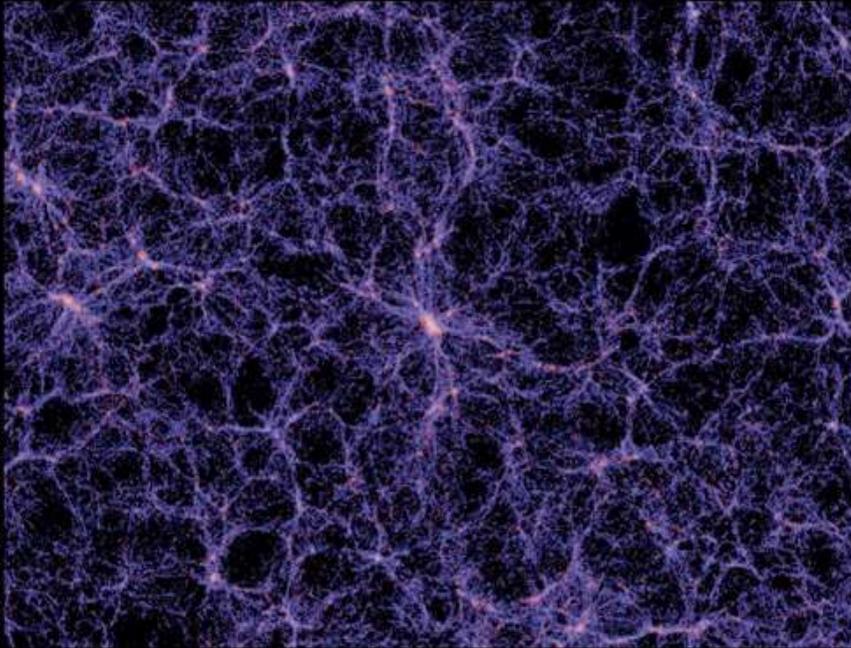


Cosmologie

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>

10A001 – Astronomie générale Cosmologie

En attendant le début du cours,
remplissez ce sondage anonyme

votamatic.unige.ch

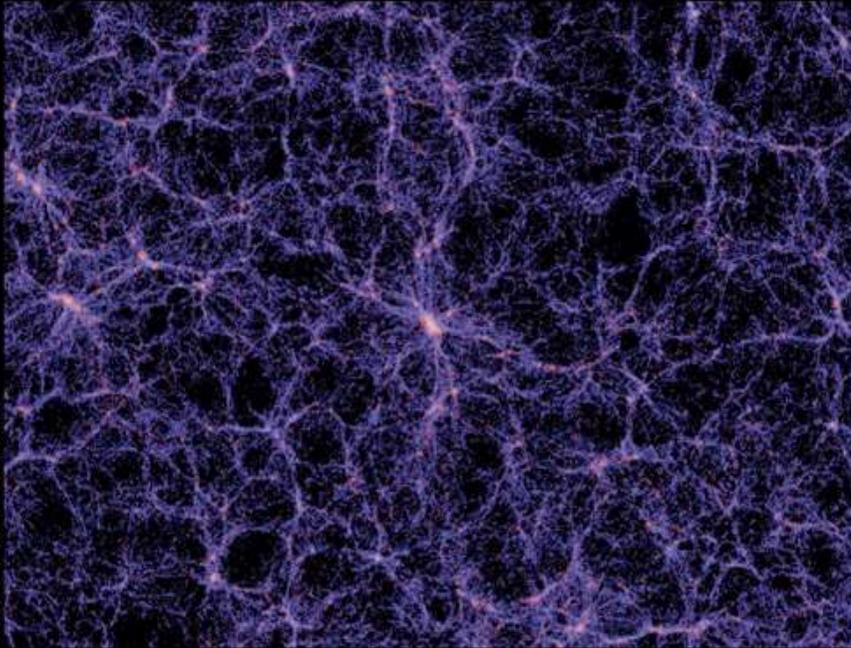
code d'accès

WWVP



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>

10A001 – Astronomie générale Cosmologie

Enseignant.e.s

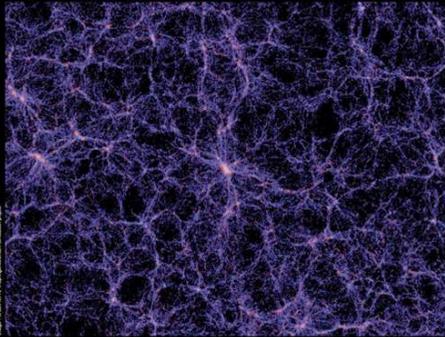
Prof. C.Charbonnel
Prof. S.Paltani
Prof. C.Bonvin

Le mardi, du 19 septembre au 19 décembre
de 17h45 à 18h45.



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>

10A001 – Astronomie générale – Cosmologie Athena

Prof. C.Charbonnel – corinne.charbonnel@unige.ch

Prof. S.Paltani – stephane.paltani@unige.ch

Prof. C.Bonvin – camille.bonvin@unige.ch

Le mardi, du 19 septembre au 19 décembre
de 17h45 à 18h45.

Examen – Oral



Alba Covelo Paz
Doctorante

Alba.Covelopaz@unige.ch
Mardi 15h à 17h en ligne
Mercredi 13h30 présentiel



Antoine Ethève
Etudiant Master

Antoine.Etheve@etu.unige.ch
Mercredi après-midi présentiel



Manon Regamey

Doctorante

Manon.Regamey@etu.unige.ch
Mercredi après-midi présentiel
Jeudi 18h en présentiel

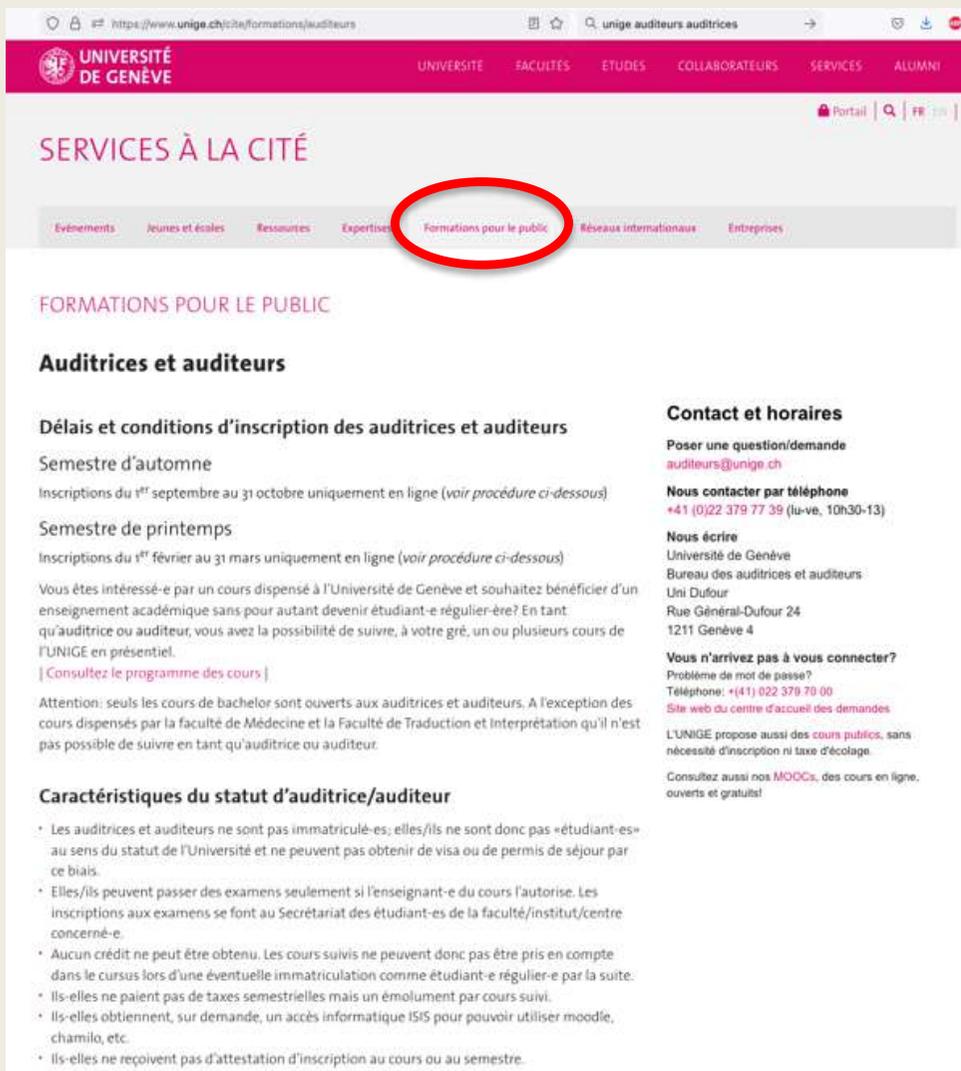


Tobias Schmidt

Post-doctorant

tobias.schmidt@unige.ch
Mercredi 18h présentiel

Inscription en ligne sur le site de l'UniGe



The screenshot shows the UniGe website's navigation menu. The 'Formations pour le public' link is highlighted with a red circle. Below the navigation, the 'FORMATIONS POUR LE PUBLIC' section is visible, with sub-sections for 'Auditrices et auditeurs', 'Délais et conditions d'inscription des auditrices et auditeurs', and 'Contact et horaires'.

Auditrices et auditeurs

Délais et conditions d'inscription des auditrices et auditeurs

Semestre d'automne
Inscriptions du 1^{er} septembre au 31 octobre uniquement en ligne (voir procédure ci-dessous)

Semestre de printemps
Inscriptions du 1^{er} février au 31 mars uniquement en ligne (voir procédure ci-dessous)

Vous êtes intéressé-e par un cours dispensé à l'Université de Genève et souhaitez bénéficier d'un enseignement académique sans pour autant devenir étudiant-e régulier-ère? En tant qu'auditrice ou auditeur, vous avez la possibilité de suivre, à votre gré, un ou plusieurs cours de l'UNIGE en présentiel.

[Consultez le programme des cours](#)

Attention: seuls les cours de bachelors sont ouverts aux auditrices et auditeurs, à l'exception des cours dispensés par la faculté de Médecine et la Faculté de Traduction et Interprétation qu'il n'est pas possible de suivre en tant qu'auditrice ou auditeur.

Contact et horaires

Poser une question/demande
auditeurs@unige.ch

Nous contacter par téléphone
+41 (0)22 379 77 39 (lu-vé, 10h30-13)

Nous écrire
Université de Genève
Bureau des auditrices et auditeurs
Uni Dufour
Rue Général-Dufour 24
1211 Genève 4

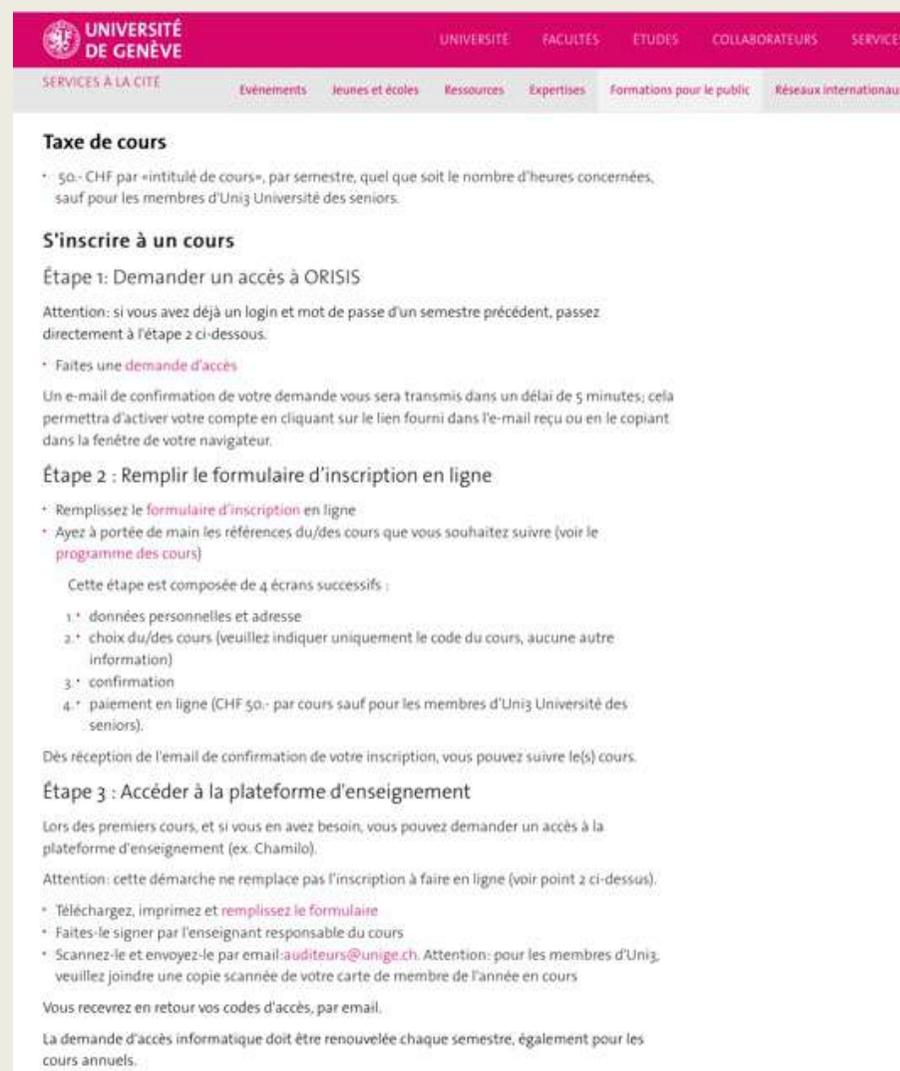
Vous n'arrivez pas à vous connecter?
Problème de mot de passe?
Téléphone: +41 (0)22 379 70 00
[Site web du centre d'accueil des demandes](#)

L'UNIGE propose aussi des cours publics, sans nécessité d'inscription ni taxe d'écotage.

Consultez aussi nos MOOCs, des cours en ligne, ouverts et gratuits!

Caractéristiques du statut d'auditrice/auditeur

- Les auditrices et auditeurs ne sont pas immatriculés-es; elles/ils ne sont donc pas «étudiant-es» au sens du statut de l'Université et ne peuvent pas obtenir de visa ou de permis de séjour par ce biais.
- Elles/ils peuvent passer des examens seulement si l'enseignant-e du cours l'autorise. Les inscriptions aux examens se font au Secrétariat des étudiant-es de la faculté/institut/centre concerné-e.
- Aucun crédit ne peut être obtenu. Les cours suivis ne peuvent donc pas être pris en compte dans le cursus lors d'une éventuelle immatriculation comme étudiant-e régulier-e par la suite.
- Ils-elles ne paient pas de taxes semestrielles mais un émoulement par cours suivi.
- Ils-elles obtiennent, sur demande, un accès informatique ISIS pour pouvoir utiliser moodle, chamilo, etc.
- Ils-elles ne reçoivent pas d'attestation d'inscription au cours ou au semestre.



The screenshot shows the 'SERVICES À LA CITÉ' section of the UniGe website. It details the 'Taxe de cours' (CHF 50.- per semester) and the 'S'inscrire à un cours' process, which involves three steps: requesting access to ORISIS, filling out the registration form, and accessing the teaching platform.

Taxe de cours

- 50.- CHF par «intitulé de cours», par semestre, quel que soit le nombre d'heures concernées, sauf pour les membres d'Unig Université des seniors.

S'inscrire à un cours

Étape 1: Demander un accès à ORISIS

Attention: si vous avez déjà un login et mot de passe d'un semestre précédent, passez directement à l'étape 2 ci-dessous.

- Faites une [demande d'accès](#)

Un e-mail de confirmation de votre demande vous sera transmis dans un délai de 5 minutes; cela permettra d'activer votre compte en cliquant sur le lien fourni dans l'e-mail reçu ou en le copiant dans la fenêtre de votre navigateur.

Étape 2 : Remplir le formulaire d'inscription en ligne

- Remplissez le [formulaire d'inscription](#) en ligne
- Ayez à portée de main les références du/des cours que vous souhaitez suivre (voir le [programme des cours](#))

Cette étape est composée de 4 écrans successifs :

1. données personnelles et adresse
2. choix du/des cours (veuillez indiquer uniquement le code du cours, aucune autre information)
3. confirmation
4. paiement en ligne (CHF 50.- par cours sauf pour les membres d'Unig Université des seniors).

Dès réception de l'email de confirmation de votre inscription, vous pouvez suivre le(s) cours.

Étape 3 : Accéder à la plateforme d'enseignement

Lors des premiers cours, et si vous en avez besoin, vous pouvez demander un accès à la plateforme d'enseignement (ex. Chamilo).

Attention: cette démarche ne remplace pas l'inscription à faire en ligne (voir point 2 ci-dessus).

- Téléchargez, imprimez et [remplissez le formulaire](#)
- Faites-le signer par l'enseignant responsable du cours
- Scannez-le et envoyez-le par email: auditeurs@unige.ch. Attention: pour les membres d'Unig, veuillez joindre une copie scannée de votre carte de membre de l'année en cours

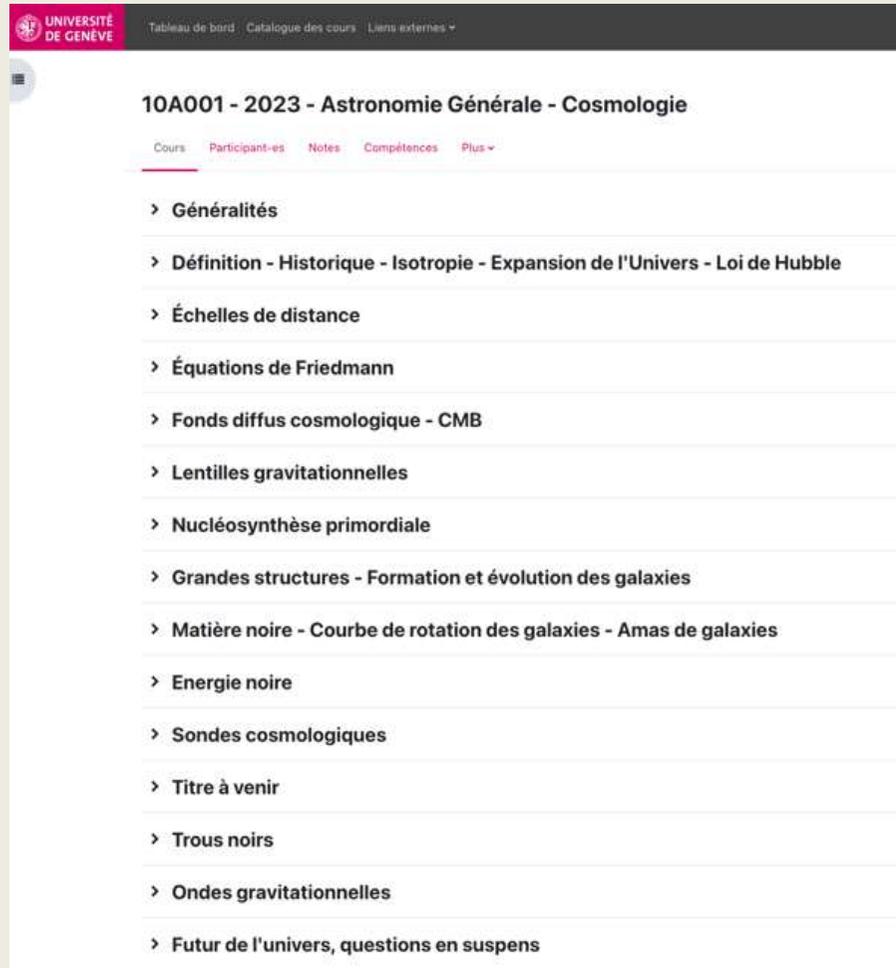
Vous recevrez en retour vos codes d'accès, par email.

La demande d'accès informatique doit être renouvelée chaque semestre, également pour les cours annuels.

+ email à chantal.tacoy@unige.ch

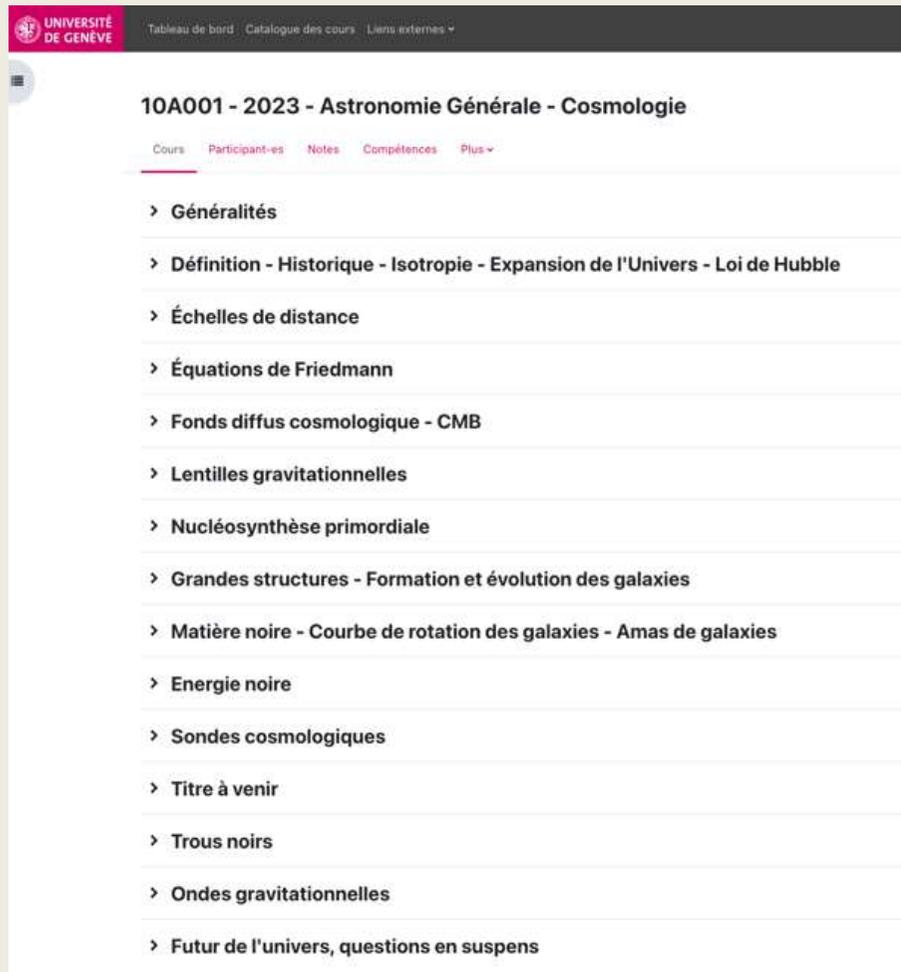
Sujet: Inscription cours public 10A001 2022

Corps du message: Nom, prénom, numéro de téléphone, adresse email



The screenshot shows the Moodle interface for the course '10A001 - 2023 - Astronomie Générale - Cosmologie'. The header includes the University of Geneva logo and navigation links: 'Tableau de bord', 'Catalogue des cours', and 'Liens externes'. Below the course title, there are tabs for 'Cours', 'Participant-es', 'Notes', 'Compétences', and 'Plus'. The main content is a list of topics, each with a right-pointing chevron icon:

- > Généralités
- > Définition - Historique - Isotropie - Expansion de l'Univers - Loi de Hubble
- > Échelles de distance
- > Équations de Friedmann
- > Fonds diffus cosmologique - CMB
- > Lentilles gravitationnelles
- > Nucléosynthèse primordiale
- > Grandes structures - Formation et évolution des galaxies
- > Matière noire - Courbe de rotation des galaxies - Amas de galaxies
- > Energie noire
- > Sondes cosmologiques
- > Titre à venir
- > Trous noirs
- > Ondes gravitationnelles
- > Futur de l'univers, questions en suspens



UNIVERSITÉ DE GENÈVE

Tableau de bord Catalogue des cours Liens externes

10A001 - 2023 - Astronomie Générale - Cosmologie

Cours Participant-es Notes Compétences Plus

- > Généralités
- > Définition - Historique - Isotropie - Expansion de l'Univers - Loi de Hubble
- > Échelles de distance
- > Équations de Friedmann
- > Fonds diffus cosmologique - CMB
- > Lentilles gravitationnelles
- > Nucléosynthèse primordiale
- > Grandes structures - Formation et évolution des galaxies
- > Matière noire - Courbe de rotation des galaxies - Amas de galaxies
- > Energie noire
- > Sondes cosmologiques
- > Titre à venir
- > Trous noirs
- > Ondes gravitationnelles
- > Futur de l'univers, questions en suspens

Slides et enregistrement mediaserver Etudiant.e.s Bachelor UniGe et Athena

**Ce cours est enregistré et mis en ligne
sur les plateformes UNIGE.**

*This course is recorded and made
available online on UNIGE platforms.*

https://www.unige.ch/sciences/astro/fr/activitespublic/cours-grand-public/ unige auditeurs auditrices

UNIVERSITÉ DE GENÈVE

UNIVERSITÉ FACULTÉS ÉTUDES COLLABORATEURS SERVICES ALUMNI

Portail FR EN

DÉPARTEMENT D'ASTRONOMIE

Actualités Recherche Projets Enseignement Séminaires, Colloques **Astronomie & Cité** Services, Informations Contacts

ASTRONOMIE & CITÉ

Cours Grand Public

COURS 10A001 (1051) ASTRONOMIE GÉNÉRALE

Depuis de nombreuses années, l'Observatoire de Genève organise un "Cours Grand Public" destiné aux nombreuses personnes intéressées par l'Astronomie. Chaque année un nouveau thème est abordé et est suivi par de nombreux auditeurs.

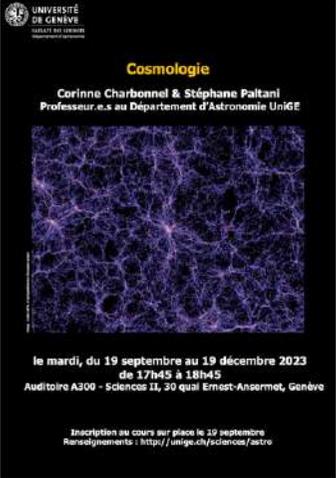
COSMOLOGIE

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

Corinne Charbonnel et Stéphane Paltani, professeur.e.s au Département d'Astronomie

Dans ce cours consacré à la cosmologie, nous vous ferons découvrir les théories décrivant l'origine, la nature, la structure et l'évolution de l'Univers dans son ensemble, ainsi que les observations astronomiques qui les sous-tendent. Nous découvrirons des phénomènes astrophysiques passionnants et présenterons les futurs instruments dont l'objectif est de lever le voile sur les mystères que recèle encore l'Univers.

Le cours sera donné par les professeur.e.s Corinne Charbonnel et Stéphane Paltani, et inclura une leçon de la professeure Camille Bonvin. Il est ouvert au grand public et ne requiert pas de connaissances préalables en astronomie. Il peut être choisi comme cours à option par les étudiant.e.s de Bachelor (filières scientifiques ou non, sauf physique). Il est proposé aux élèves du programme Athena de la Faculté des Sciences.



UNIVERSITÉ DE GENÈVE
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>

ARCHIVES DES COURS

Archives Cours Grand Public

- 2022-2023 "Les grandes missions spatiales pour

COSMOLOGIE

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

Corinne Charbonnel et Stéphane Paltani, professeur.e.s au Département d'Astronomie

Dans ce cours consacré à la cosmologie, nous vous ferons découvrir les théories décrivant l'origine, la nature, la structure et l'évolution de l'Univers dans son ensemble, ainsi que les observations astronomiques qui les sous-tendent. Nous découvrirons des phénomènes astrophysiques passionnants et présenterons les futurs instruments dont l'objectif est de lever le voile sur les mystères que recèle encore l'Univers.

Le cours sera donné par les professeur.e.s Corinne Charbonnel et Stéphane Paltani, et inclura une leçon de la professeure Camille Bonvin. Il est ouvert au grand public et ne requiert pas de connaissances préalables en astronomie. Il peut être choisi comme cours à option par les étudiant.e.s de Bachelor (filières scientifiques ou non, sauf physique). Il est proposé aux élèves du programme Athena de la Faculté des Sciences.

Cours ouvert au public						
Année Académique 2023						
1051	Cosmologie	Professeur.e.s C.Charbonnel, S.Paltani	CR	H	1h	Mardi 17h45 - 18h45
Remarques :						
Affiche et description du cours :		et				
Support du cours :		ICI (si le cours a été enregistré, le lien mediaserver se trouve sur la 1ère slide de chaque cours)				
Séance d'information et inscriptions :		le premier jour du cours : 19 septembre 2023 de 17h45 à 18h45 à Sciences II, salle A300				
Renseignements :		tél. 022 379 22 00				
Cours :		du 19 septembre 2023 au 19 décembre 2023				

login: cours-astro
mot de passe: archimede

Examen
Etudiant.e.s Bachelor UniGe

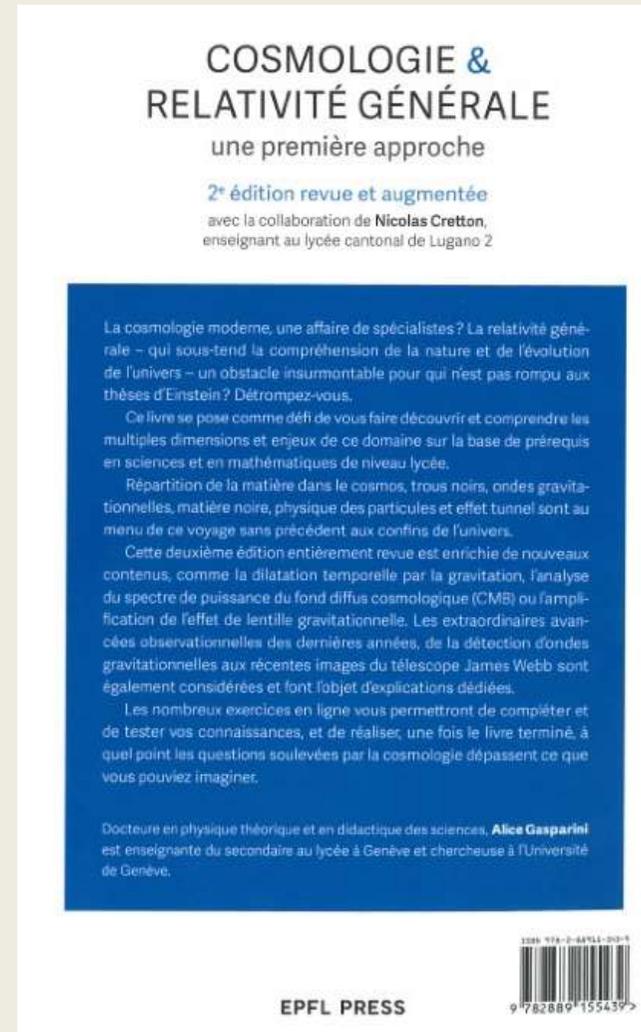
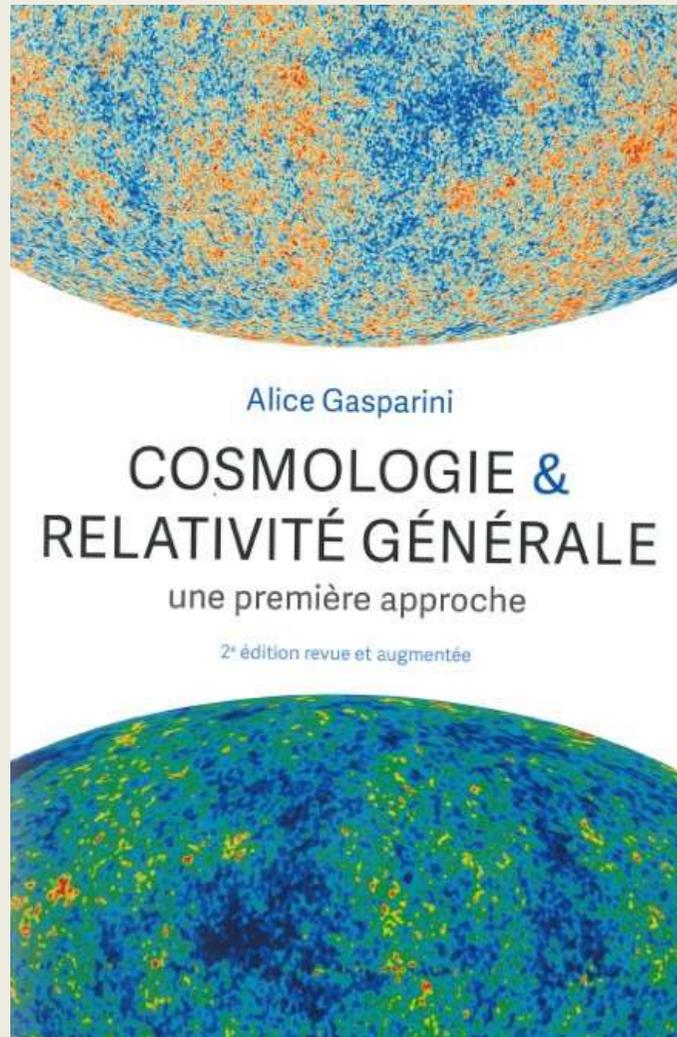
Examen écrit (questions ouvertes et qcm)

Notes de cours autorisées

Questionnaire test anonyme au cours du semestre

Examen
Athena

Présentation orale sur une question spécifique traitée en cours

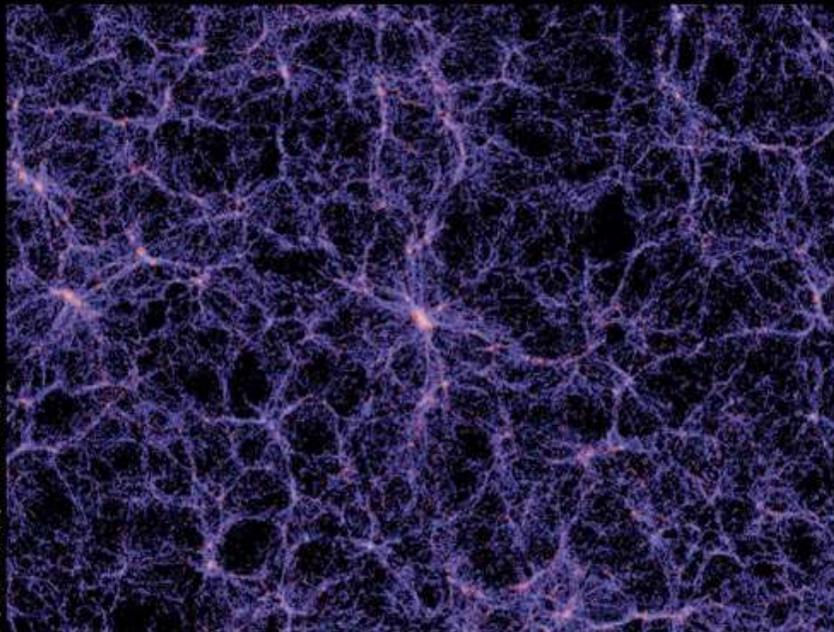


(niveau maturité/bac)

Barbara Ryden: Introduction to Cosmology
Stephen Sarjeant: Observational Cosmology

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

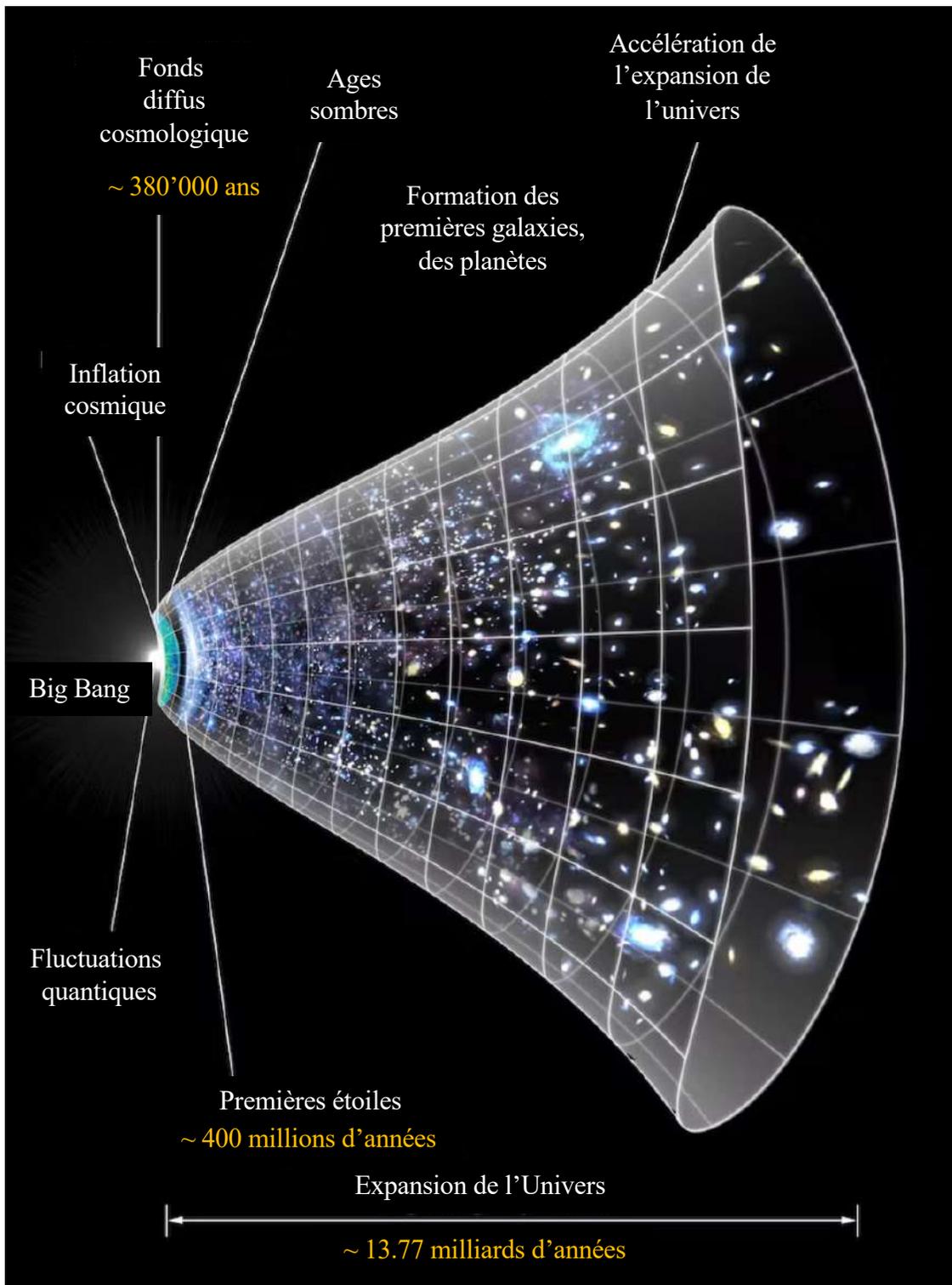
Inscription au cours sur place le 19 septembre
Renseignements : <http://unige.ch/sciences/astro>

Cours 1 – 19 septembre 2023

<https://mediaserver.unige.ch/play/196613>

Qu'est-ce que la cosmologie ?
Historique
Expansion de l'univers
Isotropie

> Définition - Historique - Isotropie - Expansion de l'Univers - Loi de Hubble	
> Échelles de distance	Charbonnel
> Équations de Friedmann	Paltani
> Fonds diffus cosmologique - CMB	Paltani
> Lentilles gravitationnelles	Paltani
> Nucléosynthèse primordiale	Charbonnel
> Grandes structures - Formation et évolution des galaxies	Charbonnel Charbonnel
> Matière noire - Courbe de rotation des galaxies - Amas de galaxies	
> Energie noire	Bonvin
> Sondes cosmologiques	Paltani
> Titre à venir	à définir
> Trous noirs	Paltani
> Ondes gravitationnelles	Paltani
> Futur de l'univers, questions en suspens	Charbonnel



Définition

Cosmologie

Kosmos «monde» – *Logia* «discours»

Branche de l'astrophysique qui étudie l'origine, la nature, la structure, et l'évolution de l'univers dans son ensemble.

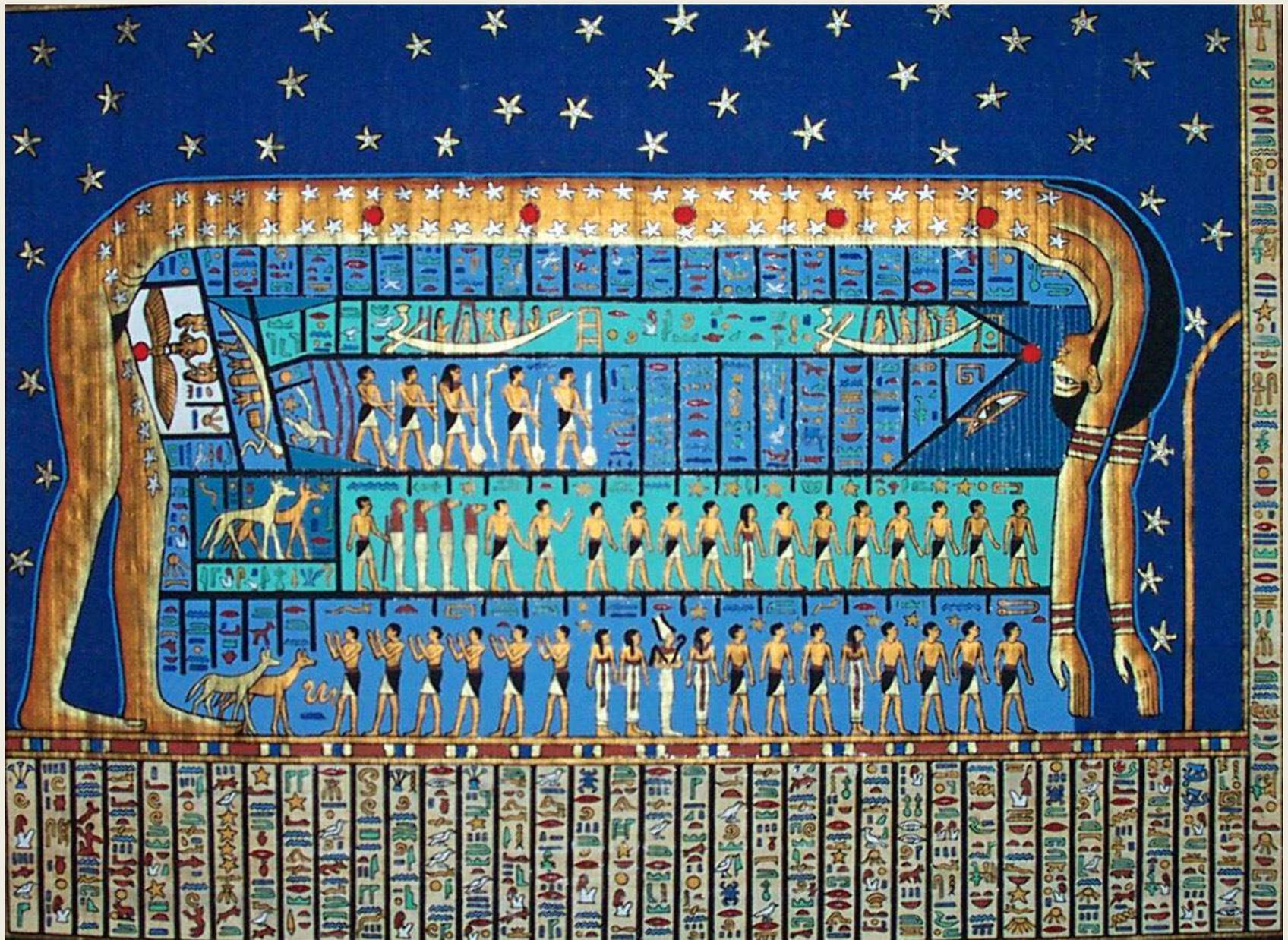
Science qui utilise et relie

- l'astrophysique observationnelle et théorique
- les domaines les plus fondamentaux de la physique théorique

Les observations de base

1. L'univers est isotrope (identique dans toutes les directions) et homogène
2. L'univers est en expansion

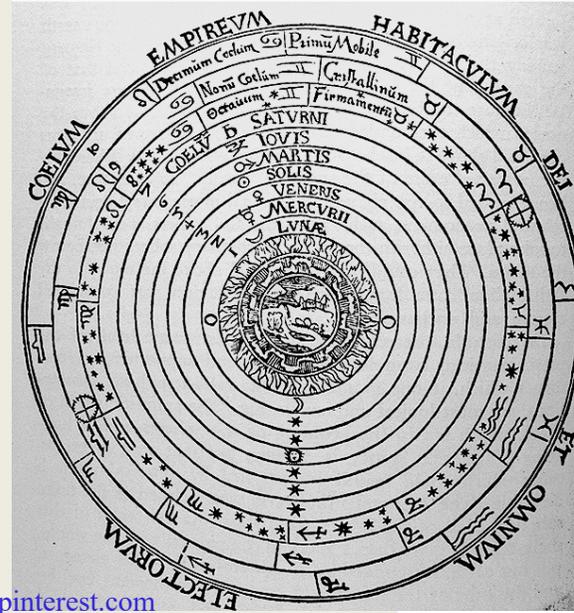
La déesse Nout – Egypte ancienne



L'Univers géocentrique



Ptolémée (90-168)
(Juste de Gand, musée du Louvre)

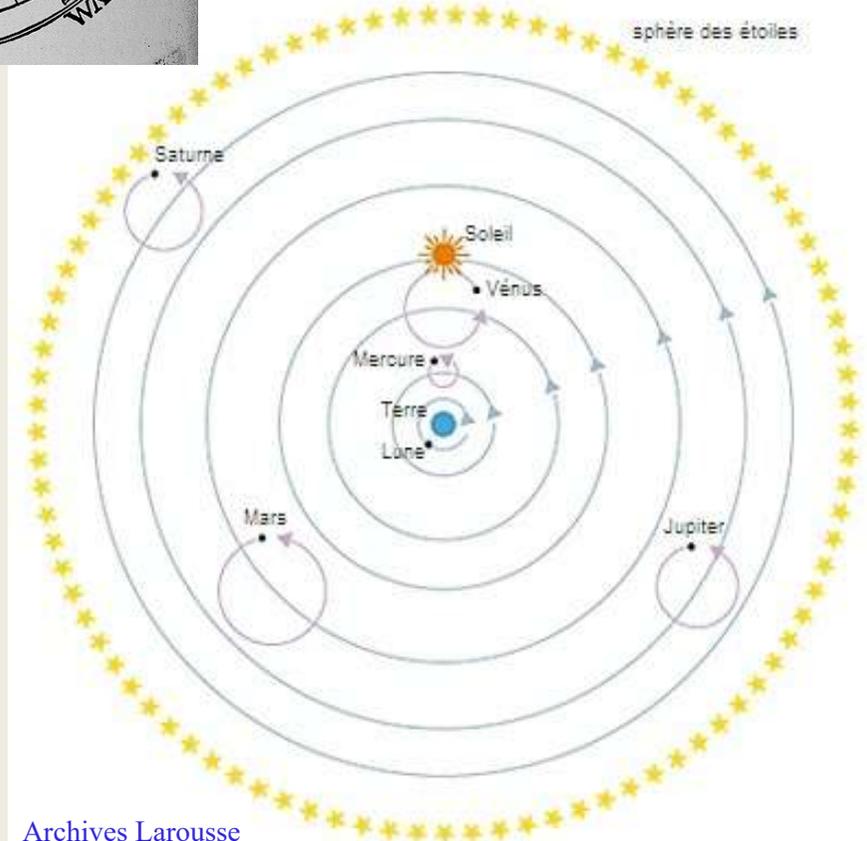


[pinterest.com](https://www.pinterest.com)

Almageste (~ 140; livre 1, IV)
Sphère des fixes



L'école d'Athènes
(Raphael, Vatican)



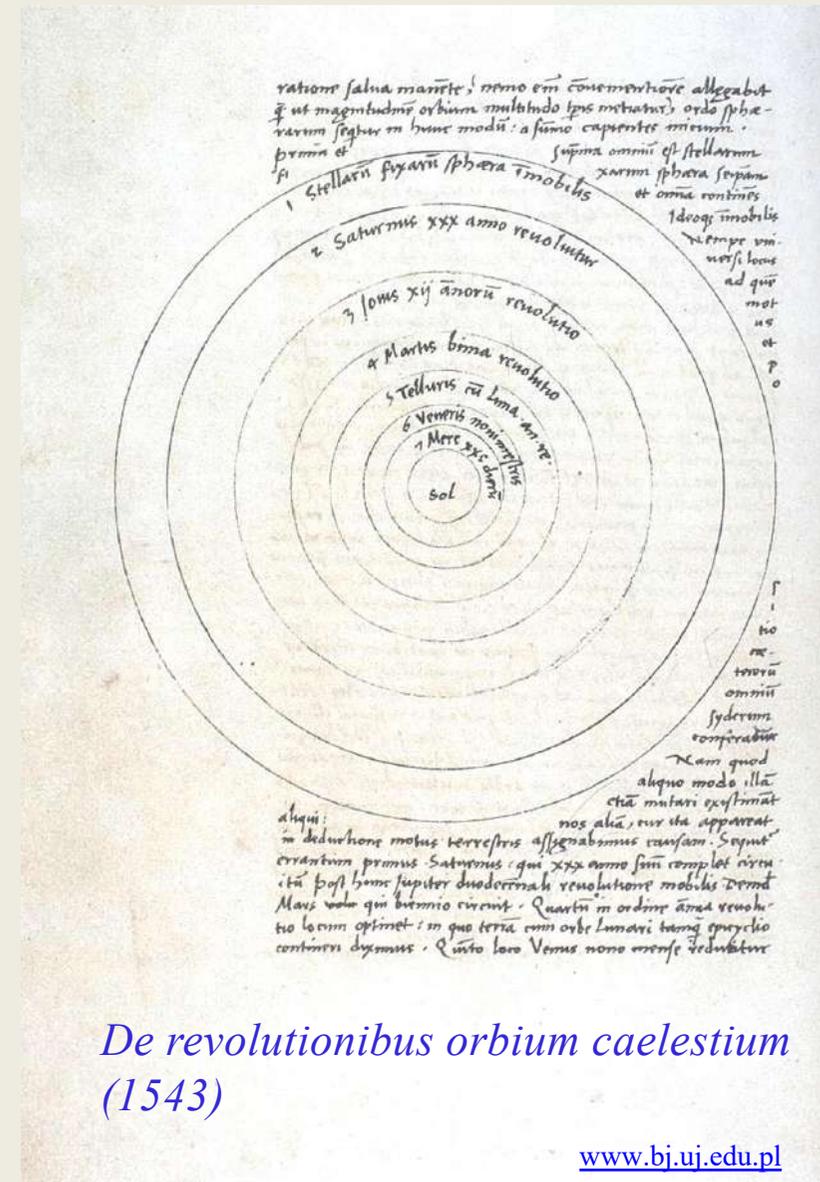
Archives Larousse

L'univers héliocentrique



Copernic (1473-1543)

L'astronome Copernic ou Conversation avec Dieu
(Jan Matejko 19^{ème} siècle)



De revolutionibus orbium caelestium
(1543)

www.bj.uj.edu.pl

L'espace infini

Un nombre infini d'étoiles à des distances variables



Thomas Digges (1546-1595)

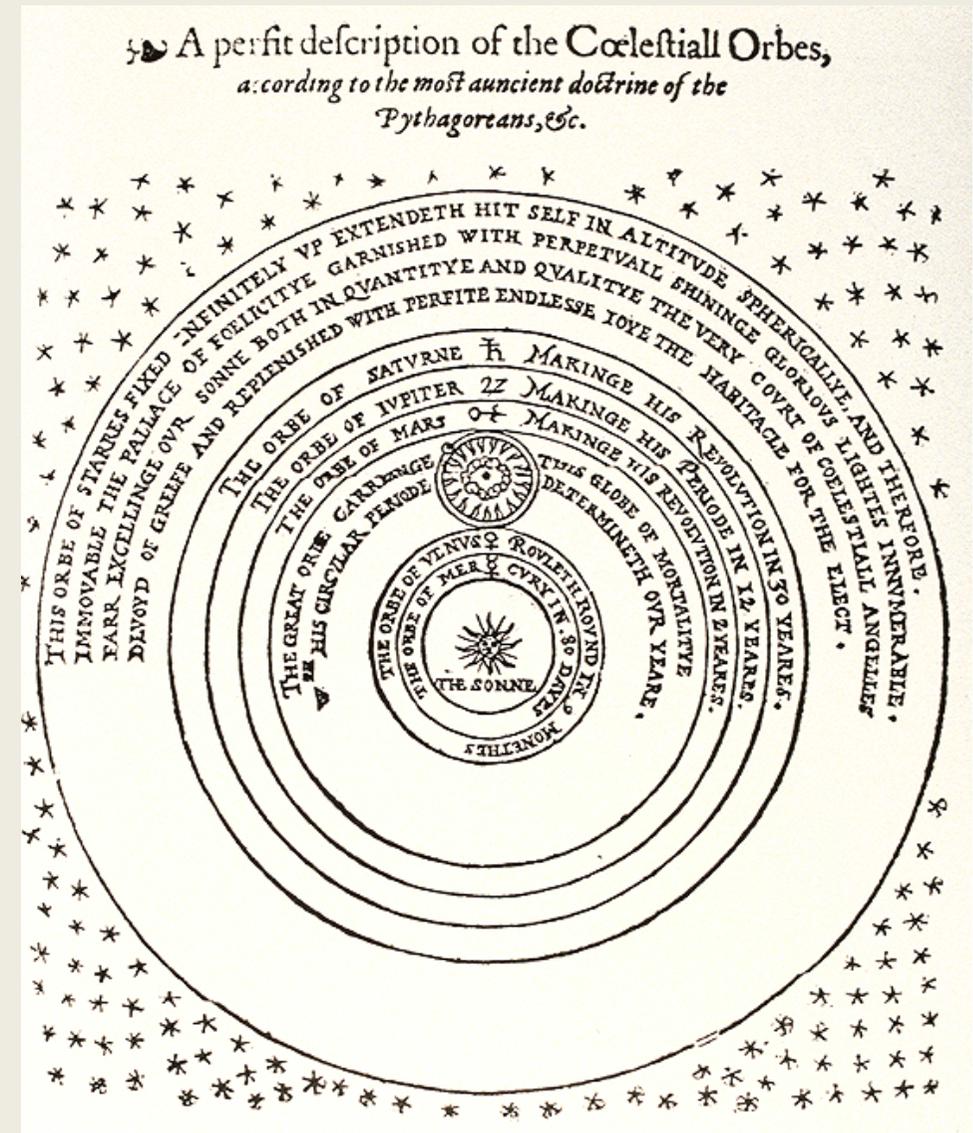


Illustration de l'univers copernicien par Thomas Digges

Source: wikipedia

L'espace infini Un univers rempli de soleils

GIORDANO
BRUNO
Nolano.

De l'infinito vniuerso
et *Mondi.*

*All' illustrissimo Signor di
Mauifsiero.*



Stampato in Venetia.
Anno. M. D. LXXXIII.

[N. 69]



Giordano Bruno
(1548 – 1600)

De l'infinito, universo et mundi
L'infini, l'univers et les mondes (1584)
Source: <http://fototeca-gilardi.com>

A perfit description of the Cœlestiall Orbes,
according to the most auncient doctrine of the
Pythagoreans, &c.

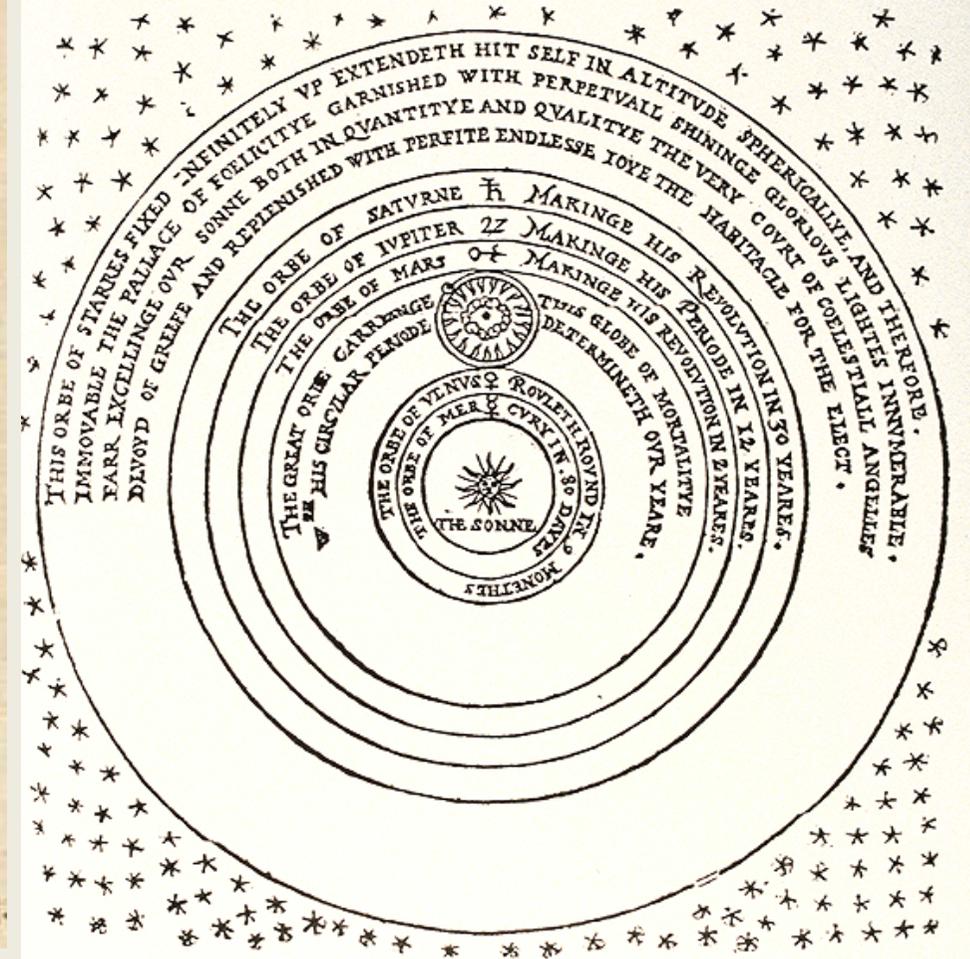
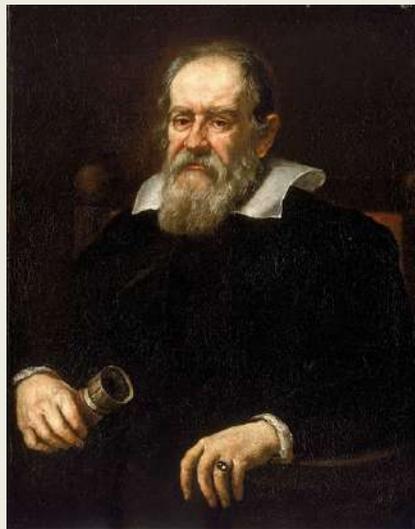


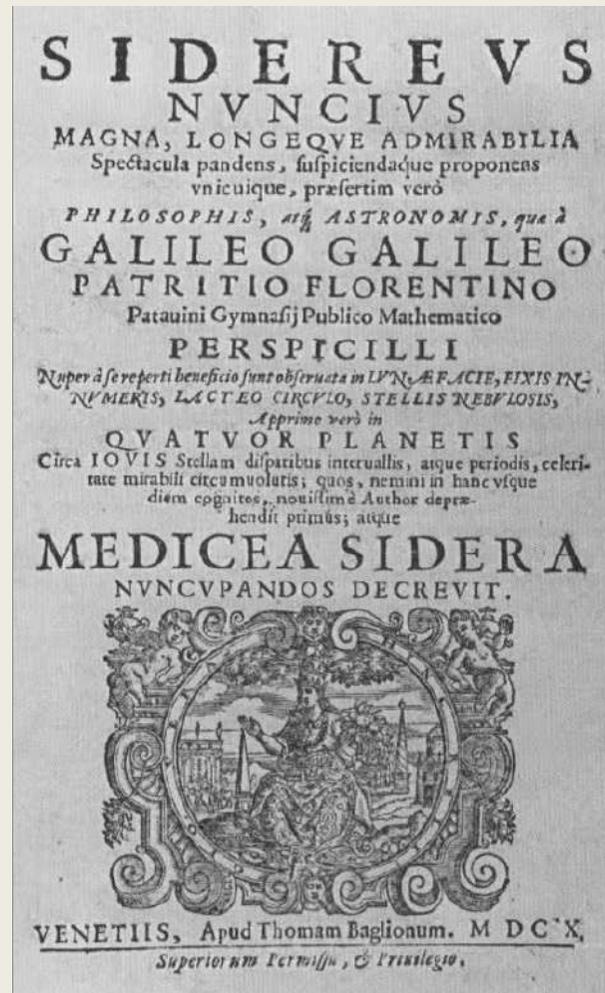
Illustration de l'univers copernicien par Thomas Digges
Source: wikipedia

La nature de la Voie Lactée

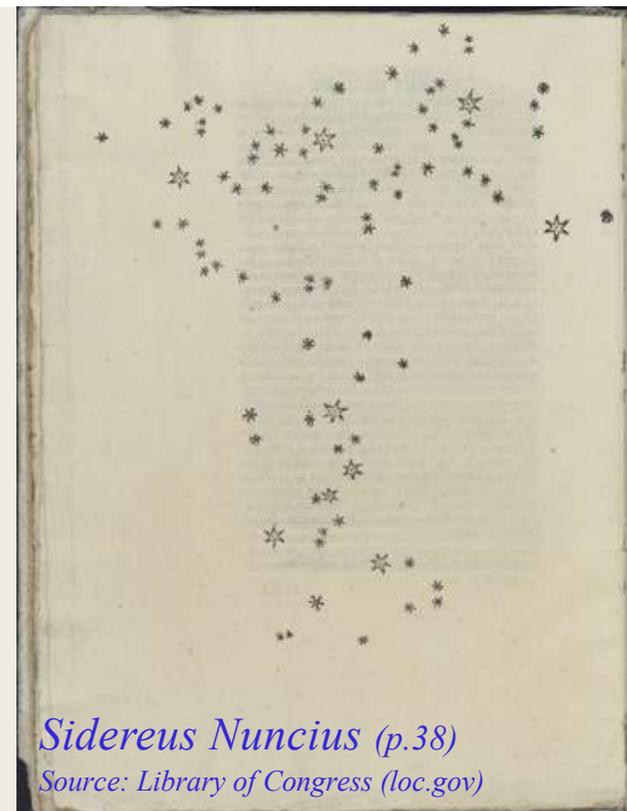
Etoiles individuelles



Galileo Galilei - Opticien et astronome
(1564-1642)
Portrait par Justus Sustermans (1636)



Sidereus Nuncius
(Le messager céleste – 1610)



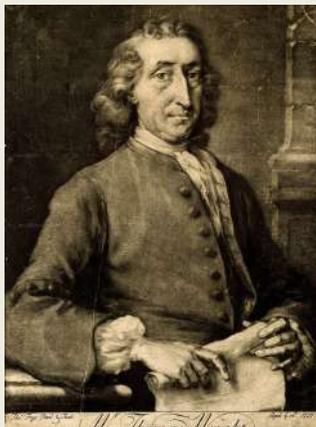
Sidereus Nuncius (p.38)
Source: Library of Congress (loc.gov)



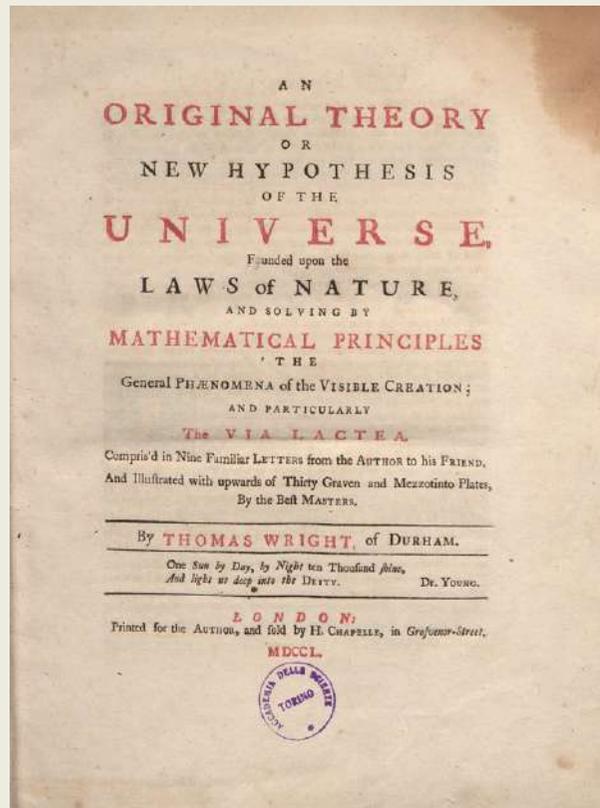
Voie Lactée au-dessus de la Vallée Blanche
au cœur du massif du Mont-Blanc
Source: [Jérôme Obiols](#)

La structure de la Voie Lactée

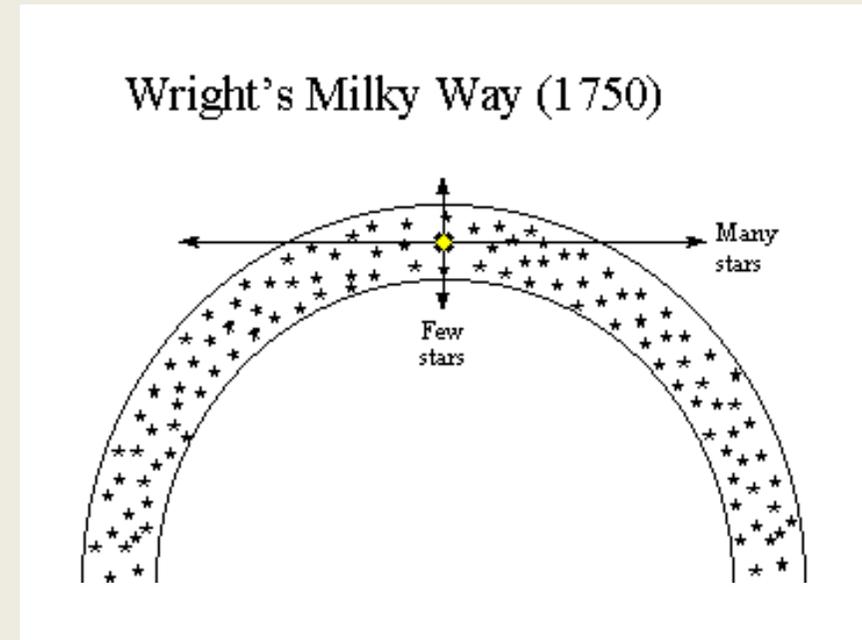
Une couche d'étoiles



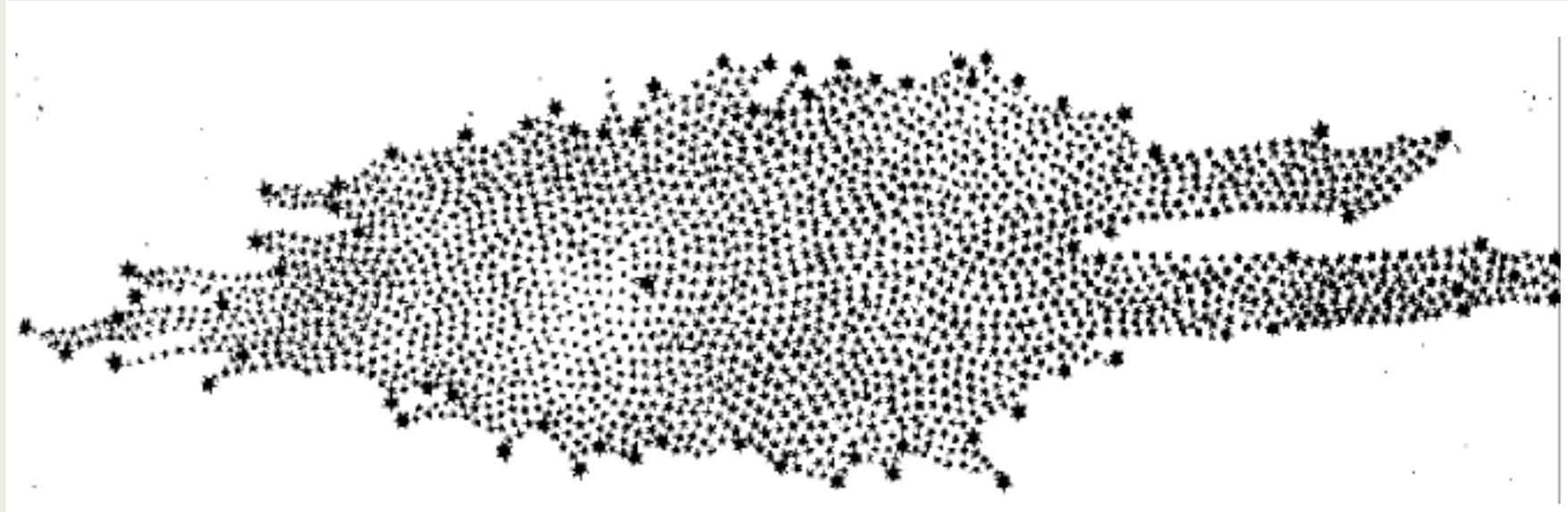
Thomas Wright (1711-1786)



(1750)



La forme de la Voie Lactée



*« On the construction of the Heavens »
Philosophical Transactions of the Royal Society of London (1785)*



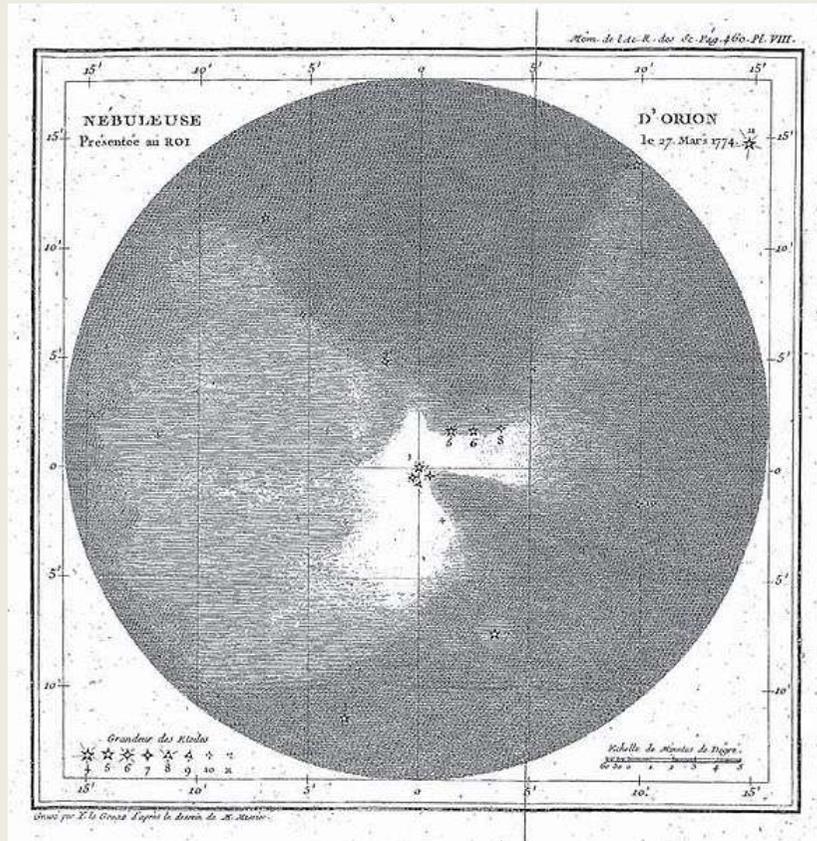
Friedrich William Herschel
(1738-1822)

La structure des «nébuleuses»

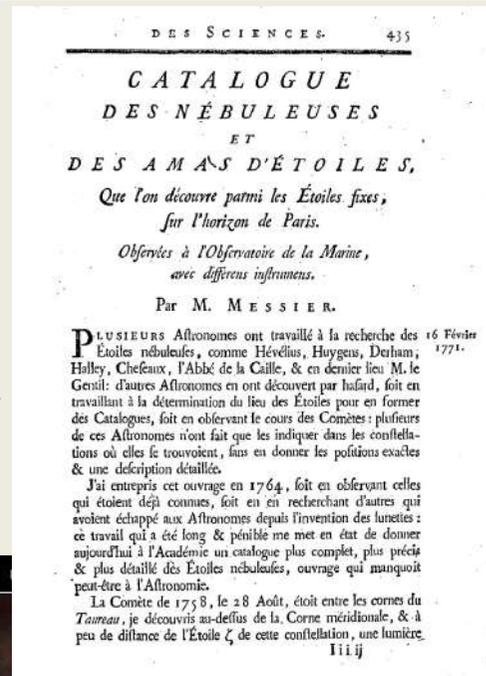


Charles Messier
(1730-1817)

Catalogue des nébuleuses et amas d'étoiles Messier (1760 +)



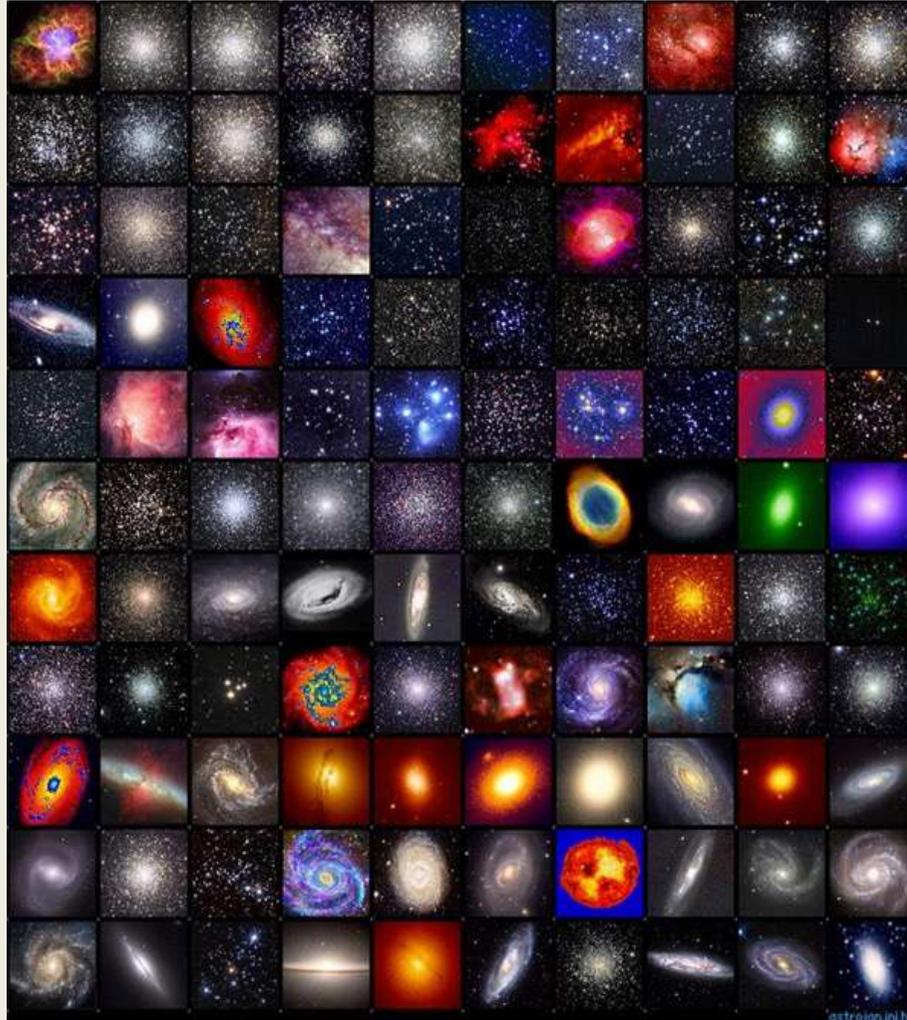
Dessin de la nébuleuse d'Orion (M42) – Messier (1771)



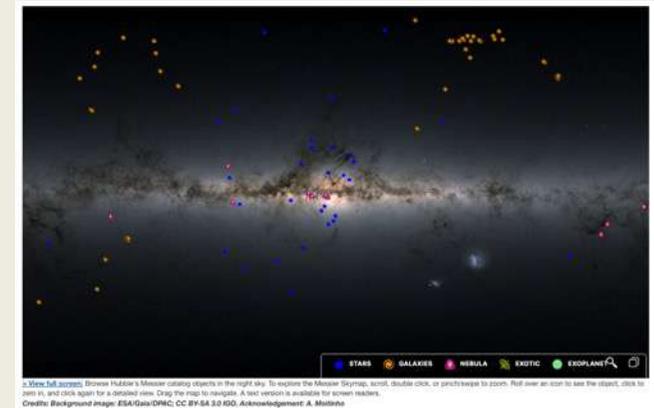
La structure des nébuleuses L'univers en constant changement



Charles Messier
(1730-1817)

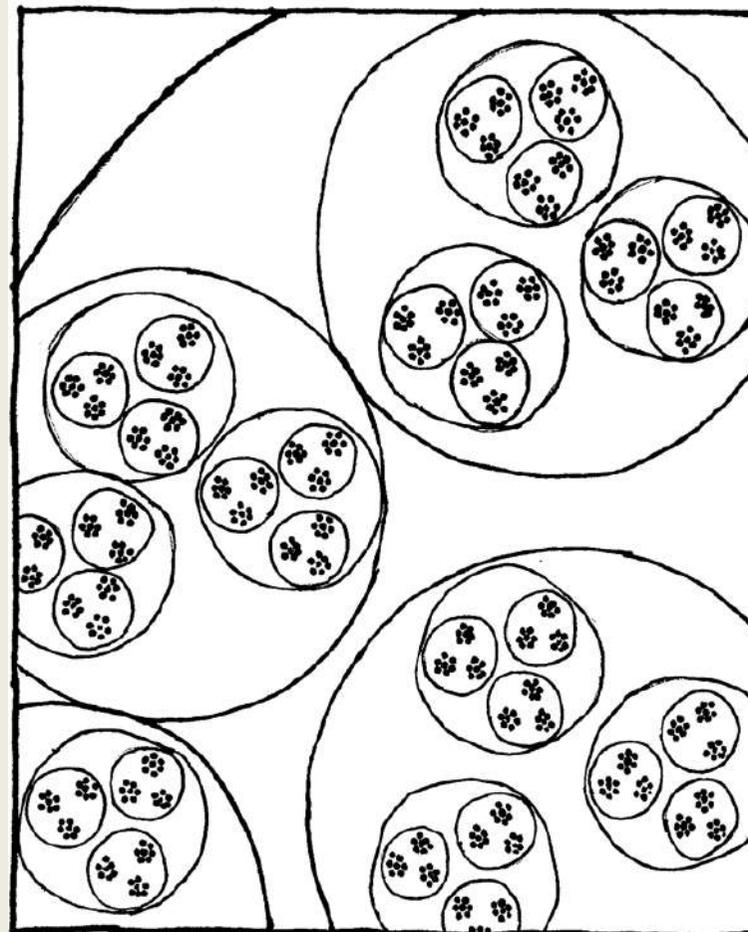


110 objets de natures très différentes
(41 dans l'édition de 1774)



Catalogue des nébuleuses et amas d'étoiles – Messier (1760 +)

Source: <http://observatoire-valcourt.over-blog.fr/>



Kant (1724-1804)

Histoire générale de la nature et théorie du ciel (1755)

Laplace

« Une nébuleuse n'est pas un unique et énorme soleil, mais un système de nombreux soleils, rassemblés en raison de leur distance dans un espace si étroit, que leur lumière, qui serait imperceptible pour chacun d'eux isolément, parvient, grâce à leur innombrable quantité, à produire une blancheur pâle et uniforme. »

Source: Harrison (2000)

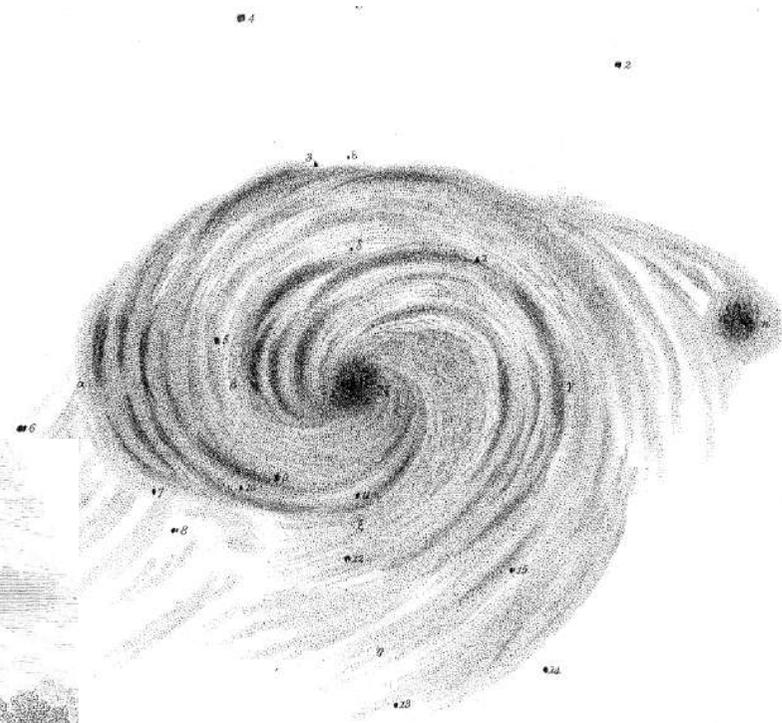
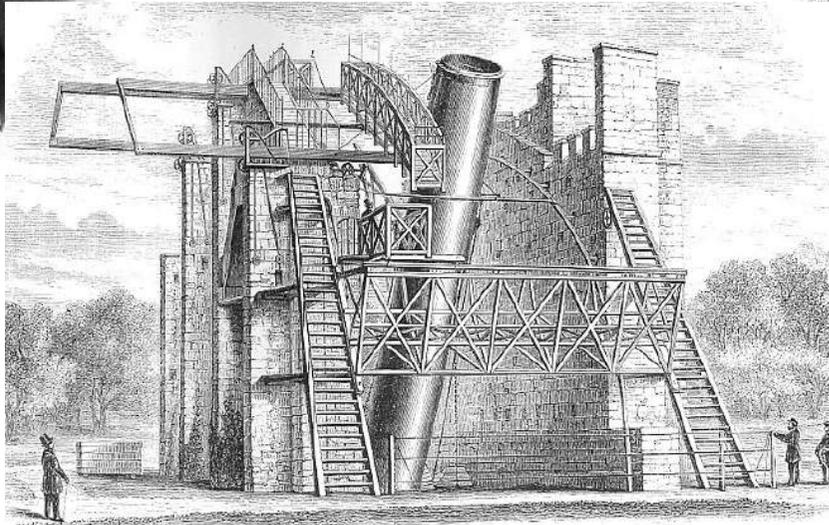
« *Cosmology: the science of the Universe, CUP* »

Vers une compréhension de la nature des galaxies

- **William Parsons (Lord Rosse) : 1800-1867**
riche astronome irlandais



- *Découverte de « nébuleuses » régulières et de bras spiraux*
- *Existence de sources ponctuelles*



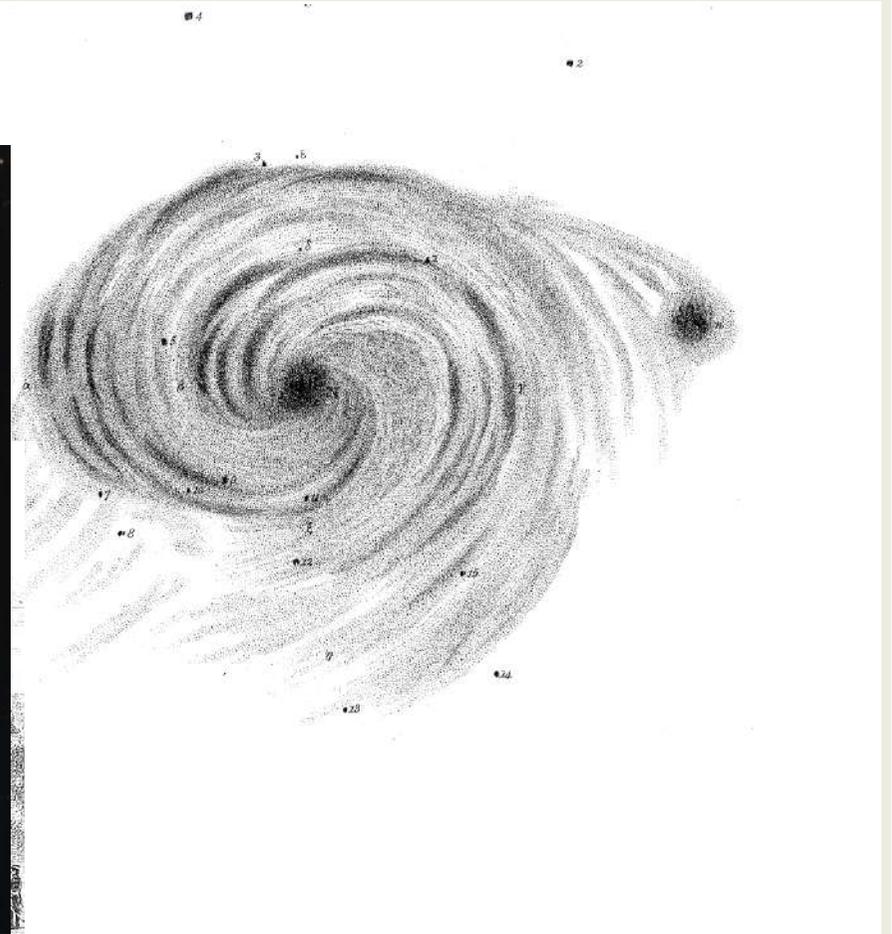
Dessin du « Tourbillon » fait en 1850

Télescope Léviathan de 183 cm
Birr Castle, Irlande

Slide courtesy D.Schaerer

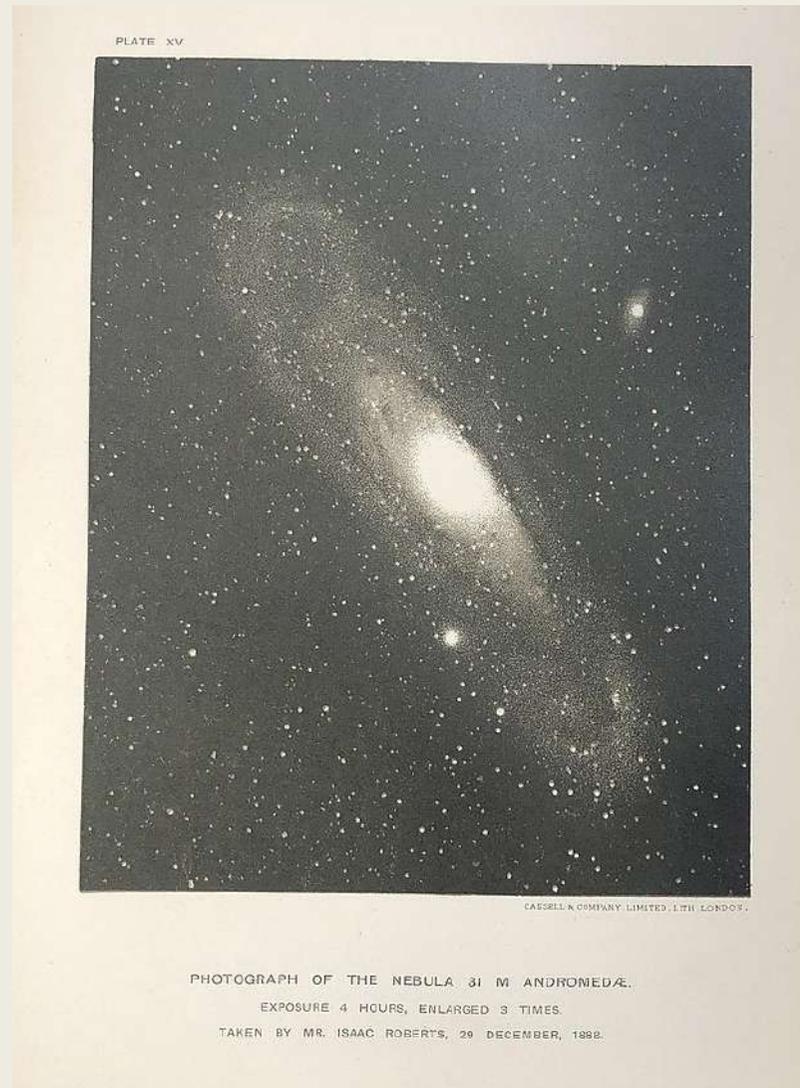
Vers une compréhension de la nature des galaxies

- **William Parsons (Lord Rosse) : 1800-1867**
riche astronome irlandais



Slide courtesy D.Schaerer

Vers une compréhension de la nature des galaxies



Isaac Roberts
(1885-1972)

Première photographie recensée de la galaxie d'Andromède
Source: Wikipedia

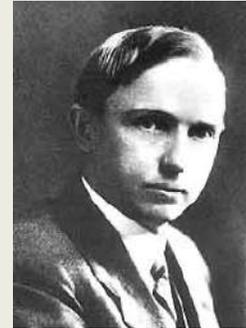
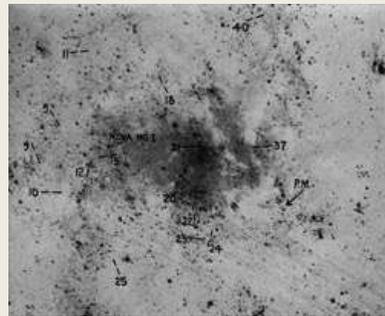
Les « nébuleuses » sont-elles à l'intérieur ou à l'extérieur de la Voie Lactée?

→ Indicateurs de distance – Chandelles standard (leçon 20230926)



Henrietta Lewitt
(1861-1921 Harvard)

Relation période-luminosité des **Céphéides** dans la Voie Lactée et dans le Petit Nuage de Magellan (1912)



Céphéides (RR Lyrae)
dans les amas globulaires de la Voie Lactée
→ (1917) Dimensions de la Galaxie
⊙ estimé ~ 300'000 a.l.
⊙ réel ~ 90'000 à 150'000 a.l.

Harlow Shapley
(1885-1972)



Nova
dans la nébuleuse d'Andromède
→ (1917) Distance estimée
~ 500'000 a.l.
Distance réelle ~ 2 millions a.l.

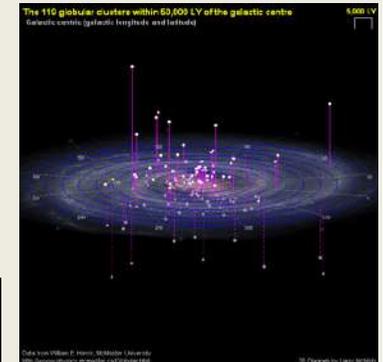
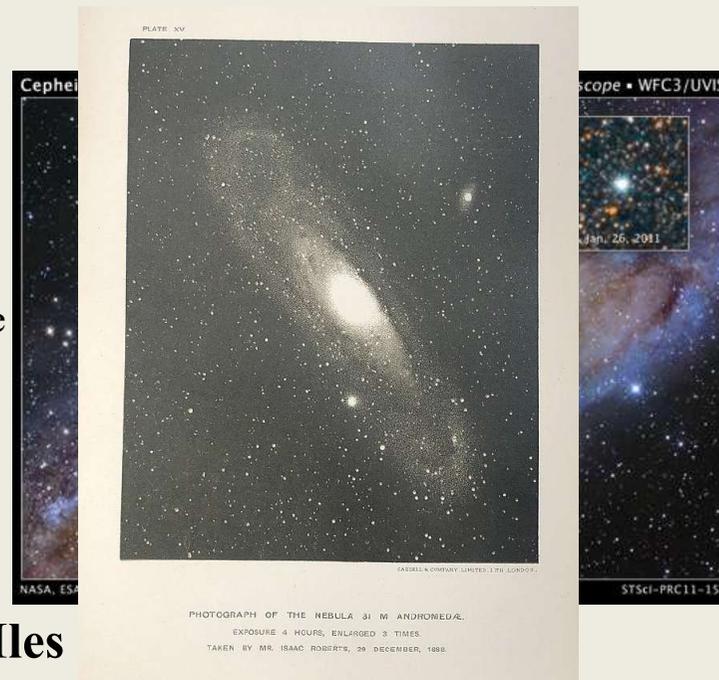
Heber Doust Curtis
(1872-1942)



Edwin Hubble
(1889-1953)

Céphéides
dans la nébuleuse d'Andromède
→ (1924) Distance estimée
~ 900'000 a.l.
Distance réelle ~ 2 millions a.l.
→ À l'extérieur

Concept d'Univers – Iles Galaxies semblables à la Voie Lactée → Univers extragalactique



Echelles de distances dans l'univers

1 unité astronomique (u.a.) = 150 millions de km
= distance moyenne Terre – Soleil

1 année lumière (a.l.) $\sim 3.1 \times 10^{13}$ km
= distance parcourue par la lumière en 1 an

1 parsec (pc) ~ 3.25 a.l. $\sim 3.09 \times 10^{13}$ km
= distance d'une étoile dont la parallaxe est la seconde d'arc

1 kilo-parsec (kpc) ~ 1000 pc
= ordre de grandeur de la dimension d'une galaxie

1 mega-parsec (Mpc) $\sim 10^6$ pc
= ordre de grandeur de la distance entre galaxies

Soleil – Terre 8 minutes lumière

Distance à l'étoile la plus proche
(Proxima du Centaure)

$\sim 4 \times 10^{13}$ km ~ 4 années lumière ~ 1.3 pc
Centre de la Voie Lactée ~ 8500 pc

Distance à la galaxie la plus proche
(Grand Nuage de Magellan)

$\sim 150'000$ années lumière ~ 50 kpc

Distance à M31 (galaxie d'Andromède) ~ 0.7 Mpc

Distance à l'amas de galaxies Virgo ~ 15 Mpc

Distance entre les amas de galaxies: s'exprime en Mpc (ou en redshift)

Masse et luminosité

Masse du soleil : $M_{\odot} \sim 2 \times 10^{30}$ kg

Luminosité du soleil : $L_{\odot} \sim 3.8 \times 10^{26}$ watts

Masse de la Voie Lactée : $L_{MW} \sim 10^{12} M_{\odot}$

Luminosité de la Voie Lactée : $L_{MW} \sim 3.6 \times 10^{10} M_{\odot}$

Temps

Million d'années – Myr

Milliard d'années – Gyr

Âge du soleil ~ 4.56 Gyr (météorites)

Temps de vie du soleil ~ 10 Gyr

Temps de vie d'une étoile de $100 M_{\odot} \sim 2$ Myr

Âge de l'univers ~ 13.77 Gyr

Le rougissement du spectre des nébuleuses (avant de connaître leur distance, i.e., leur nature extragalactique)



Vesto Slipher

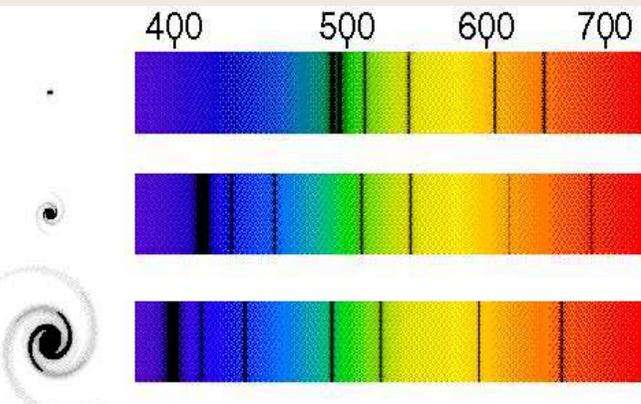
(1875 – 1969)

Etude du spectre des

« nébuleuses brillantes » (1912)

Les raies présentes dans le spectre de la plupart des nébuleuses observées ne se trouvent pas à leur position théorique en longueur d'onde

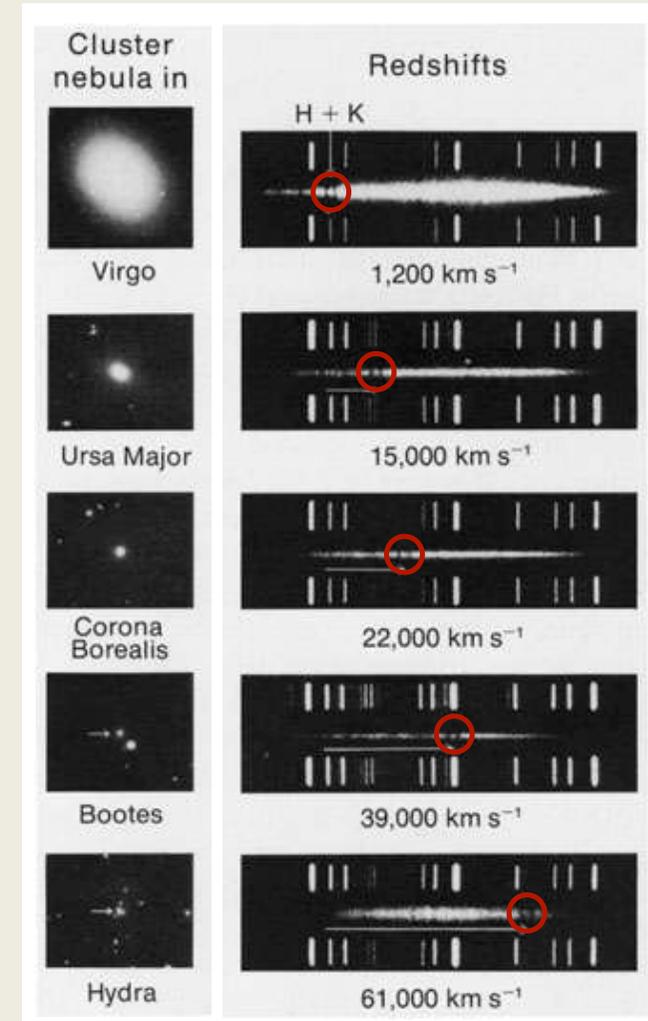
→ Interprétation: Effet de la vitesse des nébuleuses par rapport à l'observateur



Décalage vers le rouge
(vers de plus grandes longueurs d'onde)
« redshift z » :
l'objet s'éloigne de l'observateur

Spectre émis (+ laboratoire + théorique)

Décalage vers le bleu
(vers de plus courtes longueurs d'onde)
« blueshift » (e.g. M31) :
l'objet se rapproche de l'observateur



Humason (1915) observations Mont Wilson
Slipher (1917)

Effet Doppler-Fizeau

[Effet Doppler sur ScienceClic \(Youtube\)](#)

http://www.astro-caaq.org/dossiers/IntroSpectro_DominiqueBeauchamp_06/IntroSpectro.htm

Le rougissement du spectre des nébuleuses (avant de connaître leur distance, i.e., leur nature extragalactique)



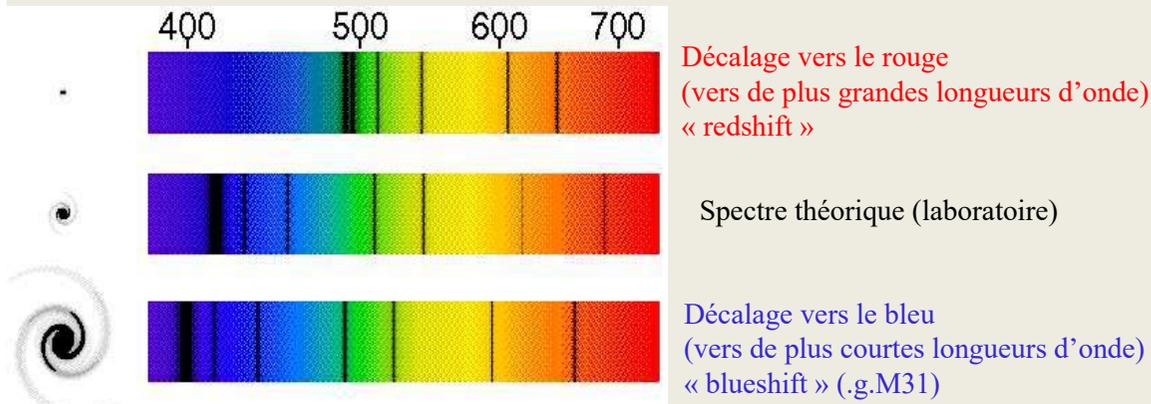
Vesto Slipher

(1875 – 1969)

Etude du spectre des
« nébuleuses brillantes » (1912)

Les raies présentes dans le spectre de la plupart des nébuleuses observées ne se trouvent pas à leur position théorique en longueur d'onde

→ Interprétation: Effet de la vitesse des nébuleuses par rapport à l'observateur



$$z = \frac{\lambda_{obs} - \lambda_{em}}{\lambda_{em}}$$
$$\lambda_{obs} = (1 + z)\lambda_{em}$$

Redshift cosmologique z

Conséquence de la **relativité restreinte (Einstein 1905)**

La perception d'un signal dépend de la vitesse relative entre la source et le récepteur.

La vitesse de la lumière dans le vide a la même valeur dans tous les référentiels galiléens.

$c = 299'792'458 \text{ m.sec}^{-1}$

Relativistic Doppler effect:

$$z = \sqrt{\frac{1 + \beta}{1 - \beta}} - 1 \quad \text{with } \beta = v/c$$

For $z \ll 1$: $z = \frac{v}{c}$

Redshift cosmologique et expansion de l'univers

→ Equations de Friedmann (leçon 20231003)

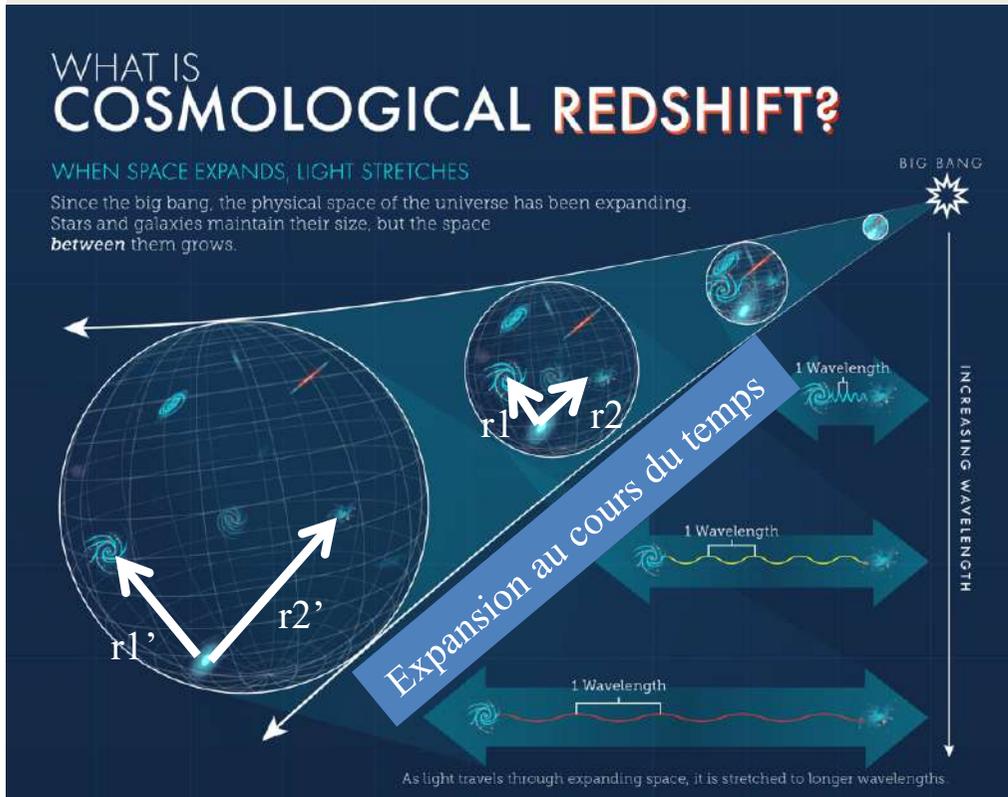


Alexandre Friedmann
(1888 – 1925)

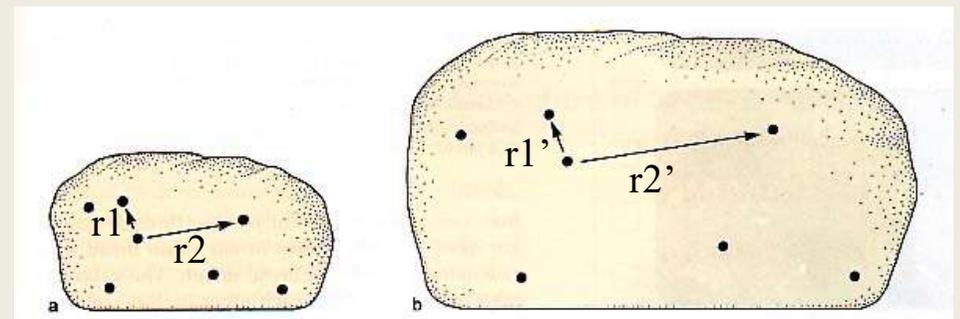
Reprend (1920) les équations d'Einstein
(**relativité générale**, 1915)

L'Univers n'est pas statique
(cf constante cosmologique postulée par Einstein),
mais dynamique dans le temps (1922);
le cosmos « change de taille » au cours
de son évolution,
il a une « histoire » spatiale et temporelle.

**L'espace se dilate uniformément dans toutes
les directions sans point privilégié
(Principe cosmologique).**

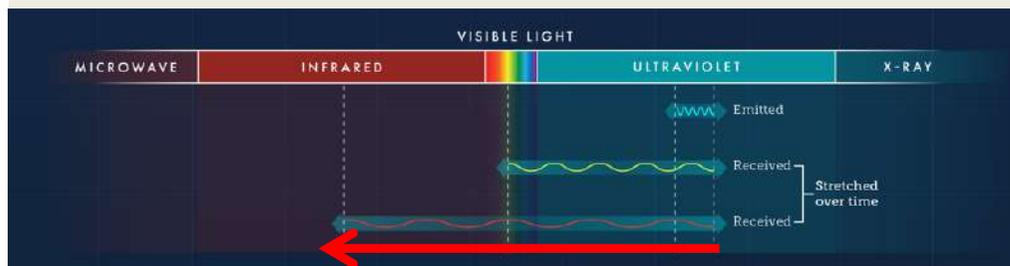
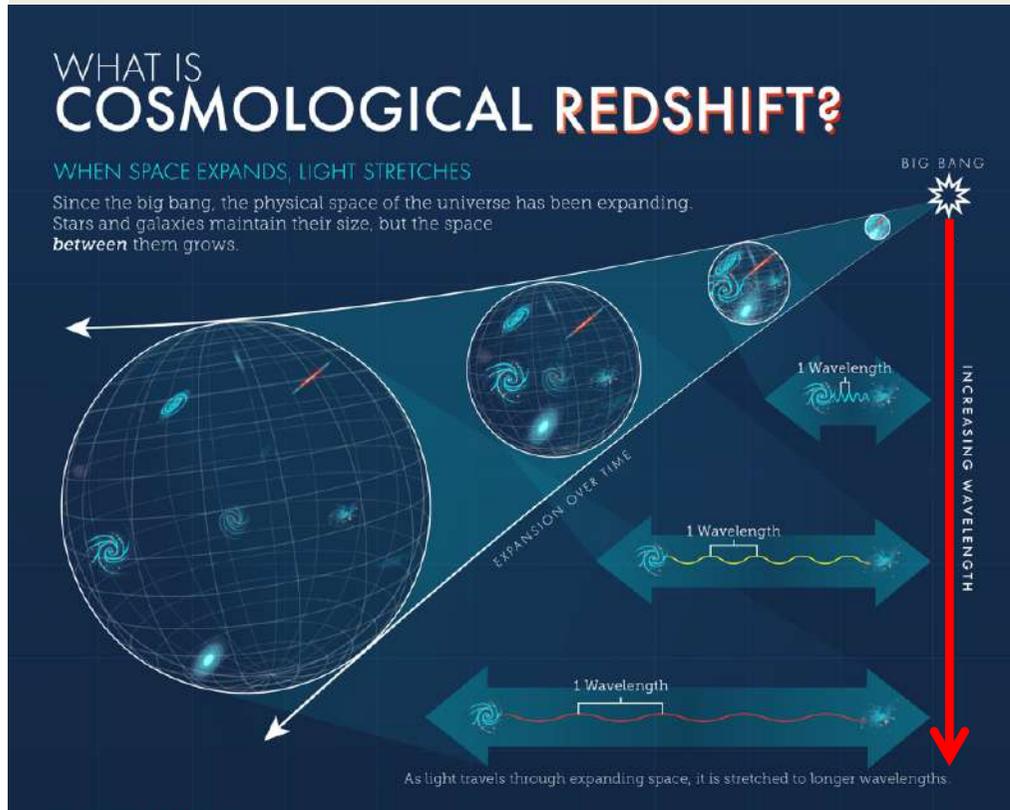


Les galaxies bougent *avec* l'espace
Le rapport des distances entre les mêmes galaxies
à des instants différents est constant:
 $r1'/r1 = r2'/r2$



Source: D.E.Gary (NJIT) – The reain-bread universe

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)

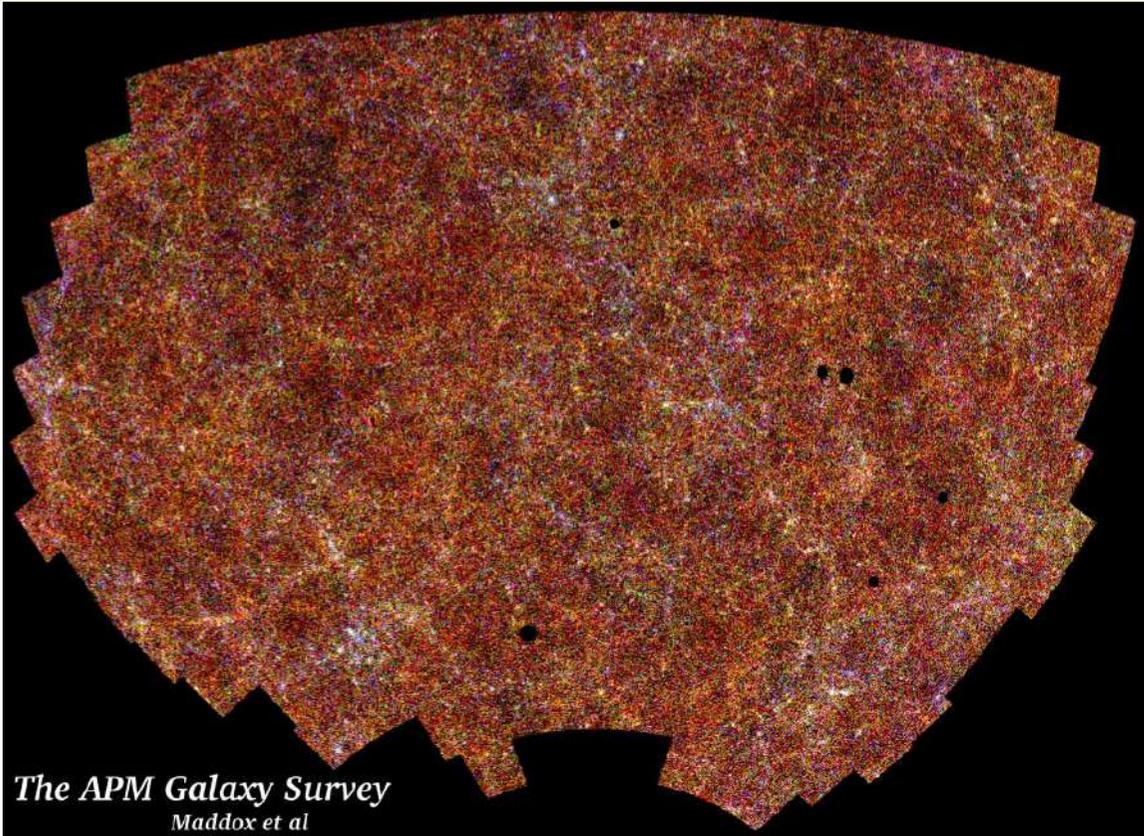
Source: NASA, ESA, Leah Hustak (STScI)

C.Charbonnel – Cours UniGe 1051 – 20230919

Principe cosmologique :

L'espace se dilate uniformément dans toutes les directions sans point privilégié

À chaque époque, l'univers apparaît le même à tout observateur, quelle que soit sa position individuelle dans l'univers.



20 million sources over 4300 sq degrees

1. L'univers est isotrope (identique dans toutes les directions) et homogène (à grande échelle)

→ Fonds diffus cosmologique – CMB (leçon 20231010)

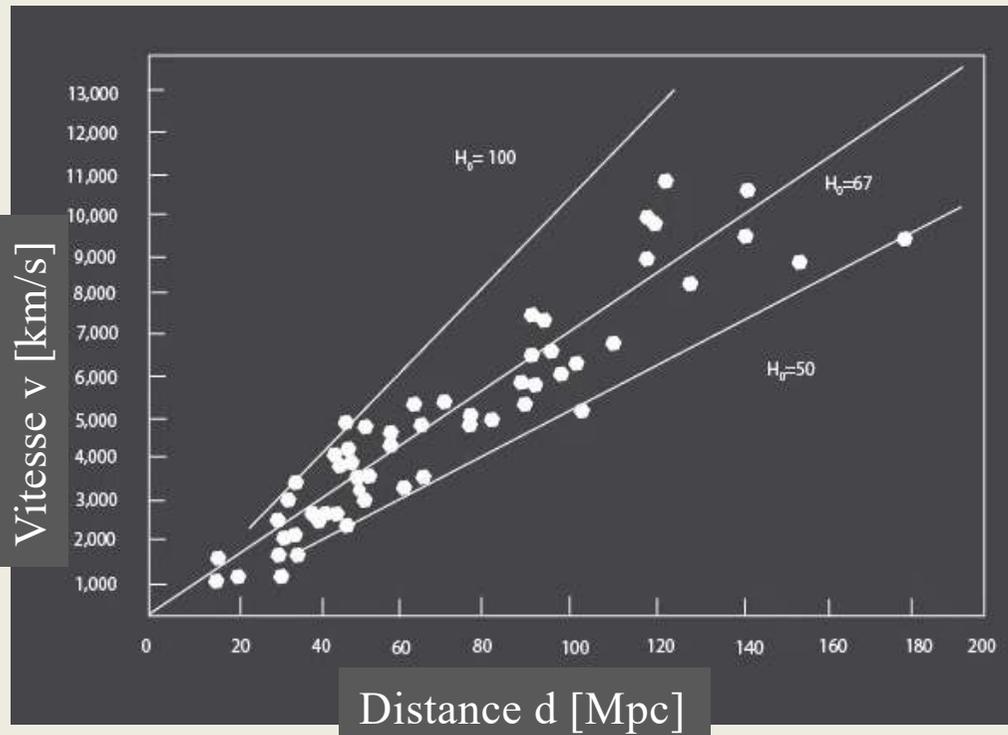
La relation de Hubble-Lemaître



Edwin Hubble
(1889 – 1953)



Georges Lemaître (1894-1966)
Albert Einstein



L'espace se dilate uniformément dans toutes les directions sans point privilégié (Principe cosmologique).

→ L'éloignement entre tous les points de l'espace est d'autant plus rapide que les points sont distants

$$v = H_0 \cdot d$$

v [km/s], d [Mpc]: vitesse et distance propre de galaxies proches
 H_0 : constante de Hubble-Lemaître [km/(s.Mpc)]

Loi de Hubble (1929) – Lemaître (1927)

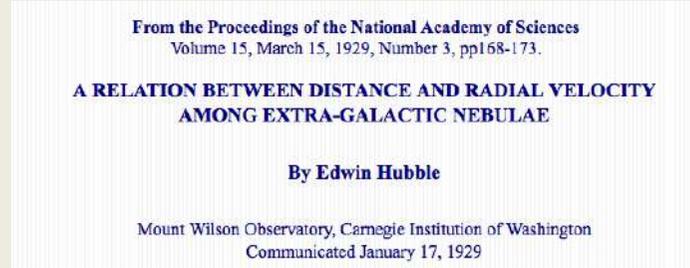
Proportionnalité entre vitesse d'éloignement v et distance d
 H_0 (pente de la courbe)

Confirmation des prédictions de la relativité générale qui n'admet pas d'univers statique.

La relation de Hubble-Lemaître



Edwin Hubble
(1889 – 1953)



Georges Lemaître (1894-1966)
Albert Einstein

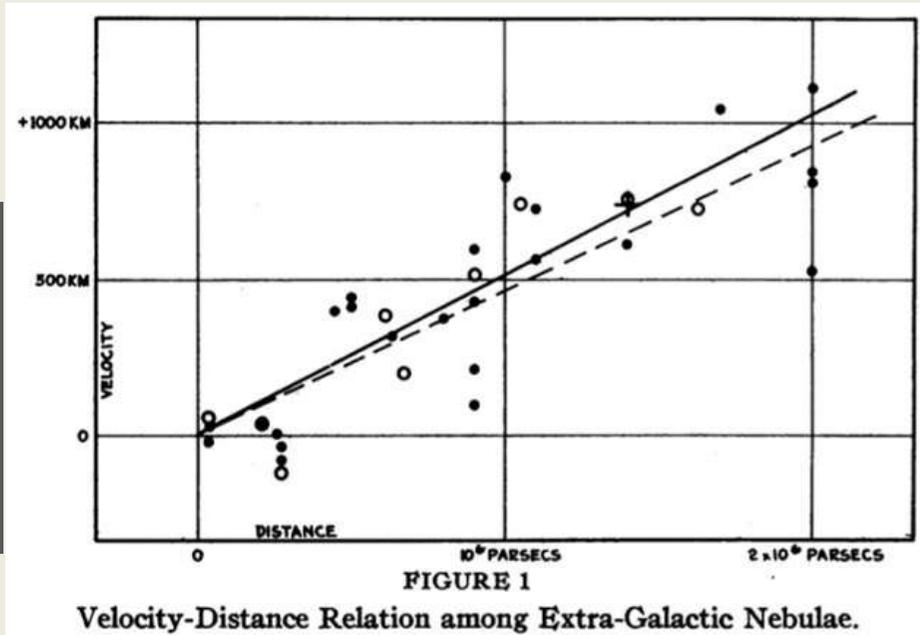
L'espace se dilate uniformément dans toutes les directions sans point privilégié (Principe cosmologique).

→ L'éloignement entre tous les points de l'espace est d'autant plus rapide que les points sont distants

$$v = H_0 \cdot d$$

v [km/s], d [Mpc]: vitesse et distance propre de galaxies proches
 H_0 : constante de Hubble-Lemaître [km/(s.Mpc)]

Loi de Hubble (1929) – Lemaître (1927)



Vitesse v [km/s]

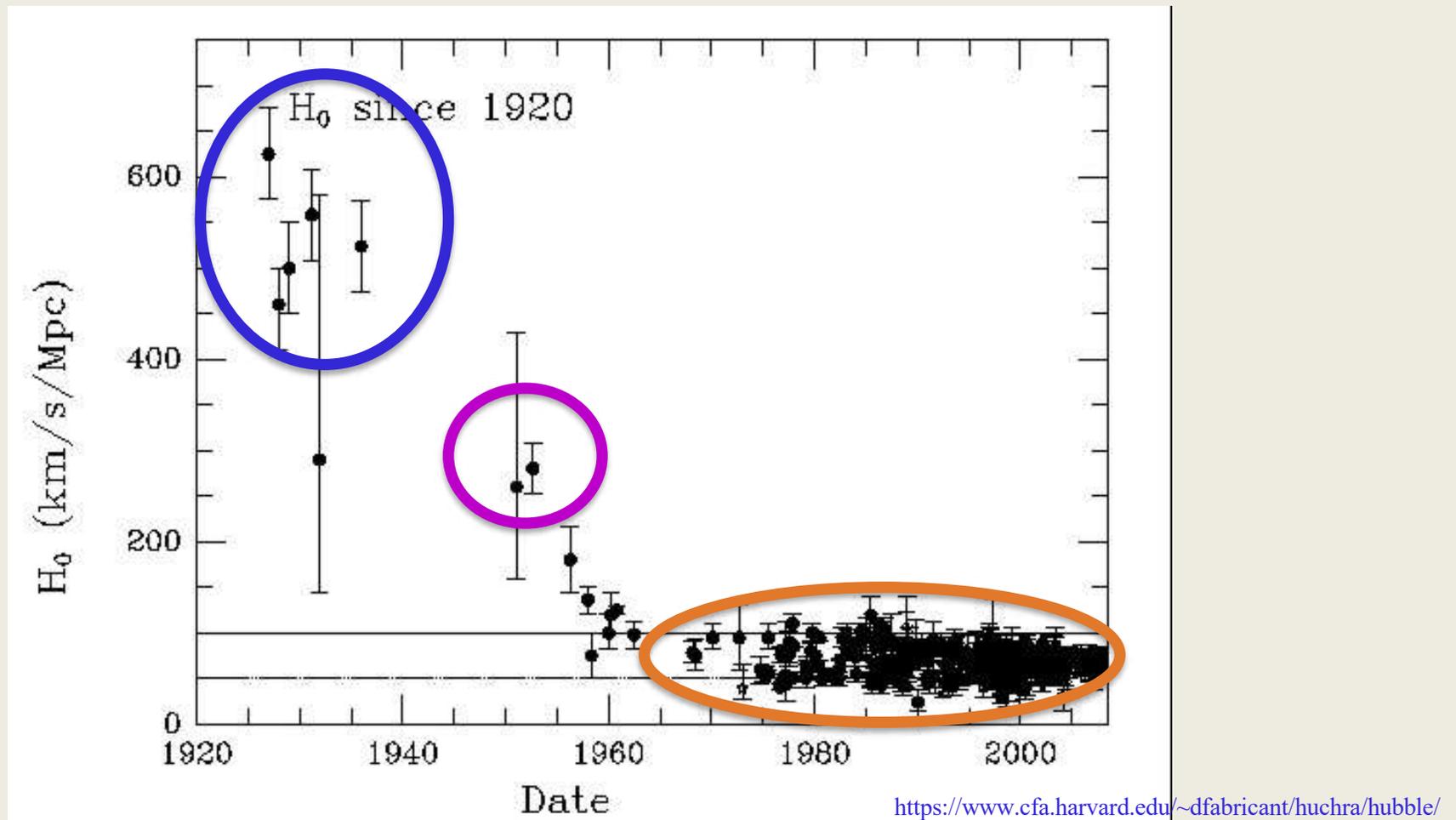
Distance d [Mpc]

$H_0 = 500 \text{ km sec}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$ (valeur déterminée par Hubble en 1929, étude de galaxies distantes de moins de 2 Mpc)

Vitesses déterminées par Milton Humason

Distances obtenues en utilisant la relation P-L des Céphéides de Henrietta Lewitt

Détermination de H_0 avec différents indicateurs



1^{er} point : Lemaître (1927) basé sur distances extragalactiques publiées par Hubble

2^{ème} point : Robertson (1928)

3^{ème} point : Hubble (1929) : $500 \text{ km sec}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$

Baade (1950) : Découverte des étoiles Population II

Relevés cosmologiques à très grande échelle,
lentilles gravitationnelles, SNe, effet Sunyaev-Zeldovich, fonds diffus cosmologique

Détermination de H_0 avec différents indicateurs

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL, 919:16 (22pp), 2021 September 20

© 2021 The Author(s). Published by the American Astronomical Society.

OPEN ACCESS

<https://doi.org/10.3847/1538-4357/ac0e95>



Measurements of the Hubble Constant: Tensions in Perspective*

Wendy L. Freedman

Department of Astronomy & Astrophysics & Kavli Institute for Cosmological Physics, University of Chicago, 5640 South Ellis Avenue, Chicago, IL 60637, USA

wfreedman@uchicago.edu

Received 2021 May 17; revised 2021 June 20; accepted 2021 June 23; published 2021 September 17

→ Fonds diffus cosmologique
(leçon 20231003 – SP)

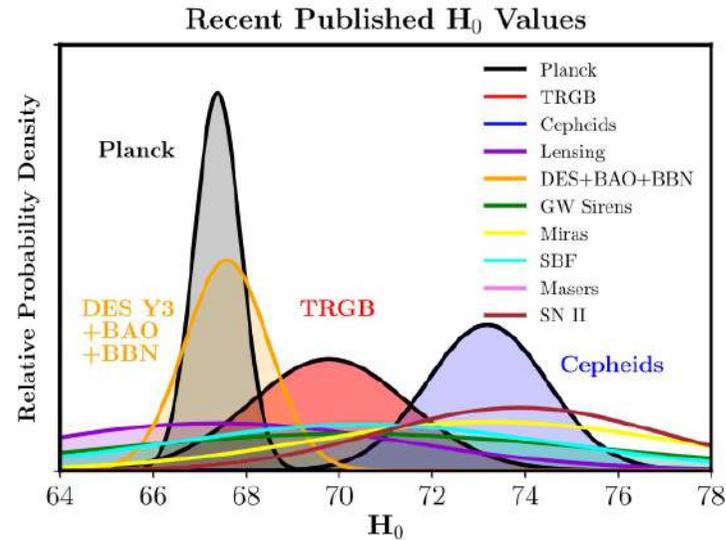


Figure 10. Relative PDFs for several current methods for measuring H_0 . The CMB, BAO, strong lensing, and TRGB methods currently yield lower values of H_0 , while Cepheids yield the highest values. The uncertainties associated with H_0 measurements from gravitational-wave sirens, strong lensing, Miras, masers, and SBF are currently significantly larger than the errors quoted for the TRGB and Cepheids. See text for details. (CMB: Planck Collaboration 2018; TRGB: this paper; DES Y3 + BAO + BBN: DES Collaboration et al. 2021; GW sirens: Hotokezaka et al. 2019; Miras: Huang et al. 2018; SBF: Khetan et al. 2021; masers: Reid et al. 2019).

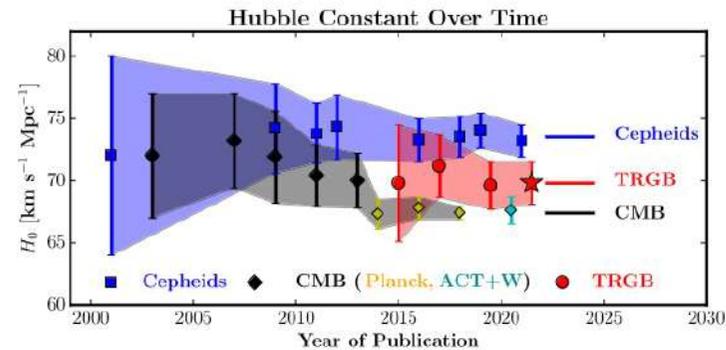


Figure 11. Summary of Hubble constant values in the past two decades based on Cepheid variables (blue squares), the TRGB (red circles and star), and estimates based on measurements of fluctuations in the CMB (WMAP: black diamonds; Planck: yellow diamonds; ACT + WMAP: cyan diamond). The CMB H_0 values assume a flat Λ CDM model. The CMB and Cepheid results straddle a range of $67\text{--}74 \text{ km s}^{-1} \text{ Mpc}^{-1}$, with the TRGB results falling in the middle and overlapping the CMB results. The tension between the CMB and TRGB results amounts to only 1.3σ .

$$H_0 = v/d$$

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
↔ $\sim 2 \cdot 10^{-15}$ 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 $< c$

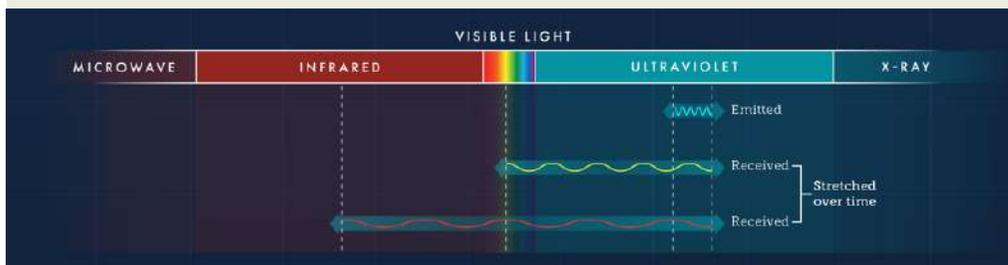
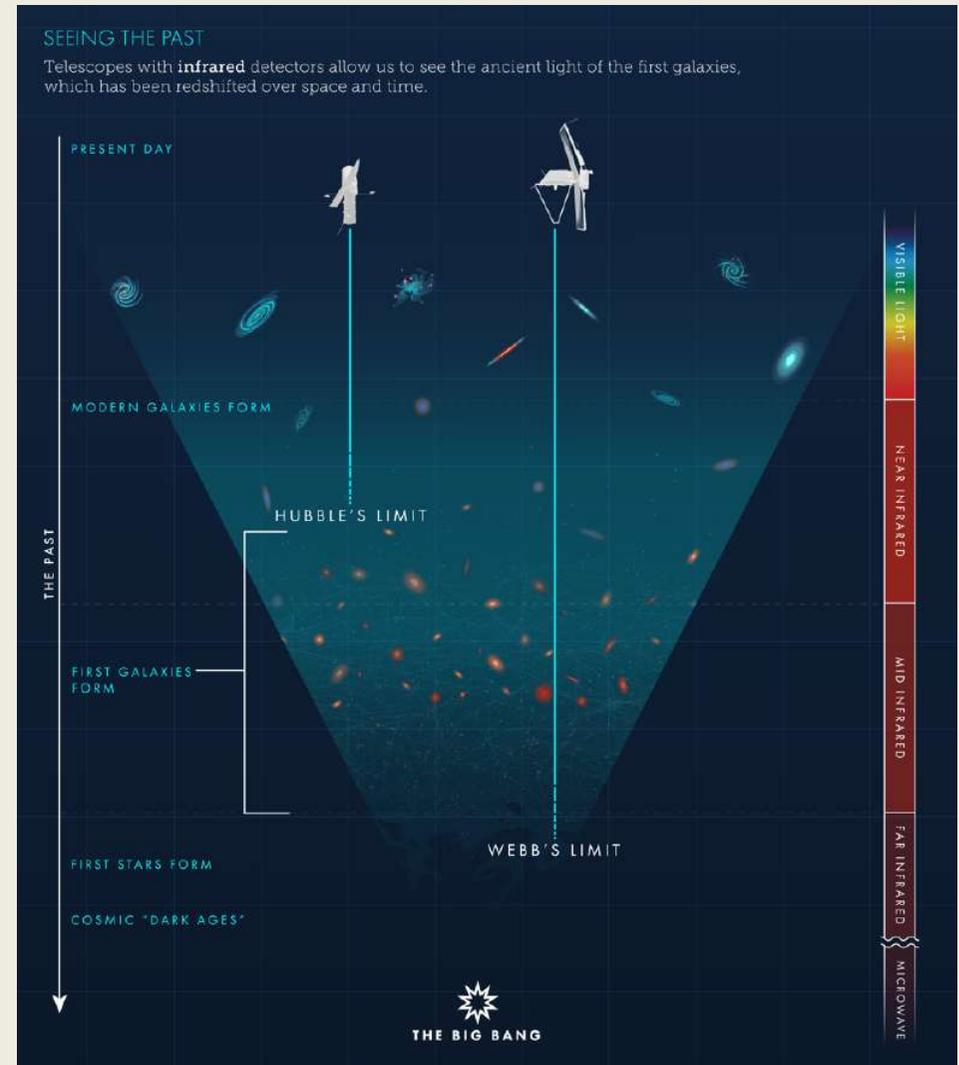
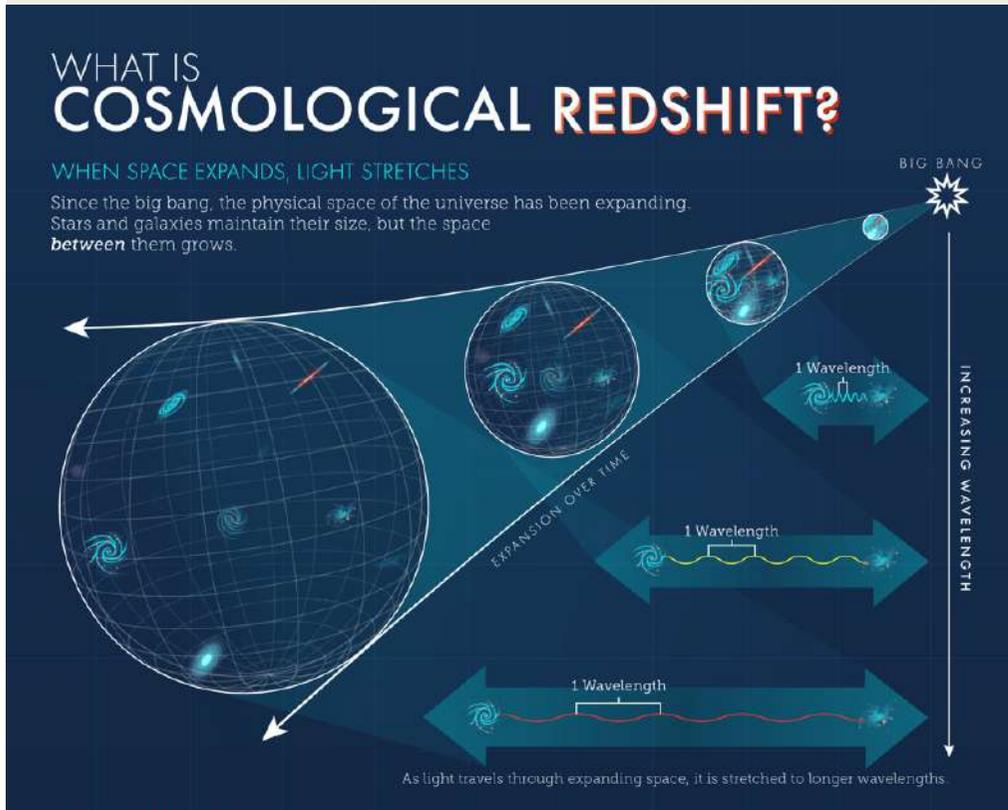
Univers observable

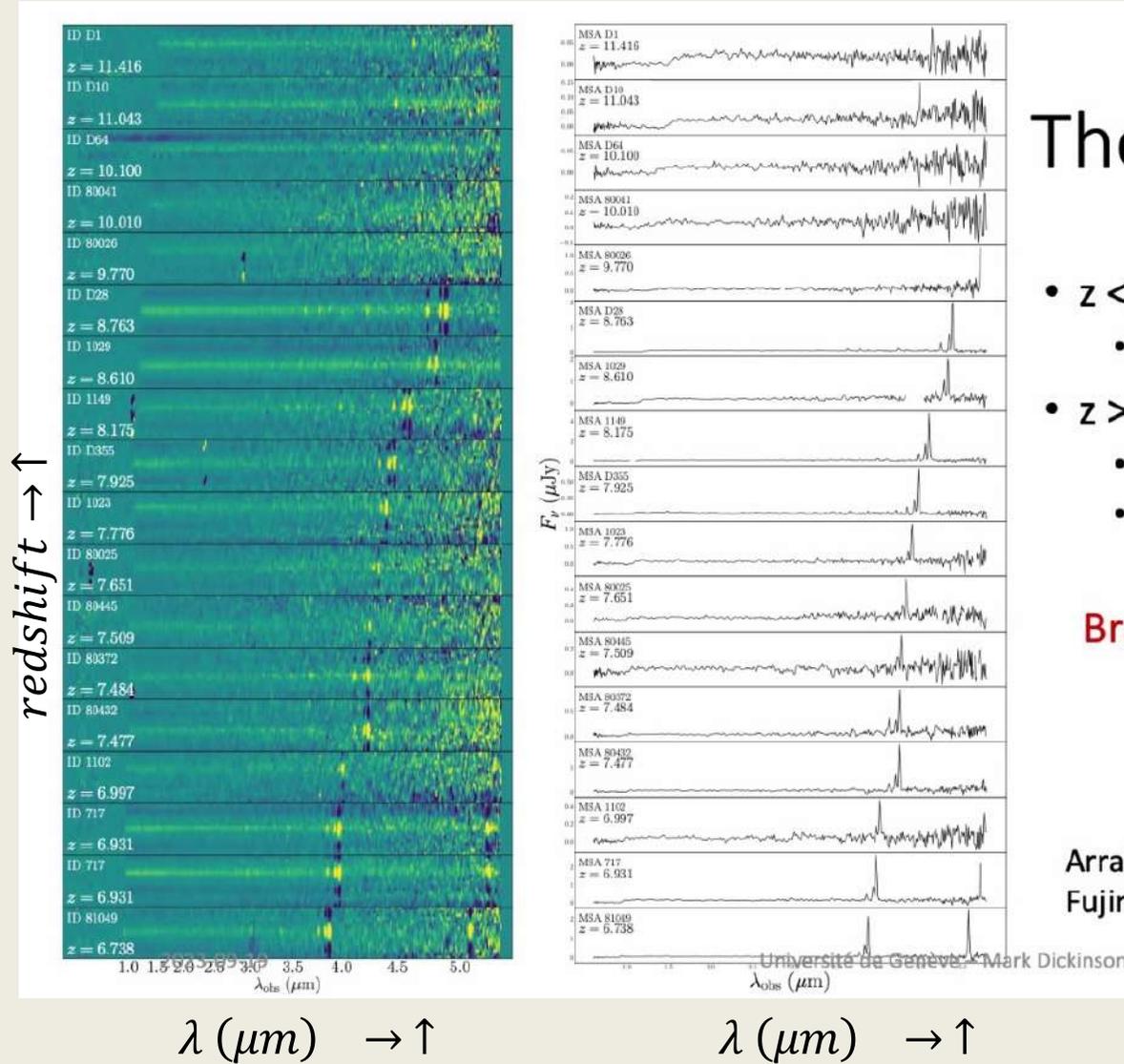
$$0 \leq z \leq \infty$$

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

$$0 \leq z \leq 1$$

→ Grandes structures – Formation et évolution des galaxies (leçon 20231031)





The Power of The Prism

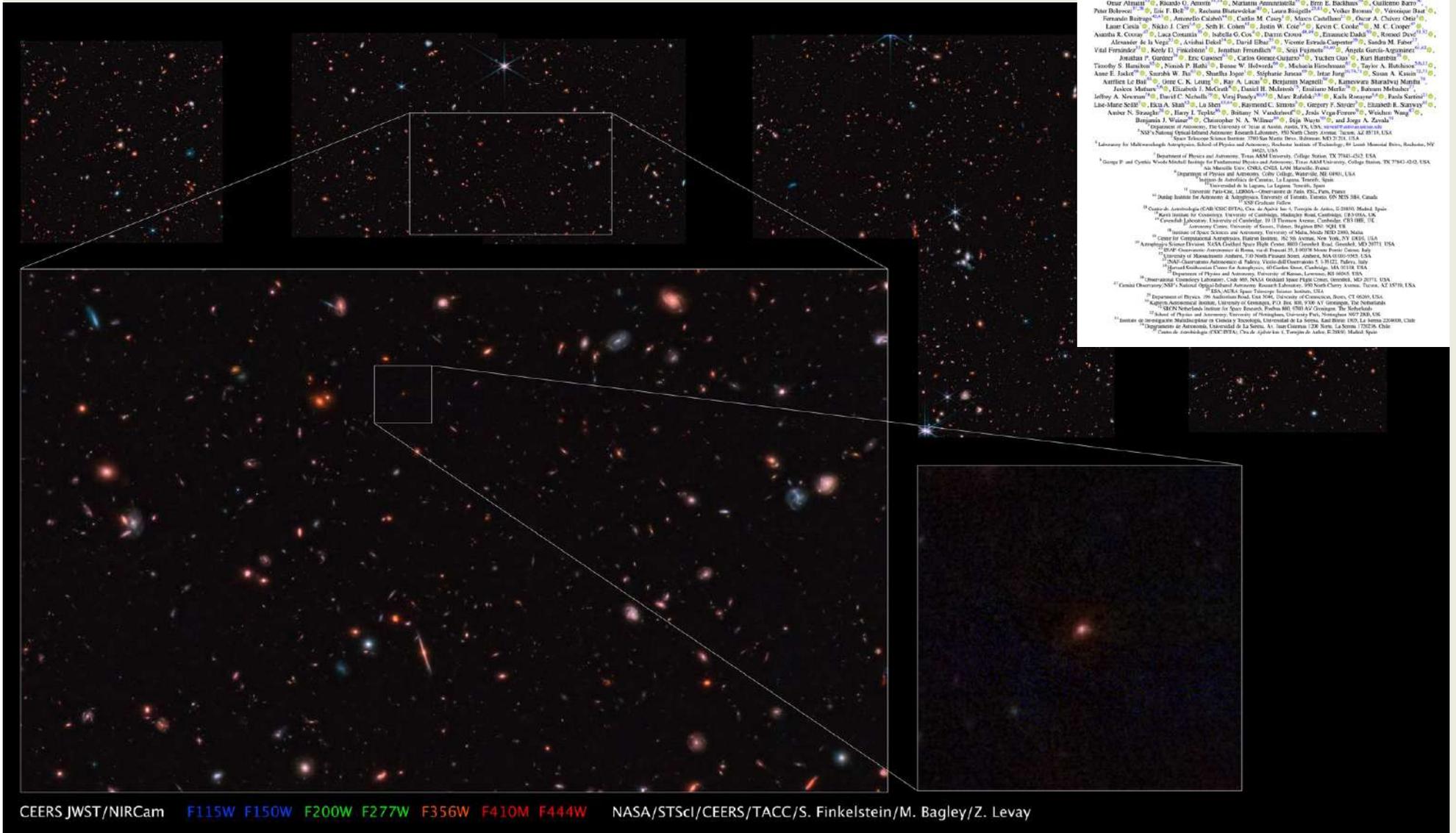
- $z < 9.6$: Like shooting fish in a barrel !
 - Strong [OIII] + H β make life easy
- $z > 9.6$: Things get tougher...
 - UV emission lines (including [OII]) are weak
 - But the Ly α IGM continuum break is reliable

Bravo to the NIRSpec team for a great, great design choice!!

Arrabal Haro et al. 2023a,b
Fujimoto et al. 2023

Proto-galaxie CEERS J141946.36+525632 (Maisie's galaxy)

Cosmic Evolution Early Release Science Survey



CEERS JWST/NIRCam F115W F150W F200W F277W F356W F410M F444W NASA/STScI/CEERS/TACC/S. Finkelstein/M. Bagley/Z. Levay

THE ASTROPHYSICAL JOURNAL LETTERS, 940:15 (2023, 2022 December) <https://doi.org/10.3847/2041-8213/acd970>
 © 2023. Published by the American Astronomical Society.

OPEN ACCESS

A Long Time Ago in a Galaxy Far, Far Away: A Candidate $z \sim 12$ Galaxy in Early JWST CEERS Imaging

Steven L. Finkelstein¹, Micaela B. Bagley¹, Pablo Aranda-Haro², Mark Dickinson³, Henry C. Ferguson⁴, Jayhan S. Kartalopoulos⁵, Casey Papovich⁶, Denis Burgarella⁷, Dale D. Kocevski⁸, Mark Harlow Compton⁹, Kaithek G. Fan¹⁰, Anna M. Koekemoer¹¹, Roberto L. Lacerda¹², Fabio G. Perez-Gonzalez¹³, Carlin Ross¹⁴, Simha Tacchella^{15,16}, Stephen M. Wilkins^{17,18}, Katarzyna Chyrowska^{19,20}, Ashley Mohan¹, Alice M. Moreau²¹, Rachel S. Somerville²², L. Y. Aaron Yang²³, Adriano Fontana²⁴, Mouni Cavaliere²⁵, Andrew Cooray²⁶, Norman A. Groth²⁷, Lisa F. Kewey²⁸, Allison Kotopoulas²⁹, Peter Koehn³⁰, Jonathan M. Lotz³¹, Laura Ferrerini³², Nor Privak³³, Swati Ravindranath³⁴, Russell E. Ryan, Jr.³⁵, Jonathan K. Trump³⁶, Qiang Yang³⁷, and The CEERS Team.

Omar Abolfathi³⁸, Ricardo G. Arróniz^{39,40}, Mariama Amramiata⁴¹, Eiri E. Bachus⁴², Gaetano Barro⁴³, Peter Behroozi⁴⁴, Eli F. Bell⁴⁵, Rachana Bhatawdekar⁴⁶, Laura Bisognella⁴⁷, Vukob Brausa⁴⁸, Veronique Buat⁴⁹, Fernando Bustos^{50,51}, Anandee Chakrabarti⁵², Collier M. Casey⁵³, Marco Castellano⁵⁴, Oscar A. Casas Otero⁵⁵, Lauri Cesáá⁵⁶, Nikko J. Carr⁵⁷, Seth H. Cohen⁵⁸, Justin W. Cole⁵⁹, Kevin C. Cooke⁶⁰, M. C. Cooper⁶¹, Anusha K. Coory⁶², Luca Costantini⁶³, Isabella G. Cox⁶⁴, Danni Cross^{65,66}, Emanuele Daddi⁶⁷, Russell Dave^{68,69}, Alexander de la Vega⁷⁰, Avishai Dekel⁷¹, David Elzube⁷², Yoonese Eom⁷³, Yoonese Eom⁷⁴, Sushant M. Farooq⁷⁵, Václav Firdaňský⁷⁶, Koehi Ii⁷⁷, Jonathan Firdaňský⁷⁸, Seiji Fujimoto^{79,80}, André Garcia-Agnanter^{81,82}, Jonathan F. Gardner⁸³, Eric Gawiser⁸⁴, Carlos Gomez-Castano⁸⁵, Yuchen Guo⁸⁶, Kurt Harbluka⁸⁷, Timothy S. Harlow⁸⁸, Nishak P. Hathi⁸⁹, Benne W. Holmbeck⁹⁰, Michaela Hirschmann⁹¹, Taylor A. Hutchison⁹², Anne E. Jaffe⁹³, Saurabh W. Hla⁹⁴, Shreshtha Jopei⁹⁵, Sijpharic Jansae⁹⁶, Irit Jorgensen^{97,98}, Soma A. Kasim^{99,100}, Arifcine Le Dai¹⁰¹, Ute C. K. Lotz¹⁰², Ray A. Lucas¹⁰³, Benjamin Maggioni¹⁰⁴, Rameshwar Bharatwaj Majumdar¹⁰⁵, Jackson Matney¹⁰⁶, Elizabeth J. McQuinn¹⁰⁷, Daniel H. Malhotra¹⁰⁸, Emilianne Merla¹⁰⁹, Raviwardhan Mehata¹¹⁰, Jeffrey A. Newman¹¹¹, David C. Nicholls¹¹², Viraj Pandya^{113,114}, Marc Rafanelli^{115,116}, Kala Ranaiah¹¹⁷, Paolo Sarinai¹¹⁸, Lisa-Marie Schee¹¹⁹, Ekin A. Shah¹²⁰, La Smet¹²¹, Raymond C. Simons¹²², Gregory F. Sitrup¹²³, Elizabeth R. Sarway¹²⁴, Amber N. Straughn¹²⁵, Henry J. Teplitz¹²⁶, Britanny N. Vanderberg¹²⁷, Jaiya Vignati-Ferraro¹²⁸, Wackou Wang¹²⁹, Benjamin J. Weiner¹³⁰, Christopher N. A. Willace¹³¹, Seja Wuyts¹³², and Jorge A. Zavala¹³³

¹Department of Astronomy, The University of Texas at Austin, Austin, TX, USA; sfinkel@utexas.edu
²INAF-Osservatorio Astronomico di Roma, via di Frascati 31, I-00078 Monte Porzio Catone, Italy
³INAF-Osservatorio Astronomico di Padova, Vicolo dell'Observatorio 1, I-35122 Padova, Italy
⁴Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁵Department of Physics, 360 Audubon Road, East 366, University of Connecticut, Storrs, CT 06269, USA
⁶Department of Physics, University of Colorado, P.O. Box 388, Fort Collins, CO 80521, USA
⁷INAF-Osservatorio Astronomico di Padova, Vicolo dell'Observatorio 1, I-35122 Padova, Italy
⁸Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹⁰Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹¹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹²Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹³Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹⁴Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹⁵Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹⁶Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹⁷Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹⁸Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹⁹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
²⁰Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
²¹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
²²Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
²³Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
²⁴Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
²⁵Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
²⁶Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
²⁷Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
²⁸Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
²⁹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
³⁰Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
³¹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
³²Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
³³Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
³⁴Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
³⁵Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
³⁶Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
³⁷Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
³⁸Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
³⁹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁴⁰Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁴¹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁴²Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁴³Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁴⁴Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁴⁵Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁴⁶Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁴⁷Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁴⁸Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁴⁹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁵⁰Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁵¹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁵²Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁵³Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁵⁴Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁵⁵Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁵⁶Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁵⁷Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁵⁸Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁵⁹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁶⁰Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁶¹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁶²Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁶³Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁶⁴Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁶⁵Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁶⁶Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁶⁷Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁶⁸Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁶⁹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁷⁰Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁷¹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁷²Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁷³Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁷⁴Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁷⁵Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁷⁶Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁷⁷Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁷⁸Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁷⁹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁸⁰Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁸¹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁸²Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁸³Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁸⁴Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁸⁵Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁸⁶Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁸⁷Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁸⁸Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁸⁹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁹⁰Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁹¹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁹²Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁹³Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁹⁴Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁹⁵Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁹⁶Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁹⁷Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁹⁸Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
⁹⁹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹⁰⁰Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹⁰¹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹⁰²Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹⁰³Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹⁰⁴Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹⁰⁵Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹⁰⁶Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹⁰⁷Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹⁰⁸Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹⁰⁹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹¹⁰Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹¹¹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹¹²Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹¹³Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹¹⁴Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹¹⁵Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹¹⁶Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹¹⁷Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹¹⁸Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹¹⁹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹²⁰Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹²¹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹²²Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹²³Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹²⁴Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹²⁵Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹²⁶Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹²⁷Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹²⁸Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹²⁹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹³⁰Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹³¹Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹³²Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA
¹³³Department of Physics and Astronomy, University of Kansas, Lawrence, KS 66045, USA

$z \sim 12$
 Formée ~ 390 Myr après le Big Bang
 Distance ~ 25 milliards a.l.

Proto-galaxie CEERS J141946.36+525632 ([Maisie's galaxy](#))

Cosmic Evolution Early Release Science Survey



This 3D visualisation portrays about 5,000 galaxies within a small portion of the CEERS (Cosmic Evolution Early Release Science) Survey, which gathered data from a region known as the Extended Groth Strip. As the camera flies away from our viewpoint, each second amounts to travelling 200 million light-years into the data set, and seeing 200 million years further into the past. The appearances of the galaxies change, reflecting the fact that more distant objects are seen at earlier times in the universe, when galaxies were less developed. The video ends at Maisie's Galaxy, which formed only 390 million years after the Big Bang, or about 13.4 billion years ago.

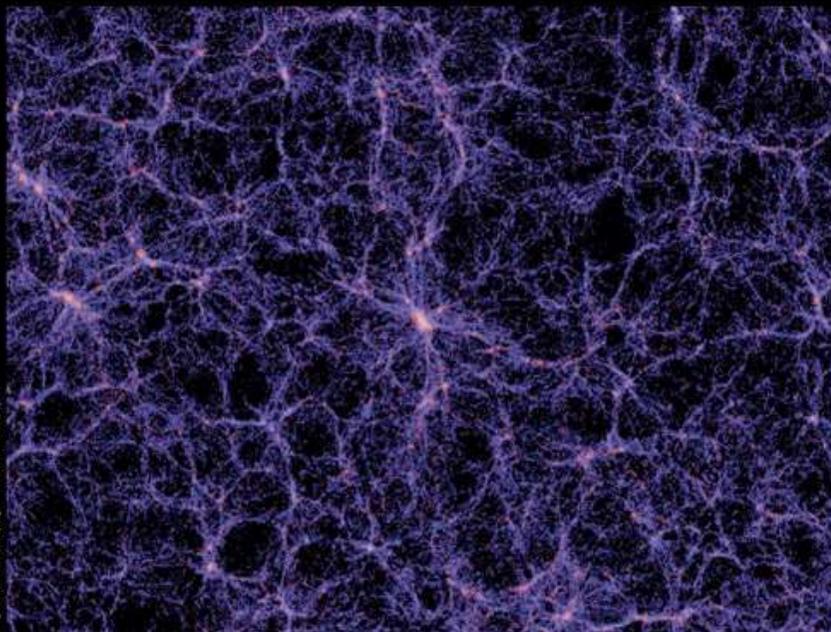
Credit :F. Summers (STScI), G. Bacon (STScI), J. DePasquale (STScI), L. Hustak (STScI), J. Olmsted (STScI), A. Pagan (STScI), S. Finkelstein (UT Austin), R. Larson (RIT), M. Bagley (UT Austin)

Music: Spring Morning, Maarten Schellekens CC BY-NC 4.0

[Source : ESA/Hubble/Webb Images and Videos](#)

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>

Cours 2 – 26 septembre 2023

Echelles de distances Mesurer l'univers

> Définition - Historique - Isotropie - Expansion de l'Univers - Loi de Hubble	
> Échelles de distance	Charbonnel
> Équations de Friedmann	Paltani
> Fonds diffus cosmologique - CMB	Paltani
> Lentilles gravitationnelles	Paltani
> Nucléosynthèse primordiale	Charbonnel
> Grandes structures - Formation et évolution des galaxies	Charbonnel Charbonnel
> Matière noire - Courbe de rotation des galaxies - Amas de galaxies	
> Energie noire	Bonvin
> Sondes cosmologiques	Paltani
> Titre à venir	à définir
> Trous noirs	Paltani
> Ondes gravitationnelles	Paltani
> Futur de l'univers, questions en suspens	Charbonnel