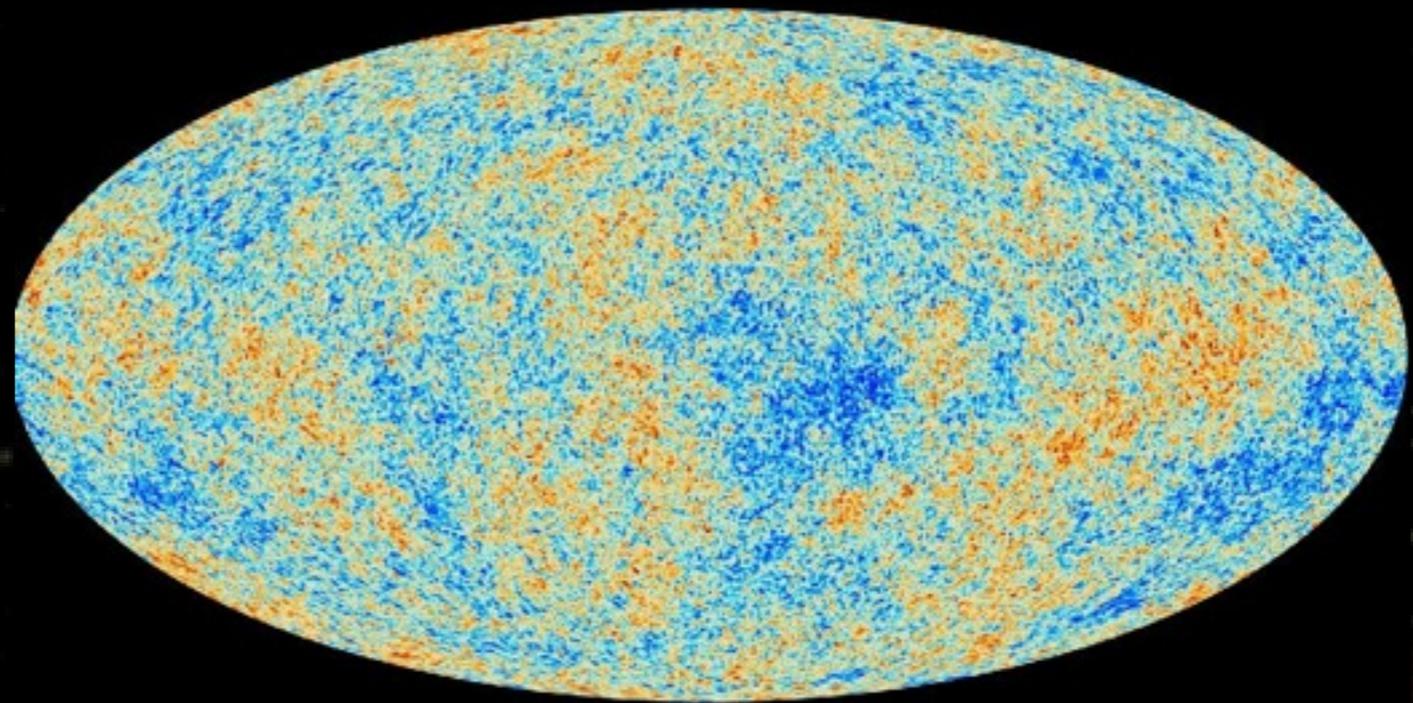
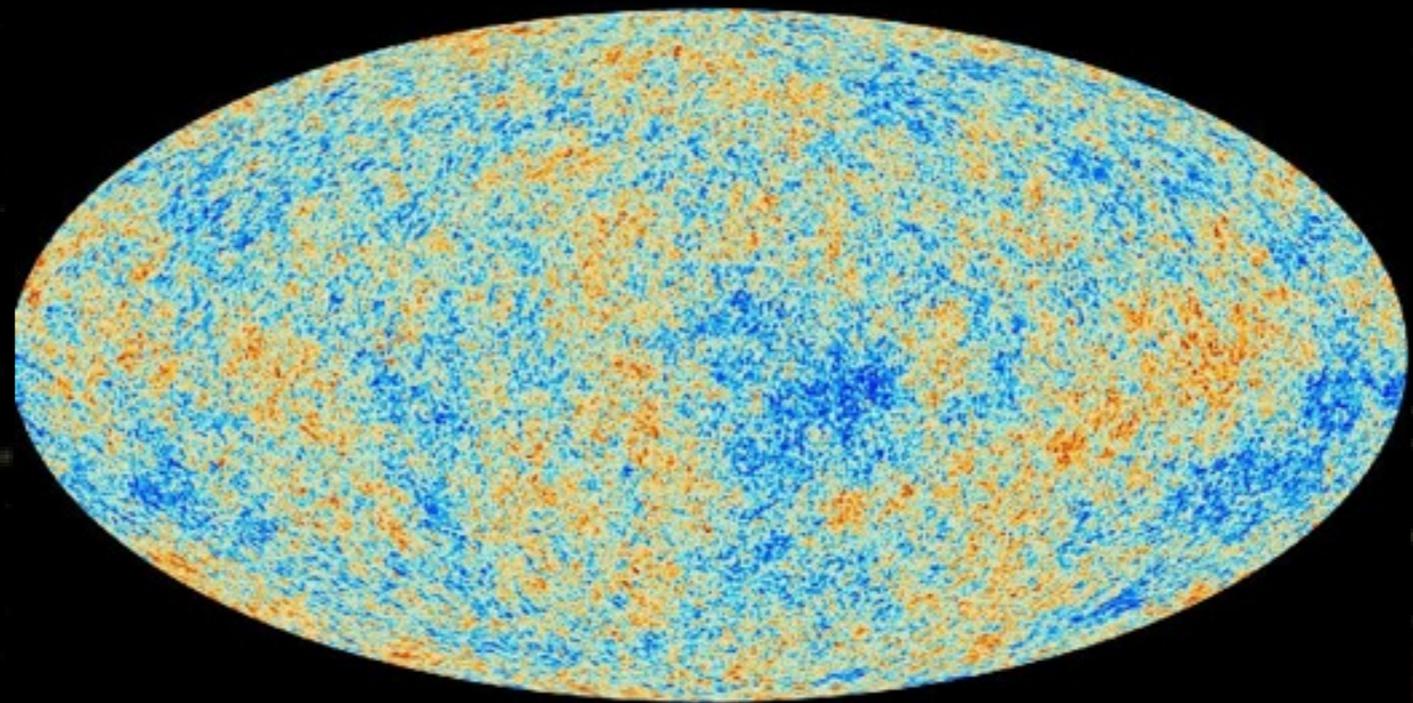


400 ans d'observations: De Tycho Brahe au rayonnement à 3K

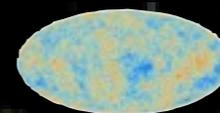


Jean-Christophe Hamilton
APC - CNRS - IN2P3 - Université Paris-Diderot

470 ans d'observations: De Copernic au rayonnement à 3K

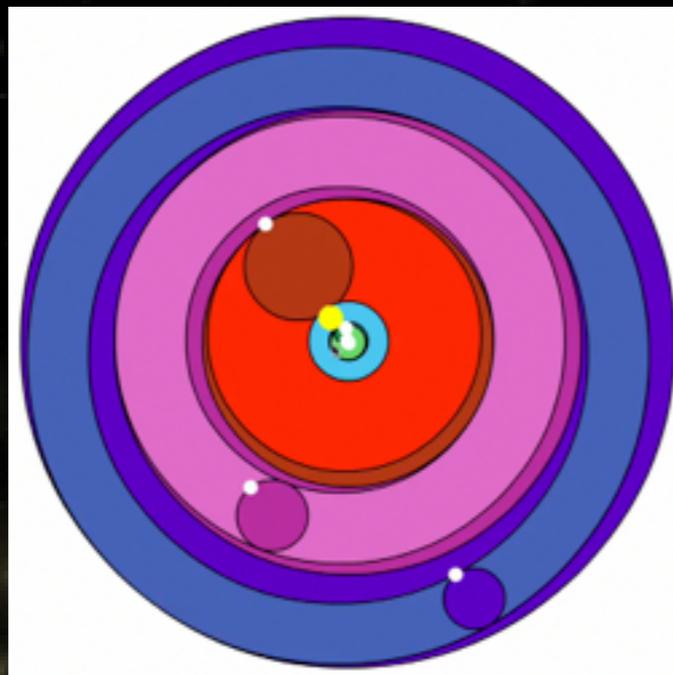


Jean-Christophe Hamilton
APC - CNRS - IN2P3 - Université Paris-Diderot



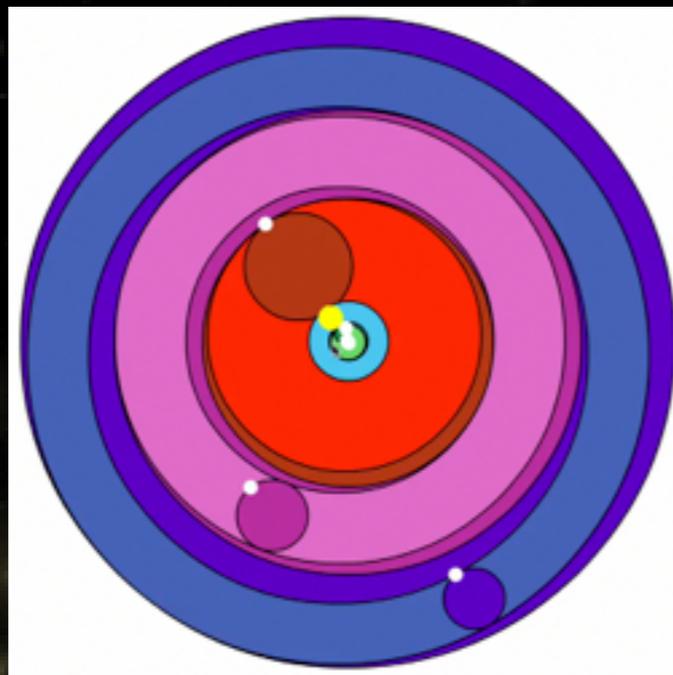
Le système de Ptolémée

- Grec d'Égypte [90-168]
 - ★ Traité d'astronomie : « L'almageste »
 - ★ Consécration du modèle Géocentrique
 - La Terre est au centre de l'Univers
 - Les planètes (y compris le Soleil) tournent autour
 - Pour rendre compte des observations des mouvements des planètes, il utilise des « épicycles » et des « équants »
 - C'est compliqué mais ça marche plutôt bien...



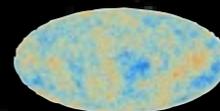
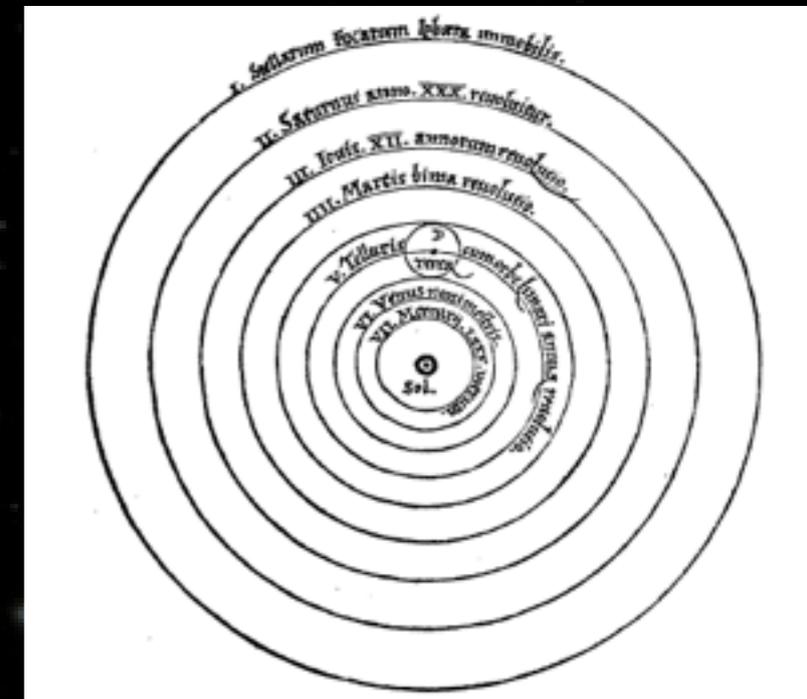
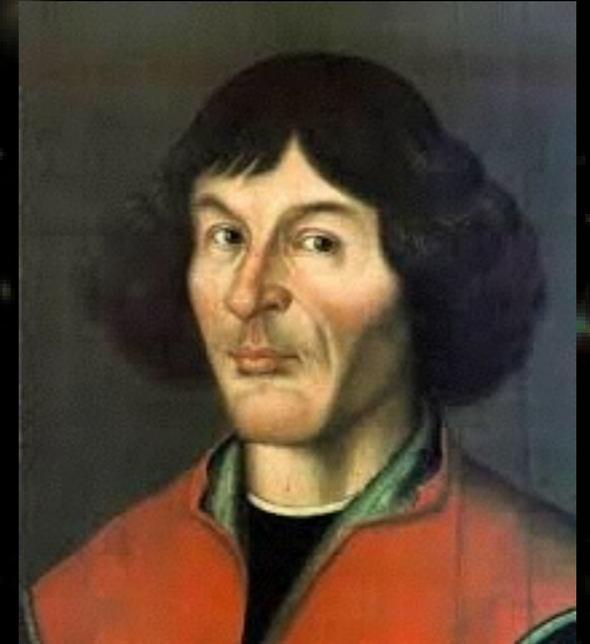
Le système de Ptolémée

- Grec d'Égypte [90-168]
 - ★ Traité d'astronomie : « L'almageste »
 - ★ Consécration du modèle Géocentrique
 - La Terre est au centre de l'Univers
 - Les planètes (y compris le Soleil) tournent autour
 - Pour rendre compte des observations des mouvements des planètes, il utilise des « épicycles » et des « équants »
 - C'est compliqué mais ça marche plutôt bien...



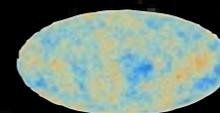
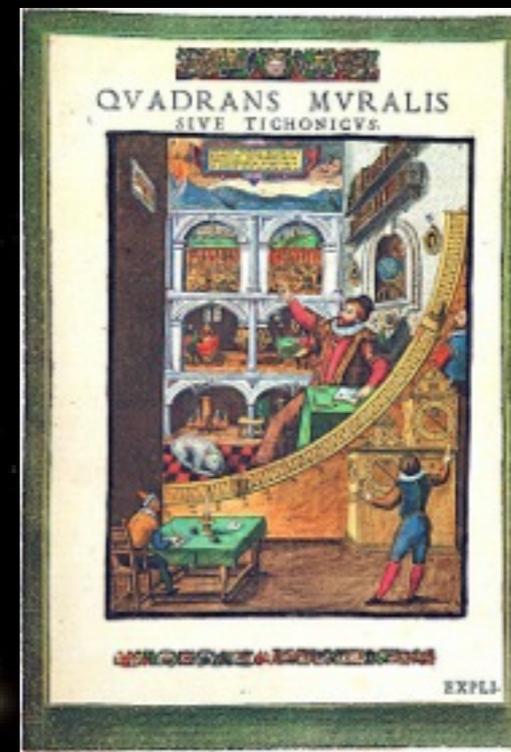
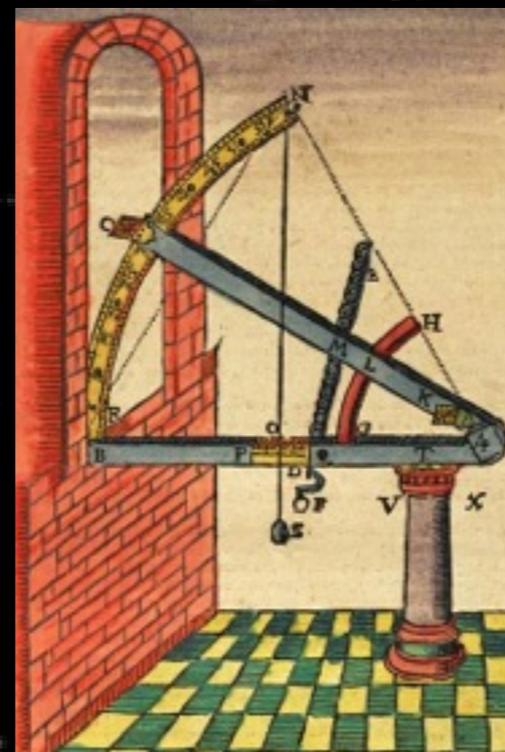
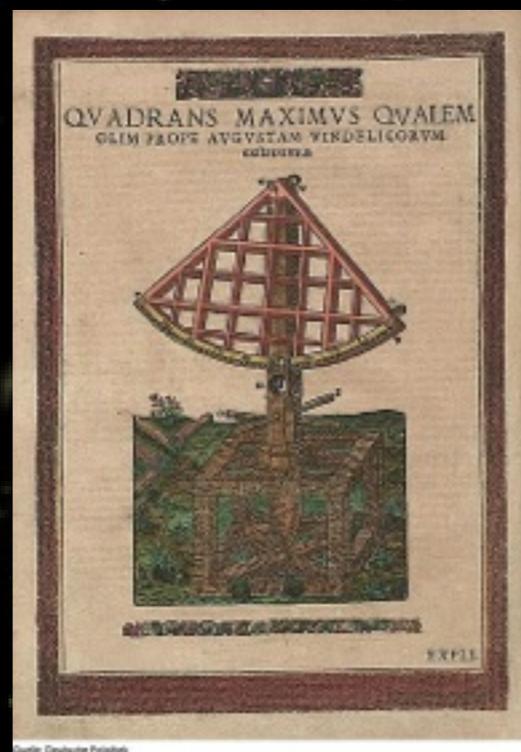
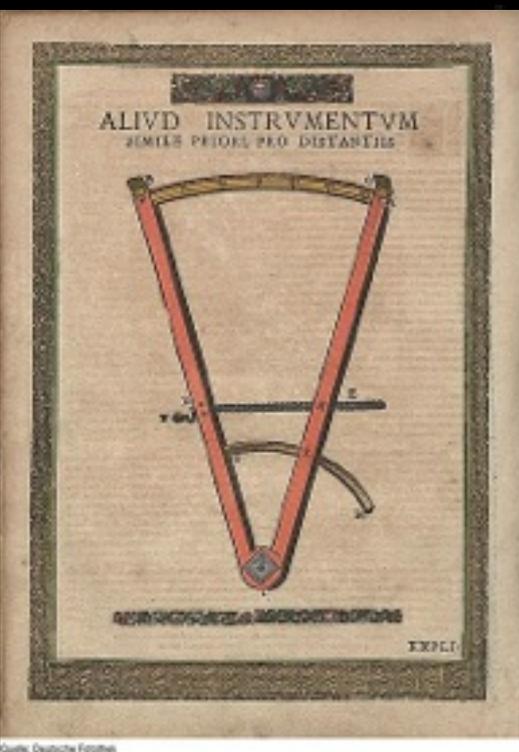
Nicolas Copernic

- Chanoine Polonais [1473-1543]
 - ★ dès ~1510 il est convaincu qu'il faut abandonner le système géocentrique de Ptolémée
 - ★ Il lui préfère un système héliocentrique: les planètes tournent autour du Soleil
 - ★ Il écrit « De Revolutionibus Orbium Coelestium » vers 1530 mais ne le publie pas craignant les réactions de l'église
 - ★ Son étudiant Rhéticus le pousse à publier peu avant sa mort en 1543
 - ★ Peu de réactions, uniquement des discussions d'experts



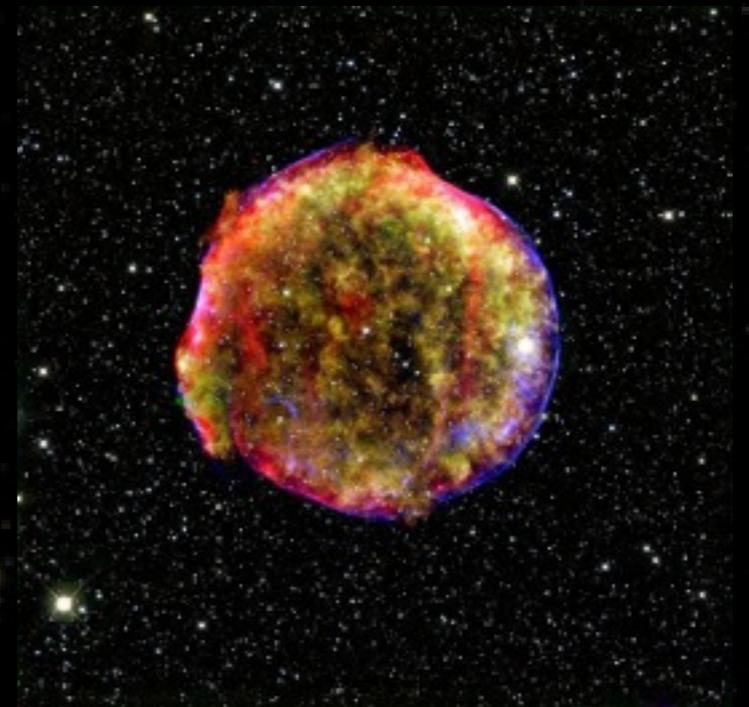
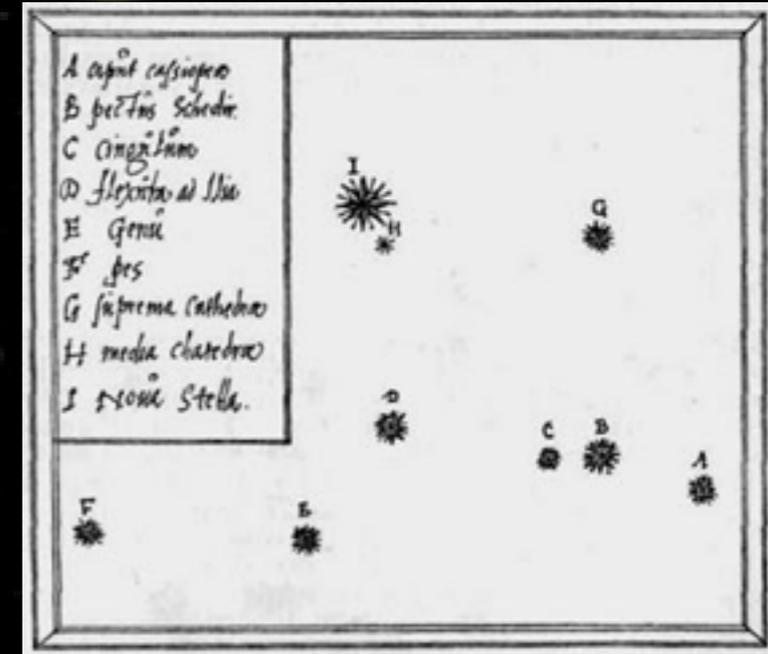
Tycho Brahe

- **Astronome Danois [1546-1601]**
 - ★ issu d'une famille riche
 - ★ Fait construire un observatoire sur une île danoise « Uraniborg »
 - ★ Améliore considérablement les instruments de l'époque (observation à l'oeil nu...)



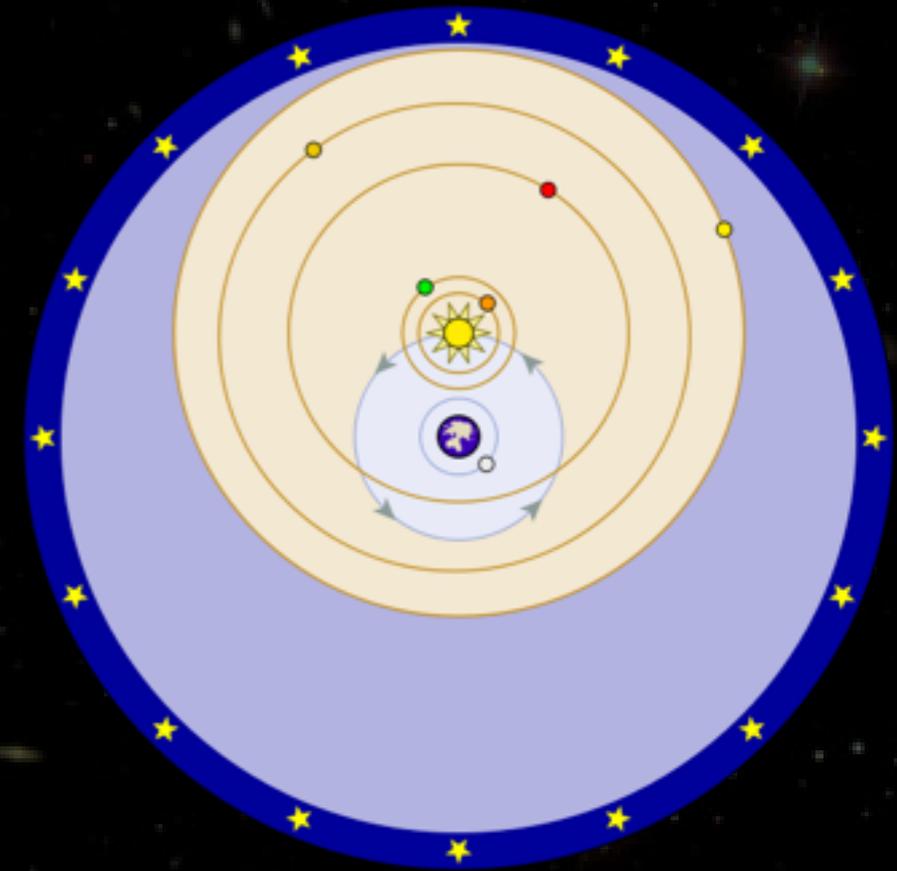
La nouvelle étoile de 1572

- T. Brahé: nouvelle étoile (stella nova)
 - ★ visible en plein jour à l'oeil nu (mag -4)
 - ★ Il l'étudie avec beaucoup de soin
 - Il ne constate pas de « parallaxe diurne » contrairement aux planètes
 - Elle est beaucoup plus lointaine
 - Sur plusieurs mois, elle demeure fixe par rapport aux étoiles
 - Elle fait partie des « étoiles fixes » et est donc très éloignée
 - ★ Le monde des étoiles n'est donc pas immuable !
 - ★ On a depuis découvert en 1960 un reste de SNIa à cet endroit
 - ★ en 2004 une étoile de type G2 (comme le soleil) a été trouvée dans la nébuleuse



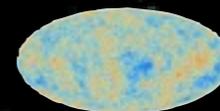
Les données de Tycho Brahé

- vers 1580 il dispose des meilleures observations de son temps
 - ★ Grâce à ses instruments mais aussi à l'exploitation des habitants de son île...
 - ★ Il développe un modèle dans lequel la Terre est immobile au centre, les autres astres tournent autour du soleil
 - c'est équivalent au modèle de Copernic...
 - ★ En particulier il a observé Mars en détails et son mouvement est encore incompris
 - ★ Kepler a besoin de ces données et vient l'assister durant ses dernières années



Giordano Bruno

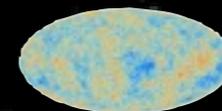
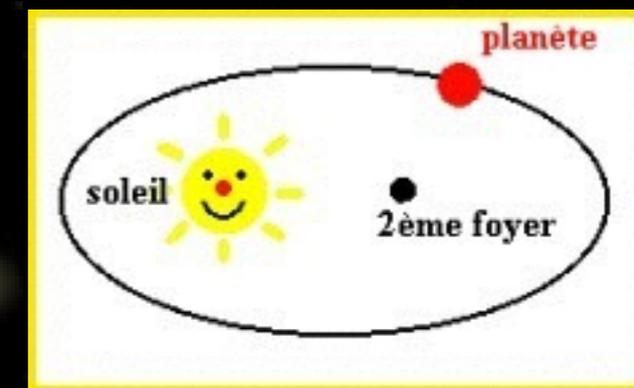
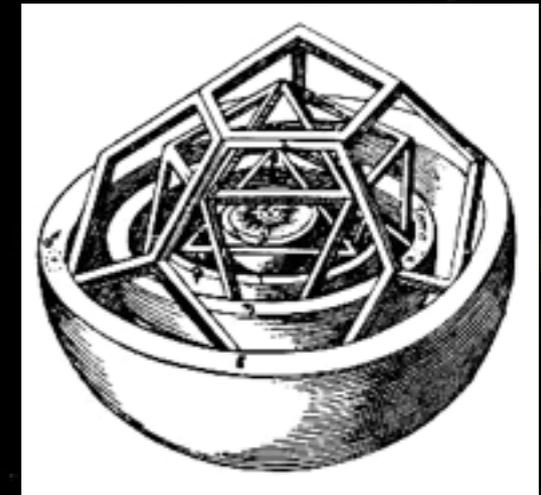
- Moine, philosophe Italien [1548-1600]
 - ★ Convaincu par le modèle Copernicien
 - ★ Il le pousse à l'extrême d'une point de vue philosophique
 - Univers infini, sans centre, peuplé d'astres et de mondes identiques au nôtre.
 - ★ Très largement révolté contre le carcan idéologique
 - met en doute le fait que la création soit l'oeuvre de Dieu
 - Jésus-Christ serait un simple « Mage habile »
 - le Saint-Esprit est l'âme du monde
 - Satan sera finalement sauvé
 - intérêt pour la magie
 - ★ Jugé par l'inquisition (procès de 8 ans) pour ses hérésies (mais pas vraiment en rapport avec le modèle copernicien)
 - ★ Brulé vif sur le Campo de' Fiori à Rome en 1600
 - ★ Cela refroidit pas mal les partisans du modèle copernicien...



Johannes Kepler



- **Astronome allemand [1571-1630]**
 - ★ Convaincu par le modèle copernicien
 - ★ 1604: Supernova de Kepler (dernière dans la Galaxie)
 - mag -2.5 (un peu moins que Jupiter) visible en plein jour ~ 3 semaines
 - ★ Fasciné par les « solides pythagoriciens », il tente de faire coller les observations des planètes avec ces formes régulières
 - ★ Il se lance dans des calculs incroyablement complexes
 - C'est l'inventeur de l'analyse de données !
 - ★ Il obtient de Tycho Brahe les données de Mars qui résistent à l'explication
 - ★ Il découvre les trois lois de Kepler
 - Loi des orbites, loi des aires et loi des périodes
 - Ces lois régissent les mouvements des astres



Galilée

- **Physicien italien [1564-1642]**

- ★ **Le premier expérimentaliste: chutes d'objets ~1600**

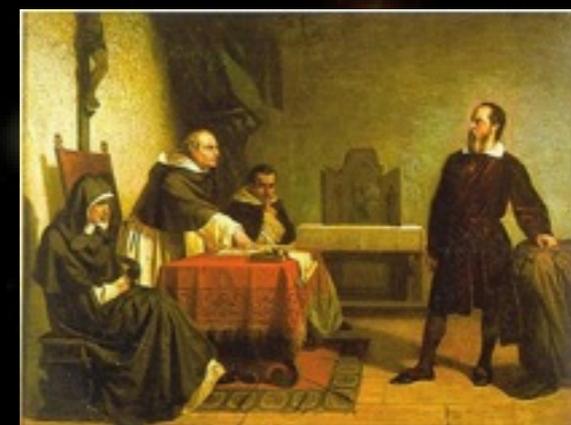
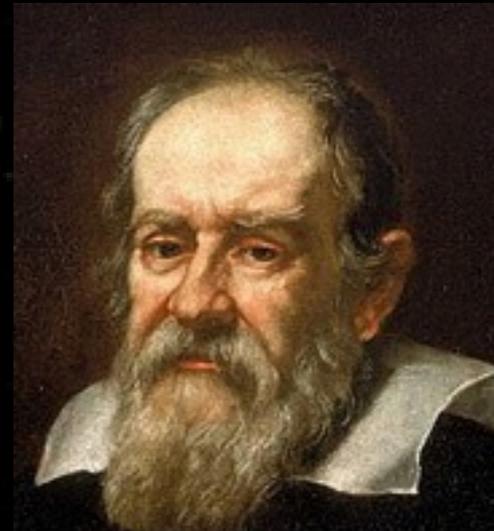
- « L'immobilité n'est pas un état naturel: quand un objet bouge, il continue à bouger à moins d'être arrêté »
- En complète opposition avec Aristote et Ptolémée

- ★ **Galilée observe le ciel en 1609 avec une lunette**

- Voit des cratères et des montagnes sur la Lune
- Taches solaires
- Phases de Vénus (incompatible avec le modèle de Ptolémée)
- 4 satellites de Jupiter: certains corps ne tournent pas autour de la Terre
- Il est définitivement convaincu par le modèle copernicien

- ★ **Il publie «Le messager céleste» en 1610 ou il défend le modèle Copernicien**

- Procès, rétractation, 9 ans d'assignation à résidence...
- Réhabilitation par l'Église Catholique Romaine en 1992



D'autres découvertes...

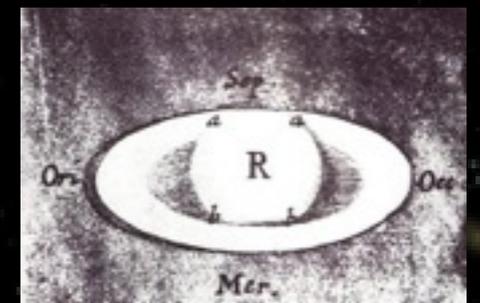
- Zupi:

- ★ Phases de Mercure en 1639



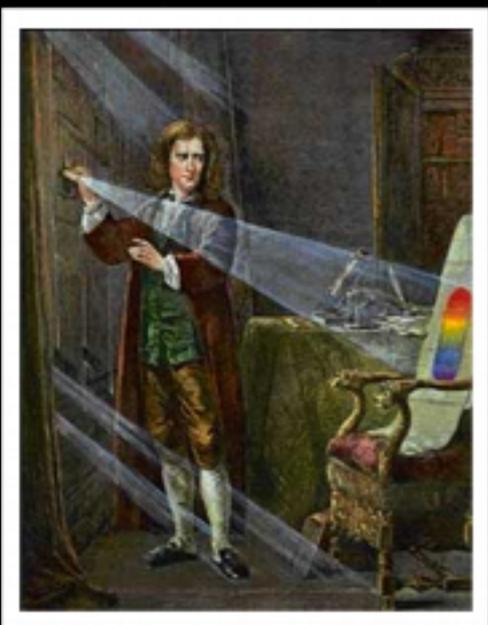
- Huygens:

- ★ 1659: observe les anneaux de saturne
- ★ 1678: montre que la lumière est faite d'ondes



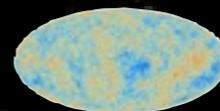
- Newton:

- ★ 1665: loi de la Gravitation Universelle
- ★ 1672: le télescope de Newton (miroirs)
- ★ 1686: publication des «principia»
 - Généralisation et compréhension des lois de Kepler

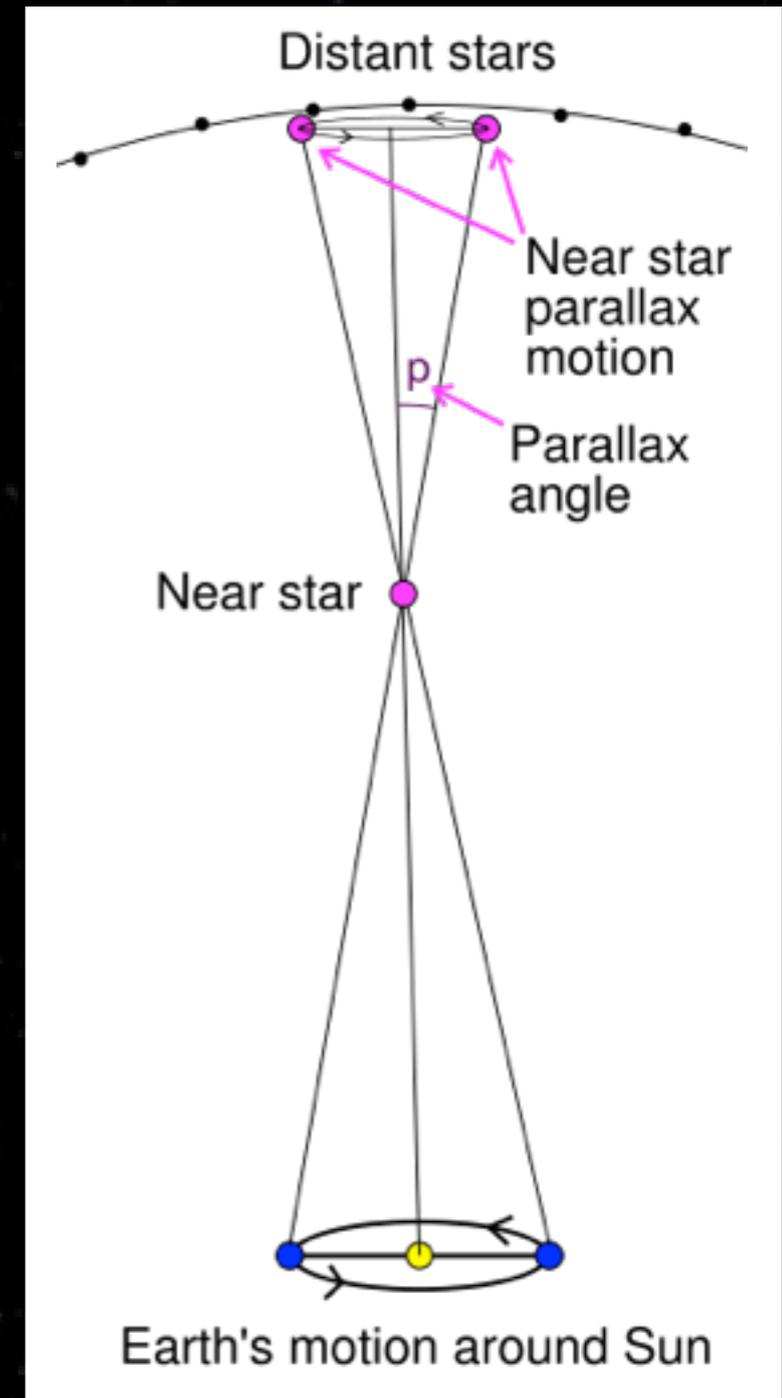
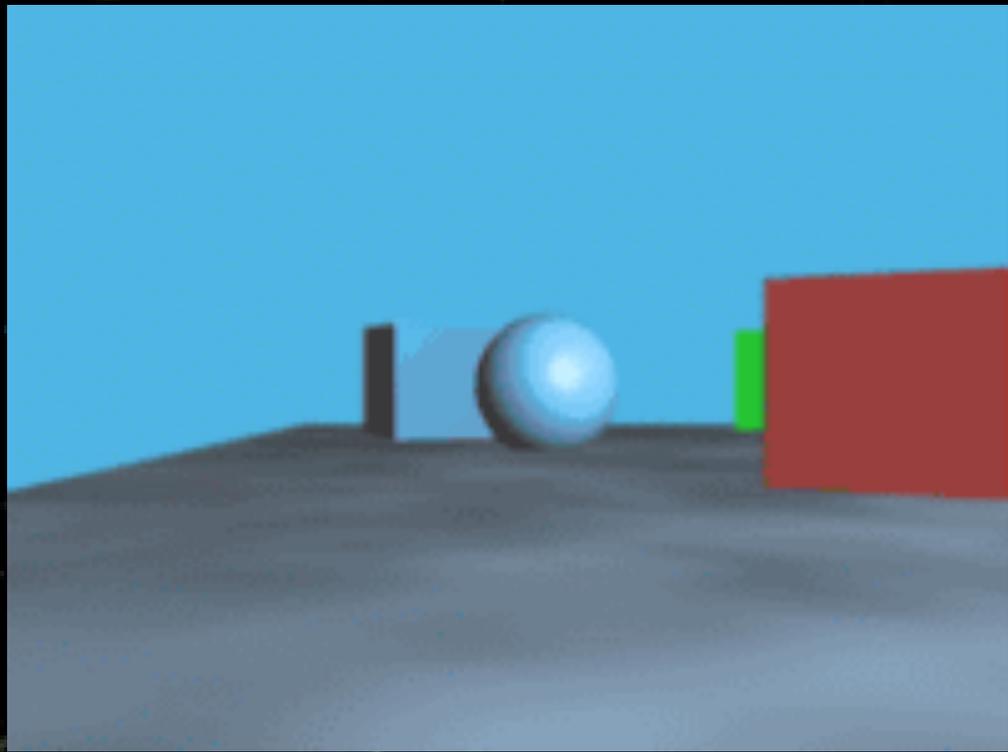


Acceptation du modèle copernicien

- NB: On n'a pas parlé de Descartes, mais on aurait dû...
- Le modèle devient impossible à nier:
 - ★ Plus logique, plus simple...
 - ★ Confirmé par toutes les observations
 - ★ Tous s'explique élégamment dans le cadre de la théorie de la gravitation de Newton
 - ★ Le modèle copernicien ne sera accepté officiellement par l'Église Catholique Romaine qu'en 1992
- Une prédiction du modèle copernicien demeurerait inobservée: les parallaxes stellaires

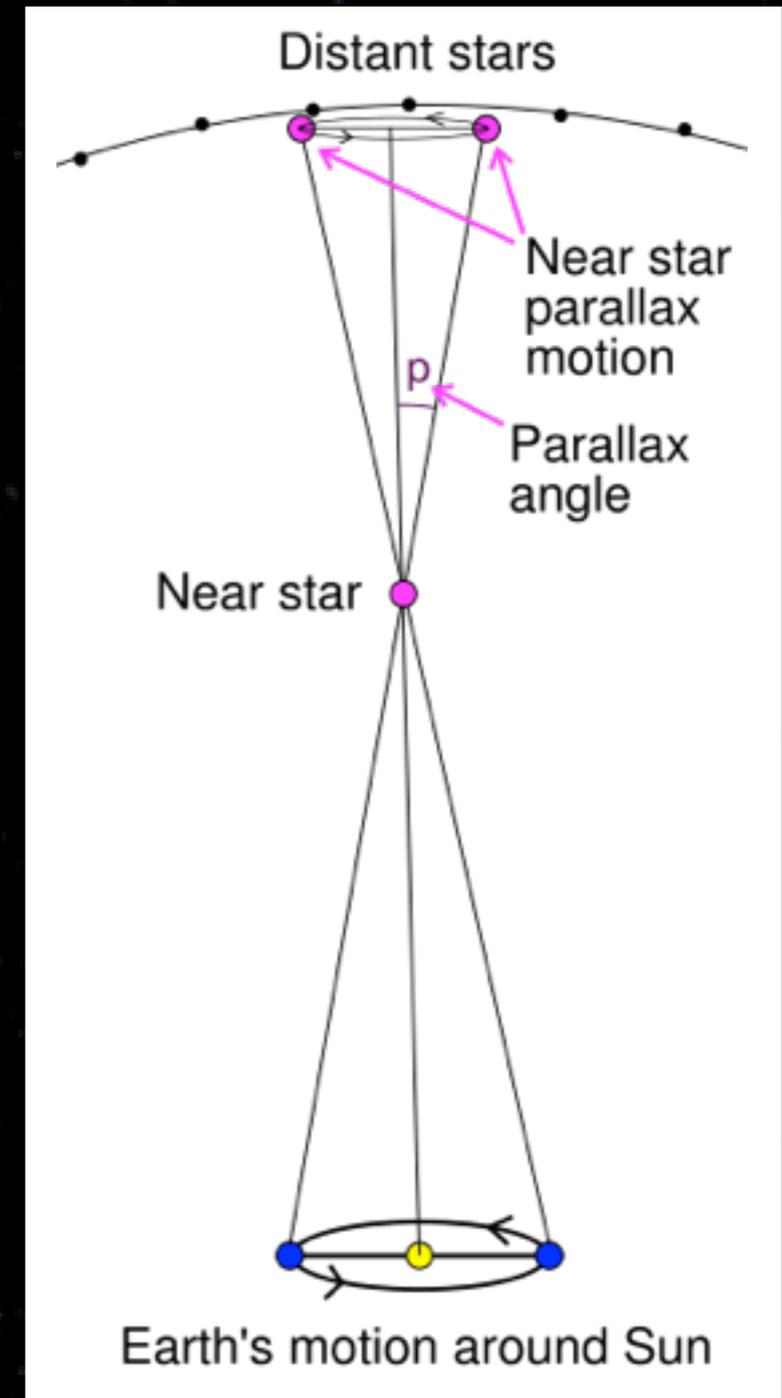
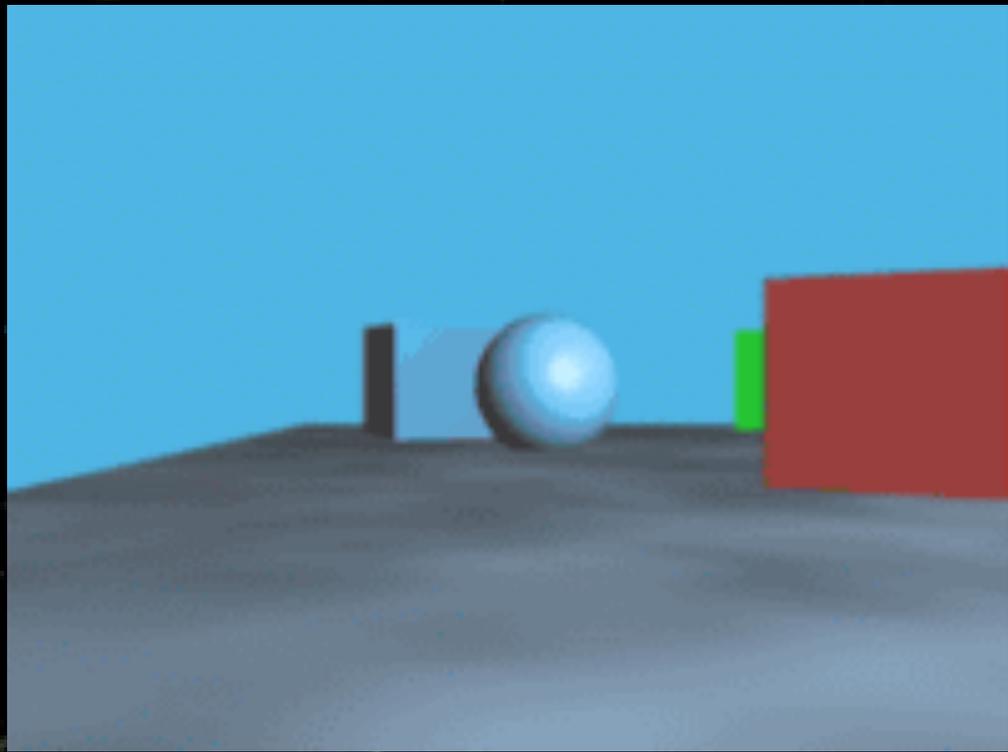


Parallaxes (mesurées en 1838)



Proxima centauri:
~0.8 arcsec

Parallaxes (mesurées en 1838)



Proxima centauri:
~0.8 arcsec

Les observations se raffinent



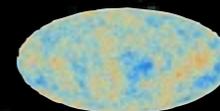
- **Halley:**

- ★ prédit la comète de 1682
- ★ 1718: découvre les mouvements propres des étoiles

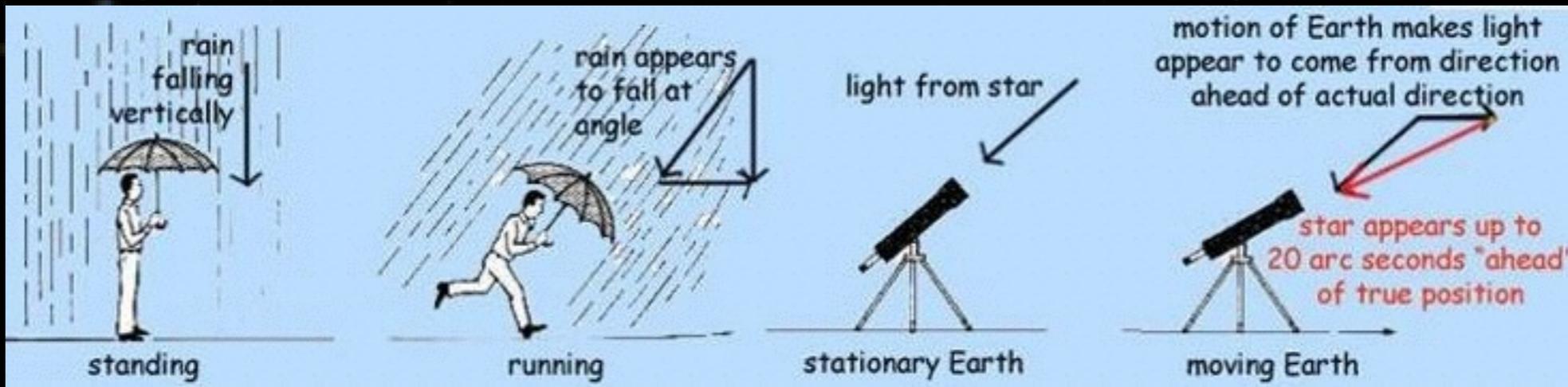
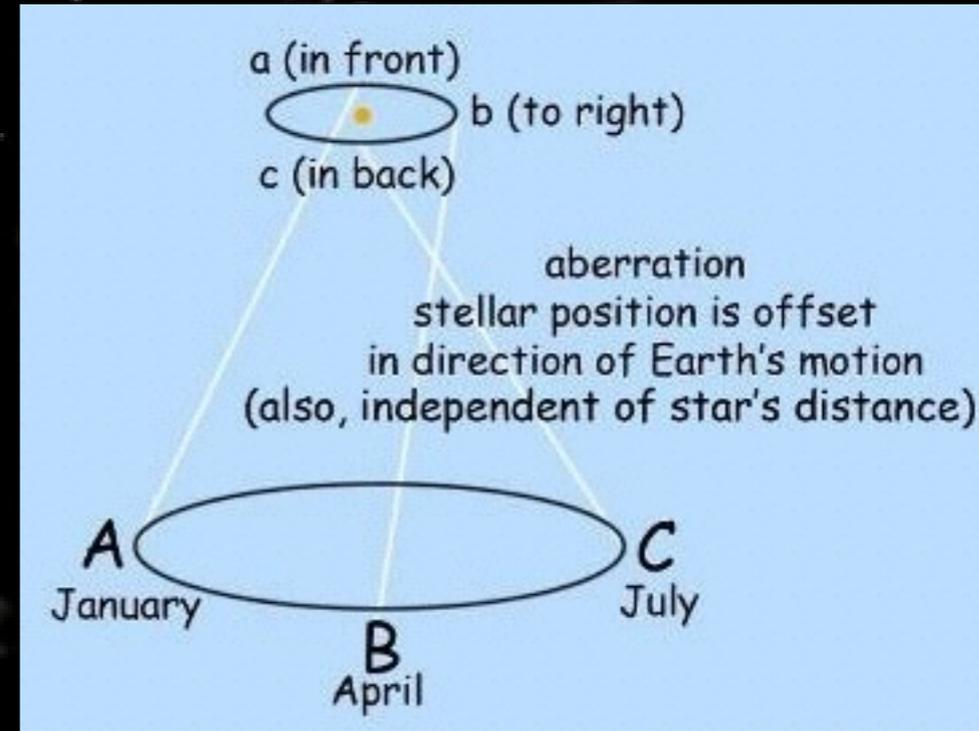
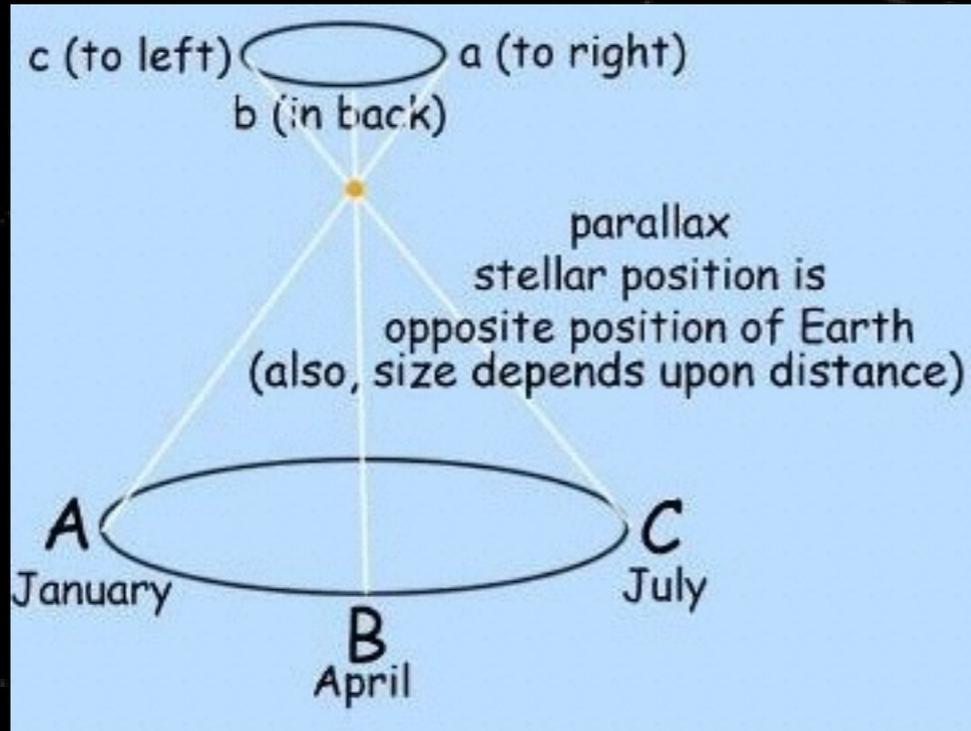


- **Bradley:**

- ★ 1729: découvre les l'aberration des étoiles
 - Première grande confirmation directe du modèle copernicien
 - La vitesse de la lumière est la même pour toutes les étoiles



Aberration des étoiles (Bradley, 1729)



Amplitude : ~ 20 arcsec

Les observations se raffinent



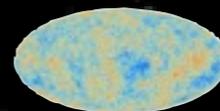
- **Halley:**

- ★ prédit la comète de 1682
- ★ 1718: découvre les mouvements propres des étoiles



- **Bradley:**

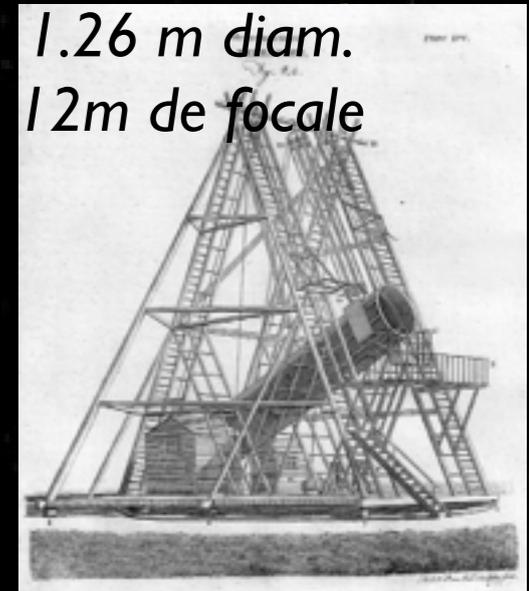
- ★ 1729: découvre les l'aberration des étoiles
 - Première grande confirmation directe du modèle copernicien
 - La vitesse de la lumière est la même pour toutes les étoiles



Les observations se raffinent

- **Herschel:**

- ★ Étude des étoiles doubles, hypothèse de binaires (~1800)
- ★ 1781: Découverte d'Uranus
- ★ 1785: Forme aplatie de la voie lactée
- ★ Grand constructeur de télescopes
- ★ découvreur de la composante infrarouge dans la lumière solaire
- ★ Calotte glaciaire de Mars variable



- **Goodricke:**

- ★ 1783: Explication de variation d'Algol comme une binaire à éclipses



Les observations se raffinent

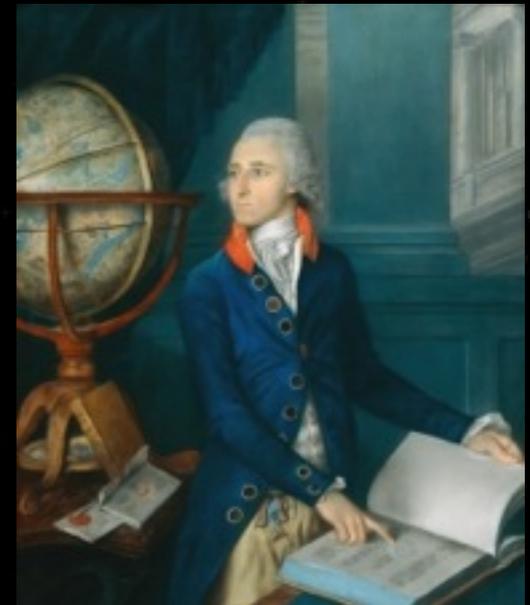
- **Herschel:**

- ★ Étude des étoiles doubles, hypothèse de binaires (~1800)
- ★ 1781: Découverte d'Uranus
- ★ 1785: Forme aplatie de la voie lactée
- ★ Grand constructeur de télescopes
- ★ découvreur de la composante infrarouge dans la lumière solaire
- ★ Calotte glaciaire de Mars variable



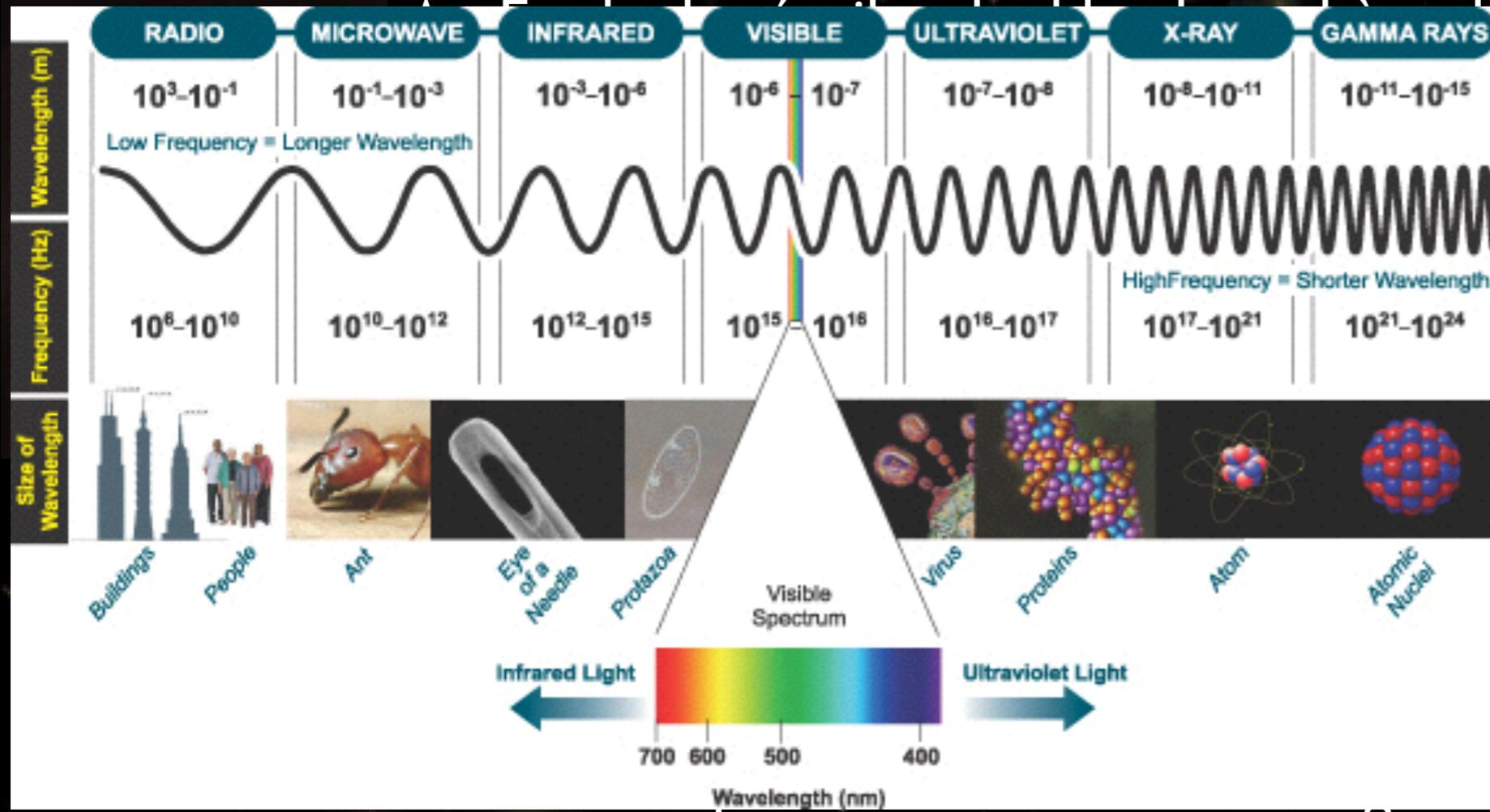
- **Goodricke:**

- ★ 1783: Explication de variation d'Algol comme une binaire à éclipses



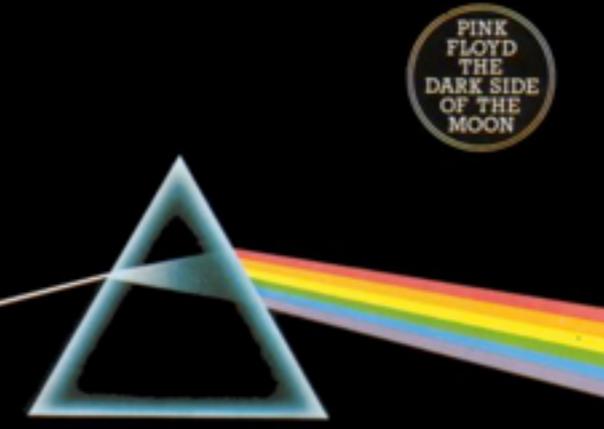
Les observations se raffinent

- Herschel:



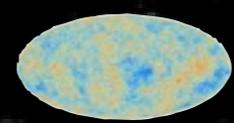
binaires

1.26 m diam.
12m de focale



une binaire à éclipses

comme



Les observations se raffinent

- **Herschel:**

- ★ Étude des étoiles doubles, hypothèse de binaires (~1800)
- ★ 1781: Découverte d'Uranus
- ★ 1785: Forme aplatie de la voie lactée
- ★ Grand constructeur de télescopes
- ★ découvreur de la composante infrarouge dans la lumière solaire
- ★ Calotte glaciaire de Mars variable



- **Goodricke:**

- ★ 1783: Explication de variation d'Algol comme une binaire à éclipses



Recensement des nouveaux objets

- Messier:

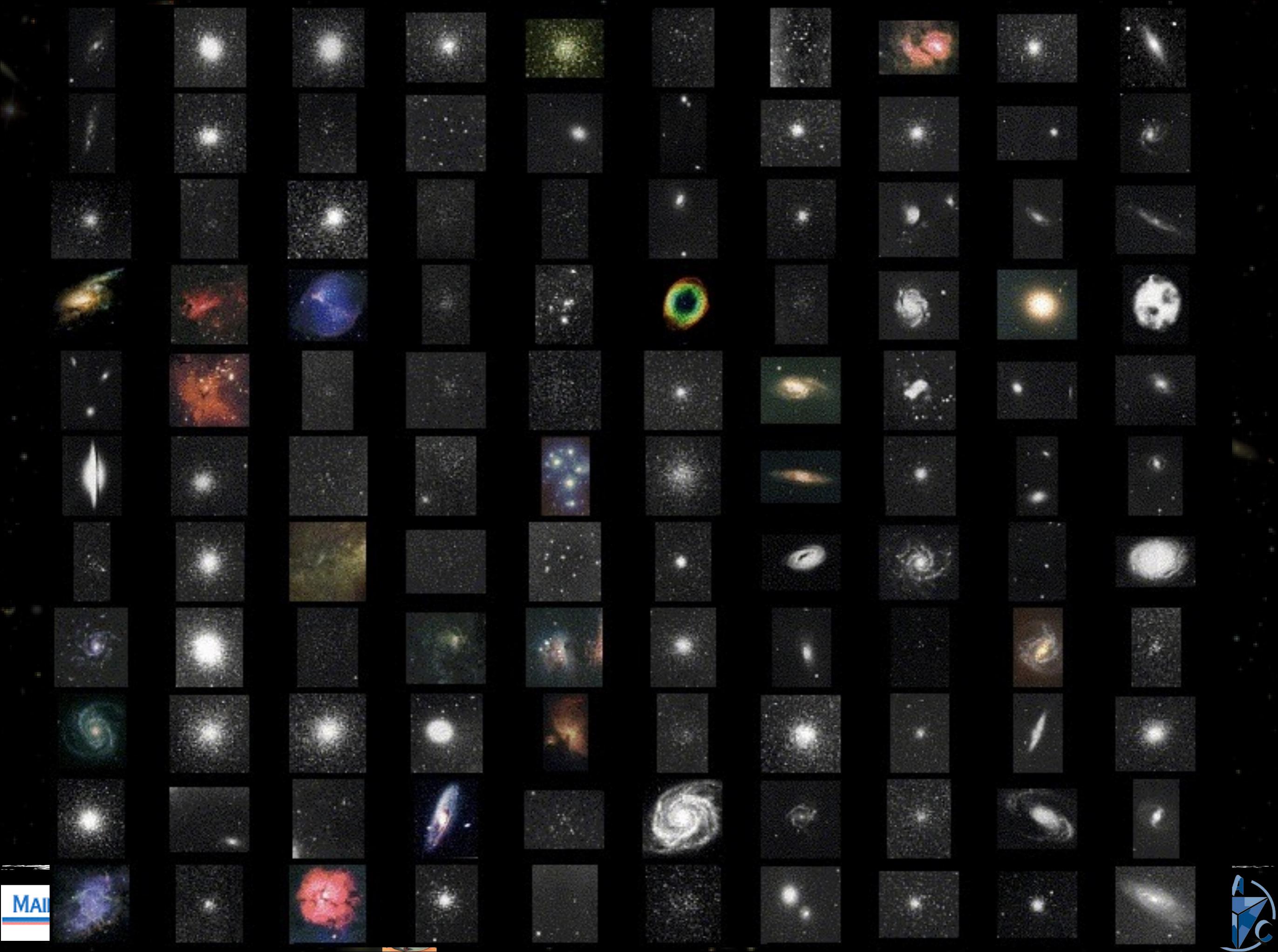
- ★ Chercheur de comètes

- ★ 1781: publie un catalogue de 110 objets nébuleux:

- objets non stellaires (flous dans un télescope) inexplicés à l'époque
- On sait aujourd'hui que ce sont des galaxies, des amas ou des nuages de gaz



M31



Recensement des nouveaux objets

- **Messier:**

- ★ Chercheur de comètes
- ★ 1781: publie un catalogue de 103 objets nébuleux:
 - objets non stellaires (flous dans un télescope) inexplicés à l'époque
 - On sait aujourd'hui que ce sont des galaxies, des amas ou des nuages de gaz



- **Herschel: entre 1782 et 1802:**

- ★ Recherche systématique
- ★ Plus de 2500 nébuleuses publiées dans 3 catalogues
- ★ Ce catalogue sera plus tard étendu et formera le NGC (new General Catalog)

- **Astéroïdes, météorites**

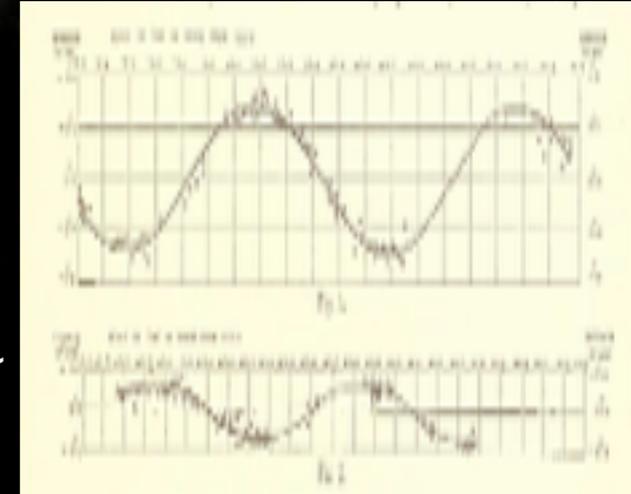
- ★ 1801: Ceres (~500km diam) découvert par Pazzi
- ★ 1803: Les météorites viennent vraiment du ciel
 - Olmstead (1833): explication des météorites:
 - La Terre croise un nuage



On semble « comprendre » des choses !

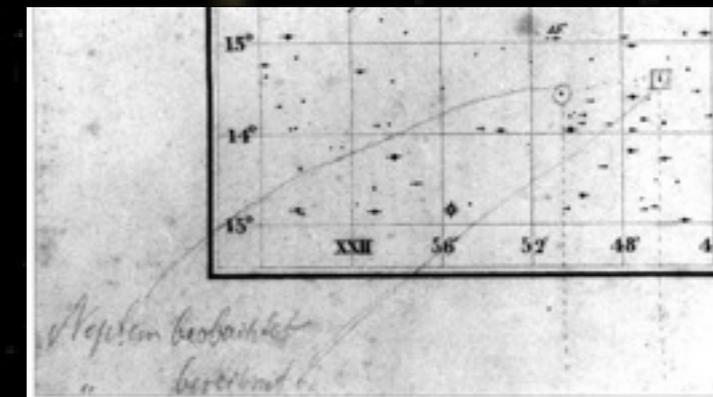
- **Parallaxes:**

- ★ 1838: premières mesures de distances d'étoiles (Bessel, Sthruve, Henderson)
- ★ Les étoiles sont beaucoup plus loin que prévu: la plus proche est à 4 a.l.



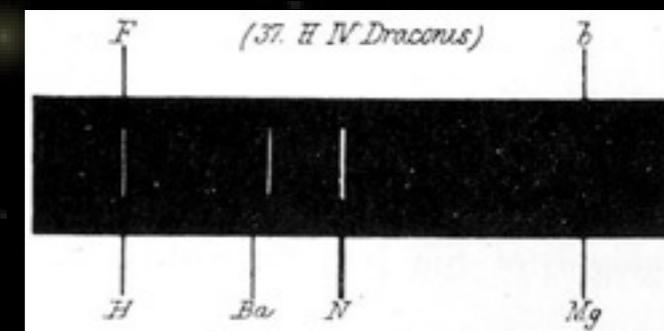
- **Découverte de Neptune:**

- ★ 1846: Le Verrier prédit et découvre Neptune

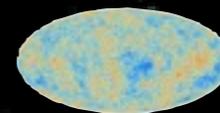
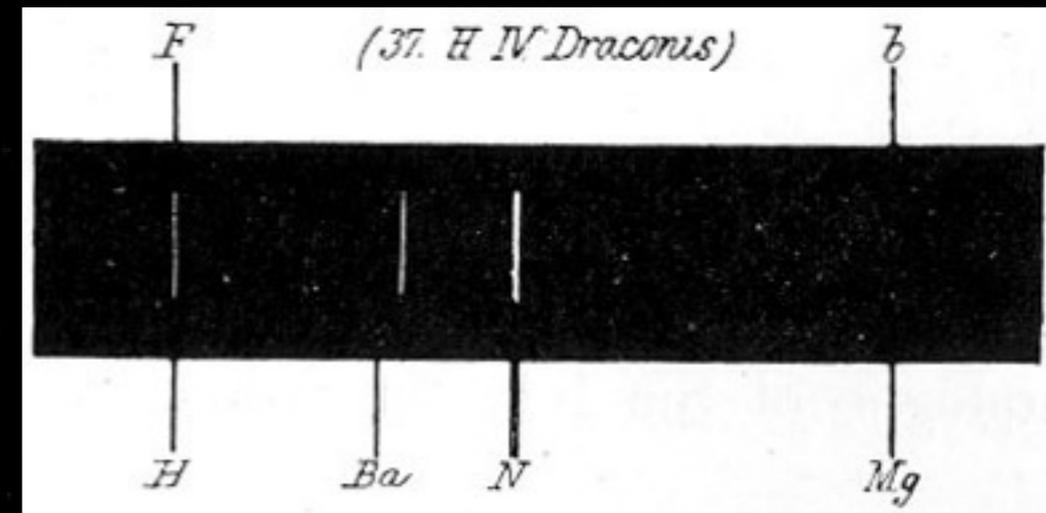
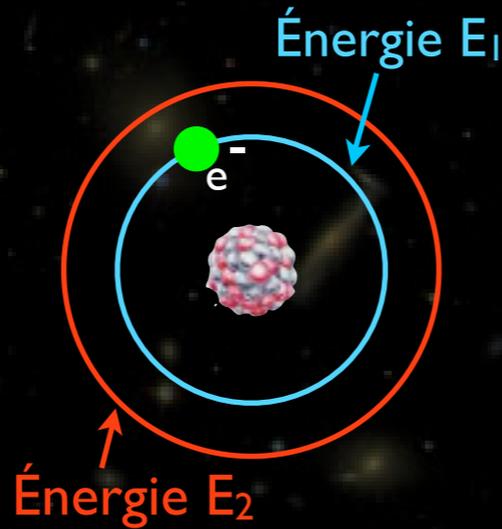
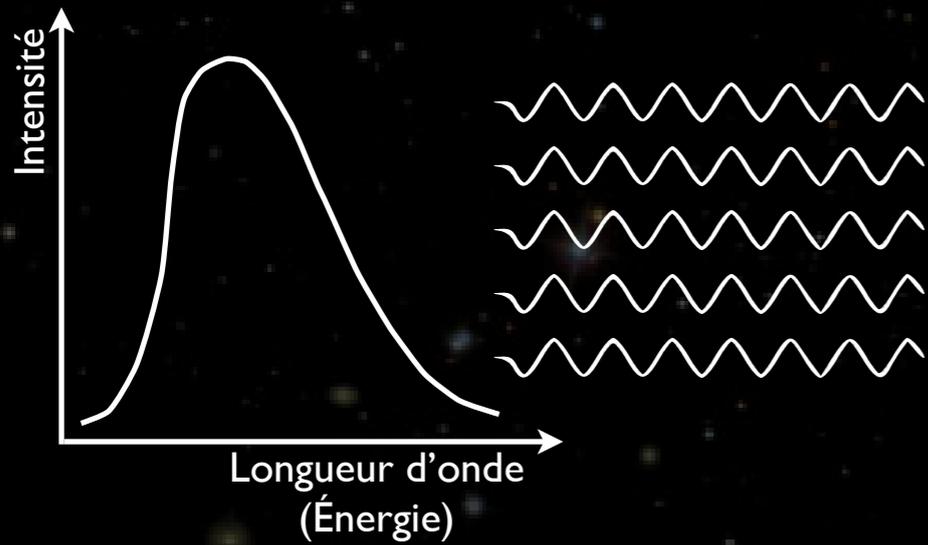
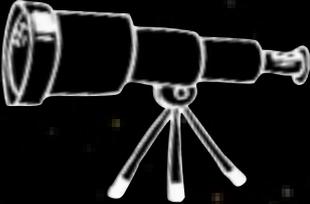


- **Raies d'absorption**

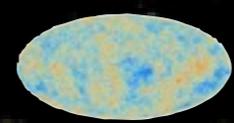
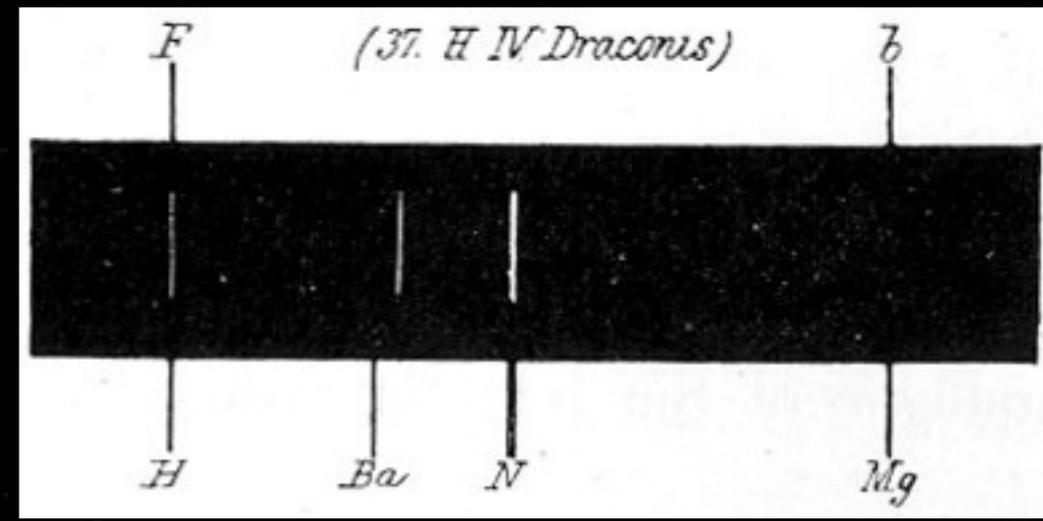
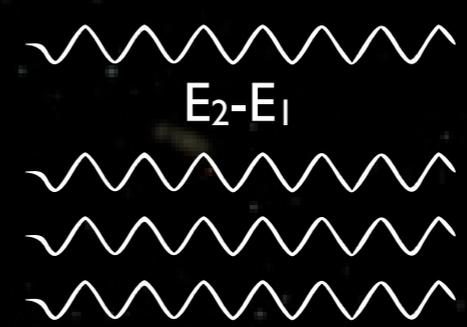
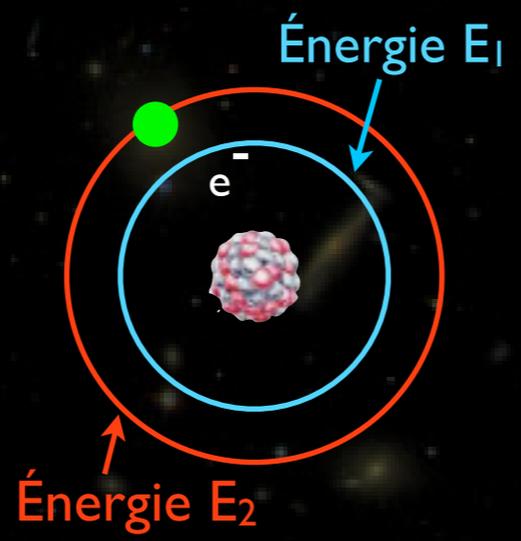
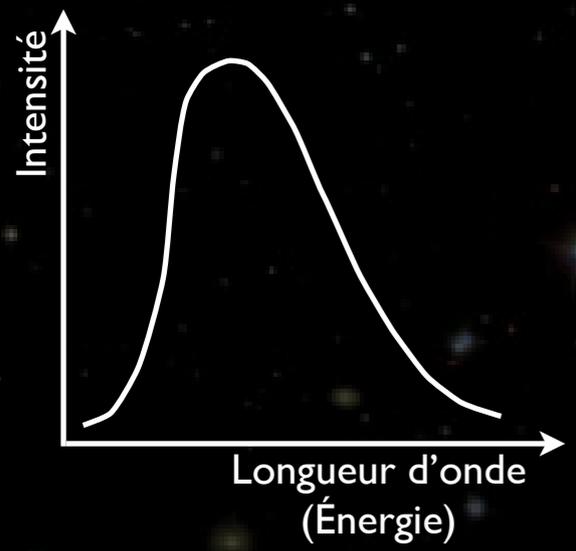
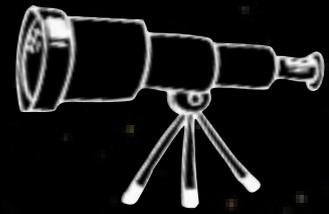
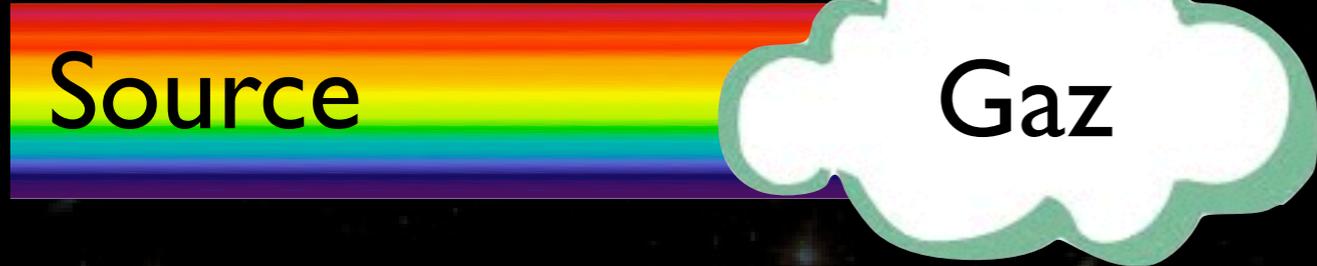
- ★ 1862: Huggins identifie les raies d'absorption des étoiles avec les éléments chimiques présents au laboratoire



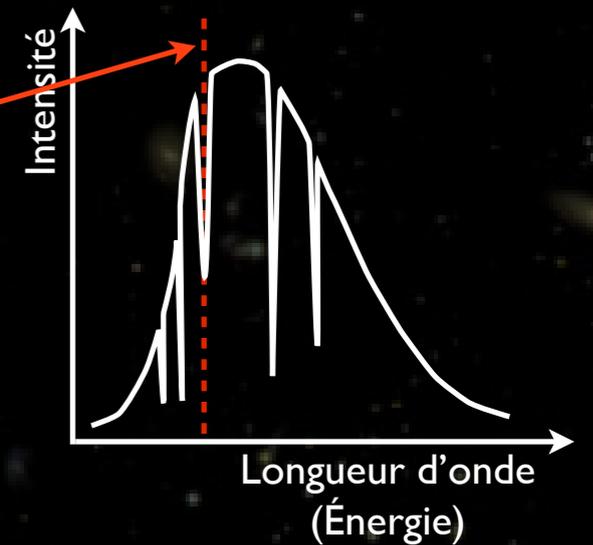
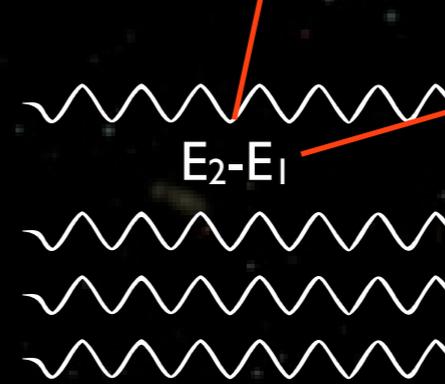
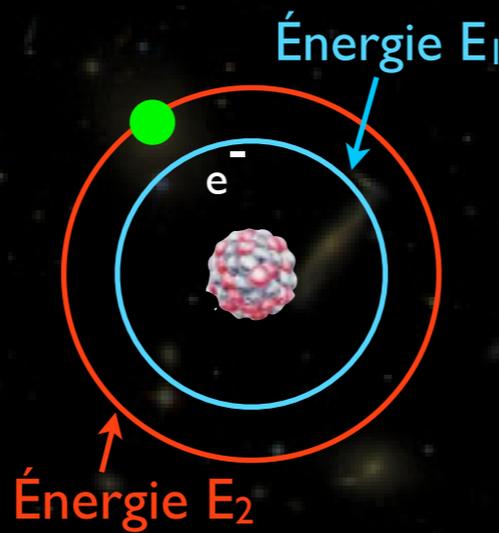
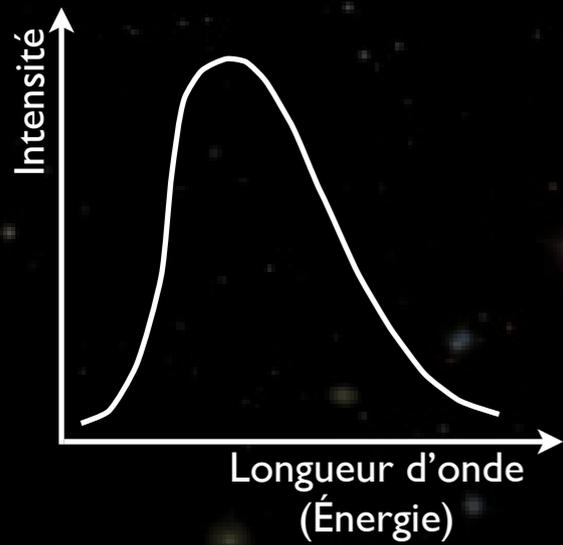
Spectres et raies (aujourd'hui)



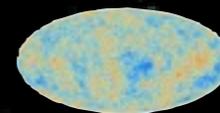
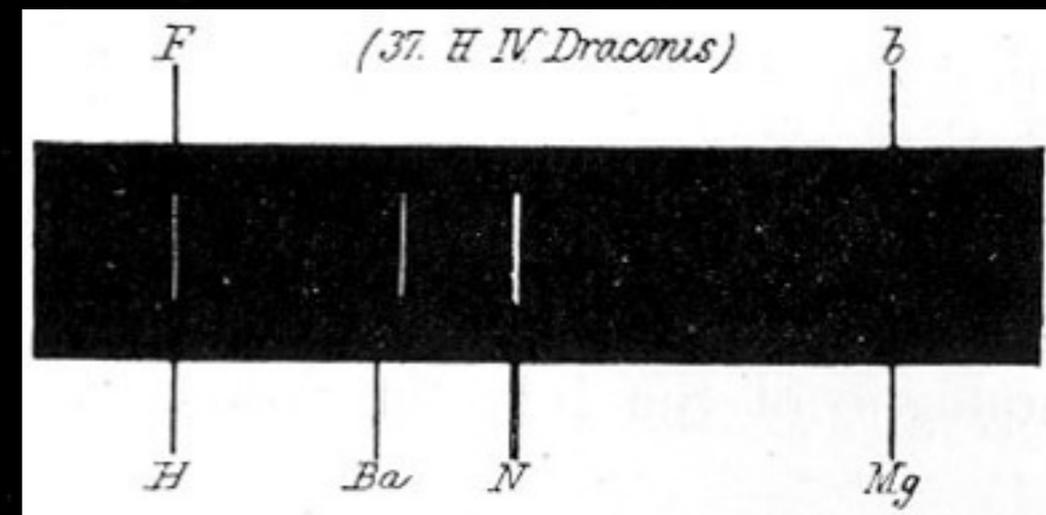
Spectres et raies (aujourd'hui)



Spectres et raies (aujourd'hui)



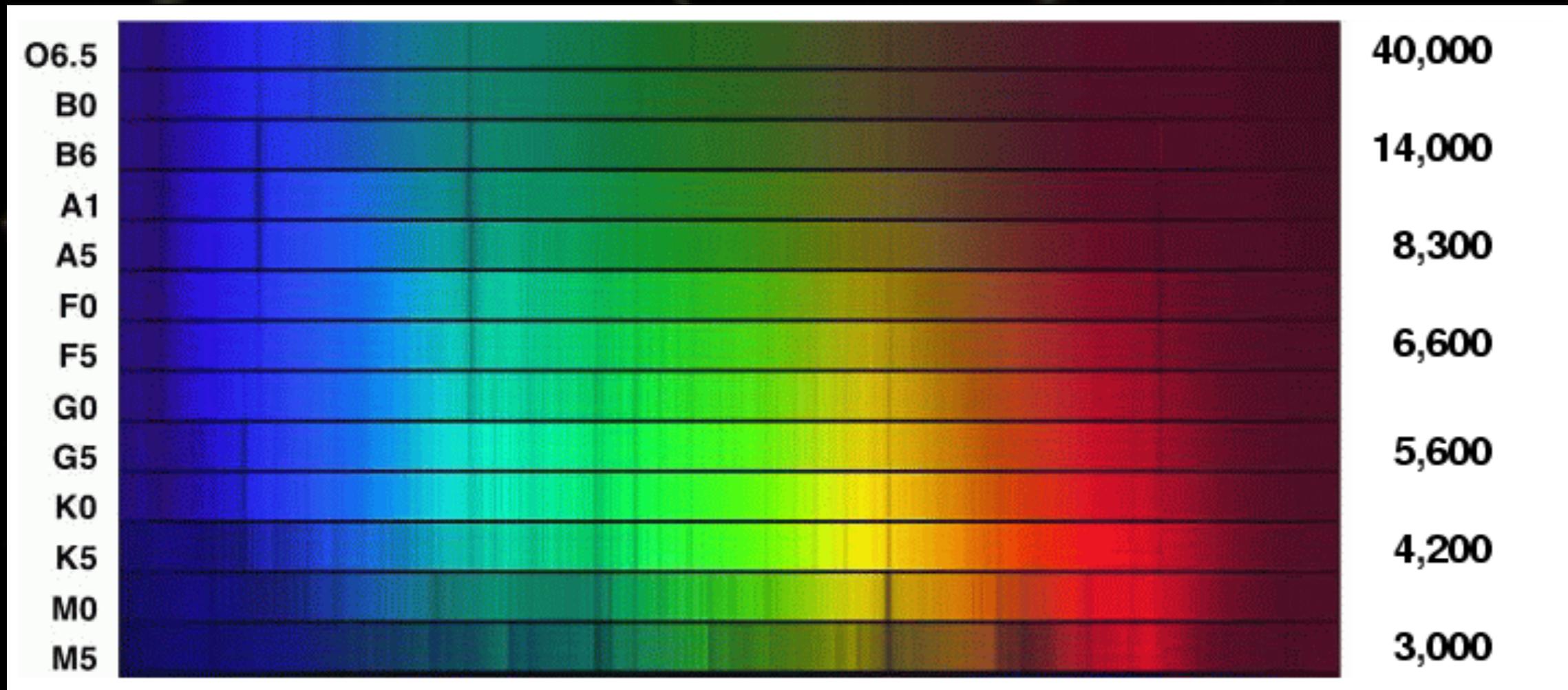
- La position des raies correspond à des transitions observées en laboratoire.
- On sait les reconnaître (doublets, triplets, ...)



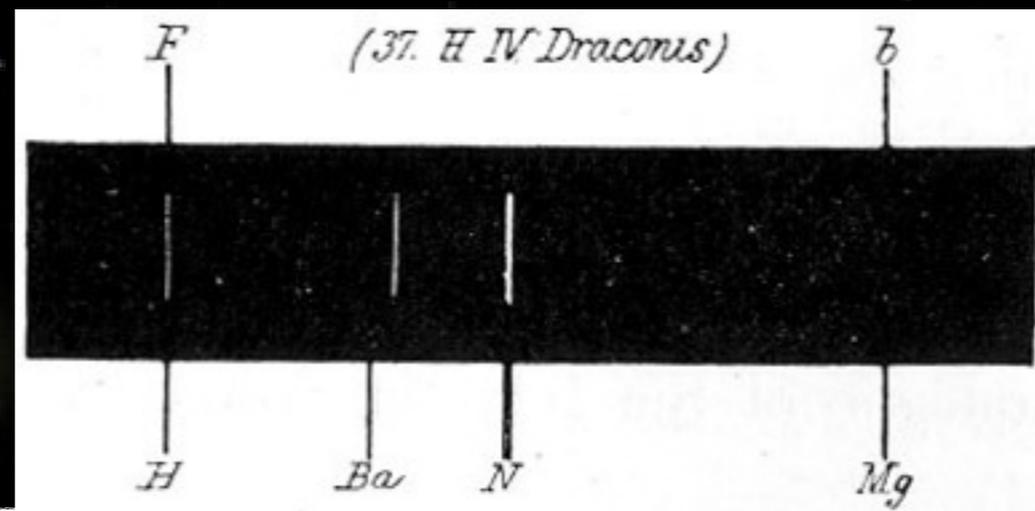
Spectres stellaires (aujourd'hui)

Type d'étoile

Température

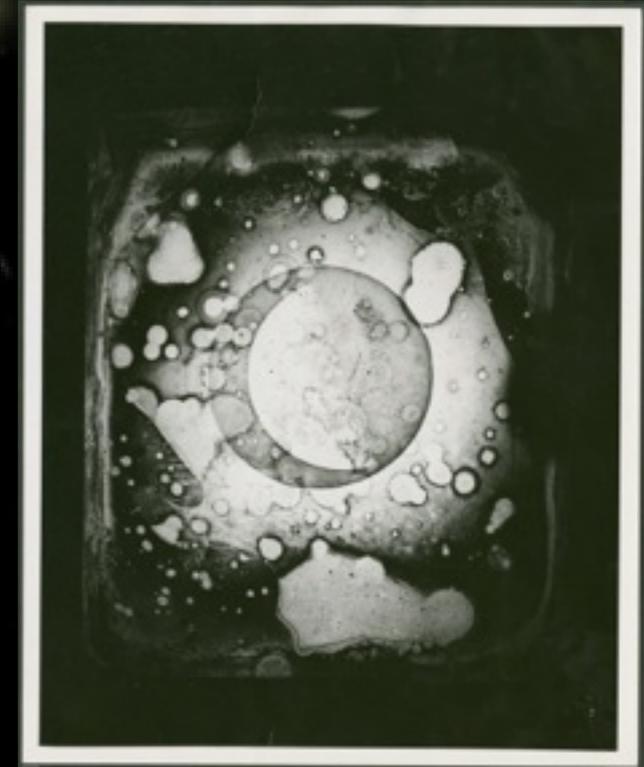


Mesures
de Huggins



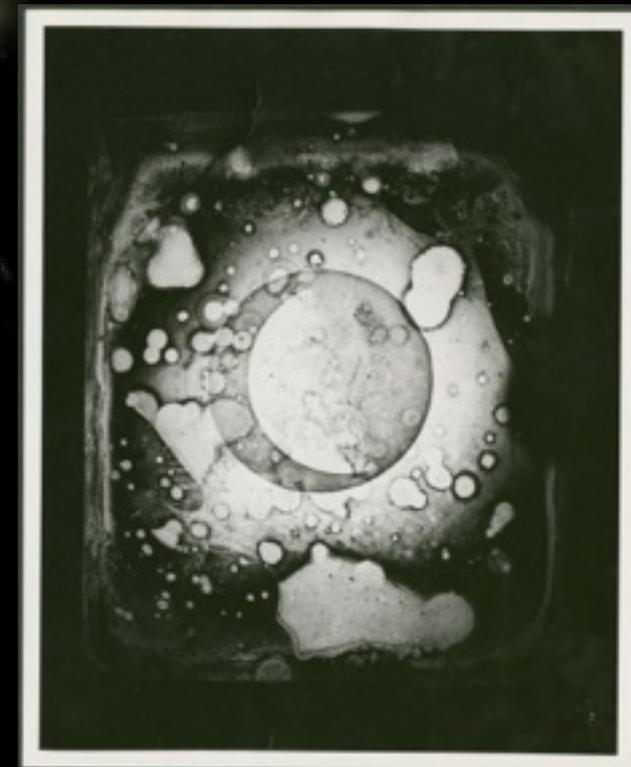
La photographie !

- entre 1820 et 1840: Niépce, Herschel (fils),
Daguerre
 - ★ 1839: Daguerre tente de photographier la Lune mais échoue
 - ★ 1840: Draper fait une exposition de 20 min sur la Lune →
- Révolution pour l'astronomie
 - ★ Permet de collecter plus de photons (temps de pose, diamètre)
 - ★ Permet d'accroître la résolution angulaire (diamètre)



La photographie !

- entre 1820 et 1840: Niépce, Herschel (fils),
Daguerre
 - ★ 1839: Daguerre tente de photographier la Lune mais échoue
 - ★ 1840: Draper fait une exposition de 20 min sur la Lune →
- Révolution pour l'astronomie
 - ★ Permet de collecter plus de photons (temps de pose, diamètre)
 - ★ Permet d'accroître la résolution angulaire (diamètre)



Fizeau & Foucault

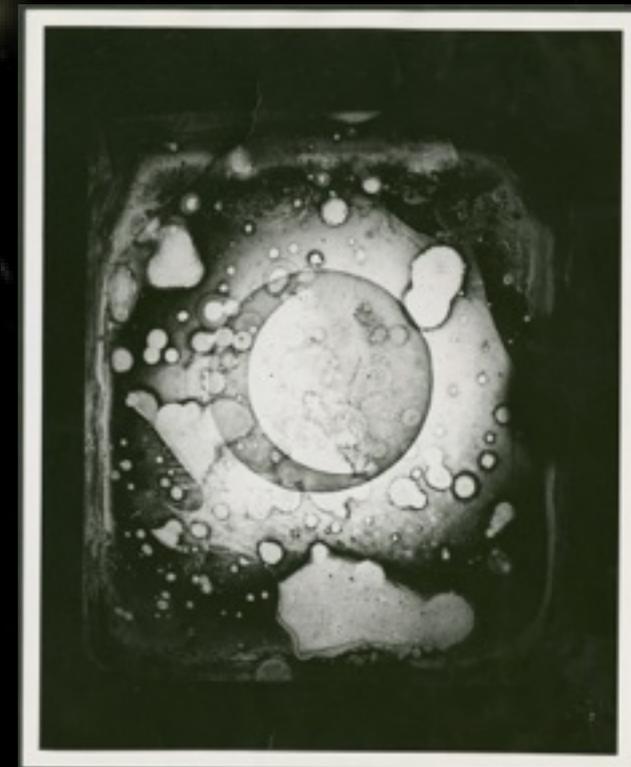
Soleil



1845

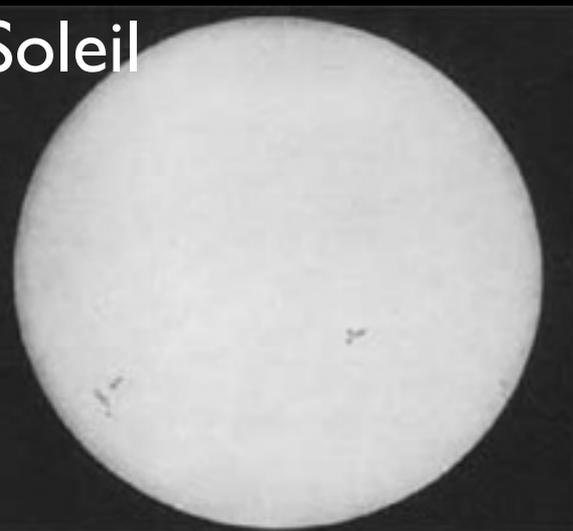
La photographie !

- entre 1820 et 1840: Niépce, Herschel (fils),
Daguerre
 - ★ 1839: Daguerre tente de photographier la Lune mais échoue
 - ★ 1840: Draper fait une exposition de 20 min sur la Lune →
- Révolution pour l'astronomie
 - ★ Permet de collecter plus de photons (temps de pose, diamètre)
 - ★ Permet d'accroître la résolution angulaire (diamètre)



Fizeau & Foucault

Soleil



1845

Berkowski

Eclipse de soleil



1851

La photographie !

- entre 1820 et 1840: Niépce, Herschel (fils),
Daguerre

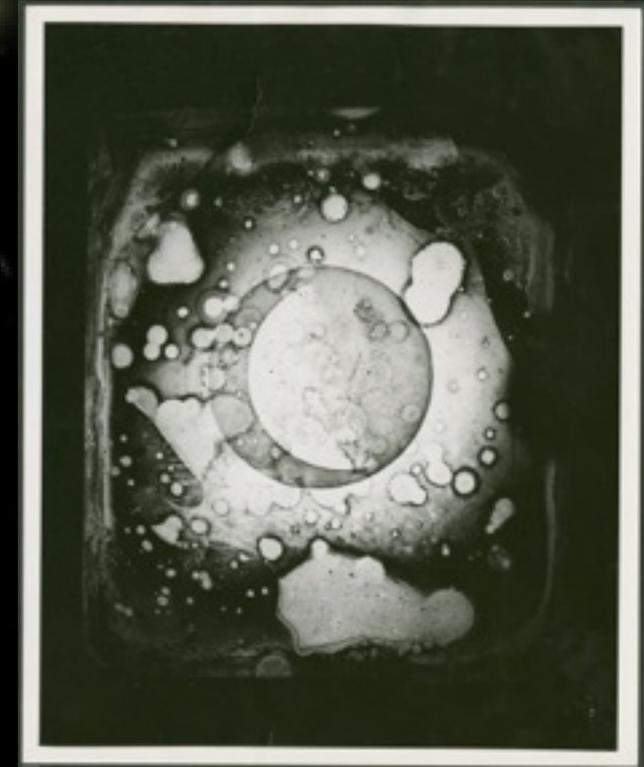
- ★ 1839: Daguerre tente de photographier la Lune mais échoue

- ★ 1840: Draper fait une exposition de 20 min sur la Lune →

- Révolution pour l'astronomie

- ★ Permet de collecter plus de photons (temps de pose, diamètre)

- ★ Permet d'accroître la résolution angulaire (diamètre)



Fizeau & Foucault

Soleil



1845

Berkowski

Eclipse de soleil



1851

H. Draper

Lune



1863

Lune

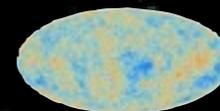


1876

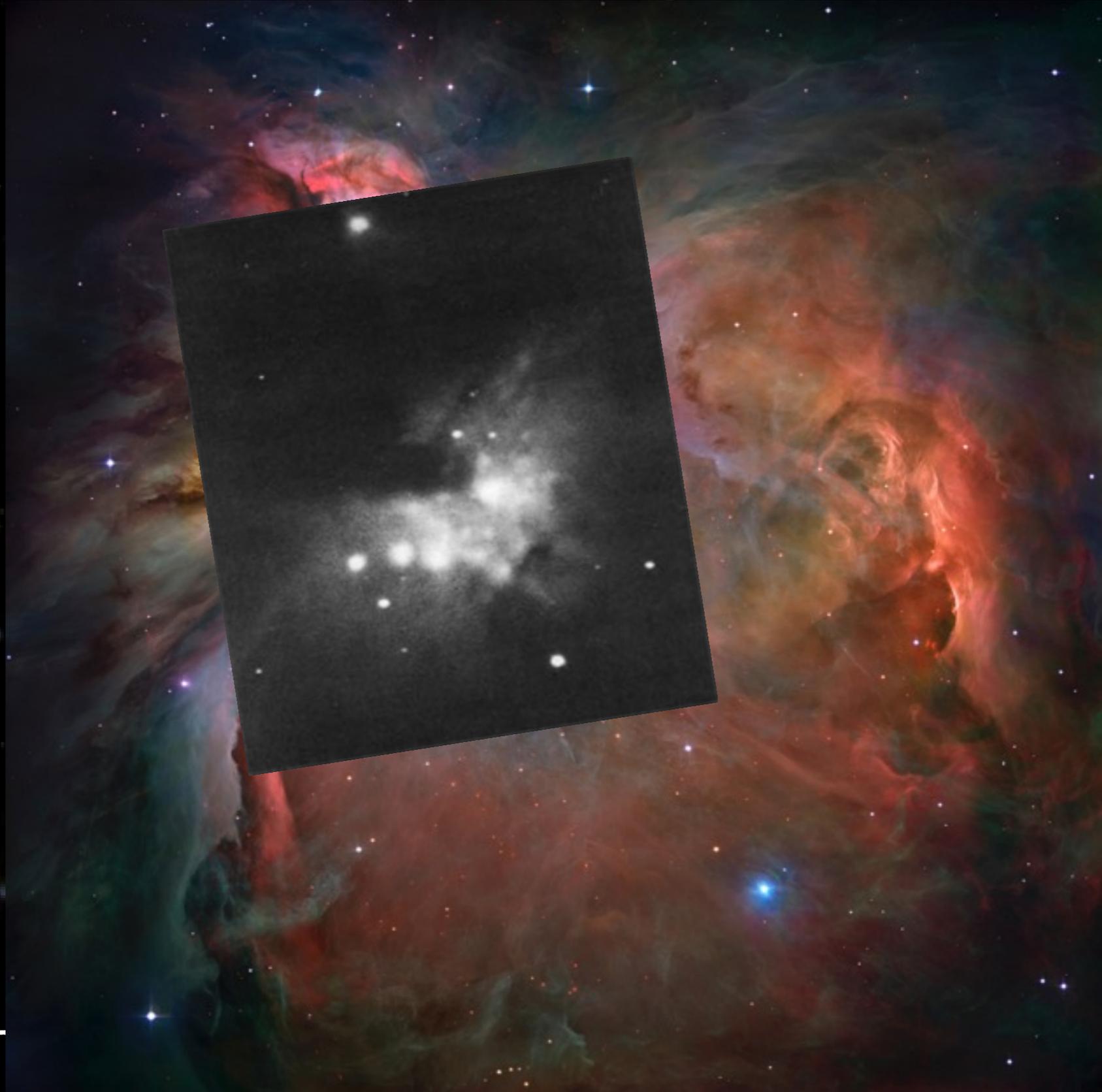
Orion



1880



Orion: Draper 1882 Vs HST 2006



Orion: Draper 1882 Vs HST 2006



Le grand débat (1920)

- Nature et distance des nébuleuses spirales ?
 - ★ Objets dans notre galaxie qui serait « tout » l'Univers
 - Position de H. Shapley
 - ★ Autres « Univers-îles » lointains
 - Position de H. Curtis
- Clos en 1925 par E. Hubble
 - ★ Détecte des « Céphéides » dans M33
 - ★ étoiles variables dont la période est liée à la luminosité absolue
 - ★ Mesure la distance à M33, M31 et d'autres galaxies et prouve qu'elles sont externes...



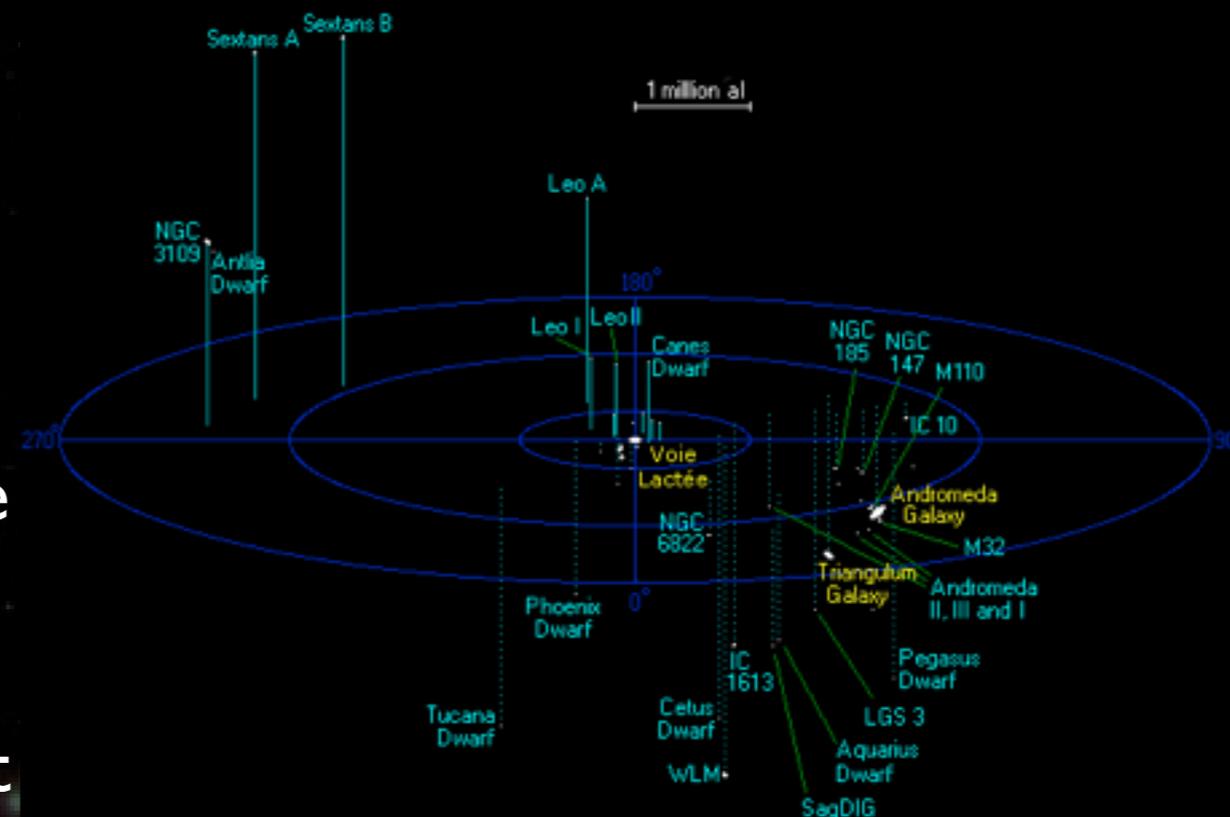
H. Shapley



H. Curtis



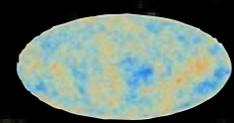
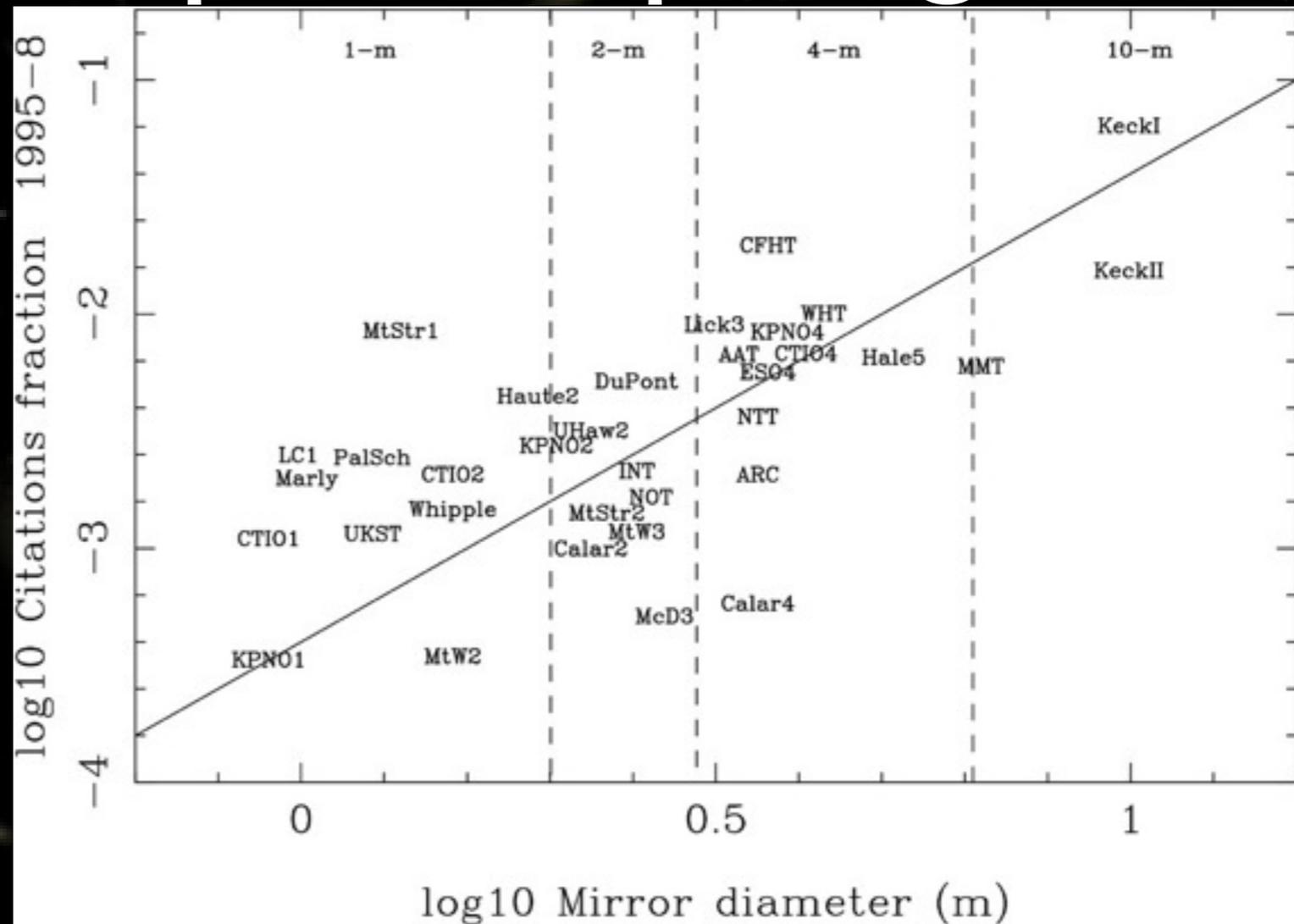
E. Hubble



Rayon du disque Galactique: 80000 a.l.
Galaxie d'Andromède : 2.4 M a.l.

Des télescopes de plus en plus grands

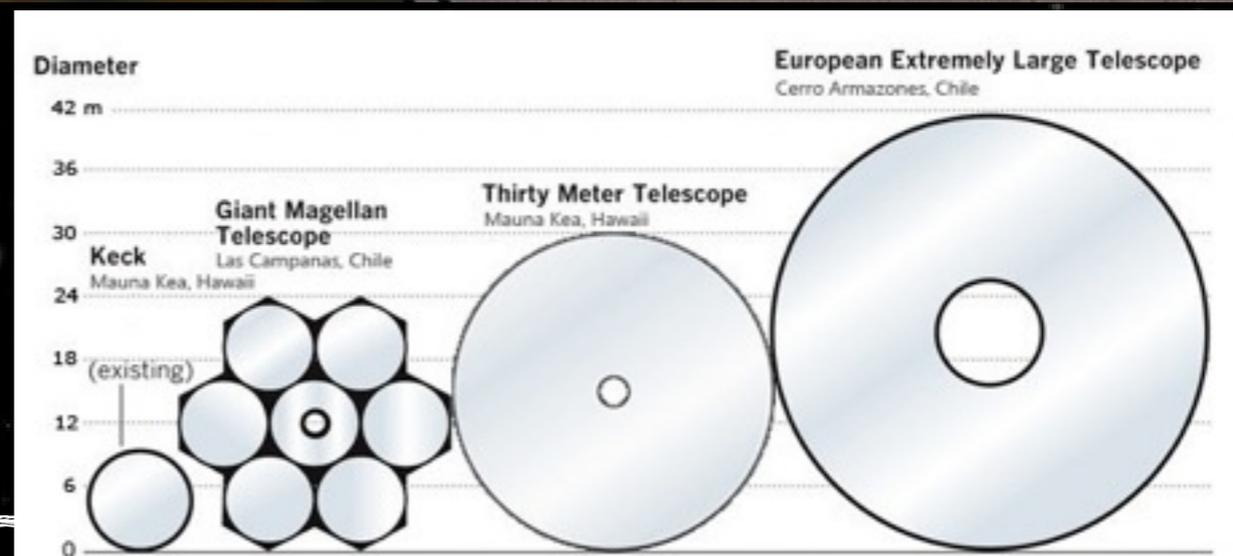
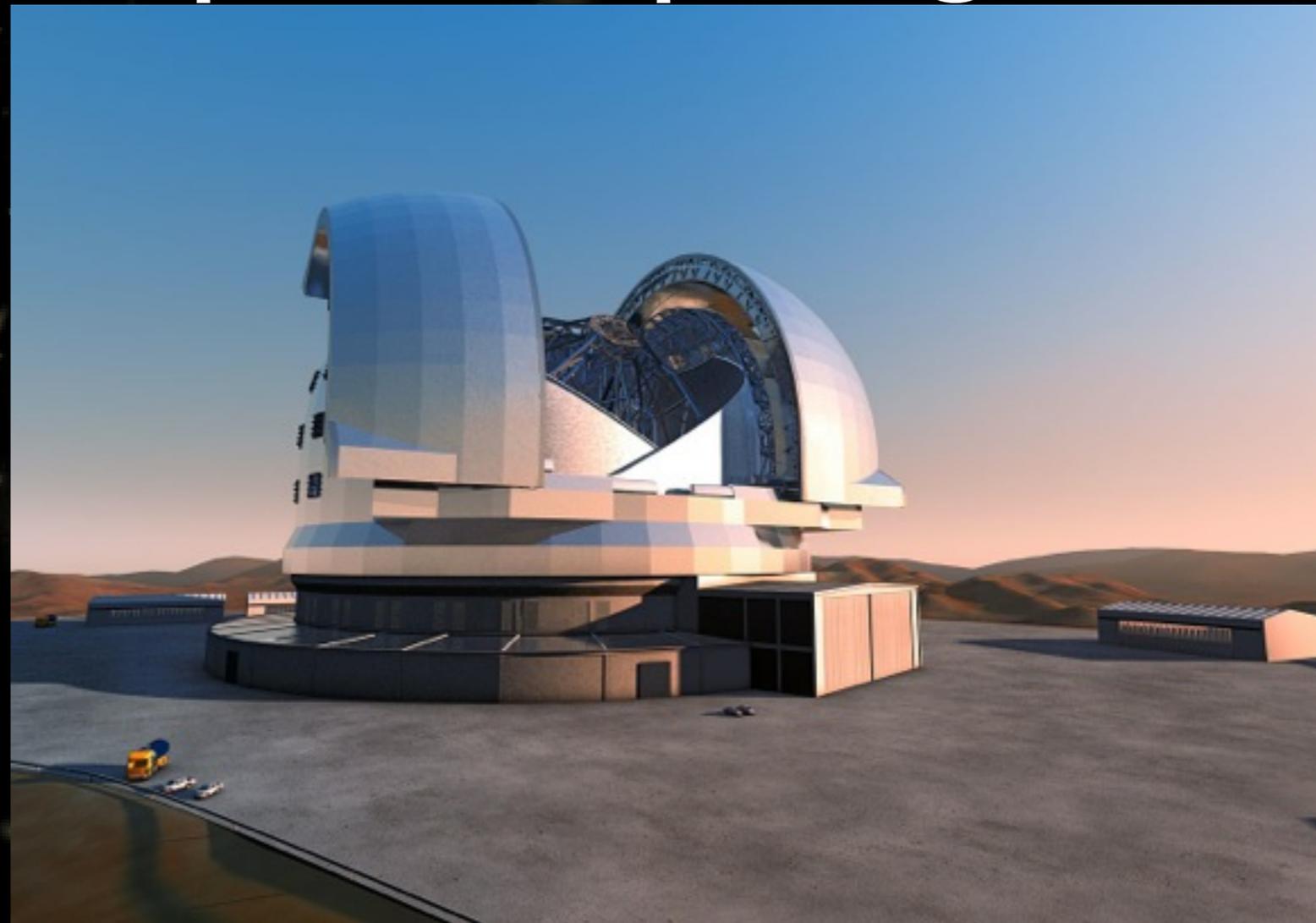
- 1789: Herschel
 - ★ 1,26 m
- 1917: Mont Wilson
 - ★ 2,54 m
- 1948: Mont Palomar
 - ★ 5.08 m
- 1976: BTA6 (URSS)
 - ★ 6 m
- 1993: Keck
 - ★ 10 m
- ~2020: GMT
 - ★ 24,5m
- ~2025: EELT
 - ★ 39m



Des télescopes de plus en plus grands

- 1789: Herschel
 - ★ 1,26 m
- 1917: Mont Wilson
 - ★ 2,54 m
- 1948: Mont Palomar
 - ★ 5.08 m
- 1976: BTA6 (URSS)
 - ★ 6 m
- 1993: Keck
 - ★ 10 m

- ~2020: GMT
 - ★ 24,5m
- ~2025: EELT
 - ★ 39m

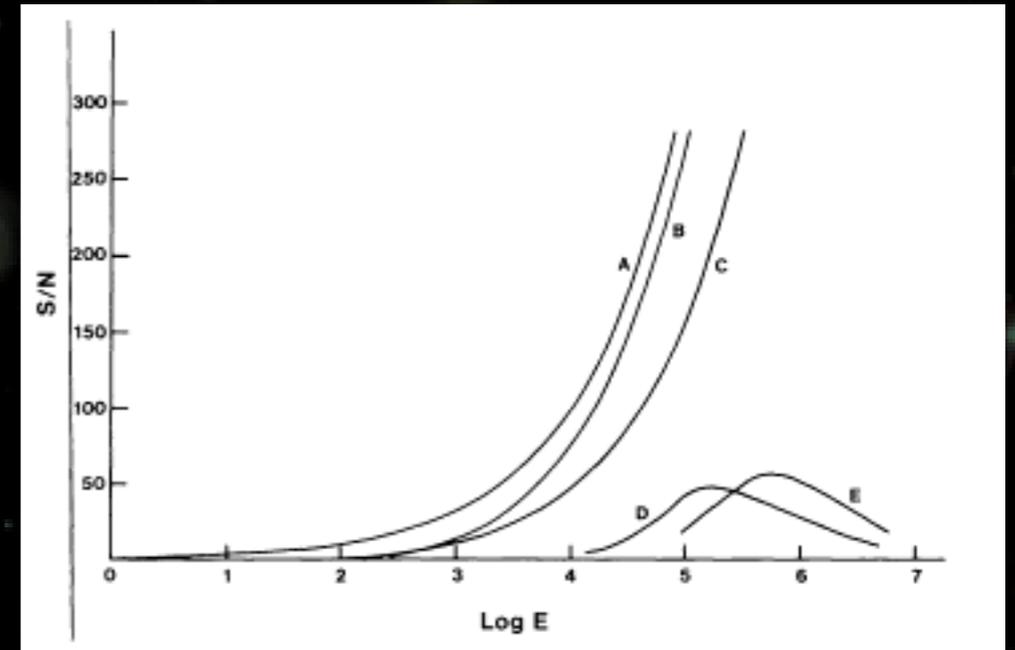


Sources: European Southern Observatory, GMTO Corp., TMT
Credit: Mark Hafer, Los Angeles Times and Jean-Baptiste Faure

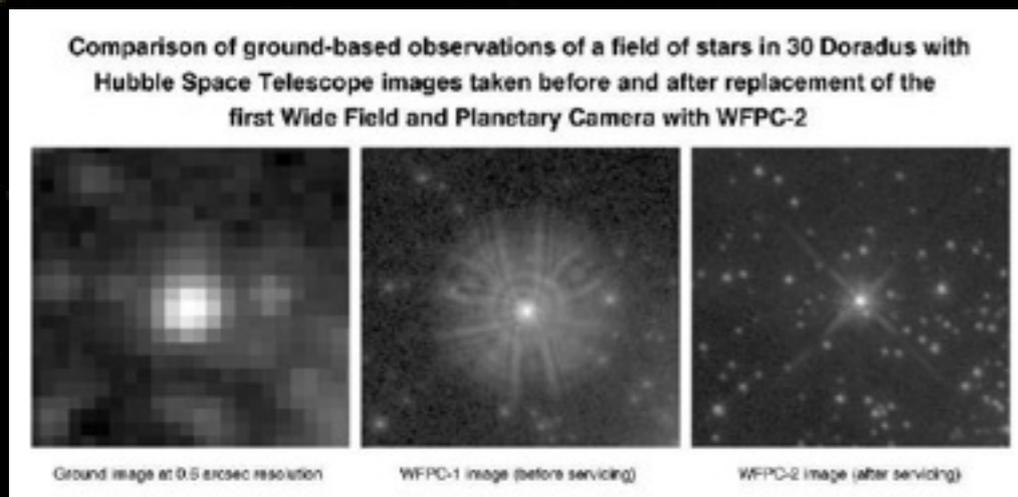


Les CCD

- 1969 Bell Labs, USA
- En astronomie: 1976
- Généralisation ~1990
 - ★ HST: 640000 pixels (satellite, 1990)
 - ★ EROS2: 32 Millions de Pixels (1996)
 - ★ SDSS-3: 120 Millions de pixels (2012)
 - ★ LSST: 3,2 Milliards de pixels (~2021)



Comparaison CCD Vs Plaques photos
Furenlid, 1984

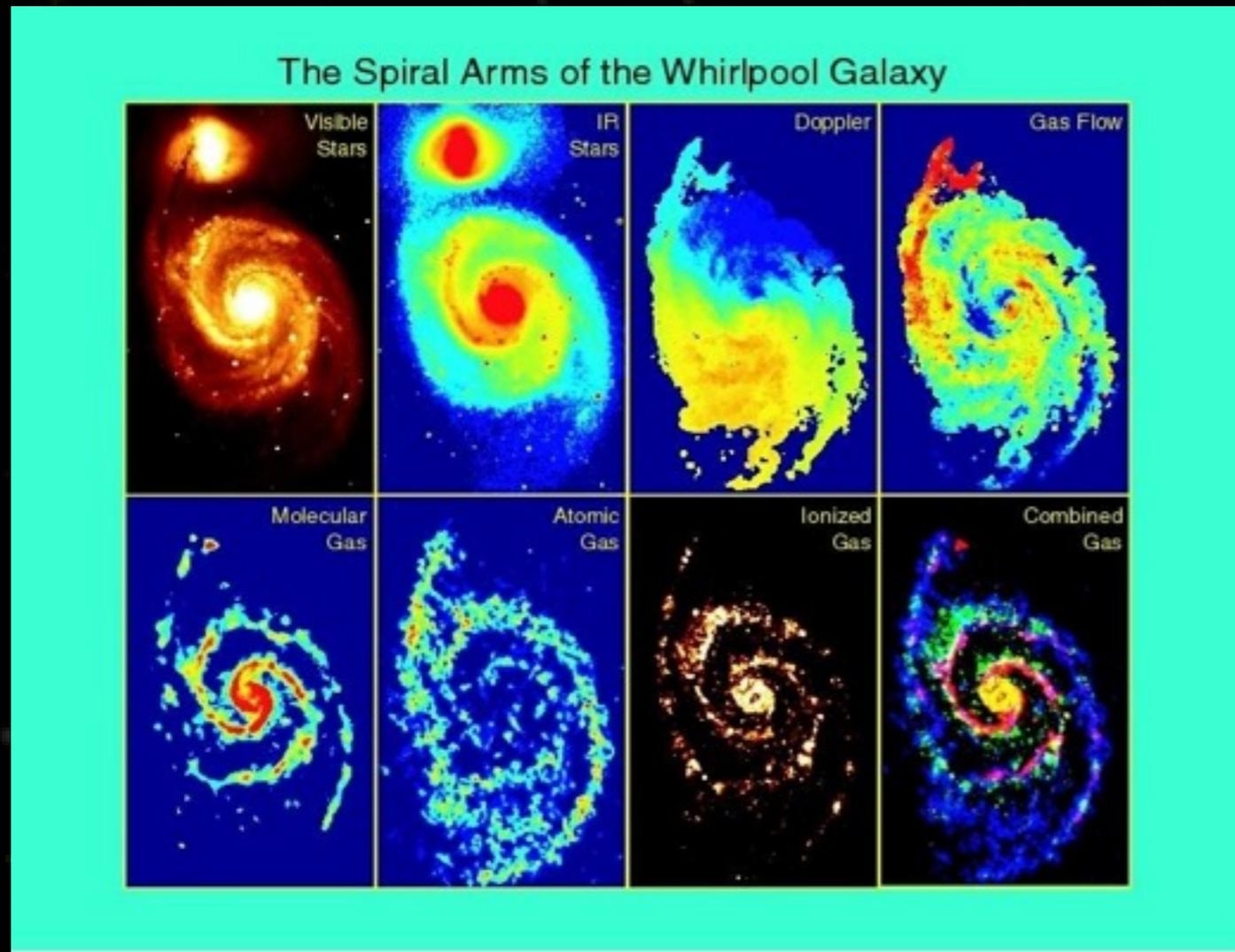


Radioastronomie et Interférométrie

- Jansky en 1933
 - ★ signal radio avec une période de 1 jour sidéral
- Seconde guerre mondiale
 - ★ Beaucoup de progrès en radio, radar et interférométrie
- Premiers radiotélescopes ~1950
 - ★ Ryle et Hewish en GB
 - ★ Besoin d'ordinateurs pour obtenir des images (interférométrie)
 - Progrès importants dans les années 1960
- Fond diffus cosmologique
 - ★ Penzias et Wilson 1965



L'astronomie à toutes les longueurs d'onde

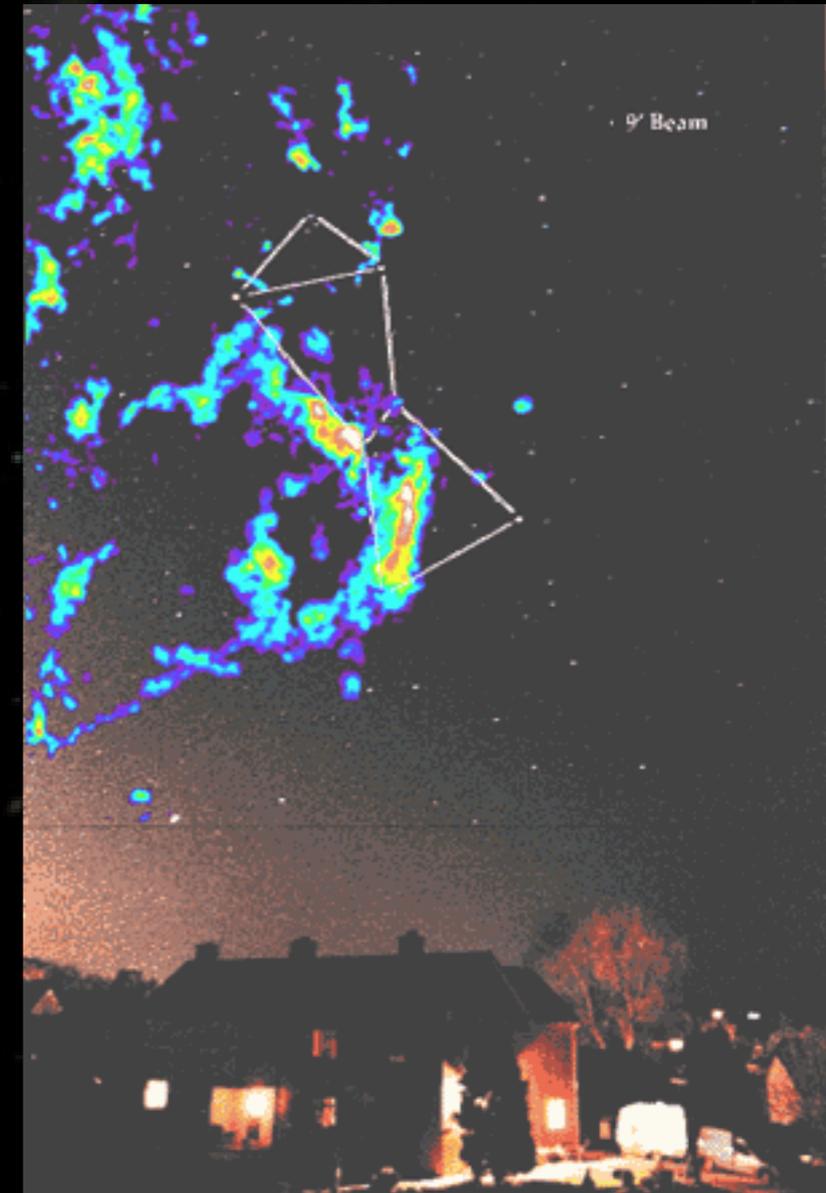
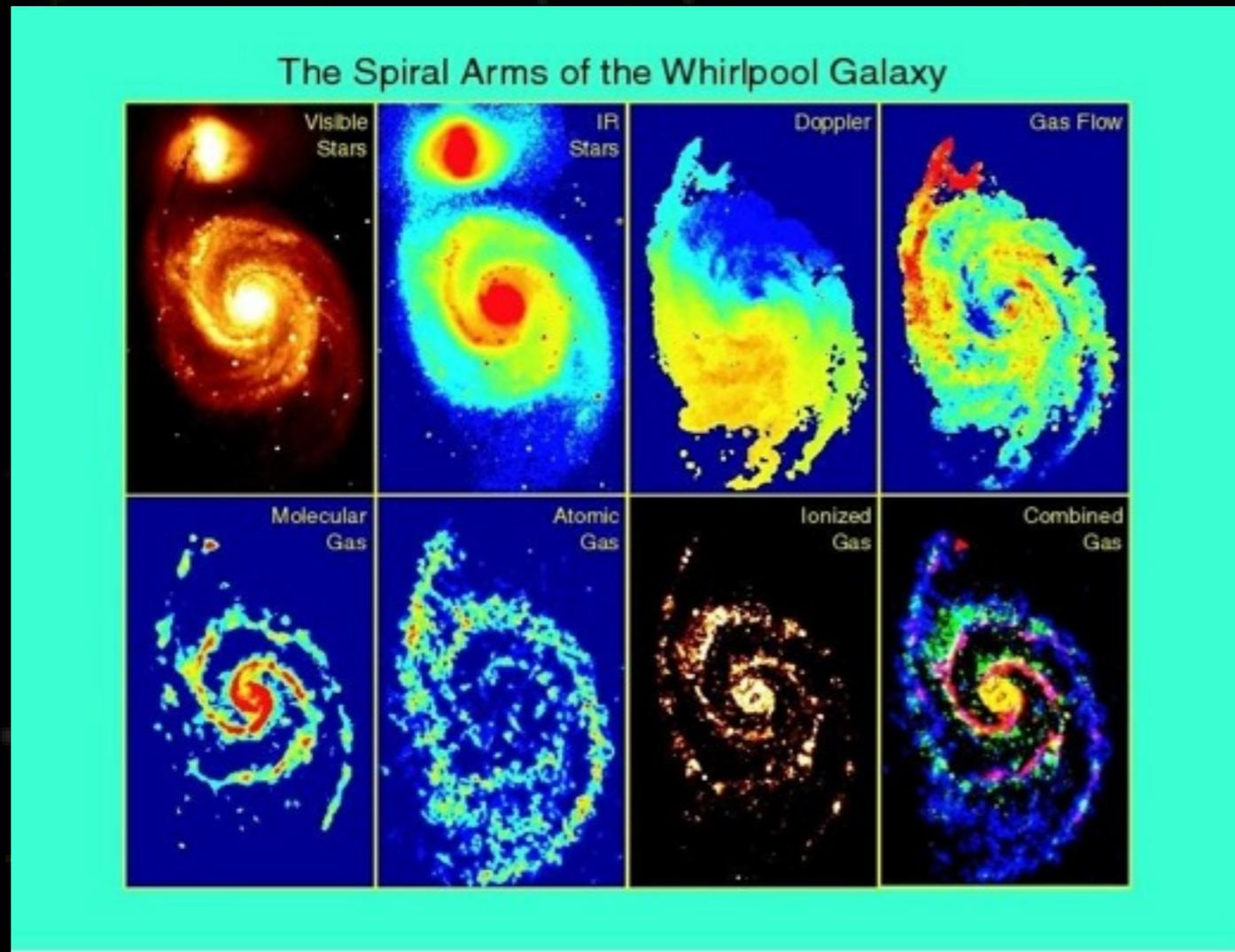


Permet de voir différents processus à l'oeuvre



Orion

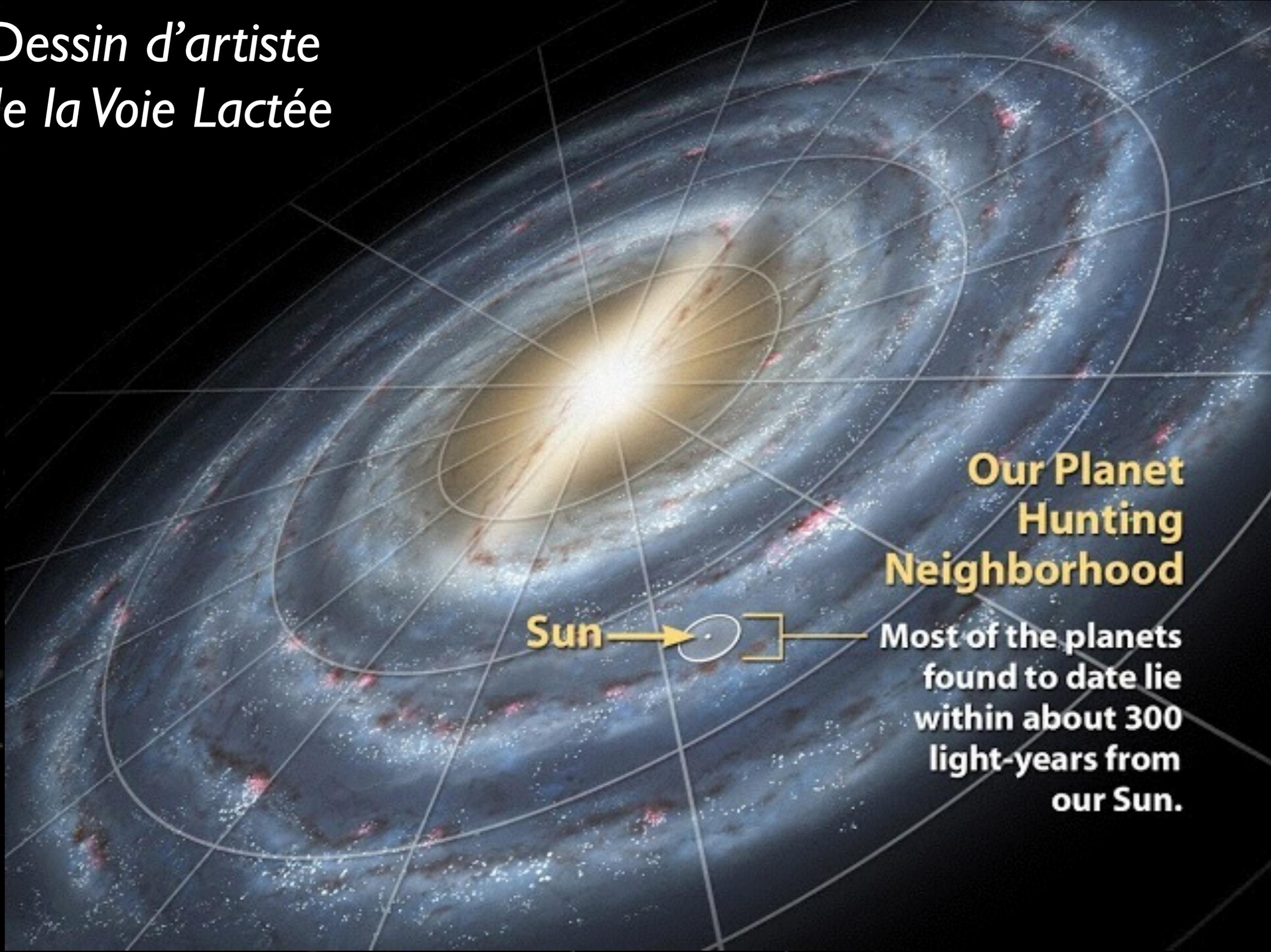
L'astronomie à toutes les longueurs d'onde



Orion

Permet de voir différents processus à l'oeuvre

Dessin d'artiste de la Voie Lactée



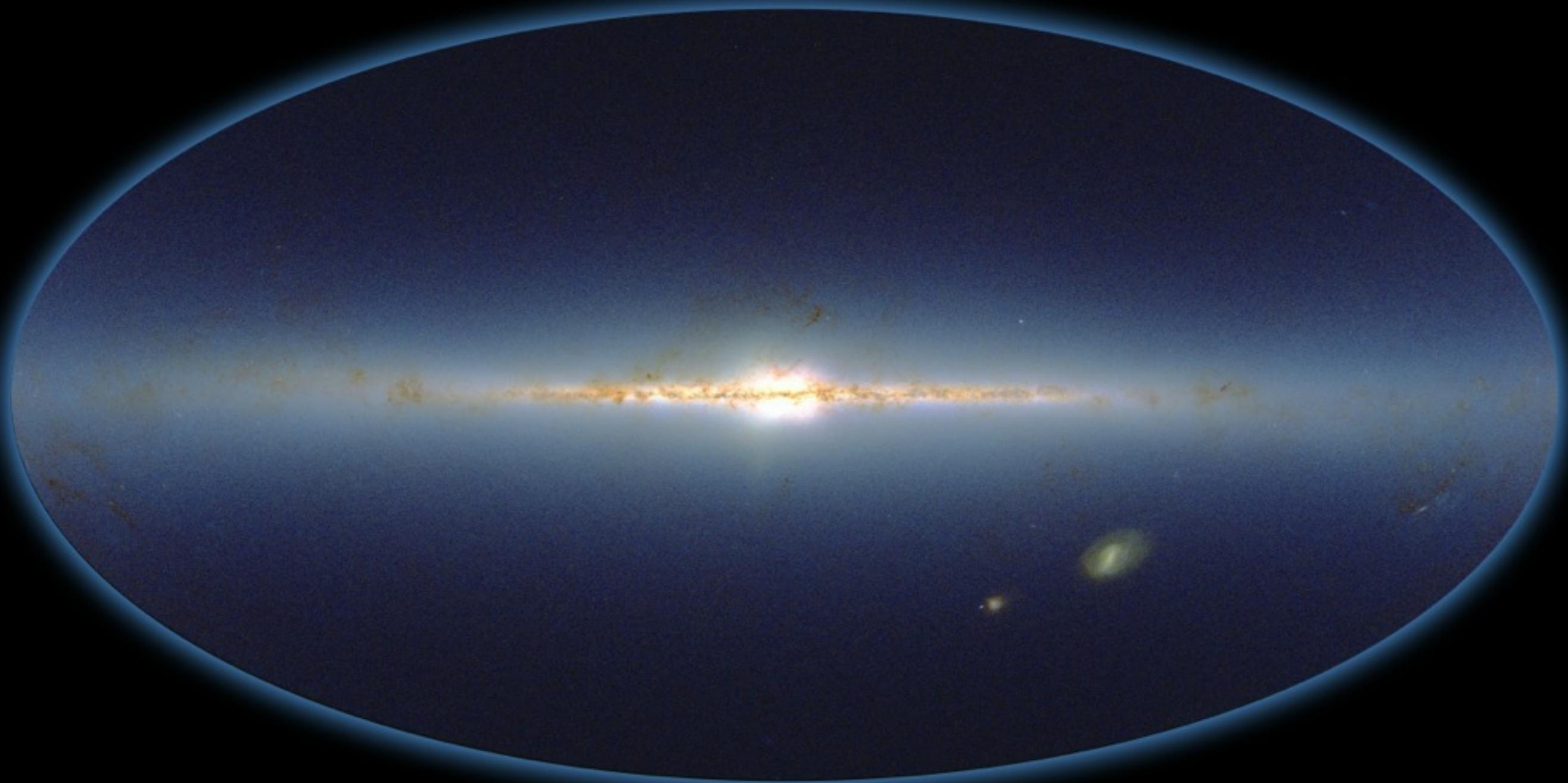
**Our Planet
Hunting
Neighborhood**

Sun → ○

Most of the planets
found to date lie
within about 300
light-years from
our Sun.

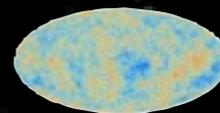
en infrarouge

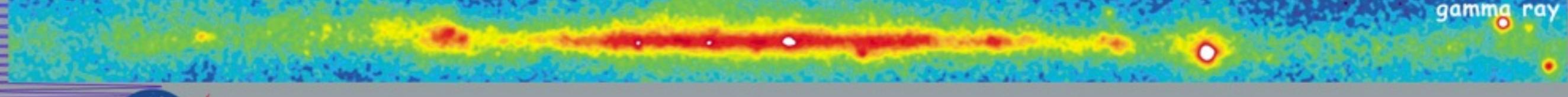
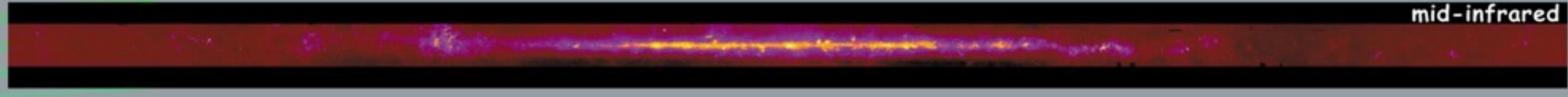
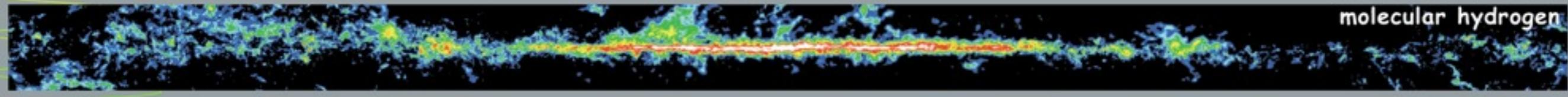
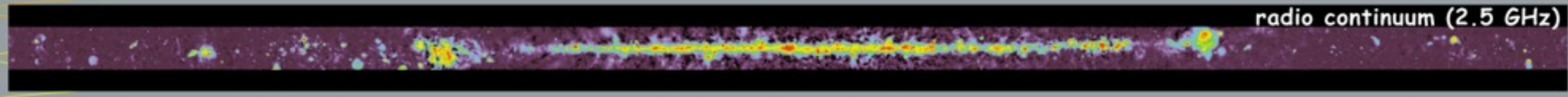
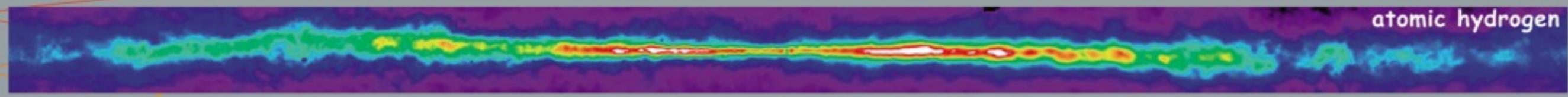
2MASS Covers the Sky



The Two Micron All Sky Survey

Infrared Processing and Analysis Center/Caltech & Univ. of Massachusetts





<http://adc.gsfc.nasa.gov/mw>



Multiwavelength Milky Way