

# Physikalische Grundlagen des Weltraumwetters - Die Heliosphäre

Volker Bothmer<sup>1</sup>  
Jörg Büchner<sup>2</sup>

(1) Institut für Astrophysik der Universität Göttingen (IAG)

(2) Max-Planck-Institut für Sonnensystemforschung (MPS), Katlenburg-Lindau

SoSe 2011

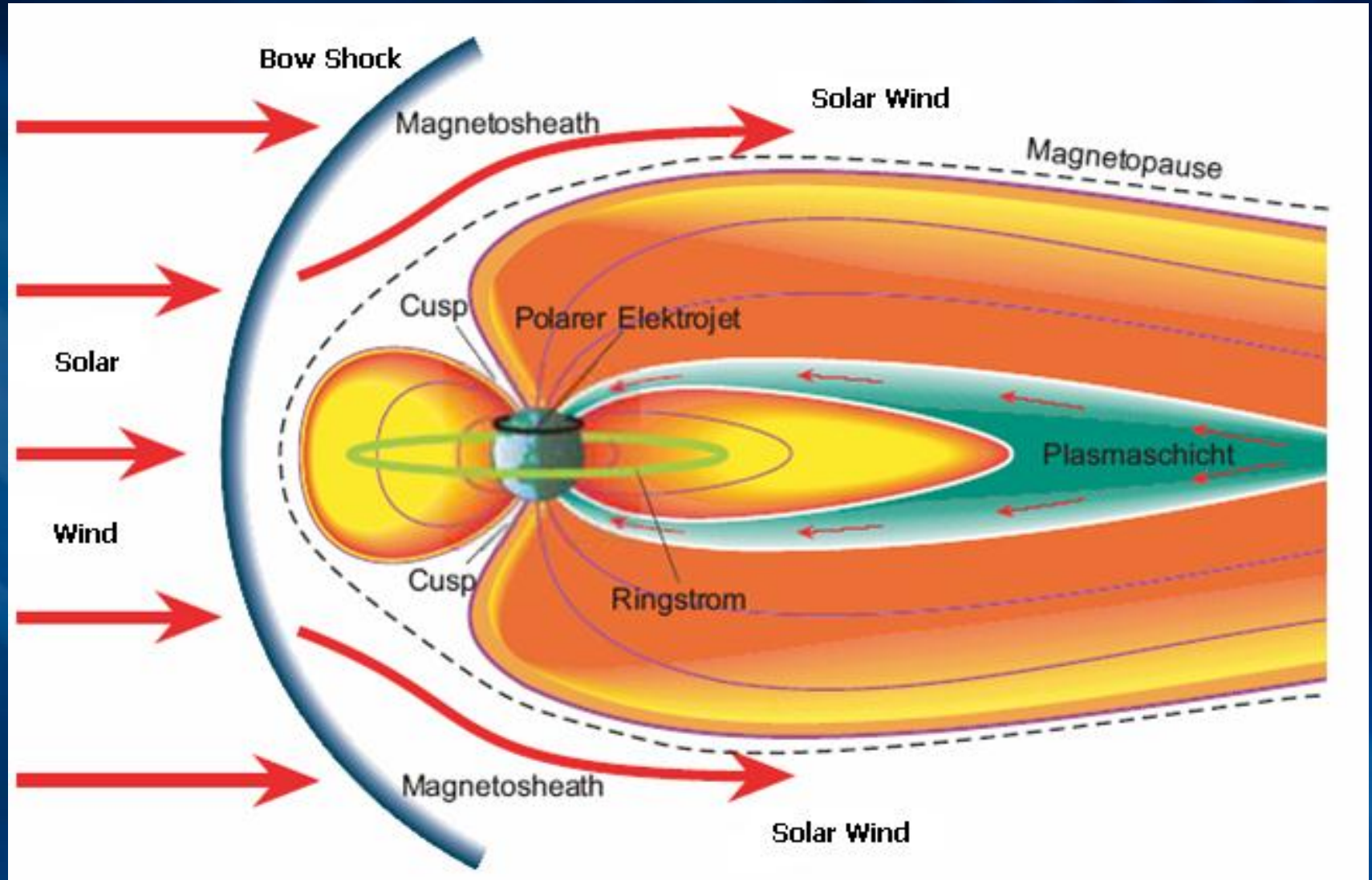
## Definition des Begriffs „Heliosphäre“

Die Heliosphäre ist der vom  
Sonnenwind ausgefüllte Bereich  
des Weltraums.

Analog zu:

- Magnetosphäre der Erde
- Stellarsphären
- Astrosphären

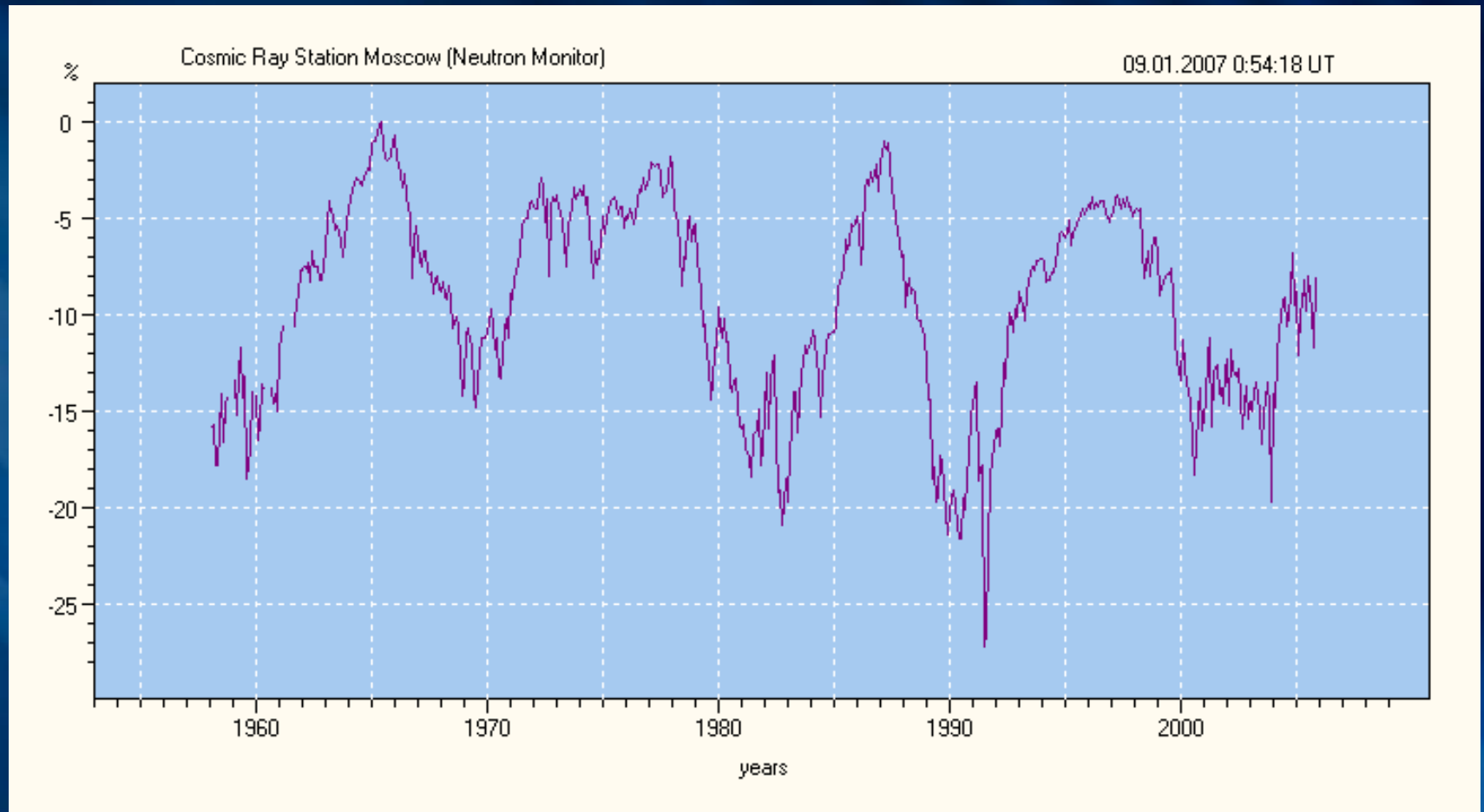
# Die Erdmagnetosphäre (s. z.B. Gold 1955)



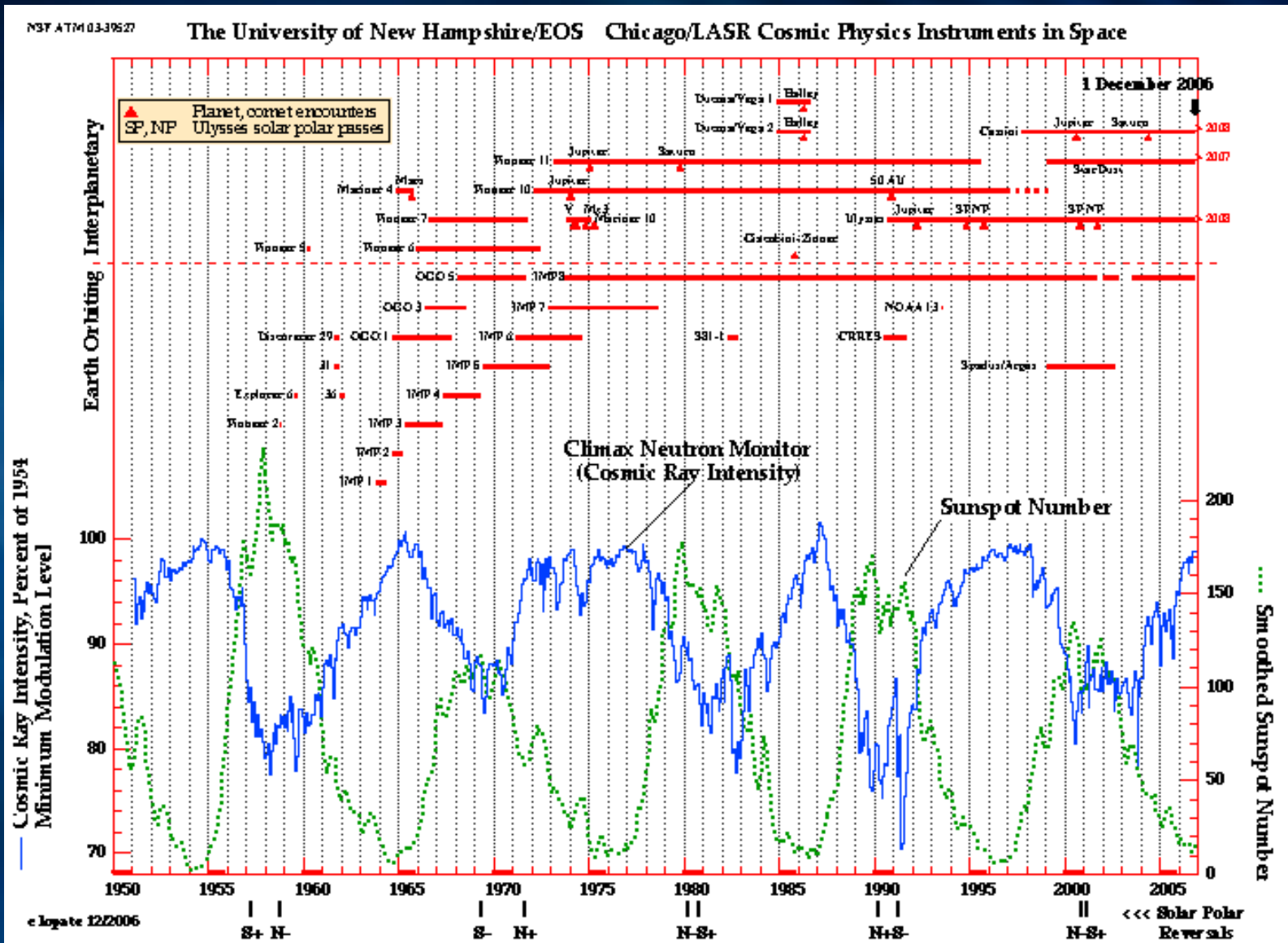
# Postulation der Existenz der Heliosphäre

Leverett Davis Jr. argues in 1955 that solar corpuscular emission will carve out a cavity in the interstellar medium accounting for some observed properties of low-energy cosmic rays (solar cycle variations).

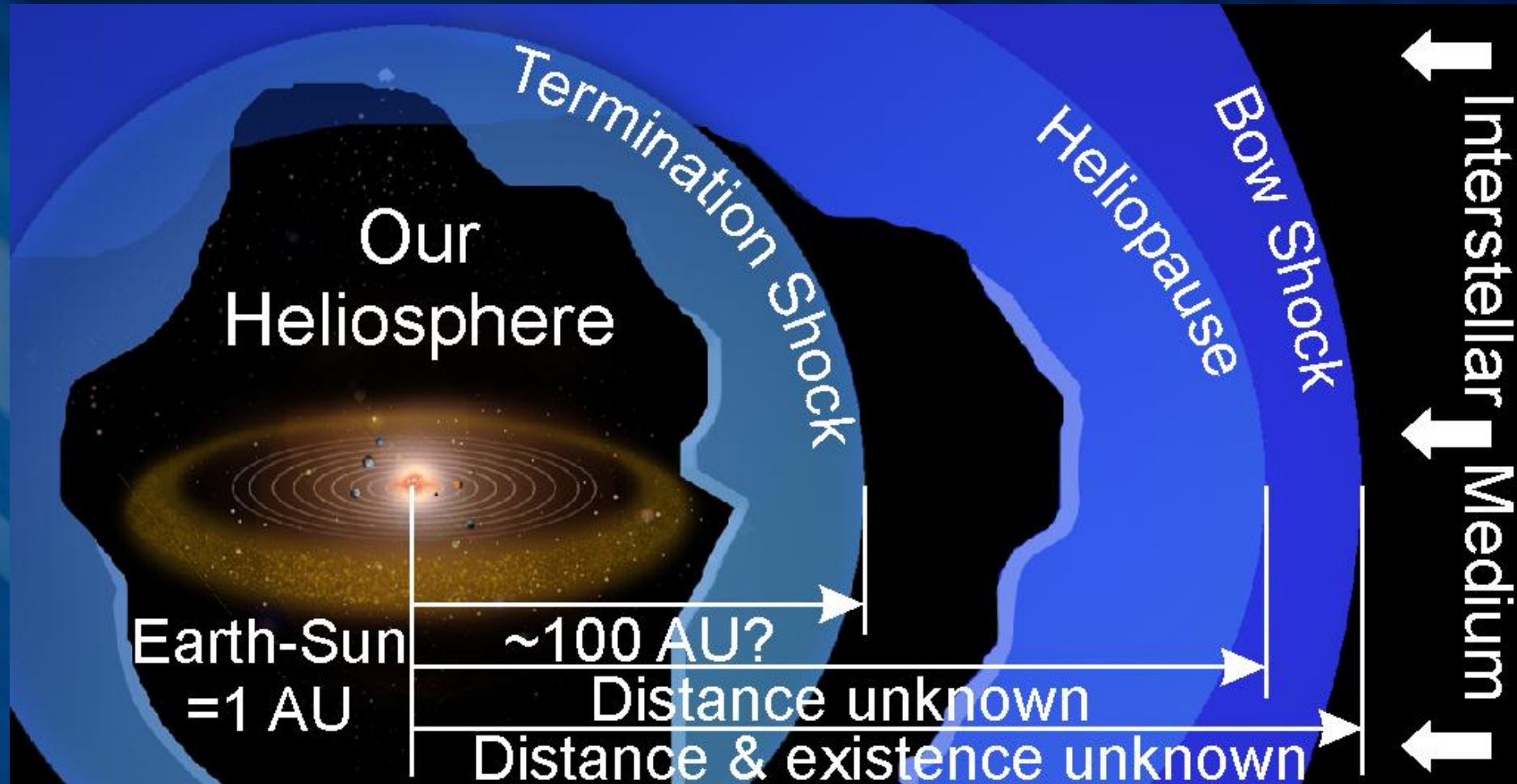
# Variation der kosmischen Strahlung mit dem Sonnenzyklus



# Variation der kosmischen Strahlung mit dem Sonnenzyklus



# Die Heliosphäre



Courtesy: D. McComas, SWRI

# Wichtige Begriffe

- Termination Shock: Abstand bei dem der Sonnenwind durch den Druck des interstellaren Mediums anfängt abgebremst zu werden.
- Heliopause: Grenze zwischen Heliosphäre und interstellarem Medium (Gas) - analog zur Magnetopause der Erde.
- Bow Shock: Hervorgerufen durch interstellaren Wind, erzeugt eine Asymmetrie der Heliosphäre (s. Sonnenwind – Erdmagnetosphäre).



# Abschätzung der Ausdehnung der Heliosphäre

- Den Radius der Heliosphäre ( $R_H$ ) kann man wie folgt abschätzen:
- Ansatz: Bestimme den Abstand bei dem der Druck (Summe aus thermischem, kinetischem und magnetischem Druck) des Sonnenwindes  $P_{SW}$ , gleich dem Druck des interstellaren Windes  $P_{IM}$  wird (Stagnationspunkt).

## Annahmen:

- Sonnenwindgeschwindigkeit ist konstant
- Dichte fällt ab in Abhängigkeit vom radialem Abstand zur Sonne mit  $1/r^2$

# Ausdehnung der Heliosphäre

$$P_{SW} = P_{1 AU} \cdot (1 AU/R_S)^2 =$$

$$(m_p N_{1 AU} V_{1 AU}^2) \cdot (1 AU/R_S)^2$$

# Ausdehnung der Heliosphäre

Benutze Sonnenwindmessungen bei 1 AU  
und setze:

$$m_p = 1,67 \times 10^{-27} \text{ kg}$$

$$N_{1 \text{ AU}} = 5 \cdot 10^6 / \text{cm}^3$$

$$V_{1 \text{ AU}} = 400 \text{ km/s}$$

Interstellarer Druck (unsichere Größe!):

$$P_I = (1,3 \pm 0,2) \times 10^{-13} \text{ N/m}^2$$

# Ausdehnung der Heliosphäre

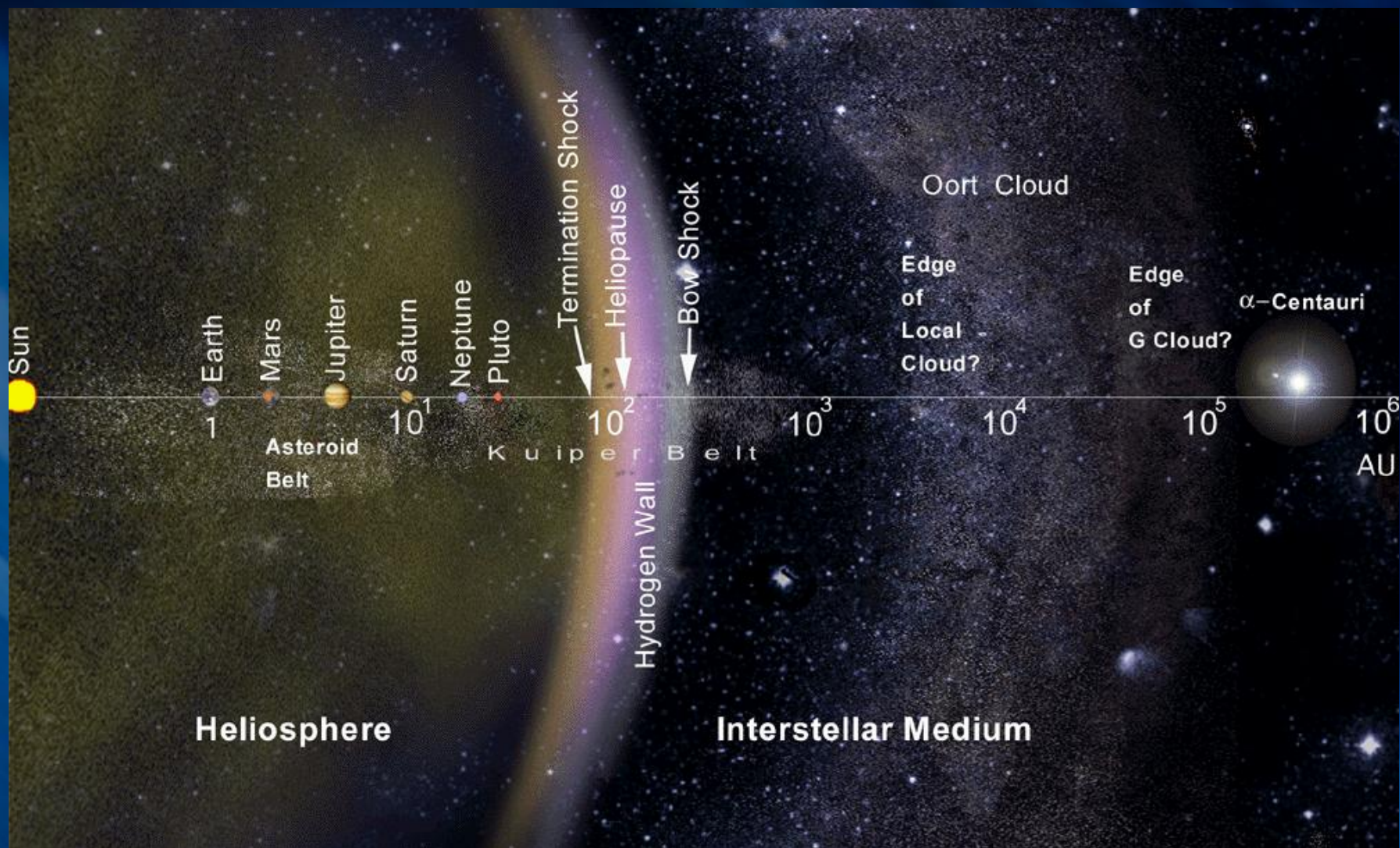
Abschätzungen führen zu:

$$R_H \geq 100 \text{ AU}$$

Wegen Unsicherheit für Parameter des IM: 100 – 140 AU

Zum Vergleich: Abstand Pluto ist 30-50 AU

# Der Einflussbereich des Sonnenwindes reicht weit über den Abstand zu den Planeten hinaus

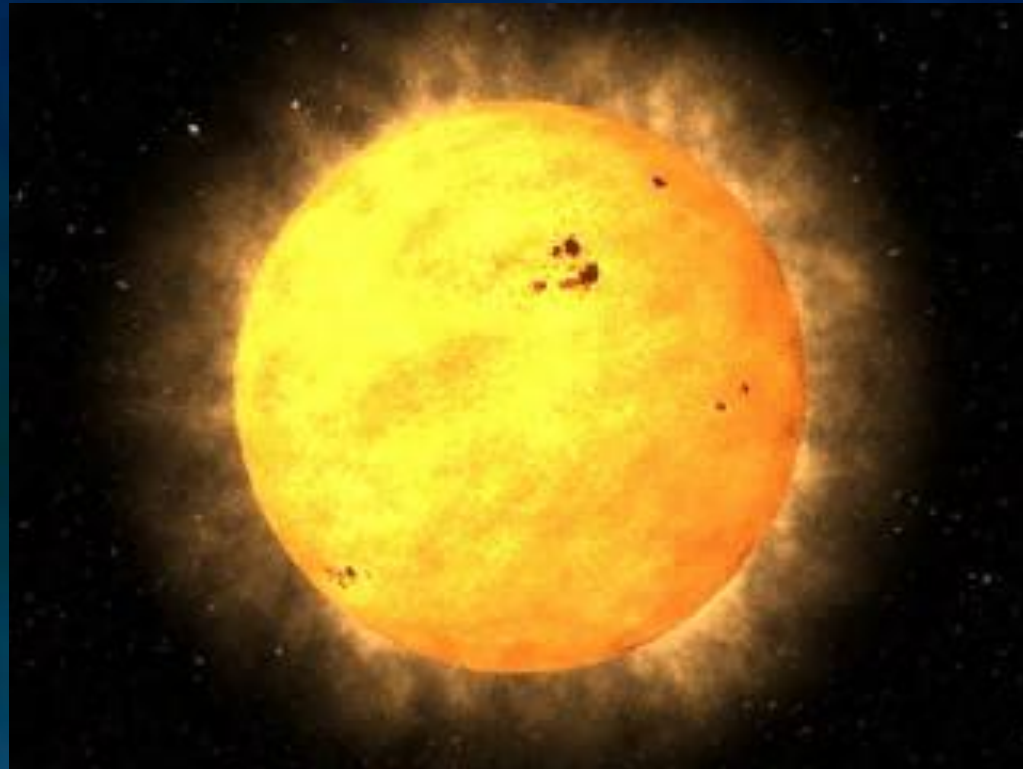


## Weitere Charakteristika der Heliosphäre

Da sich die Sonne relativ zum interstellarem Medium bewegt, sollte eine Stoßwelle in Bewegungsrichtung vor der Heliopause entstehen (analog zur Bugstoßwelle der Erde).

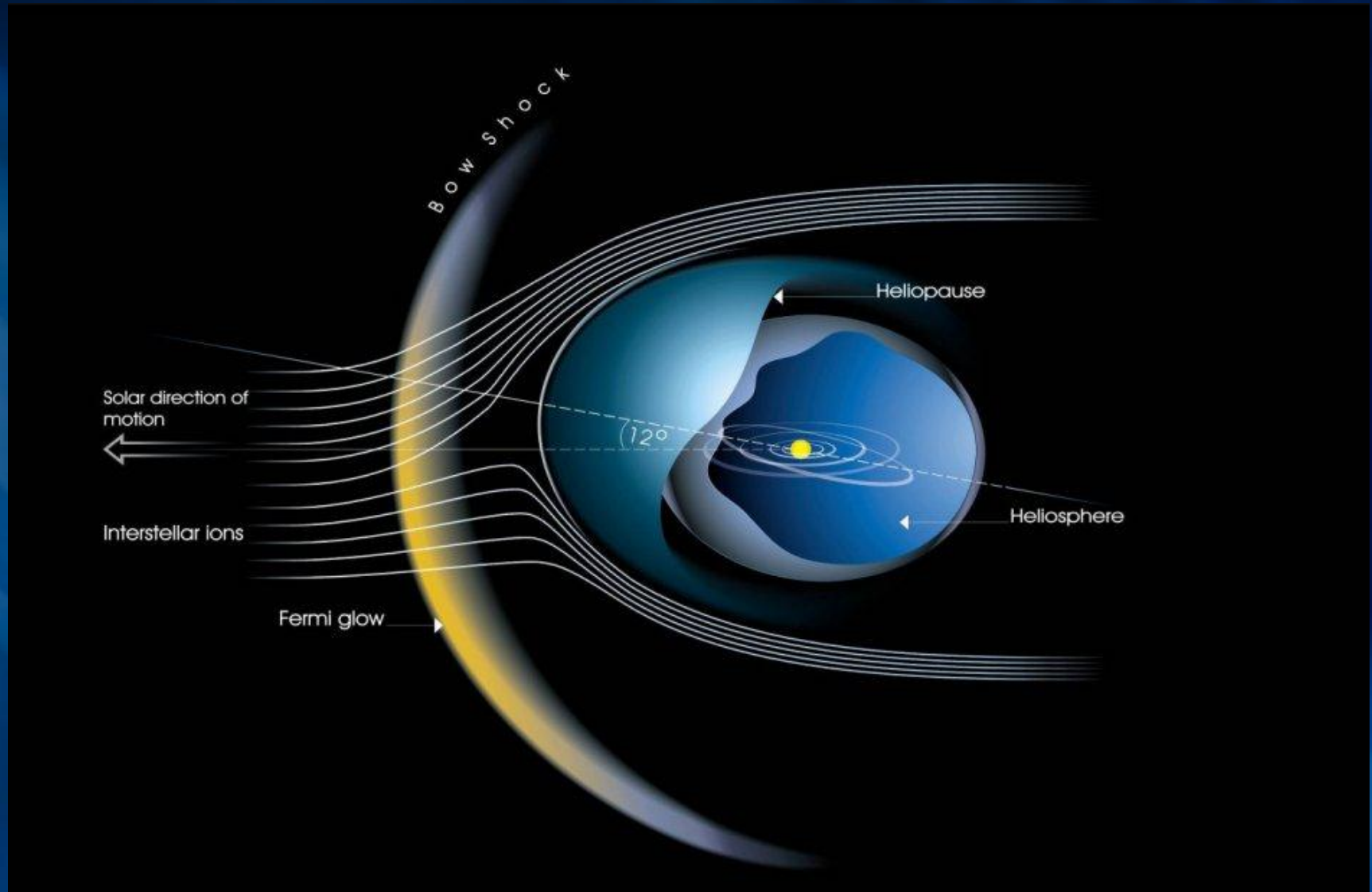
Aus Radiosignalen beschleunigter Elektronen ermittelte man eine Ausdehnung der Heliosphäre von etwa 100 – 140 AE und den Abstand des Termination Shocks bei etwa 85 AU.

# Animation Heliosphäre



Courtesy: T. Zurbuchen, University of Michigan

# Die Heliosphäre





# Wo sind Voyager 1 und Voyager 2 zur Zeit ?

## **Voyager 1: 'The Spacecraft That Could' Hits New Milestone August 15, 2006**

Voyager 1, already the most distant human-made object in the cosmos, reaches 100 astronomical units from the sun on Tuesday, August 15 at 5:13 p.m. Eastern time (2:13 p.m. Pacific time). That means the spacecraft, which launched nearly three decades ago, will be 100 times more distant from the sun than Earth is.



Courtesy: NASA

# Voyager 1 und Voyager 2



Courtesy: NASA

# Die Milchstraße am Himmel

Die Milchstraße und  
Komet Hyakutake



Eine Spiralgalaxie von  
der Seite gesehen



© Malin/IAC/RGO

# Eine Galaxie ähnlich unserer Milchstraße



Lage der Heliosphäre

# Douglas Adams - Per Anhalter durch die Galaxis:

„Weit draußen in den unerforschten Einöden eines total aus der Mode gekommenen Ausläufers des westlichen Spiralarms der Galaxis leuchtet unbeachtet eine kleine gelbe Sonne. Um sie kreist in einer Entfernung von ungefähr 150 Millionen Kilometer ein absolut unbedeutender, kleiner blaugrüner Planet, dessen von den Affen stammende Bioformen so erstaunlich primitiv sind, dass sie Digitaluhren noch immer für eine unwahrscheinlich tolle Erfindung halten.“

# Douglas Adams - Per Anhalter durch die Galaxis:

„Dieser Planet hat ein Problem: die meisten seiner Bewohner waren fast immer unglücklich. Zur Lösung dieses Problems wurden viele Vorschläge gemacht, aber die drehten sich meistens um das Hin und Her kleiner bedruckter Papierscheinchen, und das ist einfach drollig, weil es im Großen und Ganzen ja nicht die kleinen bedruckten Papierscheinchen waren, die sich unglücklich fühlten.

Und so blieb das Problem bestehen. Vielen Leuten ging es schlecht, den meisten sogar miserabel, selbst denen mit Digitaluhren.“

# Die Heliosphäre im interstellaren Medium

## IBEX

Interstellar Boundary Explorer

Mission Overview

Science Questions

IBEX Measurements

IBEX Critical to NASA

Our Place in The Galaxy

The Heliosphere

Relation to Voyager

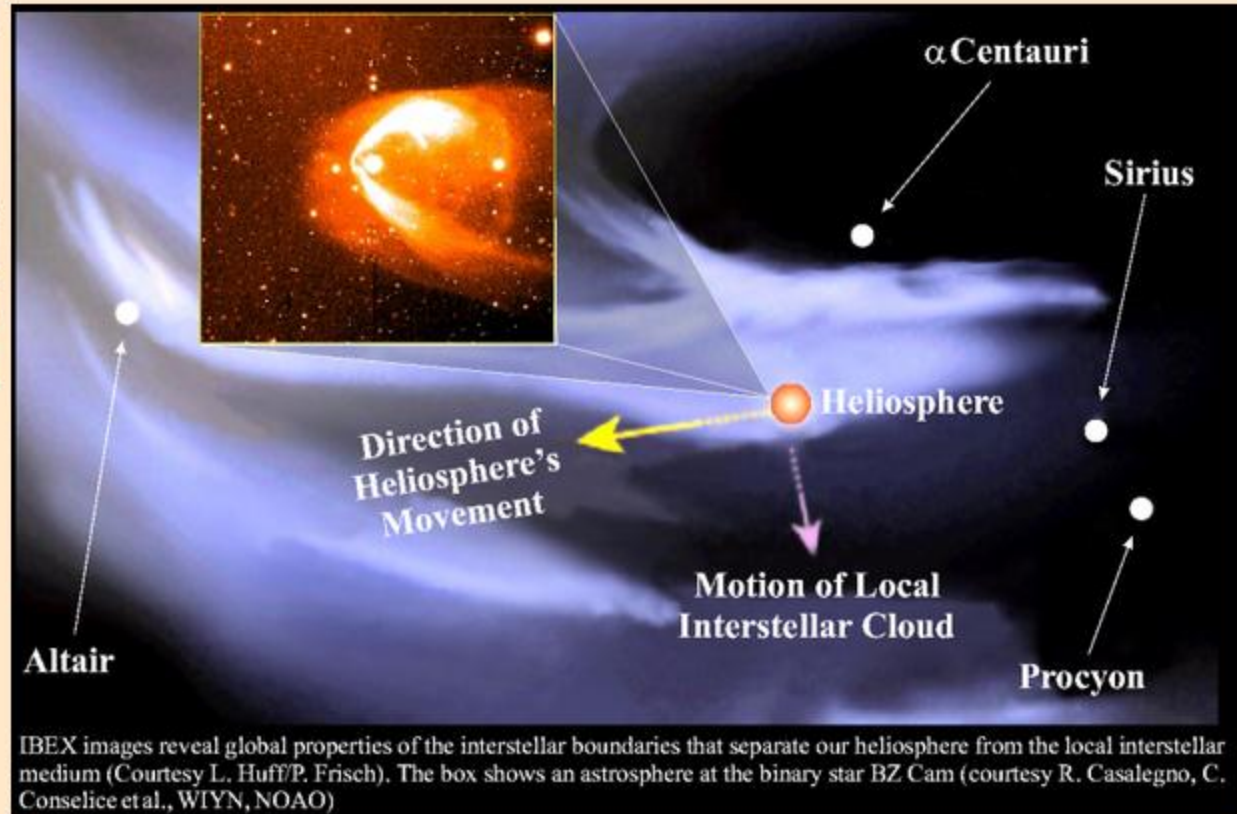
IBEX Science Team



Science Opportunities for Everyone

### IBEX Downloads

- Fact Sheet (2 Sided)
- IBEX Science Description
- Short Presentation
- Long Presentation
- Poster (SMALL) (MEDIUM) (FULL-SIZE)



IBEX images reveal global properties of the interstellar boundaries that separate our heliosphere from the local interstellar medium (Courtesy L. Huff/P. Frisch). The box shows an astrosphere at the binary star BZ Cam (courtesy R. Casalegno, C. Conelice et al., WIYN, NOAO)

Courtesy: D. McComas, SWRI

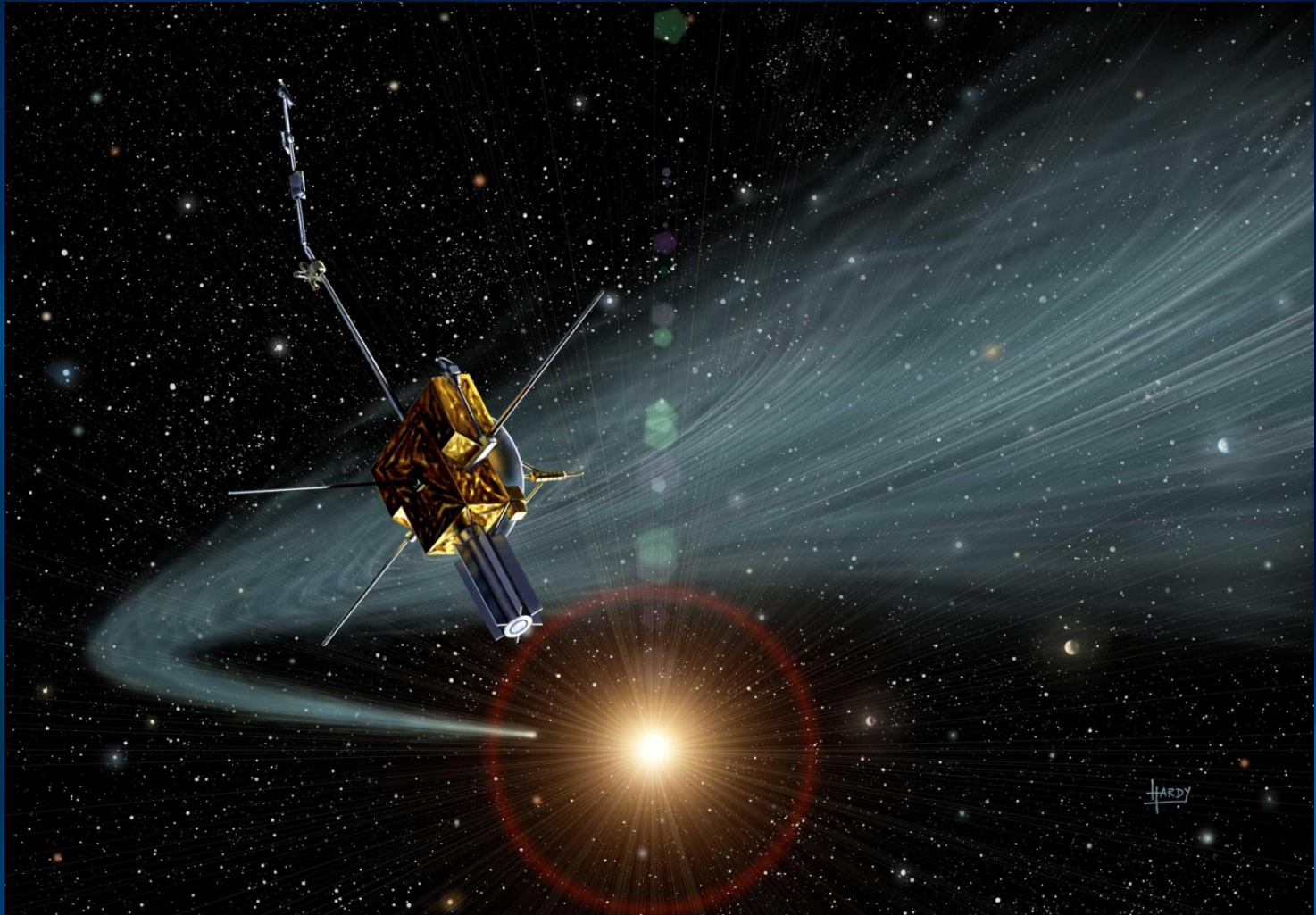
# Ulysses-Mission

Mit dem Neutralgasexperiment (MPS) auf Ulysses hat man eine Relativgeschwindigkeit der Heliosphäre zum ISM von 26 km/s ermittelt.

Achtung: LISM und ISM unterscheiden!

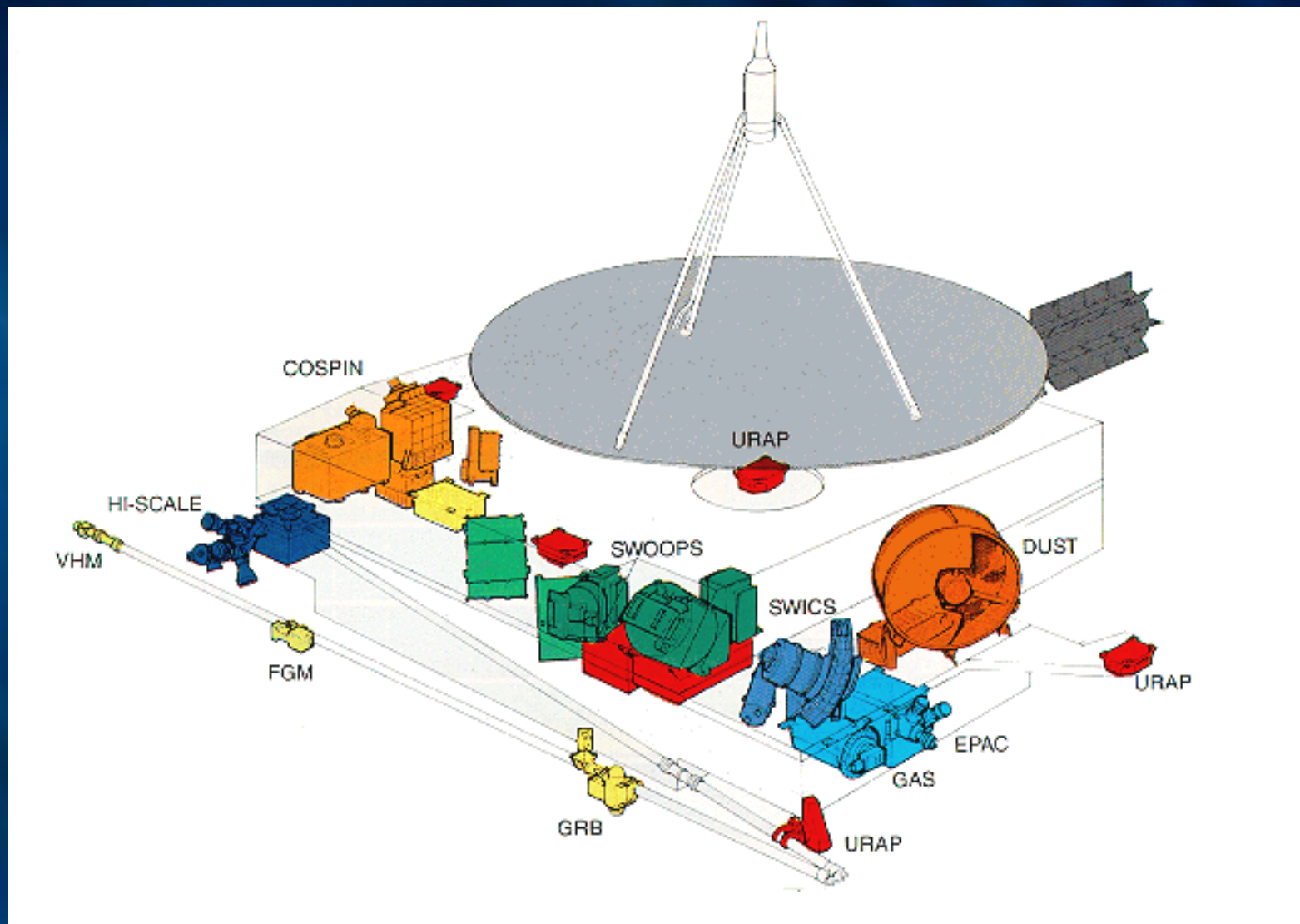


# Erforschung der Heliosphäre in 3-D: Ulysses



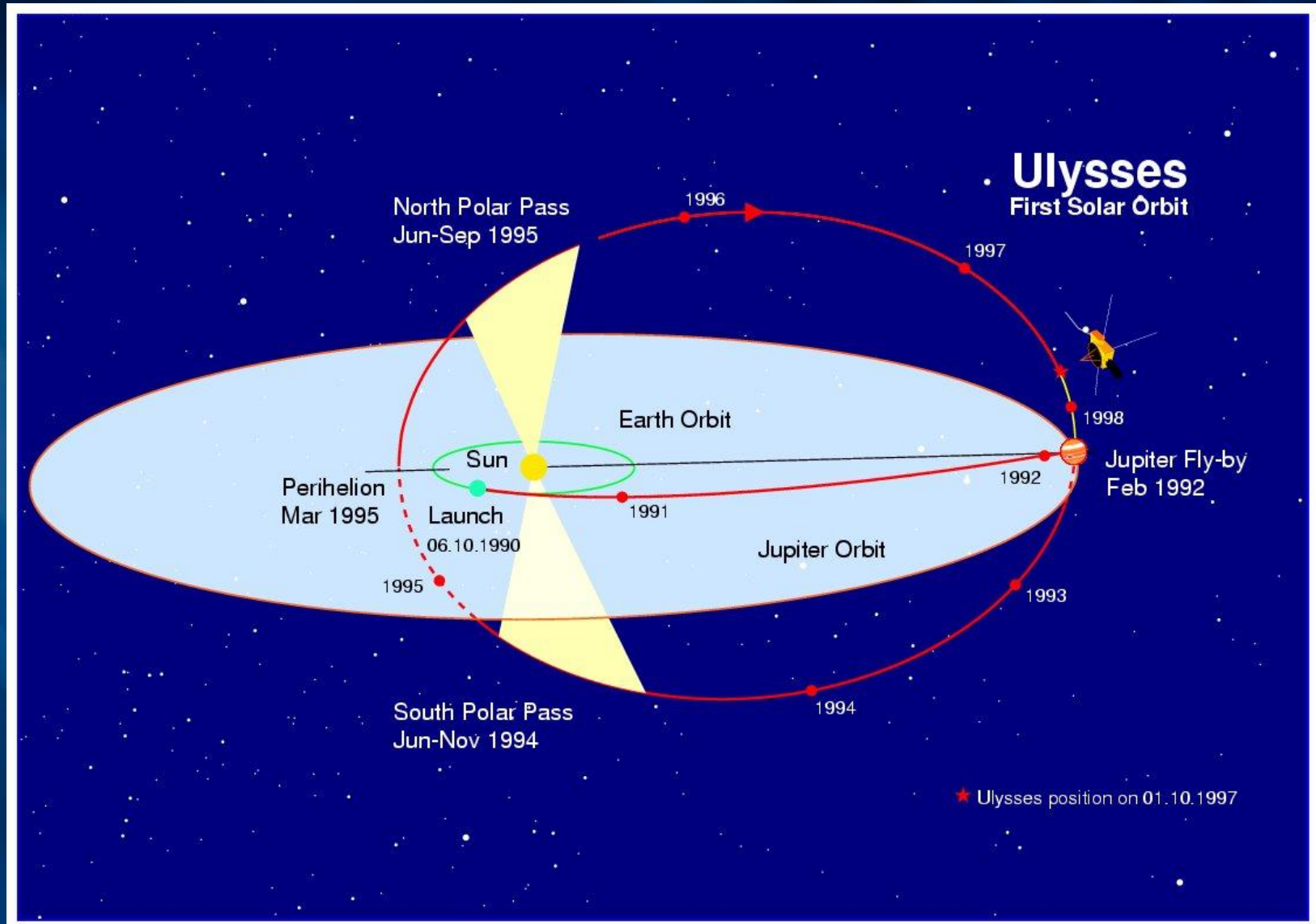
Courtesy: ESA/NASA

# Ulysses Payload

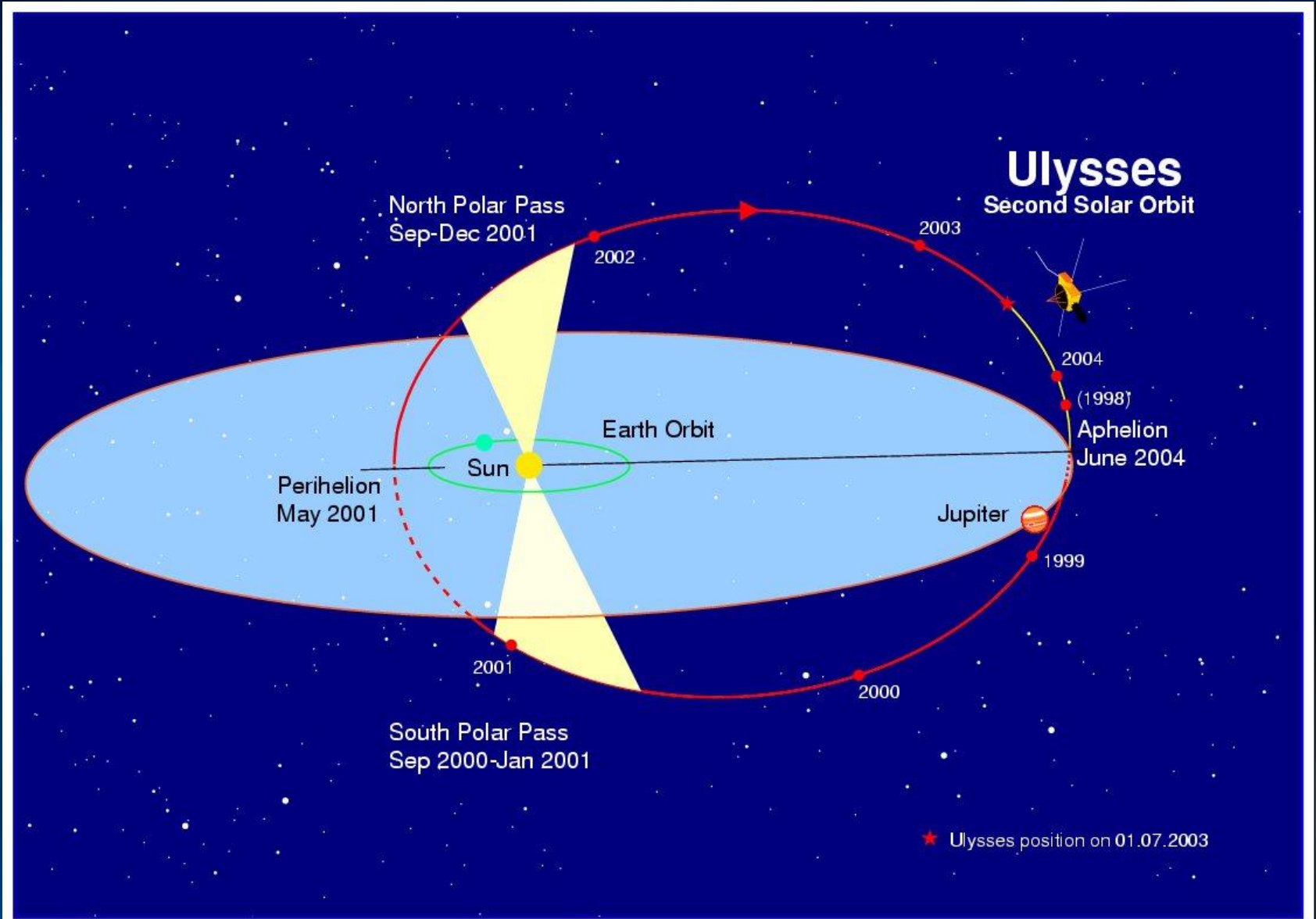


Courtesy: ESA/NASA

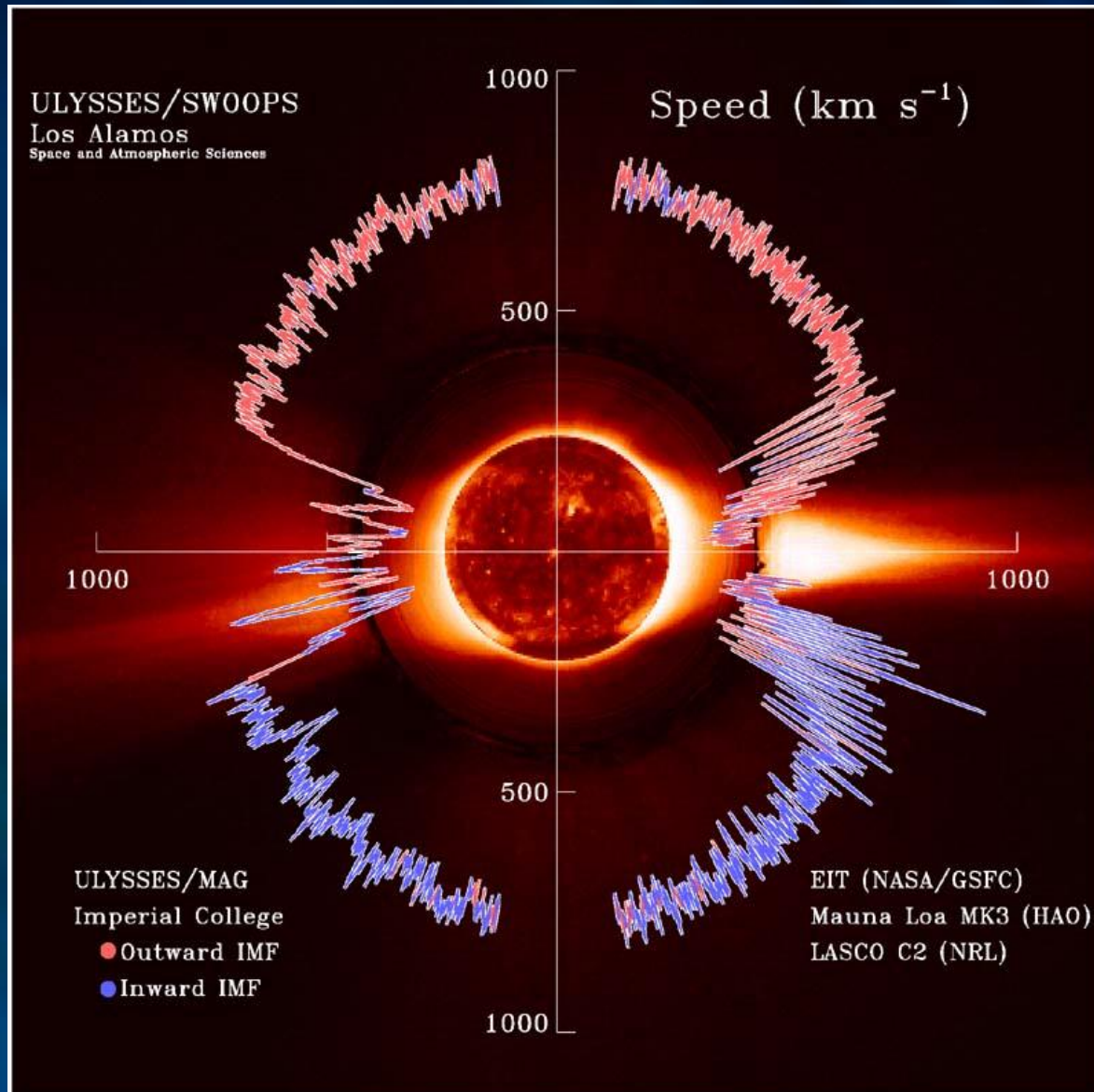
# Der 1. Orbit von Ulysses



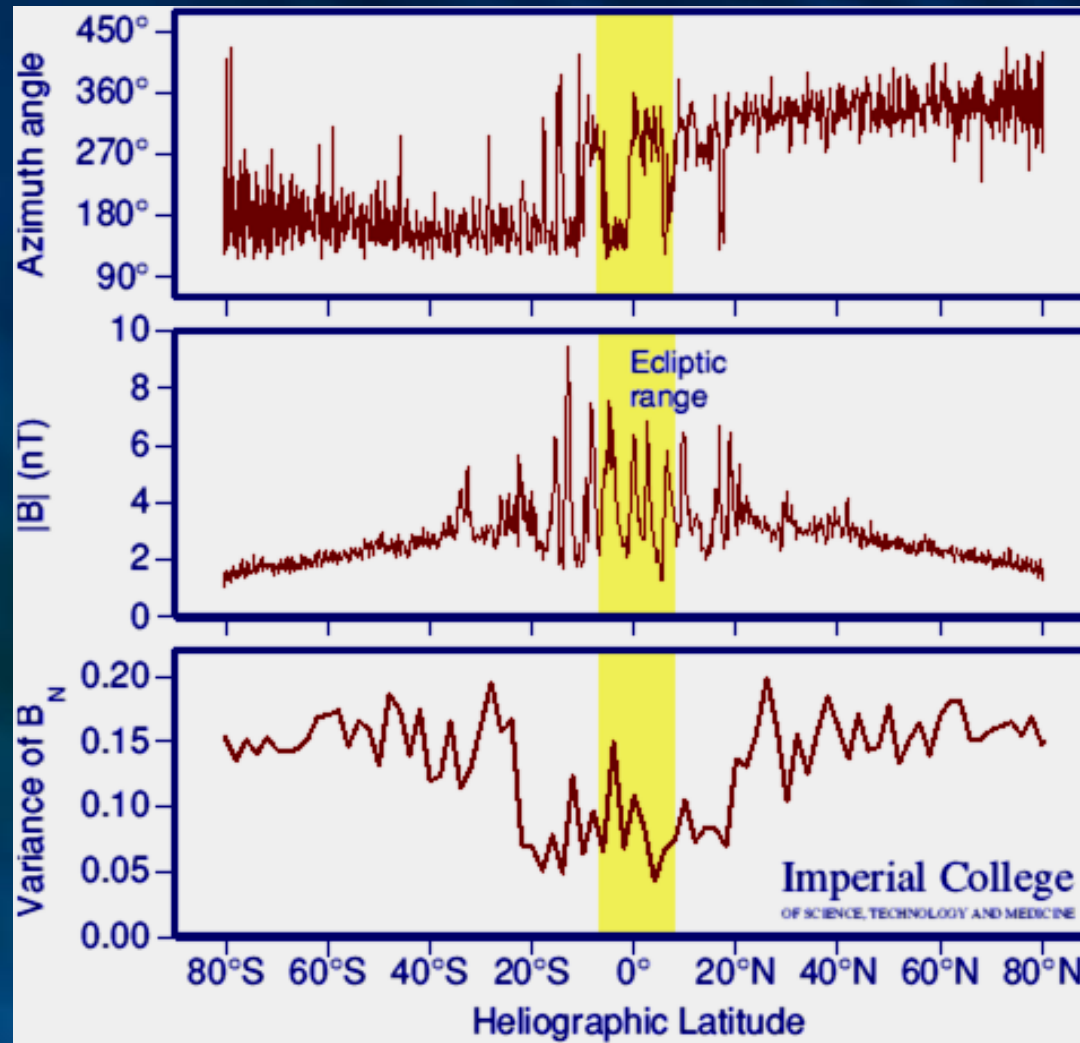
# Der 2. Orbit von Ulysses



# Sonnenwindmessungen – Ulysses, 1. Orbit



# Sonnenwindmessungen – Ulysses, Fast Latitude Scan



Magnetfeld-  
polarität

Alfvén  
waves

Balogh and  
Forsyth, 1998

# Wissenschaftliche Ergebnisse - Ulysses, 1. Orbit

Der schnelle Sonnenwind besitzt eine Geschwindigkeit von ca.  $750 \text{ km s}^{-1}$  und stammt aus den polaren koronalen Löchern.

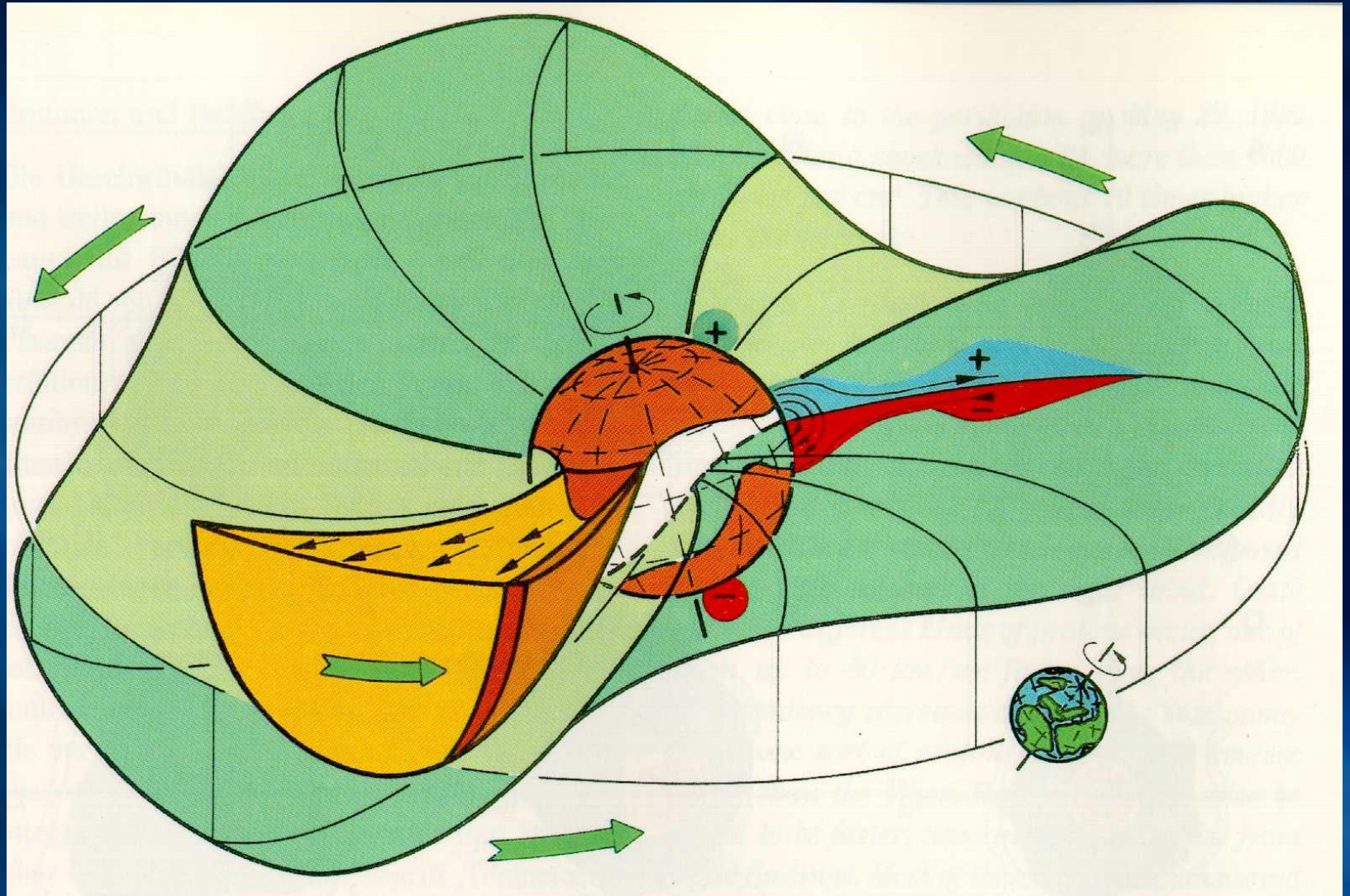
Langsamer Sonnenwind entspringt dem 'coronal streamer belt' und ist begrenzt auf einen relativ engen Bereich ( $\pm 20^\circ$ ) um den heliographischen Äquator.

Eingebettet in diesen Gürtel findet man die 'heliospheric current sheet (HCS)' welche entgegengesetzt gerichtete großräumige Magnetfeldpolaritäten trennt.

Dieser 'streamer belt' und die 'HCS' sind gewellt und weisen 'stream-interactions' auf. exhibit significant warping (allowing stream interactions to occur).

Während der 'pole-to-pole passage' in 1994/95, reichte das Band langsamen Sonnenwindes (bei einem Abstand von etwa 1.4 AU) etwa von  $22^\circ \text{S}$  bis  $+21^\circ \text{N}$ .

# Die Sonne als Ballerina und die Struktur der inneren Heliosphäre im solaren Minimum



Alfvén, 1977



# CIR-Shocks bei höheren Breiten

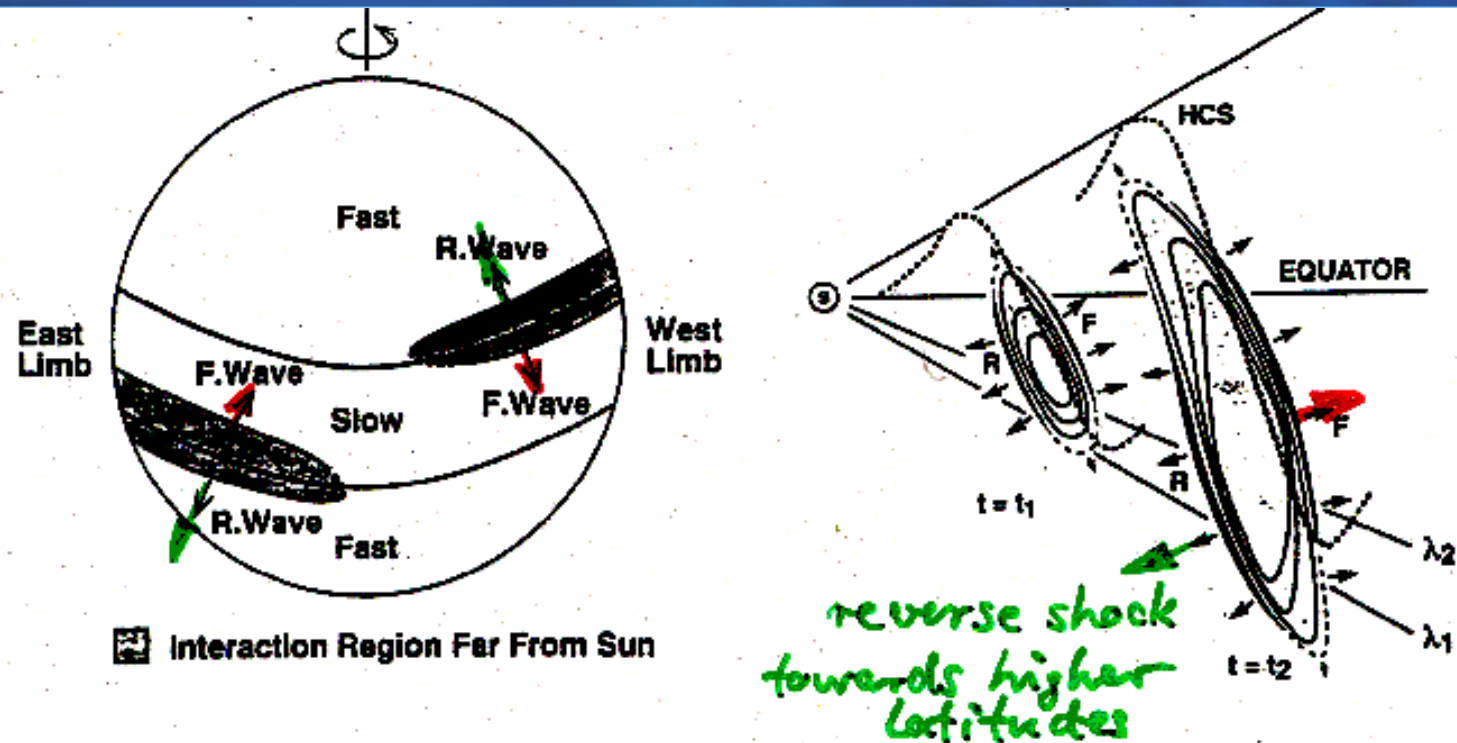
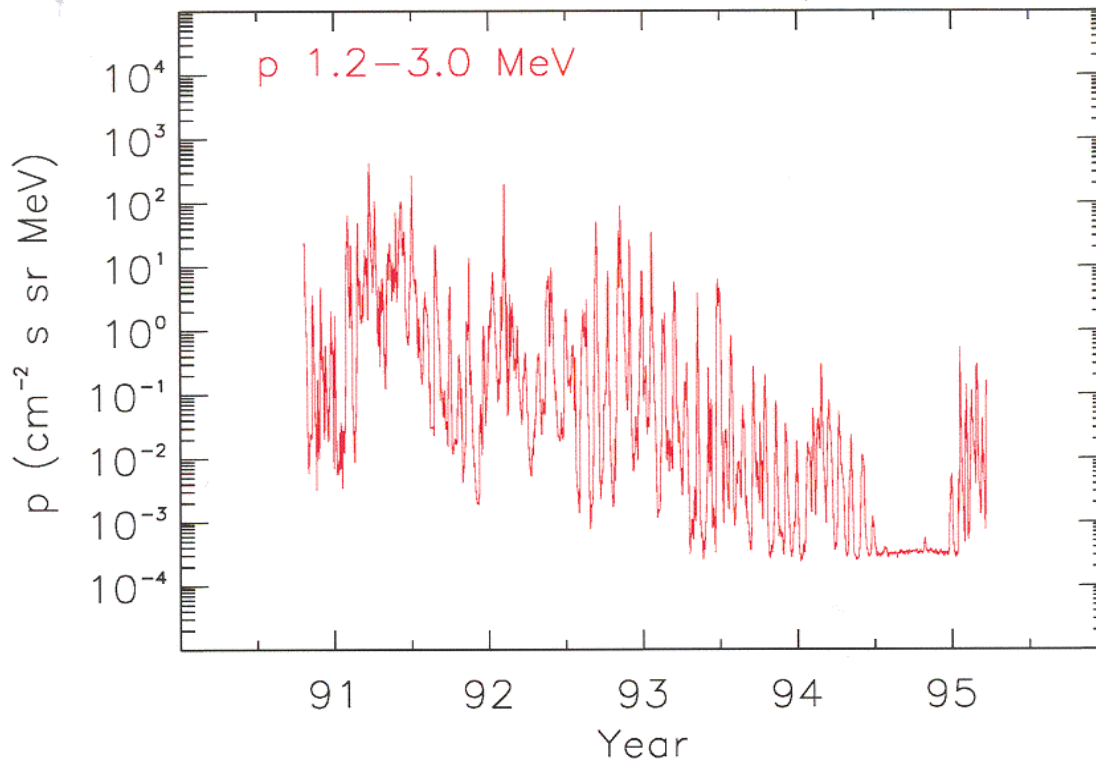


Fig. 3. (Left) A sketch illustrating the origin of tilted CIRs in interplanetary space in terms of a tilted-dipole stream structure back at the Sun. See text. (Right) Snapshots of the southern CIR at two different times. The CIR is tilted in the same sense as the heliospheric current (HCS). The solid line of varying thickness surrounding the interaction region marks the forward (F) and reverse (R) shocks, with the thickness of the line indicating the strength of the shocks. Solid lines within the CIR are pressure contours. Both sketches adapted from Gosling *et al.* (1993).

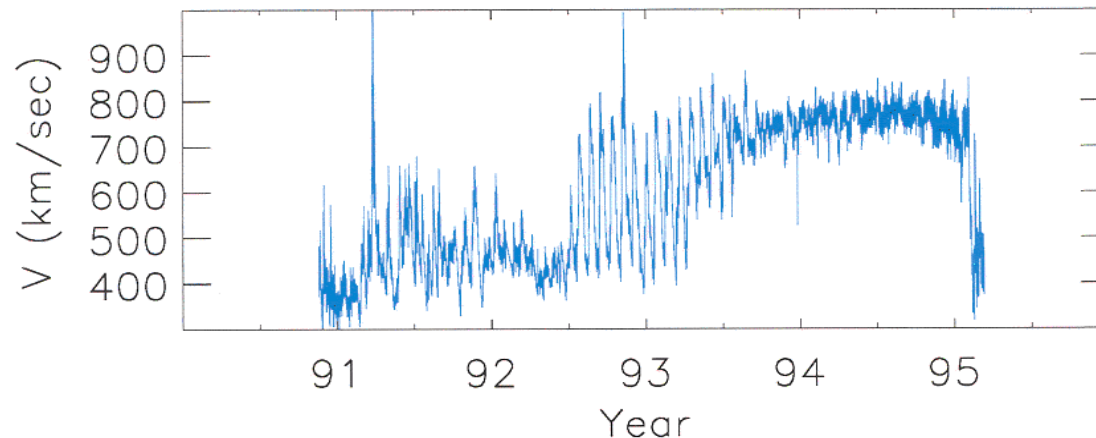
# Energierreiche Teilchen

Eine bemerkenswerte Entdeckung in diesem Zusammenhang: Bei der Passage zu hohen Breiten beobachtete Ulysses außerhalb des 'streamer belts' keine CIRs mehr, wohl aber energiereiche Teilchen.

ULYSSES COSPIN/LET

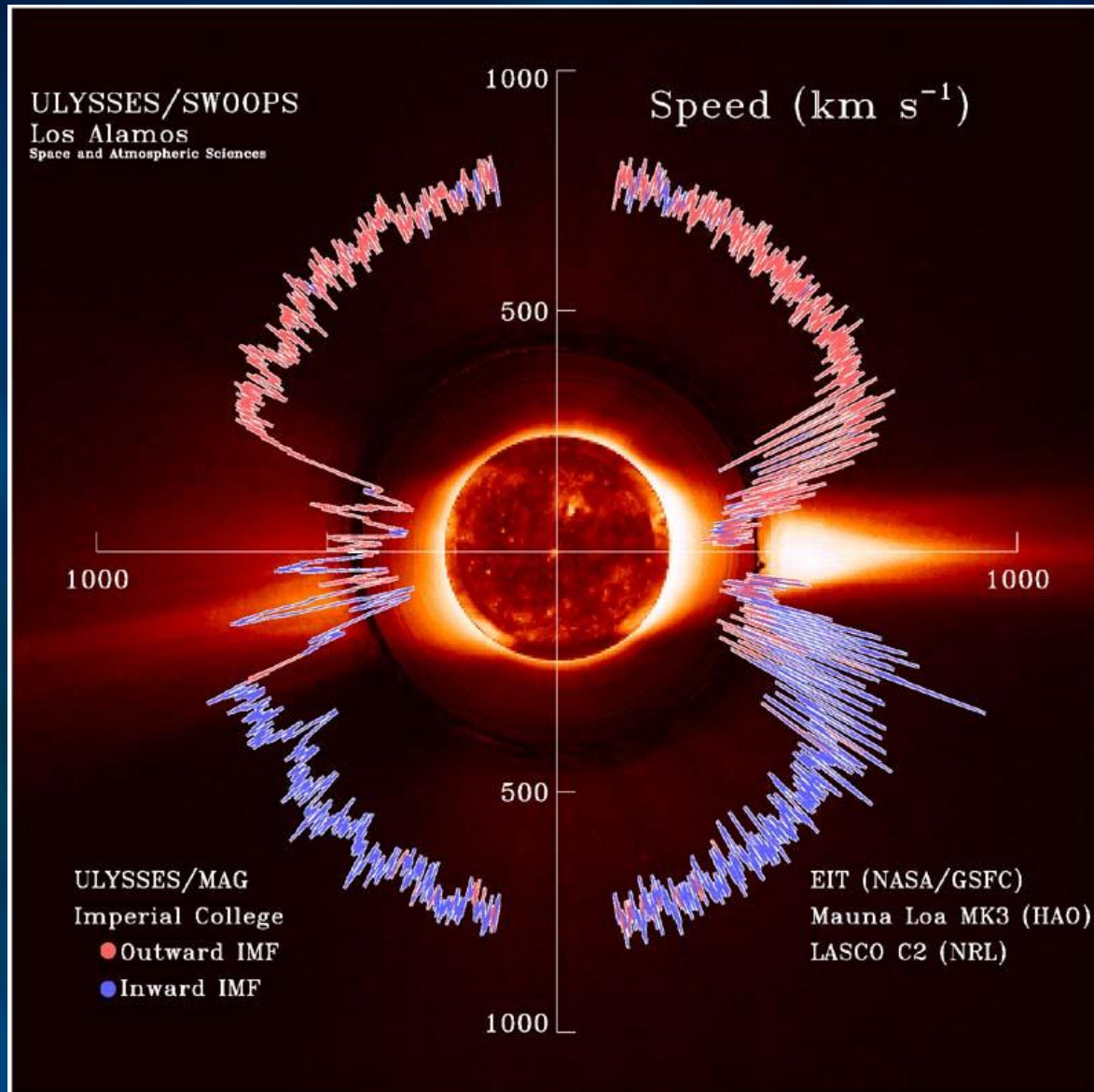


ULYSSES SWOOPS

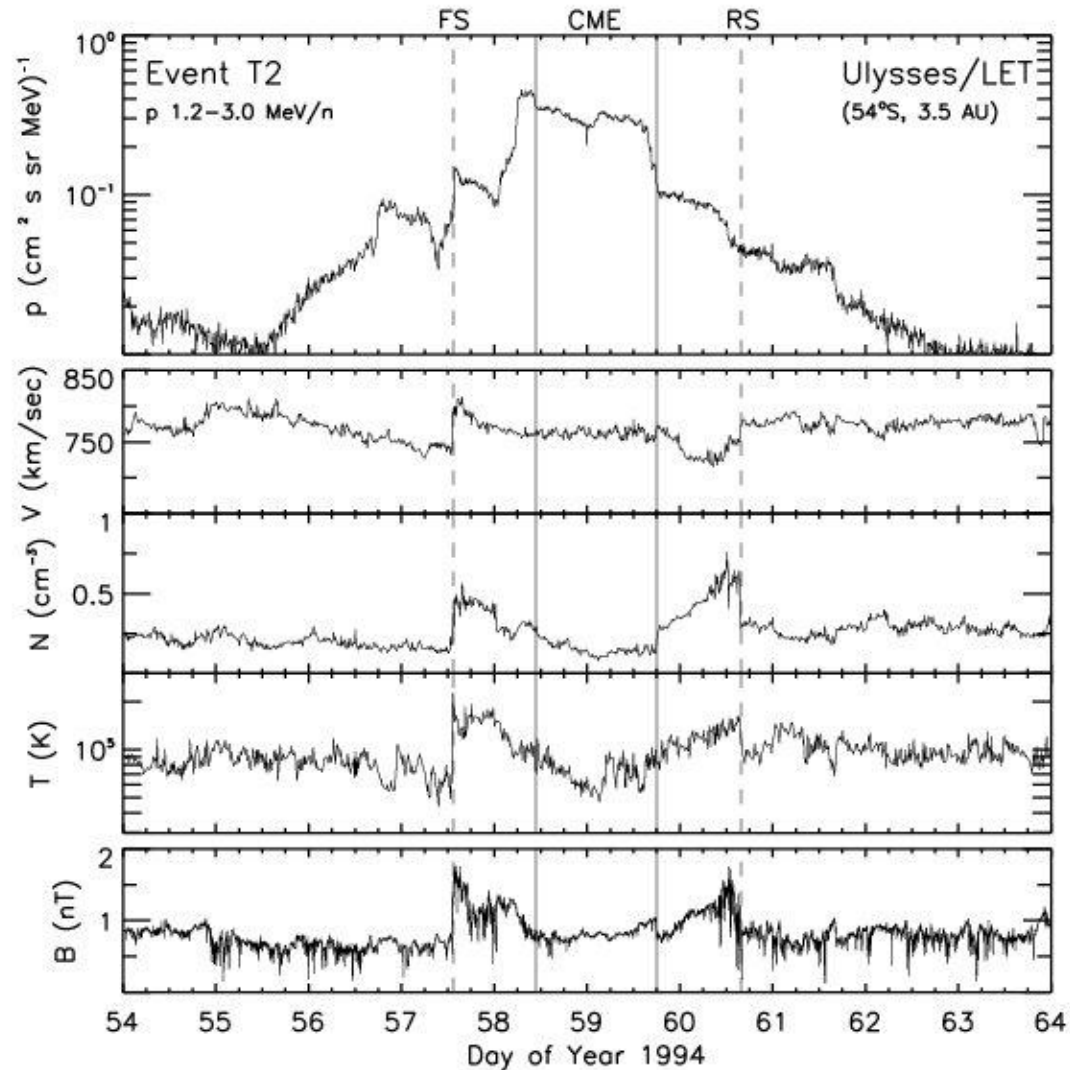


Bothmer et al., 1995

# Sonnenwindmessungen – Ulysses, 1. Orbit

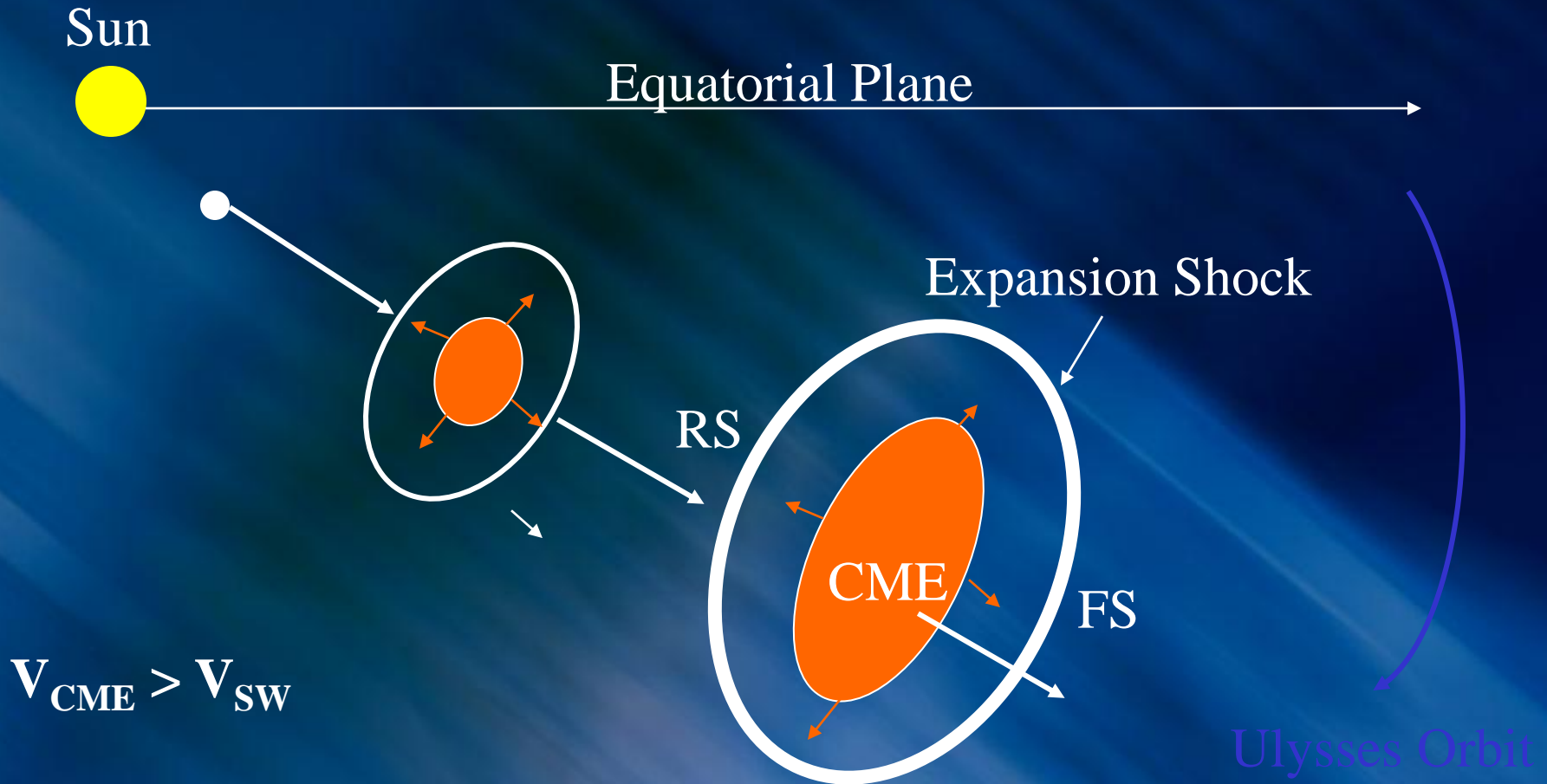


# Ulysses Messungen eines ICMEs bei hohen Breiten



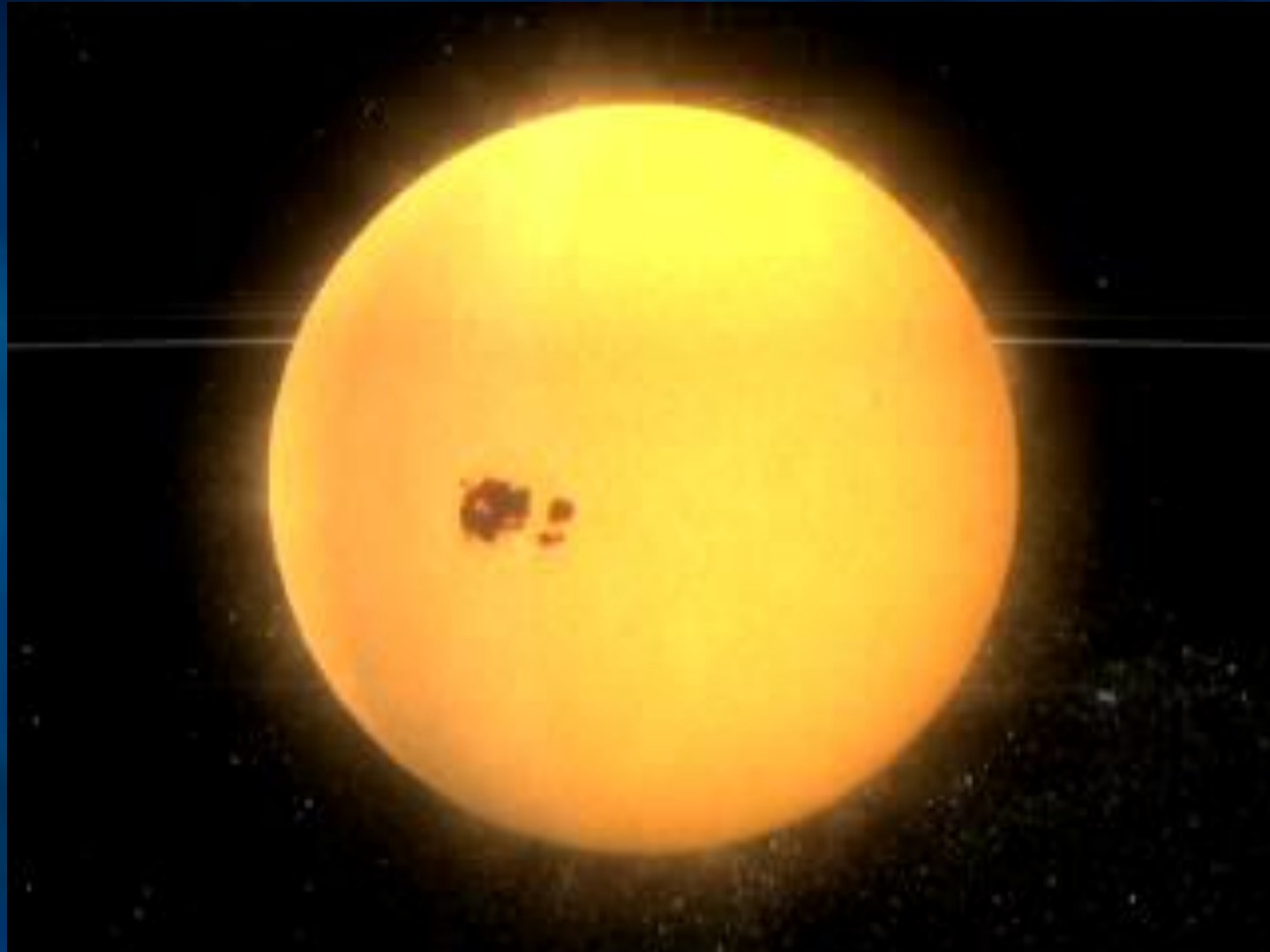
Bothmer et al.  
1995

# Struktur von ICMEs bei hohen Breiten

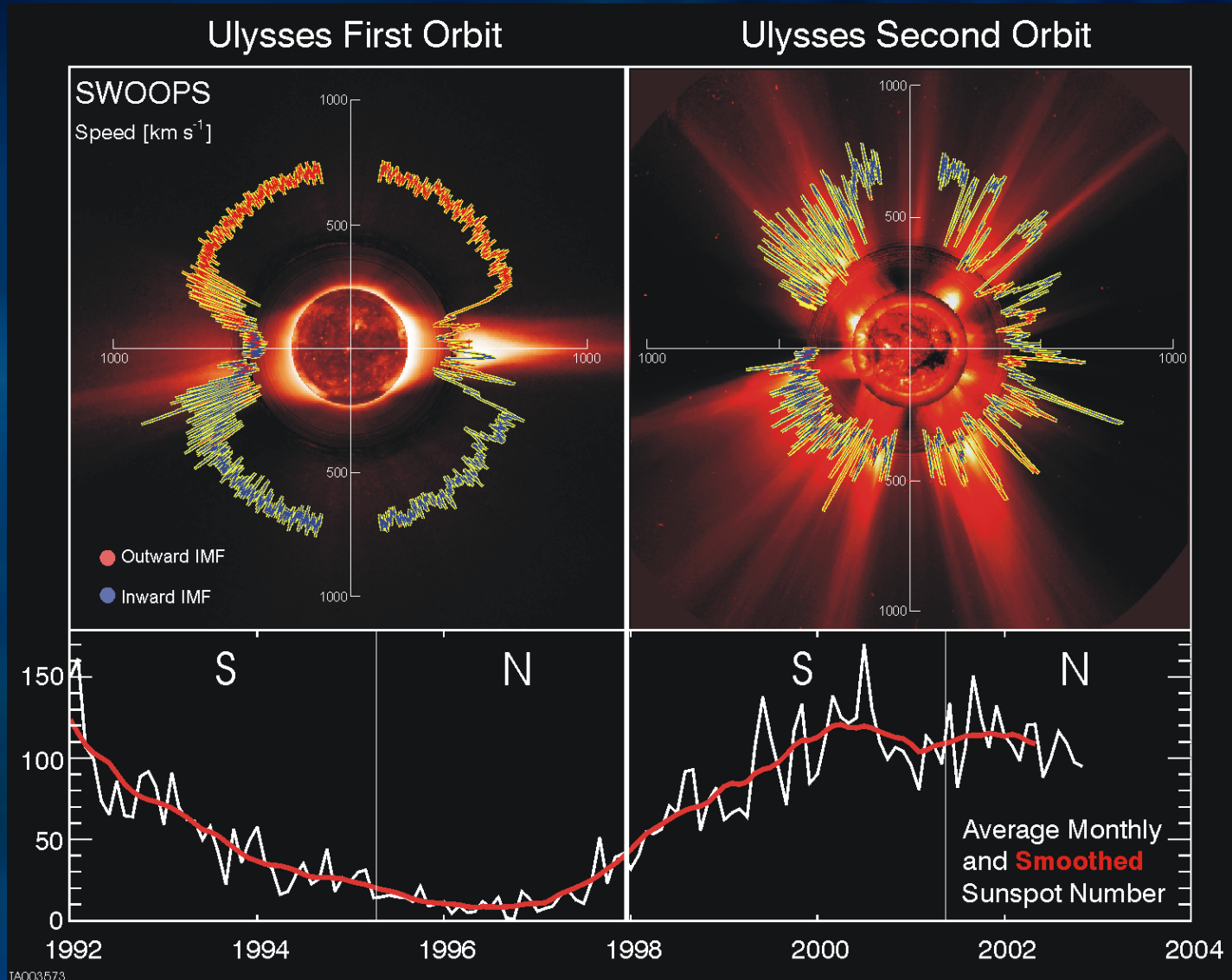


Gosling, 1994

# Ausbreitung von CMEs in der Heliosphäre



# Der Sonnenwind in der 3-D Heliosphäre – Ulysses Messungen

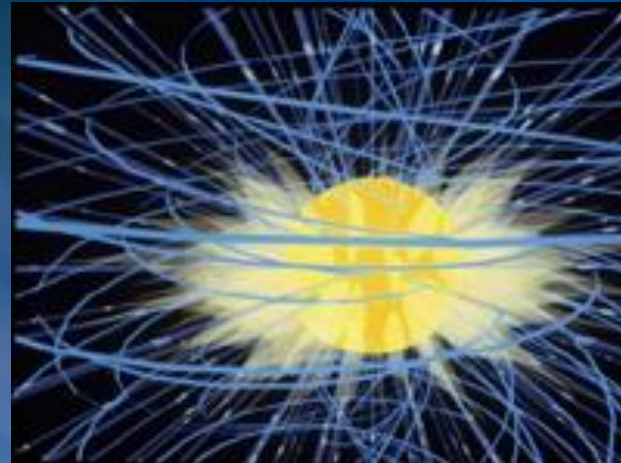


# Wissenschaftliche Ergebnisse - Ulysses, 1. Orbit

## Interplanetares Magnetfeld

Die radiale Komponente des interplanetaren Magnetfeldes wies im Gegensatz zu bestehenden Theorien, keine Breitenabhängigkeit auf!

Artist's impression of the heliospheric magnetic field



ESA/ESTEC



## Magnetfeldstärke

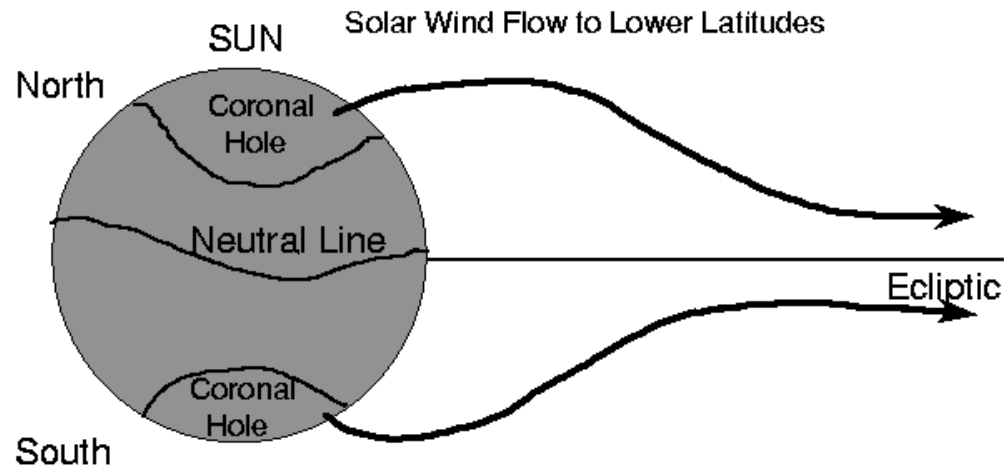
**Viele Modelle nehmen eine Dipolstruktur an, d.h. die Feldstärke über den Polen sollte doppelt so groß sein wie am Äquator.**

**Mit Ulysses fand man: Der interplanetare magnetische Fluß variiert kaum mit der Breite!**

**Schlussfolgerung: Druckkräfte nahe der Sonne sorgen für eine gleichverteilten Fluss (Überexpansion des Sonnenwindes).**

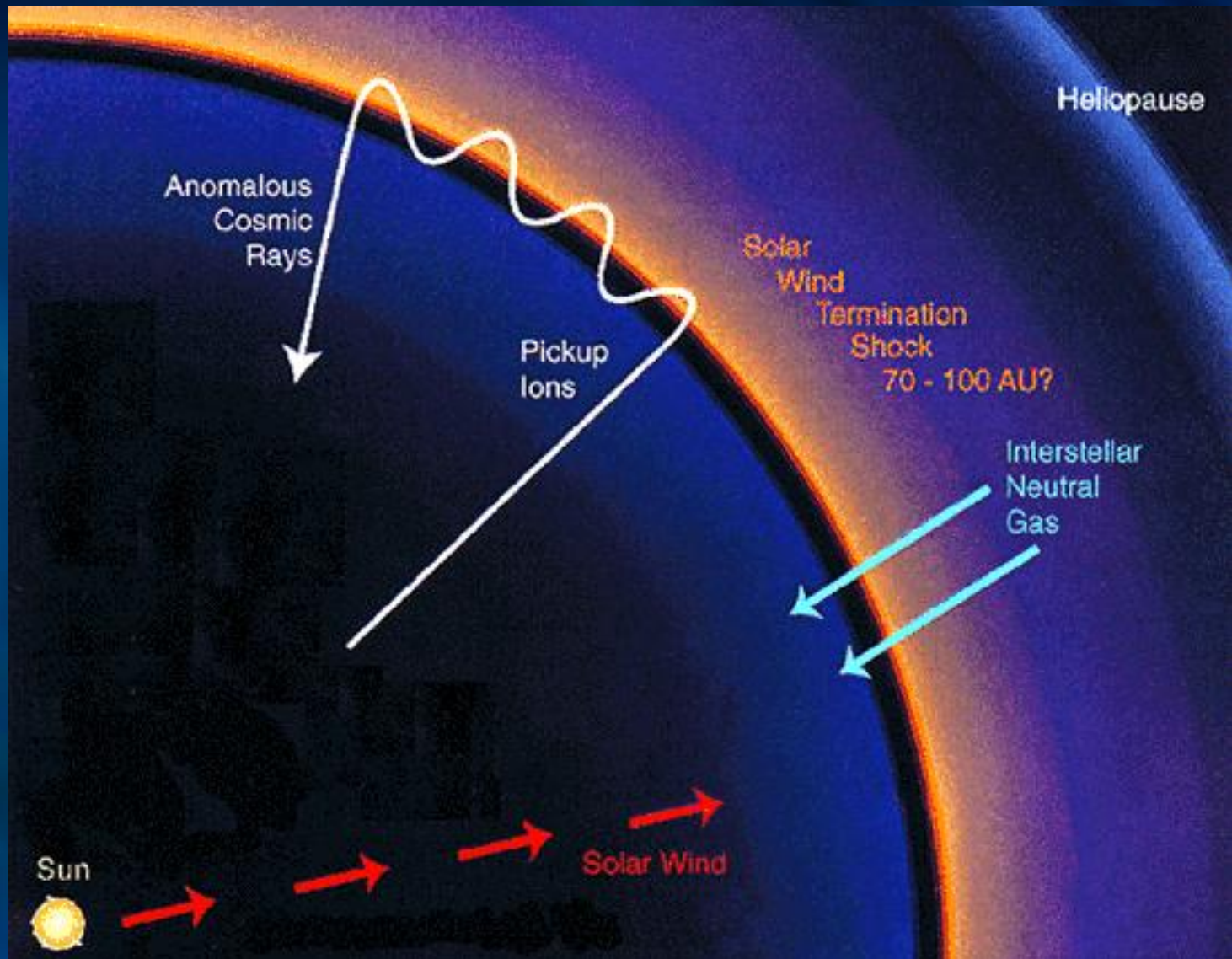
# Sonnenwindexpansion

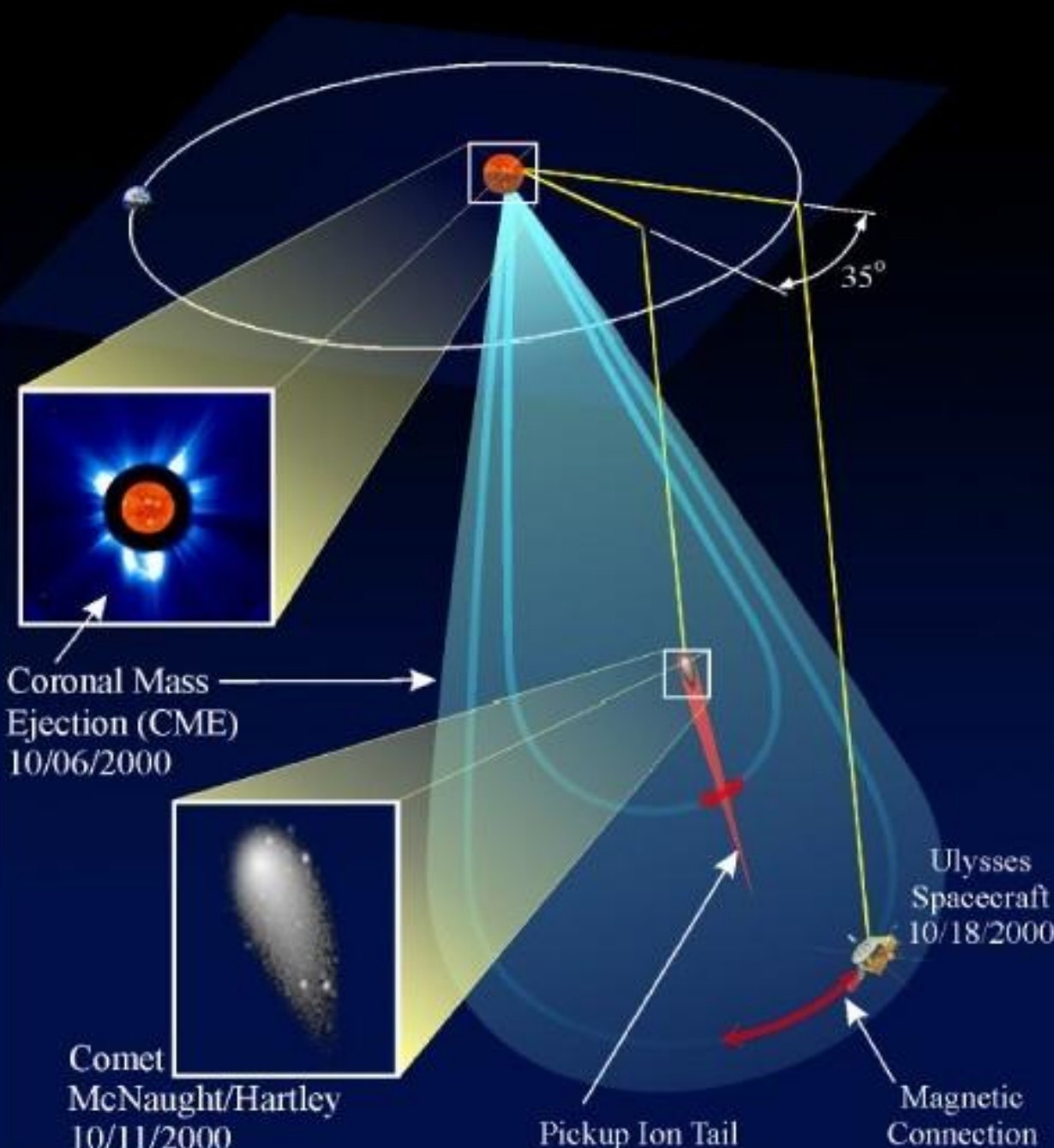
## Solar Wind Over-Expansion to Low Heliographic Latitudes



Bothmer (1999)

# Erzeugung von anomaler kosmischer Strahlung





# Ulysses und Komet McNaught/ Hartley

Courtesy: ESA/NASA

# Ulysses und Kometen

## **Komet Hyakutake**

**1. Mai 1996, 3.8 AU**

**Schweif viel ausgedehnter als erwartet!**

**Kometenschweife können vielleicht sogar bis zur Grenze der Heliosphäre expandieren.**

# IBEX



## Interstellar Boundary Explorer

### Imaging the edge of our solar system and beyond- Discovering the global interaction between the solar wind and the interstellar medium

**T**he Interstellar Boundary Explorer (IBEX) is one of five Small Explorer (SMEX) missions undergoing Phase A study for NASA's Office of Space Science. Around November 2004, NASA expects to select two of these five missions for development and flight. If selected, IBEX will provide the first global views of the Sun's interstellar boundaries, unveiling the physics of the heliosphere's interstellar interaction, providing a deeper understanding of the heliosphere and thereby astrophysics throughout the galaxy, and creating the opportunity to make even greater unanticipated discoveries.

#### Science Objectives

IBEX's sole, focused science objective is to discover the global interaction between the solar wind and the interstellar medium. IBEX achieves this objective by taking a set of global energetic neutral atom (ENA) images that answer four fundamental science questions:

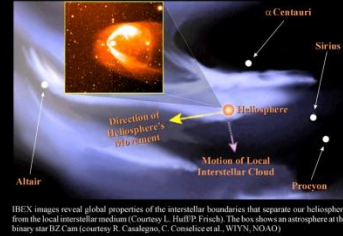
- I. What are the global strength and structure of the termination shock?
- II. How are energetic protons accelerated at the termination shock?
- III. What are the global properties of the solar wind flow beyond the termination shock and in the heliosail?
- IV. How does the interstellar flow interact with the heliosphere beyond the heliopause?

The IBEX objective is central to the Sun-Earth Connection (SEC) theme as demonstrated by both the 2003 SEC Roadmap and 2002 NRC's Decadal Survey and is specifically identified in the 2003 NASA-wide Strategic Plan.

#### Mission Overview



IBEX makes global observations of the interstellar boundaries by traveling outside of the Earth's magnetosphere in a highly elliptical, high altitude orbit. IBEX carries two very large aperture single pixel ENA cameras that look out perpendicular to the Sun-pointed spin-axis. Much like the COBE and WMAP astrophysics missions, IBEX uses the spacecraft motion over the year to generate its global maps. As COBE and WMAP have revolutionized our understanding of our place in the universe, IBEX revolutionizes our understanding of our star's interaction with the Galaxy.



IBEX images reveal global properties of the interstellar boundaries that separate our heliosphere from the local interstellar medium (Cortney L. Huff/P. Frisch). The box shows an atmosphere at the binary star BZ Cam (courtesy R. Casagrande, C. Conlon et al., WFN, NOAA).

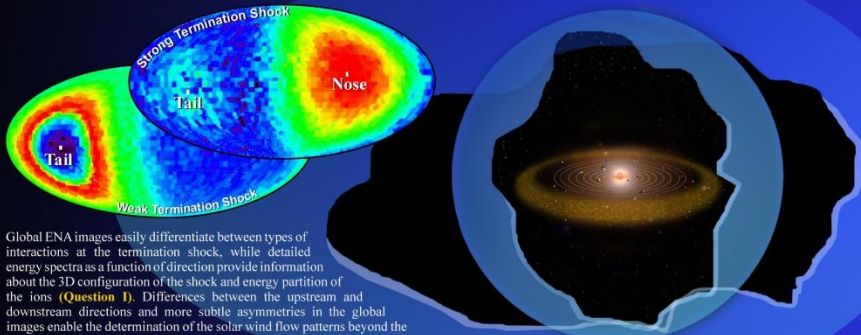
#### IBEX Science Team

The IBEX Science team includes PI Dave McComas; Co-Is Peter Bochsler, Maciej Bzowski, Hans Fahr, Horst Fichtner, Priscilla Frisch, Herb Funsten, Steve Fuselier, Mike Grunman, Vlad Izmodenov, Paul Knappenberger, Marty Lee, Stefano Livi, Don Mitchell, Eberhard Moebius, Tom Moore, Ed Roedl, Nathan Schwadron, Peter Wurz, Gary Zank; and Collaborators Frederic Allegrini, Mike Collier, Dan Reisenfeld, Martin Wieser, and Manfred Witte.

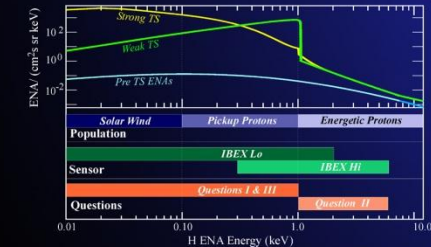
#### IBEX has Science Opportunities for Everyone

In addition to this science team, everyone is invited to join in and participate in the IBEX mission and its science return. If IBEX is selected:

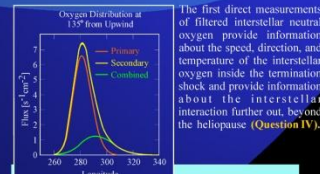
- All IBEX science team meetings will be open to everyone interested in participating.
- All science data will quickly be made available to the public.
- A \$2M IBEX-funded, but NASA peer reviewed and selected, Guest Investigator program will be implemented to support outside researchers.
- Very high sensitivity magnetospheric ENA observations, while not a formal part of IBEX science, will also be provided to the community.
- Astrophysical heliospheric cross-disciplinary research enabled by IBEX will explore synergies in the heliosphere-astrophysics connection.



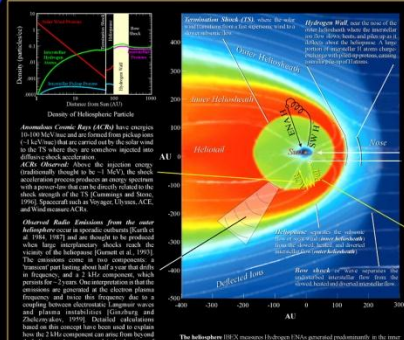
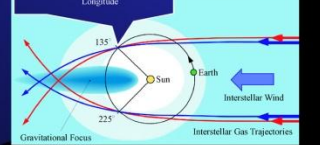
Global ENA images easily differentiate between types of interactions at the termination shock, while detailed energy spectra as a function of direction provide information about the 3D configuration of the shock and energy partition of the ions (Question I). Differences between the upstream and downstream directions and more subtle asymmetries in the global images enable the determination of the solar wind flow patterns beyond the termination shock (Question III).



ENA energy spectra are direct measures of the solar wind, pickup ions, (Questions I and III) and energetic protons beyond the termination shock (Question II). Above 1 keV, these ENA energy spectra provide information about how the energetic particle pressure modifies the termination shock (TS) and what types of injection processes may be at work there (Question II).



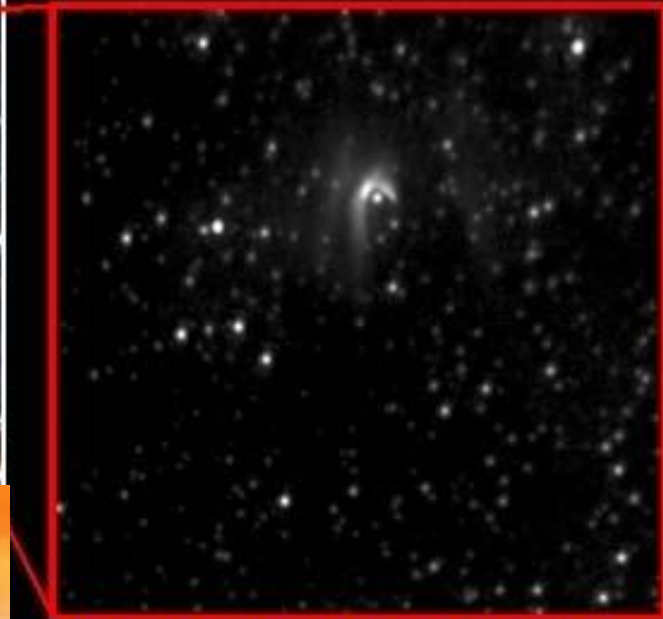
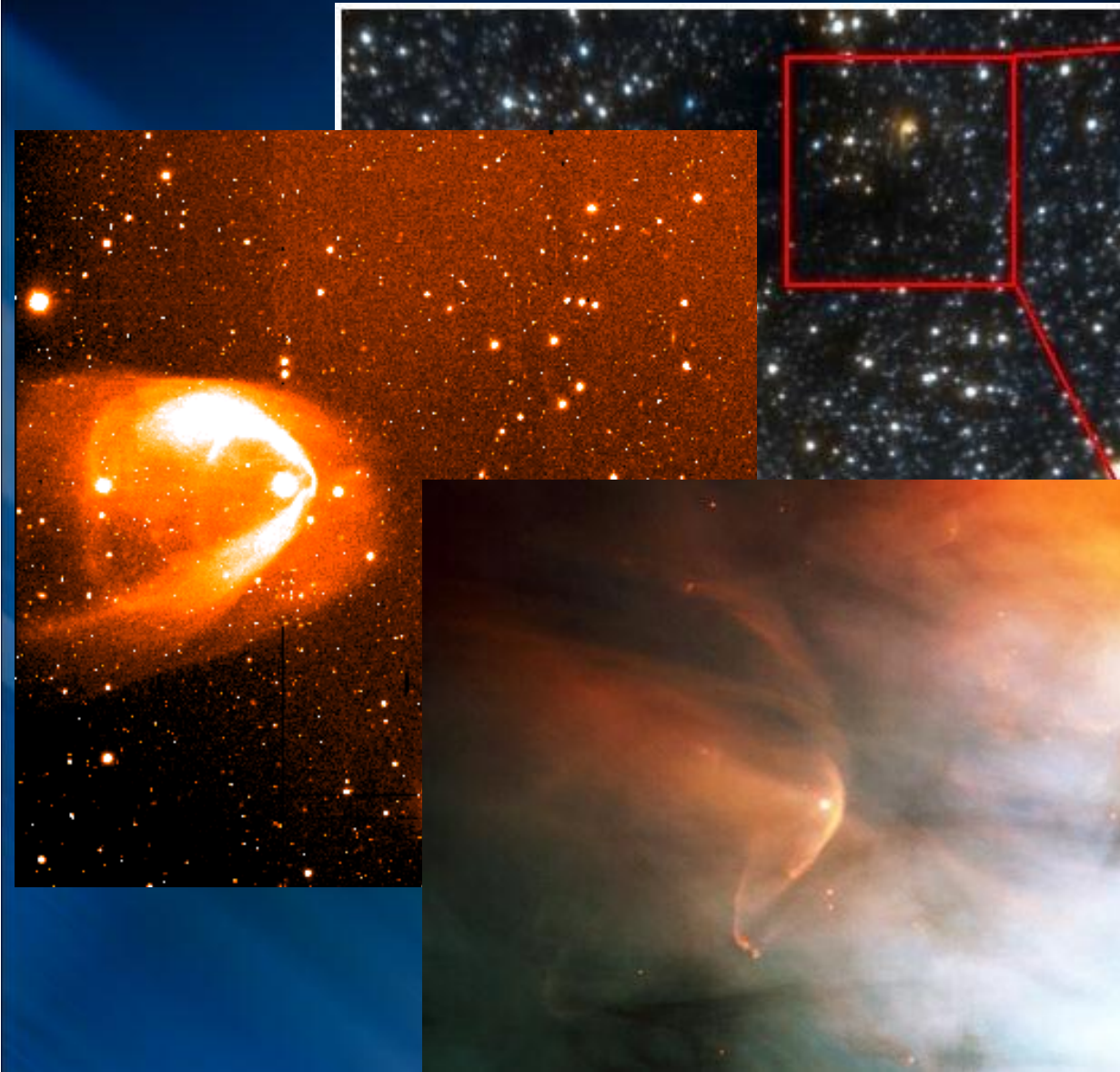
The first direct measurements of filtered interstellar neutral oxygen provide information about the speed, direction, and temperature of the interstellar oxygen inside the termination shock and provide information about the interstellar interaction further out, beyond the heliopause (Question IV).



**The Heliosphere**

Interstellar Neutral Atoms (INAs) flow unimpeded into the heliosphere, surrounded by heliospheric magnetic fields. Some of these neutral atoms are captured by the heliopause and become the primary population of neutral atoms that flow in from the interstellar medium. The heliosphere's structure is determined by the interaction of the solar wind and the interstellar medium. The heliosphere's structure is determined by the interaction of the solar wind and the interstellar medium. The heliosphere's structure is determined by the interaction of the solar wind and the interstellar medium.

# Astrosphären



*Closeup of IRS8, resolving the bow-shock of a fast-moving star.*

**Gemini North Adaptive Optics  
Image of the Galactic Center**

Some Astrospheres  
Observed by HST.  
NASA