

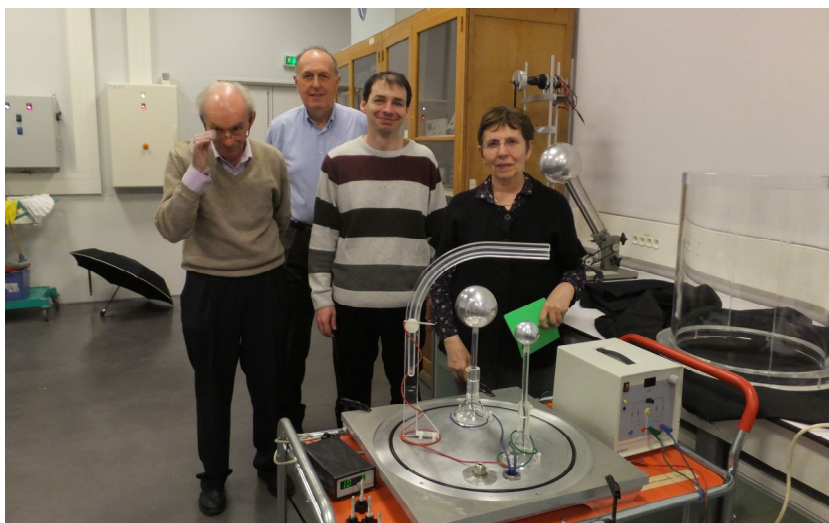
Quelques instants de physique : les aurores polaires

Par Luce Abouaf, mardi 5 mai 2015

La présentation s'est déroulée devant environ 40 participants.



Luce Abouaf a remercié les Anciens qui ont participé à la mise au point des expériences : Bernard Clerjoud, Danièle Fournier, Jean-François Planès, avec le concours de Pascal Bernard, responsable actuel de la « collection de cours de physique ».



Un film de quelques minutes, avec accompagnement musical, d'une magnifique aurore boréale qui a eu lieu en Alaska en 2012, a mis les spectateurs en condition.

L'objectif de l'exposé était de faire comprendre le plus simplement possible le mécanisme des aurores polaires.

Après une courte introduction historique, les partenaires et leur rôle dans la création des aurores (aurore boréale au nord, australe au sud), sont détaillés.

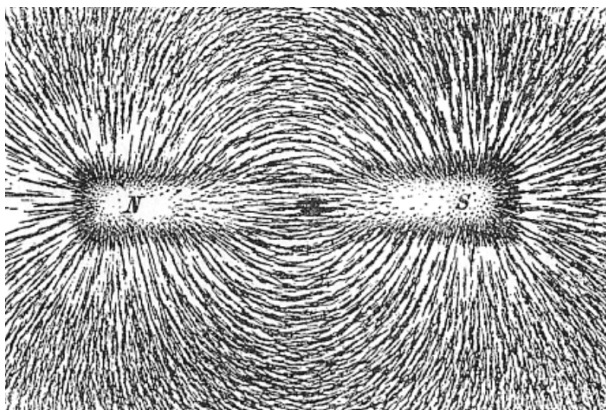
LES PARTENAIRES

• Le champ magnétique terrestre (B_T)

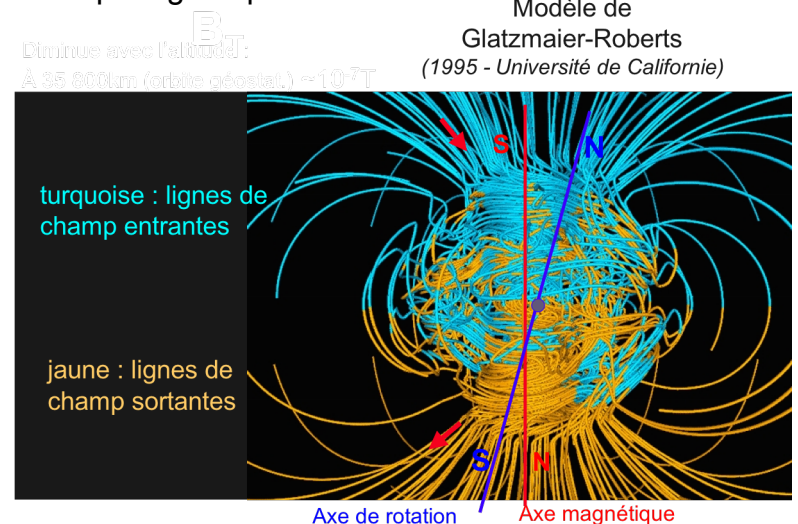
Il est expliqué à partir du noyau externe liquide de la terre composé de fer et de nickel liquides en mouvement constant, qui crée un champ magnétique, en première approximation semblable à celui d'un aimant droit : le pôle sud de l'aimant étant à environ 1000 km du pôle nord géographique, et l'axe magnétique de la terre étant incliné de $10^\circ 5'$ par rapport à l'axe de rotation de la terre.

Une *expérience* effectuée avec un aimant et de la limaille de fer, permet de visualiser les lignes de champ d'un dipôle magnétique (aimant droit). Le champ magnétique terrestre est beaucoup plus compliqué.

Champ magnétique d'un aimant droit



Champ magnétique terrestre



• L'atmosphère

Elle est essentiellement constituée d'azote (N_2 , 78%) et d'oxygène (O_2 , 21%). Le phénomène se produit entre 100 et 300 km d'altitude, dans une atmosphère très raréfiée.

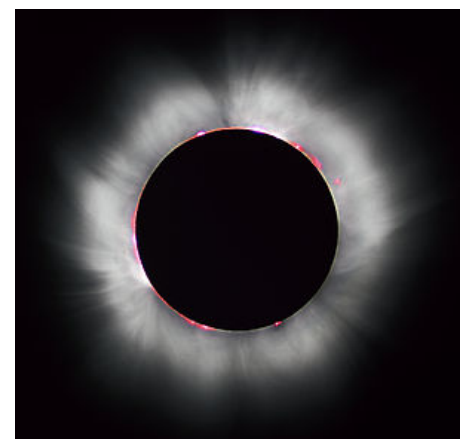
• Le soleil

Il est à la source des aurores polaires. Dans la couronne solaire de puissantes explosions magnétiques projettent vers l'espace de la matière ionisée (protons H^+ , électrons e^-), à des altitudes de plus de 100 000 km et à très grande vitesse (500 à 1000 km/s). C'est ce qu'on appelle **le vent solaire**.

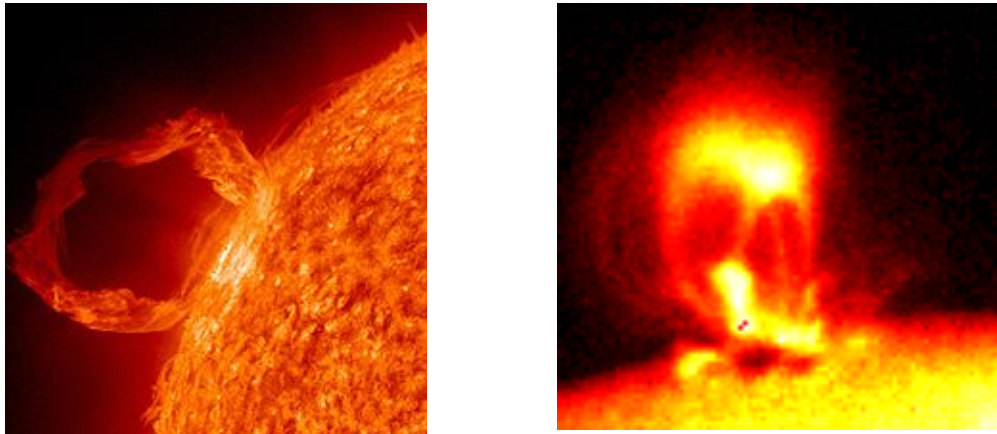
- Surface visible : photosphère,
 e \sim 500 km, émet dans le visible,
 $T_{\text{effective}} \sim 5000 K$, granuleuse, fluctuante,
 taches sombres (trous coronaux)

- Chromosphère basse atmosphère :
 - e de 500 à 2000 km, $T \sim 4000$ à $100\ 000 K$, ($\sim 10^{12} e^-/cm^3$)
 - **rose** du à l'émission à 656 nm de H^+
 - **départ des jets à qqes 100 000 km**

- Couronne solaire (73% H_2 , 25% He) :
 se dilue dans l'espace,
 e de qqes millions de km
 $T \sim 1$ à 3 millions de degrés

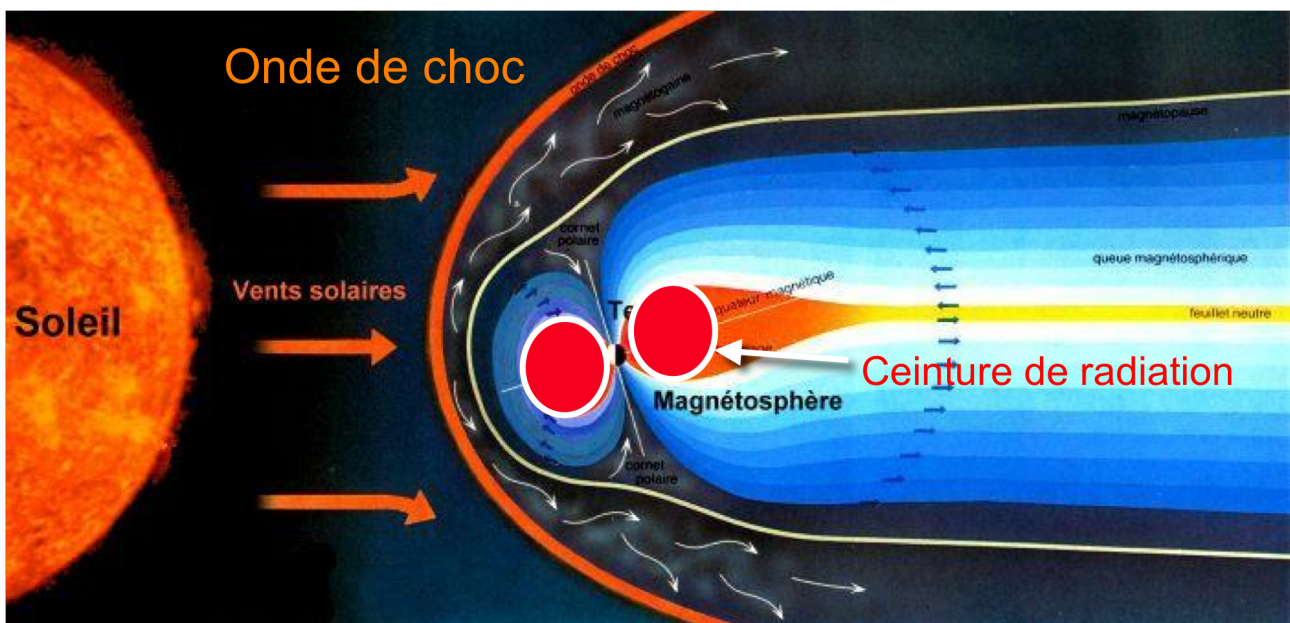


Ces **éjections de masse coronale** s'accompagnent de champs magnétiques intenses avec des lignes de champ dirigées vers l'espace.

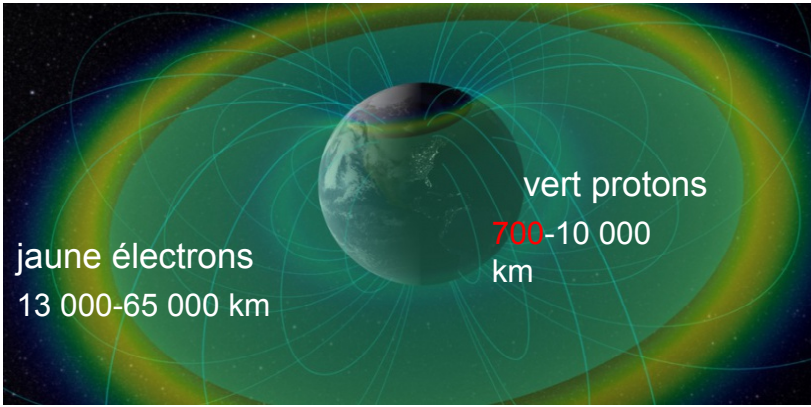


LEURS INTERACTIONS

Le **vent solaire arrivant dans le champ magnétique terrestre**, en 2 ou 3 jours (distance terre-soleil : $150 \cdot 10^6$ km), conduit à la formation d'une onde de choc. Cette onde de choc se forme quand la vitesse du vent solaire (environ 450 km/s), qui ralentit au cours de sa propagation, atteint l'équivalent de la vitesse du son dans le milieu interstellaire (environ 100 km/s). Il confine le champ magnétique terrestre dans une zone appelée **magnétosphère** (déformation ovoïdale du champ dipolaire), puis s'écoule le long de l'onde de choc.



Le champ magnétique terrestre forme ainsi une sorte de bouclier contre les particules du vent solaire. Les protons et les électrons qui arrivent à traverser ce bouclier sont piégés, par le champ magnétique terrestre dans une sorte de couronne autour de la terre : la **ceinture de radiation** (en rouge sur la figure ci-dessus) et n'atteignent donc pas la surface de la terre.



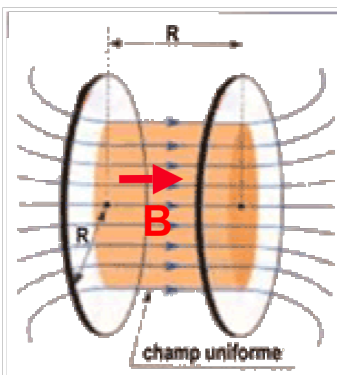
Une représentation de la ceinture de van Allen qui protège la terre des espèces de haute énergie, **sauf en cas d'éruption solaire** (particules émises par le soleil multipliées par 10 000).
(Tom Bridgman / Nasa)

• Comment fonctionne ce piège ?

Pour comprendre, il faut analyser le **mouvement d'électrons dans un champ magnétique**.

Trajectoire d'un électron dans un champ magnétique

(force de Lorentz)

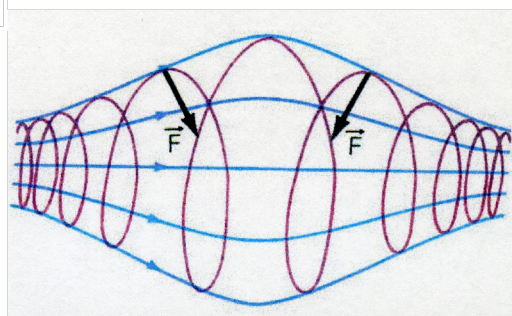
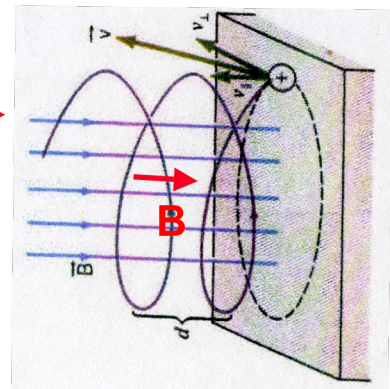


Bobines de Helmholtz
(même courant dans le même sens)
⇒ **B uniforme**

$V(e^-) // \mathbf{B}$ uniforme
Trajectoire :
Droite // \mathbf{B}

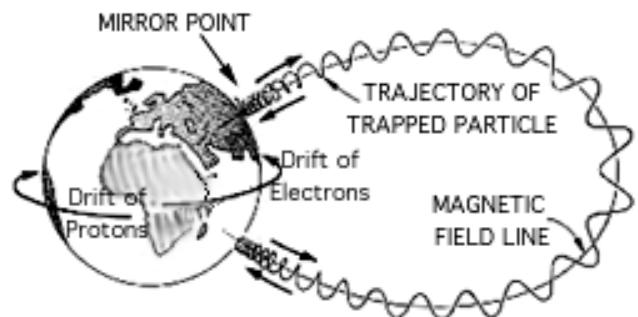
$V(e^-) \perp \mathbf{B}$ uniforme
Trajectoire :
Cercle dans plan $\perp \mathbf{B}$

$V(e^-)$ quelconque
B uniforme
Trajectoire :
Hélice



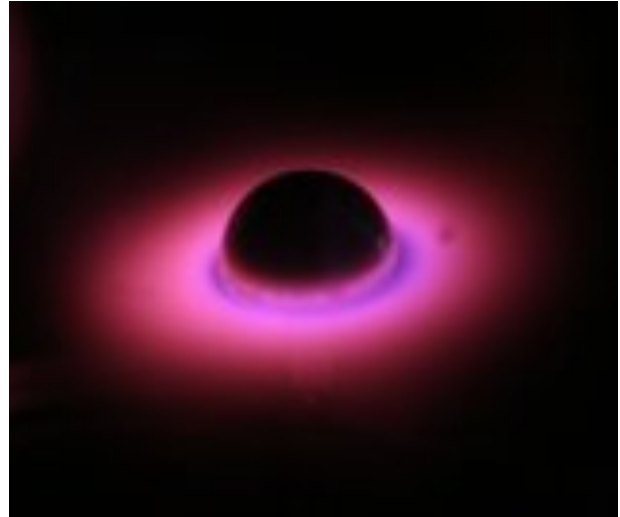
$V(e^-)$ quelconque
B non uniforme

Il en résulte que les particules chargées se réfléchissent à la surface de la terre à chaque extrémité de leur trajectoire



EXPERIENCE

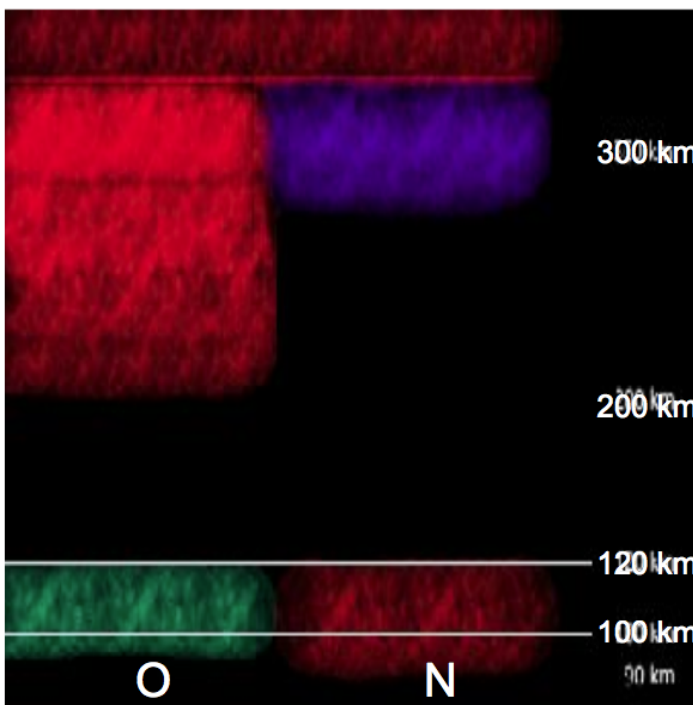
Cette ceinture de radiation correspond à l'anneau de courant observé sur l'expérience « La planeterrella » : une sphère qui contient un aimant, est reliée à la source négative d'un générateur. Elle émet donc des électrons. On observe, quand elle est placée dans une enceinte à basse pression (20 à 30 pascals), un anneau lumineux qui correspond à l'émission de l'azote excité par les électrons qu'elle retient autour d'elle.



• **En cas d'éruption solaire intense, les particules chargées du vent solaire ne sont pas toutes piégées dans la ceinture de radiation.** Certaines s'engouffrent alors par les **cornets polaires**, formés par les lignes du champ terrestre qui se resserrent aux pôles. Elles se rapprochent de la terre, entrant dans la haute atmosphère (altitude 100 à 200 km). **Elles excitent et ionisent l'azote et l'oxygène raréfiés qui s'y trouvent. Ces espèces excitées, en revenant à leur état fondamental, émettent de la lumière.**

La lumière émise dépend du degré d'excitation de ces espèces. A haute altitude, les particules solaires ont plus d'énergie et les espèces atmosphériques sont plus excitées. A basse altitude, elles sont moins excitées. La couleur émise dépend de l'espèce et de son degré d'excitation.

Emissions de l'oxygène (O) et de l'azote (N) atomiques



On observe aussi :

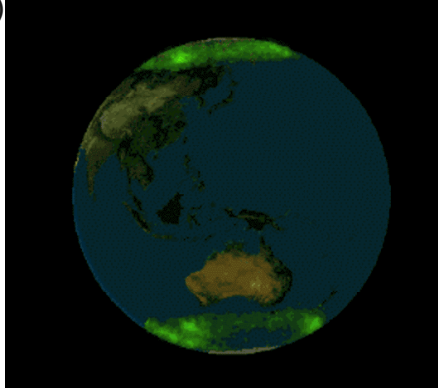
L'hydrogène atomique, à 250 km :
⇒ rouge intense, bleu.

L'azote moléculaire, vers 100 km :
⇒ rose violacé, blanchâtre.

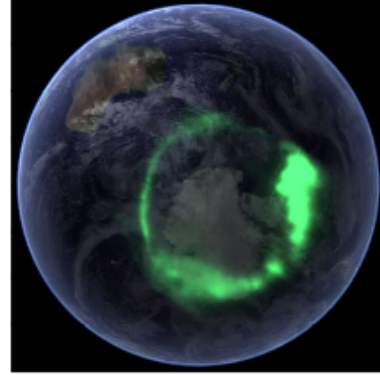
L'OBSERVATION

Les aurores polaires sont donc observées lors des périodes de grande activité solaire, au voisinage des deux pôles simultanément, généralement entre 65 et 80° de latitude (30° en 1958 à Mexico) et peuvent durer de quelques minutes à quelques heures.

Vue en entier depuis l'espace
(Sonde POLAR)



Depuis la navette spatiale Discovery
au-dessus de l'antarctique (NASA)



Elles peuvent prendre **différents aspects** : taches, rideaux, voiles, couronnes.



Il faut souvent des récepteurs très sensibles pour les photographier.

LES EXPERIENCES EN LABORATOIRE

A la fin du XIX^{ème} siècle, Kristian Birkeland a mis au point une expérience, qu'il a appelée **La Terrella**, Pour visualiser les aurores polaires et la ceinture de Van Allen, dans une chambre à vide à l'aide de rayons cathodiques.

rayons de cathode = électrons
sphère avec aimant (« magnétisée ») = terre



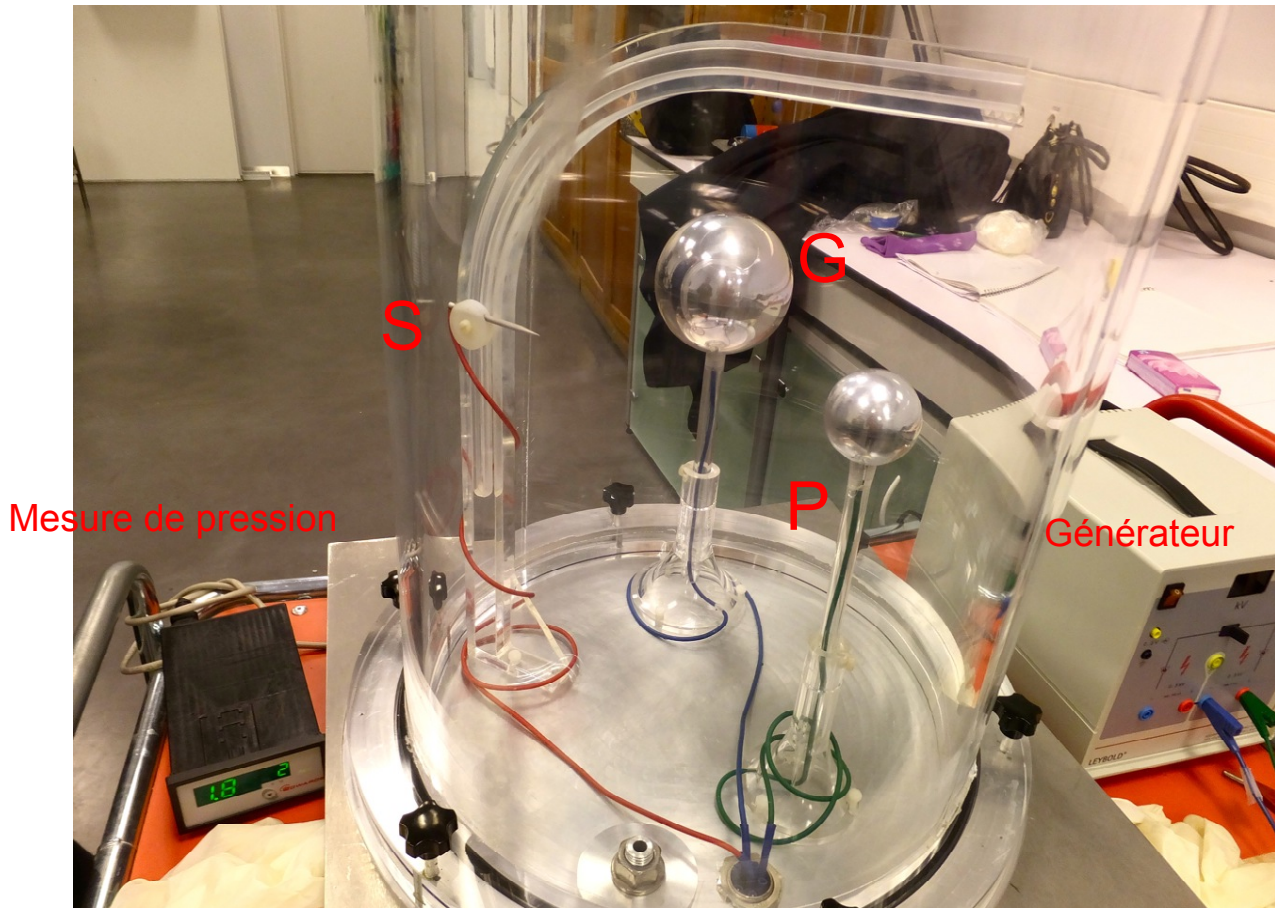
L'expérience présentée à la fin de l'exposé **La Planeterrella**, a été mise au point à Grenoble récemment par Jean Lilensten (IAPG), et reproduite à la collection de physique de l'UPMC.

- Une enceinte en plexiglas contient :
 - un stylet conducteur S,
 - une petite sphère creuse d'aluminium P (diamètre 5 cm),
 - une plus grande sphère creuse d'aluminium G (diamètre 10 cm).
- Des aimants droits peuvent être placés dans les sphères pour simuler le champ magnétique de la terre.
- Une pompe primaire permet d'évacuer les gaz atmosphériques de la cloche.
 - Un générateur (300 Volts, environ 1 mA) permet de générer des électrons au niveau de son pôle négatif et de les collecter au niveau de son pôle positif.

Pour simuler le soleil (l'émetteur d'électrons), on met une sphère au pôle négatif du générateur.
Pour simuler la terre, on place un aimant dans une sphère et on la met au pôle positif.
Le vent solaire est simulé par les électrons qui vont se propager de la sphère négative à la sphère positive.

L'air raréfié environnant, excité par les électrons émet sur leur trajet une fluorescence rose ou banchâtre (N₂), dans une zone de pression de 10 à 30 pascals.

Diverses configurations peuvent être mises en place.



Configuration 1 : les anneaux de courant.

C'est ce qui a été observé page 5, avec la sphère P contenant un aimant et reliée au pôle négatif du générateur, et la sphère G, sans aimant, reliée au pôle positif pour collecter les électrons. Un certain nombre d'électrons sont piégés autour de P, ce qui conduit à un anneau lumineux autour de la sphère.

Configuration 2 : la couronne solaire.

- la petite sphère P, sans aimant, est reliée au pôle négatif du générateur : elle est source d'électrons \Rightarrow elle simule le soleil et émet dans tout l'espace,
- le pôle positif du générateur est relié au stylet, et collecte les électrons.

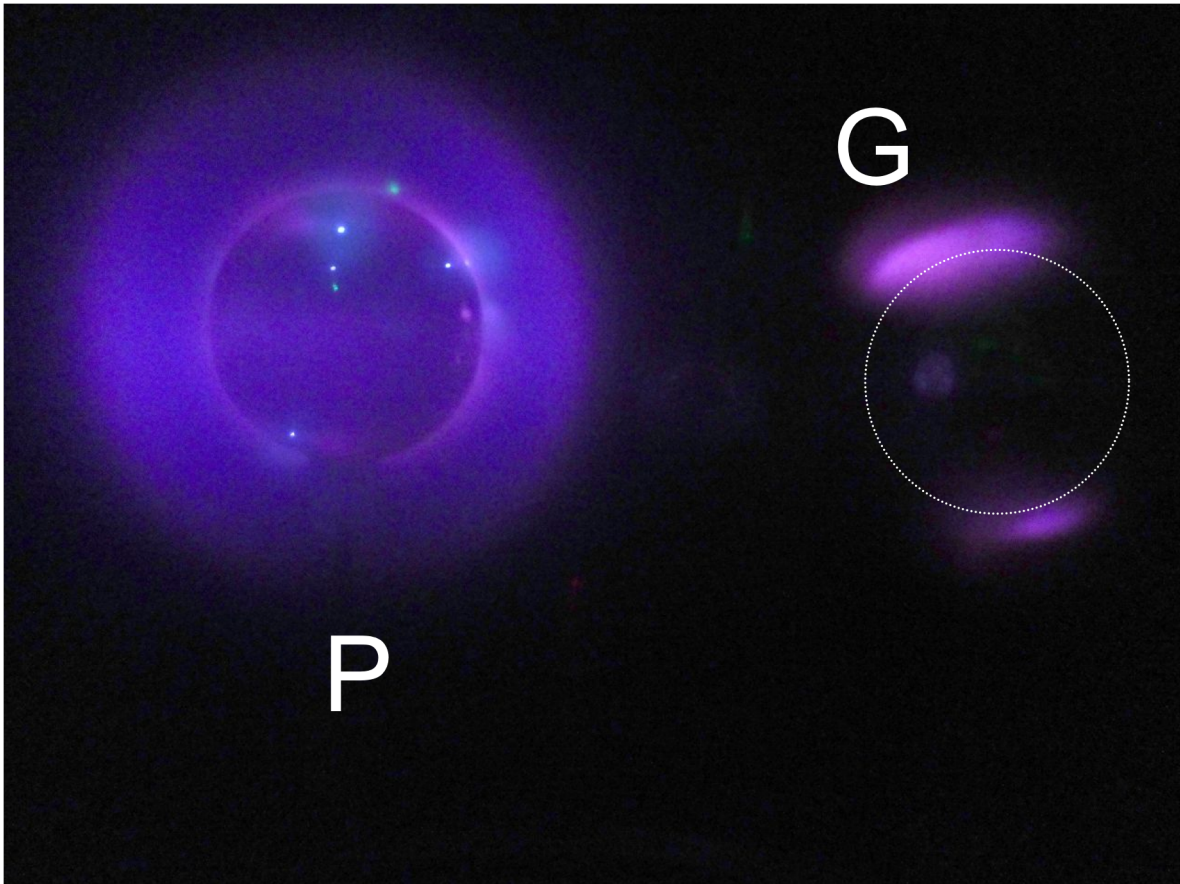


Configuration 3 : les aurores polaires

- la petite sphère P simule le soleil (cf configuration ci-dessus),
- la grosse sphère G, contenant un aimant incliné, reliée au pôle positif du générateur, simule la terre.

On voit nettement une émission de l'azote aux deux « pôles » de G, situés sur l'axe d'inclinaison des aimants.

Le phénomène était visible depuis tout l'amphithéâtre.



Le public, enthousiaste, a posé de nombreuses questions.
