed muon energy at which the MRF and the MDP are minimized and the points of minimization using the IceCube astrophysical neutrino flux, for the alternative 180 m KM3NeT-ARCA detector, are reported.

ϑ_{reco}	$\Phi_{90}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$	$\Phi_{5\sigma}[GeV^{-1}sr^{-1}s^{-1}cm^{-2}]$
$[0^\circ - 180^\circ]$	$0.568 \cdot 10^{-18}$	$1.661 \cdot 10^{-18}$
$[0^\circ - 100^\circ]$	$0.942 \cdot 10^{-18}$ $0.948 \cdot 10^{-18}$	$2.776 \cdot 10^{-18}$ $2.770 \cdot 10^{-18}$

Table A.36: The sensitivity and the discovery potential for 1 year of operation of the 180 m alternative KM3NeT-ARCA detector with 2 blocks using the IceCube astrophysical neutrino flux.