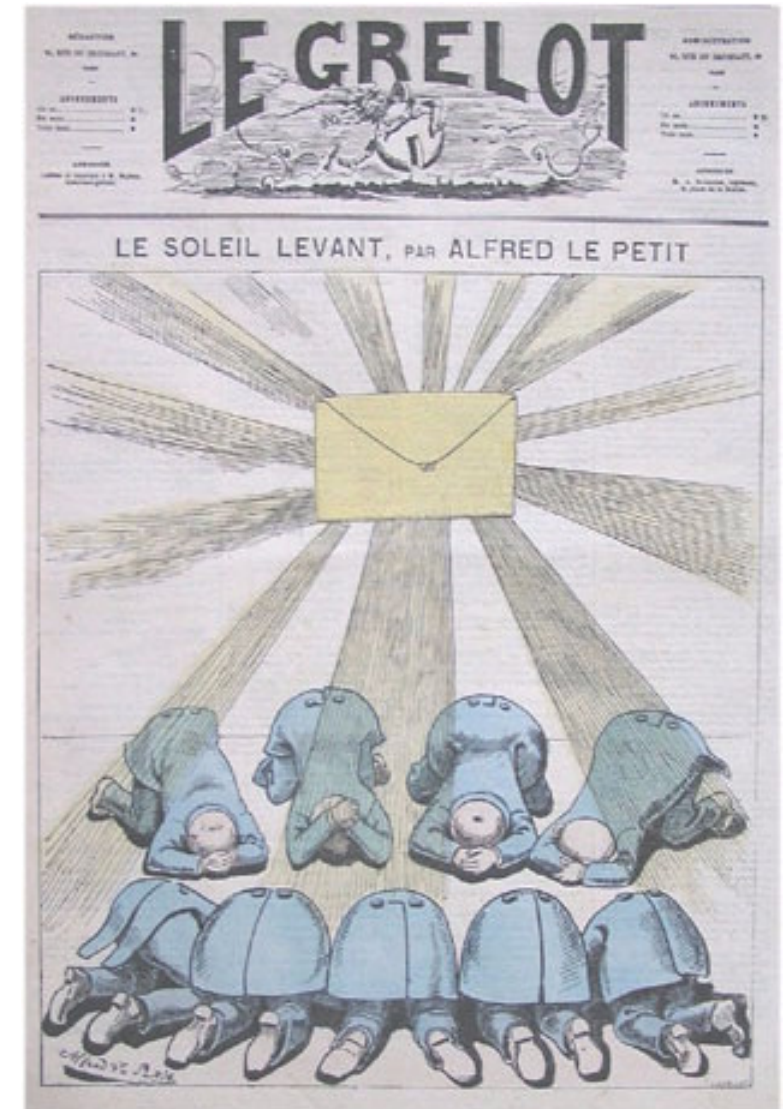


Physique du vent solaire

*Conférence pour l'Eméritat de
Joseph Lemaire et Guy Schayes*
Institut d'Astronomie et de Géophysique
G. Lemaître, UCL, Louvain-La-Neuve

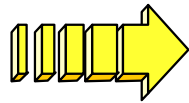
8 Octobre 2004

Nicole Meyer-Vernet
CNRS, LESIA
Observatoire de Paris
nicole.meyer@obspm.fr





Le vent solaire ... ce n'est pas



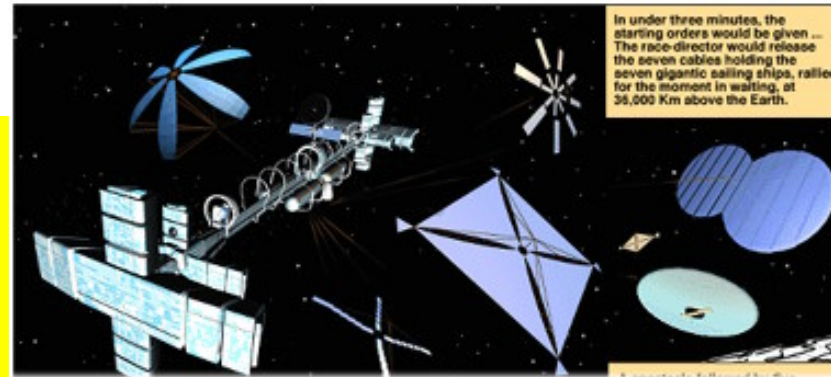
THE WIND FROM THE SUN

Text and Illustration Olivier Bolsard
From the short story by Arthur C. Clarke
"The Wind From The Sun"

Rayonnement
(photons)



... c'est un vent
de plasma



Copyright © 1995 - 1998 U3P & Ecole Centrale de Lille

$$L_{\odot} \simeq 4 \cdot 10^{26} \text{ W}$$



à $d \simeq 1 \text{ AU}$:

(électrons, protons)

$$P_{\text{plasma}} \simeq \rho v^2 \simeq 2 \cdot 10^{-9} \text{ Pa} \ll$$

interagit avec plasmas

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_L} \sim m v^2$$



Section efficace : $\sigma_C \sim r_L^2$

($\propto \ln \Lambda$ à cause interactions lointaines)
N. Meyer

$$P_R \simeq L_{\odot} / 3\pi c d^2 \simeq 6 \cdot 10^{-6} \text{ Pa}$$

interagit peu avec plasmas

$$\frac{e^2}{4\pi\epsilon_0 r_e} \sim m c^2$$

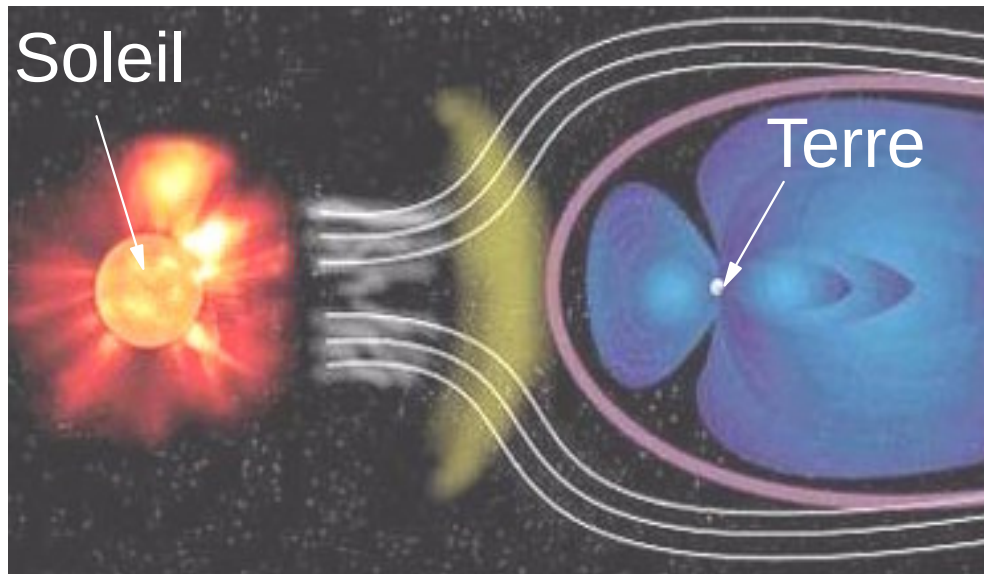


(Thomson)

Section efficace : $\sigma_T \sim r_e^2 \ll \sigma_C$

Importance du vent solaire ...

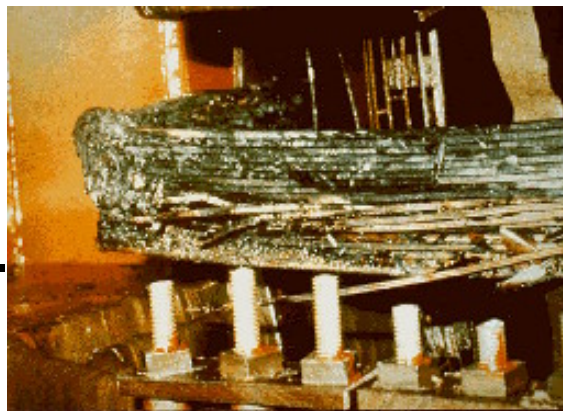
en géophysique ...



Magnétosphère

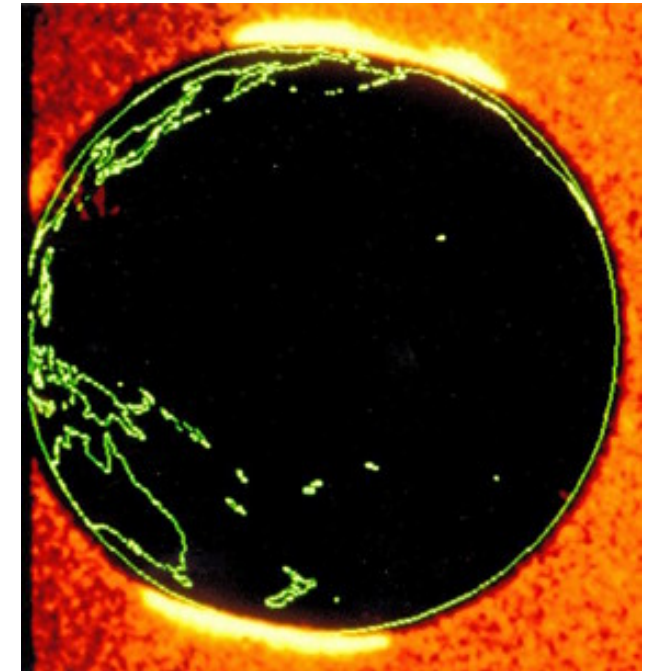
Perturbations...

restes d'un
transformateur



Source : Space Environment Center

Aurores



Dynamic Explorer (UV) NASA



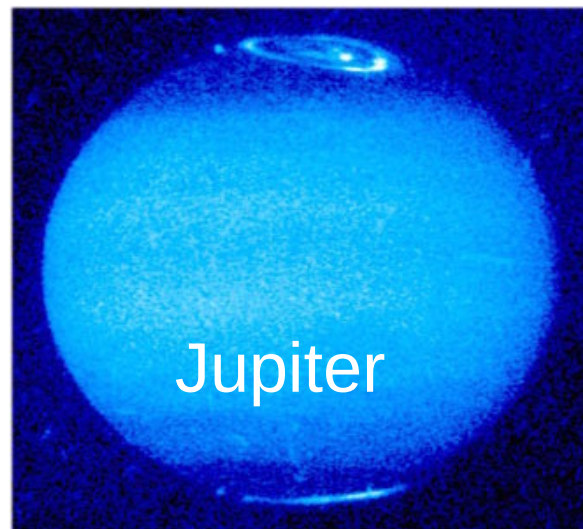
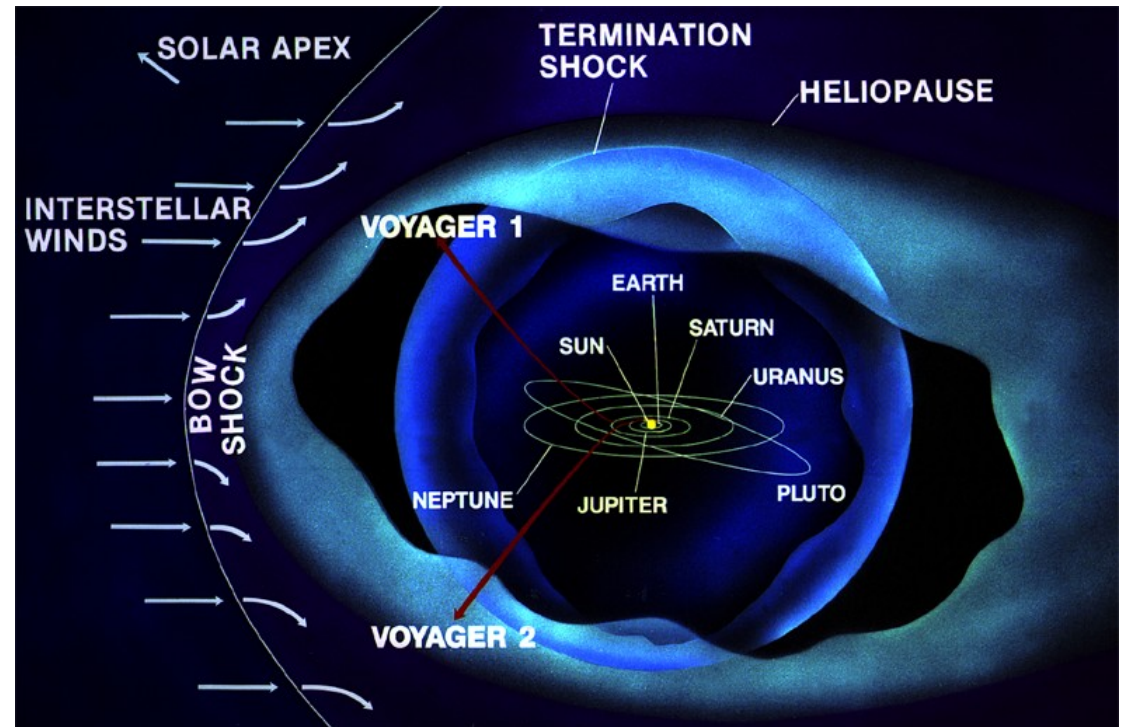
Photo: C. Molinier

en planétologie ...

Comètes



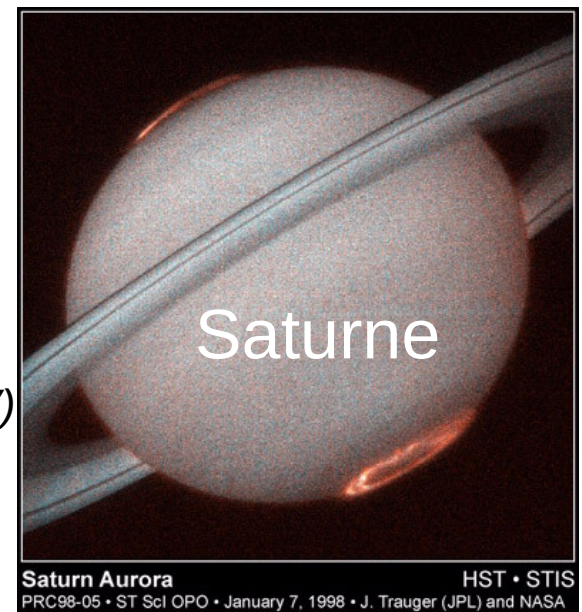
N. Meyer



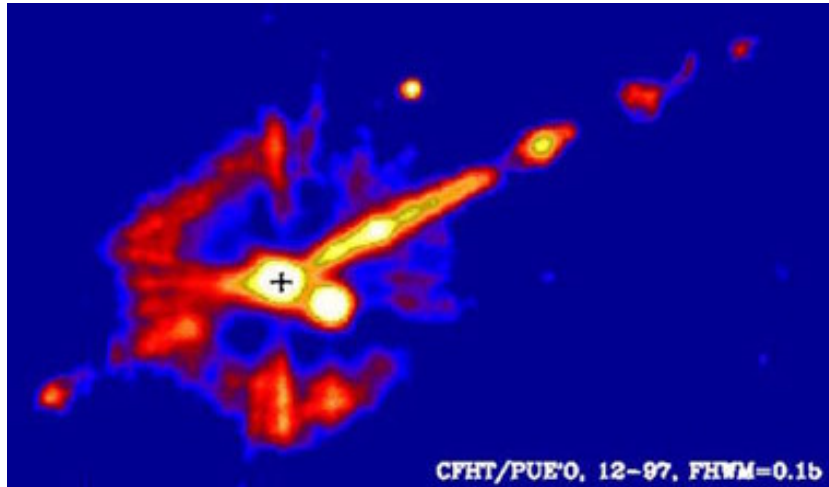
Hubble Space Telescope (UV)
J. Clarke (U. Michigan), NASA

Auror es

Hubble Space
Telescope (UV)
J. Trauger
(JPL), NASA

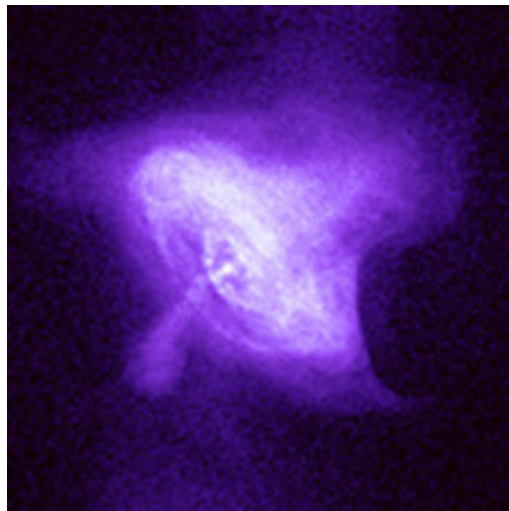


en astrophysique ...



Jet from young star RW Aurigae

Dougados et al., Hawaii, Grenoble, Paris



Rings and jets from Crab nebula

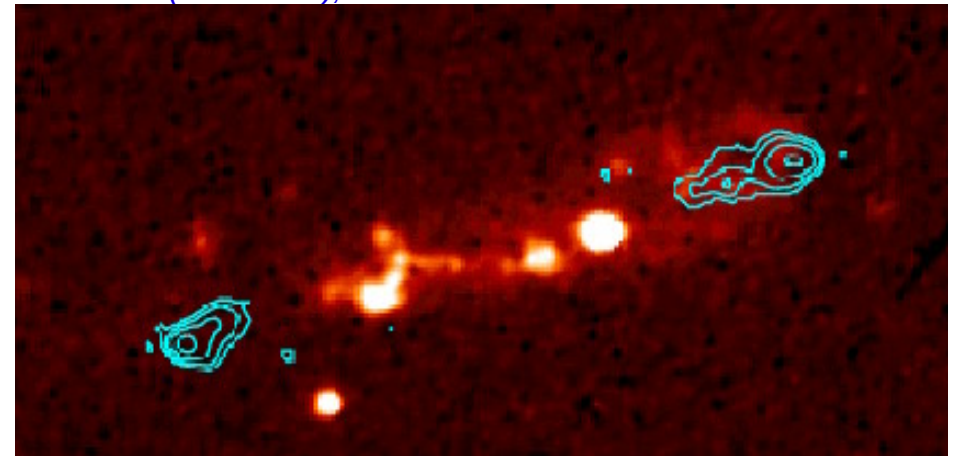
Chandra X-ray Obs., NASA

ubiquité des vents



Wind from young star LL Orionis

Hubble Heritage Team (AURA/STScI), C.R. O'Neill (Vanderbilt), NASA



Radio galaxy 3C368

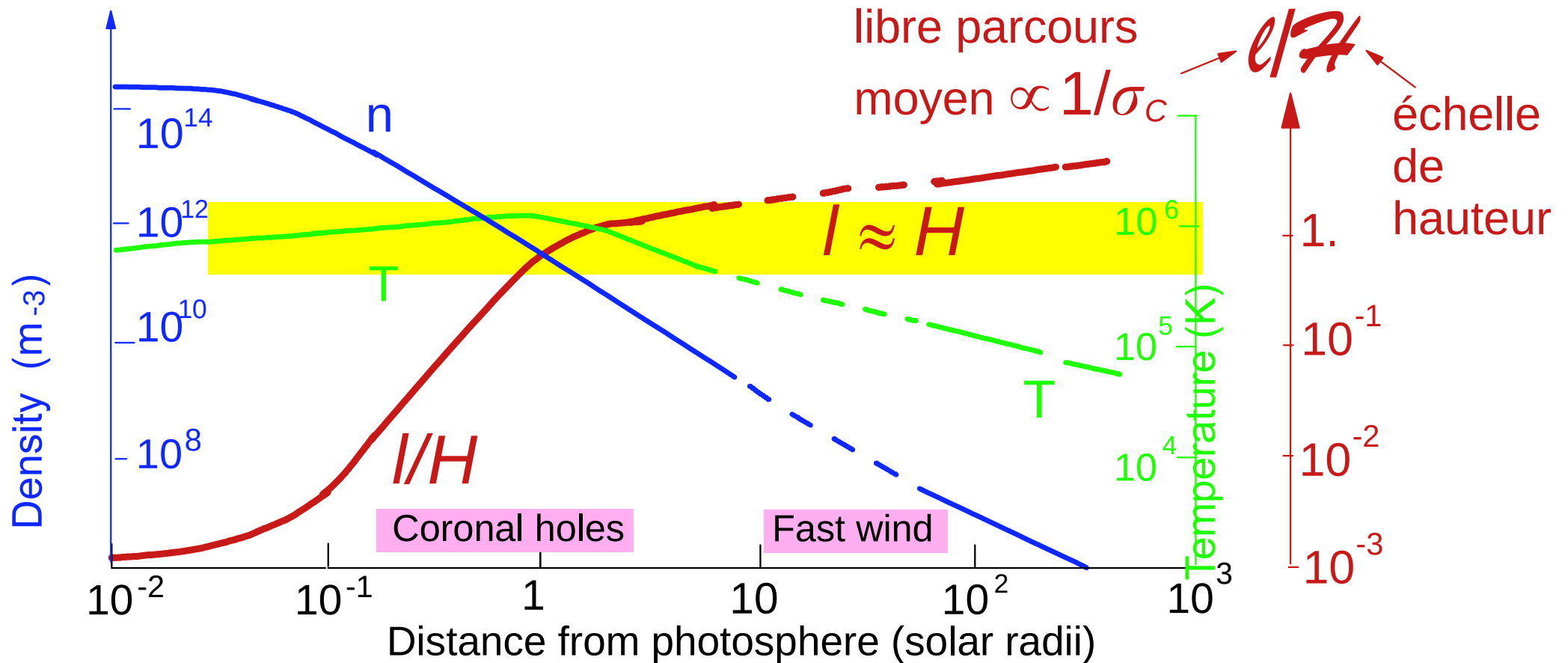
NASA, NRAO, VLA,

HST, WFPC2, M.Longair

Vent solaire: seul vent stellaire mesuré in situ

en physique ..

l mportance des collisions ?



Nb Knudsen $\sim 1 \Rightarrow$ Absence d'équilibre

Transport de chaleur incompris - Pas de théorie satisfaisante des plasmas peu collisionnels

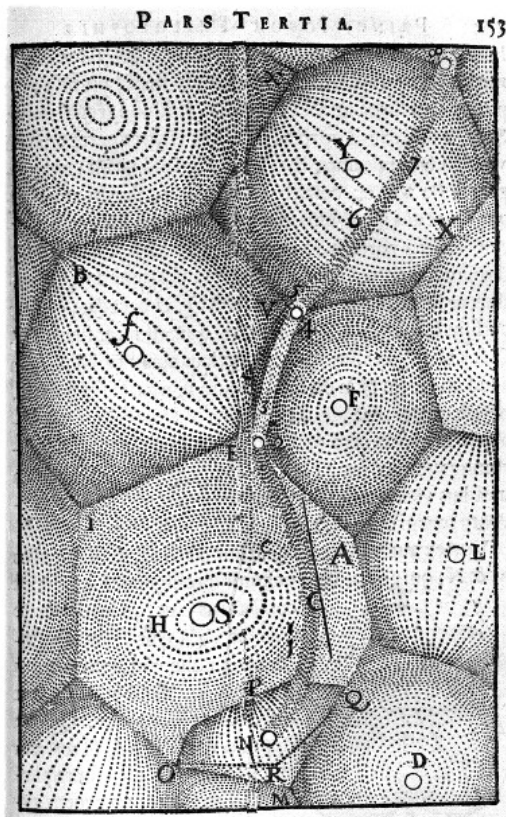
Vent solaire: laboratoire pour plasmas peu collisionnels

Le vent solaire - Petit raccourci historique (1)

Evolution des idées: (in)existence du vide, (dis)continuité de la matière, espace ou éther (véhicule des interactions et/ou matière?)

400's BC - Parménide d'Elée - Pas de vide ...

300's BC - Aristote - quintessence....



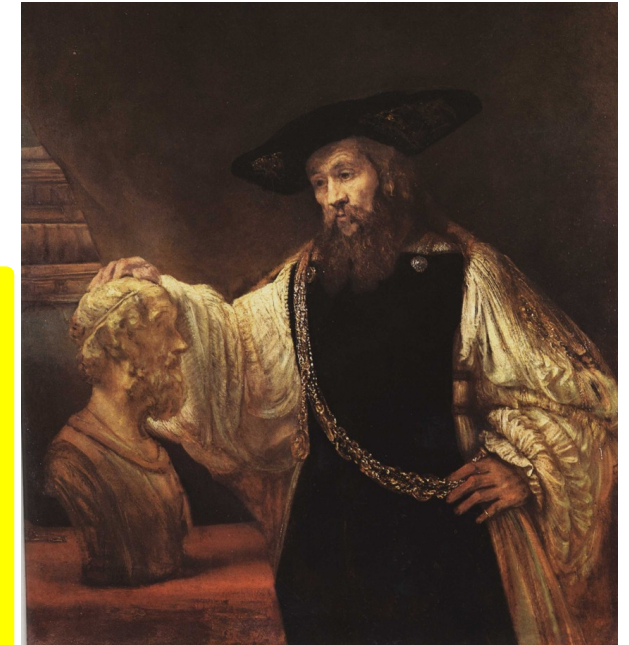
.....

Entre les planètes ...

"... pensons que la matière du ciel où sont les Planètes tourne sans cesse en rond, ainsi qu'un tourbillon ..."

René Descartes, Principia philosophiae
(Amstelodami, L. Elzevirium, 1644,
Bibliothèque de l'Observatoire de Paris)

.....



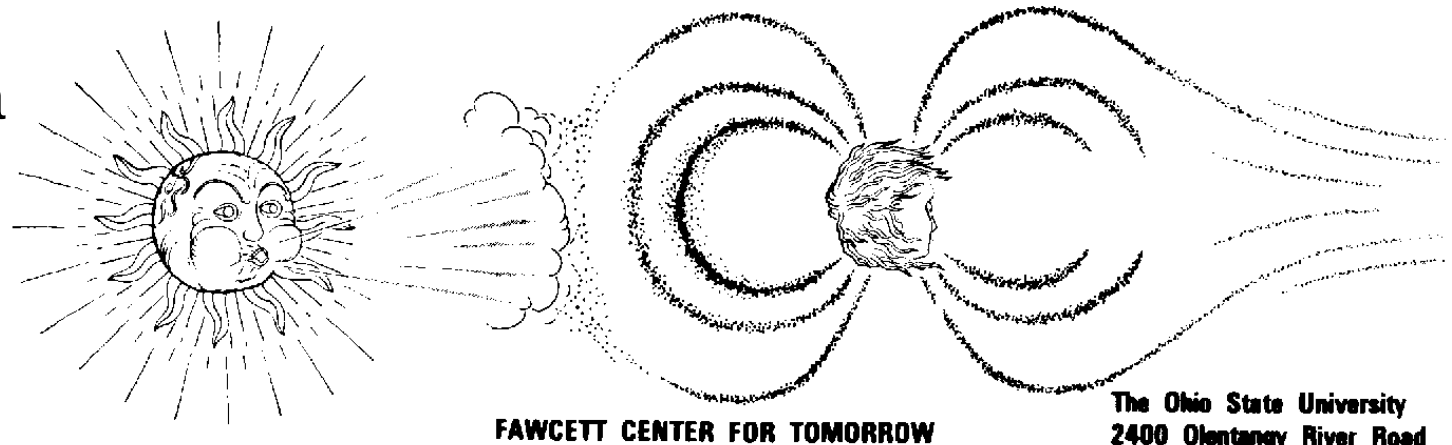
Rembrandt, *Aristote*
contemplant le buste d'Homère,
1653 (Metropolitan Museum,
New York)

Le vent solaire - Petit raccourci historique (2)

Carrington, 1859 : Eruption solaire → aurores + perturbations géomagnétiques (but ... *"one swallow does not make a summer."*)

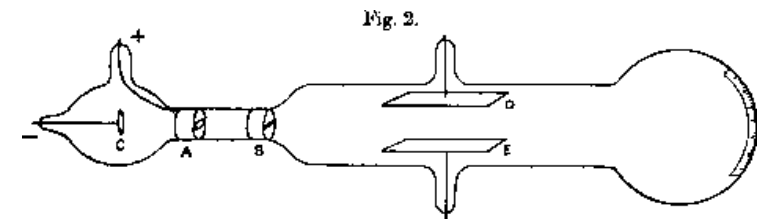
SOLAR-TERRESTRIAL INFLUENCES ON WEATHER AND CLIMATE

balbutiements de la
météorologie
spatiale →



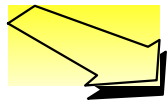
Une suggestion pionnière: "... the sun is powerfully electrified, and repels similarly electrified molecules with a force of some moderate number of times the gravitation of the molecules to the sun ..." (George FitzGerald, 1892 - *The Electrician* 30, 48)

Contexte historique: Tubes à vide, Cathode rays (J.J. Thomson, 1897 *"This experiment proves that something charged with negative electricity is shot off from the cathode ..."* Phil. Mag. 44, 293)

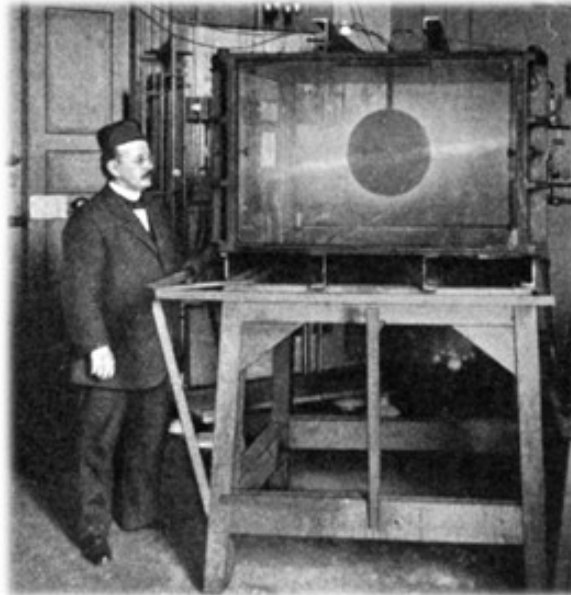


Le vent solaire - Petit raccourci historique (3)

- ~ 1900: Birkeland
- ✓ théorie,
- ✓ expériences de lab.
- ✓ observation



vent solaire permanent ...



Birkeland, K. R. The Norwegian Aurora Polaris Expedition 1902-1903 (H. Aschehoug & Co., Christiania)

~ 1950-1960:

Biermann: comètes $\Rightarrow$ vent solaire permanent

Chapman: atm. solaire conduit bien la chaleur

- $\Rightarrow$ chaude même à grande distance
- $\Rightarrow$ très étendue ... mais statique

Le vent solaire - Petit raccourci historique (4)

Parker (1958): vent solaire supersonique fluide

~~Chamberlain (1960) brise solaire (particules ou fluide?)
1er modèle cinétique sans collisions (exosphérique)~~



1962: Mariner 2

"We had data! Lots of it! There was no longer any uncertainty about the existence and general properties of the solar wind" (M. Neugebauer, 1997 - *J. Geophys. Res.* 102, 26887)



Hypothèse: atmosphère fluide avec $T \sim 10^6$ partout!

⇒ fourniture d'énergie infinie

⇒ vitesse infinie

Non justifié

Le vent solaire - Petit raccourci historique (5)

Parker (1958): vent solaire supersonique fluide
and Co. (1958-2004) : raffinements :

- × variation de T ou conductivité thermique ad-hoc
- × multi-fluide
- × multi-moments
- × addition d'énergie (ondes) → vent rapide

MAIS: Descriptions fluides injustifiées



Qu'est-ce qui pousse le vent ?

??????

Le vent solaire - Problème physique

FLUIDE

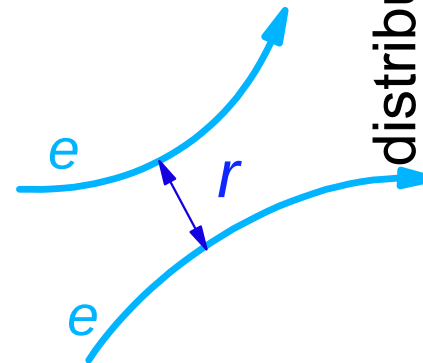
description
locale

Dessins de
F. Meyer

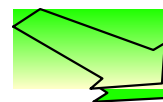
CINETIQUE



adapté de Meyer-Vernet et al. 2001



Plasma: collisions coulombiennes



particules rapides
~ sans collisions

mais ce sont elles qui assurent
la conductivité thermique

distribution des vitesses

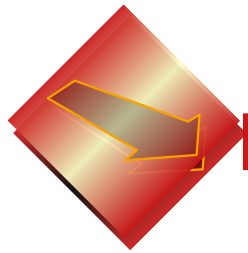
Maxwellienne

observé

adapté de Maksimovic et al. 2004

vitesse

Le vent solaire - Problème physique



Modélisation cinétique nécessaire...

au lieu de calculer grandeurs macroscopiques
 n , $\mathbf{v}$, T (moments de $f(v)$) avec eq. dérivées
locales: $d/dr = \dots$

Calculer $f(v)$ (équations d'évolution)
ou: simulation numérique (particules)

~~Parker (1958) and Co.: vent solaire supersonique fluide??~~ ~~Chamberlain (1963) brise solaire (particules ou fluide)??~~ cinétique sans collisions (exosphérique)

C. R. Acad. Sc. Paris, t. 269, p. 666-669 (6 octobre 1969).

Série B

Lemaire et Scherer 1969

AÉRONOMIE. — *Le champ électrique de polarisation dans l'exosphère ionique polaire*. Note (*) de MM. **JOSEPH LEMAIRE** et **MARC SCHERER**, transmise par M. Marcel Nicolet.

En considérant l'égalité des flux d'échappement des charges positives et négatives et la quasi-neutralité électrique du milieu, on montre que le potentiel électrique de Pannekoek et Rosseland n'est plus applicable dans l'exosphère.

Chamberlain a utilisé un champ électrique incorrect

Jockers, 1970

VOL. 76, NO. 31

JOURNAL OF GEOPHYSICAL RESEARCH

NOVEMBER 1, 1971

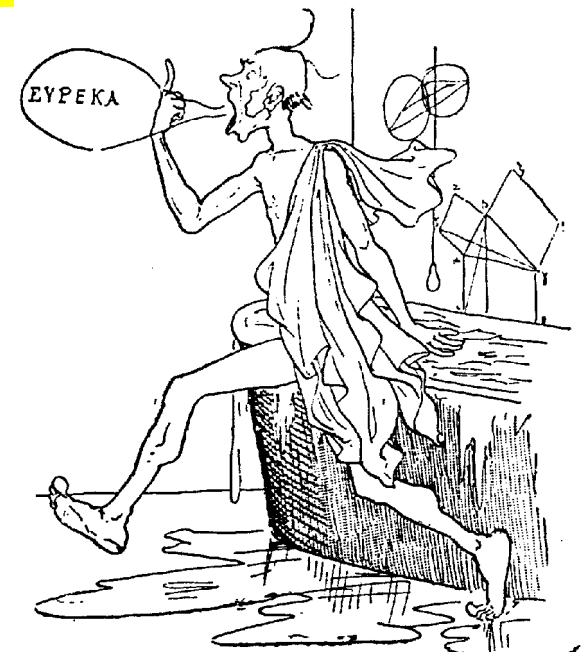
Lemaire et Scherer 1971

Kinetic Models of the Solar Wind

J. LEMAIRE AND M. SCHERER

Institut d'Aéronomie Spatiale de Belgique, Brussels, Belgium

A new kinetic model of the quiet solar wind is presented and compared with earlier
N. Meyer

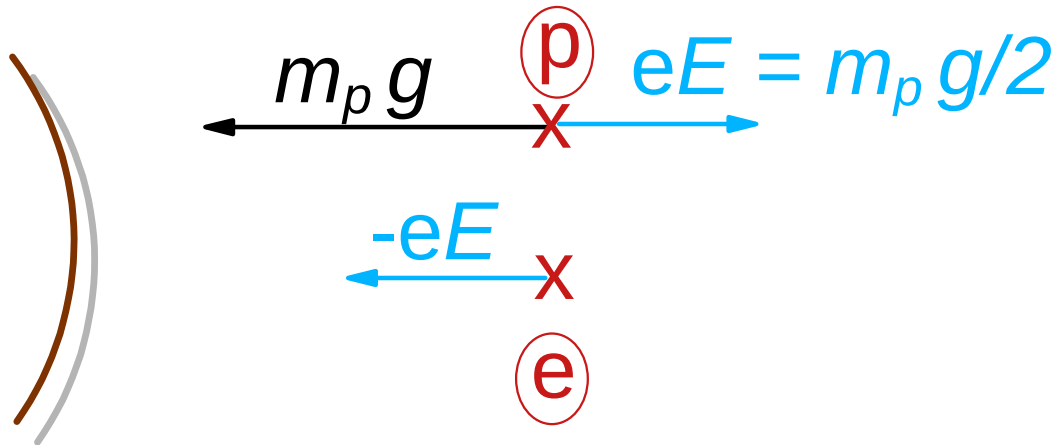


Christophe, L'idée fixe du savant Cosinus (1899, 1900, Librairie Armand Colin, Paris)

Champ élect r ique

■ Chamberlain: champ électrique E imposé a priori

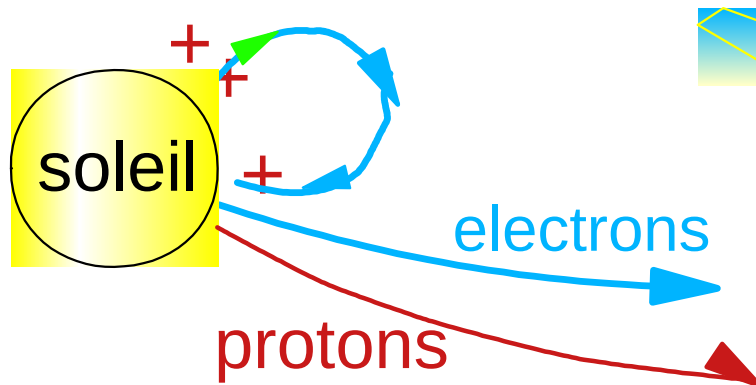
(Pannekoek-Rosseland)



Atmosphère en équilibre:
Pas de vent!

Forces égales sur $\textcircled{p}$ et $\textcircled{e}$
(compensées par gradient
de pression)

■ Lemaire et Scherer and Co. : avec ce E : électrons tendent à s'échapper plus que protons



• $\Rightarrow$ champ électrique plus grand

• $\Rightarrow$ pousse le vent

calculer E self-consistent
c.f. FitzGerald

1990's ... Renouveau des modèles exosphériques

- **Electrons suprathermiques** : Scudder et al. 1992; Maksimovic et al. 1997 → **vent rapide** (rôle analogue aux ondes dans les modèles fluides)
- **Profil de température**: Meyer-Vernet and Issautier 1998 → calcul de $T(r)$
- **Effet de B spiral**: Pierrard et al. 2001
- **Généralisation vent transonique** : Lamy et al. 2003; Zouganelis et al. 2004

MAIS ... description exosphérique néglige les collisions

injustifié  faire modèles cinétiques avec collisions

Prise en compte des collisions

- ✓ approche Fokker-Planck: Lie-Svendson and Leer 2000, Pierrard et al. 2001
- ✓ Simulations particules: Landi and Pantellini 2003
- ✓ ...

En guise de conclusion

"We cannot state at the present time why the Sun is obliged by the basic laws of physics to produce the heliosphere."

(*Eugene Parker, 2001 Astrophys. Space Sci. 277, 1*)

"Quelle sera la prochaine hypothèse 'généralement acceptée' dont il faudra se libérer un jour ..? Quels seront les futurs chercheurs qui briseront demain les images d'Epinal et représentations théoriques que nous nous accordons d'accepter aujourd'hui ?" (*Joseph Lemaire, 1993 - Giens, France*)



La soufflerie d'où sortent tous les vents de l'univers,
Jean Effel ("Turelune le Cornepipeux", 1975, copyright Adagp, Paris 2004)

This document was created with Win2PDF available at <http://www.win2pdf.com>.
The unregistered version of Win2PDF is for evaluation or non-commercial use only.
This page will not be added after purchasing Win2PDF.