

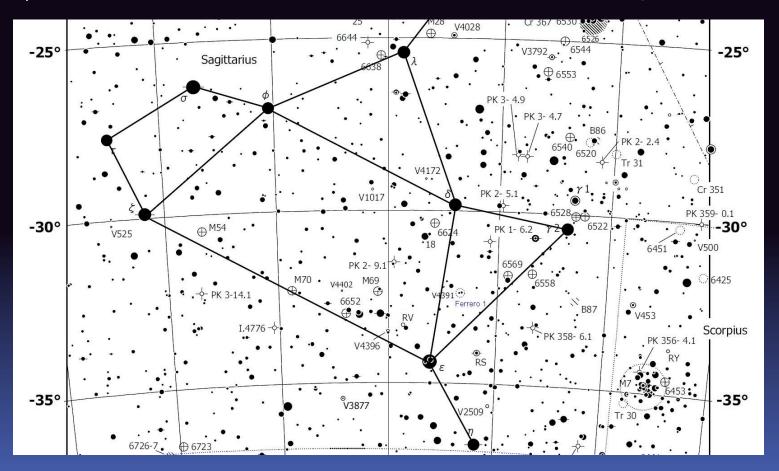
# Mesure des distances

dans l'univers



## Introduction

- position des astres dans le ciel : assez bien maîtrisée aujourd'hui



 distance des objets astronomiques (3eme dimension) : moins bien maitrisée



#### Introduction

#### Mesure des distances

- -problème se posant pour tous les objets célestes
- -pas de solution unique
- -plus un objet est loin, plus sa distance est difficile à mesurer!

# Méthodes astronomiques de mesure des distances : mesures indirectes

- -Méthodes géométriques
- –Méthodes physiques
- -Méthodes cosmologiques

- ⇒ objets plus lointains
- ⇒ objets les plus distants



#### Unités de distances

Distance Terre soleil : Unité Astronomique

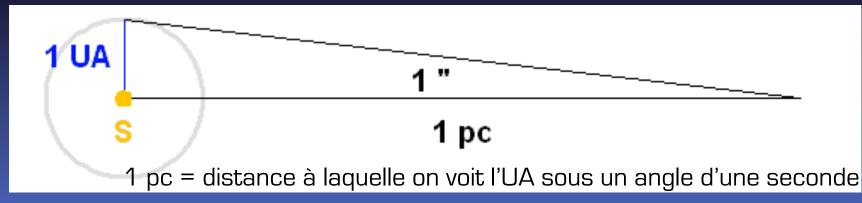
1 UA = 149 597 870 700 mètres  $\approx$  1,5  $10^{11}$  m

#### Année lumière

 $1 AL = 9,5 10^{15} m = 63 000 UA$ 

Parsec (pc) : « nouvelle » unité de distance

-distance correspondant à une parallaxe d'une seconde

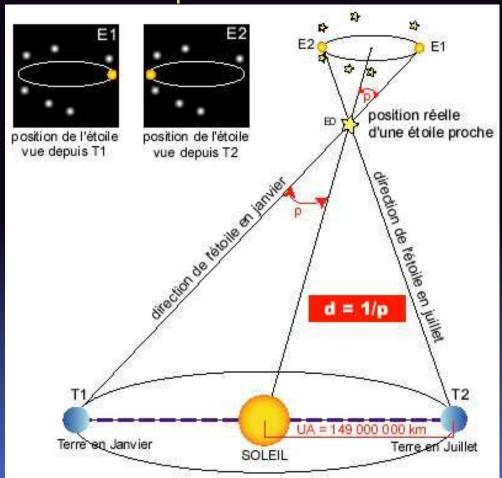


 $-1 \text{ pc} = 3,26 \text{ AL} \approx 3.10^{16} \text{ m} \approx 30 \cdot 10^{12} \text{ km}$ 

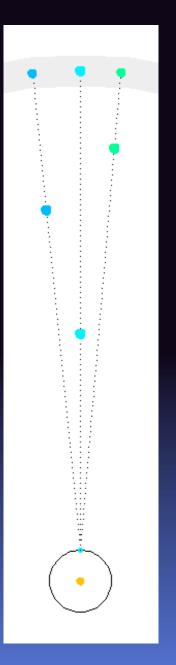


# **Bref rappel**

## Méthode de la parallaxe



distance des étoiles les plus proches.





## Quelques exemples

## Distance moyenne Planète - Soleil

- -Terre: 8 minutes-lumière
- -Jupiter à 43 minutes-lumière,
- -Neptune à plus de 4 heures-lumière
- -Confins du système solaire (nuages d'Oort) : environ 1AL



Mars à 12 minutes-lumière

Saturne à 79 minutes-lumière



## Quelques exemples

## Distance dans la galaxie

-Proxima du Centaure : 4,24 AL

-Sirius: 8,7 AL

-Arcturus: 36,7 AL

-M13:22 200 AL

Valeur de la parallaxe de Proxima du Centaure

-0,765"

- Pour comparaison, le

<del>dia</del>mètre apparent de la lune

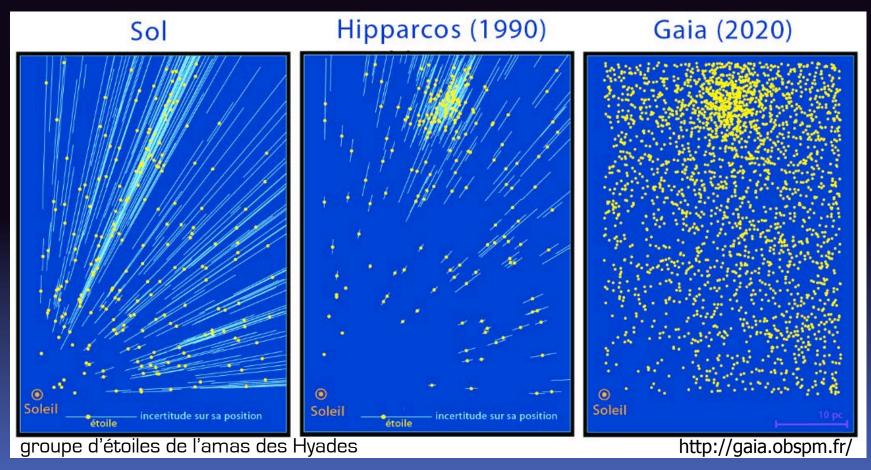
-Centre de la galaxie : 30 000 AL est de 1800"! •61 Cygni Galactic Centre :εEridani L372-58

10 Light Years



## Mesures avec des satellites

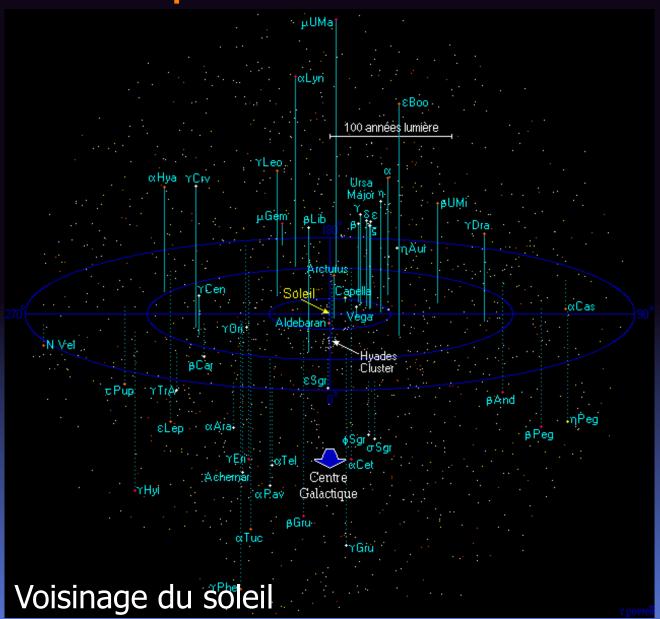
Plus d'étoiles, plus loin, précision meilleure



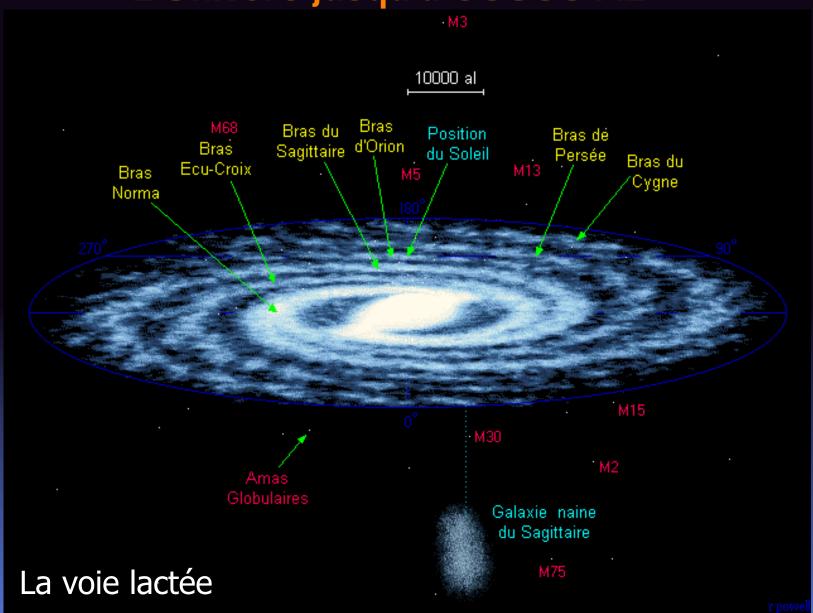
Mesure de parallaxe (à mieux que 10%) avec Gaia : 30 000 AL



# Jusqu'à 250 AL du soleil



# L'Univers jusqu'à 50000 AL





# Partie 2 Méthodes physiques et cosmologiques

Relation magnitudes/ distance

Les indicateurs primaires

Les indicateurs secondaires



# Ressources bibliographiques

La mesure des distances dans le système solaire et dans l'univers J.-E. Arlot, G. Theureau, Observatoire de Paris/UFE

Distance et temps , cours de l'Observatoire de Paris-Meudon, auteur : Benoit Mosser

http://media4.obspm.fr/public/ressources\_lu/index.html

Mesure des distances dans l'Univers, JP. Maratrey - juillet 2008

Mesure des distances, cours à l'Observatoire historique de Marseille <a href="http://astronomia.fr/1ere\_partie/distances.php">http://astronomia.fr/1ere\_partie/distances.php</a>

http://www.astrosurf.com/luxorion/menu-science.htm



## Succession d'étapes

Les étoiles les plus proches servent à estimer les distances d'autres étoiles ou amas d'étoiles plus éloignés...

... où sont présentes certaines catégories d'objets suffisamment brillants pour être observés et reconnus dans d'autres galaxies ...

... qui à leur tour, par une morphologie ou une caractéristique physique particulière, permettent d'estimer la distance de galaxies encore plus lointaines...

... pour arriver à la loi de Hubble qui énonce qu'une galaxie lointaine fuit le Soleil proportionnellement à son éloignement.



## Mesure des distances via la luminosité

#### Connaissance des étoiles les plus proches

- -Mesure de leurs distances par trigonométrie (parallaxe)
- -Analyse de leurs propriétés physiques ex : luminosité

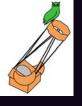




Détermination de la distance d'étoiles lointaines

- -mesure de la luminosité apparente
- -comparaison avec ce que l'on connait de la luminosité intrinsèque L de l'objet.

Différentes méthodes pour déterminer L

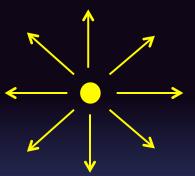


# Luminosité/distance

## Magnitude absolue

- Chaque étoile (ou galaxie) a une luminosité propre.
  - quantité d'énergie qu'elle dégage dans toutes les directions.

Luminosité totale L

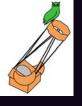


Analogie : puissance d'une ampoule en Watt, inscrite sur son culot.

-Caractéristique exprimée par la « magnitude absolue » M M ≈ - 2.5 log L + Cte

#### Remarque

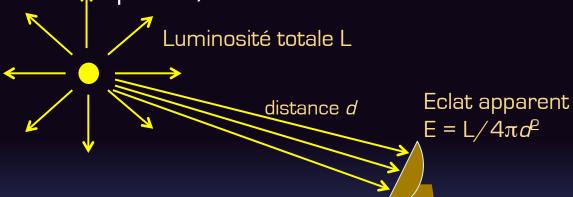
 Echelle des magnitudes construite de manière à ressembler aux « grandeurs » d'Hipparque



# Luminosité/distance

#### Magnitude apparente

-E = éclat apparent : puissance reçue par unité de surface sur le capteur , fonction de la distance de l'observateur



Si *d* est doublée, l'éclat apparent est divisé par 4

-mesure de l'éclat apparent dans une échelle logarithmique

m 
$$\approx -2.5 \log E \approx -2.5 \log L + 5 \log d + Cte$$
  
= M + 5 log d + Cte' d en parsecs (pc).

-par définition, magnitude absolue = magnitude apparente qu'aurait l'objet si il était situé à 10 parsecs de nous



#### Module de distance

 $\mu = m - M = 5 \log d - 5$ , d distance en parsecs (pc)

Principe de base de la mesure des distances

connaissance de la magnitude absolue M d'une étoile

& mesure de sa magnitude apparente m.

$$d = 10^{[(\mu+5)/5]}$$

## Deux grandes classes d'indicateurs de distance :

- 1. Primaires : basés sur des propriétés d'étoiles individuelles ou d'objets bien connus de notre Voie Lactée distances à l'intérieur de notre propre Galaxie et jusqu'aux quelques quarante galaxies les plus proches
- 2. Secondaire: dépendent de propriétés globales des galaxies, atteignent des échelles beaucoup plus grandes et concernent plusieurs milliers d'objets.

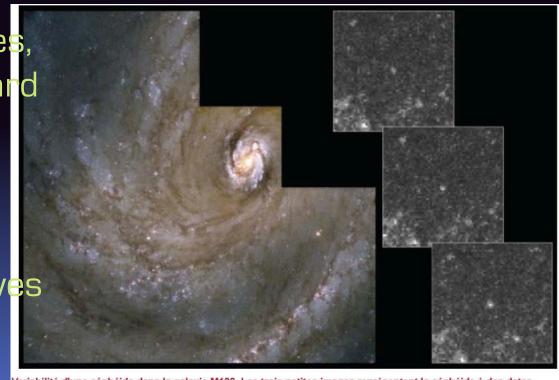


## Les indicateurs primaires

- la parallaxe spectroscopique
  - -basée sur le diagramme de Hertzsprung-Russell,

- les étoiles variables, chandelles standard
  - RR-Lyrae
  - Céphéides

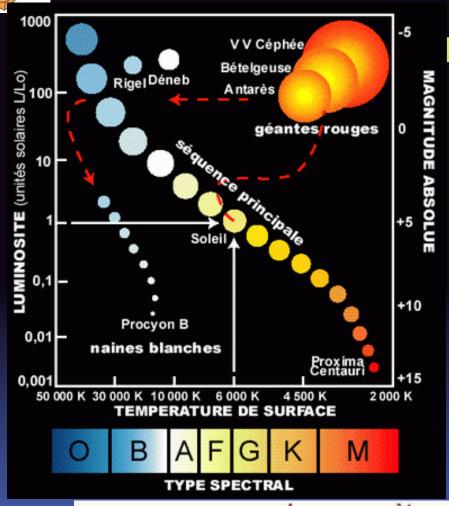
 les étoiles explosives (supernovae).



Variabilité d'une céphéide dans la galaxie M100. Les trois petites images représentent la céphéide à des dates différentes.

Crédit : HST

# Parallaxe spectroscopique



## Diagramme de Hertzsprung-Russel

- -Relation entre luminosité intrinsèque L et température superficielle des étoiles T
- -Élément incontournable de l'étude de l'évolution et de la physique stellaire.

| Les | paramètres | du diagramme | HR |
|-----|------------|--------------|----|
|-----|------------|--------------|----|

Abscisse Température effective - Indice de couleur - Type spectral...

Ordonnée Luminosité (en W ou en luminosité solaire) - Magnitude absolue ...

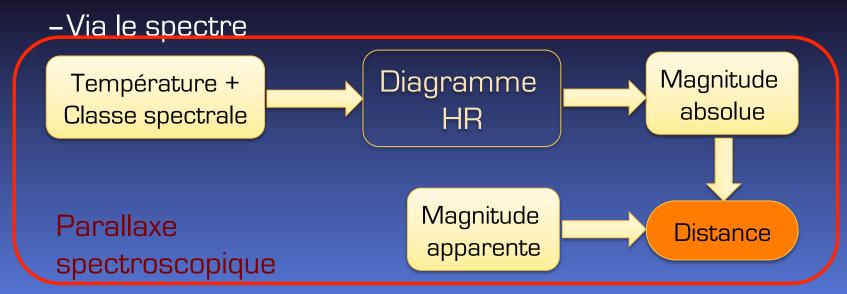


# Parallaxe spectroscopique

#### Détermination de la température

- -Détermination assez précise via
  - Couleur de l'étoile
    - différence de magnitude entre les mesures dans deux filtres (B-V)
  - Type spectral
    - obtenus par l'étude du spectre de l'étoile

#### Détermination de la classe spectrale





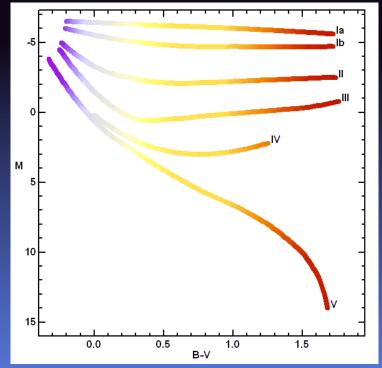
## Diagramme HR et amas

#### Diagrammes couleur magnitude d'amas d'étoiles

(tout comme l'avait fait Hertzsprung au moment de sa découverte).

- étoiles d'un amas toutes à la même distance
- diagramme H-R des étoiles de l'amas, utilisant m : décalé le long de l'axe vertical par rapport à un diagramme en magnitude absolue de la

quantité :  $\mu = m - M = 5 \log d - 5$ 



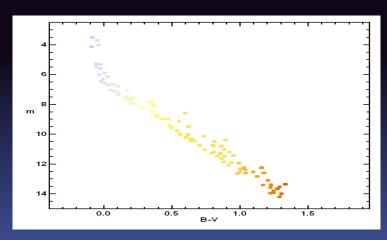


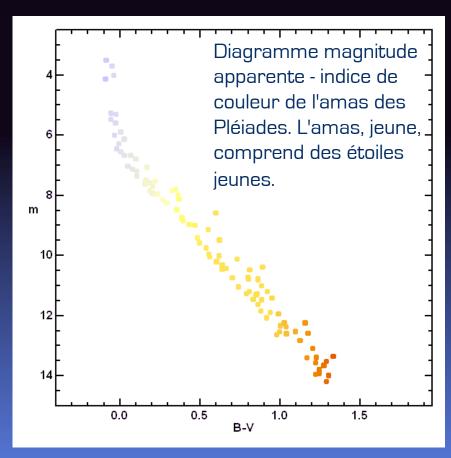
Diagramme magnitude apparente indice de couleur de l'amas des Pléiades. L'amas, jeune, comprend des étoiles jeunes.

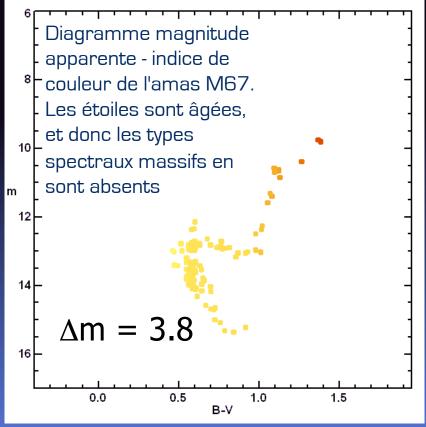


## Diagramme HR et amas

#### Détermination de la distance de l'amas

 Comparaison des positions en magnitude apparente des séquences principales de différents amas → distances relatives.







## Chandelles standards



#### Utilisation de chandelles standards

- -Reconnaissable à distance et dont on a calibré la luminosité.
- -Choix d'une catégorie d'astres :
  - dont on a toutes les raisons de penser qu'ils ont tous la même luminosité,
  - 2. que l'on peut aisément identifier par l'observation d'un ou plusieurs paramètres indépendants de la distance,
  - 3. qui sont suffisamment lumineux pour qu'on puisse les observer à grande distance.

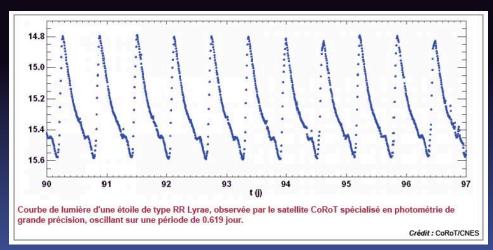


## Les étoiles variables RR-Lyrae

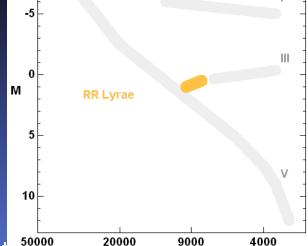
du nom de la première d'entre-elles identifiée

 groupe très homogène : toutes à peu près la même < M > Etoiles vieilles, près du centre Galactique, dans le halo, ou dans les amas globulaires.

#### Courbe de lumière



présente des variations très régulières.



T (K)

## Dans le diagramme HR

- dans la bande d'instabilité.
- région très peu peuplée de la branche horizont



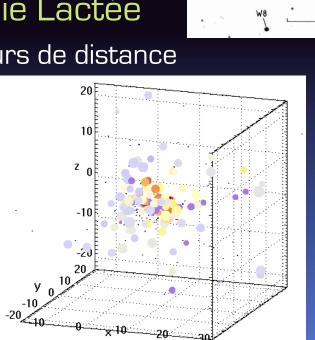
## Les étoiles variables RR-Lyrae

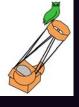
## Principe de la mesure

- -RR Lyrae: toutes la même magnitude absolue
  - 1. Identification comme RR Lyrae, via leur variabilité
  - 2. Comparaison entre magnitudes apparente et absol
  - $\rightarrow$  m M = 5 log d 5

## RR-Lyrae, amas globulaires et Voie Lactée

- H. Shapley: RR-Lyrae comme indicateurs de distance
- ⇒ distribution des amas globulaires dans notre Galaxie
- ⇒ distance du Soleil au centre de la Voie Lactée
- ⇒ Diamètre de 300.000 al (soit trois fois trop grand).

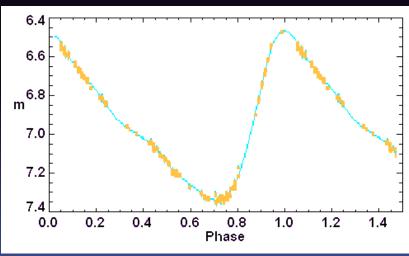




Du nom de l'étoile δ Céphée découverte en 1784 par John Goodricke

- étoiles jeunes, massives donc lumineuses
- étoiles pulsantes, la luminosité varie périodiquement

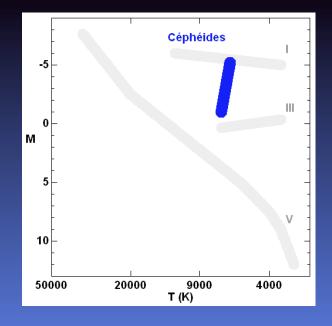
#### Courbe de lumière



Plus la céphéide est lumineuse, plus sa période de variation est longue.



-position particulière dans la bande d'instabilité





#### Principe de la mesure : relation période-luminosité

- -Découverte en 1912, par Henrietta Leavitt
- –plus la céphéide est lumineuse, plus sa période P est longue

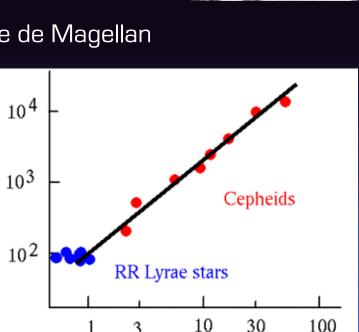
$$< M > = a log P + b.$$

a : à partir des céphéides du Petit Nuage de Magellan

b : étalonnage avec des céphéides de distances connues : dans amas globulaires



- => magnitude absolue <M>
- => distance par comparaison avec <m>



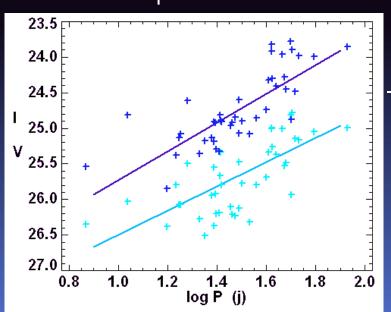
luminosity (L<sub>sun</sub>)

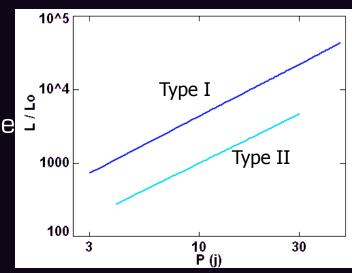
period (days)



#### Améliorations de la méthode

- Céphéides : type I et type II
- Plusieurs longueurs d'onde : étalonnage et mesure dans une même gamme
- Nécessité de tenir compte de l'absorption



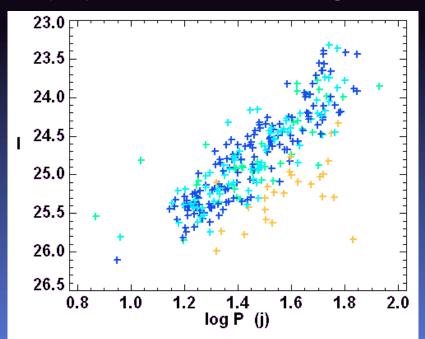


- Mesure des variations de magnitude d'une étoile céphéide dans deux zones spectrales différentes :
  - en visible, au maximum d'intensité : bonne précision sur la période P
  - en IR : limite les effets de l'extinction interstellaire pour la mesure de M



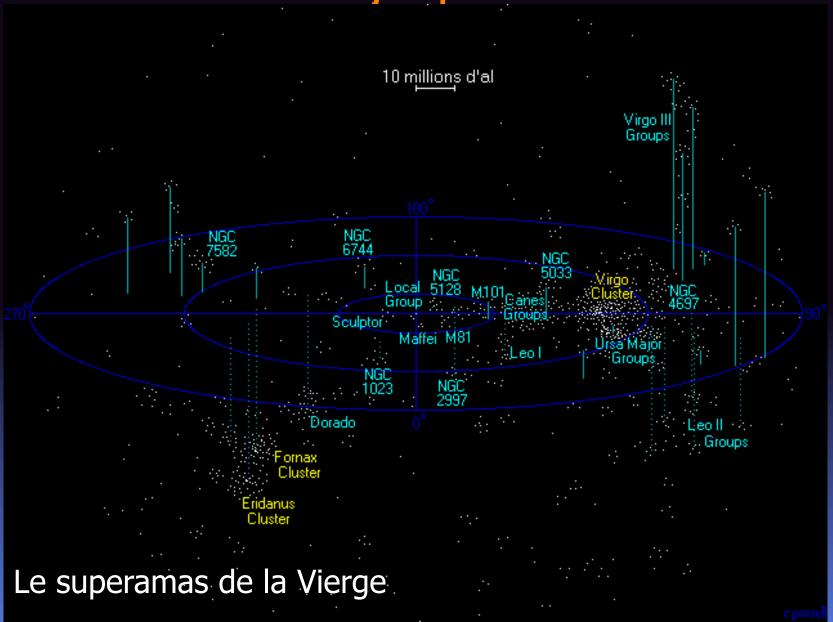
#### Les distances mesurables

- -céphéides : intrinsèquement très lumineuses => observées à grande distance ( 25 Mpc (80 M AL) avec Hubble).
  - type I:, principalement dans les bras des galaxies spirales.
  - type II : dans les bulbes des galaxies spirales, dans les galaxies elliptiques et dans les amas globulaires.



Étalonnage de la droite PL : nécessaire d'évaluer M ou d par des méthodes indépendantes

# L'univers jusqu'à 100 MAL





# Les supernova<u>e</u>

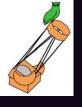
## Explosion globale d'une étoile

- <u>-Énergie libérée en 1 fois : très brillante</u>
  - Type I : transfert de masse entre les 2 composantes d'un système binaire
  - Type II : fin de vie normale d'une étoile de masse > 9  $M_{\odot}$  : effondrement du cœur, couches externes expulsées violemment.

Les supernovae de type la



- M : remarquablement constante au maximum d'éclat, évaluée dans le visible à :  $M_{\rm v} \simeq -19.48 \pm 0.20$ 



## Les supernovae

#### Principe de la mesure

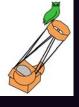
- -Mesure de la magnitude apparente d'une SN la
- $\rightarrow$  distance via  $\mu = m M = 5 \log d 5$

#### Les distances mesurables

-SN la : indicateurs primaires à plus longue portée, distances cosmologiques, (au-delà de z = 1) soit presque 10 000 M AL

#### Difficultés de la méthode

- -Une supernova est un évènement rare.
- -Nécessité d'être prêt à faire la mesure de m
- -Méthode affectée par l'absorption interstellaire (comme les autres)

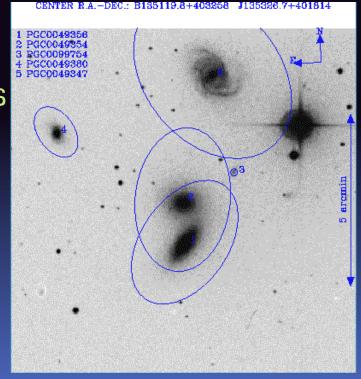


## Les indicateurs secondaires

Indicateurs de distances basés sur les propriétés statistiques de familles d'objets galactiques ou sur les propriétés globales des galaxies elles-mêmes.

- Propriétés globales des galaxies
  - Relation de Tully Fisher
  - La relation Faber-Jackson
  - Galaxies sosies

- Méthodes cosmologiques
  - Loi de Hubble et décalage vers le rouge



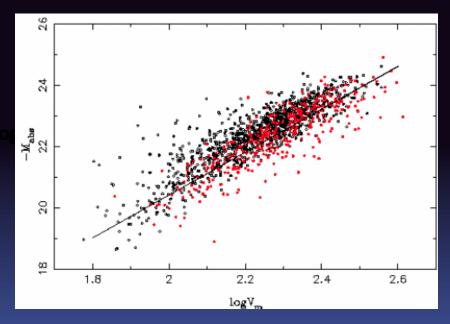


## Relation de Tully-Fisher

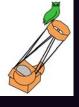
• du nom des deux astronomes anglais qui l'ont découverte en 1977

#### Galaxies spirales:

- Relation entre vitesse de maximale de rotation V<sub>m</sub> et luminosité
  - loi empirique  $M = a \log V_m + b$
- relation de type masse-luminosité plus une galaxie est massive
  - 1. plus elle tourne vite,
  - 2. plus elle est lumineuse
- vitesse de rotation V<sub>m</sub> mesurée à partir de l'émission du gaz



- Étalonnage : en mesurant V<sub>m</sub> dans le disque de galaxies dont la distance est connue. Les céphéides de ces galaxies conviennent.
  - erreur sur la détermination des distances par les Céphéides répercutée sur la détermination par Tully-Fisher.



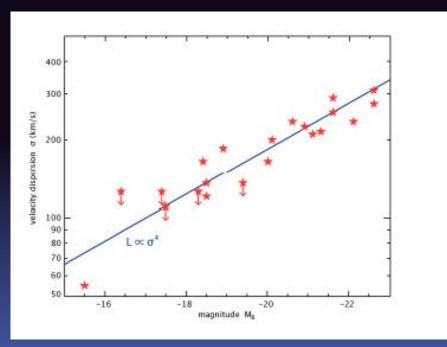
## Relation de Faber-Jackson

- du nom des deux astronomes qui l'ont découverte en 1976 galaxie elliptique ou lenticulaire (bulbe d'une spirale)

- Relation entre luminosité intrinsèque et dispersion des vitesses des

étoiles mesurées en son coeur.

- loi empirique  $M = a \log \sigma + b$
- relation de type masse-luminosité
- Mesure de la dispersion centrale des vitesses très délicate
  - par spectrométrie : agitation des étoiles de la galaxie
  - Luminosité d'autant plus forte que l'agitation est grande.





## Tully-Fisher / Faber Jackson

#### Principe de la mesure

- Mesure de  $V_m/\sigma$   $\Rightarrow$  détermination de M + mesure de m galaxie  $\Rightarrow$  distance d (via module de distance)
  - m également affectée par l'extinction interstellaire comme dans les méthodes précédentes.
  - dispersion dans la relation : pour un même  $V_m/\sigma$  , pas exactement la même valeur de M (dû à la morphologie de la galaxie)

#### Les distances mesurables

- Distances allant jusqu'à environ 300 Mpc (1 milliard d'AL)
- Précision
  - Tully-Fisher : « acceptable » de 15 à 20 % d'erreur.
  - Faber Jackson: incertitude d'environ 30 %
- Mesures disponibles : Vitesse pour 16600 galaxies (Tully Fischer) et dispersion pour environ 4000 galaxies (Faber-Jackson)



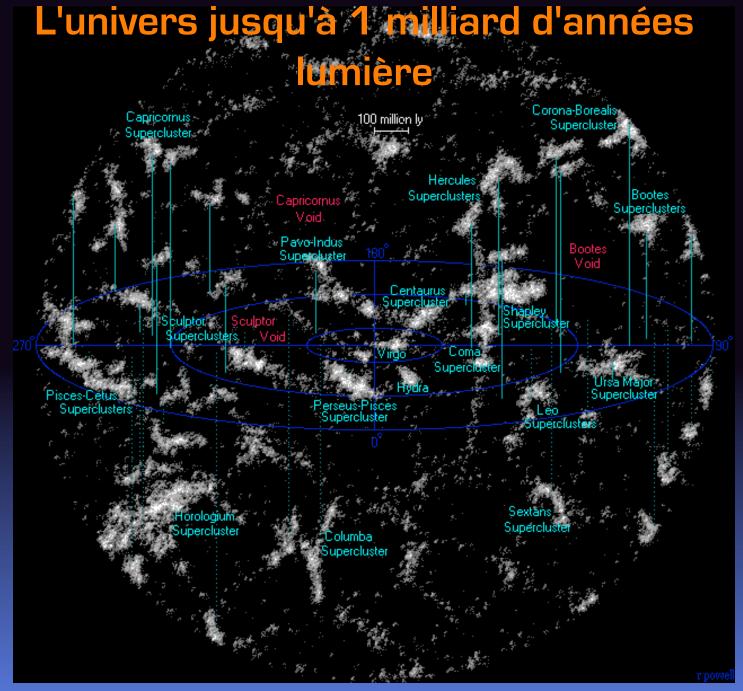
#### Galaxies sosies

Mêmes caractéristiques : même magnitude absolue



-Comparaison de l'éclat observé à l'éclat d'une galaxie étalon de distance connue pour avoir la distance de la galaxie.



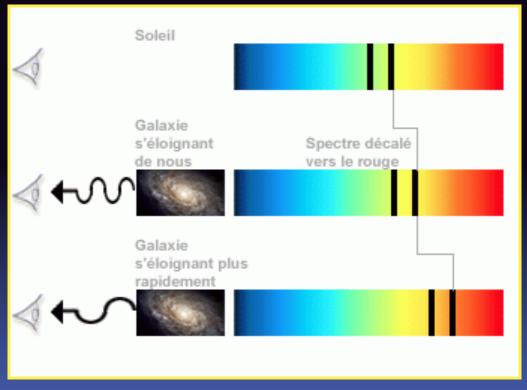




## Décalage spectral

-examen de raies galactiques sur des objets de plus en plus

lointains.



Le plus utilisé des estimateurs de distance

-décalage spectral, interprété via l'effet Doppler dû à la vitesse de fuite des galaxies  $V_r = c$ .



## Expansion de l'univers

-1929 : décalage spectral  $(z = \Delta \lambda/\lambda)$  proportionnel à la distance d des galaxies, et comme  $V_r = c$  . z

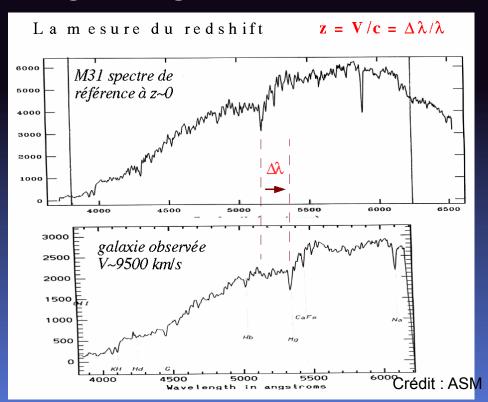
 $V_r = H_0 d H_0$ : constante de Hubble

-Plus une galaxie est éloignée, plus vite elle s'éloigne

## Principe de la mesure

Spectre de la galaxie

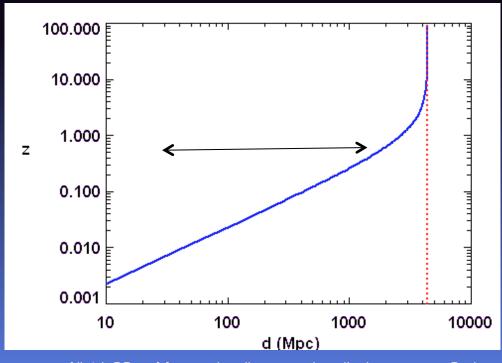
- ⇒décalage spectral z
- ⇒vitesse radiale V<sub>r</sub>
- ⇒distance *d*





#### Domaine de validité

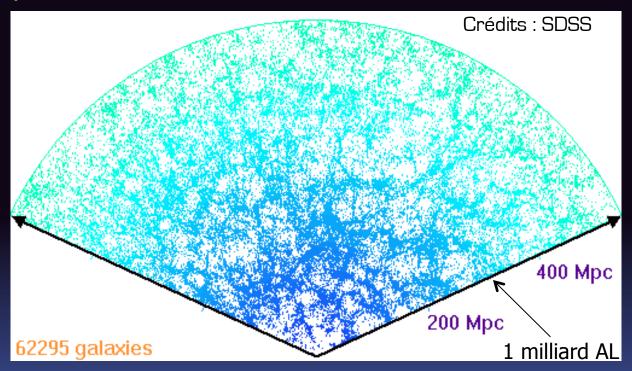
- -Méthode valable pour galaxies très éloignées d > 100 Mal où  $V_p \ll V_r$  (difficile de faire leur spectre)
- $-V_r = H_0 d$  valable que dans l'univers proche d < 5 000 Mal où les effets de la courbure de l'espace ne se font pas sentir.



Crédit · ASN



## Cartographie 3D



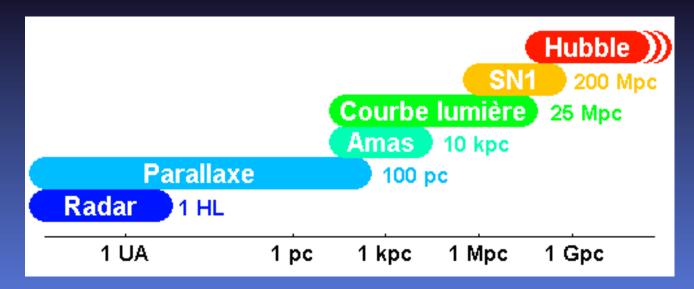
#### Au-delà?

- -Lentilles gravitationnelles
- -Effet Sunyaev Zel'dovich



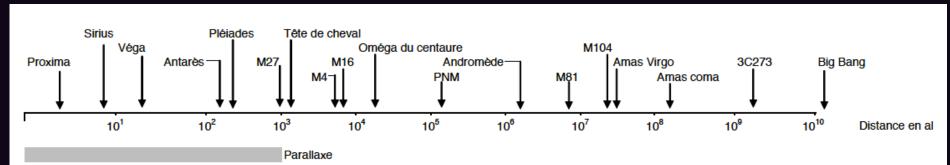
#### **Conclusions**

- La distance des objets proches est évaluée assez précisément.
- Plus les astres sont éloignés, plus l'incertitude augmente.
- Pour les objets lointains, les méthodes utilisées, même imprécises, sont souvent les seules disponibles
- La technologie évoluant rapidement, les précisions s'améliorent.





## **Conclusions**



Céphéides

Tully-Fisher et Faber-Jackson

Supernovas la

Hubble

| Portée théorique   |  |
|--------------------|--|
| 1 000 al           |  |
| 40 millions d'al   |  |
| 1 milliard d'al    |  |
| 5 milliards d'al   |  |
| Premières galaxies |  |
|                    |  |