ΑΣΤΡΙΚΕΣ ΤΑΛΑΝΤΩΣΕΙΣ
ΩΣ ΑΝΙΧΝΕΥΤΕΣ ΤΟΥ ΕΣΩΤΕΡΙΚΟΥ ΤΩΝ ΑΣΤΡΩΝ

Φυσικές αρχές και διεργασίες

#αστεροσεισμολογία

Ελένη Βαρδουλάκη
Thüringer Landessternwarte Tautenburg

elenivard@gmail.com;
https://www.linkedin.com/in/eleni-vardoulaki/
Rogue Astrophysics; Astronomy on Tap Jena
elenivardoulaki.com

slides

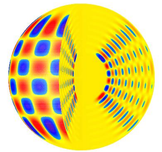
ΕΚΠΑ
ΜΑΪΟΣ 2022

Περίληψη

1. Γιατί τα αστέρια πάλλονται / ταλαντώνονται;

2. Πως μπορούμε να δούμε στο εσωτερικό τους;

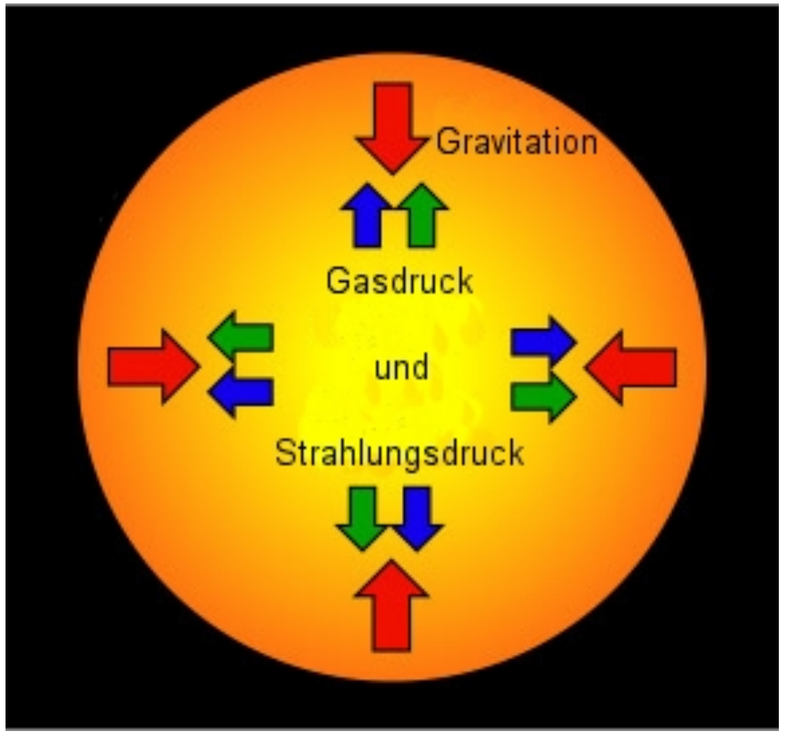
3. Τι μαθαίνουμε για το εσωτερικό των αστέρων;



ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

1. Γιατί τα αστέρια πάλλονται;

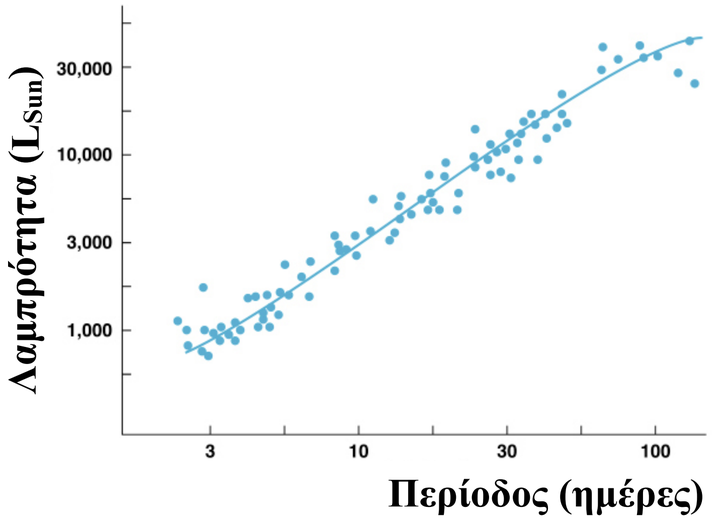
- Διαστολές και συστολές των ανώτερων στρωμάτων για τη διατήρηση της υδροστατικής ισορροπίας
- Εσωτερικοί παράγοντες (άνωση)
- Εξωτερικοί παράγοντες (όχι αυτή η ομιλία)

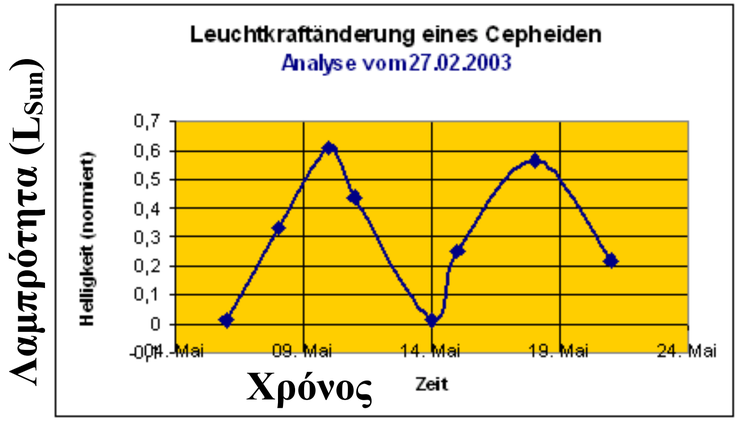


Ελενη Βαρδουλακη
elenivard@gmail.com

Κηφείδες

1908, Henrietta Leavitt (1868-1921):
Σχέση Λαμπρότητας-Περιόδου για Κηφείδες
(παλλόμενοι μεταβλητοί αστέρες)





“It is worthy of notice that … the brighter variables have the longer periods.” (Leavitt 1908)

1914, Shapley:
Σχέση μεταξύ εσωτερικής δομής και περιόδου

$$P = \frac{R}{c_{sound}} \approx \frac{1}{\sqrt{G \cdot \bar{\rho}}}$$

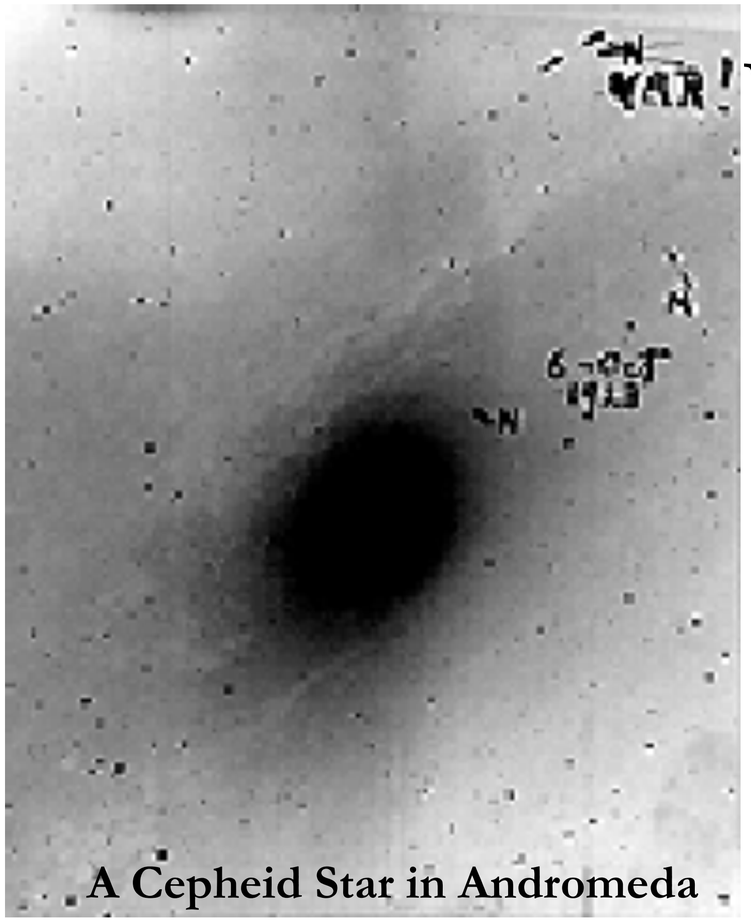
$$\langle \rho \rangle \simeq \frac{1}{GP^2}$$

credit: Markus Roth

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Είναι γαλαξίες!

1923, Edwin Hubble (1889-1953):
Απόδειξη ότι τα ‘σπειροειδή νεφελώματα’ είναι γαλαξίες



A Cepheid Star in Andromeda

Var!

6-Oct 1923

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Τύποι μεταβλητών παλλόμενων αστέρων

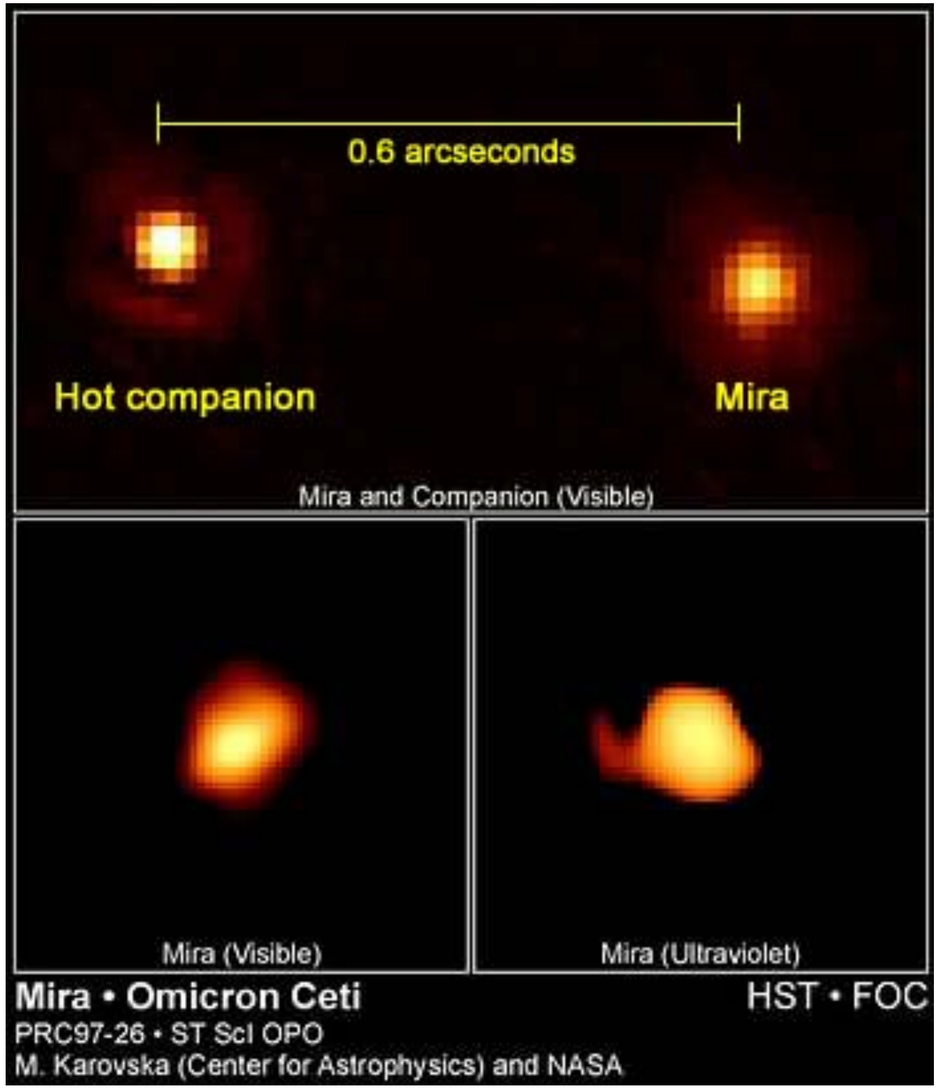
Name	N	P [d]	Spectral type	Δm
Classical Cepheids (δ Cep, W Vir)	700	1 – 50	F – K I	< 2
RR Lyrae	4400	< 1	B8 – F2 III	< 0.7
Dwarf Cepheids (δ Scuti)	20	0.05 - 2	F III	< 1
β Cephei	20	0.1 – 0.25	B1 – B3 III	< 0.1
Mira – Variable	4600	80 - 1000	M III	> 2.5
RV Tauri	100	30 - 150	G – K I	< 3
α^2 Can Ven	30	1/25/99	Ap	< 0.1
Semi-regular	2300	30 - 1000	K – M I	< 2.5
Irregular	1700	-	K – M I	< 2

N: αριθμός γνωστών αντικειμένων

credit: Markus Roth

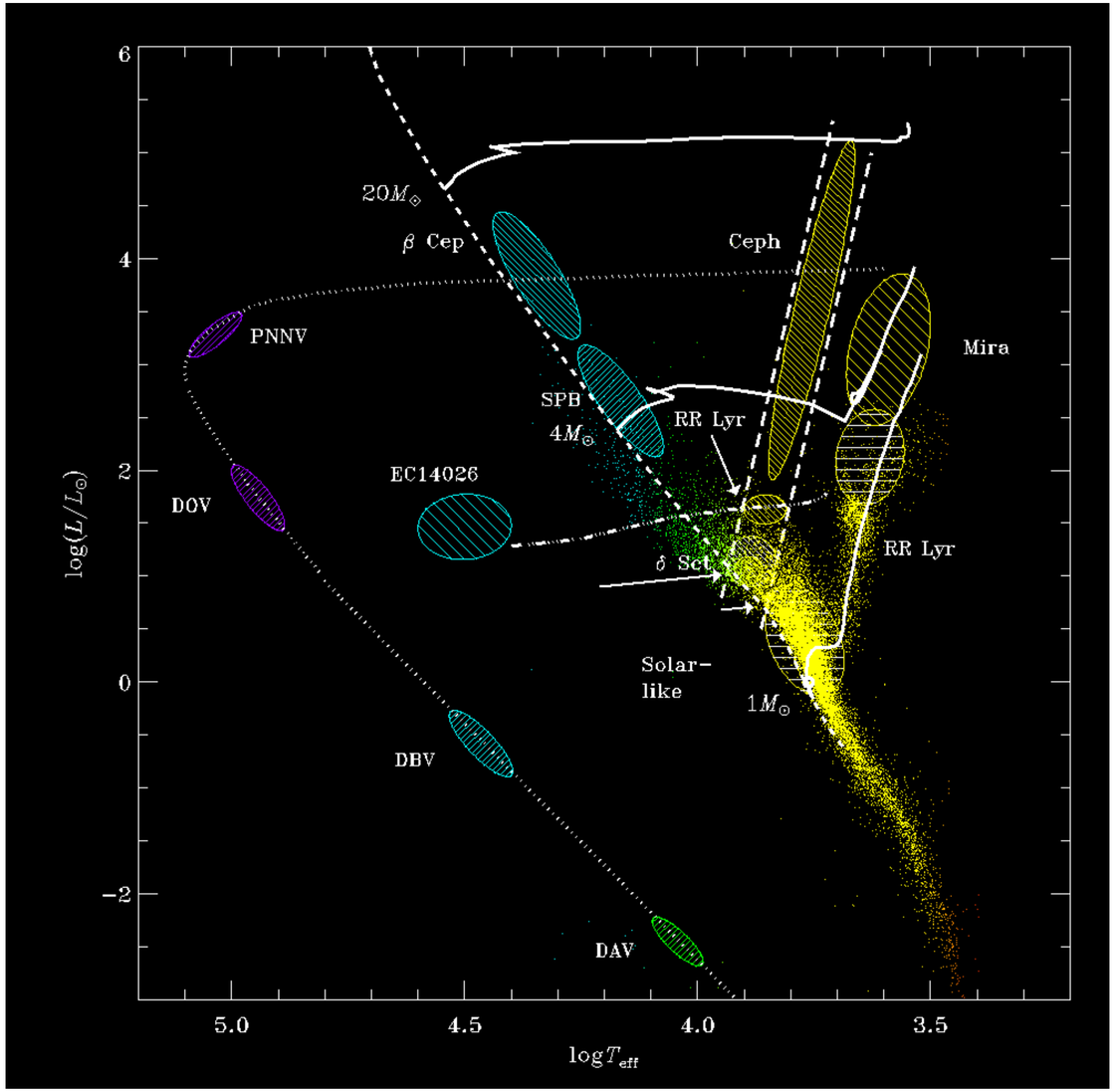
ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Μίρα



Ελενη Βαρδουλακη
elenivard@gmail.com

Μεταβλητά αστέρια στο διάγραμμα H-R

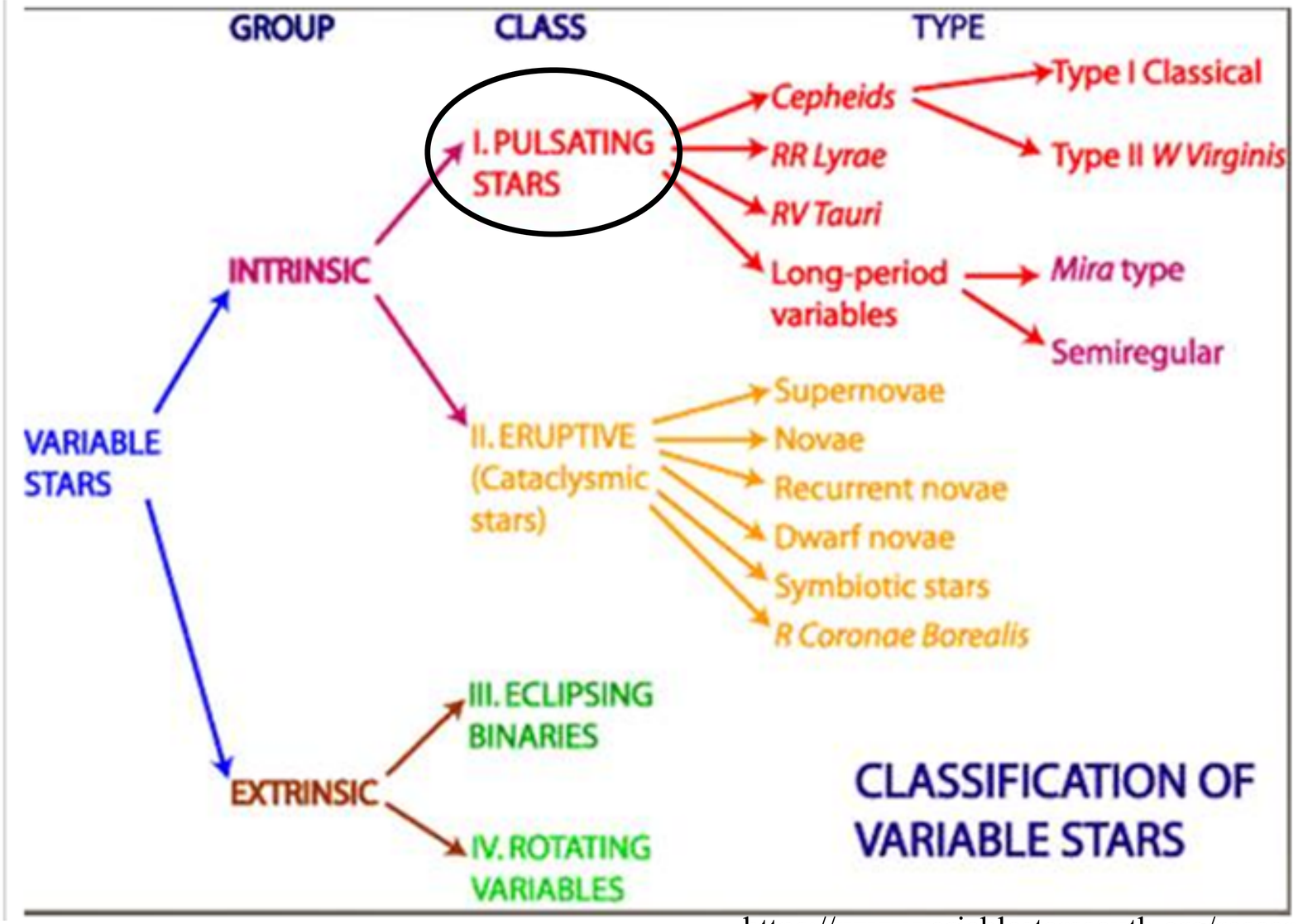


Λαμπρότητα (L_{Sun})

Θερμοκρασία (K)

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Τύποι μεταβλητών αστέρων



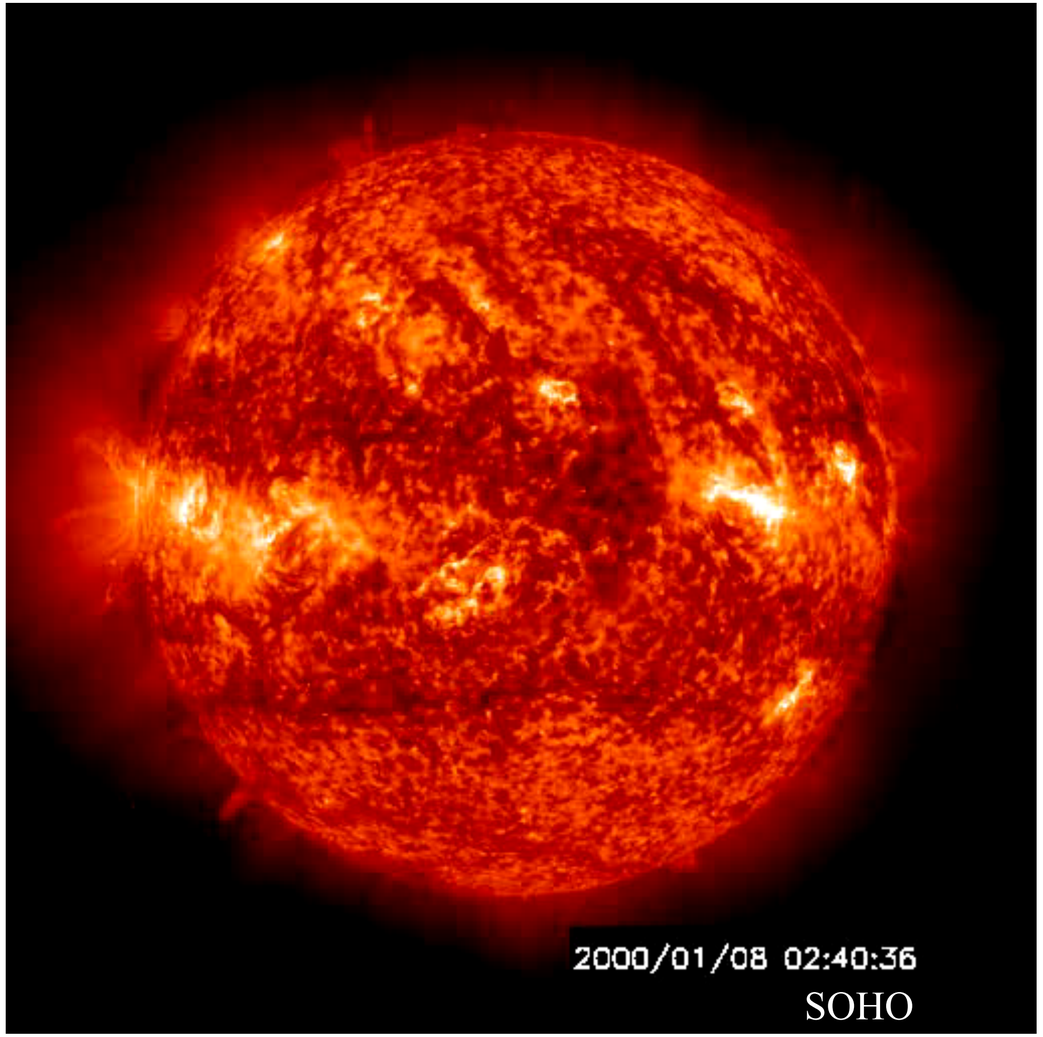
https://www.variablestarssouth.org/research-areas/pulsating-variables/

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Το πιο famous αστέρι…ο Ήλιος

- Το πιο μας κοντινό αστέρι
- Παρατηρήσεις πολλών ετών
- Διαρκείς παρατηρήσεις
  - έδαφος + διάστημα
- Σχέση με άλλα αστέρια
- Σχέση με Γη - ζωή στη Γη (και εκτός ηλιακού συστήματος)

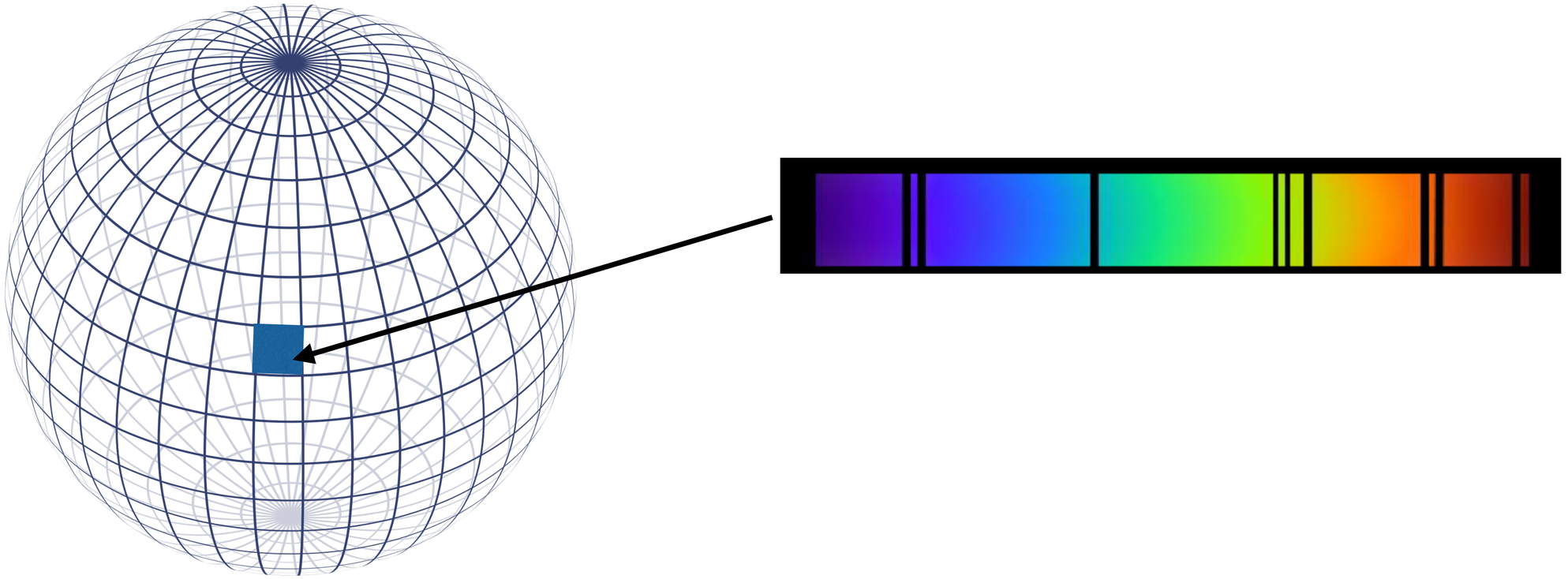
- Είναι ο Ήλιος μεταβλητός αστέρας;



ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

2. Πως μπορούμε να δούμε στο εσωτερικό των άστρων;

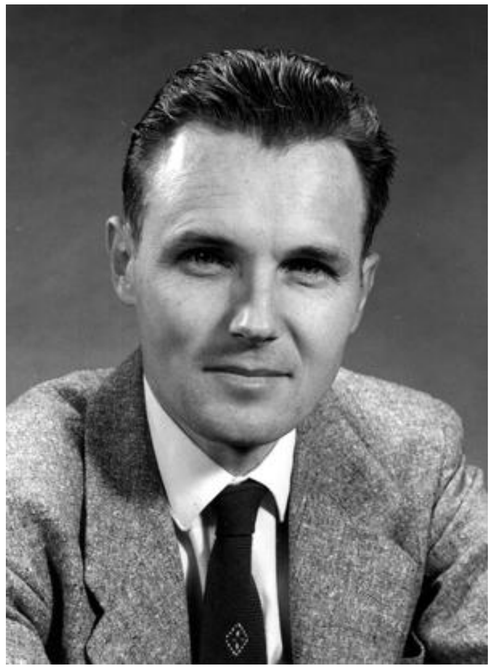
- Ήλιος: ακριβείς παρατηρήσεις της επιφάνειας με μεγάλη ακρίβεια
- φασματοσκόπια: μεταβολές στις επιφάνεια (ταχύτητα και περίοδο μεταβολών)



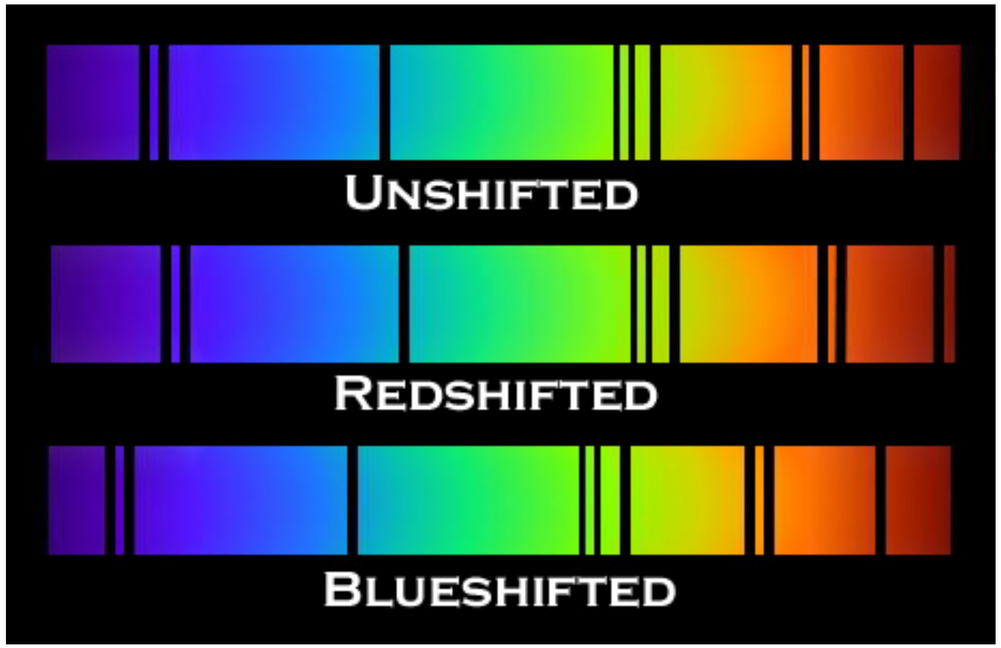
5-λεπτες ταλαντώσεις στον Ήλιο

- Μετρήσεις (έδαφος) της κίνησης της επιφάνειας του Ήλιου μέσω φαινομένου Ντόπλερ στο φως του Ήλιου
- 5-λεπτες ταλαντώσεις της επιφάνειας

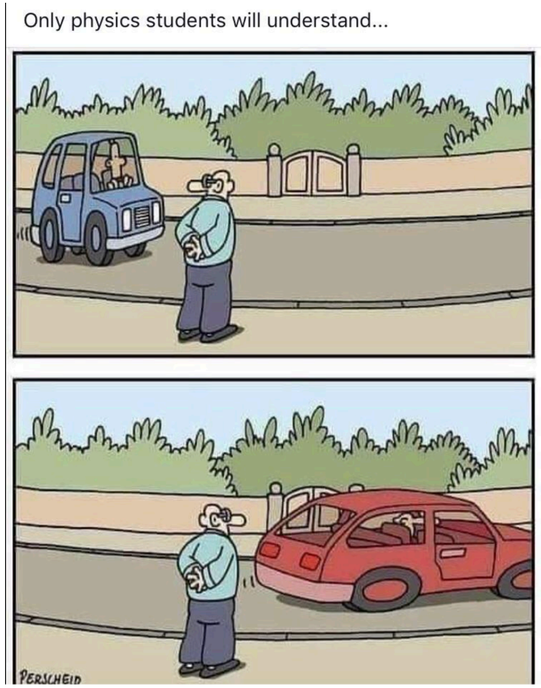
Ch. Doppler
(1803 – 1853)



Robert Leighton (1919 - 1997)



Κυανό ⟷ **Ερυθρό**

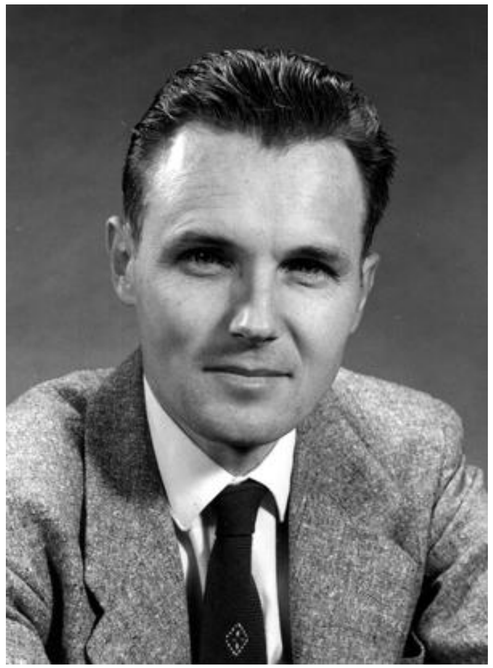


ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

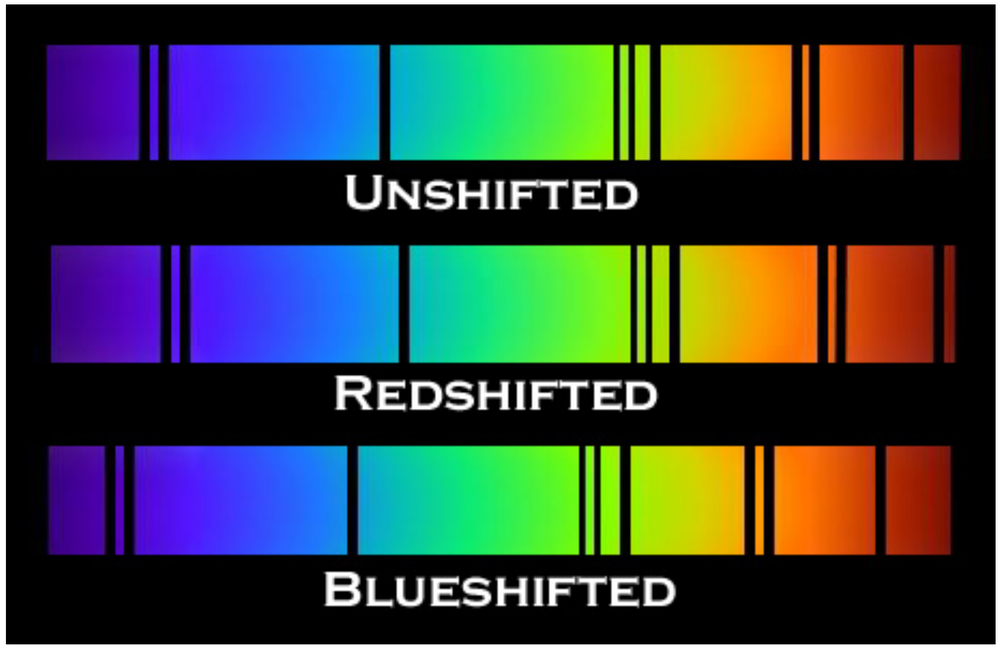
5-λεπτες ταλαντώσεις στον Ήλιο

- Μετρήσεις (έδαφος) της κίνησης της επιφάνειας του Ήλιου μέσω φαινομένου Ντόπλερ στο φως του Ήλιου
- 5-λεπτες ταλαντώσεις της επιφάνειας

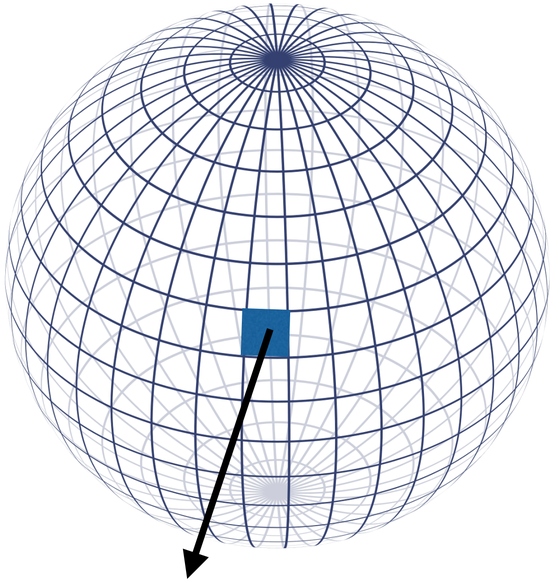
Ch. Doppler
(1803 – 1853)



Robert Leighton (1919 - 1997)



Κυανό ⟷ **Ερυθρό**



$\delta\lambda/\lambda \times c \rightarrow \upsilon$

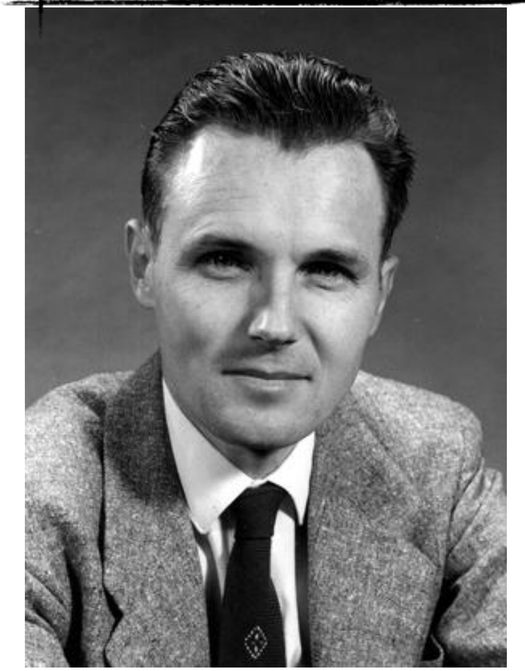
Ήλιος: +/- 500 m/s

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

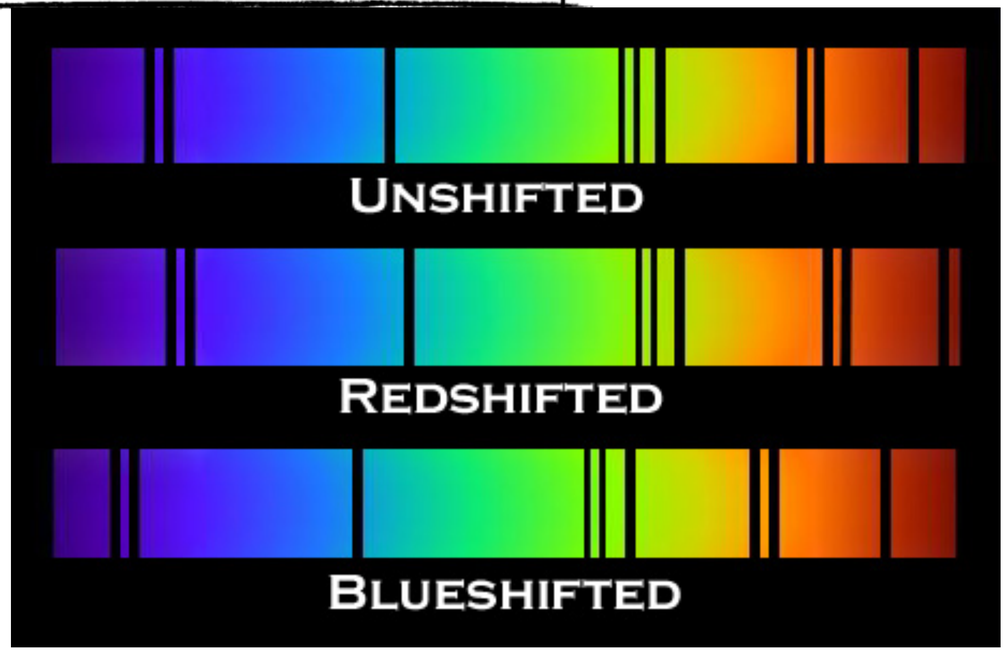
5-λεπτες ταλαντώσεις στον Ήλιο

- Μετρήσεις (έδαφος) της κίνησης της επιφάνειας του Ήλιου μέσω φαινομένου Ντόπλερ στο φως του Ήλιου
- 5-λεπτες ταλαντώσεις της επιφάνειας → ηχητικά κύματα στο εσωτερικό → νέος κλάδος Ηλιοσεισμολογίας

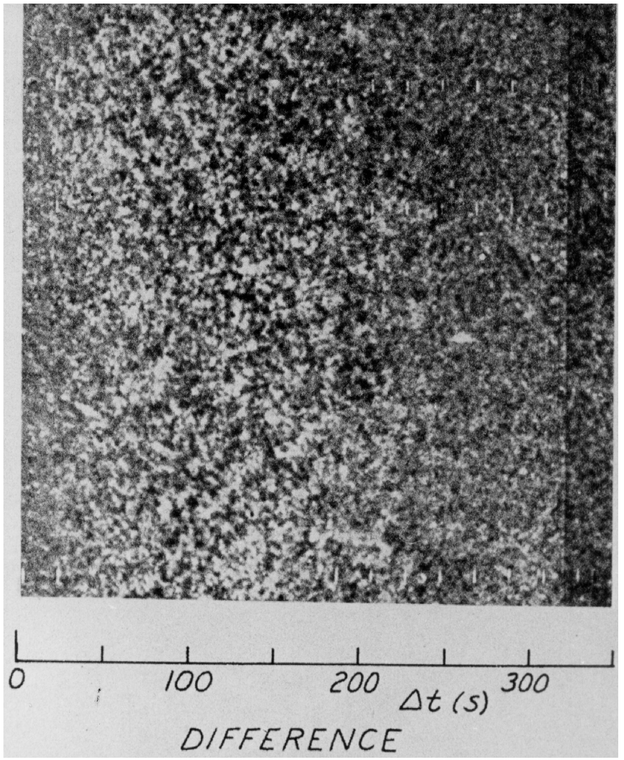
Ch. Doppler
(1803 – 1853)



Robert Leighton (1919 - 1997)

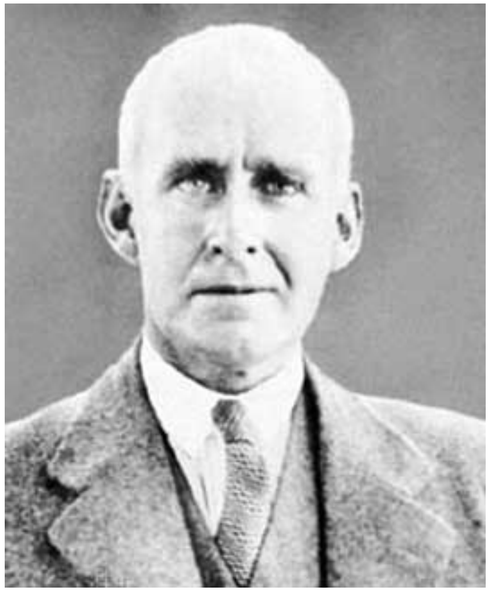


Κυανό ⟷ Ερυθρό



ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Ποια συσκευή μπορεί να δει στο εσωτερικό των άστρων;



Sir Arthur Eddington
(1882 – 1944)

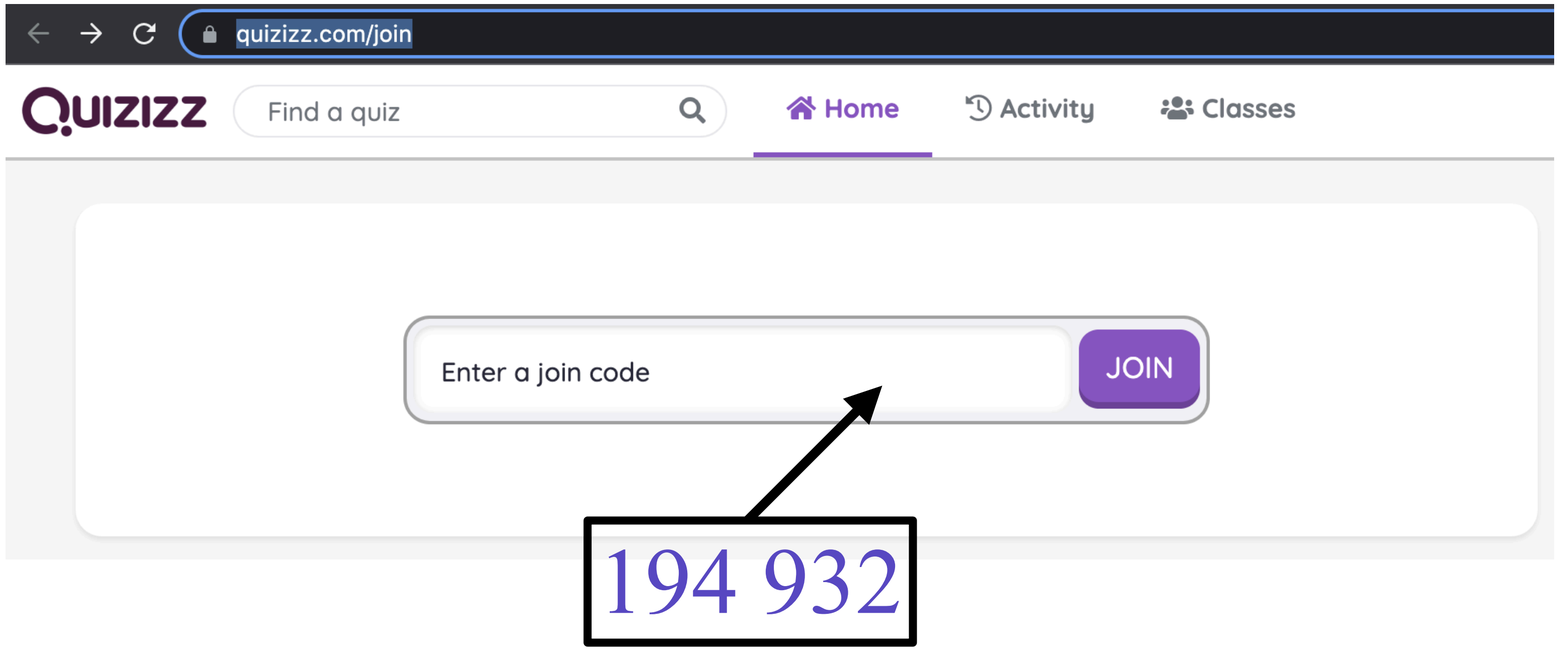
- Εκ πρώτης όψεως φαίνεται ότι το βαθύ εσωτερικό του ήλιου και των άστρων είναι λιγότερο προσιτό στην επιστημονική έρευνα από οποιαδήποτε άλλη περιοχή του σύμπαντος...
- Τα τηλεσκόπιά μας μπορεί να διεισδύουν όλο και πιο βαθιά στα βάθη του διαστήματος, αλλά πώς θα μπορέσουμε ποτέ να αποκτήσουμε ασφαλή γνώση αυτού που είναι κρυμμένο πίσω από ουσιώδη εμπόδια;
- Ποια συσκευή μπορεί να διαπεράσει τα εξωτερικά στρώματα ενός άστρου και να ελέγξει τις συνθήκες στο εσωτερικό του;

(Sir Arthur Stanley Eddington - The Internal Constitution of the Stars, 1926)

Ελενη Βαρδουλακη
elenivard@gmail.com

κουίζ #1

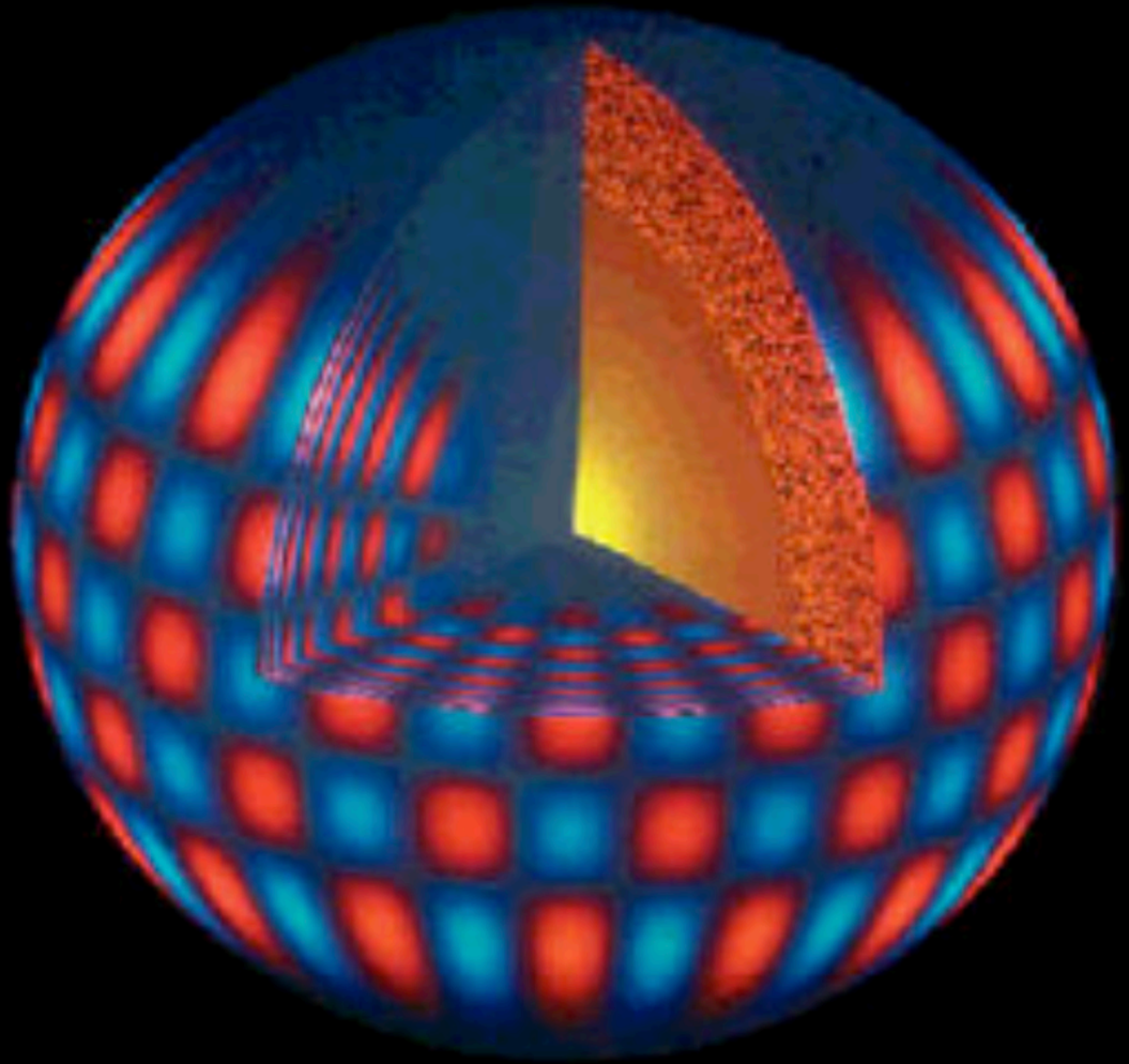
https://quizizz.com/join



"Ποια συσκευή μπορεί να διαπεράσει τα εξωτερικά στρώματα ενός άστρου και να ελέγξει τις συνθήκες στο εσωτερικό του;"

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

ΑΣΤΕΡΟΣΕΙΣΜΟΛΟΓΙΑ



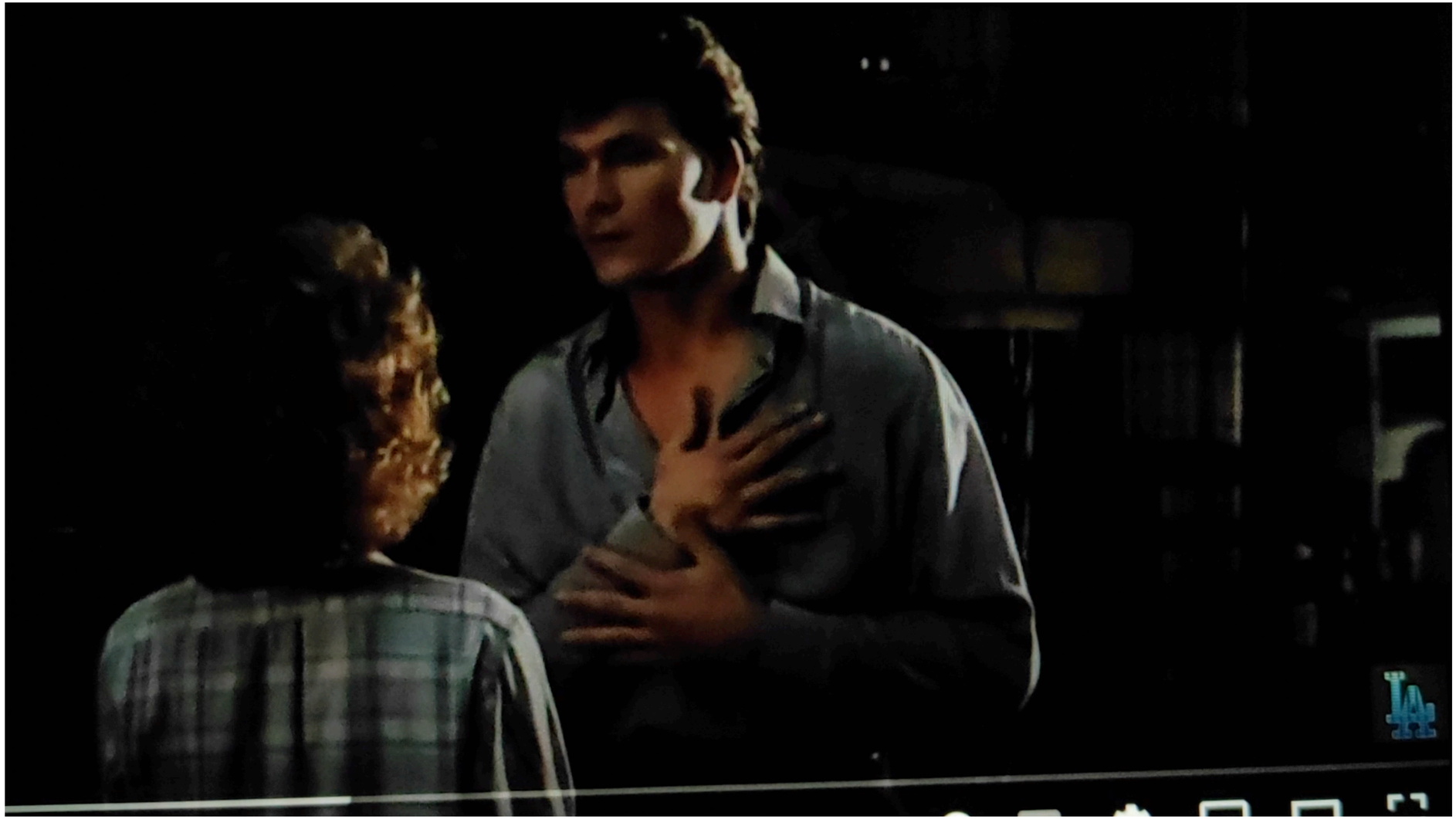
Ελενη Βαρδουλακη
elenivard@gmail.com

2. Πως μπορούμε να δούμε στο εσωτερικό των άστρων;

credit: Giphy

Ελενη Βαρδουλακη
elenivard@gmail.com

2. Πως μπορούμε να δούμε στο εσωτερικό των άστρων;

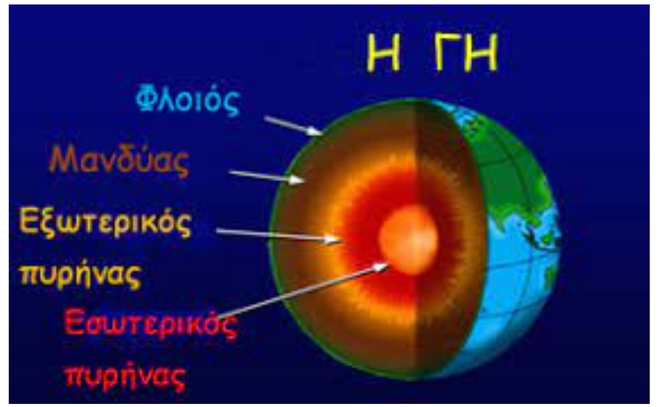


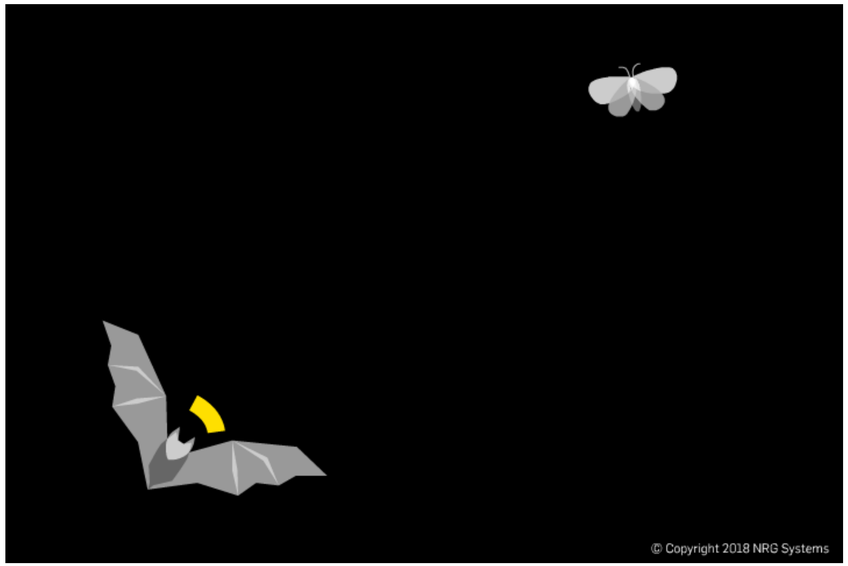
https://www.youtube.com/watch?v=iy9nVAxh6OI

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

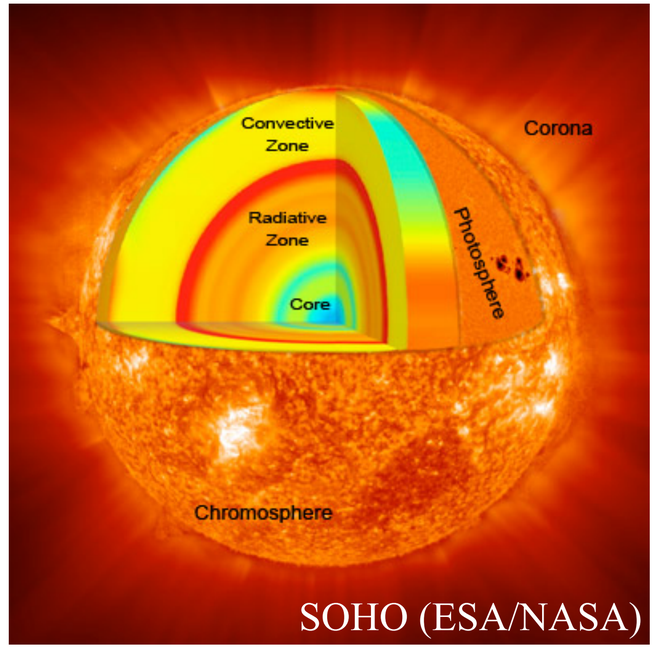
2. Πως μπορούμε να δούμε στο εσωτερικό των άστρων;

credit: thepetcollective



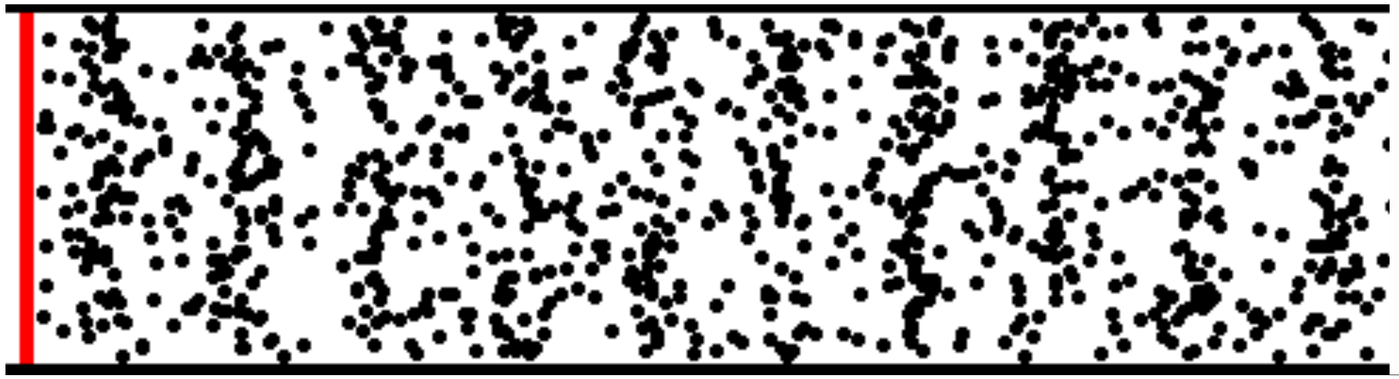


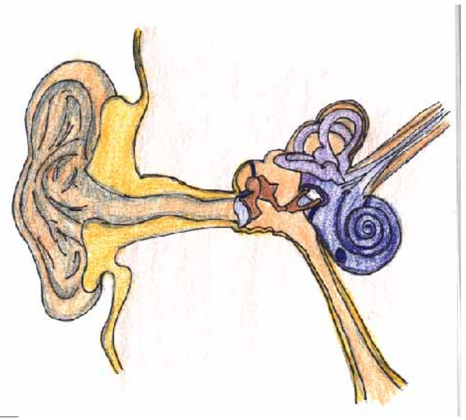
credit: seeganna



ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

2. Πως μπορούμε να δούμε στο εσωτερικό των άστρων;





- Το κύμα διαδίδεται με την ταχύτητα του ήχου
- Αν το ηχητικό κύμα χτυπήσει το αυτί, αισθανόμαστε τις μεταβολές της πίεσης.
- Αυτή η αίσθηση μεταφράζεται από τον εγκέφαλο σε ήχους.

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Ήχος

https://www.youtube.com/watch?v=Asl4yYZFMD8&list=PPSV

Ήχος

https://www.youtube.com/watch?v=Y3lLvIaYf1A

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Τύποι ταλάντωσης μονοδιάστατης χορδής

1.2.1 1-D Oscillations on a String

0 δεσμοί (nodes) 1 δεσμός 2 δεσμοί

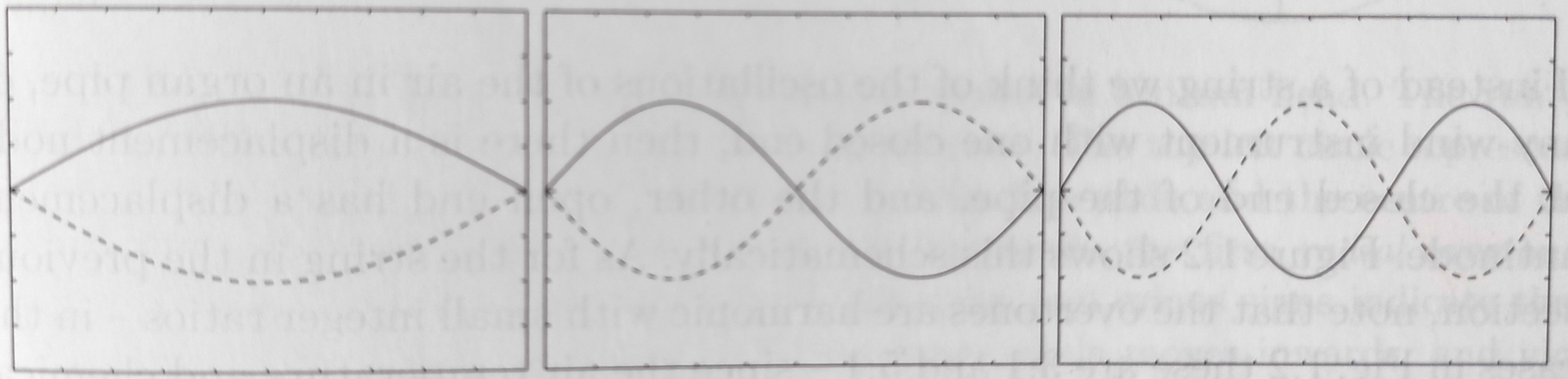
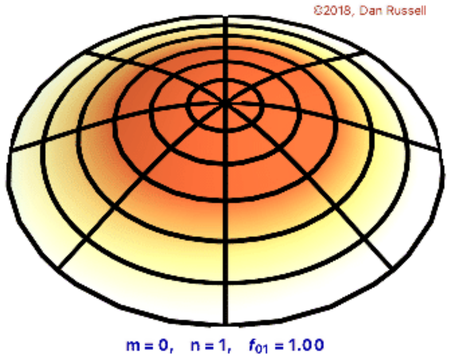


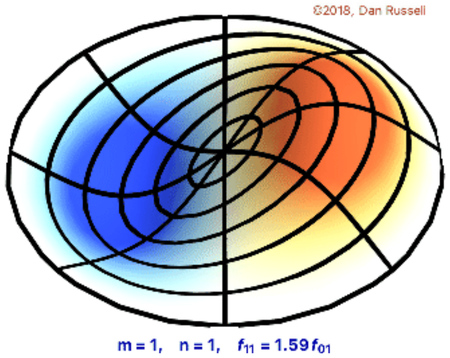
Fig. 1.1. The first three oscillation modes for a string that is fixed at both ends, such as a violin string or a guitar string. On the left is the fundamental mode; in the centre is the first overtone which has a single node; and on the right is the second overtone which has two nodes. Note that the nodes are uniformly spaced.

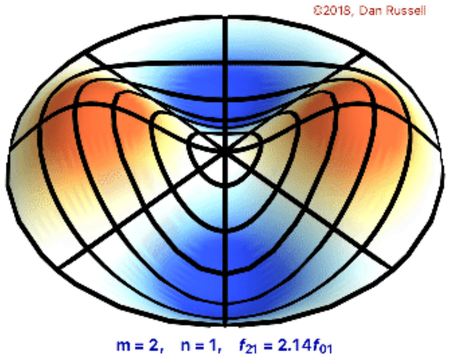
Credit: Asteroseismology, Aerts et al., Springer

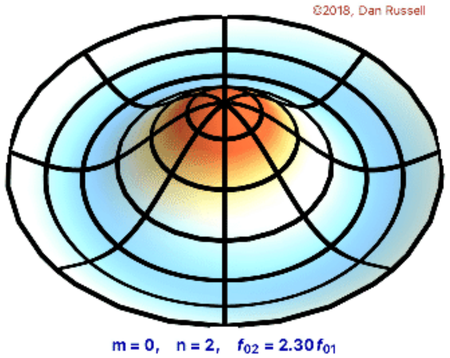
ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

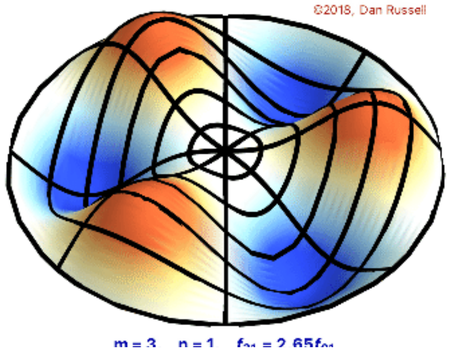
Τύποι ταλάντωσης - κυκλική μεμβράνη

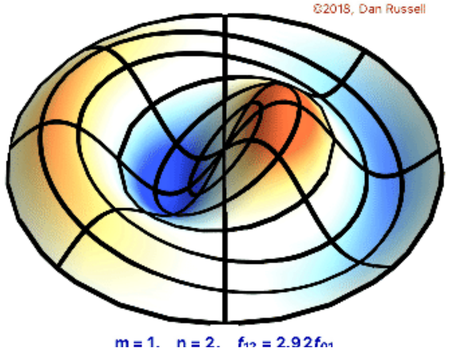


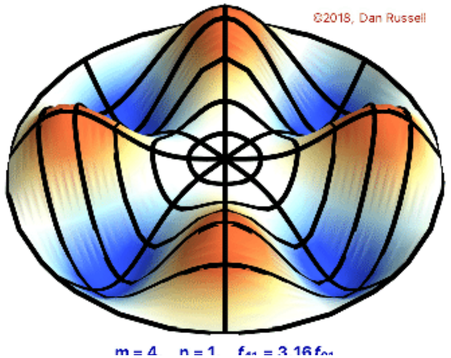


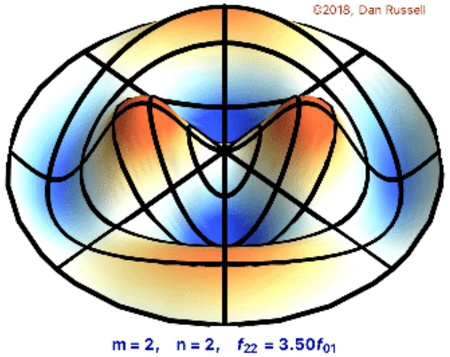


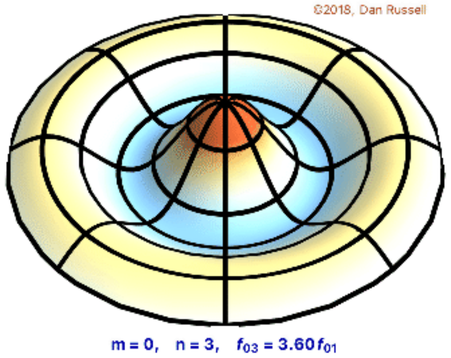


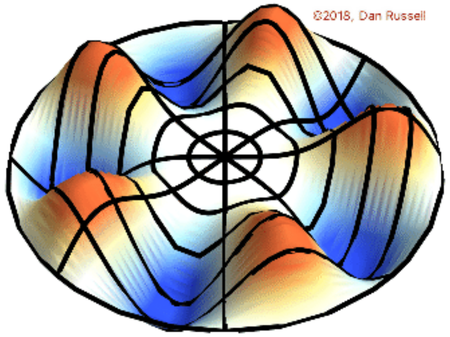


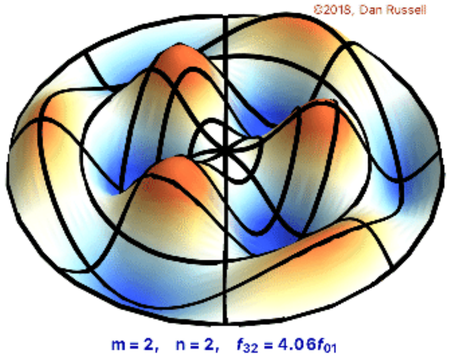










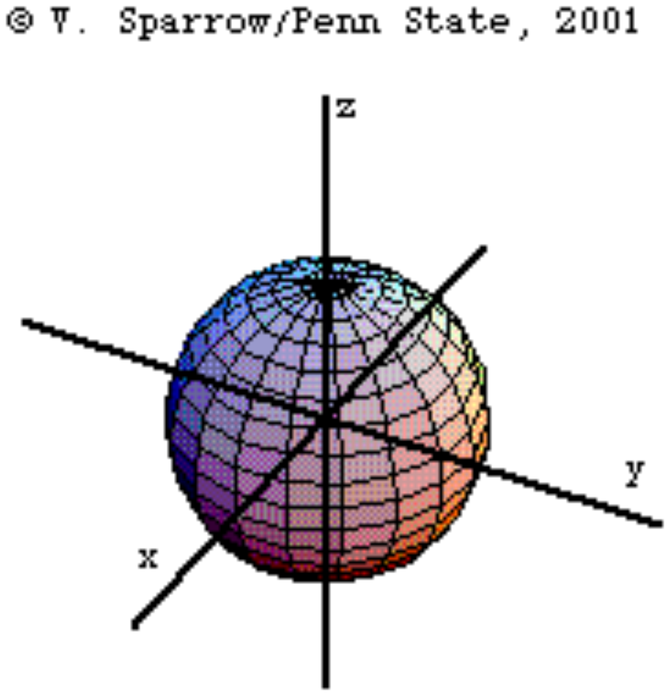


Credit: D. Russell

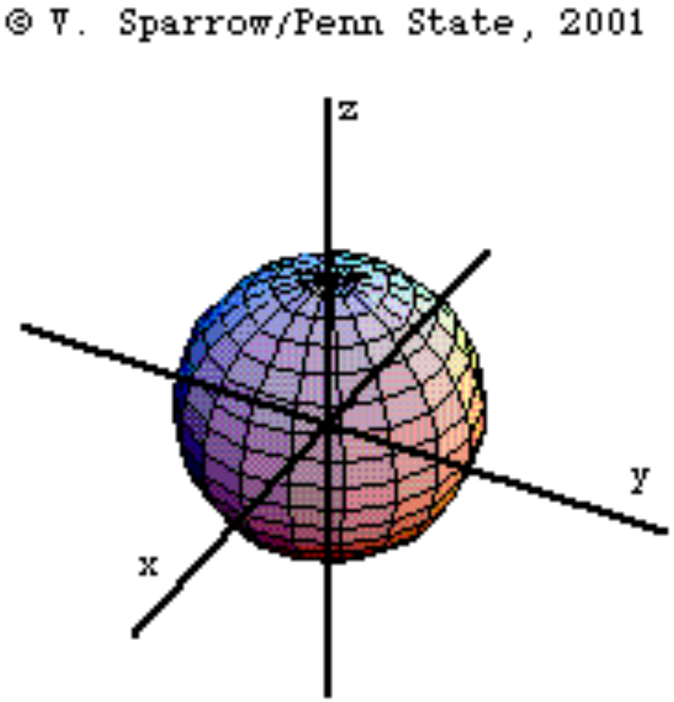
ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Τύποι ταλάντωσης - σφαίρα

Monopole



Dipole



Credit: V. Sparrow

Ελενη Βαρδουλακη
elenivard@gmail.com

Σφαιρικές αρμονικές

$$Y_l^m(\theta,\varphi) = N_l^m P_l^{|m|}(\cos\theta) e^{im\varphi}$$

αριθμός ακτινικών δεσμών

αριθμός δεσμών στο γεωγραφικό μήκος

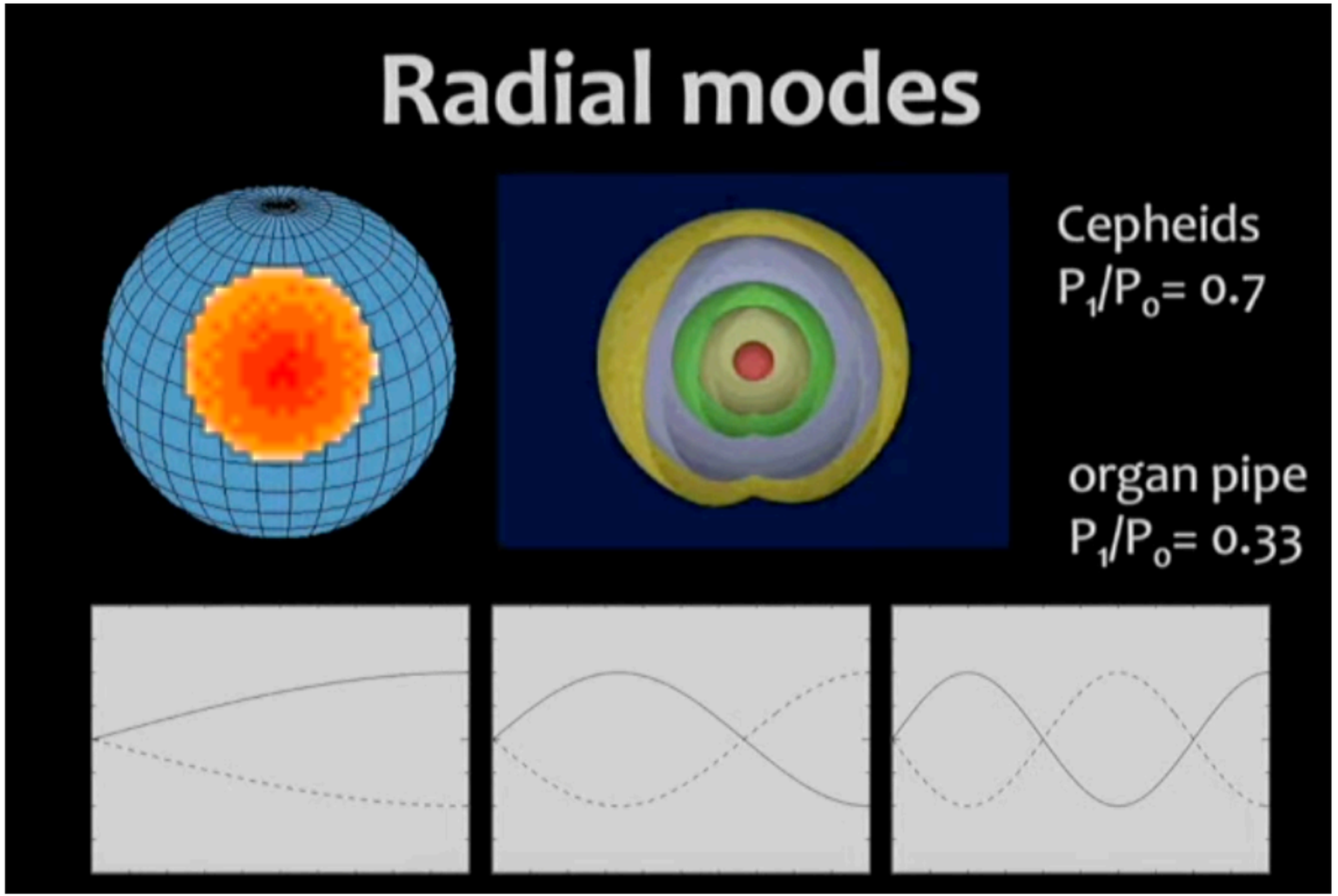
συνολικός αριθμός δεσμών στην επιφάνεια ταλάντωσης

- *n = number of radial nodes*
- *l = total number of surface nodes*
- *m = number of surface nodes that are lines of longitude*
- *l – m = number of surface nodes that are lines of latitude*

credit: Don Kurtz

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

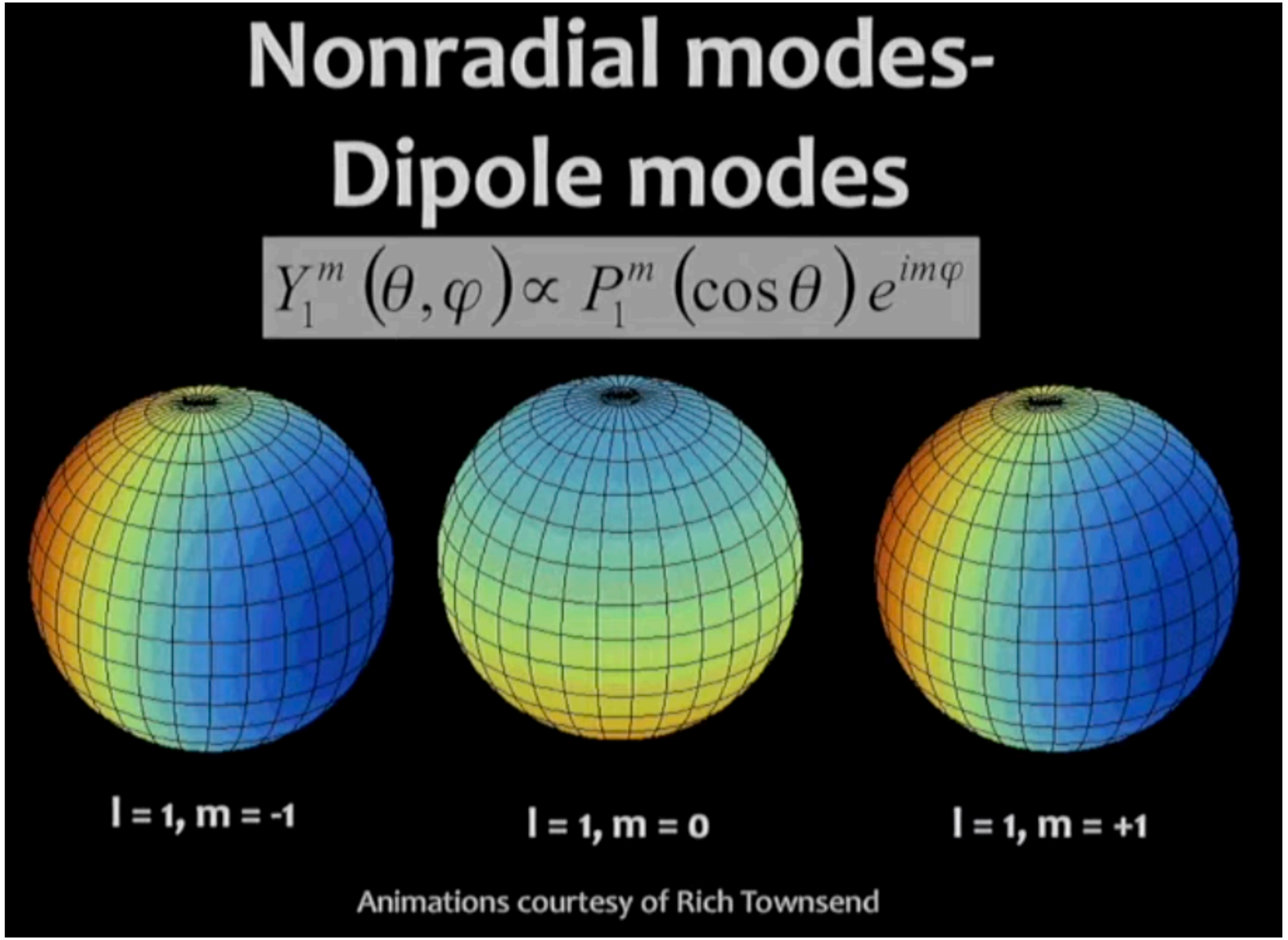
Ακτινικός τύπος



credit: Don Kurtz

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

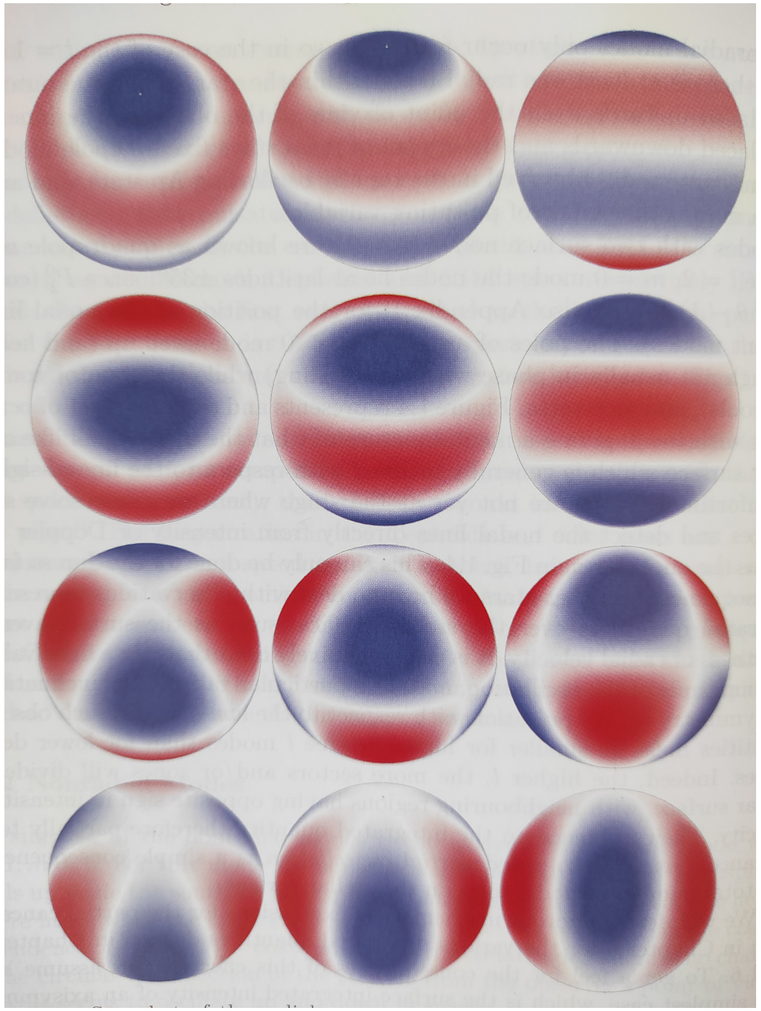
Μη-ακτινικός τύπος - Δίπολο



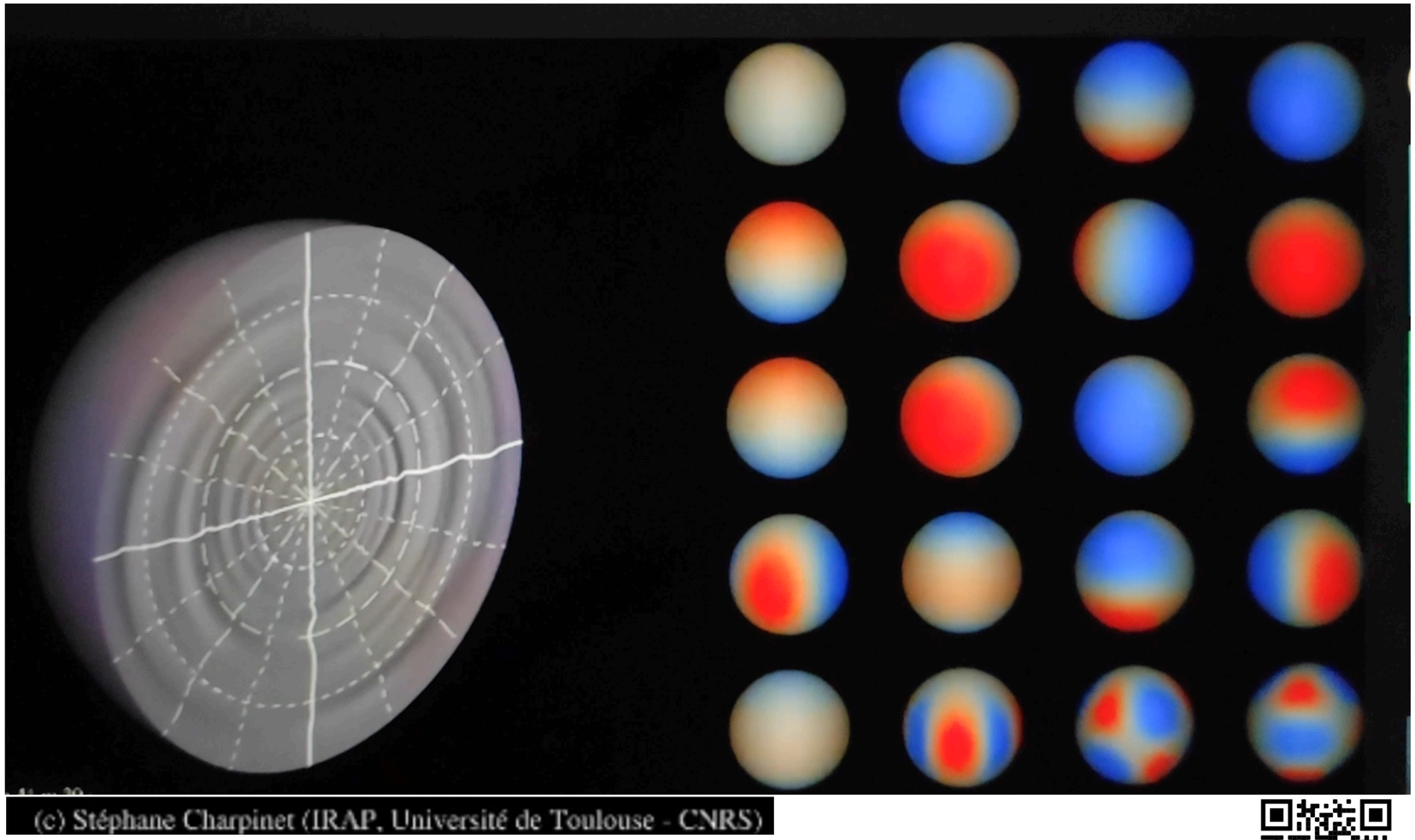
credit: Don Kurtz

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

10^7 τρόποι ταλάντωσης στον Ήλιο



Credit: Asteroseismology, Aerts et al., Springer



Stellar pulsations illustrated with glpulse3d
https://www.youtube.com/watch?v=mZnGfBtQdDk

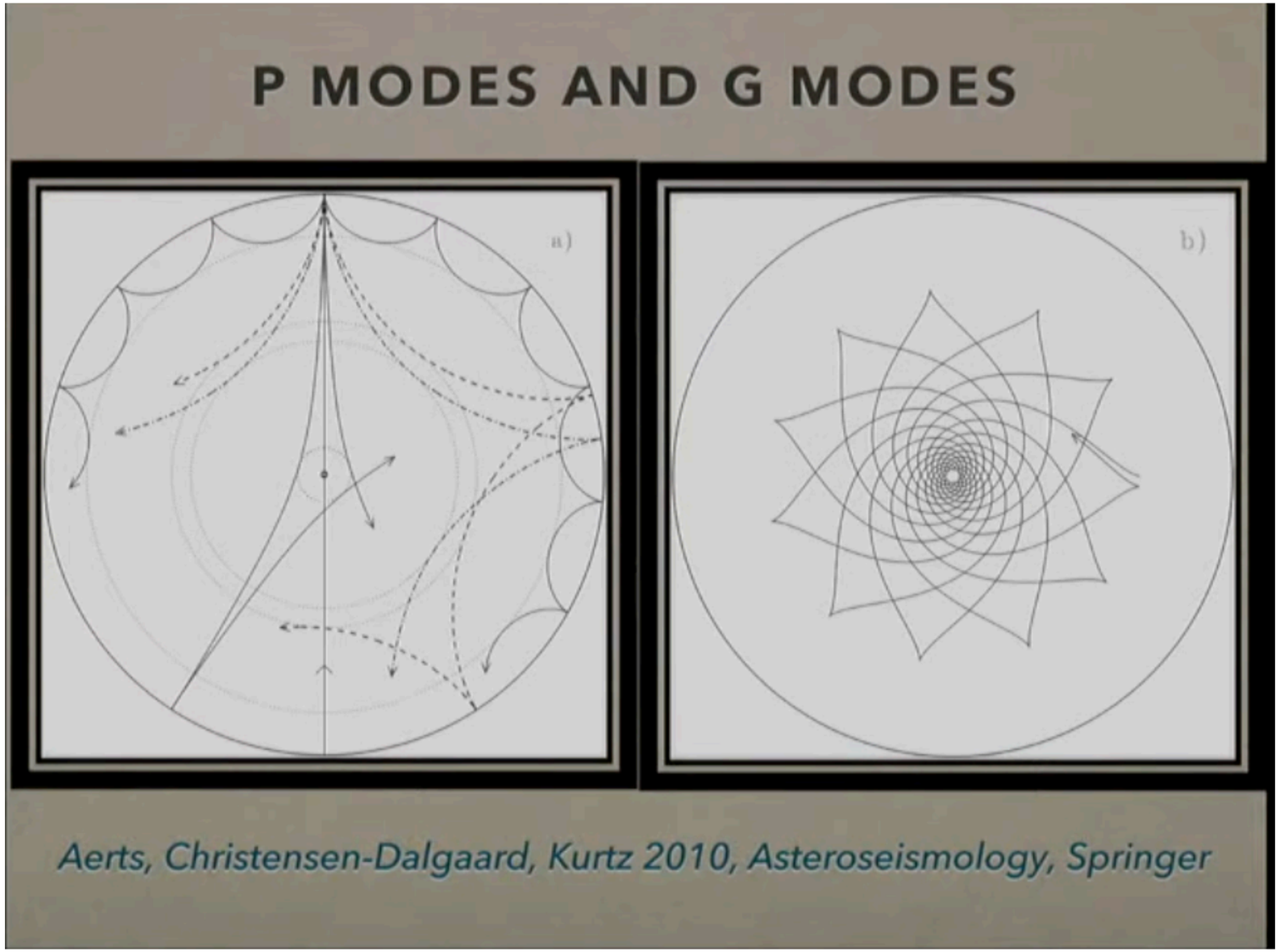
ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

p- & g-modes cheat sheet

- **2 βασικές λύσεις στην εξίσωση κίνησης για παλλόμενα αστέρια → 2 τύποι ταλαντώσεων**
- p-mode (pressure mode):
  - ακουστικά κύματα → τα προκαλεί η πίεση του αερίου (πίεση = δύναμη αποκατάστασης)
  - κοντά στην επιφάνεια - κάθετη κίνηση αερίου
  - π.χ. Ήλιος - ταχύτητα ήχου μεταβλητή, συχνότητες > 1 mHz, κυρίως 2-4 mHz (5-λεπτες ταλαντώσεις), 1/500 = 3.33 mHz, με πλάτος εκατοντάδες χιλιόμετρα
- g-mode (gravity mode):
  - κύματα βαρύτητας, πυκνότητας → οφείλονται στη βαρύτητα (άνωση = δύναμη αποκατάστασης)
  - κοντά στον πυρήνα - κάτω από τη ζώνη μεταφοράς
  - ανιχνεύονται κοντά στην επιφάνεια σε μερικά αστέρια (π.χ. γDor, λευκοί νάνοι)
  - οριζόντια κίνηση αερίου
  - χαμηλές συχνότητες (0-0.4 mHz)
  - πλάτος ~ χιλιοστά του μέτρου
  - π.χ. Ήλιος, ενδείξεις ότι ο πυρήνας περιστρέφεται 5 φορές ταχύτερα από τη φωτόσφαιρα

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

p- & g-modes



Radial Velocity (linear modes): (n, ℓ, m)

$$\Psi(r,\theta,\phi,t) = V_n(r)\, Y_\ell^m(\theta,\phi)\, e^{-2\pi i \nu t}$$

$$Y_\ell^m = P_\ell^m(\cos\theta) e^{im\phi}$$

spherical harmonic degree ℓ *radial order* n

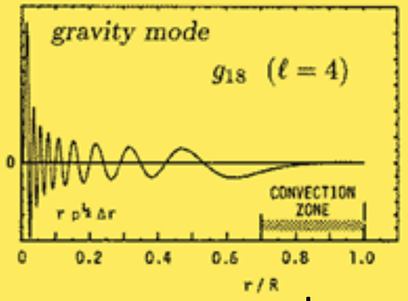
azimuthal order m *frequency* ν

$Y_\ell^m(\theta,\phi)$

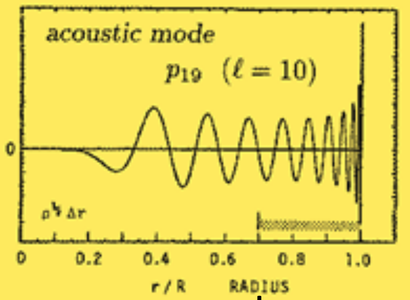
$\ell = 10$
$m = 5$

$\ell = 10$
$m = 10$

$V_n(r)$



g-mode

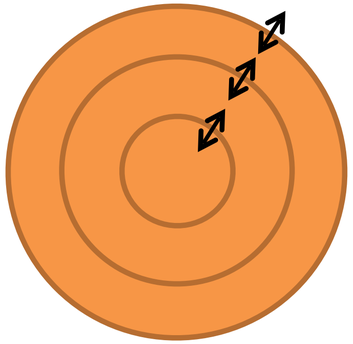


p-mode

credit: Markus Roth

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Ασυμπτωτικές εξισώσεις για p-modes



$$\nu_{nl} = \Delta\nu \left(n + \frac{l}{2} + \tilde{\alpha} \right) + \epsilon_{nl}$$

Συχνότητες ταλάντωσης (n, overtone; l, degree of mode)

*overtone = spherical symmetric nodal lines

μικρός διαχωρισμός $\delta\nu$

ηλικία αστέρα

Μεγάλος διαχωρισμός $\Delta\nu$

$$\Delta\nu = \left(2 \int_0^R \frac{\mathrm{d}r}{c(r)} \right)^{-1}$$

ακτίνα αστέρα

ταχύτητα ήχου

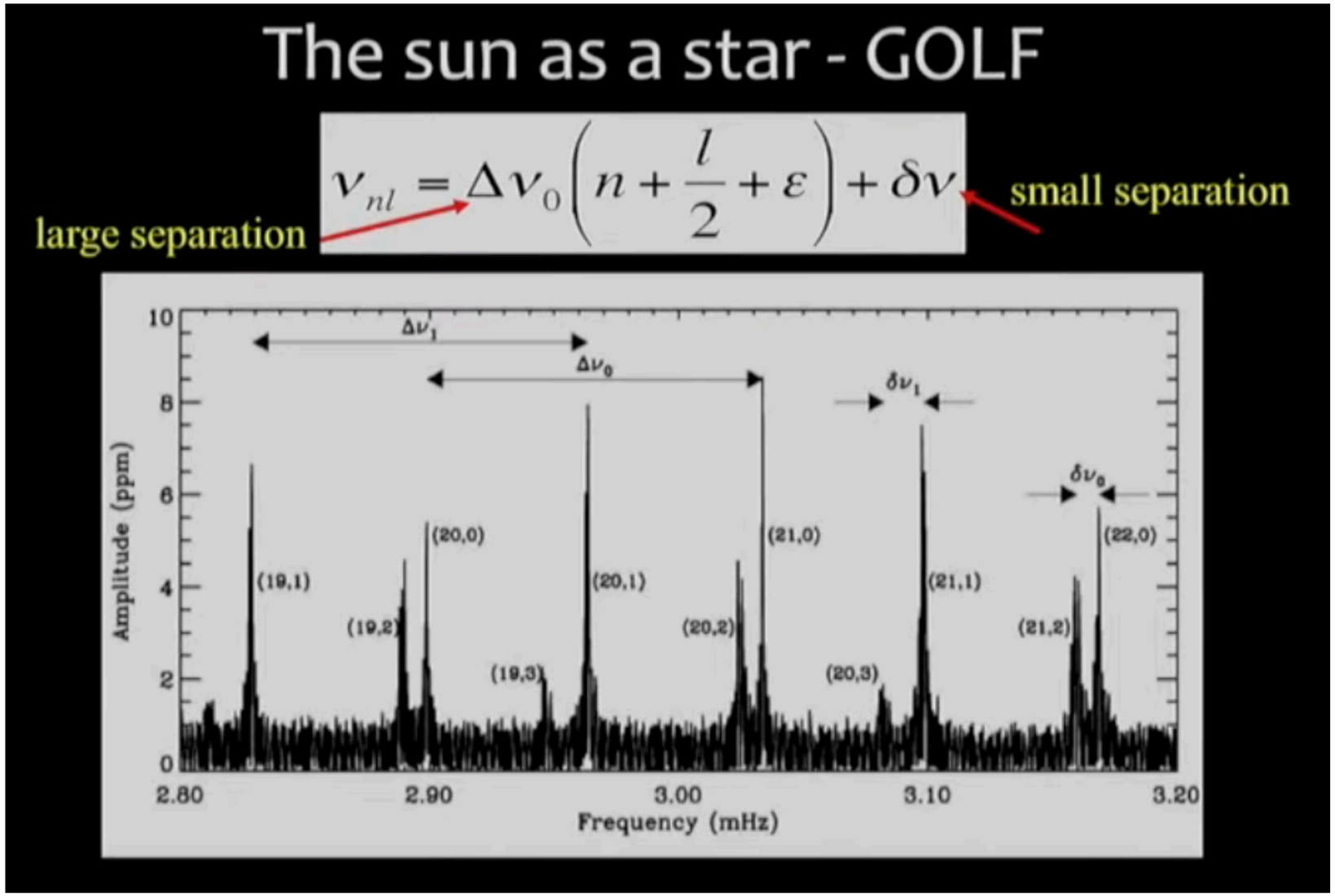
Μάζα αστέρα

(κοντά στη μέση ακολουθία)

Credit: Asteroseismology, Aerts et al., Springer

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Μεγάλοι και μικροί διαχωρισμοί στον Ήλιο



credit: Don Kurtz

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Ασυμπτωτικές εξισώσεις για g-modes

περίοδοι g-modes (n, overtone; l, degree of mode)

$$\Pi_{nl} = \frac{\Pi_0}{\sqrt{l\,(l+1)}}\,(n+\epsilon)$$

$$\Pi_0 = 2\pi^2 \left(\int \frac{N}{r} \mathrm{d}r \right)^{-1}$$

Ολοκλήρωμα πάνω στην κοιλότητα που διαδίδονται τα g-modes

Χρησιμοποιείται για να μελετήσουμε τα διάφορα **στρώματα μέσα στα αστέρια**

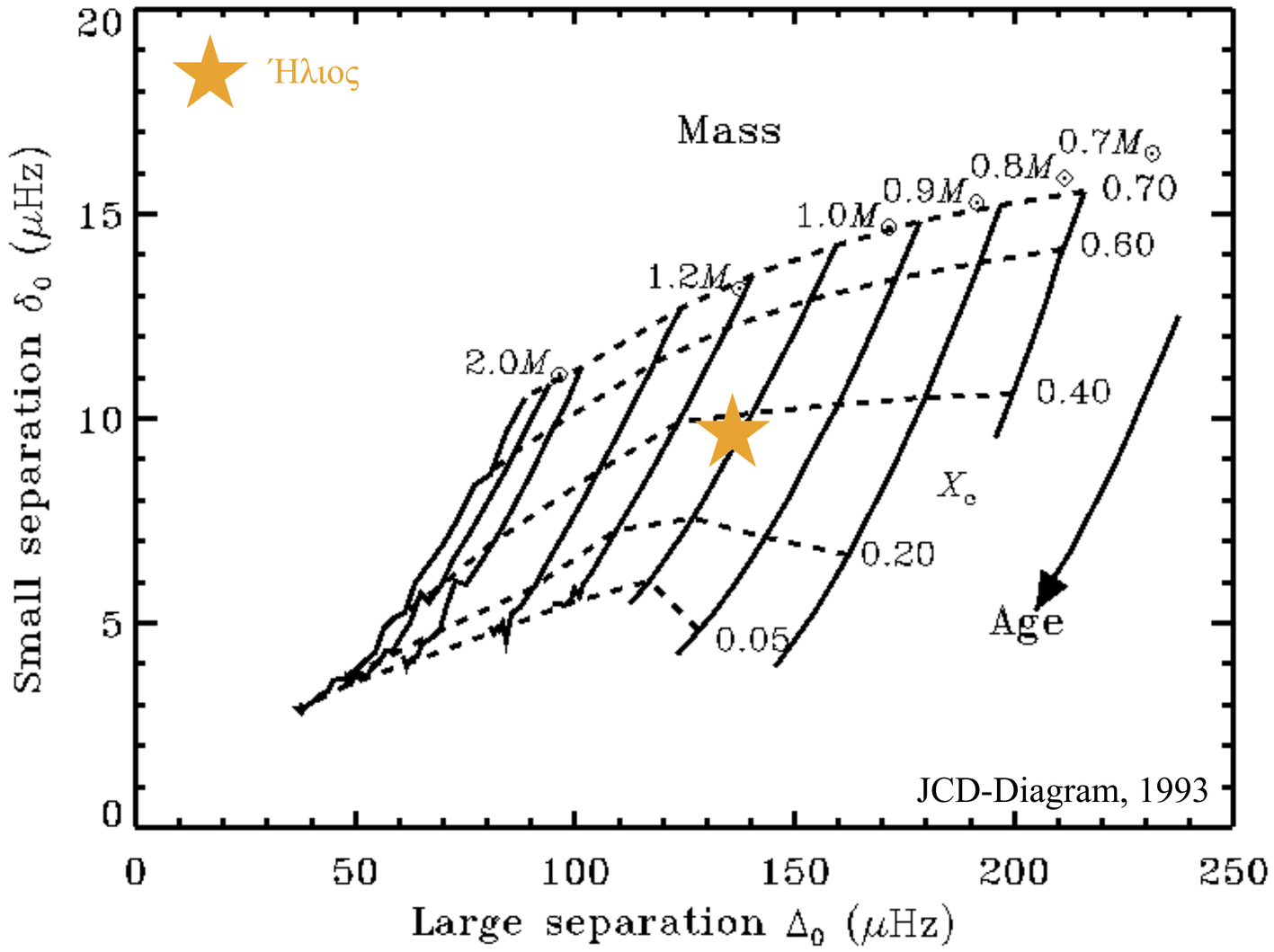
(λευκοί νάνοι: πυρήνα από άνθρακα-οξυγόνο, ανώτερα στρώματα από ήλιο και υδρογόνο)

Credit: Asteroseismology, Aerts et al., Springer

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Αστεροσεισμικό διάγραμμα H-R

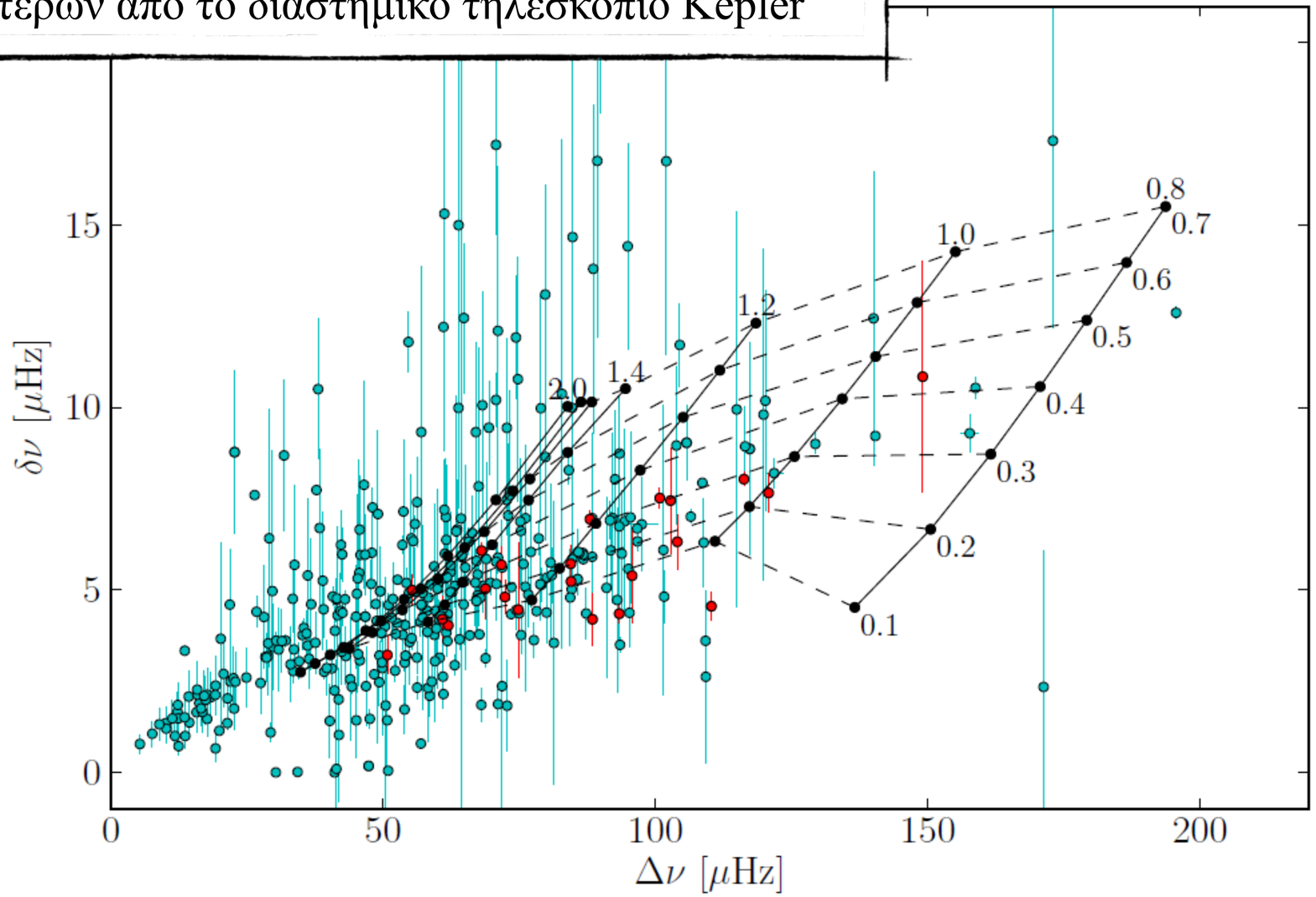
- Δν (μεγάλος διαχωρισμός) → υπολογισμός μάζας
- δν (μικρός διαχωρισμός) → υπολογισμός ηλικίας
- σχεδόν κάθετες γραμμές → μάζα αστέρα
- σχεδόν οριζόντιες διακεκομμένες γραμμές → κλάσμα μάζας υδρογόνου στον πυρήνα



ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Αστεροσεισμικό διάγραμμα H-R

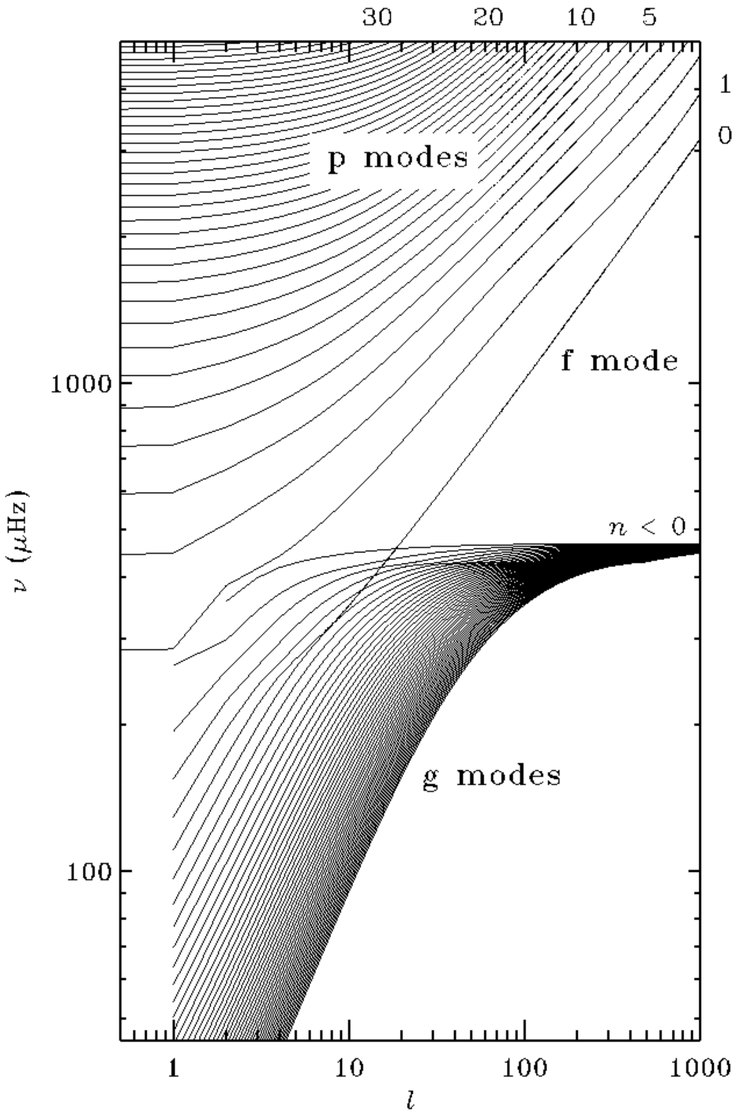
- Δεδομένα αστέρων από το διαστημικό τηλεσκόπιο Kepler



ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

p-modes, g-modes, αλλά και f-modes

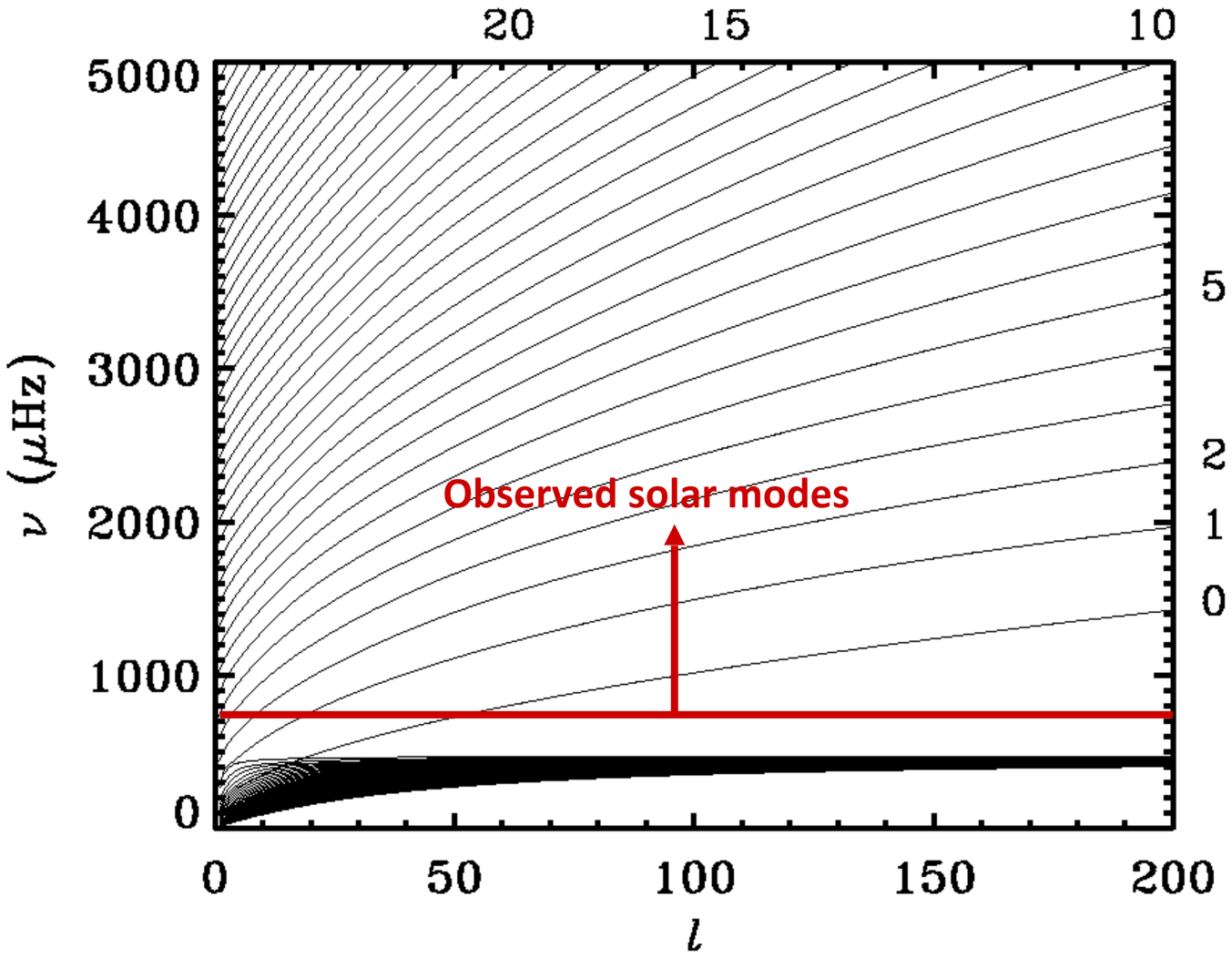
- p-modes (πίεσης - αυτά παρατηρούμε συνήθως)
- g-modes (βαρύτητας - δύσκολο να τα παρατηρήσουμε)
- f-modes:
  - επιφανειακά
  - κύματα βαρύτητας κοντά στην επιφάνεια
  - πολύ δύσκολο να τα παρατηρήσουμε

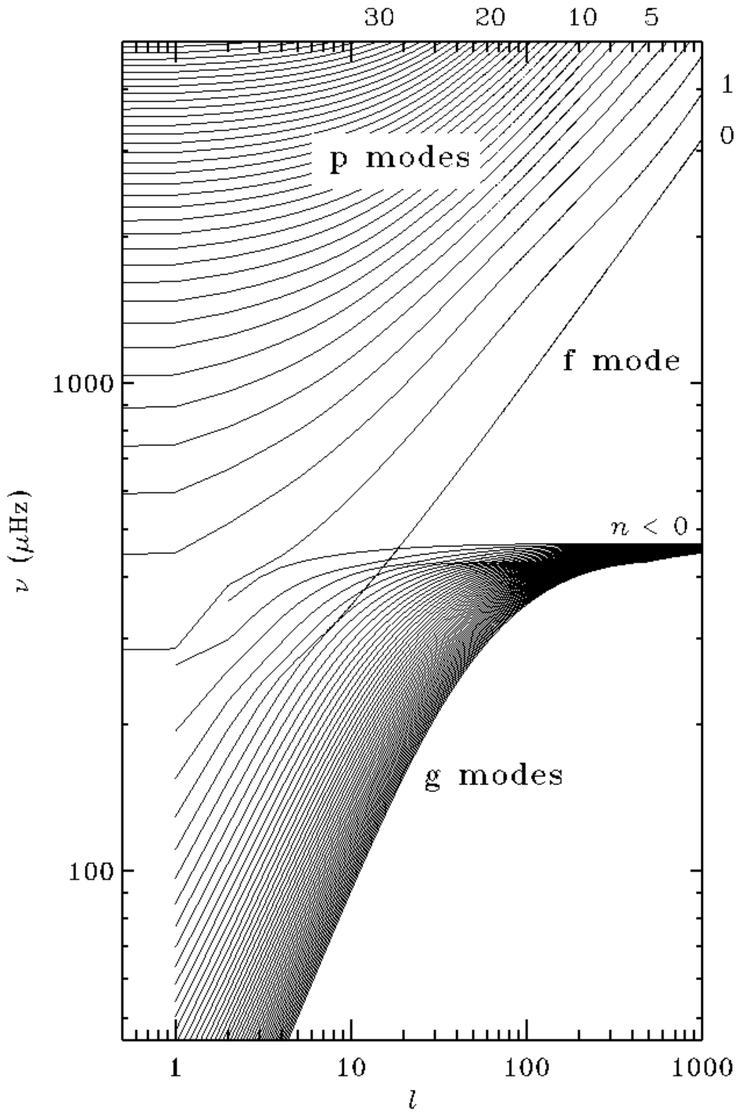


Credit: Asteroseismology, Aerts et al., Springer

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Ήλιος και p-modes



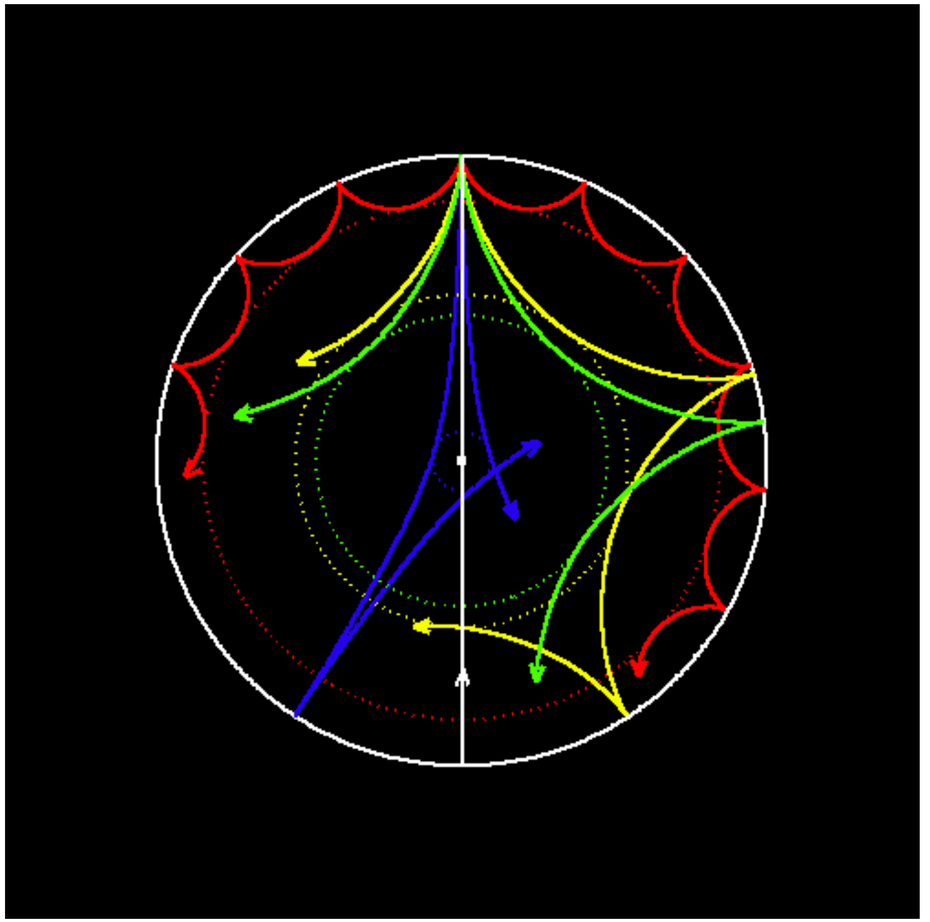


credit: Markus Roth

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Ηλιοσεισμολογία/Αστεροσεισμολογία

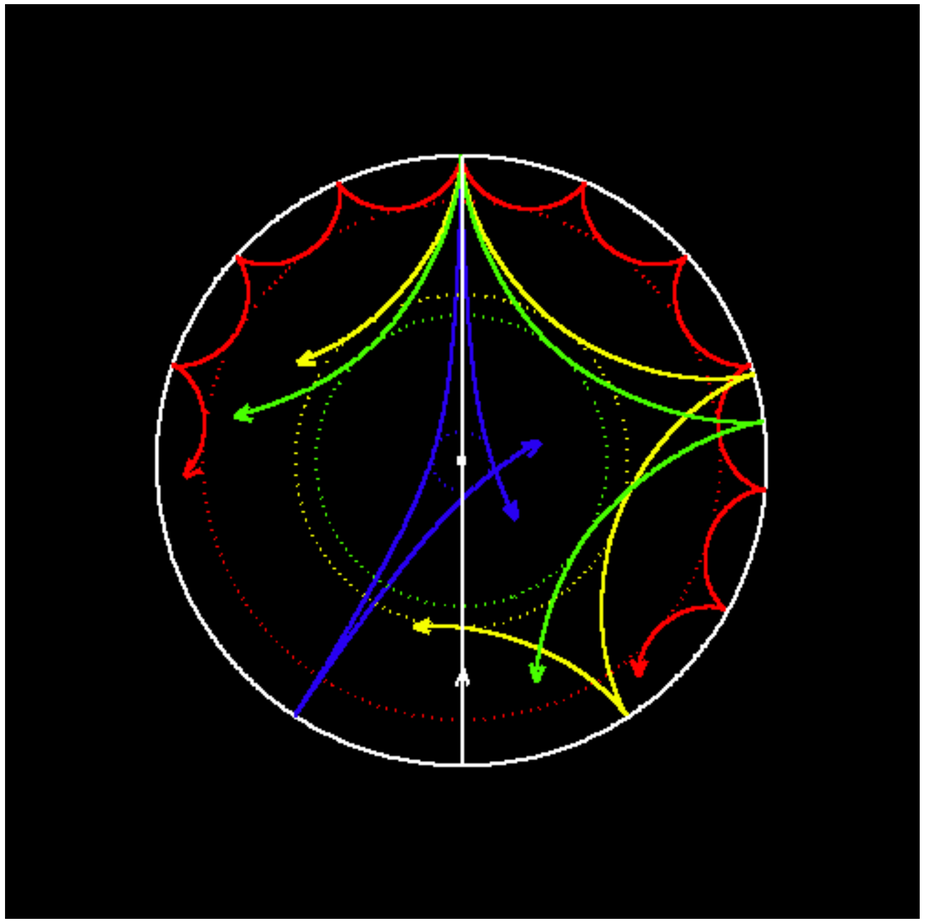
- Μια μικρή διαταραχή στην επιφάνεια → μεταδίδεται
- Διαφορετικά κύματα διαδίδονται σε διαφορετικές περιοχές στο εσωτερικό του Ήλιου → Πληροφορίες από διαφορετικά βάθη
- Από τη μέτρηση της ταχύτητας του ήχου → συμπεράσματα για την εσωτερική δομή του
- Ακριβείς μετρήσεις συχνοτήτων για το διαχωρισμό των κυμάτων → μακροχρόνιες και αδιάλειπτες μετρήσεις
- Ανάλυση συχνότητας: $\Delta\nu = \frac{1}{T}$



Ελενη Βαρδουλακη
elenivard@gmail.com

Ηλιοσεισμολογία/Αστεροσεισμολογία

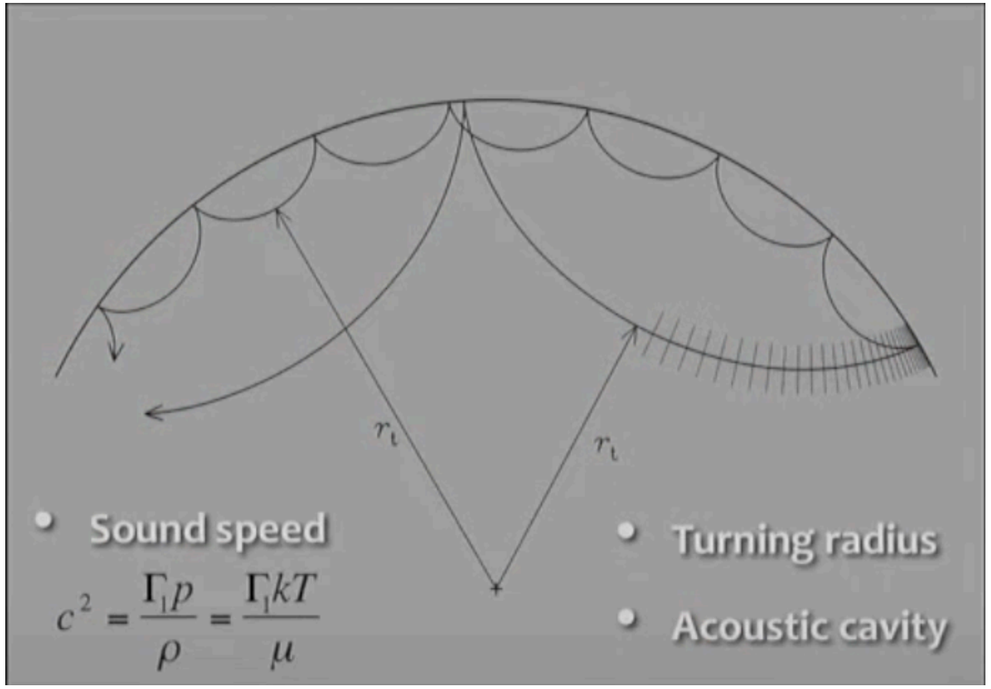
- Για τα ακουστικά κύματα, p-modes: το κατώτερο μέρος του κύματος είναι σε περιοχή μεγαλύτερης θερμοκρασίας από το ανώτερο μέρος του κύματος, δηλαδή σε περιοχή μεγαλύτερης ταχύτητας του ήχου
- Το κύμα διαθλάται πίσω στην επιφάνεια, όπου και ανακλάται, καθώς η ακουστική ενέργεια είναι παγιδευμένη μέσα στο αστέρι
- μεγαλύτερο l → περισσότερα σημεία ανάκλασης
- μεγαλύτερο l → τα κύματα διαθλώνται πιο κοντά στην επιφάνεια
- μικρότερο l → κύματα διεισδύουν πιο βαθιά στο εσωτερικό



ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Ηλιοσεισμολογία/Αστεροσεισμολογία

- Η συχνότητα του τύπου ταλάντωσης στην επιφάνεια εξαρτάται από το χρόνο διάδοσης του ήχου: από το ολοκλήρωμα της ταχύτητας του ήχου μέσα στην 'ακουστική κοιλότητα'
- Μπορούμε να "αντιστρέψουμε" τις παρατηρήσεις για να φτιάξουμε ένα χάρτη διάδοσης του ήχου στο εσωτερικό
- Από αυτό μπορούμε να υπολογίσουμε την θερμοκρασία (με παραδοχές για τη χημική του σύσταση και σύγκριση με μοντέλα)
- **Η αστεροσεισμολογία μας βοηθά να δούμε το εσωτερικό των αστέρων γιατί διαφορετικοί τρόποι ταλάντωσης διεισδύουν σε διαφορετικά βάθη στο εσωτερικό τους**



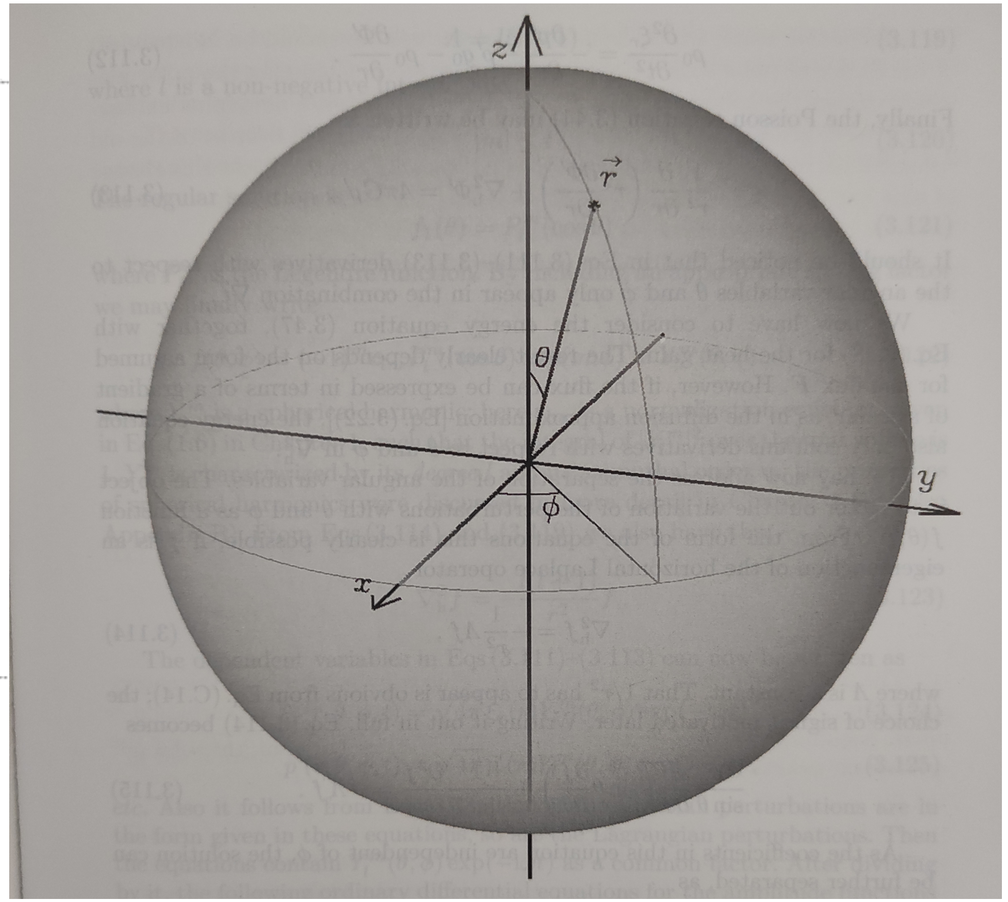
ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Ηλιοσεισμολογία/Αστεροσεισμολογία

- Διαφορετικά κύματα διαδίδονται σε διαφορετικές περιοχές στο εσωτερικό του Ήλιου → Πληροφορίες από διαφορετικά βάθη
- Από τη μέτρηση της ταχύτητας του ήχου c_s → συμπεράσματα για την εσωτερική δομή του
- Μέτρηση της ταχύτητας περιστροφής Ω

$$c_s(r, \theta, \varphi, t, \Omega)$$

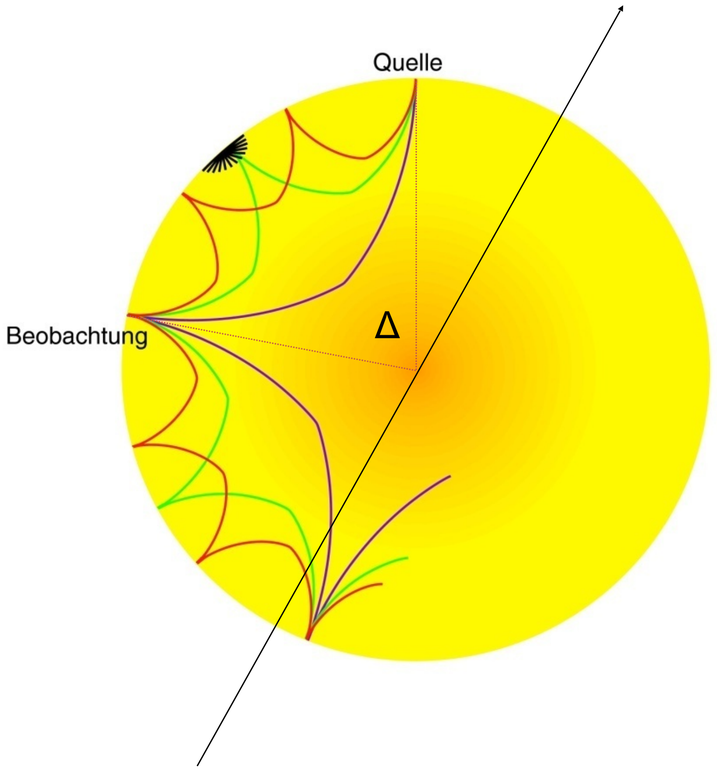
$$\Omega(r, \theta, \varphi, t)$$



Ελενη Βαρδουλακη
elenivard@gmail.com

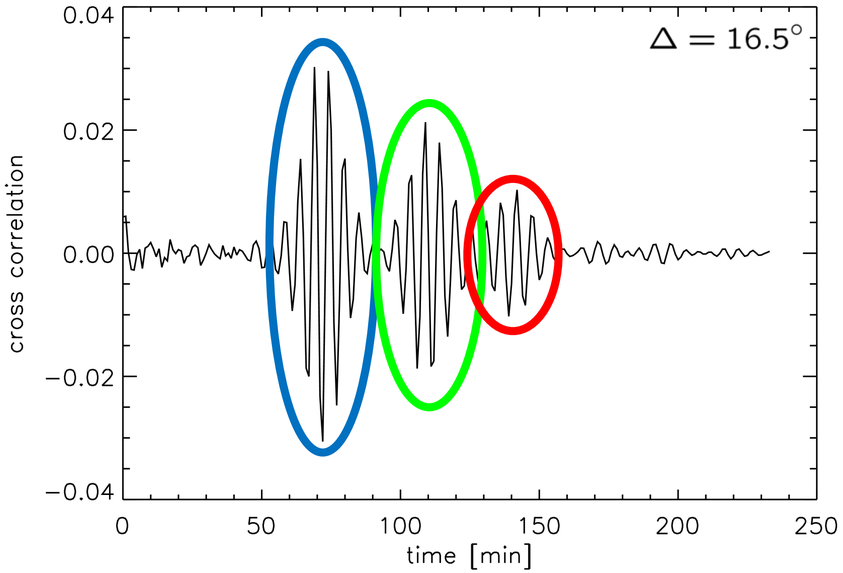
2. Πως μπορούμε να δούμε στο εσωτερικό των άστρων;

- Συσχετίζουμε μια διαταραχή στην επιφάνεια με μια άλλη
- συνάρτηση της γωνιακής απόστασης Δ και του δt

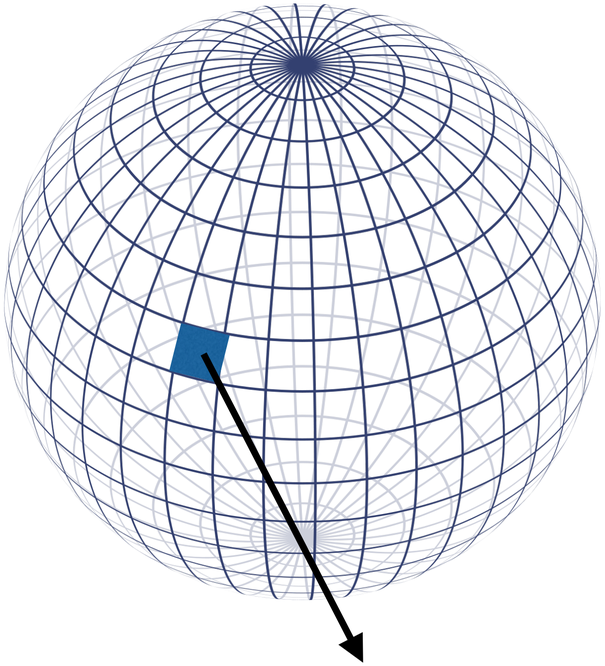


Duvall et al. (1993)

$$C(\tau, \Delta) = \int_0^T \psi(0,t)\psi(\Delta, t+\tau)\, dt$$



Ο χρόνος διαδρομής των κυμάτων προσδιορίζεται με την προσαρμογή των κυμάτων Gabor.

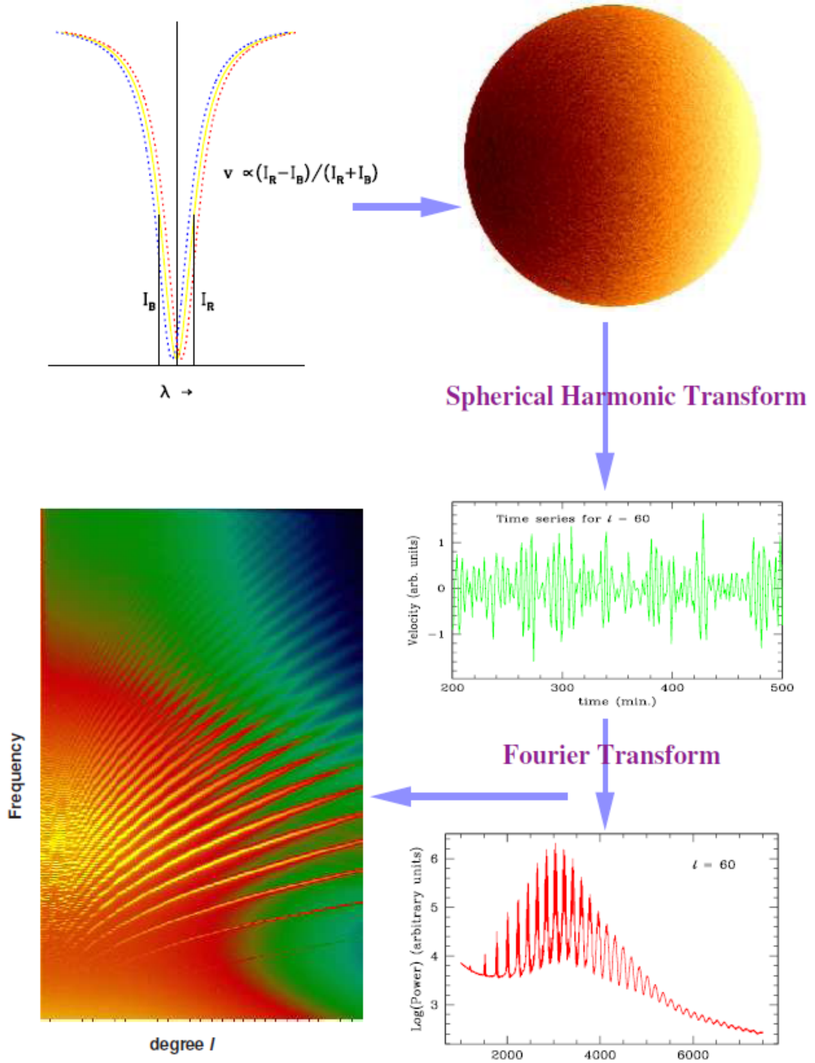


$\mathrm{cor}(x, y, x_i, y_i, \delta t_i)$

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Από τις παρατηρήσεις στο φάσμα του Ήλιου

- Φάσμα → ταχύτητα & περίοδος ταλαντώσεων → μετασχηματισμός Fourier → σχέση ενέργειας & συχνότητας → 5-λεπτες ταλαντώσεις Ήλιου
- Συγκρίνουμε παρατηρήσεις με μοντέλα
- Χρειαζόμαστε πάρα πολλές παρατηρήσεις
- Και διαρκείς παρατηρήσεις

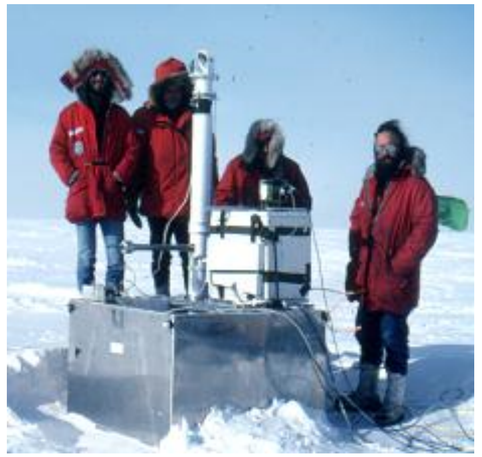


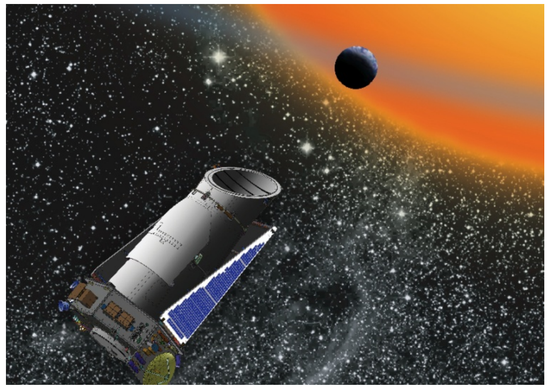
credit: Markus Roth

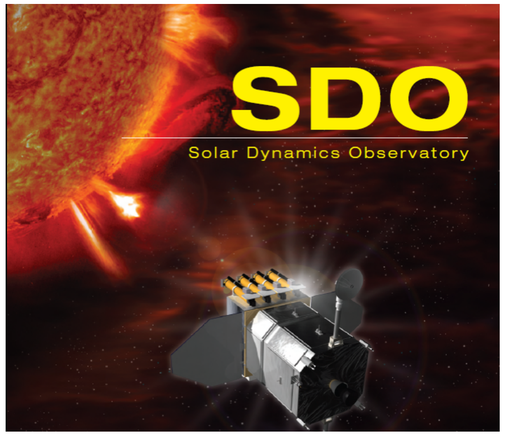
ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Παρατηρήσεις Ήλιου / αστέρων

- Παρατήρηση στο Νότιο Πόλο (10-15 ημέρες)
- Δίκτυο τηλεσκοπίων στη Γη:
  - BiSON
  - IRIS
  - ECHO / LOW-L
  - TON
  - GONG
  - SONG
- Παρατηρήσεις στο Διάστημα:
  - SOHO (GOLF, VIRGO, MDI)
  - SDO (HMI)
  - CORONAS-F (DIFOS)
  - COROT
  - Kepler
  - TESS







credit: Markus Roth

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

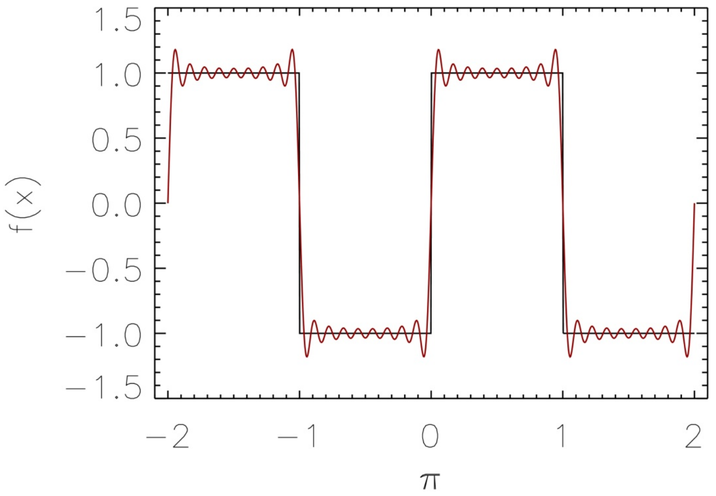
Μετασχηματισμός Fourier

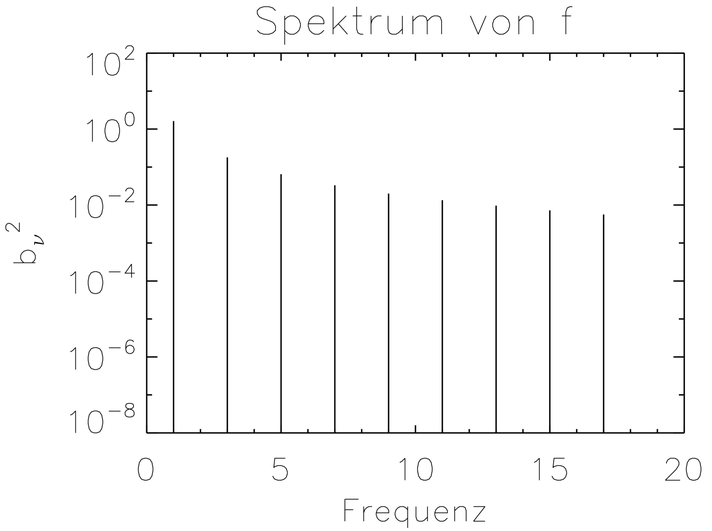
$$F(y) := \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \lim_{T\to\infty} \int_{-T}^{T} f(x)\, e^{iyx}\, dx$$

$$= \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \lim_{T\to\infty} \int_{-T}^{T} f(x) \cos yx\, dx + i \int_{-T}^{T} f(x) \sin yx\, dx$$

- F(y) είναι ο μετασχηματισμός Fourier του f
- $|F(y)|^2$ είναι το φάσμα του f

Ορθογώνια συνάρτηση



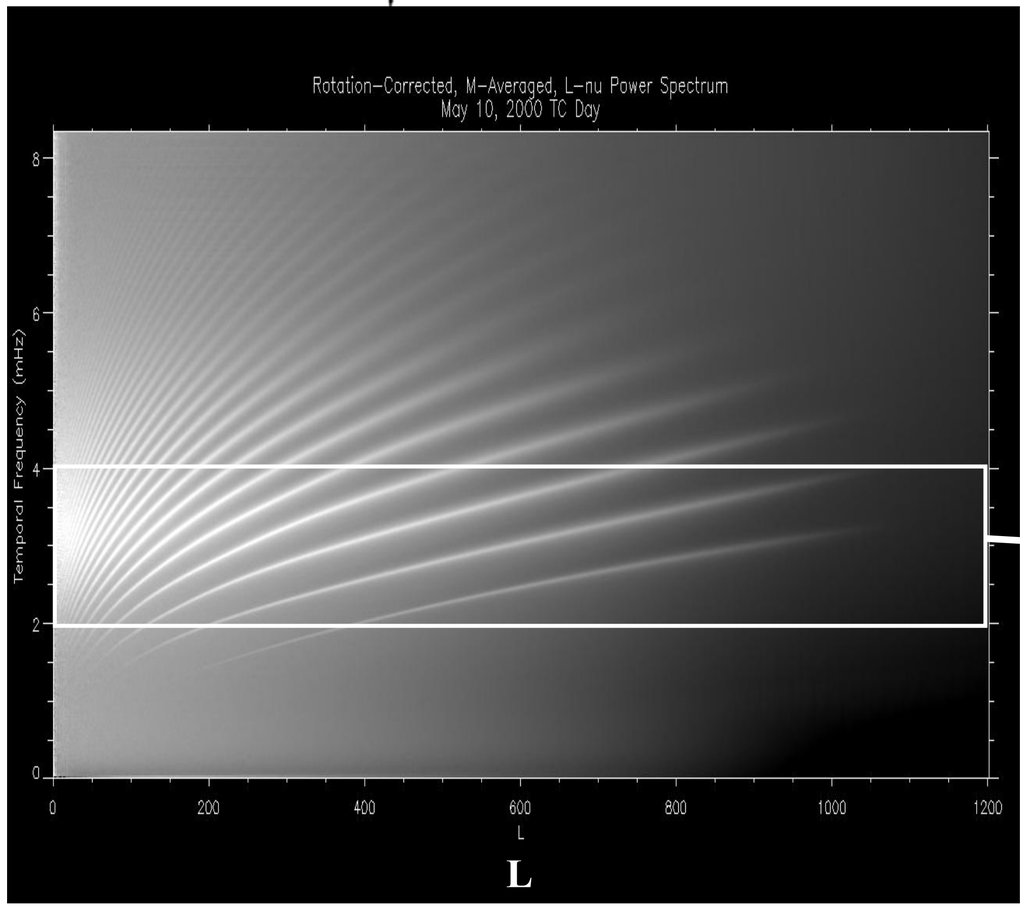


credit: Markus Roth

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

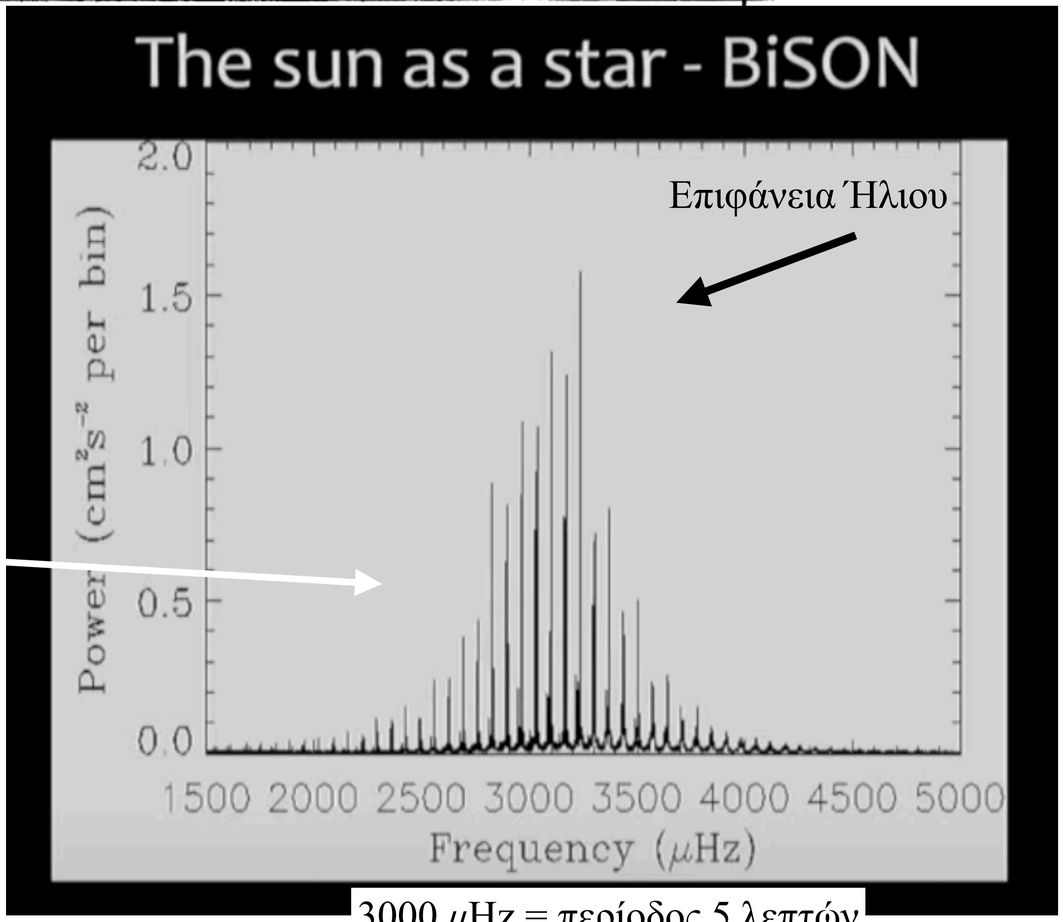
Τι μαθαίνουμε για τον Ήλιο;

Η επιφάνεια του Ήλιου κινείται προς τα πάνω και προς τα κάτω περίπου 10 cm κάθε 5 λεπτά, με ταχύτητες ~ +/-500 m/s



Συχνότητα (mHz)

L

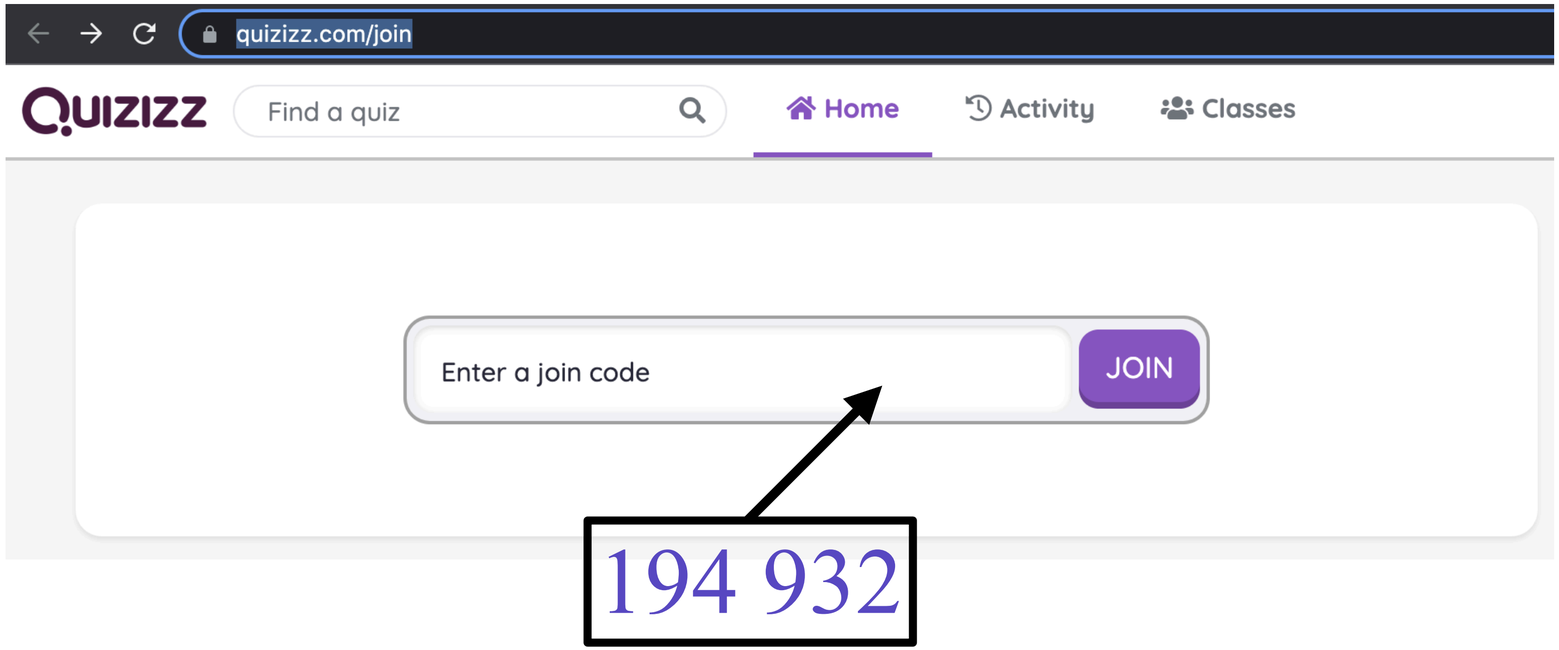


3000 μHz = περίοδος 5 λεπτών

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

κουίζ #2

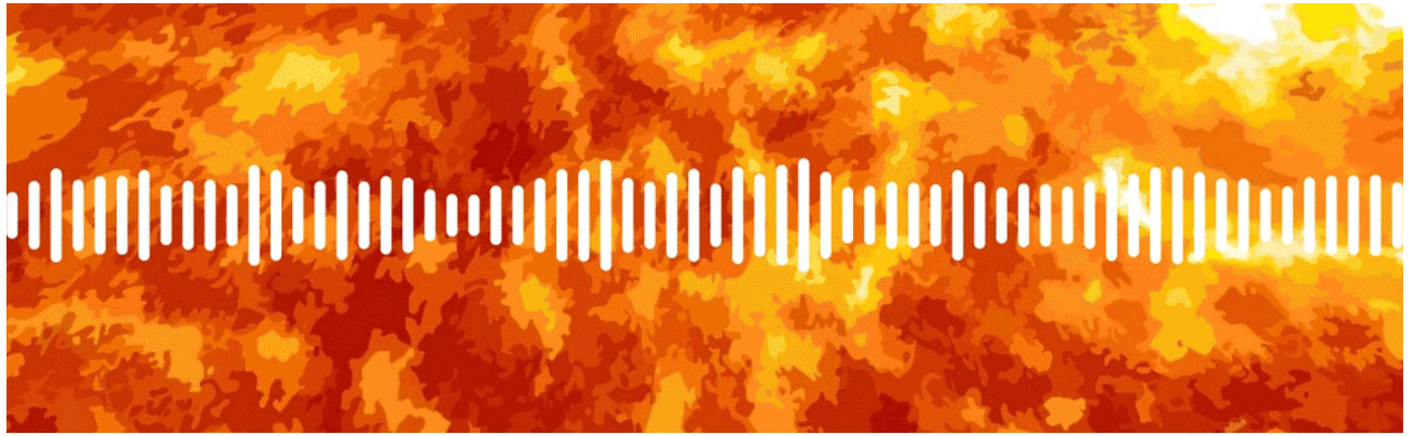
https://quizizz.com/join

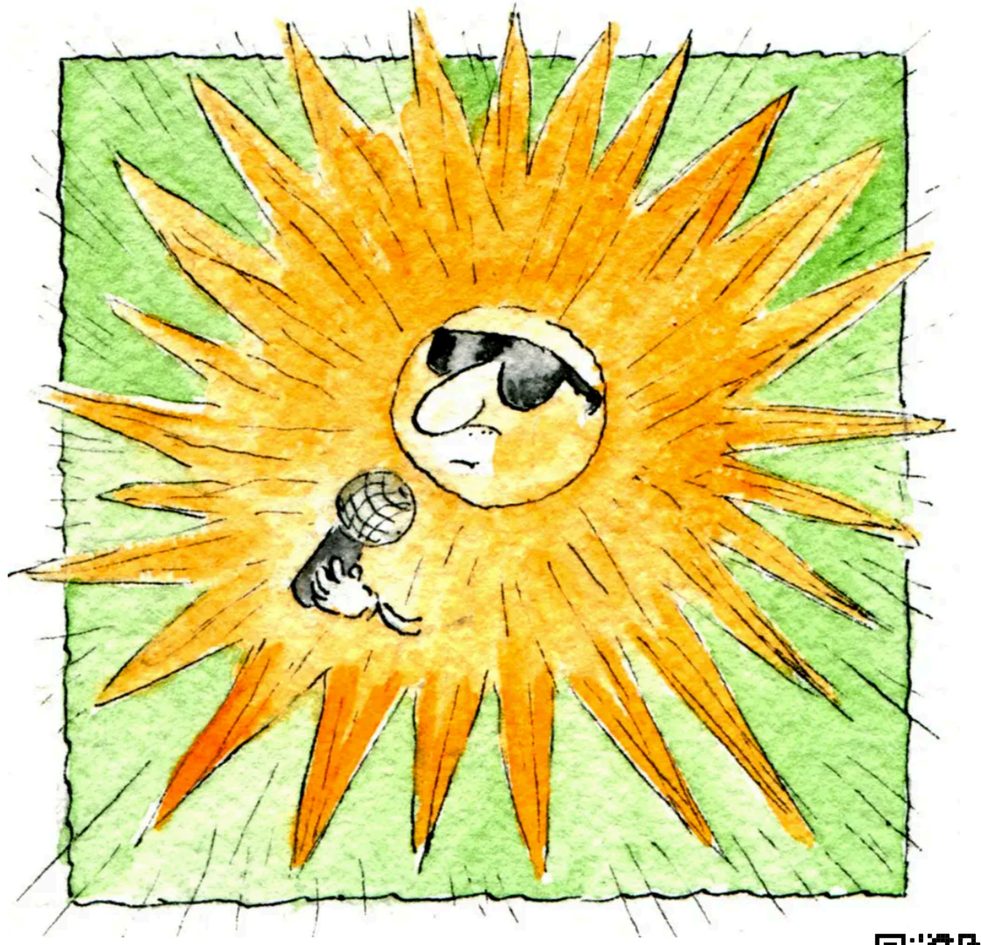


Ο ήχος διαδίδεται στο εσωτερικό του Ήλιου με διαφορετική ταχύτητα;

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

“Να σας πω ένα τραγούδι;”





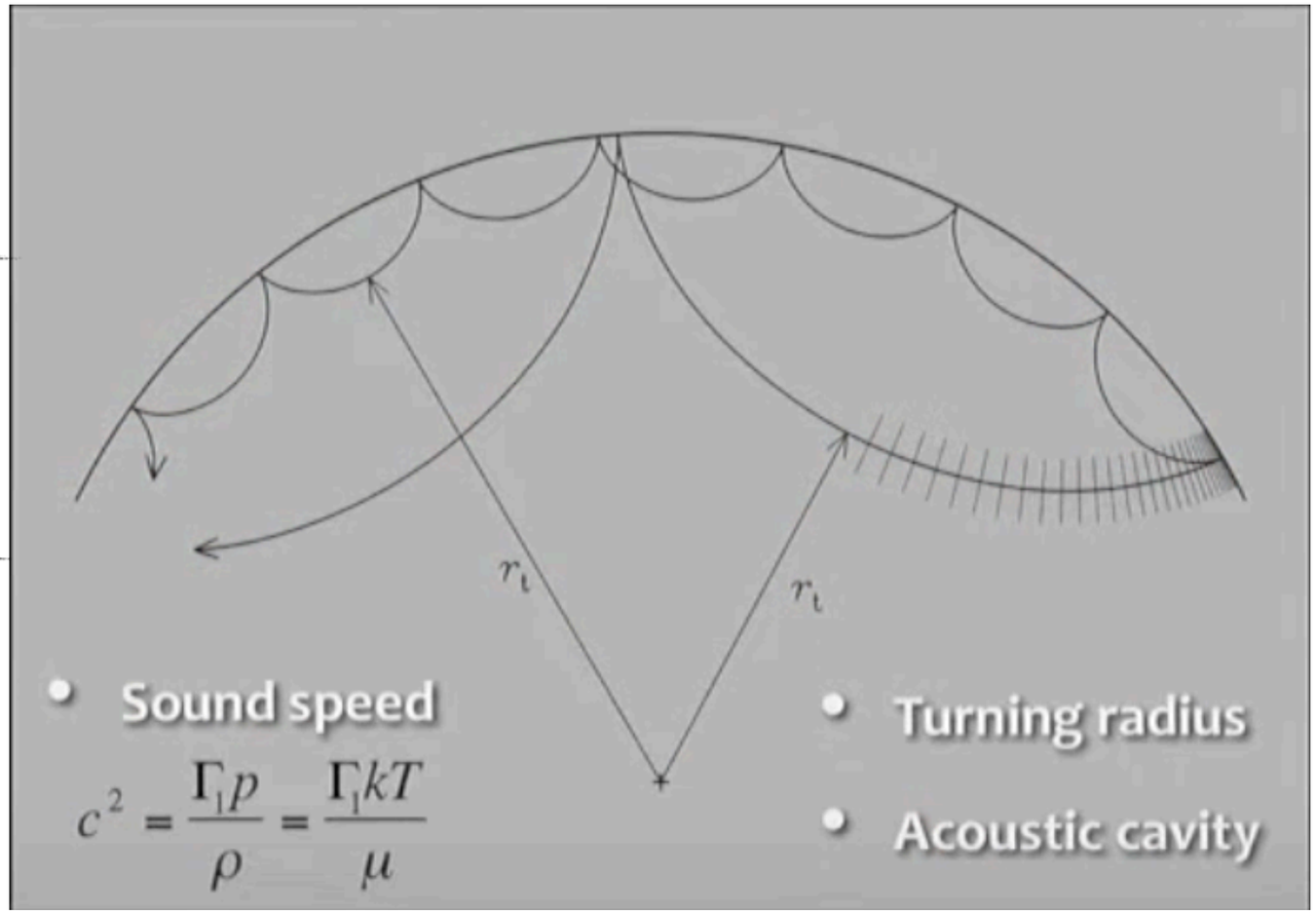
Victoria Roberts

Sonification credits: A. Kosovichev, Stanford Experimental Physics Lab
https://www.nasa.gov/feature/goddard/2018/sounds-of-the-sun

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Τι άλλο μαθαίνουμε;

- Μας δίνει την ταχύτητα του ήχου στο εσωτερικό του ήλιου - με ακρίβεια 3 μέρη στα 1000



credit: Don Kurtz

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

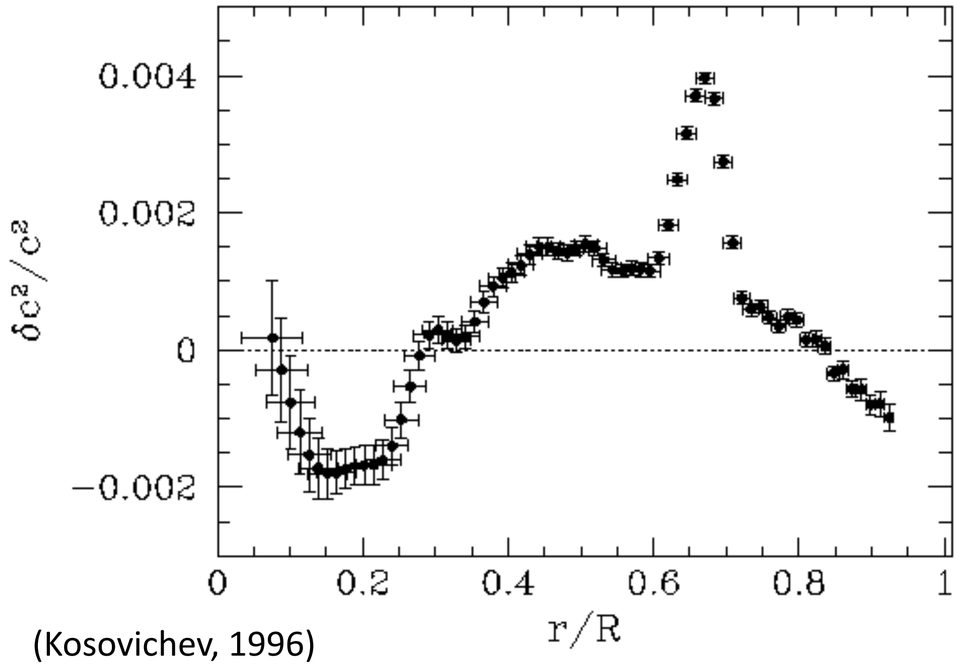
Ηλιακή εσωτερική δομή

- Διαφορά μεταξύ θεωρητικού μοντέλου και ηλιοσεισμολογίας: περίπου 2%

Αντιστροφή της ολοκληρωτικής εξίσωσης για την ταχύτητα του ήχου (παρόμοια για την πυκνότητα):

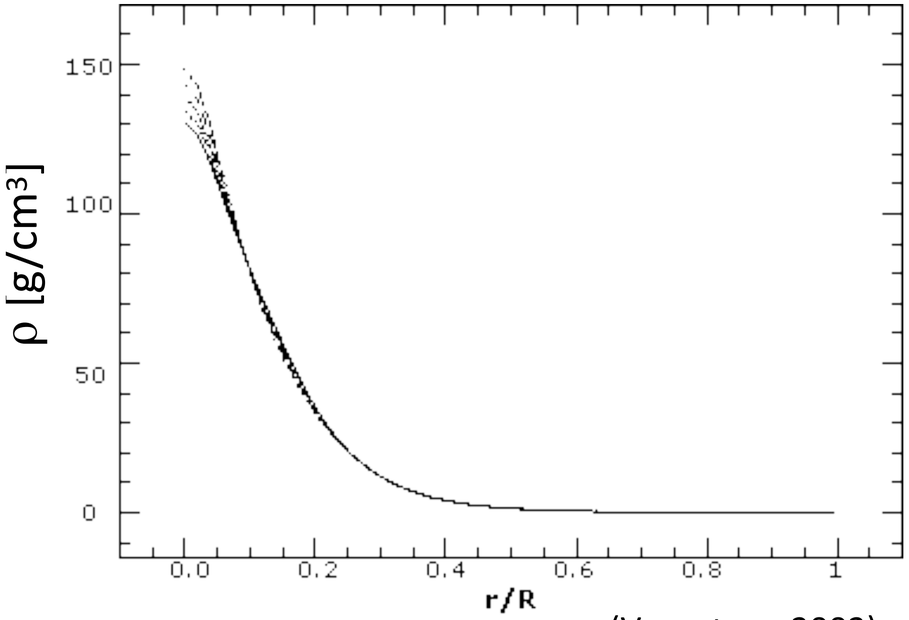
$$F\left(\frac{\omega}{L}\right) = \int_{r_t}^{R} \left(1 - \frac{L^2 c^2}{\omega^2 r^2}\right)^{1/2} \frac{\mathrm{d}r}{c} = \frac{[n + \alpha(\omega)]\pi}{\omega}, \qquad L = l + 1/2$$

Ταχύτητα ήχου



(Kosovichev, 1996)

Πυκνότητα



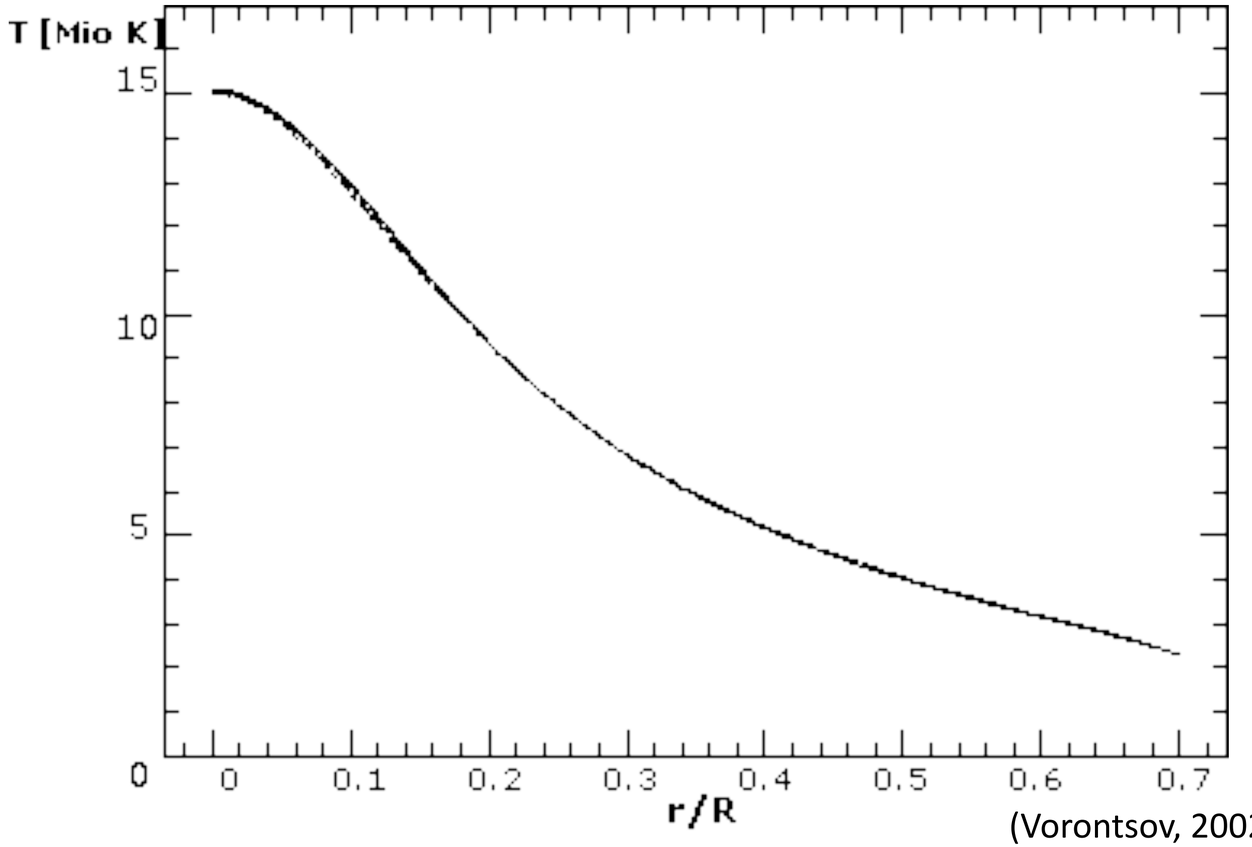
(Vorontsov, 2002)

credit: Markus Roth

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Ηλιακή εσωτερική θερμοκρασία

- Η θερμοκρασία στο ηλιακό κέντρο είναι: 17.5 εκατ. K (ακρίβεια 2%)



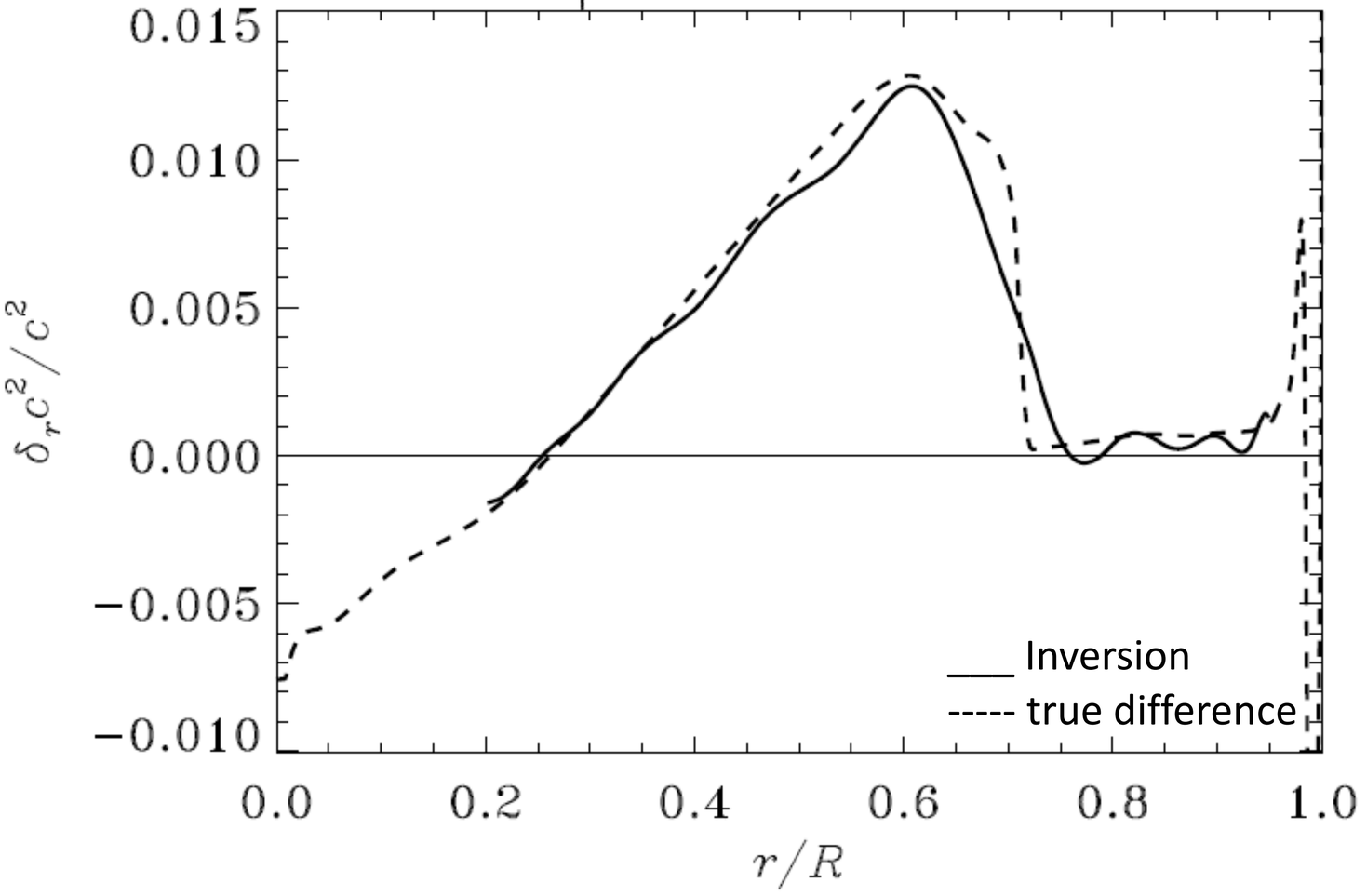
(Vorontsov, 2002)

credit: Markus Roth

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Διάχυση του ηλίου

- Ο Ηλιος έχει εξαντλήσει το ήλιο στον πυρήνα του

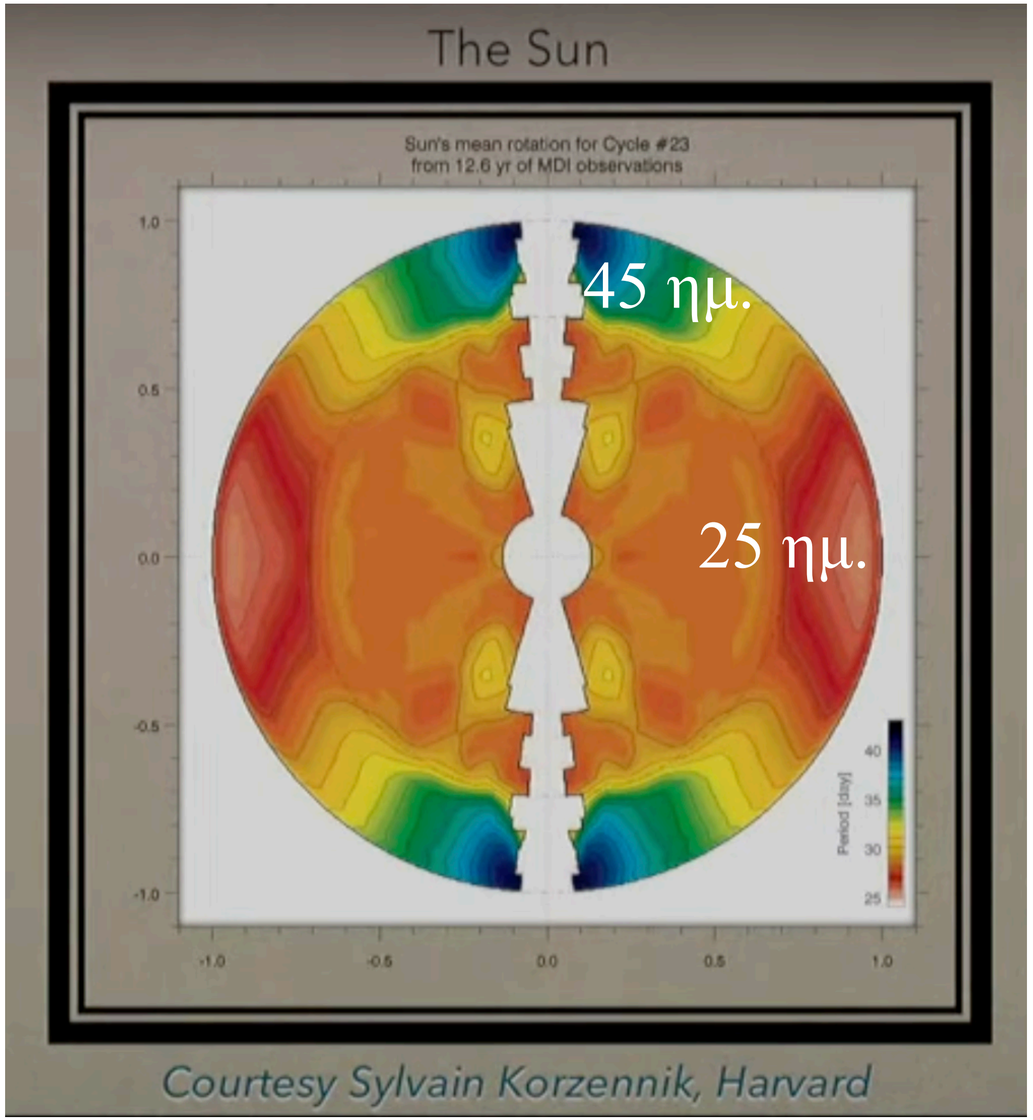


credit: Markus Roth

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

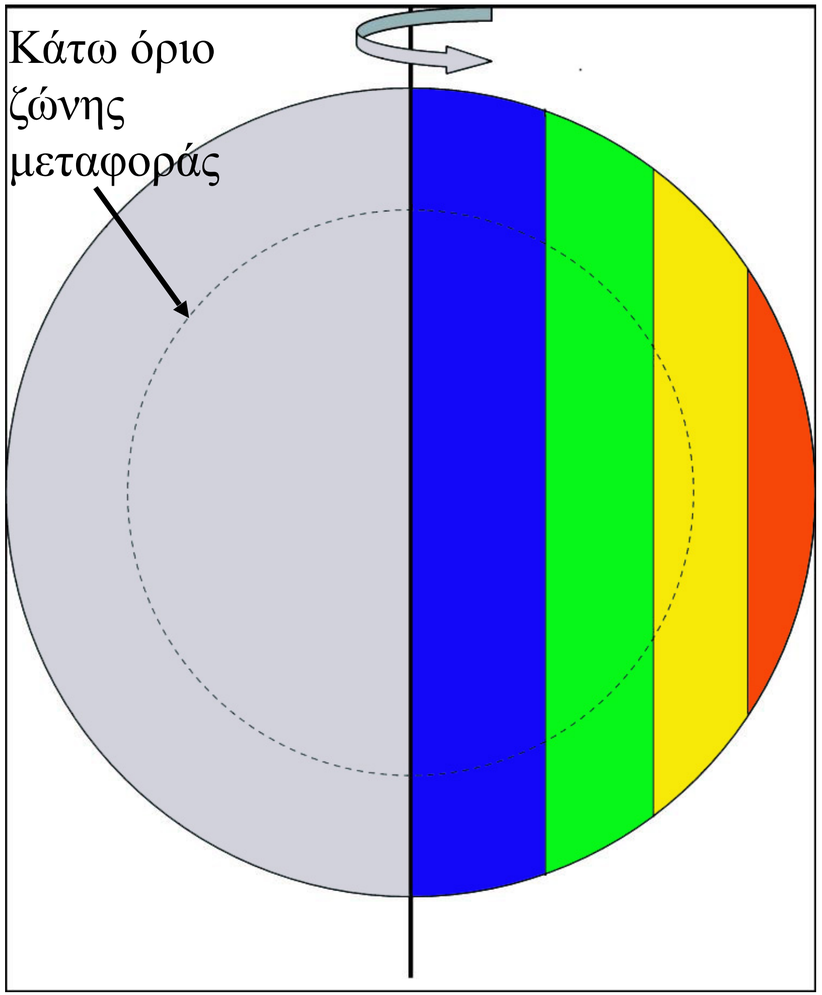
Περιστροφή Ήλιου

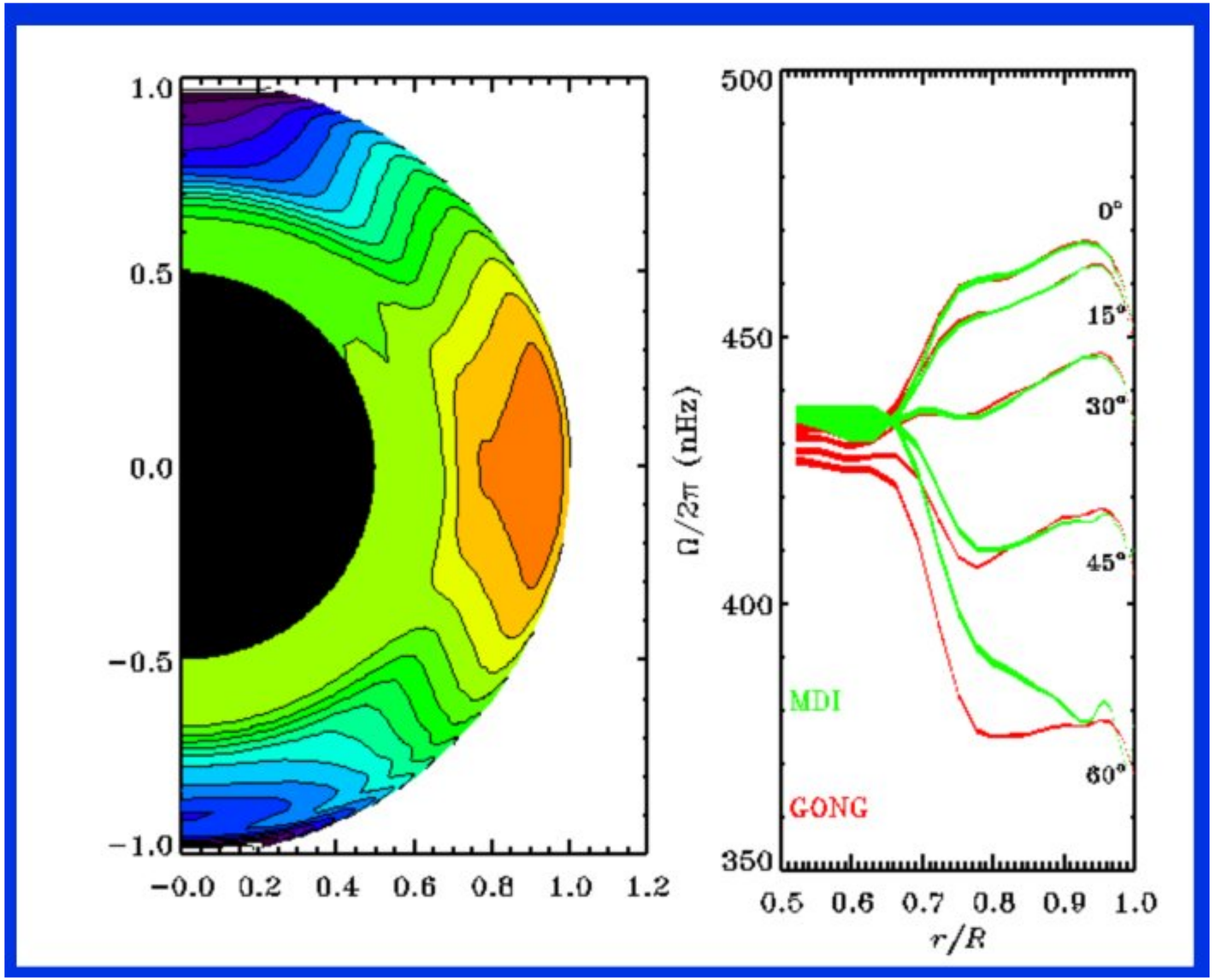
- Μπορούμε να δούμε στο εσωτερικό με τη βοήθεια των τρόπων περιστροφής (rotational modes)
- Ζεύγη: περιστροφικά δίπολα
- το ένα προς μία κατεύθυνση, το άλλο προς την άλλη κατεύθυνση
- Η διαφορά τους = ρυθμός περιστροφής
- **Περίοδος περιστροφής P~27 ημέρες κάτω από τη ζώνη μεταφοράς** (r/R_{sun} ~ 0.7, Thompson et al. 2003).



ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Περιστροφή Ήλιου
θεωρία vs παρατηρήσεις

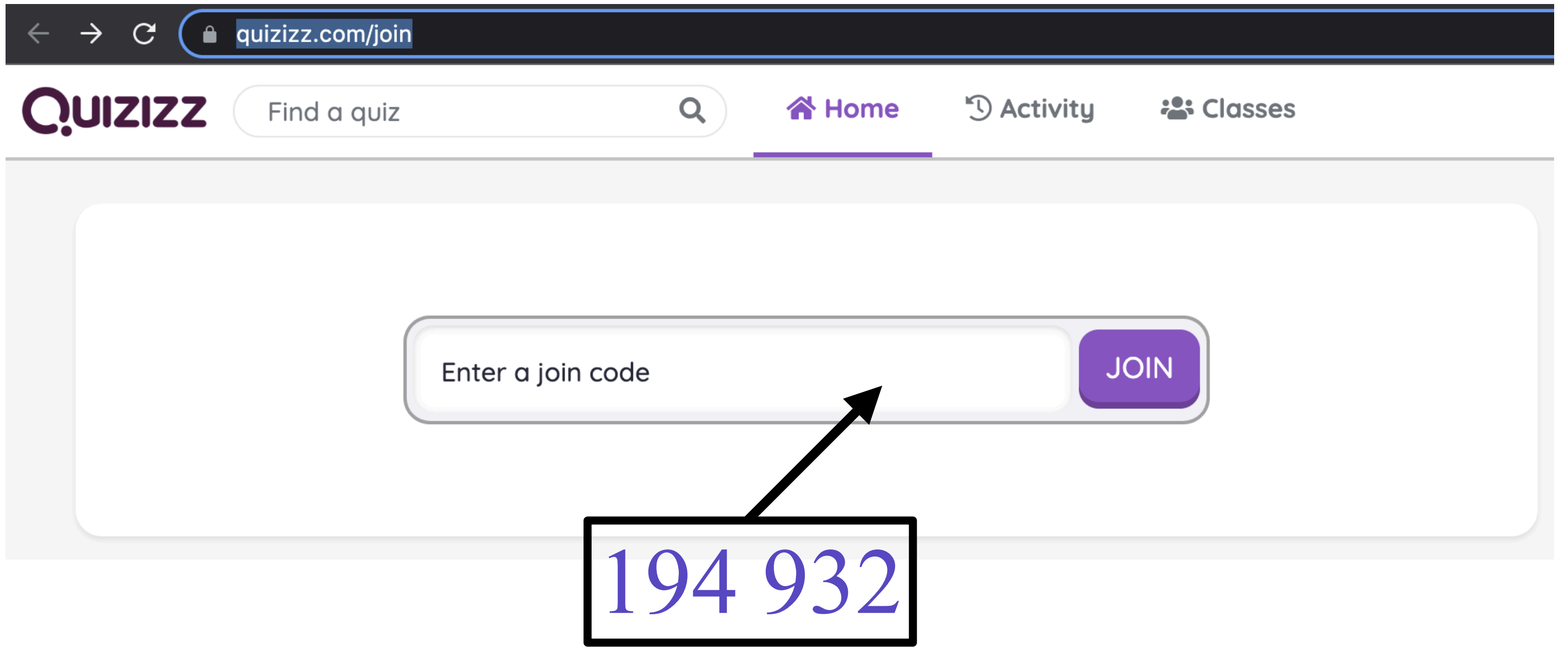




Ελενη Βαρδουλακη
elenivard@gmail.com

κουίζ #3

https://quizizz.com/join

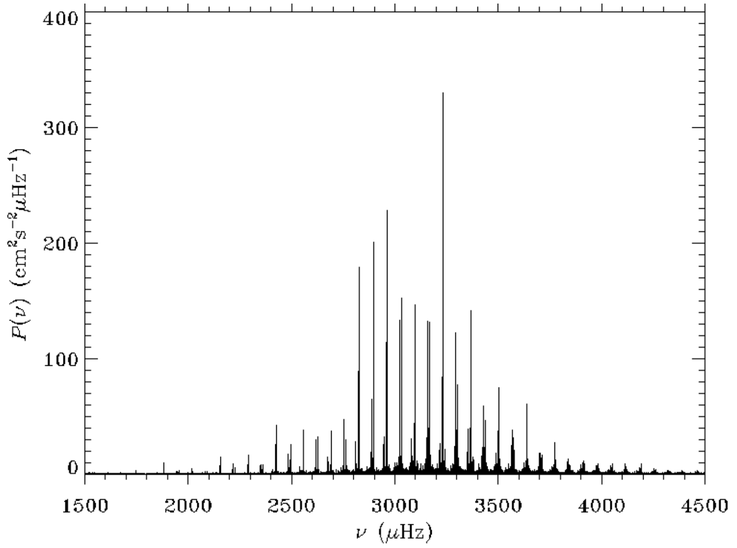


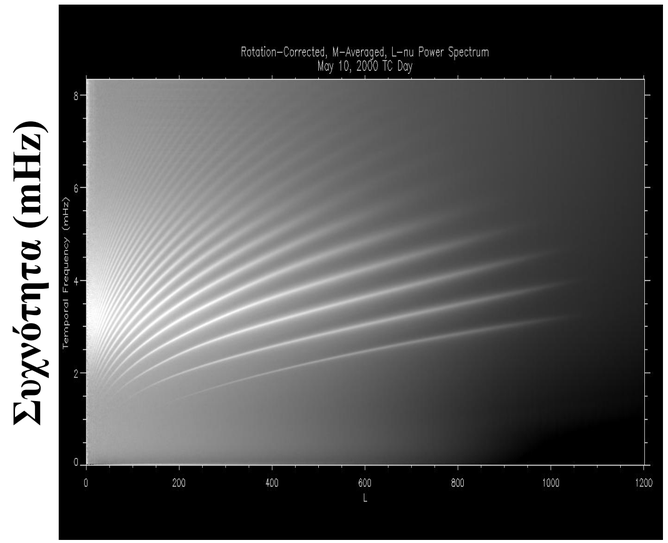
Τι διάρκεια έχουν οι ταλαντώσεις στον Ήλιο;

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Integrated vs resolved

- Integrated → κορυφές για l=0,1,2,3
- Resolved → επιτρέπουν την παρατήρηση όλων των κορυφών για l=0,...,3000
- Παρατηρήσεις υψηλής ανάλυσης δεν είναι ακόμα δυνατές για αστέρια





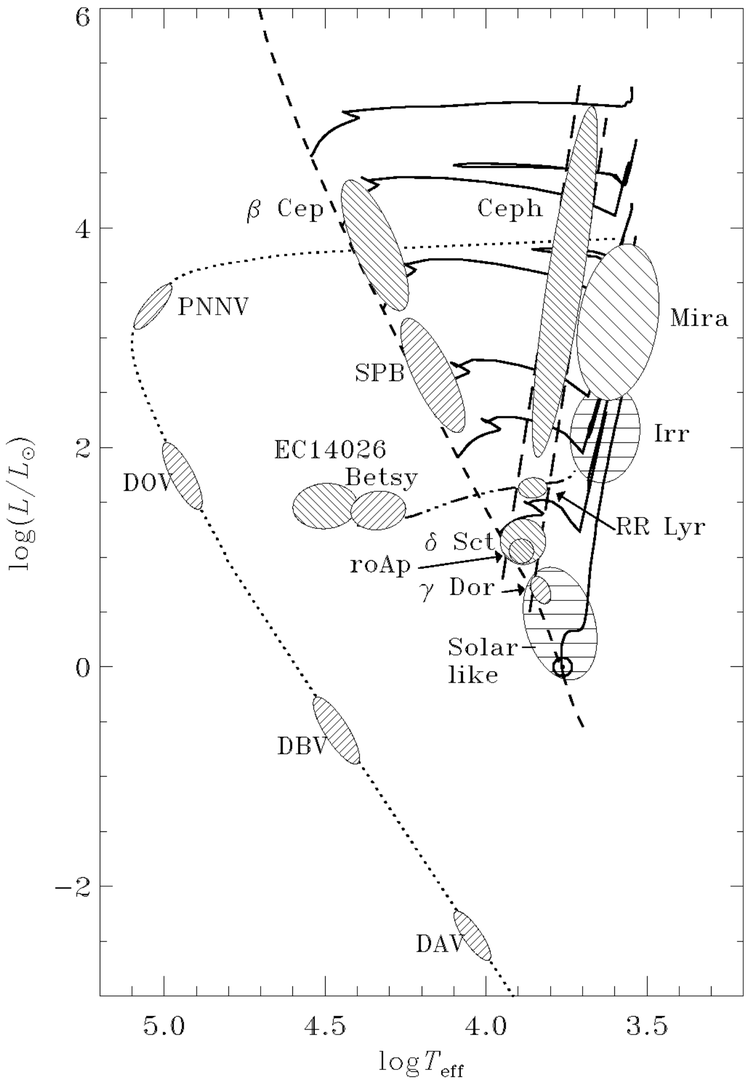
Συχνότητα (mHz)

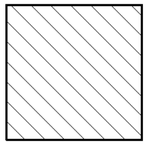
credit: Don Kurtz; Markus Roth

Ελενη Βαρδουλακη
elenivard@gmail.com

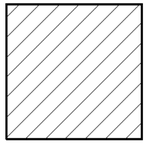
διάγραμμα H-R για ταλαντώσεις

- Δείχνει τις κατηγορίες παλλόμενων αστέρων που μπορούμε να μελετήσουμε με την αστεροσεισμολογία





p modes
heat engine



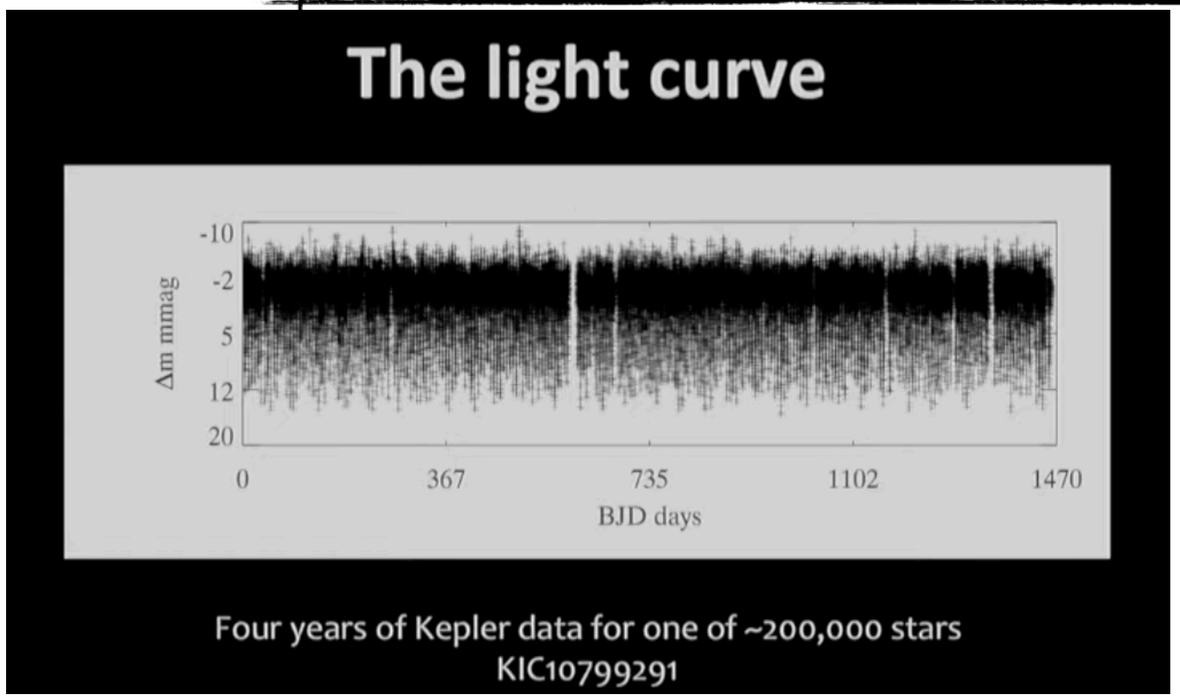
g modes
heat engine

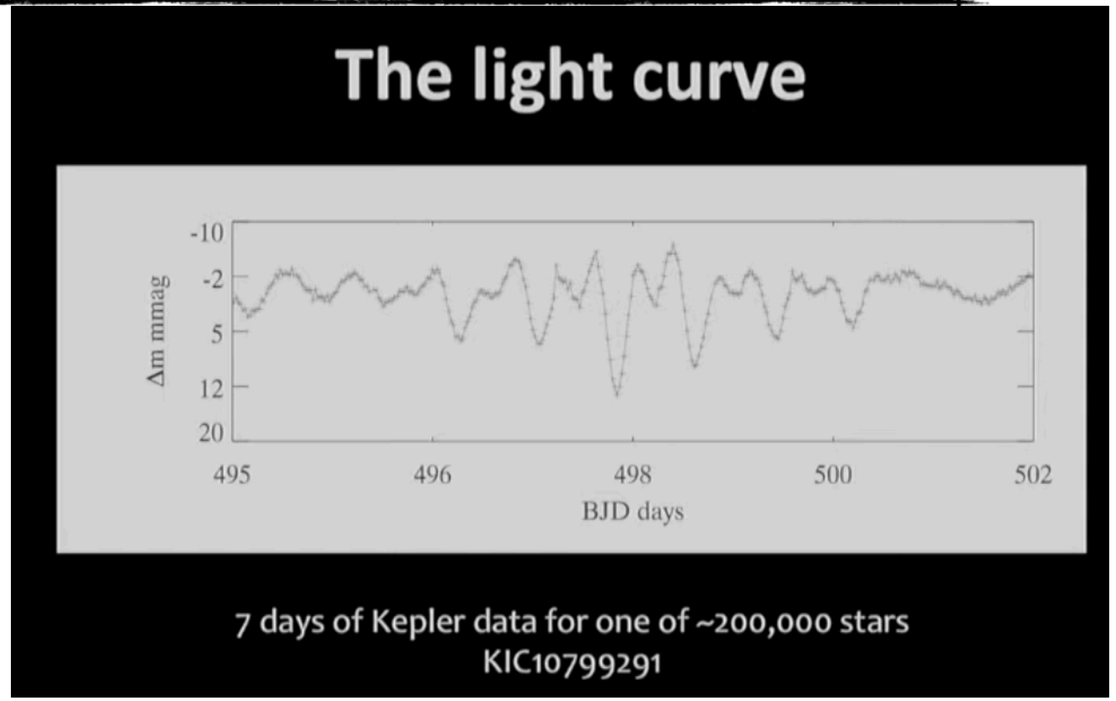
solarlike
oscillations

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Αστέρια - καμπύλες λαμπρότητας

- Άλλα αστέρια, πιο μακρινά: δεν είναι εύκολο να διακρίνουμε τις μεταβολές στην επιφάνεια
- Χρησιμοποιούμε τη μεταβολή στις καμπύλες λαμπρότητας για να μάθουμε για το εσωτερικό των αστέρων
- Να ανιχνεύσουμε τα p- & g-modes

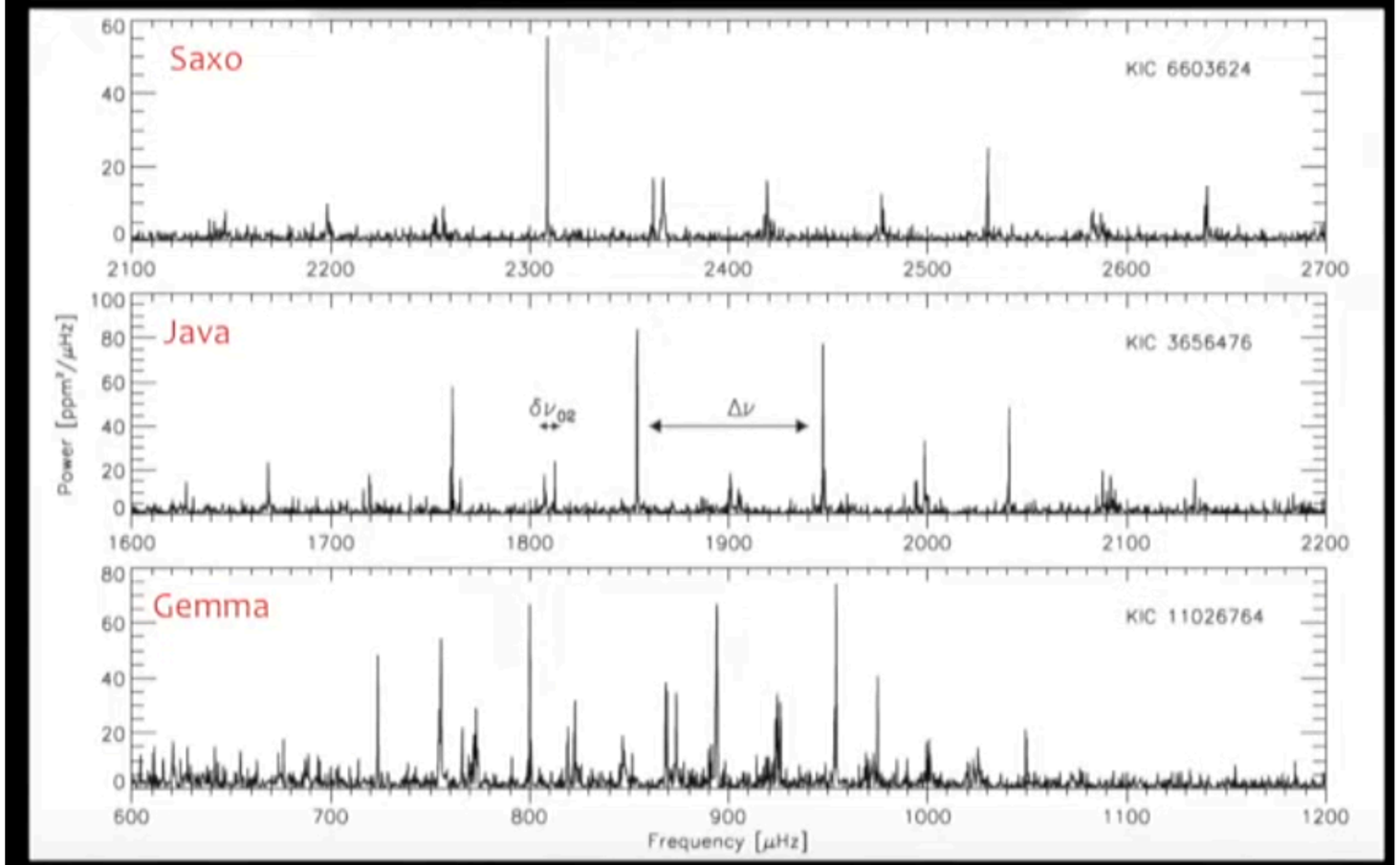




ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Μάζα και ακτίνα αστέρα από τα p-modes

$$\Delta\nu \propto \sqrt{\bar{\rho}} \propto \sqrt{\frac{M}{R^3}} \qquad \nu_{max} \propto \frac{g}{\sqrt{T_{eff}}} = \frac{GM/R^2}{\sqrt{T_{eff}}}$$



Chaplin et al. 2010, ApJ, 713, L169

ν_{max} = κορυφή όπου το αστέρι ταλαντώνεται

$\Delta\nu$ = μεγάλος διαχωρισμός

M = μάζα

R = ακτίνα

- Υπολογισμός ακτίνας και μάζας αστέρων
- Αν έχουν εξωπλανήτη: υπολογισμός μάζας πλανήτη από 3ο νόμο Κέπλερ

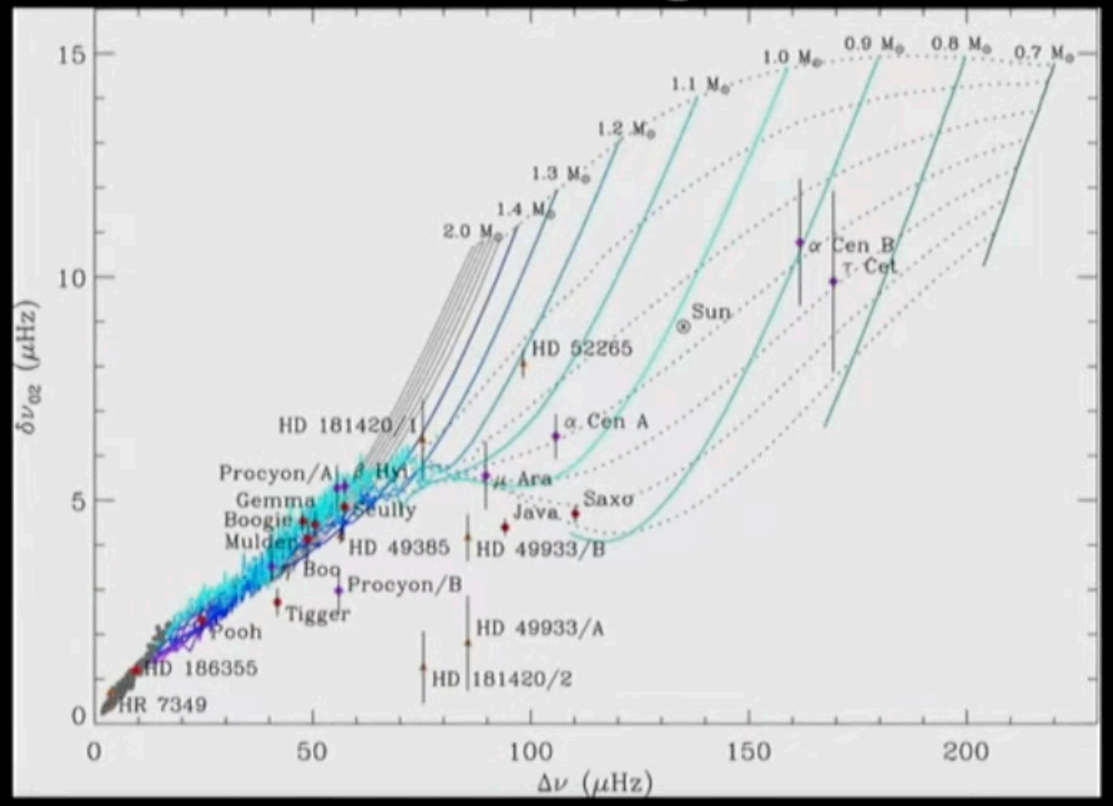
credit: Don Kurtz

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Ηλικίες από τα g-modes

- Για τους ερυθρούς γίγαντες δεν έχουμε καθαρή εικόνα από το διάγραμμα H-R
- Αλλά μπορούμε από τα g-modes (ΔP) να καθορίσουμε τη χημική τους σύσταση και ηλικία

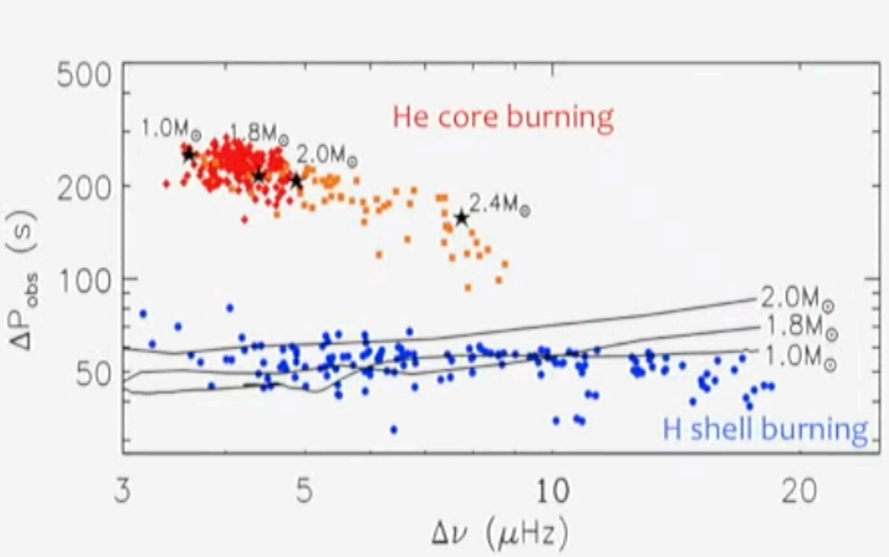
Stellar Age



White et al. 2011, ApJ, 743, 161

Red giant ages from g modes

Διαχωρισμός των κορυφών των g-modes



συχνότητα ταλαντώσεων

Bedding et al. 2011, Nature, 471, 608

credit: Don Kurtz

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Περιστροφή αστέρων

- Όχι μόνο μια θεωρία!

Monthly Notices of the ROYAL ASTRONOMICAL SOCIETY

MNRAS **444,** 102–116 (2014) doi:10.1093/mnras/stu1329

Asteroseismic measurement of surface-to-core rotation in a main-sequence A star, KIC 11145123

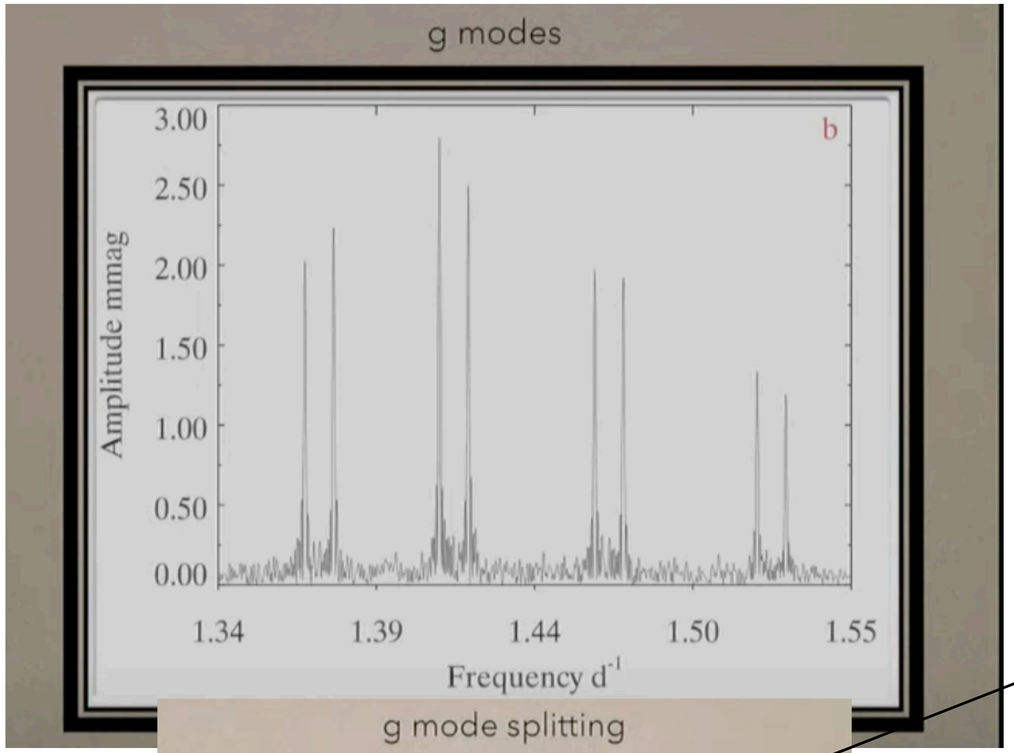
Donald W. Kurtz,[1★] Hideyuki Saio,[2] Masao Takata,[3] Hiromoto Shibahashi,[3] Simon J. Murphy[1,4] and Takashi Sekii[5]

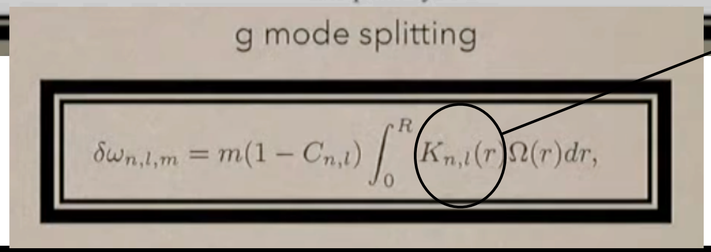
[1]*Jeremiah Horrocks Institute of Astrophysics, University of Central Lancashire, Preston PR1 2HE, UK*
[2]*Astronomical Institute, Graduate School of Science, Tohoku University, Sendai, Miyagi 980-8578, Japan*
[3]*Department of Astronomy, School of Science, The University of Tokyo, Bunkyo-ku, Tokyo 113-0033, Japan*
[4]*Sydney Institute for Astronomy, School of Physics, The University of Sydney, NSW 2006, Australia*
[5]*National Astronomical Observatory of Japan, 2-21-1 Osawa, Mitaka, Tokyo 181-8588, Japan*

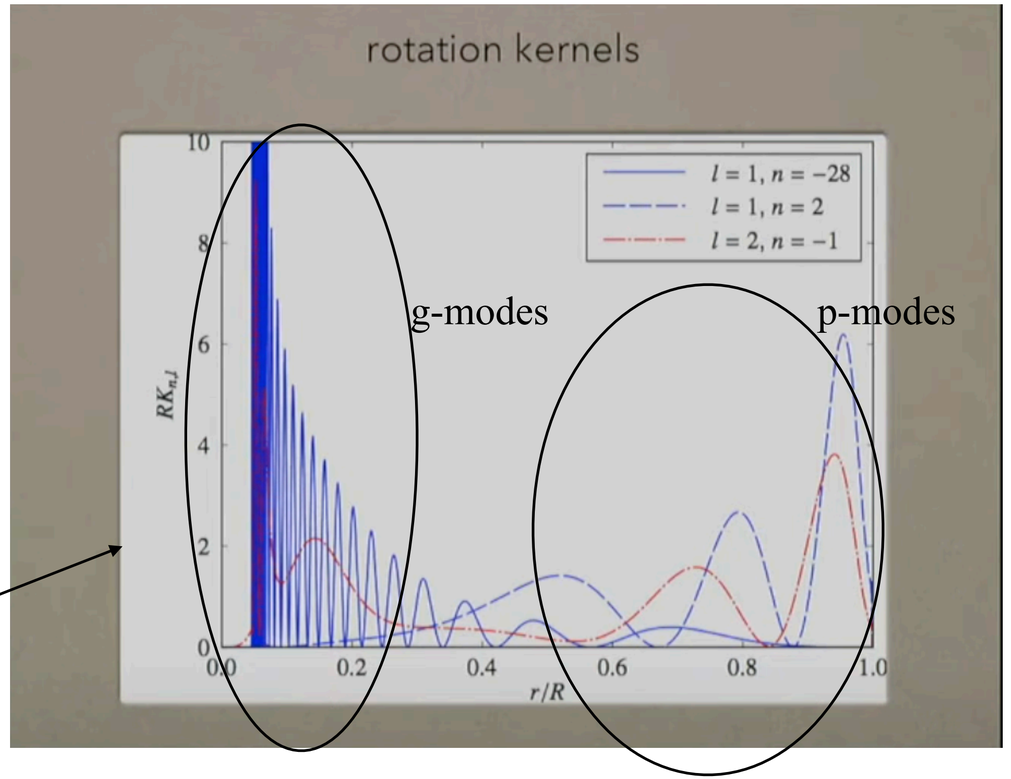
Accepted 2014 July 2. Received 2014 May 23; in original form 2014 March 31

Περιστροφή αστέρων

Από τα ζεύγη των g-modes υπολογίζουμε το μέσο ρυθμό περιστροφής στον πυρήνα, P_{core} >105.13+/-0.02 ημέρες





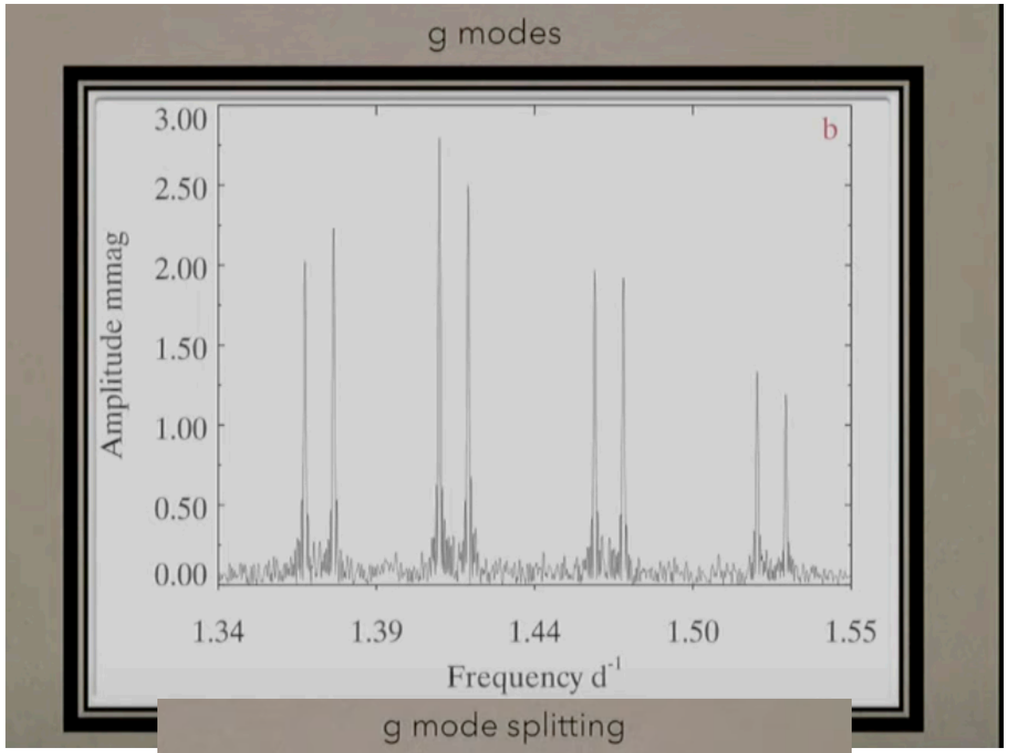


credit: Don Kurtz

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Περιστροφή αστέρα μέσης ακολουθίας

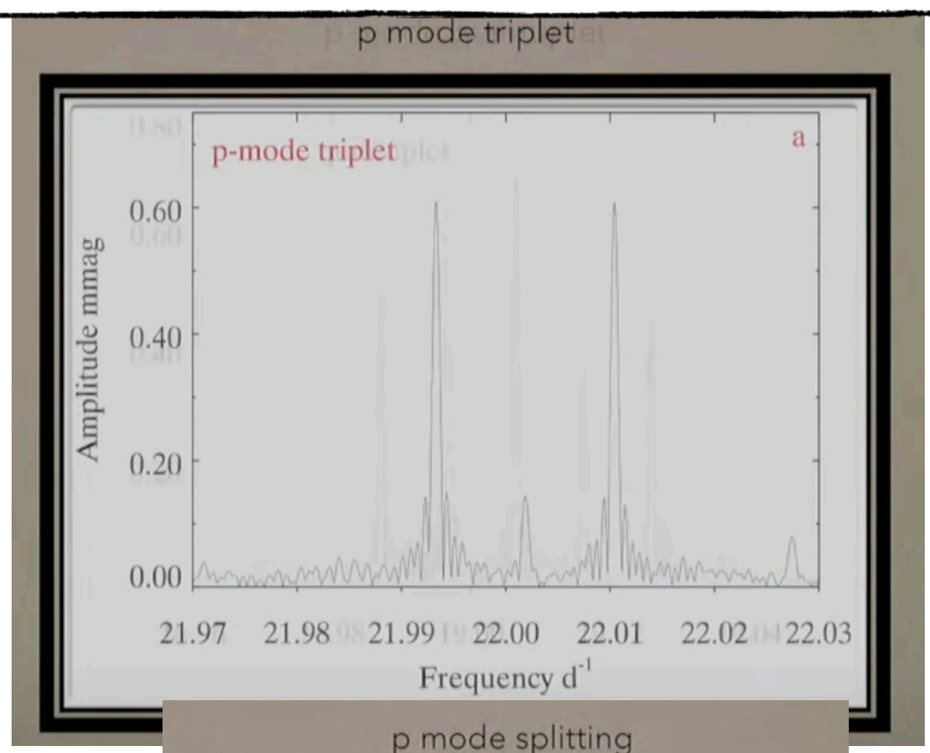
Από τα ζεύγη των g-modes υπολογίζουμε το μέσο ρυθμό περιστροφής στον πυρήνα, **P_{core} >105.13+/-0.02 ημέρες**



g mode splitting

$$\delta\omega_{n,l,m} = m(1 - C_{n,l}) \int_0^R K_{n,l}(r)\Omega(r)dr,$$

Από τα ζεύγη των p-modes υπολογίζουμε μέσο ρυθμό περιστροφής κοντά στην επιφάνεια, **$P_{surface}$ < 98.57+/-0.02 ημέρες**



p mode splitting

$$\delta\omega_{n,l,m} = m(1 - C_{n,l}) \int_0^R K_{n,l}(r)\Omega(r)dr,$$

credit: Don Kurtz

ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Περιστροφή αστέρα μέσης ακολουθίας

Από τα ζεύγη των g-modes υπολογίζουμε το μέσο ρυθμό περιστροφής στον πυρήνα, P_{core} **>105.13+/-0.02 ημέρες**

Από τα ζεύγη των p-modes υπολογίζουμε μέσο ρυθμό περιστροφής κοντά στην επιφάνεια, $P_{surface}$ **< 98.57+/-0.02 ημέρες**

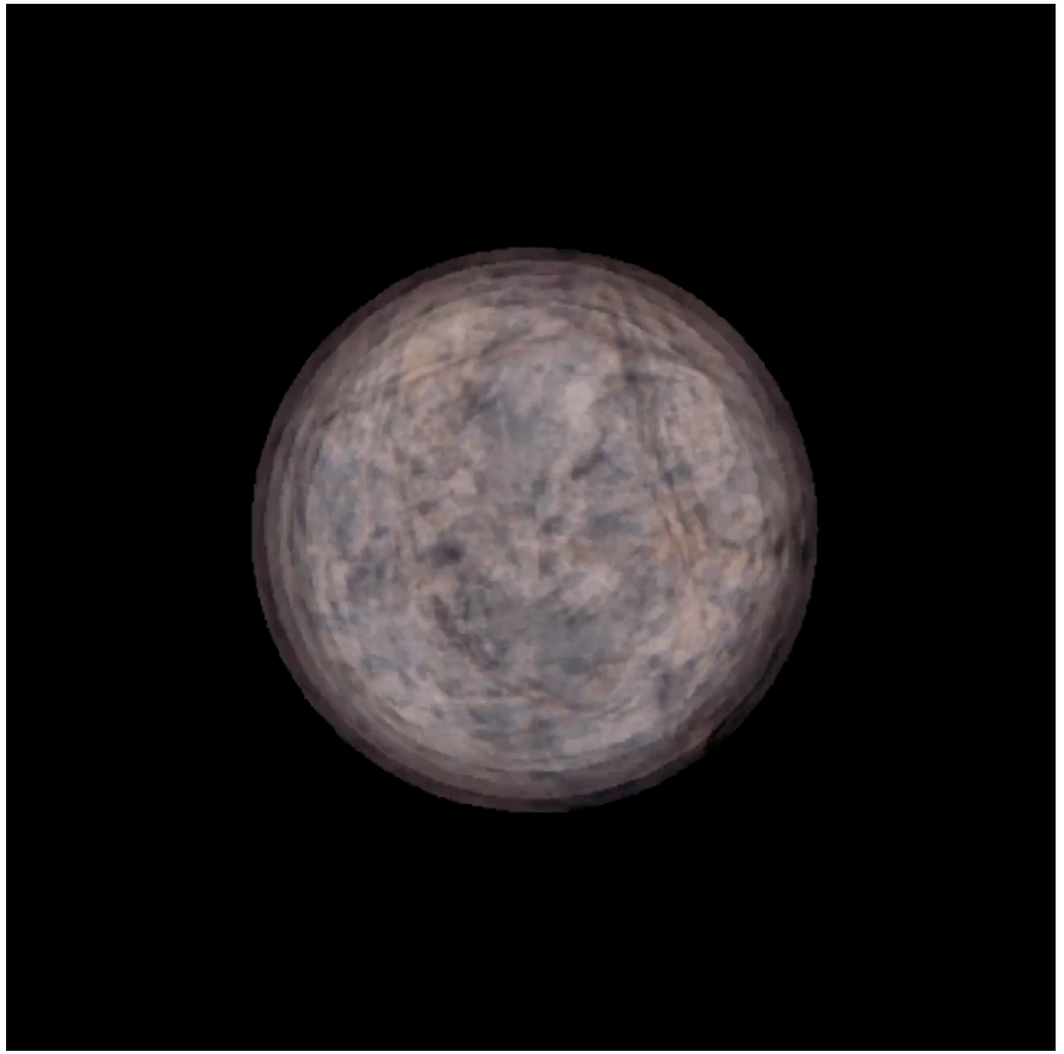
Περιστρέφεται πιο γρήγορα στην επιφάνεια από τον πυρήνα

➡ Υπάρχει μεταφορά της στροφορμής προς τα έξω που κάνει την επιφάνεια να περιστρέφεται πιο γρήγορα (άγνωστος ακόμα μηχανισμός)

credit: Don Kurtz

Περιστροφή αστέρων

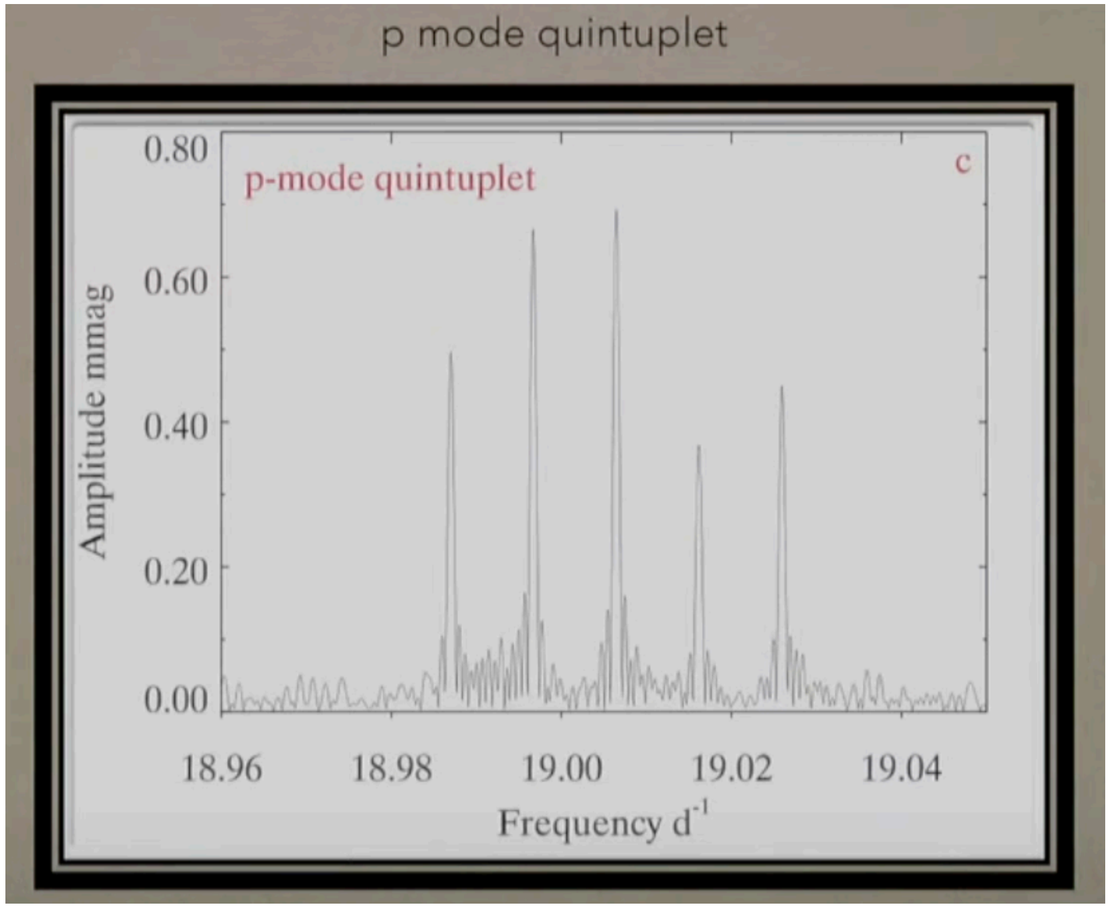
- Καθώς ένα αστέρι εξελίσσεται, διογκώνεται, η επιφανειακή περιστροφή επιβραδύνεται
- Ο πυρήνας συστέλλεται και επιταχύνεται
- Φανταστείτε έναν πατινέρ που κάνει μια περιστροφή, όταν ανοίγει τα χέρια του περιστρέφεται πιο αργά, όταν βάζει τα χέρια κοντά στο σώμα, πιο γρήγορα.
- Καθώς τα αστέρια γερνούν, επιβραδύνονται και μπορούν να διατηρήσουν την ίδια ταχύτητα περιστροφής για το υπόλοιπο της ζωής τους



ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Μέτρηση του σχήματος του αστέρα

- Η διαφορά μεταξύ των κορυφών στα p-modes μπορεί να βοηθήσει στη μέτρηση του σχήματος του αστέρα



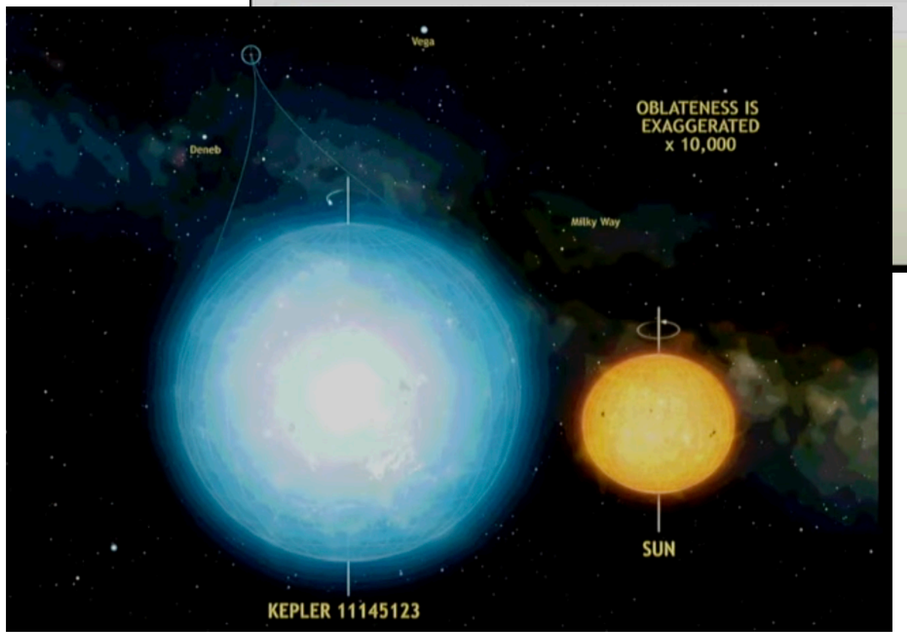
SCIENCE ADVANCES | RESEARCH ARTICLE

ASTRONOMY

Shape of a slowly rotating star measured by asteroseismology

Laurent Gizon,[1,2,3,4]* Takashi Sekii,[3] Masao Takata,[5] Donald W. Kurtz,[6] Hiromoto Shibahashi,[5] Michael Bazot,[4] Othman Benomar,[4,5] Aaron C. Birch,[1] Katepalli R. Sreenivasan[4,7]

Scientists discover roundest object ever spotted in universe



ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Ήχοι αστέρων (sonification)

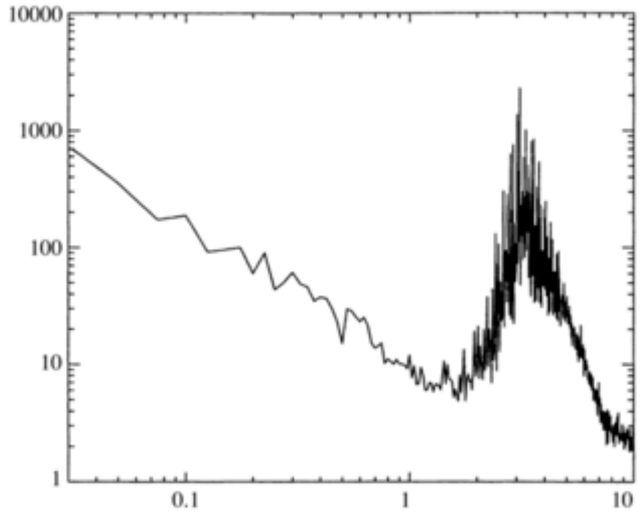
adapted from MPL3D Solar System - Star sounds https://www.youtube.com/watch?v=0ogyKgV4KN4

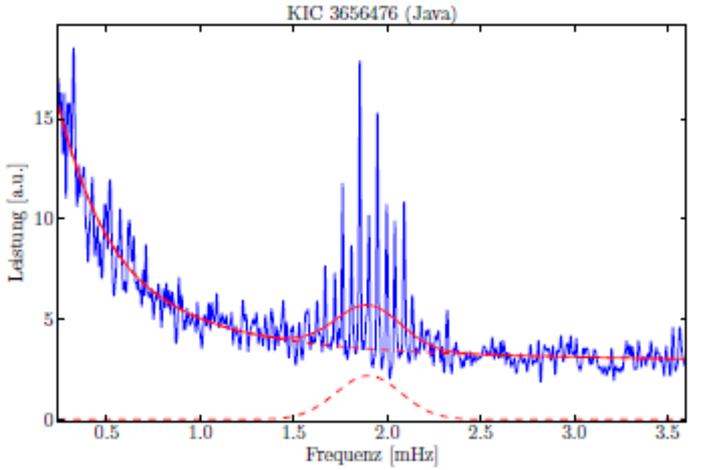
ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Τι μένει να απαντήσουμε;

- **Ηλιοσεισμολογία**
  - Επιτρέπει θέα στο εσωτερικό του ήλιου
  - Εξήγηση των εξαρτήσεων των κύκλων;
  - Ηλιακή δραστηριότητα;

- **Αστεροσεισμολογία**
  - Βασίζεται στην επιτυχία της ηλιοσεισμολογίας
  - Το φάσμα των αστρικών ταλαντώσεων είναι παρόμοιο με αυτό των ηλιακών ταλαντώσεων που έγιναν πριν από 30 χρόνια
  - Αστρική δραστηριότητα;
  - Σωστή κατανόηση της αστρικής δομής;
  - Ο ήλιος ως παράδειγμα

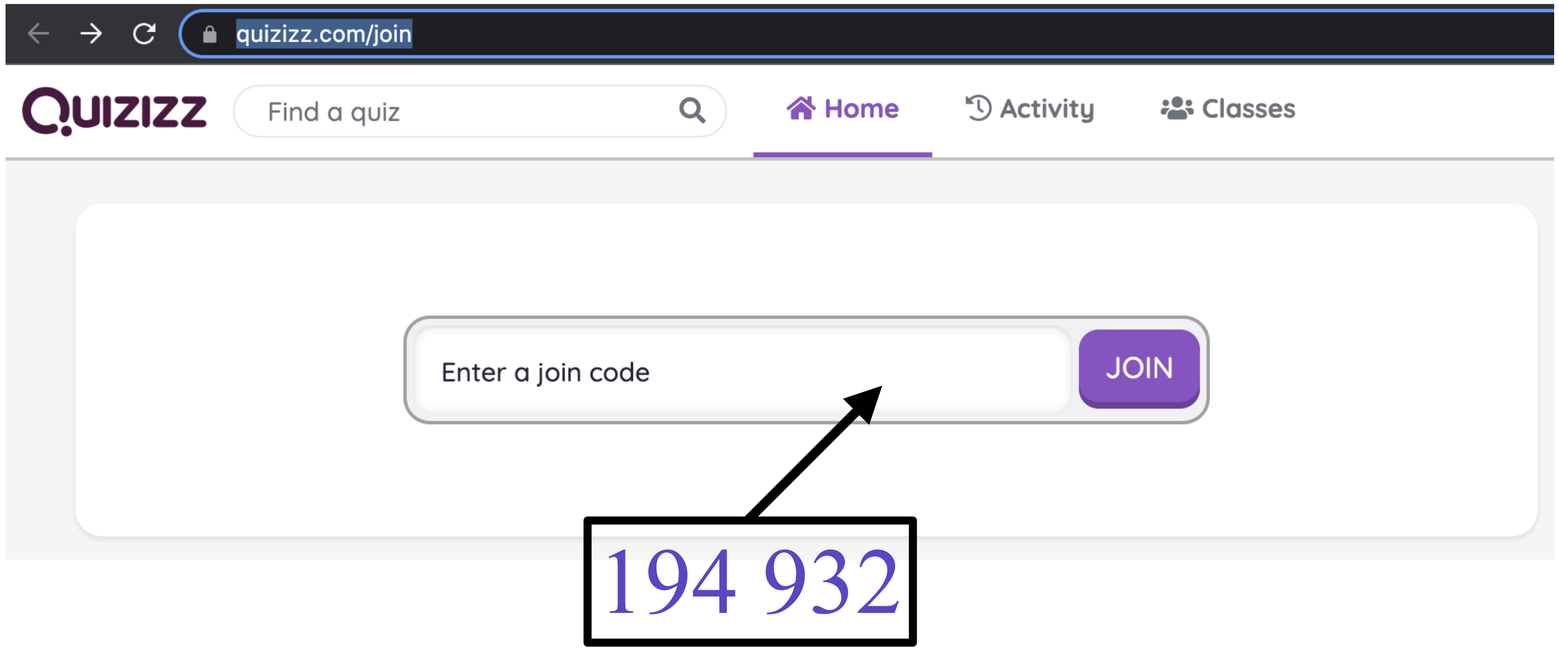




ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

κουίζ #4

https://quizizz.com/join



Με ποιόν τύπο κυμάτων έχουμε ενδείξεις ότι ο πυρήνας του Ήλιου περιστρέφεται 5 φορές ταχύτερα από την φωτόσφαιρα;

Κατά τι ποσοστό ξέρατε ή είχατε ξανακούσει θέματα από το σημερινό μάθημα;
Πως βρήκατε το σημερινό μάθημα;

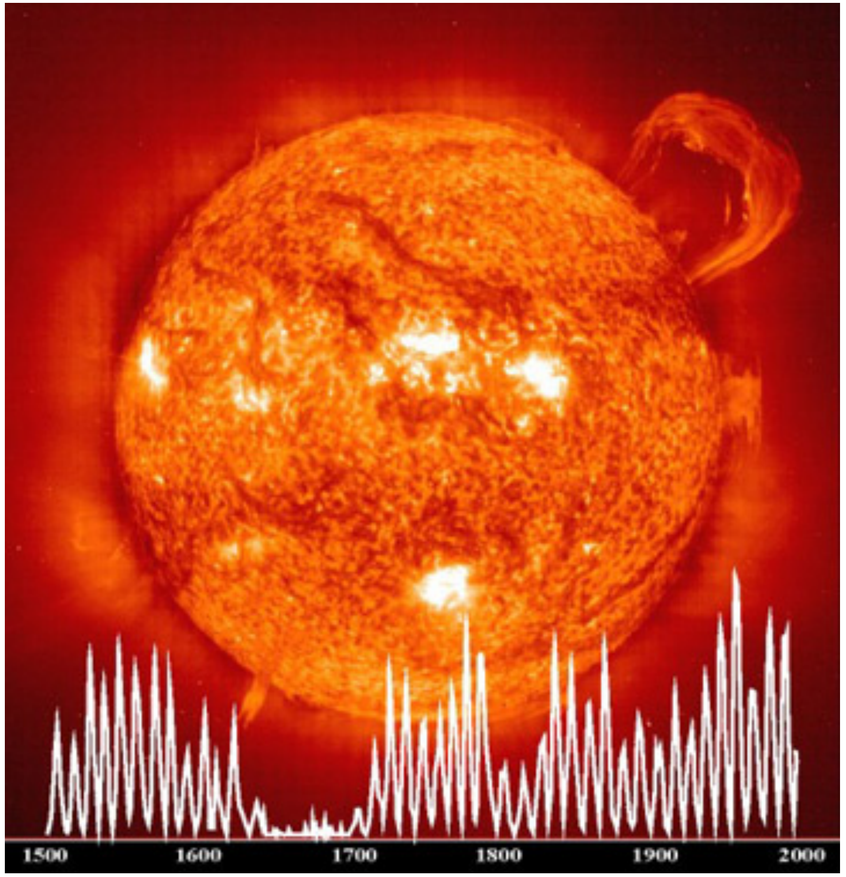
ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Take home

✳ **Σεισμολογία στους αστέρες → Αστεροσεισμολογία**

- Ο Ήλιος και κάποια αστέρια πάλλονται
- Τα ηχητικά κύματα διαδίδονται μέσα στα αστέρια
- Ο ήχος διαδίδεται με διαφορετική ταχύτητα στο εσωτερικό
- Τα κύματα αυτά επιτρέπουν τη μελέτη της εσωτερικής δομής του Ήλιου και των άστρων: ταχύτητα ήχου, πυκνότητα, θερμοκρασία, χημική σύσταση
- Μπορούμε να υπολογίσουμε μάζα, ηλικία, ταχύτητα περιστροφής
- Πρόβλεψη διαστημικού καιρού και επιπτώσεις στη Γη
- Εξωπλανήτες και ζωή εκτός ηλιακού συστήματος

Τι μας νοιάζει



ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM

Βιβλιογραφία

Διαλέξεις, π.χ. καθ. Ξ. Δ. Μουσάς / Δρ. Ε. Βαρδουλάκη

➡ https://opencourses.uoa.gr/modules/units/index.php?course=PHYS2&id=2290

➡ Το σημερινό μάθημα
https://www.dropbox.com/sh/0hw8oe4mbpw1abb/AACxzFiMxO-kjDC9P_l4pYuXa?dl=0

Επιστημονικές ομιλίες, π.χ. Prof. Don Kurtz

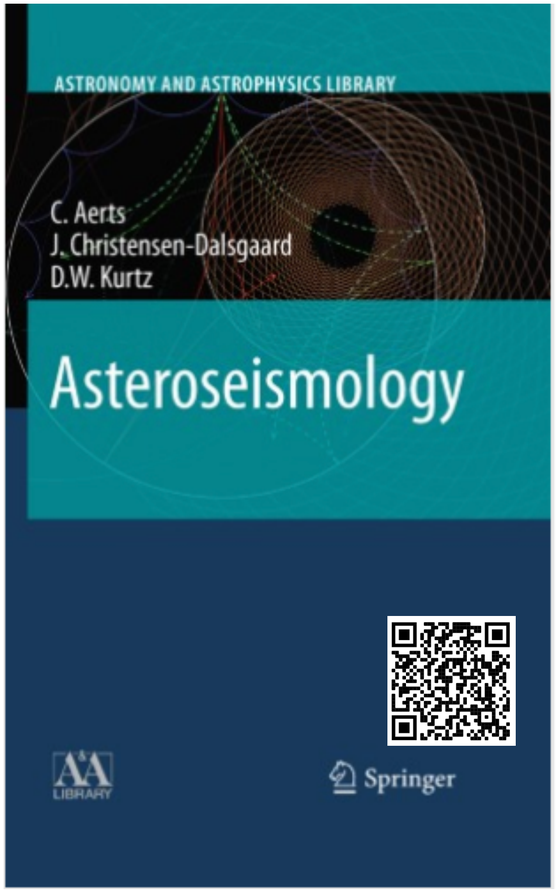
➡ https://www.youtube.com/watch?v=h6dfSLEG5_0

Εκλαϊκευμένες ομιλίες , π.χ. Prof. Don Kurt / PBS Space Time / Science News

➡ https://www.youtube.com/watch?v=wwy-9TMYZso

➡ https://www.youtube.com/watch?v=TbWyuJYybMA

➡ https://www.youtube.com/watch?v=w80z_moI8BU



ΕΛΕΝΗ ΒΑΡΔΟΥΛΑΚΗ
ELENIVARD@GMAIL.COM