



ΕΘΝΙΚΟ ΜΕΤΣΟΒΙΟ ΠΟΛΥΤΕΧΝΕΙΟ

ΣΧΟΛΗ ΕΦΑΡΜΟΣΜΕΝΩΝ ΜΑΘΗΜΑΤΙΚΩΝ
ΚΑΙ ΦΥΣΙΚΩΝ ΕΠΙΣΤΗΜΩΝ

Διατμηματικό Πρόγραμμα Μεταπτυχιακών Σπουδών
Φυσική και Τεχνολογικές Εφαρμογές

ΜΕΤΑΠΤΥΧΙΑΚΗ ΕΡΓΑΣΙΑ

ΘΕΜΑ: “*Νετρίνα από Εκλάμψεις Ακτίνων Γάμμα:
Προβλέψεις και Προοπτικές.*”

Όνοματεπώνυμο: Δρακοπούλου Ευαγγελία

Επιβλέπων καθηγητής: κ. Τσιπολίτης Γεώργιος

Επιτροπή: Αλεξόπουλος Θεόδωρος
Μάρκου Χρήστος
Τσιπολίτης Γεώργιος

Ευχαριστίες

Αυτή η εργασία πραγματοποιήθηκε στη Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου σε συνεργασία με το Ινστιτούτο Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος. Πολλές ευχαριστίες οφείλω στον επιβλέποντα καθηγητή της εργασίας μου από το ΕΜΠ, κ. Τσιπολίτη Γεώργιο και στον επιβλέποντα ερευνητή από το Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτο κ. Μάρκου Χρήστο για την αμέριστη βοήθεια, την καθοδήγηση και την υποστήριξή τους κατά τη διάρκεια της μεταπτυχιακής μου εργασίας. Θα ήθελα επίσης να ευχαριστήσω όλους τους εργαζόμενους στο Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος, και ιδιαίτερα την κ. Τζαμαριουδάκη Αικατερίνη, για την πολύτιμη βοήθειά τους σε ό,τι χρειαζόμουν.

Πολλές ευχαριστίες οφείλω επίσης, στην οικογένειά μου για την υπομονή και τη συμπαράστασή τους κατά τη διάρκεια της φοίτησής μου.

Abstract

The subject of this thesis is “ Neutrinos from GRBs: current status and prospects ” and was realized thanks to the contribution of the Institute of Nuclear Research of Demokritos Research Centre in Athens and of the School of Applied Mathematical and Physical Sciences of National Technical University of Athens.

First of all, a quick reference to the evolution of the Universe according to Big Bang theory is presented. The physical procedures taking place during the primordial phase of the Universe and formation of cosmological structures are also described. Besides, the basic issues of extragalactic astronomy, the distribution of galaxies in space and their division in different categories are discussed. Episodes taking place beyond the limits of our galaxy, like Active Galactic Nuclei (AGN) and Gamma Ray Bursts (GRBs), are referred as well.

Additionally, Gamma Ray Bursts (GRBs) are studied. Especially, there is a reference to the physical procedures leading to gamma ray production in accordance with the presentation of the main theories explaining the progenitors and emission mechanisms of these bursts. GRBs rates are also considered. The detection principle of neutrinos from GRBs and the important conclusions that can be made from their coincident observation with GRBs are discussed.

Finally, the KM3NeT’s detection ability of neutrinos from GRBs is tested using a hexagonal detector’s geometry. The detector’s efficiency per muon angle and per distance from the centre of the detector are calculated. These calculations are determined for different detector volumes and results are compared.

Περίληψη

Η παρούσα μεταπτυχιακή εργασία με θέμα “ Νετρίνα από Εκλάμψεις Ακτίνων Γάμμα: Προβλέψεις και Προοπτικές” εκπονήθηκε στο Ινστιτούτο Πυρηνικής Φυσικής του Ε.Κ.Ε.Φ.Ε. Δημόκριτος σε συνεργασία με τη Σχολή Εφαρμοσμένων Μαθηματικών και Φυσικών Επιστημών του Εθνικού Μετσόβιου Πολυτεχνείου.

Αρχικά, περιγράφεται σύντομα η εξέλιξη του Σύμπαντος σύμφωνα με τη θεωρία του Big Bang. Περιγράφονται οι φυσικές διεργασίες που συντελούνταν στο πρώιμο Σύμπαν και οι διαδικασίες σχηματισμού των κοσμικών δομών. Στη συνέχεια, παρουσιάζονται ορισμένα στοιχεία εξωγαλαξιακής αστρονομίας, μελετάται η κατανομή των γαλαξιών στο χώρο καθώς και η κατηγοριοποίησή τους με βάση διάφορα χαρακτηριστικά. Επίσης γίνεται αναφορά σε γεγονότα που λαμβάνουν χώρα εκτός του γαλαξία μας, όπως ενεργοί γαλαξιακοί πυρήνες (Active Galactic Nuclei - AGN) και εκλάμψεις ακτίνων γ (Gamma Ray Bursts - GRBs).

Ακολούθως, μελετώνται οι εκλάμψεις ακτίνων γ (GRBs). Συγκεκριμένα, εξετάζονται οι γεννήτορες αυτών των εκλάμψεων και οι μηχανισμοί εκπομπής που ακολουθούν, ενώ αναφέρονται οι φυσικές διαδικασίες που οδηγούν στην παραγωγή ακτίνων γ . Στη συνέχεια, εξετάζεται ο ρυθμός εμφάνισης των GRBs ενώ αναφέρεται ο τρόπος ανίχνευσης νετρίνων από τις εκλάμψεις αυτές και η σπουδαιότητα των συμπερασμάτων που μπορούν να προκύψουν από τη συσχέτιση των νετρίνων, που ανιχνεύονται στη γη, με τα GRBs.

Τέλος, διεξάγεται η μελέτη της ικανότητας ανίχνευσης νετρίνων από GRBs με το τηλεσκόπιο νετρίνων KM3NeT. Χρησιμοποιείται μια εξαγωνική γεωμετρία για τον προσδιορισμό της απόδοσης του ανιχνευτή συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης μιονίων και της απόστασης από το κέντρο του. Οι υπολογισμοί αυτοί πραγματοποιούνται για διαφορετικές τιμές όγκου του ανιχνευτή και συγκρίνονται τα αποτελέσματα.

Περιεχόμενα

1. Εισαγωγή	6
2. Στοιχεία Αστροφυσικής και Εκλάμψεις Ακτίνων Γάμμα (Gamma Ray Bursts)	
i. Εξέλιξη του σύμπαντος	8
ii. Σχηματισμός γαλαξιών και Εξωγαλαξιακή αστρονομία	15
3. Εκλάμψεις Ακτίνων Γάμμα (Gamma Ray Bursts - GRBs)	
i. Εκλάμψεις Ακτίνων Γάμμα (GRBs)	20
ii. Γεννήτορες των GRBs	26
iii. Μηχανισμοί εκπομπής GRBs	31
iv. Παραγωγή ακτίνων γ	35
4. Ανίχνευση Νετρίνων από Εκλάμψεις Ακτίνων Γάμμα (GRBs)	
i. Παραγωγή νετρίνων από Εκλάμψεις ακτίνων γ	39
ii. Ρυθμός εμφάνισης και ανίχνευση των GRBs	45
iii. Μελέτη της ικανότητας ανίχνευσης νετρίνων από GRBs με το τηλεσκόπιο νετρίνων KM3NeT	46
5. Σύνοψη και Συμπεράσματα	82
6. Βιβλιογραφία & Websites	

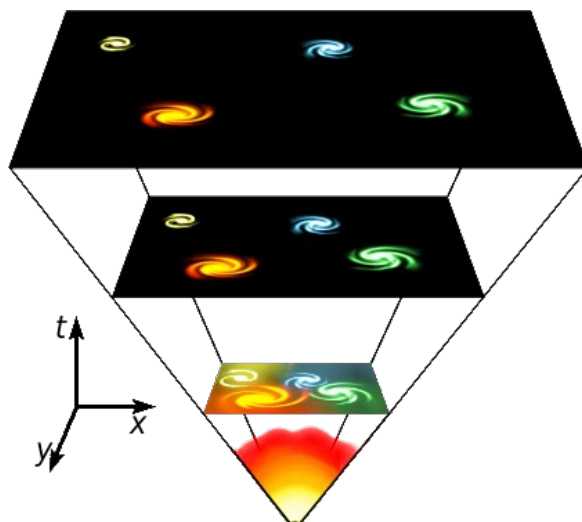
1. Εισαγωγή

Ανά τους αιώνες πολλές θεωρίες έχουν προταθεί για τον τρόπο δημιουργίας και εξέλιξης του Σύμπαντος. Ένα από τα πρώτα γεωκεντρικά μοντέλα αναπτύχθηκε από τους Αρχαίους Έλληνες και περιέγραφε ένα Σύμπαν αιώνιο και άπειρο όπου περιέχονταν ομόκεντρες σφαίρες πεπερασμένου μεγέθους. Αυτές οι σφαίρες αντιστοιχούσαν στα αστέρια, τον Ήλιο και τους πλανήτες, οι οποίοι περιστρέφονταν γύρω από την ακίνητη Γη. Αργότερα προτάθηκαν και άλλα μοντέλα όπως το Ηλιοκεντρικό μοντέλο του Κοπέρνικου ή το Νευτώνειο μοντέλο του Ηλιακού συστήματος [3].

Με την πάροδο του χρόνου, την ανάπτυξη της τεχνολογίας και της αστρονομίας έγινε γνωστό ότι το ηλιακό μας σύστημα περιέχεται σε ένα γαλαξία που αποτελείται από δισεκατομμύρια άστρα, γνωστό ως Milky Way, πέρα από τον οποίο εκτείνονται και άλλοι γαλαξίες [12]. Οι παρατηρήσεις των φασματικών γραμμών και της κατανομής των γαλαξιών αυτών οδήγησαν σε πληθώρα νέων θεωριών ενώ η ανακάλυψη της μετατόπισης στο ερυθρό (redshift) και της κοσμικής μικροκυματικής ακτινοβολίας υποβάθρου (cosmic microwave background radiation) απέδειξαν τη διαστολή του σύμπαντος και το γεγονός ότι αυτό “πρέπει να έχει μια αρχή” [12].

Το επικρατέστερο επιστημονικό μοντέλο δημιουργίας του Σύμπαντος είναι γνωστό ως Big Bang (Μεγάλη Έκρηξη). Η ονομασία Big Bang (Μεγάλη Έκρηξη) δεν είναι ακριβής αλλά χρησιμοποιείται για λόγους καλύτερης (νοερής) κατανόησης. Στην πραγματικότητα το Σύμπαν δεν ξεκίνησε με μία Μεγάλη Έκρηξη. Μια έκρηξη αρχίζει σε ένα σημείο του χώρου και συνεχίζει εκτοξεύοντας ύλη προς τα έξω με απαρχή το αρχικό της κέντρο. Το Σύμπαν δε διαστέλλεται γύρω από ένα κέντρο και δεν διαστέλλεται μέσα ή προς κάτι. Ο ίδιος ο χώρος διαστέλλεται (Εικόνα 1.1) [3], [12]. Σύμφωνα με το μοντέλο αυτό το Σύμπαν ξεκίνησε να διαστέλλεται από ένα στάδιο υψηλής θερμοκρασίας και πυκνότητας όπου ήταν συγκεντρωμένη όλη η ύλη και η ενέργεια του Σύμπαντος. Από εκείνη τη χρονική στιγμή που καλείται εποχή του Planck (και αντιστοιχεί από 0 μέχρι 10^{-43} seconds) το Σύμπαν διαστέλλεται μέχρι τη σημερινή του μορφή. Σύμφωνα με κοσμολογικές θεωρίες, είναι πιθανό το Σύμπαν να έχει περάσει μία σύντομη περίοδο “κοσμικού πληθωρισμού” (cosmic inflation), που συνέβη περίπου στα 10^{-36} δευτερόλεπτα (seconds) μετά το Big Bang και διήρκησε μέχρι τα 10^{-32} δευτερόλεπτα (seconds) [3]. Η θεωρητική ιδέα της διαστολής επιβεβαιώνεται από διάφορα πειράματα ενώ πρόσφατες παρατηρήσεις δείχνουν ότι η διαστολή αυτή επιταχύνεται από την ύπαρξη “σκοτεινής ενέργειας” (dark energy).

Αντίστοιχα, έχει ορισθεί και η έννοια της σκοτεινής ύλης (dark matter) ως η ύλη που αν και αποτελεί το μεγαλύτερο μέρος ύλης στο Σύμπαν δεν μπορεί να ανιχνευθεί με την υπάρχουσα τεχνολογία.



Εικόνα 1.1: Σχηματική αναπαράσταση της διαστολής ενός μέρους ενός επίπεδου Σύμπαντος. Σύμφωνα με το μοντέλο του Big Bang το Σύμπαν διαστάλθηκε από μία κατάσταση εξαιρετικά υψηλής πυκνότητας και θερμοκρασίας και συνεχίζει να διαστέλλεται έως σήμερα. Έτσι, ο ίδιος ο χώρος διαστέλλεται “συμπαράσύροντας” μαζί του τους γαλαξίες, όπως ένα σταφιδόψωμο που φουσκώνει παρασύρει τις σταφίδες.

Πρόσφατες μελέτες των αστρονομικών παρατηρήσεων δείχνουν ότι η ηλικία του Σύμπαντος είναι 13.75 ± 0.13 δισεκατομμύρια χρόνια (billion years) ενώ η διάμετρος του παρατηρούμενου Σύμπαντος είναι το λιγότερο 93 δισεκατομμύρια έτη φωτός (billion light years) ή 8.80×10^{26} μέτρα (meters) [2]. Σύμφωνα με τη Γενική θεωρία της Σχετικότητας, ο χώρος μπορεί να διαστέλλεται ταχύτερα από την ταχύτητα του φωτός, κατά συνέπεια μόνο ένα μικρό ποσοστό του Σύμπαντος είναι ορατό από εμάς εξαιτίας του περιορισμού που προκύπτει από την ταχύτητα του φωτός. Αφού δεν είναι δυνατή η παρατήρηση πέρα από τους περιορισμούς που ανακύπτουν από την ταχύτητα του φωτός, δεν είναι βέβαιο αν το μέγεθος του Σύμπαντος είναι πεπερασμένο ή άπειρο [3]. Αυτός ο περιορισμός στην “ορατότητα” αντικατοπτρίζεται στην παρουσία “οριζόντων”. Καθώς το Σύμπαν έχει μια ορισμένη ηλικία και το φως ταξιδεύει με ορισμένη ταχύτητα, πρέπει να υπάρχουν γεγονότα στο παρελθόν των οποίων το φως δεν έχει φτάσει ακόμα σε μας. Αυτό βάζει ένα όριο στα πιο μακρινά

αντικείμενα που μπορούν να παρατηρηθούν (past horizon). Αντίστοιχα, λόγω της διαστολής του χώρου και του γεγονότος ότι τα πιο “μακρινά” αντικείμενα απομακρύνονται ταχύτερα, το φως που εκπέμπεται από εμάς μπορεί να μη φτάσει ποτέ σε αυτά (future horizon). Έτσι δεν μπορούμε να δούμε πιο πίσω (ή πιο μπροστά) στο χρόνο από τον ορίζοντα [3], [12].

2. Στοιχεία Αστροφυσικής και Εκλάμψεις Ακτίνων Γάμμα (Gamma Ray Bursts)

i. Εξέλιξη του σύμπαντος

Μελετώντας την εξέλιξη του Σύμπαντος πίσω στο χρόνο, με τη βοήθεια της γενικής σχετικότητας, διαπιστώνουμε ότι το Σύμπαν ξεκίνησε από μια κατάσταση άπειρης πυκνότητας και θερμοκρασίας σε πεπερασμένο χρόνο στο παρελθόν. Όπως αναφέρθηκε ανωτέρω δεν είναι δυνατό να δούμε πιο πίσω στο χρόνο από την εποχή του Planck. Έτσι, ως γέννηση του Σύμπαντος θεωρείται το Big Bang. Μετρήσεις της διαστολής supernovae τύπου Ia, διακυμάνσεις της θερμοκρασίας της κοσμικής μικροκυματικής ακτινοβολίας υποβάθρου και μελέτη της συνάρτησης συσχέτισης μεταξύ των γαλαξιών καταδεικνύουν ως ηλικία του Σύμπαντος 13.75 ± 0.13 δισεκατομμύρια χρόνια [3], [2].

Οι φάσεις του Σύμπαντος που ακολουθούν το Big Bang αποτελούν αντικείμενο πολλών θεωριών. Στα περισσότερα θεωρητικά μοντέλα το Σύμπαν κυριαρχείται από πολύ μεγάλη πυκνότητα ενέργειας, τεράστιες θερμοκρασίες και πιέσεις που κατανέμονται ομογενώς και ισοτροπικά, ενώ διαστέλλεται πολύ γρήγορα και “κρυώνει”. Τη φάση της ραγδαίας διαστολής ακολουθεί μια μετάπτωση φάσης που καλείται “κοσμικός πληθωρισμός” (cosmic inflation) κατά τη διάρκεια της οποίας το Σύμπαν διογκώνεται εκθετικά. Μόλις σταματήσει η διόγκωση το Σύμπαν αποτελείται από πλάσμα κουάρκ-γλουονίων (quark-gluon plasma) και άλλα στοιχειώδη σωματίδια. Η πολύ μεγάλη θερμοκρασία οδηγεί στην τυχαία κίνηση των σωματιδίων με σχετικιστικές ταχύτητες και τη συνεχή δημιουργία και καταστροφή ζευγών σωματιδίου - αντισωματιδίου όλων των ειδών κατά τη διάρκεια των συγκρούσεων. Κάποια στιγμή μια διαδικασία που δεν είναι πλήρως κατανοητή και καλείται “γένεση βαρυονίων” (baryogenesis) παραβιάζει τη

διατήρηση του βαρυονικού αριθμού και οδηγεί σε μία πολύ μικρή αύξηση των κουάρκς (quarks) και των λεπτονίων (leptons) έναντι των αντικουάρκς (antiquarks) και των αντιλεπτονίων (antileptons). Το αποτέλεσμα είναι η κυριαρχία της ύλης έναντι της αντιύλης στο τωρινό Σύμπαν [3].

Το Σύμπαν συνέχισε να μεγαλώνει σε μέγεθος και να μειώνεται η θερμοκρασία του, οδηγώντας στη μείωση της ενέργειας κάθε σωματιδίου. Μετά από περίπου 10^{-11} δευτερόλεπτα (seconds), η εικόνα του Σύμπαντος είναι σε μεγάλο βαθμό κατανοητή, αφού τα σωματίδια έχουν ενέργειες που μπορούν να επιτευχθούν στα σημερινά πειράματα σωματιδιακής φυσικής. Στα 10^{-6} δευτερόλεπτα (seconds) περίπου, τα κουάρκς (quarks) και τα γλουόνια (gluons) συνενώνονται και σχηματίζουν βαρυόνια (baryons). Η μικρή αύξηση των κουάρκς (quarks) έναντι των αντικουάρκς (antiquarks) οδηγεί σε μία μικρή αύξηση των βαρυονίων (baryons) έναντι των αντιβαρυονίων (antibaryons) [3]. Η θερμοκρασία δεν είναι πλέον αρκετά υψηλή για τη δημιουργία νέων ζευγών βαρυονίου – αντιβαρυονίου. Έτσι, η εξαύλωση που ακολουθεί αφήνει μόνο ένα στα 10^{10} των αρχικών πρωτονίων και νετρονίων και κανένα από τα αντισωματίδιά τους. Μία ανάλογη διαδικασία συνέβη στο 1 δευτερόλεπτο (second) περίπου και αφορούσε στα ηλεκτρόνια (electrons) και τα ποζιτρόνια (positrons). Μετά από αυτές τις διαδικασίες εξαύλωσης τα υπολειπόμενα πρωτόνια, νετρόνια και ηλεκτρόνια δεν είχαν πλέον σχετικιστικές ταχύτητες και η πυκνότητα ενέργειας του Σύμπαντος κυριαρχείτο από φωτόνια (και λίγα νετρίνα) [3].

Στη συνέχεια και όταν η θερμοκρασία ήταν περίπου 1 δισεκατομμύριο Kelvin και η πυκνότητα είχε περίπου την τιμή της πυκνότητας του αέρα, τα νετρόνια συνδέθηκαν με τα πρωτόνια και σχηματίστηκαν οι πυρήνες δευτερίου και ηλίου, σε μια διαδικασία που καλείται πρωταρχική νουκλεοσύνθεση (primordial nucleosynthesis). Τα περισσότερα πρωτόνια παρέμειναν ελεύθερα σχηματίζοντας τους πυρήνες υδρογόνου [3].

Σε αυτό το στάδιο, το πρώιμο Σύμπαν ήταν αδιαφανές στα φωτόνια αφού δεν μπορούσαν να διαφύγουν λόγω των συνεχών συγκρούσεών τους με τα ελεύθερα ηλεκτρόνια και τους πυρήνες. Το Σύμπαν κυριαρχείται από μάζα (matter dominated Universe) [3]. Η μείωση της θερμοκρασίας και η συνένωση ηλεκτρονίων και πυρήνων προς σχηματισμό ατόμων (κυρίως υδρογόνου) οδήγησε στην αποσύνδεση (decouple) της ακτινοβολίας από την ύλη. Από τη στιγμή της αποσύνδεσης, η ακτινοβολία συνέχισε να ταξιδεύει στο χώρο ανεμπόδιστη. Αυτή η εναπομένουσα ακτινοβολία είναι γνωστή ως κοσμική μικροκυματική ακτινοβολία υποβάθρου (Cosmic Microwave

Background Radiation - CMBR) και η μελέτη της οδηγεί σε χρήσιμα συμπεράσματα για το πρώιμο Σύμπαν [3].

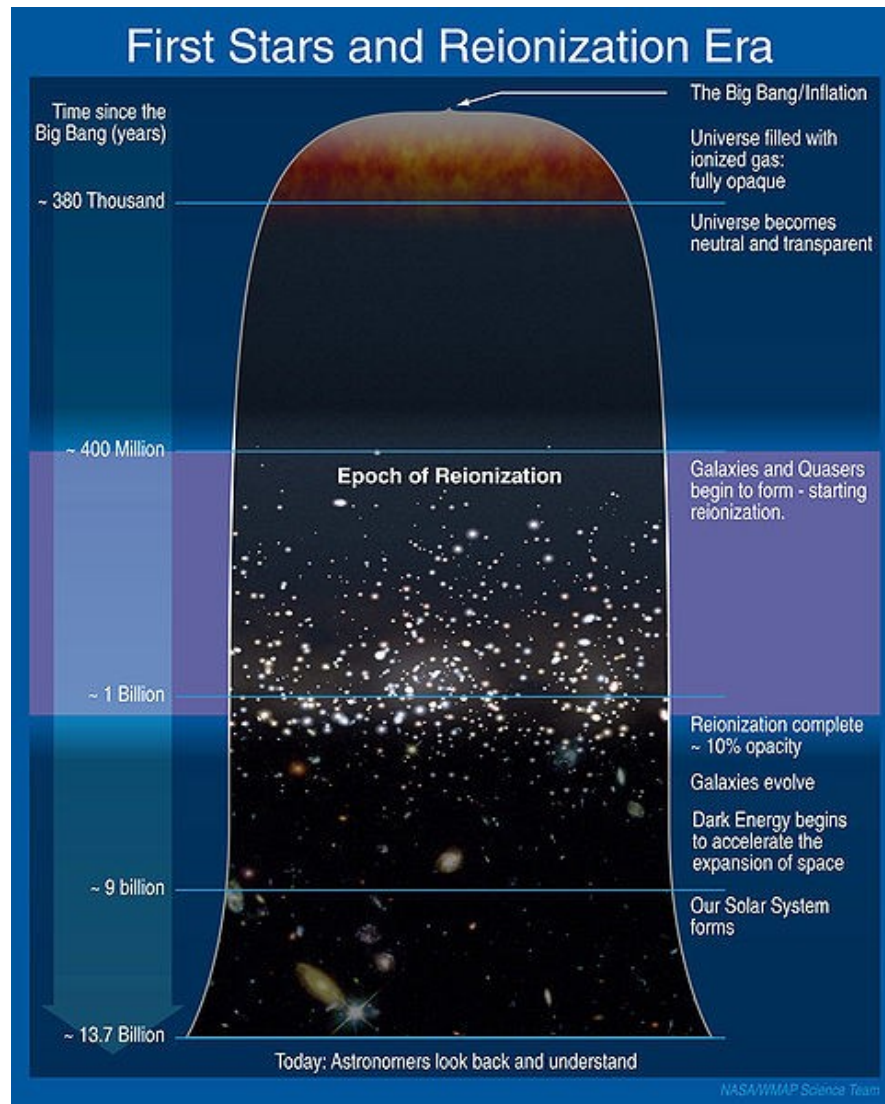


Εικόνα 2.1: Το τηλεσκόπιο Hubble Ultra Deep Field δείχνει γαλαξίες από μια παλιά εποχή, όταν το Σύμπαν ήταν νεότερο, πυκνότερο και θερμότερο σύμφωνα με τη θεωρία του Big Bang.

Στο πρώιμο Σύμπαν η ύλη ήταν σχεδόν ομοιόμορφα κατανομημένη με περιοχές που είχαν ελαφρώς μεγαλύτερη πυκνότητα από τις παρακείμενες. Οι περιοχές με μεγαλύτερη πυκνότητα ασκούν βαρυτική έλξη στην ύλη δίπλα τους, με αποτέλεσμα οι πυκνές περιοχές να γίνονται ακόμα πυκνότερες και οι αραιές ακόμα αραιότερες [3]. Έτσι σχηματίζονται νέφη αερίων, αστέρια, γαλαξίες και άλλοι αστρονομικοί σχηματισμοί που παρατηρούνται σήμερα. Αυτές οι δομές που σχηματίστηκαν στο νεαρό Σύμπαν, εξέπεμπαν ακτινοβολία με ενέργεια ικανή για τον ιονισμό των ατόμων υδρογόνου (και αργότερα ηλίου). Σε αυτή τη φάση επαναϊονισμού (reionization – 1 δισεκατομμύριο χρόνια μετά το Big Bang / σε redshift $6 < z < 20$) το Σύμπαν μετέβη από το στάδιο ύπαρξης ουδέτερων ατόμων στην ύπαρξη ιονισμένου πλάσματος (ionized plasma) [3]. Εντούτοις, η διαστολή του Σύμπαντος οδήγησε στο διασκορπισμό της ύλης σε μεγάλη απόσταση, με αποτέλεσμα οι αντιδράσεις σκέδασης να είναι λιγότερο συχνές σε σύγκριση με την εποχή πριν τον επαναϊονισμό. Έτσι, αν και το Σύμπαν είναι γεμάτο ιονισμένα άτομα υδρογόνου (τα οποία απατώνται σε χαμηλή πυκνότητα), παραμένει διαφανές στην ακτινοβολία όπως παρατηρείται και σήμερα [3].

Οι λεπτομέρειες της διαδικασίας σχηματισμού των κοσμικών δομών εξαρτώνται από τη συνολική ποσότητα και τον τύπο της ύλης στο Σύμπαν. Οι τέσσερις πιθανοί τύποι ύλης είναι γνωστοί ως κρύα σκοτεινή ύλη (cold dark

matter), θερμή σκοτεινή ύλη (warm dark matter), ζεστή σκοτεινή ύλη (hot dark matter) και βαρυονική ύλη (baryonic matter). Μετρήσεις (από το WMAP- Wilkinson Microwave Anisotropy Probe, διαστημόπλοιο που μετράει διαφοροποιήσεις στη θερμοκρασία της CMBR) δείχνουν ότι η σκοτεινή ύλη είναι κρύα σκοτεινή ύλη (cold dark matter) και αποτελεί ποσοστό περίπου 22% της ύλης του Σύμπαντος, ενώ η βαρυονική ύλη αποτελεί μόλις το 4% [3].



Εικόνα 2.2: Σχηματική αναπαράσταση της εξέλιξης του Σύμπαντος.

Η μελέτη της CMBR και των φασματικών γραμμών από supernovae τύπου Ia οδηγούν στο συμπέρασμα ότι στο Σύμπαν υπάρχει μία μορφή ενέργειας που διαπερνά όλο το χώρο. Αυτή η μορφή ενέργειας αναφέρεται στις εξισώσεις πεδίου στη γενική σχετικότητα του Einstein ως κοσμολογική σταθερά (cosmological constant) Λ ($\Lambda \neq 0$),

αλλά η σύνθεση και η φύση της παραμένουν άγνωστα [3]. Οι θεωρητικοί φυσικοί αναφέρουν την κοσμολογική σταθερά ως την ενεργειακή πυκνότητα του κενού. Σύμφωνα με παρατηρήσεις η κοσμολογική σταθερά αποτελεί το 74% της ολικής πυκνότητας ενέργειας του σημερινού Σύμπαντος. Λαμβάνοντας υπόψη τη βαρυονική και τη μη βαρυονική ύλη (συνολικά 26%) και τη κοσμολογική σταθερά Λ , υπολογίζεται η πυκνότητα του Σύμπαντος (Ω) και παρατηρείται ότι αυτή αντιστοιχεί σε ένα σχεδόν επίπεδο Σύμπαν (κοντά στην κρίσιμη πυκνότητα), δηλαδή ένα Σύμπαν σχεδόν χωρίς καμπυλότητα (θετική ή αρνητική) [3].

Όπως γίνεται φανερό, η θεωρία του Big Bang στηρίζεται σε τέσσερις θεμέλιους λίθους που έχουν αποδειχθεί από παρατηρήσεις κατά τα αρχικά στάδια μελέτης του Σύμπαντος [1], [3]. Αυτοί είναι:

- Ο νόμος του Hubble που οδηγεί στην παρατήρηση των μετατοπίσεων στο ερυθρό (redshifts) των γαλαξιών
- Οι λεπτομερείς μετρήσεις της μικροκυματικής ακτινοβολίας υποβάθρου
- Η αφθονία ελαφρών στοιχείων (όπως προκύπτει από την πρωταρχική νουκλεοσύνθεση) και
- Η κατανομή και η εξέλιξη των γαλαξιών

Ο νόμος του Hubble και η διαστολή του χώρου

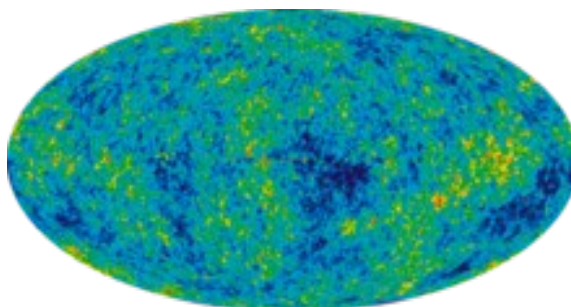
Παρατηρήσεις των φασμάτων από μακρινούς γαλαξίες και κβάζαρς (quasars) δείχνουν ότι οι φασματικές τους γραμμές παρουσιάζουν μια μετατόπιση στο ερυθρό (redshift) (ή μετατόπιση στο κυανό - blueshift) από την οποία προσδιορίζεται η ταχύτητα με την οποία τα αντικείμενα αυτά απομακρύνονται από εμάς (ή πλησιάζουν προς εμάς). Ο Slipher (1914) παρατήρησε ότι το φάσμα των περισσότερων γαλαξιών παρουσίαζε μετατόπιση στο ερυθρό (redshift), συμπεραίνοντας ότι αυτοί απομακρύνονται από εμάς. Μετά τον προσδιορισμό των αποστάσεων αρκετών γαλαξιών (μέσω της κοσμικής κλίμακας αποστάσεων που χρησιμοποιούν οι αστρονόμοι) ο Hubble (1929) ανακάλυψε ότι οι πιο μακρινοί γαλαξίες απομακρύνονται με μεγαλύτερες ταχύτητες από εμάς. Έτσι θεώρησε ότι ακολουθείται μια γραμμική σχέση της μορφής: [1], [3]

$$v = H_0 \cdot l$$

ανάμεσα στην ταχύτητα v και την απόσταση l , που καλείται νόμος του Hubble (Hubble's law). Η σταθερά αναλογίας H που καλείται σταθερά του Hubble μπορεί να μεταβάλλεται με το χρόνο, ενώ H_0 καλείται η σταθερά του Hubble στο παρόν [1]. Η ερμηνεία του νόμου του Hubble αφορά στην ομοιόμορφη διαστολή του Σύμπαντος παντού στο χώρο και αποτελεί ακρογωνιαίο λίθο της θεωρίας της Μεγάλης Έκρηξης. Η ομοιόμορφη αυτή διαστολή που αντικατοπτρίζεται και στις μετατοπίσεις στο ερυθρό (redshifts), επαληθεύει την κοσμολογική αρχή. Η κοσμολογική αρχή (cosmological principle), σύμφωνα με την οποία το Σύμπαν πρέπει να είναι ομογενές και ισότροπο, αποτελεί θεμέλιο κάθε κοσμολογικής θεωρίας [3].

Κοσμική μικροκυματική ακτινοβολία υποβάθρου – (Cosmic Microwave Background Radiation - CMBR)

Όπως αναφέρθηκε παραπάνω το Σύμπαν στα πρώτα στάδια της δημιουργίας του ήταν αδιαφανές στα φωτόνια. Μετά τη δημιουργία ατόμων και τον αποσύνδεση της ακτινοβολίας από την ύλη (επανασύνδεση - recombination) το Σύμπαν έγινε διαφανές στα φωτόνια που ταξίδευαν ανενόχλητα σε αυτό. Αυτά τα φωτόνια αποτελούν τη CMBR που παρατηρείται σήμερα ενώ η παρατήρηση διακυμάνσεων στο φάσμα της αποτελεί έναν άμεσο τρόπο θέασης του πρώιμου Σύμπαντος.



Εικόνα 2.3: Εικόνα της CMBR από το WMAP.

Η ενέργεια των φωτονίων αυτών μετατοπίστηκε στο ερυθρό (που αντιστοιχεί σε θερμοκρασία μέλανος σώματος 3000 K) λόγω της διαστολής του Σύμπαντος όμως διατήρησε το φάσμα μελανού σώματος που είχε όταν βρισκόταν σε θερμοδυναμική ισορροπία. Εντούτοις η διαστολή επέφερε πτώση της θερμοκρασίας με αποτέλεσμα τα φωτόνια που ανιχνεύονται να ανήκουν (λαμβάνοντας υπόψη το φαινόμενο Doppler)

στην περιοχή μικροκυμάτων του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος. Το 1964 οι Penzias και Wilson ανακάλυψαν και μελέτησαν τη CMBR και διαπίστωσαν πως είναι ισοτροπική και αντιστοιχεί σε φάσμα μελανού σώματος θερμοκρασίας περίπου 3 K. Ακριβέστερες μετρήσεις (με το COBE - Cosmic Background Explorer satellite της NASA) δείχνουν θερμοκρασία 2,725 K [3]. Τα ανισοτροπικά χαρακτηριστικά στο φάσμα της CMBR και συγκεκριμένα μετρήσεις του τυπικού γωνιακού μεγέθους (typical angular size) των ανισοτροπιών έδειξαν ότι το Σύμπαν είναι σχεδόν επίπεδο [3].

Το ομαλό φάσμα της ακτινοβολίας υποβάθρου παρουσίαζε μερικά προβλήματα στην ιδέα του διαστελλόμενου σύμπαντος. Έτσι φωτόνια που προέρχονταν από διαφορετικές κατευθύνσεις στον ουρανό, που σήμαινε ότι δεν είχαν βρεθεί ποτέ σε επαφή, παρουσίαζαν πολύ μεγάλη ομοιομορφία. Η λύση σε αυτό το πρόβλημα δόθηκε με την ιδέα του κοσμικού πληθωρισμού (cosmic inflation). Κατά το σύντομο στάδιο του πληθωρισμού όπου το Σύμπαν διαστελλόταν εκθετικά, περιοχές που βρίσκονταν σε θερμοδυναμική ισορροπία μεταξύ τους απομακρύνθηκαν σε μεγάλες αποστάσεις, με αποτέλεσμα όλο το παρατηρούμενο Σύμπαν να προέρχεται από μία περιοχή σε ισορροπία [3].

Αφθονία ελαφρών στοιχείων

Σύμφωνα με τη θεωρία του Big Bang και συγκεκριμένα την πρωταρχική νουκλεοσύνθεση (primordial nucleosynthesis) είναι δυνατός ο προσδιορισμός της συγκέντρωσης ^4He , ^3He , ^2H , ^7Li στο Σύμπαν σε αναλογία προς το υδρογόνο ^1H . Ο θεωρητικός υπολογισμός συμφωνεί με τις παρατηρούμενες ποσότητες αποδεικνύοντας την ορθότητα της θεωρίας που αναπτύχθηκε παραπάνω [3].

Η κατανομή και η εξέλιξη των γαλαξιών

Οι παρατηρήσεις της κατανομής γαλαξιών και των κβάζαρς (quasars) ενισχύουν την θεωρία του Big Bang, σύμφωνα με την οποία οι πρώτοι γαλαξίες και κβάζαρς (quasars) δημιουργήθηκαν περίπου 1 δισεκατομμύριο χρόνια μετά τη Μεγάλη Έκρηξη. Ύστερα άρχισαν να σχηματίζονται ακόμα μεγαλύτερες δομές, όπως σμήνη γαλαξιών (galaxy clusters) και υπερ - σμήνη γαλαξιών (galaxy superclusters).

Μετά τη δημιουργία τους, οι πληθυσμοί των άστρων εξελίσσονται και γερνούν. Λόγω της σταθερής τιμής της ταχύτητας του φωτός όσο πιο μεγάλη είναι η απόσταση ενός άστρου από τη γη, τόσο πιο πίσω στο χρόνο γίνεται η παρατήρηση [3]. Έτσι οι μακρινοί γαλαξίες, που παρατηρούνται σαν να ήταν στα πρώτα στάδια εξέλιξης του Σύμπαντος, διαφέρουν από τους κοντινούς γαλαξίες (με μικρότερες μετατοπίσεις στο ερυθρό - redshifts). Αντίστοιχα, οι γαλαξίες που σχηματίστηκαν πρόσφατα παρουσιάζουν σημαντικές διαφορές με αυτούς που είχαν σχηματιστεί μετά το Big Bang. Οι παρατηρήσεις του σχηματισμού των άστρων και της κατανομής των γαλαξιών και των κβάρζαρς (quasars) δείχνουν ότι το Σύμπαν δεν παραμένει σταθερό και συμφωνούν με τη θεωρητική περιγραφή του Big Bang [3].

ii. Σχηματισμός γαλαξιών και Εξωγαλαξιακή αστρονομία

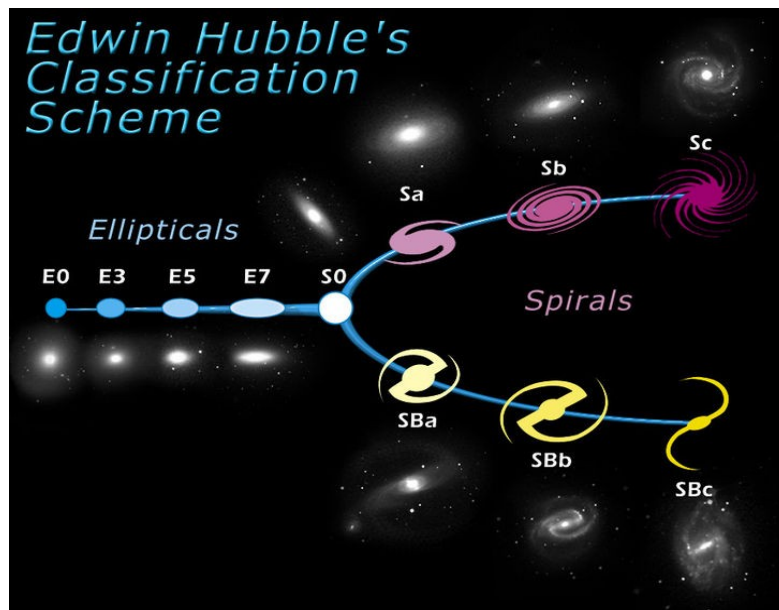
Ο σχηματισμός γαλαξιών πραγματοποιήθηκε λόγω μικρών ανομοιογενιών που υπήρχαν στην κατανομή της ύλης στα πρώτα στάδια εξέλιξης του Σύμπαντος. Ο μηχανισμός στον οποίο οφείλεται η δημιουργία των κοσμικών αυτών δομών καλείται βαρυτική αστάθεια (gravitational instability) [3]. Έτσι, όταν η θερμοκρασία μειώθηκε η ύλη συγκεντρώθηκε γύρω από τις αρχικές μικρές ανομοιογένειες λόγω βαρυτικής έλξης. Σταδιακά το υδρογόνο και το ήλιο, από τα οποία αποτελούταν κυρίως τότε το Σύμπαν, άρχισαν να συμπυκνώνονται σχηματίζοντας τα πρώτα άστρα και στη συνέχεια τους πρώτους γαλαξίες [1].

Οι γαλαξίες δεν κατανέμονται τυχαία και ομοιόμορφα στο χώρο, αλλά συγκεντρώνονται και σχηματίζουν σμήνη (clusters) δεκάδων, εκατοντάδων ή χιλιάδων μελών σε αποστάσεις εκατομμυρίων ετών φωτός. Με τη σειρά τους, τα σμήνη γαλαξιών ενώνονται με άλλα και σχηματίζουν υπερ - σμήνη γαλαξιών (galaxy superclusters), που εμφανίζονται διασκορπισμένα σε αποστάσεις εκατοντάδων εκατομμυρίων ετών φωτός [3]. Παράδειγμα αποτελεί ο γαλαξίας μας που μαζί με άλλους 30 παρόμοιους γειτονικούς γαλαξίες, σε ακτίνα 10 εκατομμυρίων ετών φωτός, σχηματίζουν ένα βαρυτικά συνδεδεμένο σύστημα που καλείται Τοπική ομάδα (Local Group). Η Τοπική Ομάδα (Local Group) μαζί με άλλες ομάδες γαλαξιών απαρτίζουν το Υπερσμήνος της Παρθένου (Virgo Supercluster). Αυτή η μη ομοιόμορφη κατανομή γαλαξιών στο χώρο έχει ως αποτέλεσμα μερικές περιοχές στο Σύμπαν να είναι απογυμνωμένες από ύλη, χωρίς ίχνος άστρων ή γαλαξιών. Σε αντίθεση άλλες

περιοχές είναι πλήρεις με τεράστιες συγκεντρώσεις δομών πολύ μεγάλων διαστάσεων. Η βαρυτική επιρροή των περιοχών αυτών μπορεί να εκτείνεται σε πολύ μακρινούς γαλαξίες. Μία από αυτές τις μεγάλες συσσωρεύσεις μάζας καλείται Μεγάλος Ελκυστής (Great Attractor) και βρίσκεται στο κέντρο του Υπερσμήνου της Παρθένου (Virgo Supercluster), σε απόσταση 200 εκατομμυρίων ετών φωτός από το γαλαξία μας [3].

Αν και η παραπάνω θεώρηση ερμηνεύει επιτυχώς το σχηματισμό των γαλαξιών, δεν εξηγεί την ποικιλομορφία τους. Οι γαλαξίες έχουν ποικιλία σχημάτων, από στρογγυλούς ή ελλειπτικούς γαλαξίες μέχρι επίπεδους ή σπειροειδείς. Ωστόσο μπορούν να ταξινομηθούν σε δύο κυρίως κατηγορίες με βάση θεμελιώδεις ιδιότητες. Έτσι, οι γαλαξίες σχηματισμού μπλε αστέρων (αστέρων με μεγαλύτερη φωτεινότητα) εμφανίζουν κυρίως σπείρες (spiral galaxies), ενώ οι γαλαξίες σχηματισμού κόκκινων αστέρων (αστέρων με μικρότερη φωτεινότητα) έχουν μορφή έλλειψης (elliptical galaxies) [1].

Η μεγάλη ποικιλία σχημάτων και μεγεθών απεικονίζεται στο διάγραμμα του Hubble – γνωστό ως “πιρούνι του Hubble” (Hubble’s fork) (Εικόνα 2.4). Σε αυτό παρατηρείται ότι οι ελλειπτικοί γαλαξίες παρουσιάζουν διαφορετικές ελλειπτικότητες ενώ οι σπειροειδείς διαχωρίζονται σε αυτούς που έχουν κοινές σπείρες (ordinary spirals) και σε αυτούς που έχουν ραβδοειδείς σπείρες (barred spirals). Οι τυπικές αναλογίες σπειροειδών και ελλειπτικών γαλαξιών σε ένα πλήθος γαλαξιών εξαρτώνται από το περιβάλλον. Έτσι σε κεντρικές περιοχές πλούσιων σμήνων γαλαξιών μόνο 10% αυτών είναι σπειροειδείς. Αντίθετα, οι σπειροειδείς γαλαξίες συνιστούν περίπου το 80% των φωτεινών γαλαξιών σε περιοχές του Σύμπαντος με χαμηλή πυκνότητα [1].



Εικόνα 2.4: “Το πιρούνι του Hubble” (Hubble’s fork) αποτελεί μια διαγραμματική απεικόνιση των γαλαξιών.



Εικόνα 2.5: NGC 891 ένας πολύ λεπτός γαλαξιακός δίσκος.



Εικόνα 2.6: Ο σπειροειδής (spiral) και barred γαλαξίας NGC 1300 από φωτογραφία με το τηλεσκόπιο Hubble (Hubble Space Telescope).

Οι γαλαξιακοί δίσκοι (Galactic disks) και οι σπειροειδείς γαλαξίες (Spiral galaxies) (Εικόνα 2.5 και 2.6) είναι πολύ λεπτοί, πυκνοί σχηματισμοί και περιστρέφονται πολύ γρήγορα. Ο δίσκος του γαλαξία μας (γνωστός ως Milky Way), που ανήκει σε αυτή την κατηγορία, έχει 100 φορές μεγαλύτερο μήκος από το πάχος του. Όμως, η πλειονότητα μάζας στους γαλαξίες αποτελείται από σκοτεινή ύλη με αποτέλεσμα να μην είναι δυνατή η παρατήρηση ή η ανίχνευσή της. Η παρουσία της δηλώνεται μόνο από την βαρυτική της επίδραση στην ύλη. Πολλοί γαλαξιακοί δίσκοι έχουν ένα διογκωμένο εξωτερικό δίσκο που αποτελείται από γηραιά άστρα. Τα άστρα αυτά αποτελούν τη γαλαξιακή άλω (halo) και έχουν πολύ μικρότερη περιεκτικότητα σε μέταλλα (αποτελούνται κυρίως από υδρογόνο και ήλιο) σε σχέση με τα άστρα που περιέχονται στο γαλαξιακό δίσκο [1].

Άλλα αστρονομικά αντικείμενα που πρέπει να ερμηνευθούν από τις θεωρίες σχηματισμού γαλαξιών είναι τα σφαιρικά σμήνη αστείων (globular clusters). Τα σμήνη αυτά τυπικά αποτελούνται από γηραιά, χαμηλής περιεκτικότητας σε μέταλλα άστρα αν και υπάρχουν περιπτώσεις που συναντώνται μερικά νεαρά ή μεγαλύτερης περιεκτικότητας σε μέταλλα άστρα σε αυτά. Μερικά από τα άστρα στα σφαιρικά σμήνη μπορεί να φτάνουν σε ηλικία την ηλικία του Σύμπαντος [1].

Οι αστρονομικές παρατηρήσεις καταδεικνύουν την ύπαρξη νεφελωμάτων υψηλής ταχύτητας (high velocity clouds). Τα νεφελώματα αφορούν νέφη ουδέτερου υδρογόνου που διαχέονται από το γαλαξία προς το διαγαλαξιακό χώρο. Οι θεωρίες

που έχουν προταθεί υποθέτουν το σχηματισμό αυτών των νεφελωμάτων από εναπομείναντα υλικά μετά το σχηματισμό των γαλαξιών. Τα νεφελώματα εμφανίζονται αναγκαία ως “πηγές” σχηματισμού αστερών στο γαλαξιακό δίσκο [1].

Τέλος, παρατηρείται ότι οι γιγάντιοι γαλαξίες περιέχουν μια μαύρη τρύπα πολύ μεγάλης μάζας στο κέντρο τους, που μπορεί να ισούται με εκατομμύρια ή δισεκατομμύρια φορές την ηλιακή μάζα. Η μαύρη τρύπα θεωρείται ότι έχει διάφορες ιδιότητες ανάλογα με το γαλαξία στον οποίο βρίσκεται [1].

Συνήθως οι γαλαξίες αποτελούνται από άστρα και διαστρική ύλη. Μερικές φορές ωστόσο παρατηρείται ένας πυκνός πυρήνας στο κέντρο του γαλαξία. Ο πυρήνας αυτός εκπέμπει άφθονες ποσότητες ακτινοβολίας σε διάφορα μήκη κύματος του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος (από ραδιοκύματα έως ακτίνες X). Ένας γαλαξίας αυτής της μορφής καλείται ενεργός γαλαξίας (active galaxy) ενώ ο πυρήνας του καλείται ενεργός γαλαξιακός πυρήνας (Active Galactic Nucleus -AGN). [1] Ένα “ακραίο” παράδειγμα ενεργού γαλαξιακού πυρήνα αποτελούν οι κβάζαρς (quasars). Ένας κβάζαρ (quasar - quasi-stellar radio source) αποτελεί έναν ενεργό γαλαξιακό πυρήνα σε μεγάλη απόσταση που εκπέμπει τεράστια ποσά ενέργειας και παρουσιάζει πολύ μεγάλη φωτεινότητα [1].

Γεγονότα πολύ μεγάλης φωτεινότητας κατά τη διάρκεια των οποίων εκπέμπονται τεράστια ποσά ενέργειας αποτελούν, επίσης, οι εκλάμψεις ακτίνων γ (Gamma Ray Bursts – σε συντόμευση GRBs). Τα GRBs παρατηρούνται σε μακρινούς γαλαξίες και η μελέτη τους αναμένεται να αποτελέσει εφελκυστήρα για τη βαθύτερη κατανόηση του Σύμπαντος.

3. Εκλάμψεις Ακτίνων Γάμμα (Gamma Ray Bursts - GRBs)

i. Εκλάμψεις Ακτίνων Γάμμα (GRBs)

Οι εκλάμψεις ακτίνων γάμμα (Gamma Ray Bursts – σε συντόμηση GRBs) αφορούν εκρήξεις, κατά τη διάρκεια των οποίων απελευθερώνονται πολύ μεγάλα ποσά ενέργειας. Οι εκλάμψεις ακτίνων γάμμα που έχουν μέχρι τώρα παρατηρηθεί λαμβάνουν χώρα σε πολύ μακρινούς γαλαξίες [4]. Θεωρούνται από τις πιο ενεργειακές εκρήξεις στο σύμπαν μετά τη Μεγάλη Έκρηξη. Αυτές οι εκλάμψεις ακτίνων γ έχουν τυπικά μικρούς χρόνους διάρκειας, της τάξης μερικών δευτερολέπτων (seconds) και αποτελούν ένα από τα λιγότερο κατανοητά φαινόμενα στην αστρονομία. Μέχρι σήμερα δεν υπάρχει μια κοινά αποδεκτή επιστημονική θεωρία στην αστροφυσική κοινότητα όσον αφορά το πώς παράγονται τα GRBs [1].

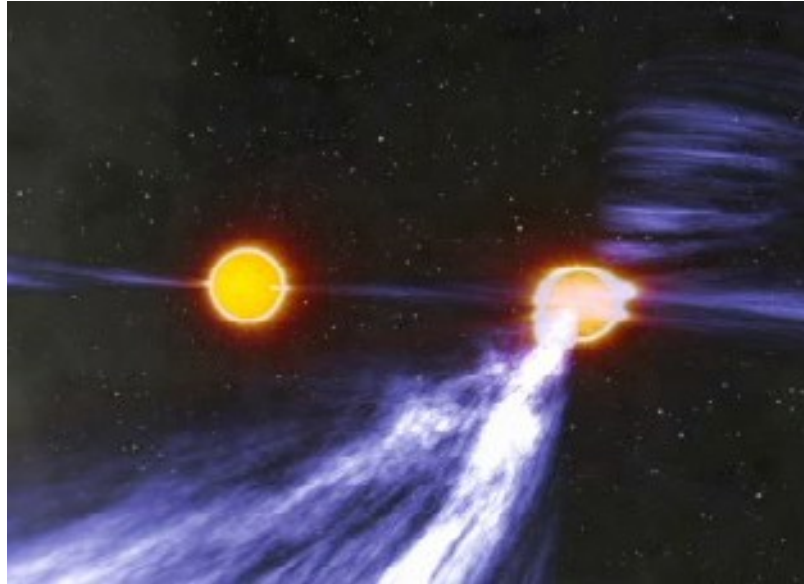
Η αρχική ανακάλυψη των GRBs έγινε κατά περίεργο τρόπο από τους αμερικανικούς δορυφόρους Vela το 1960 [4]. Οι δορυφόροι αυτοί σχεδιάστηκαν με σκοπό την ανίχνευση ακτίνων γ από μυστικές δοκιμές πυρηνικών όπλων που θα διεξήγαγε η Σοβιετική Ένωση ή άλλες χώρες [1]. Ωστόσο έγινε γρήγορα αντιληπτό ότι μερικά από τα σήματα που ανιχνεύθηκαν ήταν εξωγήινης προέλευσης [1]. Αρχικά υποτέθηκε ότι τα GRBs προέρχονταν από πηγές που βρίσκονταν μέσα στο γαλαξία μας [4]. Όμως, η εκτόξευση του Compton Gamma Ray Observatory το 1991, με τον «υψηλής ευαισθησίας» ανιχνευτή ακτίνων γ BATSE (Burst and Transient Source Explorer) έδειξε ότι τα παρατηρούμενα GRBs ήταν εξωγαλαξιακής προέλευσης. Πολλά GRBs ανιχνεύθηκαν και έγινε εμφανές ότι παρουσίαζαν ισοτροπική κατανομή, μη προσανατολισμένη σε κάποια κατεύθυνση στο χώρο, όπως το γαλαξιακό επίπεδο ή κέντρο, γεγονός που αποδείκνυε ότι πρέπει να προέρχονται από πηγές εκτός του γαλαξία μας [4].

Πολλά θεωρητικά μοντέλα που μελετούν την προέλευση των GRBs, αξιώνουν ότι πρέπει να υπάρχει μία «αχνή» εκπομπή φωτός σε μεγαλύτερα μήκη κύματος που ακολουθεί την αρχική έκρηξη. Αιτία αυτής της εκπομπής θεωρούνται οι συγκρούσεις ανάμεσα στα υλικά της έκρηξης και τη διαστρική ύλη [4]. Αυτή η “αχνή” εκπομπή φωτός που ονομάστηκε “απόφωτο” (afterglow) εντοπίστηκε το 1997 όταν ο δορυφόρος BeppoSAX ανίχνευσε μία έκλαμψη ακτίνων γ (GRB970228 – 28/02/1997) ακολουθούμενη από αχνή εκπομπή ακτίνων X [4]. Η εκπομπή ακτίνων X συνέβη αμέσως μετά το GRB και προερχόταν από το ίδιο σημείο του ουρανού [1]. Αργότερα

τέτοια afterglows βρέθηκαν να ακολουθούν πολλά GRBs. Μετά το πέρας των GRBs, τα οπτικά απόφωτά (afterglows) τους έδειχναν ότι αυτά προέρχονταν από πολύ μακρινούς, αγνούς γαλαξίες. Οι μετατοπίσεις στο ερυθρό (redshifts) μερικών από αυτούς τους γαλαξίες μετρήθηκαν οδηγώντας τελικά στον προσδιορισμό της απόστασής τους [1]. Μία χαρακτηριστική μέτρηση μετατόπισης στο ερυθρό (redshift z) είναι αυτή που προέκυψε από το φάσμα του GRB970508 με $z = 0.835$ τοποθετώντας το GRB σε απόσταση περίπου 6 δισεκατομμυρίων ετών φωτός (1 έτος φωτός = 10^{16} μέτρα) από τη Γη [4].

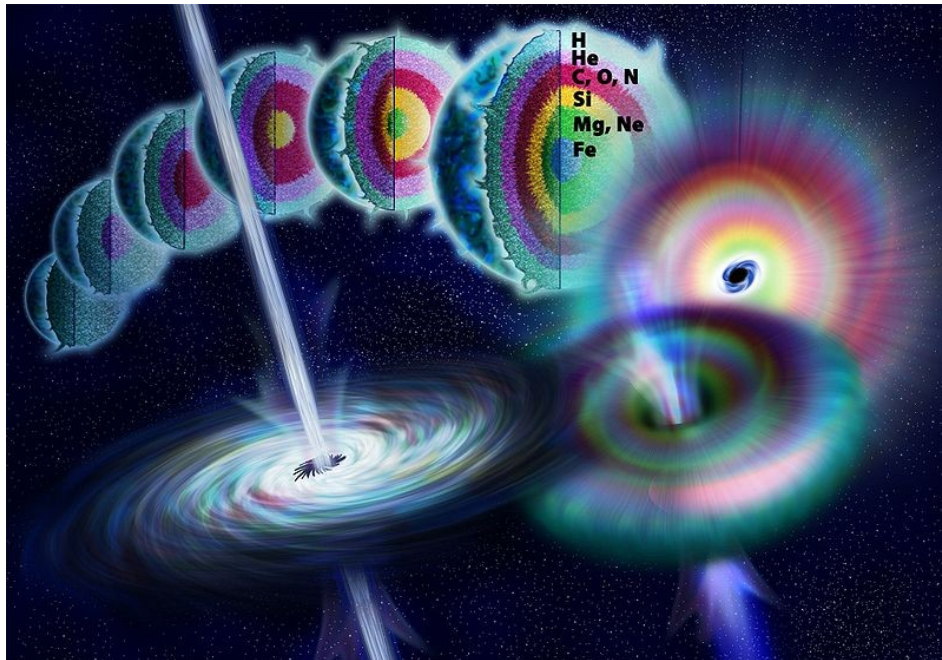
Οι αστρονόμοι συμφωνούν ότι τα GRBs κατά πάσα πιθανότητα περιλαμβάνουν σχετικιστικά κινούμενα υλικά, δεν υπάρχει όμως συμφωνία όσον αφορά στις λεπτομέρειες του φυσικού μηχανισμού που τα παράγει. Δεν είναι ακόμα σαφές αν παράγονται όλα τα GRBs με τον ίδιο τρόπο ή αν υπάρχουν δύο ή τρεις διαφορετικοί μηχανισμοί παραγωγής [1].

Μία δημοφιλής θεωρητική ιδέα είναι ότι τα GRBs προκαλούνται από συγκρούσεις μεταξύ δύο αστέρων νετρονίων. Το ζεύγος αυτών των αστέρων νετρονίων που βρίσκεται ο ένας σε τροχιά γύρω από τον άλλο, ένας εκ των οποίων λειτουργεί ως πάλσαρ (pulsar – περιστρεφόμενος αστέρας νετρονίων, ισχυρά μαγνητισμένος, που εκπέμπει ακτίνα ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας) καλείται δυαδικός πάλσαρ (binary pulsar) (Εικόνα 3.1). Καθώς οι δύο αστέρες νετρονίων βρίσκονται ο ένας σε τροχιά γύρω από τον άλλο, χάνουν ενέργεια λόγω βαρυτικής ακτινοβολίας και πλησιάζουν όλο και περισσότερο με αποτέλεσμα να συγκρουστούν μεταξύ τους και να παρατηρηθεί έκλαμψη ακτίνων γ . Εντούτοις, σύμφωνα με στατιστικές εκτιμήσεις αυτός ο μηχανισμός παραγωγής θα οδηγούσε σε μικρότερο αριθμό παρατηρούμενων GRBs από τον αριθμό που τελικά ανιχνεύουμε [1].



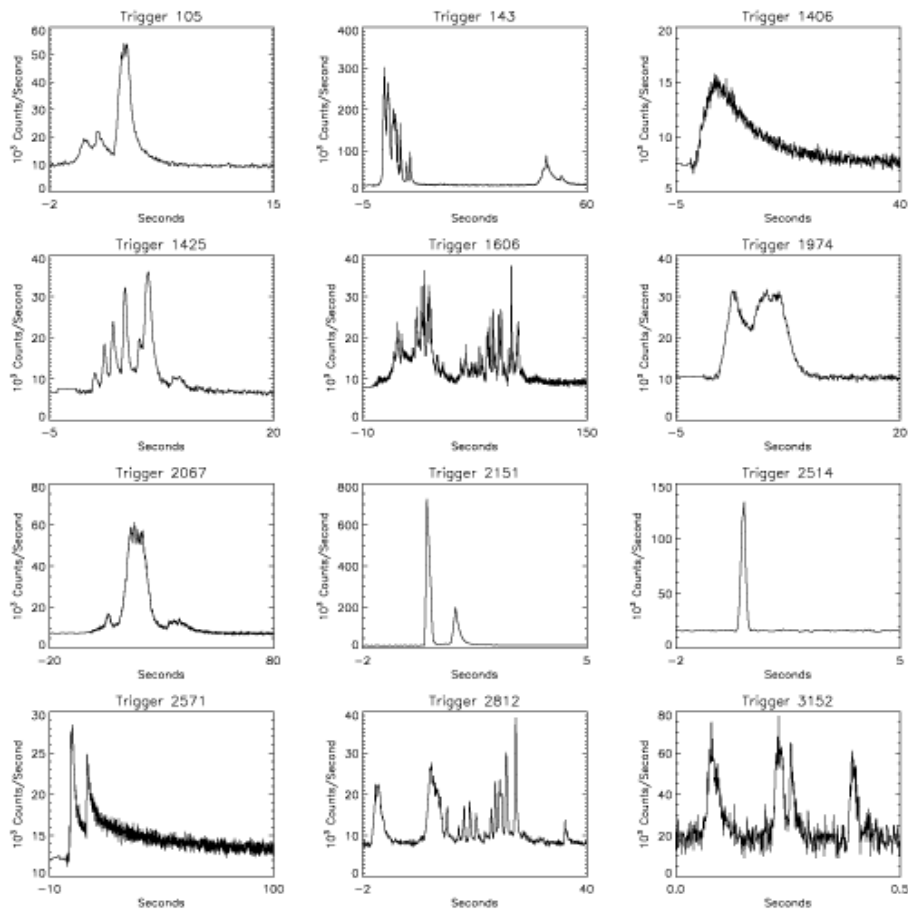
Εικόνα 3.1: Σχηματική αναπαράσταση ενός δυαδικού πάλσαρ (binary pulsar).

Σύμφωνα με έναν άλλο θεωρητικό μηχανισμό παραγωγής τα GRBs θεωρούνται ως λεπτές ακτίνες ακτινοβολίας μεγάλης έντασης, που απελευθερώνεται κατά τη διάρκεια μιας έκρηξης υπερκαινοφανούς (supernova explosion) [1]. Σε αυτή την περίπτωση, ένα αστέρι πολύ μεγάλης μάζας περιστρέφεται πολύ γρήγορα και τελικά καταρρέει σχηματίζοντας μια μαύρη τρύπα (Εικόνα 3.2). Κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης, ενέργεια μπορεί να απελευθερωθεί κατά μήκος του άξονα περιστροφής δημιουργώντας GRB [4].



Εικόνα 3.2: Σχηματική αναπαράσταση της ζωής ενός αστεριού μεγάλης μάζας καθώς η πυρηνική σύντηξη μετατρέπει τα ελαφρύτερα στοιχεία σε βαρύτερα. Όταν η σύντηξη δεν παράγει πλέον αρκετή πίεση ώστε να εξουδετερώσει τη βαρύτητα, το αστέρι καταρρέει σχηματίζοντας μια μαύρη τρύπα. Θεωρητικά, ενέργεια μπορεί να απελευθερωθεί κατά τη διάρκεια της κατάρρευσης κατά μήκος του άξονα περιστροφής δημιουργώντας GRB.

Εκτός από τους διαφορετικούς θεωρητικούς μηχανισμούς παραγωγής των GRBs, παρουσιάζονται σημαντικές διαφοροποιήσεις στα φάσματά τους (Εικόνα 3.3) [4]. Οι φωτεινές καμπύλες που ανιχνεύουμε από τα GRBs διαφέρουν ως προς τη διάρκεια της παρατηρούμενης εκπομπής, που μπορεί να υπολογίζεται από χιλιοστά του δευτερολέπτου (milliseconds) έως μερικές δεκάδες λεπτά [4]. Οι φωτεινές τους καμπύλες μπορεί να αποτελούνται από μία μόνο κορυφή ή από πολλούς μικρούς παλμούς, ενώ οι ανεξάρτητες κορυφές μπορεί να είναι είτε συμμετρικές ή πολύ φωτεινές και στη συνέχεια να εξασθενούν με αργό ρυθμό. Μερικές φορές μια μικρής έντασης έκλαμψη προηγείται της εμφάνισης των GRBs, τα οποία “ξεσπούν” μερικά δευτερόλεπτα ή λεπτά αργότερα [4].



Εικόνα 3.3: Οι φωτεινές καμπύλες των GRBs (GRBs light curves).

Διάφορες ταξινομήσεις με βάση τις διαφοροποιήσεις στα φάσματα των GRBs έχουν προταθεί με επικρατέστερη αυτή της παρατηρούμενης διάρκειας. Με βάση τη διάρκειά τους τα GRBs διακρίνονται σε “σύντομα” (short GRBs) και “παρατεταμένα” (long GRBs), ή αντίστοιχα μικρής και μεγάλης διάρκειας.

Τα μικρής διάρκειας GRBs (short GRBs) χαρακτηρίζονται από μέση διάρκεια περίπου 0.3 δευτερόλεπτα (seconds), και σ’ αυτή την κατηγορία ανήκουν τα GRBs με διάρκεια μικρότερη από 2 δευτερόλεπτα [4]. Μέχρι το 2005 δεν είχαν παρατηρηθεί επιτυχώς απόφωτα (afterglows) από GRBs αυτής της κατηγορίας. Αργότερα μελετήθηκαν αρκετές δεκάδες απόφωτα (afterglows) και προσδιορίστηκε η θέση τους. Αυτή τη στιγμή θεωρείται ότι τα μικρής διάρκειας GRBs (short GRBs) προέρχονται από περιοχές με μικρό ή ανύπαρκτο ρυθμό σχηματισμού αστεριών, συμπεριλαμβανομένων μεγάλων ελλειπτικών γαλαξιών και της διαγαλαξιακής ύλης. Αν και ο μηχανισμός παραγωγής τους παραμένει άγνωστος, θεωρείται ότι μικρής διάρκειας εκλάμψεις ακτίνων γ παράγονται από συγχώνευση ζεύγους αστέρων νετρονίων. Εξετάζεται επίσης η υπόθεση ένα μέρος των μικρής διάρκειας GRBs (short

GRBs) να σχετίζεται με γιγάντιες εκλάμπεις από ήπιους περιοδικούς πομπούς ακτίνων γ (soft gamma ray repeaters) σε κοντινούς γαλαξίες [4].

Στην κατηγορία των μεγάλης διάρκειας GRBs (long GRBs) ανήκουν οι εκλάμπεις ακτίνων γ που διαρκούν περισσότερο από 2 δευτερόλεπτα, με μέση διάρκεια περίπου 30 δευτερόλεπτα (seconds). Τα GRBs αυτής της κατηγορίας έχουν μελετηθεί πολύ περισσότερο από τα μικρής διάρκειας GRBs λόγω της μεγαλύτερης συχνότητας εμφάνισής τους και των φωτεινότερων αποφώτων (afterglows) που ακολουθούν [4]. Θεωρείται ότι τα μεγάλης διάρκειας GRBs (long GRBs) εμφανίζονται σε γαλαξίες με ταχείς ρυθμούς σχηματισμού αστεριών και σχετίζονται με το θάνατο αστέρων μεγάλης μάζας και με εκρήξεις υπερκαινοφανών (supernovae explosions) [4].

Όπως αναφέρθηκε οι εκλάμπεις ακτίνων γ απελευθερώνουν μεγάλα ποσά ενέργειας και ακτινοβολίας που ανήκει κυρίως στην περιοχή ακτίνων γ του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, αν και μπορεί να καλύπτει και μέρος του ορατού φάσματος. Τα GRBs αποτελούν πολύ εστιασμένες εκρήξεις με το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειας να εμπεριέχεται σε ένα στενό πίδακα (jet) που ταξιδεύει με ταχύτητα που ξεπερνά το 99.995% της ταχύτητας του φωτός [4]. Το γωνιακό εύρος του πίδακα μπορεί να προσδιοριστεί παρατηρώντας τα διάκενα που εμφανίζονται λόγω εξασθένησης των πιδάκων (“jet breaks”) στο φάσμα των αποφώτων (afterglows). Από αυτές τις παρατηρήσεις βρέθηκε μια διακύμανση στη γωνία των πιδάκων ανάμεσα στις 2 και τις 20 μοίρες [4].

Η μεγάλη κατευθυντικότητα των πιδάκων έχει ως συνέπεια οι ακτίνες γ που εκπέμπονται από τα περισσότερα GRBs να μην ανιχνεύονται στη Γη. Αντίστοιχα, όταν ένα GRB έχει κατεύθυνση προς τη Γη φαίνεται πολύ πιο φωτεινό απ’ ότι αν εξέπεμπε σφαιρικά την ενέργειά του, εξαιτίας αυτής της εστίασης της ενέργειάς του σε μία στενή δέσμη. Λαμβάνοντας υπόψη αυτή την παράμετρο, η πραγματική ενέργεια που απελευθερώνεται από ένα GRB είναι περίπου 10^{44} J, που αντιστοιχεί στο 1/2000 μιας ηλιακής μάζας ισοδύναμης ενέργειας [4]. Η ενέργεια αυτή, σε συμφωνία με τα θεωρητικά μοντέλα, είναι συγκρίσιμη με μια φωτεινή έκρηξη υπερκαινοφανούς (supernova) τύπου Ib/c, γνωστή και ως υπερνόβα (hypernova). Εκρήξεις υπερκαινοφανών (supernovae) έχουν βρεθεί να συνοδεύουν μερικά GRBs. Ο βαθμός κατευθυντικότητας των μικρής διάρκειας GRBs (short GRBs) δεν έχει προσδιοριστεί αλλά φαίνεται ότι αυτά προέρχονται από πληθυσμούς με μικρότερες τιμές μετατόπισης στο ερυθρό (lower- redshift populations) και είναι λιγότερο φωτεινά από τα μεγάλης διάρκειας GRBs (long GRBs) [4].

ii. Γεννήτορες των GRBs

Τα GRBs λαμβάνουν χώρα σε πολύ μεγάλες αποστάσεις από τη Γη γεγονός που καθιστά την ταυτοποίηση των πηγών δημιουργίας τους, των γεννητόρων τους (progenitors), μια επίπονη διαδικασία. Η δυσκολία αυτή εντείνεται από τις διαφοροποιήσεις που παρατηρούνται στα φάσματα των GRBs, όπως αναφέρθηκε ανωτέρω. Οι παράγοντες αυτοί σε συνδυασμό με το μικρό αριθμό παρατηρησιακών δεδομένων οδήγησαν σε μια πληθώρα θεωριών για γεννήτορες τέτοιων εκλάμψεων. Μεταξύ αυτών των θεωριών περιλαμβάνονταν “εξατμιζόμενες” μαύρες τρύπες (evaporating black holes), μαγνητικές εκλάμψεις (magnetic flares) σε λευκούς νάνους, επαύξηση της ύλης σε αστέρα νετρονίων, επαύξηση αντιύλης, εκρήξεις υπερκαινοφανών (supernovae), υπερνόβα (hypernovae) και γρήγορη αφαίρεση της περιστροφικής ενέργειας από μαύρες τρύπες πολύ μεγάλης μάζας (supermassive black holes). [4]

- **Μεγάλης Διάρκειας GRBs (Long GRBs)**

Η συσχέτιση των μεγάλης διάρκειας GRBs (long GRBs) με εκρήξεις υπερκαινοφανών (supernovae) και το γεγονός ότι οι γαλαξίες στους οποίους παρατηρούνται έχουν γρήγορο ρυθμό σχηματισμού αστεριών οδηγούν στο συμπέρασμα ότι οι εκλάμψεις ακτίνων γ μεγάλης διάρκειας σχετίζονται με αστέρια μεγάλης μάζας [4]. Συγκεκριμένα από το 2007 η επιστημονική κοινότητα συμφωνεί ότι τα μεγάλης διάρκειας GRBs (long GRBs) σχετίζονται με το θάνατο αστερών μεγάλης μάζας σε μια ειδική περίπτωση έκρηξης υπερκαινοφανούς (supernova) που καλείται κατάρρευση (collapsar) ή υπερνόβα (hypernova). Πιο αναλυτικά, στο κέντρο των αστερών πολύ μεγάλης μάζας πραγματοποιείται συνεχής σύντηξη της ύλης μέχρι να φτάσουν στο σίδηρο. Όταν γίνει αυτό, το αστέρι δεν μπορεί να συνεχίσει να παράγει ενέργεια μέσω πυρηνικής σύντηξης και καταρρέει σχηματίζοντας μια μαύρη τρύπα [4]. Ύλη από τα στρώματα που περιβάλλουν τον πυρήνα του αστεριού πέφτει προς το κέντρο και, αν πρόκειται για γρήγορα περιστρεφόμενα αστέρια, στροβιλίζεται μέσα σε ένα δίσκο επαύξησης μεγάλης πυκνότητας. Αυτή η πτώση υλικού στη μαύρη τρύπα οδηγεί στο σχηματισμό ζεύγους πιδάκων (jets) κατά μήκος του άξονα περιστροφής της όπου η πυκνότητα της ύλης είναι πολύ μικρότερη σε σχέση με το δίσκο επαύξησης. Το ζεύγος πιδάκων με κατεύθυνση τους πόλους του αστεριού έχει ταχύτητες που προσεγγίζουν την ταχύτητα του φωτός (c), δημιουργώντας σχετικιστικό

κρουστικό κύμα (relativistic shockwave) [4]. Αν το αστέρι δεν περιβάλλεται από παχύ και διάχυτο στρώμα υδρογόνου, το υλικό των πιδάκων μπορεί να φτάσει στην επιφάνεια του αστεριού. Το προπορευόμενο τμήμα του κρουστικού κύματος επιταχύνεται καθώς η πυκνότητα της αστρικής ύλης που διασχίζει μειώνεται με αποτέλεσμα όταν φτάσει στην αστρική επιφάνεια να έχει παράγοντα Lorentz (Lorentz factor) 100 ή μεγαλύτερο, δηλαδή ταχύτητα $0,9999c$ [4]. Όταν το κρουστικό κύμα φτάσει στην επιφάνεια διαχέεται στο χώρο απελευθερώνοντας το μεγαλύτερο μέρος της ενέργειάς του σε μορφή ακτίνων γ . Σύμφωνα με την παραπάνω θεώρηση, για να εξελιχθεί ένα αστέρι και να δημιουργηθεί ένα GRB πρέπει να ικανοποιούνται ορισμένες προϋποθέσεις. Το αστέρι πρέπει να έχει πολύ μεγάλη μάζα, πιθανόν μεγαλύτερη από 40 ηλιακές μάζες (μία ηλιακή μάζα αντιστοιχεί σε 10^{30} kg), ώστε να σχηματιστεί μία μαύρη τρύπα. Επιπλέον, πρέπει το αστέρι να περιστρέφεται γρήγορα για να αναπτυχθεί μια σπείρα επαύξησης (accretion torus) “ικανή” για τη δημιουργία πιδάκων και να έχει χαμηλή περιεκτικότητα σε μέταλλα ώστε να μπορέσουν οι πίδακες να διασχίσουν το στρώμα υδρογόνου και να φτάσουν στην επιφάνεια. Από τα ανωτέρω γίνεται αντιληπτός ο λόγος που τα GRBs είναι πιο σπάνια γεγονότα από τις εκρήξεις υπερκαινοφανών (supernovae) που σχετίζονται με κατάρρευση πυρήνα (core-collapse supernovae), αφού στη δεύτερη περίπτωση απαιτείται μόνο το αστέρι να έχει μεγάλη μάζα ώστε να συντήξει όλα τα υλικά του μέχρι το σίδηρο [4].

Υπάρχουν και άλλα θεωρητικά μοντέλα όσον αφορά τους γεννήτορες των μεγάλης διάρκειας GRBs (long GRBs). Σύμφωνα με αυτά, αντικαθίσταται η μαύρη τρύπα με νέο-σχηματισμένους αστέρες νετρονίων που έχουν εξαιρετικά ισχυρά μαγνητικά πεδία (magnetars), με παρόμοια εξέλιξη ως το σχηματισμό των GRBs.

Αν και είναι αβέβαιο αν μπορούν να δημιουργηθούν μεγάλης διάρκειας GRBs (long GRBs) μέσα στο γαλαξία μας, λόγω της υψηλής περιεκτικότητας σε μέταλλα, πιθανούς γαλαξιακούς γεννήτορες μεγάλης διάρκειας GRBs (long GRBs) αποτελούν οι αστέρες Wolf-Rayet (πολύ θερμά και μεγάλης μάζας αστέρια που έχουν χάσει το μεγαλύτερο μέρος του υδρογόνου τους λόγω της πίεσης από ακτινοβολία) [4]. Στην περίπτωση των μικρής διάρκειας GRBs (short GRBs) δεν έχει προσδιοριστεί αν επηρεάζεται η δημιουργία τους σε σχέση με την περιεκτικότητα ενός γαλαξία σε μέταλλα [4].

Τα θεωρητικά μοντέλα που αφορούν στην ιδέα κατάρρευσης (collapsar) ως γεννήτορα των μεγάλης διάρκειας GRBs (long GRBs) βασίζονται σε παρατηρησιακές ενδείξεις. Συγκεκριμένα έχουν παρατηρηθεί μεγάλης διάρκειας GRBs (long GRBs) σε συστήματα με γρήγορους ρυθμούς σχηματισμού αστερών, όπως σε ασύμμετρους

γαλαξίες και στους βραχίονες σπειροειδών γαλαξιών [4]. Αυτές οι παρατηρήσεις συνδέουν τα μεγάλης διάρκειας GRBs (long GRBs) με αστέρια πολύ μεγάλης μάζας, τα οποία εξελίσσονται και πεθαίνουν μέσα σε μερικές εκατοντάδες εκατομμύρια χρόνια και δεν απατώνται ποτέ σε περιοχές όπου έχει σταματήσει ο σχηματισμός αστεριών. Αντίστοιχα, έχει παρατηρηθεί ότι μια έκρηξη υπερκαινοφανούς (supernova) ακολουθεί πολλές φορές ένα GRB. Αυτές οι παρατηρήσεις αφορούν κυρίως συστήματα σε μικρές μετατοπίσεις στο ερυθρό (redshifts z) καθώς η σχετικά αχνή εκπομπή από μια έκρηξη υπερκαινοφανούς (supernova) σε απομακρυσμένα GRBs δεν είναι εύκολα ανιχνεύσιμη. Οι εκρήξεις υπερκαινοφανών (supernovae) που σχετίζονται με μεγάλης διάρκειας GRBs (long GRBs) είναι τύπου Ib/c και προκαλούνται από κατάρρευση πυρήνα (core-collapse). Επίσης, οι εκρήξεις υπερκαινοφανών (supernovae) τύπου Ib/c δεν εμφανίζουν γραμμές απορρόφησης υδρογόνου όπως προβλέπεται θεωρητικά αφού έχουν χάσει το περίβλημα υδρογόνου [4]. Πρόσφατα όμως ανακαλύφθηκαν μερικές εξαιρέσεις αυτής της θεωρίας. Τα GRB 060614 και GRB 060505 που βρίσκονταν σε κοντινή απόσταση από τη Γη δε συνοδεύονταν από κανενός τύπου έκρηξης υπερκαινοφανούς (supernova), αν και προέρχονταν από αστρικούς πληθυσμούς με ταχείς ρυθμούς παραγωγής αστερών. Πιθανή εξήγηση για την έλλειψη παρατήρησης έκρηξης υπερκαινοφανούς (supernova) είναι ότι κατά την κατάρρευση του πυρήνα ενός αστεριού μεγάλης μάζας, η μαύρη τρύπα που δημιουργείται καταπνίγει όλο το άστρο πριν προλάβει η έκρηξη υπερκαινοφανούς (supernova) να αναδυθεί στην επιφάνεια [4].

- **Μικρής Διάρκειας GRBs (Short GRBs)**

Μέχρι το 2007 μόνο λίγα από αυτά τα GRBs είχαν μελετηθεί όμως είχε γίνει αντιληπτό ότι παρουσίαζαν σημαντικές διαφορές από τα μεγάλης διάρκειας GRBs (long GRBs) [4]. Αν και τουλάχιστον ένα μικρής διάρκειας GRB (short GRB) είχε ανιχνευθεί στην κεντρική περιοχή γαλαξία όπου υπήρχε σχηματισμός αστερών, τα περισσότερα συνδέονταν με εξωτερικές περιοχές, το διαγαλαξιακό χώρο ακόμα και την άλω μεγάλων ελλειπτικών γαλαξιών όπου δε λάμβανε χώρα σχηματισμός αστεριών. Από τις παρατηρήσεις αυτές έγινε αντιληπτό ότι τα μικρής διάρκειας GRBs (short GRBs) λάμβαναν χώρα σε κοντινούς γαλαξίες με μικρές μετατοπίσεις στο ερυθρό (redshifts) z ενώ δεν υπήρχαν ενδείξεις για έκρηξη υπερκαινοφανούς (supernova) που σχετίζεται με αυτά [4].

Η επιστημονική κοινότητα δεν έχει καταλήξει ακόμα σε μια κοινά αποδεκτή θεωρία για τους γεννήτορες των μικρής διάρκειας GRBs (short GRBs). Διάφορα

θεωρητικά μοντέλα έχουν προταθεί μεταξύ των οποίων η κατάρρευση λόγω επαύξησης (accretion-induced collapse) ενός αστέρα νετρονίων ή η εξάτμιση πρωτογενών μαύρων τρυπών. Εντούτοις το επικρατέστερο θεωρητικό μοντέλο σχετίζεται με τη συγχώνευση δύο συμπαγών αντικειμένων ως αποτέλεσμα της βαρυτικής ακτινοβολίας. Τέτοια ζεύγη αντικειμένων μπορεί να αποτελούνται από δύο αστέρες νετρονίων ή έναν αστέρα νετρονίων και μια μαύρη τρύπα. Η ύπαρξη τέτοιων ζευγών αντικειμένων θεωρείται βάσιμη, αν και συναντάται σπάνια στο Σύμπαν. Σύμφωνα με τη θεωρία γενικής σχετικότητας του Αϊνστάιν, συστήματα τέτοιας φύσης θα χάσουν σταδιακά την ενέργειά τους λόγω βαρυτικής ακτινοβολίας και τα δύο εκφυλισμένα αντικείμενα θα στροβιλίζονται, πλησιάζοντας το ένα το άλλο, έως ότου στα τελευταία λεπτά οι παλιρροϊκές δυνάμεις θα αποσχίσουν το αστέρι (ή τα αστέρια). Τότε τεράστιο ποσό ενέργειας θα απελευθερωθεί και τελικά η ύλη θα “βυθιστεί” σε μία μαύρη τρύπα. Η πτώση της ύλης μέσα στη μαύρη τρύπα σε ένα δίσκο επαύξησης ενεργοποιεί μία έκρηξη όμοια με το μοντέλο κατάρρευσης (collapsar model). Όλη η παραπάνω διαδικασία πραγματοποιείται πολύ γρήγορα και ολοκληρώνεται μέσα σε λίγα δευτερόλεπτα, γεγονός που εξηγεί τη σύντομη διάρκεια των εκλάμψεων αυτών. Σε αντίθεση με τα μεγάλης διάρκειας GRBs (long GRBs) δεν περιλαμβάνεται η έκρηξη κάποιου άστρου και κατά συνέπεια δεν παρατηρείται υπερκαινοφανής (supernova) [4].

Αυτό το θεωρητικό μοντέλο έχει μέχρι τώρα επιβεβαιωθεί από τις παρατηρήσεις, όπου διαπιστώνεται ότι μικρής διάρκειας GRBs (short GRBs) βρίσκονται σε “γηραιούς” γαλαξίες όπου δε σχηματίζονται άστρα. Συχνά παρατηρούνται μικρής διάρκειας GRBs (short GRBs) και σε γαλαξίες όπου λαμβάνει χώρα σχηματισμός αστέρων, καθώς ακόμα και στους “νεότερους” γαλαξίες υπάρχουν σημαντικοί πληθυσμοί γηραιότερων άστρων. Παρά τις θεωρητικές εκτιμήσεις δεν υπάρχει επαρκής κατανόηση αυτών των GRBs, εξαιτίας της παρατήρησης αναλαμπών ακτίνων X σε μικρής διάρκειας GRBs (short GRBs) ακόμα και μερικές μέρες μετά την ολοκλήρωση της συγχώνευσης, καθώς και της αδυναμίας να βρεθούν μικρής διάρκειας GRBs (short GRBs) σε κοντινές αποστάσεις [4].

Παρά τη γενικότερη συμπεριφορά τους, υπάρχουν και υποκατηγορίες των μικρής διάρκειας GRBs (short GRBs). Μία από αυτές καλείται “γιγαντιαίες μαγνητικές εκλάμψεις” (magnetar giant flares ή megafares ή hyperflares) και αφορά σε γιγάντιες αναλαμπές από αστέρες νετρονίων που έχουν εξαιρετικά ισχυρά μαγνητικά πεδία. Αυτά τα αντικείμενα ανακαλύφθηκαν νωρίς από δορυφόρους και βρέθηκε ότι κείνται στο γαλαξιακό επίπεδο και παράγουν συχνές επαναλαμβανόμενες

εκλάμψεις “μαλακών” ακτίνων γ (soft gamma rays) και “σκληρών” ακτίνων X (hard X-rays). Οι πηγές αυτές μικρής διάρκειας GRBs (short GRBs) αποτέλεσαν γρήγορα ξεχωριστή κατηγορία από τα GRBs λόγω του επαναλαμβανόμενου χαρακτήρα τους και του “πολύ μαλακού” (γενικά θερμού) υψηλοενεργειακού φάσματός τους (very soft high-energy spectra). Εντούτοις, σε σπάνιες περιπτώσεις αυτά τα αντικείμενα μπορούν να δημιουργήσουν εξαιρετικά φωτεινές εκρήξεις [4]. Παράδειγμα αποτελεί η γιγάντια αναλαμπή (giant flare) στις 27 Δεκεμβρίου 2004, που προερχόταν από το magnetar SGR 1806-20 και ήταν τόσο φωτεινή που επέφερε κορεσμό στους ανιχνευτές ακτίνων γ κάθε δορυφόρου σε τροχιά ενώ διατάραξε την ιονόσφαιρα της Γης. Αν και πολύ λιγότερο φωτεινό από τις “κανονικές” εκλάμψεις ακτίνων γ , ένα τέτοιο γεγονός θα ήταν ανιχνεύσιμο από γαλαξίες στην απόσταση του σμήνους της Παρθένου (Virgo cluster) και σε αυτή την απόσταση θα ήταν δύσκολο να διακριθεί από τους άλλους τύπους μικρής διάρκειας GRBs (short GRBs) όσον αφορά στην καμπύλη φωτός. Μόνο τρία GRBs έχουν μέχρι τώρα συνδεθεί με αυτό το είδος σε γαλαξίες πέρα από το γαλαξία μας όπως το GRB 790503 στο μεγάλο νέφος του Μαγγελάνου, το GRB 051103 από τον M81 και το GRB 070201 από τον M31 [4].

iii. Μηχανισμοί εκπομπής GRBs

Οι μηχανισμοί εκπομπής GRBs περιλαμβάνουν θεωρίες που εξηγούν τον τρόπο με τον οποίο η ενέργεια από ένα γεννήτορα εκλάμψεων ακτίνων γ μετατρέπεται σε ακτινοβολία, ανεξάρτητα από τη φύση του γεννήτορα. Η εκπεμπόμενη από τα GRBs ακτινοβολία με βάση το φάσμα και τις φωτεινές καμπύλες δεν προσομοιάζει καμία γνωστή φυσική διαδικασία [4]. Όπως αναφέρθηκε, τα φάσματα των GRBs παρουσιάζουν μεγάλες διαφοροποιήσεις οπότε ένα επιτυχές θεωρητικό μοντέλο πρέπει να εξηγήει τη φυσική διαδικασία που εγείρει τις παρατηρούμενες διαφοροποιήσεις. Ιδιαίτερα επίπονη είναι επίσης, η ερμηνεία της μεγάλης αποδοτικότητας που παρουσιάζουν ορισμένα GRBs, τα οποία μετατρέπουν ίση ή περισσότερη από την ενέργεια που απελευθερώνεται λόγω της έκρηξης σε ακτίνες γ [4]. Ένα επιτυχές μοντέλο περιγραφής των GRBs περιλαμβάνει την ύπαρξη μιας σχετικιστικά διαστελλόμενης “σφαίρας πυρός” (fireball) [4].

Είναι γνωστό ότι για να υπάρξει εκπομπή ακτίνων γ σε μία έκλαμψη προαπαιτείται η εκτίναξη της ύλης σε σχετικιστικές ταχύτητες. Αρχικά γίνεται η παραδοχή ότι η πηγή της έκλαμψης είναι ακίνητη. Δεδομένου ότι τα GRBs διαρκούν πολύ μικρό χρονικό διάστημα και ότι η ταχύτητα του φωτός c έχει σταθερή τιμή, συμπεραίνεται ότι η περιοχή εκτίναξης της ύλης πρέπει να έχει πολύ μικρές διαστάσεις. Λαμβάνοντας υπόψη τις ενέργειες που σχετίζονται με ένα τυπικό GRB, η συγκέντρωση τόσο μεγάλου ποσού ενέργειας σε τόσο μικρό χώρο θα έκανε το σύστημα αδιαφανές στα φωτόνια, αφού θα ήταν δυνατή (ενέργεια πάνω από το κατώφλι της αντίδρασης) η παραγωγή ζευγών ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου από φωτόνιο-φωτόνιο (photon-photon pair production: $\gamma + \gamma \rightarrow e^- + e^+$) [4]. Το αποτέλεσμα θα ήταν η έκλαμψη να είχε πολύ μικρότερη φωτεινότητα και να οδηγούσε σε ένα πολύ διαφορετικό φάσμα από αυτό που παρατηρείται. Το πρόβλημα της μεγάλης αδιαφάνειας στα φωτόνια επιλύεται με την υπόθεση σχετικιστικής διαστολής των σφαιρών πυρός (fireballs) (κινούμενη πηγή της έκλαμψης). Κατά τη σχετικιστική διαστολή της σφαίρας πυρός (fireball) το μήκος κύματός της ακτινοβολίας μεταβάλλεται, με αποτέλεσμα τα φωτόνια να μετατοπίζονται στο κυανό (blueshift). Για παράδειγμα, μία ακτίνα X στη σφαίρα πυρός (fireball) θα αποτελεί μία ακτίνα γ στο σύστημα του παρατηρητή. Η σχετικιστική διαστολή οδηγεί σε σημαντική μείωση του ρυθμού δημιουργίας ζευγών e^- , e^+ , καθώς στο κινούμενο σύστημα τα φωτόνια έχουν χαμηλότερη ενέργεια κατά ένα παράγοντα Γ (παράγοντας Lorentz της σχετικιστικής ροής) και προέρχονται από περιοχή τυπικού μεγέθους $\Gamma^2 \cdot c \cdot \Delta t$ (όχι $c \cdot \Delta t$

όπως ίσχυε για την ακίνητη πηγή). Έτσι η πυκνότητα φωτονίων μειώνεται σημαντικά. Επιπλέον, αν το GRB εκπέμπει κατά τη διεύθυνση της Γης σε σχετικιστικές ταχύτητες υφίσταται σχετικιστική ακτινοβόληση (ή σχετικιστικό φαινόμενο Doppler /relativistic beaming- relativistic Doppler effect). Το αποτέλεσμα είναι να παρατηρείται από τη Γη μόνο ένα μικρό ποσοστό $1/\Gamma$ της πηγής, ανεξάρτητα από το γωνιακό εύρος της εκπομπής, ενώ το GRB “φαίνεται” φωτεινότερο. Τα φαινόμενα αυτά λαμβάνονται υπόψη κατά την παρατήρηση των GRBs [4].

Η επιτυχία του μοντέλου της σχετικιστικής σφαίρας πυρός (fireball) για τη περιγραφή των GRBs δεν επιλύει τους προβληματισμούς που προκύπτουν από την παρατήρηση της χρονικής διάρκειας και του φάσματος των GRBs. Διαπιστώνεται ότι το μεγαλύτερο ποσό ενέργειας απελευθερώνεται σε πολύ μικρής χρονικής διάρκειας “επεισόδια” (π.χ. 1 second) σε σχέση με το συνολικό χρόνο εκδήλωσης του GRB (π.χ. 100 seconds). Θεωρώντας ότι τα GRBs αφορούν την κίνηση ύλης προς τη γη με σχετικιστική ταχύτητα, δεν προβλέπεται θεωρητικά η απελευθέρωση ενέργειας σε τόσο μικρά χρονικά διαστήματα [4]. Επίσης, η ακτινοβολία που εκπέμπεται από τα GRBs, όταν το σύστημα είναι πλέον διαφανές στα φωτόνια, προβλέπεται (από τα θεωρία) να έχει φάσμα που αντιστοιχεί σε μερικώς θερμική ακτινοβολία. Αυτή η θεωρητική εκτίμηση έρχεται σε αντίθεση με το παρατηρούμενο μη θερμικό φάσμα των GRBs [4].

Για την επίλυση αυτών των προβλημάτων οι Rees και Mészáros (1992) εισήγαγαν ένα “ανανεωμένο” μοντέλο της σφαίρας πυρός (fireball). Αυτό περιλαμβάνει την ύπαρξη εσωτερικών και εξωτερικών κρούσεων (internal and external shocks) [4]. Οι εσωτερικές κρούσεις (internal shocks) αφορούν στη σύγκρουση πολλαπλών φλοιών οι οποίοι κινούνται με ελαφρώς διαφορετικές ταχύτητες. Οι κρούσεις αυτές ερμηνεύουν επιτυχώς τις ταχέα μεταβαλλόμενες φωτεινές καμπύλες (light curves) της άμεσης εκπομπής ακτίνων γ (prompt gamma ray emission). Καθώς η πηγή της έκλαμψης μεταβάλλεται, η γρήγορη (ως προς το χρόνο) μεταβολή των φασμάτων αντανακλά αυτή τη δραστηριότητα της πηγής. Οι εσωτερικές κρούσεις (internal shocks) λαμβάνουν χώρα μέσα στα υλικά της έκρηξης (που κινούνται με μεγάλη ταχύτητα) όταν η πηγή της έκλαμψης εκπέμπει διαδοχικούς φλοιούς που κινούνται με διαφορετικούς παράγοντες Lorentz. Πολλαπλές κρούσεις εμφανίζονται όταν ταχύτερα κινούμενοι φλοιοί επικαλύπτουν πιο αργούς. Η σύγκρουση δύο λεπτών φλοιών προκαλεί μεταφορά θερμότητας και ακτινοβολίας στην ύλη, μετατρέποντας τεράστια ποσά κινητικής ενέργειας σε τυχαία κίνηση (μη - θερμική) των σωματιδίων. Με αυτό τον τρόπο ενισχύεται η απελευθέρωση ενέργειας λόγω των μηχανισμών

εκπομπής. Δεν υπάρχει καθολική συμφωνία για τους φυσικούς μηχανισμούς που δημιουργούν τα παρατηρούμενα φωτόνια, αλλά οι πιο πιθανοί είναι η ακτινοβολία συγχροτρονίου (synchrotron radiation) και η αντίστροφη σκέδαση Compton (inverse Compton scattering) [4].

Δεν υπάρχει μια κοινά αποδεκτή θεωρία που να περιγράφει επιτυχώς το φάσμα όλων των GRBs. Μερικά GRBs παρουσιάζουν ένα ποσοστό καθυστερημένης εκπομπής σε πολύ υψηλές ενέργειες της τάξης των GeV και μεγαλύτερες. Μια θεωρία για αυτού του είδους την εκπομπή σχετίζεται με την αντίστροφη σκέδαση Compton (inverse Compton scattering) [4]. Αν ένας γεννήτορας GRBs, όπως ένα αστέρι Wolf-Rayet, εκραγεί μέσα σε ένα σμήνος αστέρων (stellar cluster), το ακόλουθο κρουστικό κύμα θα δημιουργούσε ακτίνες γ λόγω σκεδαζόμενων φωτονίων από γειτονικά άστρα. Περίπου το 30% των γνωστών γαλαξιακών αστέρων Wolf-Rayet (WR) βρίσκονται σε πυκνά σμήνη αστέρων O (που είναι άστρα υψηλής θερμοκρασίας και εμφανίζονται πρώτα στη σειρά με βάση τη θερμοκρασία των άστρων, όπως μαρτυρούν και τα χρώματα: **O B A F G K M**) με πεδία έντονης υπεριώδους ακτινοβολίας. Σύμφωνα με το μοντέλο κατάρρευσης (collapsar model) αυτά τα αστέρια WR είναι πιθανοί γεννήτορες GRBs. Έτσι ένα σημαντικό ποσοστό GRBs αναμένεται να συμβούν σε αυτά τα σμήνη. Καθώς η κινούμενη με σχετικιστική ταχύτητα ύλη εξέρχεται από μία έκρηξη αλληλεπιδρά με φωτόνια που ανήκουν στο υπεριώδες. Μερικά από αυτά τα φωτόνια κερδίζουν ενέργεια δημιουργώντας με αυτό τον τρόπο ακτίνες γ [4].

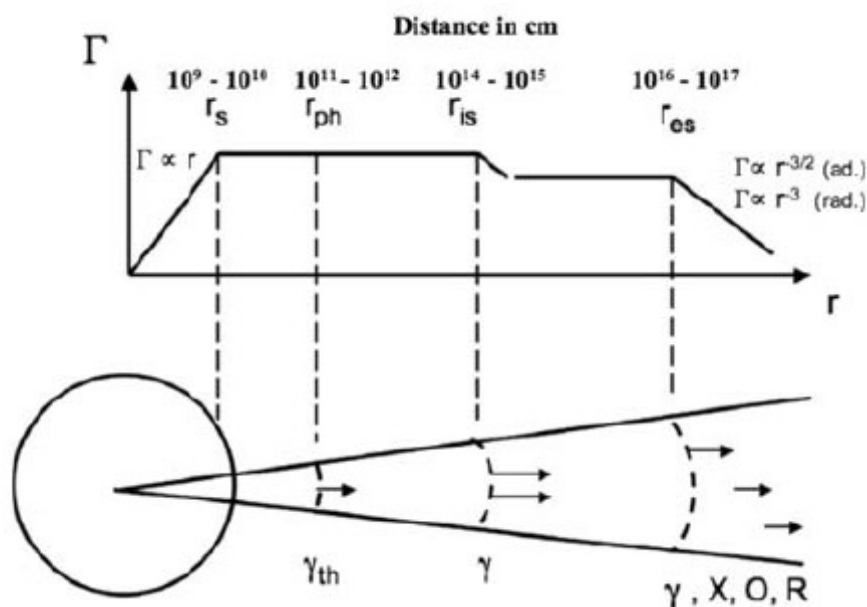
Οι εξωτερικές κρούσεις (external shocks) αφορούν κρούσεις της σφαίρας πυρός (fireball) με το εξωτερικό μέσο που περιβάλλει την πηγή. Αυτές οι κρούσεις ερμηνεύουν ικανοποιητικά την ακτινοβολία σε πολλά μήκη κύματος του αποφώτου (afterglow). Συγκεκριμένα το μοντέλο εξωτερικής κρούσης προέβλεψε την παρουσία αποφώτου (afterglow) [4]. Ειδικότερα, κάποια χρονική στιγμή όλη η εκπεμπόμενη από την πηγή ύλη έχει συγκεραστεί σε ένα μόνο φλοιό. Αυτός ο φλοιός διαδίδεται προς το διαστρικό μέσο που περιβάλλει την πηγή. Καθώς η ύλη, που ακόμα κινείται σχετικιστικά, προσκρούσει στο λεπτό διαστρικό αέριο ή το αέριο που περιβάλλει την πηγή δημιουργείται κρουστικό κύμα στο εμπρόσθιο μέρος αυτού του φλοιού. Το κρουστικό αυτό κύμα καλείται “εξωτερική κρούση” (external shock). Η ύλη κινούμενη κατά μήκος του κρουστικού κύματος θερμαίνεται σε εξαιρετικά υψηλές θερμοκρασίες. Τα σωματίδιά της, που τώρα κινούνται με σχετικιστικές ταχύτητες συναντούν ισχυρό μαγνητικό πεδίο και επιταχύνονται κάθετα σε αυτό. Το αποτέλεσμα είναι η εκπομπή ακτινοβολίας συγχροτρονίου (synchrotron radiation) [4]. Μερικές φορές η εξωτερική κρούση δημιουργεί μία αντίστροφη κρούση (reverse shock) που διαδίδεται προς τα

πίσω στην εκπεμπόμενη ύλη, μόλις αυτή έρθει σε επαφή με το διαστρικό μέσο. Τότε η διπλά-κλονισμένη (twice shocked) ύλη μπορεί να εκπέμψει ακτινοβολία στο ορατό ή το υπεριώδες τμήμα του φάσματος [4].

Στις εξωτερικές κρούσεις η ροή αλληλεπιδρά με την περιβάλλουσα ύλη ενώ στις εσωτερικές αλληλεπιδρά με τον εαυτό της (υλικά της έκρηξης). Αυτή η διαφορά απεικονίζεται στο γεγονός ότι οι εξωτερικές κρούσεις είναι έντονα σχετικιστικές ενώ οι εσωτερικές μόνο ελαφρά σχετικιστικές. Για τις εσωτερικές κρούσεις είναι πιο σημαντικό να ικανοποιείται η συνθήκη σύμφωνα με την οποία οι κρούσεις πρέπει να πραγματοποιούνται όταν η σφαίρα πυρός (fireball) είναι “οπτικά λεπτή”, γιατί αυτές οι κρούσεις λαμβάνουν χώρα κοντά στην πηγή. Πρέπει λοιπόν να πραγματοποιούνται πέρα από την φωτοσφαιρική ακτίνα R_{ph} (photospheric radius - η ακτίνα όταν το οπτικό βάθος γίνει μονάδα) ώστε να μπορεί να εξέλθει η ενέργεια σε μορφή μη-θερμικής ακτινοβολίας (non-thermal radiation). Καθώς οι εσωτερικές κρούσεις μετατρέπουν μόνο ένα ποσοστό της κινητικής ενέργειας σε τυχαία κίνηση σωματιδίων πρέπει να ακολουθούνται από τις εξωτερικές κρούσεις ανάμεσα στη ροή και το περιβάλλον μέσο ώστε να απορροφάται η υπόλοιπη κινητική ενέργεια. Οι εξωτερικές κρούσεις εκτός από τη δημιουργία του αποφώτου (afterglow), ευθύνονται και για την παρατηρούμενη “αργοπορημένη” εκπομπή των μεγάλης διάρκειας GRBs (long GRBs) και τις οπτικές εκλάμψεις (optical flares), που αποτελούν υποκατηγορία των μικρής διάρκειας GRBs (short GRBs) [4].

Η εξέλιξη μιας σφαίρας πυρός (fireball) παρουσιάζεται σχηματικά στην Εικόνα 3.4 μέσω της αναπαράστασης του παράγοντα Lorentz της ροής σε διαφορετικές περιοχές. Η απόσταση που ορίζει το τέλος της φάσης επιτάχυνσης, κατά τη διάρκεια της οποίας ο παράγοντας Lorentz αυξάνει γραμμικά με την ακτίνα r , απεικονίζεται ως r_s ($r_{saturation}$: όπου φτάνει σε κορεσμό η ακτίνα). Το r_{ph} αντιστοιχεί στη φωτοσφαιρική ακτίνα. Οι ακτίνες r_{is} και r_{es} ορίζουν την αρχή των εσωτερικών και των εξωτερικών κρούσεων αντίστοιχα. Η άμεση (prompt) εκπομπή ακτίνων γ από εσωτερικές κρούσεις πραγματοποιείται σε τυπική απόσταση r_{is} . Το Γ παύει να είναι σταθερό μετά την r_{is} ενώ μετά την r_{es} μειώνεται. Η απόσταση r_{es} ορίζει την ακτίνα επιβράδυνσης και συχνά καλείται r_{dec} . Καταδεικνύει την αρχή του αποφώτου (afterglow). Η εξάρτηση του Γ από το r στη φάση μείωσης δίνεται από τη σχέση $\Gamma \sim r^{-3/2}$ στην αδιαβατική περίπτωση ενώ $\Gamma \sim r^{-3}$ στην (radiative) περίπτωση ακτινοβολίας (έχει υποτεθεί ότι το μέσο έχει ομοιόμορφη πυκνότητα). Στην ακόλουθη εικόνα εμφανίζονται και οι τυπικές τιμές των διαφορετικών ακτίνων. Επίσης απεικονίζονται τα διαφορετικά μήκη κύματος ακτινοβολίας που εκπέμπονται στις διαφορετικές περιοχές. Η παραγωγή θερμικών

ακτίνων γ στη φωτόσφαιρα αναγράφονται ως γ_{th} , ενώ ως γ εννοούνται οι ακτίνες γ που παράγονται από εσωτερικές κρούσεις. Τα γ , X, O, R χαρακτηρίζουν την εκπομπή αποφώτου (afterglow) από εξωτερικές κρούσεις που ξεκινούν σε απόσταση (ακτίνα) r_{es} [4].



Εικόνα 3.4: Σχηματική αναπαράσταση του παράγοντα Lorentz της ροής σε διαφορετικές περιοχές.

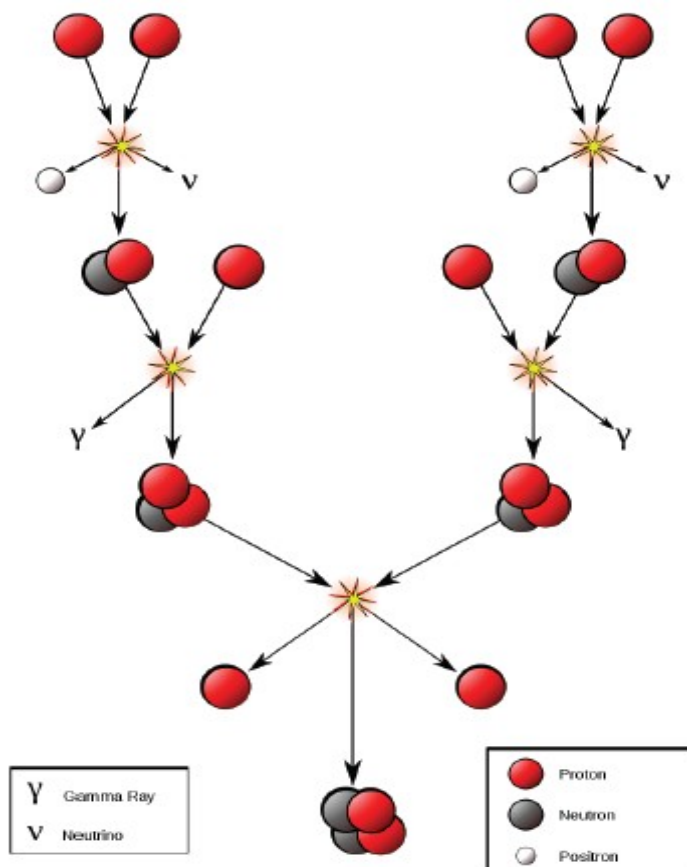
iv. Παραγωγή ακτίνων γ

Η ακτινοβολία γ είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία υψηλής συχνότητας (πολύ μικρού μήκους κύματος). Δημιουργείται από αλληλεπιδράσεις υποατομικών σωματιδίων όπως: εξαύλωση e^- , e^+ , διάσπαση π^0 , ραδιενεργό διάσπαση, σύντηξη, σχάση ή αντίστροφη σκέδαση Compton σε αστροφυσικές διαδικασίες. Οι ακτίνες γ έχουν συχνότητες μεγαλύτερες από 10^{19} Hz και ενέργειες πάνω από 100 keV. Το μήκος κύματός τους είναι λιγότερο από 10 pm, συχνά μικρότερο από ένα άτομο [4].

Οι φυσικές διαδικασίες που οδηγούν σε παραγωγή ακτίνων γ είναι οι ακόλουθες.

- **Πυρηνική σύντηξη (Nuclear fusion)**

Εκτός από την ενέργεια που απελευθερώνεται από τις αντιδράσεις πυρηνικής σύντηξης, οι εξώθερμες αντιδράσεις παράγουν ακτίνες γ . Συχνά στη διαδικασία πυρηνικής σύντηξης συμμετέχουν αντιδρώντα με μικρό αριθμό πρωτονίων (χαμηλό Z). Παράδειγμα αποτελεί η αλυσίδα πρωτονίου-πρωτονίου που κυριαρχεί σε άστρα στο μέγεθος του Ήλιου ή μικρότερα (Εικόνα 3.4) [4].



Εικόνα 3.4: Η αλυσίδα πρωτονίου-πρωτονίου (proton-proton chain) που κυριαρχεί σε άστρα στο μέγεθος του Ήλιου ή μικρότερα.

- **Ραδιενεργός διάσπαση (Radioactive decay)**

Ισομερείς μεταπτώσεις ανάμεσα σε στάθμες του ίδιου πυρήνα απελευθερώνουν ακτίνες γ . Κάθε ακτίνα γ που εκπέμπεται από μία τέτοια μετάπτωση έχει συγκεκριμένη ενέργεια χαρακτηριστική της διάσπασης. Όταν ο πυρήνας εκπέμπει ένα α ή β

σωμάτιο, ο προκύπτων θυγατρικός πυρήνας βρίσκεται μερικές φορές σε διεγερμένη κατάσταση. Κατά τη μετάβασή του σε κατάσταση χαμηλότερης ενέργειας εκπέμπει ακτίνα γ [4].

- **Ακτινοβολία πέδησης (Bremsstrahlung)**

Η ακτινοβολία πέδησης (Bremsstrahlung) έχει συνεχές φάσμα και αφορά σε ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που παράγεται όταν φορτισμένο σωματίδιο (π.χ. ηλεκτρόνιο) επιταχύνεται ως αποτέλεσμα σκέδασης με ένα άλλο φορτισμένο σωματίδιο (π.χ. πυρήνα ατόμου) [4].

- **Ιονισμός (Ionization)**

Ο ιονισμός (ionization) αναφέρεται στην εκπομπή (ή απορρόφηση) ενός ή περισσότερων ηλεκτρονίων από το άτομο. Μπορεί να συμβεί όταν το άτομο εκτεθεί σε ακτινοβολία με ενέργεια μεγαλύτερη από το δυναμικό ιονισμού. Κατά την απομάκρυνση ενός ηλεκτρονίου, δημιουργείται μια οπή και ένα ηλεκτρόνιο από υψηλότερη στάθμη μεταβαίνει να την καλύψει. Κατά τη μετάβαση αυτή εκπέμπεται φωτόνιο ενέργειας ίσης με την ενεργειακή διαφορά των δύο σταθμών [4].

- **Παραγωγή ακτίνων γ από συγχροτρόνιο (Synchrotron gamma-ray generation)**

Η ακτινοβολία συγχροτρονίου (synchrotron radiation) είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που προσομοιάζει την ακτινοβολία κυκλότρον με τη διαφορά ότι αναφέρεται σε σωματίδια υπερ-σχετικιστικής ταχύτητας που κινούνται σε μαγνητικό πεδίο [4].

- **Ακτινοβολία κυκλότρον (Cyclotron radiation)**

Η ακτινοβολία κυκλότρον (cyclotron radiation) είναι ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία που εκπέμπεται από φορτισμένα σωματίδια που κινούνται μέσα σε μαγνητικό πεδίο [4].

- **Σκέδαση Compton (Compton scattering)**

Η σκέδαση Compton (Compton scattering) είναι ένα είδος σκέδασης ακτίνων X και γ με την ύλη. Κατά την ανελαστική σκέδαση φωτονίων με την ύλη, μέρος της ενέργειας του φωτονίου μεταφέρεται στο ηλεκτρόνιο που σκεδάζεται και πιθανόν εκπέμπεται από το άτομο. Κατά την αντίστροφη σκέδαση Compton (inverse Compton scattering) το φωτόνιο αυξάνει την ενέργειά του κατά την αλληλεπίδρασή του με την ύλη. Έτσι, χαμηλής ενέργειας φωτόνια σκεδάζονται από σχετικιστικά ηλεκτρόνια και αυξάνουν την ενέργειά τους (μετατρέπονται σε ακτίνες γ) [4].

- **Δίδυμη γένεση (Pair production)**

Η δίδυμη γένεση (pair production) αναφέρεται στη δημιουργία ζεύγους ενός στοιχειώδους σωματιδίου και του αντισωματιδίου του από φωτόνιο (ή άλλο ουδέτερο μποζόνιο). Έτσι φωτόνια με ενέργεια άνω των 1.022 MeV μπορούν, παρουσία του ηλεκτρικού πεδίου του πυρήνα, να διασπαστούν σε ένα ηλεκτρόνιο και ένα ποζιτρόνιο $\gamma \rightarrow e^- + e^+$. Η αντίστροφη διαδικασία μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή ακτίνων γ (ή φωτονίων μεγαλύτερης ενέργειας) και καλείται εξαύλωση (annihilation) $e^- + e^+ \rightarrow \gamma + \gamma$ [4].

4. Ανίχνευση Νετρίνων από Εκλάμψεις Ακτίνων Γάμμα (GRBs)

i. Παραγωγή νετρίνων από Εκλάμψεις ακτίνων γ

Οι εκλάμψεις ακτίνων γ εκλύουν, όπως αναφέρθηκε, μεγάλα ποσά φωτονίων πολύ υψηλής ενέργειας, όμως μελετάται και η πιθανότητα εκπομπής άλλων σωματιδίων από GRBs. Πιο αναλυτικά, ακτίνες γ της τάξης των MeV έχουν ανιχνευθεί και διαπιστωθεί ότι συνδέονται με την εμφάνιση των GRBs ενώ έχουν καταγραφεί μερικές περιπτώσεις ανίχνευσης ακτίνων γ σε μεγαλύτερες ενέργειες (GeV και TeV) [4]. Οι θεωρίες που έχουν προταθεί για την ερμηνεία αυτών των υψηλοενεργειακών ακτίνων γ (Fragile et al, 2004) περιλαμβάνουν: την αντίστροφη σκέδαση Compton (Inverse Compton Scattering - ICS) φωτονίων από σχετικιστικά κινούμενα ηλεκτρόνια στην περιοχή της έκλαμψης, την εκπομπή ακτινοβολίας συγχροτρονίου από πρωτόνια (proton synchrotron emission) και την ανελαστική σκέδαση σχετικιστικά κινούμενων πρωτονίων από φωτόνια, που οδηγεί στη δημιουργία υψηλοενεργειακών ουδέτερων πιονίων και την ακόλουθη διάσπασή τους σε ακτίνες γ (Waxman 1995, Waxman & Bahcall 1997). Οι πιο πιθανές διαδικασίες που οδηγούν στην εμφάνιση ακτίνων γ της τάξης των TeV θεωρούνται η αντίστροφη σκέδαση Compton και η εκπομπή ακτινοβολίας συγχροτρονίου από πρωτόνια [4].

Σημαντικό ρόλο στην παραγωγή ακτίνων γ και νετρίνων υψηλής ενέργειας παίζουν τα νετρόνια. Τα νετρόνια, όπως και τα πρωτόνια, απαντώνται σε κινούμενους με σχετικιστική ταχύτητα, ανέμους με περίπου ίση αναλογία. Σε αυτούς τους ανέμους οι ροές νετρονίων και πρωτονίων διαχωρίζονται μεταξύ τους καθώς τα νετρόνια σε αντίθεση με τα πρωτόνια δεν επηρεάζονται από ηλεκτρομαγνητικά πεδία [4]. Ανελαστικές σκεδάσεις πρωτονίων και νετρονίων με φωτόνια οδηγούν στη δημιουργία ουδέτερων και φορτισμένων πιονίων (π^0 , π^- , π^+) [6]. Οι διασπάσεις των ουδέτερων πιονίων δημιουργούν εκλάμψεις φωτονίων μεγάλης ενέργειας ενώ οι διασπάσεις των φορτισμένων πιονίων οδηγούν σε δημιουργία νετρίνων (επίσης παράγεται και μεγάλος αριθμός ζευγών e^+/e^-) [4]. Μέρος των φωτονίων που προέρχονται από διασπάσεις π^0 με ενέργεια 70 MeV δεν αλληλεπιδρούν περαιτέρω, με αποτέλεσμα να ανιχνεύονται στο επίπεδο του παρατηρητή ως φωτόνια ενέργειας 100 GeV, εξαιτίας του μεγάλου παράγοντα Lorentz στην εκπεμπόμενη ύλη (και της σχετικιστικής συστολής που υφίσταται το μήκος κύματός τους). Αυτά τα φωτόνια είναι χαρακτηριστικά της ροής

νετρονίων και της αποσύνδεσής τους από τη ροή πρωτονίων, ενώ παρέχουν πληροφορίες για τον παράγοντα Lorentz της σφαίρας πυρός (fireball) [4].

Σύμφωνα με θεωρητικά μοντέλα είναι πιθανή η δημιουργία κοσμικών ακτίνων υπερυψηλών ενεργειών από GRBs. Κατά τη διάρκεια των εσωτερικών και εξωτερικών κρούσεων (internal and external shocks) τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται ενώ πιθανή θεωρείται και η επιτάχυνση βαρυονίων μέσα σε αυτές τις κρούσεις. Με αυτό τον τρόπο πρωτόνια μπορούν να επιταχυνθούν σε ένα παράγοντα Lorentz 10^{11} στο επίπεδο του παρατηρητή, που αντιστοιχεί σε ενέργειες $E_p \sim 10^{20}$ eV. Αυτά συνιστούν τις κοσμικές ακτίνες υπερυψηλών ενεργειών (Ultra High Energy Cosmic Rays - UHECRs). Η ισοτροπική κατανομή των UHECRs υποδεικνύει εξωγαλαξιακή προέλευση. Κατά τη διάλυσή τους μέσα από διαγαλαξιακό μέσο οι UHECRs εξασθενούν από τη κοσμική μικροκυματική ακτινοβολία υποβάθρου λόγω αλληλεπιδράσεων φωτονίων με μεσόνια και σκεδάσεων με το διαγαλαξιακό μαγνητικό πεδίο με αποτέλεσμα να είναι ορατές σε μικρές αποστάσεις της τάξης των 50 – 100 Mpc ($1 \text{ pc} \sim 3 \cdot 10^{16} \text{ m}$). Αυτό το φαινόμενο καλείται περικοπή GZK (GZK cutoff) [4].

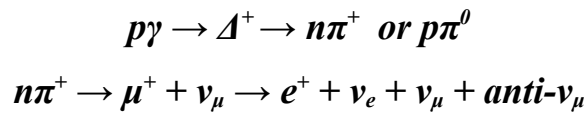
Σύμφωνα με τα παραπάνω θεωρητικά μοντέλα, η ύπαρξη πρωτονίων που επιταχύνονται στα GRBs είναι σχεδόν βέβαιη. Το γεγονός αυτό καθιστά πιθανή την παραγωγή νετρίνων υψηλών ενεργειών μέσω διαφόρων διαδικασιών, όπως $p-\gamma$, $p-p$, $p-n$ [4]. Θεωρείται ότι οι εκλάμψεις ακτίνων γ μπορεί να είναι πλούσιες σε νετρόνια. Σε αυτή την περίπτωση, τα νετρόνια αποσυνδέονται από τη σφαίρα πυρός (fireball) κατά τη διάρκεια της φάσης επιτάχυνσής της εφόσον η αρχική επιτάχυνση είναι πολύ μεγάλη. Η σχετική ταχύτητα μεταξύ νετρονίων και πρωτονίων μπορεί να είναι αρκετά υψηλή ώστε να οδηγήσει σε ανελαστικές αλληλεπιδράσεις $p-n$ πάνω από το κατώφλι παραγωγής πιονίων ($\sim 140 \text{ MeV}$) δημιουργώντας νετρίνα με ενέργεια 5-10 GeV μετρούμενη στο επίπεδο του παρατηρητή. Οι Mészáros, Rees και Bahcall (2000) έδειξαν ότι τέτοια νετρίνα των 10 GeV μπορούν να ανιχνευθούν από ανιχνευτές έκτασης μερικών km^3 αν η αφθονία νετρονίων είναι συγκρίσιμη με αυτή των πρωτονίων. Αυτά τα υψηλοενεργειακά νετρίνα συνοδεύονται από φωτόνια των περίπου 10 GeV που προέρχονται από διασπάσεις π^0 . Τα φωτόνια είναι δυνατό να ανιχνευθούν, σε μικρές μετατοπίσεις στο ερυθρό (redshifts), με το GLAST (Gamma-ray Large Area Space Telescope) [4]. Μία ταυτόχρονη ανίχνευση νετρίνου και ακτίνας γ θα μπορούσε να παρέχει πληροφορίες ως προς την αναλογία νετρονίων και κατά συνέπεια ως προς τη φύση του γεννήτορα GRBs. Στην περίπτωση των μικρής διάρκειας GRBs (short GRBs) οι Razzaque και Mészáros (2006) θεώρησαν μια ροή πλούσια σε νετρόνια και εξέτασαν την εκπομπή νετρίνων υψηλών ενεργειών (~ 50

GeV) και φωτονίων κατά την αποσύνδεση πρωτονίων και νετρονίων. Συμπέραναν ότι τα νετρίνα που αναμένονταν από το μοντέλο τους δεν είναι πιθανό να ανιχνευθούν [4]. Επίσης, νετρίνα της τάξης των 30 GeV μπορούν να δημιουργηθούν από αλληλεπιδράσεις p-p μέσα σε εσωτερικές κρούσεις (internal shocks) που οδηγούν σε π^0 , όπως πρότειναν οι Paczynski και Xu (1994) [4].

Νετρίνα σε μεγαλύτερες ενέργειες, της τάξης των TeV μπορούν να παραχθούν στα πλαίσια του σεναρίου της κατάρρευσης (collapsar scenario). Τότε, ο σχετικιστικός πίδακας διεισδύει στο διαστρικό περίβλημα, εκρήγνυται και δημιουργεί την έκλαμψη ακτίνων γ . Οι εσωτερικές κρούσεις (internal shocks) επιταχύνουν τα πρωτόνια κάτω από το περίβλημα. Αυτά τα πρωτόνια μπορεί να αλληλεπιδράσουν με θερμικά φωτόνια και πρωτόνια μέσα στο διαστρικό περίβλημα (p- γ , p-p αλληλεπιδράσεις) και να παραχθούν πόνια. Τότε είναι πιθανή η δημιουργία έκλαμψης νετρίνων της τάξης των TeV που προέρχονται από διασπάσεις των πιονίων. Έτσι ένα GRB σε μετατόπιση στο ερυθρό (redshift) $z \sim 1$ μπορεί να είναι εύκολα ανιχνεύσιμο από τηλεσκόπιο νετρίνων 1 km^3 (Mészáros & Waxman, 2001) [4]. Σε ένα σημαντικό ποσοστό καταρρεύσεων αστέρων μεγάλης μάζας, είναι πιθανό ο πίδακας να μην μπορέσει να διαπεράσει το διαστρικό περίβλημα. Παρόλα αυτά το σήμα των TeV νετρίνων από αυτούς τους “αποτυχημένους” πίδακες θα είναι ίδιο με αυτό των πιδάκων που καταφέρνουν να διαπεράσουν το διαστρικό περίβλημα και να δημιουργήσουν παρατηρήσιμα GRBs [4]. Αυτός είναι ένας τρόπος ανίχνευσης τέτοιων “σκοτεινών” (αφού δεν εκπέμπουν ακτίνες γ) καταρρεύσεων. Η εκπομπή νετρίνων από αυτά τα σκοτεινά GRBs θα είναι όμοια με την αντίστοιχη από τα φωτεινά (ως προς την ακτινοβολία γ) GRBs με τη διαφορά ότι αυτά (τα σκοτεινά) θα είναι 100 φορές πιο πλούσια σε νετρίνα (Razzaque, Mészáros & Waxman 2003, Mészáros & Waxman 2001) [4]. Ένα άλλο χαρακτηριστικό αυτών των υψηλοενεργειακών νετρίνων από σχετικιστικούς “αποτυχημένους” πίδακες είναι ότι η εκπομπή τους ξεκινά 10 - 100 δευτερόλεπτα (seconds) νωρίτερα σε σχέση με τα εκπεμπόμενα νετρίνα από τη σφαίρα πυρός (fireball) των GRBs στην περίπτωση (ηλεκτρομαγνητικά) παρατηρήσιμης έκλαμψης. Έτσι αυτά τα νετρίνα εμφανίζονται ως σήματα – προάγγελοι. Τα νετρίνα από “αποτυχημένα” GRBs μπορούν να αποτελέσουν διάχυτο υπόβαθρο για υψηλοενεργειακά νετρίνα, που θα μπορούσε να είναι ανιχνεύσιμο από το τηλεσκόπιο νετρίνων IceCube αν όλοι οι υπερκαινοφανείς με καταρρεύσεις πυρήνα (core-collapse supernovae) παράγουν “αποτυχημένα” GRBs (Razzaque, Mészáros & Waxman 2003). Η ανίχνευση αυτού του υποβάθρου των TeV νετρίνων μπορεί να είναι μια ένδειξη για υπερκαινοφανείς με καταρρεύσεις πυρήνα (core-collapse supernovae) με πιο αργούς

πίδακες που θα μπορούσαν να συμβάλλουν στη ρήξη και αποβολή του περιβλήματος του υπερκαινοφανούς. Σε αυτή την περίπτωση δεν αναμένεται έκλαμψη ακτίνων γ καθώς ο παράγοντας Lorentz είναι μικρός σε σχέση με το 100 που απαιτείται για το σχηματισμό υπερ-σχετικιστικών πιδάκων (Razzaque, Mészáros & Waxman 2004). Τέτοιου είδους ανιχνεύσεις θα έθεταν όρια ως προς τη συχνότητα των “σκοτεινών” GRBs από “αποτυχημένους” πίδακες επομένως και στη συχνότητα κατάρρευσης πυρήνων αστερών μεγάλης μάζας [4].

Νετρίνα της τάξης TeV και PeV μπορούν να παραχθούν από αλληλεπιδράσεις p- γ μέσα σε εσωτερικές (internal) και αντίστροφες κρούσεις (reverse shocks) και την ακόλουθη διάσπαση των πιονίων. Έτσι μέσα στη σφαίρα πυρός (fireball) οι εσωτερικές κρούσεις (internal shocks) που παράγουν το GRB μπορεί να οδηγήσουν σε επιτάχυνση Fermi των πρωτονίων σε ενέργειες $\sim 10^{20}$ eV (Waxman 1995, Vietri 1995). Τα πρωτόνια αυτά μπορεί να αλληλεπιδράσουν με ακτίνες γ μέσα στη σφαίρα πυρός (fireball) και να οδηγήσουν σε μια έκλαμψη νετρίνων με ενέργειες περίπου 10^{14} eV (100 TeV), που δημιουργούνται από διασπάσεις πιονίων, όπως περιγράφεται ακολούθως [4].



Αυτή η διαδικασία κυριαρχεί στο Δ^+ συντονισμό (Δ^+ resonance) και προϋποθέτει πρωτόνια με πολύ χαμηλότερη ενέργεια από την ενέργεια μέγιστης επιτάχυνσης των 10^{20} eV. Ο προσδιορισμός της ενέργειας κατωφλίου (φωτονίου - μεσονίου) των επιταχυνόμενων πρωτονίων στο Δ^+ συντονισμό επιτυγχάνεται με χρήση του τύπου: $E_\gamma E_p = 0.2 \Gamma^2 \text{ GeV}^2$, όπου: E_γ : η ενέργεια φωτονίων στο σύστημα του παρατηρητή, E_p : η ενέργεια των επιταχυνόμενων πρωτονίων και Γ : ο παράγοντας Lorentz της διαστελλόμενης σφαίρας πυρός (fireball), $\Gamma > 10^2$. Έτσι, υπολογίστηκε ότι η αλληλεπίδραση πρωτονίων ενέργειας 10^{15} eV με φωτόνια περίπου 1 MeV μπορεί να οδηγήσει στην παραγωγή έκλαμψης νετρίνων ενέργειας $\sim 10^{14}$ eV. Ένας ανιχνευτής νετρίνων 1 km^3 θα μπορούσε να ανιχνεύσει κάθε χρόνο 10 – 100 νετρίνα, τα οποία σχετίζονται ως προς το χρόνο και τη θέση με GRBs (Waxman & Bahcall 1997, 2000) [4]. Σύμφωνα με τους συγγραφείς, μερικά πολύ φωτεινά GRBs, που βρίσκονται σε κοντινή απόσταση από τη γη, θα μπορούσαν να παράγουν μια έκλαμψη αρκετών νετρίνων. Αυτά τα νετρίνα μπορούν να ανιχνευθούν από την ακτινοβολία Cherenkov

που εκπέμπεται από τα υψηλής ενέργειας μόνια τα οποία παράγονται από τις αλληλεπιδράσεις των νετρίνων κάτω από την επιφάνεια της Γης [4]. Οι Guetta et al (2001) προσδιόρισαν την παραγωγή νετρίνων στο πλαίσιο του μοντέλου των εσωτερικών κρούσεων (internal shocks) και βρήκαν ανάλογα αποτελέσματα. Υπολόγισαν την παραγωγή φωτονίων συγχροτρονίου (synchrotron photons) και την παραγωγή νετρίνων από αλληλεπιδράσεις πρωτονίων – ακτίνων γ μέσα στην περιοχή σκεδάσεων της σφαίρας πυρός (fireball). Στον υπολογισμό λήφθηκαν υπόψη οι απώλειες λόγω ακτινοβολίας συγχροτρονίου υψηλοενεργειακών πιονίων και μιονίων καθώς και η δίδυμη γένεση για φωτόνια μεγαλύτερης ενέργειας. Δεδομένου ότι η τυπική ενέργεια φωτονίων στα GRBs είναι περίπου 1 MeV απαιτούνται πρωτόνια ενέργειας μερικών 10^{16} eV για την παραγωγή νετρίνων από διάσπαση πιονίου με ενέργεια $\sim 10^{15}$ eV. Σύμφωνα με αυτό το μοντέλο προβλέπεται ανίχνευση ~ 10 μιονίων (που προέρχονται από νετρίνα) το χρόνο σε στερεά γωνία 4π sr, τα οποία σχετίζονται με GRBs, σε ανιχνευτή 1 km^3 [4].

Νετρίνα ακόμα μεγαλύτερης ενέργειας $\sim 10^{18}$ eV μπορούν να παραχθούν κατά την έναρξη της αλληλεπίδρασης της σφαίρας πυρός (fireball) με το περιβάλλον μέσο. Για τις τυπικές ενέργειες φωτονίων των $\sim 0.1 - 1$ keV, τα νετρίνα μπορούν να αποκτήσουν ενέργειες $\sim 10^{18}$ eV αν τα πρωτόνια επιταχύνονται σε $10^{19} - 10^{20}$ eV. Εκτός από π^+ και π^- , παράγονται και π^0 που οδηγούν στη δημιουργία ακτίνων γ πολύ υψηλών ενεργειών. Αυτές οι ακτίνες γ δεν μπορούν να διαφύγουν παρά μόνο σε πολύ χαμηλές ενέργειες ~ 10 GeV καθώς η σφαίρα πυρός (fireball) είναι οπτικά πυκνή για μεγαλύτερες ενέργειες. Αυτά τα νετρίνα υπερυψηλών ενεργειών και οι ακτίνες γ μερικών GeV καθυστερούν την κυρίως έκλαμψη ακτίνων γ κατά περίπου 10s και μπορεί έτσι να ανιχνευθεί. Εντούτοις αυτό προϋποθέτει ότι τα πρωτόνια μπορούν να επιταχυνθούν σε ενέργειες $\sim 10^{20}$ eV στην ήπια σχετικιστική αντίστροφη κρούση (reverse shock) που δημιουργείται όταν η διαστελλόμενη σφαίρα πυρός (fireball) συγκρούεται με το περιβάλλον μέσο [4]. Ο Vietri (1998a) έδειξε ότι τα νετρίνα υπερυψηλών ενεργειών ($> 10^{19}$ eV) δεν παράγονται μόνο κατά τη διάρκεια της έκλαμψης αλλά και του αποφώτου (afterglow). Αυτά τα νετρίνα είναι αποτέλεσμα αλληλεπιδράσεων των πρωτονίων υπερυψηλών ενεργειών με φωτόνια, που οδηγούν στην παραγωγή πιονίων και τελικά νετρίνων. Ένα από τα σημαντικότερα ζητήματα που πρέπει να μελετηθεί είναι οι ενεργειακές απώλειες που θέτουν περιορισμούς στην ενέργεια των νετρίνων. Ο Vietri (1998a) εξέτασε την περίπτωση των εξωτερικών κρούσεων (external shocks) και κατέληξε ότι τα νετρίνα που προέρχονται από διάσπαση πιονίου μένουν ανεπηρέαστα από αδιαβατικές απώλειες ή απώλειες λόγω

ακτινοβολίας συγχροτρονίου, ενώ τα νετρίνα που παράγονται από διάσπαση μιονίου σε ισχυρά κατευθυντική εκπομπή (beamed emission) υφίστανται περιορισμούς στην ενέργεια αλλά ξεπερνούν τα 10^{19} eV. Το συμπέρασμα του Vietri ήταν ότι νετρίνα υπερυψηλών ενεργειών μπορούν να παραχθούν κατά τη διάρκεια των αποφώτων (afterglows). Αντίστοιχα, οι Rachen και Mészáros (1998) μελέτησαν τις απώλειες στην περίπτωση των εσωτερικών κρούσεων (internal shocks). Διαπίστωσαν ότι η μείωση ενέργειας (cooling) των πιονίων και μιονίων στον αδρονικό καταγισμό θέτει τον ισχυρότερο περιορισμό στην ενέργεια των νετρίνων και ότι η παραγωγή κοσμικών ακτίνων υπερυψηλών ενεργειών (UHECRs) και η παρατηρήσιμη ροή νετρίνων στην ίδια θέση μπορεί να πραγματοποιηθεί κάτω από εξαιρετικές συνθήκες. Κατέληξαν λοιπόν ότι τα GRBs μπορούν να παράγουν μια σημαντική ροή νετρίνων υπερυψηλών ενεργειών (Ultra High Energy - UHE neutrinos) αλλά δεν μπορούν να ξεπεράσουν ενέργειες πάνω από 10^{18} eV [4]. Συμπερασματικά, αν και η παραγωγή νετρίνων υπερυψηλών ενεργειών (όπως και UHECRs) από GRBs είναι υπό διερεύνηση, η ταυτόχρονη ανίχνευση UHE νετρίνων με GRB θα αποδείκνυε ότι τα GRBs παράγουν και UHECRs [4].

Ο Waxman (2000) διεξήγαγε μια εκτενή μελέτη σύμφωνα με την οποία αναμένεται ανίχνευση νετρίνων από GRBs. Επιπλέον, κατέδειξε την πιθανότητα πλούσιας παραγωγής νετρίνων σε διάφορες περιοχές ενέργειας. Αν και, μέχρι στιγμής, δεν έχουν ανιχνευθεί νετρίνα από GRBs, υπάρχει η αισιοδοξία παρατήρησής τους με τα τωρινά και μελλοντικά τηλεσκόπια νετρίνων. Μερικά από αυτά είναι: το IceCube και το Amanda II στο Νότιο Πόλο, το ANTARES, το NEMO, το Nestor και το μελλοντικό KM3NeT στη Μεσόγειο και άλλα [4].

Αν και τα τηλεσκόπια νετρίνων σχεδιάζονται ώστε να έχουν πολύ μεγάλες διαστάσεις, οι πιθανότητες ανίχνευσης νετρίνων υπερυψηλών ενεργειών από GRBs είναι μικρές και οι τυχόν ανιχνεύσεις θα περιορίζονται σε μικρό αριθμό κοντινών εκλάμψεων. Ωστόσο, η ανίχνευση τέτοιων νετρίνων που “δείχνουν πίσω στην πηγή τους” είναι εξαιρετικής σημασίας καθώς θα επιφέρουν καλύτερη κατανόηση αυτών των πηγών και των μηχανισμών επιτάχυνσής τους ενώ πιθανόν θα εδραιώσουν τα GRBs ως πηγή των GZK κοσμικών ακτίνων [4]. Συγκεκριμένα, η ανίχνευση UHE νετρίνων σε συσχέτιση με GRBs θα επιβεβαιώσει τη θεωρία της κοσμολογικής σφαίρας πυρός (fireball) ενώ θα ευνοήσει την κατανόηση των αρχικών στιγμών των εκλάμψεων καθώς και της φύσης των μικρής διάρκειας GRBs (short GRBs) [11].

ii. Ρυθμός εμφάνισης και ανίχνευση των GRBs

Οι δορυφόροι που βρίσκονται τώρα σε τροχιά γύρω από τη Γη ανιχνεύουν, κατά μέσο όρο, μία έκλαμψη ακτίνων γ κάθε μέρα [7]. Λαμβάνοντας όμως υπόψη ότι οι εκλάμψεις ακτίνων γ είναι ορατές σε αποστάσεις που καλύπτουν το μεγαλύτερο μέρος του ορατού σύμπαντος στο οποίο περιέχονται πολλά δισεκατομμύρια γαλαξίες, συμπεραίνεται ότι τα GRBs είναι εξαιρετικά σπάνια γεγονότα ανά γαλαξία. Η ακριβής μέτρηση του αριθμού των GRBs ανά γαλαξία είναι επίπονη, αλλά υπολογίζεται ότι για ένα γαλαξία στο μέγεθος του γαλαξία μας αναμένεται μία έκλαμψη, συγκεκριμένα μεγάλης διάρκειας GRB (long GRB), κάθε 100.000 με 1.000.000 χρόνια [4]. Ωστόσο μόνο ένα ποσοστό από αυτά τα μεγάλης διάρκειας GRBs (long GRBs) έχουν κατεύθυνση ακτινοβολίας προς τη Γη ώστε να είναι τελικά ανιχνεύσιμο. Εκτιμήσεις για τους ρυθμούς εμφάνισης μικρής διάρκειας GRBs (short GRBs) είναι ακόμα πιο αβέβαιες, εξαιτίας του άγνωστου ποσοστού ακτινοβολίας που εκπέμπουν, αλλά είναι πιθανόν συγκρίσιμες [4].

Όπως αναφέρθηκε στην παράγραφο (i), τα GRBs οδηγούν μεταξύ άλλων στην παραγωγή ακτίνων γ , πρωτονίων και νετρίνων. Η ανίχνευση αυτών των σωματιδίων και των ακτίνων γ μπορεί να παρέχει πληροφορίες για τη φύση και τους μηχανισμούς δημιουργίας των εκλάμψεων αυτών. Παρόλα αυτά δεν είναι πάντα επιτυχής η μελέτη των GRBs με όλα τα σωματίδια-φορείς που δημιουργούνται σε αυτά. Αντίθετα η μελέτη τους αποτελεί μια επίπονη διαδικασία εξαιτίας του γεγονότος ότι πολλά από τα σωματίδια δε φτάνουν κατευθείαν από την έκλαμψη στον ανιχνευτή. Έτσι, τα πρωτόνια δε διατηρούν την αρχική τους κατεύθυνση εξαιτίας των γαλαξιακών μαγνητικών πεδίων. Αντίστοιχα, τα υψηλοενεργειακά φωτόνια αν και δεν επηρεάζονται από μαγνητικά πεδία, αλληλεπιδρούν με την κοσμική ακτινοβολία υποβάθρου ή απορροφώνται από γαλαξιακά νεφελώματα, με αποτέλεσμα να έχουν μικρή ροή. Εντούτοις, τα νετρίνα δε μεταβάλλουν την αρχική τους κατεύθυνση ούτε απορροφώνται. Το αποτέλεσμα είναι να φτάνουν στη γη με την αρχική κατεύθυνσή τους και να αποτελούν κατάλληλα σωματίδια για τον εντοπισμό της θέσης και την περαιτέρω μελέτη των GRBs [4].

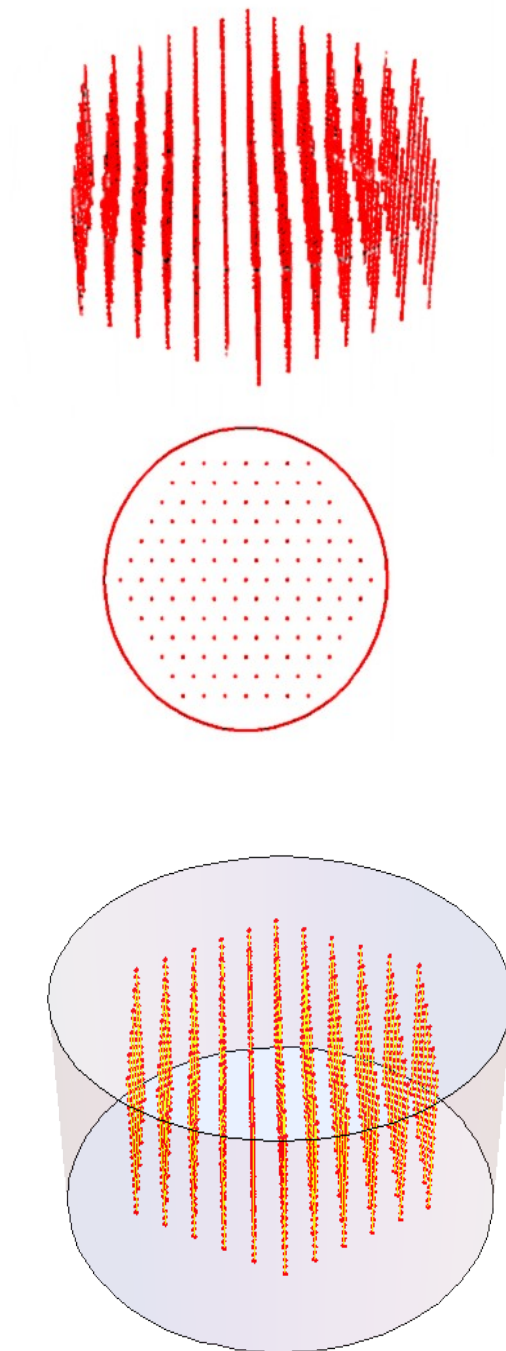
Η ανίχνευση των νετρίνων μπορεί να πραγματοποιηθεί μόνο έμμεσα. Έτσι, τα νετρίνα αλληλεπιδρούν με το νερό (ή πάγο, όπως στα IceCube και Amanda II) που περιβάλλει τον ανιχνευτή και παράγουν μίονια. Αξίζει να σημειωθεί ότι αλληλεπιδρούν κυρίως με το βραχώδες έδαφος σε μικρή απόσταση από το νερό, όπου έχει τοποθετηθεί ο ανιχνευτής, λόγω της μεγαλύτερης πιθανότητας αλληλεπίδρασης

των νετρίνων με τη γη σε σχέση με το νερό (ή τον πάγο) [8], [10]. Στη συνέχεια τα μόνια προκαλούν καταγισμούς μεγάλου εύρους που διανύουν πολλά χιλιόμετρα στο νερό (catastrophic bremsstrahlung) και σκεδάσεις μικρότερου εύρους (electrons or neutral-current events) που ωστόσο οδηγούν σε πολύ φωτεινούς καταγισμούς. Αποτέλεσμα είναι η εκπομπή ακτινοβολίας Cherenkov που ανιχνεύεται από τους φωτοπολλαπλασιαστές του ανιχνευτή (τηλεσκοπίου νετρίνων). Η ανίχνευση της ακτινοβολίας Cherenkov και συγκεκριμένα η ακριβής μέτρηση του τόπου και χρόνου άφιξης των φωτονίων (μιονίων), που προέρχονται από νεutrίνο (όχι ατμοσφαιρικών που αποτελούν “μόνιμο θόρυβο” για τον ανιχνευτή), οδηγεί σε συμπεράσματα για την τροχιά, την ενέργεια και τις αλληλεπιδράσεις του νετρίνου με την ύλη. Αφού προσδιοριστεί η κατεύθυνση και η ενέργεια του νετρίνου μπορεί να συσχετιστεί (χωρικά και χρονικά) με την ανίχνευση εκλάμψεων ακτίνων γ από τους δορυφόρους ανοίγοντας ένα νέο παράθυρο παρατήρησης αστροφυσικών αντικειμένων [9], [11].

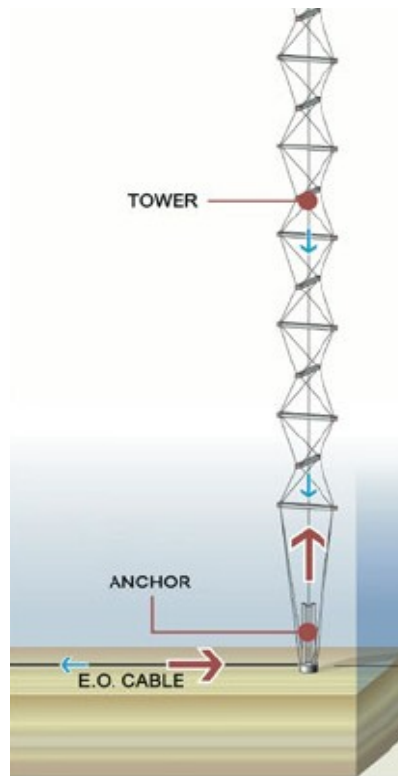
iii. Μελέτη της ικανότητας ανίχνευσης νετρίνων από GRBs με το τηλεσκόπιο νετρίνων KM3NeT

Το τηλεσκόπιο νετρίνων KM3NeT (km^3 Neutrino Telescope) θα τοποθετηθεί στα βάθη της Μεσογείου και αναμένεται να αποτελέσει έναν από τους μεγαλύτερους ανιχνευτές στον κόσμο [5]. Το KM3NeT θα αποτελείται από έναν αριθμό κατακόρυφων κατασκευών (detection units - DUs), όπου βρίσκονται τοποθετημένοι φωτοπολλαπλασιαστές καθώς και συσκευές για βαθμονόμηση και περιβαλλοντικές μετρήσεις. Κατά τη διάρκεια της σχεδιαστικής φάσης του KM3NeT έχουν προταθεί διάφορες γεωμετρίες για την ανιχνευτική διάταξη και έχει υπολογιστεί η ανιχνευτική τους ικανότητα [5].

Για την παρούσα μελέτη χρησιμοποιήθηκε μια διάταξη 310 κατακόρυφων strings (DUs) τοποθετημένων σε εξαγωνικό σχηματισμό (Εικόνα 4.1). Κάθε string αποτελείται από 40 συνολικά φωτοπολλαπλασιαστές (PMTs), διαμέτρου 0,38 m, τοποθετημένους σε διαδοχικά επίπεδα (storeys). Κάθε επίπεδο περιλαμβάνει 2 φωτοπολλαπλασιαστές, με την “ενεργή περιοχή ανίχνευσής” τους στραμμένη προς το εσωτερικό της γης (downwards), σε οριζόντια απόσταση 8 m μεταξύ τους. Τα διαδοχικά επίπεδα είναι τοποθετημένα κάθετα μεταξύ τους έτσι ώστε να είναι ανά δύο παράλληλα (Εικόνα 4.2).



Εικόνα 4.1: Σχηματικές απεικονίσεις της διάταξης των κατακόρυφων strings (DUs) τοποθετημένων σε εξαγωνικό σχηματισμό.



Εικόνα 4.2: Σχηματική απεικόνιση των 11 πρώτων διαδοχικών επιπέδων. Κάθε ένα από τα 20 συνολικά διαδοχικά επίπεδα έχει στα άκρα του 2 PMTs (με την “ενεργή περιοχή ανίχνευσης” τους στραμμένη προς το εσωτερικό της γης). Τα διαδοχικά επίπεδα είναι τοποθετημένα κάθετα μεταξύ τους.

Η ανιχνευτική ικανότητα της συγκεκριμένης γεωμετρίας προσδιορίστηκε για διαφορετικές αποστάσεις ανάμεσα στα strings καθώς και διαφορετικά ύψη μεταξύ των διαδοχικών επιπέδων. Στόχος αυτής της μελέτης είναι η κάλυψη όσο το δυνατόν μεγαλύτερου “ενεργού όγκου” (όγκου του ανιχνευτή) με το δεδομένο αριθμό strings και PMTs χωρίς παράλληλα να μειώνεται σημαντικά η απόδοση ανίχνευσης. Με αυτό τον τρόπο θα μπορούσε να αυξηθεί η περιοχή ανίχνευσης και κατά συνέπεια η πιθανότητα παρατήρησης νετρίνου από GRBs χωρίς αύξηση του κόστους κατασκευής της ανιχνευτικής διάταξης. Η απόδοση του ανιχνευτή προσδιορίστηκε για απόσταση μεταξύ των strings 90, 180 και 270 μέτρων ενώ για δεδομένη απόσταση θεωρήθηκαν τρία διαφορετικά ύψη μεταξύ των διαδοχικών επιπέδων που αντιστοιχούν σε 30, 40 και 50 μέτρα.

Για τον προσδιορισμό του αριθμού των νετρίνων, και ειδικότερα των μιονίων, που αναμένεται να φτάσουν στον ανιχνευτή χρησιμοποιήθηκαν θεωρητικές προβλέψεις. Έτσι, οι Waxman και Bahcall (1997) βασιζόμενοι στο μοντέλο της

κοσμολογικής σφαίρας πυρός (fireball), προέβλεψαν ροή μιονίων που ανέρχεται σε 10 - 100 μόνια ανά χρόνο και ανά km^2 της περιοχής του ανιχνευτή, προερχόμενα από νετρίνα, ενέργειας $\sim 10^{14}$ eV, που σχετίζονται με GRBs [11], [7]. Ο Waxman (2002) αναθεώρησε αυτή την πρόβλεψη σε 20 μόνια από νετρίνα με ενέργεια $\sim 10^{14}$ eV σε συσχέτιση με GRBs ανά χρόνο και ανά km^2 της περιοχής του ανιχνευτή. Οι Waxman και Bahcall υπολόγισαν ότι τα περισσότερα GRBs θα παράγουν ένα μόνο νετρίνο ανά km^2 αν και μερικά κοντινά GRBs μπορούν να οδηγήσουν σε παραγωγή δύο ή περισσότερων νετρίνων κατά τη διάρκεια της έκλαμψης [11], [7]. Οι παραδοχές που έλαβαν υπόψη οι Waxman και Bahcall για τους θεωρητικούς υπολογισμούς τους αφορούν στην ισοτροπική κατανομή και εκπομπή των GRBs στο Σύμπαν και την παραγωγή μιονίου από νετρίνο με πιθανότητα 1 [13]. Επίσης, αγνόησαν τις απώλειες ενέργειας των νετρίνων λόγω μετατόπισης στο ερυθρό (redshift) καθώς επέφεραν μικρές διορθώσεις. Τα όρια που υπολόγισαν δεν εφαρμόζονται για πηγές με μεγάλο οπτικό βάθος ως προς την αλληλεπίδραση πρωτονίου νουκλεονίου (proton-nucleon interaction) ή την παραγωγή μεσονίων από αλληλεπίδραση $\gamma\gamma$ (photo-production of mesons), αλλά και για πηγές όπου η παραγωγή νετρίνων προκύπτει από άλλη φυσική διαδικασία [13]. Τέλος, ο Waxman (2002) καταλήγει στο συμπέρασμα ότι απαιτούνται ανιχνευτές με μάζα ίση ή μεγαλύτερη από 1 Gton που αντιστοιχεί σε 1 km^3 νερού για την ανίχνευση νετρίνων στο ενεργειακό εύρος $1 - 10^3$ TeV, τόσο για νετρίνα προερχόμενα από σημειακές πηγές όσο και για διάχυτη ροή νετρίνων από εξωγαλαξιακές πηγές [13].

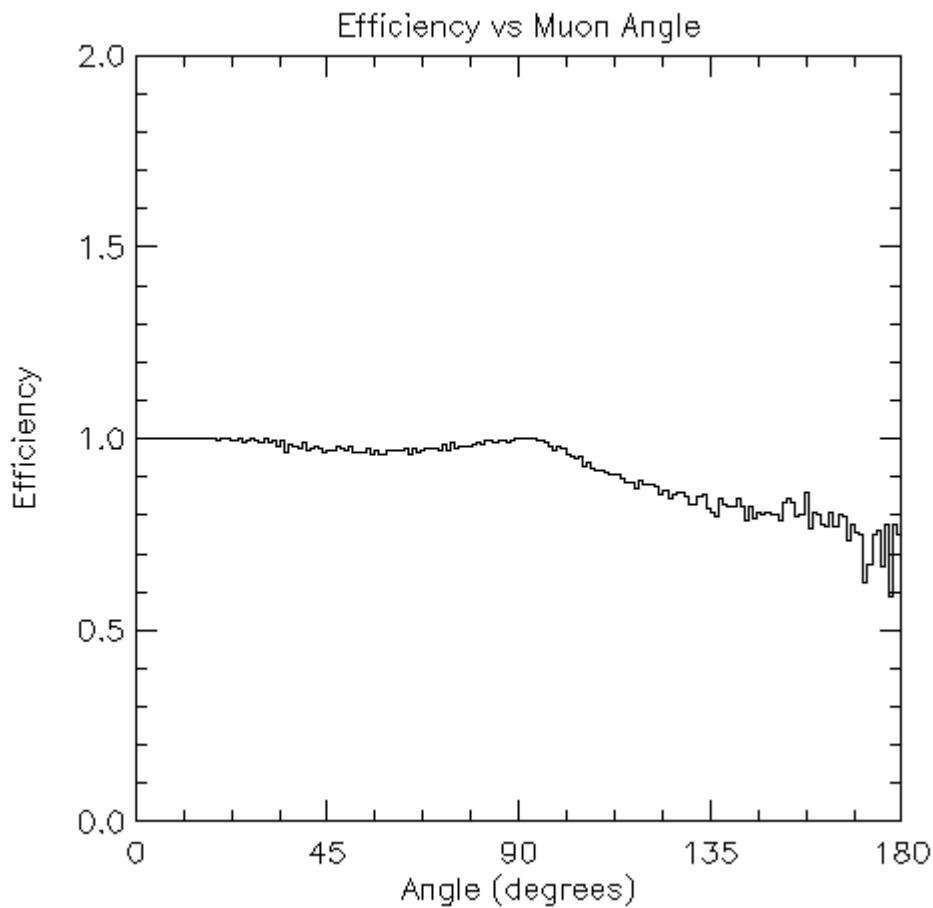
Το λογισμικό που χρησιμοποιήθηκε για την εκτίμηση της απόδοσης της παραπάνω ανιχνευτικής διάταξης αφορά στο πρόγραμμα προσομοίωσης του πειράματος NuBE (Neutrino Burster Experiment) με τις απαραίτητες τροποποιήσεις για τη συγκεκριμένη γεωμετρία. Οι τιμές που χρησιμοποιήθηκαν για την προσομοίωση αφορούν στο δείκτη διάθλασης του θαλασσινού νερού που ορίστηκε ίσος με $n = 1,35$, στην κβαντική απόδοση των φωτοπολλαπλασιαστών (PMTs) ίση με 0.20, στο μήκος εξασθένισης φωτονίων στο θαλασσινό νερό ίσο με 55 m, ενώ θεωρήθηκε ότι 20.000 φωτόνια παράγονται από κάθε μόνιο ανά μέτρο. Επίσης, για να καταγραφεί ένα γεγονός (ως μόνιο που ανιχνεύθηκε) προϋπέθετε αυτό να έχει δώσει σήμα (να έχουν ανιχνευθεί φωτόνια) σε τουλάχιστον 10 PMTs που ανήκουν σε τουλάχιστον δύο strings. Το χρονικό παράθυρο στο οποίο πρέπει να έχει παρατηρηθεί σήμα, υπολογίστηκε με βάση τον απαιτούμενο χρόνο ώστε τα φωτόνια από ένα μόνιο να διασχίσουν την απόσταση για τον κοντινότερο φωτοπολλαπλασιαστή όπου θα ανιχνευθούν. Έτσι υπολογίστηκε η ελάχιστη απόσταση μεταξύ της τροχιάς κάθε

μιονίου και της θέσης των κοντινότερων φωτοπολλαπλασιαστών και υπολογίστηκε το χρονικό παράθυρο (σε nanoseconds) μέσα στο οποίο πρέπει τα φωτόνια να έχουν δώσει σήμα στους φωτοπολλαπλασιαστές.

Θεωρώντας ροή 20 μιονίων το χρόνο ανά km^2 του ανιχνευτή, προσδιορίζεται ο αριθμός των μιονίων ανά km^2 το χρόνο, που αναμένεται να φτάσουν στον ανιχνευτή ανάλογα με το εμβαδό της περιοχής ανίχνευσης που καλύπτεται για τις διάφορες αποστάσεις ανάμεσα στα strings. Για κάθε απόσταση των strings εξετάζεται η απόδοση του ανιχνευτή για διαφορετικά ύψη μεταξύ των διαδοχικών επιπέδων. Η απόδοση του ανιχνευτή αφορά στο πηλίκο του αριθμού των μιονίων που ανιχνεύονται προς τον αριθμό των μιονίων που περιέχονται στην ανιχνευτική διάταξη.

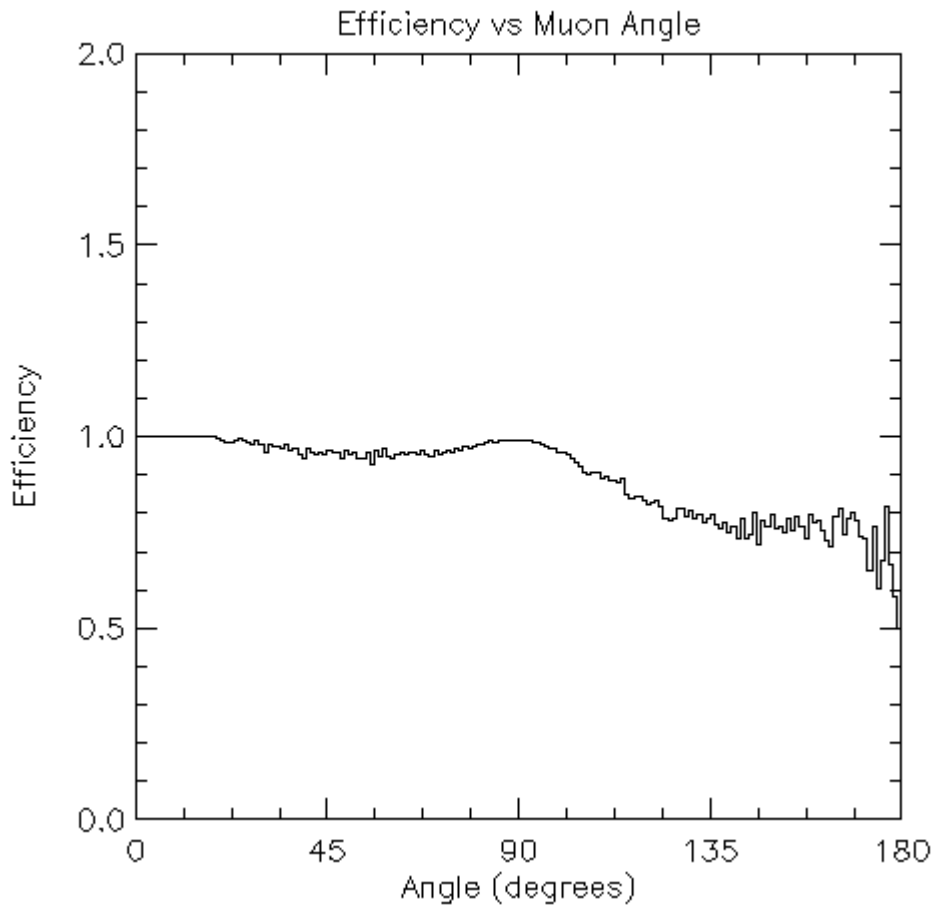
Ο ανιχνευτής, εξαγωνικού σχήματος, αποτελείται από 310 strings που αρχικά απέχουν μεταξύ τους απόσταση ίση με 90 m. Η περιοχή ανίχνευσης υπολογίζεται να έχει εμβαδό ίσο με $1,96 \text{ km}^2$, οπότε αφού αναμένονται 20 μόνια το χρόνο ανά km^2 , θα φτάνουν στον ανιχνευτή 39 μόνια το χρόνο.

Για απόσταση ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα ίση με 30 m υπολογίζεται ότι από τα μόνια που θα φτάσουν στον ανιχνευτή θα ανιχνευτούν τελικά 37 μόνια το χρόνο ανά km^2 , αφού η απόδοση της συγκεκριμένης διάταξης αντιστοιχεί σε 0,95. Η απόδοση (Efficiency) σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης των μιονίων (Angle) παρουσιάζεται στην ακόλουθη γραφική παράσταση (Σχήμα 4.1). Αξίζει να σημειωθεί ότι η μηδενική τιμή γωνίας αντιστοιχεί σε μόνια που προσπίπτουν κατακόρυφα από κάτω προς τα πάνω (από το εσωτερικό της γης προς τον ανιχνευτή), γωνίες 90 μοιρών χαρακτηρίζουν μόνια που προσπίπτουν με οριζόντια διεύθυνση ενώ γωνία 180 μοιρών αντιστοιχούν σε μόνια που προσπίπτουν κατακόρυφα από πάνω προς τα κάτω (από την ατμόσφαιρα προς τον ανιχνευτή).



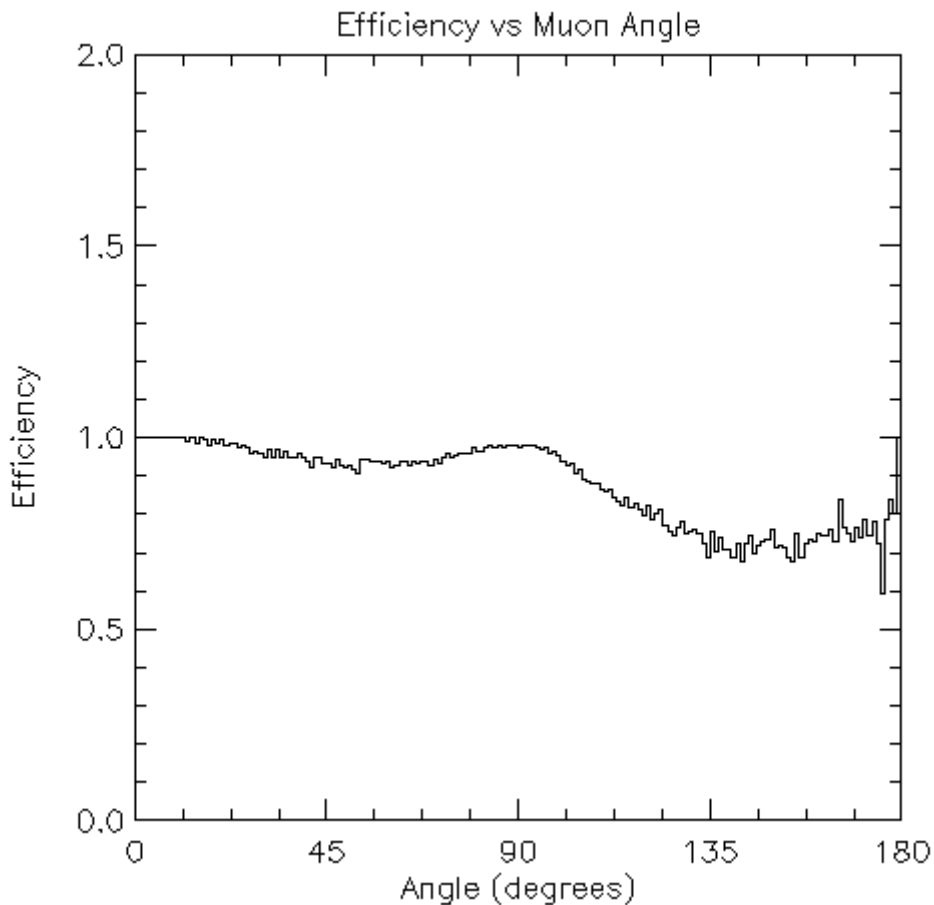
Σχήμα 4.1: Γραφική παράσταση της απόδοσης (Efficiency) του ανιχνευτή σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης των μιονίων σε μοίρες (Angle -degrees), για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 90 m και απόσταση 30 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

Διατηρώντας την απόσταση ανάμεσα στα strings σε 90 m και μεταβάλλοντας την απόσταση μεταξύ διαδοχικών επιπέδων σε 40 m, κατασκευάζεται η γραφική παράσταση της ανιχνευτικής απόδοσης (Efficiency) σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης μιονίων (Angle) (Σχήμα 4.2). Για απόσταση ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα ίση με 40 m υπολογίζεται ότι από τα 39 μόνια το χρόνο που θα φτάσουν στον ανιχνευτή θα ανιχνευτούν τελικά 38 μόνια το χρόνο, αφού η απόδοση της συγκεκριμένης διάταξης αντιστοιχεί σε 0,97.



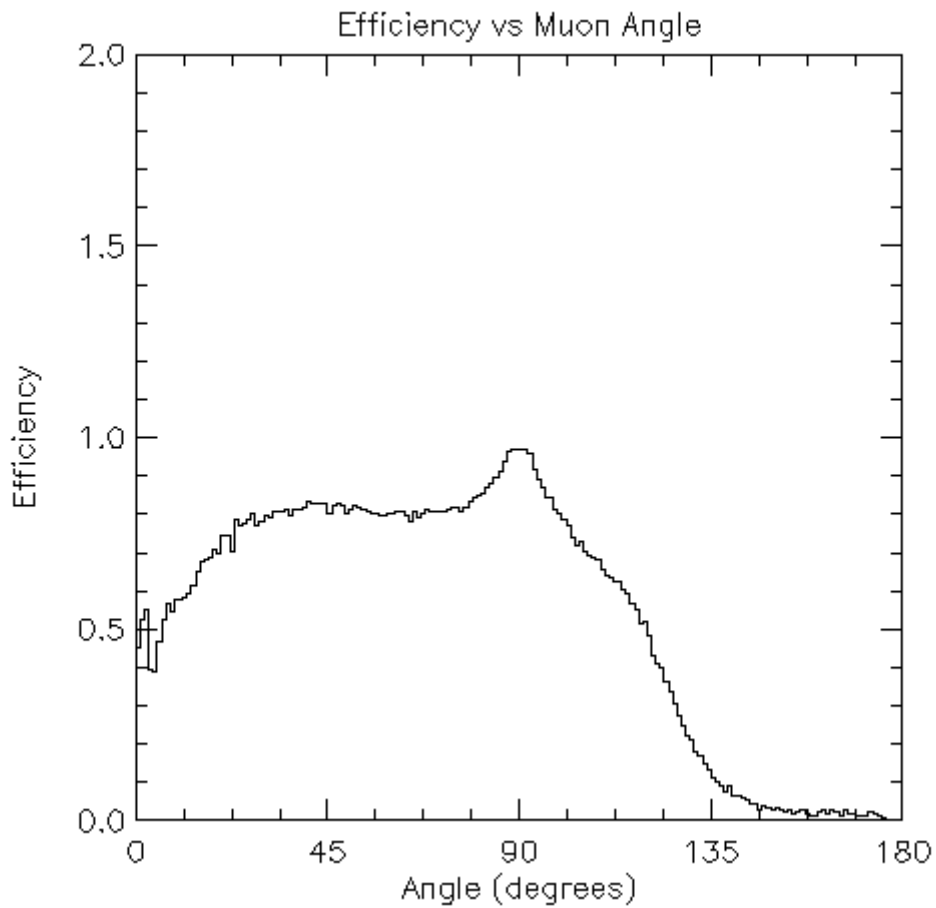
Σχήμα 4.2: Γραφική παράσταση της απόδοσης (Efficiency) του ανιχνευτή σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης των μιονίων σε μοίρες (Angle -degrees), για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 90 m και απόσταση 40 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

Για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 90 m και απόσταση μεταξύ διαδοχικών επιπέδων σε 50 m, υπολογίζεται ότι από τα 39 μόνια που θα φτάσουν στον ανιχνευτή θα ανιχνευτούν τελικά 37 μόνια το χρόνο, αφού η απόδοση της συγκεκριμένης διάταξης αντιστοιχεί σε 0,95. Στη συνέχεια κατασκευάζεται η γραφική παράσταση της ανιχνευτικής απόδοσης (Efficiency) συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης μιονίων (Angle) (Σχήμα 4.3).



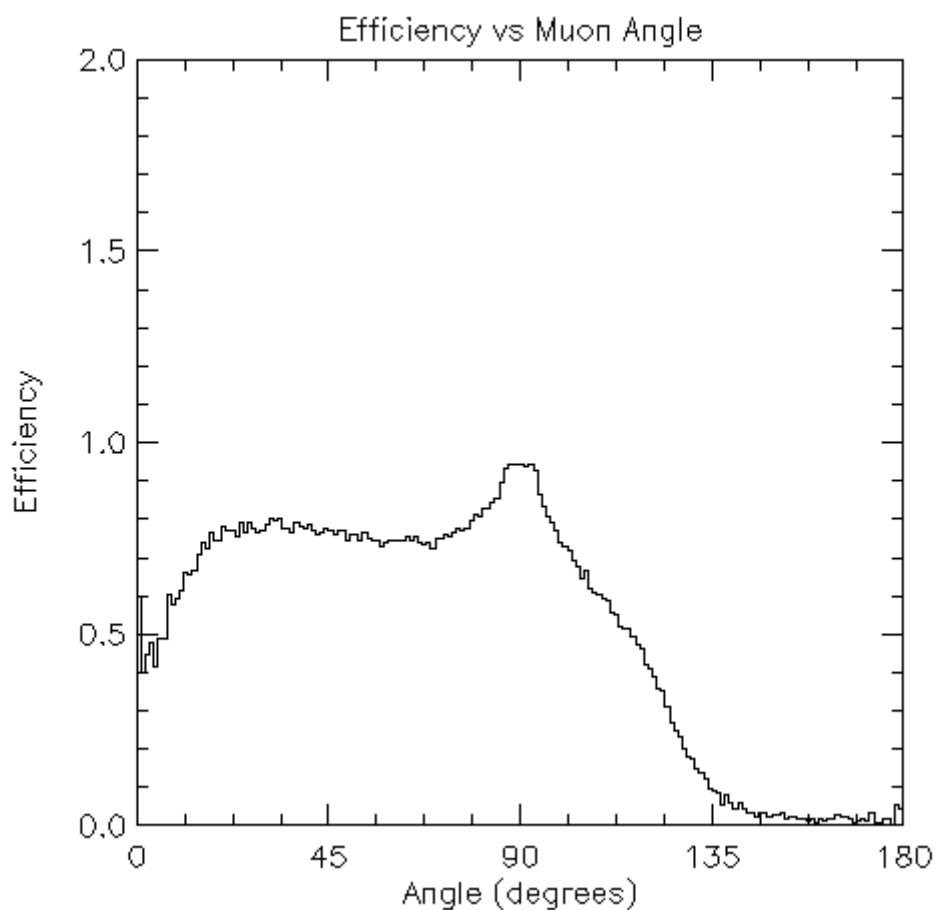
Σχήμα 4.3: Γραφική παράσταση της απόδοσης (Efficiency) του ανιχνευτή σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης των μιονίων σε μοίρες (Angle -degrees), για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 90 m και απόσταση 50 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

Μεταβάλλοντας την απόσταση ανάμεσα στα 310 strings από 90 m σε 180 m, αυξάνεται η περιοχή ανίχνευσης που υπολογίζεται να έχει εμβαδό ίσο με 7,85 km². Έτσι, αφού αναμένονται 20 μόνια το χρόνο ανά km², θα φτάνουν στον ανιχνευτή 157 μόνια το χρόνο. Εξετάζοντας την απόδοση του ανιχνευτή για απόσταση διαδοχικών επιπέδων ίση με 30 m προκύπτει ίση με 0,83 οπότε θα ανιχνευθούν τελικά 130 μόνια το χρόνο. Η εξάρτηση της απόδοσης (Efficiency) του ανιχνευτή ως προς τη γωνία (Angle) παριστάνεται γραφικά παρακάτω (Σχήμα 4.4).



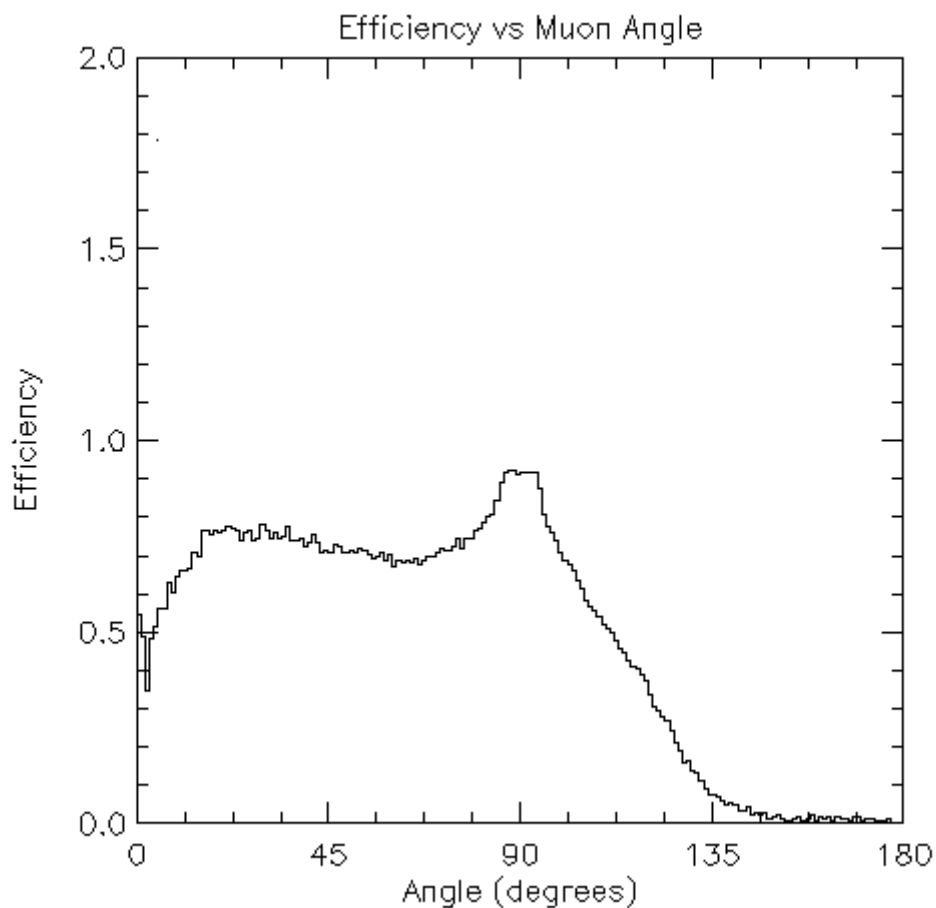
Σχήμα 4.4: Γραφική παράσταση της απόδοσης (Efficiency) του ανιχνευτή σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης των μιονίων σε μοίρες (Angle -degrees), για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 180 m και απόσταση 30 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

Αν αυξηθεί το ύψος διαδοχικών επιπέδων σε 40 m η απόδοση του ανιχνευτή αντιστοιχεί σε 0,77 και μπορούν να ανιχνευθούν 121 μόνια το χρόνο από τα 157 μόνια που θα φτάσουν στον ανιχνευτή. Η γραφική παράσταση της απόδοσης (Efficiency) του ανιχνευτή ως προς τη γωνία πρόσπτωσης μιονίων (Angle) παρουσιάζεται στη συνέχεια (Σχήμα 4.5).



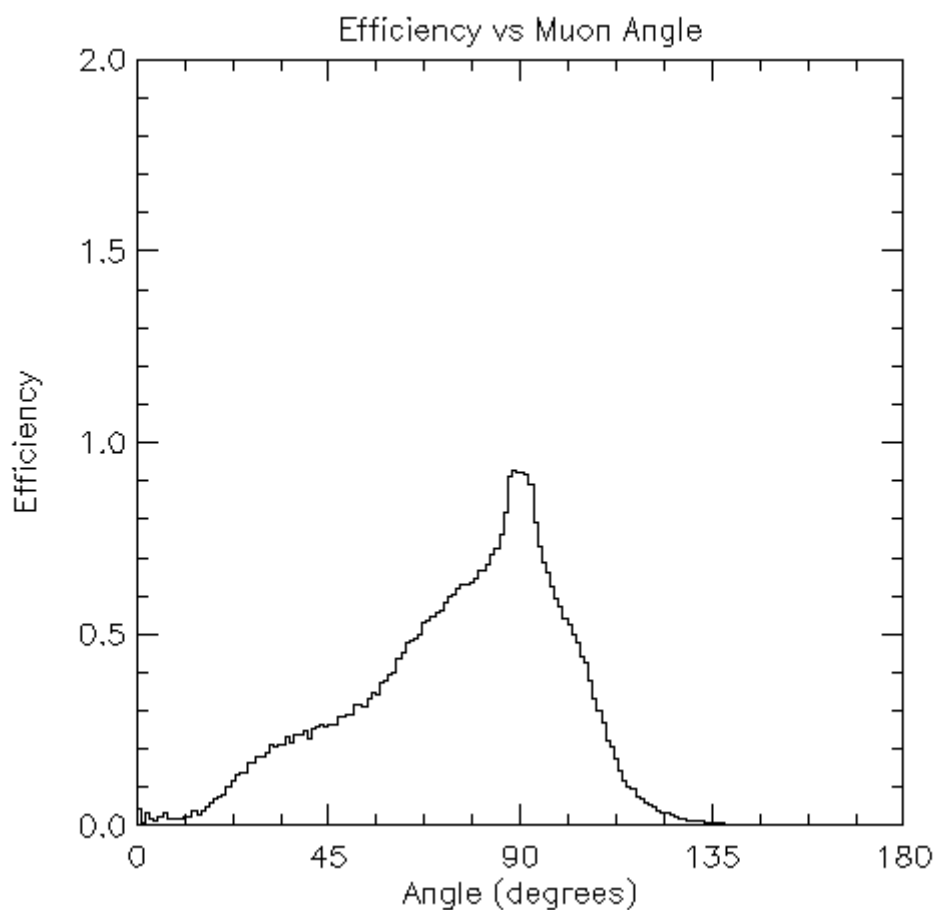
Σχήμα 4.5: Γραφική παράσταση της απόδοσης (Efficiency) του ανιχνευτή σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης των μιονίων σε μοίρες (Angle -degrees), για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 180 m και απόσταση 40 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

Περαιτέρω αύξηση του ύψους διαδοχικών επιπέδων σε 50 m οδηγεί σε απόδοση του ανιχνευτή ίση με 0,72 και δυνατότητα ανίχνευσης 113 μιονίων το χρόνο. Η απόδοση (Efficiency) του ανιχνευτή σε σχέση με τη γωνία πρόσπτωσης μιονίων (Angle) επηρεάζεται σε μικρό βαθμό και παρουσιάζεται γραφικά ακολούθως (Σχήμα 4.6).



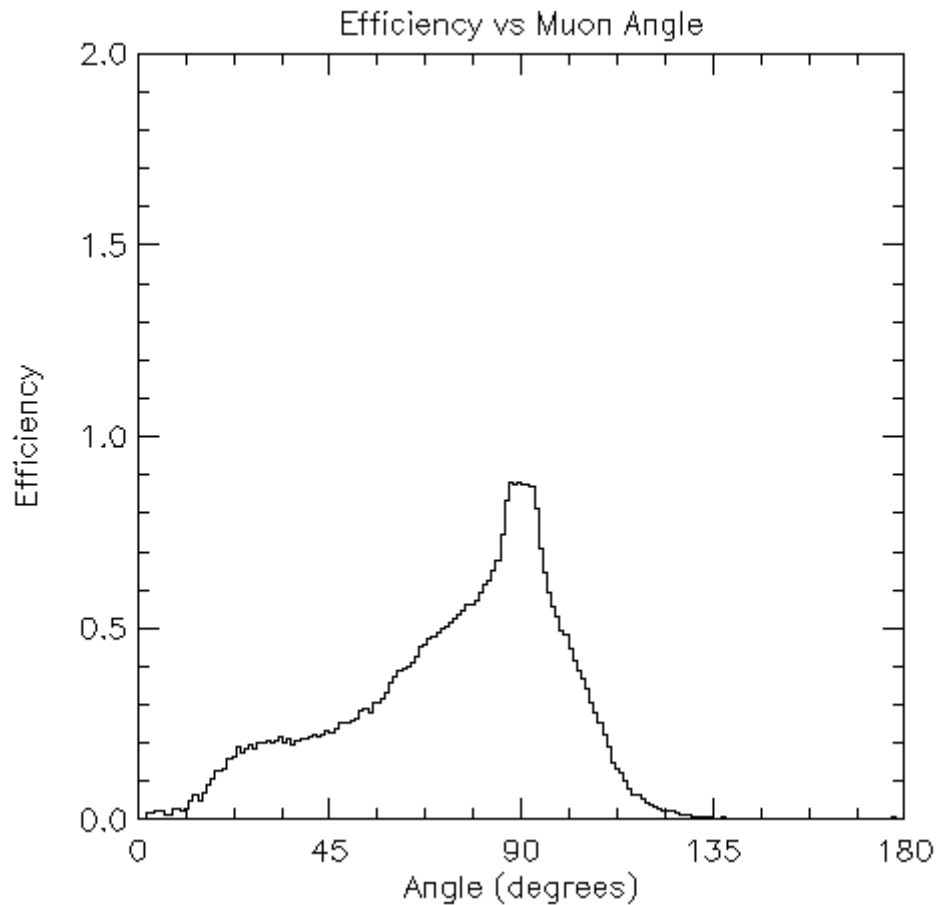
Σχήμα 4.6: Γραφική παράσταση της απόδοσης (Efficiency) του ανιχνευτή σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης των μιονίων σε μοίρες (Angle -degrees), για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 180 m και απόσταση 50 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

Τέλος, εξετάζεται η ανιχνευτική ικανότητα της εξαγωνικής διάταξης για απόσταση ανάμεσα στα 310 strings ίση με 270 m. Η περιοχή ανίχνευσης αυξάνεται και το εμβαδό της υπολογίζεται ίσο με 17,68 km². Αφού αναμένονται 20 μόνια το χρόνο ανά km², θα φτάνουν στον ανιχνευτή 354 μόνια το χρόνο. Εξετάζοντας την απόδοση του ανιχνευτή για απόσταση διαδοχικών επιπέδων ίση με 30 m προκύπτει ίση με 0,60 και τελικά θα ανιχνευθούν 212 μόνια το χρόνο. Η εξάρτηση της απόδοσης (Efficiency) του ανιχνευτή ως προς τη γωνία (Angle) παριστάνεται γραφικά στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 4.7).



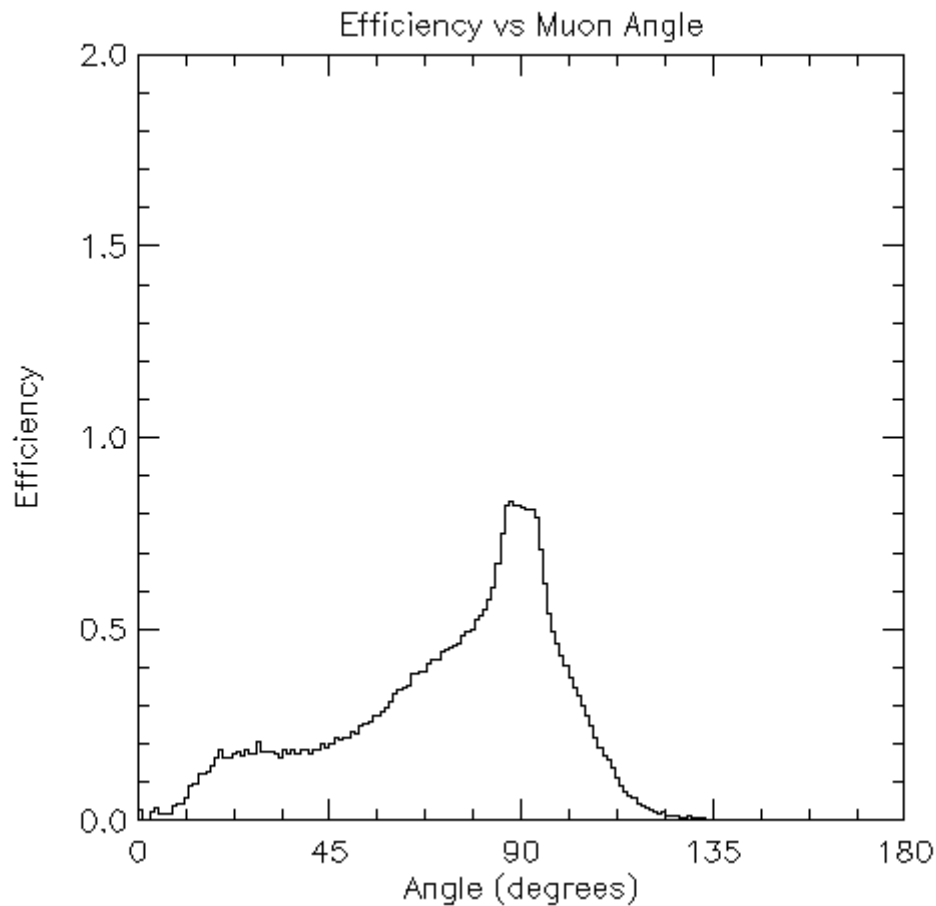
Σχήμα 4.7: Γραφική παράσταση της απόδοσης (Efficiency) του ανιχνευτή σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης των μιονίων σε μοίρες (Angle -degrees), για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 270 m και απόσταση 30 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

Κατά της αύξηση της απόστασης των strings σε 270 m παρατηρείται μείωση της απόδοσης στις μικρές γωνίες πρόσπτωσης μιονίων (κατακόρυφα μόνια από το εσωτερικό της γης). Επίσης, η απόδοση (Efficiency) του ανιχνευτή μειώνεται σε 0,53 για απόσταση διαδοχικών επιπέδων ίση με 40 m και παρουσιάζεται στην ακόλουθη γραφική παράσταση συναρτήσεως της γωνίας πρόσπτωσης μιονίων (Angle) (Σχήμα 4.8). Ο αριθμός των μιονίων που μπορούν να ανιχνευθούν σε ένα χρόνο αντιστοιχεί σε 188 μόνια από το πλήθος των 354 μιονίων που θα φτάσουν στον ανιχνευτή.



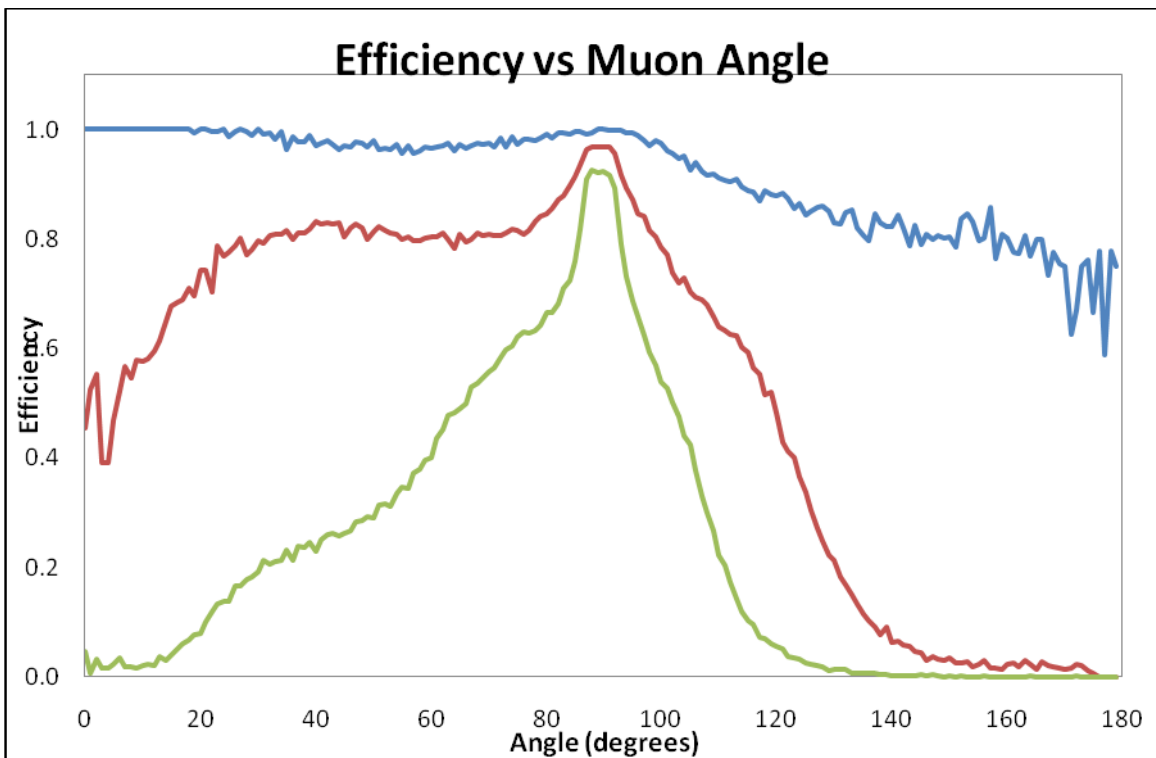
Σχήμα 4.8: Γραφική παράσταση της απόδοσης (Efficiency) του ανιχνευτή σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης των μιονίων σε μοίρες (Angle -degrees), για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 270 m και απόσταση 40 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

Αυξάνοντας, στη συνέχεια, το ύψος ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα σε 50 m, υπάρχει η δυνατότητα παρατήρησης 163 μιονίων το χρόνο. Η απόδοση (Efficiency) της ανιχνευτικής διάταξης μειώνεται και αντιστοιχεί σε 0,46. Η εξάρτηση της απόδοσης από τη γωνία πρόσπτωσης μιονίων (Angle) παριστάνεται στο ακόλουθο γράφημα (Σχήμα 4.9).



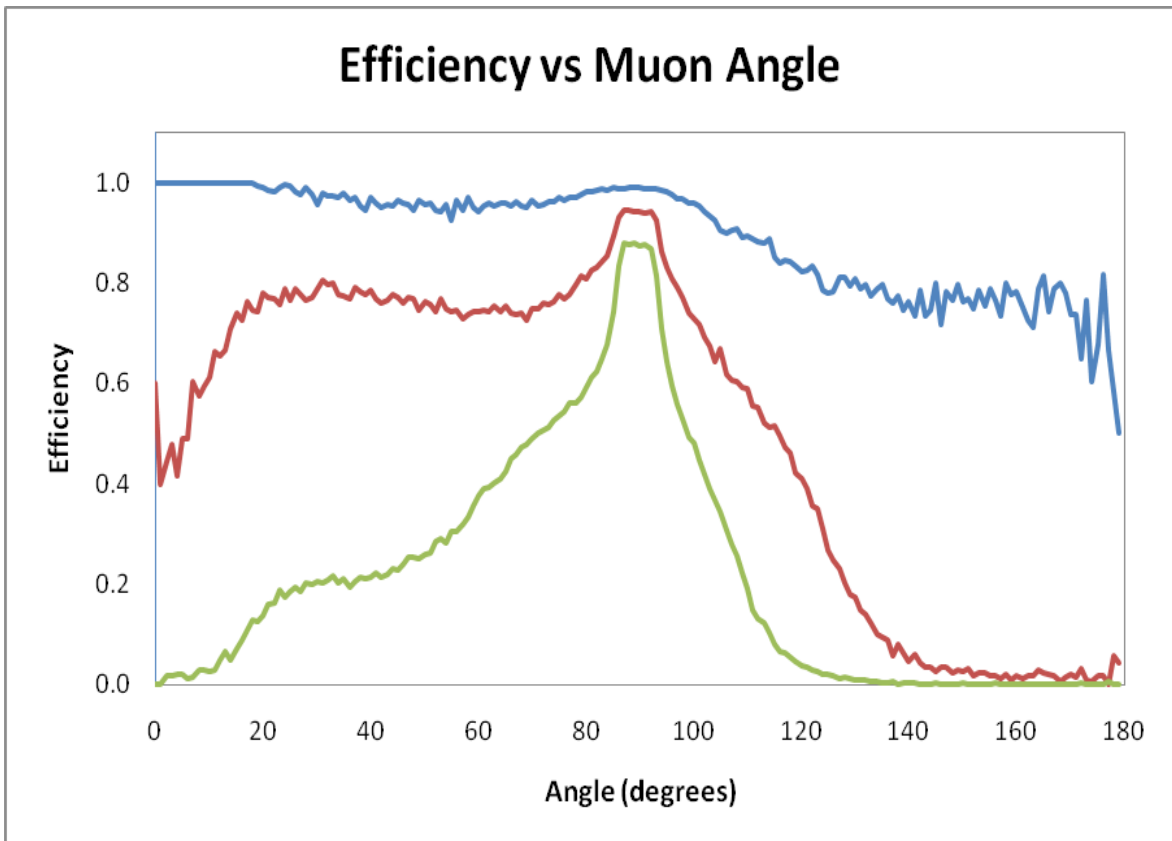
Σχήμα 4.9: Γραφική παράσταση της απόδοσης (Efficiency) του ανιχνευτή σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης των μιονίων σε μοίρες (Angle -degrees), για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 270 m και απόσταση 50 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

Για καλύτερη σύγκριση των παραπάνω αποτελεσμάτων τοποθετούνται στην ίδια γραφική παράσταση τα γραφήματα της απόδοσης (Efficiency) του ανιχνευτή συναρτήσει της γωνίας πρόσπτωσης μιονίων σε μοίρες (Angle - degrees) για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 90, 180 και 270 m. Ακολουθεί το γράφημα για απόσταση 30 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα (Σχήμα 4.10). Υπενθυμίζεται ότι η μηδενική τιμή γωνίας αντιστοιχεί σε μόνια που προσπίπτουν κατακόρυφα από κάτω προς τα πάνω (από το εσωτερικό της γης προς τον ανιχνευτή), γωνίες 90 μοιρών χαρακτηρίζουν μόνια που προσπίπτουν με οριζόντια διεύθυνση ενώ γωνία 180 μοιρών αντιστοιχούν σε μόνια που προσπίπτουν κατακόρυφα από πάνω προς τα κάτω (από την ατμόσφαιρα προς τον ανιχνευτή).



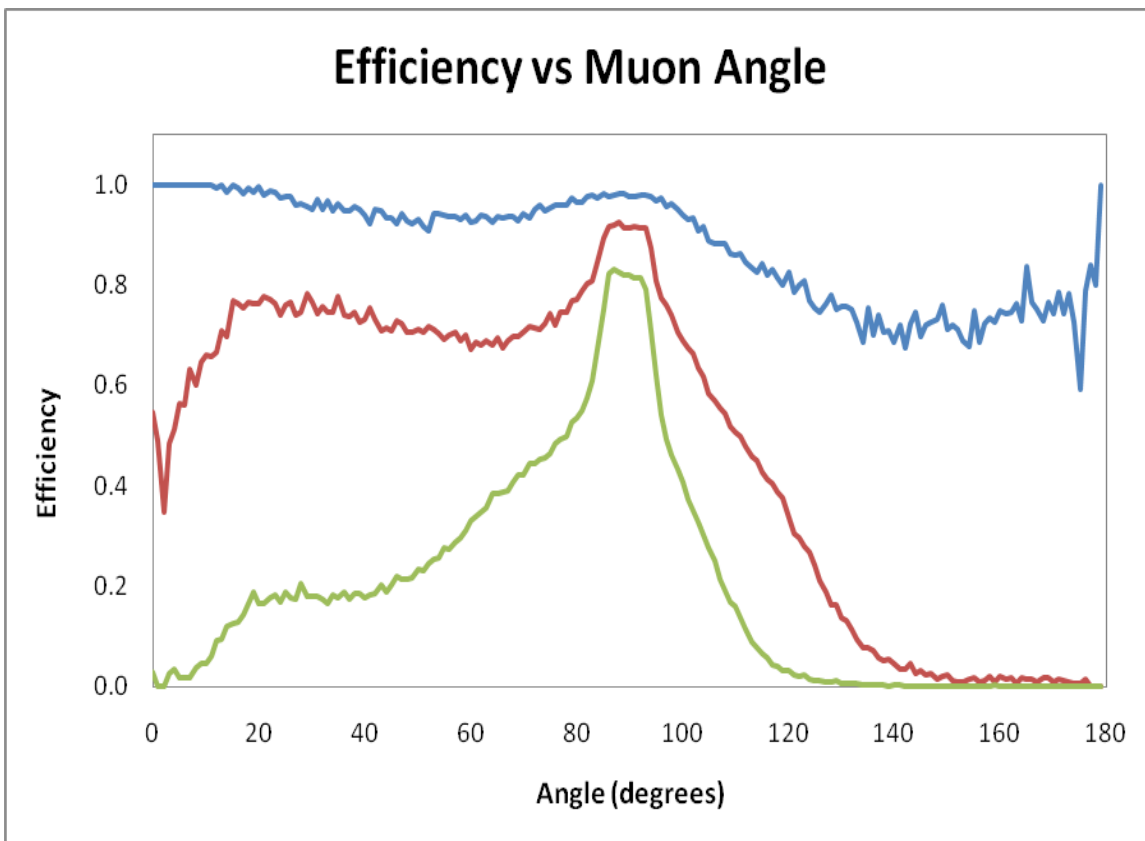
Σχήμα 4.10: Γραφική παράσταση της απόδοσης (Efficiency) του ανιχνευτή σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης των μιονίων σε μοίρες (Angle - degrees), για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με **90 m** (γαλάζια γραμμή), **180 m** (κόκκινη γραμμή) και **270 m** (πράσινη γραμμή) και απόσταση **30 m** ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

Στην παραπάνω γραφική παράσταση παρατηρείται αύξηση της απόδοσης του ανιχνευτή καθώς μειώνεται η απόσταση ανάμεσα στα strings. Για απόσταση 90 m εμφανίζεται μεγάλη τιμή απόδοσης του ανιχνευτή για όλες τις γωνίες πρόσπτωσης μιονίων με ιδιαίτερα καλή απόδοση για μίονια που προσπίπτουν κατακόρυφα (0 μοίρες) από το εσωτερικό της γης προς τον ανιχνευτή. Αυτό δικαιολογείται από το γεγονός ότι τα PMTs που χρησιμοποιούνται είναι στραμμένα προς το εσωτερικό της γης. Για την απόσταση των 180 m η απόδοση μειώνεται για όλο το εύρος γωνιών πρόσπτωσης μιονίων ενώ παρουσιάζει μεγάλη μείωση για μίονια που προσπίπτουν κατακόρυφα είτε από κάτω προς τα πάνω (0 μοίρες) είτε από πάνω προς τα κάτω (180 μοίρες). Αντίστοιχη μορφή εμφανίζει το γράφημα για απόσταση 270 m. Το γεγονός αυτό οφείλεται στη μεγάλη απόσταση ανάμεσα στα strings που οδηγεί σε περιοχές απογυμνωμένες από PMTs με αποτέλεσμα να εμφανίζονται κενά ανίχνευσης (κυρίως για κατακόρυφη πρόσπτωση μιονίων).



Σχήμα 4.11: Γραφική παράσταση της απόδοσης (Efficiency) του ανιχνευτή σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης των μιονίων σε μοίρες (Angle -degrees), για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με **90 m** (γαλάζια γραμμή), **180 m** (κόκκινη γραμμή) και **270 m** (πράσινη γραμμή) και απόσταση **40 m** ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

Αντίστοιχα συμπεράσματα προκύπτουν από τις γραφικές παραστάσεις της απόδοσης (Efficiency) του ανιχνευτή σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης των μιονίων σε μοίρες (Angle - degrees), για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 90 m (γαλάζια γραμμή), 180 m (κόκκινη γραμμή) και 270 m (πράσινη γραμμή) και για απόσταση 40 m (Σχήμα 4.11) και 50 m (Σχήμα 4.12) ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.



Σχήμα 4.12: Γραφική παράσταση της απόδοσης (Efficiency) του ανιχνευτή σε συνάρτηση με τη γωνία πρόσπτωσης των μιονίων σε μοίρες (Angle -degrees), για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με **90 m** (γαλάζια γραμμή), **180 m** (κόκκινη γραμμή) και **270 m** (πράσινη γραμμή) και απόσταση **50 m** ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

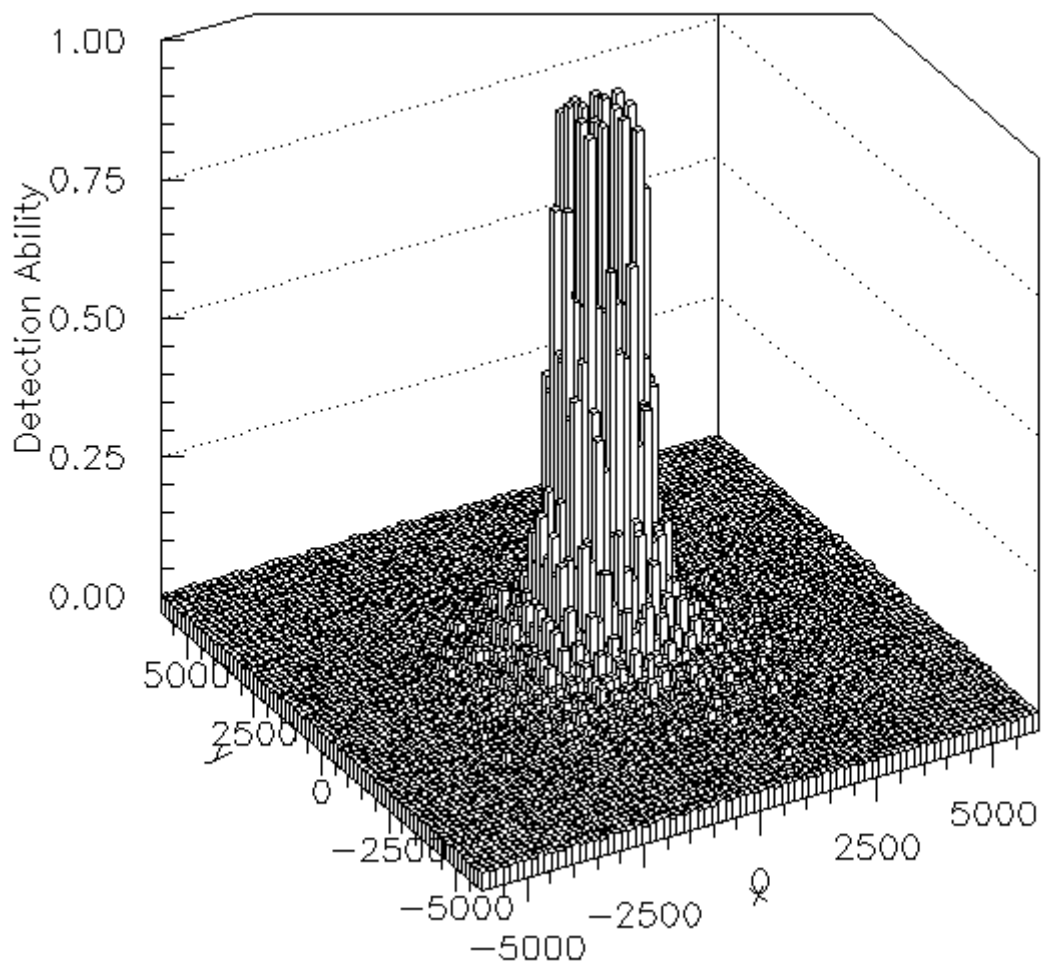
Από τα παραπάνω γραφήματα παρατηρείται ότι για δεδομένη απόσταση ανάμεσα στα strings (ίση με 180 m ή 270 m) η απόδοση του ανιχνευτή μειώνεται καθώς αυξάνεται το ύψος μεταξύ διαδοχικών επιπέδων. Αντίθετα στην περίπτωση που η απόσταση ανάμεσα στα strings αντιστοιχεί σε 90 m, παρατηρείται αύξηση της απόδοσης καθώς αυξάνεται το ύψος μεταξύ διαδοχικών επιπέδων από 30 m σε 40 m. Στη συνέχεια η απόδοση μειώνεται κατά την αύξηση του ύψους μεταξύ διαδοχικών επιπέδων από 40 m σε 50 m. Έτσι αρχικά η απόδοση του ανιχνευτή αυξάνεται λόγω της αύξησης του ενεργού όγκου ανίχνευσης αλλά περαιτέρω αύξηση του ύψους μεταξύ των διαδοχικών επιπέδων προκαλεί μείωση της απόδοσης εξαιτίας των “κενών” ανίχνευσης που δημιουργούνται.

Για λόγους πληρότητας παρουσιάζονται συνοπτικά τα παραπάνω αποτελέσματα στον ακόλουθο πίνακα (Πίνακας 4.1). Αναγράφονται η τιμή της απόδοσης και ο αριθμός των μινίων που μπορούν να παρατηρηθούν για αποστάσεις μεταξύ των strings 90, 180 και 270 μέτρων και ύψη μεταξύ των διαδοχικών επιπέδων που αντιστοιχούν σε 30, 40 και 50 μέτρα.

Απόσταση ανάμεσα στα strings (m)	90			180			270		
Ύψος διαδοχικών επιπέδων (m)	30	40	50	30	40	50	30	40	50
Απόδοση ανιχνευτή	0,95	0,97	0,95	0,83	0,77	0,72	0,60	0,53	0,46
Αριθμός μινίων	37	38	37	130	121	113	212	188	163

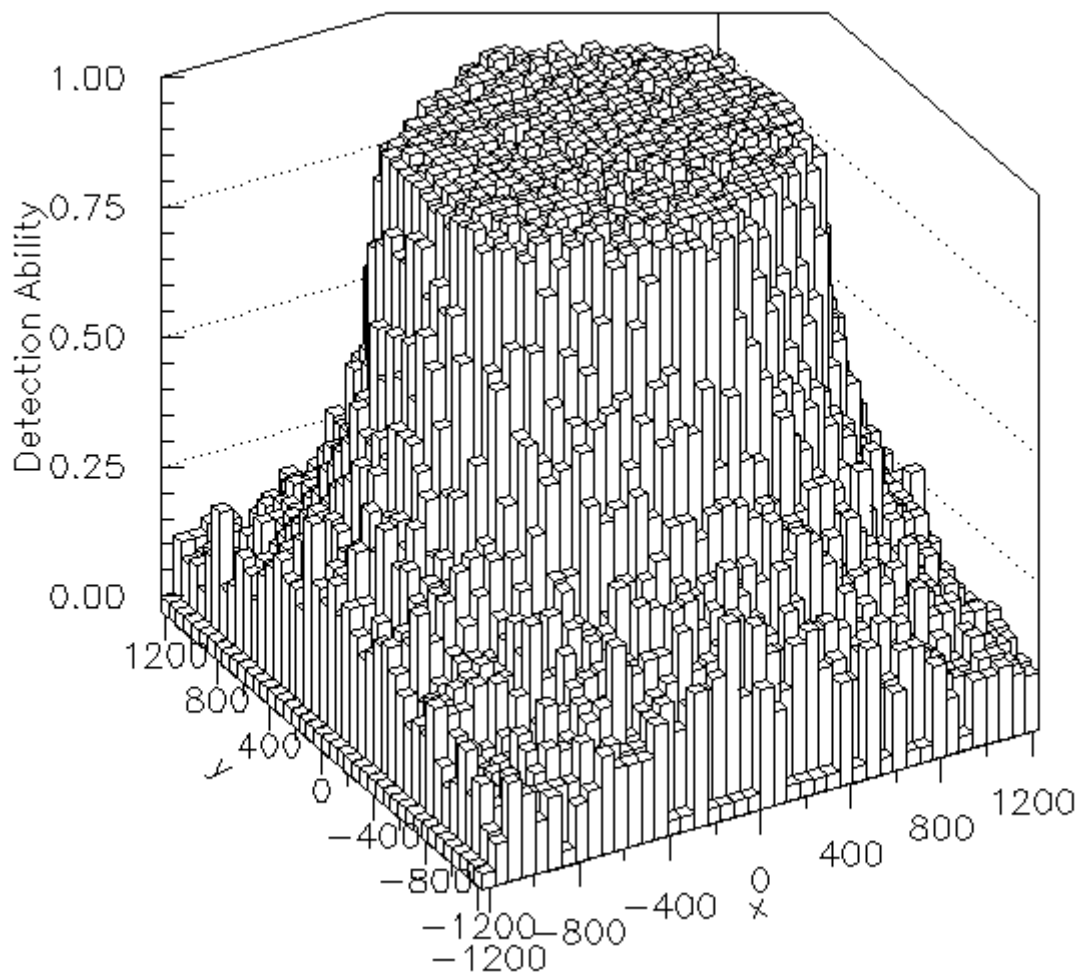
Στη συνέχεια εξετάζεται η ανιχνευτική ικανότητα της διάταξης σε ολόκληρο τον όγκο του ανιχνευτή. Για το σκοπό αυτό θεωρήθηκε ένα “νοητό” τετραγωνικό πλέγμα πλευράς 12 km το οποίο διαιρέθηκε σε μικρότερα τετράγωνα πλευράς 60 m. Στο κέντρο αυτών των μικρών τετραγώνων υπολογίστηκε η ανιχνευτική ικανότητα της διάταξης για τις παραπάνω αποστάσεις ανάμεσα στα strings και τα διαδοχικά επίπεδα. Σημειώνεται ότι η ανιχνευτική ικανότητα της διάταξης αφορά στο πηλίκο των μινίων που ανιχνεύονται προς τον αριθμό των μινίων που “παράγονται” στο κέντρο κάθε τετραγώνου του πλέγματος.

Για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 90 m και απόσταση ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα ίση με 30 m, ακολουθεί η γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης (Σχήμα 4.13).



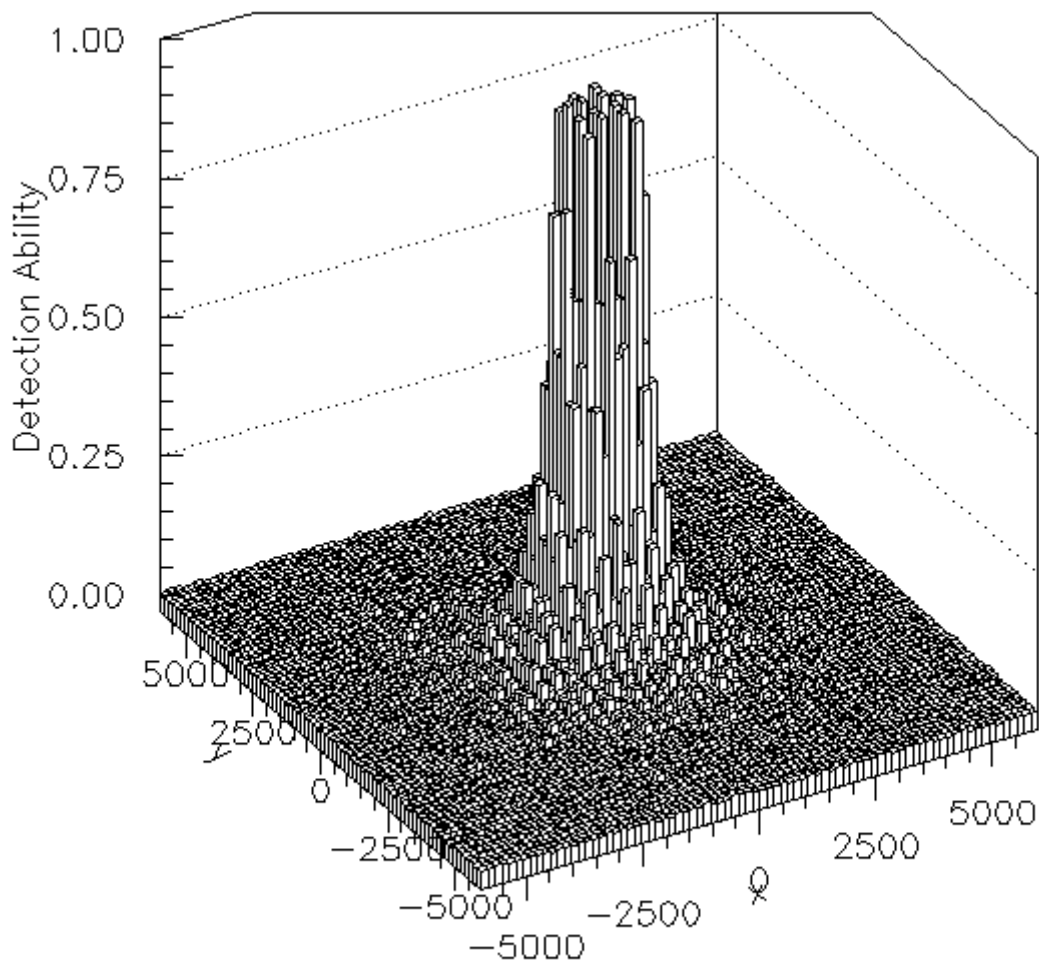
Σχήμα 4.13: Γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 90 m και απόσταση 30 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

Στη συνέχεια, εστιάζοντας στο κέντρο του ανιχνευτή, δηλαδή θεωρώντας τετραγωνικό πλέγμα 2,5 km προκύπτει η γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης (Σχήμα 4.14).



Σχήμα 4.14: Γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης, στο κέντρο του ανιχνευτή, για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 90 m και απόσταση 30 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

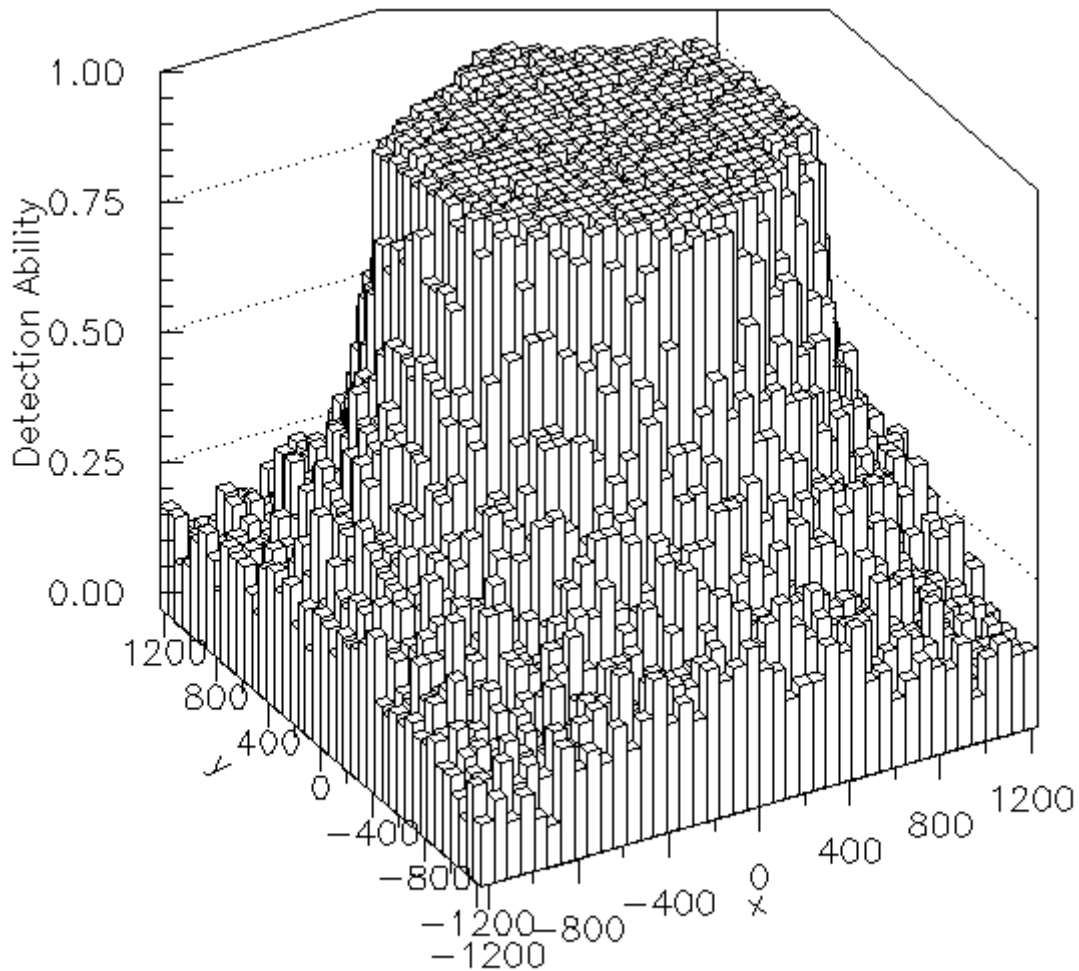
Διατηρώντας την απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 90 m και αυξάνοντας την απόσταση ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα σε 40 m, ακολουθεί η γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης για ολόκληρο τον όγκο του ανιχνευτή (Σχήμα 4.15).



Σχήμα 4.15: Γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης, για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 90 m και απόσταση 40 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

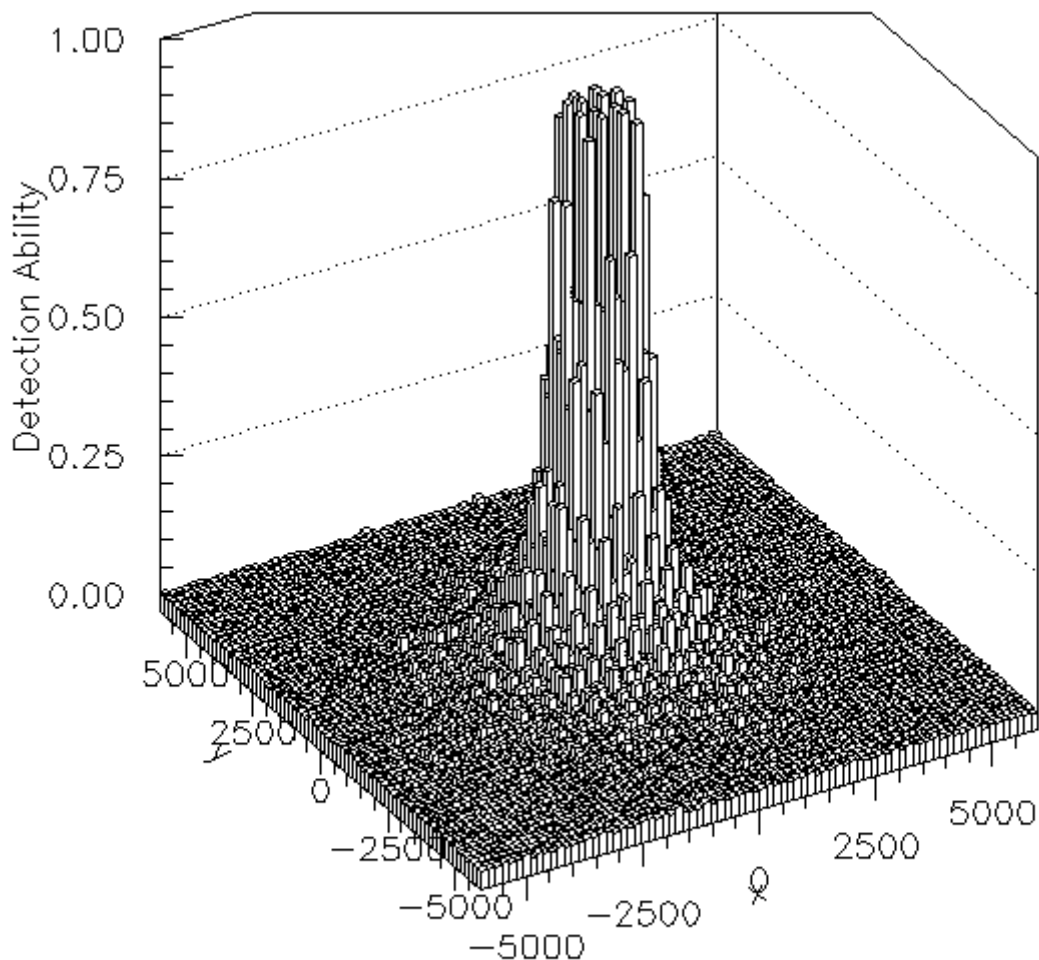
Στη συνέχεια, μελετώντας την ανιχνευτική ικανότητα (Detection Ability) της διάταξης στο κέντρο του ανιχνευτή παρουσιάζεται η ακόλουθη γραφική παράσταση (Σχήμα 4.16), θεωρώντας τετραγωνικό πλέγμα 2,5 km, για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 90 m και απόσταση ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα σε 40 m.

Διαπιστώνεται, όπως υπολογίστηκε ανωτέρω, μια μικρή αύξηση της συνολικής απόδοσης του ανιχνευτή από 0,95 για ύψος διαδοχικών επιπέδων 30 m σε 0,97 για την παρούσα διάταξη. Αυτό οδηγεί σε μια μικρή αύξηση της ανιχνευτικής ικανότητας της διάταξης όπως απεικονίζεται στα αντίστοιχα γραφήματα.



Σχήμα 4.16: Γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης, στο κέντρο του ανιχνευτή, για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 90 m και απόσταση 40 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

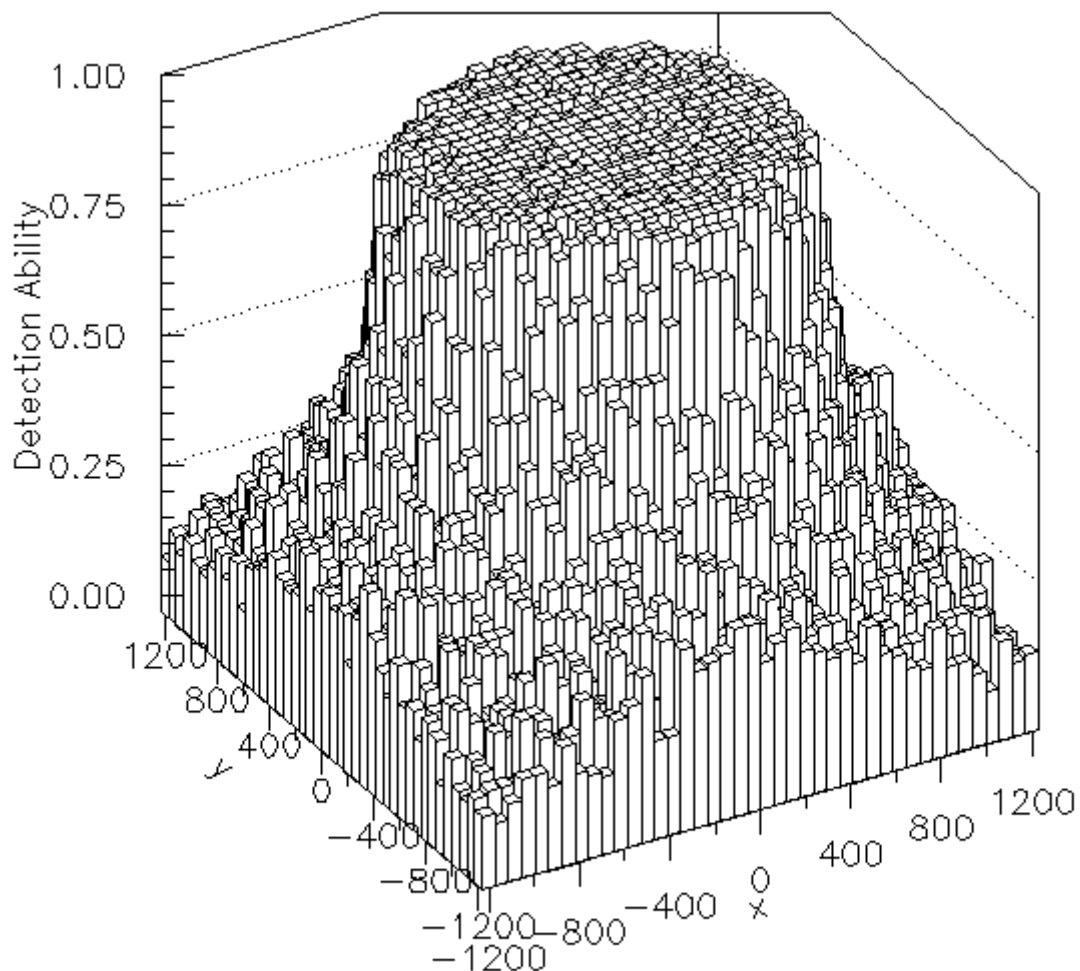
Διατηρώντας την απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 90 m και αυξάνοντας την απόσταση ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα σε 50 m, ακολουθεί η γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης για ολόκληρο τον όγκο του ανιχνευτή (Σχήμα 4.17).



Σχήμα 4.17: Γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 90 m και απόσταση 50 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

Εστιάζοντας στο κέντρο του ανιχνευτή, δηλαδή θεωρώντας τετραγωνικό πλέγμα 2,5 km προκύπτει η γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης, για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 90 m και απόσταση μεταξύ των διαδοχικών επιπέδων 50 m (Σχήμα 4.18).

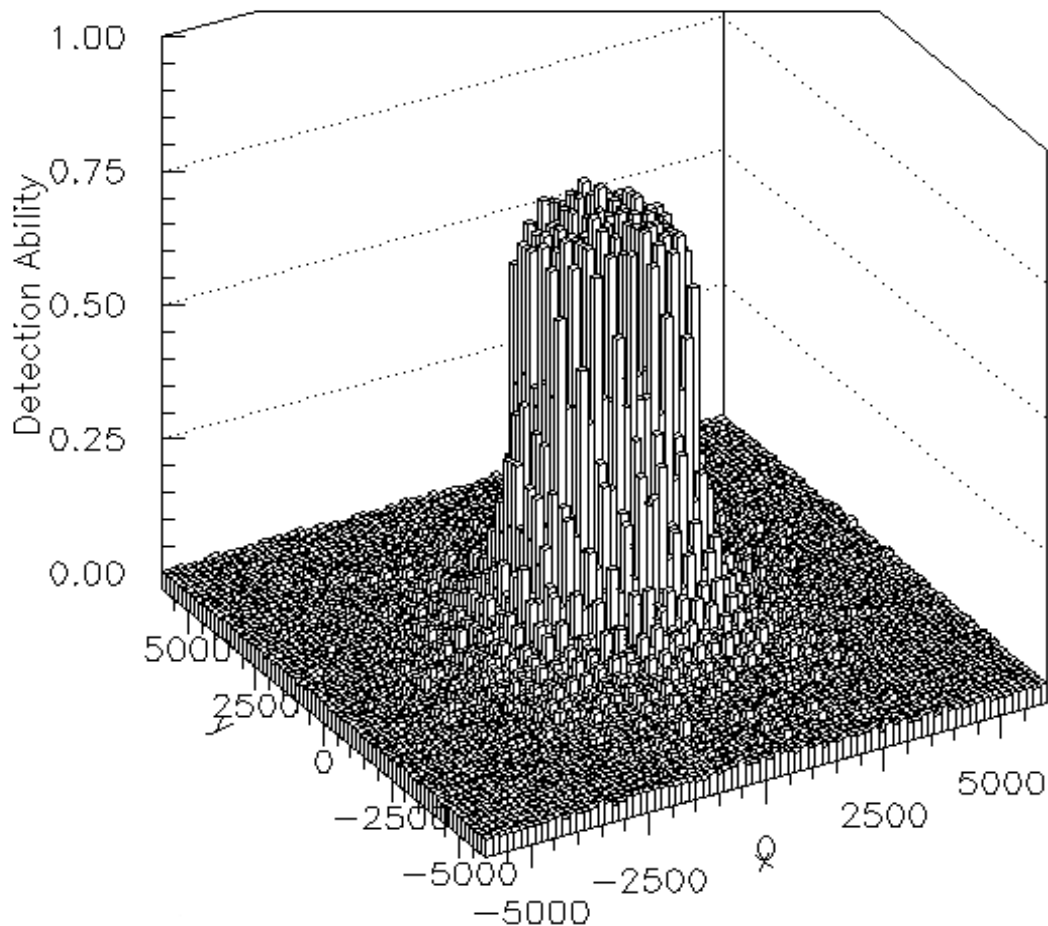
Υπενθυμίζεται ότι η τιμή της συνολικής απόδοσης της ανιχνευτικής διάταξης προσδιορίστηκε ίση με 0,95 παρουσιάζοντας μια μικρή μείωση σε σύγκριση με την προηγούμενη, για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 90 m και ύψος ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα ίσο με 40 m.



Σχήμα 4.18: Γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης, στο κέντρο του ανιχνευτή, για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 90 m και απόσταση 50 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

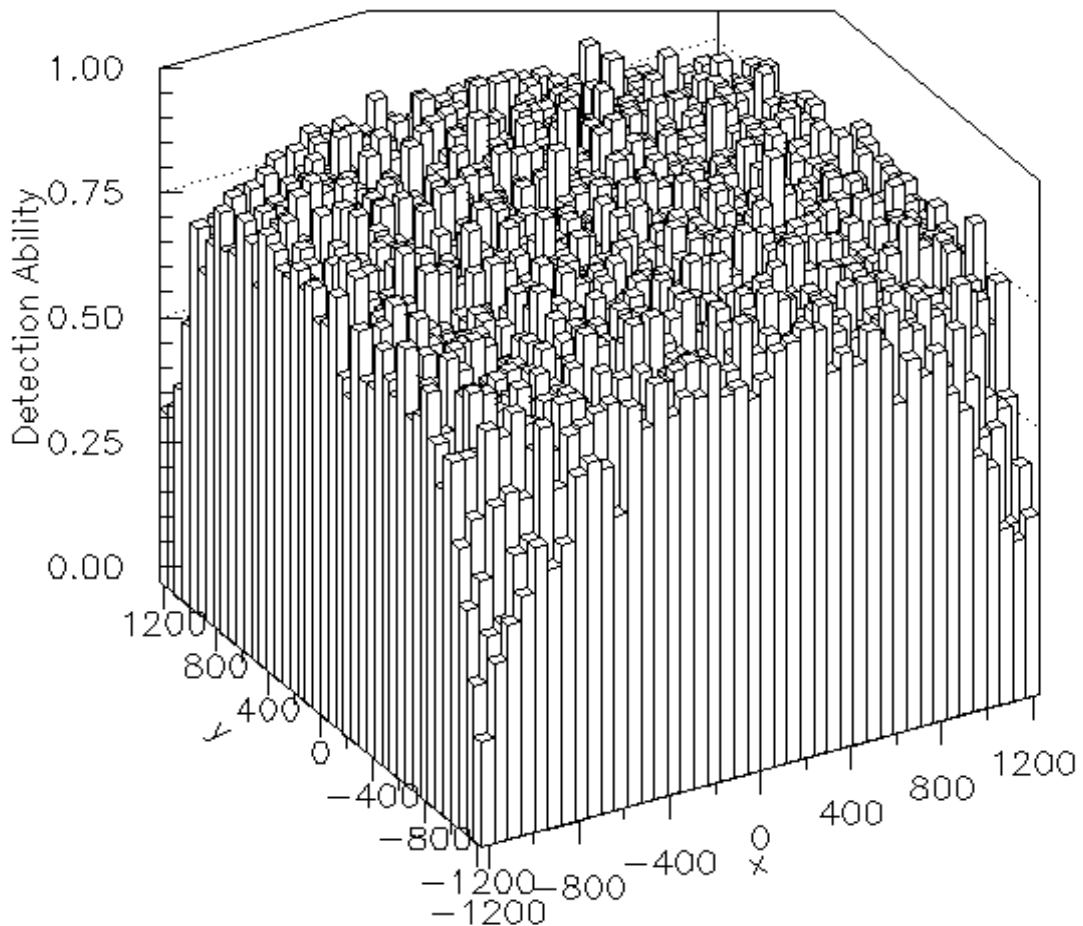
Παρατηρείται ότι αυξάνοντας την απόσταση ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα από 30 m σε 40 m βελτιώνεται η απόδοση και κατά η ανιχνευτική ικανότητα της διάταξης, καθώς αυξάνεται ο “ενεργός” όγκος ανίχνευσης.

Για διπλάσια απόσταση ανάμεσα στα strings, ίση με 180 m και απόσταση ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα ίση με 30 m, υπολογίζεται η ανιχνευτική ικανότητα (Detection Ability) της διάταξης για όλο τον όγκο του ανιχνευτή, όπως παρουσιάζεται στο ακόλουθο γράφημα (Σχήμα 4.19). Παρατηρείται μείωση της απόδοσης του ανιχνευτή σε σύγκριση με την αντίστοιχη για απόσταση 90 m, όπως προσδιορίστηκε παραπάνω. Ωστόσο, όπως αναφέρθηκε προηγούμενα ο αριθμός των μονίων που μπορούν να ανιχνευθούν αυξάνεται όσο αυξάνεται η απόσταση ανάμεσα στα strings, καθώς τότε αυξάνεται ο “ενεργός” όγκος ανίχνευσης.



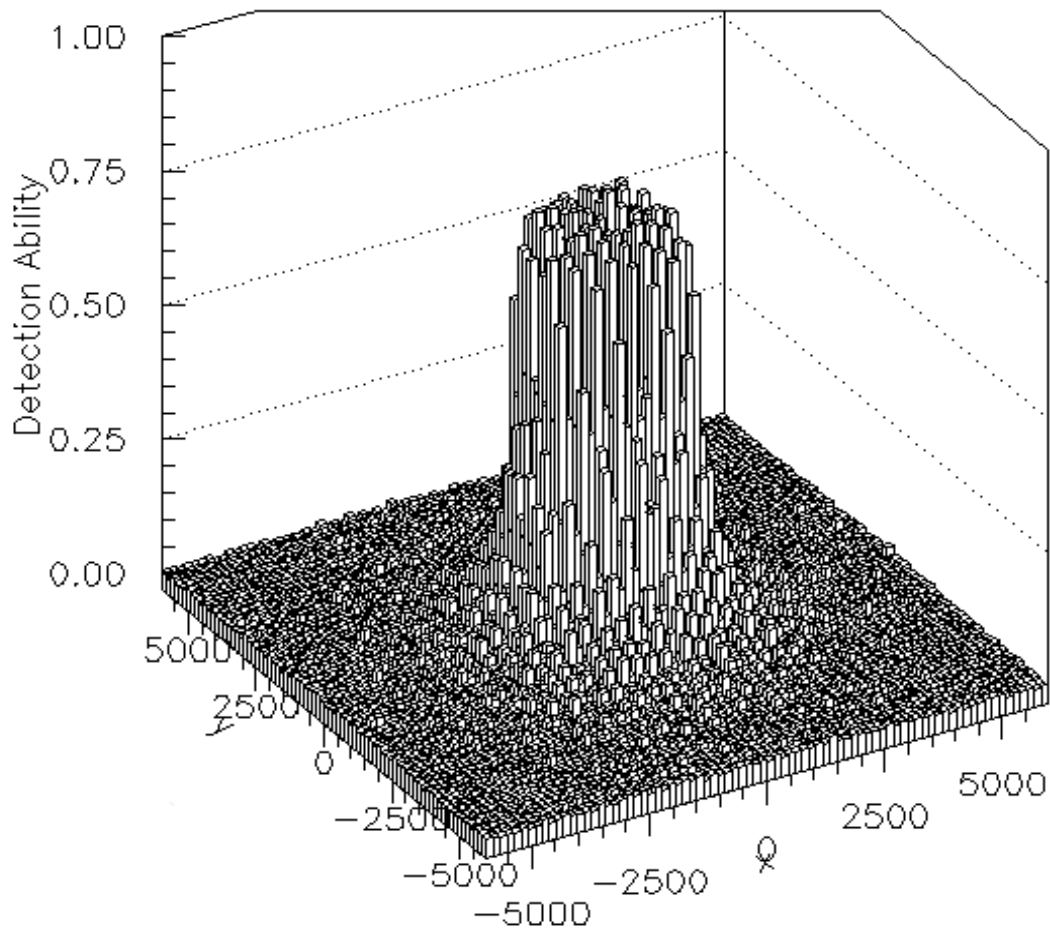
Σχήμα 4.19: Γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης, για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 180 m και απόσταση 30 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

Για το κέντρο του ανιχνευτή, δηλαδή για τετραγωνικό πλέγμα 2,5 km προκύπτει η ακόλουθη γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης. Παρατηρείται μείωση της ανιχνευτικής ικανότητας της διάταξης καθώς και της συνολικής απόδοσης του ανιχνευτή για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 180 m (0,83) σε σχέση με την αντίστοιχη για απόσταση 90 m (0,95). Στο ακόλουθο γράφημα έχει θεωρηθεί η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών επιπέδων ίση με 30 m (Σχήμα 4.20).



Σχήμα 4.20: Γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης, στο κέντρο του ανιχνευτή, για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 180 m και απόσταση 30 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

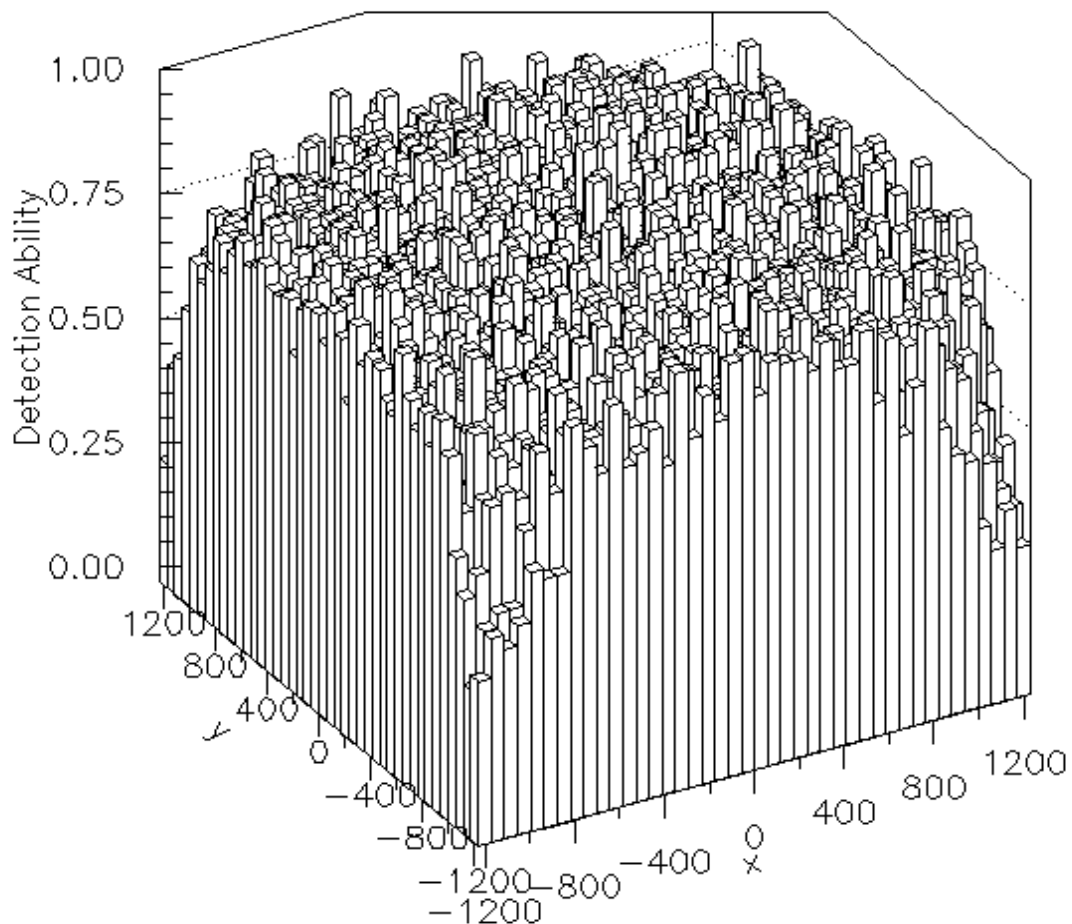
Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης, για ολόκληρο τον όγκο του ανιχνευτή (Σχήμα 4.21). Η απόσταση ανάμεσα στα strings διατηρείται ίση με 180 m και αυξάνεται η απόσταση ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα σε 40 m.



Σχήμα 4.21: Γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 180 m και απόσταση 40 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

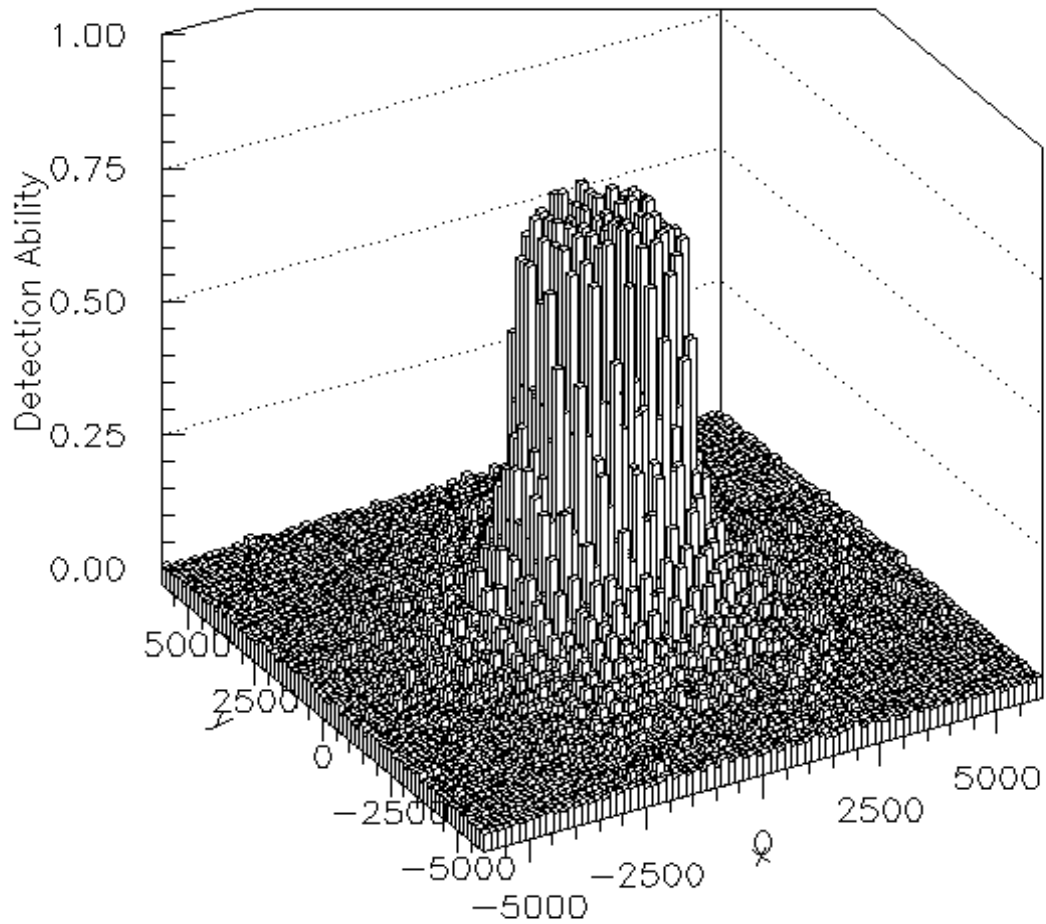
Εστιάζοντας στο κέντρο του ανιχνευτή, δηλαδή θεωρώντας τετραγωνικό πλέγμα 2,5 km προκύπτει η γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης, για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 180 m και απόσταση μεταξύ των διαδοχικών επιπέδων 40 m (Σχήμα 4.22).

Παρατηρείται μείωση της ανιχνευτικής ικανότητας της διάταξης και της συνολικής απόδοσης του ανιχνευτή από 0,83 σε 0,77 μετά την αύξηση του ύψους από 30 m σε 40 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

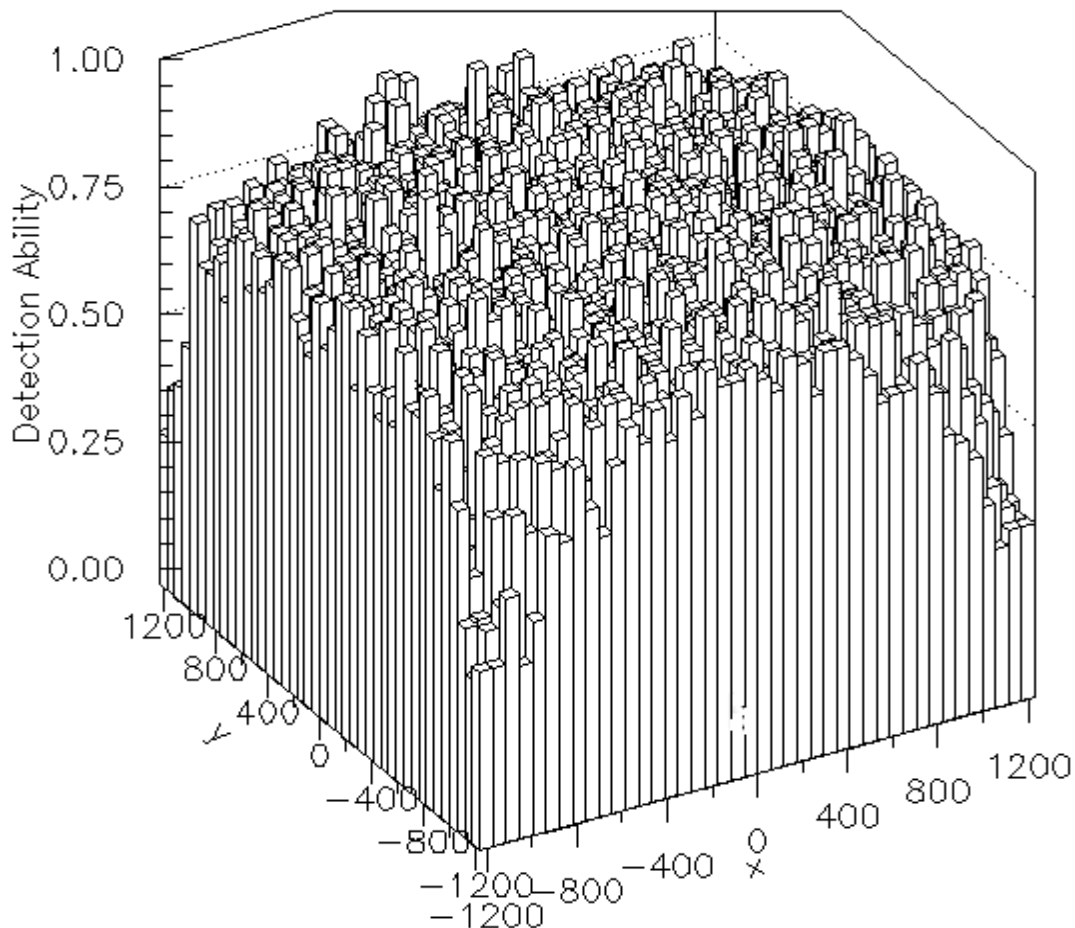


Σχήμα 4.22: Γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης, στο κέντρο του ανιχνευτή, για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 180 m και απόσταση 40 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

Ακολούθως, και αφού αυξηθεί η απόσταση ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα σε 50 m χωρίς να μεταβληθεί η απόσταση ανάμεσα στα strings (ίση με 180 m) παρουσιάζονται οι γραφικές παραστάσεις της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης για ολόκληρο τον όγκο του (Σχήμα 4.23) και για το κέντρο του (Σχήμα 4.24), δηλαδή για τετραγωνικό πλέγμα 2,5 km. Η συνολική απόδοση της ανιχνευτικής διάταξης μειώνεται σε 0,72 γεγονός σύμφωνα με παραπάνω υπολογισμούς.



Σχήμα 4.23: Γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης, για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 180 m και απόσταση 50 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

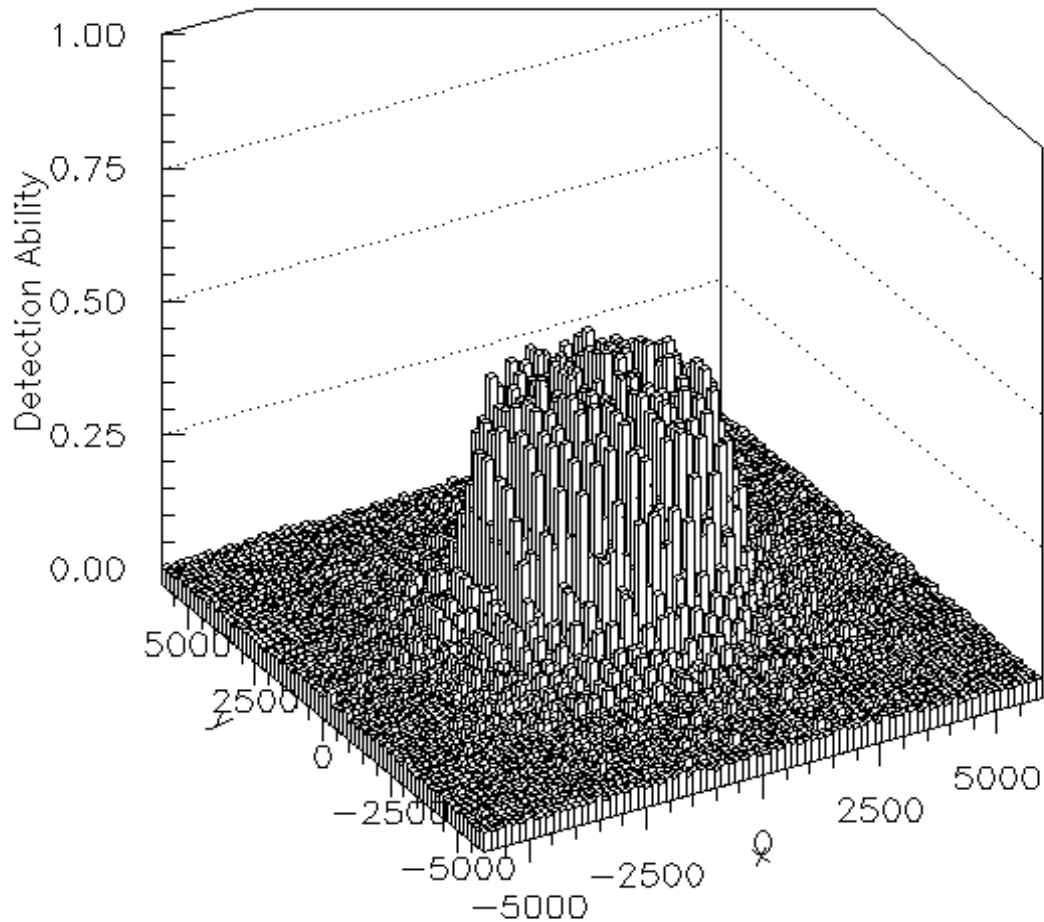


Σχήμα 4.24: Γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης, στο κέντρο του ανιχνευτή, για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 180 m και απόσταση 50 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

Παρατηρείται (όπως υπολογίστηκε ανωτέρω) ότι διατηρώντας σταθερή την απόσταση ανάμεσα στα strings στα 180 m και αυξάνοντας την απόσταση ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα από 30 m σε 40 m και στη συνέχεια σε 50 m η απόδοση του ανιχνευτή παρουσιάζει μικρή μείωση. Επίσης, μείωση της απόδοσης και της ανιχνευτικής ικανότητας της διάταξης διαπιστώθηκε κατά την αύξηση της απόστασης ανάμεσα στα strings από 90 m σε 180 m.

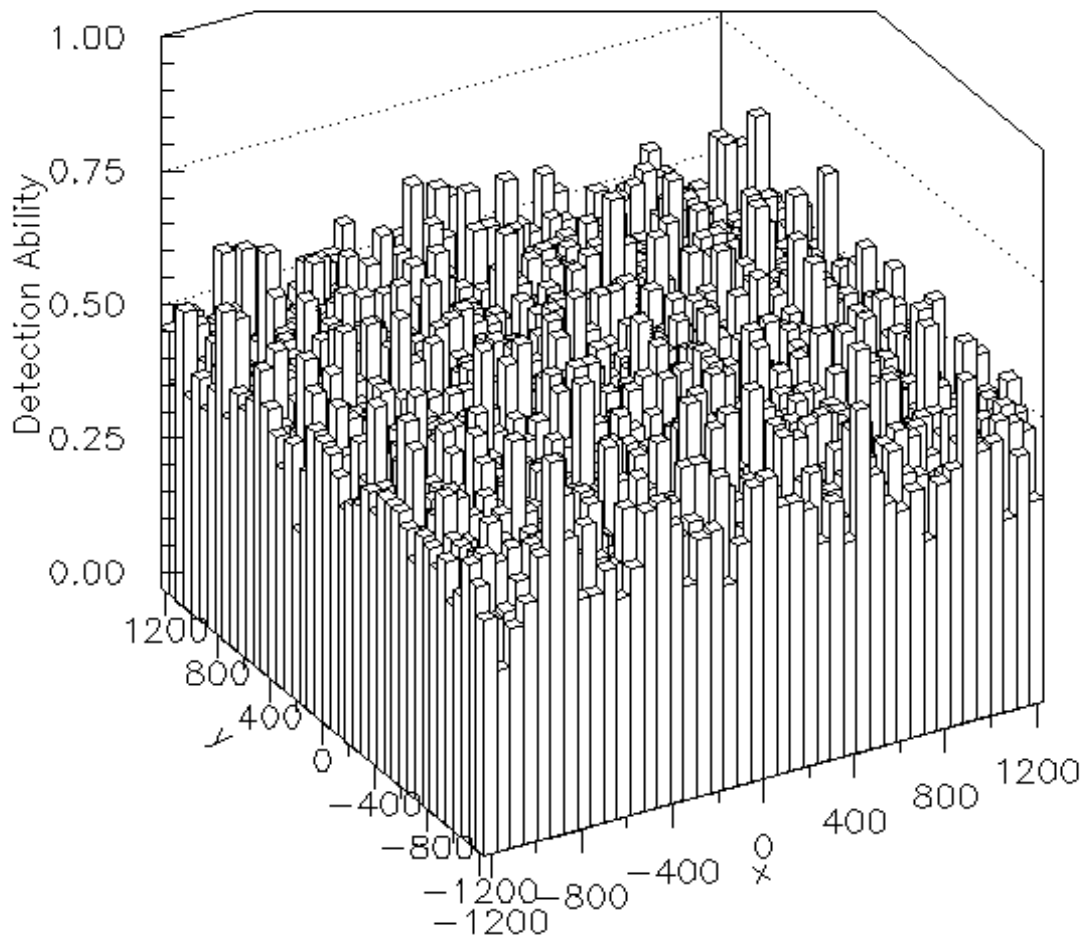
Η ακόλουθη αύξηση της απόστασης ανάμεσα στα strings από 180 m σε 270 m επιφέρει περαιτέρω μείωση της απόδοσης του ανιχνευτή σε σύγκριση με τις αντίστοιχες για αποστάσεις 90 m και 180 m. Όμως ο αριθμός των μιονίων που μπορούν να ανιχνευθούν αυξάνεται με την αύξηση της απόστασης ανάμεσα στα strings, που οδηγεί σε αύξηση του “ενεργού” όγκου ανίχνευσης. Η ανιχνευτική ικανότητα (Detection Ability) της διάταξης για όλο τον όγκο του ανιχνευτή,

υπολογίστηκε και παρουσιάζεται στο ακόλουθο γράφημα (Σχήμα 4.25). Η απόσταση ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα αντιστοιχεί σε 30 m.



Σχήμα 4.25: Γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης, για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 270 m και απόσταση 30 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

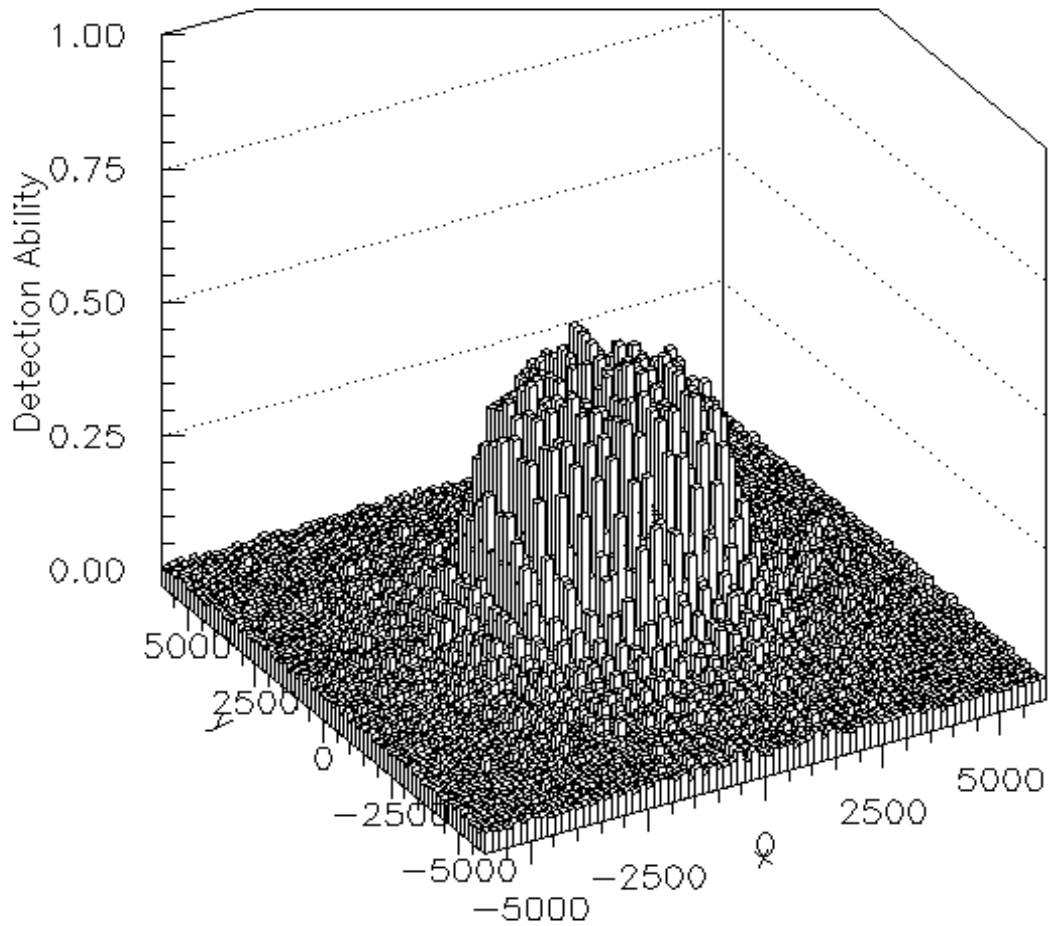
Η ανιχνευτική ικανότητα (Detection Ability) της διάταξης υπολογίστηκε και στο κέντρο του ανιχνευτή, για τετραγωνικό πλέγμα 2,5 km και παρουσιάζεται στην ακόλουθη γραφική παράσταση (Σχήμα 4.26). Η απόσταση ανάμεσα στα strings είναι ίση με 270 m και η απόσταση μεταξύ των διαδοχικών επιπέδων ίση με 30 m.



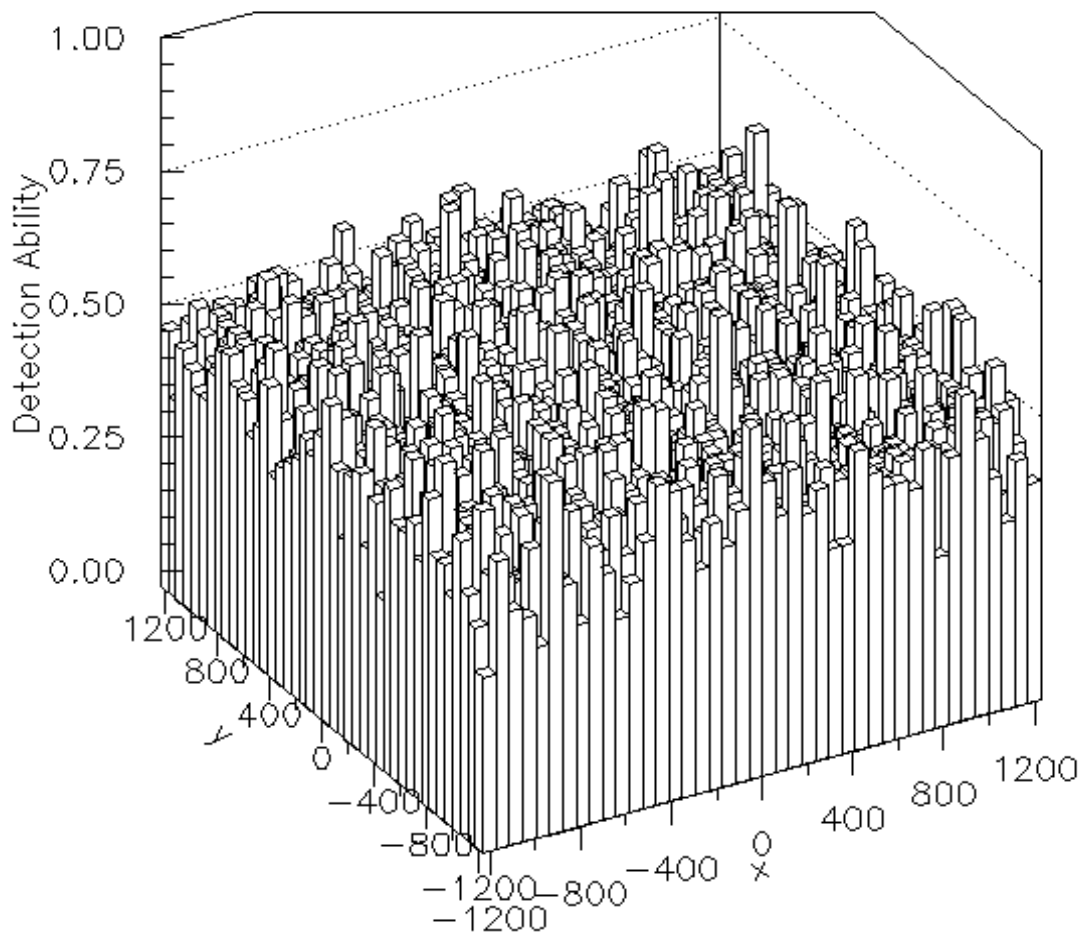
Σχήμα 4.26: Γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης, στο κέντρο του ανιχνευτή, για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 270 m και απόσταση 30 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

Στη συνέχεια, παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης για ολόκληρο τον όγκο του ανιχνευτή (Σχήμα 4.27) και για το κέντρο του (Σχήμα 4.28). Η απόσταση ανάμεσα στα strings διατηρείται ίση με 270 m και αυξάνεται η απόσταση ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα σε 40 m. Εστιάζοντας στο κέντρο του ανιχνευτή, έχει θεωρηθεί τετραγωνικό πλέγμα 2,5 km.

Παρατηρείται μείωση της ανιχνευτικής ικανότητας και της απόδοσης, η οποία μειώνεται σε 0,53 για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 270 m και ύψος ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα σε 40 m. Συγκριτικά η απόδοση του ανιχνευτή για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 270 m, ήταν 0,60 για ύψος διαδοχικών επιπέδων ίσο με 30 m.

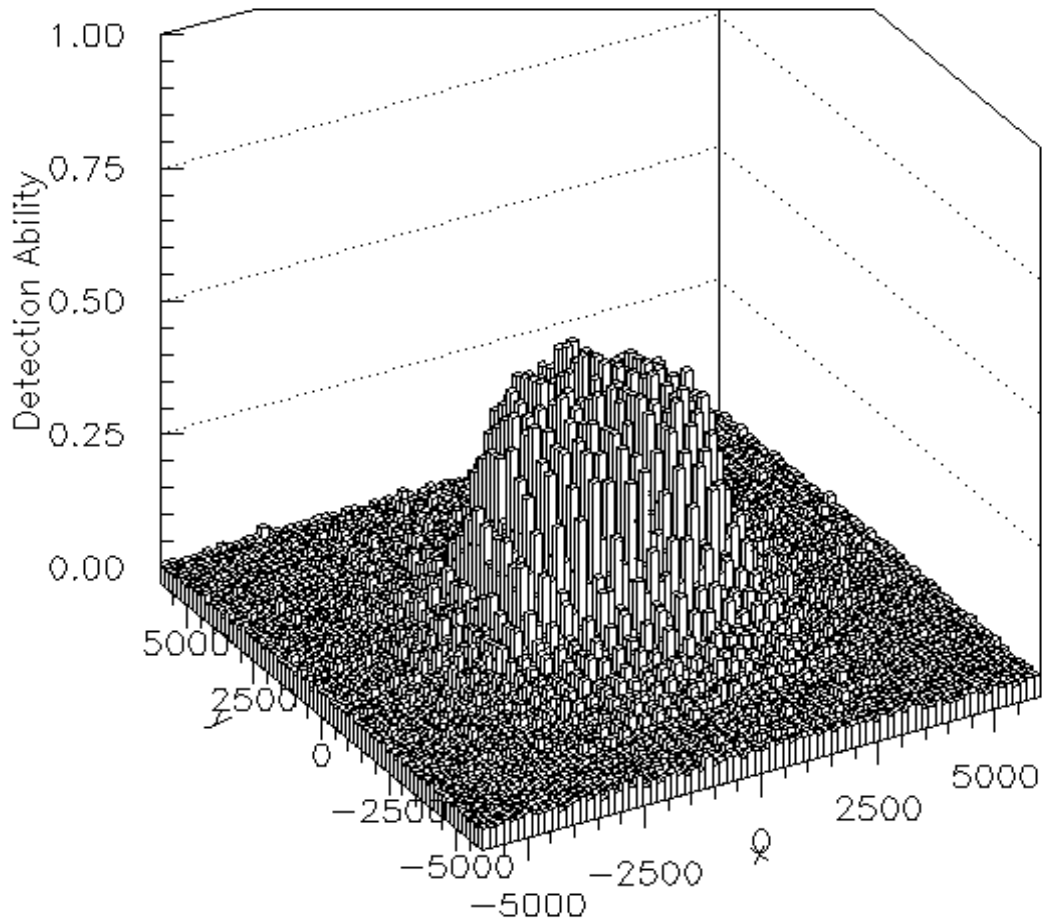


Σχήμα 4.27: Γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης, για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 270 m και απόσταση 40 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.



Σχήμα 4.28: Γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης, στο κέντρο του ανιχνευτή, για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 270 m και απόσταση 40 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

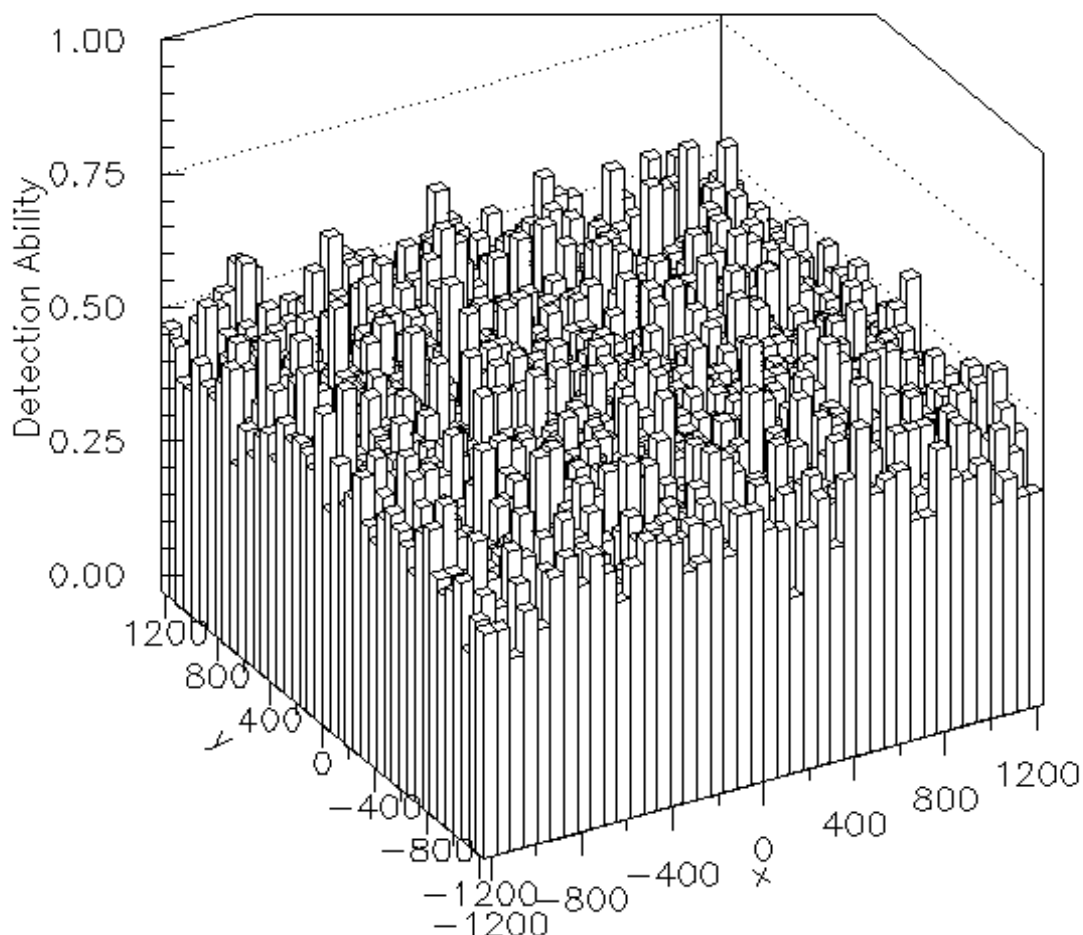
Ακολούθως, παρουσιάζεται η γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης για ολόκληρο τον όγκο του ανιχνευτή (Σχήμα 4.29). Η απόσταση ανάμεσα στα strings διατηρείται ίση με 270 m και αυξάνεται η απόσταση ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα σε 50 m.



Σχήμα 4.29: Γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 270 m και απόσταση 50 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

Η γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης, για το κέντρο του ανιχνευτή, δηλαδή για τετραγωνικό πλέγμα 2,5 km παρουσιάζεται παρακάτω (Σχήμα 4.30).

Η συνολική απόδοση του ανιχνευτή μειώνεται περαιτέρω σε 0,46 για απόσταση ανάμεσα στα strings διατηρείται ίση με 270 m καθώς αυξάνεται η απόσταση ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα σε 50 m.



Σχήμα 4.30: Γραφική παράσταση της ανιχνευτικής ικανότητας (Detection Ability) της διάταξης, στο κέντρο του ανιχνευτή, για απόσταση ανάμεσα στα strings ίση με 270 m και απόσταση 50 m ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα.

Τέλος, παρατηρείται ότι διατηρώντας σταθερή την απόσταση ανάμεσα στα strings στα 270 m και αυξάνοντας την απόσταση ανάμεσα στα διαδοχικά επίπεδα από 30 m σε 40 m και από 40 m σε 50 m η απόδοση του ανιχνευτή και η ανιχνευτική του ικανότητα παρουσιάζουν μείωση. Έτσι, η αύξηση του ύψους των διαδοχικών επιπέδων επιφέρει μείωση στην απόδοση του ανιχνευτή, καθώς περαιτέρω αυξήσεις στην απόσταση διαδοχικών επιπέδων οδηγούν σε κενά σημεία στο χώρο όπου δεν περιέχονται PMTs. Το αποτέλεσμα είναι να μην μπορούν να ανιχνευθούν τα μόνια που προσπίπτουν, κυρίως τα μόνια που προσπίπτουν σε οριζόντιες διευθύνσεις.

5. Σύνοψη και Συμπεράσματα

Συνοψίζοντας μελετήθηκαν η απόδοση και η ανιχνευτική ικανότητα μιας εξαγωνικής γεωμετρίας 310 strings για διαφορετικές αποστάσεις ανάμεσα στα strings καθώς και διαφορετικά ύψη μεταξύ των διαδοχικών επιπέδων σε όλο το γωνιακό εύρος. Στόχος αυτής της μελέτης ήταν η κάλυψη όσο το δυνατόν μεγαλύτερου “ενεργού όγκου” (όγκου του ανιχνευτή) με το δεδομένο αριθμό strings και PMTs χωρίς παράλληλα να μειώνεται σημαντικά η απόδοση και η ικανότητα ανίχνευσης. Έτσι, προσδιορίστηκε η απόδοση του ανιχνευτή για απόσταση μεταξύ των strings 90, 180 και 270 μέτρων ενώ για δεδομένη απόσταση θεωρήθηκαν τρία διαφορετικά ύψη μεταξύ των διαδοχικών επιπέδων που αντιστοιχούν σε 30, 40 και 50 μέτρα.

Συμπερασματικά, η αύξηση του ενεργού όγκου ανίχνευσης με την τοποθέτηση των strings σε μεγαλύτερη απόσταση μεταξύ τους ώστε να είναι δυνατή η ανίχνευση περισσότερων μιονίων κατά τη διάρκεια ενός έτους οδηγεί σε μείωση της συνολικής απόδοσης του ανιχνευτή. Η μείωση της απόδοσης (και η συνεπαγόμενη μείωση της ανιχνευτικής ικανότητας) αντικατοπτρίζεται και στον περιορισμό του εύρους των γωνιών πρόσπτωσης των μιονίων που μπορούν να ανιχνευθούν. Αντίστοιχη μείωση προκαλείται και από την αύξηση του ύψους των διαδοχικών επιπέδων για δεδομένη απόσταση ανάμεσα στα strings. Το αποτέλεσμα είναι να αυξάνεται ο αριθμός των μιονίων που μπορούν να ανιχνευθούν αλλά να μειώνεται ο αριθμός αυτών που θα ανιχνευθούν τελικά. Αυτές οι παρατηρήσεις θα πρέπει να λαμβάνονται υπόψη στην επιλογή της καταλληλότερης ανιχνευτικής διάταξης για ένα πείραμα ανίχνευσης νετρίνων από εκλάμψεις ακτίνων γ .

Βιβλιογραφία & Websites :

- [1] Astrophysics for physicists, Arnab Rai Choudhuri, Cambridge, www.cambridge.org/9780521815536
- [2] http://map.gsfc.nasa.gov/universe/uni_age.html
- [3] The Music of the Big Bang: The Cosmic Microwave Background and the New Cosmology, Amedeo Balbi, Springer
- [4] Gamma-Ray Bursts: The brightest explosions in the Universe, Gilbert Vedrenne & Jean-Luc Atteia. Springer
- [5] Tools and methods for simulation and evaluation of very large volume Cherenkov neutrino detectors, A.G. Tsirigotis, A. Leisos, S.E. Tzamarias
- [6] Sources of UHE Neutrinos, Mou Roy and H.J. Crawford
- [7] The Prediction and Detection of UHE Neutrino Bursts, Mou Roy, H.J. Crawford and Athena Trattner
- [8] The search for extra-terrestrial sources of high energy neutrinos, Gary C Hill
- [9] High Energy Neutrino Astronomy: Status and Perspectives, Christian Spiering
- [10] Neutrino Astronomy with Icecube, TYCE DeYOUNG
- [11] Proposal to Measure High Energy Neutrinos in Coincidence with Gamma Ray Bursts, H.J.Crawford, Principal Investigator E.Anassontzis, T.Athanasopoulos, A. Belias, F.S.Bieser, J.Engelage, C.Flagg, A.Fotiou, K.Hurley, E.G.Judd, P.Koske, E.Markopoulos, B.K.Lubsandorzhiev, K.Papageorghiou, C.Perkins, P.Rapidis, L.K.Resvanis, I.Siotis, S.Tsagli, A.L.Trattner, L.F.Utkina, G.Voulgaris, V.A.Zhukov
- [12] Misconceptions about the Big Bang, Charles H. Lineweaver, Tamara M. Davis (2005), Scientific American, Retrieved 2008-11-06
- [13] http://arxiv.org/PS_cache/astro-ph/pdf/0211/0211358v1.pdf