

# Chapitre 4

(Fin de Rayonnement et matière)

Matière interstellaire et intergalactique

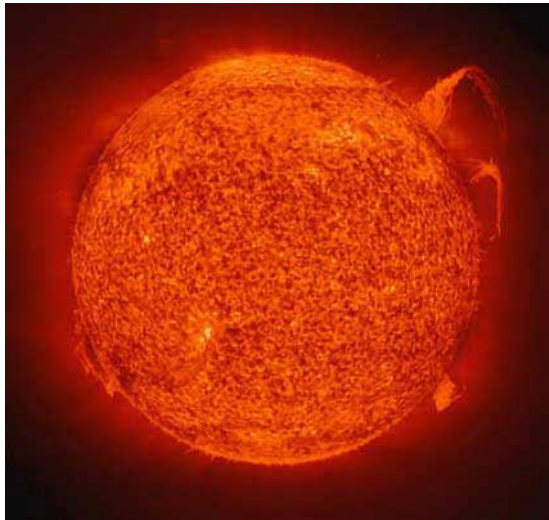
## Quiz

- \* Energie d'un photon?
- \* niveau d'énergie de l'atome d'hydrogène?
- \* raie Lyman-alpha et H-alpha ?
- \* magnitude apparent (système Vega) ?
- \* magnitude absolue et module de distance?

# **Le rayonnement de corps noir**

# Rayonnement de « corps noir »

Corps qui émet autant de rayonnement qu'il en absorbe (équilibre thermique)



# Rayonnement de « corps noir »

Un corps noir n'est pas noir ! Son spectre est décrit par la fonction de Planck

$$B_\nu = \frac{2h\nu^3}{c^2} \frac{1}{e^{h\nu/kT} - 1}$$

$$[B_\nu] = \text{W m}^{-2} \text{ Hz}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

$$B_\lambda = \frac{2hc^2}{\lambda^5} \frac{1}{e^{hc/\lambda kT} - 1}$$

$$[B_\lambda] = \text{W m}^{-2} \text{ m}^{-1} \text{ sr}^{-1}$$

Où  $h$  est la constante de Planck et où  $T$  est la température du corps noir.

Les corps noirs sont le plus souvent soit des corps chauffés, soit des corps illuminés à une certaine fréquence et qui ré-émettent à une autre fréquence (plus petite, car moins énergétique) - [Exemple poussières galactiques]

# Rayonnement de « corps noir »

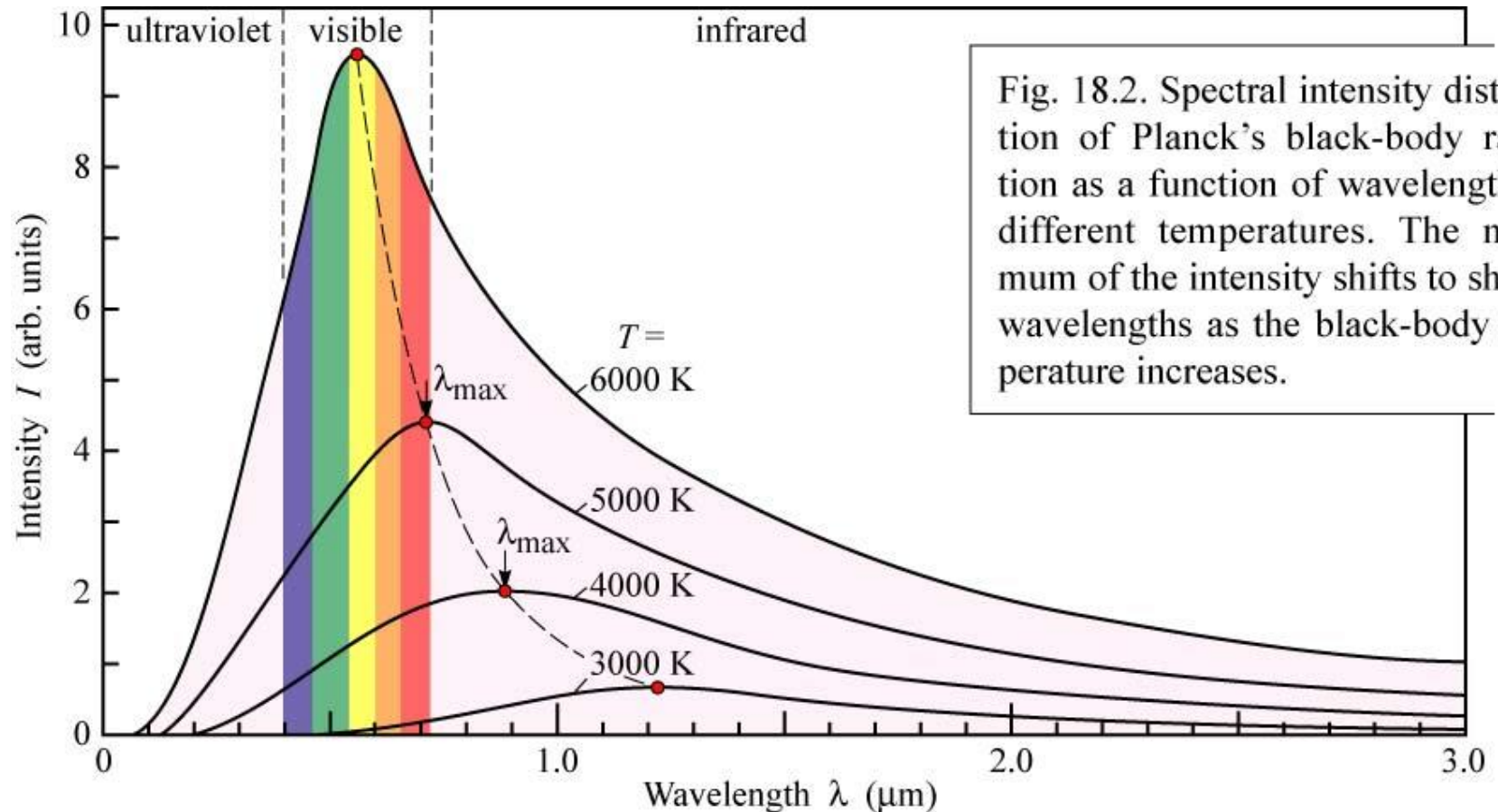
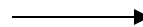


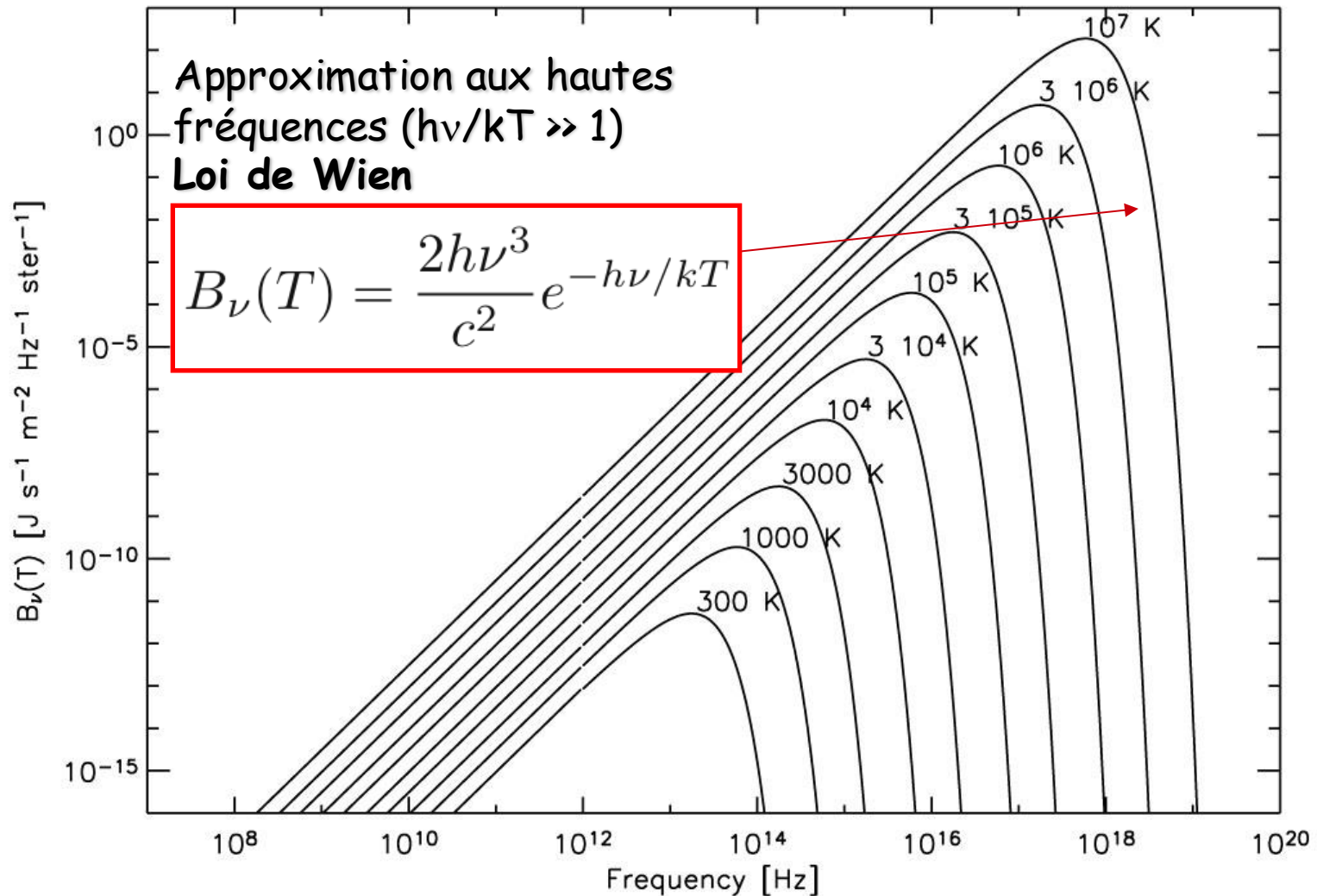
Fig. 18.2. Spectral intensity distribution of Planck's black-body radiation as a function of wavelength for different temperatures. The maximum of the intensity shifts to shorter wavelengths as the black-body temperature increases.

Position du maximum pour une  
température donnée  
Loi de déplacement de Wien



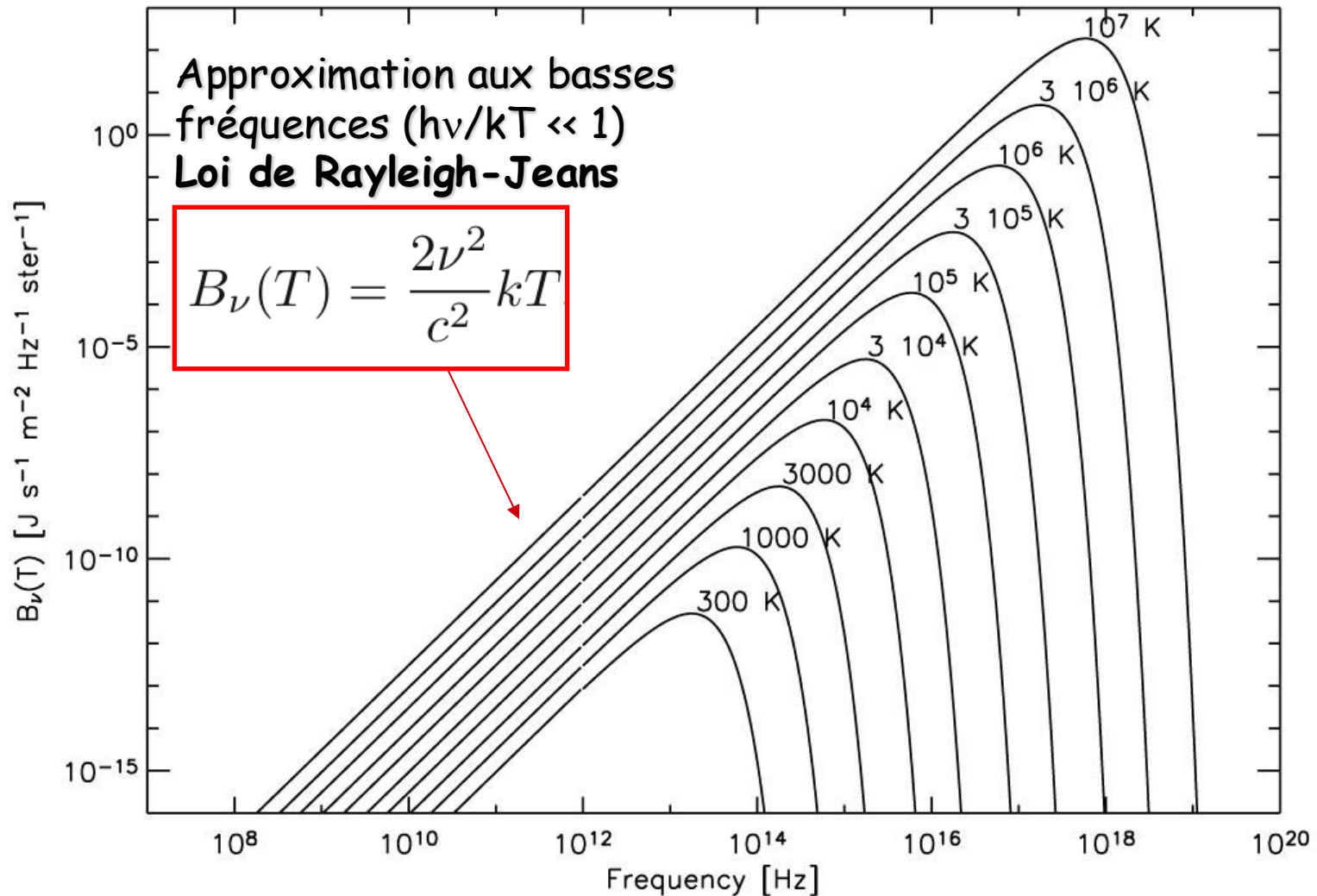
$$\begin{aligned}\frac{\nu_{\text{max}}}{T} &= 5,90 \times 10^{10} \text{ Hz K}^{-1} \\ \lambda_{\text{max}} T &= 2,90 \times 10^{-3} \text{ m K}\end{aligned}$$

# Rayonnement de « corps noir » (échelle log-log)



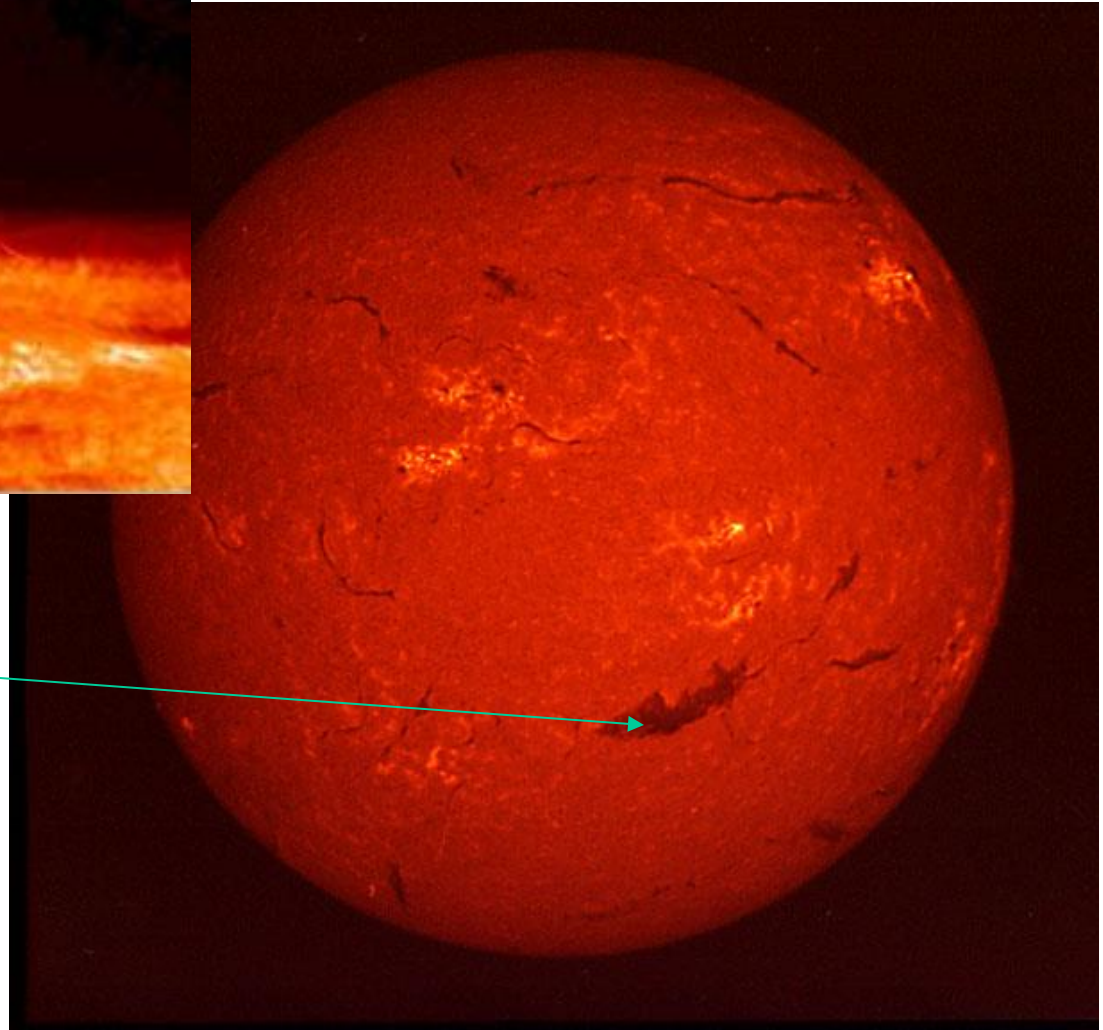
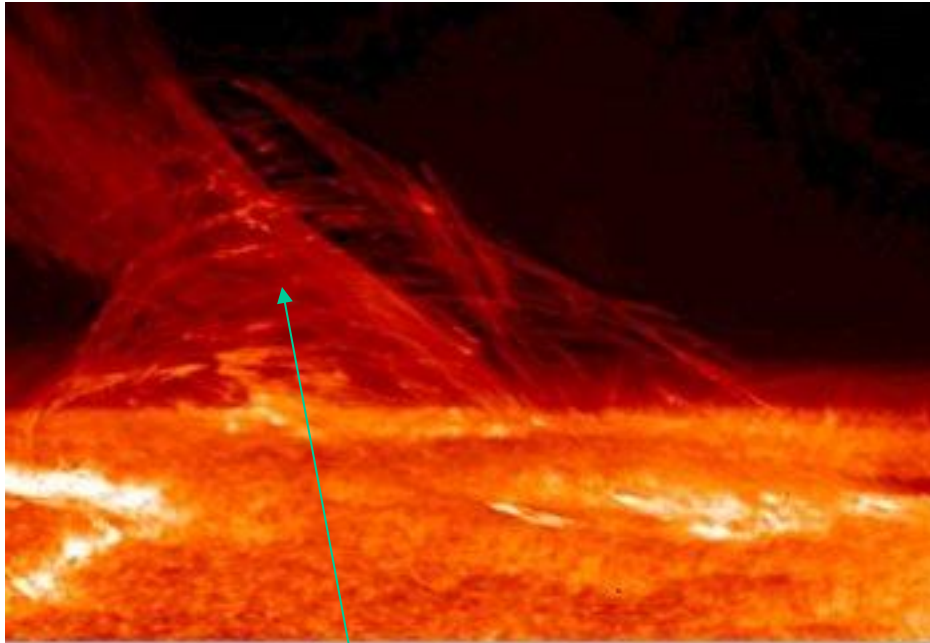


# Rayonnement de « corps noir » (échelle log-log)





# Le Soleil



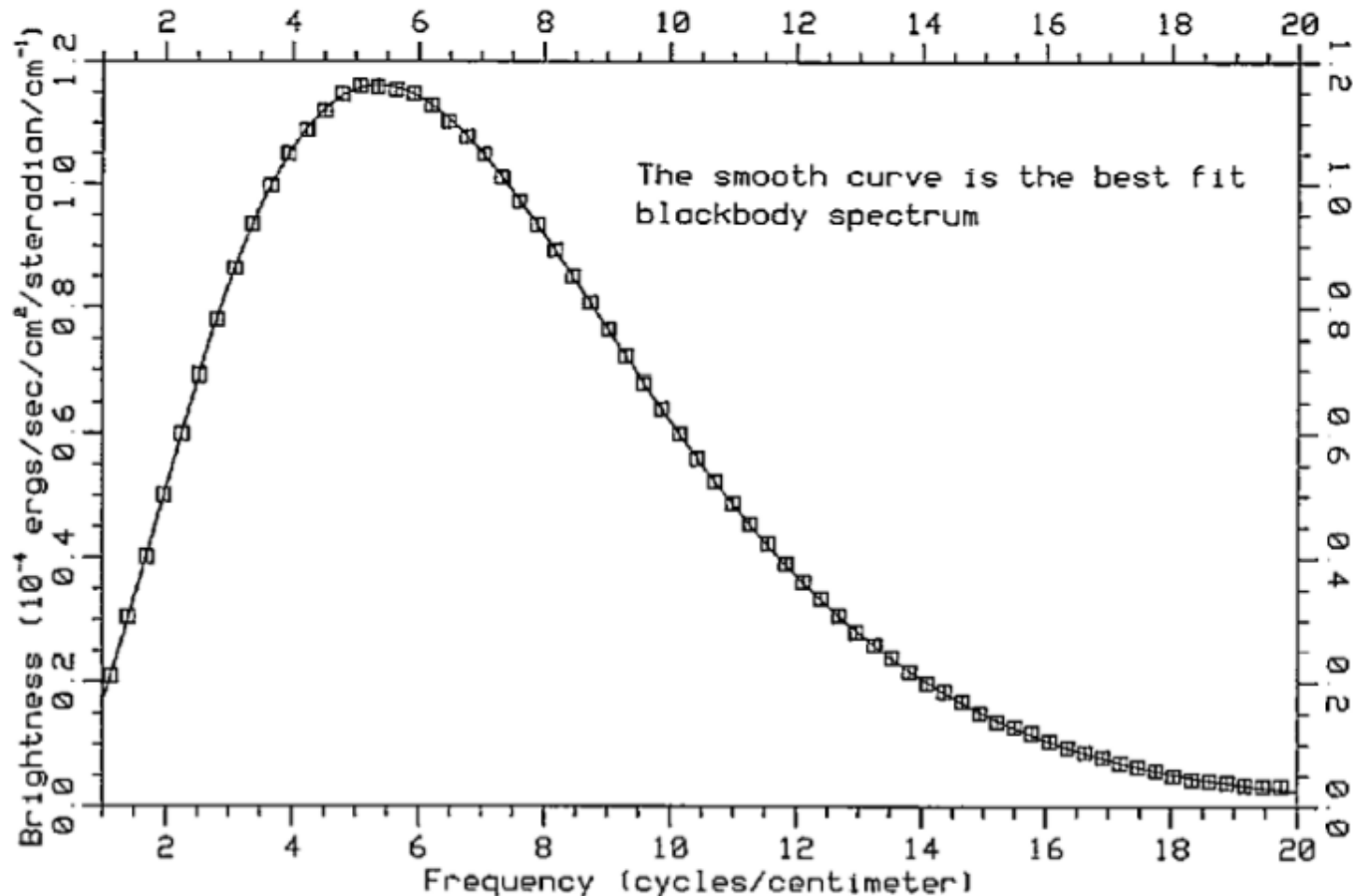
Gaz absorbant dans  
l'atmosphère solaire

# Les étoiles en général





# L'un des plus beaux corps noirs: le rayonnement cosmologique fossile



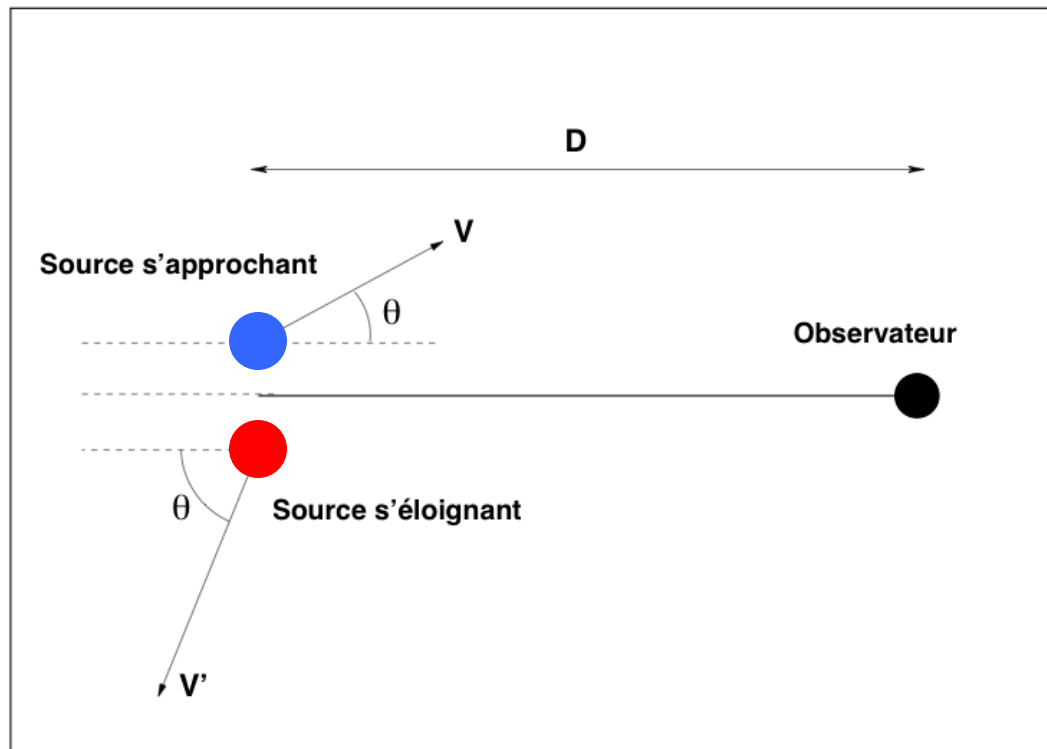
Accord parfait entre la théorie et l'expérience ! ( $T=2.735$  K)

Rayonnement émis 380'000 ans après le Big-Bang

# Effet Doppler-Fizeau

L'effet **Doppler-Fizeau** consiste en un changement apparent de la longueur d'onde d'un signal émis depuis un corps en mouvement.

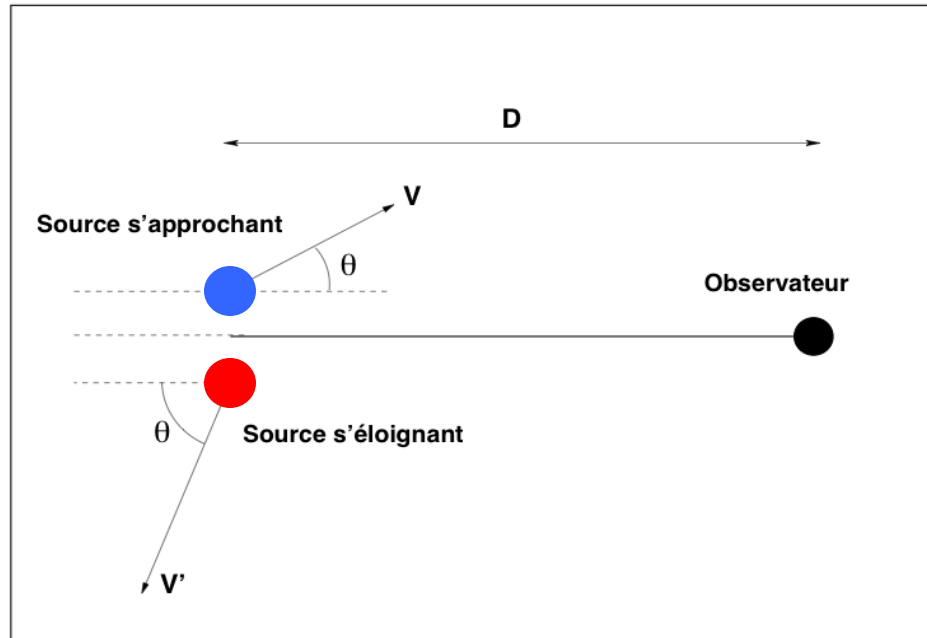
Il s'agit d'un effet présent partout en astrophysique !



Un astre se dirigeant vers l'observateur **bleuit**.

Un astre fuyant l'observateur **rougit**.

# Effet Doppler-Fizeau



Seule la composante radiale de la vitesse intervient:

Longueur d'onde  
observée

$$\frac{\lambda - \lambda_0}{\lambda_0} = \frac{V \cos \theta}{c}$$

On pose souvent  $\beta = V/c$

Longueur d'onde  
« au repos »

# **Les planètes extra-solaires ou « exoplanètes »**

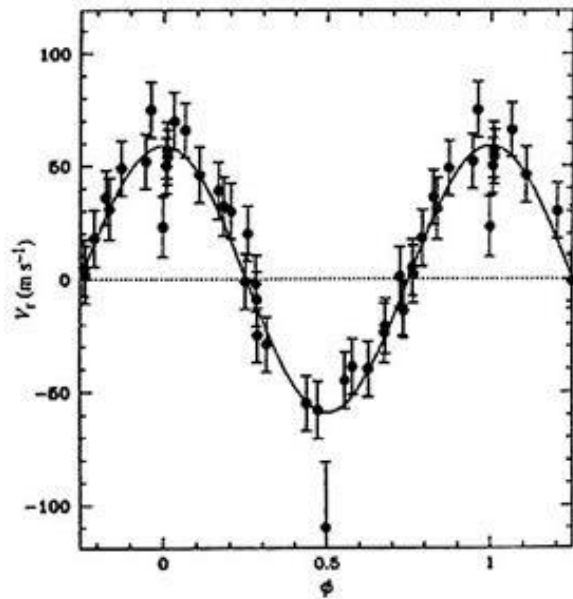
# Planètes extra-solaires

- Découverte de la première en 1995 par une équipe Suisse (Michel Mayor, Didier Queloz) ~4000 exoplanètes à ce jour.
- Détection par vitesse radiale
- Détection des premiers « transits » en 2003
- Suivi spectroscopique -> détection indirecte de l'atmosphère
- Détermination des masses (mais dégénérescence avec l'inclinaison de l'orbite)
- Détermination du profil de luminosité de l'étoile mère
- Mission spatiale Européenne, COROT (ESA)
- Mission spatiale US, KEPLER, TESS (NASA)
- Missions CHEOPS et Plato (ESA)

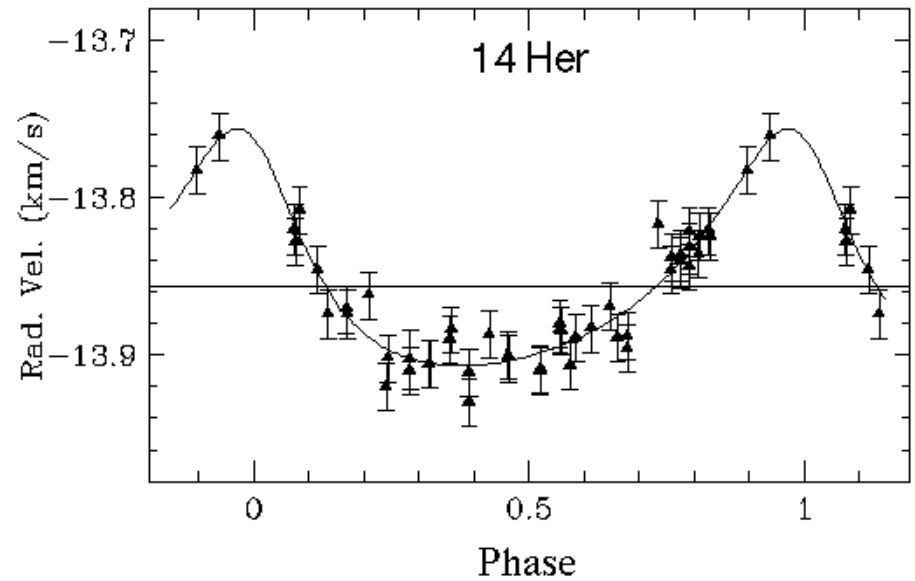


# Planètes extra-solaires

## Détection par variation de vitesse radiale

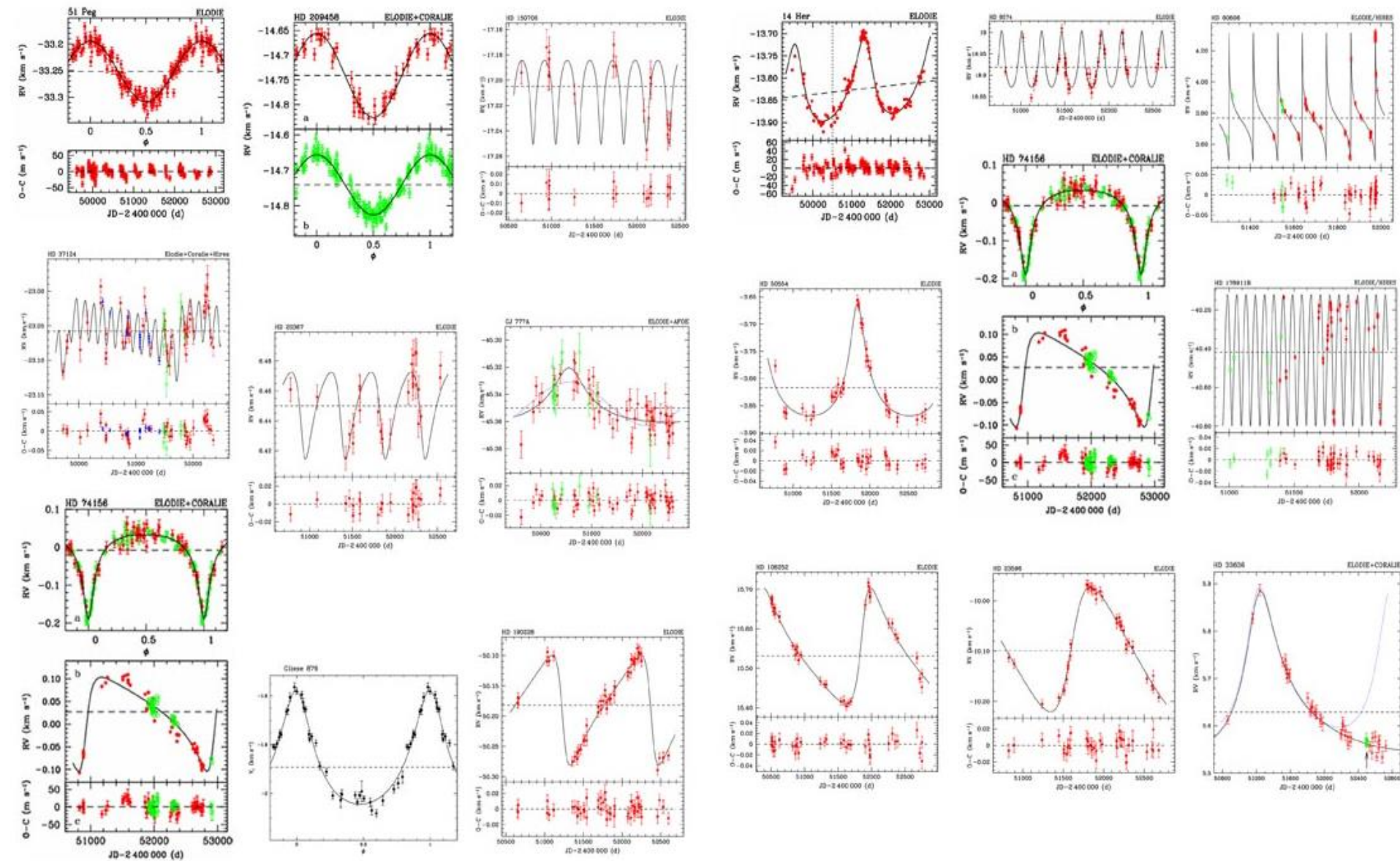


51 Peg à 48 al  
0,47 x masse Jupiter



14 Her  
3,3 x masse Jupiter

# Courbes de vitesse radiale pour les exoplanètes découvertes à l'OHP avec ELODIE



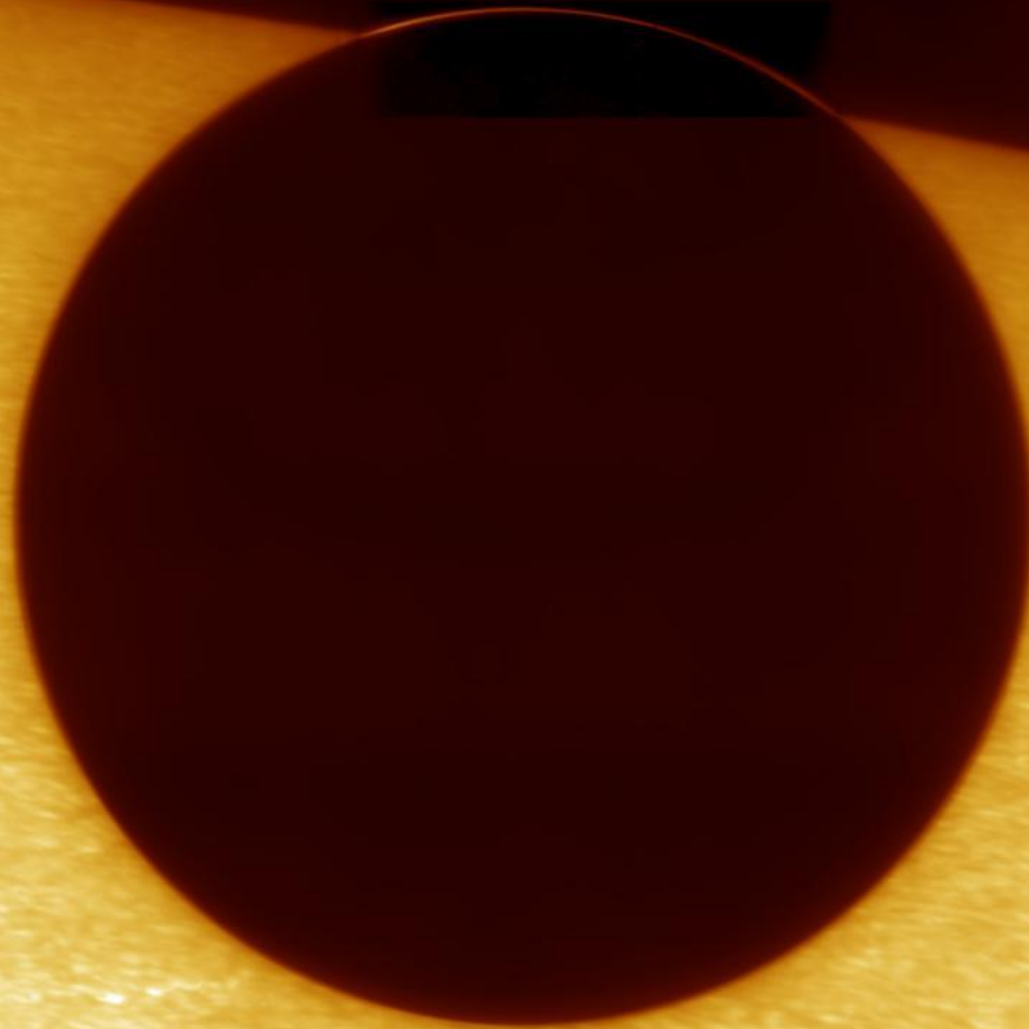


# Planètes extra-solaires

Exemple du transit de Vénus devant le Soleil

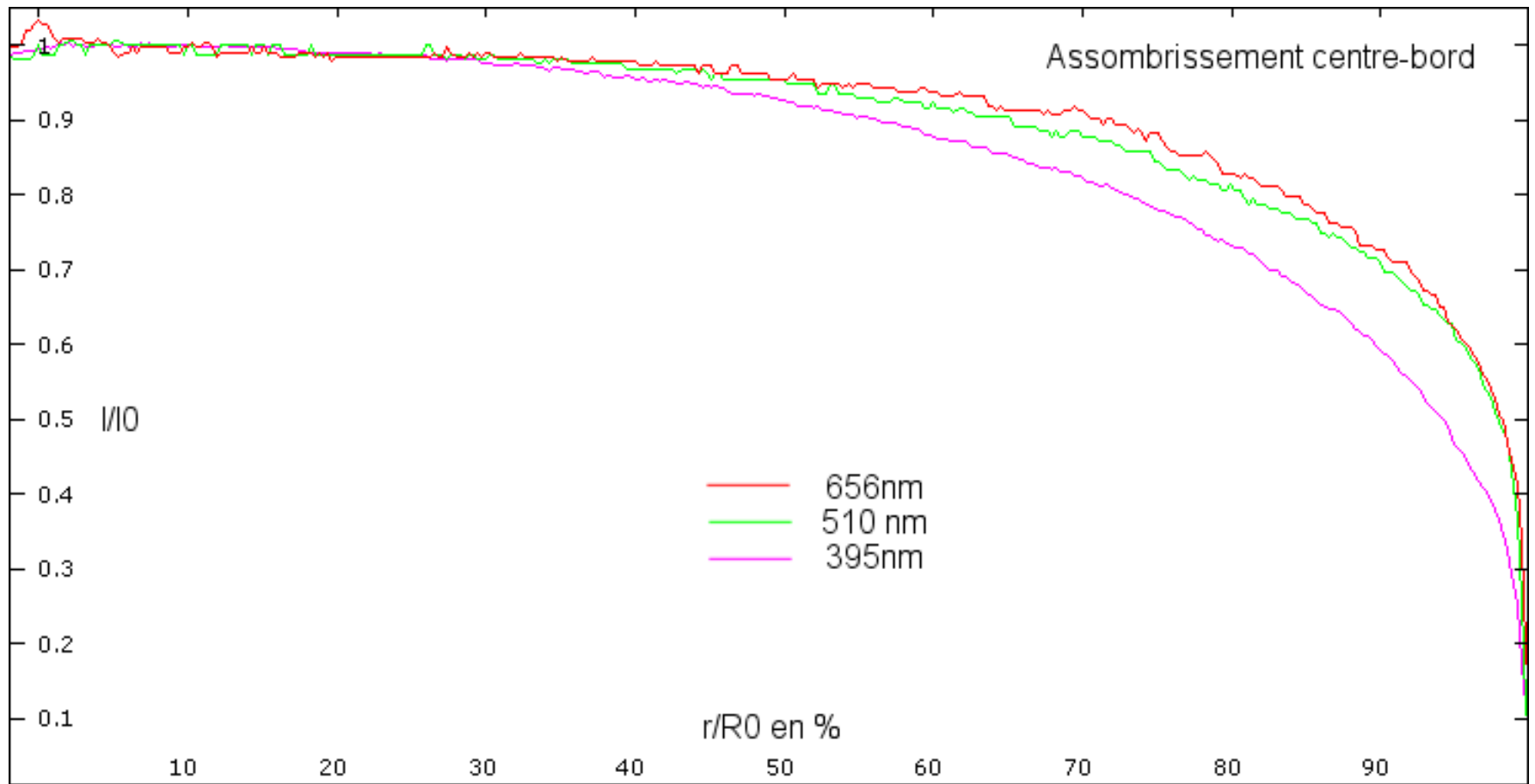


Swedish 1-m Solar Telescope, Venus transit egress, bright ring 9x enhanced



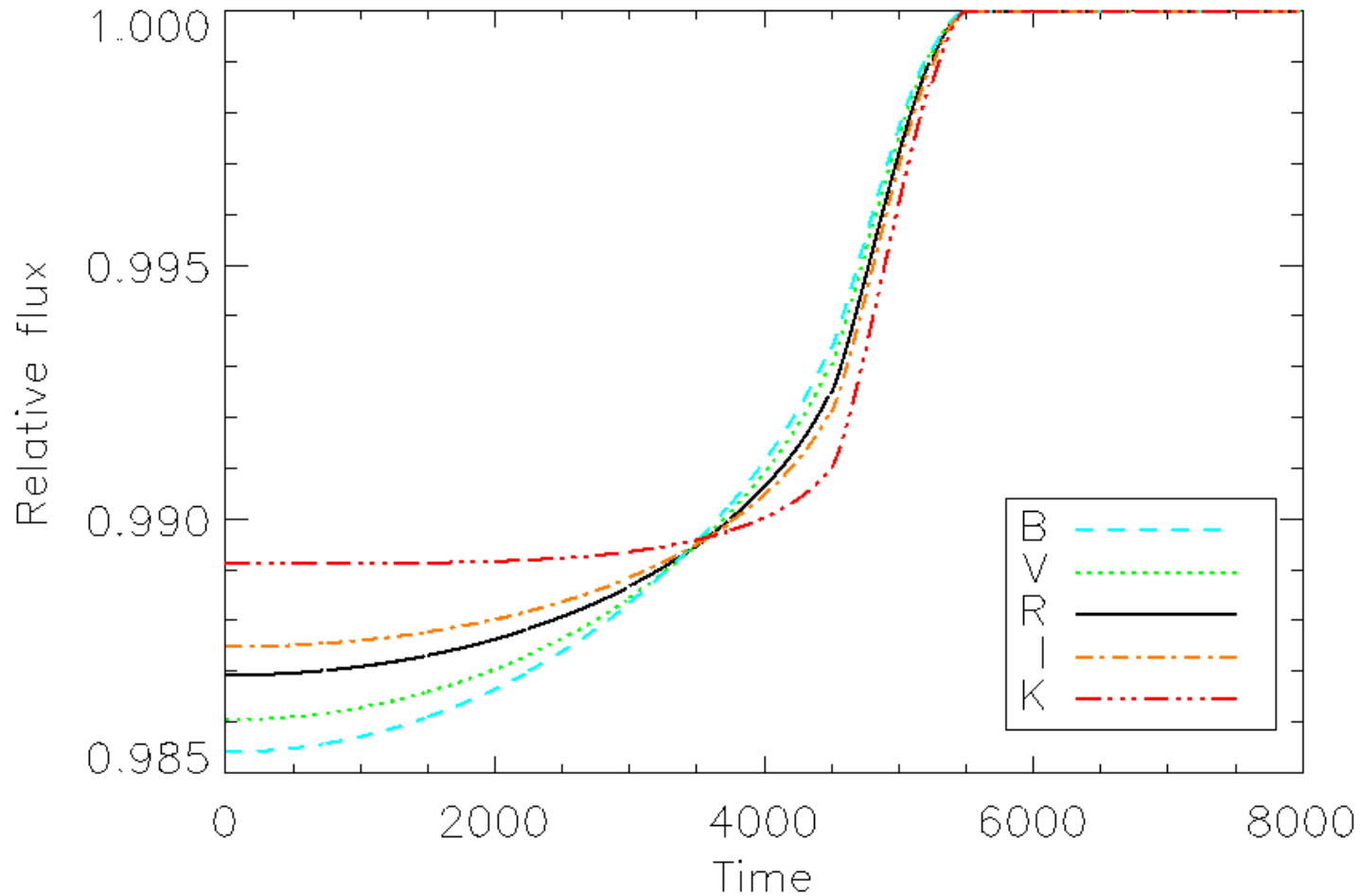
Transit de Vénus devant le Soleil

# Planètes extra-solaires



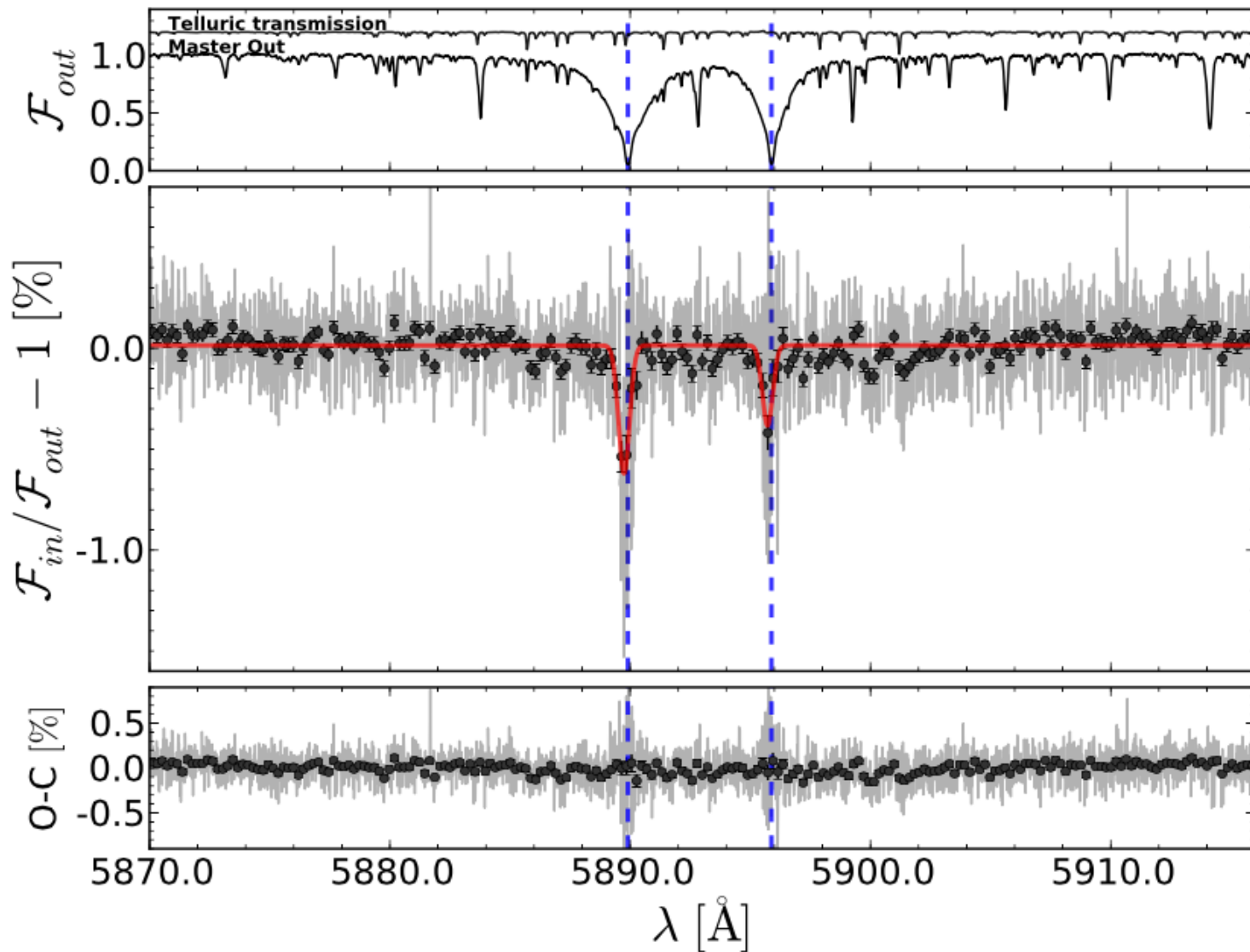
Absorption plus forte dans le bleu (profondeur optique moins grande)

# Planètes extra-solaires

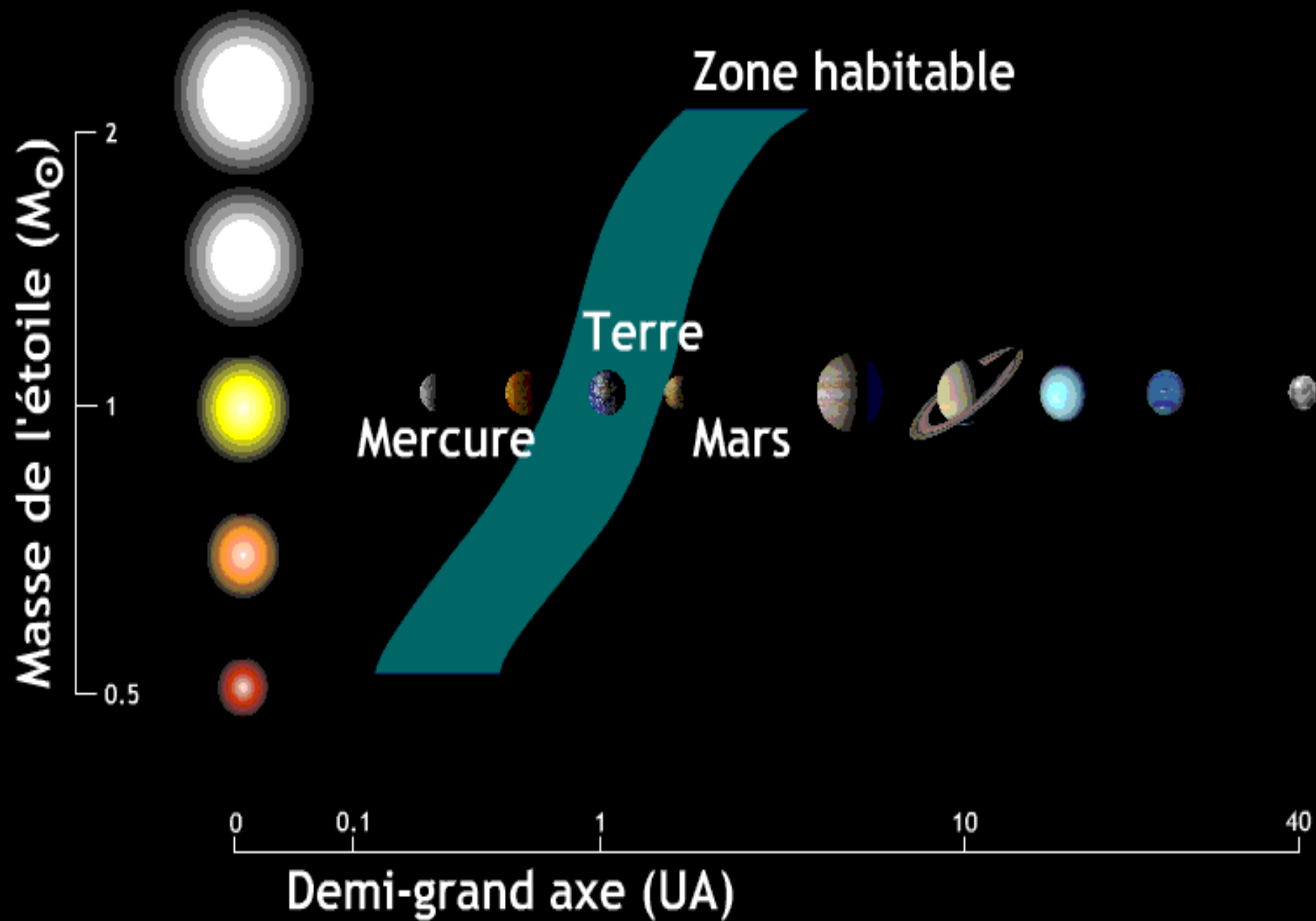


Profils d'une éclipse (transit) pour des observations depuis le bleu jusqu'à dans l'infrarouge

# Atmosphère planétaire vue « en absorption »



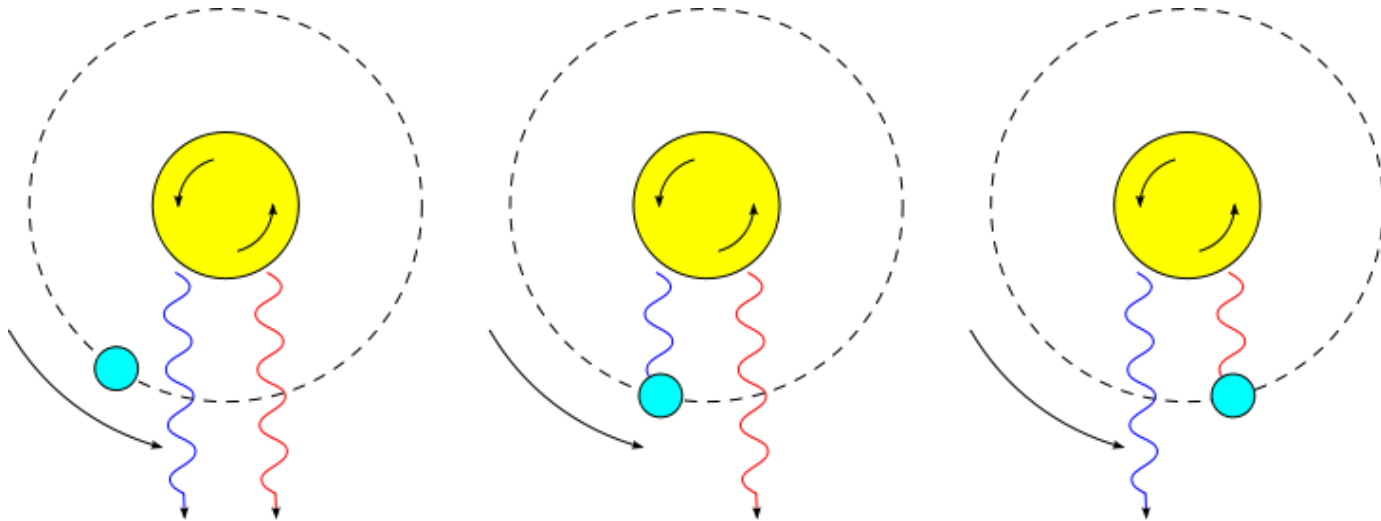




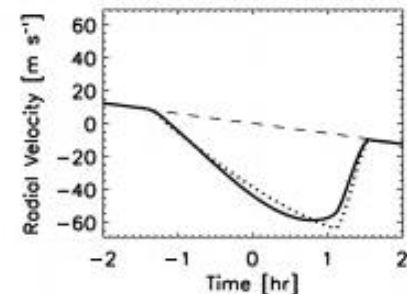
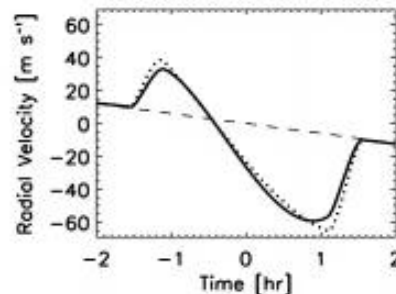
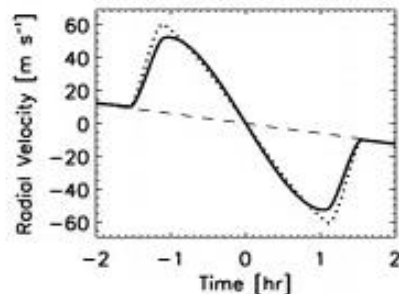
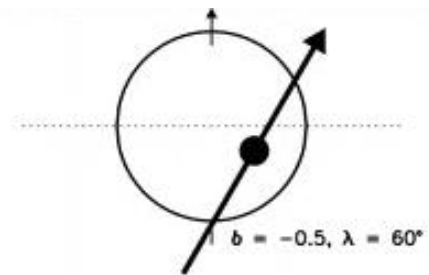
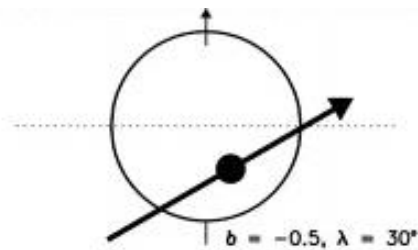
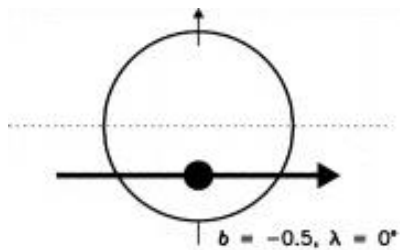
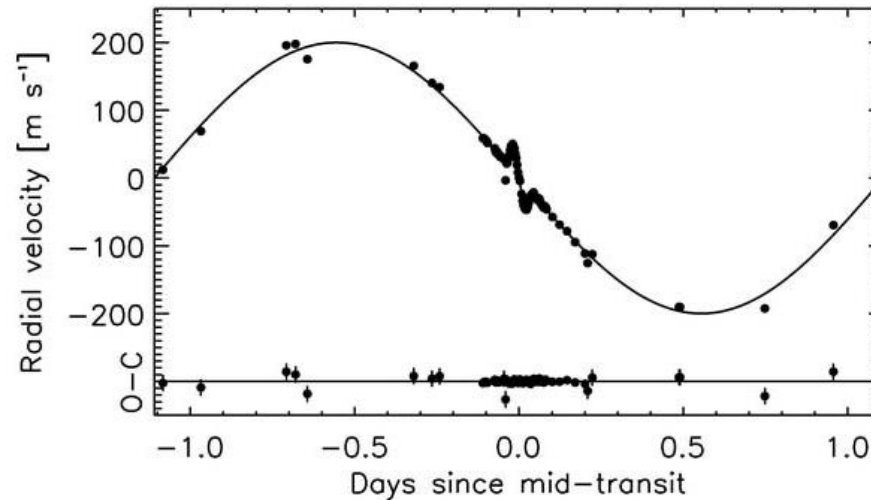
# Orbite rétrograde de 6 planètes en « transit » (Avril 2010)

Combinaison de la méthode des vitesses radiale et de la méthode des transits planétaires.

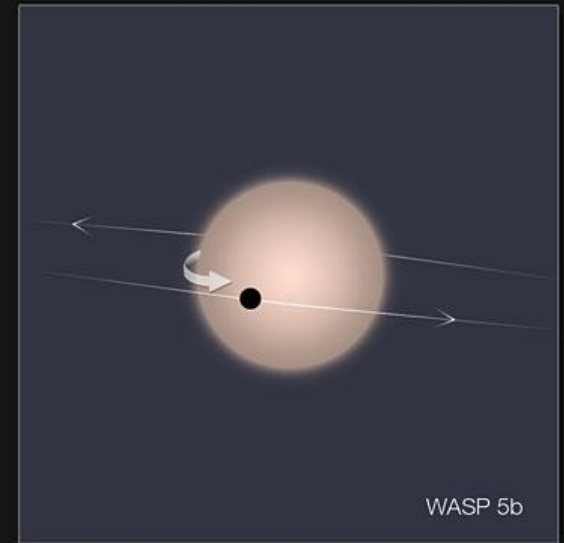
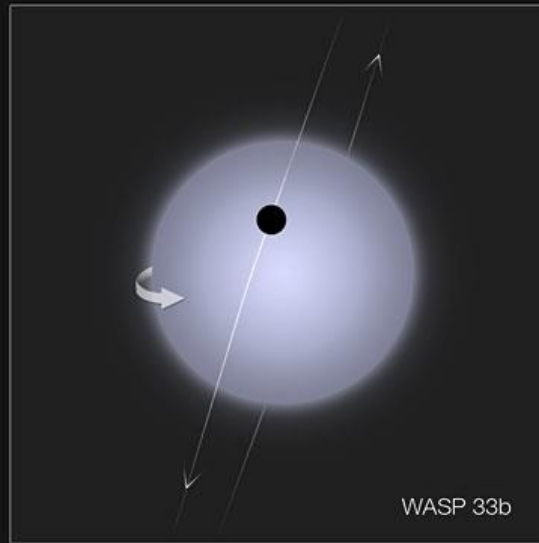
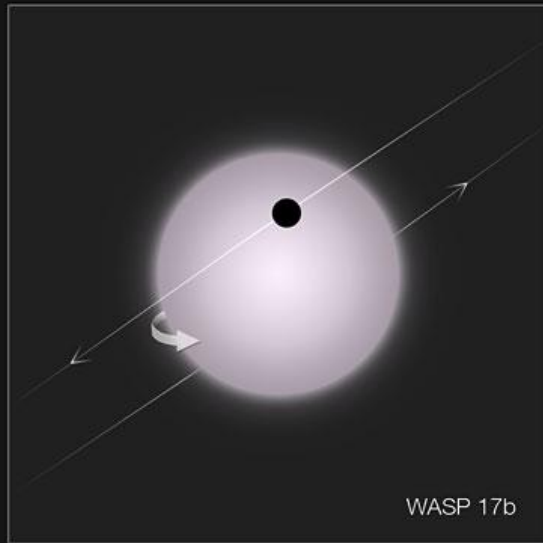
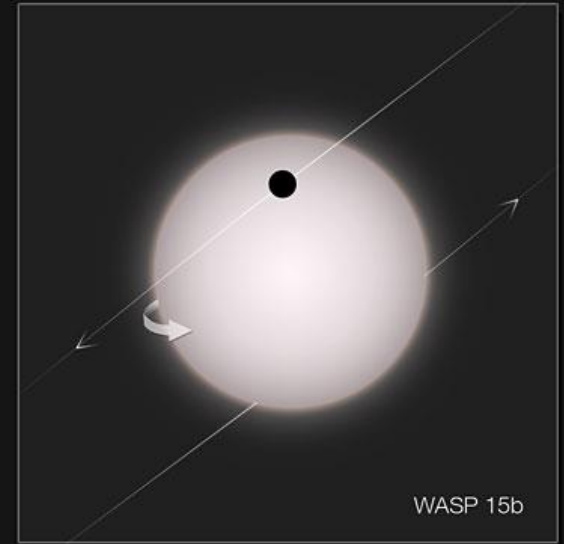
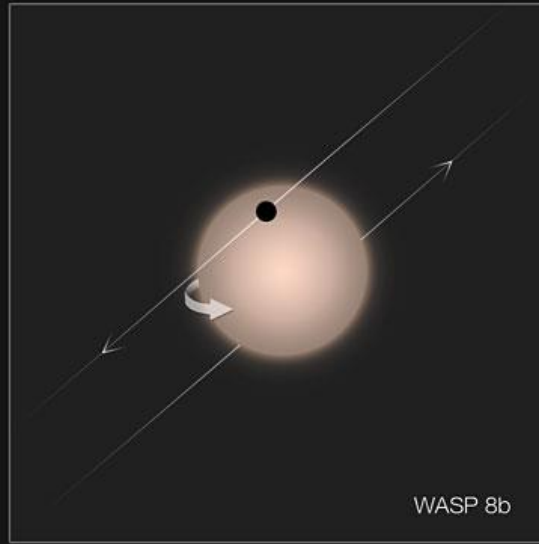
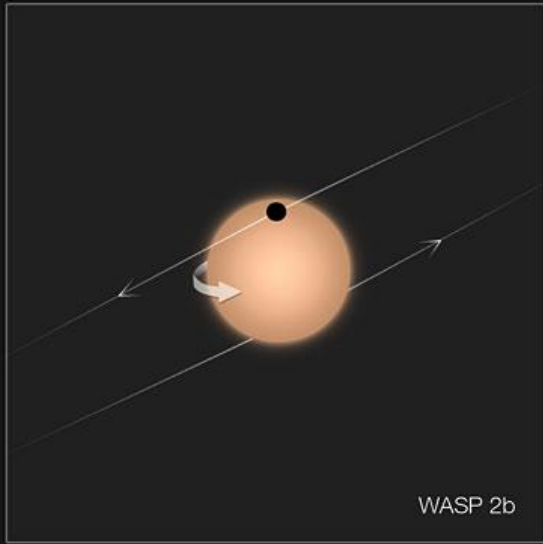
Observation de l'**effet Rossiter-McLaughlin** pendant le **transit** de la planète devant son étoile mère



# Effet Rossiter-McLaughlin pendant un transit



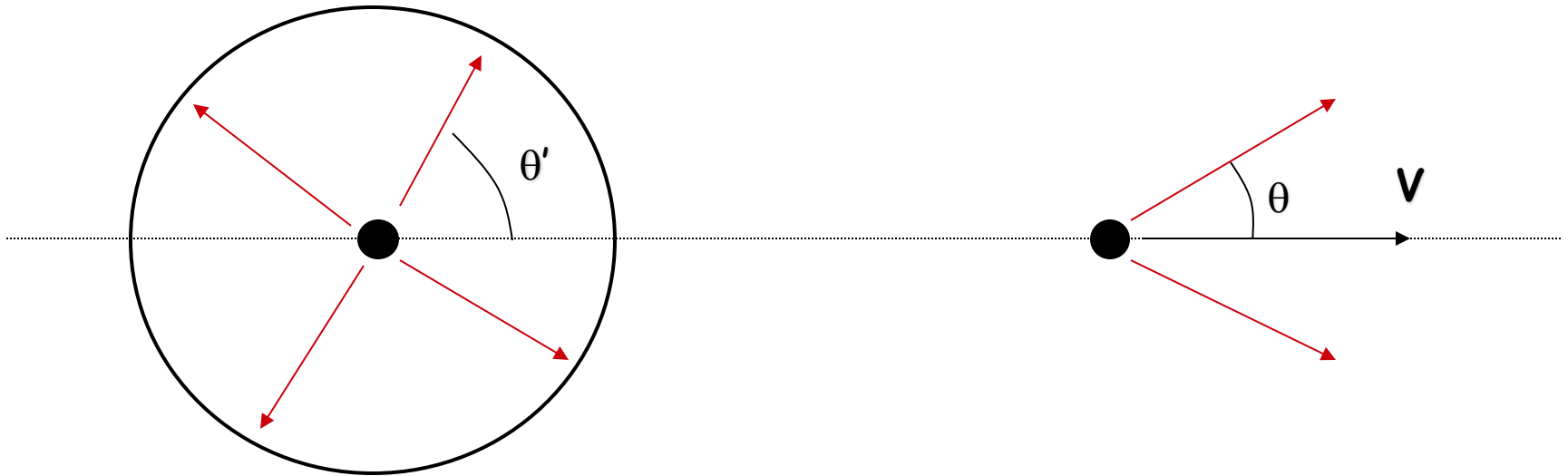
# Orbite de 6 planètes en « transit » (Avril 2010)



**Focalisation relativiste**

# Focalisation relativiste

Un rayonnement émis de façon **isotrope** dans le référentiel d'une source au repos ne l'est plus lorsque la source est en mouvement relativiste

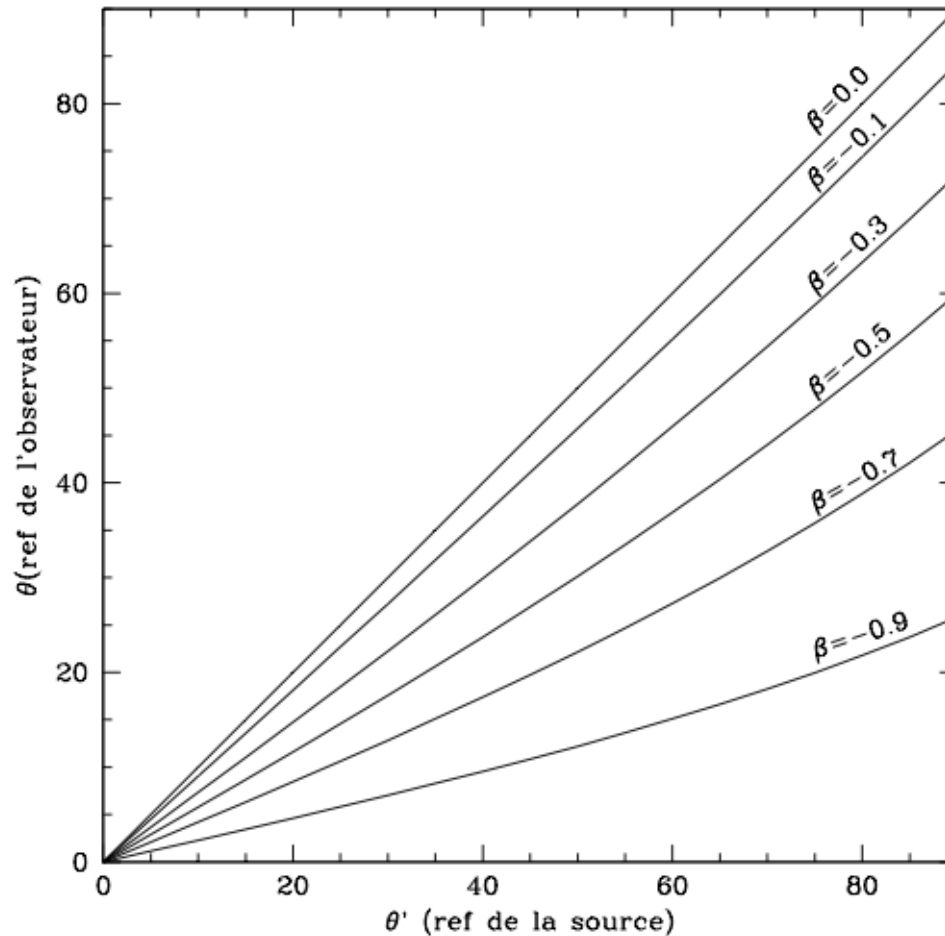


Source fixe:  
rayonnement **isotrope**

Source en mouvement:  
rayonnement **focalisé**  $\theta < \theta'$

# Focalisation relativiste

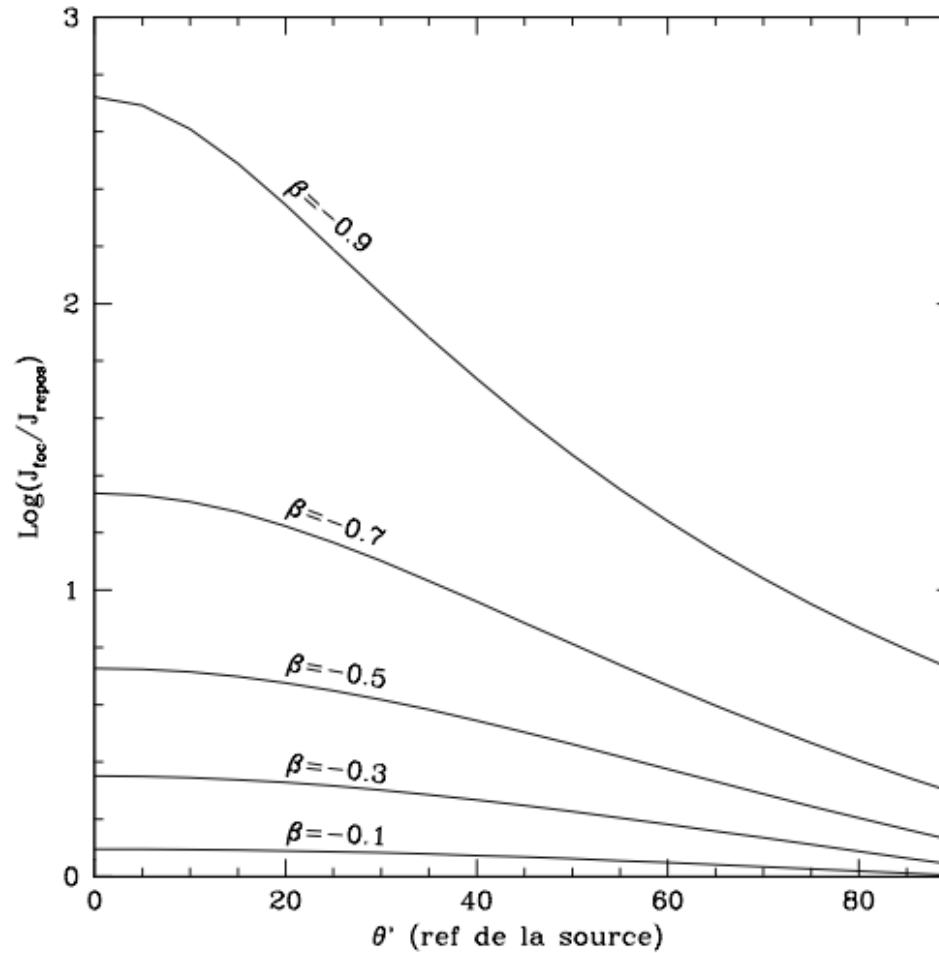
Modification de l'angle d'émission apparent avec la vitesse



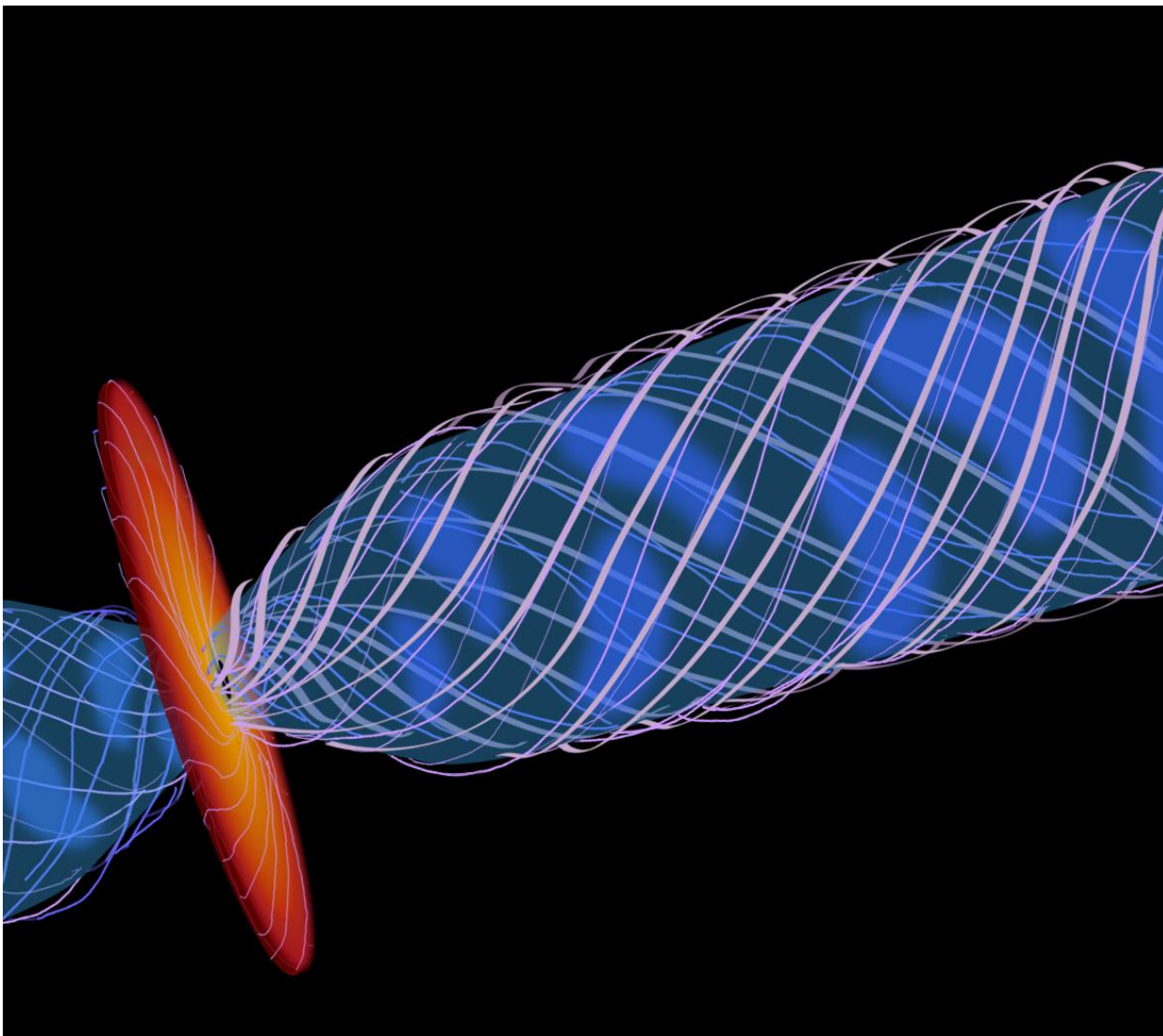


# Focalisation relativiste

Amplification lumineuse **apparente** avec la vitesse.



# Effets sur les « jets »



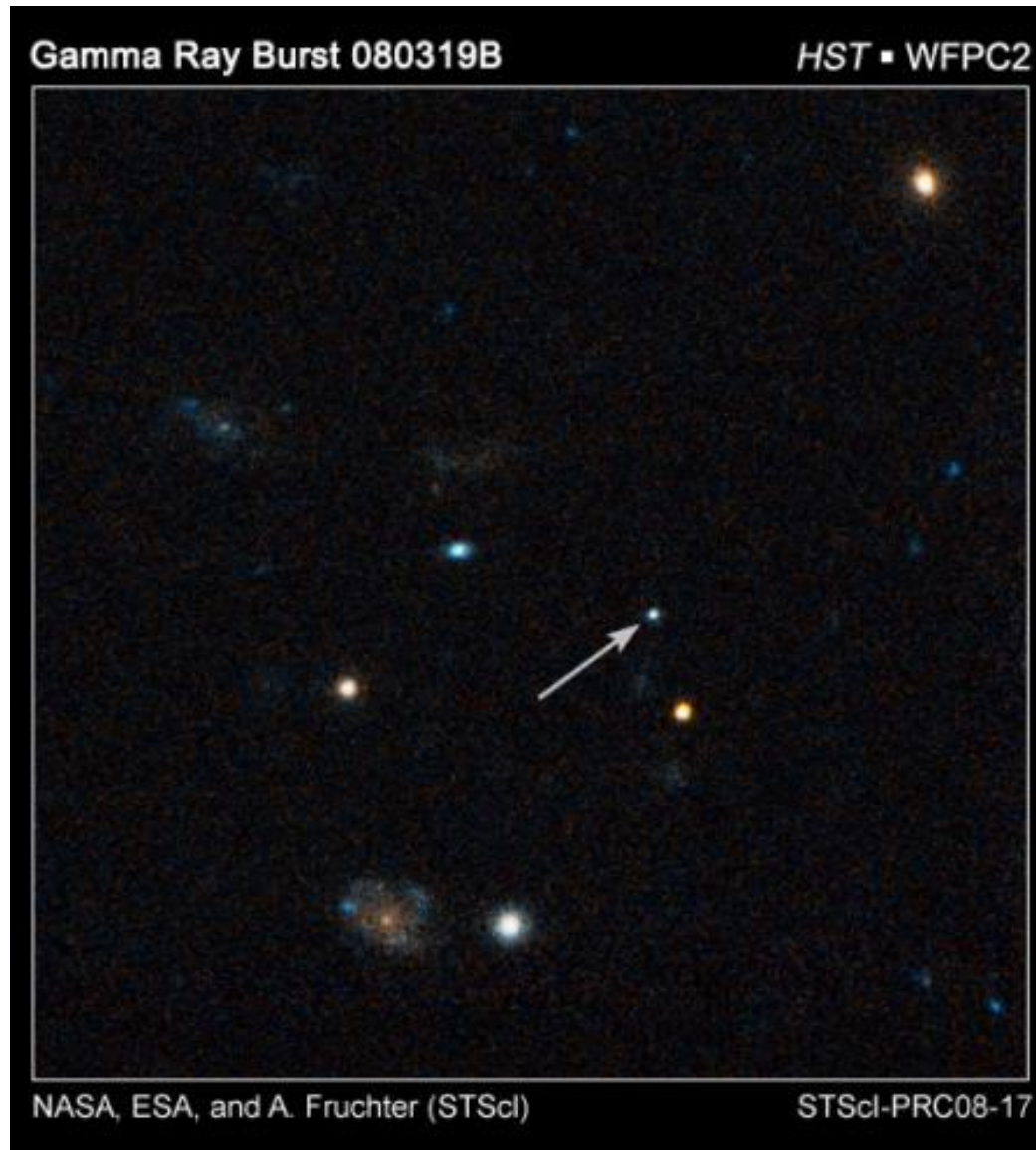
# Jet au centre de la galaxie Messier 87 (M87)



Seul le jet « d'avant-plan » est visible à cause de la focalisation relativiste



# Sursauts gamma lointains et leur contrepartie optique « amplifiée » par focalisation relativiste



# Effet des mouvements sur l'apparence des astres

Les mouvements des astres par rapport à la Terre peuvent affecter:

1- leur **couleur**

2- leur **éclat** (dans le cas de vitesses relativistes)

Il est donc essentiel d'estimer au moins des ordres de grandeurs des vitesses mises en jeu.

# **Matière interstellaire et intergalactique**

# Le milieu interstellaire et intergalactique

- **Gaz et poussières** entre les étoiles à l'intérieur des galaxies
- Gaz et poussières entre les galaxies
- Matière à l'origine de la formation des étoiles
- Influence sur le rayonnement d'arrière plan: **absorption et diffusion**
- Influence des sources de **chauffage ou d'ionisation**
- Donne l'état physique du milieu: température, densité



# Le milieu interstellaire et intergalactique: ordres de grandeur

- Peu important en masse: 10% de la masse typique d'une galaxie
- Très important du point de vue de la formation stellaire
- Milieu intergalactique très important pour la formation des galaxies
- Densité typique d'un gaz atomique:  $1 \text{ cm}^{-3}$  ou  $10^{-21} \text{ kg.m}^{-3}$
- Densité typique d'un nuage de poussières:  $10^{-13} \text{ cm}^{-3}$  ou  $10^{-23} \text{ kg.m}^{-3}$
- Températures des gaz: quelques K à  $10^6 \text{ K}$
- Température des poussières: quelques K à 100-300K

# Les différents types de nébuleuses

Nébuleuses **diffuses** (ionisation/recombinaison)

Grande nébuleuse d'Orion  
(HST, optique)



Partie centrale et son amas  
d'étoiles jeunes  
(VLT infrarouge)

Nébuleuses par réflexion (ici Messier 78)  
Le spectre de la nébuleuse est similaire à celui de l'étoile qui l'illumine



Etoile « centrale »






Poussières absorbant la  
lumière d'arrière-plan

Amas d'étoiles jeunes

Absorption par la poussière à l'échelle des galaxies

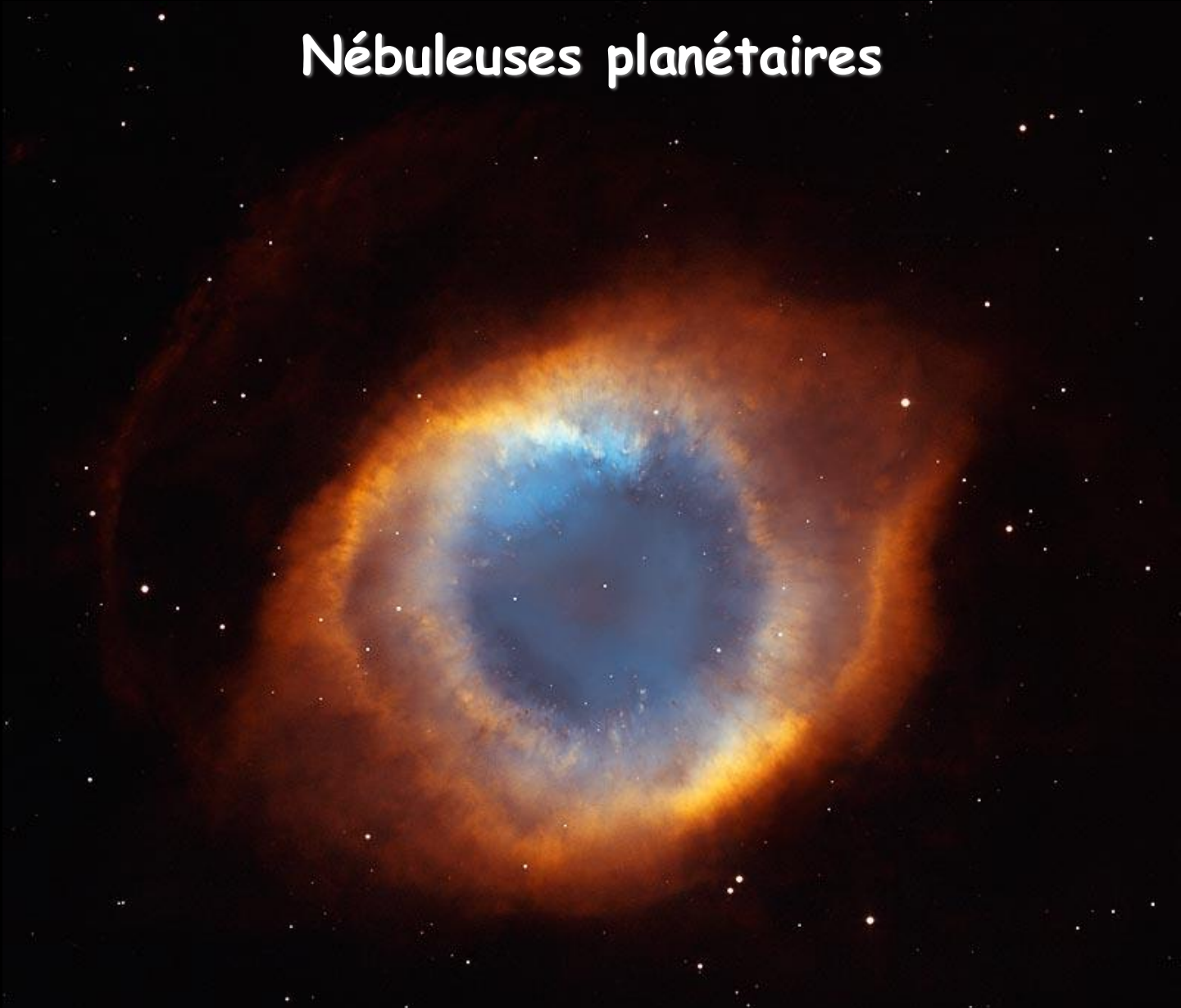
NGC 4565, galaxie spirale vue par la tranche



Bande de poussière



# Nébuleuses planétaires



Nébuleuse « helix »: nébuleuse planétaire

-> mort d'étoile peu massive.

Emission par fluorescence ou ionisation et recombinaison.

# Nébuleuses de gaz ionisé

Régions de formation d'étoiles dans la  
galaxie spirale Messier 33 (filtres B, V, Halpha)



**Emission lumineuse par les nébuleuses**



# Emission par le gaz ionisé

Processus en jeu: **ionisation et recombinaison proton-électron**

Les taux d'ionisation et de recombinaison dépendent de la densité et de la température du milieu.

A l'équilibre ces deux taux sont égaux:  $F_{\text{ion}} = F_{\text{recomb}}$

$$N = \frac{4}{3} \rho R^3 \cdot a n_e n_H$$

Photons ionisants ( $s^{-1}$ )

Constante donnée par la  
mécanique quantique  
( $\sim 3 \times 10^{-13} \text{ cm}^3 \text{ s}^{-1}$ )

Densités d'électrons  
et de protons

# Emission par le gaz ionisé

$$N = \frac{4}{3} \rho R^3 \cdot \alpha n_e n_H$$

Pour l'hydrogène la source ionisante doit avoir une température suffisante pour que les photons aient une énergie  $E > 13,6 \text{ eV}$

En supposant également que tout le gaz est ionisé à l'équilibre ( $n_e = n_H$ )

rayon de Strömgren

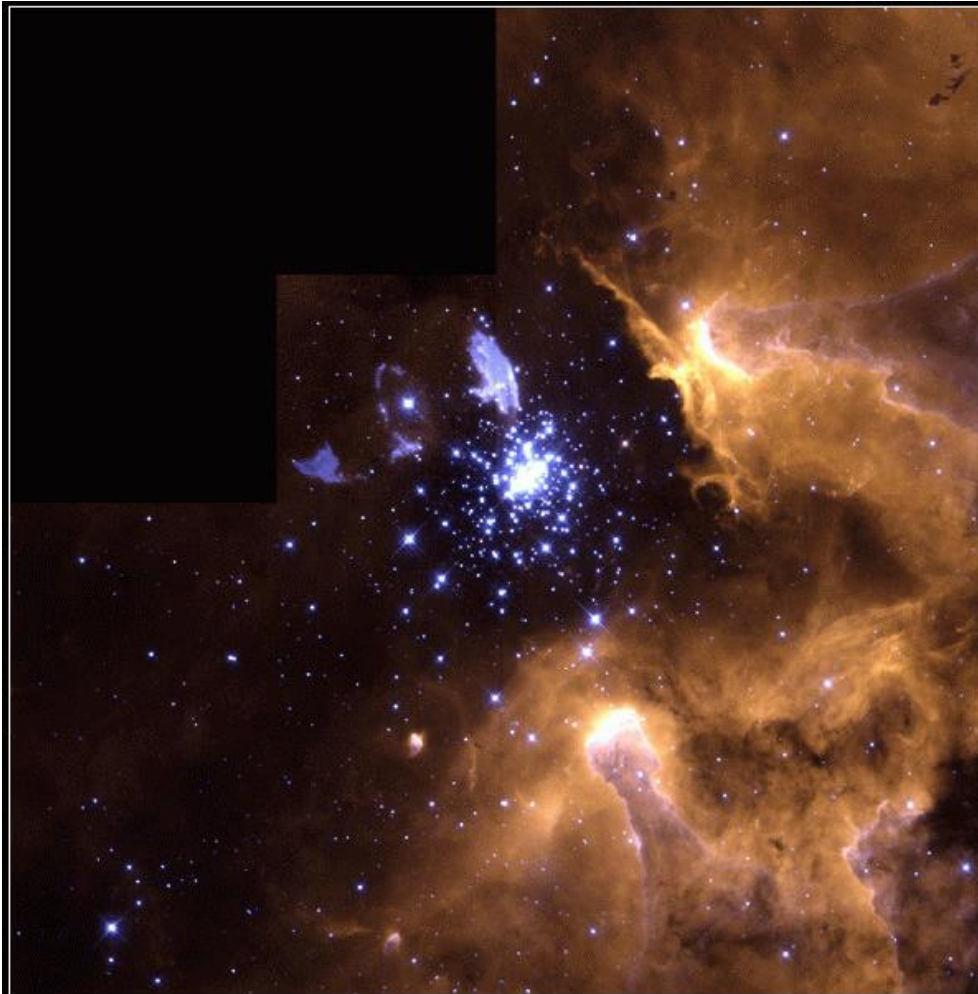
$$R = \left( \frac{3N}{4\rho\alpha n_H^2} \right)^{1/3}$$

Si la source d'ionisation est une étoile chaude ( $T \sim 45000 \text{ K}$ ), on trouve que le **rayon de Strömgren**  $R \sim 0,3 \text{ pc}$ , qui est la taille maximale de la nébuleuse pour la source d'ionisation considérée

# Nébuleuses de gaz ionisé

## Zone de formation d'étoiles

- Gaz ionisé
  - Recombinaison
  - Cascade de dé-excitations électroniques et formation de raies d'émission
- > la formation d'étoiles est souvent associée à un spectre d'émission



**NGC 3603**

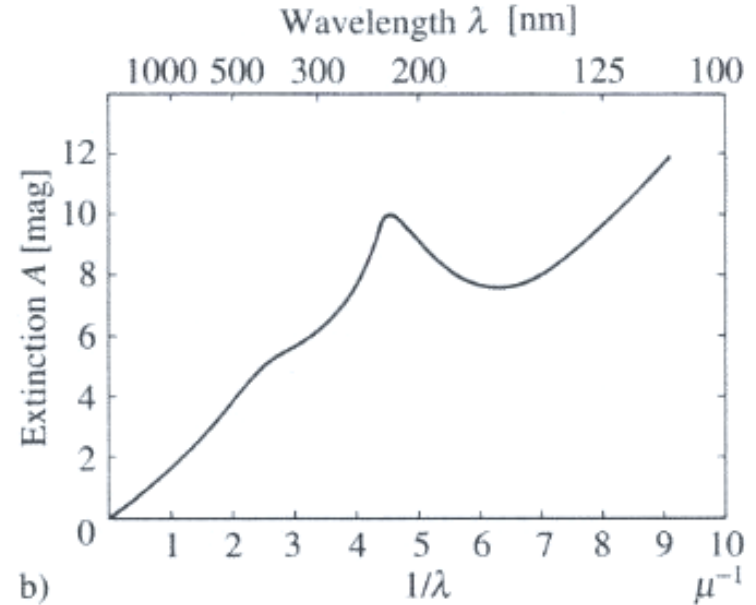
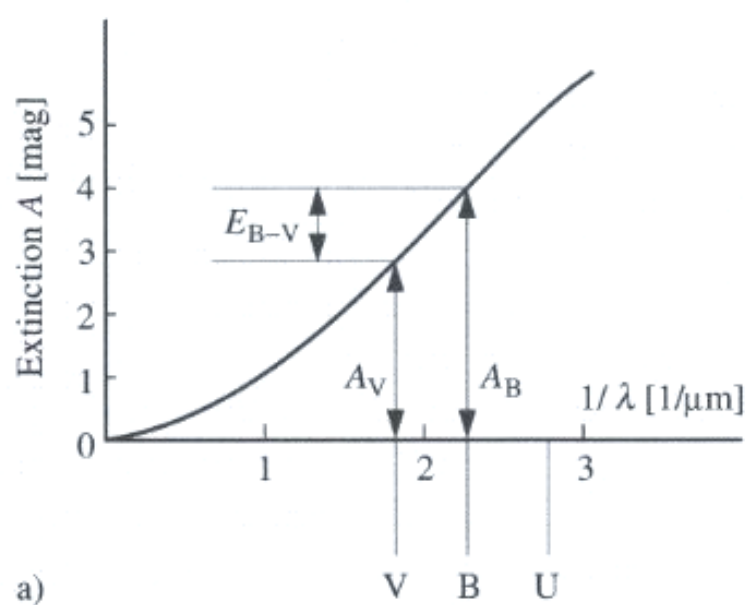
**HST • WFPC2**

PRC99-20 • STScI OPO • June 1, 1999

Wolfgang Brandner (JPL/IPAC), Eva K. Grebel (Univ. Washington),  
You-Hua Chu (Univ. Illinois, Urbana-Champaign) and NASA

# Absorption de la lumière

# Absorption de la lumière



Coefficient d'absorption et excès de couleur:

$$B-V = (B_0 + A_B) - (V_0 + A_V)$$

$$B-V = (B-V)_0 + E_{B-V}$$

Couleur observée

Couleur réelle

Excès de couleur

# Méthode empirique pour la mesure de l'absorption: le diagramme de Wolf

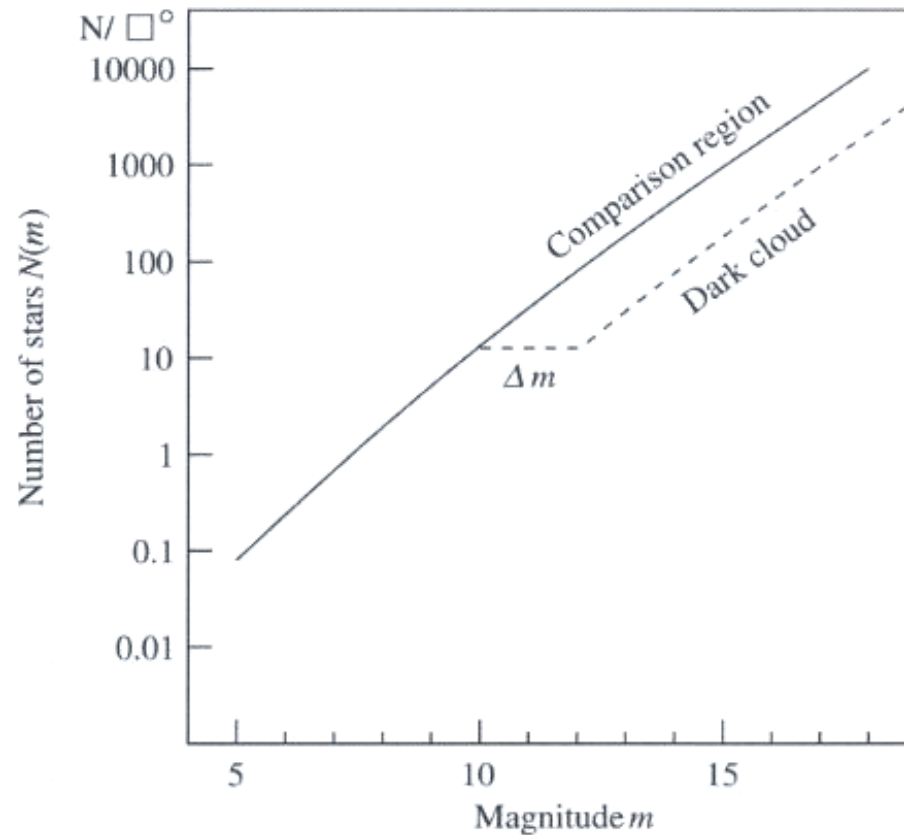
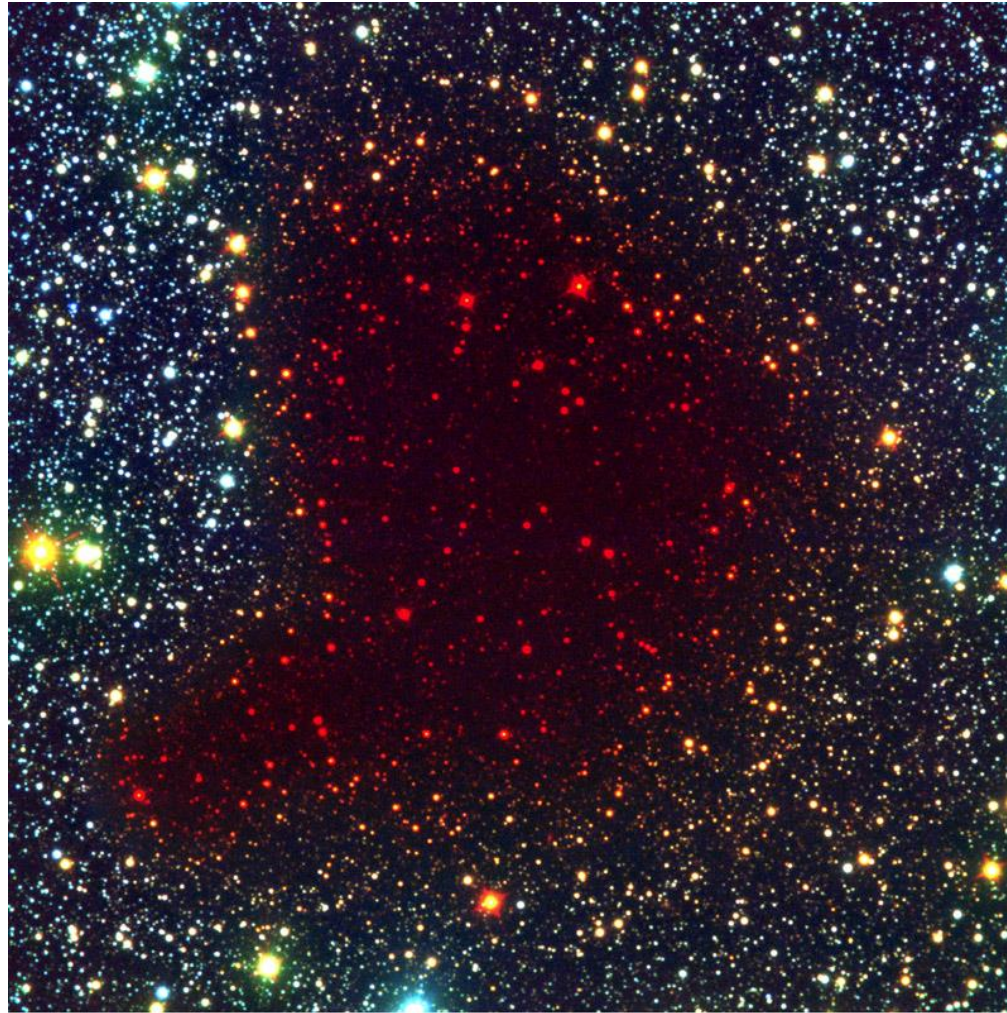


Diagramme de Wolf: **comptage** des étoiles  
par rapport à une région de référence non absorbée



# Illustration de la méthode de Wolf



Seeing Through the Pre-Collapse Black Cloud B68  
(VLT ANTU + FORS 1 - NTT + SOFI)

# Diffusion de la lumière

# Diffusion de la lumière

Coefficient d'extinction total  $Q_{\text{ext}}$

$Q_{\text{ext}}$  proportionnel à  $\lambda^{-4}$  quand le rayon des particules  $a \ll \lambda$

-> Diffusion de Rayleigh: **Isotrope**

$Q_{\text{ext}}$  proportionnel à  $\lambda^{-1}$  quand le rayon des particules  $a \gg \lambda$

-> Diffusion de Mie: **Directionnelle**

$Q_{\text{ext}}$  proportionnel à  $\lambda^{-1}$  quand  $Q_{\text{ext}} \sim Q_{\text{abs}}$

-> Absorption pure

La lumière est d'autant plus absorbée (et diffusée) qu'elle est bleue

# Diffusion de la lumière

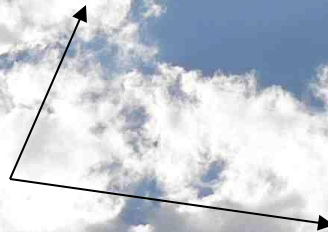
Diffusion de Rayleigh  
(ciel bleu)

$$a < \lambda$$

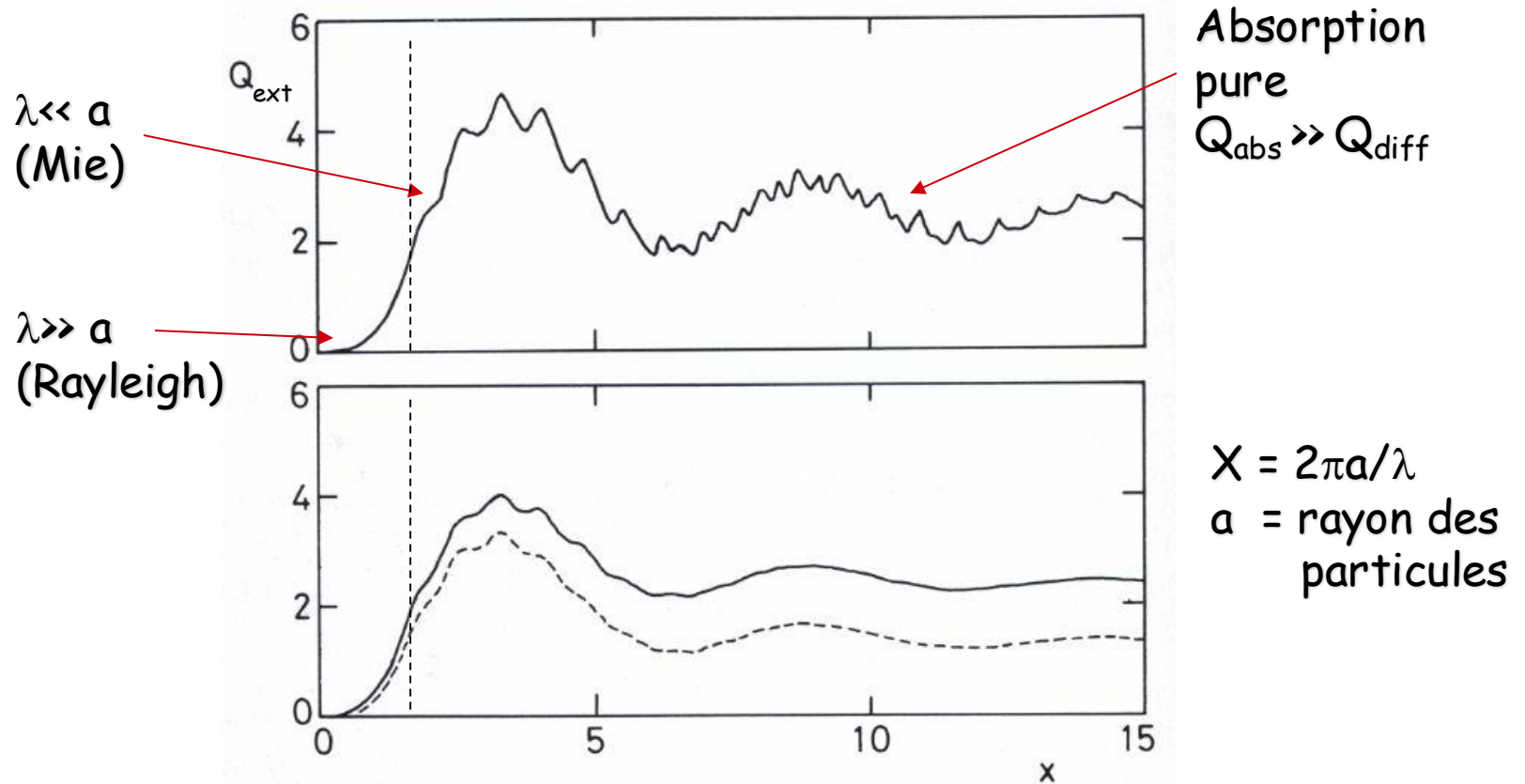


Diffusion de Mie  
(nuages)

$$a > \lambda$$



# Diffusion de la lumière



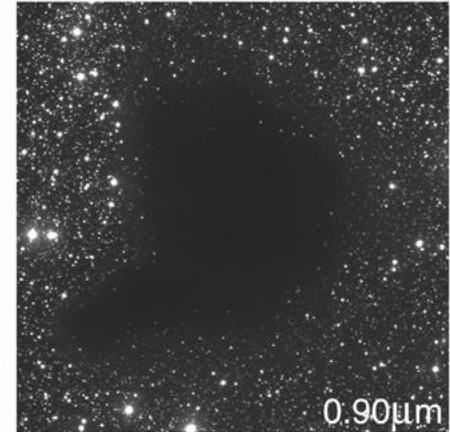
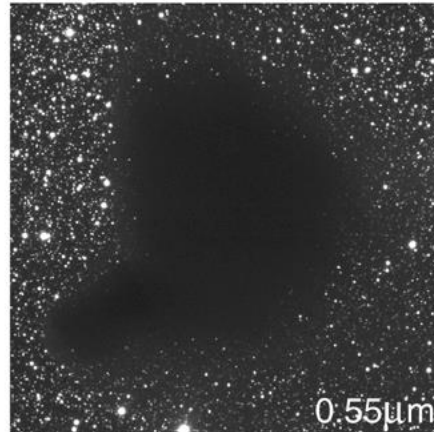
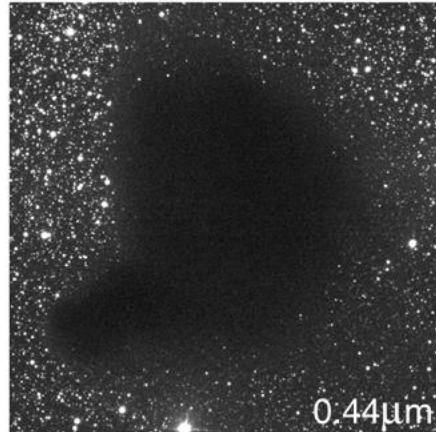
Coefficient **d'extinction total**  $Q_{ext}$  pour un nuage avec un seul type de particules (en haut) ou un mélange (en bas)

$$Q_{ext} = Q_{abs} + Q_{diff}$$

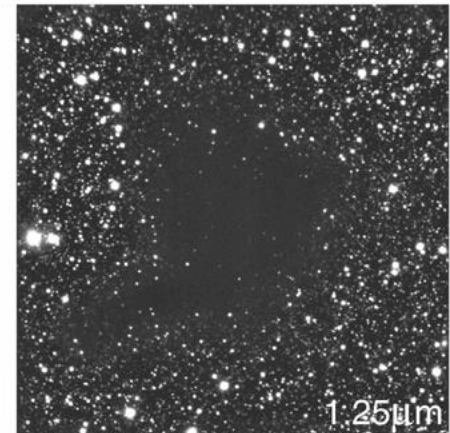
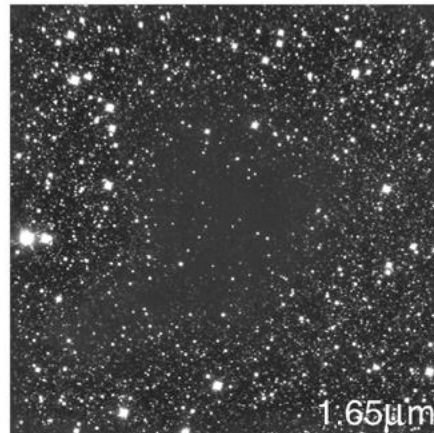
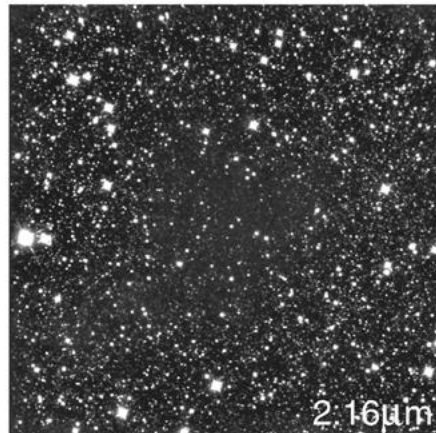


# Exemple d'absorption et de diffusion de la lumière

Absorption  
Maximale (UV)



Absorption  
minimale (IR)



The Dark Cloud B68 at Different Wavelengths (NTT + SOFI)

ESO PR Photo 29b/99 ( 2 July 1999 )

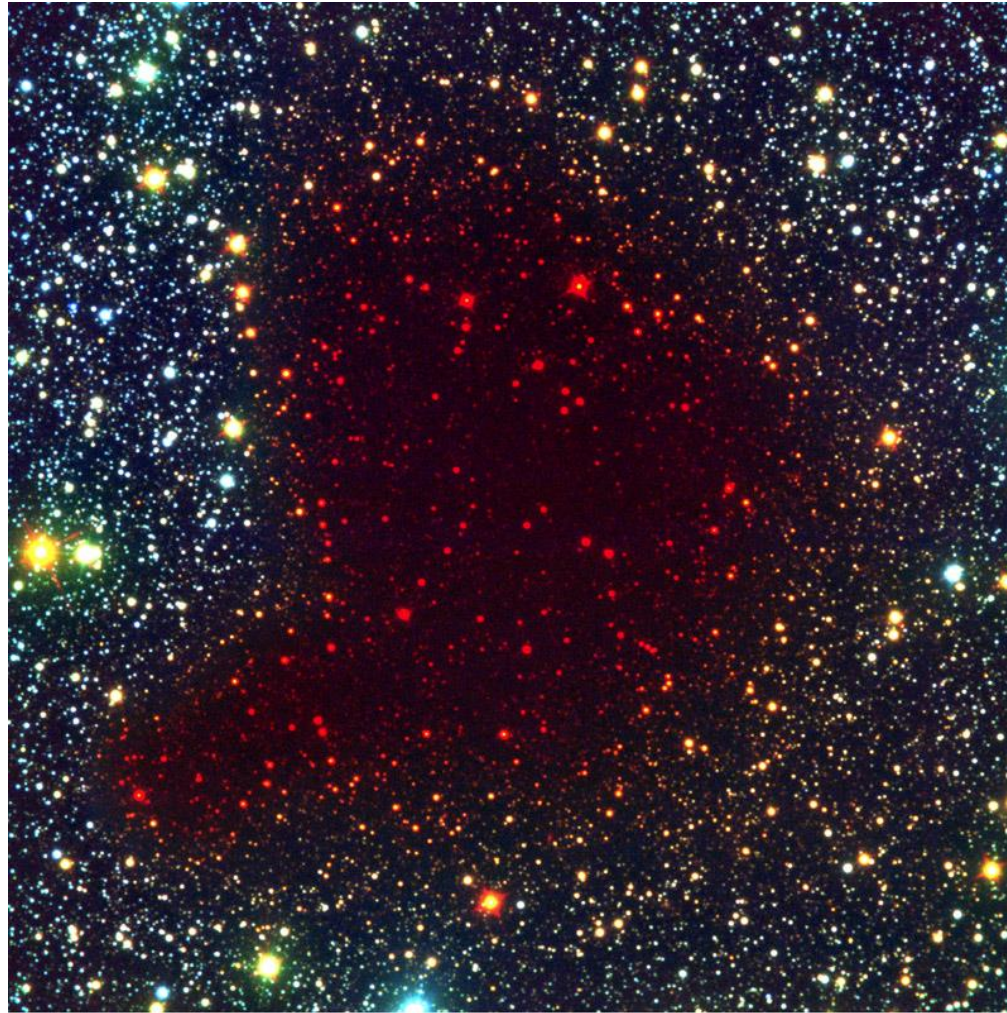
© European Southern Observatory



**Attention: ne pas confondre avec « l'effet Wolf » !!**



# Exemple d'absorption et de diffusion de la lumière



Seeing Through the Pre-Collapse Black Cloud B68  
(VLT ANTU + FORS 1 - NTT + SOFI)

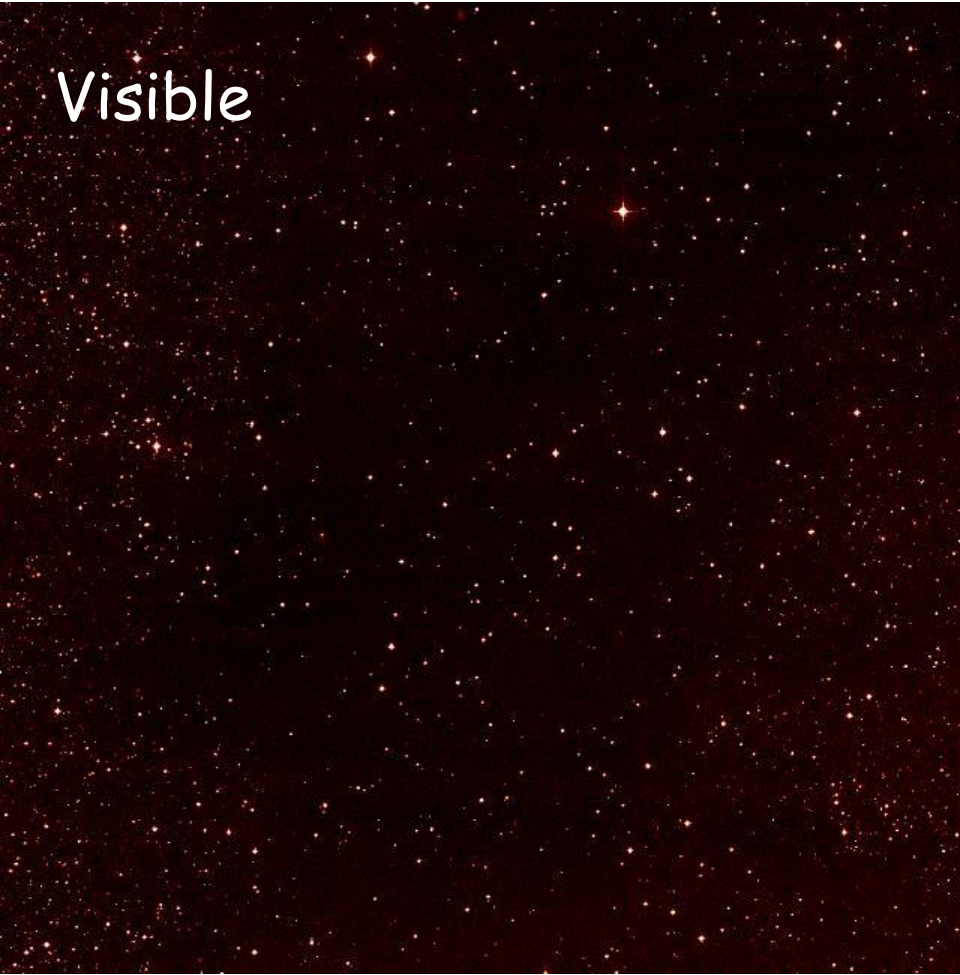
**Nuages moléculaires**

# Nuages moléculaires

- interstellaires (quelques pc)
- circumstellaires (quelques UA)
- intergalactiques (quelques pc - kpc)
- froids  $\sim 10\text{-}20\text{ K}$
- rotation/vibration des molécules
- raies et continu dans les ondes millimétriques

# Nuages moléculaires

Visible



Radio (0.35 mm)

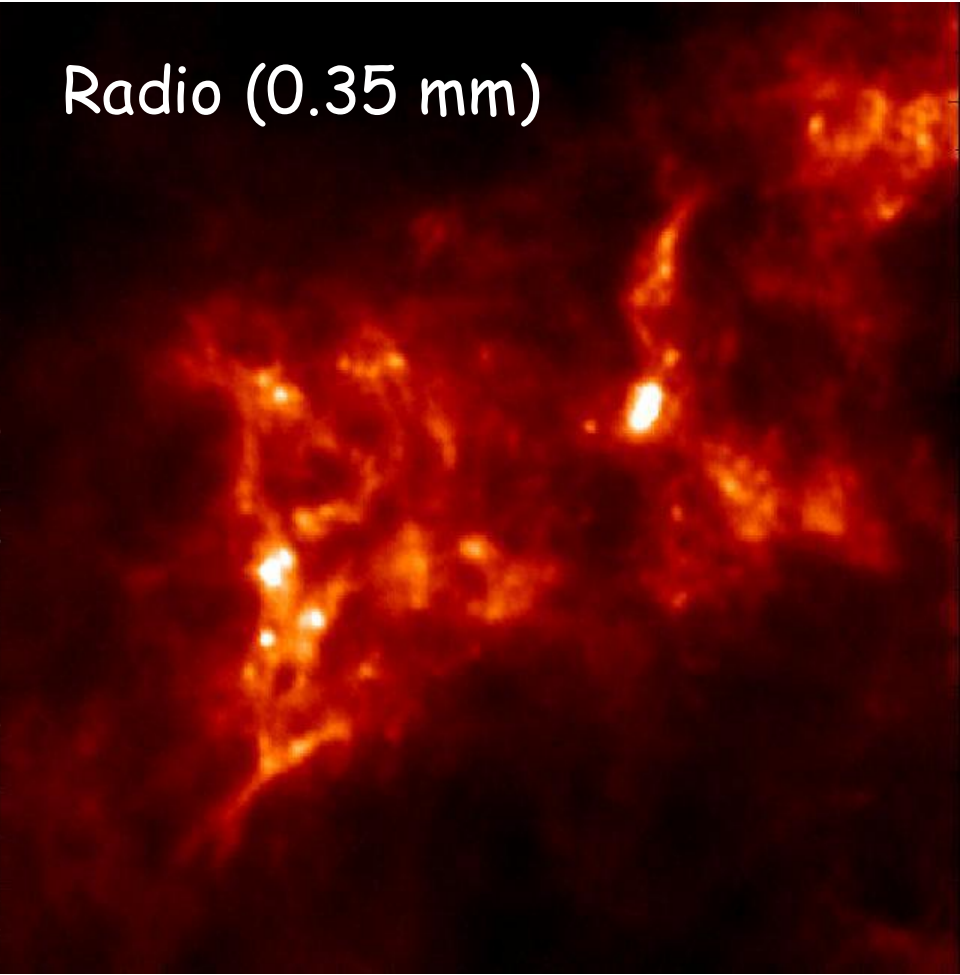


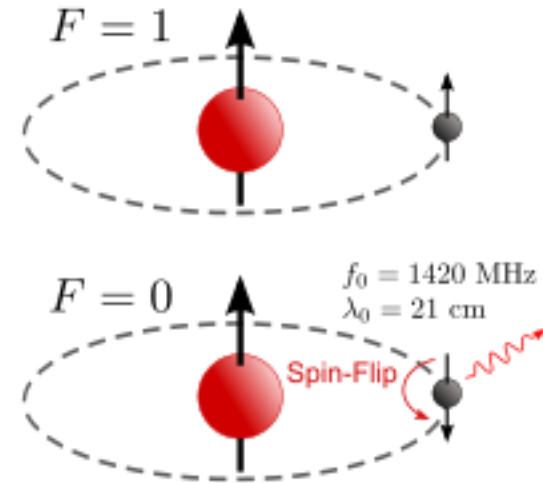
Image optique (à gauche), et image radio (à droite),  
d'un nuage moléculaire froid à  $T = 10$  K dans notre Voie Lactée.  
Les zones denses en molécules correspondent à des zones de formation d'étoiles

**L'hydrogène neutre**

# Hydrogène neutre

## Raie à 21 cm de l'hydrogène atomique neutre:

- Hydrogène **neutre** interstellaire
- niveaux de structure hyperfine  $F=1 \rightarrow F=0$
- Spins parallèles  $\rightarrow$  anti-parallèles
- Visible dans la Voie Lactée et les galaxies proches
- Domaine radio lointain (21 cm)
- Echelles spatiales de l'ordre de 10 minutes d'arc
- Projets d'antennes géantes ( $1 \text{ km}^2$ ) pour augmenter la sensibilité





# Square Kilometer Area Observatory

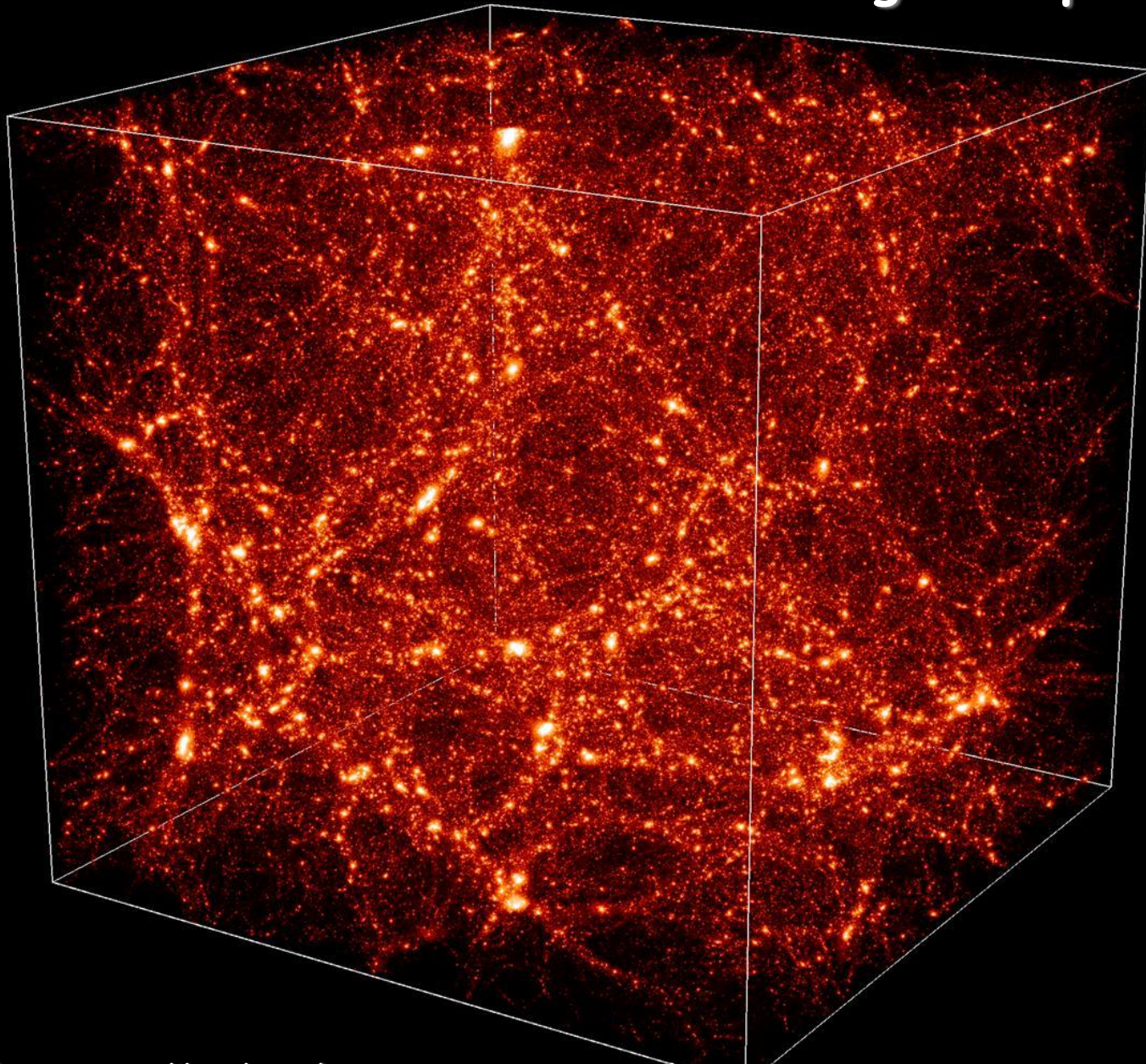


**MID: Afrique du Sud**

**LOW: Australie**



# Le milieu interstellaire et intergalactique



Filaments d'hydrogène neutre intergalactique



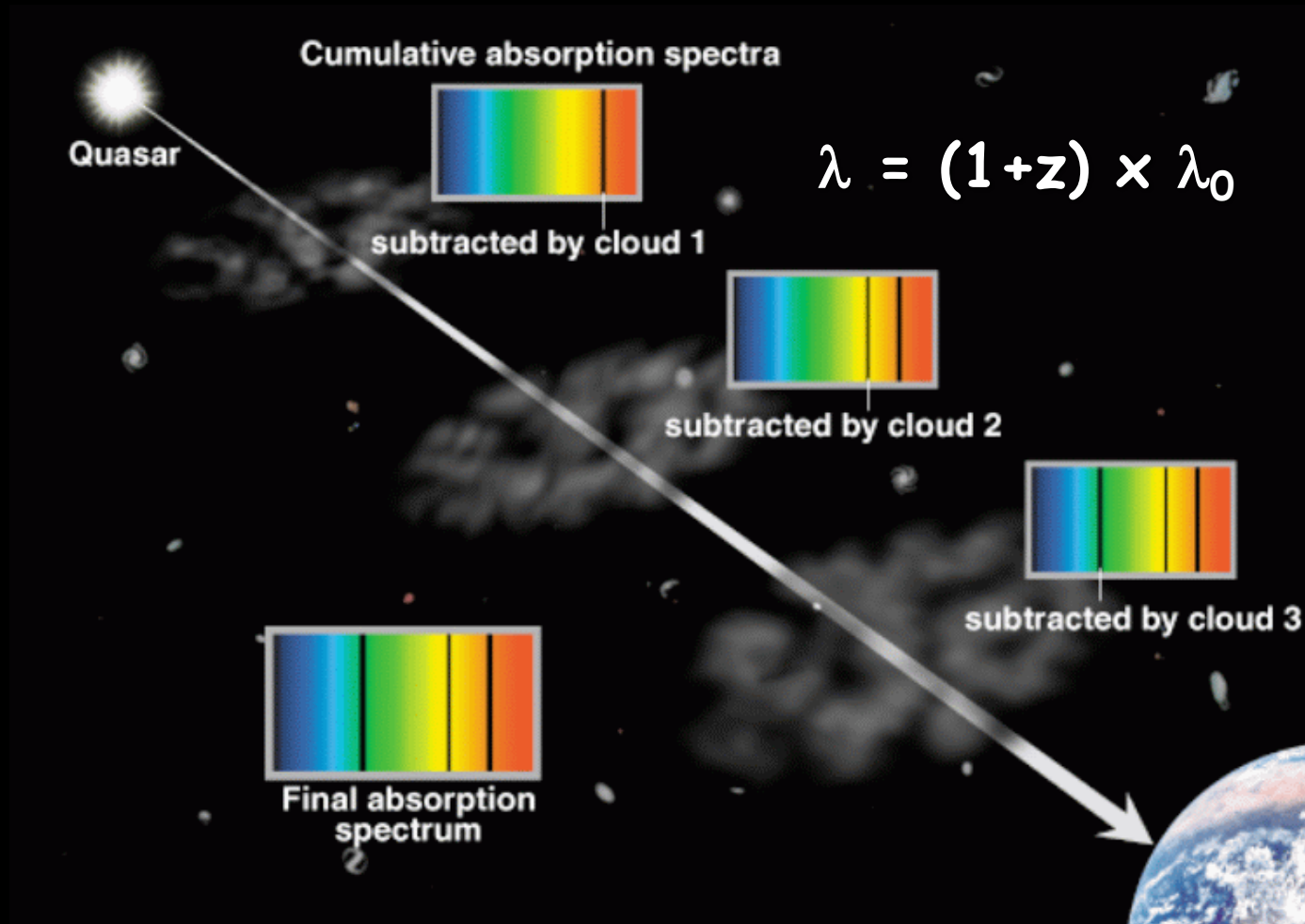
# Le milieu interstellaire et intergalactique

The image displays a complex, web-like structure of glowing filaments. These filaments are composed of numerous fine, interconnected lines that vary in brightness, with some appearing as bright orange-yellow points and others as thinner, more diffuse red lines. The overall pattern is highly irregular and fractal-like, filling the entire frame with a sense of depth and vastness. The background is a deep, solid black, which makes the glowing filaments stand out prominently.

Filaments d'hydrogène neutre intergalactique

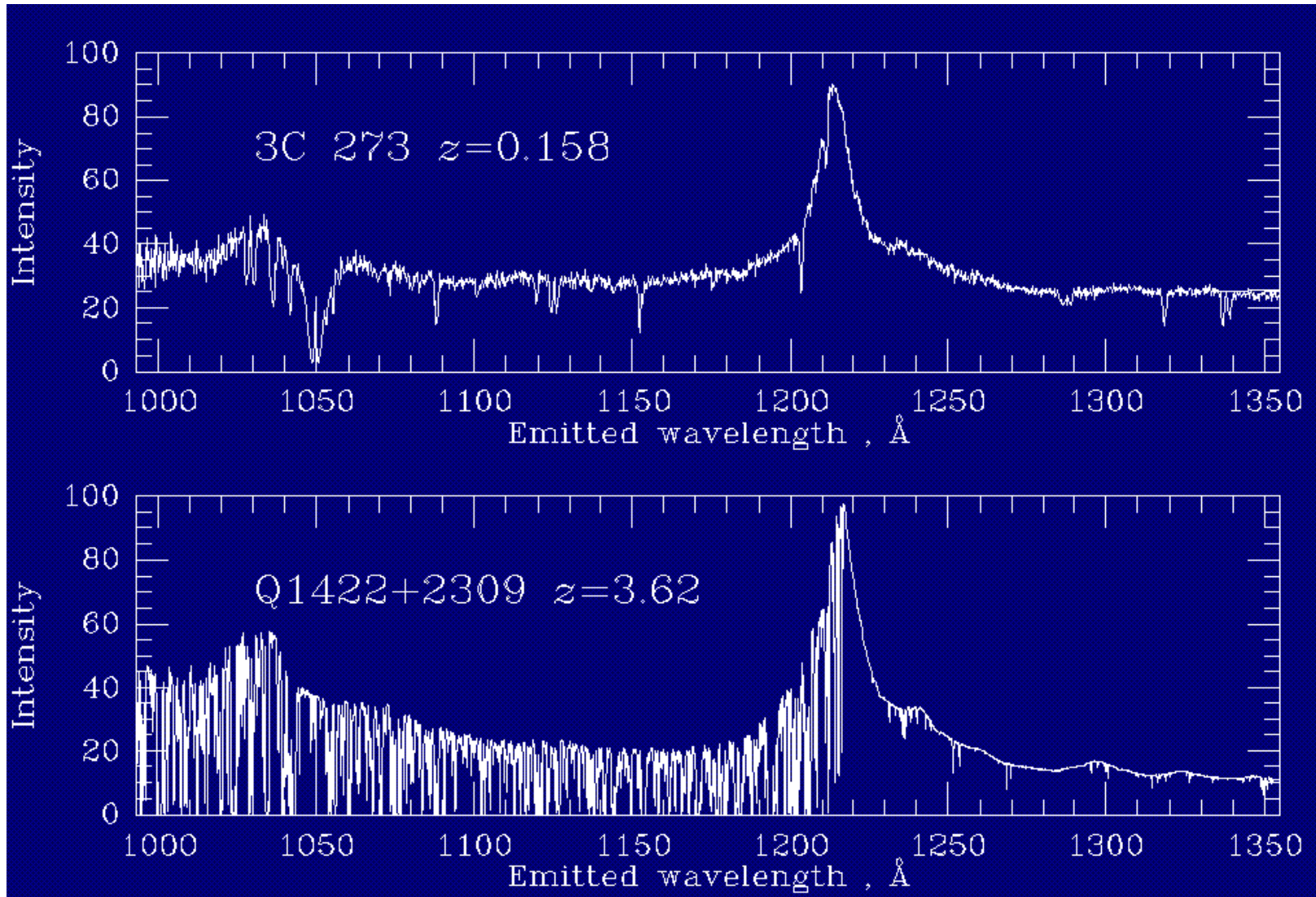


# Hydrogène neutre



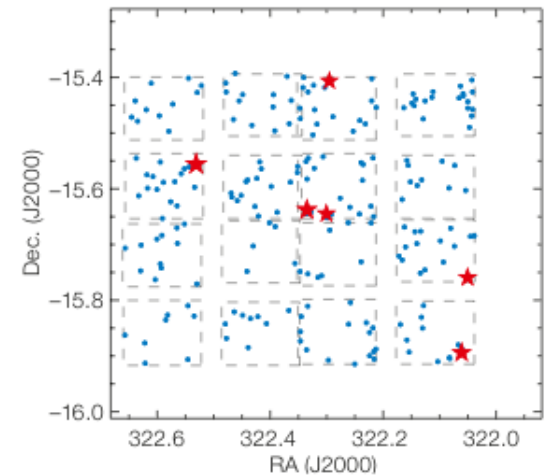
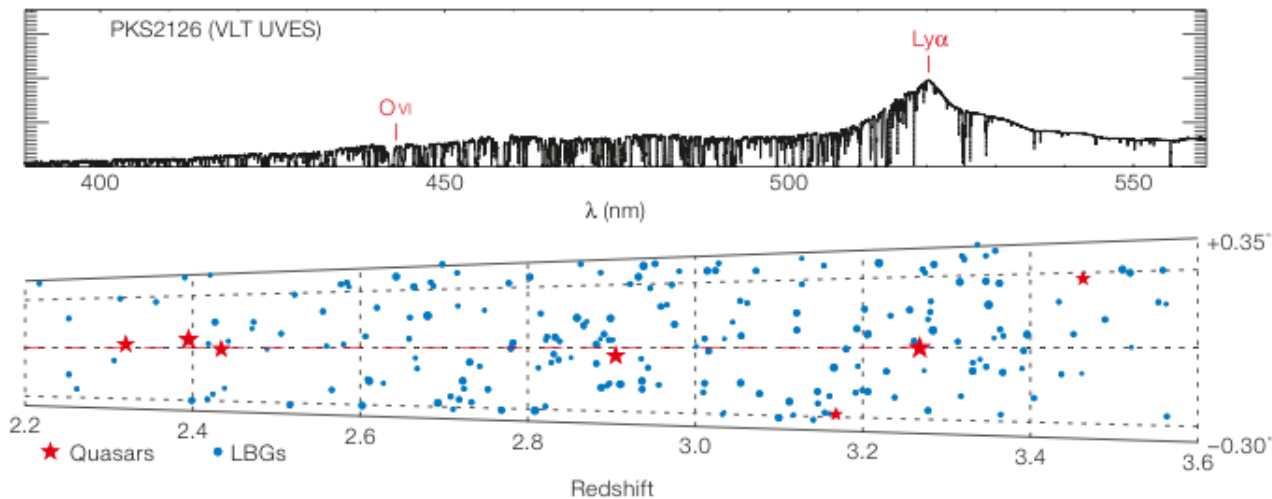
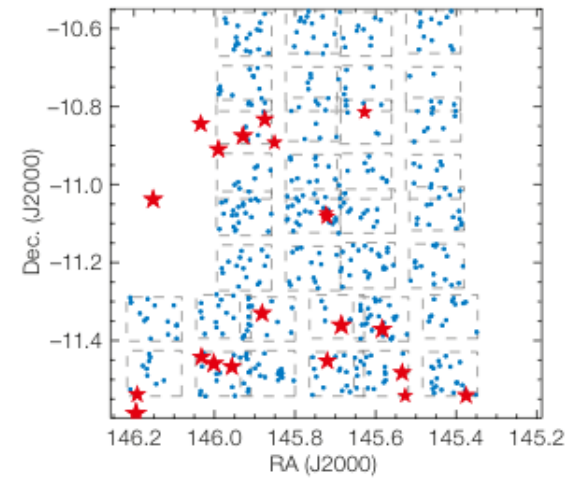
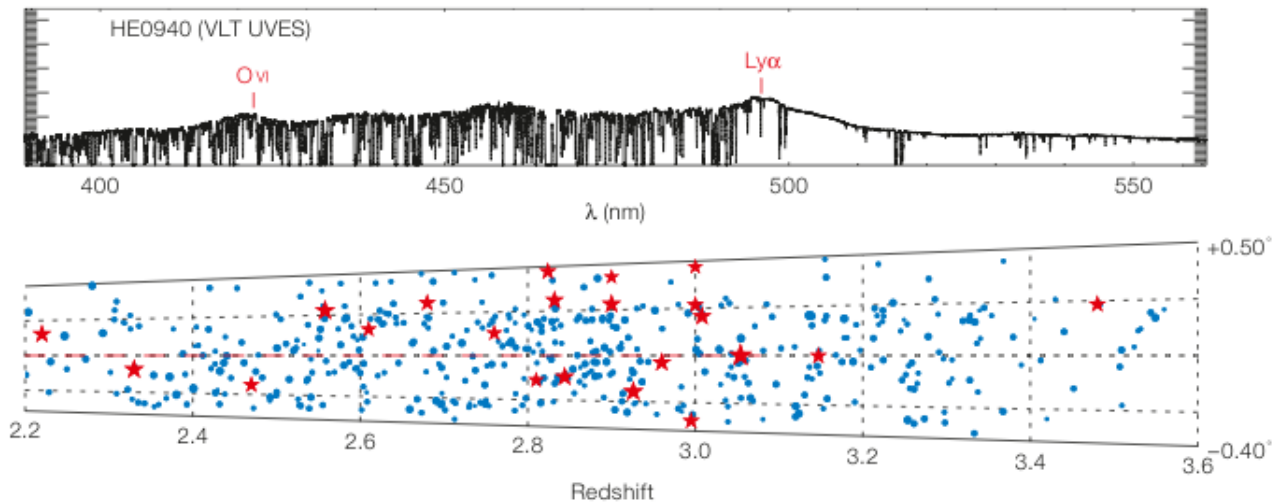
Absorption par des nuages d'hydrogène neutre à différents décalages vers le rouge (c'est-à-dire à différentes distances de nous)

# Hydrogène neutre



**Forêt** Lyman alpha (1216 Å) due à l'hydrogène neutre  
sur la ligne de visée de **quasars** distants

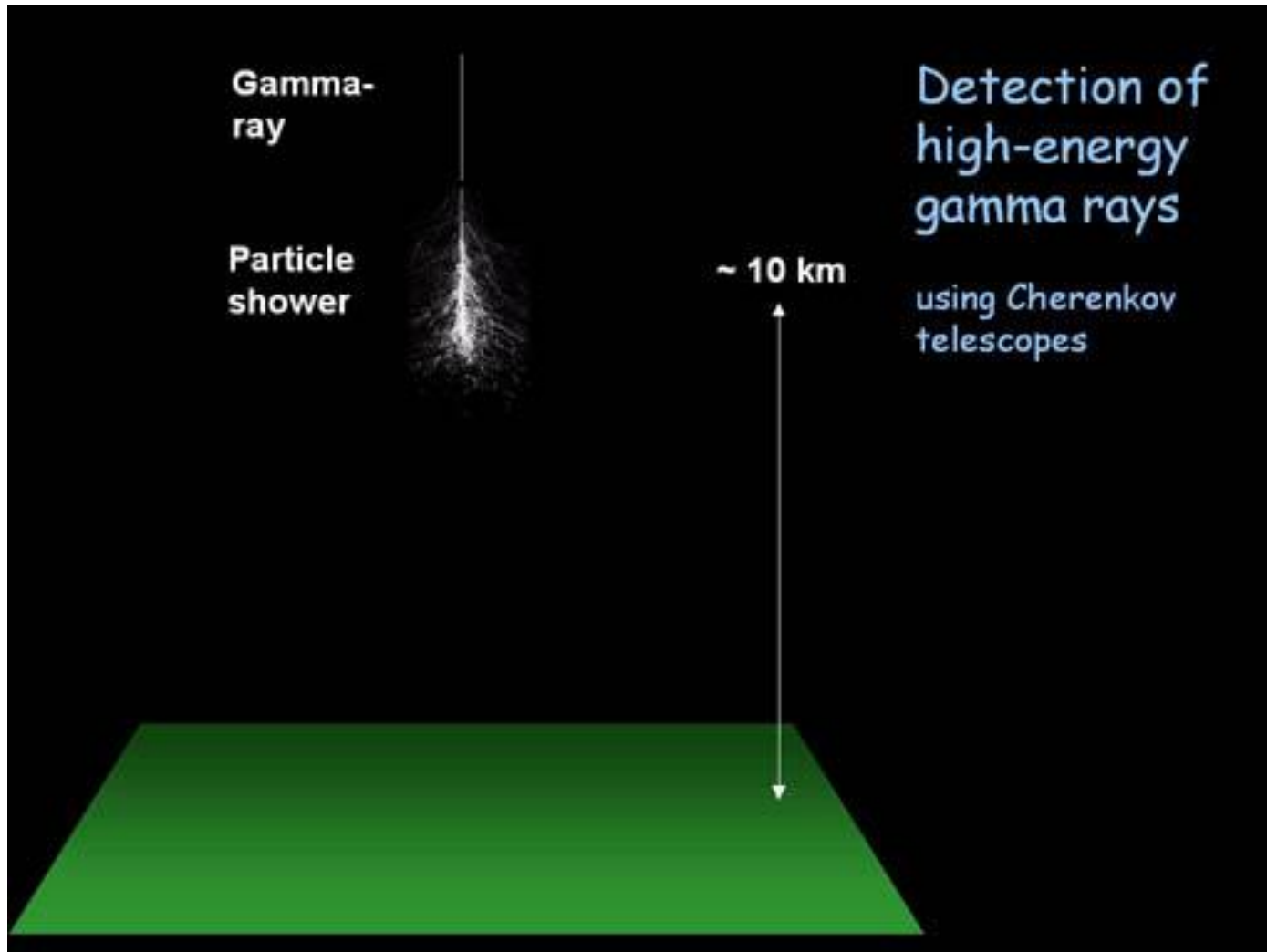




**Forêt** Lyman alpha (1216 Å) due à l'hydrogène neutre  
sur la ligne de visée de **quasars** distants

# Particules intergalactiques

# Les **particules** intergalactiques

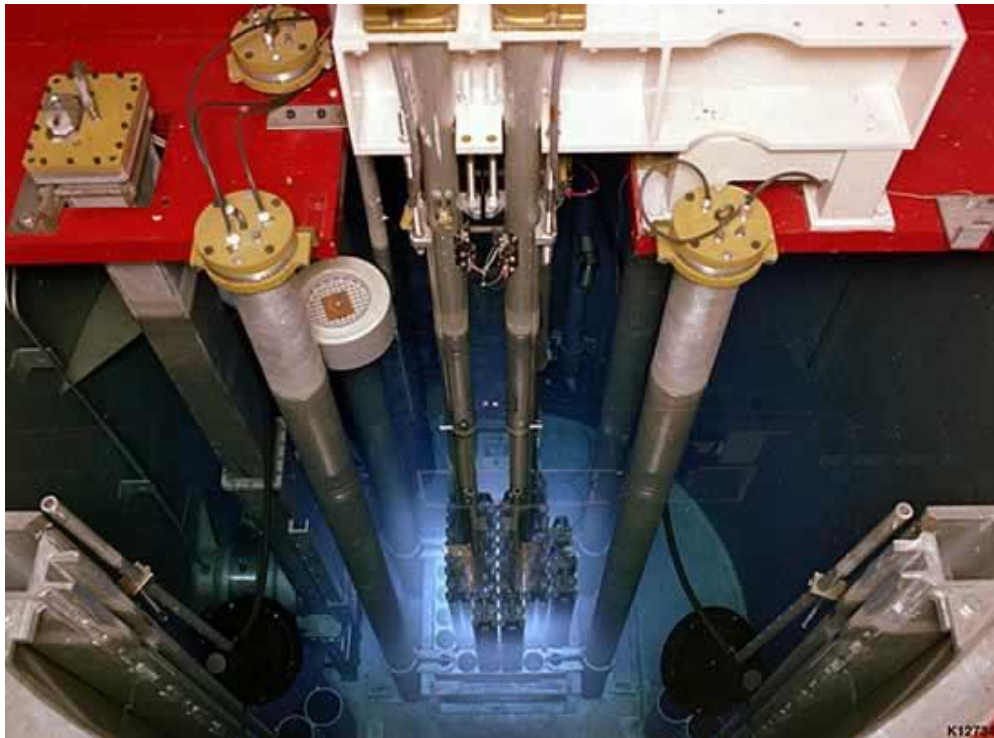


Particules (protons, électrons) accélérées par les supernovae et interagissant avec l'hydrogène neutre (HI) interstellaire

# Les **particules** intergalactiques

Détection par **effet Cherenkov**

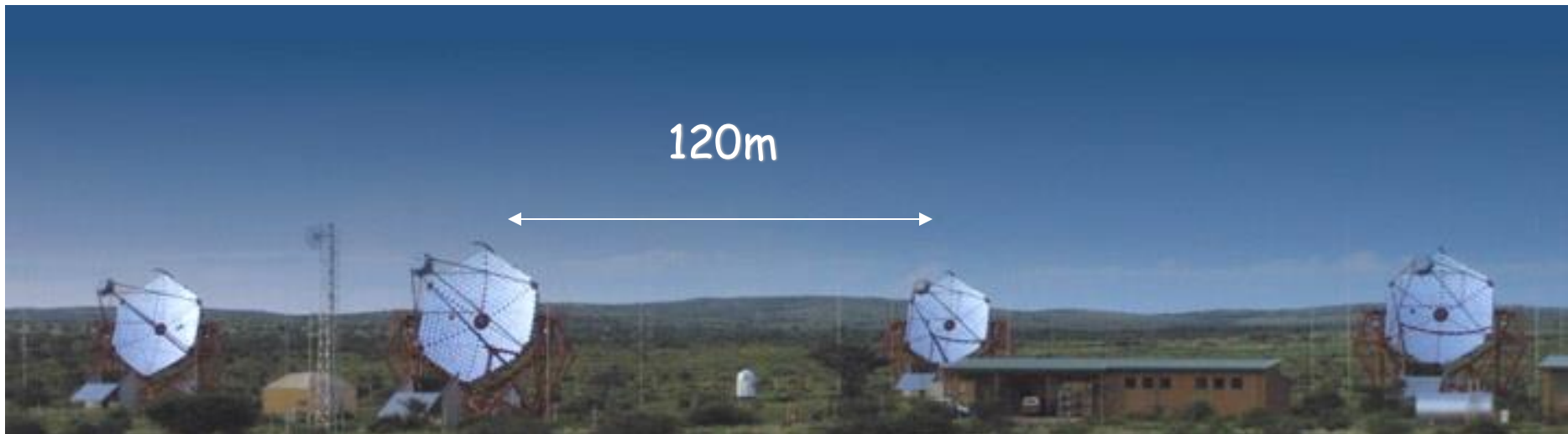
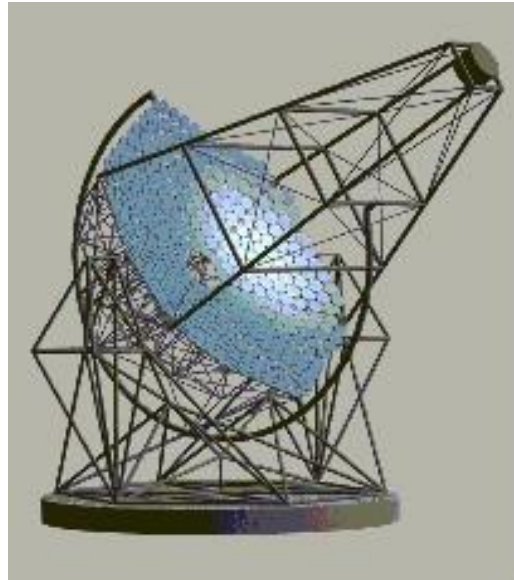
L'effet Cherenkov est un phénomène similaire à une onde de choc, produisant un flash de lumière, et, qui a lieu lorsqu'une particule chargée se déplace dans un milieu avec une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière **du milieu**.



# HESS: High Energy Stereoscopic Telescope

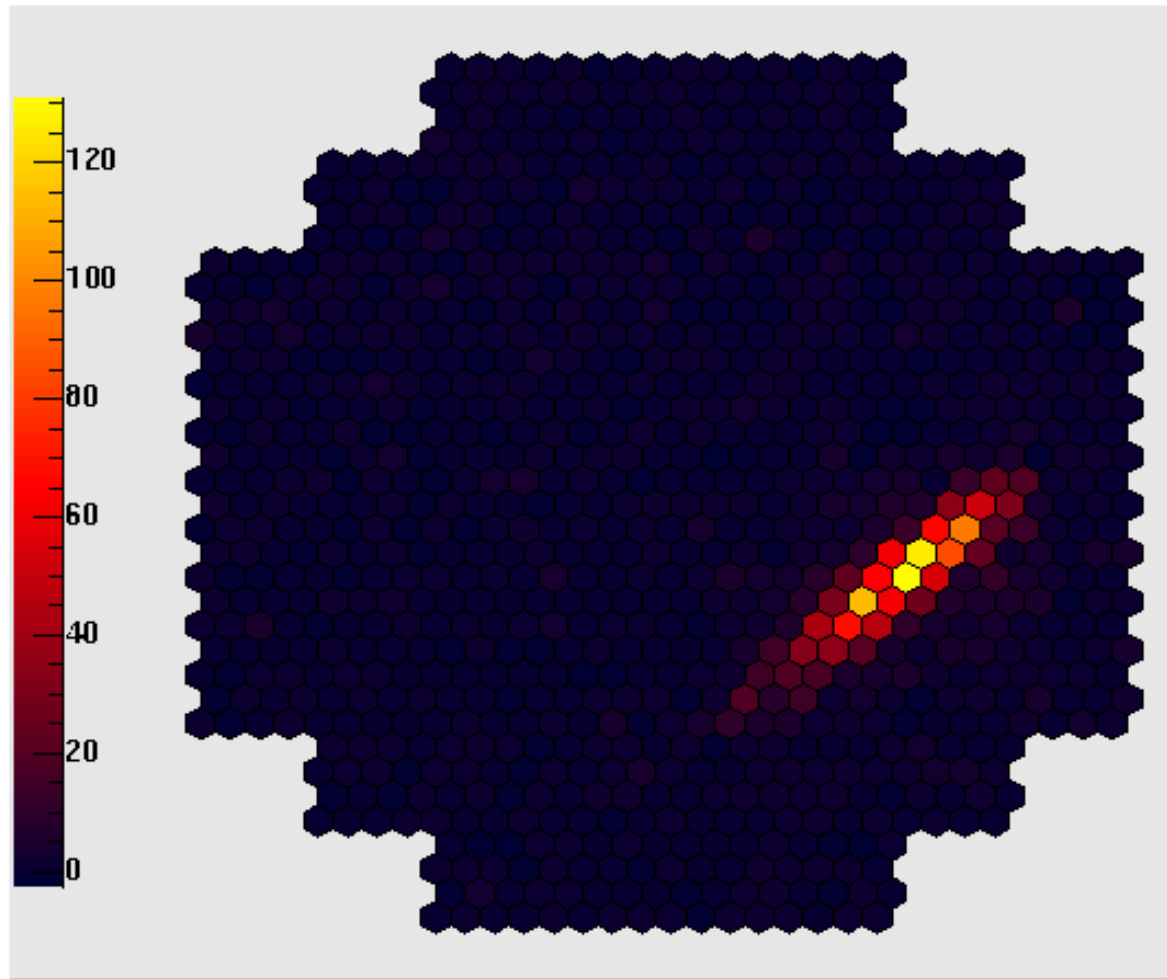
4 « télescopes » de 12 m

Chacun possède 382  
miroirs de 60 cm



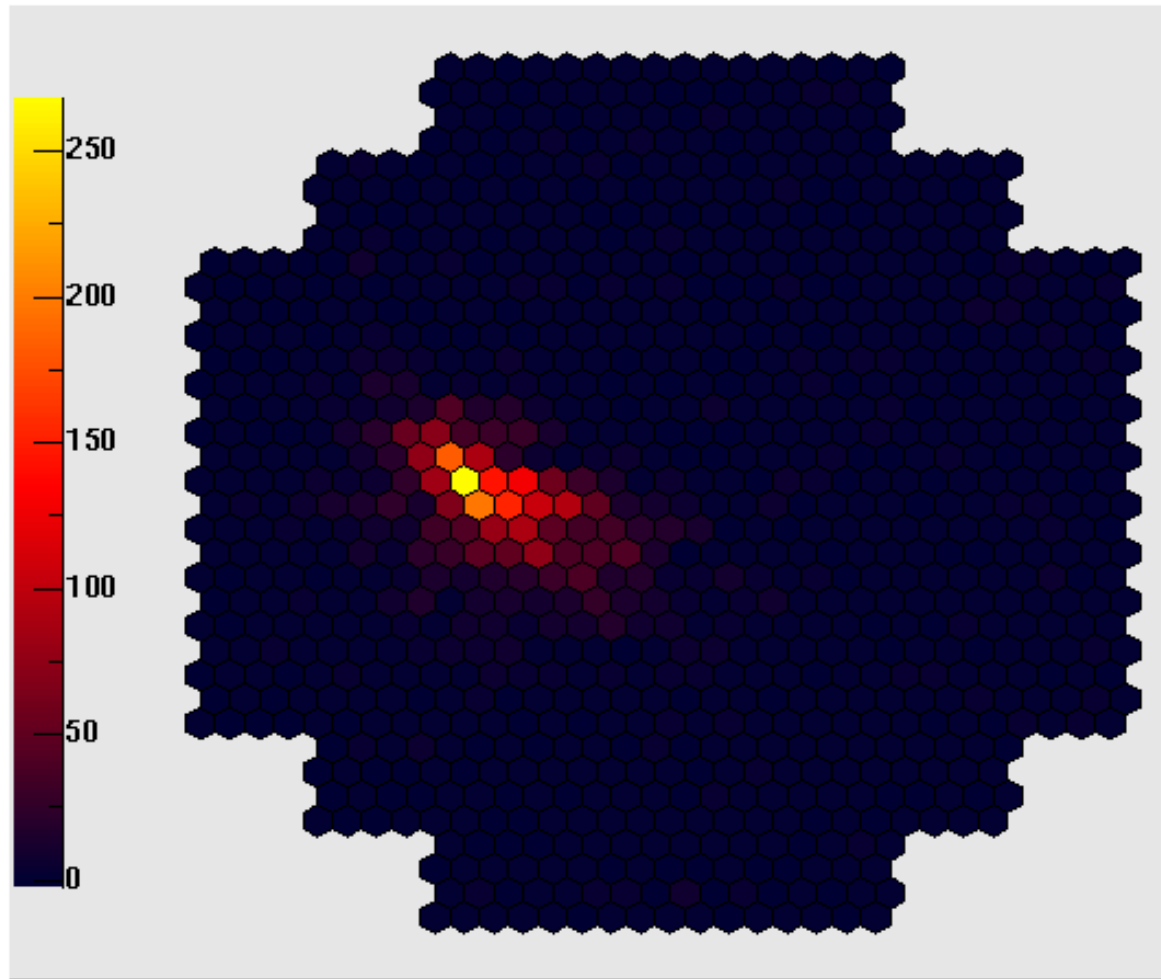


# Typique « douche » de particules



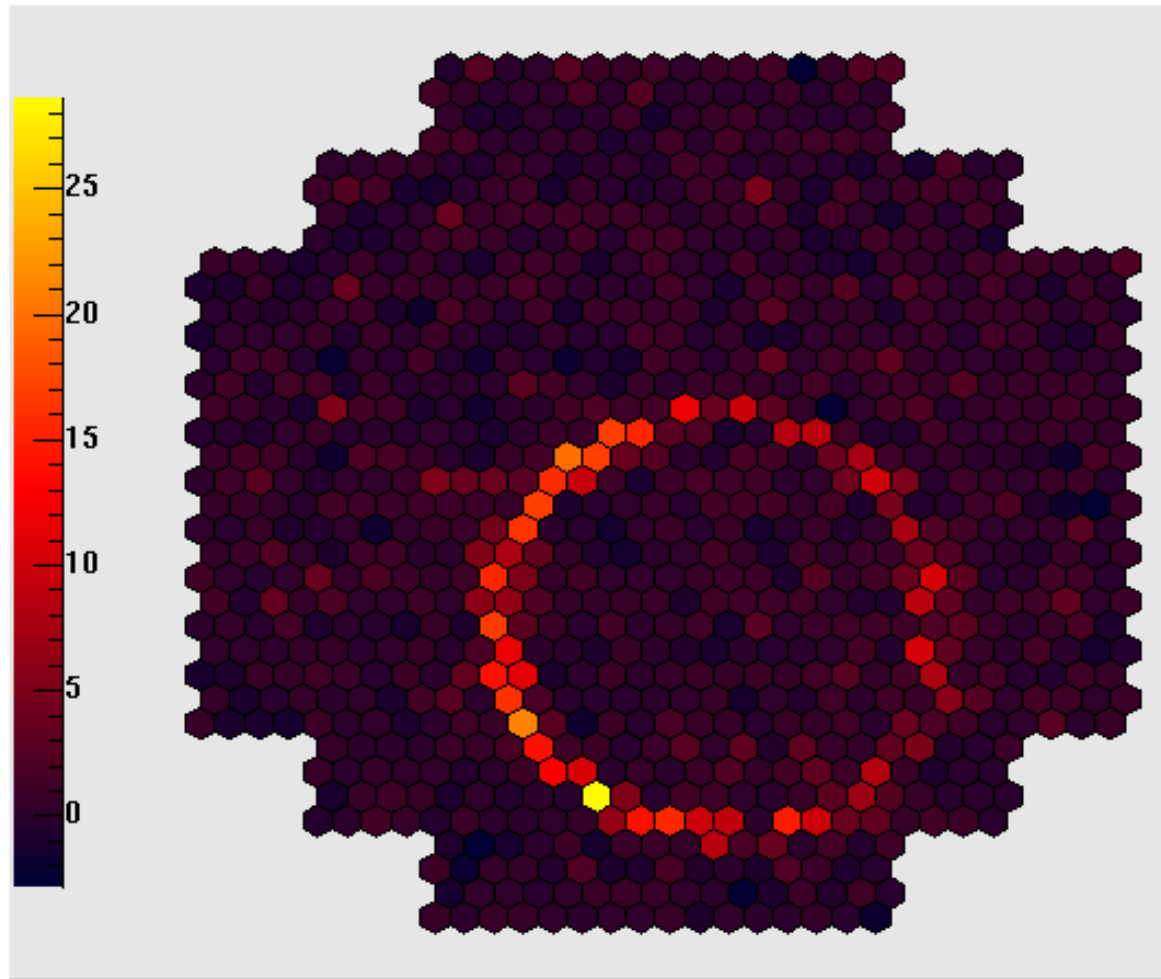
allongés = particules « focalisées »  
anneaux = particules provenant de l'atmosphère

# Typique « douche » de particules



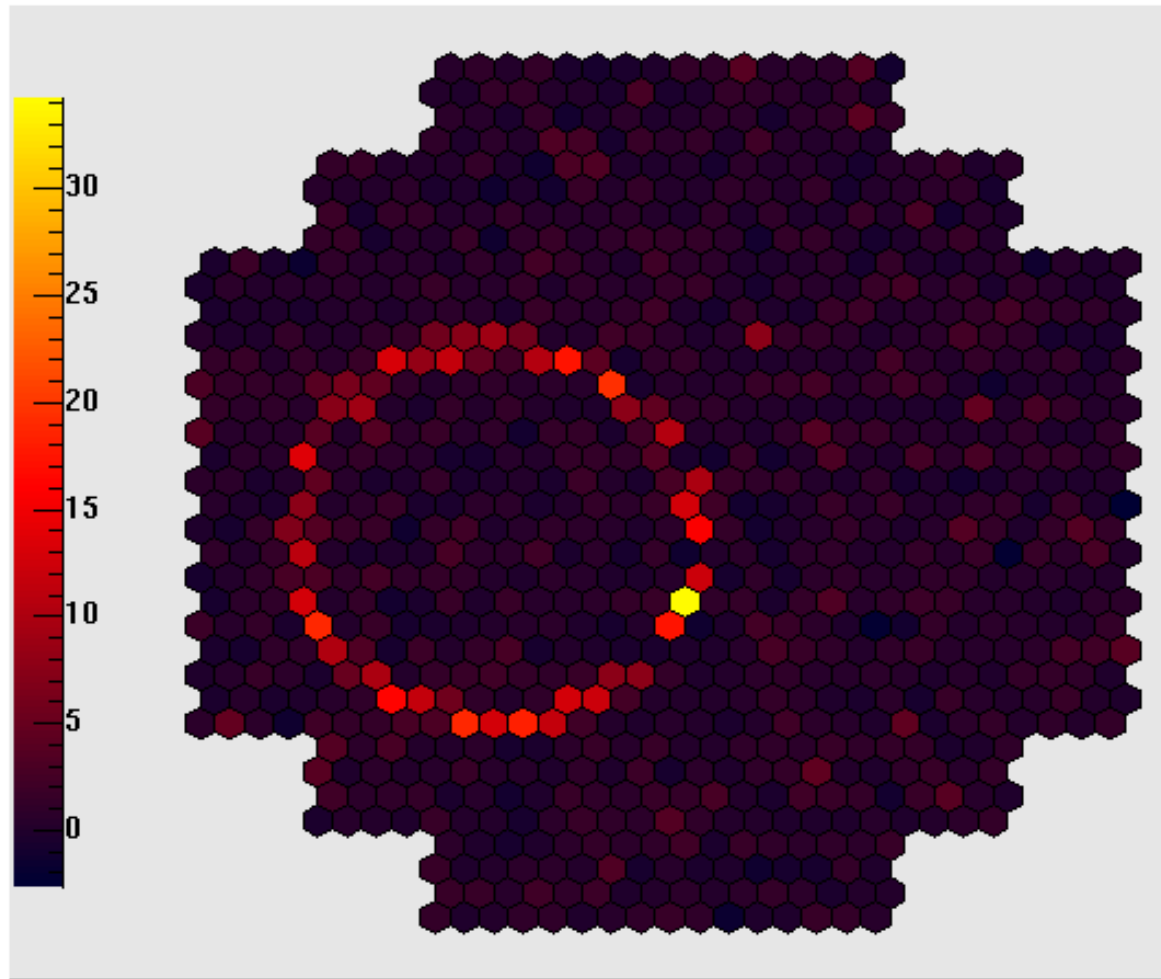
allongés = particules « focalisées »  
anneaux = particules provenant de l'atmosphère

# Typique « douche » de particules



allongés = particules « focalisées »  
anneaux = particules provenant de l'atmosphère

# Typique « douche » de particules



allongés = particules « focalisées »  
anneaux = particules provenant de l'atmosphère

