

# L'infiniment grand

**Yannick Mellier**

Institut d'Astrophysique de Paris

# **L'infiniment grand**

## **l'Univers de la cosmologie moderne**

**Yannick Mellier**

Institut d'Astrophysique de Paris

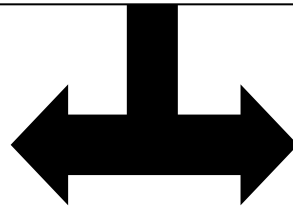
# **I. Petit panorama de la cosmologie contemporaine**

# Comprendre l'Univers

Conditions initiales  
Défauts topologiques  
Fluctuations quantiques...

Géométrie globale  
  
Ouvert  
Plat  
Fermé  
Taux d'expansion...

Contenu en matière  
et énergie  
  
Baryons  
Leptons (e,  $\nu$ , ...), DM?, DE



## Paramètres cosmologiques

$\Omega_M$  densité de matière  
 $\Omega_\Lambda$  Constante cosmologique  
 $H_0$  Constante de Hubble  
Etc...

## Spectre de puissance de la matière

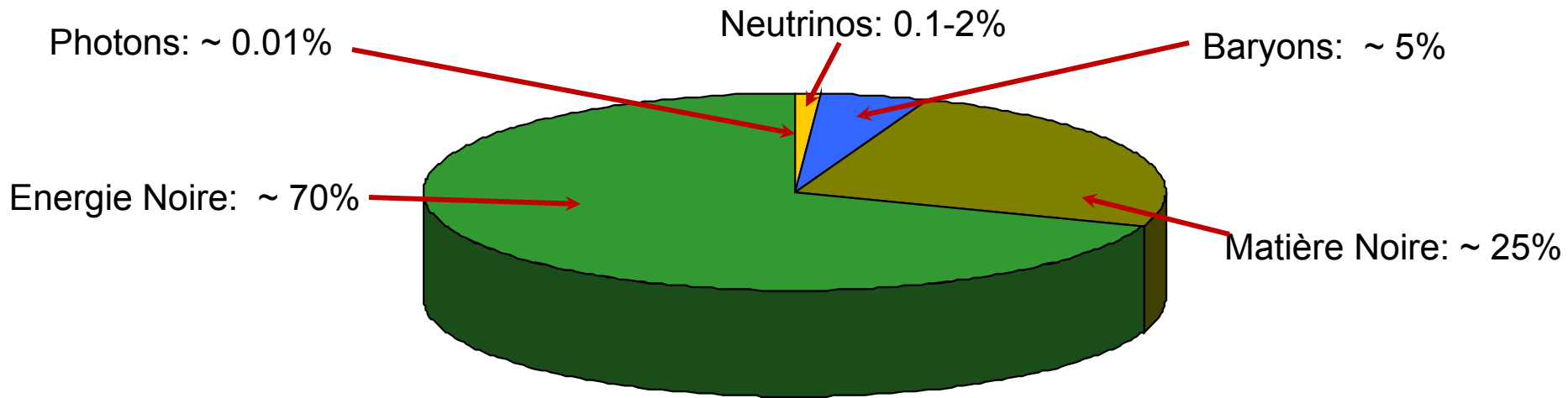
$\Omega_b$  densité en masse de baryons  
 $n$  Indice spectral primordial  
Etc...

Sonder les propriétés de l'Univers

→ déterminer des *paramètres cosmologiques*

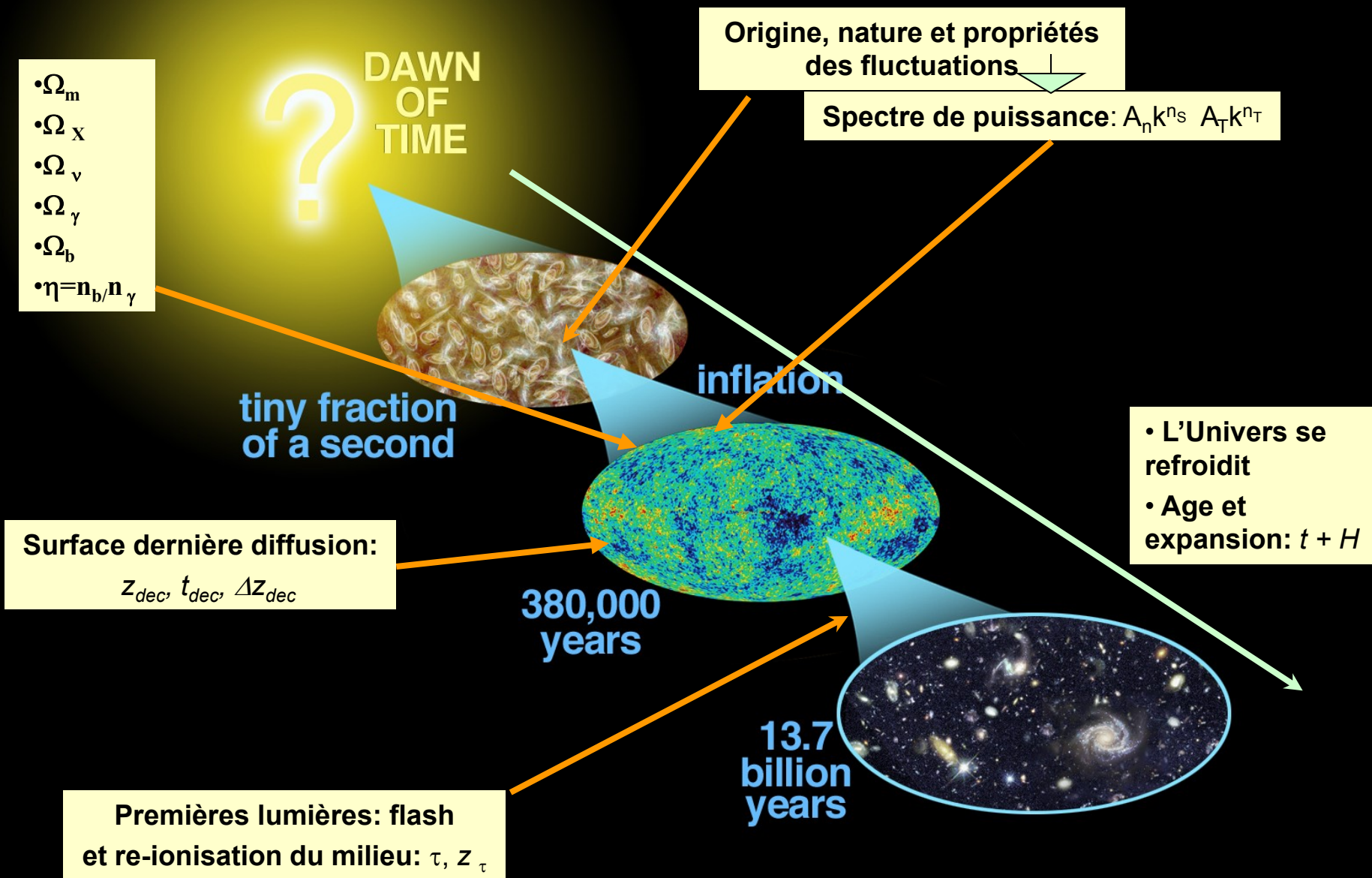
# Le paradigme actuel

- Un univers structuré et en expansion accélérée
- Contenu en énergie/matière:



- Mécanisme de formation des grandes structures
  - Fluctuations quantiques d'un champ primordial;
  - Instabilité gravitationnelle, dans un univers dominé par de la matière noire « froide » ;
  - Structuration progressive et effondrement ultime selon les paramètres cosmologiques et les processus dissipatifs affectant les baryons.

# Histoire de l'Univers et paramètres cosmologiques



# Comment explorer l'organisation de Univers?

# Comment explorer l'organisation de Univers?

Avant tout par l'observation et la  
connaissance des **distances** des  
objets qui nous entourent



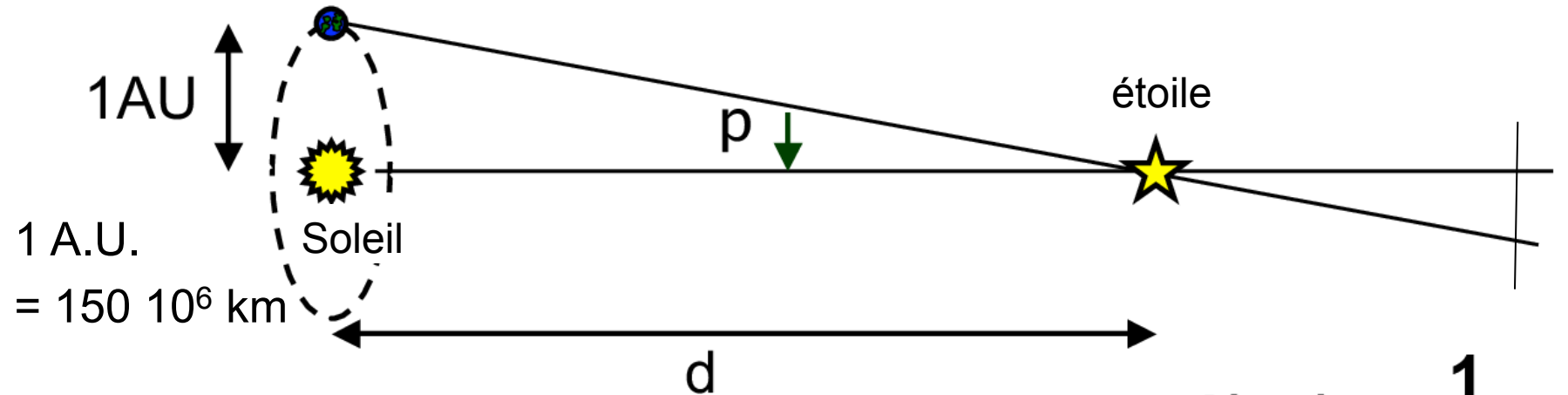
# **II. L'échelle des distances extragalactiques**

# Pourquoi mesurer des distances?

- Déterminer des propriétés intrinsèques des objets composants l'Univers:
  - Luminosité, masse, dimension, vitesse
  - Lois liant ces propriétés
- Décrire l'organisation des objets dans l'univers
- Calibrer des propriétés d'objets proches pour mesurer les distances d'objets plus lointains
- Décrire les propriétés globales de l'Univers et tester les modèles cosmologiques
  - déterminer la « constante de Hubble »
- Reconstruire l'histoire de l'Univers et de ses constituants (distance = temps)

# Mesurer des distances dans l'Univers

- Parallaxes



$$d(\text{pc}) = \frac{1}{\pi(")}$$

$$\rightarrow 1 \text{ pc} = 3.26 \text{ a.l.}$$

$$\rightarrow \sim 3.26 \cdot 10^{13} \text{ km}$$

- Télescope au sol :

$p$  mesurable jusqu'à 0.01" ( $d=100 \text{ pc}$ )

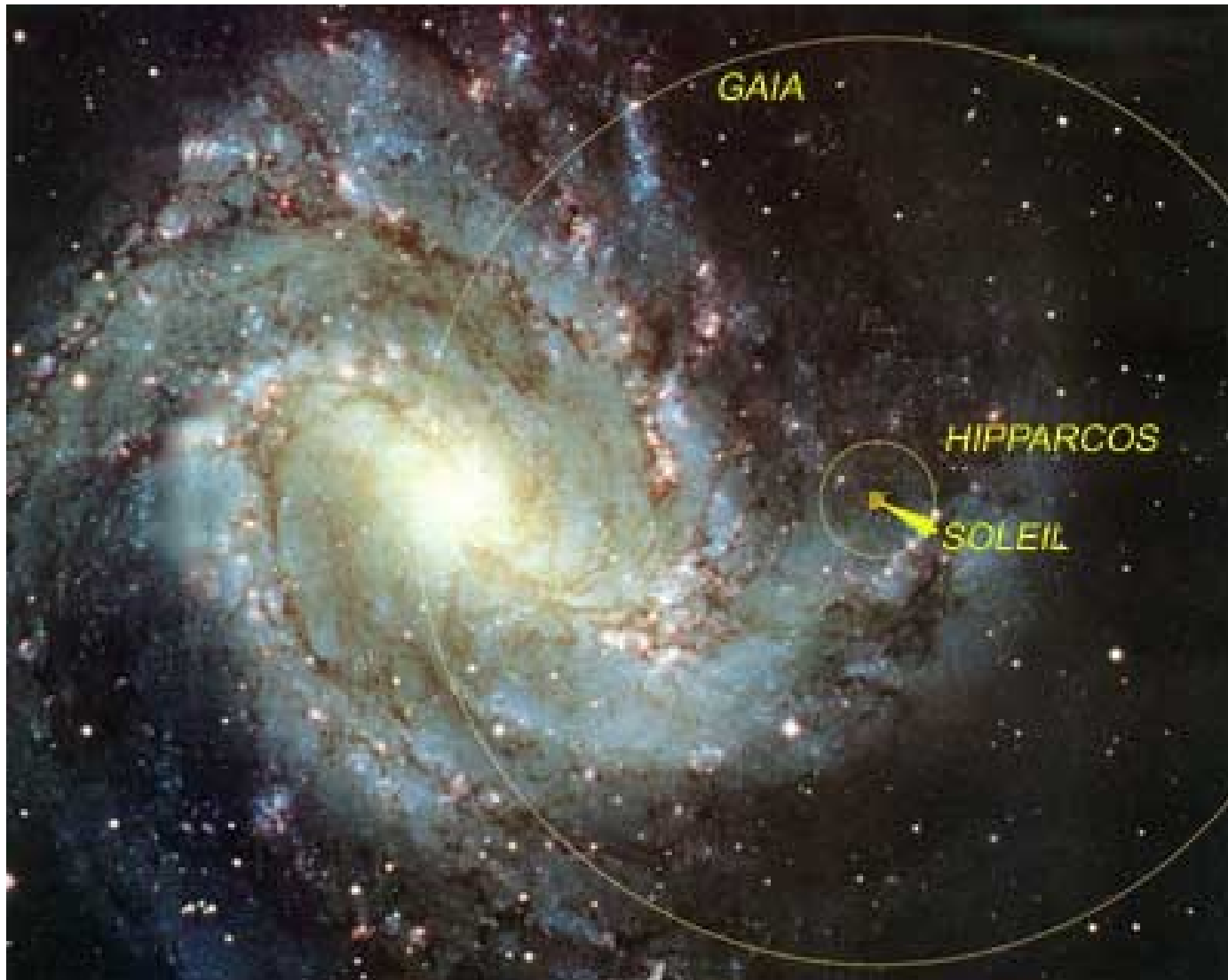
- Hipparcos:

$p$  mesurable jusqu'à 0.002" ( $d=500 \text{ pc}$ )

- GAIA :

$p$  mesurable jusqu'à  $2 \cdot 10^{-5}$ " ( $d= 50,000 \text{ pc}$ )

# Mesurer des distances dans l'Univers

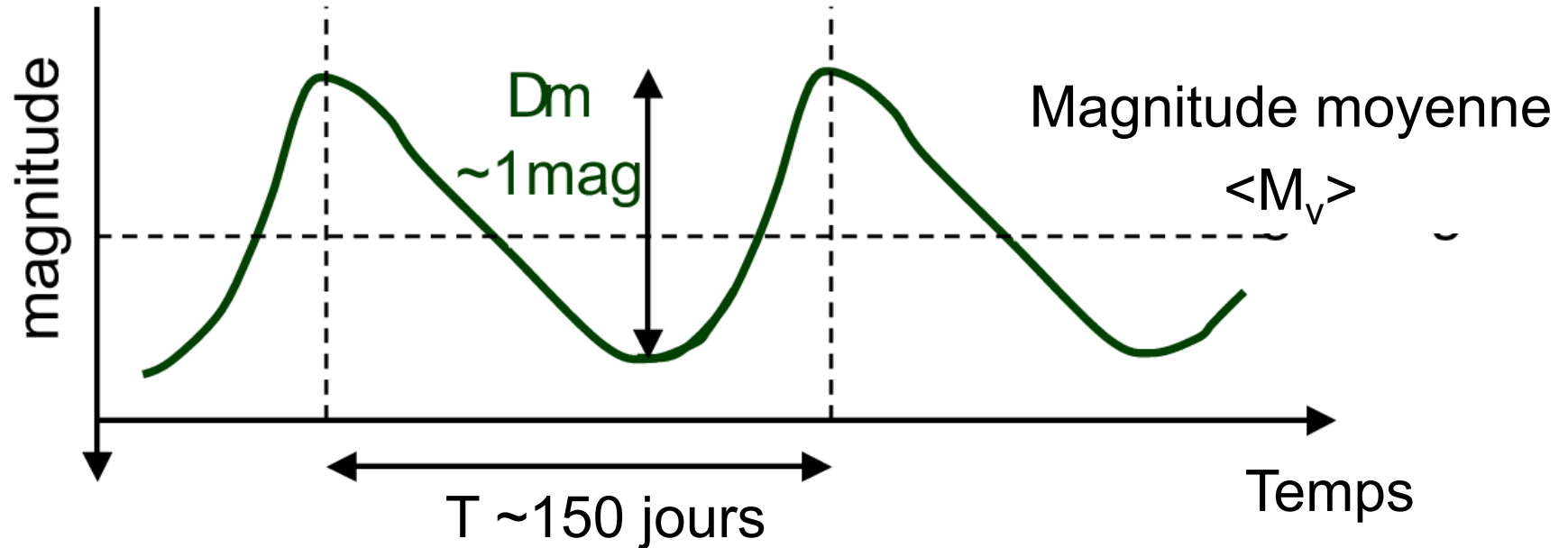


12

Distances mesurables avec les mêmes précisions pour Hipparcos et GAIA)

# Mesurer des distances dans l'Univers

- Etoiles pulsantes Céphéides



- Hebrietta Lewitt (1912) : relation entre la période de variabilité ,  $T$ , et la luminosité intrinsèque,  $L$ , de la Céphéide:

$$\langle M_V \rangle = -2.8 \log_{10} T_j - 1.4$$

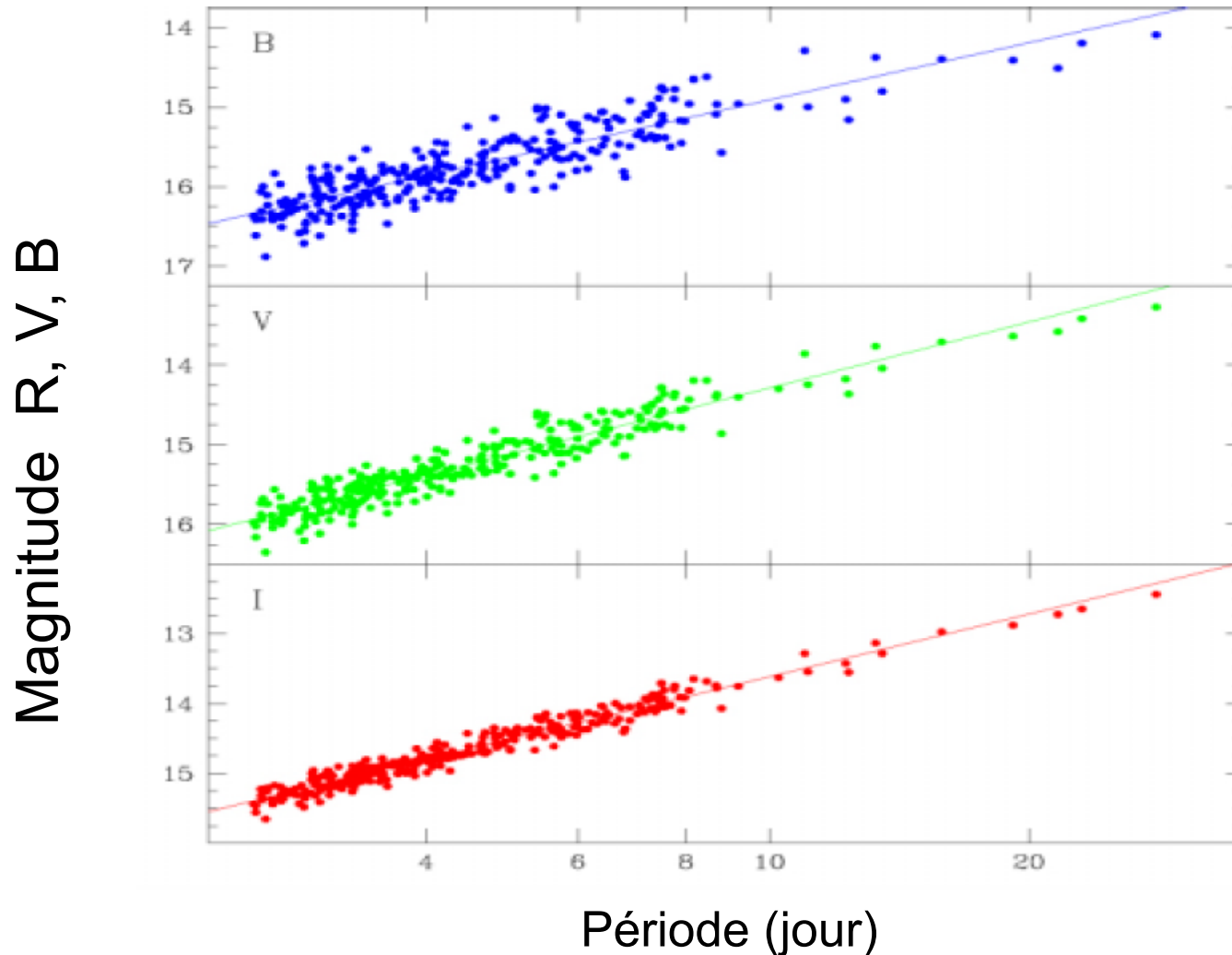
- Mesurer  $T \rightarrow$  déduire  $L$  : comme la luminosité apparente,  $I$ , est telle que  $I = L / 4\pi D^2 \rightarrow$  Distance

# Mesurer des distances dans l'Univers

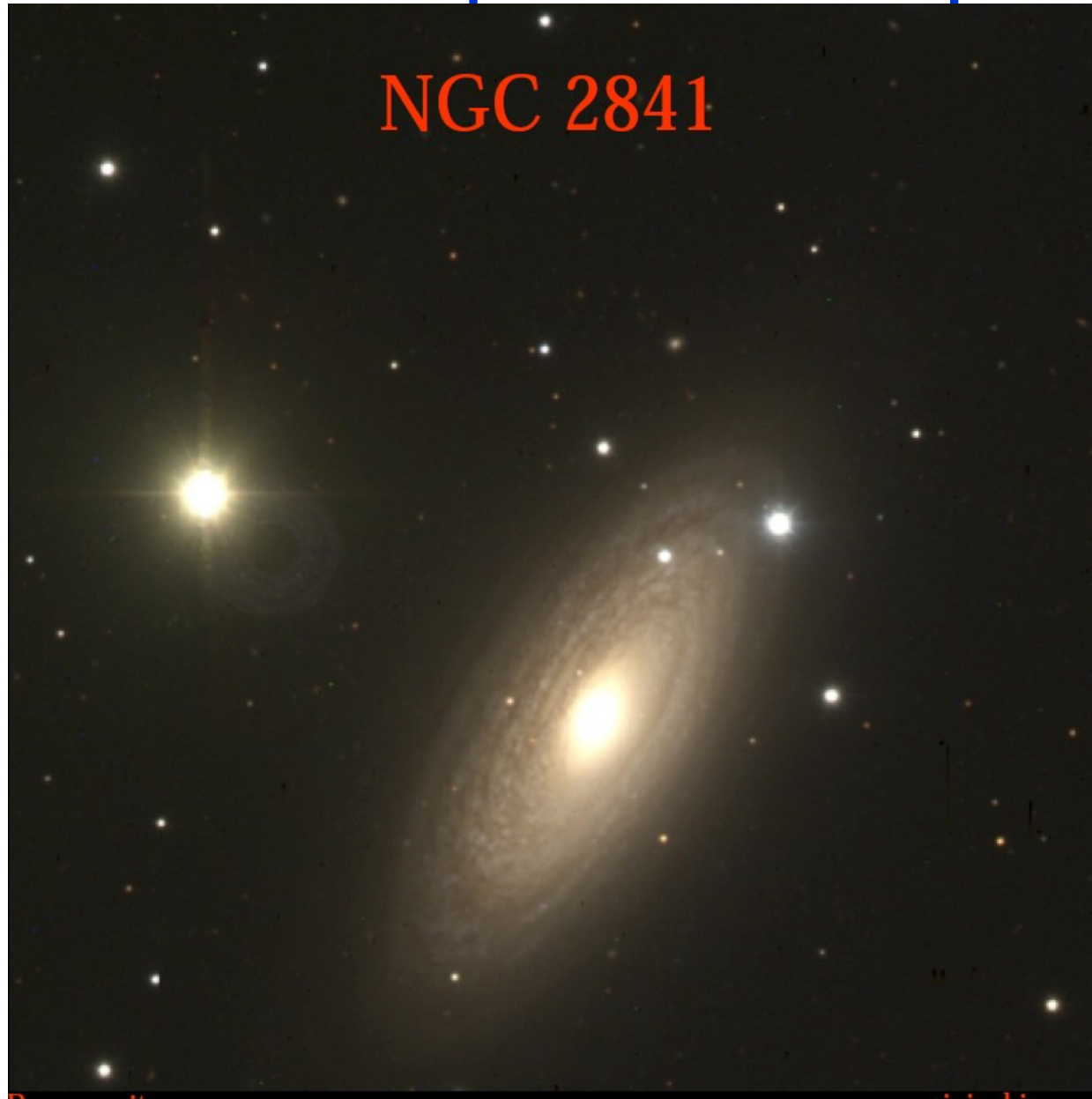
- Etoiles pulsantes Céphéides
- Origine de la relation PL (et PLC):
  - Période d'oscillation  $T$  d'une étoile de rayon  $R$ :
    - $T \sim R/c_s$  avec  $c_s^2 = P/\rho$
    - + équilibre hydrostatique:  $P/\rho = GM/R$
  - Etoile = corps noir  $L = 4 \pi R^2 \sigma T_{\text{eff}}^4$
  - + Hyp  $T_{\text{eff}} = \text{constante}$  et sachant que  $M = c^{\text{te}}$
- $\text{Log } T = 3/2 \text{ Log } (L)$   
or  $M_V = -2.5 \text{ log } (L)$ 
  - $M_V = -3.33 \text{ Log}(T) + c^{\text{te}}$
- Comme  $R$  change,  $T_{\text{eff}}$  change, un terme supplémentaire intervient: la « couleur » de l'étoile: Relation PLC des Céphéides

# Mesurer des distances dans l'Univers

- Etoiles pulsantes Céphéides



# Puissance du HST pour les Céphéïdes

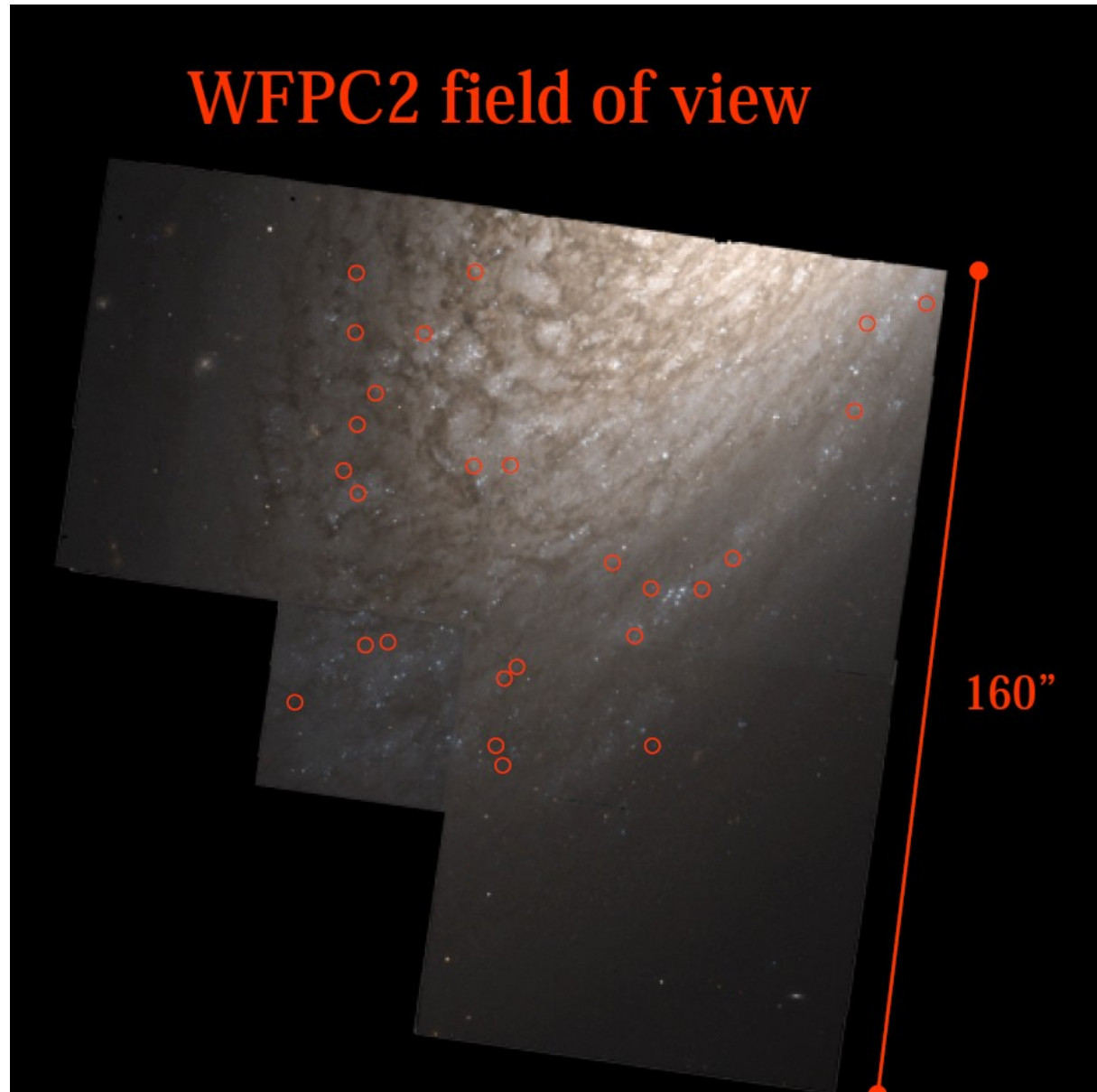




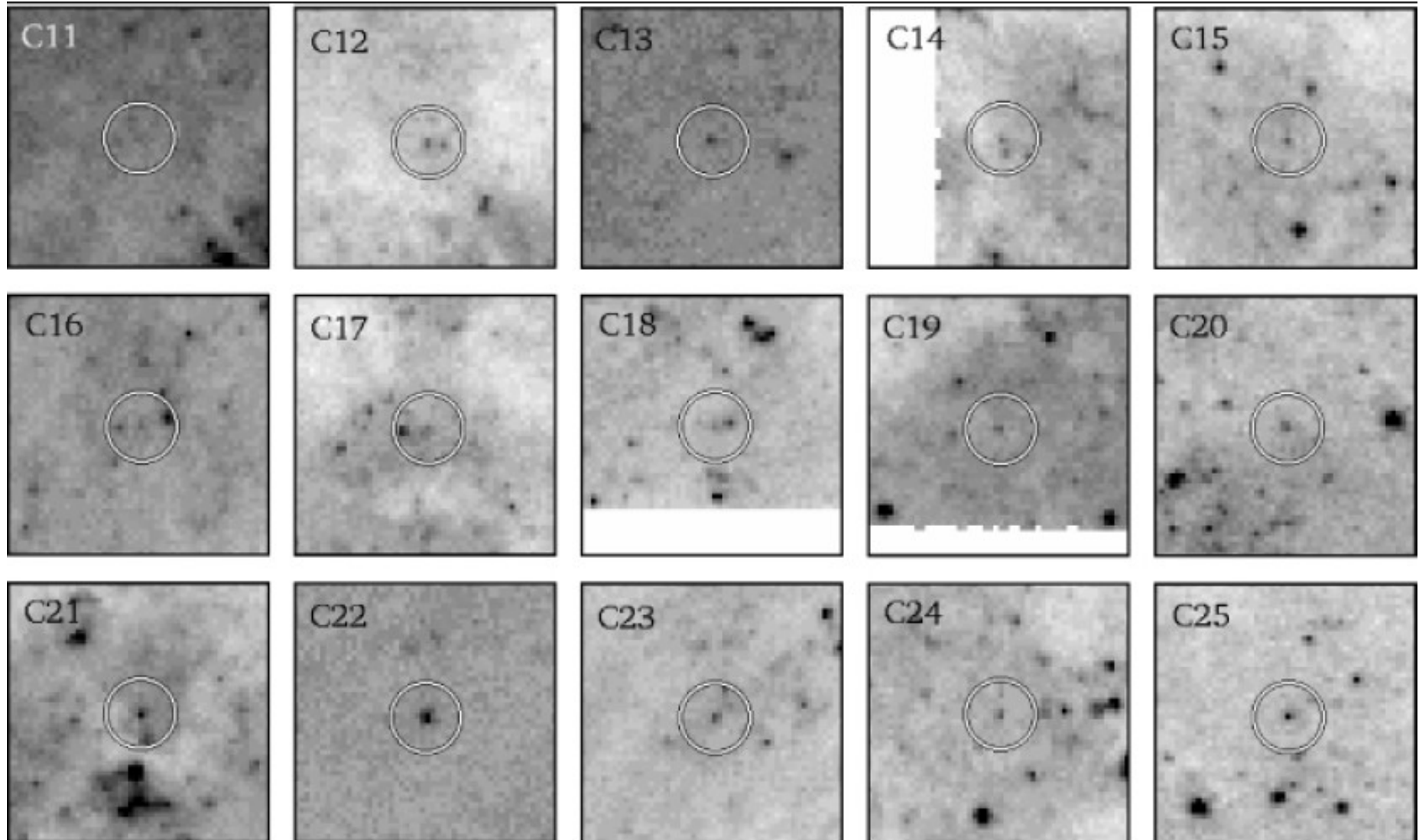
# Puissance du HST pour les Céphéides



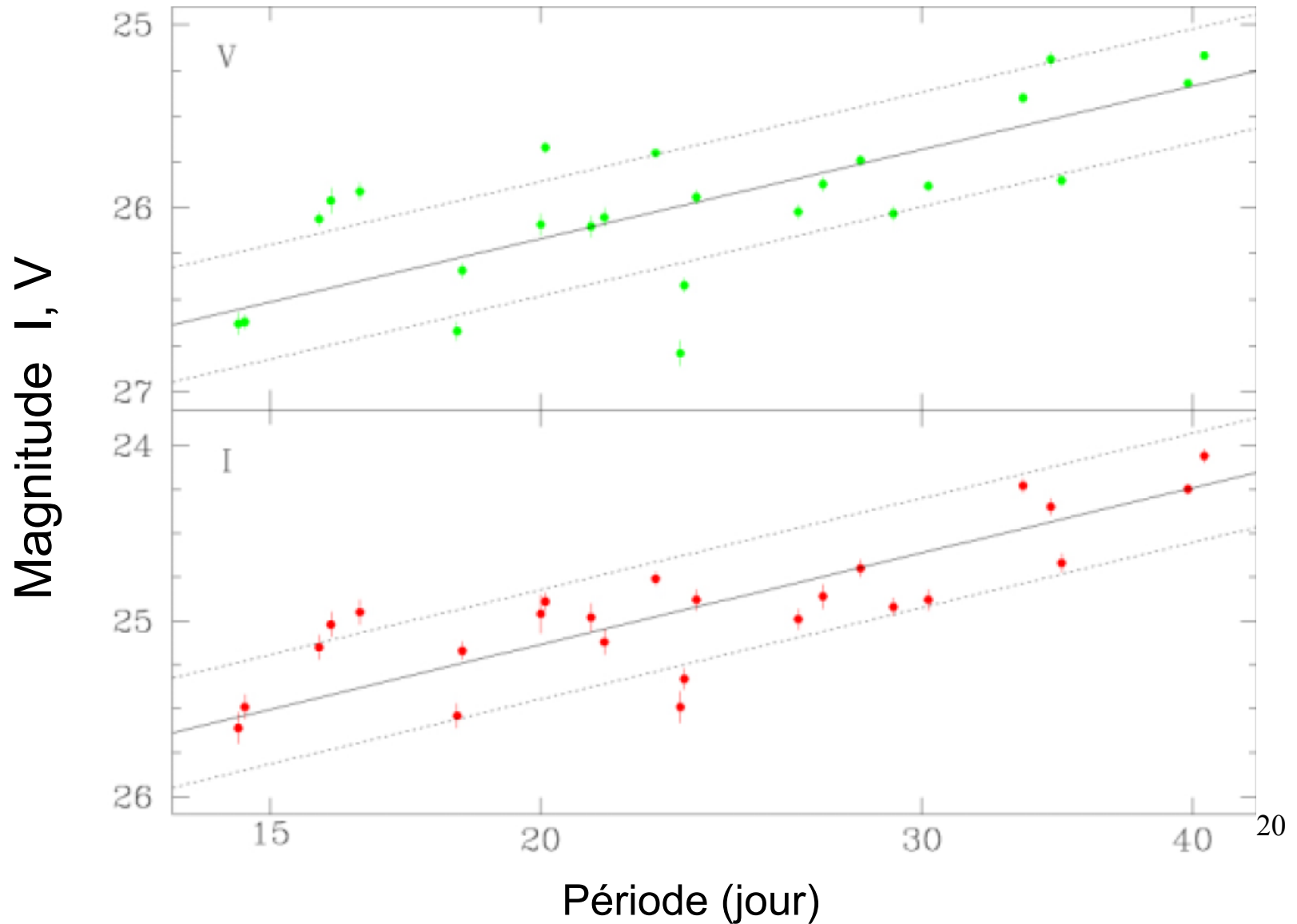
# Observations de Céphéides avec le HST



# Observations de Céphéides avec le HST



# Relation PL de Céphéïdes avec HST



# Mesurer des distances dans l'Univers

- Diagramme HR des étoiles

## Rappel magnitude/distance

Luminosité apparente :  $I = L / 4 \pi d^2$

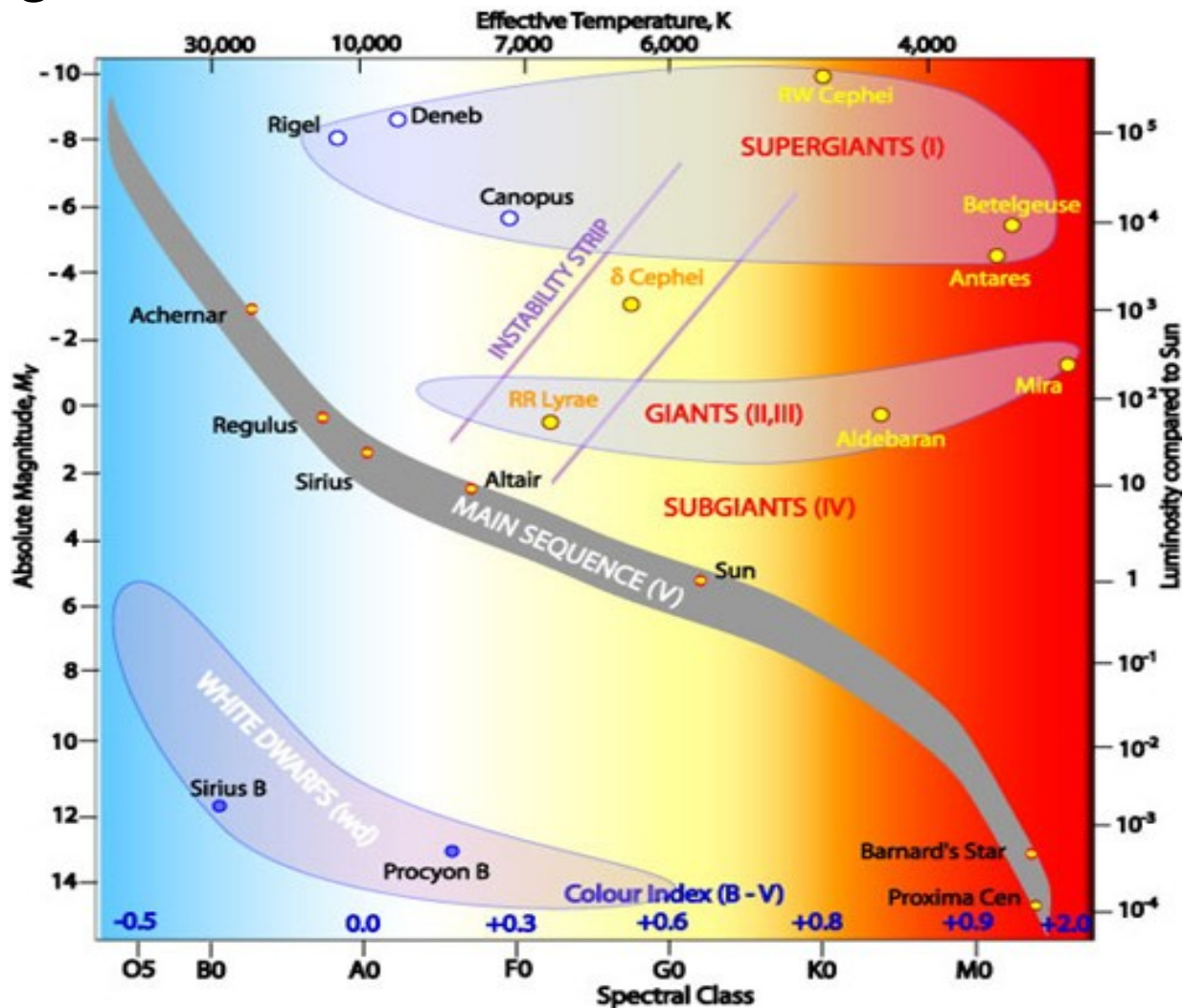
Magnitude :  $m = -2.5 \log_{10}(I)$

Module de distance  $m - M = 5 \log_{10} d_{pc} - 5$

→ Distances par simple mesure de décalage

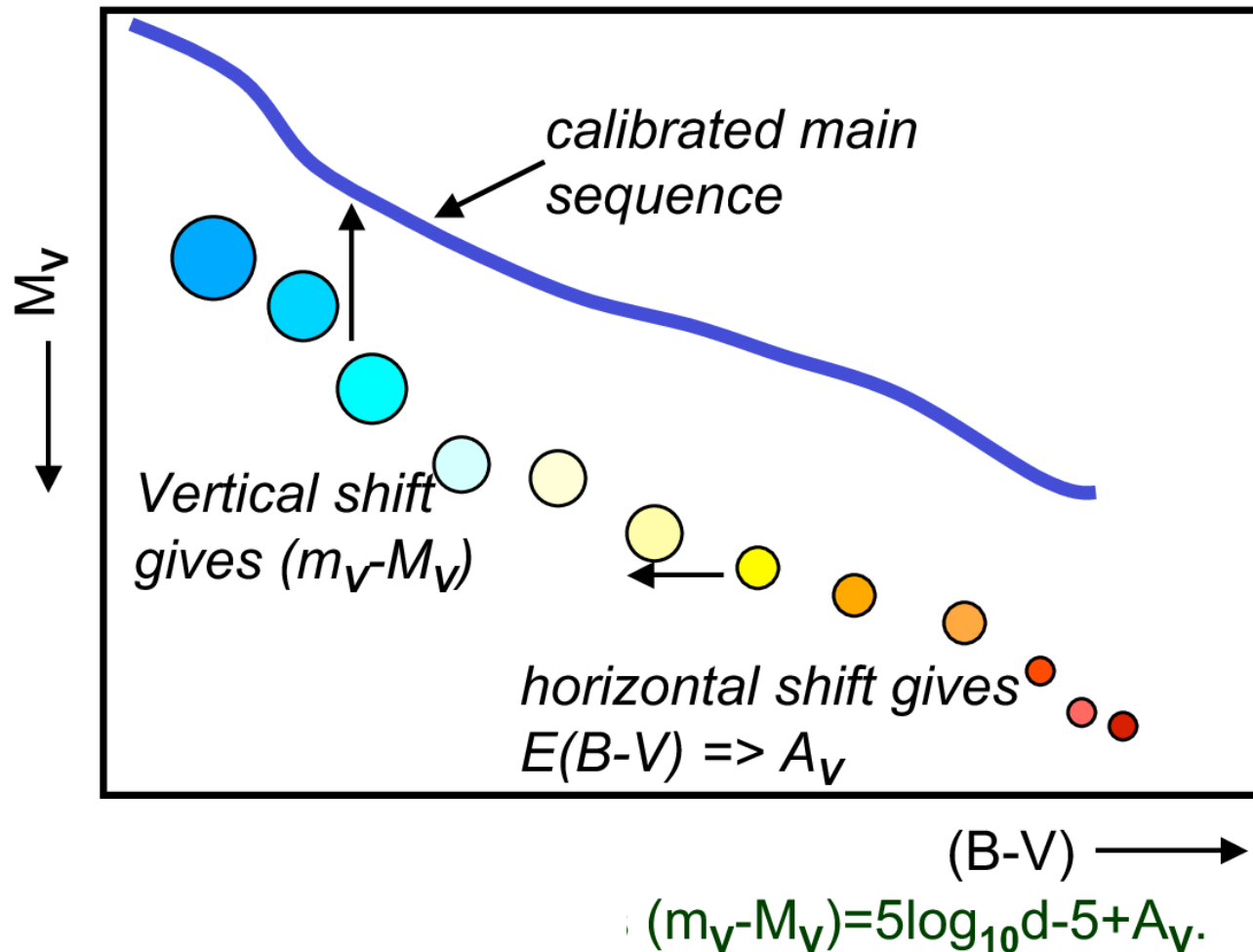
# Mesurer des distances dans l'Univers

- Diagramme HR des étoiles



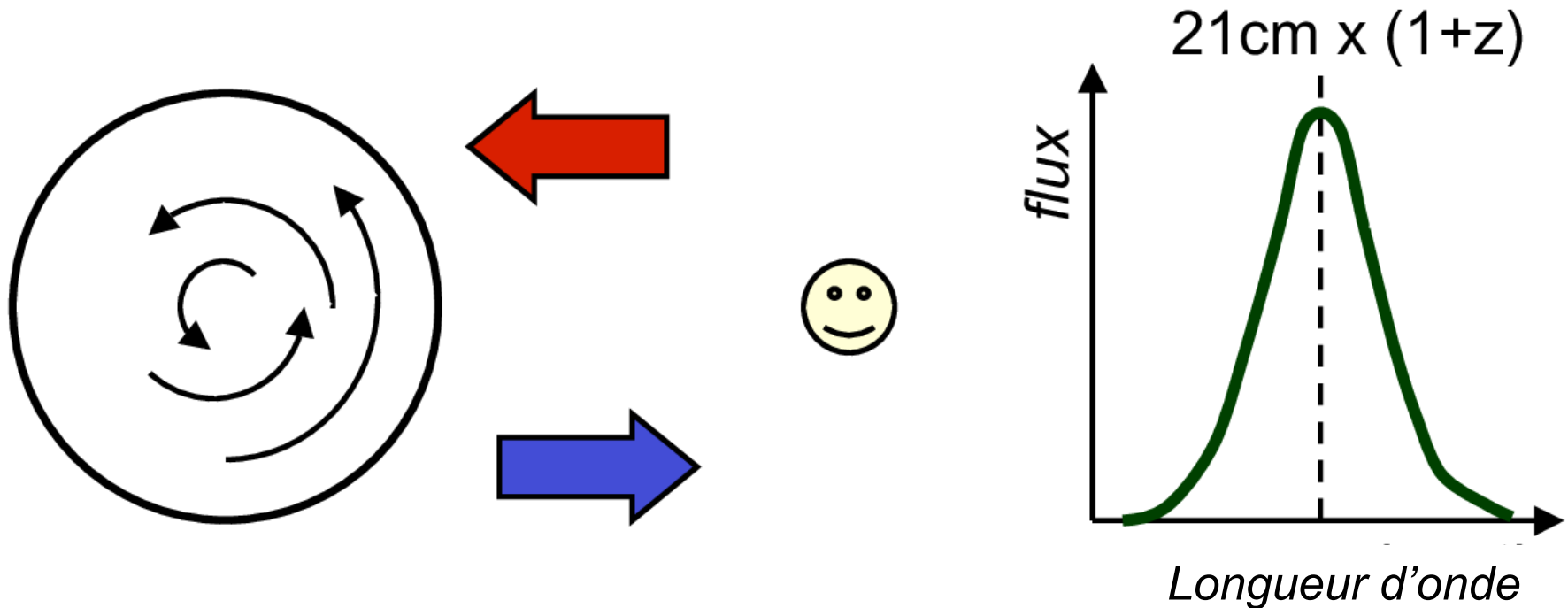
# Mesurer des distances dans l'Univers

- Diagramme HR des étoiles et module de distance



# Mesurer des distances dans l'Univers

- Relation de Tully Fisher

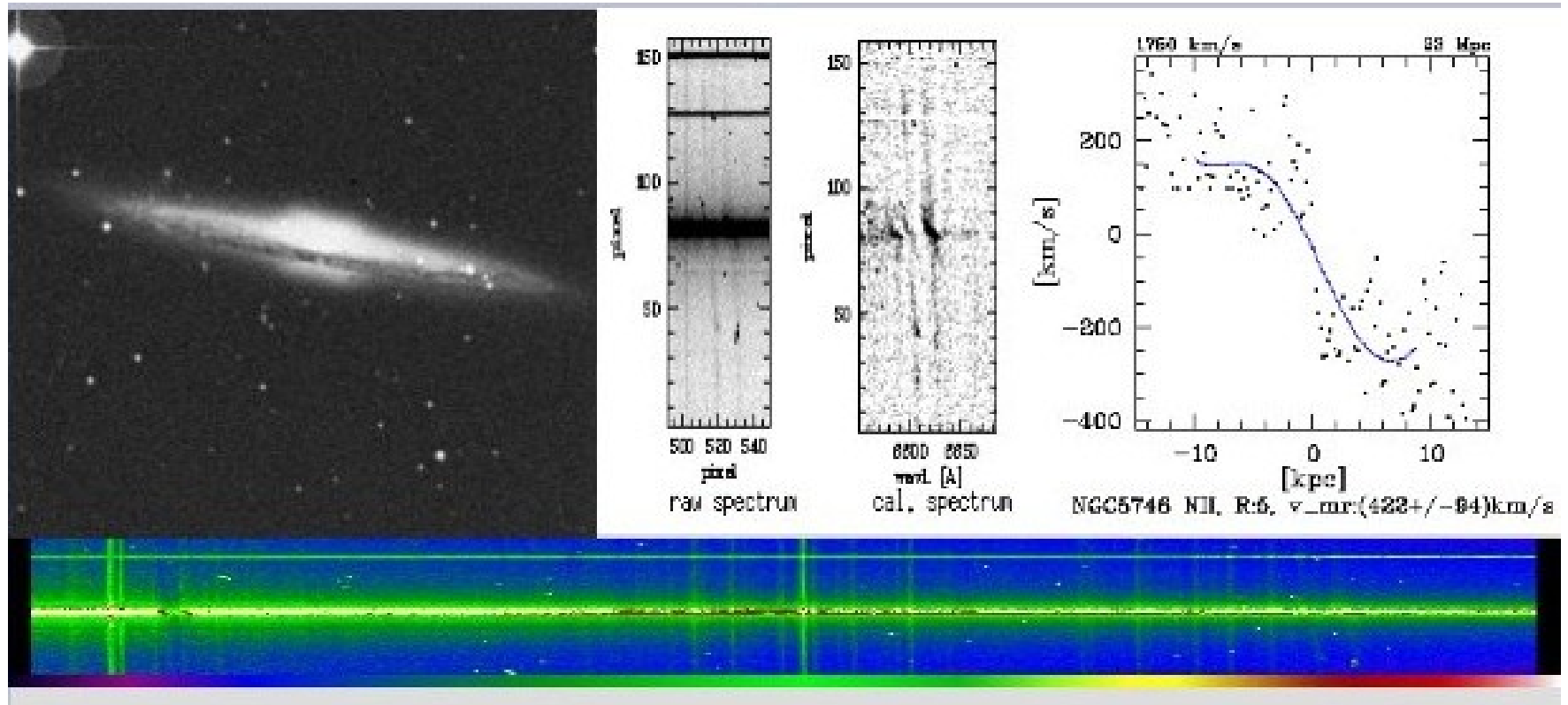


La luminosité absolue  $L$  d'une galaxie spirale dépend de la largeur de sa raie d'émission de l'hydrogène atomique  
→ vitesse de rotation de la galaxie:  $L \sim V_{\text{rot}}^4$



# Mesurer des distances dans l'Univers

## Mesure de la rotation des galaxies spirales



Vitesse mesurée sur les spectres, par effet Doppler

# Mesurer des distances dans l'Univers

- Relation de Tully Fisher

Origine de la relation:  $L \sim V_{\text{rot}}^4$

$$V_{\text{rot}}^2/R = GM/R^2 \rightarrow V_{\text{rot}}^2 \sim M/R$$

Si brillance de surface uniforme du disque de la spirale:

$$L \sim 4\pi R^2 \Sigma \rightarrow R \sim L^{1/2}$$

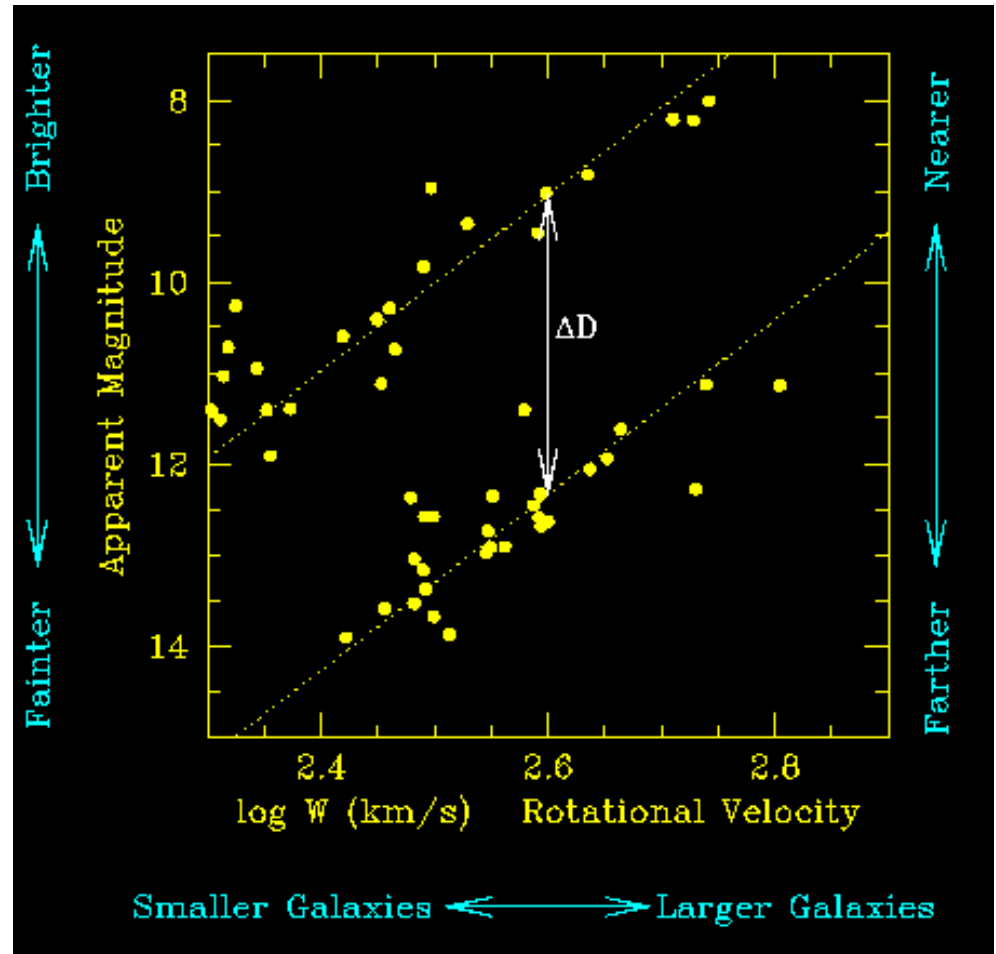
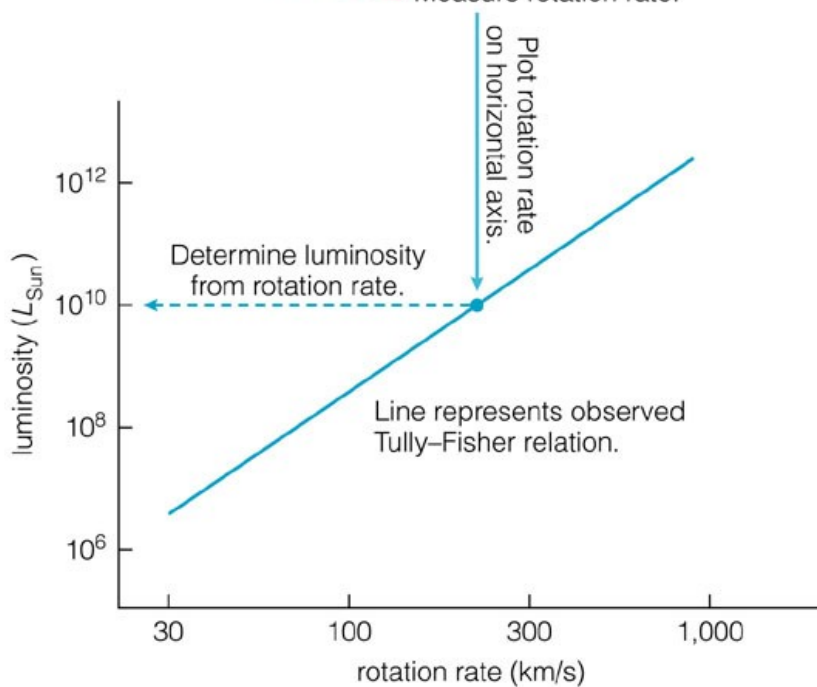
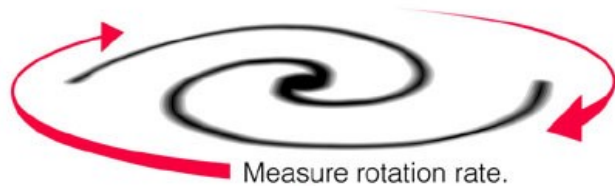
$$\rightarrow V_{\text{rot}}^4 = M^2 / L = (M/L) \cdot M$$

Or  $M/L = \text{cte}$  et si  $M \sim L$  alors

$$L \sim V_{\text{rot}}^4$$

# Mesurer des distances dans l'Univers

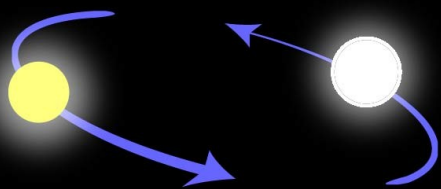
- Relation de Tully Fisher



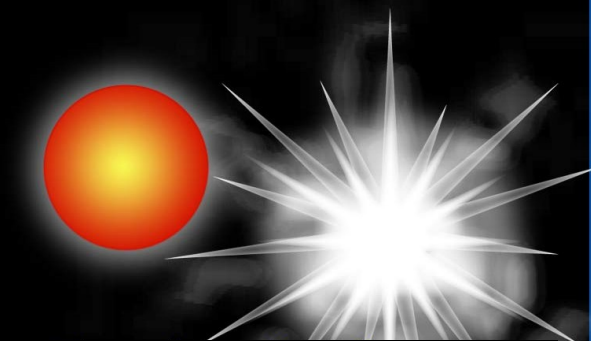
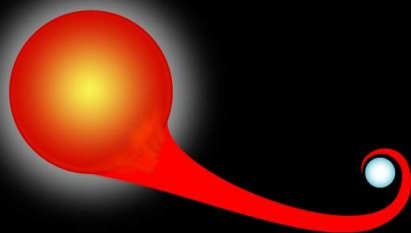
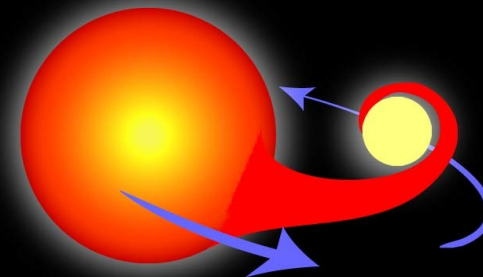
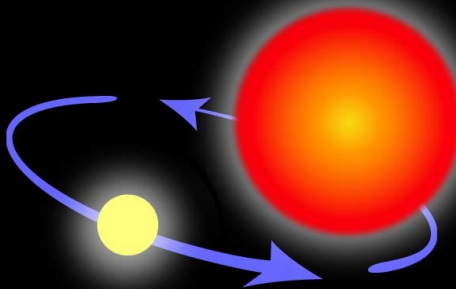
# Mesurer des distances dans l'Univers

- Les supernovae SNIa

# L'origine des supernovae de type Ia



A la source: des systèmes  
d'étoiles doubles

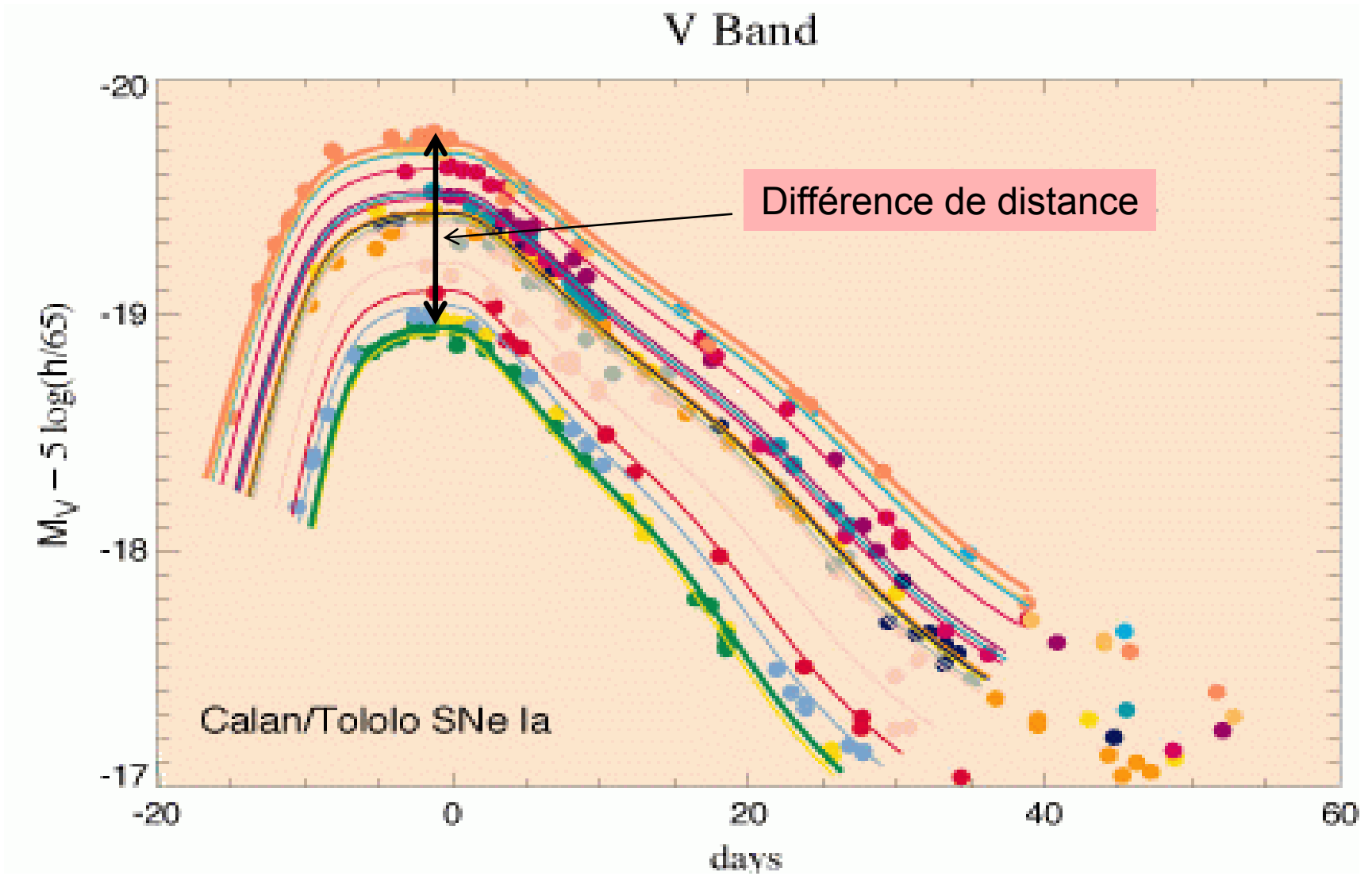


Au pic de l'explosion, toutes les  
supernovae emettent exactement la  
même quantité de lumière...

La différence de luminosité  
apparente dépend  
uniquement de leur distance.

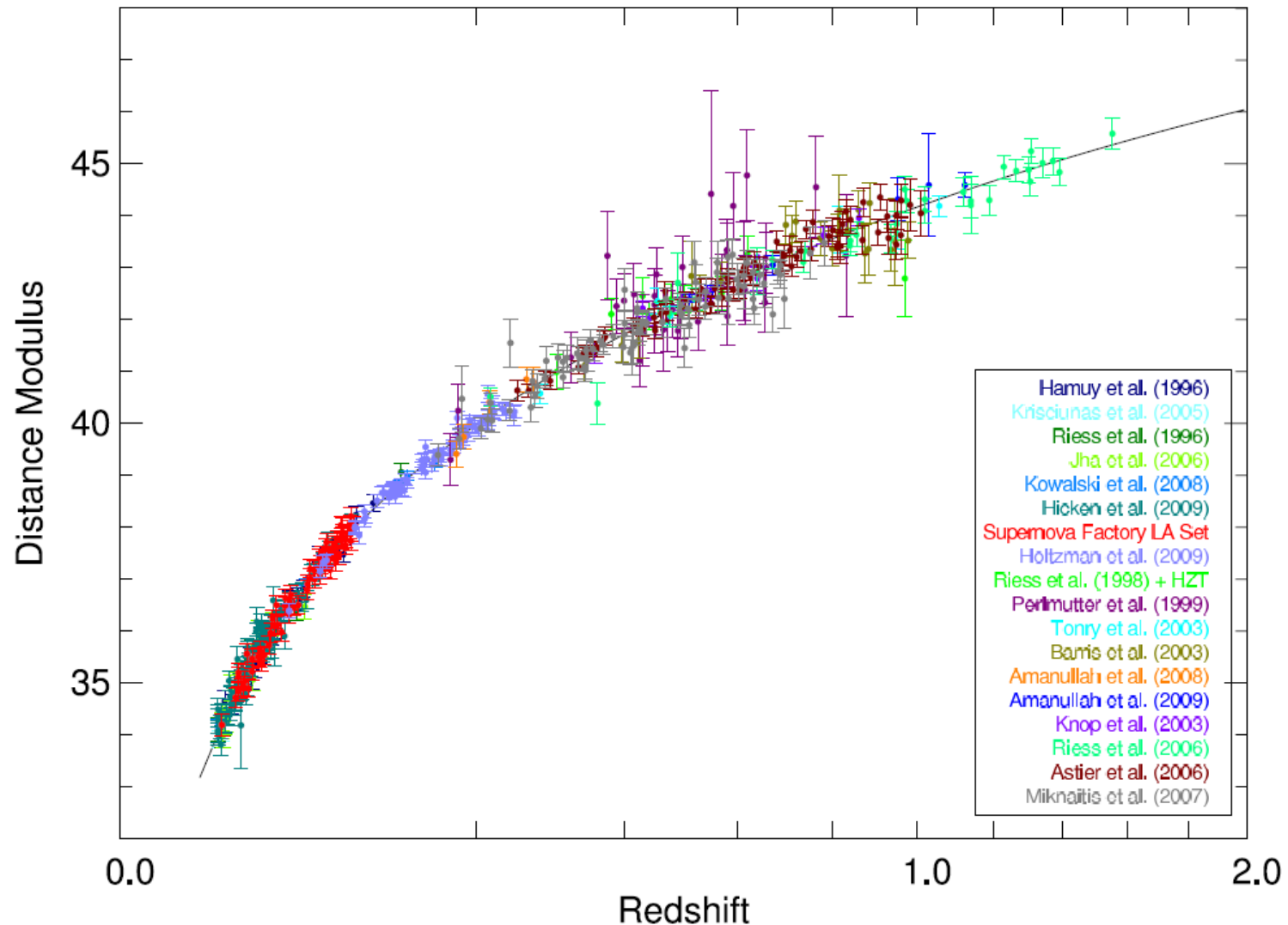
# Mesurer des distances dans l'Univers

- Les supernovae SNIa



# Mesurer des distances dans l'Univers

- Les supernovae SNIa



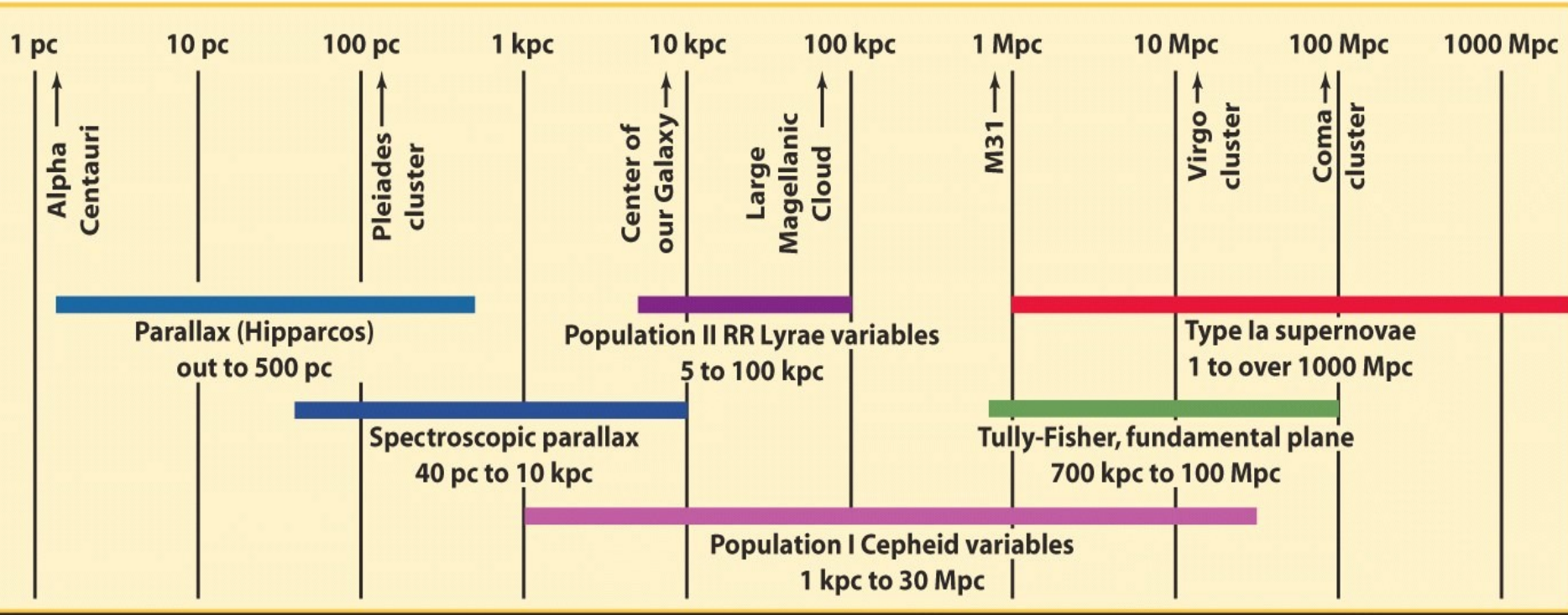
# Mesurer des distances dans l'Univers

Les indicateurs de distance ne sont pas équivalents

- Différence de qualité: erreurs statistiques et systématiques, compréhension du mécanisme physique
- Différence de portée: luminosité
- Ils sont utilisés en construisant une *échelle de distance* progressive:
  - Le pilier primaire: la parallaxe
  - Le pilier extragalactique: les Céphéides
  - Le pilier cosmologique: les SNIa



# L'échelle des distances

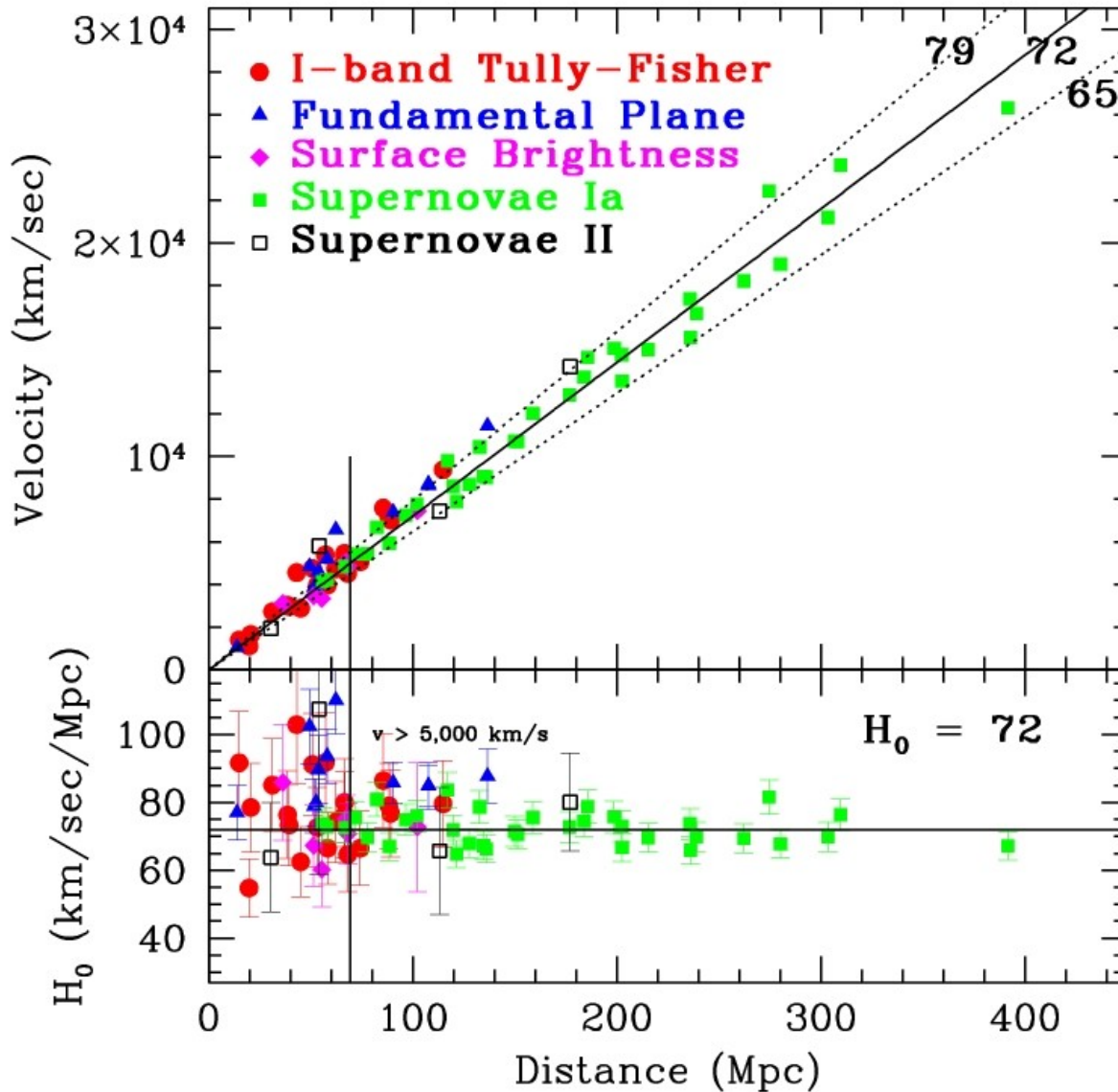


- Chaque étage de l'échelle se superpose au précédent et au suivant
- Les erreurs des échelles inférieures se répercutent sur les étages suivants

# Des distances extragalactiques à la cosmologie

1. L'Univers est en expansion
2. L'Univers est structuré

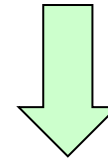
# Un univers en expansion: relation vitesse-distance



Vitesse par effet Doppler

$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}}$$

Distance par les méthodes précédentes



Loi de Hubble:  
 $v = H_0 \cdot D = c \cdot z$

# Un univers en expansion: relation magnitude-décalage spectral

Relation Magnitude-Redshift:  
Diagramme de Hubble

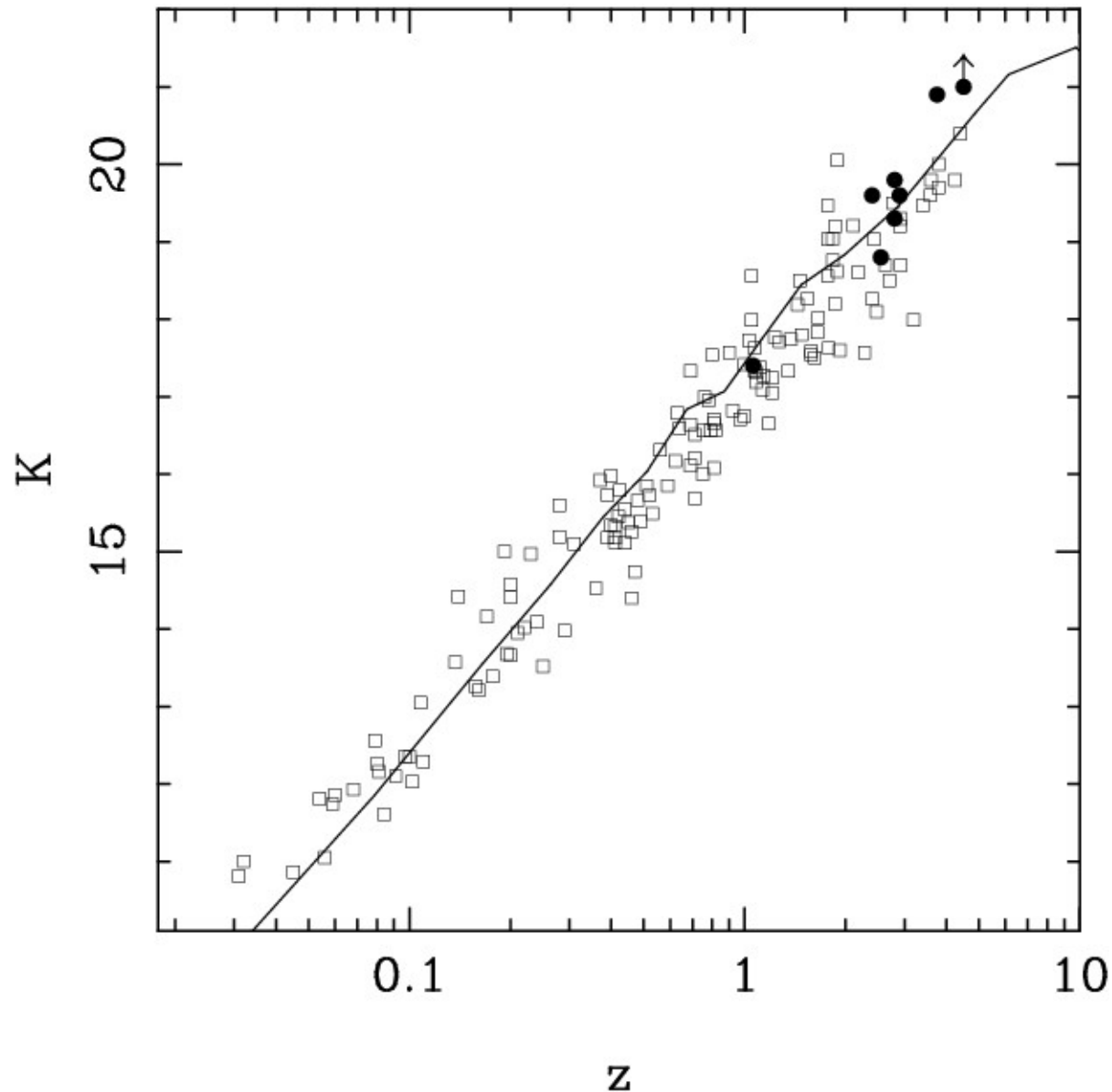
$$m = -2.5 \log(F) + C$$



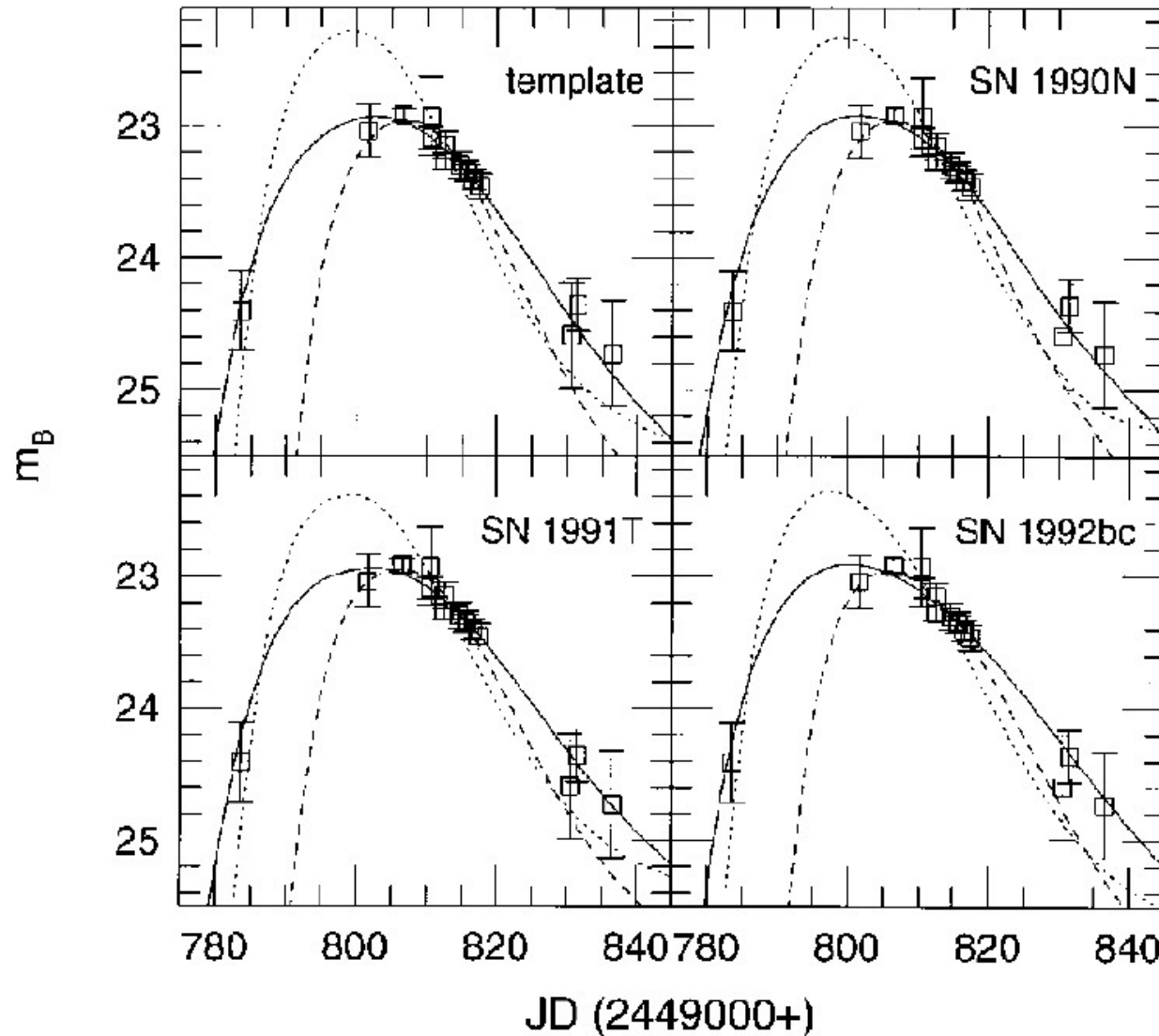
$$F = \frac{L}{4\pi D^2} = \frac{L H_0^2}{4\pi c^2 z^2}$$



$$m = 5 \times \log[z] + C'$$

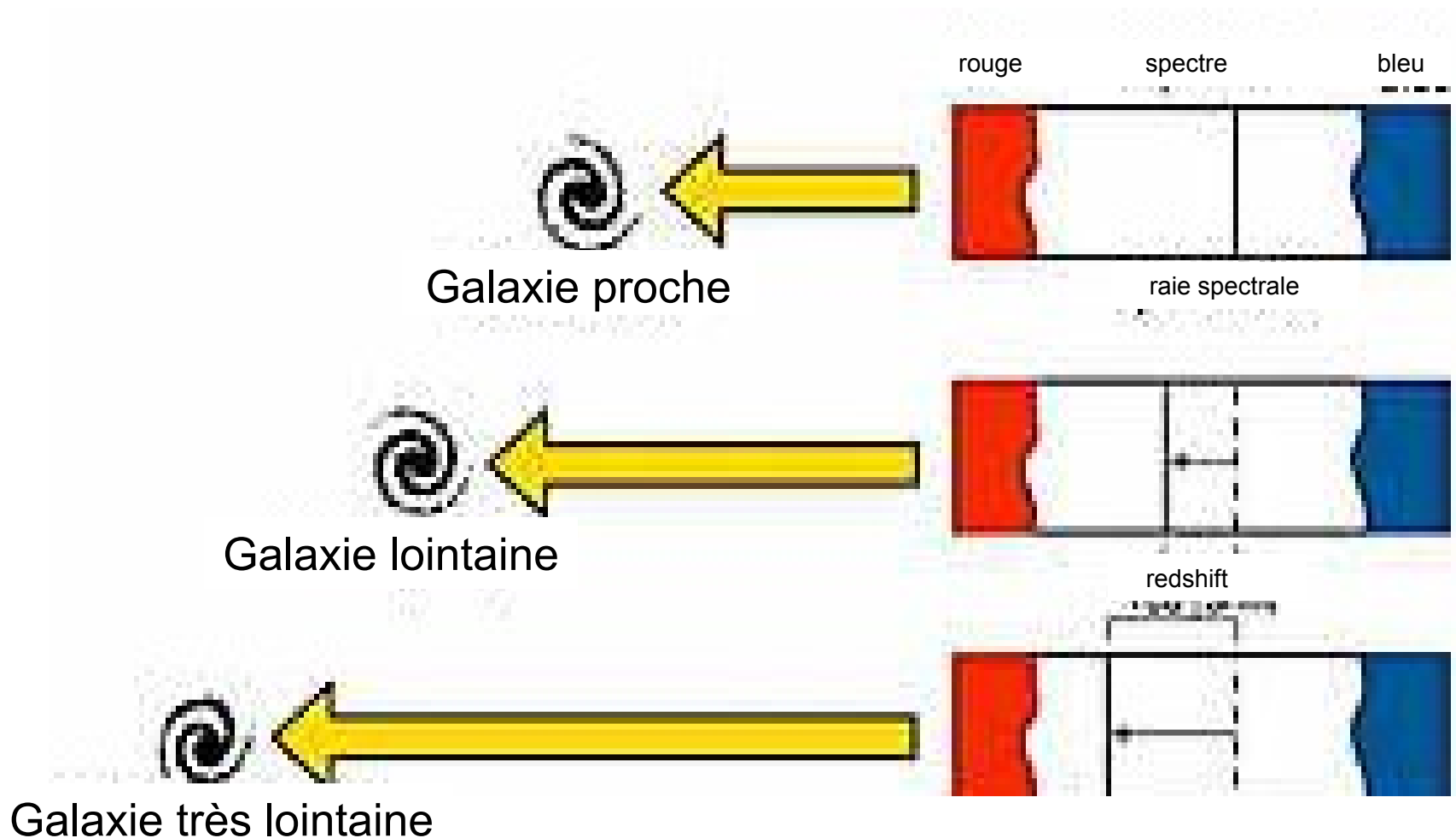


# Un univers en expansion: dilatation des courbes de lumière



# Conséquence de la loi d'expansion observée:

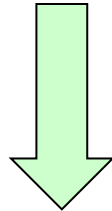
Mesurer des redshifts = mesurer des distances



# Mesure de la constante de Hubble:

Principe: Mesurer deux distances

1. Avec  $V = H_0 D$  où  $D =$  redshift
2. Avec un indicateur de distance

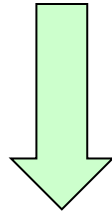


$H_0$

# Mesure de la constante de Hubble:

Principe: Mesurer deux distances

1. Avec  $V = H_0 D$  où  $D =$  redshift
2. Avec un indicateur de distance



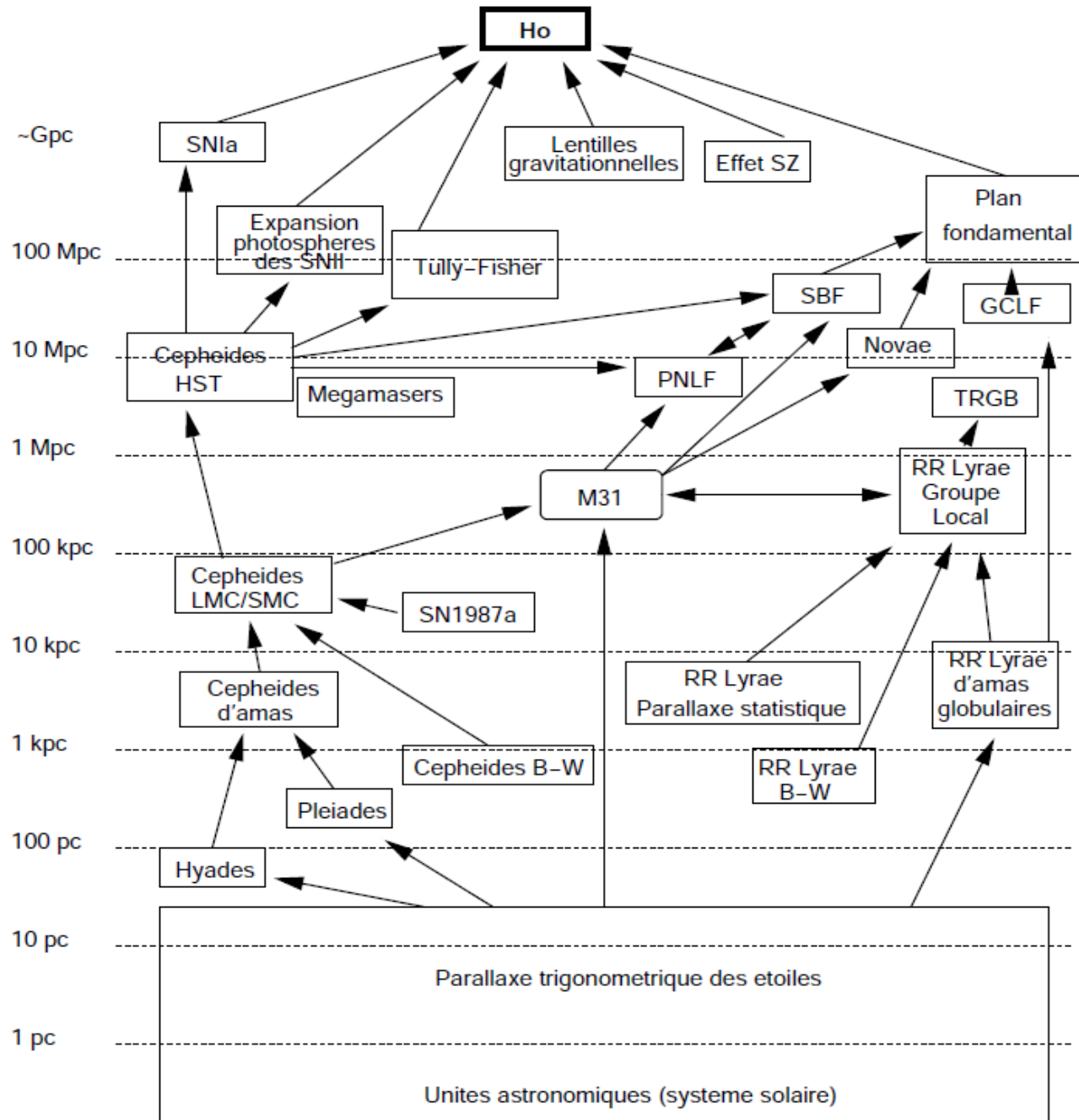
$H_0$

Simple en principe, très difficile en pratique:

Biais + Erreurs systématiques



Mesure de la constante de Hubble:  
un échaffaudage périlleux



# Mesure de la constante de Hubble

Méthode	$H_0$
Méthodes traditionnelles (toutes confondues)	$74 \pm 10$
Baade-Wiesselink	$60 \pm 10$
Cepheid HST	$72 \pm 8$
SnIa	$64 \pm 3$
SZ	$55 \pm 17$
Décalage temporel	$66 \pm 8$
WMAP-5 (CMB)	$72 \pm 3$
WMAP-5 (CMB) + BAO + SNIa	$70.1 \pm 1.3$