



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ
Εθνικόν και Καποδιστριακόν
Πανεπιστήμιον Αθηνών

Ηλιακή Φυσική

Ενότητα 2: Εσωτερικό του ηλίου

Ξενοφών Δ. Μουσάς
Σχολή Θετικών Επιστημών
Τμήμα Φυσικής



ΕΘΝΙΚΟ ΚΑΙ ΚΑΠΟΔΙΣΤΡΙΑΚΟ ΠΑΝΕΠΙΣΤΗΜΙΟ ΑΘΗΝΩΝ
ΤΜΗΜΑ ΦΥΣΙΚΗΣ
ΕΡΓΑΣΤΗΡΙΟ ΑΣΤΡΟΦΥΣΙΚΗΣ

ηλιοσεισμολογία

Ε. Μουσάς

xmoussas@phys.uoa.gr

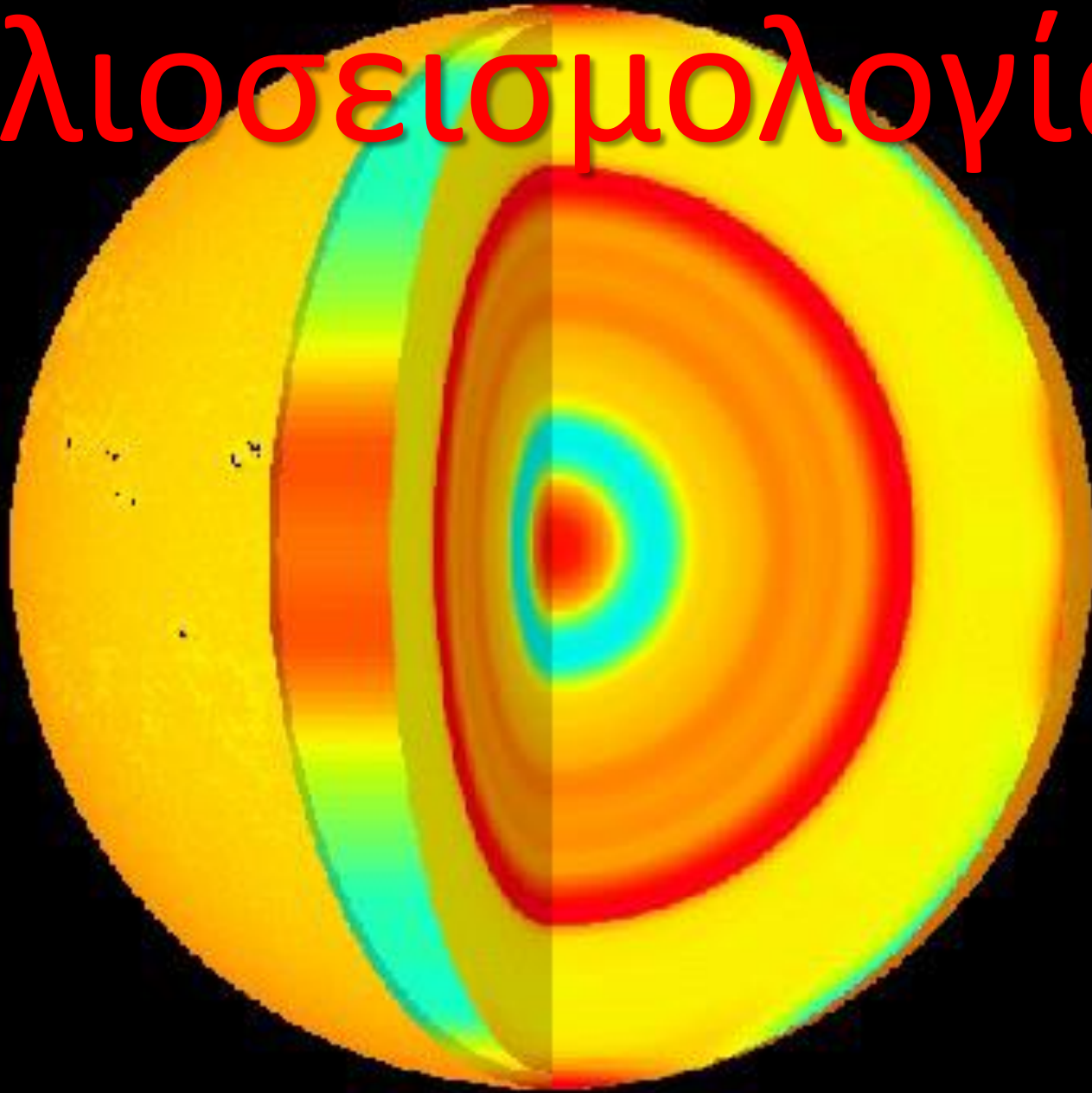
Αθήνα, 2013

Ευχαριστίες

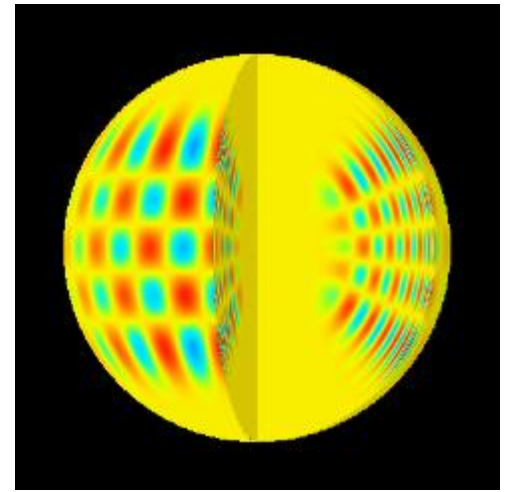
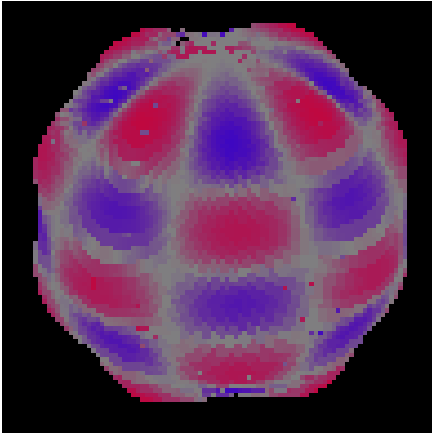
Ιδιαίτερες Ευχαριστίες οφείλονται στη NASA, ESA, ESO, NOAO/NSO/Kitt Peak FTS/AURA/NSF

στους Ερευνητές και λοιπούς συντελεστές των επιγείων τηλεσκοπίων και διαστημικών πειραμάτων, Dr Laurent Gizon, Dr Aaron C. Birch, στην κυρία Παν. Πρέκα Παπαδήμα, στους κυρίους Αλ. Χείλαρη, Αθ. Κοντογεώργο, Παν. Τσιτσιπή, Πάνο Παπασπύρου για τις ενδιαφέρουσες συζητήσεις, σε αυτούς που μας έδωσαν μετρήσεις ή συμβουλές, στην Wikipedia για πολλές πολύτιμες εικόνες που προσφέρονται χωρίς δικαιώματα χρήσης και συνεπώς είναι πολύτιμες σε κάθε δάσκαλο.

ηλιοσεισμολογία



Τρόποι ταλάντωσης



- Με διάμετρο 1 400 000 km, ο Ήλιος ηχεί σε χαμηλές συχνότητες γύρω από τα 3 mHz, πολλές οκτάβες κάτω από ότι ακούει ο άνθρωπος (16 έως 20 000 Hz).

- Ηλιακές ταλαντώσεις έχουν ευρύ φάσμα εσωτερικών ακουστικών κυμάτων και επιφανειακών κυμάτων βαρύτητας που διεγείρονται τυχαία από την τυρβώδη μεταφορά.

* p-mode ή ακουστικά κύματα, για τα οποία η πίεση του αερίου είναι η δύναμη που τα προκαλεί.

Μέσα στον Ήλιο η ταχύτητα του ήχου είναι μεταβλητή.

Έχουν συχνότητες > 1 mHz κυρίως 2-4 mHz και ονομάζονται 5-λεπτες ταλαντώσεις του Ηλίου (5 minutes $\Rightarrow 1/300 = 3.33$ mHz.)

Έχουν πλάτος εκατοντάδες χιλιόμετρα

•g-mode ή κύματα βαρύτητας, είναι κύματα πυκνότητας που οφείλονται στη βαρύτητα, που είναι η δύναμη αποκατάστασης.

Έχουν χαμηλές συχνότητες (0-0.4 mHz).

Σχηματίζονται στη ζώνη μεταφοράς (0.7-1.0 ηλιακής ακτίνας).

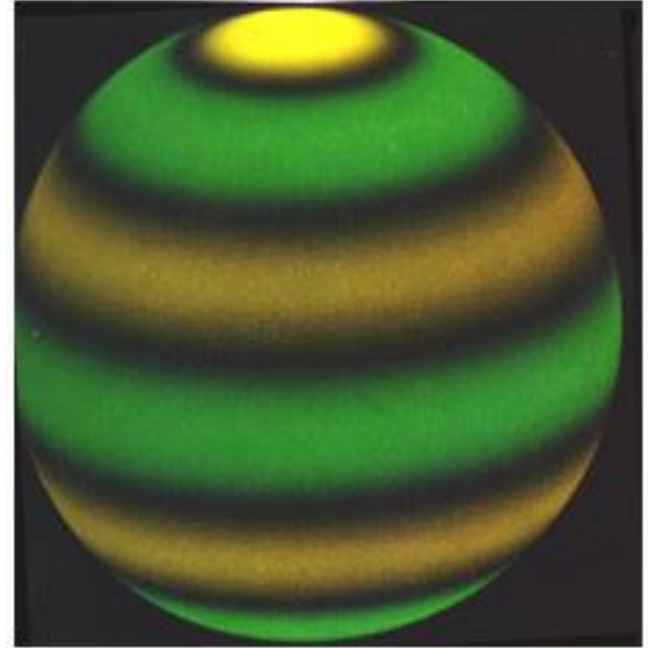
Δεν ανιχνεύονται στην επιφάνεια.

Δίνουν ενδείξεις ότι ο πυρήνας περιστρέφεται 5 φορές ταχύτερα από την φωτόσφαιρα

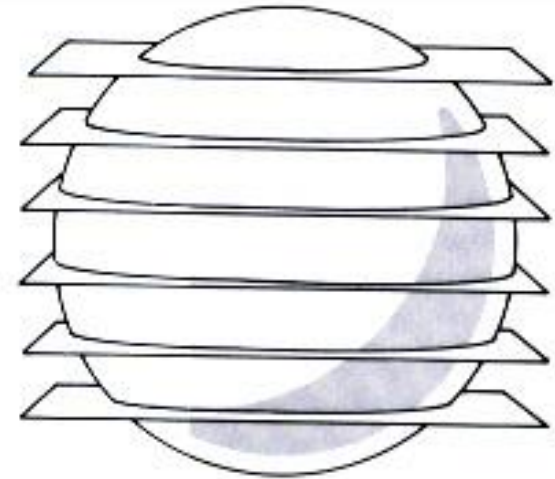
Η ύπαρξή τους αμφισβητείται από πολλούς, διότι το πλάτος τους είναι μόλις μερικά χιλιοστά του μέτρου και δεν ανιχνεύονται.

f-mode η επιφανειακά κύματα
είναι επίσης κύματα βαρύτητας
κοντά στη φωτόσφαιρα

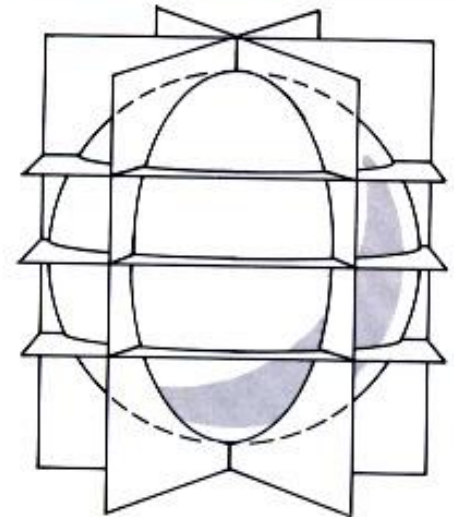
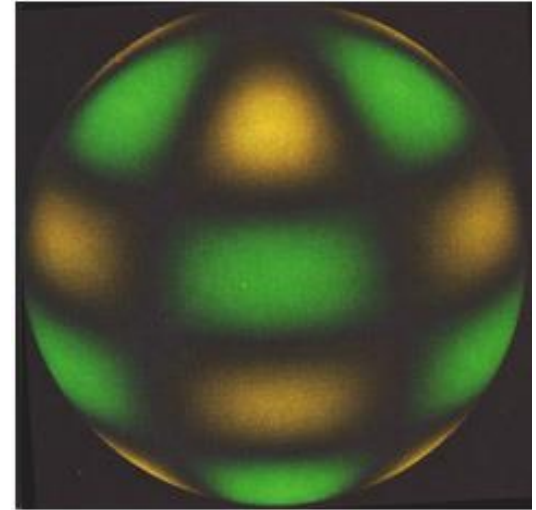
Υπάρχουν περίπου 10^7
τρόποι ταλάντωσης ρ και f



J. Harvey, "Sounding Out the Sun,"
Physics Today, October 1995, pages
32-38.

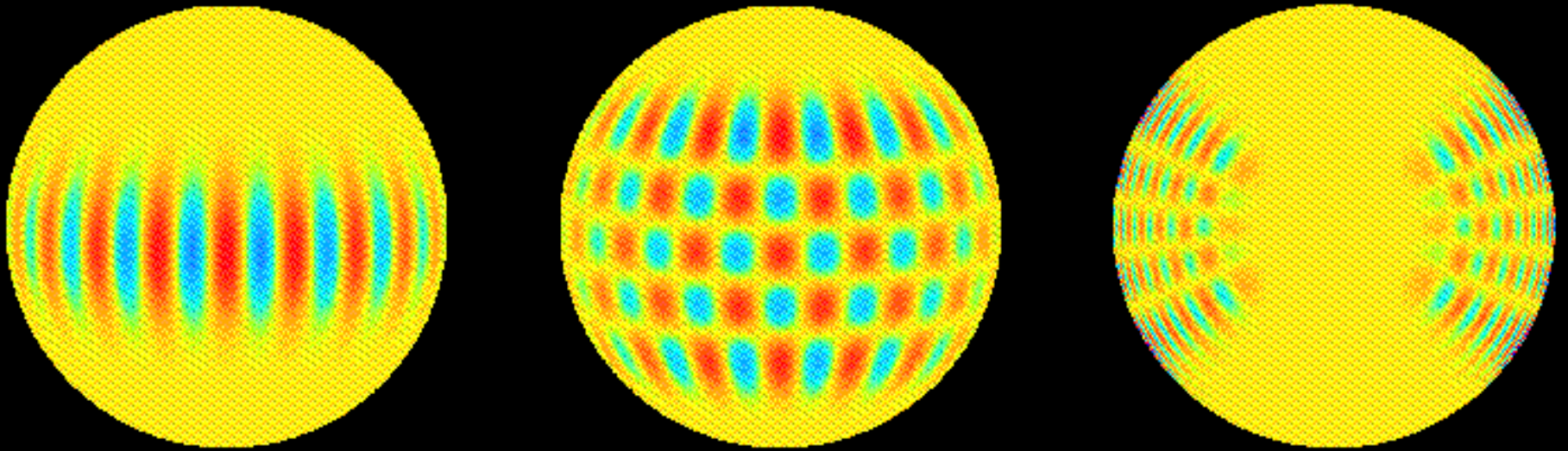


Υπάρχουν περίπου 10^7 τρόποι ταλάντωσης p και f

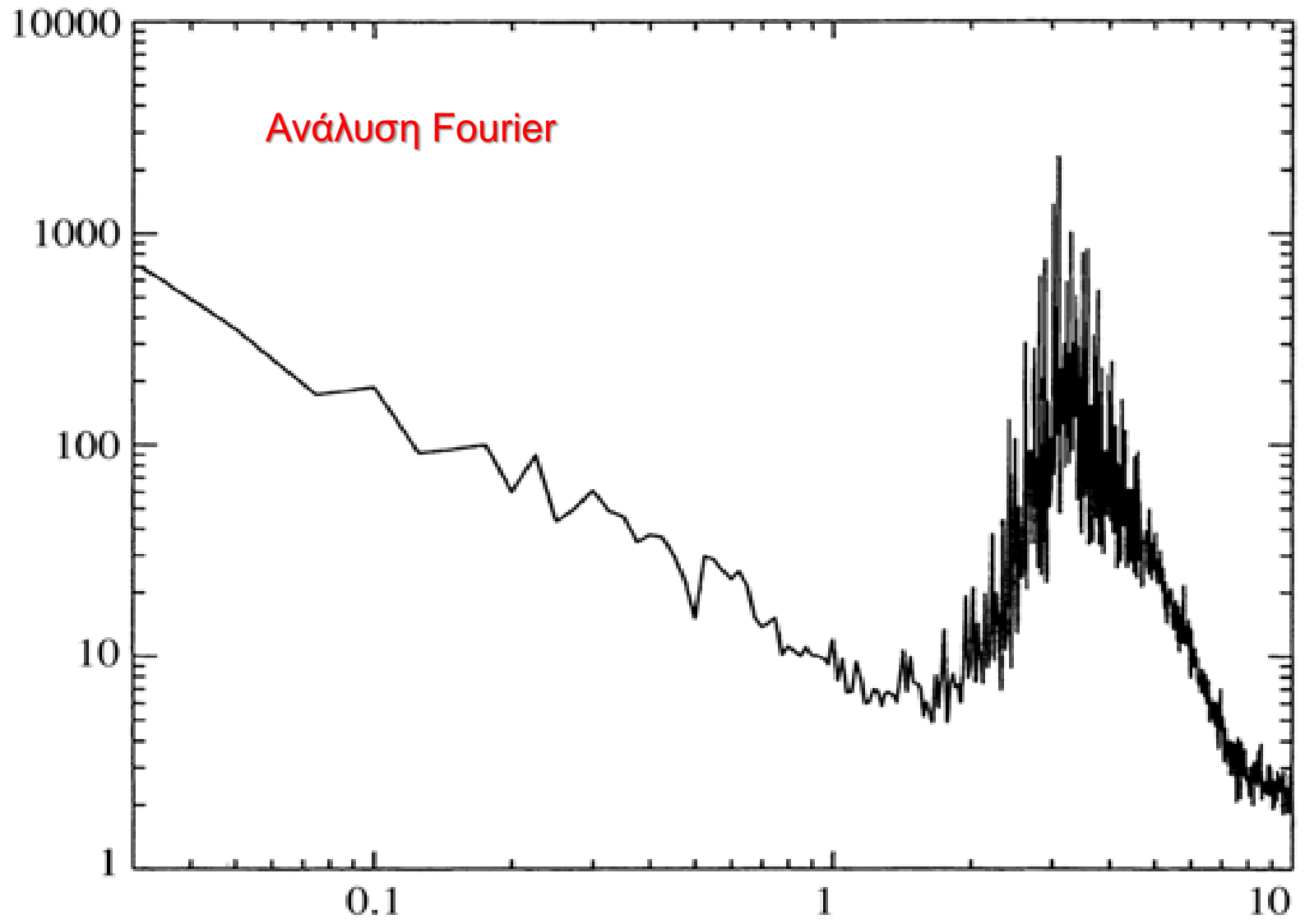


J. Harvey, "Sounding Out the Sun,"
Physics Today, October 1995, pages 32-38.

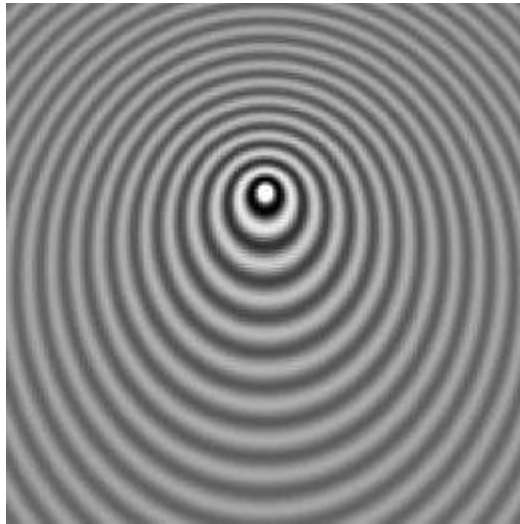
Υπάρχουν περίπου 10^7 τρόποι
ταλάντωσης ρ και f



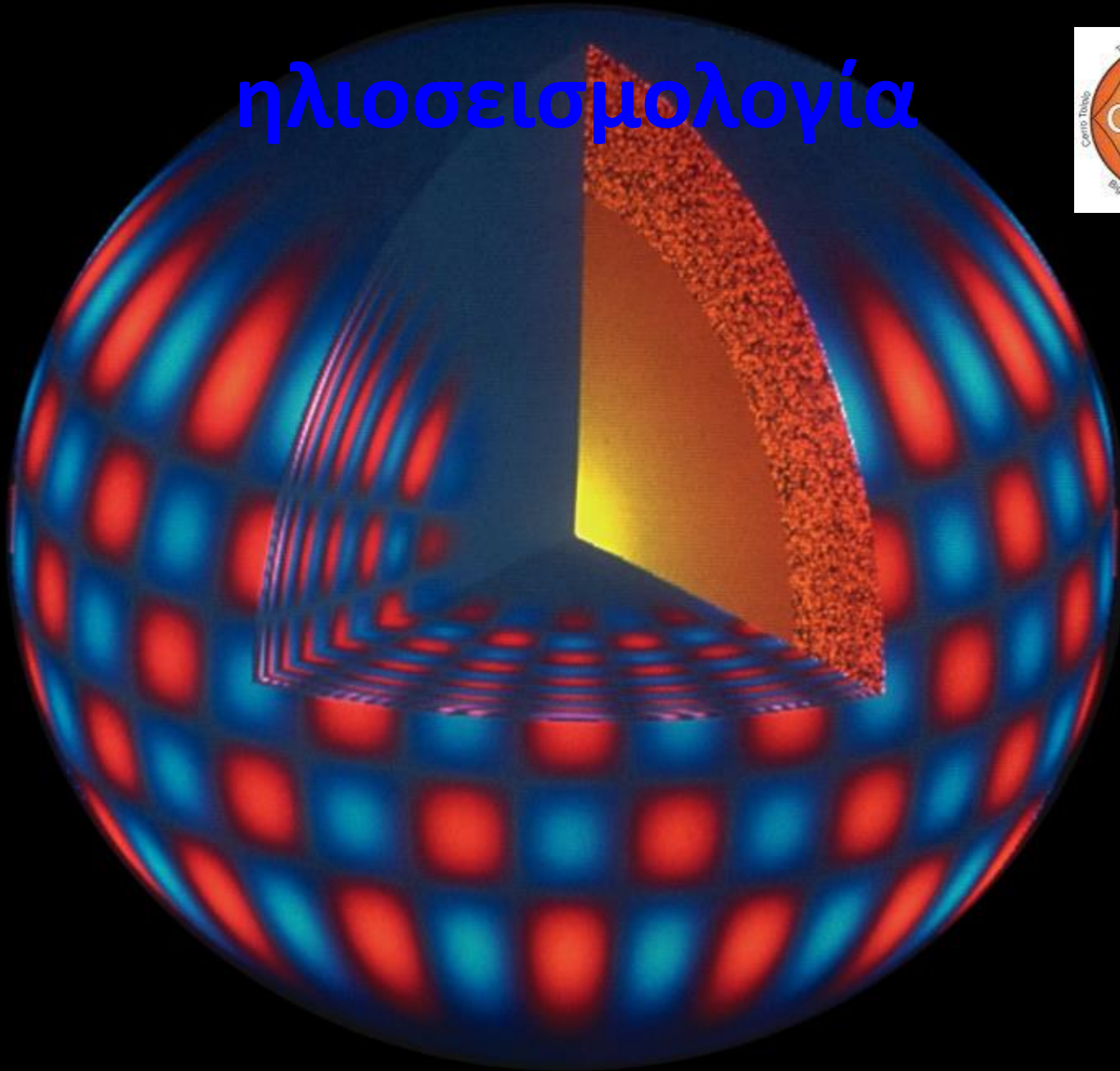
J. Harvey, "Sounding Out the Sun,"
Physics Today, October 1995, pages 32-
38.



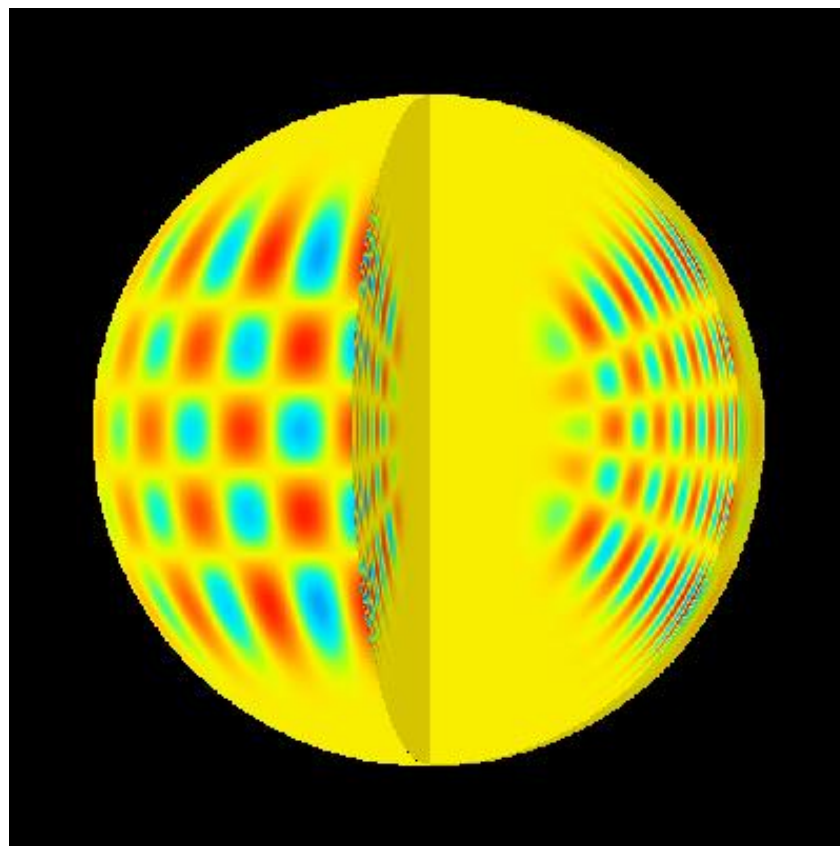
doppler

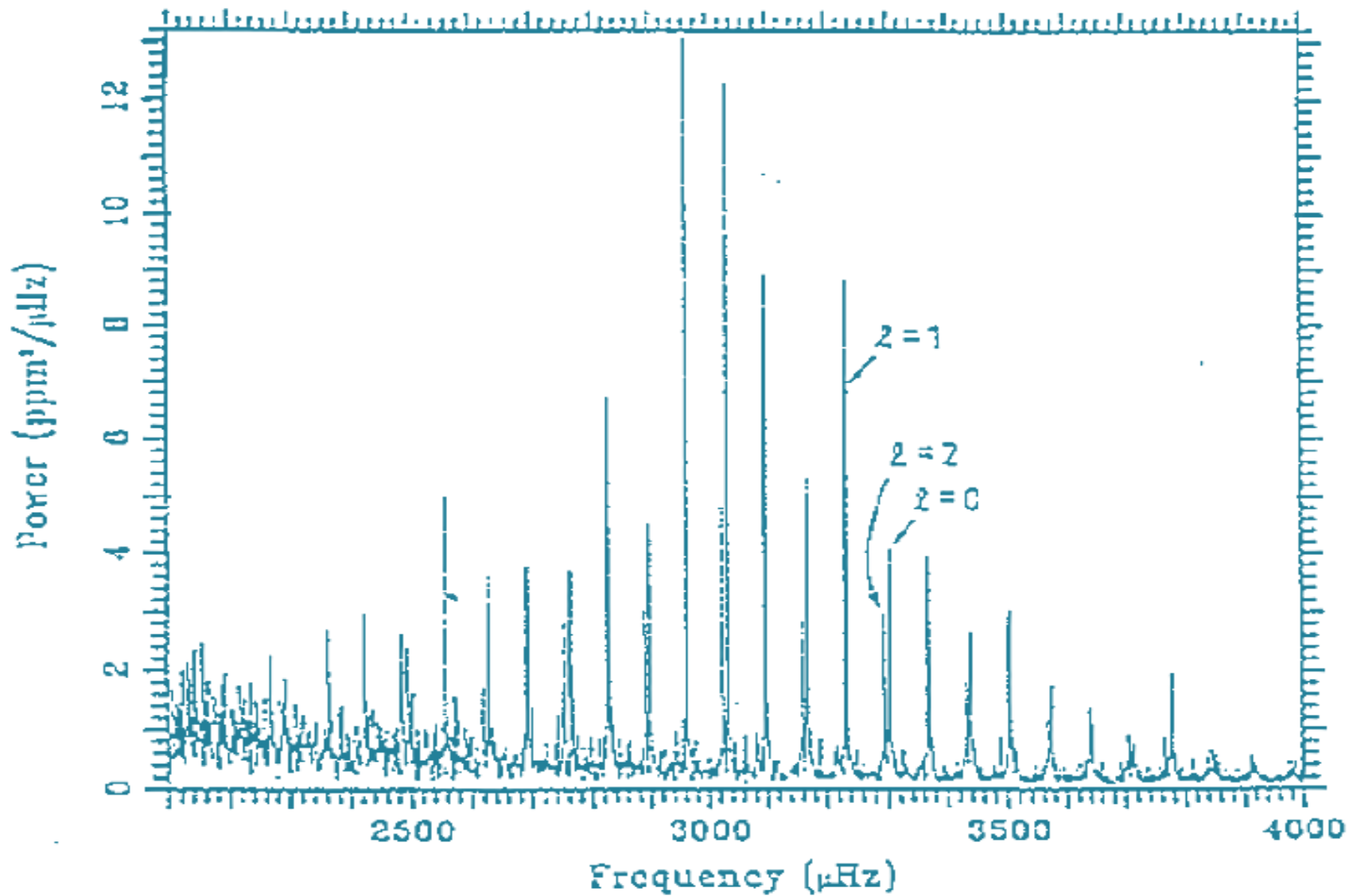


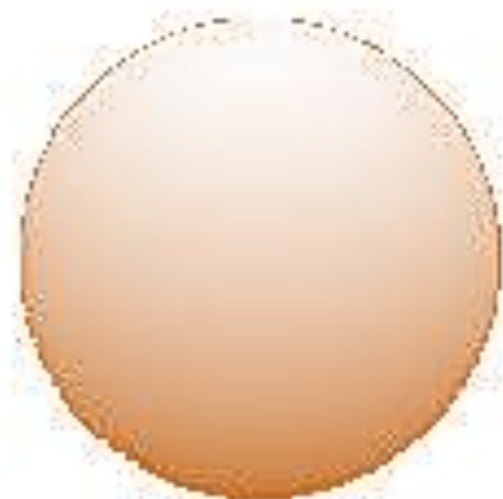
ηλιοσεισμολογία



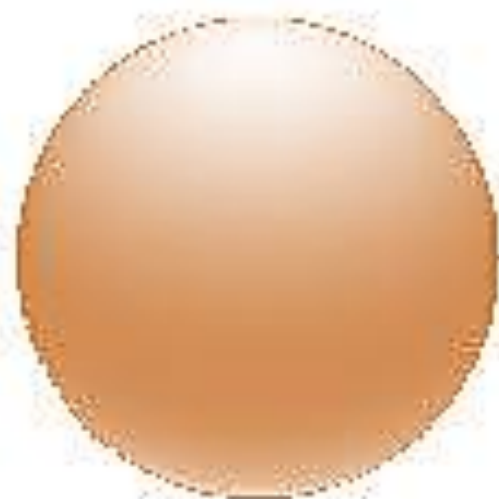
ηλιοσεισμολογία



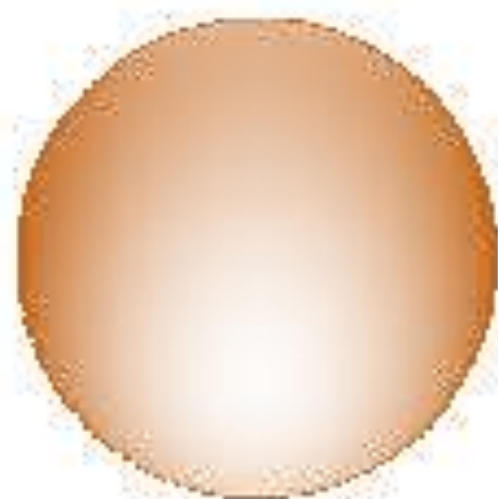




$$l = 1, m = 0$$



$$l = 2, m = 0$$



$$l = 2, m = 2$$



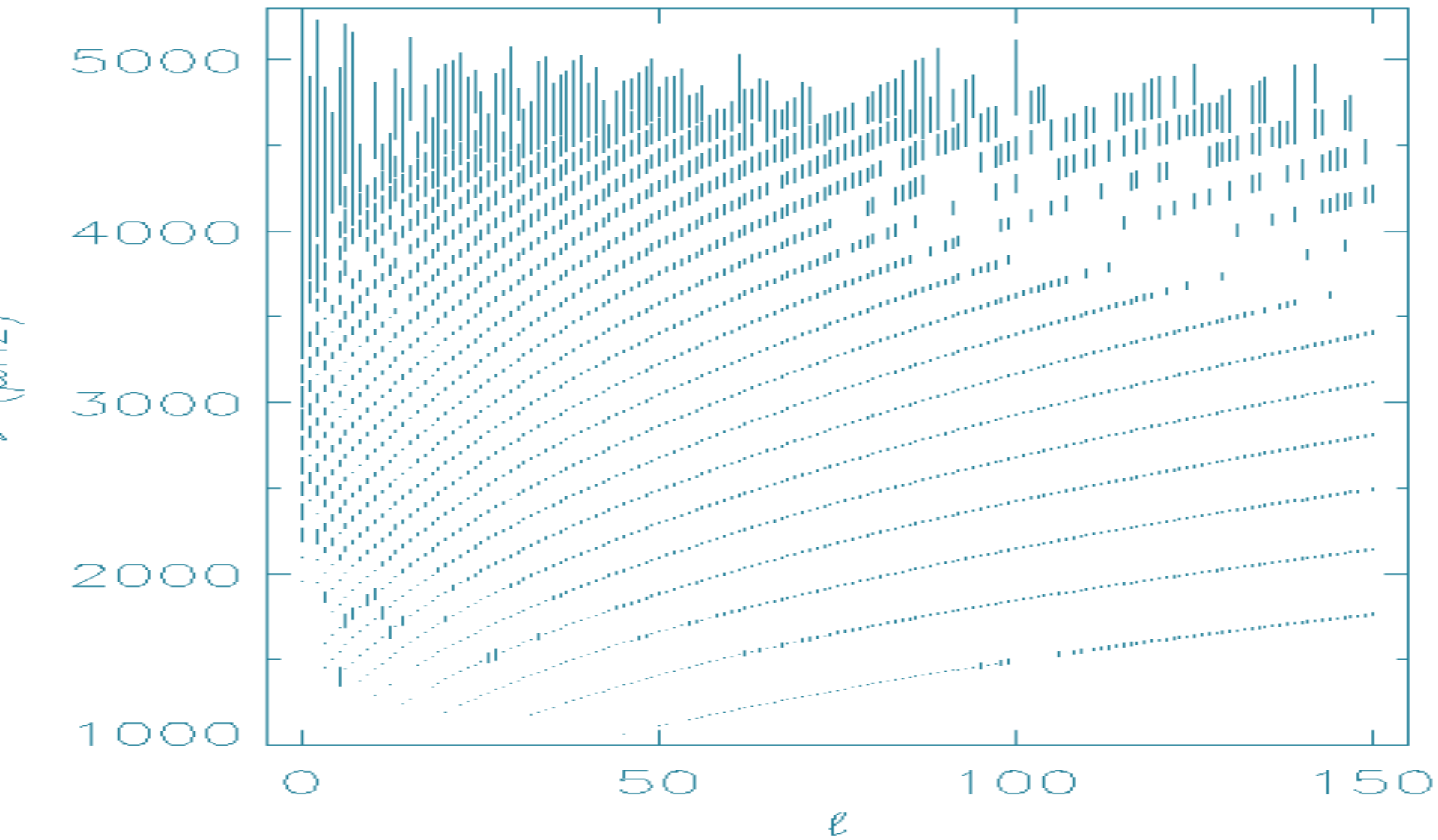
$$l = 20, m = 0$$



$$l = 20, m = 17$$



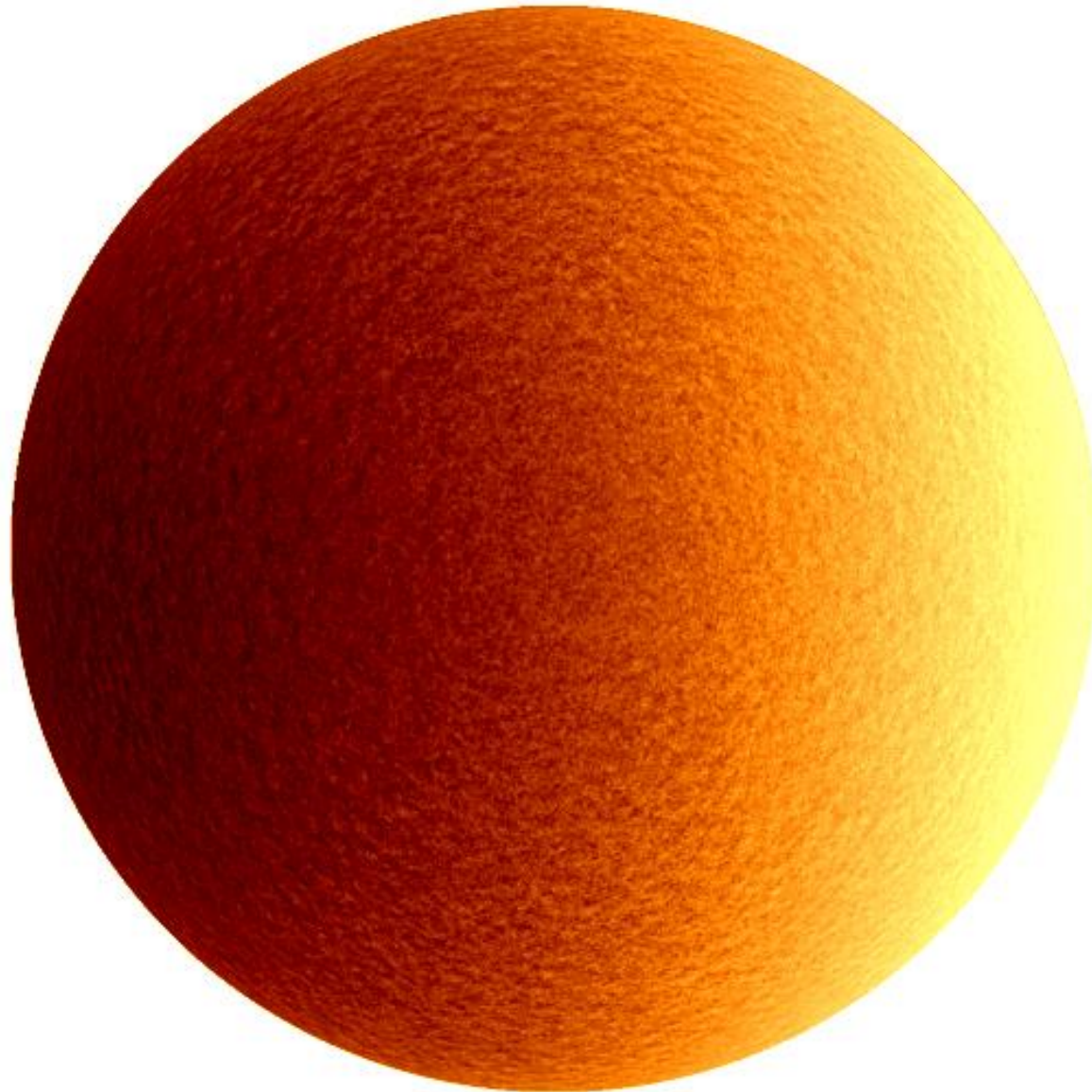
$$l = 20, m = 20$$



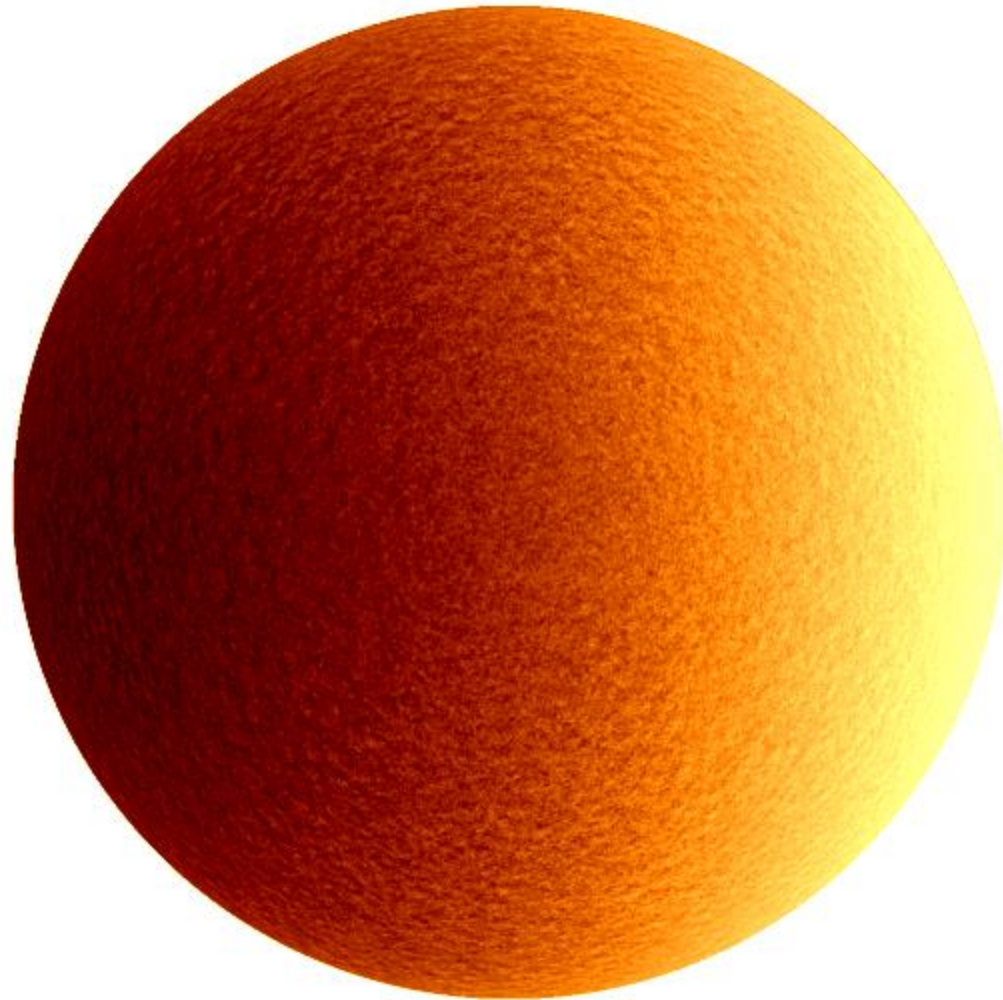
sigma error bars!

es et al., Solar Physics, 1997

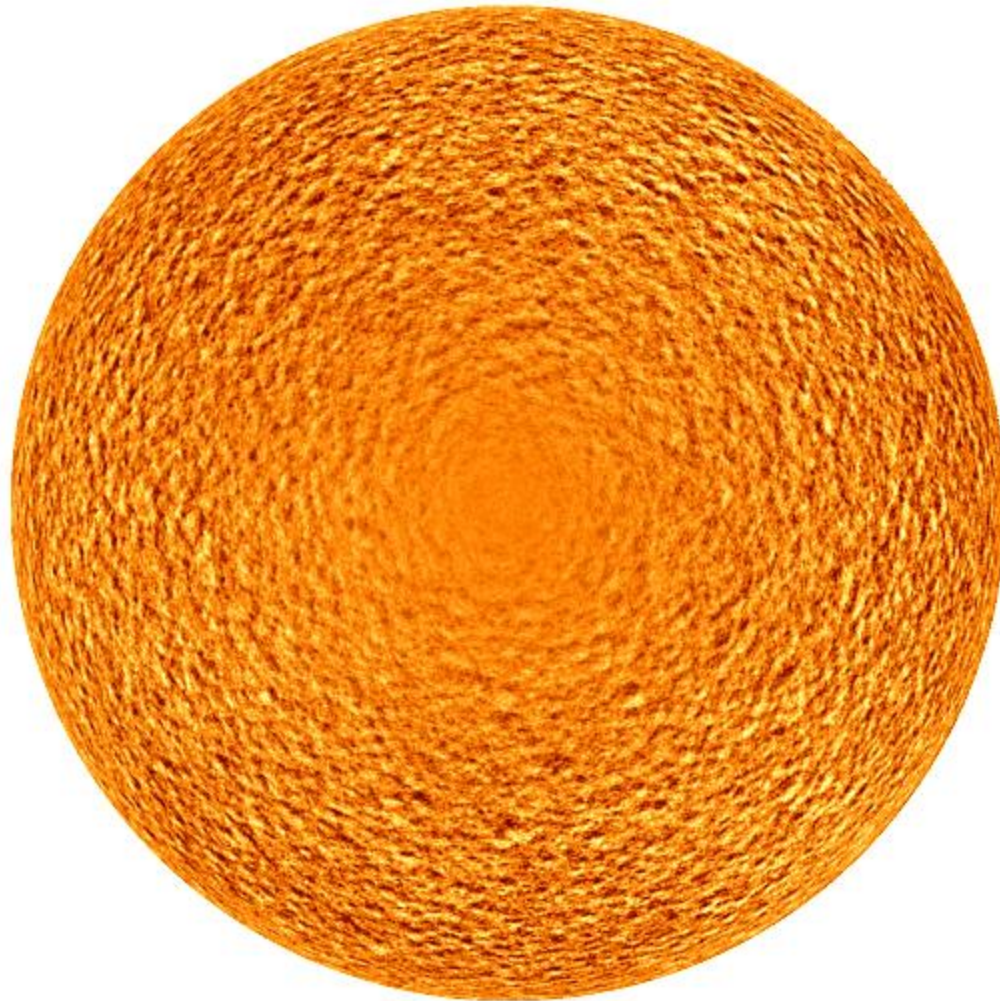
Ηλιοσεισμολογία



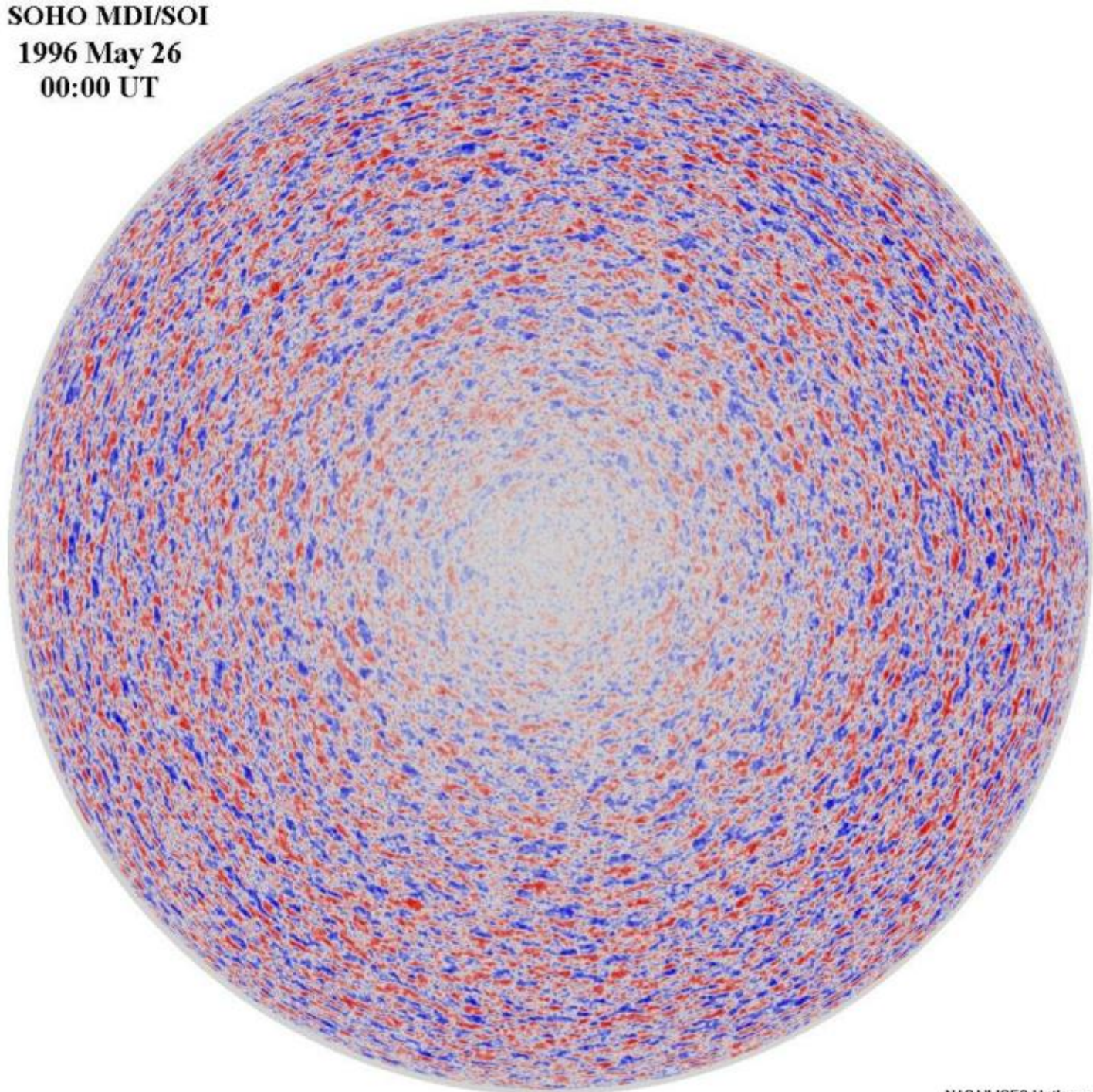
Ηλιοσεισμολογία



Ηλιοσεισμολογία



SOHO MDI/SOI
1996 May 26
00:00 UT

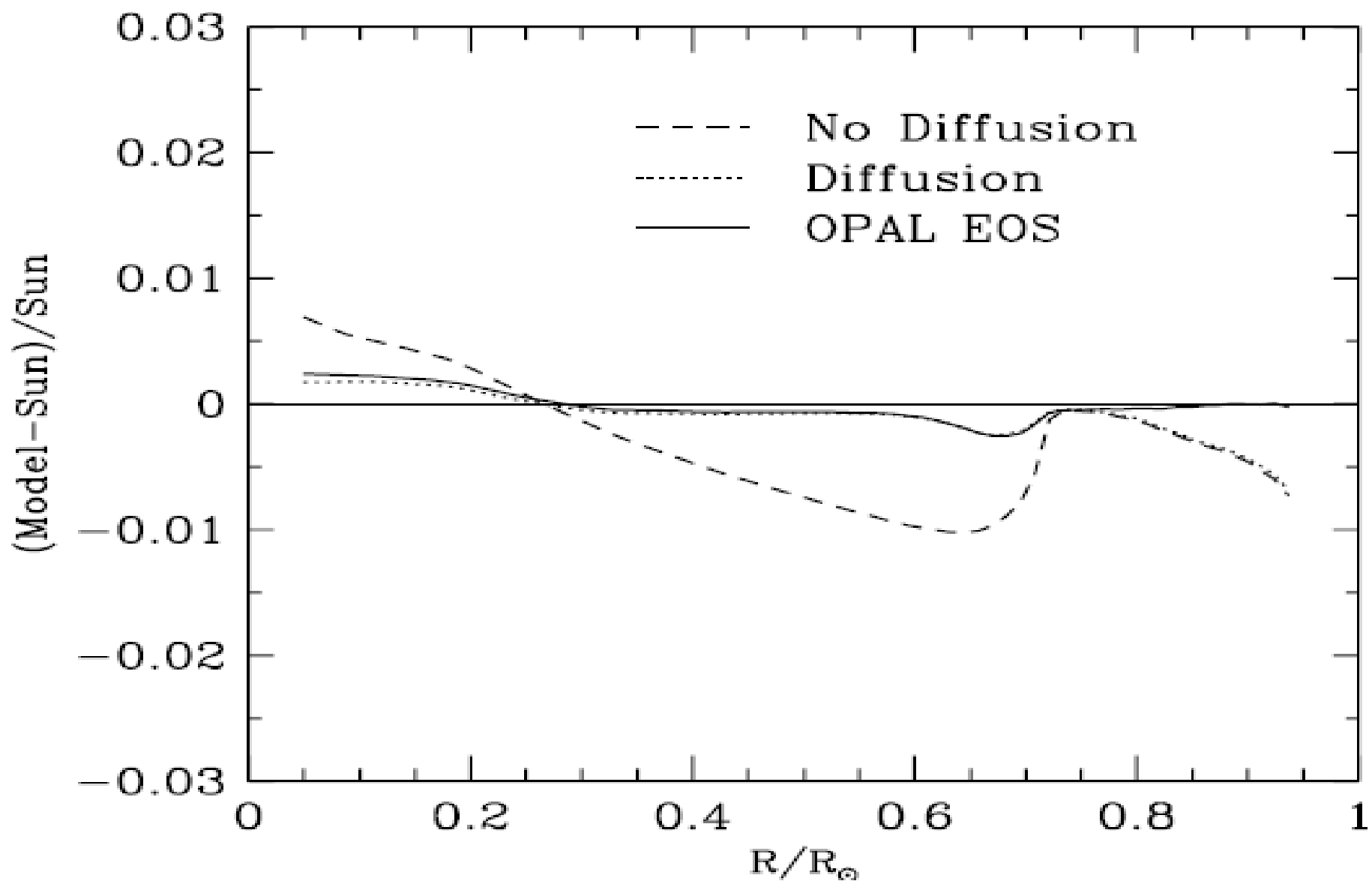


Helioseismology

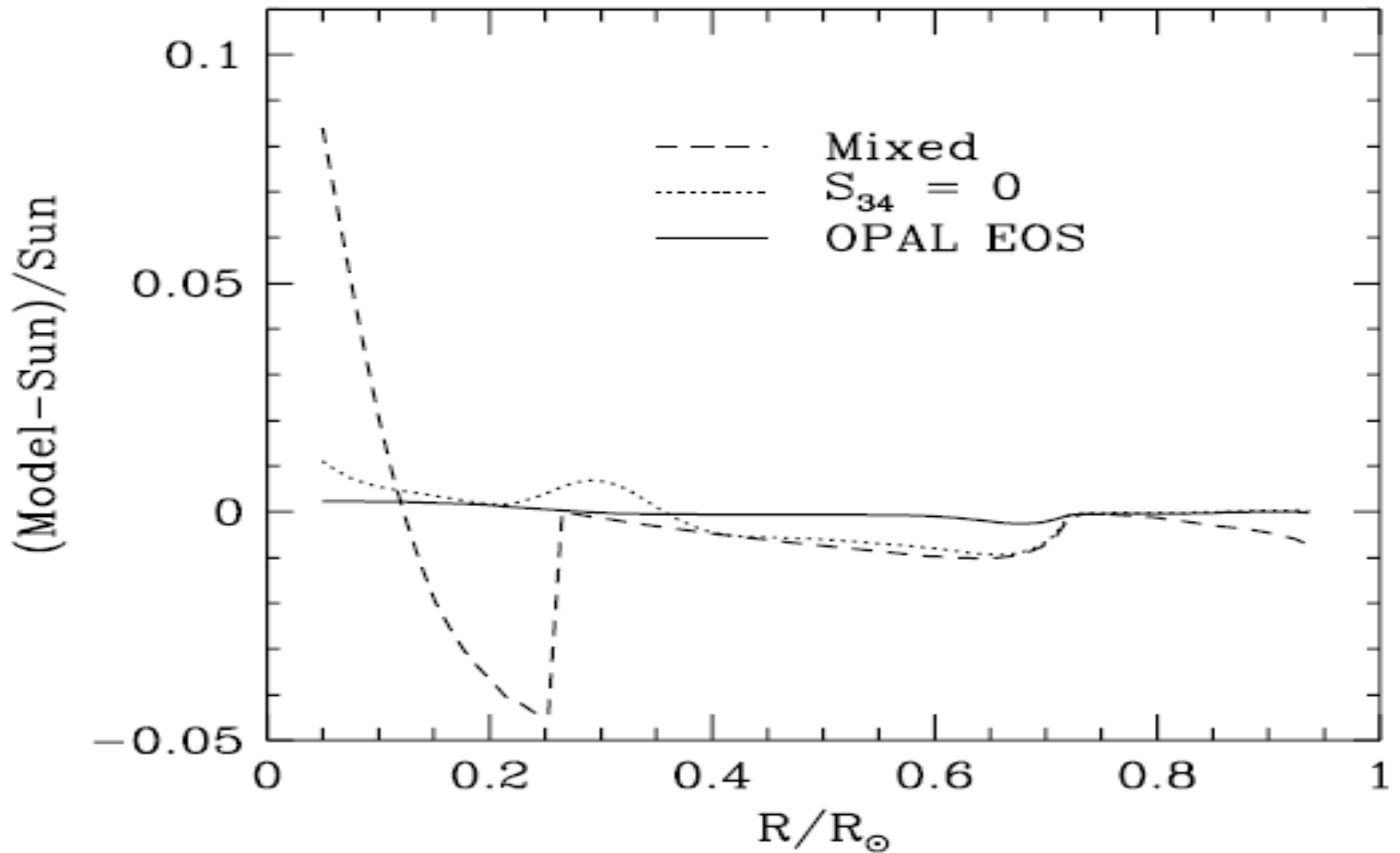
- Leighton et al. (1962)
- Ulrich (1970)
- Leibacher and Stein (1971).
- Deubner (1975)
- Jørgen Christensen-Dalsgaard, *Rev. Mod. Phys.*,
Oct. 2002

5-λεπτες ταλαντώσεις

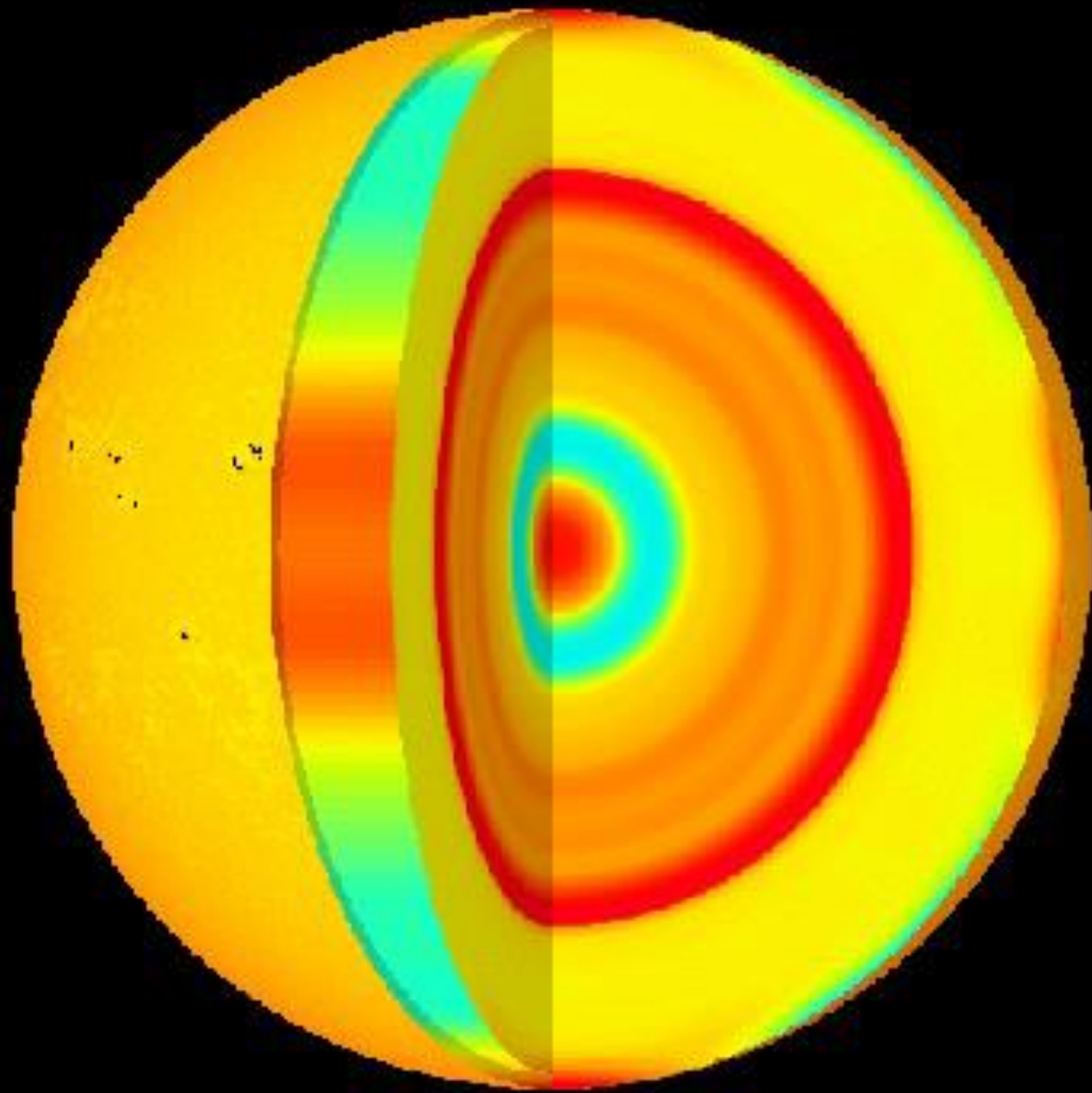
- R. B. Leighton, R. W. Noyes and R. W. Simon, *Astrophys. J.* 135, 474 (1962).
- Ερμηνεύθηκαν ως βαθέα στάσιμα ακουστικά κύματα από τον R. K. Ulrich, *Astrophys. J.* 162, 993 (1970).
- Καλες μετρήσεις (αρχικά) από τον F.-L. Deubner, *Astron. Astrophys.* 44, 371 (1975).



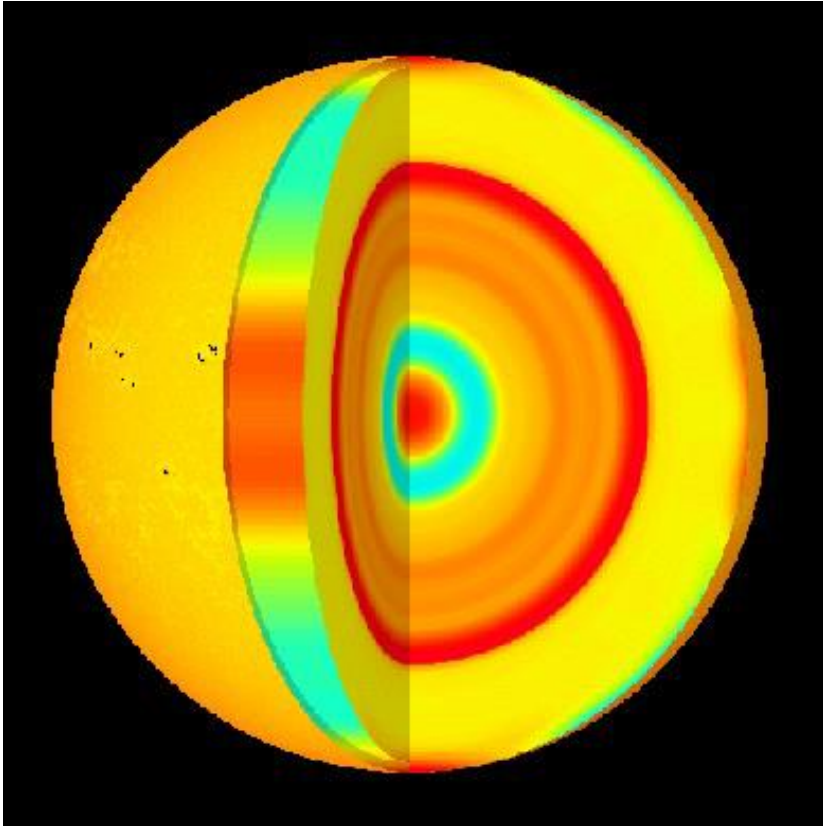
Comparison of sound speeds predicted by different standard solar models with the sound speeds measured by helioseismology.



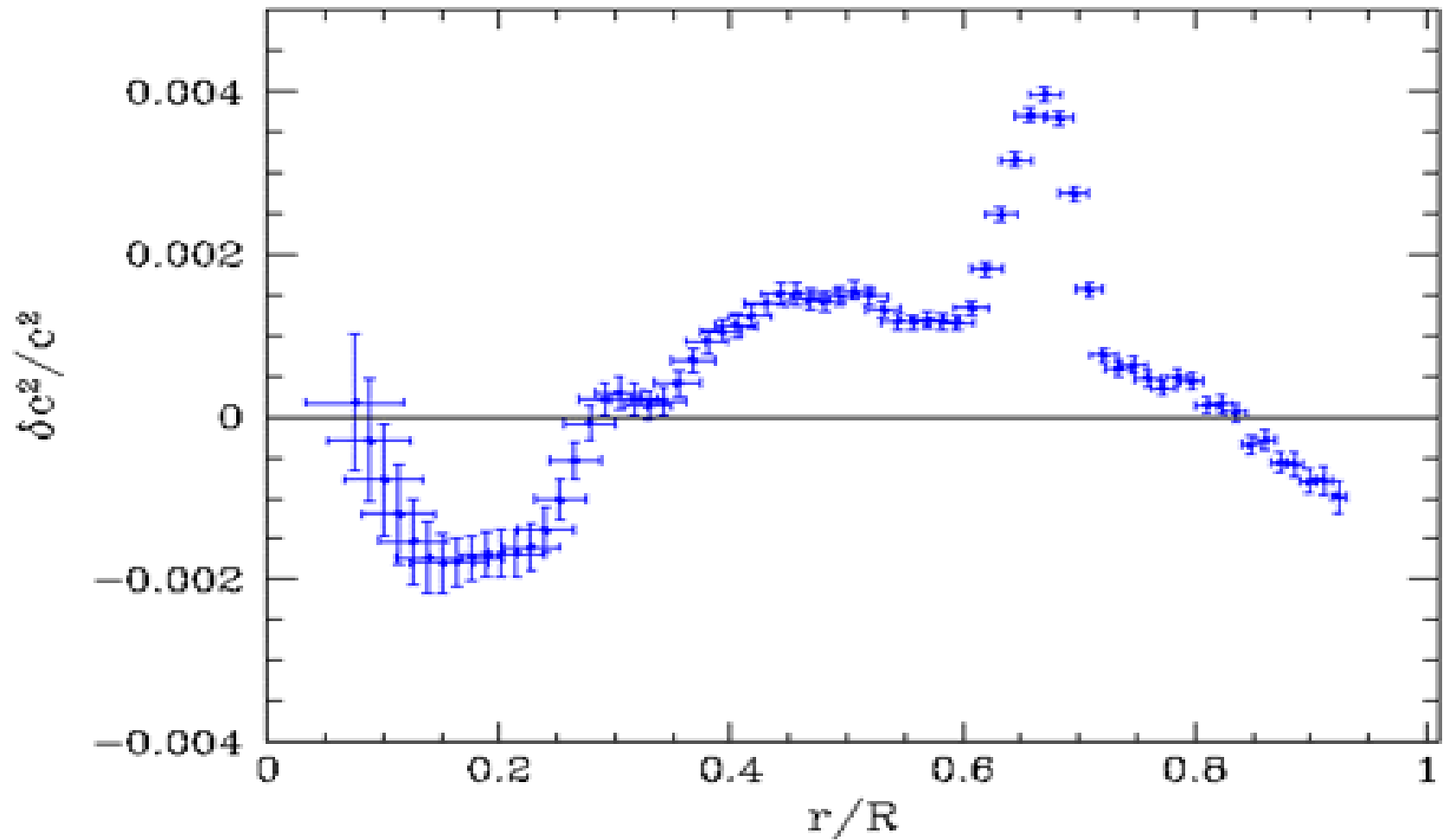
Comparison of sound speeds for Non-standard solar models compared with helioseismology. The dashed curve represents the sound speeds computed for the mixed solar model of Cumming and Haxton with ^3He mixing. The dotted line represents the sound speed for a solar model computed with the rate of the $^3\text{He}(\alpha, n)^7\text{Be}$ reaction set equal to zero. For comparison, we also include the results for the new standard model labeled OPAL EOS



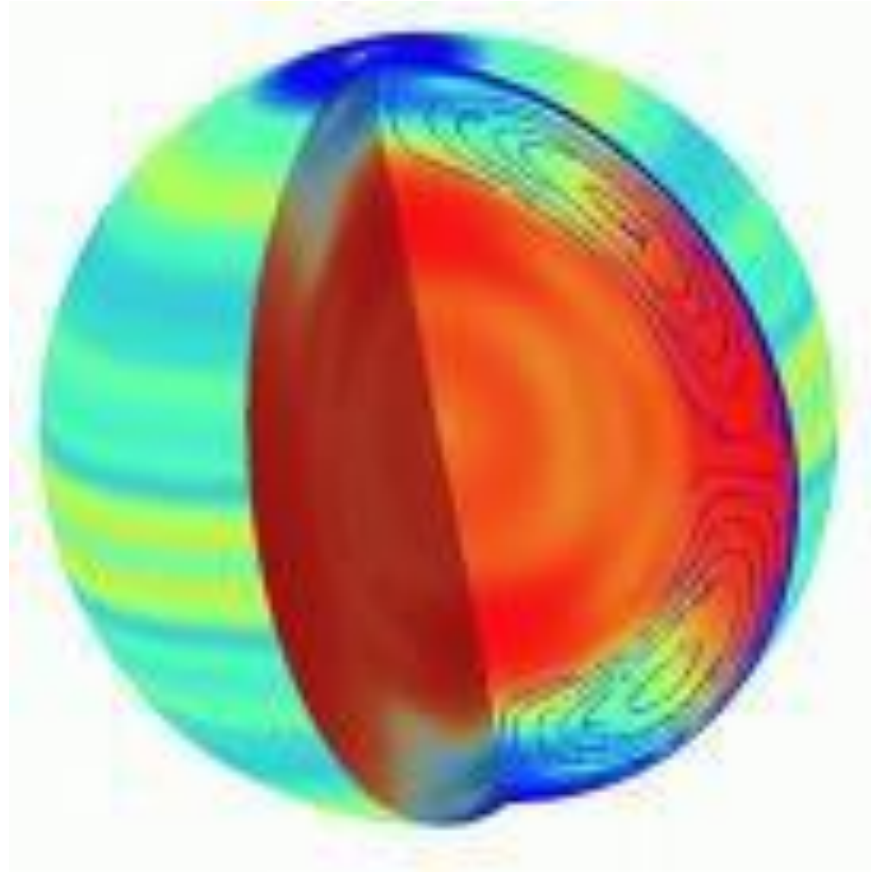
- A.G. Kosovichev shows the radial and latitudinal variations of the sound speed in the Sun, relative to a standard solar model.



Sun - Standard Solar Model
from 2 months of SOHO/MDI Medium- l Data



Μεσημβρινή ροή



Laurent Gizon and Aaron C. Birch,

Local Helioseismology

Living Rev. Solar Phys., 2, (2005), 6. [Online Article]: cited [<date>],

<http://www.livingreviews.org/lrsp-2005-6>

<http://solarphysics.livingreviews.org/Articles/lrsp-2005-6/download/lrsp-2005-6Color.pdf>

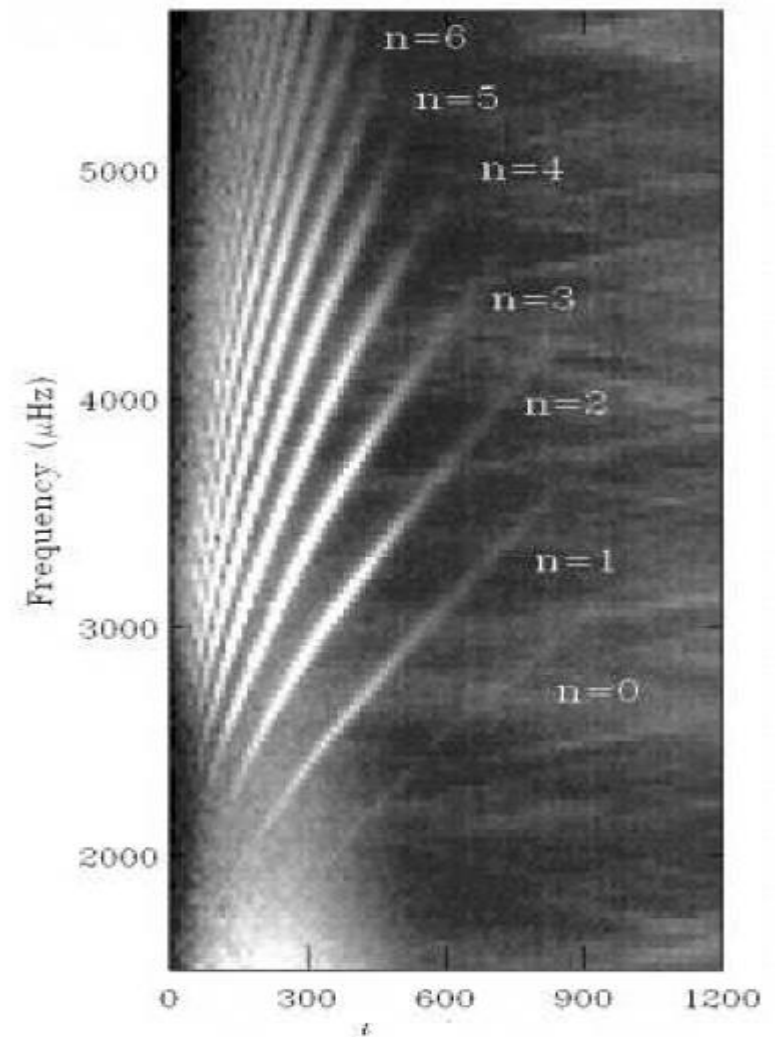
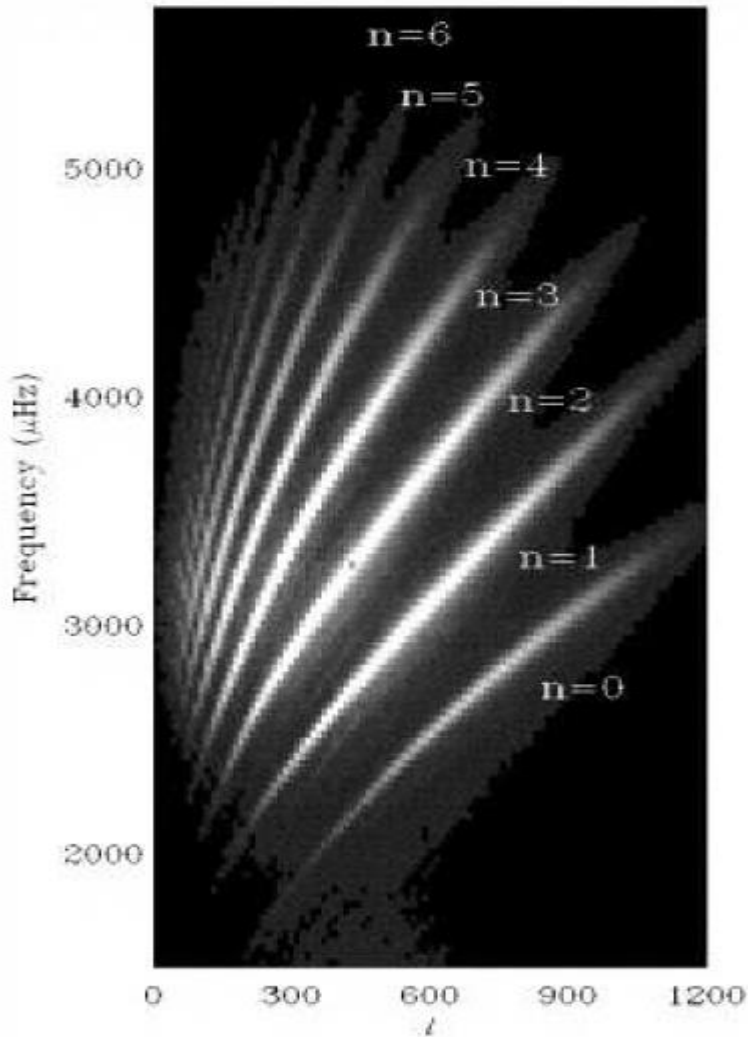
Τοπική ηλιοσεισμολογία

Μετρήσεις:

- Doppler images of the Sun's
- started with observations of acoustic absorption by sunspots using Kitt Peak vacuum telescope (Braun et al., 1987, 1988).
- Observations obtained by Hill (1988, 1989) at the Sacramento Peak vacuum tower telescope solar oscillations give information about internal horizontal flows.
- acoustic waves (Duvall Jr et al., 1993).
- the Taiwan Oscillation Network (TON),
- the Global Oscillation Network Group (GONG), and the
- Michelson Doppler Imager (MDI) aboard the ESA/NASA SOHO spacecraft in a halo orbit around the L1 Sun-Earth Lagrange point.

Y_l^m are spherical harmonics,
 α_{nlm} is a complex mode amplitude, and
 $\xi_{nl}(r)$ is the radial eigenfunction of the mode
with frequency ω_{nlm} .

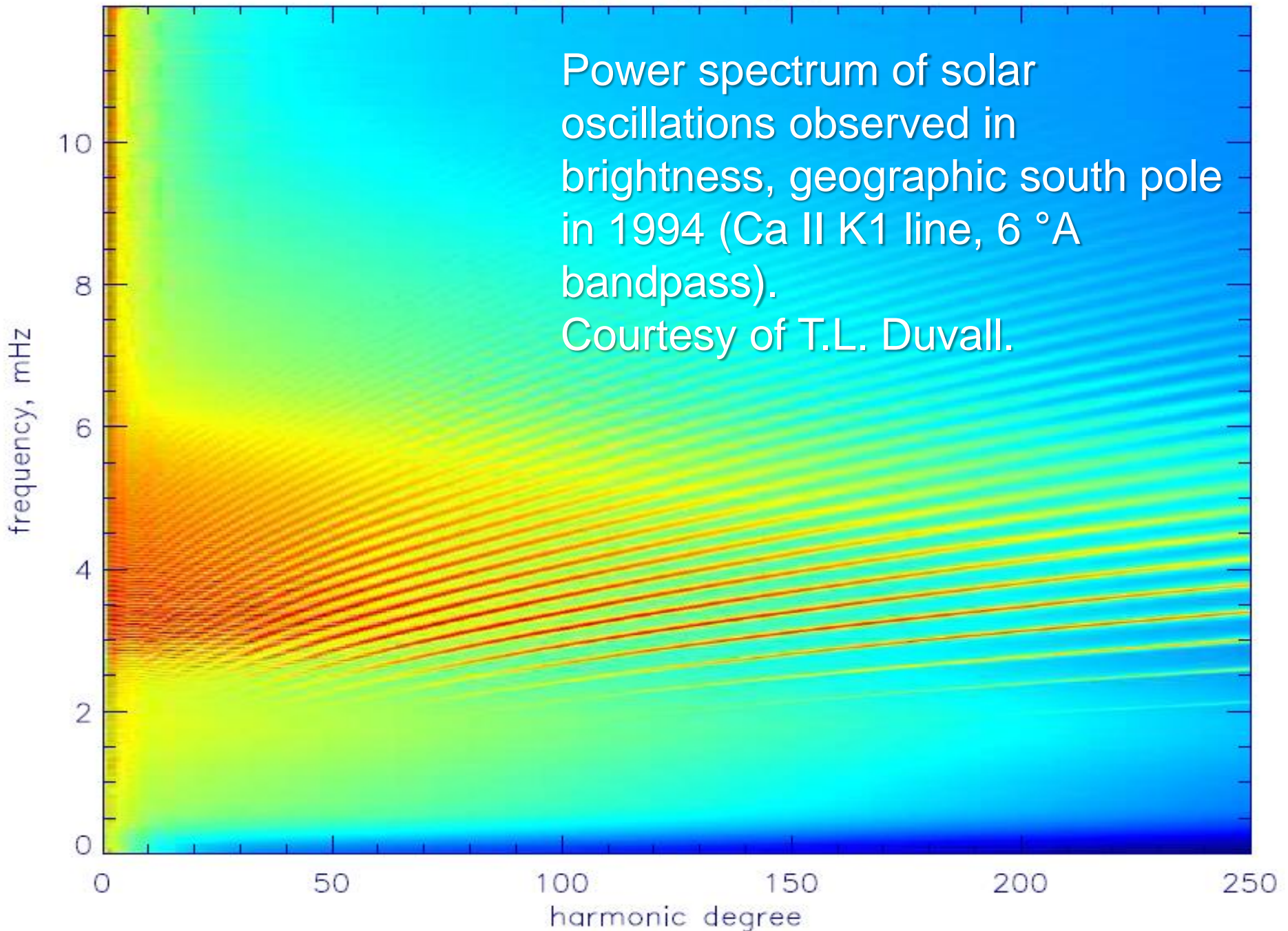
$$\delta r(r, \theta, \phi, t) = \sum_{n,l} \sum_{m=-l}^l a_{nlm} \xi_{nl}(r) Y_l^m(\theta, \phi) e^{i\omega_{nlm}t},$$

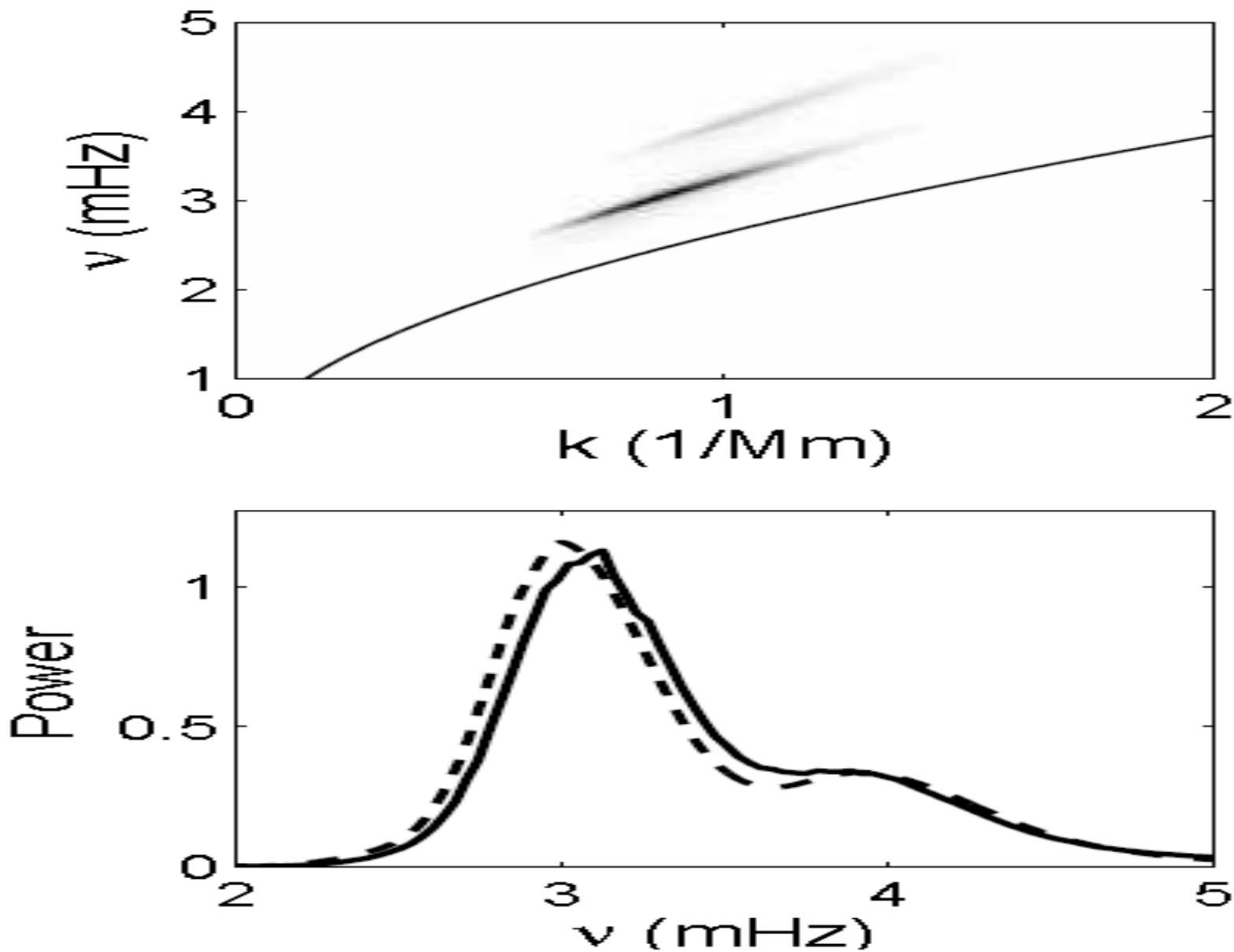


m-averaged power spectra of solar oscillations obtained from 512 min series of tracked Doppler images of size 30×30 (near disk center) observed by MDI (left) and TON (right), versus spherical harmonic degree l and temporal frequency. The ridges are labelled by the value of the radial order n . From Gonzalez Hernandez et al. (1998).

South Pole data

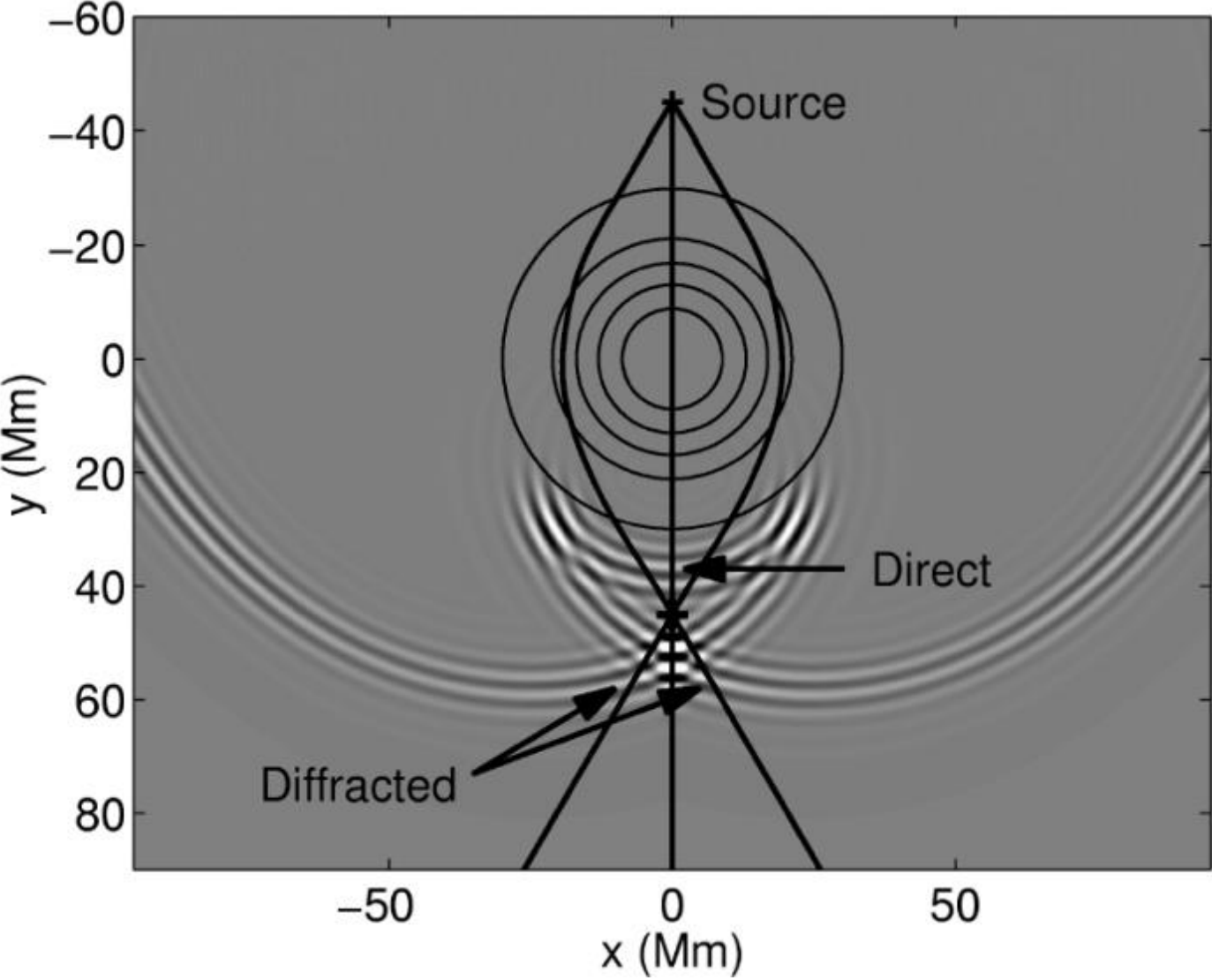
Power spectrum of solar oscillations observed in brightness, geographic south pole in 1994 (Ca II K1 line, 6 °Å bandpass).
Courtesy of T.L. Duvall.





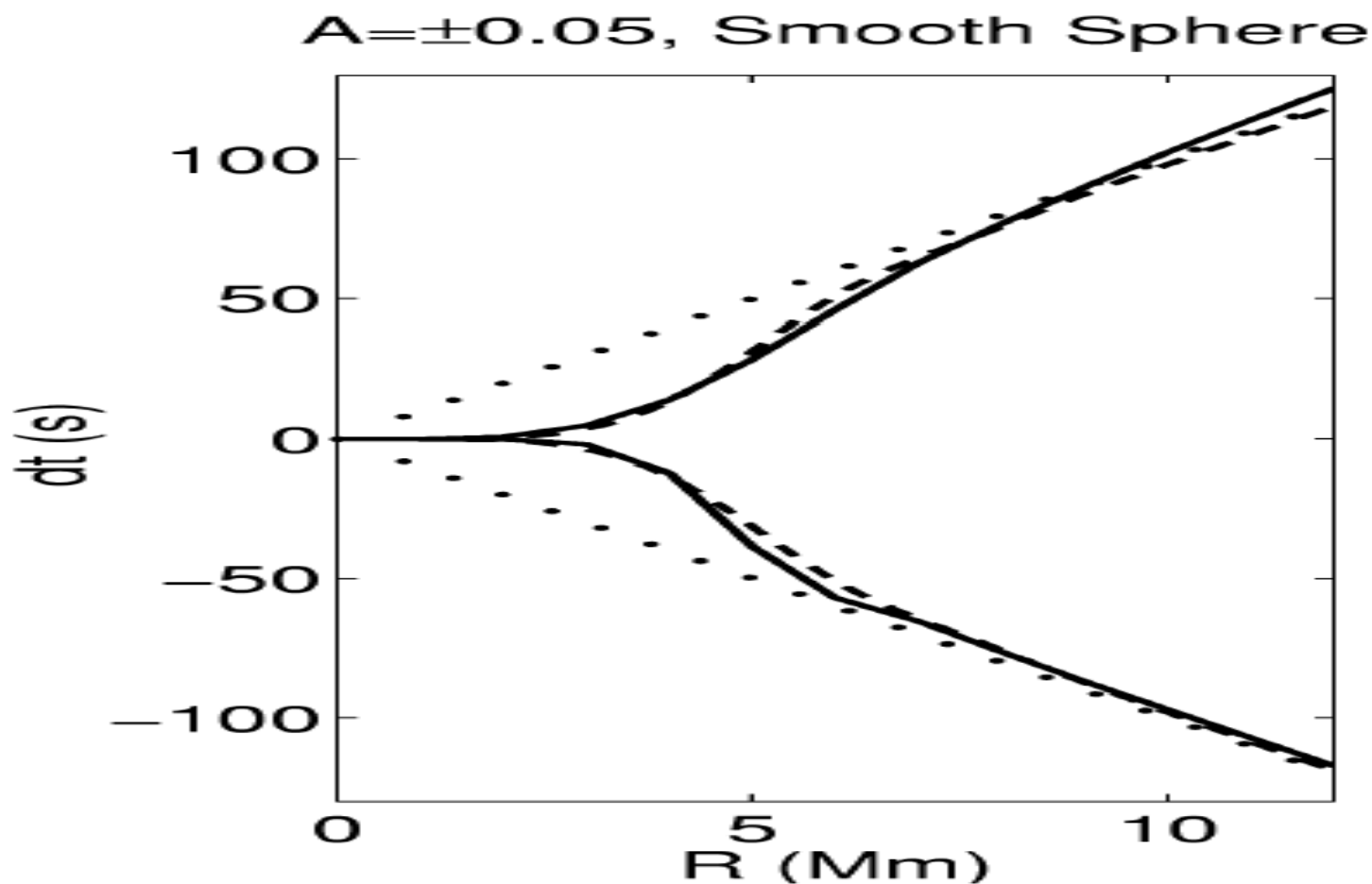
Comparison of a model filtered power spectrum with the filtered power spectrum of MDI data.

A numerical experiment of wave scattering by a spherical region of perturbed sound speed.

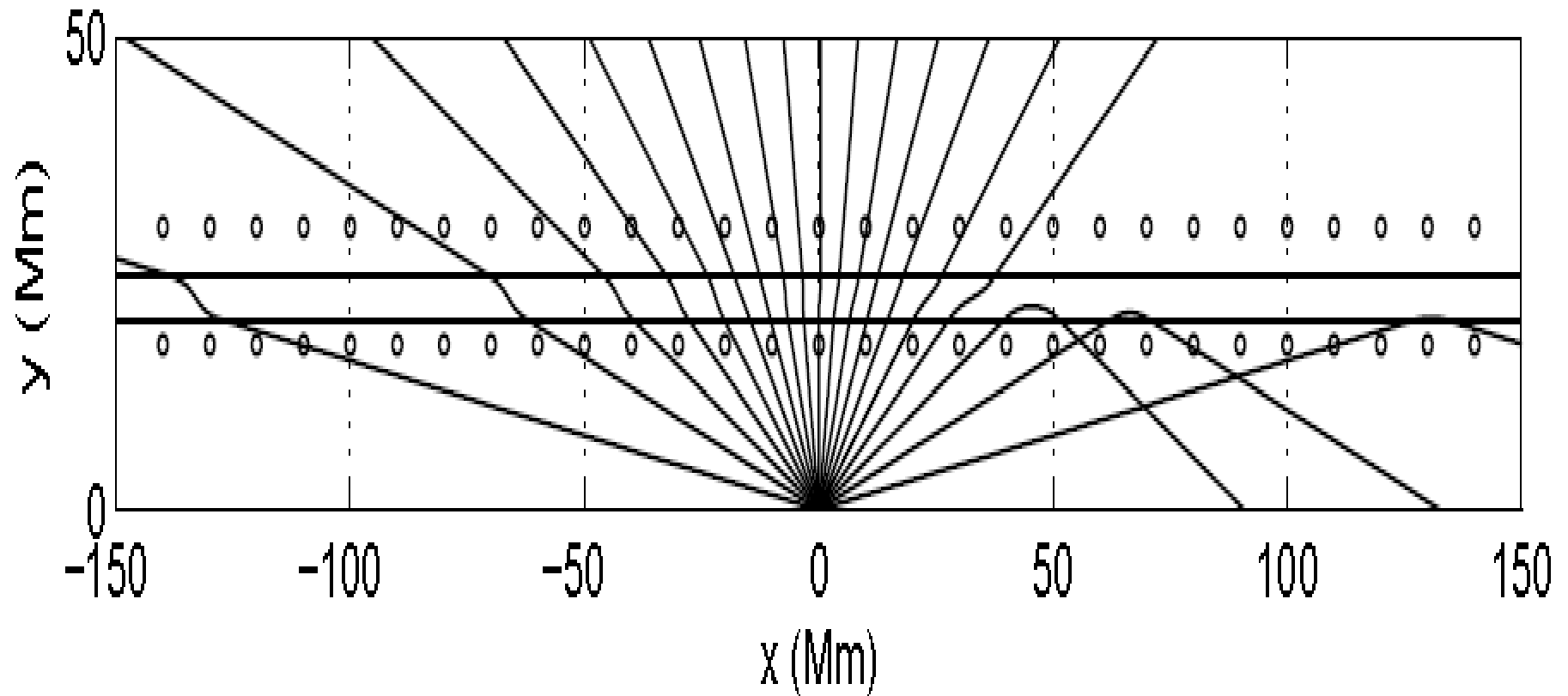


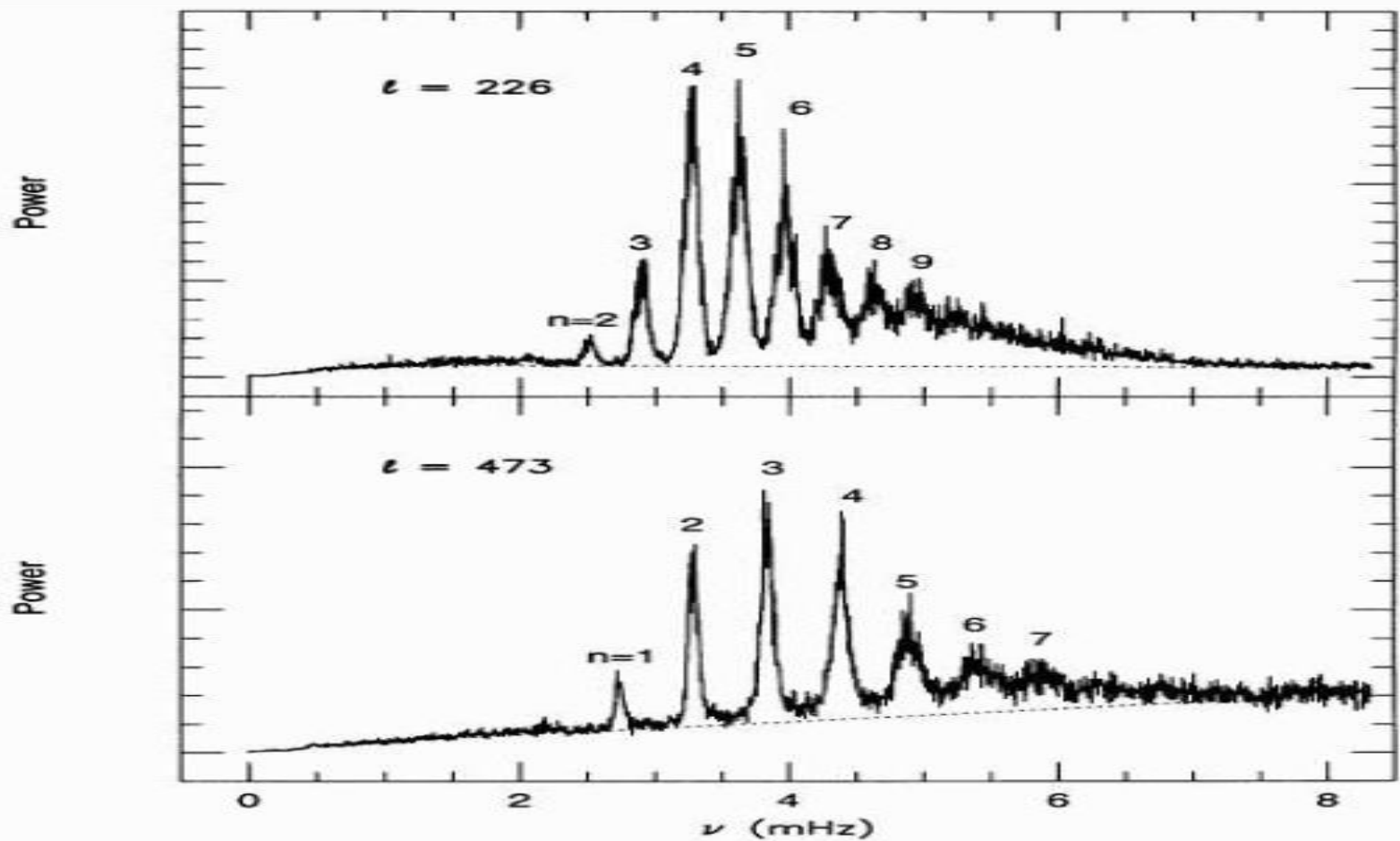
A numerical experiment of wave scattering by a spherical region of perturbed sound speed

the numerical travel times perturbations (solid lines),
the Born approximation travel time perturbations (dashed lines),
and the first-order ray approximation for the perturbed travel times (dotted lines),



Geometry for a numerical test of the Born approximation

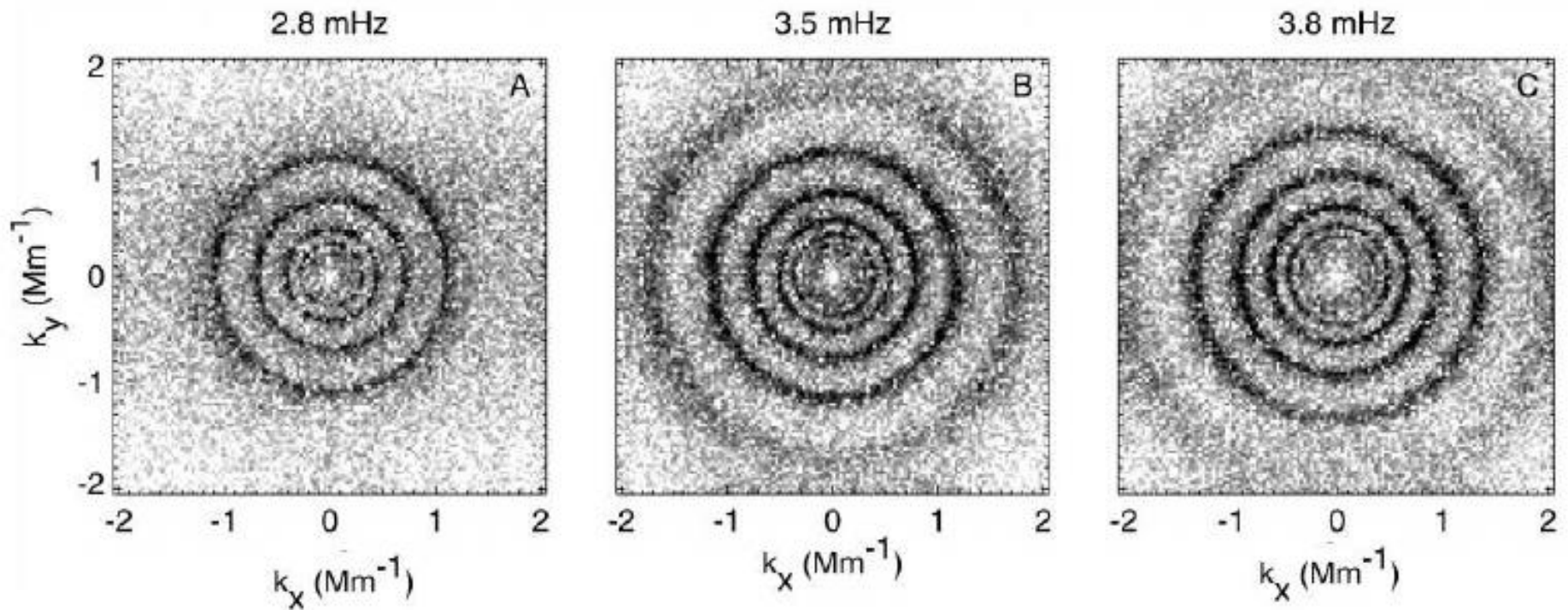




The m-averaged net power (incoming plus outgoing) as a function of frequency for two representative values of degree l . These power spectra were obtained from the analysis of 1988 quiet-Sun south pole data.

The p-mode ridges are labeled by the value of the radial order n .

The dashed lines show the background power (L, ν). From Braun (1995).



Cuts at constant frequency through the three-dimensional power spectrum.

correspond to cuts at frequencies 2.8, 3.5, and 3.8 mHz,

The outermost ring corresponds to the f mode,

and the inner rings to p1, p2, p3, and so forth.

- The data cube is Fourier transformed to obtain (k, ω) , where k is the horizontal wavevector and ω is the angular frequency (approximately a plane-wave decomposition).
- The three-dimensional power spectrum of the resulting data cube, $P(k, \omega) = |\Phi(k, \omega)|^2$,

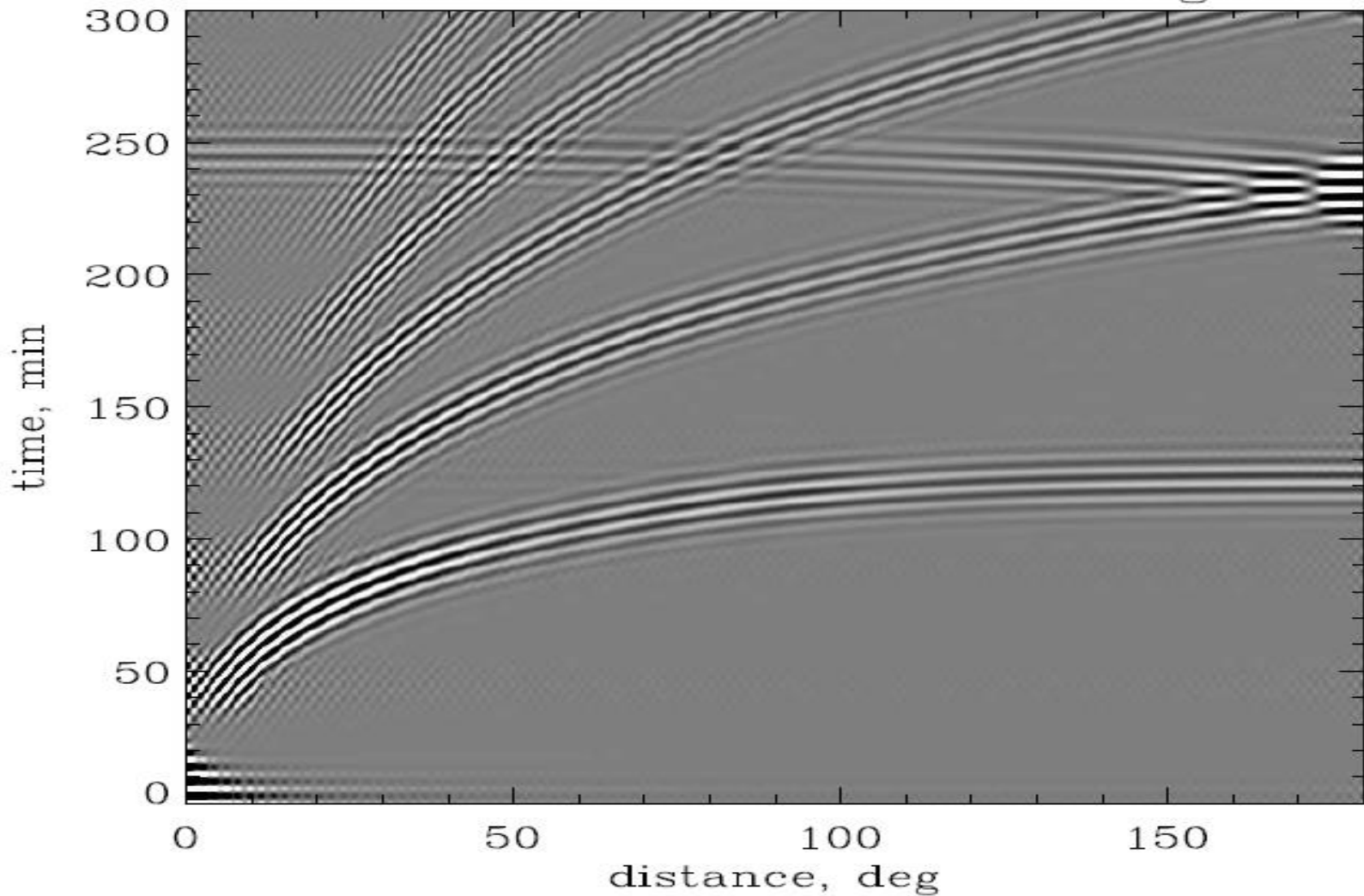
Τρισδιάστατη ανάλυση Φουριέ

$$P_k(\psi, \omega) = \sum_m a_m(\omega) \cos m\psi + b_m(\omega) \sin m\psi$$

$$P_{\text{fit}}(\psi, \omega) = \frac{A}{1 + (\omega - \omega_0 - kU_x \cos \psi - kU_y \sin \psi)^2 / \gamma^2} + Bk^{-3}$$

ψ gives the direction of k
(the angle between x and k)

Theoretical Time-Distance Diagram



Theoretical cross-covariance function for p modes, $C(x_1, x_2, t)$, as a function of time lag and arc distance, also called the time-distance diagram. In this calculation the solar model is spherically symmetric.

Hence C only depends on the distance between x_1 and x_2 and is symmetric with respect to the time lag t . Courtesy of A.G. Kosovichev.

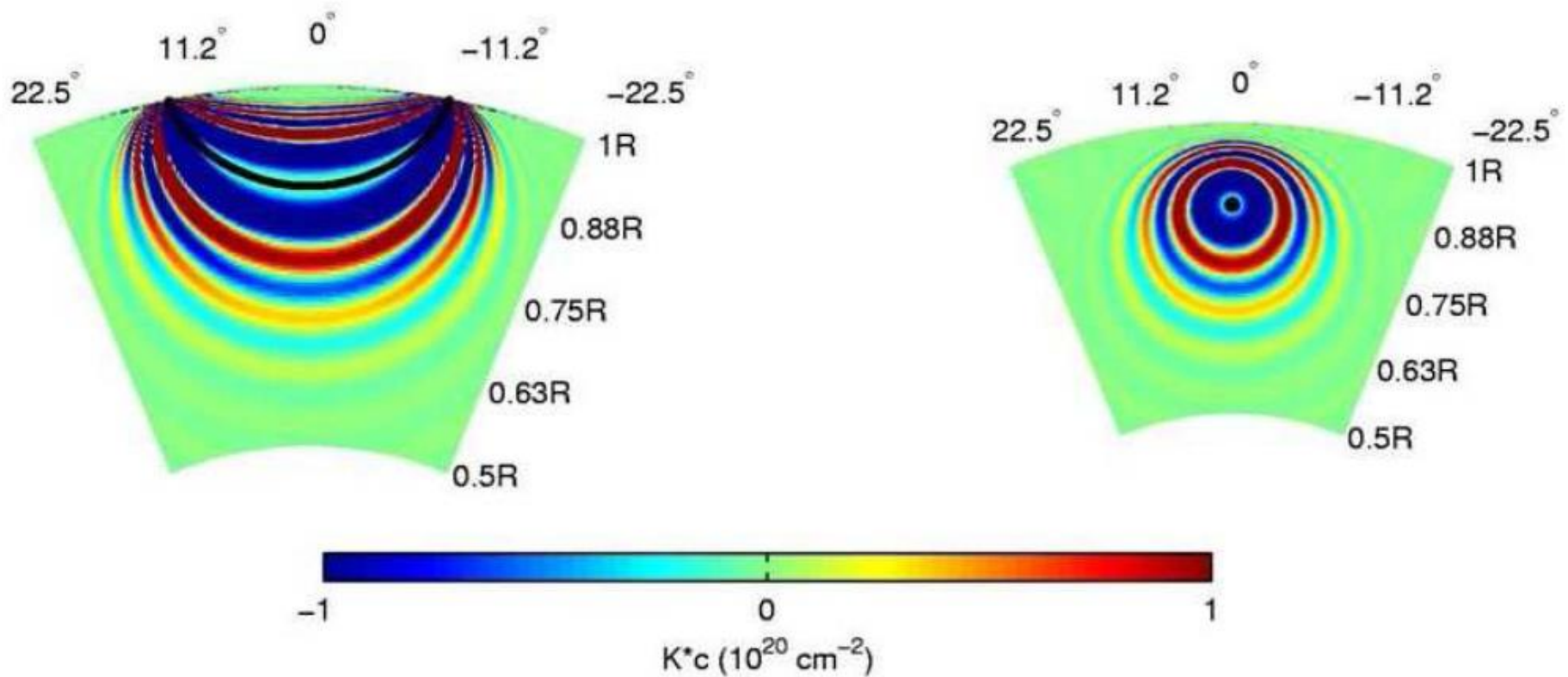
Συνδιασπορά, *cross-covariance*

- εγκάρσια-συνδιακύμανσης (ή μερικές φορές διασυσχέτιση, ετεροσυσχέτιση)

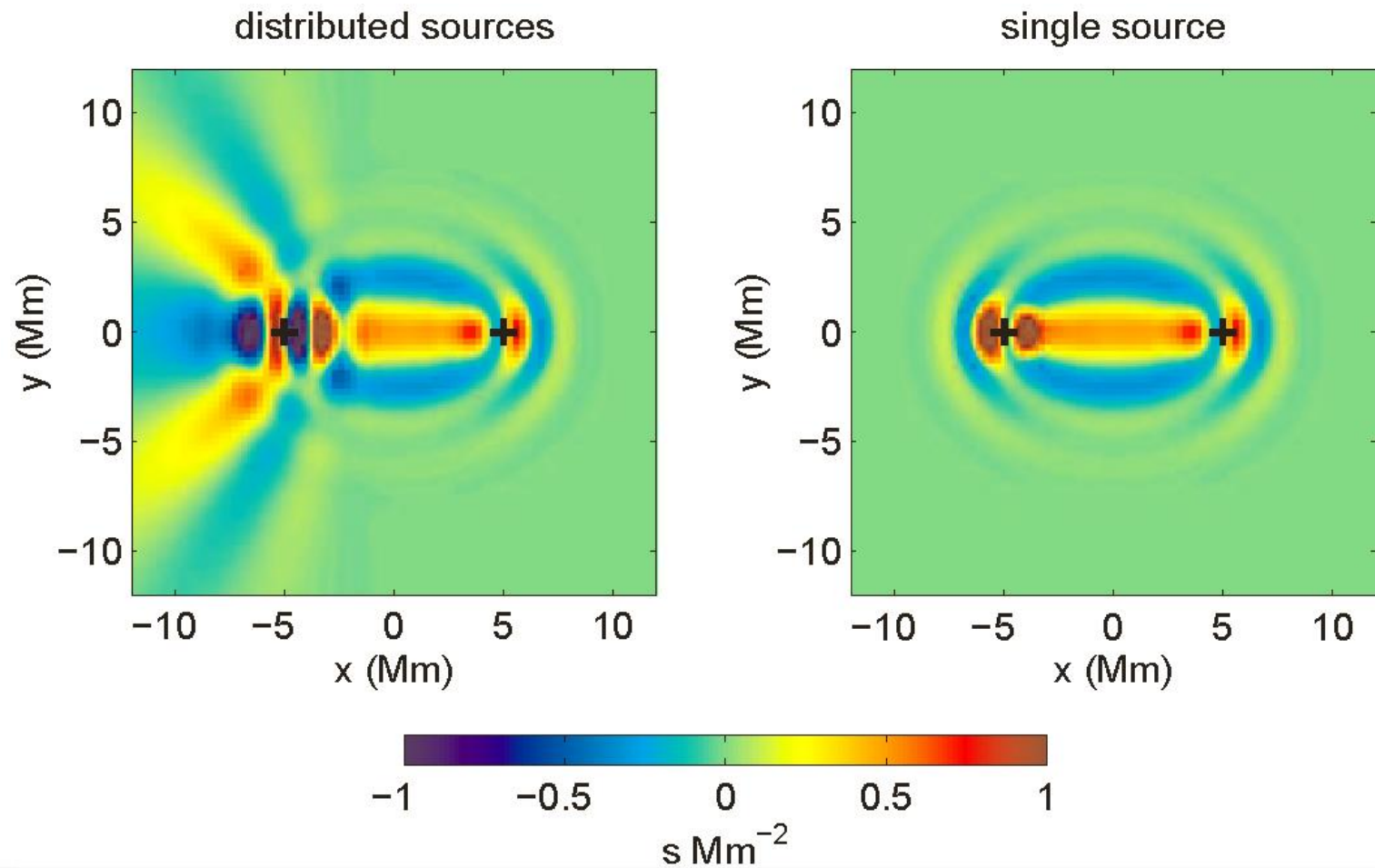
$$\text{cov}(X, Y) = \text{E}[(X - \mu_X)(Y - \mu_Y)'],$$

- Για συνεχείς συναρτήσεις $f(x)$ και $g(x)$ η εγκάρσια-συνδιακύμανση ορίζεται ως

$$(f \star g)(x) \stackrel{\text{def}}{=} \int f^*(t)g(x+t) dt$$



Single-source Born approximation travel time kernel. The left panel is a cut in the plane of the ray path; the right panel is a cut in the plane that is perpendicular to the ray path at the lower turning point. The color scale shows the sensitivity of the travel time to a local change in the sound speed. The solid black line, left panel, shows the ray path. From Birch and Kosovichev (2000).

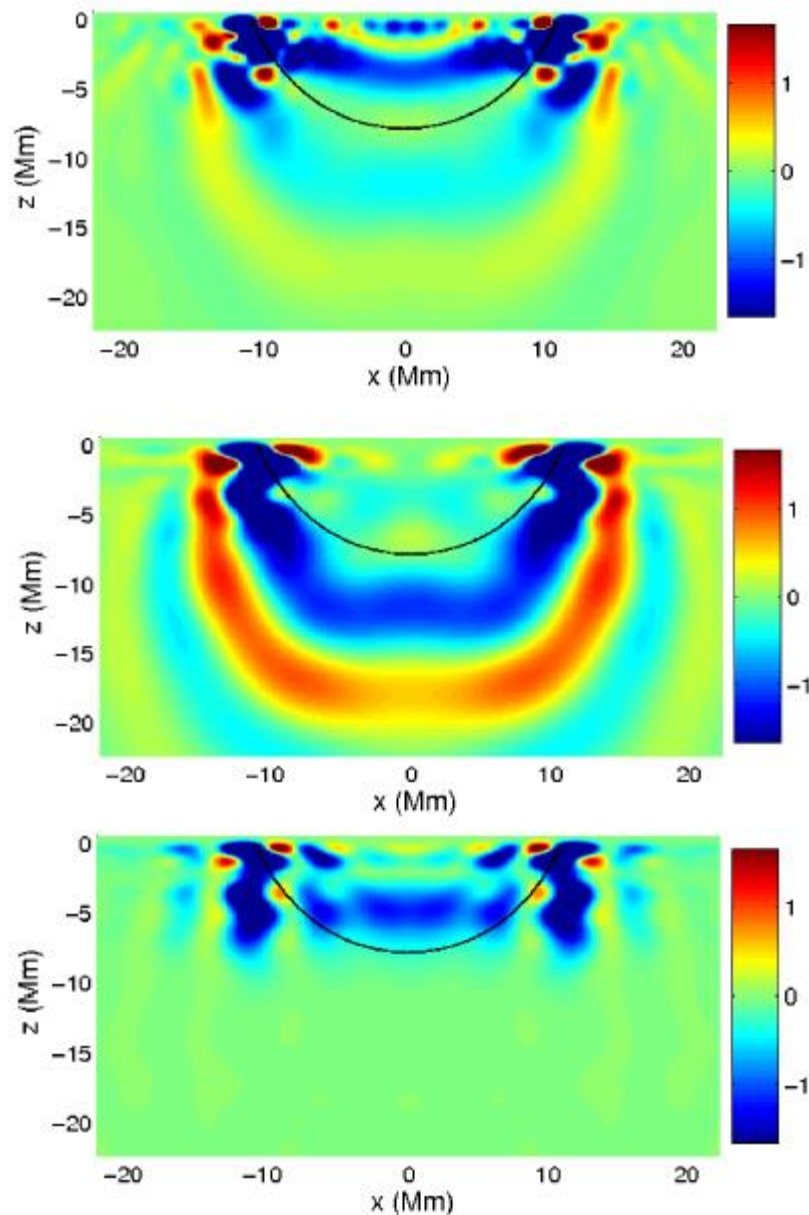


Comparison of the distributed stochastic source model (left panel) and the single-source model (right panel) for f-mode travel time kernels for wave damping perturbations. The observation locations are shown as black plus signs. The kernels are for the one-way travel times (from left to right). From Gizon and Birch (2002).

Slices through travel time kernels for the effect of sound-speed perturbations on mean travel times.

Top panel: no filters other a filter to remove the f mode; middle panel: also includes an approximate model of the MDI full-disk MTF;

bottom panel: also includes a narrow phase speed filter in addition to the MTF. In all of the panels the kernels are shown in the plane of the ray path, which is shown by the black line. From Birch et al. (2004).



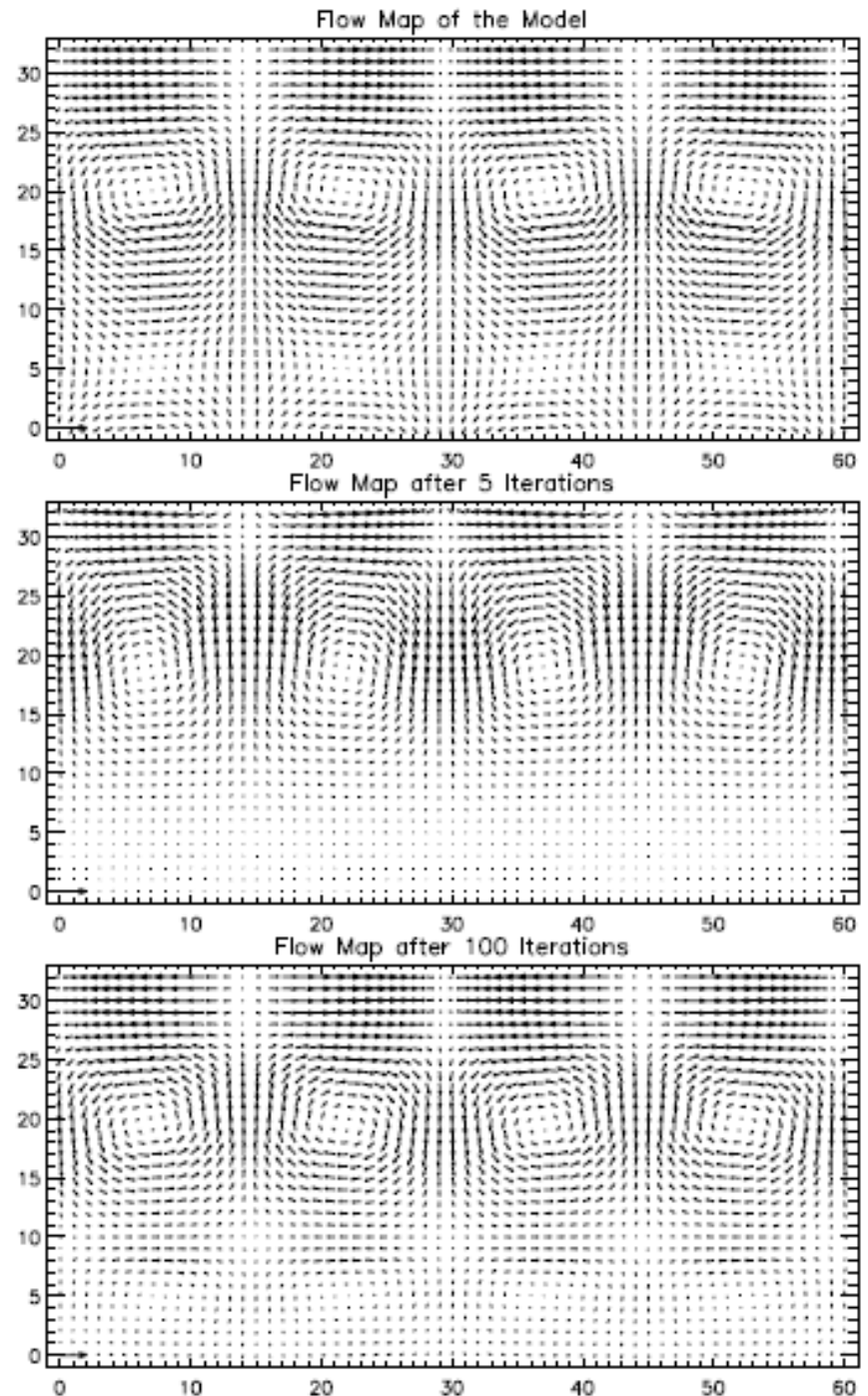
Tests of an RLS inversion for supergranulation-like flows.

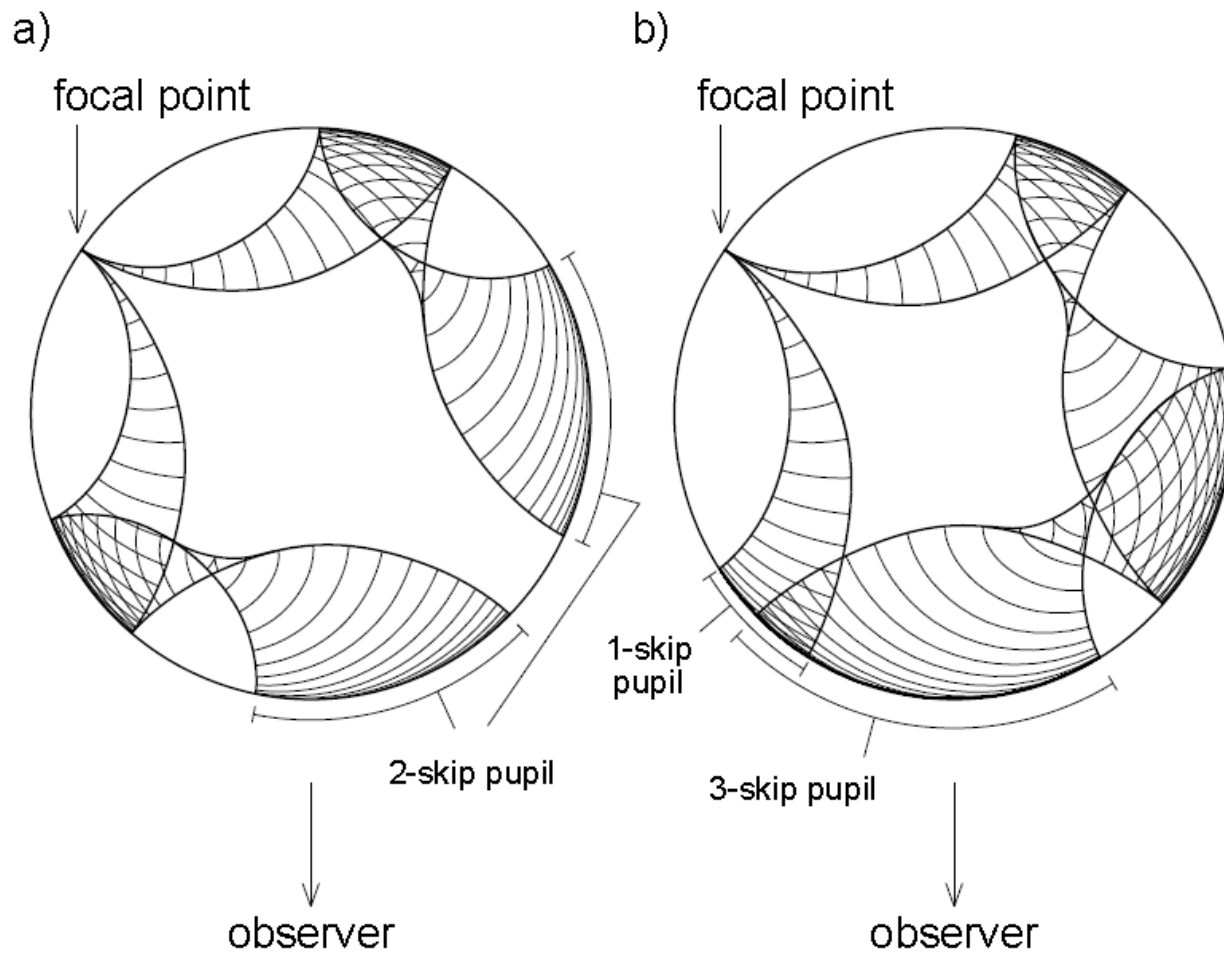
Top panel: flow field in the model;

middle panel: the inversion result after five iterations of LSQR;

bottom panel: inversion result after one hundred inversions of LSQR.

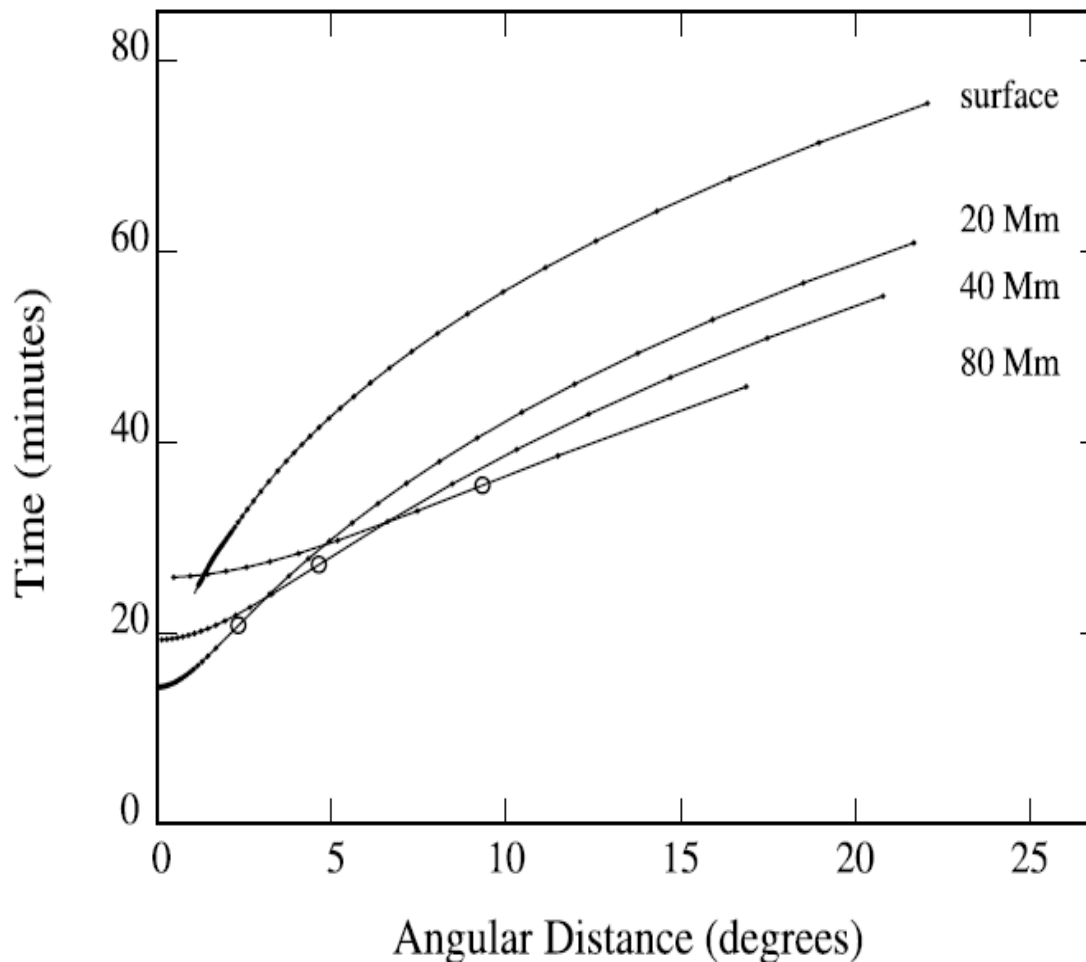
In practice one hundred iterations would greatly magnify any noise in the data.
From Zhao and Kosovichev (2003a).





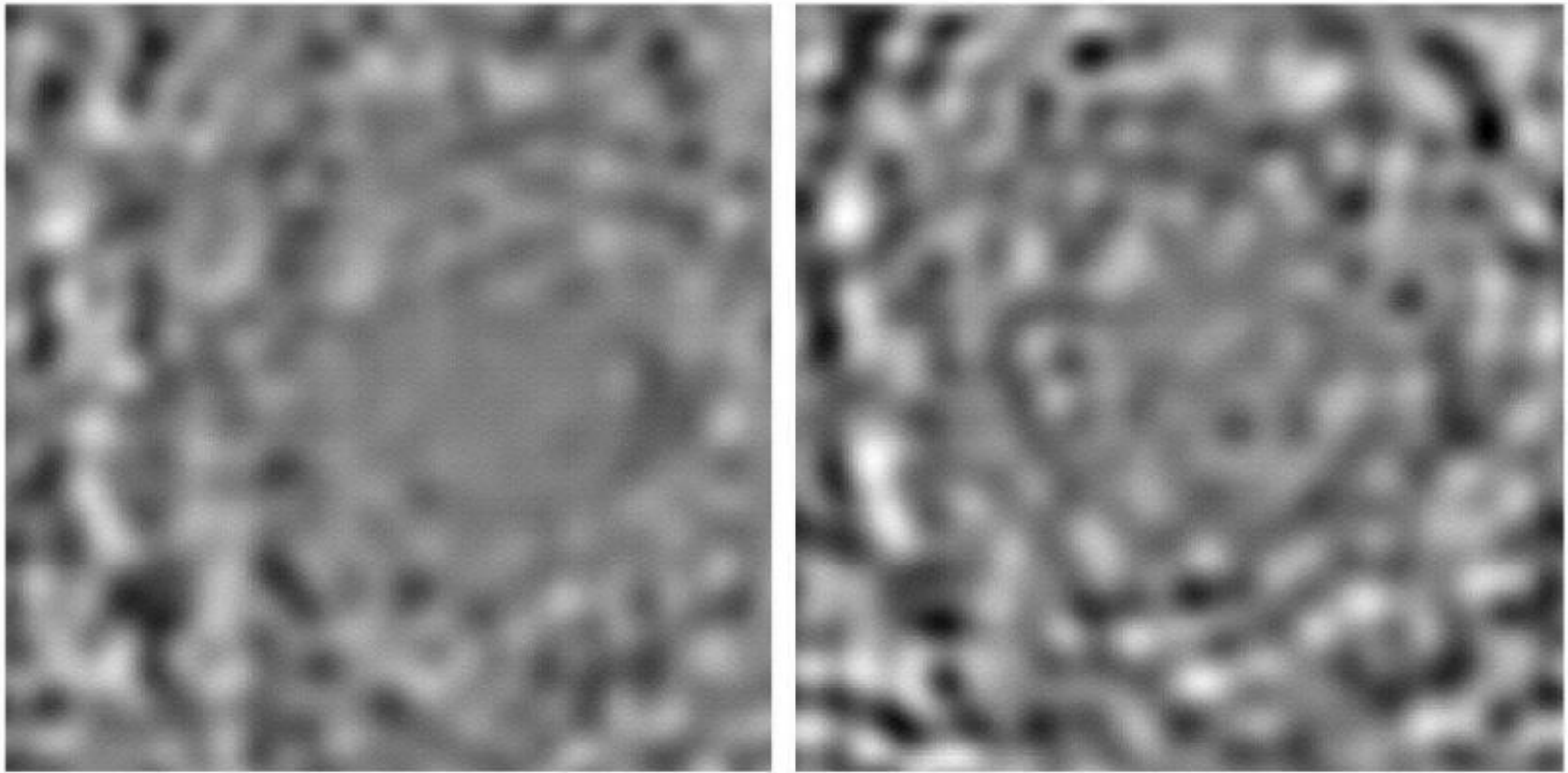
Geometry for far-side imaging. (a) Two-skip correlation scheme. (b) One-skip/threeskip correlation. In far-side imaging the data on the visible disk are used to estimate the wavefield at focal points on the far-side of the Sun.

From Braun and Lindsey (2001).



Time-distance relations at various focal depths, computed from a standard solar model, based on ray theory, at 3 mHz. Each curve corresponds to different target depths, as indicated.

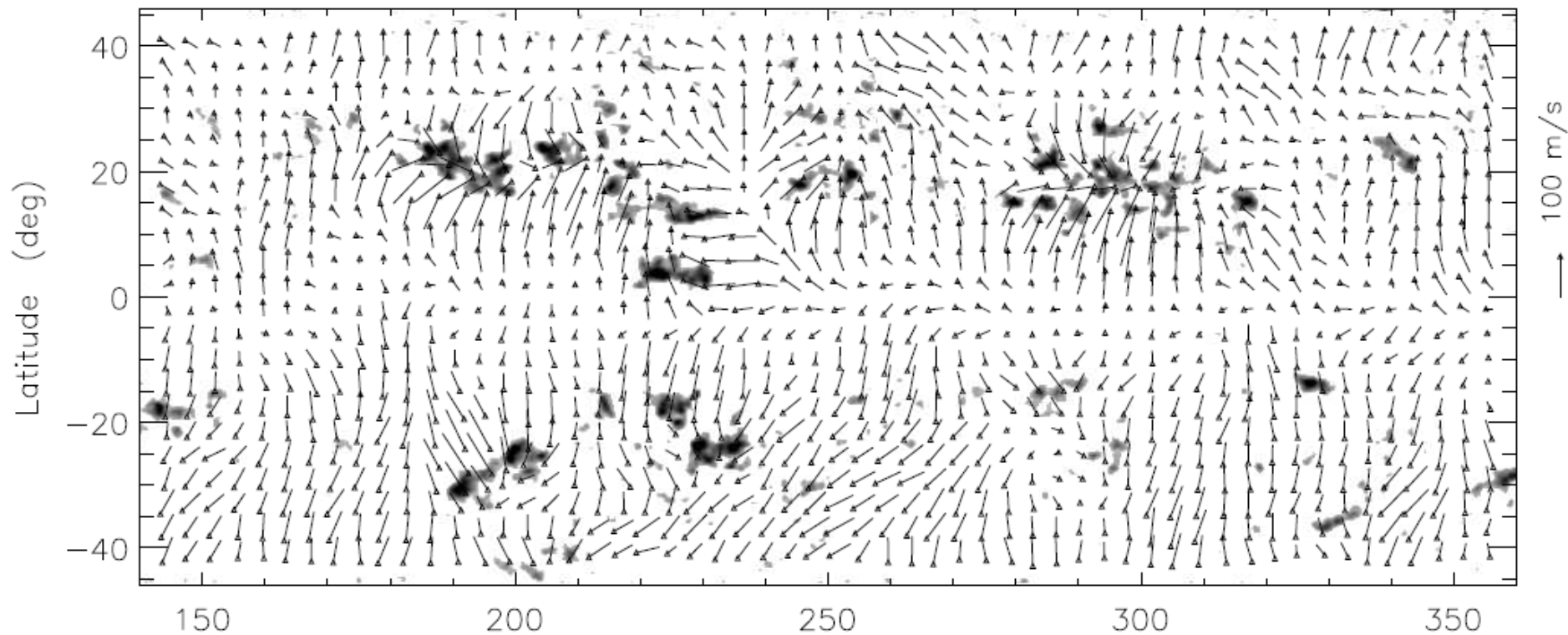
For each curve, the dots correspond to modes whose l values are multiples of 10, starting with $l = 80$ at the right end of each curve. The highest- l mode which can reach the target depth is marked by an open circle on each curve. The l value decreases in either direction away from the open circle along the curve. From Chou et al. (1999).



Line-of-sight velocity maps showing **supergranular-scale flow**, based on SOHO/MDI high spatial resolution Dopplergrams.

Left panel: Line-of-sight projection of near-surface flows inferred from direct modeling of seismic data.

Right panel: Velocity map obtained by **averaging the 16 hr** sequence of Dopplergrams used in the seismic analysis. From Woodard (2002).

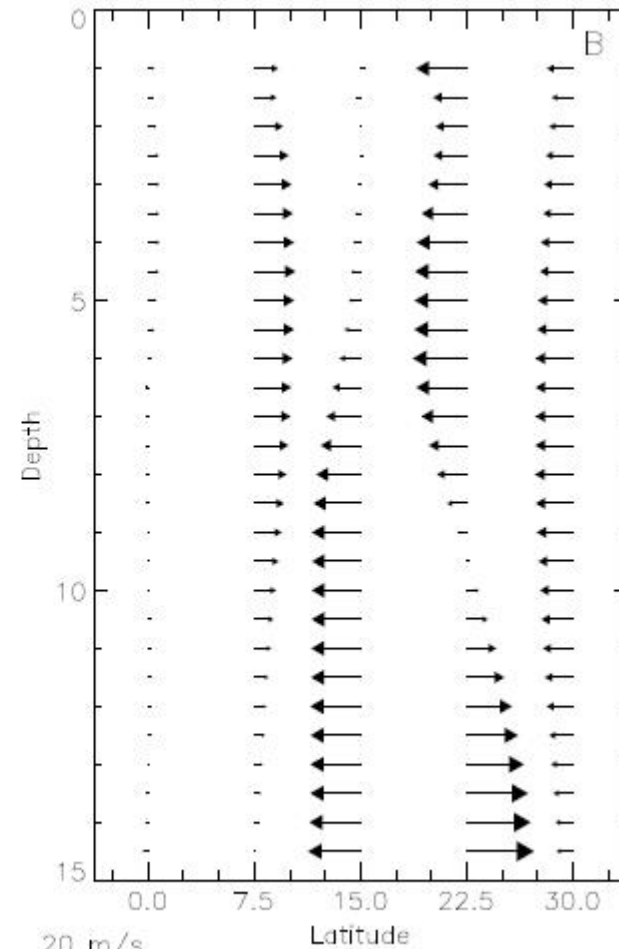
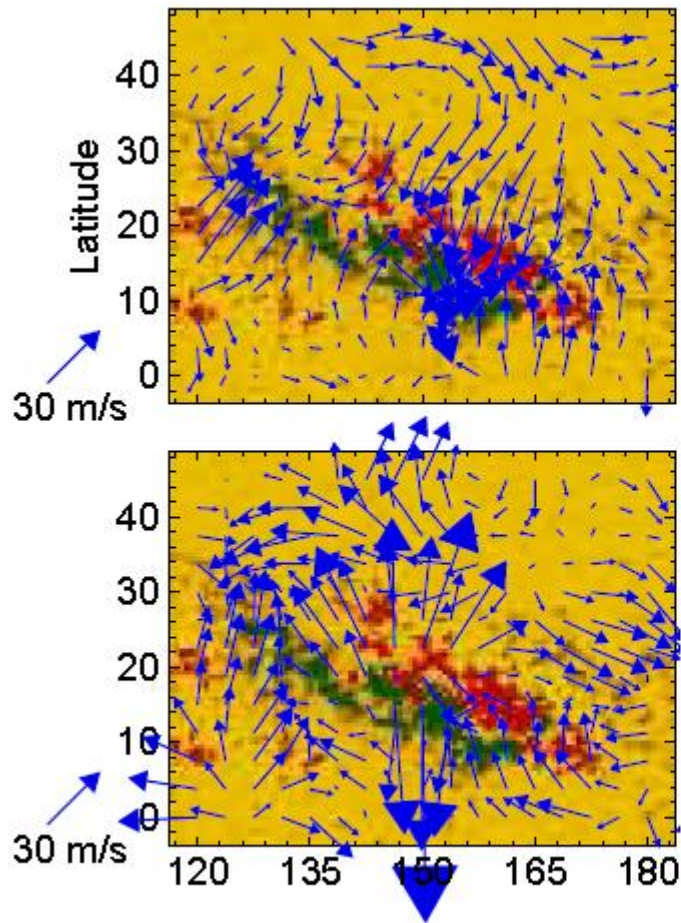


Map of near-surface horizontal flows obtained for Carrington rotation 1949 using f-mode time-distance helioseismology. A smooth rotation profile has been subtracted.

The dark shades are shorter travel time anomalies that correspond to regions of enhanced magnetic activity.

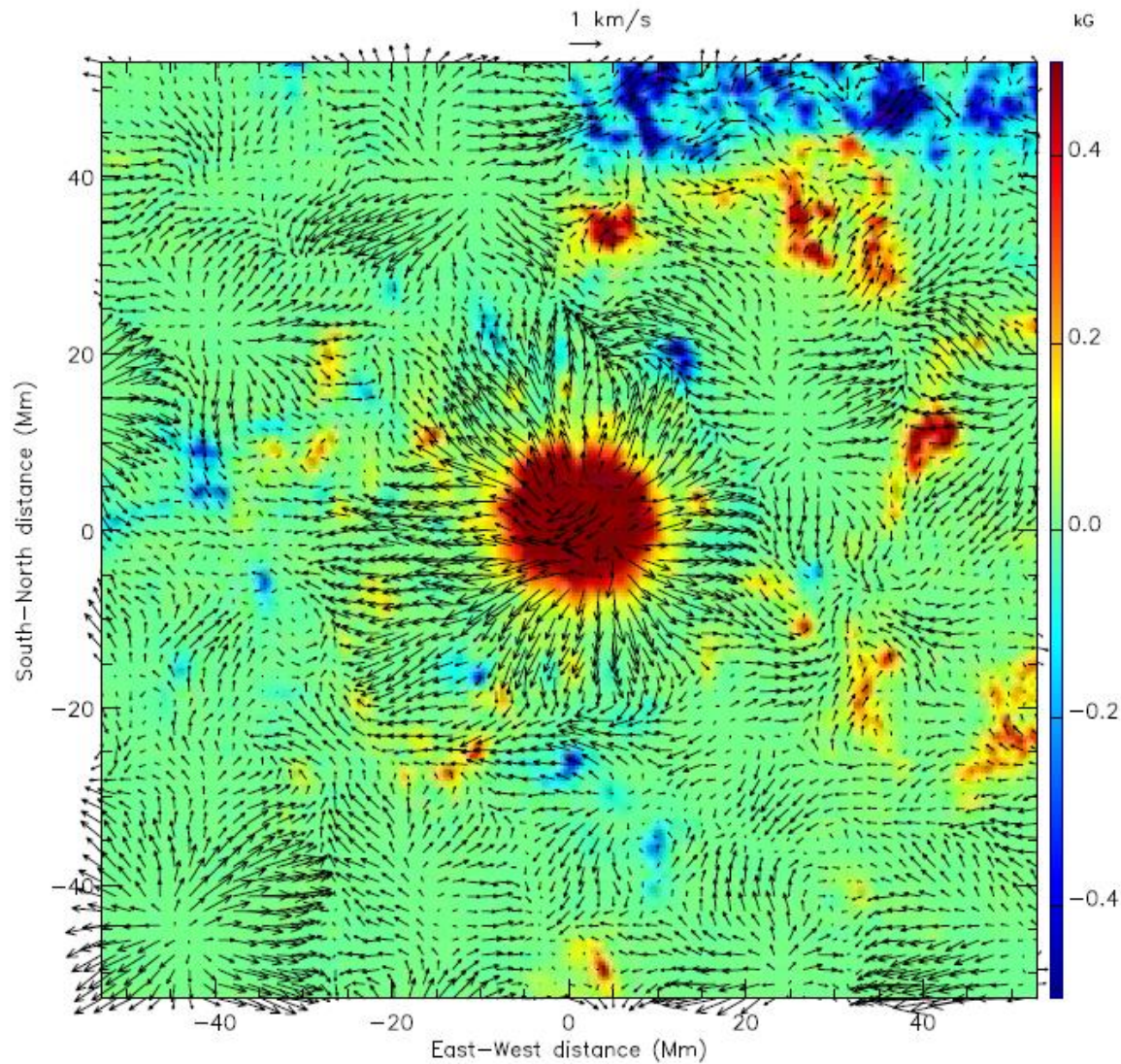
Local flows converge toward complexes of activity with an amplitude of 50 m s^{-1} . Notice also the poleward meridional flow.

From Gizon et al. (2001).

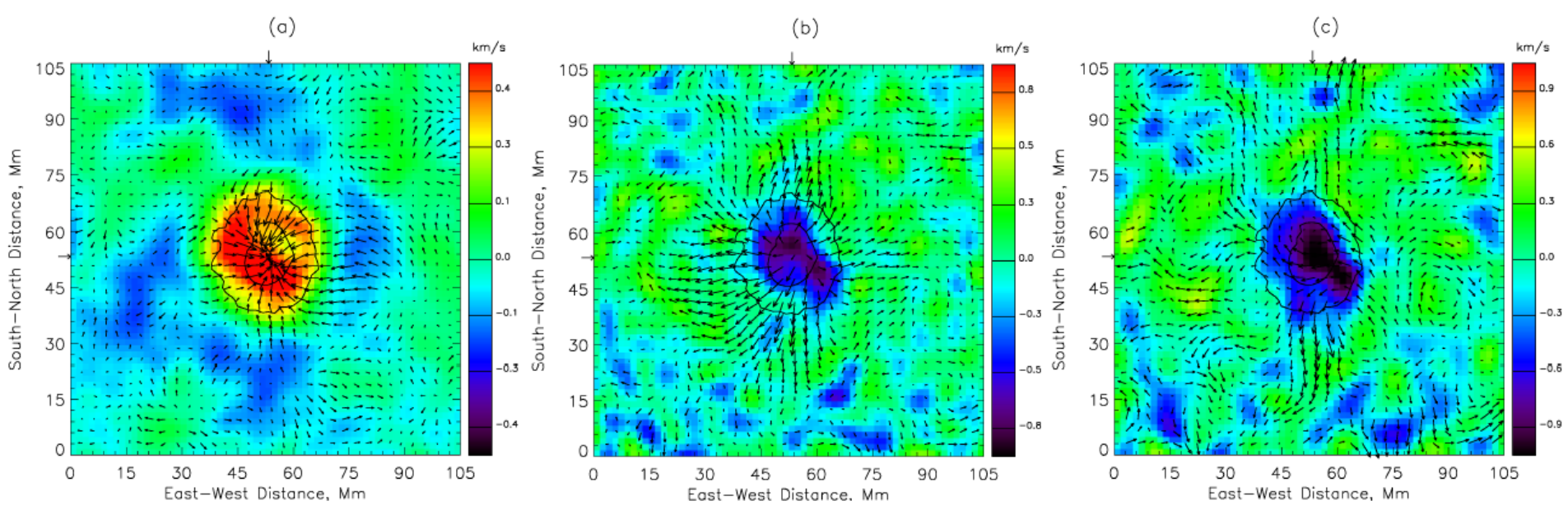


OLA inversion of horizontal flows around active region NOAA9433 on 23 April 2001 obtained using ring-diagram analysis. The depths shown are 7 Mm (upper panel) and 14 Mm (lower panel). The green and red shades are for the two polarities of the magnetic field. The horizontal and vertical axes give the longitude and the latitude in heliospheric degrees.

Right panel: Horizontal flows around NOAA9433 as a function of depth and latitude, averaged over the longitude range (142.5, 157.5) and the time period 23–27 April 2001. The transition between inflow and outflow occurs near 10 Mm depth. Haber et al. (2004).



Horizontal flows around a sunspot on 1998 December 6, obtained with f-mode time-distance helioseismology. Overplotted is the line-of-sight magnetic field (MDI high resolution) truncated at ± 0.5 kG. The moat flow beyond the penumbra (red) is clearly visible. Adapted from Gizon et al. (2000).

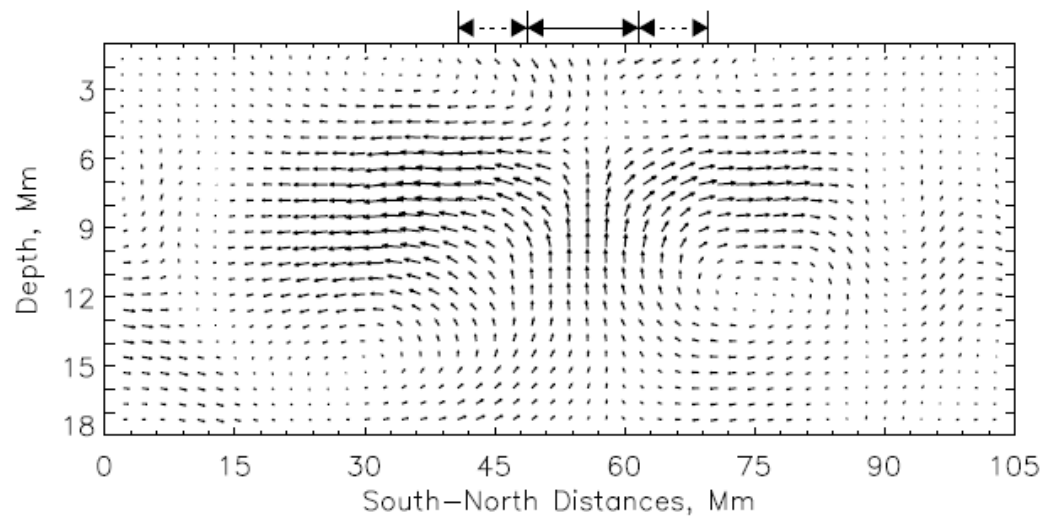
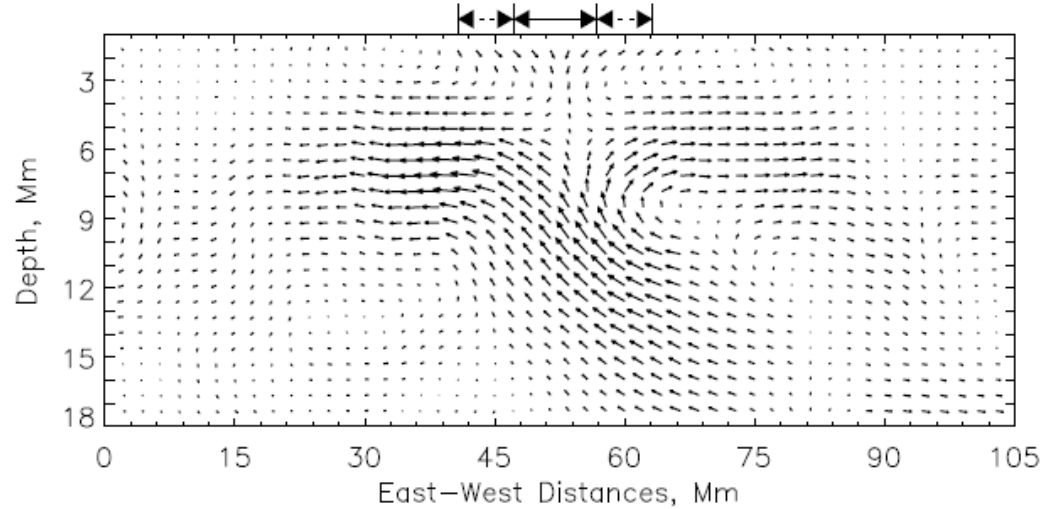


Flow maps around a sunspot at depths of (a) 0 – 3 Mm, (b) 6 – 9 Mm, and (c) 9 – 12 Mm, inferred using p-mode time-distance helioseismology.

Arrows show the magnitude and direction of horizontal flows. The color background shows vertical flows (positive values for downward).

The contours at the center correspond to the umbral and penumbral boundaries.

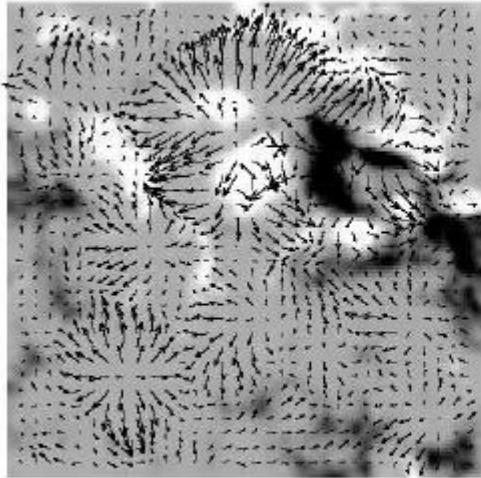
The longest arrow represents 1 km s^{-1} for (a) and 1.6 km s^{-1} for (b) and (c). From Zhao et al. (2001).



Vertical cuts through the sunspot

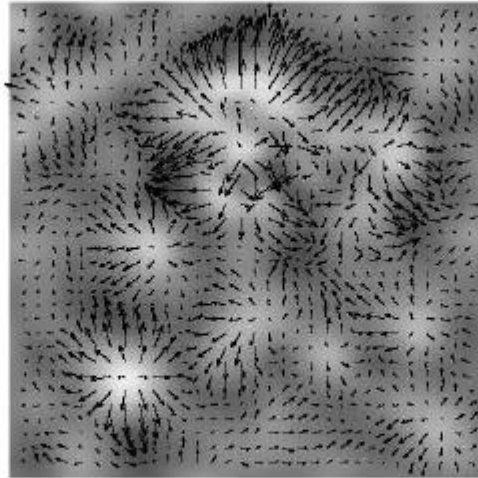
Upper panel: Cut in the eastwest direction. Lower panel: Cut in the north-south direction. The location of the umbra and the penumbra is indicated at the top of each frame. The longest arrow corresponds to a velocity of 1.4 km s^{-1} . From Zhao et al. (2001).

focus = 3 Mm

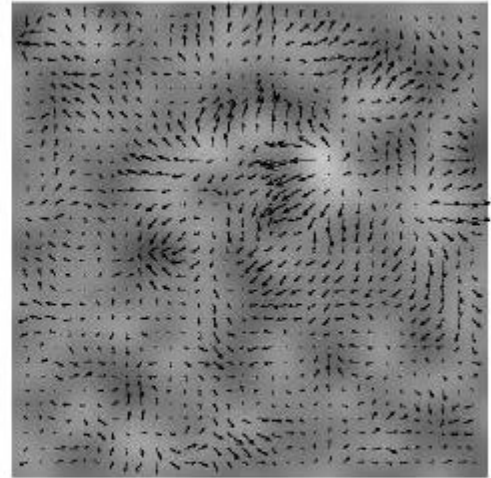


↗ 500 m/s

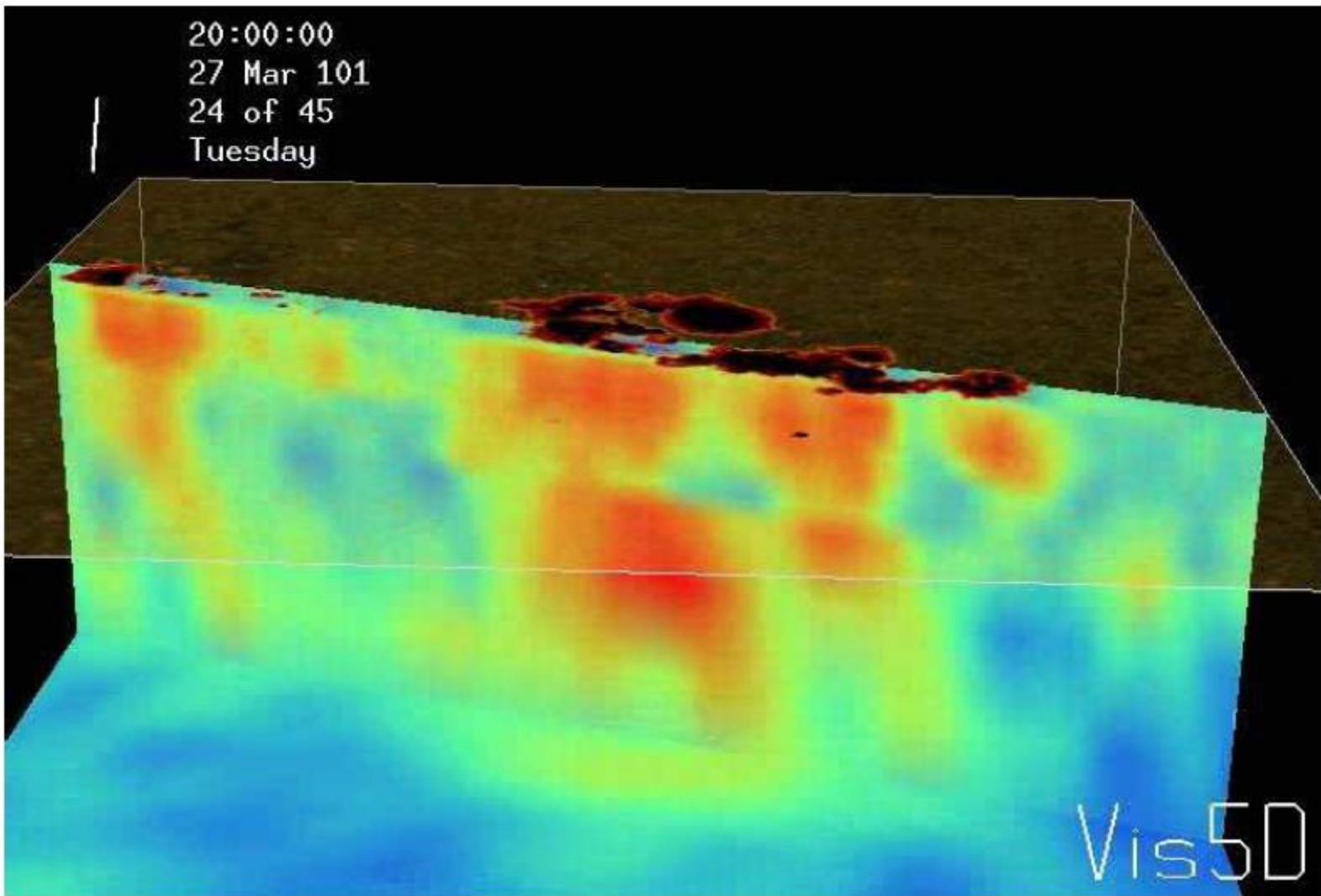
focus = 3 Mm



focus = 14 Mm



100 Mm |—————|



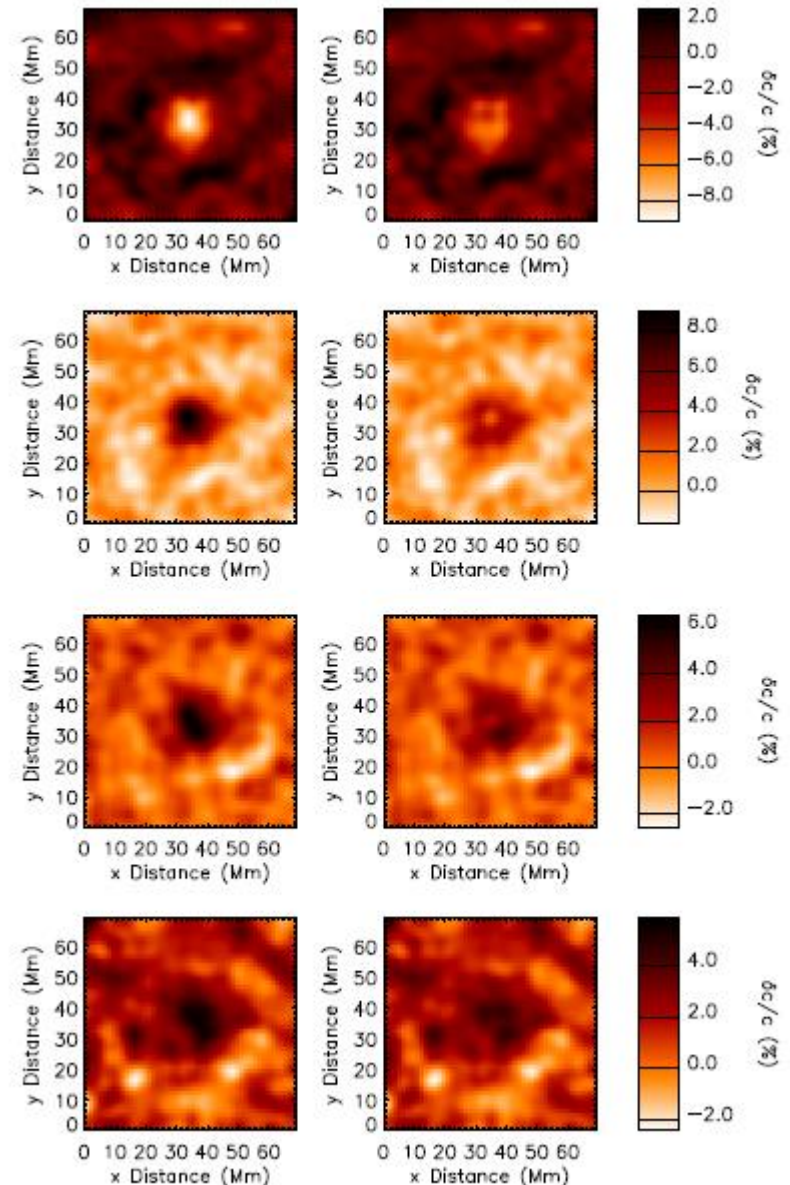
Wave speed perturbation associated with the active region AR9393. The positive values are shown in red and the negative ones in blue. The movie shows the evolution of the wave speed perturbation from March 25 until April 1, 2001. Courtesy of A.G. Kosovichev. (To watch the movie, please go to the online version of this review article at <http://www.livingreviews.org/lrsp-2005-6>.)

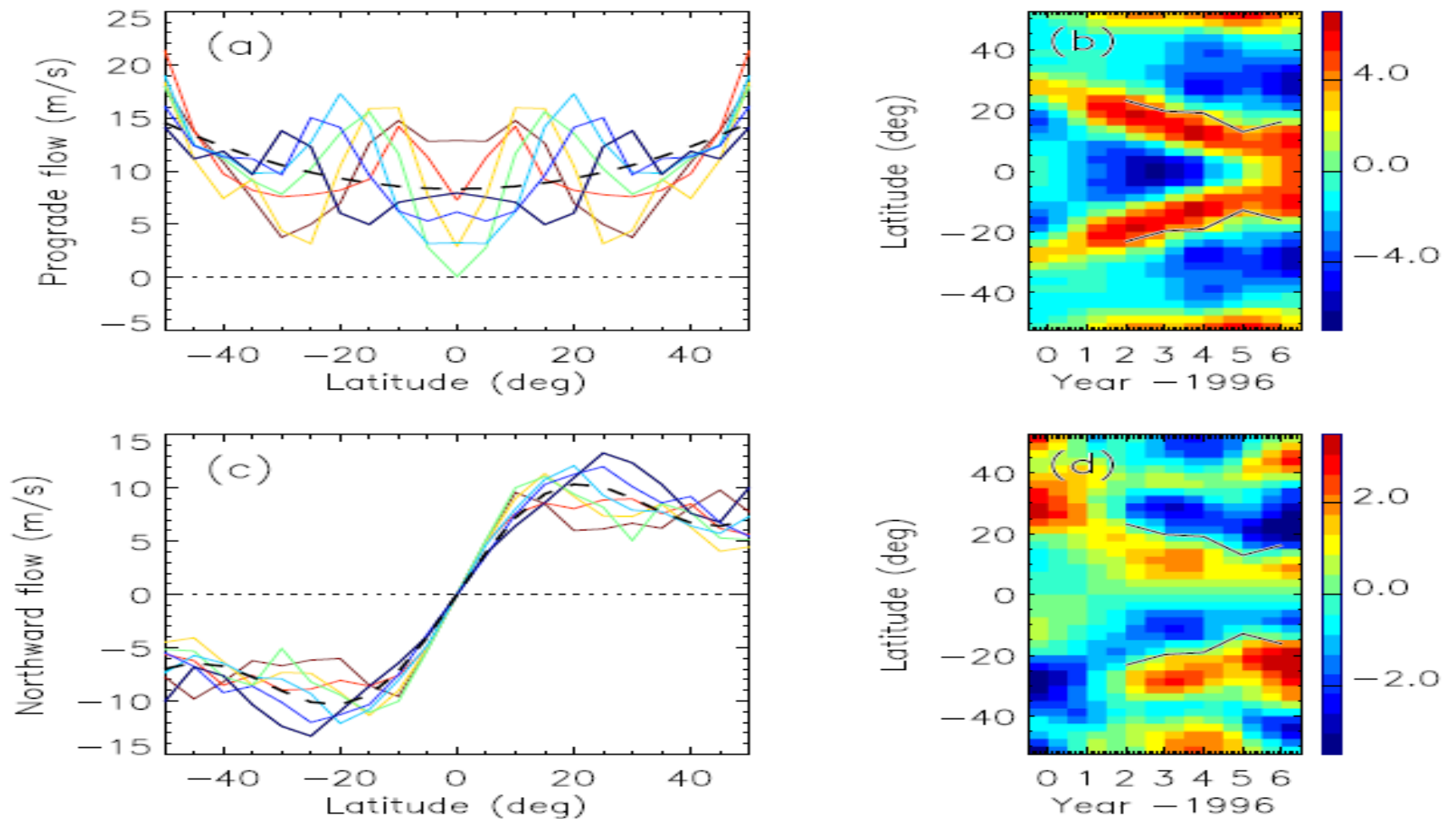
Horizontal slices through the inferred sound-speed perturbations under a sunspot using GONG data.

From top to bottom the rows correspond to the depth ranges

- 1.7 – 2.3 Mm,
- 3.6 – 4.4 Mm,
- 6.2 – 7.3 Mm, and
- .5 – 9.8 Mm.

The inversion results for uncropped (left column) and cropped data (right column) are qualitatively similar. From Hughes et al. (2005).





(a) Advective flow U_x versus λ at $kR = 115$. Each curve corresponds to a different year (from blue in 1996 to red in 2002). U_x is measured with respect to the reference $R_{\text{mag}} \cos \lambda$ (small magnetic features). Only the north-south symmetric component is shown. (b) Residuals of U_x after subtraction of a smooth fit (dashed line in panel a). The scale bar has units of ms^{-1} . The black curve is an estimate of the mean latitude of activity. (c) Advective flow U_y versus λ at $kR = 115$. Only the north-south antisymmetric component is shown. (d) Residual meridional circulation with respect to the dashed line in panel (c). The scale bar has units of ms^{-1} .

Τέλος Ενότητας

Χρηματοδότηση

- Το παρόν εκπαιδευτικό υλικό έχει αναπτυχθεί στο πλαίσιο του εκπαιδευτικού έργου του διδάσκοντα.
- Το έργο «**Ανοικτά Ακαδημαϊκά Μαθήματα στο Πανεπιστήμιο Αθηνών**» έχει χρηματοδοτήσει μόνο την αναδιαμόρφωση του εκπαιδευτικού υλικού.
- Το έργο υλοποιείται στο πλαίσιο του Επιχειρησιακού Προγράμματος «Εκπαίδευση και Δια Βίου Μάθηση» και συγχρηματοδοτείται από την Ευρωπαϊκή Ένωση (Ευρωπαϊκό Κοινωνικό Ταμείο) και από εθνικούς πόρους.



Σημειώματα

Σημείωμα Ιστορικού Εκδόσεων Έργου

Το παρόν έργο αποτελεί την έκδοση 1.0.0.



Σημείωμα Αναφοράς

Copyright Εθνικών και Καποδιστριακών Πανεπιστημίων Αθηνών, Ξενοφών Δ. Μουσάς 2015.«Ηλιακή Φυσική. Εσωτερικό του ηλίου». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:

<http://opencourses.uoa.gr/courses/PHYS2/>



Σημείωμα Αδειοδότησης

Το παρόν υλικό διατίθεται με τους όρους της άδειας χρήσης Creative Commons Αναφορά, Μη Εμπορική Χρήση Παρόμοια Διανομή 4.0 [1] ή μεταγενέστερη, Διεθνής Έκδοση. Εξαιρούνται τα αυτοτελή έργα τρίτων π.χ. φωτογραφίες, διαγράμματα κ.λ.π., τα οποία εμπεριέχονται σε αυτό και τα οποία αναφέρονται μαζί με τους όρους χρήσης τους στο «Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων».



[1] <http://creativecommons.org/licenses/by-nc-sa/4.0/>

Ως **Μη Εμπορική** ορίζεται η χρήση:

- που δεν περιλαμβάνει άμεσο ή έμμεσο οικονομικό όφελος από την χρήση του έργου, για το διανομέα του έργου και αδειοδόχο
- που δεν περιλαμβάνει οικονομική συναλλαγή ως προϋπόθεση για τη χρήση ή πρόσβαση στο έργο
- που δεν προσπορίζει στο διανομέα του έργου και αδειοδόχο έμμεσο οικονομικό όφελος (π.χ. διαφημίσεις) από την προβολή του έργου σε διαδικτυακό τόπο

Ο δικαιούχος μπορεί να παρέχει στον αδειοδόχο ξεχωριστή άδεια να χρησιμοποιεί το έργο για εμπορική χρήση, εφόσον αυτό του ζητηθεί.



Διατήρηση Σημειωμάτων

Οποιαδήποτε αναπαραγωγή ή διασκευή του υλικού θα πρέπει να συμπεριλαμβάνει:

- το Σημείωμα Αναφοράς
- το Σημείωμα Αδειοδότησης
- τη δήλωση Διατήρησης Σημειωμάτων
- το Σημείωμα Χρήσης Έργων Τρίτων (εφόσον υπάρχει)

μαζί με τους συνοδευόμενους υπερσυνδέσμους.

