

# Détermination des vitesses dans l'Univers

Atelier d'astrophysique  
XVIIe festival d'astronomie de Fleurance

Sylvain Chaty

Université Paris 7 / Service d'Astrophysique

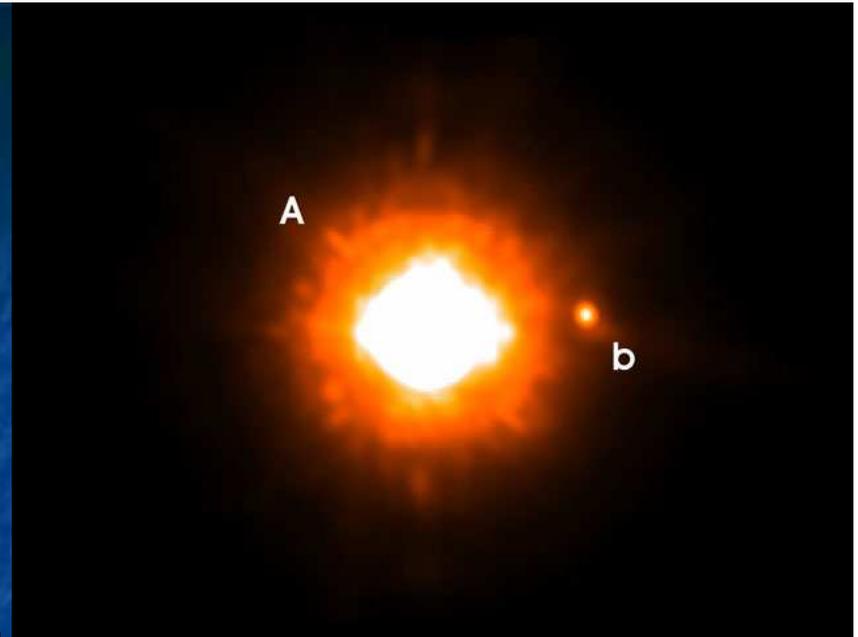
9 août 2007

# Exoplanètes

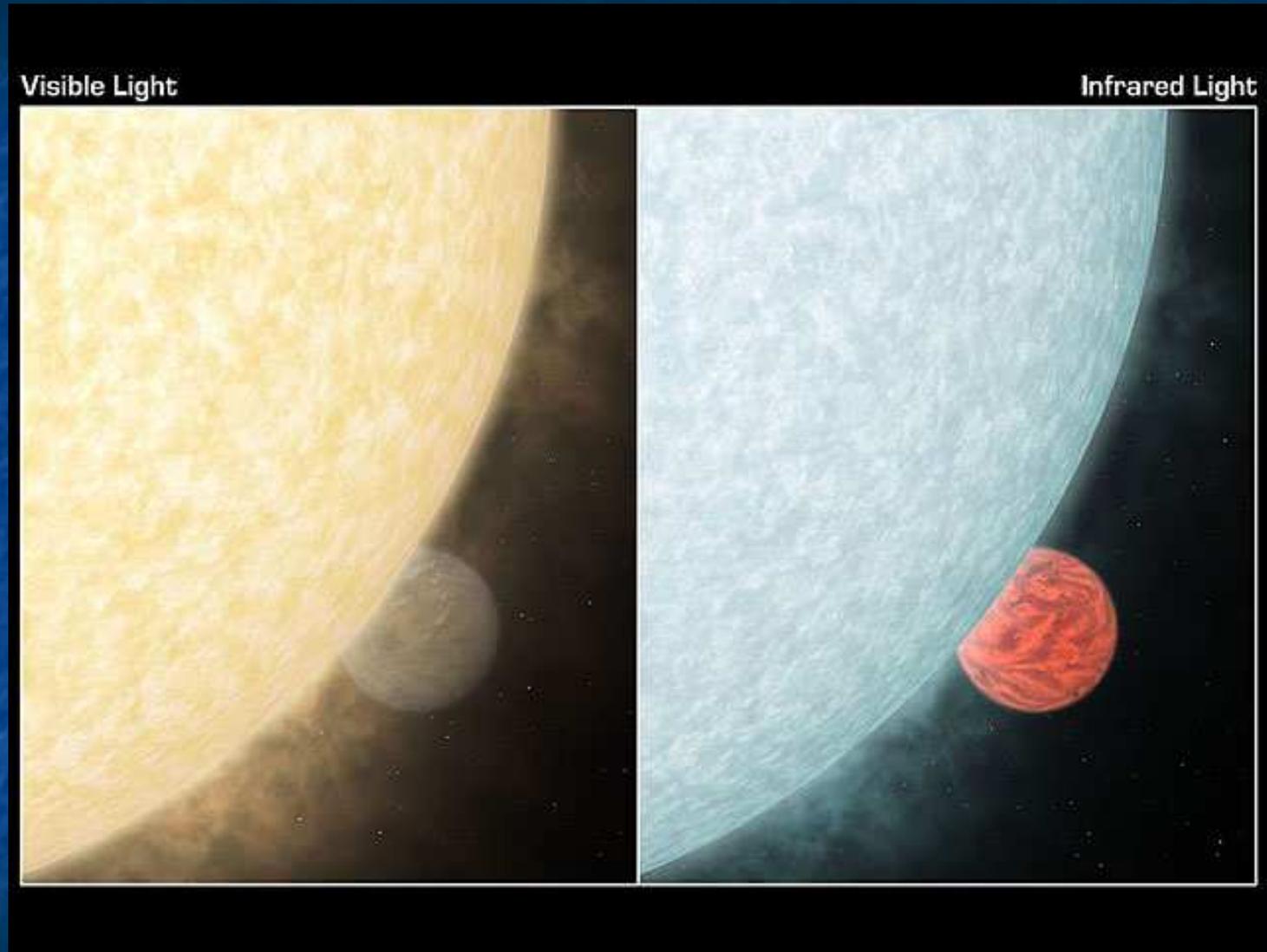


# Exoplanètes

- Plus de 200 exoplanètes
- Mais comment les « voir »??? ...
- et comment obtenir leurs paramètres?
  - Différentes méthodes:
    - Méthode des vitesses radiales (variations de vitesse de l'étoile)
    - Méthode astrométrique (variations de position de l'étoile)
    - Méthode des transits
    - Imagerie directe:
      - coronographie stellaire; techniques interférométriques; observation IR...
    - Méthode des microlentilles



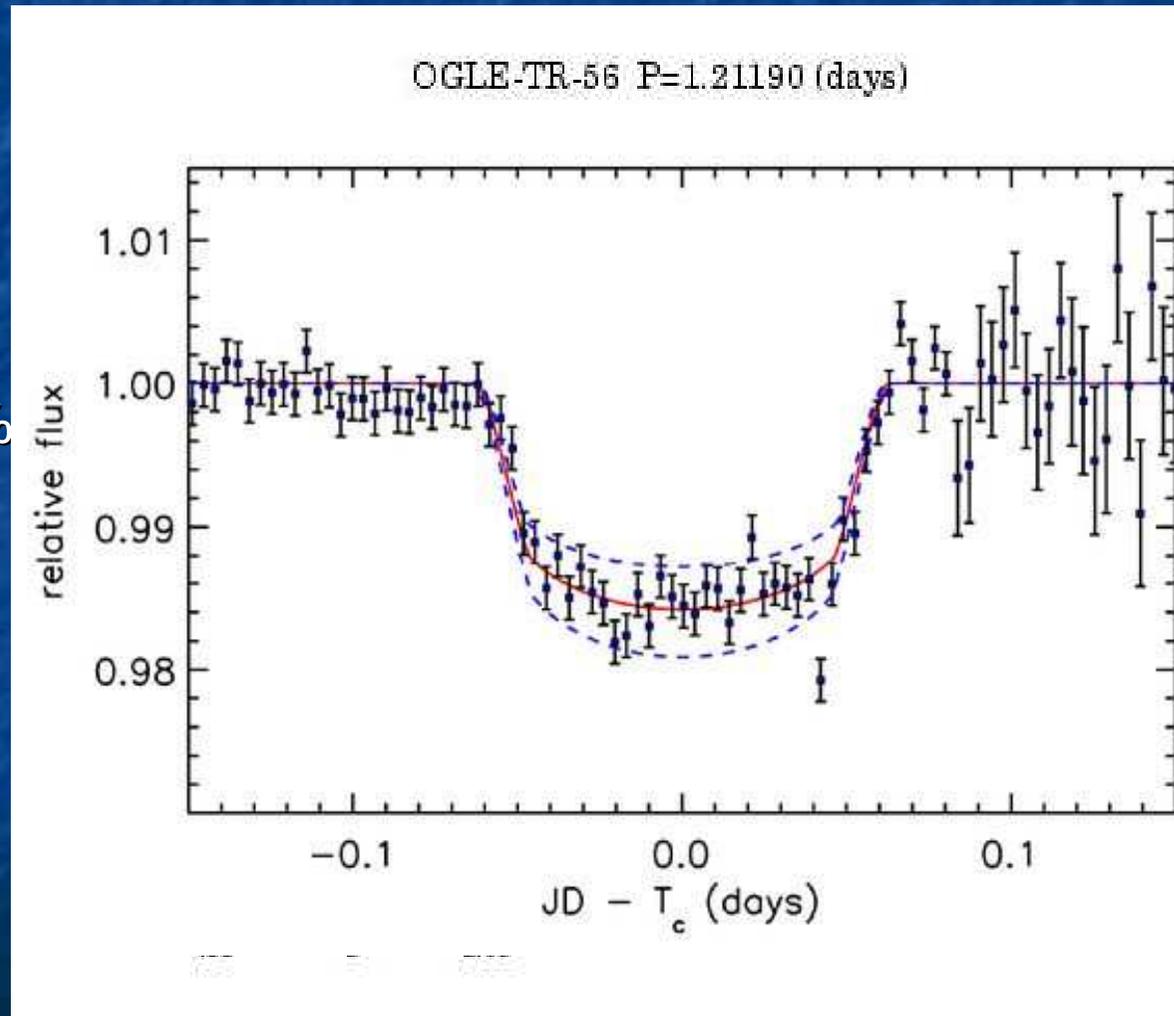
# Exoplanètes



- Afin de mieux voir les planètes: observation en infrarouge

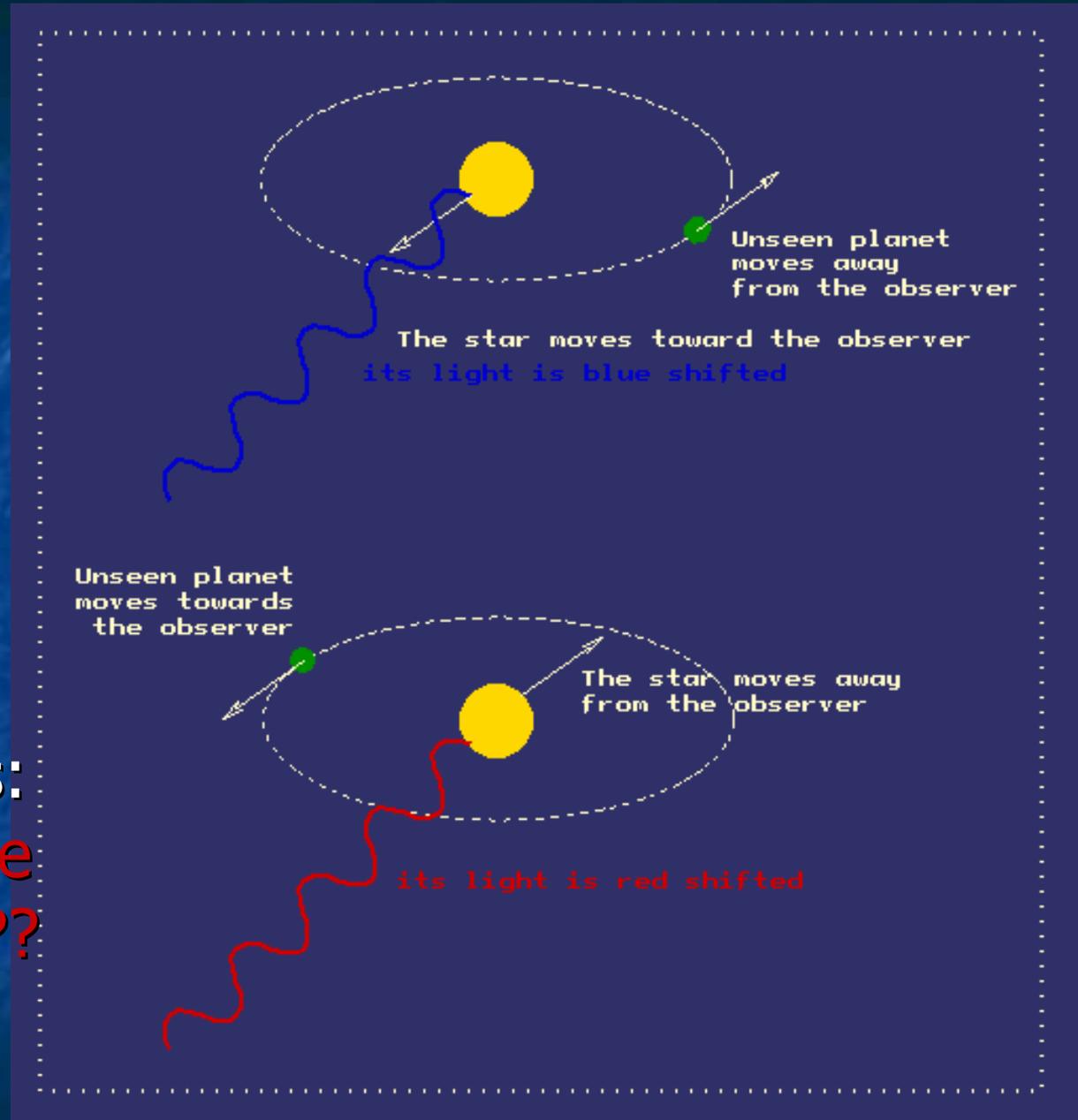
# Exoplanètes

- Méthode des Transits:
- Observations de variations photométriques
  - Jupiter: 1%
  - Terre: 0.01-0.001%
- Confirmation par l'observation de plusieurs passages...
- **Question: Quelle est la variation relative de flux de OGLE-TR-56?**



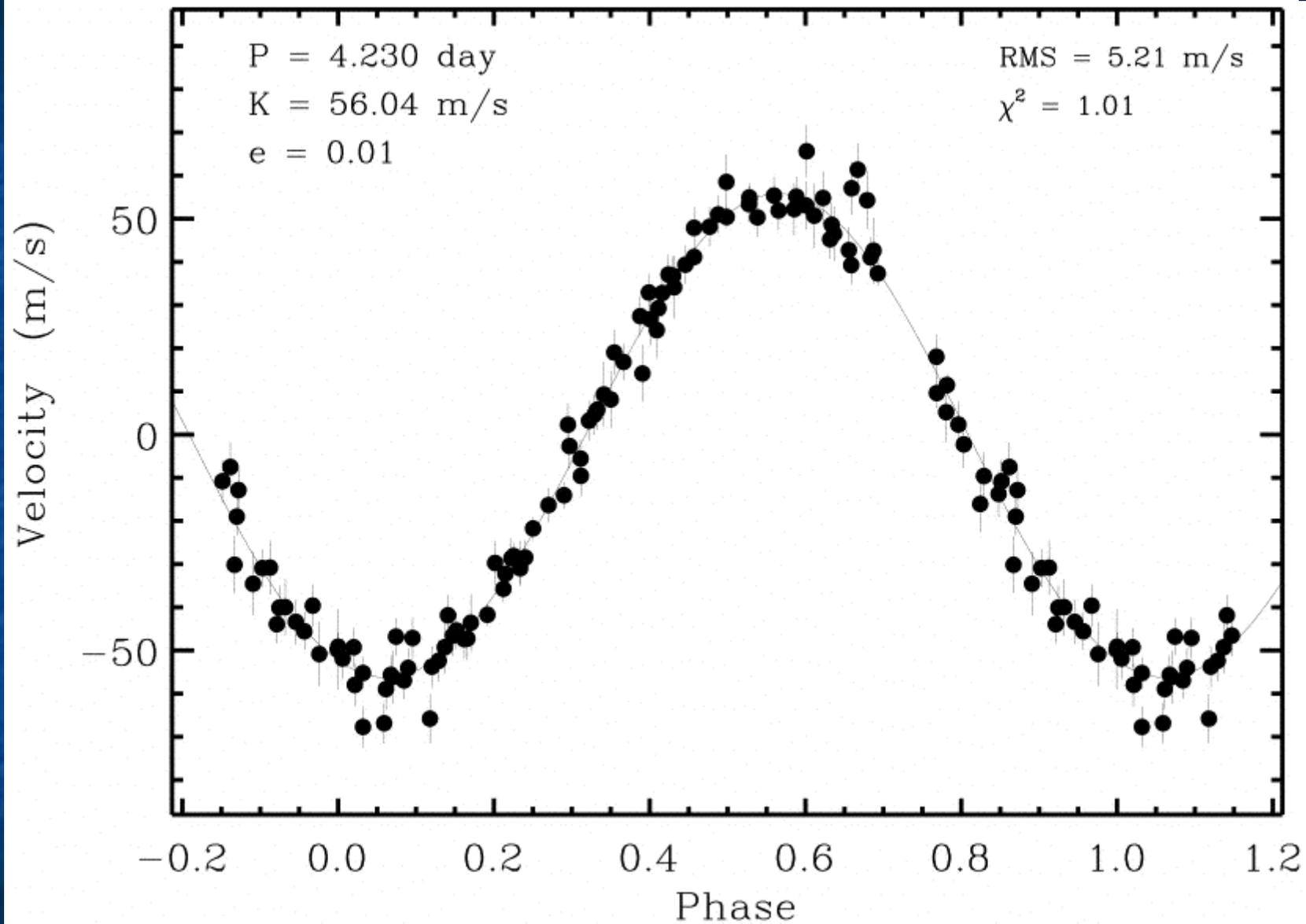
# Exoplanètes

- Méthode des Vitesses radiales: comment marche cette méthode???



# Exoplanètes

- Méthode des vitesses radiales basée sur l'effet Doppler-Fizeau
- L'objet s'approche: tassement des ondes
  - $\Rightarrow$   $f$  augmente, son + aigu
- L'objet s'éloigne: espacement des ondes
  - $\Rightarrow$   $f$  diminue, son + grave
  - $\sim$  ambulance, chauve-souris...
- **Question: comment voit-on une planète à côté d'une étoile? Tracer le signal reçu**



# Exoplanètes: vitesses radiales

- Pourquoi vitesse « radiale »?
- Quelle périodicité détectons-nous?
- Quelle masse mesurons-nous? De quoi dépend-elle?
- De quelle précision avons-nous besoin?
  - Quelle est la précision d'observation disponible?
- Donner  $c$  en fonction de  $T$ ,  $\lambda$ , et/ou  $v$
- Donner l'expression du décalage  $z$  en fonction de  $\lambda$ ,  $v$  et/ou  $c$

# Exoplanètes: vitesses radiales

- Radial = Direction parallèle Etoile/Terre
- $P_* = P_p$  ( $T_{\text{Jup}} = 11$  ans)
- $M_{\text{min}} = M_p \sin i$
  
- Variation de quelques dizaines de m/s
  - Précision des meilleurs spectrographes: 10m/s
  
- $c = \lambda/T = \lambda\nu$
- $z = \Delta\lambda/\lambda = v/c$

# Exoplanètes: vitesses radiales



# Exoplanètes: vitesses radiales

- Planètes de la taille de Jupiter, près de l'étoile
  - $M$ : 0.22 -> 17.10  $M_{\text{Jup}}$
  - $d$ : 0.04 -> 3.4 ua ( $T = 3$  j)
  - $D$ : 15->253 al
  - $V_{\text{Terre}}$ : 28.76 km/s (aphélie) -> 30.75 km/s (périhélie)

# HD 188753: Triple coucher de Soleil

- Découverte récente d'un Jupiter chaud orbitant dans le système stellaire [triple HD 188753](#)
- 149 a.l. dans la constellation du Cygne, planète détectée spectroscopiquement au [Keck](#).
- Un challenge pour les théories de formation de planètes!



# Jets de Systèmes binaires

- Premier microquasar:
  - SS 433
- Microquasar à jets superluminiques:
  - GRS 1915+105

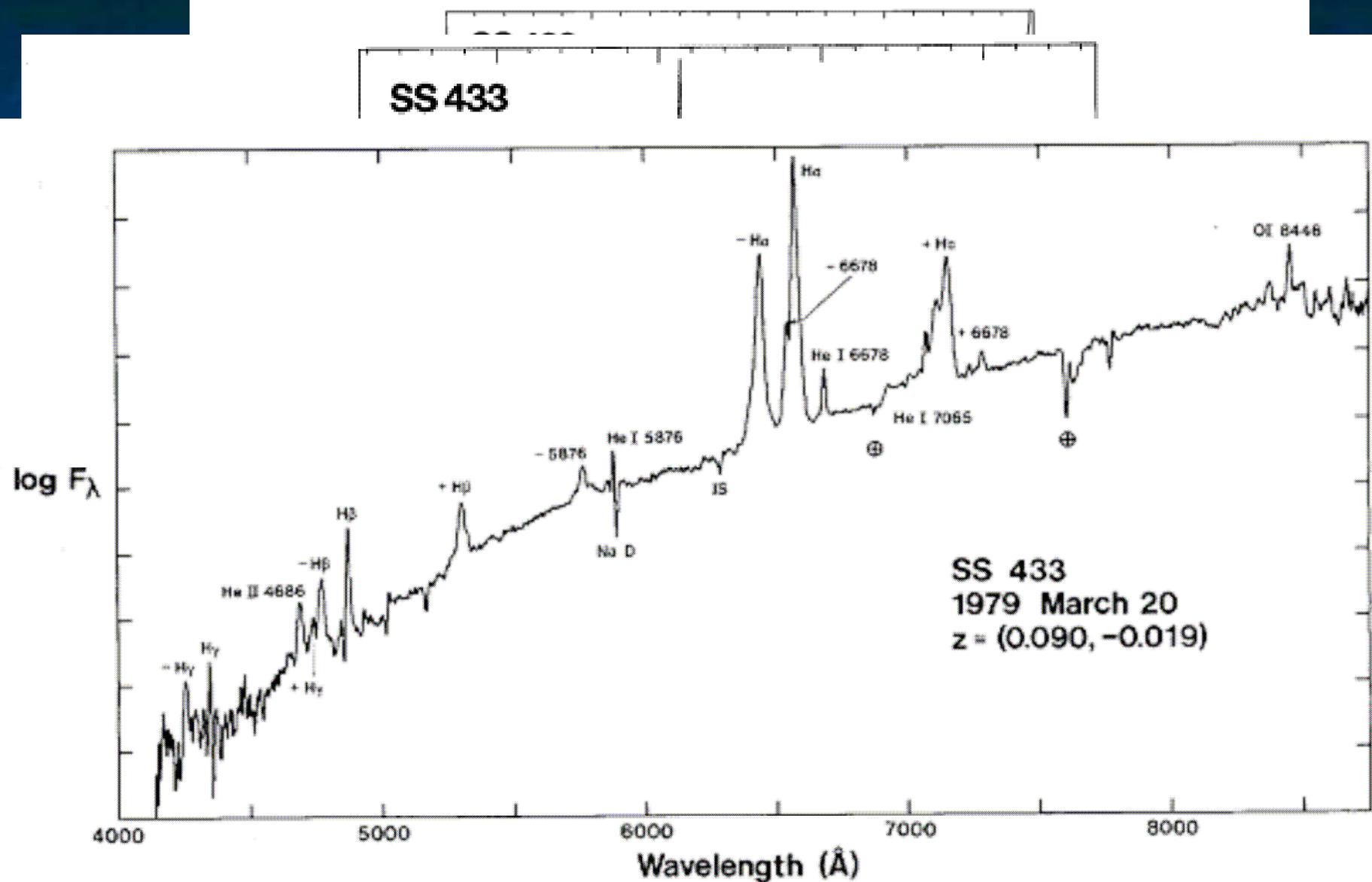


FIG. 1.—Spectrum of SS 433 obtained on 1979 March 20 with the Lick Observatory 3 m Shane reflector. The data have been converted to flux units via observations of spectrophotometric standard stars from the list of Stone (1977). The principal emission features are identified, and the prefixes “+” and “-” to these labels denote lines in the redshift and blueshift systems, respectively. Stronger interstellar and telluric absorption features are also labeled. Each division on the ordinate corresponds to 0.83 mag.

# SS 433

- Pourquoi des raies sont-elles décalées?
- Lier  $v$  à  $c$ ,  $\lambda$
- Calculer les décalages extrêmes  $z$  pour ces raies
- Calculer les vitesses extrêmes pour ces raies

# SS 433

- Paraît incroyable, mais raies de Balmer décalées par effet Doppler!!!
- $\Delta\lambda_- ; \Delta\lambda_+ ; v=c(\Delta\lambda/\lambda)$
- $z = \Delta\lambda/\lambda = ?$ 
  - $H\alpha_-:6050\text{\AA}, H\alpha:6600\text{\AA}, H\alpha_+:7600\text{\AA}$ 
    - $z_-=-550/6600 = -0.08; z_+=+1000/6600 = 0.13$
    - $z$  extrêmes de -0.08 à 0.13:  $v = -24\ 000$  à  $+40\ 000$  km/s
- Calcul relativiste:
  - $v = cz = -35\ 000$  à  $+50\ 000$  km/s

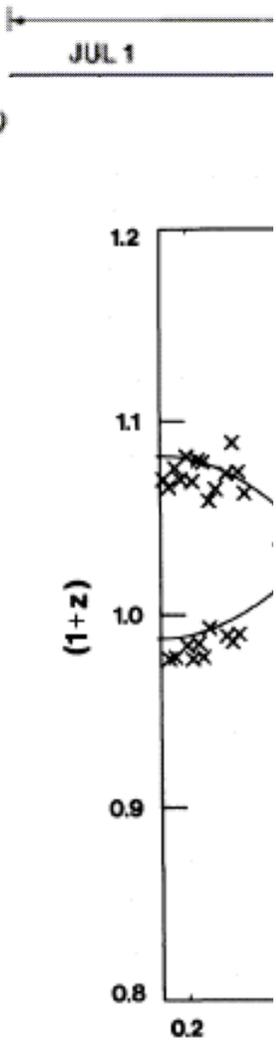


FIG. 2.—The data of Fig. 1 for when the emission lines cross each other. Different plotting symbols are used for data taken at different times. The free parameters as described in the text are  $v = 0.2601 \pm 0.00014$ ,  $\theta = 19.80^\circ \pm 0.18^\circ$ ,  $i = 78.82^\circ \pm 0.11^\circ$ ,  $t_0 = \text{JD } 2,443,562.27 \pm 0.39$ ,  $P = 162.532 \pm 0.062$  days.

shifted He I  $\lambda 6678$  of these data is

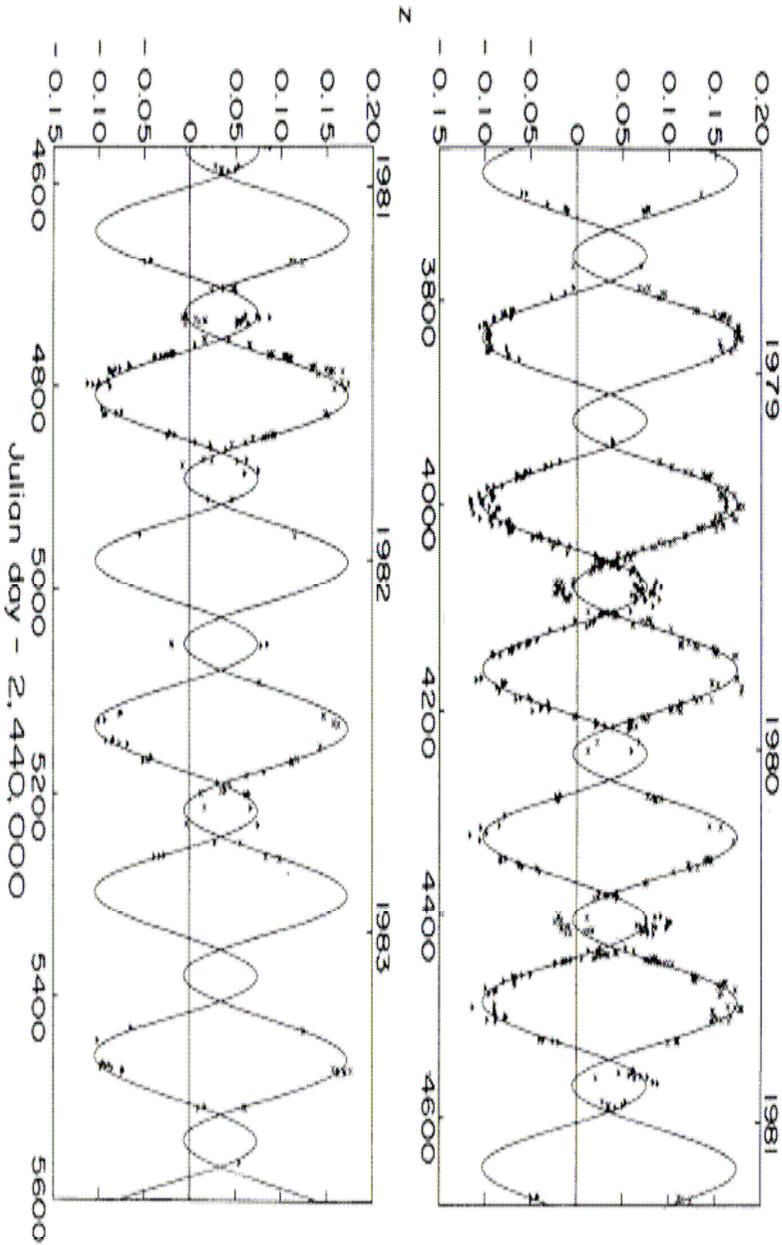
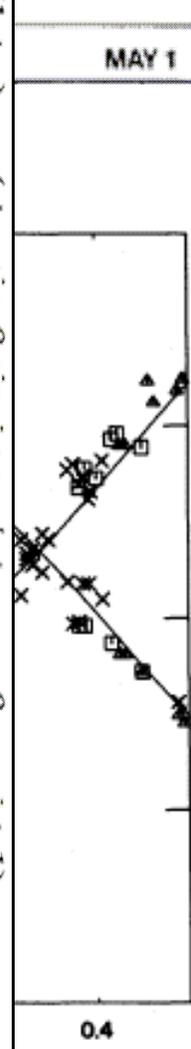


Figure 1 Doppler shifts of SS 433 on 450 nights in the period 1978–83. The majority of these data were obtained by the author and colleagues, supplemented by sources cited in (105). The solid curve is a least-squares best fit to the simple “kinematic model” (1). The free parameter values and their associated  $1\sigma$  uncertainties (notation as in 105) for this fit are  $v/c = 0.2601 \pm 0.00014$ ,  $\theta = 19.80^\circ \pm 0.18^\circ$ ,  $i = 78.82^\circ \pm 0.11^\circ$ ,  $t_0 = \text{JD } 2,443,562.27 \pm 0.39$ ,  $P = 162.532 \pm 0.062$  days.



(1+z) =  $\gamma(\pm v \sin \theta \sin i \cos \psi \pm v \cos \theta \cos i + 1)$ .

1.

and III; viz., phase zero occurs at  $\lambda = 4483.6$ ; triangles, data prior to 1979; crosses, data from 1979 to 1983. The central resolution is  $\pm 0.001 \text{ \AA}$ .

# SS 433

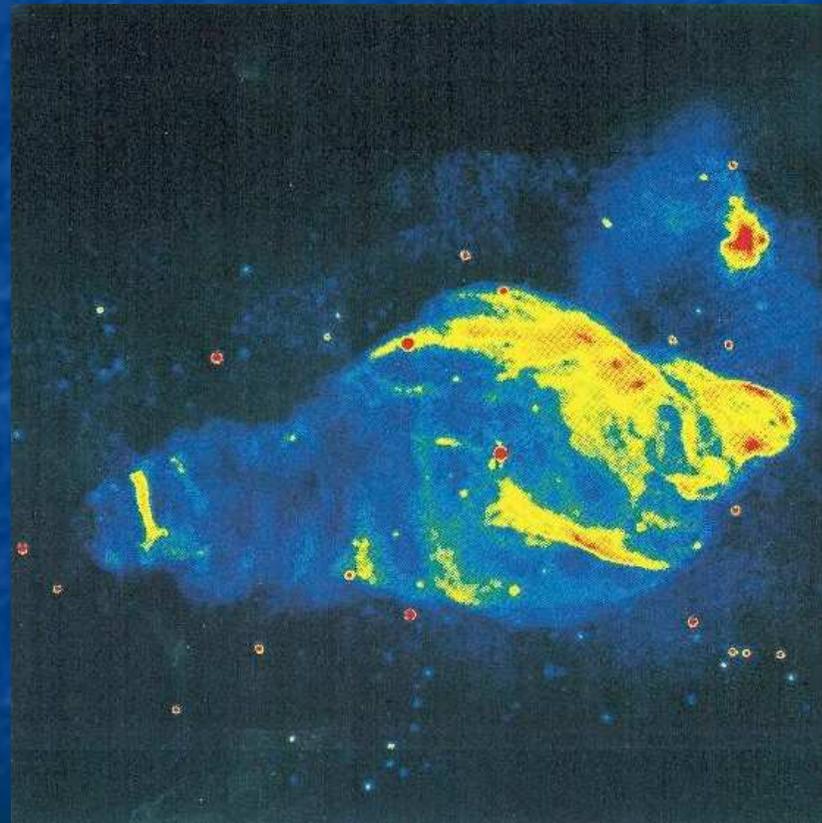
- Quelle est la Périodicité?
- Calculer le facteur de Lorentz  $\gamma=(1+z)$
- Quelle vitesse en déduisez-vous?

# SS 433

- $T = 164 \pm 3$  jours: période de précession
- $T = 13$  jours: période orbitale du système binaire
- $\gamma = (1 + z_{\text{sym}}) = 1.04 = 1/(1 - \beta^2)^{1/2}$
- avec  $\beta = v/c \Rightarrow v = 81\,000 \text{ km/s} = 0.26 c$ 
  - Différent des vitesses mesurées directement sur le spectre à cause du facteur de Lorentz
- Inclinaison  $78^\circ$
- Précession  $20^\circ$ , collimation  $< 4^\circ$

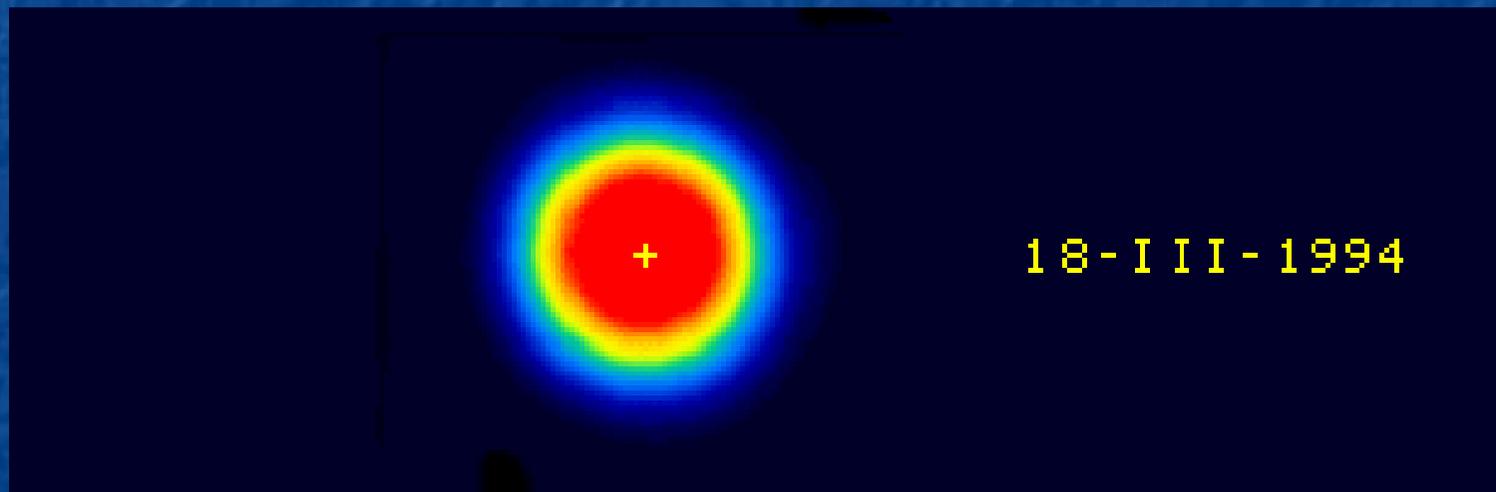
# Le premier microquasar SS 433

- 1979: **Microquasar prototype**: SS 433, comment un astre de la galaxie peut-il émettre de la matière à  $0.26c$  ( $\Gamma=1.04$ )???
  - Margon 1984
- Observations de raies d'émission en optique: le contenu des jets est baryonique
- Unique, et propriétés trop spéciales pour être classé dans une famille

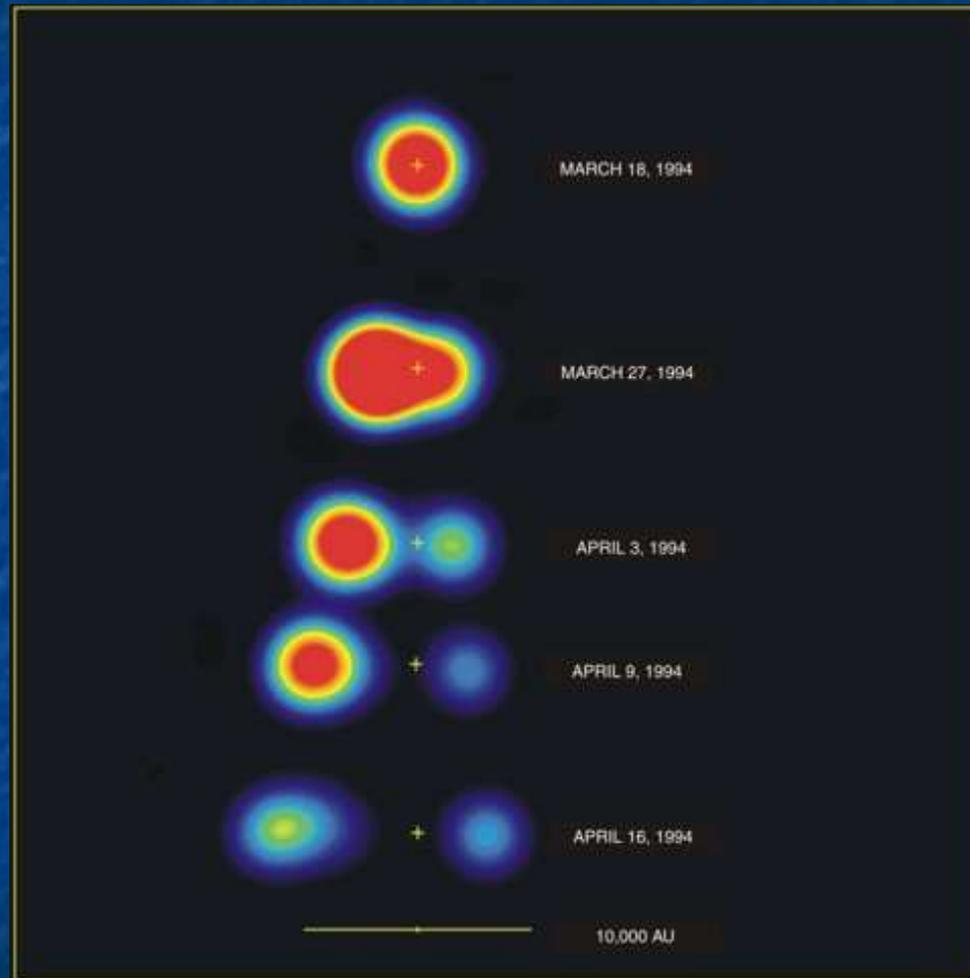


SS433 & W50:  $2^\circ \times 2^\circ$  (Dubner et al., 1998)

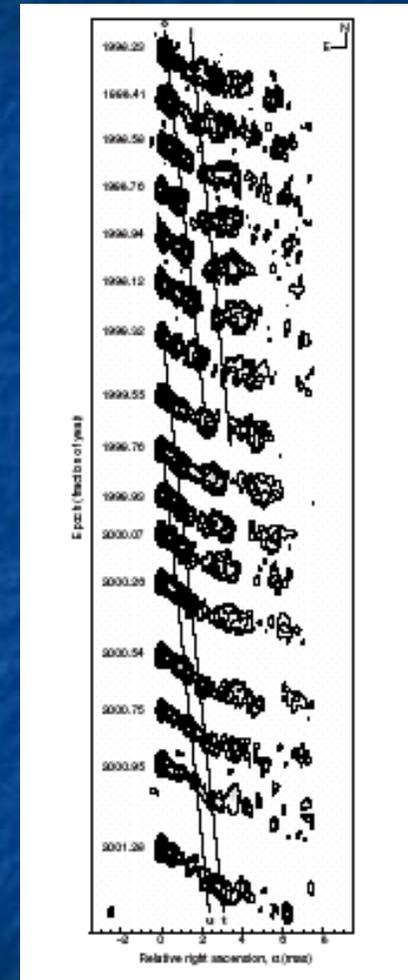
# Microquasar GRS 1915+105



# Microquasars et quasars



GRS 1915+105 observé sur 1 mois



Marscher et al. 2002  
(3C120 observé sur 3 ans)

# Mouvement des nuages

- Calculer la vitesse apparente des jets

# Mouvement des nuages

- vitesse apparente des jets:
  - $d = D \tan \alpha = 10 \text{ kpc} \times \tan 1'' = 0.0485 \text{ pc}$
  - $v = d/t = 578 \text{ 183 km/s} = 1.93c$ 
    - $= (0.0485 \times 3.09 \times 10^{13}) / (30 \times 86400)$

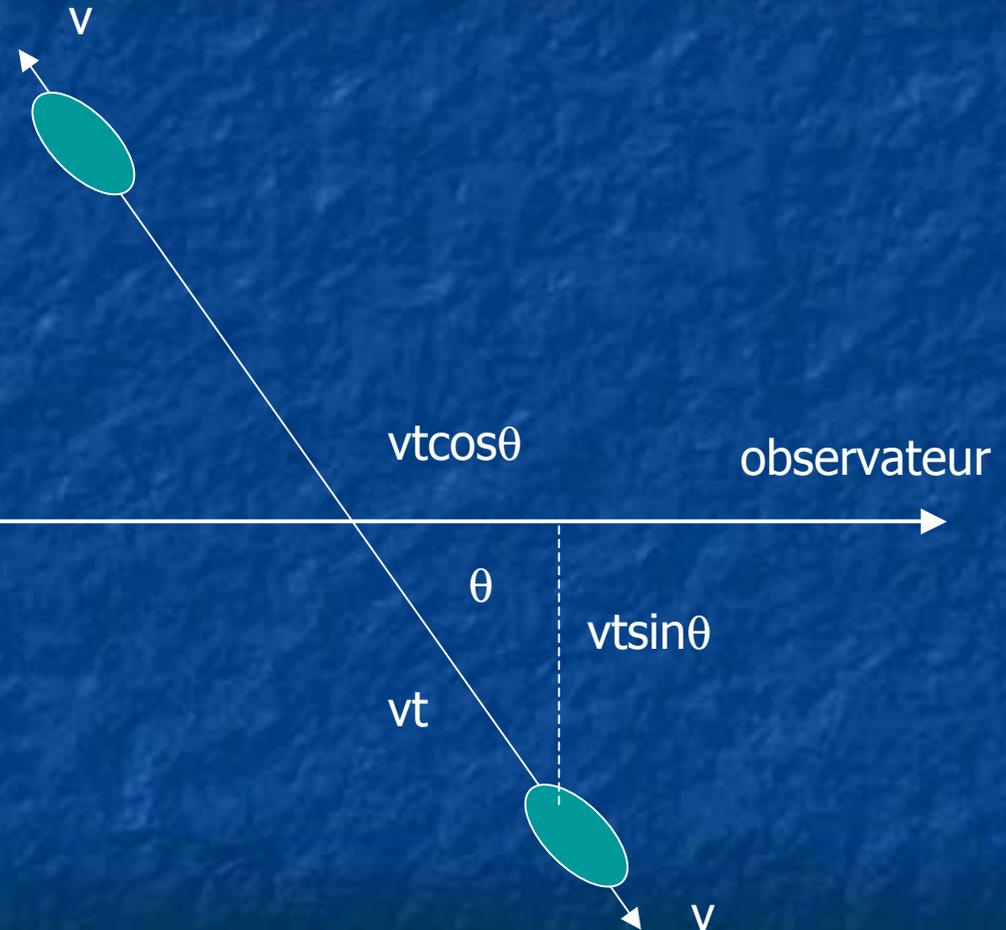


# Mouvement superluminaire

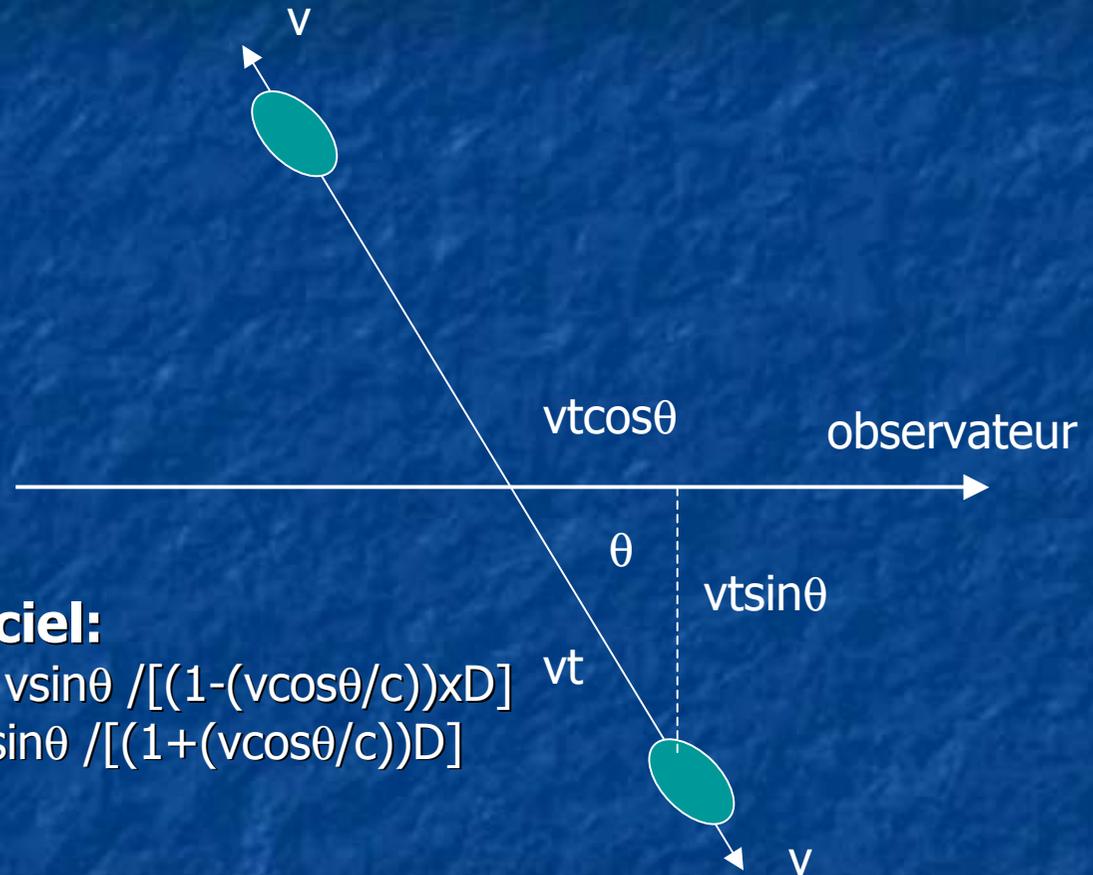
- Comment expliquer des vitesses superlumineuses?
- Re-calculer la vitesse des jets (dans le référentiel source)
- Calculer le mouvement propre des jets
- Faire le calcul pour  $\theta=70^\circ$  et  $v=0.92c$

# Mouvement superluminaire

- Nuage s'est déplacé de  $vt$
- Projection: l'observateur voit  $v t \sin \theta$
- Nuage s'est rapproché de l'observateur de  $v t \cos \theta \Rightarrow$  temps de déplacement vu par l'observateur  $t' = t - (v t \cos \theta / c)$
- Vitesses apparentes
  - du nuage s'approchant:  
 $v_a = v \sin \theta / (1 - (v \cos \theta / c))$   
peut être  $> c$
  - du nuage s'éloignant:  
 $v_r = v \sin \theta / (1 + (v \cos \theta / c))$



# Mouvement superluminaire



- **Mouvement propre sur le ciel:**

- du nuage s'approchant:  $\mu_a = v \sin \theta / [(1 - (v \cos \theta / c)) \times D]$

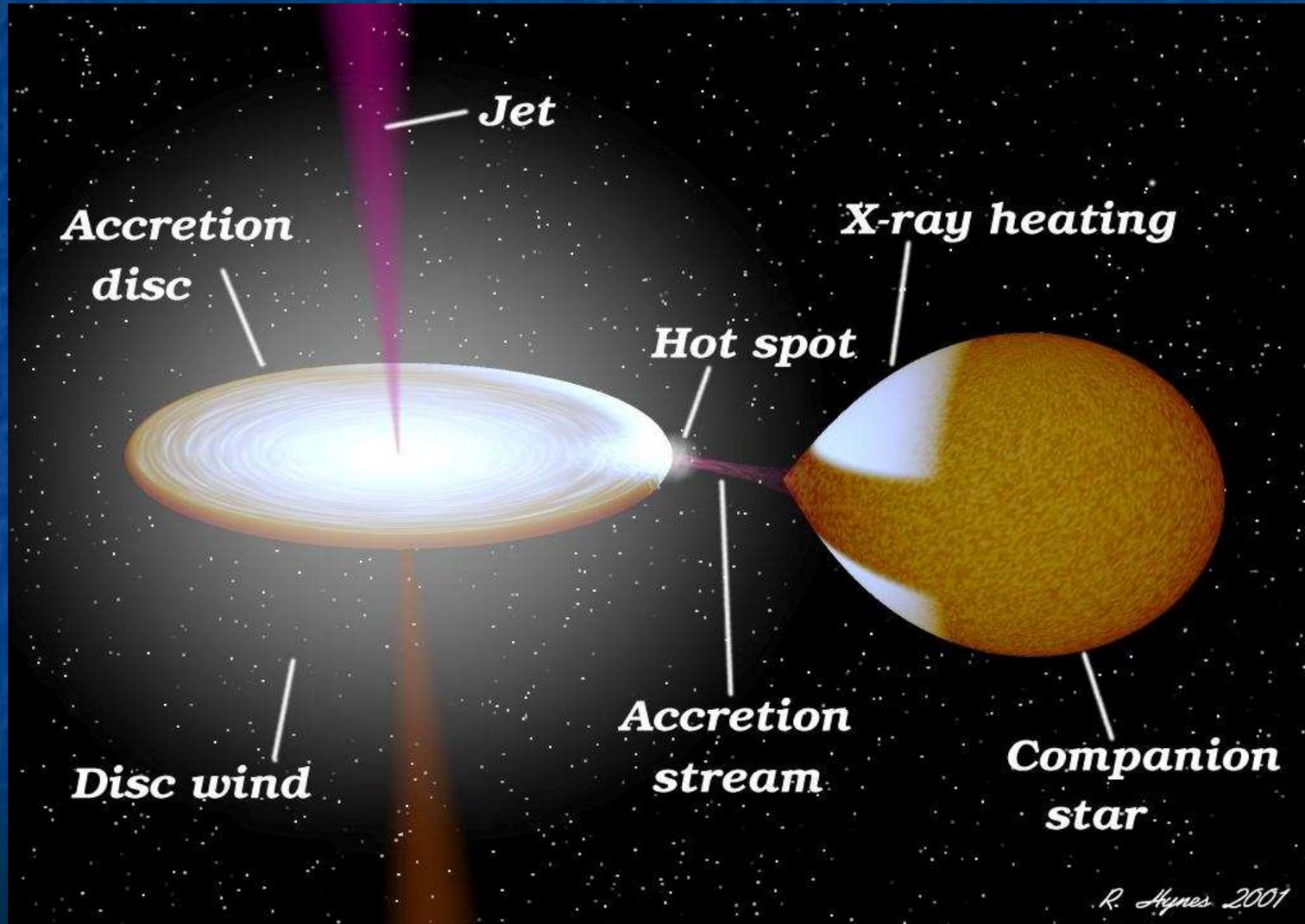
- du nuage s'éloignant:  $\mu_r = v \sin \theta / [(1 + (v \cos \theta / c)) D]$

$\mu_a$  et  $\mu_r$  en rad/s

- **Longueur d'onde des raies spectrales:**

$$\lambda_{a,r} / \lambda_{\text{repos}} = (1 \pm (v/c) \cos \theta) / (1 - (v/c)^2)^{0.5}$$

# Microquasar



# Distances cosmologiques...

- Pourquoi dit-on que l'univers est en expansion?
- Que mesurons-nous?
- Qu'en déduisons-nous?

# Distances cosmologiques...

- Expansion de l'Univers: Edwin Hubble (1930) décalage vers le rouge des galaxies
- Loi de Hubble:  $v = H_0 \times d \sim \Delta\lambda/\lambda$ 
  - «  $H_0$  » constante km/s/Mpc
- Détermination des distances de 100 Mpc aux confins de l'Univers
  - pas possible avec vitesses des galaxies proches, affectées par la gravitation du superamas de la Vierge
  - Basée sur les autres indicateurs de distances, « bougies standards »

# Bibliographie

- Exoplanètes:
- SS 433:
  - Margon et al., 1979, ApJ, 230, L41
  - Margon et al., 1979, ApJ, 233, L63
  - Margon et al., 1980, ApJ, 241, 306
  - Margon, 1984, ARAA, 22, 507
- Vitesses superluminiques:
  - Mirabel & Rodriguez, 1994, Nature 371, 46
  - Mirabel & Rodriguez, 1998, Nature 392, 673

# C'est fini...

- Bon courage pour la suite!...
- ... et à l'année prochaine
  - **Les jets dans l'Univers**