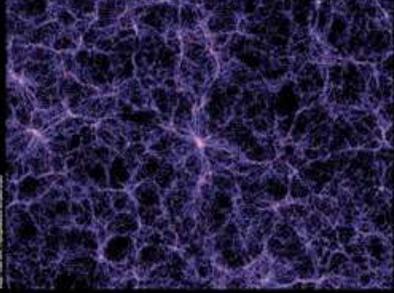


UNIVERSITÉ DE GENÈVE
FACULTÉ DES SCIENCES
Département d'Astronomie

Cosmologie

Corinne Charbonnel & Stéphane Paltani
Professeur.e.s au Département d'Astronomie UniGE



le mardi, du 19 septembre au 19 décembre 2023
de 17h45 à 18h45
Auditoire A300 - Sciences II, 30 quai Ernest-Ansermet, Genève

Inscription au cours sur place le 19 septembre
Renseignements : <http://unige.ch/sciences/astro>

q20230919

Titre	Charbonnel	
Nb de participants		37
Date d'évaluation	2023-09-19 17:40:05	
Question	L'univers est isotrope	
Type	Vrai/Faux	
Réponse	VRAI <input checked="" type="checkbox"/>	21
Réponse	FALIX <input type="checkbox"/>	16
Réponse	Null <input type="checkbox"/>	0
Question	L'univers est en expansion	
Type	Vrai/Faux	
Réponse	VRAI <input checked="" type="checkbox"/>	36
Réponse	FALIX <input type="checkbox"/>	1
Réponse	Null <input type="checkbox"/>	0
Question	Ptolémée était un défenseur de l'idée d'un univers géocentrique	
Type	Vrai/Faux	
Réponse	VRAI <input type="checkbox"/>	22
Réponse	FALIX <input checked="" type="checkbox"/>	15
Réponse	Null <input type="checkbox"/>	0
Question	Le soleil est une étoile	
Type	Vrai/Faux	
Réponse	VRAI <input checked="" type="checkbox"/>	36
Réponse	FALIX <input type="checkbox"/>	1
Réponse	Null <input type="checkbox"/>	0
Question	Notre galaxie s'appelle la galaxie d'Andromède	
Type	Vrai/Faux	
Réponse	VRAI <input type="checkbox"/>	6
Réponse	FALIX <input checked="" type="checkbox"/>	31
Réponse	Null <input type="checkbox"/>	0
Question	Le système solaire est au centre de la galaxie	
Type	Vrai/Faux	
Réponse	VRAI <input type="checkbox"/>	2
Réponse	FALIX <input checked="" type="checkbox"/>	35
Réponse	Null <input type="checkbox"/>	0
Question	La taille du disque de la Voie Lactée est environ	
Type	Réponse unique	
Réponse	50 années lumière	1
Réponse	10'000 années lumière	15
Réponse	120'000 années lumière <input checked="" type="checkbox"/>	21
Question	La galaxie d'Andromède se situe à environ	
Type	Réponse unique	
Réponse	120'000 années lumière de la Voie Lactée	8
Réponse	2 millions d'années lumière de la Voie Lactée <input checked="" type="checkbox"/>	26
Réponse	2 milliards d'années lumière de la Voie Lactée	3
Question	Le redshift d'une galaxie est	
Type	Réponse multiple	
Réponse	le décalage vers le rouge de son spectre <input checked="" type="checkbox"/>	32
Réponse	le décalage vers le bleu de son spectre	2
Réponse	une conséquence de la relativité restreinte <input checked="" type="checkbox"/>	10
Question	La vitesse de récession des galaxies lointaines peut être supérieure à la vitesse de la lumière	
Type	Vrai/Faux	
Réponse	VRAI <input checked="" type="checkbox"/>	15
Réponse	FALIX <input type="checkbox"/>	22
Réponse	Null <input type="checkbox"/>	0

10A001 – Astronomie générale

Cosmologie

En attendant le début du cours,
remplissez ce questionnaire anonyme

votamatic.unige.ch

code d'accès
WDQR





UNIVERSITÉ
DE GENÈVE
FACULTÉ DES SCIENCES
Département d'astronomie

Cosmologie

Corinne Charbonnel & Stéphane Paltani
Professeur.e.s au Département d'Astronomie UniGE

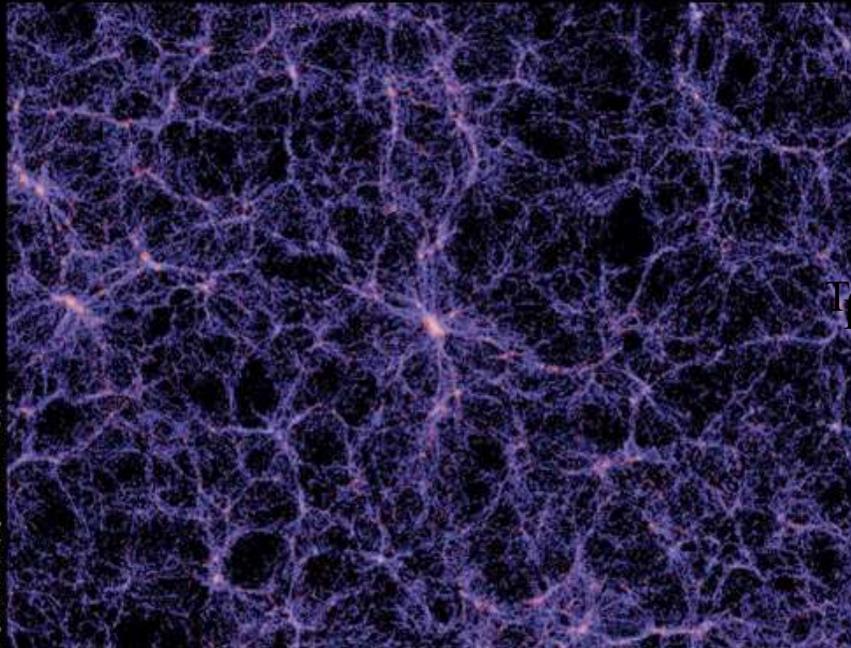


Image : CHIST, MPA, V. Springel/Milkenium Simulation project

le mardi, du 19 septembre au 19 décembre 2023
de 17h45 à 18h45
Auditoire A300 - Sciences II, 30 quai Ernest-Ansermet, Genève

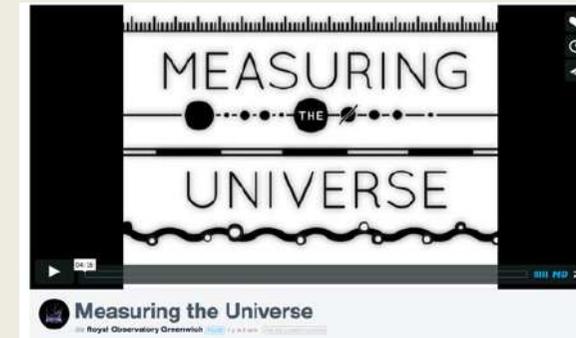
Inscription au cours sur place le 19 septembre
Renseignements : <http://unige.ch/sciences/astro>

Cours 2 – 26 septembre 2023

Echelles de distances *Mesurer l'univers*

Enregistrement mediaserver

<https://mediaserver.unige.ch/play/198247>



Crédit: Hart Interior photo

Echelles de distance

Formation stellaire récente

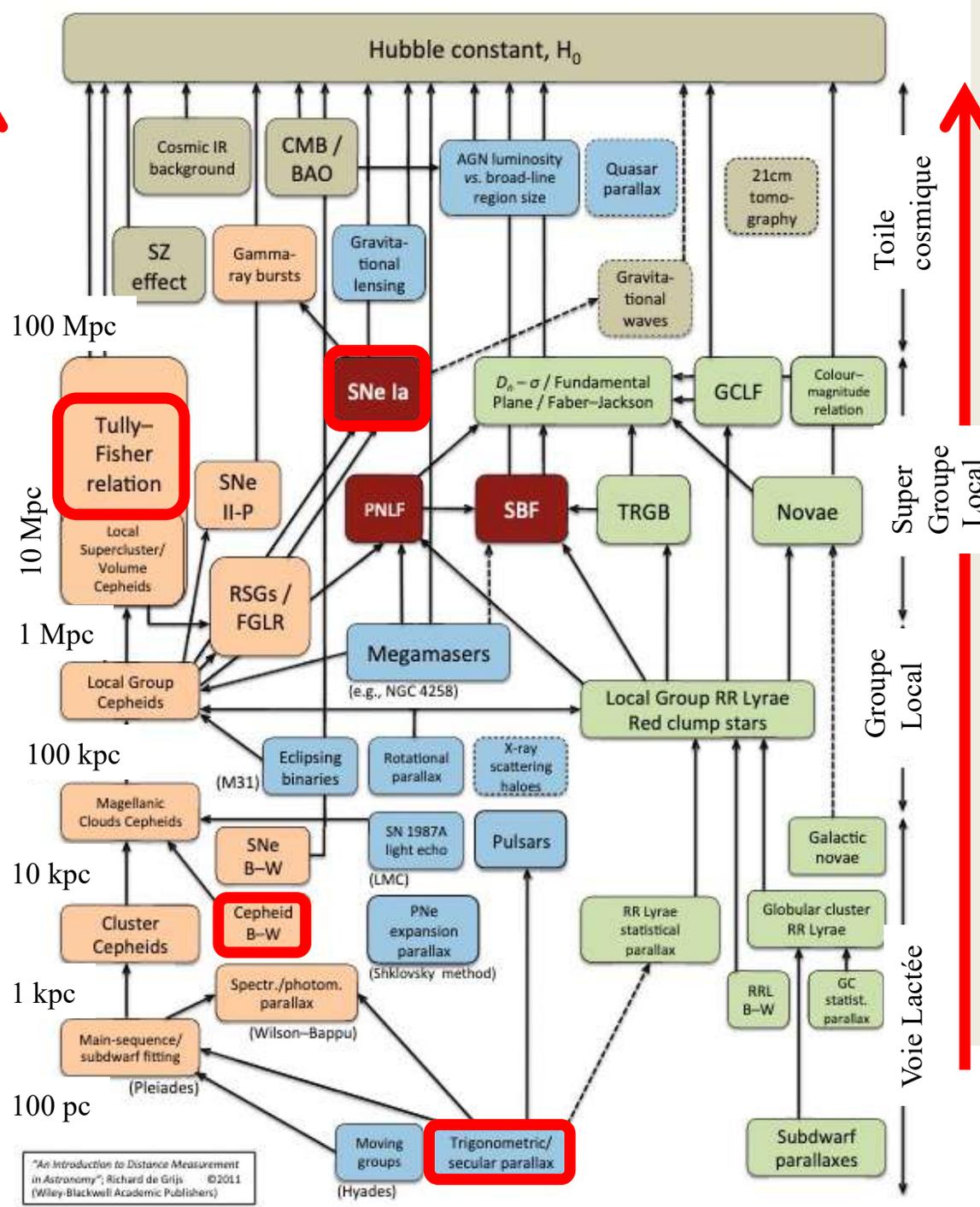
Vieilles étoiles

Etoiles jeunes et vieilles

Méthodes géométriques

Indépendantes des populations stellaires

Distance



Environnement

Toward an Internally Consistent Astronomical Distance Scale 1745

Table 1 Internally consistent distance moduli (as a function of increasing distance) to selected Local Group galaxies, comprising a robust local framework (adapted from de Grijs and Bono 2015)

Galaxy	$(m - M)_0^{\text{best}}$ (mag)	Tracer(s)	$(m - M)_0^{\text{TRGB}}$ (mag)
LMC	18.49 ± 0.09	Cepheids, RR Lyrae, CMD	18.54–18.69
SMC	18.96 ± 0.02	EBs, Cepheids, RR Lyrae, TRGB, RC	19.00 ± 0.04
NGC 185	24.00 ± 0.12	TRGB, RR Lyrae	24.03 ± 0.33
NGC 147	24.11 ± 0.11	TRGB, RR Lyrae	24.16 ± 0.22
IC 1613	24.34 ± 0.05	Cepheids, RR Lyrae, TRGB	24.29 ± 0.12
IC 10	24.36 ± 0.45	TRGB	24.36 ± 0.45
M32	24.43 ± 0.07	SBF, TRGB, RR Lyrae	24.32 ± 0.20
M31	24.45 ± 0.10	Cepheids, RR Lyrae, TRGB	24.47 ± 0.01
NGC 205	24.56 ± 0.15	TRGB, RR Lyrae	24.45 ± 0.20
M33	24.67 ± 0.07	Cepheids, RR Lyrae, TRGB	24.70 ± 0.11
NGC 4258	29.29 ± 0.08	H ₂ O masers	29.24–29.44

Notes: CMD: color-magnitude diagram; EBs: eclipsing binaries; RC: red clump; SBF: surface-brightness fluctuations; TRGB: tip of the red giant branch

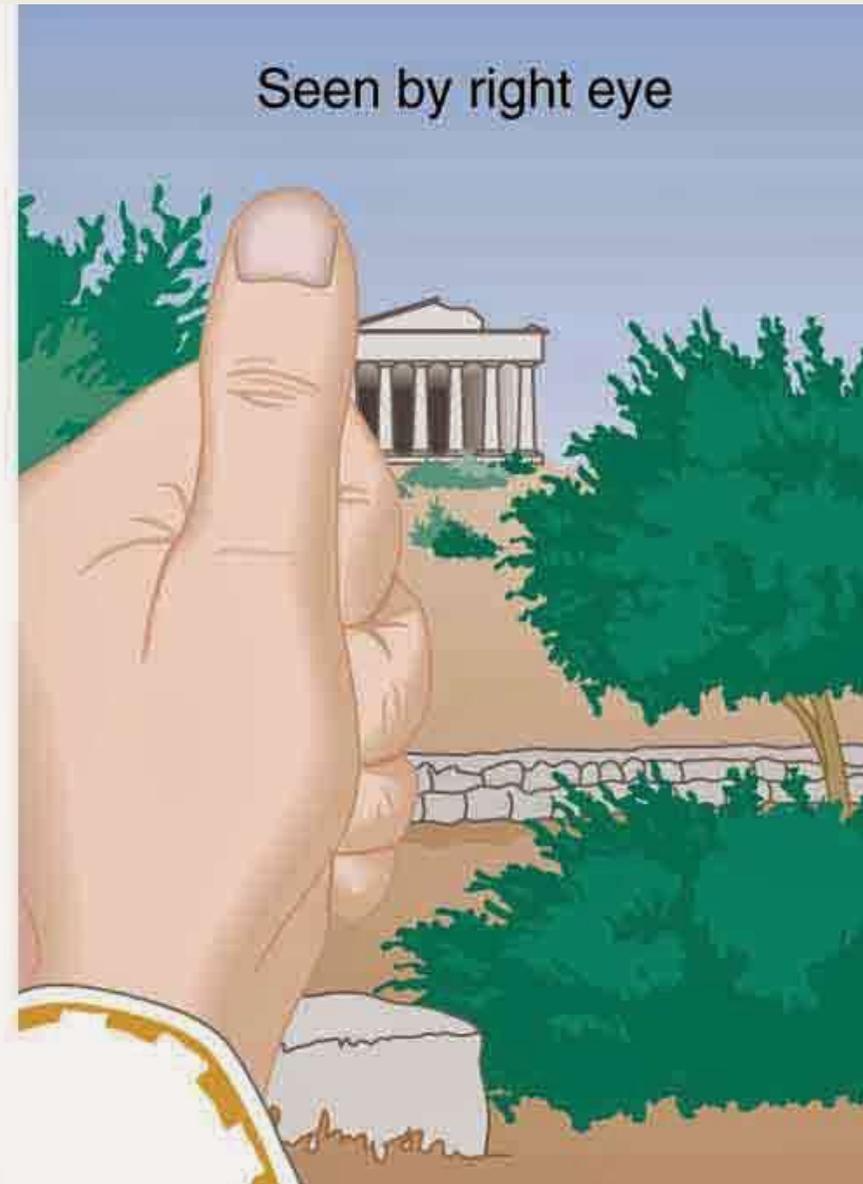
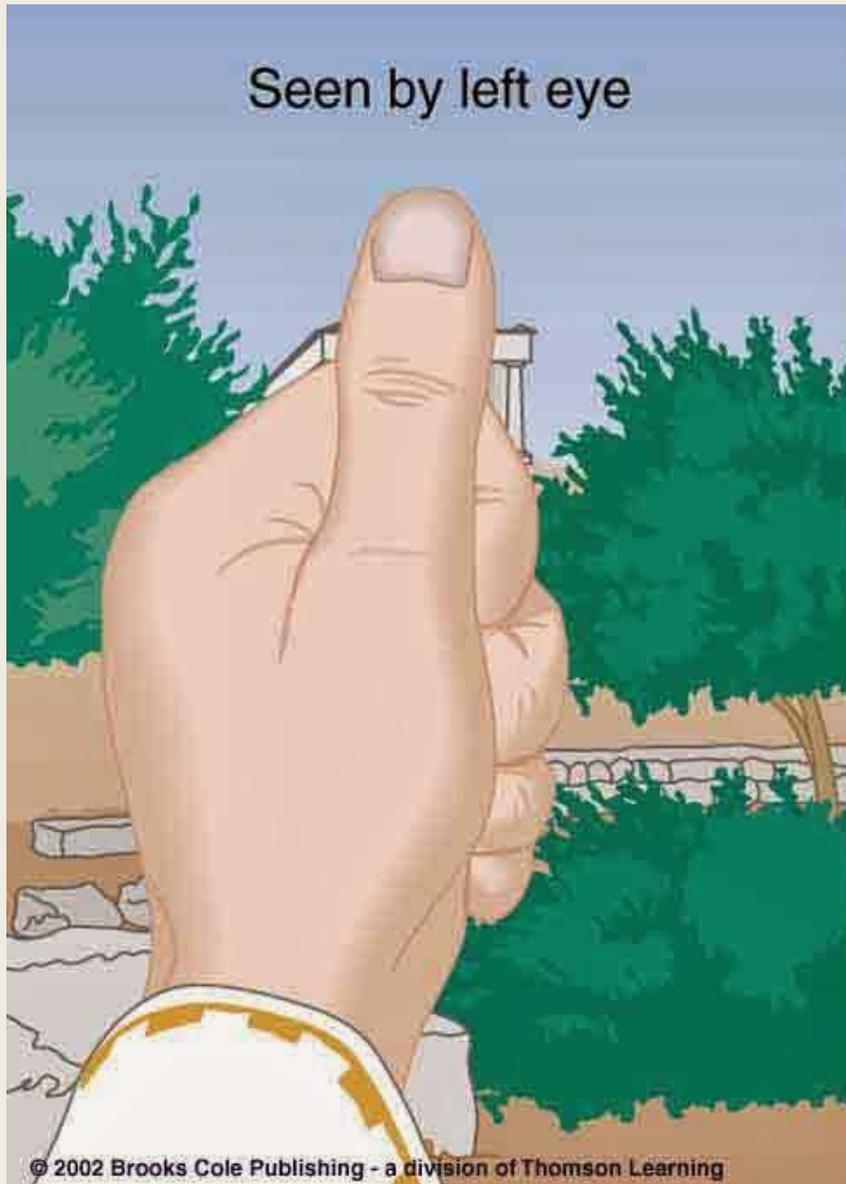


Credit: Hart Interior photo

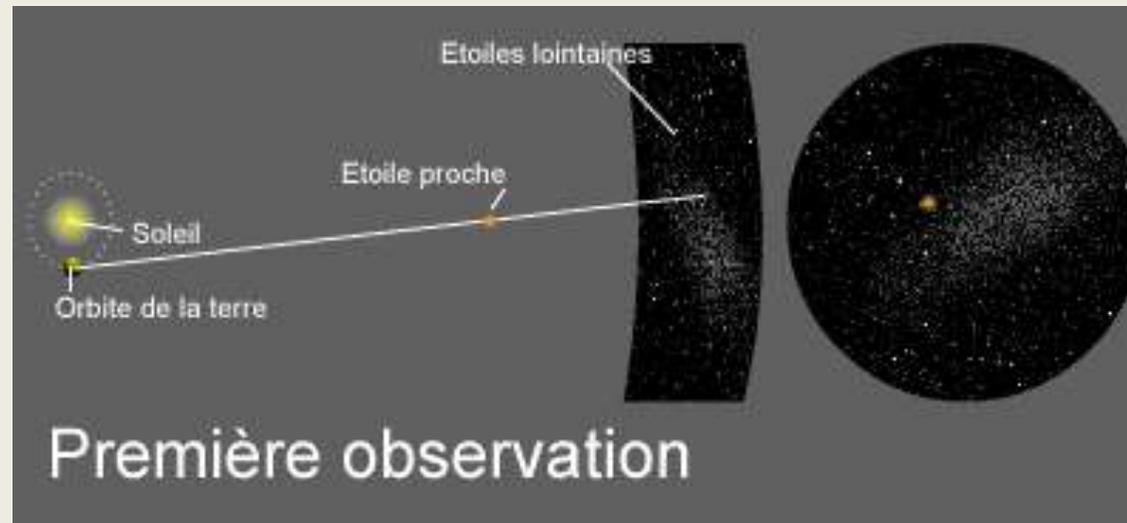
Figure 1. Updated, present-day distance ladder, based on an original idea by Ciardullo (2006). Light orange: Methods of distance determination associated with active star formation ('Population I', intermediate- and high-mass stars). Light green: Distance tracers associated with 'Population II' objects/low-mass stars. Blue: Geometric methods. Red: Supernovae (SNe) Ia, the planetary nebulae (PNe) luminosity function (PNLF) and surface-brightness fluctuations (SBF) are applicable for use with both Populations I and II. Light brown: Methods of distance or H_0 determination which are not immediately linked to a specific stellar population. Dashed boxes: Proposed methods. Solid, dashed arrows: Reasonably robust, poorly established calibrations. B-W: Baade-Wesselink. RRL: RR Lyrae. RSGs/FGLR: Red supergiants/flux-weighted gravity-luminosity relationship. TRGB: Tip of the red-giant branch. GCLF: Globular cluster (GC) luminosity function. SZ: Sunyaev-Zel'dovich. CMB/BAO: Cosmic microwave background/baryon acoustic oscillations. Colour-magnitude relation: Refers to galactic colours and magnitudes. (adapted from de Grijs 2011)

Mesure des distances en A300

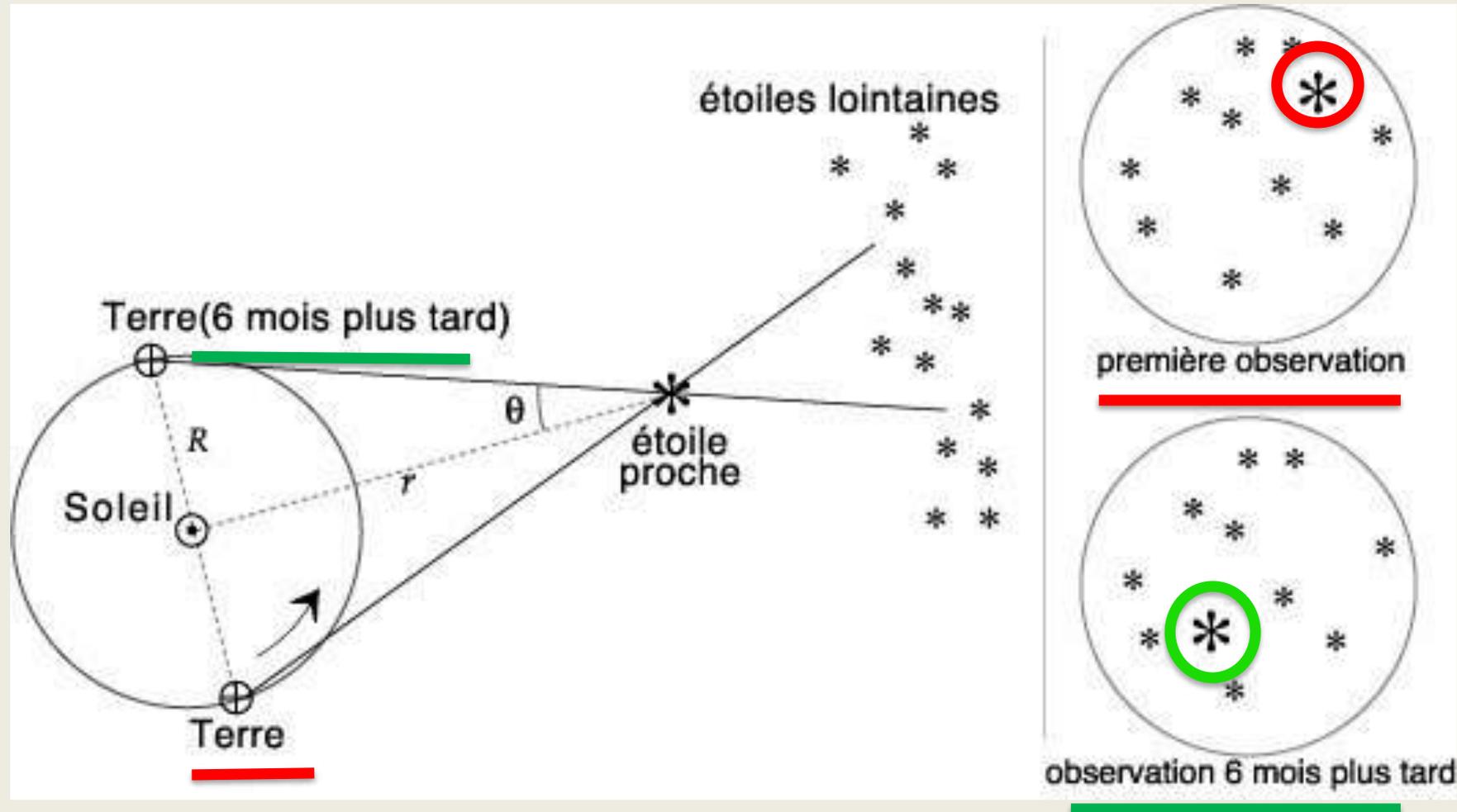




Mouvement apparent des objets astronomiques dans le ciel



Parallaxe – Mesure de distance des étoiles proches



$\tan \theta = ST / SE = R / r \sim \theta \text{ (rad)}$
 $ST = R = \text{distance Soleil - Terre}$
 $SE = r = \text{distance Soleil Etoile}$
 $\theta = \text{parallaxe de l'étoile}$

1 parsec (pc) = Distance d'une étoile dont la parallaxe vaut 1 seconde d'arc = $ST / \tan(1'')$
 1 seconde d'arc = 3600^{ème} partie d'1 degré d'angle
 Parsec pour Par(allax)Sec(ond)

1 parsec (pc) = 3.2616 années-lumière = 206 000 UA \sim 3 x 10¹⁶ m

Parallaxe – Mesure de distance des étoiles proches



61 Cygni

Friedrich Bessel (1838)

Déplacement annuel de 0.314 sec d'arc

10 années lumière

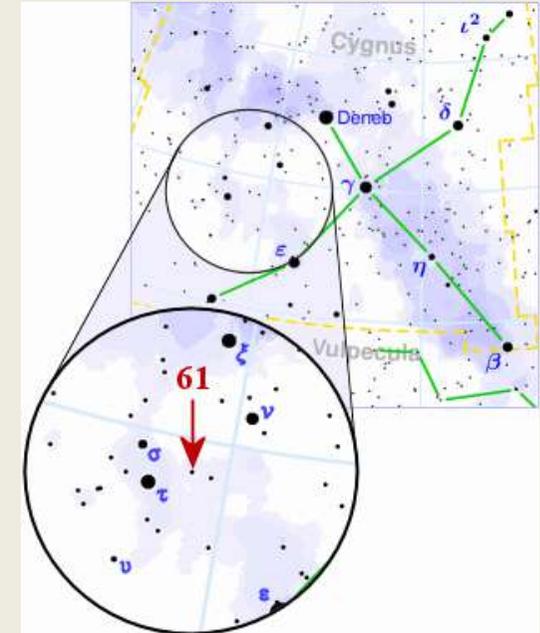
Médaille d'or de la

Royal Astronomical Society

Mesures actuelles: Bessel (1838)

Système binaire

Parallaxe: 0.287 and 0.286 arc sec



Copyright © 2003 Torsten Bronger

0.314 sec d'arc : distinguer 1 voiture à 3000 km



"61 Cygni Proper Motion" by IndividusObservantis

Parallaxe – Mesure de distance des étoiles proches



Alpha Centauri

Thomas Henderson

(observations 1832/3, publication 1839)

Cap de Bonne Espérance (Afrique du Sud)

Système binaire (0.755 et 0.797 arc sec)

3.35 a.l. (mesure actuelle: 4.37 a.l.)

Etoiles les plus proches du Soleil



Vega

Wilhelm Struve (1837, 1840)

0.261 arc sec (0.30 arc sec satellite Hipparcos, 26 a.l.)

Cartographier le ciel – Précision astrométrique

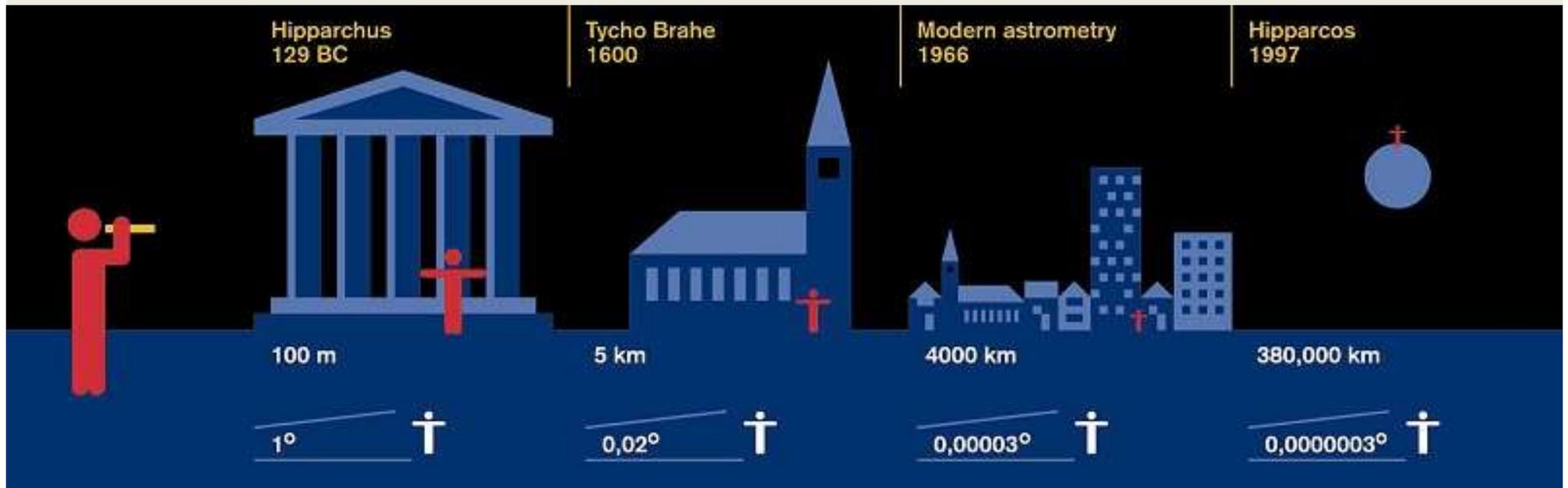
Hipparque

Catalogue environ 1000 étoiles

Précision environ 1 degré

Tycho Brahe

Précision environ 1 minute d'arc (60ème de degré)



Plaques photos (mi/fin 19ème)

Précision environ 10ème de arc sec (10'000ème de degré)

Satellites Hipparcos et Astrométrie spatiale (fin 20^{ème} siècle)

Satellite Hipparcos

Précision 1000^{ème} secondes d'arc sec
(millionième de degré)

Astrométrie spatiale (depuis 1913)

Satellite Gaia

Précision 7 à 10 micro secondes d'arc
(micro secondes de degré)

Cartographier le ciel – L'ère de précision

Hipparcos (1989 - ~ 1993) catalogue

Gaia (depuis 2013) Mission ESA

2 télescopes de miroirs primaires 1.45m x 0.5m partageant le même plan focal. Mesures astrométriques, photométriques, et spectroscopiques.

Catalogue de 1 milliard d'étoiles

avec une précision jusqu'à 100 x supérieure à celle d'Hipparcos

~ 500'000 astéroïdes; ~ 500'000 quasars

1 à 10 millions de galaxies

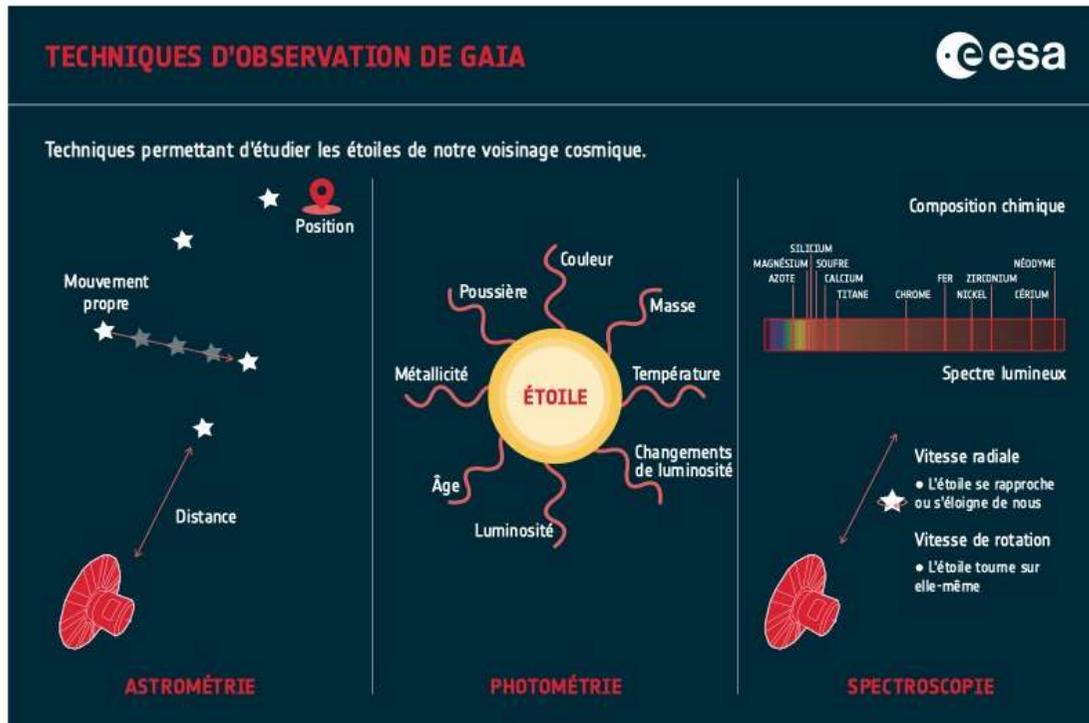
2000 à 5000 exoplanètes



<http://blogs.esa.int/gaia/>

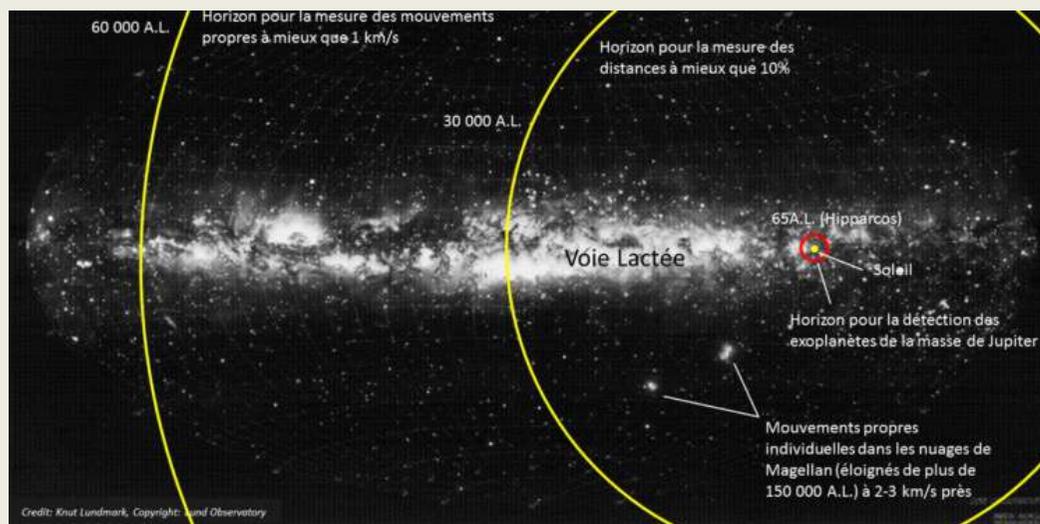
<http://wwwhip.obspm.fr/~arenou/articles/lastro-HipGaia.html>

L'apport du satellite Gaia



Parallaxes trigonométriques déterminées

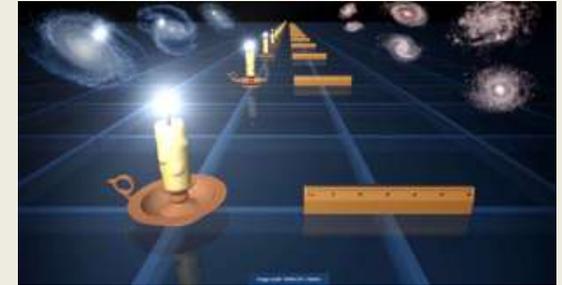
- à mieux que 0.1% pour ~ 100'000 étoiles (3 avec Hipparcos)
- à mieux de 1% pour 11 millions d'étoiles (719 avec Hipparcos)
- à mieux que 10% pour ~150 millions d'étoiles (30'000 avec Hipparcos)



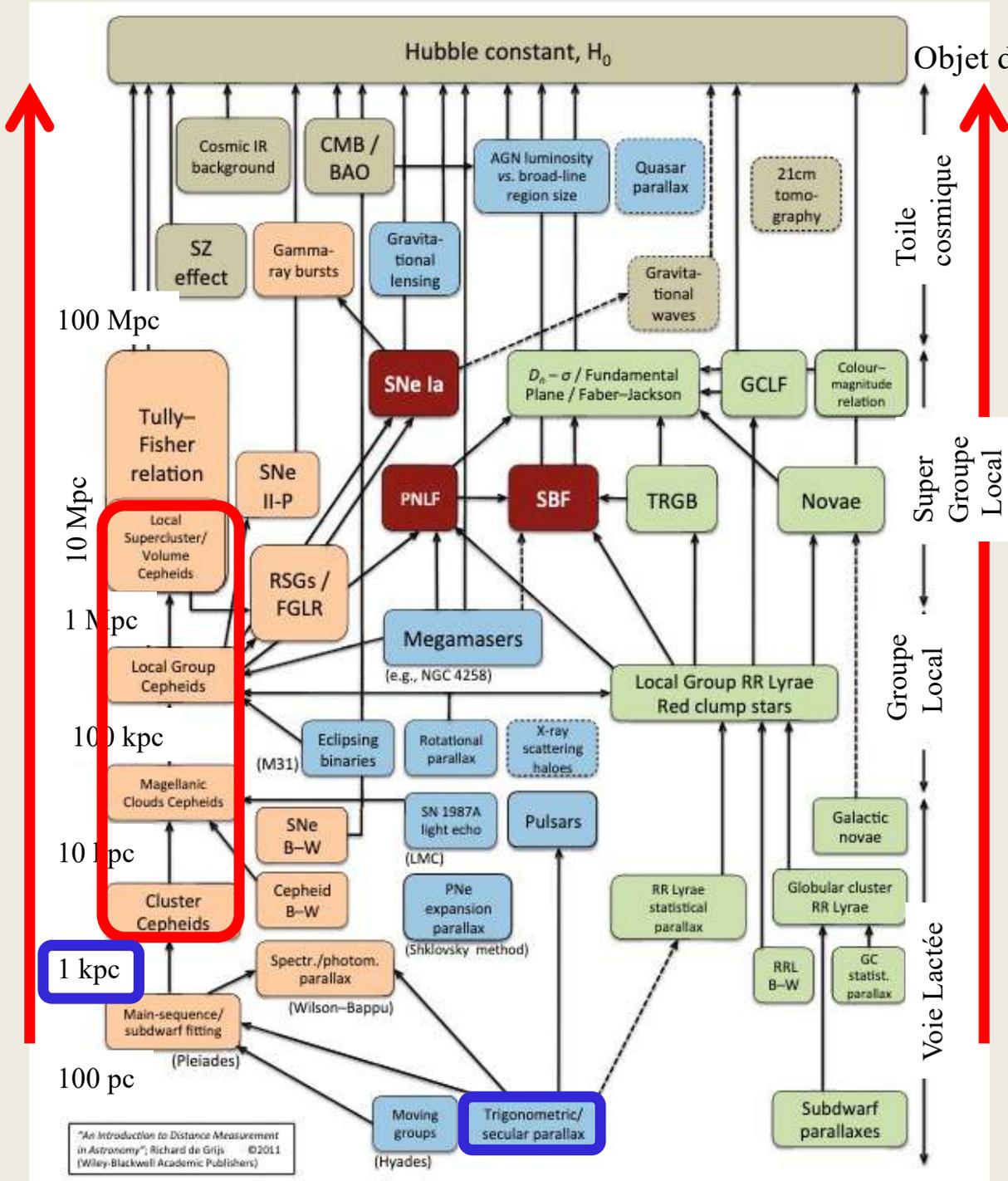
Pour en savoir plus: <https://gaia.obspm.fr/>

Chandelle standard

Objet dont on connaît la luminosité intrinsèque



Distance



Environnement

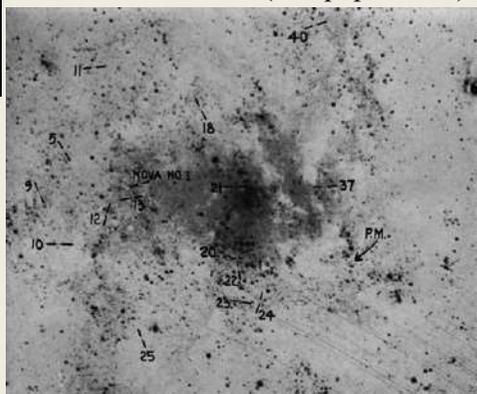
Les étoiles Céphéides

Indicateurs de distance – Les étoiles Céphéides

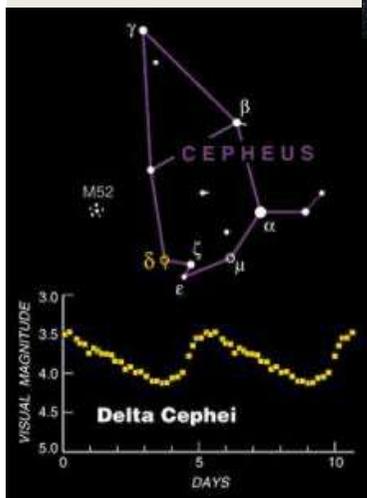


Petit Nuage de Magellan

Observations et identification de 25 Céphéides depuis la Station australe de Harvard (Arequipa Pérou)

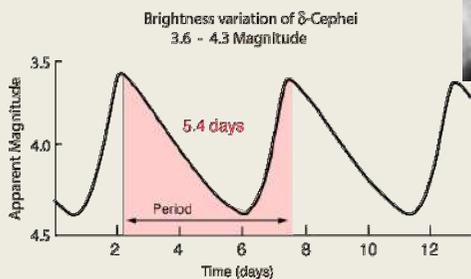


Crédit: Hart Interior photo



J. Goodricke
Découverte de la variabilité de δ Cephei en 1764

Crédit : G.B. Lima Neto



Henrietta Lewitt (1868 – 1921 Harvard)
Découverte de 2400 étoiles variables et de la relation entre **période** et **luminosité moyenne**

Luminosité (log) \uparrow

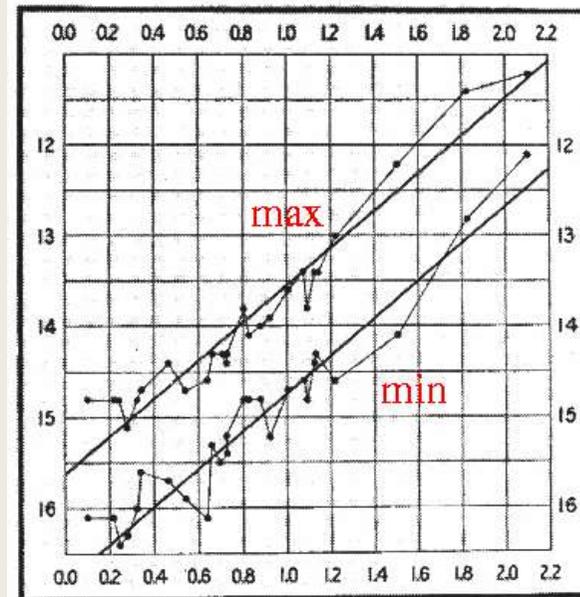


FIG. 2.
Période (log, en jour) \rightarrow

Leavitt, 1908, *Annals of Harvard College Observatory*, vol. 60, p87

Plus une céphéide est lumineuse, plus la période entre ses 2 pics de luminosité est longue.

Si 2 Céphéides varient avec la même période, elles doivent avoir la même luminosité intrinsèque.

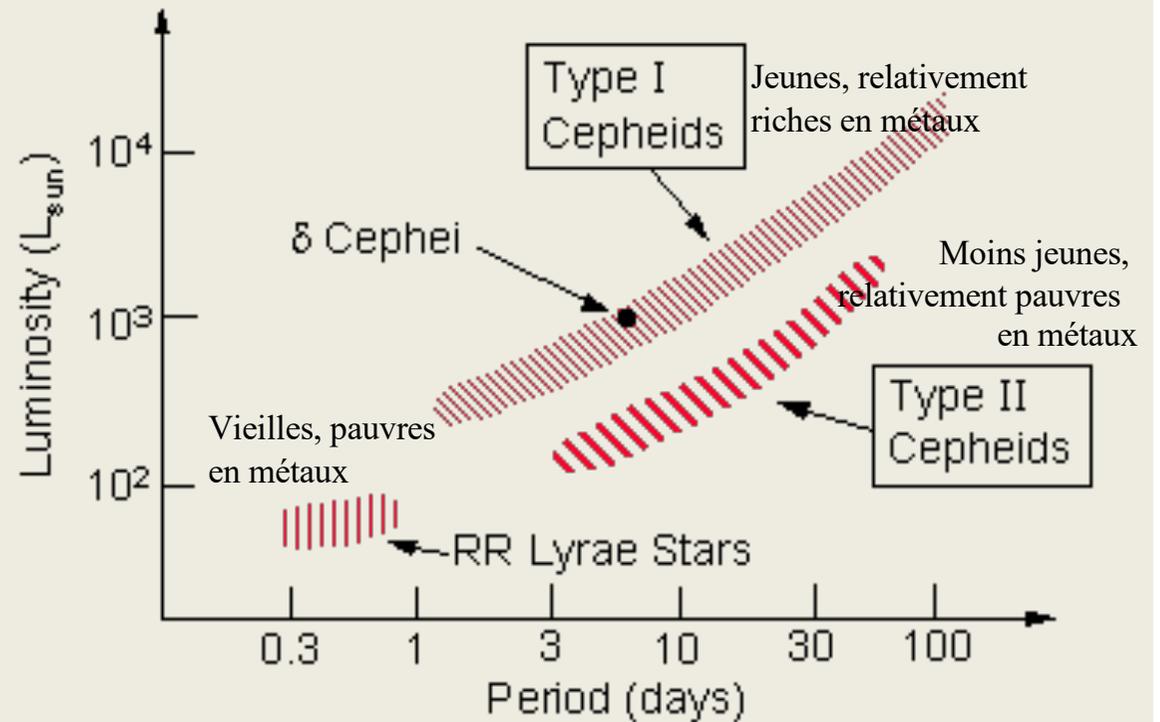
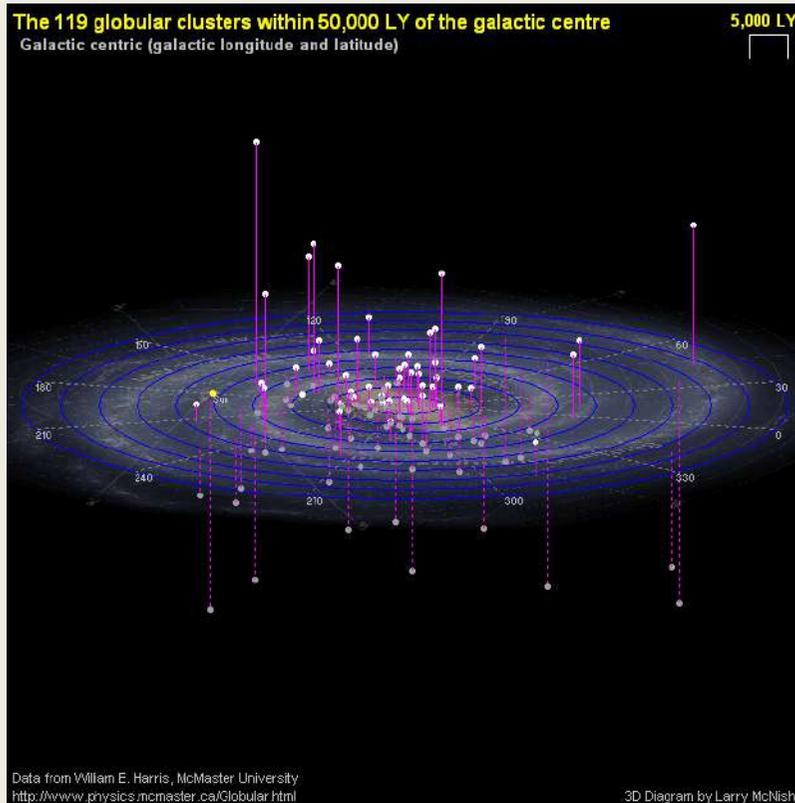
Si l'une apparaît 9 x plus faible, elle doit être 3 x plus éloignée

(la brillance diminue avec le carré de la distance).

Si l'une apparaît 144 x plus faible, elle doit être 12 x plus éloignée.

Céphéides avec parallaxes connues pour calibrer la relation

Chandelles standard – De la Voie Lactée à l'univers extragalactique



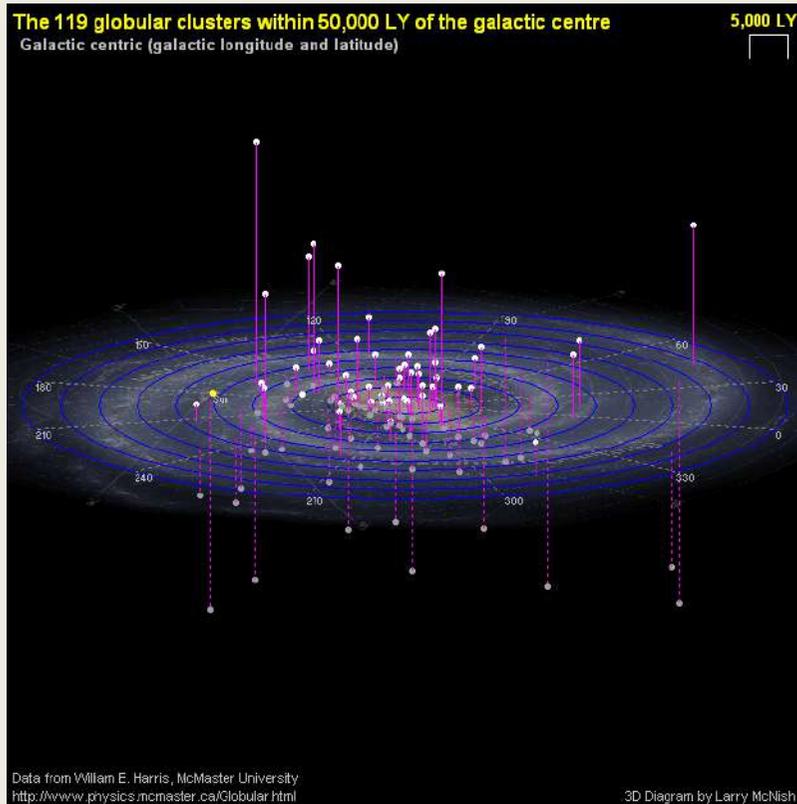
Dimensions de la Voie Lactée (H. Shapley – 1917 - RR Lyrae)

Source d'erreur (2) : Confusion entre Céphéides (périodes 5 à 10 jours, variations 0.5 – 2 magnitude)
et RR Lyrae (périodes de 1.5 heure à 1 jour, variations 0.5 – 2 mag)

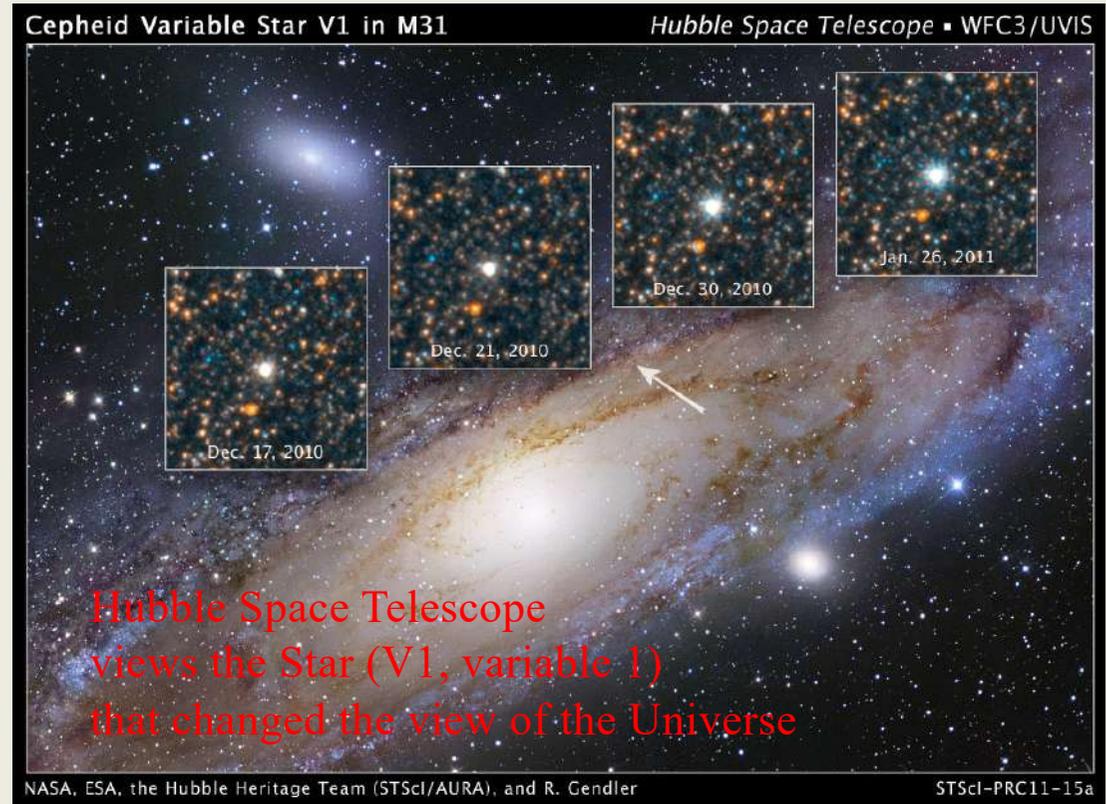


Henrietta Lewitt (1868 – 1921 Harvard)
Découverte de 2400 étoiles variables
et de la relation entre **période** et **luminosité moyenne**

Chandelles standard – De la Voie Lactée à l'univers extragalactique



Dimensions de la Voie Lactée
(H.Shapley – 1917 - RR Lyrae)



Concept d'Univers – Iles
Galaxies semblables à la Voie Lactée
(V.Slipher – 1914) (E.Hubble – 1924)

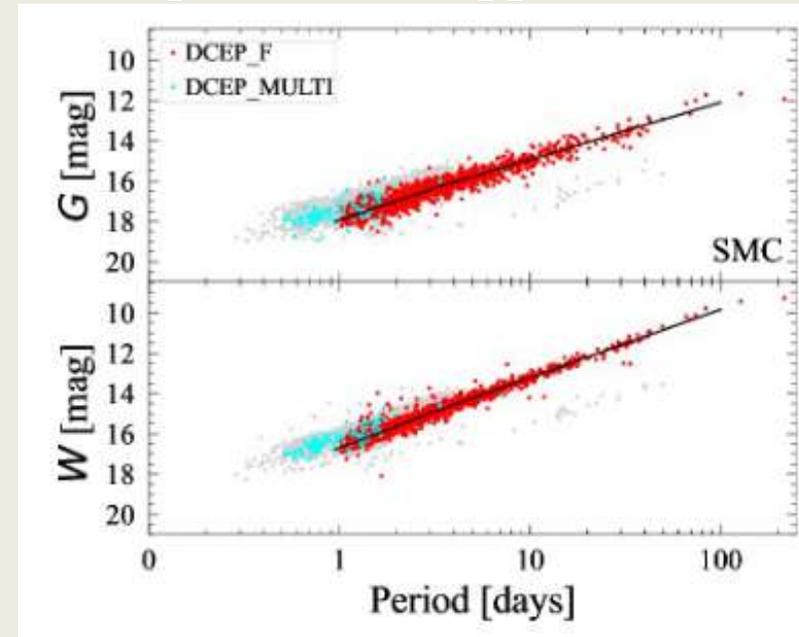
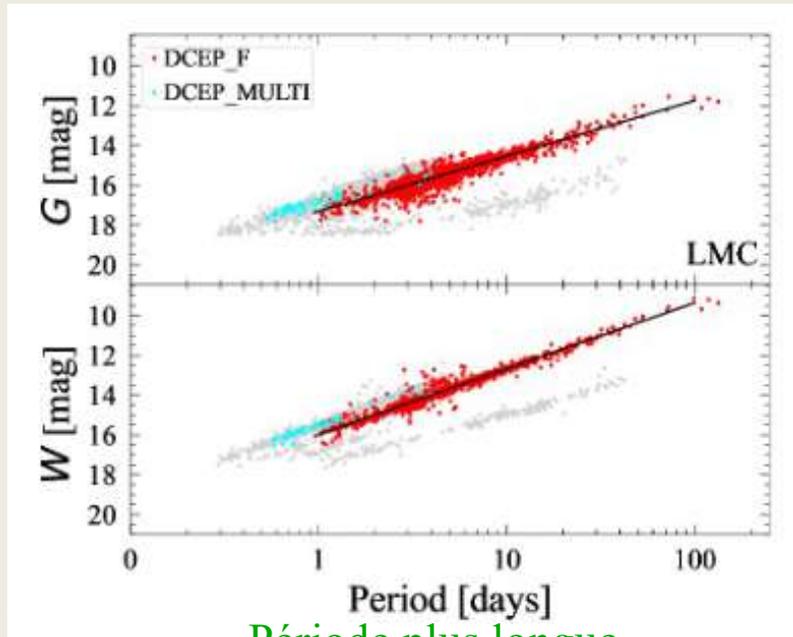


Henrietta Lewitt (1868 – 1921 Harvard)
Découverte de 2400 étoiles variables
et de la relation entre **période** et **luminosité moyenne**

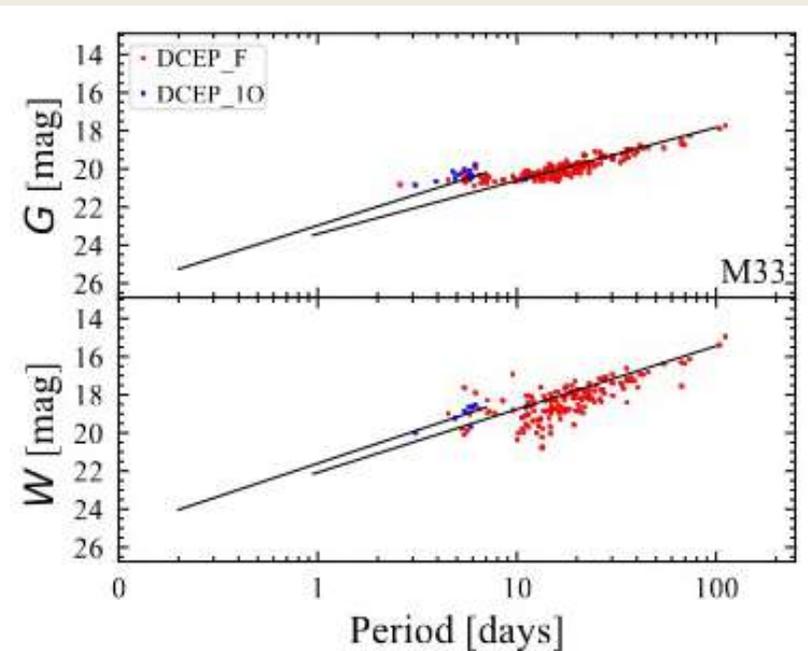
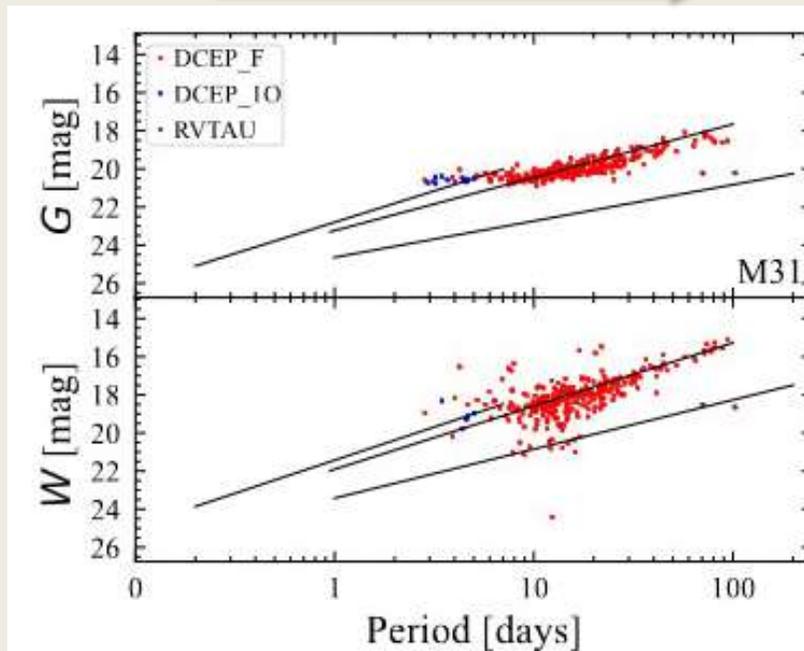


Céphéides – L'apport du satellite Gaia

Etoiles plus brillantes ↑



→ Période plus longue



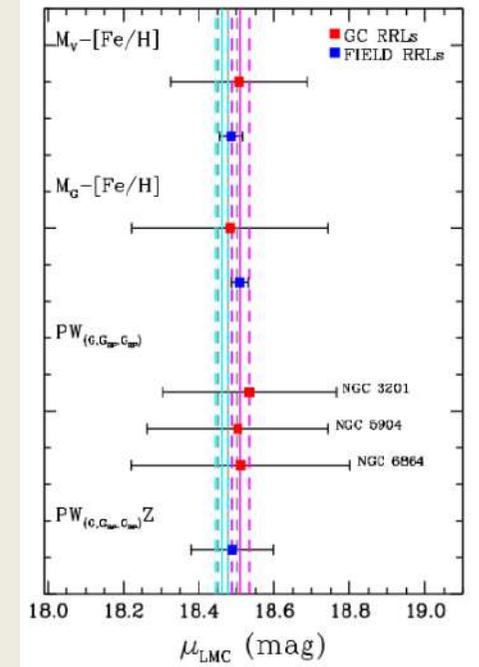
Distance au Grand Nuage de Magellan



Date: 03 December 2020

Satellite: Gaia

Copyright: ESA/Gaia/DPAC; CC BY-SA 3.0 IGO. Acknowledgement: L. Chemin; X. Luri et al (2020)



Garofalo et al. (2021) – RR Lyrae in MW GC

49.59 ± 0.09 (statistical) ± 0.54 (systematic) kiloparsecs

Toward an Internally Consistent Astronomical Distance Scale

1745

Table 1 Internally consistent distance moduli (as a function of increasing distance) to selected Local Group galaxies, comprising a robust local framework (adapted from de Grijs and Bono 2015)

Galaxy	$(m - M)_0^{\text{best}}$ (mag)	Tracer(s)	$(m - M)_0^{\text{TRGB}}$ (mag)
LMC	18.49 ± 0.09	Cepheids, RR Lyrae, CMD	18.54–18.69
SMC	18.96 ± 0.02	EBs, Cepheids, RR Lyrae, TRGB, RC	19.00 ± 0.04
NGC 185	24.00 ± 0.12	TRGB, RR Lyrae	24.03 ± 0.33
NGC 147	24.11 ± 0.11	TRGB, RR Lyrae	24.16 ± 0.22
IC 1613	24.34 ± 0.05	Cepheids, RR Lyrae, TRGB	24.29 ± 0.12
IC 10	24.36 ± 0.45	TRGB	24.36 ± 0.45
M32	24.43 ± 0.07	SBF, TRGB, RR Lyrae	24.32 ± 0.20
M31	24.45 ± 0.10	Cepheids, RR Lyrae, TRGB	24.47 ± 0.01
NGC 205	24.56 ± 0.15	TRGB, RR Lyrae	24.45 ± 0.20
M33	24.67 ± 0.07	Cepheids, RR Lyrae, TRGB	24.70 ± 0.11
NGC 4258	29.29 ± 0.08	H ₂ O masers	29.24–29.44

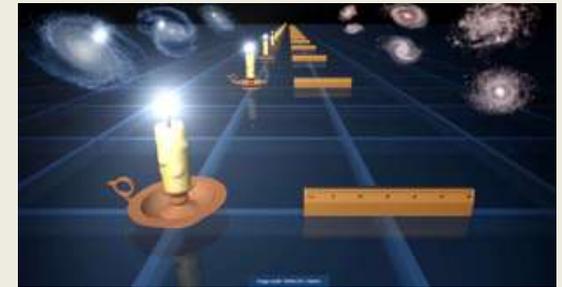
Notes: CMD: color–magnitude diagram; EBs: eclipsing binaries; RC: red clump; SBF: surface-brightness fluctuations; TRGB: tip of the red giant branch

De Grijs (2015)

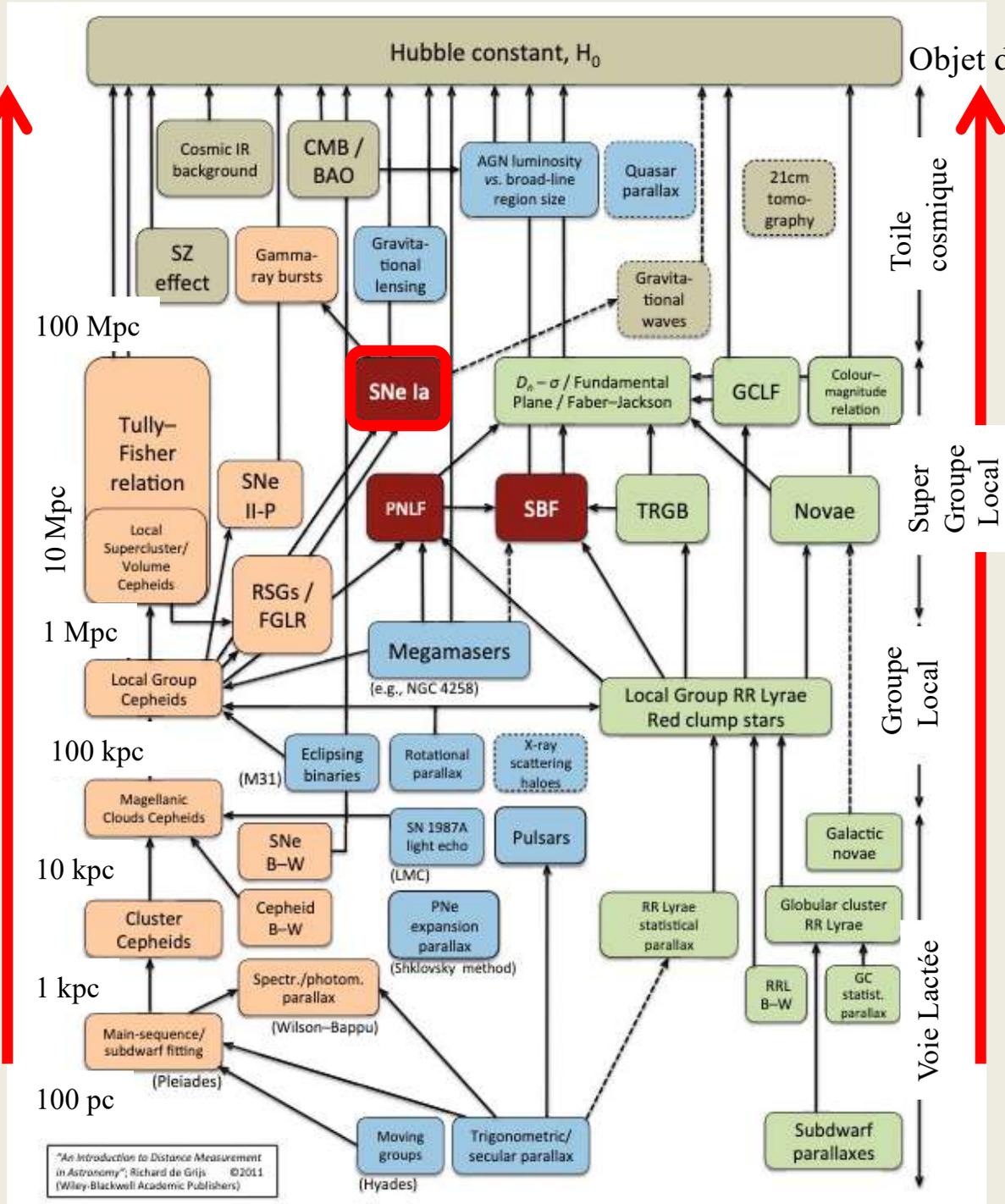
Module de distance : $\mu = m - M = 5 \cdot \log(\text{Distance, en pc}) - 5$
 m, M: magnitudes apparente et absolue

Chandelle standard

Objet dont on connaît la luminosité intrinsèque



Distance

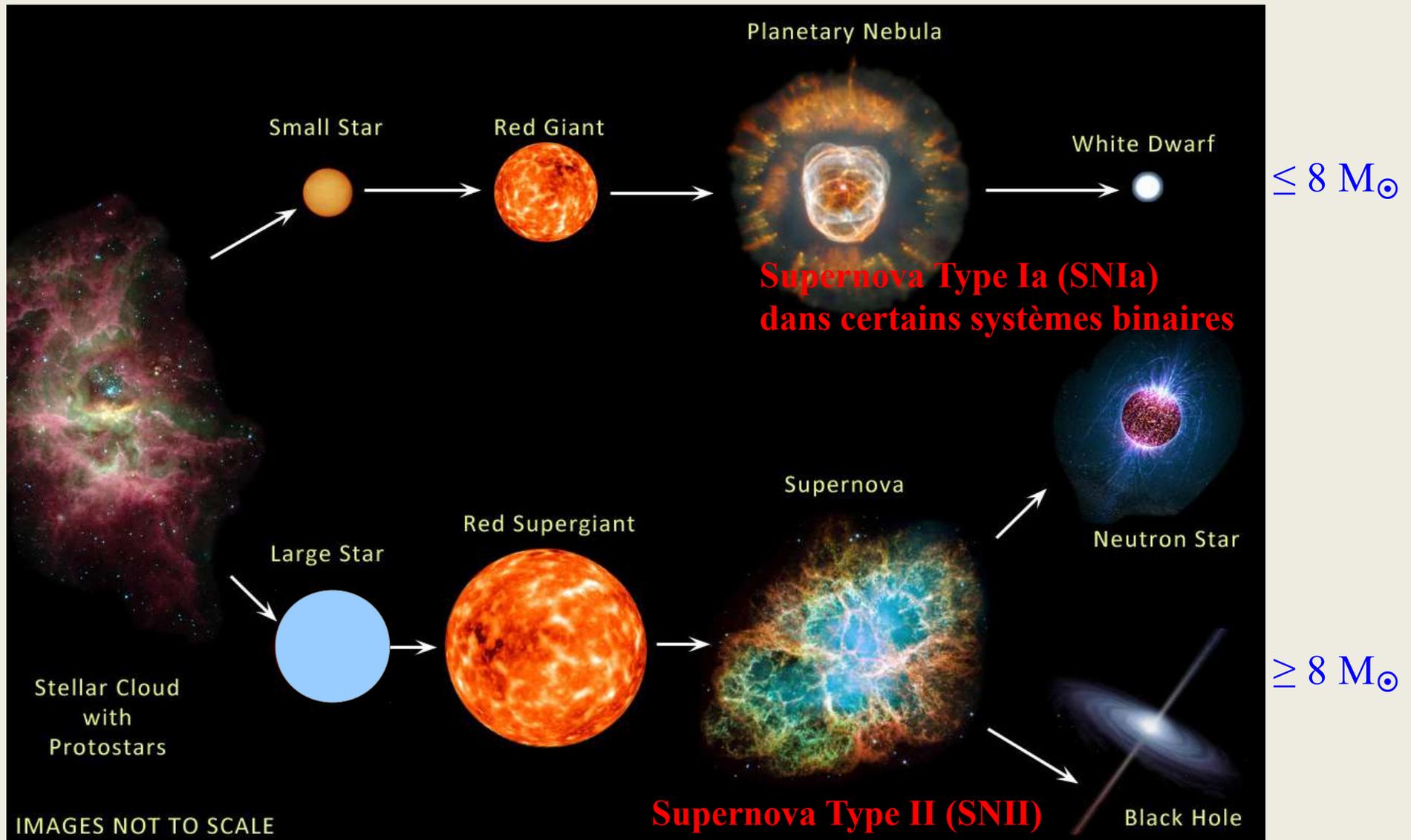


Environnement

Supernovae de Type Ia

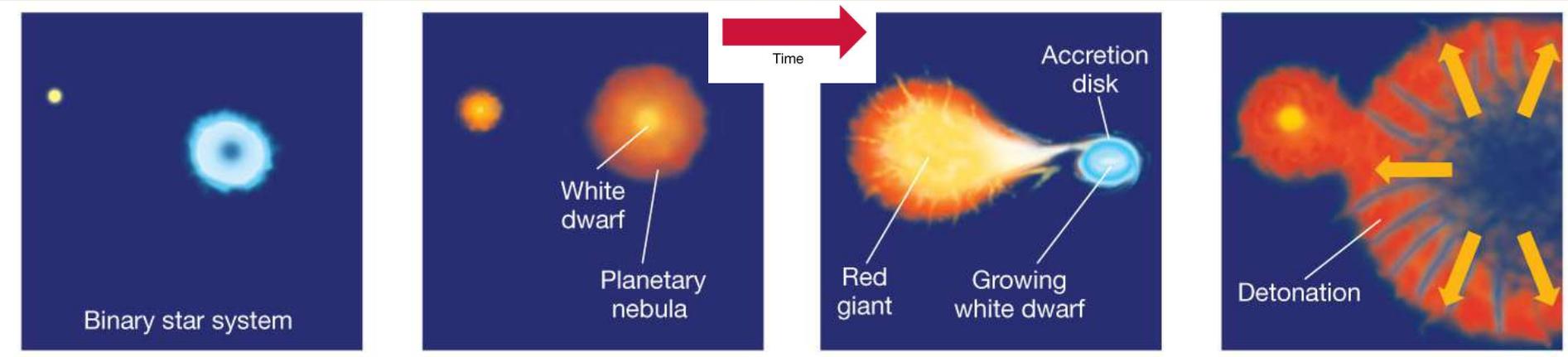


Evolution des étoiles en fonction de leur masse initiale

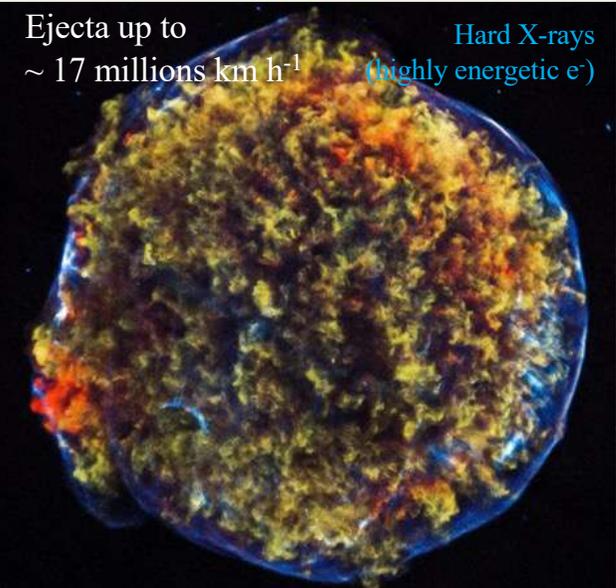
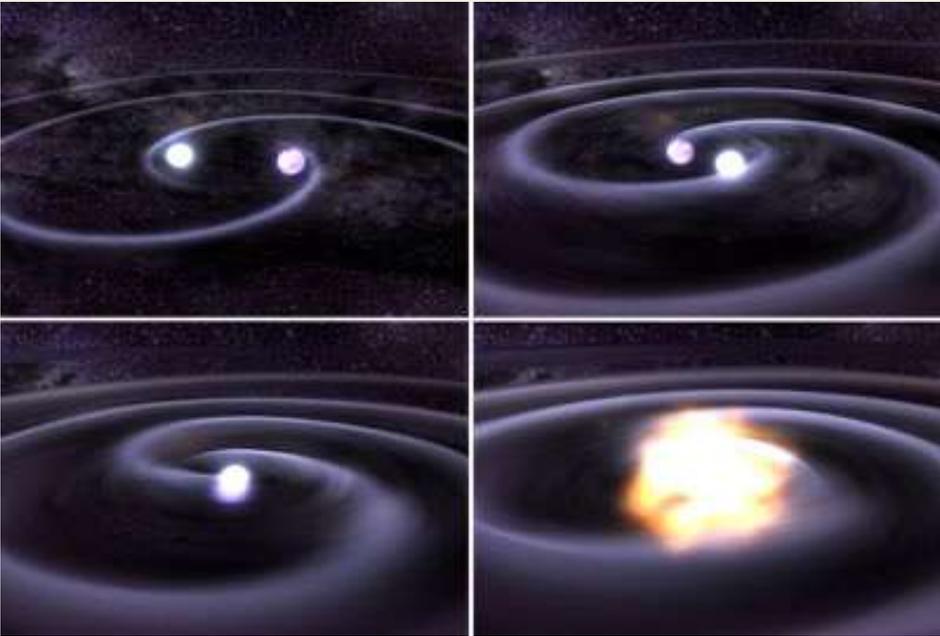


Supernovae de Type Ia

SNe Ia : Explosion thermonucléaire de naines blanches de carbone et d'oxygène ($\sim 1.35 M_{\odot}$) suite au transfert de masse par un compagnon ($M > 1.44 M_{\odot}$)



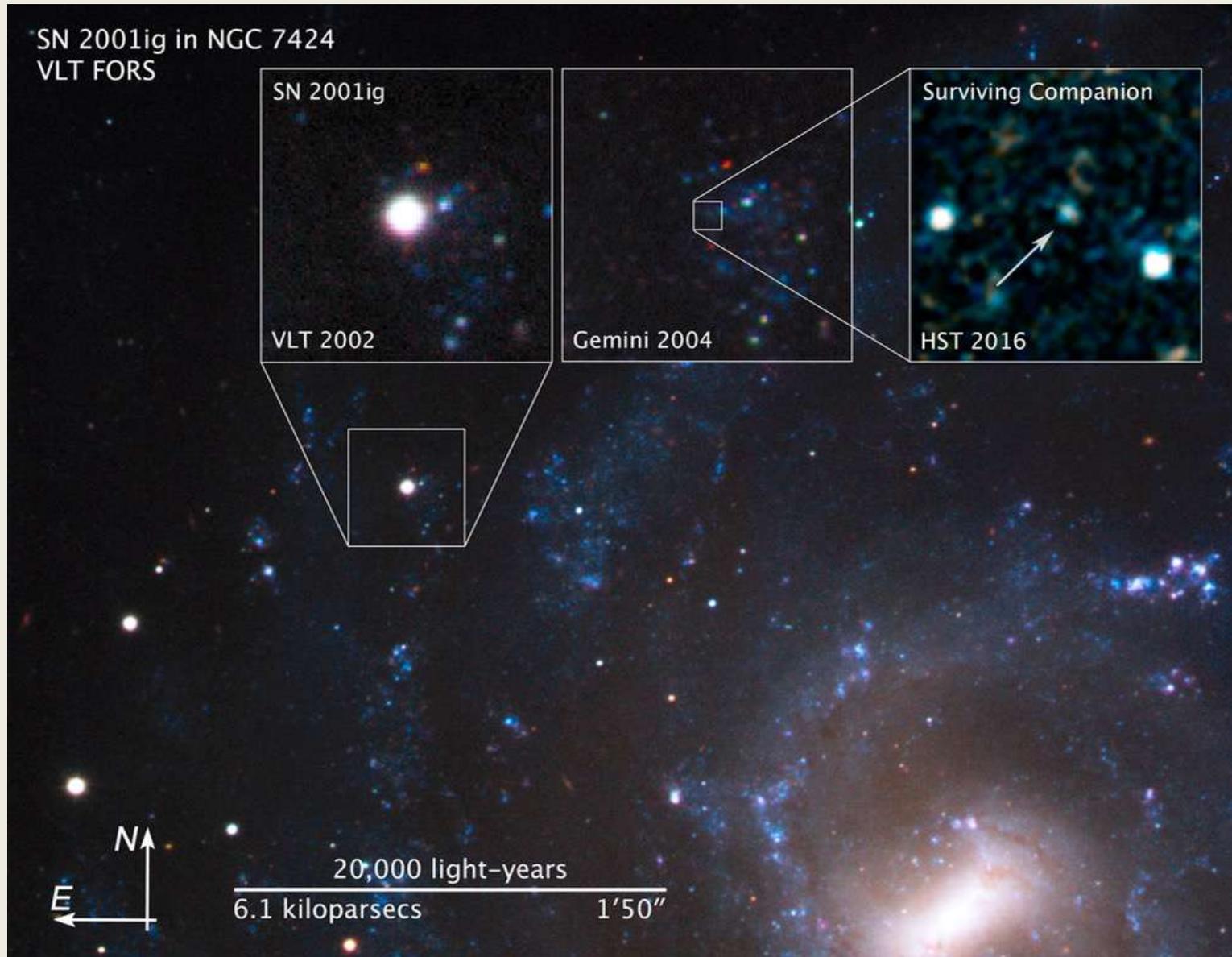
Coalescence de deux naines blanches ?



Credit: NASA/CXC/SAO - Chandra

Tycho Supernova (SN 1572) in our Galaxy

Supernovae de Type Ia – Sur les traces du compagnon

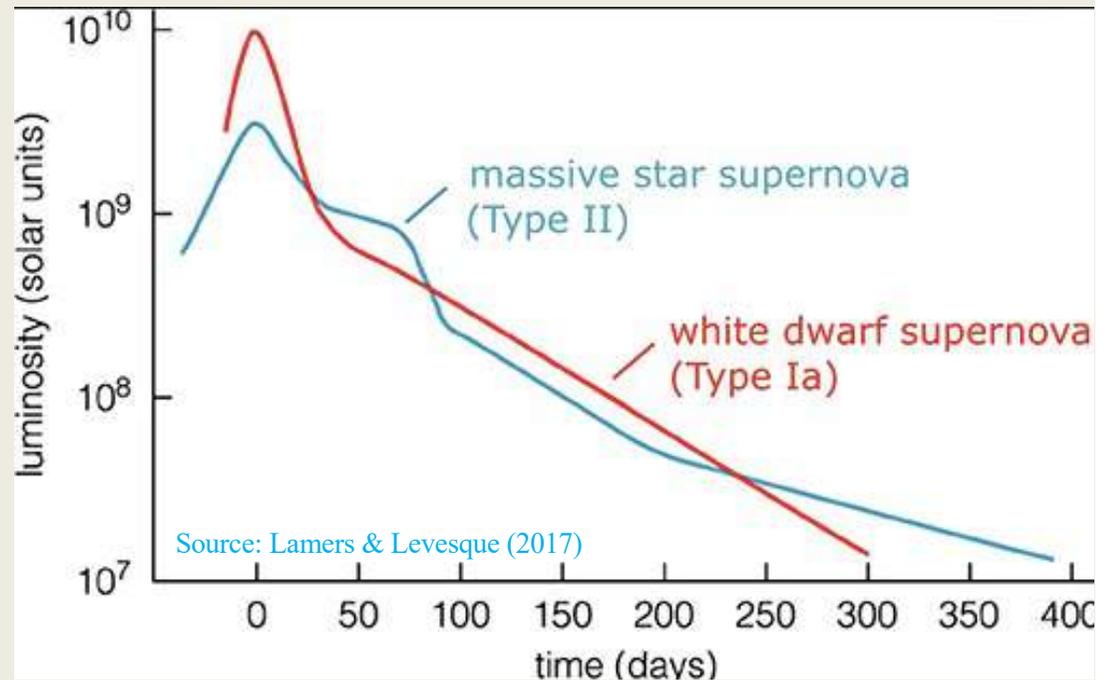


Galaxie NGC 7424 (@ ~ 40 millions a.l.)

<http://hubblesite.org/image/4157/news/84-supernovae>

Supernovae de Type Ia

SNe Ia : Explosion thermonucléaire de naines blanches de carbone et d'oxygène ($\sim 1.44 M_{\odot}$)



Type Ia : $L_{\max} \sim 10^{10} L_{\text{sun}}$

Pic ~ 50 jours

Type II : $L_{\max} \sim \text{qq } 10^9 L_{\text{sun}}$

moins lumineuses mais plus fréquentes

Relation entre L_{\max} et décroissance de la courbe de lumière

Supernovae de Type Ia

Combustion du CO en ^{56}Ni (0.05 à $0.9 M_{\odot}$)
 et Si-Ca (0.2 à $0.9 M_{\odot}$)

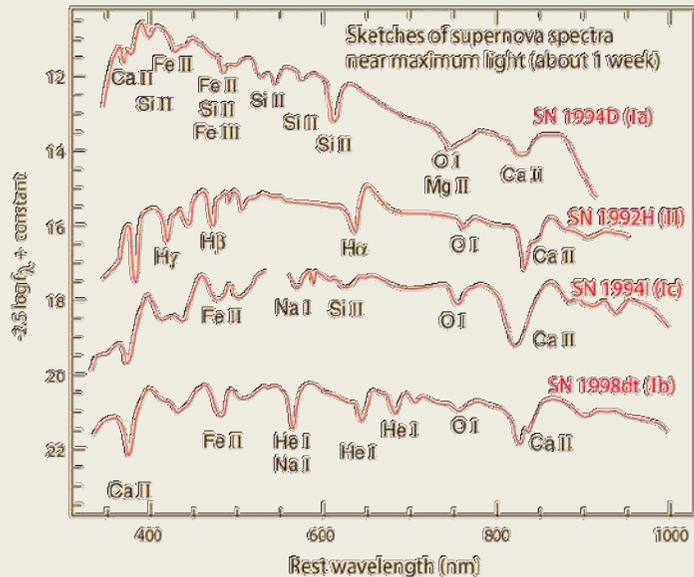
Luminosité due à la chaîne de désintégration
 $^{56}\text{Ni} \rightarrow ^{56}\text{Co} \rightarrow ^{56}\text{Fe}$

Masse de Chandrasekhar ($\sim 1.44 M_{\odot}$)

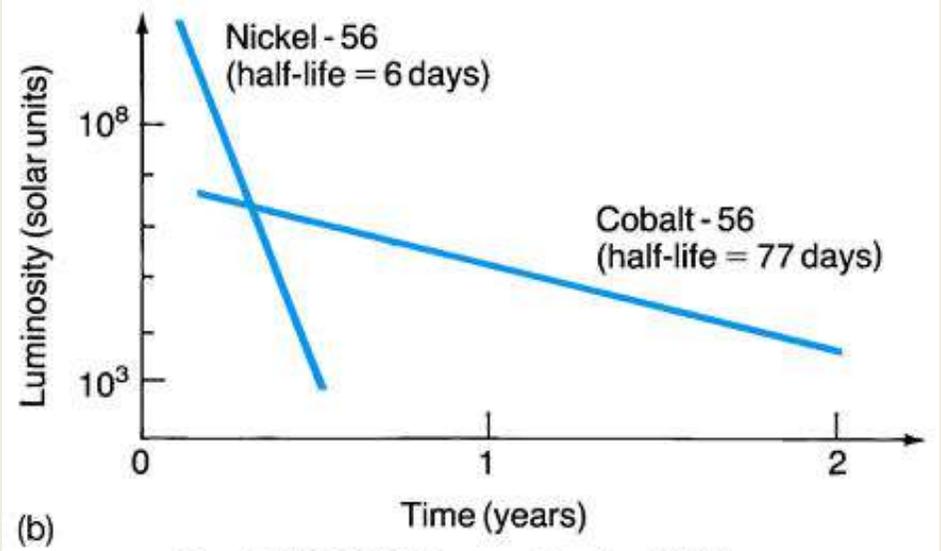
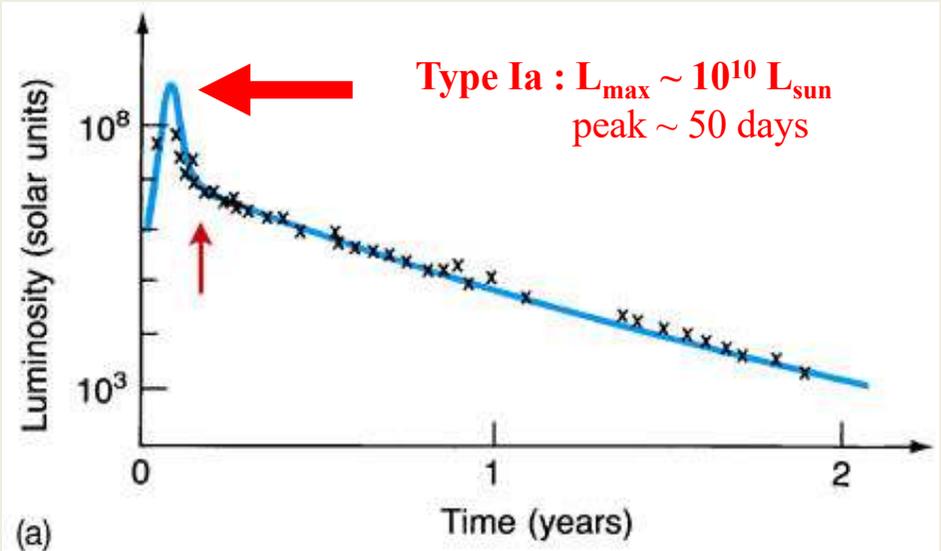
- **Luminosité quasi-invariable** (à 25% près)
- $M_{\text{bol}} \sim -19.5$ (magnitude bolométrique absolue)
- Chandelle standard

Mesure de la magnitude apparente m

→ Distance D : $m - M = 5 \log D_{\text{pc}} - 5$



Sketches of spectra from Carroll & Ostlie, data attributed to Thomas Matheson of National Optical Astronomy Observatory.



Copyright © 2005 Pearson Prentice Hall, Inc.

Type I : Pas de raies de l'hydrogène dans le spectre (contrairement aux SN Type II)

Type Ia : Fortes raies d'absorption Si à 6150 Å

Supernovae de Type Ia – Chandelles standard parfaites ?

Il existe des variations du maximum de L, corrélées à la largeur de la courbe de lumière

$$\Delta M_B^{\text{peak}} \sim 1.5 (\times 4 \text{ in } L)$$

Phillips ('93) discovered that the width of the lightcurve peak is correlated with the peak luminosity:

Brighter = Broader

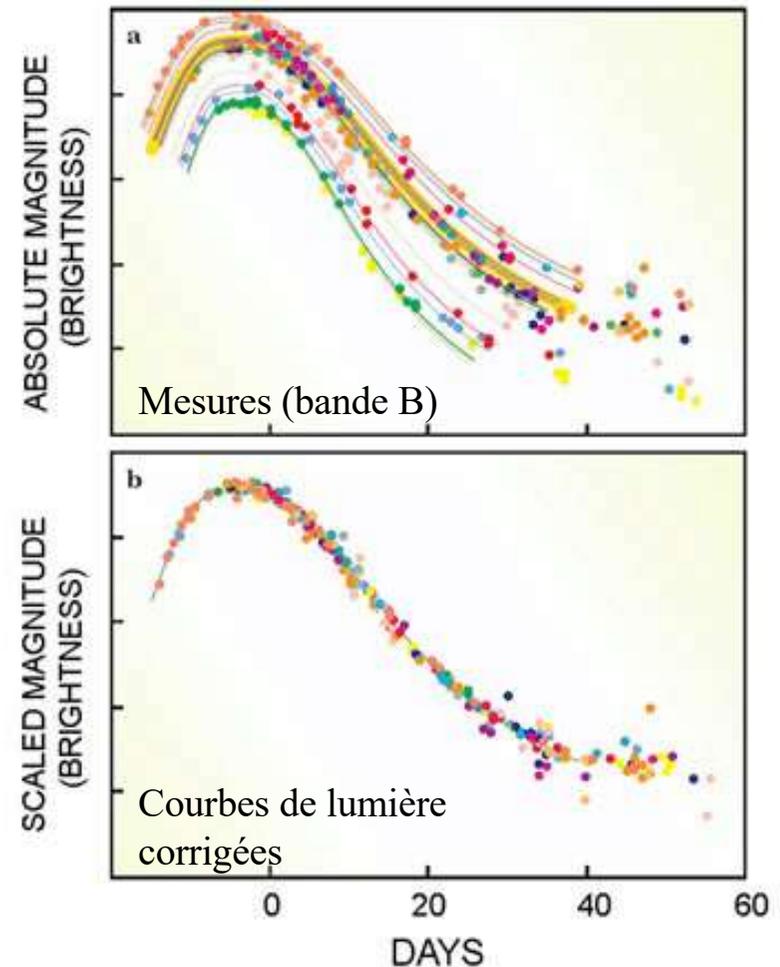
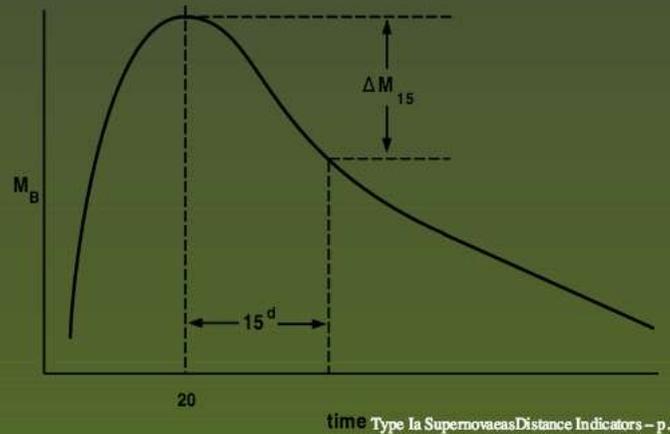
Larger $M \leftrightarrow$ smaller Δm_{15}

Can use the

$\Delta m_{15}/L$ relation to

“standardize” the candle

to $\sigma \sim 0.1 \text{ mag}$



+ SN Ia observées dans tous les types de galaxies

- Problèmes / incertitudes

- Observations, absorption, rougissement

- Statistiques

- Evolution en fonction du redshift

SN Ia @ $z = 0$ identiques à

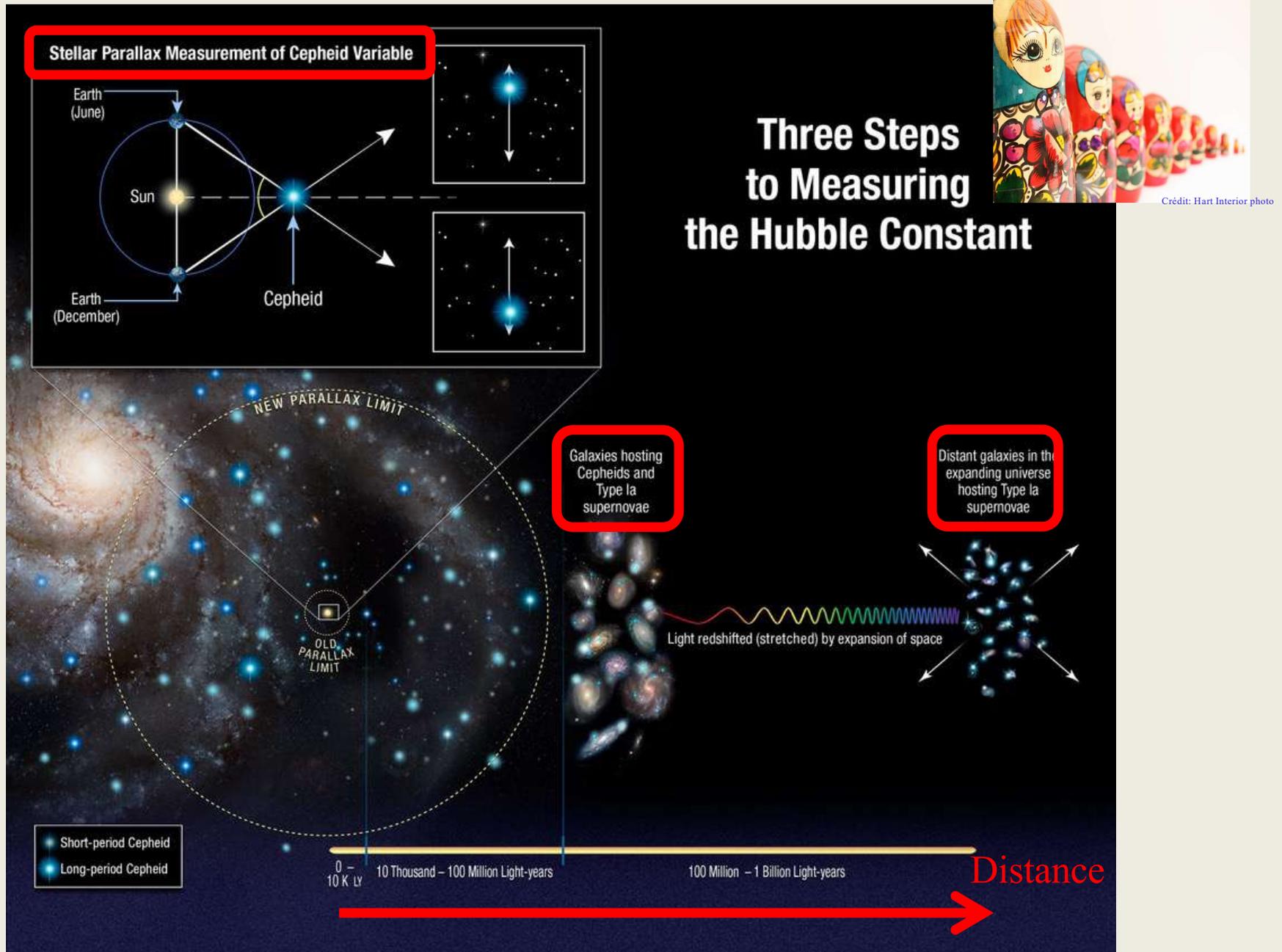
SN Ia @ grand z ?

- Source (simple/double degenerée)

- Mécanisme (ignition, mécanisme de combustion, transport d'énergie)

Stretch factor method

[Mignone \(2009\)](#)



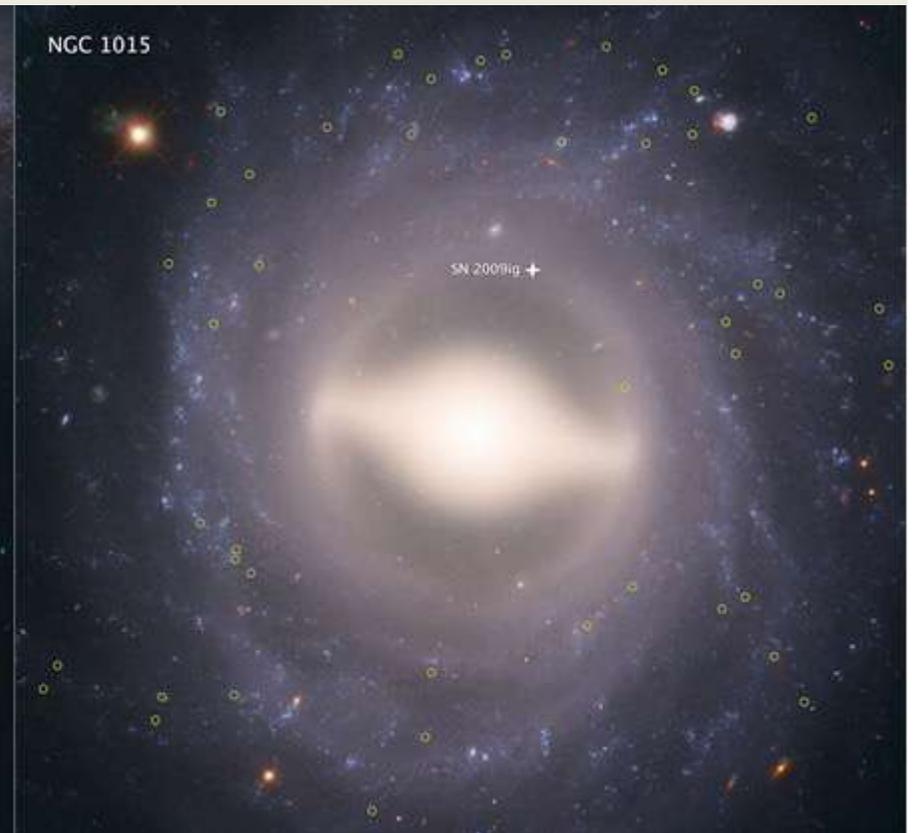
<https://www.nasa.gov/feature/goddard/2018/improved-hubble-yardstick-gives-fresh-evidence-for-new-physics-in-the-universe>

Calibration – Des Céphéides aux SNIa

Images HST (2015)

Jaune: Céphéides

Croix : SNIa



NGC 3972 @ 65 millions d'a.l.

NGC 1015 @ 118 millions d'a.l.

Distances précises de 50 Céphéides proches (Voie Lactée)
Observations de Céphéides et SNIa extragalactiques avec HST

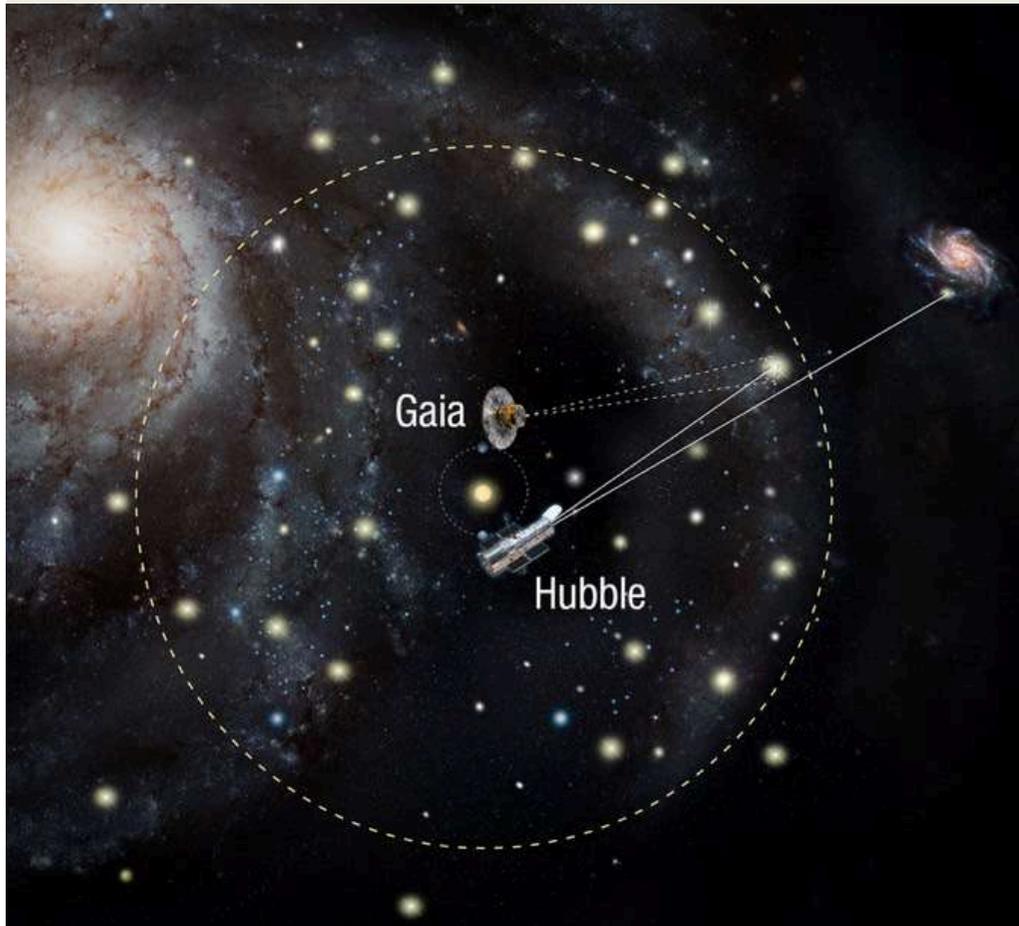
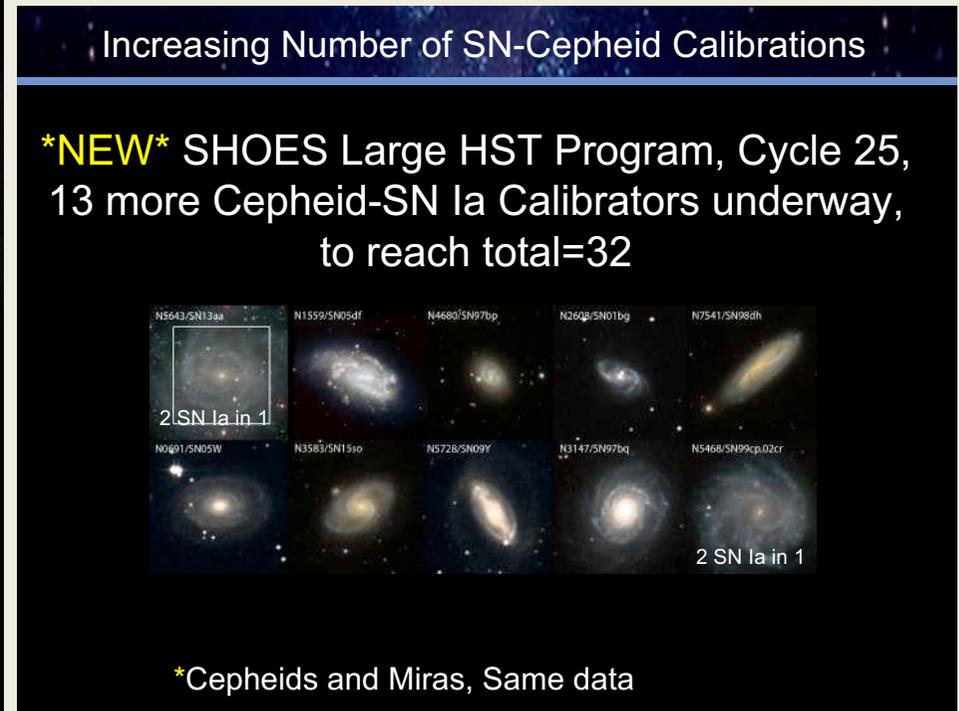


Image: NASA, ESA, and A. Feild (STScI)

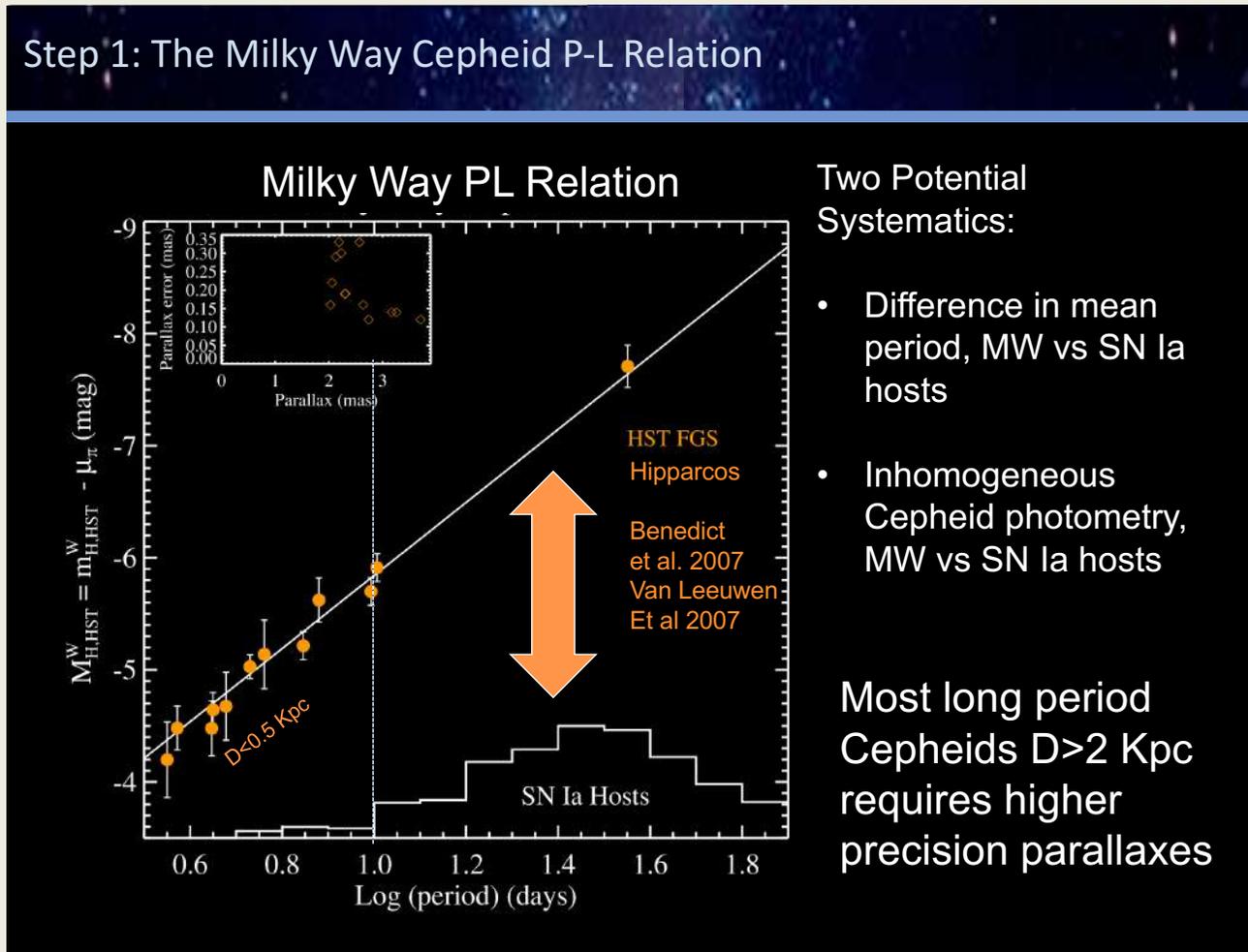


Source : A.Riess (2018)

Gaia et HST: $H_0 = 73.5 \text{ km sec}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (incertitude $\sim 2\%$)

Riess *et al.* (2018)

Distances précises de 50 Céphéides proches (Voie Lactée) Observations de Céphéides et SNIa extragalactiques avec HST

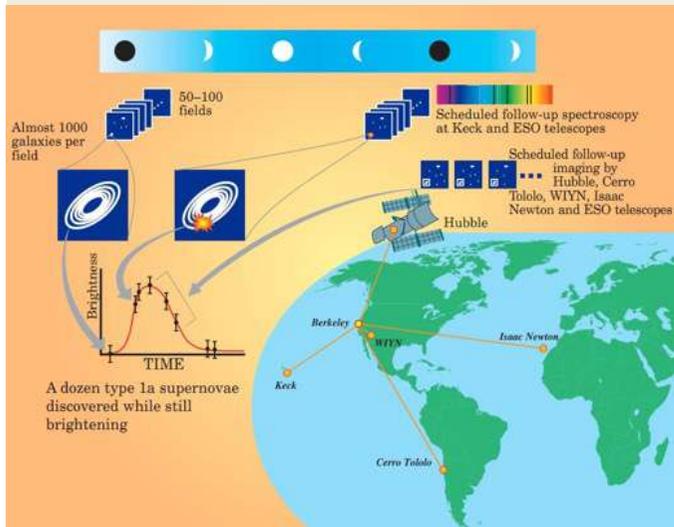


Gaia et HST: $H_0 = 73.5 \text{ km sec}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (incertitude $\sim 2\%$)

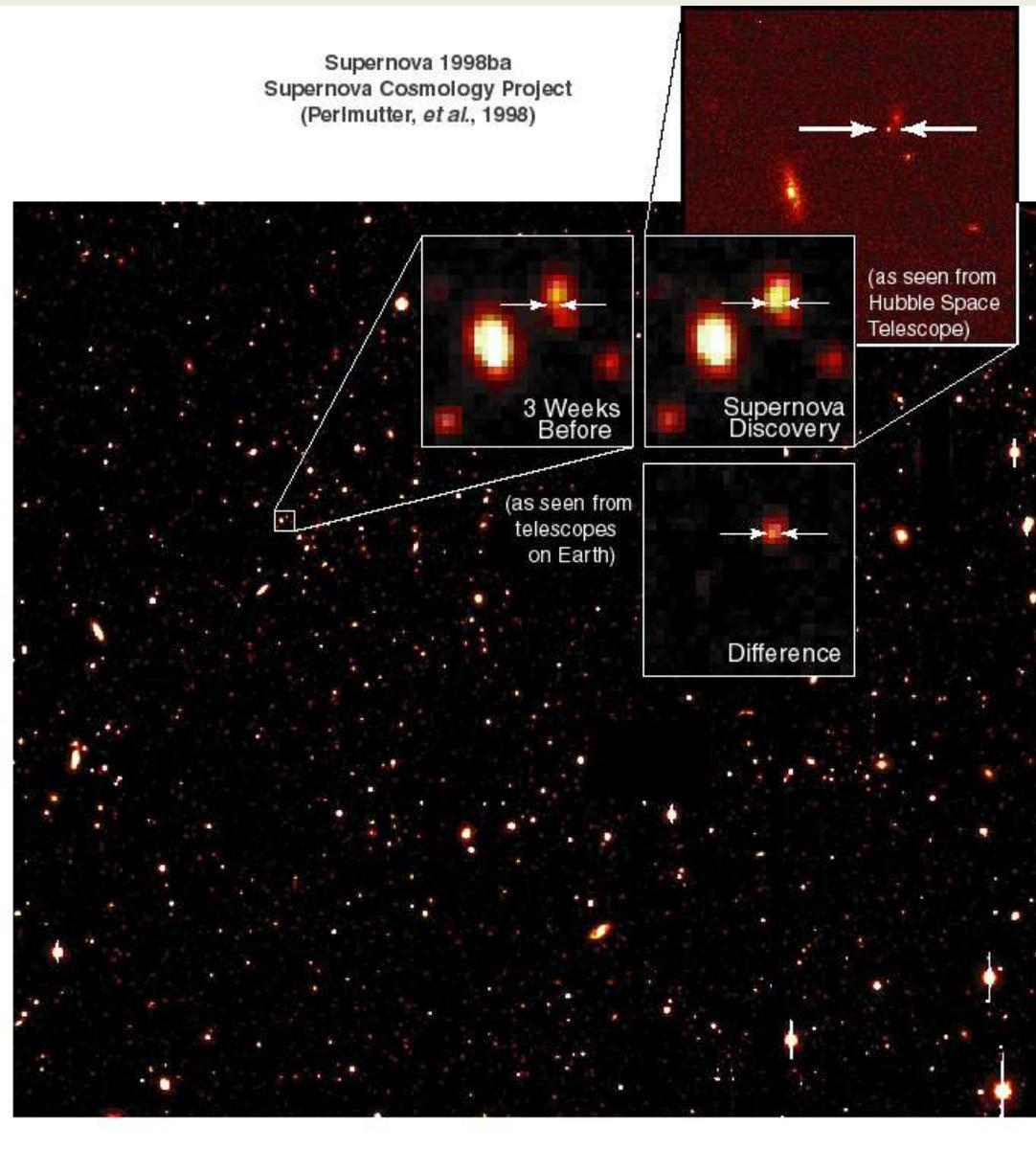
Riess *et al.* (2018)

Surveys pour la recherche systématique de SNIa

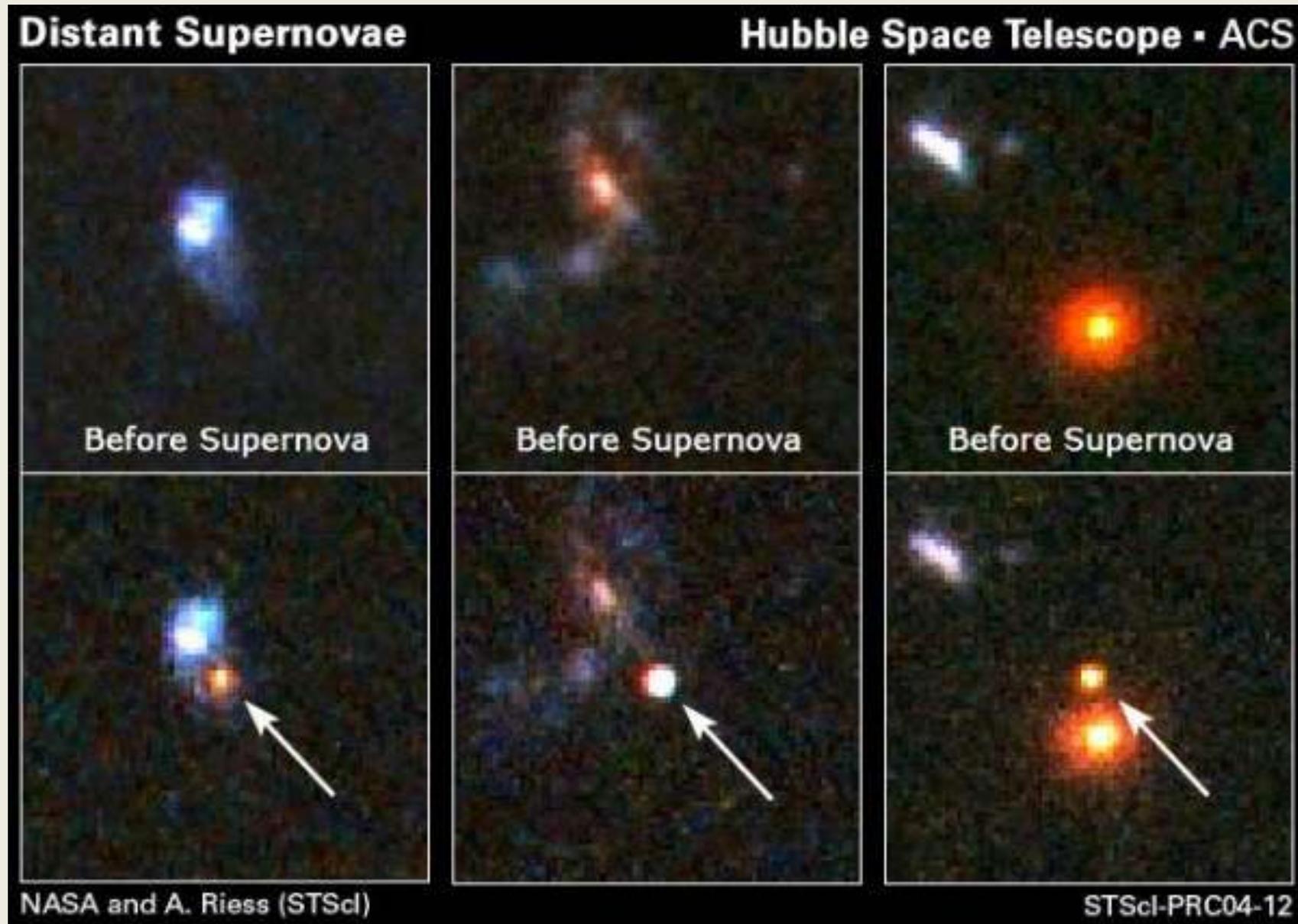
Supernova Cosmology project Collaboration internationale (80s-90s) HST

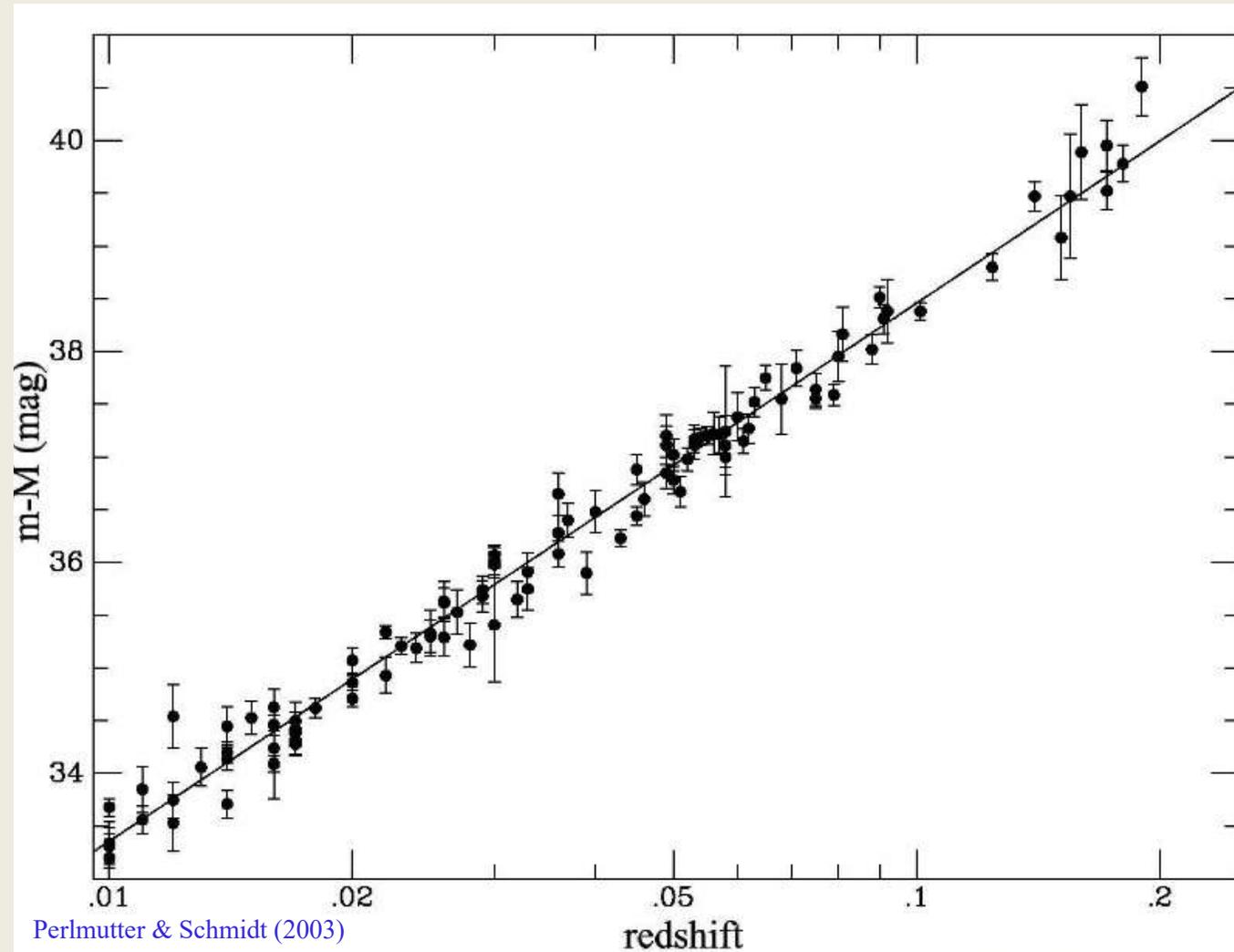


Discovery of a supernova explosion
at half the age of the Universe
[Perlmutter et al. \(1998 Nature\)](#)

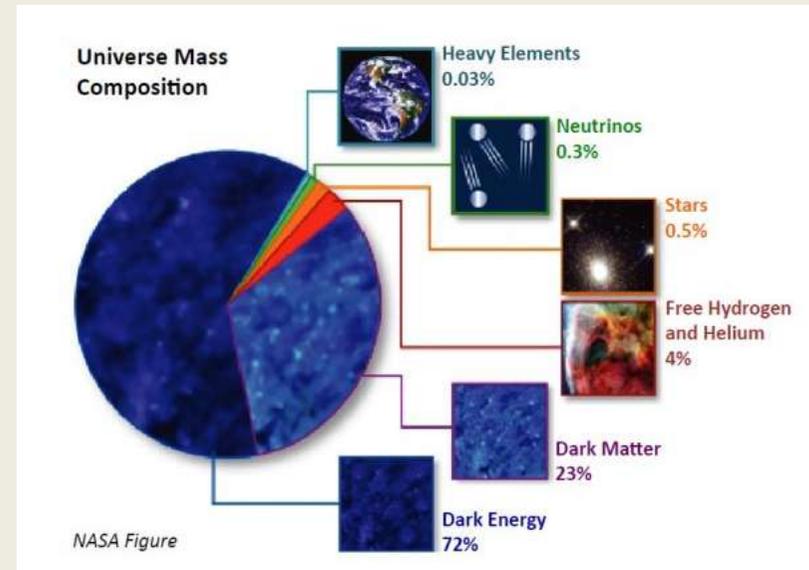
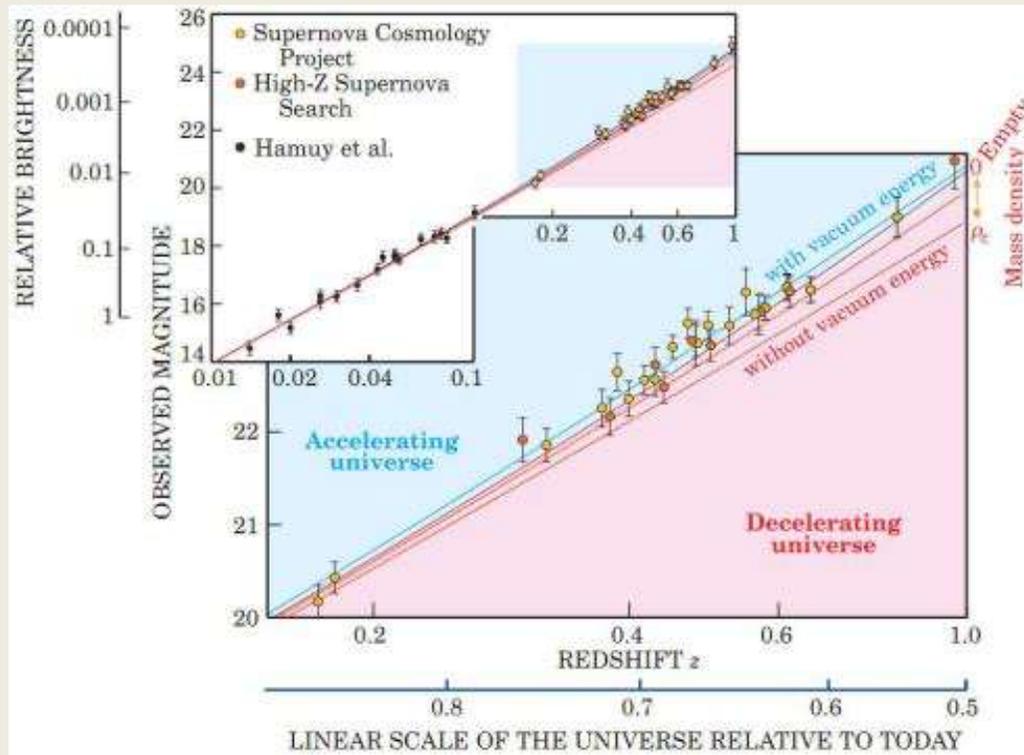


Surveys pour la recherche systématique de SNIa

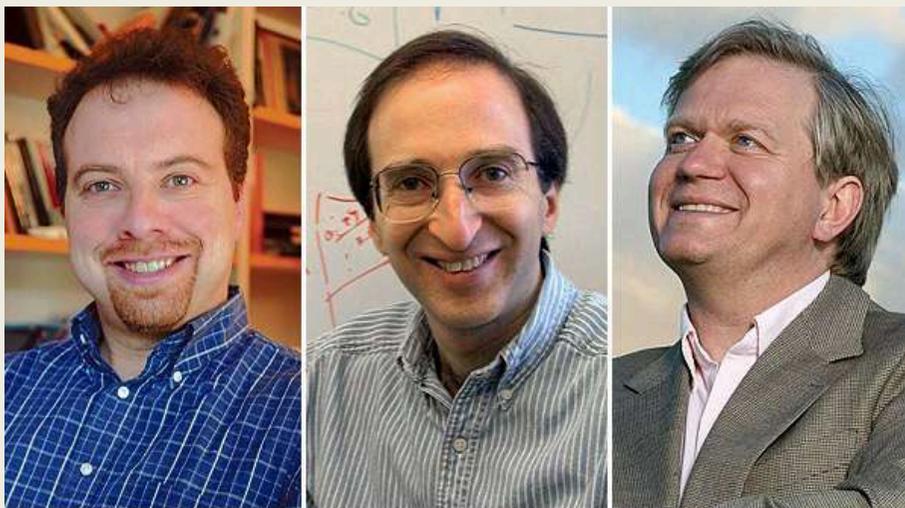




Découverte de l'accélération de l'expansion de l'Univers



→ Energy noire (leçon 20231114)

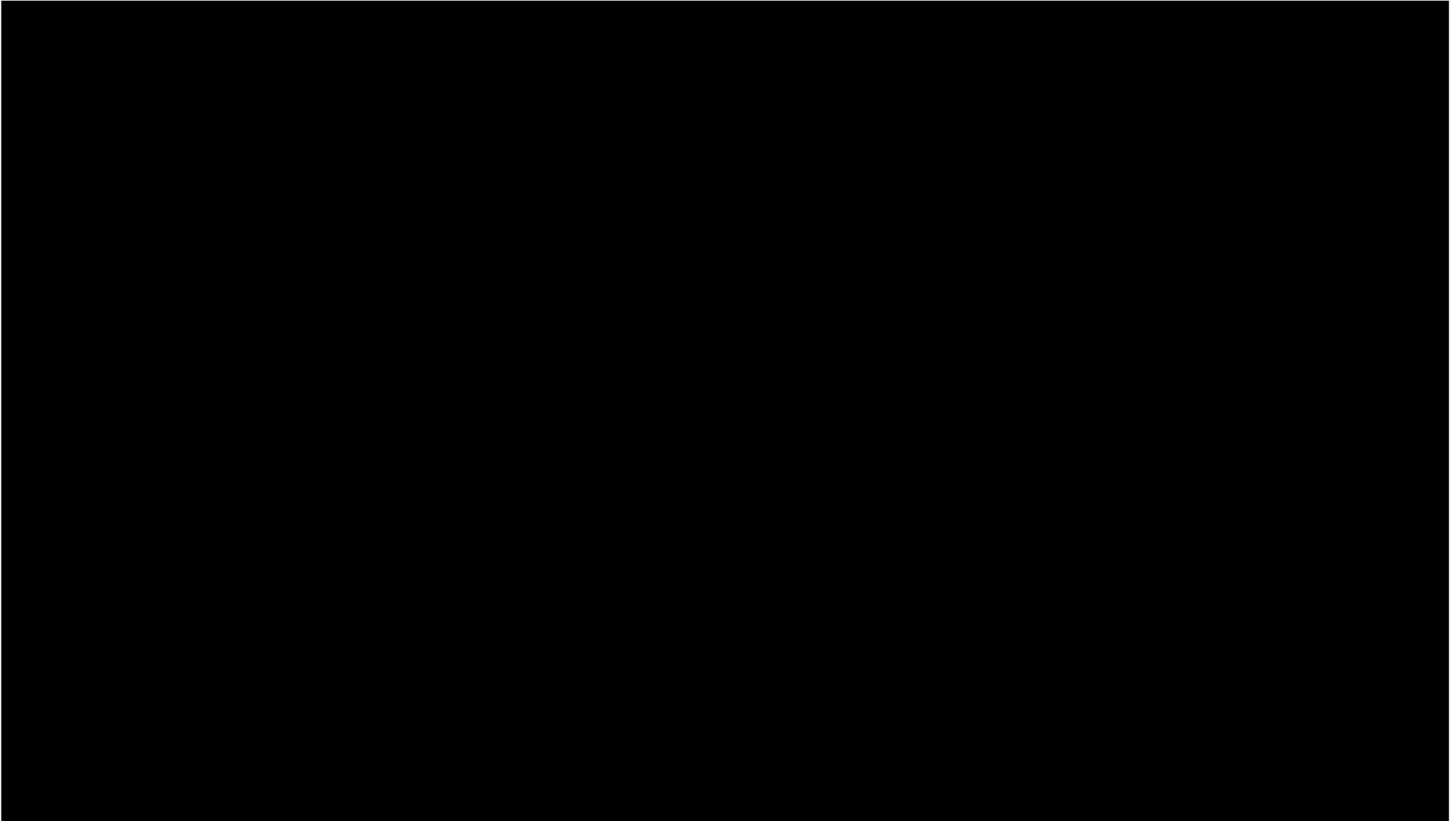


Johns Hopkins University; University Of California At Berkeley; Australian National University

From left, Adam Riess, Saul Perlmutter and Brian Schmidt shared the Nobel Prize in physics awarded Tuesday.

Adam G. Riess (High-z SNe project)
Saul Perlmutter (SNe cosmology project)
Brian P. Schmidt
Prix Nobel 2011
Prize motivation: "for the discovery of the accelerating expansion of the Universe through observations of distant supernovae"

Télescope Spatial Nancy Grace Roman (NASA)

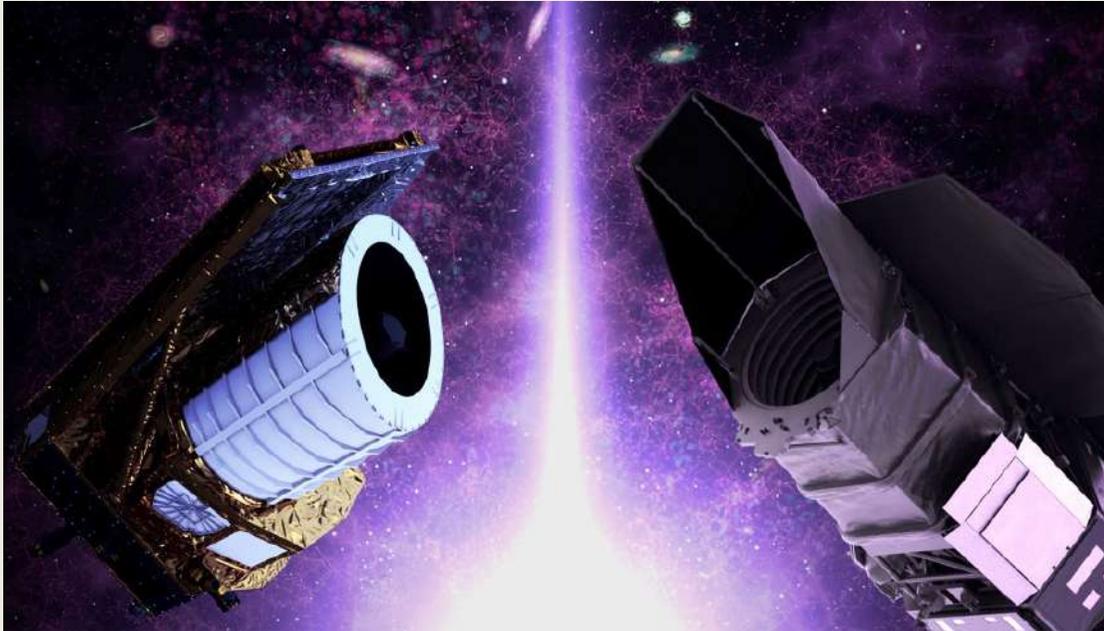


T2.4m spatial
IR
100 x champ de vue de HST
~ 2027

<https://roman.gsfc.nasa.gov/>

https://roman.gsfc.nasa.gov/Type_Ia_Supernovae.html

Télescope Spatial Nancy Grace Roman Euclid

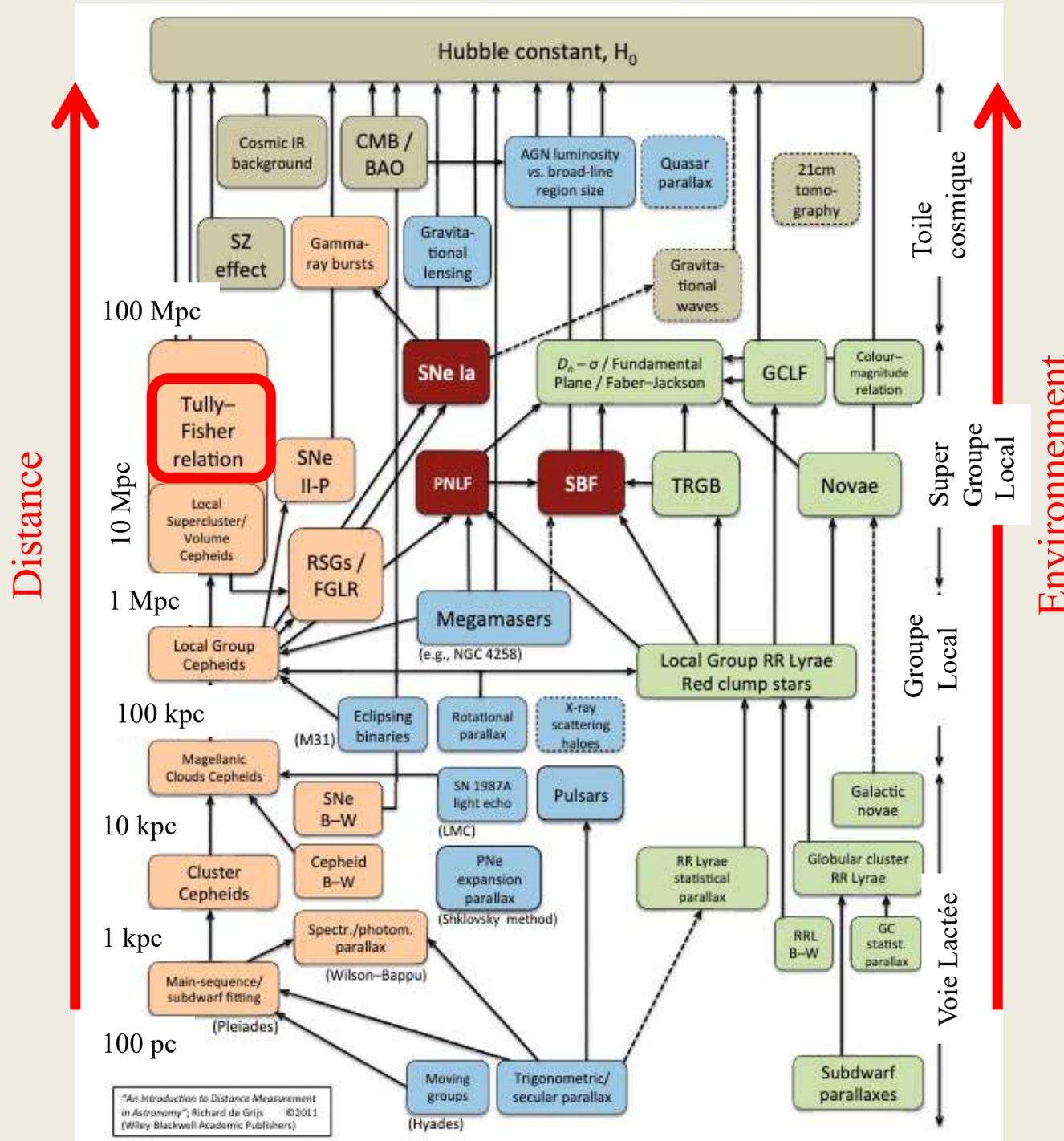


COSMIC OBSERVATORIES

	EUCLID	ROMAN
Primary Agency	ESA	NASA
Primary Science	Cosmology (Dark Energy)	Cosmology, Exoplanets, Infrared Astronomy
Dark Energy Search Method	Weak Lensing Galaxy Clustering	Weak Lensing Galaxy Clustering Type Ia Supernovae
Proposed Survey Size	15,000 degrees ²	~2,000 degrees ²
Observing Wavelengths	Visible and Infrared	Infrared
Detectors	36 4K CCD (VIS) 16 2K HgCdTe NIR Array (NISP)	18 4K HgCdTe NIR Array (WFI)
Primary Mirror	3.9ft (1.2m)	7.9ft (2.4m)
Launch Date	July 2023	By May 2027
Orbit Location	Around Sun-Earth L2	Around Sun-Earth L2
Spacecraft Length	14.9ft (4.5m)	42ft (12.7m)
Spacecraft Mass	4,500lbs (2,000kg)	18,000lbs (8,000kg)

→ Energy noire (leçon 20231114)

Relation de Tully-Fisher Luminosité totale d'une galaxie



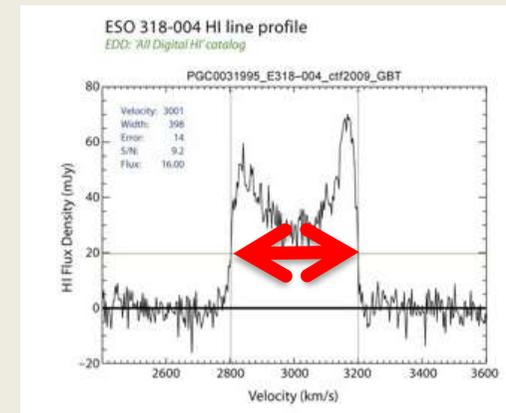
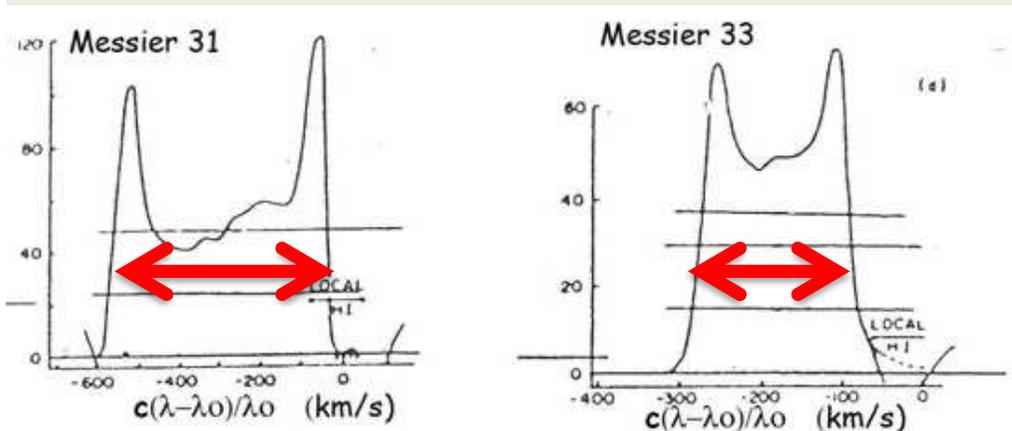
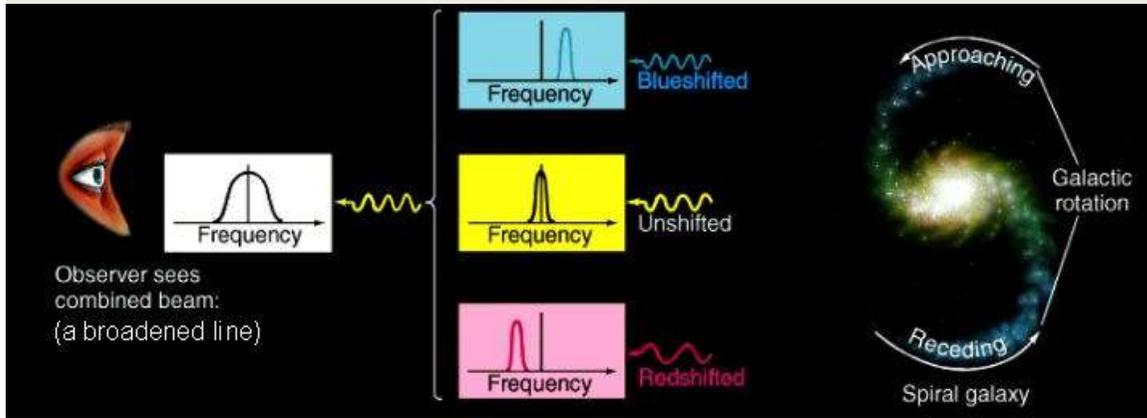
Relation de Tully-Fisher

Luminosité totale d'une galaxie

(1971 A&A 54, 661)

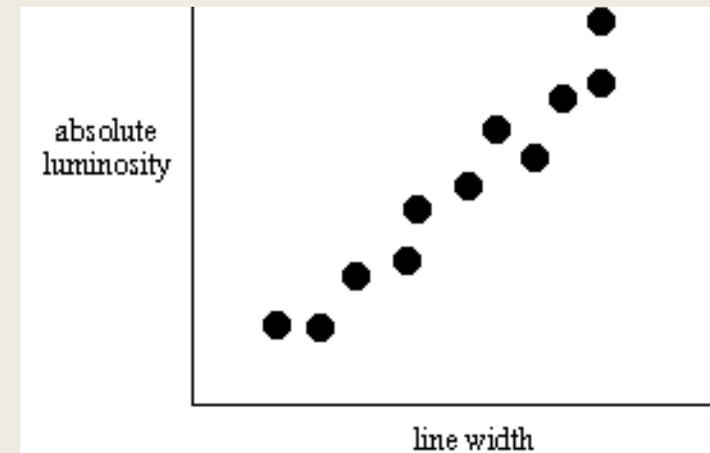
Rotation d'une galaxie spirale

Dédoublément de la raie à 21cm
l'hydrogène atomique
(radioastronomie centimétrique)



La largeur de la raie est proportionnelle à la vitesse de rotation, donc à la masse de la galaxie

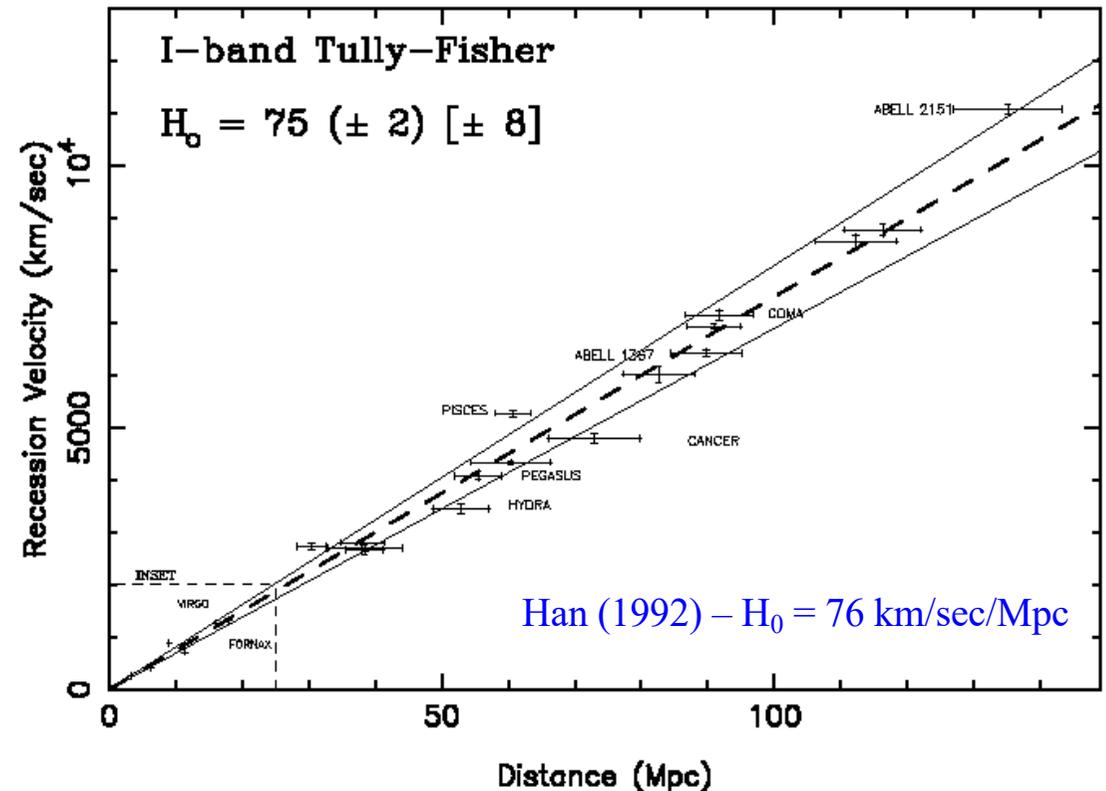
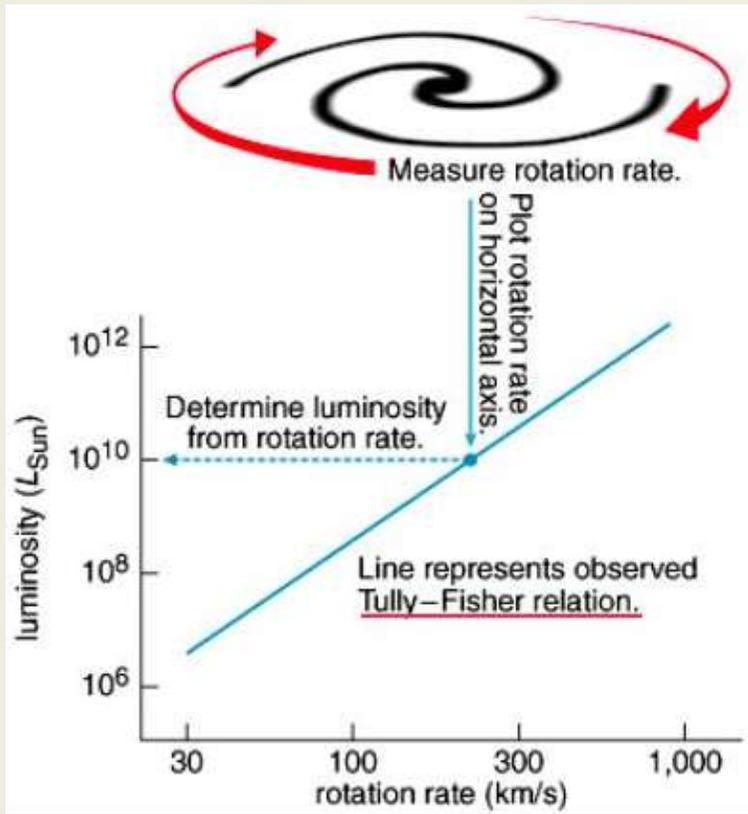
La luminosité de la Galaxie est proportionnelle à sa masse (son contenu en étoiles)



Relation de Tully-Fisher

Luminosité totale d'une galaxie

Far-Field Hubble Constant (1971 A&A 54, 661)



La luminosité (donc la magnitude absolue) de la galaxie est proportionnelle à son taux de rotation

$$M = a \log V + b$$

Relation empirique calibrée

sur des galaxies avec distances mesurées par Céphéïdes
+ inclinaison de la galaxie

Mesure de $V \rightarrow$ Calcul de M

Mesure de la luminosité apparente m

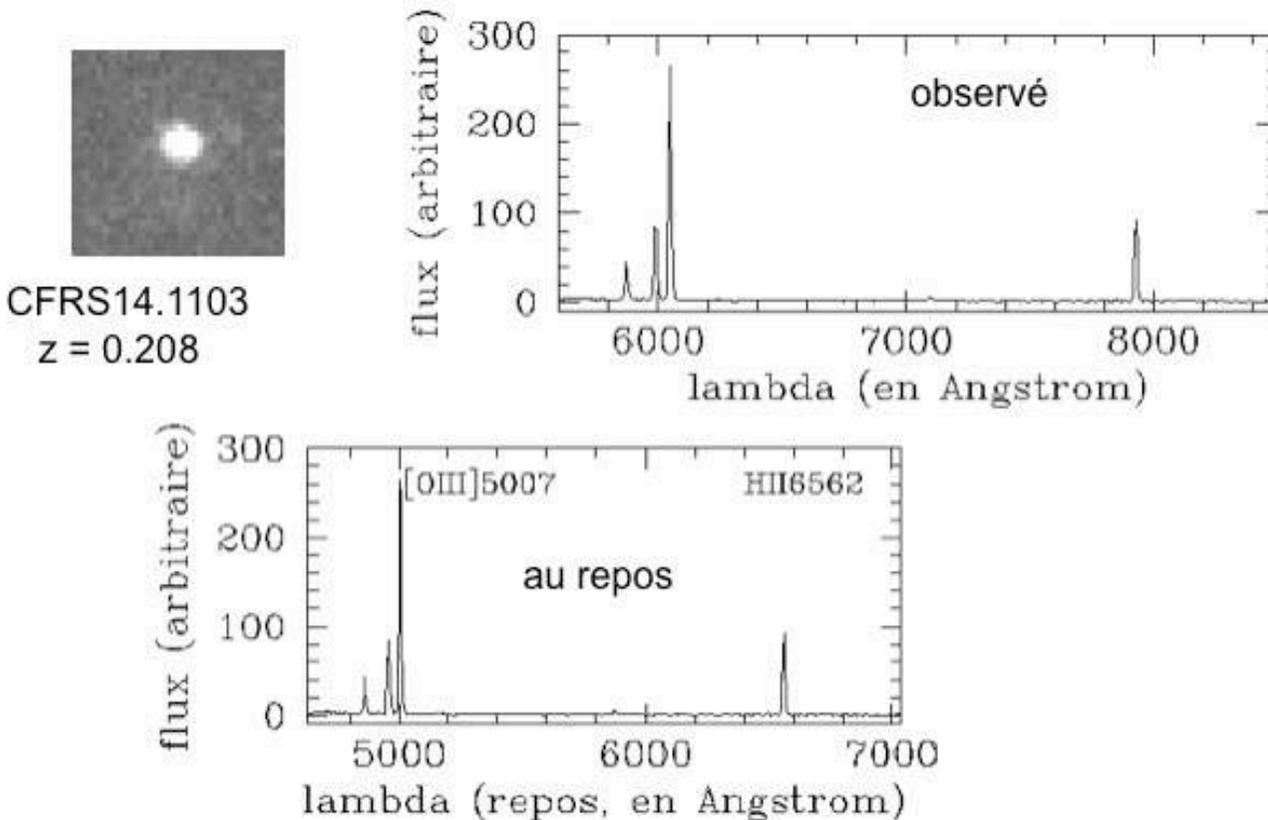
\rightarrow Distance D

$$\text{avec } m - M = 5 \log D(\text{pc}) - 5$$

Rougisement du spectre des galaxies

Spectre de la galaxie CDRS14.1103

située à 2.74 milliards d'années- lumière (redshift $z = 0.208$; vitesse d'éloignement $56'000\text{km sec}^{-1}$)



Décalage spectral (redshift)

$$z = (\lambda - \lambda_0) / \lambda_0$$
$$= v / c$$

Vitesse d'éloignement
de la galaxie

$$v = c \times \frac{((z+1)^2 - 1)}{((z+1)^2 + 1)}$$

Entre l'émission de la lumière
par la galaxie
et sa réception par l'observateur,
l'univers s'est dilaté

Crédit : Astrophysique sur Mesure / François Hammer

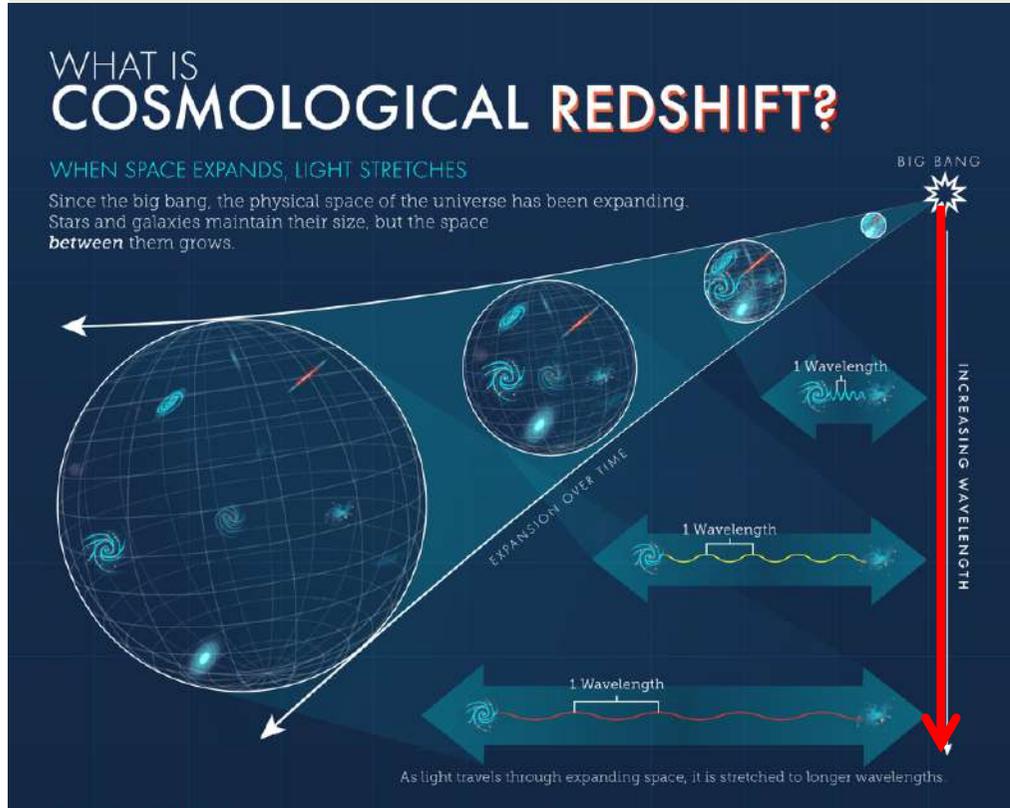
Evolution du continuum espace-temps de l'Univers

Distance de la galaxie

$$D = v / H_0$$

$H_0 =$ constante de Hubble ($\text{km sec}^{-1} \text{Mpc}^{-1}$)

Redshift cosmologique et expansion de l'univers



Alexandre Friedmann
(1888 – 1925)



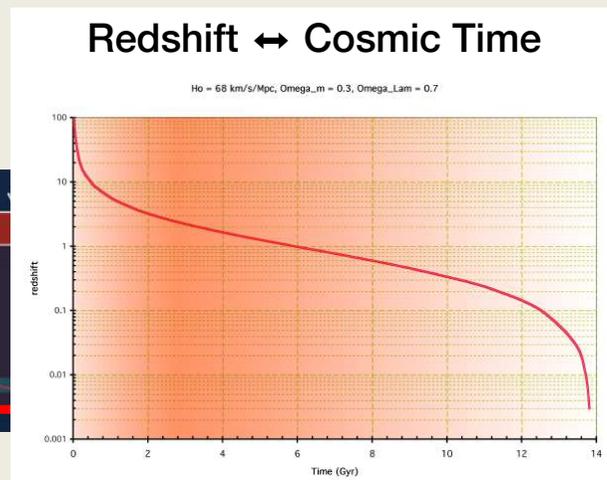
Georges Lemaître (1894-1966)
Albert Einstein

Reprend (1920) les équations d'Einstein (**relativité générale**, 1915)

→ Explication du décalage vers le rouge en terme d'**expansion de l'Univers**

Lorsque la lumière se déplace dans un espace en expansion, elle est étirée vers des longueurs d'ondes plus grandes (vers le rouge).

→ **Plus le redshift z d'une galaxie est grand, plus loin on regarde dans le passé**



Redshift z	Age Univers (années)
infini	0
4	1.5×10^9
3	2.2×10^9
2	3.3×10^9
1	5.9×10^9
0.5	8.6×10^9
0.1	12.4×10^9
0	13.7×10^9

A retenir:
galaxies à grand z = galaxies lointaines = galaxies jeunes

Source: M.Dessauges (UniGe)

Source: NASA, ESA, Leah Hustak (STScI)

C.Charbonnel – Cours UniGe 1051 – 20230926

$$H_0 = v/d$$

Taux d'expansion de l'univers par unité de longueur
[km / (sec.Mpc)]

- La vitesse de récession entre deux points de l'espace augmente d'environ 70 km/sec pour chaque Mpc qui les sépare
↔ $\sim 2.10^{-15}$ m/sec pour chaque km:
- Perceptible seulement à des distances de l'ordre du Mpc (distance entre les amas de galaxies).
- Aux échelles plus petites, les autres interactions sont trop importantes pour que la matière « se plie » à l'expansion générale.
À notre échelle (matière ordinaire): distances et mouvements gouvernés par les interactions électromagnétiques.
Aux échelles astrophysiques jusqu'aux galaxies proches:
interaction gravitationnelle domine et crée des vitesses particulières des galaxies supérieures à celles dues à l'expansion

H_0 - Indice 0: Au temps 0 (aujourd'hui)
Constante dans l'espace mais pas
forcément dans le temps cosmologique

H_0 - mesure le taux d'expansion de l'Univers.
- dépend fortement de la **densité de l'univers**
→ Proportions des **différents types de matière / énergie** dans le cosmos

Exercice 5. La constante de Hubble

Les estimations actuelles de la constante de Hubble donnent

$$H_0 \approx 7 \cdot 10^4 \frac{\text{m/s}}{\text{Mpc}} .$$

- a) Convertir cette valeur en $\frac{\text{nm}}{\text{année}}/\text{km}$. Pouvons nous ressentir cette expansion à notre échelle ?
- b) Quelle est la vitesse de l'expansion à l'échelle du diamètre du Système solaire ? Comparer son ordre de grandeur (ODG) avec celui de la vitesse de Pluton autour du Soleil $v_P = 4,74 \text{ km/s}$ (= 17100 km/h).
- c) Quelle est la vitesse de l'expansion à l'échelle du diamètre de notre galaxie ? Comparer son ODG à celui de la vitesse de rotation du Soleil autour du noyau galactique $v_{\odot} = 220 \text{ km/s}$.
- d) Quelle est la vitesse de l'expansion à l'échelle de la taille moyenne des groupes de galaxies ? La comparer avec la vitesse à laquelle Andromède (image ci-contre) se rapproche de notre galaxie $v_A = 111 \text{ km/s}$.

Rayon de Hubble – Dépasser la vitesse de la lumière

À partir de quelle distance $d = r_H$ la vitesse de récession v dépasse-t-elle la vitesse de la lumière c ?

$$v = H_0 \cdot r_H > c$$

$$r_H > c / H_0 = 4.5 \text{ Gpc}$$

4.5 milliards de parsecs

~ 14 milliards a.l.

: distance parcourue par la lumière depuis le début de l'univers

Au-delà du rayon de Hubble, toute galaxie s'éloigne à une vitesse de récession supérieure à celle de la lumière.

! C'est l'espace qui s'étend

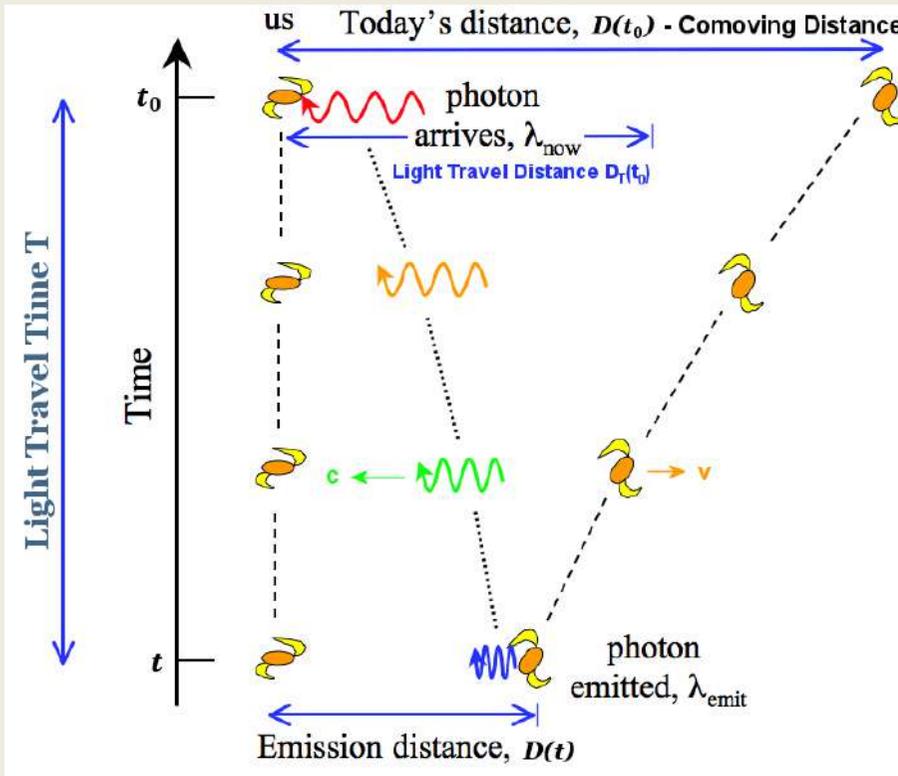
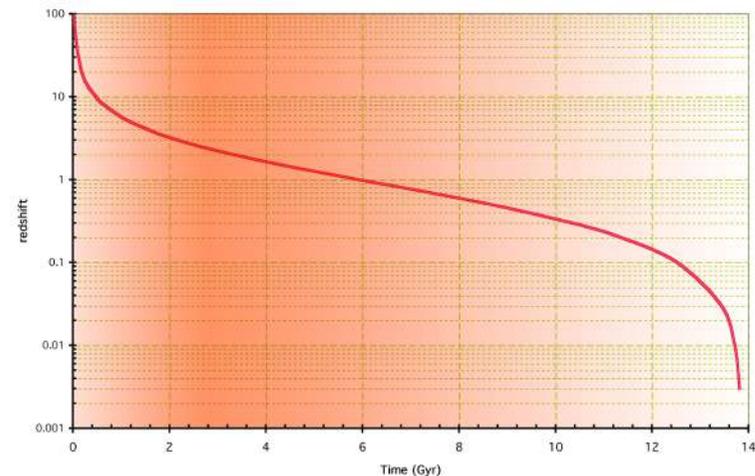
! Par rapport à l'espace environnant, chaque galaxie se déplace avec une vitesse $< c$

Univers observable

$$0 \leq z \leq \infty$$

Redshift ↔ Cosmic Time

$H_0 = 68 \text{ km/s/Mpc}$, $\Omega_{m,0} = 0.3$, $\Omega_{\Lambda,0} = 0.7$



<https://universe-review.ca/115-47-CosmicD2.png>

Les points de l'espace délimités par le rayon de Hubble s'éloignent à une vitesse inférieure à celle de la lumière.

$$0 \leq z \leq 1$$



UNIVERSITÉ
DE GENÈVE
FACULTÉ DES SCIENCES
Département d'astronomie

Cosmologie

Corinne Charbonnel & Stéphane Paltani
Professeur.e.s au Département d'Astronomie UniGE

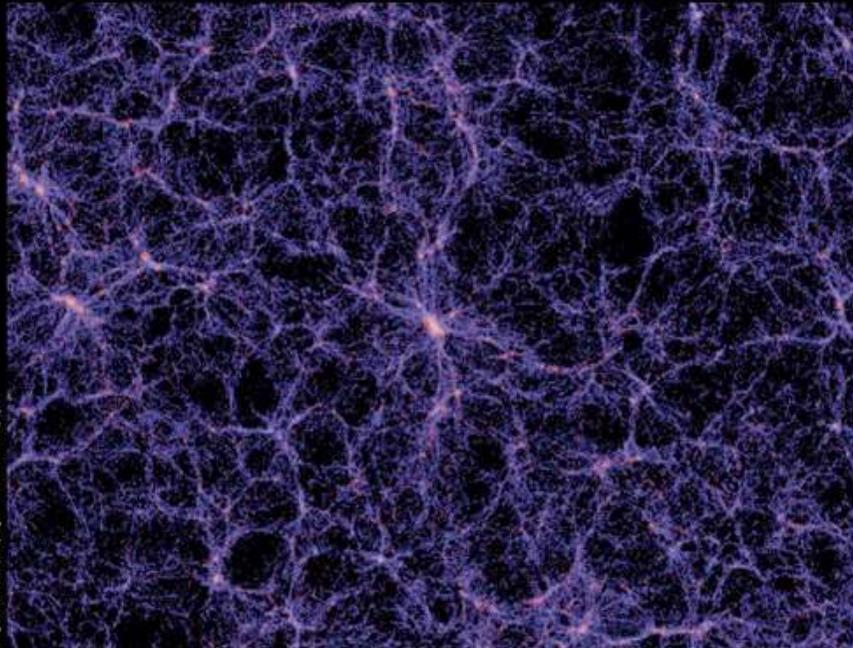


Image : CHIST, MPA, V. Springel/Milkenam Simulation project

le mardi, du 19 septembre au 19 décembre 2023
de 17h45 à 18h45
Auditoire A300 - Sciences II, 30 quai Ernest-Ansermet, Genève

Inscription au cours sur place le 19 septembre
Renseignements : <http://unige.ch/sciences/astro>

Cours 3 – 3 octobre 2023

Les équations de Friedmann