

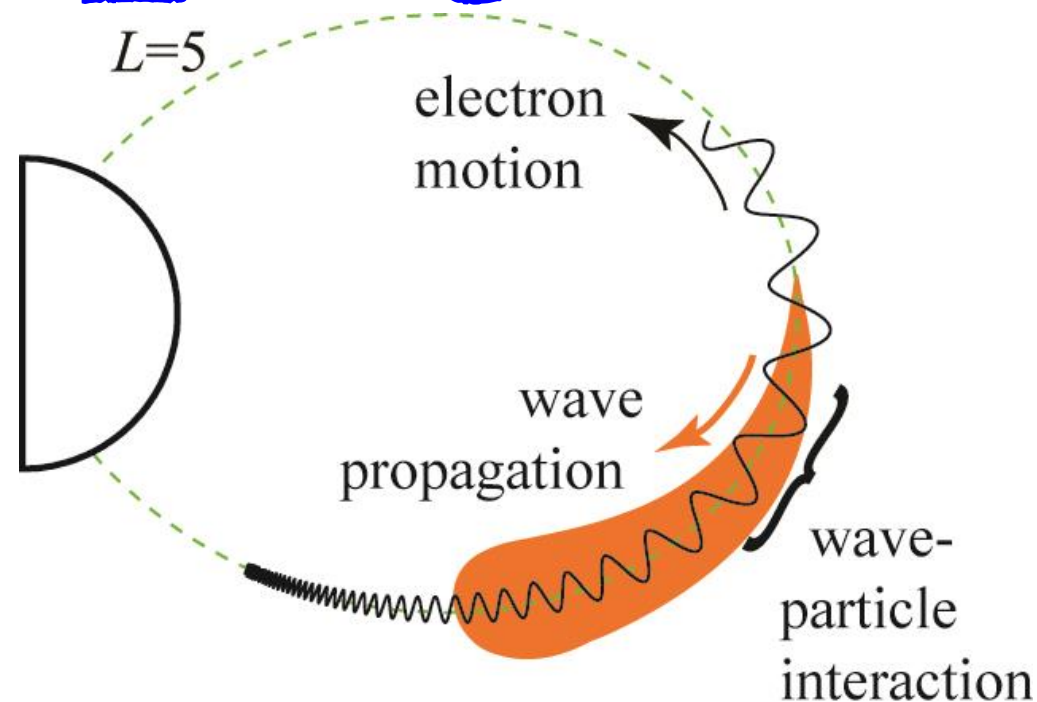
Space Physics Master's Course

Lecture 5

Plasma Population Description

(Non)Adiabatic processes

Sun-Earth Connection



RECOMMENDED READING

Διαστημική Φυσική: Δαγκλής, Κατσαβριάς,
Γεωργίου, Σέργης. Κεφάλαιο 4

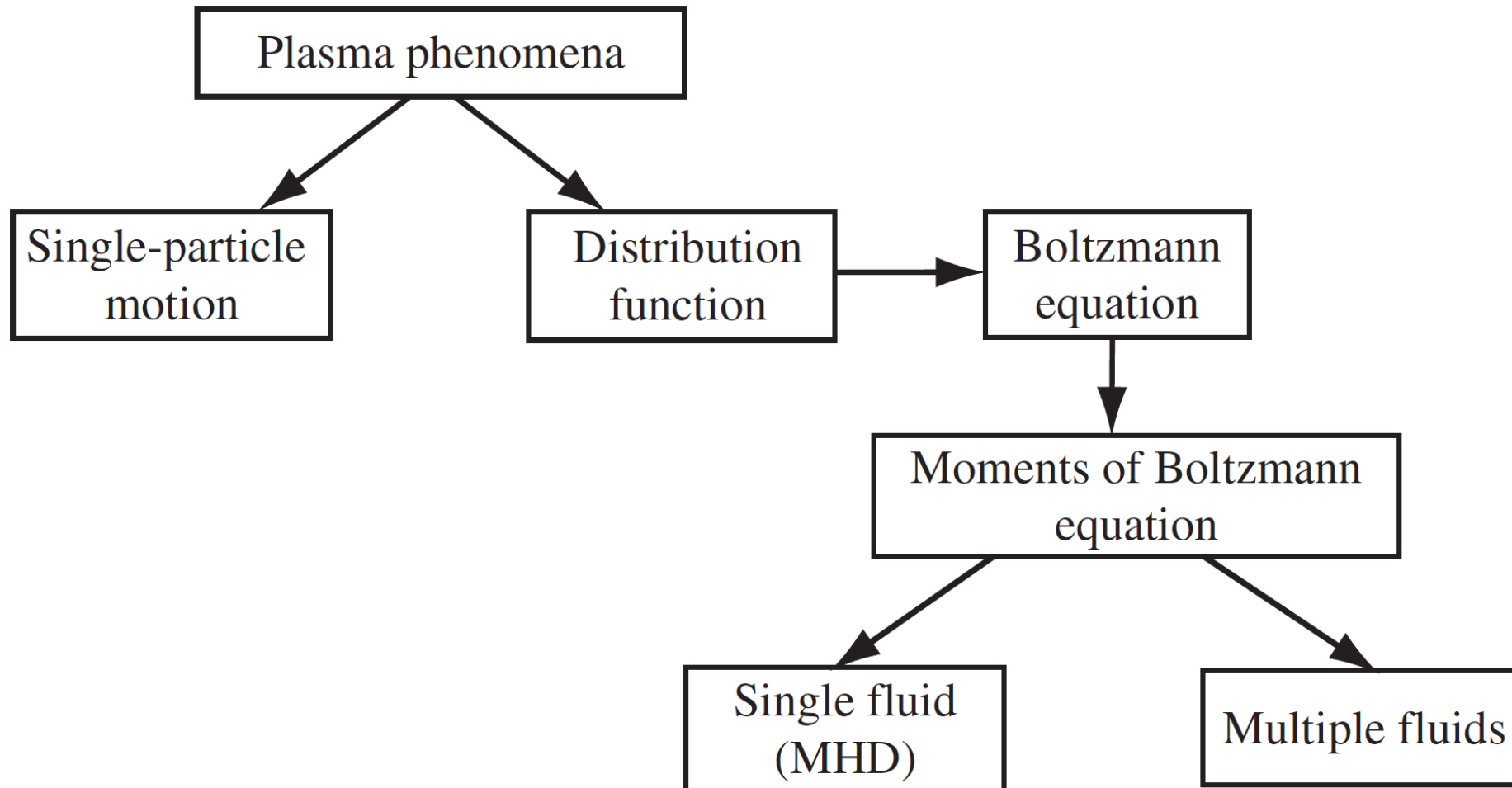
(<https://repository.kallipos.gr/handle/11419/11507>)

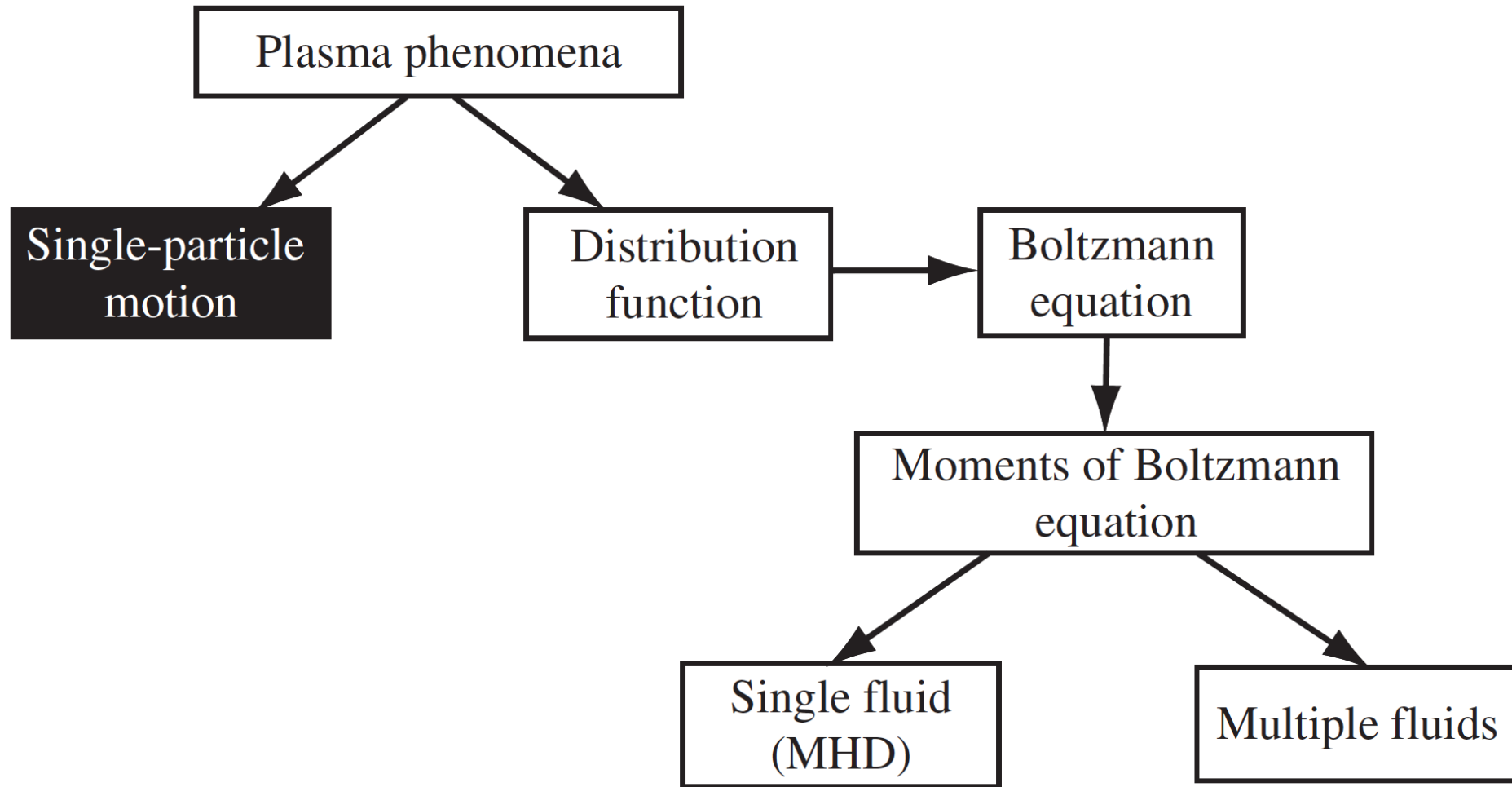
Physics of Earth's Radiation Belts: Koskinen and
Kilpua. Κεφάλαιο 3

(<https://link.springer.com/content/pdf/10.1007/978-3-030-82167-8.pdf>)

Space Physics: May-Britt Kallenrode. Κεφάλαιο 5

Περιγραφή πλάσματος

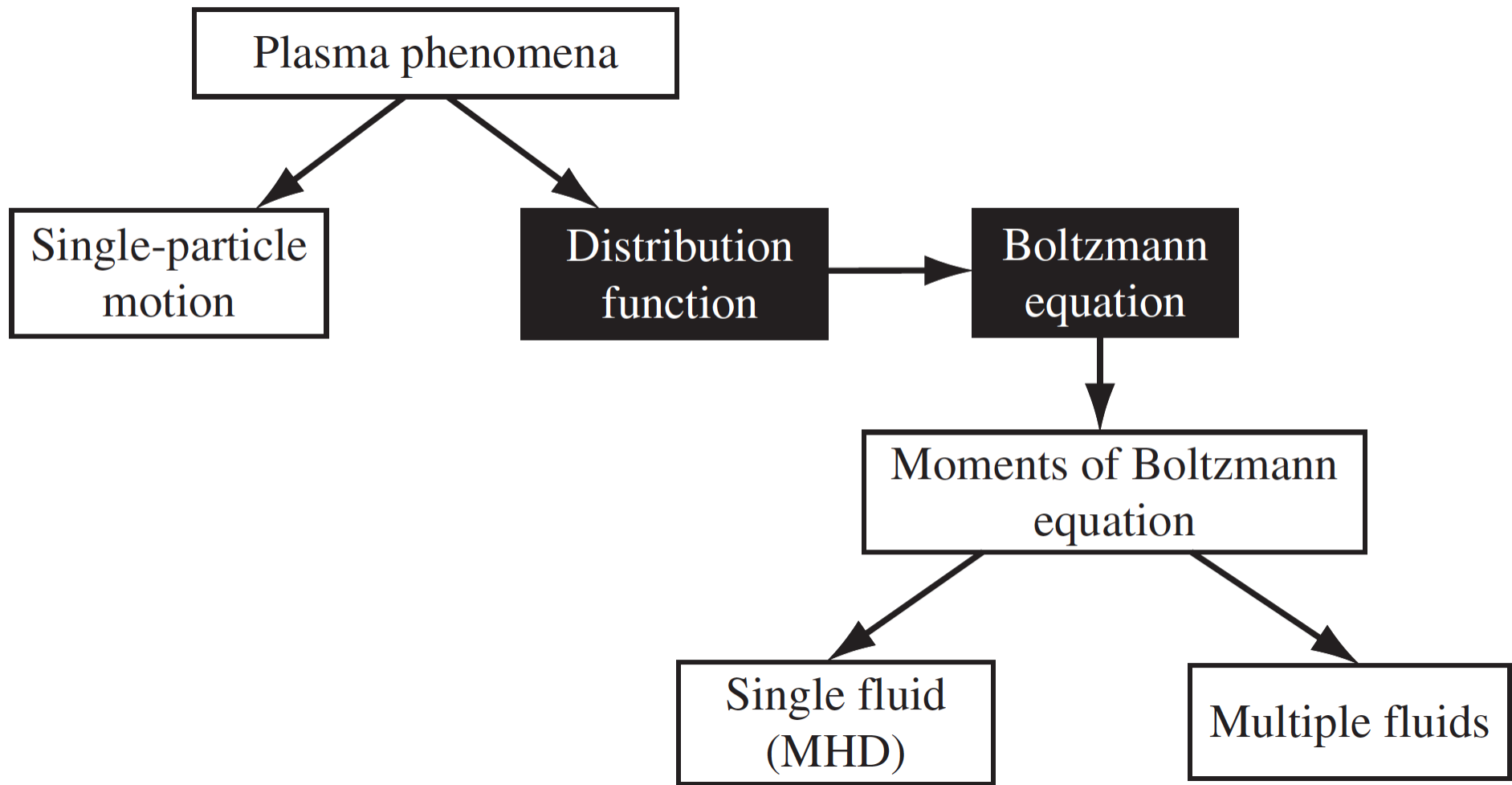




Τρία επίπεδα περιγραφής

Ακριβής μικροφυσική περιγραφή:

Single particle description: tenuous plasma with strong external fields (e.g. Van Allen belts), important for gaining insight into physical processes involved (e.g. particle energization)



Τρία επίπεδα περιγραφής

Κινητική θεωρία (στατιστική περιγραφή):

For a system with a large number of particles it is **neither possible nor desirable** to determine the motion of **every single particle**. The statistical approach focuses on average **macroscopic** properties.

Kinetic theory averages out microscopic information to obtain statistical, kinetic equations. No knowledge of individual particle motion is required to describe observable phenomena.

Η **συνάρτηση κατανομής** $f(r, v, t)$
δίνει την αριθμητική πυκνότητα
στη μονάδα όγκου $dx dy dz dv_x dv_y dv_z$
του **εξαδιάστατου χώρου φάσεων** (r, v)
τη χρονική στιγμή t .

Το ολοκλήρωμα της συνάρτησης κατανομής
(πχ Maxwell, μετατοπισμένη Maxwell, kappa)
ως προς dv μάς δίνει την αριθμητική
πυκνότητα n του πλάσματος στη μονάδα
όγκου του χώρου

Distribution functions are **probability densities** in phase space.

Distribution functions are not measured directly.

The measured quantity is the particle flux to the detector:

$$f(L^*, \mu, K) = j(E, \alpha) / p^2$$

where the conversion involves interpolating flux measurements

at fixed pitch angle α and energy E ,

then transforming to the adiabatic invariant coordinates.

This allows researchers to separate

local acceleration (peaks in phase space density)

from **radial transport** (gradients in L^*)

<https://doi.org/10.3389/fspas.2024.1423545>

Momentum dependence: The p^2 factor accounts for the geometry of momentum space—higher momentum particles have larger available phase space volume

Conservation properties: Phase space density obeys stricter conservation laws than flux, making it more fundamental for theoretical analysis

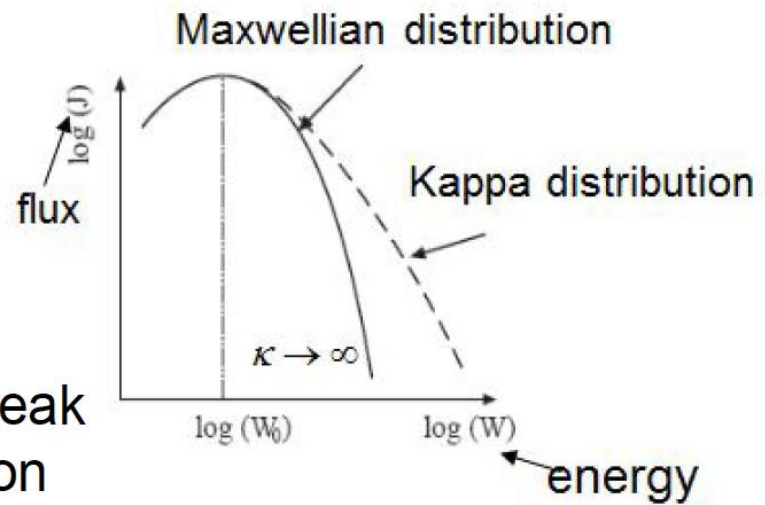
Observational practice: Satellites measure flux directly, which must be converted to phase space density for rigorous analysis using adiabatic invariants

Kappa distribution ~ Maxwellian with high-energy tail

The tail follows a **power law** $f(W) \propto (W_0/W)$

$$f_{\kappa}(W) = n \left(\frac{m}{2\pi\kappa W_0} \right)^{3/2} \frac{\Gamma(\kappa + 1)}{\Gamma(\kappa - 1/2)} \left(1 + \frac{W}{\kappa W_0} \right)^{-(\kappa+1)}$$

\nearrow Γ -function \nearrow energy at the peak of the distribution



Plasma description

Plasma as a collection of particles

The properties of a collection of particles can be described by specifying **how many there are in a 6D volume called phase space.**

The density of particles of species “s” (number per unit volume) is:

$$n_s(\vec{r}, t) = \int f_s(\vec{r}, \vec{v}, t) dv$$

Ολοκληρώνοντας το n ως προς $dx dy dz$, βρίσκουμε το συνολικό πλήθος σωματιδίων στον συγκεκριμένο χώρο

$$N(t) = \int n dx dy dz.$$

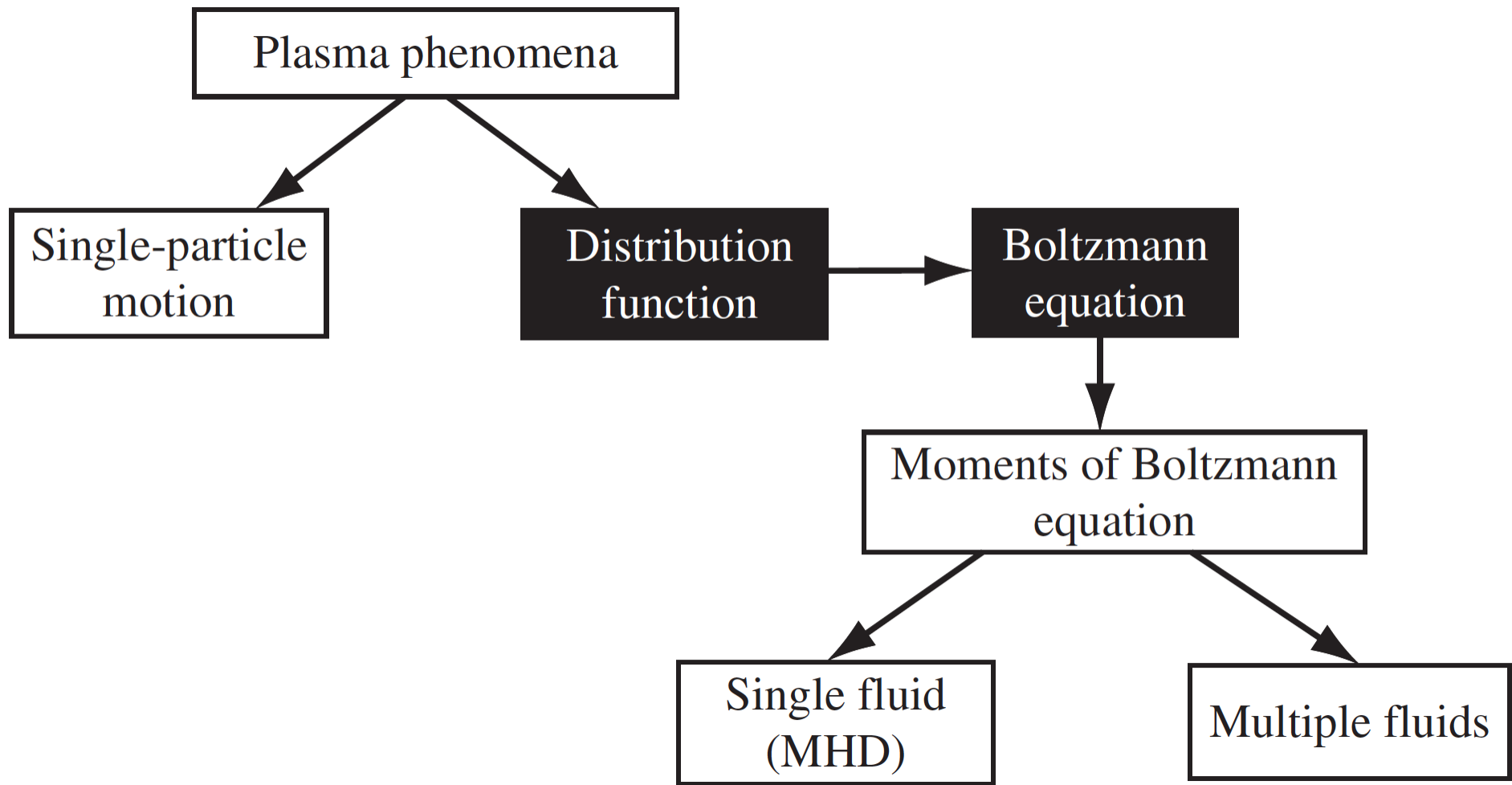
Από τις ροπές της συνάρτησης κατανομής μπορούμε να υπολογίσουμε άλλες μετρήσιμες παραμέτρους του πλάσματος (πχ ταχύτητα ροής σωματιδίων, κινητική θερμοκρασία, πίεση, ροή θερμότητας)

Average velocity (bulk flow velocity)

$$\vec{u}_s(\vec{r}, t) = \int \vec{v} f_s(\vec{r}, \vec{v}, t) dv / \int f_s(\vec{r}, \vec{v}, t) dv$$

Average random energy

$$\left\langle \frac{1}{2} m_s (\vec{v} - \vec{u}_s)^2 \right\rangle = \int \frac{1}{2} m_s (\vec{v} - \vec{u}_s)^2 f_s(\vec{r}, \vec{v}, t) d\mathbf{v} / \int f_s(\vec{r}, \vec{v}, t) d\mathbf{v}$$



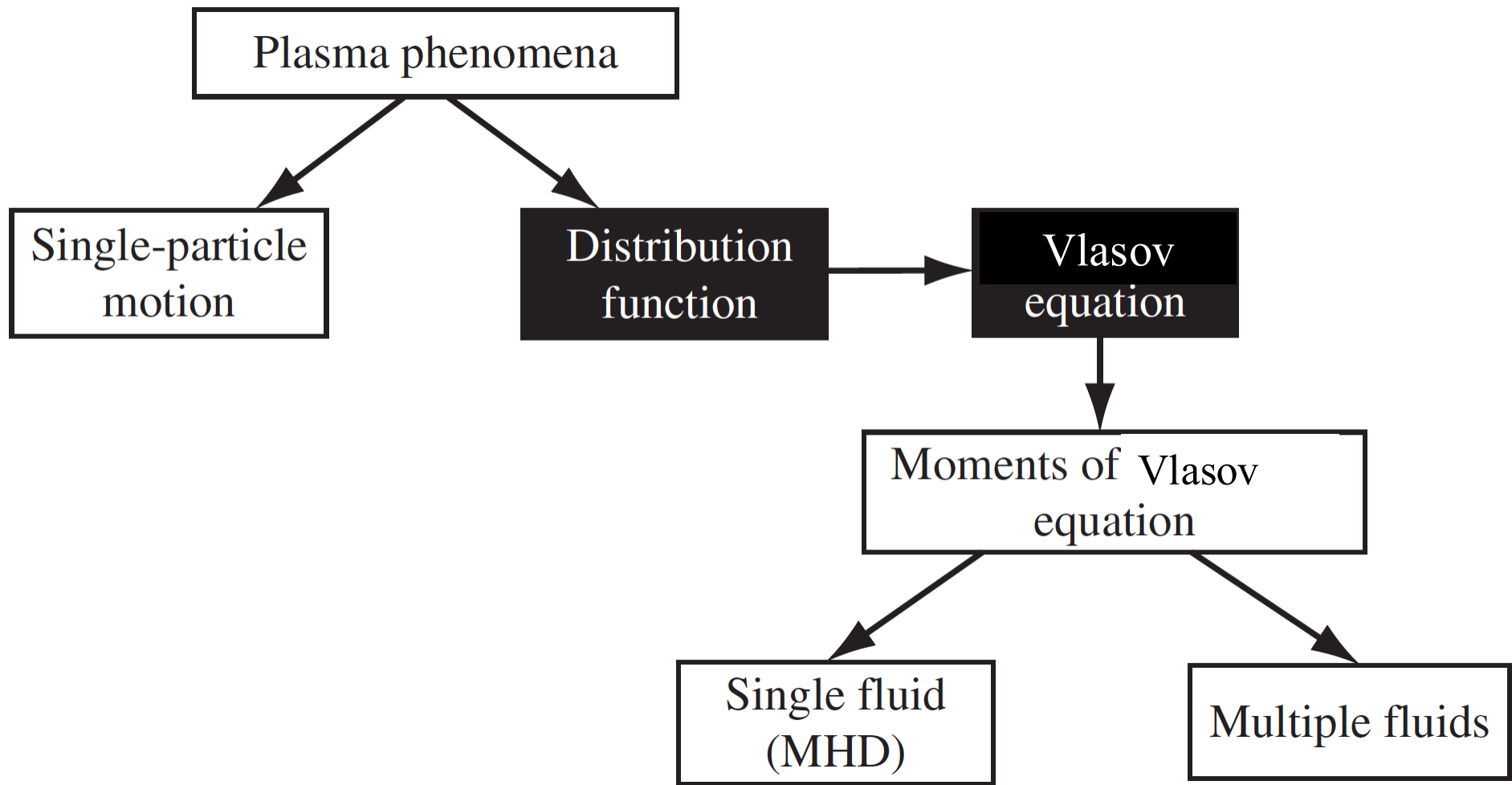
Από την εξίσωση Boltzmann στην εξίσωση Vlasov

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} + \mathbf{F}/m \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = \left(\frac{\partial f}{\partial t}\right)_{\text{coll}}$$

Η εξίσωση Vlasov είναι η
κινητική εξίσωση για τη συνάρτηση κατανομής
(= εξίσωση Boltzmann απουσία κρούσεων – collisionless plasma):

$$\frac{\partial f}{\partial t} + \mathbf{v} \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{r}} + \frac{q}{m} (\mathbf{E} + \mathbf{v} \times \mathbf{B}) \cdot \frac{\partial f}{\partial \mathbf{v}} = 0$$

Boltzmann Equation	Vlasov Equation
Includes collision term $(\partial f / \partial t)_{\text{coll}}$	Collision term set to zero
Short-range binary interactions	Long-range collective electromagnetic forces
External or prescribed fields	Self-consistent fields from Maxwell's equations
Valid for neutral gases, short-range forces	Valid for collisionless plasmas with $N \gg 1$
Irreversible (H-theorem, entropy increase)	Reversible (Liouville's theorem, phase space conservation)



Ολοκληρώνοντας την εξίσωση Vlasov στον χώρο των ταχυτήτων, παίρνουμε την εξίσωση συνέχειας του ρευστού:

$$\frac{\partial n_{\alpha}}{\partial t} + \nabla \cdot (n_{\alpha} \mathbf{V}_{\alpha}) = 0$$

In the absence of any interaction process which creates or annihilates particles, the particle number density is conserved during the motion of the fluid

Τρία επίπεδα περιγραφής

Ρευστοδυναμική (μακροσκοπική περιγραφή):

Macroscopic plasma theories are fluid theories at different levels:

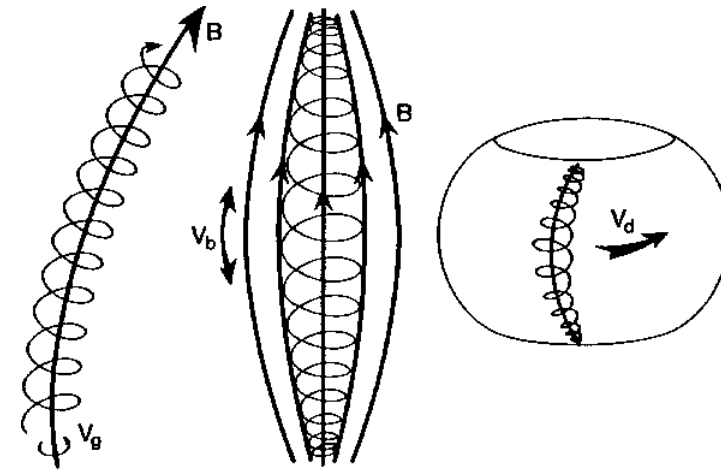
single fluid (magnetohydrodynamics MHD)

two-fluid (multifluid, separate equations for electron and ion fluids)

Periodic motion

1 MeV electron, $\alpha = 45^\circ$, $L = 4.5$

- Energetic particles undergo three types of periodic motion:
 - They **gyrate** around the magnetic field
 - They **bounce** between the mirror points
 - They **drift** around the Earth



gyro
motion

bounce
motion

drift
motion

f 10 kHz

3 Hz

1 mHz

T 0.1 ms

0.36 s

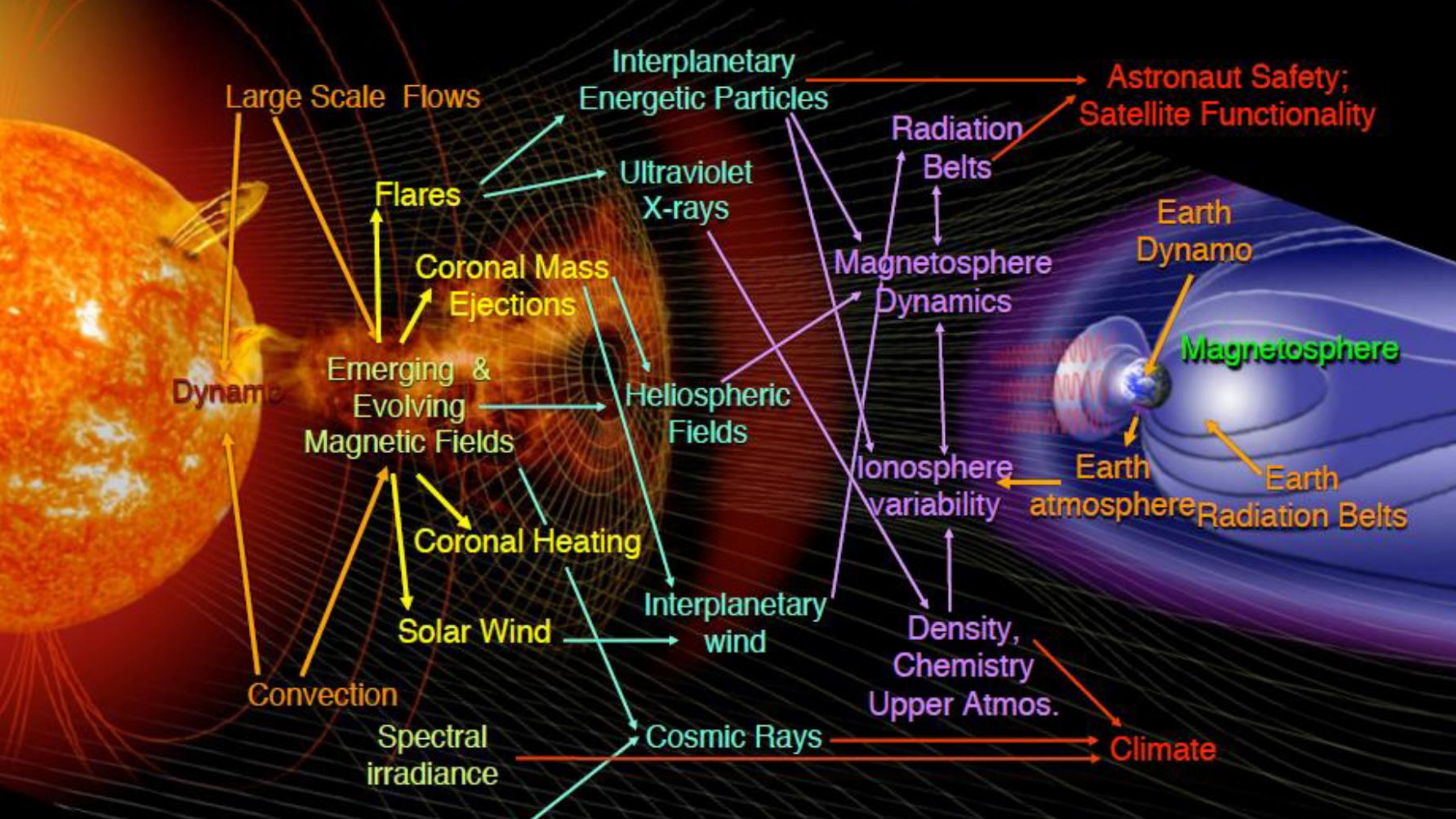
15 min

$$\mu = \frac{p_{\perp}^2}{2mB}$$

$$J = \int_{\text{bounce}} p_{\parallel} ds$$

$$\Phi = \int_{\text{drift}} B dS$$

- Associated adiabatic invariant

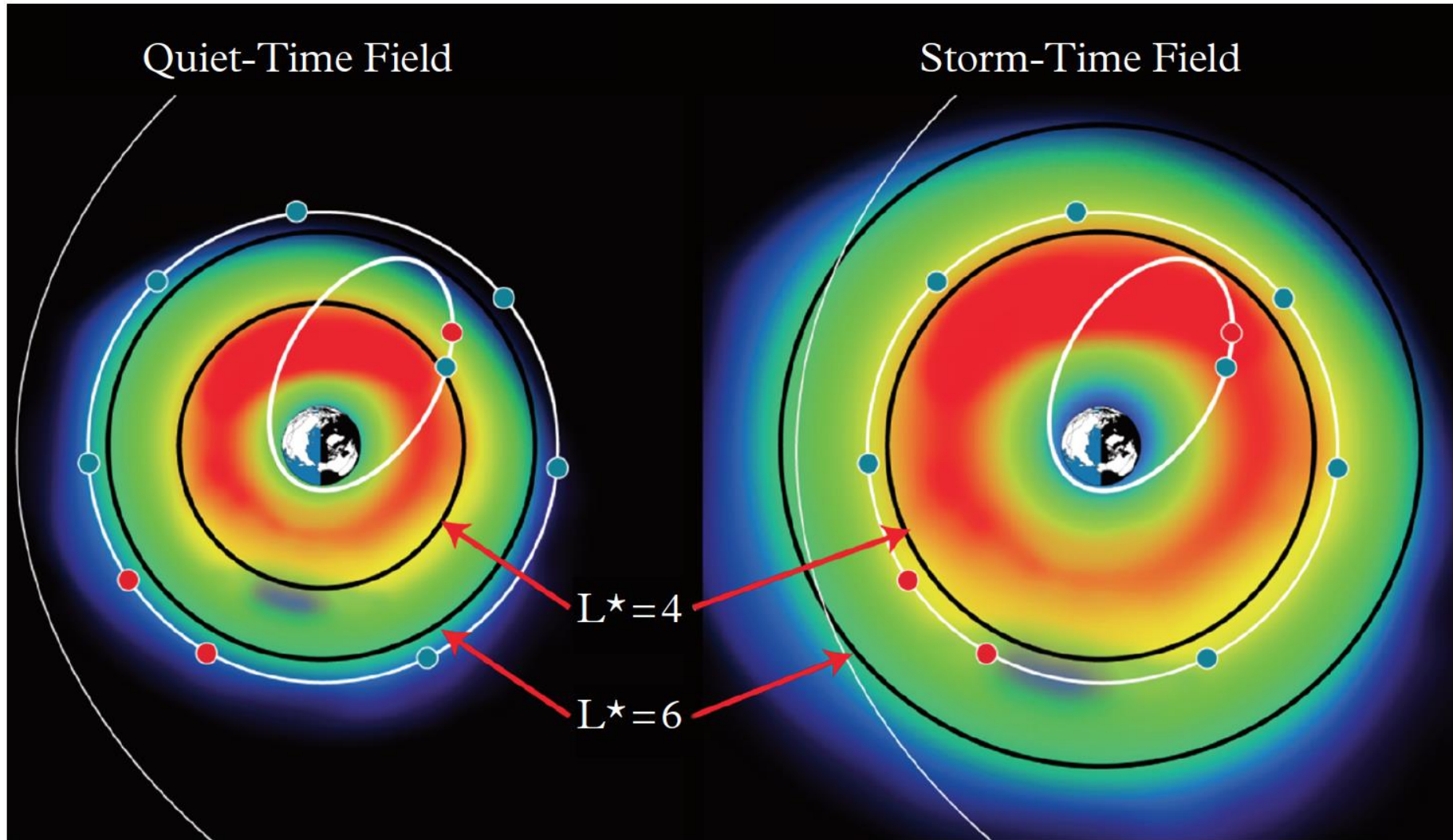


Μεταβολές:
χωρικές; χρονικές;

χωρική ή χρονική παράγωγος:

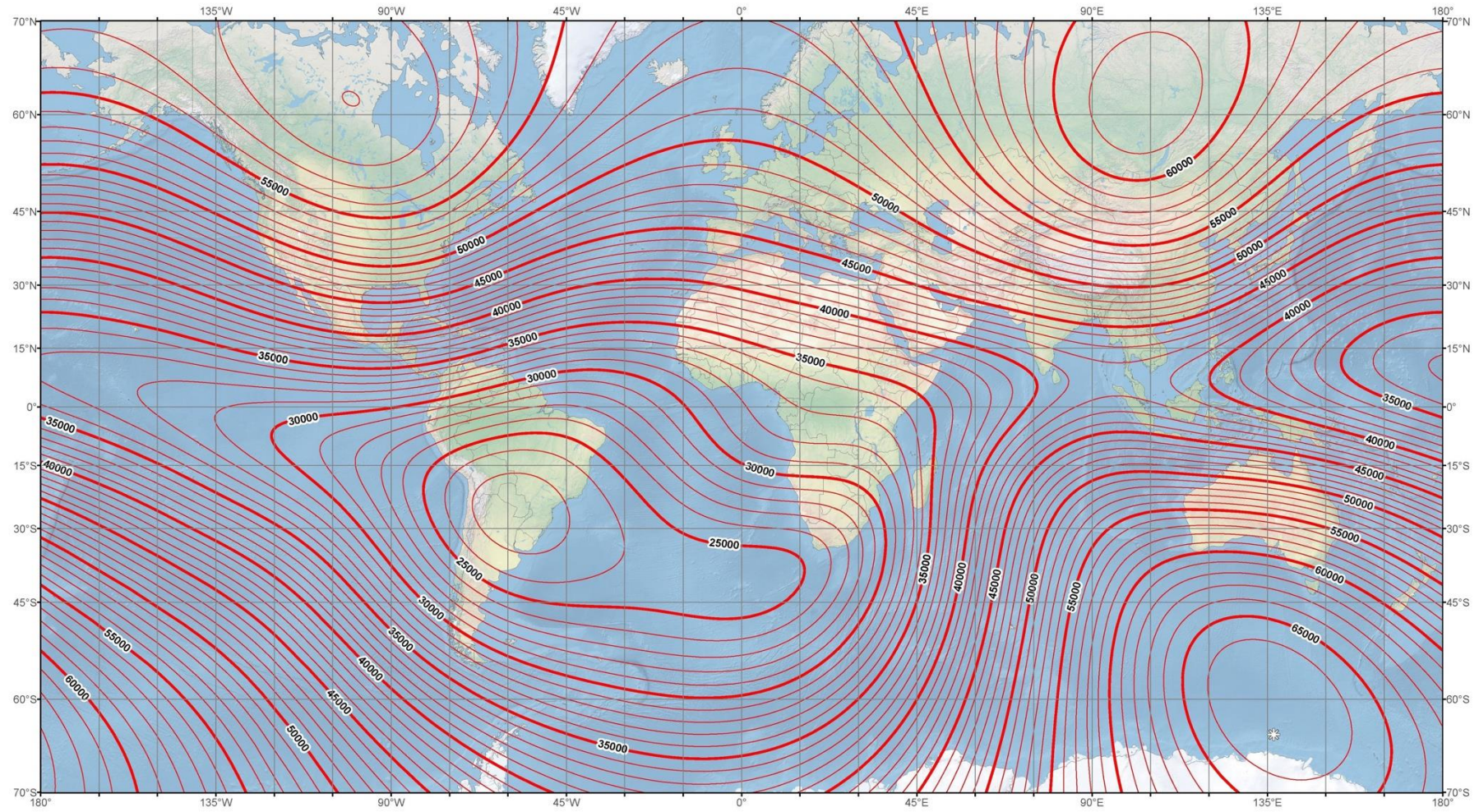
αλλάζει κάτι στο σύστημα με το πέρασμα
του χρόνου ή συναντά το σκάφος κάποια
άλλη χωρική δομή;

αδιαβατικές ή μή;



US/UK World Magnetic Model - Epoch 2015.0

Main Field Total Intensity (F)

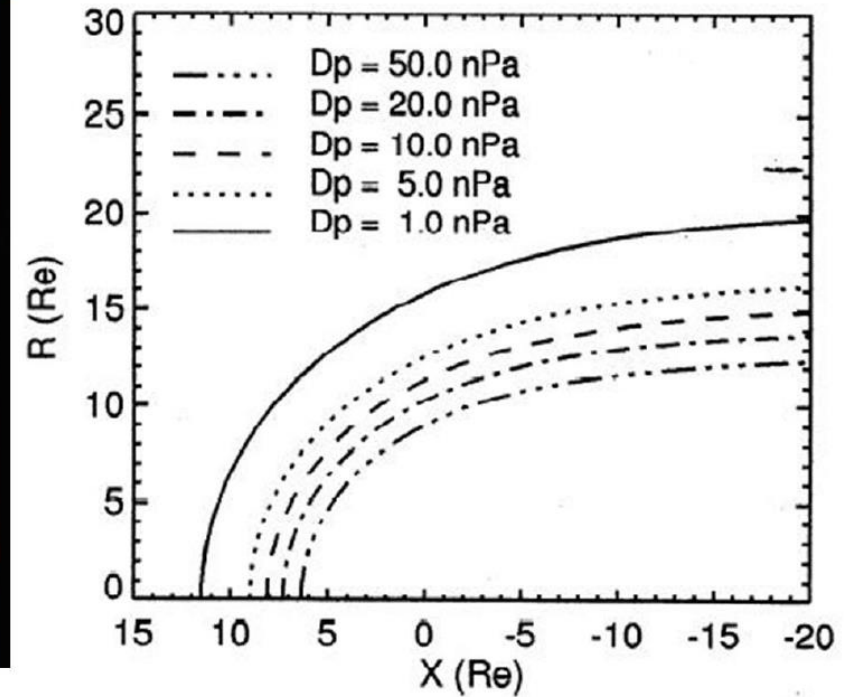
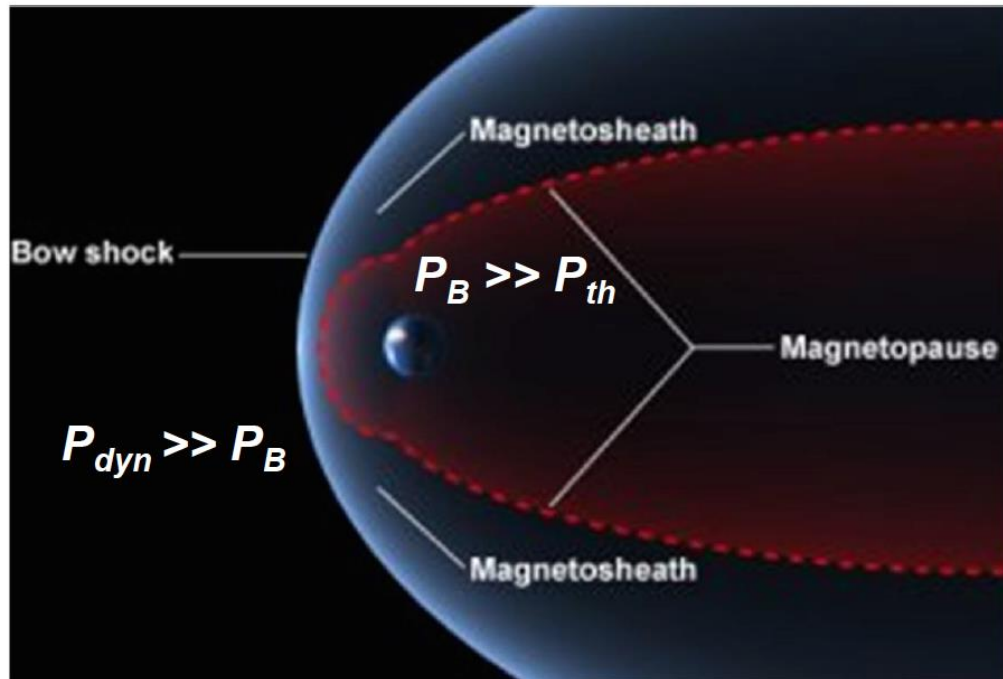


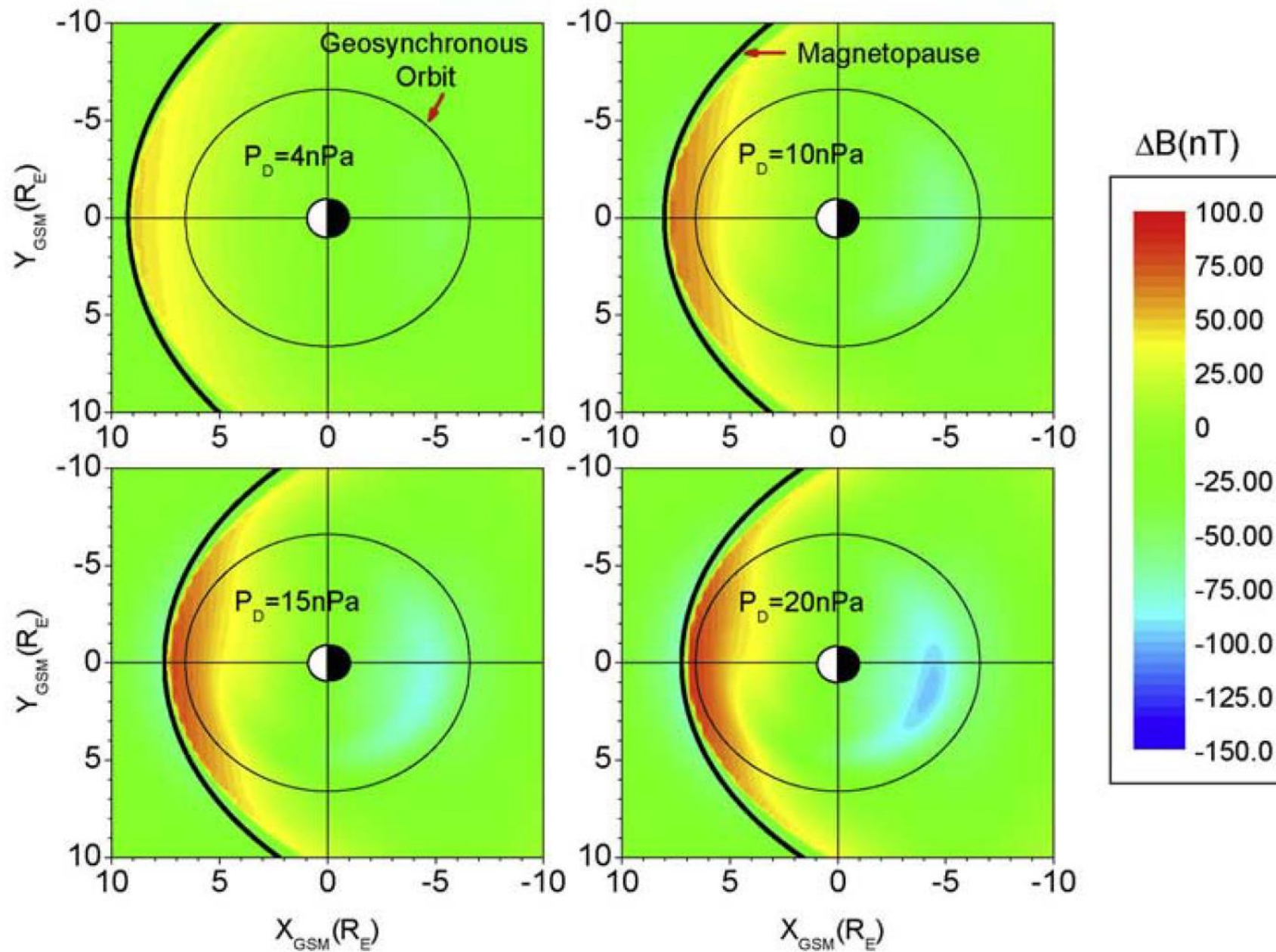
Main Field Total Intensity (F)
Contour interval: 1000 nT.
Mercator Projection.
☉: Position of dip poles

Map developed by NOAA/NGDC & CIRES
<http://ngdc.noaa.gov/geomag/WMM>
Map reviewed by NGA and BGS
Published December 2014

Magnetopause

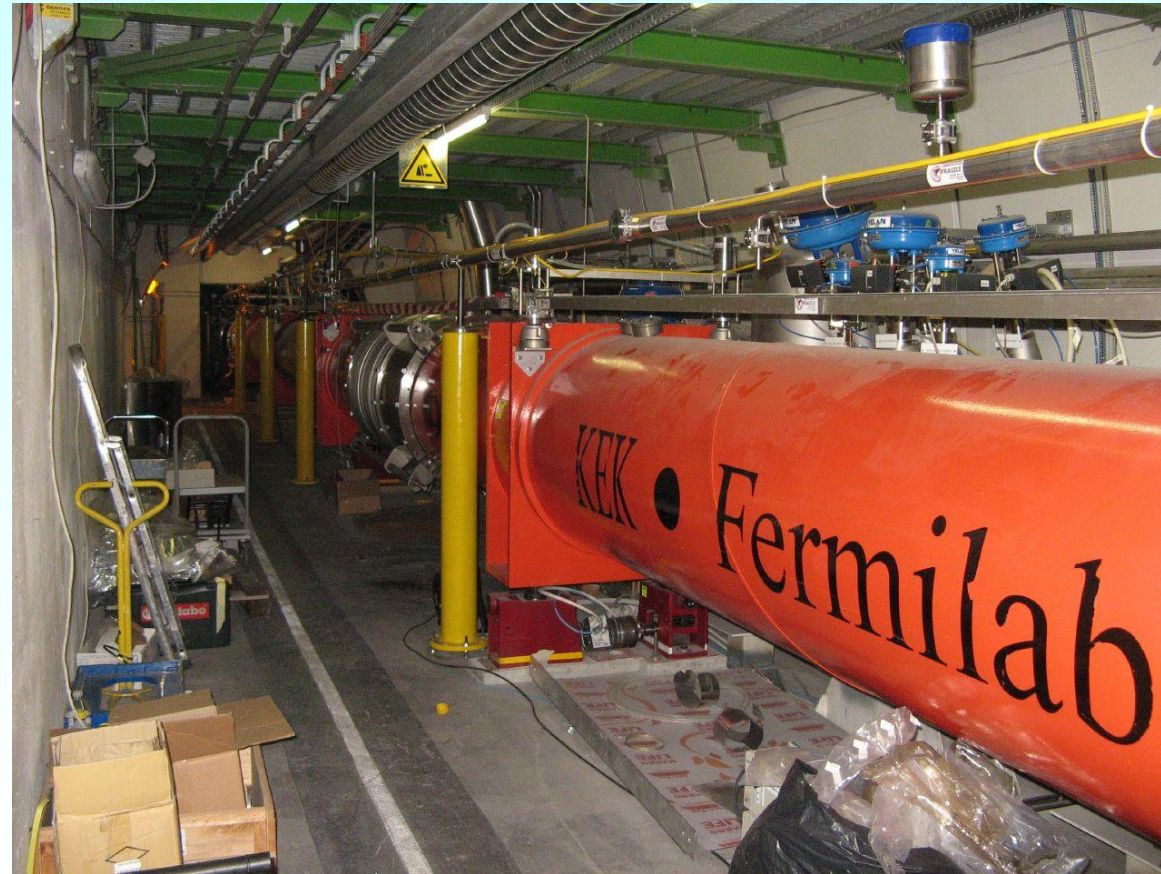
- 1930 Chapman and Ferraro
- 1960s: in-situ evidence (Explorer 10&12)
- nose at ~10 RE





Δυναμική πίεση ηλιακού ανέμου
1 nPa

1 nPa: Large Hadron Collider



Δυναμική πίεση ηλιακού ανέμου
 1 nPa

Ατμοσφαιρική πίεση
 10^5 Pa

Δυναμική πίεση ηλιακού ανέμου

$$1 \text{ nPa} = 10^{-9} \text{ Pa}$$

Ατμοσφαιρική πίεση

$$10^5 \text{ Pa}$$

Διαφορά 14 τάξεων μεγέθους

Δυναμική πίεση ηλιακού ανέμου
 $1 \text{ nPa} = 10^{-9} \text{ Pa}$

Ατμοσφαιρική πίεση
 10^5 Pa

Διαφορά 14 τάξεων μεγέθους

Αρτηριακή πίεση: ? Pa

Δυναμική πίεση ηλιακού ανέμου

$$1 \text{ nPa} = 10^{-9} \text{ Pa}$$

Ατμοσφαιρική πίεση

$$10^5 \text{ Pa}$$

Διαφορά 14 τάξεων μεγέθους

Αρτηριακή πίεση:

$$10^5 + 10^4 \text{ Pa} = 115 \text{ kPa}$$

1 Pa



1 Pa



**Πίεση ένα δισεκατομμύριο φορές μεγαλύτερη
από του ηλιακού ανέμου!**



Dovima and the Elephants
by Richard Avedon



Richard Avedon:
Dovima and
the Elephants



Elephant foot: ? Pa

Stiletto heel: ? Pa



Richard Avedon:
Dovima and
the Elephants

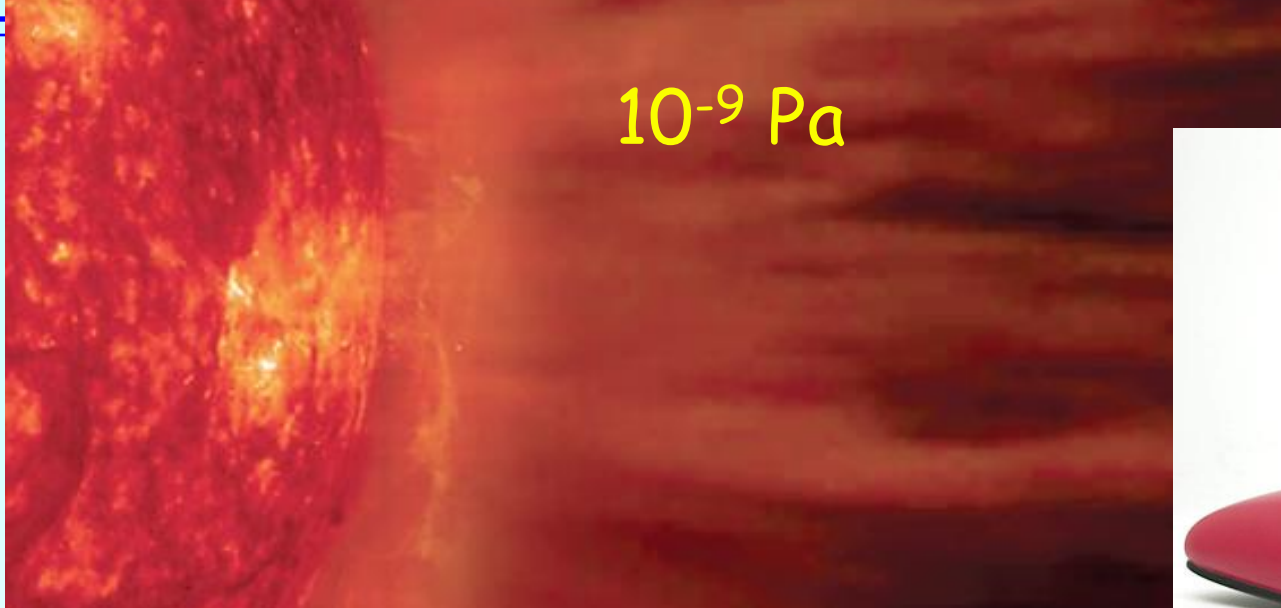


Elephant foot: 6×10^5 Pa

Stiletto heel: 10^7 Pa



10^{-9} Pa



10^7 Pa

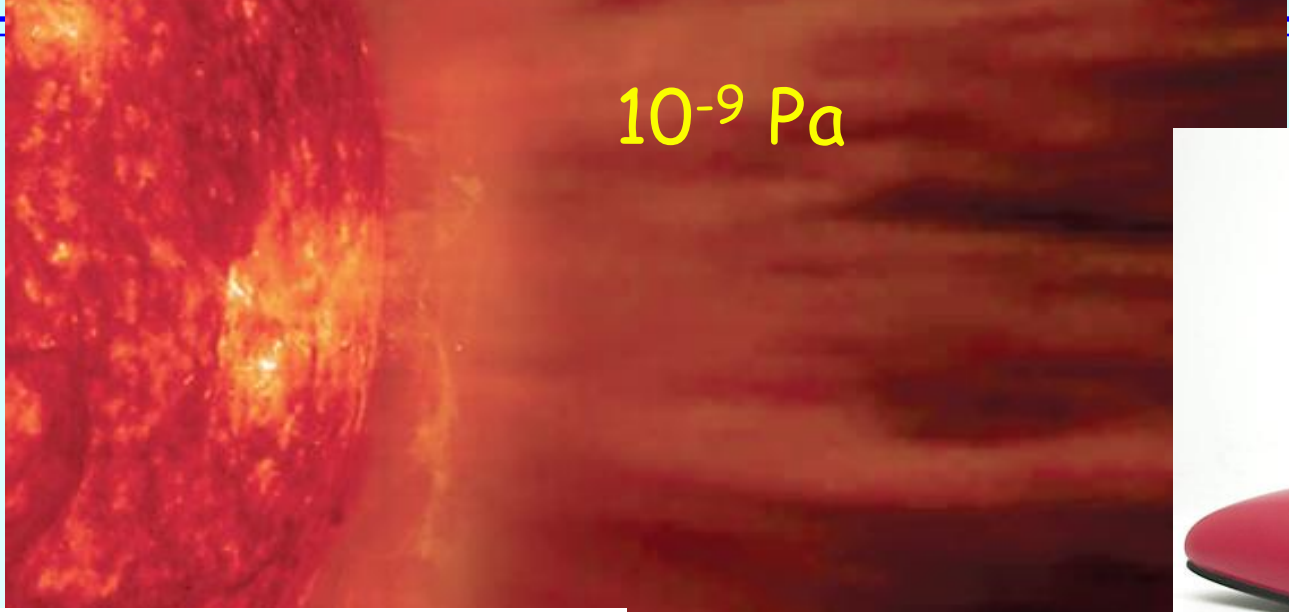


1 Pa



10^6 Pa





10^{-9} Pa



10^7 Pa



1 Pa



10^6 Pa

Intergalactic void

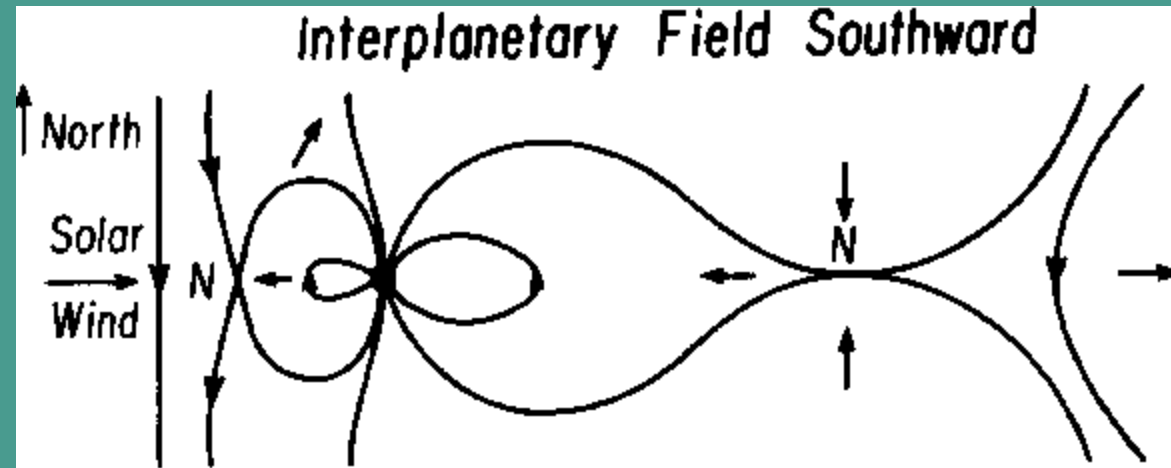
10^{-17} Pa

Neutron star

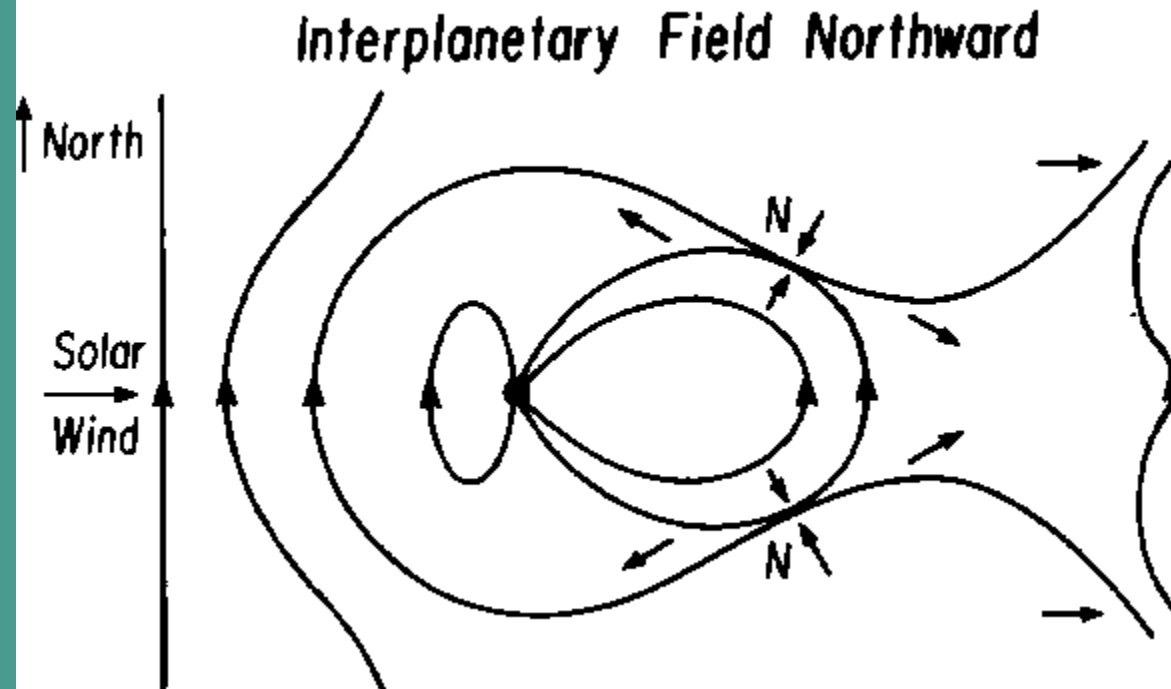
10^{34} Pa

Magnetosphere for IMF B_{ZS} and B_{ZN}

Dayside
Shrinks
by Flux
Ablation



Dayside
Grows
by Flux
Accretion

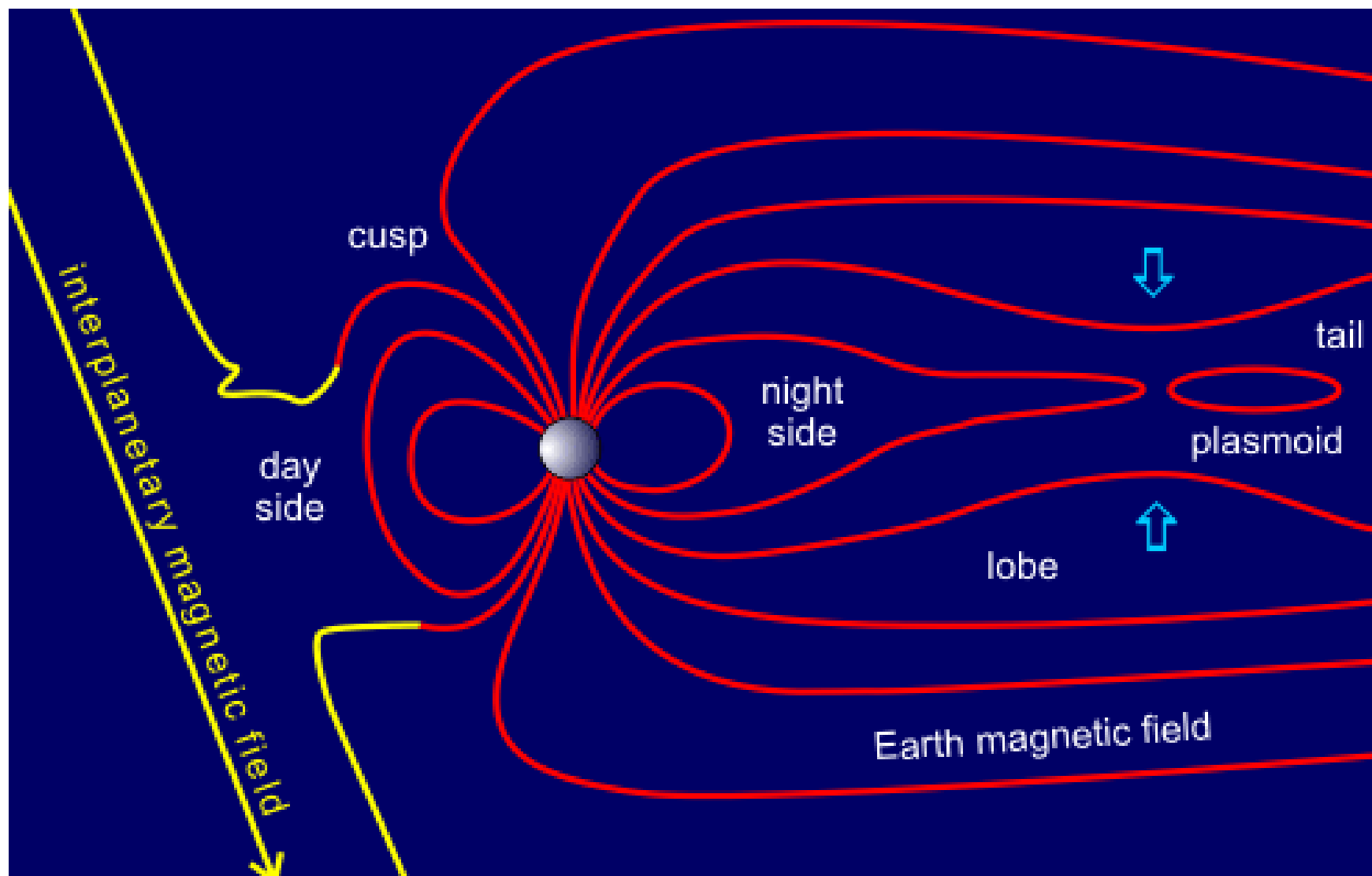


Magnetic reconnection

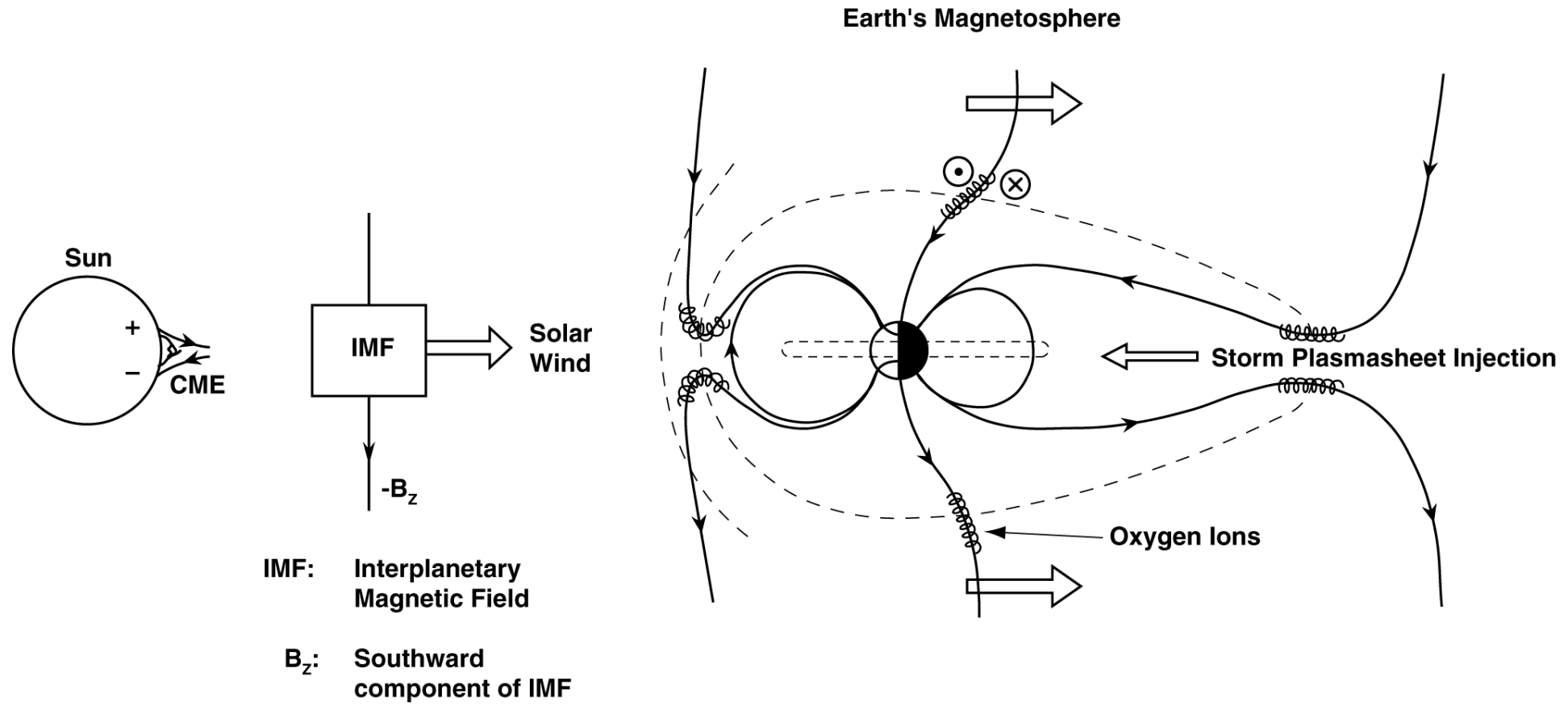
<https://www.youtube.com/watch?v=7sS3Lpzh0Zw>

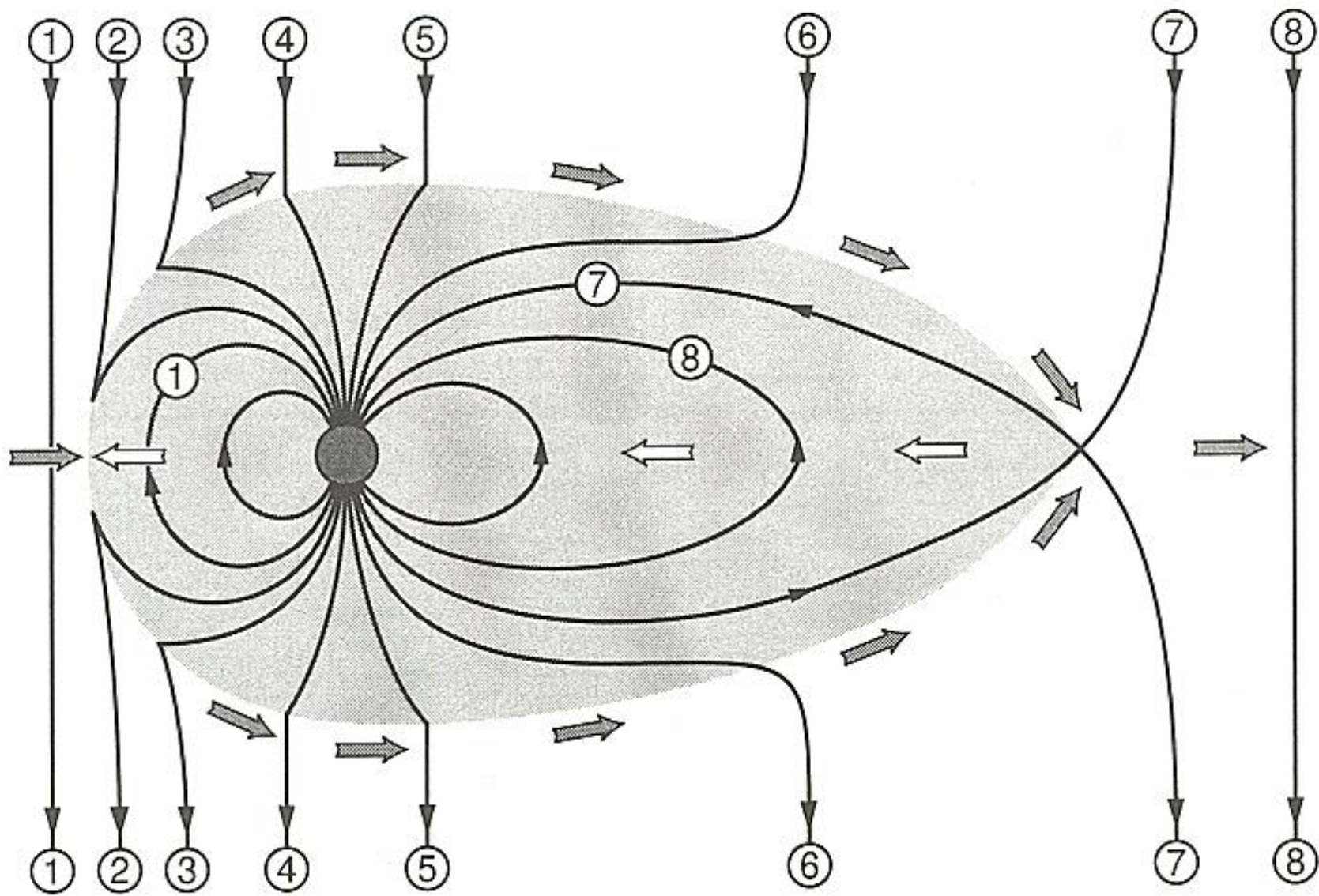


<https://www.youtube.com/watch?v=K-YAPFcy6Wk>



Solar wind – magnetosphere coupling





Μεταφορά ισχύος
(δηλαδή ρυθμός μεταφοράς ενέργειας)
ανάλογη του:

$$P_{\text{dyn}} \propto v_{\text{sw}} B_s$$