Mesure de la distances des galaxies

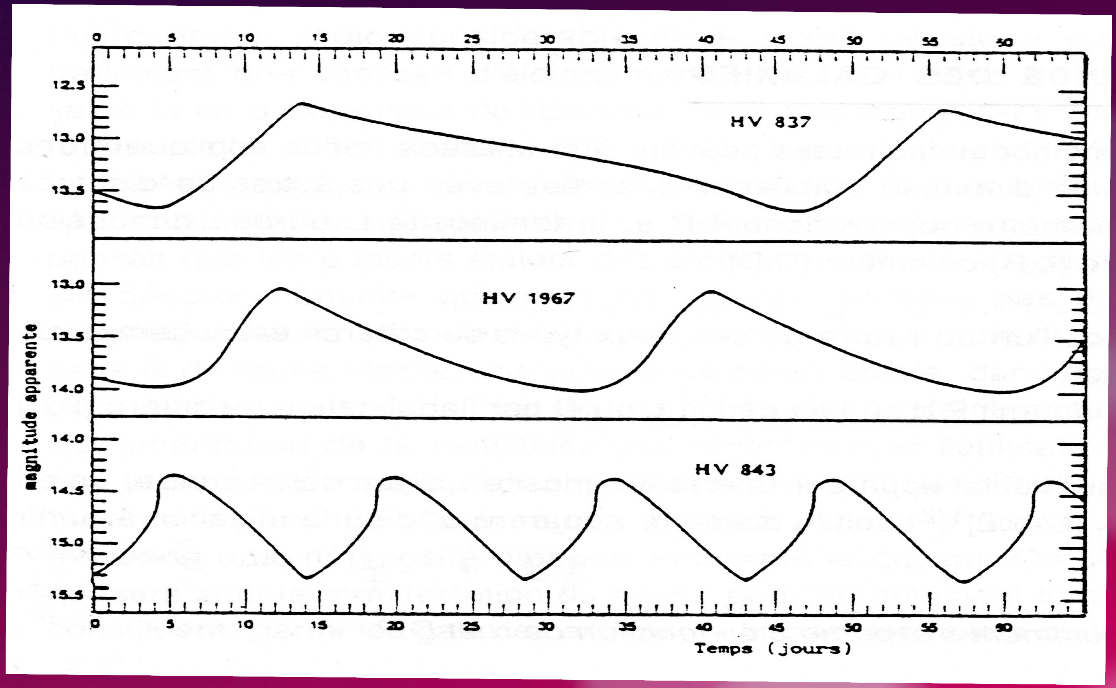
Alain Brémond

Méthodes

- A partir des étoiles variables céphéides
- La loi de Tully-Fisher
- La relation de Hubble
- Autres méthodes

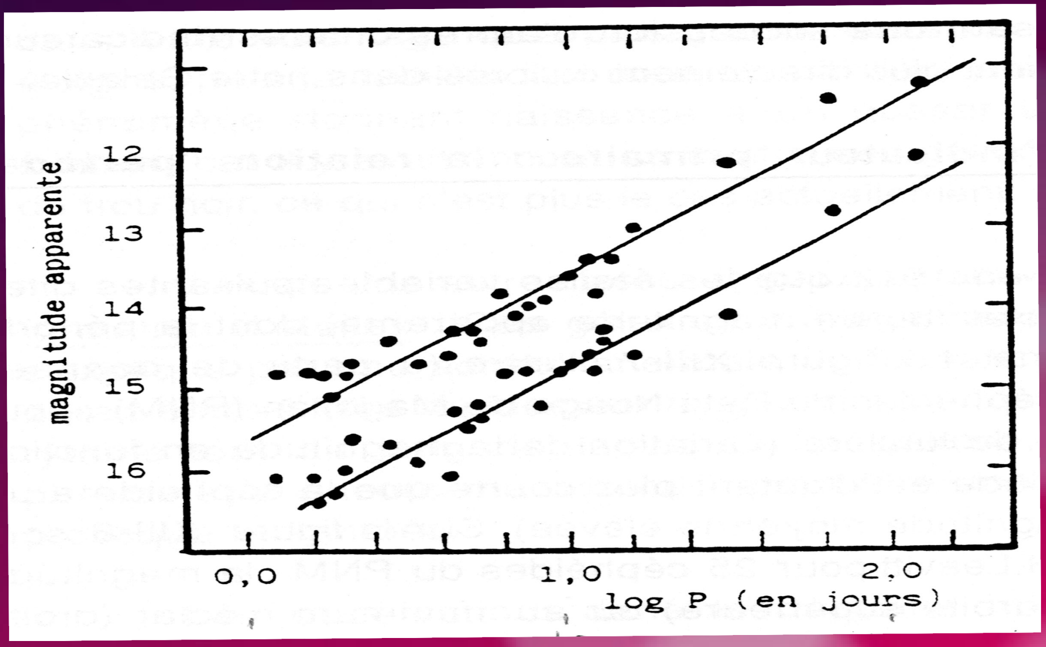
La distance par les céphéides

- Calcul de la magnitude moyenne
  - $<m> = (m_{max}-m_{min})/2$
- Et de la période



H. Leavitt : Il existe une relation entre la période et la luminosité apparente (magnitude).

- $m = a . \log(p)$
- A correspond à la pente de la courbe



- Comme toutes les céphéides sont dans le petit nuage de Magellan (PNM), elles sont toutes à la même distance de la Terre
- Connaissant la distance du PNM (hier) ou des céphéides de distances connues, on peut transformer la magnitude apparente en magnitude absolue grâce à la formule du module de distance :
- $m – M = 5 \log(d) – 5$ avec d en pc
- Que l'on transforme en $M = m - 5 \log(d) + 5$

La relation devient alors :

$$<M> = a \log(P) + b$$

En pratique :

Dans une galaxie, on repère des céphéides

On mesure leur magnitude apparente **m** et leur période **P**

La relation <M> = a log(P) +b permet de calculer M

Avec la relation m – M = 5 log(d) – 5 on calcule d : **d** $=10^{((5-m-M)/5)}$

Exemple de la galaxie d’Andromède par Hubble (1925) :

<m> = 18,2 et m-M = 21,9

D = 239800 pc = 782000 a.l.

Cepheids in M 31.

Var. No.	Period in Days.	Log. P.	Photographic Magnitude, Max.
5	50·17	1·70	18·4
7	45·04	1·65	18·15
16	41·14	1·61	18·6
9	38	1·58	18·3
1	31·41	1·50	18·2
12	22·03	1·34	19·0
13	22	1·34	19·0
10	21·5	1·33	18·75
2	20·10	1·30	18·5
17	18·77	1·28	18·55
18	18·54	1·27	18·9
14	18	1·26	19·1

Cette distance est sous-estimée pour 3 raisons :
- Mauvaise calibration (le b de la formule)
- L'absence de prise en compte de l'absorption interstellaire
- Une définition imprécise des céphéides

Amélioration de la courbe de calibration
1952 : W. Baade : les distances sont multipliées par 2
Années 1990 : HST

Limites des mesures de distance par les Céphéides : sur Terre : 4 Mpc, par satellites : > 20 Mpc.

La méthode de Tully-Fisher (1977)

- Basée sur la mesure de la vitesse de rotation des galaxies spirales en radioastronomie (raie 21 cm de l’hyrogène neutre).

Calibration de la relation de Tully et Fisher

- On part de galaxies de distances connues, mesurées grâce aux céphéides.
- On calibre la relation entre la vitesse maximale et la magnitude absolue de chaque galaxie

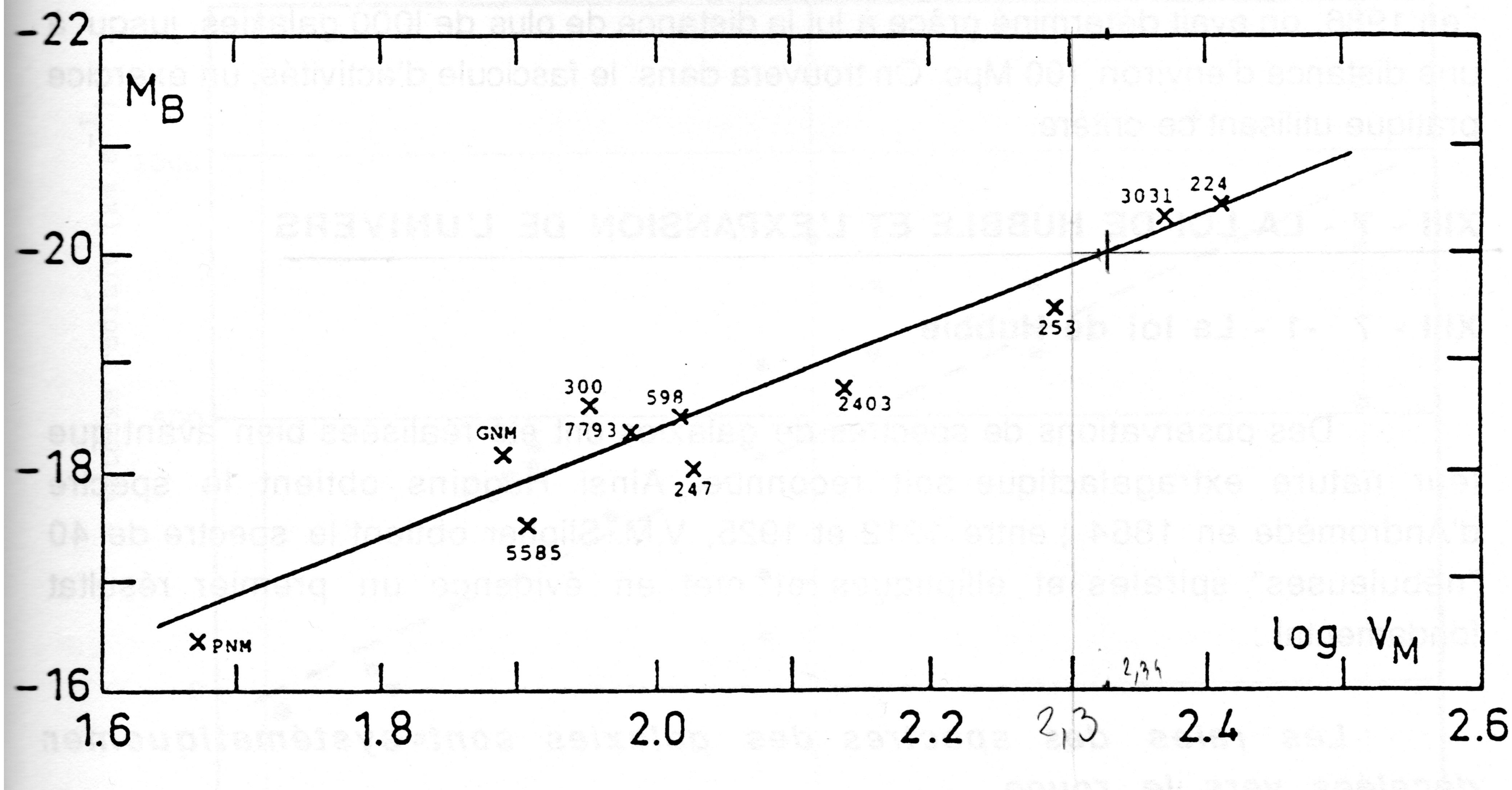


Fig. XIII-9- Relation de Tully et Fisher entre la magnitude absolue bleue M_B et la vitesse maximum de rotation V_m (en km s^{-1}) pour les galaxies proches de distance connue.

$$-M_B = 5 \log V_m + 8{,}40$$

- En pratique :
- On mesure la Vmax de rotation de la galaxie et sa magnitude apparente m
- On en déduit sa Magnitude absolue M

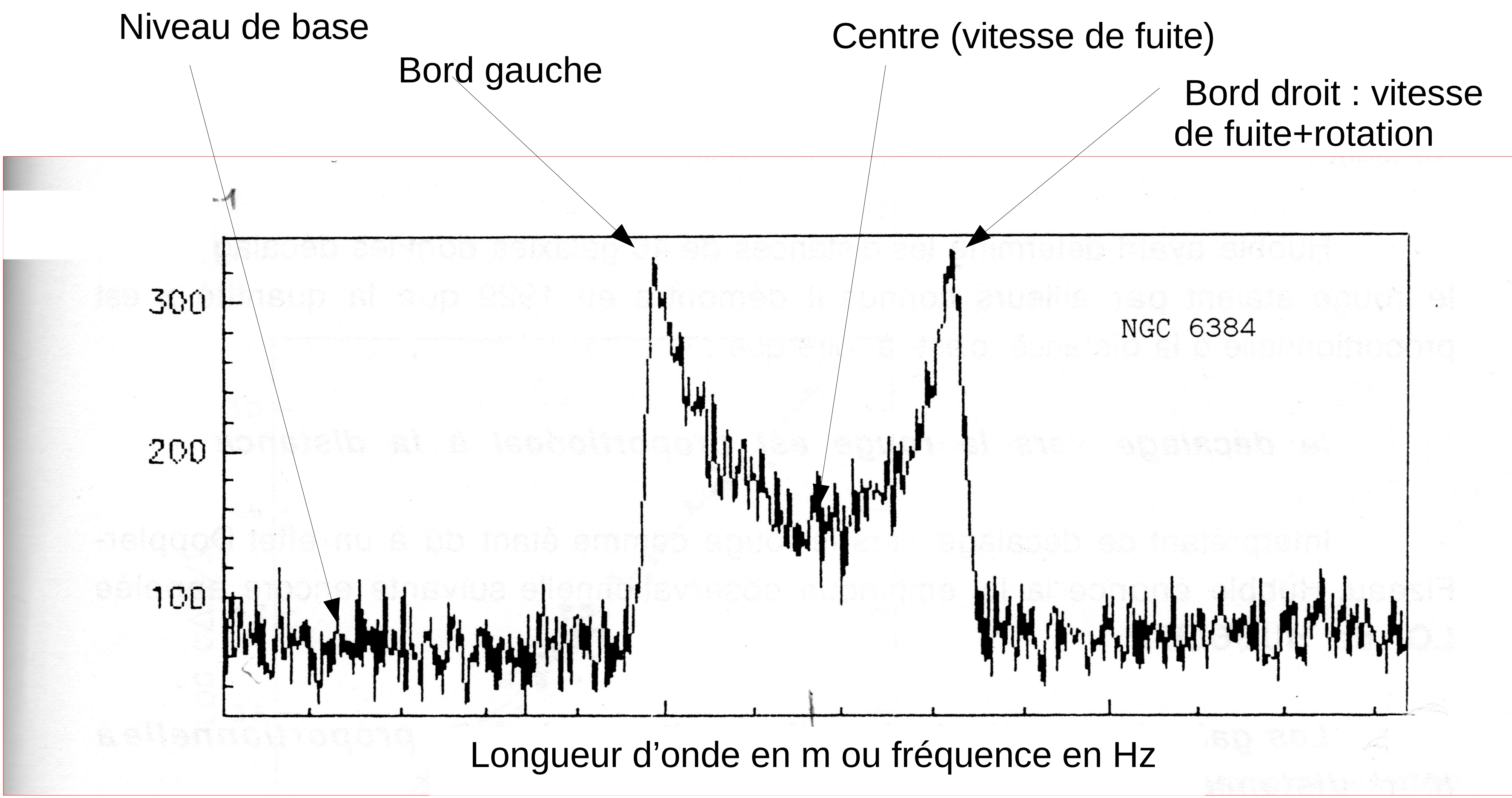
$$-M = 5 \log Vm + 8,4$$

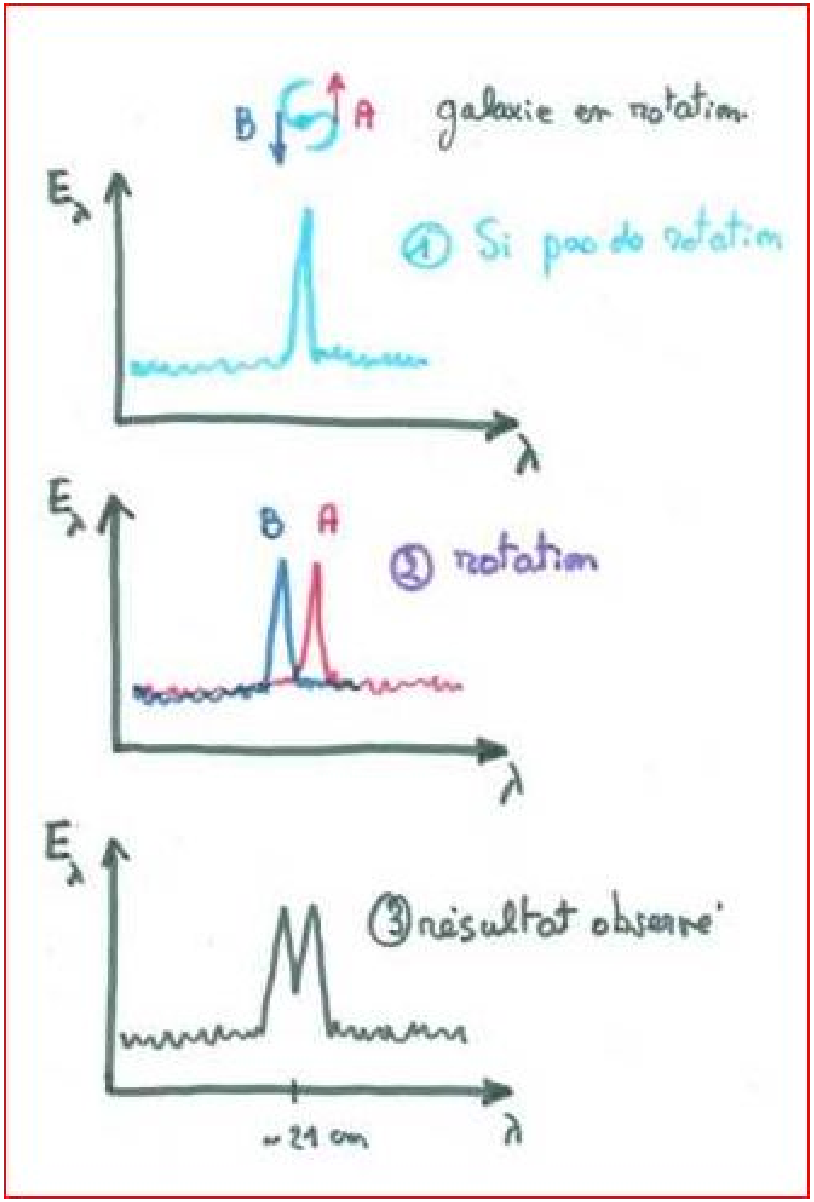
- Puis on calcule sa distance :

$$d = 10^{((5-m-M)/5)}$$

En pratique

- On étudie une galaxie inclinée (pourquoi?).
- On obtient le signal suivant qui est la raie 21 cm de l’hydrogène neutre : 21 cm = 0.21 m.
- Explications de la courbe obtenue :


Niveau de base
Bord gauche
Centre (vitesse de fuite)
Bord droit : vitesse de fuite+rotation
300
200
100
NGC 6384
Longueur d’onde en m ou fréquence en Hz



B A galaxie en rotation
E_λ
① Si pas de rotation
λ
E_λ
B A
② rotation
λ
E_λ
③ résultat observé
~ 21 cm
λ

Longueur d’onde de « repos » : objets émetteur immobile : 21 cm = 0,21m

Fréquence $\nu = c / \lambda = 300\ 000\ 000 / 0.21$

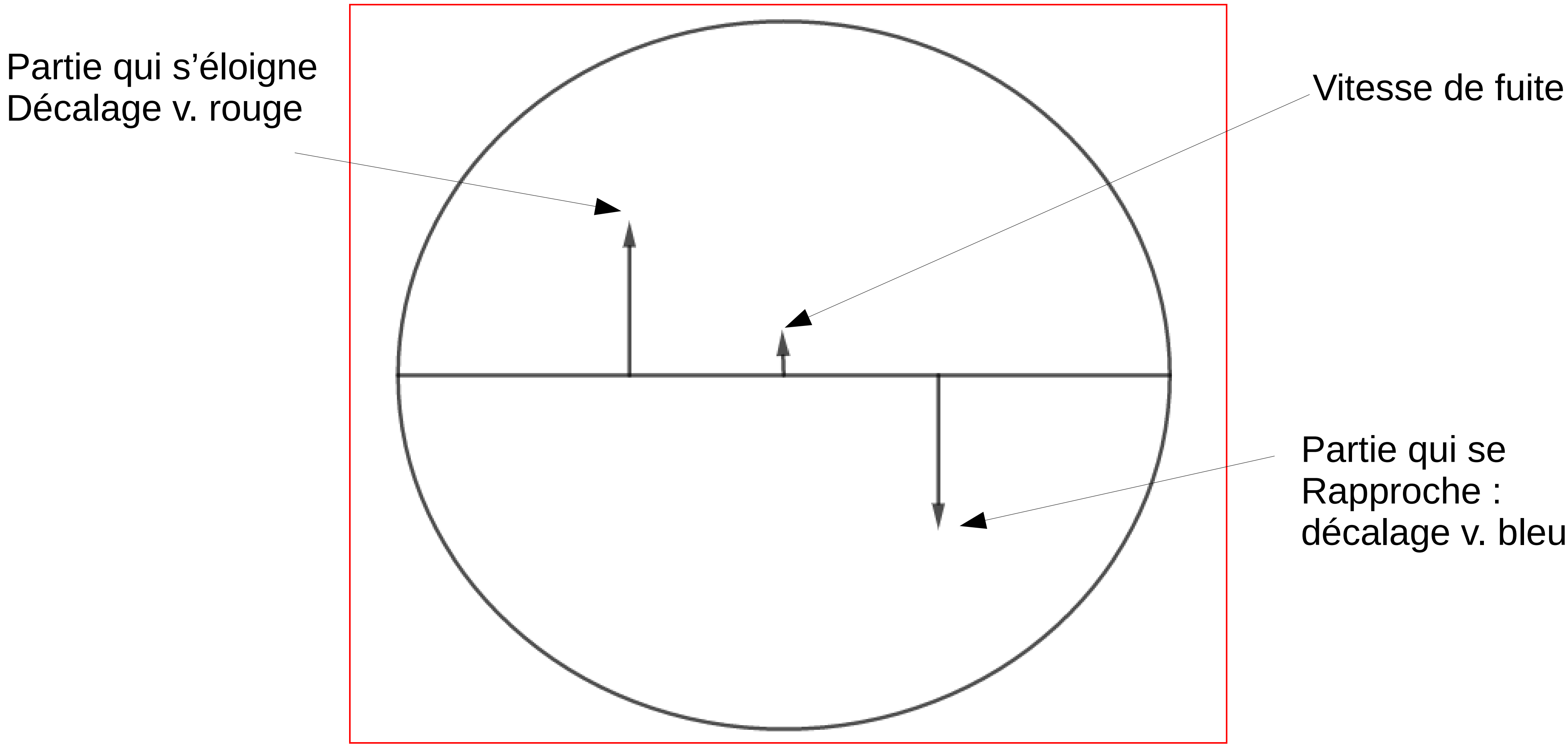
$\nu = 1428$ MHz

Le décalage spectral et la vitesse de rotation

- λe = longueur d'onde émission
- λo = longueur d'onde observée
- Décalage relatif : $z = (\lambda e - \lambda o) / \lambda e$
- Loi de Doppler-Fizeau : $V_{radiale} = c.\, z$
- Donc connaissant z, on obtient la vitesse radiale

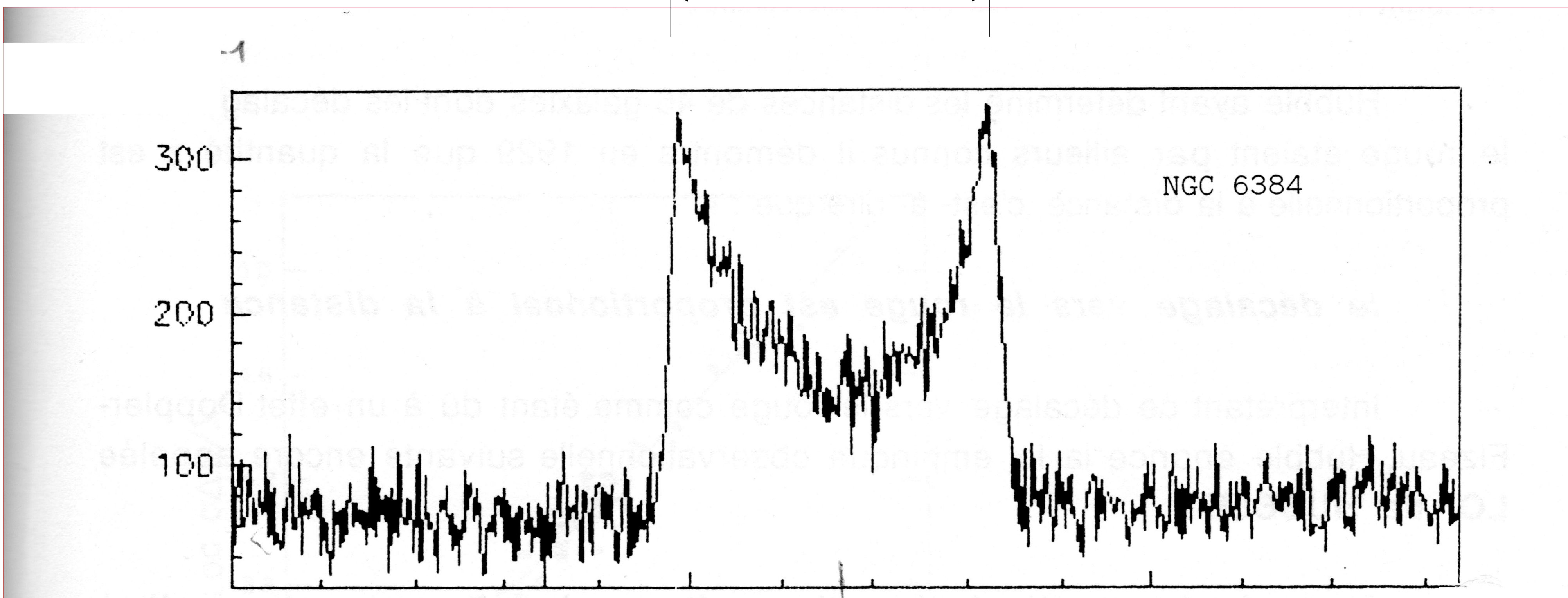
Revenons à notre galaxie

- On veut mesurer sa vitesse de rotation.
- Sur une galaxie vue de face (un cercle), il n'y a pas de composante radiale
- Sur une galaxie inclinée, il y a deux composantes radiales de la vitesse de rotation : un côté se rapproche (décalage vers le bleu et un côté s'éloigne, décalage vers le rouge)


Partie qui s’éloigne
Décalage v. rouge
Vitesse de fuite
Partie qui se
Rapproche :
décalage v. bleu

Elargissement de la raie
21 cm correspond à deux
fois le vitesse radiale

5,4 cm

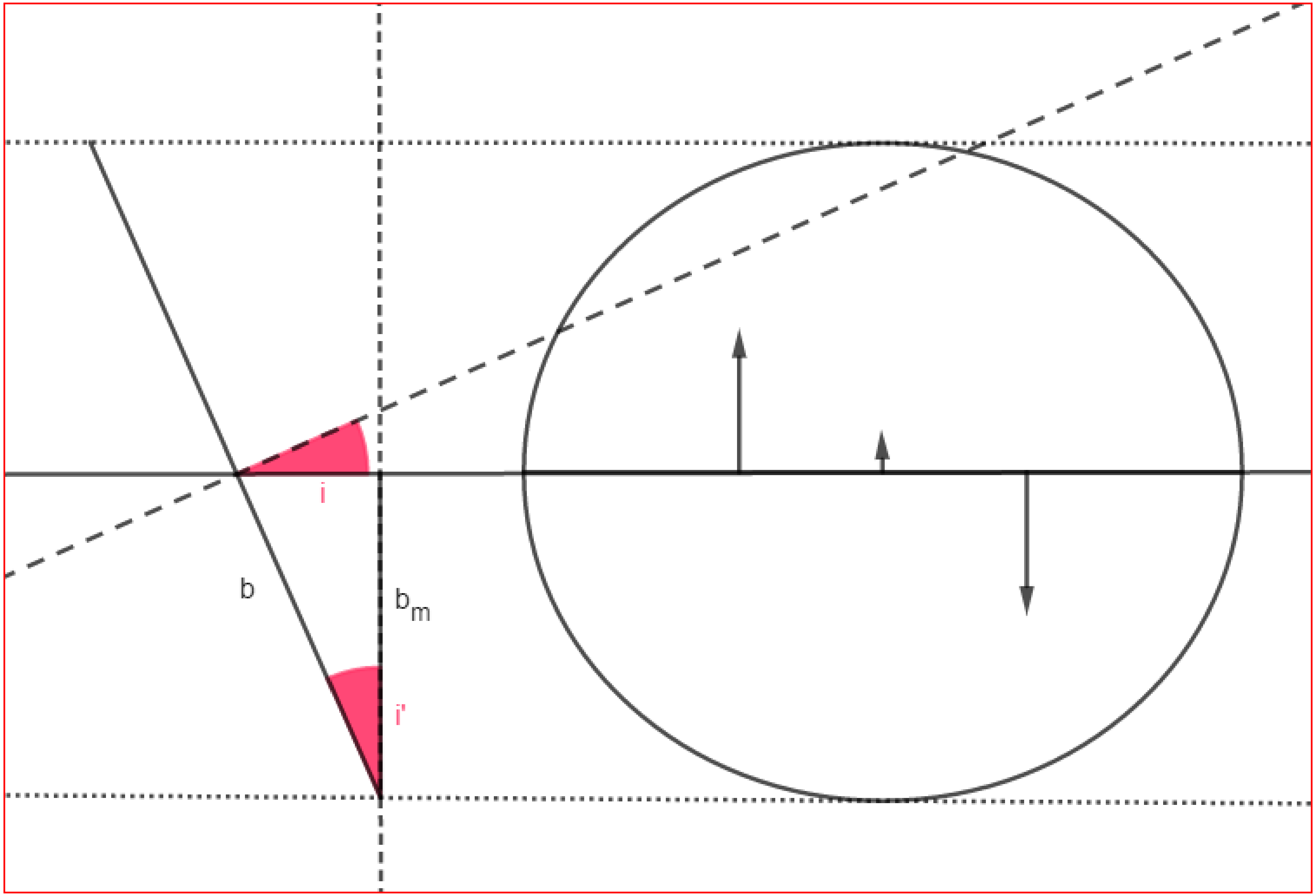


Longueur d’onde en m ou fréquence en Hz

On mesure donc le décalage W en mètre.
La relation Vr = cz donne la vitesse radiale,
En réalité on a 2 Vr (voir schémas)
Vr = cz /2

Mais en fait ce qu’on mesure ici doit être corrigé de l’inclinaison de la galaxie.

Mais comment mesurer l’inclinaison d’une galaxie ?



On a : bm (celui qui est mesuré) et b le petit axe réel
Et bm = b cos(i) donc i = arccos(bm/b)
Or en réalité sur la galaxie b = a (le grand axe puisque la galaxie est un cercle)
Donc i = arcos(b/a)

On a maintenant la vraie valeur de la vitesse de rotation qui est Vm . sin i

Tully et Fischer ont mesuré dans des galaxies dont la distance était connue par les céphéides : Vr et m dont ils ont tiré M
Puis tracé la relation entre M et Vr

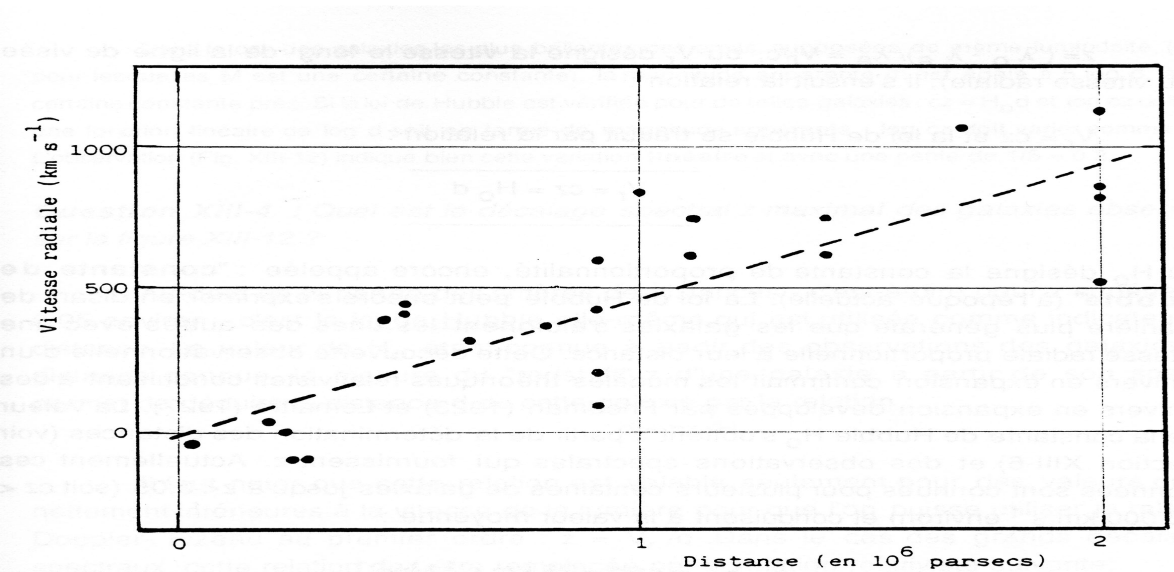
Maintenant, dans une galaxie quelconque, il suffit de mesurer sa Vr et sa magnitude apparente pour avoir sa magnitude absolue
Puis, sa distance avec
$M - M = 5 \log(d) - 5$ d en pc.

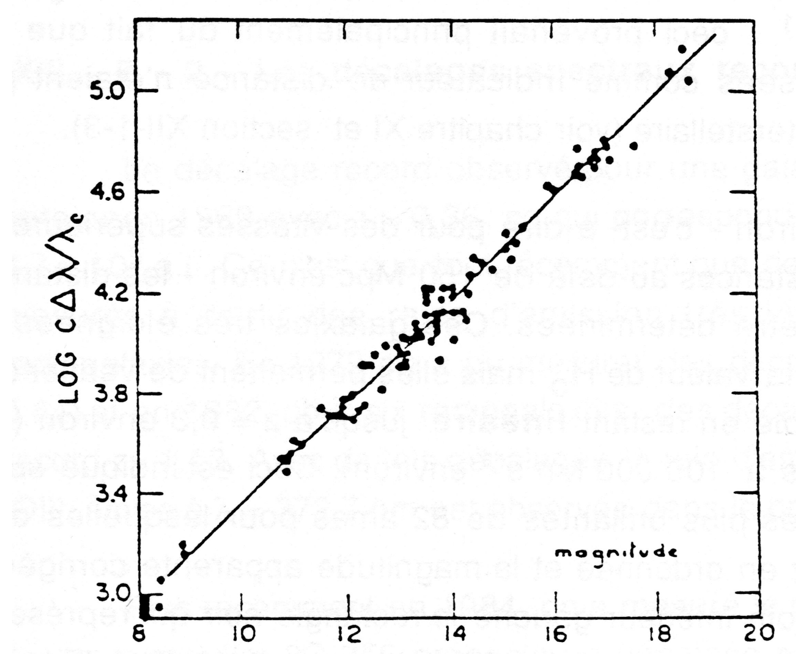
La relation de Hubble

- Hubble a montré que les galaxies avaient (en général) un mouvement de fuite par rapport à la notre.
- Que cette vitesse de fuite était proportionnelle à la distance de ces galaxies (1929) :

  $V = H0\ d$ où $H0$ est la constante de Hubble.
- On mesure V grâce à l'effet Doppler
- D'où on tire la distance d.

Courbe de Hubble à gauche et courbe basée sur 83 galaxies à droite.





Principe des mesures

- 1 - le décalage spectral
  - On mesure la longueur d'onde d'une raie d'un corps au laboratoire : λ_e.
  - On repère cette raie dans le spectre de la galaxie
  - On constate que ces deux raies ne sont pas à la même position : la raie dans la galaxie est décalée vers le rouge
  - Selon Doppler et Fizeau cela indique que la galaxie s'éloigne de l'observateur.

$$z = \Delta\lambda/\lambda_e = (\lambda_o - \lambda_e) / \lambda_e$$

- 2 – Ce décalage z est proportionnel à la distance :
  - $V_r = cz = H_0\ d$

- 3 – En étudiant plusieurs galaxies Hubble calcule la valeur H0. Elle est aujourd'hui estimée à 71 $km.s^{-1}.Mpc^{-1}$

- 4 – On peut mesurer z pour des galaxies très lointaines avec des télescopes puissants et donc leurs distances.
- Attention lorsque z tend vers 1 il faut utiliser la correction de Lorentz (effet relativiste)

Autres méthodes

- SN Ia
- Amas globulaires dans les galaxies