Les plasmas, quatrième état de la matière

Nicole Meyer-Vernet

Laboratoire d'Etudes Spatiales et d'Instrumentation en Astrophysique
Observatoire de Paris, CNRS

Solar Probe Plus – NASA - 2025

Aurore sur Jupiter- Hubble

Nébuleuse NGC 248 - Hubble

Université A. Rodin, 14 Mars 2017

nicole.meyer@obspm.fr
www.lesia.obspm.fr/perso/nicole-meyer/

Une des plus belles manifestations des plasmas : l'aurore boréale ou australe

Ont intrigué les hommes depuis longtemps

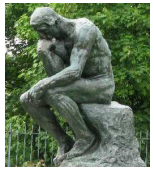
San-Hai Ching, 2200 BC
« *Un serpent rouge brillant dans le ciel* »

Tablette Babylonienne (567 BC)
The earliest datable observation of the aurora borealis (Stephenson et al. 2004)

Pline l'ancien, 1er siècle AC
(Histoire Naturelle, II, XXVII)
« *On y voit aussi sous un aspect sanglant … un incendie tombant vers la Terre …* »

Aurore vue dans le Calvados en 2005

QUESTIONS



- Qu'est-ce qu'un plasma ?
- Comment former un plasma ?
- Où trouve-t-on des plasmas ?
- Quelles sont leurs propriétés ?

Qu'est-ce qu'un plasma ?

Plasma = 4ème état de la matière

1. solide
2. liquide
3. gaz
4. PLASMA

Qu'est-ce qu'un plasma ?

FORMATION DE LA VAPEUR
- A la vue de l'Esprit, la Matière s'est mise dans tous ses états …

PLASMA

Qu'est-ce qu'un plasma ?

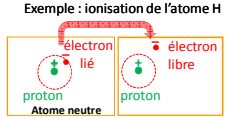
4ème état de la matière

1. solide — Rigide - Molécules liées rigidement entre elles

2. liquide — Déformable mais incompressible - Molécules faiblement liées (peuvent bouger)

3. gaz — Molécules libres (compressible)

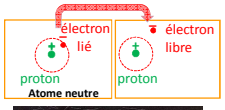
Exemple : ionisation de l'atome H



4. **PLASMA** — Electrons séparés des atomes (mélange d'électrons et ions libres)

Comment produire un plasma ?

Exemple : ionisation de l'atome H



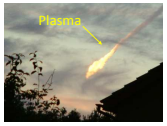
Extraire les électrons des atomes

Fournir l'énergie d'ionisation : 10 eV par électron

COMMENT ?

1. Chauffage Exemple : « étoile filante »

Météoroïde qui tombe dans l'atmosphère (100 t/j)



Produit du chauffage par frottement

Pluie d'étoiles filantes: passage de la Terre dans la traînée de poussières laissées par une comète le long de sa trajectoire

Pluies d'étoiles filantes

Exemple : Léonides : Passage de la Terre dans les poussières éjectées par la comète 55P/Tempel-Tuttle

Comète :
périgée 0.98 UA
apogée : 9.3 UA
Période : 33 ans

1 UA = distance Terre-Soleil
= 150 millions de km

Orbite de la comète (période 33 ans inclinaison 18°)

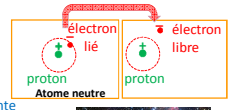
Nuages de poussières éjectées par la comète à chaque passage

Les plus grosses restent le long de l'orbite

orbite de la Terre

Comment produire un plasma ?

Exemple : ionisation de l'atome H



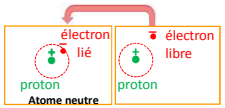
Extraire les électrons des atomes

Fournir l'énergie d'ionisation : 10 eV par électron

2. Rayonnement ionisant : photons d'énergie suffisante
   ⇒ longueur d'onde < 0.1 µm (UV, X ..) presque partout dans l'univers

3. Champs électriques (décharges, orages, aurores ...)
4. Collision avec particule énergétique (presque partout dans l'univers)
5. Compression (intérieur des étoiles)

Note : On voit les plasmas car ils produisent du rayonnement



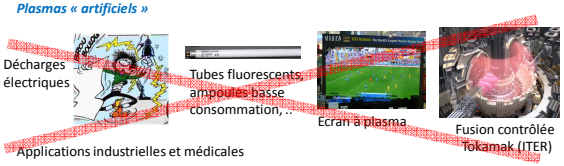
quand les électrons :

- Se recombinent
- Ou excitent des atomes ou molécules

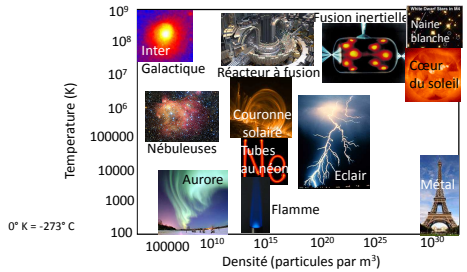
Aurore : électrons excitent des molécules de l'atmosphère

Où trouve-t-on des plasmas ?

Plasmas « artificiels »



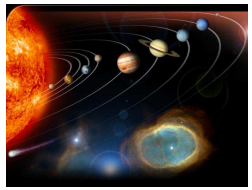
Plasmas « naturels » *L'essentiel de l'univers est formé de plasma*



Presque tout l'univers est formé de plasma

Etoiles

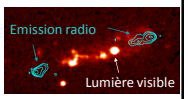
Milieu interstellaire



Environnement des planètes

Milieu interplanétaire

Galaxies …



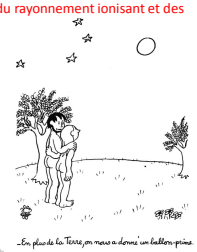
Milieu intergalactique

Presque tout l'univers est formé de plasma

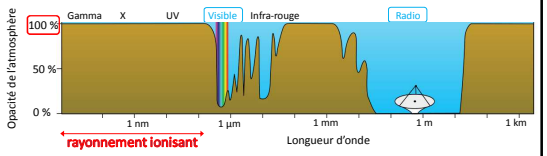
… sauf les régions denses et froides protégées du rayonnement ionisant et des particules énergétiques

Nous habitons un des rares endroits de l'univers qui n'est pas un plasma

… car la Terre est entourée d'une atmosphère qui absorbe le rayonnement ionisant



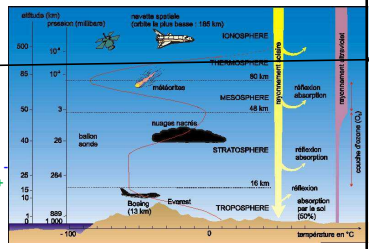
Nous habitons un des rares endroits de l'univers qui n'est pas un plasma



… car la Terre est entourée d'une atmosphère qui absorbe le rayonnement ionisant

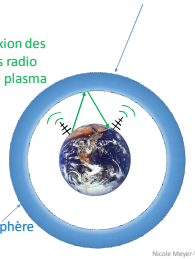
Au-dessus de 100 km d'altitude environ, l'atmosphère n'est plus assez dense pour arrêter le rayonnement ionisant

Plasmas



Couche de plasma dense autour de la Terre : l'ionosphère

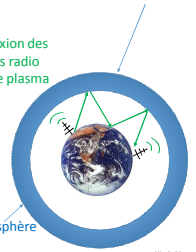
Réflexion des ondes radio par le plasma



Ionosphère

Couche dense de plasma autour de la Terre : l'ionosphère

Réflexion des ondes radio par le plasma



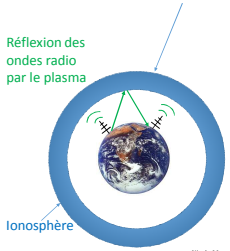
Ionosphère

Si l'antenne est beaucoup plus loin, Le signal arrive car le sol (mouillé) et l'eau sont conducteurs et réfléchissent aussi les ondes, qui peuvent ainsi faire le tour de la Terre

Couche de plasma dense autour de la Terre : l'ionosphère

Réflexion des ondes radio par le plasma

Ionosphère

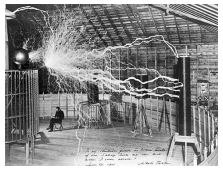


1901: 1ère transmission radio entre l'Angleterre et le Canada

G. Marconi

… en fait c'est Nikola Tesla l'inventeur !

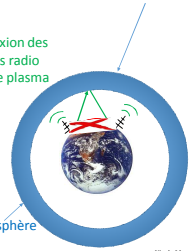
Nikola Tesla (1856-1943)



Couche de plasma dense autour de la Terre : l'ionosphère

Réflexion des ondes radio par le plasma

Ionosphère



1901: 1ère transmission radio entre l'Angleterre et le Canada

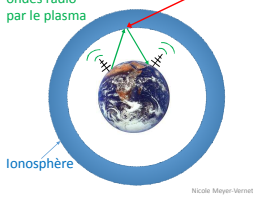
G. Marconi

O. Heaviside et A. Kennelly suggèrent l'existence d'une couche conductrice réfléchissant les ondes

Couche dense de plasma autour de la Terre : l'ionosphère

Réflexion des ondes radio par le plasma

Ionosphère



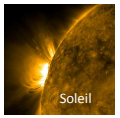
Pourquoi le plasma de l'ionosphère arrête-t-il les ondes radio ?

Propriétés des PLASMAS : mélange d'électrons et ions libres

1. Interagissent avec les champs électriques

2. Conduisent l'électricité

3. Produisent et subissent des champs magnétiques



Propriétés des PLASMAS : mélange d'électrons et ions libres

1. Interagissent avec les champs électriques

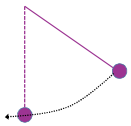
Les charges de signe opposé s'attirent

Quand on essaye de séparer les électrons des ions positifs, cela produit un champ électrique qui tend à les ramener en place

- Plasma quasi-neutre à grande échelle
- Comportement collectif - oscillations à une fréquence caractéristique

oscillations à une fréquence caractéristique

Comme un pendule



Mais champ électrique au lieu de la force de gravitation

Les plasmas sont quasi-neutres (électriquement) à grande échelle

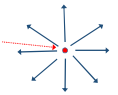
Quasiment pas de champ électriques permanents à grande échelle dans l'univers

Mais il y a des champs magnétiques permanents partout dans l'univers !

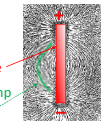
Pourquoi ?

A cause d'une dissymétrie : il existe des charges électriques

… mais pas de charges (monopoles) magnétiques



Champ électrique



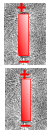
Barre aimantée

Lignes de champ magnétique

Les lignes de champ magnétique sont toujours fermées

Si on coupe une barre aimantée en deux

… on obtient deux barres aimantées



A cause d'une dissymétrie : il existe des charges électriques

… mais pas de charges (monopoles) magnétiques

Charges électriques

Pas de courants magnétiques

Equations de Maxwell

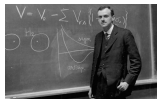
$$\nabla \cdot \mathbf{E} = \rho_e/\epsilon_0 \qquad \nabla \times \mathbf{E} = -\partial \mathbf{B}/\partial t$$

$$\nabla \cdot \mathbf{B} = 0 \qquad \nabla \times \mathbf{B} = \mu_0 \mathbf{J} + (1/c^2)\, \partial \mathbf{E}/\partial t$$

Pas de charges magnétiques

Courants électriques

« Monopoles magnétiques » prédits par Dirac (1931) pour expliquer la quantification de la charge électrique (charges = multiples de la charge de l'électron)



… mais pas observés

ONDES

- Ondes sonores

- Ondes sur l'eau
- Ondes sismiques, …
- Ondes électromagnétiques …

Se propagent dans un milieu … à une vitesse qui dépend du milieu

Peuvent se propager dans le vide

Transportent :

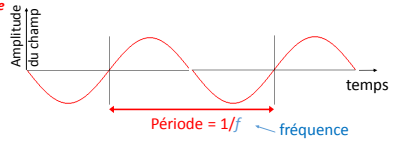
- énergie

- quantité de mouvement

Ondes électromagnétiques

- Variation du champ électromagnétique
- Se propage dans le « vide » à 300.000 km/s (vitesse de la lumière *c*)
- Et dans d'autres milieux (vitesse dépend de l'indice de réfraction)

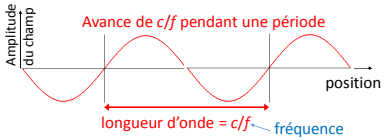
Onde la plus simple



onde radio : fréquence inférieure à 300 GHz (par convention)

Ondes électromagnétiques

- Variation du champ électromagnétique
- Se propage dans le « vide » à 300.000 km/s (vitesse de la lumière *c*)
- Et dans d'autres milieux (vitesse dépend de l'indice de réfraction)



onde radio : longueur d'onde supérieure à 1 mm (par convention)

Longueurs d'onde inférieures : infrarouge - technologie optique

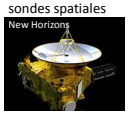
Ondes électromagnétiques

- Variation du champ électromagnétique
- Se propage dans le « vide » à 300.000 km/s (vitesse de la lumière *c*)
- Et dans d'autres milieux (vitesse dépend de l'indice de réfraction)

Bande FM ~ 100 MHz (3 m)
GO : ~ 0.2 MHz
AM : ~ 0.5 MHz

~ GHz

Télémesure des sondes spatiales



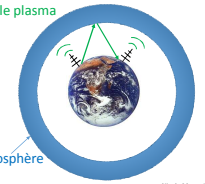
Réception Antenne 70m

~ 10 GHz

onde radio : fréquence inférieure à 300 GHz (par convention)

Pourquoi l'ionosphère arrête-t-elle les ondes radio ?

Réflexion des ondes radio par le plasma



Le champ électrique de l'onde déplace les électrons du plasma

Ce déplacement des électrons crée un champ électrique opposé à celui de l'onde

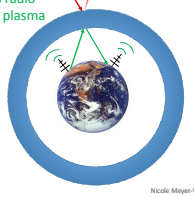
… qui annule le champ initial

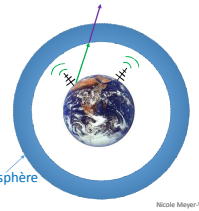
Donc les ondes ne pénètrent pas dans le plasma

Ondes venant de l'espace

Ca marche dans les deux sens

Réflexion des ondes radio par le plasma





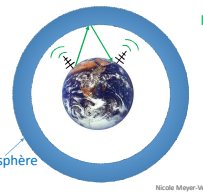
Mais si la fréquence des ondes est trop grande (supérieure à la fréquence caractéristique du plasma)
Alors les électrons n'ont pas le temps de se déplacer et le plasma n'arrête pas les ondes

Fréquence caractéristique de l'ionosphère (de jour) : 10 MHz

Réfléchit les fréquences inférieures à *f* = 10 MHz

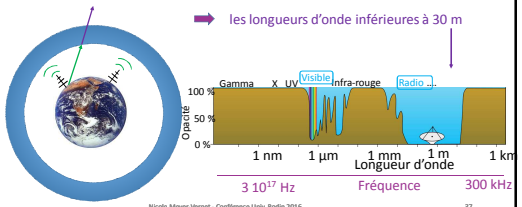
les longueurs d'onde supérieures à *c*/*f* = 30 m

« ondes HF (courtes)» (radiodiffusion, trafic maritimes et aérien, radioamateurs)



Transmet les fréquences supérieures à 10 MHz

les longueurs d'onde inférieures à 30 m



Radio astronomie

Etude des ondes radio venant de l'espace

Produites par des plasmas dans l'espace

Réception avec des antennes au sol : fréquences supérieures à 10 MHz

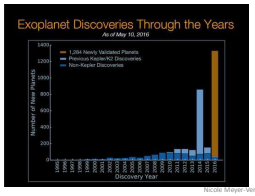
Grand Radio Télescope de Nancay ~ GHz

Antenne d'Arecibo (Porto-Rico)

Radio astronomie

Etude des ondes radio venant de l'espace

Astrophysique et aussi recherche de la vie dans l'univers : projet SETI (Search for Extraterrestrial Intelligence)



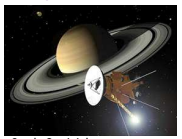
Environ 3000 Planètes extrasolaires découvertes actuellement

Nouveau projet aux USA …(Allen Telescope Array en Californie) concours pour le message le plus pertinent

Radio astronomie

Depuis l'espace : fréquences inférieures à 10 MHz : sondes spatiales

Sondes STEREO observant le soleil



Sonde Cassini dans l'environnement de Saturne

Sonde Solaire – Lancement 2018

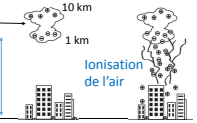
Propriétés des PLASMAS : mélange d'électrons et ions libres

2. Conduit l'électricité

Eclairs d'orage : quand le champ électrique entre un nuage et le sol devient assez grand, l'air s'ionise et le plasma conduit l'électricité

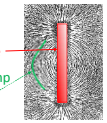
Temps normal : champ électrique dans l'atmosphère = 100 V/m

Temps orageux : cumulo nimbus



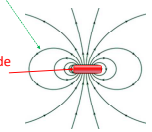
2. Conduit l'électricité

3. Produit et subit des champs magnétiques



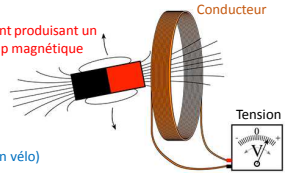
- Courants électriques produisent champ magnétiques
- Champs magnétiques modifient le mouvement des charges électriques et les courants

Electron ou ion dans un champ magnétique



Par exemple si on déplace un conducteur dans un champ magnétique

Cela induit un champ électrique

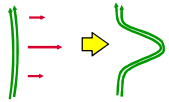


Qui induit un courant (c.f. dynamo sur un vélo)

Qui produit un champ magnétique qui s'oppose à la variation initiale

En astrophysique (grandes dimensions) ça gèle les champs magnétiques dans les plasmas

Lignes de champ magnétique



En astrophysique (grandes dimensions) les champs magnétiques sont gelés dans les plasmas

Plasmas magnétisés à grande échelle se comportent comme une matière élastique qui peut être pliée, tordue ou étirée

Les mouvements du plasma peuvent augmenter le champ magnétique

➡ Champ magnétiques des étoiles

Et stocker des énergies énormes dans le champ magnétique

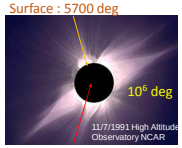
Exemple de plasma magnétisé : l'atmosphère du soleil (la couronne solaire)

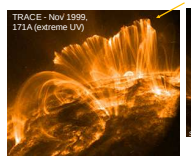
Observée du sol pendant une éclipse en lumière visible

… et en détail par une sonde spatiale en ultra-violet et X

Boucles de champ magnétique

Surface : 5700 deg

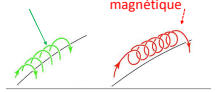




Intérieur : 10^7 deg

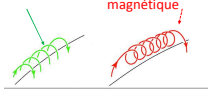
Ces lignes de champ magnétique se comportent comme des cordes qui retiennent le plasma

Stockage d'énergie dans ce champ magnétique

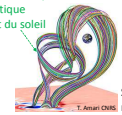


Ces lignes de champ magnétique se comportent comme des cordes qui retiennent le plasma

Stockage d'énergie dans ce champ magnétique



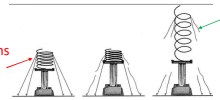
Lignes de champ magnétique sortant du soleil



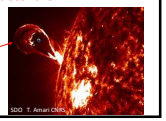
Simulation numérique

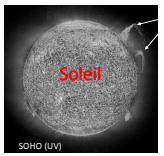
L'énergie stockée est libérée quand les cordes cassent, et permettent au ressort de se détendre

Stockage d'énergie dans le ressort (retenu par des cordes)

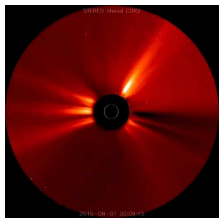


Eruption solaire





Le champ magnétique supporte des paquets de matière de la taille d'une montagne (10^{12} kg)



Libération de l'énergie : éruption solaire

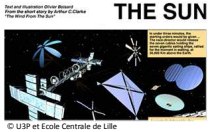
10^{24} Joules !

La « montagne » part à 300 km/s !

Plasmas du système solaire : dus au Soleil

Le Soleil émet deux types de vents :

1. La lumière (ondes = vent de photons) qui pousse les voiles solaires



© U3P et Ecole Centrale de Lille

Ionise les atmosphères des planètes

2. Un vent de plasma (protons et électrons)

« le vent solaire » qui baigne tout le système solaire et pousse les plasmas

➢ Le vent de photons

- Qu'on voit
- Qui ionise les environnements du système solaire
- Dont l'énergie maintient la vie

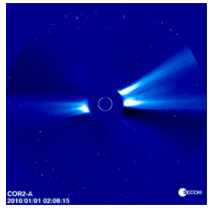
Ne pas confondre

➢ Le vent de plasma

- Qu'on ne voit pas directement
- Qui n'arrive pas à la surface de la Terre
- Mais qui sculpte les environnements du système solaire

Le vent de plasma (électrons et protons)

Vent supersonique éjecté en permanence par le Soleil à 400 km/s



SOHO/LASCO

- Le soleil perd ainsi 10^9 kg/s
- En 10 milliards d'années (sa durée de vie) il perd ainsi le 10.000 ème de sa masse
- A la distance de la Terre, il contient environ 5 électrons et 5 protons par cm^3
- A une température de 100.000 K

Très dilué : distance entre 2 particules = 5 mm

Comparez : dans cette pièce : 4 nm

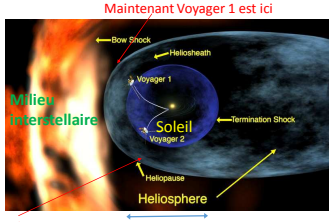
Le vent solaire (électrons et protons)

- Remplit tout le système solaire
- Formant une bulle dans le milieu interstellaire

Les sondes spatiales Voyager 1 & 2 (lancées en 1977)

et Voyager 2 est là

Maintenant Voyager 1 est ici



30 milliards de km
La lumière met 1 jour

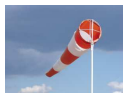
Le vent solaire (électrons et protons)

Il ne pousse pas les voiles solaires … mais il pousse et sculpte les plasmas

Produit les queues de plasma des comètes

Les queues de plasma cométaires indiquent la direction du vent solaire

Comme une manche à air

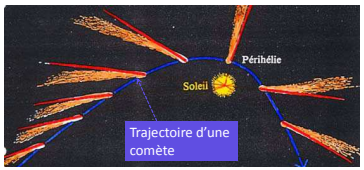


Vent solaire

Le vent solaire (électrons et protons)

Il ne pousse pas les voiles solaires … mais il pousse et sculpte les plasmas

Les queues de plasma cométaires indiquent la direction du vent solaire



Perturbation du champ magnétique du vent solaire : déconnecte la queue de la comète de Halley

Le vent solaire (électrons et protons)

Supersonique : va plus vite que les ondes sonores
→ n'a pas le temps de s'adapter aux compressions
→ produit des chocs quand il rencontre des obstacles (planètes)

onde de choc en laboratoire (ONERA)

Vent de la jeune étoile LL Orionis, qui rencontre le milieu interstellaire de la nébuleuse d'Orion

Le vent solaire (électrons et protons)

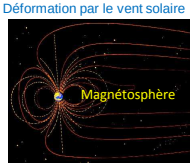
Il ne pousse pas les voiles solaires … mais il pousse et sculpte les plasmas

Lorsque les planètes ont un champ magnétique **… le vent solaire déforme ce champ**

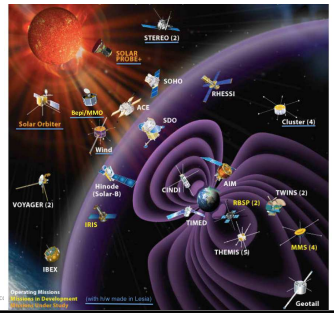
Lignes de champ magnétique autour d'une planète

vent solaire

Déformation par le vent solaire



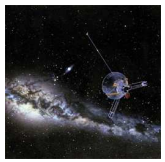
La flottille de sondes spatiales explorant le vent solaire et la magnétosphère de la Terre



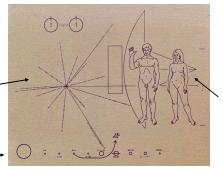
Les sondes spatiales pionnières …

Pioneer 10 (lancé en 1972) et 11 (lancé en 1973)

- 1ère exploration des planètes Jupiter et Saturne
- 1ères sondes à sortir du système solaire



Position du Soleil par rapport au centre de la galaxie et de 14 pulsars

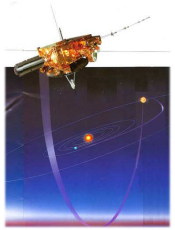


« humains moyens »

Représentation du système solaire

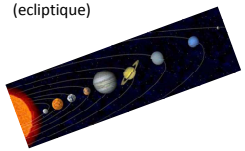
(Conception : Carl Sagan et al.)

Les sondes spatiales pionnières …

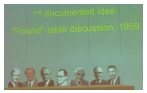


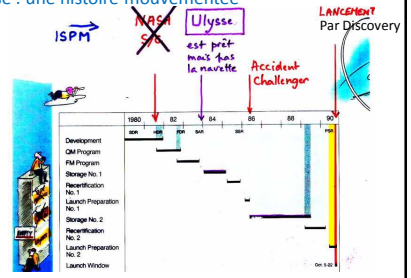
La sonde Ulysse

- 1ère exploration hors du plan des planètes (ecliptique)

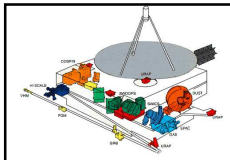


La sonde Ulysse : une histoire mouvementée

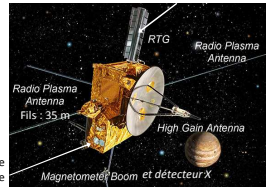




La sonde Ulysse



Générateur thermoélectrique à radioisotope



Contrôle trajectoire par jets d'hydrazine

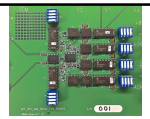
370 kg (dont 33 kg hydrazine et 55 kg d'instruments scientifiques) -3 X 3 X 2 m

La sonde Ulysse

Récepteur radio (fabriqué en **1980** à Meudon)

- 2008 : plus d'énergie
  ⇒ l'hydrazine gèle
- -Juin 2009 : arrêt définitif des communications

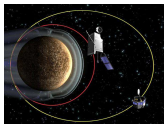
Récepteur radio sur Bepi-Colombo (fabriqué en **2009** à Meudon)



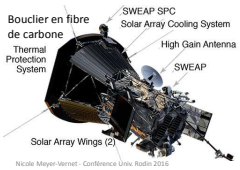
Récepteur radio sur la **sonde solaire** (fabriqué en **2016** à Berkeley)

Récepteurs radio du futur

Lancements prévus en 2018



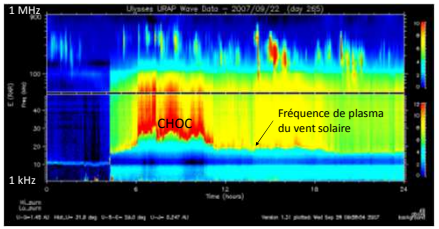
Exploration de Mercure
Lancement prévu en 2018



20 fois plus près du Soleil que la Terre
⇒ 400 fois plus d'énergie !
⇒ 1400°C !

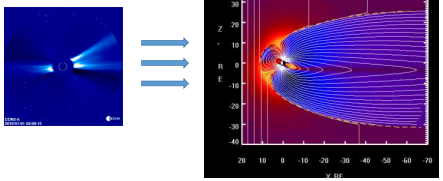
La sonde Ulysse dans le vent solaire

Exemple de mesure du récepteur radio

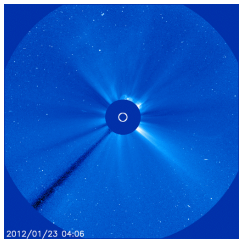


Code de couleur : Intensité des ondes

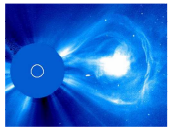
Variation des lignes de champ magnétique de la Terre à cause des petites variations continuelles du vent solaire



Eruptions solaires



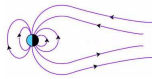
Effets des éruptions solaires



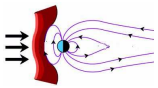
Nuage de plasma

Onde de choc

Environnement de la Terre



Arrive près de la Terre



Comprime le champ magnétique Terrestre

Effets des éruptions solaires

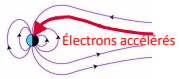
- Crée des courants électriques
- Perturbe les systèmes de communication
- Modifie le champ magnétique terrestre

Space Environment Center

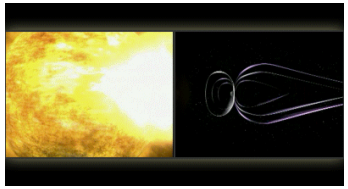
restes d'un transformateur

- Accélère des électrons

Ces électrons reviennent vers les régions polaires



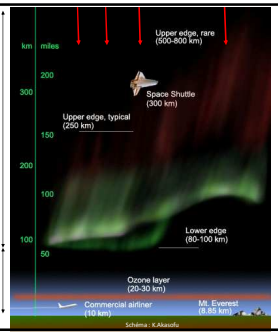
Effets des éruptions solaires



Comprime le champ magnétique Terrestre

Ionosphère

Atmosphère neutre



Les électrons accélérés descendent dans l'atmosphère et excitent des atomes

… produisant des aurores

Effets des éruptions solaires

Aurore polaire

Aurore polaire

Couleurs des aurores

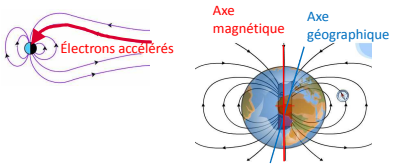
Violet : excitation de l'Hydrogène et l'Hélium (encore plus haut)

Rouge : excitation de l'oxygène atomique en haute altitude (300 km)

Bleu ou vert : Excitation des molécules d'azote et d'oxygène (bas dans l'atmosphère)

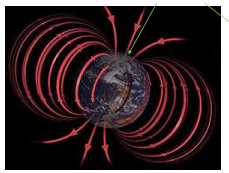
Où et quand peut-on observer des aurores ?

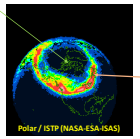
Autour des pôles magnétiques de la Terre



Où et quand peut-on observer des aurores ?

Pôle nord magnétique

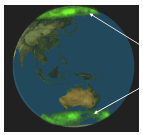




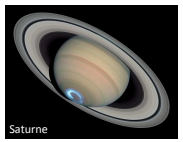
Les électrons accélérés arrivent sur un **ovale auroral entourant le pôle**

Lignes de champ magnétique terrestre

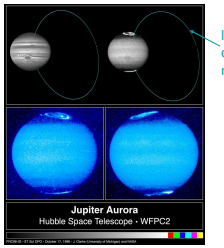
Aurores terrestres



ovales auroraux autour des pôles



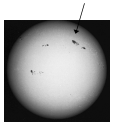
… et sur les autres planètes



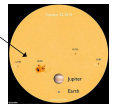
ligne de champ magnétique

Où et quand peut-on observer des aurores ?

Taches solaires



Disque solaire
(lumière visible)



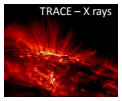
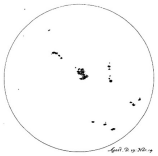


Image X d'une tache solaire

Taches solaires

Galilée



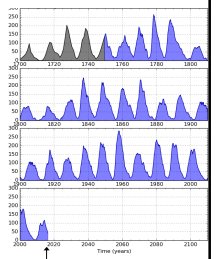
- Découverte (1ère publication): 1611 David Fabricius
- Galilée dit les avoir observés en 1610

Un de ses premiers dessins du Soleil (1612) *Istoria e dimostrazioni intorno alle macchie solari* (Galileo, 1613, p. 94). Légende de la fig. 'Disegni della Macchia grande Solare, veduta con la semplice vista dal Sig. Galilei, e similmente mostrata a molti; nelli giorni 19.20.21. d'Agosto 1612'

Activité solaire

Cycle de 11 ans de l'activité solaire

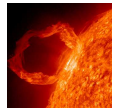
Nombre de taches solaires



2017

Eruptions

L'ovale auroral s'élargit vers les basses latitudes



Où et quand peut-on observer des aurores ?

En période de maximum d'activité solaire (2001, 2012, 2023 …)

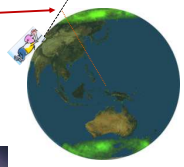
- Beaucoup plus d'éruptions solaires
- L'ovale auroral s'élargit

⇒

- Beaucoup plus d'aurores
- On peut les voir plus loin des pôles

Loin des pôles, comme on est loin des régions aurorales, on voit le haut des aurores

Ligne de visée



⇒ Aurores rouges (ou violettes)

En période de maximum d'activité solaire (2001, 2012, 2023 …)

Aurores visibles aux plus basses latitudes … et rouges (ou violettes)

Aurores vues de Belgique en 2003

Aurores observées en Grèce (Plutarque – 467 BC, Aristote 384-322 BC) et en Italie (Pline l'ancien, Sénèque) pendant l'antiquité

Shakespeare

Jules César (Acte 2, scène 1)

Calphurnia: "*Fierce fiery warriors fight upon the clouds*
In ranks and squadrons and right form of war,
Which drizzled blood upon the Capitol"

« Des guerriers de feu se sont battus férocement sur les nuages, rangés en escadrons, et leur sang a goutté sur le Capitole »

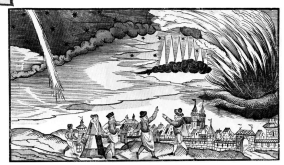
Silverman 1998 Journal of Atmospheric and Solar Terrestrial Physics

A l'époque de Shakespeare, nombreuses descriptions d'aurores en Europe

"Fierce **fiery** warriors fight upon the clouds …"

Aurore près de Bamberg (Allemagne, 1560)

"Which drizzled **blood** over the Capitol…"



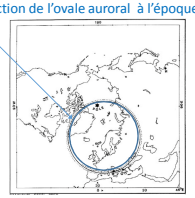
Aurore près de Nurnberg (Allemagne, 1591)

Stothers 1979 Astron. Astrophys. 77, 121 ; ISIS 70, 85
Majestic lights (R. H. Eather, AGU Washington, DC)

Le champ magnétique terrestre varie : les pôles magnétiques se déplacent

Reconstruction de l'ovale auroral à l'époque d'Aristote

?



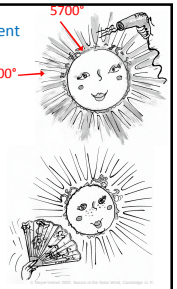
Dans l'antiquité, le pôle magnétique de la Terre était plus proche de la Méditerranée (?)

Mouvement du pôle magnétique Nord

50 km/an

Quelques questions actuelles pas entièrement résolues pour les plasmas dans l'espace

- Qu'est-ce qui chauffe la couronne solaire ?
- Comment est produit le vent de plasma du soleil ?

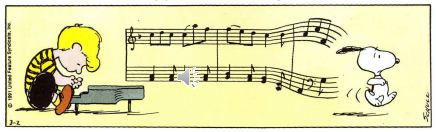


La sonde solaire

Ray Bradbury : The golden apples of the Sun

- Comment est produit le vent de plasma du soleil qui produit une bulle dans l'espace ?

« The answer, my friend, is blowing in the wind »



Remerciements à Bob Dylan

Exemple extrême (absence de transmission d'information)

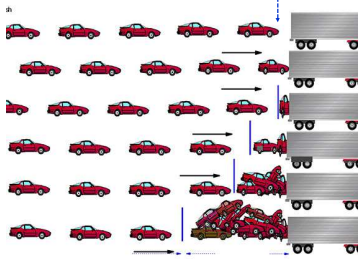
CHOC

File de voitures en mouvement avec des conducteurs endormis (ou sourds et aveugles)

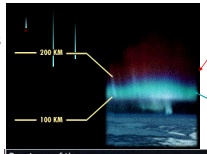
Qui arrive sur un camion arrêté

↓

La vitesse s'annule brusquement au choc : transition irréversible et dissipative

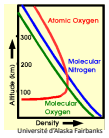


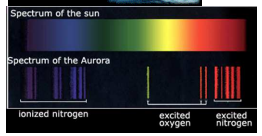
Couleurs des aurores



Rouge :
excitation de l'oxygène atomique qui domine en haute altitude

Bleu ou vert :
Excitation des molécules d'azote et d'oxygène (qui dominent plus bas dans l'atmosphère)

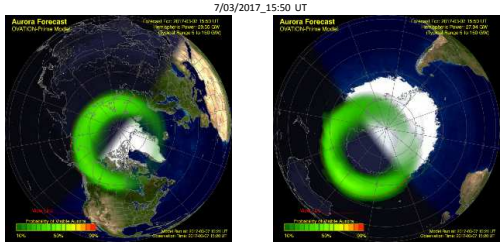




Prévision d'activité aurorale en temps réel

http://www.swpc.noaa.gov/products/aurora-30-minute-forecast

7/03/2017_15:50 UT



Hémisphère nord Hémisphère sud

Note : Lord Kelvin (William Thomson) Président de la Royal Society en 1892 : démontre » l'impossibilité que le Soleil soit responsable des orages magnétiques terrestres !