

Εισαγωγή

# Εισαγωγή στην Ακουστική Ωκεανογραφία

Το θαλάσσιο περιβάλλον είναι γεμάτο πληροφορίες που σχετίζονται με την ιστορία την καθημερινή μας ζωή, αλλά και το μέλλον της ανθρωπότητας.

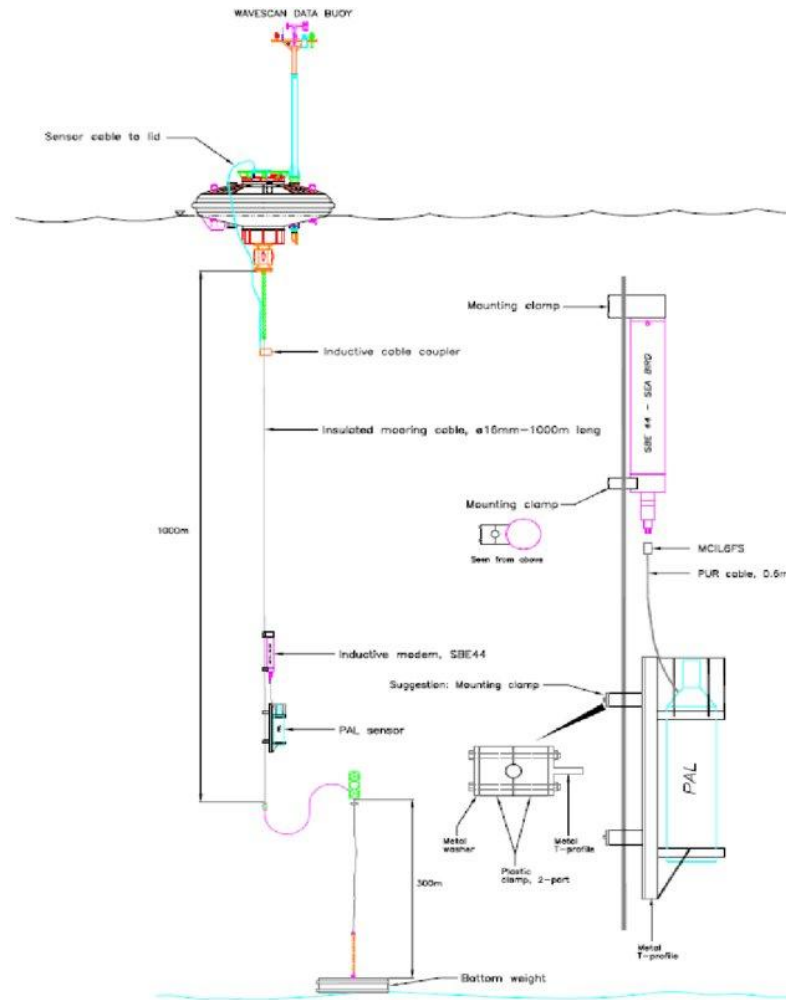
Η ανάκτηση των πληροφοριών αυτών δημιουργεί γνώση που με κατάλληλη αξιοποίηση μπορεί να βοηθήσει σε μία καλύτερη διαχείριση του οικοσυστήματος μας.

Πως μπορεί να πάρει κανείς πληροφορίες για την κατάσταση της θάλασσας ιδιαίτερα σε μεγάλα βάθη αλλά και να μεταδώσει πληροφορίες δια μέσου της ?

## Μέσα λήψης πληροφοριών

- Μόνιμοι Σταθμοί μετρήσεων
- Ωκεανογραφικά σκάφη
- Δορυφόροι

## Μόνιμοι Σταθμοί



Poseidon (HCMR) Pylos mooring

## Ωκεανογραφικά Σκάφη



## Δορυφόροι





- Η θάλασσα είναι «εχθρική» σε κάθε εισβολέα (άνθρωπο ή όργανο) ενώ είναι πρακτικά αδιαφανής στα ηλεκτρομαγνητικά κύματα
- Οι δορυφόροι μπορούν να δώσουν πληροφορίες για τα επιφανειακά υδάτινα στρώματα μόνο.
- Οι επιτόπιες μετρήσεις μπορεί να δώσουν μεμονωμένες πληροφορίες που θα πρέπει να συνδεθούν με ωκεανογραφικά μοντέλα για να ληφθούν πληροφορίες σε μεσαία ή μεγάλη κλίμακα

### Από την άλλη πλευρά.....

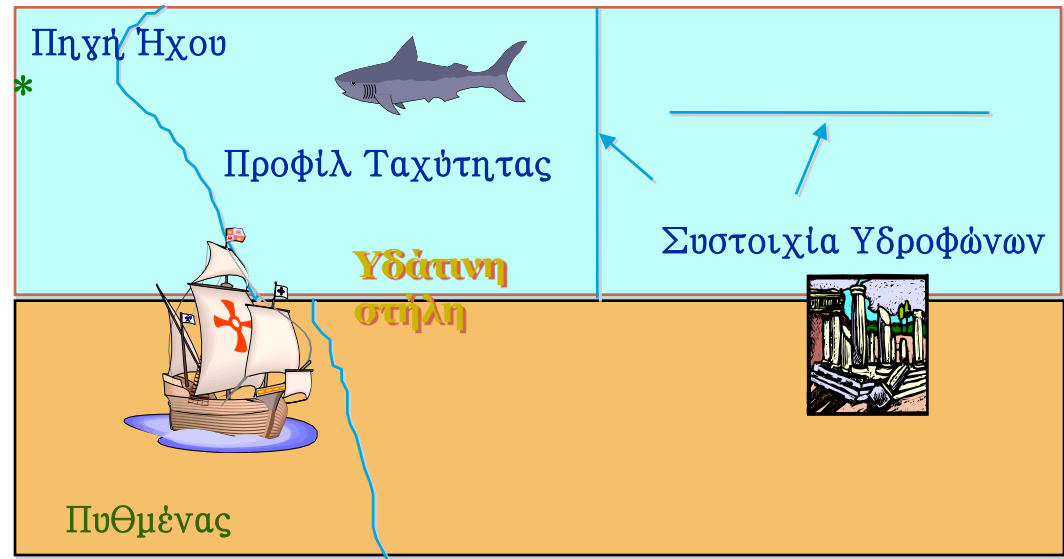
- Η θάλασσα είναι «διαφανής» για τα ακουστικά κύματα !!





# ΣΥΝΕΠΩΣ.....

**Ο ήχος μπορεί να χρησιμοποιηθεί για την μετάδοση δεδομένων και την παρακολούθηση μεταβολών στο θαλάσσιο περιβάλλον !**






## Εισαγωγή στην Ακουστική Ωκεανογραφία

# Πηγές υποθαλάσσιου θορύβου



Πηγή	Εύρος συχνοτήτων
Μικροσεισμοί	-0,2 Hz
Επιφανειακά κύματα	- 1 Hz
Τύρβη	1-100 Hz
Σεισμοί	1-100 Hz
Εγκαταστάσεις άντλησης πετρελαίου	- 100 Hz
Θόρυβος Ναυσιπλοΐας	10-1000 Hz
Άνεμος	300 Hz – 25 kHz
Θερμικός Θόρυβος	20-30 kHz
Βροχή	1-50 kHz
Βιολογικοί Θόρυβοι	10 Hz-100 kHz

Ήχος από υποβρύχιο σεισμό	
Ήχος από θραύση παγόβουνου	
Ήχος από φάλαινα (killer whale)	

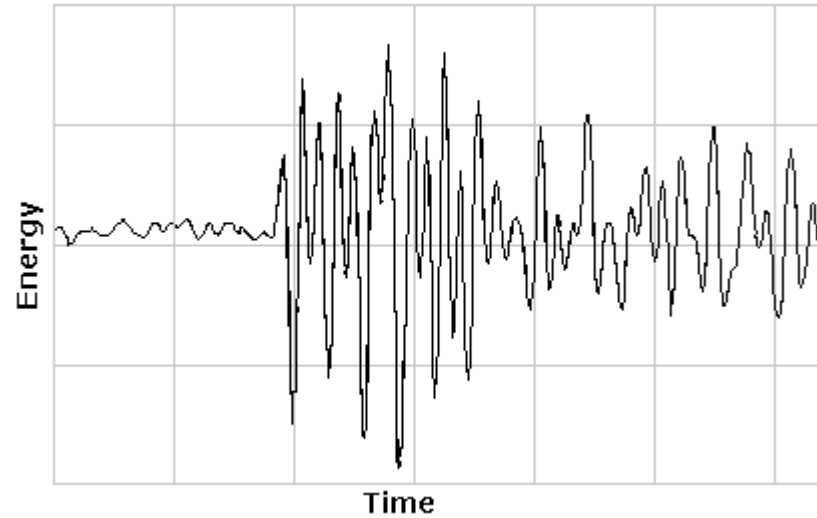
# Some sound samples



Sound file of the loud cracking sound made by an iceberg recorded in Bransfield Strait Antarctica (Oregon State University)



Sound file of the loud cracking sound made by an iceberg recorded in Bransfield Strait Antarctica (Oregon State University)



Earthquakes with fin, minke and humpback whales recorded in the western North Atlantic. Sound ©Cornell Laboratory of Ornithology, Bioacoustics Research Program.



Sound file of an underwater earthquake in Bransfield Strait - Antarctica (Oregon State University)



Sound courtesy of OSAP/IOS CANADA



Light rain recorded just below the surface. Sound courtesy of  
Sonatech & University of Rhode Island





This recording is a small Zodiac with a 35 HP engine. One can hear the engine starting, going into gear and then the thundering cavitation noise as the propeller begins to spin. Sound courtesy of Tom Kieckhefer & University of Rhode Island

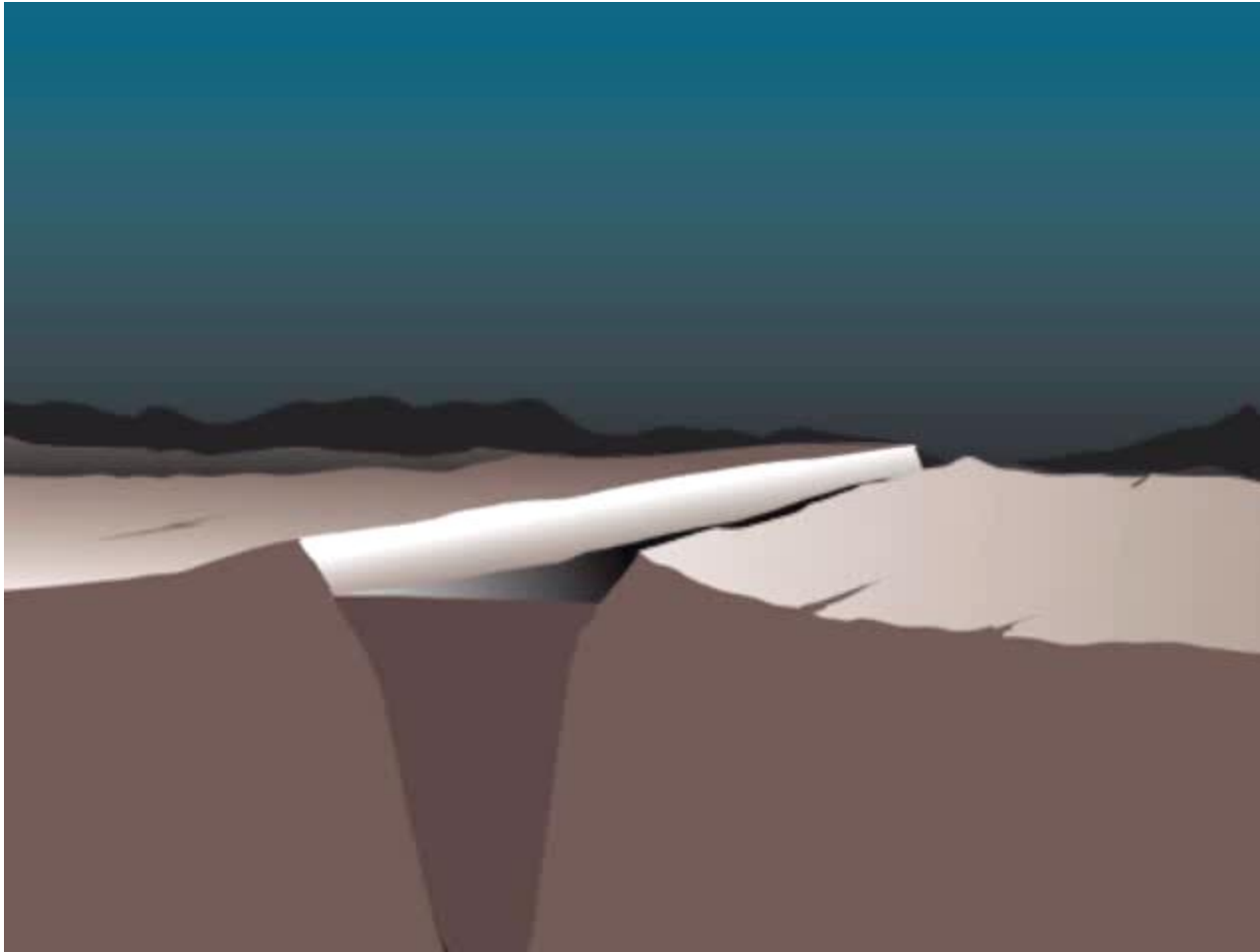


Recorded as vessel was approaching from 1.7 km away. (Sound courtesy of Peter Scheifele & University of Rhode Island)



Recorded 3.2 km away from the ship which was cruising at a speed of 20 knots (Sound courtesy of Tom Kieckhefer & University of Rhode Island)





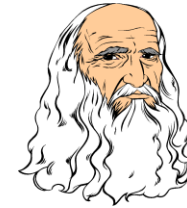
Cartoon movie showing how sound from underwater earthquakes and whales are recorded in moored hydrophone (Oregon State University)

# Απαρχές της επιστήμης



## Αριστοτέλης (384-322 π.Χ.)

.....Από τους πρώτους που αναγνώρισε τη δυνατότητα ακρόασης στο νερό.....



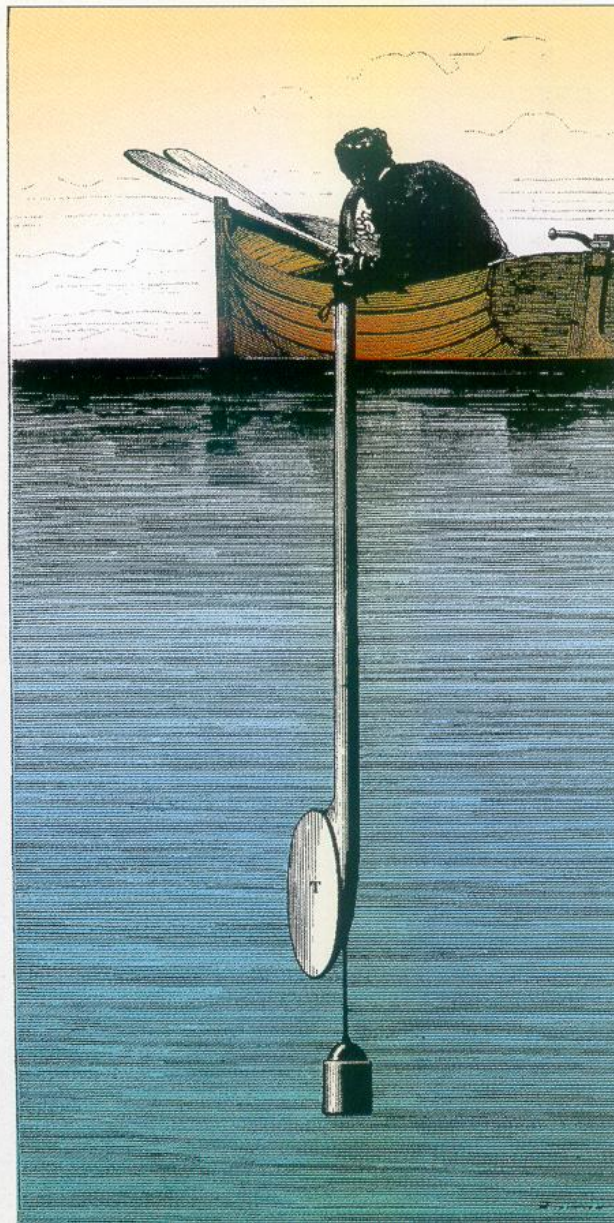
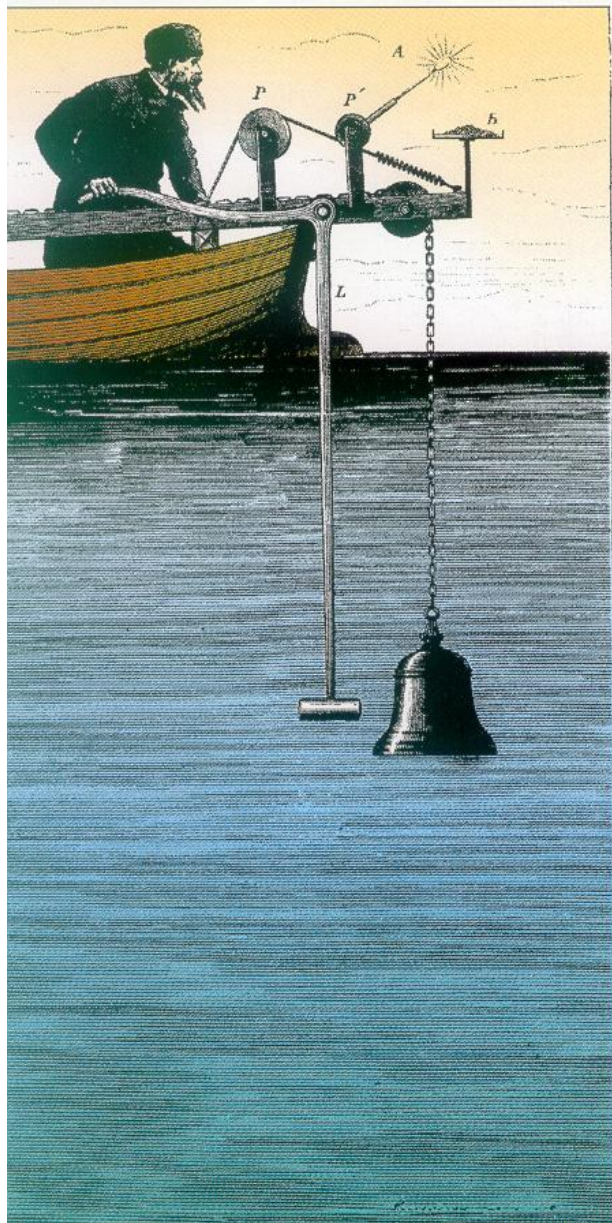
## Leonardo da Vinci (1452-1519 μ.Χ.)

«.....Εάν αναγκάσεις το πλοίο σου να σταματήσει και βάλεις την μία άκρη ενός σωλήνα στο νερό και την άλλη άκρη στο αυτί σου, θα ακούσεις πλοία σε μεγάλες αποστάσεις...»

# Μερικοί σταθμοί στην υποβρύχια ακουστική

- 1743, J.A. Nolett Ο ήχος ακούγεται στο νερό. Υπάρχει διαφορά στην ένταση με το βάθος. Χρήση του αυτιού ως δέκτη .....
- 1780, Alexander Morno Σύγκριση της ταχύτητας διάδοσης του ήχου στο νερό και στον αέρα.

- 1826, J.F.Colladon και J.K.F. Sturm. Μετρούν στην λίμνη της Γενεύης την ταχύτητα του ήχου στο νερό (Annalen der Physik und Chemie, Leipzig, Vol 12, 1828). Ταχύτητα στους 8°C, 1435 m/sec (μόλις 3 m/sec μικρότερη από την σήμερα αποδεκτή ταχύτητα για την δεδομένη περιοχή και θερμοκρασία).

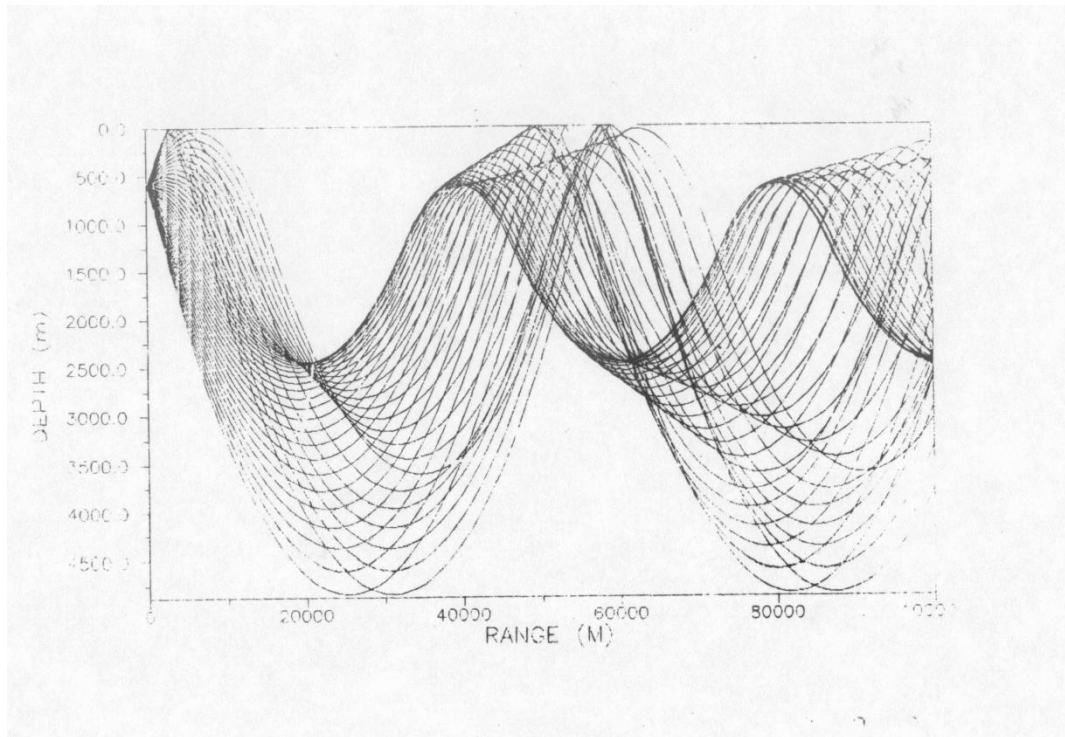


- 1859, M.F. Mauary. Ανακοινώνει την δυνατότητα βαθυμέτρησης με ήχο.
- 1912, R.A. Fessenden Σχεδιάζει τους πρώτους εμπορικά αποδεκτούς μετατροπείς (transducers) υποβρύχιας χρήσης.



- **1918-1940**, Οι ερευνητές μελετούν την φυσική της διάδοσης του ήχου στο νερό και τις μεταβολές των ακουστικών παραμέτρων της θάλασσας. Προετοιμάζονται οι εφαρμογές που σχετίζονται με την ανίχνευση υποβρυχίων.
- **1937**, Οι ωκεανογράφοι συνεργάζονται με τους ακουστικούς. Γέννηση της **Ακουστικής Ωκεανογραφίας**

- 1940-1944, Εκτεταμένες μελέτες για ακουστικά υποβρύχια όπλα.
- 1945, Maurice Ewing, Στέλνει ήχο στη θάλασσα που ακούγεται σε απόσταση 3000 Km (Bahamas – South Africa).

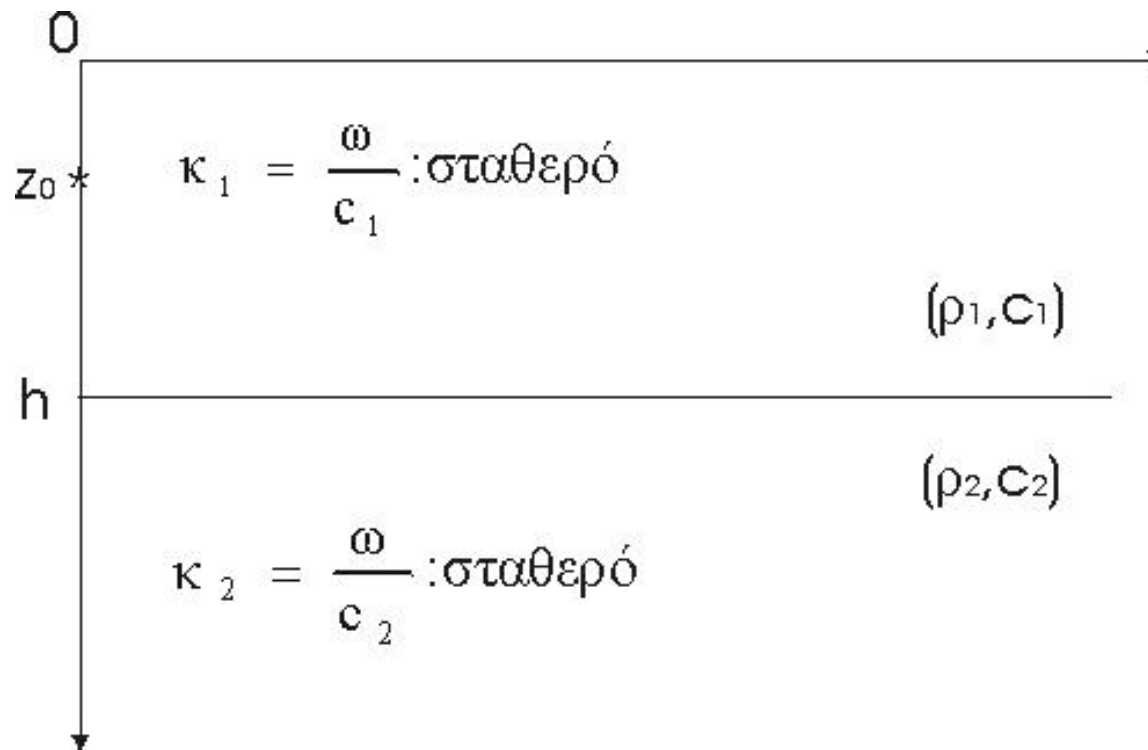


Ανακάλυψη του SOFAR Channel.

Leonid Brekhovskikh (1917-2005)



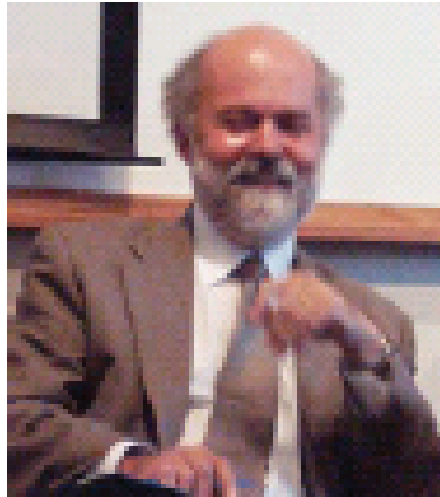
- 1949, C. Pekeris Το πρώτο μοντέλο κανονικών ιδιομορφών για την μαθηματική μελέτη της διάδοσης του ήχου στη θάλασσα.



- **1949-1957**, Οι ερευνητές ασχολούνται με τα πρώτα βήματα της θαλάσσιας βιοακουστικής μελετώντας τις ανακλάσεις του ήχου από τα ψάρια.

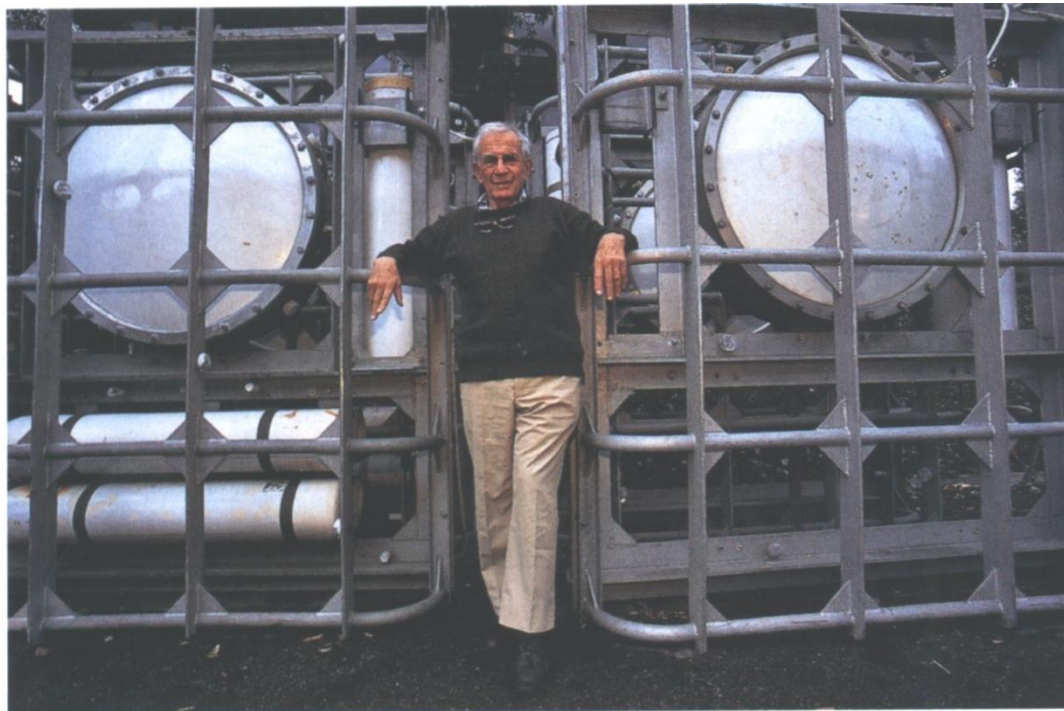


- 1979, F. Tappert (1940-2002) . Εισαγωγή της παραβολικής προσέγγισης στην υποβρύχια ακουστική.

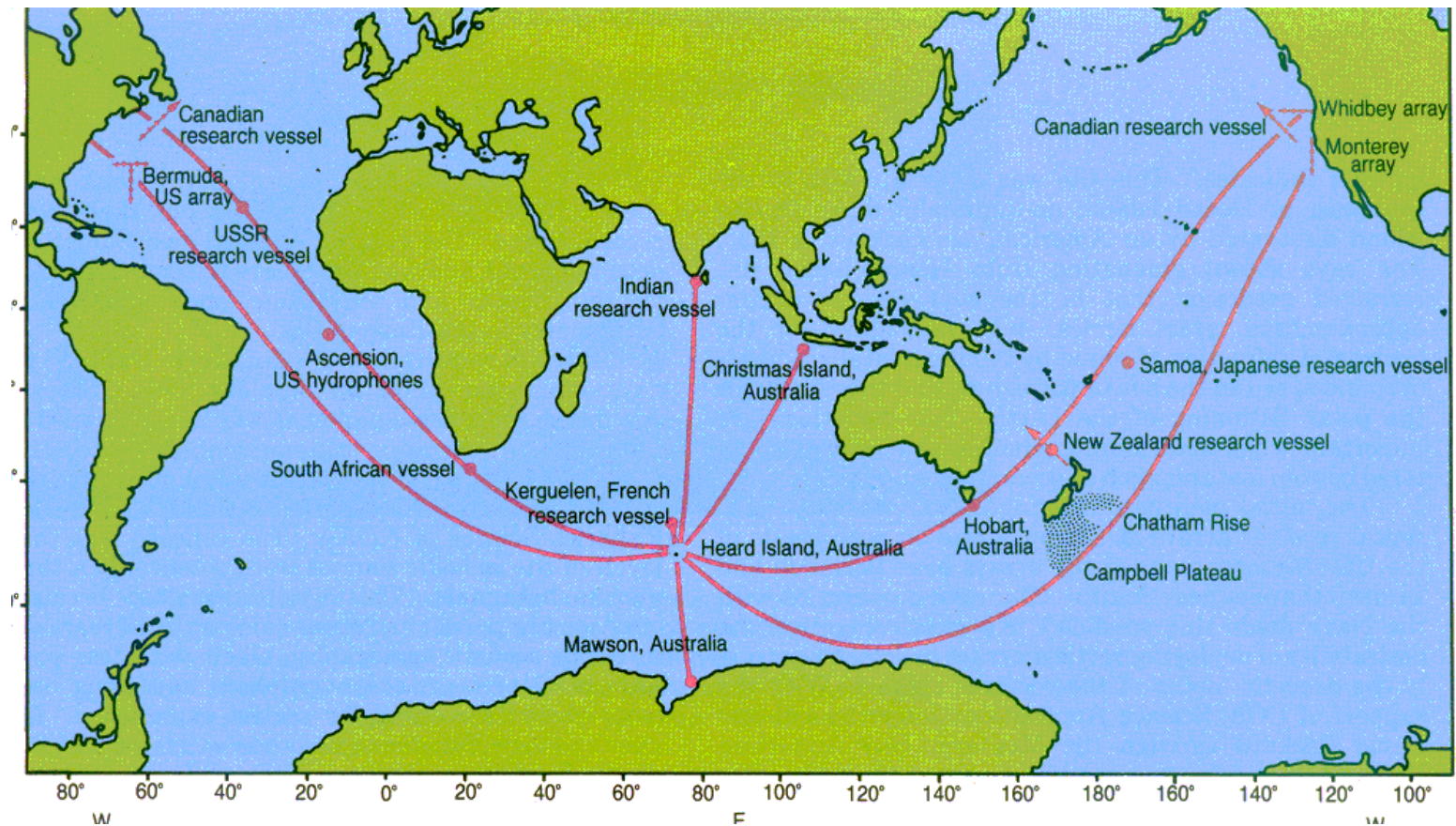


$$i \frac{\partial \psi(r, z)}{\partial r} + \frac{1}{2k_0} \frac{\partial^2}{\partial z^2} \psi(r, z) + \frac{k_0}{2} (n^2(r, z) - 1) \psi(r, z) = 0$$

- 1991, W. Munk (1917- ). Θαλάσσια ακουστική τομογραφία

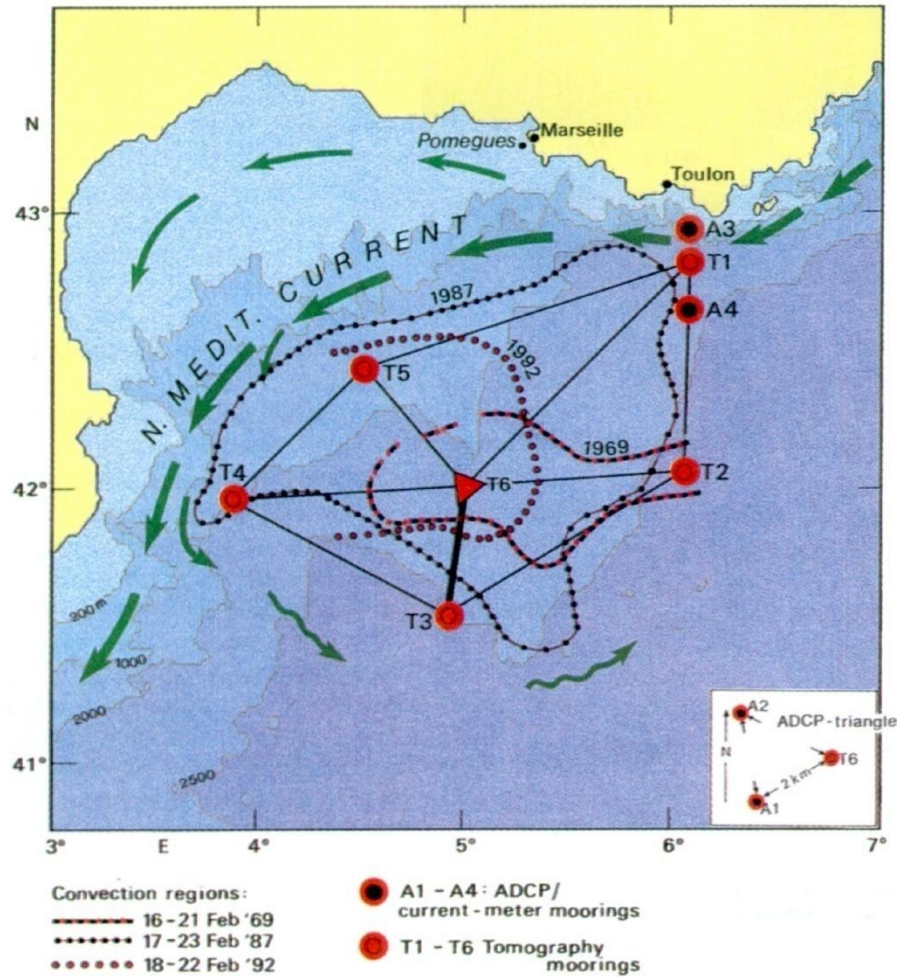


- 1991, Με το πείραμα των νησιών Heard τεκμηριώνεται η δυνατότητα χρήσης του ήχου για την πλανητική παρακολούθηση των μεταβολών του θαλάσσιου περιβάλλοντος





•1991-1992, Πρώτο πείραμα ακουστικής τομογραφίας στην Μεσόγειο



Η θάλασσα για τον ήχο είναι ένας κυματοδηγός. Η ύπαρξη της επιφάνειας και του πυθμένα σε συνδυασμό με την μεταβολή της ταχύτητας διάδοσης του ήχου με το βάθος ευνοούν την μετάδοση του ήχου σε πολύ μεγάλες αποστάσεις χωρίς σημαντική εξασθένηση.

Ερώτηση :

Μπορεί να στείλουμε ένα ακουστικό κύμα στη θάλασσα και αφού αυτό κάνει το γύρο της γήινης σφαίρας να ακουστεί ξανά στο σημείο απ' όπου εκπέμφθηκε ?



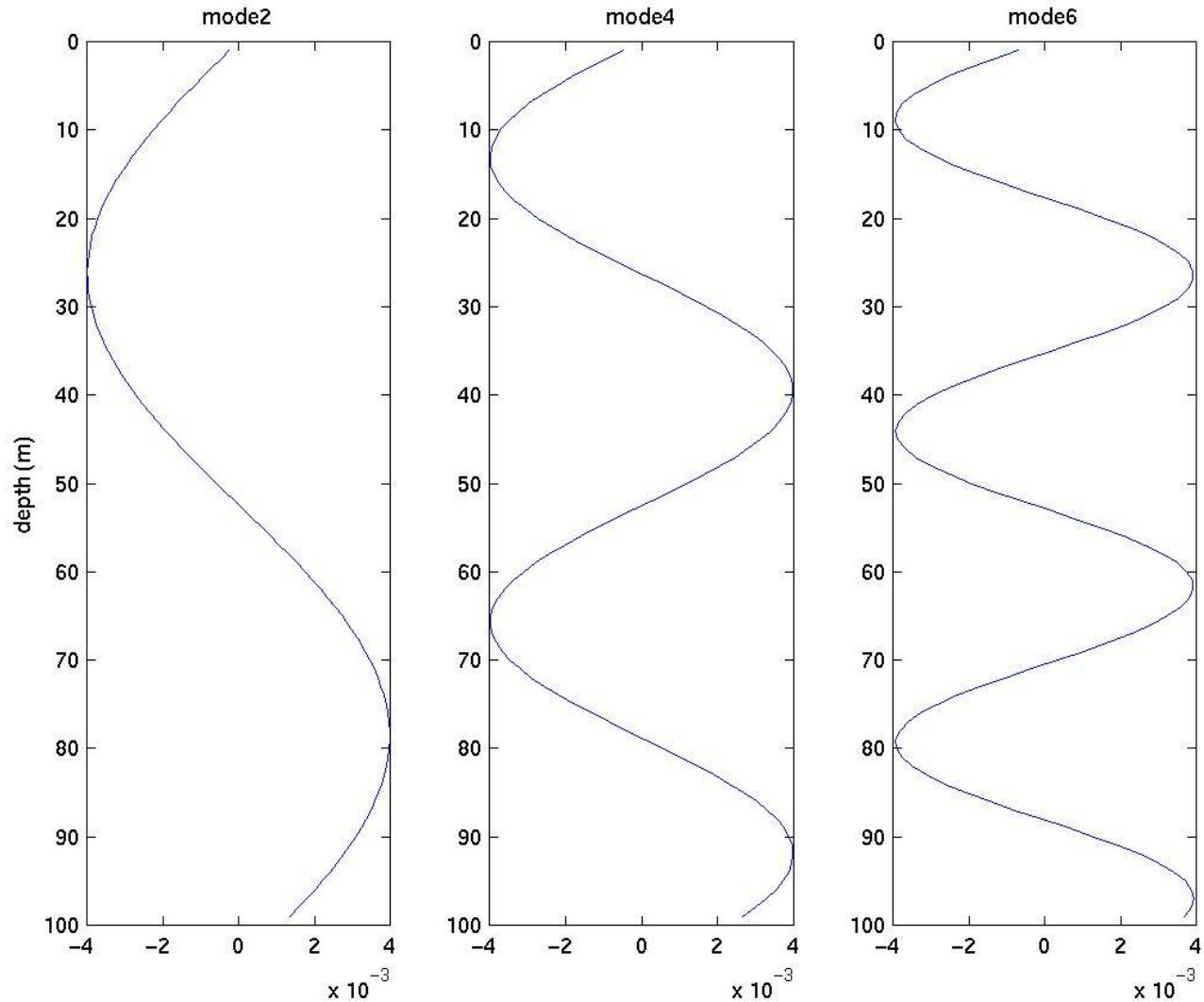
Απάντηση :

**Όχι**

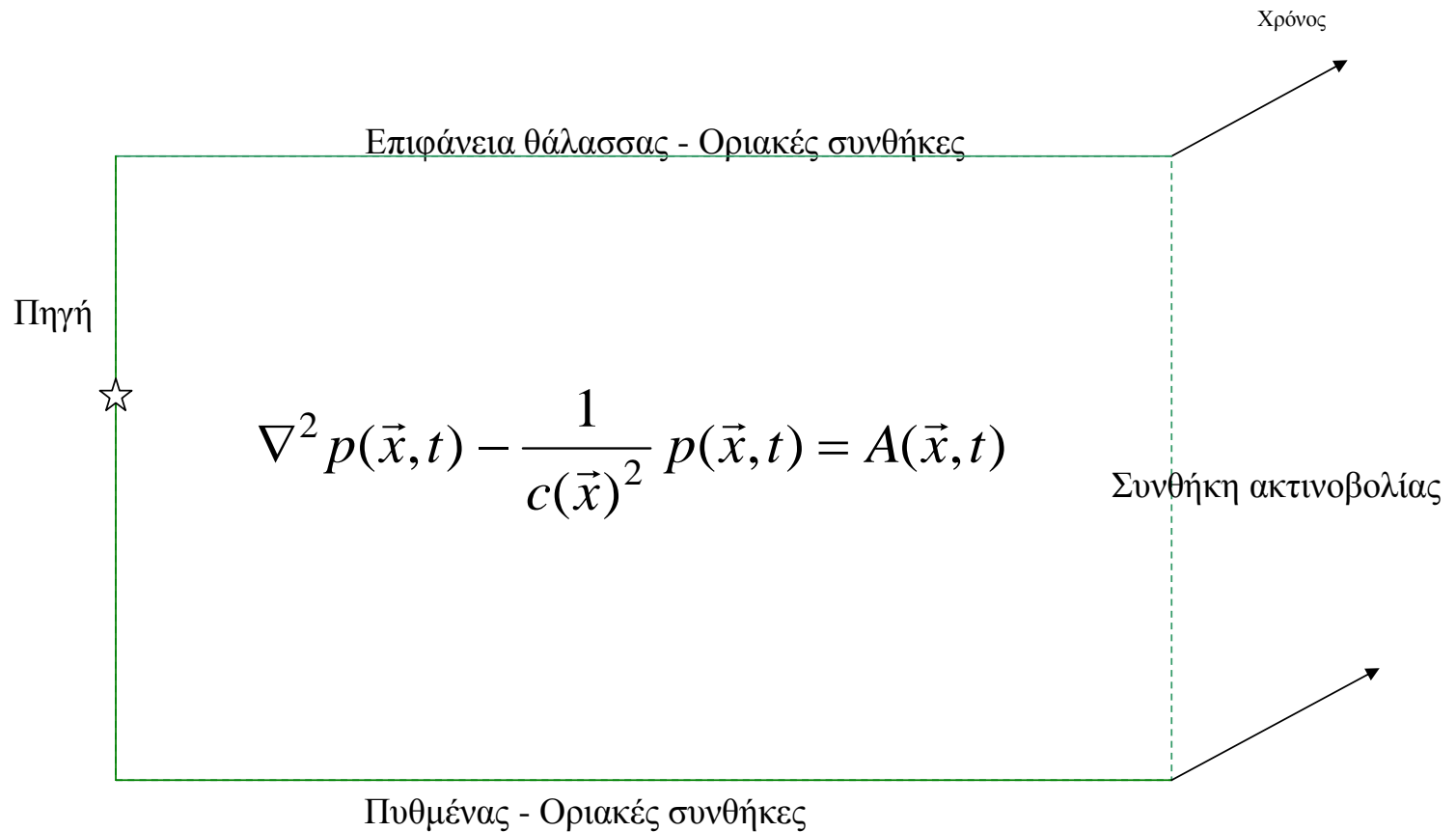
Δεν υπάρχει κυματοδηγός που να διατρέχει όλη τη γήινη σφαίρα. Υπάρχουν όμως κυματοδηγοί που στέλνουν την ηχητική ενέργεια σε τεράστιες αποστάσεις

Ο ήχος διαδίδεται με πολλούς “τρόπους” (modes) ο αριθμός και η μορφή των οποίων εξαρτώνται από τη γεωμετρία, τις παραμέτρους του ακουστικού μέσου και την συχνότητα.

## Τρόποι μετάδοσης της ηχητικής ενέργειας στο νερό



Μαθηματική αναπαράσταση θαλάσσιου περιβάλλοντος για τη μελέτη της διάδοσης του ήχου σε αυτήν.



## Αναπαράσταση κανονικών ιδιομορφών

$$p(\vec{x}) = \sum_{n=1}^N p_n(\vec{x}) = \sum_{n=1}^N B_n(\vec{x})u_n(z)$$

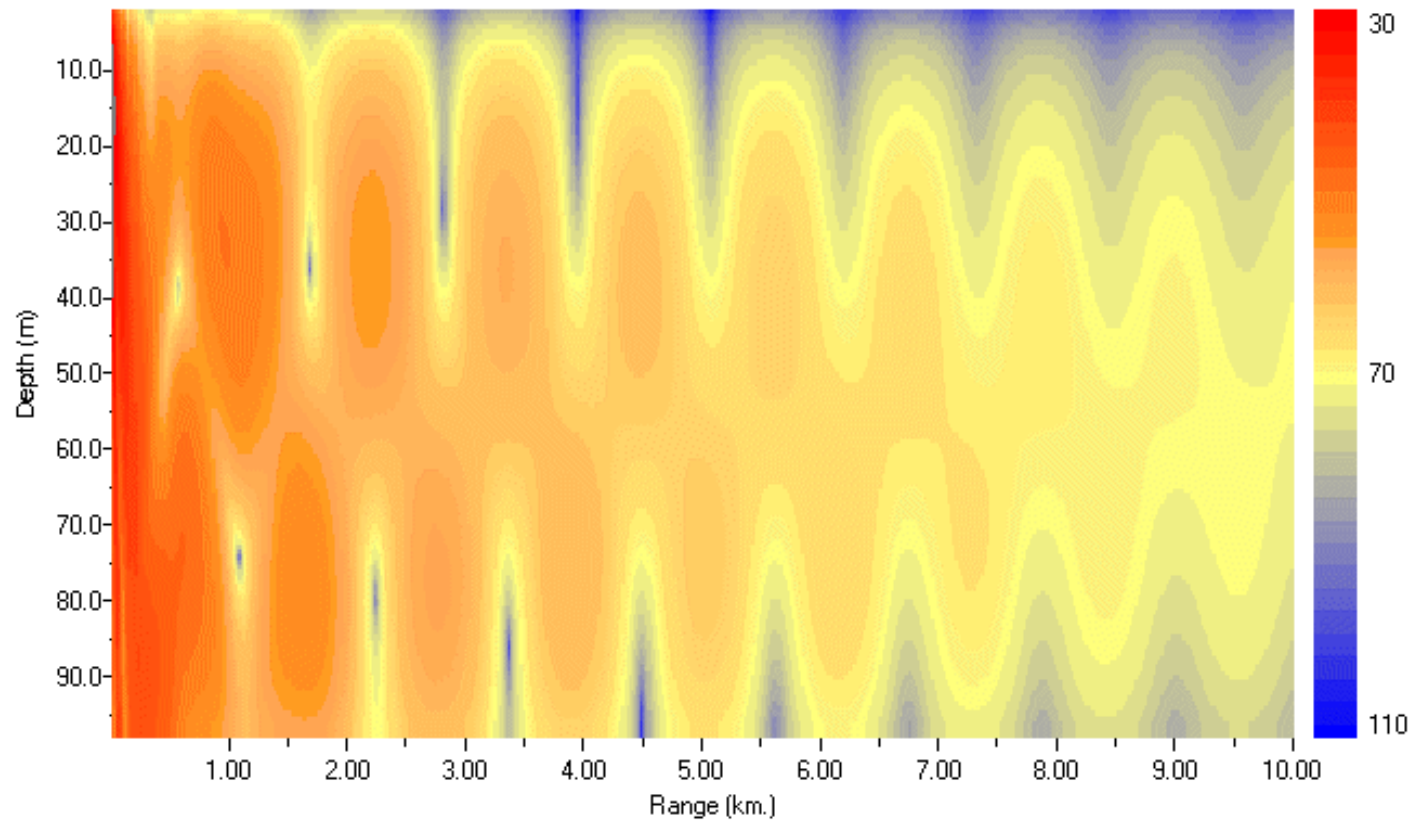
Σε κυλινδρικό σύστημα αξονικής συμμετρίας

$$p(\vec{x}) = p(r, z; z_0) = \sum_{n=1}^N D_n(r, z_0)u_n(z; r)e^{i\ddot{k}_n r}$$

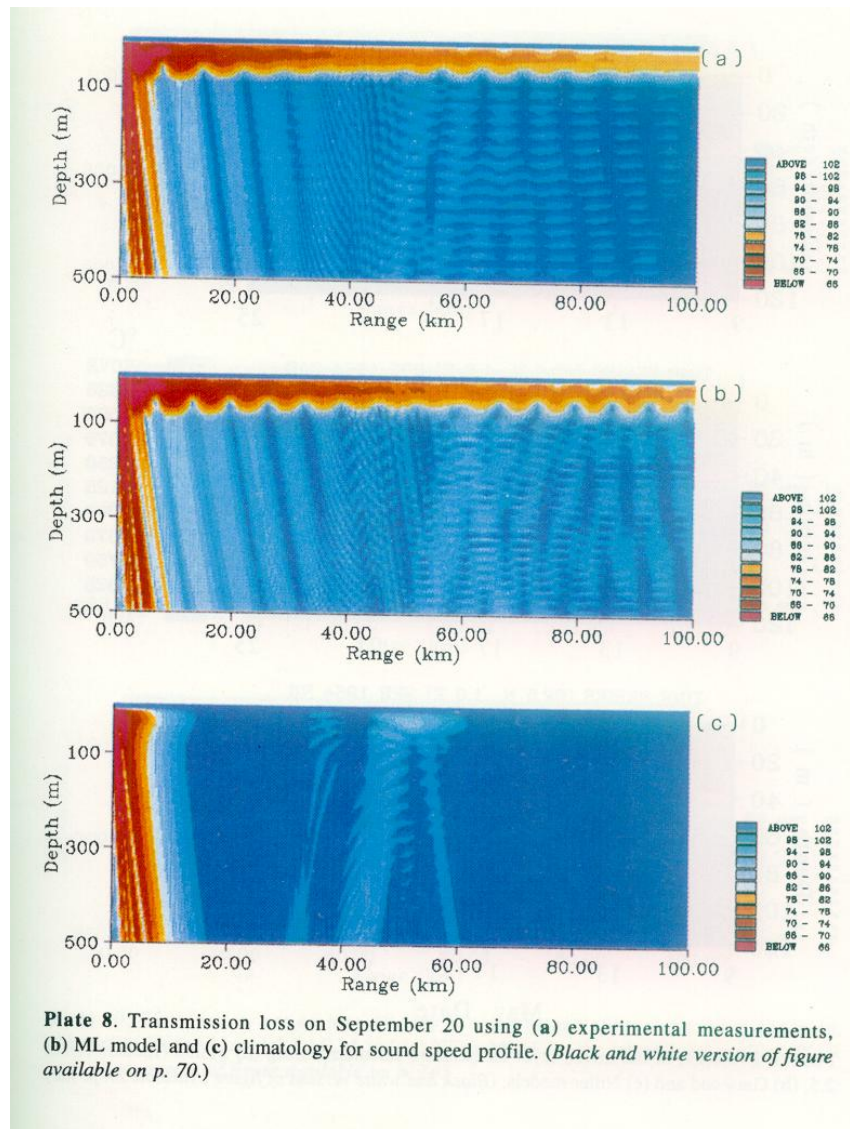
## Υπολογισμός ακουστικού πεδίου σε ρηχή θάλασσα

3

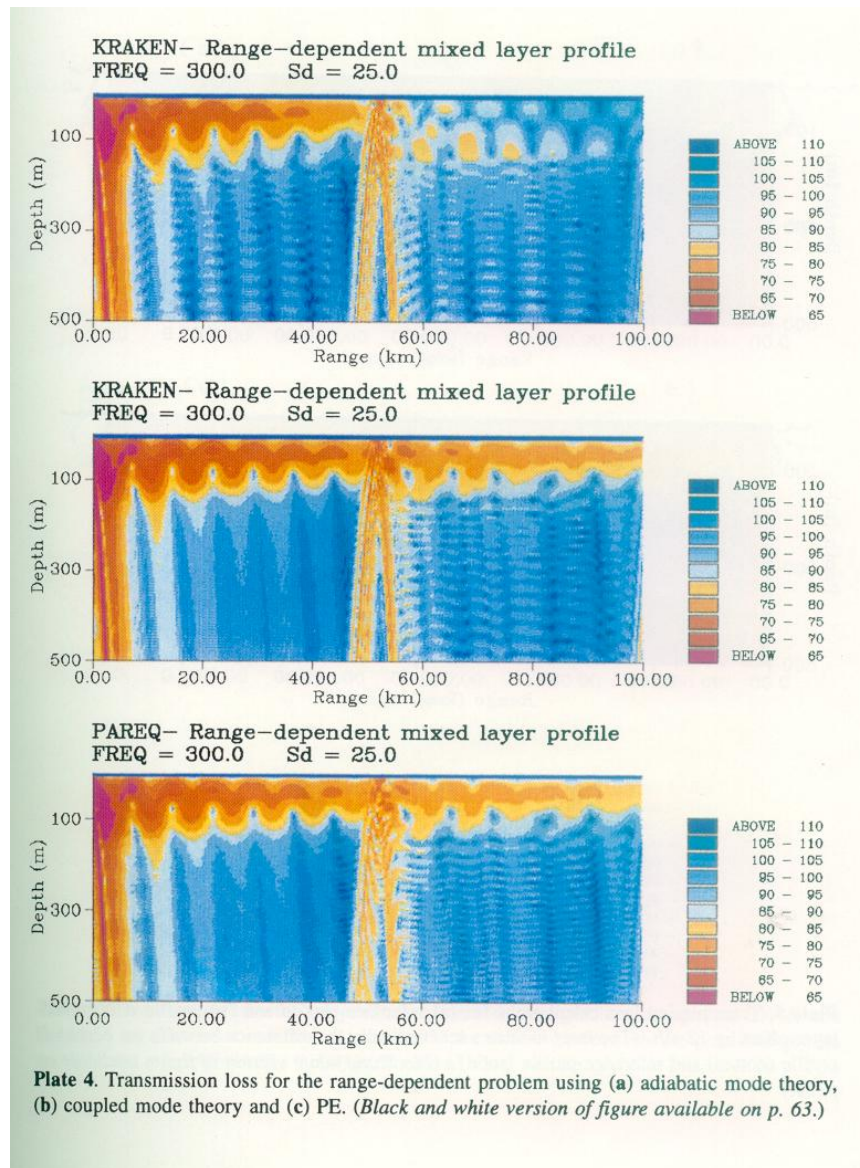
Transmission Loss versus Range and Depth (in dB / wavelength)







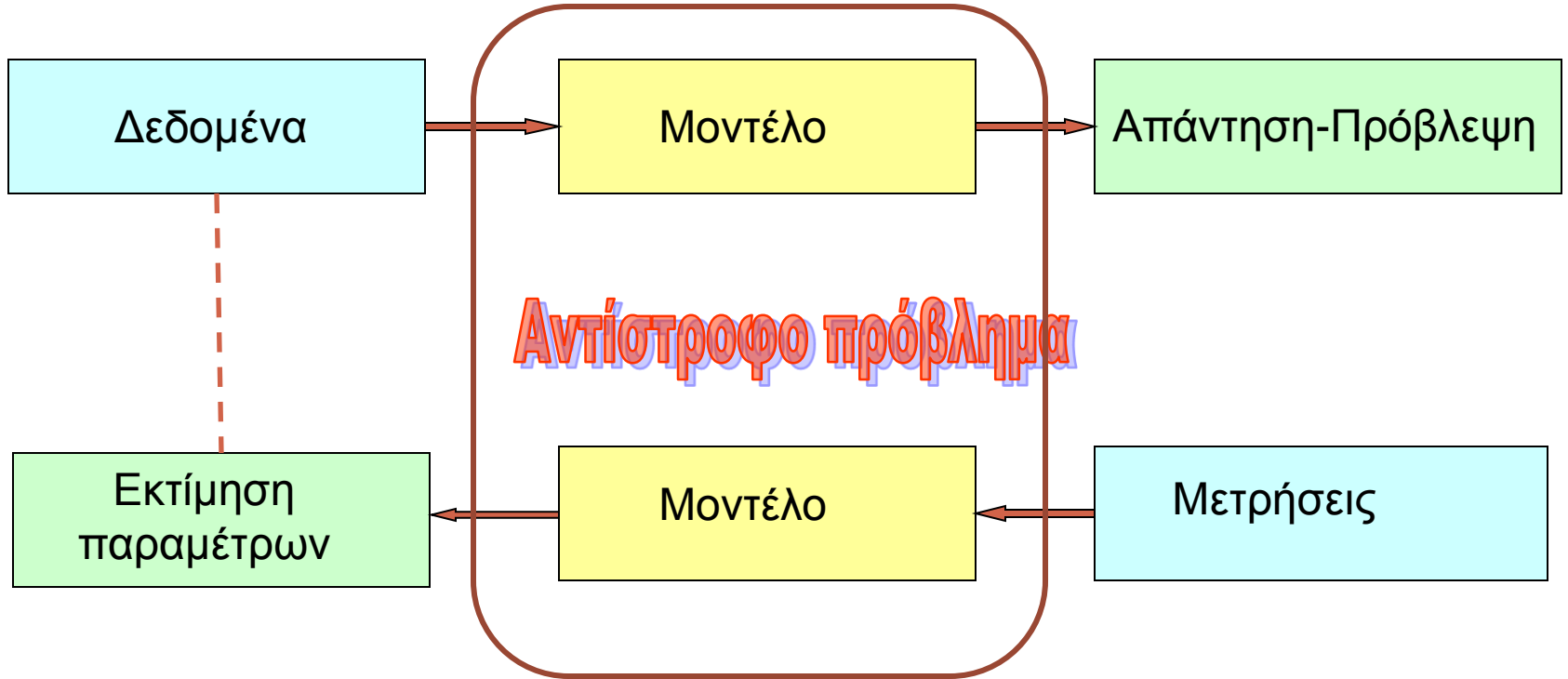
**Plate 8.** Transmission loss on September 20 using (a) experimental measurements, (b) ML model and (c) climatology for sound speed profile. (Black and white version of figure available on p. 70.)



# Εφαρμογές Ακουστικής Ωκεανογραφίας

- Υποβρύχιες επικοινωνίες
- Εντοπισμός αντικειμένων στο νερό και τον πυθμένα
- Αναγνώριση πυθμένα
- Εντοπισμός και χαρακτηρισμός ακουστικής πηγής
- Ακουστική παρακολούθηση θαλάσσιου περιβάλλοντος
- Ακουστική παρακολούθηση ιχθυοαποθεμάτων
- Θαλάσσια βιοακουστική

## Ευθύ πρόβλημα



# Εφαρμογές που μελετώνται με βάση το ευθύ πρόβλημα ακουστικής διάδοσης

- Επικοινωνίες (μετάδοση δεσομένων)
- Παθητική παρακολούθηση ακουστικών πηγών
- Βάση για όλα τα αντίστροφα προβλήματα

**ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΑ ΠΡΟΒΛΗΜΑΤΑ  
ΥΠΟΒΡΥΧΙΑΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ**

**ΤΗΛΕΠΙΣΚΟΠΗΣΗ  
(REMOTE SENSING)**

**ΕΝΤΟΠΙΣΜΟΣ  
(LOCALISATION)**

**ΕΠΙΦΑΝΕΙΑΚΟΙ  
ΚΥΜΑΤΙΣΜΟΙ**

**ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ  
ΝΕΡΟΥ**

**ΠΑΡΑΜΕΤΡΟΙ  
ΠΥΘΜΕΝΑ**

**ΑΚΟΥΣΤΙΚΗ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑ  
(OCEAN ACOUSTIC TOMOGRAPHY)**



# Υποθαλάσσιες Επικοινωνίες

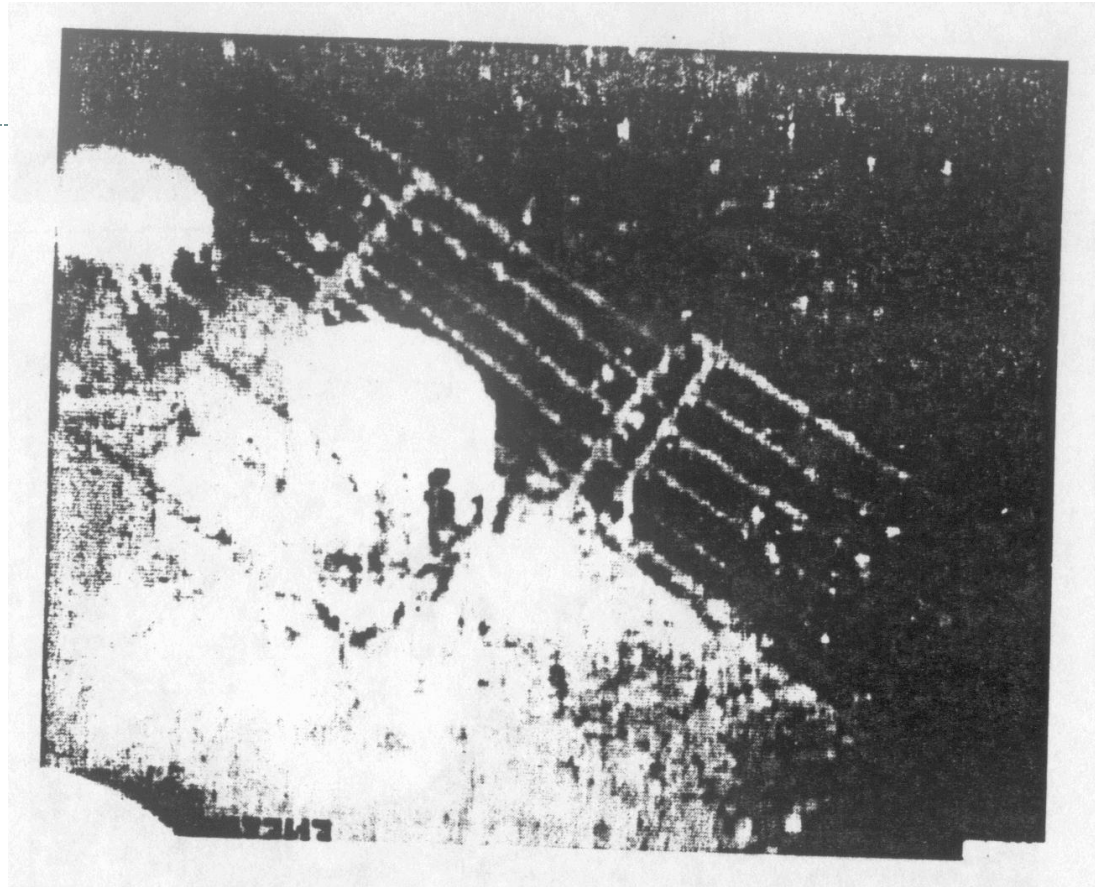
## Υποθαλάσσιες Επικοινωνίες

Ο ήχος χρησιμοποιείται για την μετάδοση δεδομένων



# Δύο εφαρμογές επικοινωνιών

- **Επικοινωνία ανάμεσα σε δύτες**
- **Μετάδοση κωδικοποιημένης πληροφορίας**



Εικόνες από το ναυάγιο του Τιτανικού που μεταδόθηκαν ακουστικά στα τέλη της δεκαετίας του '80 !!

# Απαραίτητος εξοπλισμός Ακουστικοί μετατροπείς (modems)

Μετατρέπουν ηλεκτρικά σήματα σε ηχητικά για μετάδοση σε μεγάλες αποστάσεις

# Πιθανές εφαρμογές

Μετάδοση υποβρύχιων σεισμικών σημάτων με  
χρήση σειсмоγράφων βυθού και ακουστικών  
μετατροπών

## ΠΛΕΟΝΕΚΤΗΜΑ !!

Μετάδοση υποβρύχιας σεισμικότητας με  
πληροφορίες σε ευρύ δίκτυο σε **πραγματικό χρόνο**

# Αναγνώριση της σύστασης του πυθμένα της θάλασσας

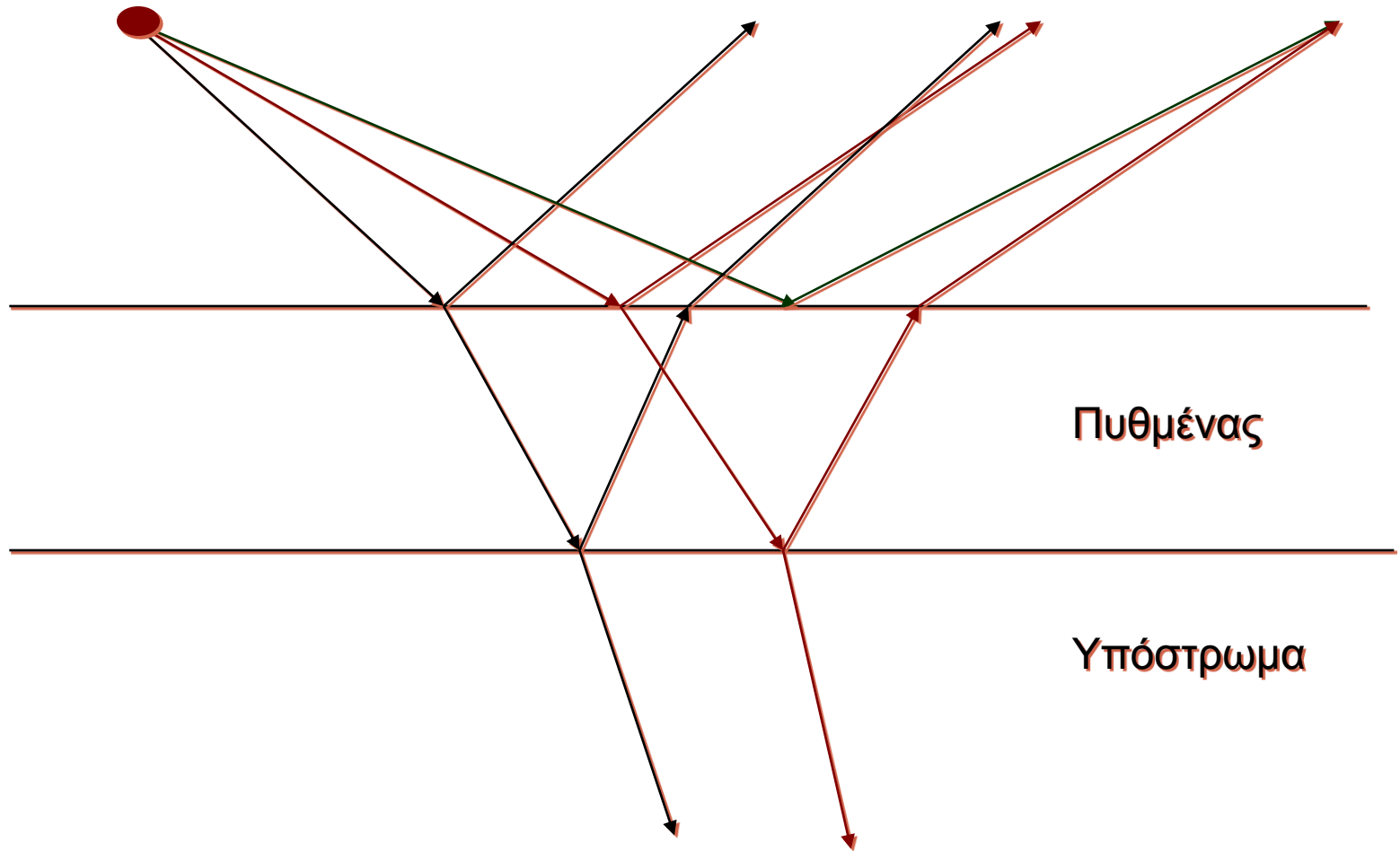
Ο ήχος εισχωρεί στα ιζήματα του πυθμένα και μεταφέρει πληροφορίες για την σύστασή τους

## Βασική αρχή :

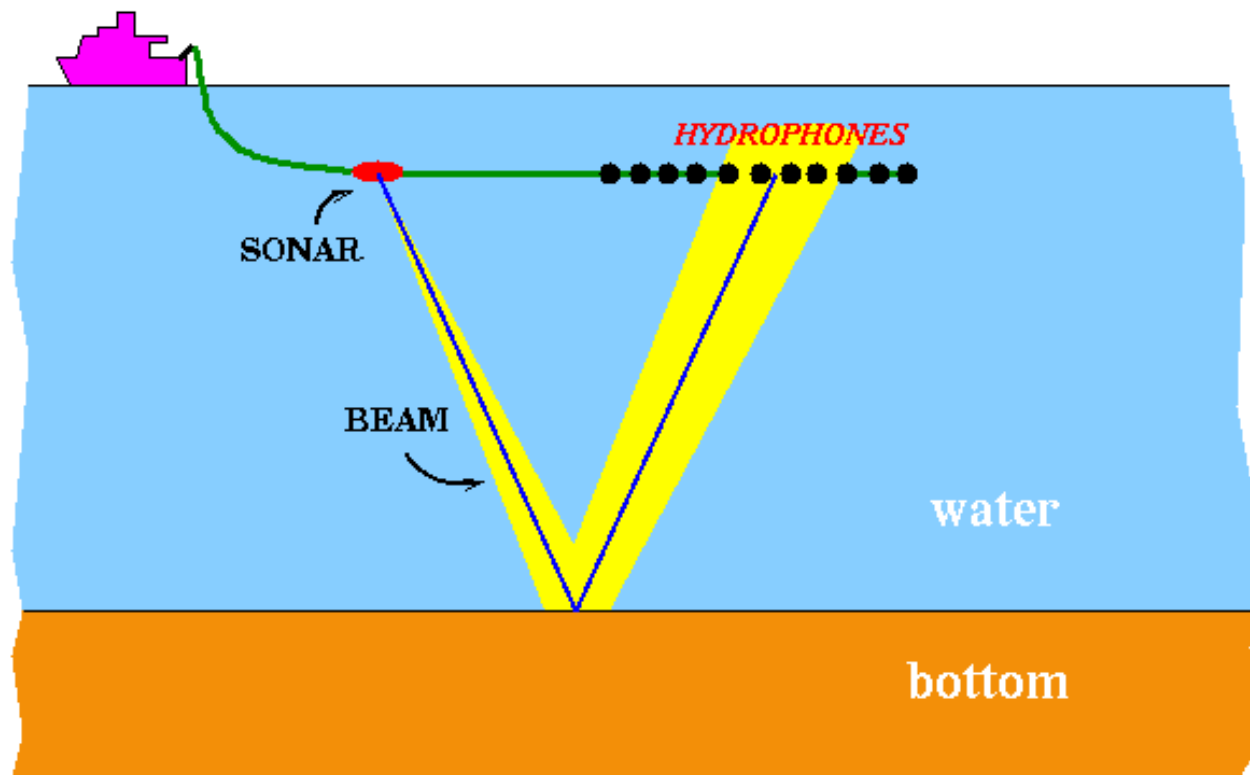
- Ο ήχος ανακλάται από τα στρώματα του πυθμένα αλλά και από κάθε αντικείμενο που θα βρεθεί στον δρόμο του
- Το σώμα που ανακλά τον ήχο αλλοιώνει τα χαρακτηριστικά του με τρόπο που σχετίζεται άμεσα με τα χαρακτηριστικά το σώματος.
- Με κατάλληλες τεχνικές αντιστροφής των μετρήσεων μπορεί να ανακτηθεί η πληροφορία που αφορά το σώμα που ανακλά τον ήχο.

# Σχηματικό διάγραμμα ανάκλασης-διάδοσης ηχητικών ακτίνων

Ηχητική πηγή



Σύστημα ακουστικής αναγνώρισης πυθμένα με χρήση ρυμουλκούμενης παραμετρικής πηγής και συστοιχίας υδροφώνων









# Project ACUSTICA

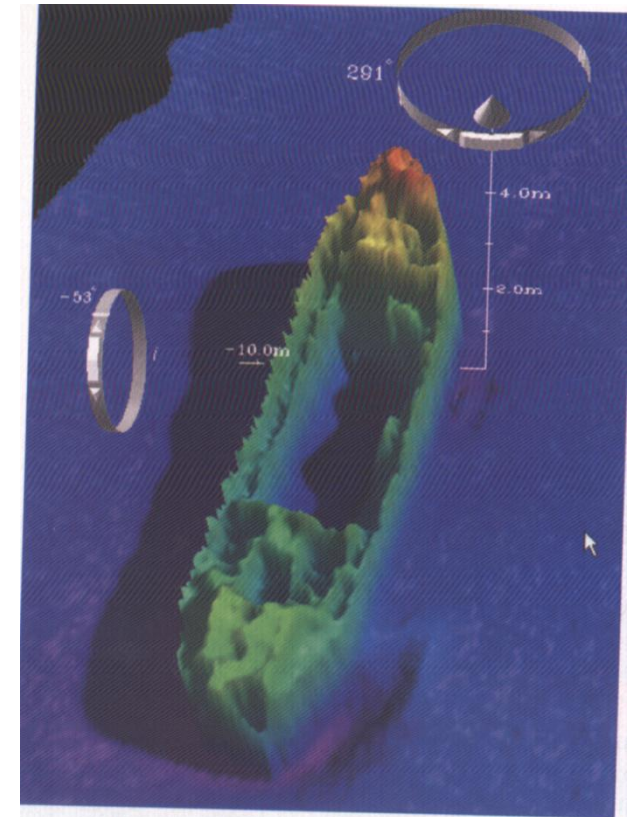
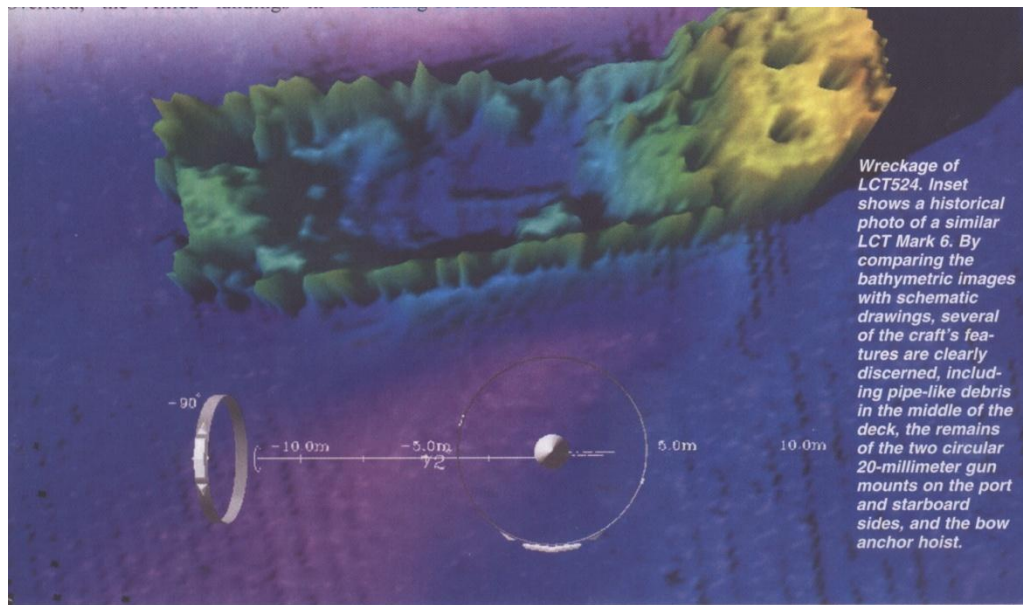


Ινδία  
Κεράλα

# Εντοπισμός και αναγνώριση αντικειμένων

## Εντοπισμός και αναγνώριση αντικειμένων

Ο ήχος χρησιμοποιείται σε συνδυασμό με τεχνολογίες απεικόνισης για την αναγνώριση αντικειμένων



Ναυάγια πλοίων στις ακτές τις Νορμανδίας που απεικονίζονται με ακουστικές μεθόδους

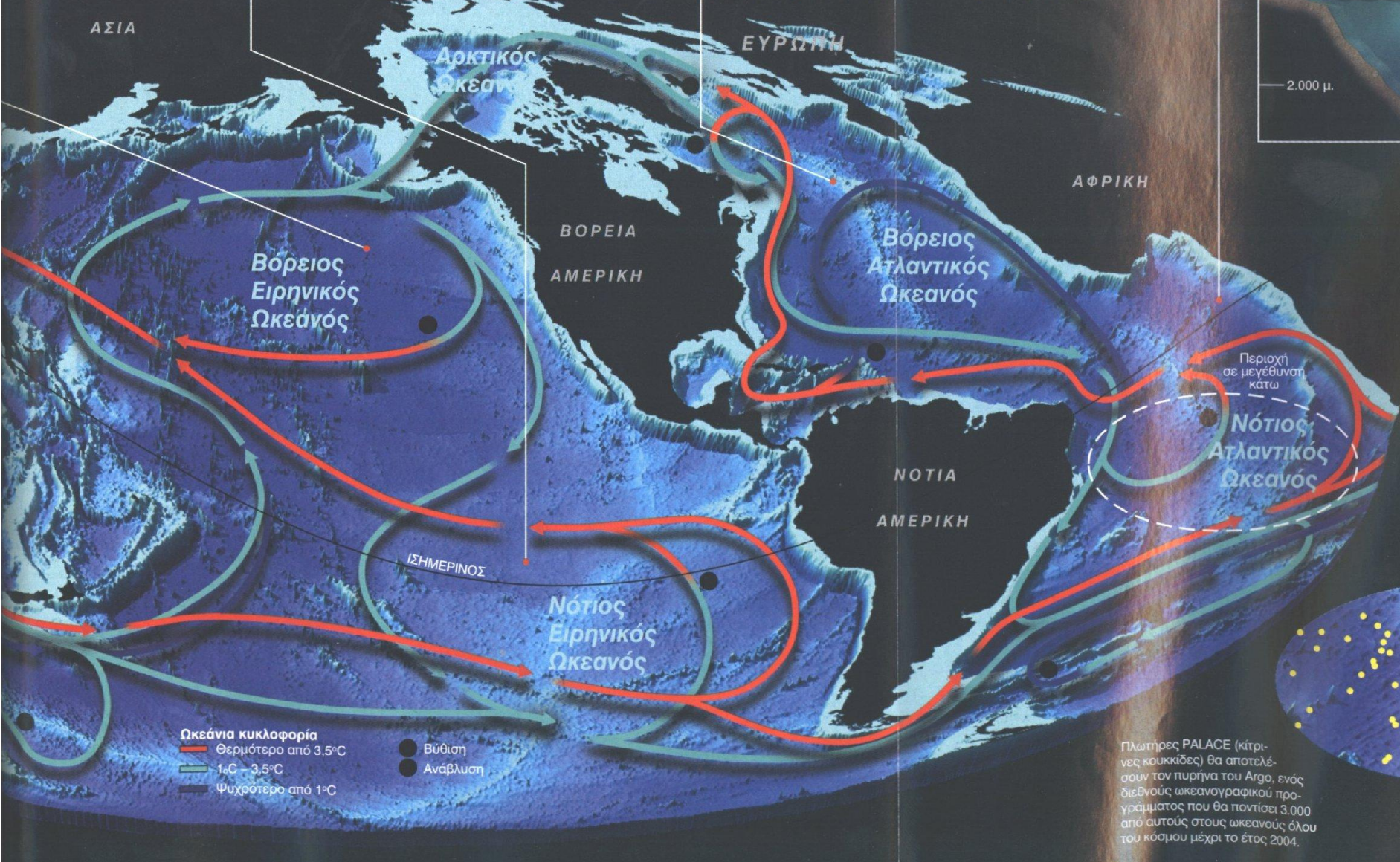
# Ακουστική παρακολούθηση του θαλάσσιου περιβάλλοντος

Ο ήχος μεταφέρει αρκετή πληροφορία για να μας βοηθήσει στην παρακολούθηση των μεταβολών των θαλασσίων μαζών

# Η ακουστική ως εργαλείο παρακολούθησης του θαλάσσιου περιβάλλοντος

- Μεταβολή κλίματος
- Δυναμική της θαλάσσιας μάζας
- Έλεγχος ρύπανσης
- Παρακολούθηση υποβρύχιας σεισμικότητας
- Συμπεριφορά θαλάσσιων θηλαστικών

1947-76 (πάνω αριστερά).



χαμηλότερη από την κανο- Καναδά και τη Γροιλανδία.

2.000 μ.

**Ωκεάνια κυκλοφορία**

- Θερμότερο από 3,5°C
- 1°C - 3,5°C
- Ψυχρότερο από 1°C

- Βύθιση
- Ανάβλυση

Περιοχή σε μεγέθυνση κάτω

Πλωτήρες PALACE (κίτρινες κουκκίδες) θα αποτελέσουν τον πυρήνα του Argo, ενός διεθνούς ωκεανογραφικού προγράμματος που θα ποντίσει 3.000 από αυτούς στους ωκεανούς όλου του κόσμου μέχρι το έτος 2004.

## Θάλασσα

### Μερικά δεδομένα.....

- Καλύπτει το 70 % της γήινης σφαίρας
- Είναι ένα ασταθές μετεωρολογικό σύστημα
- Μέχρι πρόσφατα δεν είχε πλήρως μελετηθεί
- Σήμερα, τα μαθηματικά και η τεχνολογία προσφέρουν τα απαραίτητα εργαλεία για την κατανόηση των περίπλοκων θαλάσσιων συστημάτων, μια κατανόηση που αποσκοπεί στην καλύτερη διαχείριση της ευαίσθητης βιόσφαιρας στην οποία ζούμε.



## Θάλασσα

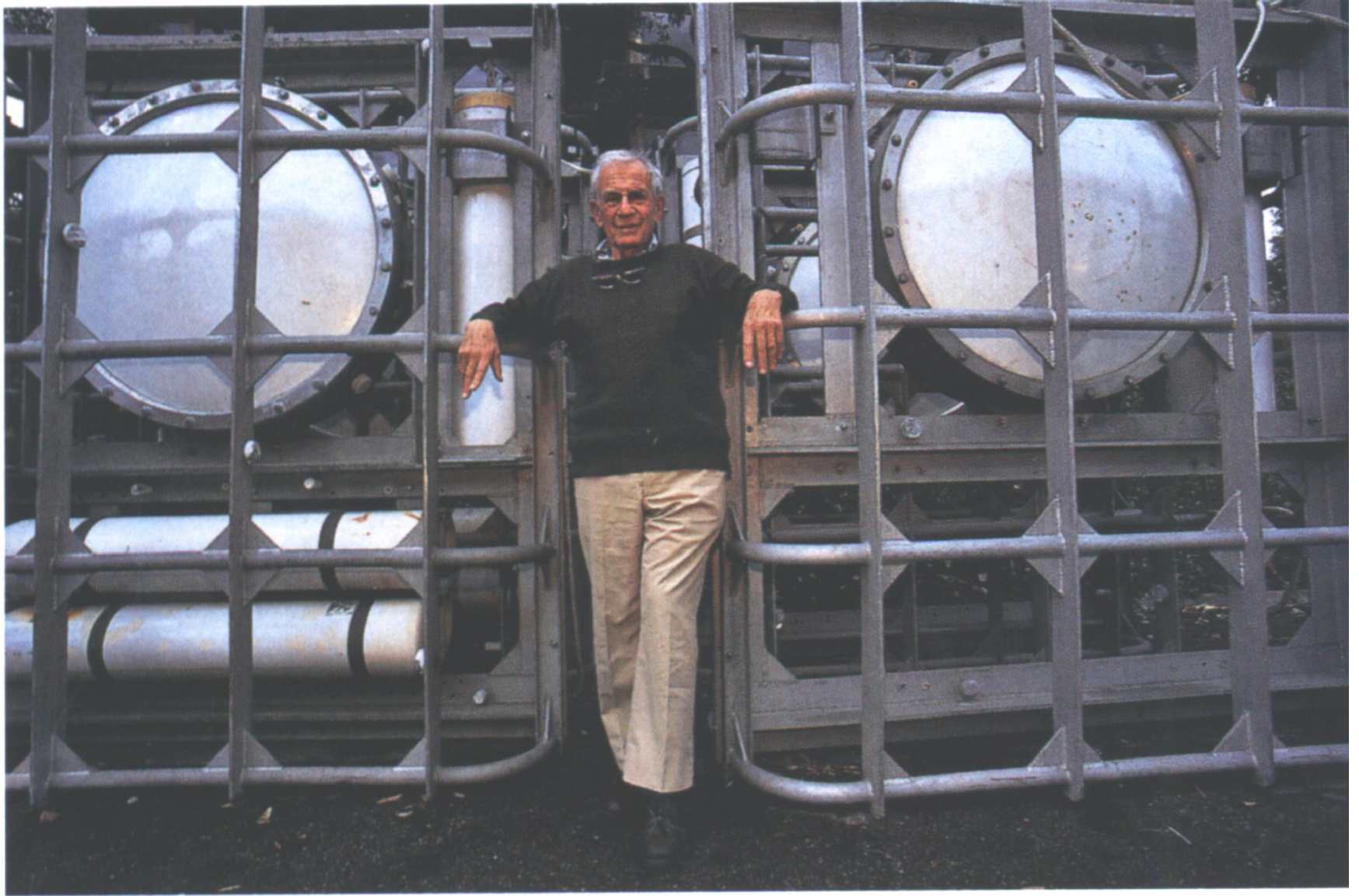
### Μερικά δεδομένα.....

- Η μελέτη της δυναμικής των θαλάσσιων μαζών ανάμεσα στις εποχές και από δεκαετία σε δεκαετία είναι αναγκαία για την κατανόηση του θαλάσσιου συστήματος.
- Οι βασικές παράμετροι που μελετώνται σε ένα θαλάσσιο περιβάλλον είναι η θερμοκρασία η ταχύτητα των ρευμάτων και η αλατότητα

## Θάλασσα και κλίμα

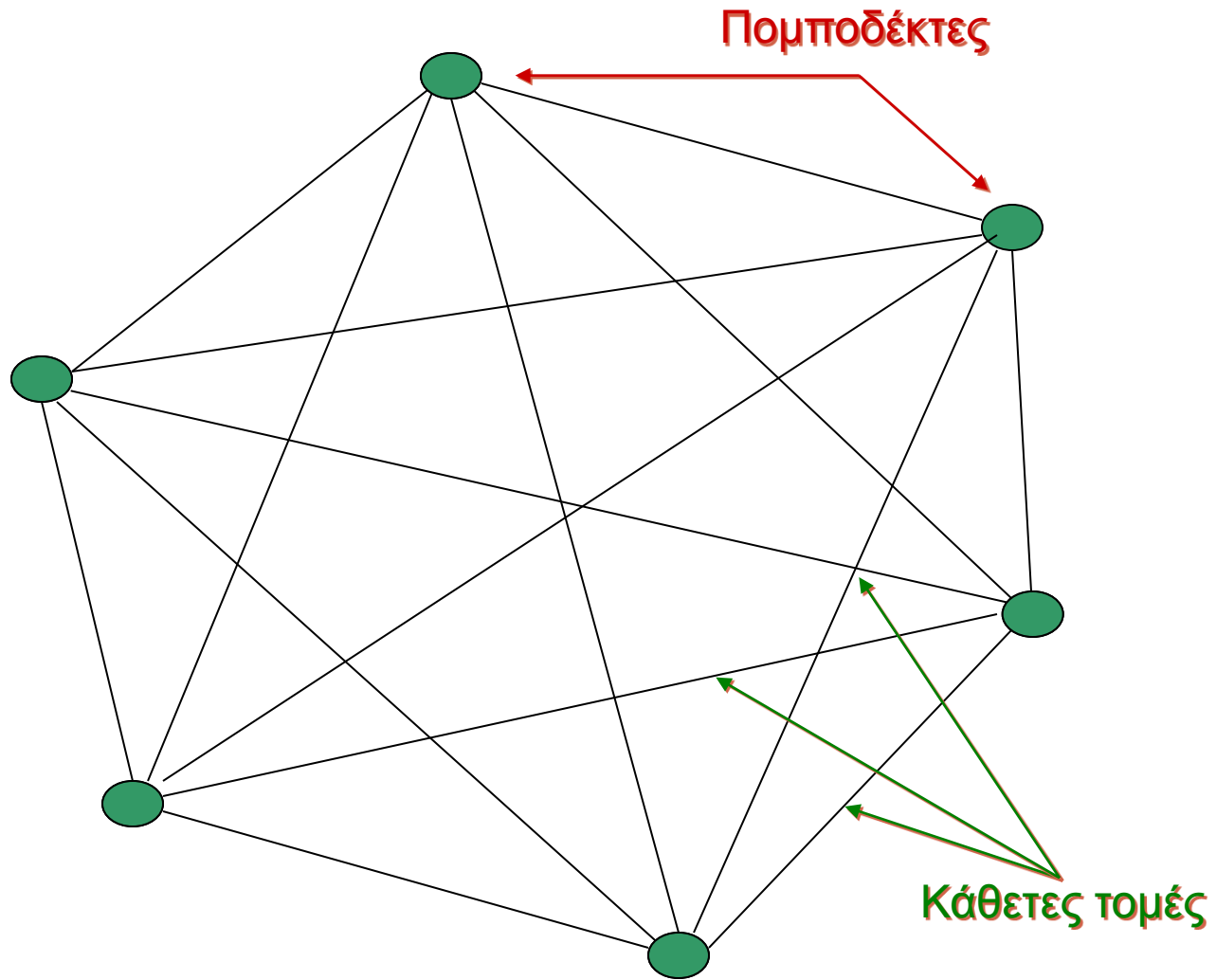
### Δεδομένα.....

- Ακόμη και μικρές μεταβολές στην θερμοκρασία των ρευμάτων σε μία περιοχή μπορεί να έχει σημαντικές επιπτώσεις στην θερμοκρασία της ατμόσφαιρας και στα μετεωρολογικά φαινόμενα σε όλη την υφήλιο
- Δεν είναι δυνατόν να γίνουν εκτιμήσεις μεγάλης κλίμακας του κλίματος της γής χωρίς να ληφθεί υπ' όψιν η θαλάσσια κυκλοφορία

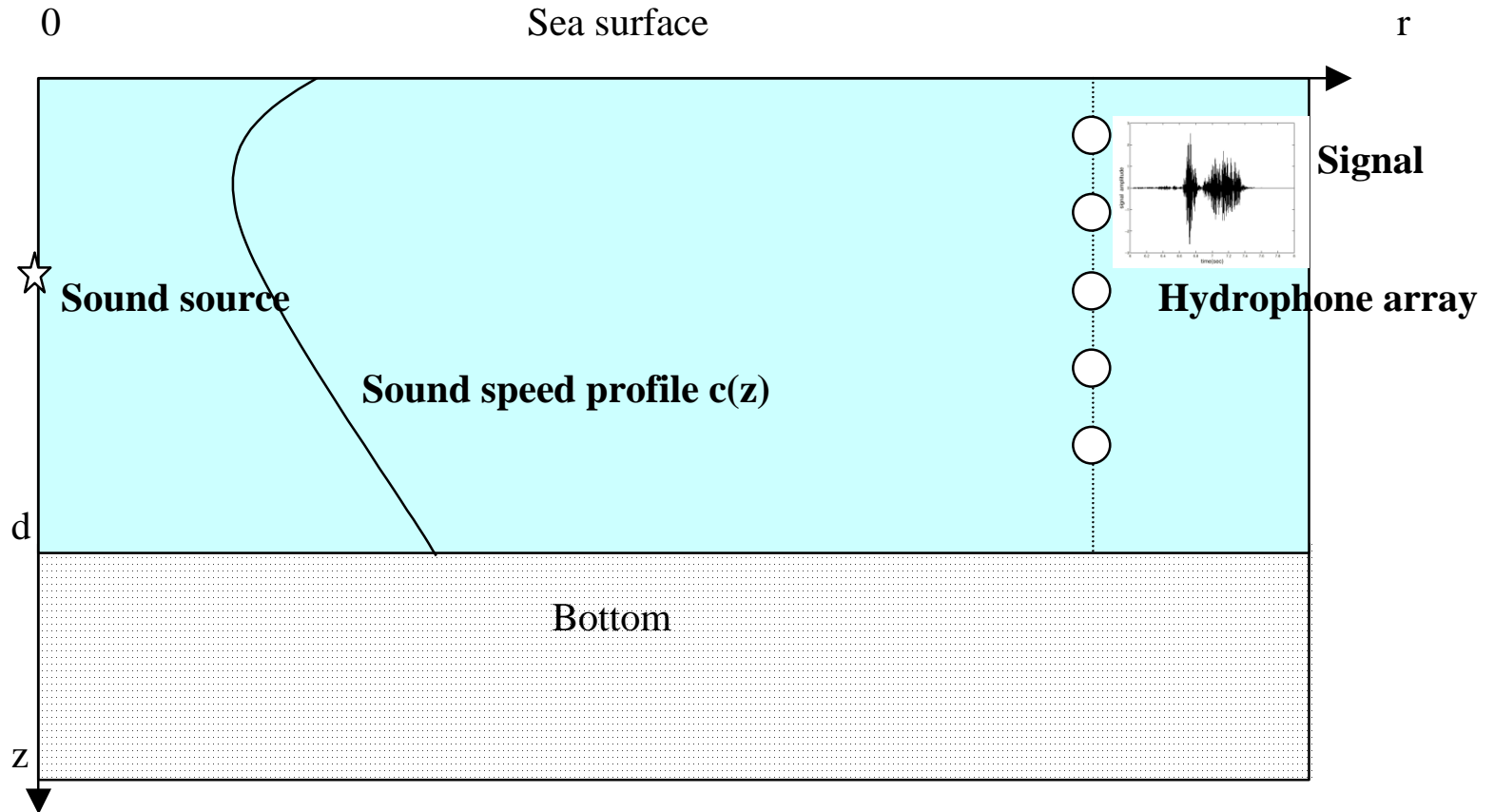


- Η Θαλάσσια ακουστική τομογραφία εισήχθη το 1979 μετά από την παρατήρηση των '70s ότι 99% από την κινητική ενέργεια της θαλάσσια κυκλοφορίας σχετίζεται με φαινόμενα μεσαίας κλίμακας διαμέτρου περίπου 100 km.
- Η παρακολούθηση των μεταβολών μεσαίας και μεγάλης κλίμακας είναι επομένως χρήσιμη στην κατανόηση των πλανητικών μεταβολών.
- Χρήση ακουστικής !!

# Η Ιδέα της θαλάσσιας ακουστικής τομογραφίας



# Μία κατακόρυφη τομή



## ΤΟ ΑΝΤΙΣΤΡΟΦΟ ΠΡΟΒΛΗΜΑ ΤΗΣ ΘΑΛΑΣΣΙΑΣ ΑΚΟΥΣΤΙΚΗΣ ΤΟΜΟΓΡΑΦΙΑΣ

Με δεδομένες μετρήσεις του ηχητικού πεδίου σε συγκεκριμένες θέσεις στο θαλάσσιο περιβάλλον, υπολογίστε το προφίλ ταχύτητας που χαρακτηρίζει την διαδρομή από την πηγή στον δέκτη  $c(x,y,z)$

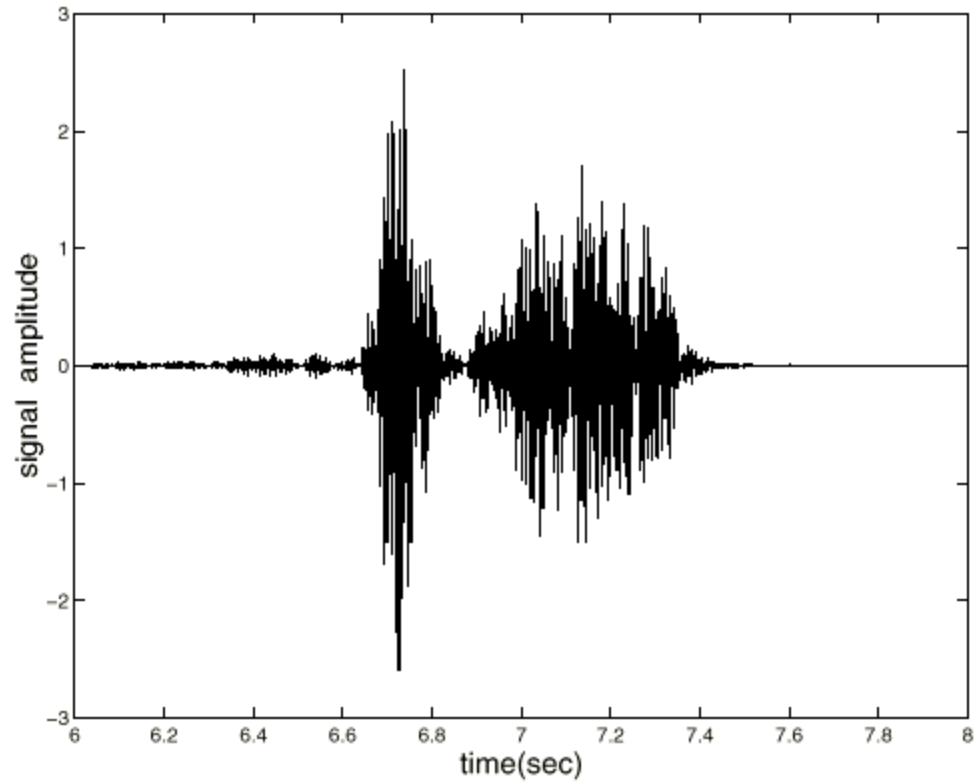
**Πρόσθετοι άγνωστοι** : Η ακριβής θέση πηγής και δεκτών. Η δομή του πυθμένα (?)

**Τύποι πηγών** : Ειδικές πηγές που εκπέμπουν διαμορφωμένα σήματα. Μερικές φορές εκπέμπουν αρμονικά σήματα.

**Τύποι μετρήσεων** : Συνήθως χρονοσειρές του εκπεμπόμενου σήματος σε ένα υδρόφωνο ή σε μία συστοιχία. Με επεξεργασία Fourier είναι δυνατή η μεταφορά του σήματος στο πεδίο συχνοτήτων.



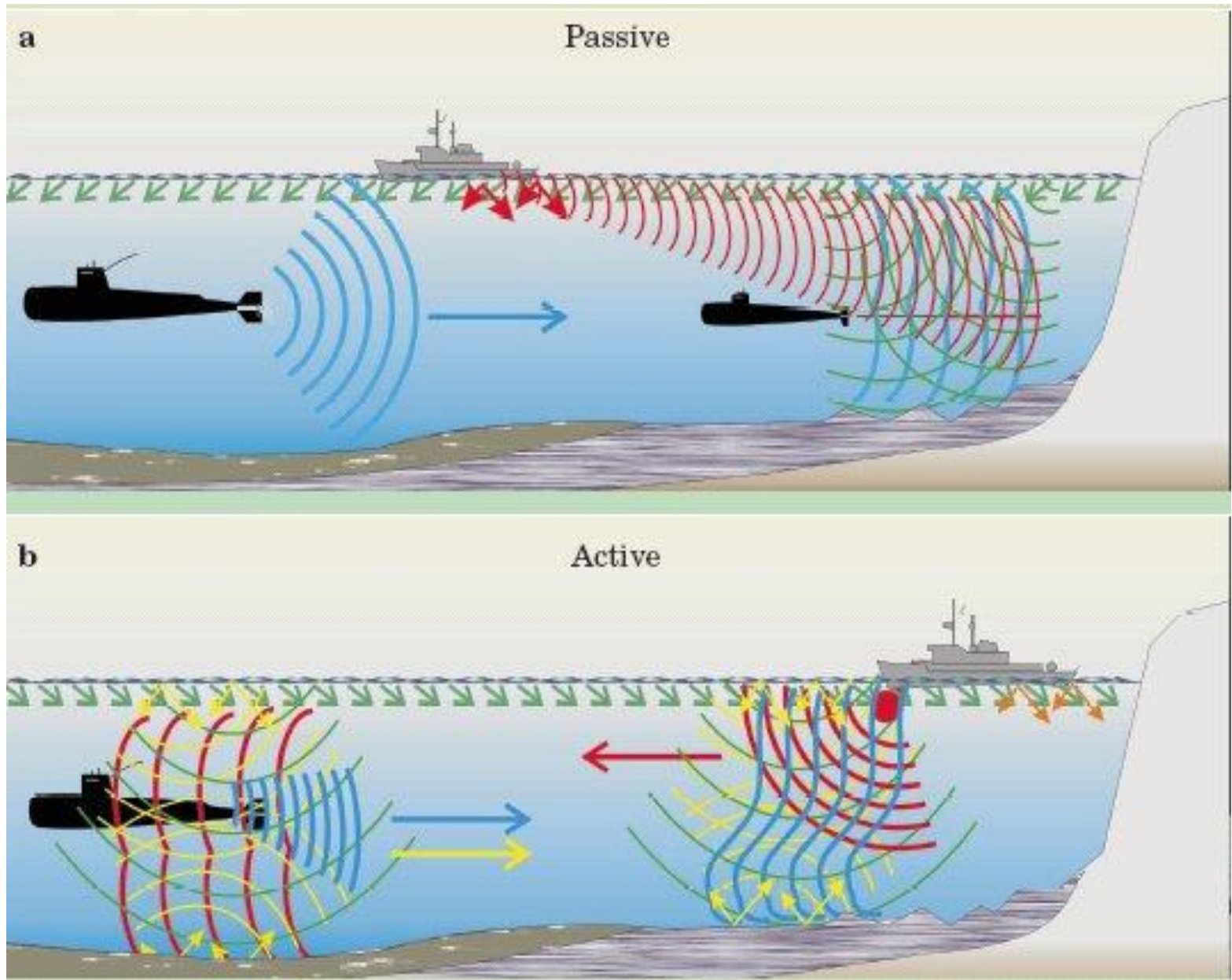
## Τυπική λήψη τομογραφικού σήματος



# Αναγνώριση ηχητικής πηγής

## Αναγνώριση ηχητικής πηγής

Τα χαρακτηριστικά του ήχου μας πληροφορούν για το είδος της πηγής που τον εκπέμπει



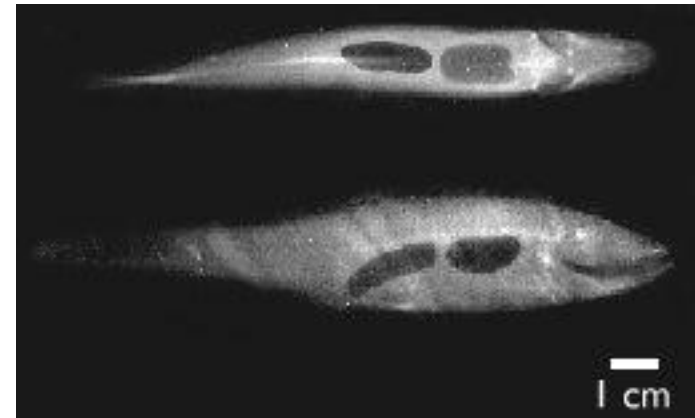
## Μέθοδοι αναγνώρισης :

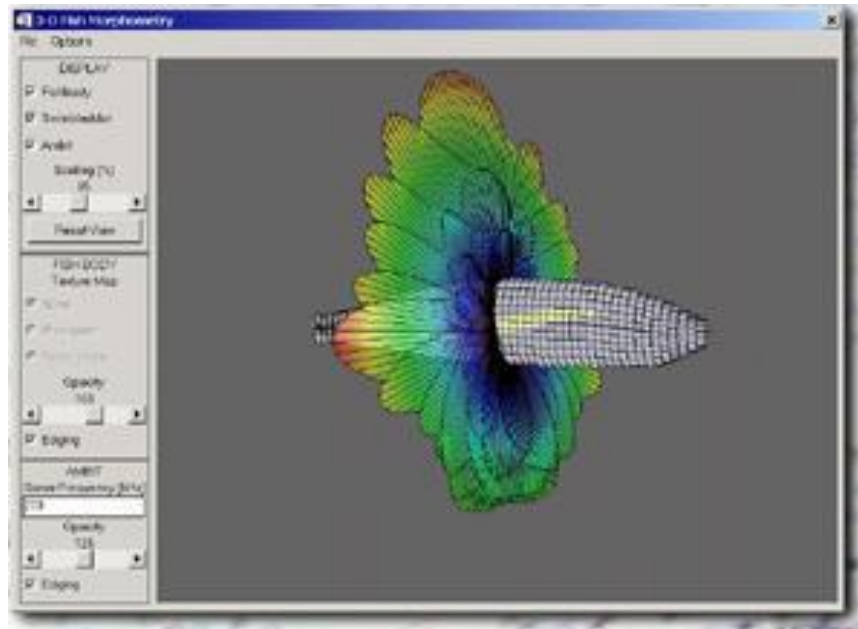
- Τα χαρακτηριστικά του ηχητικού πεδίου που μετρώνται συγκρίνονται με εκείνα που αφορούν γνωστές πηγές ήχου.
- Η σύγκριση γίνεται συστηματικά με χρήση κατάλληλης συνάρτησης κόστους και αφού ποσοτικοποιηθούν τα χαρακτηριστικά που μετρήθηκαν.
- Η διαδικασία σύγκρισης μπορεί να γίνει με σύγχρονες μεθόδους μη γραμμικής αντιστροφής (π.χ. Νευρωνικά δίκτυα)

# Ακουστική παρακολούθηση των ιχθυοαποθεμάτων

Ο ήχος ανακλάται στα ψάρια ! Τα χαρακτηριστικά της ανάκλασης μας δίδουν πληροφορίες για τα ιχθυοαποθέματα

# Κύστες πλευστότητας (Swimbladders)





# Θαλάσσια βιοακουστική

## Θαλάσσια βιοακουστική

Τα κητώδη δεν χρειάζονται την επιστήμη για να χρησιμοποιήσουν τον ήχο στη θάλασσα. Χρησιμοποιούν τον ήχο για να ζήσουν σε αρμονία με το θαλάσσιο περιβάλλον





Ήχοι από κοπάδι ζωοδέλφινων και κοινών δελφινιών στον Κορινθιακό  
(από την ιστοσελίδα του Ινστιτούτου «ΠΕΛΑΓΟΣ»)







# Περιεχόμενα Μαθήματος

## 1. Περιγραφή του θαλάσσιου περιβάλλοντος

- 1.1. Στρωματοποίηση του θαλασσινού νερού.
- 1.2. Περιγραφή του πυθμένα της επιφάνειας της θάλασσας και στοιχεία από τη ζωή στη θάλασσα.

## 2. Ακουστικές διαταραχές στο θαλάσσιο περιβάλλον

2.1 Η φύση των διαταραχών

2.2 Ακουστικά κύματα

## 3. Ακουστικά κύματα στο θαλάσσιο περιβάλλον

3.1 Ακουστική εξίσωση

3.2 Στοιχειώδεις λύσεις της ακουστικής εξίσωσης

3.3 Διατμητικά κύματα

3.4 Ανάκλαση/διάδοση επίπεδων κυμάτων ανάμεσα σε διεπιφάνειες

3.5 Διάδοση σε μεγάλες αποστάσεις - γεωμετρική ακουστική - ηχητικές ακτίνες

3.6 Φυσική εξασθένηση του ήχου

3.7 Εξίσωση sonar

## 4. Ακουστικά σήματα και εισαγωγή στην επεξεργασία τους

4.1 Τύποι ακουστικών σημάτων στη θάλασσα

4.2 Ανάλυση Fourier

4.3 Φίλτρα και θόρυβος

4.4 Θόρυβος του Θαλάσσιου περιβάλλοντος

4.4 Συσχέτιση ακουστικών σημάτων