

*La constante de Hubble ...
Une saga pleine de
péripéties ...*

Allan Sandage (1961) :

« ... Le but de la cosmologie observationnelle est d'obtenir la valeur de deux paramètres : la constante de Hubble H_0 et le paramètre de décélération q_0 »

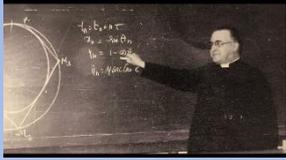
La constante de Hubble H_0 exprime le taux d'expansion actuel de l'Univers

Loi de Hubble- Lemaître

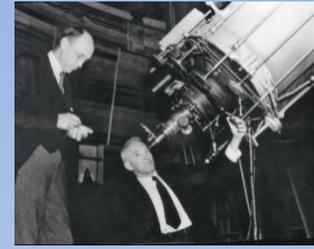
$$V = H_0 D$$

...le paramètre de décélération (de l'expansion) est devenu un paramètre ... d'accélération

Lemaitre 1927



$$H_0 \sim 600 *$$



(Slipher 1922)



$$H_0 \sim 500 - 550 \text{ Hubble 1929}$$



$$H_0 \sim 200$$

Baade - Mt Palomar 1950

$$50 < H_0 < 130$$

Sandage 1970

$$H_0 \sim 65 - 75$$

Vers 1990

* (km/s)/Mpc

Un effort considérable :

*Plus de 1000 estimations de
la constante de Hubble depuis 1980 ...*

*Environ 200 mesures publiées dans
les 2 dernières années ..*

Tout va bien ! ...



Hubble Space Telescope (HST)

$$H_0 = 73,3 \pm 1,04$$

Riess et al. 2022

Tout va bien ... ??

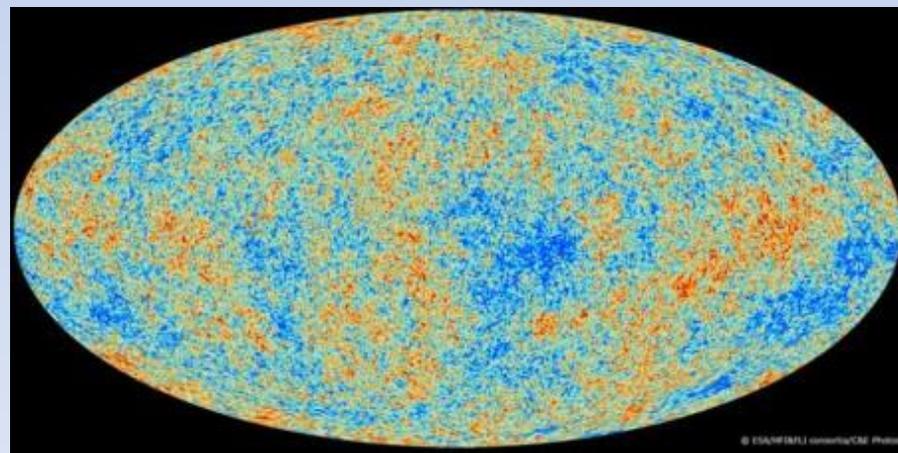
$$H_0 = 73,3 \pm 1,04$$

Univers local = récent



© NASA

Collaboration Planck – (2013- 2020)



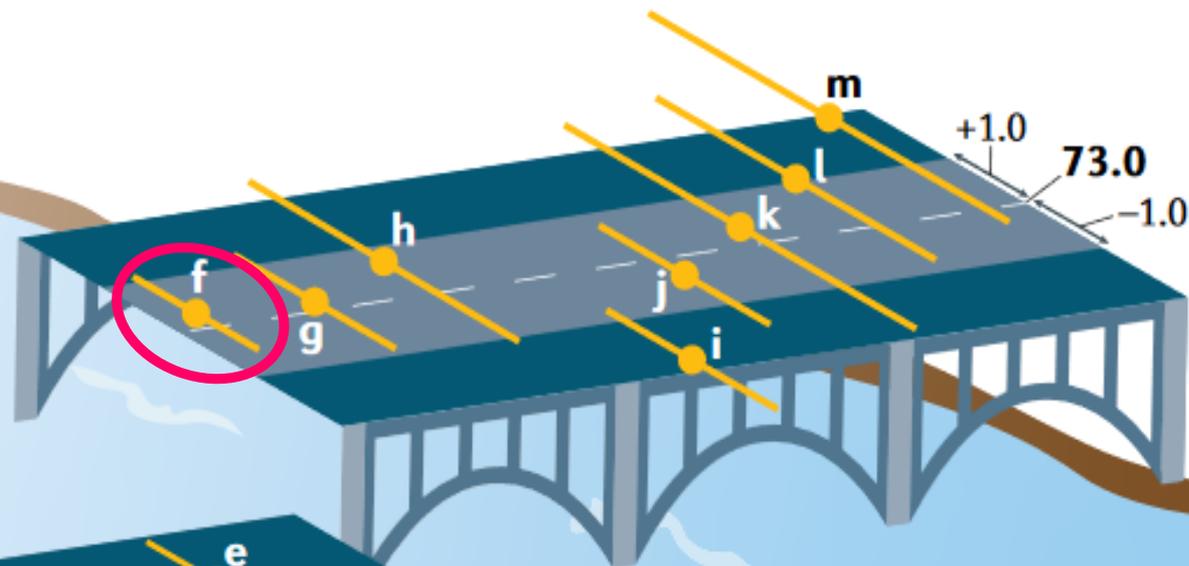
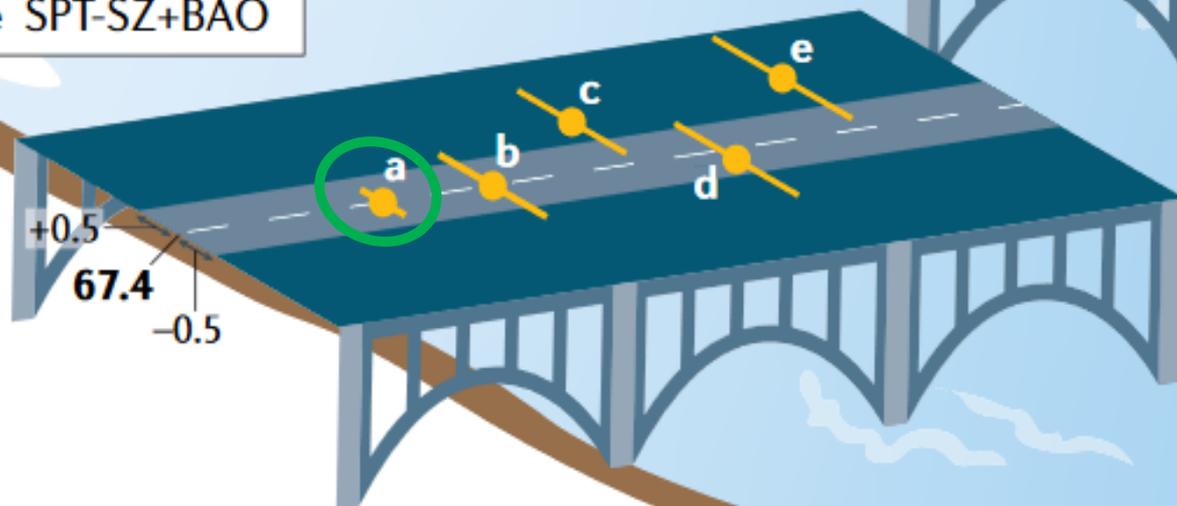
Riess et al. 2022

$$H_0 = 67,4 \pm 0,5$$

Univers « lointain » = primordial

Early route

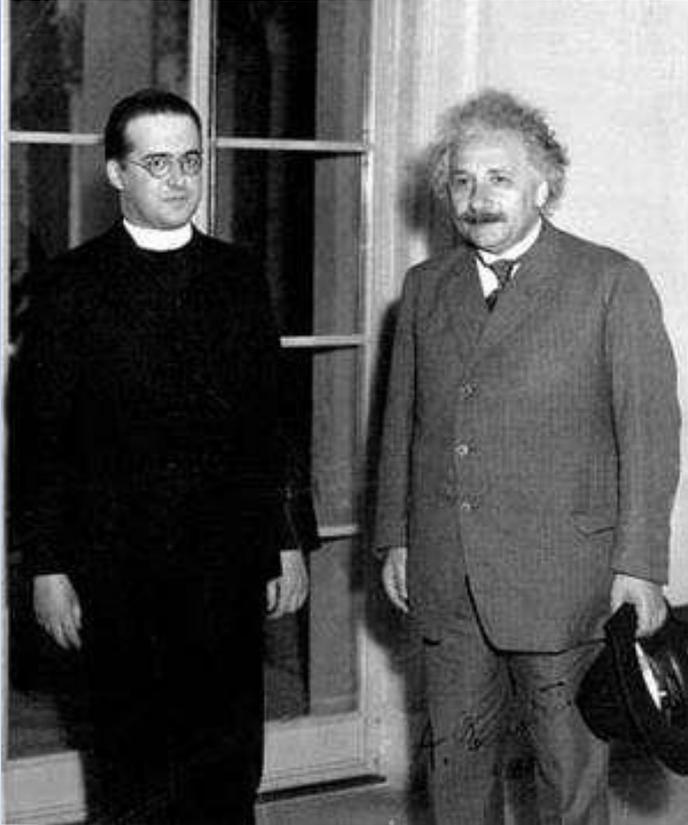
- a** Planck
- b** BBN+BAO
- c** WMAP+BAO
- d** ACTPol+BAO
- e** SPT-SZ+BAO



Late route

- | | |
|------------------|------------------|
| f SH0ES | g H0LiCOW |
| h STRIDES | i TRGB 1 |
| j TRGB 2 | k Miras |
| l Masers | m SBF |

La constante de Hubble et l'expansion de l'Univers: La loi de Hubble-Lemaître



Einstein (1917) : RG appliquée à l'Univers entier
→ Univers homogène et isotrope
Statique ?? Instable ! ...

*Alexandre Friedmann (Leningrad -1922) :
Première théorie de l'Univers en expansion*

Georges Lemaître (1927) :
« Univers homogène de masse constante
et de rayon croissant »

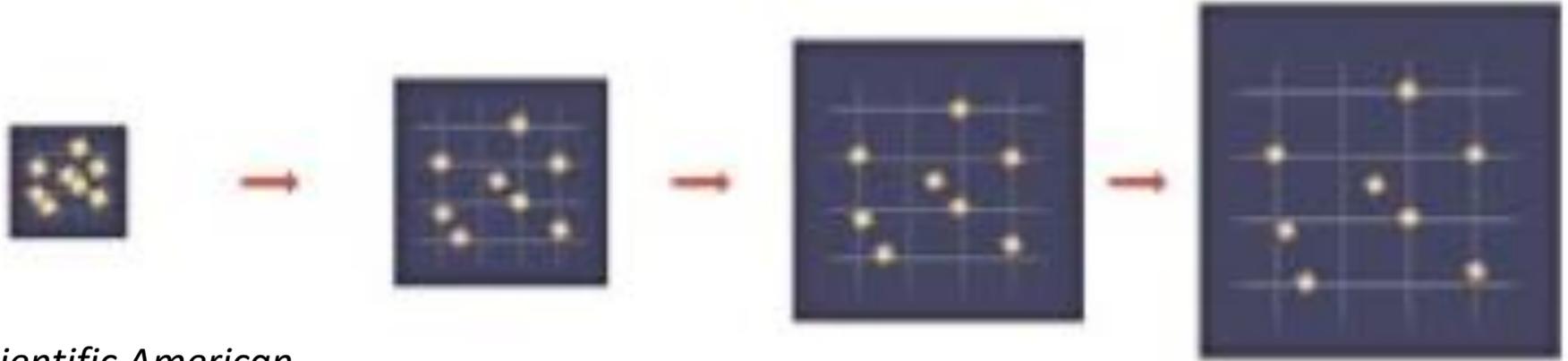
L'article en français contient déjà la relation

$$V = k D$$

Avec une estimation de la valeur de $k \sim 600 \text{ (km/s)/Mpc}$
Mais cette relation disparaîtra dans la version anglaise de 1931,

Expansion de l'Univers :

Il s'agit d'une expansion DE l'espace lui-même



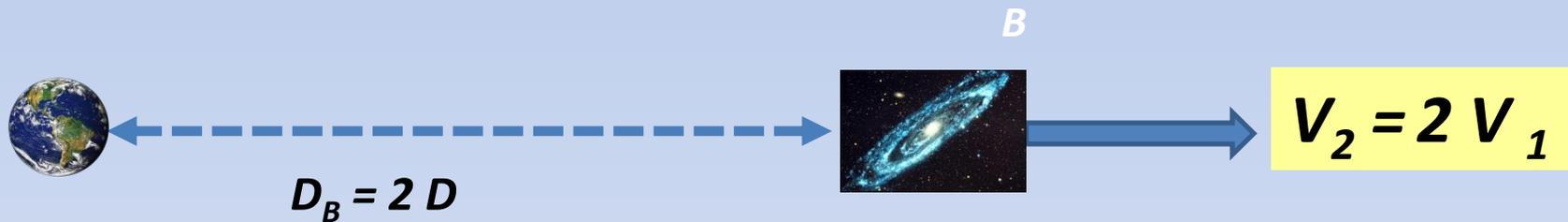
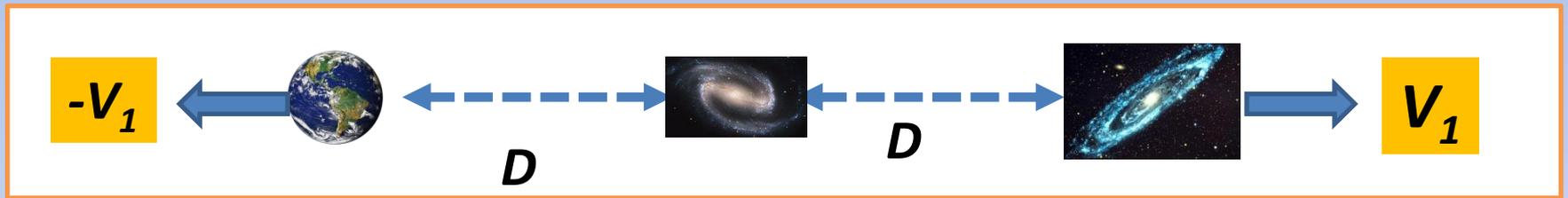
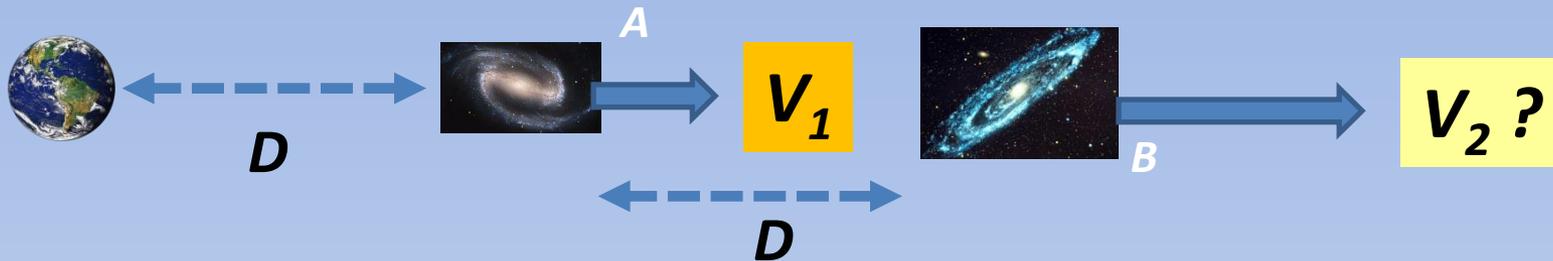
© Scientific American

*Tous les objets physiques s'éloignent les uns des autres
(à condition d'être assez éloignés entre eux)
Il n'y a pas de centre, pas de lieu privilégié (principe
Copernicien)*

En remontant dans le passé : « Big Bang » qui a eu lieu partout ou, plus précisément, l'Univers a connu une phase de très hautes températures et de très haute densité où que l'on se trouvait, il y a environ 13,8 Milliards d'années

Principe Cosmologique :

Univers homogène et isotrope (à grande échelle) → Loi de Hubble-Lemaître



Publié par
Hubble (1929)

$$V = H_0 D$$

« Loi de Hubble-Lemaître »
(UAI -2018)

$V =$ « vitesse de récession »

$H_0 =$ taux d'expansion « local »
(à l'instant « présent »)

Constante de Hubble et estimation de l'âge de l'Univers

H_0 = Vitesse / Longueur , c'est « l'inverse d'une durée »

$$V = H_0 D \Rightarrow D = V \times \left(\frac{1}{H_0}\right) \equiv V \times t_0$$

Age de l'Univers

Si le taux d'expansion est constant au cours du temps ...

$H_0 \sim 500 \rightarrow t_0 \sim 2$ Milliards d'années

$H_0 \sim 50 \rightarrow t_0 \sim 20$ Milliards d'années

$H_0 \sim 100 \rightarrow t_0 \sim 10$ Milliards d'années

Age des plus vieilles étoiles :
Entre 12 et 14 milliards d'années !!!

Trop naïf ! Le taux d'expansion évolue avec le temps ...

Le « paramètre de Hubble » dépend bien du temps

$$H(t) \text{ et } H_0 = H(t = t_0)$$

Pour estimer l'âge de l'Univers t_0 il faut tenir compte de toute l'histoire de l'expansion depuis le Big Bang !

La découverte de l'accélération de l'expansion résout le problème du « grand » H_0

" $H_0 \sim 70$ "



Expansion à vitesse constante

(situation fictive)



$t_0 = 13,6$ Milliards d'années



Expansion ralentie

Univers de matière à 100% (Matière noire + atomes)



$t_0 = 9$ à 10 Milliards d'années



+



Univers avec accélération il y a 6-7 Milliards d'années due à l'Energie Noire (70%) + Matière (30%)



$t_0 = 13,8$ Milliards d'années

Comment mesurer H_0 avec précision ?


$$V_1 = H_0 D_1$$


$$V_2 = H_0 D_2$$


$$V_3 = H_0 D_3$$

⋮


$$V_N = H_0 D_N$$

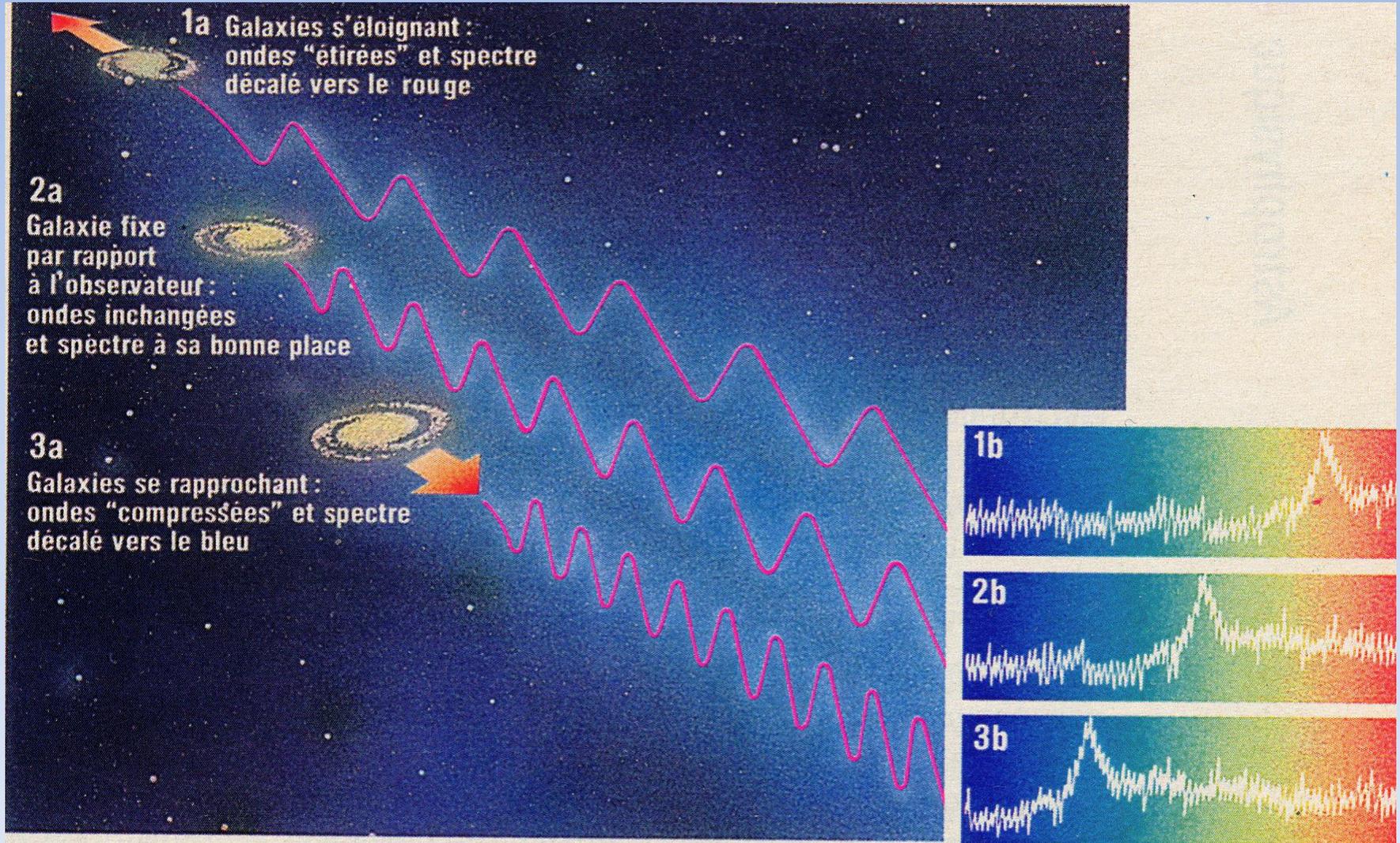
Mesurer chaque vitesse de récession : facile !

Mesurer chaque distance ??? le plus difficile !!

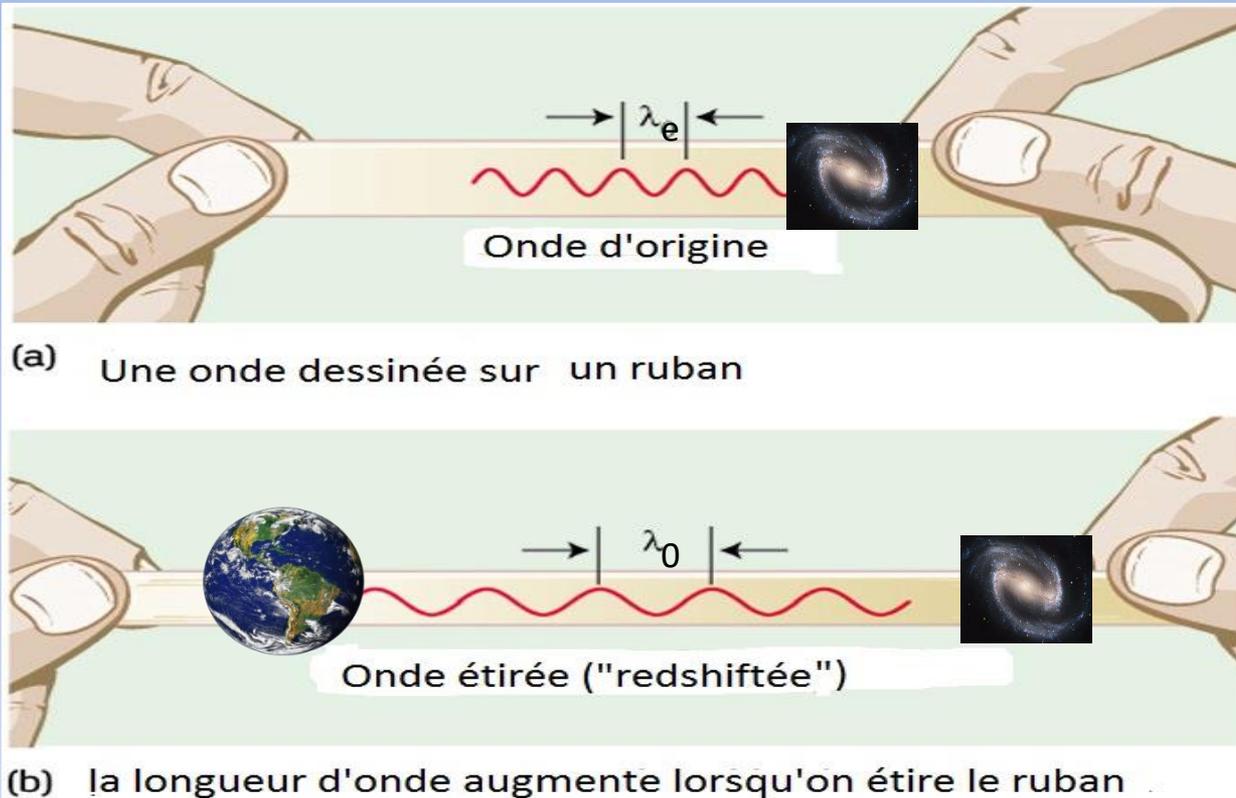
Des galaxies assez lointaines .. Mais pas trop !

Des Galaxies dans le « flot de Hubble »

Mesurer la vitesse de récession : Le redshift cosmologique



Le décalage de longueur d'onde mesure de combien l'espace s'est dilaté entre le moment de l'émission de la lumière et le moment de la réception, ce que l'on peut traduire en terme de « vitesse de récession » .



$$Z = \frac{\lambda_0 - \lambda_e}{\lambda_e}$$

En général, Les relations « redshift – vitesse de récession » et aussi « redshift – distance » ne sont pas simples car elle dépendent de toute l'histoire de l'évolution de l' Univers

Localement ce phénomène est analogue à un « effet Doppler » $Z = \frac{V}{c}$

Mesurer les distances ?

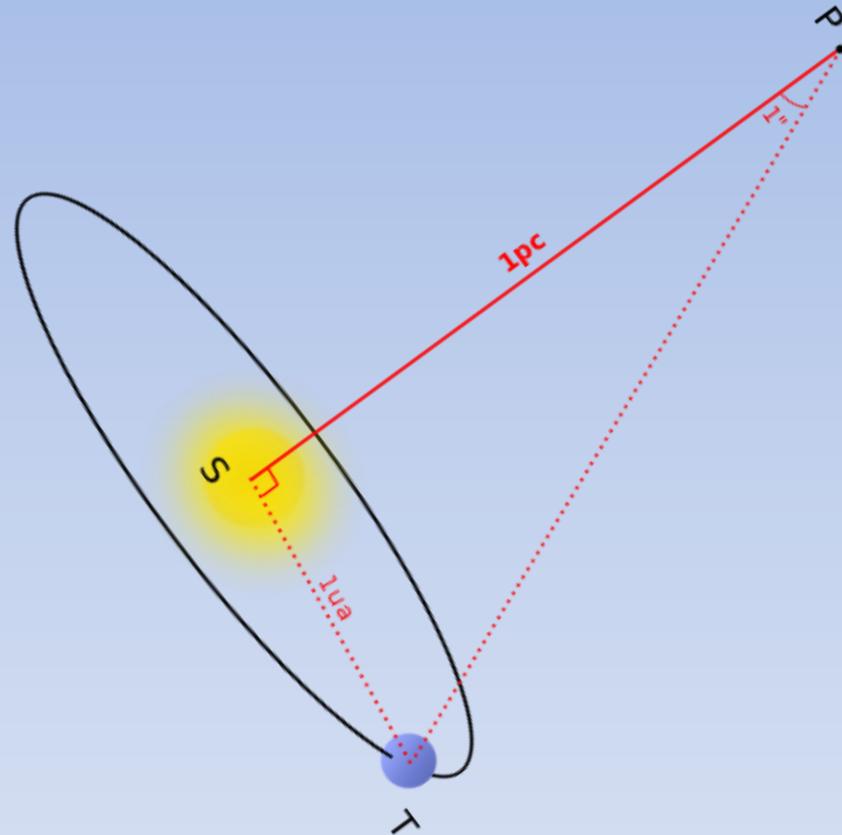
..... C'est tout le problème de la cosmologie !!

- Les méthodes géométriques : parallaxe – « règles standard »
- Utilisation des « ***Chandelles standards*** »
- La mise en œuvre : la stratégie des « échelles cosmiques »

- Une méthode purement géométrique :
La mesure de la Parallaxe des étoiles « proches »



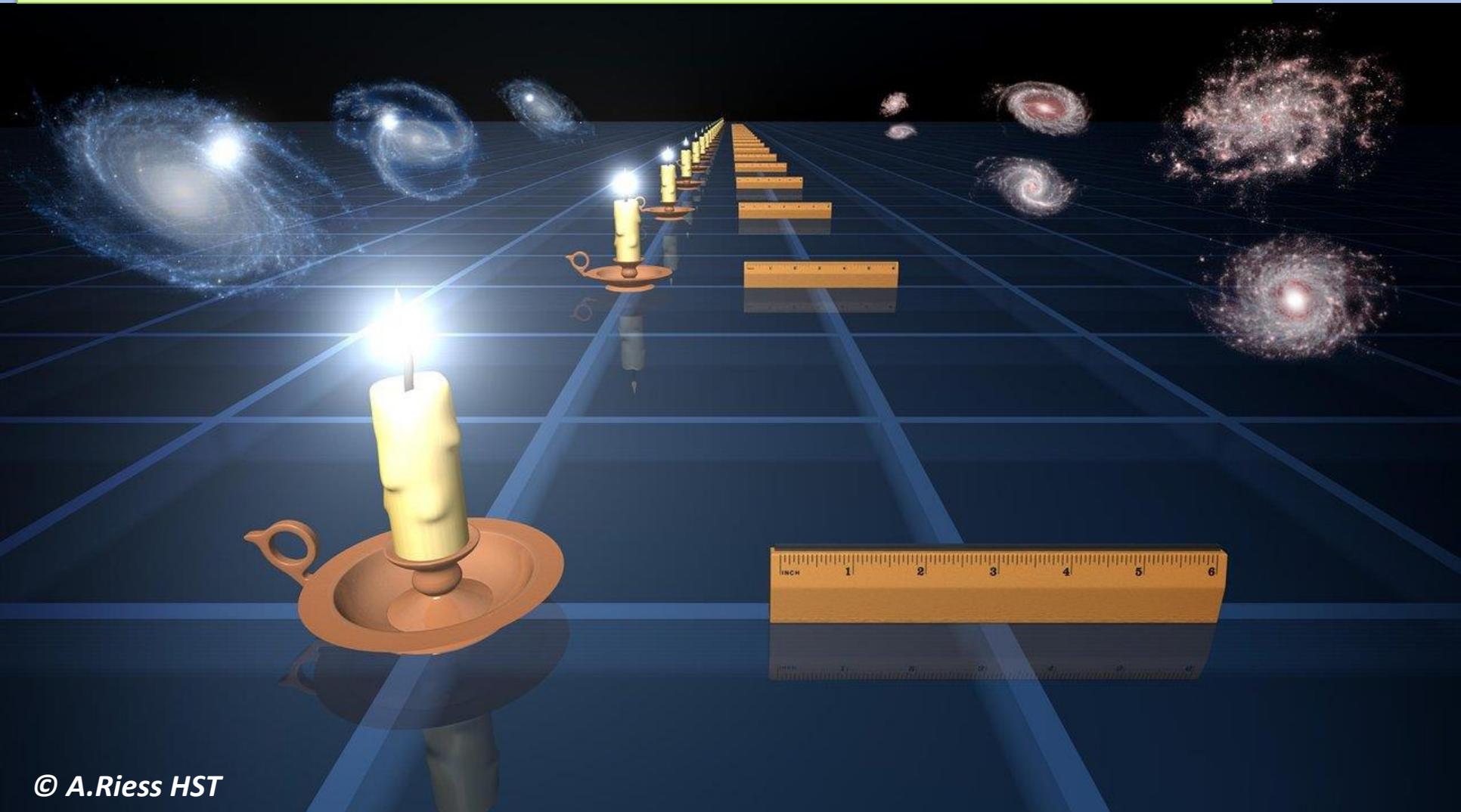
Friedrich Willem Bessel (1838) :



Alpha du Centaure (environ 4 A.L = 270 000 Unités Astronomiques)
L'angle est d'environ 1 seconde d'arc (1832-1838))

OK Pour les étoiles « proches » (de 4 AL à quelques centaines/milliers d'AL) :

Autre mesure géométrique : les « Règles standards »

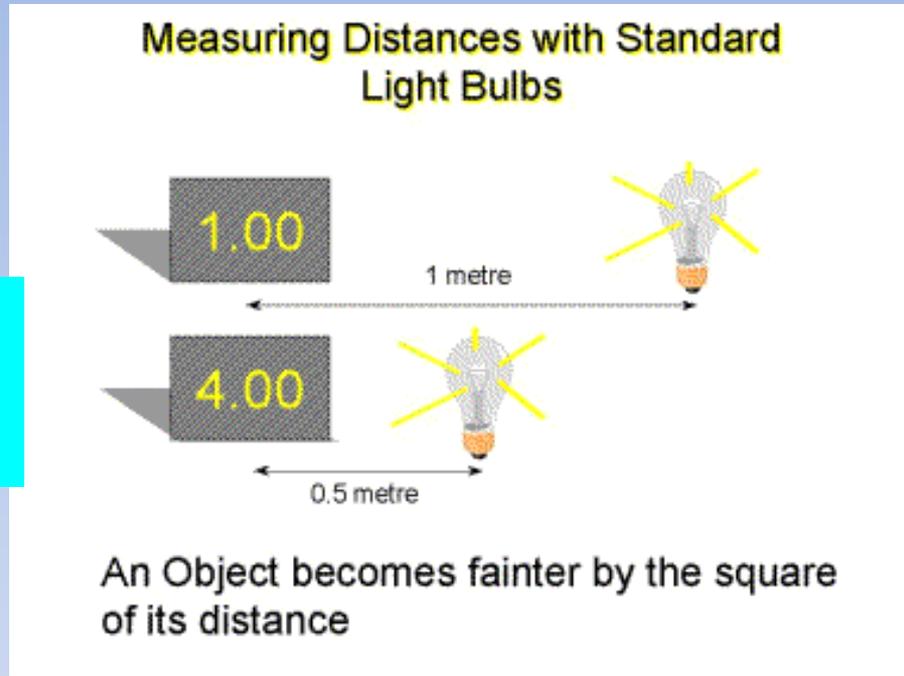


© A.Riess HST

Elles sont très rares !!

Les « Chandelles standards »

Plus un objet est loin, moins il est lumineux.



La mesure de la luminosité est donc une mesure directe de la distance

À condition que l'on connaisse la puissance de l'ampoule (***luminosité absolue***) et que les ampoules considérées soient toujours du même type (***ampoules standards***)

Une bonne « chandelle standard » astrophysique:

- Est très lumineuse (on la voit même si elle est très loin)
- On *estime correctement* sa **luminosité absolue** : **la luminosité qu'elle aurait si elle était placée à une distance connue**

En général on ne sait pas la calculer exactement

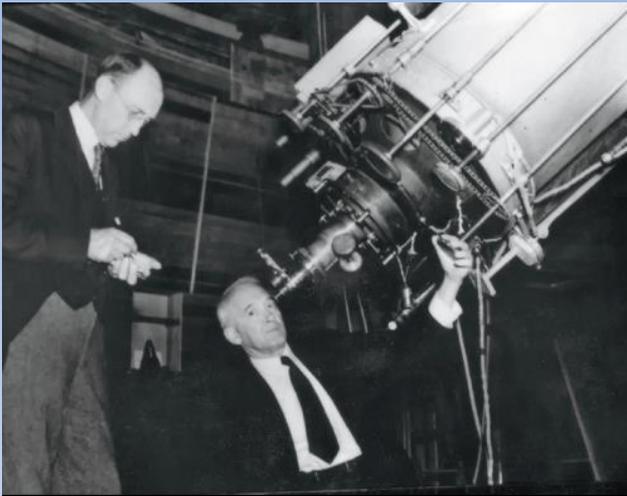
Il faut contourner ce problème :

Une calibration est nécessaire !!!

- Tenir compte de possibles **biais** :
 - A t'on bien affaire toujours au même type de « chandelle » ?
 - Les chandelles observées sont-elles toutes bien « standard » ??
 - Y a-t-il une dépendance dans l'environnement ?
 - Autres biais statistiques ...

La démarche contient inévitablement une part d'empirisme ...

Historique : « nébuleuses » et redshift, Céphéides



V. Slipher

*Lunette de 60 cm de Lowell Observatory
(Arizona)*

Observations de 1910 à 1922

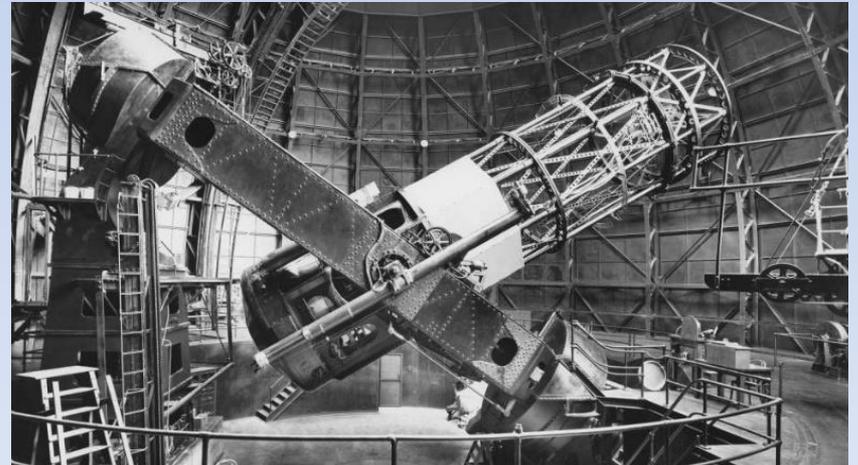
*41 « nébuleuses spirales » : 36 ont un redshift,
5 un blueshift*

« Plus les « nébuleuses » ont une faible luminosité plus le redshift est important »

*Hubble et
Humason (1924)*

*Télescope
du Mt Wilson
(2,50 m)*

*Confirment la nature extragalactique
des « nébuleuses » spirales*



*Vers une chandelle standard ...
Miss Leavitt , les Céphéides
et les Nuages de Magellan...*

HARVARD COLLEGE OBSERVATORY
Circular 173

Edward C. Pickering, March 3, 1912.

Periods of 25 Variable Stars In The Small Magellanic Cloud.

The following statement regarding the periods of 25 variable stars in the Small Magellanic Cloud has been prepared by Miss Leavitt.

A Catalogue of 1777 variable stars in the two Magellanic Clouds is given in H.A. 60, No. 4. The measurement and discussion of these objects present problems of unusual difficulty, on account of the large area covered by the two regions, the extremely crowded distribution of the stars contained in them....



La loi de Leavitt et les Céphéides

Céphéides : étoiles pulsantes très lumineuses
(jusqu'à 100 000 X Soleil !) (1908)



Le petit Nuage
de Magellan (SMC)
25 Céphéides (**1912**)



Relation entre la luminosité (observée) et la période

*Les céphéides dans le SMC sont toutes
(à peu près) à la même distance de la Terre !*

Loi de Leavitt : si la luminosité absolue est plus grande, alors la période augmente

⇒ Calibration ? Problème : on ne connaît pas la distance au SMC ...on ne connaît pas leur vraie Luminosité absolue

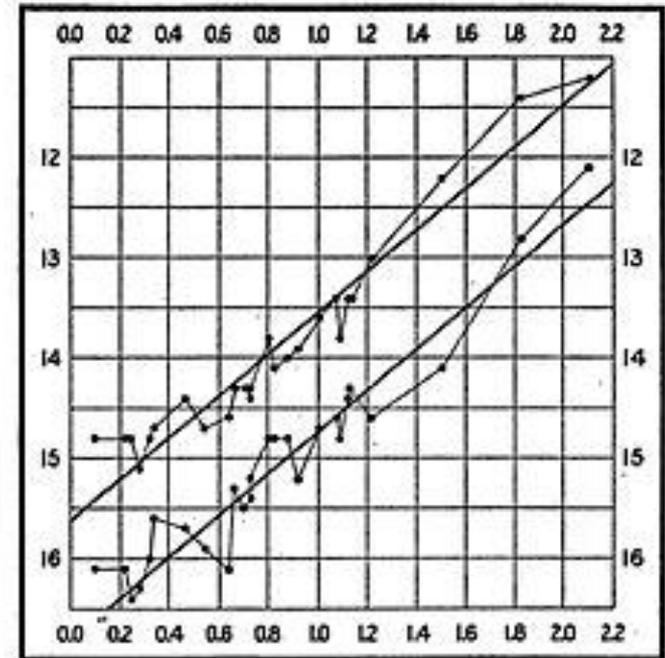


FIG. 2.



E. Hubble

1929



Cepheid Variable Star V1 in M31
Hubble Space Telescope ■ WFC3/UVIS

NASA, ESA, and the Hubble Heritage Team (STScI/AURA)

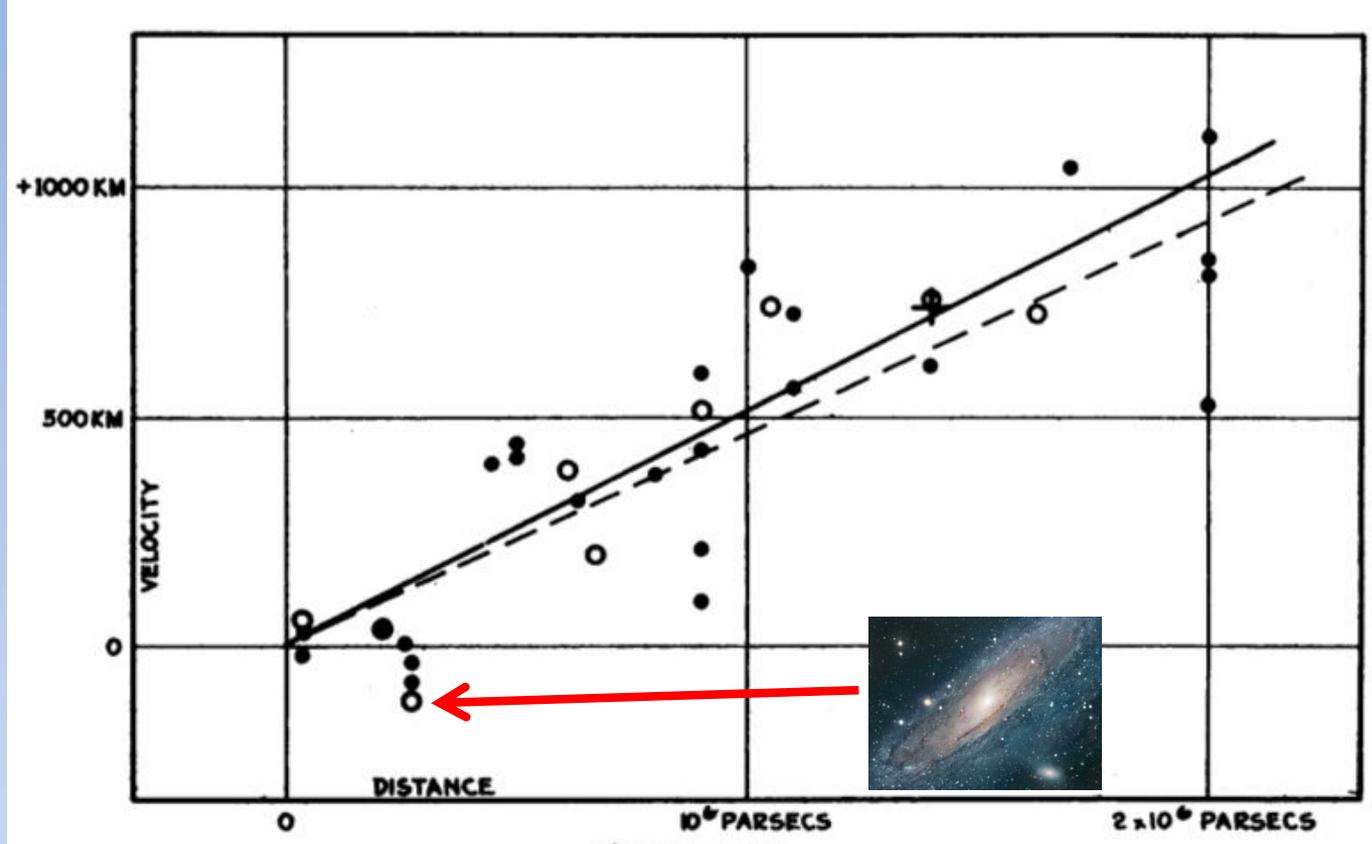
STScI-PRC11-15a

*Céphéides dans la « Nébuleuse » d'Andromède !!
Permet une estimation de sa distance (Hubble) à 0,84 M A.L. :
définitivement extragalactique !
Valeur actuelle: 2,5 M AL – correction en 1952 grâce au Mt Palomar*



E. Hubble

1929



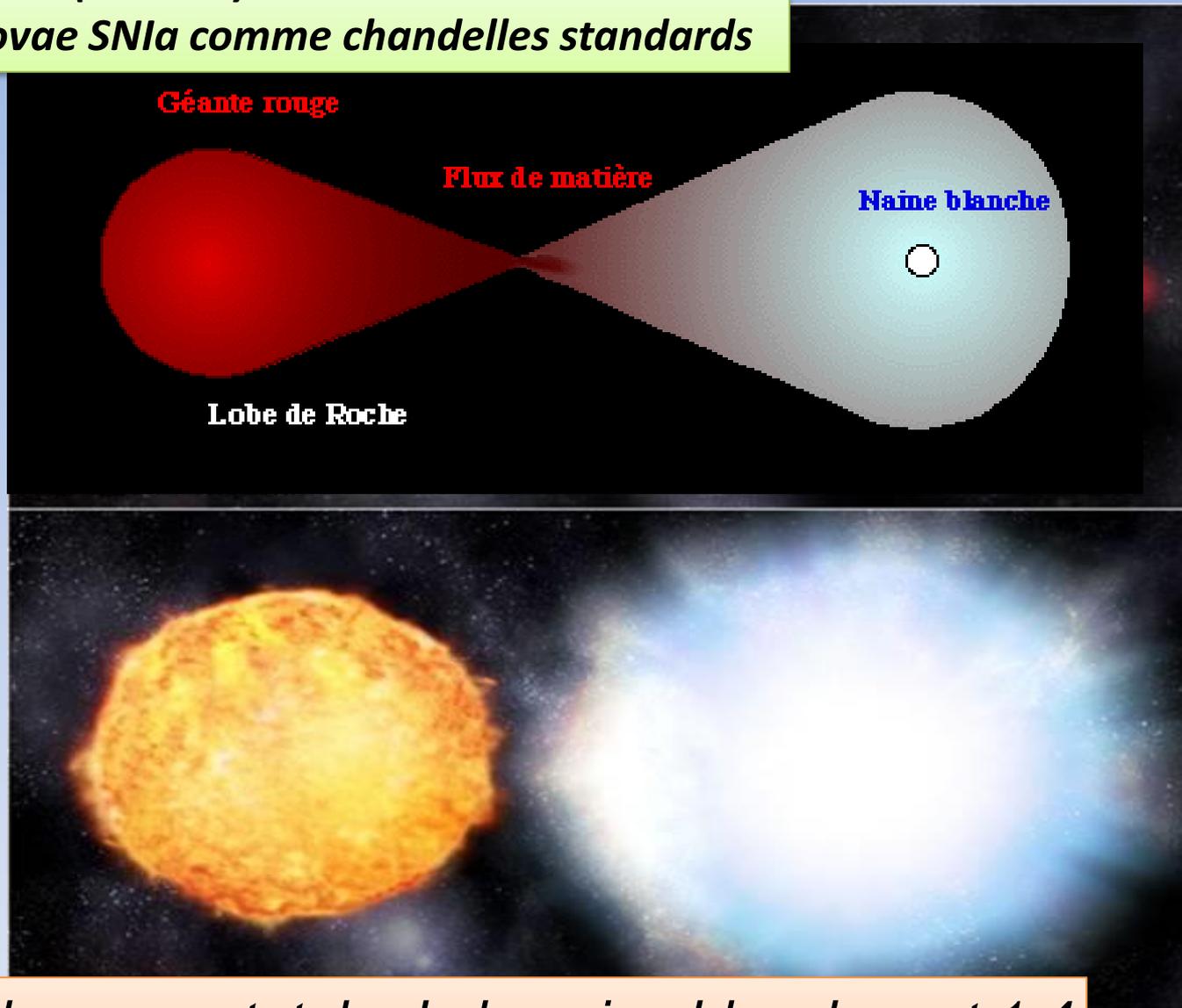
18 redshifts mesurés pour des galaxies « proches » : distances estimées grâce à leurs étoiles les plus brillantes + Céphéides

$$V = H_0 D$$

$$H_0 \sim 500 \text{ (km/s)/Mpc}$$

C'est le début de la méthode des « échelles cosmiques »

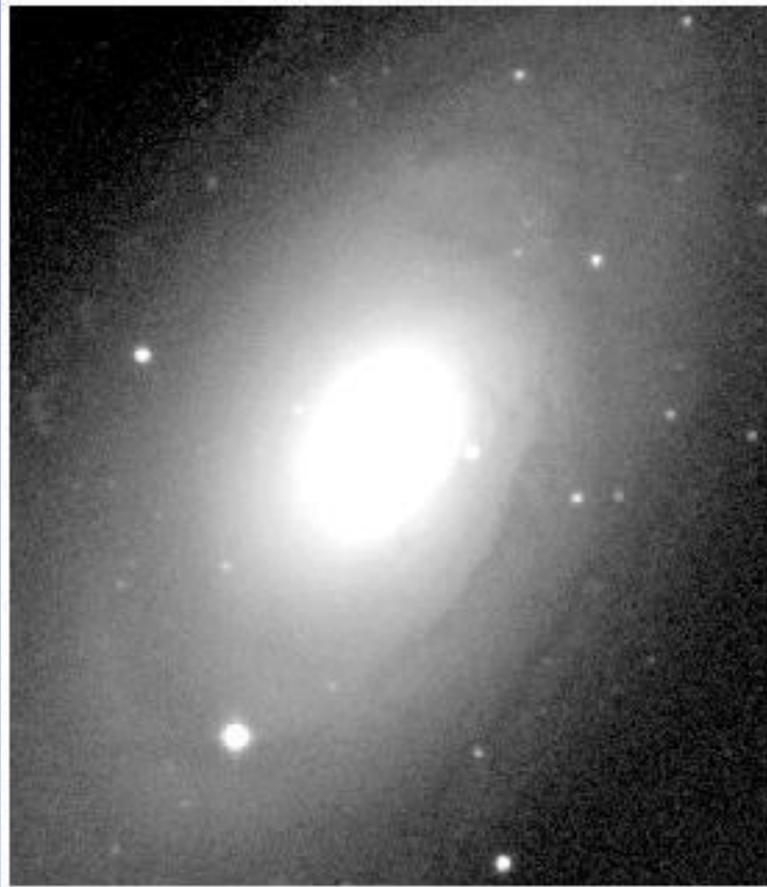
*Une révolution (1980 -..):
Les Supernovae SNIa comme chandelles standards*



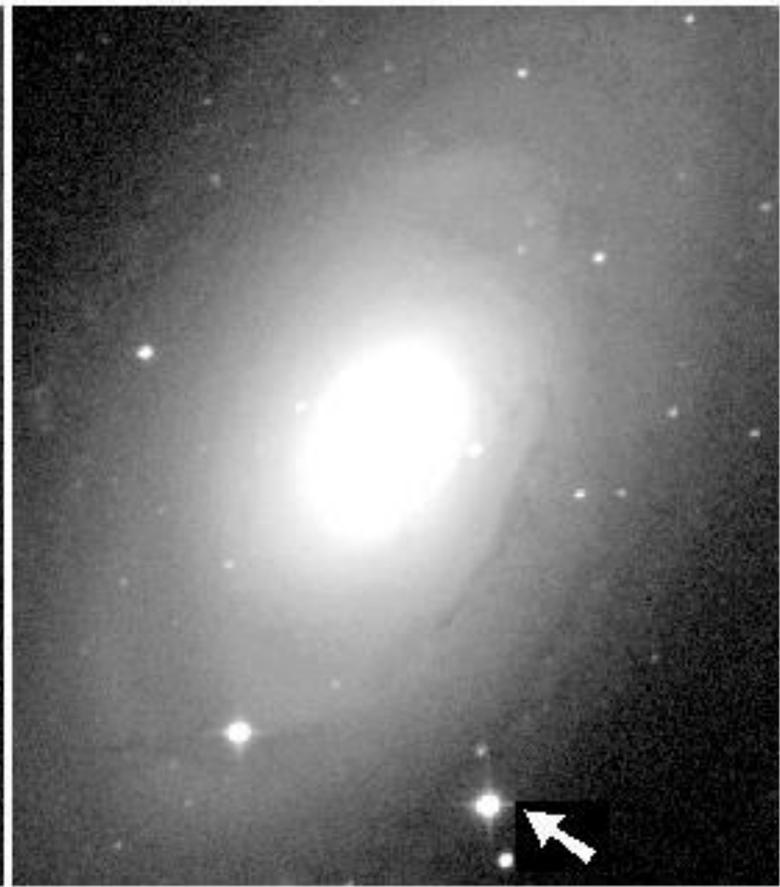
*Lorsque la masse totale de la naine blanche est 1,4
masse solaire => explosion => toujours la même
quantité de lumière émise*



Très lumineuse mais ...en moyenne une SNIa par galaxie chaque siècle ...



April 23, 1992



April 1, 1993

Pour tester la loi de Hubble-Lemaître :

*on a toujours le problème de la **calibration** ...*

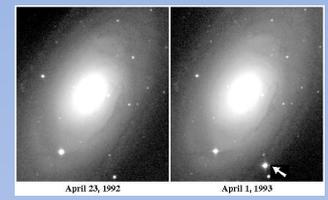
***Le must** : une SNIa dans une galaxie où on a observé des Céphéides !!*

Les « échelles Cosmiques !!



Galaxies Dans le Flot de Hubble

Supernovae Ia



Céphéides

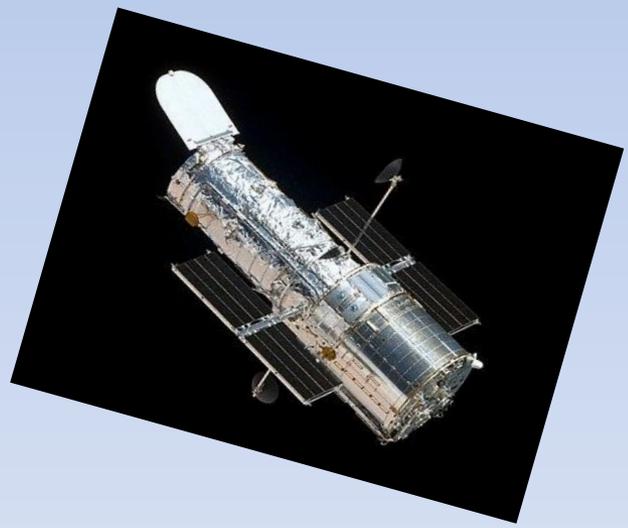


M106
Andromède
Nuages de Magellan

Céphéides

Mégamaser

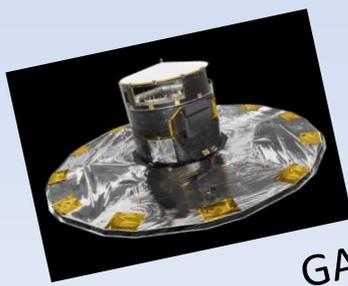
Binaires à éclipses



Voie Lactée

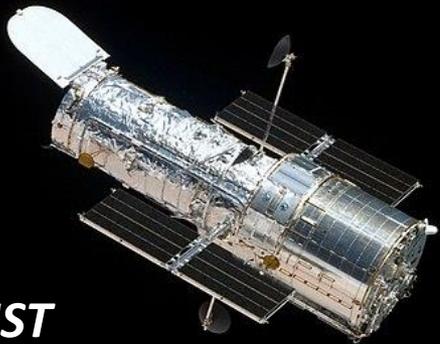
Céphéides

Parallaxes



GAIA



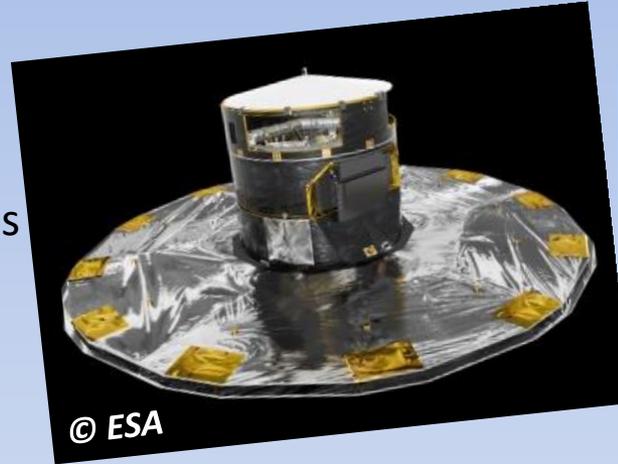


HST

Le must de la détermination « locale » de H_0 : SHOES (2005-)

*Adam Riess et al.
(Nobel 2011 avec Perlmutter et Schmidt)*

GAIA (ESA) – lancée en 2013
Mesure les positions et les vitesses
de milliards d'étoiles dans la
Voie Lactée



© ESA

*GAIA mesure des angles
de parallaxe de 10
microsecondes d'arc !!*

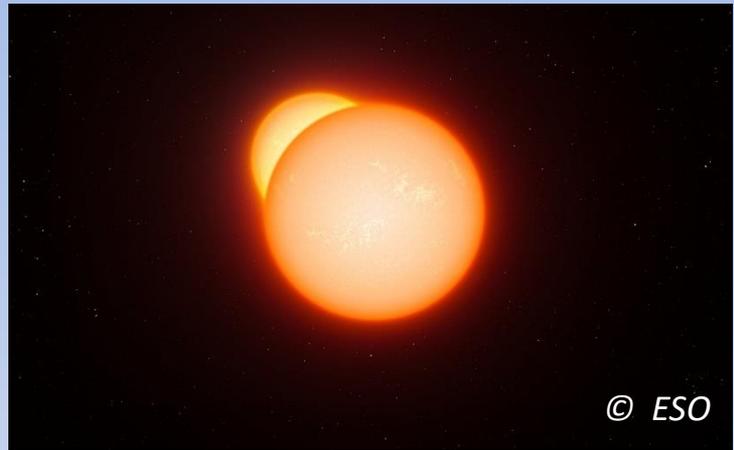
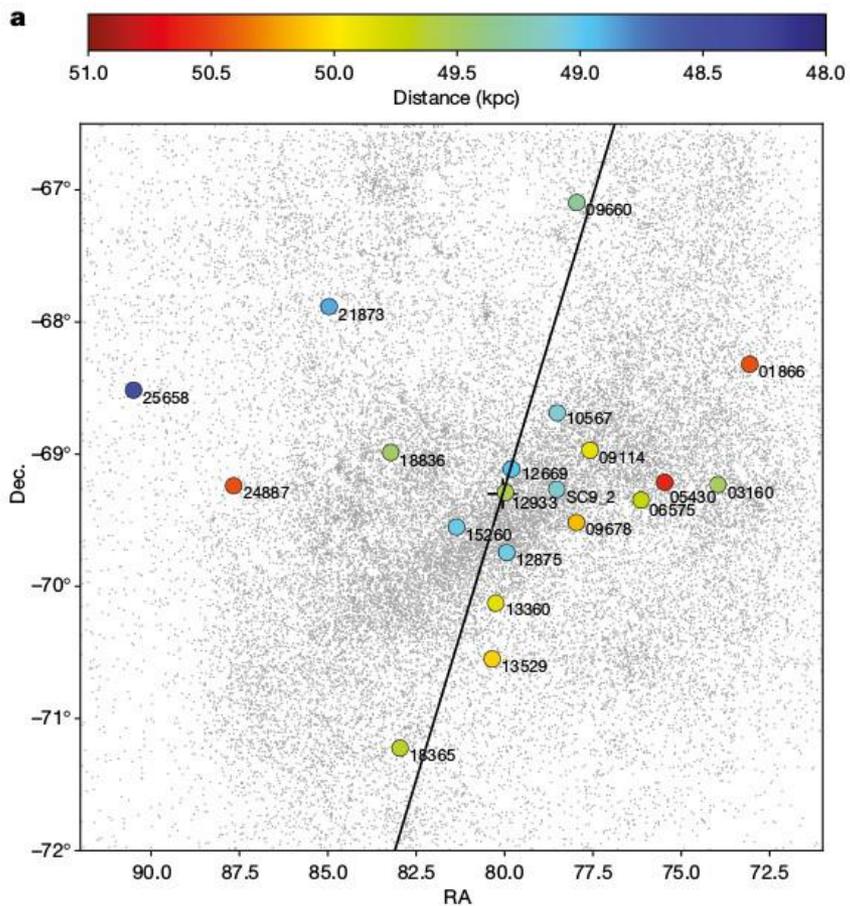
*SHOES utilise 75 Céphéides dans la Voie Lactée dont la parallaxe est
mesurée par GAIA + 8 Céphéides mesurées par HST*

70 Céphéides analysées (HST) dans le Grand Nuage de Magellan et
145 dans le Petit Nuage de Magellan

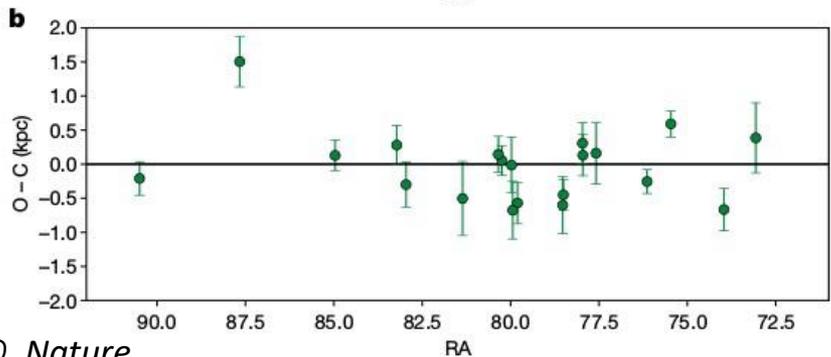
Nécessaire !!! : distance précise aux Nuages de Magellan ???
→ Méthode des *Binaires à éclipses* !!!

Binaires à éclipses (DEB) dans LMC et SMC

Mesurer le rayon
de géantes rouges très lumineuses
=> Magnitude absolue



Détection et étude de 20 systèmes
binaires à éclipse **en 20 ans** dans le LMC
+ 10 dans SMC
(VLT de l'ESO au Chili + Afrique du Sud)
➔ Distance précise aux LMC et SMC !
(158 000 A.L. pour le centre du LMC)



Les futurs ELT (30 – 40 m) devraient permettre
de réaliser le même type d'études dans
Andromède et des galaxies proches

+ Une galaxie « exceptionnelle » **Messier 106** (NGC 4258) située à 23,5 Millions d'A.L.

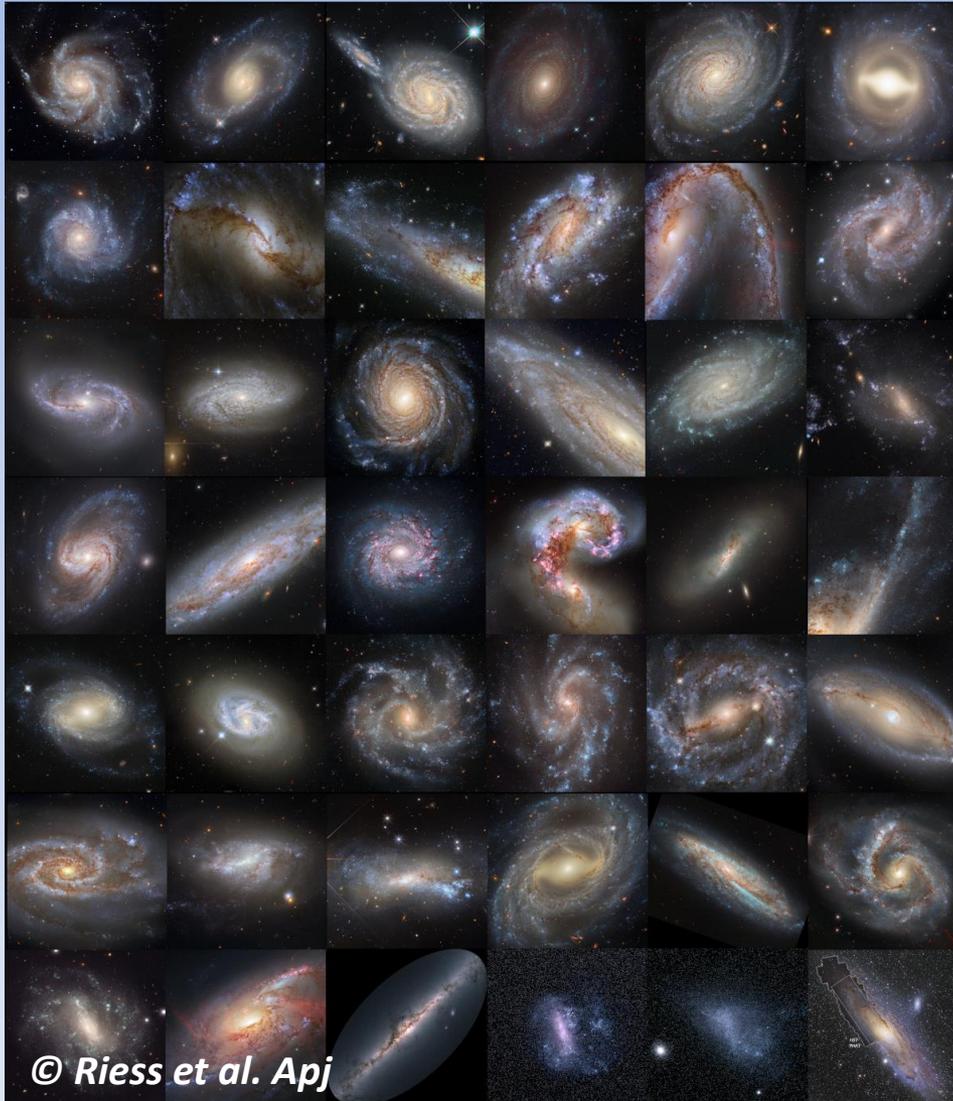


Technique du MégaMaser qui permet de mesurer dans le temps (**10 ans**) vitesse et accélération du disque d'accrétion autour du Trou Noir central => **le vrai diamètre** ! (règle standard) en mesurant **le diamètre apparent** du disque on obtient la **distance** à la galaxie avec une précision de 1,4 %

(Avec radio-telescopes VLBI ... et en tenant compte de la dérive des continents sur Terre ..)

+ 443 Céphéides dans cette galaxie (HST)

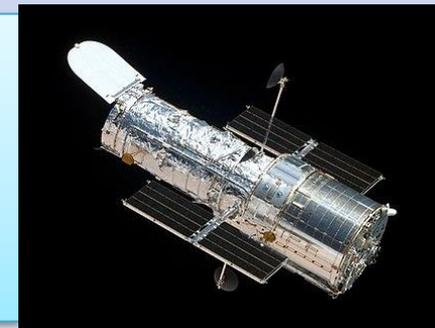
Les supernovæ de type Ia dans des galaxies hôtes de Céphéides



*SHOES : 42 Galaxies hôtes de
SNIa et de Céphéides*

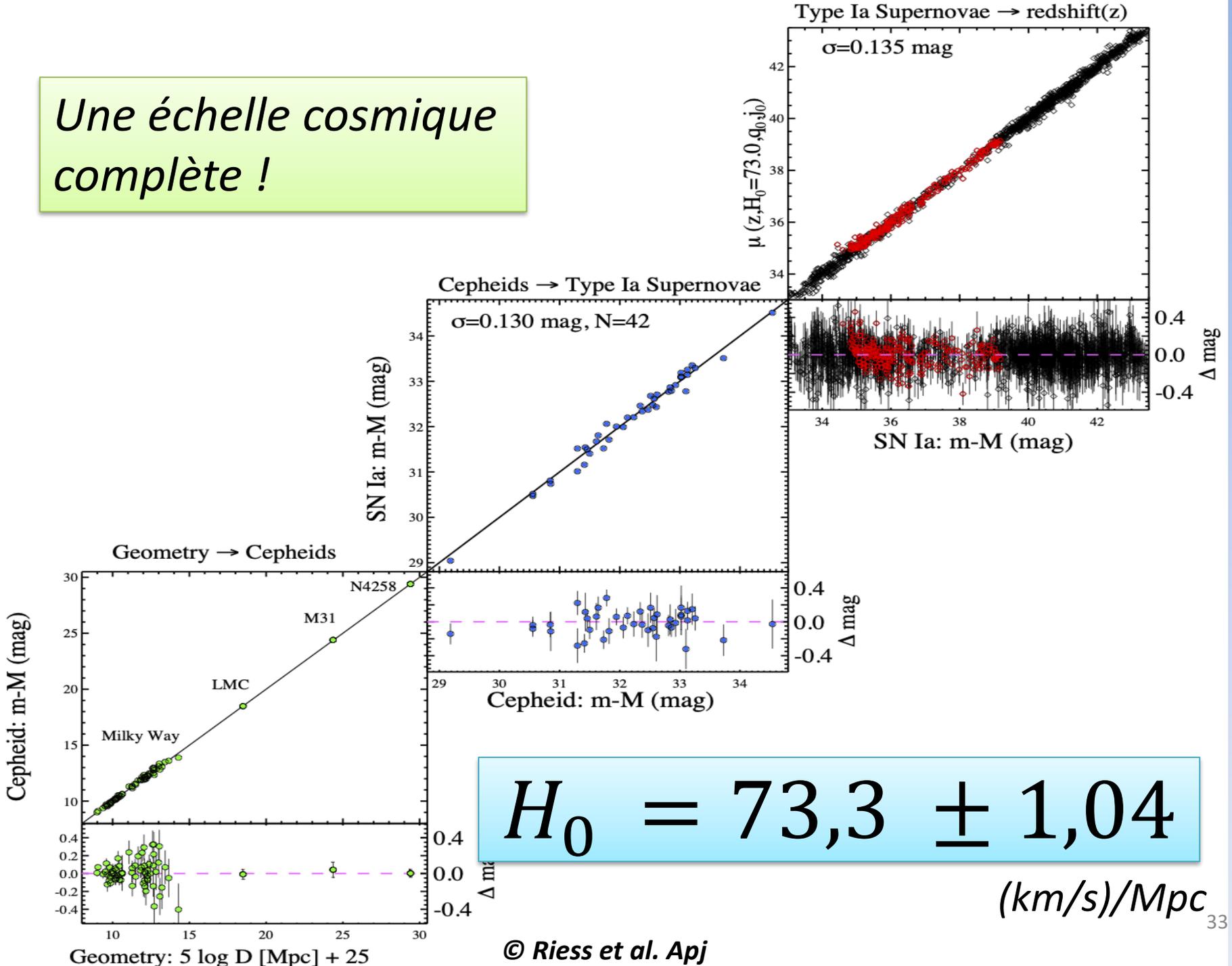
*Jusqu'à environ
100 M A.L.*

*Avec un seul
instrument: le HST !
Important pour la
qualité
de la calibration !*



© Riess et al. Apj

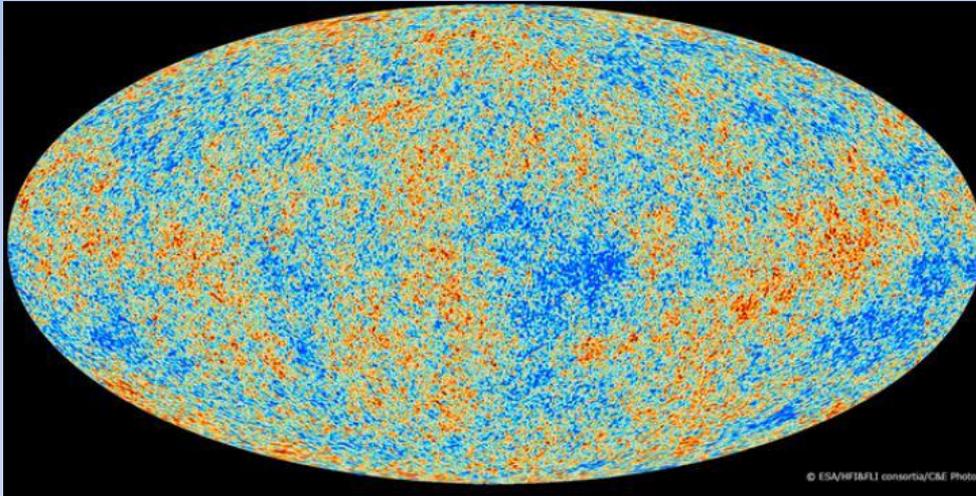
Une échelle cosmique
complète !



© Riess et al. Apj

Univers primordial et constante de Hubble

Les leçons du « fond diffus cosmologique » (CMB)



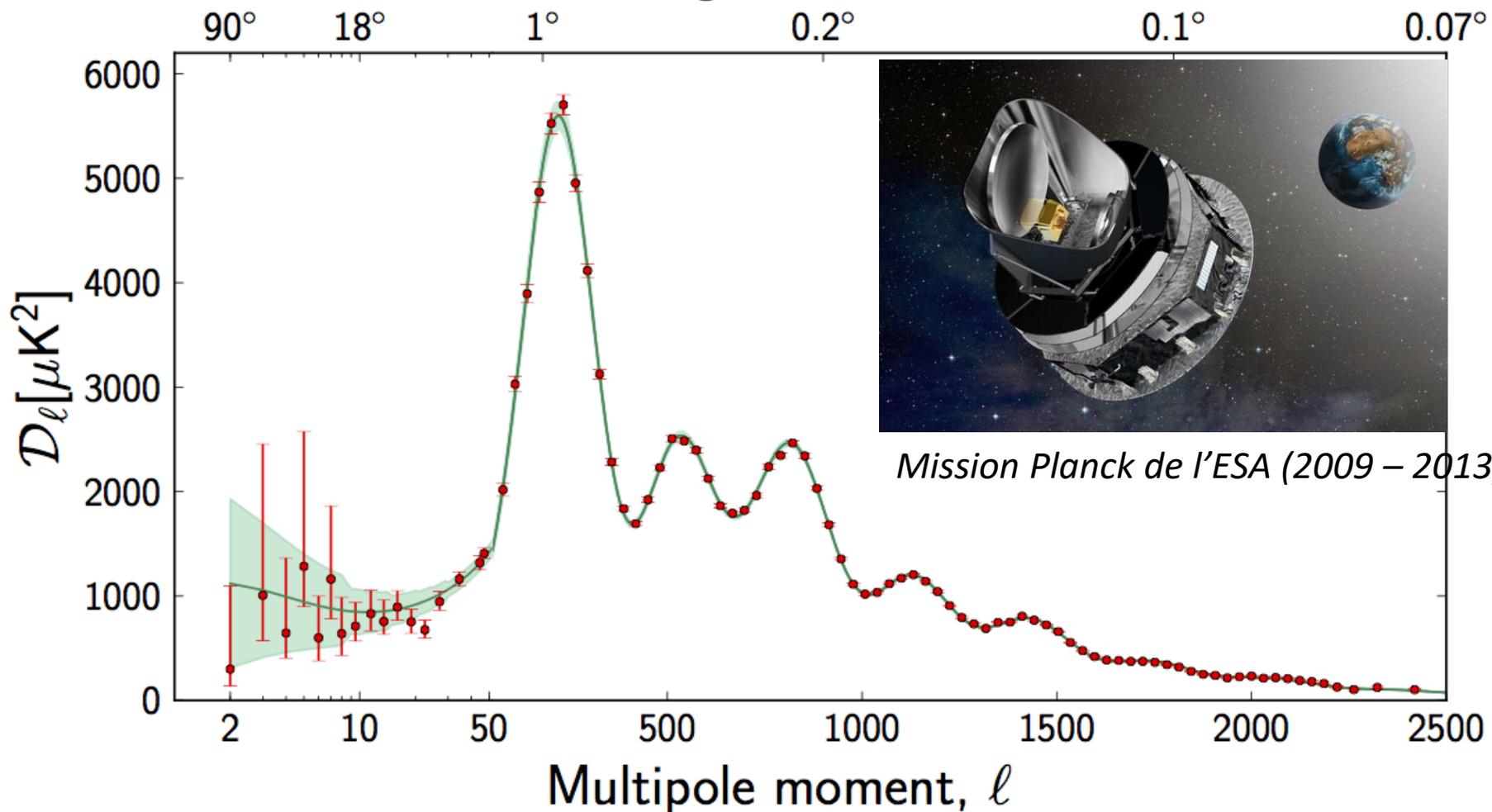
Carte (du ciel) du rayonnement fossile émis environ 400 000 ans après le Big Bang ($z \sim 1000$)



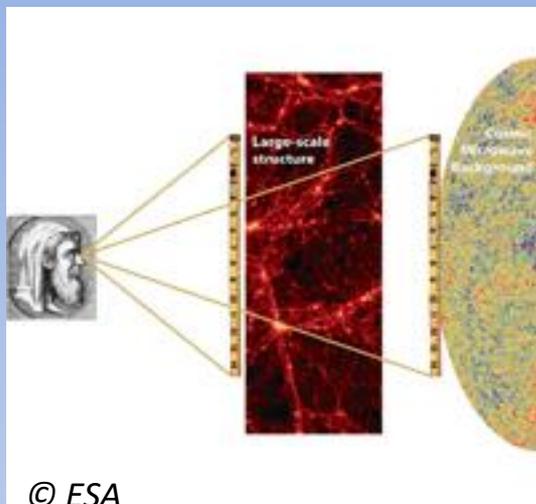
Depuis, toutes les distances dans l'Univers se sont dilatées d'un facteur 1000 et la température a baissé d'un facteur 1000

Rayonnement isotrope à $1/100\ 000$ mais anisotropies reflètent de très petites inhomogénéités qui sont les « graines » des grandes structures à venir (amas, galaxies ..)

Angular scale



Une physique connue => informations très précises sur tous les ingrédients de la « soupe » primitive : **Courbure spatiale (nulle)**, densités de matière noire, de matière ordinaire (baryonique), paramètres liés à la formation des grandes structures etc ...

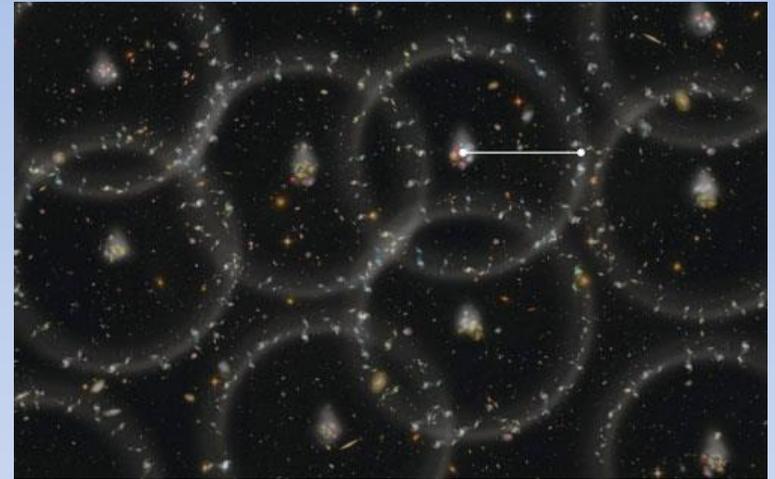


© ESA

Oscillations dans le plasma

=> Horizon acoustique : une ***règle standard*** fournie par l'Univers Primordial

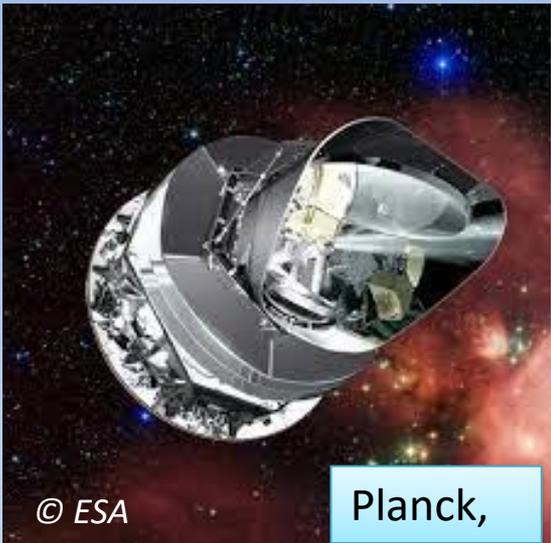
Les oscillations acoustiques ont laissé leur empreinte dans la distribution spatiale des galaxies à très grand échelle (BAO) (quelques milliards d'années après le Big Bang)



Le modèle cosmologique standard Λ CDM permet de « faire évoluer » les quantités physiques mesurées dans l'Univers primordial, jusqu'à l'époque récente (Univers « récent » ou « local ») ... et ça colle !

Equations du Λ CDM \Rightarrow de $H(t_{dec})$ à $H(t_0) \equiv H_0$

Résultats à partir de « L'Univers Primordial »:



$$H_0 = 67,4 \pm 0,5$$

(2018-2020)

(km/s)/Mpc

Atacama Cosmology Telescope



$$H_0 = 67,9 \pm 1,5$$

(2020)

(km/s)/Mpc

*OK avec d'autres mesures
qui concernent l'Univers lointain
(BAO, BBN..)*

Pole Sud Telescope

Autre analyse du CMB



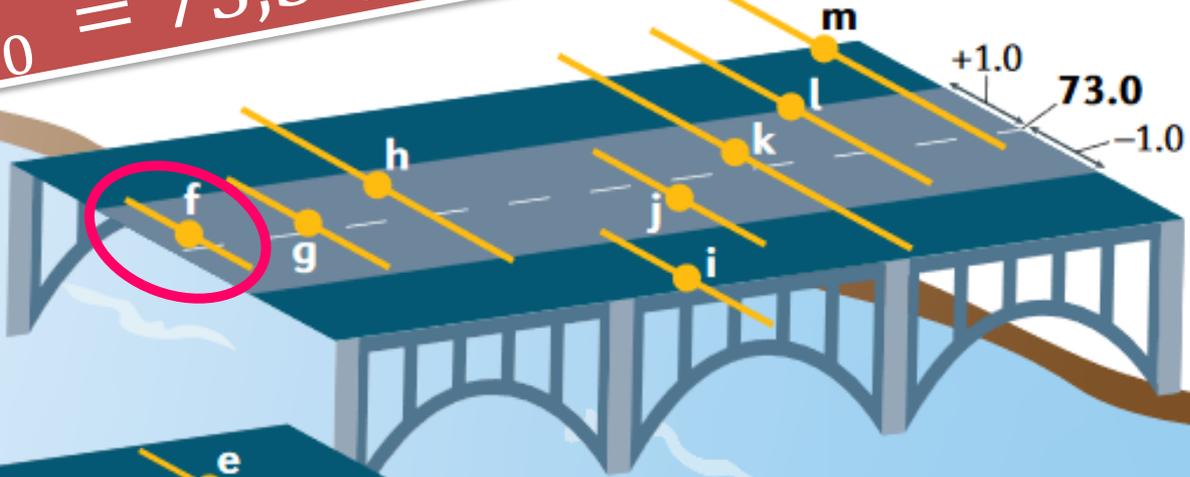
$$H_0 = 74 \pm 3 ?$$

(km/s)/Mpc

$$H_0 = 73,3 \pm 1,04$$

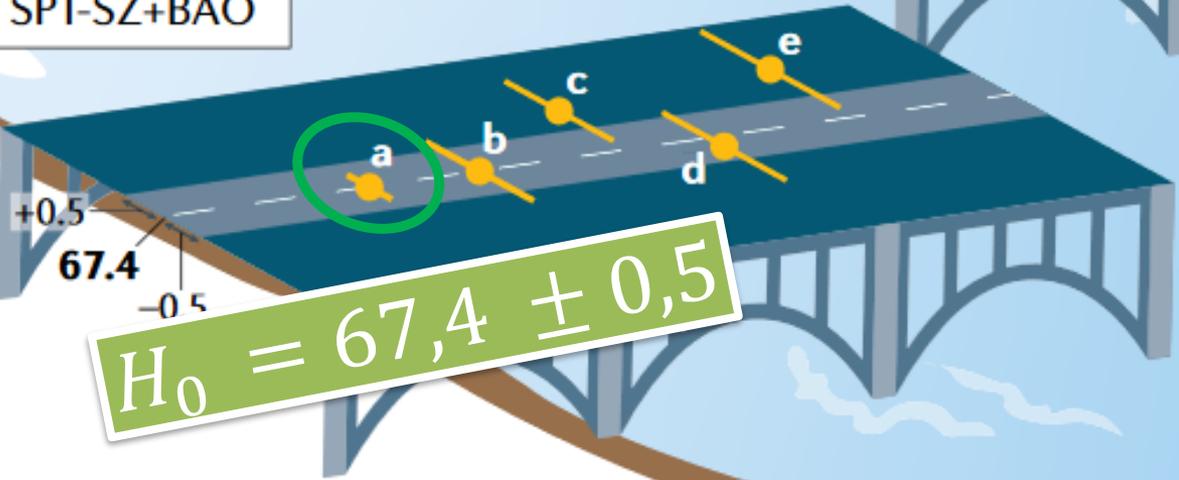
Early route

- a Planck
- b BBN+BAO
- c WMAP+BAO
- d ACTPol+BAO
- e SPT-SZ+BAO



Late route

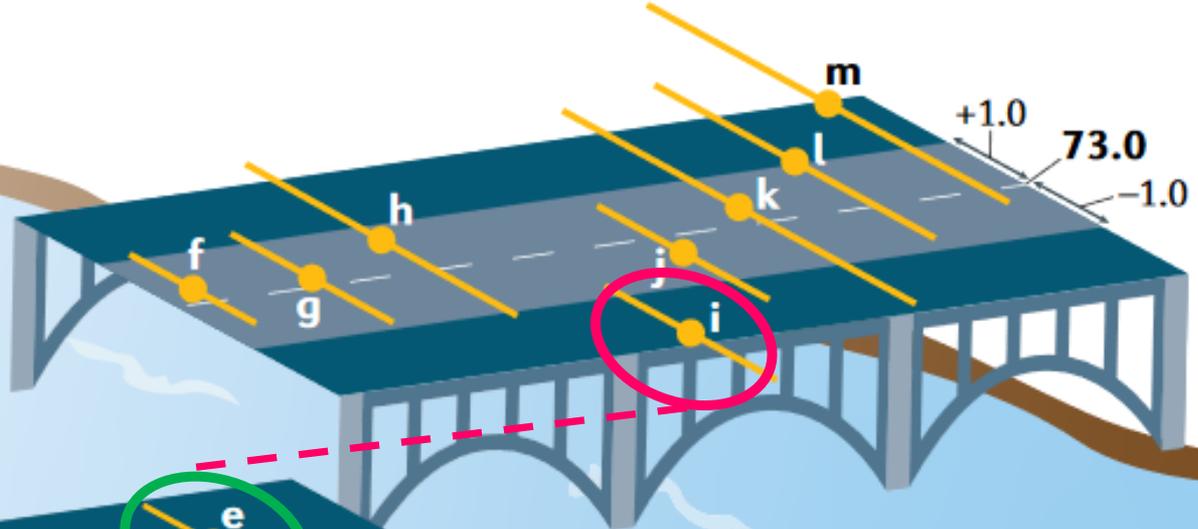
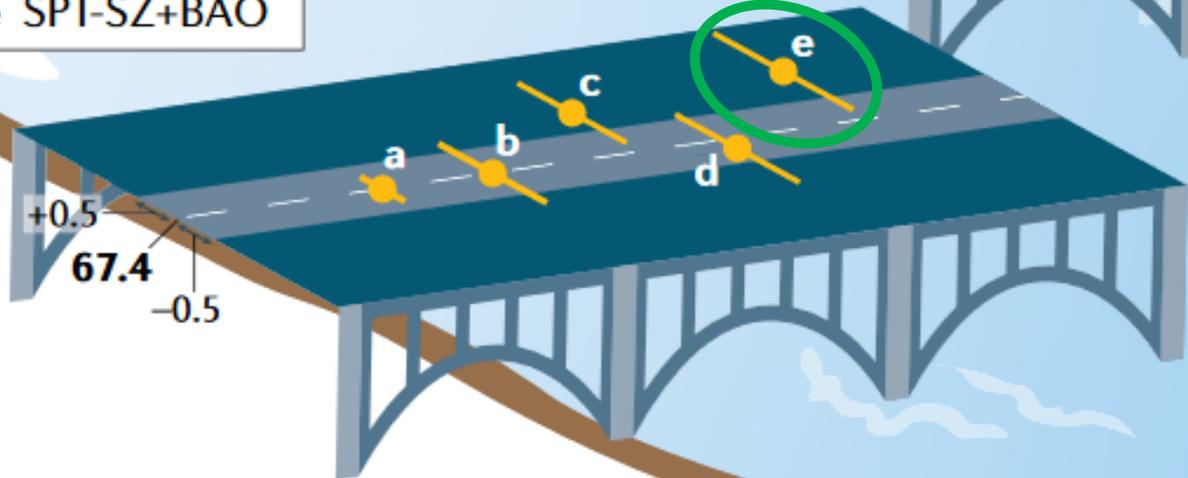
- | | |
|-----------|-----------|
| f SH0ES | g H0LiCOW |
| h STRIDES | i TRGB 1 |
| j TRGB 2 | k Miras |
| l Masers | m SBF |



$$H_0 = 67,4 \pm 0,5$$

Early route

- a** Planck
- b** BBN+BAO
- c** WMAP+BAO
- d** ACTPol+BAO
- e** SPT-SZ+BAO



Late route

- | | |
|------------------|------------------|
| f SH0ES | g H0LiCOW |
| h STRIDES | i TRGB 1 |
| j TRGB 2 | k Miras |
| l Masers | m SBF |

Un vrai problème ?

- *Oui cette « tension » entre les analyses « Univers primordial – Univers local » est perçue comme un vrai problème...*
- *Bien que des biais observationnels peuvent toujours être présents*

Univers local (stratégie type SHOES) :

Céphéides et leur calibration ★★★★★

Supernovae ★★★ *influence de l'environnement à préciser*

Autres chandelles astrophysiques ★★ *calibrations à améliorer*

Univers primordial et lointain :

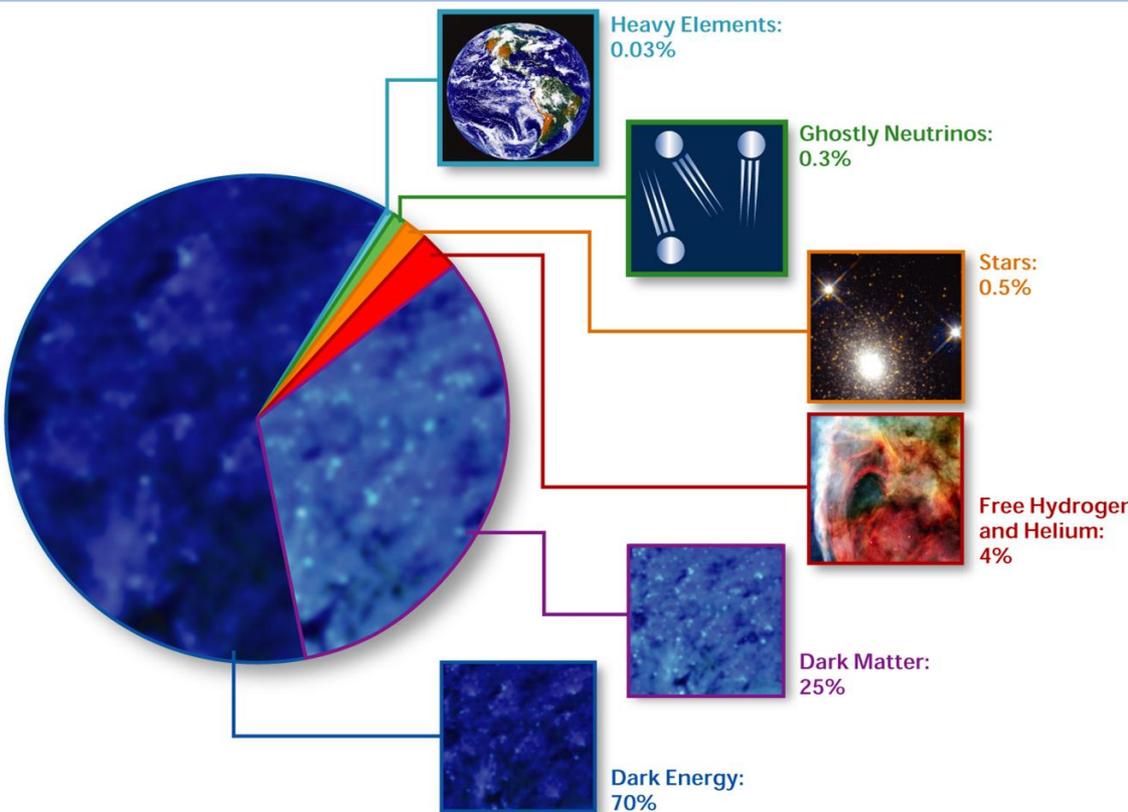
CMB ★★★★★ *difficile de faire mieux (polarisation !)*

Autres paramètres OK !! *...un peu de courbure modifie les résultats ... (?)*

Empreinte du CMB dans la distribution des galaxies: ★★★
(sera amélioré dans un futur proche)

Des solutions ?

Une nouvelle physique ?? Modifier le modèle « standard » Λ CDM !



Difficile !

ce modèle colle avec l'essentiel des données tout le long de l'histoire de l'Univers (Nucléosynthèse primordiale, Grandes structures ...)

- De très nombreuses tentatives théoriques, soit sur l'Univers primordial (ajouter des ingrédients, jouer sur la nature de l'énergie sombre) soit sur l'Univers local (modifier la gravité ?, énergie sombre ?)

Un « péché capital » : le « fine tuning »

Une possibilité « non copernicienne » :

Si « nous » étions dans une (très large région) particulière dans l'Univers : une région sous-dense !

=> Dans ce cas le taux d'expansion dans notre environnement cosmique pourrait être plus élevé !

Alors « notre » H_0 serait plus grand que le H_0 « universel » (celui donné par le CMB)

→ Modèles inhomogènes/anisotropes

(très peu probable d'après la théorie...)

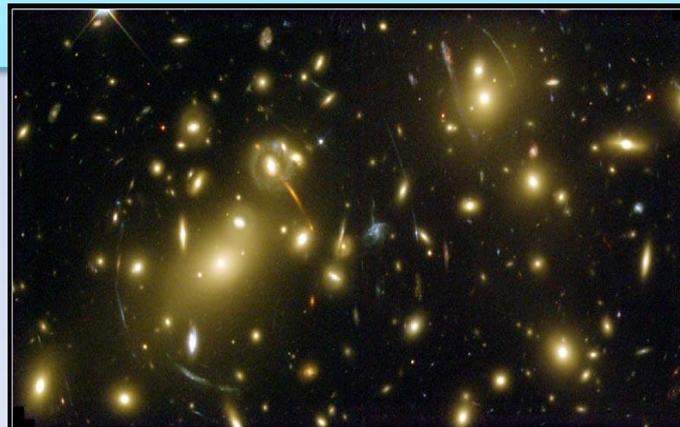
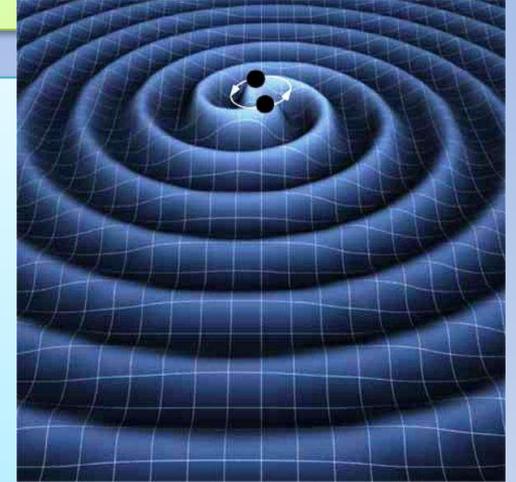
Confirmation ? : Rechercher des anisotropies dans la distribution des galaxies/des Supernovae lointaines etc ..

D'autres tests dans le futur ?

*Si possible des Tests indépendants/complémentaires
des tests actuels !!*

- *Ondes gravitationnelles
comme « sirènes » standards !*

- *Mesurer les distances grâce aux mirages
gravitationnels*



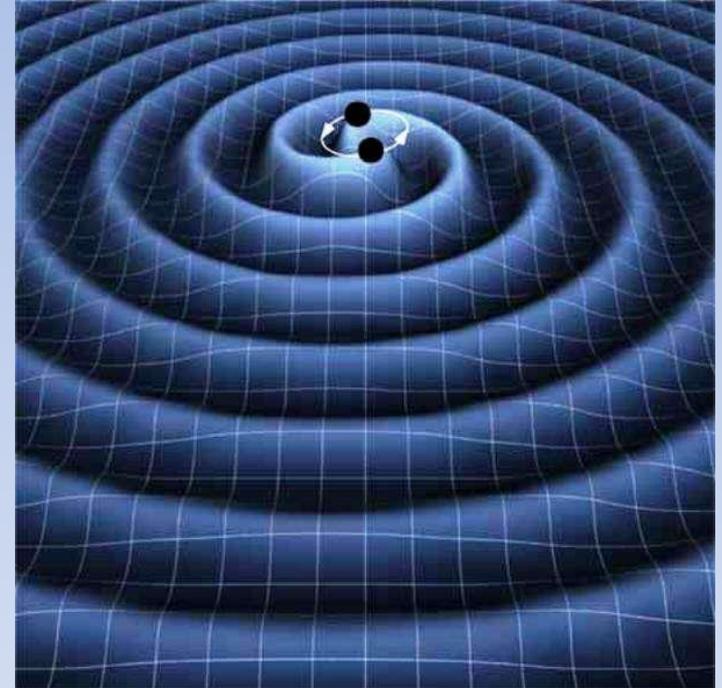
Galaxy Cluster Abell 2218

HST • WFPC2

NASA, A. Fruchter and the ERO Team (STScI, ST-EOF) • STScI-PRC00-08

Des « sirènes standards » !!

*10 fusion de Trous Noirs (2016-2022)
+ 1 fusion d'étoiles à neutron (2017)*

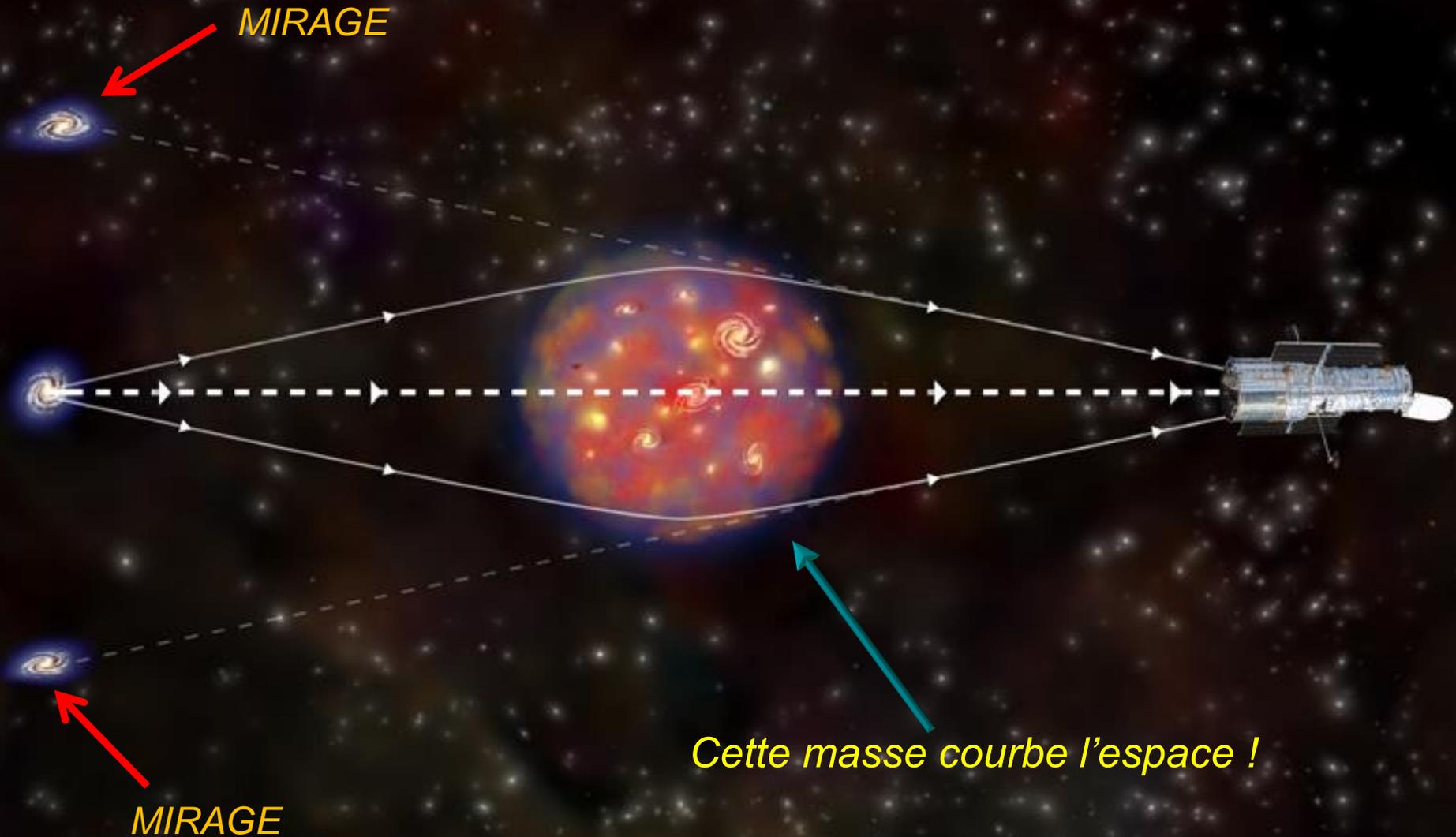


$$H_0 = 70,3 \pm 5$$

*1 seul événement de
« sirène lumineuse »(2017)*

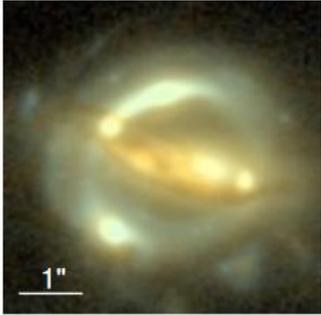
Précision de 1% d'ici 2030 ?

Einstein dixit ... confirmé par les observations depuis 1922 ...

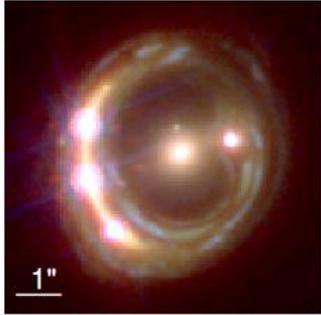


Collaboration H0LiCOW : décalages temporel entre les images

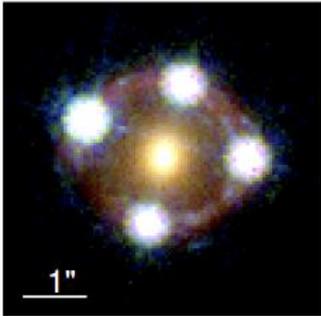
6 systèmes observés



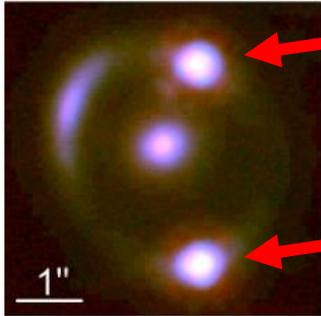
(a) B1608+656



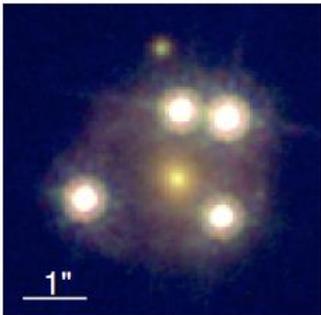
(b) RXJ1131-1231



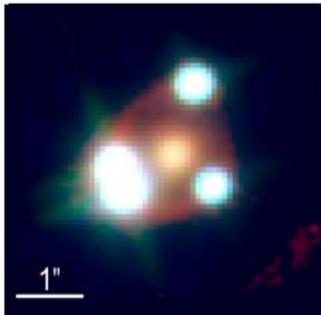
(c) HE 0435-1223



(d) SDSS 1206+4332



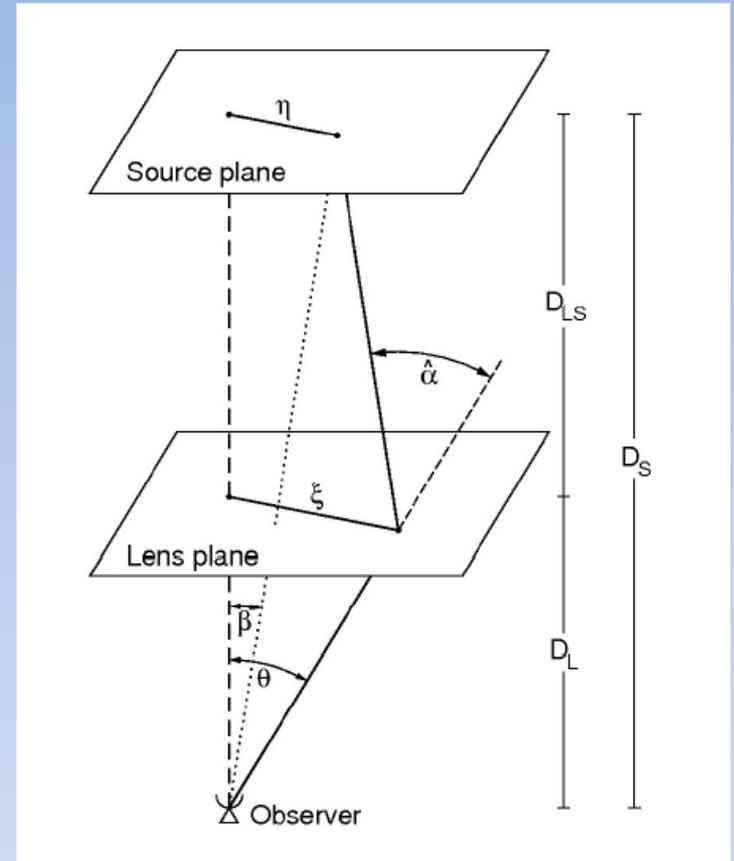
(e) WF12033-4723



(f) PG 1115+080

Jour J

Jour J+10



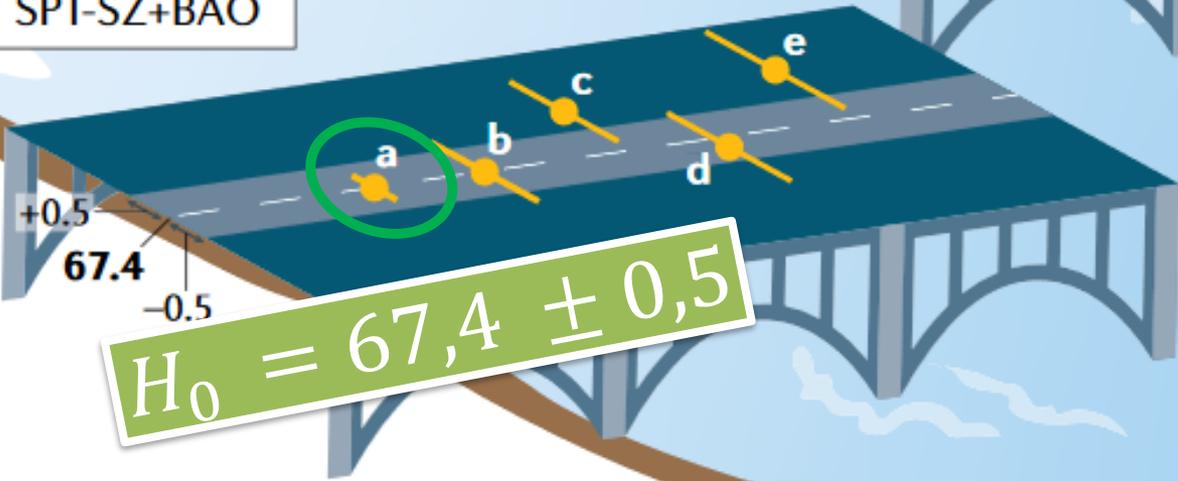
$$H_0 = 73,3 \pm 1,8$$

Possibilité étudier 200 systèmes d'ici 10 ans
(Vera Rubin (LSST), EUCLID, Nancy Roman..)

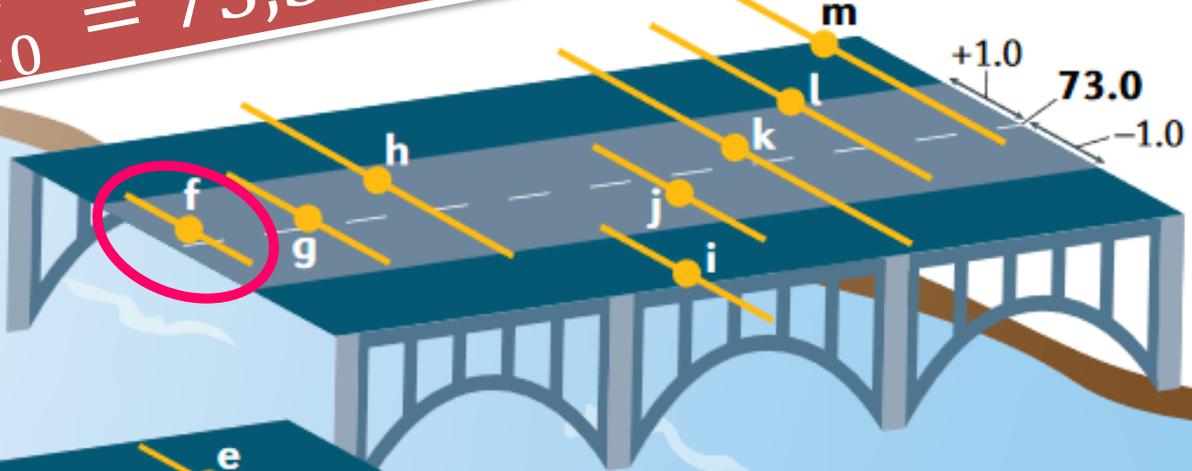
$$H_0 = 73,3 \pm 1,04$$

Early route

- a** Planck
- b** BBN+BAO
- c** WMAP+BAO
- d** ACTPol+BAO
- e** SPT-SZ+BAO



$$H_0 = 67,4 \pm 0,5$$



Late route

- | | |
|------------------|------------------|
| f SH0ES | g H0LiCOW |
| h STRIDES | i TRGB 1 |
| j TRGB 2 | k Miras |
| l Masers | m SBF |

... L'histoire des sciences montre que les périodes les plus stériles sont celles où on croit « tout » comprendre...

...Les périodes les plus intéressantes sont celles où il y a de vraies énigmes à résoudre !

En cosmologie moderne, les énigmes ne manquent pas !!

Remerciements

L'auteur tient à remercier Philippe AMRAM et Albert BOSMA, du Laboratoire d'Astrophysique de Marseille, pour les précisions fournies sur les travaux historiques de Miss Henrietta Leavitt au sujet des Céphéides dans les Nuages de Magellan.

Un grand merci également à Magali Damoiseaux et José Busto du CPPM pour l'invitation et l'excellente organisation de cette conférence.

