

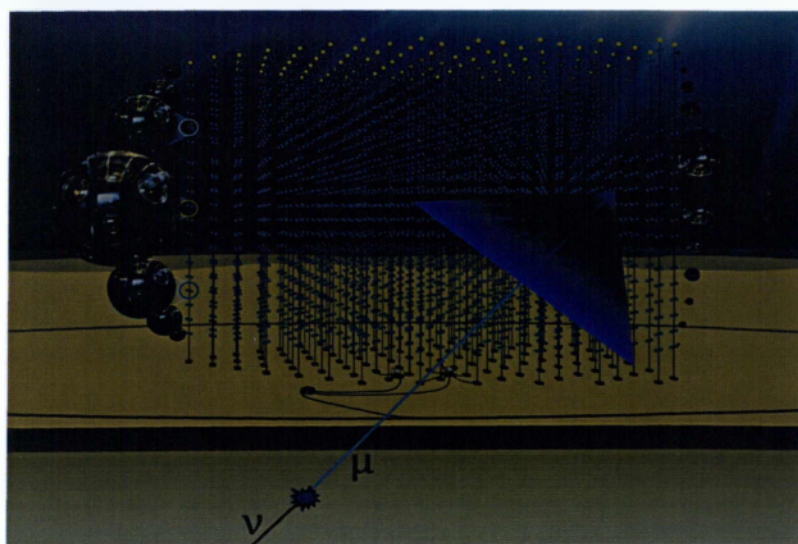
Τ.Ε.Ι ΣΠΑΡΤΗΣ
Τμήμα Μηχανικών Πληροφορικής Τ.Ε.
Σχολή Τεχνολογικών Εφαρμογών
(έδρα:Σπάρτη)
Τ.Ε.Ι. ΠΕΛΟΠΟΝΝΗΣΟΥ

Πτυχιακή Εργασία με τίτλο:

Μέθοδοι προσομοίωσης στη χρήση ανιχνευτών για
την καταγραφή νετρονίων από υποθαλάσσιους
ανιχνευτές

ΟΝΟΜΑΤΕΠΩΝΥΜΟ: ΚΑΜΠΑΝΙΕΡΗ ΑΔΑΜΑΝΤΙΑ
ΑΜ: 2007013

Απρίλιος, 2015



Επιβλέπουσα Καθηγήτρια: Δρ. Κωνσταντία Μπαλάση

Η παρούσα πτυχιακή εργασία της Κα. Αμάντα Καμπανιέρη με τίτλο:

Μέθοδοι προσομοίωσης στη χρήση ανιχνευτών για την καταγραφή νετρίνων
από υποθαλάσσιους ανιχνευτές

εξετάστηκε από την ακόλουθη Τριμελή Εξεταστική Επιτροπή:

- Καραγιώργος Γρηγόρης
- Λιαπέρδος Ιωάννης
- Κατσάκος Μαυρομιχάλης-Νικόλαος

Ευχαριστίες

Ολοκληρώνοντας την παρούσα πτυχιακή εργασία, θα ήθελα να ευχαριστήσω τους ανθρώπους που με στήριξαν και με βοήθησαν σε όλη τη διάρκεια της προσπάθειας μου. Η έρευνα αυτή δε θα μπορούσε να εκπονηθεί χωρίς τη βοήθεια και συμπαράσταση ορισμένων ανθρώπων.

Αισθάνομαι πρωτίστως την ανάγκη να ευχαριστήσω από καρδιάς την κα Μπαλάση Κωνσταντία.

Όλα όσα με δίδαξε με ενθουσιασμό και ενδιαφέρον καθώς και οι ανεκτίμητες συμβουλές υπήρξαν έμπνευση για εμένα.

Θέλω να απευθύνω τις θερμές ευχαριστίες μου στον κο Ιωάννη Λιαπέρδο, Καθηγητή ΤΕΙ Σπάρτης για την συμμετοχή του στην εξεταστική επιτροπή, ως επιβλέποντα Καθηγητή, για τη συνεχή υποστήριξη του καθ' όλη τη διάρκεια των σπουδών μου.

Επίσης, οφείλω να ευχαριστήσω ιδιαίτερω τον κο Καραγιώργο Γρηγόρη Καθηγητή και Προϊστάμενου του ΤΕΙ Σπάρτης, μέλος της 3-μελούς Συμβουλευτικής Επιτροπής, για την υποστήριξη, τη συνεργασίας του και τις σημαντικές του υποδείξεις.

Ευχαριστώ, επίσης, θερμά, τον κο Κατσάκο Μαυρομιχάλη-Νικόλαο Καθηγητή του ΤΕ.Ι Σπάρτης, για τη συμμετοχή του στην τριμελή επιτροπή και την υποστήριξη του.

Τέλος, αισθάνομαι την ανάγκη να ευχαριστήσω τις φίλες μου, τόσο για τις αγωνίες που μοιραστήκαμε κατά την εκπόνηση των πτυχιακών μας εργασιών όσο και για τις αλησμόνητες στιγμές που περάσαμε όλα αυτά τα χρόνια μαζί.

Ευχαριστώ θερμά το ΤΕΙ Σπάρτης για τη φιλοξενία και την τεχνική του υποστήριξη για την υλοποίηση της εργασίας μου.

Το μεγαλύτερο ευχαριστώ δικαιωματικά στους γονείς μου, Αναστάσιο και Ιωάννα Καμπανιέρη για τη συμπαράσταση, την υπομονή και την ανεκτίμητη βοήθεια τους.

Αδαμαντία Καμπανιέρη
Μαιος ,2015

Περιεχόμενα

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1 ΕΙΣΑΓΩΓΗ

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2 ΝΕΤΡΙΝΑ

- 2.1 Εισαγωγή
- 2.2 Νετρίνα από Ενεργειακούς Γαλαξιακούς Πυρήνες
- 2.3 Εκλάμψεις ακτινών γάμμα (GRBs)
- 2.4 Ανακάλυψη
- 2.5 Ιδιότητες εκπομπής των GRBs
 - 2.5.1 Ροή – διάρκεια
 - 2.5.2 Φάσμα και κατανομή τους στον αστρικό ουρανό
- 2.6 Επίγεια Παράθυρα παρατήρησης

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3 ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΝΕΤΡΙΝΩΝ

- 3.1 Τεχνικές ανίχνευσης
- 3.2 Πειραματικές μέθοδοι ανίχνευσης σωματιδίων
- 3.3 *“Μελετώντας τον ουρανό, κάτω από τη θάλασσα!” «Τηλεσκόπιου Νετρίνων Κυβικού Χιλιόμετρου» (Multi-Cubic Kilometre Neutrino Telescope) ή KM3NeT*
- 3.4 *“Μελετώντας τον ουρανό, κάτω από τους πάγους!”-ICECUBE*
- 3.5 Λειτουργία του πειράματος
- 3.6 Ακτινοβολία Cherenkov

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4 ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

- 4.1 Εισαγωγή
- 4.2 Φωτοπολλαπλασιαστές: Αρχή και λειτουργία
- 4.3 Το Οπτικό Στοιχείο (ΟΣ) του πειράματος ΝΕΣΤΩΡ
- 4.4 Ο φωτοπολλαπλασιαστής

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5 ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΚΩΝΟΥ WINSTON ΣΕ ΦΩΤΟΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΗ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

- 5.1 Ο κώνος Winston ως μέσο αύξησης της οπτικής ικανότητας

του ανιχνευτή

5.2 Εφαρμογή του προγράμματος Litranι για την προσομοίωση του κώνου Winston

5.3 Εγκαθιστώντας το πρόγραμμα Litranι σε περιβάλλον Linux

5.4 Προσομοίωση ανιχνευτικού κώνου πάνω σε φωτοπολλαπλασιαστή για την ενίσχυση της ανιχνευτικής του ικανότητας (Πρόγραμμα σε C)

ΚΕΦ. 6 ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Περιεχόμενο Σχημάτων

Σχήμα 1.1: Τα νετρίνα διασχίζουν σημαντικά μεγαλύτερες αποστάσεις από τα φωτόνια, γιατί αλληλεπιδρούν μόνο ασθενώς, σε αντίθεση με τα φωτόνια και τα φορτισμένα σωμάτια.

Σχήμα 1.2: Ασθενείς αλληλεπιδράσεις νετρίνων.

Σχήμα 2.1: Πιθανός μηχανισμός παραγωγής υψηλοενεργειακών ακτινών γάμμα και νετρίνων από ενεργειακούς γαλαξιακούς πυρήνες. Ηλεκτρόνια και πρωτόνια που επιταχύνονται μέσα σε στρώματα σχετικιστικών αέριων μαζών κατά μήκος του πίδακα, αλληλεπιδρούν με φωτόνια τα οποία ακτινοβολούνται από την περιοχή του δίσκου πρόσφυσης. Η αλληλεπίδραση δημιουργεί πιόνια τα οποία στην συνέχεια διασπώνται σε ακτίνες γάμμα και νετρίνα.

Σχήμα 2.2. Καταστροφή ενός αστεριού. (NASA News/New Topics/Universe)

Σχήμα 2.3. Δημιουργία των εκλάμψεων ακτίνων γάμμα

Σχήμα 2.4. Κατανομή των T_{90} των GRBs που ανιχνεύτηκαν από το πείραμα BATSE.

Εικόνα 2.5: Καταγραφή 2.704 GRBs από το πείραμα BATSE (εννεαετή λειτουργία).

Σχήμα 3.1. Διαπερατότητα της ατμόσφαιρας για ποικίλες ενέργειες φωτονίων και πιθανές μέθοδοι ανίχνευσης.

Σχήμα 3.2 Ακτινοβολία Cherenkov.

Σχήμα 3.3 Ένας φωτοπολλαπλασιαστής είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται ευρέως σε πειράματα Αστροσωματιδιακής Φυσικής, ο οποίος μετατρέπει το φως σε ηλεκτρικό σήμα, και όρα ενεργεί ως "ηλεκτρονικό μάτι". Όταν ένα υψηλής ενέργειας νετρίνο αλληλεπιδρά, παράγει ένα μύονιο που κινείται προς την

θετική κατεύθυνση (up-going muon) στη θάλασσα, το οποίο θα οδηγήσει σε ένα μπλε φως Cherenkov, το οποίο με τη σειρά του θα παρατηρηθεί με μια σειρά από φωτοπολλαπλασιαστές.

Σχήμα 3.4 Υποθαλάσσιος ανιχνευτής

Σχήμα 3.5 Σχηματική αναπαράσταση του παρατηρητήριου IceCube. Στο Σχήμα διαφαίνονται τα κύρια χαρακτηριστικά του. Τα διαφορετικά στάδια έχουν χαρακτηριστεί από διαφορετικά χρώματα στην επιφάνεια του ανιχνευτή.

Σχήμα 3.6 Ανιχνευτικές διατάξεις

Σχήμα 3.7 Ανιχνευτής δευτερογενών σωματιδίων αλληλεπίδρασης νετρίνων με την ύλη.

Σχήμα 3.8: Η περιοχή της Ουράνιας σφαίρας που καλύπτει ένα τηλεσκόπιο νετρίνων στην Μεσόγειο Θάλασσα (Σχήμα α) και στον Νότιο Πόλο (Σχήμα β). Επίσης φαίνονται και μερικές από τις γνωστές πηγές ακτινών Χ και γάμμα.

Σχήμα 3.9: Εκπομπή σφαιρικών ηλεκτρομαγνητικών παλμών κατά μήκος της τροχιάς (κόκκινη γραμμή) ενός φορτισμένου σωματίου όταν αυτό κινείται με ταχύτητα μικρότερη (α) ίση (β) ή μεγαλύτερη (γ) από την ταχύτητα του φωτός στο διηλεκτρικό μέσο.

Σχήμα 4.1: Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας του φωτοπολλαπλασιαστή

Σχήμα 4.2: Τυπικός φωτοπολλαπλασιαστή παλμός στην άνοδο

Σχήμα 4.3: Η κβαντική απόδοση (quantum efficiency) της φωτοκαθόδου του φωτοπολλαπλασιαστή R2018-03 (κατασκευής Hamamatsu) συναρτηθεί του μήκους κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (συνεχής γραμμή). Εξαιτίας του μεγάλου μεγέθους της επιφάνειας της φωτοκαθόδου (15") παρατηρούμε μια μικρή μείωση της κβαντικής απόδοσης συγκρινόμενη με την κβαντική απόδοση (διακεκομμένη γραμμή) μικρότερων φωτοπολλαπλασιαστών των οποίων η φωτοκάθοδος είναι κατασκευασμένη από το ίδιο υλικό

Σχήμα 4.4 Οπτικό Στοιχείο.

Σχήμα 4.5 Αποτελεσματικότητα φωτοπολλαπλασιαστή 13".

Σχήμα 5.1 Δαχτυλίδι ανάκλασης (κώνος Winston) προσαρμοσμένο σε οπτικό στοιχείο.

Σχήμα 5.2 Γεωμετρία ενός κώνου Winston. Οι προσπίπτουσες ακτίνες των οποίων η γωνία σε σχέση με τον άξονα του κώνου είναι μικρότερη από θ_{max} εστιάζονται μέσα στο φωτοπολλαπλασιαστή.

Σχήμα 5.3 Αναλυτικό σχέδιο του φωτοπολλαπλασιαστής 3 ιντσών, τύπου Photonis XP53B20.

Σχήμα 5.4 Διαστάσεις του φωτοπολλαπλασιαστή R8055 (σε mm).

Σχήμα 5.5 Η φωτοκάθοδος του φωτοπολλαπλασιαστή απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα. Ο κώνος αλουμινίου έχει προσαρμοστεί ώστε να συλλέγεται το φως που προσπίπτει στα άκρα του PMT. Η προσαρμογή αυτή γίνεται με ένα ειδικό gel.

Σχήμα 5.6 Η συλλεκτική ικανότητα του υπό μελέτη ανιχνευτή. Στο Σχήμα απεικονίζονται τα [οτελέσματα μας για την η ικανότητα αυτή χωρίς τον κώνο Winston (κόκκινο χρώμα) καθώς και τα αποτελέσματα μας και με αυτόν (μαύρο χρώμα).

Περίληψη

Στην παρούσα εργασία εστιάζουμε την προσοχή μας στην κατασκευή κώδικα που θα προσομοιώνει την αποδοτικότητα ενός ευαίσθητου οργάνου συλλογής φωτός (φωτοπολλαπλασιαστή). Οι φωτοπολλαπλασιαστές αποτελούν όργανα με τα οποία ανιχνεύεται το φως που εκπέμπουν τα δευτερεύοντα σωματίδια που παράγονται όταν νετρίνα αλληλεπιδρούν με την ύλη.

Συγκεκριμένα στην Πύλο Μεσσηνίας βρίσκεται το Ινστιτούτο Νέστωρ, το οποίο ερευνά τρόπους ανίχνευσης των νετρίνων. Ο τόπος αυτός είναι κατάλληλος για τέτοιου είδους μελέτες διότι παρέχει το πιο βαθύ σημείο της Μεσογείου, το οποίο είναι εύκολα προσβάσιμο από την ακτή. Αυτό καθιστά πολύ εύκολες τις δοκιμαστικές ποντίσεις που πραγματοποιούνται. Τα νερά στην περιοχή είναι αρκετά διαυγείς, με αποτελέσματα να μειώνεται το επίπεδο θορύβου στις μετρήσεις που πραγματοποιούνται και το οποίο προέρχεται από τα θαλάσσια ψάρια και το πλαγκτόν καθώς και από το ραδιοϊσότοπο ^{40}K από το οποίο αποτελείται το θαλασσινό νερό. Επιπρόσθετα, στην περιοχή της Πύλου τα θαλάσσια ρεύματα είναι ασθενή και έτσι δεν μετατοπίζονται οι ανιχνευτές που ποντίζονται. Αυτό είναι πολύ σημαντικό στην έρευνα των νετρίνων διότι η θέση του ανιχνευτή πρέπει να είναι καθορισμένη και όχι μεταβλητή, ώστε να μπορεί να ανακατασκευαστεί η τροχιά των νετρίνων.

Τα πειράματα ανίχνευσης νετρίνων σε θαλάσσιο βάθος βασίζονται στην πόντιση ανιχνευτικών διατάξεων, οι οποίες τοποθετούνται κάθετα σε μορφή γραμμών (strings). Στις γραμμές αυτές τοποθετούνται γυάλινες σφαίρες (οπτικά στοιχεία-OM's) μέσα στα οποία τοποθετούνται τα ανιχνευτικά όργανα, δηλαδή οι φωτοπολλαπλασιαστές (PMT's). Το όλο σύστημα τοποθετείται με μια άγκυρα σε μεγάλο θαλάσσιο βάθος (συνήθως πάνω από 3.000 μέτρα). Ο ανιχνευτής συνδέεται με ειδικό καλώδιο στην ακτή, σε σταθμό επεξεργασίας δεδομένων του Ινστιτούτου, ώστε να μεταφέρονται τα δεδομένα του πειράματος. Τα δεδομένα μπορούν, επίσης, να μεταδοθούν μέσω Modem.

Η διαδικασία ανίχνευσης νετρίνων βασίζεται στην ακόλουθη φυσική αλληλεπίδραση και αρχή:

Τα νετρίνα, σχεδόν άμαζα σωματία έρχονται από το διάστημα και αλληλεπιδρούν με την ύλη. Σε αυτή την αλληλεπίδραση εκπέμπονται δευτερεύοντα σωματίδια, τα οποία υπό ορισμένη γωνία εκπέμπουν ένα συγκεκριμένο φως (ακτινοβολία Cherenkov). Οι φωτοπολλαπλασιαστές είναι τα ειδικά όργανα που χρησιμοποιούνται για να καταγράψουν το χρόνο άφιξης και την ενέργεια των φωτονίων της ανωτέρω ακτινοβολίας. Επειδή τα νετρίνα ταξιδεύουν σε ευθείες τροχιές η καταγραφή των δευτερευόντων σωματιδίων μας αποκαλύπτει την τροχιά των νετρίνων και την πηγή από την οποία προήλθαν.

Στη συγκεκριμένη εργασία κατασκευάσαμε ένα φορμαλισμό ο οποίος προσομοιώνει την αποδοτικότητα ενός φωτοπολλαπλασιαστή, ο οποίος θα χρησιμοποιηθεί σύντομα (Ιούνιος 2015) στο Ινστιτούτο Νέστωρ για τις ανάγκες ενός πειράματος. Ανώτερος σκοπός της μελέτης, ήταν η τοποθέτηση ενός οπτικού κώνου ενίσχυσης φωτός (κώνος Winston) και η προσομοίωση αυτού με σκοπό την αύξηση της αποδοτικότητας του ανιχνευτή. Η έρευνα είναι πρωτότυπη και η σπουδαιότητα της βασίζεται στο ότι τα συγκεκριμένα ανιχνευτικά όργανα θα χρησιμοποιηθούν στην ανωτέρω πόντιση.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 1

ΕΙΣΑΓΩΓΗ

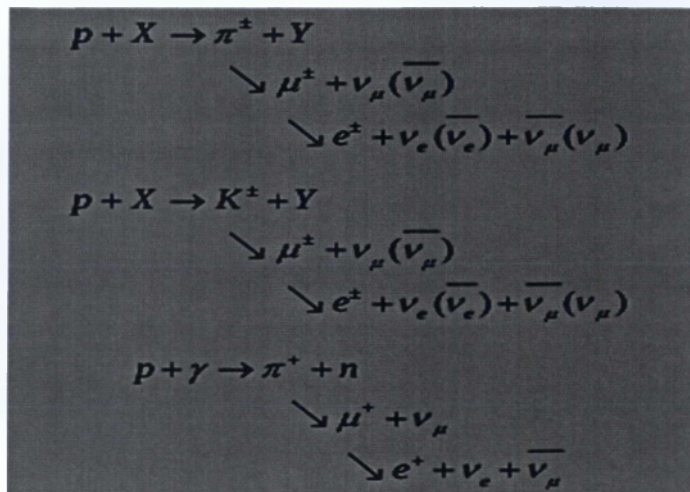
1. Εισαγωγή

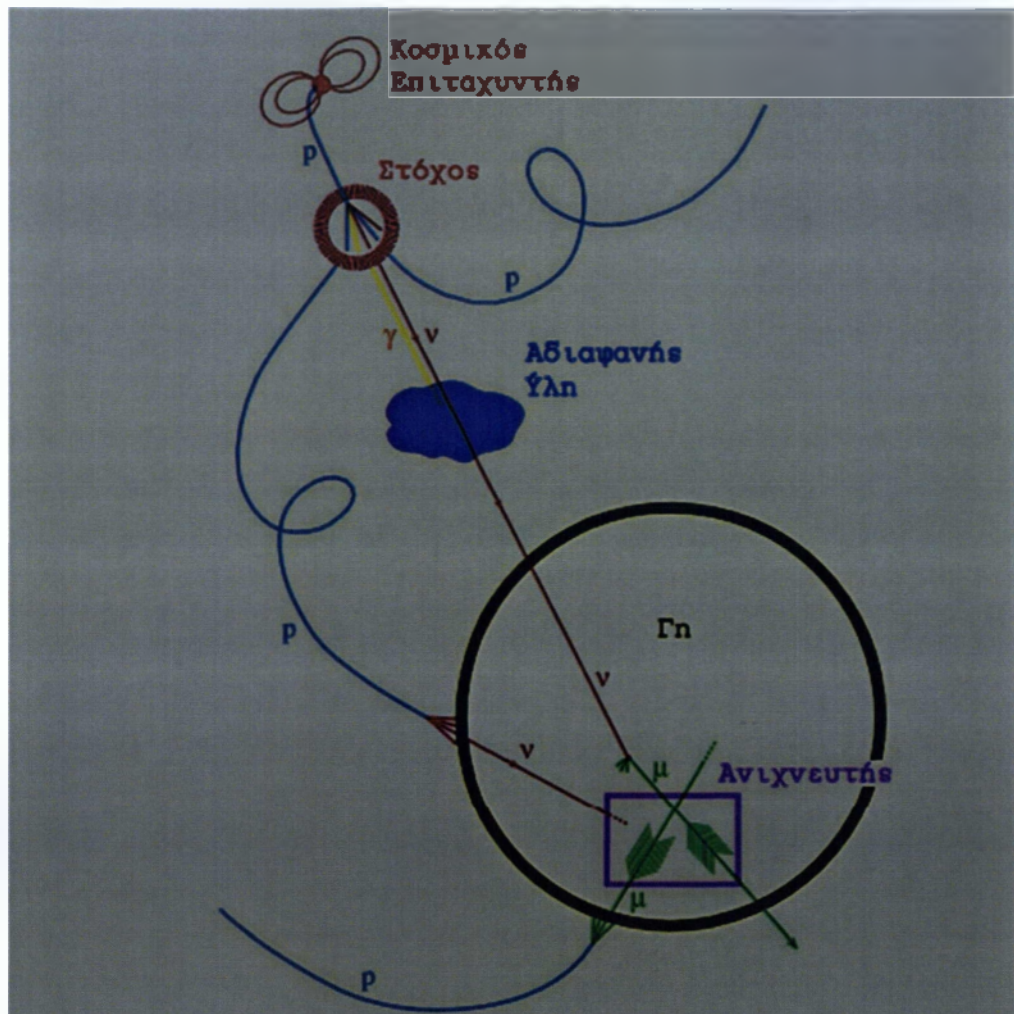
Το Σύμπαν έχει εξερευνηθεί μέσω του ηλεκτρομαγνητικού φάσματος, από ραδιοκύματα ως και ακτίνες γάμμα υψηλής ενέργειας. Η δυνατότητα εξερεύνησης του με την χρήση ενός νέου σωματίου, του νετρίνου, ανοίγει ένα νέο παράθυρο παρατήρησης στον Κόσμο. Στο παρόν Κεφάλαιο περιγράφεται η αξιοποίηση των νετρίνων ως πηγή πληροφορίας και παρατήρησης του Σύμπαντος [1,2,3].

Η ανίχνευση σημειακών πηγών νετρίνων στην Ουράνια Σφαίρα είναι ουσιώδης στον εντοπισμό ιδιαίτερα ενεργών αστροφυσικών αντικειμένων στα οποία δημιουργούνται και επιταχύνονται οι υψηλοενεργειακές κοσμικές ακτίνες που παρατηρούμε. Εικάζεται ότι ο Γαλαξίας μας έχει στο κέντρο του μία μελανή οπή μάζας $\sim 106 M_{\odot}$, η οποία λειτουργεί ως Ενεργός Γαλαξιακός Πυρήνας (AGN). Με την μέτρηση της ροής νετρίνων από το κέντρο του Γαλαξία θα δοθεί η δυνατότητα επιβεβαίωσης και ελέγχου διαφόρων θεωρητικών μοντέλων δημιουργίας των κοσμικών ακτινών υψηλών ενεργειών [4].

Το γεγονός ότι τα νετρίνα δεν αλληλεπιδρούν παρά μόνο με ασθενείς και βαρυτικές αλληλεπιδράσεις τα καθιστά ιδανικούς φορείς πληροφορίας (βλέπε Σχήμα 1.1). Πρωτίστως, τα νετρίνα δεν απορροφώνται από την διαστρική ύλη, και δεν αλληλεπιδρούν με το κοσμικό υπόβαθρο της μικροκυματικής ακτινοβολίας, αντίθετα με τα φωτόνια και τα φορτισμένα σωματίδια. Επιπλέον, δεν εκτρέπονται από μαγνητικά πεδία, παρά μόνο από το ασθενές βαρυτικό πεδίο του Γαλαξιακού και διαγαλαξιακού χώρου.

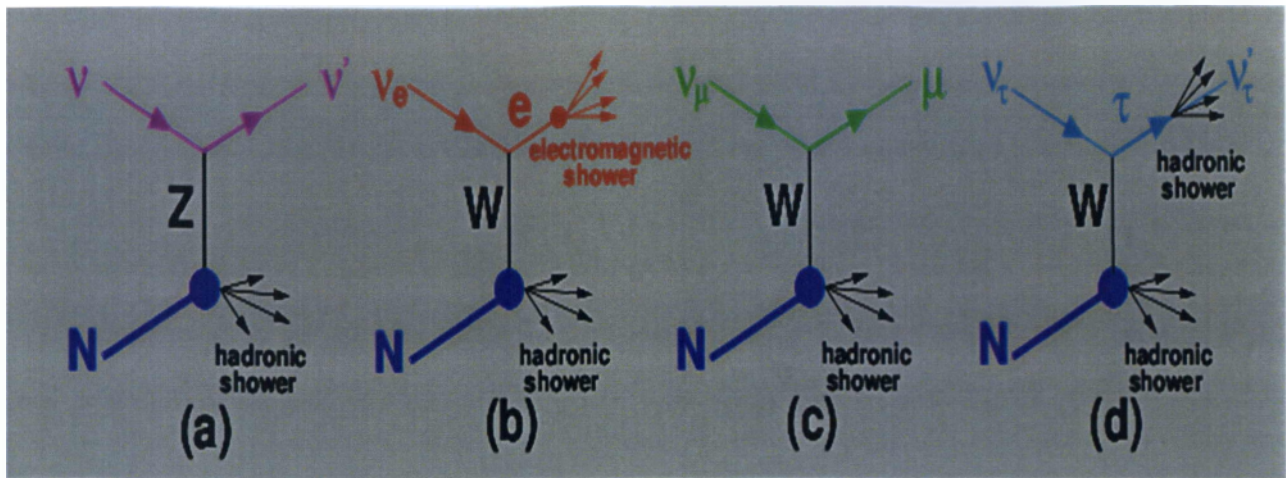
Οι κοσμικοί επιταχυντές θα πρέπει να παράγουν σημαντική ροή υψηλοενεργειακών νετρίνων, μέσω της αλληλεπίδρασης ενός ποσοστού κοσμικών ακτινών (πρωτόνια) στην περιοχή της δημιουργίας τους με την περιβάλλουσα ύλη και τα ηλεκτρομαγνητικά πεδία (beam dump σενάριο). Η αλληλεπίδραση αυτή οδηγεί σε παραγωγή μεσονίων με μικρή διάρκεια ζωής τα οποία στην συνέχεια διασπώνται σε μίονια και ηλεκτρόνια σύμφωνα με τις ακόλουθες διαδικασίες [5,6]:





Σχήμα 1.1: Τα νετρίνα διασχίζουν σημαντικά μεγαλύτερες αποστάσεις από τα φωτόνια, γιατί αλληλεπιδρούν μόνο ασθενώς, σε αντίθεση με τα φωτόνια και τα φορτισμένα σωμάτια.

Εντός της πηγής παραγωγής και επιτάχυνσης των κοσμικών πρωτονίων, το υλικό του στόχου αποτελείται από UV ή X-rays ή από αδρόνια. Από τις αλληλεπιδράσεις των πρωτογενών πρωτονίων με το υλικό του στόχου δημιουργούνται κυρίως πιόνια και σε μικρότερη έκταση καόνια. Η διάσπαση των φορτισμένων πιονίων και καονίων έχει ως συνέπεια την παραγωγή ροής νετρίνων [7,8,9,10,11,12,13]. Τα ουδέτερα πιόνια διασπώνται ηλεκτρομαγνητικά σε δύο φωτόνια, και έτσι συνεισφέρουν στο υψηλό ενεργειακό φάσμα ακτίνων γάμμα από την πηγή.



Σχήμα 1.2: Ασθενείς αλληλεπιδράσεις νετρίνων.

Οι σχετικές εντάσεις της ροής των διαφορετικών ειδών νετρίνων είναι στενά συνδεδεμένες με τον μηχανισμό παραγωγής και διάδοσης των νετρίνων. Ενώ η απόλυτη ροή εξαρτάται από πολλές, ως επί το πλείστον άγνωστες, ιδιότητες των πηγών παραγωγής τους, ο λόγος των αναμενόμενων ροών για τα τρία γνωστά είδη των νετρίνων μπορεί να προβλεφθεί με καλή ακρίβεια. Μετρώντας τον αριθμό των νετρίνων στις αλληλεπιδράσεις που περιγράφονται στο Σχήμα 1.2. βρίσκουμε ότι ο λόγος των ροών είναι: $N_{\nu_e} : N_{\nu_\mu} : N_{\nu_\tau} = 1 : 2 : 0$. Η δυνατότητα ταλαντώσεων των νετρίνων (neutrino oscillations) κατά την διάδοση τους μπορεί να μεταβάλλει το λόγο αυτό [14,15].

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 2

ΝΕΤΡΙΝΑ

2. 1 Εισαγωγή

Γαλαξιακά νετρίνα παράγονται μέσω αδρονικών αλληλεπιδράσεων που συμβαίνουν όταν σωμάτια της κοσμικής ακτινοβολίας διαχέονται και αλληλεπιδρούν στην διαστρική ύλη. Μεγάλο μέρος της διαθέσιμης ενέργειας των υψηλό-ενεργειακών κοσμικών ακτινών διατίθεται για την παραγωγή μεσονίων, τα οποία στην συνέχεια διασπώνται με προϊόντα μεταξύ άλλων ακτίνες γάμμα και νετρίνα. Τα μεσόνια διασπώνται πριν προλάβουν να αλληλεπιδράσουν με την αραιή ενδογαλαξιακή ύλη, οπότε το ενεργειακό φάσμα των παραγόμενων ακτινών γάμμα και νετρίνων μοιάζει με το φάσμα των κοσμικών ακτινών στο διαστρικό μέσο,[16,17,18]

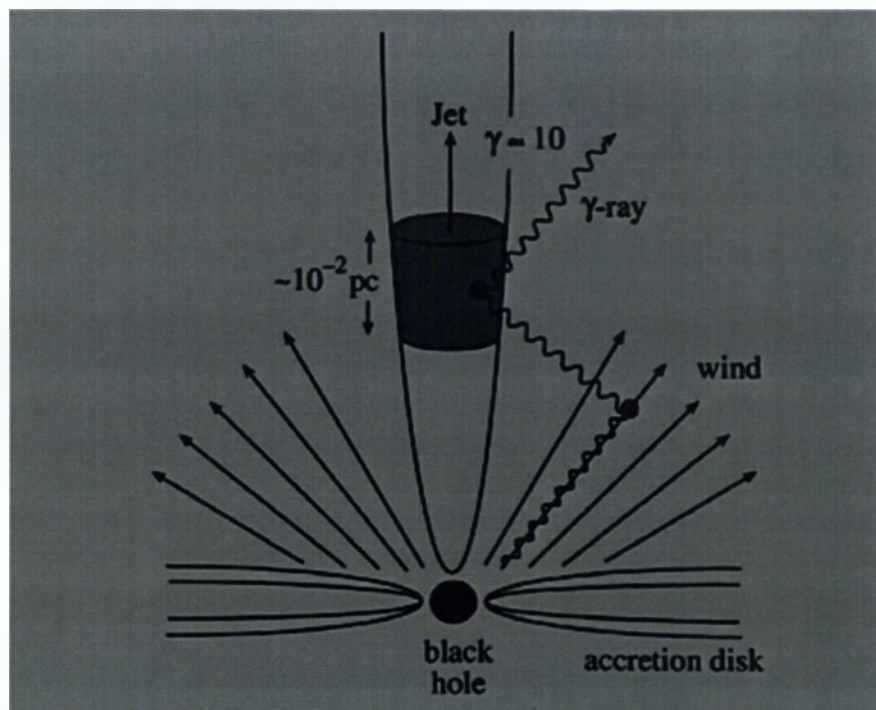
$$dN \propto E^{-2.7} .$$

2. 2 Νετρίνα από Ενεργειακούς Γαλαξιακούς Πυρήνες

Οι ενεργειακοί γαλαξιακοί πυρήνες (AGN ή Active Galactic Nuclei) είναι πολύ λαμπρά κέντρα γαλαξιών, με φωτεινότητα συγκρίσιμη ενός ολόκληρου γαλαξία. Εκπέμπουν φωτόνια σε όλο το ηλεκτρομαγνητικό φάσμα, από ραδιοκύματα ως και ακτίνες γάμμα ενέργειας TeV. Η περιοχή εκπομπής πρέπει να είναι αρκετά συμπαγής έτσι ώστε να δικαιολογούνται οι παρατηρούμενες μεταβολές της φωτεινότητας σε χρονική κλίμακα ημερών, ωρών ή και λιγότερο. Η γενικά αποδεκτή άποψη είναι ότι ένας ενεργειακός γαλαξιακός πυρήνας περιέχει μία μελανή οπή με μάζα $M \approx 10^8 M_{\odot}$ που περιβάλλεται από ένα δίσκο πρόσφυσης (accretion disc). Η ενέργεια που απαιτείται για την εξήγηση της παρατηρούμενης φωτεινότητας των AGNs διατίθεται από την ύλη του δίσκου πρόσφυσης η οποία πέφτει ελικοειδώς μέσα στην μελανή οπή. Η πλειοψηφία της ενέργειας εκλύεται μέσω πιδάκων (jets), που απομακρύνονται από τον πυρήνα παράλληλα του άξονα περιστροφής της οπής. Τα παρατηρούμενα χαρακτηριστικά του ενεργού γαλαξιακού πυρήνα μεταβάλλονται σημαντικά, ανάλογα με την διεύθυνση του πίδακα σε σχέση με την διεύθυνση παρατήρησης, καθώς και με την απόσταση [19,20,21]. Νετρίνα και ακτίνες γάμμα υψηλότερων ενεργειών αναμένεται να ανιχνεύονται από παρατηρητή που

βρίσκεται κατά μήκος της διεύθυνσης του πίδακα. Οι ενεργειακοί γαλαξιακοί πυρήνες με πίδακες που κοιτούν προς την Γη εμφανίζονται σαν Blazars. Δυο

σχετικά κοντινά Blazars είναι τα Mrk421 και Mrk501, από όπου έχουν παρατηρηθεί ακτίνες γάμμα ενέργειας μέχρι και 20TeV. Στο Σχήμα 2.1 περιγράφεται σχηματικά ο μηχανισμός παραγωγής ακτίνων γάμμα και νετρίνων στην περιοχή του πίδακα ενός ενεργού γαλαξιακού πυρήνα. Φορτισμένα σωμάτια επιταχύνονται σε σχετικιστικές ταχύτητες εντός του πίδακα και αλληλεπιδρούν με φωτόνια παράγοντας μεσόνια τα οποία στην συνέχεια παράγουν υψηλοενεργειακές ακτίνες γάμμα και νετρίνα[22,23,24,25,26,27,28,29,30]. Η παρατηρούμενη μεταβλητότητα της φωτεινότητας των AGNs ($t \sim 1$ μέρα) καθορίζει το μέγεθος των περιοχών επιτάχυνσης εντός του πίδακα σε: $R = \gamma ct$, και υποθέτοντας ένα παράγοντα Lorentz $\gamma \sim 10$ δίνει $R \sim 10^{-2}$ pc.



Σχήμα 2.1: Πιθανός μηχανισμός παραγωγής υψηλοενεργειακών ακτίνων γάμμα και νετρίνων από ενεργειακούς γαλαξιακούς πυρήνες. Ηλεκτρόνια και πρωτόνια που επιταχύνονται μέσα σε στρώματα σχετικιστικών αέριων μαζών κατά μήκος του πίδακα, αλληλεπιδρούν με φωτόνια τα οποία ακτινοβολούνται από την περιοχή του δίσκου πρόσφυσης. Η αλληλεπίδραση δημιουργεί πιόνια τα οποία στην συνέχεια διασπώνται σε ακτίνες γάμμα και νετρίνα.

2.3 Εκλάμψεις ακτινών γάμμα (GRBs)

Μια φορά την ημέρα κάτι αξιοσημείωτο συμβαίνει: ο ουρανός φωτίζεται από μια έκρηξη μεγάλης ενέργειας. Η μυστηριώδης αυτή έκρηξη έχει τυχαία κατεύθυνση και αποτελεί ένα από τα πιο λαμπερά γεγονότα που παρατηρούνται στον ουρανό.

Η ενέργεια απελευθερώνεται υπό τη μορφή γάμμα ακτινοβολίας, συνεπώς είναι αδύνατον για το ανθρώπινο μάτι να την αντιληφθεί. Εξάλλου, οι ακτίνες γάμμα δεν διαπερνούν την ατμόσφαιρα. Η ύπαρξη τους γίνεται αντιληπτή μόνο μέσω των δορυφόρων που βρίσκονται σε τροχιά.

Αυτά τα γεγονότα είναι γνωστά ως εκλάμψεις ακτίνων γάμμα (Gamma Ray Bursts – σε συντόμηση GRBs). Αντιπροσωπεύουν τις πιο ισχυρές εκρήξεις ενέργειας από την εποχή της Μεγάλης Έκρηξης.[31,32,33]

2.4 Ανακάλυψη

Οι εκλάμψεις ακτίνων γάμμα (GRB's) ανακαλύφθηκαν τυχαία το 1967. Οι στρατιωτικοί δορυφόροι Vela των Ηνωμένων Πολιτειών στοχεύοντας στην εύρεση μιας πιθανής παραβίασης της πυρηνικής απαγόρευσης που είχε συμφωνηθεί το 1963, ανίχνευσαν εκλάμψεις γάμμα ακτινοβολίας προερχόμενες από το διάστημα. Τα δεδομένα αυτά άρχισαν αμέσως να επεξεργάζονται από τους αστρονόμους. Μέχρι το 1973 καταγράφηκαν 16 παρόμοιες ανιχνεύσεις. Οι εκλάμψεις ακτίνων γάμμα σύντομα επιβεβαιώθηκαν από το Σοβιετικό δορυφόρο Cosmos, ο οποίος παρατήρησε εκλάμψεις γάμμα ακτινοβολίας με εύρος 0.05-0.3 MeV[34,35,36,37,38,39].

Οι παρατηρήσεις παρόμοιων εκλάμψεων ενισχύθηκαν το 1991 από το δορυφόρο CGRO (παρατηρητή Compton ακτινοβολίας-γάμμα). Ο συγκεκριμένος δορυφόρος μετέφερε τέσσερα όργανα ανίχνευσης γάμμα ακτινοβολίας με εύρος ενέργειας 30 keV έως 30 GeV. Το πείραμα BATSE (Πείραμα Πηγής Έκρηξης και Μεταφοράς) διαδραμάτισε σημαντικό ρόλο στην ιστορία της αστρονομίας γ-ακτινοβολίας. Ο ανιχνευτής του κατέγραψε 2.704 GRB's, 185 Επαναλήπτες γ-ακτινοβολίας (SGRs) και άλλα γεγονότα[40,41,42,43,44,45].

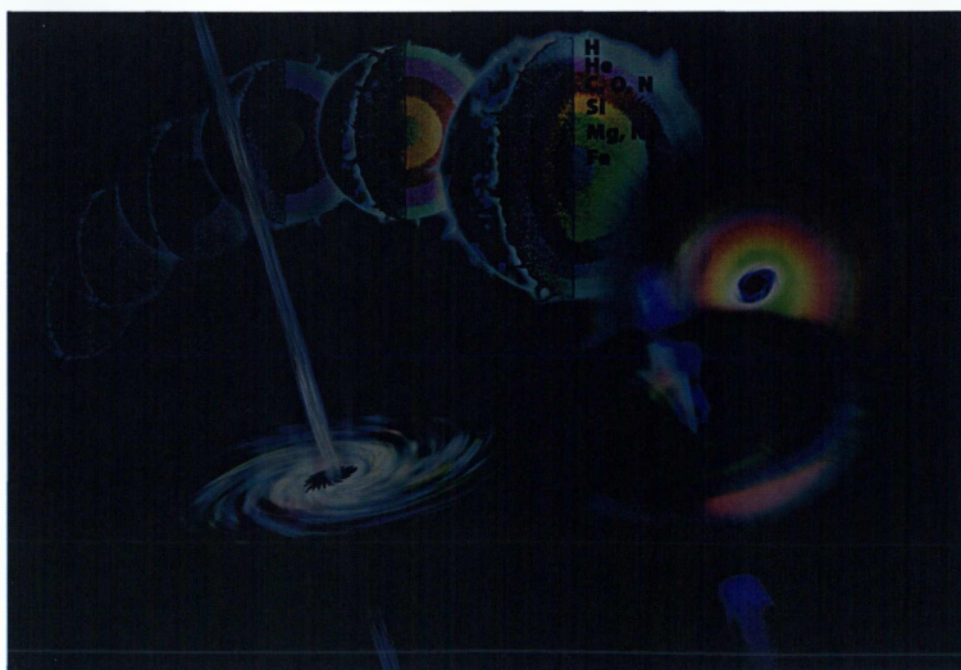
Πολλά GRBs ανιχνεύθηκαν και έγινε εμφανές ότι παρουσίαζαν ισοτροπική κατανομή, μη προσανατολισμένη σε κάποια κατεύθυνση στο χώρο, όπως το γαλαξιακό επίπεδο ή κέντρο, γεγονός που αποδεικνυε ότι πρέπει να προέρχονται από πηγές εκτός του γαλαξία μας. Πολλά θεωρητικά μοντέλα που μελετούν την προέλευση των GRBs, αξιώνουν ότι πρέπει να υπάρχει μια «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. 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 Χ[46,47].

Η εκπομπή ακτίνων Χ συνέβη αμέσως μετά το GRB και προερχόταν από το ίδιο σημείο του ουρανού. 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, αχνούς γαλαξίες. Οι μετατοπίσεις στο ερυθρό (redshifts) μερικών από αυτούς τους γαλαξίες μετρήθηκαν οδηγώντας τελικά στον προσδιορισμό της απόστασής τους. 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 = 10¹⁶ μέτρα) από τη Γη.

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.

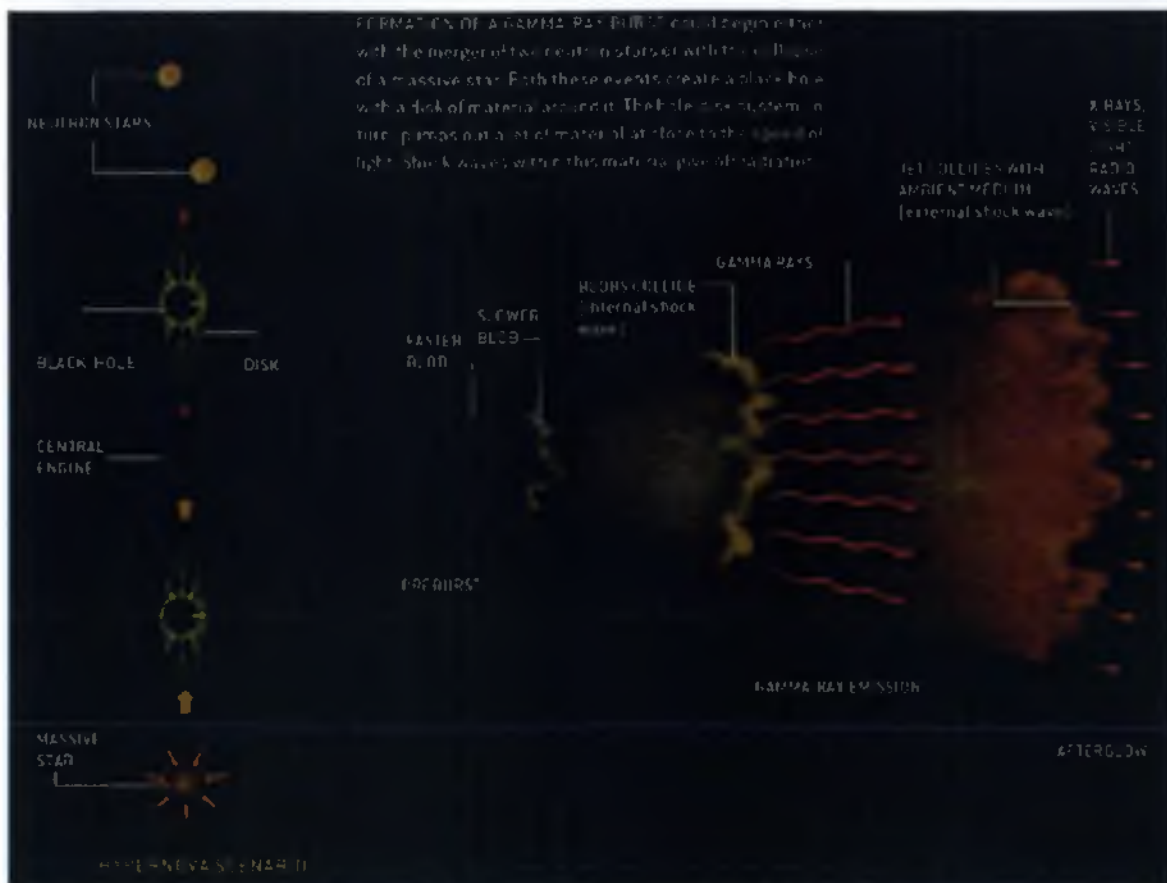
Η λάμψη των αστεριών οφείλεται στην καύση του υδρογόνου (nuclear fusion). Η διαδικασία αυτή παράγει την 'στάχτη' ηλίου. Καθώς τελειώνουν τα αποθέματα υδρογόνου το αστέρι αρχίζει να καίει πλέον το ήλιο. Με την ίδια ακολουθία συνεχίζει η καύση των στοιχείων άνθρακα και οξυγόνου. Στο τελικό στάδιο της καύσης το στοιχείο που απομένει είναι ο σίδηρος, ο οποίος δεν μπορεί να αποτελέσει πυρηνικό καύσιμο.

Απουσίας καυσίμων το αστέρι δεν μπορεί πλέον να στηρίξει το βάρος του και ο πυρήνας του καταρρέει. Αν η μάζα του είναι αρκετά μεγάλη ο πυρήνας σχηματίζει μια μαύρη τρύπα, η οποία με ταχύ ρυθμό σχηματίζει jets. Ο σχηματισμός της μαύρης τρύπας συνοδεύεται από εκλάμψεις ακτίνων γάμμα



Σχήμα 2.2. Καταστροφή ενός αστεριού. (NASA News/New Topics/Universe)

Οι εκλάμψεις πιστεύεται ότι δημιουργούνται από βολίδες πλάσματος (fireballs), οι οποίες εκπέμπονται κατά την διάρκεια κατάρρευσης των πυρήνων σε εκρήξεις υπερκαινοφανών, από αστέρες νετρονίων ή μελανές οπές (Σχήμα 2.3).. Πρωτόνια και ηλεκτρόνια των βολίδων επιταχύνονται σε υπέρ-σχετικιστικές ταχύτητες (με παράγοντα Lorentz ~ 100) και αλληλεπιδρώντας με περιβάλλοντα φωτόνια δημιουργούν μεσόνια τα οποία διασπώνται παράγοντας υψηλό-ενεργειακές ακτίνες γάμμα και νετρίνα. Βασιζόμενοι σε αυτό το μοντέλο των διαστελόμενων βολίδων, έχει γίνει εκτίμηση της συνολικής ροής νετρίνων από τις πηγές εκλάμψεων ακτίνων γάμμα, η οποία ροή είναι δυνατόν να ανιχνευτεί από τηλεσκόπια νετρίνων μεγάλης έκτασης ($\sim 1\text{km}^3$).

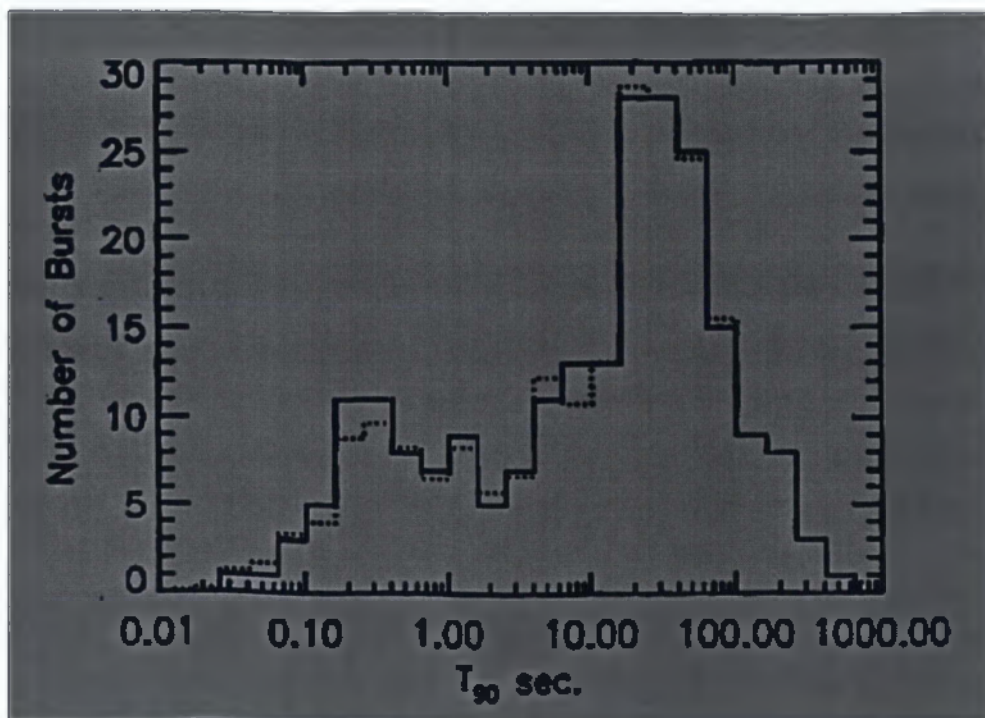


Σχήμα 2.3. Δημιουργία των εκλάμψεων ακτίνων γάμμα

2.5 Ιδιότητες εκπομπής των GRBs

2.5.1 Ροή - διάρκεια

Τα φωτόνια που εκπέμπονται από ένα GRB έχουν ενέργεια $\approx 30-1000$ keV με μέγιστη τιμή στα 180 keV. Η μέγιστη ροή είναι $\approx 0.3 - 50 \text{ ph.cm}^{-2}.\text{s}^{-1}$ ενώ το κατώτερο όριο καθορίζεται από την ευαισθησία του οργάνου (συνήθως $\approx 10^{-8} - 10^{-4} \text{ erg.cm}^{-2}$). Η διάρκεια τους κυμαίνεται από ≈ 0.01 s έως και ≈ 1000 s.



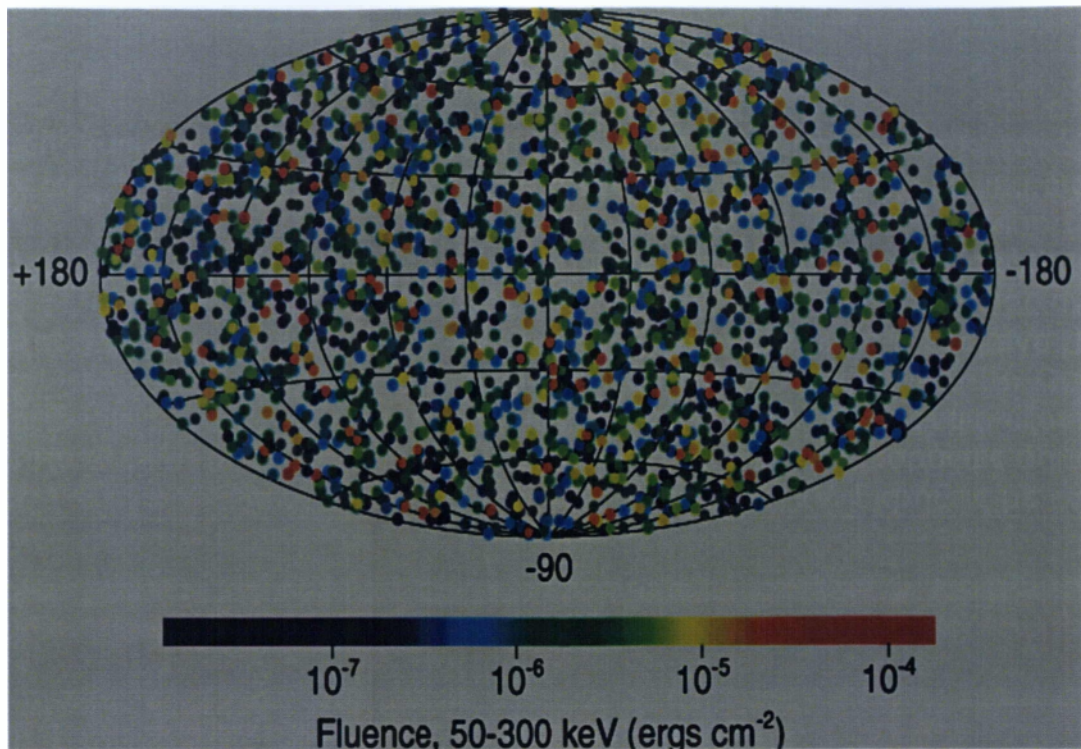
Σχήμα 2.4. Κατανομή των T_{90} των GRBs που ανιχνεύτηκαν από το πείραμα BATSE.

Στο Σχήμα 2.4 περιγράφεται η κατανομή του χρόνου T_{90} στον οποίο η έκρηξη αυξάνεται από 5% στο 95%. Γενικά διακρίνονται σε δυο κατηγορίες. Στην ομάδα των σύντομων εκρήξεων (short burst), όπου $T_{90} < 2$ sec και σε αυτή των εκρήξεων με μεγάλη διάρκεια (long burst) με $T_{90} > 2$ sec . Ωστόσο, έχει προταθεί και η ύπαρξη μιας μεσαίας διάρκειας ομάδας GRBs. Κάθε έκρηξη ακτινοβολίας-γ έχει ένα μοναδικό προφίλ. Γενικά υπάρχει ποικιλία στο χρονικό προφίλ του κάθε GRB. Ωστόσο κατά ομάδες ακολουθούν κάποια συγκεκριμένη μορφή. Έτσι, εμφανίζονται ως: I. μοναδιαίος παλμός ή γεγονός, II. Ομαλές καθορισμένες κορυφές σήματος, III. Ξεχωριστά καλά καθορισμένα επεισόδια εκπομπής, IV. Εκρήξεις με εντελώς χαοτική μορφή.

2.5.2 Φάσμα και κατανομή τους στον αστρικό ουρανό

Τα GRBs εμφανίζουν μη-θερμικό φάσμα. Συνήθως είναι προσαρμοσμένα στην εμπειρική συνάρτηση Band.

Το πείραμα BATSE έδειξε ότι η κατανομή των GRBs στον ουρανό είναι ισοτροπική (Σχήμα 2.5) [48,49,50,51,52]. Από την κατανομή αυτή φαίνεται ότι τα GRBs δεν βρίσκονται στον γαλαξία Milky Way ή στη διεύθυνση του γειτονικού σύμπαντος, γεγονός που υποδεικνύει έντονα την εξωγαλαξιακή προέλευση τους.



Εικόνα 2.5: Καταγραφή 2.704 GRBs από το πείραμα BATSE (εννεαετή λειτουργία).

Το πείραμα BATSE έδειξε ότι οι σύντομες εκρήξεις έχουν πιθανότητα πάνω από 99% να κατανεμηθούν ανισοτροπικά και απόκλιση $\approx 2\sigma$ από την ισοτροπία σε γωνιακή κλίμακα $\approx 2 - 4$. Οι μεσαίας έντασης εκρήξεις GRB εμφανίζουν ανισοτροπία σε ποσοστό 97% [53,54,55]. Ωστόσο οι μακράς διάρκειας εκρήξεις κατανέμονται ισοτροπικά.

2.6 Επίγεια Παράθυρα παρατήρησης

Για την ανίχνευση φωτονίων από GRBs έχουν σχεδιαστεί πολλοί επίγειοι ανιχνευτές Cherenkov ακτινοβολίας. Ο ανιχνευτής νερού Milagrito τοποθετημένος σε βάθος 2.650 m κοντά στο Los Alamos, κατέγραψε πολλά γεγονότα κατά την ανίχνευση του GRB 970417A από τον ανιχνευτή BATSE. Ο ανιχνευτής AMANDA (Antarctic Muon And Neutrino Detector Array), αποτελείται από φωτοπολλαπλασιαστές τοποθετημένους κάτω από την επιφάνεια του πάγου στο Νότιο Πόλο. Στόχος του ήταν να ανιχνεύσει πλεόνασμα νετρίνων τα οποία θα προέρχονταν από 400 GRBs που συνέβησαν τα 7 χρόνια λειτουργίας του . Η προσπάθεια του δυστυχώς δεν είχε θετικό αποτέλεσμα.

Το πείραμα IceCube είναι ένας ανιχνευτής κυβικού χιλιομέτρου 1 km^3 στην Ανταρκτική. Αποτελείται από 4.800 φωτοπλασιαστές.

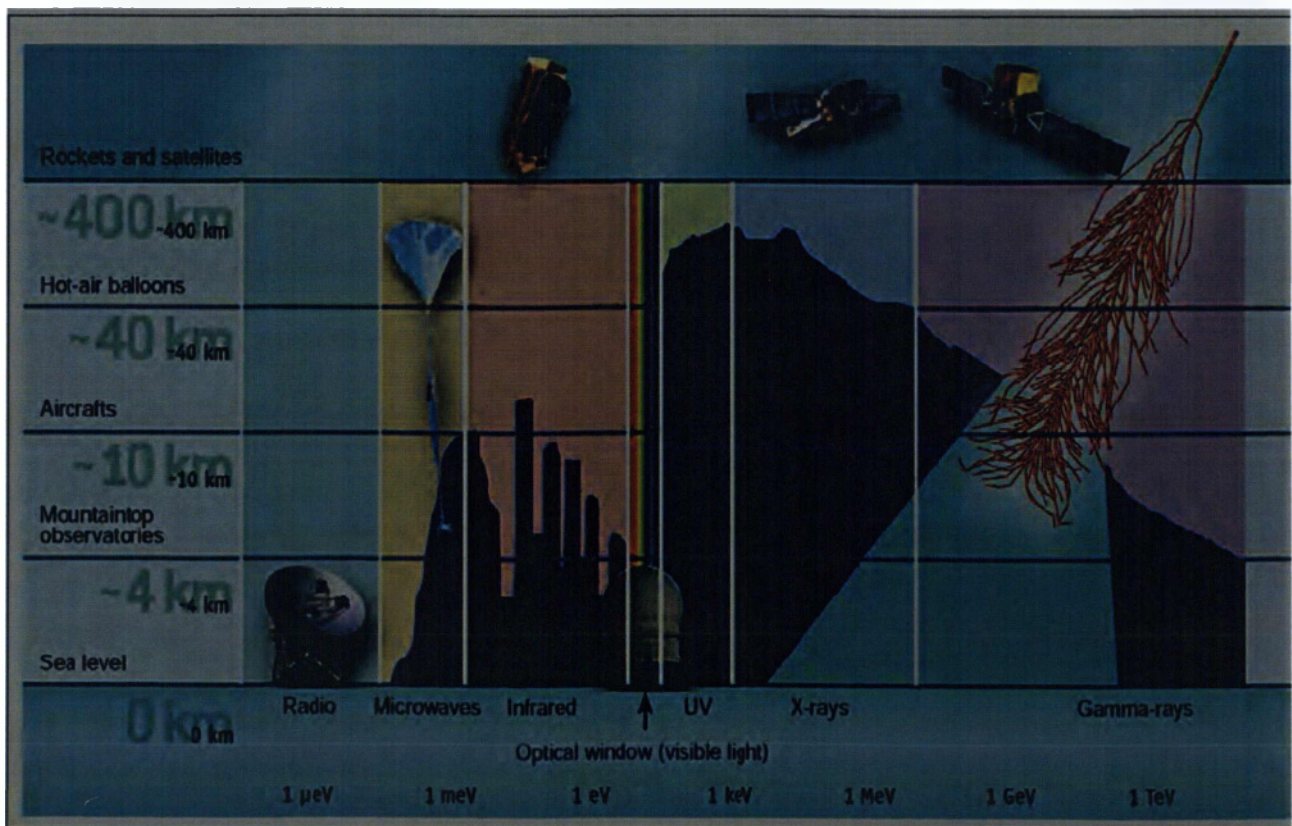
Έως σήμερα δεν έχει καταγραφεί καμία πηγή νετρίνων προερχόμενη από έκρηξη

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 3

ΠΕΙΡΑΜΑΤΑ ΝΕΤΡΙΝΩΝ

3.1 Τεχνικές ανίχνευσης

Η καταγραφή της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας του σύμπαντος επιτυγχάνεται πλέον από τον κλάδο της αστρονομίας γ-ακτινοβολίας. Ωστόσο πρέπει κανείς να λάβει υπόψη του τα χαμηλά όρια ενεργειών στην μάζα του ηλεκτρονίου, όπου η καταστροφή ζεύγους ηλεκτρονίου-ποζιτρονίου και η πυρηνική δομή αρχίζουν να γίνονται εμφανής. Τα όρια υψηλών ενεργειών βασίζονται στην παρατήρηση GRBs σε ενέργειες μεγαλύτερες των 10^{20} eV (ενδεχομένως να μην υπάρχει ανώτατο όριο). Στο ακόλουθο Σχήμα περιγράφεται η διαπερατότητα της ατμόσφαιρας για ποικίλες ενέργειες φωτονίων. Στο ίδιο Σχήμα φαίνονται και οι πιθανές μέθοδοι ανίχνευσης.



Σχήμα 3.1. Διαπερατότητα της ατμόσφαιρας για ποικίλες ενέργειες φωτονίων και πιθανές μέθοδοι ανίχνευσης.

3.2 Πειραματικές μέθοδοι ανίχνευσης σωματιδίων

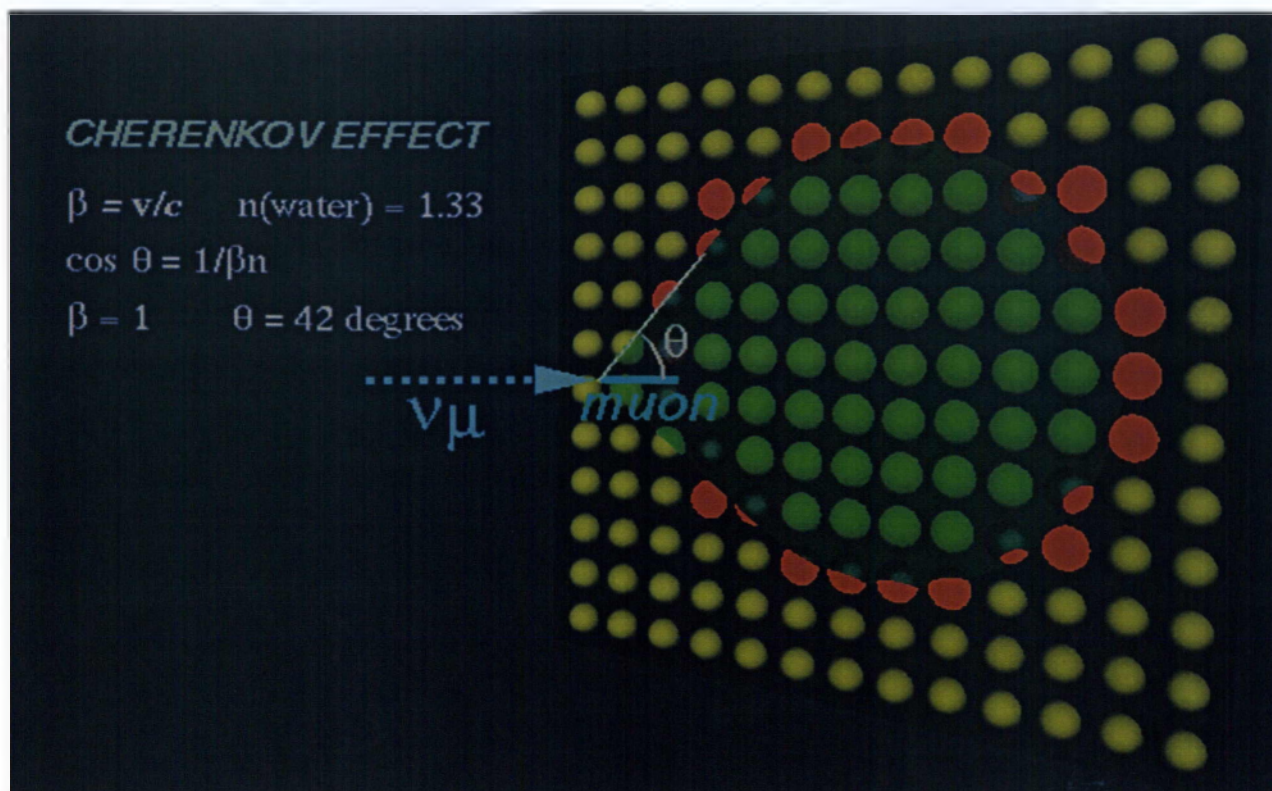
Τα πειράματα ανίχνευσης σωματιδίων ανιχνεύουν ευθέως τη φορτισμένη συνιστώσα της ατμοσφαιρικής δέσμης, μετρώντας το χρόνο άφιξης της. Η κατεύθυνση της εκπεμπόμενης κοσμικής ακτίνας μπορεί να υπολογιστεί με ακρίβεια σχεδόν μιας μοίρας.

Το πείραμα Auger αποτελεί χαρακτηριστικό παράδειγμα παρόμοιας τεχνικής. Μια διάταξη από 1.600 ανιχνευτές επιφάνειας καλύπτουν μια περιοχή 3.000 km² και ανιχνεύει τα σωματάρια σε επίπεδο εδάφους μέσω της ακτινοβολίας Cherenkov που παράγεται στο νερό [56].

Ο βασικός μηχανισμός λειτουργίας των περισσοτέρων ανιχνευτών βασίζεται στον ιονισμό της ύλης που προκαλείται από ταχέως κινούμενα φορτισμένα σωματάρια. Ο ιονισμός αυτός με την σειρά του προκαλεί πληθώρα φαινομένων που χρησιμοποιούνται για την ανίχνευση και τον χαρακτηρισμό των σωματιδίων. Έτσι σήμερα υπάρχει μια τεράστια ποικιλία ανιχνευτών ανάλογα με τις πειραματικές ανάγκες. Τέτοιοι ανιχνευτές μπορεί να είναι θάλαμοι φυσαλίδων, σπινθηριστές, ανιχνευτές ημιαγωγών, ανιχνευτές αερίου κτλ. Οι ανιχνευτικοί σταθμοί των σύγχρονων πειραμάτων της φυσικής υψηλών ενεργειών περιέχουν μια μεγάλη ποικιλία ανιχνευτών με διαφορετικούς ρόλους ώστε να εξαχθεί όσο το δυνατόν περισσότερη πληροφορία από κάθε γεγονός σύγκρουσης.

Η τεχνική που χρησιμοποιήθηκε για την ανίχνευση των νετρίνο είναι η ακτινοβολία Cherenkov. Η ακτινοβολία Cherenkov είναι το οπτικό ανάλογο του sonic boom, όπως για παράδειγμα ένα αεροπλάνο που ξεπερνά την ταχύτητα του ήχου δημιουργεί μία ηχητική έκρηξη. Η ταχύτητα του φωτός μέσα στο καθαρό νερό είναι ίση με τα 3/4 περίπου της ταχύτητας του φωτός στον αέρα. Έτσι, αν ένα σωματάρδιο εισέλθει [όπως συμβαίνει με τα νετρίνο] με ταχύτητα κοντά στην ταχύτητα του φωτός, θα έχει σαν αποτέλεσμα τη δημιουργία ενός δακτυλίου φωτός, μιας γαλάζιας ακτινοβολίας συμμετρική ως προς τη διεύθυνση κίνησης του σωματιδίου.

Ουσιαστικά πρόκειται για μια ιδιαίτερη περίπτωση όπου η ταχύτητα του σωματιδίου είναι μεν μικρότερη από την [ανώτατη] ταχύτητα του φωτός, αλλά μεγαλύτερη από την επιτρεπτή για το σωματάρδιο c/n ταχύτητα στο μέσο. Η ακτινοβολία συνεχίζεται μέχρι το σωματάρδιο να χάσει την κινητική του ενέργεια και η ταχύτητά του να φθάσει κάτω από c/n . Το τι ακριβώς συμβαίνει μπορούμε να το δούμε στις επόμενες παραγράφους. Το φαινόμενο αυτό μελέτησε θεωρητικά ο Sommerfeld το 1904 [πριν καν διατυπωθεί η θεωρία της σχετικότητας!], ανακάλυψε πειραματικά ο Cherenkov το 1934 και ερμηνεύθηκε από τους Tamm & Frank το 1937.



Σχήμα 3.2 Ακτινοβολία Cherenkov.

Τα μίονια είναι μεγαλύτερης μάζας σωματίδια και δεν διανύουν μεγάλη διαδρομή, παράγοντας σχετικά καθαρούς δακτυλίους. Τα ηλεκτρόνια από την άλλη, ενδέχεται να αλληλεπιδράσουν κατά τη πορεία τους, οπότε θα δημιουργηθούν και νέα σωματίδια τα οποία τα θα ακτινοβολήσουν και αυτά με την σειρά τους μικρότερους δακτυλίους κ.ο.κ., με αποτέλεσμα να δημιουργείται συνολικά ένας πιο θολός δακτύλιος. Η ακρίβεια στο διαχωρισμό των δύο εικόνων (νετρίνο ηλεκτρονίου – νετρίνο μιονίου) είναι 98%, και παράγεται περίπου μία εικόνα κάθε 1.5 ώρα. Παρά τις ανακρίβειες, μπορεί οι απόλυτες τιμές των ροών των νετρίνο να είναι σχετικά επισφαλείς, αλλά ο λόγος των ροών του νετρίνο του μιονίου προς του νετρίνο του ηλεκτρονίου υπολογίζεται αρκετά αξιόπιστα ώστε να εξαχθούν συμπεράσματα.

Ερχόμαστε τώρα στην ουσία. Το μέγεθος του ανιχνευτή επέτρεψε στην ομάδα να ανιχνεύσει ατμοσφαιρικά νετρίνο μιονίου μεγαλύτερης ενέργειας από ότι τα προηγούμενα πειράματα, και με λεπτομερέστερη εξάρτηση από τη γωνία εισόδου. Η ανακάλυψη έγκειται στο γεγονός ότι: η ροή που αντιστοιχεί σε νετρίνο που δημιουργούνται στην ατμόσφαιρα πάνω περίπου από τη θέση του ανιχνευτή [όπου τα νετρίνο του μιονίου έχουν διανύσει περίπου 20km πριν ανιχνευθούν] είναι μεγαλύτερη από αυτή που δημιουργείται από νετρίνο που έχουν διανύσει πρώτα τη γη [απόσταση μέχρι και 13,000km]. Πιο συγκεκριμένα, μετρήθηκε η διαφορά ενεργειών ανάμεσα στους δύο τύπους των νετρίνο, και άρα η διαφορά των τετραγώνων των μαζών των του νετρίνο του μιονίου και του νετρίνο του ηλεκτρονίου. Αυτό σημαίνει βέβαια, πως υπάρχει διαφορά μάζας μεταξύ τους, που προκύπτει μόνο αν τα νετρίνο έχουν μάζα. Η

διαφορά στη μάζα που μετρήθηκε είναι περίπου $10^{-2}eV^2$. Τα αποτελέσματα του πειράματος δημοσιεύθηκαν μετά από 1.5 χρόνο συλλογής δεδομένων το 1998.



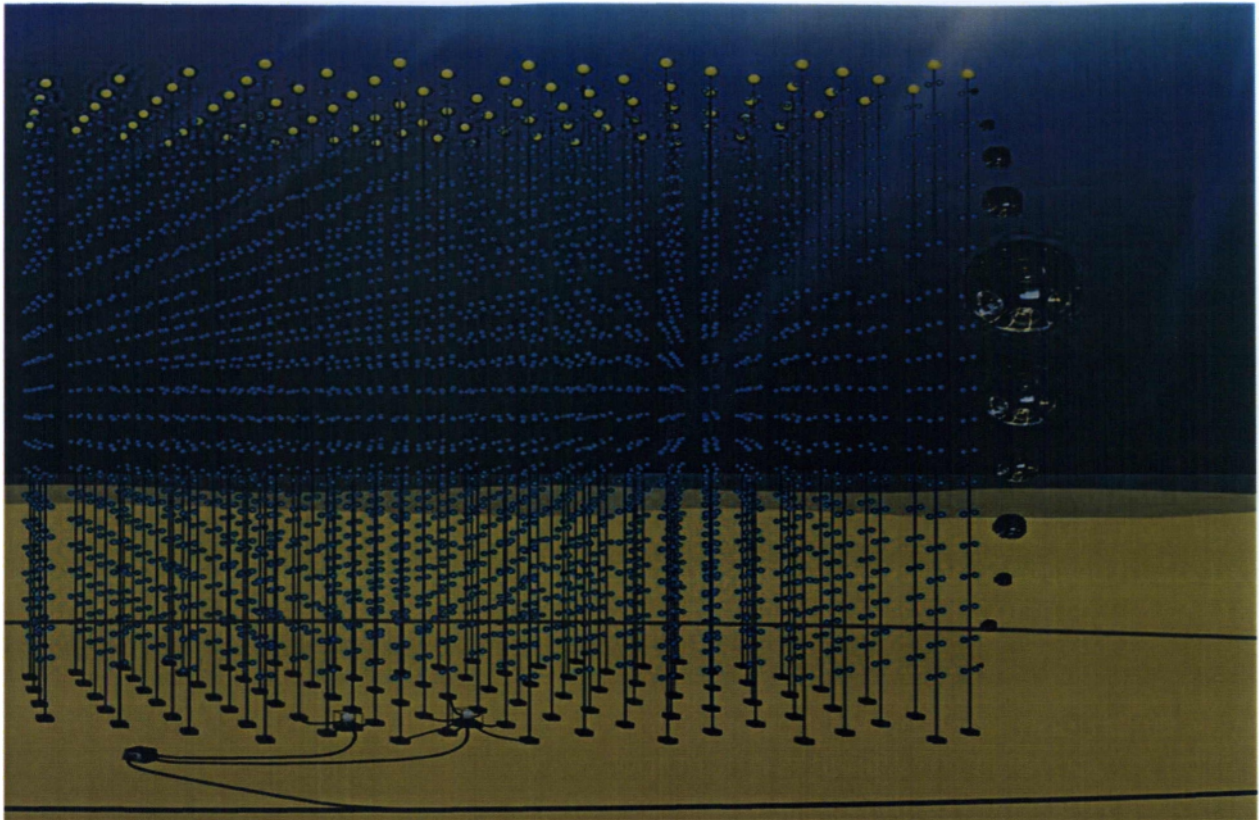
Σχήμα 3.3 Ένας φωτοπολλαπλασιαστής είναι ένα εργαλείο που χρησιμοποιείται ευρέως σε πειράματα Αστροσωματιδιακής Φυσικής, ο οποίος μετατρέπει το φως σε ηλεκτρικό σήμα, και άρα ενεργεί ως "ηλεκτρονικό μάτι". Όταν ένα υψηλής ενέργειας νεutrino αλληλεπιδρά, παράγει ένα μόνιο που κινείται προς την θετική κατεύθυνση (up-going muon) στη θάλασσα, το οποίο θα οδηγήσει σε ένα μπλε φως Cherenkov, το οποίο με τη σειρά του θα παρατηρηθεί με μια σειρά από φωτοπολλαπλασιαστές.

3.3 "Μελετώντας τον ουρανό, κάτω από τη θάλασσα!" «Τηλεσκόπιου Νετρίνων Κυβικού Χιλιομέτρου» (Multi-Cubic Kilometre Neutrino Telescope) ή KM3NeT



Τα νετρίνα είναι στοιχειώδη σωματίδια που δημιουργούνται κατά την ραδιενεργό διάσπαση, στις πυρηνικές αντιδράσεις όπως π.χ. οι αντιδράσεις που συμβαίνουν στο εσωτερικό των αστέρων και στους πυρηνικούς αντιδραστήρες, καθώς και κατά την αλληλεπίδραση των κοσμικών ακτίνων με τα άτομα ύλης. Τα νετρίνα αλληλεπιδρούν μόνο ασθενώς με την ύλη και για το λόγο αυτό είναι πολύ δύσκολο να ανιχνευτούν. Πρόσφατα έρευνες Ιταλών επιστημόνων κατέγραψαν κίνηση του νετρίνου με ταχύτητα μεγαλύτερη από αυτή του φωτός.

Το πρόγραμμα KM3NeT[58] προβλέπει την κατασκευή ενός τεράστιου ανιχνευτή εντοπισμού νετρίνων. Το πρόγραμμα αυτό δεν είναι κάτι εντελώς νέο, αφού οι προκαταρκτικές μελέτες ξεκίνησαν το 2006 στο πλαίσιο του 6ου Προγράμματος της Ε.Ε. για την Έρευνα. Πρόκειται για μια κοινοπραξία με 40 ερευνητικούς φορείς από 10 χώρες, περιλαμβανομένης της Ελλάδας, οι οποίοι ενώνουν τις δυνάμεις τους για μια υπερ-κατασκευή που στόχο έχει τον εντοπισμό των νετρίνων και τη μελέτη των ιδιοτήτων του. Πρέπει να σημειωθεί ότι η ελληνική συμμετοχή στο έργο είναι ιδιαίτερα έντονη. Οι ερευνητικοί φορείς που συμμετέχουν είναι το Ελληνικό Κέντρο Θαλασσιών Ερευνών (ΕΛΚΕΘΕ), το Ανοικτό Πανεπιστήμιο Πάτρας, το ΕΚΕΦΕ "Δημόκριτος", το Πανεπιστήμιο Αθηνών, το Εθνικό Αστεροσκοπείο Αθηνών και το πρόγραμμα "Νέστωρ". Το KM3Net θα εντοπίζει νετρίνα και θα αναζητά πληροφορίες για έντονα κοσμικά φαινόμενα όπως οι εκρήξεις υπερκαινοφανών αστέρων, οι εκρήξεις ακτινοβολίας γάμμα, καθώς ακόμη και η Μεγάλη Έκρηξη. Οι επιστήμονες ευελπιστούν ότι το KM3Net είναι πιθανό να αποκαλύψει άγνωστα μέχρι σήμερα φαινόμενα που δεν είναι εφικτό να εντοπιστούν με τα υπάρχοντα όργανα διαστημικής παρατήρησης. Οι εμπνευστές του προγράμματος τονίζουν ότι η Μεσόγειος είναι το ιδανικό μέρος καθώς η θάλασσα της διαθέτει το κατάλληλο βάθος, χωρίς να υπάρχει μεγάλη απόσταση από τις ακτές όπου θα πρέπει να δημιουργηθούν τα απαραίτητα κέντρα υποστήριξης, και εξαιτίας της 'καθαρότητας' της.



Σχήμα 3.4 Υποθαλάσσιος ανιχνευτής

Σημειώνεται πως σήμερα στη Μεσόγειο λειτουργούν συνολικά τρεις μονάδες ανίχνευσης, τρία τηλεσκόπια νετρίνων δηλαδή, στην Πύλο, στα νότια της Σικελίας και στα ανοιχτά των γαλλικών ακτών (Toulon).

Το σχέδιο για το KM3NeT προβλέπει την κατασκευή μιας μεγάλης συστοιχίας πύργων, καθένας από τους οποίους θα έχει ύψος περίπου 900 μέτρα. Σε κάθε πύργο θα τοποθετηθούν ειδικές συσκευές ανίχνευσης που θα αναζητούν νετρίνα. Οι ανιχνευτές τοποθετούνται σε ένα ολοκληρωμένο σύστημα με το σχέδιο να προβλέπει την εγκατάσταση 31 ανιχνευτών ανά μονάδα.

Η σχετικά μικρή ροή των υψηλο-ενεργειακών νετρίνων καθώς και η ασθενής τους αλληλεπίδραση με την ύλη καθιστούν επιτακτική την ανάγκη για την κατασκευή ενός μαζικού ανιχνευτή. Μια πιθανή λύση των προαναφερθέντων απαιτήσεων είναι η κατασκευή ενός μεγάλου υποθαλάσσιου τηλεσκοπίου αποτελούμενο από μια δισδιάστατη σειρά οπτικών στοιχείων, δηλ. φωτοπολλαπλασιαστών τοποθετημένων μέσα σε κατάλληλα περιβλήματα ανθεκτικά στην πίεση του νερού.

3.4 “Μελετώντας τον ουρανό, κάτω από τους πάγους!”-ICECUBE



“Γνωρίζουμε πως το πείραμα αυτό ακούγεται εν πρώτοις τρελό. Κι όμως, μπορούμε να μελετήσουμε τον ουρανό θάβοντας τους ανιχνευτές μέσα στον πάγο! Είμαστε ενθουσιασμένοι γιατί τα νετρίνα και οι κοσμικές ακτίνες μας αποκαλύπτουν έναν εντελώς νέο τρόπο να μελετάμε το Σύμπαν και μας επιτρέπουν να δούμε περιοχές που δεν μπορούσαμε μέχρι σήμερα”.

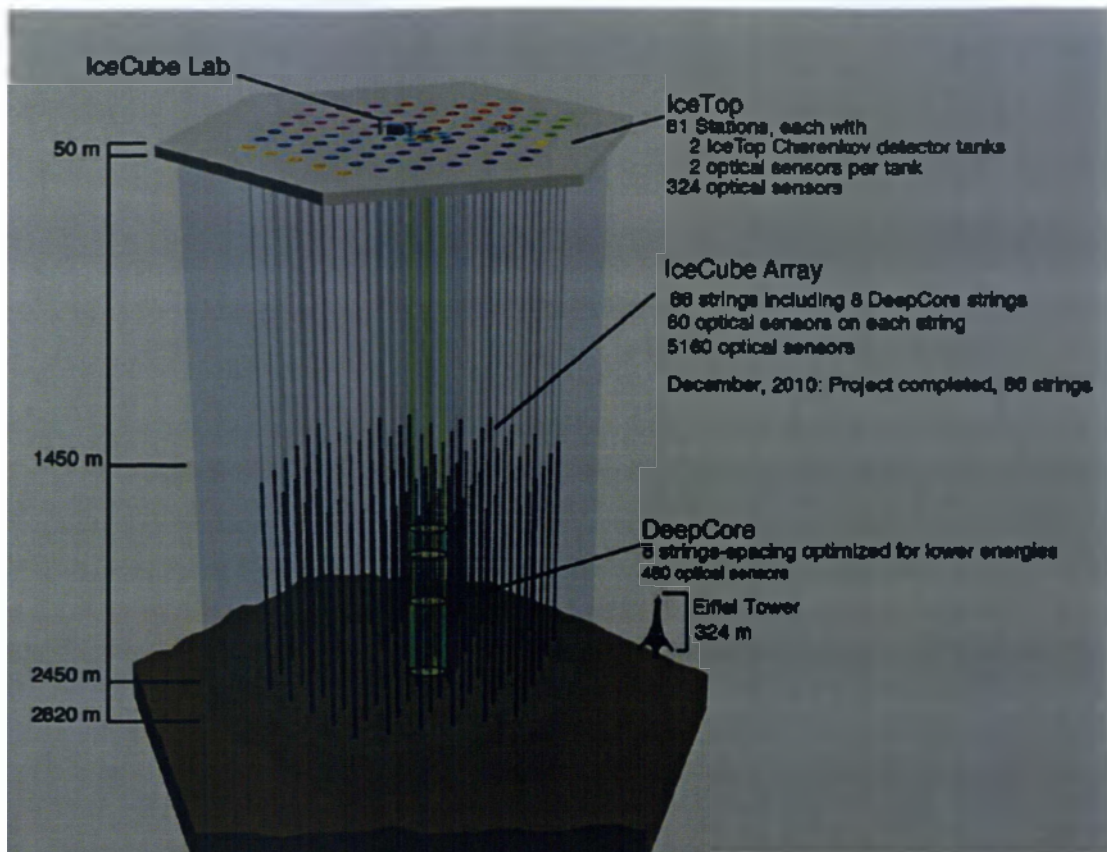
δρ Σουμπίρ Σαρκάρ, αστροφυσικός στο Πανεπιστήμιο της Οξφόρδης/επικεφαλής της βρετανικής ομάδας επιστημόνων του πειράματος IceCube [57]

Οι κοσμικές ακτίνες (πρωτόνια ή πυρήνες ατόμων που κινούνται σχεδόν με την ταχύτητα του φωτός και ξεπερνούν κατά εκατοντάδες φορές την ενέργεια των σωματιδίων στους ισχυρότερους επιταχυντές του κόσμου) πιστεύεται ότι πηγάζουν από δύο πηγές: τα υλικά που επιταχύνονται σε ακραίες ταχύτητες καθώς πέφτουν μέσα στις μαύρες τρύπες στα κέντρα των γαλαξιών και οι λεγόμενες εκλάμπει ακτίνων γάμμα (GRB), εκρήξεις τόσο μεγάλης ισχύος ώστε μπορούν να απελευθερώσουν σε λίγα δευτερόλεπτα την ενέργεια που θα απελευθερώσει ο Ήλιος σε όλη τη διάρκεια της ζωής του. Οι εκλάμπει αυτές είναι πίδακες ακτίνων γ, ακτίνων X και ορατού φωτός, οι οποίοι πιστεύεται, ότι εκπέμπονται από τους πόλους άστρων καθώς καταρρέουν κάτω από το ίδιο τους το βάρος και μετατρέπονται σε μαύρες τρύπες ή άστρα νετρονίων.

Το πείραμα **IceCube** κάνει χρήση ενός ανιχνευτή νετρίνων που έχει εγκατασταθεί στην Ανταρκτική. Το γιγάντιο σύστημα περιλαμβάνει 5.000 αισθητήρες, οι οποίοι παρακολουθούν ένα κυβικό χιλιόμετρο πάγου και καταγράφουν τις εκλάμπει που εκπέμπονται κατά τη διάρκεια των αντιδράσεων των νετρίνων με τον πάγο. Οι ερευνητές αναζήτησαν νετρίνα που θα εμφανίζονταν ταυτόχρονα με τα φωτόνια (το φως) των εκλάμψεων. Από τον Μάιο του 2009 μέχρι τον Μάιο του 2010, δορυφορικά παρατηρητήρια είχαν καταγράψει 190 GRB.

Όμως το IceCube δεν ανίχνευσε νετρίνα σε καμία από αυτές τις περιπτώσεις ακόμα.

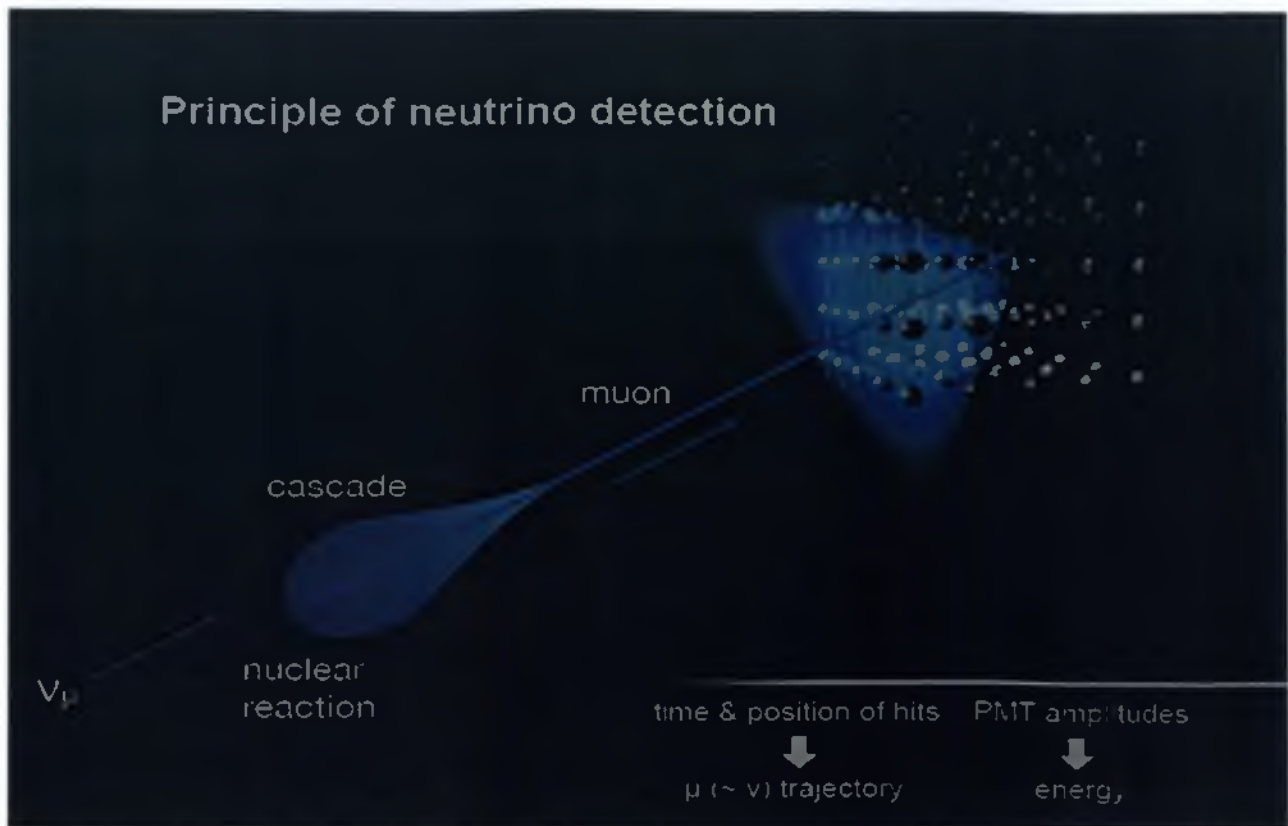
Ο Francis Halzen, βασικός ερευνητής του πειράματος αναφέρει ότι η υπόθεση ότι οι GRB είναι η πηγή των κοσμικών ακτίνων βασικά αποκλείεται. Η επιστημονική αυτή δήλωση περιπλέκει το μυστήριο των κοσμικών ακτίνων και εσποιάζει την έρευνα στους ενεργούς γαλαξιακούς πυρήνες, δηλαδή τις γειτονιές όπου κρύβονται μαύρες τρύπες ακραίας μάζας, ικανές να επιταχύνουν σωματίδια στις ακραίες ταχύτητες των κοσμικών ακτίνων.



Σχήμα 3.5 Σχηματική αναπαράσταση του παρατηρητήριου **IceCube**. Στο Σχήμα διαφάνονται τα κύρια χαρακτηριστικά του. Τα διαφορετικά στάδια έχουν χαρακτηριστεί από διαφορετικά χρώματα στην επιφάνεια του ανιχνευτή.

3.5 Λειτουργία του πειράματος

Ο συνδυασμός της σχετικά μικρής ροής των υψηλοενεργειακών κοσμικών νετρίνων και της ασθενούς αλληλεπίδρασης τους με την ύλη απαιτεί την χρήση μεγάλων ανιχνευτικών διατάξεων για την ανίχνευση τους. Η λύση είναι ο εξοπλισμός ενός μεγάλου όγκου φυσικά διαθέσιμης ποσότητας νερού ή πάγου με ένα τρισδιάστατο πλέγμα Οπτικών Στοιχείων. Τα Οπτικά Στοιχεία βασίζονται σε φωτοπολλαπλασιαστές για την ανίχνευση της αμυδρής ακτινοβολίας Cherenkov που εκπέμπεται κατά την διάδοση ενός φορτισμένου σωματίου στο μέσο ανίχνευσης.



Σχήμα 3.6 Ανιχνευτικές διατάξεις

Η τυπική απόσταση μεταξύ γειτονικών Οπτικών Στοιχείων καθορίζεται από το μήκος διάδοσης των φωτονίων Cherenkov στον θαλασσινό νερό ή στον πάγο. Το τυπικό μήκος απορρόφησης της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας στο καθαρό θαλασσινό νερό είναι $\sim 55\text{m}$, ενώ στον πάγο $\sim 100\text{m}$ (για μήκος κύματος $\sim 400\text{nm}$).

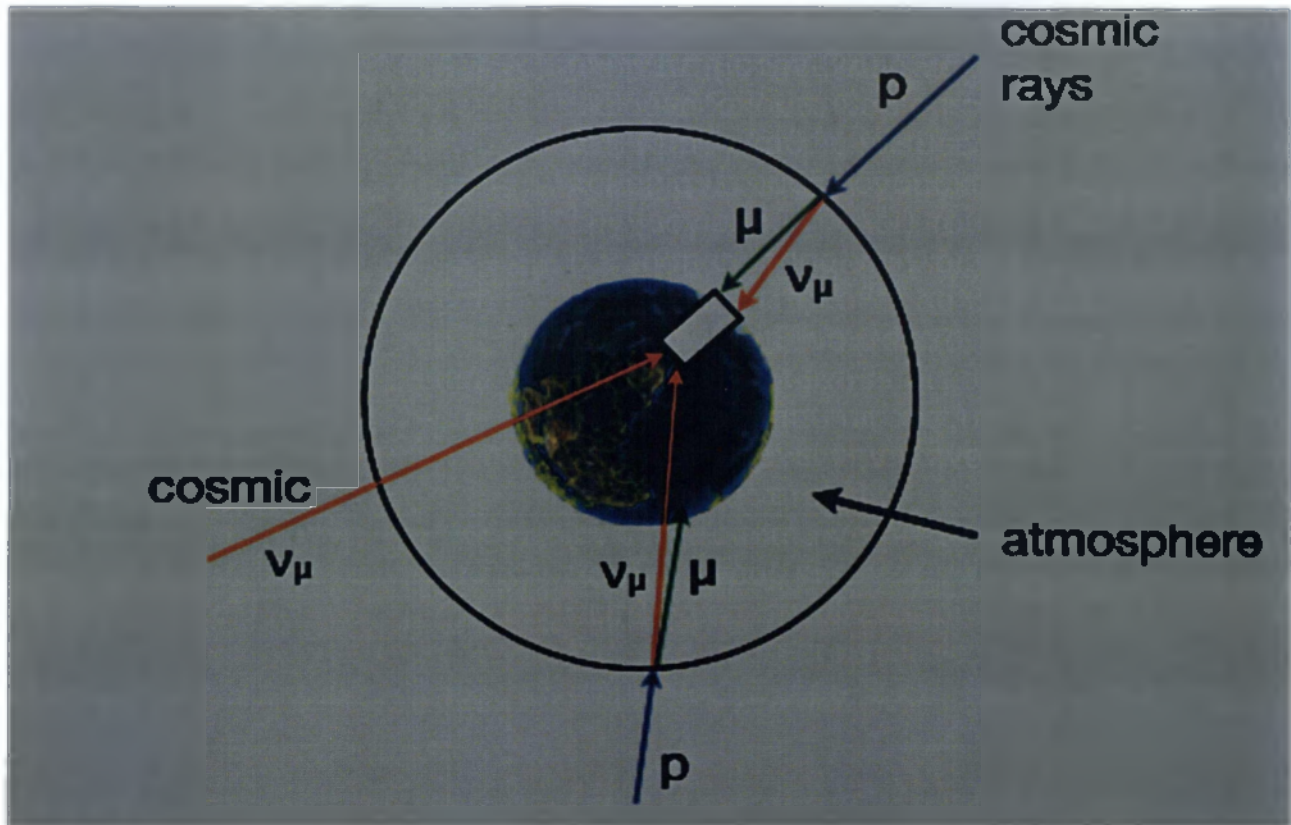
Από την άλλη μεριά στον πάγο τα οπτικά φωτόνια έχουν μήκος σκέδασης $\sim 7\text{m}$ πολύ μικρότερο από το μήκος σκέδασης $\sim 100\text{m}$ για το καθαρό θαλασσινό νερό. Αυτό έχει ως αποτέλεσμα την καλύτερη ακρίβεια στον προσδιορισμό της διεύθυνσης της τροχιάς ενός μιονίου στο θαλασσινό νερό από ότι στον πάγο. Η γωνιακή ακρίβεια ενός τηλεσκοπίου νετρίνων καθορίζεται από το μοχλικό βραχίονα (lever arm) μεταξύ των Οπτικών Στοιχείων, από την ακρίβεια με την οποία γνωρίζουμε τις θέσεις τους, καθώς και από την ακρίβεια στον προσδιορισμό του χρόνου άφιξης των φωτονίων Cherenkov στα Οπτικά Στοιχεία.

Η απαιτούμενη ακρίβεια ($\sim 1\text{ns}$) στον προσδιορισμό των χρόνων άφιξης των φωτονίων Cherenkov και η ακρίβεια ($\sim 10\text{cm}$) στον προσδιορισμό της θέσης των Οπτικών Στοιχείων (τα οποία μπορεί να μετατοπίζονται από υποθαλάσσια

ρεύματα) συνεπάγεται την χρήση μεθόδων λεπτομερούς βαθμονόμησης του ανιχνευτή στην βαθιά θάλασσα. Η βαθμονόμηση αυτή μπορεί να γίνει με χρήση μεθόδων ακουστικού εντοπισμού των επιμέρους μονάδων του βυθισμένου ανιχνευτή, καθώς και με χρήση φωτεινών παλμών που εκπέμπονται σε καθορισμένους χρόνους σε σχέση με το καθολικό ηλεκτρονικό περιοδικό σήμα συγχρονισμού (ρολόι) του ανιχνευτή.

Η χρήση φωτοπολλαπλασιαστών με μεγάλη κβαντική απόδοση και μεγάλη επιφάνεια φωτοκαθόδου βελτιώνει την ανιχνευτική ικανότητα ενός τηλεσκοπίου νετρίνων, αυξάνοντας τον ενεργό του όγκο. Επιπλέον η χρήση Οπτικών Στοιχείων που έχουν διευθυντική διακριτική ικανότητα, δηλαδή παρέχουν πληροφορία που αφορά την τροχιά του φωτονίου Cherenkov που προσπίπτει σε αυτούς, αυξάνει την ικανότητα ανακατασκευής των γεγονότων που έχει ένας ανιχνευτής νετρίνων.

Ένα τηλεσκόπιο νετρίνων πρέπει να έχει υψηλή ανιχνευτική ικανότητα σε ένα μεγάλο εύρος ενεργειών όλων των γεύσεων των νετρίνων. Η απορρόφηση των υψηλοενεργειακών νετρίνων από την Γη απαιτεί την ικανότητα ενός τηλεσκοπίου νετρίνων να ανιχνεύει κατερχόμενα μίονια ή/και καταιονισμούς σωματίων (Σχήμα 3.7)..



Σχήμα 3.7 Ανιχνευτής δευτερογενών σωματιδίων αλληλεπίδρασης νετρίνων με την ύλη.

Αυτό συνεπάγεται υψηλή ικανότητα ανίχνευσης σε μεγάλο γωνιακό εύρος που εκτείνεται και πάνω από τον ορίζοντα. Η τοποθέτηση του ανιχνευτή νετρίνων σε μεγάλο βάθος στο νερό ή στον πάγο ελαχιστοποιεί τον θόρυβο από την ροή των ατμοσφαιρικών μιονίων και παρέχει την ικανότητα ανίχνευσης μιονίων ή/και καταιονισμών που δημιουργούνται από την αλληλεπίδραση νετρίνων με μικρές ζενιθιακές γωνίες πρόσπτωσης. Επιπλέον η χρήση Οπτικών Στοιχείων που είναι στραμμένοι προς τα πάνω αυξάνει την ανιχνευτική ικανότητα για μικρές ζενιθιακές γωνίες. Από την άλλη μεριά σε ένα υποθαλάσσιο περιβάλλον με υψηλή περιεκτικότητα σε οργανικά ή ανόργανα ιζήματα, η ανιχνευτική ικανότητα των Οπτικών Στοιχείων που είναι στραμμένα προς τα πάνω μειώνεται με την πάροδο του χρόνου.

Η εγκατάσταση ενός μεγάλου ($\sim 1\text{km}^3$) τηλεσκοπίου νετρίνων σε φυσικά διαθέσιμες ποσότητες μέσου ανίχνευσης (νερό ή πάγος) απαιτεί βαθιά γνώση των ιδιοτήτων του μέσου στο οποίο θα βυθιστεί. Οι γνώση των ιδιοτήτων αυτών είναι επιτακτική για την χρήση τους σε προγράμματα προσομοίωσης της απόκρισης του ανιχνευτή στα φυσικά φαινόμενα που συμβαίνουν στον ενεργό του όγκο, καθώς και σε αλγόριθμους ανακατασκευής των παραμέτρων των φαινομένων αυτών. Ένα υποθαλάσσιο τηλεσκόπιο νετρίνων θα πρέπει να εγκατασταθεί σε θαλάσσια περιοχή κοντά στην ακτή και με τα εξής χαρακτηριστικά:

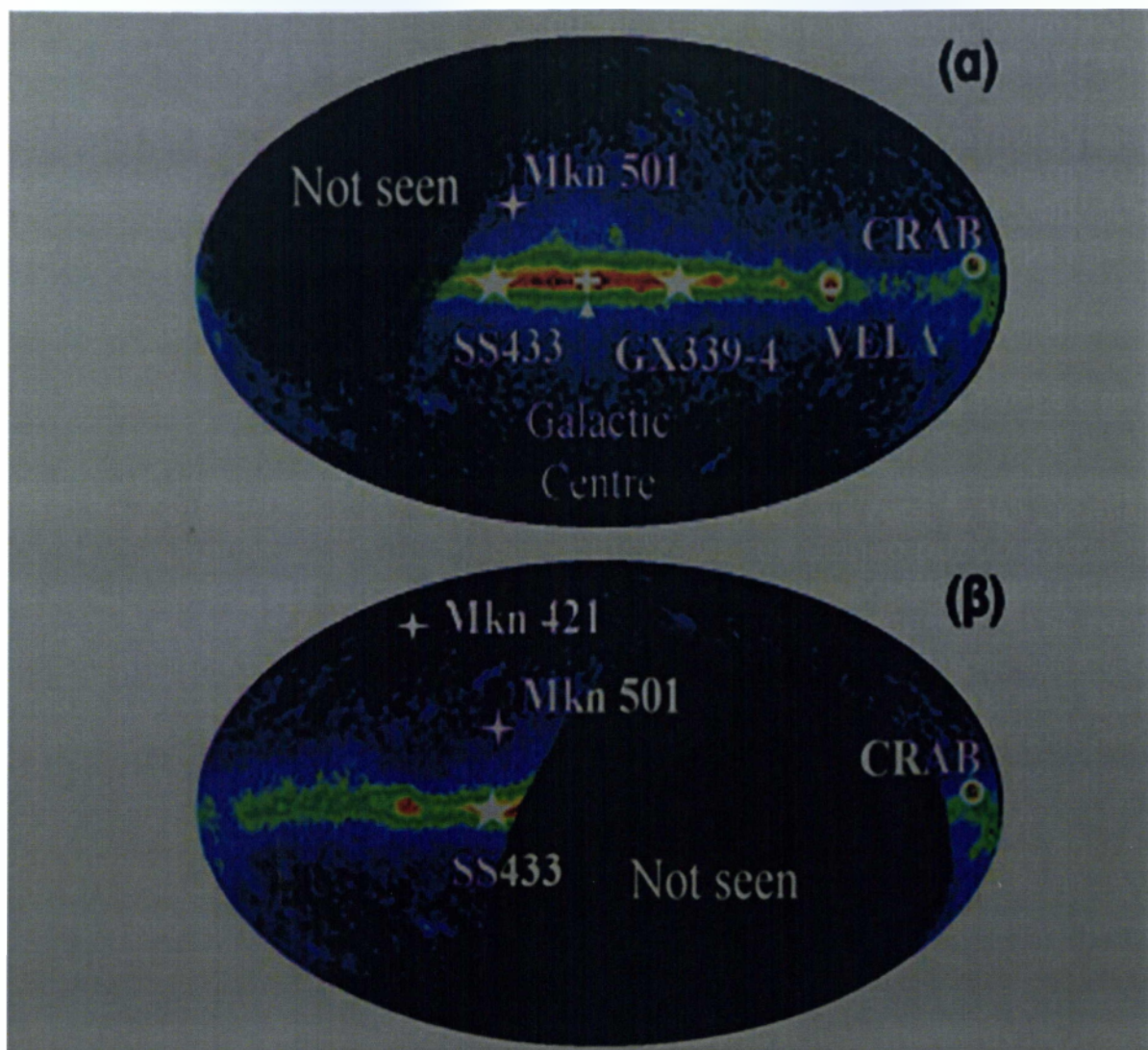
- Μεγάλο βάθος για την ελαχιστοποίηση του θορύβου που εισάγει η ροή των

ατμοσφαιρικών μιονίων,

- Χαμηλή γεωσεισμική δραστηριότητα και υποθαλάσσια ρεύματα για την αποφυγή καταστροφικών συμβάντων στην γειτονιά του ανιχνευτή,
- Χαμηλή περιεκτικότητα σε οργανικά και ανόργανα ιζήματα, τα οποία έχουν αρνητική επίδραση στις οπτικές ιδιότητες του θαλασσινού νερού και επικάθονται πάνω στους φωτοπολλαπλασιαστές με αποτέλεσμα την μείωση της ανιχνευτικής ικανότητάς τους με την πάροδο του χρόνου,
- Χαμηλή περιεκτικότητα σε οργανισμούς που εκπέμπουν φως (βιοφωταύγεια),
- Μεγάλο μήκος διάδοσης του φωτός στα οπτικά μήκη κύματος.

Η παρουσία ραδιενεργών ισοτόπων, κυρίως του ^{40}K , στο θαλασσινό νερό έχει ως αποτέλεσμα τον υψηλό ρυθμό καταμέτρησης στους φωτοπολλαπλασιαστές ενός ανιχνευτή νετρίνων. Μια τυπική τιμή αυτού του ρυθμού είναι $\sim 50\text{kHz}$ για φωτοπολλαπλασιαστές διαμέτρου $15''$ και για κατώφλι τάσης 30mV . Τα ηλεκτρονικά συστήματα επιλογής και επεξεργασίας του πειραματικού σήματος ενός τηλεσκοπίου νετρίνων πρέπει να έχουν την ικανότητα εξαγωγής του σήματος από αυτόν τον θόρυβο υποβάθρου.

Ένα μεγάλο ($\sim 1\text{km}^3$) τηλεσκόπιο νετρίνων (ICECUBE) βρίσκεται στο στάδιο της ανάπτυξης στους πάγους της Ανταρκτικής και γύρω στο έτος 2010 θα αρχίσει να λαμβάνει δεδομένα. Ένα μεγάλο τηλεσκόπιο νετρίνων στο Βόρειο Ημισφαίριο είναι απαραίτητο για την κάλυψη όλης της Ουράνιας Σφαιράς. Η Μεσόγειος θάλασσα παρέχει ένα ιδανικό περιβάλλον για την ανάπτυξη αυτού του τηλεσκοπίου. Το βαθύτερο σημείο της Μεσογείου (5300m) παρέχει την απαραίτητη προστασία του ανιχνευτή από την θόρυβο υποβάθρου των ατμοσφαιρικών μιονίων. Επιπλέον, η Μεσόγειος Θάλασσα, και κυρίως το Ιόνιο Πέλαγος, είναι μια ολιγοτροφική περιοχή, δηλαδή έχει μικρή βιολογική δραστηριότητα και μικρή ποσότητα οργανικών και ανόργανων ιζημάτων που την καθιστούν ιδανική για την εγκατάσταση ενός ανιχνευτή νετρίνων.



Σχήμα 3.8: Η περιοχή της Ουράνιας σφαίρας που καλύπτει ένα τηλεσκόπιο νετρίνων στην Μεσόγειο Θάλασσα (Σχήμα α) και στον Νότιο Πόλο (Σχήμα β). Επίσης φαίνονται και μερικές από τις γνωστές πηγές ακτίνων Χ και γάμμα.

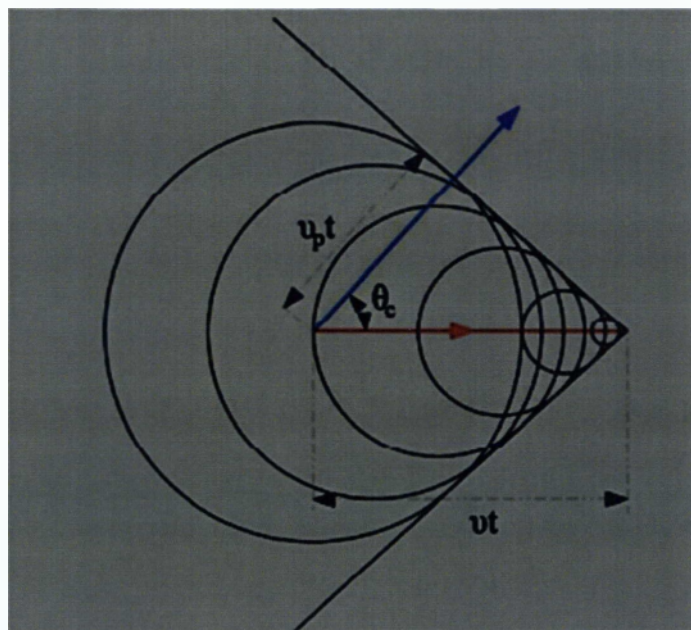
Στο Σχήμα 3.8 παρουσιάζονται οι περιοχές της Ουράνιας Σφαίρας (στο σύστημα συντεταγμένων του Γαλαξία) που θα καλύπτουν τα δύο μεγάλα τηλεσκόπια νετρίνων, το ένα στον Νότιο Πόλο και το δεύτερο στην Μεσόγειο. Είναι προφανές ότι με τον συνδυασμό αυτών των δύο τηλεσκοπίων νετρίνων καλύπτεται η Ουράνια Σφαίρα στο σύνολο της. Επιπλέον στο ίδιο Σχήμα έχουν σημειωθεί μερικές από τις γνωστές πηγές υψηλοενεργειακών πηγών ακτίνων-Χ και γάμμα, καθώς και το κέντρο του Γαλαξία.

3. 6 Ακτινοβολία Cherenkov

Η ακτινοβολία Cherenkov εκπέμπεται κατά την διάδοση ενός φορτισμένου σωματίου από το διηλεκτρικό μέσο διάδοσης όταν η ταχύτητα του σωματίου είναι μεγαλύτερη από την ταχύτητα του φωτός στο μέσο. Αν ο δείκτης διάθλασης του διηλεκτρικού μέσου συναρτηθεί του μήκους κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας είναι $n(\lambda)$, τότε η συνθήκη εκπομπής της ακτινοβολίας Cherenkov μήκους κύματος λ από το φορτισμένο σωματίο είναι:

$$v > v_p(\lambda) = \frac{c}{n(\lambda)},$$

όπου v είναι η ταχύτητα του σωματίου, $v_p(\lambda)$ η ταχύτητα του φωτός στο μέσο και c η ταχύτητα του φωτός στο κενό. Το Σχήμα 3.9 περιγράφει σχηματικά το φαινόμενο. Ο κώνος φωτός της ακτινοβολίας Cherenkov είναι ένα ηλεκτρομαγνητικό μέτωπο κύματος το οποίο δημιουργείται από την συμβολή των σφαιρικών κυμάτων που δημιουργούνται κατά μήκος της τροχιάς του φορτισμένου σωματίου από τα μόρια του διηλεκτρικού μέσου διάδοσης.



Σχήμα 3.9: Εκπομπή σφαιρικών ηλεκτρομαγνητικών παλμών κατά μήκος της τροχιάς (κόκκινη γραμμή) ενός φορτισμένου σωματίου.

Στην τελευταία περίπτωση εκπέμπεται ακτινοβολία Cherenkov όταν τα σφαιρικά

κύματα συμβάλλουν πάνω σε ένα κώνο.

Κάθε διηλεκτρικό μέσο αποτελείται από μοριακά δίπολα τα οποία προσανατολίζονται με την παρουσία ενός φορτισμένου σωματίου. Όταν το σωματίο αυτό απομακρυνθεί τα δίπολα αποπροσανατολίζονται και η αποθηκευμένη ενέργεια πόλωσης εκπέμπεται με την μορφή ενός σφαιρικού ηλεκτρομαγνητικού παλμού. Η κίνηση του φορτισμένου σωματίου στο διηλεκτρικό μέσο δημιουργεί διαδοχικούς τέτοιους παλμούς κατά μήκος της τροχιάς του. Όταν το σωματίο κινείται με ταχύτητα μικρότερη από την ταχύτητα του φωτός στο μέσο, οι σφαιρικοί ηλεκτρομαγνητικοί παλμοί δεν συμβάλουν σε κανένα σημείο του χώρου, όταν κινείται με την ταχύτητα του φωτός στο μέσο συμβάλλουν μόνο στο σημείο που βρίσκεται το σωματίο, ενώ όταν κινείται με μεγαλύτερη ταχύτητα συμβάλλουν πάνω σε ένα χαρακτηριστικό κώνο.

Η γωνία θ_c με την οποία εκπέμπονται τα φωτόνια Cherenkov σε αναφορά με την διεύθυνση κίνησης του φορτισμένου σωματίου μπορεί να υπολογιστεί από την γεωμετρία του κώνου που παρουσιάζεται στο Σχήμα ως εξής:

$$\cos \theta_c = \frac{v_p}{v} = \frac{1}{\beta n(\lambda)}, \text{ όπου } \beta = v/c.$$

Για μίονια με ενέργεια μεγαλύτερη από 10GeV, η ταχύτητα τους είναι πολύ κοντά στην ταχύτητα του φωτός στο κενό, ενώ ο δείκτης διάθλασης του νερού και για μήκος κύματος 1 420nm είναι ίσος με 1.355, οπότε η γωνία εκπομπής των φωτονίων Cherenkov είναι $\theta_c = 42.5^\circ$.

Ο αριθμός των φωτονίων Cherenkov που εκπέμπονται ανά μονάδα μήκους της τροχιάς και ανά μονάδα μήκους κύματος δίνεται από την εξίσωση:

$$\frac{dN}{dx d\lambda} = \frac{2\pi\alpha}{\lambda^2} \left(1 - \frac{1}{\beta^2 n^2(\lambda)}\right)$$

όπου

$$\alpha = 1/137.036$$

είναι η σταθερά λεπτής υφής. Με ολοκλήρωση της εξίσωσης για μήκη κύματος από 300 ως και 610 nm, όπου η κβαντική απόδοση της φωτοκαθόδου των

φωτοπολλαπλασιαστών είναι μεγαλύτερη από 1%, βρίσκεται ότι ο αριθμός των φωτονίων που εκπέμπονται ανά μονάδα μήκους τροχιάς είναι ίσος με ~ 350 φωτόνια/cm.

Η εκπομπή των φωτονίων Cherenkov υπό συγκεκριμένη γωνία ως προς την διεύθυνση της τροχιάς, δίνει την δυνατότητα ανακατασκευής της τροχιάς των μιονίων που διασχίζουν τον ενεργό όγκο ενός ανιχνευτή νετρίνων.

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 4

ΑΝΙΧΝΕΥΤΙΚΕΣ ΔΙΑΤΑΞΕΙΣ

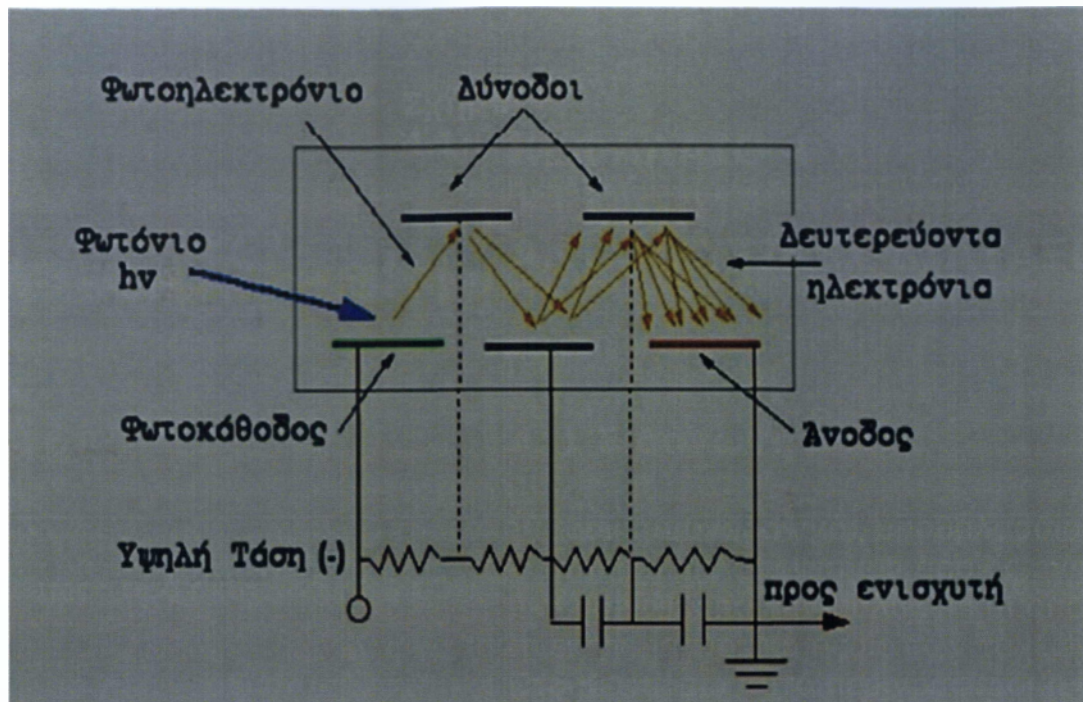
4.1 Εισαγωγή

Η βασική μονάδα ενός υποθαλάσσιου τηλεσκοπίου νετρίνων είναι ο φωτοπολλαπλασιαστής ο οποίος ανιχνεύει την ακτινοβολία Cherenkov που εκπέμπεται από την πόλωση και αποπόλωση των μορίων του νερού από το ηλεκτρομαγνητικό πεδίο των ταχέων φορτισμένων σωματιδίων.

Στο Κεφάλαιο αυτό περιγράφεται η αρχή και λειτουργία των φωτοπολλαπλασιαστών, και η στατιστική κατανομή του ύψους των παλμών τους. Επιπλέον, περιγράφεται το Οπτικό Στοιχείο του πειράματος ΝΕΣΤΩΡ.

4.2 Φωτοπολλαπλασιαστές: Αρχή και λειτουργία

Ο φωτοπολλαπλασιαστής είναι ένας ευαίσθητος ανιχνευτής ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας, σε ένα ευρύ φάσμα μήκων κύματος, από το υπεριώδες έως και το υπέρυθρο. Στο Σχήμα 4.1 φαίνεται ένα σχηματικό διάγραμμα με τα βασικά στοιχεία του φωτοπολλαπλασιαστή.



Σχήμα 4.1:

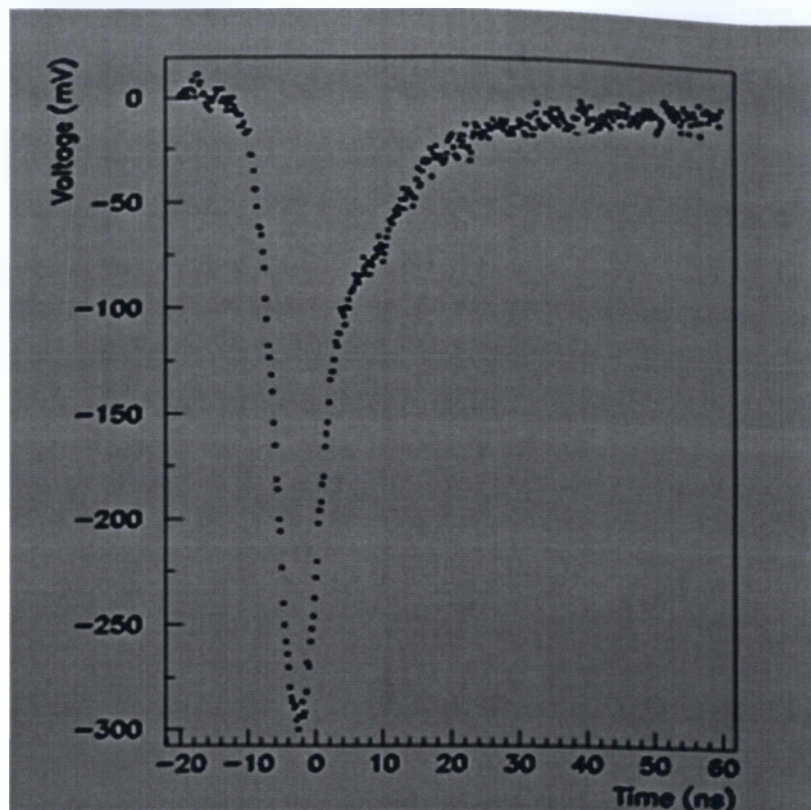
Σχηματικό διάγραμμα λειτουργίας του φωτοπολλαπλασιαστή

Τα βασικά μέρη ενός φωτοπολλαπλασιαστή, τα οποία βρίσκονται μέσα σε περίβλημα κενού αέρος, είναι:

- Η φωτοκάθοδος, πάνω στην οποία μετατρέπεται η ροή των φωτονίων σε ροή ηλεκτρονίων,
- Ο πολλαπλασιαστής των ηλεκτρονίων (electron multiplier) που αποτελείται από μία αλληλουχία από ηλεκτρόδια (δύνοδοι) πάνω στα οποία γίνεται δευτερεύουσα εκπομπή ηλεκτρονίων,
- Η άνοδος που συλλέγει την ροή των ηλεκτρονίων από τον πολλαπλασιαστή και παρέχει το σήμα εξόδου.

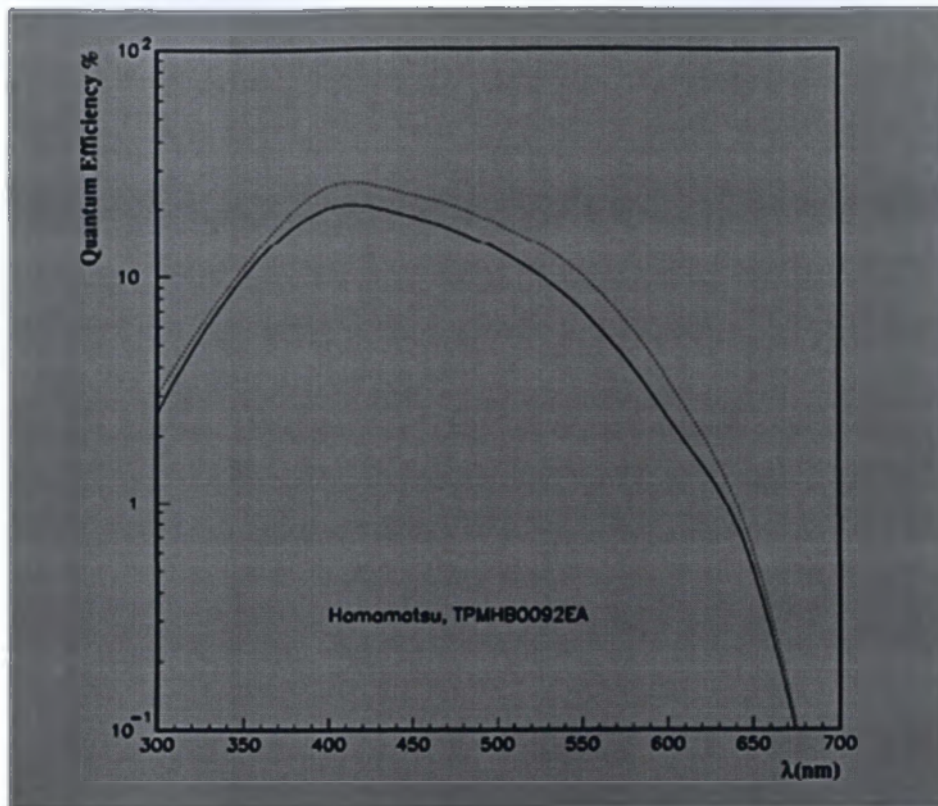
Η λειτουργία του φωτοπολλαπλασιαστή βασίζεται στο φωτοηλεκτρικό φαινόμενο. Όταν ένα φωτόνιο ενέργειας $h\nu$ προσπίπτει πάνω στη φωτοκάθοδο εκπέμπεται ένα φωτοηλεκτρόνιο το οποίο κατευθύνεται προς την πρώτη δύνοδο, υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου μεταξύ καθόδου και πρώτης δυνόδου. Ένας αριθμός δευτερευόντων ηλεκτρονίων εκπέμπονται από την πρώτη δύνοδο για κάθε ένα από τα αρχικά προσπίπτοντα φωτοηλεκτρόνια. Αυτά τα δευτερεύοντα ηλεκτρόνια κατευθύνονται επιταχυνόμενα στην συνέχεια, υπό την επίδραση του ηλεκτρικού πεδίου, σε μια δεύτερη δύνοδο κ.ο.κ. Τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται από την τελευταία δύνοδο συλλέγονται από την άνοδο. Τα ηλεκτρόνια επιταχύνονται και εστιάζονται μεταξύ των δυνόδων από κατάλληλα ηλεκτρικά πεδία που δημιουργούνται από ένα διαιρέτη τάσης κατά μήκος των ακροδεκτών τροφοδοσίας της υψηλής τάσης του φωτοπολλαπλασιαστή. Στο Σχήμα 4.2 παρουσιάζεται ένας τυπικός παλμός από φωτοπολλαπλασιαστή (μοντέλο R2018-03 της Hamamatsu) ο οποίος έχει

ψηφιοποιηθεί από ψηφιακό παλμογράφο υψηλής ευκρίνειας.



Σχήμα 4.2: Τυπικός φωτοπολλαπλασιαστή παλμός στην άνοδο

Κάθε φωτόνιο που προσπίπτει στην φωτοκάθοδο δεν οδηγεί υποχρεωτικά σε εκπομπή ενός φωτοηλεκτρονίου. Ο λόγος του μέσου αριθμού των εκπεμπόμενων φωτοηλεκτρονίων προς τον μέσο αριθμό των προσπιπτόντων φωτονίων στη φωτοκάθοδο ονομάζεται κβαντική απόδοση, q , της φωτοκαθόδου και εξαρτάται από το μήκος κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας, το υλικό κατασκευής της φωτοκαθόδου και από το πάχος της φωτοευαίσθητης επιφάνειας. Στο Σχήμα 4.3 φαίνεται η κβαντική απόδοση της φωτοκαθόδου του φωτοπολλαπλασιαστή της Hamamatsu R2018-03 σαν συνάρτηση του μήκους κύματος.



Σχήμα 4.3: Η κβαντική απόδοση (quantum efficiency) της φωτοκαθόδου του φωτοπολλαπλασιαστή R2018-03 (κατασκευής Hamamatsu) συναρτήσεως του μήκους κύματος της προσπίπτουσας ακτινοβολίας (συνεχής γραμμή). Εξαιτίας του μεγάλου μεγέθους της επιφάνειας της φωτοκαθόδου (15") παρατηρούμε μια μικρή μείωση της κβαντικής απόδοσης συγκρινόμενη με την κβαντική απόδοση (διακεκομμένη γραμμή) μικρότερων φωτοπολλαπλασιαστών των οποίων η φωτοκάθοδος είναι κατασκευασμένη από το ίδιο υλικό

Αν η μέση τιμή του αριθμού των ηλεκτρονίων που εκπέμπονται από την i th δύνοδο για κάθε ηλεκτρόνιο που προσπίπτει σε αυτή είναι μ_i , τότε ο συνολικός αριθμός M των ηλεκτρονίων που συλλέγονται από την άνοδο για κάθε προσπίπτον φωτοηλεκτρόνιο στην πρώτη δύνοδο, θα είναι:

$$M = \prod_{i=1}^N \mu_i,$$

όπου N είναι ο αριθμός των δυνόδων. Ο αριθμός M των δευτερευόντων ηλεκτρονίων για κάθε φωτοηλεκτρόνιο που εκπέμπεται από τη φωτοκάθοδο καλείται απολαβή (gain) του φωτοπολλαπλασιαστή, εξαρτάται από τη διαφορά δυναμικού μεταξύ των δυνόδων και μπορεί να πάρει τιμές μεγαλύτερες από 108. Η φωτοκάθοδος από την οποία εκπέμπονται τα φωτοηλεκτρόνια, αλλά και οι δύνοδοι που αποτελούν τον πολλαπλασιαστή των ηλεκτρονίων είναι κατασκευασμένες από κατάλληλα υλικά με μικρό έργο εξόδου, έτσι ώστε η

κβαντική απόδοση, q , της φωτοκαθόδου και η απολαβή μ για κάθε στάδιο στον πολλαπλασιασμό των ηλεκτρονίων να είναι μεγάλη.

4.3 Το Οπτικό Στοιχείο (ΟΣ) του πειράματος ΝΕΣΤΩΡ

Στο Σχήμα 4.4 παρουσιάζεται το ΟΣ του πειράματος ΝΕΣΤΩΡ σχηματικά. Το ΟΣ αποτελείται από ένα φωτοπολλαπλασιαστή διαμέτρου 15" (ή 13") που στεγάζεται σε ένα σφαιρικό γυάλινο περίβλημα Benthos, το οποίο μπορεί να αντέξει υδροστατικές πιέσεις ως και 700 ατμόσφαιρες. Για της μείωση της επίδρασης του Γήινου Μαγνητικού Πεδίου, οι φωτοπολλαπλασιαστές

περιβάλλονται από ένα κλωβό υψηλής μαγνητικής διαπερατότητας (μ -metal).



Σχήμα 4.4 Οπτικό Στοιχείο.

Η οπτική σύζευξη του φωτοπολλαπλασιαστή με το γυάλινο περίβλημα επιτυγχάνεται με γλυκερίνη ή σιλικόνη, η οποία σφραγίζεται από ένα διαφανές παρέμβυσμα κολλοειδούς πήγματος σιλικόνης. Η υψηλή τάση που τροφοδοτεί κάθε φωτοπολλαπλασιαστή δημιουργείται από ένα μετασχηματιστή συνεχούς ρεύματος μέσα στο γυάλινο περίβλημα. Το ηλεκτρικό σήμα από το φωτοπολλαπλασιαστή, η τάση των 24V που τροφοδοτεί τον μετασχηματιστή συνεχούς ρεύματος και τα σήματα ελέγχου και παρακολούθησης μεταδίδονται κατά μήκος ενός υβριδικού καλωδίου στο ηλεκτρονικό σύστημα του ορόφου, μέσα στη κεντρική σφαίρα τιτανίου. Το υβριδικό καλώδιο συνδέεται με το οπτικό στοιχείο και την σφαίρα τιτανίου με ένα 7-pin σύνδεσμο. Στο πίσω μέρος του ΟΣ και γύρω από την βάση του φωτοπολλαπλασιαστή, τοποθετούνται ένας μετασχηματιστής συνεχούς ρεύματος ο οποίος παρέχει την υψηλή τάση λειτουργίας της λυχνίας, ένας μετρητής εσωτερικής πίεσης, καθώς και πυριτία (Silica) για την απομάκρυνση τυχόν παραμένουσας υγρασίας στο

εσωτερικό του γυάλινου περιβλήματος. Όλα τα στοιχεία είναι προσαρμοσμένα πάνω σε ένα δίσκο αλουμινίου που χρησιμεύει και σαν απαγωγέας θερμότητας.

4.4 Ο φωτοπολλαπλασιαστής

Η λειτουργία ενός υποθαλασσίου ανιχνευτή νετρίνων όπως ο ΝΕΣΤΩΡ εξαρτάται από την ποιότητα και την σωστή λειτουργία των φωτοπολλαπλασιαστών (PMT) του.

Για ένα τέτοιο ανιχνευτή οι PMTs που θα υιοθετηθούν πρέπει να πληρούν συγκεκριμένες προδιαγραφές:

- Υψηλή κβαντική απόδοση της φωτοκαθόδου, ούτως ώστε ο ανιχνευτής να έχει υψηλή ανιχνευτική αποδοτικότητα, υψηλή αποδοτικότητα ανακατασκευής και χαμηλό ενεργειακό κατώφλι,
- Μεγάλη γωνιακή κάλυψη, ούτως ώστε κάθε Οπτικό Στοιχείο να καλύπτει την μέγιστη στερεά γωνία ανίχνευσης φωτονίων,
- Καλή χρονική απόκριση και υψηλή ανάλυση στον προσδιορισμό του αριθμού των φωτονίων που ανιχνεύει,
- Χαμηλό θερμοϊονικό θόρυβο,
- Καλή γραμμικότητα της απόκρισης σε ένα μεγάλο δυναμικό εύρος σήματος,

Για την αποφυγή μετάδοσης υψηλών τάσεων μέσω των υβριδικών καλωδίων στην θάλασσα, η υψηλή τάση των φωτοπολλαπλασιαστών παράγεται τοπικά στο Οπτικό Στοιχείο με χρήση ρυθμιζόμενων μετασχηματισμών συνεχούς ρεύματος (τύπος PS2000 κατασκευής THORNE-EMI) που τροφοδοτούνται με συνεχής τάση 24V dc και παρέχουν τάση εξόδου ως και 2500V dc. Η υψηλή τάση εξόδου ρυθμίζεται μέσω μιας τάσης ελέγχου (0-10V), που στέλνεται από το Housekeeping Board μετά από εντολή του συστήματος ελέγχου της ξηράς, και παρακολουθείται μέσω διαιρετών τάσεως εντός του μετασχηματιστή. Η τάση τροφοδοσίας των 24V, η τάση ελέγχου και η τάση παρακολούθησης δρομολογούνται μέσω των υβριδικών καλωδίων από τα οποία επίσης στέλνεται και το σήμα εξόδου των φωτοπολλαπλασιαστών στην σφαίρα τιτανίου.

- Σταθερότητα της απόδοσης για μεγάλα χρονικά διαστήματα.
- Οι προδιαγραφές αυτές πληρούνται από την λυχνία HR8055, διαμέτρου 13" (με 15 δυνόδους) κατασκευής Hamamatsu. Επίσης η νεότερης κατασκευής λυχνία R8055-01, διαμέτρου 13" (με 10 δυνόδους) πληρεί τις προδιαγραφές, παρέχοντας καλύτερη χρονική απόκριση και ενεργειακή ανάλυση. Η φωτοκάθοδος και στους δύο τύπους φωτοπολλαπλασιαστών αποτελείται από επίστρωση διαλκαλικού (bialkali) μίγματος το οποίο έχει υψηλή φασματική ευαισθησία σε ευρεία περιοχή που κυμαίνεται από 300 ως και 650nm, χαμηλή θερμοϊονική εκπομπή και τυπική τιμή της κβαντικής απόδοσης 20%. (Σχήμα 4.5).

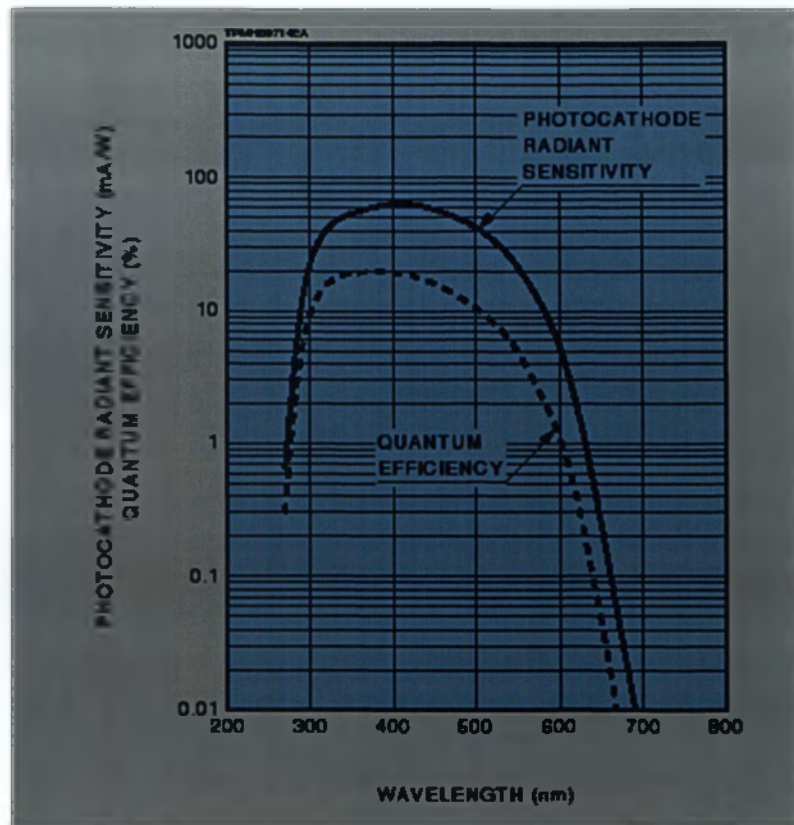
Ο φωτοπολλαπλασιαστής (Photo-Multiplier Tube-PMT) αποτελεί ένα όργανο με ιδιαίτερη ευαισθησία στην ανίχνευση και μέτρηση του φωτός. Στην έξοδο του λαμβάνεται ένα ηλεκτρικό σήμα ανάλογο με την ένταση του φωτός που προσπίπτει σε αυτόν. Ένα από τα κύρια χαρακτηριστικά του είναι η ικανότητα του να ανιχνεύει πολύ χαμηλές εντάσεις φωτός, ακόμη και μεμονωμένων φωτονίων καθώς και να ενισχύει το παραγόμενο ηλεκτρικό ρεύμα με μεγάλη ταχύτητα. Εν συντομία, το όργανο αυτό αποτελείται από ένα γυάλινο σωλήνα μέσα στον οποίο υπάρχει υψηλό κενό. Φως προσπίπτει στη μια επιφάνεια του σωλήνα και ηλεκτρικό σήμα εξέρχεται μέσω ενός ηλεκτροδίου στο άλλο άκρο του. Στο ίδιο άκρο υπάρχουν και τα ηλεκτρόδια τροφοδοσίας του συγκεκριμένου οργάνου με τις τάσεις που απαιτούνται από τις προδιαγραφές του. Το φως προσπίπτει στη φωτοκάθοδο (λεπτό υμένιο φωτοευαίσθητου υλικού). Σύμφωνα με το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο εκπέμπονται ηλεκτρόνια. Τα ηλεκτρόνια αυτά επιταχύνονται σε μια μεταλλική πλάκα η οποία βρίσκεται σε θετικό δυναμικό ως προς την φωτοκάθοδο. Η επιφάνεια αυτή ονομάζεται πρώτη δύνοδος (D1) και είναι επιστρωμένη με υλικό χαμηλού έργου εξαγωγής έτσι ώστε για κάθε προσπίπτον ηλεκτρόνιο να εξέρχονται περισσότερα του ενός ηλεκτρόνια. Με τη διαδικασία αυτή επιτυγχάνεται ο πολλαπλασιασμός του αριθμού των ηλεκτρονίων. Στη συνέχεια αυτά τα ηλεκτρόνια (δευτερογενή ηλεκτρόνια) επιταχύνονται από το ηλεκτρικό πεδίο σε μια δεύτερη δύνοδο. Η ίδια διαδικασία επαναλαμβάνεται αρκετές φορές. Ο τελικός αριθμός των ηλεκτρονίων που προσπίπτουν στην έξοδο είναι αρκετά μεγάλος. Το ηλεκτρικό σήμα του φωτοπολλαπλασιαστή είναι εύκολα μετρήσιμο. Η ενέργεια των πρωτογενών ηλεκτρονίων καθορίζεται από τη διαφορά δυναμικού ανάμεσα στις δυο διαδοχικές δυνόδους. Ο λόγος του αριθμού των δευτερογενών προς τον αριθμό των πρωτογενών ηλεκτρονίων σε κάθε δύνοδο εξαρτάται από την ανωτέρω ενέργεια και τις ιδιότητες της επιφάνειας.

Το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο ανακαλύφθηκε από τον Hertz το 1887, κατά την διάρκεια των πειραμάτων του για την διάδοση ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων. Παρατήρησε, ότι εύκολα εμφανιζόταν σπινθήρας στο διάκενο μεταξύ δύο ακροδεκτών αν αυτοί φωτιζόντουσαν με φως παρά όταν οι ακροδέκτες ήταν σε σκότος. Παρατήρησε επίσης ότι ο αρνητικός ακροδέκτης ήταν πιο ευαίσθητος από τον θετικό ακροδέκτη.

Το **φωτοηλεκτρικό φαινόμενο** είναι μια κβαντική διεργασία κατά την οποία απελευθερώνονται ηλεκτρόνια από μια επιφάνεια αγωγού όταν προσπέσει σε αυτή ηλεκτρομαγνητική ακτινοβολία *συχνότητας* τέτοιας ώστε τα ηλεκτρόνια να κατορθώσουν να υπερπηδήσουν το φράγμα δυναμικής ενέργειας που τα συγκρατεί στην επιφάνεια αυτή. Τα ηλεκτρόνια που εκπέμπονται μπορούν να χρησιμοποιηθούν για να παραχθεί ηλεκτρικό ρεύμα.

Εφαρμογές του φωτοηλεκτρικού φαινομένου απαντώνται στα φωτοκύτταρα ή φωτοστοιχεία, τα φωτοβολταϊκά στοιχεία, τα ηλιακά στοιχεία κ.ά.

Το φωτοηλεκτρικό ρεύμα αυξάνει ανάλογα με την ένταση της προσπίπτουσας ακτινοβολίας. Στην συνέχεια ανακαλύφθηκαν και άλλα πειραματικά δεδομένα που αφορούσαν το φωτοηλεκτρικό φαινόμενο.



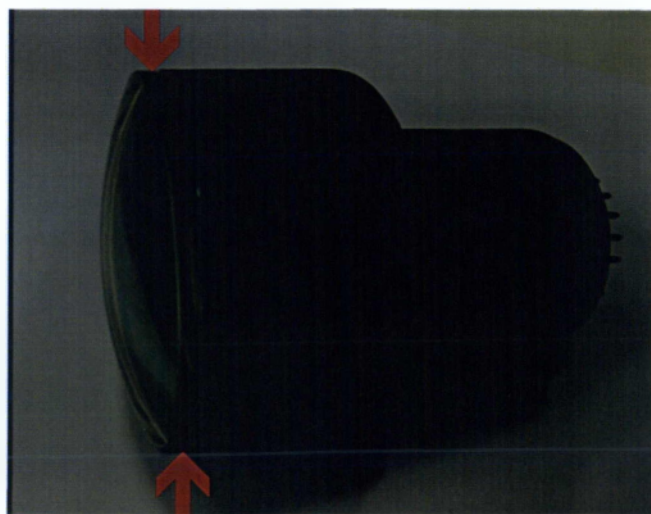
Σχήμα 4.5
Αποτελεσματικότητα φωτοπολλαπλασιαστή 13".

ΚΕΦΑΛΑΙΟ 5

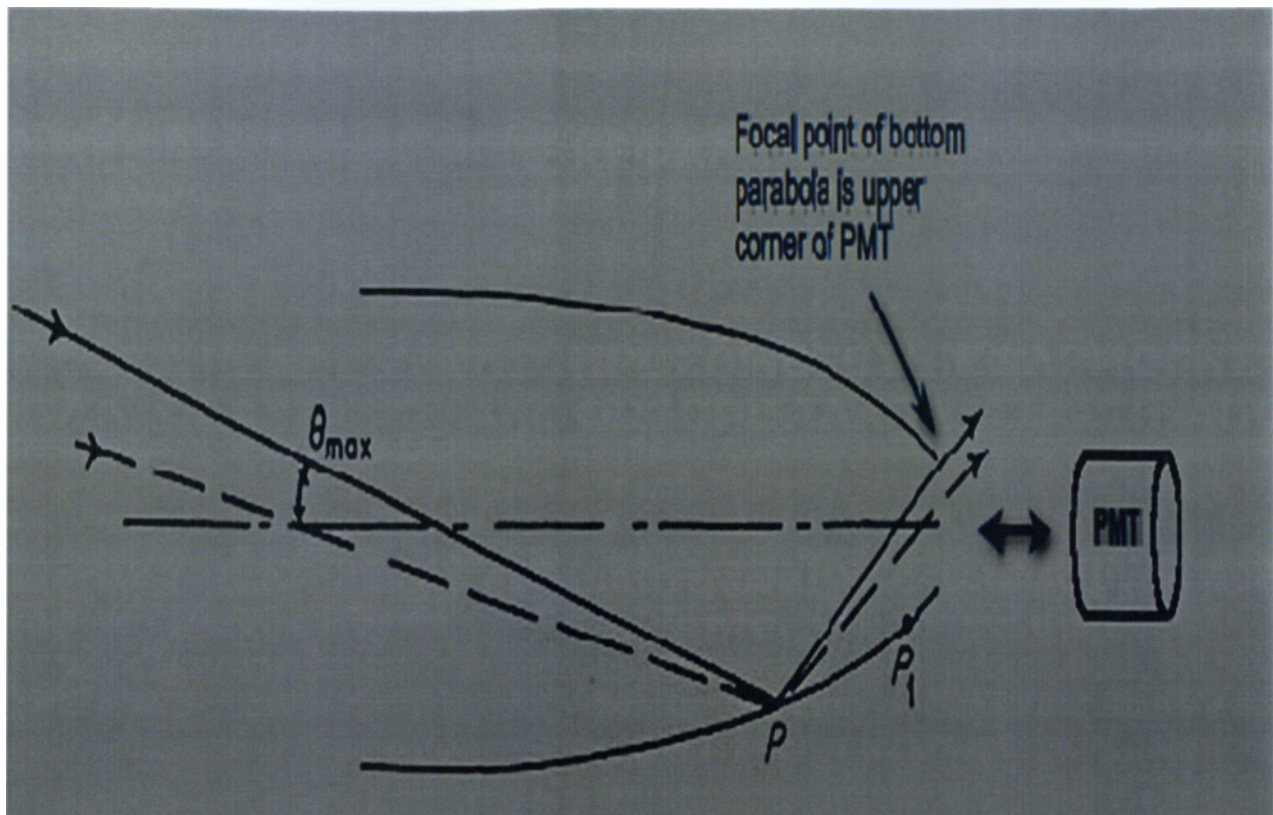
ΠΡΟΣΟΜΟΙΩΣΗ ΕΦΑΡΜΟΓΗΣ ΚΩΝΟΥ WINSTON ΣΕ ΦΩΤΟΠΟΛΛΑΠΛΑΣΙΑΣΤΗ-ΑΠΟΤΕΛΕΣΜΑΤΑ

5.1 Ο κώνος Winston ως μέσο αύξησης της οπτικής ικανότητας του ανιχνευτή

Κίνητρο της παρούσας εργασίας αποτέλεσε η ανάγκη να αυξηθεί η συλλογή του φωτός των ήδη υπάρχοντων φωτοπολλαπλασιαστών έτσι ώστε να αποφευχθεί η αγορά άλλων μεγαλύτερων και πιο ακριβών φωτοπολλαπλασιαστών. Για το λόγο αυτό σχεδιάστηκε ένας κώνος Winston (Σχήμα 5.1). Ο κώνος αυτός αποτελεί ένα στοιχείο συλλογής φωτός. Προσαρμόζεται στην επιφάνεια του φωτοπολλαπλασιαστή και έχει ως αποτέλεσμα να συλλέγει το μέγιστο αριθμό συγκέντρωσης του φωτός. Σχεδιάζεται ώστε σχεδόν όλα τα προσπίπτοντα φωτόνια έως μια συγκεκριμένη γωνία (γωνία αποδοχής) να συλλέγονται από τον φωτοπολλαπλασιαστή, όπως φαίνεται στο Σχήμα 5.2.



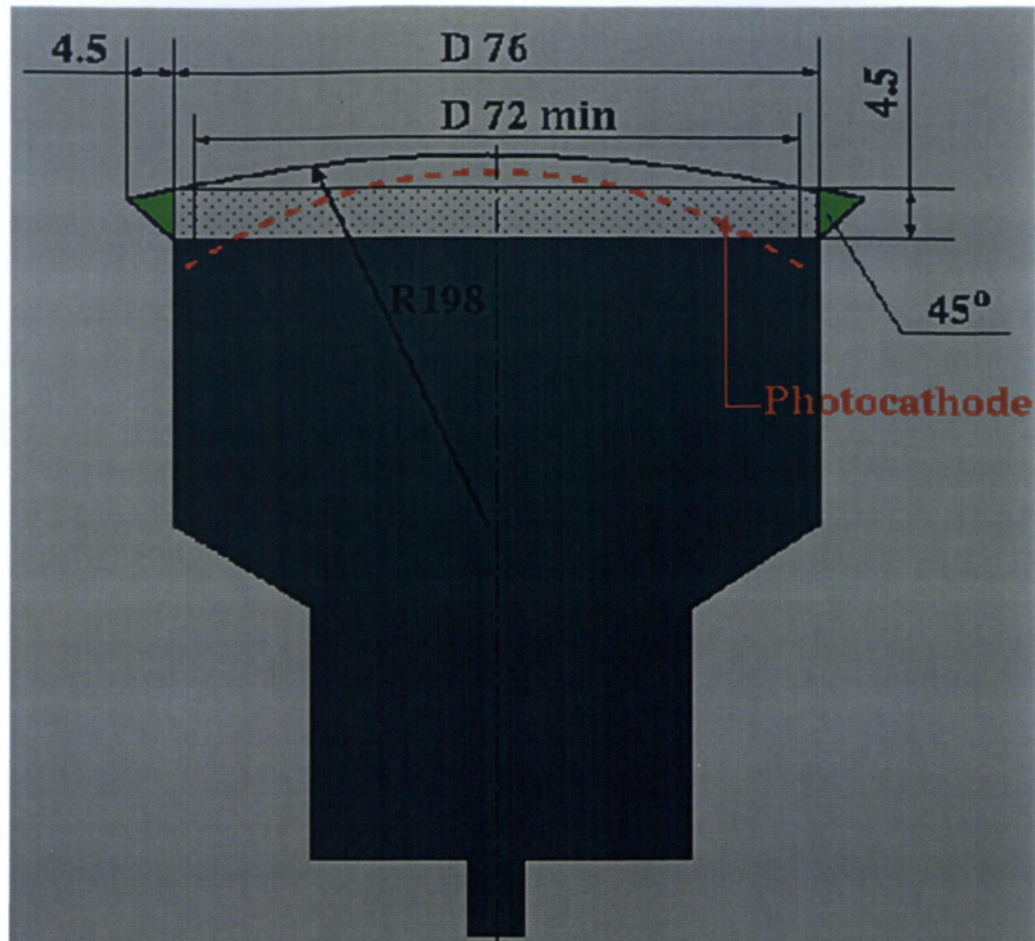
Σχήμα 5.1 Δαχτυλίδι ανάκλασης (κώνος Winston) προσαρμοσμένο σε οπτικό στοιχείο.



Σχήμα 5.2 Γεωμετρία ενός κώνου Winston. Οι προσπίπτουσες ακτίνες των οποίων η γωνία σε σχέση με τον άξονα του κώνου είναι μικρότερη από θ_{max} εστιάζονται μέσα στο φωτοπολλαπλασιαστή.

Σε πρώτο στάδιο για να ελέγξουμε την αξιοπιστία των αποτελεσμάτων μας, χρησιμοποιήθηκε ένας φωτοπολλαπλασιαστής διαμέτρου 3 ιντσών τύπου Photonis XP53B20, ιδίου τύπου με αυτόν που χρησιμοποιείται στο πείραμα του κυβικού χιλιομέτρου (Σχήμα 5.3). Ως πηγή φωτός χρησιμοποιήθηκε ένα λέιζερ με μήκος κύματος $\lambda = 405 \text{ nm}$.

Σχήμα
5.3



Αναλυτικό σχέδιο του φωτοπολλαπλασιαστής 3 ιντσών, τύπου Photonis XP53B20.

5.2 Εφαρμογή του προγράμματος Litrani για την προσομοίωση του κώνου Winston

Το πρόγραμμα Litrani (**L**ight **T**Ransmission in **AN**isotropic media) είναι ένα πρόγραμμα προσομοίωσης της διάδοσης του φωτός σε ιστροπικό ή ανισοτροπικό μέσο. Το πρόγραμμα εκτελείται σε περιβάλλον ROOT. Στο συγκεκριμένο πρόγραμμα δεν δύναται να τοποθετηθεί μια γεωμετρία μέσα σε μια άλλη. Κάθε σχήμα κατασκευάζεται από διαφορετικά υλικά. Η διηλεκτρική σταθερά καθώς και το μήκος απορρόφησης εξαρτώνται από το μήκος κύματος. Κάθε επιφάνεια ενός όγκου μπορεί να είναι μερικώς ή ολικώς σε επαφή με μια άλλη επιφάνεια ενός άλλου όγκου.

Το ROOT αποτελεί ένα πλαίσιο επεξεργασίας δεδομένων, γεννημένο στο CERN, για τις ανάγκες της Φυσικής Υψηλών Ενεργειών. Ο κύριος σκοπός του εστιάζεται στα ακόλουθα:

- **αποθήκευση δεδομένων**. Σε ένα αρχείο τύπου ROOT μπορεί κάποιος να

σώσει τα δεδομένα του ή οποιοδήποτε αντικείμενο σε C/C++. Το πρόγραμμα επιτρέπει την γρήγορη επεξεργασία μεγάλου όγκου δεδομένων.

- **πρόσβαση σε πληροφορίες.** Τα δεδομένα που έχουν αποθηκευτεί σε ένα ή περισσότερα αρχεία ROOT μπορούν εύκολα να είναι προσβάσιμα από το PC, το διαδίκτυο ή από συστήματα διακίνησης πληροφοριών μεγάλης εμβέλειας, π.χ. GRID. Τα "δένδρα" πολλών αρχείων ROOT μπορούν να ταξινομηθούν και να γίνουν προσβάσιμα ως ένα μοναδικό αντικείμενο, επιτρέποντας με αυτόν τον τρόπο την επανάληψη (loop) μέσα σε ένα μεγάλο μέγεθος πληροφοριών.
- **επεξεργασία πληροφοριών.** Δυναμικά μαθηματικά και στατιστικά εργαλεία παρέχονται για την επεξεργασία των δεδομένων. Η διαχείριση των πληροφοριών γίνεται με χρήση των εφαρμογών της γλώσσας C++. Δεδομένα μπορούν επίσης να δημιουργηθούν ακολουθώντας κάθε στατιστική κατανομή, έτσι ώστε περίπλοκα συστήματα να μπορούν να προσομοιωθούν.
- **Απεικόνιση δεδομένων.** Τα δεδομένα απεικονίζονται σε ιστογράμματα και διαγράμματα. Τα γραφήματα υψηλής ευκρίνειας αποθηκεύονται συνήθως σε μορφή PDF.
- **Εφαρμογές αλληλεπίδρασης.** Για να αλληλεπιδράσει ο χρήστης με το πρόγραμμα χρησιμοποιούνται οι εντολές της C/C++ ή κώδικας σε γλώσσα Python.

5.3 Εγκαθιστώντας το πρόγραμμα Litraní σε περιβάλλον Linux

Το πρόγραμμα προσομοίωσης μπορεί να εγκατασταθεί τόσο σε περιβάλλον Windows όσο και σε περιβάλλον Linux. Στην παρούσα μελέτη εργαστήκαμε σε περιβάλλον Linux. Τα βήματα που ακολουθήσαμε για την εγκατάσταση είναι τα ακόλουθα

- Κατασκευάστηκε ένα αρχείο "rootdev", το οποίο διαδραματίζει τον ίδιο ρόλο με το Litraní.
- Στο αρχείο αυτό δημιουργούνται τρεις υποφακέλοι: "bin", "lib" και "include".
- Ορίστηκε μια νέα μεταβλητή με την ονομασία ROOTDEV στο αρχείο .cshrc, με βάση την εντολή:

```
setenv ROOTDEV /home/dap1xa177/mnt/gentit/rootdev
```

- προστεθηκε το \$ROOTDEV/bin συμφωνα με την εντολη:

```
set path=($path $ROOTDEV/bin)
```

- και το `$ROOTDEV/lib` στο `LD_LIBRARY_PATH`

Στη συνέχεια εγκαταστάθηκε το Litrani. Ο φάκελος που δημιουργήθηκε περιείχε 10 υποφακέλους:

-“Intro_bin”

-“Intro_lib”

-“Intro_include”

-“database”

-“FitMacros”.

-“Macros”

-“TwoPad”. Στο φάκελο αυτό βρίσκονται τα αρχεία κατασκευής. Πρέπει να εκτελεσθούν οι εντολές: **gmake clean**

gmake

gmake install

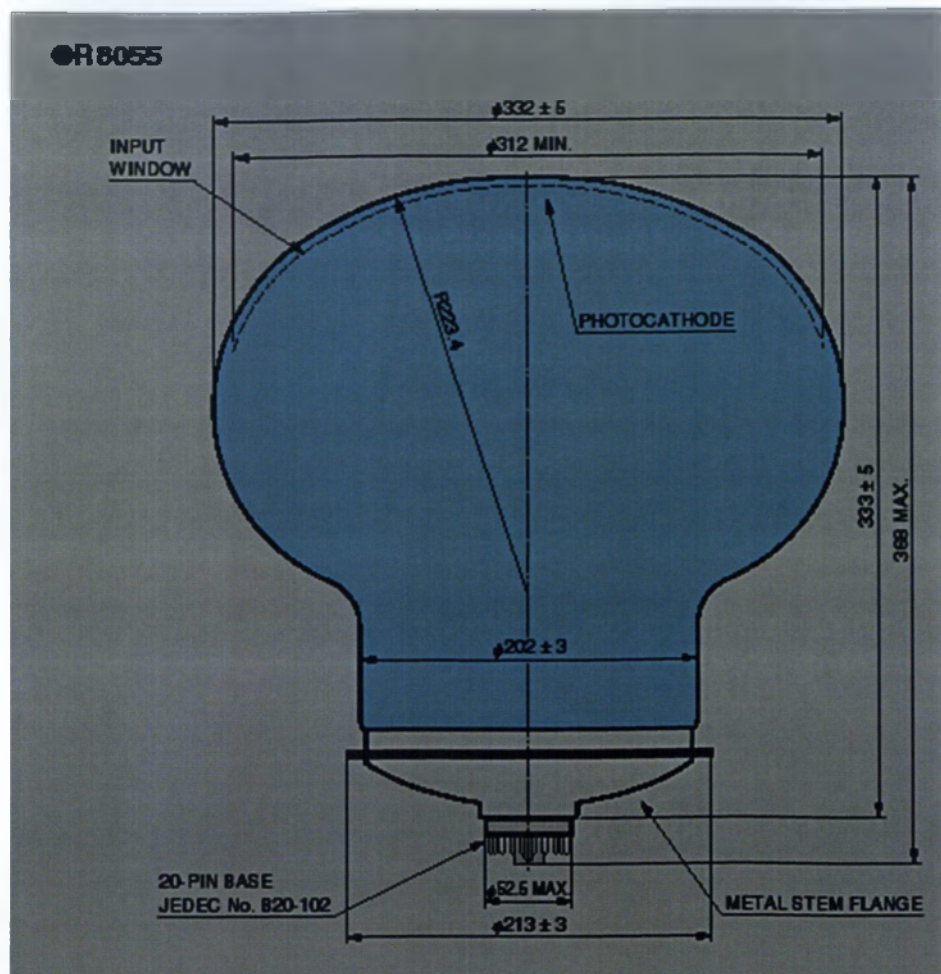
-“SplineFit”. Οι παραπάνω εντολές πρέπει επίσης να εκτελεσθούν και στο συγκεκριμένο φάκελο καθώς επίσης και στους ακόλουθους δυο υποφακέλους.

-“litrani”

-“VisuLitrani”

5.4 Προσομοίωση ανιχνευτικού κώνου πάνω σε φωτοπολλαπλασιαστή για την ενίσχυση της ανιχνευτικής του ικανότητας (Πρόγραμμα σε C)

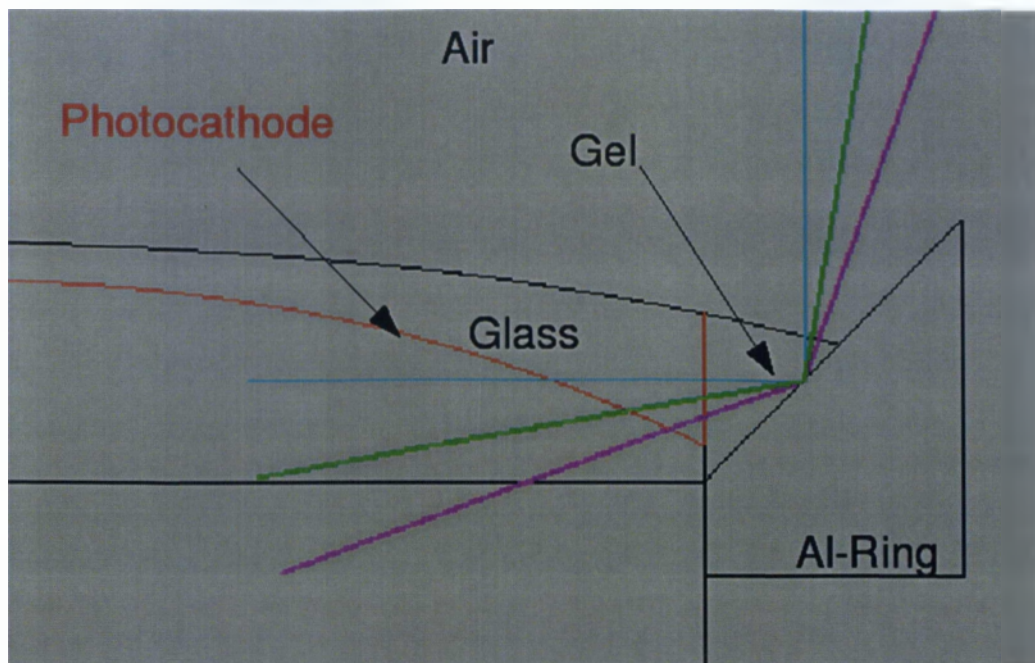
Ο σκοπός της παρούσας εργασίας ήταν η προσομοίωση ενός κώνου ενίσχυσης του φωτός πάνω σε ένα φωτοπολλαπλασιαστή τύπου R8055 της εταιρίας Hamamatsu. Ο συγκεκριμένος φωτοπολλαπλασιαστής έχει διάμετρο 13 ίντσες και θα χρησιμοποιηθεί στην πόνηση του ανιχνευτή νετρίνων στο πείραμα του Νέστωρ στην Πύλο Μεσσηνίας τον Ιούνιο του 2015. Οι διαστάσεις του φαίνονται στο Σχήμα 5.4.



Σχήμα 5.4 Διαστάσεις του φωτοπολλαπλασιαστή R8055 (σε mm).

Αρχικά σχεδιάστηκε ένας κώνος σύμφωνα με τις διαστάσεις του φωτοπολλαπλασιαστή.

Έπειτα για να προσομοιωθεί ο κώνος Winston κατασκευάστηκε το ακόλουθο πρόγραμμα. Σε αυτό έχει εισαχθεί ο φωτοπολλαπλασιαστής, όπως καθορίζεται από τις διαστάσεις του καθώς και τα ανιχνευτικά του χαρακτηριστικά (quantum efficiency). Πάνω στον φωτοπολλαπλασιαστή έχει σχεδιαστεί ένα σχήμα κωνικό με τις διαστάσεις του κώνου Winston, όπως αυτές υπολογίστηκαν από τη θεωρία. Η συνολική αυτή επιφάνεια σκανάρεται με ένα λέιζερ για γωνίες από 0 έως 180 μοίρες. Η όλη διάταξη φαίνεται στο ακόλουθο σχήμα (Σχήμα 5.5).



Σχήμα 5.5 Η φωτοκάθοδος του φωτοπολλαπλασιαστή απεικονίζεται με κόκκινο χρώμα. Ο κώνος αλουμινίου έχει προσαρμοστεί ώστε να συλλέγεται το φως που προσπίπτει στα άκρα του PMT. Η προσαρμογή αυτή γίνεται με ένα ειδικό gel.

```

{
char *name    = "winston_cone_simulation";
char *listing = "winston_cone_simulation";
char *upcom   = "simulate an expansion cone";
char *downcom = "for 13" Hamamatsu PMT detector";
gROOT->ProcessLine(".x
InitLitrani.C(8,name,listing,upcom,downcom,kFALSE,kFALSE,kTRUE)");
//
// arguments of InitLitrani:
//

```

```

// size    = 0 | 1 | 2 | 3 according to the size you want for the canvas
// name    name of the produced ROOT file (without ".root")
// listing name of the listing file (without ".lis")
// upcom   name of the comment appearing on top left of canvas
// downcom name of the comment appearing on bottom left of canvas
// otherseq true if one wants an other sequence of random numbers at each
new launching
// indebug true if one wants to run Litrani2 in debug mode
// WithDate if true, appends date and time to name of root file and name of
listing

// (1) - Material PbWO4 is treated as negativ birefringent, with also an
anisotropic
//      absorption length.
// (2) - The shape of the crystal is the one of a CMS crystal.
// (3) - "The optical axis" is parallel to Ox (move it if you will).
// (4) - The beam of photons is polarized parallel to Ox or parallel to Oy or
parallel
//      to Oz, at will.
//
gLit->SetPrintFreq(50000);
//
// The setup is composed of a crystal of PbWO4, of shape TS8PTS, on top of a
TSBRIK made
//of air and containing a source of light. The source of light is elliptical, the axis
of
//the beam is parallel to the normal to the ellipse. The aperture of the beam is
2 degrees.
//On top of the crystal is an other TSBRIK made of air having on top of it a
phototube, of
//shape TSCYL.
// This setup is intended to simulate the kind of apparatus used by opticians
to measure
//transmission.
//
// Following fits are used in this macro:
// - "AbsLengthTensor_PbWO4__000"
// - "AbsLengthTensor_PbWO4__001"

```

```

// - "DielTensor_PbWO4__000"
// - "DielTensor_PbWO4__002"
// - "RefrIndex_Sodocal"
// - "QuantumEff_XP2020"
// These fits have been declared nowhere! So they will be searched and found
in the
//"database" SplineFitDB.rdb
//
// To know how to define your own fits, please read the documentation about
SplineFit at:
//
// ---> http://gentit.home.cern.ch/gentit/splinefit/
//
//
// BEGIN of code
//
// Material "Air" is declared, with magnetic permeability fixed at 1.0,
absorption length
//fixed at 10000 cm, index of refraction fixed at 1.0. Nothing depends upon
wavelength.
  TOpticMaterial *water;
  water = new TOpticMaterial("Water","Water",kFALSE,1.33,10000.0);
  water->IsIsotropic(1.0);
//

// Definition of the material sodocal, the window of the Phototube. It has an
absorption
//length of 1000 cm (we have not been able to find the true values for the
absorption
//length of sodocal), a magnetic permeability of 1.0. It is optically isotropic,
with an
//index of refraction varying as a function of wavelength by the fit
"RefrIndex_Sodocal"
  TOpticMaterial *sodocal;
  sodocal = new TOpticMaterial("Sodocal","Sodocal",kFALSE,1.0,1000.0);
  sodocal->IsIsotropic("RefrIndex_Sodocal");
//
// Definition of the revetment "TotAbsorbing", giving only the 1st 2

```

arguments. When the

//other arguments 3 to 8 are not given, following default values are assumed :

//

// (3) - nameMat = "none" : no slice material between face and revetment.

// (4) - diffus = 0.0 : Reflecting, not diffusing. Irrelevant because of (8).

// (5) - Rindex = 2.0 : Real part of index. Irrelevant because of (8).

// (6) - Iindex = 6.0 : Imaginary part of Index. Irrelevant because of (8).

// (7) - Mu = 1.0 : Magnetic permeability. Irrelevant because of (8).

// (8) - supplAbs = 1.0 : supplementary absorption of 100%.

//

// When a photon reaches such a revetment, it is absorbed in any case, it has no chance

//neither of making a total reflection (there is no slice of material between shape and

//revetment) nor of being reflected by the revetment (because the revetment has a

//supplementary absorption of 100%).

TRvetment *totabsorbing;

totabsorbing = new TRvetment("TotAbsorbing","Totally absorbing revetment");

//

// Geometry

//

const Double_t zero = 0.0;

const Double_t deux = 2.0;

//

//

// TSCYL describing the window of the phototube.

const Double_t tube_r = 2.2; //radius of the phototube

const Double_t tube_dz = 0.2; //half height of the cylinder building the window of PM

//

Double_t laser_z; //translation in z of TSBRIK with light source

Double_t gap_z; //translation in z of air gap

```

Double_t tube_z;          //translation in z of phototube
laser_z = - crys_dz - laser_dz;
gap_z = crys_dz + gap_dz;
tube_z = crys_dz + deux*gap_dz + tube_dz;

// The shape containing the source of light is assumed to be a TSBRIK. It is
made of Air,
//and covered with a totally absorbing revetment, except for the face in
contact with the
//crystal.
TSBRIK *laserbrick;
laserbrick = new TSBRIK("laserbrick","laserbrick","Air","TotAbsorbing",
                        laser_dx,laser_dy,laser_dz);

// The air gap is assumed to be a TSBRIK, broader than the crystal. It is made
of Air,
//and covered with a totally absorbing revetment, except for the face in
contact with the
//crystal and the part of the face in contact with the window of the phototube.
TSBRIK *gapbrick;
gapbrick = new TSBRIK("gapbrick","gapbrick","Air","TotAbsorbing",
gap_dx,gap_dy,gap_dz);
// Definition of the TSCYL shape representing the window of the phototube. It
is made
//of sodocal, covered with a totally absorbing revetment.
TSCYL *pm;
pm = new
TSCYL("Phototube","Phototube","Sodocal","TotAbsorbing",tube_r,tube_dz);
//Declares that the shape pm is a phototube, that the upper face (1) is the
photocathode,
pm->fSuppl->SetPhotoTube("XP2020","Phototube Phillips
XP2020",1,"QuantumEff_XP2020");
//
//use different colors
laserbrick->SetLineColor(4);
laserbrick->SetLineWidth(2);
gapbrick->SetLineColor(2);
gapbrick->SetLineWidth(2);

```

```

pm->SetLineColor(28);
pm->SetLineWidth(2);
//
// TSNODE gives the position of a shape with respect to the node currently
//selected, by mean of a translation vector and a rotation matrix. No node
//being actually selected, node1 will be the main node and will define the
//WCS (world coordinate system). As no translation vector is given, the
//crystal will not be translated (translation vector 0 assumed). As no
//rotation matrix is given, the crystal will not be rotated and will remain
//with its axis parallel to Oz. Node1, the crystal, is selected and will remain the
//reference for all other nodes.
TSNode *node1;
node1 = new TSNODE("node1","node1",crystal);
node1->SetLineColor(1);
node1->SetLineWidth(2);
node1->cd();
//
// Node2 will give the position of the laserbrick shape with respect to the node
//currently selected, the crystal node. A translation vector (0,0,laser_z) will
//put the shape exactly under the crystal. No rotation matrix being given, the
laserbrick
//shape will stay with its axis parallel to the Oz axis.
TSNode *node2;
node2 = new TSNODE("node2","node2",laserbrick,zero,zero,laser_z);
//
// Node3 will give the position of the gapbrick shape with respect to the node
//currently selected, the crystal node. A translation vector (0,0,gap_z) will
//put the gapbrick shape exactly above the crystal. No rotation matrix being
given, the
//shape will stay with its axis parallel to the Oz axis.
TSNode *node3;
node3 = new TSNODE("node3","node3",gapbrick,zero,zero,gap_z);
//
// Node4 will give the position of the pm shape with respect to the node
//currently selected, the crystal node. A translation vector (0,0,tube_z) will
//put the phototube shape exactly above the air gap. No rotation matrix being

```

```

given, the
//shape will stay with its axis parallel to the Oz axis.
    TNode *node4;
    node4 = new TNode("node4","node4",pm,zero,zero,tube_z);
//
// There is a contact between crystal shape and laserbrick shape. Notice this
// nice
//property that you do not have to tell which face of crystal is in contact with
// which
//face of laserbrick: Litrani will find it for you. The face of crystal is bigger then
// the
//face of the laserbrick hence "containing".
    TContact *contact12;
    contact12 = new TContact("cr_laser","cr_laser","crystal","laserbrick",
    containing);
//
// There is a contact between crystal shape and air gap shape. It is face 5 of
// crystal
//which is in contact with face 4 of gapbrick. Face 5 of crystal is smaller than
// face 4 of
//gapbrick and is entirely contained into it. Hence "contained".
    TContact *contact13;
    contact13 = new TContact("cr_gap","cr_gap","crystal","gapbrick",contained);
//
// There is a contact between air gap shape and pm shape. It is face 5 of air
// gap which
//is in contact with face 0 of pm. Face 5 of air gap is bigger than face 0 of pm
// and
//contains it entirely. Hence "containing".
    TContact *contact34;
    contact34 = new TContact("gap-pm","gap-
    pm","gapbrick","Phototube",containing);
//
    const Double_t WvlghStart = 300.0; //starting value for wavelength
    const Double_t WvlghStep = 25.0; //step in wavelength
    Double_t wavelength = WvlghStart;
//
// Declaration of a spontaneous source of light inside the shape "laserbrick",

```


at point

//(0,0,0) in the local coordinate system of the laserbrick, i.e. exactly in the middle

//of the laserbrick. This spontaneous source emit light at the wavelength "wavelength".

```
TSpontan *laser;
```

```
laser = new TSpontan("laser","laser","laserbrick",zero,zero,zero,wavelength);
```

```
//
```

```
// DefineCradle() is called here with the following arguments
```

```
//
```

```
// (1) - laserbrick : name of shape in which the cradle of the photons is
```

```
// (2) - ellipse : kind of cradle : {point, disk, ellipse, parallelogram,
```

```
// paralleliped}
```

```
// (3) - a1 = 0.1 : large semi-axis of ellipse
```

```
// (4) - a2 = 0.05 : small semi-axis of ellipse
```

```
// (5) - a3 = 0.0 : Irrelevant for an ellipse
```

```
// (6) - theta3 = 0.0 : angle theta (degree, in LCS) of the normal to the ellipse
```

```
// (7) - phi3 = 0.0 : angle phi (degree, in LCS) of the normal to the ellipse
```

```
// (8) - theta1 = 90.0 : angle theta (degree, in LCS) of the large axis of the ellipse
```

```
// (9) - phi1 = 0.0 : angle phi (degree, in LCS) of the large axis of the ellipse
```

```
//
```

```
laser->DefineCradle("laserbrick",ellipse,0.1,0.05,0.0,0.0,0.0,90.0,0.0);
```

```
//
```

```
//We want a flat distribution with aperture 2 degrees. The beam is polarized, with its axis
```

```
//of polarization parallel to the Ox axis. It is not exactly true that the beam is polarized
```

```
//along the Ox axis, because the beam has an aperture of 2 degrees. In fact, the
```

```
//E vector of the photon is almost parallel to the Ox axis, but compatible with the requirement
```

```
//that k and E vector are orthogonal.
```

```
// Notice that you will be only partially obeyed when you ask that the polarization of the
```

```

//photon ( the direction of its electric field E ) has a given direction ! The E
field HAS
//to be orthogonal to the k vector of the photon in isotropic material. The
direction you
//have required for the E field will be changed, as few as possible, so that k
and E are
//orthogonal.
    laser->DefineBeam(flat,2.0,"",kTRUE,90.0,0.0);
    for (Int_t i=0;i<21;i++) {
//
// Generation of 100000 photons of wavelength "wavelength". A run number
must be greater
//than 0, hence 100+i and not i !
        laser->Gen(100+i,100000,wavelength);
        wavelength += WvlghStep;
//Changes the wavelength
        laser->SetWvlgh(wavelength);
    }
// It is a good idea to make a drawing of the setup. Any geometrical mistake
will
//appear as an awful drawing ! Notice however that ROOT has a very strange
and
//questionable way of drawing a setup : the proportion of the 3 axis are not
//respected by ROOT ! ROOT feels free to affect different factor to the 3 axis
Ox,
//Oy and Oz ! So do not be surprised by the proportions !
    gLit->BookCanvas();
    node1->Draw();
    gTwoPad->ChangePad();
// Here all runs of generation of photons are finished. It remains to analyze
the results.
//For that, you have at hand the 2 classes TResults and TPublication, and all
the
//power of ROOT ! Look at the web description of the classes Tresults and
//TPublication where you will find a full description of all types of histograms
//available at the end of a production of Litrani. You will learn there that
//for instance gGp is a pointer towards the summary histograms of Litrani.
Naming

```

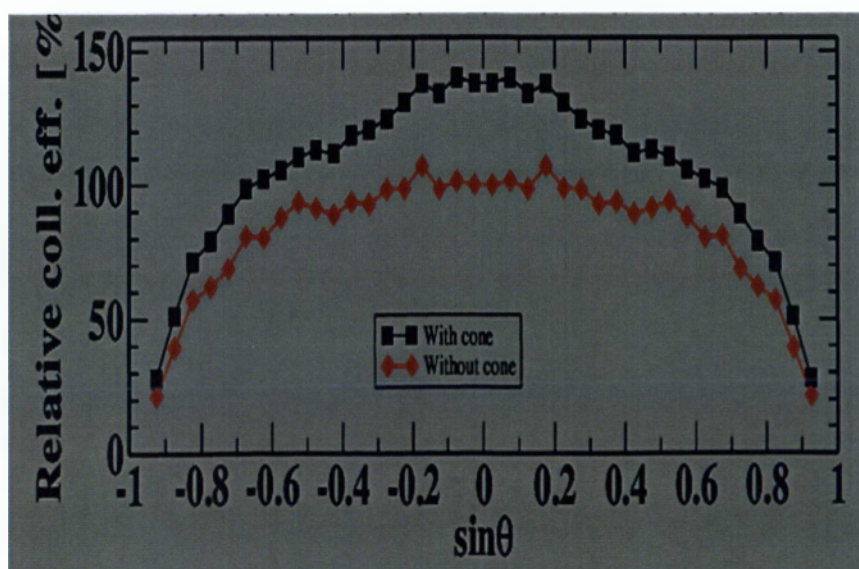
```

//the title of the class TPublication (pointed to by gGp) "wavelength of laser"
//will have for result that all the summary histograms will contain this in their
//title. For instance, the histogram on efficiency that we plot here will have as
//title : "Efficiency versus wavelength of laser ",
  gGp->SetTitle("wavelength of laser");
//Summary() creates all summary histograms
  gGp->Summary();
  gGs->DoStat();
  gLit->CloseFiles();
}

```

Ένα χαρακτηριστικό του φωτοπολλαπλασιαστή το οποίο δηλώνει την ευαισθησία της καθόδου είναι ο λόγος του αριθμού των φωτοηλεκτρονίων που εκπέμπονται στην έξοδο προς τον αριθμό των φωτοηλεκτρονίων που προσπίπτουν στην (αποδοτικότητα-quantum efficiency).

Συγκρίνοντας την απόδοση του φωτοπολλαπλασιαστή συμπεραίνουμε ότι η εφαρμογή του κώνου Winston είχε ως αποτέλεσμα την αύξηση της συλλεκτικής του ικανότητας κατά ~20%. Το ποσοστό αυτό είναι πολύ σημαντικό σε πειράματα ανίχνευσης νετρίνων και άλλων στοιχειωδών σωματιδίων.



Σχήμα 5.6 Η συλλεκτική ικανότητα του υπό μελέτη ανιχνευτή. Στο Σχήμα απεικονίζονται τα αποτελέσματα μας για την η ικανότητα αυτή χωρίς τον κώνο Winston (κόκκινο χρώμα) καθώς και τα αποτελέσματα μας και με αυτόν (μαύρο χρώμα).

ΚΕΦ. 6

ΣΥΜΠΕΡΑΣΜΑΤΑ-ΠΡΟΟΠΤΙΚΕΣ

Το νετρίνο αποτελεί το πιο άφθονο σωματίδιο προερχόμενο από το διάστημα καθώς και το ελαφρύτερο, ασθενώς αλληλεπιδρούμενο φερμιόνιο. Ο τρόπος με τον οποίο η γεύση του νετρίνο μεταβάλλεται καθώς οδεύει από το διάστημα υποδεικνύει ότι υπάρχουν τουλάχιστον τρεις διαφορετικές μάζες. Υπάρχουν αρκετά ερευνητικά προγράμματα που εστιάζουν στη μελέτη αυτών των ιδιοτήτων των νετρίνων καθώς και των πηγών προέλευσης τους.

Ένα από αυτά αποτελεί και το πείραμα του κυβικού χιλιομέτρου στο οποίο συνεργάζονται η Ελλάδα, η Ιταλία και η Γαλλία. Σκοπός του πειράματος είναι η κατασκευή ενός υποθαλάσσιου ανιχνευτή, διαστάσεων 1 κυβικού χιλιομέτρου, ο οποίος θα ανιχνεύει το φως που εκπέμπεται από τα δευτερεύοντα σωματίδια που παράγονται κατά την αλληλεπίδραση των νετρίνων με την ύλη. Το φως αυτό ανιχνεύεται από ευαίσθητα όργανα (φωτοπολλαπλασιαστές) και στη συνέχεια από τα χαρακτηριστικά του ανακατασκευάζεται η τροχιά του νετρίνο.

Στην Πύλο Μεσσηνίας, πρόκειται να ποντιστεί ένας ανιχνευτής νετρίνων, ο οποίος θα χρησιμοποιεί ένα φωτοπολλαπλασιαστή διαμέτρου 13 ιντσών. Στην παρούσα εργασία μελετήσαμε την απόδοση του φωτοπολλαπλασιαστή εστιάζοντας στο σχεδιασμό και την προσομοίωση ενός κώνου, με σκοπό να αυξηθεί το ποσοστό του φωτός που συλλέγεται από αυτόν. Από τα αποτελέσματα μας παρατηρήσαμε ότι η απόδοση του φωτοπολλαπλασιαστή αυξάνεται κατά ~20% με χρήση του κώνου. Το αποτέλεσμα αυτό είναι μεγάλης σημασίας διότι θα βοηθήσει μελλοντικά στην βελτίωση του τρόπου ανίχνευσης των μελλοντικών πειραμάτων.

Στο άμεσο μέλλον ο κώνος που προσομοιώθηκε θα κατασκευαστεί και θα μελετηθεί στο εργαστήριο του ερευνητικού κέντρου Νέστορα στην Πύλο. Επιπρόσθετα, θα πραγματοποιηθούν και άλλες παρόμοιες προσομοιώσεις του κώνου με άλλα υλικά και επιστρώσεις, που αποσκοπούν στην περαιτέρω αύξηση της απόδοσης του ανιχνευτή-φωτοπολλαπλασιαστή.

ΑΝΑΦΟΡΕΣ

- [1] NESTOR: Proceedings of the 2nd NESTOR International Workshop, L. K. Resvanis editor (1992); Proceedings of the 3rd NESTOR International Workshop, L. K. Resvanis editor (1993); website <http://www.nestor.org.gr>.
- [2] Proceedings of the "Workshop on Technical Aspects of a Very Large Volume Neutrino Telescope in the Mediterranean Sea (VLVvT 2003)", NIKHEF, Amsterdam, 5-8 October 2003, ISBN 90-6488-026-3, April 2004; KM3NeT Proposal, March 1 2003 (unpublished).
- [3] F.Halzen and A.D.Martin , Quarks and Leptons: An introductory course in Modern Particle Physics, Ed. John Wiley: New York, 1984.
- [4] T.K. Gaisser, "Cosmic Rays and Particle Physics", Cambridge University Press (1990) .
- [5] I.J.R.Aitchison and A.J.G.Hey, Gauge Theories in Particle Physics, Second Edition, Inst. of Phys. Publishing, Bristol and Philadelphia, 1993 (reprinted). Graduate Student Series in Physics.
- [6] D. Karlen, Experimental Status of the Standard Model, Talk presented at the XXIXth International Conference on High Energy Physics (ICHEP 98), Vancouver, Canada, July 1998
- [7] N.Hayashida et.al. Phys. Rev. Lett 77 (1996) 1000
- [8] A.A.Lee and R.W.Clay, J.Phys.G21(1995)1743
- [9] L.O'C. Drury, "Acceleration of Cosmic Rays", Contemp.Phys. 35(1994)231-242
- [10] Mather, J.C., etal, Astro. Jour. 354, L37 (1990)
- [11] Greisen, K.1966, Phys Rev. Lett. 16, 748
- [12] Zatsepin, G.T. & Kuzmin, V.A. 1966, JETPh Lett. 4,78
- [13] P. Bhattacharjee , G. Sigl , " Origin and Propagation of Extremely High

Energy

Cosmic Rays", Phys.Rept. 327 (2000) 109-247

[14] Werner Rodejohann, "A PARAMETRIZATION FOR THE NEUTRINO MIXING MATRIX", Phys.Rev.D69:033005,2004

[15] M. Lindner, "THE PHYSICS POTENTIAL OF FUTURE LONG BASELINE NEUTRINO OSCILLATION EXPERIMENTS", Proceedings of the 20th International Conference on Neutrino Physics and Astrophysics (Neutrino 2002), Nucl.Phys.Proc.Suppl.118:199-209,2003

[16] Urry, C. M. and Padovani, P., "Unified Schemes for Radio-Loud Active Galactic Nuclei", Publ. Astron. Soc. Pac. 107:803 (1995).

[17] Quinn, J. et al., Detection of gamma-rays with $E > 300$ -GeV from Markarian 501. *Astrophys. J.* 456:L83 (1996).

[18] Krennrich, F. et al., Cuto in the TeV energy spectrum of Markarian 421 during strong ares in 2001. *Astrophys. J.* 560:L45 (2001).

[19] Sreekumar, P. et al., EGRET observations of the extragalactic gamma ray emission. *Astrophys. J.* 494:523 (1998).

[20] Rachen, J. P. and Meszaros, P., Photohadronic neutrinos from transients in astrophysical sources. *Phys. Rev. D* 58:123005 (1998).

[21] Sergio Colafrancesco, et al., "CLUSTERS OF GALAXIES AND THE DIFFUSE GAMMA-RAY BACKGROUND", *Astropart.Phys.*9:227-246,1998; (e-Print Archive: astro-ph/9804262)

[22] Abraham, J., et al. 2004, *Nuclear Instruments and Methods in Physics Research A*, 523, p. 50

[23] Abramovici, A., et al. 1992, *Science*, 256, p. 325

[24] Acernese, F., et al. 2004, *Gravitational Wave and Particle Astrophysics Detectors*

[25] Hough, J.; Sanders, G. H., *Proceedings of the SPIE*, 5500, p. 58

[26] Aitchison, J., & Brown, J. A. C. 1957, *The Lognormal Distribution*, Cambridge University Press, Cambridge, UK

[27] Atkins, R., et al. 2000, *ApJ*, 533, p. L119

[28] Atkins, R., et al. 2005, *ApJ*, 630, p. 996

[29] Atwood, W. B., et al. 2009, *ApJ*, 697, p. 1071

- [30] Band, D. L., Norris, J. P., Bonnell, J. T. 2004, *ApJ*, 613, p. 484
- [31] Barat, C., et al. 1981, *Astrophysics and Space Science*, 75, p. 83
- [32] Butler, N. R., Bloom, J. S., Poznanski, D. 2010, *ApJ*, 711, p. 495
- [33] Cline, D. B., Matthey, C., Otwinowski, S. 1999, *ApJ*, 527, p. 827
- [34] Cline, T. L., et al. 1973, *ApJ*, 185, p. L1
- [35] Cline, T. L., et al. 1979, *ApJ*, 232, p. L1
- [36] Cline, T. L., et al. 2003, *AIP Conf. Proc.*, 662, p. 143
- [37] Della Valle, M., et al. 2003, *A&A*, 406, p. L33
- [38] Della Valle, M., et al. 2006, *ApJ*, 642, p. L103
- [39] Fishman, G. J., & Meegan, C. A. 1995, *Annual Review of Astronomy & Astrophysics*, 33, p. 415
- [40] Fong, W., Berger, E., Fox, D. B. 2010, *ApJ*, 708, p. 9
- [41] Gehrels, N., et al. 2005, *Nature*, 437, p. 851
- [42] Gonz´alez, M. M., et al. 2003, *Nature*, 424, p. 749
- [43] Greiner, J., et al. 2011, *A&A*, 526, p. A30
- [44] Hakkila, J., et al. 2004, *Baltic Astronomy*, 13, p. 211
- [45] Horv´ath, I. 2009, *Astrophysics and Space Science*, 323, p. 83
- [46] Horv´ath, I., et al. 2010, *ApJ*, 713, p. 552
- [47] Horv´ath, I., M´esz´aros, P., M´esz´aros, A. 1996, *ApJ*, 470, p. 5
- [48] Klebesadel, R. W., Strong, I. B., Olson, R. A. 1973, *ApJ*, 182, p. L85
- [49] Kouveliotou, C., et al. 1993a, *ApJ*, 413, p. L101
- [50] Kouveliotou, C., et al. 1993b, *Nature*, 362, p. 728
- [51] Kouveliotou, C., et al. 1994, *Nature*, 368, p. 125
- [52] Kouveliotou, C., et al. 1996, *AIP Conf. Proc.*, 384, p. 42
- [53] M´esz´aros, A., Bagoly, Z., Vavrek, R. 2000a, *A&A*, 354, p. 1

[54] Mészáros, A., et al. 2000b, ApJ, 539, p. 98

[55] Mészáros, A., et al. 2006, A&A, 455, p. 785

[56] https://en.wikipedia.org/wiki/Cherenkov_radiation

[57] <http://icecube.wisc.edu/>

[58] www.km3net.org/