

# ΦΥΣΙΚΟΣ ΚΟΣΜΟΣ

ΤΡΙΜΗΝΗ ΕΚΔΟΣΗ ΤΗΣ ΕΝΩΣΗΣ ΕΛΛΗΝΩΝ ΦΥΣΙΚΩΝ  
ΤΕΥΧΟΣ 13 (172) - ΣΕΠΤΕΜΒΡΙΟΣ - ΟΚΤΩΒΡΙΟΣ - ΝΟΕΜΒΡΙΟΣ 2003 - ΤΙΜΗ 7 ΕΥΡΩ

Το τηλεσκόπιο νετρίνο  
ΝΕΣΤΩΡ

Σημεία σύγκλισης  
λογοτεχνίας και φυσικής

Γραμμικό ελαστικό μέσο

Ηλιοτροπικό σύστημα  
με μετρητή ηλιοφάνειας

Η ορατή κοσμολογία  
του Λεονάρντο ντα Βίντσι



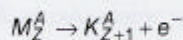


# Το τηλεσκόπιο νεutrίνο ΝΕΣΤΩΡ

## Το νεutrίνο

Βαθιά, στον πυθμένα της θάλασσας στο Νοτιοδυτικό άκρο της Πελοποννήσου κοντά στο φρέαρ των Οινουσσών, περίπου 30 km από την πόλη της Μεθώνης, άρχισε να κατασκευάζεται το Υποβρύχιο Τηλεσκόπιο Νεutrίνο ΝΕΣΤΩΡ, με το Πολυεπιστημονικό Εργαστήριο Βαθιάς Θάλασσας ΛΑΕΡΤΙΣ. Ο σκοπός αυτού του υποθαλάσσιου τηλεσκοπίου είναι διττός: Αφενός, όπως όλα τα τηλεσκόπια, να μελετήσει τον ουρανό χρησιμοποιώντας τα νεutrίνο (αντί των φωτονίων) και αφετέρου να μελετήσει αυτά καθαυτά τα μυστηριώδη σωματίδια νεutrίνο.

Η ανακάλυψη των νεutrίνο θυμίζει αστυνομική ιστορία. Από την εποχή των Curie ήταν γνωστή η πυρηνική διάσπαση κατά την οποία ένας πυρήνας εκπέμποντας ένα ηλεκτρόνιο,  $e^-$ , μετατρέπεται σε ένα άλλο πυρήνα σύμφωνα με την αντίδραση:



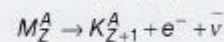
Όπου  $A$  είναι ο μαζικός αριθμός του πυρήνα και  $Z$  ο ατομικός αριθμός. Μελετώντας την αντίδραση παρατηρήθηκε ότι διατηρείται το φορτίο (αρχή διατήρησης φορτίου). Και αναμενόταν ότι θα διατηρείται επίσης η ενέργεια και η ορμή (αρχή διατήρησης ενέργειας και ορμής), αφού η ενέργεια πριν και μετά την διάσπαση είναι καθορισμένη από το είδος του αρχικού και τελικού πυρήνα. Μάλιστα, το ηλεκτρόνιο που εκπέμπεται κατά τη διάσπαση αυτή θα πρέπει να έχει συγκεκριμένη ενέργεια, ίση με τη διαφορά των ενεργειών του τελικού από τον αρχικό πυρήνα. Όμως, πρώτος ο Chadwick έδειξε ότι το ενεργειακό φάσμα των εκπεμπόμενων ηλεκτρονίων είναι συνεχές. Συνεπώς δεν ισχύει η διατήρηση της ενέργειας και ορμής;

Ο Pauli, το 1932, διέλυσε τη σύγχυση που επεκράτησε στον κόσμο των φυσικών με αυτό το ερώτημα. Θεώρησε ότι στη διάσπαση του πυρήνα πρέπει να παράγεται ένα τρίτο σωματίδιο το οποίο έχει μηδενική μάζα, δεν έχει φορτίο, έχει spin  $1/2$ , κινείται με την ταχύτητα του φωτός και έχει ενέργεια τόση, όση χρειάζεται για να συμπληρώσει το «έλλειμμα» ενέργειας

Ε. Γ. Ανασοντζής\*, επ. καθηγητής φυσικής,  
Τομέας Πυρηνικής Φυσικής και Φυσικής  
Στοιχειωδών Σωματιδίων ΕΚΠΑ

και ορμής που παρατηρούμε στο ηλεκτρόνιο που εκπέμπεται. Το ονόμασε νεutrίνο (neutrino, σύμβολο  $\nu$ ), δηλαδή μικρό neutron<sup>1</sup>.

Τη β-διάσπαση (όπου εκπέμπεται ένα ηλεκτρόνιο) μπορούμε τώρα να την γράψουμε ως εξής:



Παράλληλα γράφουμε τη  $\beta^+$  διάσπαση (όπου εκπέμπεται ένα ποζιτρόνιο) ως εξής:



Σήμερα γνωρίζουμε ότι έχουμε τριών ειδών νεutrίνο, το  $\nu_e$ , το  $\nu_\mu$  και το  $\nu_\tau$  τα οποία συνδέονται με τα τρία λεπτόνια: το ηλεκτρόνιο,  $e$ , το μίονιο,  $\mu$ , και το ταυ,  $\tau$  (και τα αντισωματίδια τους με τα αντίστοιχα αντινεutrίνο). Αντίστοιχα, κατά την αντίδραση των νεutrίνο με την ύλη παράγεται ανάλογα ένα ηλεκτρόνιο, ένα μίονιο ή ένα λεπτόνιο  $\tau$ .

## Αστρονομία νεutrίνο

Τα άστρα θέλγουν τον άνθρωπο από την αρχή της ιστορίας. Τα πρώτα μαθηματικά ή η πρώτη μέτρηση του χρόνου άρχισε με την ανάγκη των πρώτων παρατηρητών των ουράνιων σωμάτων να μετρήσουν και να καταγράψουν την θέση των άστρων. Και ο πρώτος μεταφορέας αυτών των πληροφοριών ήταν το

<sup>1</sup> Η παραπάνω αντίδραση λέγεται και β-διάσπαση. Το 1934, ο Anderson ανακάλυψε το αντισωματίδιο του ηλεκτρονίου, το ποζιτρόνιο και την β<sup>+</sup>-διάσπαση. Τώρα, το σωματίδιο που παράγεται στην β-διάσπαση το λέμε αντινεutrίνο (το αντισωματίδιο του νεutrίνο) ενώ αυτό της β<sup>+</sup>-διάσπασης, νεutrίνο.



φως. Από τότε, μέχρι μόλις «χθες», το φωτόνιο (και μάλιστα στα ορατά στο μάτι μήκη κύματος της ηλεκτρομαγνητικής ακτινοβολίας) ήταν το μοναδικό σωματίδιο το οποίο μας πληροφορούσε για τα θαυμάσια που συμβαίνουν στα άστρα και το μόνο εργαλείο για να τα μελετήσουμε και να καταλάβουμε το μηχανισμό της δημιουργίας της ζωής και του θανάτου τους. «Πρόσφατα», στον τελευταίο αιώνα κυρίως, για τη μελέτη των άστρων χρησιμοποιήθηκαν και φωτόνια με άλλα μήκη κύματος, «ορατά» στα ραδιοηλεκτροσκοπία και στα τηλεσκοπία υπερύθρων και υπεριωδών ηλεκτρομαγνητικών κυμάτων, καθώς και τα στοιχειώδη σωματίδια. Όλα αυτά τα σωματίδια έχουν ένα βασικό μειονέκτημα: αλληλεπιδρούν με την ύλη. Έτσι, παραδείγματος χάρη, το φωτόνιο το οποίο εκπέμπεται από ένα άστρο με κατεύθυνση τη Γη, αν συναντήσει στην πορεία του ένα άλλο άστρο ή πλανήτη θα απορροφηθεί από αυτό. Μπορεί επίσης να απορροφηθεί από την κοσμική σκόνη ή να «συγκρουστεί» με στοιχειώδη σωματίδια και να απορροφηθεί ή να αλλάξει κατεύθυνση.

Όμως τα νετρίνο, λόγω του μηδενικού φορτίου και επειδή αλληλεπιδρούν μόνο με την ασθενή αλληλεπίδραση, αντιδρούν πολύ σπάνια με την ύλη. Μπορεί ένα νετρίνο να περάσει μέσα από την Γη ή τον Ήλιο και να μην αλληλεπιδράσει με τους πυρήνες των ατόμων τους, που είναι το πιθανότερο<sup>2</sup>. Αυτή η μοναδικότητα του νετρίνο το κάνει να είναι εξαιρετικά δύσκολο να ανιχνευθεί. Παράλληλα το νετρίνο λόγω του μηδενικού φορτίου δεν αλλάζει κατεύθυνση κατά την πορεία του. Συνεπώς, αν παρατηρήσουμε την τροχιά ενός νετρίνο, μπορούμε να προσδιορίσουμε από ποιο σημείο του Σύμπαντος προέρχεται. Να κάνουμε δηλαδή αστρονομική παρατήρηση.

Μεγάλο μέρος των νετρίνο που υπάρχουν στο Διάστημα προέρχονται από τη Μεγάλη Έκρηξη. Αυτά όμως, λόγω της διαστολής του Σύμπαντος, έχουν τώρα εξαιρετικά χαμηλή κινητική ενέργεια και μηδαμινή

πιθανότητα ανίχνευσης. Ωστόσο υπάρχουν σε μεγάλη πυκνότητα. Υπολογίζεται ότι υπάρχουν στο Διάστημα  $330 \cdot 10^6$  νετρίνο/ $m^3$  που προέρχονται από τη Μεγάλη Έκρηξη.

Μεγάλο αριθμό νετρίνο χαμηλής ενέργειας εκπέμπει ο Ήλιος όπως και όλοι οι αστέρες. Τα νετρίνο του Ηλίου παρατηρούνται από αριθμό πειραμάτων και ήδη έχουν δώσει σημαντικές πληροφορίες για τις φυσικές διεργασίες που γίνονται στον Ήλιο. Όμως τα νετρίνο αυτά είναι τόσα πολλά που «τυφλώνουν» τους ανιχνευτές και συνεπώς δεν μπορούμε να παρατηρήσουμε νετρίνο χαμηλής ενέργειας που έρχονται από άλλους αστέρες, όπως ακριβώς δεν μπορούμε το μεσμέρι να δούμε ένα κερί αναμμένο 500 m μακριά από μας. Επίσης, χαμηλής ενέργειας νετρίνο εκπέμπονται από ραδιενεργούς πυρήνες, από αντιδραστήρες, ακόμα και από το «σώμα» μας (από τη διάσπαση του ελαχίστου ραδιενεργού ισότοπου του καλίου  $K^{40}$  που υπάρχει στο ανθρώπινο σώμα).

Τα πλέον κατάλληλα νετρίνο για αστρονομικές παρατηρήσεις είναι τα νετρίνο υψηλής ενέργειας. Αυτά παράγονται από εξαιρετικά βίαιες διεργασίες, παραδείγματος χάρη, σε ενεργούς πυρήνες γαλαξιών ή σε «εκλάμψεις» ακτίνων γάμα. Ακολουθώς ταξιδεύουν μέσα στο Σύμπαν χωρίς να απορροφηθούν, χωρίς να αλλάξει η κατεύθυνσή τους, χωρίς να χάσουν ενέργεια. Παρ' όλο δε το μικρό αριθμό νετρίνο υψηλής ενέργειας που φτάνουν στην Γη (ο αριθμός των νετρίνο ανά μονάδα επιφάνειας - flux - ελαττώνονται με την αύξηση της ενέργειάς τους) είναι πιο εύκολο να τα ανιχνεύσουμε από τα νετρίνο χαμηλής ενέργειας, καθώς η πιθανότητα αλληλεπίδρασής τους με την ύλη αυξάνει με την αύξηση της ενέργειάς τους. Έτσι, μόνο 1 στα  $10^9$  νετρίνο ενέργειας περίπου 1 GeV, αφού διασχίσουν και χωρίς καν να «καταλάβουν» τη Γη, αλληλεπιδρά και ανιχνεύεται στον ανιχνευτή του Super-Kamiokande στην Ιαπωνία. Αντιθέτως, νετρίνο με ενέργεια 1 PeV απορροφώνται από την Γη και δε φθάνουν στον ανιχνευτή. Επιπλέον, τα υψηλής ενέργειας νετρίνο αν αλληλεπιδράσουν με την ύλη (του ανιχνευτή μας) αποδίδουν σε αυτόν μεγαλύτερη ενέργεια από όση τα νετρίνο χαμηλής ενέργειας, η οποία βεβαίως ανιχνεύεται ευκολότερα.

Όπως αναφέρθηκε, αν το νετρίνο αλληλεπιδράσει, θα δώσει ένα ηλεκτρόνιο ή ένα μιονίο ή ένα ταυ.

<sup>2</sup> Η πιθανότητα αλληλεπίδρασης εξαρτάται από την ενέργεια του νετρίνο και μεγαλώνει με την αύξηση της ενέργειας. Παραδείγματος χάρη, τα χαμηλής ενέργειας νετρίνο μπορούν να διαπεράσουν μόλυβδο πάχους μερικών δεκάδων ετών φωτός χωρίς να αλληλεπιδράσουν.



Από τα σωματίδια αυτά, το ηλεκτρόνιο θα διανύσει μικρή απόσταση, θα απορροφηθεί από το μέσο εκπέμποντας ακτινοβολία Cherenkov και θα χάσει την αρχική του κατεύθυνση (λόγω του μαγνητικού πεδίου της Γης και της μικρής μάζας του), συνεπώς θα ανιχνευθεί δύσκολα και δε θα μας δώσει πληροφορίες για την κατεύθυνση του νετρίνο. Επίσης το ταυ, θα διανύσει πολύ μεγάλες αποστάσεις (δεκάδων χιλιομέτρων) πριν απορροφηθεί και θα μας δώσει λίγη πληροφορία στις πεπερασμένες διαστάσεις του ανιχνευτή. Τελικά, το πλέον κατάλληλο σωματίδιο για να παρατηρήσουμε αστρικά νετρίνο είναι το μιονίο.

Το μιονίο θα έχει σχεδόν την ίδια κατεύθυνση του νετρίνο από το οποίο παρήχθη και θα διανύσει μερικές εκατοντάδες μέτρα πριν σταματήσει (παραδείγματος χάρι μιονίο ενέργειας μερικών TeV θα διανύσει μερικά χιλιόμετρα). Κατά τη διάρκεια αυτής της πορείας του, το μιονίο θα εκπέμπει φωτόνια ακτινοβολίας Cherenkov, τα οποία θα έχουν μία αυστηρά καθορισμένη γωνία με την τροχιά του μιονίου. Τα φωτόνια αυτά μπορούν, πριν απορροφηθούν, να διανύσουν μεγάλες αποστάσεις (δεκάδες μέτρα στα πολύ καθαρά νερά που βρίσκουμε στο πυθμένα του Ιονίου Πελάγους). Αν ο ανιχνευτής μας αποτελείται από συστοιχίες φωτοπολλαπλασιαστών<sup>3</sup> τα φωτόνια φτάνουν στους φωτοπολλαπλασιαστές με διαφορά χρόνου, ανάλογα σε πιο σημείο της τροχιάς γεννήθηκαν και πόσο απέχει αυτό το σημείο από το φωτοπολλαπλασιαστή που ανίχνευσε το φωτόνιο. Από αυτούς τους χρόνους μπορούμε να υπολογίσουμε την τροχιά του μιονίου, δηλαδή του νετρίνο που το δημιούργησε. Συνεπώς, μπορούμε να προσδιορίσουμε από πιο σημείο του ουρανού ήρθε. Να κάνουμε αστρονομία.

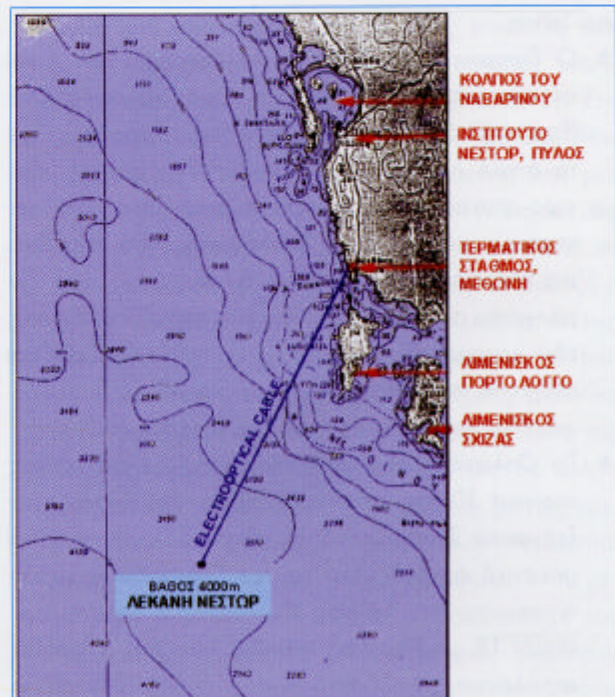
### Τηλεσκόπιο νετρίνο ΝΕΣΤΩΡ

Το τηλεσκόπιο νετρίνο ΝΕΣΤΩΡ ανιχνεύει την ακτινοβολία Cherenkov που παράγεται από μιονία, όταν αυτά διασχίσουν ένα διαφανές μέσο όπως είναι το νερό. Τα μιονία που παρατηρούμε έχουν παραχθεί από νετρίνο (σήμα) ή από αντιδράσεις κοσμικών ακτίνων στην ατμόσφαιρα (κοσμικά μιονία, θόρυβος). Οι

<sup>3</sup> Ηλεκτρονικές μονάδων που μπορούν να ανιχνεύσουν ακόμα και ένα φωτόνιο.

πιο σημαντικές προϋποθέσεις για έναν ανιχνευτή νετρίνο – και οι οποίες ικανοποιούνται απόλυτα στην περιοχή που έχουμε εκλέξει για την ανάπτυξη του τηλεσκοπίου ΝΕΣΤΩΡ – είναι: Καθαρό νερό (δηλαδή μέσο με μικρό συντελεστή απορρόφησης του φωτός), βαθιά θάλασσα (για να απορροφάει μεγάλο μέρος των ατμοσφαιρικών μιονίων), μικρή απόσταση από την ξηρά (για να έχουμε μικρό μήκος ηλεκτροοπτικού καλωδίου μέσω του οποίου παρέχομε ισχύ στον ανιχνευτή και μεταφέρουμε τα δεδομένα στην ξηρά), χαμπλές ταχύτητες υποθαλασσιών ρευμάτων (για να μην αναπύσσονται μεγάλες μηχανικές καταπονήσεις στον ανιχνευτή), επίπεδη και πλατιά επιφάνεια του βυθού (για μελλοντική ανάπτυξη με πόντιση περισσότερων ανιχνευτών) και σταθερές γεωλογικές και περιβαλλοντολογικές συνθήκες (για μεγάλη διάρκεια ζωής του ανιχνευτή).

Μία περιοχή με στίγμα 36° 37,5' N, 21° 34,6' E (Εικόνα 1), στη μέση μιας υποθαλάσσιας λεκάνης με μικρή κλίση (που ονομάζουμε υποθαλάσσια λεκάνη του ΝΕΣΤΩΡ) και με μέσο βάθος τα 4000 m πληροί όλες τις παραπάνω προϋποθέσεις και έχει οριστεί ως η περιοχή του πειράματος ΝΕΣΤΩΡ.



Εικ. 1. Ναυτικός χάρτης με την πορεία του ηλεκτρο-οπτικού καλωδίου από τη Μεθώνη έως το στίγμα όπου ποντίστηκε το τηλεσκόπιο νετρίνων ΝΕΣΤΩΡ.





Εικ. 2. Το κτίριο του ΟΤΕ όπου βρίσκεται ο Τερματικός Σταθμός Μεθώνης.



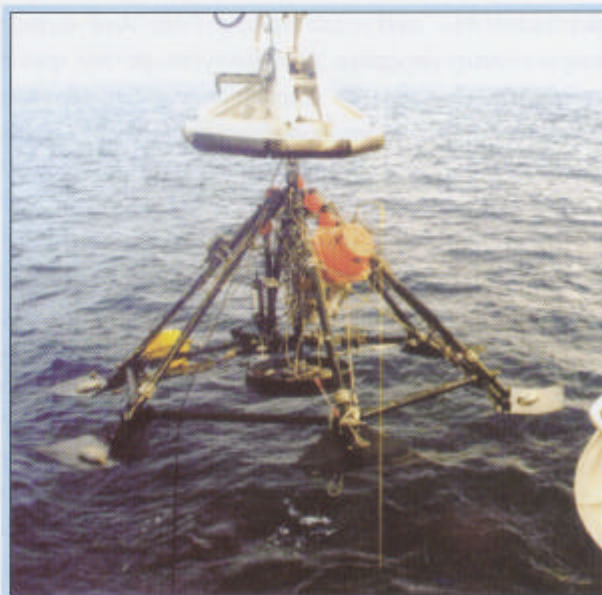
Εικ. 3. Το υποβρύχιο «άροτρο» ενώ θάβει το ηλεκτρο-οπτικό καλώδιο στον κόλπο της Μεθώνης.

Αν εξετάσουμε το σύστημα του τηλεσκοπίου νετρίνο ΝΕΣΤΩΡ, το οποίο σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε με τη συνεργασία του Εθνικού Κοποδιστριακού Πανεπιστημίου Αθηνών, του Ινστιτούτου ΝΕΣΤΩΡ, του Πανεπιστημίου του Κιέλου και της Ρωσικής Ακαδημίας Επιστημών, θα παρατηρήσουμε ότι αποτελείται από τα εξής τμήματα, διαδοχικά από την ξηρά προς τη θάλασσα, που είναι:

- ▶ Ο **Τερματικός Σταθμός** του τηλεσκοπίου που είναι σε ένα κτίριο το οποίο έχει παραχωρήσει ο ΟΤΕ (Εικόνα 2). Εδώ βρίσκεται το ειδικό τροφοδοτικό με το οποίο παρέχουμε ρεύμα (ισχύ μέσω του **ηλεκτρο-οπτικού καλωδίου**) στο σύστημα που είναι ποντισμένο καθώς και ο υπολογιστής που λαμβάνει την πληροφορία που στέλνει ο ανιχνευτής στην ξηρά, μέσω των οπτικών ινών του καλωδίου. Επίσης, εδώ λειτουργούν οι υπολογιστές που ρυθμίζουν και ελέγχουν την λειτουργία του ανιχνευτή και καταγράφουν τα γεγονότα σε οπτικούς δίσκους (CD).
- ▶ Το **Οπλισμένο ηλεκτρο-οπτικό** καλώδιο έχει μήκος περίπου 30 km, το «άκρο ξηράς» βρίσκεται στον Τερματικό Σταθμό, ενώ το «άκρο θάλασσας» είναι μηχανικά συνδεδεμένο με την **Πυραμίδα Άγκυρας**. Αποτελείται από χάλκινο σωληνίσκο ο οποίος περικλείει 18 μονότροπες οπτικές ίνες και ο οποίος περικλείεται σε πλαστικό χιτώνα από πολυαιθυλένιο. Οι οπτικές ίνες μεταφέρουν τα δεδομένα στην ξηρά, ο χάλκινος σωληνίσκος λειτουργεί ως αγωγός ηλεκτρικού ρεύματος, ενώ ο πλαστικός χιτώνας κρα-

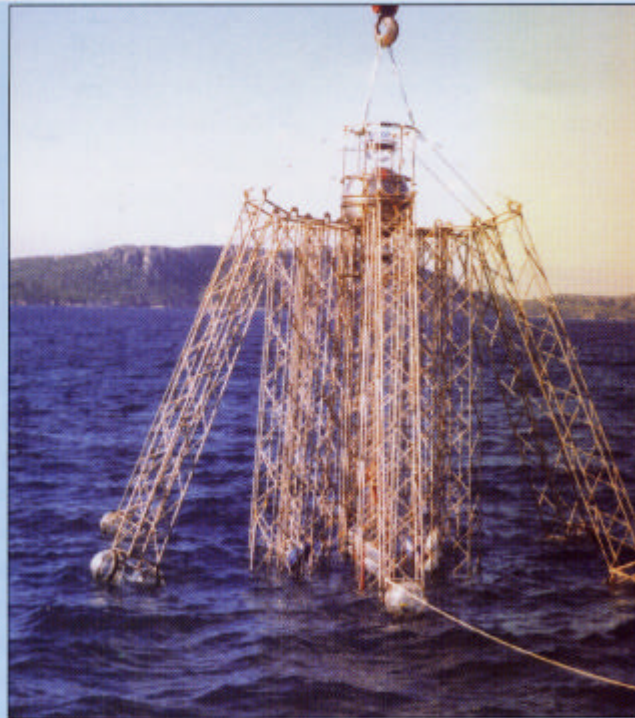
τάει στεγανό τον αγωγό. Ο πλαστικός χιτώνας περιβάλλεται από στσάλινα σύρματα τα οποία προσδίδουν στο καλώδιο την απαιτούμενη μηχανική αντοχή. Το καλώδιο έχει ποντιστεί με τη συνεργασία του ΟΤΕ και το τμήμα που είναι ποντισμένο στον κόλπο της Μεθώνης έχει θαφτεί στην άμμο για προστασία (Εικόνα 3).

- ▶ Η **Πυραμίδα Άγκυρας** (Εικόνα 4) κρατάει κατ' αρχή τον ανιχνευτή (ο οποίος έχει θετική πλευστότητα) σταθερά στον βυθό της θάλασσας, συγκρατεί το καλώδιο κατά τη διαδικασία της πόντισης και φέρε-



Εικ. 4. Η Πυραμίδα Άγκυρας, πλήρως εξοπλισμένη.



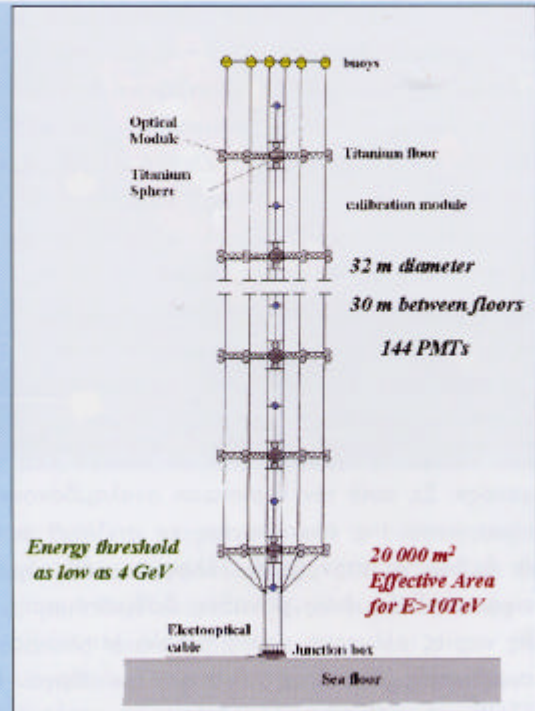


Εικ. 5. Ο αστερίας εξοπλισμένος με τις Οπτικές Μονάδες και διπλωμένος.

το Βασικό Σύνδεσμο, έναν υδατοστεγή κύλινδρο από τιτάνιο με ειδικούς ηλεκτρο-οπτικούς συνδετήρας οι οποίοι συνδέονται αφενός με το οπλισμένο ηλεκτρο-οπτικό καλώδιο, αφετέρου με εύκαμπτα ηλεκτρο-οπτικά καλώδια.

Τα εύκαμπτα ηλεκτρο-οπτικά καλώδια συνδέουν τους ορόφους του τηλεσκοπίου ΝΕΣΤΩΡ με το Βασικό Σύνδεσμο, μεταφέρουν ισχύ στους ορόφους και διαβιβάζουν την πληροφορία από αυτούς προς το Βασικό Σύνδεσμο. Επίσης στην Πυραμίδα Άγκυρας είναι προσαρμοσμένα διάφορα περιβαλλοντολογικά όργανα όπως είναι ο ρευματογράφος, το **Κεντρικό Σεισμόμετρο Βυθού** (OBS της GEOPRO), ο δέκτης της ακουστικής τηλεμετρίας (ΔΑΤ) των δορυφορικών αυτονόμων Σεισμομέτρων Βυθού και οι άλλοι αισθητήρες, ανάλογα με το πρόγραμμα. Δορυφορικά **Αυτόνομα Σεισμόμετρα Βυθού** θα ποντιστούν γύρω από τον πύργο και σε απόσταση μέχρι 5 km από αυτόν και θα συνδέονται ακουστικά με το δέκτη της ακουστικής τηλεμετρίας.

- ▶ Ο **Ανιχνευτής Νετρίνο** είναι βέβαια η βασική μονάδα του τηλεσκοπίου νετρίνο. Ο ανιχνευτής αποτε-



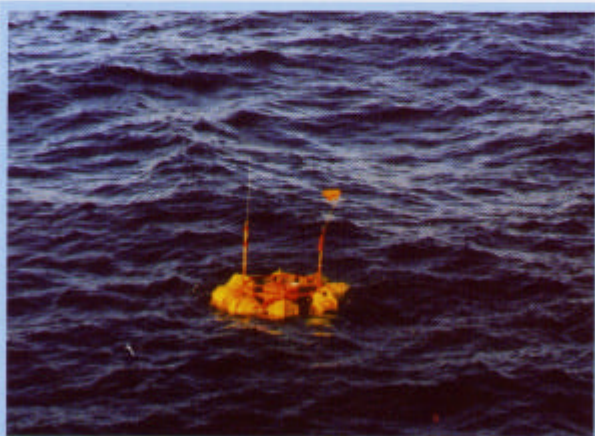
Εικ. 6. Γραφική απεικόνιση του πύργου του τηλεσκοπίου ΝΕΣΤΩΡ.

λείται από «ορόφους». Κάθε όροφος είναι ένα κοροδικτύωμα σε σχήμα αστερία από σωλήνες τιτανίου (ή αλουμινίου) με έξι ακτίνες (Εικόνα 5). Στα άκρα κάθε ακτίνας τοποθετούνται δύο **Οπτικές Μονάδες**. Κάθε Οπτική Μονάδα αποτελείται από μία υάλινη σφαίρα διαμέτρου 45 cm (κατασκευής ΒΕΝΤΗΟΣ, πάχους 15 mm και ικανή να ποντιστεί σε βάθος μεγαλύτερο από 4000 m χωρίς να σπάσει) η οποία περιέχει ένα φωτοπολλαπλασιαστή της ΗΑΜΑΜΑΤΣΟΥ με μεγάλη επιφάνεια φωτοκαθόδου και με ενίσχυση περίπου  $10^7$ . Οι οπτικές μονάδες είναι τοποθετημένες έτσι, ώστε η φωτοκάθοδος της μίας να «κοιτάει» προς τα «πάνω» της δε άλλης προς τα «κάτω», καλύπτοντας, έτσι, ανά ζεύγος, στερεά γωνία 4π. Στο κέντρο του αστερία τοποθετείται επίσης μία σφαίρα από τιτάνιο διαμέτρου 1 m, μέσα στην οποία τοποθετούνται τα ηλεκτρονικά του ορόφου. Μέχρι και 12 τέτοιοι όροφοι, διαμέτρου 32 m ο καθένας και τοποθετημένοι ο ένας πάνω από τον άλλο σε απόσταση 30 m, αποτελούν ένα πύργο του ανιχνευτή ΝΕΣΤΩΡ (Εικόνα 6). Ο πύργος θα έχει συνολικό ύψος 330 m, θα είναι 100



τη πάνω από τον βυθό και αγκυροβολημένος με την Πυραμίδα Αγκυρας, ενώ η άνωση του θα τον κρατάει κατακόρυφο. Τα ηλεκτρονικά του ορόφου αποτελούνται από τους **ψηφιοποιητές**, τη **σκανδάλη**, την **επικοινωνία** και τον **έλεγχο**. Οι ψηφιοποιητές λαμβάνουν (μέσω ειδικού καλωδίου) τα αναλογικά σήματα των φωτοπολλαπλασιαστών και τα μετατρέπουν σε ψηφιακές λέξεις. Τα ηλεκτρονικά του ελέγχου διαβάζουν περιβαλλοντολογικά στοιχεία του συστήματος και ρυθμίζουν τη λειτουργία του ορόφου. Η σκανδάλη είναι το λογικό κύκλωμα το οποίο αποφασίζει, ανάλογα με τις συνθήκες που έχουμε προγραμματίσει, αν έχουμε ένα «γεγονός». Σε αυτή την περίπτωση αναλαμβάνουν τα ηλεκτρονικά της επικοινωνίας να στείλουν οπτικά τα δεδομένα στην ξηρά. Τέλος σε κάθε όροφο είναι συνδεδεμένες μονάδες βαθμονόμησης με τις οποίες ελέγχεται οπτικά η καλή λειτουργία του συστήματος. Η ενεργός διατομή του πύργου ΝΕ-ΣΤΩΡ για μόνια υψηλής ενέργειας υπολογίζεται σε περίπου 10 000 m<sup>2</sup>.

- ▶ Το **Σχοινί Πόντισης**, μήκους 5000 m, είναι δεμένο στην κορυφή του ανιχνευτή. Το Σχοινί Πόντισης χρησιμοποιείται για την ανέλκυση και πόντιση του συστήματος στις διάφορες φάσεις κατασκευής του ανιχνευτή και αλλαγής του **Επιστημονικού Φορτίου** και ποντίζεται σαν επέκταση του καλωδίου στο βυθό της θάλασσας. Το άλλο άκρο του σχοινού είναι δεμένο στον **Πλωτήρα Πόντισης** (Εικόνα 7). Αυτός ο πλωτήρας συνδέεται με άγκυρα μέσω ακουστικών ελευθερωτών.



Εικ. 7. Ο Πλωτήρας Πόντισης αφού έχει ανέβει στην επιφάνεια της θάλασσας και έχει εντοπιστεί.

Η διαδικασία πόντισης του Επιστημονικού Φορτίου αποτελείται από τρεις φάσεις:

α) Κατ' αρχήν γίνεται η ανέλκυση του Επιστημονικού Φορτίου το οποίο είναι ήδη ποντισμένο. Αφού το κατάλληλο σκάφος επιφανείας φτάσει στο σημείο όπου είναι ποντισμένος ο Πλωτήρας Πόντισης, με ειδικό μηχανήμα δίνουμε ακουστικά εντολή στον απελευθερωτή που είναι ποντισμένος και συνδεδεμένος στην άγκυρα του πλωτήρα, να απελευθερώσει την άγκυρα. Τότε, ο πλωτήρας ανεβαίνει στην επιφάνεια της θάλασσας παρασύροντας μαζί του το Σχοινί Πόντισης. Όταν ο πλωτήρας φτάσει στην επιφάνεια και αφού εντοπιστεί, συλλέγεται από το σκάφος επιφανείας, το οποίο στη συνέχεια αρχίζει να μαζεύει το Σχοινί Πόντισης ακολουθώντας ένα αυστηρό πρόγραμμα πλοήγησης (θέση, χρόνος και μήκος σχοινού πόντισης που έχει ήδη ανέλκυσει), ώστε να μη συρθεί και υποστεί βλάβη το Επιστημονικό Φορτίο ή το καλώδιο που είναι ακόμα στο βυθό της θάλασσας. Συνεχίζοντας αυτή τη διαδικασία κάποια στιγμή αρχίζει και η ανέλκυση του Επιστημονικού Φορτίου με το άκρο του καλωδίου το οποίο είναι συνδεδεμένο με αυτό. Η φάση αυτή τελειώνει όταν το Επιστημονικό Φορτίο φτάσει στην επιφάνεια της θάλασσας.

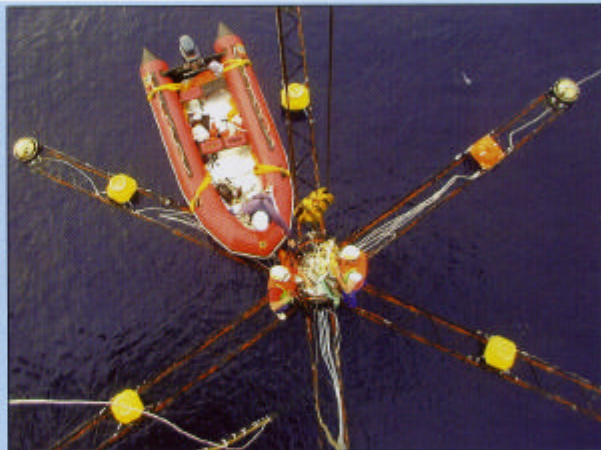
β) Η διαδικασία αντικατάστασης του Επιστημονικού Φορτίου αρχίζει με την ακινητοποίηση του σκάφους επιφανείας. Αυτό σημαίνει, ότι με τη βοήθεια του GPS<sup>4</sup> και με τη χρήση των μηχανών του σκάφους, το σκάφος παραμένει σε ένα συγκεκριμένο στίγμα (και με ακρίβεια 10 m) για όσο διάστημα χρειαστεί. Ακολούθως, χρησιμοποιώντας τους γεραμούς του σκάφους επιφανείας και με φουσκωτά στην επιφάνεια της θάλασσας γίνεται αφενός η αφαίρεση του υπάρχοντος Επιστημονικού Φορτίου αφετέρου η τοποθέτηση του νέου (Εικόνες 8 και 9). Καθ' όλη τη διάρκεια των εργασιών, το άκρο του ηλεκτρο-οπτικού καλωδίου είναι ασφαλισμένο στο σκάφος επιφανείας. Η αλλαγή του Επιστημονικού Φορτίου γίνεται ανάλογα με το πρόγραμμα του πειράματος, κυρίως για να τοποθετήσουμε περισσότερους ορόφους.

<sup>4</sup> GPS, Global Positioning System, παγκόσμιο σύστημα προσδιορισμού στίγματος.





Εικ. 8 και 9. Ο αστερίας του τηλεσκοπίου ΝΕΙΣΤΩΡ (φάση α') κατά την διάρκεια χειρισμών αλλαγής του Επιστημονικού Φορτίου.



γ) Η διαδικασία πόντισης αρχίζει την στιγμή που ο ανιχνευτής είναι κάτω από την επιφάνεια της θάλασσας συγκρατούμενος (μαζί με το καλώδιο) από το Σχοινί Πόντισης (Εικόνα 10). Το σκάφος επιφανείας ακολουθώντας πάλι ένα πρόγραμμα πλοήγησης, ποντίζει το επιστημονικό φορτίο και το καλώδιο που είναι συνδεδεμένο με αυτό, σύμφωνα με τους κανόνες πόντισης καλωδίων. Όταν υπολογιστεί ότι το Επιστημονικό Φορτίο έχει ακουμπήσει στο βυθό, τοποθετείται ο Πλωτήρας Πόντισης (με την άγκυρά του) στην θάλασσα και δένεται το Σχοινί Πόντισης σε αυτόν. Ο πλωτήρας (πού τώρα λόγω της άγκυρας, το βάρος του συστήματος είναι μεγαλύτερο από την άνωσή του) συγκρατούμενος από το σκάφος με ένα βοηθητικό σχοινί μέσω ακουστικού απελευθερωτή, αρχί-

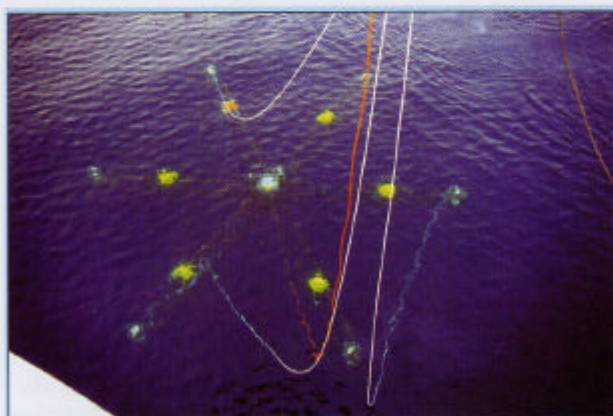
ζει να βυθίζεται ελεγχόμενα από το σκάφος έως ότου φθάσει σε απόσταση περίπου 500 m από το βυθό. Τότε, με ειδική ακουστική εντολή από το σκάφος, ο ακουστικός απελευθερωτής ανοίγει, και ο μεν πλωτήρας κατεβαίνει στο βυθό με ελεύθερη κατάβαση, το δε σκάφος αφού μαζέψει το βοηθητικό σχοινί, επιστρέφει στο λιμάνι.

Θα πρέπει να παρατηρηθεί εδώ, ότι ο ανιχνευτής τροφοδοτείται με ηλεκτρική ισχύ μόλις περάσει το βάθος των 500 m περίπου, οπότε από το σταθμό ξηράς παρατηρούμε την κάθοδο του προς το βυθό, και προσδιορίζουμε (με πιεσόμετρα) πότε έχει καθίσει και σταθεροποιηθεί σε αυτόν.

### Δεδομένα

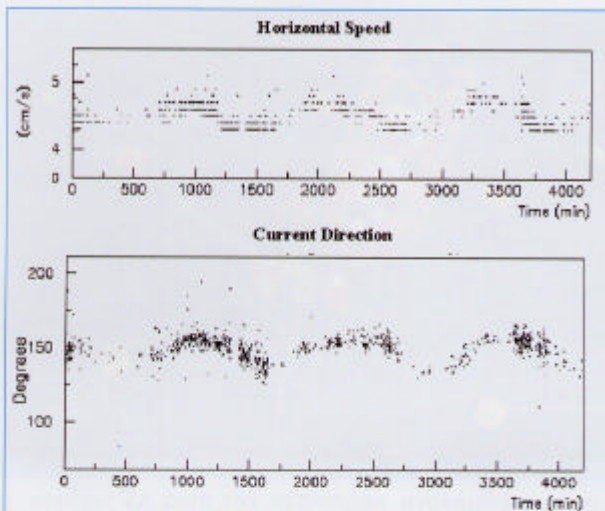
Ένα τυπικό διάγραμμα της ταχύτητας και φοράς υποθαλάσσιων ρευμάτων, όπως καταμετρήθηκαν από τον υποθαλάσσιο ρευματογράφο που είναι τοποθετημένος στη Πυραμίδα Άγκυρας και μετρά το ρεύμα 20 cm από το βυθό, φαίνεται στην Εικόνα 11. Παρατηρούμε μια πιθανή επιρροή της παλιρροιακής δράσης ή από κυκλοφορία που οφείλεται σε μέγιστο πεδίου ατμοσφαιρικής πίεσης. Η θερμοκρασία του νερού στο ίδιο βάθος έχει την τυπική τιμή για τα μεγάλα βάθη της Μεσογείου, 14,4 °C.

Ο σειсмоγράφος βυθού κατέγραψε πολλές σεισμικές δονήσεις, οι οποίες αντιστοιχίστηκαν με σεισμούς που κατέγραψε το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών. Έτσι στην Εικόνα 12 φαίνεται ένα τυπικό σειсмоγράφημα που καταγράψαμε αντιστοιχεί στον σεισμό μεγέθους 3,9 ρί-

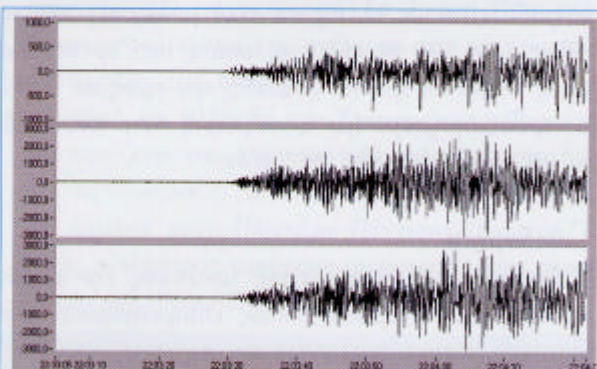


Εικ. 10. Ο όροφος καθώς βυθίζεται ελεγχόμενα. Ο αστερίας παρασύρεται από την Πυραμίδα Άγκυρας η οποία είναι ήδη 80 m κάτω από την επιφάνεια του νερού και συγκρατείται από το Σχοινί Πόντισης.





**Εικ. 11.** Ταχύτητα και διεύθυνση των υποβρυχίων ρευμάτων σε βάθος 4000 m και σε απόσταση 20 cm από τον βυθό. Παρατηρούμε ότι η ταχύτητα είναι πολύ χαμηλή (λιγότερο από 5 cm/s) με διεύθυνση περίπου νότια. Παρατηρείται επίσης μία περιοδικότητα περίπου 20 ωρών. [Η διεύθυνση των θαλασσιών ρευμάτων ορίζεται «προς τα που κατευθύνεται το ρεύμα», ενώ η διεύθυνση του ανέμου ορίζεται «από που φυσάει ο άνεμος».]



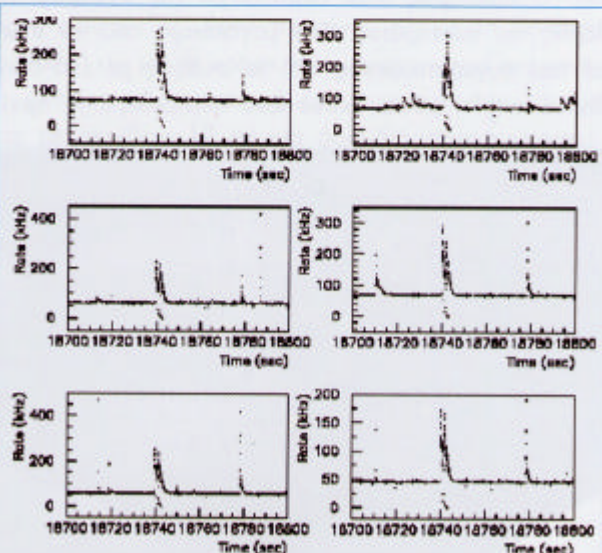
**Εικ. 12.** Σεισμογράφημα του Σεισμογράφου Βυθού (OBS). Αντιστοιχεί σε σεισμό που κατέγραψε το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο του Εθνικού Αστεροσκοπείου Αθηνών, στις 30 Ιανουαρίου 2002, ώρα 20:03:33.8 GMT, εντάσεως 3.9, βάθους 5km και επίκεντρο στο στίγμα 37.66° N, 21.66° E, περίπου 120km Βόρεια από το τηλεσκόπιο. (Ο χρόνος στο γράφημα είναι σε τοπική ώρα Ελλάδος.)

χτερ που έγινε στις 30 Ιανουαρίου 2002 και ώρα 20:03GMT, με επίκεντρο 37,66°N, 21,66°E και βάθος 5 km. (Το Γεωδυναμικό Ινστιτούτο αναφέρει τους σεισμούς σε χρόνο GMT ενώ ο ΝΕΣΤΩΡ σε τοπική ώρα.)

Στην Εικόνα 13 φαίνεται ο ρυθμός καταγραφών των φωτοπολλαπλασιαστών. Οι περισσότερες από αυτές οφείλονται στο θερμιοκτικό θόρυβο των φωτοπολλαπλασιαστών (που είναι γενικά χαμηλός) και σε φωτόνια που παράγονται έμμεσα από τη διάσπαση του ραδιενεργού ισότοπου του καλίου  $K^{40}$  (το οποίο βρίσκεται σε χαμηλό ποσοστό στο νερό της θάλασσας). Ο θόρυβος αυτός στον ανιχνευτή μας ανέρχεται σε περίπου 50 kHz. Ωστόσο παρατηρούμε εξάρσεις του θορύβου διάρκειας μερικών δευτερολέπων. Αυτές οφείλονται στο φως που εκπέμπουν μικροοργανισμοί της θάλασσας όταν διεγερθούν, δηλαδή στη βιοφωταύγεια.

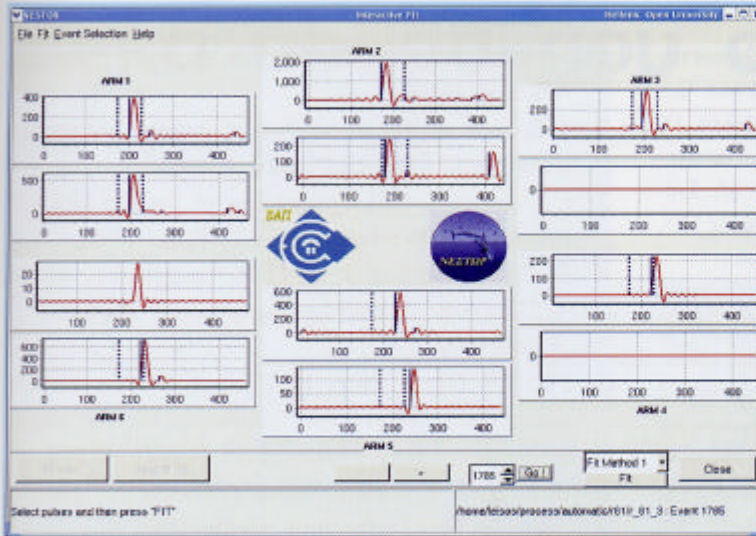
Τέλος, στην Εικόνα 15 φαίνεται η γραφική αναπαράσταση ενός τυπικού γεγονότος, ενός μιονίου και των φωτονίων που παρήγαγε και ανιχνεύσαμε με το τηλεσκόπιο νετρίνο ΝΕΣΤΩΡ με ένα όροφο (Φάση Α').

Ας μελετήσουμε τη διαδικασία ανίχνευσης του μιονίου σε αυτό το τυπικό παράδειγμα. Το μόνιο παρήγαγε φωτόνια, μερικά από τα οποία έφθασαν στους φωτοπολλαπλασιαστές και έδωσαν ηλεκτρικούς παλμούς διάρκειας μερικών νανοδευτερολέπων ( $10^{-9}$ s). Ενώ οι παλμοί οδεύουν μέσω γραμμών καθυστέρησης (delay lines) στους ψηφιοποιητές, το σύστημα σκανδάλης (fast trigger), αποφασίζει, σύμφωνα με τα κριτήρια που έχουμε θέσει, αν το γεγονός είναι αποδεκτό. Αν είναι,



**Εικ. 13.** Οι συχνότητα παλμών των φωτοπολλαπλασιαστών συναρτήσει του χρόνου για τους έξι φωτοπολλαπλασιαστές που έχουν την φωτοκάθοδο προς τα πάνω. Παρατηρούμε της εξάρσεις της συχνότητας λόγω βιοφωταύγειας.





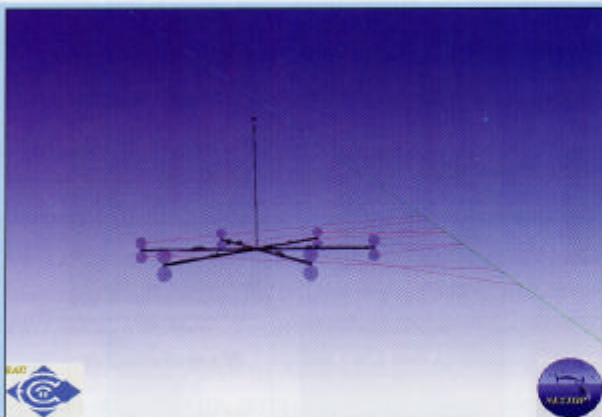
**Εικ. 14.** Ανακατασκευασμένοι παλμοί φωτοπολλαπλασιαστών. Οι διακεκομμένες γραμμές σημειώνουν την χρονική περιοχή στην οποία θα πρέπει να βρίσκονται οι παλμοί, ώστε να συμμετάσχουν στον προσδιορισμό της τροχιάς του μιονίου, στο συγκεκριμένο παράδειγμα.

τότε επιτρέπουμε στους παλμούς των φωτοπολλαπλασιαστών να φτάσουν στους ψηφιοποιητές όπου και ψηφιοποιούνται. Το υπερταχές αυτό σύστημα ψηφιοποίησης, που σχεδιάστηκε και κατασκευάστηκε από την ομάδα του Πανεπιστημίου του Berkeley, αποτελείται από ATWD (Analog Transient Waveform Digitizer) με δυνατότητα ψηφιοποίησης  $3 \times 10^8$  δειγμάτων των 10 bit ανά δευτερόλεπτο.

Οι ψηφιοποιημένοι παλμοί και άλλες ψηφιακές πληροφορίες της λειτουργίας του ανιχνευτή κωδικοποιού-

νται σε πακέτα πληροφορίας και αποστέλλονται οπτικά, μέσω των οπτικών ινών, στον Τερματικό Σταθμό, όπου την πειραματική πληροφορία υποδέχεται το Σύστημα Λήψης Δεδομένων. Εδώ η πληροφορία μετατρέπεται σε κωδικοποιημένες ψηφιακές λέξεις (των 16 bits) και αποθηκεύεται σε σκληρούς και οπτικούς δίσκους υπολογιστών (hard disks, CD). Το Σύστημα Λήψης Δεδομένων, το οποίο αναπτύχθηκε από την ομάδα του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου, ελέγχει, επίσης, συνεχώς την καλή λειτουργία των ηλεκτρονικών, τις περιβαλλοντικές συνθήκες του ανιχνευτή και την ποιότητα των πειραματικών δεδομένων.

Ακολουθώντας, με το πρόγραμμα ανάλυσης των δεδομένων (το οποίο επίσης αναπτύχθηκε από την ομάδα του Ελληνικού Ανοικτού Πανεπιστημίου, ΕΑΠ) επεξεργαζόμαστε την αποθηκευμένη πειραματική πληροφορία, ώστε να ελαχιστοποιηθούν τα σφάλματα μέτρησης των χαρακτηριστικών των παλμών των φωτοπολλαπλασιαστών. Στην Εικόνα 14 απεικονίζονται οι ανακατασκευασμένες κυματομορφές των φωτοπολλαπλασιαστών για ένα τυπικό γεγονός. Στη συνέχεια, από τους χρόνους άφιξης των φωτονίων στους φωτοπολλαπλασιαστές και από το ύψος των παλμών που καταγράψαμε, προσδιορίζουμε τις παραμέτρους της τροχιάς του μιονίου. Στην Εικόνα 15, όπως αναφέραμε προηγουμένως, φαίνεται η γραφική αναπαράσταση αυτού του τυπικού γεγονότος (το μίονιο οδεύει προς την άνω αριστερή γωνία της εικόνας, ενώ τα φωτόνια Cherenkov παρίστανται με κόκκινη γραμμή).



**Εικ. 15.** Γραφική αναπαράσταση της εκπομπής φωτονίων ακτινοβολίας Cherenkov (κόκκινες γραμμές) προς τους φωτοπολλαπλασιαστές κατά τη διέλευση μιονίου κοντά στον όροφο του τηλεσκοπίου. Για τον προσδιορισμό των παραμέτρων της τροχιάς του μιονίου χρησιμοποιήθηκαν τα πειραματικά δεδομένα που παρίστανται στην Εικόνα 14.



**\*Συνεργάτες**

Ανασοντζής Ε.Γ.<sup>α</sup>, Ball A.E.<sup>β</sup>, Μπουρλής Γ.<sup>γ</sup>, Chinowsky W.<sup>δ</sup>, Γραμματικάκης Γ.<sup>ε</sup>, Fahrur E.Y, Fahrur E.Y, Green C.Y, Grieder P.<sup>ς</sup>, Ilinski D.<sup>η</sup>, Koske P.Y, Λεϊσος Α.<sup>ζ</sup>, Makris J.<sup>θ</sup>, Μαρκόπουλος Η.<sup>θ</sup>, Minkowsky P.<sup>ς</sup>, Nygren D.<sup>ι</sup>, Παπαγεωργίου Κ.<sup>θ</sup>, Ρεσβάνης Α.Κ.<sup>αθ</sup>, Σιώτης Ι., Sopher J.<sup>λ</sup>, Στάβερης Α.<sup>ς</sup>, Τζαμαρίας Σ.<sup>ς</sup>, Τσαγλή Β.<sup>θ</sup>, Τσιριγώτης Α.<sup>ς</sup>, Zhukov V.A.<sup>ς</sup>

<sup>α</sup>Ε.Κ. Πανεπιστήμιο Αθηνών, Ελλάδα, <sup>β</sup>CERN, Switzerland, <sup>γ</sup>University of Kiel, Germany, <sup>δ</sup>Πανεπιστήμιο Κρήτης, Ελλάδα, <sup>ε</sup>University of Bern, Switzerland, <sup>ς</sup>Ελληνικό Ανοικτό Πανεπιστήμιο, Ελλάδα, <sup>η</sup>GEOPRO, Hamburg and Institut für Geophysik, Universität Hamburg, Germany, <sup>θ</sup>Ινστιτούτο ΝΕΣΤΩΡ, Ελλάδα, <sup>ι</sup>ΕΚΕΦΕ "Δημόκριτος", Ελλάδα, <sup>λ</sup>Institute for Nuclear Research, Russian Academy of Sciences, Russia, <sup>λ</sup>Lawrence Berkeley National Laboratory, USA.

**Σχετικοί δικτυακοί τόποι**

[www.nestor.org.gr](http://www.nestor.org.gr), [www.phys.hawaii.edu/\\_jgl/nuastron.html](http://www.phys.hawaii.edu/_jgl/nuastron.html), [www.lapp.in2p3.fr/nuetrinos/aneut.html](http://www.lapp.in2p3.fr/nuetrinos/aneut.html), [hep.physics.uch.gr/DOC/OUTREACH/ARTICLES/neutrino.html](http://hep.physics.uch.gr/DOC/OUTREACH/ARTICLES/neutrino.html), [cupp.oulu.fi/neutrino](http://cupp.oulu.fi/neutrino)

**Βιβλιογραφία**

- 1 Nickolas Solomey, *The elusive neutrino*, Scientific American Library.
- 2 J. G. Learned, An introduction to neutrino astronomy, [www.phys.hawaii.edu/\\_jgl/nuastron.html](http://www.phys.hawaii.edu/_jgl/nuastron.html)
- 3 L. K. Resvanis, (Ed.), *Proceedings of the 3rd NESTOR International Workshop*, (1993), Pylos 1993.
- 4 E. G. Anassontzis et al, Light transmissivity in the NESTOR site, *Nuclear Instruments and Methods A* 349 (1994), p. 242.
- 5 NESTOR collaboration, NESTOR: A neutrino particle astrophysics underwater laboratory for the Mediterranean, *Nuclear Physics B* 35 (1994), p. 294.
- 6 H. L. Clark, Continuous ocean presence for scientific research, *Sea Technology*, August 2002.
- 7 Deep-sea km<sup>3</sup> neutrino detector gets thumbs up, *Physics Today*, October 2002.
- 8 E. G. Anassontzis, P. Koske, Deep-sea station connected with cable to shore, *Sea Technology*, July 2003.