

Wechselwirkung mit dem Weltraum: Sonnenwind und kosmische Strahlung

Uwe Motschmann
Institut für Theoretische Physik, TU Braunschweig
DLR Institut für Planetenforschung, Berlin

Ringvorlesung, TU Berlin, 25. Juni 2009

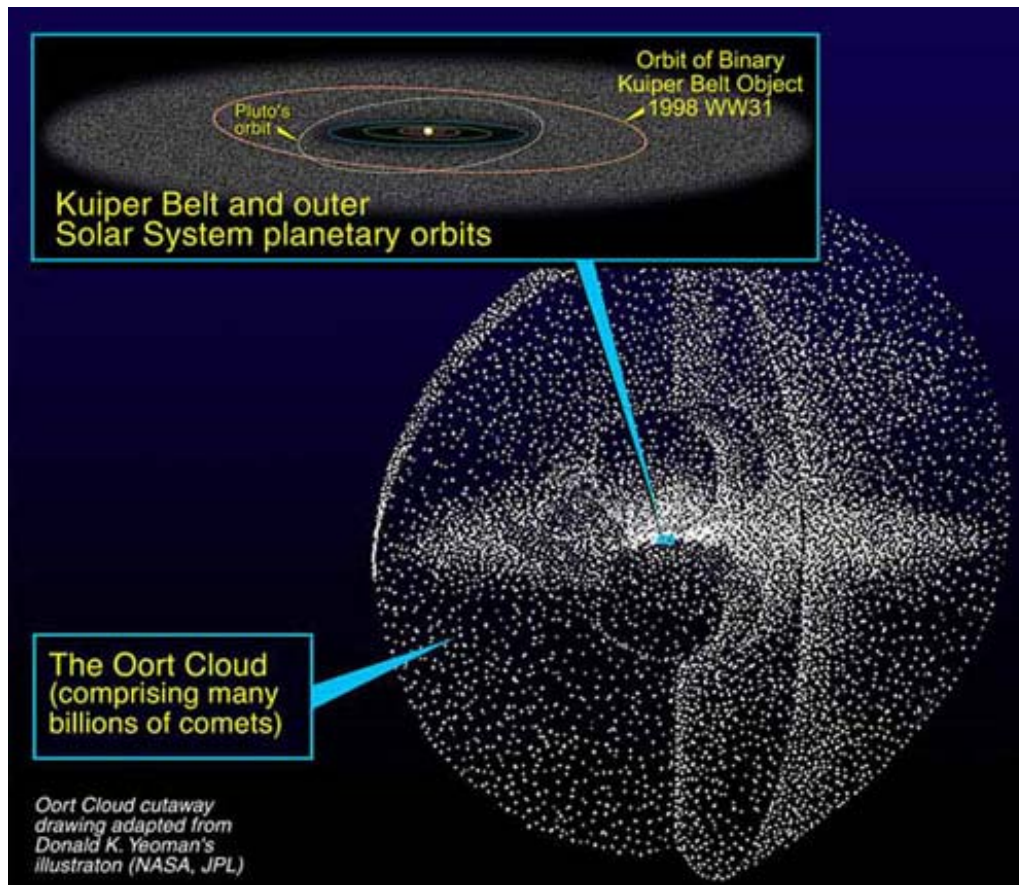
Einbettung im interplanetaren Raum



Merkur
Venus
Erde
Mars
Jupiter
Saturn
Uranus
Neptun
Pluto
Monde
Asteroiden
Kometen
Satelliten
Weltraum-Müll

$N \sim 10^1$ Planeten, 10^5 Asteroiden (10^{12} Kometen)
 $D \sim 10^2$ AU (10^4 AU)

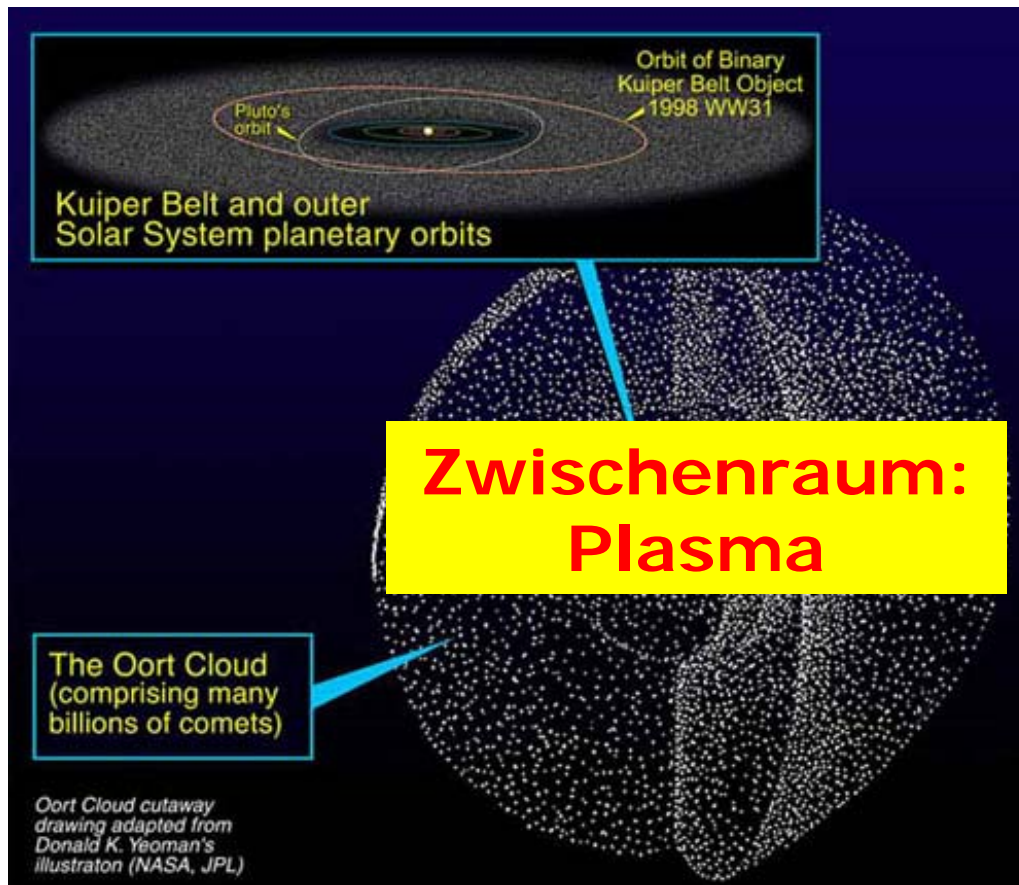
Einbettung im interplanetaren Raum



- Merkur
- Venus
- Erde
- Mars
- Jupiter
- Saturn
- Uranus
- Neptun
- Pluto
- Monde
- Asteroiden
- Kometen
- Satelliten
- Weltraum-Müll

$N \sim 10^1$ Planeten, 10^5 Asteroiden (10^{12} Kometen)
 $D \sim 10^2$ AU (10^4 AU)

Einbettung im interplanetaren Raum



- Merkur
- Venus
- Erde
- Mars
- Jupiter
- Saturn
- Uranus
- Neptun
- Pluto
- Monde
- Asteroiden
- Kometen
- Satelliten
- Weltraum-Müll

$N \sim 10^1$ Planeten, 10^5 Asteroiden (10^{12} Kometen)
 $D \sim 10^2$ AU (10^4 AU)

Einbettung in der Milchstrasse



© Mark A. Garlick / space-art.co.uk

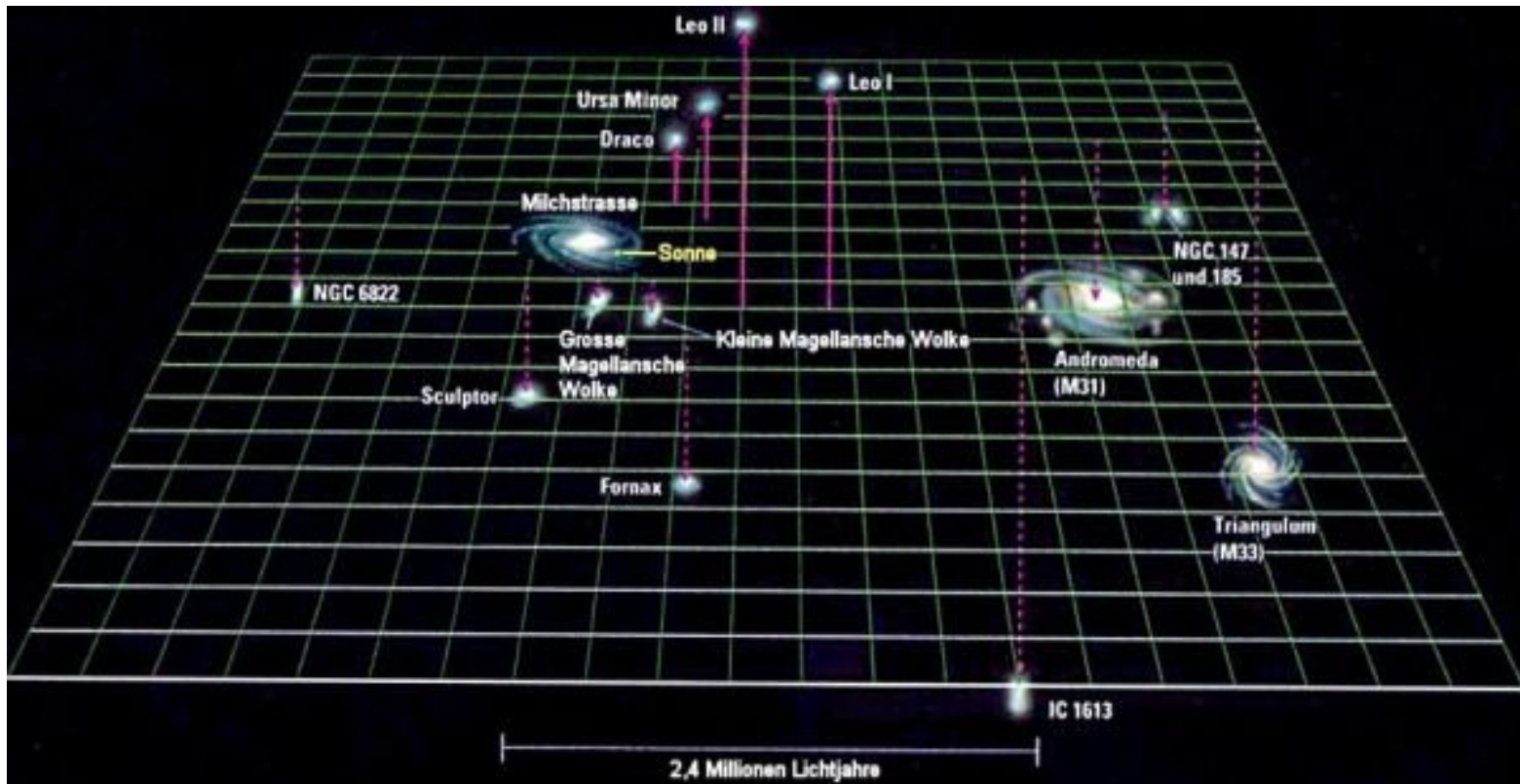
$N \sim 100 \text{ Mrd Sterne}$
 $D \sim 100\,000 \text{ Lj}$

Einbettung in der Milchstrasse



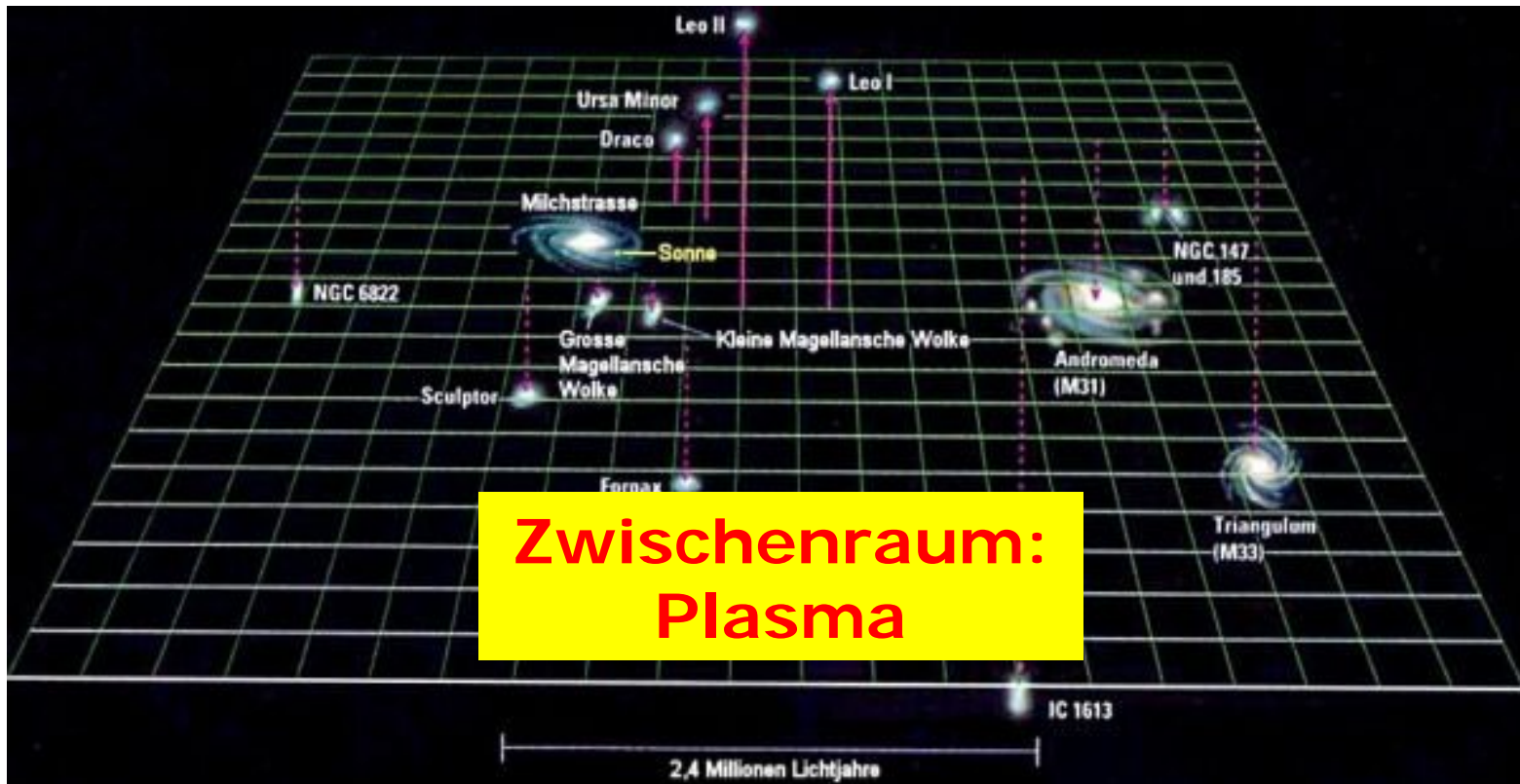
$N \sim 100$ Mrd Sterne
 $D \sim 100\ 000$ Lj

Einbettung in der Lokalen Gruppe



$$D \sim 5 \dots 7 \cdot 10^6 \text{ Lj}$$

Einbettung in der Lokalen Gruppe



$$D \sim 5 \dots 7 \cdot 10^6 \text{ Lj}$$

Einbettung im Virgo-Superhaufen



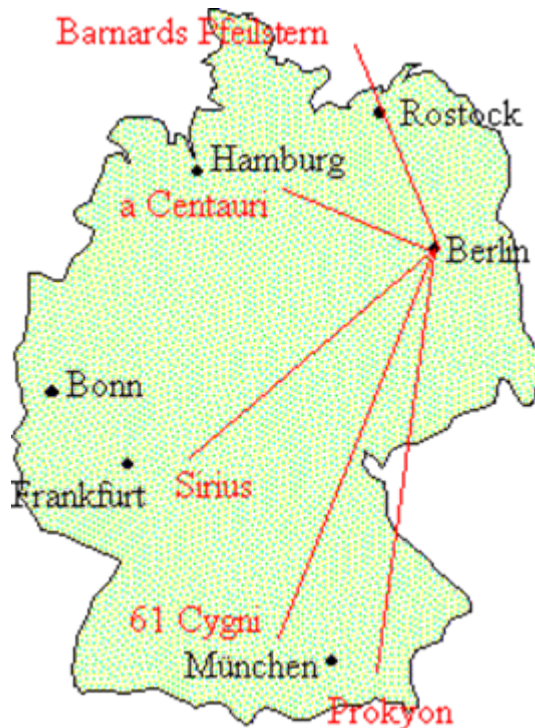
$D \sim 200 \cdot 10^6 \text{ Lj}$

Einbettung im Virgo-Superhaufen



$D \sim 200 \cdot 10^6 \text{ Lj}$

Stern-Abstände in der Milchstrasse



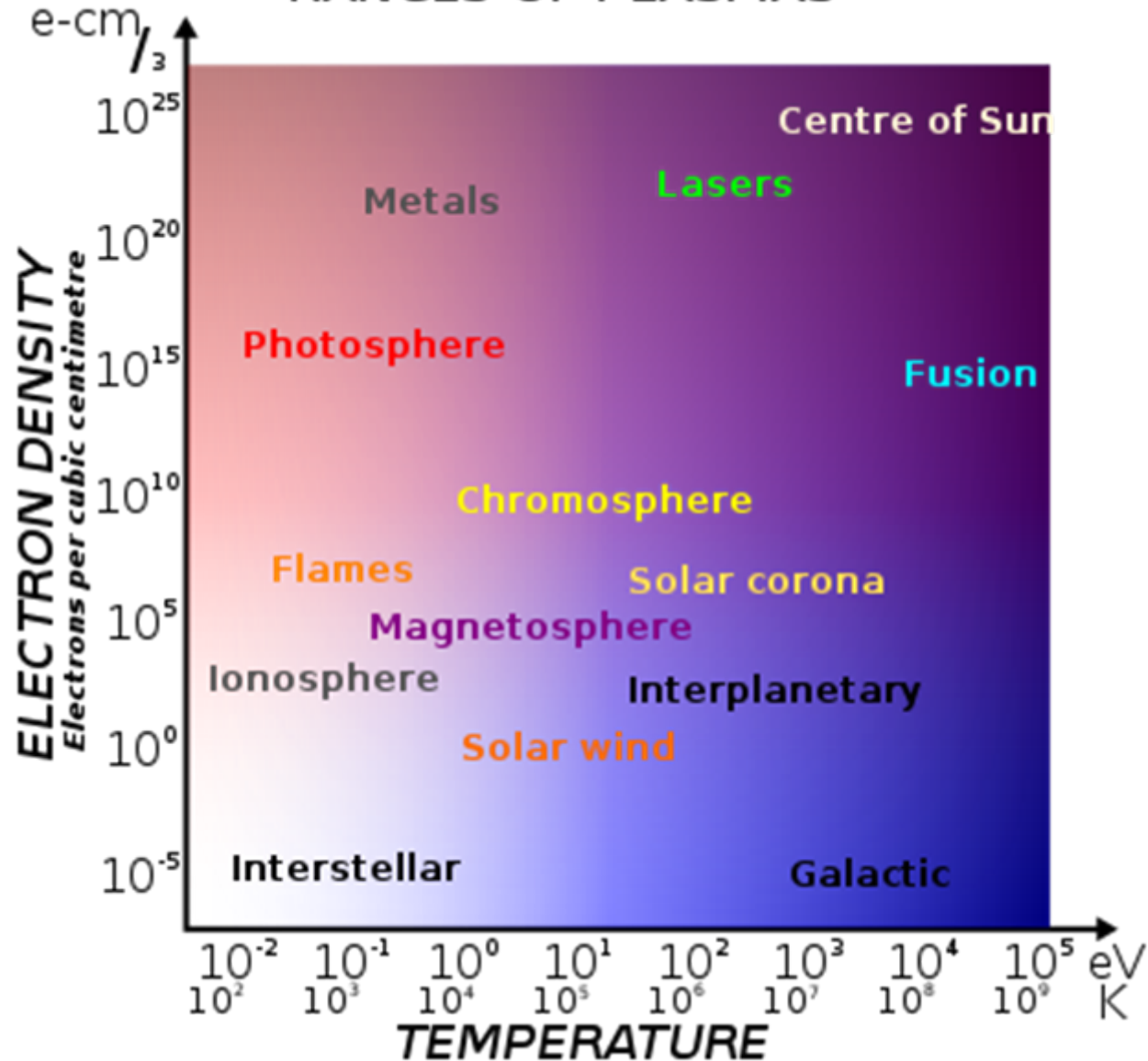
Wie gross sind die Sterne im Vergleich zu ihren Abständen untereinander?

6mm

Zwischenraum: Kosmisches Plasma

- 4. Aggregatzustand
- Exotisch für irdische Erfahrungswelt
- Normalzustand im Universum: >99%
- Inneres der Sterne: Extrem dicht
- Zwischenraum: Extrem dünn
- Neutrale Inseln: <1% (Planeten u.ä.)

RANGES OF PLASMAS



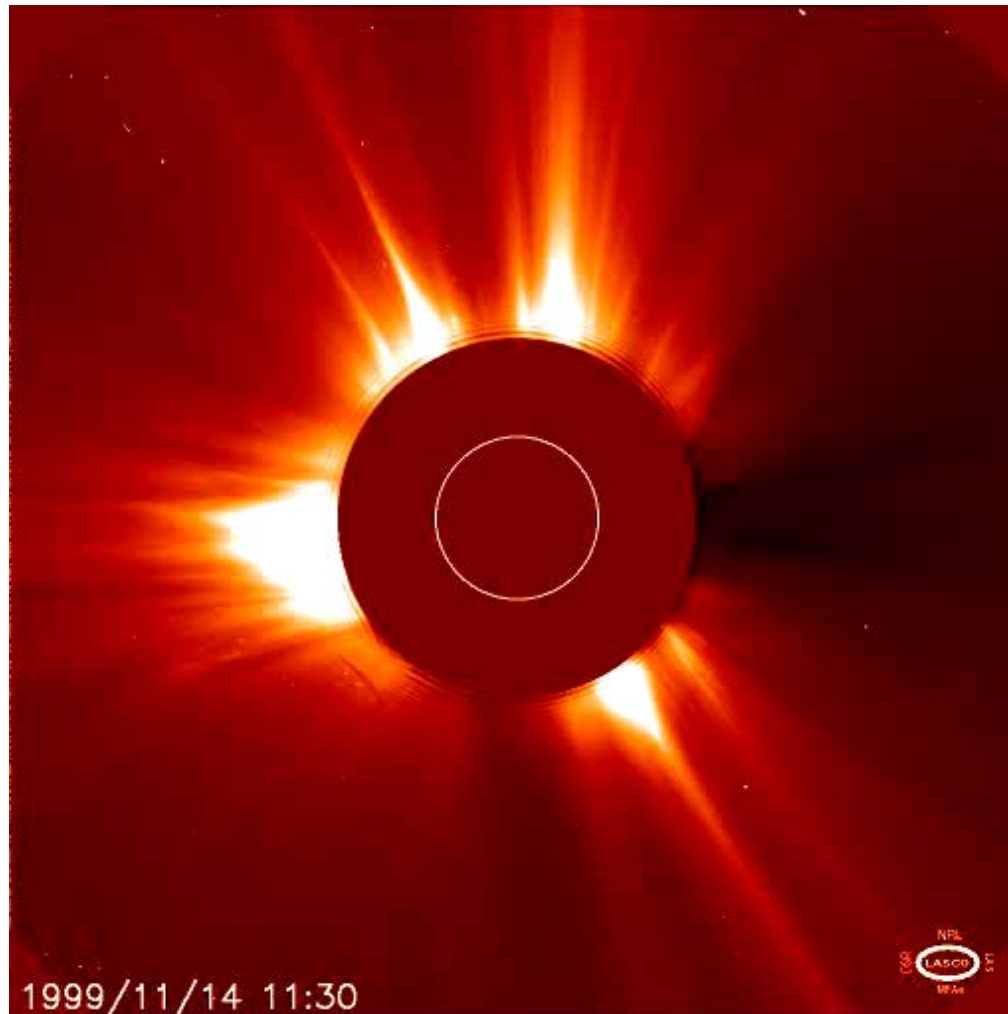
Quellen des interplanetaren Plasmas

- Sonne mit Sonnenwind
- Atmosphären/Ionosphären von Planeten und Monden
- Kometen
- Interstellares Plasma
- Intergalaktisches Plasma u. kosmische Strahlung

Sonnenwind als Fortsetzung der Korona



Sonnenwind



Sonnenwind in Erdnähe

Komposition	96% H ⁺ , 4% He ⁺⁺ , <1% Metalle, e
Dichte	5 cm ⁻³
Geschwindigkeit	400 km/s
Protonen-Temp	4 10 ⁴ K
Elektronen-Temp	2 10 ⁵ K
Magnetfeld	5 nT
Gesamtverlust	1 Mio t/s

Sonnenwind in Erdnähe

Komposition	96% H ⁺ , 4% He ⁺⁺ , <1% Ionen, e
Dichte	5 cm ⁻³
Geschwindigkeit	400 km/s
Protonen-Temp	4 10 ⁴ K
Elektronen-Temp	2 10 ⁵ K
Magnetfeld	5 nT
Gesamtverlust	1 Mio t/s
	10 ⁻¹⁴ Sonnenmassen/Jahr

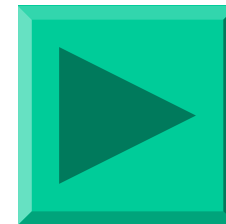
Sonnenwind in Erdnähe

Komposition	96% H ⁺ , 4% He ⁺⁺ , <1% Ionen, e
Dichte	5 cm ⁻³
Geschwindigkeit	400 km/s
Protonen-Temp	4 10 ⁴ K
Elektronen-Temp	2 10 ⁵ K
Magnetfeld	5 nT
Gesamtverlust	1 Mio t/s
	10 ⁻¹⁴ Sonnenmassen/Jahr
	1 Ostsee/Jahr

Sonnenwind-Entstehung

Sonnenwind ist die Fortsetzung der Korona
Korona befindet sich nicht im hydrostatischen Gleichgewicht
Korona befindet sich permanenter Flucht/hydrod. Flucht (Parker, 1959)

Entdeckung, 1951, Ludwig Biermann, Kometenschweife



Biermann, 1907-1986

Hydrostatisches Gleichgewicht

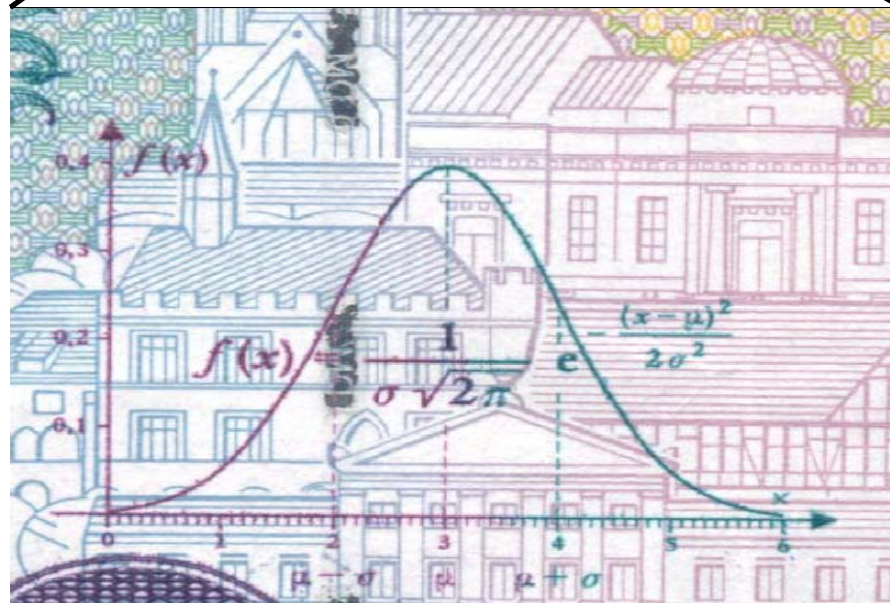
vs.

Hydrodynamische Flucht

- Hydrostatisches Gleichgewicht
 - Mehrzahl der Teilchen bleibt erhalten
 - Jeans-Flucht weniger Teilchen
- Hydrodynamische Flucht
 - Mehrzahl der Teilchen entweicht
- Erklärung
 - Gauss-Verteilung der Teilchen



Gauss-Verteilung der Teilchen



Hydrodynamische Flucht:
Mittlere Geschw. > 0

Jeans-Flucht:
Mittlere Geschw. $= 0$,
 $v_{\text{part}} > v_{\text{esc}} (= 11 \text{ km/s})$

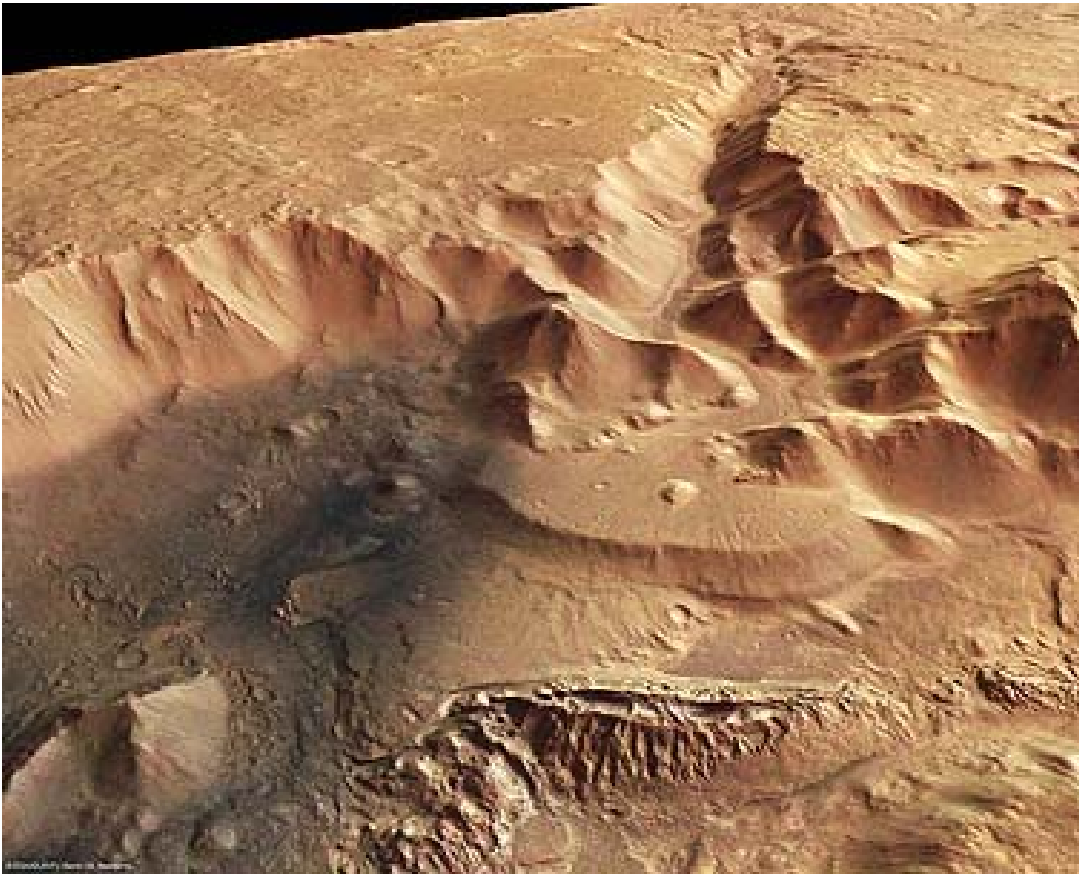
Planeten als Plasma-Quelle



Atmosphären im
Hydrostatischen
Gleichgewicht,

Jeans-Flucht
 10^0 kg/s

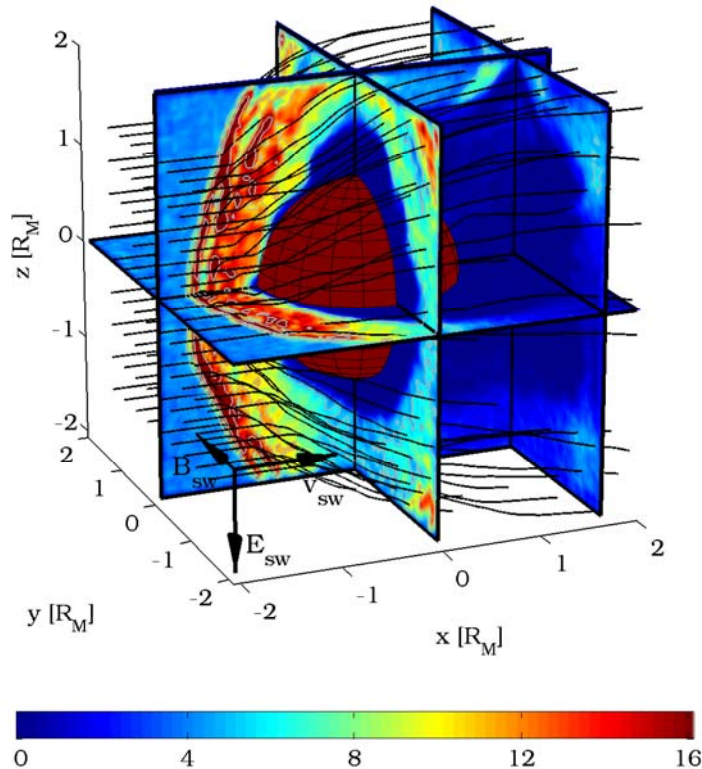
Wasser des Mars als Plasma-Quelle



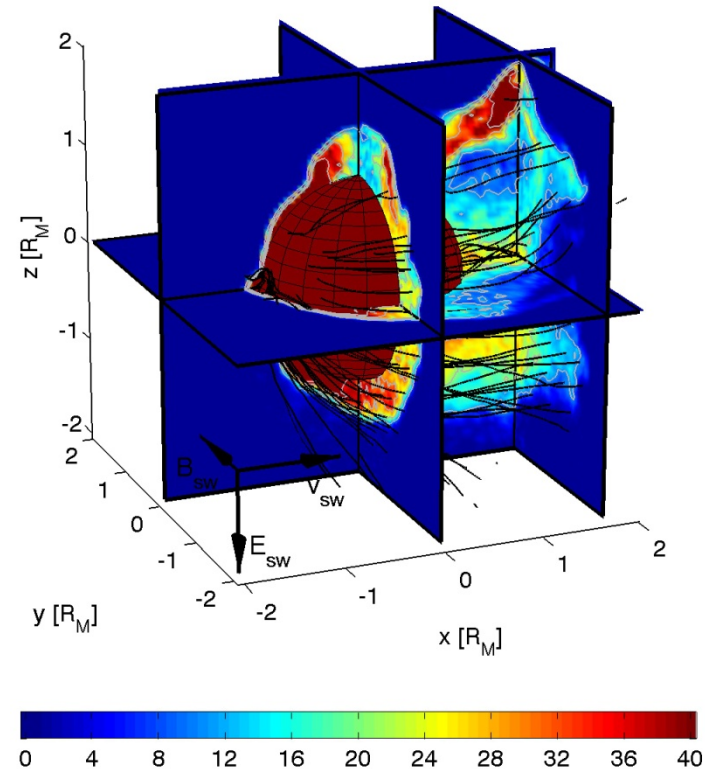
Jeans-Flucht
+
Nichtthermische Verluste:
Ionen-Pickup

Flussdelta in Nepenthes Mensae [www.dlr.de]

Simulation der Mars-Umgebung



Solar wind density n_{sw} [cm^{-3}]



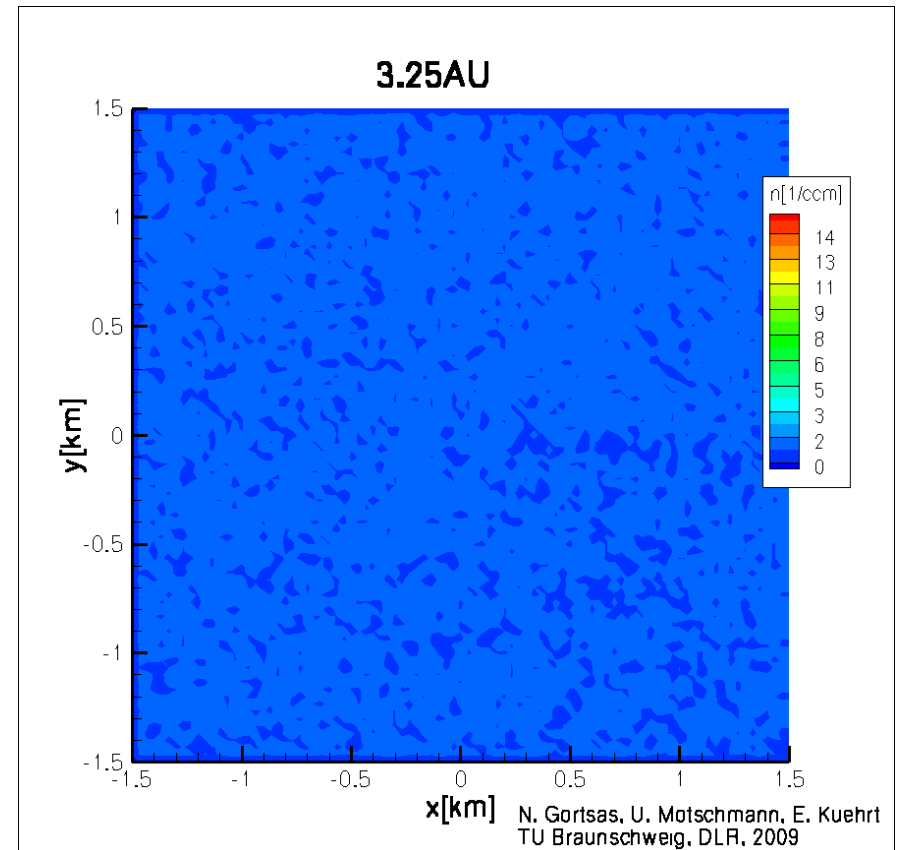
O^+ density n_h [cm^{-3}]

[A. Böswetter et al, 2007]

Kometen als Plasma-Quelle



[Michael Weiler, DLR, 2003]

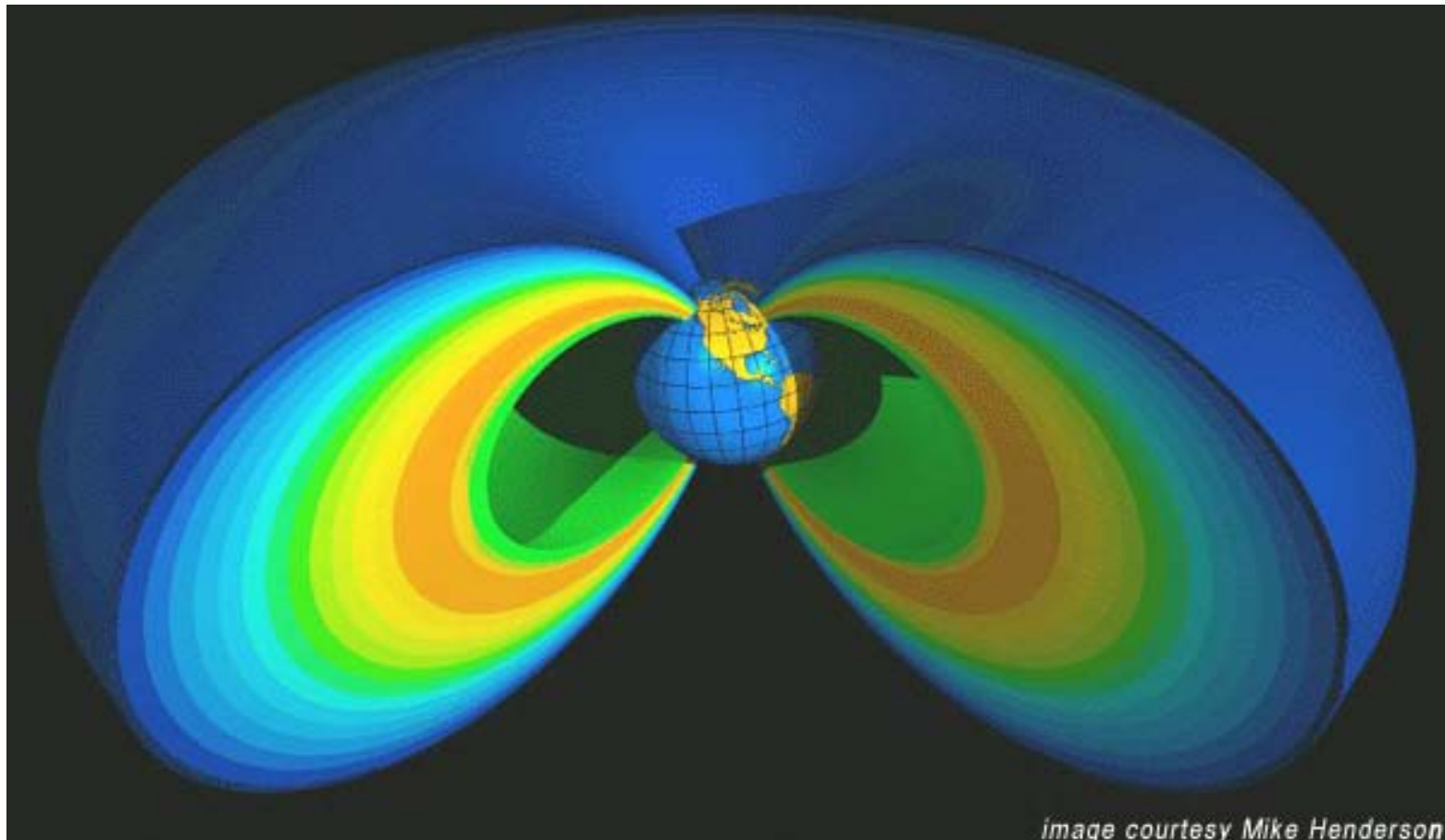


Produktionsraten: g ... kg/s

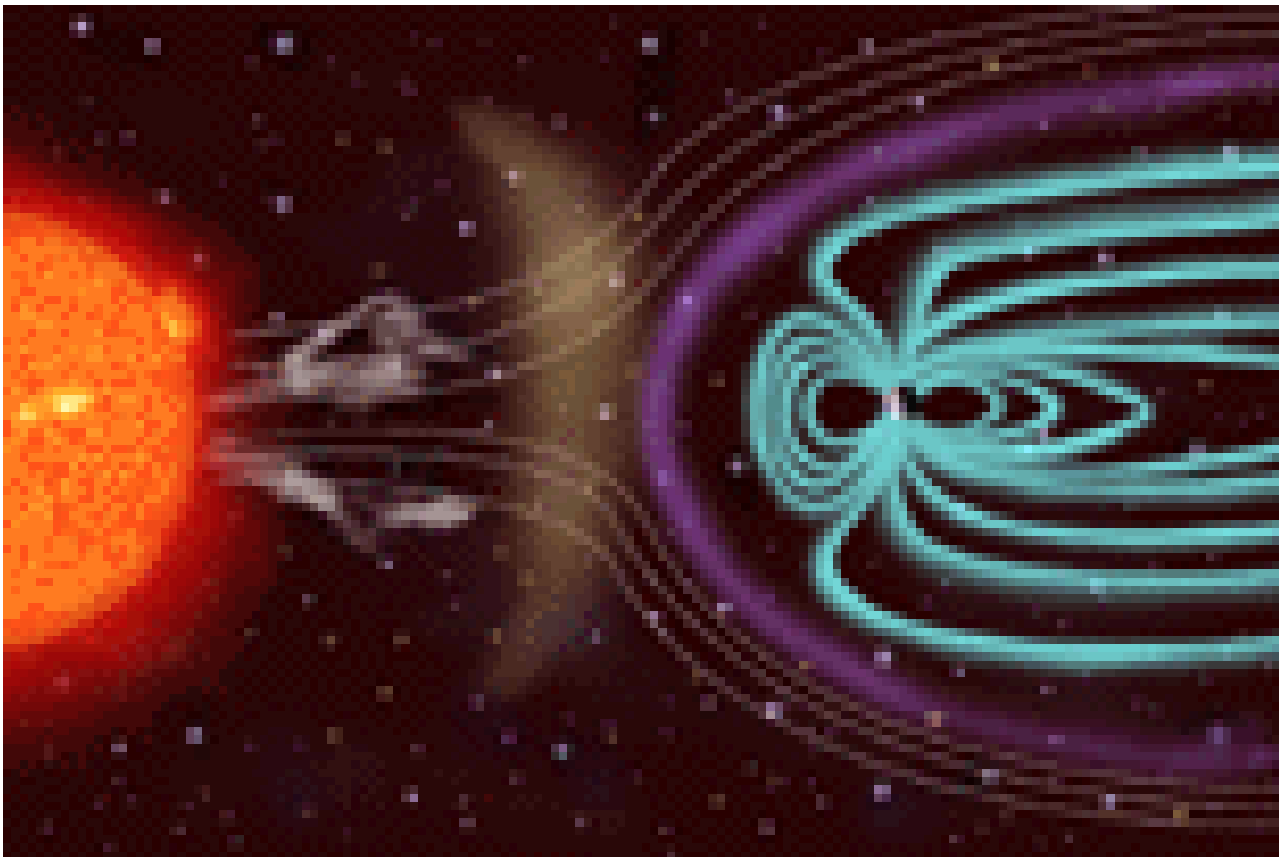
Dynamik der Wechselwirkung des Plasmas mit Erde u.a. Objekten

- Hohe Relativgeschwindigkeiten zwischen Objekten und dem umgebenden Plasma
- Dominanz des Sonnenwind-Plasmas
- Bedingungen für den Rücktransport des umgebenden Plasmas in Atmosphären oder auf Oberflächen von Planeten

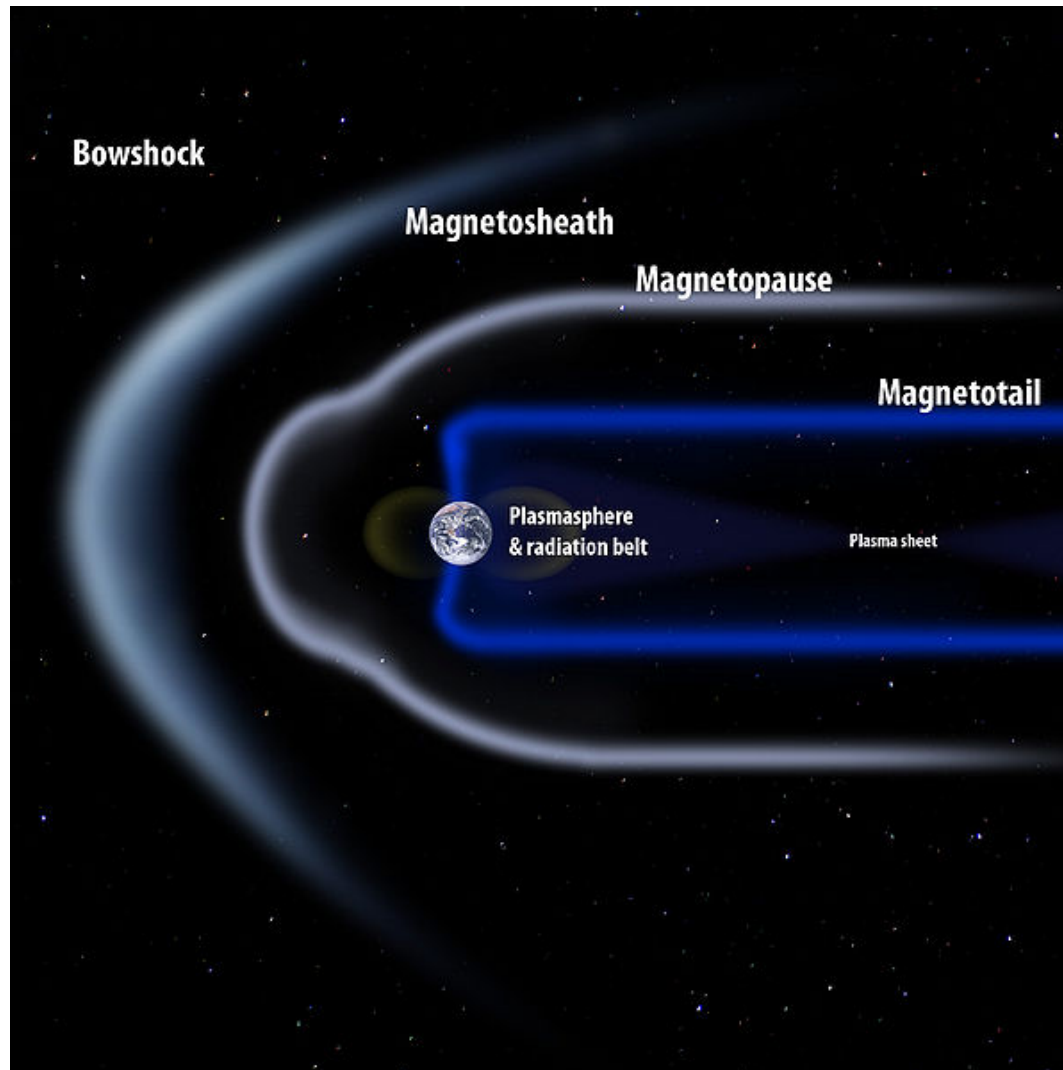
Magnetfeld der Erde



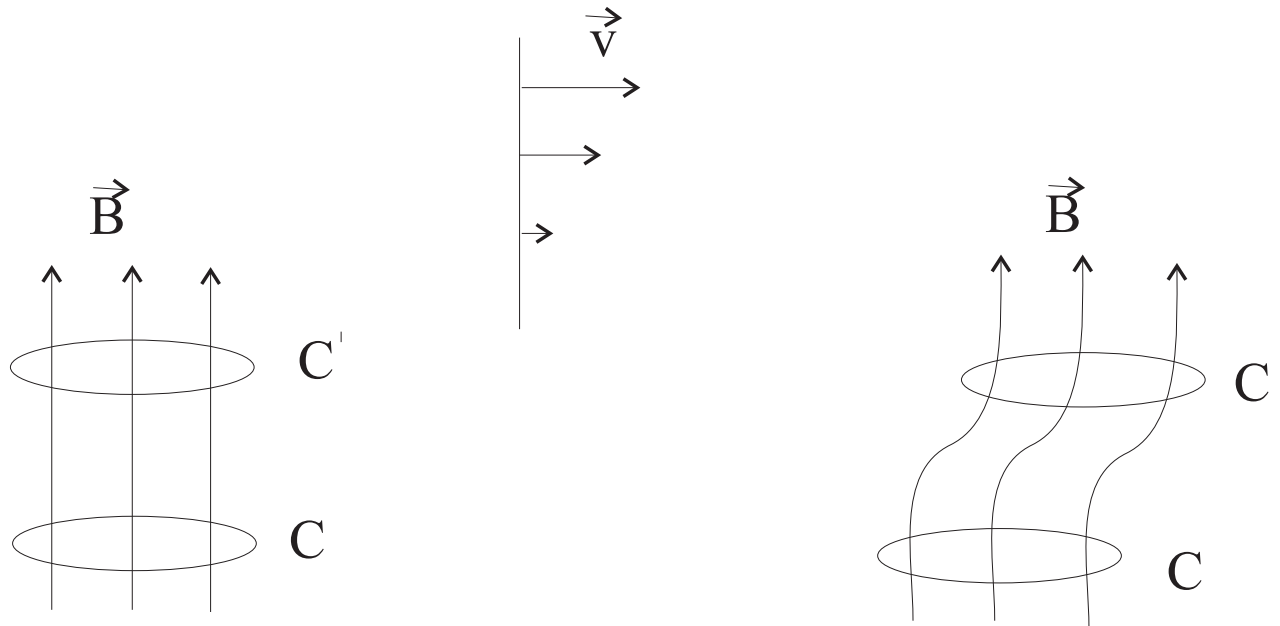
Deformation des Erdmagnetfeldes durch den Sonnenwind



Magnetosphäre der Erde

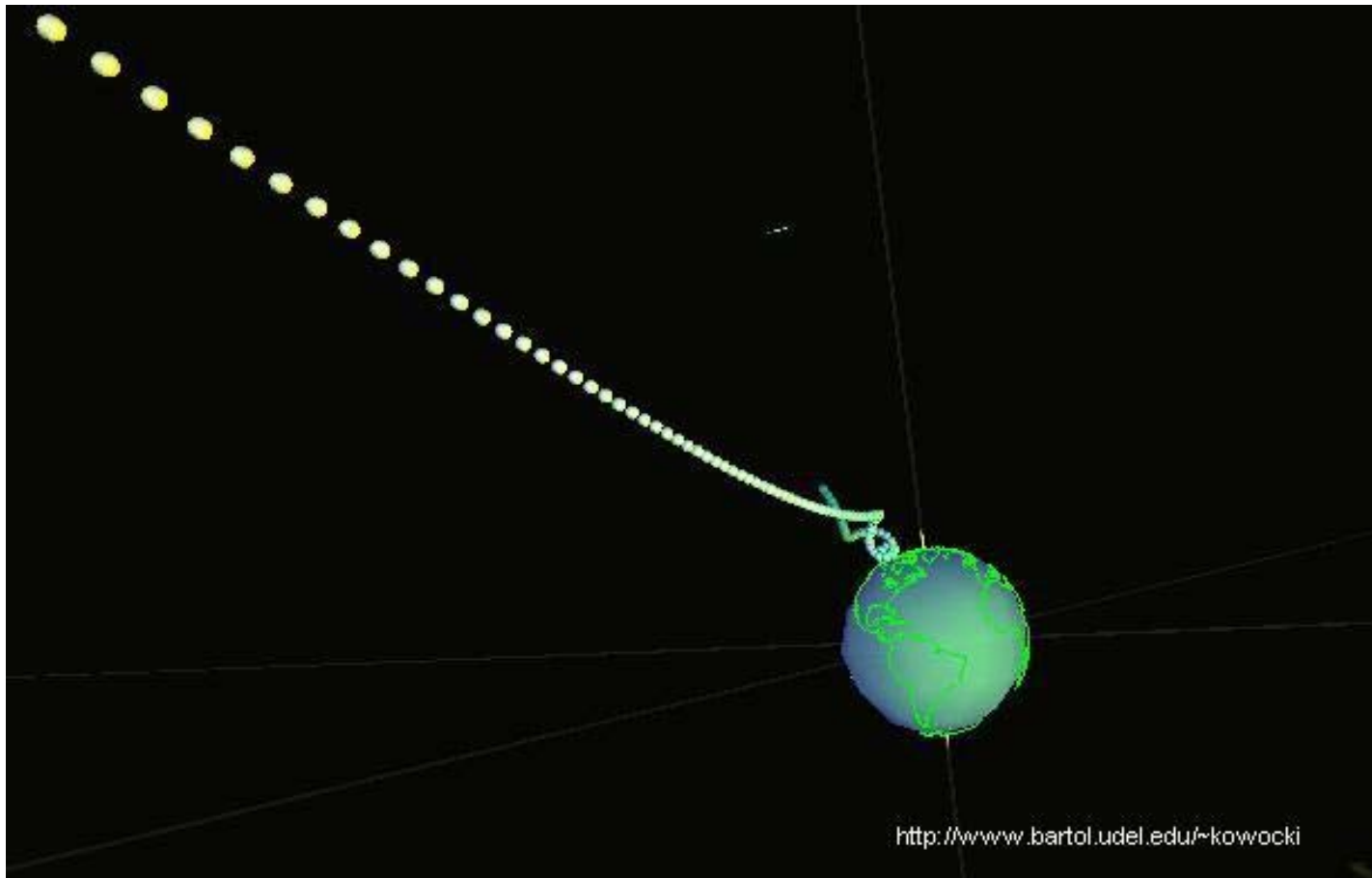


Frozen-In-Theorem



- Magnetfeld ist im Plasma „eingefroren“
- Magnetfeld und Plasma bewegen sich gemeinsam

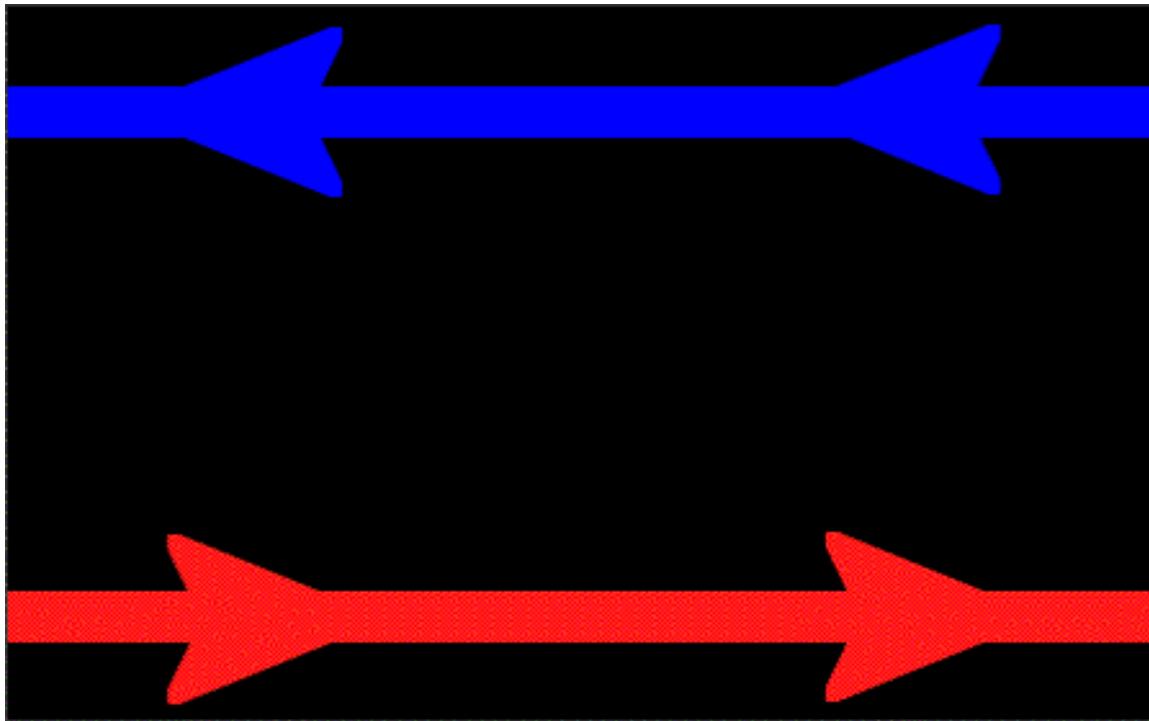
Eindringen energetischer Teilchen



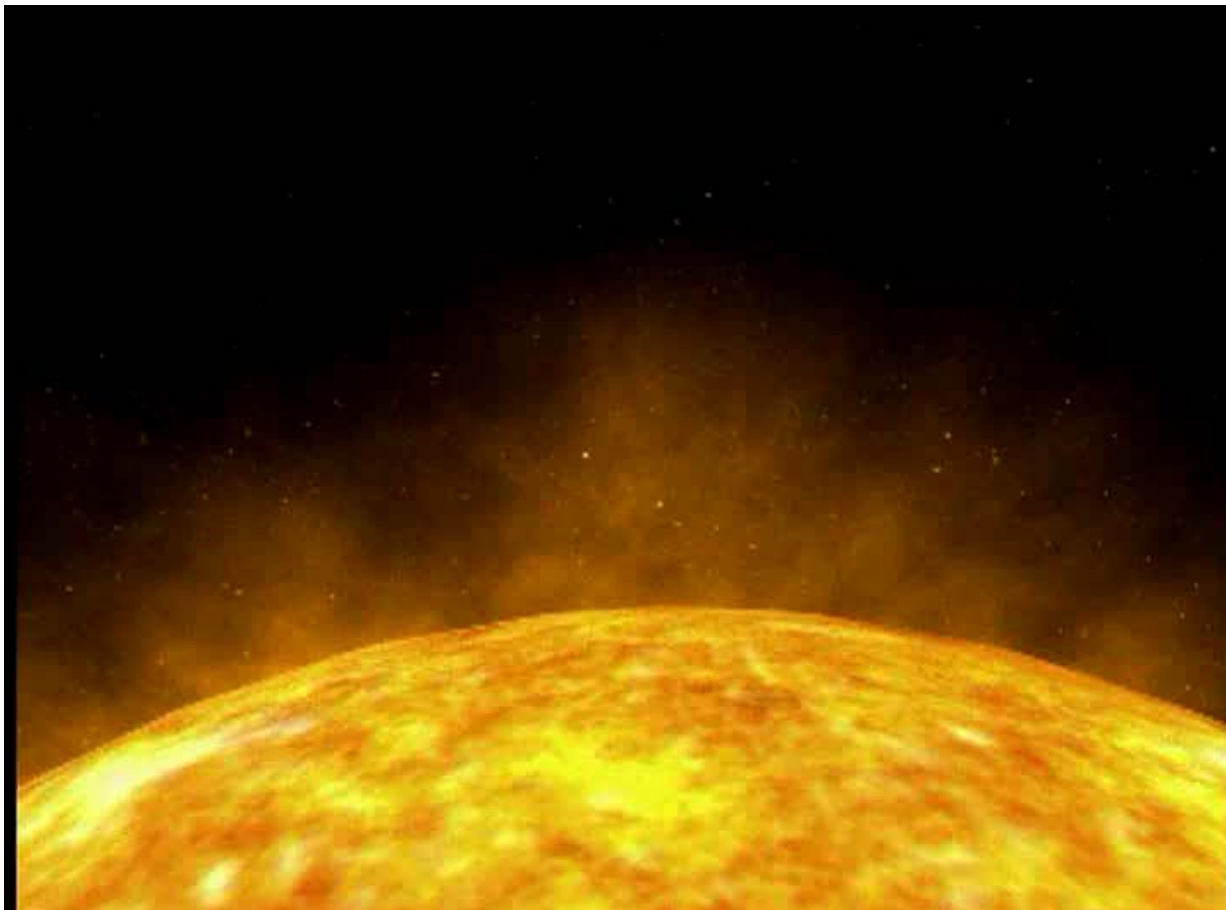
Polarlicht



Öffnen der Magnetopause durch Rekonnexion

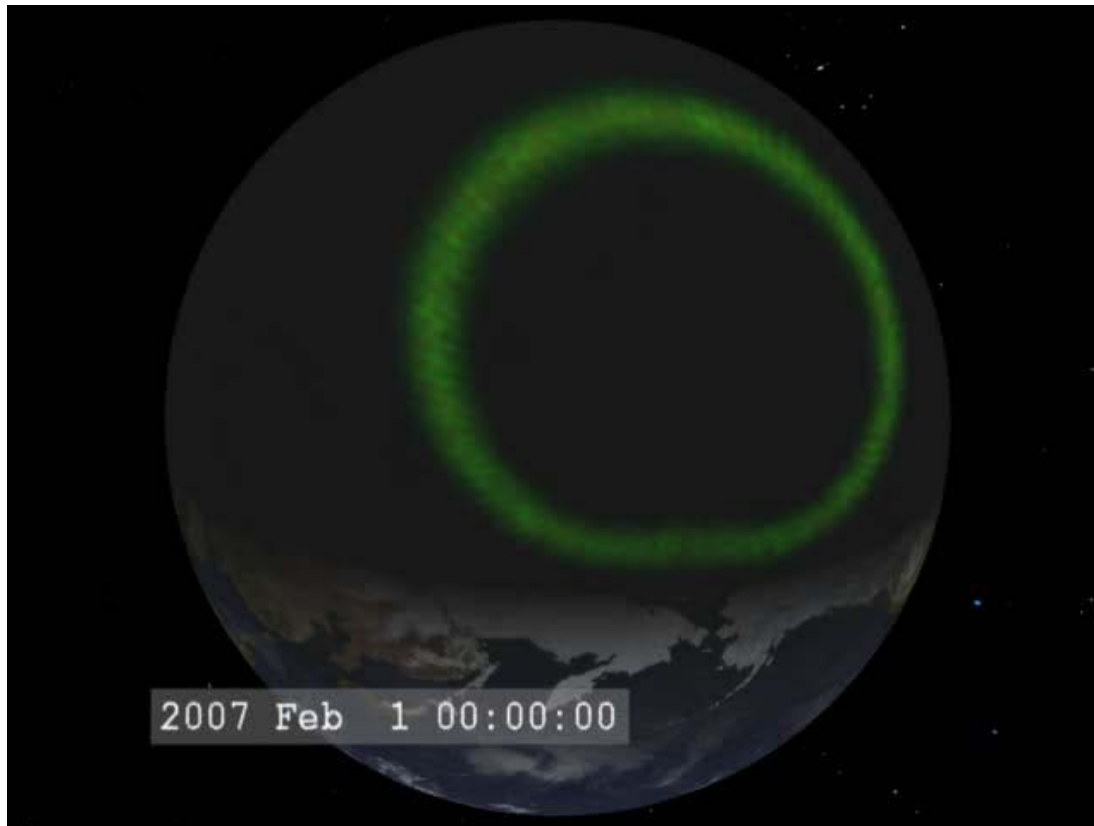


Öffnen der Magnetopause durch Rekonnexion



Animation zum
Space Weather

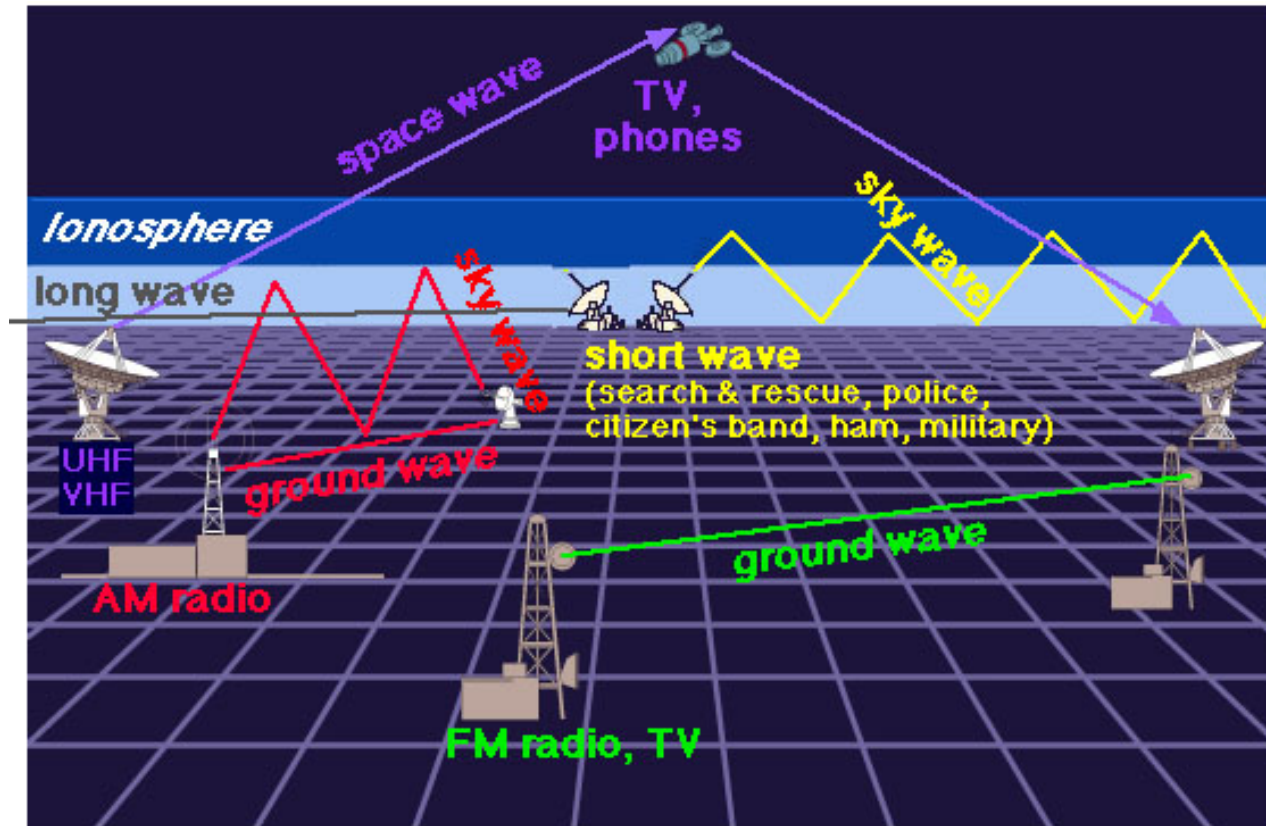
Öffnen der Magnetopause durch Rekonnexion



Animation und
Simulation zur
THEMIS-Mission

[www.nasa.gov]

Space Weather



[spaceweather.com]

Plasma-Quellen jenseits des Sonnensystems

=

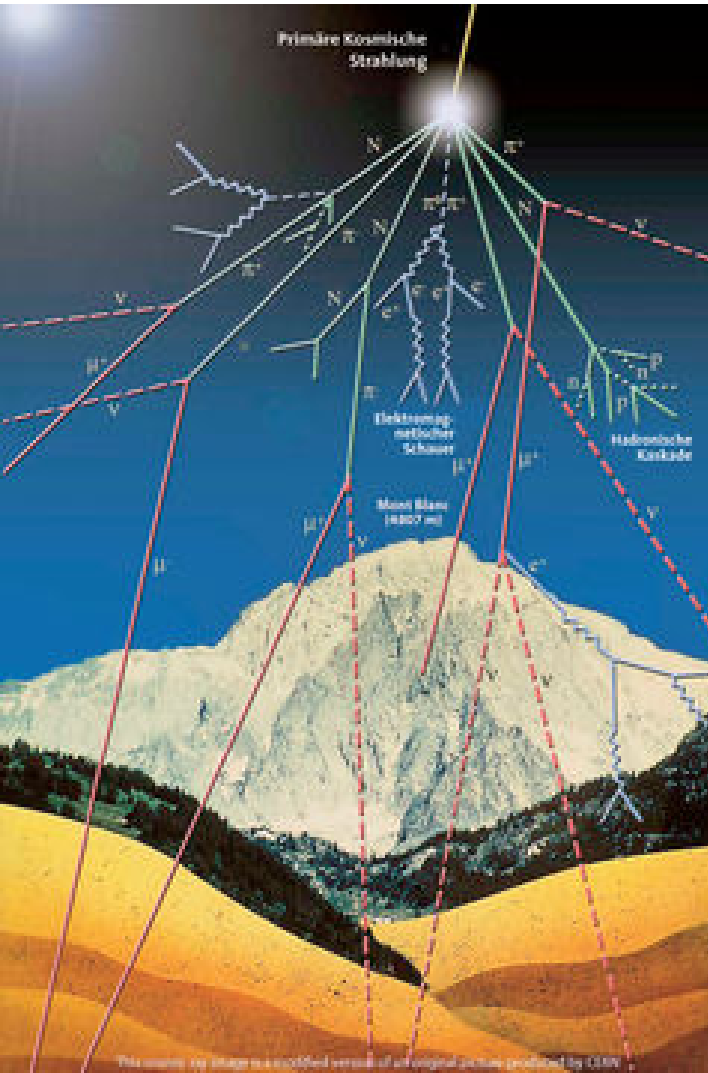
Kosmische Strahlung

Plasma kann aus dem interstellaren oder dem intergalaktischen Raum in den interplanetaren Raum eindringen

Ununterscheidbar bei ähnlichen Eigenschaften

Unterscheidbar durch hohe Energie ($v \approx c$)

Kosmische Strahlung



$v \approx c$:

Kaum Beeinflussung
durch Magnetosphäre,
Vordringen in Atmosphäre,
Auslösung von Reaktionen

98% Ionen:

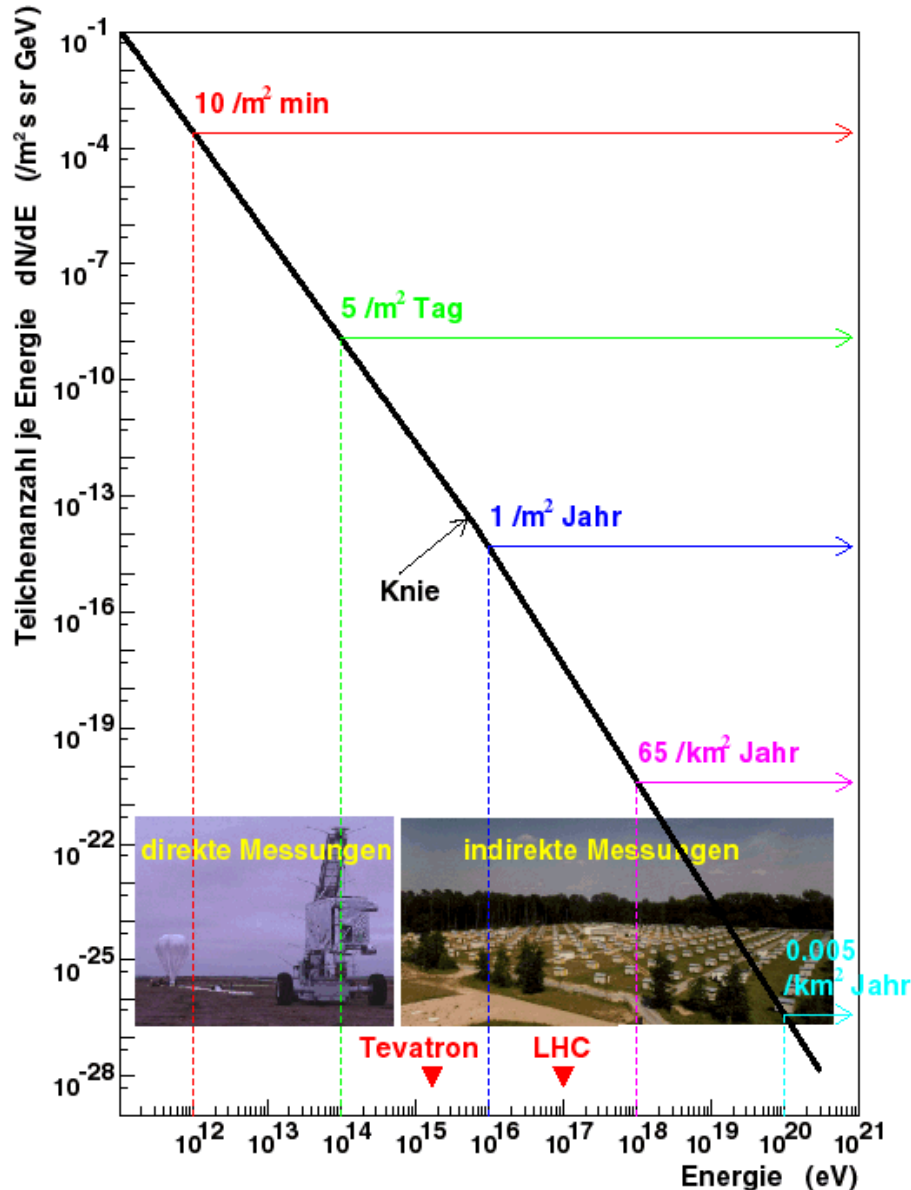
87% H^+

12% He^{++}

1% Schwere
bis Aktiniden

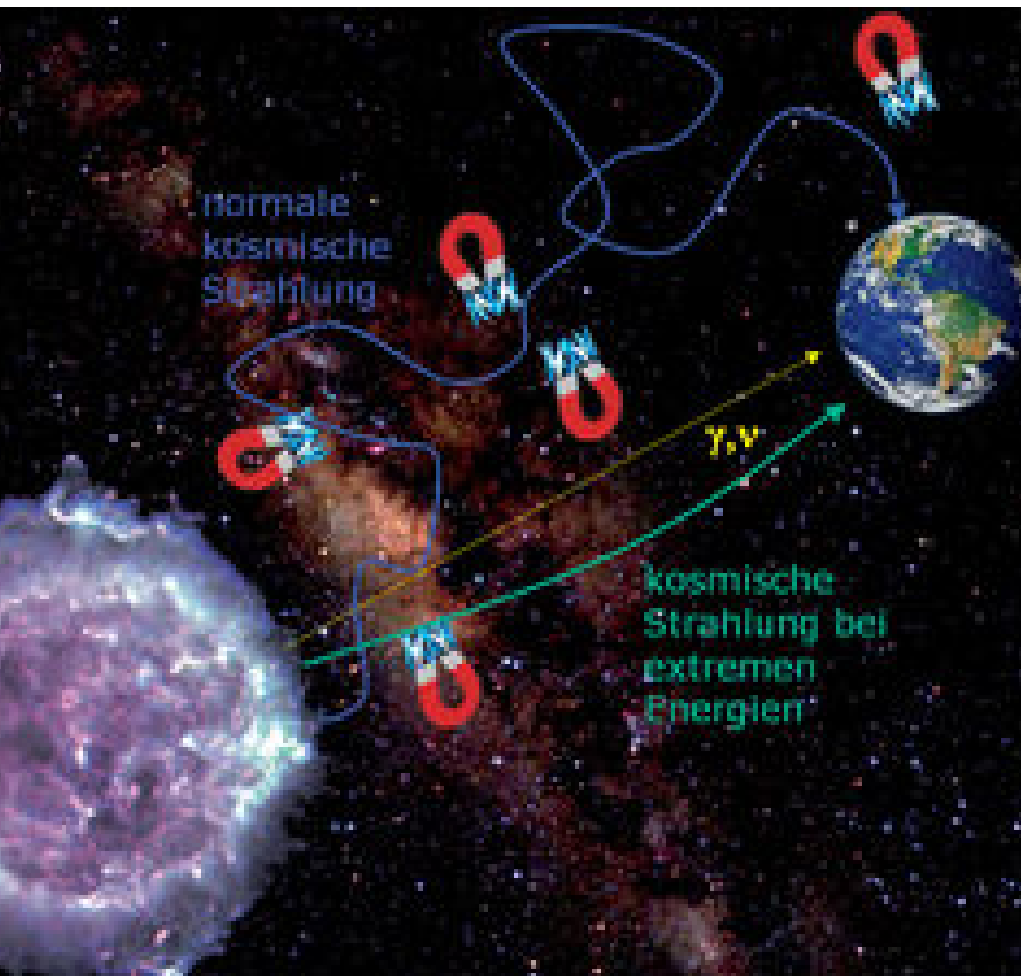
2% Elektronen

Energiespektrum der kosmischen Strahlung



Vgl:
 Ruheenergie Elektron: MeV
 Ruheenergie Proton: GeV
 >>>>
 Relativistische Geschwindigkeiten

Kosmische Strahlung

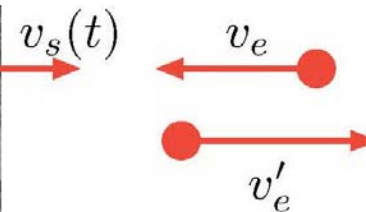


Isotroper Einfall auf die Erde

Entstehung in Supernovae,
AGN, ...

Fermi-Beschleunigung

Fermi-Beschleunigung



$$v'_e = v_e + 2v_s(t)$$

- $v_s > 0$, energy gain
 $v_s < 0$, energy loss

- Let $v_s = v_{s0} \cos \omega t$
 $\langle v_e'^2 \rangle = v_e^2 + 2v_{s0}^2$

A net energy gain

Entdeckung der Kosmischen Strahlung



Viktor Hess 1883-1964
Nobelpreis 1936



Ballonexperiment 1912

Ende