



ΕΛΛΗΝΙΚΗ ΔΗΜΟΚΡΑΤΙΑ  
Εθνικόν και Καποδιστριακόν  
Πανεπιστήμιον Αθηνών

# Φυσική Διαστήματος

Ενότητα 1: Ηλιακός Άνεμος

Ξενοφών Δ. Μουσάς  
Σχολή Θετικών Επιστημών  
Τμήμα Φυσικής

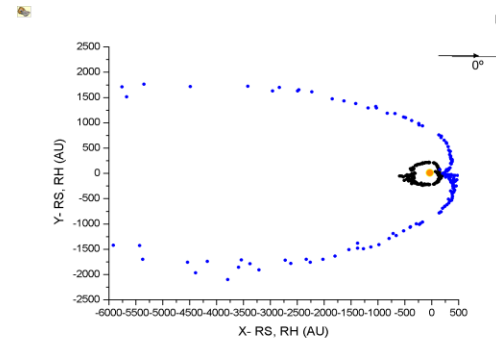
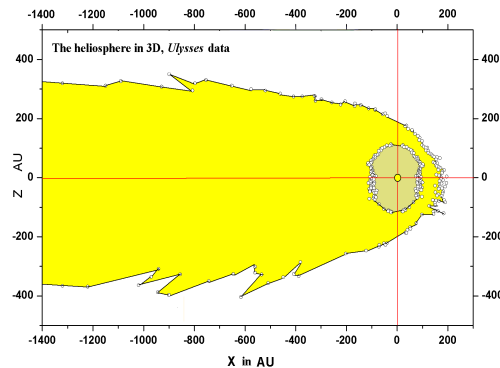


# Η Ηλιόσφαιρα

Ξενοφών Διον. Μουσάς, Γιώργος Έξαρχος, Βαγγέλης Παούρης, Βαλάντης Κάτσικας, Αγγελική Νικολοπούλου

Εργαστήριο Αστροφυσικής  
Πανεπιστήμιο Αθηνών

xmoussas@phys.uoa.gr



2014

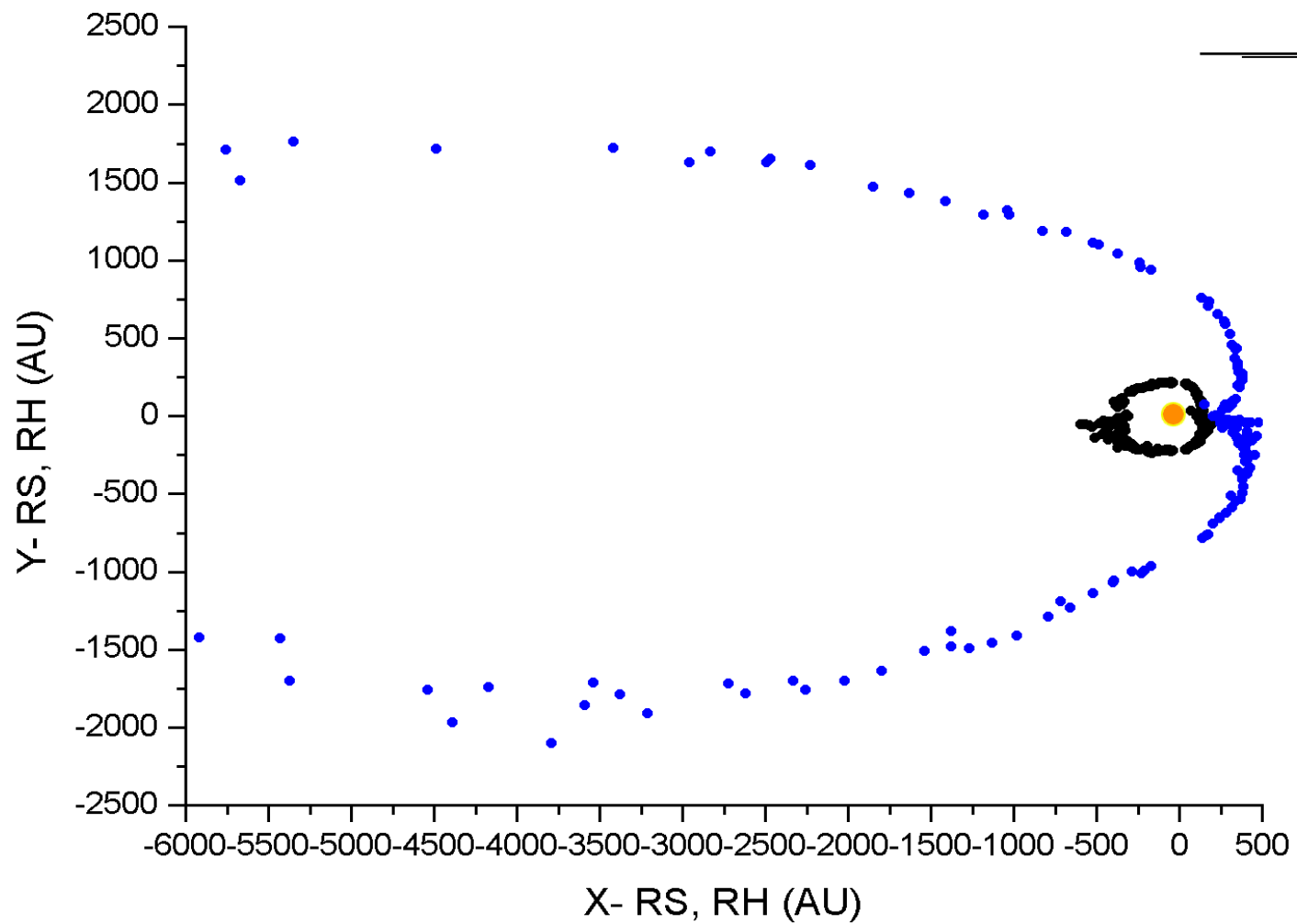
# Ευχαριστίες

Ιδιαίτερες Ευχαριστίες οφείλονται στη NASA, ESA,

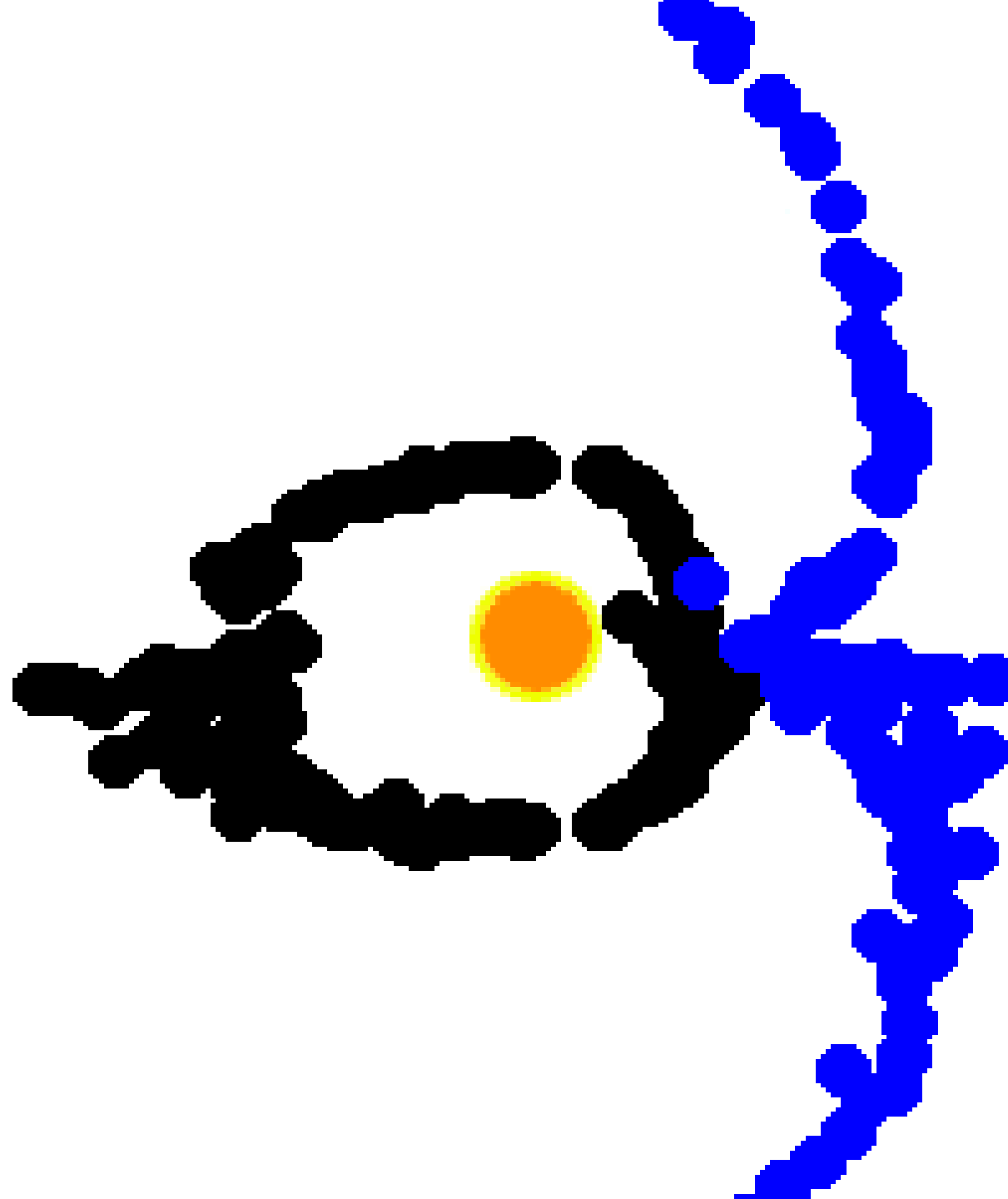
στους Ερευνητές και λοιπούς συντελεστές των επιγείων τηλεσκοπίων και διαστημικών πειραμάτων, στην κυρία Παν. Πρένα Παπαδήμα, στους κυρίους Γιώργο Έξαρχο, Βαλάντη Κάτσια, Βαγγέλη Παύρη, Πάνο Παπασπύρου, κυρία Αγγελική Νικολοπούλου, για υπολογισμούς, τις ενδιαφέρουσες συζητήσεις ή συμβουλές, σε όλους αυτούς που μας έδωσαν μετρήσεις, το NSSDC, στην Wikipedia για πολλές πολύτιμες εικόνες που προσφέρονται χωρίς δικαιώματα χρήσης και συνεπώς είναι πολύτιμες σε κάθε δάσκαλο.



B







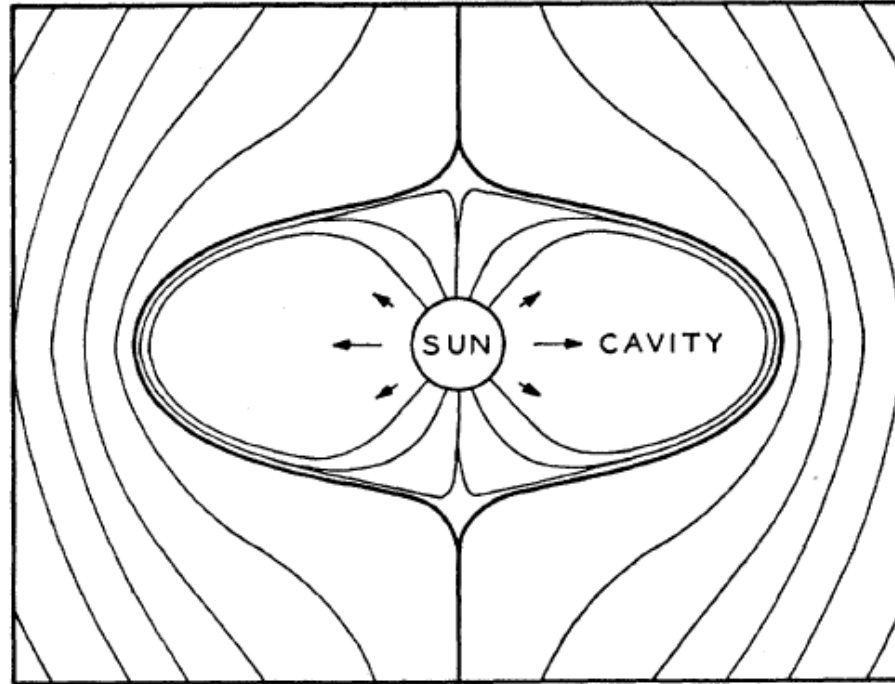
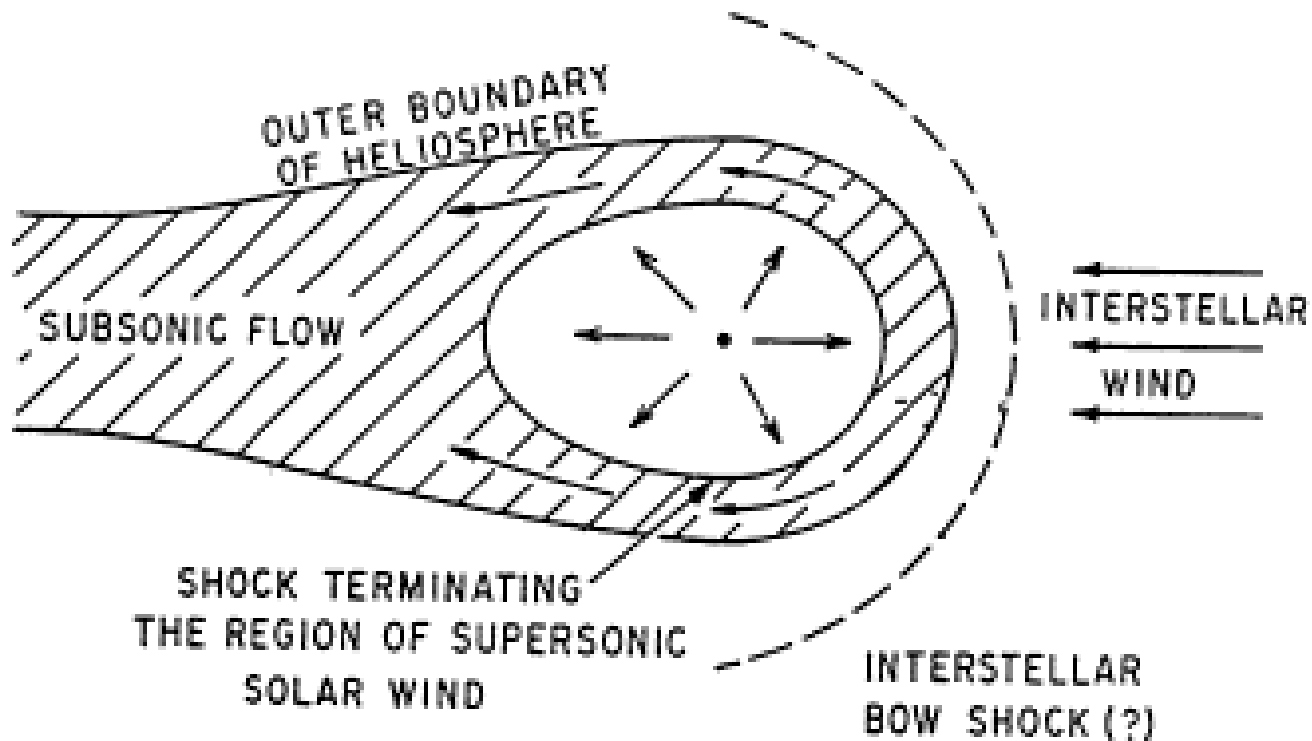


FIG. 1. A possible disposition of a solar magnetic field inside the cavity in the galactic field. The arrows represent the solar corpuscular radiation.

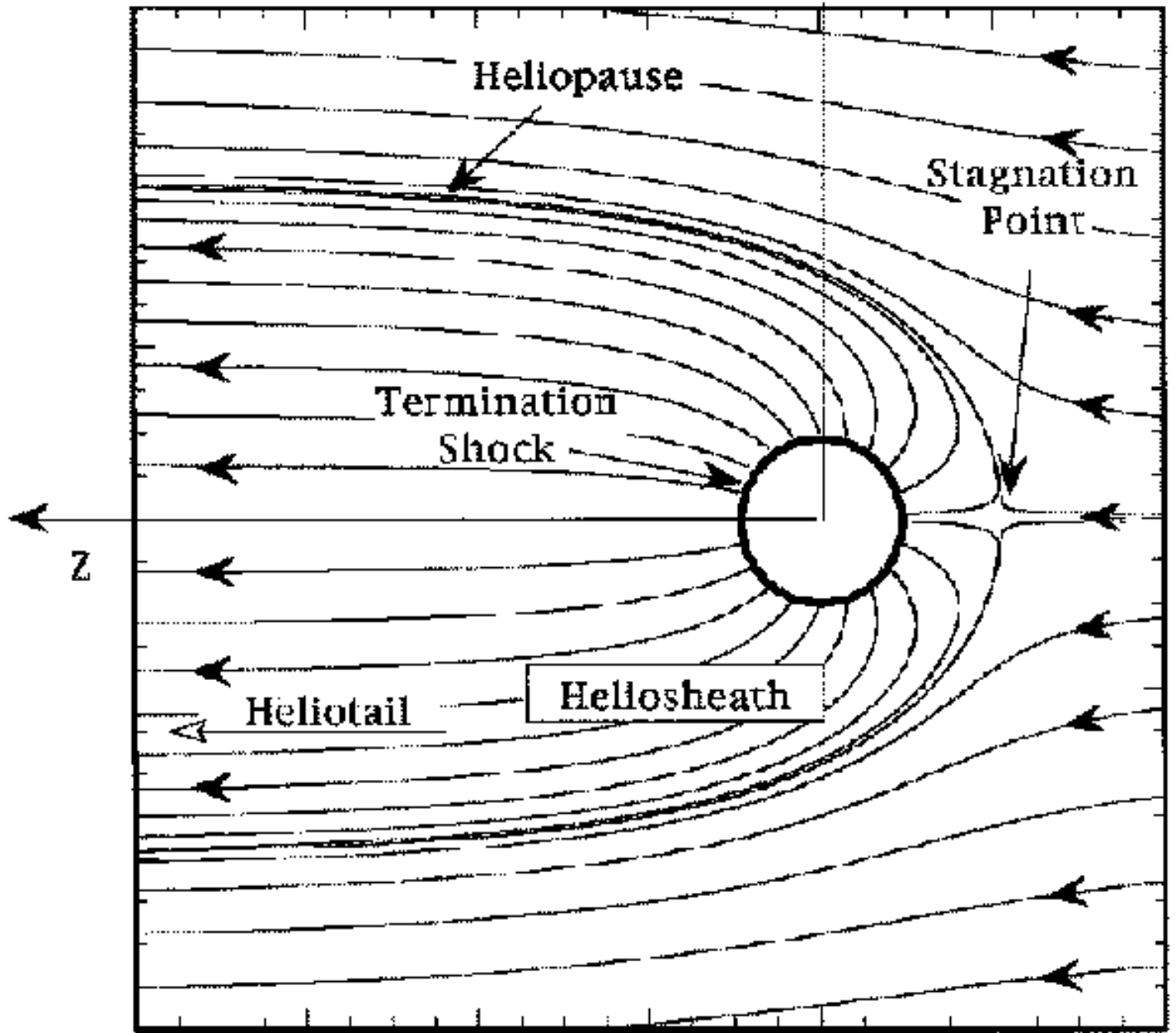
The first suggestions concerning the existence and nature of the heliosphere were made in 1955 by Leverett Davis in connection with the origin and propagation of **cosmic rays**

Axford, W. I., The interaction of the solar wind with the interstellar medium, *Solar Wind*, NASA SP-308 (C. P. Sonett, P. J. Coleman, Jr., and J. M. Wilcox, eds.), pp 609-657, NASA, Washington D.C., 1972.

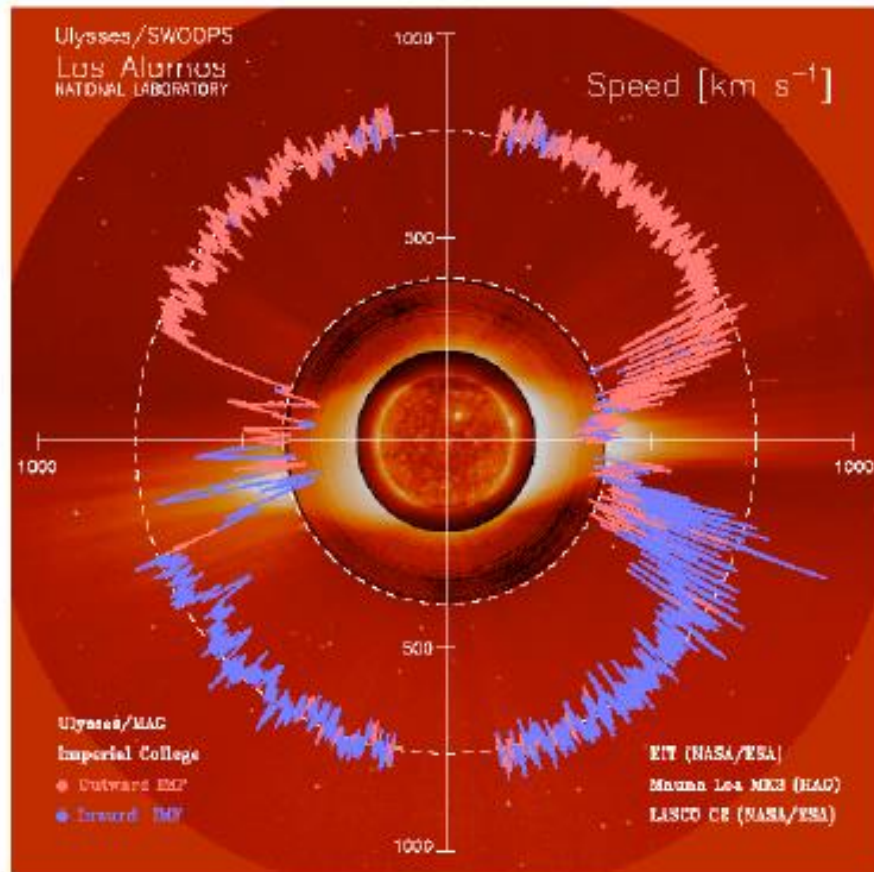


Outer boundary of heliosphere = "heliopause"  
 Region of subsonic flow = "heliosheath"

Figure 1. The configuration of the heliosphere shown schematically.



Orbit 1



Orbit 2

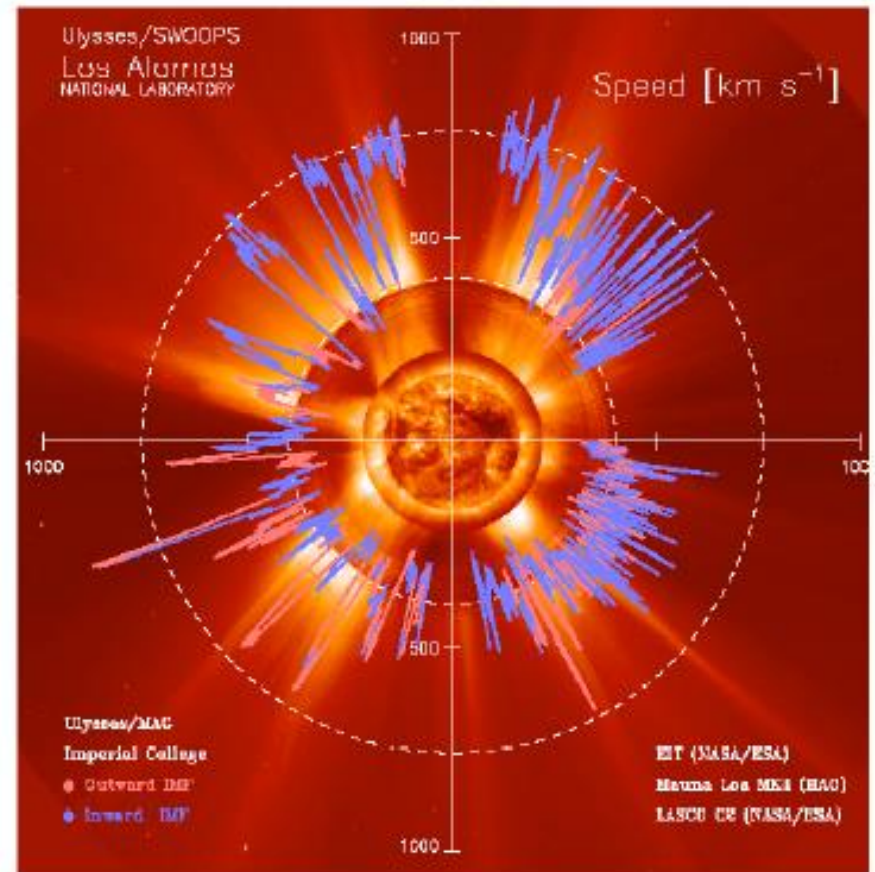


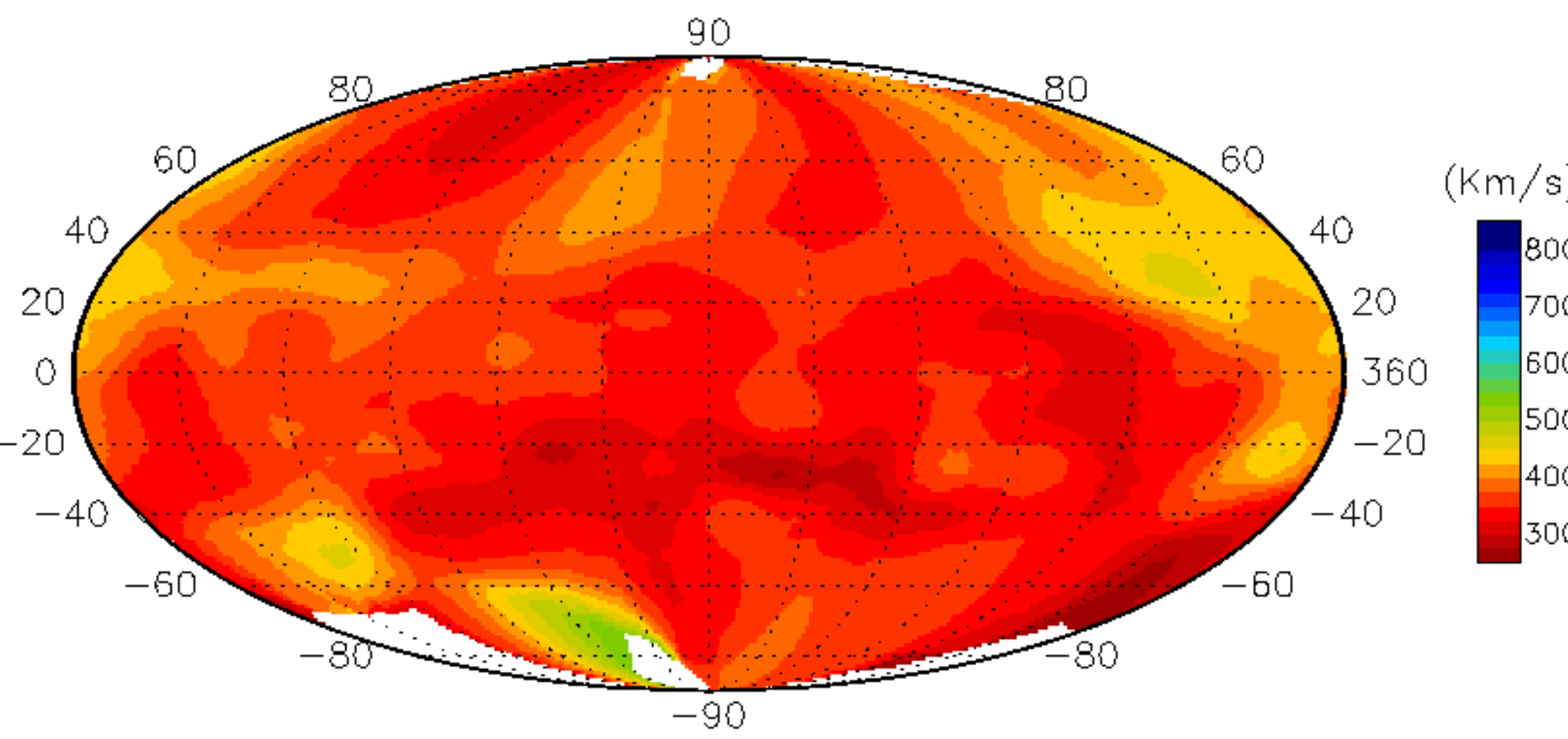
Figure 1.3. Dial plots of solar wind speed with co-temporal coronal images two years prior to solar minimum (Orbit 1) and at solar maximum (Orbit 2). Time runs clockwise from 3 o'clock, along with heliographic latitude. The solar wind speed scales are 500 km/s (1000 km/s) on the inner (outer) dashed circle. The 6.2 year orbits start in 1992 and 1998. The gaps at the north and south poles reflect the maximum Ulysses latitude of  $80.2^\circ$ . The final U-II data point is from December 2002.



# SOLAR WIND SPEED SYNOPTIC CHART FROM IPS MEASUREMENTS

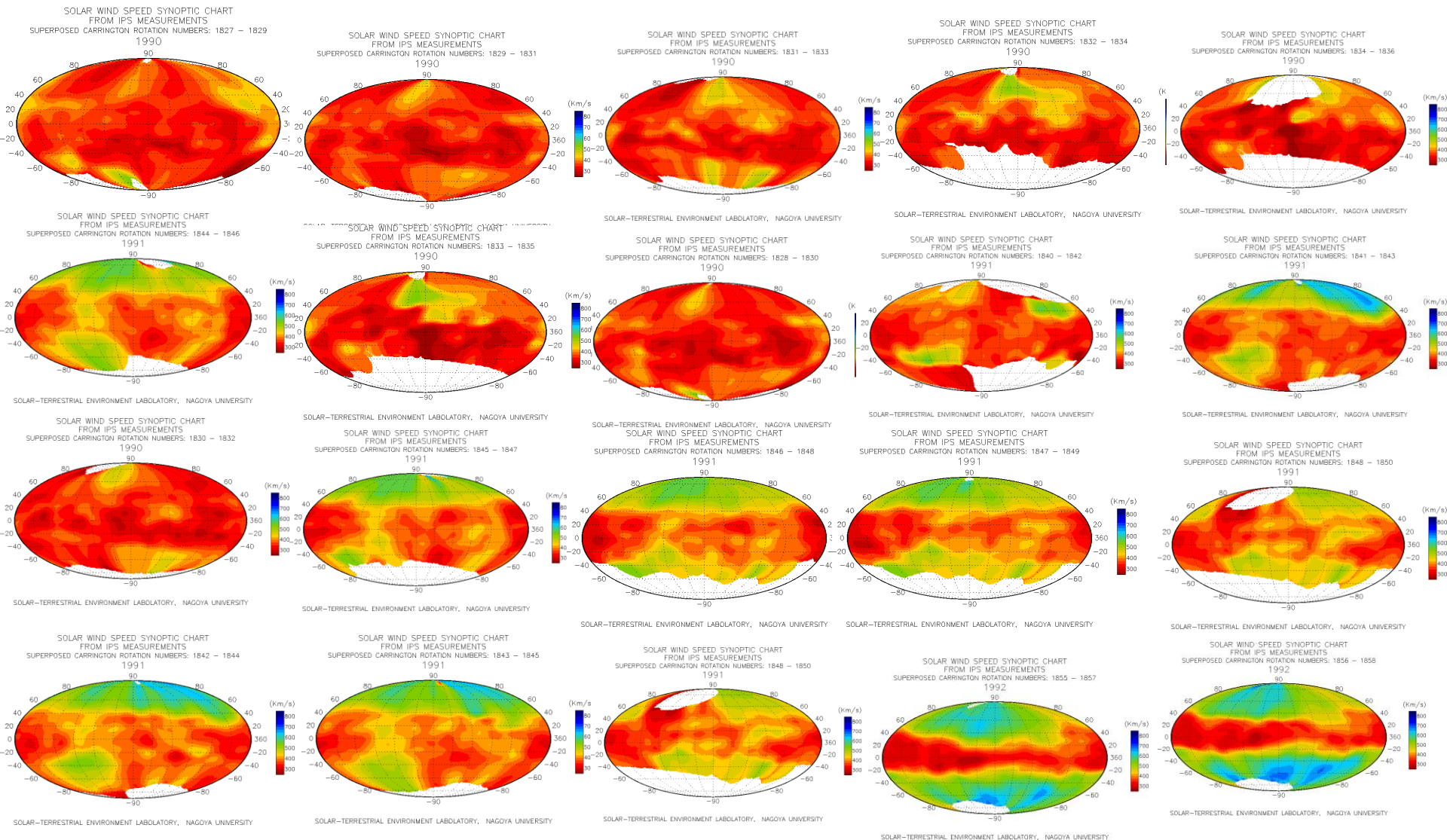
SUPERPOSED CARRINGTON ROTATION NUMBERS: 1827 - 1829

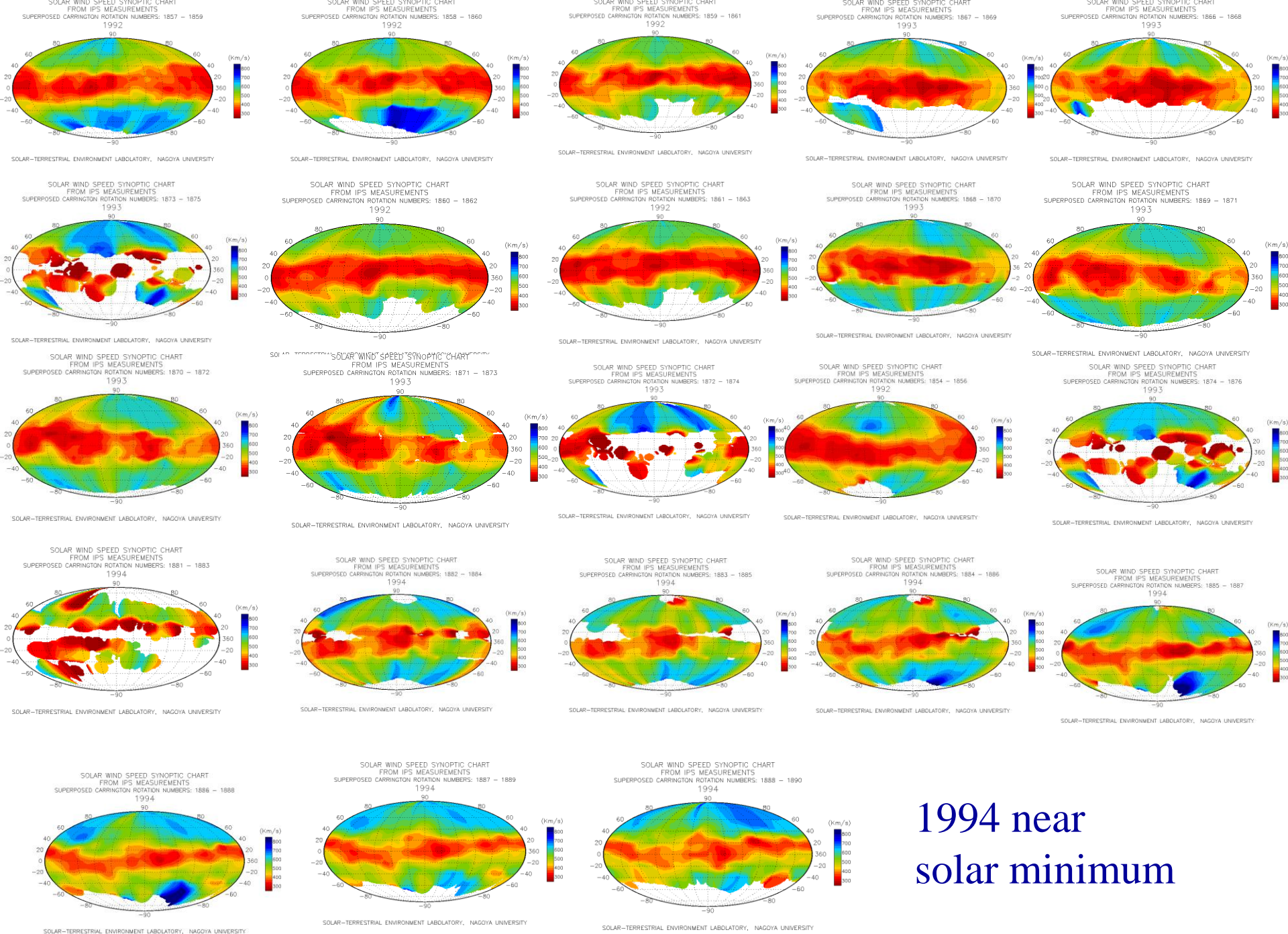
1990



SOLAR-TERRESTRIAL ENVIRONMENT LABOLATORY, NAGOYA UNIVERSITY

# Solar wind velocity in 3D for several Carrington rotations near solar maximum (1990)





1994 near solar minimum



Η αλληλεπίδραση του διαστρικού αερίου με τον ηλιακό άνεμο.

Διακρίνουμε την **Ηλιόπαυση**, που είναι μια επαπτομενική ασυνέχεια ή ασυνέχεια επαφής που χωρίζει το πλάσμα του ηλιακού ανέμου από το διαστρικό αέριο

Το **τερματικό κρουστικό κύμα** (*termination shock, TS*) που σχηματίζεται εκεί όπου ο ηλιακός άνεμος γίνεται υποηχητικός, καθώς μειούται η ταχύτητά του.

Το **τοξοειδές κρουστικό κύμα** (*bow shock BS*).

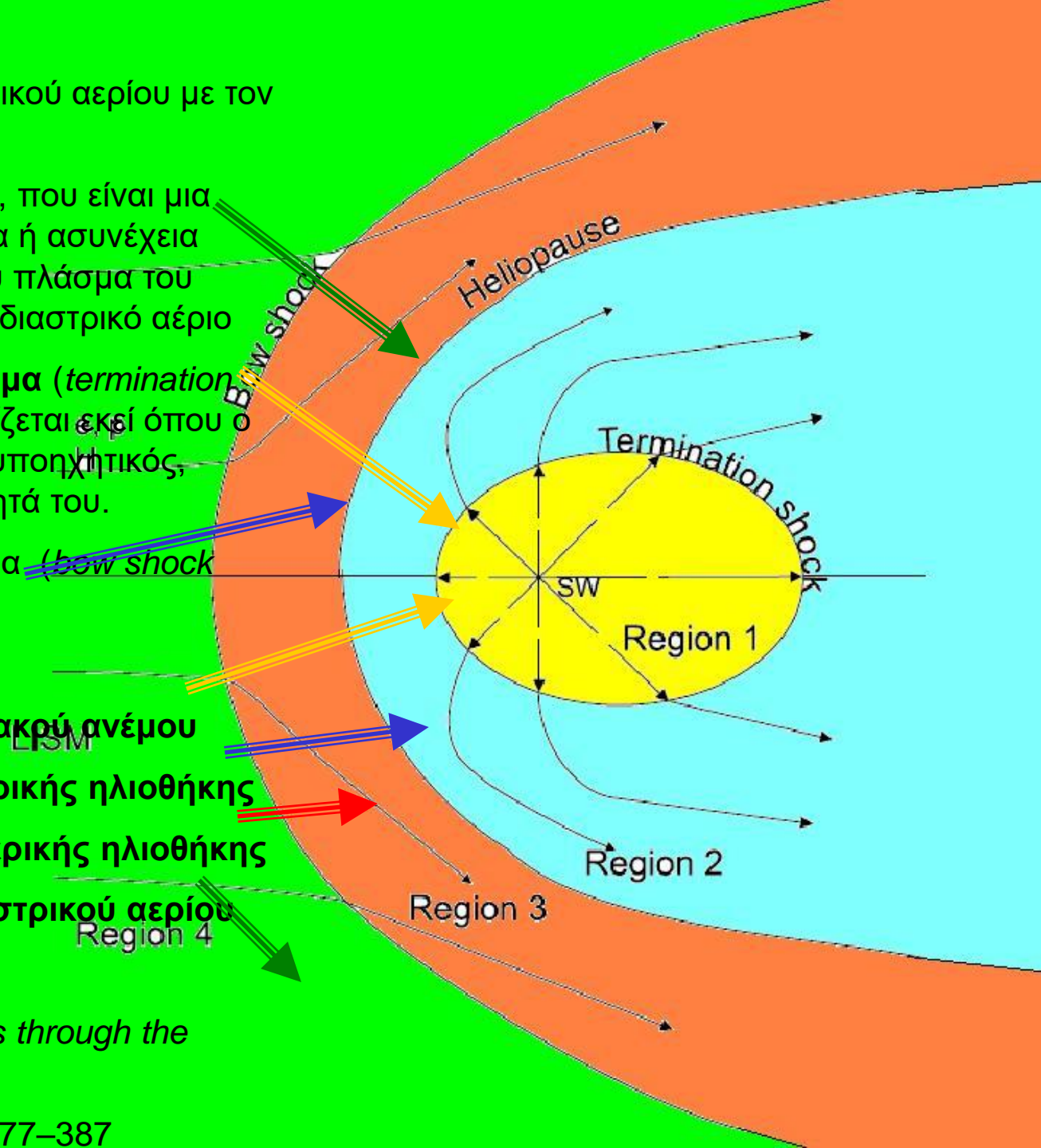
Διακρίνουμε 4 περιοχές:

- 1) του υπερηχητικού ηλιακού ανέμου
- 2) τη περιοχή της εσωτερικής ηλιοθήκης
- 3) της παραγμένης εξωτερικής ηλιοθήκης
- 4) του αδιατάρακτου διαστρικού αερίου

V.V. Izmodenov,

*Filtration of Interstellar Atoms through the Heliospheric Interface,*

Space Sci Rev (2007) 130: 377–387



# Properties of the Very Local Interstellar Medium

NEUTRAL COMPONENT Flow Speed 25 +/- 2 km/s

Flow Direction 75.4 ecliptic longitude **-7.5 ecliptic latitude**

Hydrogen density 0.10 +/- 0.01 /cubic cm

Helium density 0.010 +/- 0.003 /cubic cm

Hydrogen temperature (7 +/- 2) x 1000K

Helium temperature (7 +/- 2) x 1000K

IONIZED COMPONENT

**Electron density < 0.3/ cubic cm**

Flow speed Assumed same as neutral component

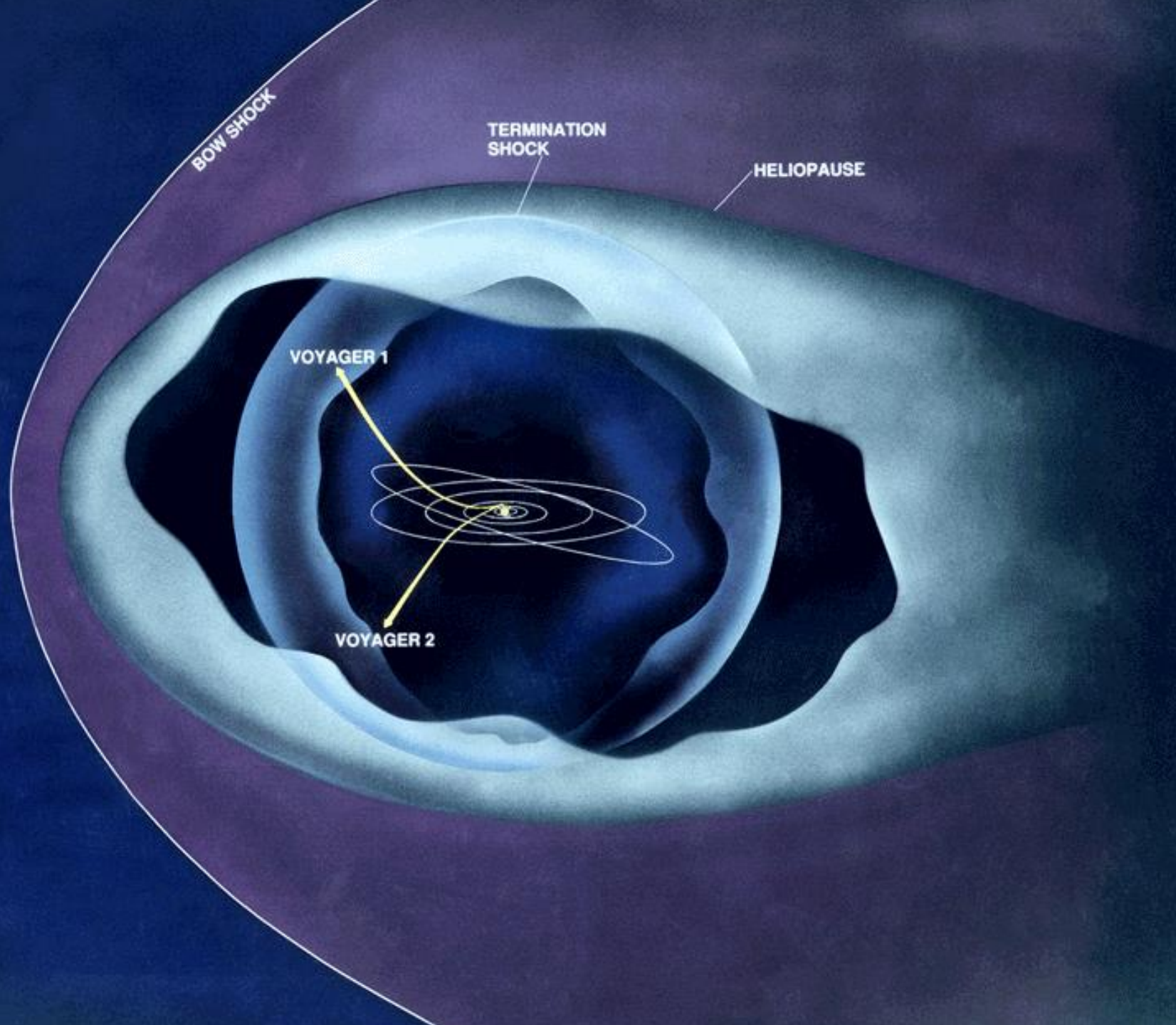
Flow direction Assumed same as neutral component

Ion temperature Assumed same as neutral component

MAGNETIC FIELD Magnitude 0.1 - 0.5 nT Direction Unknown

**COSMIC RAYS Total pressure (1.3+/-0.2) x 10<sup>(-12)</sup>dynes/square cm**





BOW SHOCK

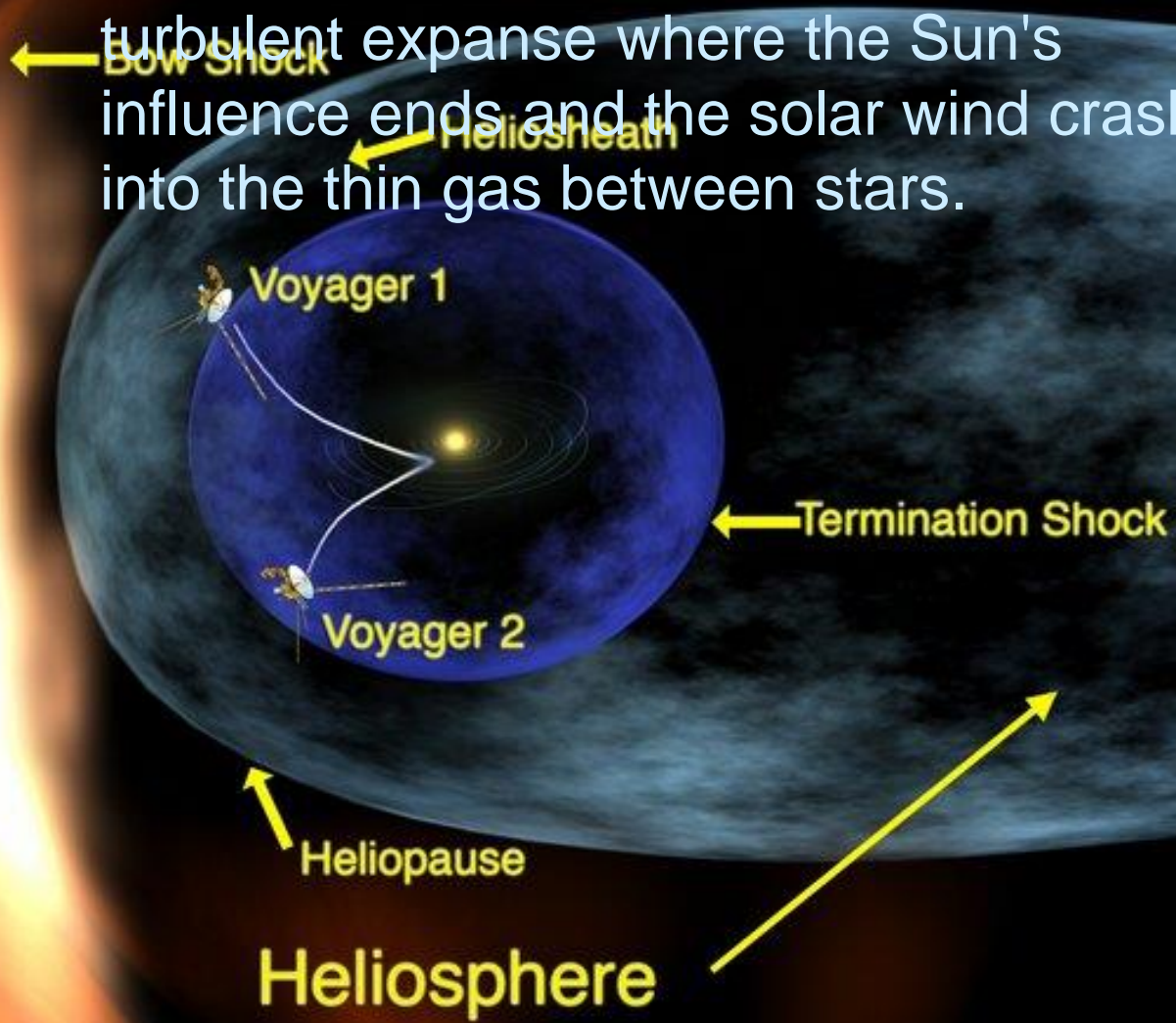
TERMINATION SHOCK

HELIOPAUSE

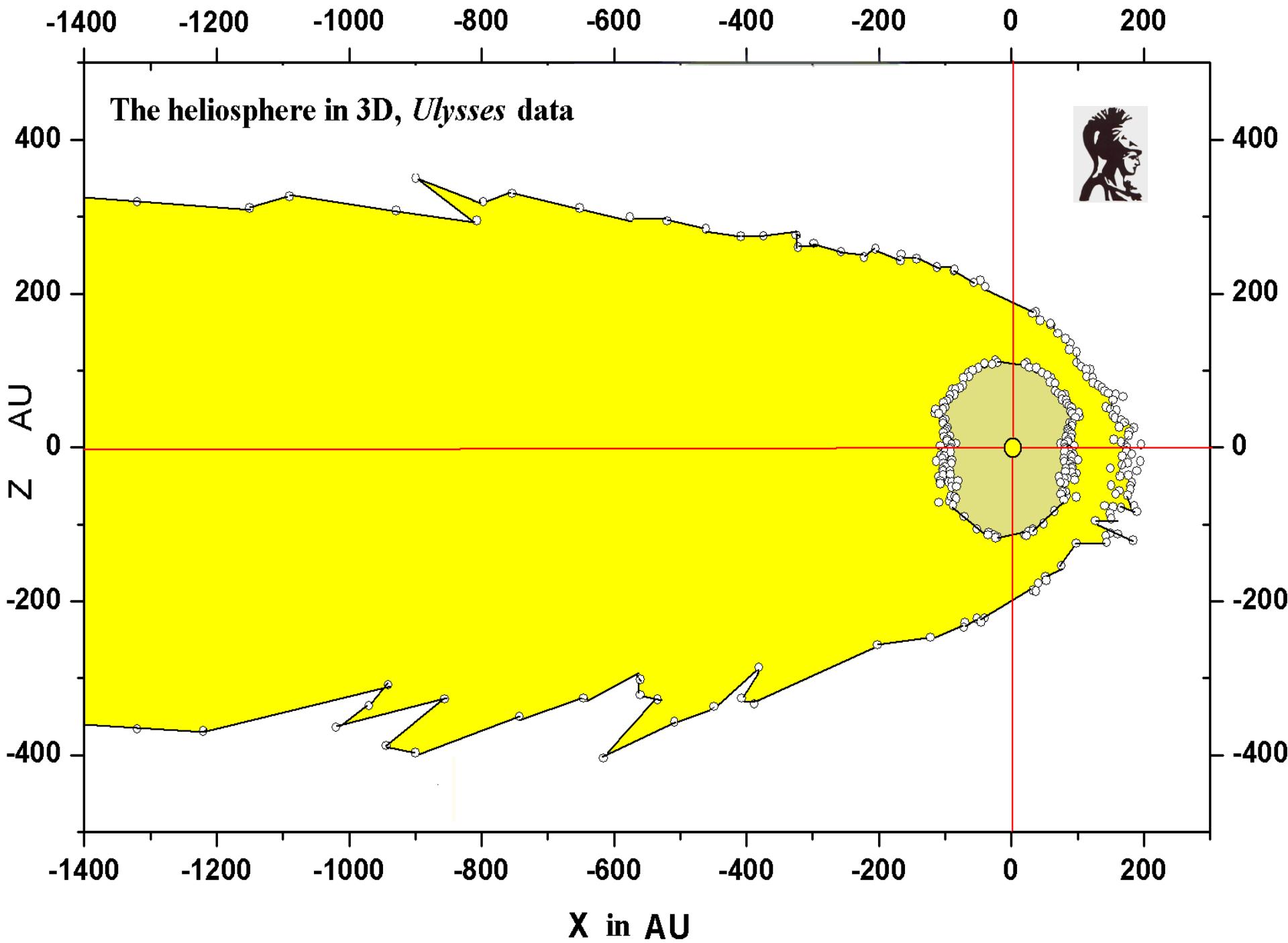
VOYAGER 1

VOYAGER 2

NASA's Voyager 1 spacecraft has entered the solar system's final frontier, a vast, turbulent expanse where the Sun's influence ends and the solar wind crashes into the thin gas between stars.



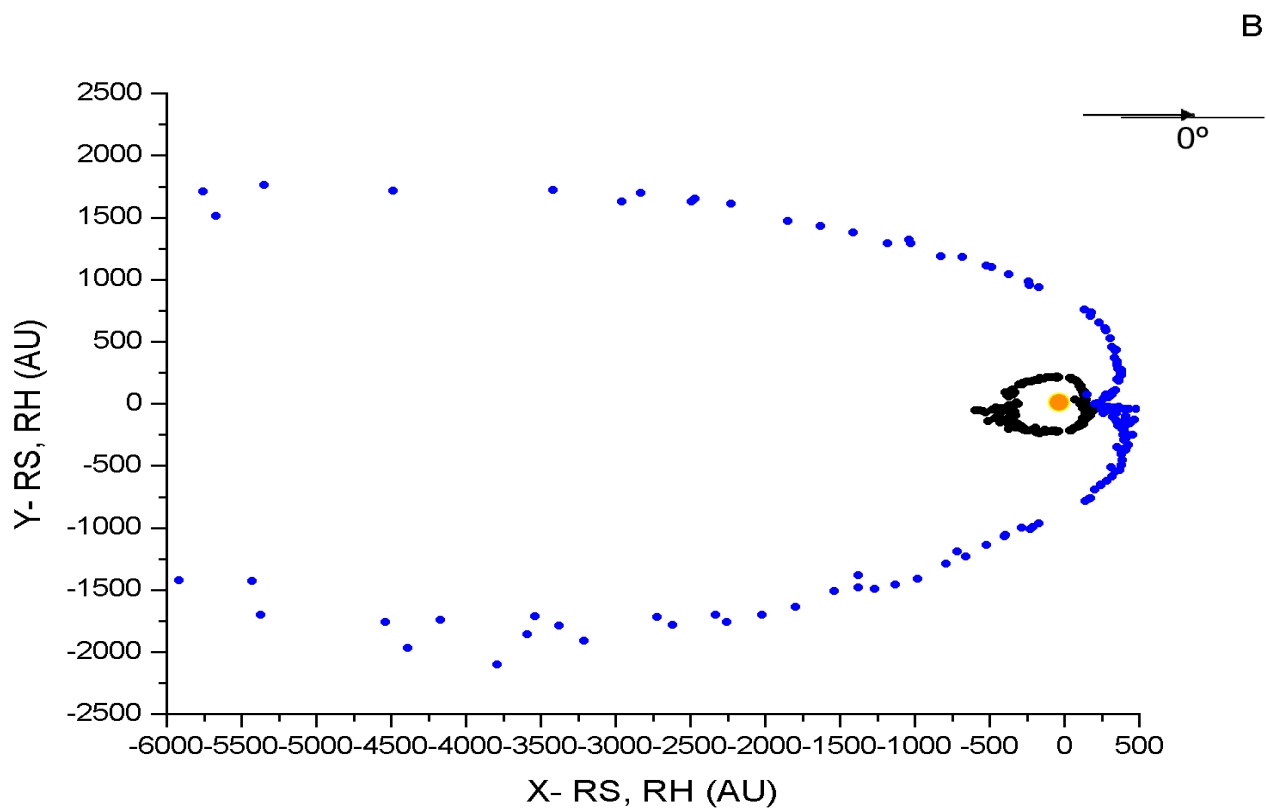
**Voyager Enters Solar System's Final Frontier, ~95 AU**





Οι μεταβολές της **Ηλιόσφαιρας**  
συναρτήσει του  
προσανατολισμού του διαστρικού μαγνητικού πεδίου

Αγγελική Νικολοπούλου, Γιώργος Έξαρχος



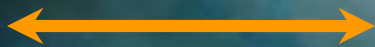


# LL ORIONI

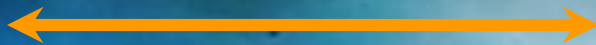
## Bow shock

αστρόσφαιρα

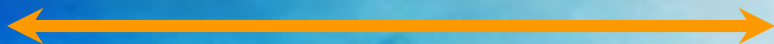
10 000 AU



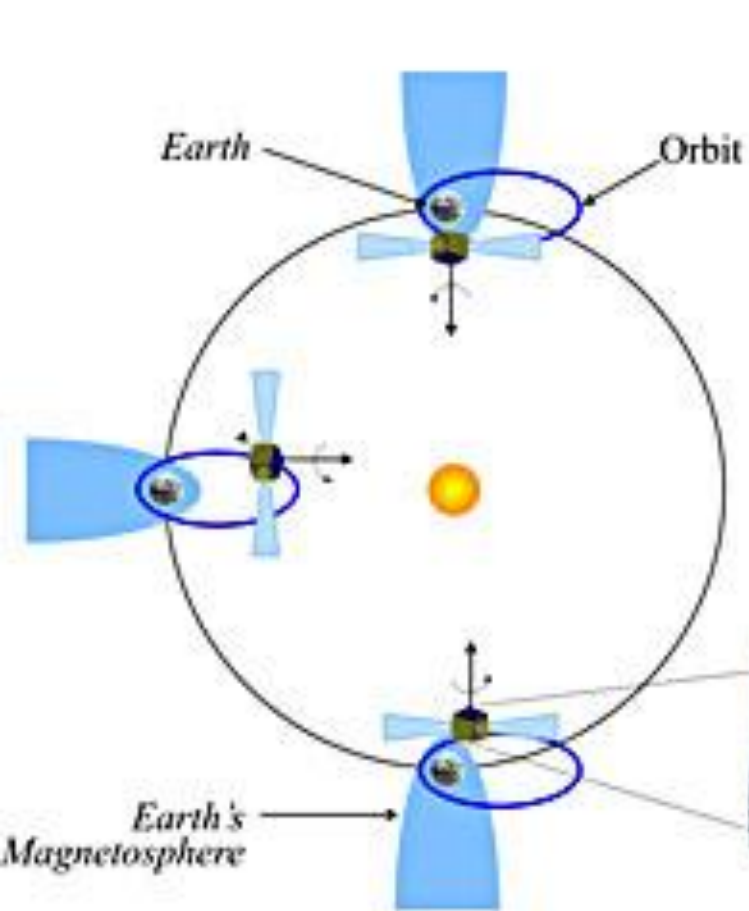
0,25 έτους φωτός



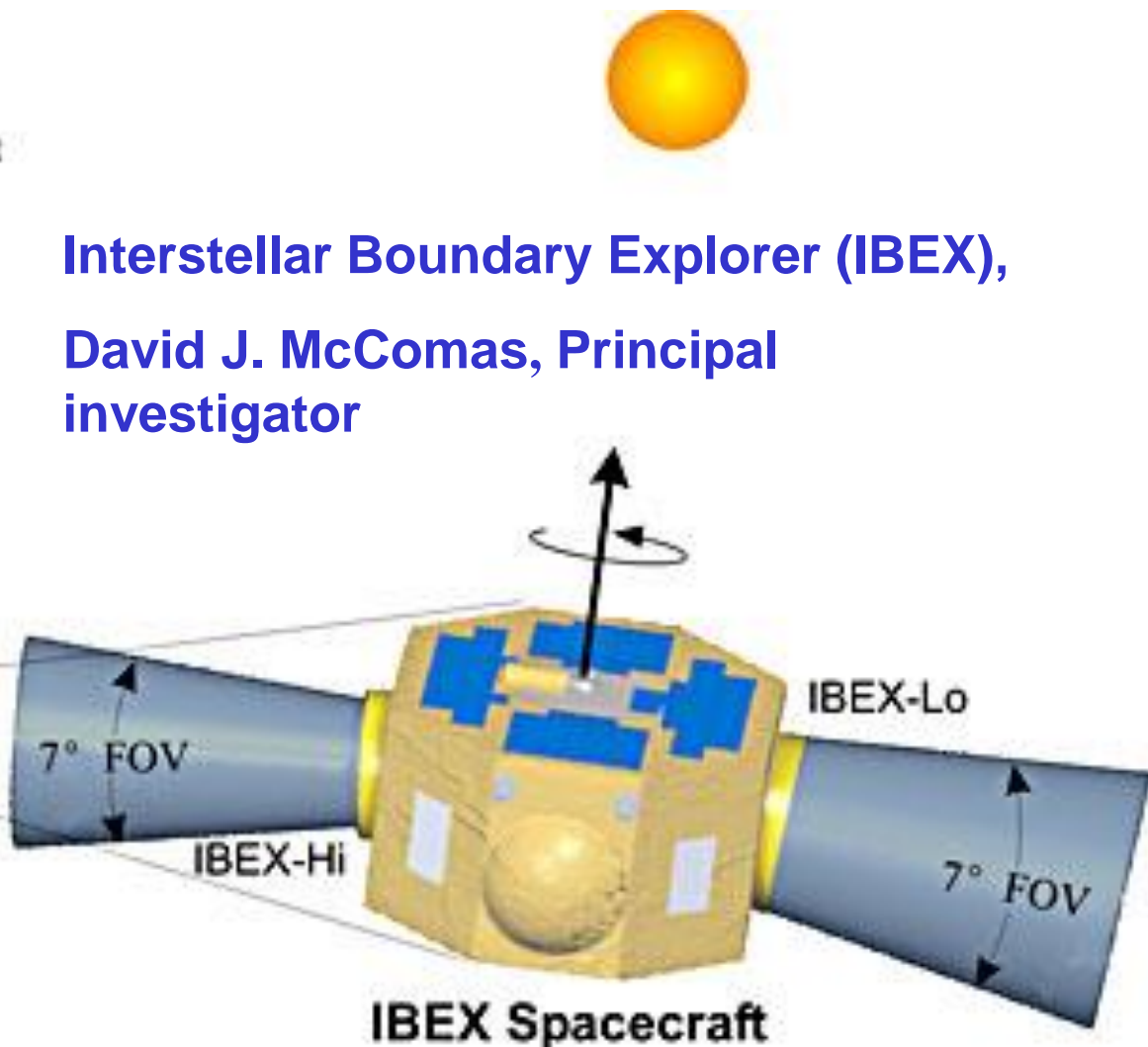
0,1 parsec

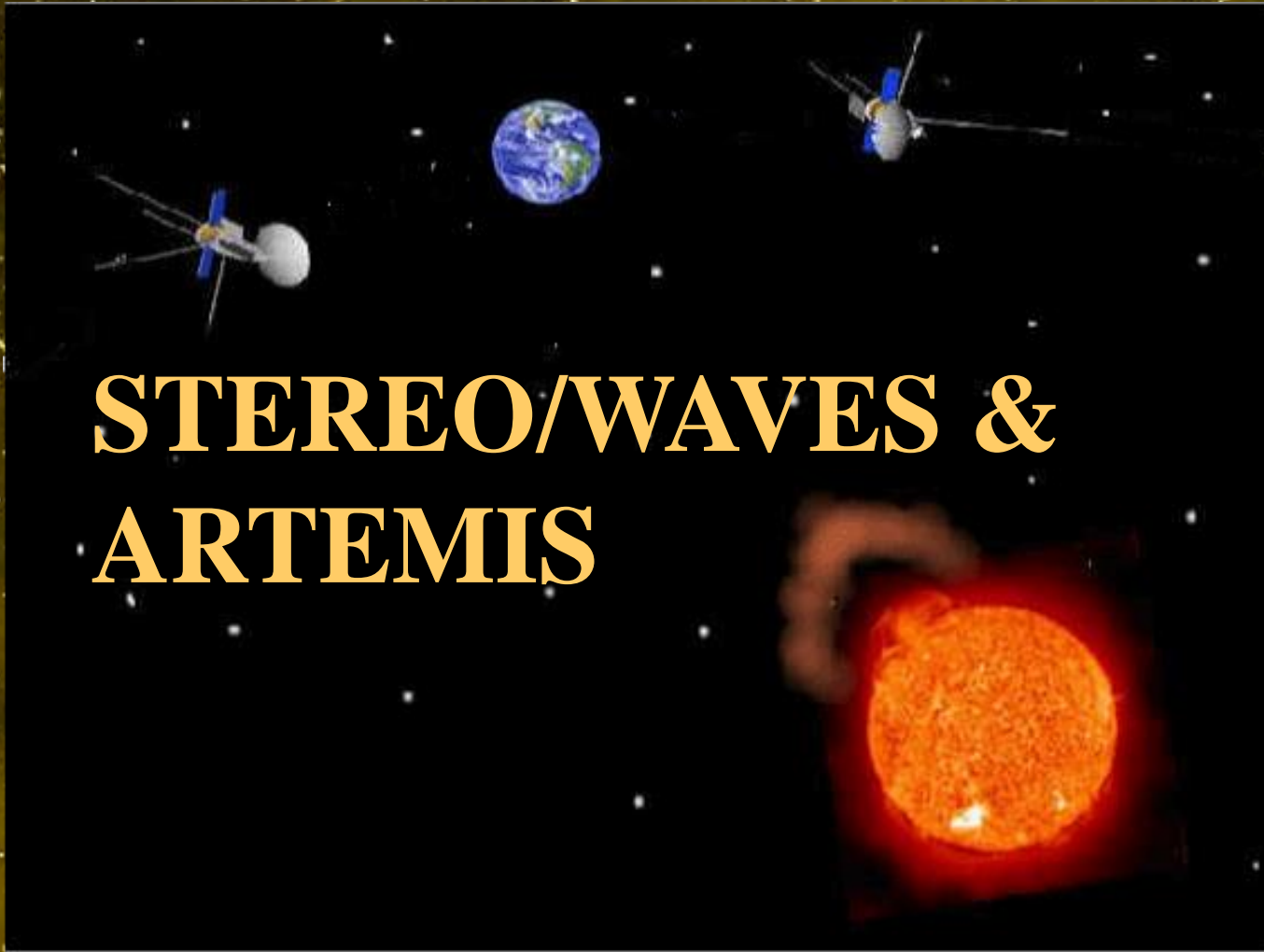






Interstellar Boundary Explorer (IBEX),  
David J. McComas, Principal  
investigator





# STEREO/WAVES & ARTEMIS



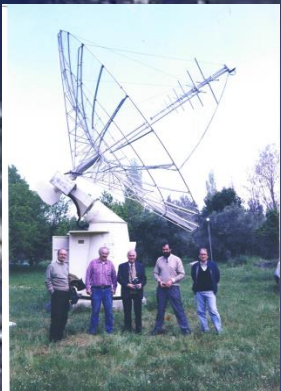


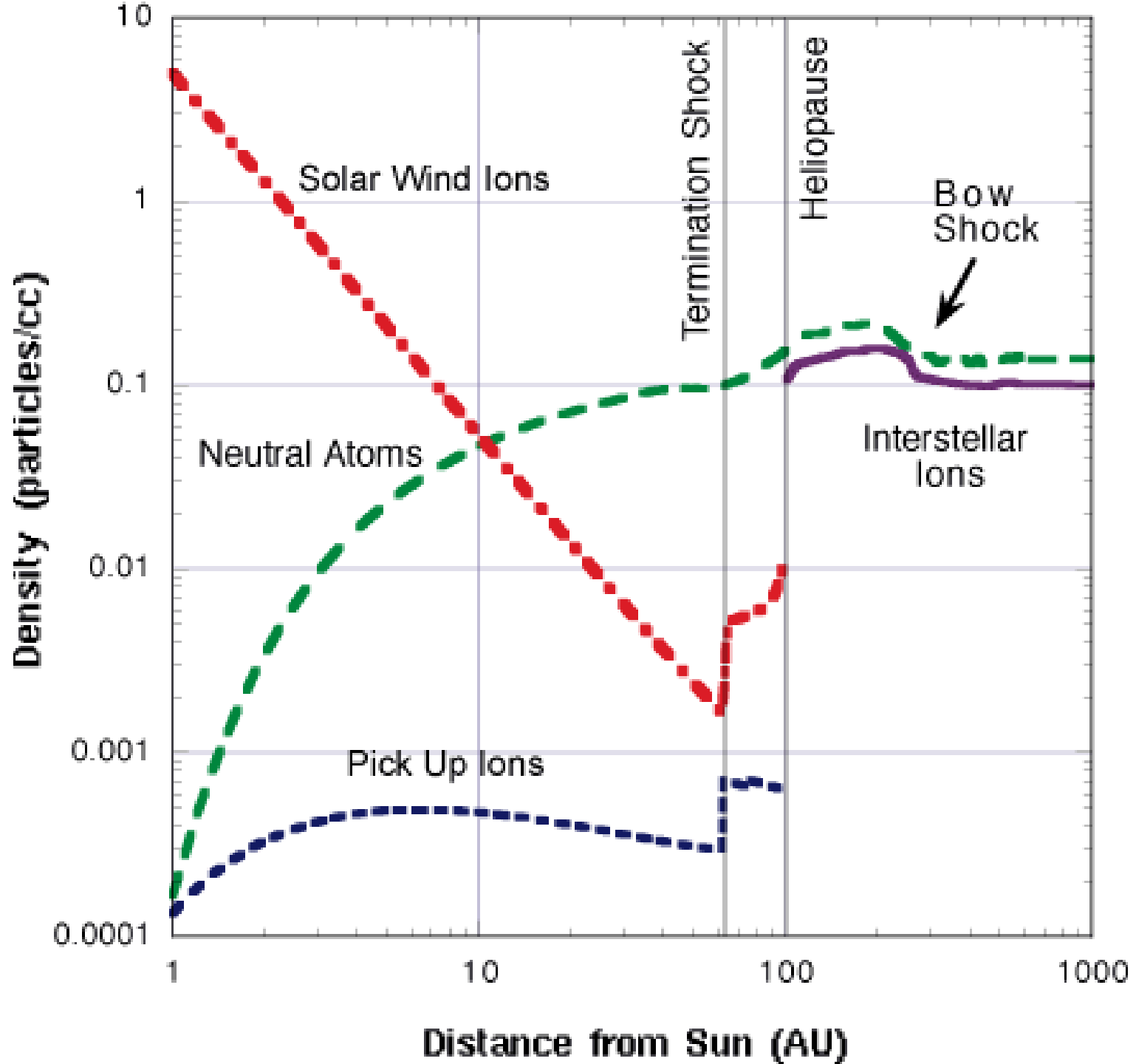
## **ARTEMIS IV**

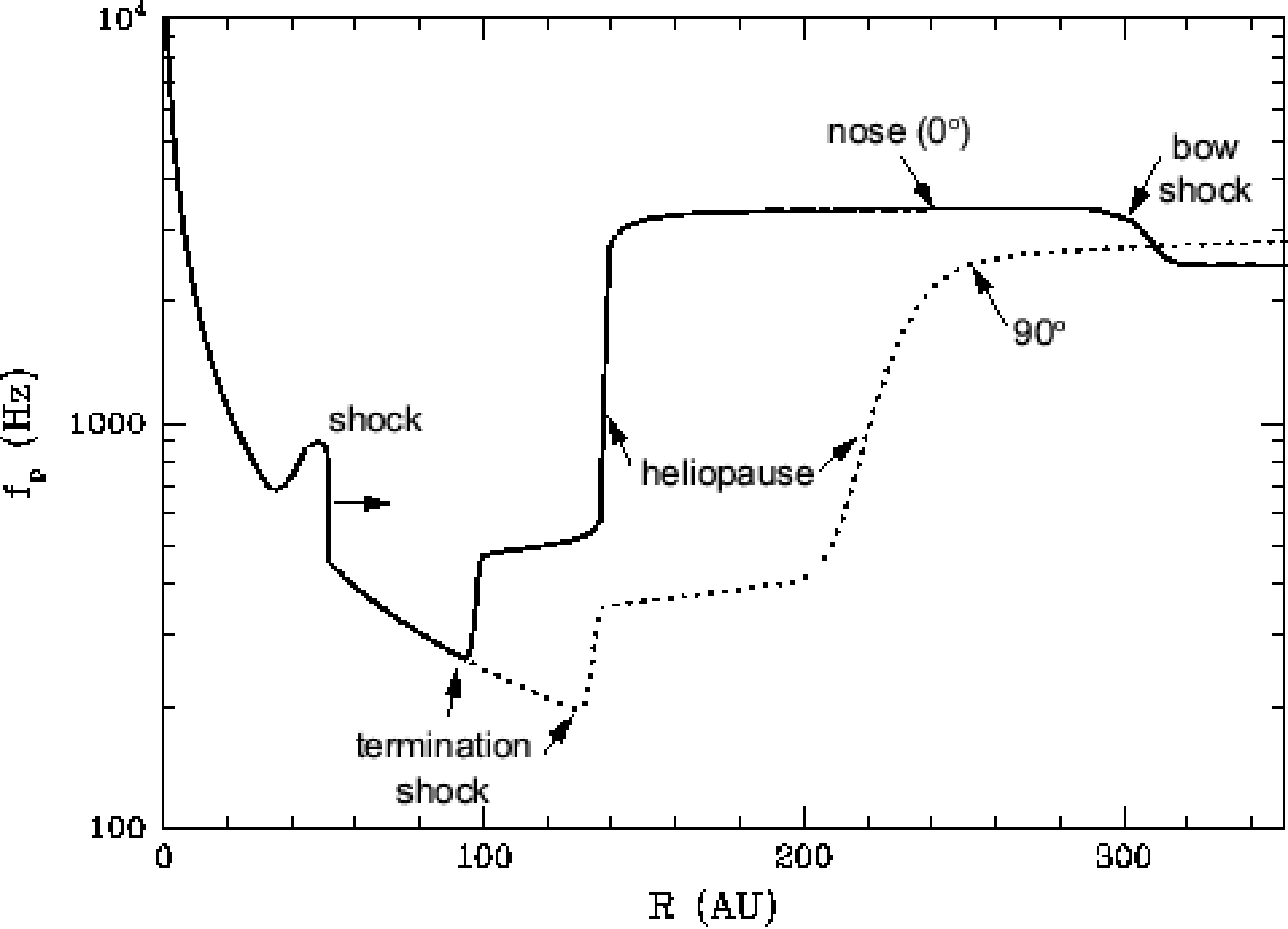
**solar  
radiospectrograph  
operated by the University  
of Athens at Thermopylae**

**Latitude 38 49' N,  
Longitude 22 41' E**

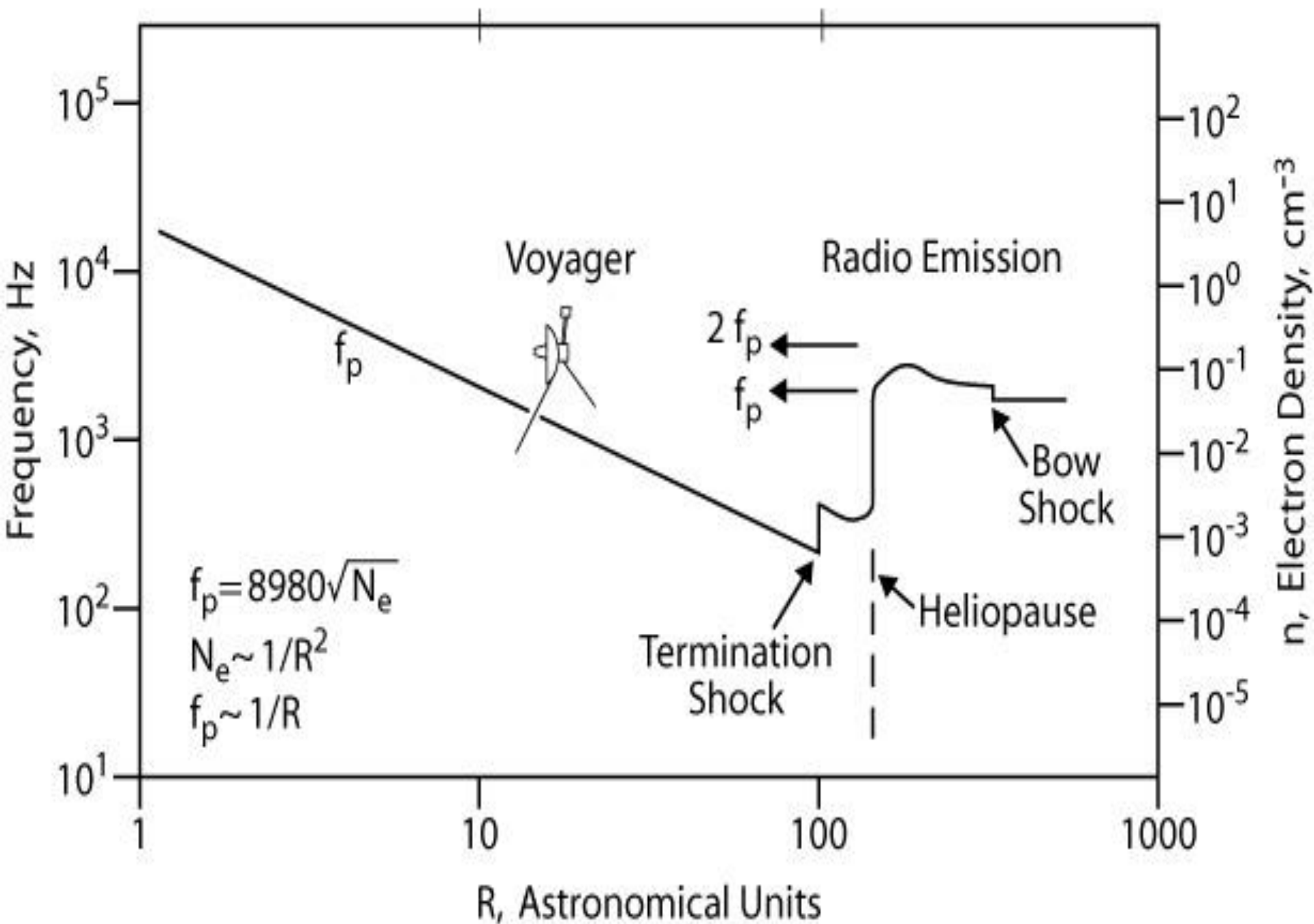
The observations last  
nearly **9 hours and 40  
minutes** daily, which is 4  
hours and 50 minutes  
before and after local  
noon

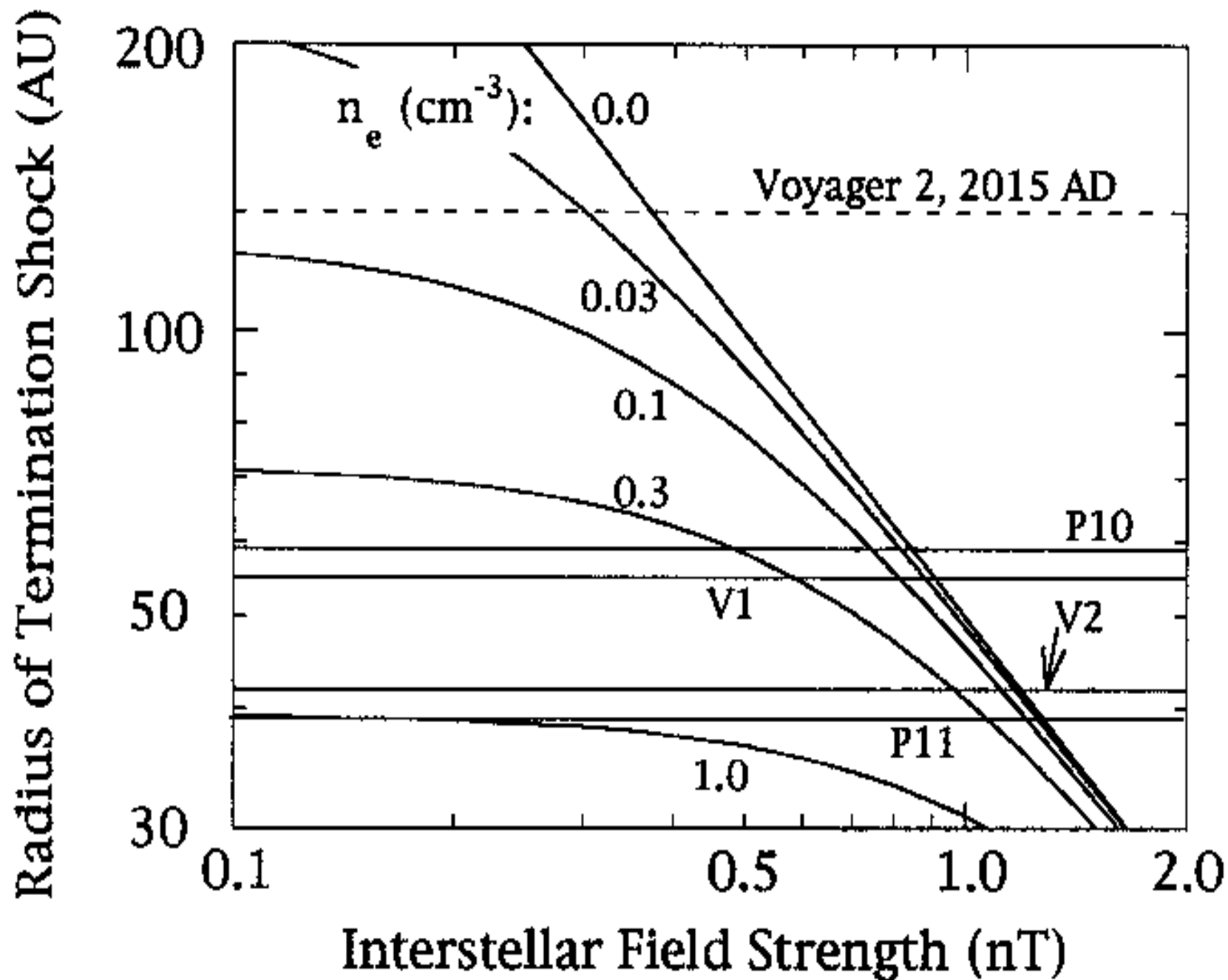


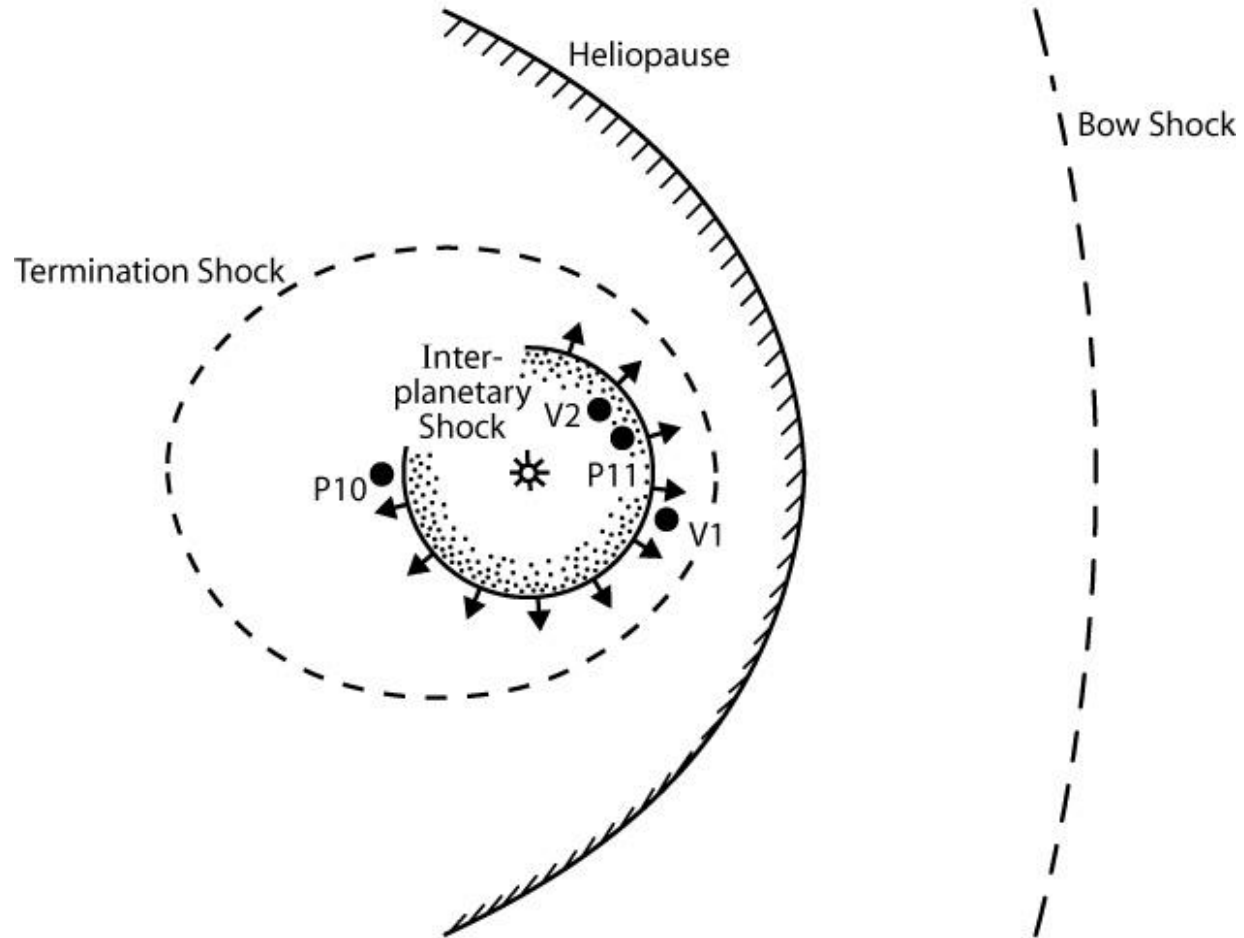


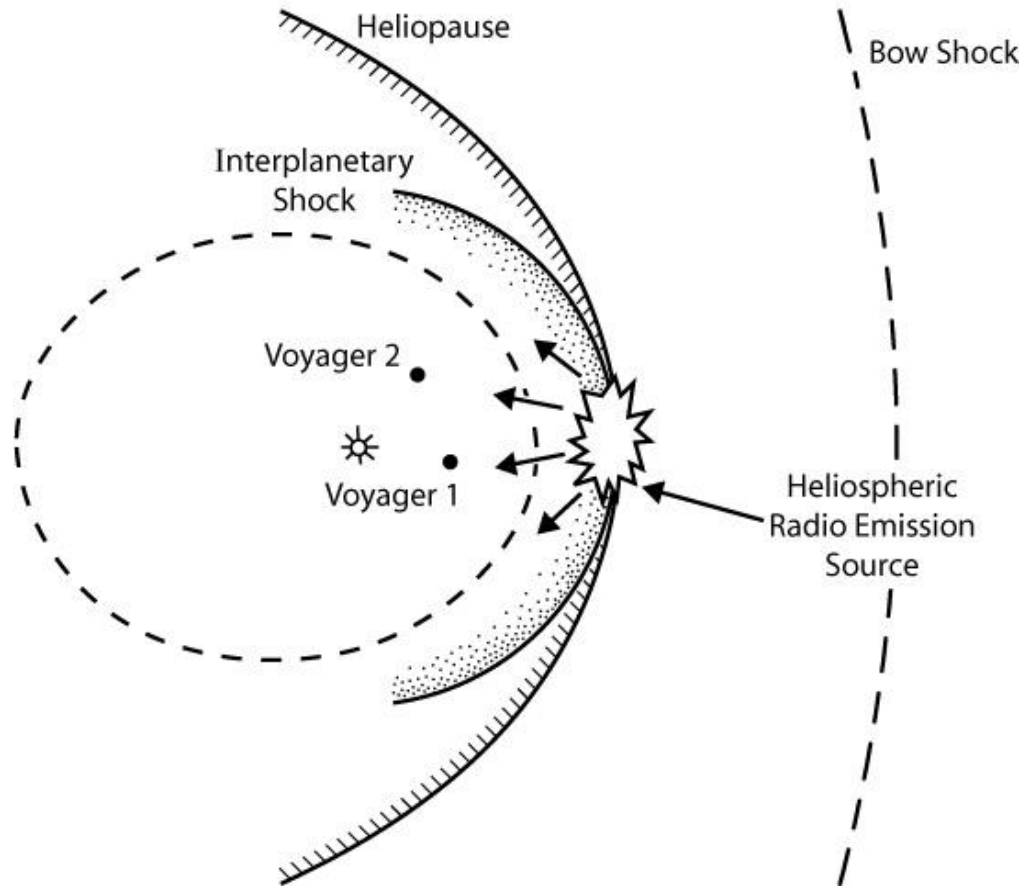












**INTERSTELLAR WIND**

**HELIOPAUSE**

**HELIOSPHERE**

**VOYAGER 1**

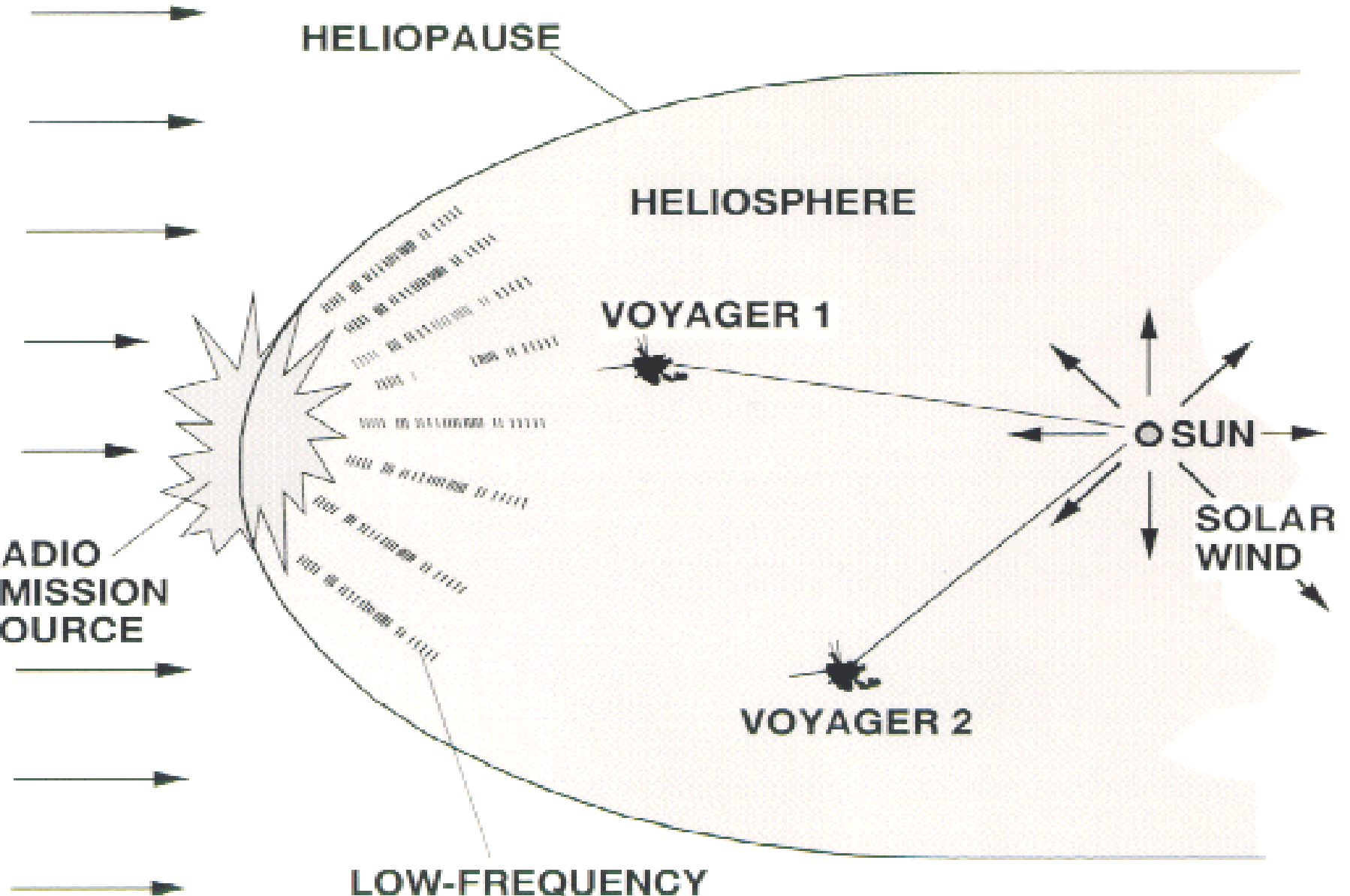
**SUN**

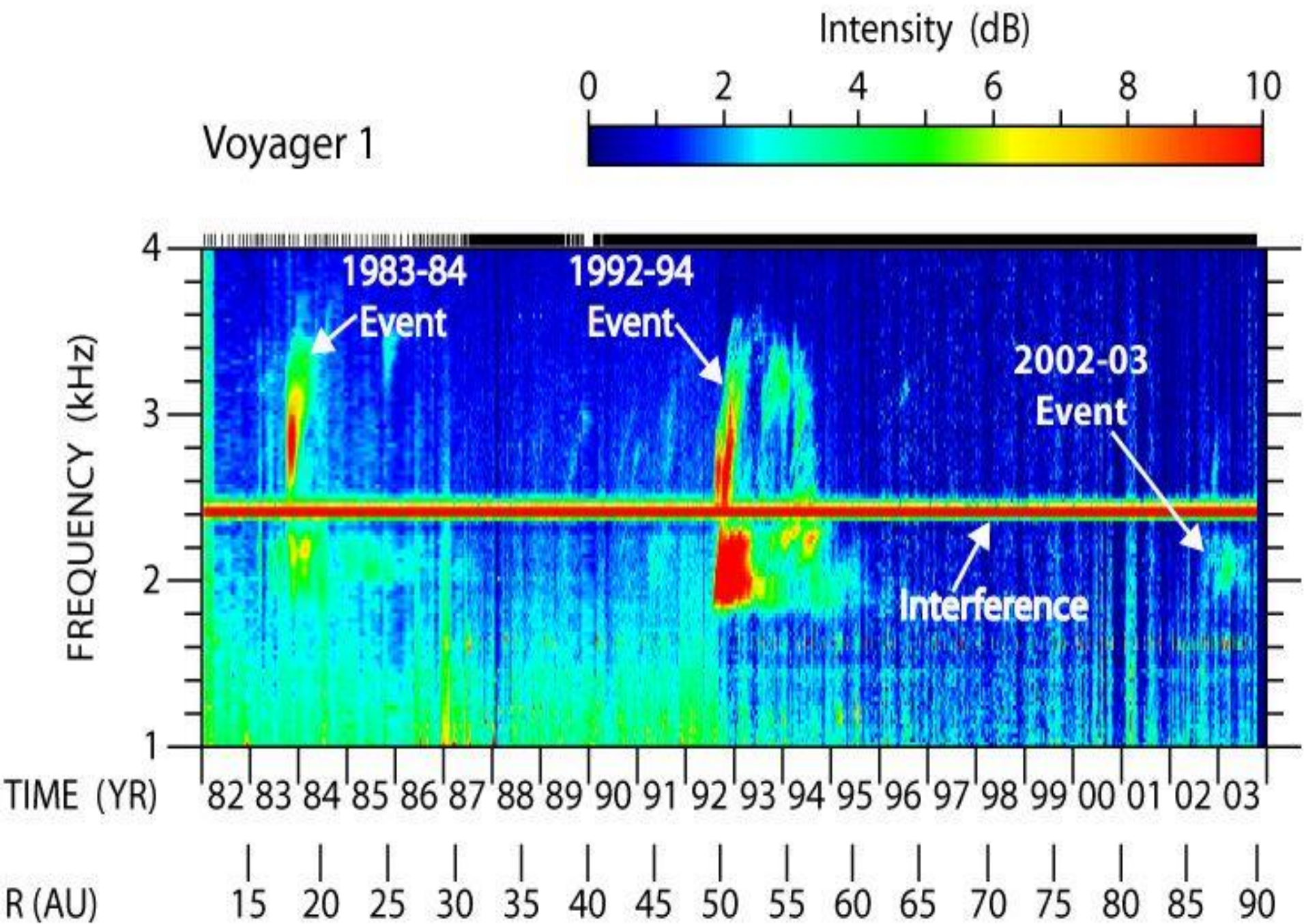
**SOLAR WIND**

**VOYAGER 2**

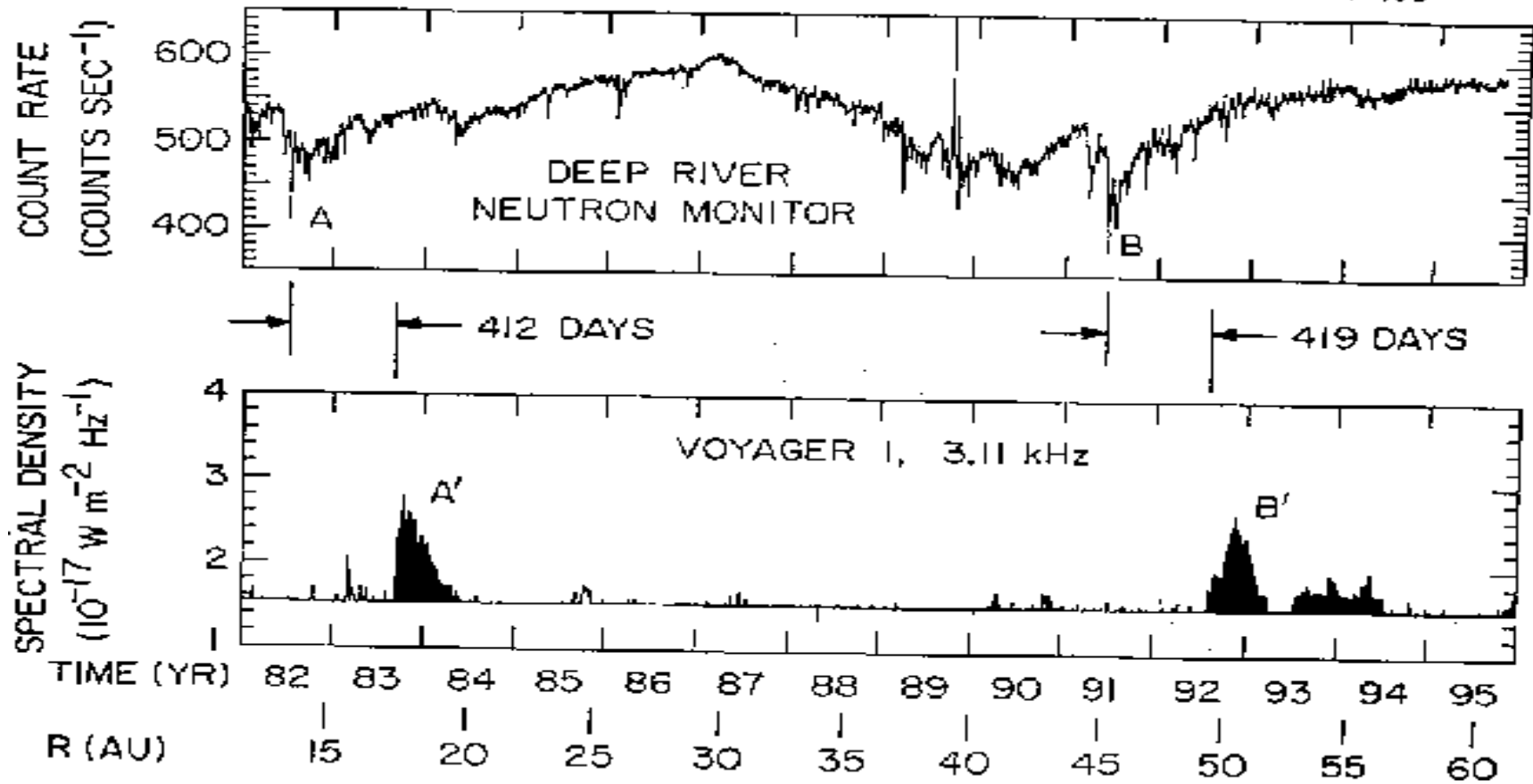
**RADIO EMISSION SOURCE**

**LOW-FREQUENCY RADIO SIGNALS**







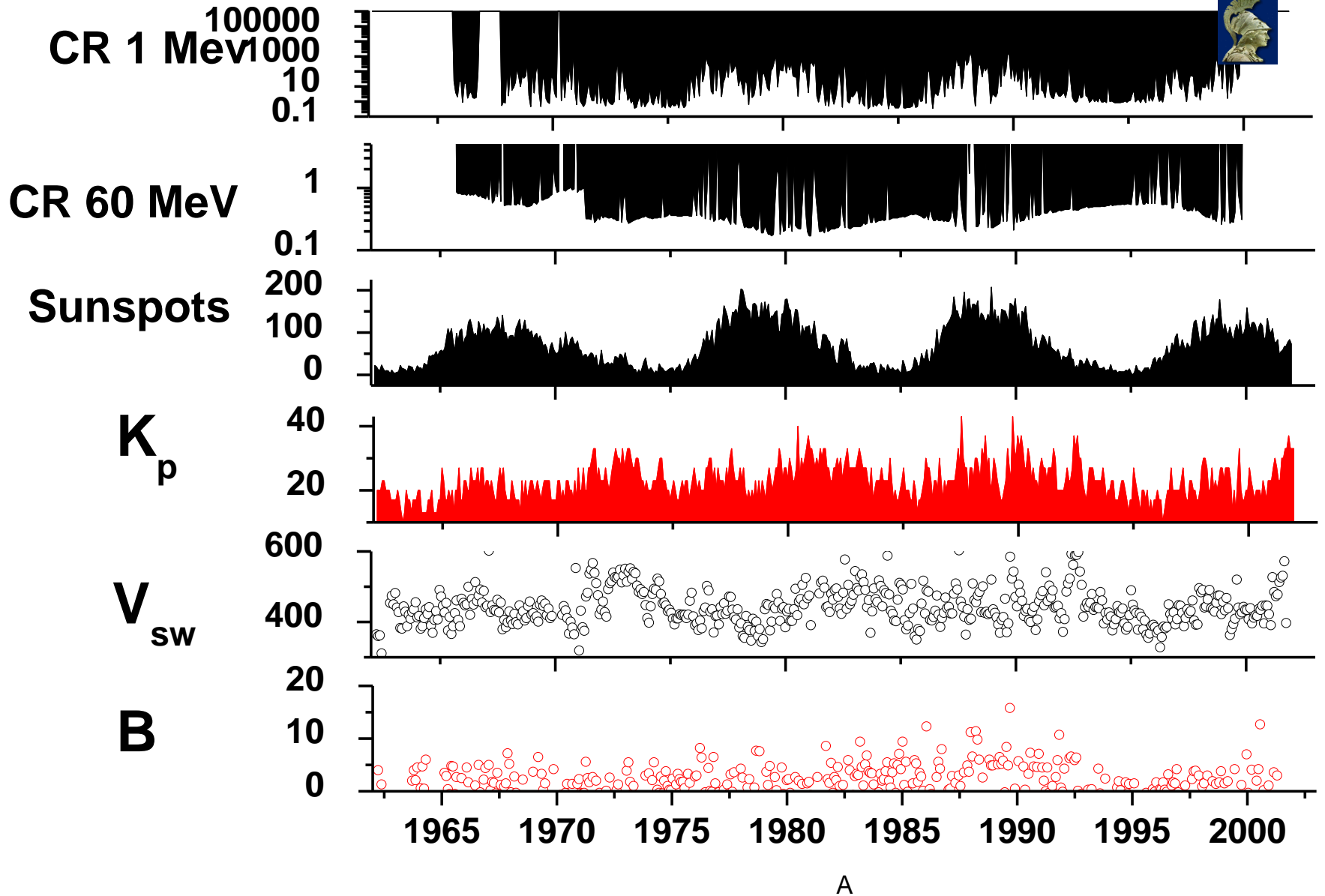


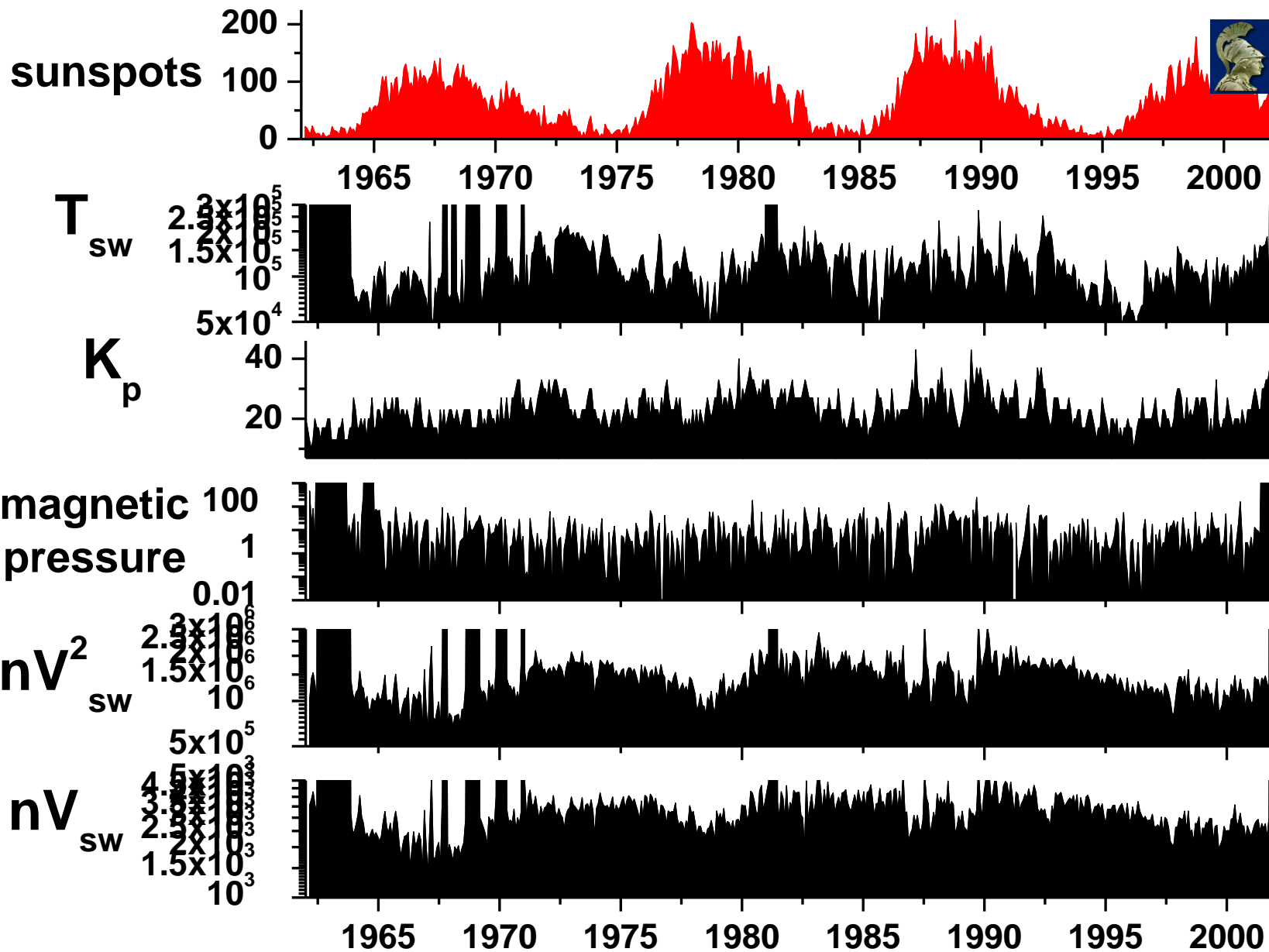
each major radio event follows 415 days after one of the two largest decreases in the cosmic ray flux observed at Earth (Forbush decreases), both of which were associated with periods of unusually high solar activity and multiple CMEs.

$$415 \text{ ημέρες} \times 86400\text{s} \times 800\text{km/s} = 200 \text{ AU} ;$$

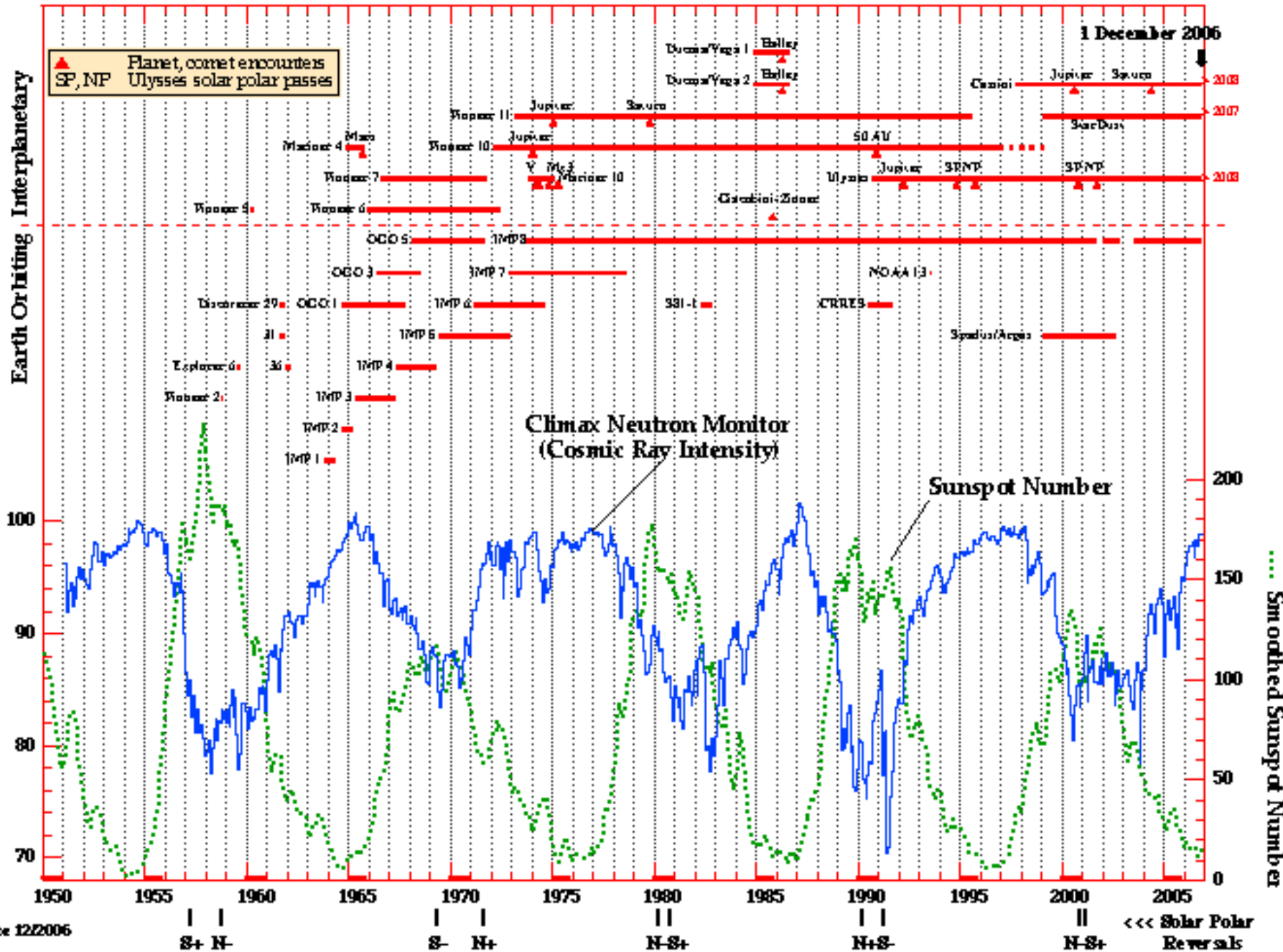
$$415 \text{ ημέρες} \times 86400\text{s} \times 400\text{km/s} = 100 \text{ AU}$$

•Gurnett, D.A., and W.S. Kurth, Heliospheric 2-3 kHz radio emissions and their relationship to large Forbush decreases, *Adv. Space Res.*, **16(9)**, 279, 1995.





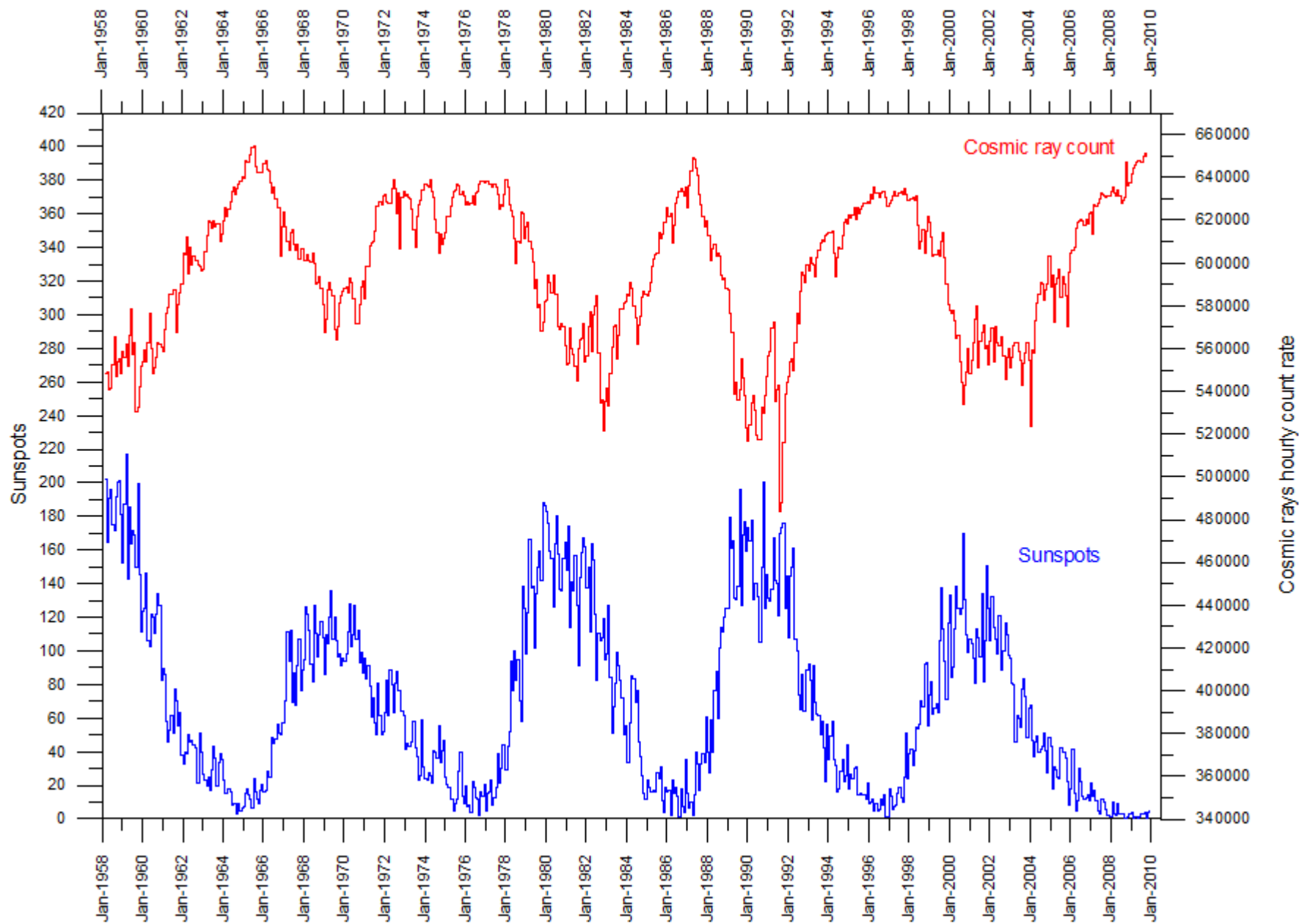
Cosmic Ray Intensity, Percent of 1954 Minimum Modulation Level



Climax Neutron Monitor (Cosmic Ray Intensity)

Sunspot Number

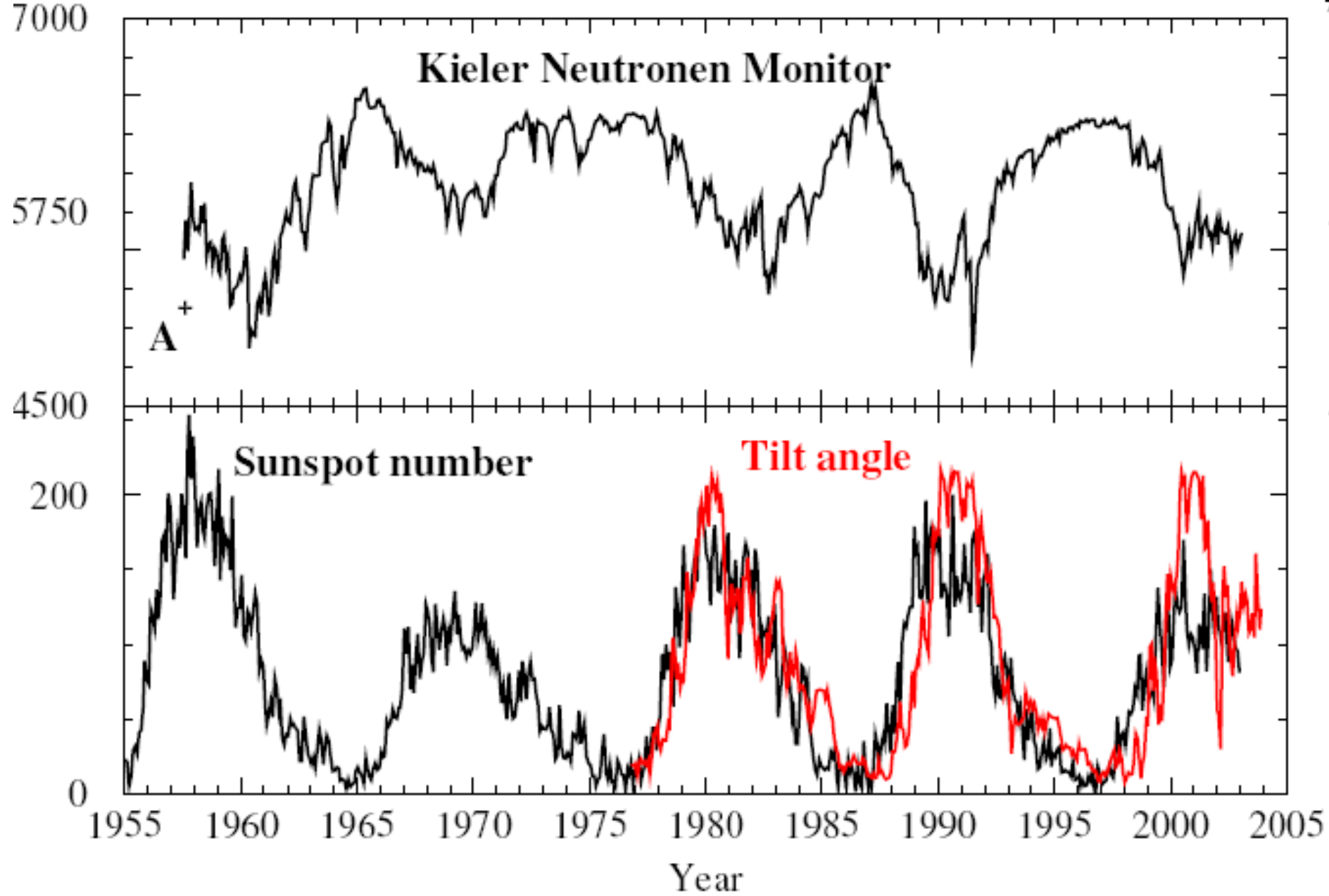
1 December 2006

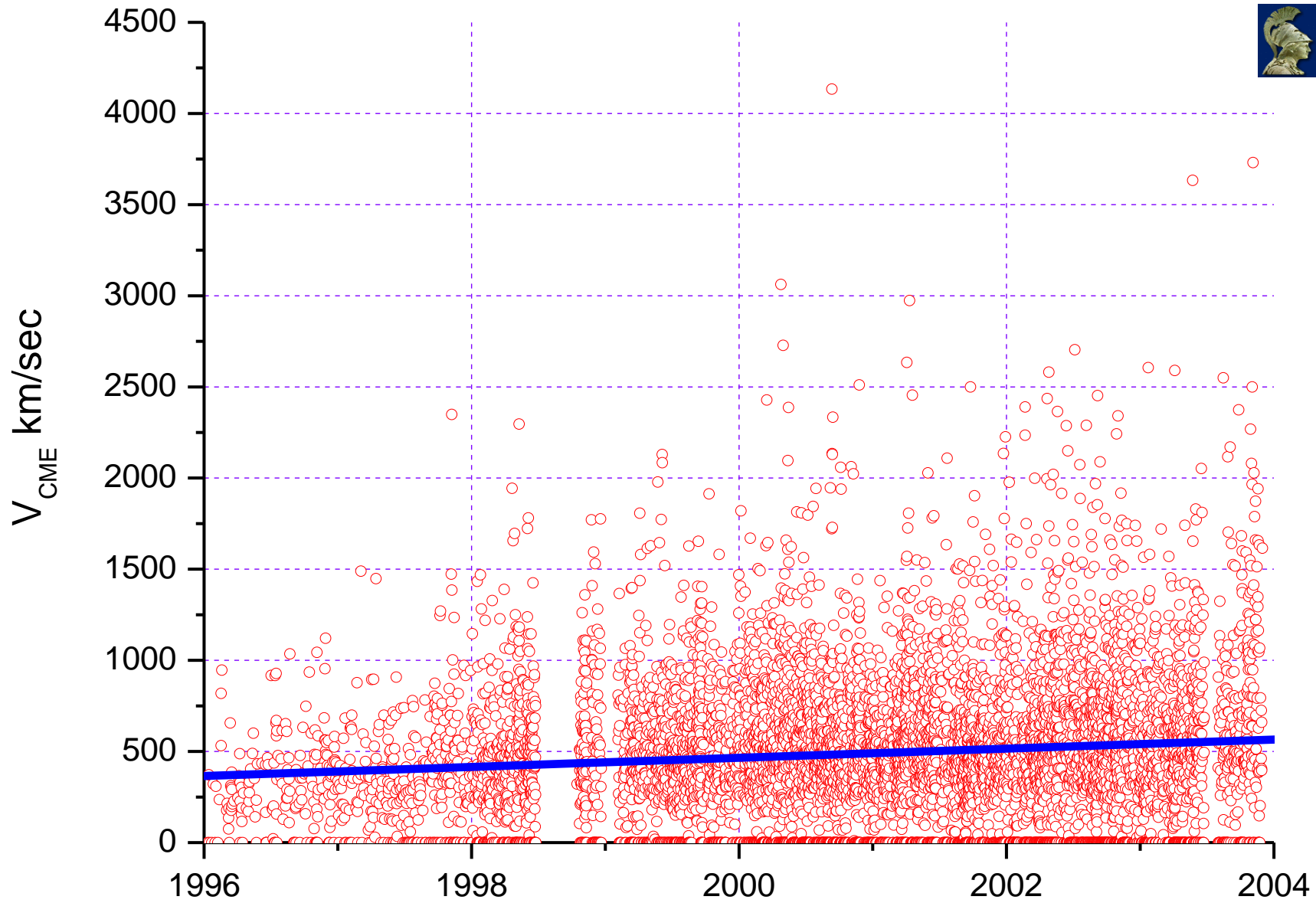


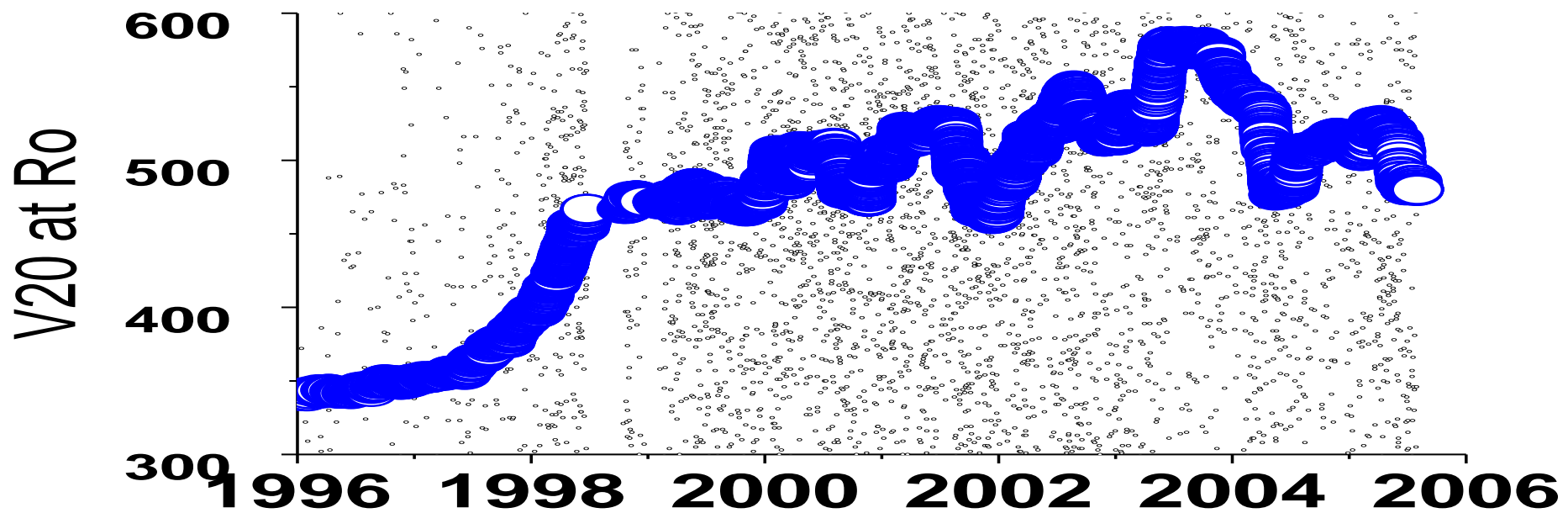
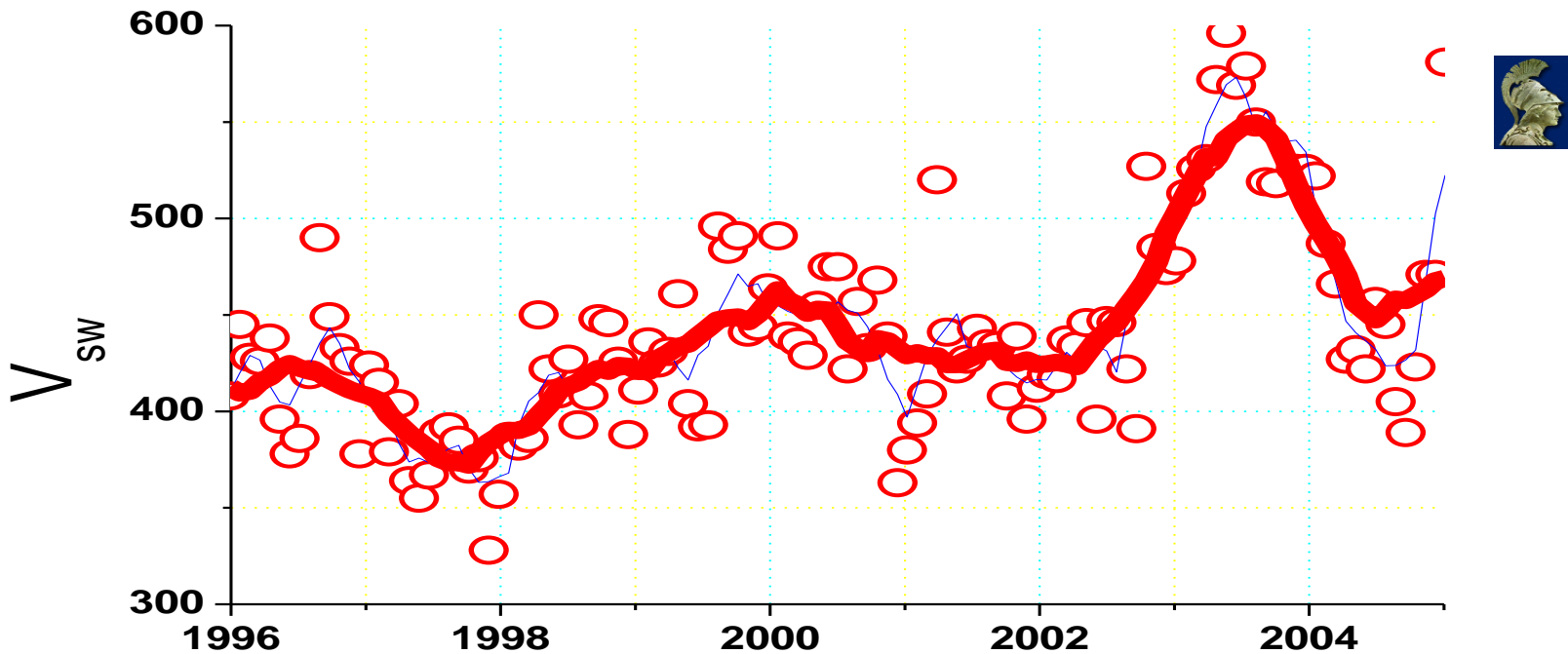
<http://www.ieap.uni-kiel.de/et/reta/en/Hintergrund.html>

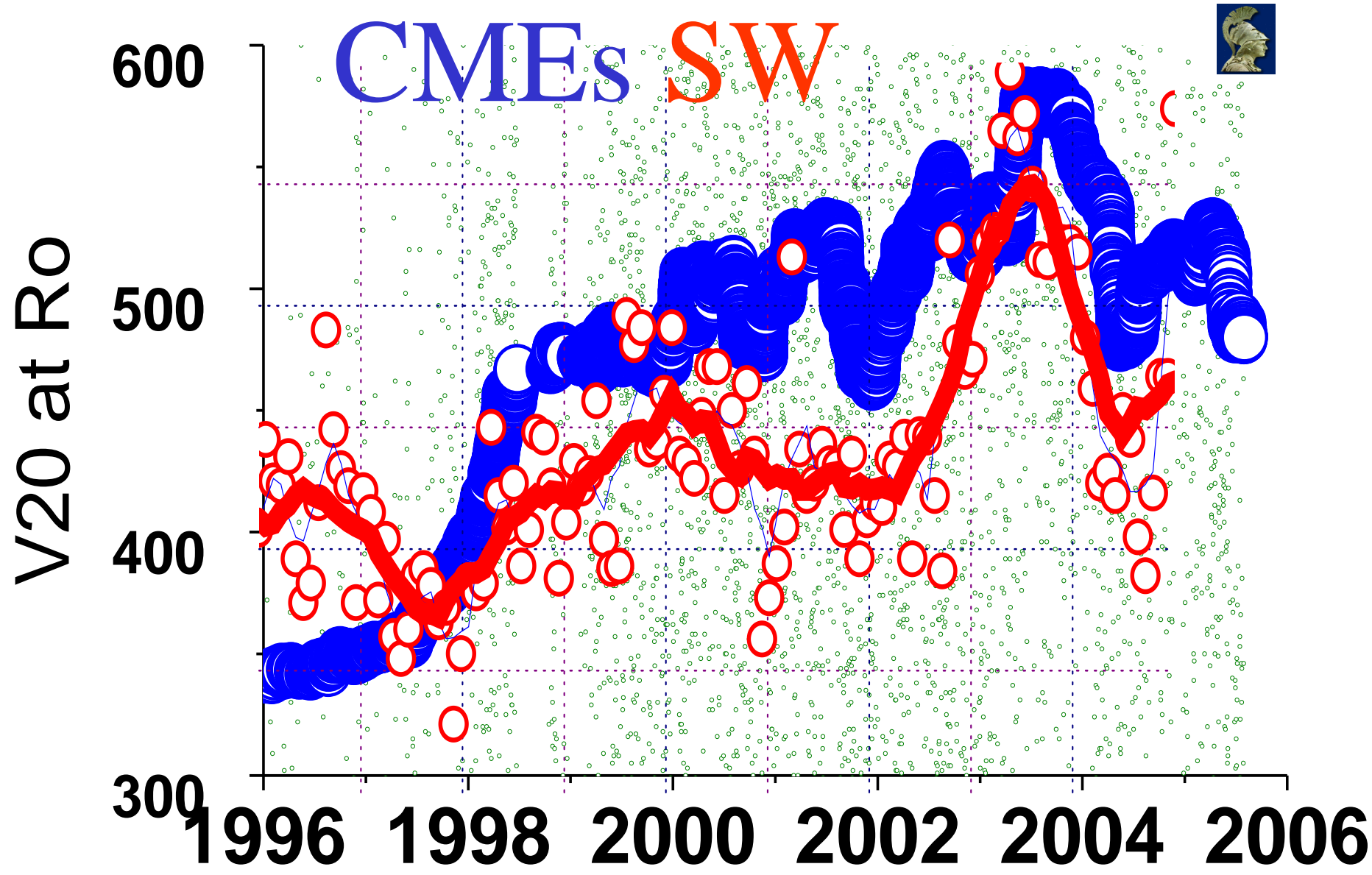
<http://www.climate4you.com/Sun.htm>





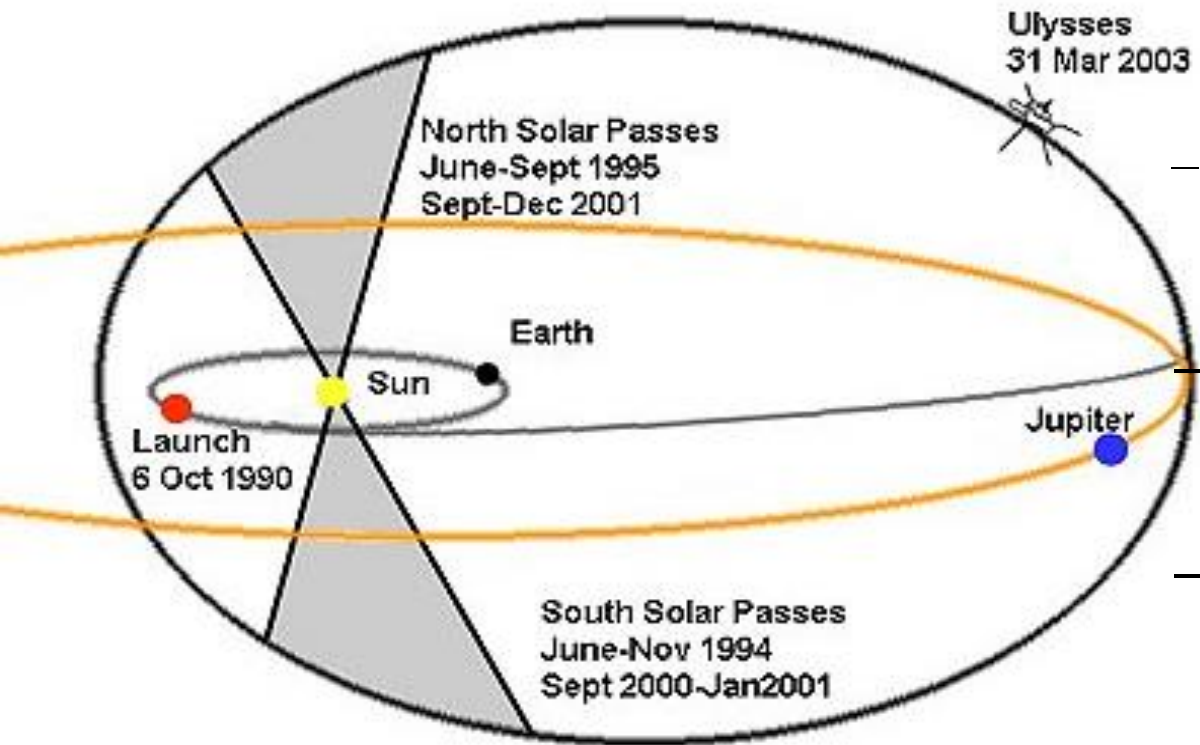








# Ulysses mission



## Orbit:

- It is the first time that a mission study the heliosphere in 3D
- observing the interplanetary medium off the ecliptic,
- above the poles of the Sun.

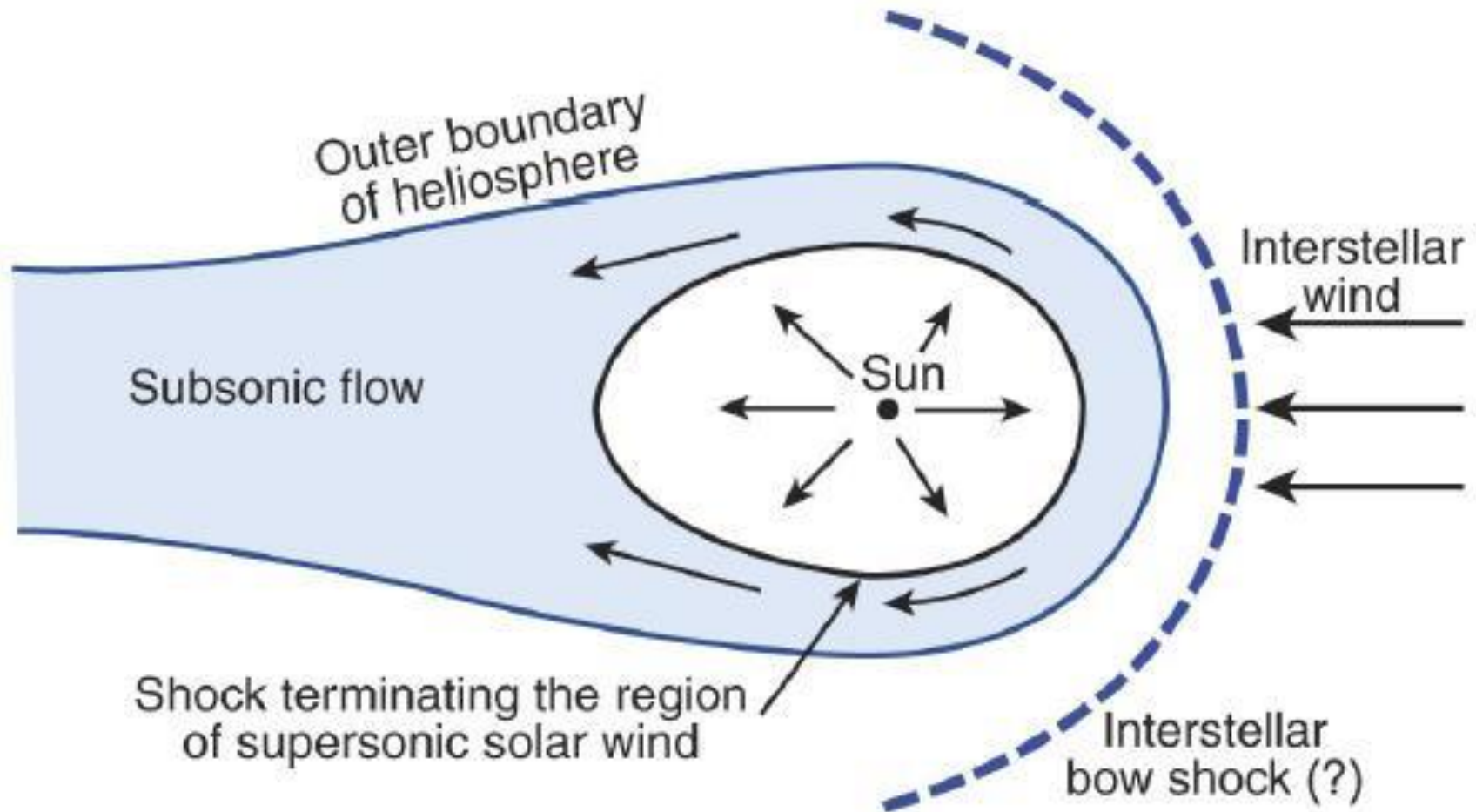
# Αλληλεπίδραση της Ηλιόσφαιρας με το Διαστρικό Χώρο.

Ηλιόσφαιρα: Ο χώρος μέσα στον οποίο κυριαρχεί  
ο Ηλιακός Άνεμος και τα μαγνητικά πεδία  
Ηλιακής προέλευσης.

Η Ηλιόπαυση βρίσκεται εκεί όπου η πίεση στο  
εσωτερικό της Ηλιόσφαιρας εξισώνεται με την  
πίεση στο εξωτερικό της.

$$\frac{1}{2} \rho u^2 + \frac{B^2}{2\mu_0} + nkT = \frac{1}{2} \rho_{Lism} u_{Lism}^2 + \frac{B_{Lism}^2}{2\mu_0} + nkT_{Lism}$$

Η εικόνα της Ηλιόσφαιρας με τα  
μέχρι σήμερα μοντέλα.



- Στον Ηλιοφλοιό υπάρχουν εκτός από τα πρωτόνια του Ηλιακού Ανέμου, και τα pickup ions (PUIs).
- Παράγονται από ιονισμό των ουδετέρων ατόμων του διαστρικού αερίου καθώς αυτά εισέρχονται στην Ηλιόσφαιρα.
- Στο TS τα PUIs του Υδρογόνου φτάνουν σε πυκνότητες κοντά στο 10-20% της πυκνότητας του Ηλιακού Ανέμου, θερμαίνονται και παράγεται ένας πλυθησμός υπερθερμικών ιόντων.
- Η πίεση των ιόντων αυτών είναι και η κυρίαρχη στην περιοχή αυτή του Ηλιοφλοιού.



# ENAs (Energetic Neutral Atoms)

- Ενεργητικά φορτισμένα σωμάτια στον Ηλιοφλοιό (πρωτόνια Ηλιακού Ανέμου και PUIs), αλληλεπιδρούν με ουδέτερα άτομα του διαστρικού αερίου.
- Μέσω της ανταλλαγής φορτίου που επιτυγχάνεται με την αλληλεπίδραση δημιουργούνται τα ENAs
- Τα ENAs εισέρχονται στην Ηλιόσφαιρα και δεν επηρεάζονται από το διαπλανητικό μαγνητικό πεδίο.

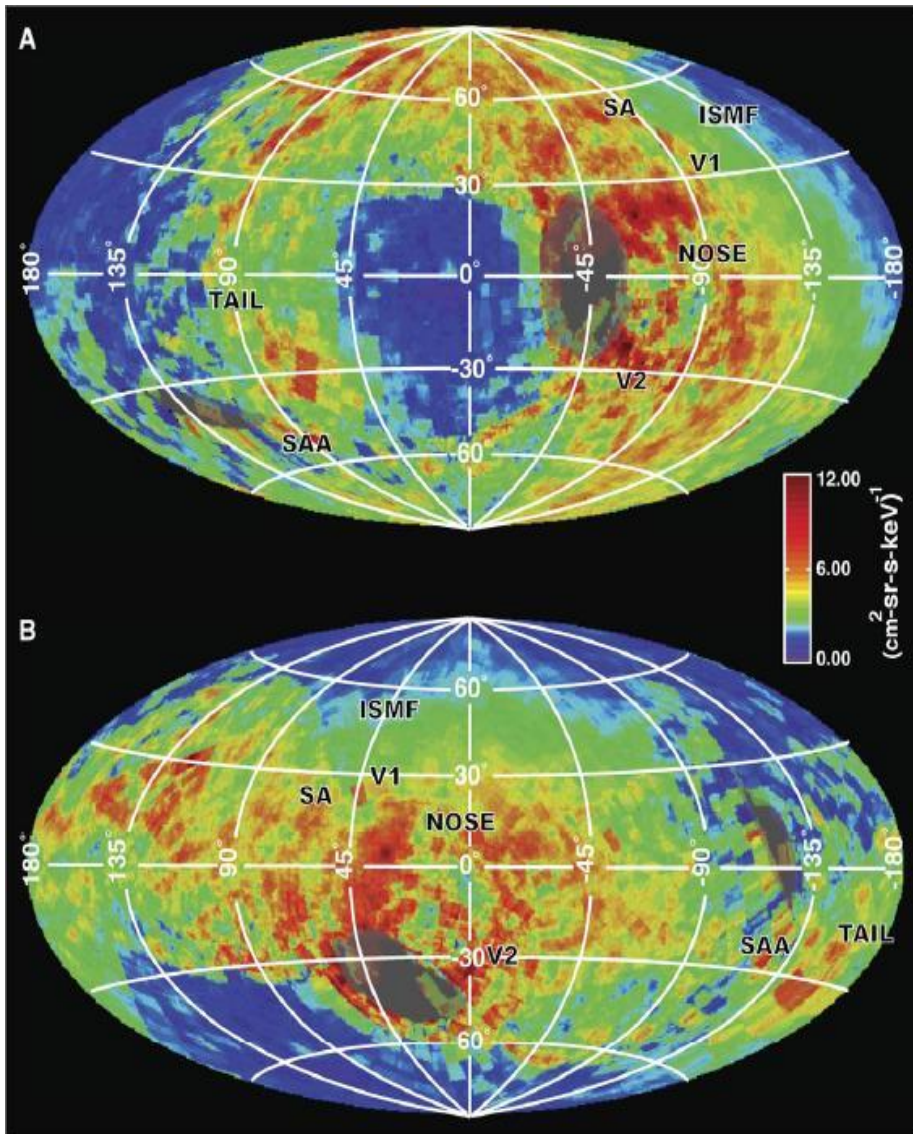
# Τα πρώτα δεδομένα.

- Ο Voyager 1 περνά από το κρουστικό κύμα της Ηλιόσφαιρας στις 94 A.U το 2004 σε εκλειπτικό πλάτος 35 μοίρες.
- Ο Voyager 2 εντοπίζει το Κρουστικό κύμα το 2007 σε απόσταση 84 A.U σε εκλειπτικό πλάτος -26 μοίρες.
- Το πλάσμα στον Ηλιοφλοιό παραμένει Υπερηχητικό. Λόγω του γεγονότος ότι μεγάλο μέρος της ενέργειας δαπανάται για την θέρμανση των pickup ions (PUI).

- Τα μέχρι σήμερα μοντέλα θεωρούσαν την πίεση ροής του διαστρικού αερίου να παίζει τον κυρίαρχο ρόλο στον σχηματισμό της Ηλιόσφαιρας.
- Με την μελέτη των Ενεργητικών ουδετέρων ατόμων (ENAs) φαίνεται πως τα μοντέλα μας αδυνατούν να αποδώσουν τα παρατηρούμενα δεδομένα.
- Καθοριστικός πλέον φαίνεται να είναι ο ρόλος του διαστρικού μαγνητικού πεδίου.

# Αποστολή Cassini – Huygens και IBEX.

- Με το όργανο Ion and Neutral Camera (INCA) έχουν γίνει μετρήσεις που εξυπηρετούν στην κατασκευή χάρτη του ουρανού των ENAs σε ενέργειες 6-13keV.
- Πιο πρόσφατα δεδομένα από τον (IBEX) μας δίνουν την δυνατότητα κατασκευής χαρτών ουρανού των ENAs μικρότερων Ενεργειών (0.5-6 keV)



Η Εικόνα των ENAs (5.2-13.5 keV) σε εκλειπτικές συντεταγμένες (πάνω) και σε γαλαξιακές συντεταγμένες (κάτω)

Οι χάρτες έγιναν με την χρήση δεδομένων από το όργανο INCA της αποστολής Cassini-Huygens.



# Κύρια χαρακτηριστικά.

- Το ελάχιστο της έντασης των ENAs εμφανίζεται στην κεντρική περιοχή της εικόνας καθώς και σε εκλειπτικά μήκη μεγαλύτερα των 120 μοιρών μέχρι περίπου τις -170 μοίρες.
- Η «ζώνη» αυτή εκτείνεται στον ισημερινό από -30 μοίρες έως -150 μοίρες και αφού κάνει κύκλο στον ουρανό ξαναπερνά τον ισημερινό στα μήκη από 50 μοίρες μέχρι 110 μοίρες, αλλά η ένταση στην πλευρά αυτή είναι μικρότερη.
- Δεν παρατηρείται μέγιστο στην ένταση στην κατεύθυνση της ροής του διαστρικού αερίου (Nose), όπως προέβλεπαν προηγούμενα μοντέλα.

- Οι εντάσεις στην κατεύθυνση της «ουράς» είναι μικρότερες.
- Επίσης παρατηρούμε ότι οι εντάσεις στην περιοχή αυτή του χάρτη (περίπου 90μοίρες εκλειπτικού μήκους), είναι λιγότερο «οργανωμένες».
- Οι εντάσεις στις κατευθύνσεις απ' όπου περασε ο Voyager 1 και Voyager 2 είναι λίγο μικρότερες από την ένταση στο μέγιστο της «ζώνης»

# Υπολογισμοί από τα δεδομένα του INCA

- Από τα δεδομένα για την ένταση των ENAs μπορούμε να εκτιμήσουμε την ένταση των Ιόντων.
- Θα είμαστε τότε σε θέση να εκτιμήσουμε την μή θερμική πίεση των ιόντων του Ηλιοφλοιού.
- Οπότε θα έχουμε μια διαφωτιστική εικόνα για την δυναμική που διέπει την αλληλεπίδραση της Ηλιόσφαιρας με το διαστρικό αέριο.

- Η μετρούμενη ένταση των ENAs με ταχύτητα  $v$  μπορεί επίσης να δοθεί από τον τύπο:

$$J_{ENA}(v, r_0 / v) = \sigma^{10} r_0 \int_0^{\infty} nH(r - vt) J_{ion}(r - vt, t) dr$$

- Όπου  $r_0$  είναι η απόσταση του TS.
- $nH$  είναι η πυκνότητα των διαστρικών ατόμων Υδρογόνου.
- $J_{ion}$  είναι η ένταση των ενεργητικών ιόντων
- $\sigma$  είναι ο charge-exchange factor.

Το ολοκλήρωμα μπορεί να γραφτεί ως:

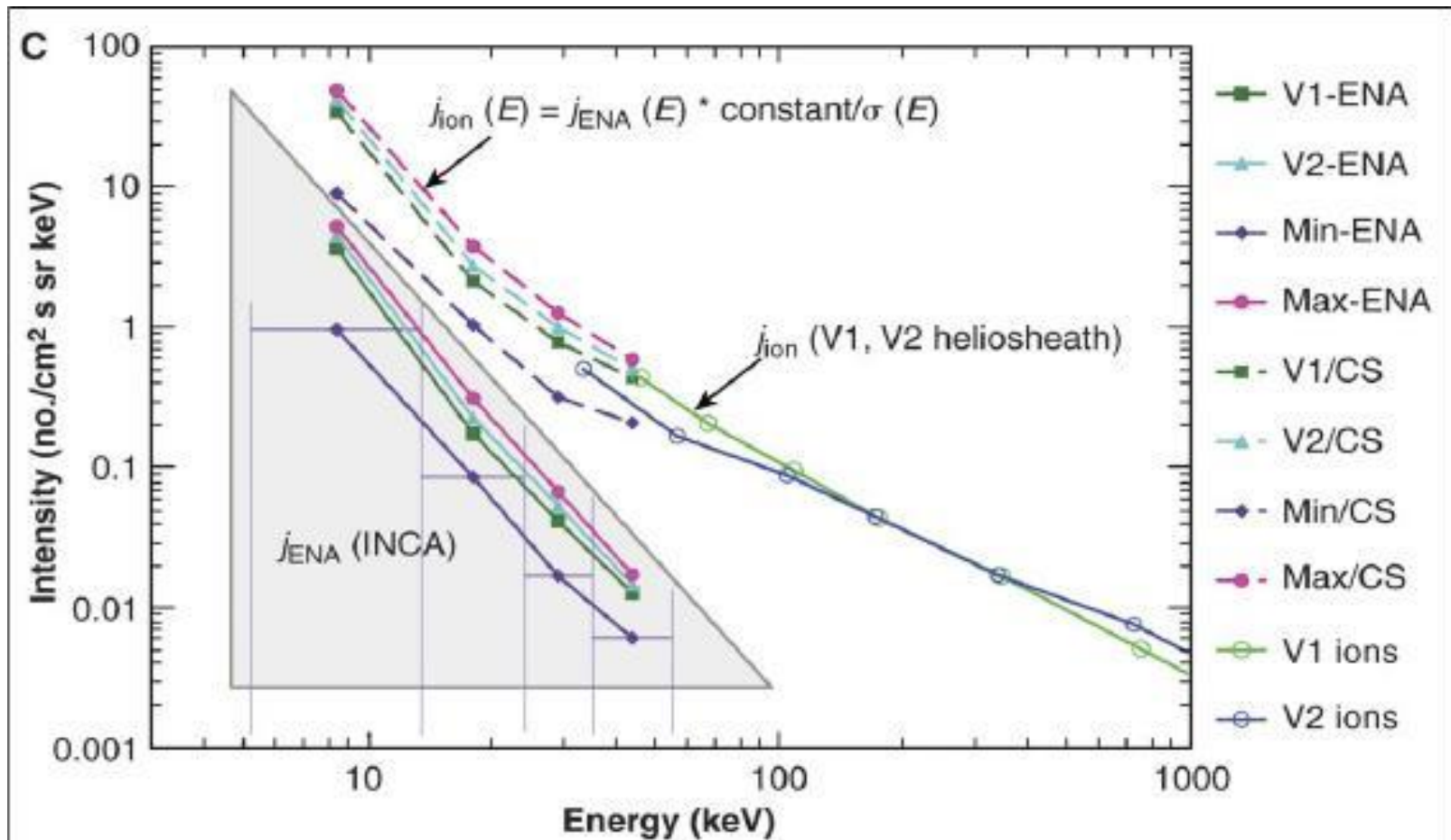
$$J_{ENA} = \sigma^{10} n_0 j_0 L_{ion}$$

Όπου  $n_0 j_0$  είναι η μέση τιμή του γινομένου  $nHj_{ion}$  σε διάστημα που καθορίζεται από την ακτινική απόσταση  $r_0$  έως  $r_0 + L_{ion}$ .

Στην περιοχή αυτή πάνω από το TS βρίσκεται ο περισσότερος πλυθησμός των ενεργητικών ιόντων.



Οπότε μπορούμε να μετατρέψουμε την μετρούμενη ένταση των ENAs στην αντίστοιχη μέση ένταση των ιόντων του Ηλιοφλοιού.



- Με τα όσα αναφέρθηκαν μπορεί να γίνει ο υπολογισμός της πίεσης του πλάσματος στις αντίστοιχες ενέργειες  $E \geq 6 \text{ keV}$ .
- Πολλά από τα PUIs τα οποία είναι συνιφασμένα με το TS και τον Ηλιοφλοιό αναμένεται να έχουν ενέργειες αυτού του εύρους.

Για να γίνουν οι μετατροπές δεχόμαστε μια μέση τιμή του  $L_{\text{ion}} = 50 \text{ A.U}$

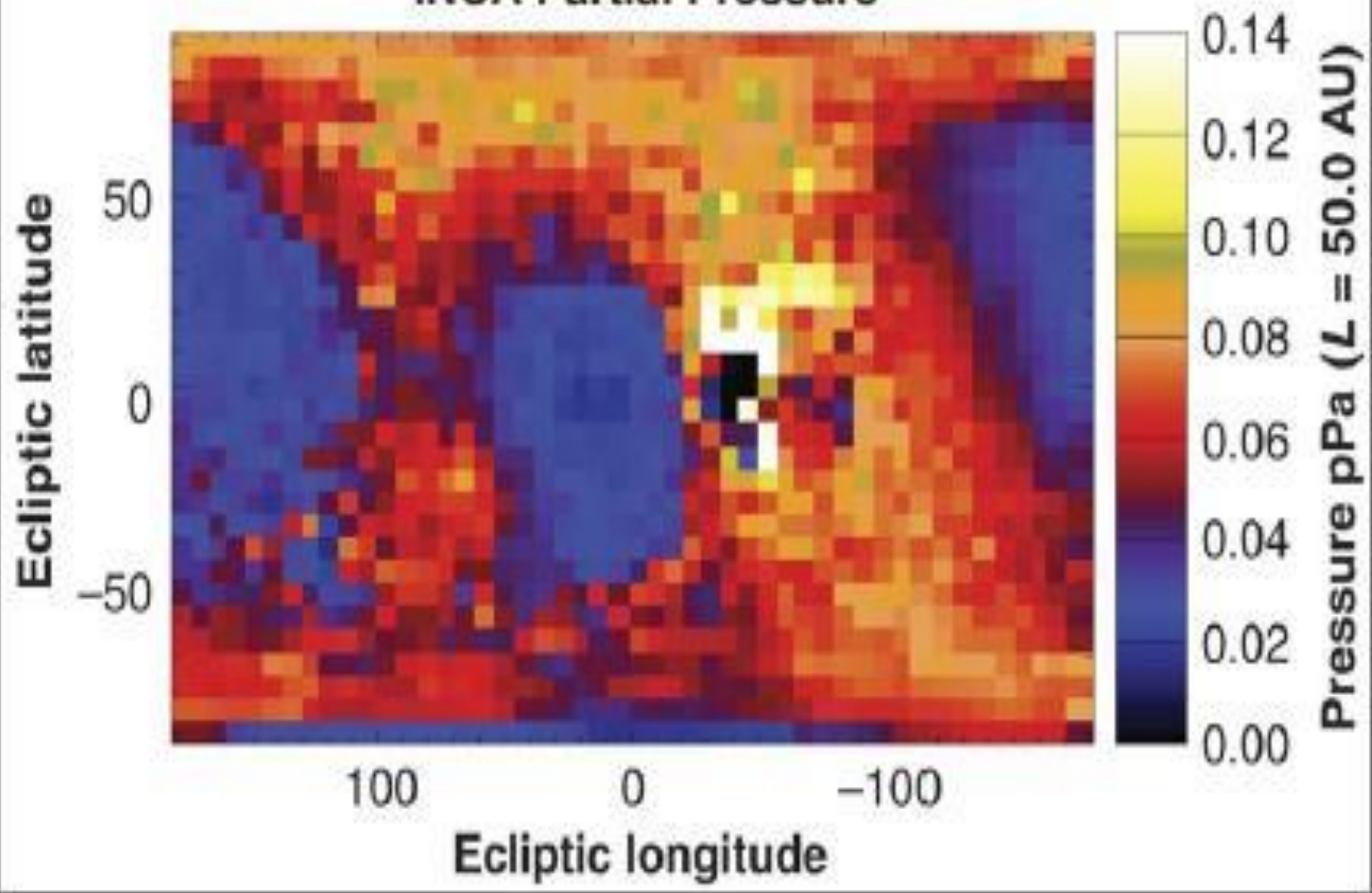
Η μερική πίεση  $\Delta P$  είναι:

$$\Delta P = (4\pi r/3) J_{\text{ion}} \Delta E$$

όπου  $r$ : η ορμή των πρωτονίων  
και  $\Delta E$ : το εύρος ενέργειας του  
εκάστοτε καναλιού του INCA

Προσθέτοντας αυτές τις ποσότητες για κάθε κανάλι του οργάνου μπορεί να φτιαχτεί ο αντίστοιχος χάρτης πίεσης σε εκλειπτικές συντεταγμένες.

# INCA Partial Pressure



- Η κατανομή της πίεσης στις εκλειπτικές συντεταγμένες είναι όμοια με τον χάρτη των ENAs που παρουσιάσαμε προηγουμένως.
- Μετρήσεις που έγιναν από τον Voyager 1 στην φωτεινή περιοχή της κατανομής υποδεικνύουν ότι πρέπει να προστεθούν ακόμα 0.02 pPa στην εν λόγω περιοχή.
- Εάν λάβουμε υπ' όψη μας και τα δεδομένα του IBEX (σε ενέργειες 0.2-0.6 keV) τότε η ολική μη θερμική πίεση για ενέργειες μεγαλύτερες των 0.2 keV ξεπερνά τα 0.31 pPa



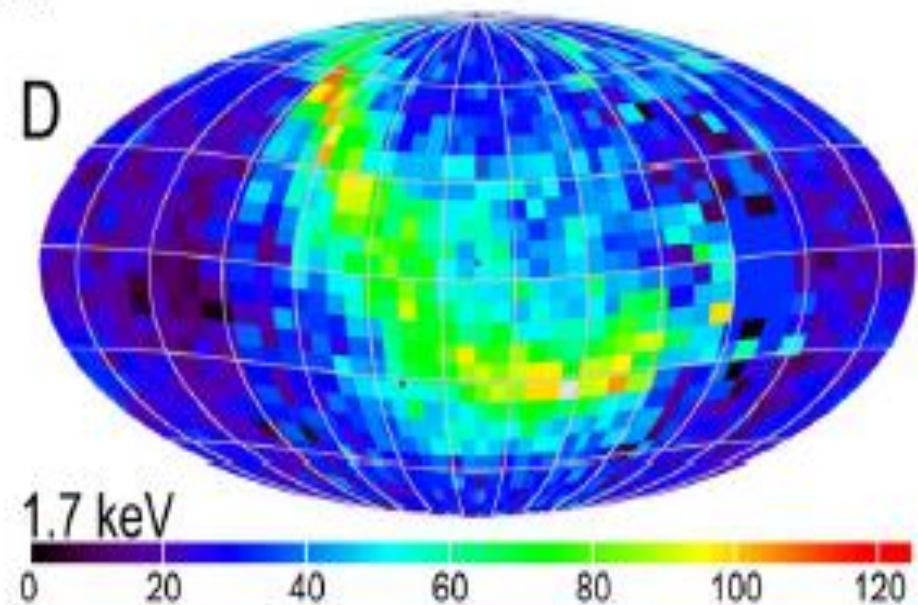
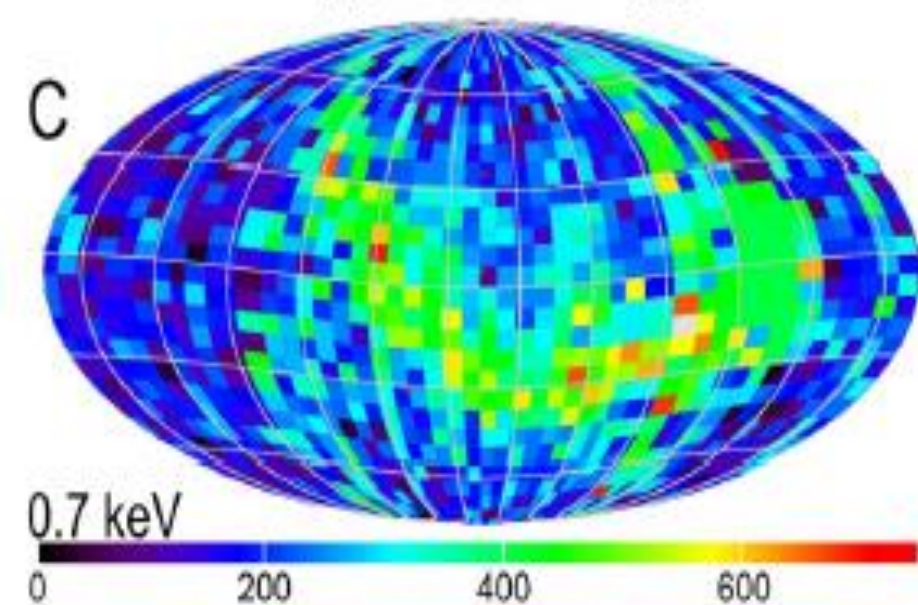
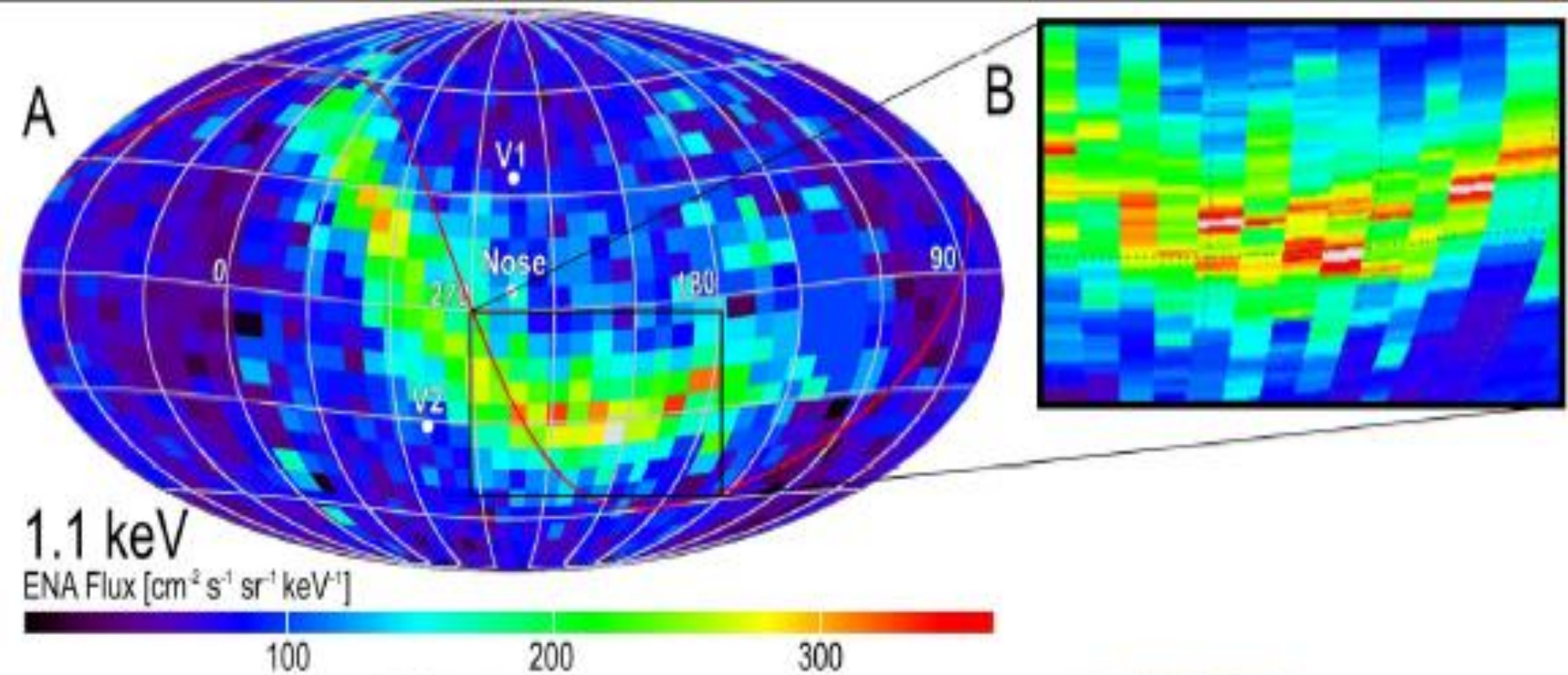
- Η πίεση ροής του διαστρικού αερίου είναι  $0.11 \text{ pPa}$  για πυκνότητα διαστρικού αερίου  $0.1/\text{cm}^3$
- Θα πρέπει η πίεση του διαστρικού μαγνητικού πεδίου να παίζει κυρίαρχο ρόλο στην διαμόρφωση της Ηλιόσφαιρας.
- Η αλληλεπίδραση των ιόντων του Ηλιοφλοιού με το διαστρικό μαγνητικό πεδίο έχει κυρίαρχο ρόλο στην διαμόρφωση της Ηλιόσφαιρας και στην χαρακτηριστική μορφή των χαρτών των ENAs.
- Οπότε παρουσιάζουμε το εναλλακτικό μοντέλο που υπήρχε για την Ηλιόσφαιρα.

- Δημιουργία διαμαγνητικής «φυσάλιδας»
- Κύρια αλληλεπίδραση PH με PB
- Δημιουργία της «ζώνης» εκεί όπου το διαστρικό μαγνητικό πεδίο είναι κάθετο στην επιφάνεια της Ηλιόπαυσης.

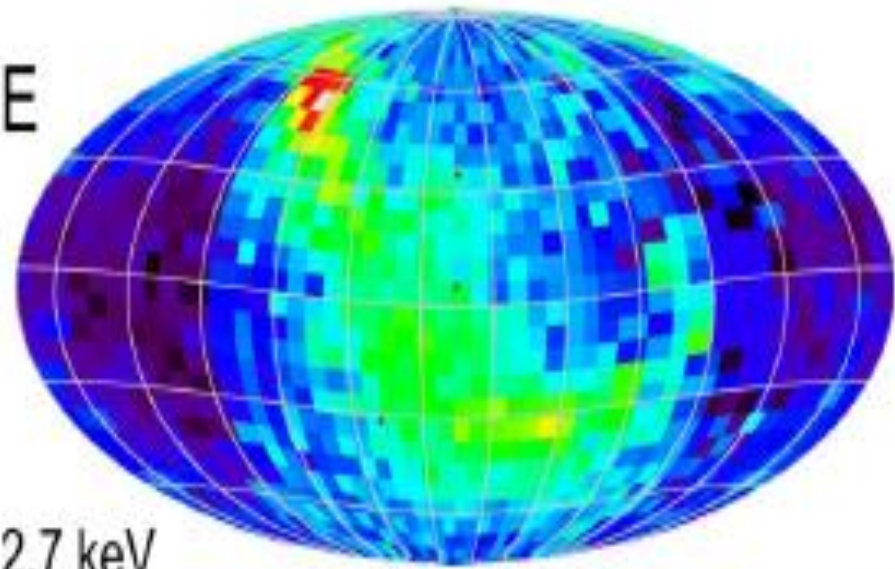
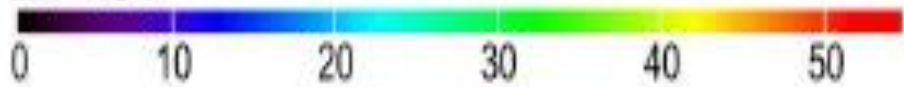
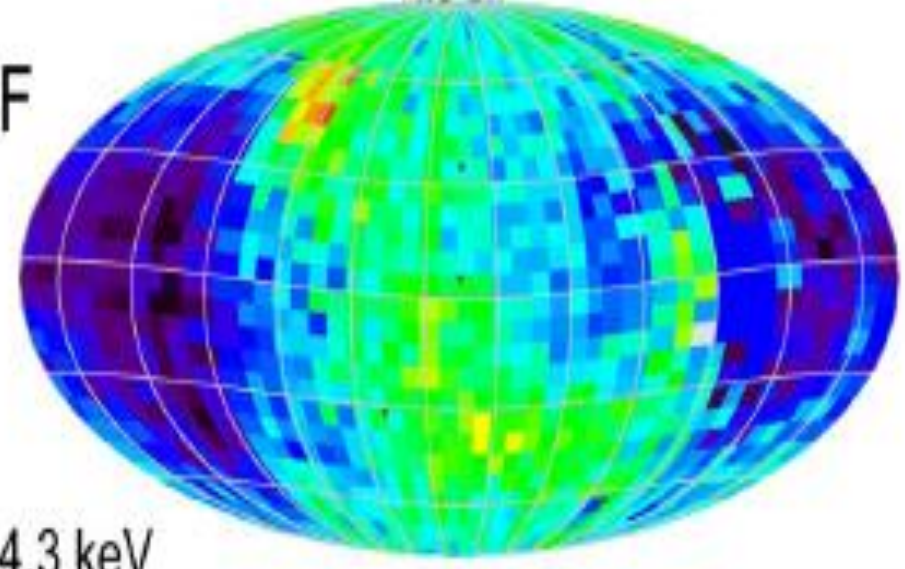
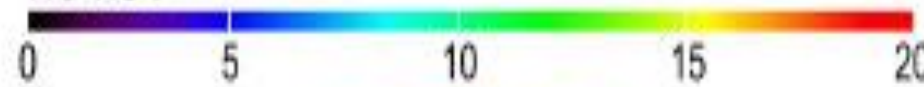
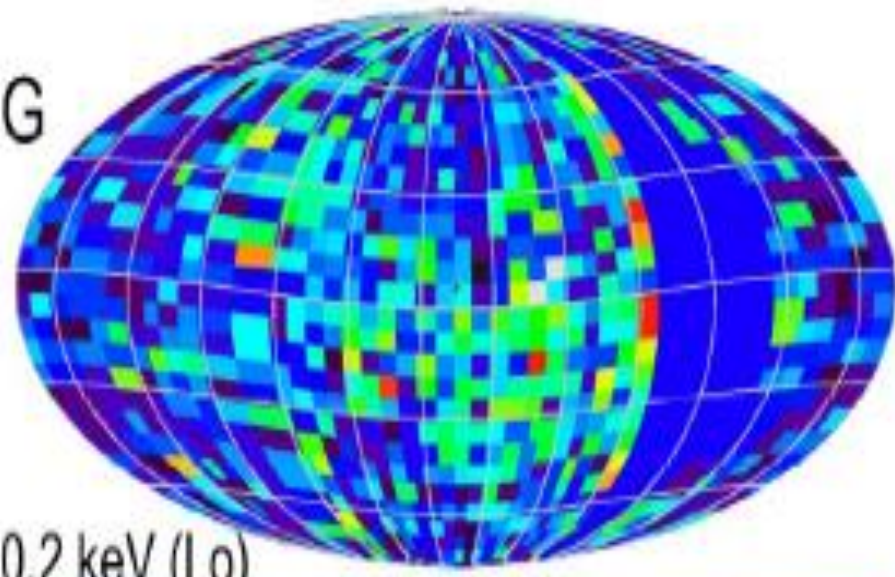
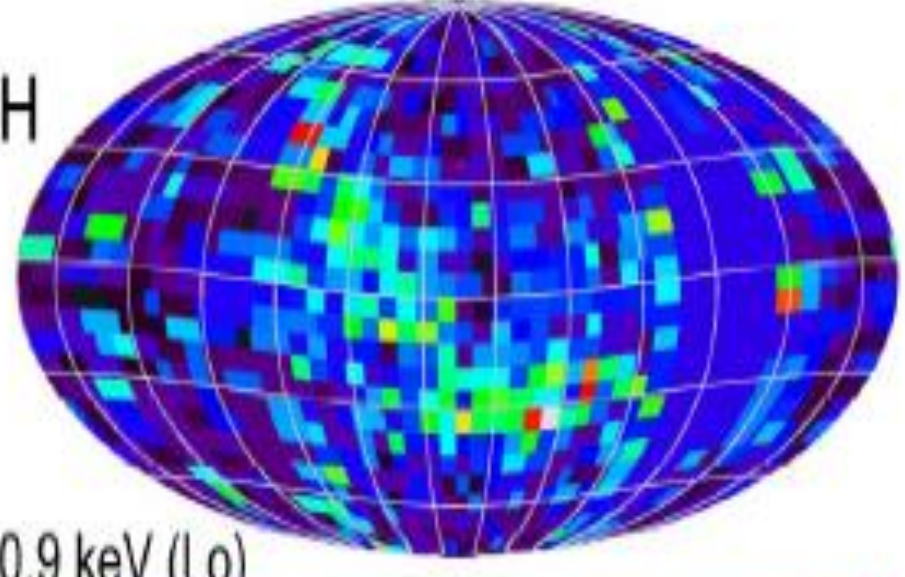
# Δεδομένα από τον IBEX

- Διαθέτει 2 single-pixel ENA καμερες υψηλής ευαισθησίας.
- A) IBEX-Lo : Μετράει ENAs ενεργειών  $10\text{eV}-2\text{KeV}$
- B) IBEX-Hi : Μετράει ENAs ενεργειών  $300\text{eV}-6\text{keV}$

Σε αυτό το φάσμα ενεργειών υπάρχει η δυνατότητα καταγραφής των ENAs που προκύπτουν από ανταλλαγή φορτίου με τα ιόντα του Ηλιακού Ανέμου και με τα PUIs





**E****2.7 keV****F****4.3 keV****G****0.2 keV (Lo)****H****0.9 keV (Lo)**

# Κύρια χαρακτηριστικά.

- Ύπαρξη φωτεινής «κορδέλλας» όπως αναφέρεται.
- Η ένταση των ENAs στην «κορδέλλα» είναι 2-3 φορές μεγαλύτερη από την ένταση στην γύρω της περιοχή.
- Το εύρος της κυμαίνεται από 15-25μοίρες.
- Το μέσο εύρος είναι διαφορετικό για κάθε ενέργεια.
- Περνάει 25μοίρες μακριά από την «nose»



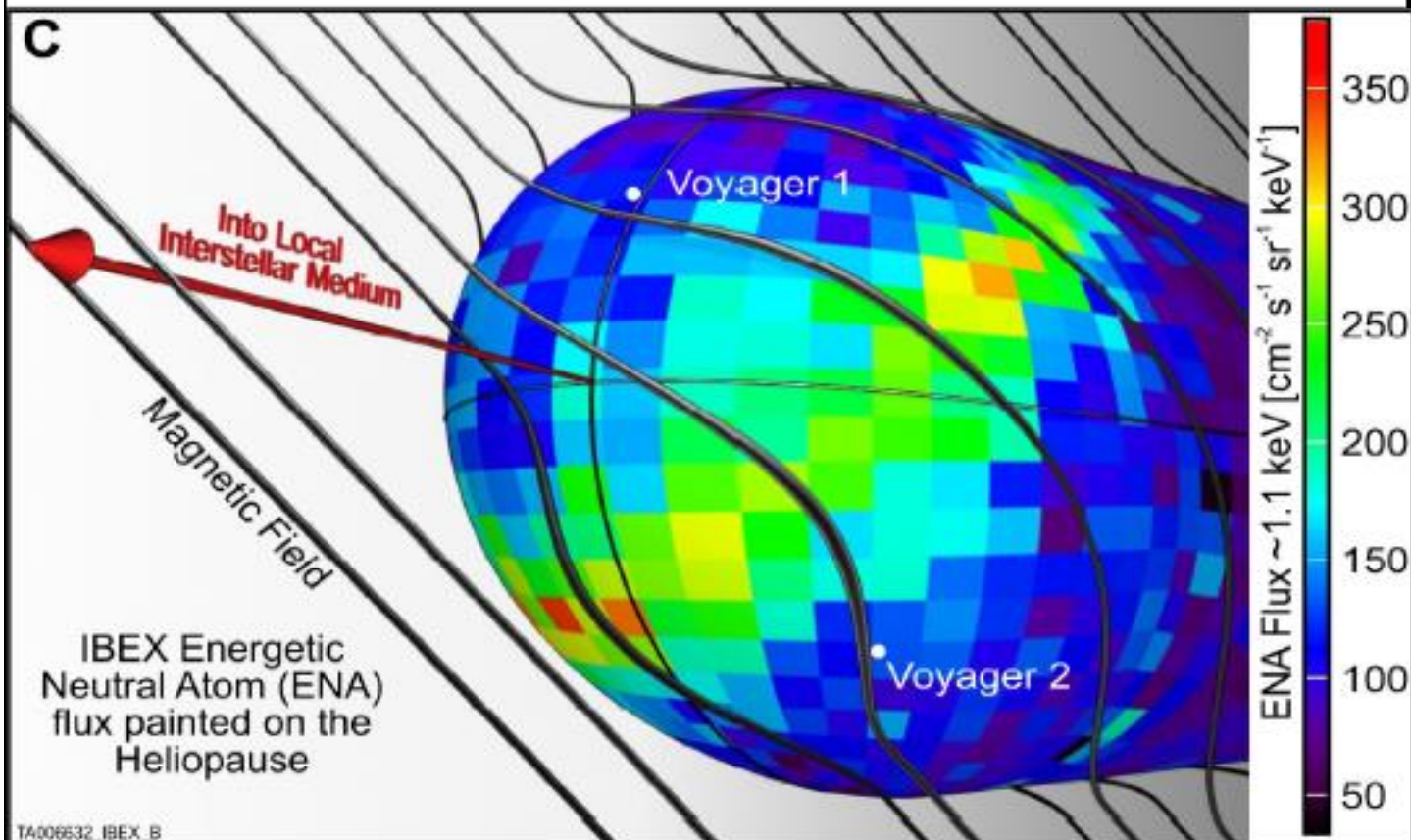
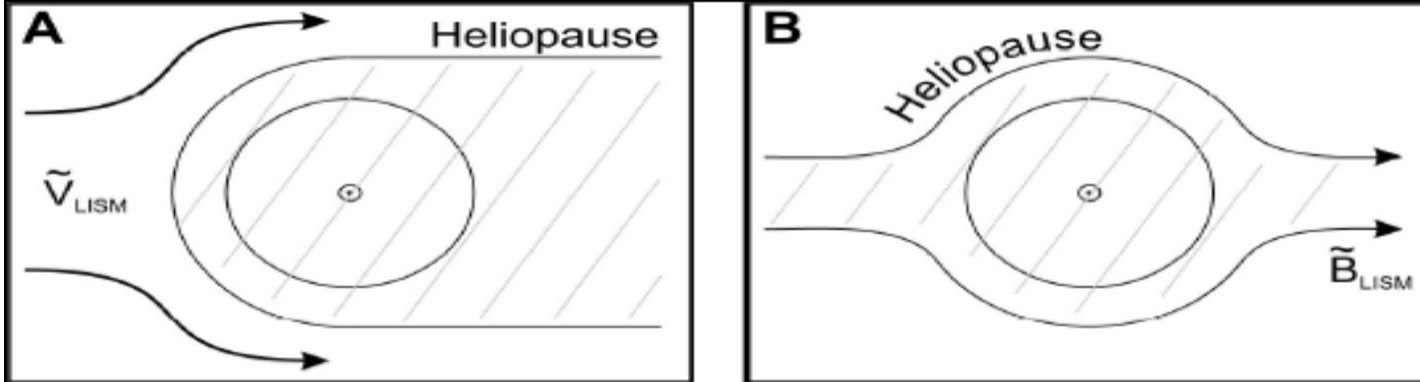
- Στους χάρτες των ENAs για ενέργειες 1.7keV, 2.7keV και 4.3keV διακρίνουμε φαρδύτερες περιοχές εντονότερης εκπομπής.

Ο σχηματισμός της «κορδέλας» που φαίνεται στους χάρτες των ENAs, δεν μπορεί να εξηγηθεί από κάποιο μοντέλο που είχαμε μέχρι σήμερα για την αλληλεπίδραση της Ηλιόσφαιρας με το διαστρικό αέριο.

Πιθανή εξήγηση για τον παρατηρούμενο σχηματισμο:

Το διαστρικό μαγνητικό πεδίο κατέχει κυρίαρχο ρόλο στον σχηματισμό της εξωτερικής Ηλιόσφαιρας.

Ένα πιθανό μοντέλο αλληλεπίδρασης της Ηλιόσφαιρας με το διαστρικό χώρο που προτείνει ο D.J.McComas με τους συνεργάτες του είναι το εξής:



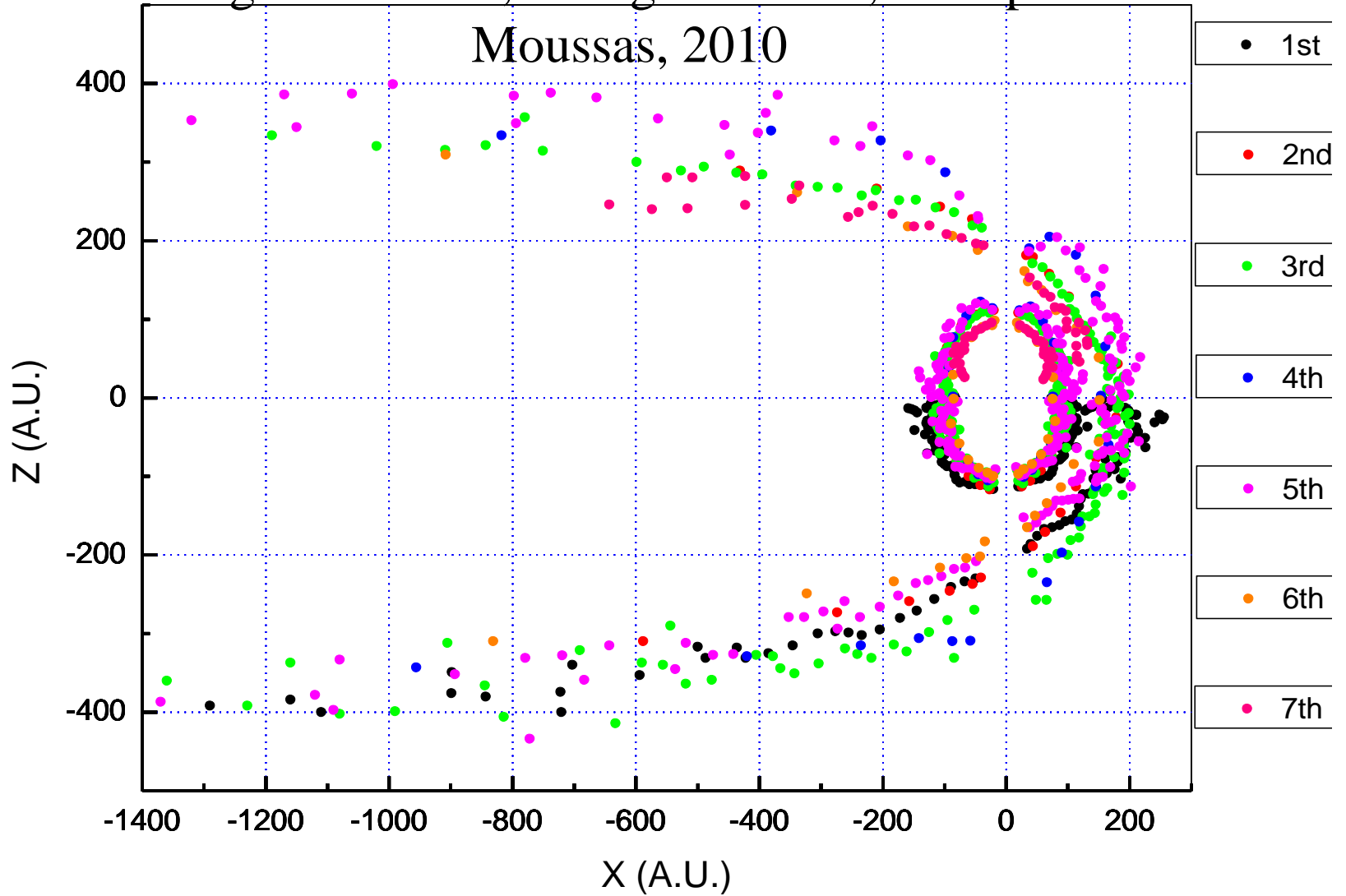
- Οι πίεση ροής του διαστρικού αερίου είναι συγκρίσιμη με την πίεση του μαγνητικού πεδίου του διαστρικού αερίου.
- Στην εικόνα φαίνεται πως το διαστρικό μαγνητικό πεδίο περιτυλίγεται γύρω από την ηλιόπαυση.
- Το διαστρικό μαγνητικό πεδίο συμπιέζει την Ηλιόπαυση περισσότερο στο νότιο ημισφαίριο παρά στο βόριο.

Πιθανή εξήγηση γιατί ο Voyager 2 εντόπισε το κρουστικό κύμα 10A.U εγγύτερα στον Ήλιο απ' ό τι ο Voyager 1.

- Ομοίως με την προηγούμενη ανάλυση των στοιχείων του Cassini, η «κορδέλα» παρατηρείται εκεί όπου το ISMF είναι κάθετο στην Ηλιόπαυση.

# The shape of the heliosphere, 1990-2009

Vangelis Paouris, George Exarhos, Xenophon



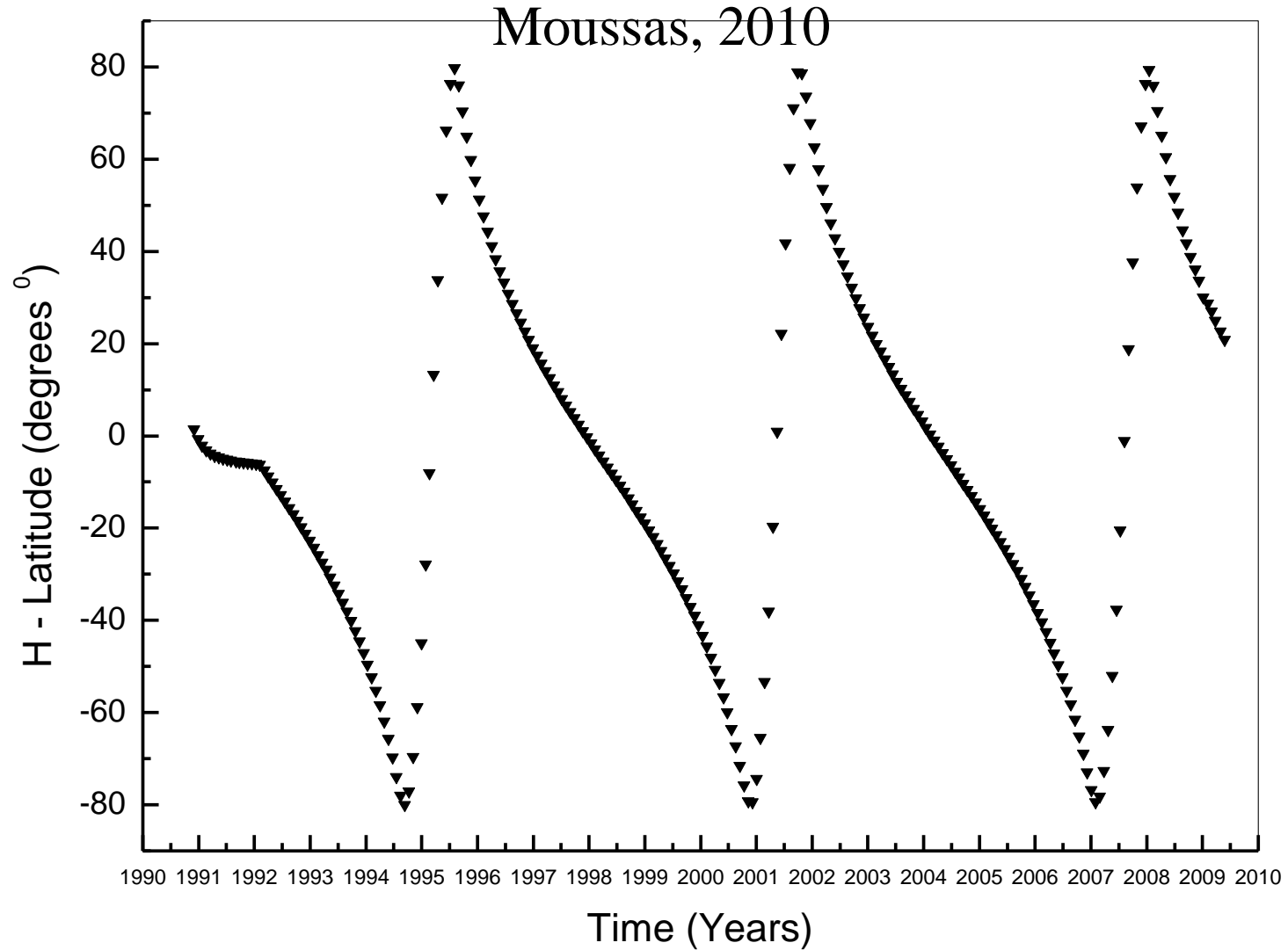


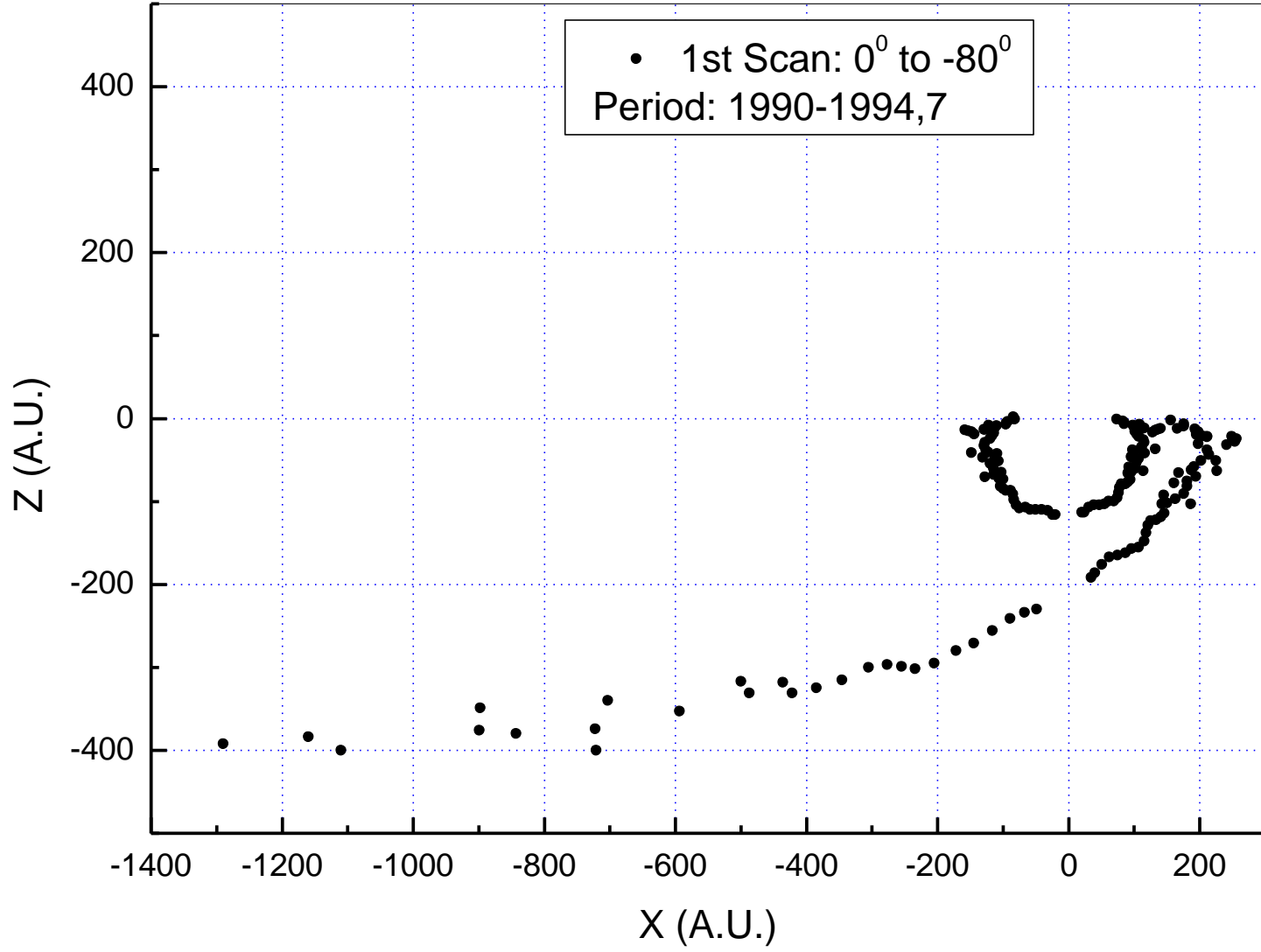


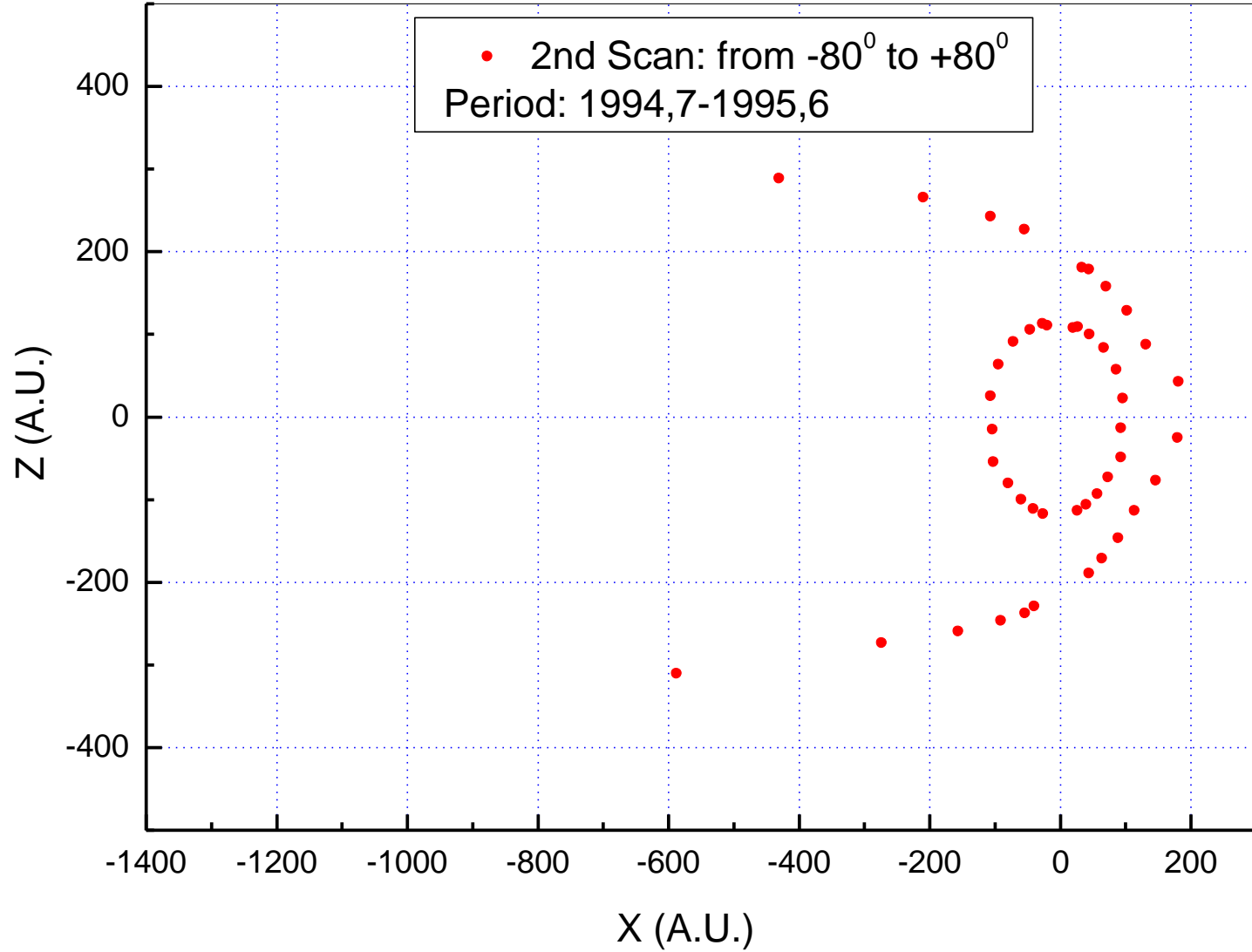
Ελάχιστο  
Μέγιστο

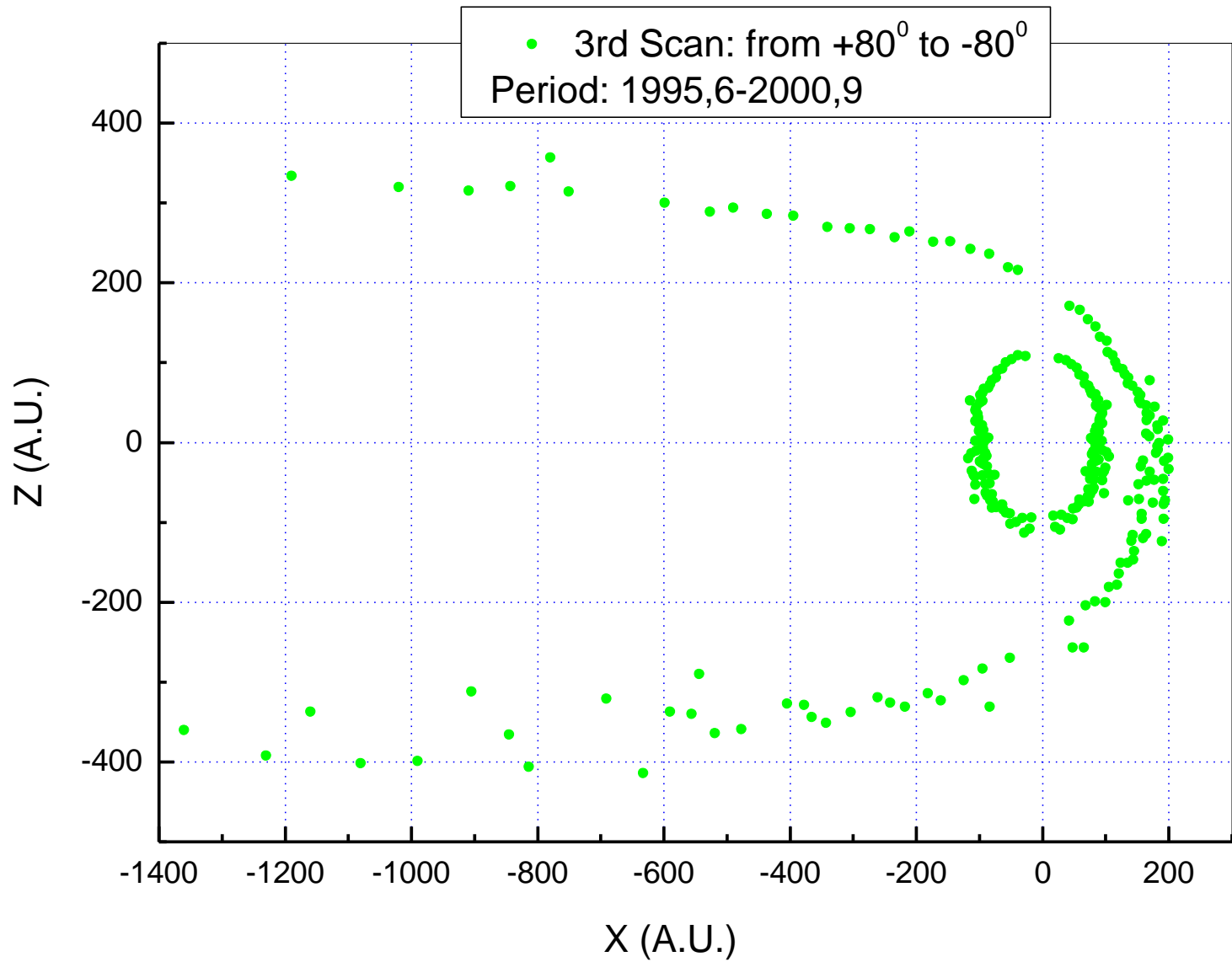
# The shape of the heliosphere, 1990-2009

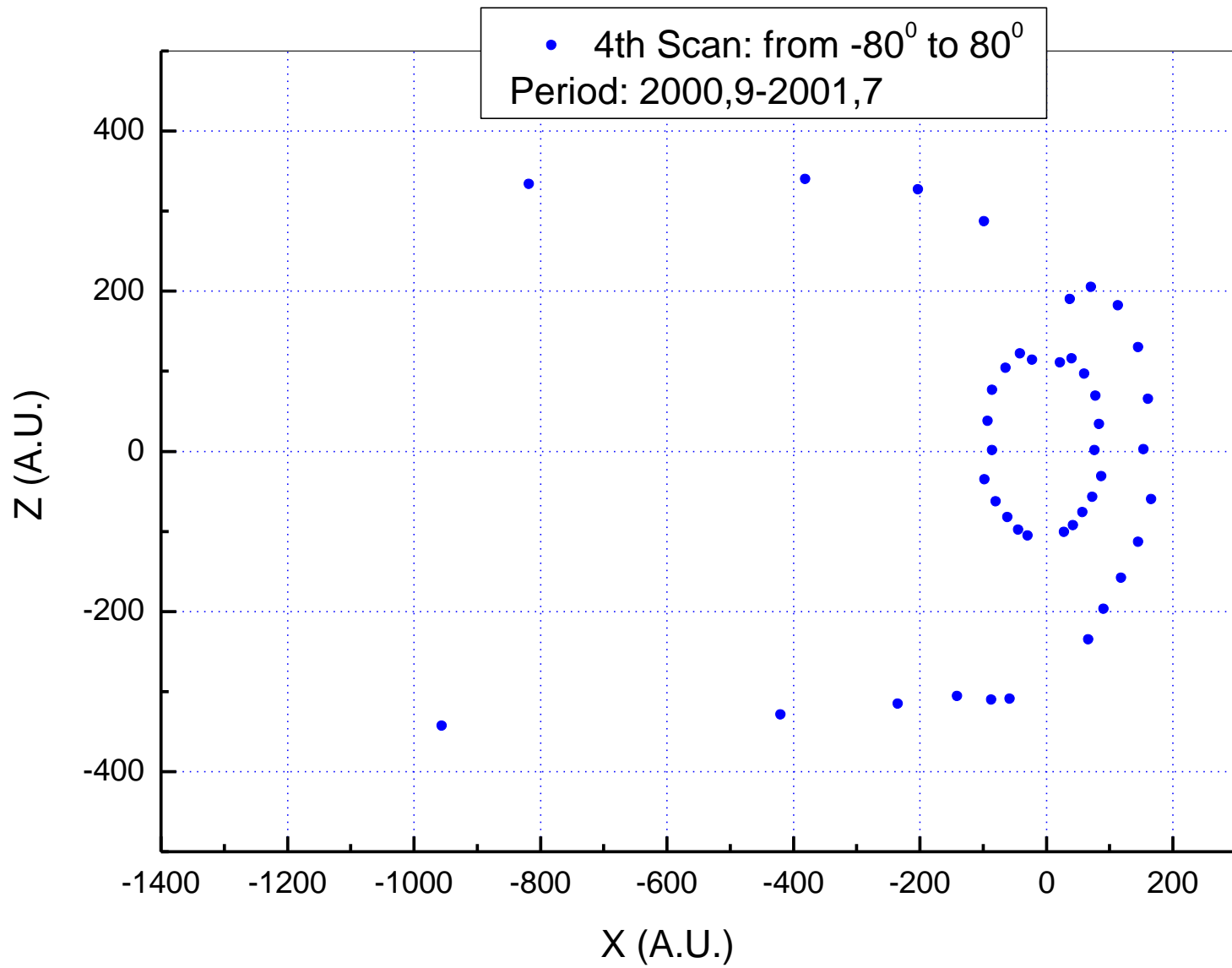
Vangelis Paouris, George Exarhos, Xenophon



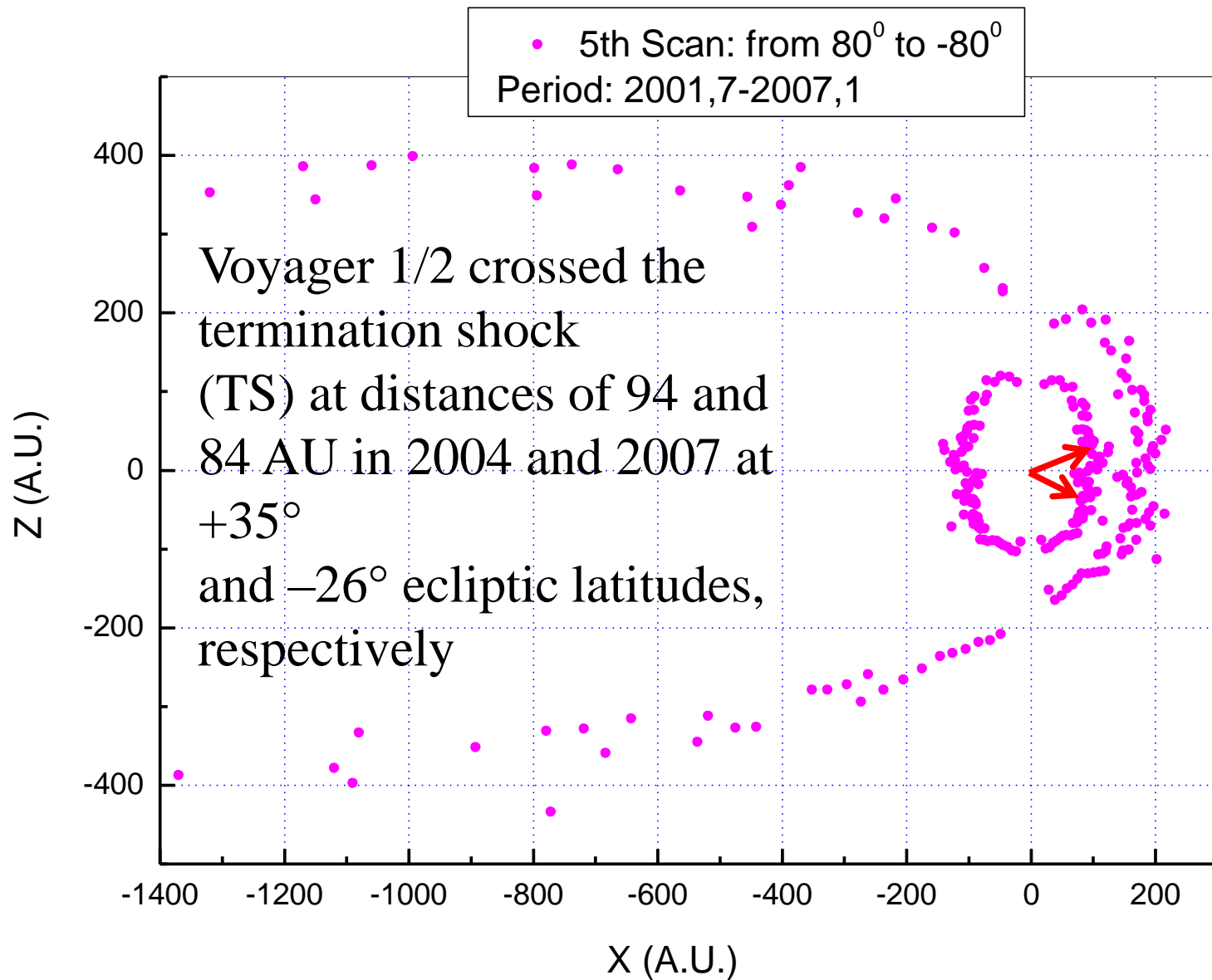


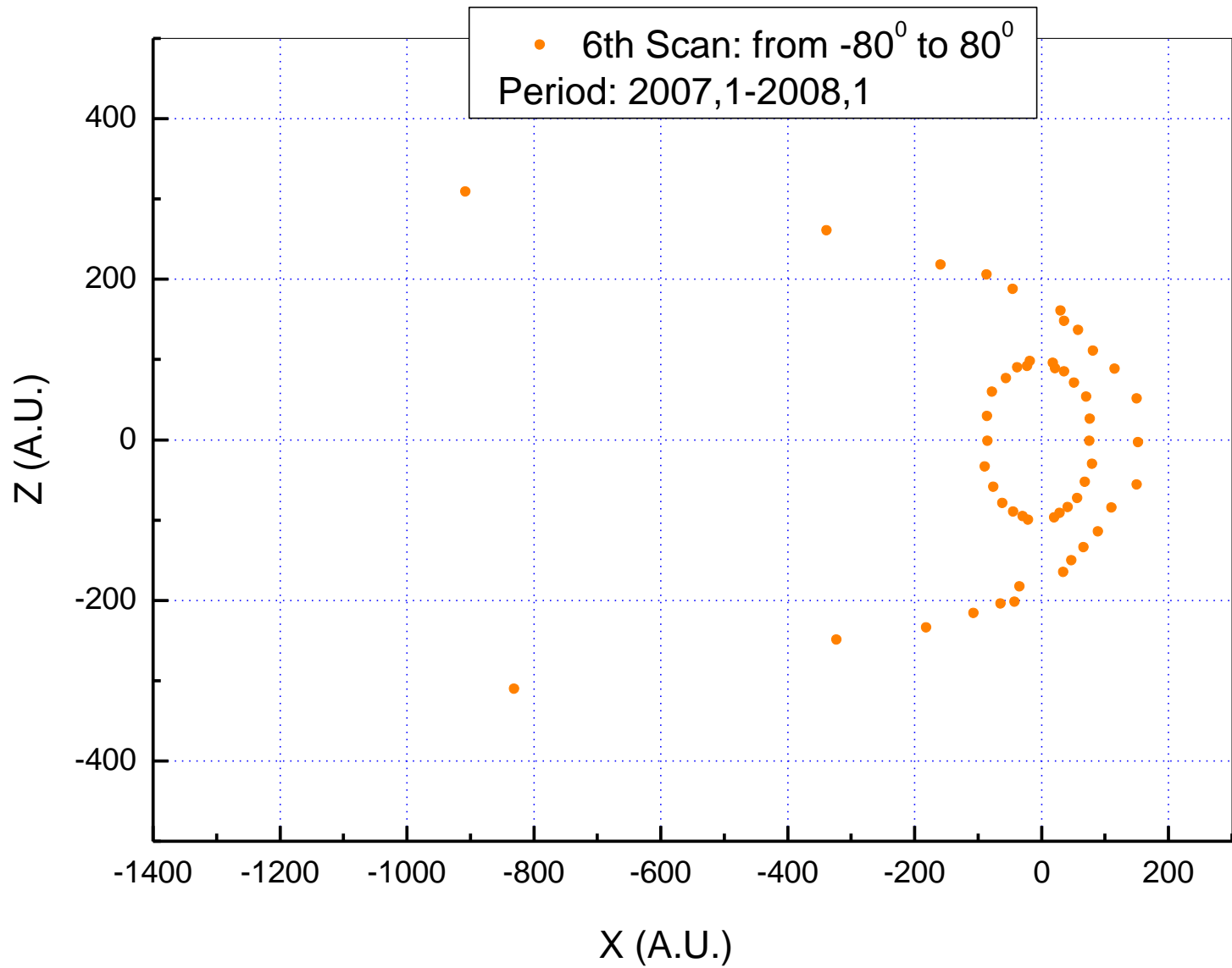


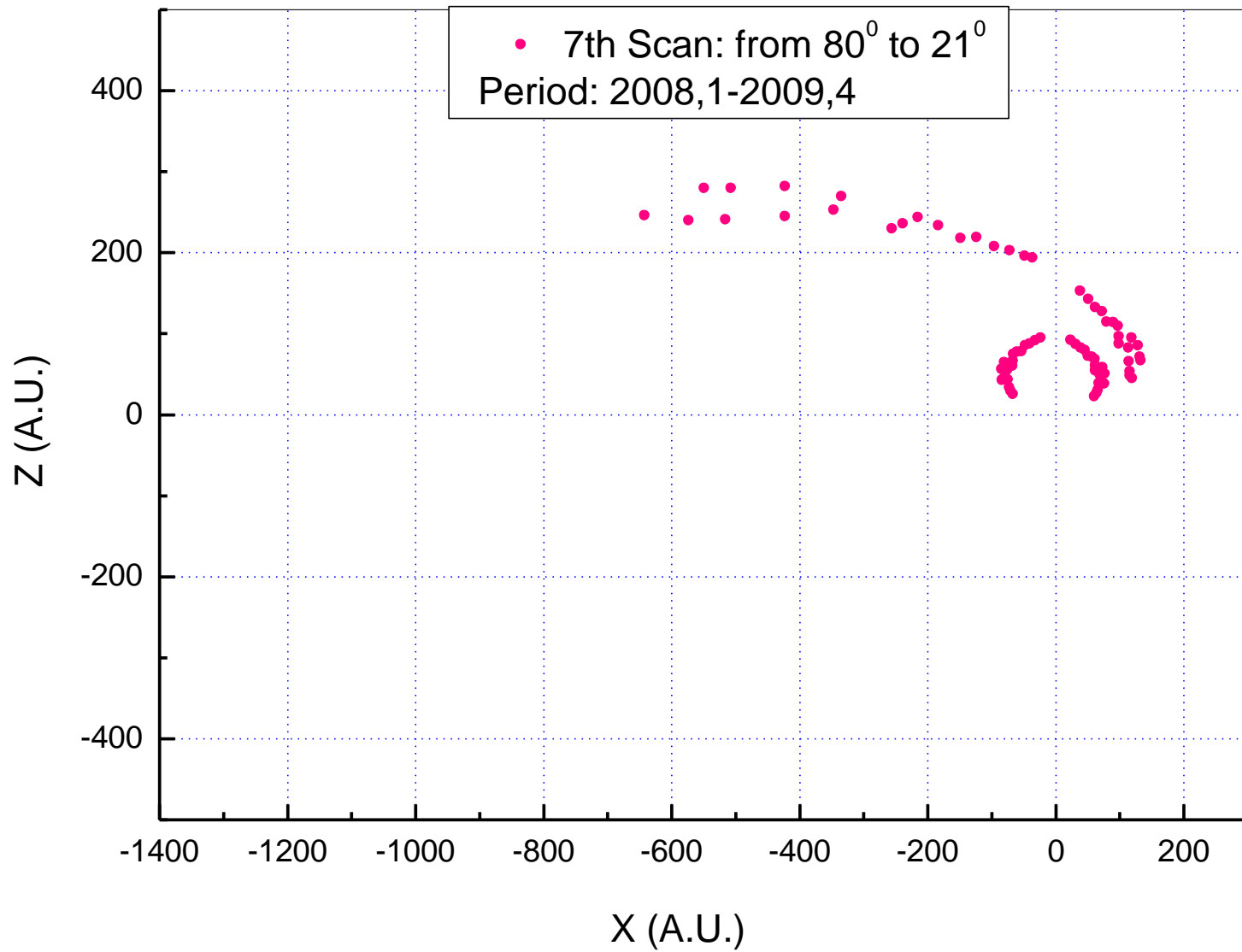






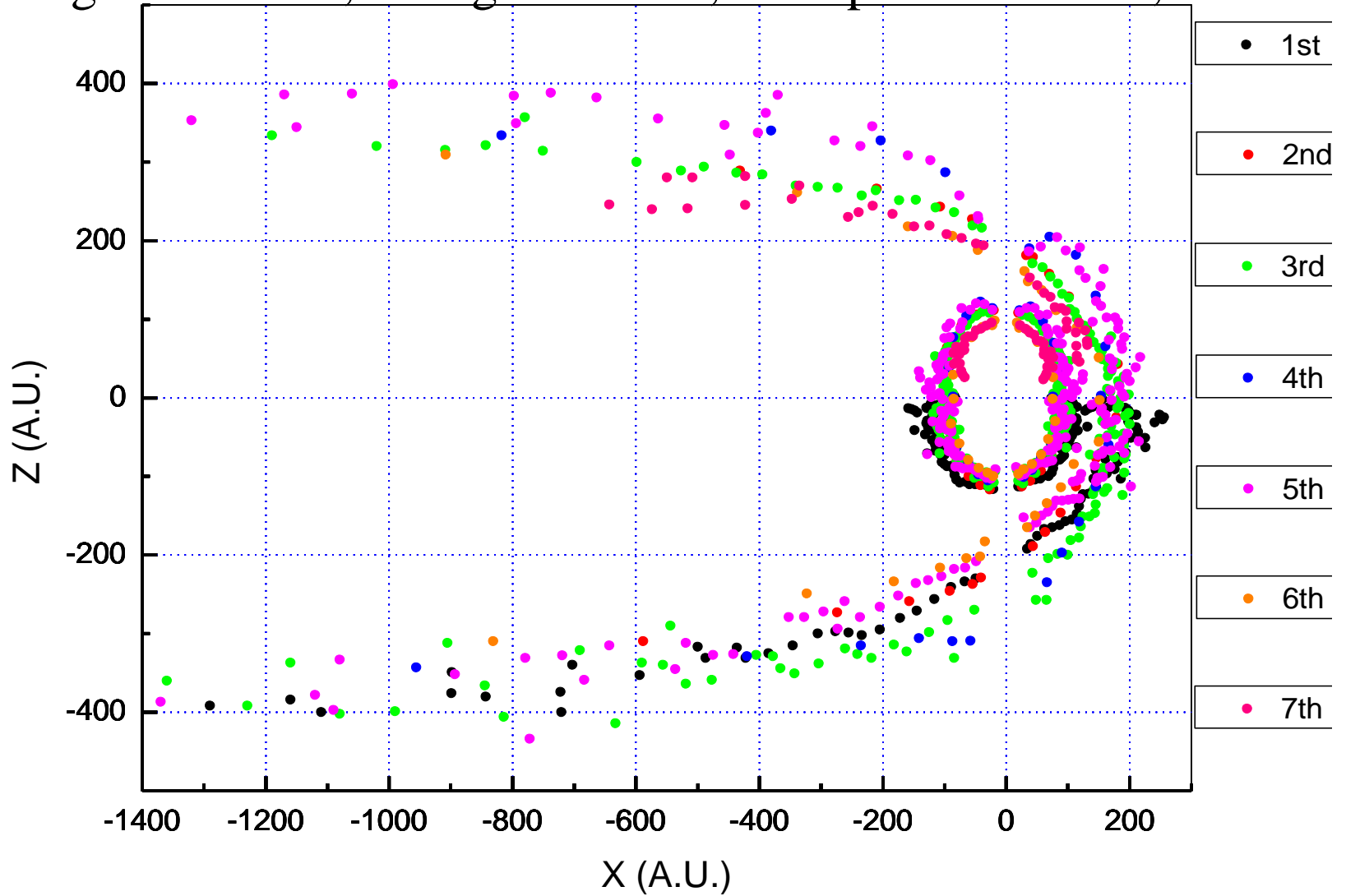




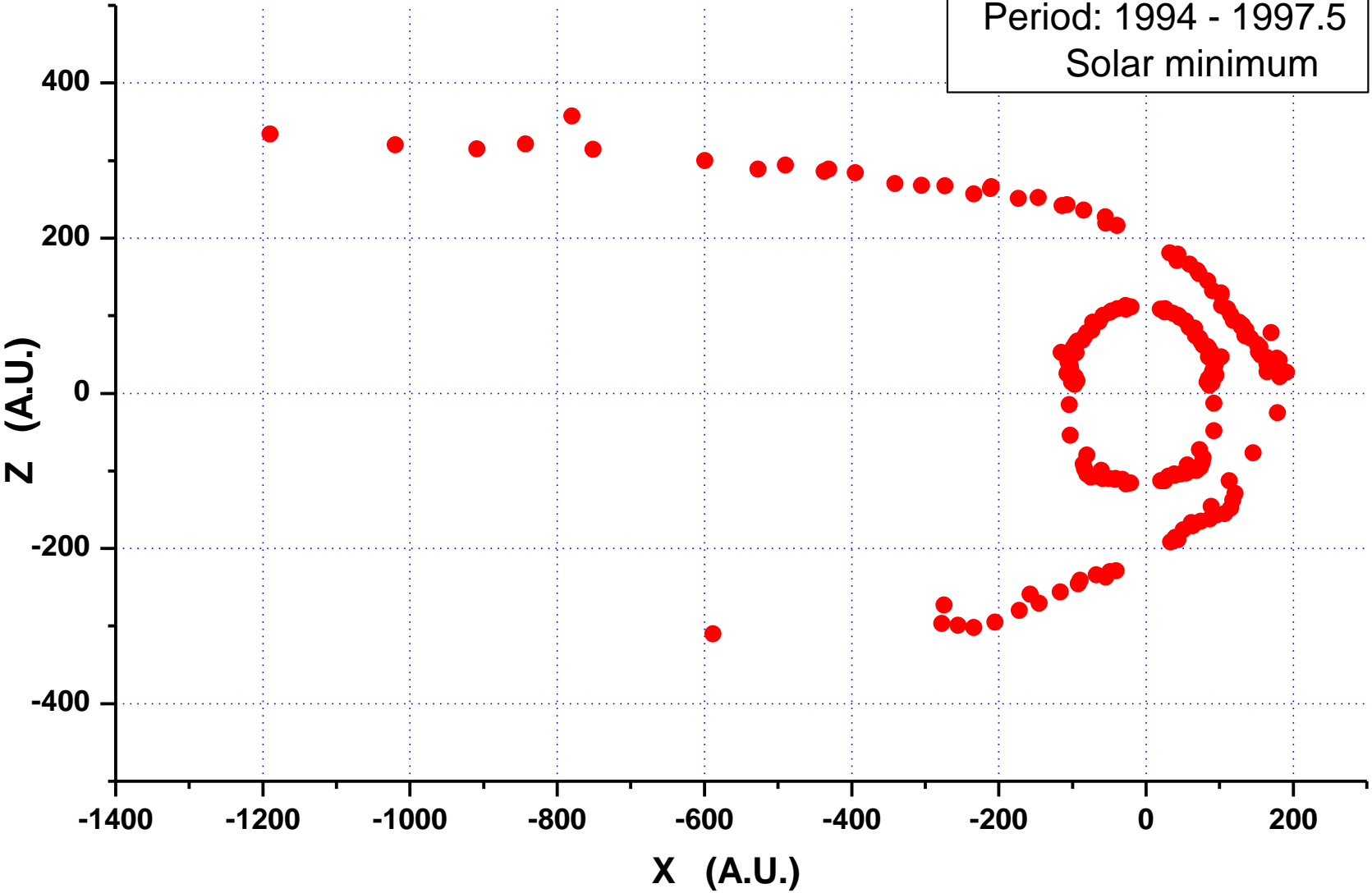


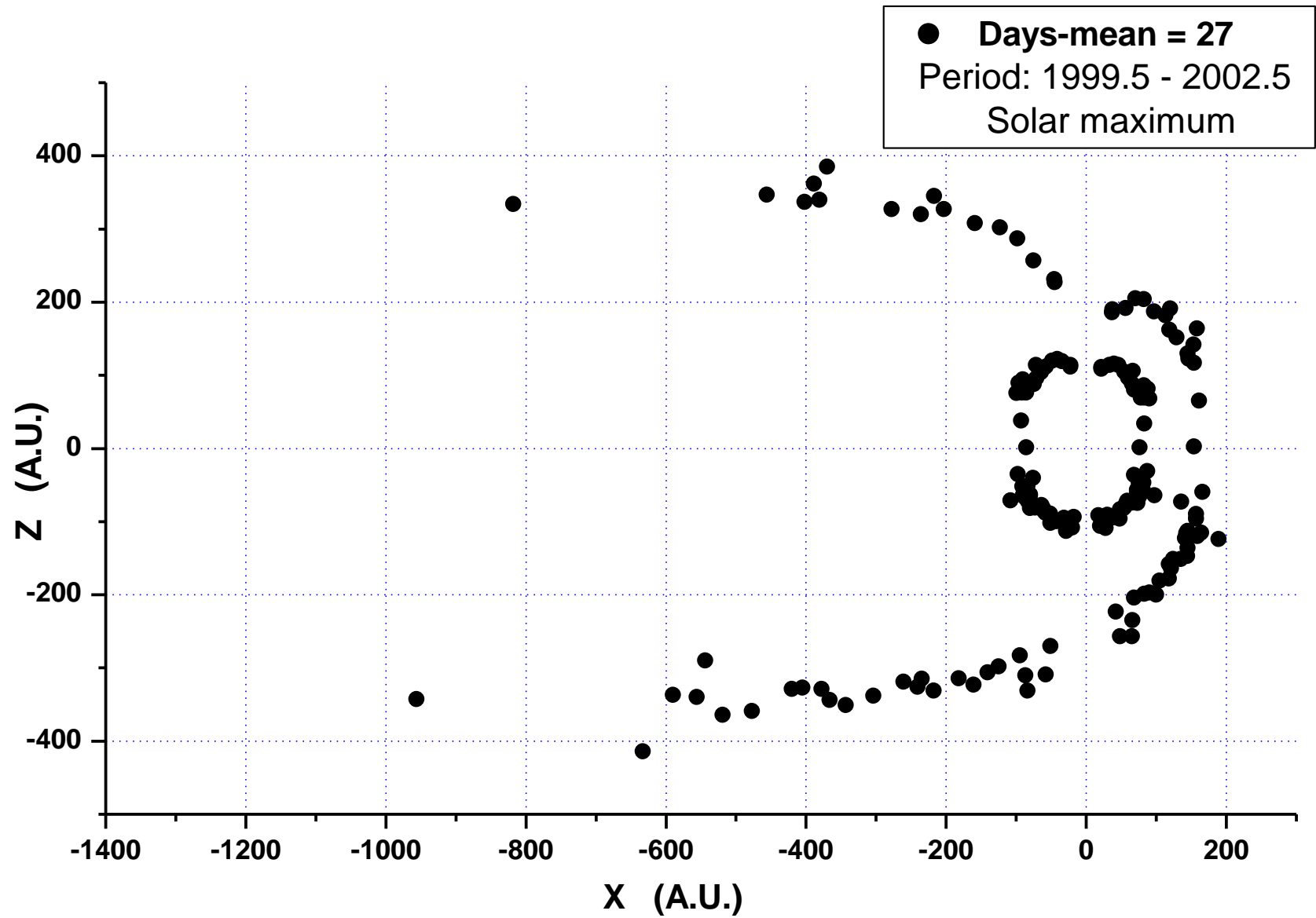
# The shape of the heliosphere, 1990-2009

Vangelis Paouris, George Exarhos, Xenophon Moussas, 2010



● Days-mean = 27  
Period: 1994 - 1997.5  
Solar minimum

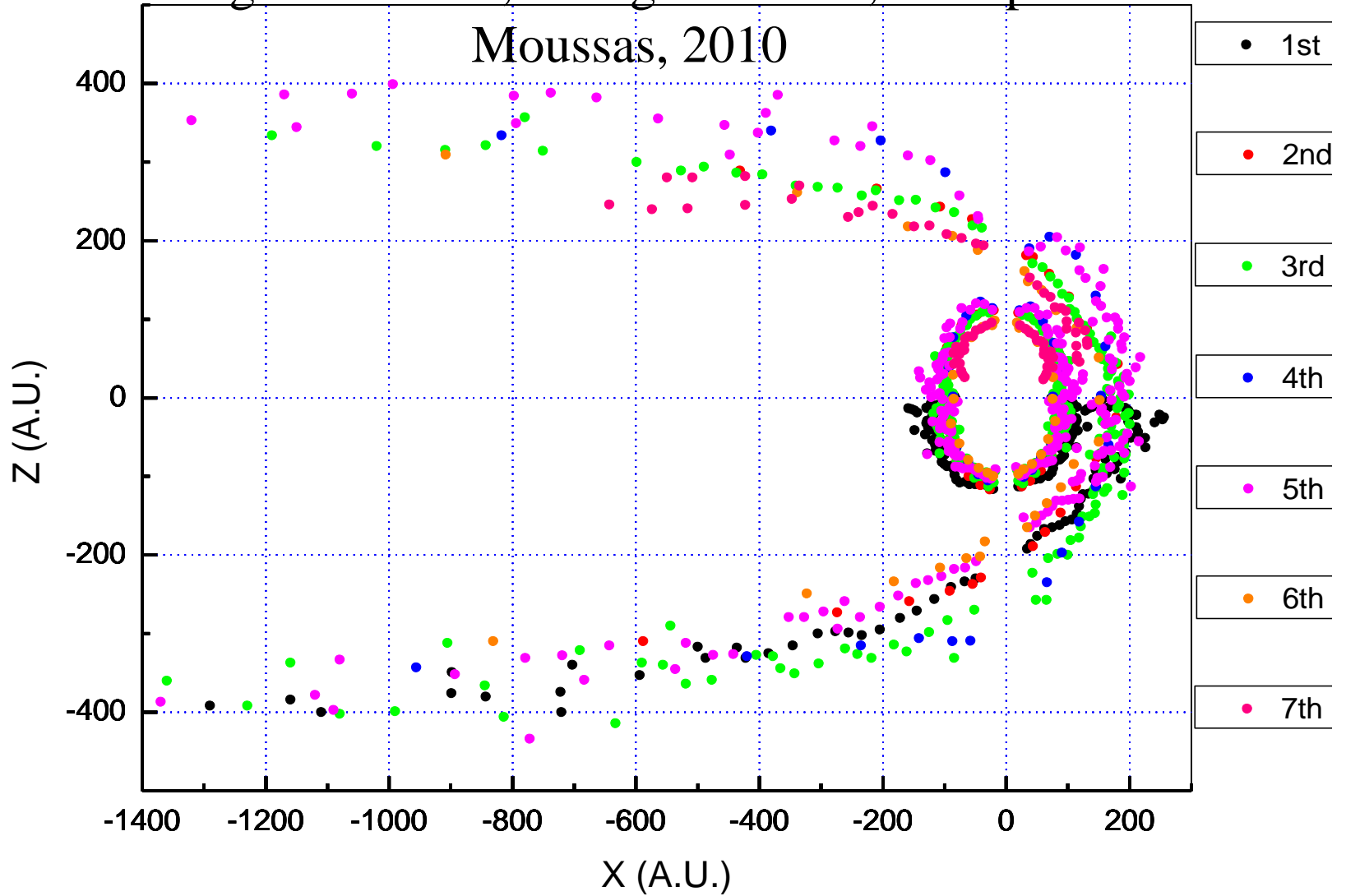






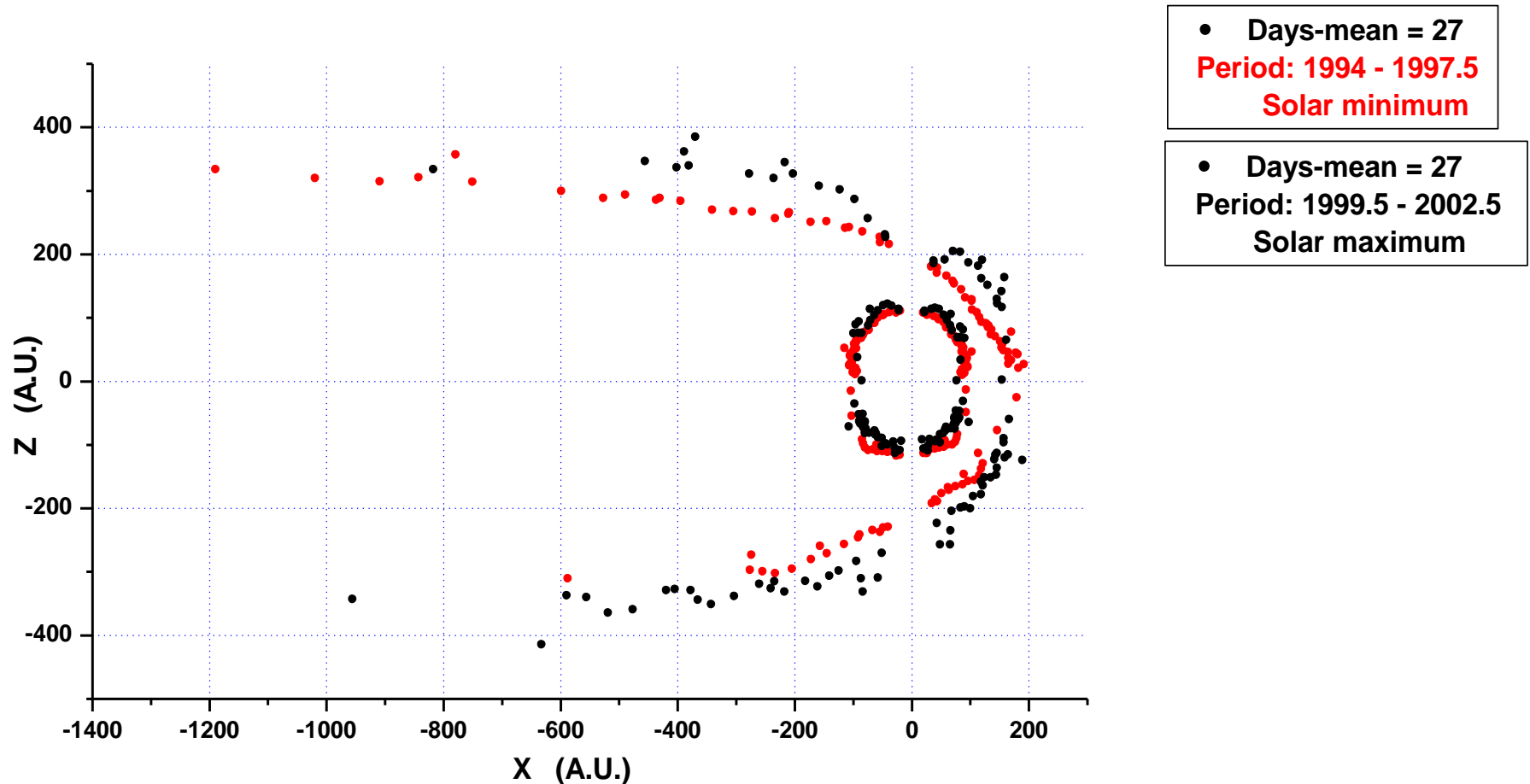
# The shape of the heliosphere, 1990-2009

Vangelis Paouris, George Exarhos, Xenophon

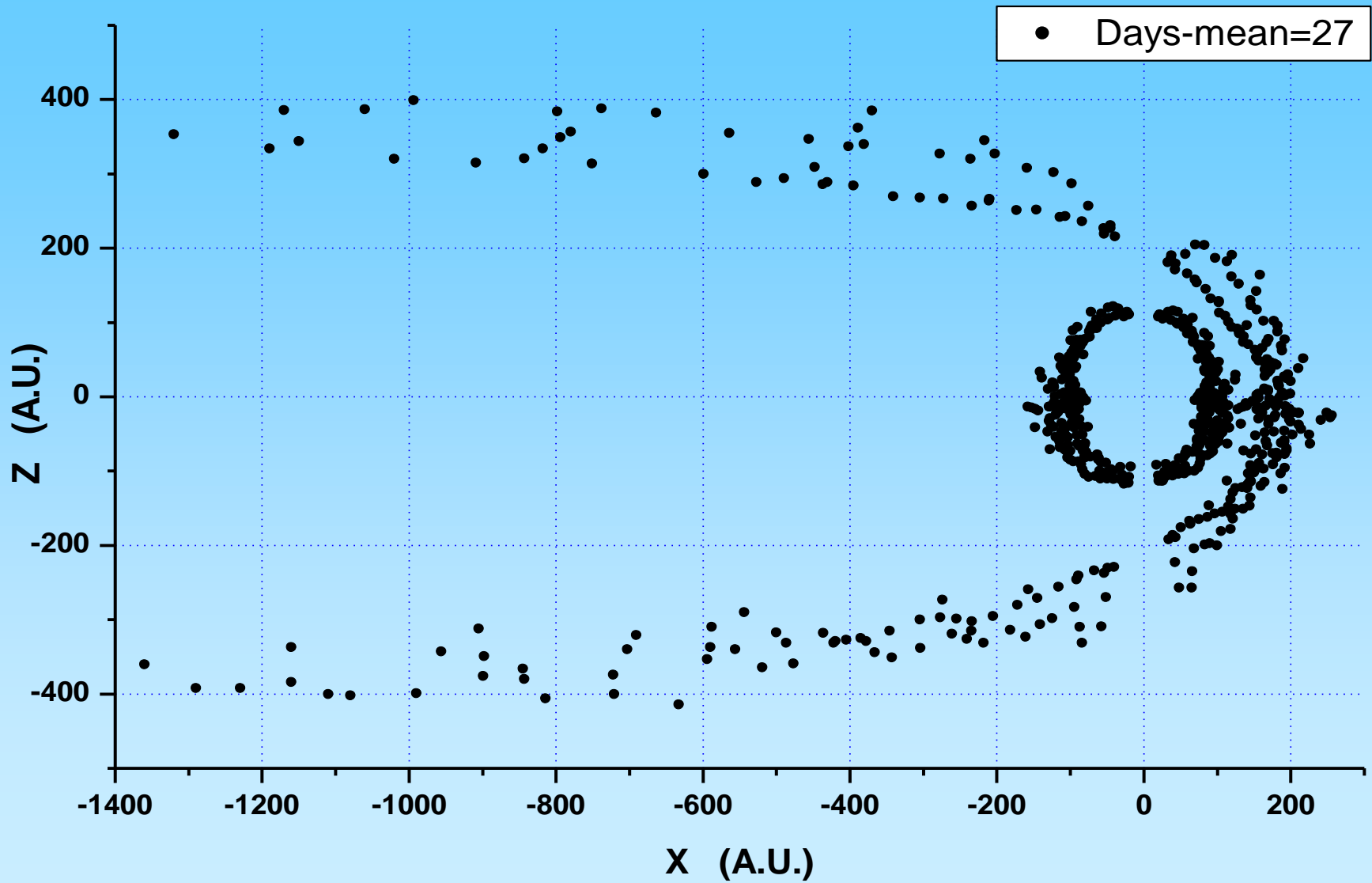


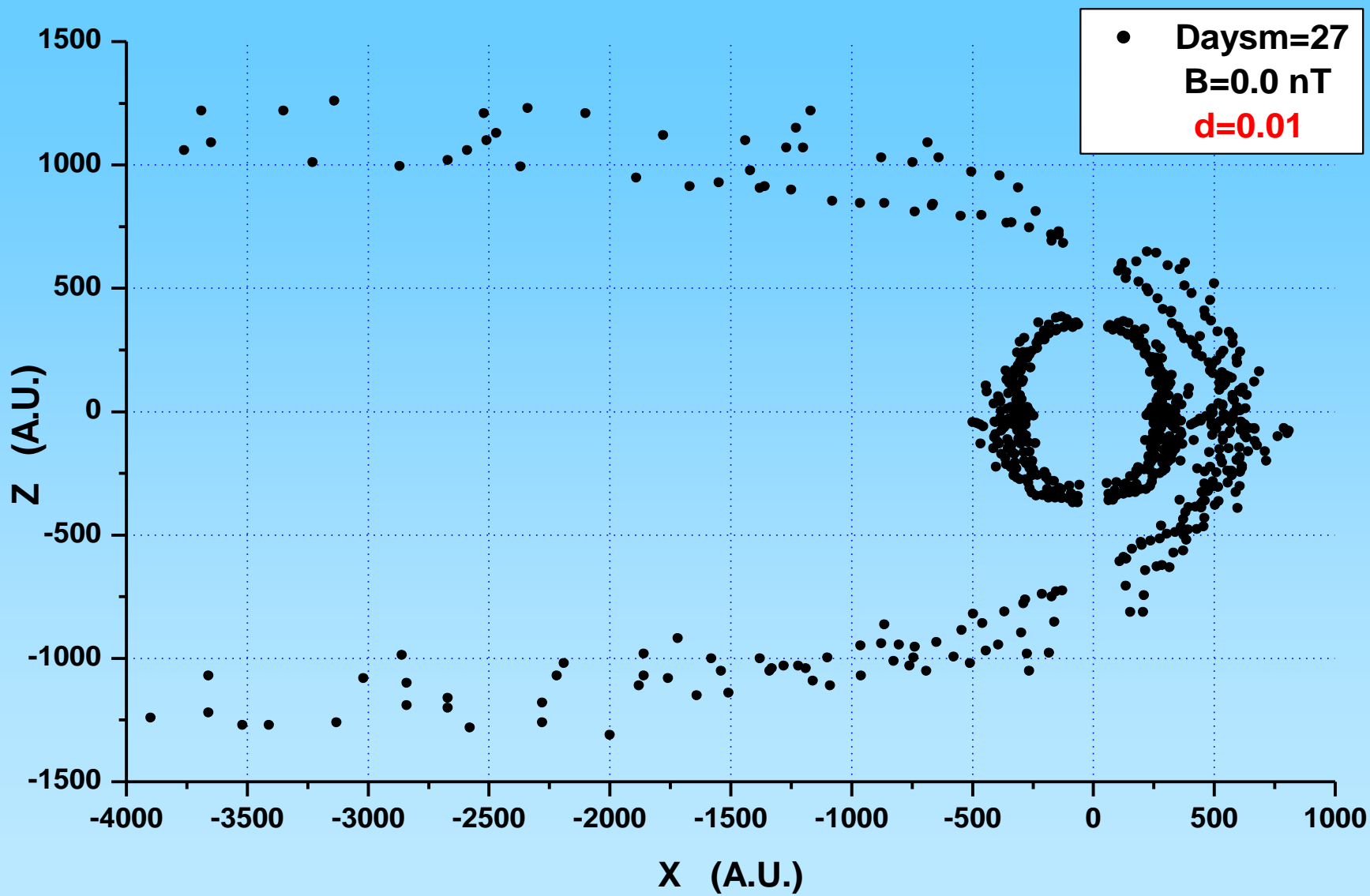
# The shape of the heliosphere, minimum and maximum conditions

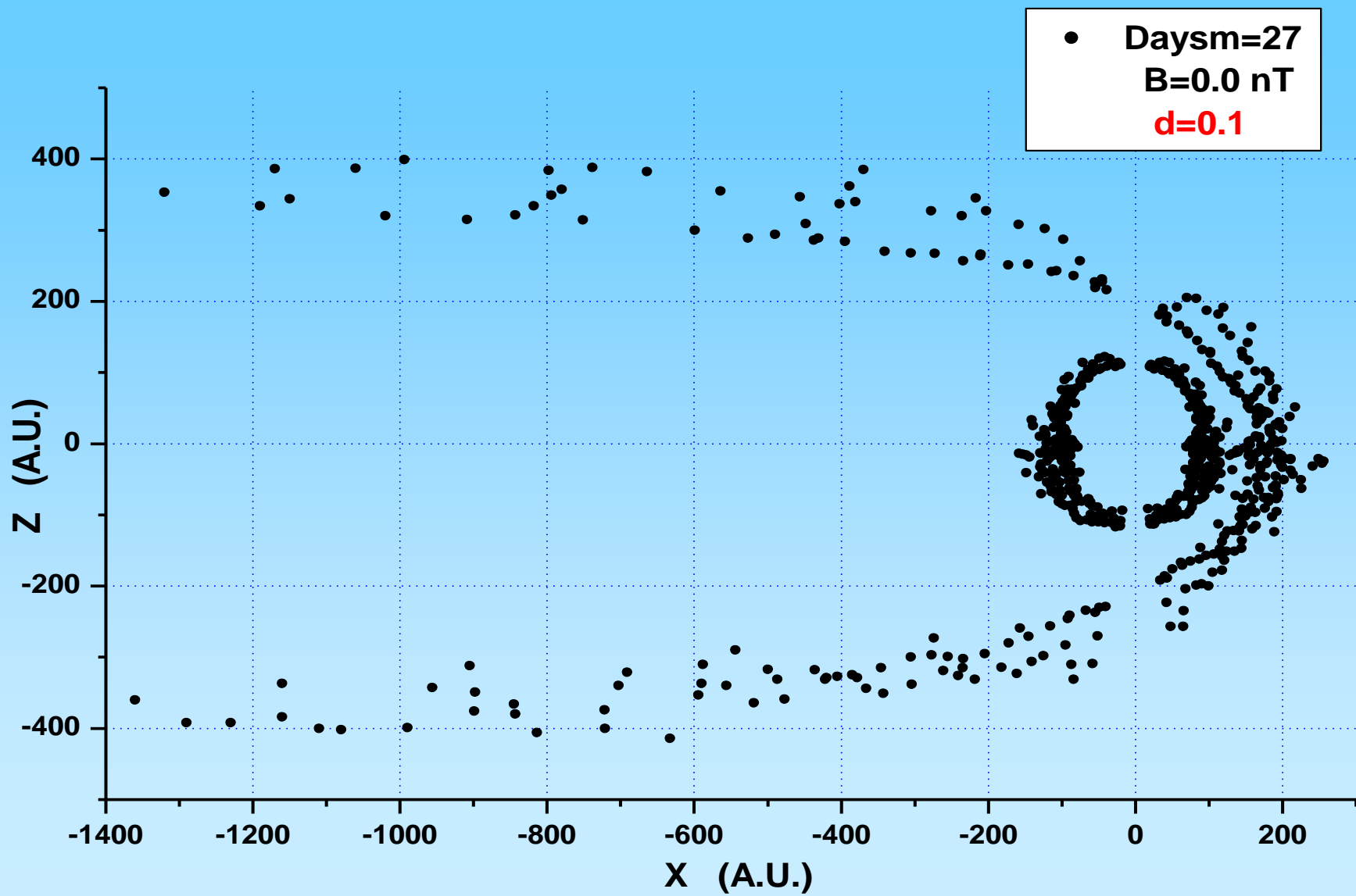
Vangelis Paouris, George Exarhos, Xenophon Moussas, 2010

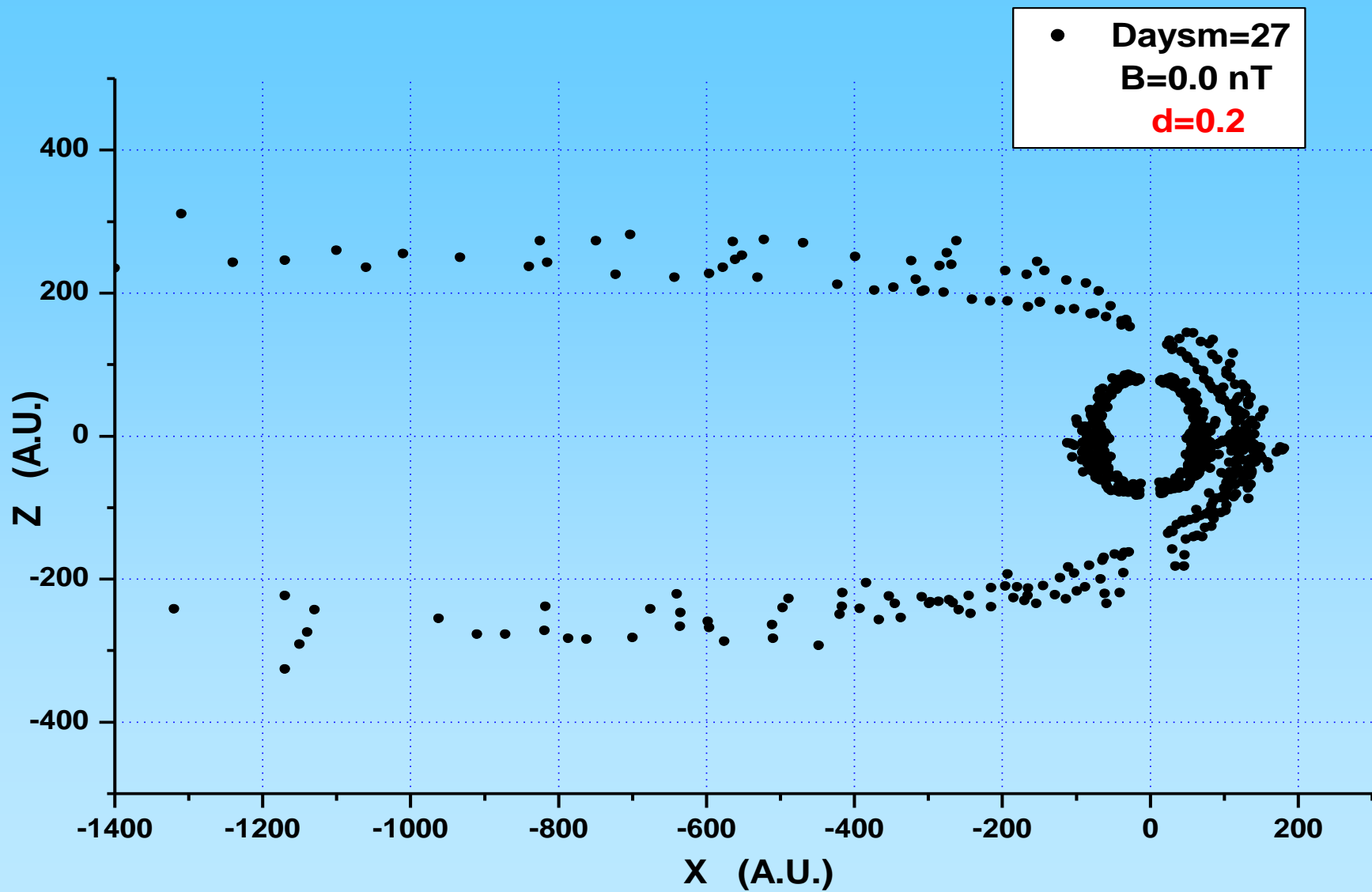


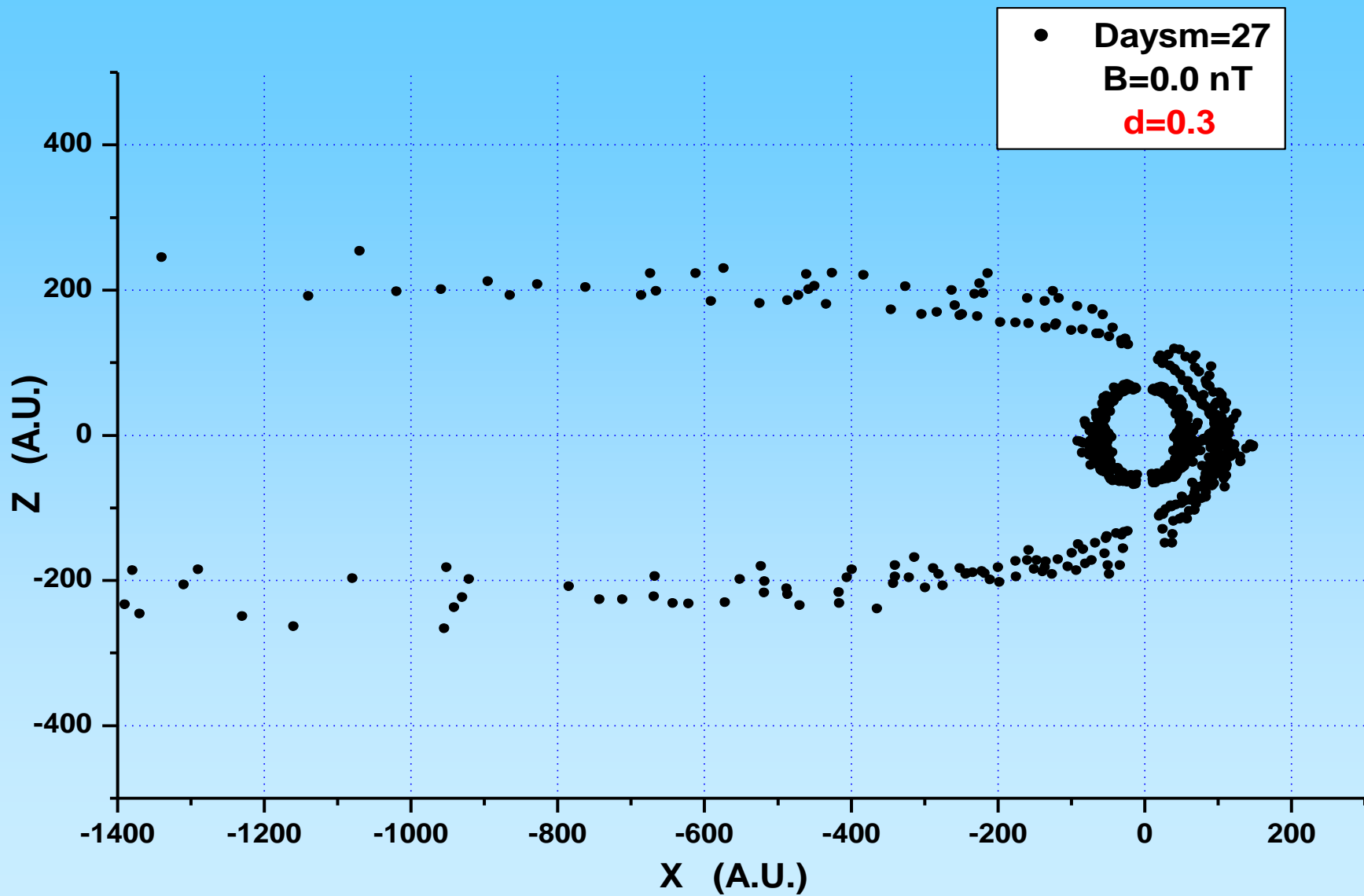
# the shape of the heliosphere using *Ulysses* measurements



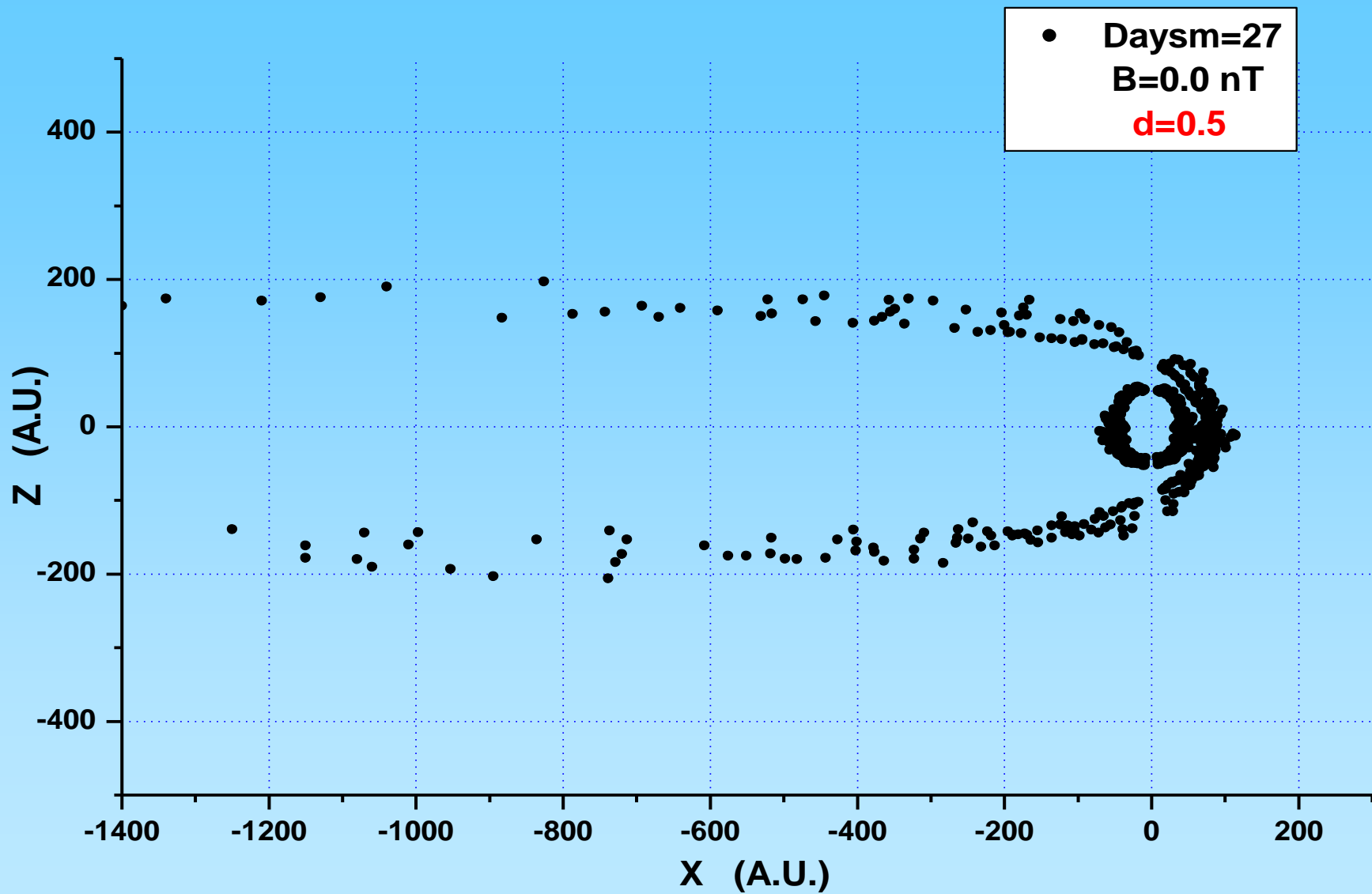






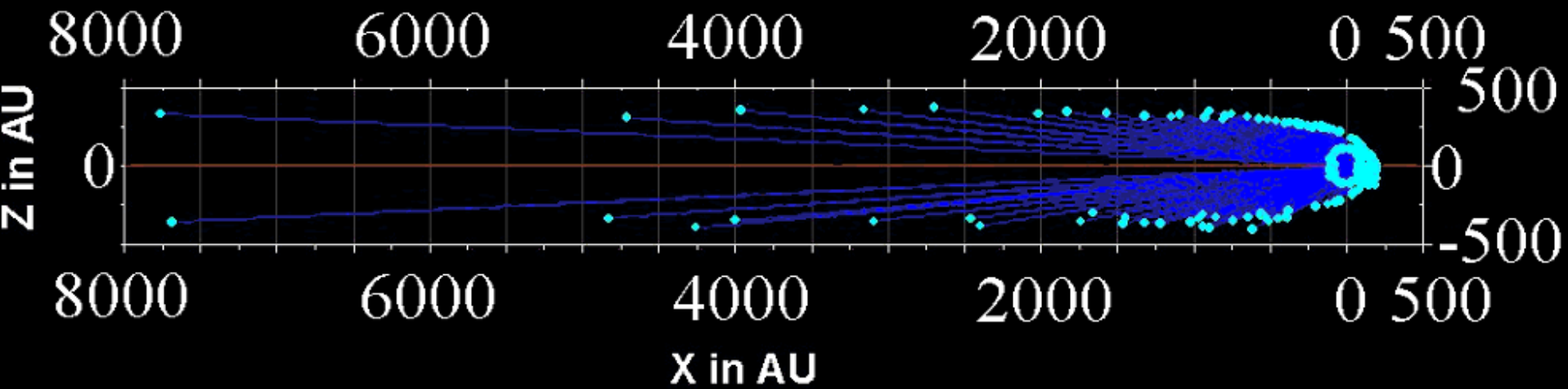






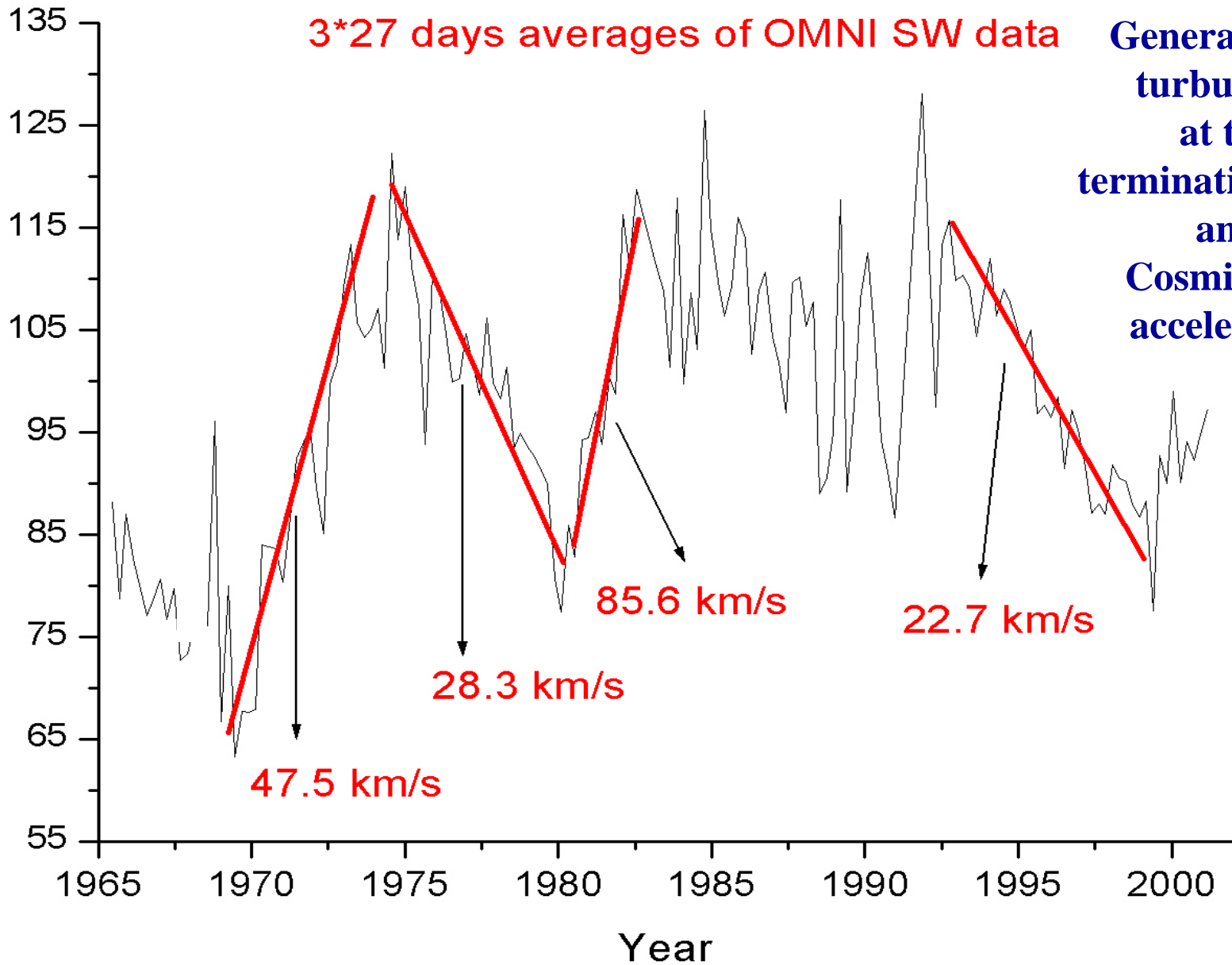


# heliosphere and heliopause *Ulysses* data

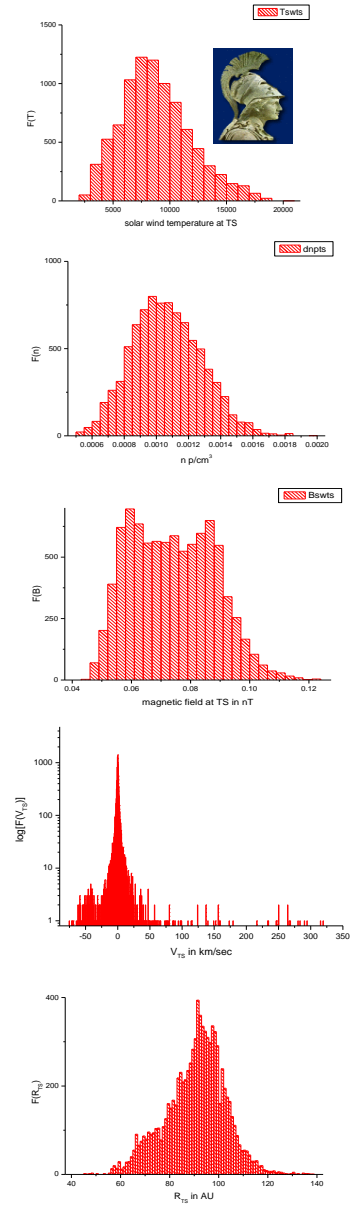
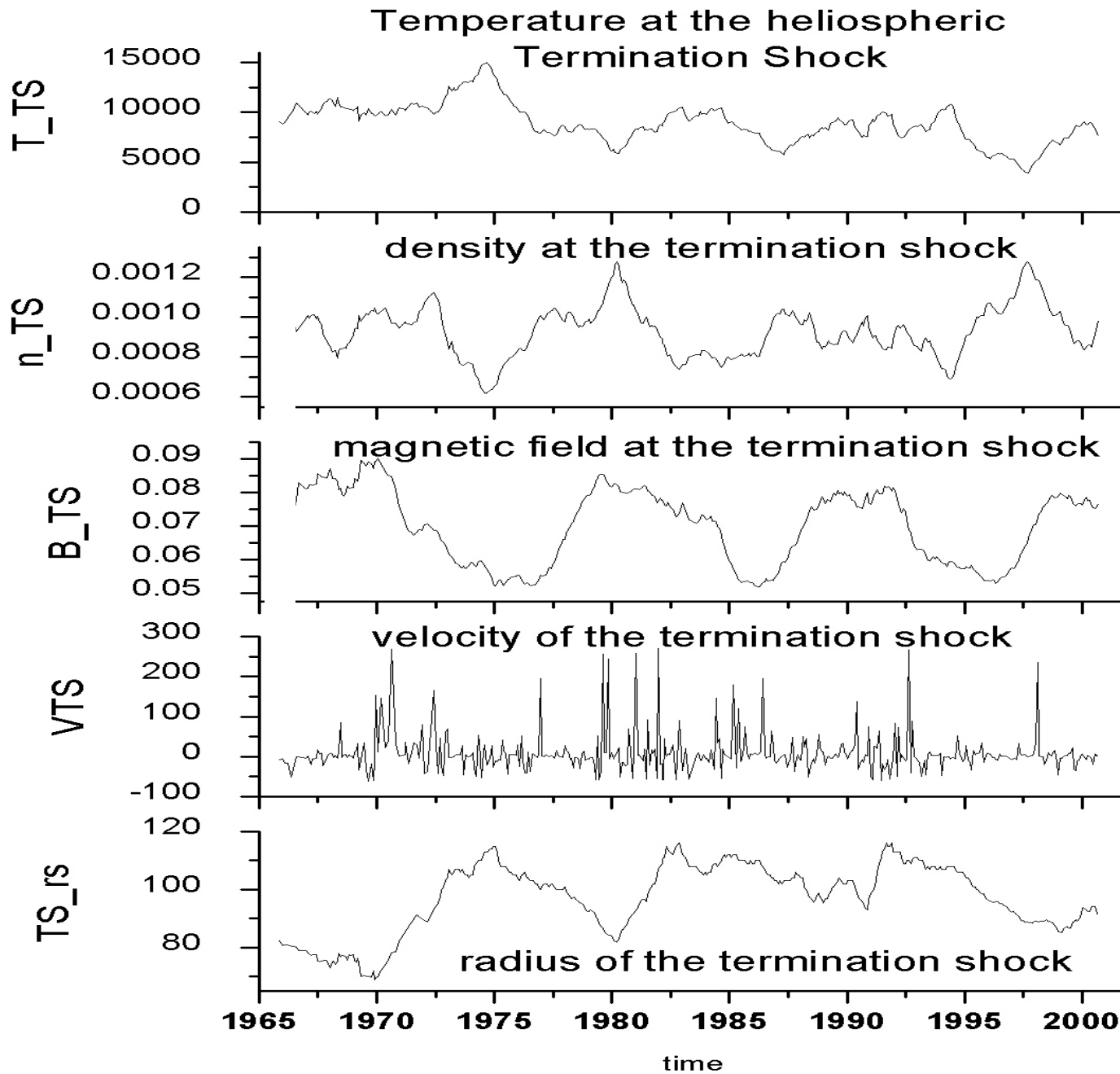




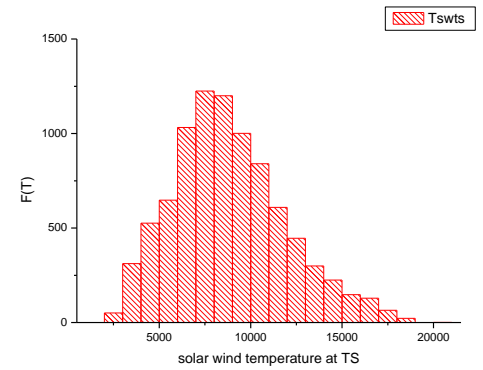
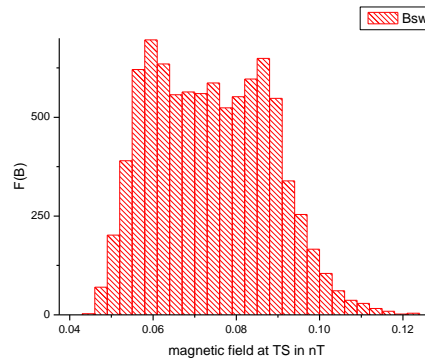
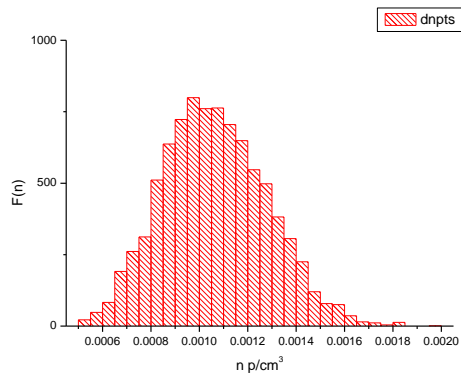
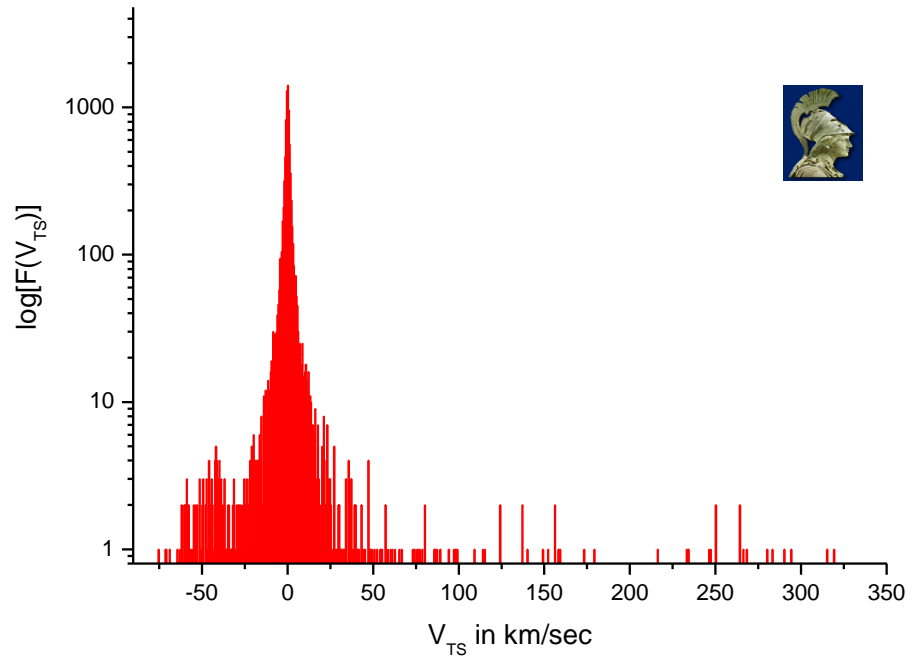
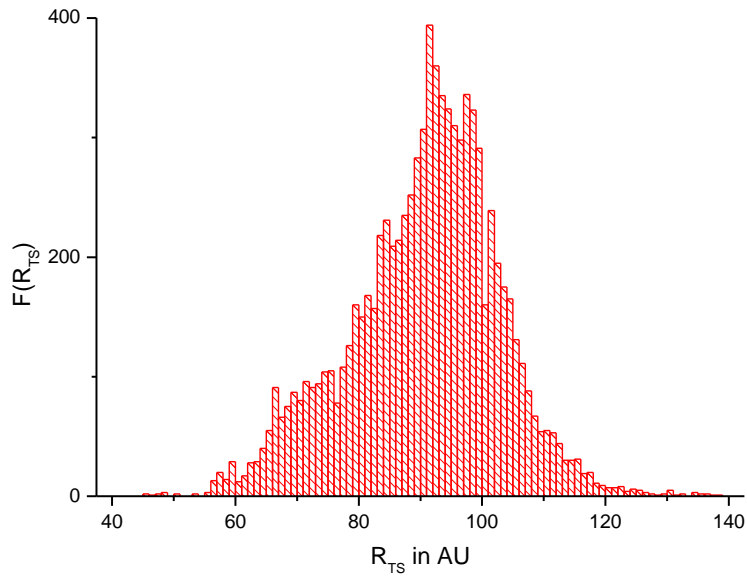
heliospheric termination shock in AU



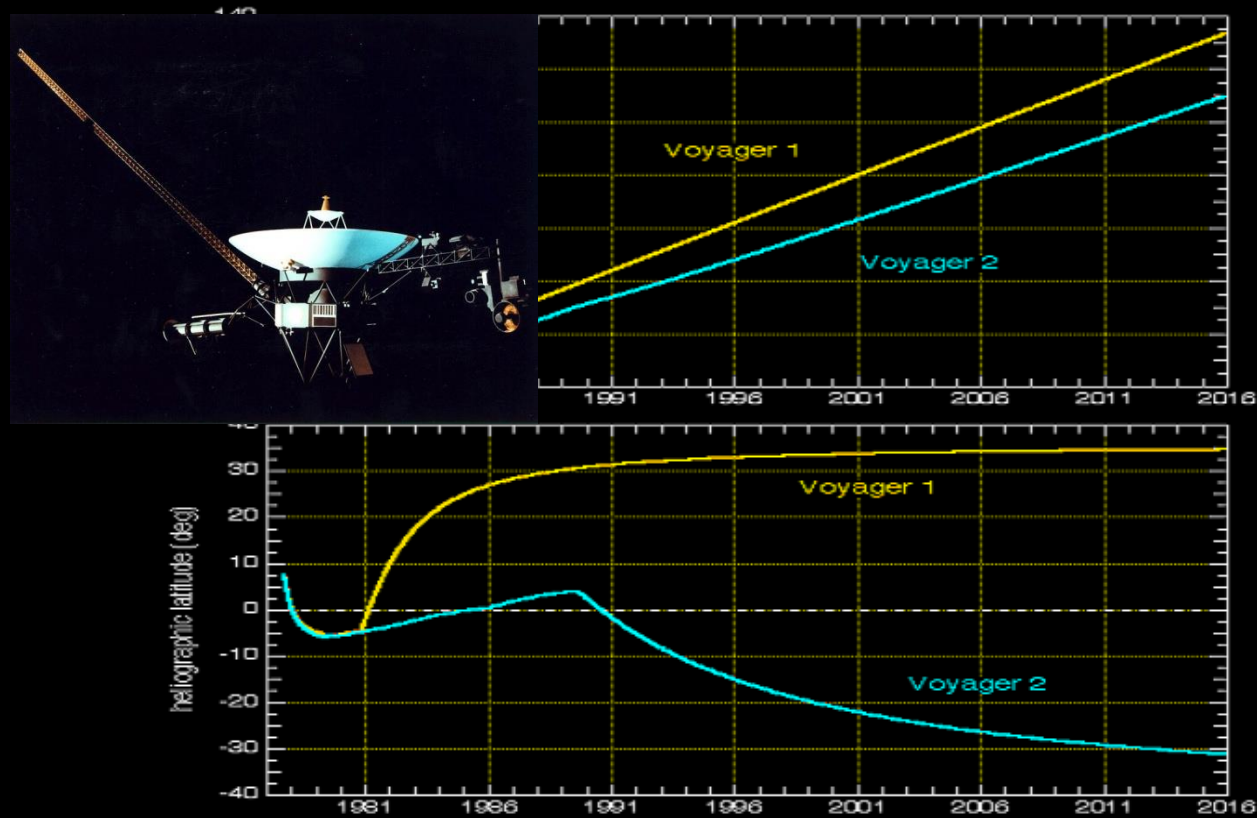
Time variations of the Heliosphere, estimations of the heliospheric termination velocity (OMNI data).



time variations of the Heliosphere: temperature, density, magnetic field, velocity of the termination shock and radius (OMNI data)



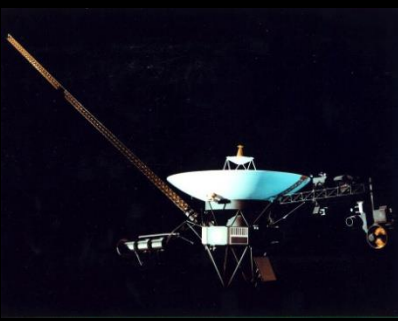
**Distributions of the heliosphere: temperature, density, magnetic field radius and velocity of the termination shock**



*Voyager 1 in the foreshock, termination shock, and heliosheath.*

Decker RB, Krimigis SM, Roelof EC, Hill ME,  
Armstrong TP, Gloeckler G, Hamilton DC, Lanzerotti LJ.

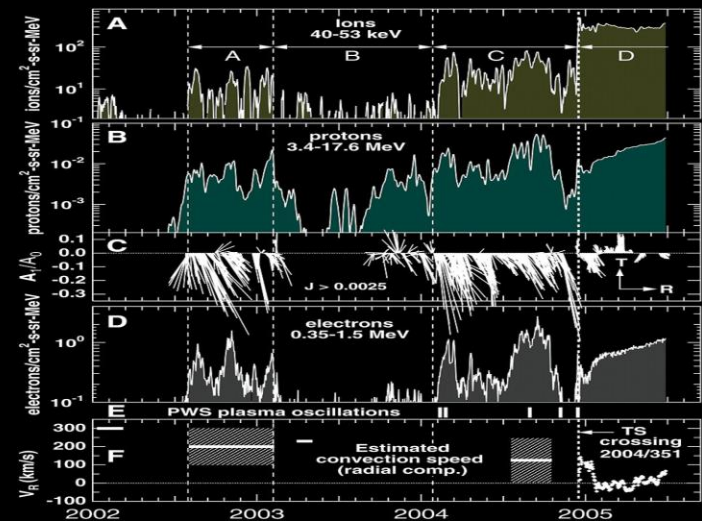
Science. 2005 Sep 23;309(5743):2020-4.



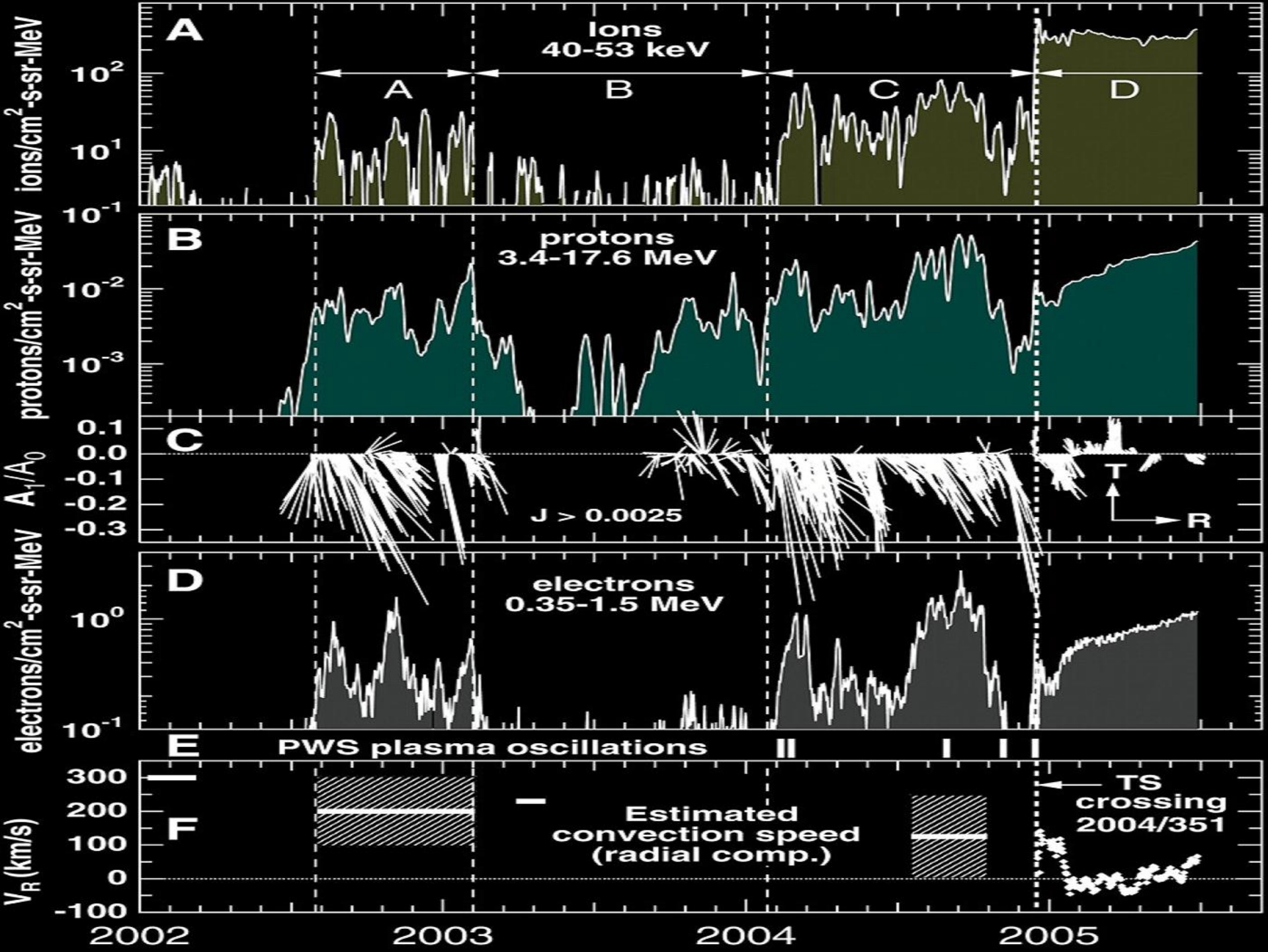
*Voyager 1 in the foreshock, termination shock, and heliosheath.*

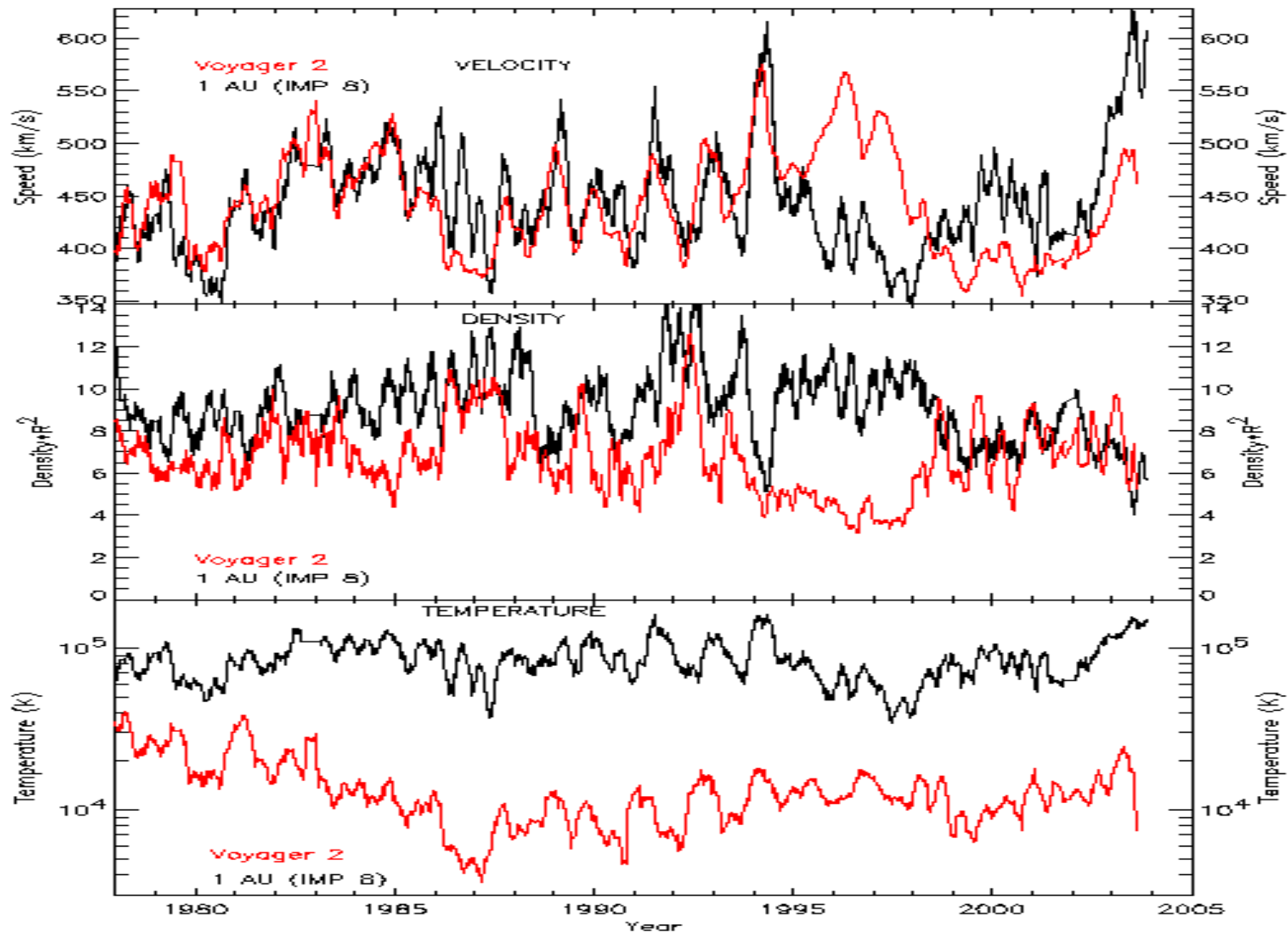
Decker RB, Krimigis SM, Roelof EC, Hill ME,  
Armstrong TP, Gloeckler G, Hamilton DC, Lanzerotti LJ.

Science. 2005 Sep 23;309(5743):2020-4.



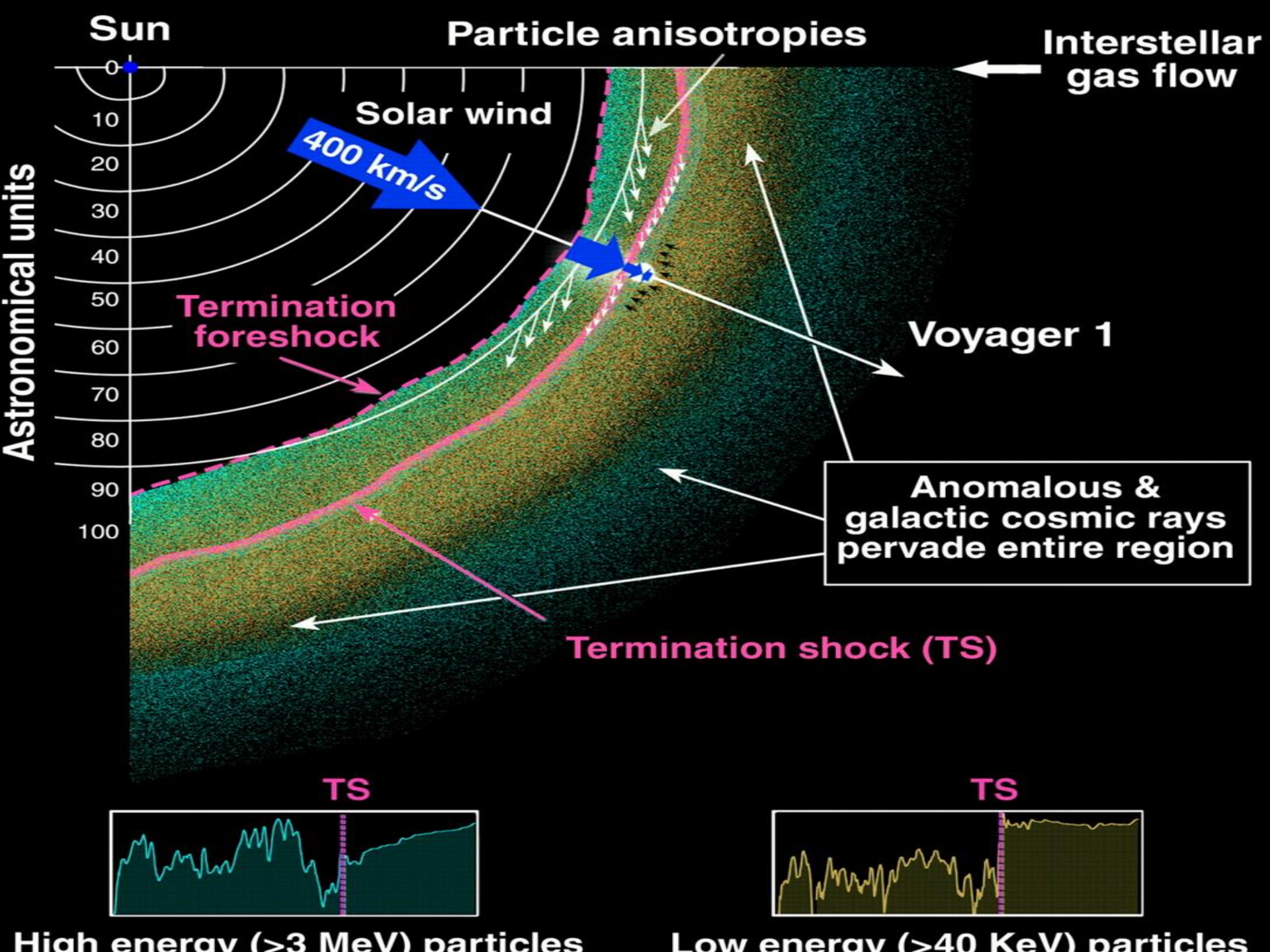


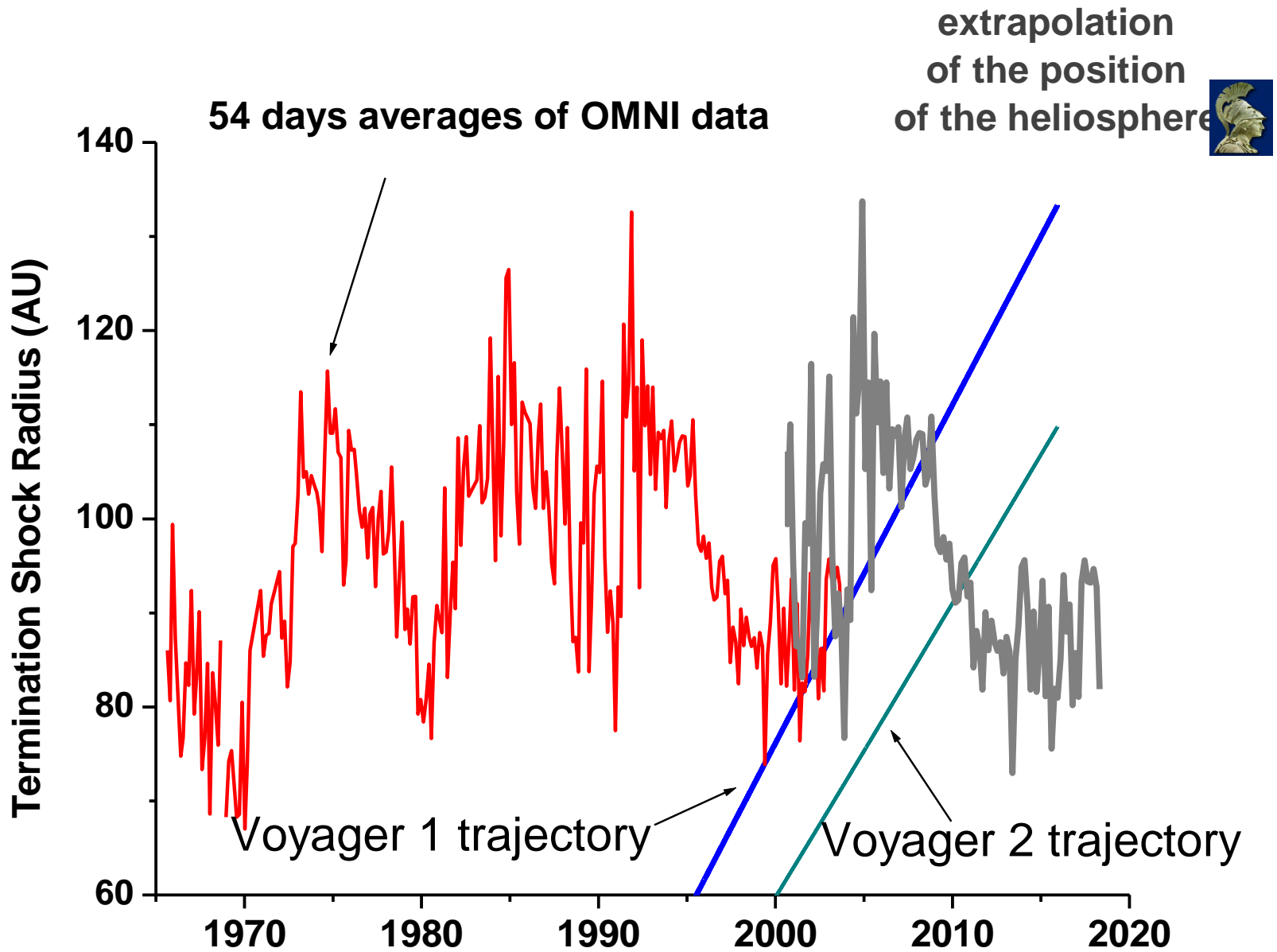




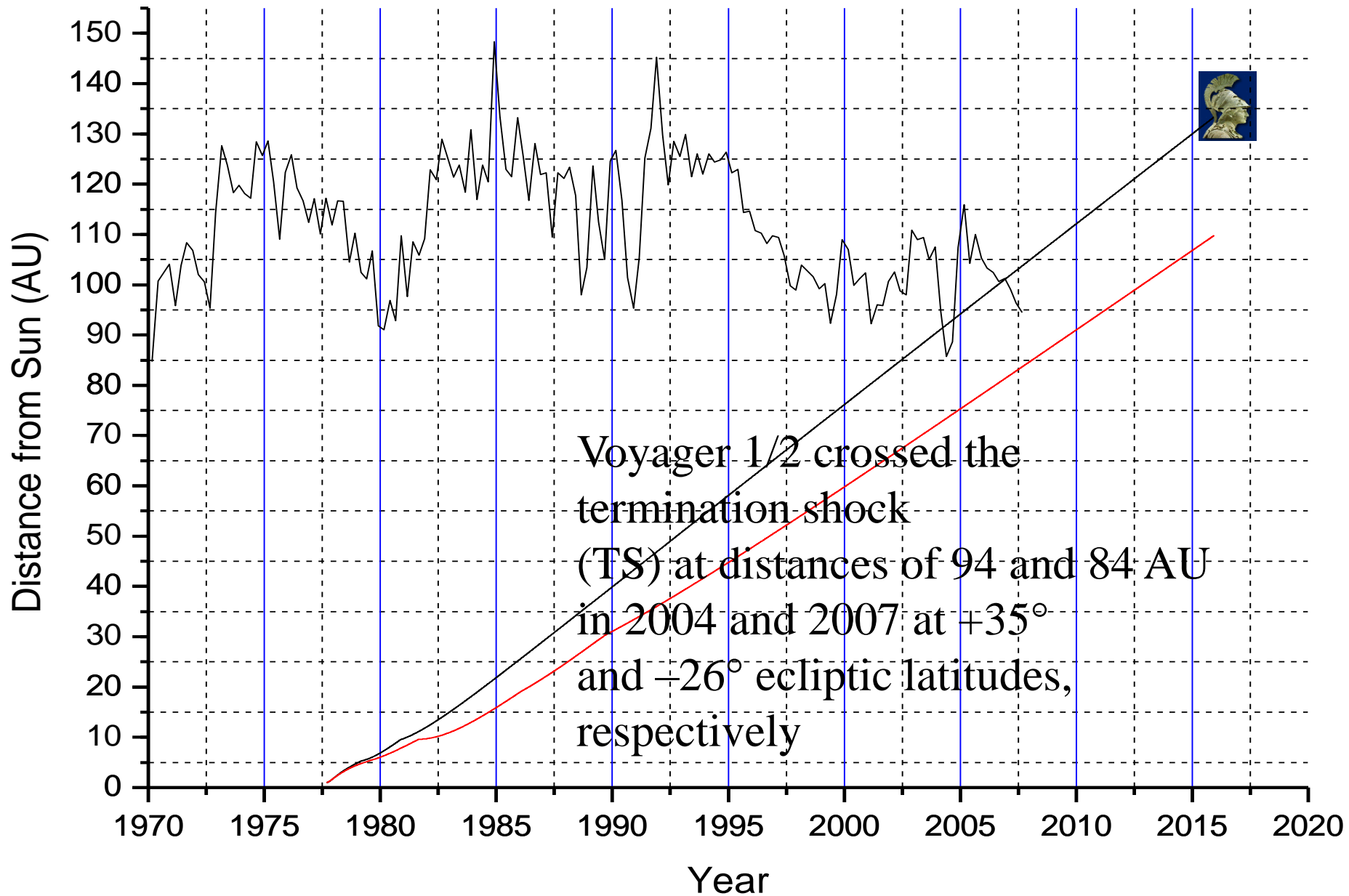
**NASA's Voyager 1 spacecraft has entered the solar system's final frontier. It is entering a vast, turbulent expanse, where the sun's influence ends and the solar wind crashes into the thin gas between stars. "Voyager 1 has entered the final lap on its race to the edge of interstellar space," said Dr. Edward Stone, Voyager project scientist at the California Institute of Technology in Pasadena. Caltech manages NASA's Jet Propulsion Laboratory in Pasadena, which built and operates Voyager 1 and its twin, Voyager 2.**





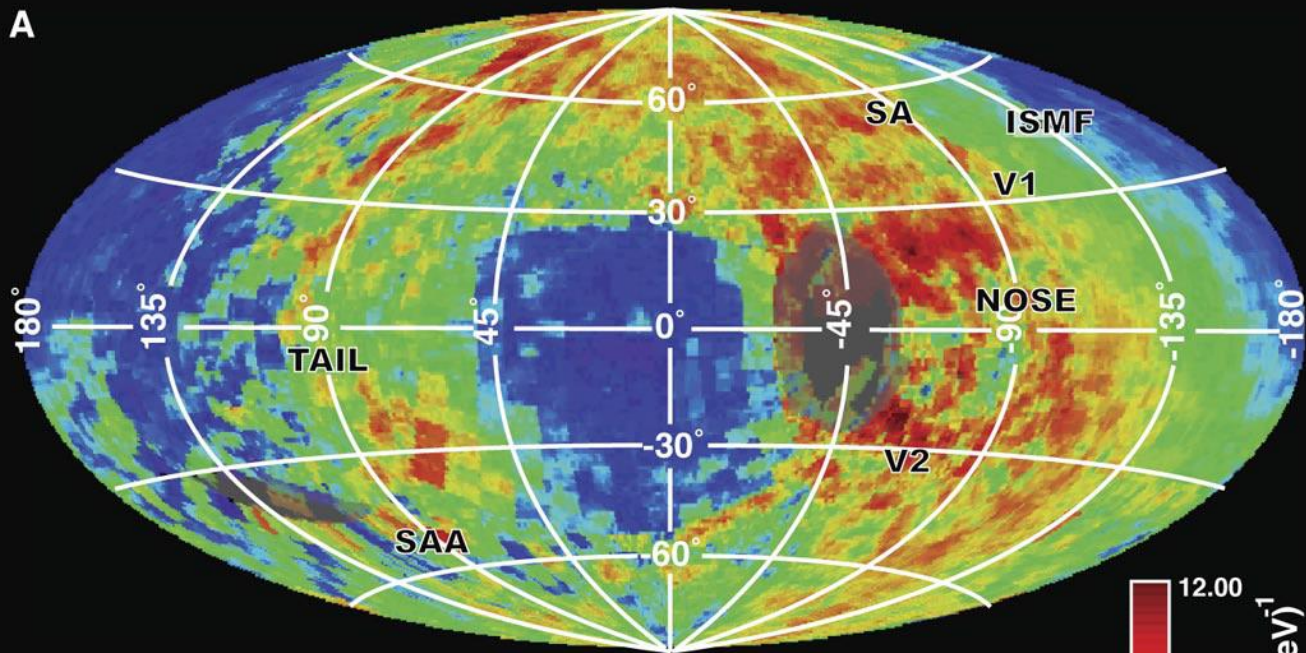


Time variations of the Heliosphere, estimation of the heliospheric termination velocity and extrapolation (OMNI data). **Voyager 1 and 2 trajectories show that Voyager exited the solar wind (Krimigis, 2003), while the heliosphere was expanding?** Next crossings in a few years? Multiple crossings are expected.

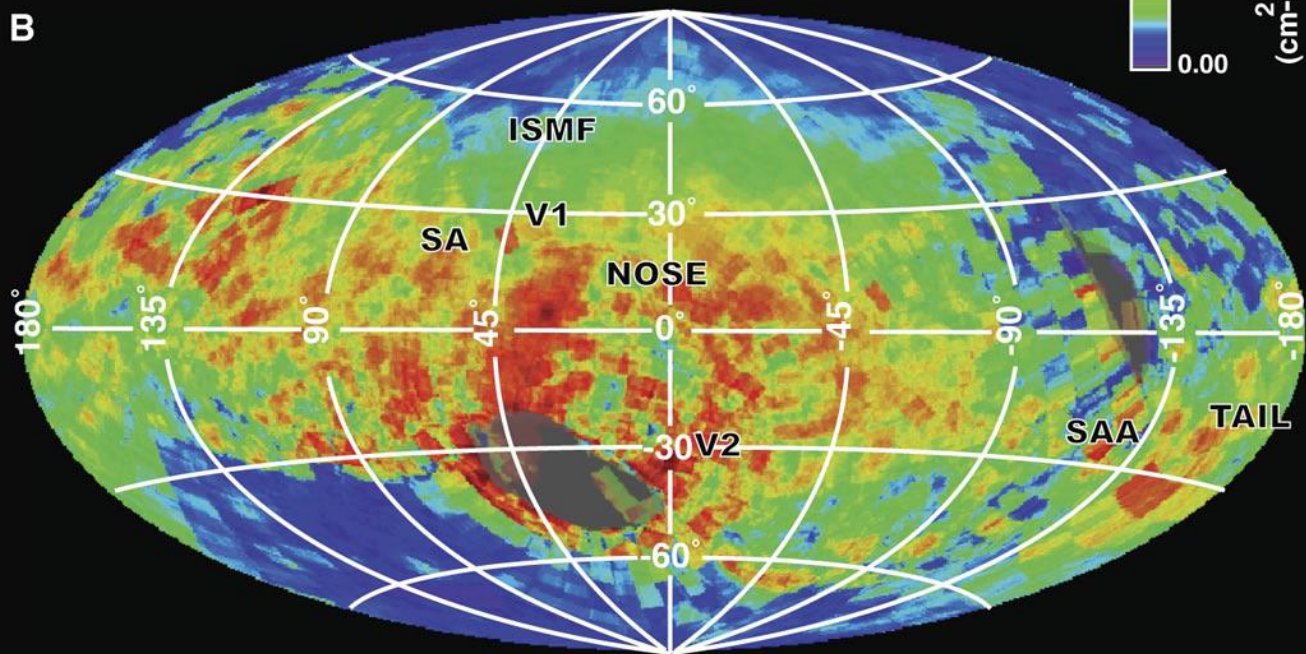


**Time variations of the Heliosphere, estimation of the heliospheric termination velocity and extrapolation (OMNI data). Voyager 1 and 2 trajectories show that Voyager exited the solar wind (Krimigis, 2003), while the heliosphere was expanding? Many crossings in next few years? Multiple crossings are expected.**



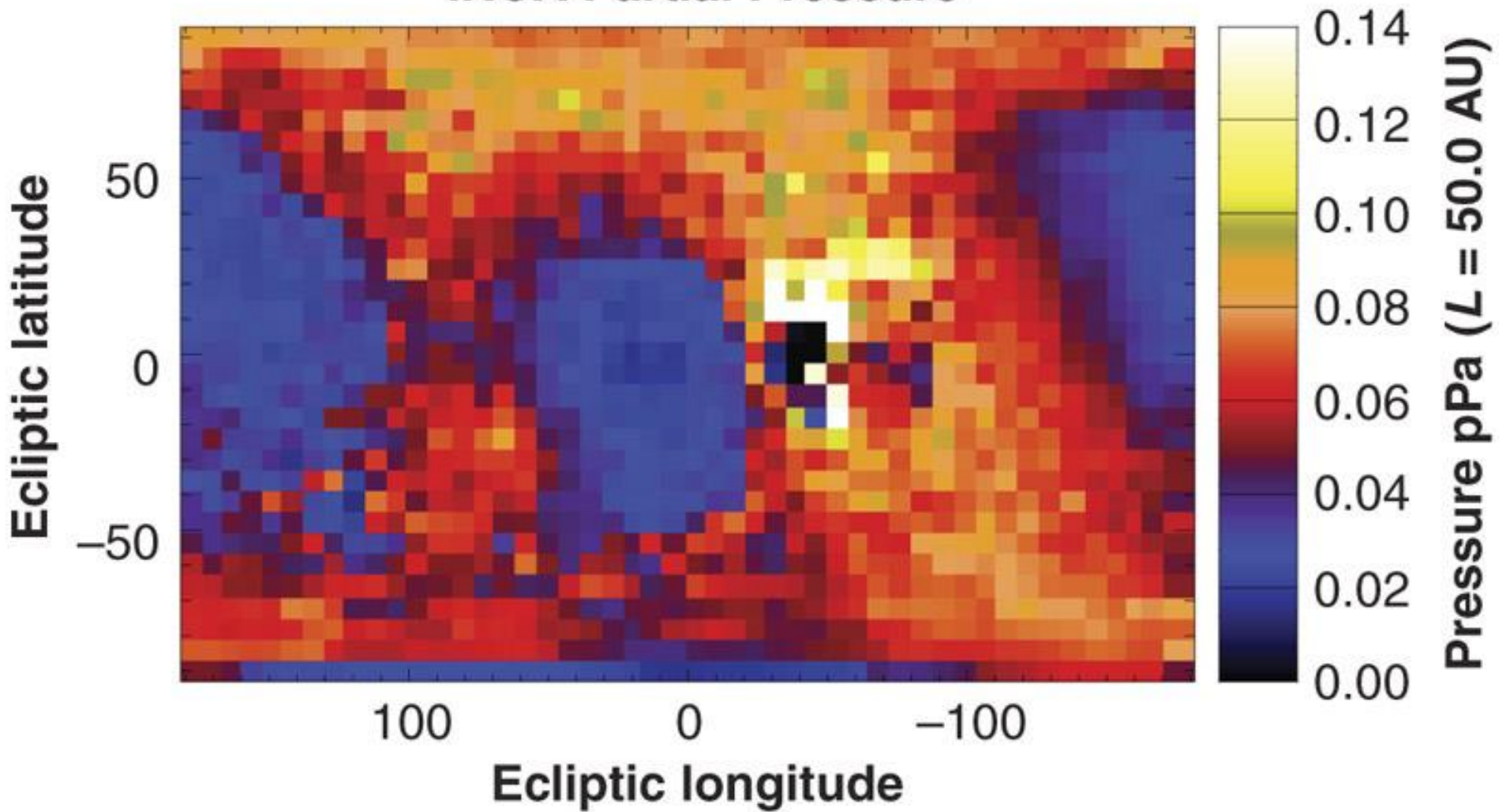


Κριμυγίς 2009

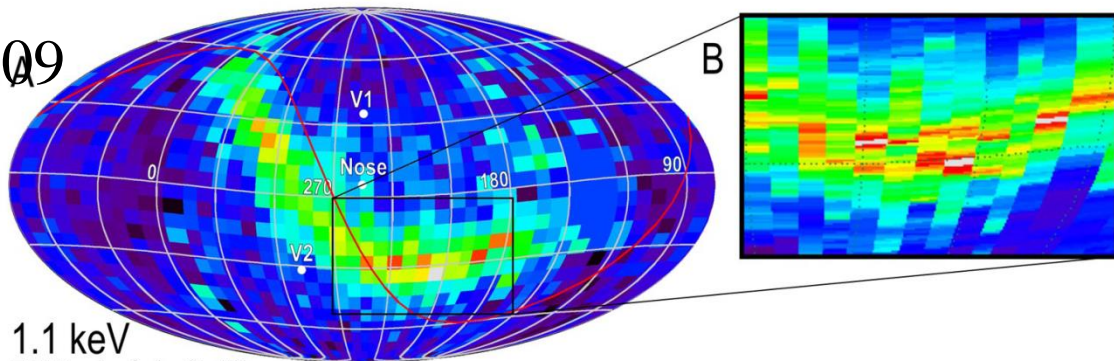




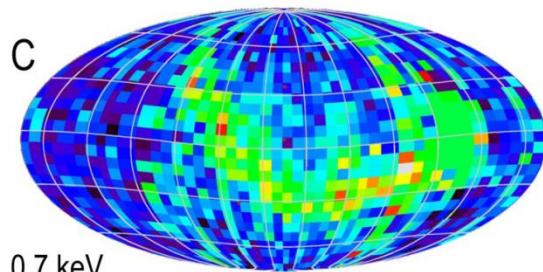
# INCA Partial Pressure



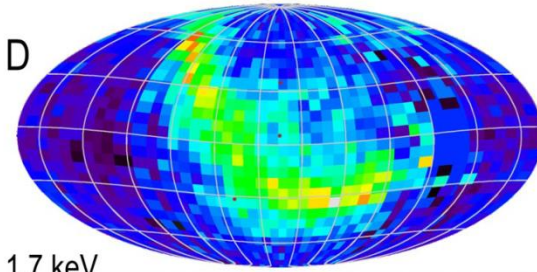
Κριμγιοσ 2009



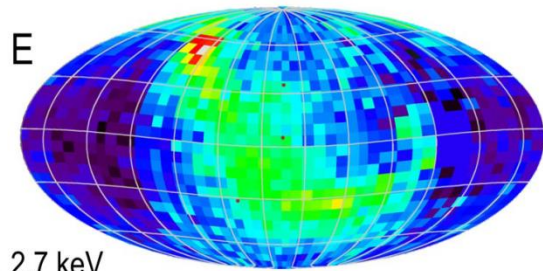
1.1 keV  
ENA Flux [ $\text{cm}^{-2} \text{s}^{-1} \text{sr}^{-1} \text{keV}^{-1}$ ]



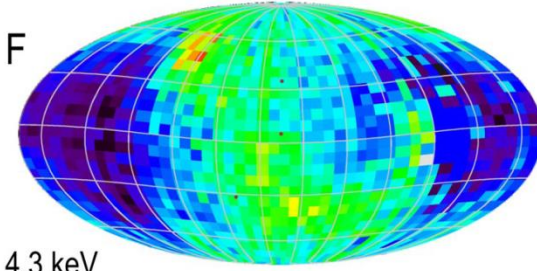
0.7 keV



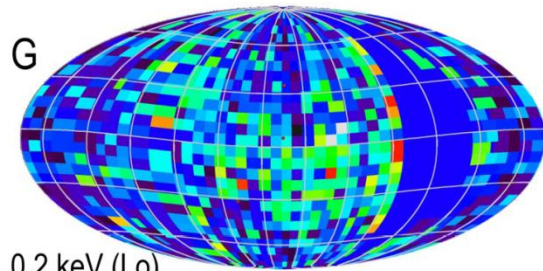
1.7 keV



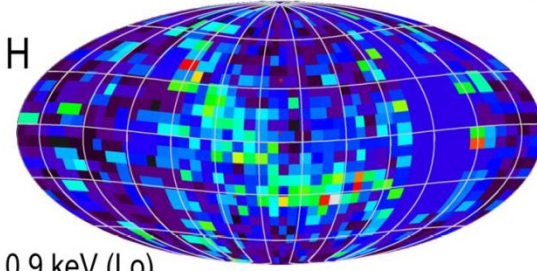
2.7 keV



4.3 keV



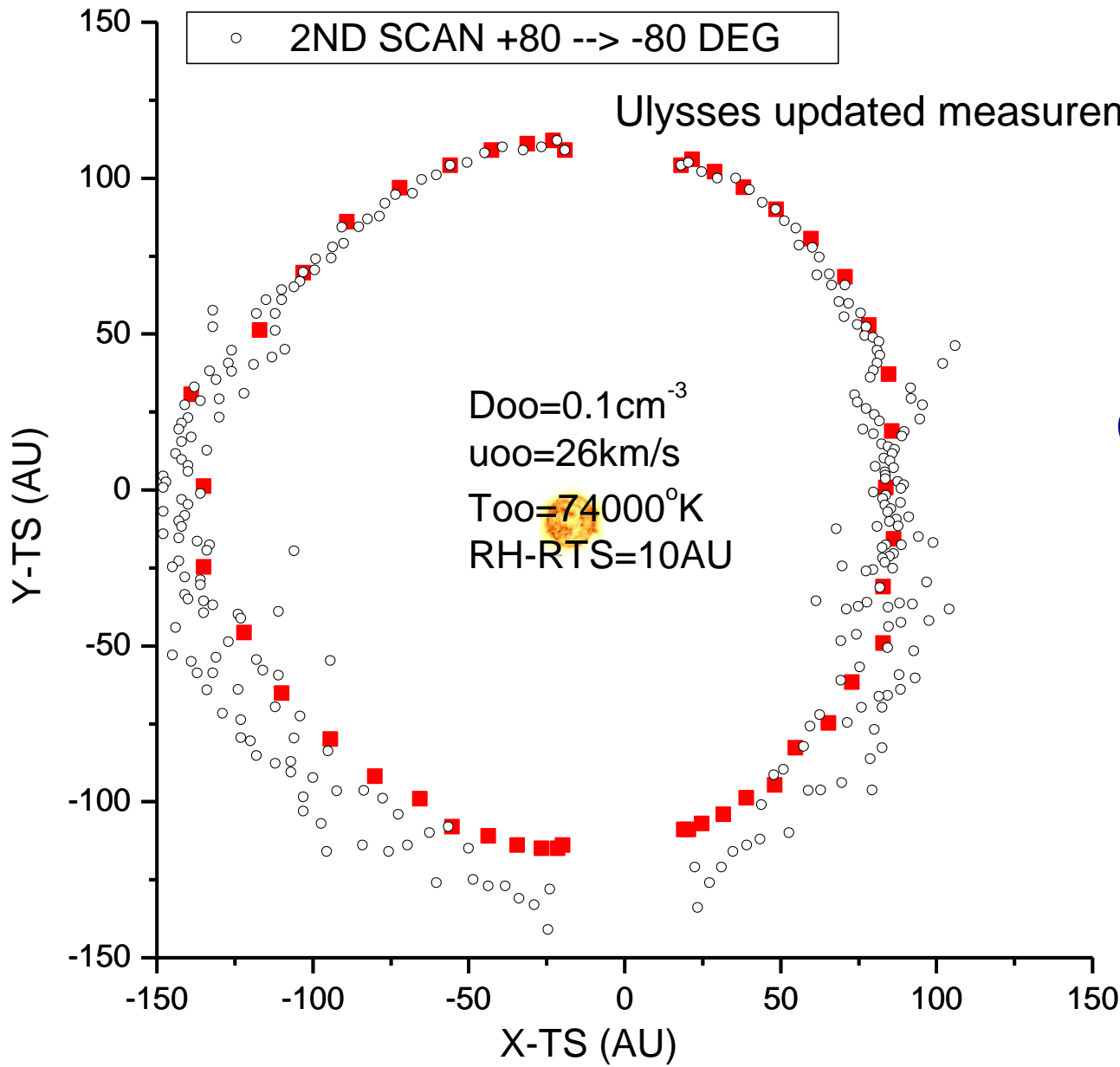
0.2 keV (Lo)



0.9 keV (Lo)

■ 1ST SCAN -80 --> +80 DEG

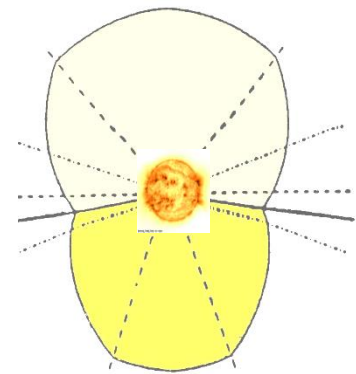
○ 2ND SCAN +80 --> -80 DEG

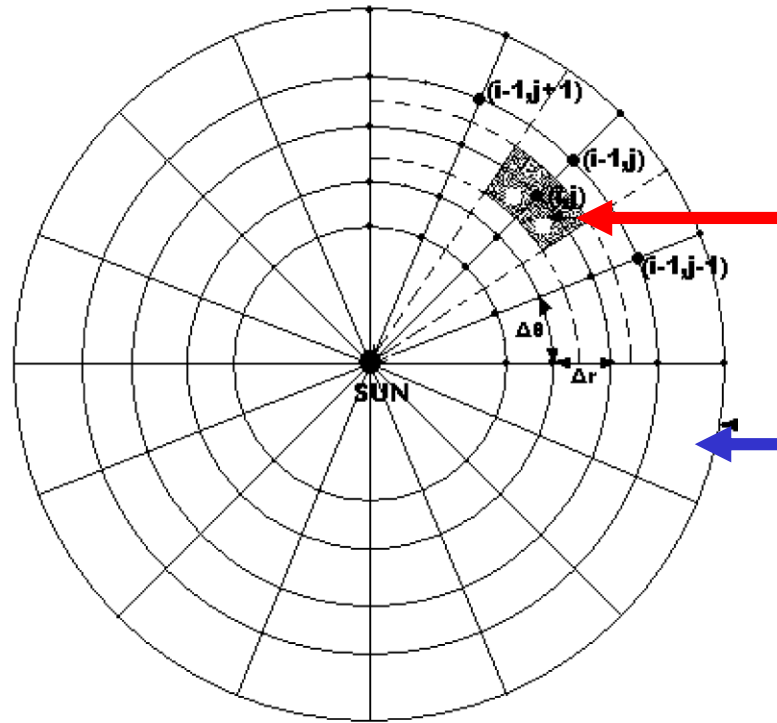


CR data

time dependence  
and asymmetry

*Ulysses* cosmic ray  
measurements  
(Mc Kibben et al 1996)  
polar diagram





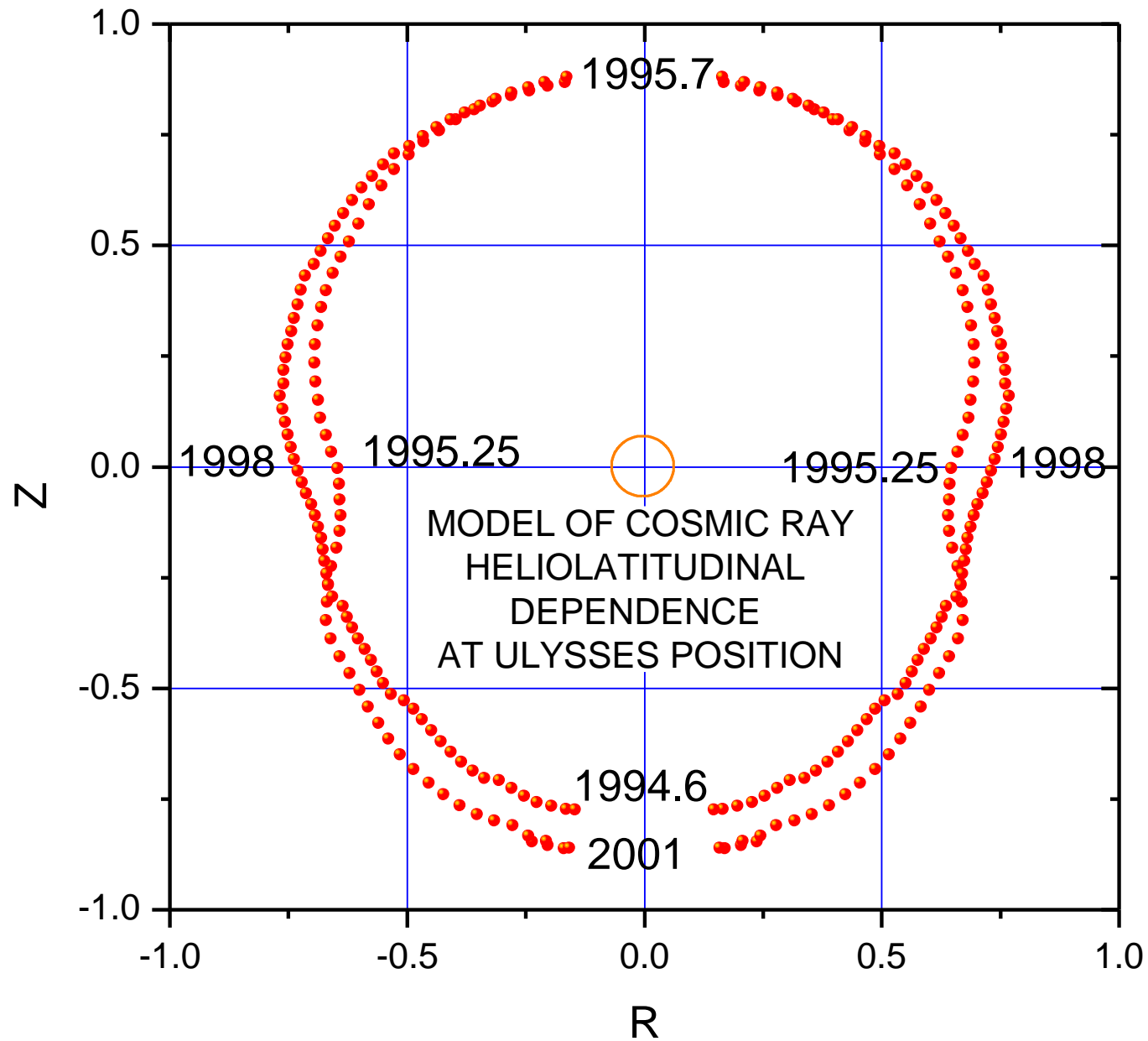
Spherical  
magnetic  
sector



Heliospheric  
termination  
shock

Magnetic heliosphere model (time variable)  
homocentric spherical shells with  
constant magnetic field measured by s/c



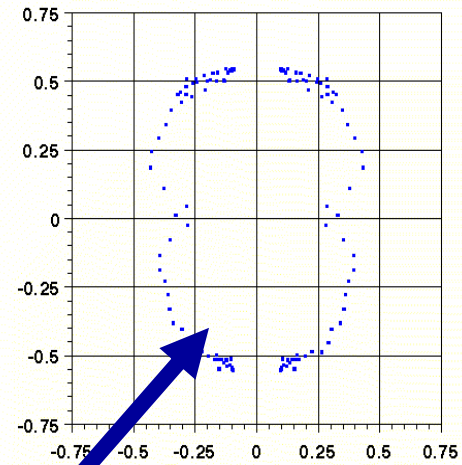
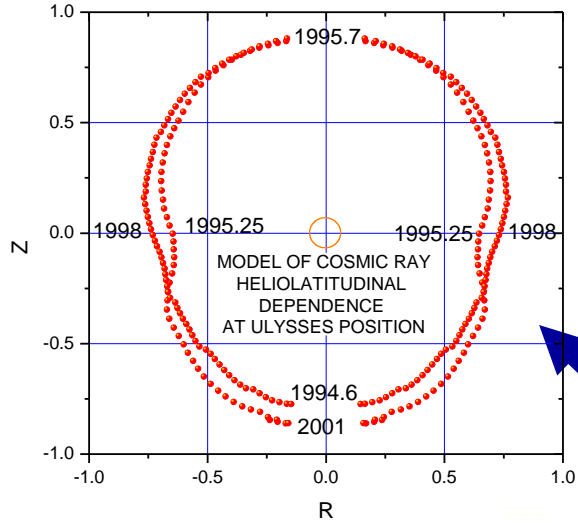


**Cosmic ray model: time and latitudinal dependence (polar diagram)**

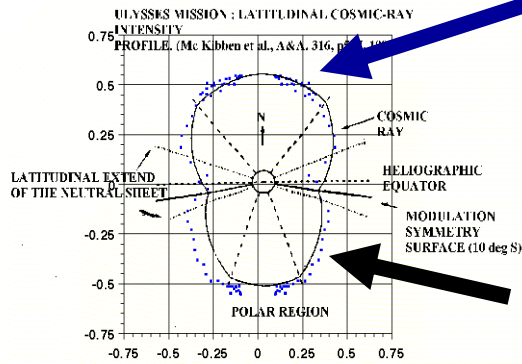
# cosmic ray latitudinal gradient Ulysses data and model



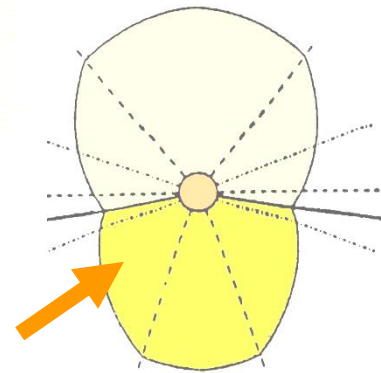
LATITUDINAL COSMIC-RAY INTENSITY PROFILE SHELL- MODEL RESULTS

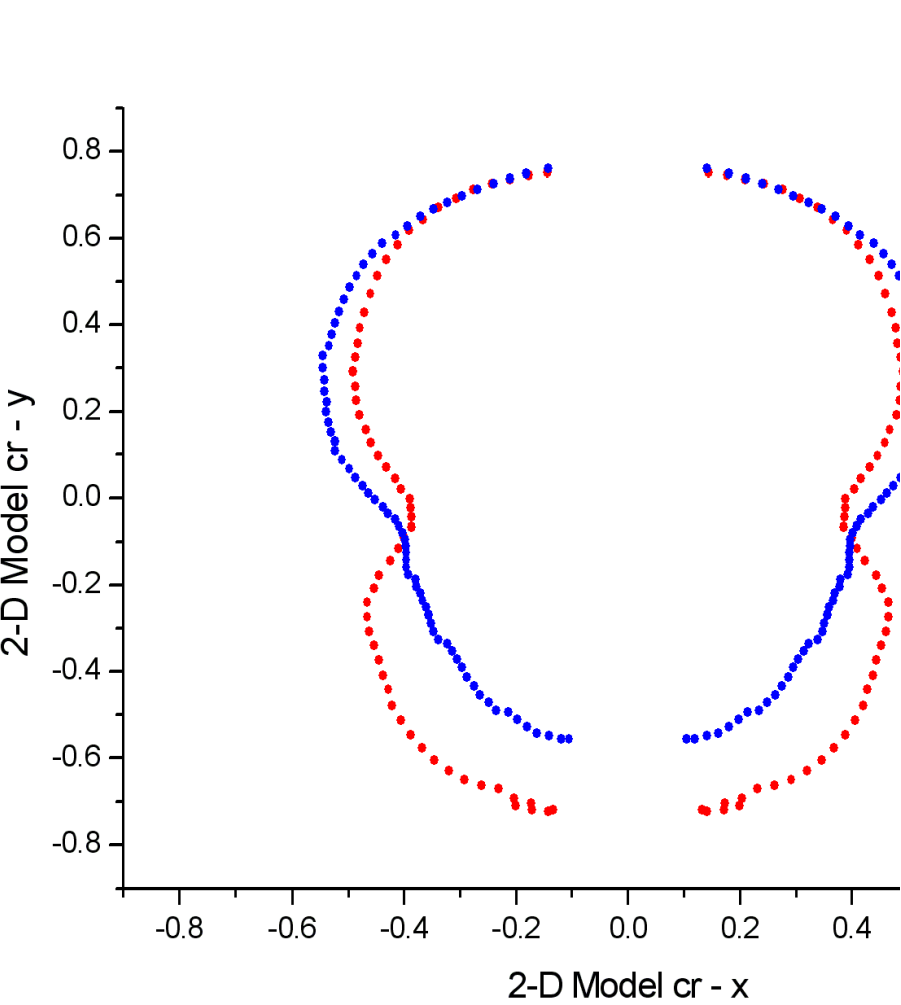


CR model polar diagram

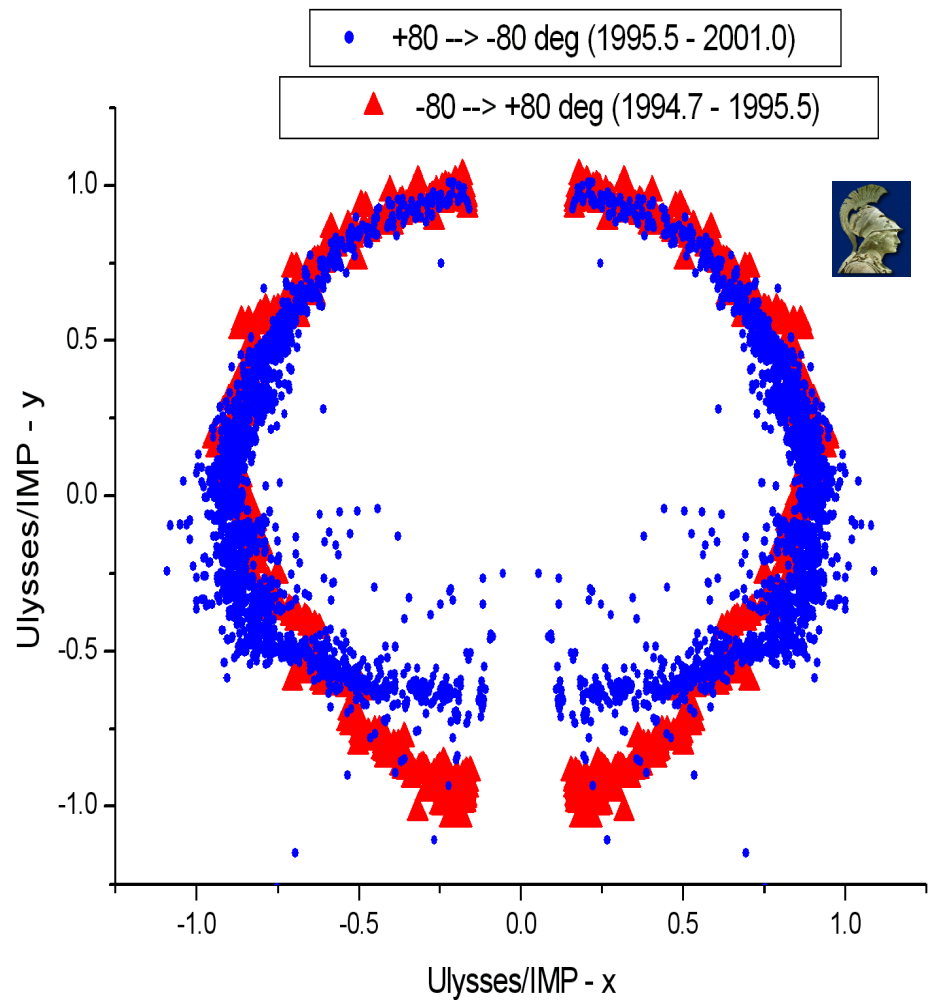


Ulysses cosmic ray measurements (Mc Kibben et al 1996) polar diagram



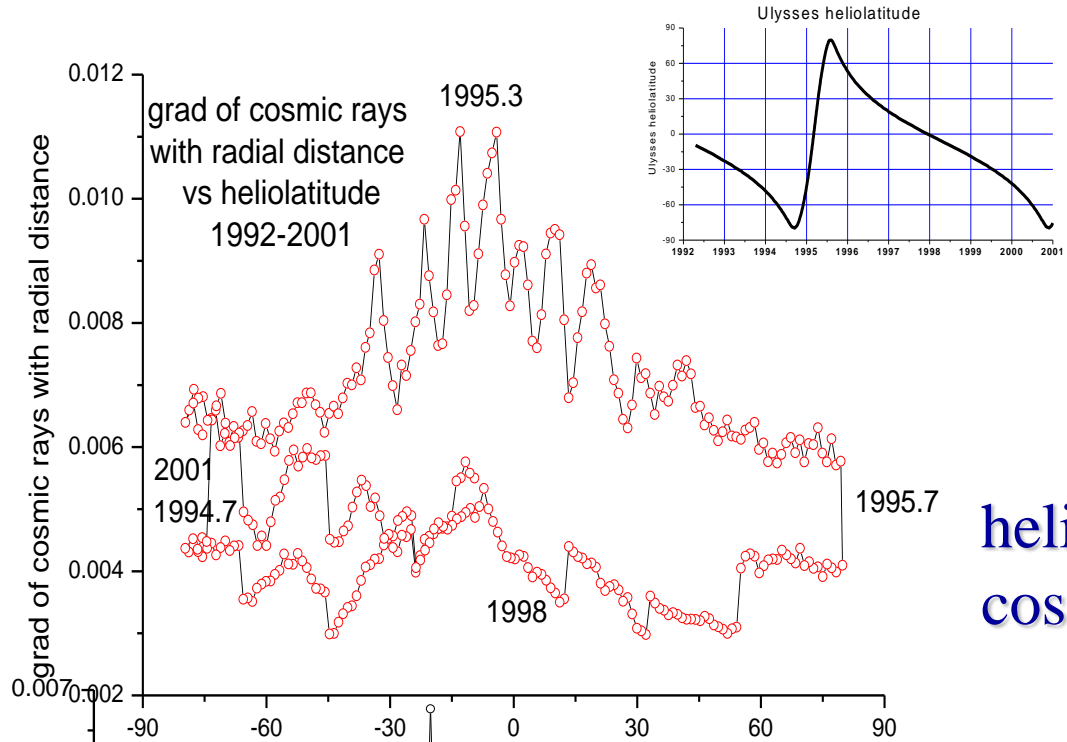


**COSMIC-RAY MODEL  
POLAR DIAGRAM**



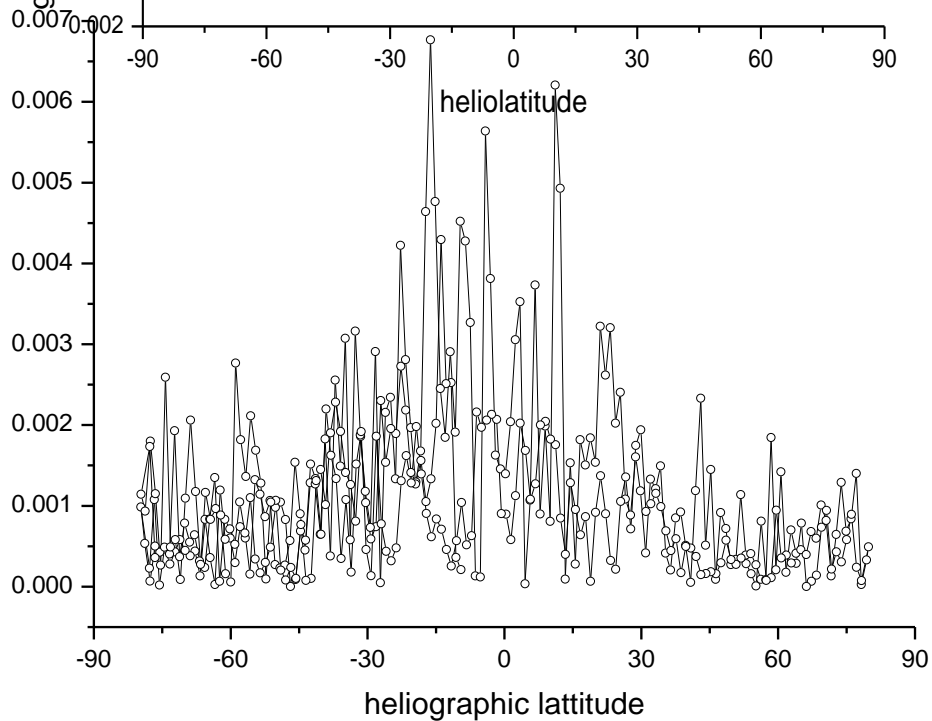
**ULYSSES COSMIC-RAY MEASUREMENTS  
(320-2100 MeV) POLAR DIAGRAM**





heliolatitudinal variation of cosmic ray radial gradient

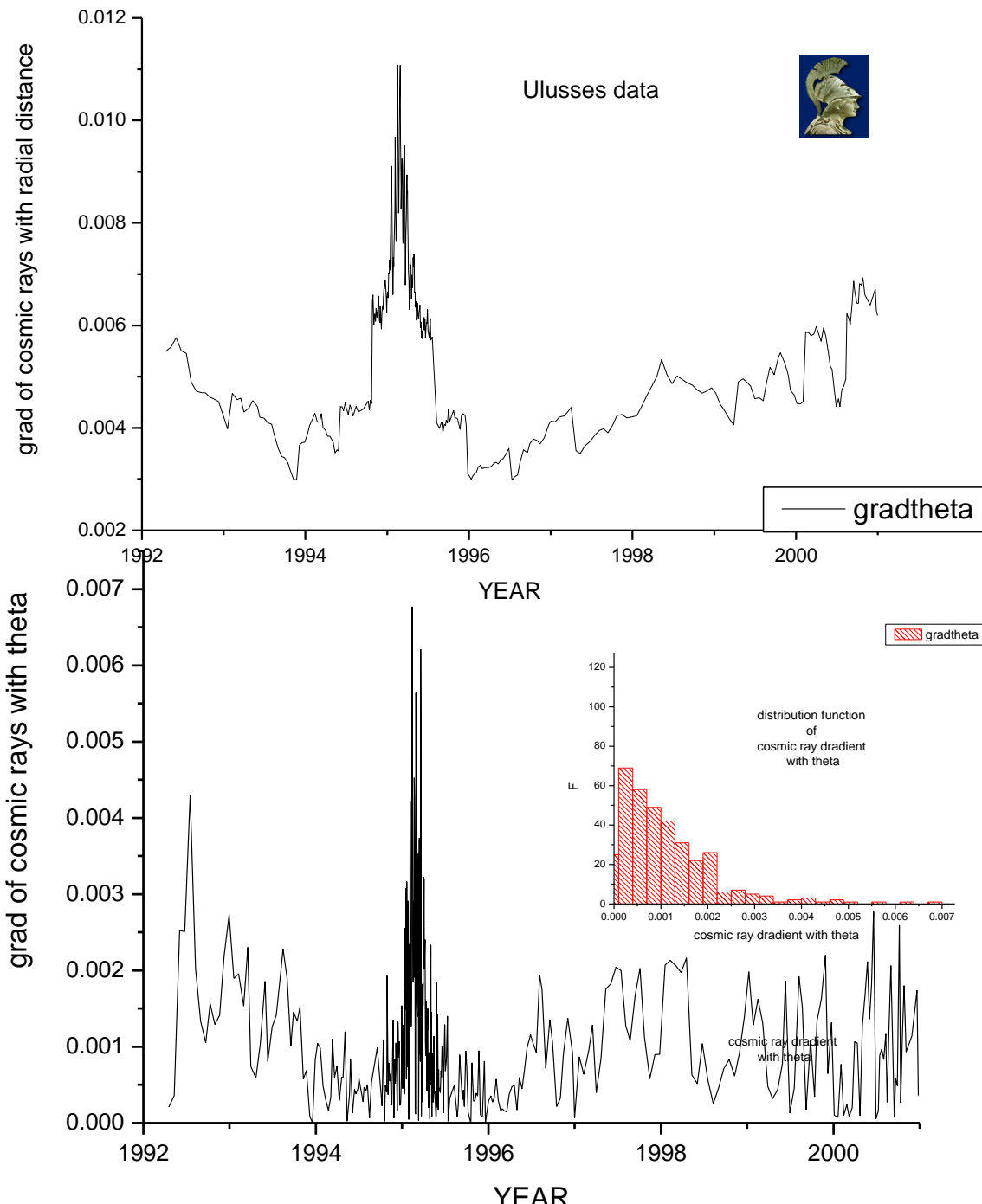
radial gradient of cosmic rays vs heliolatitude

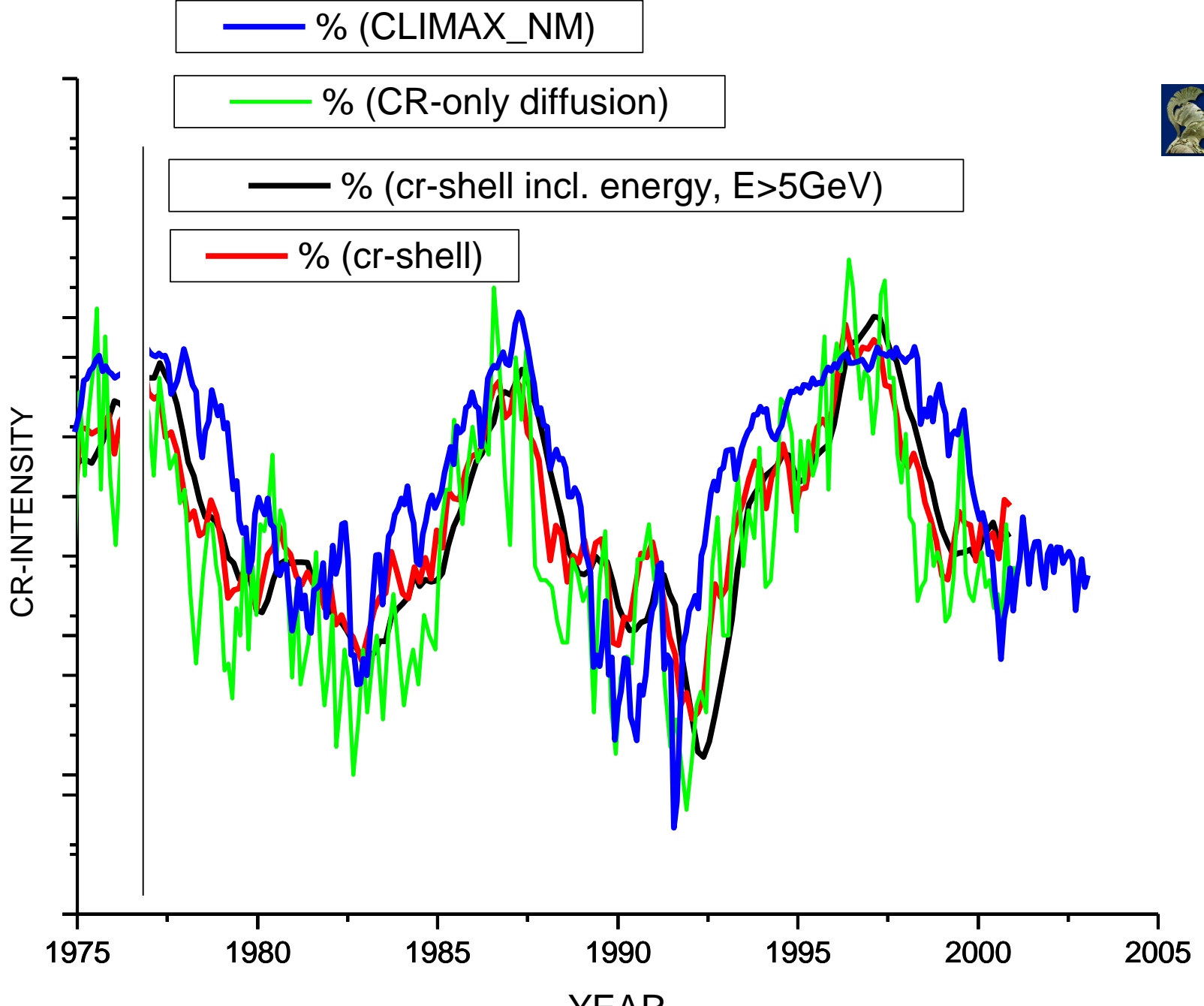


model (top) and Ulysses data

# time variation of cosmic ray radial gradient

model (top) and  
Ulysses data

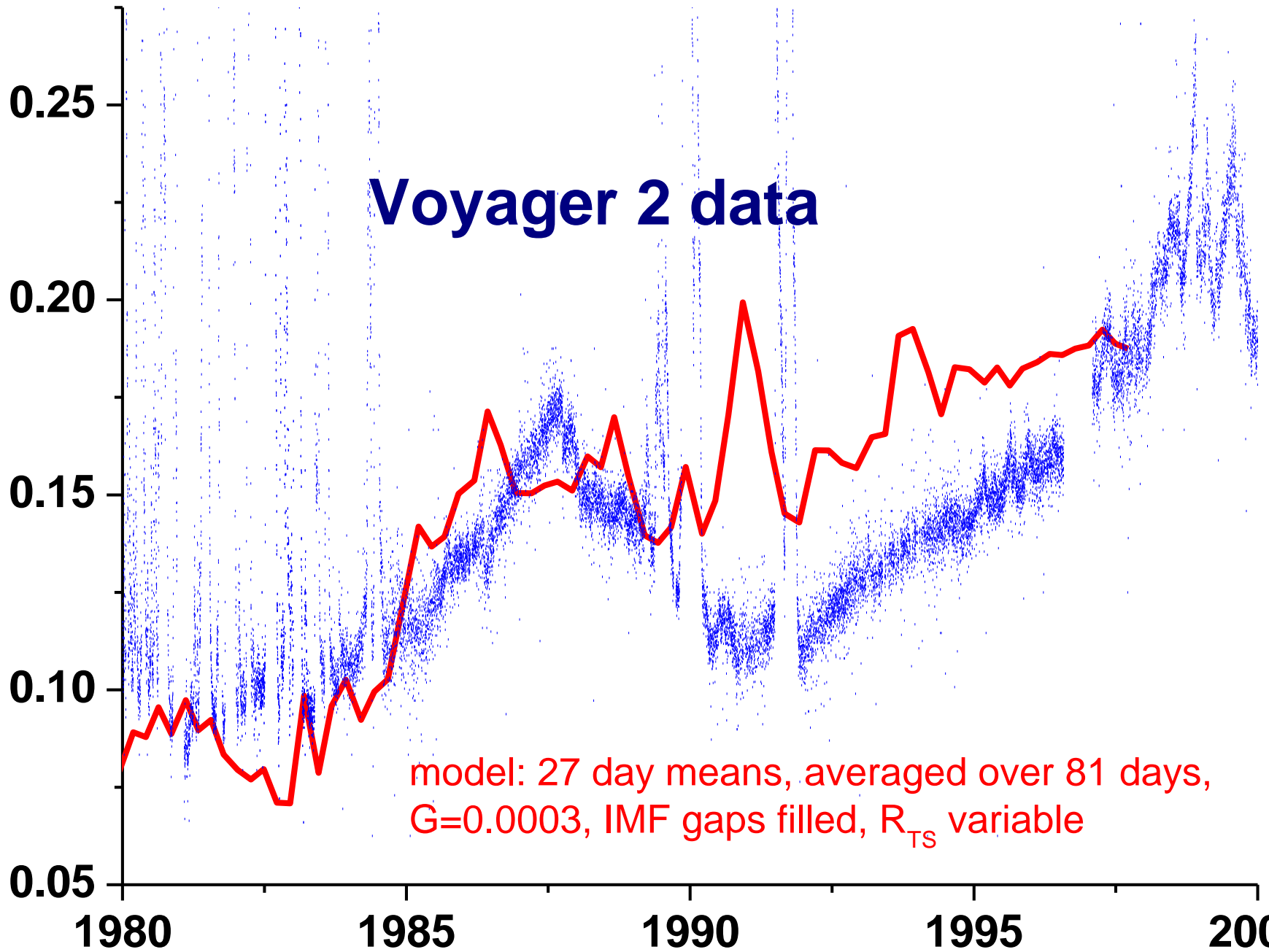




Cosmic ray 1D shell model (red), also for 400 MeV, > 5 GeV compared with Climax Neutron Monitor

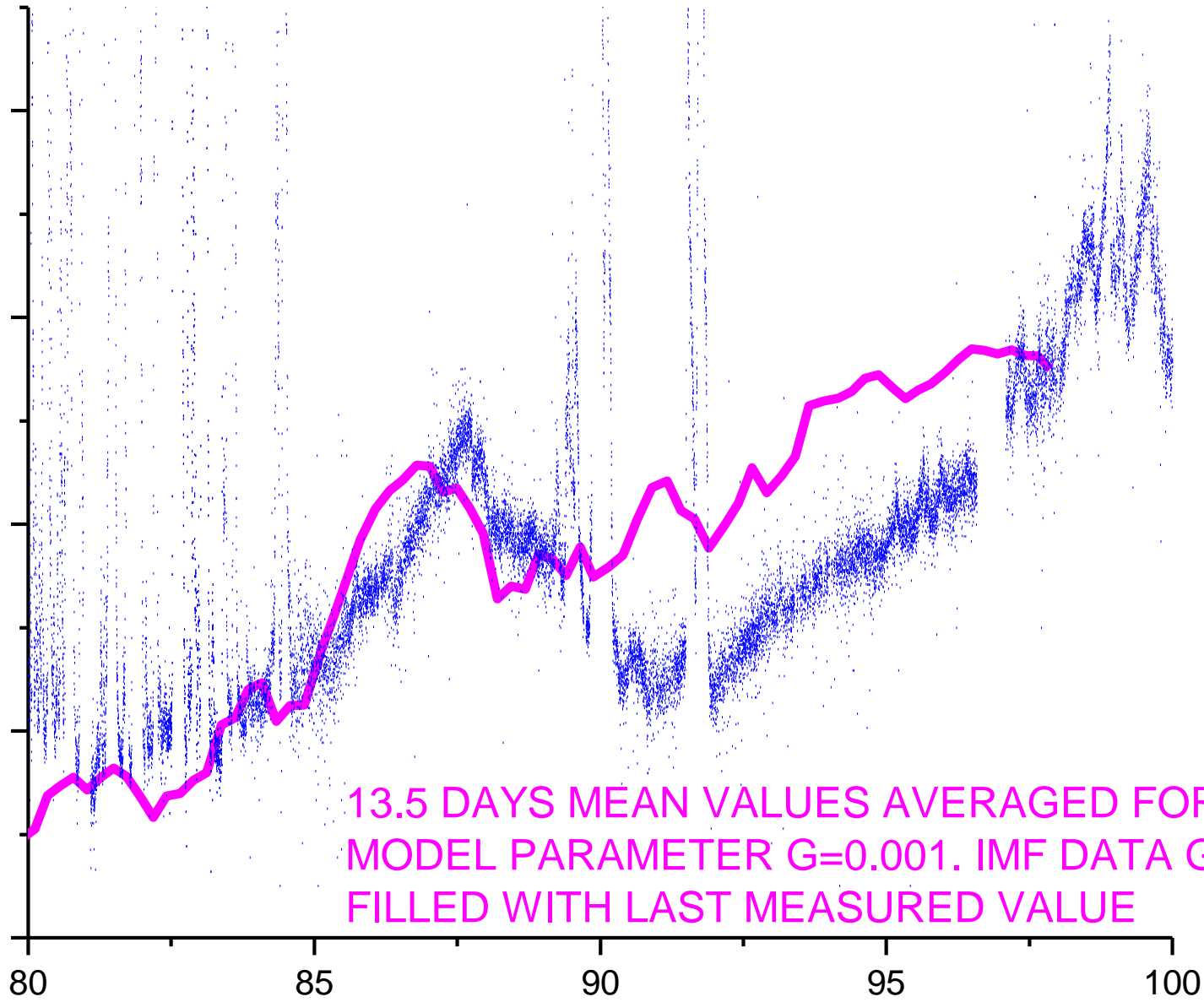


cosmic ray intensity



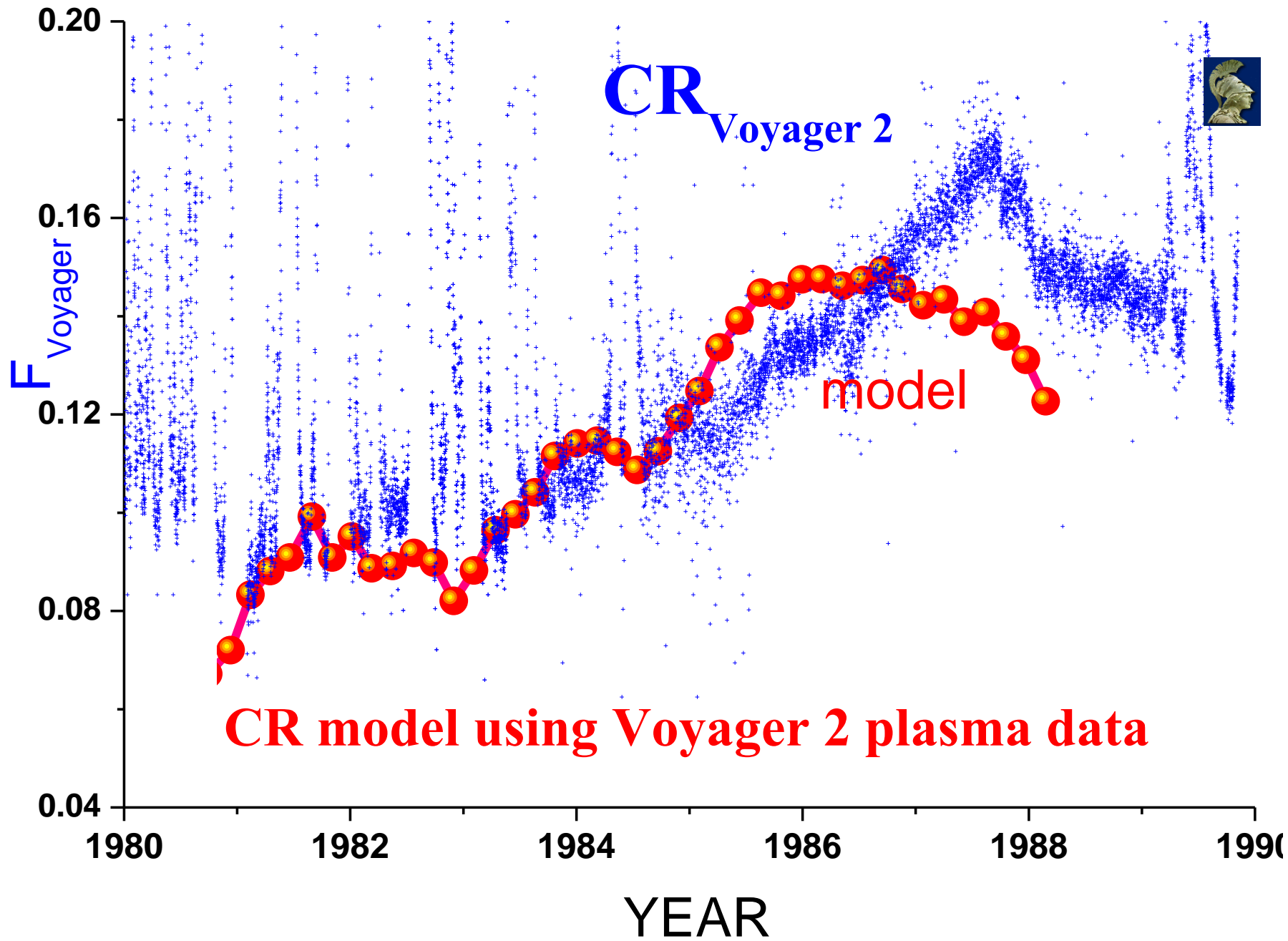
V2\_CR\_RATE

MODEL\_CR\_RATE



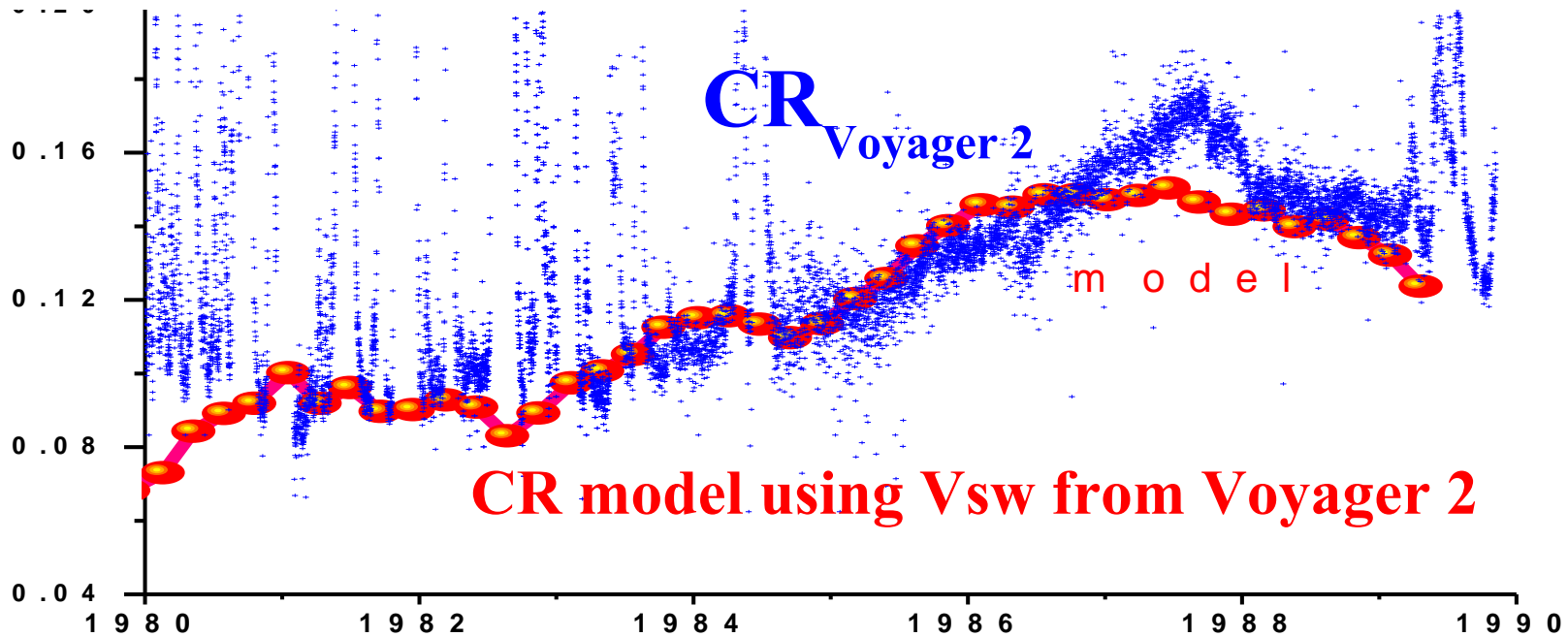
13.5 DAYS MEAN VALUES AVERAGED FOR 81 DAYS  
MODEL PARAMETER  $G=0.001$ . IMF DATA GAPS  
FILLED WITH LAST MEASURED VALUE

YEARS





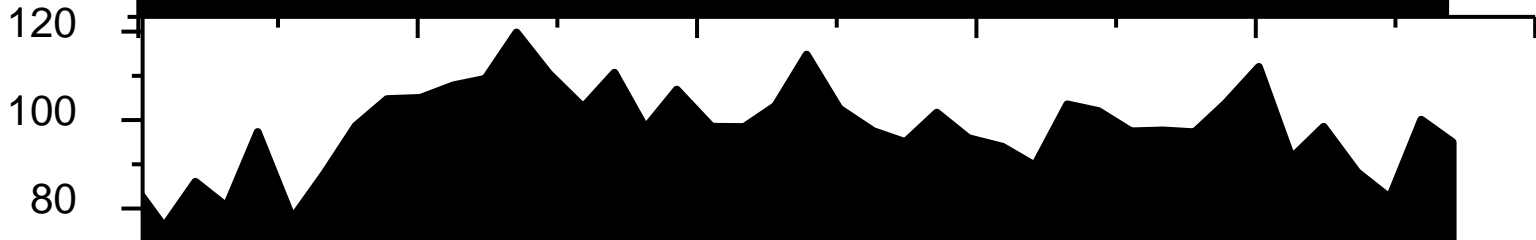
$F_{\text{Voyager}}$



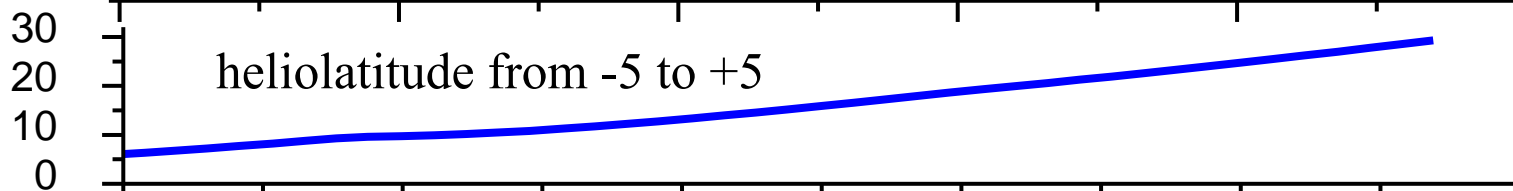
$V_{\text{SW}}$



$R_{\text{TS}}$



R in AU

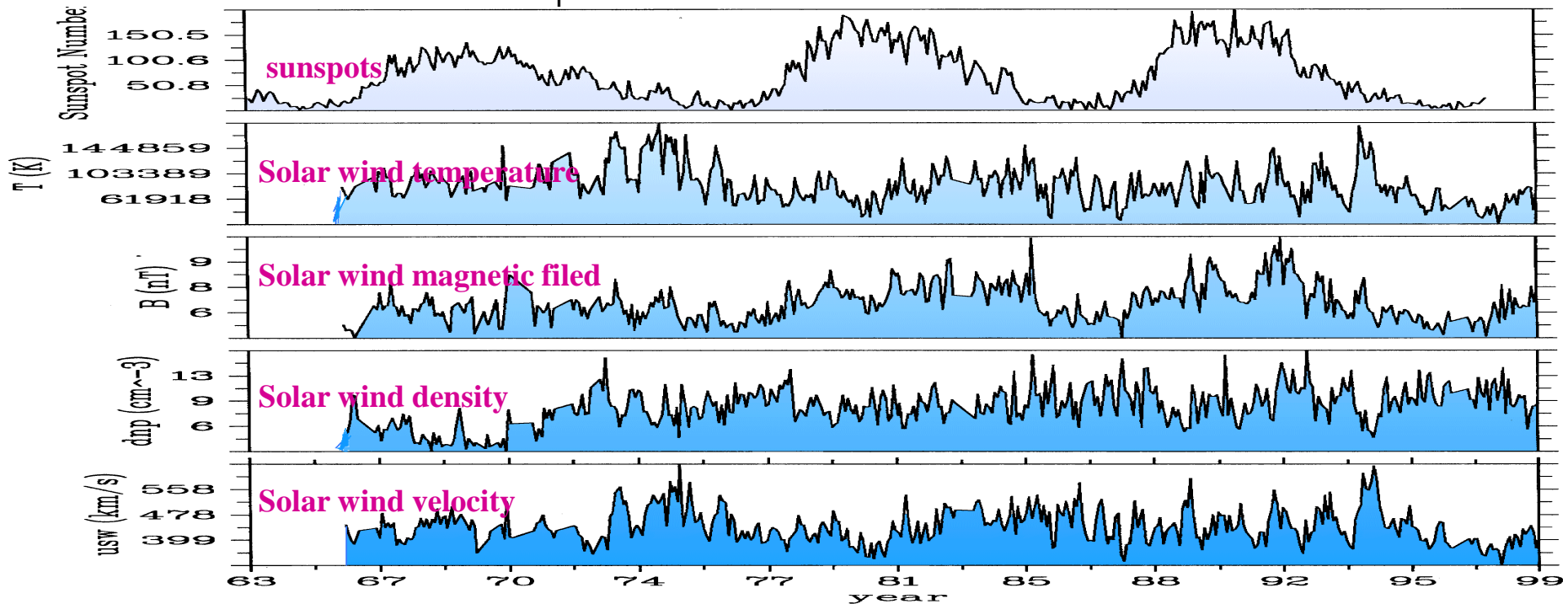
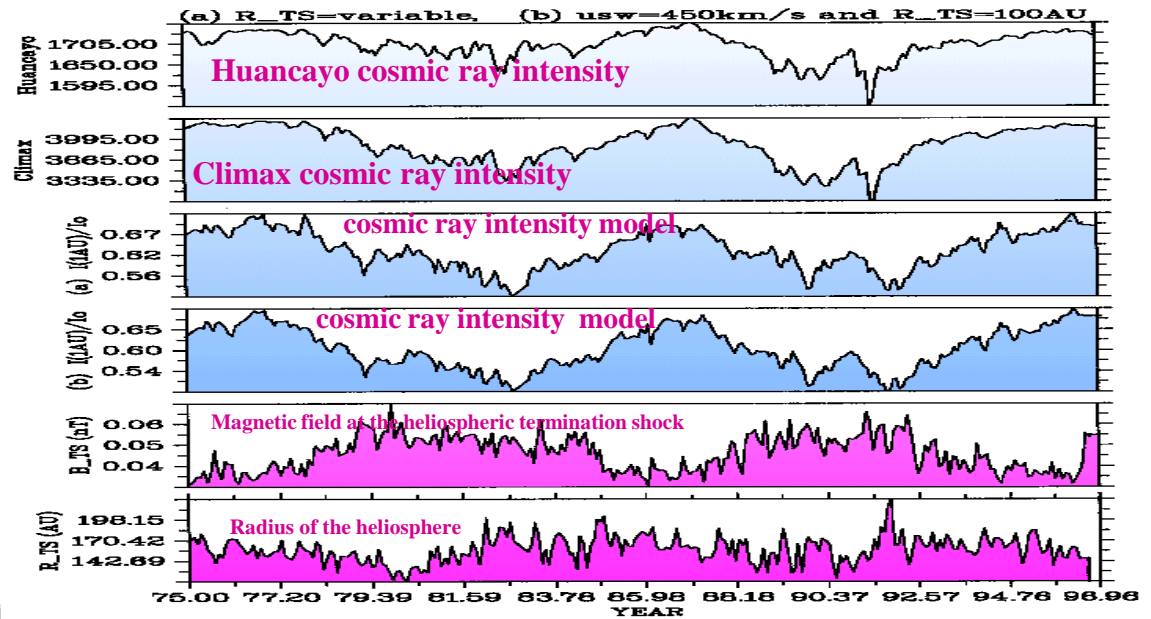


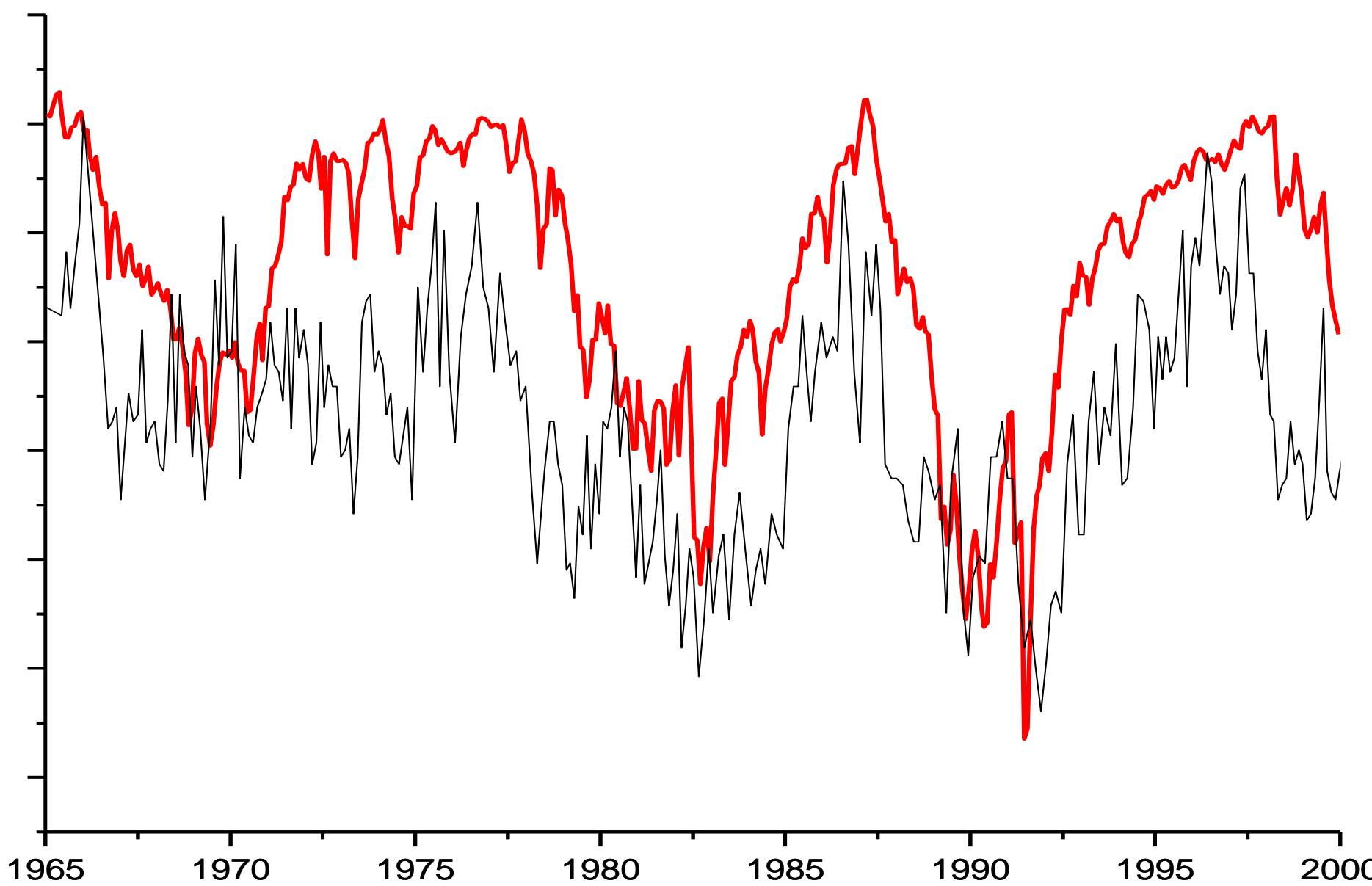
80 82 84 86 88 90  
year





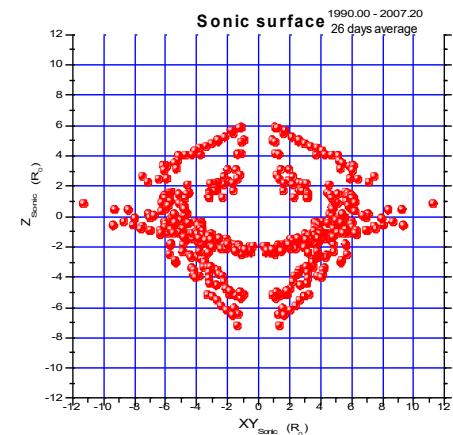
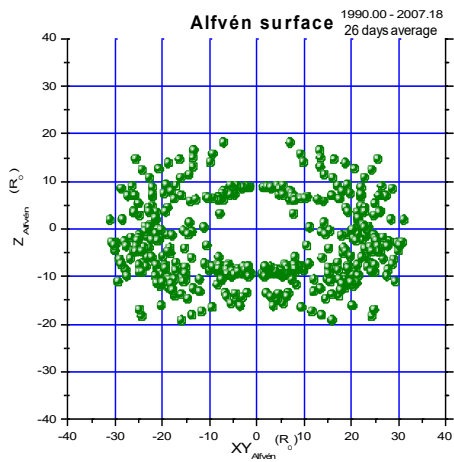
- We use a realistic semi-empirical and detailed model to reproduce the long term temporal variations of galactic cosmic ray intensity. The model is based on diffusion-convection and actual interplanetary plasma data from satellites at 1 AU.
- We simulate the heliosphere with a series of concentric spherical shells, each with its magnetic field. These magnetised shells modulate the cosmic ray intensity during their travel from the Sun to the heliospheric boundary.
- The cosmic ray intensity at the Earth's orbit is the result of the successive dynamic influence of all shells between the observer (at the Earth) and the heliospheric boundary.
- Our estimations of the cosmic ray modulation are in very good agreement with ground-based observations from Climax and Huancayo cosmic ray stations.



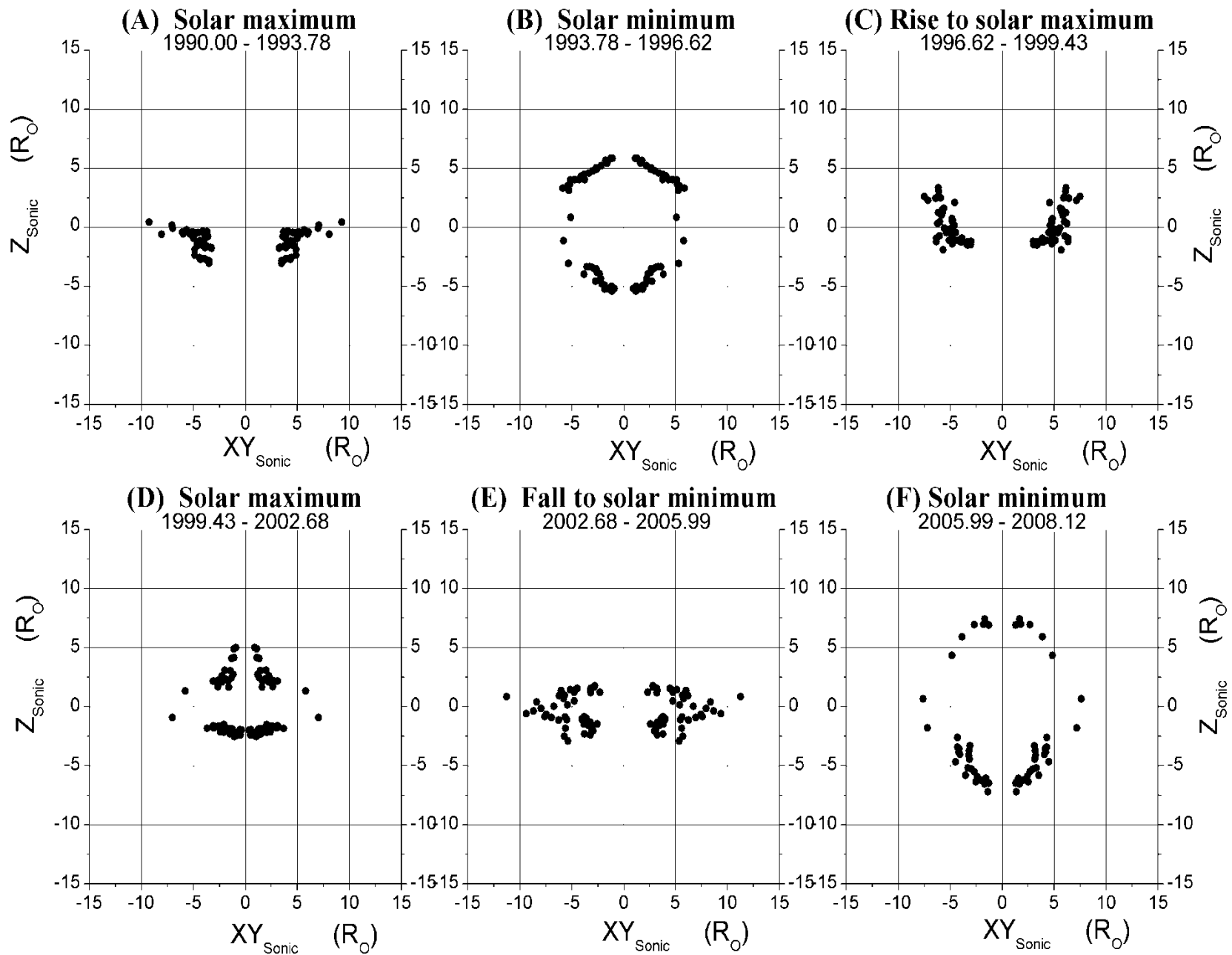


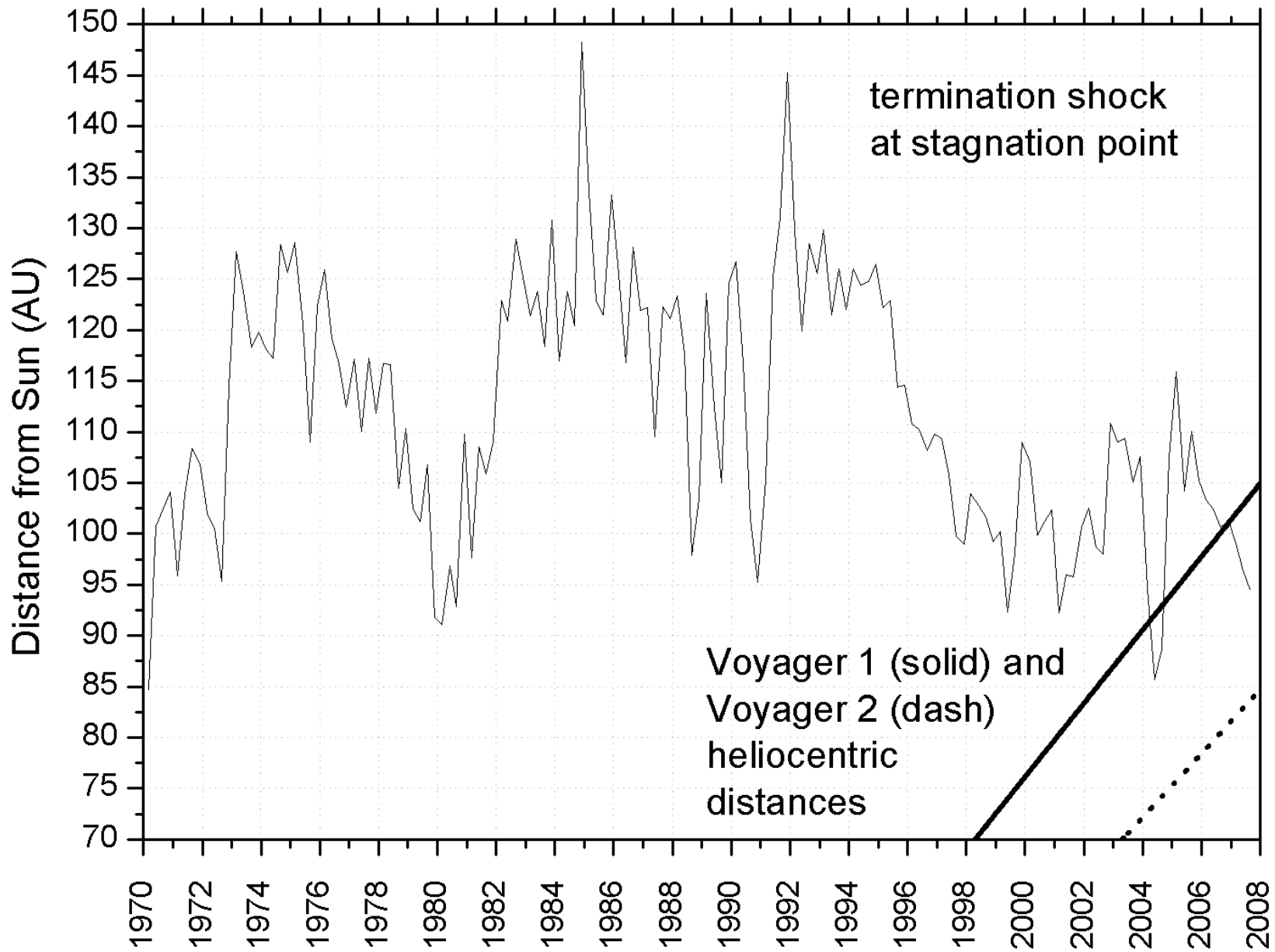
**Cosmic ray 1D shell model vs Climax Neutron Monitor cosmic ray data (longer period)**

# Η Σφαίρα Alfven και η ηχητική επιφάνεια γύρω από τον Ήλιο



# Sonic surface

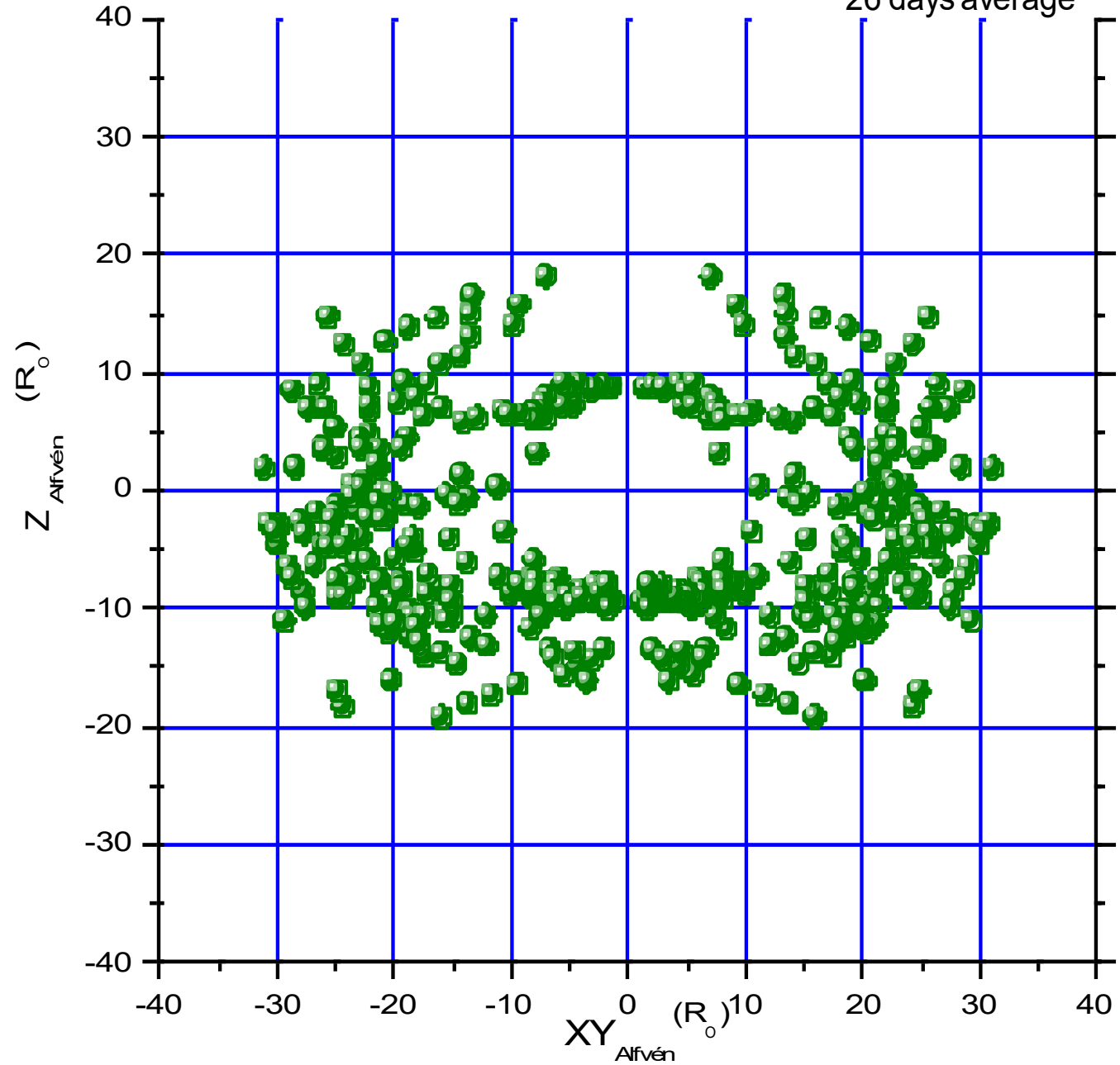




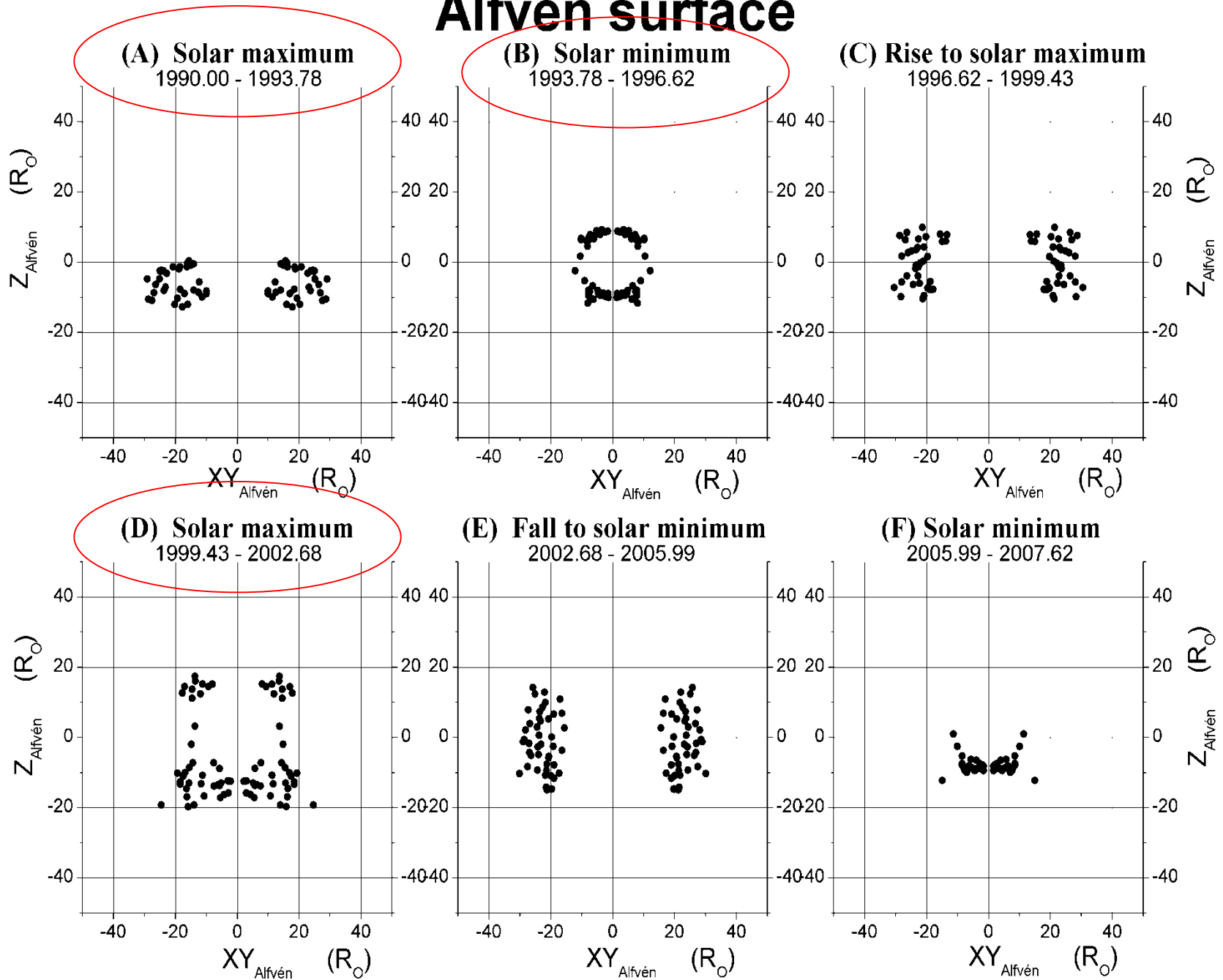
# Alfvén surface

1990.00 - 2007.18

26 days average



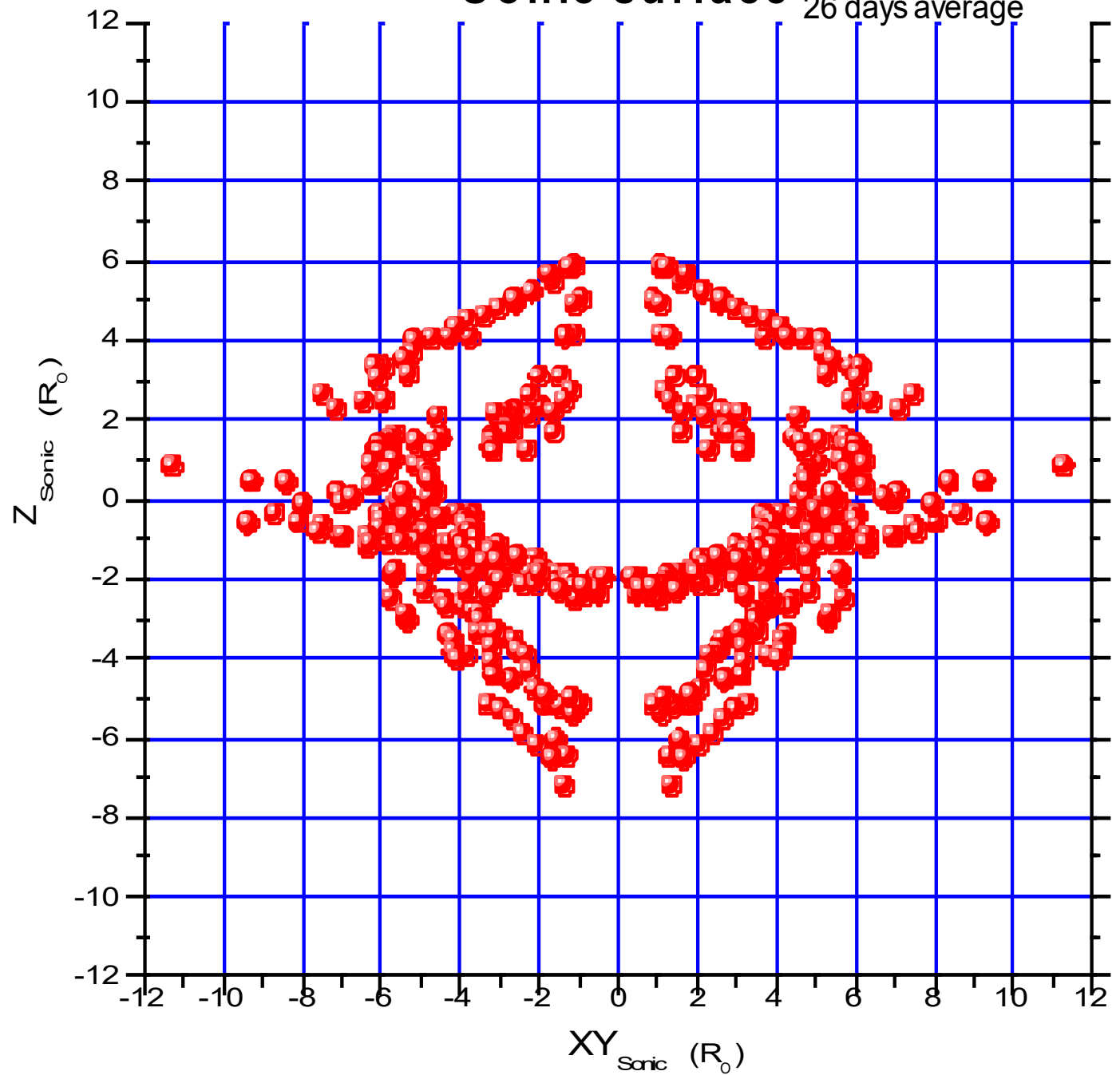
# Alfvén surface





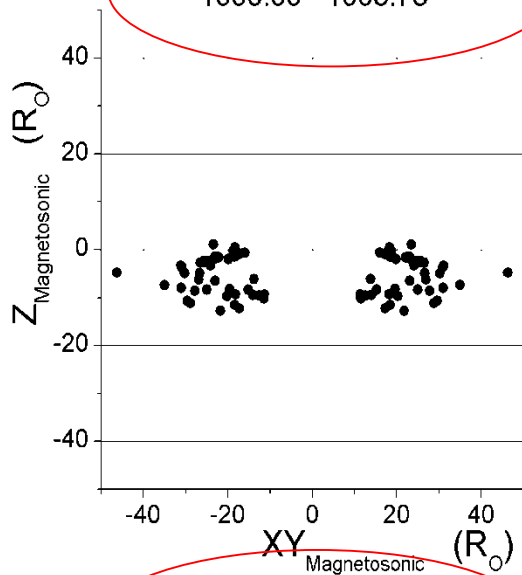
# Sonic surface

1990.00 - 2007.20  
26 days average

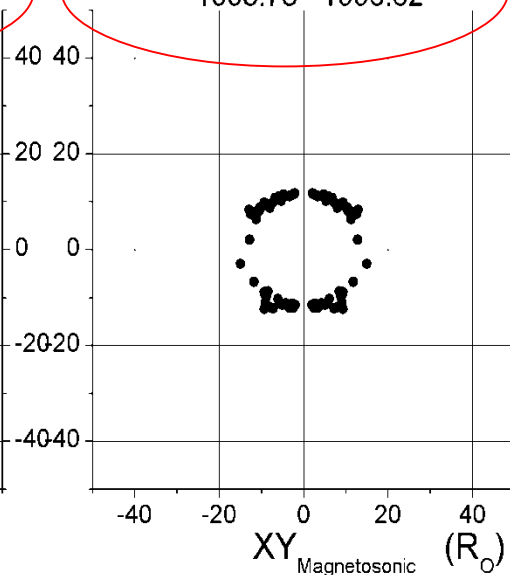


# Magnetosonic surface

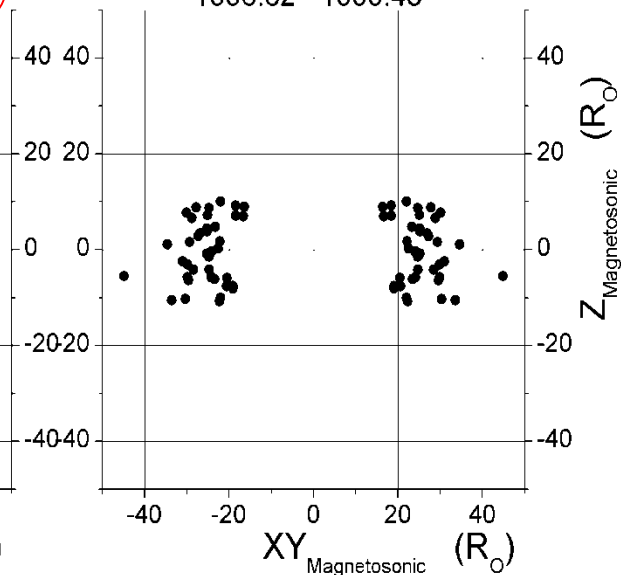
**(A) Solar maximum**  
1990.00 - 1993.78



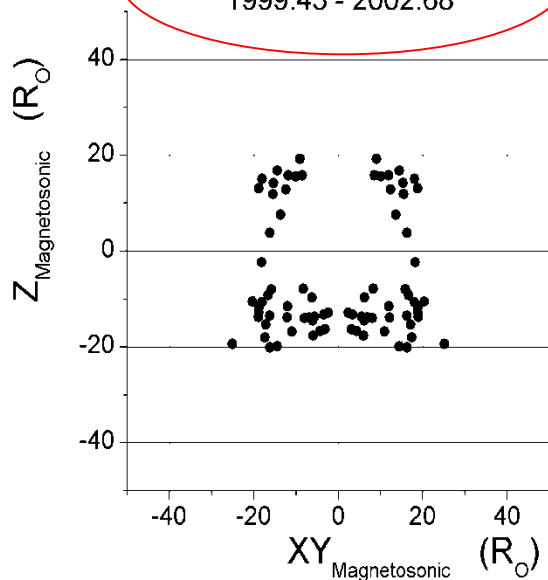
**(B) Solar minimum**  
1993.78 - 1996.62



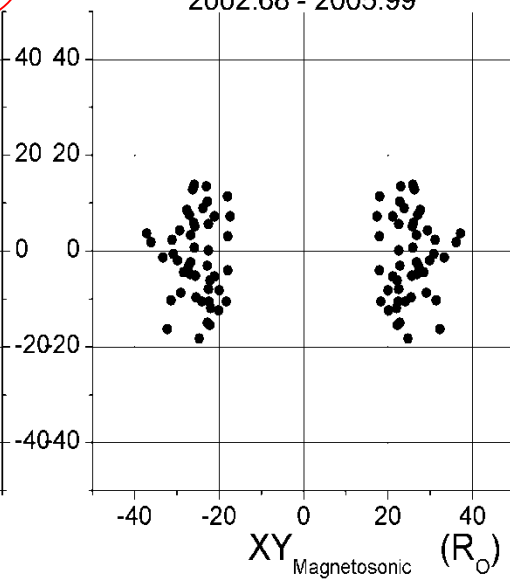
**(C) Rise to solar maximum**  
1996.62 - 1999.43



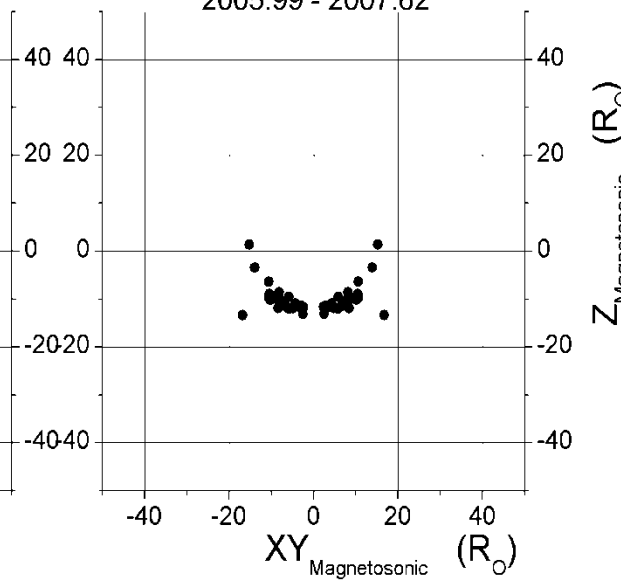
**(D) Solar maximum**  
1999.43 - 2002.68



**(E) Fall to solar minimum**  
2002.68 - 2005.99



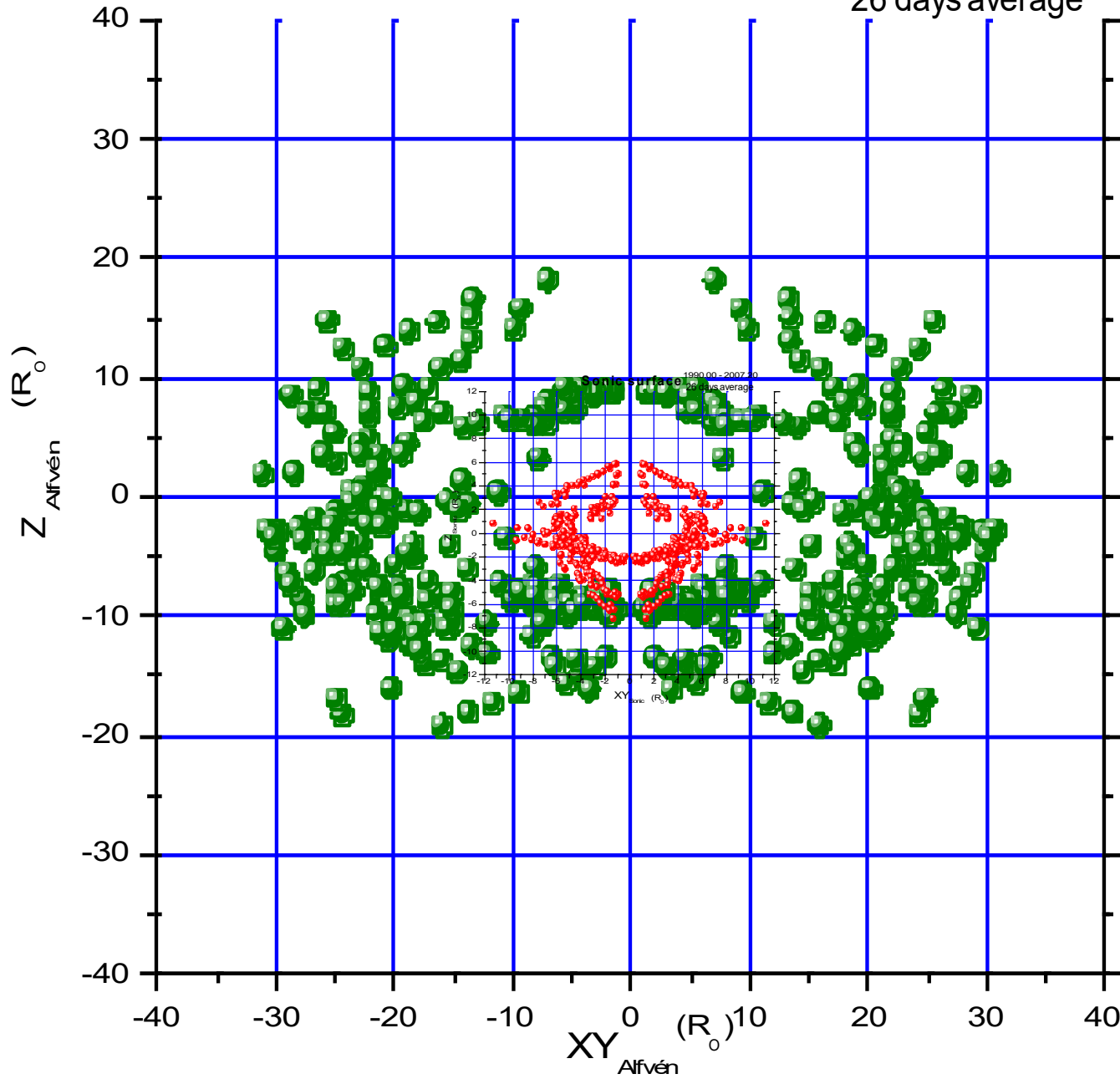
**(F) Solar minimum**  
2005.99 - 2007.62

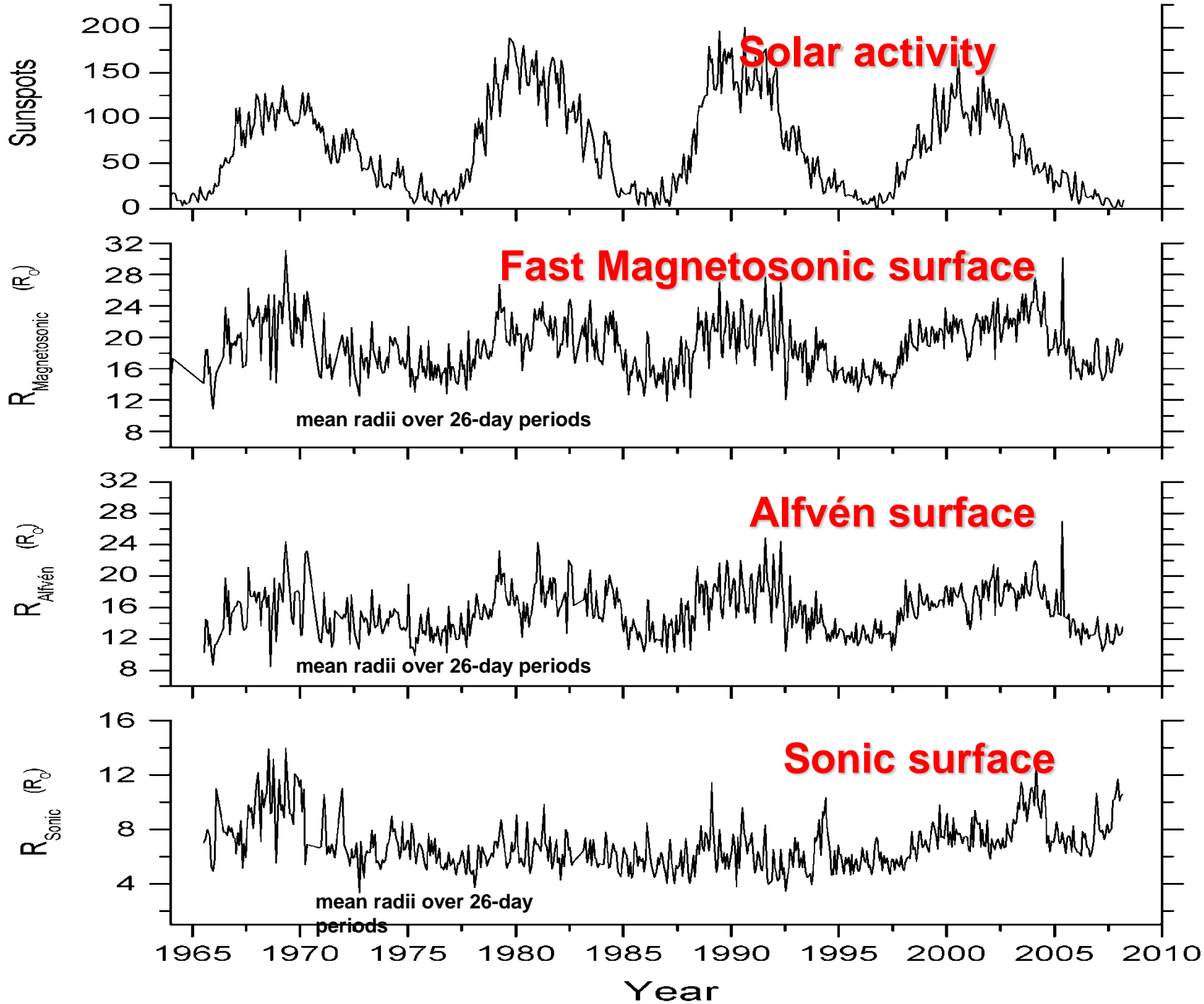


# Alfvén surface

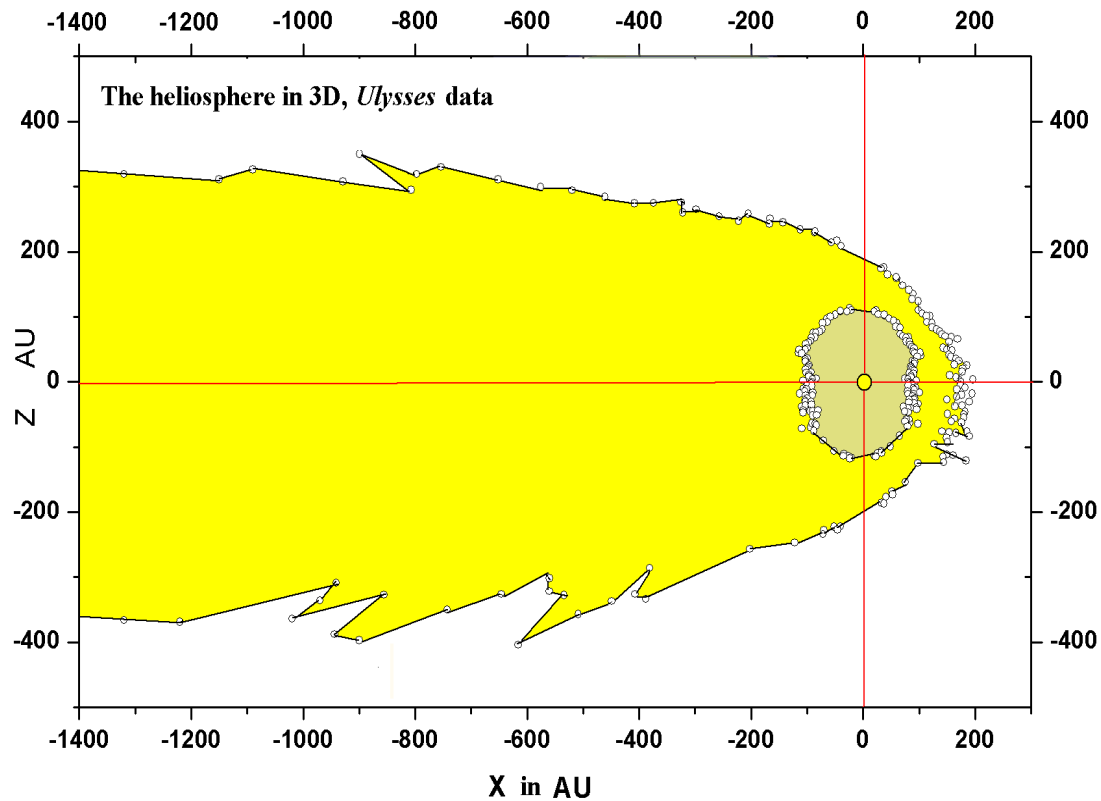
1990.00 - 2007.18

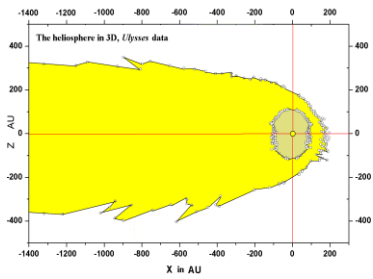
26 days average





# παράρτημα





# THE LOCATION OF THE HELIOSPHERIC TERMINATION SHOCK

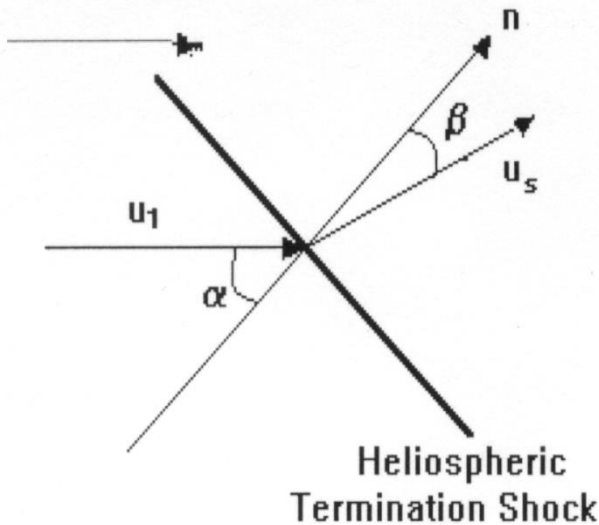


## 2.1. Analysis

From Rankine-Hugoniot shock jump conditions for a strong oblique termination shock, we get (Barnes 1998)

$$u_s \sin \beta = u_1 \sin \alpha \quad (1)$$

solar wind flow



$$u_s \cos \beta = \left( \frac{\gamma - 1}{\gamma + 1} \right) u_1 \cos \alpha \quad (2)$$

$$\rho_s = \rho_1 \left( \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \right) \quad (3)$$

$$p_s = \rho_1 u_1^2 \left( \frac{2}{\gamma + 1} \right) \cos^2 \alpha, \quad (4)$$

FIG. 1.—Solar wind passing through an oblique termination shock



# solar wind flow

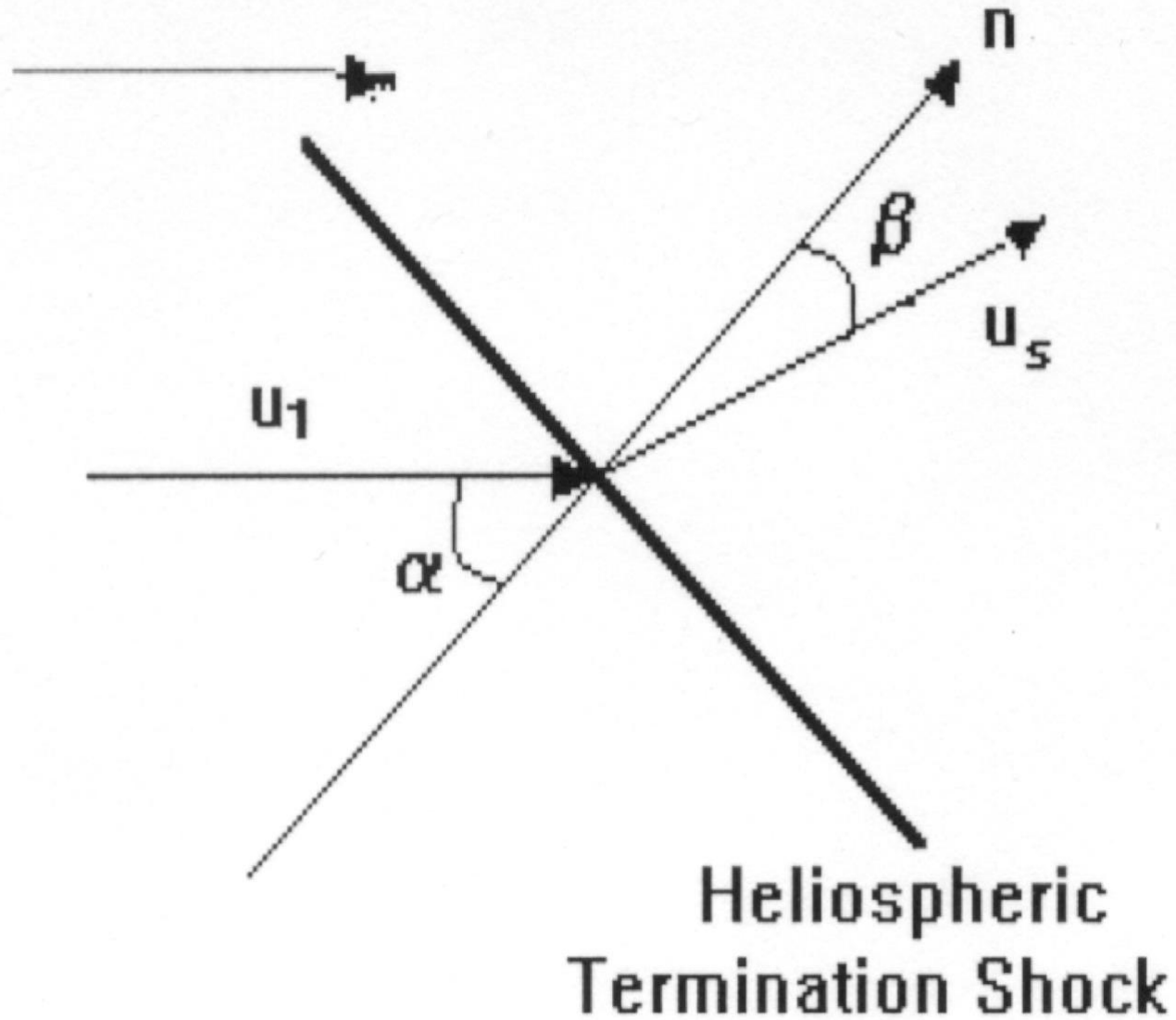


FIG. 1.—Solar wind passing through an oblique termination shock





Then equation (4), with the help of equations (2) and (5), becomes

$$p_s = \rho_1 u_1^2 \frac{2(\gamma + 1)}{(\gamma - 1)^2} \frac{\cos^2 \beta}{[4\gamma/(\gamma - 1)^2] \cos^2 \beta + 1} . \quad (6)$$

The pressure distribution  $p_s$  on the termination shock is obtained applying the Bernoulli equation for the flow between the termination shock and the heliopause, assuming that the flow is incompressible (see § 1):

$$\frac{1}{2}\rho_s u_s^2 + p_s = \frac{1}{2}\rho_\infty u_\infty^2 + p_\infty . \quad (7)$$

Substituting  $\rho_s$  from equation (3) and  $u_s$  from equation (5) and then solving for  $p_s$ , we take

$$p_s = p_\infty + \frac{1}{2} \rho_\infty u_\infty^2 - \frac{1}{2} \rho_1 \left( \frac{\gamma + 1}{\gamma - 1} \right) \times \frac{u_1^2}{[4\gamma/(\gamma - 1)^2] \cos^2 \beta + 1} . \quad (8)$$



The solar wind density  $\rho_1$  upstream of the termination shock varies with radial distance  $r$  like

$$\rho_1 = \rho_o \left( \frac{r_o}{r_s} \right)^2, \quad (9)$$

$$\left( \frac{r_s}{r_o} \right)^2 = \frac{\rho_o(\gamma + 1) \{ u_1^2 + [u_s^2 / (\gamma - 1)] \}}{2\gamma(p_\infty + \frac{1}{2}\rho_\infty u_\infty^2)}.$$



We express the **velocity potential of the flow after the termination shock** in the form (**Fahr et al. 1993; Nerney & Suess 1995**)

where P are the associated Legendre polynomials

$$\Phi = \sum_{lm} (A_{lm} r^l + B_{lm} r^{-(l+1)}) \cos m\phi P_l^m(\cos \theta)$$

$$\Phi = A_o + \frac{B_o}{r} + r(A \cos \phi \sin \theta + B \cos \theta) + \frac{1}{r^2} (\Gamma \cos \phi \sin \theta + \Delta \cos \theta)$$

$$u_r = -\frac{\partial \Phi}{\partial r} = \frac{B_o}{r^2} - (A \cos \theta \sin \theta + B \cos \theta) + \frac{2}{r^3} (\Gamma \cos \phi \sin \theta + \Delta \cos \theta)$$

$$u_\theta = -\frac{1}{r} \frac{\partial \Phi}{\partial \theta} = -A \cos \phi \cos \theta + B \sin \theta - \frac{1}{r^3} (\Gamma \cos \phi \cos \theta - \Delta \sin \theta)$$

$$u_\phi = -\frac{1}{r \sin \theta} \frac{\partial \Phi}{\partial \phi} = A \sin \phi + \frac{\Gamma \sin \phi}{r^3} .$$

The boundary conditions that we use are the following:

1.  $u(r \rightarrow \infty) = -u_\infty \hat{z}$ ;
2.  $r_s(\theta = \pi/2, \phi = 0) = r_s(\theta = \pi/2, \phi = \pi)$ ;
3.  $u(r = r_{hp}, \theta = 0) = 0$ ;
4.  $u[r = r_s(\theta = 0)] = (\gamma - 1)/(\gamma + 1)u_1$ .

From condition 2 we find that  $A = 0$  and  $\Gamma = 0$ .

From condition 1

$$B = u_\infty .$$

From condition 3 we have  $B_o = \left[ B - \frac{2\Delta}{r_h^3(\theta = 0)} \right] r_h^2(\theta = 0)$

$$\Delta = \frac{\{[(\gamma - 1)/(\gamma + 1)]u_1 + u_\infty\}r_s^2(\theta = 0) - u_\infty^2 r_h^2(\theta = 0)}{2\{[1/r_s(\theta = 0)] - [1/r_h(\theta = 0)]\}} .$$

the only unknown parameters are  
the termination shock radius  
and the heliopause radius  $r_s$   $r_h$

$r_s(0)$  can be determined from:

$$\left(\frac{r_s}{r_o}\right)^2 = \frac{\rho_o(\gamma + 1)\{u_1^2 + [u_s^2/(\gamma - 1)]\}}{2\gamma(p_\infty + \frac{1}{2}\rho_\infty u_\infty^2)} .$$

$r_h(0)$  can be determined from the one-dimensional model by  
Khabibrakhmanov et al. 1996)

$$r_h(0) - r_s(0) = 37.6 \text{ AU} .$$

# CR modulation

$$J = J_o \exp(-\gamma u_{sw} B^\alpha)$$

$$J(i, j) = \left( J(i-1, j) \exp(-\gamma_1 u_{sw} B_{(i-1, j)}^\alpha) \right. \\ \left. + J(i-1, j-1) \exp(\gamma_2 u_{sw} B_{(i-1, j-1)}^\alpha) \right. \\ \left. + J(i-1, j+1) \exp(-\gamma_3 u_{sw} B_{(i-1, j+1)}^\alpha) \right) / 3.0,$$

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.«Φυσική Διαστήματος. Ηλιακός Άνεμος». Έκδοση: 1.0. Αθήνα 2015. Διαθέσιμο από τη δικτυακή διεύθυνση:

<http://opencourses.uoa.gr/courses/PHYS5/>



# 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.

