

Chapitre 4

(Fin de Rayonnement et matière)

Matière interstellaire et intergalactique

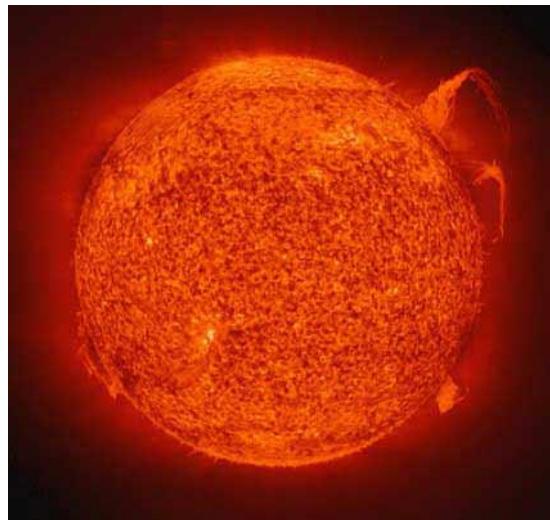
Quiz

- * 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

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

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

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

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

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-emettent à une autre fréquence (plus petite, car moins énergétique) - [Exemple poussières galactiques]

Rayonnement de « corps noir »

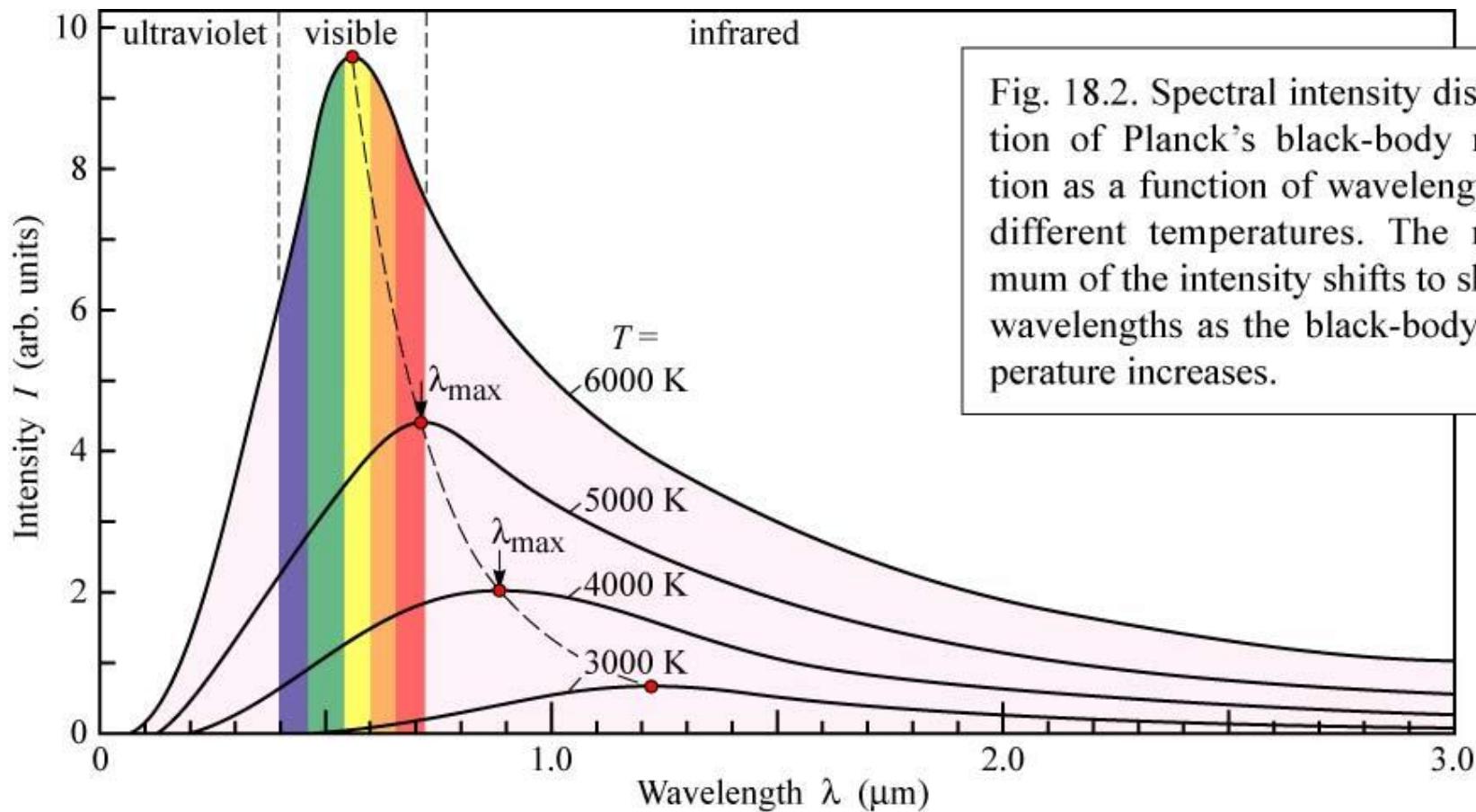
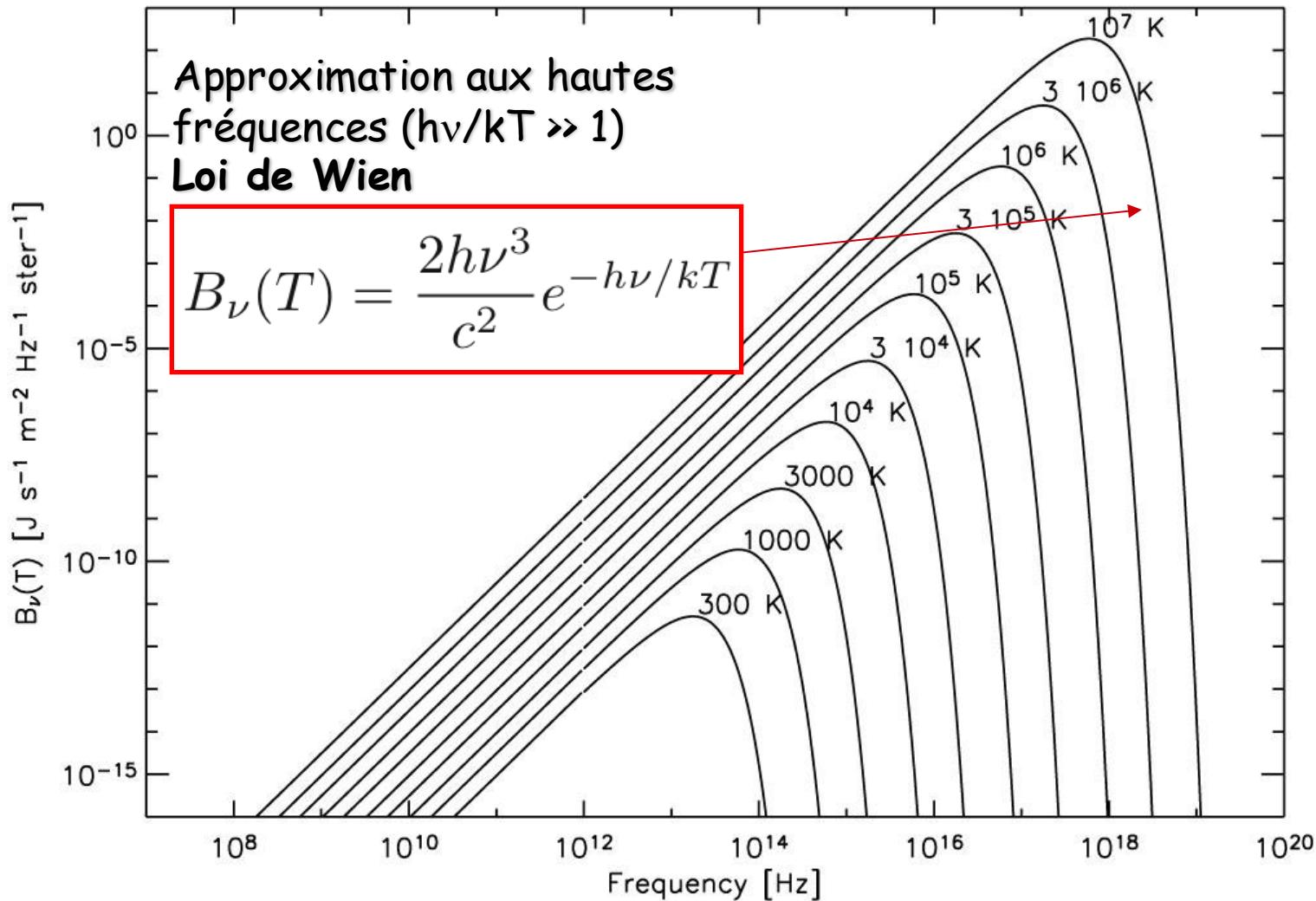


Fig. 18.2. Spectral intensity distribution of Planck's black-body radiation as a function of wavelength for different temperatures. The maximum of the intensity shifts to shorter wavelengths as the black-body temperature increases.

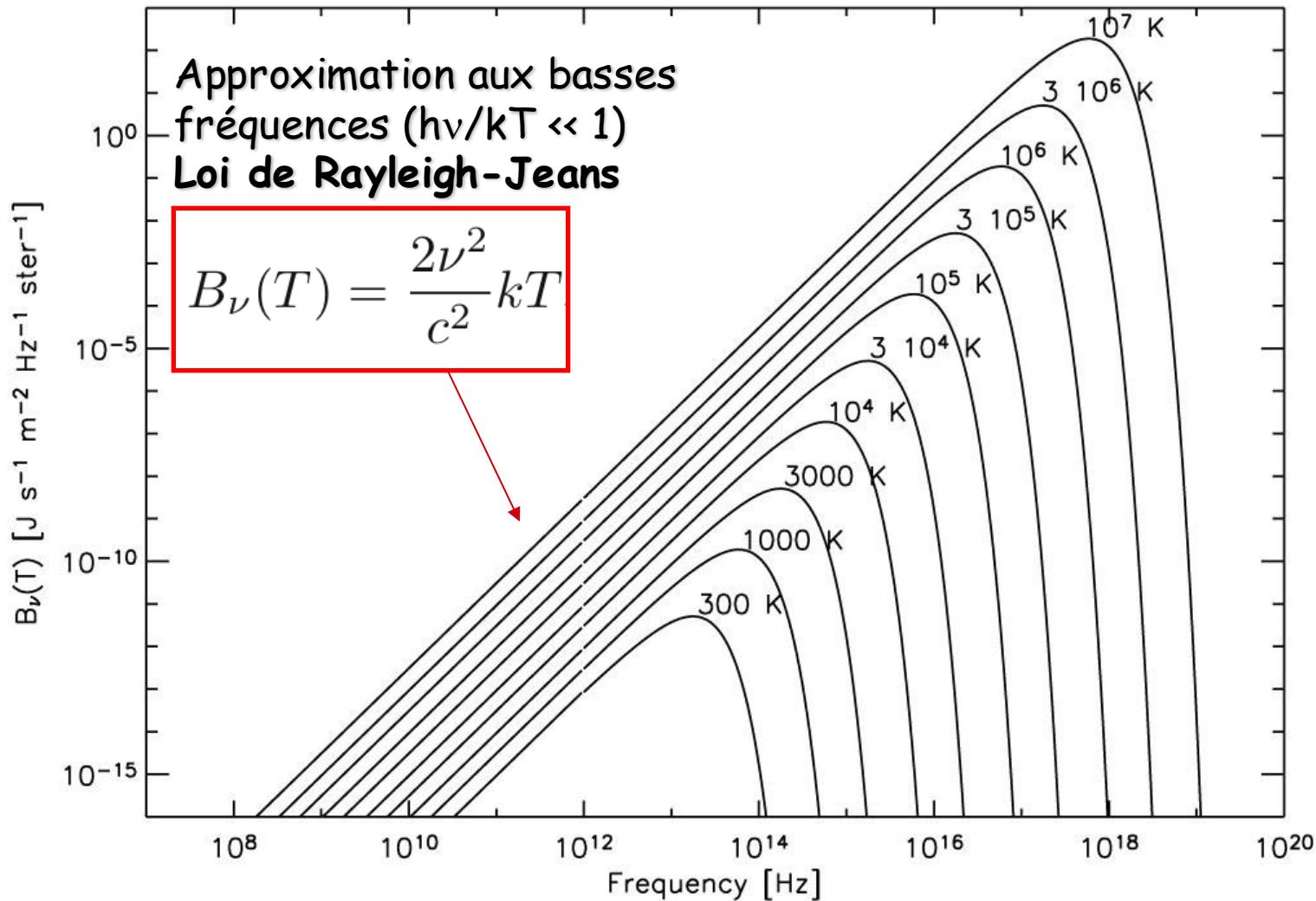
Position du maximum pour une température donnée
Loi de déplacement de Wien

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

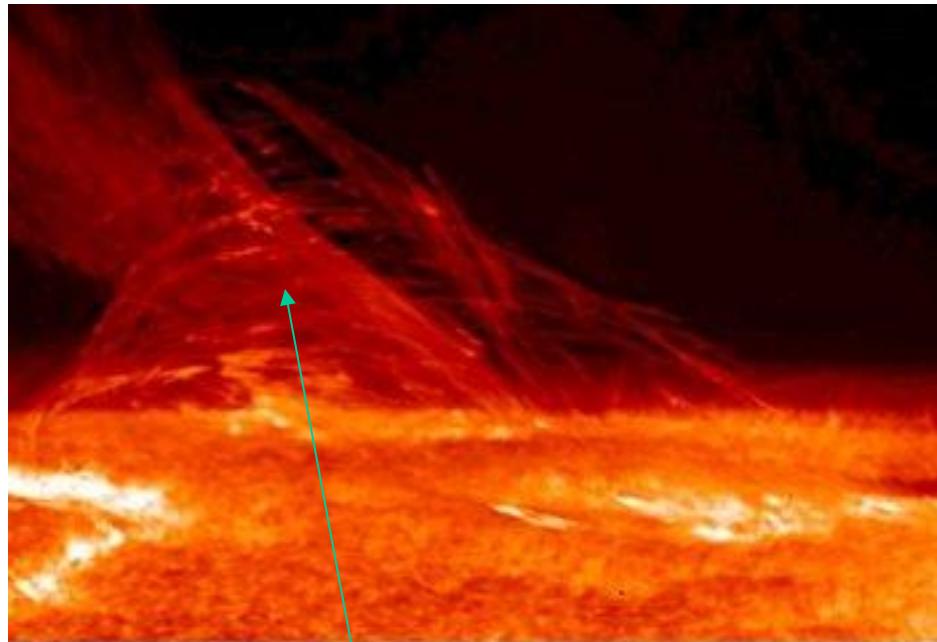
Rayonnement de « corps noir » (échelle log-log)



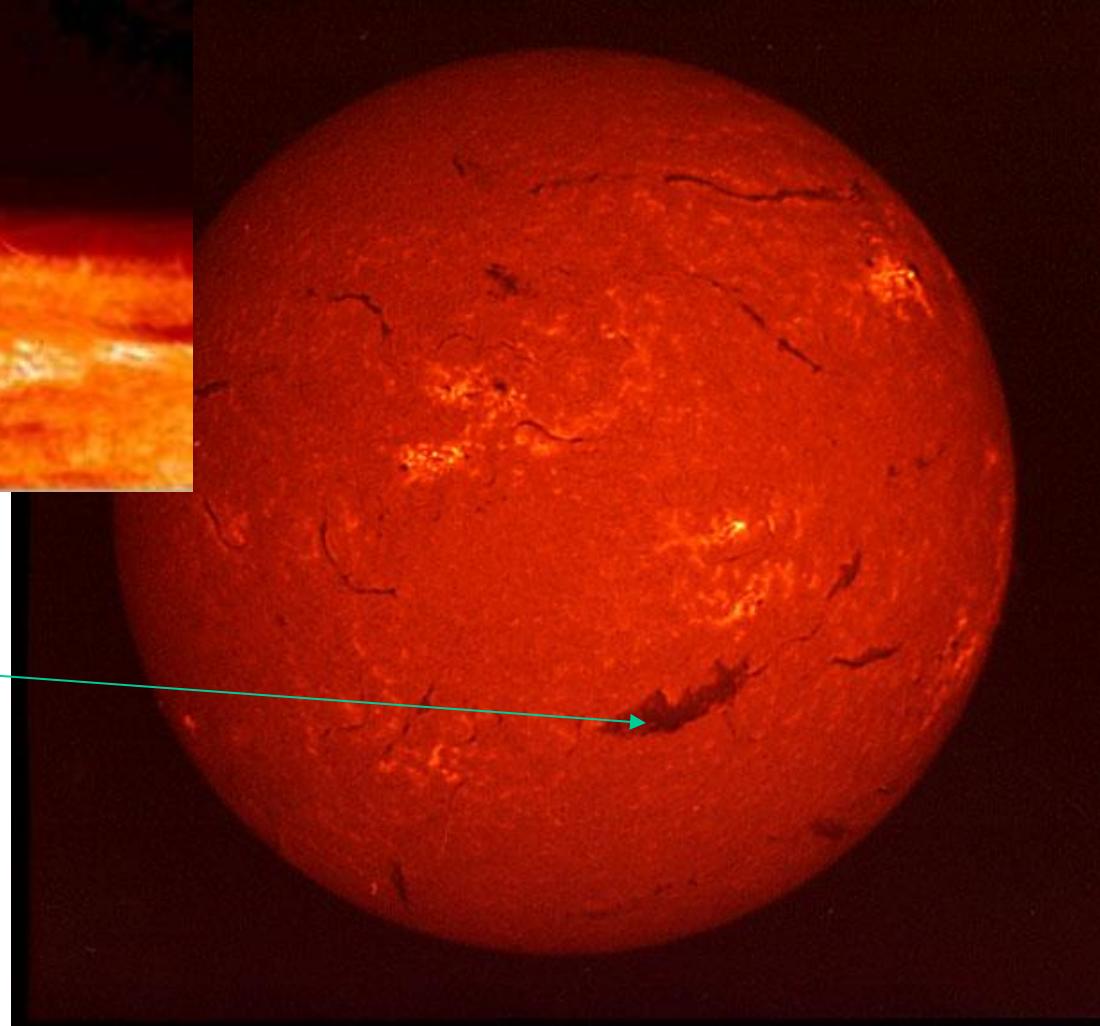
Rayonnement de « corps noir » (échelle log-log)



Le Soleil



Gaz absorbant dans
l'atmosphère solaire

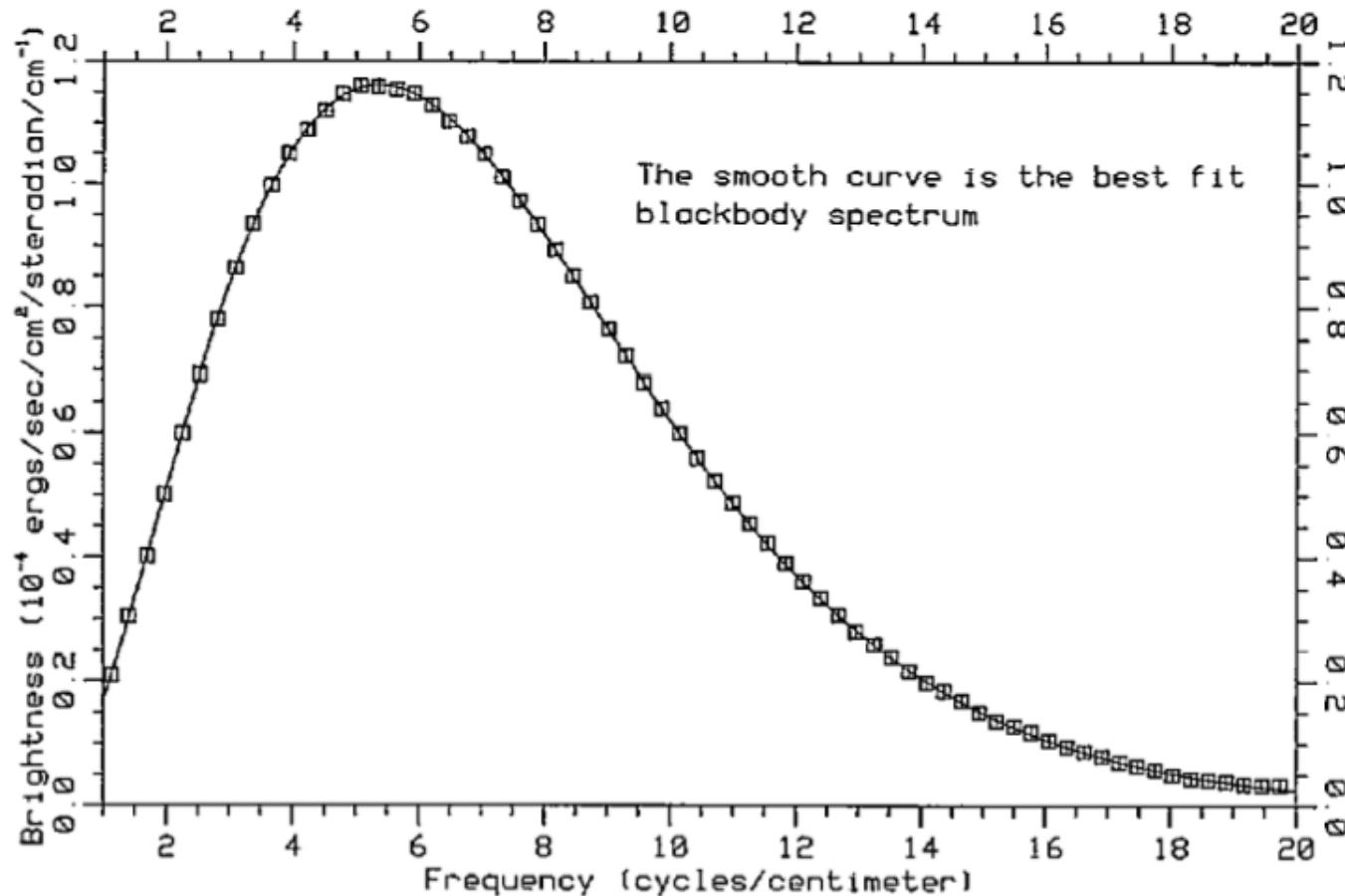




Les étoiles en général



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



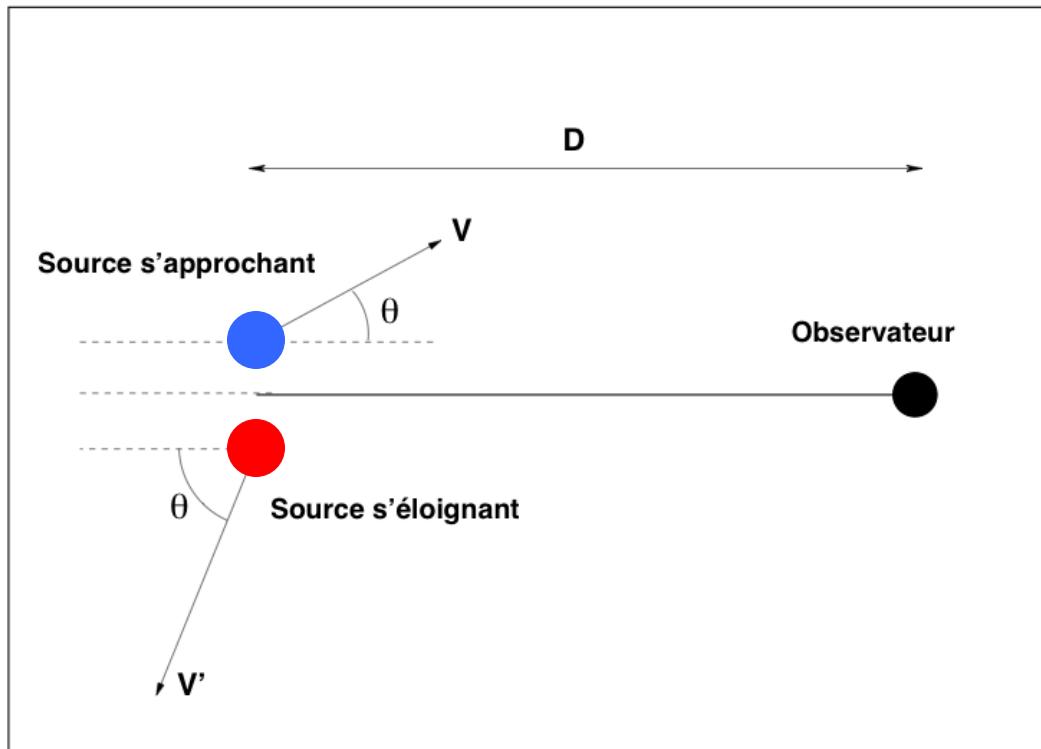
Accord parfait entre la théorie et l'expérience ! ($T=2.735\text{ K}$)

Rayonnement émis 380'000 ans après le Big-Bang

Effet Doppler-Fizeau

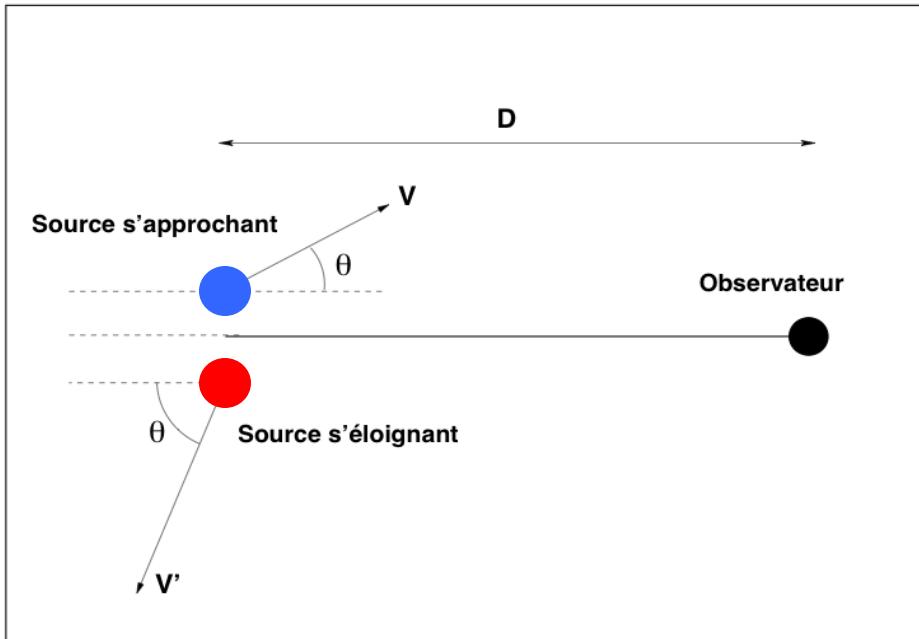
L'effet Doppler-Fizeau consiste en un changement apparent de la longueur d'onde d'un signal émis depuis un corps en mouvement.

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

Longueur d'onde
« au repos »

$$\frac{l - l_0}{l_0} = \frac{V \cos \theta}{c}$$

On pose souvent $\beta = V/c$

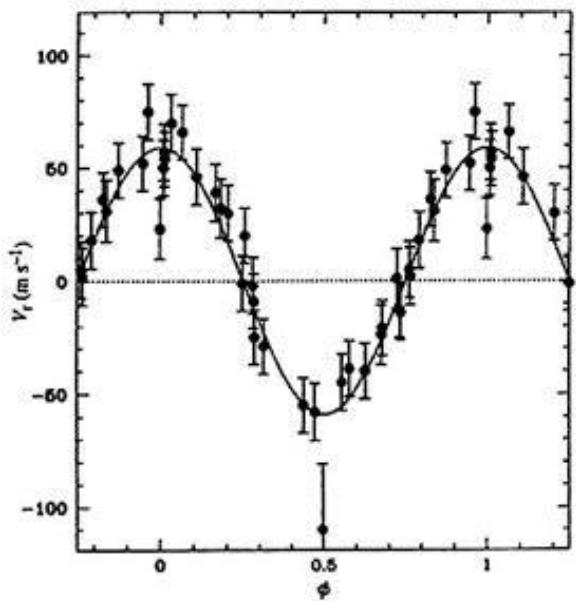
Les planètes extra-solaires ou « exoplanètes »

Planètes extra-solaires

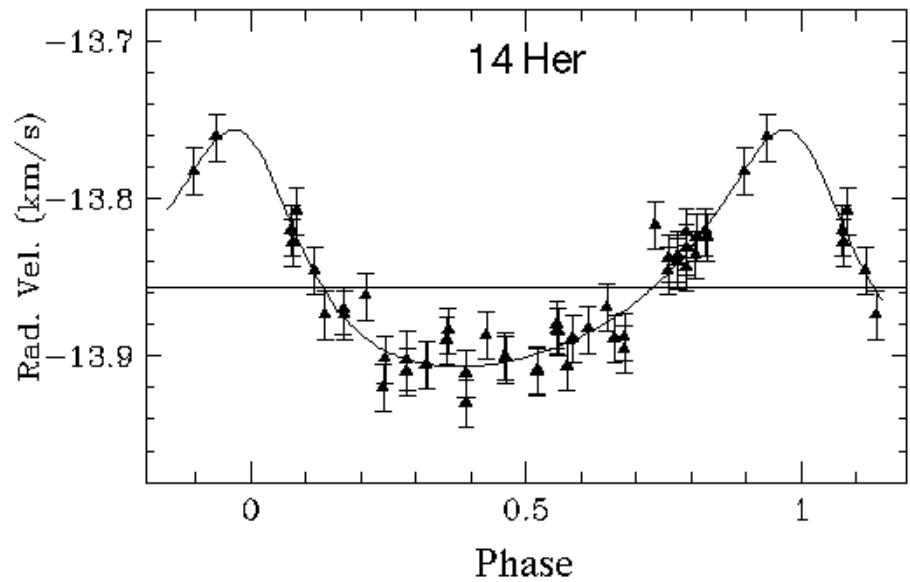
- Découverte de la première en 1995 par une équipe Suisse (Michel Mayor, Didier Queloz) ~4000 exoplanètes à ce jour.
- Détection par vitesse radiale
- Détection des premiers « transits » en 2003
- Suivi spectroscopique -> détection indirecte de l'atmosphère
- Détermination des masses (mais dégénérescence 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

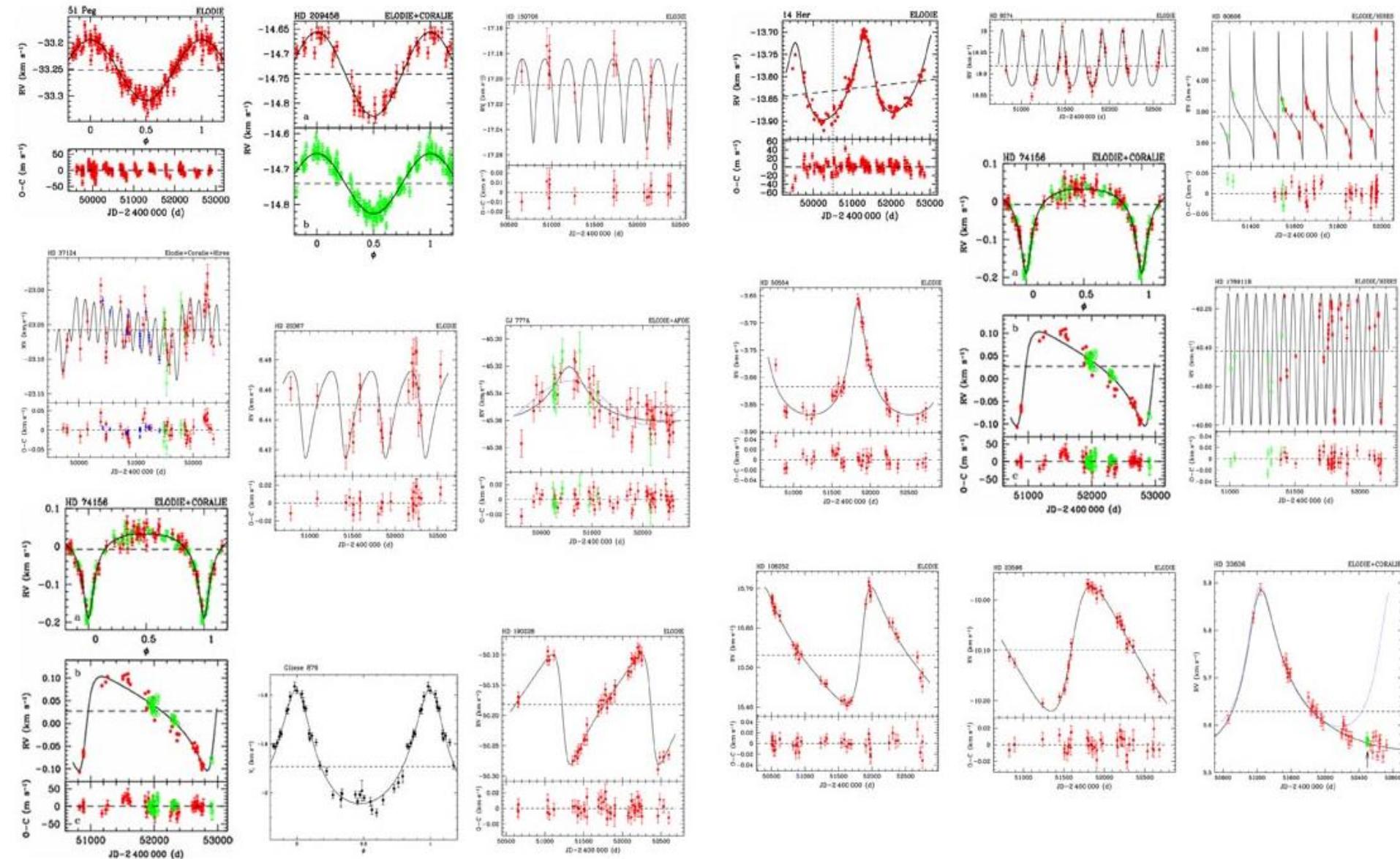


51 Peg à 48 al
0,47 × masse Jupiter



14 Her
3,3 × masse Jupiter

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

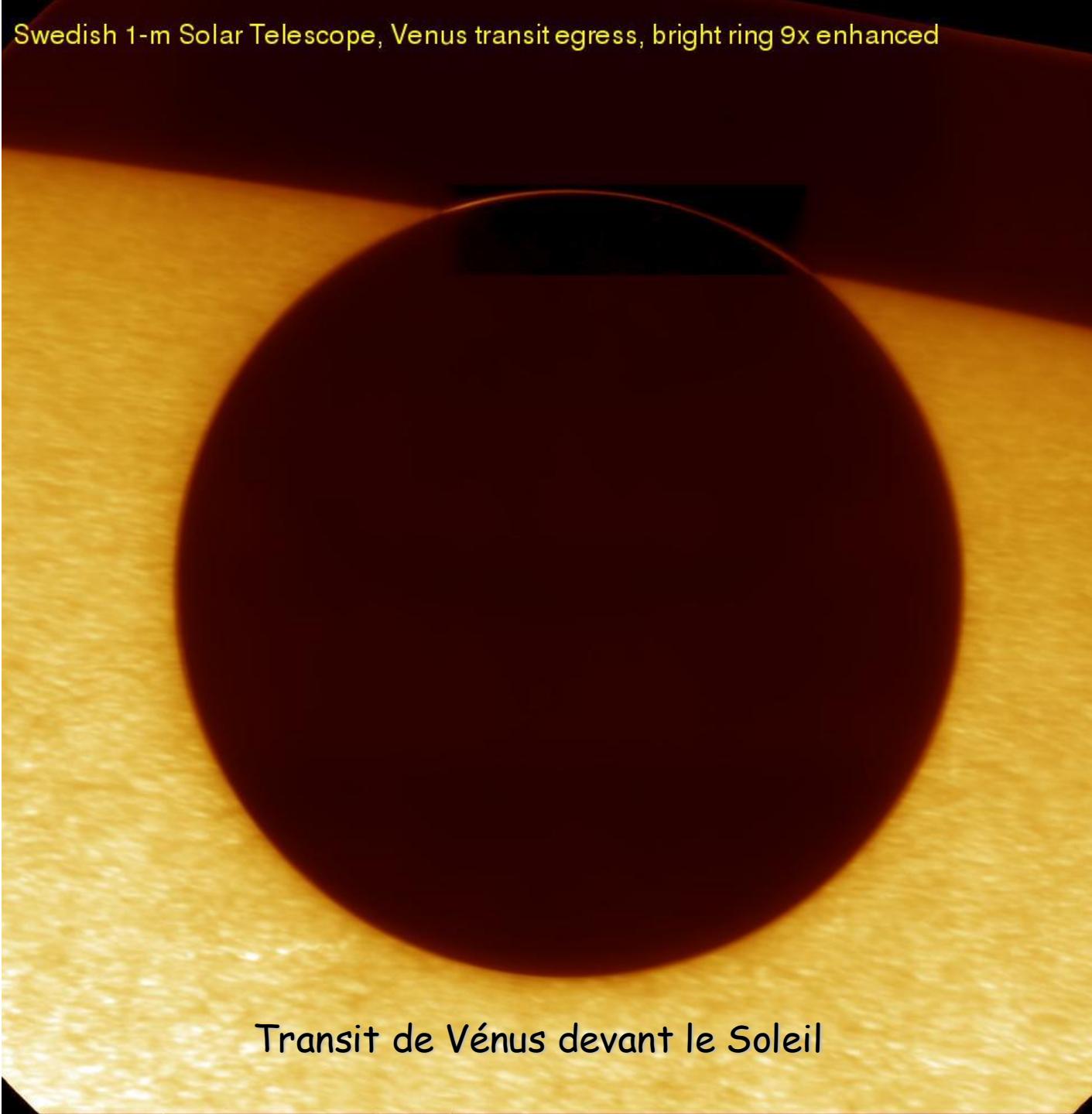


Planètes extra-solaires

Exemple du transit de Vénus devant le Soleil

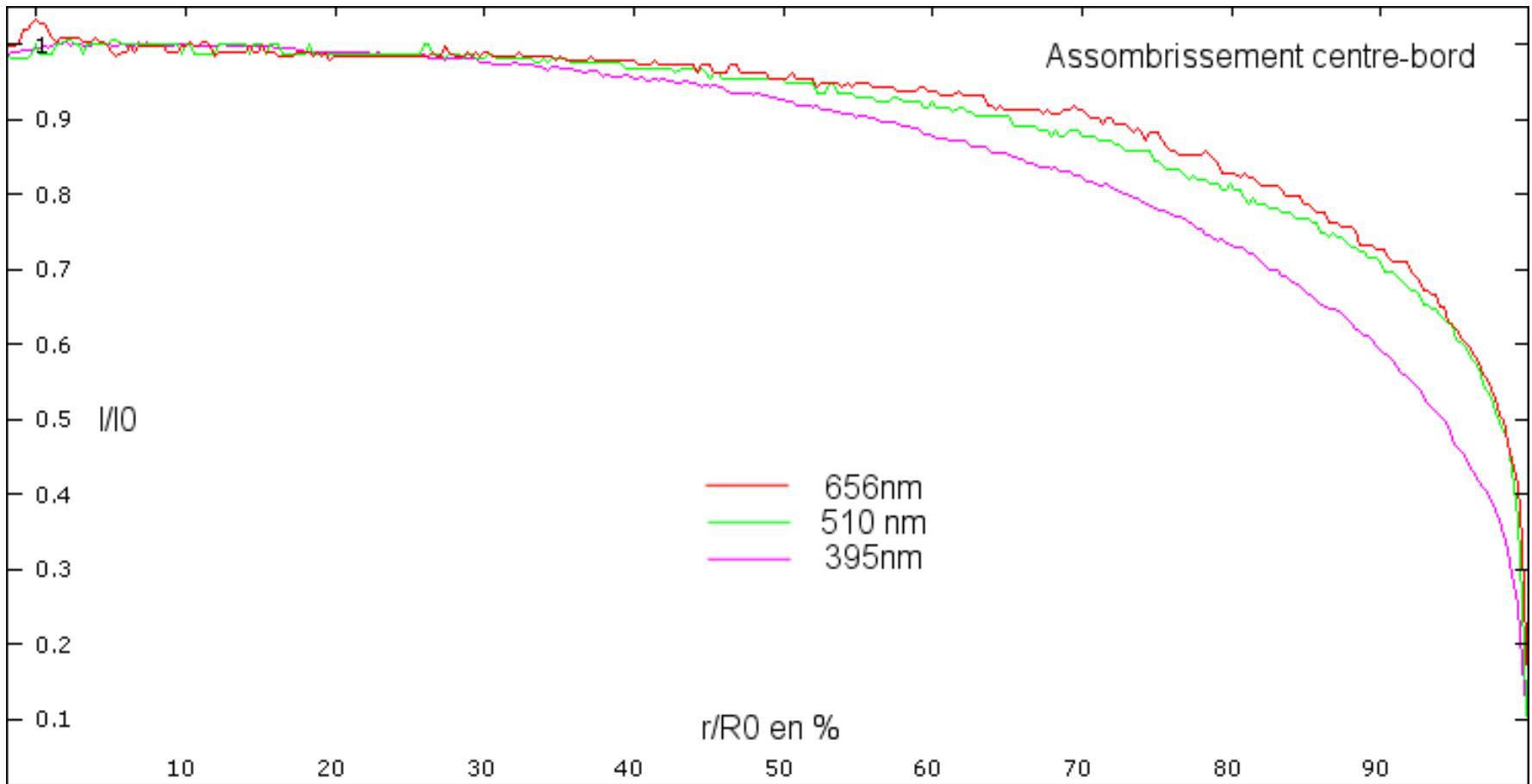


Swedish 1-m Solar Telescope, Venus transit egress, bright ring 9x enhanced



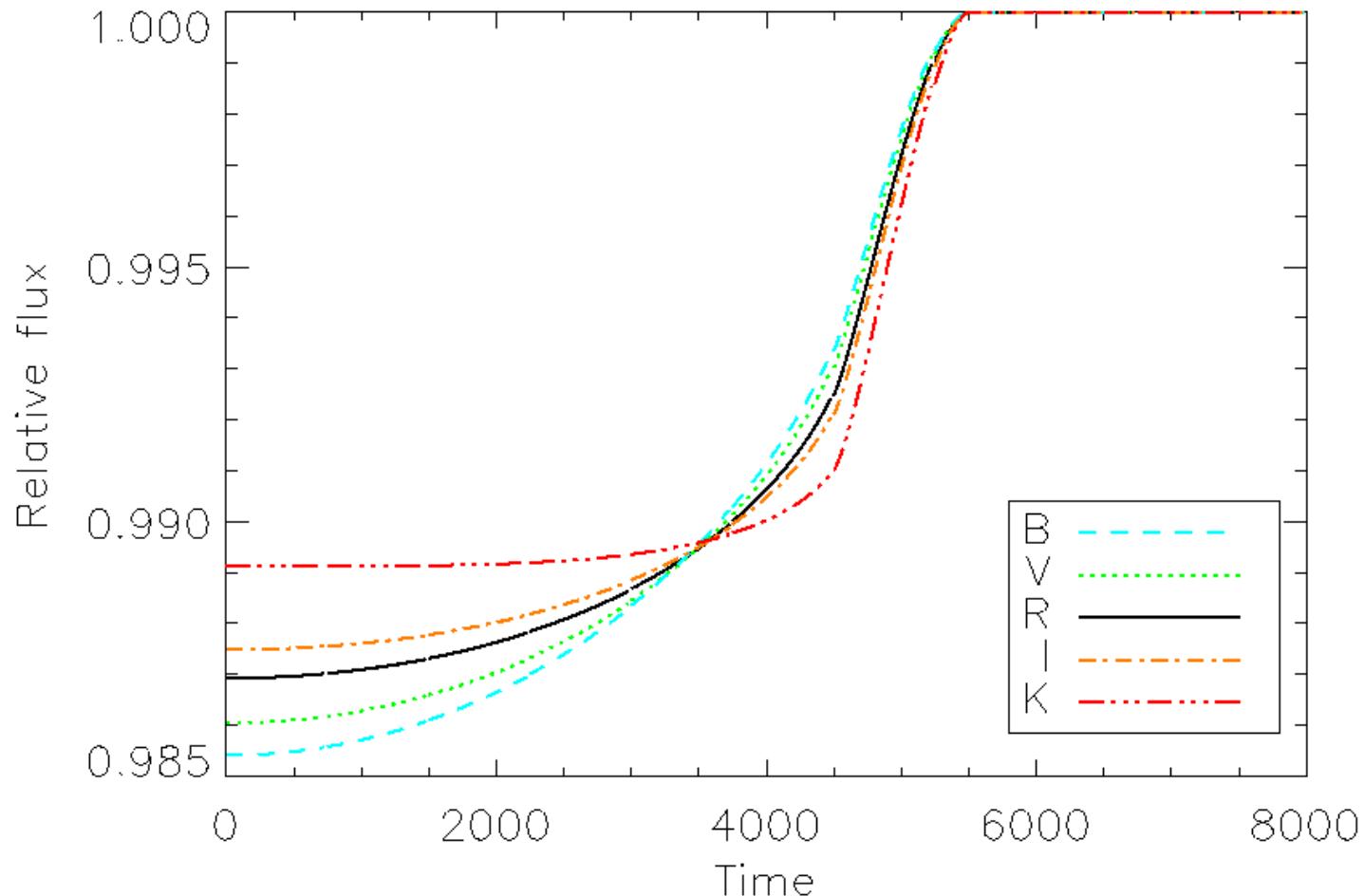
Transit de Vénus devant le Soleil

Planètes extra-solaires



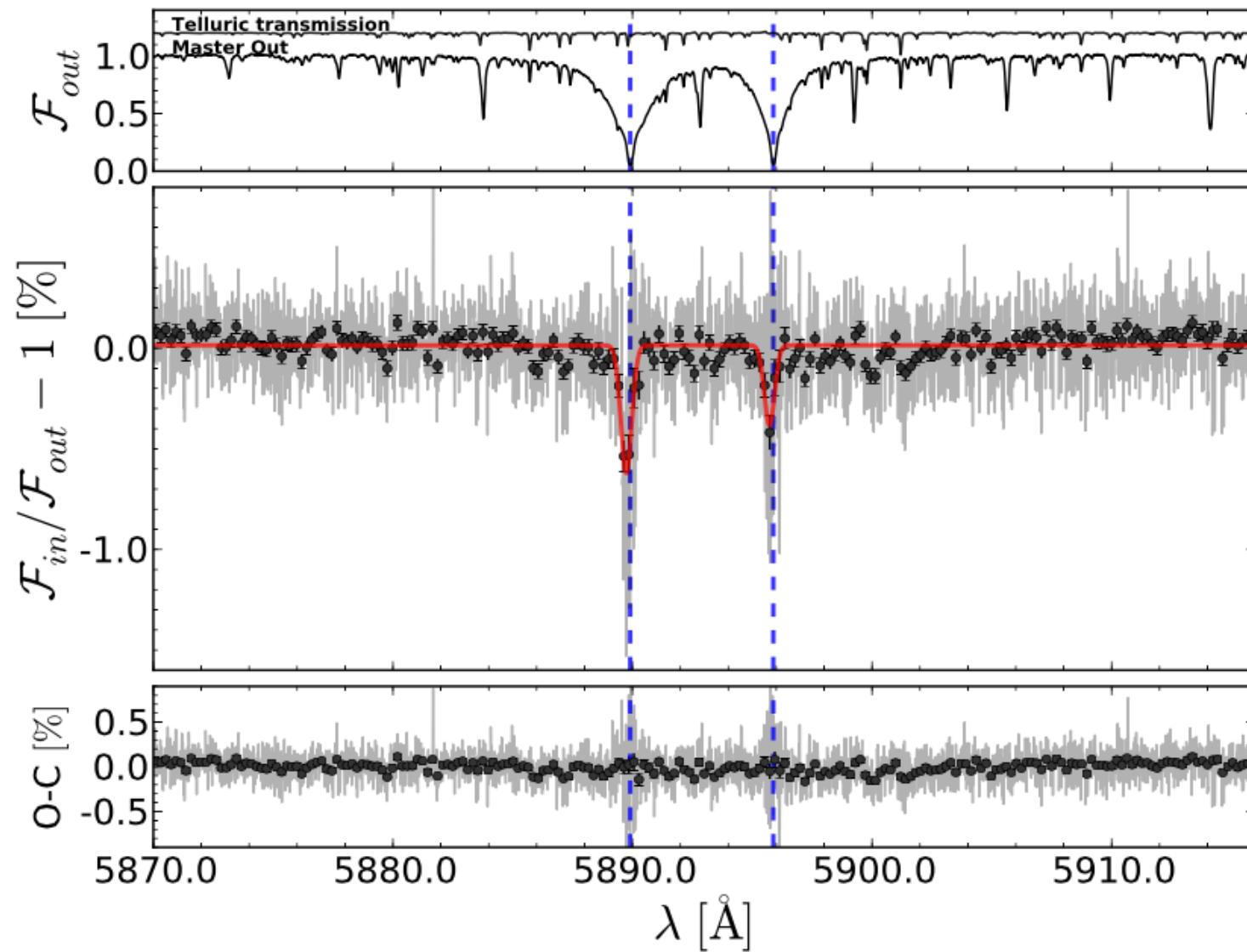
Absorption plus forte dans le bleu (profondeur optique moins grande)

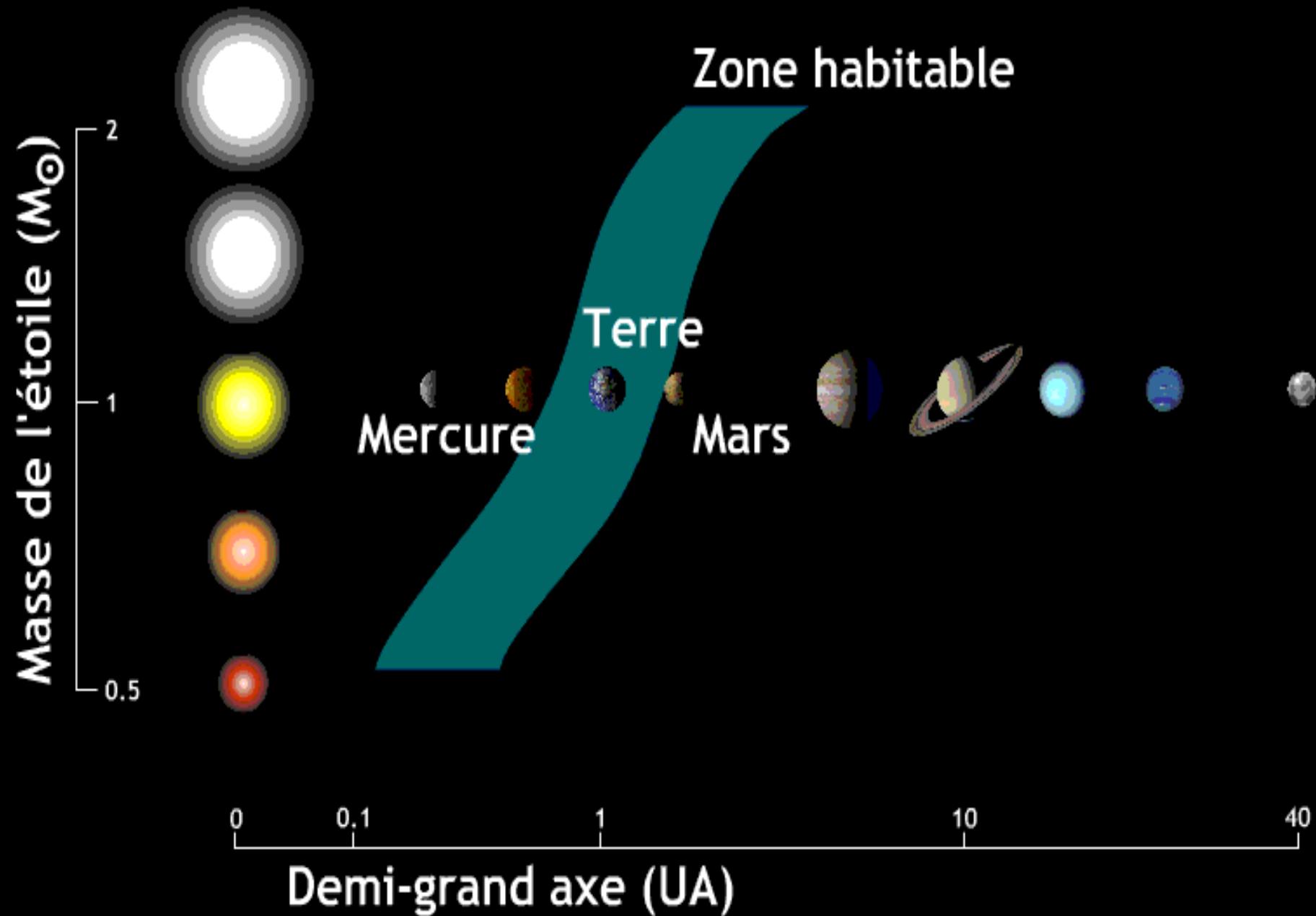
Planètes extra-solaires



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

Atmosphère planétaire vue « en absorption »

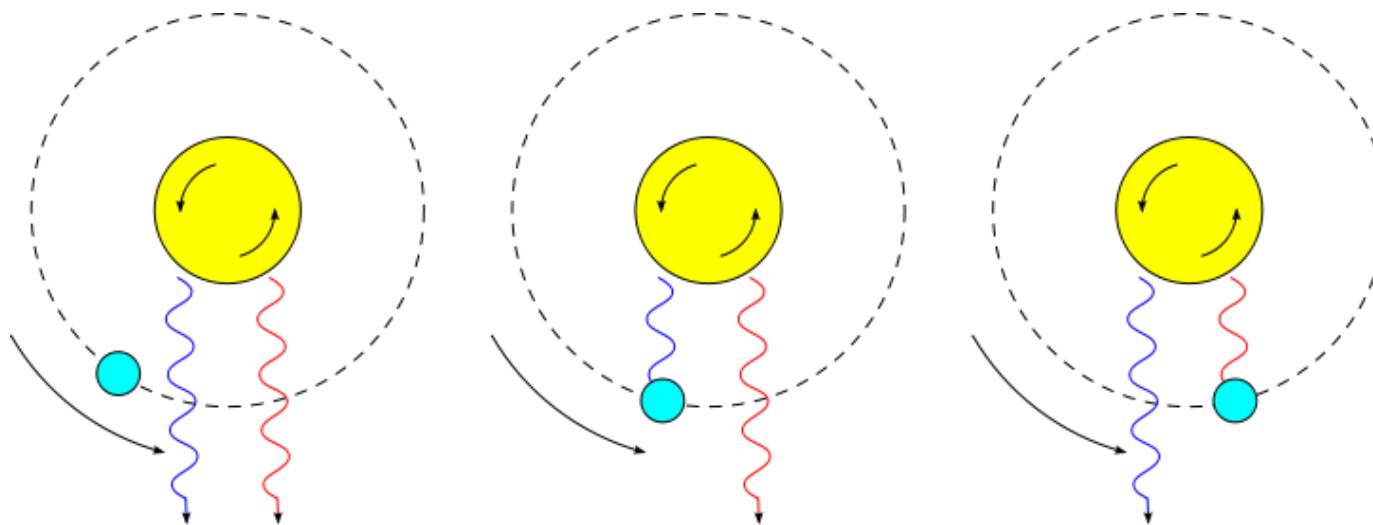




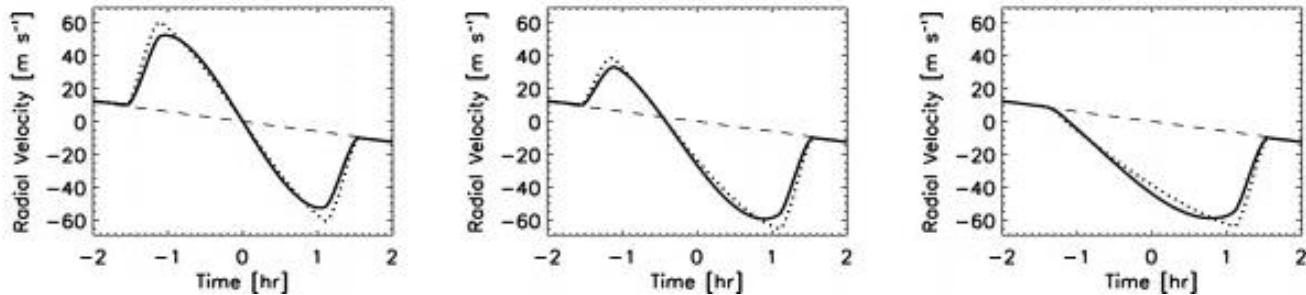
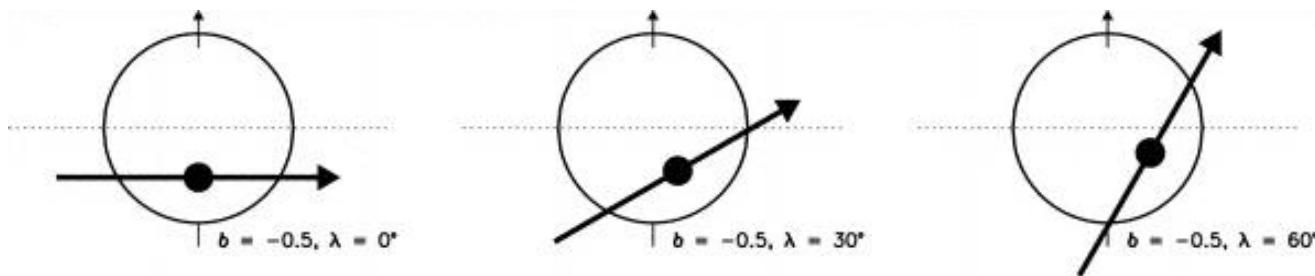
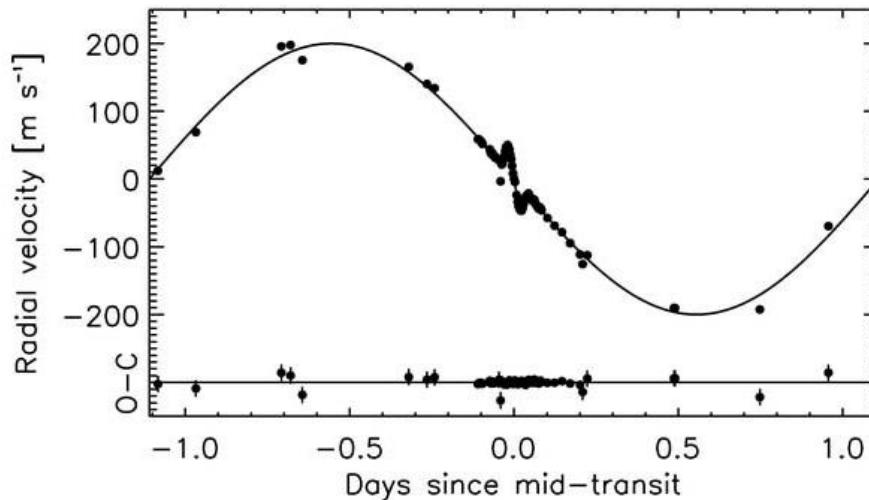
Orbite rétrograde de 6 planètes en « transit » (Avril 2010)

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

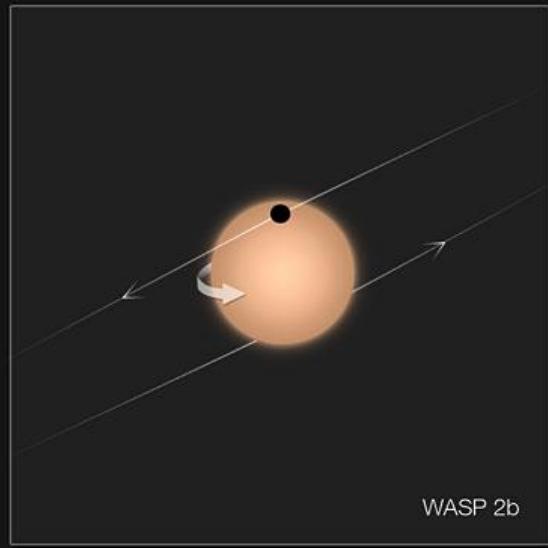
Observation de l'**effet Rossiter-McLaughlin** pendant le transit de la planète devant son étoile mère



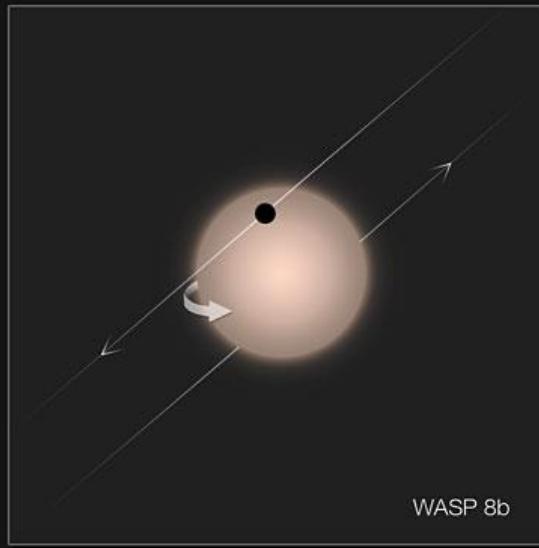
Effet Rossiter-McLaughlin pendant un transit



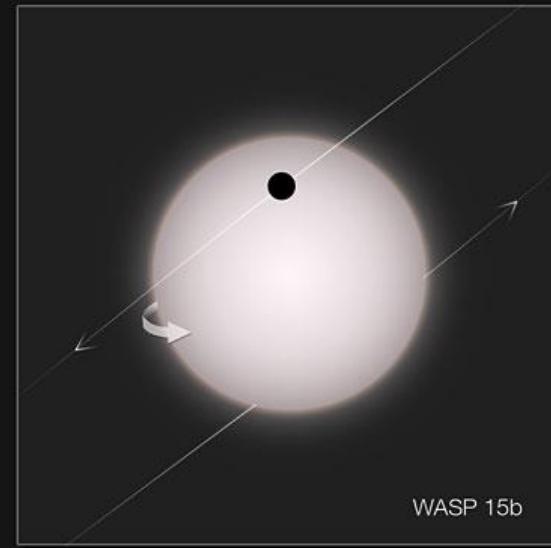
Orbite de 6 planètes en « transit » (Avril 2010)



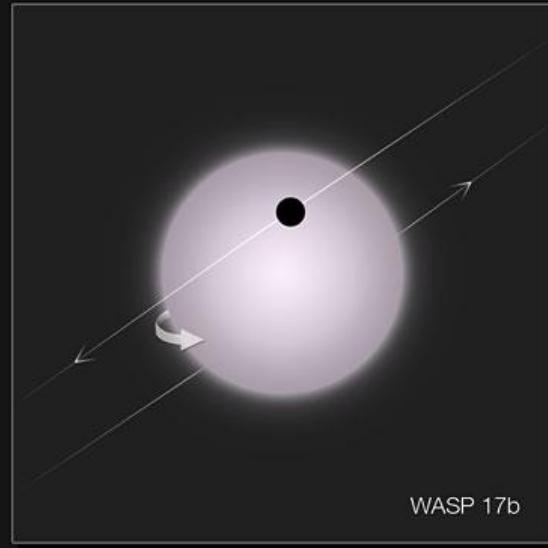
WASP 2b



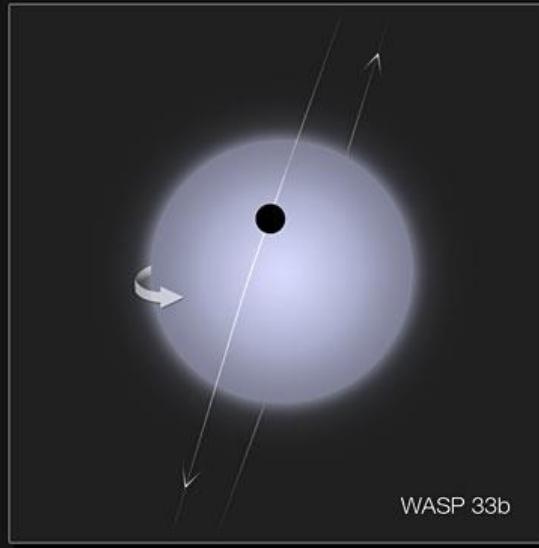
WASP 8b



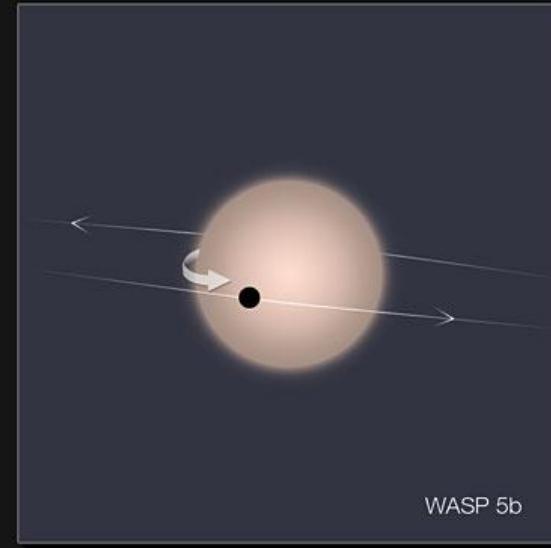
WASP 15b



WASP 17b



WASP 33b

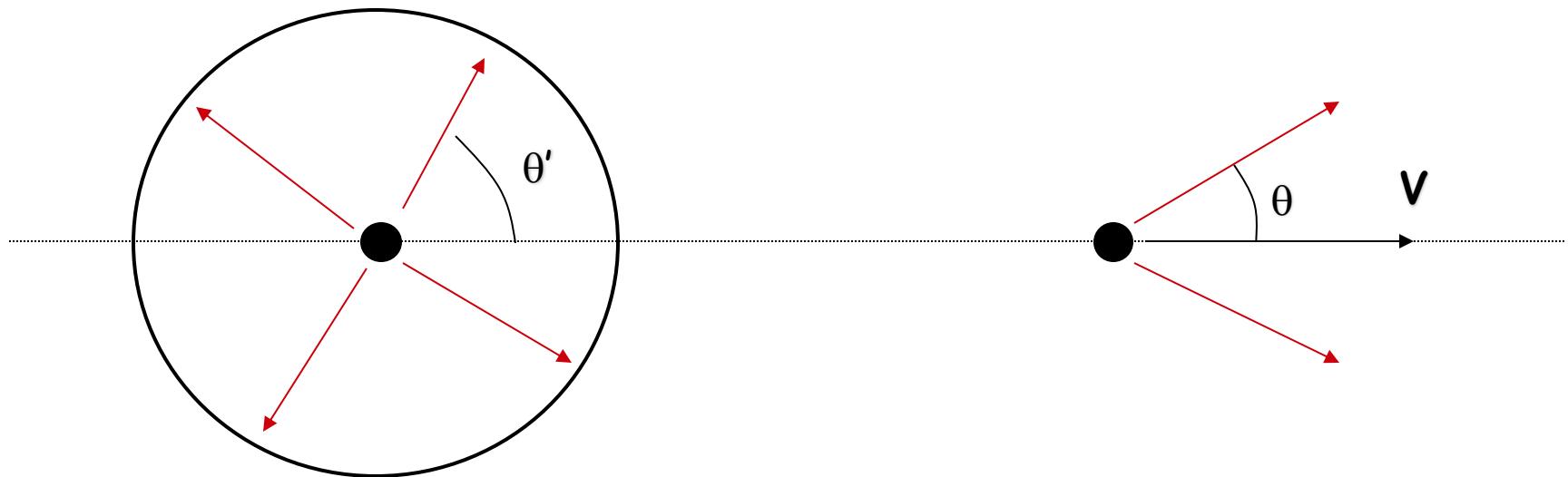


WASP 5b

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

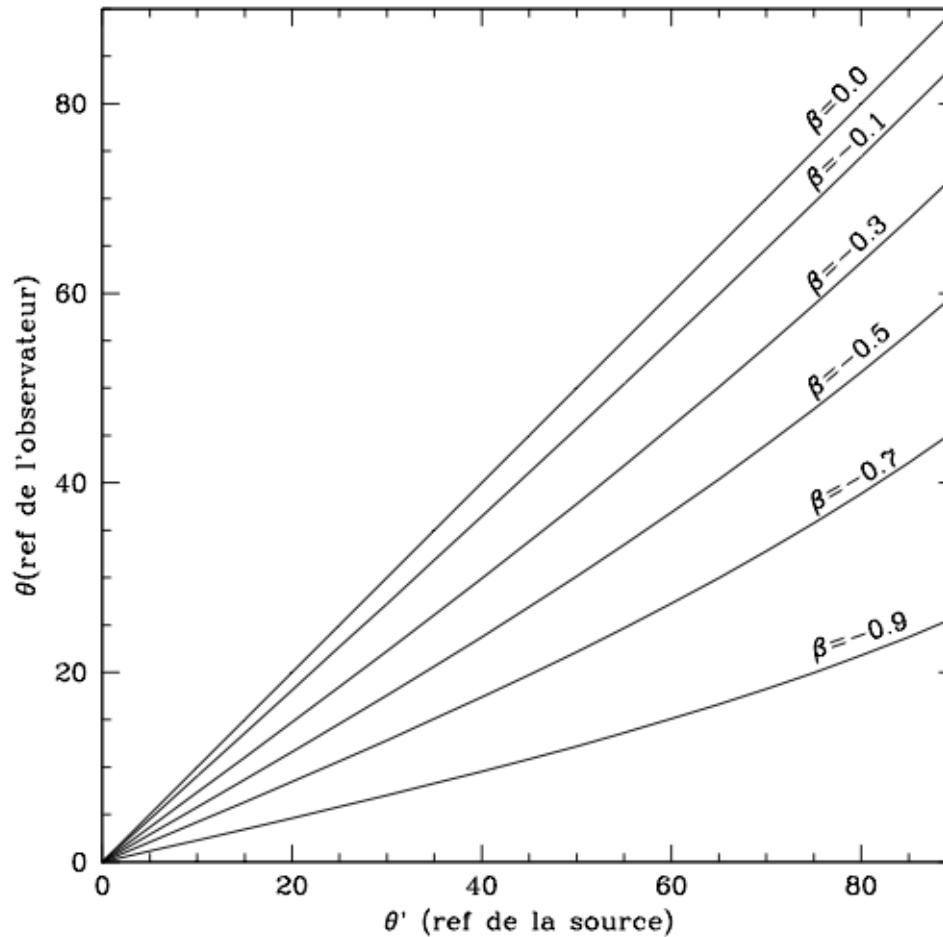


Source fixe:
rayonnement **isotrope**

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

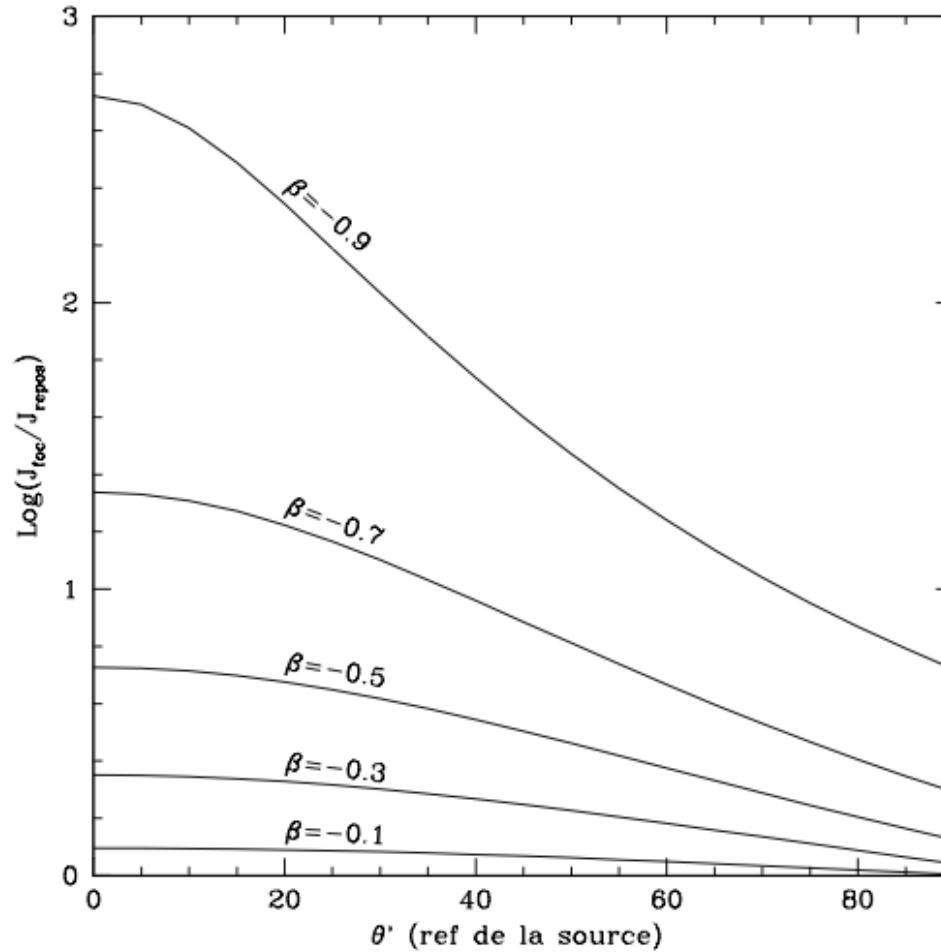
Focalisation relativiste

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

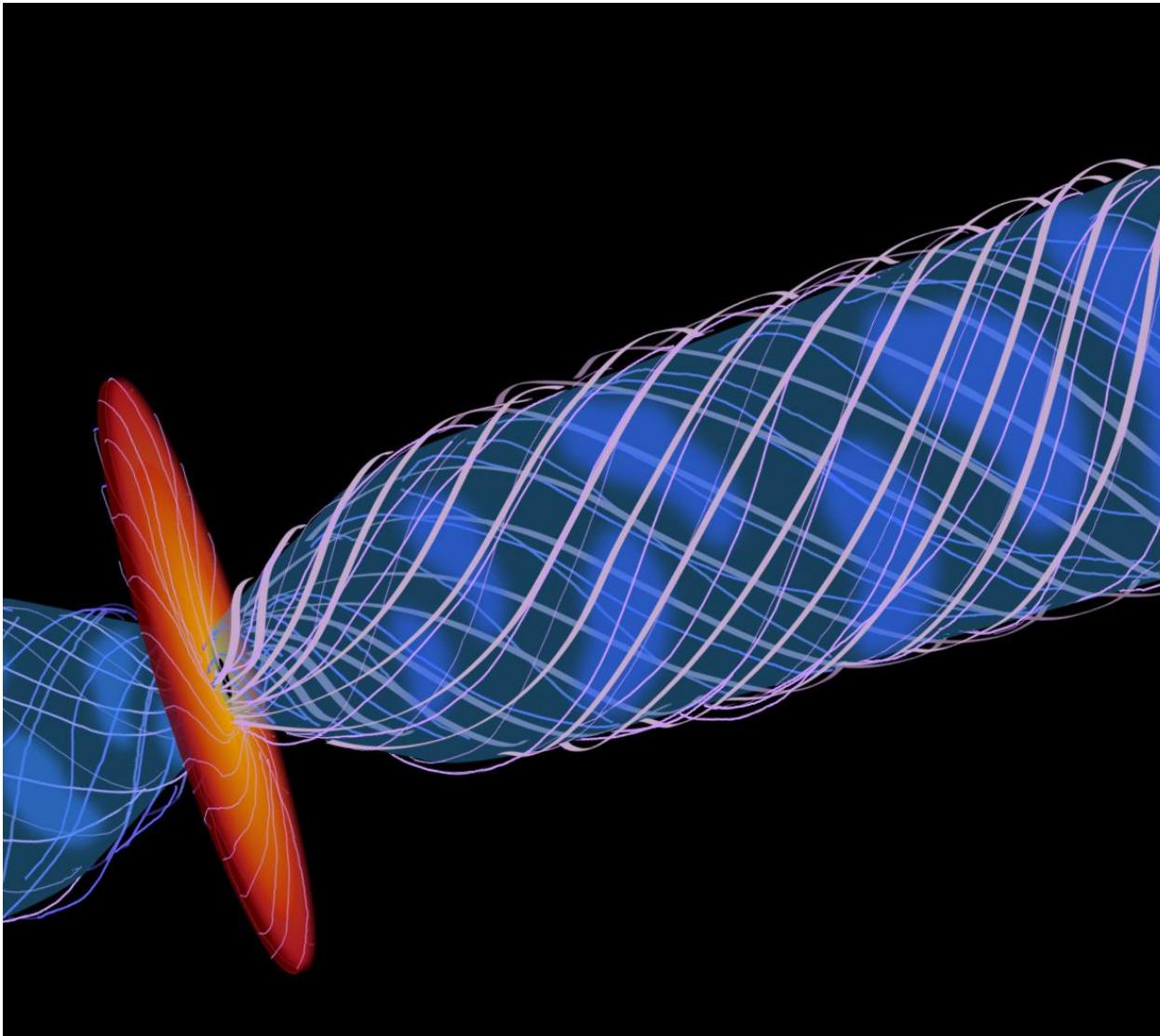


Focalisation relativiste

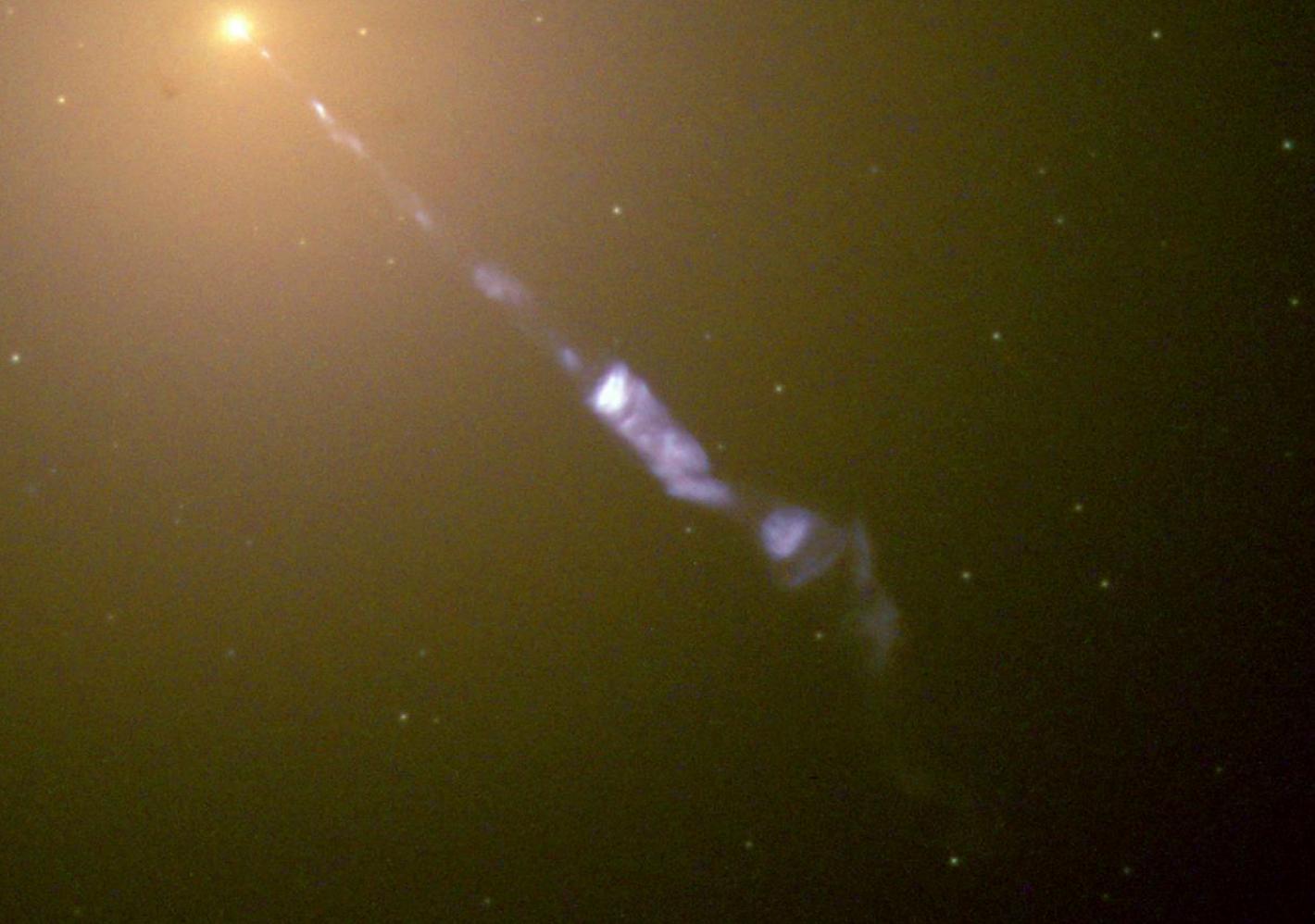
Amplification lumineuse **apparente** avec la vitesse.



Effets sur les « jets »

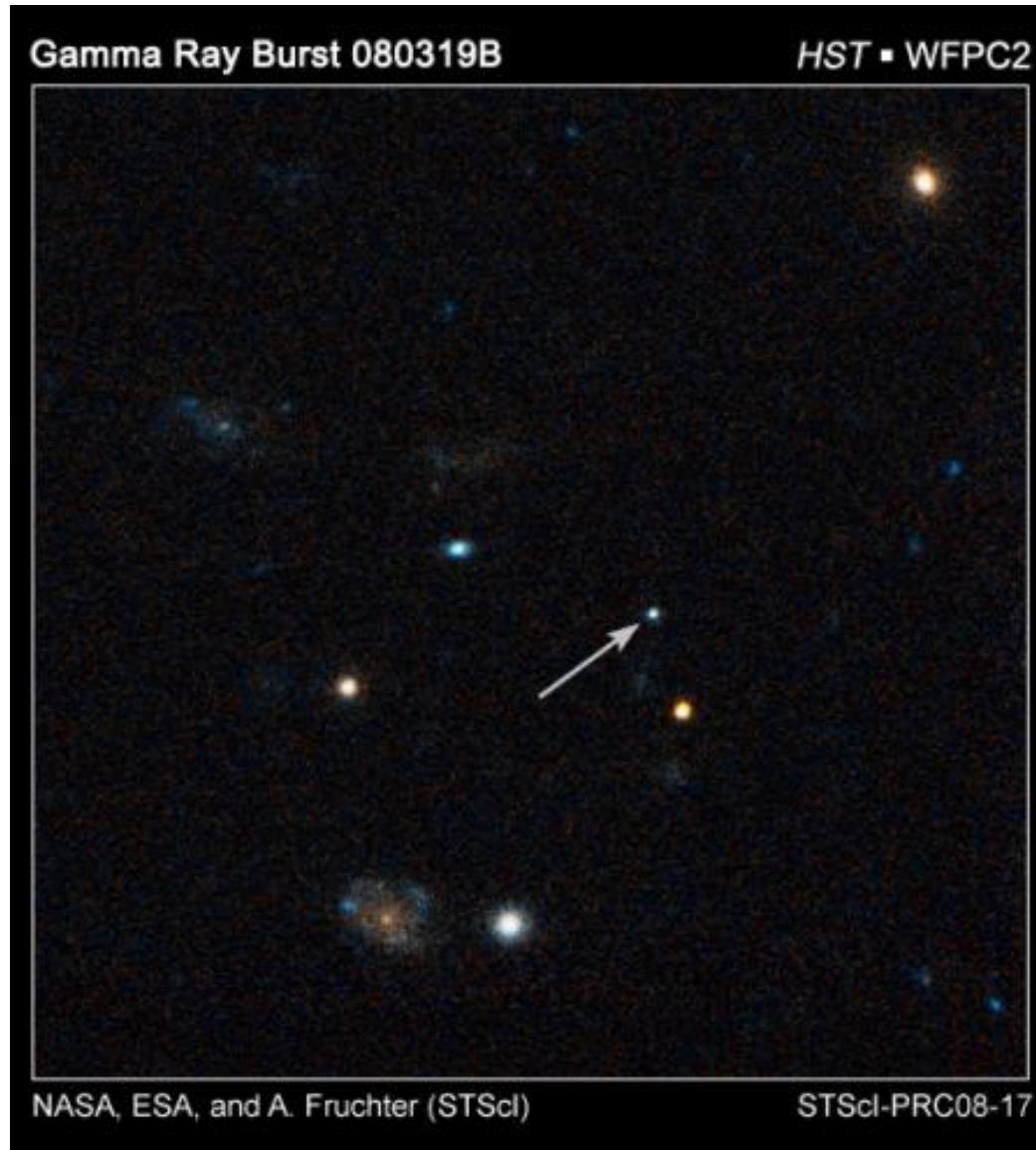


Jet au centre de la galaxie Messier 87 (M87)



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 cm^{-3} ou $10^{-21} \text{ kg.m}^{-3}$
- Densité typique d'un nuage de poussières: 10^{-13} cm^{-3} ou $10^{-23} \text{ kg.m}^{-3}$
- Températures des gaz: quelques K à 10^6 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



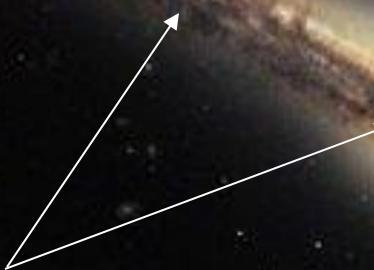
Etoile « centrale »

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: $F_{\text{ion}} = F_{\text{recomb}}$

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

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

```
graph TD; Eq[N = (4/3)*rho*R^3*alpha*n_e*n_H]; P[Photons ionisants (s^-1)] --> Eq; C[Constante donnée par la  
mécanique quantique  
(~ 3 x 10^-13 cm^3 s^-1)] --> Eq; D[Densités d'électrons  
et de protons] --> Eq;
```

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 $E > 13,6 \text{ eV}$

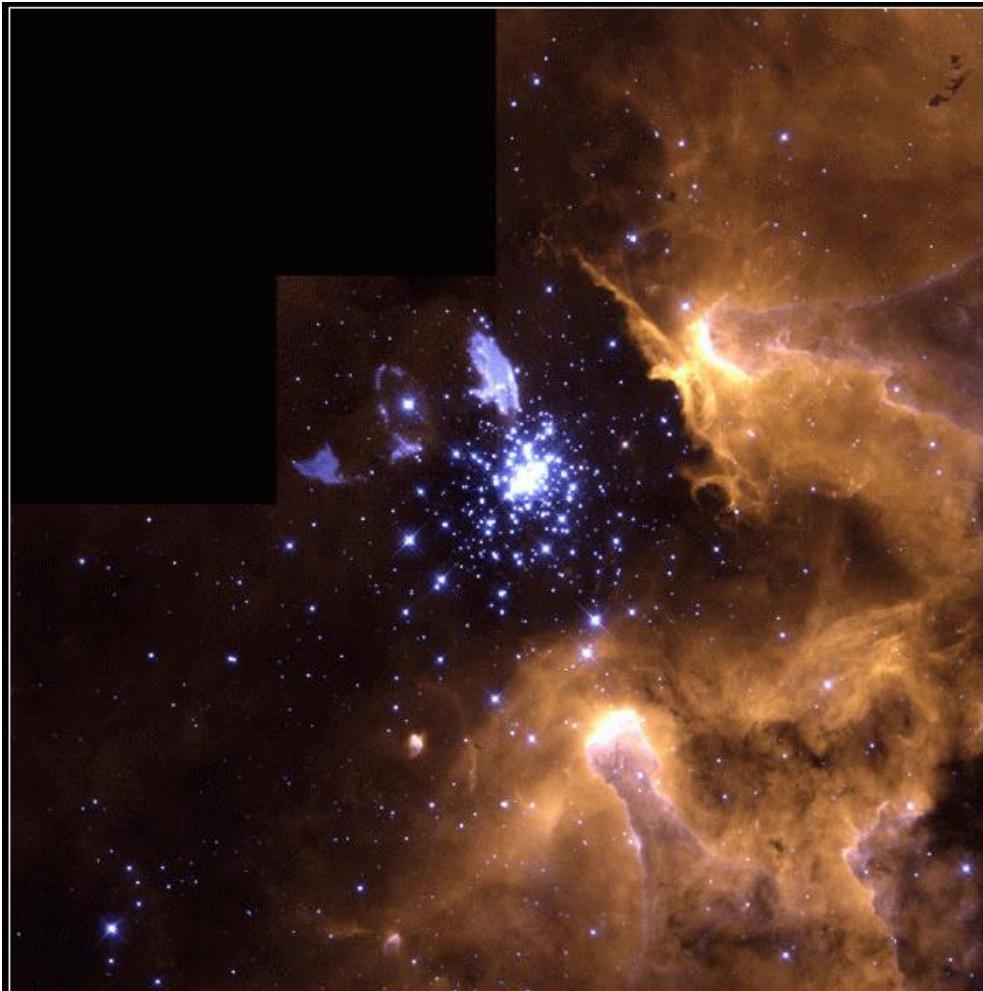
En supposant également que tout le gaz est ionisé à l'équilibre ($n_e = n_H$)

rayon de Strömgren

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

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



NGC 3603

HST • WFPC2

PRC99-20 • STScI OPO • June 1, 1999

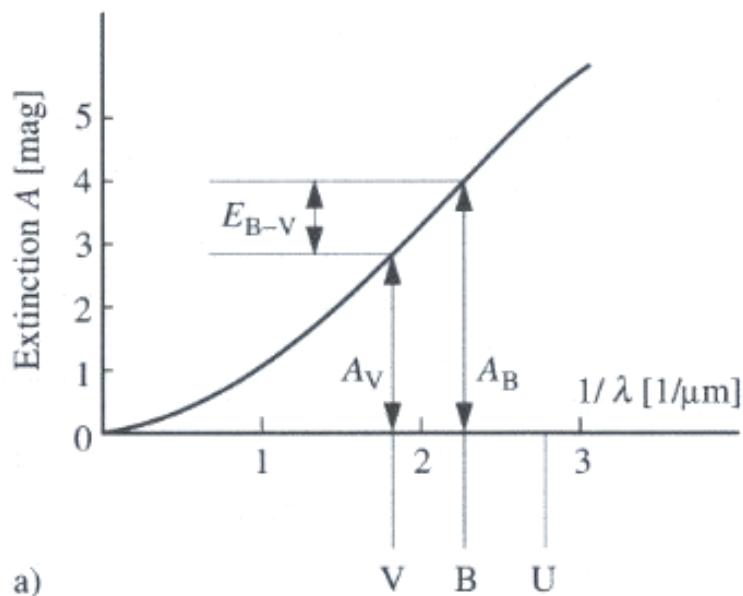
Wolfgang Brandner (JPL/IPAC), Eva K. Grebel (Univ. Washington),
You-Hua Chu (Univ. Illinois, Urbana-Champaign) and NASA

Zone de formation d'étoiles

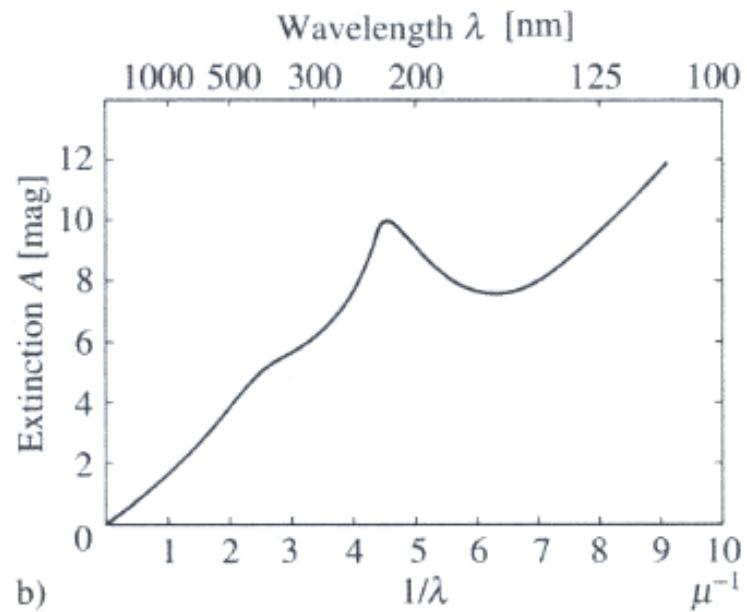
- Gaz ionisé
 - Recombinaison
 - Cascade de dé-excitations électroniques et formation de raies d'émission
- > la formation d'étoiles est souvent associée à un spectre d'émission

Absorption de la lumière

Absorption de la lumière



a)



b)

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

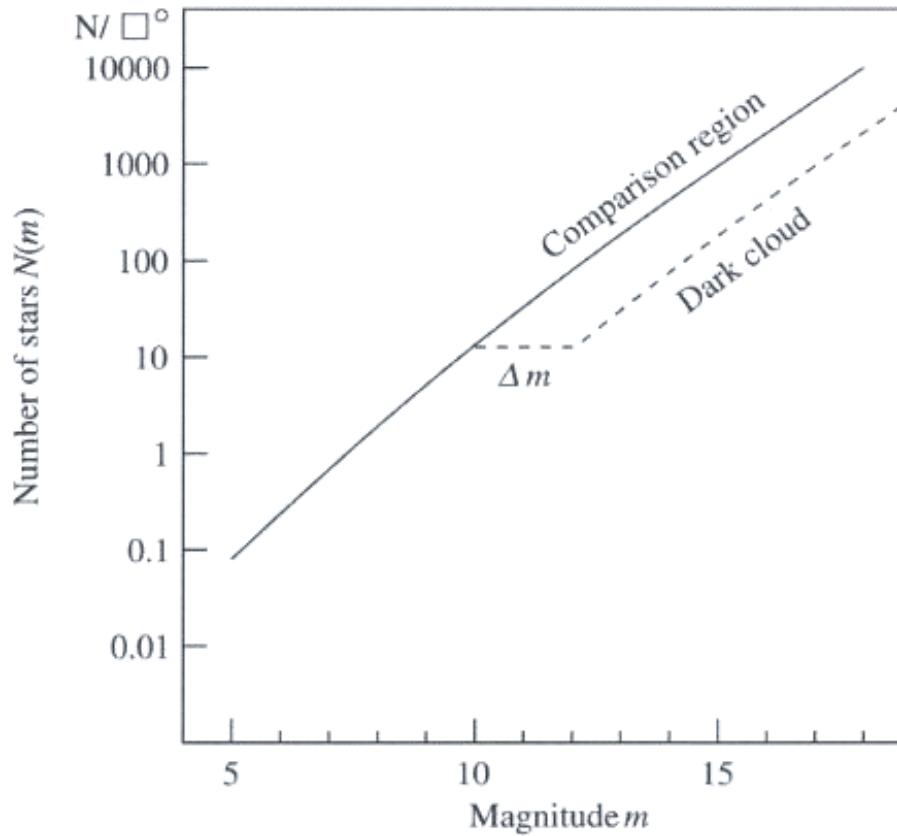
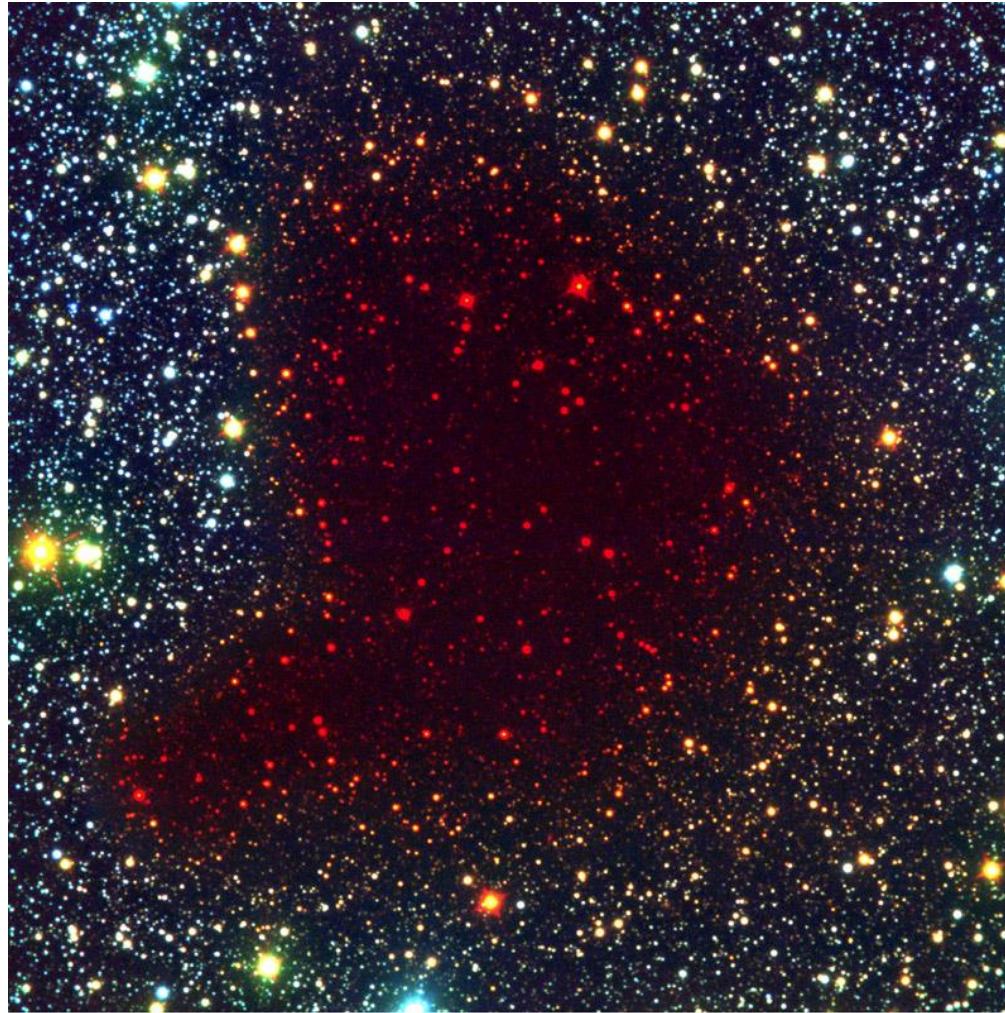


Diagramme de Wolf: comptage des étoiles
par rapport à une région de référence non absorbée

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_{ext}

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

-> Diffusion de Rayleigh: **Isotrope**

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

-> Diffusion de Mie: **Directionnelle**

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

-> Absorption pure

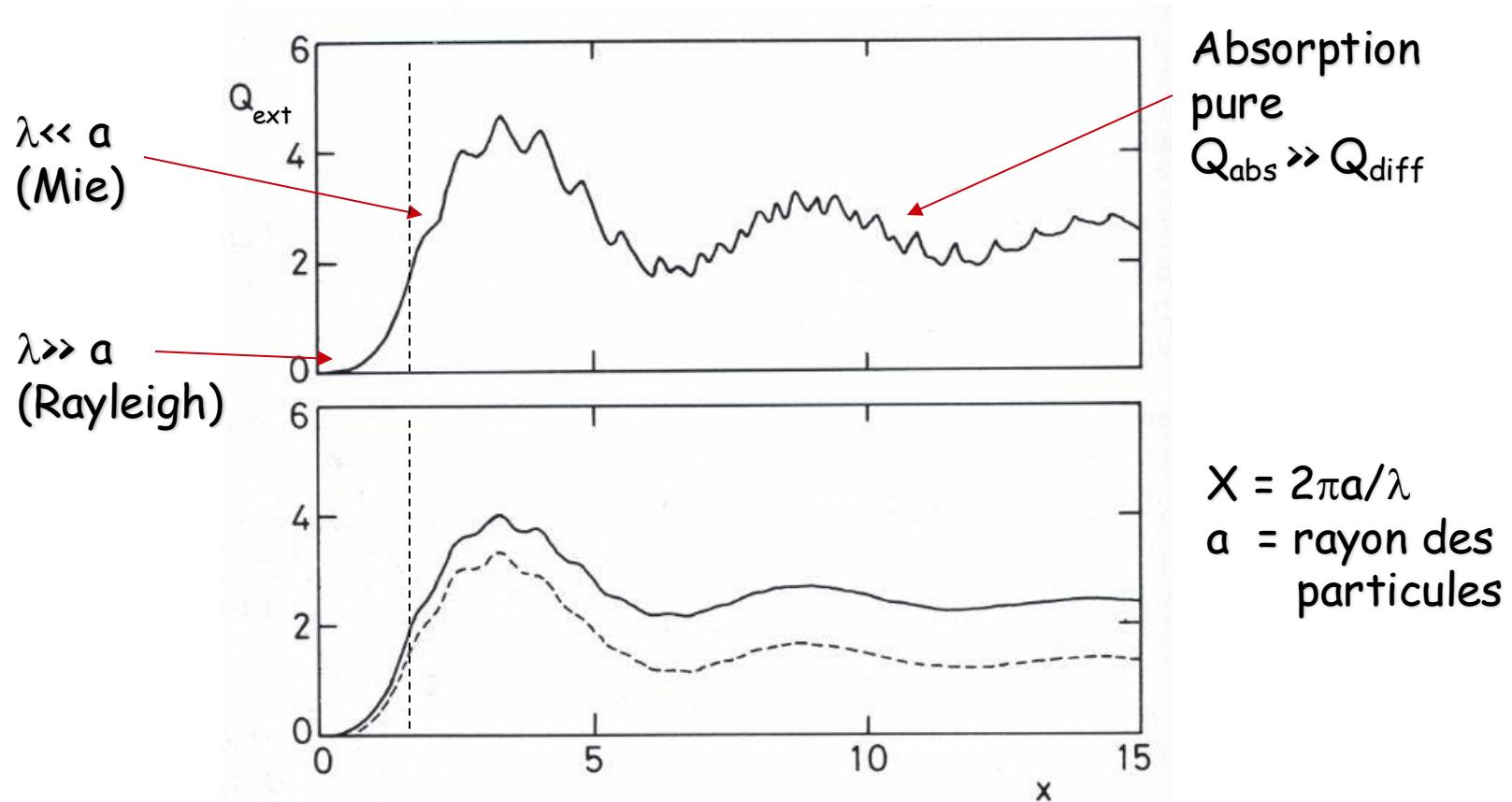
La lumière est d'autant plus absorbée (et diffusée) qu'elle est bleue

Diffusion de la lumière

Diffusion de Rayleigh
(ciel bleu)
 $a < \lambda$

Diffusion de Mie
(nuages)
 $a > \lambda$

Diffusion de la lumière

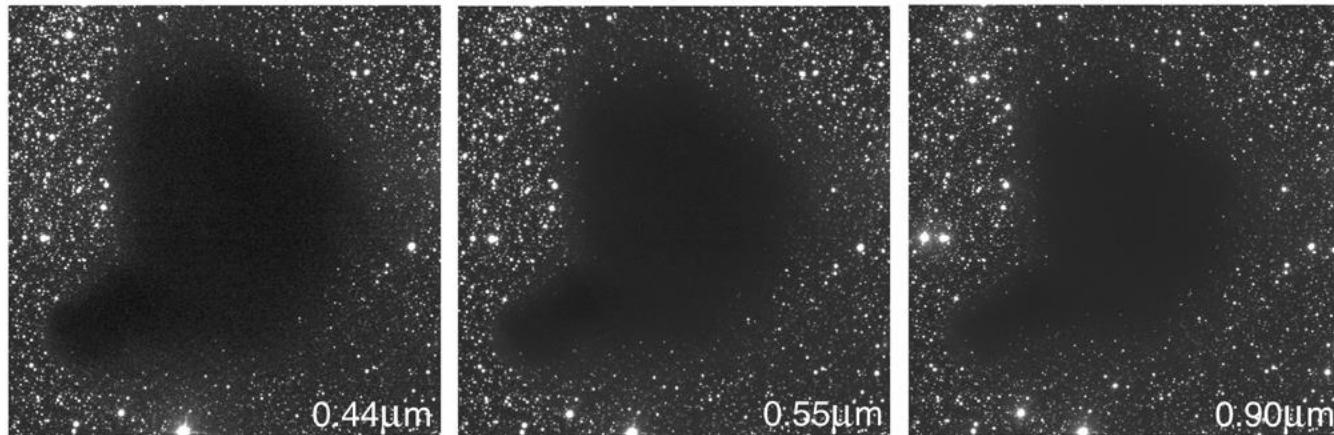


Coefficient d'extinction total Q_{ext} pour un nuage avec un seul type de particules (en haut) ou un mélange (en bas)

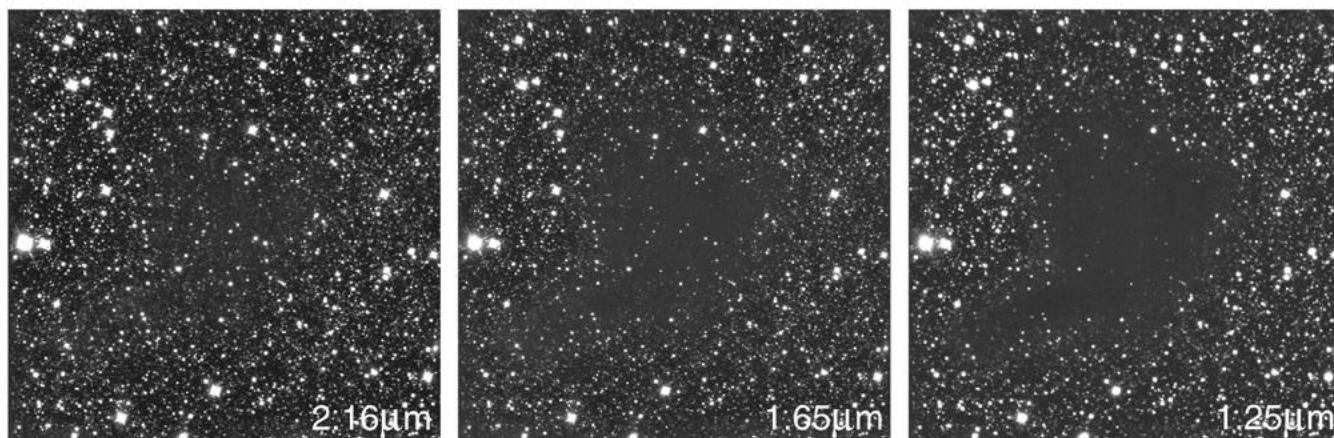
$$Q_{\text{ext}} = Q_{\text{abs}} + Q_{\text{diff}}$$

Exemple d'absorption et de diffusion de la lumière

Absorption
Maximale (UV)



Absorption
minimale (IR)



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

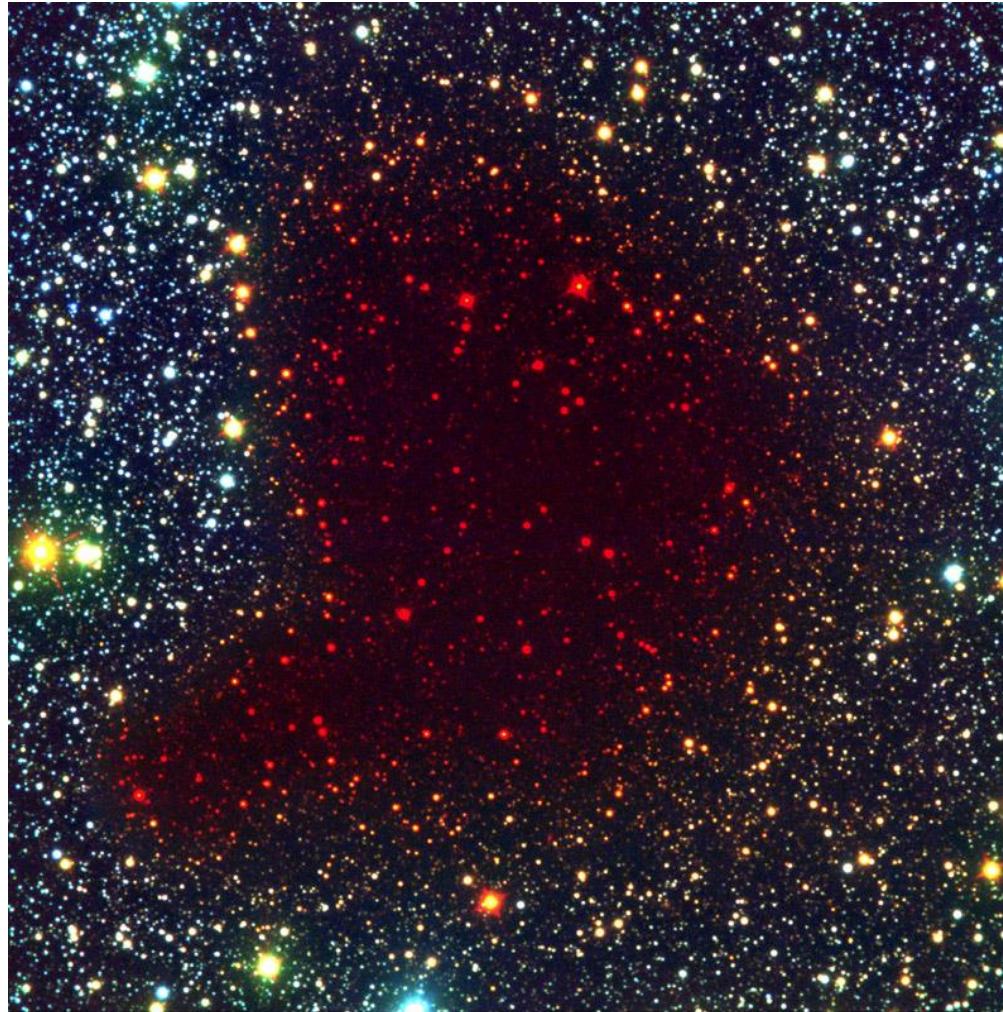
ESO PR Photo 29b/99 (2 July 1999)

© 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 ~ 10-20 K
- rotation/vibration des molécules
- raies et continu dans les **ondes millimétriques**

Nuages moléculaires

Visible



Radio (0.35 mm)

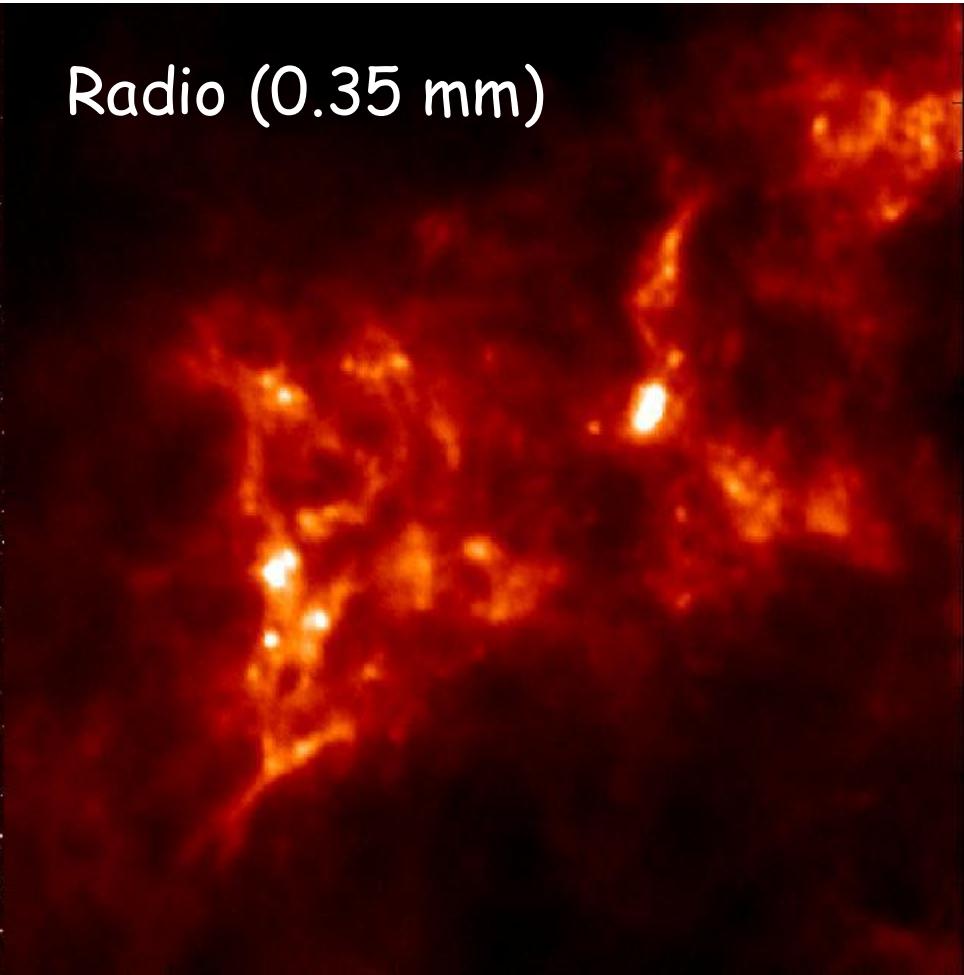


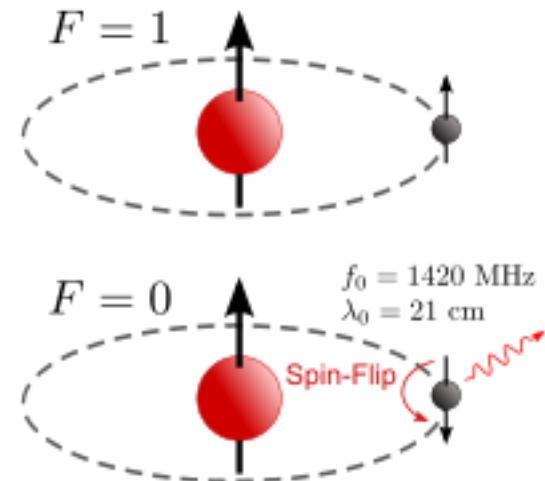
Image optique (à gauche), et image radio (à droite),
d'un nuage moléculaire froid à $T = 10$ K dans notre Voie Lactée.
Les zones denses en molécules correspondent à des zones de formation d'étoiles

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 km^2) pour augmenter la sensibilité



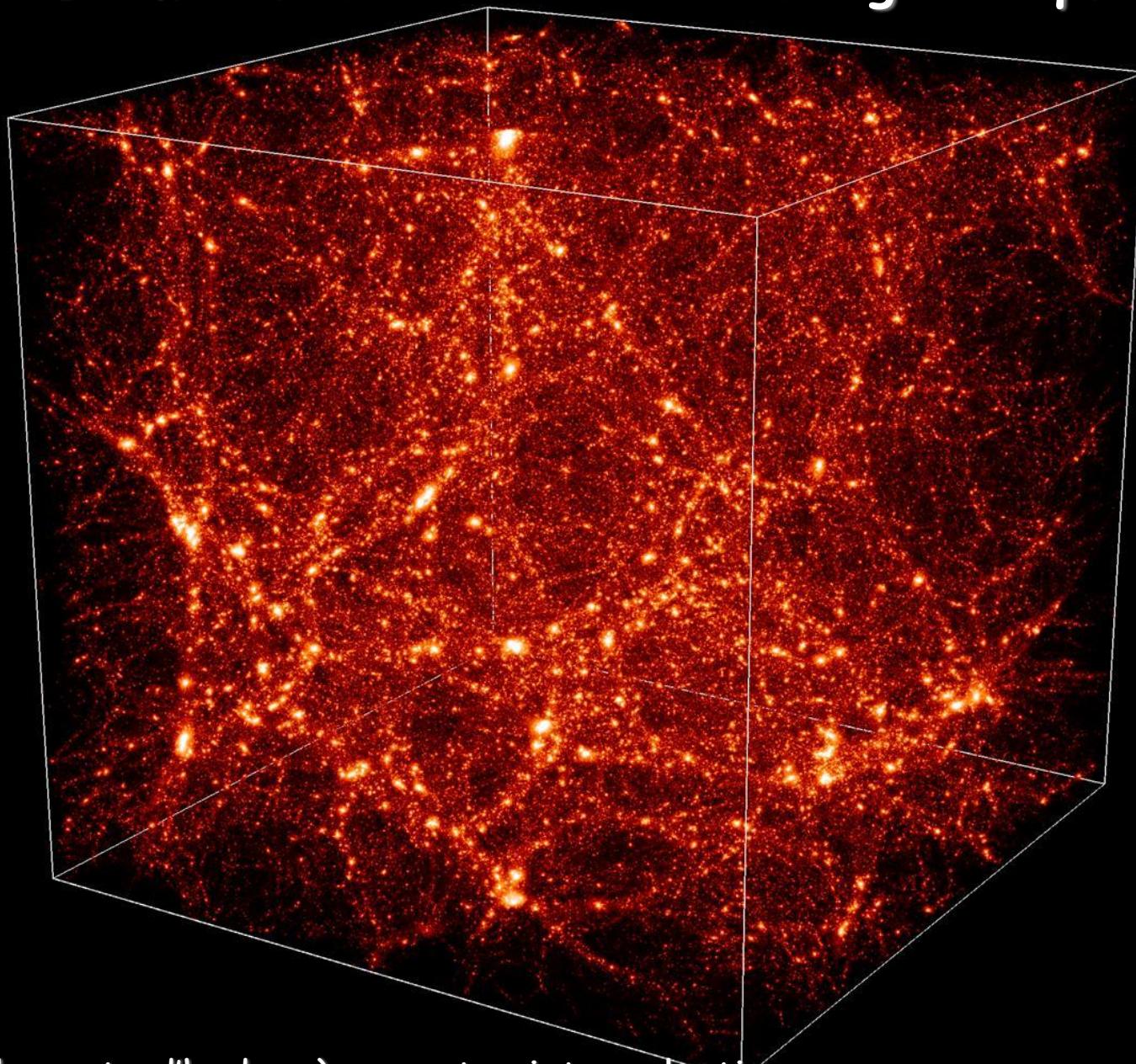
Square Kilometer Area Observatory



MID: Afrique du Sud

LOW: Australie

Le milieu interstellaire et intergalactique



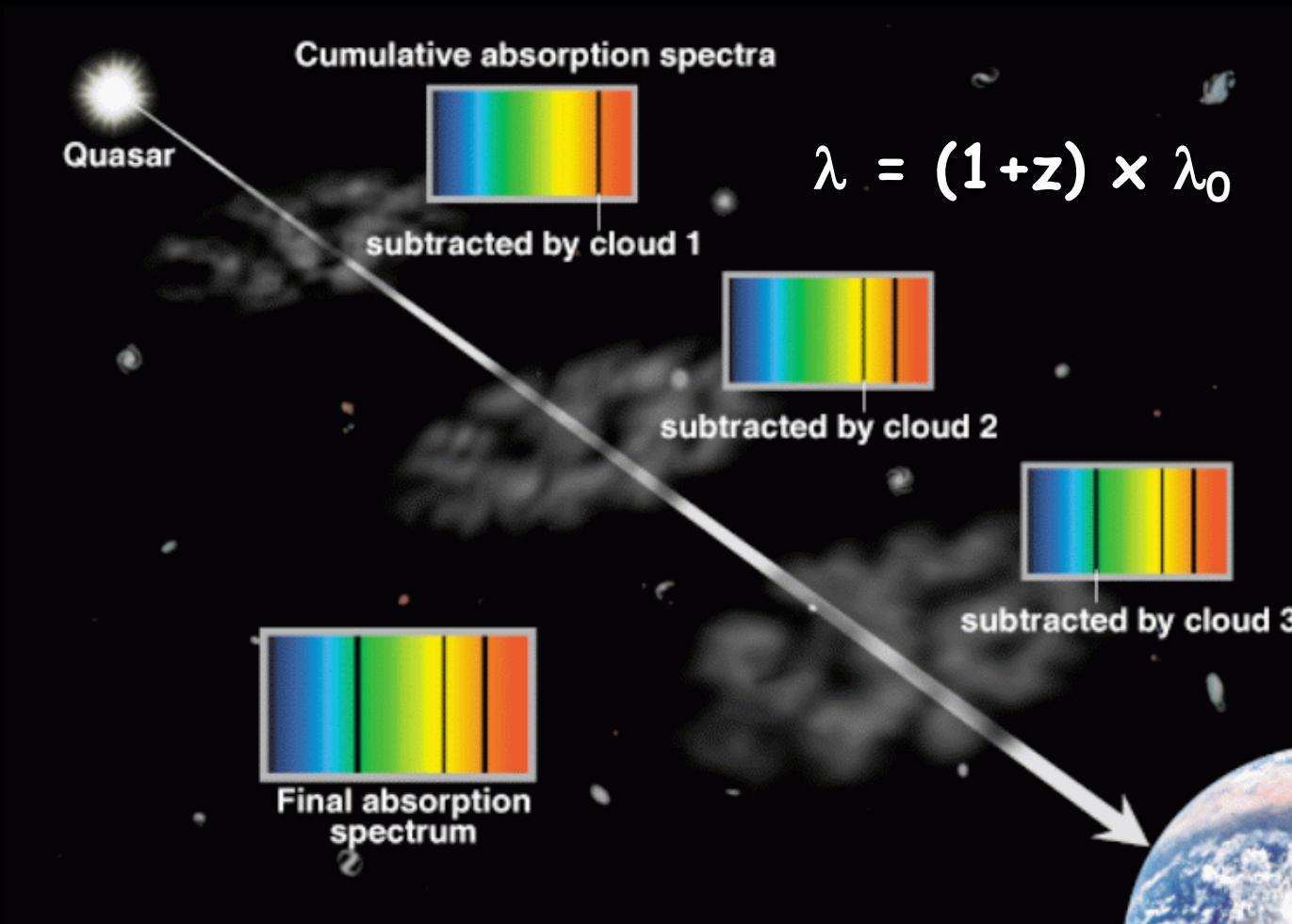
Filaments d'hydrogène neutre intergalactique

Le milieu interstellaire et intergalactique



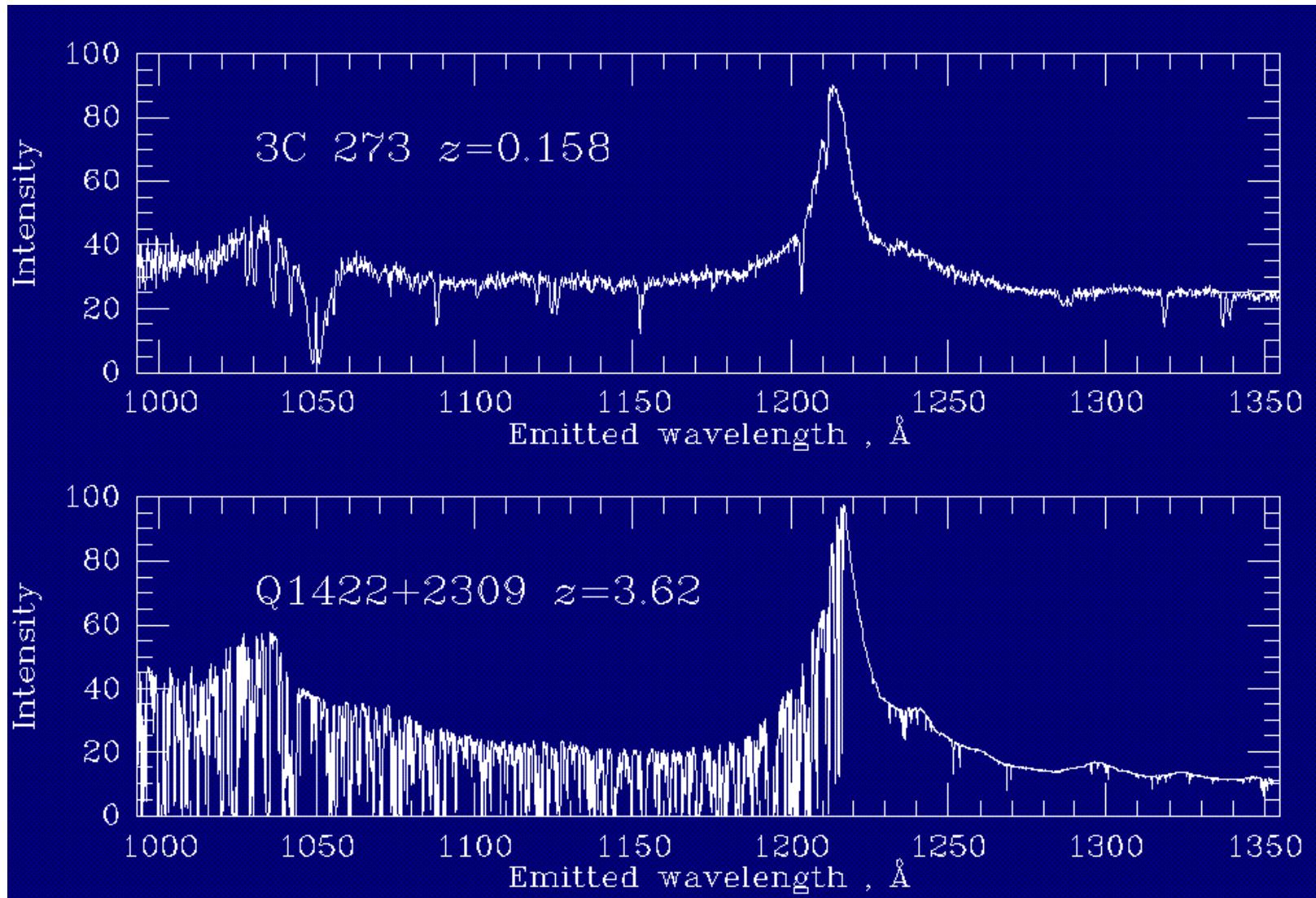
Filaments d'hydrogène neutre intergalactique

Hydrogène neutre

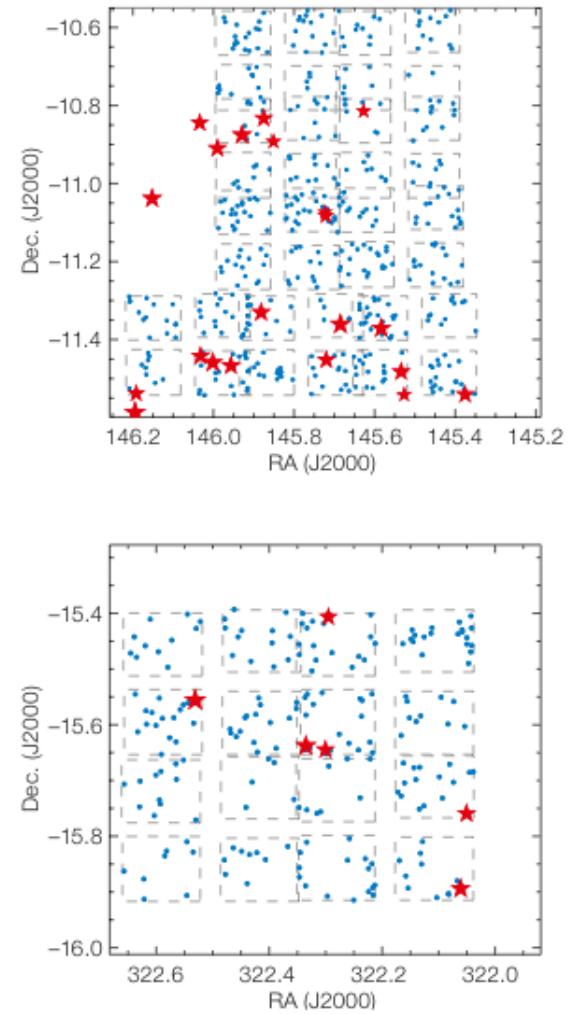
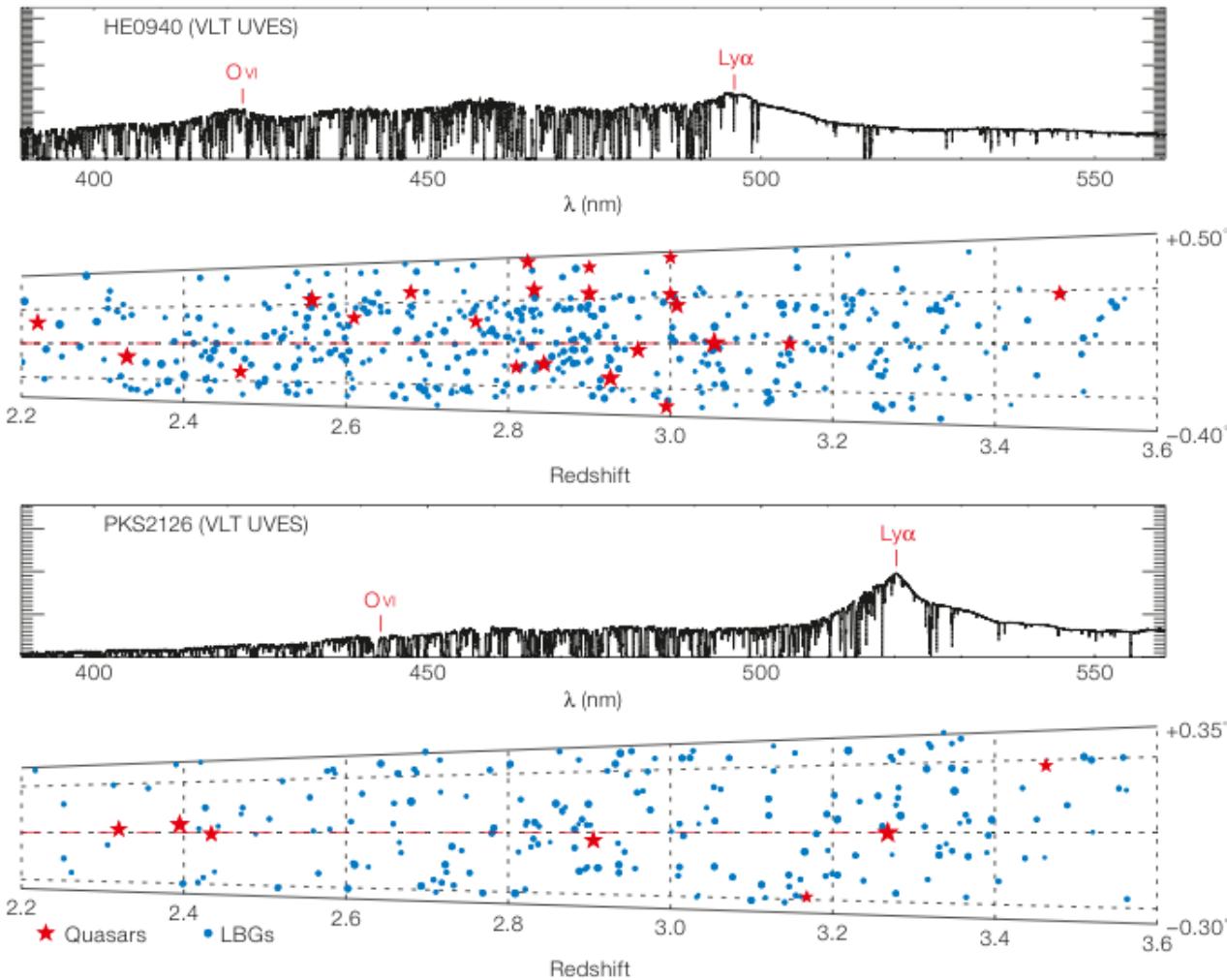


Absorption par des nuages d'hydrogène neutre à différents décalages vers le rouge (c'est-à-dire à différentes distances de nous)

Hydrogène neutre



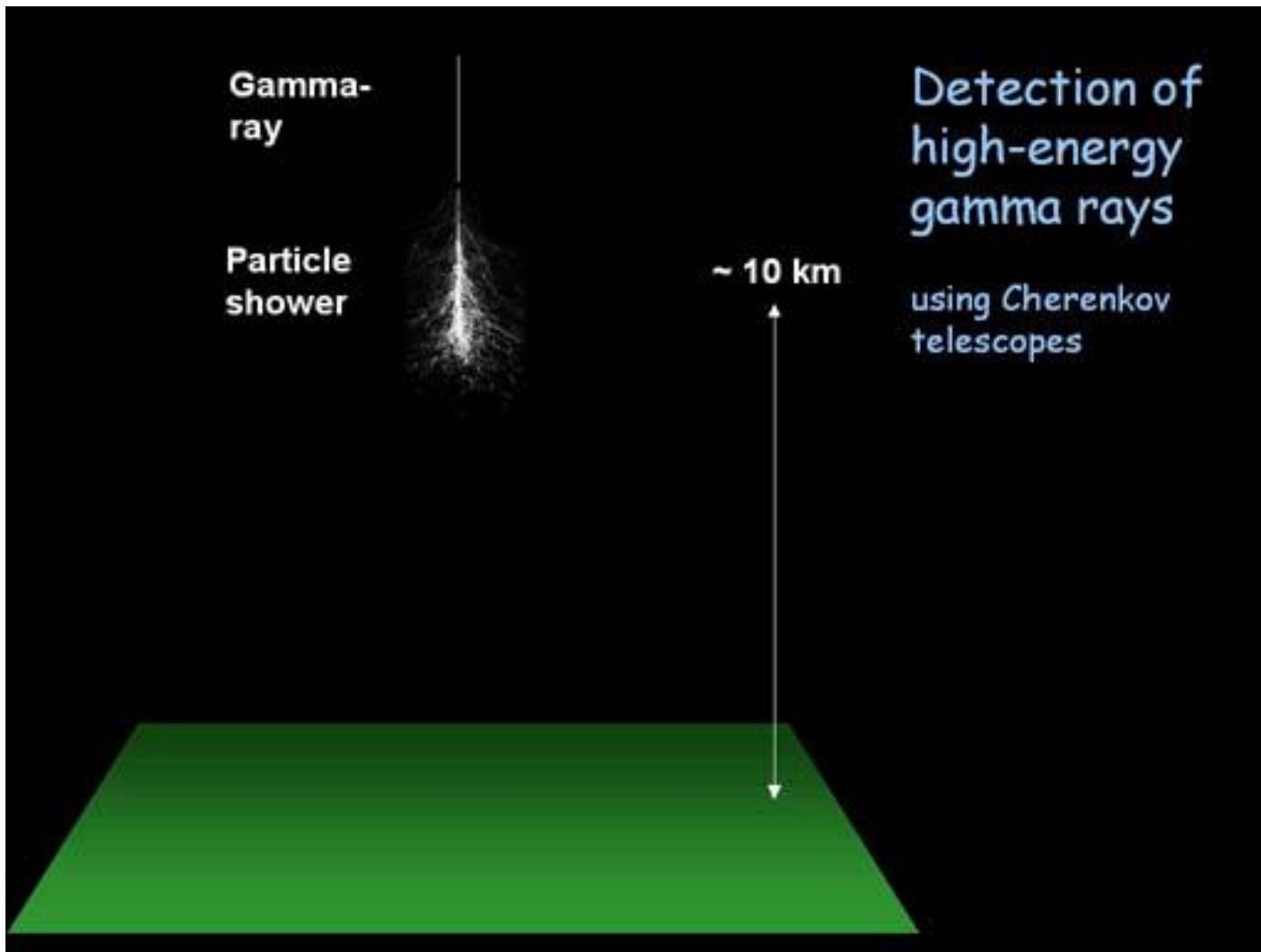
**Forêt Lyman alpha (1216 Å) due à l'hydrogène neutre
sur la ligne de visée de quasars distants**



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

Particules intergalactiques

Les **particules** intergalactiques

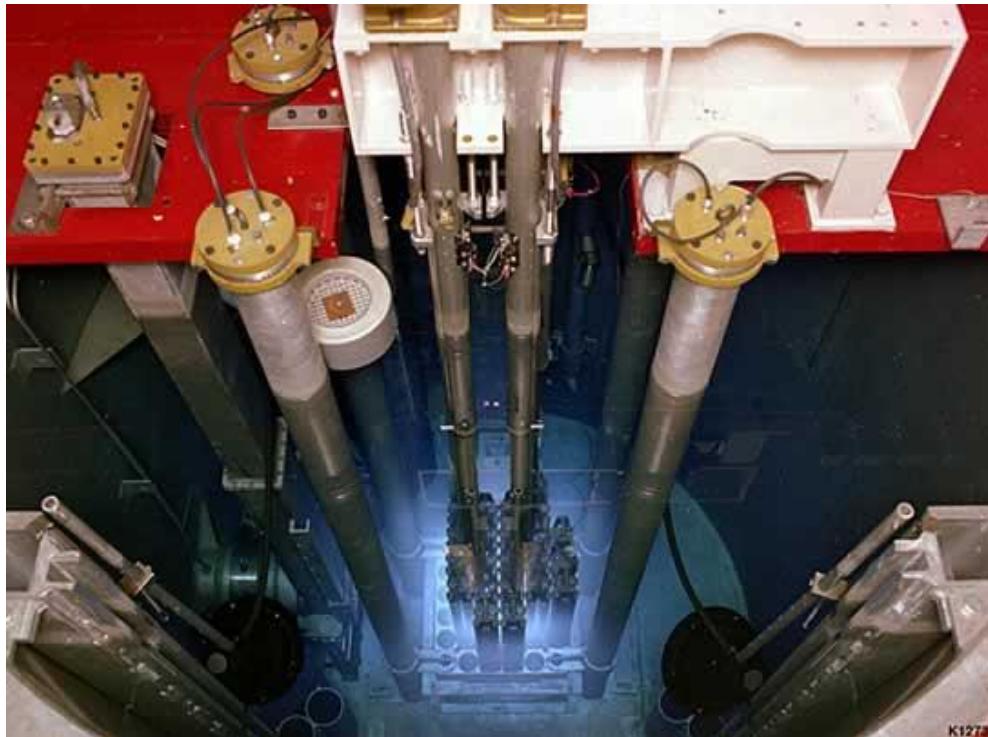


Particules (protons, électrons) accélérées par les supernovae et interagissant avec l'hydrogène neutre (HI) interstellaire

Les **particules** intergalactiques

Détection par **effet Cherenkov**

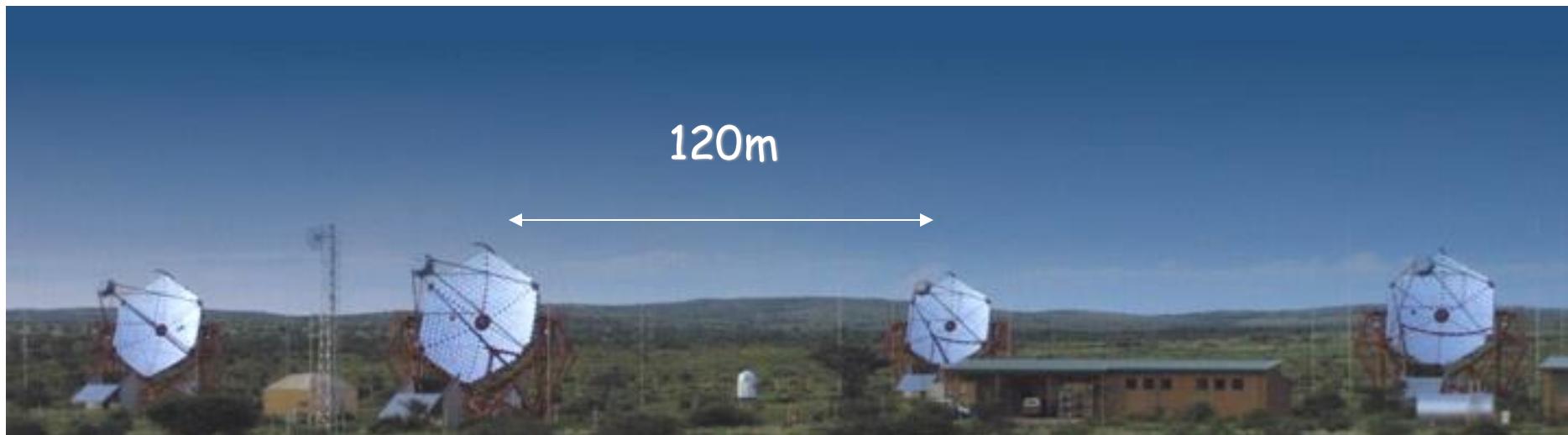
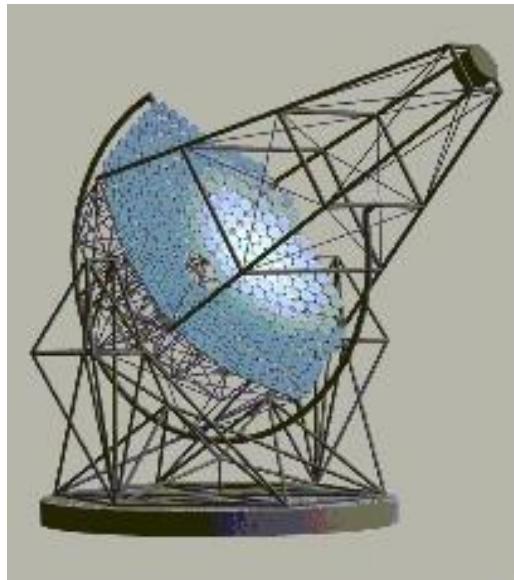
L'effet Cherenkov est un phénomène similaire à une onde de choc, produisant un flash de lumière, et, qui a lieu lorsqu'une particule chargée se déplace dans un milieu avec une vitesse supérieure à la vitesse de la lumière **du milieu**.



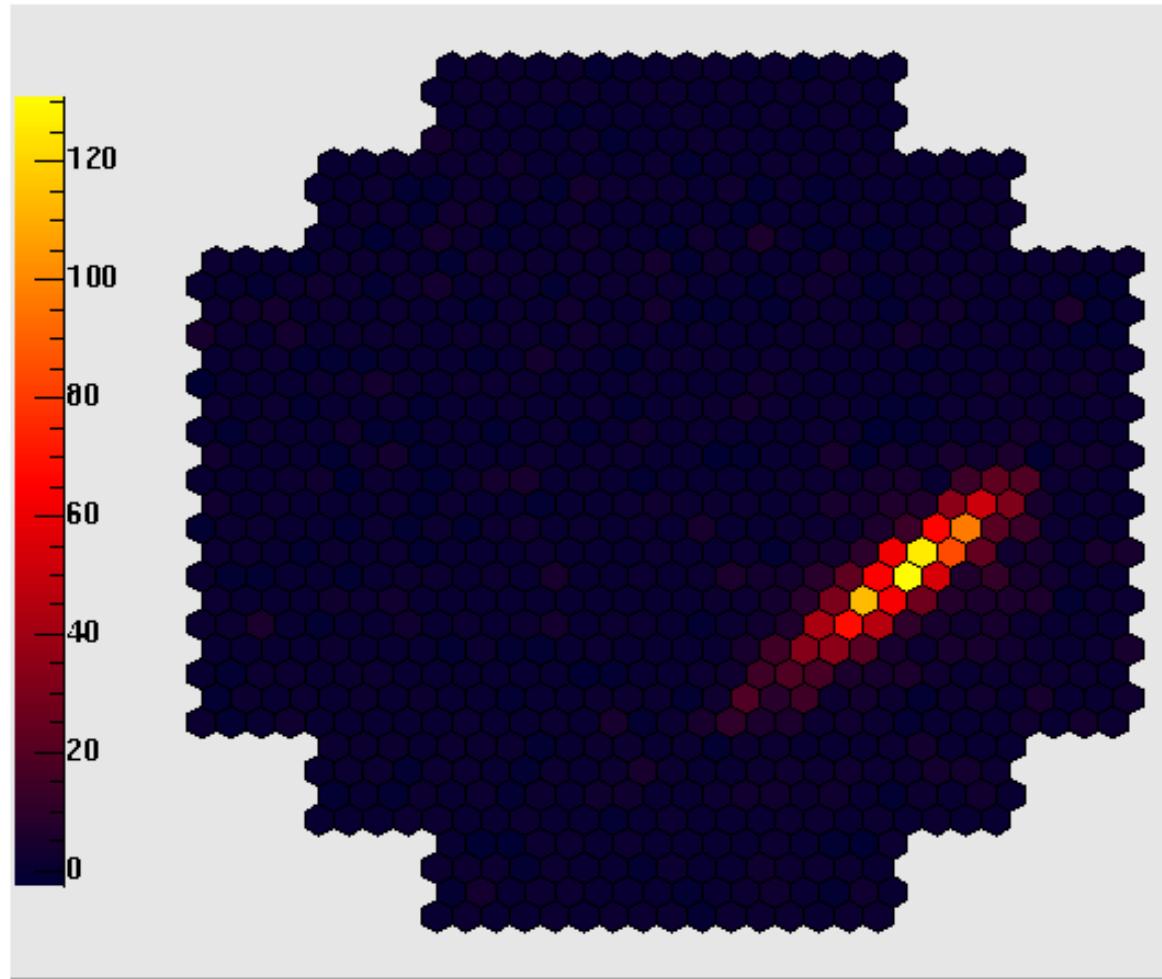
HESS: High Energy Stereoscopic Telescope

4 « télescopes » de 12 m

Chacun possède 382
miroirs de 60 cm



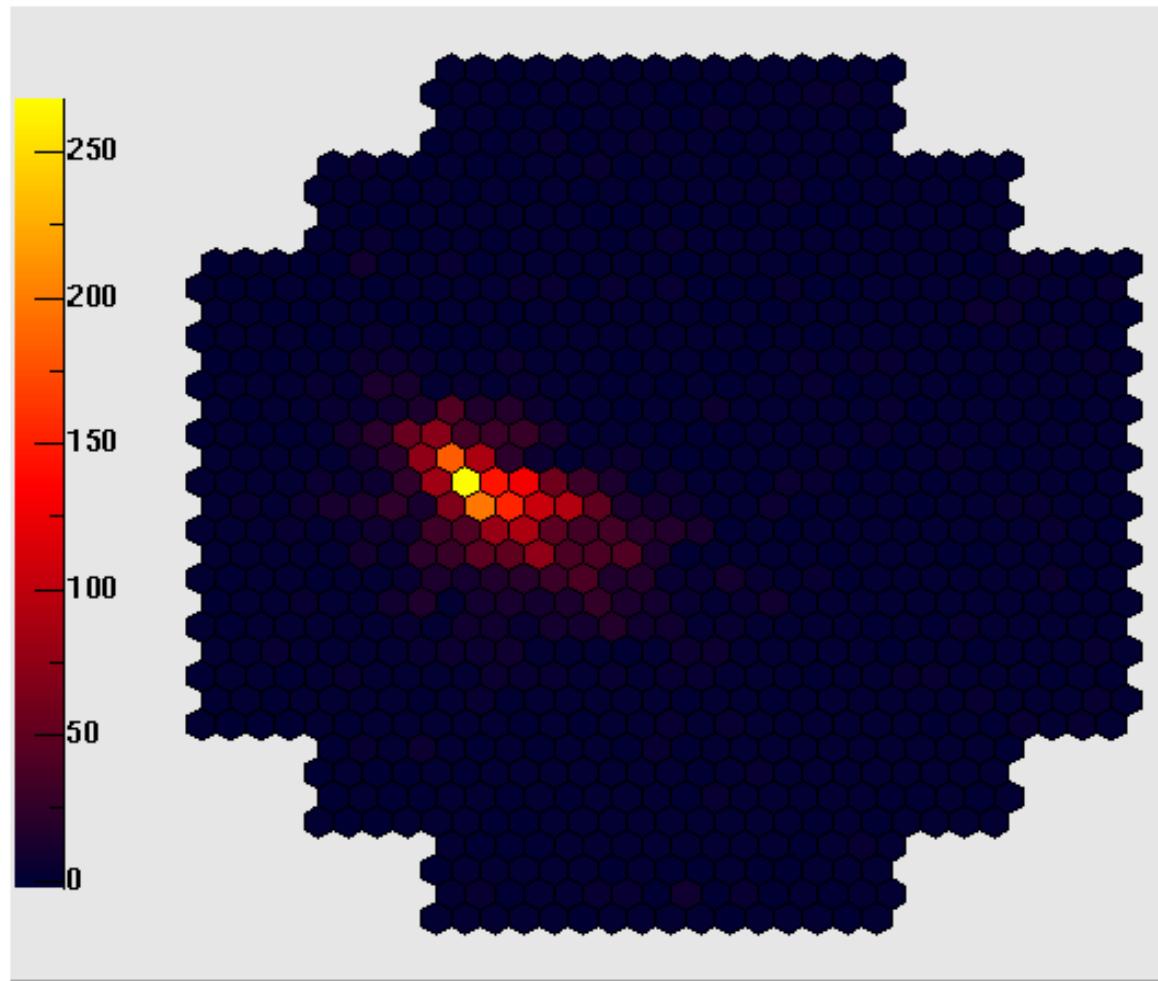
Typique « douche » de particules



allongés = particules « focalisées »

anneaux = particules provenant de l'atmosphère

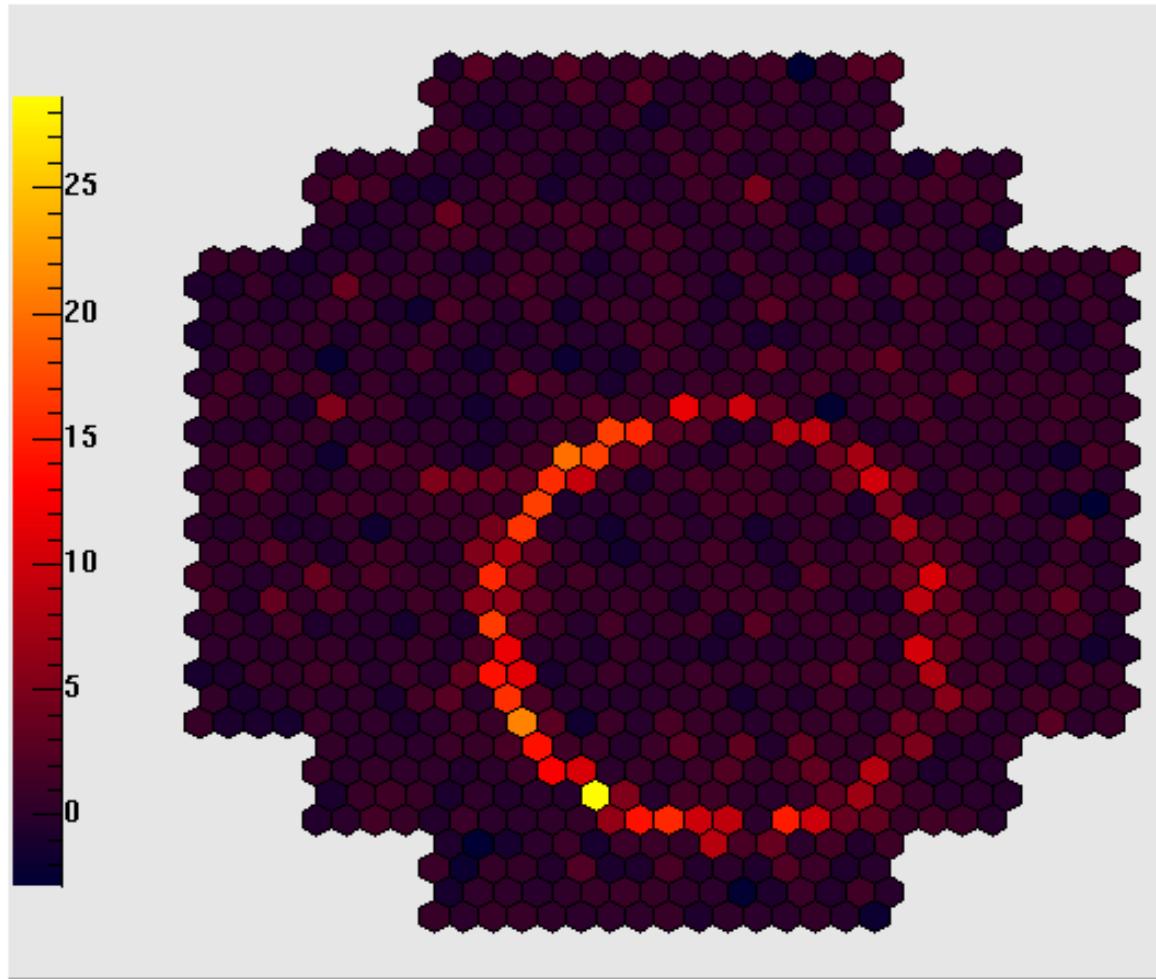
Typique « douche » de particules



allongés = particules « focalisées »

anneaux = particules provenant de l'atmosphère

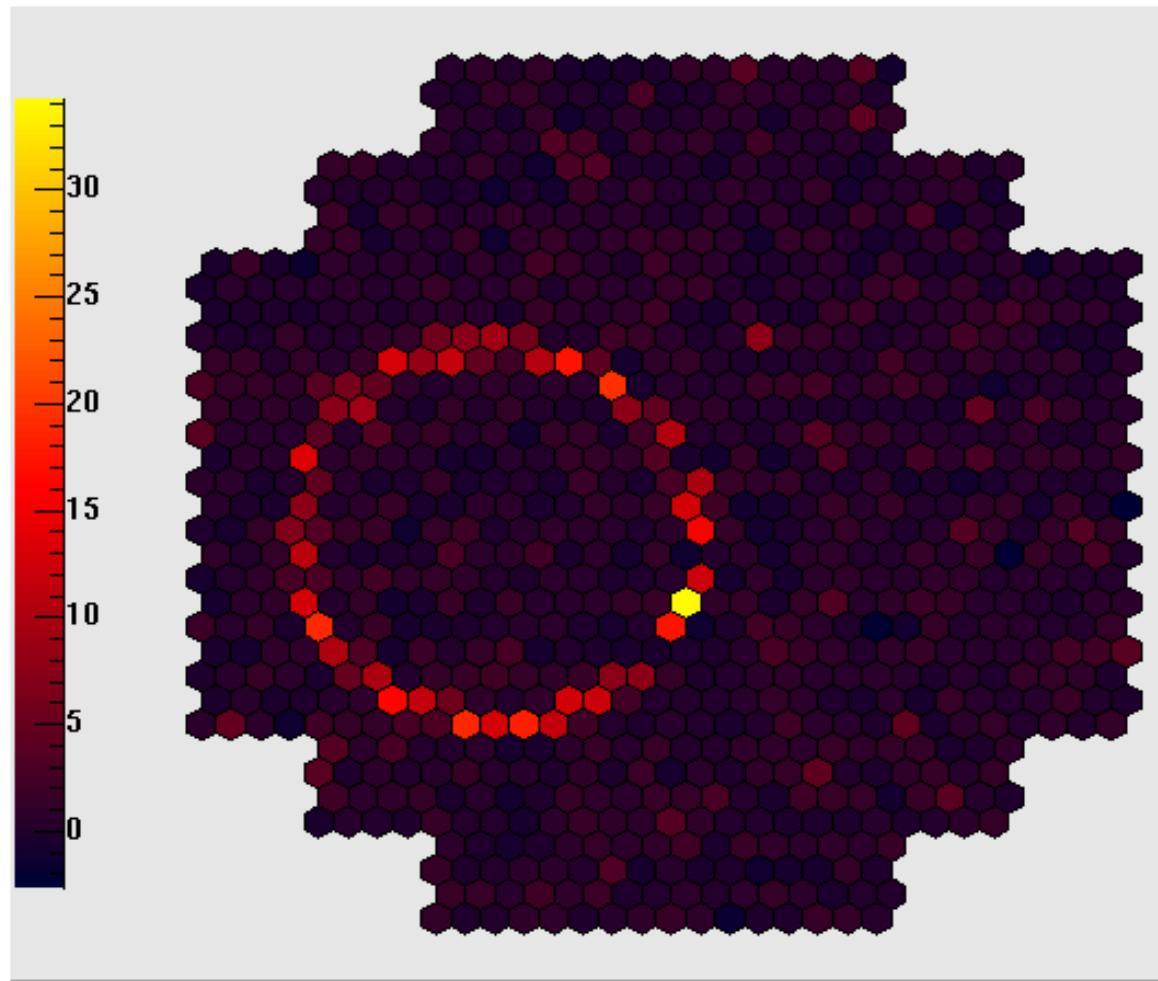
Typique « douche » de particules



allongés = particules « focalisées »

anneaux = particules provenant de l'atmosphère

Typique « douche » de particules



allongés = particules « focalisées »

anneaux = particules provenant de l'atmosphère

