Vents stellaires et héliosphère

LP210 – 2^{ième} semestre
2013

Le vent solaire

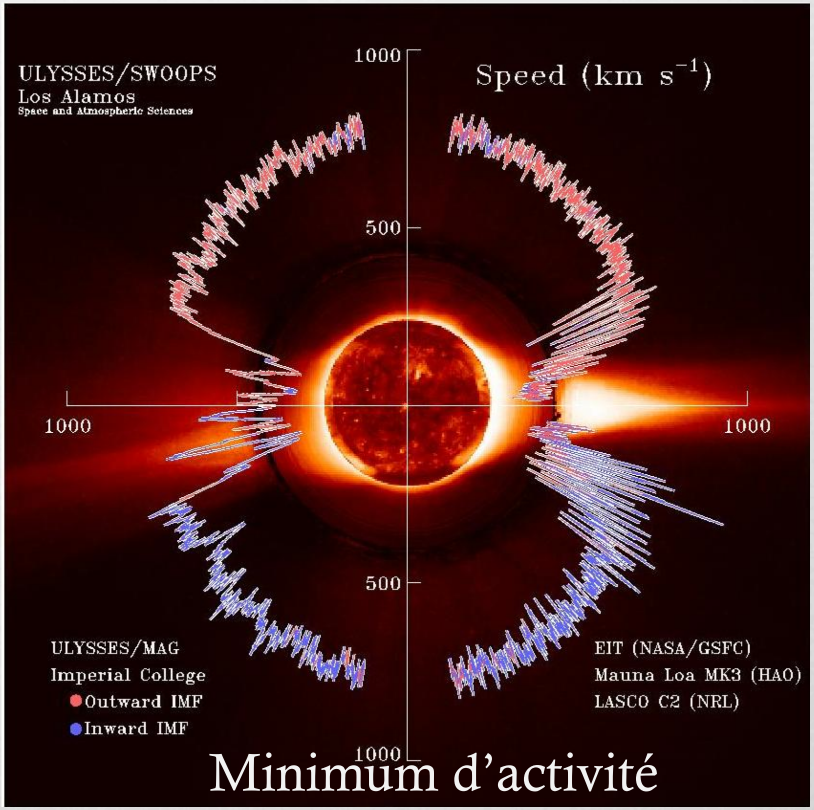
Flux continu de p^+ et e^- provenant de la couronne solaire:

- $\dot{M} = 2.\ 10^{-14}$ $M_\odot$ / an .

- Pour les étoiles massives:

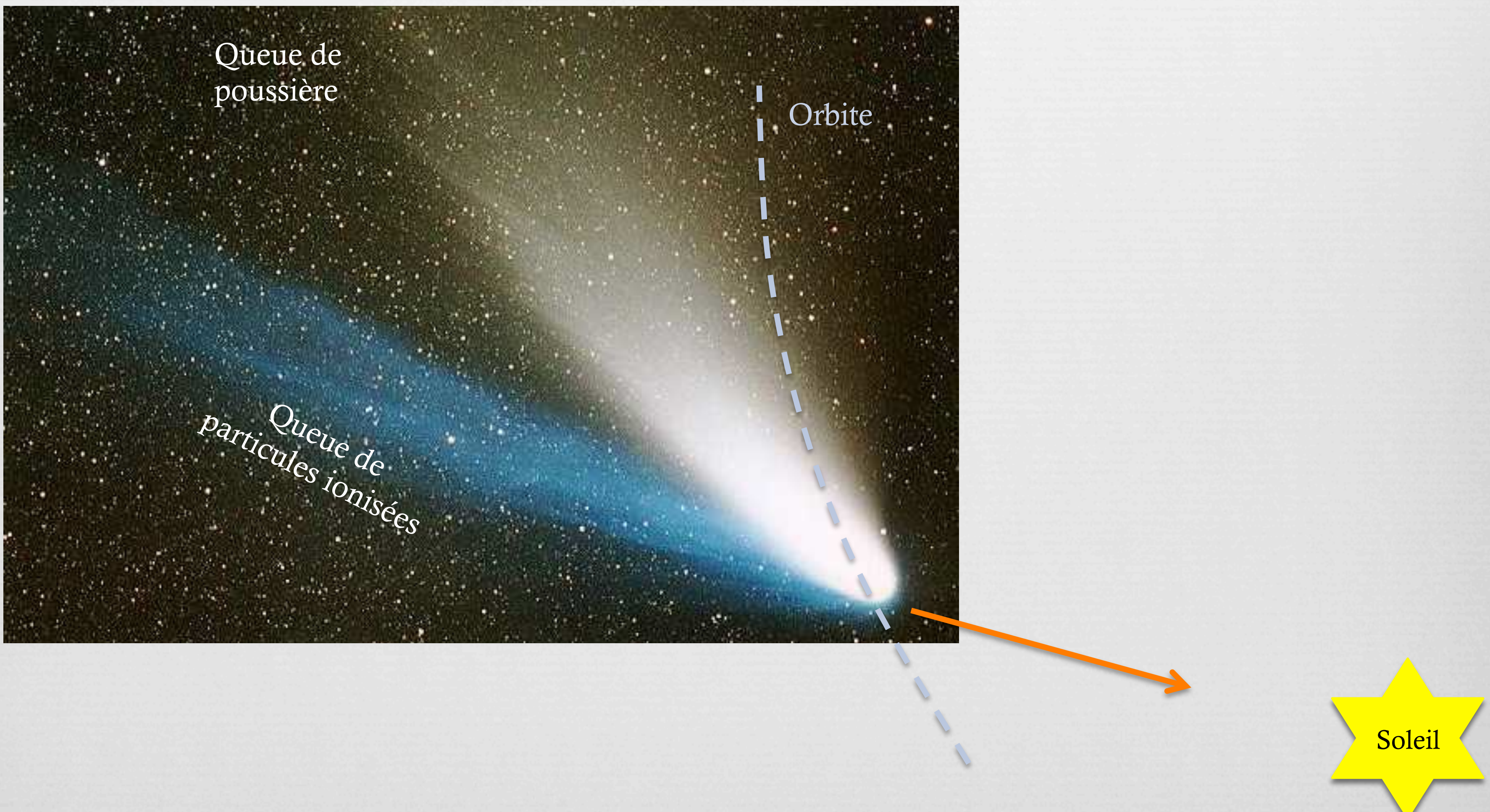
  50% de leur masse pendant le vie.

- Vitesse caractéristique: 400 $km.s^{-1}$.



Minimum d’activité

Vent solaire et comètes



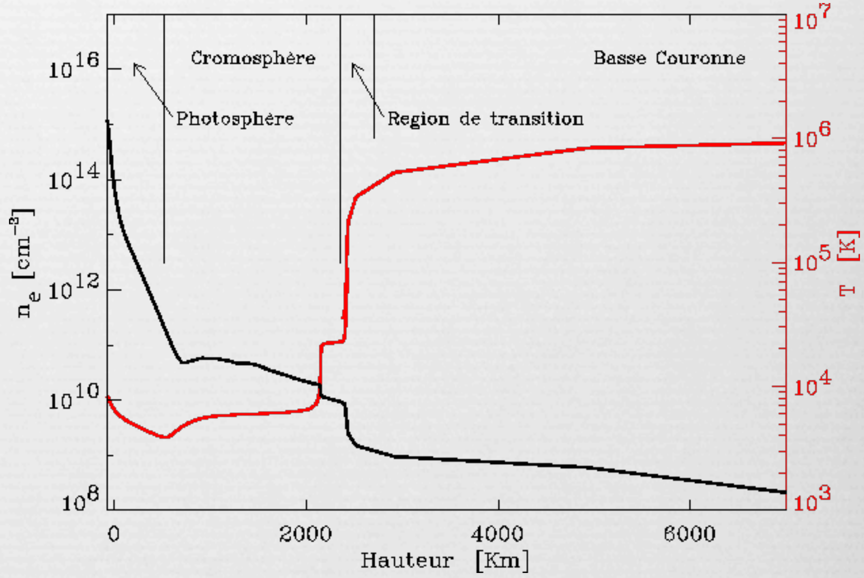
Mécanisme d'émission

Vitesse d'échappement à la surface du soleil:

~600 km.s^{-1}

Température maximale dans la couronne:

$T \sim 10^6\,K \Leftrightarrow v_{therm} \sim 150\ km.s^{-1}$



Mais:

- ✓ Vitesse plus grande dans la queue de la gaussienne.
- ✓ Probable mécanisme d'accélération (champ magnétique, etc…)

Modéliser le vent stellaire

On va modéliser le vent stellaire comme un écoulement fluide stationnaire, à symétrie sphérique, en négligeant le champ magnétique.

On peut décrire cet écoulement grâce au:

- Profil de vitesse: v(r)

- Profil de densité: ρ (r)

Deux paramètres intéressants:

- Vitesse asymptotique: $\mathbf{v}(\infty)$

- Taux de perte de masse: $\dot{M} = 4\pi r^2 \rho(r)\, v(r)$

Modèle de Parker: système d' équations

$$\begin{cases} \dfrac{d}{dr}\left(r^2\rho(r)\,v(r)\right) = 0 \\ \\ P(r) = c_s^2\rho(r) \\ \\ \dfrac{dv}{dr}v(r) = -\dfrac{GM}{r^2} - \dfrac{1}{\rho(r)}\dfrac{dP}{dr} \end{cases}$$

Conservation de la matière

Equation d'état

$2^{ième}$ loi de Newton

Equation adimensionnelle

Si on introduit $r_c = \dfrac{GM}{2c_s^2}$ (voir démonstration en cours) et

$u = v / c_s$

$x = r / r_c$

On se ramène à l'équation:

$$\boxed{\left(u(x) - \frac{1}{u(x)}\right)\frac{du}{dx} = -2\left(\frac{1}{x^2} - \frac{1}{x}\right)}$$

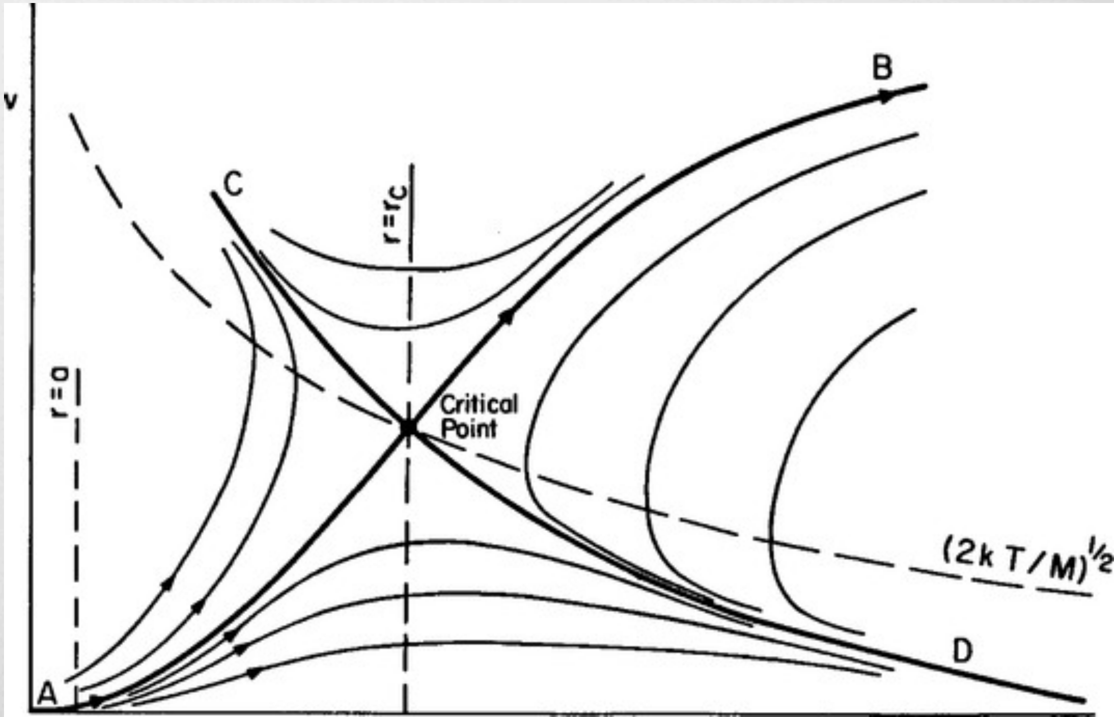
Equation différentielle du premier ordre, non linéaire, à variable séparables.

Solutions implicites

On peut intégrer l'équation sous la forme implicite:

$$\frac{u^2}{2} - \ln(u) = \frac{2}{x} + 2\ln(x) + cst$$

Suivant la valeur de la constante, on obtient un réseau de solutions.



Discussion de la solution critique

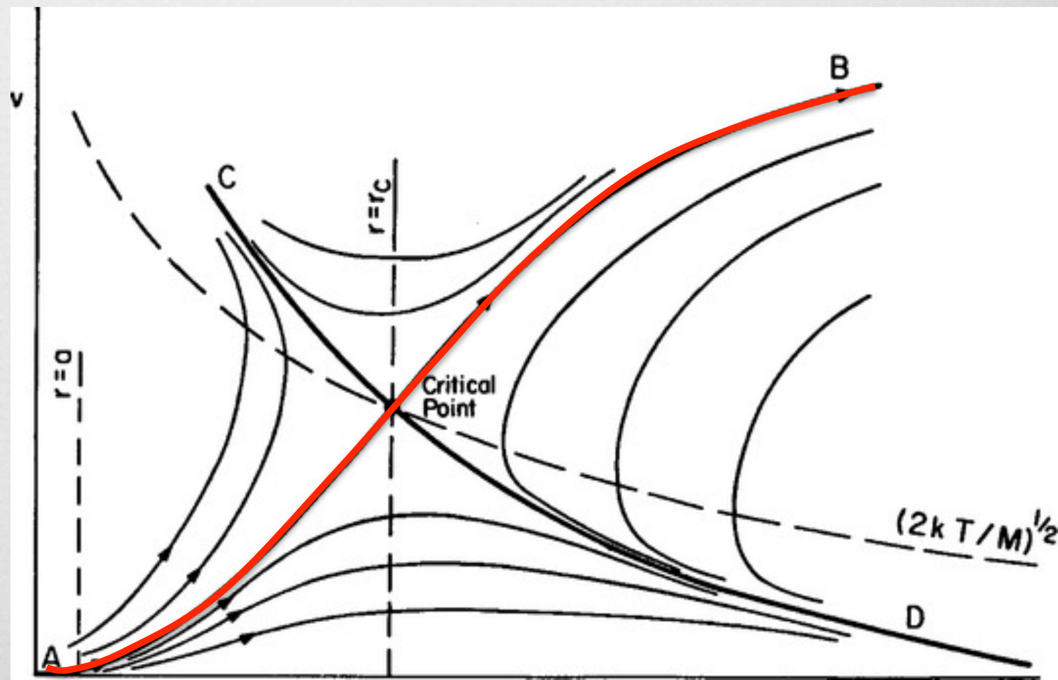
Au niveau de la terre, on observe: $T_{vent} \sim 10^7$ K => c_s=300 km, $r_c < 10^6$ km

Et on observe $v_{vent} > c_s$.

Donc la seule solution acceptable est la solution transonique, qui passe par (u=1,x=1).

Sous forme implicite:

$$\frac{u^2}{2} - \ln(u) = \frac{2}{x} + 2\ln(x) - \frac{3}{2}$$



Discussion de la solution critique: x<<1

Comportement à x<<1, u<<1:

$$\frac{u^2}{2} - \ln(u) \sim -\ln(u) = \frac{2}{x} + 2\ln(x) - \frac{3}{2}$$

$$u = \frac{1}{x^2}\exp\left(-\frac{2}{x} + \frac{3}{2}\right)$$

$$\boxed{v(r) = c_s\left(\frac{r_c}{r}\right)^2 \exp\left(-\frac{2r_c}{r} + \frac{3}{2}\right)}$$

$$\lim_{r\to 0} v(r) = 0$$

Dans l'hypothèse isotherme, transonique, la vitesse "initiale" est fixée par la température: ce n'est pas un paramètre libre. Donc dM/dt est uniquement fixé par ρ_0.

Discussion de la solution critique: x>>1

Comportement à x>>1: $\frac{u^2}{2} - \ln(u) \sim \frac{u^2}{2} \quad = \quad \frac{2}{x} + 2\ln(x) - \frac{3}{2} \sim 2\ln(x)$

$$u = 2\sqrt{\ln(x)}$$

$$\boxed{v(r) = 2c_s\sqrt{\ln\left(\frac{r}{r_c}\right)}} \qquad \lim_{r\to\infty} v(r) = \infty$$

La vitesse tend vers l'infini… douteux. En réalité elle tend vers une constante.

Pb: conservation de l'énergie. $E_c \to \infty \qquad E_p \to 0 \qquad U = cst$

=> **Il faut une source de chauffage**, pour permettre à P de travailler et nourrir E_c.

Modèle adiabatique et polytropique

Quand v >> c_s, les échanges de chaleur n'ont pas le temps de se faire.

On peut modéliser le vent avec:

$$PV^{\gamma} = cst \quad \text{soit} \quad P\rho^{-\gamma} = cst$$

On obtient les même équations avec la nouvelle définition: $c_s = \sqrt{\gamma \frac{P}{\rho}}$

On peut également envisager des équations d'état polytropique: $PV^{\alpha} = cst$

Ingrédient physiques supplémentaires

Pression de radiation sur le vent: $\propto \frac{L}{r^2}$ (pour les étoiles massives)

Effet équivalent à une diminution de la masse de l'étoile.

Rôle du champ magnétique:

Densité de force

$$\frac{\rho}{m} q\, \vec{\mathbf{v}} \times \vec{B} \quad = \quad \vec{J} \times \vec{B}$$

Champ magnétique plus rotation du soleil: spirale de Parker.

Spirale de Parker