



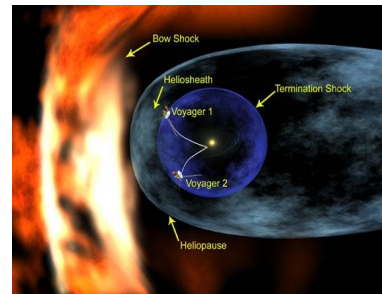
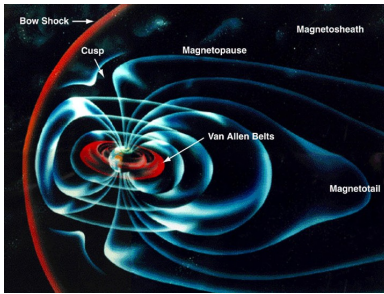
Magnetfelder in der Heliosphäre

Robert F. Wimmer-Schweingruber

wimmer@physik.uni-kiel.de

www.ieap.uni-kiel.de/et/people/wimmer/teaching/mnu/

Institut für Experimentelle und Angewandte Physik
Christian-Albrechts-Universität zu Kiel



- 1.) Sonne und Erde – Aktivität und Weltraumwetter
Die Magnetosphäre als Schutzschild
- 2.) Das solare Magnetfeld und seine Folgen
- 3.) Bildung und Grenzen der Heliosphäre
– Die Heliosphäre als Schutzschild
- 4.) Der magnetische Schutz kann auch zu Ende gehen – Was
Mars uns zu sagen hat

**Ein groß vñ sehr erschröckliches Wunderzeichen/so man
im Jar 1580. den 10. September/in der Keyserliche Reichstatt Augspurg/nach
vndergang der Sonnen/an dem Himmel/gar eygentlich gesehen hat.**

Erlauter spricht an dem Himmel worden
Zeichen geschehen: vnd auff Erden/
Wurde den Leuten angst vnd bang fleiglich

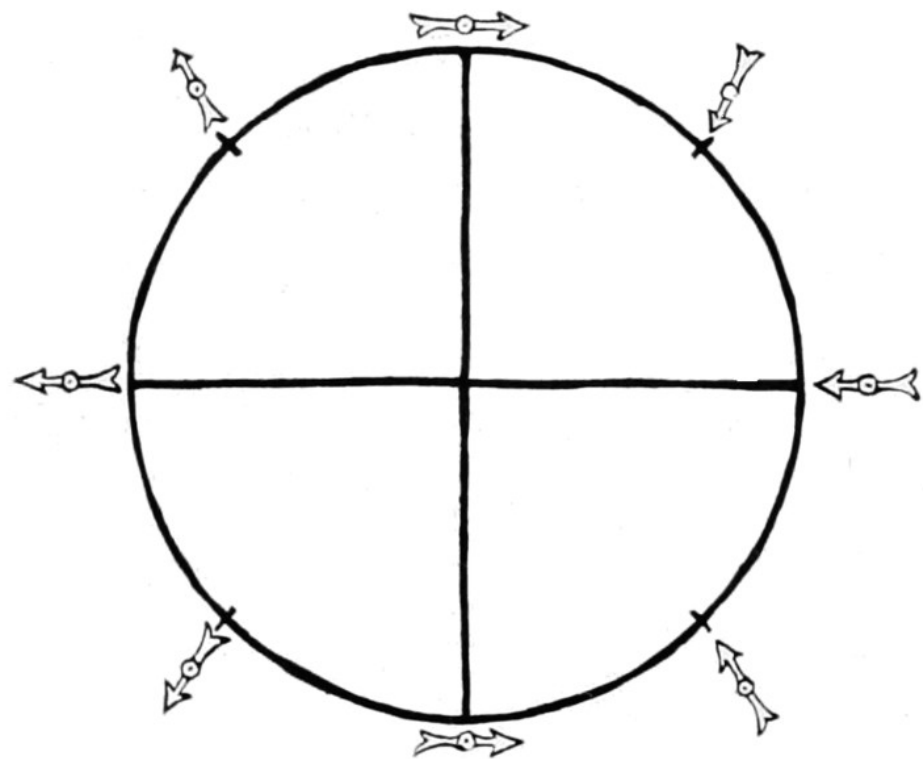
Sein/das sie in der not vntreglich/
Nicht wissen was hinaus/ich sag:
Jez geht es also alle tag.

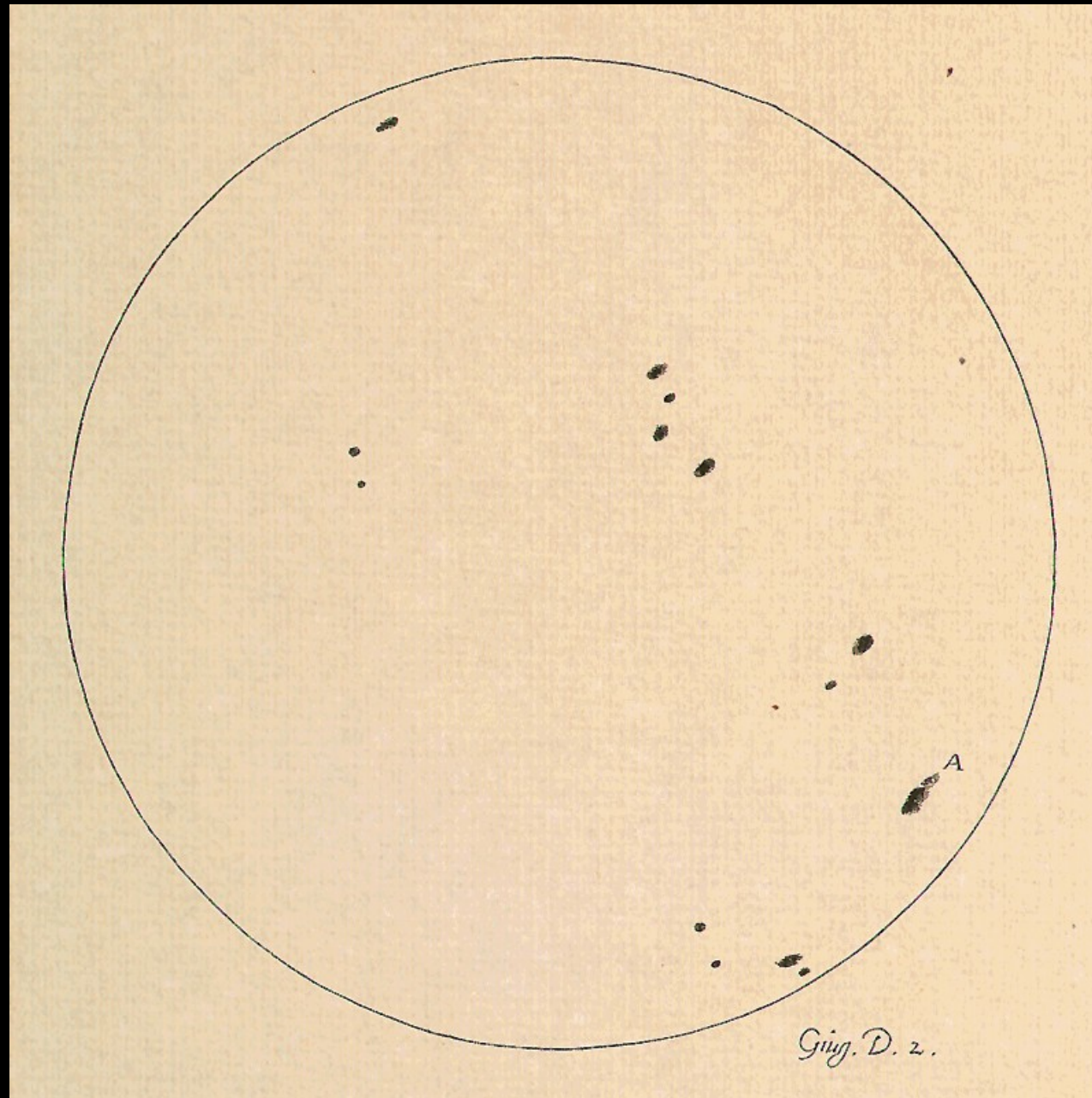




Magnus magnes ipse est
globus terrestris
(Die Erde selbst ist ein
großer Magnet)

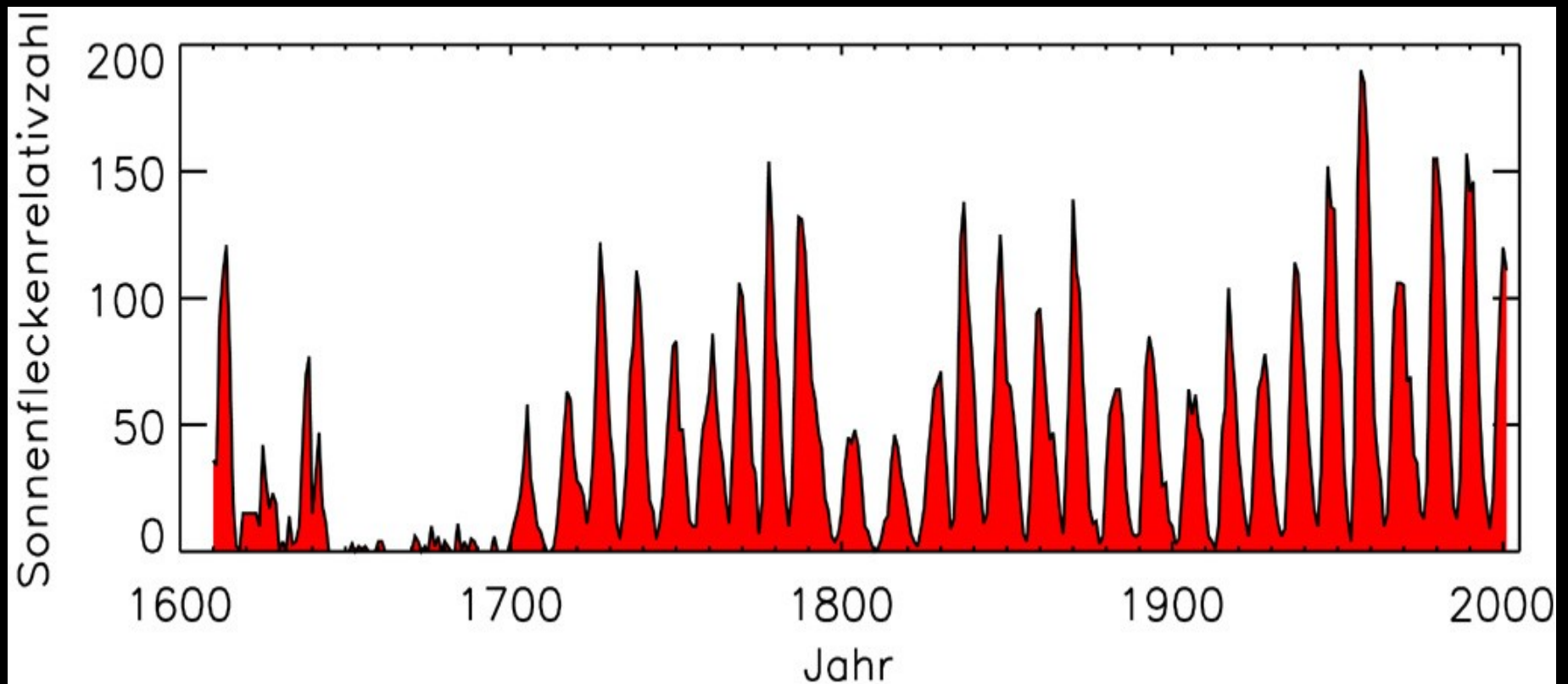
William Gilbert, (1544-1603)
De Magnete, 1600





Galileo, 1612

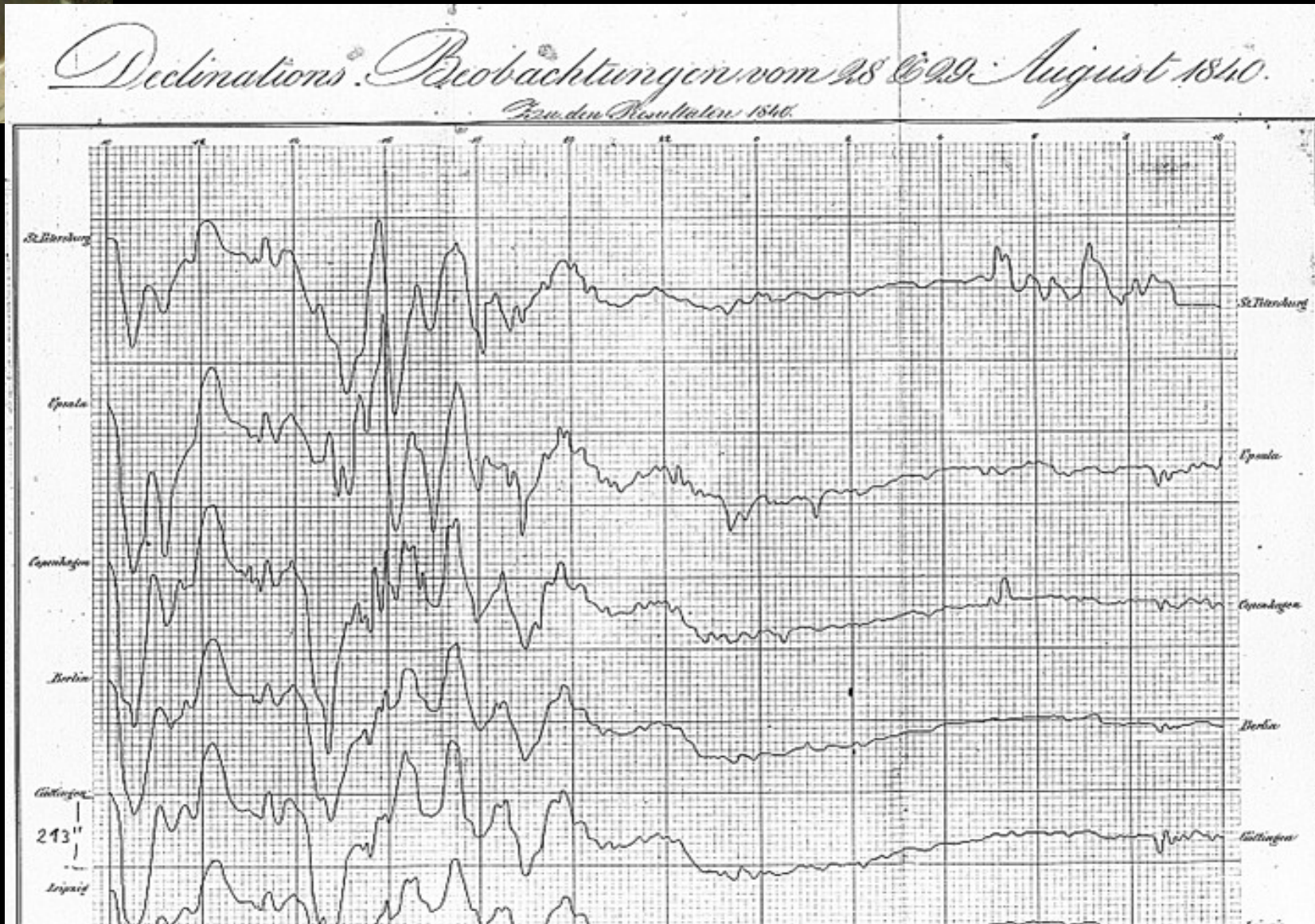
Frühe Beobachtungen von Sonnenflecken durch Galileo, Scheiner, etc.



Die Zahl der Sonnenflecken schwankt. Die Sonne ist nicht konstant!



C.F. Gauss untersucht geomagnetische Störungen und erstellt ein globales Netz von Magnetometerstationen (1833 ff).





K. Birkeland untersucht das Verhalten einer magnetisierten Kugel im Plasma (Terrellversuche) und erforscht in Expeditionen die Aurora.



Bow Shock →

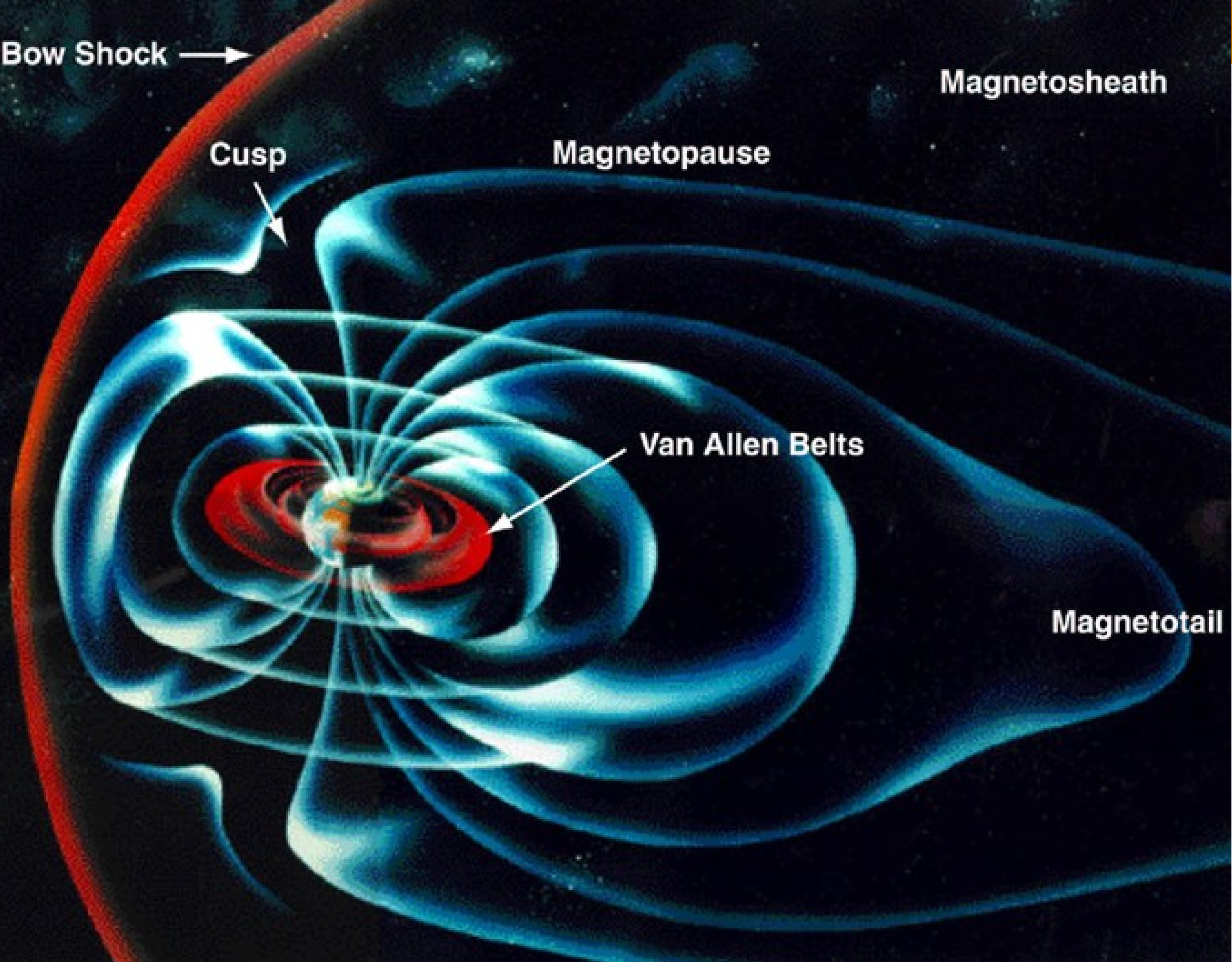
Magnetosheath

Cusp ↙

Magnetopause

Van Allen Belts ↙

Magnetotail



The answer, my friend, is blowing in the wind



The answer, my friend, is blowing in the wind

Im Sonnenwind



Typische Größen:

Dichte: 10 /cm^3

Geschw: 300 – 800 km/s









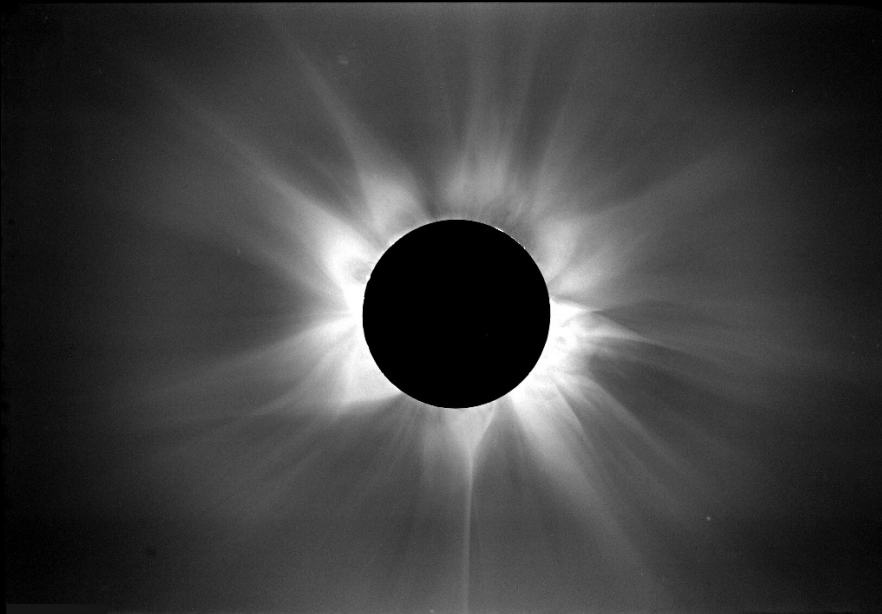
Unsere heutige, technikabhängige Zivilisation wird vom Weltraumwetter beeinflusst.





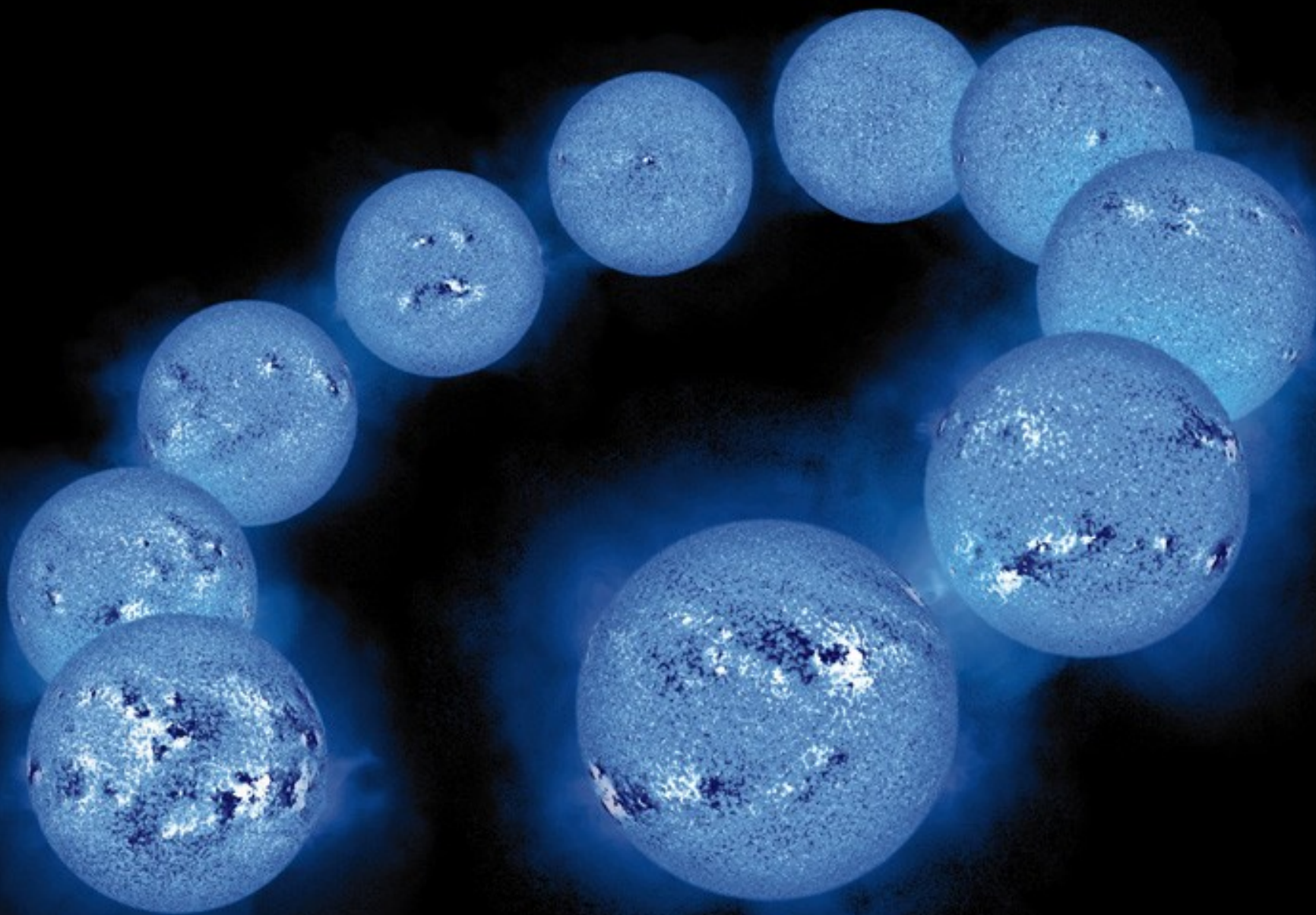
Was müssen wir verstehen, um solche Störungen voraussagen zu können?

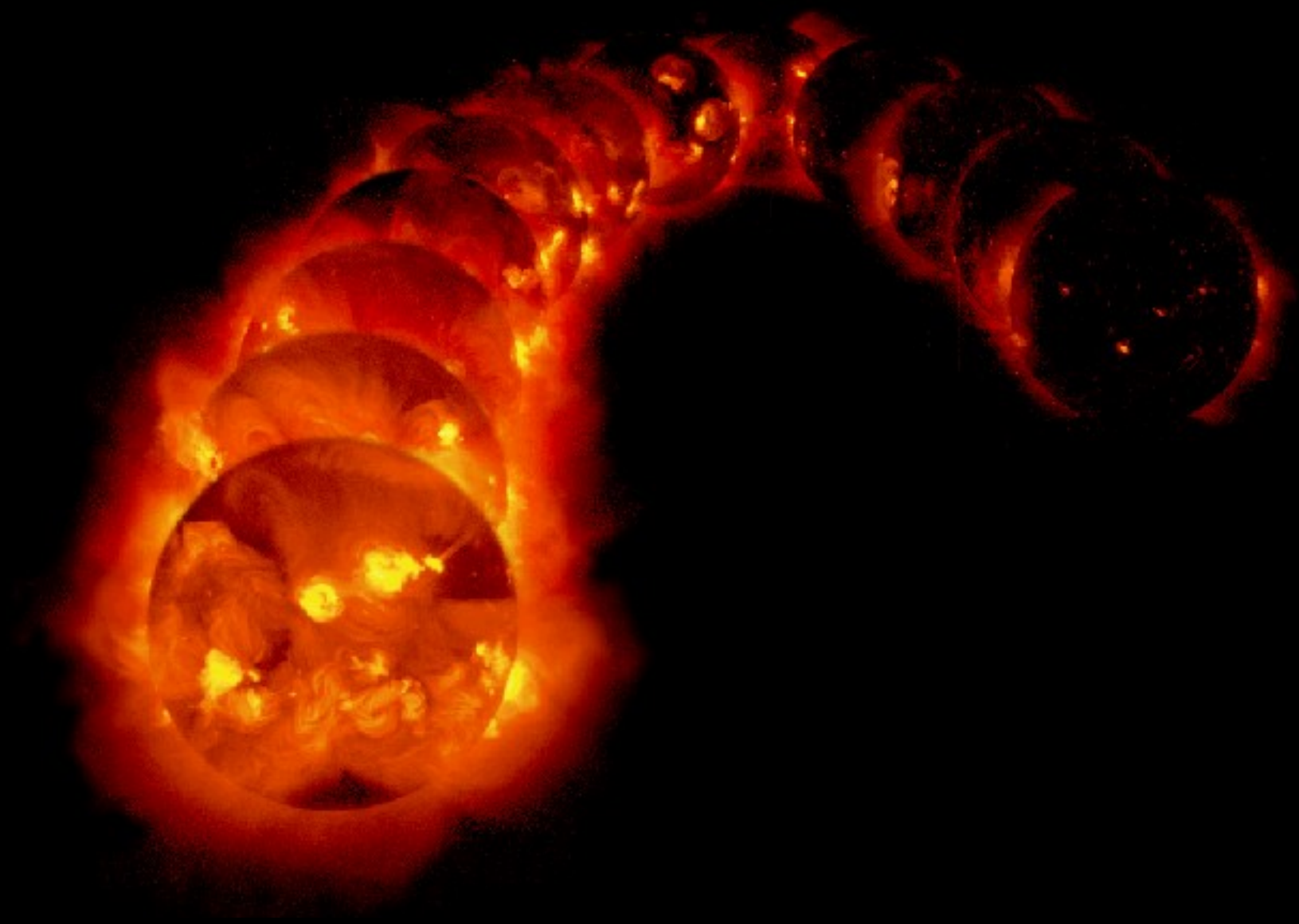
Aktivitätsmaximum (1988)

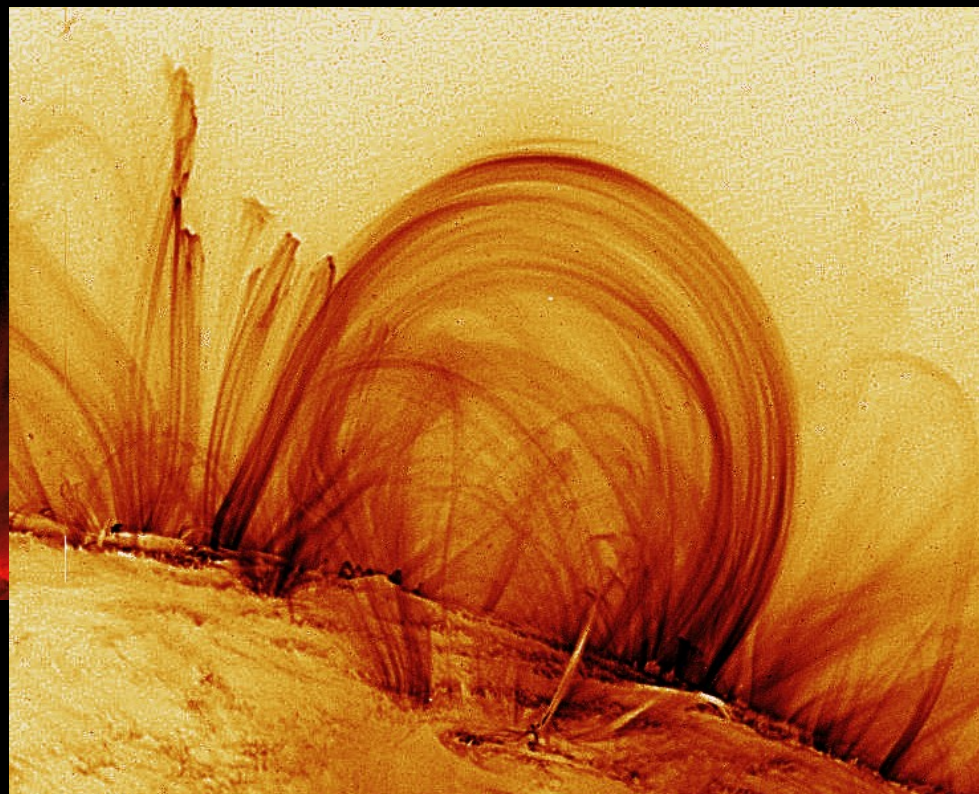
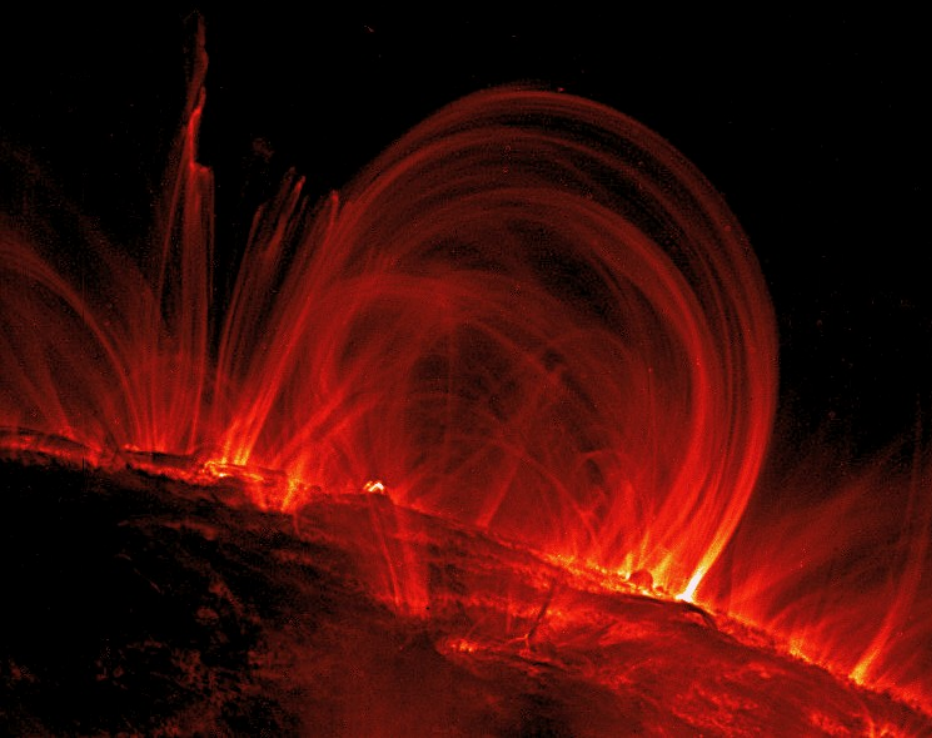


Aktivitätsminimum (1994)



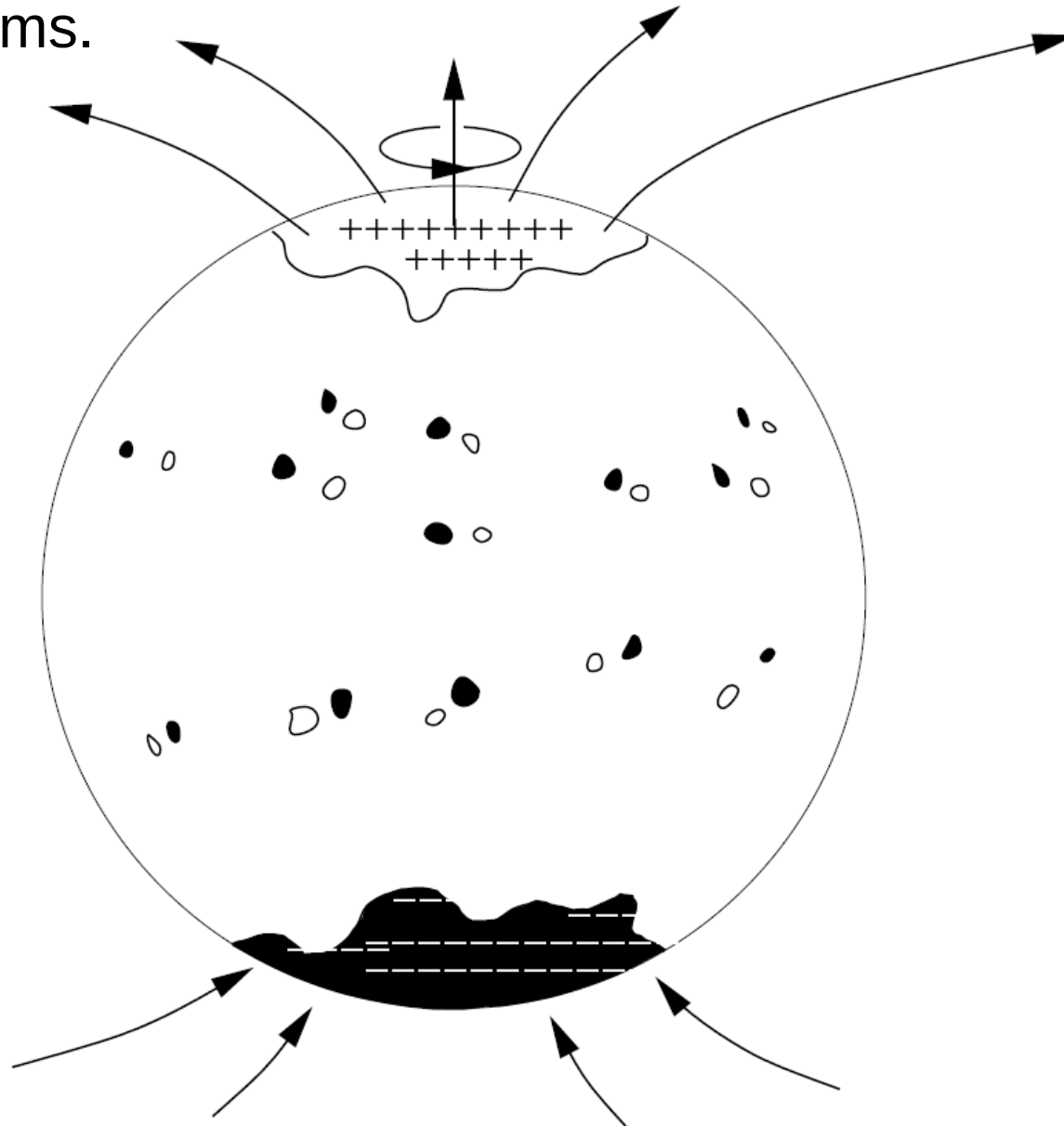








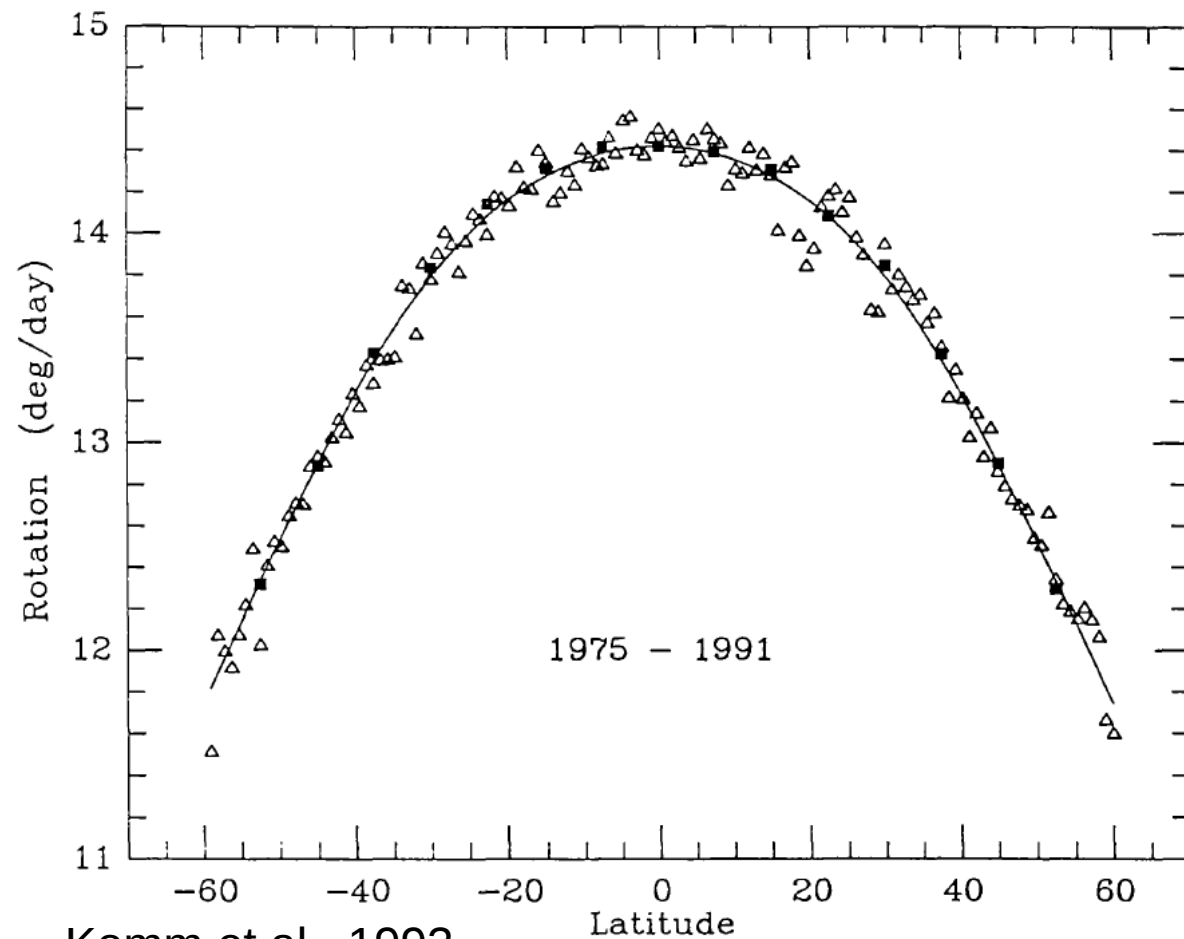
Das Gesetz von Hale: In der Regel entspricht die Polarität des führenden Sonnenflecks der des koronalen Loches derselben Hemisphäre während des vorangegangenen solaren Aktivitätsminimums.





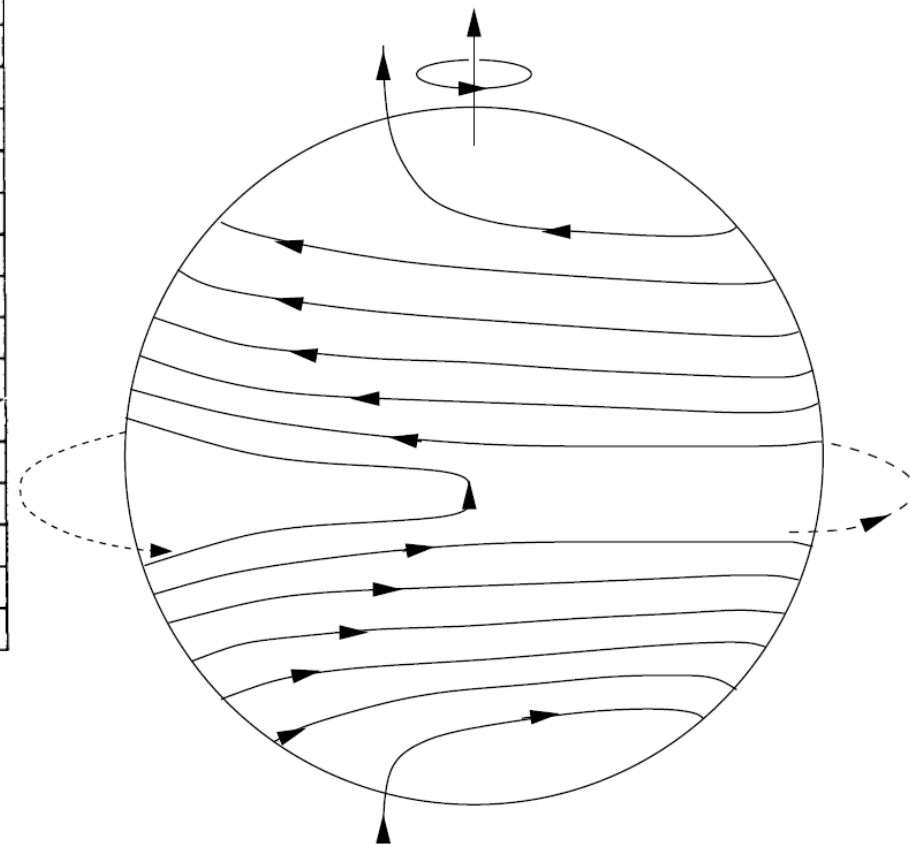
Ursprung des solaren Magnetfeldes I

Die Photosphäre rotiert differentiell



Komm et al., 1993

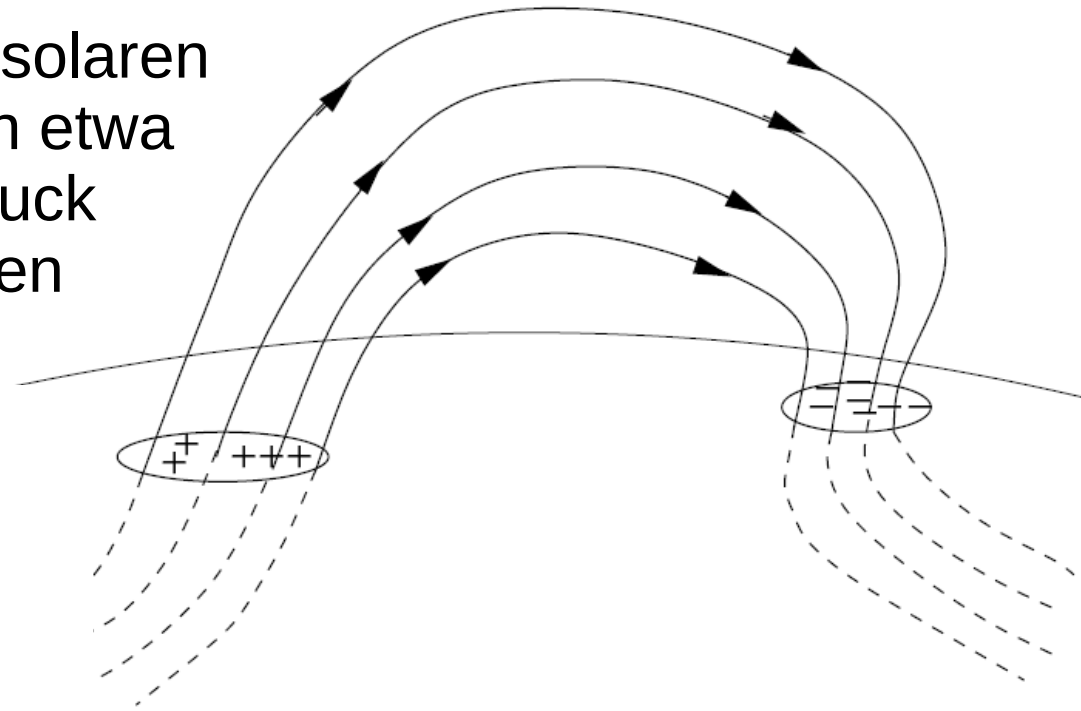
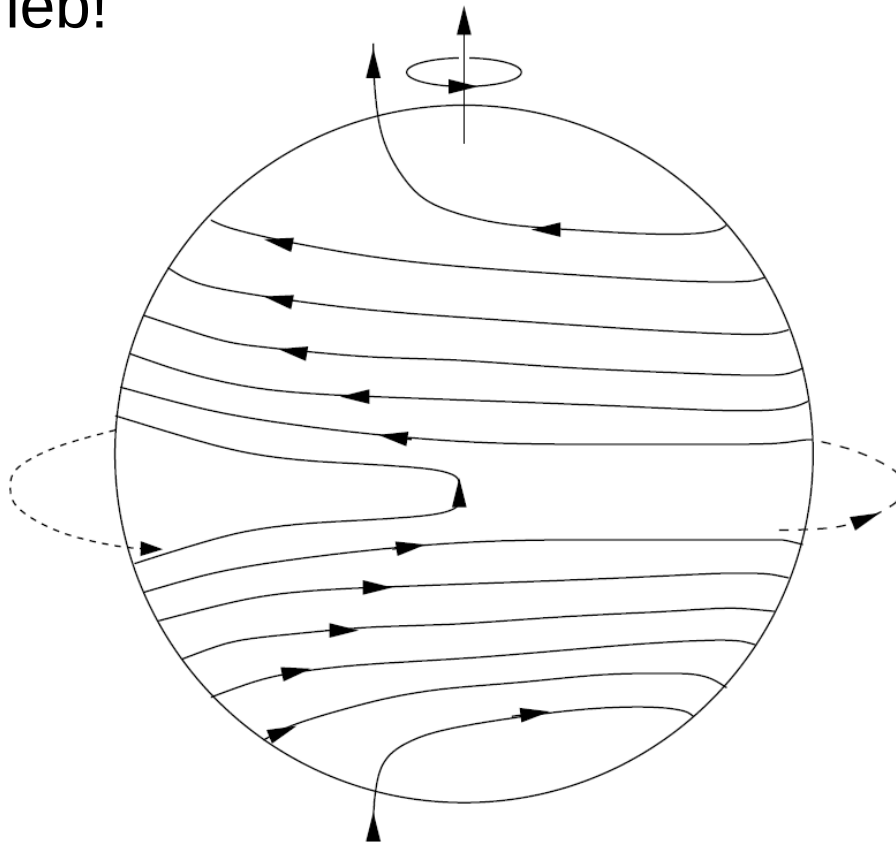
Wenn dies auch durch die Konvektionszone hindurch gilt, so wickelt sich das Feld immer stärker auf.





Ein starkes Magnetfeld unter der Sonnenoberfläche unterliegt dem magnetischen Auftrieb.

Wegen der guten Leitfähigkeit des solaren Plasmas hat es in diesen Schichten etwa dieselbe Temperatur. Wenn der Druck auch gleich sein soll, so muss wegen $P = n k T$ die Dichte geringer sein. Auftrieb!

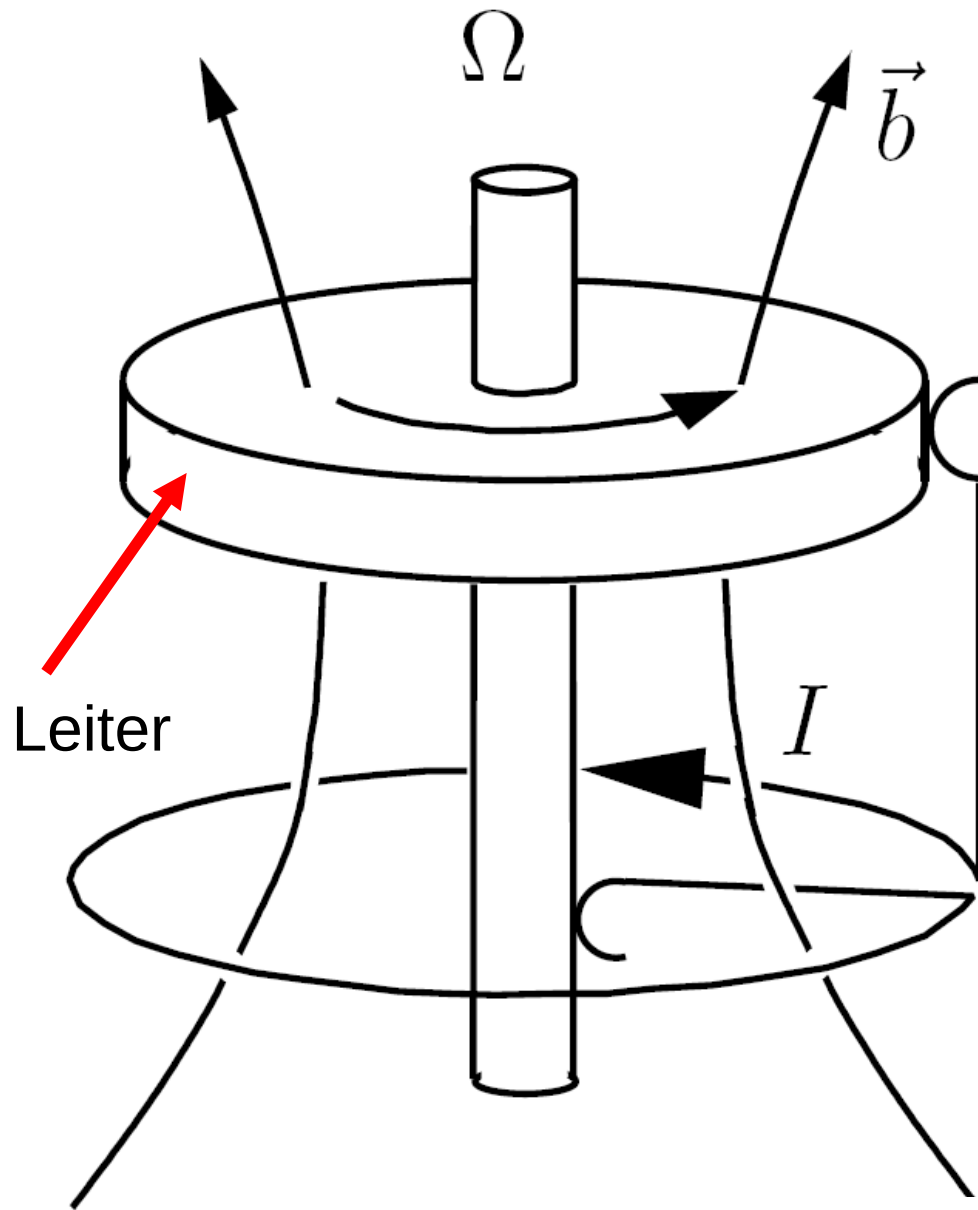


Mikroskopische Begründung
von Hales Gesetz



Bullards homopolarer Dynamo

Gegeninduktivität



$$\Phi = M I,$$

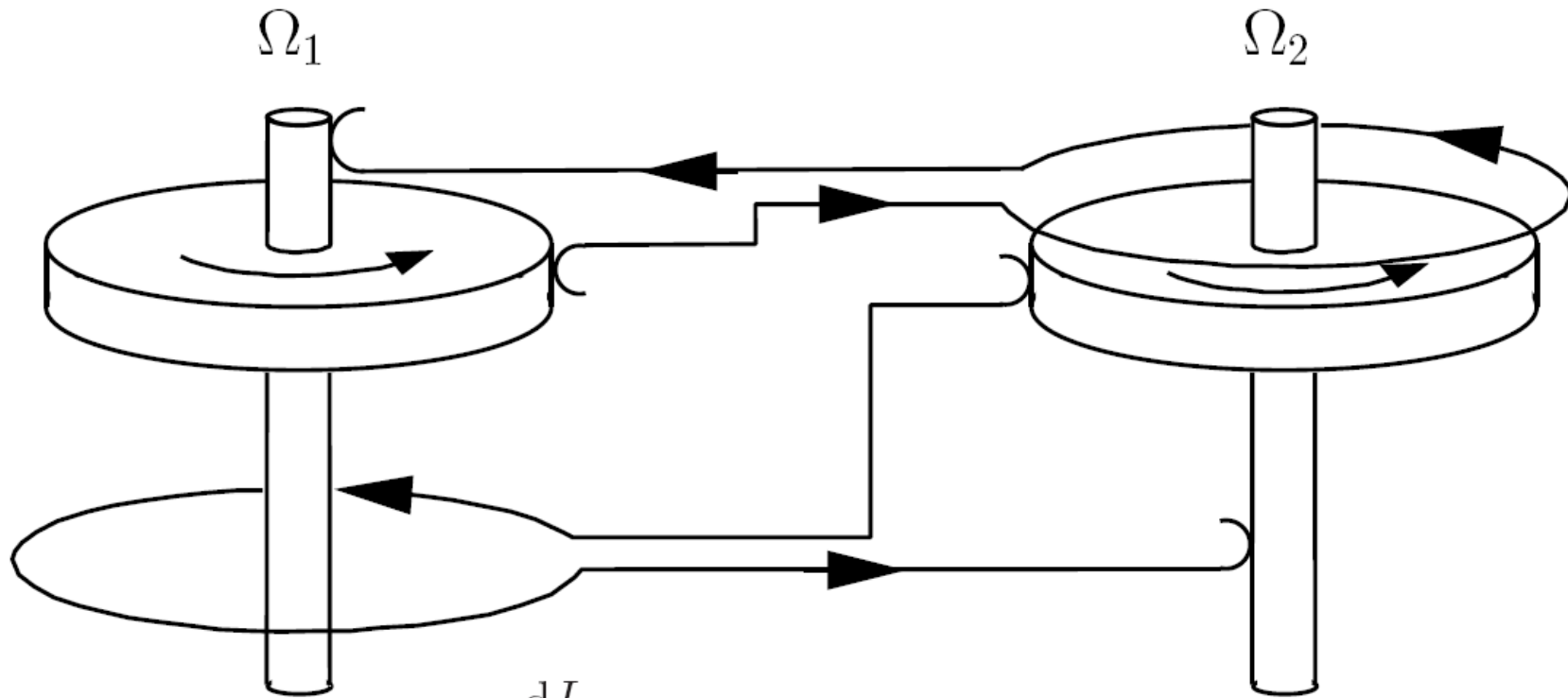
$$L \frac{dI}{dt} + R I = M \frac{\Omega}{2\pi} I$$

$$I(t) = I_0 \cdot e^{\left(\frac{M\Omega}{2\pi} - R\right)t/L}$$

$$F = q \cdot \Omega \cdot r \cdot B = q \cdot \Omega \cdot \Phi / \pi r^2$$



Rikitakes Geodynamo



$$L \frac{dI_1}{dt} + RI_1 = M\Omega_1 I_2,$$

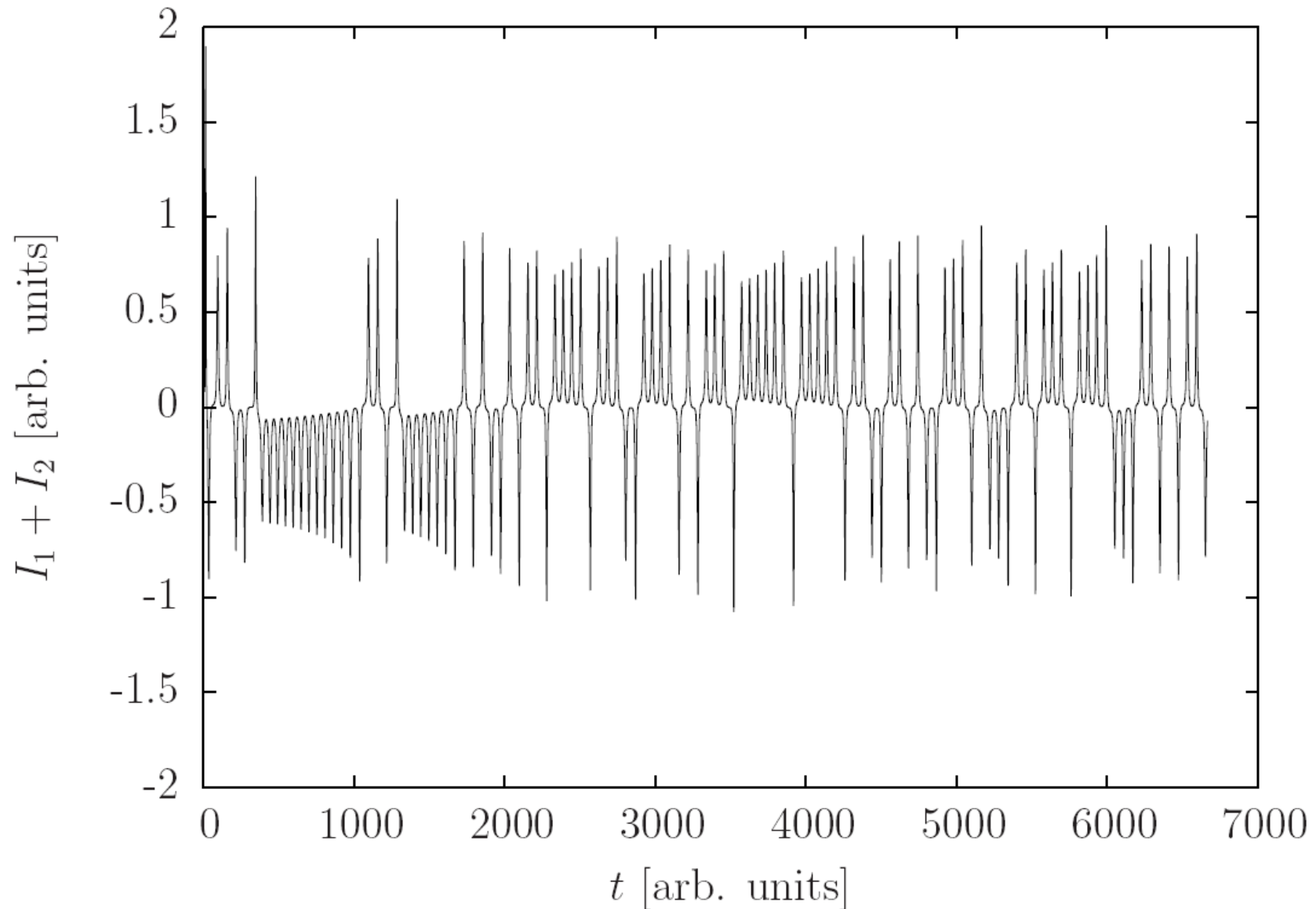
$$L \frac{dI_2}{dt} + RI_2 = M\Omega_2 I_1,$$

$$C \frac{d\Omega_1}{dt} = G - MI_1 I_2,$$

$$C \frac{d\Omega_2}{dt} = G - MI_1 I_2,$$



Numerische Lösung von Rikitakes Geodynamo



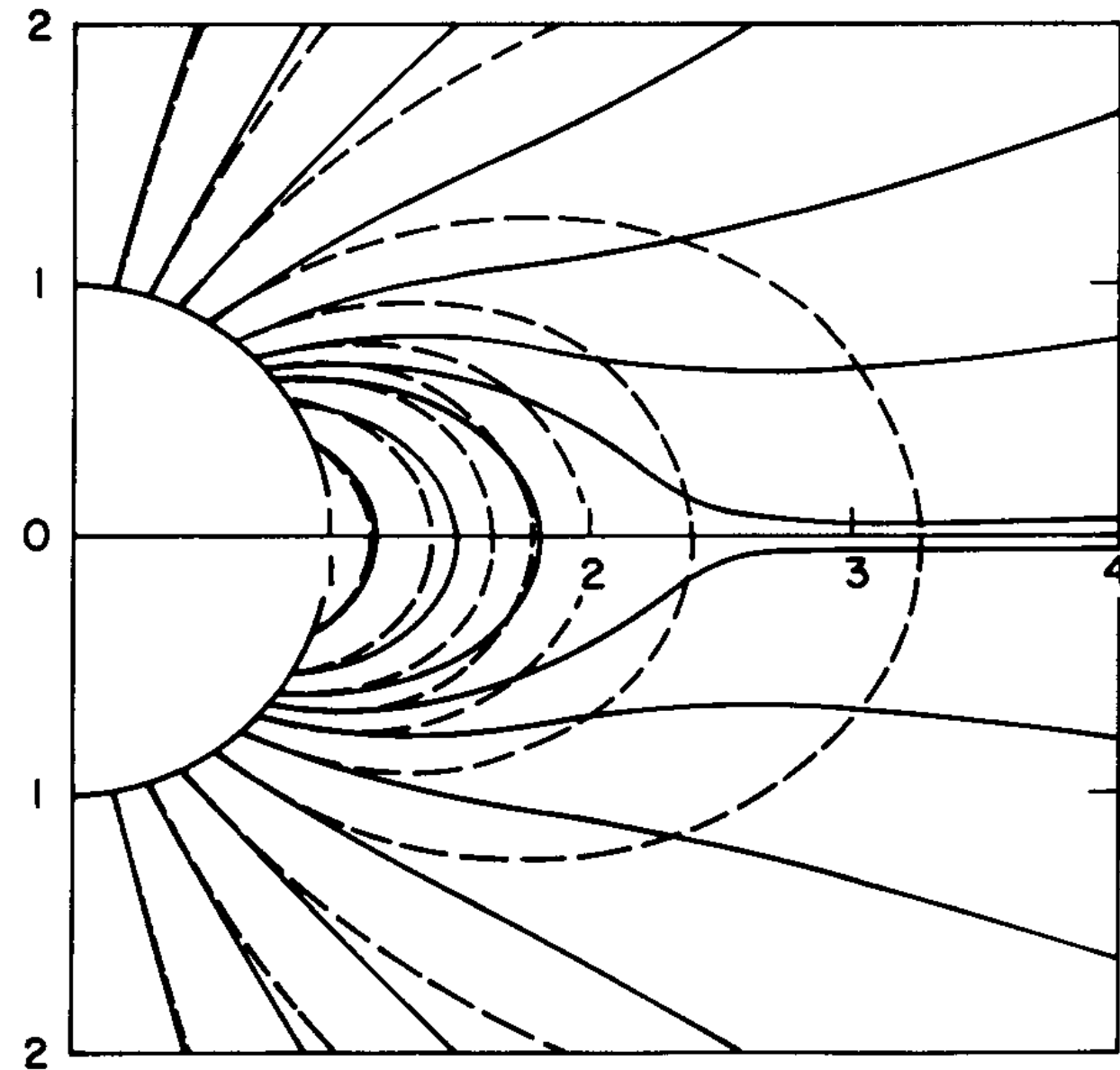
(Verlangt allerdings die richtigen Anfangsbedingungen) ²⁶



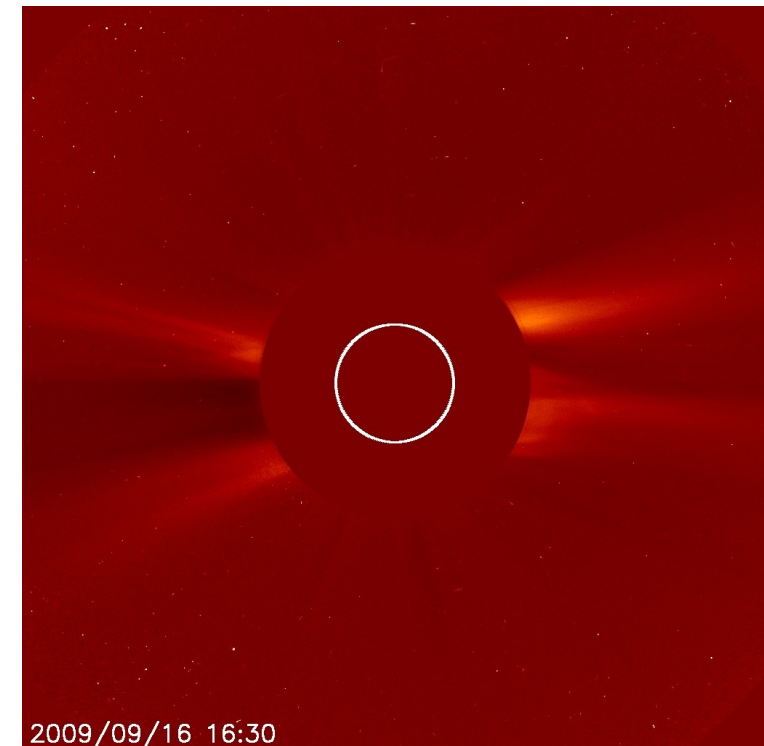
Wie breitet sich das solare Magnetfeld durch die Korona in die Heliosphäre aus?

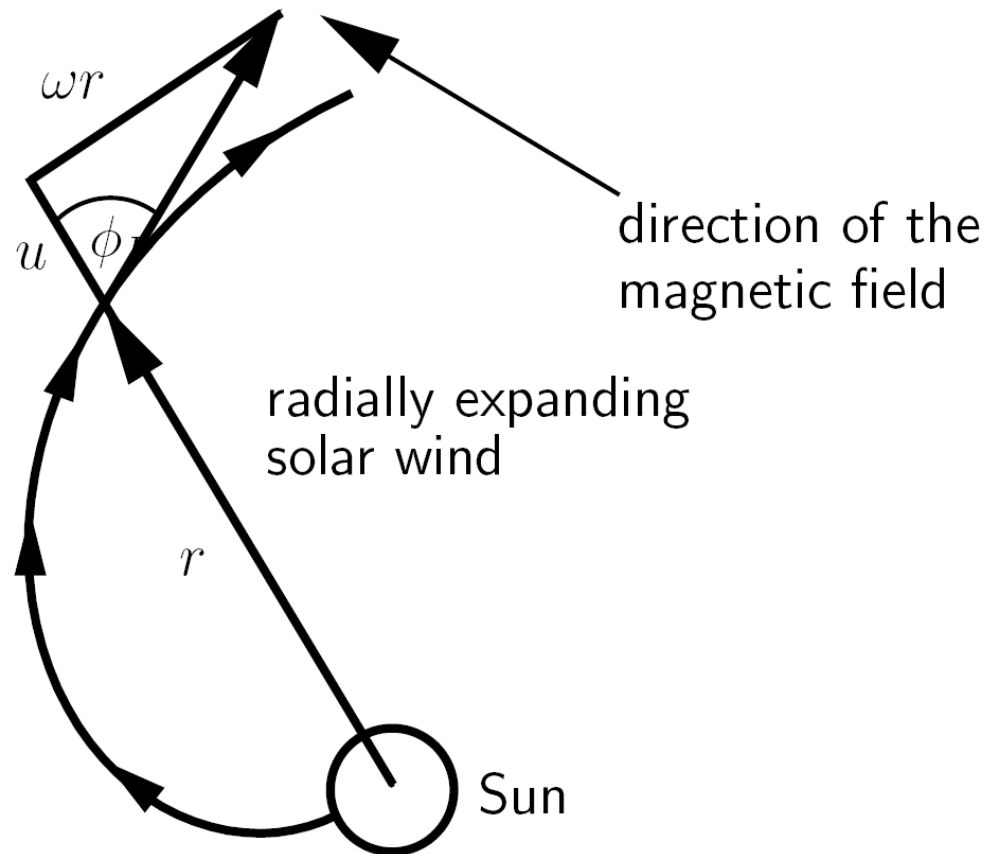
Das solare Magnetfeld wird durch den Sonnenwind nach außen getragen und verformt.

Modell ähnlich wie Bild im solaren Aktivitätsminimum.



Pneumann and Kopp, 1971

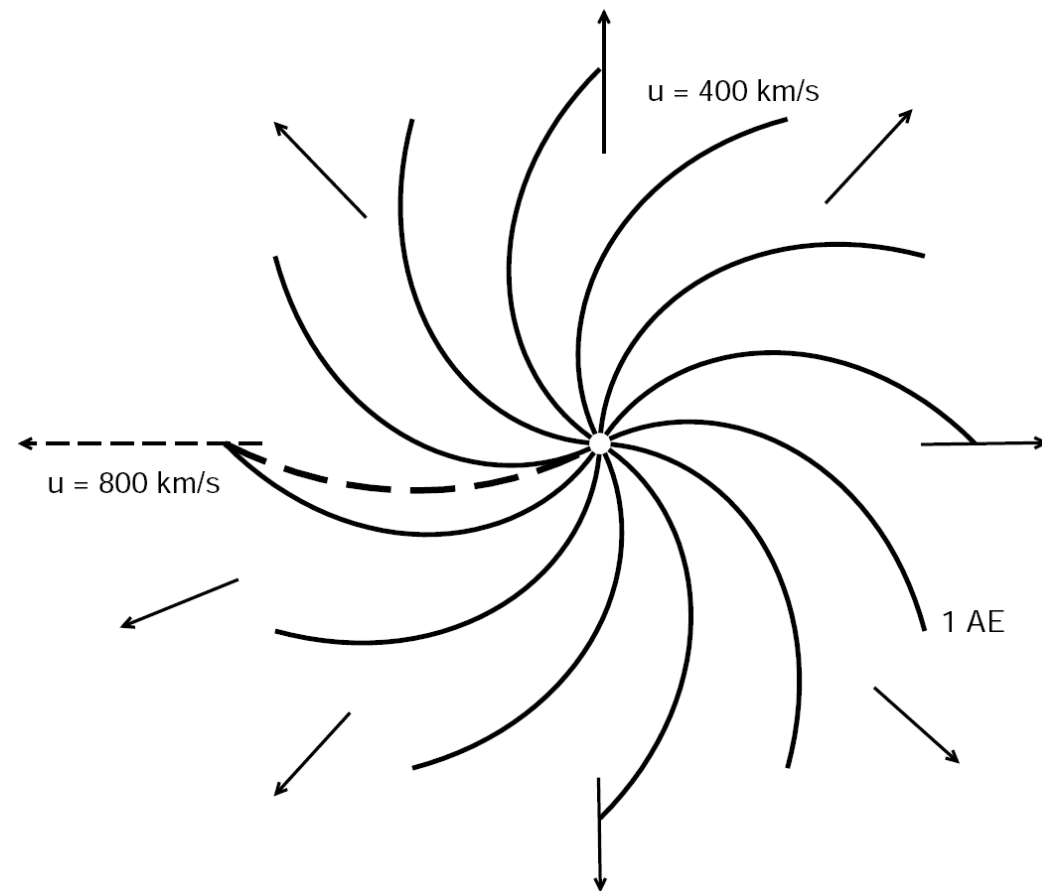


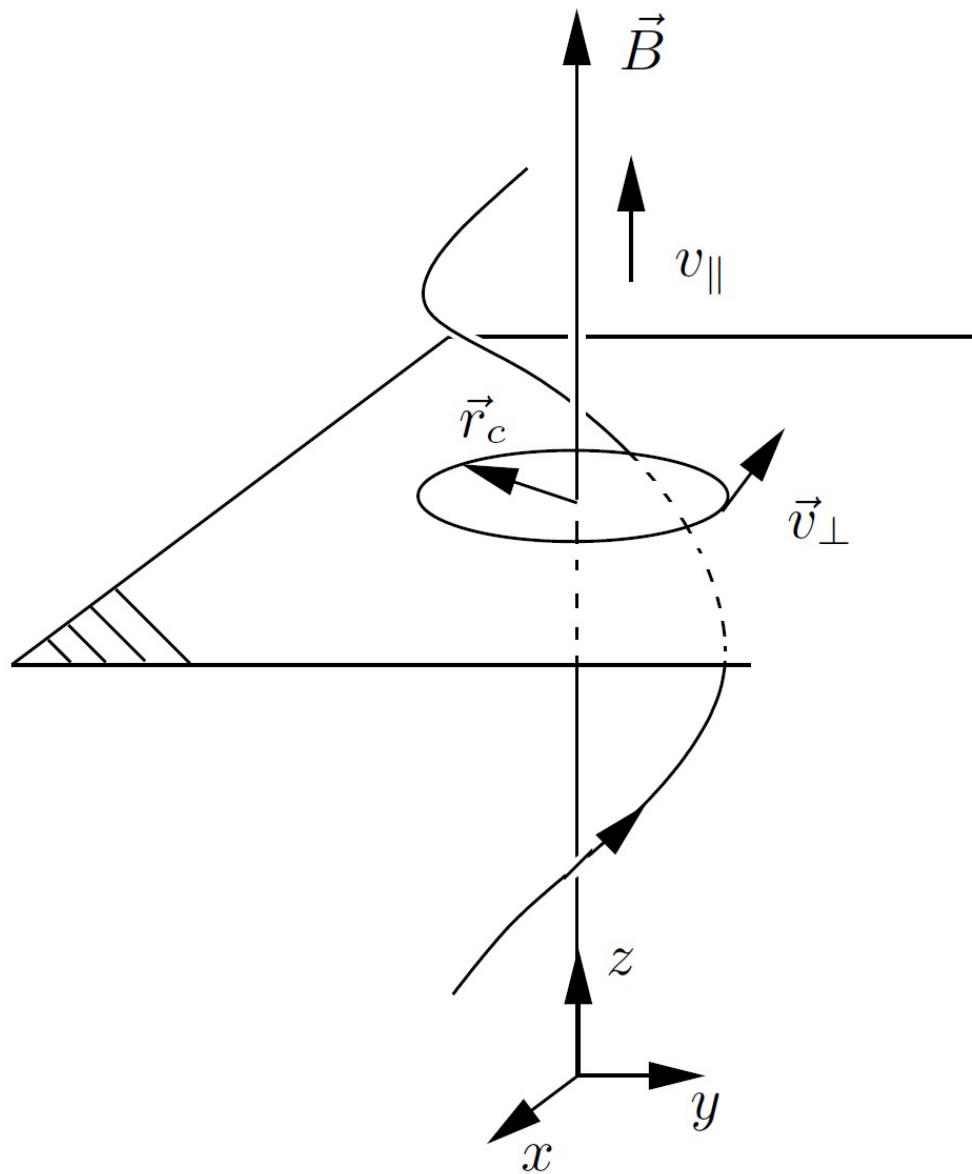


Teilchen müssen sich also entlang der Parkerspirale ausbreiten. Deshalb kommen sie von der Erde aus gesehen immer von 'rechts' (Westen von der Nordhalbkugel aus)

Wegen der Drehung der Sonne wickelt sich das Feld auf – wie bei einem Rasensprenger.

Man nennt dies archimedische Spirale oder Parkerspirale.



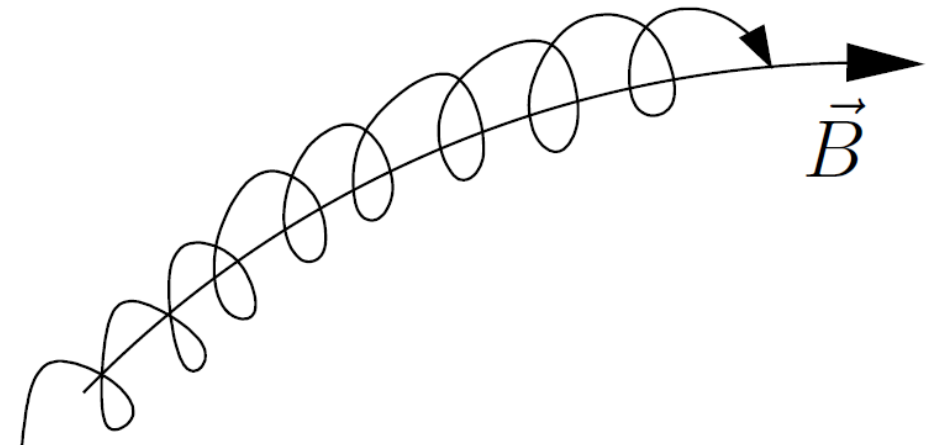


Bewegung elektrisch geladener
Teilchen im Magnetfeld

$$\vec{F} = q \cdot (\vec{v} \times \vec{B})$$

$$\vec{F} = q(\vec{E} + \vec{v} \times \vec{B})$$

Wegen der Lorentzkraft bleiben
Teilchen an Feldlinien 'kleben'.
Sie bewegen sich auf Spiralbahnen.





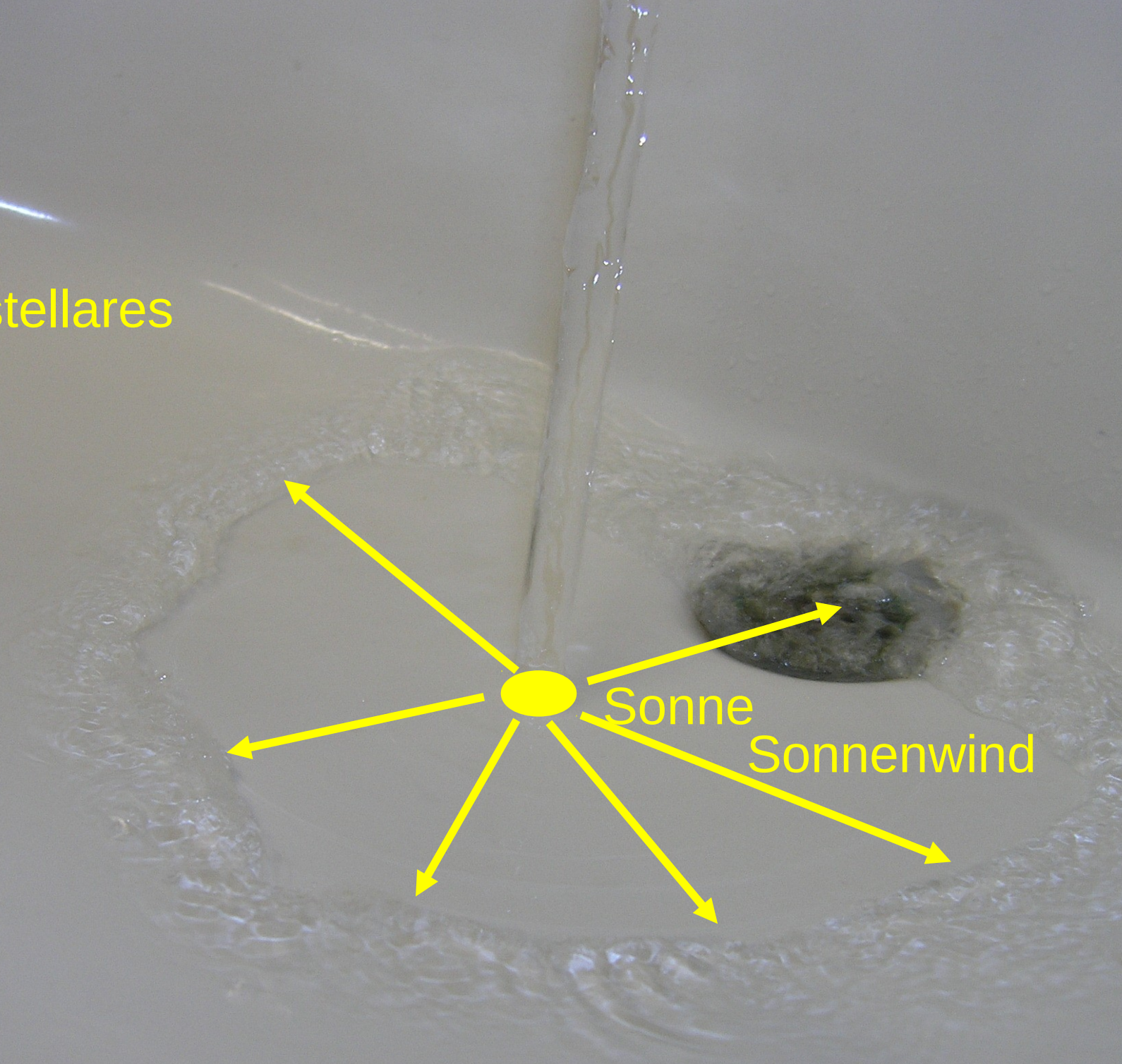




Lokales interstellares
Medium

 Sonne

Lokales interstellares
Medium



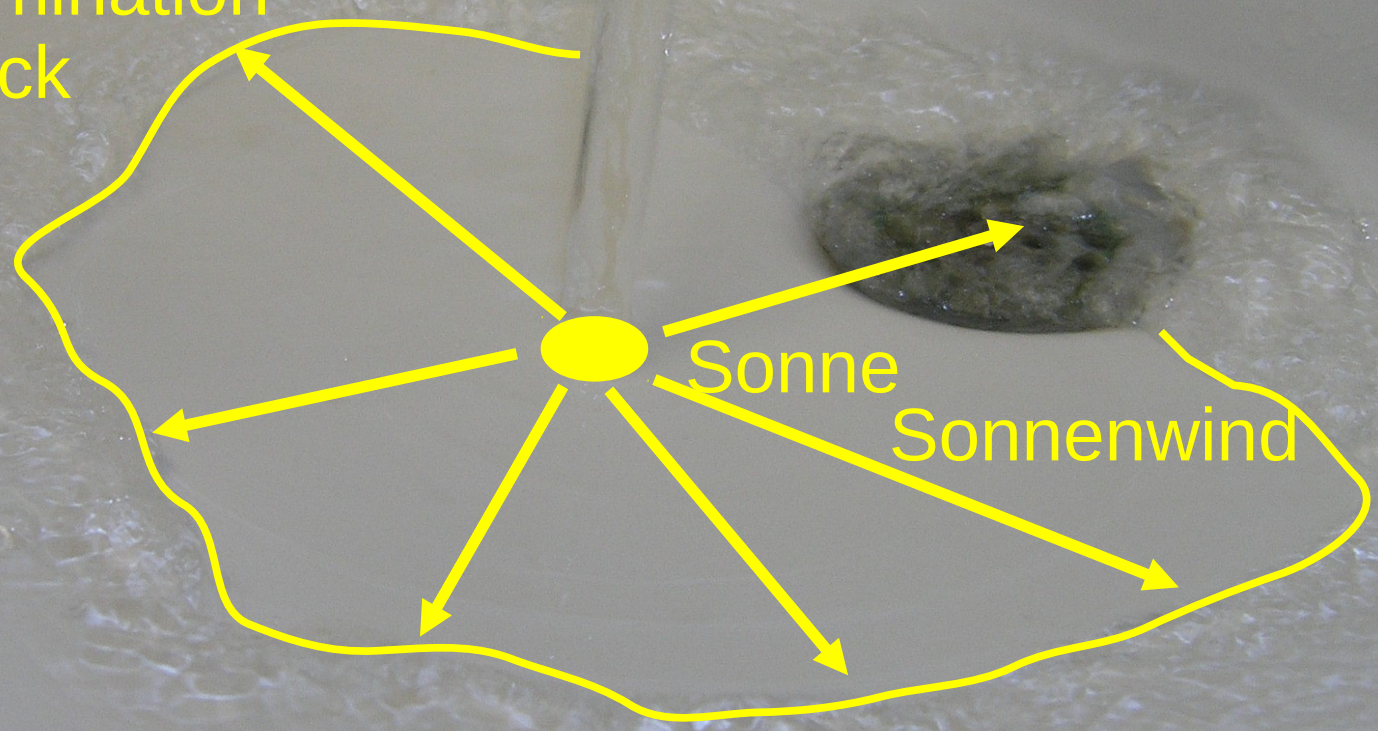
Sonne

Sonnenwind

Lokales interstellares
Medium

Termination
shock

Sonne
Sonnenwind

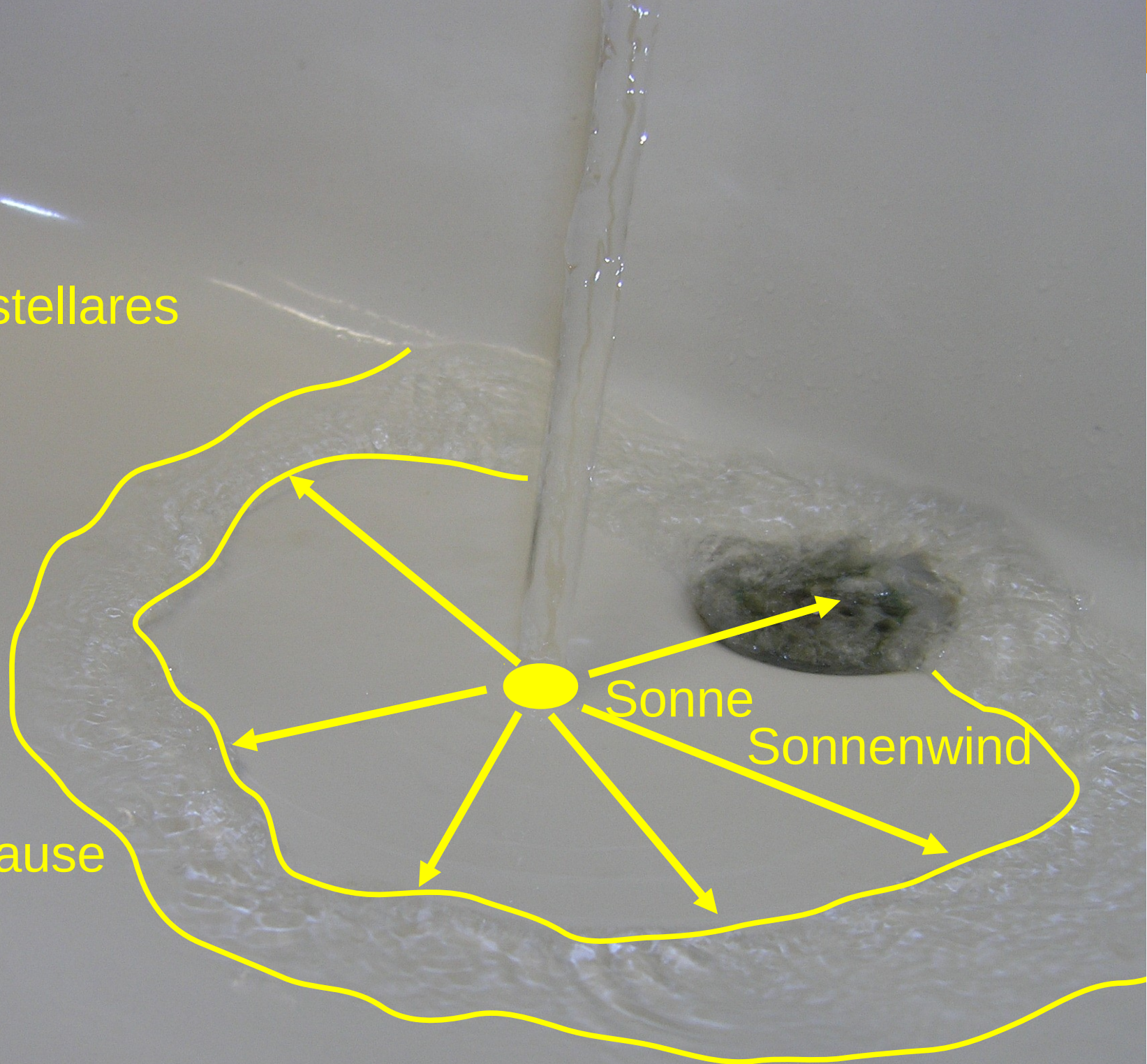


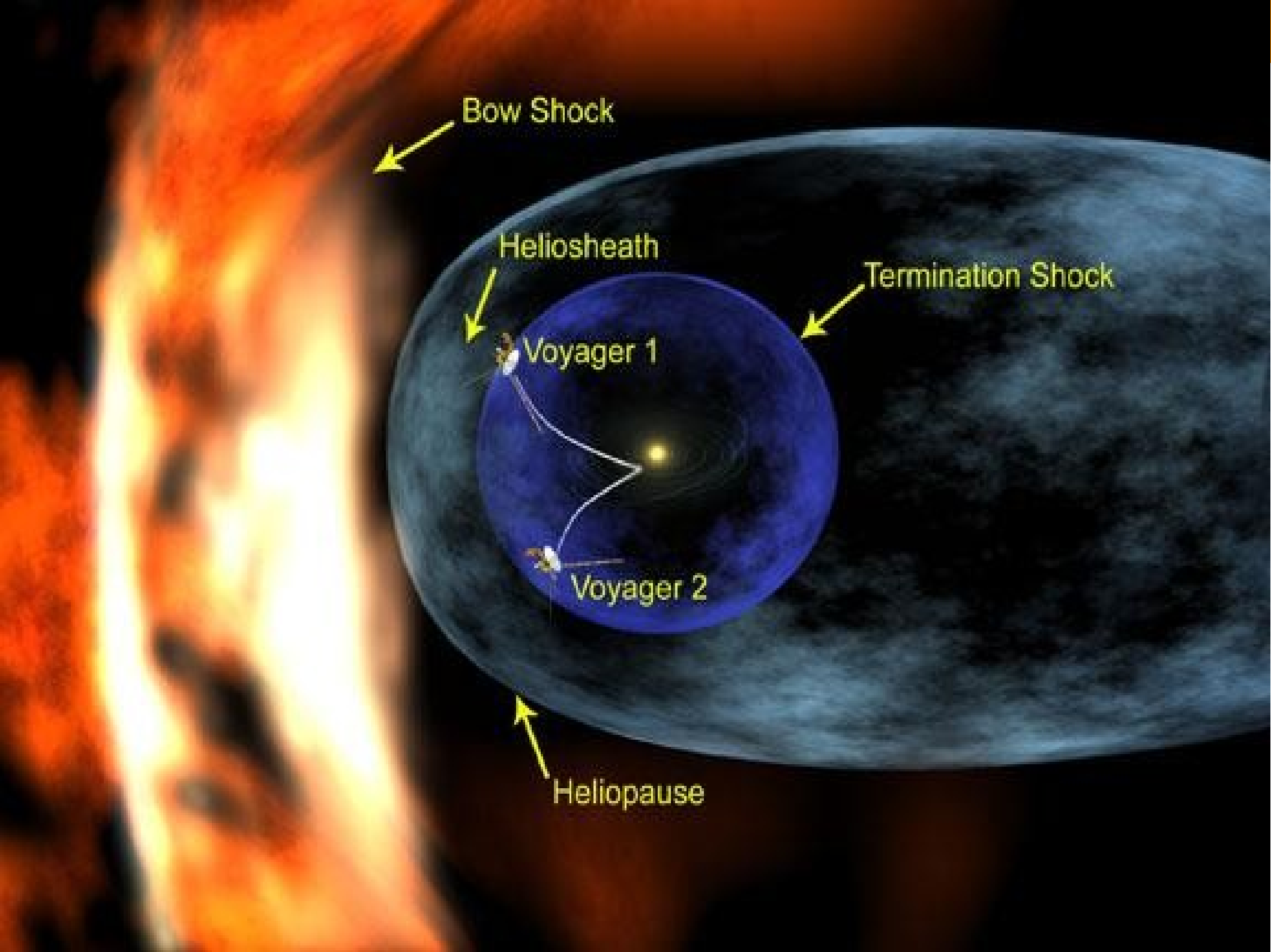
Lokales interstellares
Medium

Heliopause

Sonne

Sonnenwind





Bow Shock

Heliosheath

Termination Shock

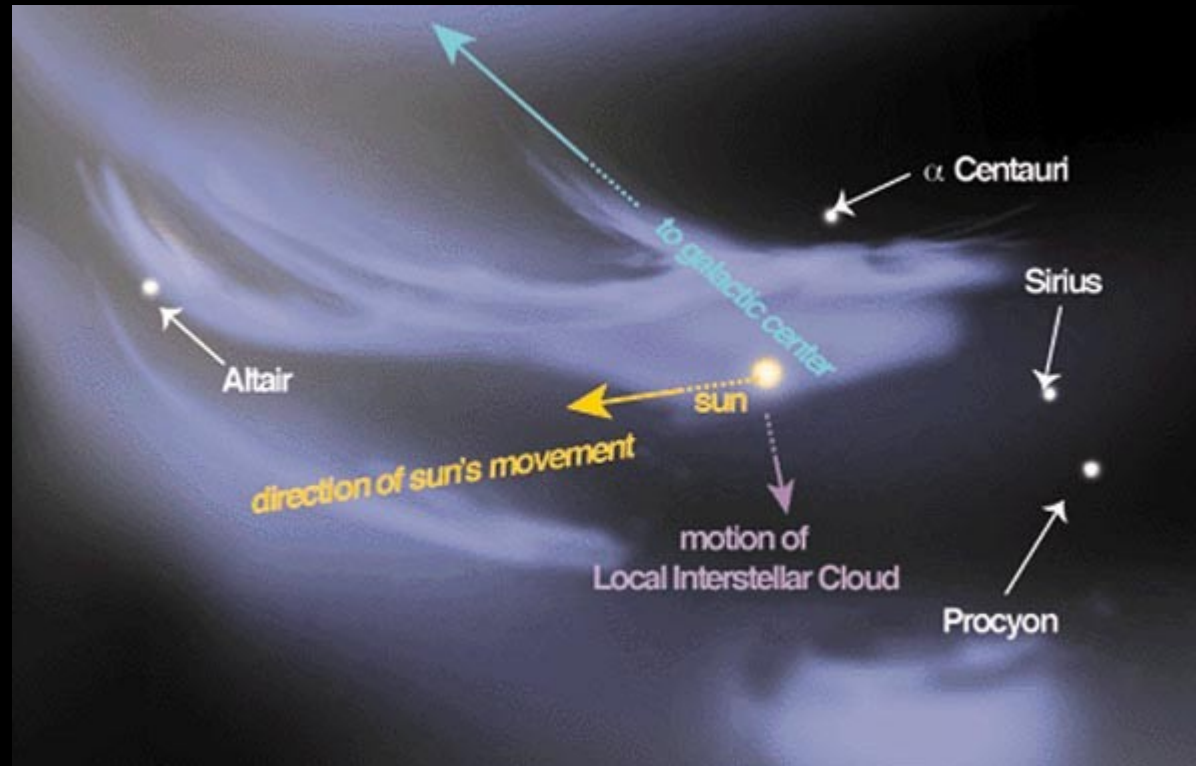
Voyager 1

Voyager 2

Heliopause



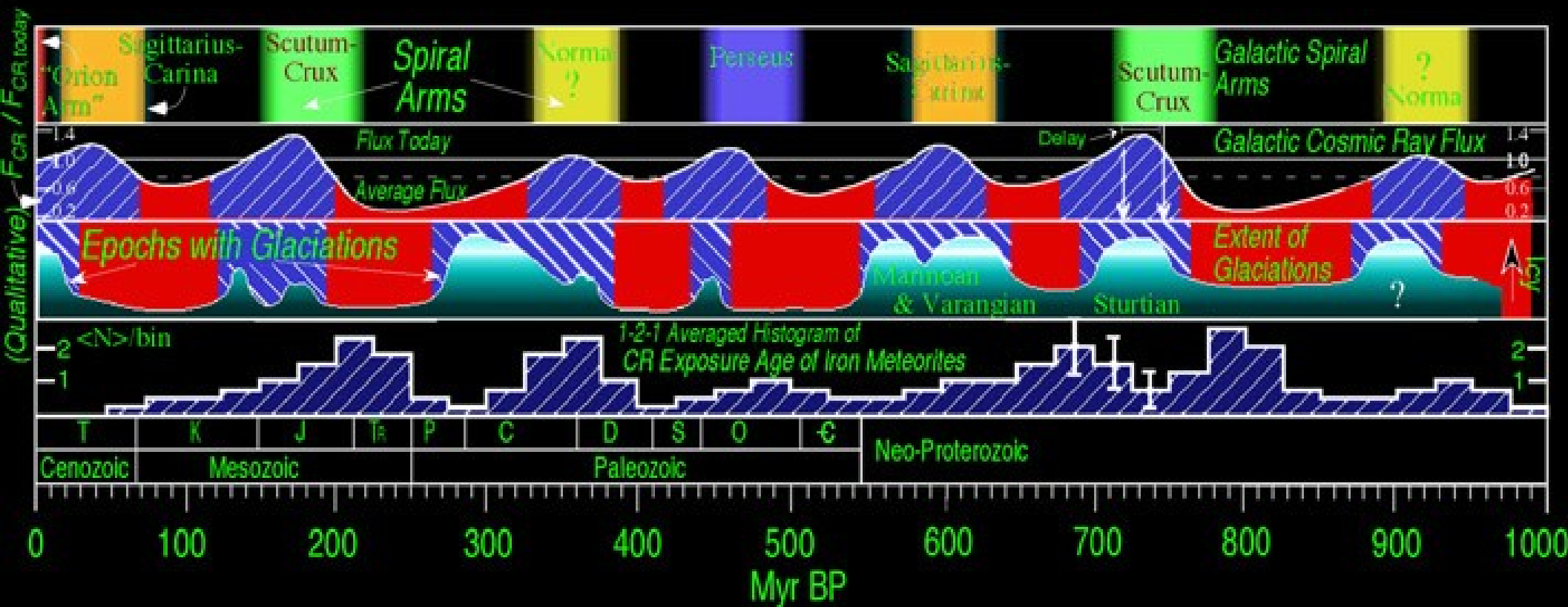
Das Sonnensystem bewegt sich durch das lokale interstellare Medium



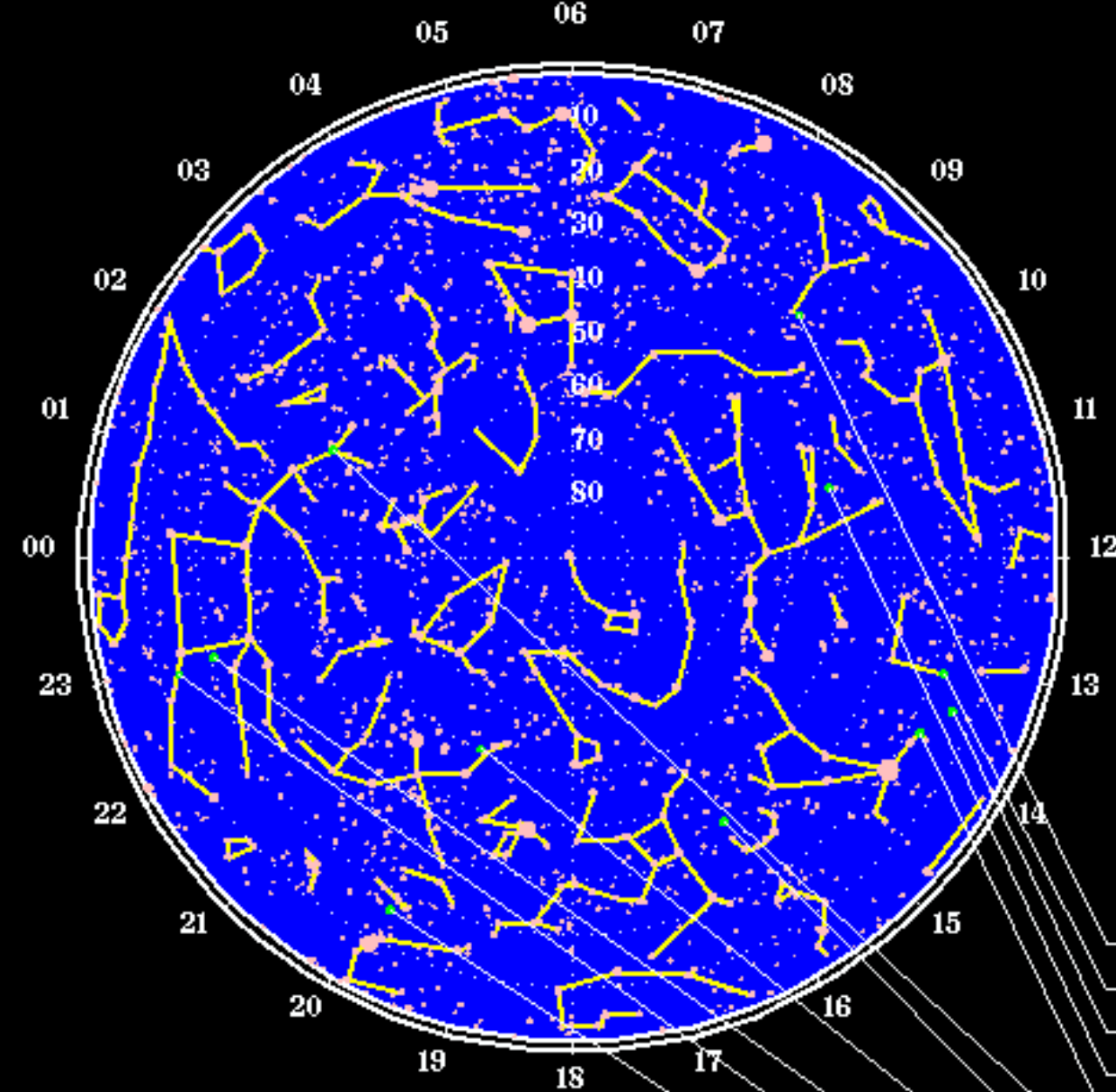
... und erlebt so im Laufe der Jahrmmillionen eine veränderliche galaktische Umwelt



Wir vermuten, dass auch die galaktische Wanderung einen Einfluss auf unser Klima haben könnte.



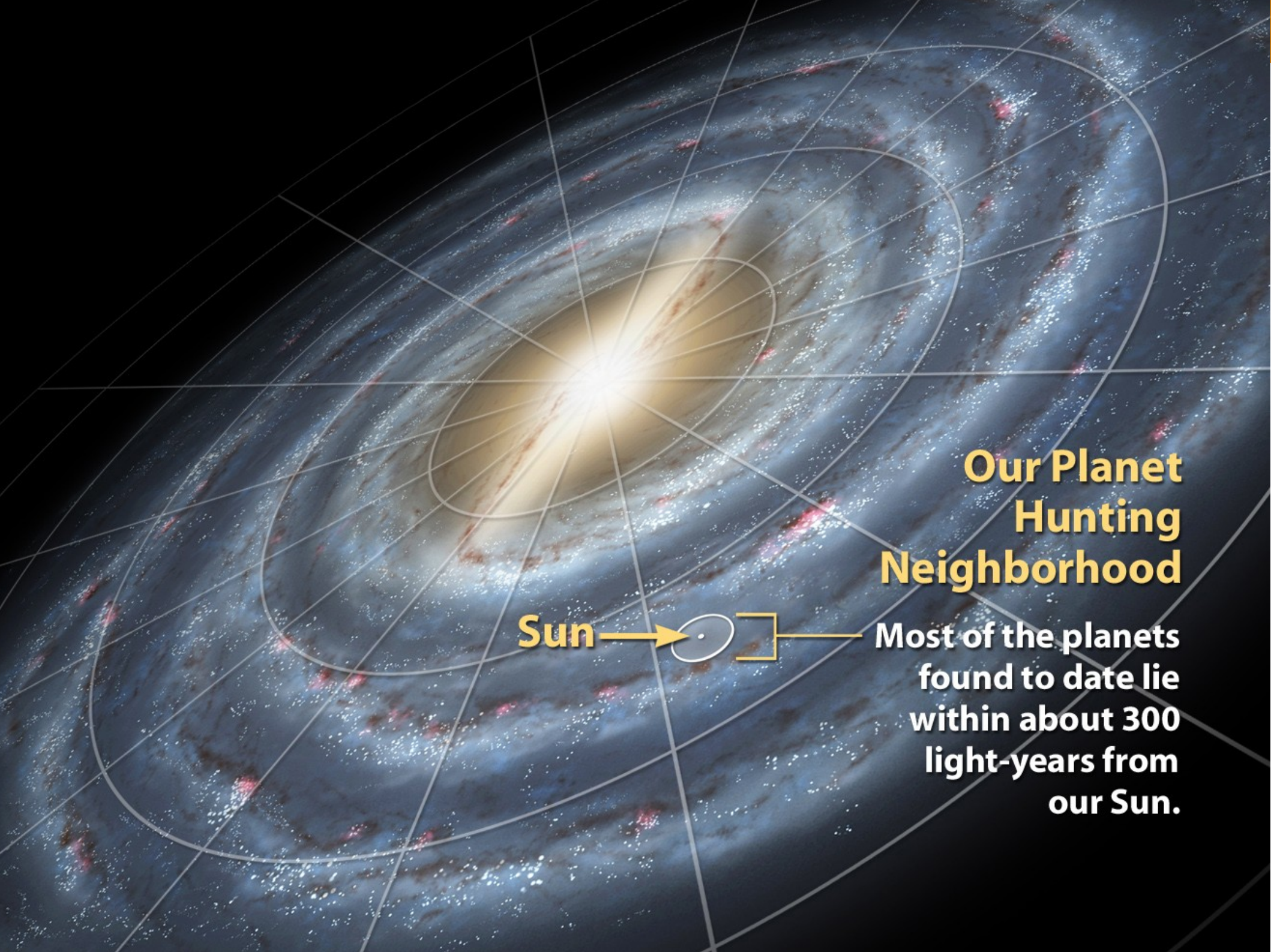




Ja, es gibt überall
Planeten!

25.03.2013: 861

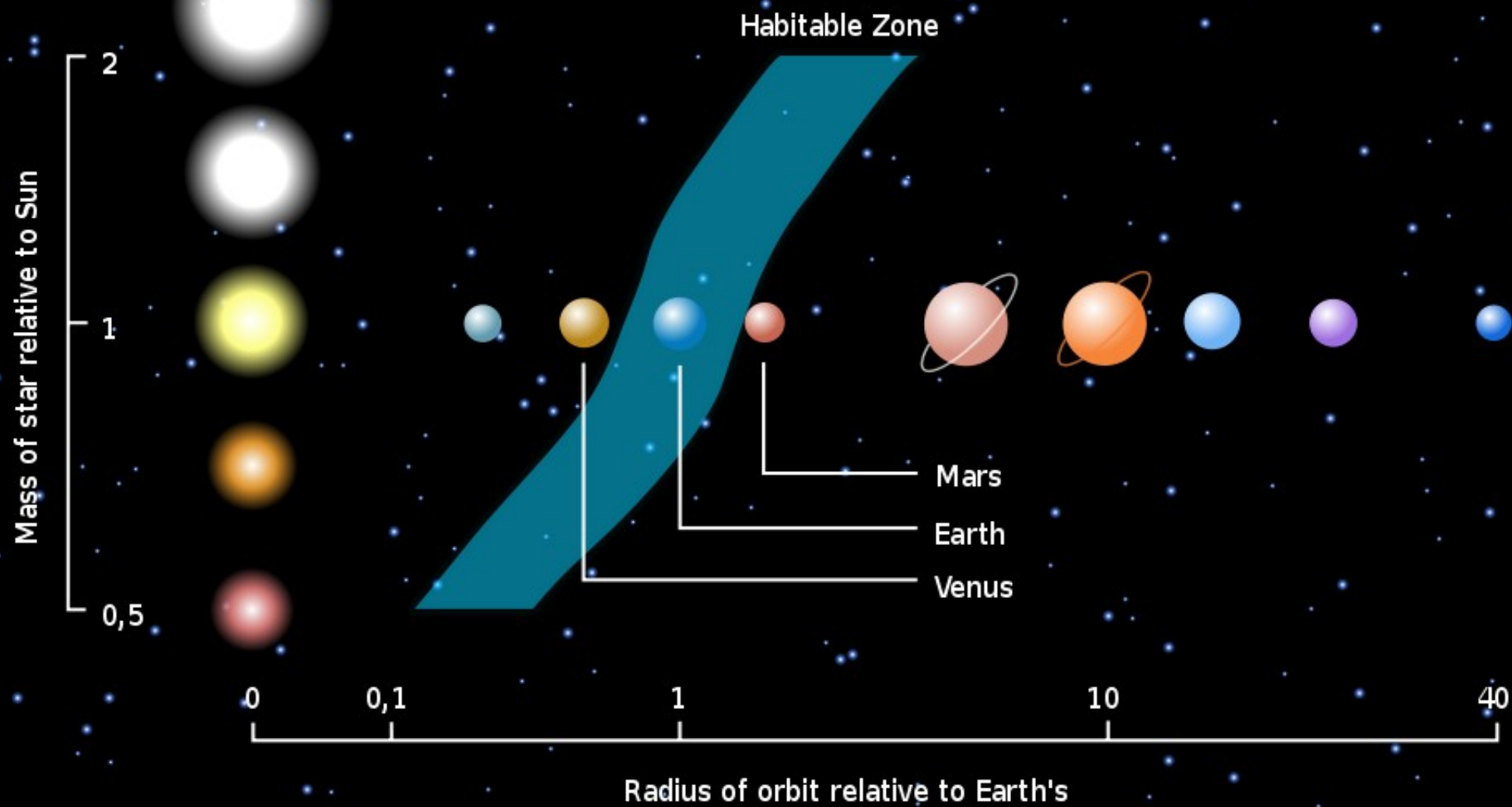
- 55 Cancrī
- HD 114762
- 70 Virginis
- 47 Ursae Majoris
- τ Bootis
- ν Andromedae
- ρ Coronae Borealis
- 16 Cygni B
- 51 Pegasi
- Gliese 876
- 14 Herculis

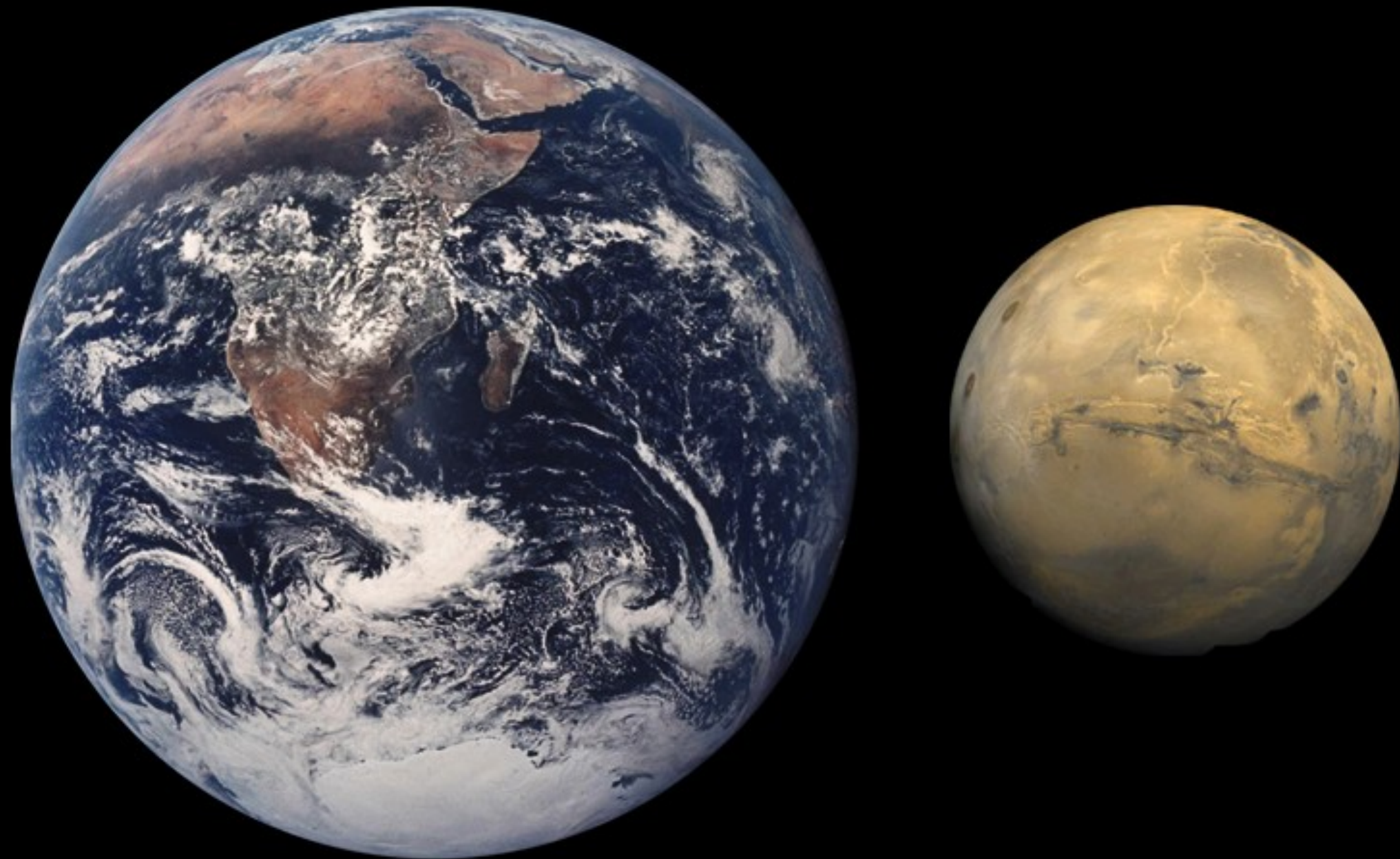


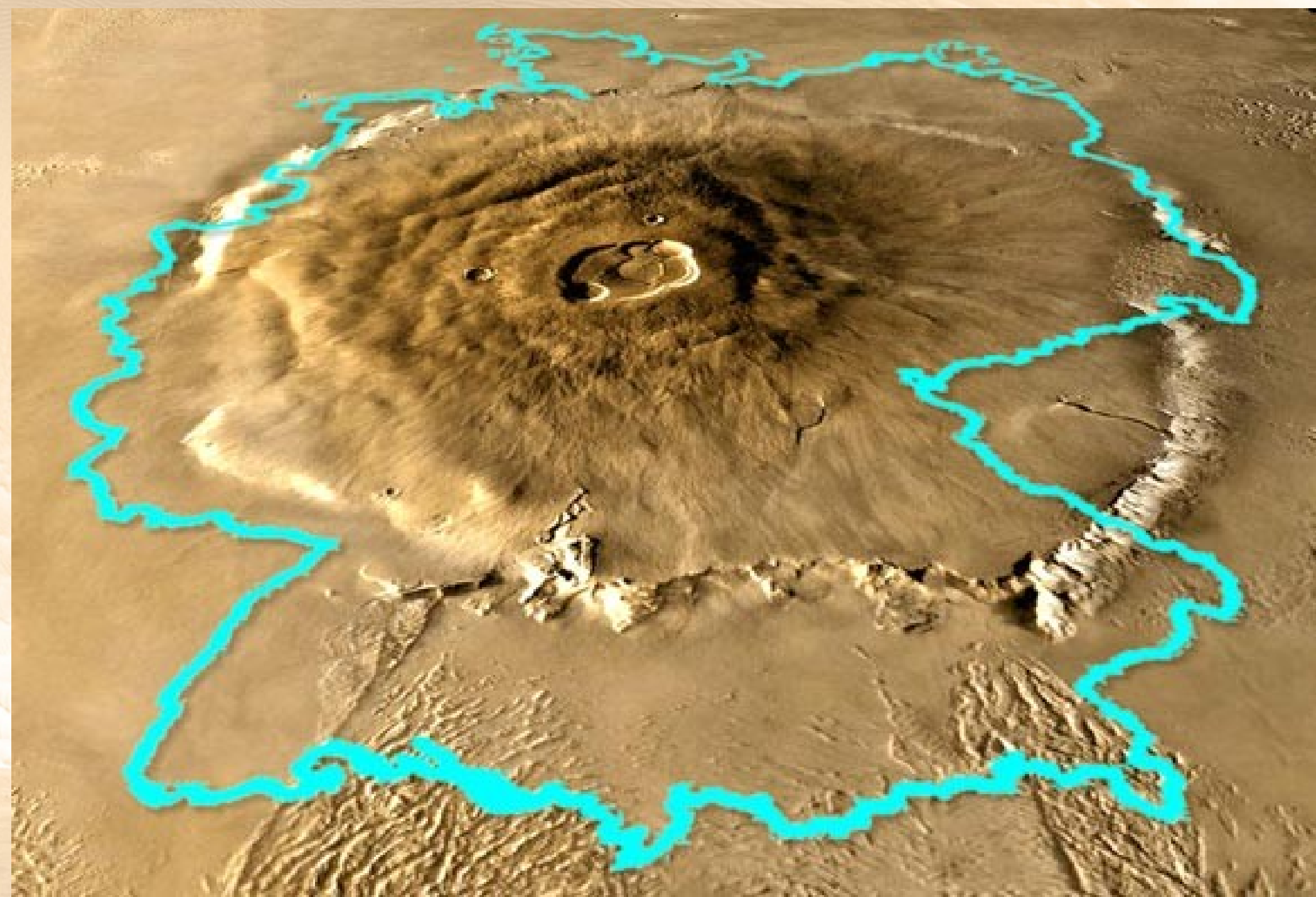
Our Planet Hunting Neighborhood

Sun →

Most of the planets
found to date lie
within about 300
light-years from
our Sun.





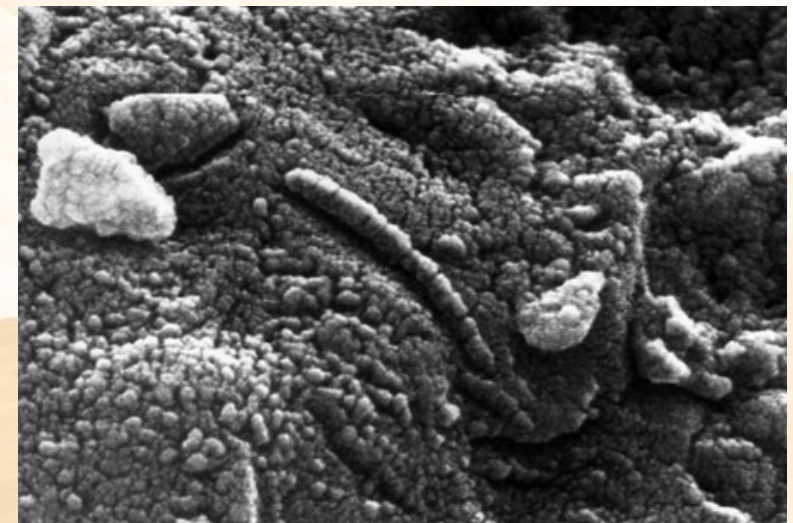


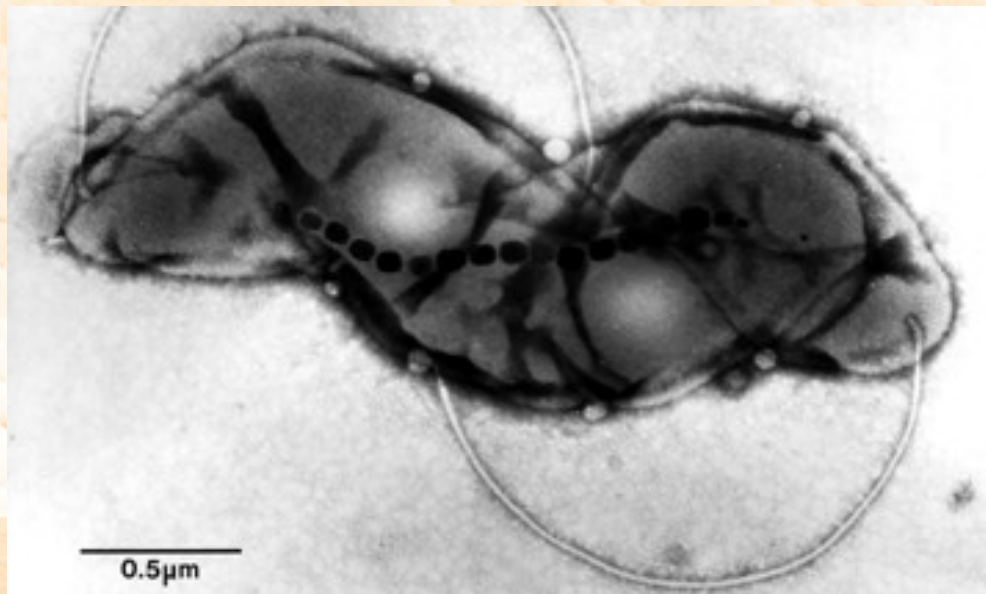
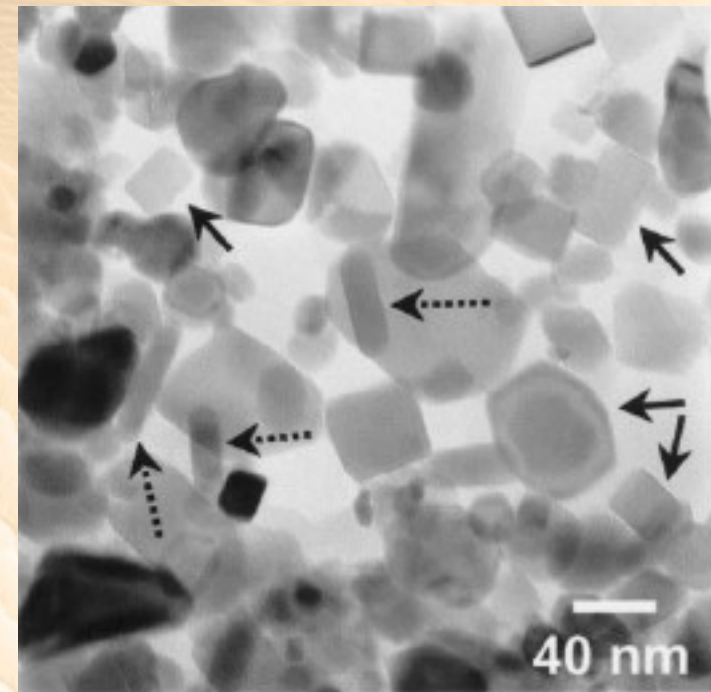
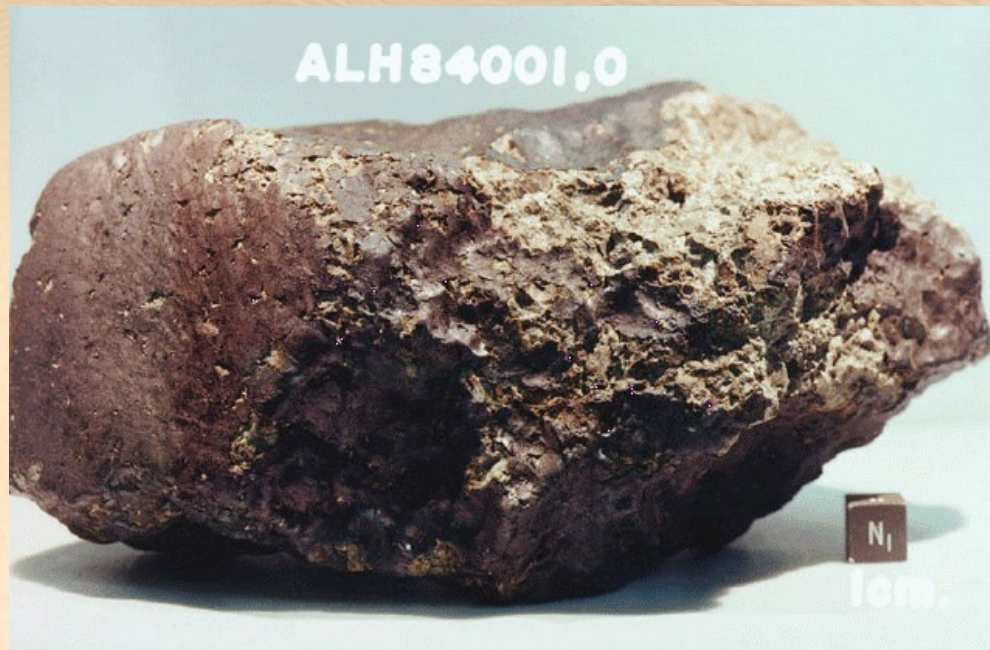


1984 wird bei Alan Hills in der Antarktis der Marsmeteorit ALH84001.0 gefunden.

Untersuchungen decken später Strukturen auf, die Signaturen von Leben ähneln.

Gab es früher Leben auf Mars?





Später werden im selben Meteoriten Magnetitkristalle entdeckt, wie sie auf der Erde nur durch Bakterien erzeugt werden. Hier richten sie die Bakterien nach dem Erdmagnetfeld aus.



Konsequenz:

Gyroradius größer als der des Planeten (Mars).

Verlustrate: $\sim 10^{25} \text{ s}^{-1}$ (Lundin et al 89).

Dies entspricht über 3.8 Gy mehreren 10% der irdischen Atmosphäre.

Mars Express misst Verlustprozesse und -raten.

Weltraumwetter (Sonnenwind, Störungen) spielt zentrale Rolle.



Venus ähnlich, aber Gyroradius kleiner.



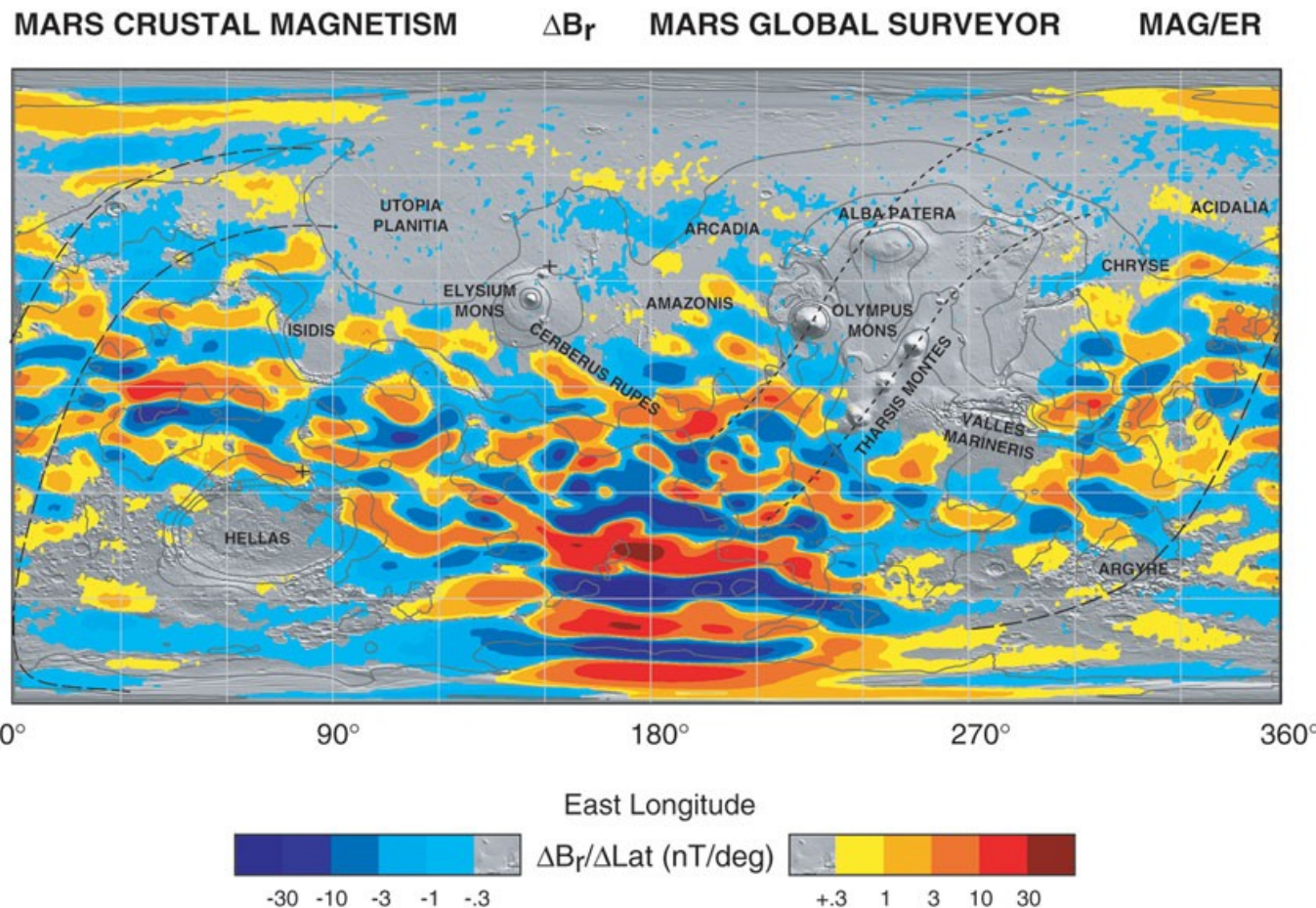


Mars – Ein Planet ohne globales B-Feld

Mars hat **heute** nur noch ein remanentes Krustenmagnetfeld. Dies deutet jedoch darauf hin, dass er **früher** einen aktiven Dynamo hatte.

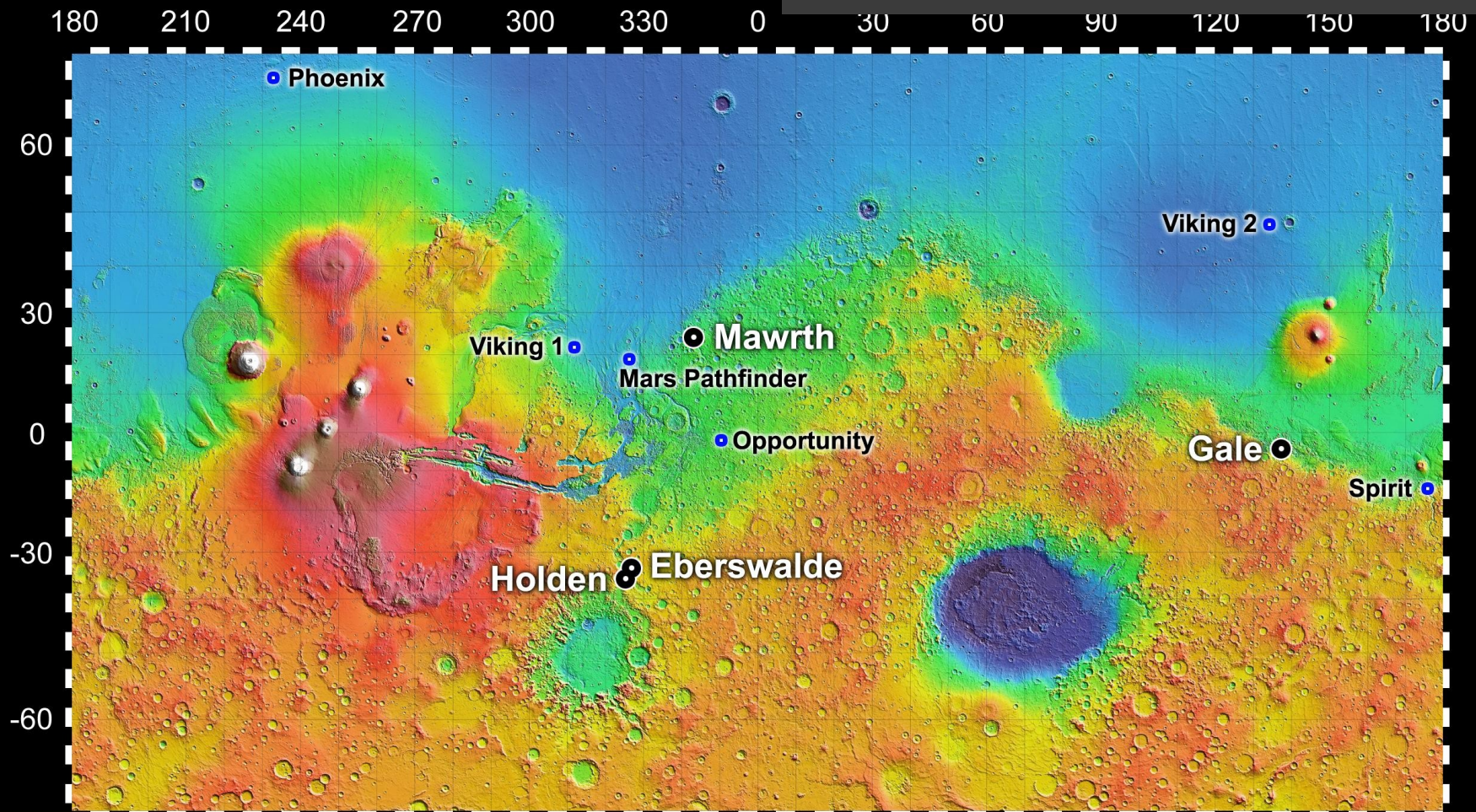


Der Verlust der globalen Magnetosphäre führte zum Verlust der Atmosphäre durch Wechselwirkung mit dem Sonnenwind.

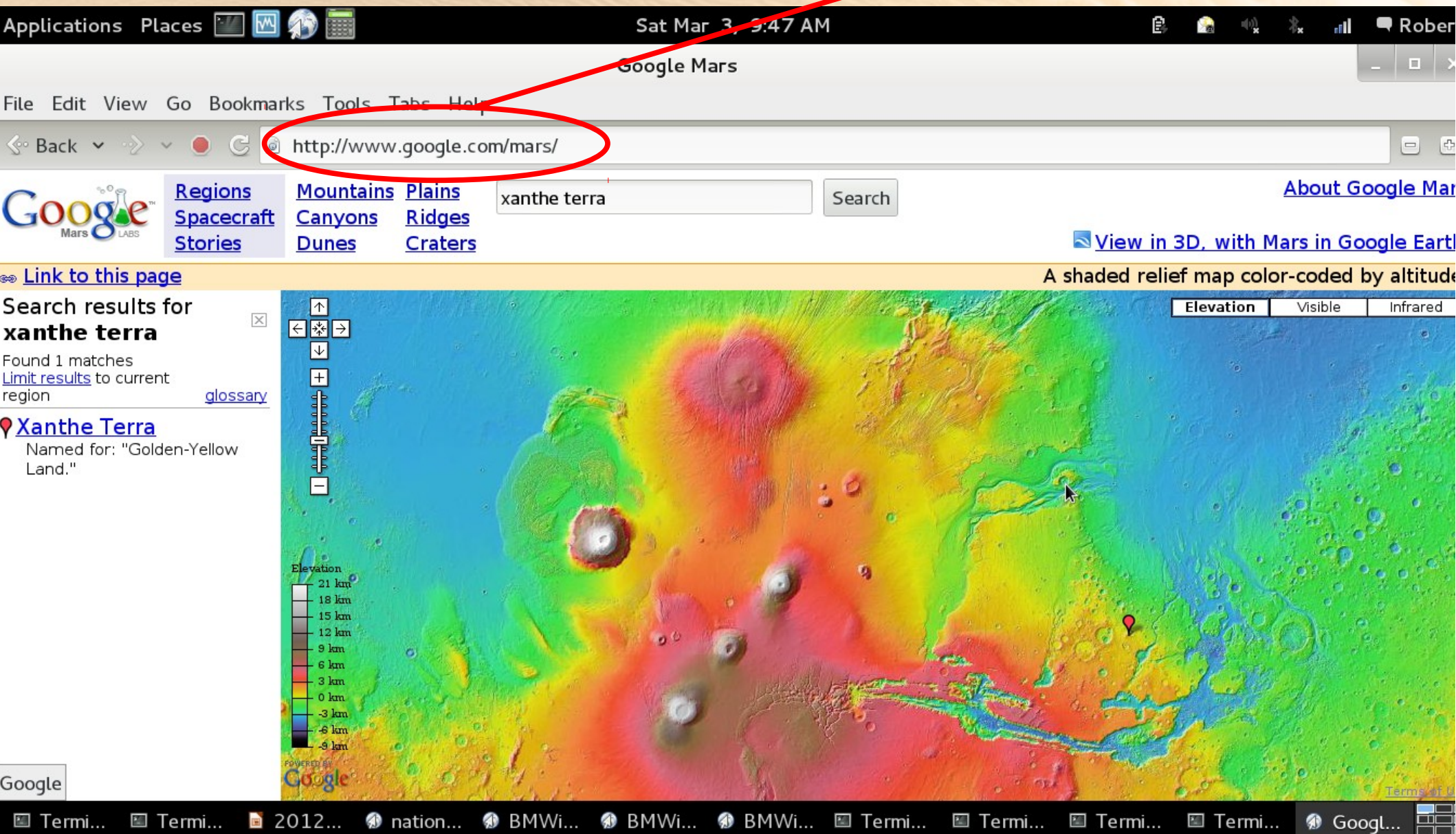


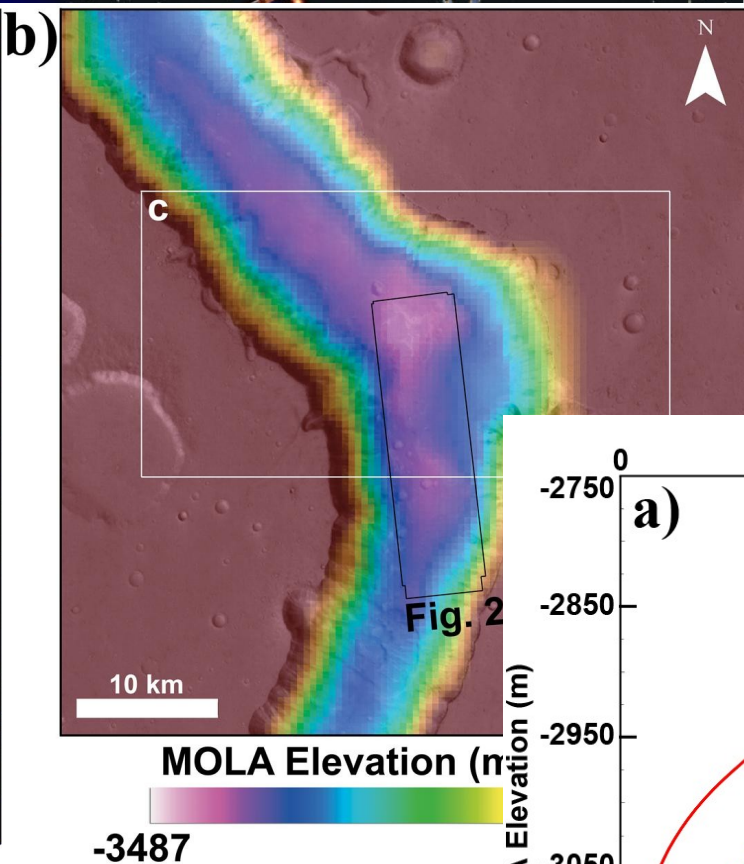
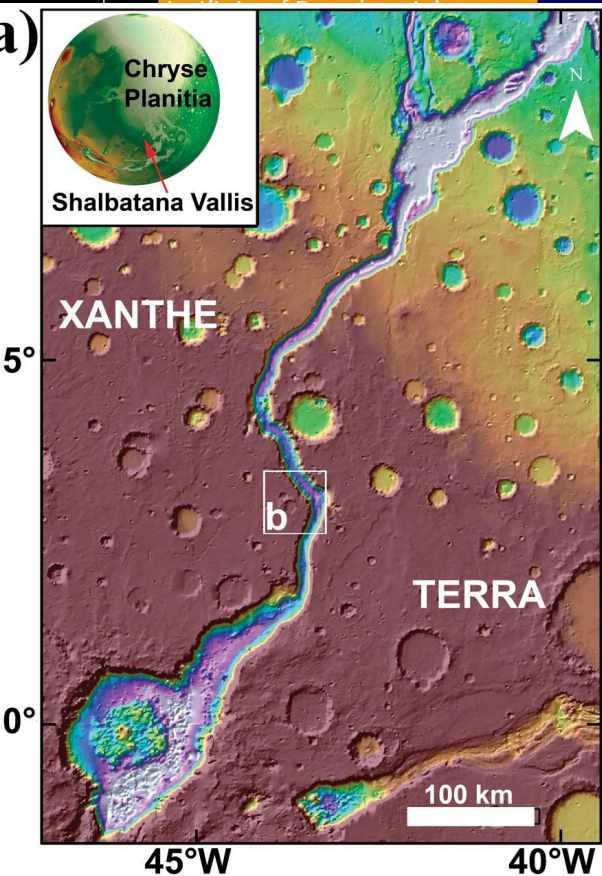
Mit der Abnahme der Atmosphäre
verschwand auch das Wasser.

Aber alles? Gibt es noch Wasser
auf dem Mars?

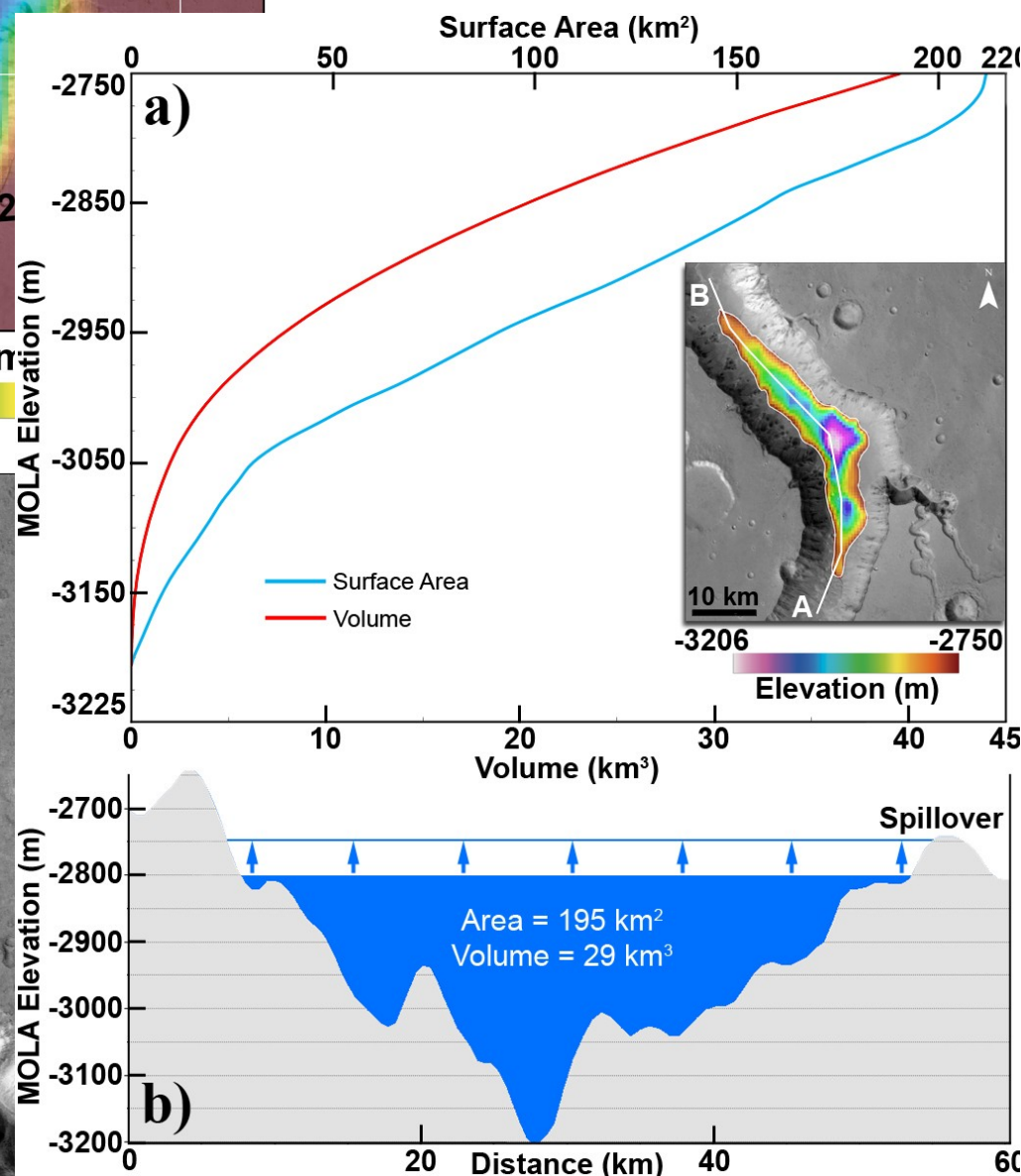
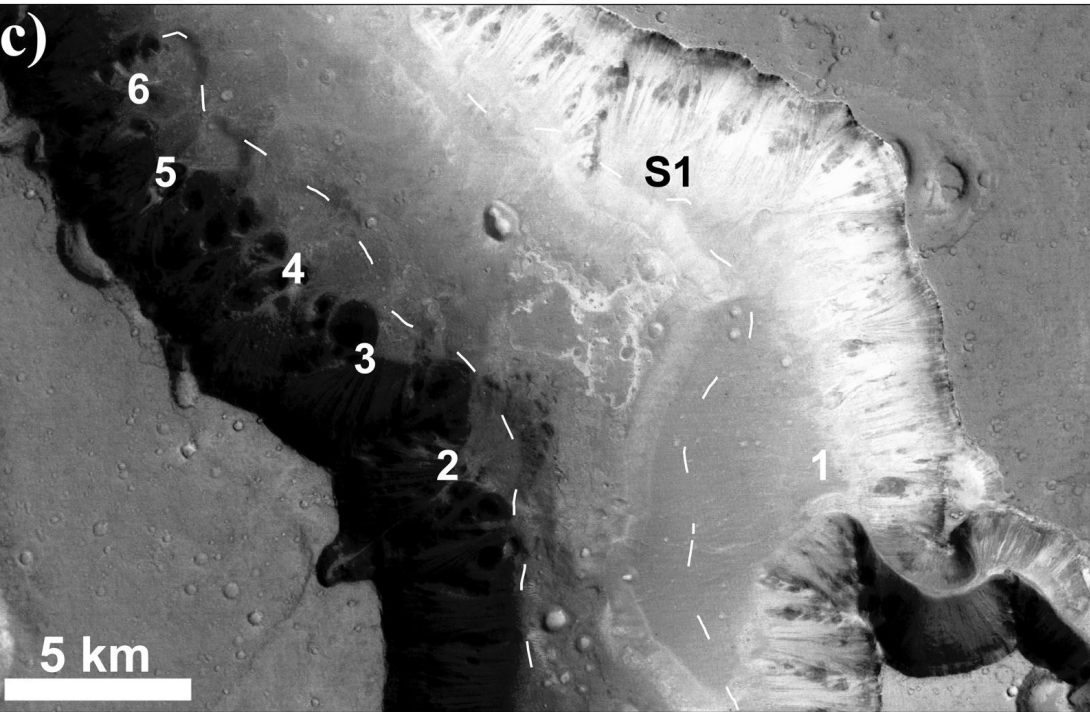


www.google.com/mars





Entdeckung von
Küstenlinien deuten
auf stehendes Wasser.

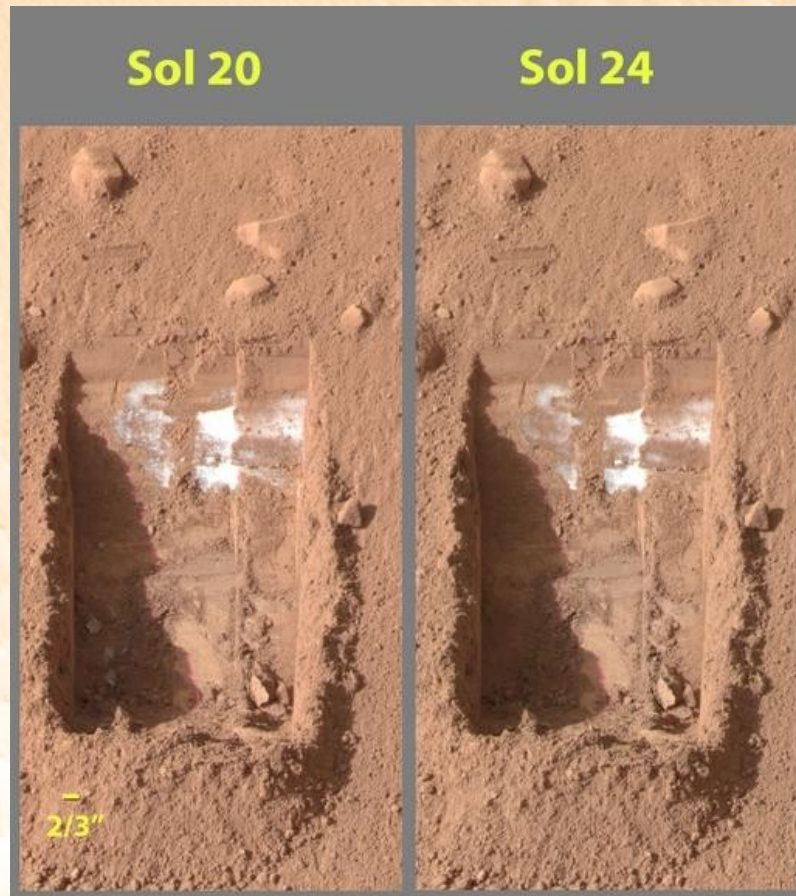








Phoenix hat (bei 68°Nord) Wassereis nur wenig
unter der Oberfläche gefunden - und am Marsmorgen
kondensierendes Wassereis (Frost).

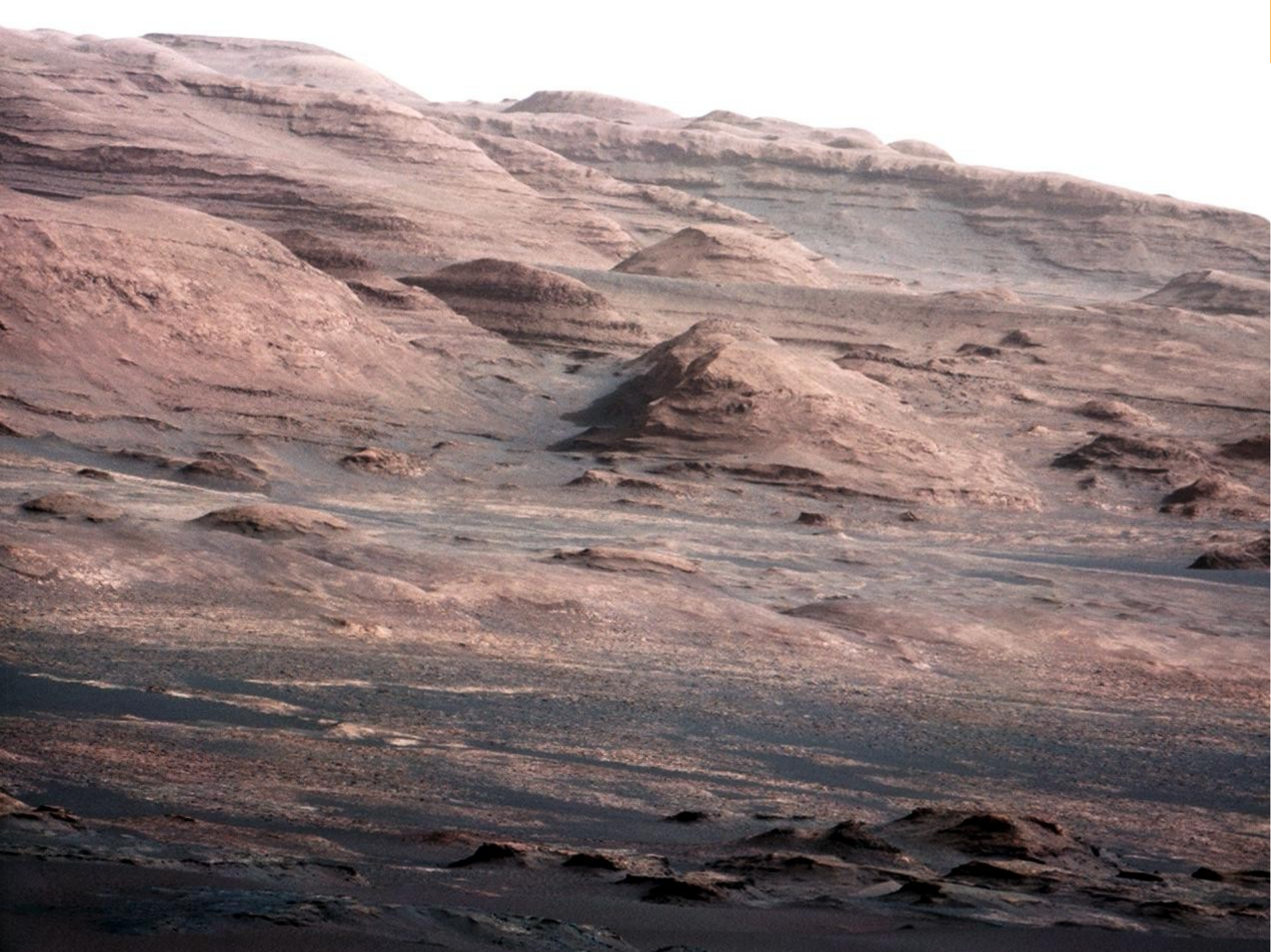


Wind Telltale

00:53 AM

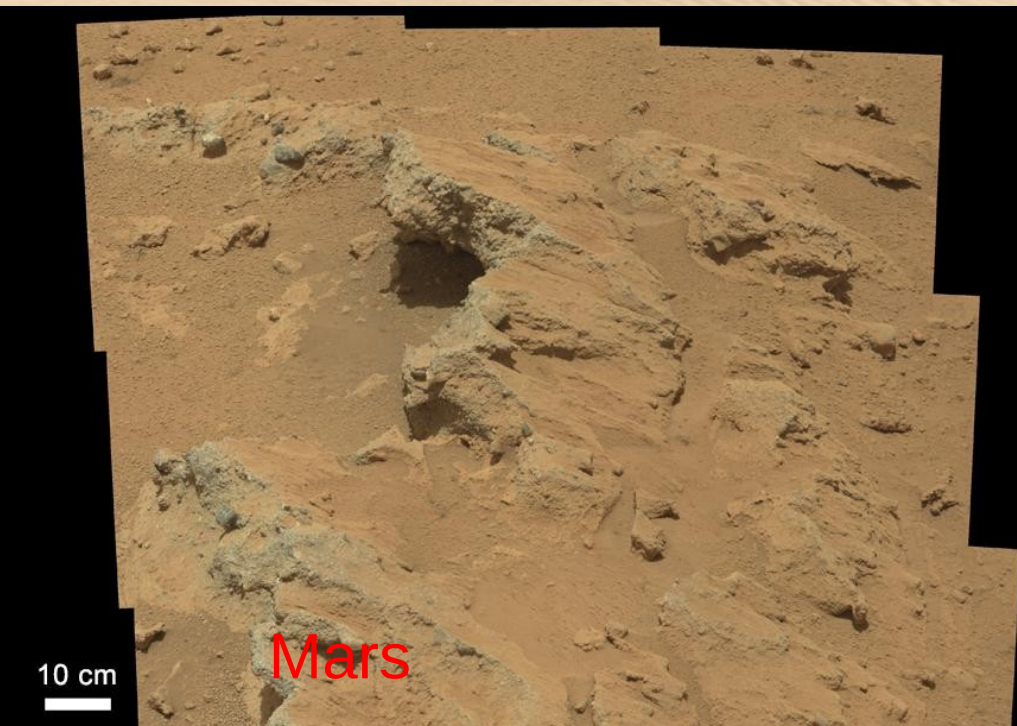
LTST







Curiosity in Überresten eines Flussbettes!



Mars



Mars



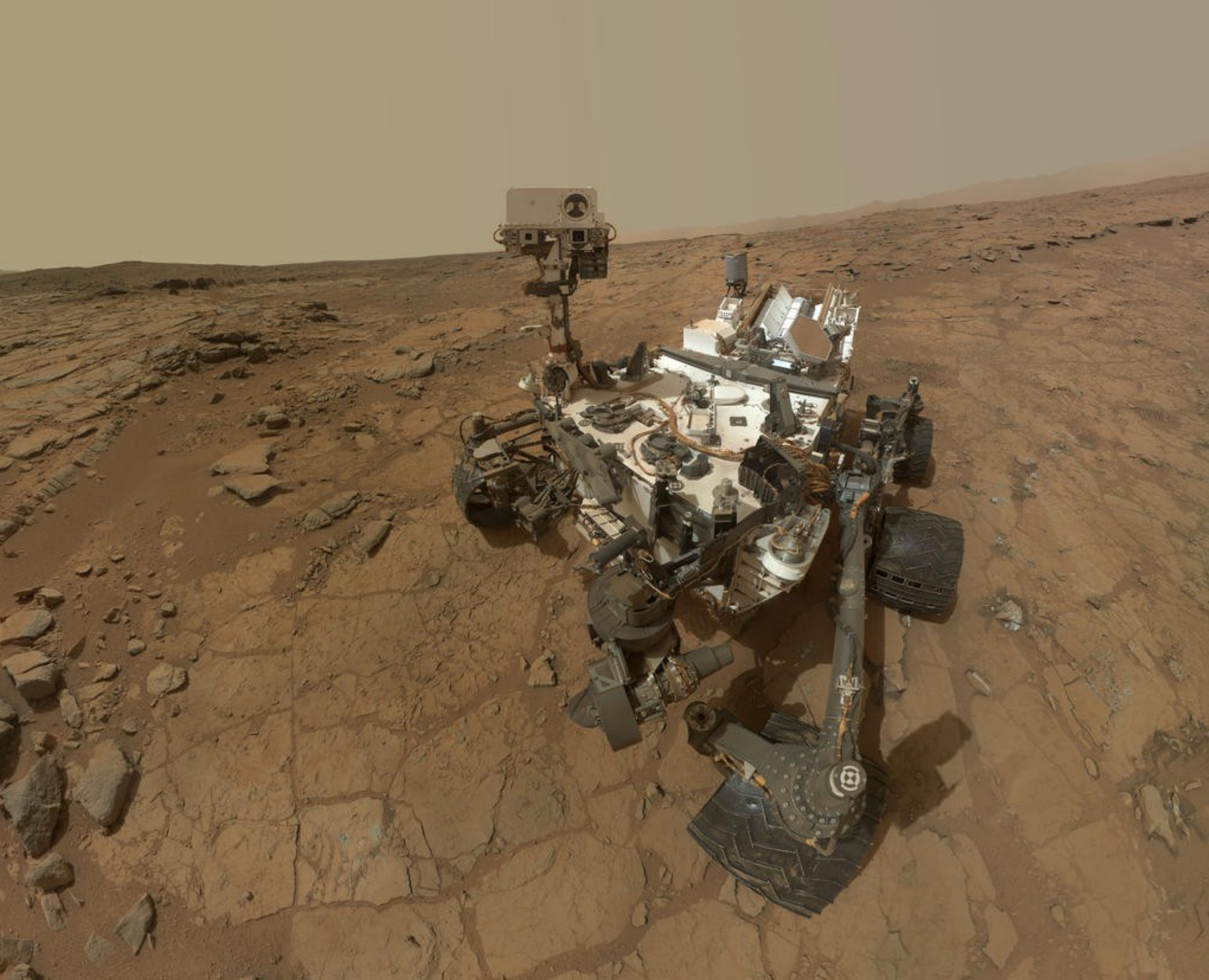
Mars



Erde



Erde







Zusammenfassung:

- 1.) Sonne und Erde – Aktivität und Weltraumwetter
 - Das irdische Magnetfeld wirkt als Schutzschild
- 2.) Das solare Magnetfeld und seine Folgen
 - Dynamo erzeugt solares (und irdisches) Magnetfeld
 - Erzeugt den Sonnenwind
- 3.) Bildung und Grenzen der Heliosphäre
 - Galaktische Wanderung des Sonnensystems – Klima?
- 4.) Der magnetische Schutz kann auch zu Ende gehen – Was Mars uns zu sagen hat
 - Implikationen für Leben im Sonnensystem

Dank:

Mitarbeiterinnen und Mitarbeiter des IEAP
und

Supported by:



Federal Ministry
of Economics
and Technology

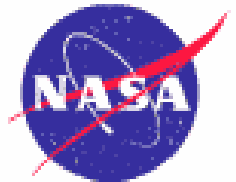
on the basis of a decision
by the German Bundestag



Christian-Albrechts-Universität zu Kiel



esa

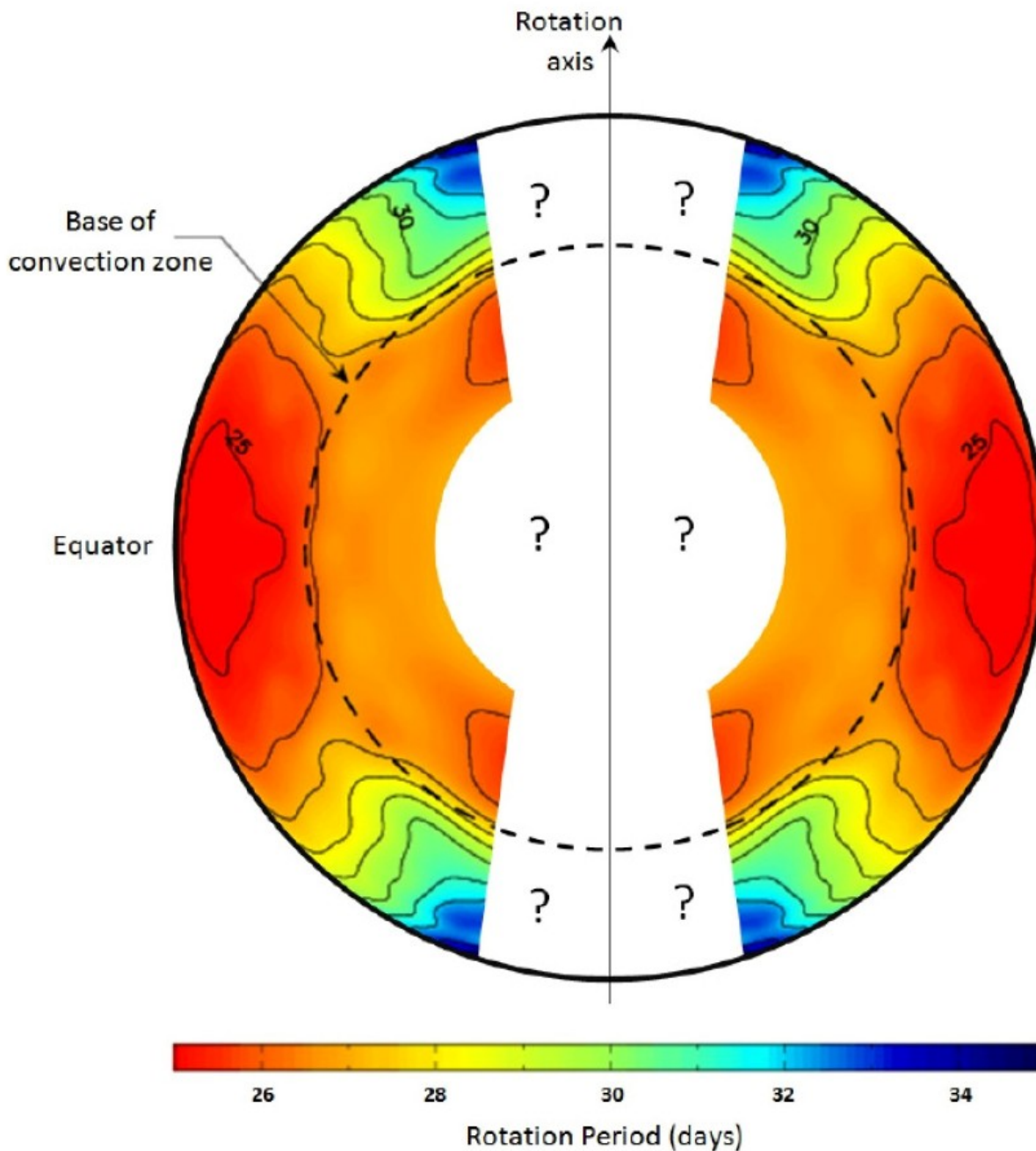




Backup Slides



Die Sonne rotiert differentiell

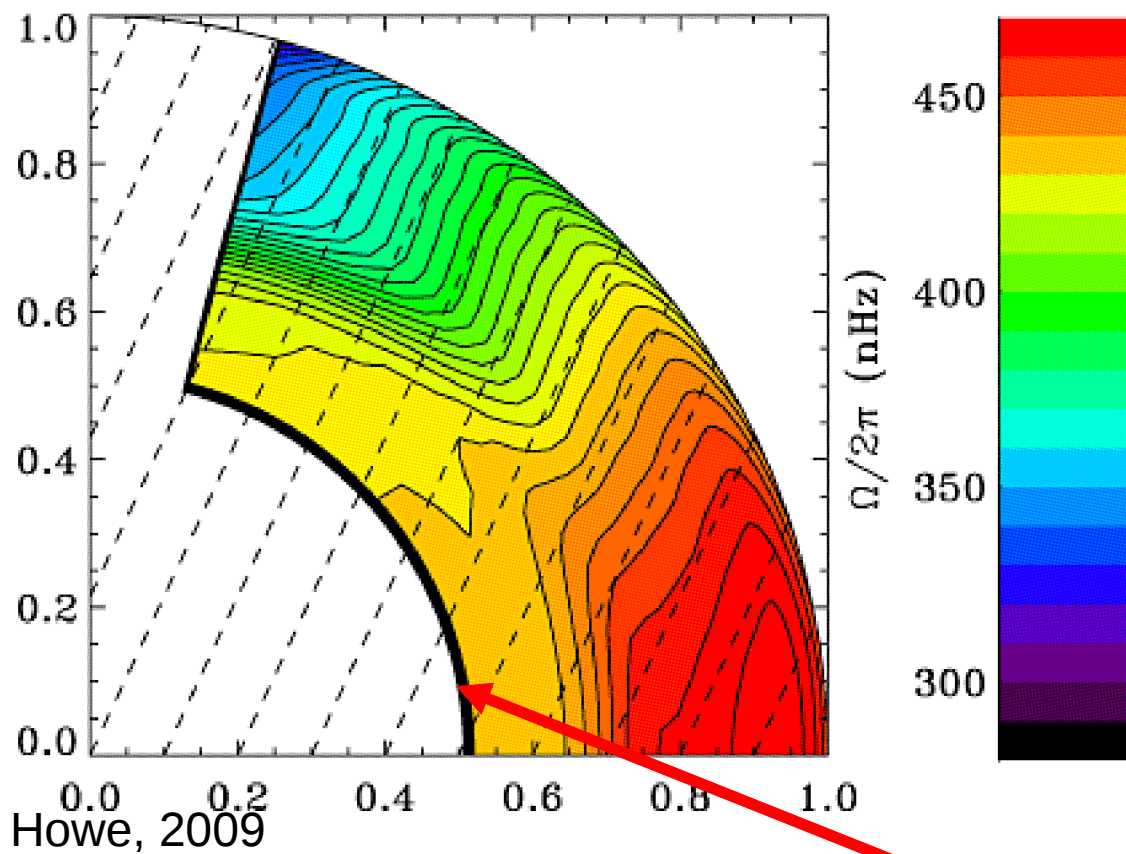


Eine wesentliche Schwierigkeit liegt darin, dass wir die polaren Regionen der Sonne nicht beobachten können.

Dort muss sich die meridionale Zirkulation irgendwie schließen.

Wir wissen aber nicht einmal, wie viele Zirkulationszellen es dort gibt!

Wir brauchen polare Beobachtungen!

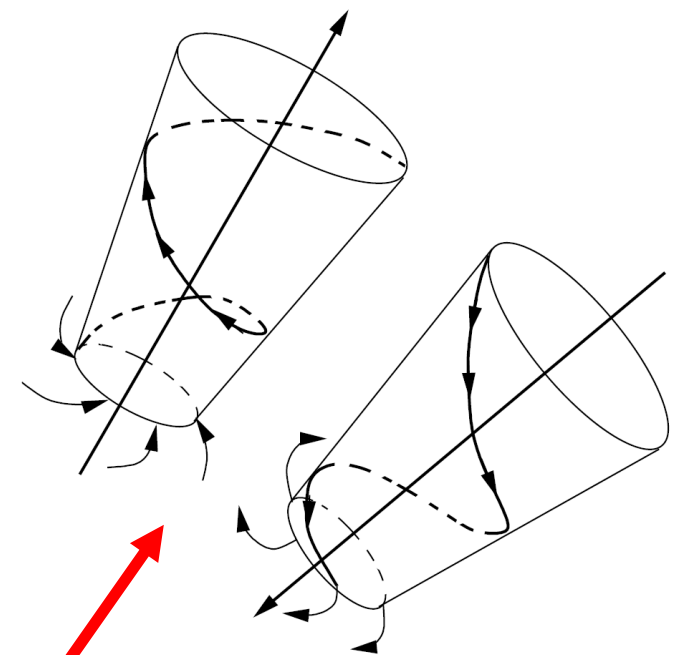


Because of the Coriolis force
we can close the loop:

$$B_p \xrightarrow{\text{diff. rot.}} B_t \xrightarrow{\alpha\text{-effect}} B_p$$

and generate a magnetic field
with differential rotation and the
 α -effect.

tachocline



This is
where the
 α -effect acts.

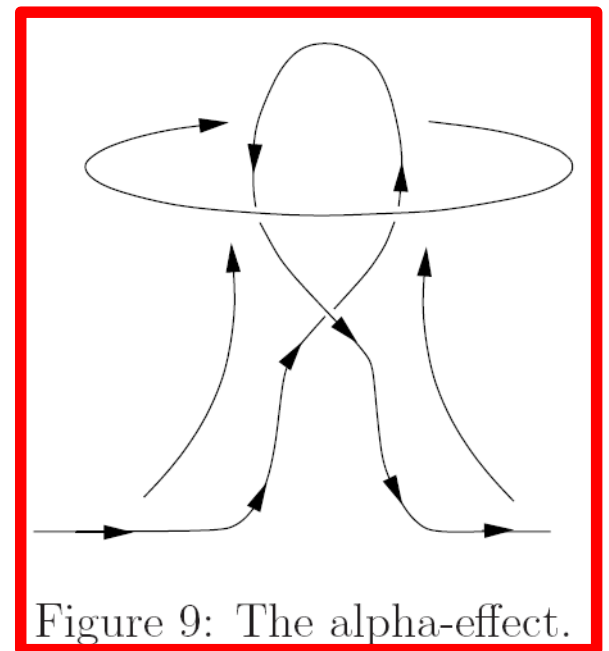


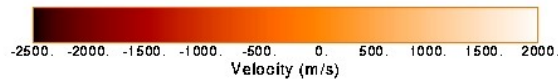
Figure 9: The alpha-effect.



Helioseismologie erlaubt einen tiefen Einblick ins Sonneninnere

Single Dopplergram

(30-MAR-96 19:54:00)

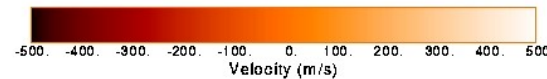


SOI / MDI

Stanford Lockheed Institute for Space Research

Single Dopplergram Minus 45 Images Average

(30-MAR-96 19:54:00)

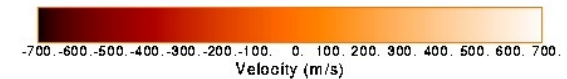


SOI / MDI

Stanford Lockheed Institute for Space Research

Average Dopplergram Minus Polynomial Fit

45 images averaged (30-Mar-96 19:26 to 30-Mar-96 20:17)

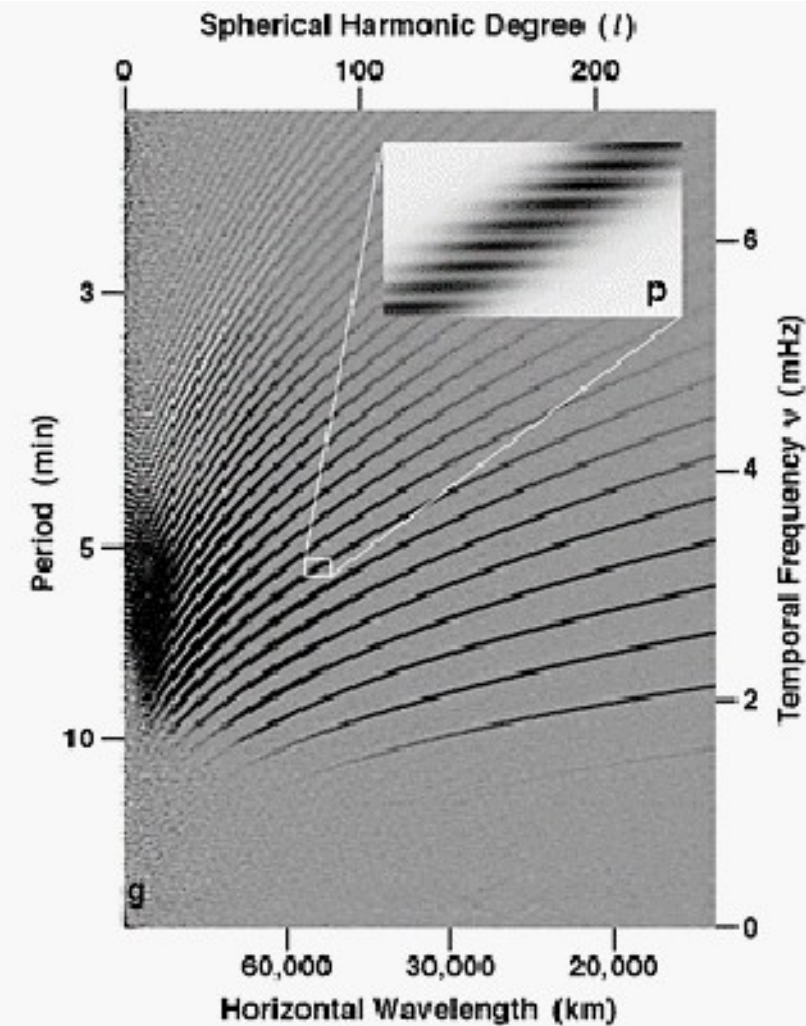
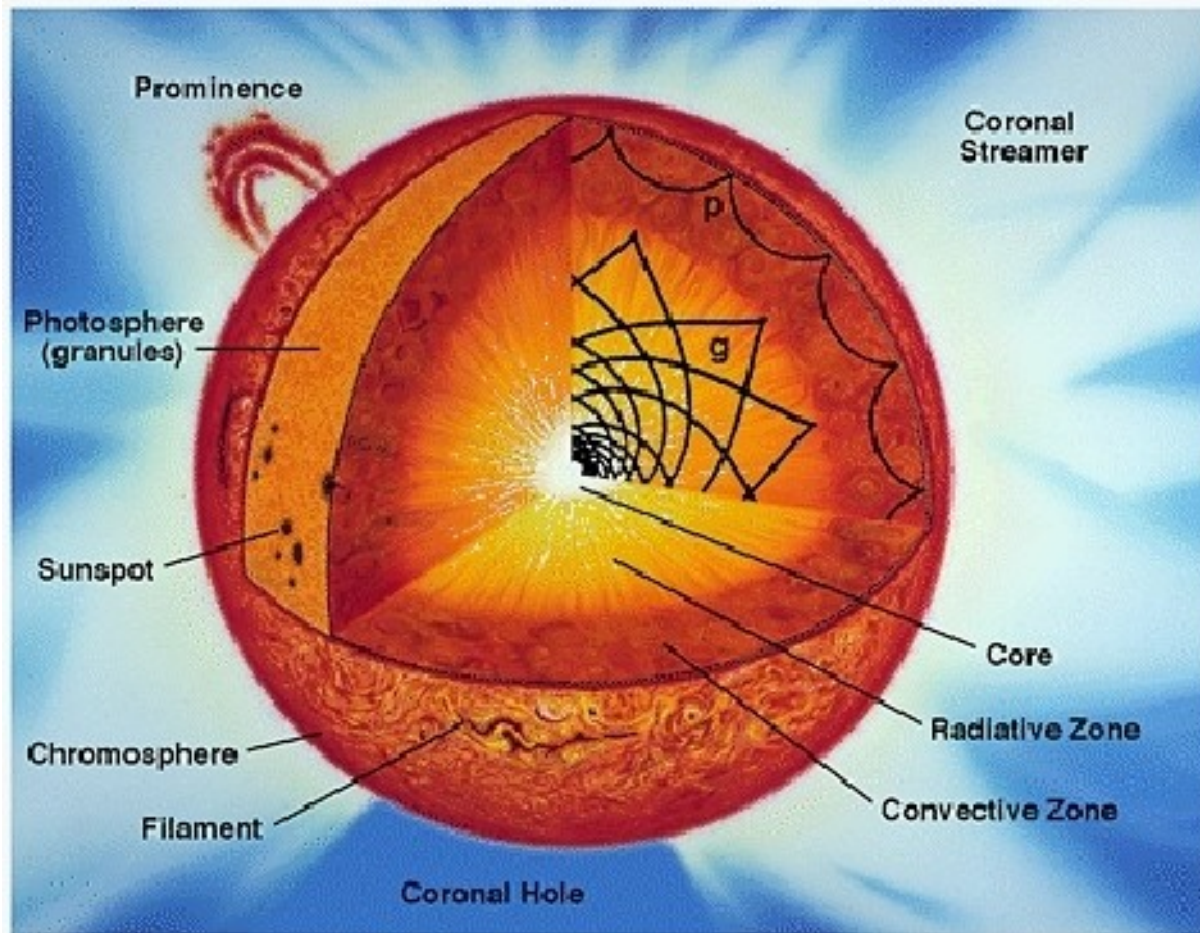


SOI / MDI

Stanford Lockheed Institute for Space Research

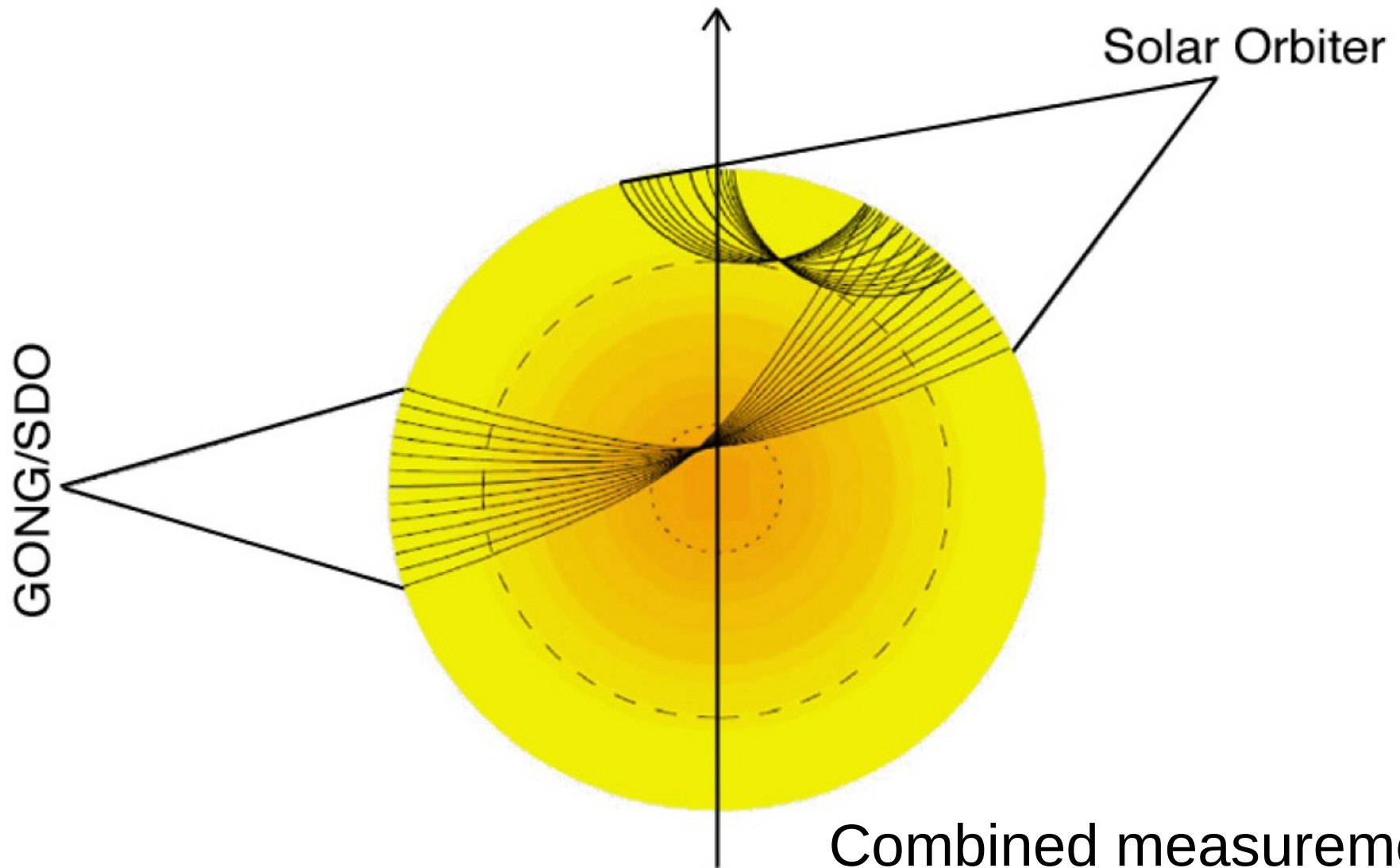


Helioseismologie erlaubt einen tiefen Einblick ins Sonneninnere





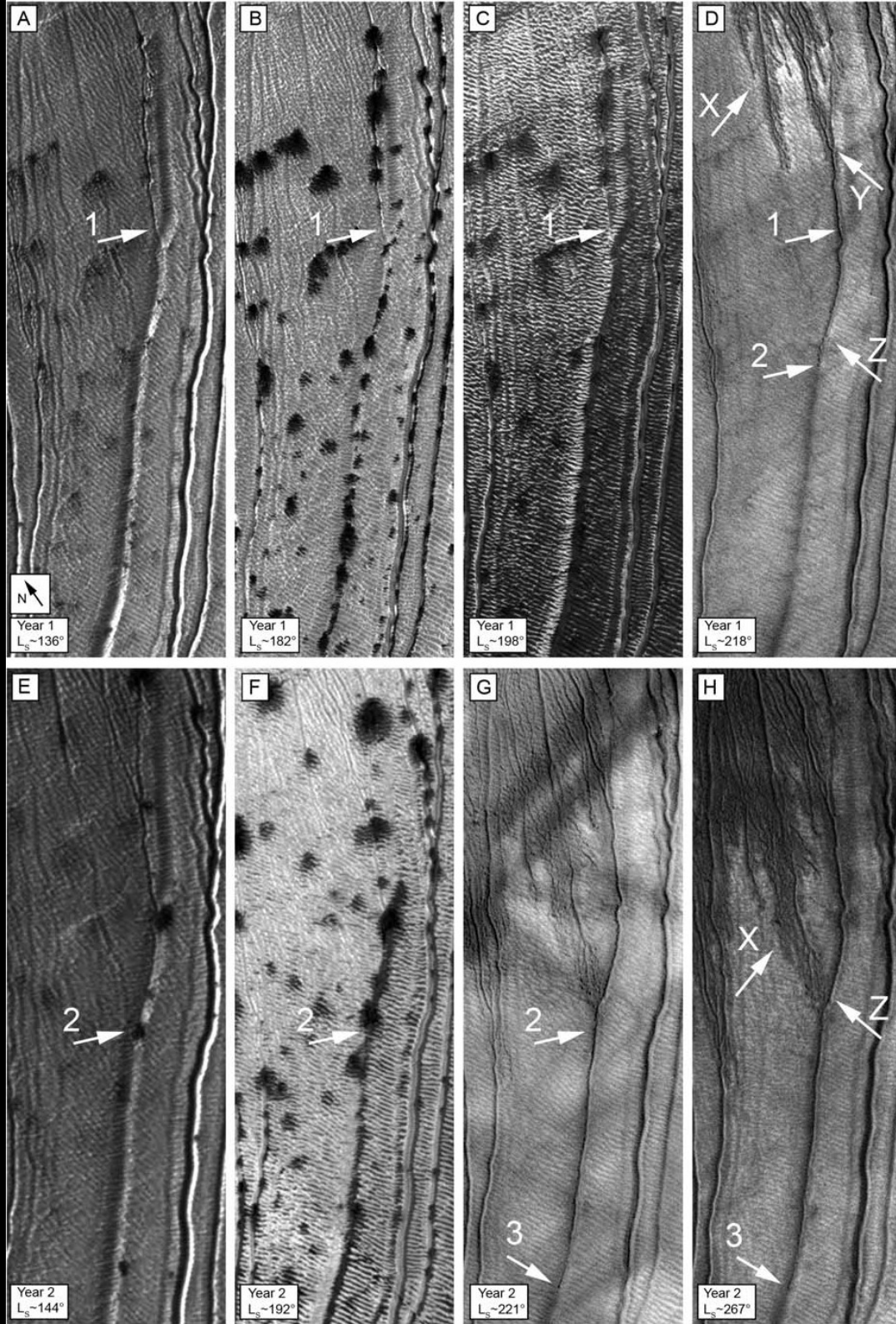
Moreover,...

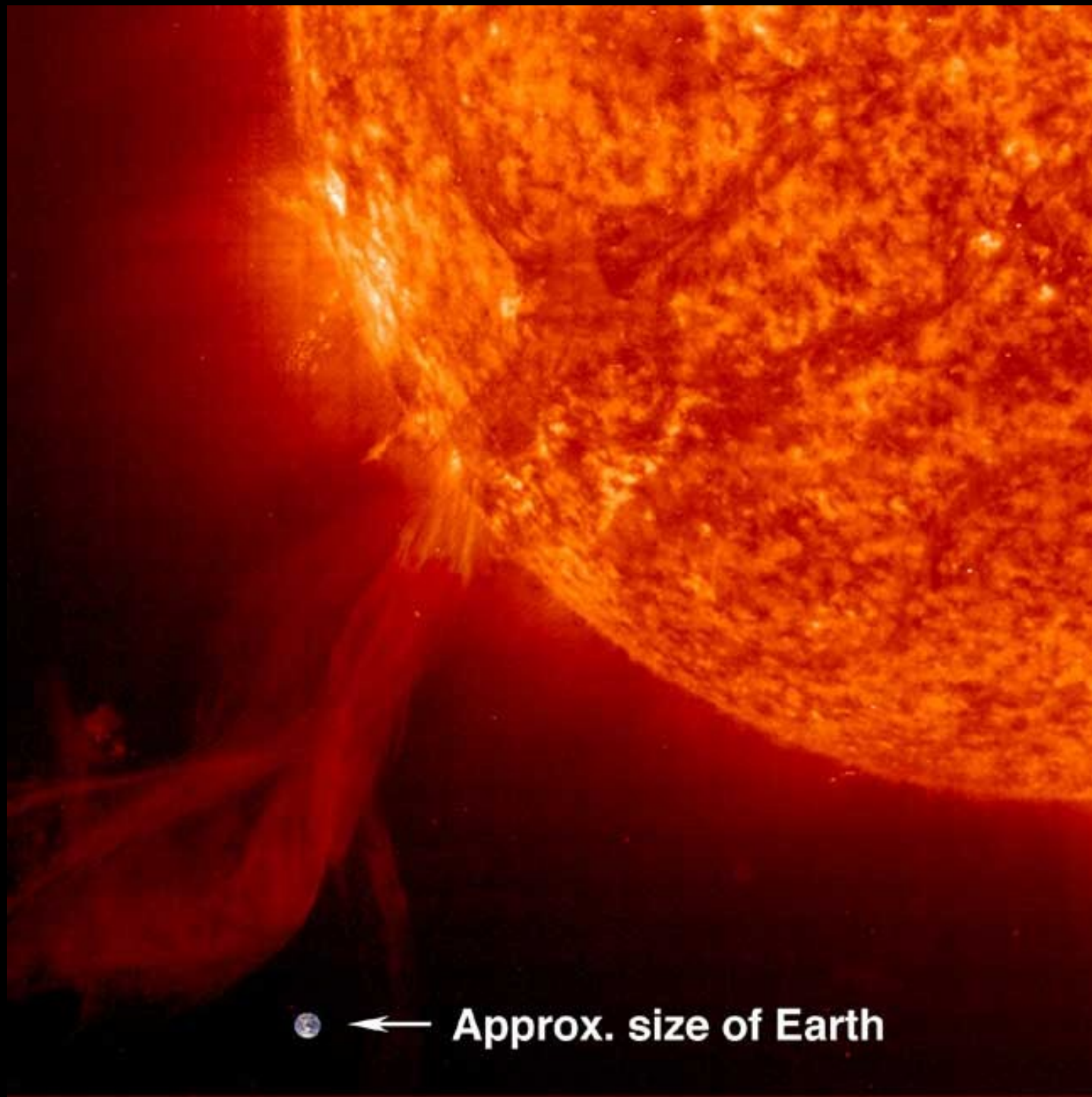


Combined measurements
will be able to observe
the solar core!



© Weldon Owen PTY Ltd / image by Mark A. Garlick

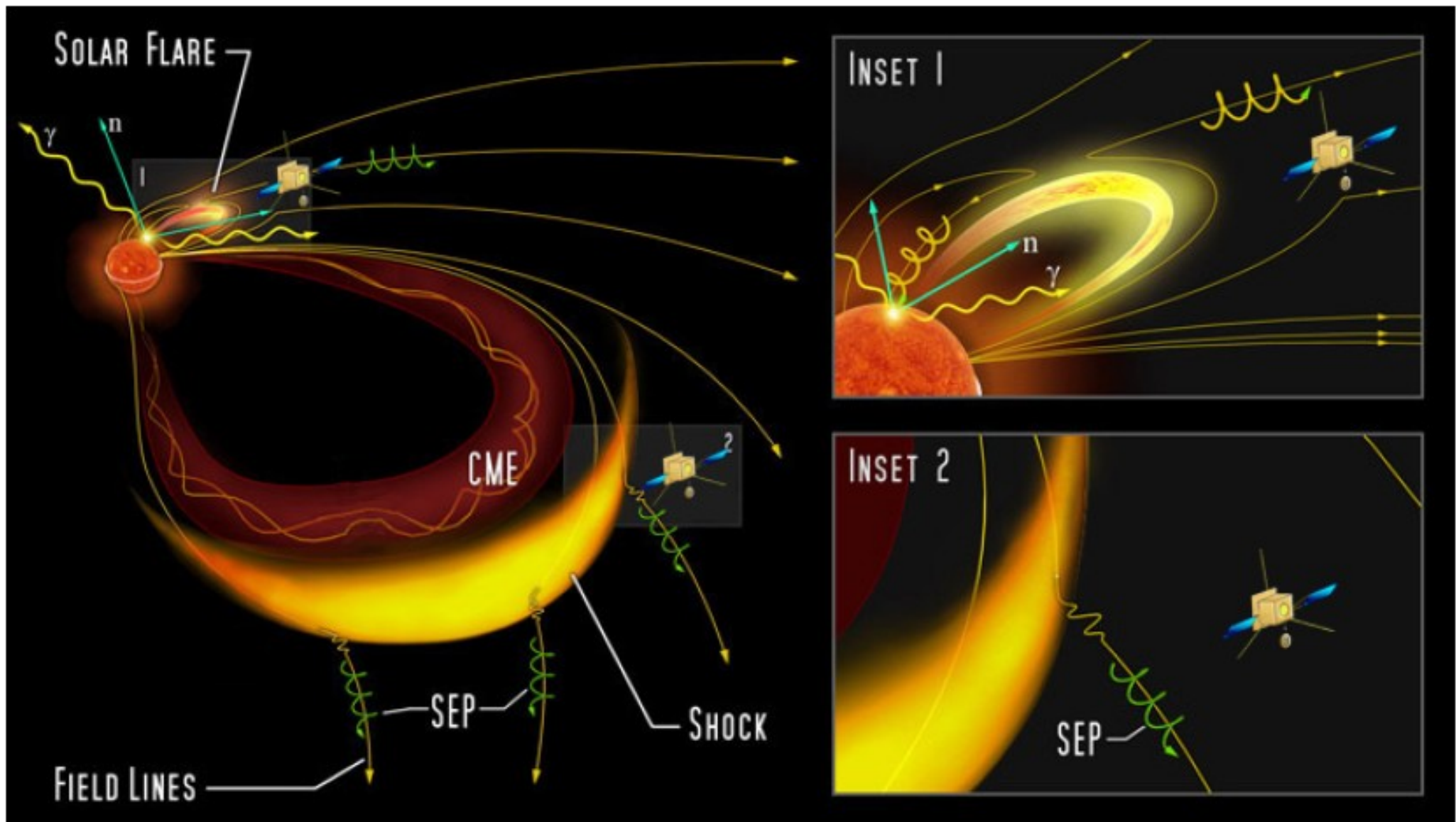


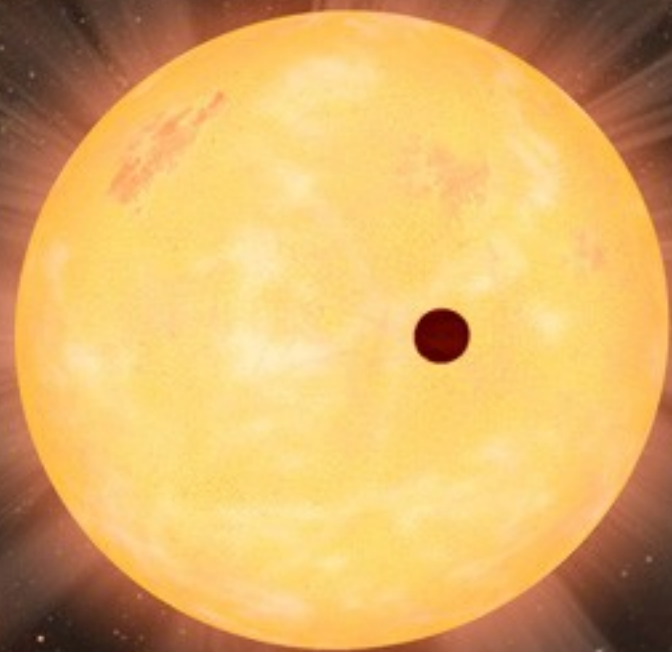
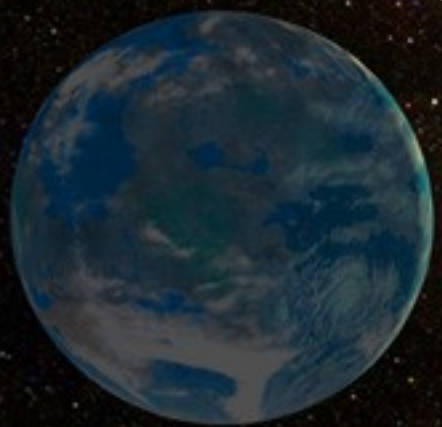


← Approx. size of Earth



Some science objectives require coordinated in-situ measurements only. Some need both in-situ and remote-sensing.

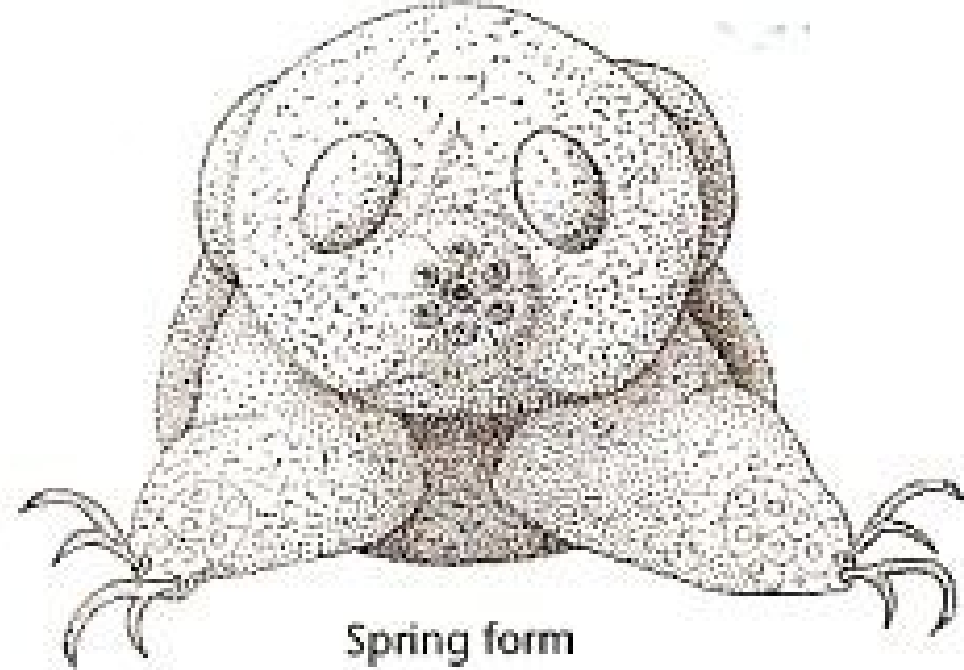






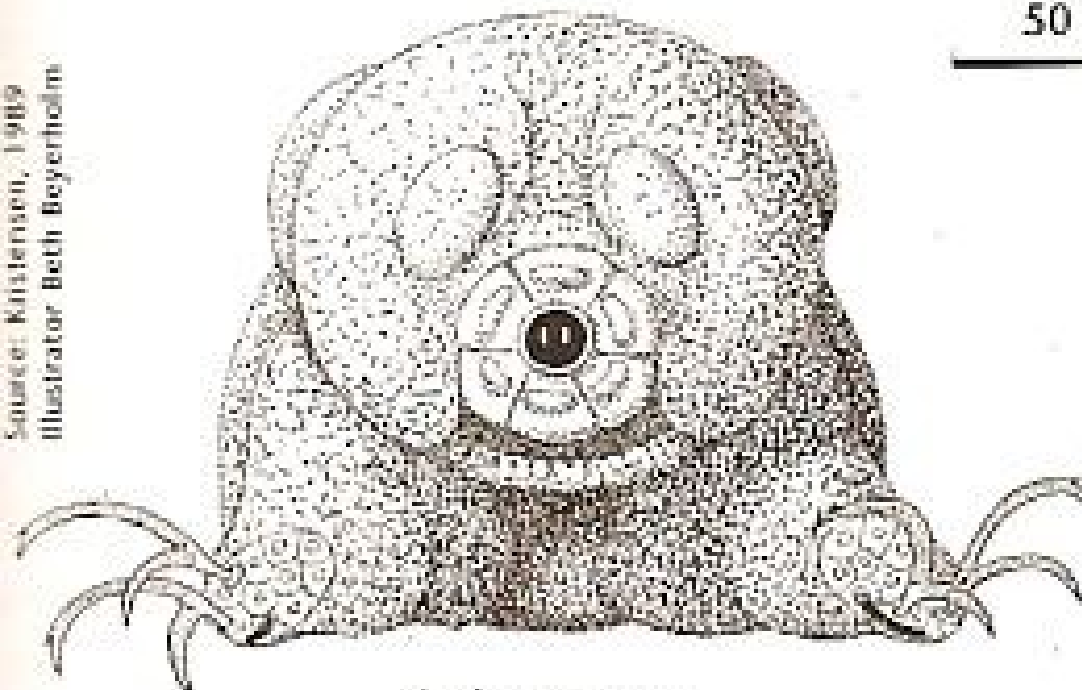


Cold resistant autumn
and winter form

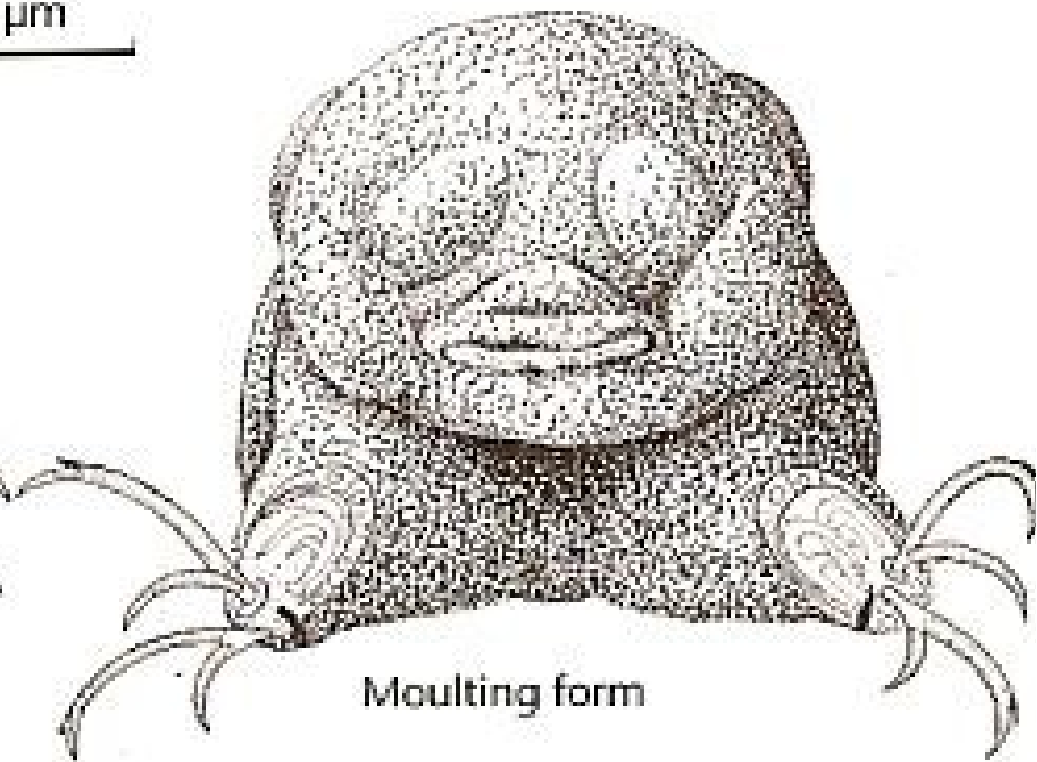


Spring form

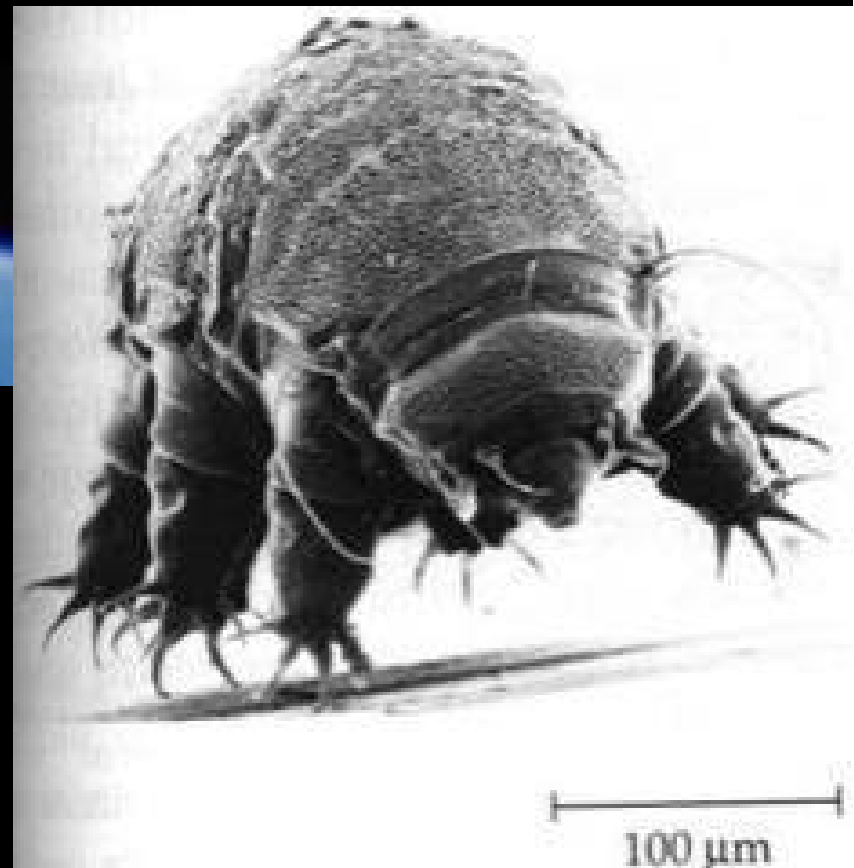
50 μ m



Active, mature
summer form



Moulting form

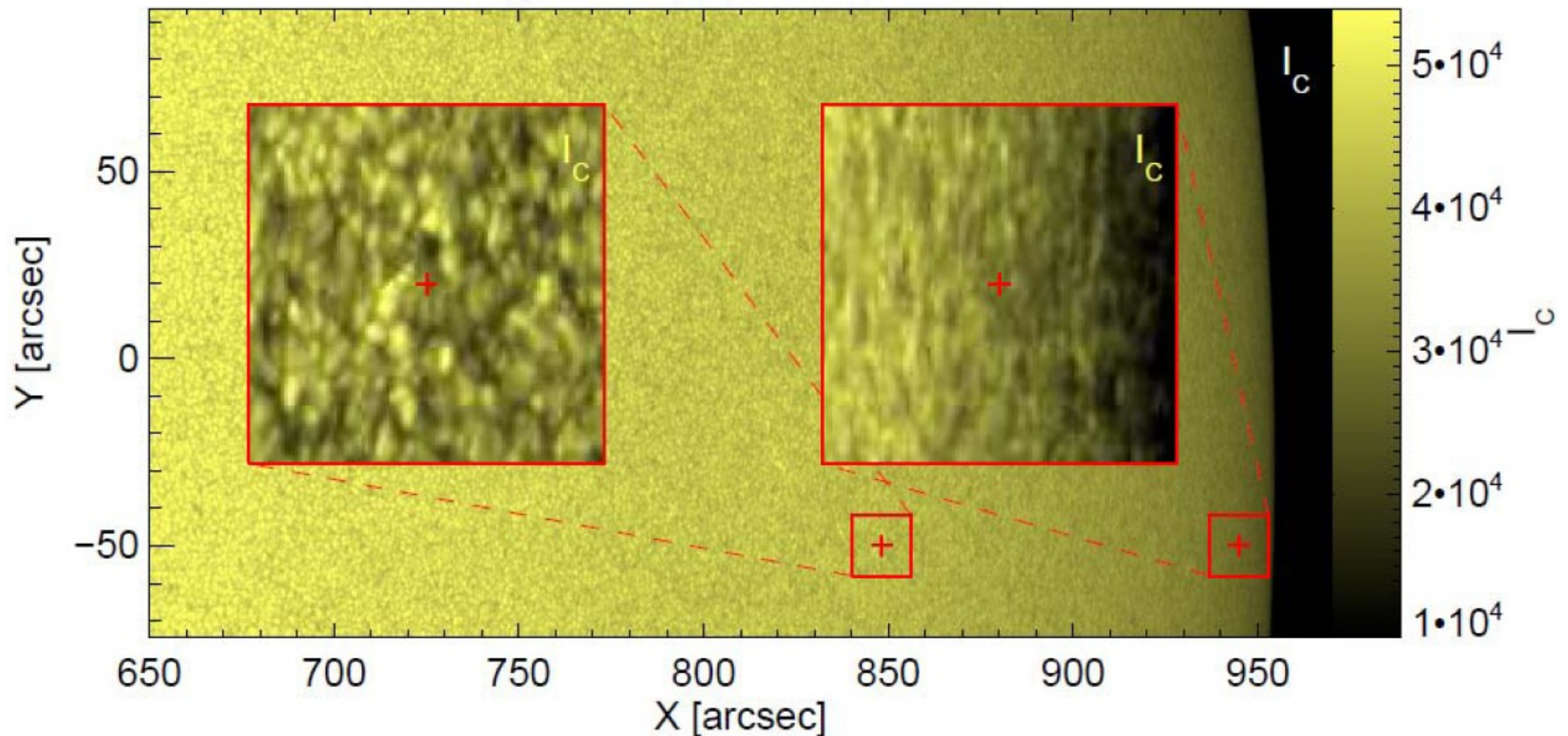




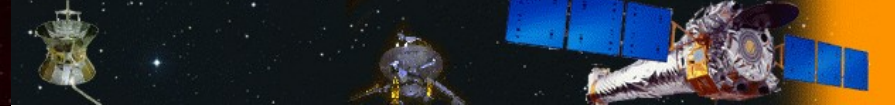
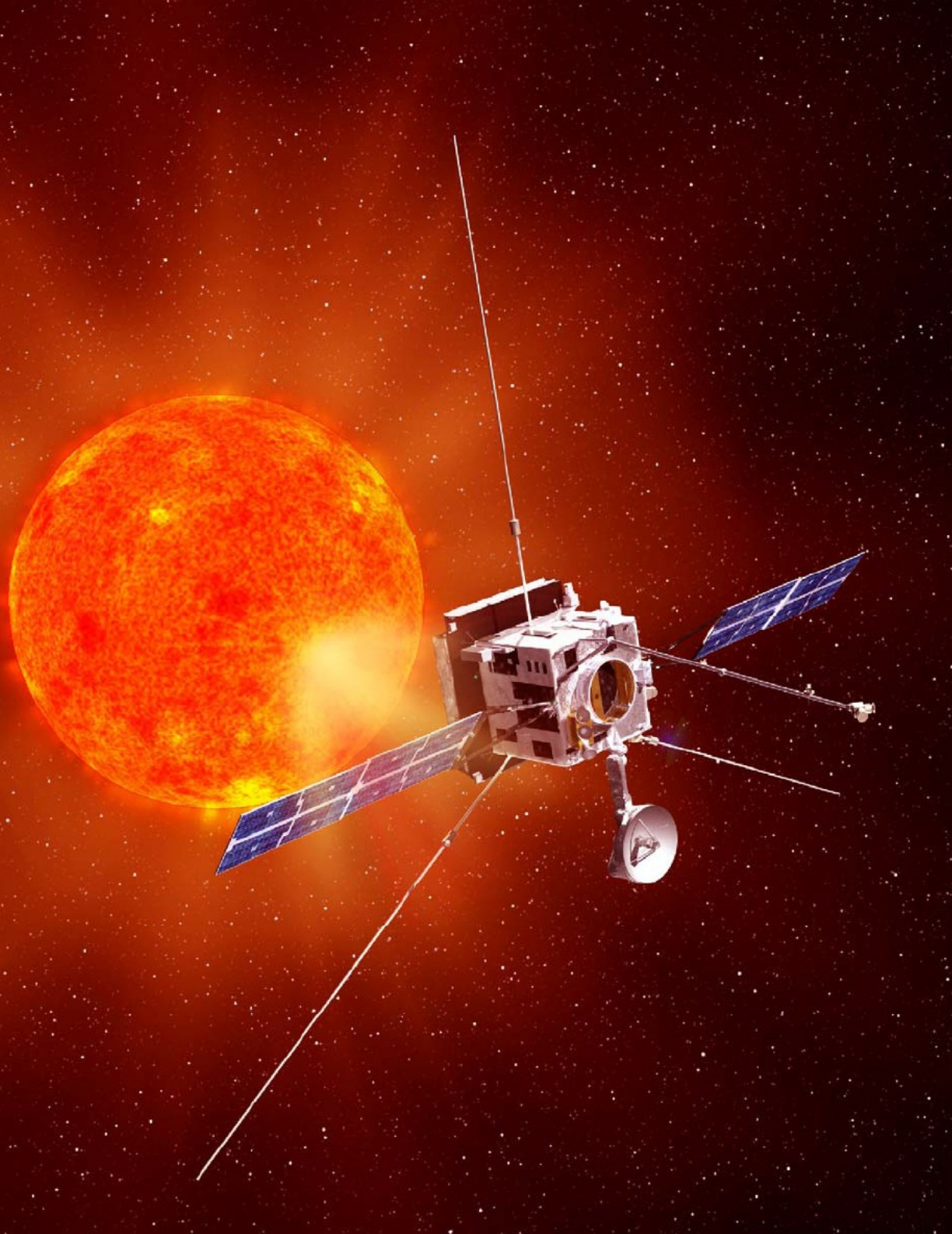


Beobachtungen von 20°
wären eine große Hilfe!

Angle from Limb: 27° vs. 7°



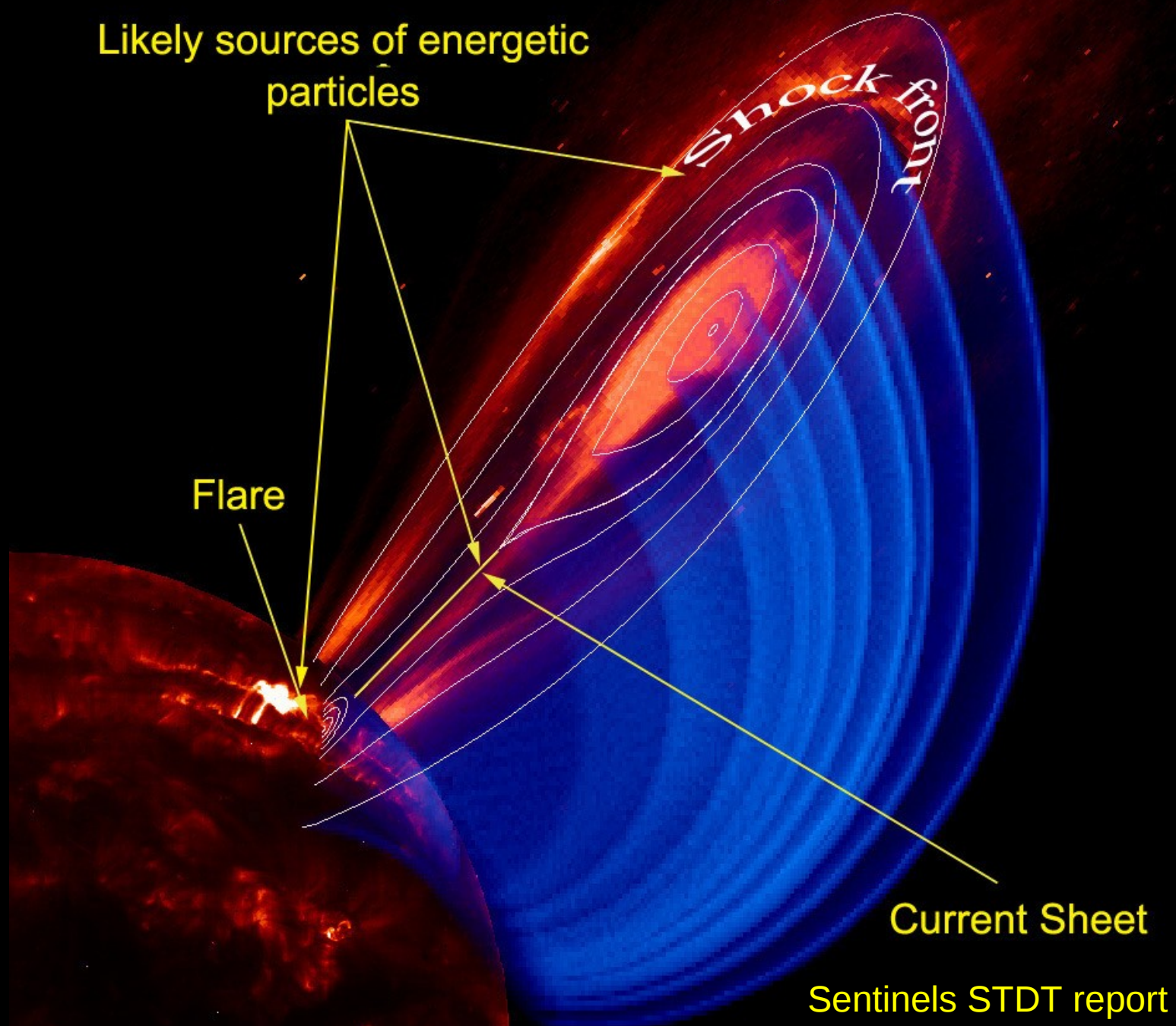
Die Neigung der solaren
Drehachse beträgt lediglich
 7° gegenüber der Ekliptik₇

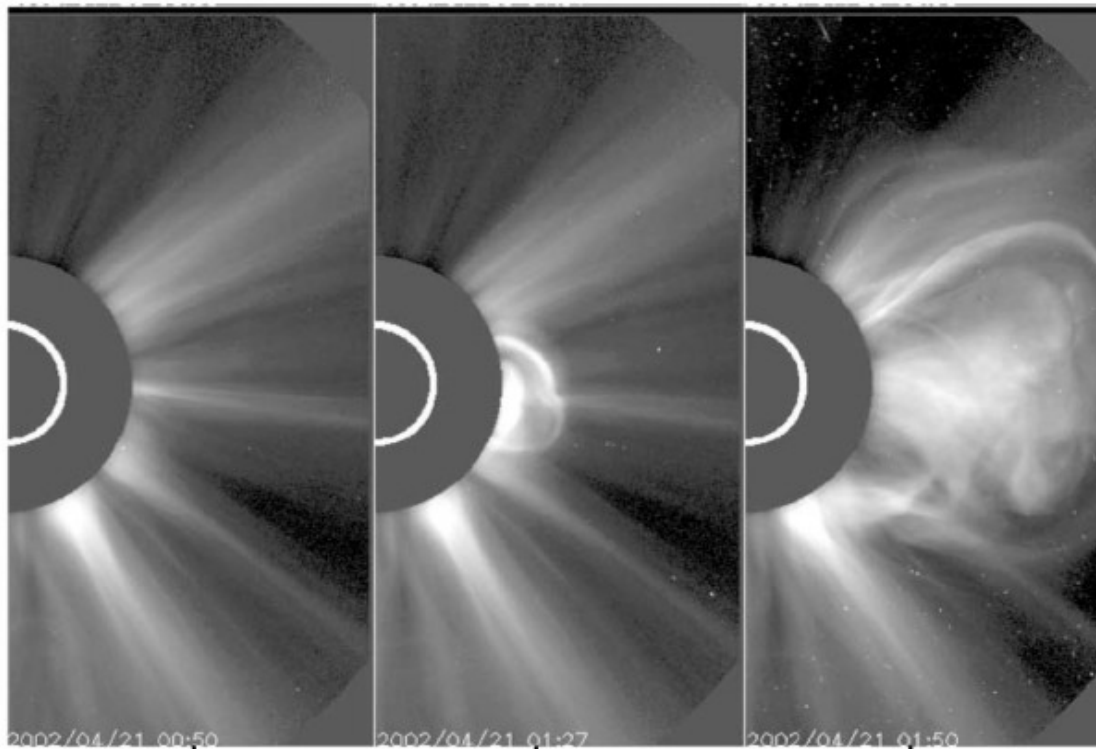


Solar Orbiter - Exploring the Sun-Earth Connections

Wie erzeugt die Sonne die
Heliosphäre und wie
kontrolliert sie sie?

Auswahl: Oktober 2011
Aktuell: PDR
Abgabe: Januar 2015
Start: Januar 2017

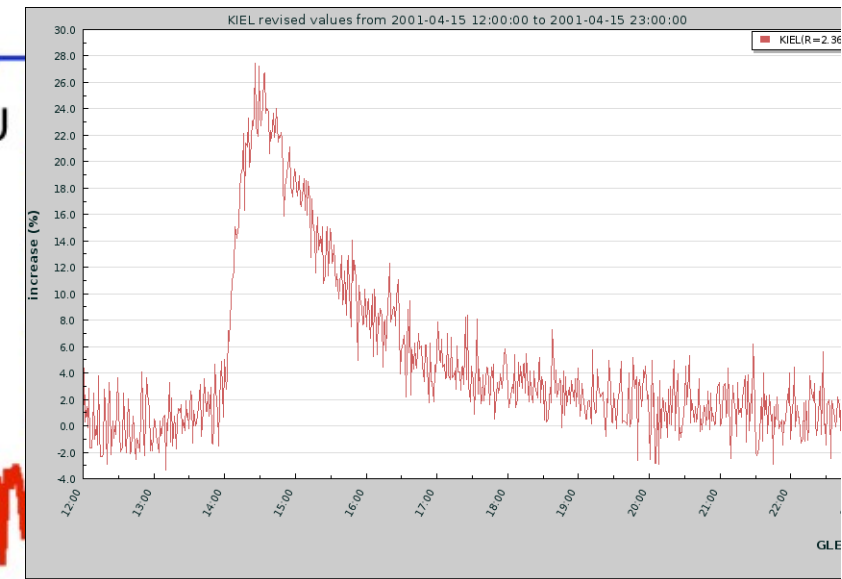
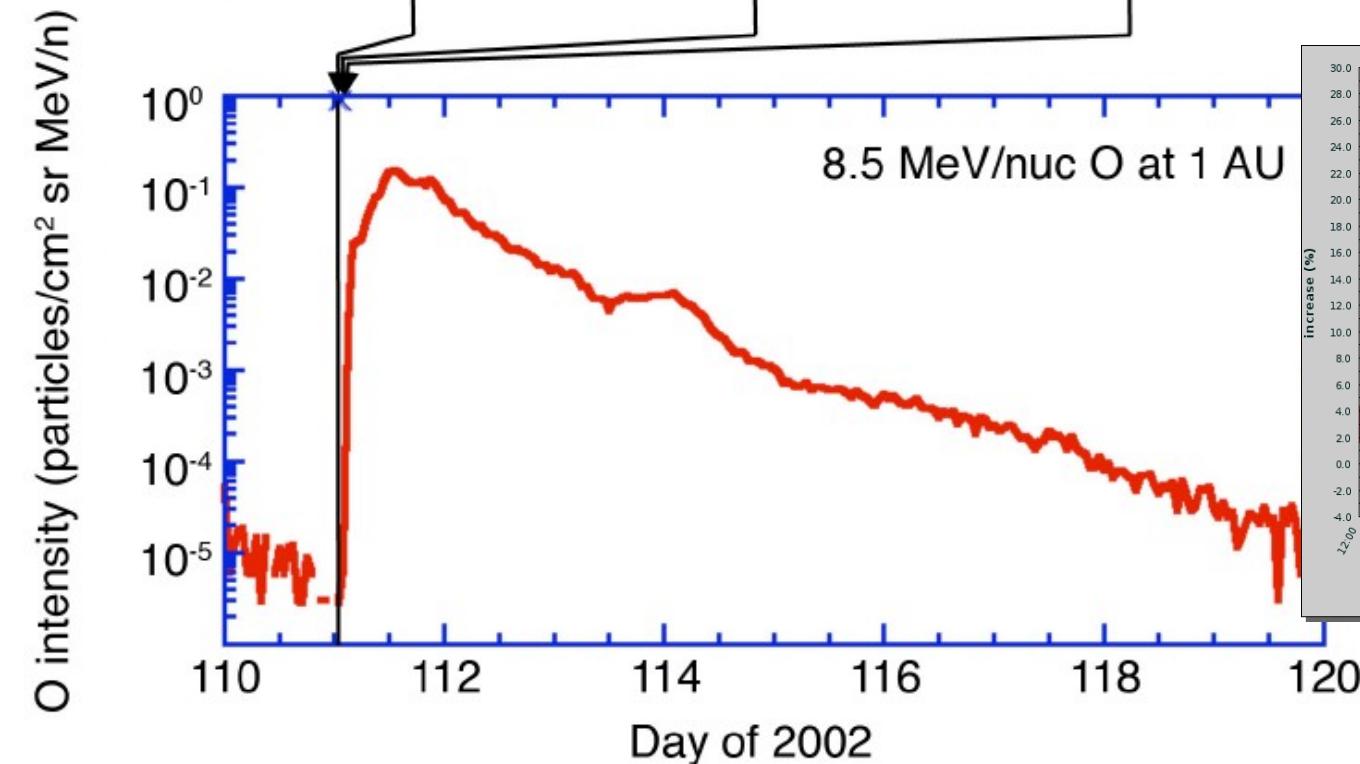




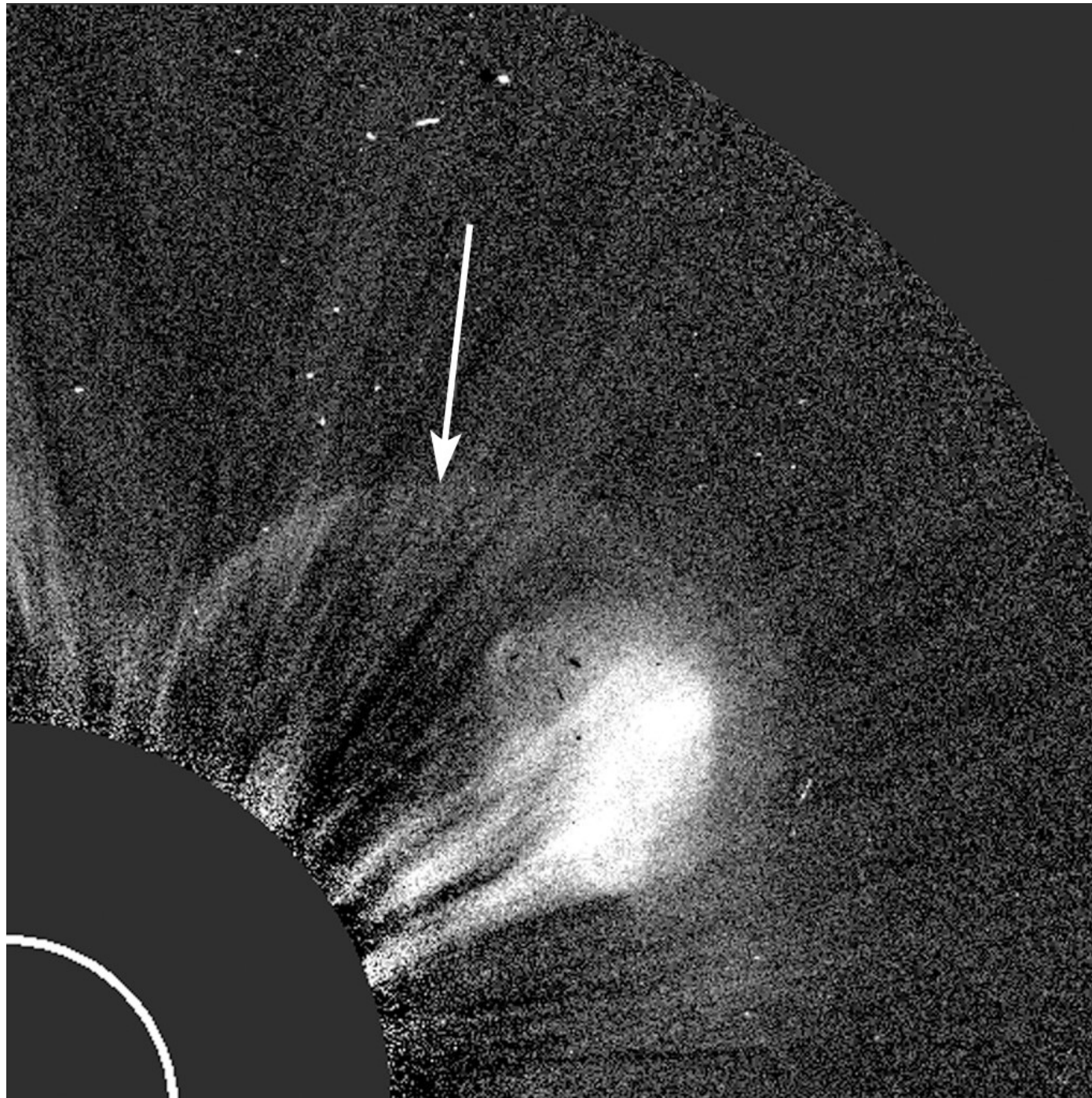
Große Teilchenereignisse beginnen mit koronalen Massenauswürfen.

Was beschleunigt die Teilchen zu so hohen Energien?

Manchmal sogar auf der Erde nachzuweisen!

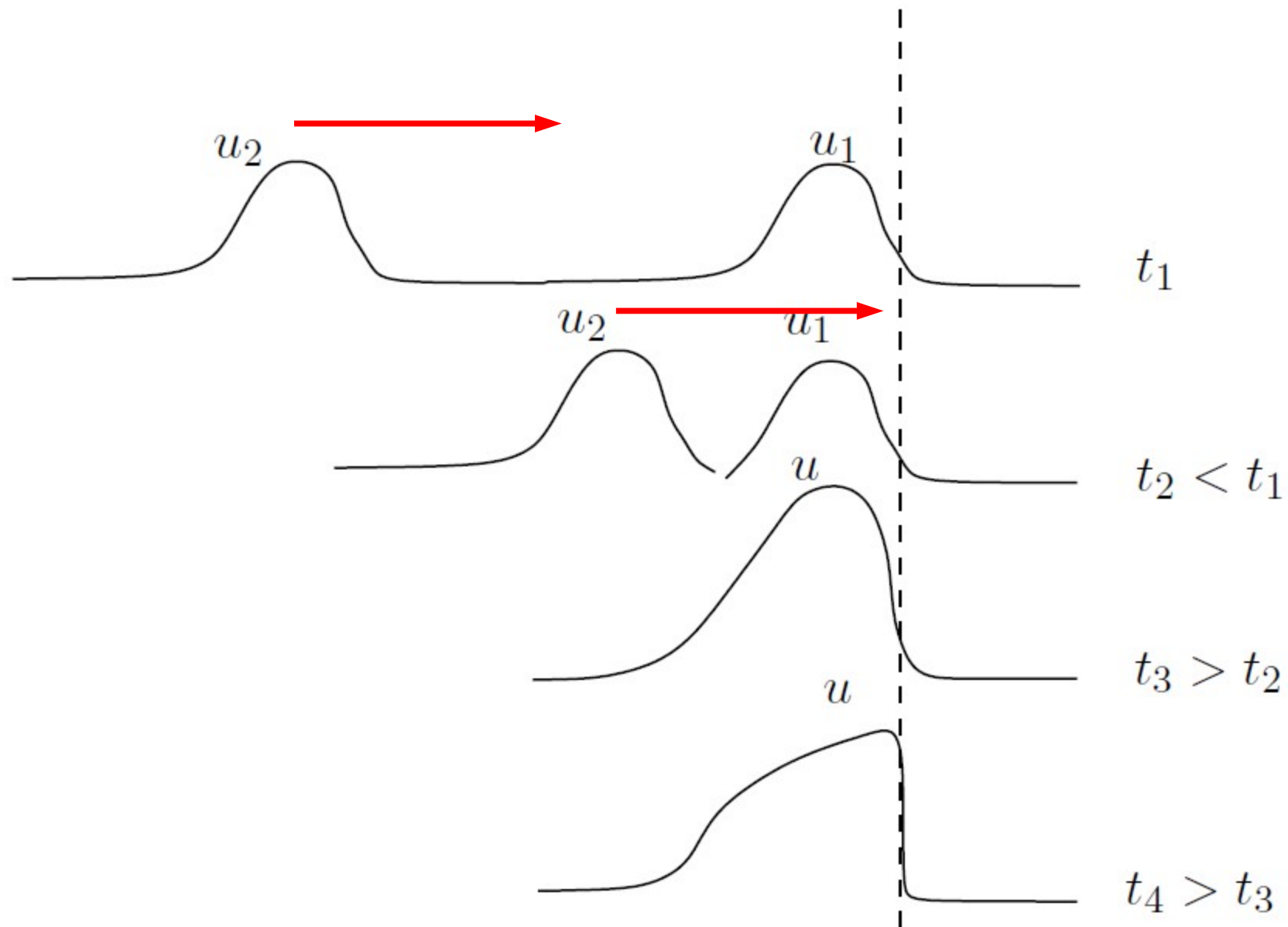


Kieler Neutronenmonitor (Ostern 2001)





Wie entsteht eine solche Stoßfront oder ein Schock?





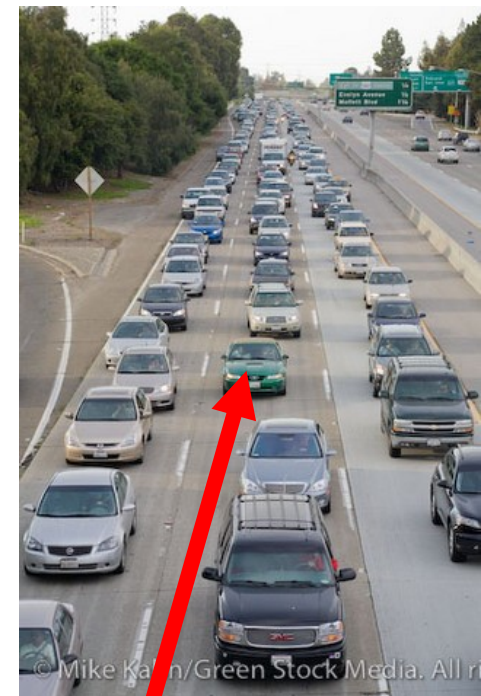
Turbulente Strukturen
bewegen sich auf
Schock zu



Stoßfront

Turbulente Strukturen
bewegen sich auf
Schock zu



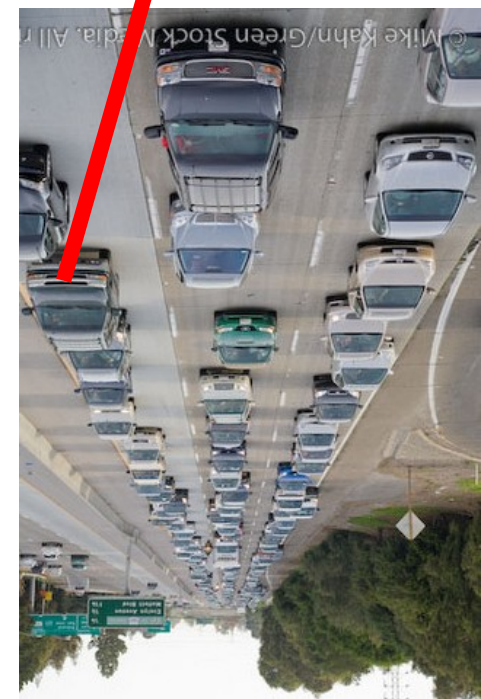


Turbulente Strukturen
bewegen sich auf
Schock zu

Einige Teilchen gewinnen mit jedem Stoß
Energie.



Stoßfront



Turbulente Strukturen
bewegen sich auf
Schock zu





Turbulente Strukturen
bewegen sich auf
Schock zu

Einige Teilchen gewinnen mit jedem Stoß
Energie. Stochastischer/zufälliger Prozess

Stoßfront

Turbulente Strukturen
bewegen sich auf
Schock zu



Turbulente Strukturen
bewegen sich auf
Schock zu

Stufenweise
Beschleunigung über
turbulente Bewegungen

Einige Teilchen gewinnen mit jedem Stoß
Energie. Stochastischer/zufälliger Prozess

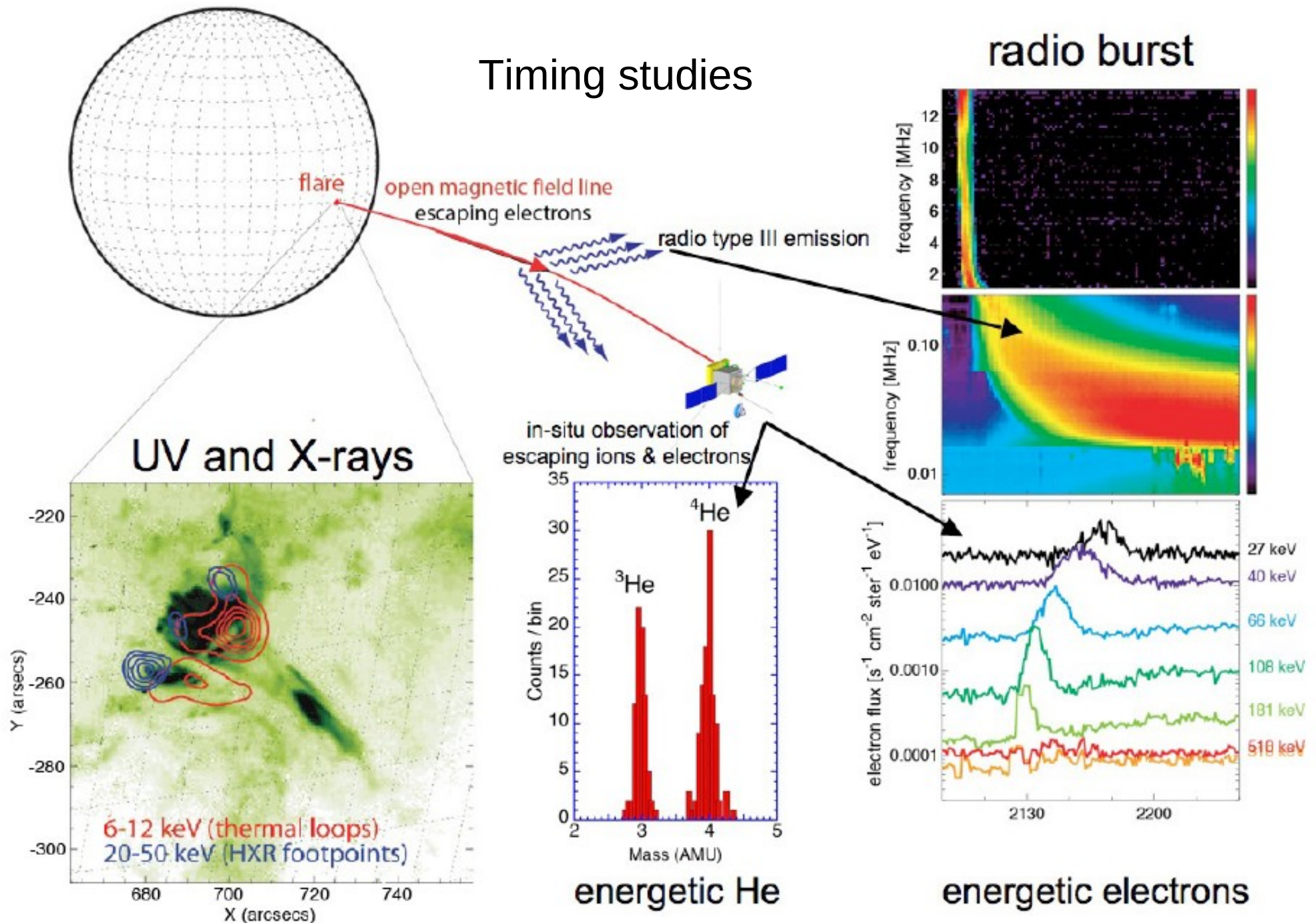
Stoßfront

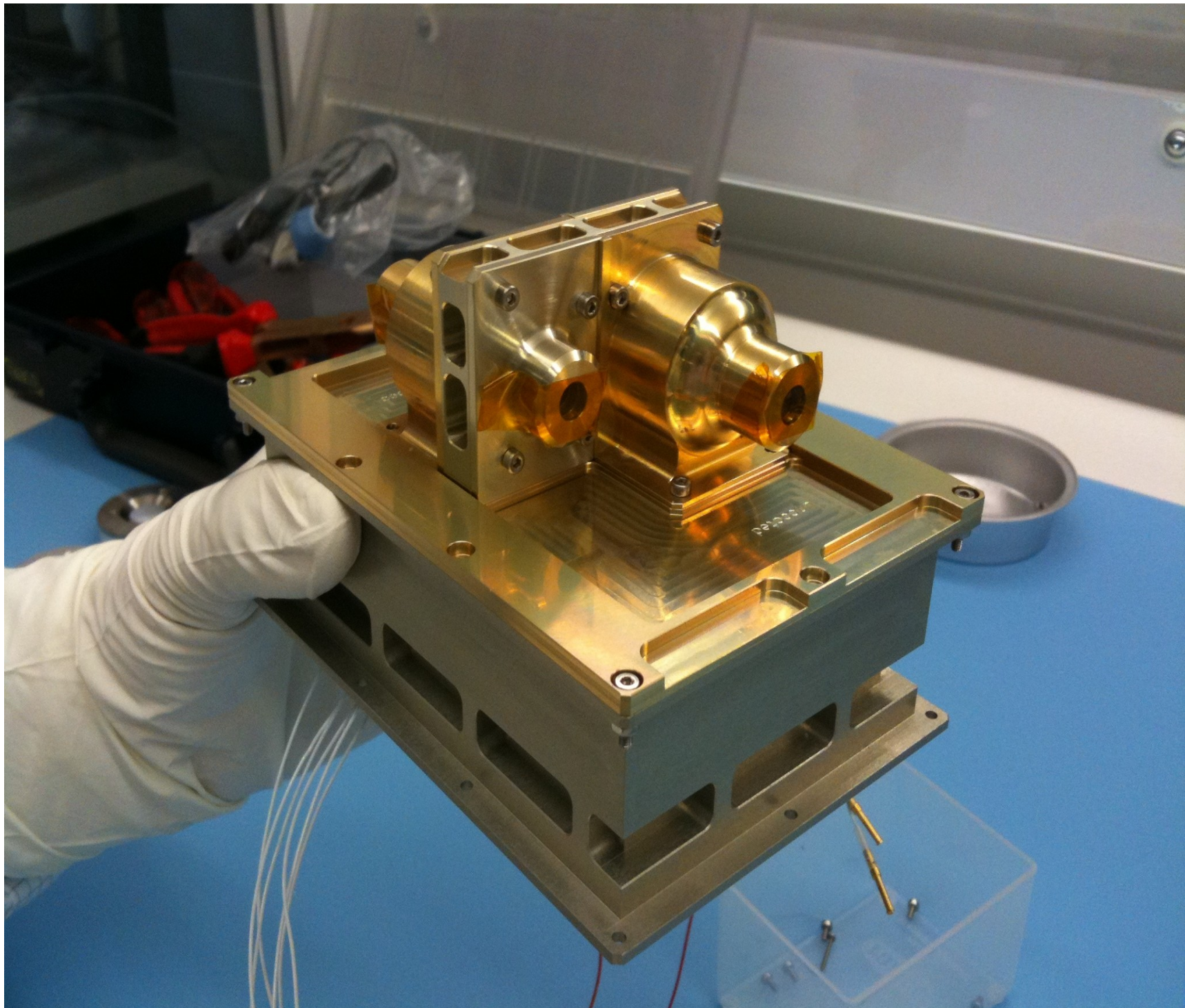
Dieses Szenario führt
zu den beobachteten
Energiespektren

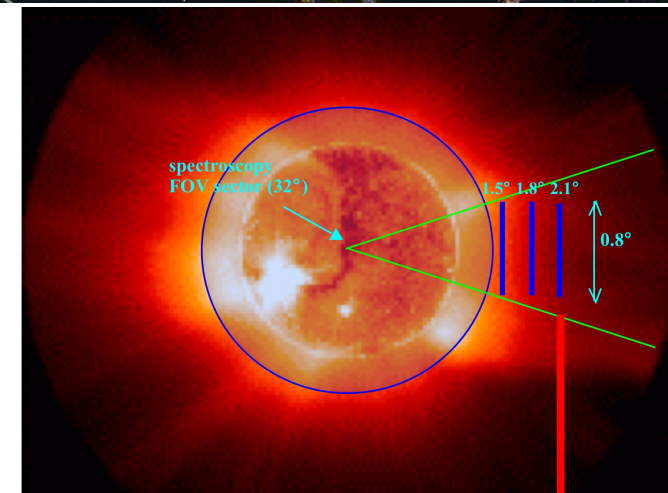
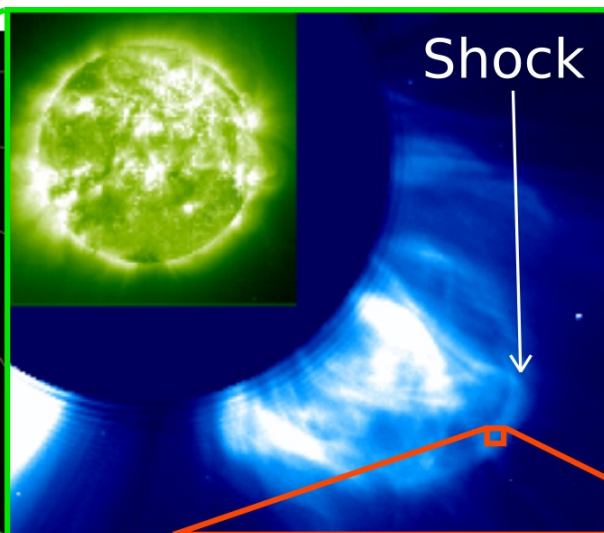
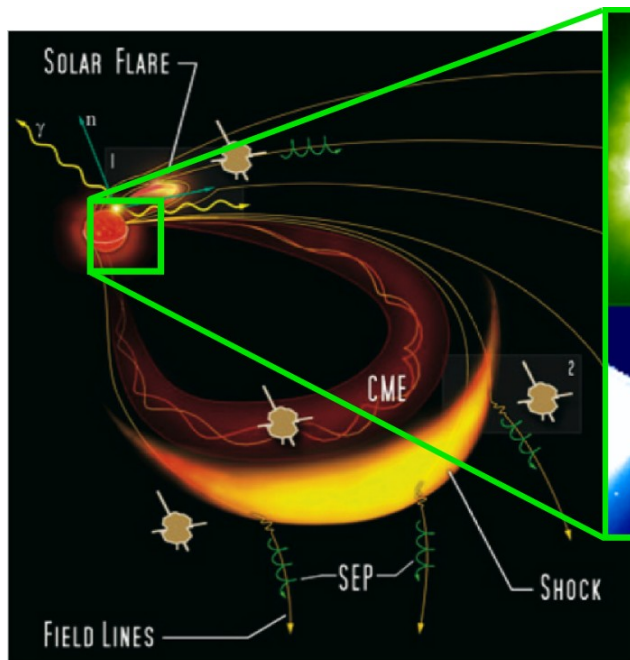
Turbulente Strukturen
bewegen sich auf
Schock zu

Solar Orbiter: erstmals koordinierte Beobachtungen in Sonnennähe

Timing studies

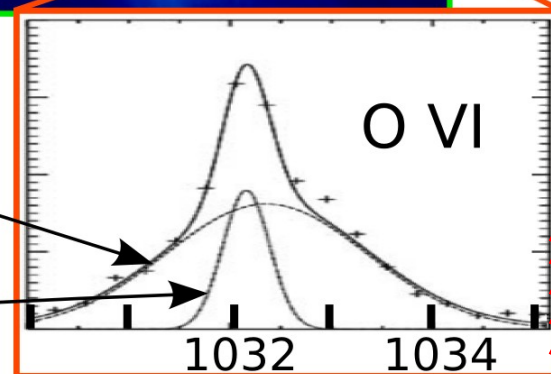






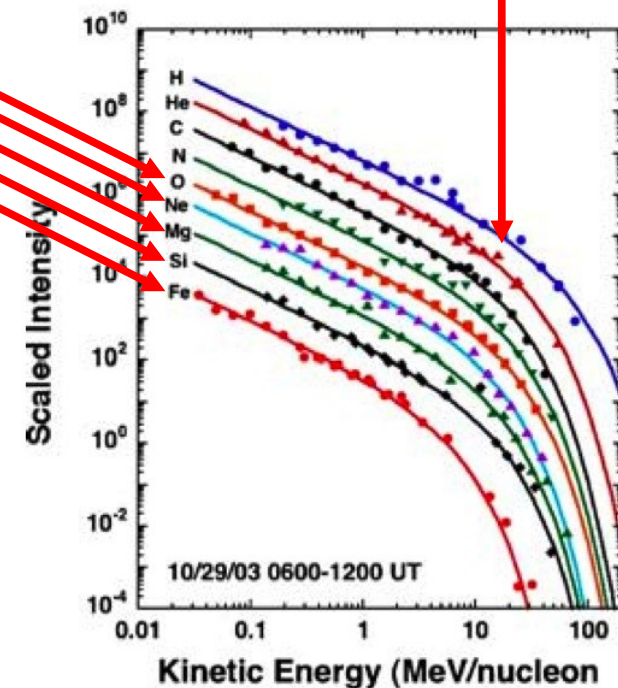
Pre-accelerated population

Background plasma



Fernbeobachtungen der suprathermalen Quellpopulation kann erstmals mit insitu Messungen dieser Teilchen kombiniert werden.

Deren Zusammensetzung wird erstmals zugänglich sein!



Mewaldt, 2006

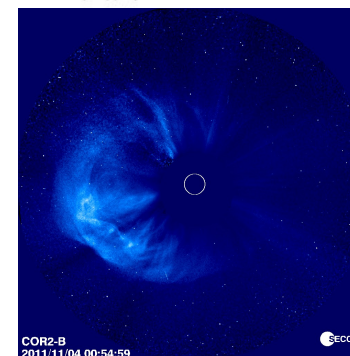
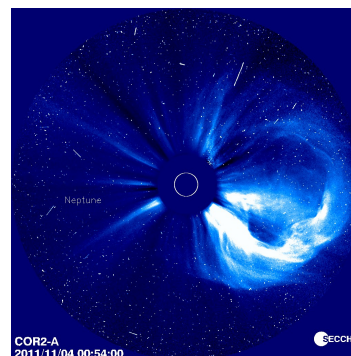
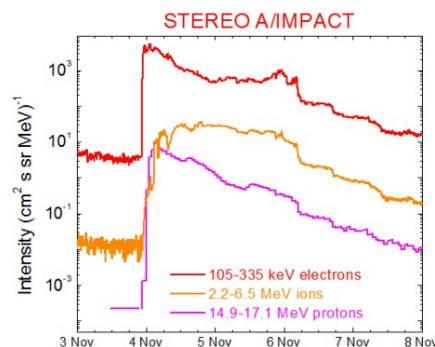
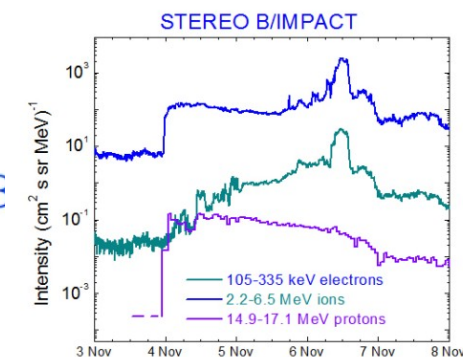
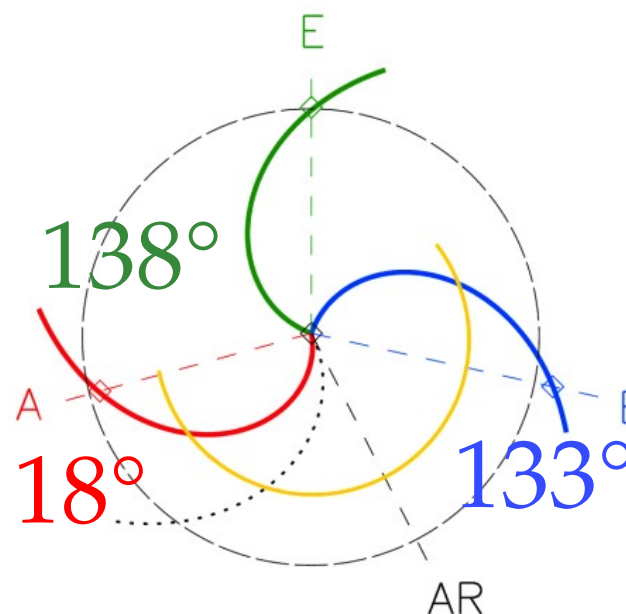
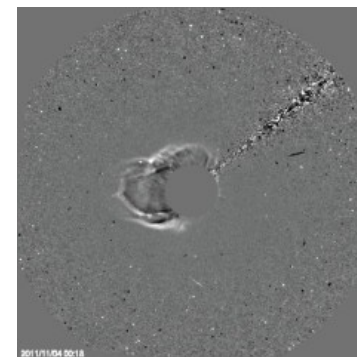
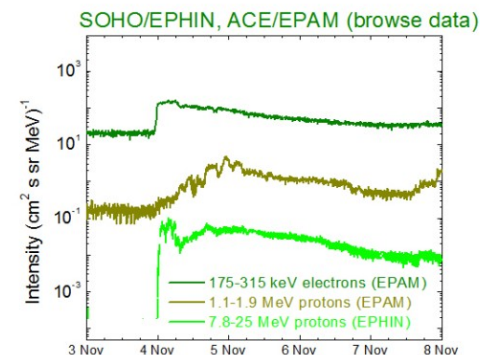


Am 3. November 2011 ergab sich folgendes Bild:

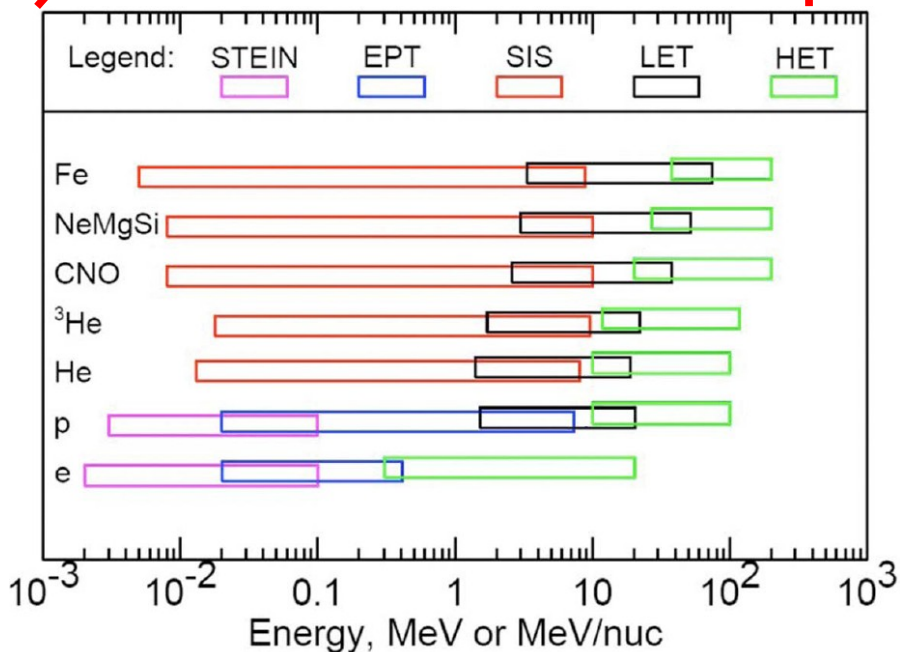
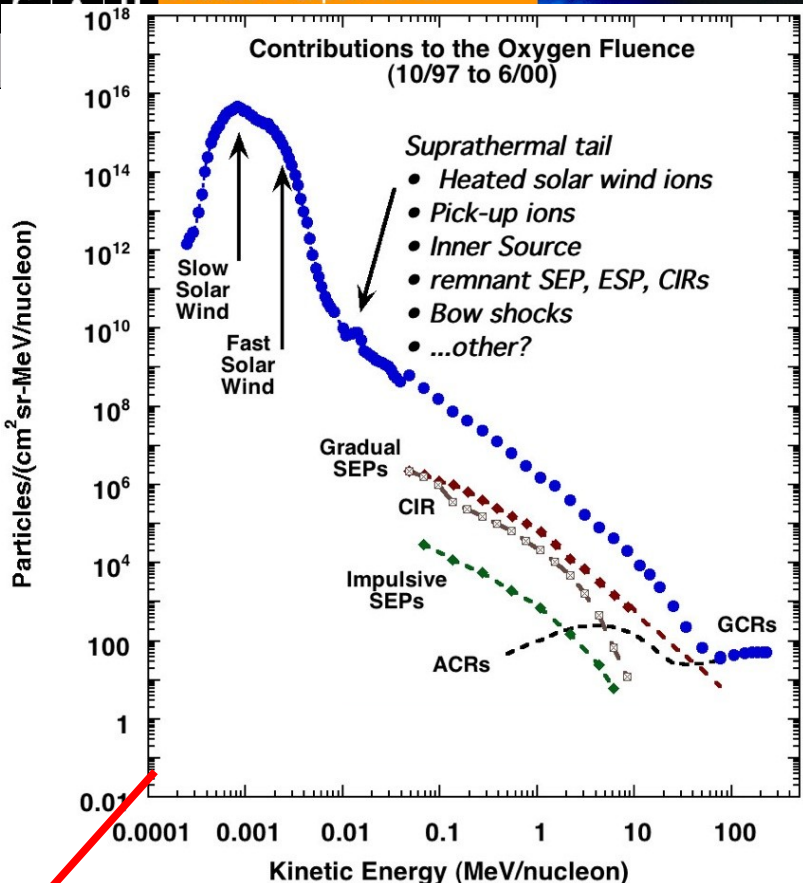
Simultane Beobachtungen von energiereichen Elektronen ($E > 2\text{MeV}$) und Protonen ($E > 50\text{ MeV}$) bei SOHO, ACE und STEREO.

Wie kann das passieren?

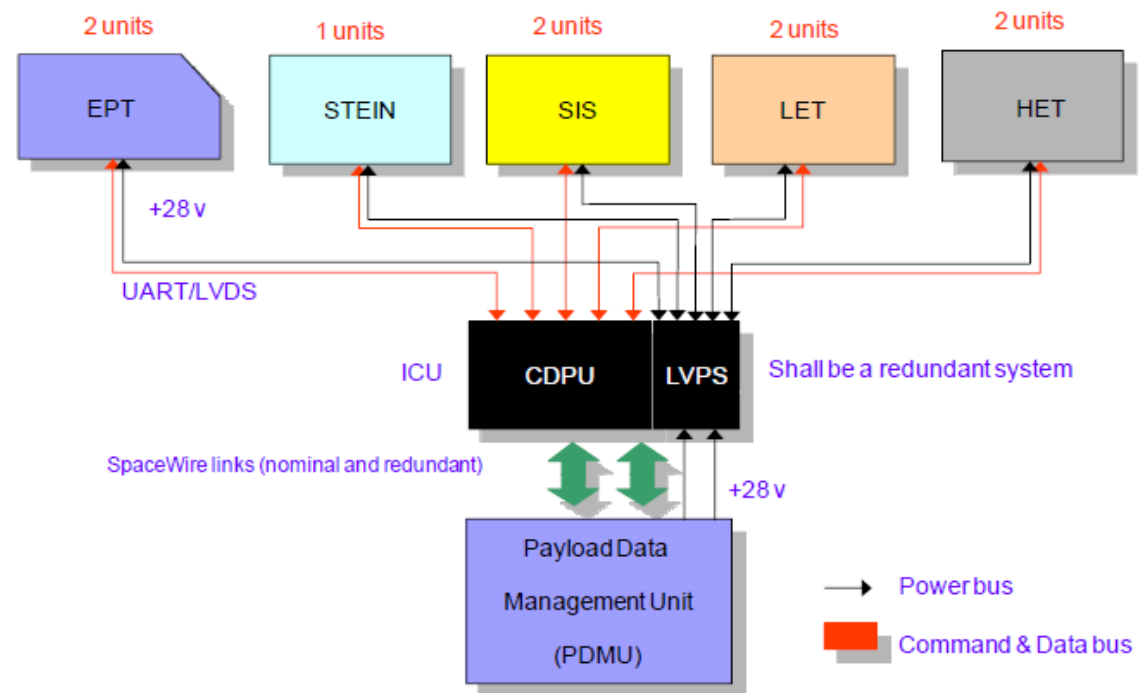
Diese (und ähnliche) Beobachtungen sind nicht verstanden!



Dresing, 2011



Zur Messung energiereicher Teilchen wurde eine Suite von fünf Sensoren vorgeschlagen und ausgewählt. Nur so kann der gesamte Energiebereich abgedeckt werden.



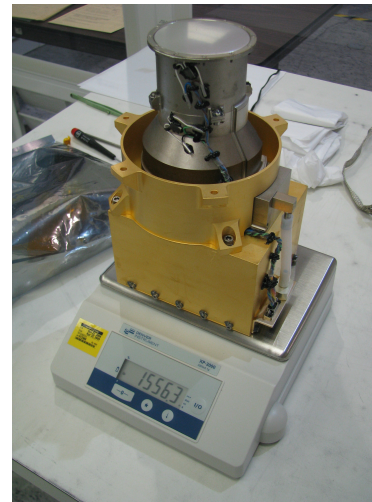
Wie verhalten sich diese Teilchen in Sonnennähe? Wie werden sie injiziert, beschleunigt, transportiert?



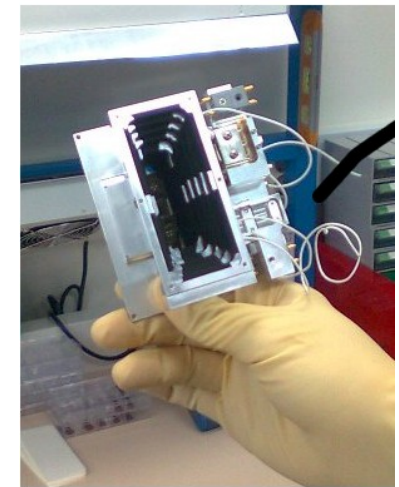
IEAP/CAU steuert drei (vier) Sensoren zum EPD Instrument bei.



EPT

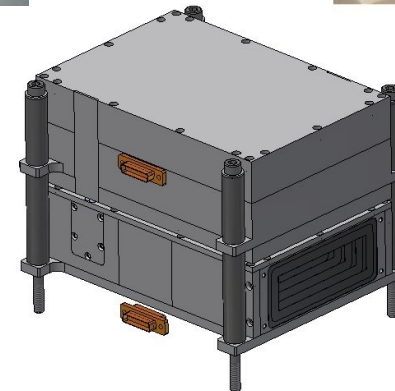
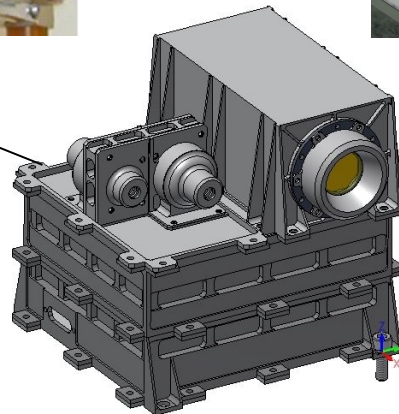


HET



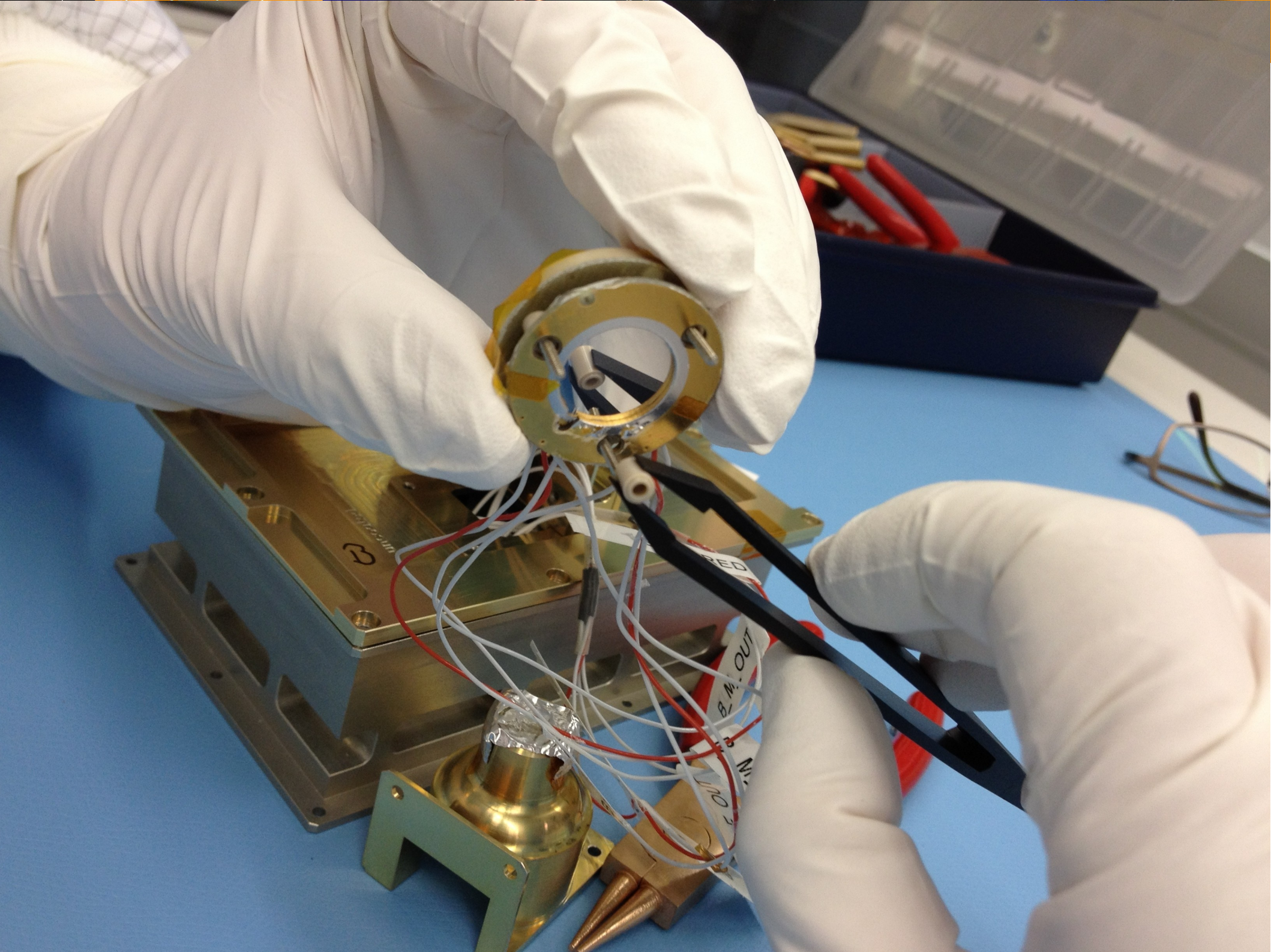
STEIN

2 x EPT/HET



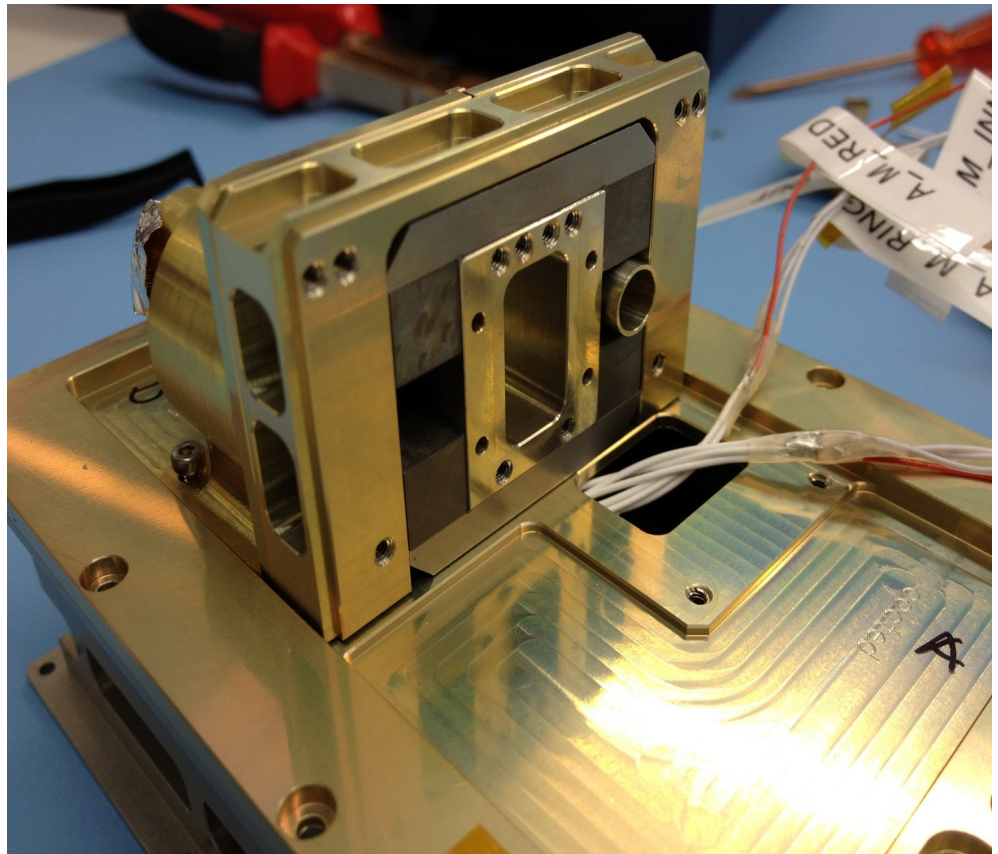
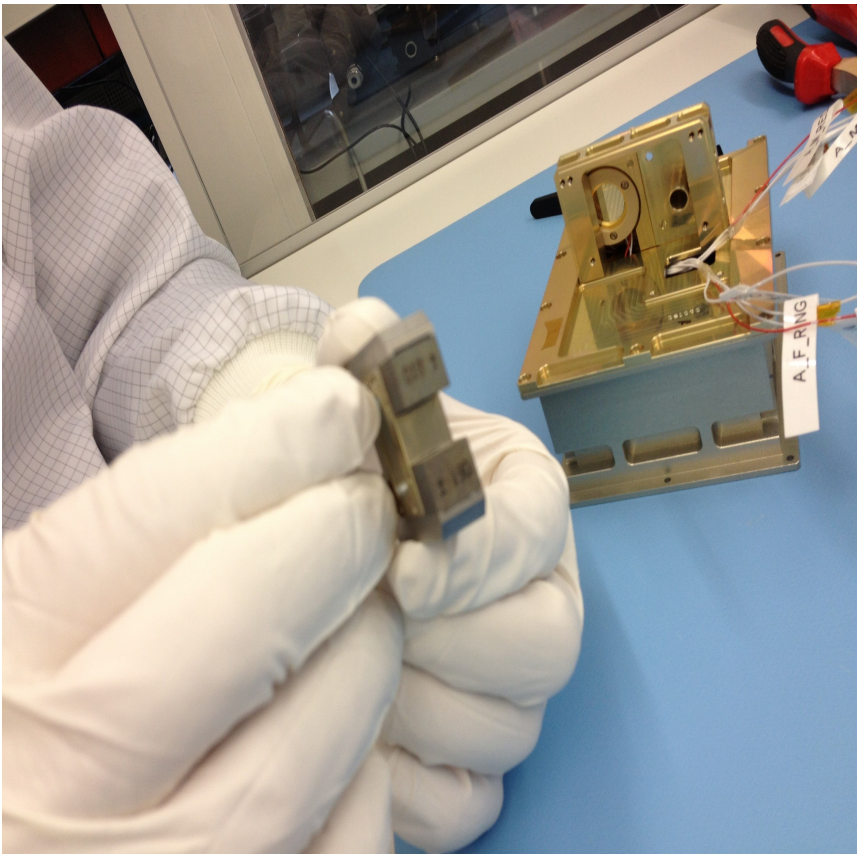
1 x STEIN

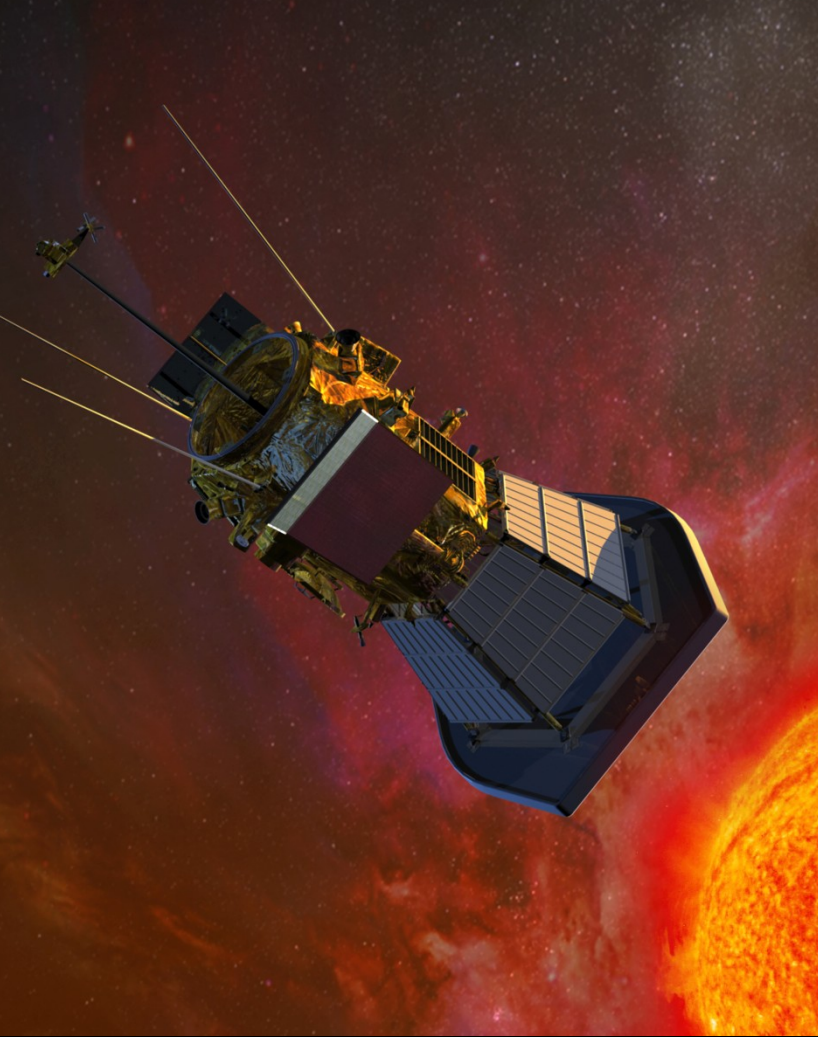
(Ein vierter Sensor, SIS, wird z.Zt. mit ESA verhandelt.)





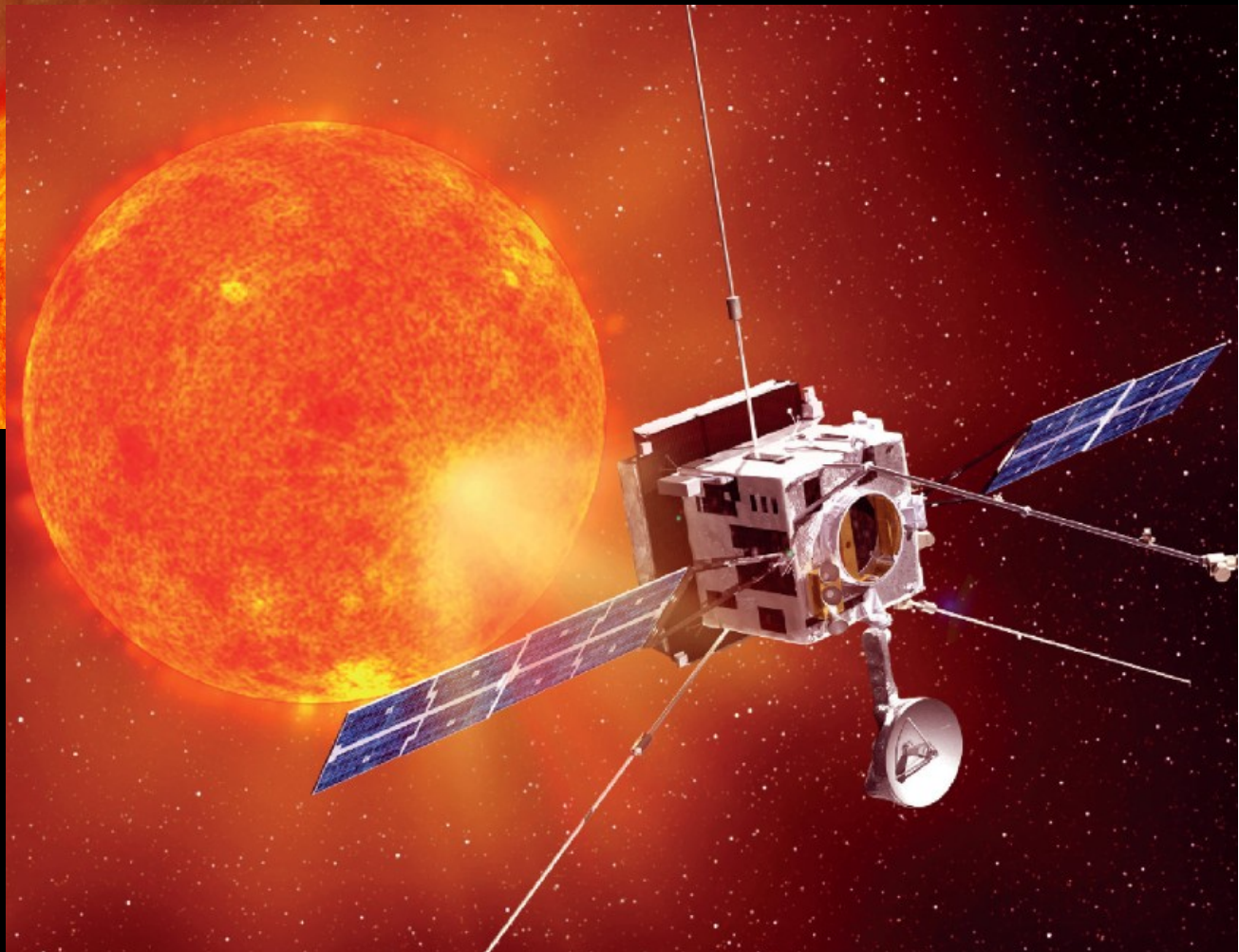
Demomodel 1 wurde bereits gebaut und getestet. Hier im Bild das Electron Proton Telescope (EPT).





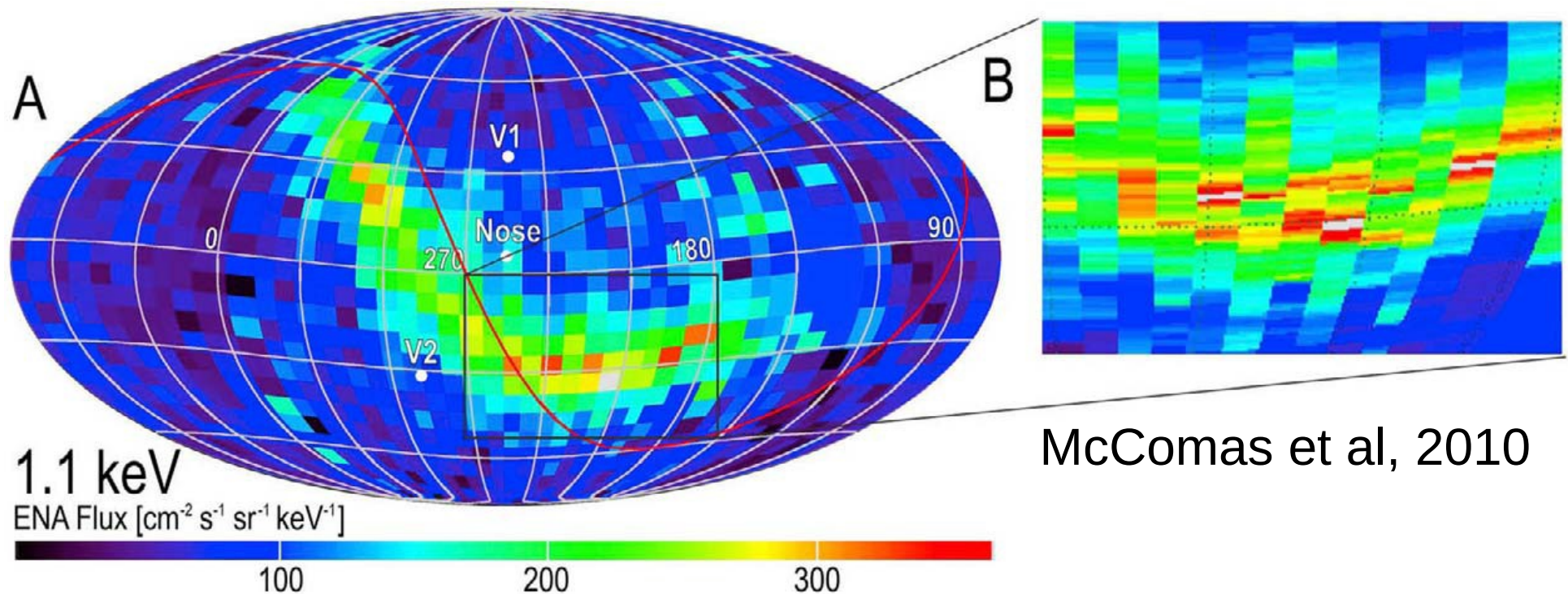
Solar Probe Plus will investigate the Sun from closer than 10 solar radii.

Solar Orbiter is an observatory that will study the Sun and its polar regions from close by (0.28 AU).





IBEX Beobachtungen von 1.1 keV ENAs des unerwarteten Bandes



Feinstrukturierte Variationen deuten auf kleinskalige Prozesse in den ENA-Quellregionen hin.

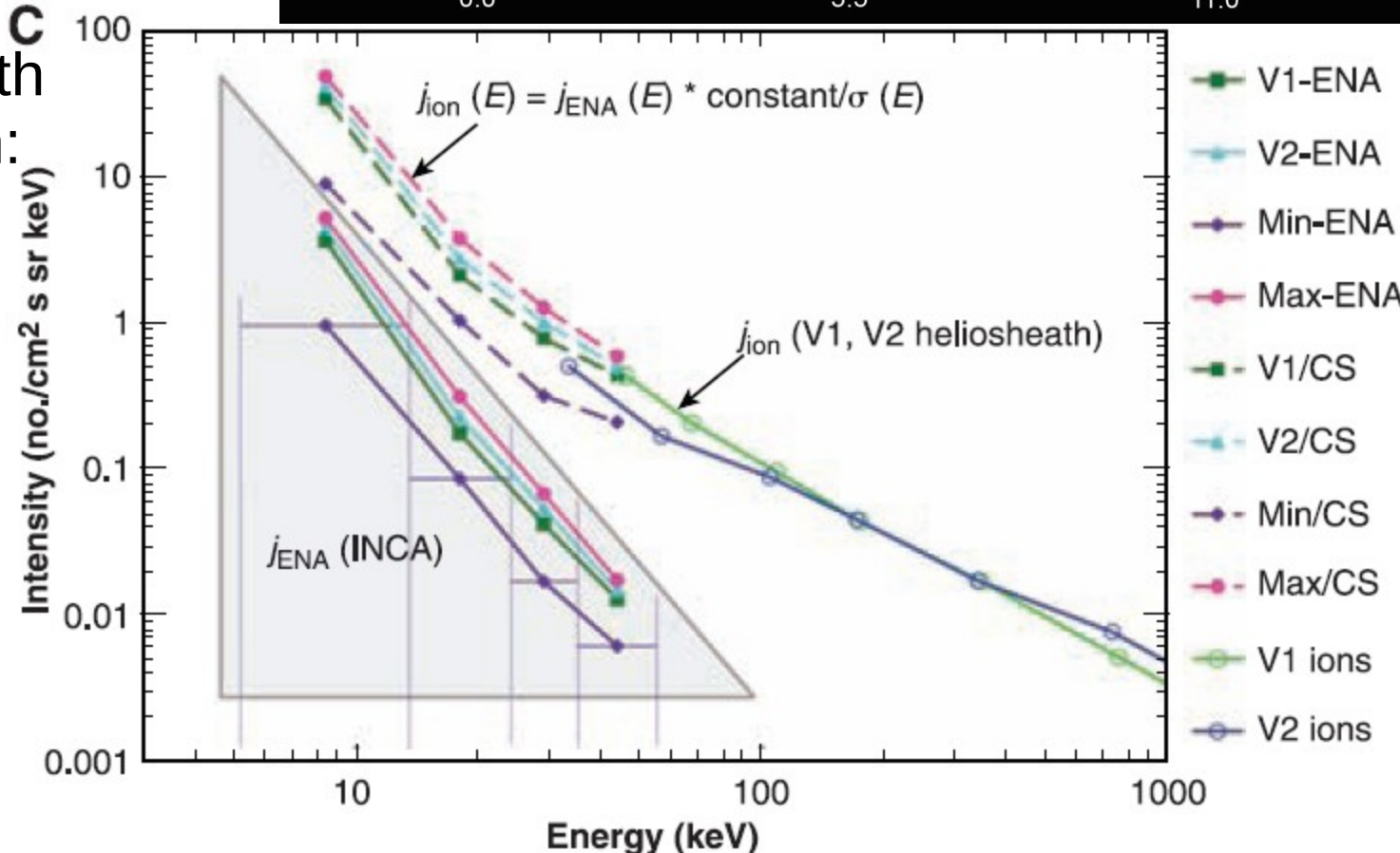
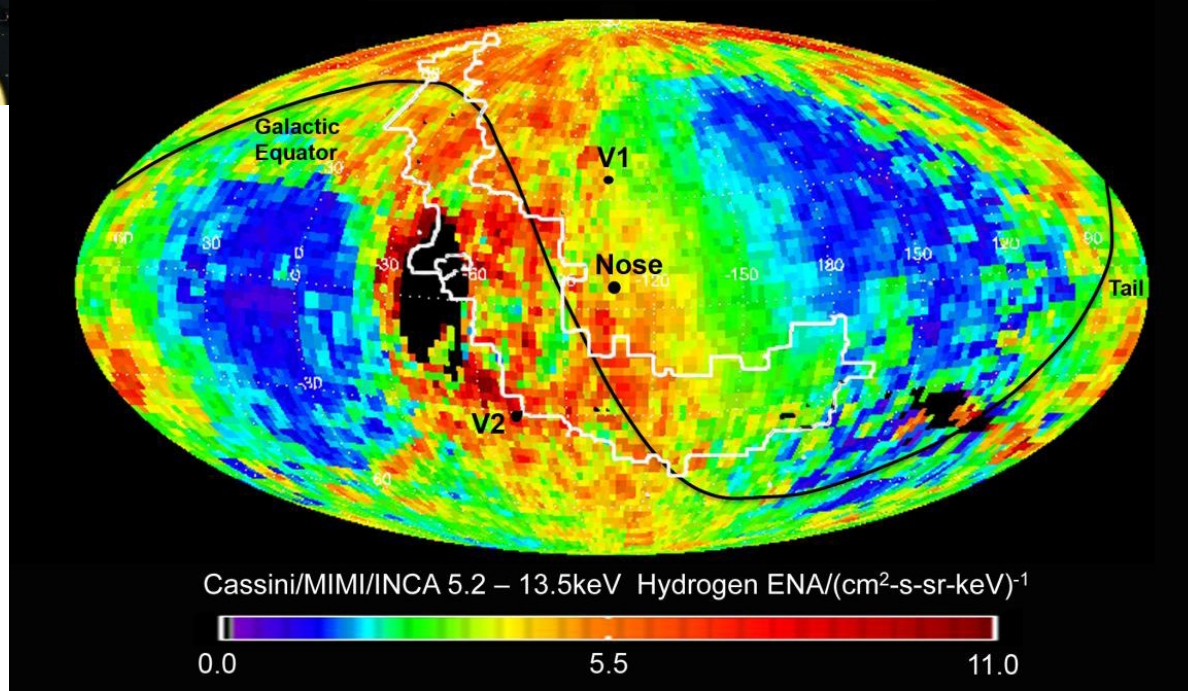
Die Voyager-Sonden können die Quellpopulation der IBEX-Band-ENAs nicht messen. Deren Energie liegt tiefer.



Die Messungen von Cassini/INCA liegen in einem höheren Energiebereich, der auch von den Voyagers erfasst wird. Spektrum überall ähnlich.

Daraus kann auf die Dicke der Heliosheath geschlossen werden:

$$L \sim 50 \text{ AU}$$

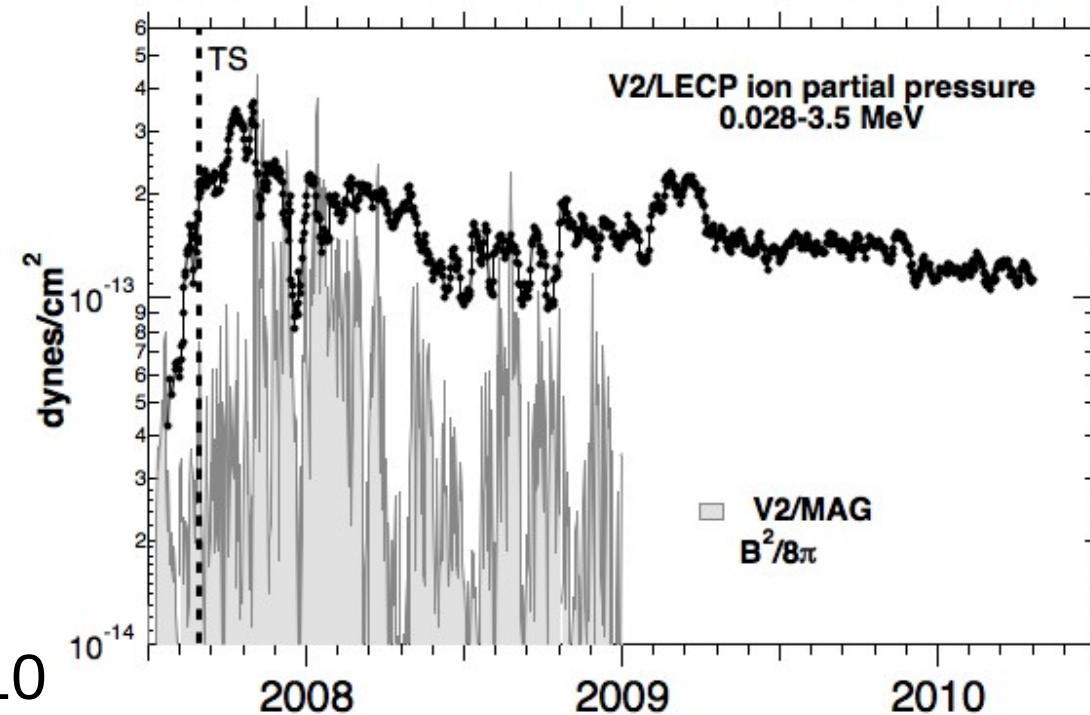
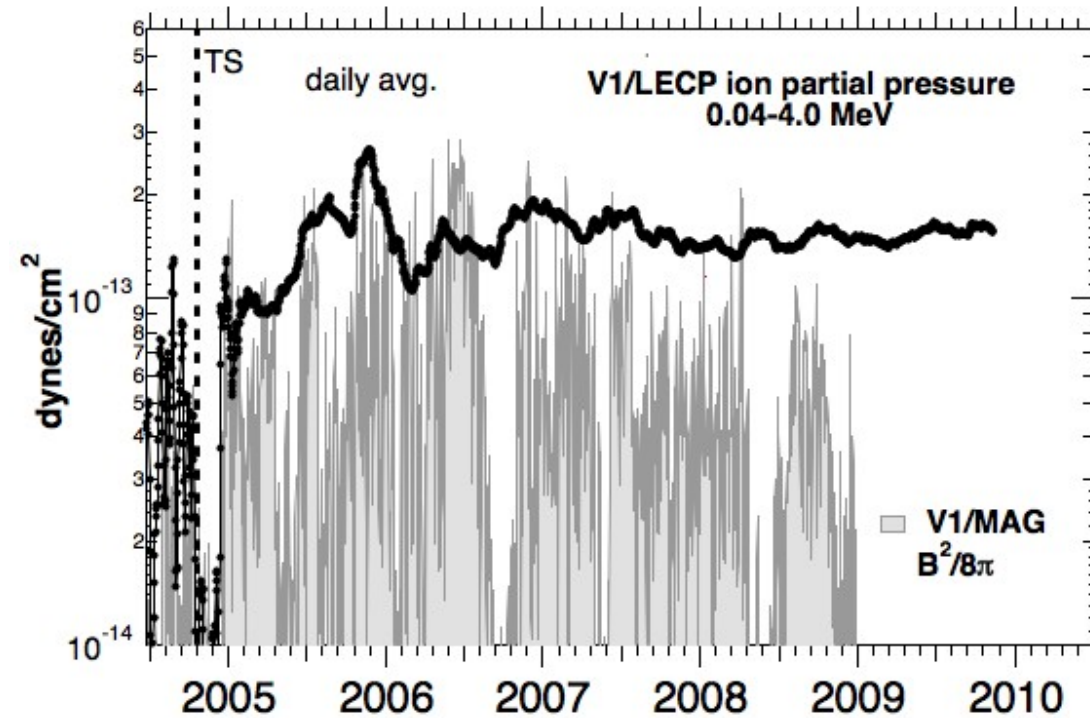




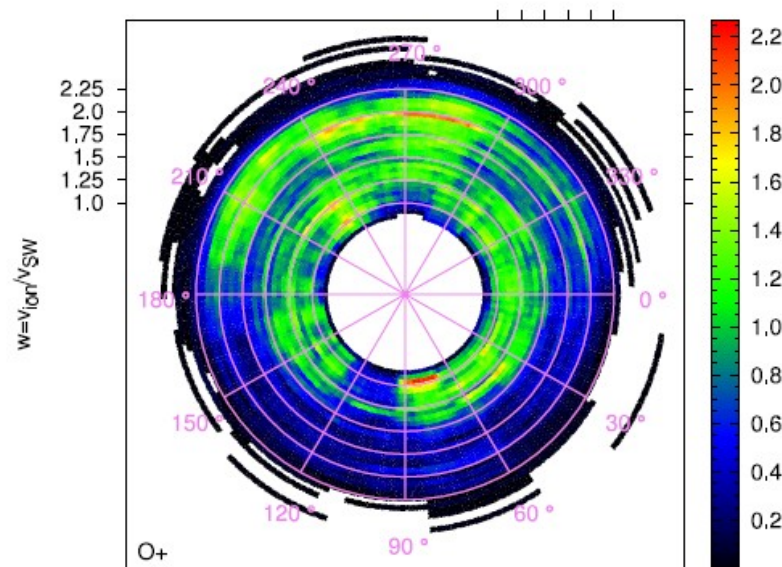
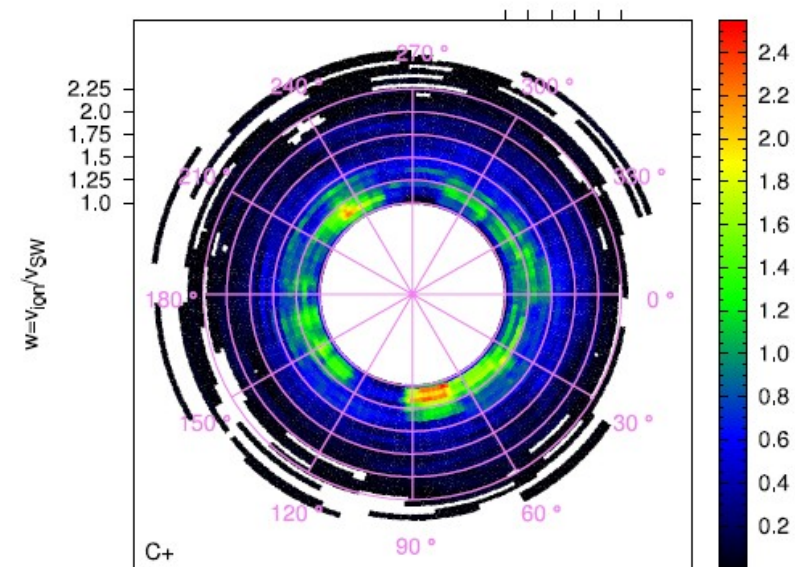
Als sich die Voyagers in die Heliosheath begeben haben, begannen sie, ein Plasma zu beobachten, in welchem der Druck hauptsächlich aus der suprathermalen Population stammt!

Dies ist sehr ungewöhnlich, ein nicht thermisches Plasma!

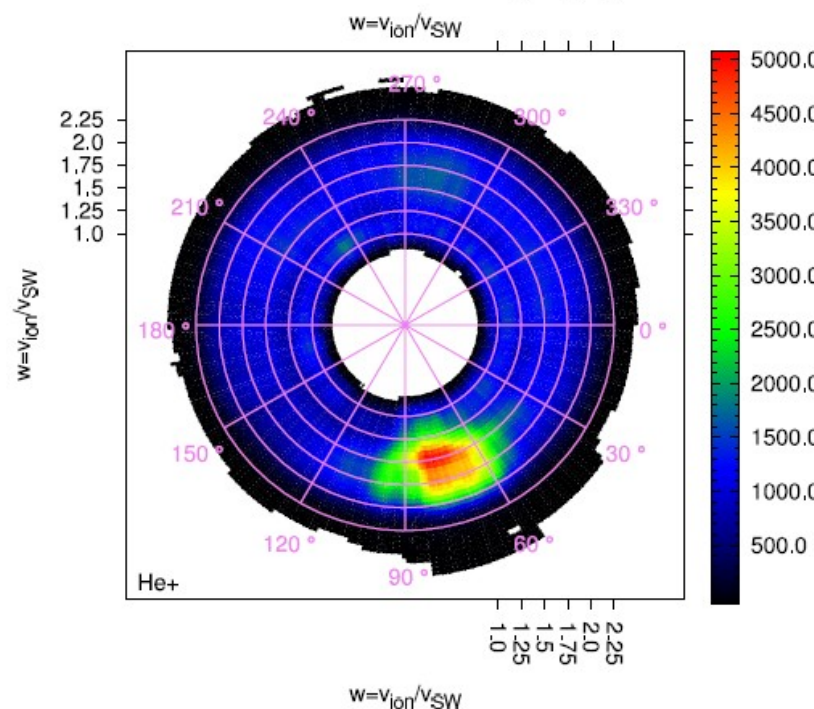
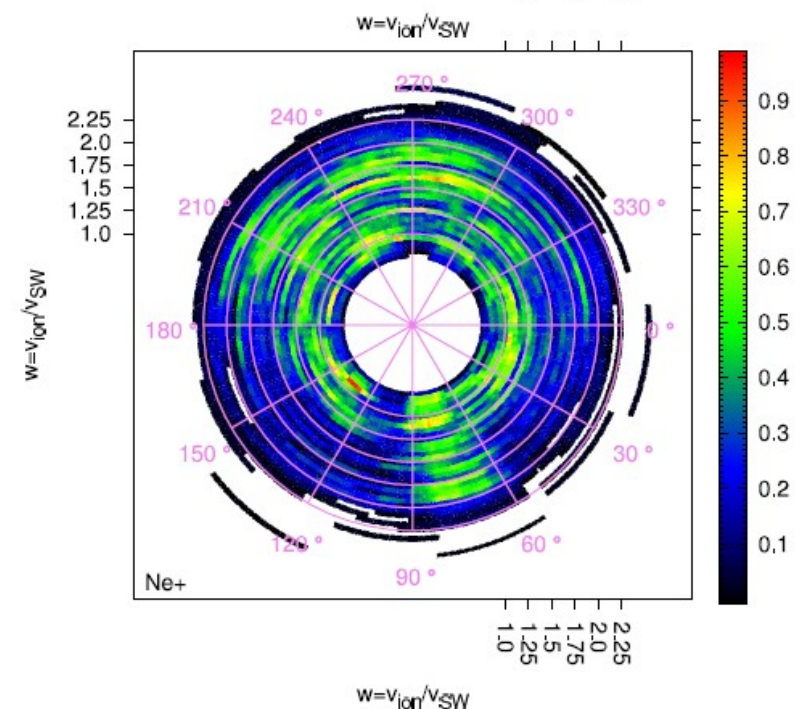
Dieser Druck ist auch größer als der magnetische Druck.



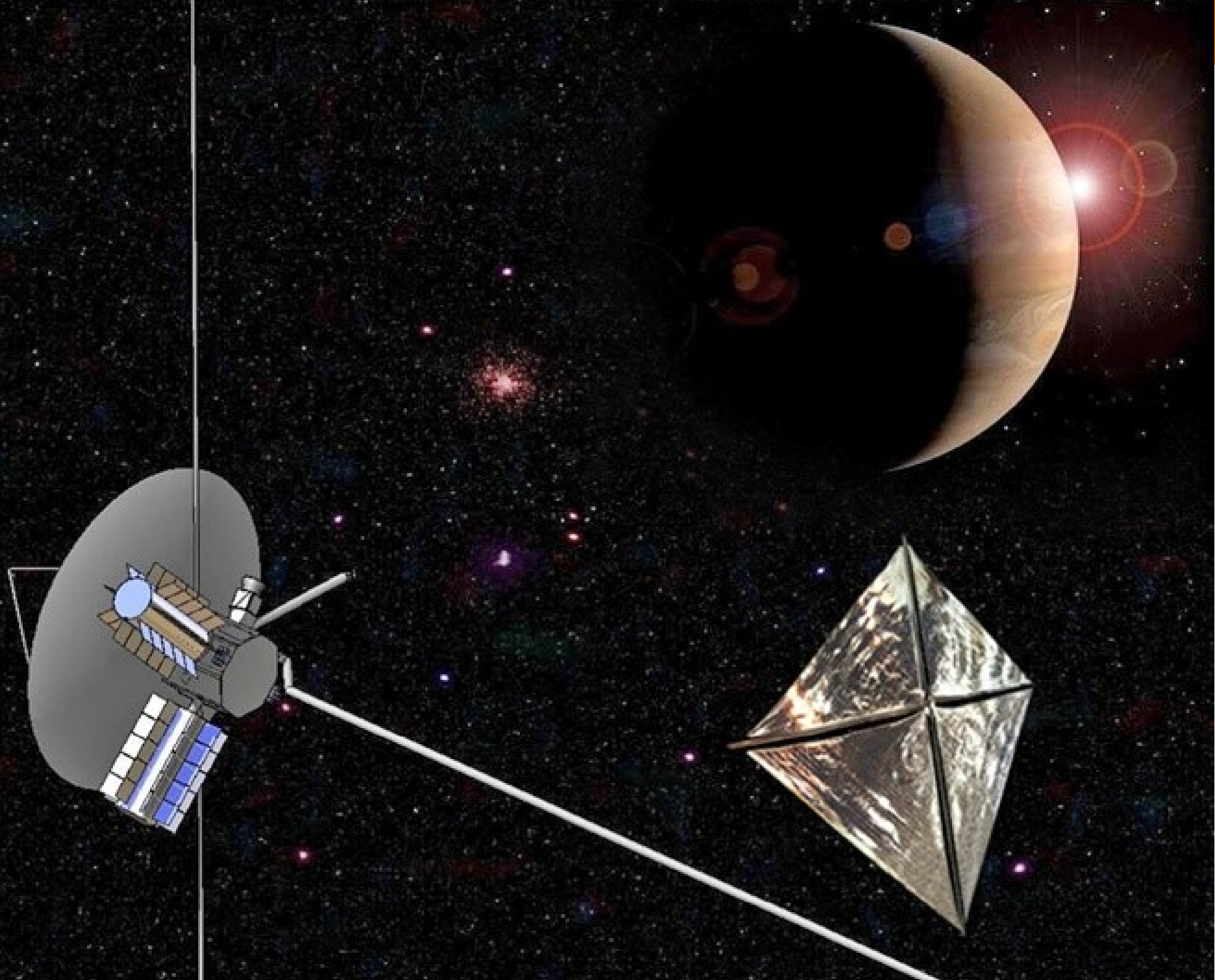
Krimigis et al., 2010

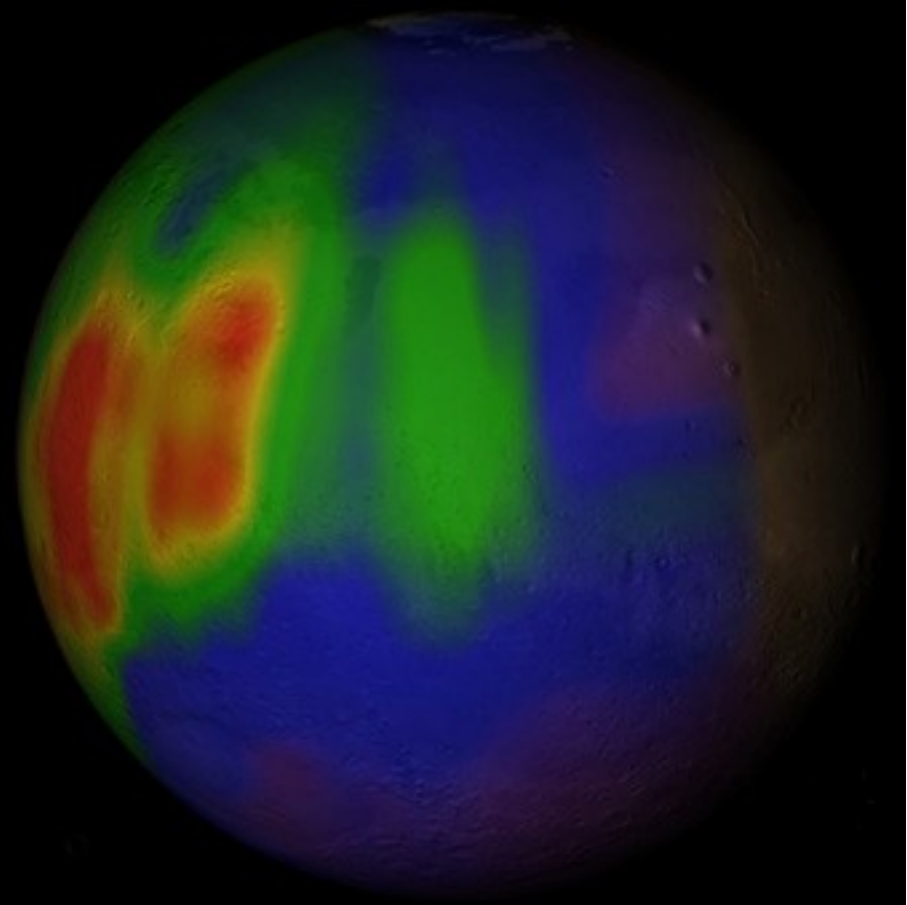
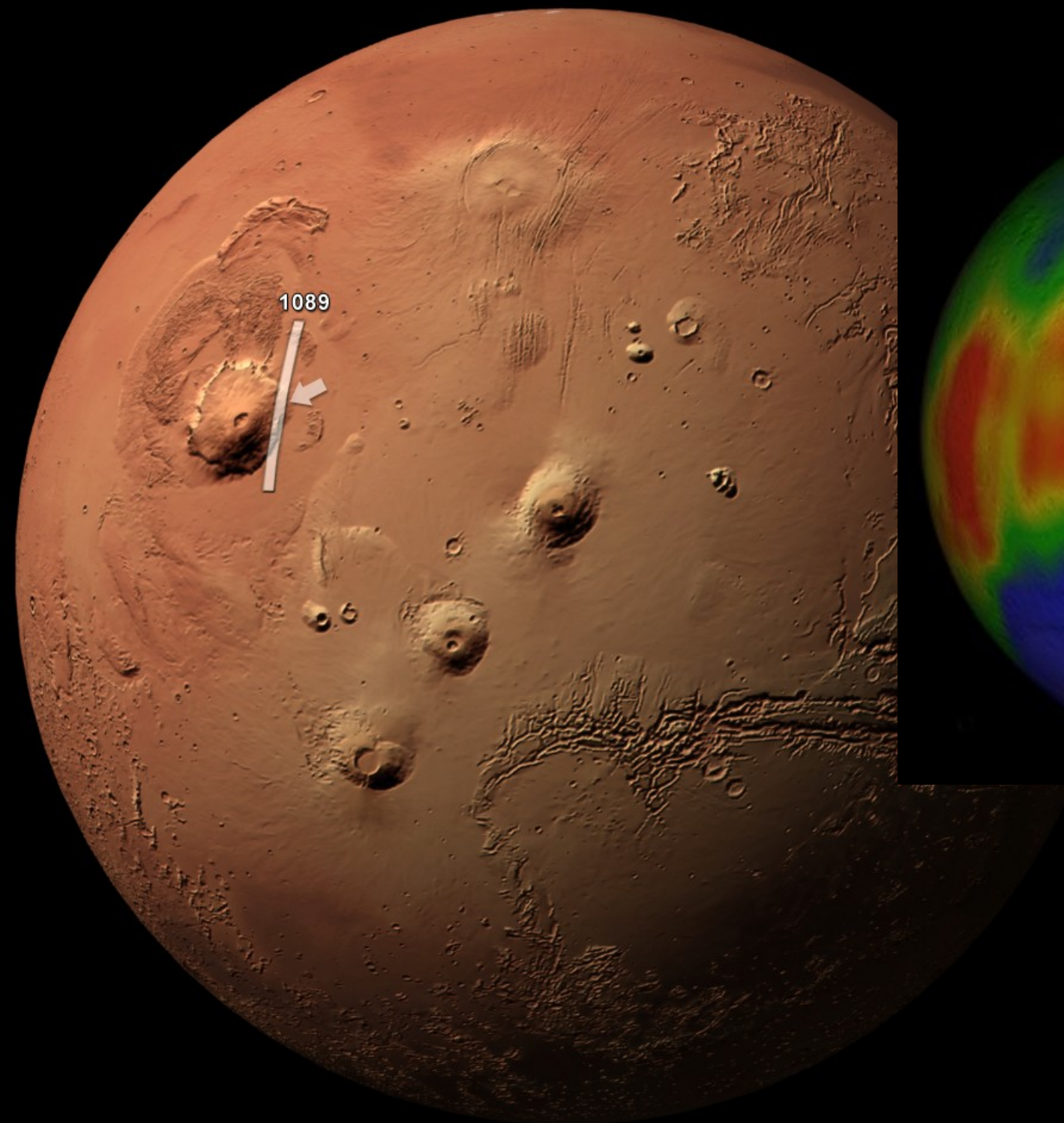


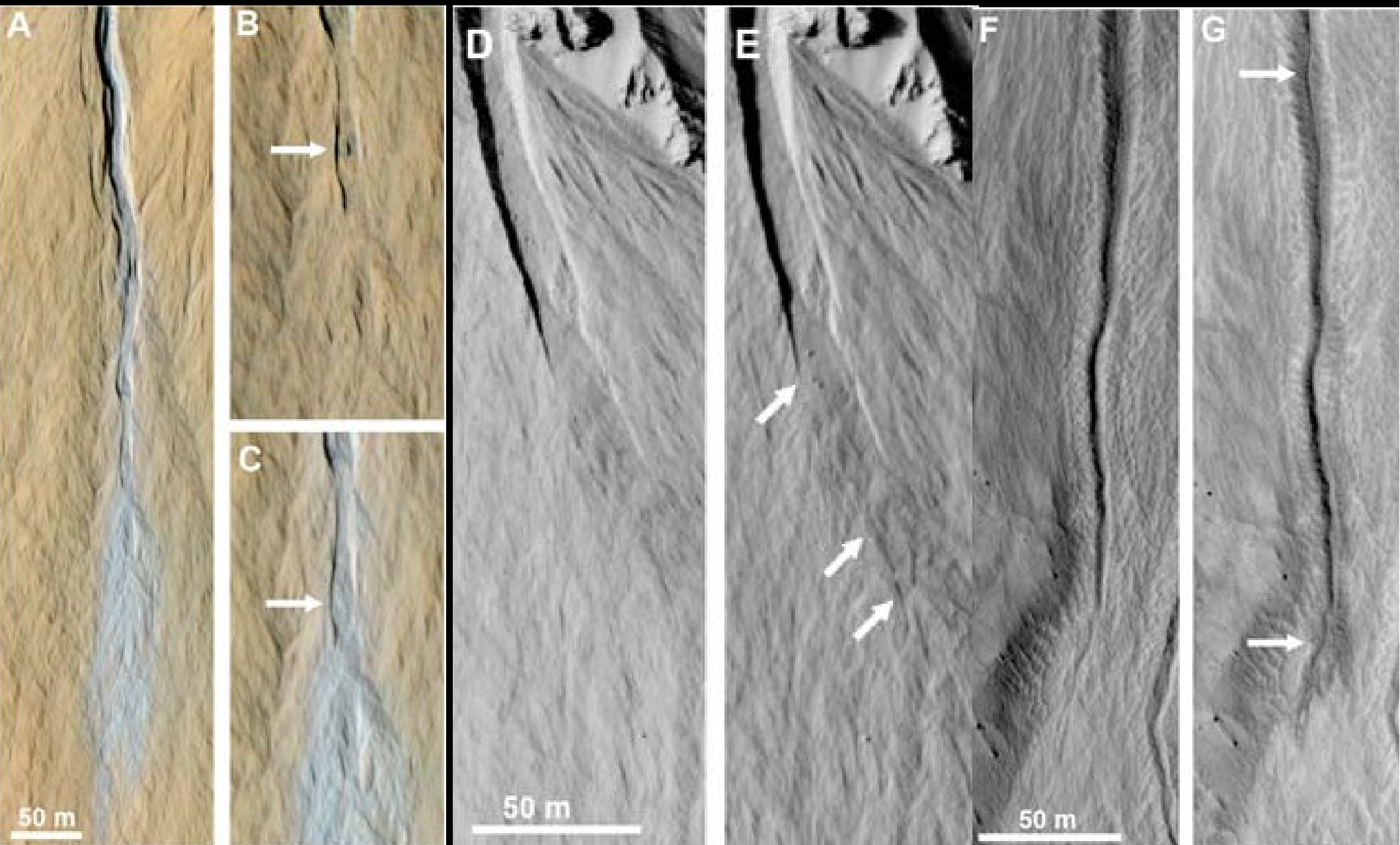
Druck sehr wahrscheinlich auf interstellare Pickup-Ionen zurückzuführen.



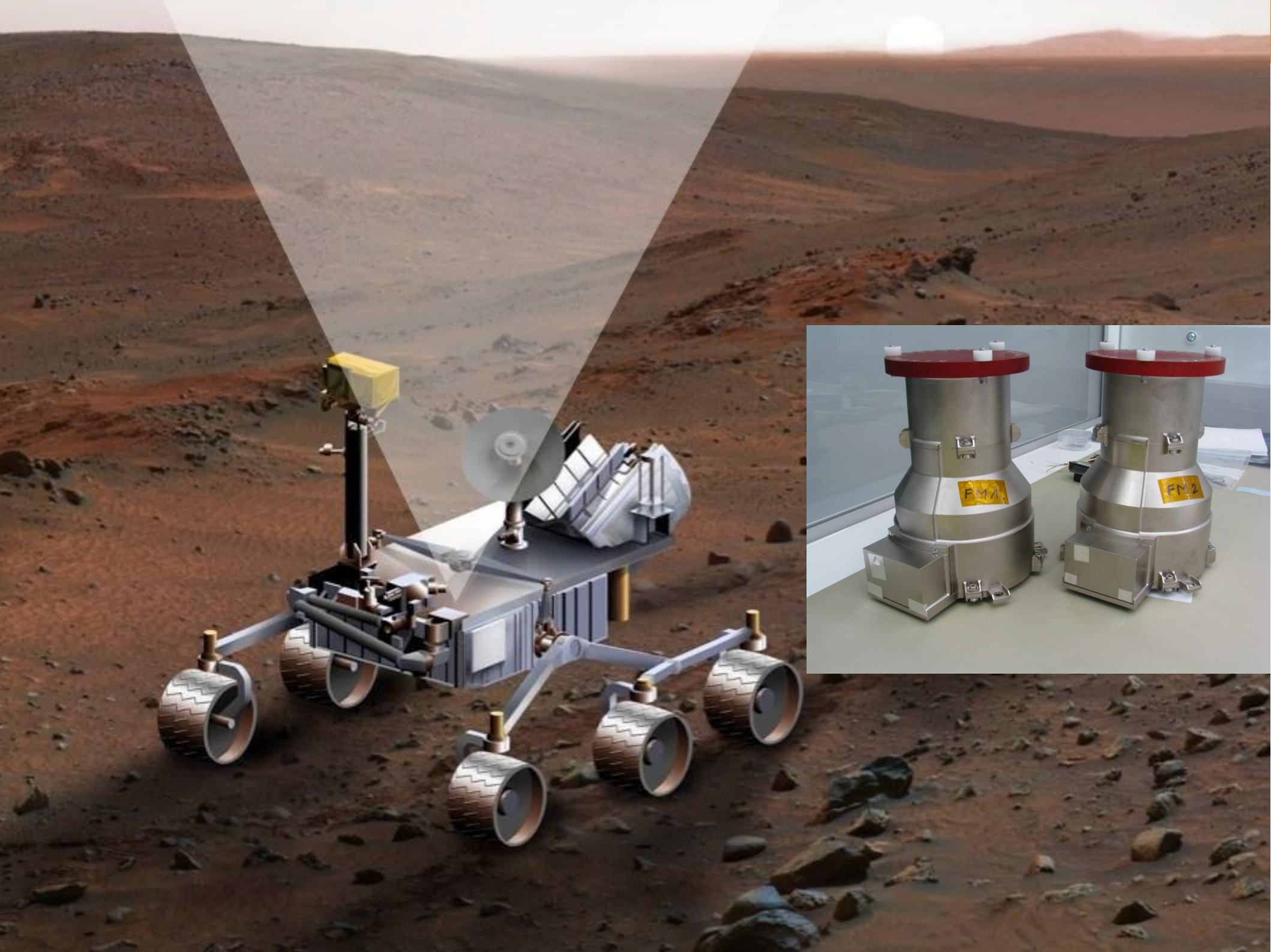
Diese können wir in-situ messen und überprüfen, ob deren Menge zur Erklärung ausreicht.

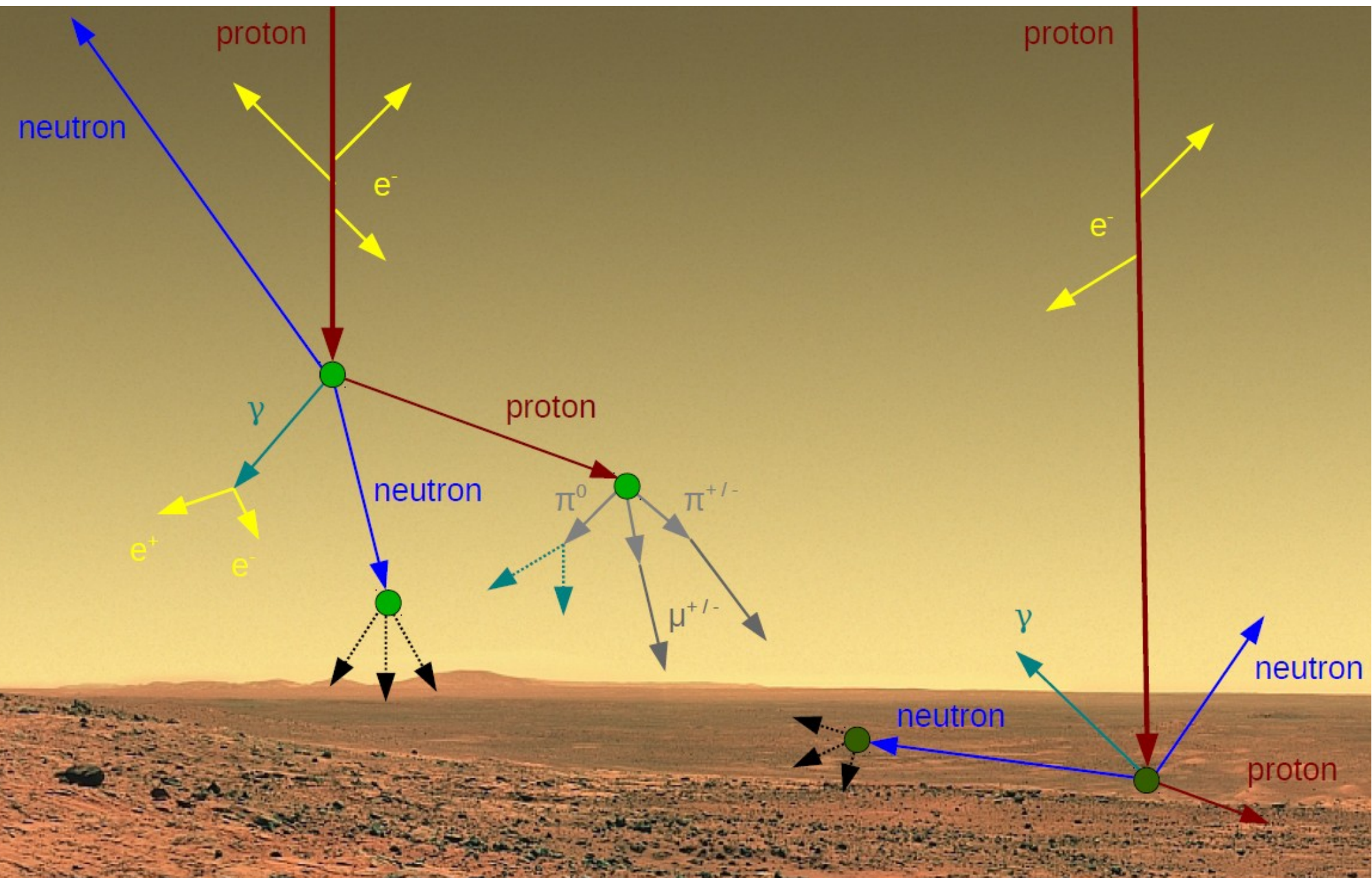












Sekundäre Strahlung (neutrale!) spielt wesentliche Rolle! (Ehresmann, 2011)



Present-day omnidirectional surface fluxes

